令和 6 年度原子力規制庁委託成果報告書

原子力施設等防災対策等委託費
（高分解能被ばく評価手法の整備）事業

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

令和 7 年 3 月

本報告書は、原子力規制委員会原子力規制庁からの委託により実施した業務の成果をとりまとめたものです。

本報告書に関する問い合わせは、原子力規制庁までお願いします。

目次

■ 1章　本事業の目的及び概要 …… 1
1.1 本事業の目的 …… 1
1.2 本事業の概要 …… 2
1.3 本事業報告書の概要 …… 2
■ 2章　高分解能大気拡散シミュレーションにおける線量評価に係る文献調査 …… 4
2.1 本章の概要 …… 4
2.2 大気拡散シミュレーションの概要 …… 5
2.3 放射性物質大気拡散に係る被ばく評価の文献調査（日本語） …… 16
2.4 放射性物質大気拡散に係る被ばく評価の文献調査（英語） …… 59
2.5 まとめ …… 134
■ 3章　高分解能大気拡散シミュレーションにおける線量評価に係るヒアリング調査 …… 163
3.1 本章の概要 …… 163
3.2 高分解能大気拡散シミュレーションにおける線量評価に係るヒアリング調査機関 …… 163
3.3 東京大学（産学協創推進本部） …… 164
3.4 日本原子力研究開発機構（安全研究センター①） …… 166
3.5 日本原子力研究開発機構（安全研究センター②） …… 171
3.6 日本原子力研究開発機構（原子力基礎工学研究センター） …… 174
3.7 日本原子力研究開発機構（システム計算科学センター） …… 177
3.8 まとめ …… 182
■ 4章　局所域高分解能大気拡散・線量評価システム「LHADDAS」 …… 186
4.1 本章の概要 …… 186
4.2 局所域高分解能大気拡散モデル「LOHDIM-LES」 …… 186
4.3 線量率評価モデル「SYBIL」 …… 194
4.4 まとめ …… 197
■ 5章　局所域高分解能大気拡散・線量評価システム「LHADDAS」試計算 …… 200
5.1 本章の概要 …… 200
5.2 試計算（準備と結果） …… 200
5.3 LHADDAS シミュレーションの課題 …… 213
5.4 まとめ …… 214
■ 6章　局所域高分解の線量評価システム「3D-ADRES-Outdoor」試計算 …… 215
6.1 本章の概要 …… 215
6.2 3D-ADRES を用いたクラウド及びグランドシャインによる建屋内線量率の推定作業 …… 216
6.3 屋内環境 CFD シミュレーションによる被ばく推定解析作業 …… 265
■ 7章　高分解能大気拡散モデル整備に向けた本事業のまとめと課題 …… 349
7.1 本章の概要 …… 349
7.2 高分解能大気拡散モデルによる線量評価における課題と解決策 …… 349
7.3 まとめと結論 …… 352

■ 1 章　本事業の目的及び概要

1.1　本事業の目的

東京電力ホールディングス・福島第一原子力発電所事故（以下「1F 事故」という。）では、1 号機から 3 号機までが炉心損傷し、大量の放射性物質が環境に放出され大気中及び海洋に拡散した。1F 事故のような原子力施設からの放射性物質の放出に際し、環境への放射性物質の放出量や放出後の分布を推定するには、気象及び地形影響等を考慮する大気拡散モデル、沿岸・海底及び海流等を考慮する海洋拡散モデルの他、放射性物質が降着した陸域の特徴を考慮する各放射性物質の動態モデルを統合した環境拡散評価手法の整備が必須となる。しかし、各対象域のモデル化に当たっては、多くの課題が残されており、特に、放出後の放射性物質の拡散や降着等を決定づける大気拡散では、極めて複雑な挙動が観測され、適切なモデルの構築が大きな課題として残されている。本事業では、上記放射性物質の大気拡散のシミュレーションモデルの中でも、高分解能大気拡散シミュレーションモデルの整備を目標とし、令和 5（R5）年度に実施した事業[1-1]に引き続き、文献調査、ヒアリング調査、各試計算等を通して、これまでに得られた知見とその課題を整理する。

原子力災害発生時における原子力施設周辺住民の避難及び屋内退避等の防護措置については、対象住民の過大な負担を避けるため、より実効的な防護措置の枠組みの構築が求められ、予測を含む適切な情報を提供することが重要と考えられる。1F 事故では、緊急時環境線量情報予測システム SPEEDI (System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information)[1-2]が、「環境放射線モニタリング指針」[1-3]にて定められた方法に従い、事故直後より単位放出による予測結果を関係各所へ提供した他、各機関からの依頼に対し、仮定した条件に基づき予測結果を提供している。その結果、SPEEDI の事故対応への利用については、東京電力福島原子力発電所事故調査委員会（国会事故調）において、避難判断に利用するには限界があるとされた一方、原子力安全に関する IAEA (International Atomic Energy Agency) 閣僚会議に対する日本国政府の報告書[1-4]、東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会（政府事故調）[1-5]、及び福島原発事故独立検証委員会（民間事故調）[1-6]では、SPEEDI を活用すべきであったと結論づけられ、様々な議論が活発に行われてきた。

以上、1F 事故では、解析に基づく防護措置は実施されず、議論（課題）が残ったが、原子力施設のおよそ 30km 圏内においては、より実効的な防護措置についての検討が必要と考えられる。上記圏内では、原子力施設の事故発生に伴い、避難計画に従い住民の避難等を実施する必要があるが、一律な計画に従うことで過度な負担を強いる場合があると指摘されており、より実効的な方策を柔軟に適用することが重要と考えられている。

以上の状況を鑑み、精度の高いシミュレーションを活用することで得られる現実的な被ばく評価に従い、防護措置の判断基準となる知見を蓄積する必要がある。現在、計算機資源の発達は目覚ましく、十分な精度を有するシミュレーション技術が低コストで取得可能となりつつある現状を念頭に置くと、最新のシミュレーション技術を整備し、課題の整理と共に、今後の研究開発の方向性を論ずる必要があると考えられる。

本事業では、以上の議論に基づき、R5 年度に開始した現在の評価手法で考慮していない放射性プルームの比較的詳細な分布情報や小規模地形及び建造物群等の影響を評価できる高分解能の大気拡散シミュレーションに基づく被ばく評価手法の整備[1-1]を継続し、その活用により得られる結果より課題の整理を行い、R5 年度に引き続き、知見の蓄積を目指す。

上記の目的達成のため、本事業では、先ず、原子力施設から拡散する放射性核種に対し、局所域での高分解能シミュレーションモデルを調査し、その活用において生じうる課題を抽出・整理する他、利用可能なモデルを選択し、その整備に向けた準備を同時に進展させる。また、上記モデルの整備と共に試計算を行い、実際のシミュレーション利用時における課題を抽出・整理し、高分解能シミュレーションモデルの適用に際し、その有効性を評価し報告する。R5 年度は、主に大気拡散のシミュレーション技術一般の進展をレビューした上で最新技術を議論し、最終的に原子力施設近傍での被ばく評価の高度化につながる技術の評価を行い、シミュレーション技術の選別を実施した[1-1]が、R6 年度は、引き続き大気拡散のシミュレーション技術の評価(試計算とその評価)を継続する一方、高分解能な被ばく評価に係るシミュレーション技術（文献調査及びヒアリング調査の他、線量評価シミュレーション技術の試計算）にも焦点を当てる。

1.2 本事業の概要

1.1 にて記したように、本事業では R5 に引き続き、現実の気象場の考慮及びその再現の下、Large Eddy Simulation(LES)により数メートル～数十メートルの水平分解能で地形及び建物等の構造物の影響を受けた大気の流れをシミュレーションし、放射性核種の大気中動態を詳細に評価できる大気拡散シミュレーションモデルの整備を継続し、その知見や課題を整理する。また、大気拡散の計算結果から得られる大気中及び地表に沈着した放射性物質の詳細な分布に基づき、小規模地形や建造物群等による遮蔽効果を考慮した外部被ばく線量及び吸入による内部被ばく線量等を評価する線量評価モデルの整備に当たる。具体的に上記を実施するため、下記の項目（調査手法と試験解析）に従い調査及び試解析を実施する。

(1) 調査

① 方法：上記目的にかなう線量評価手法を中心とする文献調査を行い、現状と課題について整理する。また、主要な研究開発機関 3 カ所程度（各 2 回程度）へのインタビューを行い、線量評価手法等の特性、適用範囲、適用実績、課題等についての情報と資料を収集する。

② 検証用データ整備：①の線量評価手法の検証に適した線量データ等について調査を行い、収集する。

(2)試験解析

上記目的に見合う大気拡散シミュレーションモデルとして LHADDAS コード（R5 事業にて、整備対象として選択）及び線量評価手法の性能評価を行う。原子力規制庁が指定する原子力施設 1 カ所を対象に、本事業にて取得した検証用データを模擬する 24 時間程度の複数条件での試験解析を行う。その結果を基に、各々の性能を評価して実プラントに適用する上での課題について整理する。

1.3 本事業報告書の概要

以下では、本事業（R6 年度）報告書の概要を記す。

次章（2 章）以降では、1.1 にて記した本事業の目標に従い、1.2 に記した本事業における実施項目（文献調査とヒアリング調査及びモデルの整備事項及び試解析結果と整理した課題等）を記す。

2 章では、本事業の目的である局所高分解能大気拡散モデルの整備のため、CFD を活用する高分解能大気拡散モデルについて、R５年度に引き続き関連する文献の調査結果を報告する他、大気拡散と共に

放射性物質が環境中に分布した際の被ばく評価について広く関係する文献の調査結果を報告する。調査対象は、国内（日本語）及び国外（英語）の文献とし、各々の文献にて述べられている現状・方法・結果・成果及び課題に対し、その概要を抽出・整理し報告する。

3 章では、国内において、CFD 等の高分解能大気拡散モデルを念頭に被ばく評価のシミュレーション研究（線量評価を中心に）を実施している研究機関を 5 機関程度選択し、ヒアリング調査を行った結果をまとめ、現状と課題及び課題解決策の観点より取得・整理した内容を記す。

4 章では、R5 年度に選択した、日本原子力研究開発機構より公開されている、放射性物質の高分解能大気拡散計算に基づき線量評価を初めて実現した「LHADDAS」を対象に、その特徴と課題を整理する。「LHADDAS」とは、大気拡散シミュレーションモデルとして、差分法を用いて LES シミュレーションを行う LOHDIM と格子ボルツマン法を用いる City-LBM、それらの LES コードを基に詳細な線量評価を実施する SIBYL から成る。それらの特徴と課題を報告した R5 年度[1-1]に引き続き、本報告では、その補足を記す他、大気拡散モデルのシミュレーション結果から得られる放射性物質の大気濃度や地上沈着量の下、放射線量を計算可能とする SIBYL について、R5 年度に引き続き、その特徴及び課題を整理し報告する他、新たに地上環境の詳細モデリングを背景に、より詳細な線量評価を可能とするコード : 3D-ADRES-Outdoor（開発元：日本原子力研究開発機構）を紹介する（試解析結果：6 章）。

5 章では、上記「LHADDAS」の試計算結果について、WSPEEDI(広域)との連携による気象条件の導入及びその試解析結果を報告し、六ケ所村で実施された放出実験との比較を実施し、LHADDAS の特徴と課題について報告する。6 章では、SIBYL を用いる計算では含めることができない、環境中の詳細情報(地形変化から様々な家屋や家屋集団の存在)による γ 線の散乱や遮蔽効果も考慮可能な「3D-ADRES-Outdoor」を用いた高精度な線量評価技術とその試解析結果について報告する。なお、6 章の後半では、家屋内に浸入する放射性物質の CFD（LES）解析による結果を基に線量評価する技術の試解析結果も示し、家屋内での線量評価の高精度化の新しい方向性についても報告する。

7 章は、本事業全体のまとめと考察である。

参考文献

[1-1] 日本原子力研究開発機構, 令和 5 年度原子力施設等防災対策等委託費（高分解能被ばく評価手法の整備）事業成果報告書, 令和 5 年 3 月. https://www.nra.go.jp/data/000473704.pdf

[1-2] 緊急時迅速放射能影響予測ネットワークシステム SPEEDI パンフレット、文部科学省（2007）.

[1-3] 環境放射線モニタリング指針（平成 22 年 4 月一部改訂）, 原子力安全委員会（2010）.

[1-4] 原子力災害対策本部, 原子力安全に関するＩＡＥＡ閣僚会議に対する日本国政府の報告書－東京電力福島原子力発電所の事故について－, 平成 23 年 5 月. https://www.kantei.go.jp/jp/topics/2011/iaea_houkokusho.html

[1-5] 東電福島原発事故調査・検証委員会, https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/icanps/index.html

[1-6] 福島原発事故検証委員会（民間事故調）, https://apinitiative.org/project/fukushima/

■2章　高分解能大気拡散シミュレーションにおける線量評価に係る文献調査

2.1 本章の概要

東京電力ホールディングス（株）・福島第一原子力発電所（1F）事故以後、原子力災害発生時における避難及び屋内退避等の防護措置に対し、対象となる住民の過大な負担を避けるため、より実効的な防護措置の枠組みの構築が求められている。特に原子力施設のおよそ 30km 圏内において、より実効的な防護措置の検討を目的とし、大気拡散シミュレーションを活用した現実的な被ばく線量評価を行い、防護措置の検討及び、その基準の見直しに必要となる知見を蓄積する必要がある。

上記のニーズに応えるため、現在の評価手法では、考慮していない放射性プルームの分布情報や小規模地形及び建造物群等の影響を評価できる高分解能の大気拡散シミュレーションに基づく被ばく線量評価手法の整備を実施することが求められる。

本報告では、上記の現状（必要性等）を鑑み、放射性物質大気拡散に係る被ばく線量評価の現状調査を中心に調査結果を報告する。なお、被ばくには、外部被ばくと内部被ばくが考えられ、両者の調査を行うが、文献数が多く、放射性物質大気拡散に関係する文献に焦点を当てる。

調査項目は以下の通りである。先ず、放射性物質大気拡散に係る被ばく評価に係る文献の調査を R5 年度に引き続き実施し、関係する文献を絞りこみ、広範囲な調査結果（CFD 等を活用する汚染物質拡散）を報告した R5 年度結果から、主要文献のみ抽出し報告する。特に、原子力施設からの放射性物質の大気拡散では、様々なシミュレーションが実施されており、放射性物質濃度の時空間経時変化と共に被ばく線量が評価され、住民の避難等に対する判断基準が議論されてきたが、それらに関連する文献の調査結果を報告する。なお、対象文献は、日本語および英語にて記されたものとし、言語毎に分別し報告する。なお、言語を分けて、文献調査結果を報告する理由は、日本語文献の多くが、日本国内を対象とし、CFD 等のシミュレーションを適用し、得られた研究成果を報告する等、本事業の目的である日本の原子力施設に係る局所大気拡散シミュレーションの現状と課題を調査することに直結するものと考えられるからである。また、上記テーマに関し、数多くの文献や報告書等が検索されるが、先端的な手法とその課題整理による知見蓄積を目標とするため、対象文献は、主に 2000 年以降とする。2000 年以降は、CFD による大気拡散シミュレーションが大きく発展した時期と合致し、実際の活用例も急速に増えると共に、課題も明らかににになってきたと考えられるからである

本調査では、放射性物質の高分解能大気拡散モデルとして CFD を活用し、線量評価を実施する文献調査を目的とするが、その目的達成に向けては、広く CFD による大気拡散シミュレーションモデルの発展を概観し、CFD の活用やその発展（CFD 以外のシミュレーションについても高分解能モデルに相当すると判断した場合は報告する）がどのように進展してきたかについても、該当する代表的文献を調査し報告する（R5 年度文献調査報告から抜粋し報告）。大気拡散シミュレーションの発展段階において、CFD の活用は、自然な発展の流れではあるが、メリットと共に様々な課題があることも指摘したい。

本章における文献の引用では、日本語文献は、1)、2)、3)のように記し、英語文献は 1]、2]、3] のように区別し表すこととする。章末に、引用する日本語文献及び英語文献のリストを各々、まとめて示した。本文中でレビューする文献は、リストの前半にてまとめ、後半はレビューしない文献とする。また、文献のレビュー内での他文献の参照には、その文献がリストにない場合もあり、引用が必要と判断したものは、日本語文献、英語文献とも、章末リストの参照番号ではなく、氏名(西暦年)もしくは(氏名，西暦年)を本文内で

表示する。

2.2 大気拡散シミュレーションの概要

2.2.1 大気拡散シミュレーションの概要と変遷

本章の主たる報告内容である大気拡散シミュレーションに係る被ばく評価の文献調査結果を報告する前に、被ばく評価にインプットを与える汚染物質の大気拡散シミュレーションの発展を概観する。被ばく評価の高度化に際しては、大気拡散シミュレーションの高分解能化が前提となり、その精度が被ばく評価の精度にも反映されるからである。

上記観点に立ち、先ず、汚染物質とそれが拡散する空間スケールに注目し、これまでの発展を下記のように分類する。対流圏・成層圏を含む地球規模のスケール、日本国内や東アジアなどの大陸内スケール(領域規模)、そして、工場から排出される汚染物質が近隣地域に影響を与えるような局所域の場合等、様々な対象空間スケールに分類される。なお、汚染物質の大気拡散と密接な関係を持つ気象分野では、上記空間スケールとそれに対応するシミュレーションモデルを次のように分類している。

- **全球規模　　大気循環モデル（General Circulation Model, GCM）**
- **領域規模　　地域気候モデル（Regional Climate Model, RCM）あるいは**
  メソスケール気候モデル（Mesoscale Climate Model, MCM）
- **局地規模　　局地モデル　(Microscale Model, Local Model)**

本報告で主たる対象となる局地的な空間スケールに対応する気象現象の用語としては、微気象（microscale meteorology)が重要な関連用語として挙げられる。微気象は、地表面より高さ数 100m から 1000m 程度までの空間で起こる気象現象であり、その空間は接地境界層とも呼ばれる。これは、上記大気拡散シミュレーションの空間スケールで最も狭い領域であり、局地規模の汚染物質の大気拡散現象では、この接地境界層における気象メカニズムが拡散の様態に大きく関わっていることが知られている。

次に、汚染物質の大気拡散現象に着目すると、物理的には、主に移流拡散方程式という時間と空間を独立変数とする偏微分方程式により記述できると考えられている。当該方程式の解を求めるに当たっては、解析解を求める方法と空間の次元に応じて、1～3 次元の移流拡散方程式を数値的に解く方法の２つに大別される。実際の現象は、風の流れ、汚染物質の種類、排出源から影響を与える地点までの距離や地表面の起伏、構造物の有無等、複雑な条件が重なり合い、複雑な大気拡散現象が起こることが知られている。

上記の複雑な大気拡散現象に対し、解析解とは、条件を単純化し、風の流れを一方向で一定とする他、地表面を平坦とする等、簡単化した場合の偏微分方程式の解析解をベースとする。この考え方を基にした予測手法の一つがプルームモデルであり、簡便且つ容易に解析を実施することが可能である他、結果の直感的な理解が容易であり、活用されてきた歴史も深い。

その一方、上記移流拡散方程式が偏微分方程式であることから、それを数値的に解く技術とその活用が、数値流体解析（CFD）として、コンピュータの進歩とともに発展し、1950 年代の手動計算機による円柱周りの流れの解析から、60 年代の渦度－流線関数を用いた２次元解析、さらに流速 u, v, w を変数とする 3 次元解析へと進展し、様々な分野で各種手法やモデルが開発され活用されてきた。

中でも、1960 年代の後半に、非圧縮性流体の解法として提案された MAC(**M**arker **A**nd **C**ell)法は、連続

条件のアルゴリズムに流速圧力同時緩和法を適用することで CFD の基礎となった。また、その後 SOLA（**SOL**ution **A**gorithm）（SOLA-A Numerical Solution Algorithm for Transient Fluid Flows, Hirt et al., 1975)という名称にて、汎用の流体解析コードが MAC 法を基に開発され、CFD を用いた研究開発の一つの基礎が作られた。以降、CFD では、上記連続条件のアルゴリズムのほかに、移流項の離散化、渦動粘性係数/拡散係数のモデル化、格子生成手法等において、課題とその解決手段が次々と提案され、現在でも新しい提案が引き続き行われ、改良が重ねられている。

上記課題の中でも、渦動粘性係数のモデル化に対しては、流体の運動方程式、連続式とともに、エネルギーや汚染物質などの輸送式（移流拡散式）と同様、乱流エネルギーｋと乱流逸散率εの輸送式を連立させて解く、Launder and Spaldingが提唱したｋ－εモデルが、工学上の様々な対象に対する流体解析に用いられた他、気象分野では、Mellor and Yamadaによるｋ－ℓ モデル（ℓは長さスケール）が一つの時代を築いてきた。なお、これらの乱流モデルは、総称してRANS（レイノルズ応力モデルあるいはレイノルズ平均ナビエストークスモデル、**R**eynolds-**A**veraged **N**avier-**S**tokes (RANS) equations）と呼ばれ、それを活用した膨大な研究が行われてきた。

他方、近年のコンピュータの著しい性能向上を反映し、上記RANSの平均化された乱流量をベースとする近似を超え、解析最小格子サイズ以下の渦のみをモデル化し、そのサイズ以上については、方程式を直接解くことで、乱流運動のダイナミクスを高精度に追跡可能とする**L**arge-**E**ddy **S**imulation (LES）と、格子分解能以下のモデル化を行わない直接シミュレーション**D**irect **N**umerical **S**imulation(DNS)が注目されている。なお、本事業では、上記のLESの優れた乱流解析能力に注目し、放射性物質の大気拡散シミュレーションへの活用を検討し整備する（本報告の後半4、5、6章にて報告）。

以上、大気環境を解析する 3 次元のシミュレーション手法には、その目的に応じていくつかのモデルがあるが、対象領域や格子サイズから、表 2.1 に示すように、主に次の 3 つに分類されることを記す。

表 2-1　大気環境の流体シミュレーション手法の対象領域と格子サイズ

モデル	目的	対象領域と格子サイズ	特徴
領域モデル (メソスケールモデル)	気象予測や天気予報等	数 10km から数 100km 格子サイズ　2km～100km 鉛直　大気高層まで	広域の気象条件をモデル化、観測データと連動して活用し、建物形状などは考慮しない
局地モデル (マイクロスケールモデル・接地境界層モデル)	変化する地形や建物周辺の気象環境や、有害物質の拡散解析	数 km から 10 ㎞程度 格子サイズ　数ｍから数100m 鉛直　数 10m から数 100m	接地境界層の気象モデルを備える他、建物形状などは簡単にモデル化される
（汎用）CFD 活用モデル	建物、構造物周辺の流れ（ビル風など）や地形の影響を受ける流れ	局所的であり、地形の詳細変化や建物構造物の形状を再現し計算に反映させる。注目構造物の周辺空間格子サイズは 1m 以下～数 m 及び数 10m	局所的な気象条件の設定や流出入条件の設定には別途モデル化が必要となる

なお、どのスケールでも、大気拡散に大きな影響を与える接地境界層での大気の運動は、運動量、熱、水蒸気の乱流交換により支配される。また、地表面の植生（草地、樹木）や建物の抵抗、地表面からの熱の移動も重要となり、モニン・オブコフの相似則*に基づく風速・温度の鉛直プロファイルのモデル化は、大気の運動を理解する上で重要な役割を果たしてきた。

*モニン・オブコフの相似則：接地境界層での鉛直方向の風速や温度の分布は、大気安定度が中立の場合、対数則に従う。熱的・力学的安定性や摩擦速度・摩擦温度の概念をもとに、安定成層や不安定成層など一般の成層状態における風速・温度プロファイルを無次元高さの関数として表した。

以下、大気拡散予測モデルに関わる論文調査結果の報告に先立って、2000 年頃までの大気環境解析におけるシミュレーションモデル研究開発の状況を簡単に把握しよう（当該状況に立ち、2000 年以降の進展がある）。

近藤裕昭(2001) 1)による「数値モデルによる大気環境解析」では、大気環境学会モデリング・動態解析分科会において、1996 年から 1998 年にかけて発表された内容に対し、ミクロスケールから領域スケールの特徴的な現象と各モデルを表 2-2 のようにまとめている。ミクロスケールでは LES を活用する研究開発が見られるが、実際の大気拡散現象の予測ツールとしては、プルームモデルやｋ－ε モデルが用いられたケースが多いことが報告されている。

表 2-2　近藤による 2000 年頃の数値モデル論文の分類（文献 1）表 2 を基に複製）

(1) 気象・公害：フィールドデータ分析
(2) 気象・風況パターン：モデリング
(3) 汚染物質の輸送と拡散：モデル化
(4) シミュレーションモデルによるフィールドの解析

論文の分類

規模	カテゴリー	方法	目的及び対象	No.
マイクロ(−500m)	(2)	LES	プラントの乱気流キャノピー	1
	(2)	LES	霧	2
	(2/3)	LES	建物周囲の汚染	3
マイクロ/アーバン (−5km)	(2)	MM、風洞	火山ガス	4
	(2)	都市の天蓋	都市の熱環境	5、6
	(3)	プルームモデル(r)	汚染物質	7
	(4)	プルームモデル(r)	応用	8
ローカル (−50km)	(1)	フィールド分析	気象学	9、10
	(1)	フィールド分析	NOx	11
	(3)	モデル	SPM	12、13
	(4)	MM(k−ε)	気象学	14、15、16
メソスケール (−500km)	(2,3,4)	MM(r)	汚染物質	17
	(2,3)	MM	CO_2	18
	(4)	MM+CTM	汚染物質	19、20、
	(5)	MM	放射性塵	21
	(6)	MM	水蒸気	22
地域(−5000km)	(1)	現場分析	酸性物質	23
	(4)	長距離輸送	汚染物質	25,26
リスク評価	(3,4)			27、28、29、30、31、32

[注] LES: Large−Eddy シミュレーション
MM: メソスケール気象モデル
CTM: 化学輸送モデル
(r): レビュー
No. 文献1）の引用文献No.

次に、実現象を予測するシミュレーションという切り口で、大気拡散シミュレーションの概要について記す。実現象予測では、用いるシミュレーションモデルの妥当性を評価し、その予測限界を知った上で、妥当な活用を実現することが重要と考えられる。従って、大気拡散シミュレーションを分類・評価するに当たり、その活用対象が、下記のように分類されることを指摘する。なお、下記分類対象は、大気汚染に係る重要な社会的課題となった経緯から、各々に対し、シミュレーションモデルが研究開発され、相互に関連しながら発達してきたことを指摘する。

（1） 汚染物質の拡散問題一般
（2） 風況予測、風車等の適地検討、市街地や道路構造物、建物の設計（風荷重の検討など）
（3） 広域の拡散問題、気象モデル（CFD 含む）、黄砂等
（4） 放射性物質の拡散

本報告の目的は、上記（4）放射性物質の拡散に係る被ばく評価であるが、（4）の発展は、文献調査の結果、（1）～（3）の発展と不可分であることが分かる。

次に、大気拡散シミュレーションの中でも、特に本報告の主眼である局所域高分解能シミュレーションを用いて実現象をシミュレーションするという観点から、シミュレーションモデルの構成要素技術を考えると、それらは、次の６つに大きく分類できることが分かる。

（1） 汚染物質の発生源のモデル化
（2） 建物、地形条件（ジオメトリ）のモデル化
（3） 気象条件、気象場のモデル化
（4） 移流拡散、物質移行過程のモデル化
（5） 初期・境界条件のモデル化
（6） 数値手法

上記の各々の構成要素技術の具体例を以下の表 2-3 に示す。高分解能大気拡散モデルを実際に活用する際、これらの構成要素技術については、適切な準備が必要となる。

表 2-3：局所域高分解能シミュレーションモデルの構成要素技術の分類とその概要

汚染物質の発生源のモデル化	・放出シナリオ、プルームモデルの排煙上昇高さ ・線源、面源の格子表現 ・広域汚染物質の排出量データベースなど
建物、地形条件（ジオメトリ）のモデル化	・一様平坦地形、地形の起伏表現、建物や構造物の格子表現 ・起伏に沿った座標系、一般座標系など
気象条件、気象場のモデル化	・Pasquill の大気安定度、モニン・オブコムの相似則 ・データ同化手法
移流拡散、物質移行過程のモデル化	・解析解を用いる（プルームモデル） ・移流拡散式を数値的に解く（オイラー・ラグランジュ） ・乱流のモデル化（0 方程式、１方程式、２方程式、LES など） ・物質移行過程のパラメータ表現モデル ・沈着・再付着、化学反応モデル、線量評価モデル等の移行過程中のモデル化
初期・境界条件のモデル化 注）建物、地形条件も境界条件であるが、ここでは、想定した計算領域全体の境界条件を言う	・一様、実測値利用、周期境界条件等の技術 ・データ同化手法、ネスティング等のシミュレーション技術
数値手法	・偏微分方程式（３D）、常微分方程式（積分モデル） ・コンパートメントモデル、有限要素法、有限体積法 ・差分スキーム、ネスティング、並列化等、多岐に渡る技術及び手法

さらに、実現象のシミュレーションに対し、その妥当性を評価するシミュレーションモデルの検証方法を概観すると、検証方法は、以下のようにおおよそ分類できる。

（１） 風洞実験
（２） 野外トレーサ実験
（３） 気象観測
（４） 事故イベント、観測のモニタリングデータ（NO_xなど、PM、火山灰や黄砂、放射性物質の拡散）

2.2.2 シミュレーションモデルの評価指標と検証データ

本項では前項の最後に記した、シミュレーション手法の検証とその評価について、その概要をまとめる。シミュレーション手法の検証や規準などは、被ばく評価等の人への影響を判断する上で重要であり、その検討結果を総括的に記す文献や情報は、おおよそ、次の４種類に分けられることを指摘する（個別のシミュレーションモデルの検証ではないことに注意）。

（1） 政府・行政機関等によるシミュレーションモデル活用に対する規制・規準
（2） 学会等によるシミュレーションモデルの検証及びその評価基準
（3） シミュレーションモデルの検証基準や評価手法及びその妥当性の確認方法に関する論文
（4） シミュレーションモデルの検証に用いる検証データ、アーカイブサイト等

以下、（1）（2）の規制・基準の例（文献）について、代表文献を下に記す。

i) IAEA Safety Series No. 57(1982)による Generic Models and Parameters for Assessing the Environmental Transfer of Radionuclides from Routine Releases 1]、
ii) ASTM(2000)による ASTM, 2000: Standard guide for statistical evaluation of atmospheric dispersion model performance 2]、
iii) EU 委員会のレポートをまとめた AMEC Environment & Infrastructure UK Limited(2014)による Intermediate report Annex2: Consequence Assessment Methods for Human Health （Task2） Report for the European Commission (DG Environment) 3]、
iv) Kevin Dowding（2016）によるアメリカ機械学会によるレポート Overview of ASME V&V 20-2009 Standard for Verification and Validation in Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer 4]。

次に（3）のシミュレーションモデル検証及び評価基準についての概要を以下に記す。**J.C.Chang(2004) 5]**らは、モデル検証の基準やモデルの評価に関して、大気質モデルの性能を評価する方法をレビューし、次のように指摘している。

i) 大気質モデルの使用に伴い、経済、公衆衛生、環境への影響を鑑み、モデルを適切に評価することが重要。
ii) モデルの評価には、モデルのアルゴリズムの科学的評価、現場または実験室のデータを使用した際の統計的評価、実際のアプリケーションでのユーザーによる運用評価などが含まれる。

本報告では、統計的評価に焦点を当て概要を記す。統計モデルの評価作業では、評価の目的を明確に定義し、検証すべき仮説を明確にすることから始める。最善のパフォーマンス指標や最良の評価方法は、一つに絞られるものではなく、一連の様々なパフォーマンス指標の適用が薦められる。以下、具体的に「妥当な」モデルに期待されるパフォーマンスの測定値に関する指標を示す。

$$\mathrm{FB} = \frac{(\bar{C}_o - \bar{C}_p)}{0.5(\bar{C}_o + \bar{C}_p)},$$

$$\mathrm{MG} = \exp\left(\overline{\mathrm{In}C}_o - \overline{\mathrm{In}C}_p\right),$$

$$\mathrm{NMSE} = \frac{\overline{(C_o - C_p)^2}}{\bar{C}_o \bar{C}_p},$$

$$\mathrm{VG} = \exp\left[\overline{\left(\mathrm{In}C_o - \mathrm{In}C_p\right)^2}\right]$$

FAC2 = 満たされるデータの割合 $0.5 \leq \frac{C_p}{C_o} \leq 2.0$

ここで、C_oは濃度の観測値（記録された最高値）を示し、C_pは濃度のモデル予測値（予測された最高値）を示す。また、overbar ($\bar{C}$) はデータセット全体の平均を示す。

なお、**J.C.Chang(2005) 6]**らは、これらの統計的評価のガイドブックとして、Technical Descriptions and User's Guide for the BOOT Statistical Model Evaluation Software Package, Version 2.0 をまとめている。更に、国際的な評価の取り組みとして、**HORMO.ORG 7]**という組織があり、Initiative on Harmonization within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes (Harmo Initiative) と題する大気拡散シミュレーションモデルの評価に関する国際的なワークショップが 1992 年から毎年開催されている。この活動を主導する著者の一人である **H.R.Olesen(2001) 8]**による A Platform for Model Evaluation について簡単に紹介する。

Olesen によると、モデルの評価の問題は、本質的に難しく、モデルの結果を完全に信頼できない場合、モデルの結果の不確実性に関する情報が必要となることを指摘している。適切なモデル評価には、科学的な真摯なレビューとフィールドデータを使用した統計的評価が必要であり、適切な評価方法は、アプリケーション作成の意図や背景と利用可能なデータセットに依存する等、状況によって異なるとして、実験データとモデルの不確実性について、次のような定式化を示した。

$$\underset{\text{観測された濃度}}{C_o(\alpha,\beta)} = \underset{\text{アンサンブル平均}}{\dot{C_o}(\alpha)} + \underset{\text{計測誤差}}{c(\Delta c)} + \underset{\text{固有の不確実性}}{c(\alpha,\beta)} \quad (1)$$

$$\underset{\text{モデル化された濃度}}{C_m(\alpha)} = \underset{\text{アンサンブル平均}}{\dot{C_o}(\alpha)} + \underset{\text{入力の不確実性}}{d(\Delta\alpha)} + \underset{\text{モデル形式の誤差}}{f(\alpha)} \quad (2)$$

$$\underset{\text{残差}}{C_o(\alpha,\beta) - C_m(\alpha)} = \underset{\text{計測誤差}}{c(\Delta c)_o} + \underset{\text{固有の不確実性}}{c(\alpha,\beta)} - \underset{\text{入力の不確実性}}{d(\Delta\alpha)} - \underset{\text{モデル形式の誤差}}{f(\alpha)} \quad (3)$$

式(3)は、モデル評価結果の解釈のための基本的な方程式です。

この定式化によると、式（3）のように、2 つの誤差と 2 つの不確実性の和として、モデル結果と観測結果の差が表されていることがわかる。なお、HARMO.ORG のサイトには、モデルの評価キットや、前述した BOOT ガイドブックなども掲載されている。

日本語文献では、**岡本眞一(2007) 2)**らが、大気環境学会の都市大気環境モデリング分科会による検討結果を報告している。それによれば、日本における総量規制での評価基準（年平均値など長期平均濃度に関して、計算値と実測値の整合性を回帰直線で判断）や、アメリカの EPA 等の考え方（下記）を紹介している。

i) 時間空間を指定し、濃度の予測値・実測値を種々の統計量、残差の平均や標準偏差、相関係数、変動係数、平均二乗誤差で比較。

ii) 一定の範囲内での最高濃度の予測値・実測値の比較

iii) 累積濃度分布曲線（PC 曲線）での予測値・実測値の比較

さらに、EPA の手引書を引用し、次ページのような統計指標を提示している。

表 2-4：文献 2)の表 II-1 モデルの性能評価に使われる統計指標を複製

名称	定義
Mean Normalized Bias:	$\mathrm{NMB} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\frac{M_i - O_i}{O_i}$
Mean Normalized Gross Error:	$\mathrm{MNGE} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\frac{M_i - O_i}{O_i}$
Average Peak Prediction Bias and Error:	観測値と計算値のそれぞれの日最高値について求めたNMBとMNGE
Mean Observation and Prediction:	$\bar{O} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} O_i,\ \bar{M} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} M_i$
Ratio of the Means:	$\mathrm{RATIO} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\frac{M_i}{O_i}$
Mean Bias:	$\mathrm{BIAS} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(M_i - O_i)$
Normalized Mean Bias:	$\mathrm{NMB} = \sum_{i=1}^{N}(M_i - O_i) \Big/ \sum_{i=1}^{N}(O_i) = \mathrm{BIAS}/\bar{O}$
Mean Fractional Bias:	$\mathrm{FBIAS} = \frac{2}{N}\sum_{i=1}^{N}\frac{(M_i - O_i)}{(M_i + O_i)}$
Mean Error:	$\mathrm{ERR} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\lvert M_i - O_i\rvert$
Normalized Mean Error:	$\mathrm{NME} = \sum_{i=1}^{N}\lvert M_i - O_i\rvert \Big/ \sum_{i=1}^{N}(O_i) = ERR/OBS$
Mean Fractional Error:	$\mathrm{FERROR} = \frac{2}{N}\sum_{i=1}^{N}\frac{\lvert M_i - O_i\rvert}{(M_i + O_i)}$
Correlation Coefficient:	$\mathrm{CORRCOEFF} = \frac{\sum_{i=1}^{N}(M_i - \bar{M})\,(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(M_i - \bar{M})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(O_i - \bar{O})^2}}$
Root Mean Square Error:	$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(M_i - O_i)^2}$
Normalized Ratio of Standard Deviation:	$\sigma^* = \frac{1}{\bar{M}}\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(M_i - \bar{M})^2} \Big/ \frac{1}{\bar{O}}\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(O_i - \bar{O})^2}$
Percentage within a Factor of 2:	計算値と観測値の全ペア（N）のうち、$0.5 \le M_i/O_i \le 2$を満たすペアの割合

O_i：ある地点における時刻（日）の観測値
M_i：O_iに対応する計算値
N：O_iとM_iが共に存在するペアの総数
名称および略称は、すべて出典（EPA手順書、HASS）に従った。

2.2.3 文献検索の方針

前節で述べた、一般の大気拡散シミュレーション手法の対象、モデルの構成要件、検証データと評価基準

を念頭に、対象を放射性物質の拡散と被ばく線量評価に関係する文献とし、線量評価の前提となる放射性物質の大気拡散に係る濃度及び降下量の時空間変化に着目し、それを出来るだけ高精度に求められるシミュレーションとそれを実現するソフトウエア及びシステムも含む文献を調査する。また、同時に線量評価法の進展、体内摂取量と直接関係する、人と接する放射性物質の空気中濃度、放射性物質の屋内への拡散および屋内における物質の拡散と人体への吸収に関する文献については、最近の進展を詳しく調査する。調査に当たっては、生成 AI（ChatGPT とそのプラグインである ScholarAI および SciSpace）による検索の結果も利用し、該当文献に当たり、その回答内容を全て確認した上で報告内容を記した。

一つの例として、日本語文献の調査方法を記す（2.3.1 にて報告する文献の調査方針を例とする)。まず、「放射性物質の高精度大気拡散予測モデル」を構成する要素技術として、下記 10 項目を選択し、関連する原論文のリストを取得する。

1. 高度気象データ同化技術（4D-Var や EnKF：4 次元データ同化、アンサンブル・カルマンフィルタ）
2. ラージ・エディ・シミュレーション（LES)
3. 都市キャノピーモデル（Urban Canopy Model, UCM)
4. ガンマ線イメージングと 3D 風観測
5. ガウスプルームモデルの改良とデータ同化
6. GPU 並列計算による高速化
7. 流体と粒子の相互作用モデル
8. IoT デバイスと移動体データの利用
9. 高解像度の気象モデリングと数値シミュレーション、NWP(数値気象予報)との統合
10. リアルタイムでの放射線量計測と解析

これらの結果から、「放射性物質の高精度大気拡散予測モデル」文献調査の対象として、重要な知見として報告すべき技術（1, 2, 3, 5, 6, 9）を抽出し、それらを整理し、且つ、文献数等を勘案し、下記 7 項目に分類する。なお、（7）は、機械学習技術の活用等、従来にない研究開発例についても新たな項目として付加した。

（1） 数値気象モデル、高度気象データの利用、データ同化技術（上記 1 と 9）
（2） 汚染物質（放射性物質）の大気拡散、LES および領域モデル
（3） SPEEDI の発展
（4） 都市・市街地モデル及び複雑地形等でのモデル開発とその利用
（5） ガウスプルームモデルベースの拡散評価手法
（6） 並列計算や GPU による高速化
（7） 最近の新たな展開

以上、高精度の被ばく評価を達成するためには、まず高精度の大気拡散予測モデルが重要との観点から、これを構成する要素技術として、上記項目を代表する原論文及びそれに関連する文献を収集し、それらを時系列で整理し、その分野における進展及び成果を明らかにする。また、同時に、その時点における到達点や課題を整理し、技術の到達点と課題について報告する。

2.3 放射性物質大気拡散に係る被ばく評価の文献調査（日本語）

本節では、前節で述べたように高精度の放射性物質の拡散と被ばく線量評価に関するシミュレーション（モデル及び手法）とそれを実施するソフトウエア及びシステム等について、まず、大気拡散モデルの高度化技術とその知見及び課題から、その主な７つの要素技術（前節 2.2.3 にて分類）に関して文献調査を行った結果を示し、当該分野の変遷を明示するとともに、現時点での到達点や課題、展望についてまとめる。

次に、本事業の主たる要調査内容である大気拡散による被ばく評価が、凡そ、外部被ばくと内部被ばくに分類され、外部被ばくが、クラウドシャインとグランドシャインに分類できることを受け、高精度化大気拡散シミュレーションにより得られた放射性物質濃度の分布を基に、被ばく評価の高精度化を目指す研究開発の取り組みについて紹介し、知見と課題を整理する。従って、先ず、外部被ばくをクラウドシャインとグラウンドシャインに分類し、屋外での被ばくに着目した後、屋内での同様の被ばくと内部被ばくについての文献調査結果を報告する。

2.3.1 線量評価と連携する大気拡散シミュレーションに係る文献調査

（１）数値気象モデル、高度気象データの利用、データ同化技術

気象条件は、放射性物質の輸送と拡散に大きな影響を与える。風速、風向、気温、気圧などの要因は、放射性核種の拡散パターンを決定する上で重要な役割を果たす。数値気象モデルは、気象パラメータの取得に利用され、それをメソスケールモデルに組み込んで、さまざまな条件下での輸送挙動がシミュレートされる。

日下博幸(2009) 3)は、次世代の領域気象モデルである WRF（Weather Research and Forecasting model）の概要、機能、適用例、そしてその課題について詳しく解説している。WRF モデルは気象シミュレーションの精度向上と多様な気象現象への対応を目指して開発されており。当該文献では WRF モデルの構造や特徴を紹介し、その適用可能性と課題が明らかにされた。

まず、WRF モデルの構造について、基本構造、物理スキーム、数値解法に関する詳細な説明がなされた。また、都市気候研究や局地的な気象現象のシミュレーションなど、具体的な適用例を通じてモデルの有効性が示され、さらに、モデルの精度向上に向けた課題や、入力データの重要性についても述べられている。高解像度シミュレーションの実現に関し、WRF モデルは、特に都市域の詳細な気象解析に有効であることが示されている。また、大気物理過程を詳細に再現するための多様な物理スキームが実装されており、ユーザーの目的に応じた選択が可能であることが確認されている。さらに、都市域の気候解析に特化した都市キャノピーモデルが組み込まれており、ヒートアイランド現象のシミュレーションなどに活用されている。

WRF モデルの成果としては、多様な気象現象や地域特性に対応できる柔軟性を持ち、研究や実務に広く適用可能であることが示された。さらに、世界中の研究者や技術者による活発なコミュニティ活動により、モデルの継続的な改良や情報共有が進められていることが報告されている。

その一方、課題としては、シミュレーションの精度が入力データの質に大きく依存することが挙げられる。特に、土地利用データや大気データの選択が結果に影響を与えるため、適切なデータの準備が必要であることが指摘される。また、高解像度シミュレーションや長期間の予測を行う場合、計算コストが増大するため、高性能な計算環境の整備が求められる。さらに、多様な気象現象や地域特性に対応するため、観測データとの比較によるモデルの継続的な検証と改良が必要であることは注意すべき点である。

竹見哲也(2009) 4)らは、気象モデル（WRF）と数値流体力学（CFD）モデルを組み合わせることで、微細規模の大気流れを高精度にシミュレーションする手法を検討し、都市域の防災対策や環境評価において、よ

り精度の高い風況予測を可能にする基盤の提供が可能であることを記した。

都市域など複雑な地形上での風速変動や突風の評価は、防災や環境対策の観点から重要である。しかし、従来の気象モデルでは、都市の建物効果を陽的に取り扱うのが難しく、また、CFD モデル単独では広域的な気象擾乱の影響を再現するのが困難だった。当該論文の目的は、気象モデルと CFD モデルの融合により、これらの課題を克服し、微細規模の大気の流れを高精度にシミュレーションすることである。

具体的な手法として、領域気象モデル WRF を用い、水平格子幅を 120m まで細分化した 4 重ネスト領域を設定して気象場を計算した。また、ラージ・エディ・シミュレーション（LES）に基づく CFD モデルを用い、都市域の詳細な風速場を解析した。さらに、WRF モデルで得られた風速データを CFD モデルの入力条件として用い、両モデルを融合させることで、実気象場での建物の影響を考慮した風速変動を再現した。その結果、メソスケールの気象モデルのみを用いる場合と比較し、CFD モデルを組み合わせることで建物群や局所地形の影響を細かく捉えられるようになった。結果として、風向・風速分布、温度勾配などの再現性が向上し、観測値との誤差が減少した。また、運動エネルギーや乱流強度の鉛直・水平分布を細かく評価することが可能で、特に地表面付近の流れの可視化により、湧き上がり・渦の形成などの微細な乱流現象を把握するのに有用であることが示された。都市部あるいは特定の複雑地形を対象としたケーススタディにおいては、風速や気温の時空間分布が観測データと良好に一致する傾向も確認されている。当該研究の成果として、気象モデルと CFD モデルの融合により、都市域など複雑な地形上での風速変動や突風の評価が精度良く実施できることが示され、高解像度の気象モデルと LES 解析により、気象擾乱の微細構造や都市の建物効果を詳細に再現することが可能となったことは、重要な進展（知見）と考えられる。

その一方、課題として、気象モデルと CFD モデルの時間・空間スケールの違いを適切に調整し、融合させる手法の確立が必要であることが挙げられる。また、高解像度シミュレーションや LES 解析は計算機資源を多く消費するため、効率的な計算手法や高性能計算環境の整備が求められる。さらに、シミュレーション結果の妥当性を検証するため、観測データとの比較やモデルの検証・改良が継続的に必要であることが指摘される。

弓本桂也(2009) 5)は、気象・輸送モデルにおけるデータ同化の手法を整理し、その応用可能性を示している。気象・輸送モデルは大気や海洋の流れをシミュレーションし、天気予報や環境汚染物質の拡散予測などに活用される。しかし、これらのモデルは初期条件や境界条件に対する不確実性が大きいため、観測データを適切に取り入れる「データ同化（Data Assimilation）」が重要である。データ同化とは、数値モデルの予測と観測データを統合し、より正確な初期状態を推定する技術であり、特に気象シミュレーションや大気汚染物質の輸送解析において活用が進んでいる。

データ同化手法には、単純な統計補正による最適内挿法（Optimal Interpolation, OI）、カルマンフィルタ（Kalman Filter）などによる逐次データ同化（Sequential Data Assimilation）、時系列データを考慮した最適化手法である変分法（Variational Methods）等がある。中でも、大気の初期状態をより現実的に推定するため、代表的な手法として、Ensemble Kalman Filter（EnKF）や変分法の 4D-Var が気象予測精度向上に貢献している。さらに、大気中のエアロゾルや汚染物質の拡散予測において、観測データとシミュレーションを組み合わせた手法が利用され、火山灰拡散や放射性物質の輸送解析にもデータ同化が応用されている。実際、データ同化の導入により、実際に気象モデルと輸送モデルの精度が向上したことが示されている。EnKF や 4D-Var を導入することで、数値天気予報の誤差が顕著に減少し、大気中の二酸化炭素（CO_2）や放射性物質の拡散予測も、データ同化の導入により高精度化が可能となった。また、リモートセンシングデ

ータ（衛星観測など）との統合が進み、広域的なデータ同化が可能になるとともに、大規模なデータセットを活用した予測システムの開発が進められている。さらに、火山灰や PM2.5、放射性物質の拡散予測において、データ同化の導入により不確実性の削減が確認され、災害時の汚染物質の緊急予測にも有用であることが示唆されている。

データ同化手法の特性を整理し、気象・輸送モデルにおける主要な手法に対し、それぞれの特徴を明確化したことも成果の一つである。データ同化により、初期条件の不確実性を低減し、モデルの精度向上が確認され、大気中の汚染物質の輸送シミュレーションや災害時の緊急予測にデータ同化が有効であることが示されたことは、重要な成果（知見）と考えられる。しかし、課題としては、4D-Var や Ensemble Kalman Filter などの高度なデータ同化手法の計算コストが大きいため、実用的な運用のためには、高性能計算環境が必要であることが挙げられる。また、観測データの空間的・時間的な分布が不十分だと、データ同化の効果が限定的となるため、観測ネットワークの拡充も課題である。さらに、データ同化技術をリアルタイム気象予測や災害監視システムに組み込むためには、計算の高速化とモデルの最適化が必要であることを念頭に置く必要がある。

関山剛(2022) 6)らは、アンサンブル・カルマンフィルタ（EnKF）*における変数局所化手法を用いて、気象データ（風速・気温・気圧など）と大気中の濃度観測データを同時に同化する方法を検討した。EnKF はバックグラウンド誤差共分散を明示的に導出し、カルマンゲインの計算に利用するが、サンプル数が系の自由度よりもはるかに少ない場合、サンプリングエラーが生じ、解析精度が低下する可能性がある。これを防ぐため、共分散局所化が用いられ、物理的距離に基づく空間的局所化だけでなく、変数間の相関に基づく変数局所化も有効である。当該論文の目的は、変数局所化を適用することで、気象場と大気濃度場の同時データ同化における解析精度の向上を図ることである。

具体的な手法として、EnKF を用いて気象データと大気濃度データを同時に同化した。さらに、変数局所化を導入し、変数間の相関に基づき相関の小さい変数の組み合わせで共分散を強制的にゼロにする手法を適用した。実際、同時データ同化実験により、変数局所化の効果を検証している。その結果、変数局所化により、風速観測の情報から濃度分布の解析精度が向上したが、濃度観測の情報から風速分布の解析精度向上は確認されなかった。以上、変数局所化により、サンプリングエラーの影響を減少させ、解析精度を向上させることが確認され、また、気象データと大気濃度データの同時同化において、一方の観測データから他方の場の解析精度向上が期待できることが示された。しかし、課題として、濃度観測データから気象場の解析精度を向上させるための手法や条件の検討が必要であり、変数局所化の適用範囲や方法について、さらなる最適化と検証が求められる。

*アンサンブル・カルマンフィルタ（Ensemble Kalman Filter: EnKF）：複数のモデル予測（アンサンブル）を用いて誤差共分散を推定し、観測データを同化するカルマンフィルター（KF）の一種で、主に数値天気予報や海洋予測など、多数の状態変数を含む大規模なシステムにおいて用いられる。変数局所化とは、観測と状態ベクトル（モデル変数）間の誤差共分散を、空間や時間だけでなく“変数間”でも制限（局所化）する手法である。

○本項（１）のまとめ

高分解能な放射性物質の大気拡散や被ばく線量評価においては、注目する領域は局所的となるが、その精度向上には、広域的な気象予測も必要となる。ここでは、広域気象モデル（領域モデル）WRF の活用から、

それより小規模の領域を対象とした CFD モデル（工学モデル）との結合、気象観測データや大気濃度の観測データとのデータ同化手法の発展をたどった。

日下博幸(2009) 3)は、次世代の領域気象モデルである WRF の概要、機能、適用例、そしてその課題について詳しく解説し、WRF には、大気物理過程を詳細に再現するための多様な物理スキームが実装されており、ユーザーの目的に応じた選択が可能であることを述べた。**竹見哲也(2009) 4)**らは、気象モデル（WRF）と数値流体力学（CFD）モデルを組み合わせることで、微細規模の大気流れを高精度にシミュレーションする手法を検討し、都市域の防災対策や環境評価において、より精度の高い風況予測を可能にする基盤を提供した。**関山剛(2022) 6)**らは、アンサンブル・カルマンフィルタ（EnKF）における変数局所化手法を用いて、気象データ（風速・気温・気圧など）と大気中の濃度観測データを同時に同化する方法を検討し、変数局所化により風速観測からの濃度分布解析精度の向上を確認した。

その一方、データ同化手法については、**弓本桂也(2009) 5)**は、単純な統計補正による最適内挿法、カルマンフィルタなどによる逐次データ同化、時系列データを考慮した最適化手法である変分法などがあり、大気の初期状態をより現実的に推定するために Ensemble Kalman Filter（EnKF）や変分法の 4D-Var が気象予測精度向上に貢献していると報告した。

（2）汚染物質（放射性物質）の大気拡散、LES および領域モデル

汚染物質の大気拡散予測は、ガウスプルームモデルの利用から CFD の RANS そして LES へ、詳細な格子分割による大規模な計算へと発展した。ここでは、放射性物質の拡散に関する広域のモデルおよび局所的な高分解能のモデルを簡単にレビューする。

道岡武信(2003) 7)らは、乱流境界層内での煙突ガスの拡散に対して、ラージ・エディ・シミュレーション（LES）を適用し、サブグリッドスケール（SGS）の濃度変動を考慮したベータ確率密度関数（PDF）モデル*を用いて、粗いグリッド解像度でも瞬間的な高濃度値を予測する手法を検討した。

大気境界層内での汚染物質の拡散予測は、環境影響評価や大気汚染対策において重要な課題であり、従来のモデルでは乱流による濃度変動の詳細な再現が難しく、特に高濃度のピーク値の予測に課題があった。本研究の目的は、LES とベータ PDF モデルを組み合わせることで、SGS の濃度変動を考慮し、粗いグリッド解像度でも高精度な濃度予測を実現することである。

具体的な手法として、有限差分法に基づく LES を用いて乱流境界層内での煙突ガスの拡散をシミュレーションし、数値振動や負の濃度値を防ぐために Flux-Corrected Transport（FCT）スキームを適用した。また、SGS の濃度変動を考慮するためにベータ PDF モデルを導入し、瞬間的な高濃度値の予測精度を向上させた。シミュレーション結果の妥当性を検証するため、風洞実験のデータと比較を行った。

その結果、ベータ PDF モデルを用いることで、粗いグリッド解像度でも瞬間的な高濃度値を正確に予測できることが確認された。さらに、LES とベータ PDF モデルの組み合わせによるシミュレーション結果は、風洞実験のデータと良好に一致し、モデルの有効性が示された。

当該研究開発の成果として、LES とベータ PDF モデルの組み合わせにより、乱流境界層内でのトレーサガスの濃度変動を高精度で予測できる手法を確立したことが挙げられる。さらに、FCT スキームの導入により、数値振動や負の濃度値の発生を防ぎ、シミュレーションの安定性を確保することができた。

その一方、課題としては、本手法を他の大気条件や地形、異なる汚染物質に適用する際のモデルの一般化と検証が必要であることが挙げられる。また、LES は計算資源を多く消費するため、計算コストの削減や効

率的な計算手法の開発が求められる。

*ベータ確率密度関数（PDF）モデル：ベータ分布は 0 と 1 の間の値を持ち、その性質を利用して濃度変動を予測する手法である。著者らは、瞬間的な高濃度値に注目し、この関数を採用した。

滝川雅之(2011) 8)は、福島第一原子力発電所事故により放出された放射性物質の大気中での輸送と沈着の過程を、領域化学輸送モデルを用いて解析した。当該研究の目的は、領域化学輸送モデルを用いて、放射性物質の大気中での輸送経路や沈着量を推定し、その分布を明らかにすることである。放出された放射性物質がどのように輸送され、地表や海洋に沈着したかを明らかにすることは、環境影響評価や今後の防災対策において重要である。

具体的な手法として、領域化学輸送モデルを用いて放射性物質の大気中での挙動をシミュレーションし、福島第一原発からの放射性物質の放出量や放出時刻などの情報をモデルに入力した。また、シミュレーション期間中の気象データをモデルに組み込み、放射性物質の輸送経路を解析した。さらに、大気中の放射性物質が地表や海洋に沈着する過程をモデル内で再現した。その結果、モデルのシミュレーション結果から、放射性物質の地表や海洋への沈着量の分布を推定することができた。また、放射性物質が大気中でどのように輸送されたか、その経路も明らかにした。領域化学輸送モデルを用いることで、放射性物質の大気中での輸送と沈着過程を一定の精度で再現できることが確認された。

シミュレーション結果は、放射性物質の環境中での分布を理解する上で有用な情報を提供し、今後の環境影響評価や防災対策に役立つと考えられる。しかし、放出源情報や気象データの不確実性がシミュレーション結果に影響を与えるため、これらの精度向上が求められる。さらに、今後、放射性物質の長期的な環境中での挙動や影響を評価するためのモデルの改良やデータ収集が必要である。

井口敬雄(2012) 9)らは、2011 年の福島第一原子力発電所事故で放出された放射性物質の大気中輸送シミュレーションにおいて、使用する大気再解析データや放出フラックス予測の違いが結果に与える影響を検証した。

福島第一原発事故により放出された放射性物質の拡散予測は、環境影響評価や防災計画において重要な課題である。しかし、シミュレーションに使用する大気再解析データや放出フラックスの推定には不確実性が伴い、これらがシミュレーション結果にどの程度の誤差をもたらすかを明らかにする必要がある。本研究の目的は、異なる大気再解析データセットや放出フラックス予測の違いが、放射性物質の大気輸送シミュレーションに与える影響を定量的に評価することである。

具体的な手法として、3D 全球大気輸送モデル（水平 1.25° x 水平 1.25°、鉛直 18 層）を使用し、複数の大気再解析データ（アンサンブル再解析データ（ALERA2）、NCEP/NCAR 再解析データ、ERA Interim データ、JCIDAS データなど）を用いてシミュレーションを実施し、結果の差異を比較した。また、放出開始日を変えて 1 日だけ放出させたシミュレーションを行い、放出タイミングの違いが輸送結果に与える影響を検証した。

その結果、ALERA2 を用いたシミュレーションでは、濃度の標準偏差は平均値の 10%以内に収まったが、他の再解析データを用いた場合、標準偏差は平均値の 30%以内となり、データセット間での差異が確認された。さらに、放出日を変えたシミュレーションでは、その後の放出物質の輸送経路や濃度分布に大きな違いが見られ、放出タイミングの重要性が示された。これにより、大気再解析データや放出フラックス予測の違いがシミュレーション結果に与える影響が定量的に評価され、モデルの不確実性が明らかとなった。誤差要因の特定により、今後のモデル改良やデータ選択の際の指針も提供された。

しかし、シミュレーション精度を向上させるためには、より高精度な大気再解析データや放出フラックス情報の整備が必要である一方、他の要因（例：化学反応、地形効果）も考慮した総合的な誤差評価が求められる。

堅田元喜(2013) 10)らは、プラント近傍での局所的な拡散現象を高精度で解析し、放射性物質の初期分布に関する重要な知見を得た。福島第一原子力発電所事故では、大量の放射性物質が短期間にわたり放出され、特にプラント近傍の局所的な拡散挙動を明らかにすることが求められた。当該研究の目的は、放射性物質の局所的な大気拡散をシミュレーションし、事故初期におけるプラント近傍での物質分布を詳細に解析することである。その具体的な手法としては、局所的な拡散現象を再現するために特化した高解像度モデルを利用し、放出源情報として実測データやシナリオに基づく推定を入力した。また、事故当時の風向・風速など、詳細な気象データを使用し、微気象の影響を再現するためにモデルを微細化した。さらに、プラント周辺の実測データと比較し、モデルの妥当性を検証した。

その結果、放出直後のプラント近傍で、特定方向に高濃度の放射性物質が拡散する挙動の再現に成功している。また、放出物質の分布には風向や地形が影響を及ぼしていることが確認され、実測データとモデルシミュレーションの結果が概ね一致し、モデルの信頼性が示された。

当該研究の成果としては、プラント近傍での放射性物質の挙動を高精度で再現する詳細な局所拡散解析が行われたことが挙げられる。また、得られた知見は事故時の初動対応やリスク評価に活用可能である。

しかし、放出源の特性や量に関するデータの精度向上が必要であり、高解像度シミュレーションは計算コストが高く、その効率化が求められる。さらに、初期拡散だけでなく、その後の長期間にわたる挙動の追跡も課題となる。

日本学術会議(2014) 11)は、国内外の 9 個の領域規模大気輸送モデル、6 個の全球規模大気輸送モデル、11 個の海洋拡散モデルによるシミュレーション結果を比較・解析することによって、放射性物質の輸送・沈着に関するモデル間差や観測結果との差異についてまとめた。シミュレーションの不確実性に関するこのような知見は、今後の輸送モデルの改善への指針を与えるとともに、災害の把握と軽減対策における輸送モデル利用の信頼度を判定するために役立つと報告している。

福島第一原子力発電所事故によって大量の放射性物質が環境中に放出され、その輸送および沈着過程を正確に把握することが環境影響評価において重要である。当該研究の目的は、複数の大気輸送モデルを用いて放射性物質の輸送および沈着過程を解析し、それぞれのモデルの計算結果を比較することで、モデルの適用性や精度を評価することである。

具体的な手法として、モデルとして国内外で利用されている大気輸送モデル（WRF-Chem, CMAQ, ldX, GEARN など）を選定し、各モデルの特徴や設定を統一した条件で比較した。放射性物質の放出量やタイミング等、統一された放出源情報を基にモデル計算を実施し、事故当時の気象条件を再現するために再解析データ（ERA-Interim, JRA-25）を使用した。さらに、モデル計算結果を放射線モニタリングポストや航空機観測データと比較し、結果の妥当性を検証した。

その結果、各モデルで放射性物質の輸送経路の再現性は概ね一致したが、一部で濃度分布や沈着量に違いが見られた。また、モデル間で地表沈着量に数倍程度の差が確認され、沈着過程の表現における違いが影響していることが示唆された。使用した気象データの違いが結果に大きく影響することも確認された。

これらの結果により、各モデルの長所と短所が明らかになり、特定の用途に応じたモデル選定が可能になる。また、計算結果は放射性物質の影響評価や防災対策の基礎データとして利用可能であることが示された。

しかし、モデルごとに沈着過程の表現が異なるため、統一的な検証基準が必要であり、気象条件による計算結果のばらつきを抑える手法の開発も求められる。さらに、放出源情報の更なる精度向上がシミュレーション精度に直結することも課題である。

小野浩己(2017) 12)らは、地熱発電所の環境アセスメントにおける硫化水素（H_2S）の大気拡散予測を効率化するため、従来の風洞実験に代わる 3 次元数値モデルの開発を行った。地熱発電所の冷却塔から放出される H_2S の拡散評価は、環境影響評価において重要である。従来は風洞実験が主に用いられてきたが、時間と費用の面で効率的な代替手段が求められていた。当該研究の目的は、風洞実験に代わる高精度な数値モデルを開発し、H_2S の拡散予測の効率化を意図している。

具体的な手法として、ラージ・エディ・シミュレーション（LES）を基盤とした 3 次元数値モデルを開発し、冷却塔からの排気上昇、周辺建屋や地形の影響を高精度に再現した。また、LES に適した格子生成プログラムを作成し、複雑な地形や構造物の影響を詳細にシミュレーション可能とした。さらに、実際の地熱発電所を想定した風洞実験を実施し、数値モデルの予測精度を検証した。

その結果、開発した数値モデルは、風洞実験で得られた地表濃度の傾向を精度良く捉え、最大着地濃度に関しても風洞実験結果の 0.5～2.0 倍以内に収まることが確認された。また、数値モデルは、地熱発電所の環境アセスメントにおける H_2S 拡散予測に十分適用可能であると結論付けられた。

当該研究の成果として、風洞実験に代わる数値モデルの開発により、予測評価の期間短縮と費用削減が期待されることが挙げられる。また、LES を用いることで、冷却塔からの排気上昇や地形の影響を詳細に再現し、高精度な H_2S 拡散予測が可能となった。

しかし、異なる地熱発電所や多様な地形条件への適用性を検証し、モデルの汎用性を高める必要がある。また、高精度なシミュレーションに伴う計算負荷を軽減するための効率的なアルゴリズムの開発も求められる。

堅田元喜(2017) 13)らは、福島第一原発事故における放射性核種の大気放出、拡散、沈着の過程を、実測データと数値シミュレーションを統合することで詳細に解析した。エアロゾルとの相互作用を含めた評価により、地域ごとの沈着パターンや被曝リスクの特徴が明らかになり、防護対策やリスク評価のための有用な基盤が提供された。

福島第一原発事故により、大量の放射性核種が大気中へ放出され、広範囲に拡散・沈着した。事故後、住民の被曝リスクや環境への影響が深刻な問題となり、放射性核種の大気中での挙動やエアロゾルとの関係が注目された。本研究では、事故における放射性核種の大気放出から拡散、さらに地表への沈着過程を定量的に解析し、そのメカニズムを明らかにし、気象条件やエアロゾル粒子との相互作用が、放射性物質の拡散・沈着にどのような影響を及ぼすかを評価することで、被曝リスク評価や将来的な防護対策のための基礎データを提供することを目的とした。

具体的な手法として､実測データとシミュレーションの統合解析を行った｡事故直後の放射線測定データ、沈着量データなどの現地観測値を収集し、大気拡散モデルを用いて放射性核種の拡散・沈着プロセスを再現する数値シミュレーションを実施した。さらに、放射性核種がエアロゾル粒子に付着することで、空中での滞留時間や拡散距離が延びる現象に着目し、エアロゾル粒子の物理化学的特性とそれに伴う大気中での挙動を解析してシミュレーションに反映させた。加えて、風向、風速、大気の安定度などの気象パラメータ、建物や地形による局所条件の違いが放射性核種の運搬に与える影響を評価し、地域ごとの沈着パターンや被曝リスクのばらつきを明らかにした。

この結果、事故直後には大量の放射性核種が大気中に放出され、局地的には高濃度のプルームが発生し、気象条件により広域に拡散、各地域で異なる沈着パターンが確認された。放射性核種がエアロゾル粒子に付着することで空中での滞留時間が延長され、遠方まで運ばれるケースが示唆され、結果として一部地域では低濃度ながらも長期にわたる沈着が観測された。さらに、風向や大気の安定度、地形条件などにより特定の地域で沈着が集中する現象が明らかになり、観測データとシミュレーション結果が概ね一致し、地域ごとの被曝リスク評価のための基礎情報が得られた。

当該研究の成果として、事故における放射性核種の大気放出から拡散・沈着までの一連の過程を、実測データとシミュレーションを通じて体系的に解明し、エアロゾル粒子との相互作用が遠方への拡散および長期沈着に寄与することを示し、被曝リスク評価や除染対策の立案に有用な知見を提供した。また、地域ごとの気象条件や地形の影響を考慮した評価手法が確立され、今後の原発事故や大気放出事故に対する防護計画の基盤となることが示された。

しかし、数値シミュレーションにおけるパラメータ設定の不確実性が残り、より詳細な現地観測や実験データとの連携が求められる。また、エアロゾル粒子の物理化学的特性については、さらに高精度な測定や解析が必要であり、モデルの精緻化が今後の課題である。さらに、沈着後の再懸濁や長期的な環境影響、住民被曝の二次的リスクに関する包括的な評価が引き続き求められる。

李秀澈(2023) 14)らは、日本、中国、韓国の原子力発電所で重大事故が発生した際、放射性物質（セシウム137）の拡散範囲と被害人口を定量的に推定した。東アジア地域には多数の原子力発電所が存在し、各国の国境が近接しているため、一国での原発事故が周辺国にも影響を及ぼす可能性が高い。従って、放射性物質の拡散シミュレーションを通じて、地域全体での被害予測と防災対策の必要性が高まっている。当該研究の目的は、日中韓の原発で重大事故が発生した場合の放射性物質の拡散範囲と影響人口を定量的に推定し、各国間の協力体制の構築に資する情報を提供することである。

具体的な手法として、大気中の物質の移流・拡散をシミュレーションするためにHYSPLITモデルを使用し、Cs-137を対象とし、ORIGEN2コードを用いて原子炉内での同位体組成を計算した。また、日中韓それぞれの国から2つずつ、計6つの原子力発電所を選定し、各発電所での重大事故を仮定したシナリオ設定を行い、各シナリオでHYSPLITモデルを用いて放射性物質の拡散範囲と影響を受ける人口を推定した。

その結果、各国の原発事故シナリオにおいて、放射性物質は国境を越えて広範囲に拡散し、近隣諸国にも影響を及ぼすことが示された。また、シミュレーションの結果、事故当事国のみならず、周辺国の住民も避難を余儀なくされる可能性があることが明らかになった。例えば、韓国の古里原子力発電所での事故シナリオでは、放射性物質が日本や中国にまで拡散し、多数の人口に影響を与える可能性が示された。

HYSPLIT モデルを用いることで、原発事故時の放射性物質の拡散と影響人口を定量的に評価する手法を確立し、日中韓の原発事故が相互に影響を及ぼす可能性を示すことによって、地域的な防災協力の重要性が強調された。

その一方、シミュレーションの精度を高めるためには、気象データや放出源情報の詳細化が必要であり、異なる季節や気象条件、放出量の変化を考慮した多様なシナリオでの分析が求められる。また、研究結果を各国の防災計画や政策に反映させるための取り組みも必要である。

○本項（２）のまとめ

道岡武信(2003) 7)らは、乱流境界層内での煙突ガスの拡散に対して、LESを適用し、サブグリッドスケー

ルの濃度変動を考慮したベータ確率密度関数（PDF）モデルを用いて、粗いグリッド解像度でも瞬間的な高濃度値を予測する手法を検討し、風洞実験と比較した。**堅田元喜(2013) 10)**らは、プラント近傍での局所的な拡散現象を高精度で解析し、初期分布に関する重要な知見を得た。特定方向に高濃度の放射性物質が拡散する挙動を再現するとともに、風向や地形が大きく影響していることを確認した。**小野浩己(2017) 12)**らは、地熱発電所の環境アセスメントにおける硫化水素（H_2S）の大気拡散予測を効率化するため、従来の風洞実験に代わる 3 次元数値モデルの開発を行った。

滝川雅之(2011) 8)は、福島第一原子力発電所事故により放出された放射性物質の大気中での輸送と沈着の過程を、領域化学輸送モデルを用いて解析した。大気中輸送される経路を明らかにし、地表や海洋への沈着量の分布を推定した。**井口敬雄(2012) 9)**らは、福島第一原子力発電所事故で放出された放射性物質について、3D 全球大気輸送モデルを用いて解析し、使用する大気再解析データや放出量の予測の違いが結果に与える影響を検証した。**日本学術会議(2014) 11)**は、福島第一原子力発電所事故後に、国内外の 9 個の領域規模大気輸送モデル、6 個の全球規模大気輸送モデル、11 個の海洋拡散モデルによるシミュレーション結果を比較・解析することによって、放射性物質の輸送・沈着に関するモデル間差、観測結果との差異についてまとめた。**堅田元喜(2017) 13)**らは、福島第一原発事故における放射性核種の大気放出、拡散、そして沈着の過程を、実測データと数値シミュレーションを統合することで詳細に解析した。**李秀澈(2023) 14)**らは、日本、中国、韓国の原子力発電所で重大事故が発生した際、放射性物質(Cs-137）の拡散範囲と被害人口を ORIGEN2/HYSPLIT モデルを用いて定量的に推定した。

（3）SPEEDI の発展

ここでは、放射性物質の大気拡散に特化したモデル（SPEEDI）の研究開発をレビューする（凡そ 2000 年以降）。

永井晴康(1999) 15)らは、原子力緊急時における放射性物質の大気中拡散を高精度で予測するため、大気力学モデル「PHYSIC」を用いた新たな予測手法の開発を報告している。原子力事故時に放出される放射性物質の拡散予測には、気象予測モデルの精度が極めて重要である。従来のモデルでは、局所的な気象変化や混合層の変動を十分に考慮できない場合があった。本研究の目的は、3 次元の局所気象予測を可能とし、観測データを同化することで予測精度を向上させる大気力学モデル「PHYSIC」を導入し、放射能拡散予測の精度を高めることである。

具体的な手法として、PHYSIC は 3 次元の局所気象予測を可能とし、気象庁から提供される広域予測データを初期値や境界条件として取り込み、局所的な気象変化を詳細にシミュレーションする。さらに、局所の気象観測データを「ナッジング法」によりモデルに組み込み、予測精度を向上させる他。混合層の変動を考慮することで、放射性物質の拡散挙動をより正確に再現する。

その結果、PHYSIC の導入により、局所的な気象条件の変化や混合層の変動を詳細に再現でき、放射性物質の拡散予測の精度が向上した。実際の気象観測データとの比較により、PHYSIC を用いた予測手法の有効性が確認された。

当該研究の成果としては、PHYSIC を用いることで、原子力緊急時における放射性物質の拡散予測精度が向上し、迅速な対応や避難計画の策定に貢献できる手法が開発されたことが挙げられる。

しかし、高精度なシミュレーションには高い計算コストが伴うため、リアルタイムでの予測に向けた効率化が求められる。また、多様な気象条件や地形に対するモデルの適用性を検証し、汎用性の高い予測手法と

しての改良が必要である。

茅野政道(2003) 16)らは、原子力事故時における放射性物質の拡散予測と被ばく線量評価を行うシステム「SPEEDI」の開発経緯、現状、そして将来的な展望について解説している。1979 年の米国スリーマイル島原子力発電所事故を契機に、原子力施設から放出される放射性物質の拡散とその影響を迅速かつ正確に予測するシステムの必要性が高まり、日本では「SPEEDI」の開発が進められ、国内外の原子力事故に対応するためのシステムとして運用されている。当該解説の目的は、SPEEDI の開発の歴史、実際の事故への適用例、そして今後の展開について概説することである。

具体的手法に着目すると、SPEEDI は世代別に開発されてきた。第 1 世代 SPEEDI は、国内原子力施設の事故に対応するためのシステムとして開発され、文部科学省のシステムとして実運用されている。第 2 世代 SPEEDI（WSPEEDI）は、チェルノブイリ事故を契機に、国外での事故が日本に与える影響をリアルタイムで評価する目的で開発された。第 3 世代 SPEEDI（SPEEDI-MP）は、大気中での問題だけでなく、海洋拡散や土壌への放射性物質の移行まで包括的に扱えるように改良が進められている。また、実事故への適用と検証として、チェルノブイリ事故、旧動燃再処理施設の火災爆発事故、JCO 事故、三宅島の火山ガス噴出等、様々な事故に SPEEDI を適用し、事故調査に貢献するとともに、システムの信頼性を検証している。

その結果、実際の事故において、SPEEDI は、放射性物質の拡散予測と被ばく線量評価において有効であることが確認された。各世代の SPEEDI の開発を通じて、より広範囲で複雑な環境への対応が可能となり、予測精度も向上している。

上記研究開発等の成果として、SPEEDI の導入により、原子力事故時の迅速な拡散予測と被ばく線量評価が可能となり、防災対策に大きく貢献していることが挙げられる。特に、WSPEEDI の開発により、国外での原子力事故に対しても日本への影響をリアルタイムで評価できる体制が整ったことは重要な進展に位置付けられる。

しかし、SPEEDI-MP の開発を進め、海洋や土壌への放射性物質の移行も含めた包括的な予測能力の向上が求められている。また、実際の事故データを用いた継続的な検証と改良を行い、システムの信頼性をさらに高める必要がある。

古野朗子(2006) 17)らは、原子力緊急時における放射性物質の放出源（位置、期間、放出量）をリアルタイムで推定する手法の開発を報告した。原子力事故時には、放射性物質の放出源情報が不明確な場合が多く、迅速な対応が求められる。そのため、観測データと大気拡散モデルを組み合わせて放出源情報をリアルタイムで推定する手法の開発が必要とされる。

具体的な手法として、放出源の位置、期間、放出量の組み合わせに基づき、大気拡散の試行シミュレーションを多数実施し、モデル予測結果とモニタリングステーションから得られる大気中の放射性物質濃度や空間線量率の観測データを統計的に比較した。また、観測データと最も一致するモデル予測を提供する放出条件の組み合わせを特定するため、並列実行手法を開発して多数の初期条件を効率的に処理した。

その結果、欧州トレーサー実験（ETEX）のデータセットを用いて手法の性能を評価し、良好な結果を得た。提案手法により、原子力緊急時における放射性物質の放出源情報をリアルタイムで推定することが可能となり、緊急対応の迅速化と精度向上に寄与することが確認された。

しかし、実際の事故時には観測データの不確実性や不足が考えられるため、手法の適用性と精度をさらに検証・改善する必要がある。

寺田宏明(2008) 18)らは、国外で発生した原子力事故が日本に及ぼす放射線影響を迅速に予測するための

システム、WSPEEDI-II の開発について報告している。従来の SPEEDI システムは国内の原子力事故に対応するものだったが、チェルノブイリ事故以降、国外での事故による影響を予測する必要性が高まった。WSPEEDI-II は、国外での原子力事故時に放射性物質の大気中拡散や被ばく線量を迅速かつ高精度に予測し、日本国内での防災対策に役立てることを目的としている。

具体的な手法として、局所から広域までのスケールに対応し、適切な時間・空間分解能で放射性物質の大気拡散を予測するために非静力学気象モデルを採用した。また、国外の事故で放出源情報が不明な場合、モデル計算結果と環境モニタリングデータを組み合わせて放出状況を推定する機能を開発した。さらに、米国や欧州の同様の緊急時対応システムとオンラインで予測データを交換できる機能を備え、国際的な連携を強化した。ユーザーが容易に操作できるよう、Web ベースのグラフィカルユーザーインターフェースを開発し、東アジア域での原子力事故に迅速に対応するためのデータベースも整備した。

その結果、非静力学気象モデルの導入により、局所から広域までのスケールでの放射性物質の拡散予測精度が向上した。また、放出源情報が不明な場合でも、観測データとモデル計算を組み合わせることで放出状況の推定が可能となり、他国のシステムとのデータ交換機能により国際的な緊急時対応能力が向上した。

当該研究開発の成果として、WSPEEDI-II の開発により、国外での原子力事故時にも迅速かつ高精度な放射性物質の拡散予測と被ばく線量評価が可能となり、日本国内での防災対策に大きく貢献したことが挙げられる。

しかし、システムのさらなる精度向上とユーザーインターフェースの改善が求められており、国際的なデータ共有や連携体制の強化も引き続き重要な課題である。

永井晴康(2013) 19)らは、2011 年の福島第一原子力発電所事故初期に放出された放射性物質の大気中濃度分布を再構築し、被ばく線量評価に必要なデータを提供した。福島第一原発事故では、短半減期の放射性ヨウ素（I-131、I-133）や放射性テルル（Te-132）などが大量に放出された。これらの核種は内部被ばく線量に大きく寄与するため、事故初期段階での大気中濃度分布を詳細に再構築することが重要である。当該研究の目的は、大気拡散シミュレーションを用いて、これら核種の時空間濃度分布を明らかにし、被ばく線量評価の基盤となるデータベースを構築することである。

具体的な手法として、内部被ばく線量への寄与を考慮し、I-131、I-133、Te-132、Cs-137 の 4 核種を対象とした。また、気象データと放出源情報を基に大気拡散シミュレーションを行い、対象核種の大気中濃度の時空間分布をシミュレーションした。さらに、地上付近の水平方向 3km 間隔、時間分解能 1 時間の濃度分布データベースを作成した。

その結果、シミュレーションにより事故初期段階における対象核種の大気中濃度分布を詳細に再現し、構築した濃度分布データベースは被ばく線量評価や健康影響調査に活用可能であることが確認された。

当該研究の成果として、再構築した濃度分布データが事故初期の内部被ばく線量評価に不可欠な情報を提供し、住民の健康リスク評価に寄与することが挙げられる。

しかし、シミュレーションの精度向上のため、気象データや放出源情報の更なる精緻化が必要であり、モデルの不確実性を定量的に評価し、結果の信頼性を向上させることが求められている。

中山浩成(2013) 20)らは、福島第一原子力発電所事故における放射性物質の大気中拡散を評価するため、緊急時環境線量情報予測システム（WSPEEDI）を用いたシミュレーションの結果を報告した。2011 年 3 月の福島第一原発事故では、大量の放射性物質が環境中に放出された。当該研究の目的は、WSPEEDI を用いて事故当時の放射性物質の拡散状況を再現し、その精度や有効性を評価することである。

具体的な手法として、WSPEEDI は気象データと放射性物質の放出情報を基に大気中での拡散・沈着過程をシミュレーションする。シミュレーション設定として、事故当時の気象データや放出源情報を入力し、放射性物質の拡散・沈着を計算した。シミュレーション結果を環境モニタリングデータと比較し、モデルの精度を評価した。

その結果、WSPEEDI は事故当時の放射性物質の拡散経路や地表沈着分布を概ね再現し、シミュレーションにより福島県内の高線量地域の形成メカニズムが明らかになった。

この研究の成果として、WSPEEDI が原子力事故時の放射性物質拡散予測に有効であることが示され、今後の原子力災害時の防災計画策定に役立つと考えられる。

しかし、放出源情報の不確実性がシミュレーション結果に影響を与えるため、より正確なデータの取得が必要であり、地形や気象条件の影響をより詳細に考慮するため、モデルのさらなる改良が求められる。

根本美穂(2021) 21)らは、北朝鮮による地下核実験に対応するため、WSPEEDI-II 自動計算システムの移管とその運用について報告している。北朝鮮が地下核実験を実施した際、原子力緊急時支援・研修センター（支援・研修センター）は、原子力規制庁からの要請に基づき、国による対応への支援活動として、原子力基礎工学研究センター（基礎工センター）の協力を得て、WSPEEDI-II を用いて放射性物質の大気拡散予測計算を実施し、予測結果を原子力規制庁に提出した。本報告書では、北朝鮮地下核実験対応に特化するために基礎工センターで開発され、2013 年 2 月から 2017 年 9 月までに実施された 3 回の地下核実験対応に使用された WSPEEDI-II 自動計算システムの支援・研修センターへの移管と整備について述べている。

基礎工センターで開発された WSPEEDI-II 自動計算システムは、支援・研修センターへ移管され、北朝鮮地下核実験対応に特化した運用体制が整備された。移管後、システムの整備や保守が行われ、迅速な対応が可能な体制が構築された。また、地下核実験発生時の対応手順を明確化され、迅速かつ正確な大気拡散予測が行えるよう運用手順が確立された。

その結果、WSPEEI-II を用い、北朝鮮地下核実験時の放射性物質の大気拡散予測に対する迅速な対応が可能となった。システムの整備と運用手順の確立により、地下核実験発生時の対応能力が向上したと評価できる。

当該研究開発の重要な成果として、システムの移管と整備により、北朝鮮地下核実験時の放射性物質の大気拡散予測において、迅速な対応体制が構築されたことが挙げられる。また、運用手順を明確化することで、対応の効率性と正確性が向上したことは特筆すべきと評価できる。

しかし、システムの信頼性を維持するため、継続的な保守と改善が必要であり、運用手順の有効性を維持し、精度向上のためには、定期的な見直しと訓練等が求められる。

中山浩成(2023) 22)らは、都市部での放射線テロに対応するため、局所域高分解能大気拡散・線量評価システム（LHADDAS）の開発とその応用について報告した。都市部での放射線テロが発生した場合、建物の影響を考慮した高精度な大気拡散予測と線量評価が求められる。従来のモデルでは、個々の建物の影響を十分に考慮できないため、精度の高い評価が難しいという課題があった。本研究では、建物の影響を詳細に考慮した大気拡散と線量評価を可能とする LHADDAS を開発し、放射線テロ対策への応用性を検証することが目的である。

具体的な手法として、LHADDAS は以下の 3 つの計算コードを統合した。まず、LOHDIM-LES は、建物の影響を考慮した高解像度の大気拡散シミュレーションを行うコードである。次に、SIBYL は建物の遮蔽効果を考慮して迅速に空間線量率評価を行うコードである。最後に、CityLBM は、都市域での大気拡散の即時

解析を可能とするコードである。これらのモデルの特徴として、高分解能の計算格子を用いて個々の建物の影響を詳細に再現し、現実の気象条件を取り入れて実時間でのシミュレーションを実施する点が挙げられる。また、ユーザーの目的に応じて各計算コードを柔軟に選択可能である。

応用事例として、警察庁科学警察研究所との共同研究において、LHADDAS を用いた放射線テロ対策シミュレーションを実施し、その有効性を検証した。結果として、LHADDAS は都市部における放射性物質の拡散挙動を高精度で予測可能であり、建物間の複雑な気流や汚染物質の分布を詳細に再現した。また、建物の遮蔽効果を考慮した線量評価により、被ばくリスクの高いエリアを迅速に特定することができた。さらに、警察庁との共同研究を通じて、LHADDAS が放射線テロ対策において実用的であることが確認された。

当該研究開発の成果として、LHADDAS の開発により、都市域での放射線テロや原子力緊急事態に対する高精度な大気拡散予測と線量評価が可能となったことが挙げられる。また、LHADDAS は原子力施設の立地審査、緊急時対応、都市部でのテロ対策など、さまざまな局所域大気拡散の課題解決に活用できる。

しかし、計算効率の向上が求められており、高分解能シミュレーションに伴う計算負荷の軽減やリアルタイム解析のための計算速度の向上が必要である。また、多様な都市環境や気象条件での適用性を高めるため、さらなる実測データとの比較やモデルの改良が求められる。

○本項（３）のまとめ

永井晴康(1999) 15)らは、原子力緊急時における放射性物質の大気中拡散を高精度で予測するため、データ同化（ナッジング）を備えた大気力学モデル「PHYSIC」による新たな予測手法を開発した。局所的な気象条件の変化や混合層の変動を詳細に再現でき、放射性物質の拡散予測の精度が向上した。**茅野政道(2003) 16)**らは、原子力事故時における放射性物質の拡散予測と被ばく線量評価を行うシステム「SPEEDI」の開発経緯、現状、そして将来的な展望を解説した。文部科学省のシステムとして実運用された第 1 世代 SPEEDI、チェルノブイリ事故を契機に、国外での事故が日本に与える影響をリアルタイムで評価する第 2 世代 SPEEDI（WSPEEDI）、大気中での問題だけでなく、海洋拡散や土壌への放射性物質の移行まで包括的に扱うことを目指す第 3 世代 SPEEDI（SPEEDI-MP）について述べた。**古野朗子(2006) 17)**らは、原子力緊急時における放射性物質の放出源（位置、期間、放出量）をリアルタイムで推定する手法を開発した。原子力緊急時における放射性物質の放出源情報をリアルタイムで推定することが可能となり、緊急対応の迅速化と精度向上に寄与する。**寺田宏明(2008) 18)**らは、国外で発生した原子力事故が日本に及ぼす放射線影響を迅速に予測するためのシステム WSPEEDI-II の開発について報告した。高精度な予測能力と放出源を推定する機能を備え、国際的な緊急時対応能力が向上した。2011 年の福島第一原子力発電所事故について、**永井晴康(2013) 19)**らは、初期に放出された放射性物質の大気中濃度分布を再構築し、被ばく線量評価に必要なデータを提供した。**中山浩成(2013) 20)**らは、福島第一原子力発電所事故における放射性物質の大気中拡散を評価するため、緊急時環境線量情報予測システム（WSPEEDI）を用いたシミュレーションの結果を報告した。**根本美穂(2021) 21)**らは、北朝鮮による地下核実験に対応するため、WSPEEDI-II 自動計算システムの移管とその運用について報告した。**中山浩成(2023) 22)**らは、都市部での放射線テロに対応するため、局所域高分解能大気拡散・線量評価システム（LHADDAS）の開発とその応用について報告した。このシステムは、高解像度の大気拡散シミュレーションを行う LOHDIM-LES、建物の遮蔽効果を考慮して迅速に空間線量率評価を行う SIBYL と都市域での大気拡散の即時解析を可能とする CityLBM の 3 つの部分から構成される。

（4）都市・市街地モデル及び複雑地形等でのモデル開発とその利用

都市・市街地及び複雑地形環境での大気境界層中の大気と汚染プルームの挙動を高精度にモデル化するには、上空の気流の流れとともに、地表面の複雑な形状を再現し、流れのパターンや乱流特性等、都市構造と大気の流れとの複雑な相互作用を詳細に表現する必要がある。

中山昭彦(2003) 23)は、複雑な地形上での気流シミュレーションの事例を紹介し、現在の課題と今後の展望について論じた。複雑地形上の気流解析は、風力発電や大気汚染物質の拡散予測など、多岐にわたる分野で重要な役割を果たしている。しかし、地形の複雑さや気象条件の変動性により、正確なシミュレーションは困難を伴う。当該論文の目的は、これまでのシミュレーション事例を通じて複雑地形上の気流解析の現状を把握し、今後の研究課題を明確にすることである。

具体的な手法として、水平な海上に位置する比較的平坦な島周辺の気流や山岳地域の気流に関するシミュレーション事例を取り上げ、これらの事例を通じて地形の影響やモデルの適用性を検証した。各事例に対して適切な数値モデルを選択し、シミュレーションを実施し、モデルの選択やパラメータ設定の方法についても言及した。

その結果､シミュレーション結果から地形の形状や配置が気流に与える影響を定量的に評価した｡例えば、島周辺の気流では地形による風の収束や発散が観察された。また、各数値モデルの適用性や限界についても検討し、複雑地形上での気流解析におけるモデル選択の重要性を示した。

当該研究開発の成果として、複雑地形上の気流シミュレーションに関する事例を蓄積し、今後の研究や実務における参考資料を提供したことは重要な点と評価される。また、地形や気象条件に応じた数値モデルの選択や適用方法についての指針も示した。

しかし、現行の数値モデルでは複雑地形上の微細な気流構造を完全には再現できない場合があり、更なる高精度化が求められる。また、高精度なシミュレーションには多大な計算リソースが必要であり、効率的な計算手法の開発が必要である。さらに、シミュレーション結果の妥当性を検証するため、実測データとの比較やフィードバックが重要であることが指摘される。

田村哲郎(2003) 24)らは、実在する都市環境における大気中の物質拡散を高精度に予測するため、ラージ・エディ・シミュレーション（LES）を用いて解析を行った。都市部では建物や構造物が密集しているため、風の流れや大気中の物質拡散が複雑になる。これらの複雑な気流や拡散挙動を正確に予測することは、環境影響評価や防災計画において重要である。当該研究の目的は、実在する都市環境における空間的に発達する境界層乱流の中での大気拡散特性を明らかにすることである。

具体的な手法としては、LES を用いて都市部の複雑な地形や建物配置を再現し、空間的に発達する境界層乱流をシミュレートした。また、規則的な粗度ブロック配列を通じたプルーム拡散に関する過去の実験結果と比較し、モデルの妥当性を確認した。さらに、実在都市における風の流れとプルーム拡散の特性、およびさまざまな地表面粗度に基づく濃度変動特性を調査した。

その結果、実在都市における平均濃度の空間分布パターンは、規則的な粗度ブロック配列の場合とは大きく異なることが示され、濃度変動には規則的な粗度ブロック配列で得られた拡散過程の物理的メカニズムでは説明できない特有の特徴があることが明らかになった。

当該研究の成果として、LES を用いることで、実在する都市環境における複雑な風の流れと大気拡散の特性を詳細に解析できることが示され、都市部の大気拡散に関する新たな知見が得られ、環境影響評価や防災計画に役立つ情報を提供したことは評価できる。

しかし、実在都市の詳細な地形データや建物配置情報の取得と、それらをモデルに適切に組み込む手法の確立が必要であり、シミュレーションの高精度化と計算コストのバランスを取るための効率的な計算手法の開発が求められる。

竹見哲也(2012) 25)は、福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の拡散を考慮し、複雑な地形が局地的な風速場に与える影響を高解像度の気象モデルを用いて解析した。2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災により、福島第一原子力発電所から放射性物質が大気中に放出された。この拡散過程を正確に予測・評価するためには、原発周辺の複雑な地形が局地的な風況場に与える影響を詳細に把握することが不可欠である。当該研究では、福島県東部地域を対象に、高解像度の気象シミュレーションを実施し、複雑地形上での局地的な風速場の特性を明らかにすることを目的とした。

具体的な方法として、メソスケール気象モデルである WRF（Weather Research and Forecasting）モデルを採用し、高解像度の数値シミュレーションを実施した。対象地域を 400m の格子間隔で解像し、複雑な地形を詳細に再現した。初期値や境界条件には、気象庁のメソ客観解析値および米国環境予測センターの最終解析値を使用した。解析期間として、2011 年 3 月の期間を対象にシミュレーションを行い、地形と大気境界層内の風系との関係を調査した。

その結果、複雑地形の影響は地上高 200m までの風速場に顕著であることが示され、低層大気における地形の影響範囲が明確となった。また、乱流粘性係数の空間分布を解析し、地形の複雑さが乱流特性に与える影響を明らかにし、乱流混合の強度や範囲が地形によって変化することが確認された。

当該研究の成果として、400m 格子の高解像度シミュレーションにより、複雑地形上の局地的な風速場を詳細に再現できることが示され、放射性物質の拡散予測の精度向上に寄与する基礎的知見が得られた。また、地形が風速場や乱流特性に与える影響を定量的に評価することで、局地的な気象現象の理解が深まり、地形の影響を考慮した気象予測モデルの改良に役立つ情報が得られた。

しかし、より詳細な地形や植生、都市構造の影響を考慮するため、さらなる高解像度化やモデルの改良が必要であり、これにより、微細な地形効果や人間活動の影響をより正確に再現できる可能性があることが示唆される。また、シミュレーション結果の精度を向上させるため、現地観測データとの比較や同化手法の導入が求められ、モデルの妥当性を検証し、予測精度の向上が期待される。

大西領(2019) 26)らは、都市部における微気象の高解像度予測をリアルタイムで実現するため、深層学習を用いた新たなシミュレーション手法を開発した。都市環境では、建物や道路などの複雑な構造物が風の流れや温度分布に影響を与え、微気象の予測が難しくなる。従来の数値シミュレーションは高精度だが、計算コストが高く、リアルタイム予測には適していない。当該研究の目的は、深層学習を活用して、計算コストを削減しつつ高解像度な微気象予測をリアルタイムで行う手法を開発することである。

まず、高解像度の数値シミュレーションデータを用いて、深層学習モデルの学習用データセットを作成し、次に、畳み込みニューラルネットワーク（CNN）をベースにした超解像モデルを構築し、低解像度の気象データから高解像度の微気象情報を生成するよう訓練した。開発したモデルの性能は、従来の数値シミュレーション結果と比較して評価した。

その結果、深層学習モデルは、低解像度の入力から高解像度の微気象情報を高い精度で再現できることが確認され、従来の数値シミュレーションと比較して計算時間を大幅に短縮し、リアルタイム予測が可能となることが示された。

当該研究の重要な成果としては、深層学習を活用することで都市部の微気象をリアルタイムで高解像度に

予測する手法を確立したことで、計算コストを削減し、限られた計算資源でも高精度な予測が可能となったことが挙げられる。

しかし、異なる都市構造や気象条件に対しても高精度な予測を維持するため、モデルの汎用性を向上させる必要があり、多様な気象条件や季節変動に対応するため、さらなる学習データの収集とモデルの改良が求められる。

○本項（4）のまとめ

中山昭彦(2003) 23)は、複雑な地形上での気流シミュレーションの事例を紹介し、現在の課題と今後の展望を論じて、各数値モデルの適用性や限界についても検討し、複雑地形上での気流解析におけるモデル選択の重要性を示した。**田村哲郎(2003) 24)**らは、実在する都市環境における物質拡散を高精度に予測するため、LES を用いて境界層乱流をシミュレートし、風の流れとプルーム拡散の特性、およびさまざまな地表面粗度に基づく濃度変動特性を調査した。**竹見哲也(2012) 25)**は、福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の拡散を考慮し、複雑な地形が局地的な風速場に与える影響を、メソスケール気象モデル WRF を用いて解析し、局地的な風速場を詳細に再現して、放射性物質の拡散予測の精度向上に寄与する基礎的知見を得た。**大西領(2019) 26)**らは、都市部における微気象の高解像度予測をリアルタイムで実現するため、深層学習を用いたシミュレーション手法を開発し、畳み込みニューラルネットワーク（CNN）による深層学習モデルを構築して、低解像度の気象データから高解像度の微気象情報を予測する手法を示した。

（5）ガウスプルームモデルベースの拡散評価手法

ガウスプルームモデルは、現在も原子力施設の安全評価の基準として定められ、結果の迅速性などから緊急時の予測システムとしても多用されている。ここでは、CFD の詳細な解析など高度なシミュレーション技術を統合して精度を高めた事例を取り上げた。

佐田幸一(2009) 27)らは、原子力施設からの排ガス拡散を予測し、被ばく線量を評価するための数値モデルの開発と、その妥当性を風洞実験と比較検証した。原子力施設の安全解析において、排ガスの大気中での拡散挙動を正確に予測し、周辺住民の被ばく線量を評価することは重要である。当該研究の目的は、建屋や複雑な地形の影響を考慮した数値モデルを開発し、その精度を風洞実験と比較することで検証することである。

具体的な手法としては、建屋や複雑地形の影響を考慮するため、乱流モデルを用いて気流を計算し、ラグランジュ粒子モデルで排ガスの拡散を予測する手法を構築した。また、実際の地形や建屋配置を再現した風洞実験を実施し、地表面の濃度分布や放出源の有効高さを測定した。これらの実験結果と数値モデルの予測結果を比較することで、モデルの妥当性を検証した。さらに、数値モデルと風洞実験で得られた有効高さを基に、周辺地域の被ばく線量を計算し、その結果を比較した。

その結果、数値モデルによる放出源の有効高さの予測値は、風洞実験の結果とほぼ一致し、数値モデルと風洞実験で得られた有効高さを用いた被ばく線量の評価結果は、両者でほぼ一致する分布を示した。

以上、当該研究の成果としては、建屋や複雑地形の影響を考慮した数値モデルが風洞実験と同等の精度で排ガス拡散と被ばく線量を予測できることが示され、原子力施設の安全解析における排ガス拡散予測と被ばく線量評価に有用であることが確認されたことが挙げられる。

しかし、より複雑な地形や多様な気象条件への適用性を高めるため、モデルの改良が必要であり、実際の環境での観測データとモデルの予測結果を比較し、モデルの精度をさらに検証することが求められている。

田村淳二(2009) 28)らは、茨城県東海村周辺で実施された長期野外拡散試験のデータを用いて、確率論的事故影響評価（PCA）コード OSCAAR と、詳細な地域気象モデル RAMS および物質輸送モデル HYPACT の大気拡散モデルの妥当性を検証した。従来の PCA コードでは、計算コストの観点から直線プルーム型やセグメントプルーム型の大気拡散モデルが広く採用されている。日本原子力研究所（現日本原子力研究開発機構）で開発された OSCAAR コードでは、ガウス型の変動流跡線パフモデルが採用されている。当該研究の目的は、OSCAAR コードと RAMS/HYPACT コードの大気拡散モデルを比較評価し、更に OSCAAR コードに対し、実際の野外拡散試験データと比較することで評価することである。

具体的な手法として、茨城県東海村周辺で実施された長期野外拡散試験のデータを収集し、OSCAAR コードと RAMS/HYPACT コードを用いて試験条件を再現するシミュレーションを実施した。また、シミュレーション結果と実測データを比較し、モデルの予測精度を評価した。

その結果、OSCAAR コードと RAMS/HYPACT コードの予測結果は実測データと比較的良い一致を示し、両モデルは試験条件下でおおむね同程度の性能を持つことが示された。

当該研究の成果としては、OSCAAR コードと RAMS/HYPACT コードの大気拡散モデルが実測データに対して妥当であることが確認され、OSCAAR コードが大気拡散モデルとして、その妥当性が確認されたことで PCA コードとしての信頼性が検証されたことが挙げられる。

しかし、本研究で使用したモデルの適用範囲や限界を明確にするため、さらなる検証が必要であり、詳細なモデルの導入に伴う計算コストの増加を考慮し、実用的な PCA コードの開発が求められる。

青山智夫(2015) 29)らは、原子力発電所事故時に放出される放射性物質の大気中での拡散経路（プルーム軌跡）をリアルタイムで予測するシミュレータを開発した。原子力事故時には、放射性物質が大気中に放出され、周辺地域への影響が懸念される。迅速かつ正確なプルームの軌跡予測は、避難計画や被ばくリスクの評価に不可欠である。当該研究の目的は、Windows PC 上で実時間運用が可能なプルーム軌跡シミュレータを開発し、その精度を検証することである。

具体的には、4 次元の風データを入力としてプルームの時間発展を計算するリアルタイムシミュレータを開発したが、気象庁のメソスケールモデル（MSM）データを同化した WRF（Weather Research and Forecasting）モデルの風データを使用する。実際、福島第一原子力発電所事故時のデータを用いてプルーム到着時刻の予測精度を評価し、モニタリングポストでの観測結果と比較して到達時刻の誤差を算出した。その結果、開発したシミュレータは放出源から 8km 以内の地点で、プルーム到達時刻の誤差は、3～5 分程度であることが確認され、実用に耐える精度を持つことが示された。

当該研究の成果としては、Windows PC 上で動作し、実時間でプルーム軌跡を予測できるシミュレータを開発し、緊急時の迅速な対応が可能となったことが挙げられる。また、MSM データを同化した WRF モデルの風データを使用することで、プルーム到達時刻の高精度な予測が可能であることが示された。

しかし、実際の緊急時には予測風データしか利用できないため、予測精度が低下する可能性がある。類似した気圧配置の既存データを引用する方法など、予測精度向上のための工夫が必要である。また、異なる気象条件や地形に対する適用性の評価等、モデルの改良を進める必要もある。特に、乱流拡散の表現を観測データに基づいて再構築する作業が進行中であり、これにより予測精度の向上が期待される。

小野浩己(2022) 30)らは、原子力発電所の安全解析において重要なパラメータである放出源の有効高さを評価する数値モデルの不確かさを定量化し、その精度を向上させることを目的とした研究開発の成果を報告した。原子力施設の安全解析では、放射性物質の大気拡散を予測する際に、建屋や地形の影響を考慮した放

出源の有効高さを評価することが求められる。従来、この評価には風洞実験が用いられてきたが、数値モデル（CFD）の活用により、期間やコストの削減が期待される。しかし、数値モデルの不確かさ評価が十分に行われておらず、その信頼性確保が課題となっていた。当該研究の目的は、数値モデルの不確かさを定量化し、実用的な評価手法を提案することである。

具体的には、複数回の風洞実験を行い、得られたデータの不確かさを定量化し、数値モデルの検証に必要な基準データを取得し、数値モデルの検証（Verification & Validation）を実施した後、モデルの推定誤差を定量化した。具体的には、ラージ・エディ・シミュレーション（LES）に基づく気流・拡散計算を行い、風洞実験結果との比較を通じてモデルの精度を評価した。また、数値モデルの推定誤差を考慮した放出源の有効高さ評価手法を提案し、風洞実験を行わなくても数値モデルのみで有効高さを評価できる可能性を示した。実際、数値モデルによる放出源の有効高さの評価結果は、風洞実験結果と良好に一致し、モデルの有効性が確認された。以上、数値モデルの推定誤差を定量化することで、モデルの信頼性を向上させる手法を確立した。

この研究の成果としては、不確かさ評価を通じて数値モデルの信頼性を向上させ、風洞実験に代わる評価手法としての可能性を示した。また、推定誤差を考慮した新たな評価手法により、風洞実験を行わずに放出源の有効高さを評価できる道を拓いた。

しかし、提案手法の適用範囲を拡大するため、さまざまな地形や気象条件下での検証が必要であり、複雑な地形や建屋配置に対するモデルの適用性を評価することが求められる。数値モデルの精度向上のため、乱流モデルの改良や計算格子の最適化など、技術的な改善も必要である。

○本項（５）のまとめ

佐田幸一(2009) 27)らは、原子力施設からの排ガス拡散を予測し、被ばく線量を評価するための数値モデルを開発し、その妥当性を風洞実験と比較検証した。数値モデルによる放出源の有効高さの予測値は、風洞実験の結果とほぼ一致し、得られた有効高さを用いた被ばく線量の評価結果も、風洞実験と数値モデルでほぼ一致した。**田村淳二(2009) 28)**らは、茨城県東海村周辺で実施された長期野外拡散試験のデータを用いて、確率論的事故影響評価（PCA）コード OSCAAR と、詳細な地域気象モデル RAMS および物質輸送モデル HYPACT の大気拡散モデルの妥当性を検証した。両コードの予測結果は、実測データと比較的良い一致を示した。**青山智夫(2015) 29)**らは、原子力発電所事故時に放出される放射性物質の大気中での拡散経路（プルーム軌跡）を Windows PC 上でリアルタイムに予測するシミュレータを開発し、実時間運用が可能なことを示した。**小野浩己(2022) 30)**らは、原子力発電所の安全解析において重要なパラメータである放出源の有効高さについて、LES に基づく気流・拡散計算を行い、風洞実験結果との比較を通じてモデルの精度を評価して、数値モデルの推定誤差を考慮した放出源の有効高さ評価手法を提案した。

（６）並列計算や GPU による高速化

高精度の大気拡散シミュレーションは、高分解能で高度なモデルの使用につれて計算コストが膨大になり、結果を得るまでの時間も必要となる。そのため、並列計算や GPU の利用による高速化が試みられてきた。

丸山直也(2012) 31)らは、気象シミュレーションコード SCALE-LES にて、GPU を用いて高速化し、その成果を報告した。気象シミュレーションコード SCALE-LES は、大規模な並列計算環境における計算性能の向上を目指して開発され、特に GPU の活用が注目されている。本研究の目的は、GPU を用いた SCALE-

LES の性能を評価し、従来の CPU ベースの実装と比較することで、計算コスト削減や高速化の可能性を明らかにすることである。

具体的な手法としては、SCALE-LES の各モジュールを GPU 向けに最適化し、従来の CPU ベースの手法と比較した。また、GPU 特有のメモリ管理やスレッド最適化技術を適用し、計算効率を最大化した。さらに、複数のシミュレーションシナリオを実行し、計算速度、精度、リソース消費を比較した。

その結果、GPU による大幅な計算速度の向上が確認され、特に非静力学モデルにおいて優れた性能を発揮した。GPU を活用することで、従来の CPU ベースの計算と比較して計算効率が向上し、大規模気象シミュレーションの実行時間が短縮した。また、メモリ使用の最適化により、大規模データ処理時のスループット向上が見られた。

この研究の成果としては、GPU を活用することで計算速度が大幅に向上し、特に非静力学モデルで優れた性能を発揮することが示された。また、計算効率が向上し、実行時間が短縮されたことが確認された。

しかし、GPU のメモリ制約が大規模計算の制限要因となり、さらなる最適化が必要であること、並列処理の負荷分散の最適化が求められ、スケーラビリティの向上が課題であること、他の気象モデルとの互換性や統合に向けた調整も必要であることが課題として残されている。

二星義裕(2012)32)らは、都市街区スケールの気象を高解像度で再現するための大規模計算において、GPU（Graphics Processing Unit）を活用して計算速度の向上を図った。都市域の気象現象を詳細にシミュレーションするためには、ラージ・エディ・シミュレーション（LES）モデルが用いられるが、高解像度での計算は計算コストが非常に高い。近年、GPU を汎用計算に利用する GPGPU（General-Purpose computing on Graphics Processing Units）の研究開発が進展し、計算速度の向上が期待されている。当該研究の目的は、LES モデルの一部を GPU に実装し、計算の高速化を実現することである。

具体的な手法としては、地形の効果を取り入れた一般曲線座標系による LES 気象モデルを対象とし、NVIDIA 社の CUDA アーキテクチャを用いて計算コストの高いルーチンを順次 GPU に実装した。具体的には、CPU 上でのプロファイリング結果を基に負荷の高い部分を特定し、GPU への移植を行っている。GPU 実装後は、計算速度向上の効果を評価し、計算精度の維持も確認した。

その結果、GPU 化により従来の CPU のみの実装と比較して計算速度が大幅に向上した。具体的な速度向上倍率は実装したルーチンや計算条件によるが、最大で数倍の高速化が確認された。また、GPU 実装後も計算結果の精度は従来の CPU 実装と同等であることが確認され、GPU 化による高速化が計算精度に悪影響を与えないことが示された。

当該研究の成果として、GPU を活用することで都市街区スケールの高解像度気象シミュレーションの計算時間を短縮できることを示し、リアルタイム性が求められる気象予測や防災シミュレーションへの応用可能性が高まったことが挙げられる。また、気象分野における GPGPU 技術の有効性を実証し、他の数値流体力学モデルへの応用の可能性を示し、計算科学全般における GPU 活用の促進が期待できる点を報告したことは評価に値する。

しかし、本研究では計算コストの高い一部のルーチンのみを GPU 化したが、モデル全体の GPU 化には至っていない。全体の GPU 化によりさらなる高速化が期待されるが、実装の複雑さやデータ転送の効率化など技術的な課題が存在する。また、高解像度シミュレーションでは大量のメモリが必要となるため、GPU のメモリ容量には限界があり、メモリ使用量の最適化や分散処理の工夫が求められる。特に、大規模な都市モデルや長時間のシミュレーションにおいては、メモリ管理が重要な課題となる。

藤川隼人(2018) 33)らは、データ同化手法の一つであるアジョイント法に対して時空間ブロッキング技術を適用し、その性能を評価・モデル化する研究を報告した。アジョイント法は、数値シミュレーションと観測データを組み合わせてモデルの精度を向上させるデータ同化手法の一つであるが、その計算は大規模であり高性能化が求められる。時空間ブロッキングは、計算の空間的および時間的なデータアクセスパターンを最適化することで、キャッシュ効率を向上させ、計算性能を改善する技術である。

藤川らは、まず、アジョイント法の計算過程を詳細に解析し、計算負荷の高い部分を特定した。次に、その特定した計算部分に対して時空間ブロッキング技術を適用し、キャッシュ効率の向上を図った。また、適用後の計算性能を評価し、性能モデルを構築することで、最適なブロッキングパラメータの選定や性能予測を可能とした。

当該研究の結果、時空間ブロッキングの適用によりアジョイント法の計算性能が向上することが確認された。また、構築した性能モデルにより異なる計算環境や問題サイズに対しても最適なブロッキングパラメータを予測できることが示された。この研究により、時空間ブロッキング技術の適用によりアジョイント法の計算効率を向上させることができ、性能モデルを構築することで計算環境や問題サイズに応じた最適なブロッキングパラメータの選定が可能となった。

しかし、より複雑な計算や異なるデータ同化手法への時空間ブロッキングの適用には、さらなる研究が必要である。また、提案手法の他の計算環境やアーキテクチャへの適用性を検証し、汎用的な実装を目指すことが求められる。

辻大亮(2019) 34)らは、都市気象の大規模乱流シミュレーション（LES）を高速化するため、GPU（Graphics Processing Unit）を用いた並列計算手法の最適化と性能評価を行った。都市域の気象現象を高精度でシミュレーションするためには、LES が有効だが、その計算は非常にコストがかかる。近年、GPU を活用した並列計算により、計算速度の向上が期待されている。当該研究では、都市気象シミュレーションコード「City-LES」を GPU 環境で最適化し、計算効率を向上させることを目的とした。

藤川らは、既存の City-LES コードを GPU 上で動作するように改修し、計算の並列化を図った。また、計算負荷の高い部分に対してメモリアクセスの最適化や計算カーネルのチューニングを行った。GPU 実装後には、ベンチマークテストを実施し、計算速度の向上度合いやスケーラビリティを評価した。

上記の結果、GPU 実装により、従来の CPU 実装と比較して計算速度が大幅に向上したことを確認した（特定の計算条件下で数倍から十数倍の高速化が確認）。また、GPU 数を増加させた際の性能向上も確認され、並列化の効果が実証された。これにより、GPU を活用することで都市気象 LES の計算時間を大幅に短縮できることが示された。また、メモリアクセスの最適化やカーネルチューニングが計算効率向上に有効であることを確認した。

その一方、さらに大規模なシミュレーションに対応するためには、GPU 間通信の最適化や負荷分散の改善が必要である。さらには、他の気象モデルやシミュレーションコードへの適用性を検討し、汎用的な最適化手法の確立が求められる。

菊池航平(2021) 35)らは、都市気象シミュレーションモデル「City-LES」の計算効率を向上させるため、GPU（Graphics Processing Unit）を活用した高速化手法を検討した研究を報告した。都市気象の詳細なシミュレーションには高解像度かつ高精度な計算が求められるが、その分計算コストも増大する。特に City-LES のような大規模なラージ・エディ・シミュレーション（LES）モデルでは、計算時間の短縮が課題となる。当該研究開発では、City-LES における詳細モデル計算部分を GPU 上で実行することで、計算効率を向

上させることを目的とした。

菊池らは、City-LES の詳細モデル計算部分を特定し、GPU 上での実行が可能なようにコードを改修し、さらに、GPU プログラミングのためのディレクティブベースの並列化方法である OpenACC を用いてコードの並列化を行った。GPU 実装後は、ベンチマークテストを実施し、計算速度の向上度合いやスケーラビリティを評価した。

当該研究開発の結果、GPU 実装により従来の CPU 実装と比較して City-LES の詳細モデル計算部分の計算速度が大幅に向上したことを確認し、特定の計算条件下で数倍から十数倍の高速化が確認できた。また、GPU 数を増加させた際の性能向上が確認され、並列化の効果が実証された。これにより、GPU を活用することで City-LES の計算時間を大幅に短縮できることが示されたと言える。また、OpenACC を用いた並列化手法が計算効率向上に有効であることを確認できた。

一方、さらに大規模なシミュレーションに対応するためには、GPU 間通信の最適化や負荷分散の改善が必要である。また、他の気象モデルやシミュレーションコードへの適用性を検討し、汎用的な最適化手法の確立が求められる。

○本項（６）のまとめ

丸山直也(2012) 31)らは、気象コード SCALE-LES について GPU を用いて高速化し、メモリ管理やスレッド最適化技術を適用して、大幅な計算速度の向上が確認され、特に非静力学モデルにおいて優れた性能を発揮したと報告した。**二星義裕(2012) 32)**らは、都市街区スケールの気象を高解像度で再現するために、地形の効果を取り入れた一般曲線座標系による LES 気象モデルを GPU を活用して計算速度の向上を図り、最大で数倍の高速化を確認した。**藤川隼人(2018) 33)**らは、データ同化手法の一つであるアジョイント法に対して、時空間ブロッキング技術を適用してキャッシュ効率の向上を図り、アジョイント法の計算効率を向上させた。**辻大亮(2019) 34)**らは、都市気象の大規模乱流シミュレーション（LES）を高速化するため、GPU（Graphics Processing Unit）を用いた並列計算手法の最適化と性能評価を行った。**菊池航平(2021) 35)**らは、都市気象シミュレーションモデル「City-LES」の計算効率を向上させるため、GPU を活用した高速化手法を検討して、メモリアクセスの最適化や計算カーネルのチューニングを行い、特定の計算条件下で数倍から十数倍の高速化を確認した。

（７）最近の新たな展開

本項では、放射性物質の大気拡散シミュレーションに係わる最近の新しい展開（従来にはない最新手法を活用した展開）の一例を示す。

吉兼隆生(2017) 36)らは、サポートベクターマシン（SVM）*を用いて、放射性物質の拡散方向を予測する手法を開発した。2011 年の福島第一原子力発電所事故では、予測情報の信頼性が明確でなかったために、放射性物質の拡散予測が十分に活用されなかったことが指摘されている。本研究では、気象パターンから放射性物質の拡散方向を予測し、機械学習を用いてその信頼性を確認する手法を開発した。

吉兼らは、まず低気圧や季節風などの気象パターンと放射性物質の拡散方向の関係を調査した。次に、教師あり学習型のサポートベクターマシン（SVM）を用いて地上風データから拡散方向を予測するモデルを構築した。過去 5 年間のデータを用いてモデルの適中率を評価し、気象パターンからの推定結果と実際の拡散方向を比較した結果、適中率の平均は、0.85 以上を示した。さらに、地上風の 33 時間予報値を適用した場

合でも、0.77 以上の適中率を示した。

この研究開発により、気象パターンから放射性物質の拡散方向を予測する新たな手法を開発し、機械学習を用いてその信頼性を示すことができたことは評価できる。また、事前に拡散方向を把握し、適切な防護措置を講じることで被曝リスクを低減できる可能性が示されたことも重要な進展と考えらえる。

しかし、特に夏季において台風などの稀な現象に対する予測精度が低下する傾向があり、これらのパターンをモデルに組み込む必要がある。また、実際の緊急時に適用するためには、さらなるデータ収集とモデルの検証が必要である。

*サポートベクターマシン（SVM）：機械学習モデルの一種で教師データを学習することで分類を効果的に実施することが可能である。

加藤信介(2021) 37)は、風工学の視点から汚染物質の輸送メカニズムを解析し、逆解析手法を用いて汚染源の特定や拡散経路の推定を行う研究の成果を報告した。工場などから大気中に排出される汚染物質の拡散は公害問題として深刻化しており、特に市街地近くに建設される場合、その影響評価が重要である。当該研究の目的は、風工学の知見を活用して汚染物質の輸送解析と逆解析を行い、汚染源の特定や拡散経路の推定を高精度で実施することにある。

加藤は、風洞実験や数値シミュレーションを用いて汚染物質の大気中での拡散挙動を詳細に解析した。また、観測データから汚染源を特定するために逆解析手法を導入し、汚染物質の拡散経路や発生源の推定を行った。これにより、汚染物質の拡散パターンや風の影響を明らかにし、観測データを基にした逆解析により、汚染源の位置や強度を高精度で推定できることを示した。

当該研究により、逆解析手法の適用により複雑な都市環境においても汚染源の特定精度が向上し、風工学の知見を取り入れることで汚染物質の拡散解析に新たな視点を提供したことは評価される。しかし、特定の条件下での解析結果を他の状況にも適用できるようモデルの一般化が必要であり、緊急時に迅速な対応が求められるためリアルタイムでの汚染源特定や拡散予測が可能なシステムの構築が課題であることが示された。

賈鴻源(2021) 38)らは、都市部における空気汚染物質の発生源を特定するために、ラージ・エディ・シミュレーション（LES）による随伴濃度解析とベイズ推定を組み合わせた手法を提案した。都市環境では、空気汚染物質の発生源を迅速かつ正確に特定することが求められているが、従来の手法では複雑な都市形態や風の影響を十分に考慮できない場合があった。当該研究の目的は、LES による高精度な流れ場解析と随伴濃度解析を組み合わせ、ベイズ推定を用いることで、都市部における汚染物質の発生源を効果的に特定する手法を開発することである。

賈らは、都市部の立方体群モデルを用いて LES により詳細な風の流れ場をシミュレートした。次に、LES で得られた流れ場を基に随伴濃度場を解析し、観測された濃度分布との比較を行った。さらに、観測データと随伴濃度場の差異をベイズ定理に基づいて定式化し、発生源の位置や強度を確率的に推定した。提案手法により、従来の手法と比較して発生源の位置や強度の推定精度が大幅に向上した。また、市街地立方体群モデルを用いた風洞拡散実験の計測データと比較することで提案手法の有効性が確認された。

当該研究により、LES とベイズ推定を組み合わせることで都市環境における汚染物質の発生源を高精度で特定する手法を確立し、風洞実験のデータと高い整合性を示し実用性の高さが示されたことは評価できる。しかし、LES による解析は高い計算コストを要するため効率的な計算手法の導入やモデルの簡略化が求められる。また、実際の都市環境での適用性を検証し、さらなるモデルの改良やセンサー配置の最適化が必要である。

○本項（７）のまとめ

吉兼隆生(2017) 36)らは、気象パターンから放射性物質の拡散方向を予測し、機械学習を用いてその信頼性を示す手法を開発した。**加藤信介(2021) 37)**は、風工学の視点から汚染物質の輸送メカニズムを解析し、逆解析手法を用いて汚染源の特定や拡散経路の推定を行う手法の有効性を示した。**賈鴻源(2021) 38)**らは、都市環境における空気汚染物質の発生源の迅速かつ正確な特定のため、LES による風況場の詳細な解析と随伴濃度解析、ベイズ推定を組み合わせて発生源の位置や強度を確率的に推定した。

2.3.2 クラウドシャインによる線量評価に係る文献調査

本項では、大気拡散による線量評価の際、汚染プルームの飛来と共に発生するクラウドシャインと呼ばれる効果による線量評価についての文献調査結果を報告する。

以下では、先ず、外部被ばく線量に係わる線量計算コードとその発展、人体模型、福島第一原子力発電所事故後の汚染地域における空間線量率の上昇要因や外部被ばく線量の評価法、宇宙線による被ばく線量、複数の放射線雲による影響、線量計算高速化法について紹介する。

斎藤公明(2006) 39)らは、ファントムの開発と利用に関する専門研究会における活動報告として、最新の物理ファントム・数値ファントム技術の調査結果を整理し、日本国内の放射線防護や医療被ばく管理における適用可能性を評価した。ファントム（phantom）は、放射線防護や医療分野において被ばく線量を測定・評価するために用いられる人体モデルであり、近年、計算機技術の発展とともに物理ファントム（実物モデル）だけでなく数値ファントム（コンピュータ上でのシミュレーションモデル）の開発が進んでいる。これにより、放射線の人体内での吸収や散乱の詳細な解析が可能となり、より精密な被ばく線量の評価が期待されている。当該研究会は、日本保健物理学会の専門研究会として設立され、最新のファントム開発とその活用方法についての情報を収集・整理することを目的としている。具体的には、物理ファントムと数値ファントムの双方を対象に、国内外の研究動向を調査し、放射線医療や防護対策への応用を検討した。

当該活動では、まず物理ファントムと数値ファントムの最新技術の収集を行い、国内外の研究文献や技術レポートを調査して最新のファントム開発状況を整理した。また、人体組織の放射線吸収特性を正確に反映するための新しい材料の開発状況を分析し、医療分野（放射線治療、診断）、防護研究、基準線量測定におけるファントムの適用事例を分類した。特に内部被ばく評価のためのファントム開発に焦点を当て、既存の国際基準（ICRP、IAEA など）と国内の研究成果を比較し、日本の基準確立のための課題を特定した。

当該研究の結果、物理ファントムにおいては、より精密な人体組織の模擬が可能となる新素材が開発されていることが明らかとなった。また、数値ファントムでは CT/MRI 画像を用いた個別化ファントムの開発が進んでおり、より現実的な線量評価が可能となったことが報告された。これにより、放射線治療における線量最適化、放射線診断の被ばく評価、環境放射線測定など、幅広い分野での応用も確認された。特に内部被ばくの評価のために、新しいバイオキネティックモデルと連携したファントムの必要性が示唆された。

一方で、国内外で異なる線量測定基準が用いられており、日本国内での標準化が求められることが明らかとなった。特に ICRP モデルとの互換性を持たせるためのファントム開発が必要であり、これらの課題に取り組むことが求められる。

この活動により、最新の物理ファントム・数値ファントム技術を網羅し、それぞれの特徴や利点を明確化することができたことは評価できる。また、国内のファントム研究の方向性を提言し、内部被ばく評価、医

療被ばく管理、環境放射線測定など、特定の用途ごとにファントムの活用可能性を提示することもできた。さらに、国内外の標準化動向を整理し、日本におけるファントム開発の課題を浮き彫りにした。

しかしながら、ファントムの標準化や数値ファントムの実用化、内部被ばく評価の精度向上など、解決すべき課題も残されている。特に、国際基準との整合性を確保するため、日本独自の標準ファントムの開発が求められる。また、CT/MRI 画像を用いた個別化ファントムの開発が進んでいるが、臨床現場での実用化にはさらなる検証が必要であり、新しいファントムと ICRP の生体動態モデルを統合して内部被ばく評価の精度を向上させる必要がある。

渡邊正敏(2009) 40)らは、低レベル放射性廃棄物処分場の操業中におけるスカイシャイン（skyshine）による被ばく線量を評価するためのコードシステム「SKYOSD」の開発とその使用方法についてまとめた。低レベル放射性廃棄物の処分において、操業中の処分場から放出される放射線が大気中で散乱し、周辺地域の一般公衆に被ばくをもたらす可能性がある。この大気中での散乱放射線は「スカイシャイン」と呼ばれ、その評価は処分場の安全性確認において重要であるが、原子力施設事故での発生プルームからの「クラウドシャイン」を推定する上でも重要な知見となる。従来の評価手法では、点減衰核積分法*に基づく簡略化された方法が用いられてきたが、より厳密な評価が求められた。本研究の目的は、光子の物質透過中の物理現象を厳密に取り扱う輸送方程式に基づいたスカイシャイン線量評価コードシステム「SKYOSD」を開発し、その使用方法を提供することにある。

渡邊らは、まず SKYOSD コードシステムの構成として、ANISN-JR コードと DOT3.5 コードの 2 つの計算コードを採用した。ANISN-JR コードは 1 次元輸送計算コードで、処分場外表面における光子フルエンス率*を算出し、DOT3.5 コードは 2 次元輸送計算コードで、スカイシャインによる周辺監視区域境界での外部被ばく線量を算出する。光子の物質透過中の物理現象を厳密に取り扱うため、輸送方程式に基づいて光子の透過問題を解決し、スカイシャインによる被ばく線量を高精度で評価した。処分場の構造、放射性廃棄物の種類と配置、周辺環境などのパラメータを詳細に設定し、現実的なシナリオに基づく評価を可能とした。

当該研究の結果、SKYOSD は、光子の輸送方程式に基づく厳密な計算手法を採用したことで、従来の点減衰核積分法に比べて高精度なスカイシャイン線量評価が可能となったことが評価される。また、ユーザーズマニュアルを提供し、SKYOSD コードシステムの構造やパラメータ設定方法、使用手順などを詳細に記述することで、ユーザーが実際にコードを使用する際の指針となった。

当該研究により、輸送方程式に基づく計算手法の導入によりスカイシャインによる被ばく線量を従来よりも高精度に評価できるようになり、SKYOSD の活用により放射性廃棄物処分場の操業中における周辺住民の被ばく線量を正確に評価可能となり、処分場の安全性確認や運用計画の策定に貢献することが示された。

一方で、SKYOSD の適用範囲をさらに広げ、さまざまな処分場の設計や運用条件に対応できるよう、モデルの改良や追加機能の開発が求められる。また、ユーザーがより直感的に操作できるインターフェースの開発や計算効率の改善、さらにはユーザー教育やトレーニングの充実が必要である。

*光子フルエンス率：単位面積あたり、単位時間に通過する光子の数として定義され、単位として［個/(cm²・s)］または［個/(m²・s)]が使われる。

*点減衰核積分法：一般に光子（X 線、γ 線）の物質透過問題に対する解法は、光子エネルギーと媒質に依存する線減衰係数とビルドアップ係数により散乱線の寄与を含めた光子の線量率を算出する点減衰核積分法と、ボルツマン輸送法定式に基づいて光子フルエンス率を算出し、それに線量換算係数を乗ずる方法の 2 種類に大別される（日本語文献：大森敏明（2020）も参照)。

佐藤薫(2012) 41)らは、日本原子力研究開発機構（JAEA）が開発した日本人成人ボクセルファントム（JM-103、JF-103）を用いて、光子比吸収割合（PAA）*を評価し、ICRP 2007 年勧告に基づく線量評価への適用可能性を検討した。その結果、JM-103/JF-103 は日本人成人の平均的な体格・臓器質量を反映しており、日本人向けの放射線防護・医療被ばく評価に適用できる標準ファントムとして有用であることが示された。放射線防護や医療被ばく評価のためには、人体モデル（ファントム）を用いた線量評価が不可欠である。特に、日本人の体格に適したファントムを用いることで、より正確な被ばく線量評価が可能となる。当該研究では、日本原子力研究開発機構（JAEA）において開発された平均的成人日本人ボクセルファントムを用いて、光子比吸収割合（PAA: Photon Absorbed Fraction）の評価を行い、その適用可能性を検討した。さらに、ICRP（国際放射線防護委員会）の 2007 年基本勧告に基づく組織加重係数を考慮した線量評価への適用も目的とした。当該研究により、平均的成人日本人ボクセルファントムの特性として、JM-103（男性モデル）と JF-103（女性モデル）が日本人の平均的な体格・臓器質量を反映した点が挙げられる。これらは ICRP の 2007 年基本勧告で設定された組織加重係数に基づき、各臓器の形状や質量が最適化されている。光子比吸収割合（PAA）の計算においては、光子エネルギー範囲（0.01 MeV ～ 4MeV）で光子の吸収割合をシミュレーションし、甲状腺、胃壁、肺、リンパ節等の臓器を対象にボクセルファントムで PAA を計算している。また、他の成人日本人ファントムと JM-103、JF-103 の結果を比較し、PAA の差異を数値的に評価し、要因を解析した。

その主な結果として、JM-103/JF-103 の PAA は日本人成人の平均的な特性を反映していることが示された。甲状腺、胃壁、肺、リンパ節の PAA は、従来の日本人ファントムと比較して数 10%の違いが見られ、この差異は主に臓器・組織の質量の違いに起因する。また、ICRP 2007 年勧告に基づく線量評価において、JM-103/JF-103 は適切な結果を示し、日本人に特化した線量評価モデルとして利用可能であることが明らかとなった。さらに、JM-103/JF-103 は、日本人成人の平均的な線量評価に使用できる標準ファントムとして適していることが分かった。

当該研究の成果としては、日本人の体格に基づいた線量評価モデルを確立し、ICRP 2007 年勧告に準拠したボクセルファントムを用いて日本人成人の標準線量評価を実施した。また、光子比吸収割合（PAA）のデータセットを提供し、光子エネルギー範囲 0.01 MeV～~~10~~4 MeV における詳細な PAA データを算出して放射線防護の基礎データを提供した。さらに、従来の日本人ファントムとの比較・検証を行い、PAA の違いを定量的に評価し線量評価の精度向上に貢献した。

その一方、個体差の考慮や他の放射線種（中性子など）への適用、医療被ばく評価への応用等、今後の課題も明確となった。特に、個体差（年齢、性別、体格）を考慮したさらなる研究や、中性子や荷電粒子の被ばく評価には追加の研究が必要である。また、環境放射線防護を主目的とする本研究を医療被ばく評価（CT スキャン、X 線撮影）にも応用するための追加検討も求められる。

*光子比吸収割合（PAA: Photon Absorbed Fraction）：放射線（特に光子=γ 線や X 線）が特定の組織や臓器に照射された際に、その組織がどれだけのエネルギーを吸収するかを示す無次元比率である。

斎藤公明(2014) 42)らは、環境 γ 線の特性を整理し、被ばく線量評価に必要な基礎データを提供した。特に、空間線量率と被ばく線量の関係を定量化し、年齢層ごとの線量換算係数を算出することで、より正確な外部被ばく評価が可能となった。

環境 γ 線（ガンマ線）の正確な評価は、外部被ばく線量の推定や放射線防護の観点から重要である。しかし、環境中の γ 線は、放射性核種の種類や分布、測定条件によって大きく変動するため、正確な被ばく線量

評価には基礎的特性の理解が不可欠である。当該研究の目的は、環境中の典型的なγ線源から放出されるγ線の基本的特性を整理し、被ばく線量評価の基礎情報を提供することである。また、γ線の空間線量率と実際の被ばく線量の関係を調査し、線量換算係数をまとめることにも焦点を当てた。

当該研究では、まず自然放射線源（宇宙線、地殻放射線など）と人工放射線源の特性を分析し、各放射線源からのγ線スペクトルの特性を評価した。次に、さまざまな年齢層を対象にγ線の被ばくシミュレーションを実施し、被ばく線量の変動要因（個人の体型やシールド効果）を考慮した。さらに、環境γ線の空間線量率と実際の被ばく線量の関係を定量化し、被ばく評価のための線量換算係数を年齢層別に算出した。空間線量率の測定と被ばく線量の関係分析では、実際の環境における空間線量率の測定データを収集し、被ばく線量の実測値と比較して線量換算の精度を検証した。

その主な結果として、環境γ線の空間線量率と個人被ばく線量の関係が定量化され、空間線量率の測定値から人体が受ける実効線量を高精度に推定できる手法が確立された。特に、年齢層ごとの被ばく影響を考慮した線量換算係数が算出された。また、自然放射線源（宇宙線、地殻放射線）と人工放射線源（放射性降下物など）によるγ線の寄与の違いを評価し、測定条件や環境の影響が線量評価に及ぼす影響が定量的に分析された。これにより、空間線量率の測定値から実際の被ばく線量を推定する精度が向上し、放射線防護対策の基盤となるデータが提供された。

当該研究により、外部被ばく線量評価のための基礎データが提供され、環境γ線の特徴を整理して被ばく線量の評価に必要な基礎情報が体系化された。また、放射線防護や環境モニタリングに応用可能なデータも提供され、年齢別の線量換算係数を整理して、より精密な被ばく評価が可能となった。さらに、環境中のγ線の放射線防護への影響を詳細に分析し、将来の放射線リスク評価に活用可能なデータが蓄積された。

その一方、異なる環境での測定データとの比較が必要であり、本研究のデータを他の地域や環境での測定結果と比較して汎用性を検証する必要がある。また、γ線の線量率は時間的変動を伴うため、長期的なモニタリングによる精度向上が必要である。さらに、当該研究で用いた測定手法と、他のγ線測定手法（ドシメトリ測定や環境モニタリングデータ）を統合することで、より包括的な評価が可能になる。

以上、斎藤らの研究は、環境γ線の特性を明らかにし、被ばく線量評価に必要な基礎データを提供することで、外部被ばく評価の精度向上に寄与している。

若月泰孝(2014) 43)らは、2011年3月15～16日に、福島県中通り地方で観測された空間線量率の上昇をシミュレーションし、降水が放射性物質の沈着に与える影響を定量的に評価した。福島第一原子力発電所事故では、2011年3月15～16日に福島県中通り地方で観測された空間線量率の上昇は、放射性物質の大気中拡散と降下（沈着）による影響と考えられた。放出された放射性物質の拡散・沈着を数値シミュレーションにより解析し、空間線量率の分布を再現することを目的とし、特に、降水量と空間線量率の関係に着目し、放射性降下物の沈着量を推定するためのモデルが検討された。

また、著者らは放射性物質（トレーサ）の大気中濃度と降水量から地表への沈着量を推定する方程式を開発し、大気中拡散・沈着シミュレーションを用いて空間線量率を計算した。さらに、放射性物質の沈着分布を基に地表からのガンマ線束を理論的に計算し、実測データと比較して線量率の推定精度を評価した。実測された空間線量率のデータを用いて、モデルの主要パラメータを最適化し、福島県中通りの複数地点（32地点）で適用し、線量率の再現性を評価した。

当該研究の結果、降水による放射性物質の沈着が空間線量率に大きな影響を与えることが確認された。2011年3月15～16日にかけての降水量と空間線量率の上昇が一致し、放射性降下物の沈着が線量率上昇の

主要因であることが明らかになった。最適化したモデルによるシミュレーション精度が向上し、計算値の71%が誤差比 3.1 以下に収まる結果を示した。また、大気拡散・沈着シミュレーション結果を補正する形で、降水量に基づく放射性沈着の経験的補正モデルを構築した。このモデルの最適化によって、沈着過程の物理的理解が深まり、放射線防護対策の基盤となるデータが提供された。

当該研究により、2011 年 3 月 15～16 日に観測された空間線量率の上昇を数値シミュレーションによって再現することに成功し、降水量が放射性物質の沈着量を決定する主要因であることを示した。また、降水量と放射性物質の沈着量の関係を数値モデルで評価し、放射性降下物の環境動態をより正確に予測できる手法が開発された。文部科学省、KEK（高エネルギー加速器研究機構）、福島県の実測データを活用し、モデルパラメータを最適化することでシミュレーションの精度が向上し、さらに、線量率の変化を予測するためのモデルが構築され、緊急時の放射線防護対策に応用可能なデータが提供されている。

その一方、異なる気象条件での検証は必要であり、今回のシミュレーションは 2011 年 3 月 15～16 日の特定条件下での解析であるため、異なる気象状況での再現性を検証する必要がある。また、長期的な沈着影響の評価や異なる地域への適用可能性の検証も今後の課題である。また、本研究では主に事故直後の放射性降下物の影響を分析したが、長期的な再浮遊や移流拡散の影響については未検討であり、さらなる研究が必要である。

高原省五(2015) 44)らは、福島第一原子力発電所事故による汚染地域での外部被ばく線量評価を精密に行うための決定論的評価手法の整備と、その成果について報告し、福島第一原発事故後の外部被ばく線量評価を精密化するための重要な基盤を提供した。福島第一原子力発電所事故により、多量の放射性核種が環境中に放出され、広範囲にわたる大気、水、土壌等の環境汚染が発生した。これらの汚染に対する復旧対策を立案するにあたっては､放射性核種に起因する外部被ばく線量を評価する必要がある｡この要求に応えるため、新生児から成人までの公衆を代表する複数の年齢に対して、最新の放射線防護の知見を反映して、大気、水および土壌に分布した放射性核種（1252 核種）からの外部被ばく線量の評価に利用できる線量換算係数を整備することを目的とした。

高原らは、まず線量換算係数の計算において、環境中の放射性核種（Cs-134、Cs-137）からのガンマ線に焦点を当て、ICRP の放射線防護基準*を反映した計算を行った。また、土壌汚染分布を考慮した線量評価を実施し、光子の散乱と吸収を正確に再現するモンテカルロシミュレーションを用いて、放射性物質から人体への影響を計算した。さらに、新生児から成人までを対象とする ICRP リファレンスファントム*を用いて年齢ごとの被ばく線量を評価し、汚染の程度や分布に基づく被ばく線量データを構築した。

当該研究の結果、新生児から成人までの幅広い年齢層に対応した線量換算係数が作成され、放射性核種ごとの線量評価が可能となった。環境中の汚染状況をより反映した実効線量評価のため、高精度な放射線輸送計算により地形や核種の違いを考慮した詳細な線量評価を実現した。このように、実用的な評価手法の確立により、福島第一原発事故後の汚染地域での外部被ばく評価に適用できる手法を提供し、新生児から成人までの詳細な線量評価が可能となり、住民の健康管理に寄与することが示された。

一方で、モンテカルロ計算は高精度であるが計算コストが高いため、リアルタイム評価に向けた効率化が必要である。また、多様な環境条件や放射性核種に対応するためのさらなるモデル改良が求められる。さらに、モデル精度を向上させるためには、実測データとの継続的な比較と検証が必要である。

当該研究により、外部被ばく線量評価の基盤が整備され、汚染地域における放射線防護対策に大いに貢献することが期待される。

*ICRP の放射線防護基準: 国際放射線防護委員会（ICRP）が定めた、放射線から人や環境を守るための基準。

*ICRP リファレンスファントム : 放射線防護のために使用される人体模型。人体に放射線があたるときの皮膚や臓器への影響を評価するために使用される。

平山英夫(2015) 45)は、測定線量（物理量）と防護量（人体影響評価）の違いを明確にし、それぞれを適用する際の注意点を指摘し、測定線量と防護量の概念を整理し、放射線防護のための適切な線量評価の枠組みを提示している。当該研究では、「測定線量」と「防護量」の違いを整理し、それらを適切に活用するための基準を明確にすることを目的としている。

放射線防護の分野では、「測定線量」と「防護量」の概念は区別され、それぞれ異なる目的で使用される。測定線量は、放射線測定器を用いて直接得られる物理量である一方、防護量は人体の放射線影響を考慮して計算される指標である。これらの違いを正しく理解し、適切に適用することが放射線防護の基本である。

当該研究では、ICRP（国際放射線防護委員会）の勧告を基に、測定線量と防護量の定義を整理し、それぞれの適用範囲を明確にする。また、吸収線量、カーマ（Kerma）、線量当量（H*10, Hp(10) など）の測定線量と、実効線量（Effective Dose）、等価線量（Equivalent Dose）の防護量を分類・解析する。さらに、測定線量と防護量の間にある補正係数や換算係数を解析し、さまざまな測定環境（空間線量、個人被ばく、内部被ばく）での適用を評価した。

当該研究の主な結果として、測定線量と防護量の関係を体系的に整理し、測定線量が物理的な測定結果を基にした線量指標であるのに対し、防護量が人体の生物学的影響を考慮して計算されることが明確化された。また、測定された線量をそのまま防護量として扱うことはできないため、線量換算係数や補正係数の適用が不可欠であることが指摘された。

当該研究では、環境モニタリングでは H(10)（アンビエント線量当量）を使用し、個人被ばく管理では Hp(10)（個人線量当量）を用いることが適切であると結論している。なお、医療被ばくでは、臓器等価線量や実効線量を評価することが重要である。

最後に、測定線量と防護量の違いを明確化し、放射線管理や規制の現場でより正確な評価が可能となる知見を提供することに成功した点は評価できる点である。また、放射線防護における適切な指標の活用方法を提示し、測定結果を防護量に適用する際の注意点を示し、実用的な基準を提案している。さらに、測定値をどのように解釈し、防護のために適用するかを整理し、実用的な放射線防護計画の策定に貢献している。

しかし、当該研究にはいくつかの課題が残されている。放射線環境ごとの実証データの収集が必要であり、異なる環境（原子力施設、医療機関、事故環境など）での実測データを用いた実証研究が求められる。また、防護量は平均的な人体モデルを基に算出されるため、個人差を考慮する必要がある。さらに、原子力事故などの緊急時の線量評価において、測定線量と防護量の関係を迅速に適用する方法の確立が求められる。

平井奈々子(2014) 46)らは、外照射治療計画における線量計算アルゴリズムの進化を整理し、精度向上の重要性を強調している。本研究の目的は、簡易な経験的モデルから物理モデル、モンテカルロ法へと進化する流れを体系的に整理し、各手法の長所と短所を明確にすることである。

外照射治療（External Beam Radiotherapy, EBRT）は、がん治療の主要な方法の一つであり、その治療計画の精度は患者の治療成績に大きな影響を与える。特に、線量計算アルゴリズムの精度向上は、治療の安全性と有効性の向上に不可欠である。当該研究では、外照射治療計画における線量計算アルゴリズムの進化を概観し、各手法の特徴と課題を整理することを目的とした。

まず、線量計算アルゴリズムの分類と進化について、従来の経験的モデルからモンテカルロ法などの精密な計算手法へと発展してきた経緯を整理し、各時代の代表的な手法を比較・分析した。線量計算の対象としては、X 線外照射治療の線量計算に焦点を当て、電子線や陽子線などのアルゴリズムについては簡単に触れている。また、過去数十年の発展をレビューし、RTPS（放射線治療計画システム）*の商用参照文献も提示している。

当該研究の主な結果としては、線量計算アルゴリズムの進化を体系的に整理し、計算精度の向上が治療精度の向上につながることを示した点が挙げられる。また、密度不均一の影響を考慮するモデルの精度向上が求められることを指摘し、従来の手法では組織の不均質性や散乱の影響を完全に考慮することが困難であるため、新しい手法の導入が必要であるとした。さらにモンテカルロ法が最も高精度な線量計算手法であることを確認したが、計算コストが高く、実臨床に適用するには高速化と計算資源の最適化が必要であることも明らかにした。

当該研究では、商用放射線治療計画システム（RTPS*）における線量計算アルゴリズムの進化を概観し、最新の手法では計算の高速化と精度向上が両立しつつあることを強調している。また、外照射治療における線量計算の歴史と進化を総括し、治療精度の向上に寄与してきた線量計算アルゴリズムの発展を体系的に整理している。物理的手法（散乱理論）からボクセルベースの計算手法、そしてモンテカルロ法へと進化してきた流れが詳細に記述された。

さらに、最新の放射線治療計画システムで使用されているアルゴリズムについても言及し、臨床応用が進んでいるアルゴリズムの概要を解説し、放射線治療の精度向上に向けた指針として、線量計算の高速化と高精度化を両立させるための今後の課題を整理している。

しかし、当該研究にはいくつかの課題が残されている。モンテカルロ法は非常に高精度であるが、計算負荷が大きく、実用化にはさらなる最適化が必要となる。また、当該論文では X 線の外照射に焦点を当てており、電子線や陽子線の線量計算アルゴリズムについての詳細な議論はされていない。さらに、実際の放射線治療施設での導入や運用の簡便化が求められる。

*RTPS（放射線治療計画システム）：本文では、「Williams と Thwaites が編集した放射線治療物理の教科書」として次の文献が挙げられている。Williams JR, Thwaites DI: Radiotherapy Physics: In Practice, 1st edition. 1993, Oxford University Press, Oxford, UK

佐藤達彦(2017) 47)らは、モンテカルロ法に基づく放射線輸送計算コード PHITS を用いて、宇宙線による被ばく線量を評価する手法の開発とその適用について報告した。当該研究の目的は、PHITS コードを用いて宇宙空間や高高度における宇宙線被ばく線量を精度良く評価するモデルを構築することである。

宇宙飛行士や航空機乗務員は、地上よりも高い宇宙線被ばくを受けるため、正確な線量評価が求められる。そこで、当該研究では、宇宙航空研究開発機構（JAXA）が開発した任意軌道の宇宙線環境評価モデルを使用し、宇宙機外の宇宙線フラックスを計算した。得られた宇宙線フラックスを入力として、PHITS コードを用いて宇宙機内の宇宙線挙動を詳細に解析し、宇宙飛行士や機器の被ばく線量を推定した。

当該研究の主な結果としては、PHITS を基盤とした宇宙線被ばく線量評価モデルを構築し、国際宇宙ステーション（ISS）内外での線量評価に適用可能であることが示された点が挙げられる。また、開発したモデルの結果は、既存の測定データや他のシミュレーション結果と良好に一致し、その有効性が確認された。

以上、PHITS を用いることで宇宙空間や高高度における宇宙線被ばく線量を高精度に評価できる手法を確立し、開発したモデルは ISS 内外だけでなく、他の宇宙機や航空機での線量評価にも応用可能であることが

示唆された。

しかし、当該研究にはいくつかの課題が残されている。モンテカルロ法に基づく PHITS は高精度であるが、計算時間が長くなる傾向があるため、実用的な線量評価のためには、計算効率の向上が求められる。また、異なる条件下での実測データとの比較や、他のシミュレーションコードとの比較を通じて、モデルの精度と信頼性をさらに検証する必要がある。

舟山京子(2017) 48)らは、複数の原子炉からの放射性物質の放出が敷地境界近傍に与える影響を解析し、単一の炉心事故では説明できない非線形なリスクが存在することを示した。当該研究の目的は、複数の原子炉から放出された放射性物質が敷地境界近傍の健康リスクに与える影響を分析し、放射性雲（プルーム）の影響を評価することである。特に、単一の放出源だけでなく、複数の放出源が存在する場合のリスク評価の非線形性に焦点を当てた。

福島第一原子力発電所事故では、1 号機、2 号機、3 号機から大量の放射性物質が環境中に放出された。従来の安全評価では、複数の原子炉が同時に重大事故（シビアアクシデント）を起こした場合の影響は十分に考慮されておらず、単一炉心事故の確率や影響評価に重点が置かれていた。それに対し、当該研究では、複数の原子炉から放出された放射性物質が敷地境界近傍の健康リスクに与える影響を分析し、放射性雲（プルーム）の影響を評価した。

放射性物質の放出シナリオとして、1 号機、2 号機、3 号機がそれぞれ放射性物質を放出するケースを想定し、各ユニットの位置関係や気象条件を考慮して敷地境界付近の放射線量を評価した。また、風向や風速が放射性雲の拡散に与える影響を解析し、複数のユニットからの放射性物質放出が同時に発生した場合と異なる時間帯で発生した場合を比較した。さらに、急性被ばくの確率と健康リスクを確率論的に分析し、単一の炉心事故による健康リスクと複数の炉心事故のリスクの違いを解析した。

当該研究の主な結果として、複数の原子炉からの放出が同時に発生した場合、各炉心単独の影響を単純に加算するだけでは正確なリスク評価ができないことが明らかになった。これは、閾値効果（一定の放射線量を超えた場合に急性影響が発生する）や非線形なリスクの関係が影響しているためである。また、ユニット間の相対的な位置と風向の組み合わせにより、敷地境界付近への影響が大きく変化することを確認し、特定の風向では、複数のプルームが重なることで局所的な線量が大幅に増加する可能性があることが示された。さらに、放射性物質の放出が長時間にわたる場合、単一のピークよりも健康リスクが分散する可能性があることを示唆し、逆に短時間に高濃度の放射性物質が放出された場合、急性被ばくのリスクが急増する可能性も示唆された。

当該研究の主たる成果として、複数の炉心事故が発生した場合のリスク評価の必要性を提言し、従来の単一炉心事故評価では、複数炉心事故時の実際の影響を十分に評価できない可能性が示唆された点が挙げられる。また、放射性物質の放出タイミング、風向、原子炉の配置が敷地境界付近の放射線量に大きな影響を与えることを示し、リスク評価の新たな視点を提供している。具体的には、単純な確率計算ではなく、放出源間の相互作用を考慮した非線形なリスク評価が重要であることを提言している。

しかし、本研究にはいくつかの課題が残されている。長期的な低線量被ばくの影響についての評価は未実施であり、異なる気象条件でのシナリオ分析も必要である。また、福島第一原発事故の実測データとの比較検証が不十分であり、実際の放射性物質の移動経路との整合性を確認する必要がある。

後神進史(2022) 49)らは、放射線のスカイシャイン（散乱線）線量評価のために、従来のモンテカルロ法による計算の精度と効率の課題に対処したハイブリッド接続計算機能を開発し、その有効性を検証した。当該

研究の目的は、モンテカルロ法の精度を活かしつつ、計算速度を向上させるハイブリッド手法を PHITS に実装し、その効果を評価することである。

スカイシャイン線量の評価では、従来の計算コードが重要な役割を果たしてきた一方、モンテカルロ法は高精度な結果を提供するものの、計算時間が長く、結果の妥当性検証が難しいという課題があった。そこで、本研究では、放射線源周辺の遮蔽材料における放射線挙動をモンテカルロ法で計算し、その結果を簡略化されたスカイシャイン線量計算に入力する手法を提案した。この簡略化計算は、事前にモンテカルロ法で構築したデータベースを利用することで実現される。

この研究の検証結果として、従来のモンテカルロ法と比較して計算速度が 10～1,000 倍向上し、一定の信頼性を担保しながら、高速かつ効率的なスカイシャイン線量評価が実現された。

当該研究の成果としては、モンテカルロ法の精度を保持しつつ計算時間を大幅に短縮し、現地での迅速な線量評価を可能にする新たなアプローチを提供した点が挙げられる。また、事前構築されたモンテカルロデータベースを活用することで、計算リソースを効率的に活用し、当該ハイブリッド手法が PHITS に統合されることで、汎用的な放射線防護ツールとしての利便性が向上している。

しかし、本研究にはいくつかの課題が残されている。複雑な条件や大規模施設への適用時における精度の検証が必要であり、他の放射線源や構造物における適用性を検証し、一般化を進める必要がある。さらに、緊急時対応や即時的な評価シナリオでのさらなる性能強化が求められている。

○本項（2.3.2）のまとめ

斎藤公明(2006) 39)らは、放射線防護や医療分野で被ばく線量の評価に用いられる人体モデル「ファントム」の開発について、日本保健物理学会・専門研究会での議論及び研究をまとめることで、最新の物理ファントム・数値ファントム技術について、国内外の動向を整理し、日本におけるファントム開発の課題を明らかにした。**渡邊正敏(2009) 40)**らは、低レベル放射性廃棄物処分場におけるスカイシャインよる被ばく線量を評価するためのコードシステム「SKYOSD」の開発とその使用方法をまとめた。**佐藤薫(2012) 41)**らは、日本人成人ボクセルファントムの ICRP 2007 年勧告に基づく線量評価への適用可能性を検討し、光子比吸収割合の計算により放射線防護の基礎データを提供した。**斎藤公明(2014) 42)**らは、環境 γ 線の特性を整理し、さまざまな年齢層を対象に、γ 線の被ばくシミュレーションを実施して、被ばく線量評価に必要な基礎データを提供した。**平井奈々子(2014) 46)**らは、医療における線量計算アルゴリズムの進化を整理し、簡易な経験的モデルから、物理モデル、モンテカルロ法へと進化する流れを体系的に整理して、各手法の長所と短所を明確にした。**佐藤達彦(2017) 47)**らは、モンテカルロ法に基づく放射線輸送計算コード PHITS を用いて、宇宙空間や高高度における宇宙線による被ばく線量を評価する手法の開発とその適用について報告した。**後神進史(2022) 49)**らは、放射線のスカイシャイン（散乱線）線量評価のために、放射線源周辺の遮蔽材料における放射線挙動をモンテカルロ法で計算してデータベース化し、それを利用した簡略化計算により、従来と比べて最大 1,000 倍の高速化を達成したと報告している。その一方、**若月泰孝(2014) 43)**らは、事故後の放射性物質の大気中濃度と降水量から、地表への沈着量を推定する方程式を開発し、大気中拡散・沈着シミュレーションを用いて、空間線量率を計算し、降水による放射性物質の沈着が空間線量率に大きな影響を与えたことを示した。**高原省五(2015) 44)**らは、事故による汚染地域での放射性セシウムの γ 線による線量換算係数を計算し、ICRP ファントムを用いて年齢ごとの被ばく線量を評価し、外部被ばく評価に適用可能な実用的評価手法を提供した。**平山英夫(2015) 45)**は、測定線量と防護量の関係を体系的に整理し、測定された線

量は、そのまま防護量として扱うことはできないため、線量換算係数や補正係数の適用が不可欠であることを指摘した。**舟山京子(2017) 48)**らは、複数の原子炉からの放射性物質の放出が敷地境界近傍に与える影響を解析し、単一の炉心事故では説明できない非線形なリスクが存在することを示した。

2.3.3 グラウンドシャインによる線量評価に係る文献調査

本項では、主に地表面や土壌中に沈着・浸透した放射性核種による線量の評価手法について紹介する。

平山英夫(2013) 50)らは、地表に広範囲に分布する放射性物質から放出されるガンマ線のスペクトルを、地上 1 メートルの高さで評価するためにモンテカルロシミュレーションコード EGS5 を用いて解析した。本研究の目的は、福島第一原子力発電所の事故により地表に広く分布した放射性物質からのガンマ線スペクトルを正確に評価することにある。

シミュレーションの設定としては、地表に一様に分布する放射性核種（Cs-134、Cs-137）を想定し、EGS5 コードを用いて地上 1 メートルの高さでのガンマ線スペクトルを計算した。また、計算の効率化と精度向上を図るため、「面等方線源を点等方線源と面検出器に置き換える手法」を適用し、シミュレーション結果を実測データと比較した。

当該研究の主な結果としては、EGS5 による計算結果が、スペクトルの形状および絶対値の両面で実測値と良好に一致したことが挙げられる。また、地上 1 メートルでのガンマ線フラックスにおいて散乱ガンマ線の寄与が支配的であることも示された。さらに、散乱ガンマ線が周辺線量当量や実効線量に与える影響も検討され、これらの評価において散乱成分の考慮が重要であることが確認された。

当該研究の成果としては、EGS5 コードを用いたシミュレーションが地表に広く分布する放射性物質からのガンマ線スペクトル評価に有効であることが確認され、ガンマ線スペクトルおよび線量評価において、散乱成分の寄与が大きいことが明らかにされた点が重要と判断される。今後の評価において、これらの知見は重要な意味を持つと考えられる。

しかし、本研究にはいくつかの課題が残されている。異なる地形や放射性物質の分布状況に対しては、評価精度の検証が必要であり、より複雑な環境条件や多様な放射性核種に対応するため、モデルの高度化やパラメータ設定の精緻化が求められる。今後の研究において、これらの課題にも対処することが期待される。

佐藤大樹(2014) 51)らは、放射性セシウムが土壌に分布した場合の外部被ばく線量換算係数（DCF）を、モンテカルロシミュレーションを用いて算出し、放射線防護のための基礎データを提供した。本研究の目的は、福島第一原子力発電所事故により環境中に放出された放射性セシウム（Cs-137、Cs-134）が人体に与える外部被ばく線量を正確に評価し、被ばく評価の基準を確立することにある。

福島第一原子力発電所事故により、環境中に大量の放射性セシウムが放出され、これらは土壌に沈着し、長期間にわたって住民の外部被ばくの主な原因となっている。従って、環境中の放射性セシウムが人体に与える外部被ばく線量を正確に評価することが、被ばく管理および放射線防護の観点から重要である。

当該研究では、モンテカルロシミュレーションを用いた線量評価を行った。放射線輸送コード PHITS を使用し、土壌中の放射性セシウムから放出されるガンマ線の人体への影響をシミュレーションした。また、Cs-137 と Cs-134 の異なる深度分布（表面沈着型、均一分布型など）を考慮し、線量換算係数（DCF）を計算した。ICRP（国際放射線防護委員会）の成人ファントムを用いて、体内の各臓器の吸収線量を解析し、Cs-137 と Cs-134 のガンマ線エネルギー特性を考慮して、被ばく量を推算した。環境中の放射性セシウム濃度（Bq/m^2）から、人体の実効線量（mSv）を求める換算係数を導出し、過去の研究と比較して新たな評価手法

の妥当性を検証した。

当該研究の主な結果としては、放射性セシウムの分布形態が外部被ばく線量に大きく影響することが示された点が挙げられる。土壌の表面に沈着した場合、特に Cs-137 のガンマ線の影響で線量率が高くなり、土壌の深部に分布するほどガンマ線は減衰し、人体への線量が低下した。Cs-137 の DCF は約 0.15～0.30 μSv/h per kBq/m²の範囲にあり、Cs-134 の DCF は Cs-137 よりもやや高いことが確認された。また、体位による被ばく線量の違いも示され、立位よりも仰臥位で被ばく線量が高くなる傾向が見られた。これは地面からの放射線が直接当たる面積の違いによるものである。本研究の DCF は、ICRP や EPRI（米国電力研究所）の推奨値と一致する部分が多く、信頼性の高い結果を提供した。

本研究の成果としては、福島第一原発事故後の被ばく評価に貢献し、放射性セシウムによる外部被ばくの線量換算係数を算出して被ばくリスク評価の基準を提供した点が評価される。これにより、日本国内の放射線防護基準の設定に貢献できる可能性がある。また、モンテカルロシミュレーションを用いた高精度な評価により、ICRP ファントムと PHITS コードを活用し、過去の評価よりも詳細な外部被ばくシミュレーションを実施されている。さらに、当該研究は、異なる環境条件への適用が可能であり、土壌の放射能濃度や分布条件を変えることで多様な環境での線量評価が可能である。被ばく低減策（除染、表土除去など）の効果を定量的に評価することもできる。

しかし、本研究にはいくつかの課題が残されている。まず、実際の環境データとの比較が必要であり、本研究は数値シミュレーションを用いた結果であるため、実際の環境測定データとの比較が求められる。また、土壌中の放射性セシウムは降水や地表流出により移動するため、長期的な影響を評価する必要がある。さらに、本研究では ICRP 成人ファントムを用いているが、高齢者の被ばく影響を評価する必要がある。今後の研究において、これらの課題に対処することが期待される。

大森敏明(2019) 52)らは、放射性核種から放出される直接ガンマ線の平均光子移動距離の理論解を導出し、それを用いて線量率を迅速に評価できる簡易計算手法を提案している。本研究の目的は、環境中の放射性核種から放出されるガンマ線が地表や大気中を伝播しながら周囲の環境に及ぼす影響を評価し、迅速な環境線量評価を可能にすることである。

環境中の放射性核種から放出されるガンマ線は、地表や大気中を伝播しながら周囲の環境に影響を与える。放射性物質の沈着が長期間にわたる地域では、外部被ばく線量の推定が放射線防護対策の重要な要素となる。従来、環境線量率の推定にはモンテカルロシミュレーションなどの高精度計算手法が用いられてきたが、本研究では地表の放射性核種から放出される直接ガンマ線の平均光子移動距離の理論解を導出し、この情報を用いて線量率を簡易に計算する手法を提案している。

放射性核種の分布パターンとして、地表面に均一に広がる放射性核種（平面分布）、土壌内部に一様に分布する放射性核種（均質分布）、深さに応じて指数関数的に減衰する放射性核種（指数減衰分布）の 3 つを考慮した。光子の移動距離と線量率の計算においては、平均光子移動距離を理論的に導出し、光子のフルエンス率（fluence rate）とビルドアップ係数（buildup factor）を用いて線量率を推定した。さらに、モンテカルロシミュレーションとの比較検証を行い、MCNP（Monte Carlo N-Particle）シミュレーションと比較して提案手法の妥当性を評価した。

この研究の主な結果として、放射性核種の分布形態によって平均光子移動距離が異なり、深部に沈着した場合には線量率が低下することが示された点が挙げられる。特に、地表面に均一に広がる放射性核種のモデルが最も高い線量率を示した。また、提案した簡易計算手法はモンテカルロシミュレーションと良好に一致

し、短時間で環境放射線の影響を評価できる可能性が示唆された。

提案手法の成果としては、住民や自治体が迅速に放射線リスクを評価するために実用可能であり、除染効果の簡易評価や被ばく低減対策の策定にも応用可能である。具体的には、環境放射線評価のための簡易計算手法を開発し、光子の移動距離を考慮した線量率計算手法を確立することで、従来の高精度シミュレーションに匹敵する結果を得ている。以上、計算負荷が軽減し、リアルタイムでの環境線量評価が可能となる手法であれば、自治体や住民が自主的に利用できるツールの開発につながる可能性がある。

しかし、本研究にはいくつかの課題が残されている。降雨や地表面の性質の違いによる影響を評価する必要があり、異なる環境条件での検証が求められる。また、放射性核種の移動や崩壊を考慮した動的な線量評価も必要であり、他の放射線源（人工放射線など）との統合も課題となる。当該研究は、自然環境中の放射性核種を対象としているが、人工放射線源の影響を統合する研究も必要である。今後の研究において、これらの課題に対処することが期待される。

大森敏明(2020) 53)らは、有限な地表面に沈着した放射性物質からの線量率を簡易に計算する手法を提案した。本研究の目的は、放射性物質が地表面に沈着した際の周辺線量率を迅速かつ正確に評価することにある。従来のモンテカルロ法などの詳細な計算手法は高精度だが、計算コストが高く迅速な評価には不向きであったため、点減衰核法（point-kernel method）の概念に基づいて、簡易かつ高精度な計算手法を開発することを目指した。

提案された手法では、点減衰核法を適用し、小さい体積線源による環境中の線量率を計算する。線量換算係数、線量ビルドアップ係数、直接線フルエンス率を用いて線量率を求める方法を採用している。具体的には､光子の平均自由行程の関数として線量ビルドアップ係数を導入し､散乱光子の寄与を簡易的に評価する。また、放射線源から検出器までの光子の平均自由行程を計算し、これを用いて線量ビルドアップ係数を評価する。さらに、土壌と空気の層状構造を考慮し、二重層の線量ビルドアップ係数を用いて計算を行う。

この研究の主な結果として、提案手法による計算結果は、単一媒体（例：無限に広がる地表面）において詳細なモンテカルロ法による結果と良好に一致したことが確認された。また、土壌と空気の層状構造を持つ場合、二重層の線量ビルドアップ係数の精度が結果に大きく影響することが示された。地表面の汚染半径が 100 m 以上の場合、提案手法と詳細計算結果の差異は 7%未満であり、実用上許容できる精度であることが明らかになった。

当該研究の成果としては、地表面に沈着した放射性核種からの線量率を迅速かつ簡易に評価できる手法を提案し、実用的な線量評価に寄与したことが挙げられる。提案手法の計算結果が詳細なモンテカルロ法の結果と良好に一致することを確認し、その有効性が示されている。

しかし、課題も残されている。土壌と空気などの多層媒体における線量ビルドアップ係数の精度向上が必要であり、さらなる研究が求められている。また、複雑な地形や異なる環境条件に適用する際の精度検証と手法の拡張も今後の課題である。

点減衰核法（point-kernel method）について補足すると、体積線源を複数の等方点線源セルの集合体として扱い、ガンマ線エネルギー依存の減衰量とビルドアップ係数を計算する数値解析手法である。この手法では、線源からの放射線を無衝突線と散乱線に分け、散乱線の寄与（ビルドアップ係数）を事前にデータベース化しておき、遮蔽計算を迅速に行うことができる。詳しくは渡邊正敏（2009）の文献も参照されたい。

○本項（2.3.3）のまとめ

平山英夫(2013) 50)らは、モンテカルロシミュレーションコード EGS5 を用いて、地表分布する放射性物質からのガンマ線のスペクトルを地表 1mの高さで解析し、散乱ガンマ線の寄与が支配的であることを明らかにした。佐藤大樹(2014) 51)らは、土壌に分布した放射性セシウムによる外部被ばく線量換算係数（DCF）をモンテカルロシミュレーションで解析し、被ばくリスク評価や被ばく低減策（除染、表土除去など）の効果を定量的に評価する基準を提供した。大森敏明(2019) 52)らは、地表の放射性核種から放出される直接ガンマ線の平均光子移動距離の理論解を導出し、この情報を用いて線量率を簡易に計算する手法を提案した。さらに、大森敏明(2020) 53)らは、有限な地表面に沈着した放射性物質からの線量率を簡易に計算する手法を提案し、詳細なモンテカルロ法の結果と良好に一致することを確認した。

2.3.4 屋内でのクラウド及びグランドシャインによる線量評価に係る文献調査

建物内外における被ばく線量評価、屋内における放射性物質の現地測定技術、また、内部被ばく評価に関連する CFD を用いた室内空気汚染の解析例等、室内環境改善のための最新の技術動向をまとめた。

加藤信介(2007) 54)は、室内空気汚染の時間的・空間的変動特性を把握するため、実測およびシミュレーションにより、汚染物質の分布や拡散メカニズムを具体的に示している。また、汚染を効率的に検出する技術的アプローチを提案し、室内空気質改善を議論するうえで有用な指針を提示している。

近年、室内空気汚染が健康に与える影響が問題視されており、特に都市部では建築物内での空気質の管理が重要と考えられている。当該研究では、室内空気汚染の時間的・空間的変動特性を解析し、効果的な検出手法を開発することを目的としている。

測定方法として、室内空気のサンプリングを行い、空間内の異なる位置での濃度分布を分析する。時間経過モニタリングにより、時間的な変動を特定する。また、データ解析には CFD（数値流体力学）シミュレーションを活用し、空気流動と汚染物質の拡散を予測している。さらに、環境要因（気温、湿度、換気状況）の影響を考慮した統計解析を行う。

主たる成果として、室内空気汚染が時間帯や空間的な要因によって大きく変動し、特に換気不足の環境では、汚染レベルが上昇することが示された。また、建築設計や換気計画に応じた空気質管理の重要性が明らかになり、定点測定の有効性が確認された。さらに、CFD 解析により、汚染拡散のホットスポットを特定し、効率的な換気設計の指針が提供された。

当該研究は、室内空気質の管理と改善に関する重要な知見を提供しており、今後の研究や実践においても有用な指針となるだろう。

大森敏明(2016) 55)らは、福島第一原子力発電所事故後の環境において、建物内外の放射線量を評価するための簡易な計算法を開発した。2011 年の東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所事故により、多量の核分裂生成物（FP）が環境中に放出された。事故から 5 年以上が経過し、放射性物質の減衰や除染活動により放射能レベルは低下しているが、住民の帰還に際しては、建物内外の放射線量を正確に評価することが求められている。

当該研究開発の目的は、モンテカルロ法を用いて建物内外の放射線量を簡易かつ高精度に計算する手法を開発することである。放射性物質から放出されるガンマ線の建物内外での透過や散乱をシミュレーションするため、モンテカルロ法を採用し、複雑なシールド構成や評価点における吸収を詳細に解析した。また、コンプトン散乱*によるエネルギー低下を考慮するため、光子の平均自由行程の関数として線量ビルドアップ係数*を導入し、散乱光子の寄与を簡易的に評価した。

これらの手法に基づき、放射線量を計算するコード「RADAR-γ」を開発した。このコードは、地表に Cs-137 が沈着した場合の簡易な幾何学的条件での線量評価を可能としている。開発した RADAR-γ コードの検証のため、広く使用されている点核積分コード QAD-CGGP-A と比較を行い、結果の一致度を確認した。

研究の主な結果として、RADAR-γ コードによる計算結果は、QAD-CGGP-A コードの結果と良好に一致し、提案手法の有効性が確認された。また、開発した手法により、建物内外の放射線量を簡易かつ高精度に評価できることが示された。これにより、住民が自身の居住空間の放射線量を把握しやすくなり、帰還に対する安心感の向上に寄与することが期待される。

しかし、本研究にはいくつかの課題が残されている。まず、実際の複雑な建物構造への適用性を検証する必要がある。また、モンテカルロ法は計算コストが高いため、計算効率の向上や高速化が求められる。

*コンプトン散乱：X 線を物体に照射したとき、散乱 X 線の波長が入射 X 線の波長より長くなる現象をコンプトン効果といい、この散乱をコンプトン散乱と呼ぶ。

*線量ビルドアップ係数：線源から放出された γ 線が評価点まで一度も衝突することなく到達する線量に対する、散乱線を含めた線量の比、または放射線がコンクリートや鉛などの媒質を透過するとき、任意の点での全放射線量と直接線の量の比を指す。

大森敏明(2017) 56)らは、福島第一原子力発電所事故後に環境中に放出された放射性物質が地表や建物表面に沈着した際の屋内線量率を簡易に推定する計算法を開発し、その適用性を検証している。本研究の目的は､建物内の放射線量を迅速かつ簡易に評価するための計算法を提案し､その有効性を検証することである。

福島第一原子力発電所事故後、環境中に放出された放射性セシウム（Cs-137 や Cs-134）が地表や建物表面に沈着し、住民の被ばく線量評価が重要な課題となった。本研究では、放射線輸送計算法の開発により、地表面や建物壁面に沈着した放射性物質から放出されるガンマ線の輸送を計算する手法を開発した。具体的には、モンテカルロ法を用いて、各種遮蔽構造を通過するガンマ線の透過と評価点での吸収を計算した。また、複数の建材から構成される壁を等価な単層壁としてモデル化し、計算の簡略化を図った。

開発した手法を基に、「RADAR-γ」コードを作成し、Meckbach のプレハブ住宅モデル*や IBEC（建築環境・省エネルギー機構）の戸建て住宅モデルに適用して、屋内線量率の推定を行った。木造プレハブ住宅における屋内線量率は、Meckbach の論文と比較して 10～20%高い値を示し、コンクリートや軽量気泡コンクリート（ALC)、木造の 3 種類の構造について解析を行った。その結果、同様の位置にある同種構造の住宅での線量率は、古田らの計算結果と良好に一致した。また、建材の密度が高いほど、屋内線量率は低下する傾向が確認された。また、放射性セシウムが土壌中に浸透した場合、コンクリート住宅では 2 階の線量率が 1 階より低くなる一方、木造住宅では逆の傾向が見られた。

当該研究の成果としては、建物内の放射線量を迅速に推定できる計算法を提案し、「RADAR-γ」コードとして実装したことが挙げられる。当該計算法は、異なる構造や材質を持つ住宅モデルに適用され、計算法の有効性と汎用性が確認された。

しかし、ビルドアップ係数の選定については、コンクリート材のビルドアップ係数を全ての材質に適用したが、材質ごとの差異を考慮することで、さらなる精度向上が期待される。また、放射性セシウムの時間経過による影響についても、Cs-134 の半減期が約 2 年であるため、時間経過とともに線量率への寄与が変化する。これらの時間的変化を考慮した長期的な線量評価手法の確立が求められる。

*Meckbach のプレハブ住宅モデル: Meckbach の論文（以下の文献）を参照

1) P. Meckbach, P. Jacob and H.G. Paretzke, Gamma Exposures due to Radionuclides Deposited in

Urban Environments. Part I: Kerma Rates from Contaminated Urban Surfaces, Radiat. Prot. Dosim. 25(3), 167-179(1988).
2) P. Meckbach, P. Jacob and H.G. Paretzke, Gamma Exposures due to Radionuclides Deposited in Urban Environments. Part II: Location Factors for Different Deposition Patterns, Radiat. Prot. Dosim. 25(3), 181-190(1988).

上記 2 つの論文の概要：0.3 MeV、0.662 MeV、および 3.0 MeV のエネルギーの地表面の単位線源を想定して、モンテカルロ法を使用して都市環境の建物の内外の場所に蓄積された放射能によるγ線被ばくを、遮蔽されていない場所と比較して計算した。建物の種類は、プレハブ住宅、半戸建て住宅、4 軒の大きなテラスハウスの列、および複数階建ての住宅ブロックで、建物内外の様々な場所で、壁、窓、屋根、採光窓、舗装エリア、芝生、樹木などについて示した（上記 1)）。このデータを元に、それぞれの場所での被曝率と芝生上の被曝率の比率を「場所係数」と定義して示し、さらに沈着直後の場所係数と沈着後 1 年間の場所係数の比較を行った（上記 2)）。日本語文献：古田琢哉(2014) 104)も参照資料となる。

加藤信介(2020) 57)は、数値流体力学（CFD）を用いて室内の換気設計を最適化し、感染症対策としての室内環境改善に寄与する手法を検討し報告した。本研究の目的は、CFD 解析を活用して室内の気流や汚染物質の運搬・輸送特性を詳細に解析し、効果的な局所換気設計の手法を提案することである。

室内環境における換気設計は、「全般換気」と「局所換気」の 2 つの概念に分類される。全般換気は室内全体の空気を均一に混合することを目的とし、局所換気は特定のエリアでの汚染物質の除去や制御に焦点を当てる。特に感染症対策では、ウイルスなどの汚染物質の拡散を防ぐため、局所換気の設計が重要となる。

CFD 解析の適用により、室内の気流や汚染物質の分布を詳細に解析し、室内の不均一な空気の流れや汚染物質の拡散パターンを可視化して換気効率を評価した。さらに、特定のエリアでの汚染物質の除去や制御を目的とした局所換気の設計手法を検討し、換気装置の配置や風量の最適化などを行った。

当該研究の主な結果として、CFD 解析により室内の気流が必ずしも均一ではなく、特定のエリアで汚染物質が滞留しやすいことが明らかになった。これにより、全般換気だけでは不十分であり、局所換気の重要性が示された。また、局所換気設計を適用することで、特定エリアでの汚染物質の濃度を効果的に低減できることが確認され、感染症対策としての換気設計の有効性が示された。

研究の成果としては、CFD 解析を活用することで室内の気流や汚染物質の分布を詳細に把握し、効果的な換気設計が可能であることが示され、感染症対策としての室内環境設計に CFD 解析が有用であることが確認された。また、全般換気だけでなく局所換気を適切に設計することで、室内の汚染物質の濃度を効果的に制御できることが示され、感染症対策としての換気設計の指針を提供した。これらの知見は、放射性物質の沈着にも応用可能と考えられる。

しかし、本研究にはいくつかの課題が残されている。CFD 解析の精度は入力データやモデルの設定に依存するため、より正確な解析結果を得るためには実測データの収集やモデルの改良が必要である。また、CFD 解析は計算コストや専門知識を要するため、実務での適用には簡便化やツールの開発が求められる。なお、設計者や施工者への教育や普及活動も重要な課題である。

田中敦(2023) 58)らは、家屋内放射性物質分布の現場測定技術を検討し、低レベル汚染を含む局所的な汚染箇所の可視化法について報告している。当該研究の目的は、福島第一原子力発電所の事故後に家屋内における長期的な放射性物質の分布状況を把握し、被ばくリスク低減や適切な除染対策を検討することである。

従来の測定手法では、家屋内の放射線量はサーベイメータ（線量率計）や環境放射線モニタリング装置で

測定されるが、これらの機器では、壁や床など部位ごとの微細な分布を定量的・視覚的に把握するのは容易ではない。そこで、本研究では、イメージングプレート（Imaging Plate: IP）を用いた家屋内放射性物質の局所分布評価を目指した。IP は放射線を高感度で検出し、可視化することが可能な技術であり、家屋内（壁面、床面、家具表面など）のどこにどの程度の放射性物質が付着・沈着しているかを現場測定し、その分布を可視化することを目指している。

実測手法の検証と有用性の評価では、IP を用いた測定方法を家屋内に実際に適用し、測定精度や手順の確立を図った。従来のサーベイメータ等との比較により、家屋内の放射性物質評価への適用可能性や有効性が検討された。

当該研究の成果としては、家屋内における放射性物質の分布可視化が挙げられる。床、壁、天井、家具などのさまざまな面に IP を配置することで、場所ごとの放射性物質の付着や線源の有無を二次元画像として把握し、一般的な線量率計による測定結果だけではわかりにくい微細な汚染箇所の特定に成功した。また、IP の高感度特性により、従来の機器の検出感度不足やバックグラウンドが高く見逃されがちだった低レベル汚染箇所の確認が可能となった。特に、放射線源が強くない場合でも長時間の積算により画像化できることが示された。

測定手法の運用性・実用性の評価では、IP の取り扱いやデジタル化プロセスなど現場測定に特有の制約や作業負荷を検証し、家屋内での短期・長期の測定を想定し、測定時間や線量率の異なる条件での比較を行い、最適な測定条件や設置・読取手順を提案した。また、サーベイメータや放射能分析との併用により、線量率分布の把握・定量的評価と IP による二次元分布可視化を組み合わせることで、家屋内の放射性物質評価をより高精度に実施できることが示唆された。

しかし、いくつかの課題も残されている。まず、IP 自体は高感度だが、長時間の積算やスキャン作業が必要になる場合があり、導入コストやデータ解析の手間も考慮する必要がある。さらに、IP を用いた測定値を線量率や放射能量に変換するには、エネルギー特性やバックグラウンドの補正を含めた較正が不可欠であり、より精密な較正手法の研究が求められる。また、家屋内の放射性物質は壁や床に付着している場合だけでなく、埃との結合や隙間への堆積、内部への浸透など多様な形態をとりうるため、これらに対応した測定方法の工夫が必要である。安全性確保と除染対策への応用についても、分布を可視化できたとしても実際のリスク低減に結びつけるためのガイドラインづくりが必要であり、IP 測定後の解析結果を住民や除染担当者が理解しやすい形にまとめ、行動指針を示すコミュニケーション手法の確立も課題である。また、経年変化や季節変動を追跡するために、IP 測定を定期的に実施するか、簡易なリアルタイムモニタとの併用が考えられる。データの蓄積と解析を行い、リスク評価や被ばくシナリオの推定に資する長期的なモニタリング体制の構築は、今後の課題となろう。

庄司研(2024) 59)らは、室内におけるエアロゾル感染リスクを定量的に評価する手法と基準を提案している。本研究の目的は、新型コロナウイルス感染症の拡大に伴い、室内環境での感染リスク評価の重要性が増している中で、エアロゾル感染に焦点を当て、室内の感染リスクを定量的に評価する手法とその基準を提案することである。

当該研究の手法としては、Wells-Riley モデル*を活用し、感染確率を導出し、室内の空間分布を考慮した二次感染者数を算出することで感染リスク評価値を設定された。また、数値流体力学（CFD）解析を用いて室内の気流とエアロゾル濃度の分布をシミュレーションし、各座席位置での感染確率を評価した。さらに、二次感染者数が 1 人未満であれば感染が収束すると仮定し、この条件を感染リスクの評価基準とした。

当該研究の主な結果として、空調方式の影響が明らかになった。床吹出しシステムは天井吹出しシステムに比べて感染リスクが低いことが示され、吹出口と吸込口の配置が感染リスクに大きな影響を与えることが確認された。また、捕集率 50%以上のフィルタを設置することで感染リスクの低減に効果的であることが確認された。

当該研究の成果としては、エアロゾル感染リスクを定量的に評価する手法と基準が提案され、室内環境設計や感染症対策に有用な指針を提供したことが挙げられる。これにより、空調方式やフィルタ設置の効果を明らかにされ、効果的な換気計画の立案に貢献している。

しかし、課題も残されている。感染リスク評価の精度を高めるため、エアロゾルの挙動や人の活動による影響をさらに詳細にモデル化する必要がある。また、提案手法をさまざまな室内環境や異なる感染症に適用し、汎用性と有効性を検証することが求められる。

*Wells-Riley モデル：感染性粒子発生量は quanta という単位で与えられ, 感染源ごとに異なる値が求められている。感染リスクは次の式で表される。$[\text{感染リスク}] = 1 - exp\left(-\frac{I\,q\,p\,t}{Q}\right)$

I：一次感染者の人数（通常は 1）［-］, q：感染性粒子発生量（quanta 値）［/h］, p：呼吸量［m3/h］, t：滞在時間［h］, Q：換気量［m3/h］

参照：日本語文献：諏訪好英(2021)127）

○本項（2.3.4）のまとめ

大森敏明(2016) 55)らは、福島第一原子力発電所事故後に求められた簡易な放射線量計算法について、モンテカルロ法に基づく手法を開発し、建物内外の放射線量を簡易かつ高精度に評価できることを示した。さらに、**大森敏明(2017) 56)**らは、建物の壁面を等価な単層壁としてモデル化し、放射性物質が地表や建物表面に沈着した際の屋内線量率を簡易に推定する計算法の開発とその適用性を検証した。**田中敦(2023) 58)**らは、放射線を高感度で検出し、可視化できるイメージングプレートを用いて、低レベル汚染を含む局所的な汚染箇所の放射性物質の付着や線源の有無を二次元画像として表現する現場測定技術を開発した。一方、**加藤信介(2007) 54)**は、室内空気のサンプリングと CFD 解析により、室内空気汚染の実態と変動特性を把握し、室内の空気質を改善するための建築設計や換気計画、汚染を効率的に検出する技術的アプローチを提案した。また、**加藤信介(2020) 57)**は、CFD を用いて室内の換気設計を最適化し、感染症対策としての室内環境改善に寄与する手法を検討した。**庄司研(2024) 59)**らは、室内の気流とエアロゾル濃度の分布をシミュレーションし、空調方式やフィルタの効果を評価して、室内におけるエアロゾル感染リスクを定量的に評価する手法と基準を提案した。

2.3.5　内部被ばく線量評価に係る文献調査

内部被ばく線量評価に係る文献調査では、線量換算係数が重要となる。当該係数については、ICRP 勧告に基づく改訂や国内基準との整合性の検討、福島における甲状腺被ばく線量の再評価についての文献調査報告を行う。また、関連する文献として、最新の CFD 技術を用いた人体周辺や気道内の解析、飛沫やエアロゾルの挙動解析の事例を取り上げる。

真辺健太郎(2011) 60)らは、ICRP107 に基づく新しい放射性核種データが作業者の内部被ばく線量換算係数（DCF）に及ぼす影響を定量的に評価し、その結果、特に、吸入摂取の DCF に変化が見られ、エネルギ

ーデータの変更が主要な要因であることを明らかにした。

放射線防護のための内部被ばく線量評価は、放射性核種の物理・化学的特性に依存し、それらのデータはICRP（国際放射線防護委員会）の改訂によって更新される。従来のICRP Publication 38（ICRP38）で用いられていたデータが変更され、ICRP Publication 107（ICRP107）による新しい放射性核種データが作業者の内部被ばく線量換算係数（DCF）に与える影響を評価した。特に経口摂取と吸入摂取による被ばく線量の変化に着目し、その違いを定量的に分析した。

手法としては、線量換算係数（DCF）の計算に、ICRP107およびICRP38に基づく放射性核種データを使用し、DCAL（Dose Calculation Software）を用いて計算を行った。計算対象は774種類の放射性核種の876種類の化学形態であり、ICRP107に基づくDCFとICRP38に基づくDCFを比較し、10%以上増減した核種のリストを作成した。また、その要因（エネルギーデータの変化、崩壊モード、半減期の変化など）を特定し、被ばく経路の違い（経口摂取と吸入摂取）による線量換算係数の違いを分析した。

当該文献の主な結果としては、ICRP107の導入により、DCFが10%以上増加した化学形態は61種類、減少した化学形態は28種類であることが判明し、DCFの変化が最も顕著な要因としては、エネルギーデータの変更があったことが分かった。特に、電子線と光子線のエネルギー比率の変化が吸入摂取よりも経口摂取のDCFに大きく影響を与えることが明らかになった。また、特定のβ崩壊核種では、新たな分岐比（branching ratio）が考慮されたことでDCFが変動した。

以上、当該論文の成果としては、ICRPのデータ改訂による影響を定量化し、ICRP107による変更がどの程度、内部被ばく線量評価に影響を与えるかを明確に示した点が挙げられる。特に吸入被ばく評価に大きな影響があることを発見し、作業者の線量評価を最新のICRPデータに基づいて更新する必要性を指摘している。また、放射線作業環境での吸入摂取リスク評価の見直しに貢献し、ICRP107に基づくDCFを提供し、規制機関や産業界の被ばく管理に活用できるデータも提供した。

しかし、いくつかの課題も残されている。異なる職種・作業環境への適用性の評価が必要であり、長期的な低線量被ばくの影響についてもさらなる研究が求められる。DCF以外の内部被ばく評価手法（例えばバイオモニタリング*）との比較研究が求められる。

*バイオモニタリング（Biomonitoring）：生体試料（尿、血液、毛髪、爪、排泄物など）を分析し、体内に取り込まれた放射性物質の種類や量を評価する方法で、特に、内部被ばく線量を評価するための重要な手法である。

松尾俊紀(2013) 61)らは、室内環境が人体に与える影響を評価するため、呼吸サイクルや定常熱モデルを組み込んだ数値人体モデルを開発した。当該文献の目的は、室内の熱環境や空気質が居住者の健康や快適性に与える影響を総合的に評価するため、人体の生理機能や呼吸サイクルを考慮した詳細な数値モデルを開発し、室内環境に起因する健康リスクを評価することである。

具体的な手法として、呼吸サイクルを再現するため時間変化する呼吸流量をモデル化し、非定常な数値解析を可能とした。さらに、CFD（数値流体力学）解析を用いて、人体周辺や気道内の流れ場、温度場、湿度場、汚染物質濃度場を計算し、各種輸送現象を予測した。

当該論文の主たる結果は、開発した数値人体モデルにより、室内環境が人体に与える影響を詳細に評価できることを示した点と、さらに、呼吸サイクルを考慮した解析により、吸入空気中の汚染物質濃度や温湿度の変動を予測し、健康リスク評価の基礎データを得たことである。

当該研究の成果としては、呼吸サイクルや熱モデルを組み込んだ数値人体モデルを開発し、室内環境に起

因する健康リスクを総合的に評価する手法を確立したことが挙げられる。当該モデルは、建築環境設計だけでなく、医学や公衆衛生学分野にも応用可能であり、幅広い分野での活用が期待される。

しかし、いくつかの課題も残されている。人体の詳細な生理機能や個人差を考慮したモデルの精度向上が必要であり、さらなる研究が求められている。また、複雑な室内環境や多様な汚染物質に対するモデルの適用性を検証し、実用的な評価手法としての確立が課題である。

高橋史明(2020) 62)らは、ICRP 2007 年勧告に基づき、内部被ばくの実効線量係数を算出し、日本国内の放射線防護基準に適用するための基礎データを提供した。その結果、従来の ICRP 1990 年勧告と比較して特定の放射性核種において線量係数の変動が確認され、新たな生体動態モデルによる影響が明確に示された。

背景として、放射線防護の国際的な基準を策定する国際放射線防護委員会（ICRP）が、2007 年に勧告（ICRP Publication 103）を発表し、それに基づく内部被ばく線量評価の基準が求められた。この勧告では、放射線の生物学的影響の評価方法の改定が行われ、内部被ばく線量評価に使用する「実効線量係数（Dose Coefficients）」の見直しが求められた。当該研究では、新たな実効線量係数を算出し、従来のモデルとの比較を行うことを目的としている。

手法としては、ICRP 2007 年勧告に基づく線量評価モデルを適用し、新しい放射線加重係数および組織加重係数を考慮し、放射線の生物学的影響をより正確に反映させた。内部被ばく線量計算の基礎となる生体動態モデル（Biokinetic Model）を最新の ICRP モデルに基づき更新し、新しい放射性核種の線量係数を計算した。中でも、主要な放射性核種（Cs-137、Sr-90、トリチウムなど）については、新しい線量係数を導出し、従来の ICRP モデル（ICRP 1990 年勧告）との比較を行った。

当該研究の主な結果としては、新しい線量係数を導出し、ICRP 2007 年勧告に基づく内部被ばく線量係数を計算し、国内の放射線防護指針の適用に適したデータセットを作成した。その結果、特定の放射性核種（例えば、Cs-137、I-131）については、従来の評価よりも線量係数がわずかに増加または減少する傾向が見られた。ICRP 1990 年勧告との比較では、新しい線量係数は、多くの核種で変動を示したが、一部の核種では大きな変動が確認された。特に、トリチウム（H-3）やストロンチウム(Sr-90)の内部被ばく評価において、組織加重係数の変更が影響を及ぼすことが明らかになった。また、新しい ICRP モデルは、体内での放射性核種の代謝や排出のパターンをより詳細に反映し、長期にわたる核種の蓄積や除去に関する評価が改善された。

以上、当該文献の成果としては、ICRP 2007 年勧告に準拠した実効線量係数の国内適用が行われ、日本国内の放射線防護規制に適用可能な新しい内部被ばく線量係数を導出し、その妥当性を検証した点が挙げられる。これにより、放射線作業者および一般公衆に対する放射線防護のための基礎データが提供され、従来の線量評価モデルよりも、精度が向上し、内部被ばくにおけるリスク評価がより信頼性の高いものとなった。また、従来考慮されていなかった一部の放射性核種についても、線量係数の算出が可能となり、より包括的な評価が実施可能になった。

しかし、いくつかの課題も残されている。年齢別の影響評価が必要であり、幼児や高齢者の代謝特性を考慮したさらなる評価が求められている。また、長期的な低線量被ばくに関する評価も必要であり、特定の核種（例えばプルトニウムやウラン）の線量係数についてさらなる詳細な分析が求められる。今後の ICRP の追加改訂や、新しい放射線防護基準との整合性を確認する必要がある。

次は、内部被ばく評価に密接に係る文献報告について述べる。

坪倉誠(2021) 63)は、スーパーコンピュータ「富岳」を活用し、新型コロナウイルスの飛沫やエアロゾルの拡散をシミュレーションし、感染リスクの評価と対策を提案した。新型コロナウイルス感染症（COVID-19）

の拡大に伴い、飛沫やエアロゾルを介した感染経路の解明と効果的な対策が求められており、当該研究では、飛沫やエアロゾルの挙動を詳細に解析することで、感染リスクの可視化と低減策の提案を目的とした。「富岳」の高性能計算能力を活用し、詳細な物理モデルの構築、さまざまなシナリオの検証、およびシミュレーション結果の可視化と社会発信を行い、感染予防の啓発を実施した。具体的には、飛沫の蒸発や壁面への付着など現実的な物理現象を考慮したモデルを作成し、オフィスや満員電車、コンサートホール、小学校等、さまざまな環境での飛沫拡散をシミュレーションした。また、シミュレーション結果を動画などで可視化し、社会に向けて発信することで、感染予防の啓発を行った。

主たる結果としては、さまざまな環境下での飛沫やエアロゾルの拡散経路を詳細に可視化し、感染リスクの高い状況を特定したことが挙げられる。また、パーティションの設置や窓開け換気、マスクの素材や装着方法の違いによる効果を定量的に評価し、感染リスクの低減策の効果も検証した。これらの結果を基にした啓発活動により、感染予防策の重要性に対する社会の理解と行動変容を促進することができた。感染リスク評価の高度化が求められ、高精度なシミュレーションを通じて具体的な感染リスク評価と効果的な対策の提案が可能となり、飛沫拡散の可視化を通じて一般市民や行政への啓発活動に寄与し、感染拡大防止に貢献したことは極めて重要と考えられる。

しかしながら、更なるモデルの精緻化が必要であり、飛沫やエアロゾルの挙動をさらに正確に再現するためには、物理モデルの高度化が求められる。また、より多様な実環境でのシミュレーションを行い、汎用性の高い対策の提案が求められている。さらに、即時的な感染リスク評価と対策立案を可能にするために、シミュレーションの高速化や効率化が課題となった。

なお、関連する英語文献：K. Ando et al (2022) 264]が 2021 年のゴードン・ベル賞 COVID-19 研究特別賞を受賞した。

廣内淳(2021) 64)らは、ICRP の消化管吸収率（f_1）を反映した内部被ばく線量係数を計算し、JAEA の OSCAAR を用いて原子力事故時の被ばくリスクを評価した。その結果、消化管吸収率が線量係数に与える影響を定量化することで、従来モデルと比較し評価精度が向上することを確認した。放射線防護において、内部被ばくの評価は重要であり、特に放射性物質の消化管吸収率（f_1係数）が線量計算に大きく影響する。国際放射線防護委員会（ICRP）は、放射性核種ごとに消化管吸収率の推奨値を示しており、これに基づいて線量係数（Dose Coefficient）が算出される。本研究では、JAEA が開発した OSCAAR（Off-Site Consequence Analysis code for Atmospheric Release in Reactor Accident）を用いて、ICRP の f_1値を考慮した内部被ばく線量係数を計算し評価の妥当性を検証した。

具体的には、ICRP の報告書に基づき、消化管吸収率（f_1）の値を各放射性核種に適用し、消化管での吸収率が線量評価に与える影響を解析した。原子力事故時の放射性核種の拡散と人体への内部被ばくを評価する際は OSCAAR を用い、ICRP の f_1値を反映した吸収率の違いによる内部被ばく線量係数の変動を分析した。従来の ICRP モデルを適用した場合との違いを定量的に評価することで、放射性ヨウ素、セシウム、ストロンチウムなど、人体に影響を及ぼしやすい主要な放射性核種について、詳細分析を加えている。

主な結果としては、消化管吸収率（f_1）が線量評価に与える影響を定量化したことで、放射性セシウム（Cs-137）やストロンチウム（Sr-90）等、f_1値が比較的高い核種では、線量係数の増減が顕著に見られたことが挙げられる。その一方、低吸収率（f_1値が低い）核種では、線量係数の影響は限定的であった。ICRP の新しい f_1値を適用することで、より現実的な線量評価が可能となり、従来の評価と比較して、一部の核種では無視できない線量変動が確認された。また、原子力事故時の放射性物質の拡散と内部被ばくの計算において、

OSCAAR は、ICRP モデルと整合的な結果を示し、f_1 を考慮した内部被ばく線量評価の高精度化に貢献していることが分かる。即ち、OSCAAR による計算が、ICRP の推奨値と整合していることを確認したことで、実際の事故時に適用可能な内部被ばく線量評価手法として、OSCAAR を活用することで、日本国内の放射線防護指針に応用できるデータセットの提供が可能となったと位置づけられる。

しかし、本研究では成人を対象とした評価が中心であり、幼児や高齢者の f_1 値を考慮した追加分析も必要である。また、短期的な線量係数の評価に焦点を当てているため、長期間にわたる低線量被ばくの影響については、さらなる研究が必要である。食品や水、吸入による内部被ばくの影響を詳細に評価することで、より包括的なリスク評価が可能になるが、ICRP の新たな改訂が行われた場合には、本研究の結果と整合性を確認する必要がある。

鈴木元(2022) 65)らは、2011 年の東日本大震災後の福島県民の甲状腺被ばく線量を再構築し、従来の評価よりも低い線量が推定されることを示した。福島第一原子力発電所事故により、大気中へ大量の放射性ヨウ素（I-131）が放出されたが、特に甲状腺への被ばくは子供や若年層において長期的な健康影響が懸念された。しかし、当時の放射線測定データが限られていたため、国際連合科学委員会（UNSCEAR）による 2013 年の評価では、被ばく線量の不確実性が高く、過大評価の可能性が指摘された。その後の研究により、より精度の高い線量推定方法が開発され、2021 年に発表された UNSCEAR 2020 年報告書では、福島県民の甲状腺被ばく線量の修正が行われた。

UNSCEAR 2013 年報告書と 2020 年報告書を比較し、修正の要因を分析した結果、過去の評価における不確実性の要因として測定データ不足や推定モデルの違いが特定された。その分析結果を受け、日本国内の研究グループによる新たな線量評価手法を統合し精度を向上させた。空間線量率データ、食品中の放射性物質の摂取量、放射性降下物の沈着データを反映し、モニタリングデータを用いた新たな線量再評価を実施し、被ばく線量の地域ごとの変動を考慮し、より実測データに基づく評価を行った。

主な結果としては、上記のように、UNSCEAR 2013 年報告では甲状腺吸収線量が過大評価されていた可能性を指摘し、2020 年の報告に対し、修正を行った点が挙げられ、福島県の住民の甲状腺被ばく線量は、従来の評価よりも低い水準に再計算された。また、最新の評価では「福島県の住民における放射線関連の甲状腺がん発生率の上昇は予測されない」ことが示され、長期的な健康影響のリスクは限定的であると結論づけられた。

研究手法の精度向上により、過去 10 年間の研究により、線量評価方法の改善が進み、被ばく線量推定の精度が向上したことは価値ある進展と判断できる。また、空間線量モニタリングと食品摂取データを組み合わせた新たな推定モデルが導入され、より現実的な評価が可能になったことも評価できる。結果として、2011 年当初の評価における不確実性を改善し、より正確な甲状腺吸収線量を再構築し、過去の過大評価を修正し、福島県民のリスク評価の科学的根拠を強化可能となった。また、国際機関（UNSCEAR）による評価の修正では、日本国内の研究成果が反映され、UNSCEAR 2020 年報告において、福島県民の被ばく線量評価が更新された。放射線リスク評価の国際的基準の確立に貢献し、今後の原子力災害時のリスク評価の基盤を構築した点は評価できる。しかし、乳幼児や若年層の甲状腺被ばく線量の詳細な再評価が求められ、成長段階による代謝の違いを考慮した追加研究が必要である他、低線量被ばくの長期的影響を明確にするため、今後も甲状腺がんの発生率調査等を継続し、環境因子の影響を考慮した被ばく線量評価がさらに求められる。

○本項（2.3.5）のまとめ

真辺健太郎(2011) 60)らは、ICRP107 の改訂による核種データの変更による内部被ばく線量換算係数(DCF)の変化について詳細に検討し、その影響を定量化した。変化が最も顕著な要因は、エネルギーデータの変更であり、崩壊モードの変化、半減期の変更、放射性崩壊系列の変更などが影響を及ぼし、また経口摂取に比べて吸入摂取の DCF の変化が大きいと指摘した。**高橋史明(2020) 62)**らは、ICRP 2007 年勧告に基づき、それに準拠した内部被ばく線量係数を導出し、国内の放射線防護指針の適用に適したデータセットを作成した。**廣内淳(2021) 64)**らは、ICRP の放射性物質の消化管吸収率の推奨値を反映して、吸収率の違いによる内部被ばく線量係数の変動を分析し、内部被ばく線量評価の精度を向上させるとともに、OSCAAR による線量評価が ICRP の結果と整合していることを確認し、実際の事故時に適用可能な内部被ばく線量評価手法を確立した。**鈴木元(2022) 65)**らは、日本国内の研究グループによる新たな線量評価手法を統合し、福島県民の甲状腺被ばく線量の再評価を実施し、線量評価方法の改善、被ばく線量推定の精度向上に貢献した。

一方、CFD 分野では、**松尾俊紀(2013) 61)**らが、呼吸サイクルや人体の熱収支を計算する数値人体モデルを開発し、人体周辺や気道内の流れ場、温度場、湿度場、汚染物質濃度場を計算して、室内環境に起因する健康リスクを総合的に評価する手法を確立した。また、**坪倉誠(2021) 63)**は、スーパーコンピュータ「富岳」を活用して、飛沫やエアロゾルの挙動を詳細に解析することで、具体的な感染リスク評価と効果的な対策の提案を可能としている。こうした CFD 分野の発展により、放射性物質を含んだ微粒子の経口摂取や吸入摂取に関するより高精度の解析が可能になると思われる。

2.4 放射性物質大気拡散に係る被ばく評価の文献調査（英語）

本節では、前述したように高精度の放射性（汚染）物質の拡散と被ばく線量評価に関する文献（英語）の結果を報告する。先ず、線量評価と連携する大気拡散シミュレーションにおけるモデル及びそれを用いるシステムについて、主な下記 7 つの要素技術に関して文献調査を行い、その分野の課題の変遷を明示するとともに、現時点での到達点や課題及び展望についてまとめる。

（1） 高精度な気象データの利用及びデータ同化技術
（2） 数値気象予報とメソスケールモデリング
（3） 汚染物質（放射性物質）の大気拡散、LES による高精度モデル
（4） 日本原子力研究開発機構による高精度局所大気拡散モデル LOHDIM-LES の発展
（5） 都市環境の大気拡散、都市キャノピーモデル(Urban Canopy Model, UCM)
（6） ガウスプルームモデルの改良と応用
（7） 並列計算や GPU による高速化の活用
（8） 新たな手法を用いた最近の展開

次に、日本語文献調査と同様に、大気拡散による被ばく評価が、凡そ、外部被ばくと内部被ばくに分類され、外部被ばくがクラウドシャインとグランドシャインに分類できることを受け、高精度化した放射性物質濃度の分布を基に、被ばく評価の高精度化を目指す研究開発の取り組みについて紹介し、知見と課題を整理する。上記の観点から、外部被ばくをクラウドシャインとグラウンドシャインに分類し、その後、内部被ばくについての文献調査結果を報告する。

2.4.1 線量評価と連携する大気拡散シミュレーションの概要

（1）高精度な気象データの利用及びデータ同化技術

高精度の放射性物質大気拡散予測モデルでは、気象条件など不確実なパラメータを推定する手法が不可欠であり、アンサンブル・カルマンフィルタ（EnKF）や 4 次元変分法（4D-Var）など様々なデータ同化手法が開発されてきた。

D.Q. Zheng (2009) 9]らは、核関連事故の影響評価を目的とした大気拡散モデルにおいて、モデルの状態と不確実なパラメータを同時に推定するためのアンサンブル・カルマンフィルタ（EnKF）ベースの手法を提案した。ソースタームや気象条件等の不確実なモデルパラメータは、予測の信頼性に影響を与える可能性があり、EnKF を使用して放射線モニタリングデータに基づき、モデル状態および不確実なパラメータ（放出率、風向、乱流強度）を同時に推定する方法を構築した。当該手法は、確率的状態空間モデルに基づき、モデルパラメータの誤差を確率的変数として扱うものである。シミュレーションデータと実際の放射線モニタリングデータの両方に対してテストされ、拡散の現実的な再現およびパラメータの時間的変動の追跡が可能であることが確認された。これにより、EnKF を用いたリアルタイム推定により、モデル状態とパラメータを同時にリアルタイムで更新することが可能となり、拡散の再現性が向上した。EnKF による推定結果は、真の値に収束し、放出率や風向などの不確実なパラメータを正確に評価可能であることが示された。実際、現実のモニタリングデータを用いた検証においても手法の有効性が実証された。

しかし、EnKF の計算には高い処理能力が求められ、特に大規模なデータセットでは、計算時間が課題となることが明らかとなった。さらに、モデルの初期状態やパラメータ設定が推定結果に影響を与える可能性があることも示唆された。提案手法は、特定の核関連事故シナリオを対象としているため、他の災害シナリオへの適用には追加の検証が必要である。

この研究の成果としては、モデル状態とパラメータを同時にリアルタイムで更新することにより、拡散の再現性が向上し、高精度なパラメータ推定が可能となった。EnKF による推定結果は、真の値に収束し、実際のモニタリングデータを用いた検証においても手法の有効性が実証された。これにより、核関連事故の影響評価において、より信頼性の高い予測が可能となったが、高い計算負荷や初期条件への依存性、さらなる一般化の必要性といった課題が残されている。

A.R. Jones (2011) 10]は、気象予報のアンサンブルデータ ECMWF を用いて、核関連事故や化学物質漏洩等の緊急時対応における大気拡散予測の不確実性に関し、気象条件の不確実性が拡散予測に与える影響を評価した。即ち、数値気象予測（NWP）におけるアンサンブル手法の採用と複数の予測シナリオを計算することで、不確実性の範囲の評価を行っている。また、英国気象庁のラグランジュ粒子モデル「NAME III」を適用し、ETEX 1（長距離トレーサー実験）のデータを用いた解析を行い、ETEX 1 実験を基にしたアンサンブル拡散予測の実用性と課題を評価した。アンサンブル手法を使用することで、気象条件による拡散予測の不確実性が定量化でき、NAME III を用いたシミュレーションが実データ（ETEX 1）と整合していることが確認され、モデルの信頼性が確認された。アンサンブル手法は、核関連事故や化学物質漏洩時の迅速な意思決定をサポートする有用なツールとして評価された。

その一、アンサンブル手法は、多数のシミュレーションを必要とし、計算負荷が高いことが課題である。また、NAME III や ETEX 1 に特化しており、他の条件やモデルでの汎用性は未確認である。さらに、アンサンブル手法でも全ての不確実性を解消することは困難であり、さらなる改善案の検討も必要とされる。

この研究の主たる成果としては、気象条件による拡散予測の不確実性を定量化することで、緊急時対応に

おける迅速な意思決定を支援する有用なツールとなり得ることを示した点が挙げられる。しかし、計算コストやモデル依存性、さらなる不確実性の解消の困難さといった課題は残されている。

M. Kadowaki (2017) 11]らは、気象データの改善によってシミュレーションの再現性を高めることを目的として、福島第一原発事故における放射性物質の大気拡散シミュレーションの精度を向上させるため、4 次元変分データ同化法（4D-Var）を採用し、WRF（気象予測モデル）と大気拡散モデル GEARN を使用し、風況場および降水場を 4D-Var によって改善した。対象地域は、福島第一原発周辺および茨城、栃木、福島各県を含む広域であり、Cs-137 の沈着パターンをシミュレーションし、実測値と比較した。その結果、シミュレーション精度の向上が確認され、4D-Var による風況場と降水場の改善により、Cs-137 沈着パターンの再現性が向上した。則ち、地域スケールでの有効性が実証され、局地的および広域的な大気拡散シミュレーションの精度向上が示された。また、データ同化を活用したモデルが、事故時の放射性物質拡散評価に効果的であることが証明されたと判断される。

しかし、高精度なデータ同化には、詳細な気象データが必要であり、これが実運用の制約となる可能性がある。また、4D-Var 法の適用には、高い計算コストが必要であり、実時間処理が課題となる。さらに、福島第一原発事故を対象としているため、異なる条件下での汎用性については追加検証が必要である。以上、シミュレーション精度の向上が確認され、地域スケールでの有効性が実証され、データ同化を活用したモデルが、事故時の放射性物質拡散評価に効果的であることが証明されたが、データ取得の制約や計算負荷、他の事故シナリオへの適用といった課題が残されている。

C.L. Defforge (2019) 12]らは、大気中の物質拡散をシミュレーションする CFD モデルについて、複雑な地形が存在する局所的な領域での風況場シミュレーションの精度向上に注目しデータ同化技術を適用した。CFD モデルは地形や境界条件に敏感であり、大規模モデルや観測値に依存するため、正確な局所的風況場を再現するのは難しい。当該研究では、境界条件を強化するために 3 つのデータ同化技術（3DVar、Back-and-Forth Nudging（BFN）、Iterative Ensemble Kalman Smoother（IEnKS））を適用して結果を比較した。大気を 2 層に単純化した 1 次元浅水波方程式*を用いてデータ同化手法のパフォーマンスを比較したところ、初期条件ではなく、境界条件に焦点を当てたデータ同化の適用により、局所的な風況場の再現精度が向上した。IEnKS が最も高い精度を示し、次いで BFN と 3DVar が良好な結果を達成した。少数の観測データを同化するだけで、複雑な地形の影響を考慮した精度の高い拡散予測を実現させている。

当該研究の成果としては、境界条件の改善により局所的な風況場の再現精度が向上し、IEnKS が最も高い精度を示した点が挙げられる。データ同化技術の適用により、少数の観測データを同化するだけで精度の高い拡散予測が実現された。しかし、IEnKS のような高度なデータ同化技術は、計算資源の消費が大きく、実時間適用には改善が必要である。また、本研究の評価は、単純化された 1 次元浅水波方程式に基づいており、実際の大気環境への適用には追加の検証が必要である。さらに、同化精度は観測データの量や品質に依存するため、広範な観測ネットワークが不可欠であることも示唆された。

*1 次元浅水波方程式 : 波動方程式の 1 つで、波長に比べて水深が十分浅い水面を伝わる波を表した方程式で、ここではその式を基に上下二層の密度差をモデル化している。

K. Li (2021) 13]らは、核事故時の放射性物質拡散モデルの精度向上を目的とし、ラグランジュパフモデルを基にした簡便なデータ同化（DA）手法を提案した。当該手法では、モデルパラメータ（放出率、風速、風向、プルーム高さ）の不確実性を考慮し、座標変換を用いてパラメータバイアスの影響を近似的に修正し、最適化アルゴリズムとして、粒子群最適化（Particle Swarm Optimization: PSO）*を使用し、最適パラメー

タを探索した。なお、提案手法の性能を検証するために、Twin 実験と Kincaid 実験を用いて評価を行った。

主な成果としては、放射性核種の拡散予測の信頼性を効果的に向上させ、早期段階での緊急対応に寄与可能な点が挙げられる。また、概念が明快で計算が簡易であるため、迅速な適用も可能であり、PSO を用いた最適化により、モデルパラメータの推定精度も向上することが挙げられる。

その一方、複雑な条件への適応が課題として残り、単純な気象条件下から複雑なシナリオへの適用には追加の検証が必要である。また、観測データが同化精度に影響を与えるため、広範な観測ネットワークが必要である。さらに、PSO の計算コストが大規模シナリオでの実用性を制約する可能性も指摘された。

*粒子群最適化（Particle Swarm Optimization、PSO）：鳥や昆虫の大群の行動を、多次元空間において位置と速度を持つ粒子群でモデル化したもの。群れのメンバーが情報交換し、それに基づいて自身の位置と速度を調整し、最適な位置を探す。

E. Bach (2022) 14]らは、異なるモデルの誤差を動的に調整しながらデータ同化と予測を行う「マルチモデル・アンサンブル・カルマンフィルタ（MM-EnKF)」を開発した。データ同化（Data Assimilation, DA）は、部分的かつノイズを含む観測データとモデル予測を最適に統合する技術であり、気象・気候予測や環境シミュレーションなどに広く応用されている。従来のカルマンフィルター（Kalman Filter, KF）やアンサンブル・カルマンフィルタ（EnKF）は、単一のモデルに基づいてデータを同化することが一般的だが、異なるモデルを組み合わせるマルチモデル DA の手法は十分に確立されていない。当該研究では、マルチモデル・アンサンブル・カルマンフィルタ（Multi-Model Ensemble Kalman Filter, MM-EnKF）を開発し、異なるモデルの特徴を活かしながら、最適なデータ同化と予測を行う。その際、変分法およびベイズ統計に基づき、MM-EnKF の最適推定を導出し、MM-EnKF が最小分散線形不偏推定量（Minimum Variance Linear Unbiased Estimator, MVLUE）であることを証明している。なお、MM-EnKF は、異なるモデルの誤差を適応的に推定し、各モデルの貢献度を動的に調整する機能を持つ。当該研究では、各モデルと観測データの相対的な信頼性に基づき、最適な重みを計算する仕組みを構築した。数値実験としては、Lorenz96 モデル*を使用し、MM-EnKF の性能を評価するための数値シミュレーションを実施し、パラメータ誤差、異なる解像度、異なるモデル忠実度などの条件で比較した。

研究成果としては、MM-EnKF は最も精度の高い単一モデルよりもさらに誤差を低減し、特に確率的・決定論的誤差指標の両方で優れた性能を発揮した点が挙げられる。また、重み付けを考慮しない単純なマルチモデルアンサンブルよりも優れた予測性能を示し、モデルの誤差特性を適応的に考慮することが重要であることを実証した。MM-EnKF は各モデルの長所を活かし、短所を補う形で予測精度を向上させることが可能であり、異なるパラメータ設定や異なる解像度のモデルを統合する手法として有望である。

しかし、現実世界のデータへの適用にはさらなる検証が必要であり、理想化された数値実験では、良好な結果を得たが、実際の気象・気候データへの適用には課題が残る。また、MM-EnKF は、複数のモデルを並列に扱うため、単一モデルの EnKF に比べて計算負荷が高く、高性能な計算資源が必要となるため、大規模シミュレーションへの適用時には最適化が求められる。さらに、現在の MM-EnKF の重み付け手法は仮定に基づいているため、非線形性が強い場合や突発的な変化がある場合、どの程度適応できるかの検証が必要である。

*Lorenz96 モデル：気象のカオス的な性質を再現する単純な数学モデルであり、特にデータ同化手法の研究や検証に広く用いられる。簡潔な構造ながら、非線形性とカオス的振る舞いを示すため、気象予測の限界やデータ同化の有効性を理解するのに役立つ。

S. Leadbetter (2024) 15]らは、アンサンブル気象データを用いた大気拡散シミュレーションの価値を評価し、決定論的シミュレーションと比較したところ、アンサンブルシミュレーションが全体的に優れた予測精度を持ち、特に時間経過と共にスキルスコアが向上することを示した。

大気拡散モデルは、火山噴火による火山灰の拡散や原子力事故による放射性物質の拡散などを予測し、意思決定者に重要な情報を提供する役割を果たす。しかし、これらのモデルには不確実性が伴い、その一因として気象データの不確実性が挙げられる。当該研究では、英国気象庁（Met Office）のアンサンブル予測システムを活用し、気象不確実性を考慮した大気拡散予測の精度を評価した。具体的には、火山灰および放射性物質の仮想的な放出シナリオを用い、アンサンブル気象データを用いたシミュレーションと、従来の決定論的（deterministic）気象予測を用いたシミュレーションとの比較を行った。具体的には、2 種類の仮想シナリオ（火山噴火シナリオと放射性物質放出シナリオ）を 4 か月間、12 時間ごとに繰り返し実行した。気象データの使用としては、アンサンブル気象データを用いた拡散シミュレーションと決定論的気象データを用いた拡散シミュレーションを行い、解析気象データを「真の状態」として比較した。拡散シミュレーションの精度を数値気象予測（NWP）モデル評価で一般的に用いられるブライアスキルスコア（Brier Skill Score: BSS）*で算出した。

当該研究の成果としては、アンサンブルシミュレーションは決定論的シミュレーションよりも平均的に優れることが示された。特に、シミュレーションの時間が経過するにつれ、スキルスコアは向上し、沈着量に対するスキルスコアの向上が顕著となった。また、火山灰の拡散シミュレーションでは、高度により、アンサンブル予測の精度に違いが見られ、特定の高度で正のスキルスコアを示す場合があった。

しかし、放出源の不確実性は考慮されておらず、気象データの不確実性に加えて放出源の不確実性も考慮したシミュレーションが必要である。また、アンサンブルシミュレーションの中には決定論的シミュレーションよりも低い精度を示すものもあり、どの条件下でアンサンブルが有効かを特定するためのさらなる研究が求められる。火山灰の拡散においては異なる高度での予測精度にばらつきが見られ、異なる高度ごとの不確実性を考慮した評価が必要である。

*Brier Skill Score（BSS）: Brier Score（BS）は、確率予測の誤差を測る指標（小さいほど良い）で、Brier Skill Score（BSS）は、BS を基準モデルと比較し、予測の改善度を示すスコアである。BSS>0 ならモデルは有益、BSS<0 なら基準モデルより劣る。この指標は、単なる誤差評価ではなく、モデルの有効性を定量的に評価できる。

Y. El-Ouartassy (2022) 16]は、核関連事故時の健康および環境影響を予測するための大気拡散モデル（ADM）と、気象予測アンサンブルの組み合わせを検討した。フランスの気象機関 Météo-France が提供するメソスケール気象アンサンブル「AROME-EPS」を用い、フランス放射線防護・原子力安全研究所（IRSN）のガウスパフモデル「pX」と組み合わせた。当該研究では、Orano La Hague 再処理工場から定期的に放出される Kr-85 のデータを基に、20km 圏内での拡散予測を評価した。具体的には、2 か月間にわたる Kr-85 の空気中濃度連続測定データを用い、アンサンブルシミュレーションの精度を ROC 曲線*や Peirce スキルスコア（PSS）*などの確率的指標で評価した。その結果として、決定論的予測に比べ、アンサンブル予測が観測されたピーク値をより正確に予測できることが確認された。

当該研究の主たる成果としては、複数のシミュレーションを用いることで、不確実性を考慮した現実的な予測が可能となり、意思決定プロセスへの提供情報の精度が向上したと判断される。なお、アンサンブルメンバーのうち 3 つ以上が閾値を超える場合、イベントの「発生する可能性が高い」と判断する閾値ルールが

提案された。また、AROME-EPS の気象予測精度は、IRSN および Météo-France の観測データと整合したことが確認された。

しかし、アンサンブル手法は複数のシナリオ計算が必要であり、計算資源の確保が課題であることが示唆される。また、拡散シミュレーションにおける大気安定度の計算方法やガウス分散標準偏差の感度が結果に影響し、本研究は特定地域（北コタンタン半島）に焦点を当てているため、他地域での適用には追加検証が必要であることも指摘された。

*ROC 曲線：ROC(相対動作特性：relative operating characteristic）曲線は、天気予報の場合の降水の有無など、二値予報のさまざまなしきい値に対して、「起こる」と予報した割合と、「起こらない」としたときにも誤って起こると予報してしまう割合をグラフで可視化したもので、グラフ上では、縦軸に「捕捉率（真陽性率)」、横軸に「誤報率（偽陽性率)」をとり、しきい値を変化させて得られる点を結んで曲線を描く。曲線が左上に張り付くほど予報精度が高くなり、曲線の下の面積（AUC:Area Under the Curve）が大きいほど、総合的に性能が優れていると評価される。気象分野をはじめ、医療や機械学習など多様な領域で、二値分類の性能を比較・評価するために用いられる。

*Peirce スキルスコア（PSS）：観測と二択（Yes/No など）による予報を比較したとき、予報がどの程度有効かを示す指標である。

E. Gorokhovsky (2023) 17]らは、観測データの誤った時間情報や未知の時間オフセット（タイムエラー）がデータ同化（DA）の性能に与える影響に対処するため、アンサンブル・カルマンフィルタ（EnKF）アルゴリズムを拡張した。タイムエラーは、モデルの先行状態に偏りをもたらし、同化プロセス全体の精度を低下させる。DA は、予測モデルと観測値を統合する技術であり、気象科学や海洋学など、動的システムの予測に広く使用されている。提案手法では、時間オフセットの影響を緩和するためのアルゴリズムを開発し、誤った時間にマッピングされた観測データの影響を最小化した。主たる成果としては、タイムエラーが存在する場合でも、EnKF を利用した DA の精度を向上させる新たなアプローチを実証し、多種多様な動的システムに対してタイムエラーを補正する汎用的な方法を考案したことが挙げられる。さらに、気象予測や海洋モデリングなど、タイムエラーが頻発する科学分野において実用性が示唆された。

その一方、時間オフセットを補正するプロセスが追加されることで、従来の EnKF に比べ計算負荷が高まる可能性があると考えられる。また、高精度な観測データが、同化の成功に不可欠であり、データ品質が重要な要因となることが指摘された。さらに、提案手法がどの程度汎用的かを評価するため、さらなるケース

スタディが必要であることが示された。

当該研究の成果としては、タイムエラーが存在する場合でも、DA の精度を向上させる新たなアプローチが実証され、提案手法は多種多様な動的システムに対してタイムエラーを補正する汎用的な方法を提供したが、計算負荷の増加や観測データの精度依存、他のモデルへの適用性といった課題が残されている。

○本項（１）のまとめ

まず、核関連事故時の影響評価を目的とした活用例が挙げられる。**D.Q. Zheng (2009) 9]**らは、事故の影響評価を目的とした大気拡散モデルにおいて、EnKF を使用し、モデル状態および不確実なパラメータ（放出率、風向、乱流強度）を同時に推定する方法を構築した。**A.R. Jones (2011) 10]**は、気象予報のアンサンブルデータ ECMWF を用いて、核関連事故や化学物質漏洩などの緊急時対応における大気拡散予測の不確実性に関して、気象条件の不確実性が拡散予測に与える影響に着目して評価を行った。**M. Kadowaki (2017) 11]**

らは、気象データの改善によってシミュレーションの再現性を高めることを目的として、福島第一原発事故における放射性物質の大気拡散シミュレーションの精度を向上させるため、4 次元変分データ同化法（4D-Var）を採用した。**K. Li (2021) 13]**らは、核関連事故時の放射性物質拡散モデルの精度向上を目的とし、ラグランジュパフモデルを基にした簡便なデータ同化（DA）手法を提案した。**Y. El-Ouartassy (2022) 16]**は、核関連事故時の健康および環境影響を予測するための大気拡散モデル（ADM）と、気象予測アンサンブルの組み合わせを検討した。

また **E. Bach (2022) 14]**らは、異なるモデルの誤差を動的に調整しながらデータ同化と予測を行う「マルチモデル・アンサンブル・カルマンフィルタ（MM-EnKF)」を開発し、Lorenz96 モデルを用いて数値実験を行った。一方、一般の大気拡散シミュレーションにおいても、気象データの不確実性を減らすために、アンサンブル手法やデータ同化が用いられている。**C.L. Defforge (2019) 12]**らは、大気中の物質拡散をシミュレーションする CFD モデルについて、複雑な地形が存在する局所的な領域での風況場シミュレーションの精度向上にデータ同化技術を適用した。**S. Leadbetter (2024) 15]**らは、アンサンブル気象データを用いた大気拡散シミュレーションの価値を評価し、決定論的シミュレーションと比較し、前者が全体的に優れた予測精度を持ち、特に時間経過とともにスキルスコアが向上することを示した。**E. Gorokhovsky (2023) 17]**らは、観測データの誤った時間情報や未知の時間オフセット（タイムエラー）がデータ同化（DA）の性能に与える影響に対処するため、アンサンブル・カルマンフィルタ（EnKF）アルゴリズムを拡張した。

（2）数値気象予報とメソスケールモデリング

前節でも触れたように高精度の放射性物質大気拡散予測モデルでは、広域の気象条件などに大きな影響を受けるため、これに対応するメソスケールの気象モデルとの連携も必要となる。

C.V. Srinivas (2006) 18]らは、インド・カルパッカムの核関連施設における緊急対応のために、並列コンピューティングを活用してメソスケールの気象および大気拡散予測を行うシステムを開発・実装した。システムの構成要素として、MM5 気象モデル（階層型グリッドを用いたメソスケール気象モデル）と FLEXPART 拡散モデル（ランダムウォーク粒子拡散モデルで、放射性プルームの挙動を予測）が採用された。

当該システムは、16 ノードのデュアル Xeon 分散メモリクラスターで運用され、48 時間の気象および拡散予測を提供する。三重ネストドメインの MM5 モデルでは、24 時間の気象予測に約 4 時間の計算時間を要するが、モデルの初期条件と境界条件には、インド・NCMRWF および米国・NCEP が提供するデータを利用し、特に NCEP データを使用した場合には、空間的および時間的解像度の高さにより降雨予測精度が向上したことを示している。

当該研究の主な成果としては、放射性物質の拡散予測を迅速に提供し、事故時の緊急対応能力が向上したことが挙げられる。また、並列コンピューティングを利用することで大規模シミュレーションを短時間で実現し、高解像度の NCEP データを用いることで降水量などの気象予測精度が向上した。

その一方、当該計算には、高性能なコンピューティング環境が必要であり、小規模施設での実装には制約があることが示唆された。さらに、初期条件や境界条件データの品質にモデルの精度が依存すること、現行の拡散モデルには、さらに現実的なシナリオを扱う機能が求められることが課題として挙げられた。

当該研究の成果としては、並列コンピューティングを活用した気象および大気拡散予測システムの開発と実装に成功した他、緊急対応能力の向上と高解像度データの利点が確認されたが、計算資源の要求やデータ依存性、拡散モデルの改善余地といった課題が残されている。

B. Yan-shan (2010) 19]らは、放射性核種の拡散とその可視化について検討し、関連部門の意思決定を支援するための新たな手法を提案し、ラグランジュメソスケール大気拡散パフモデル RIMPUFF を基盤として、放射性核種の特性を統合した改良モデルを開発した。改良内容としては、風況場、乾性沈着、放射性核種の崩壊プロセスを統合し、AERMOD モデルの高山地形処理方法を採用して複雑な地形と環境条件への対応を強化することで、境界グリッドの細分化による濃度計算の効率化を実現した。

主な成果としては、AERMOD の高山処理手法を取り入れたことで、山岳地帯や複雑な地形での拡散モデルの精度が向上し、境界グリッドの細分化手法により、各受容点での濃度計算時間を大幅に短縮した点が挙げられる。また、風況場、乾性沈着、放射性崩壊を包括的に考慮した新しい統合的な拡散モデルを構築している。

しかし、提案モデルの適用可能性を広げるためには、より多様な実地データとの比較が必要であり、高解像度な地形や気象データを扱うための計算資源が必要であることが課題として挙げられる。また、提案された可視化手法のさらなる改良により、結果の解釈性を向上させる余地があることも示唆された。

B.E.J. Bodmann (2012) 20]らは、原子力発電所からの放射性物質の拡散を解析的にモデル化し、緊急時の対応や環境影響の評価に役立つ手法を提案した。モデル構築において、3 次元の移流拡散方程式を基礎とし、観測データから得られる平均風速場を用いてモデルを構築した。気象パラメータは、メソスケールの Weather Research and Forecasting（WRF）プラットフォームを用いて決定した。具体的には、拡散方程式を、乱流フラックスが渦粘性係数により平均濃度勾配と関係づけられるという K 理論*に基づく解析的手法で解き、乱流状態での放射性物質拡散をシミュレーションした。これは、原子炉事故のシナリオや関連する緊急時対応にとって重要な要素となる。

当該研究の主な成果としては、放射性物質の拡散挙動を解析的に記述する新たな手法を提示し、迅速な予測が可能となった点が挙げられる。また、WRF プラットフォームを利用した気象パラメータ設定により、実環境に基づく高精度なシミュレーションを実現し、事故時に迅速かつ正確な拡散予測を提供することで、緊急時の意思決定を支援する可能性が示された。

その一方、提案されたモデルは、平均風速場に依存しており、風速の急激な変動や局地的な乱流の影響を完全には再現できない可能性があることが課題として挙げられた。また、WRF プラットフォームの品質によりモデルの精度が大きく影響されるため、気象データへの依存性が指摘された。さらに方程式の解法が近似的なため、複雑な地形や異常気象条件下での精度検証が必要であることが示唆された。

*K 理論（または 渦粘性理論）: 乱流による物質輸送（特に拡散）のモデル化に使用される理論で、乱流フラックス（乱流による物質の移動量）を平均濃度勾配と関係づける。特に、大気や海洋、工業プロセスなどで物質の輸送を予測する際に重要な理論となる。

Y. Huang (2023) 21]らは、浮体式原子力発電所（Offshore Floating Nuclear Power Plants）における冷却材喪失事故（LOCA）の際に放出される大気中放射性核種の拡散挙動を、CALPUFF モデルを用いてシミュレーションした。放射性核種である I-131 の濃度分布を解析し、航行中と停泊中の条件での違いを比較した。また、風速、雲量、気温、気圧という 4 つの気象パラメータが拡散に与える影響を感度解析で評価した。

当該研究の主な成果としては、風向が放射性核種の拡散方向を決定し、拡散距離が増加するほど濃度が減少することを確認した点が挙げられる。また、航行中の条件では、放射性核種の拡散範囲が停泊中に比べて広がり、影響範囲が大きくなることが示された。さらに、風速が拡散挙動に最も影響を与える主要な要因であり、次いで雲量、気温、気圧が拡散に寄与することが明らかとなった。当該研究は、海上浮体式原子力発

電所における核関連事故対応の理論的根拠を提供し、迅速な緊急対応計画の策定に寄与する可能性が示されている。

その一方、本研究は I-131 を対象としており、他の放射性核種や多様な事故シナリオに適用するには追加の検証が必要であることが課題として挙げられた。また、拡散予測の精度は気象データの品質に依存しており、特に海上での気象観測網の整備が課題となることが示唆された。さらに、高精度なモデルをリアルタイムで運用するためには、計算効率の向上が求められることが指摘された。

Z. Ma (2024) 22]らは、重大な原子力事故時の放射性物質の大気中輸送を数値的に解析し、異なる気象条件が拡散挙動に及ぼす影響を評価した。当該研究では、気象条件と放射性物質の輸送・拡散特性とのカップリング効果を調査し､環境への影響を評価するための枠組みを提供した｡使用手法としては､気象モデルに WRF（Weather Research and Forecast）モデルを用い、季節ごとの気象パラメータを取得した。次に、輸送モデルとしてメソスケール数値モデルを使用し、放射性物質の輸送と沈着挙動をシミュレーションした。また、データ同化として 4 次元データ同化（FDDA）技術を適用し、気象パラメータおよび輸送挙動への影響を評価した。

当該研究の成果としては、気象条件の影響評価において、季節ごとに異なる気象条件が放射性物質の拡散挙動に与える影響を明確化し、特に風向や降雨パターンが沈着の分布に大きな影響を及ぼすことを確認した点が挙げられる。また、データ同化の有効性については、FDDA 技術を用いることで、気象パラメータと拡散モデルの一致性が向上し、予測精度が改善したことが示された。さらに、緊急時に対し、本研究は、原子力事故時の影響評価および対策計画に有益な情報を提供可能と評価できる。

その一方、課題としては、モデルの適用範囲が特定の気象条件や地形で評価されているため、他の条件での普遍性の検証が必要であることが挙げられる。また、データ取得の依存性については、高品質な気象データがモデル精度に大きく影響するため、データ取得のインフラが課題となることが示された。さらに、計算コストに関しては、メソスケールモデルおよび FDDA 技術の適用には、高い計算負荷が伴うため、実時間適用の効率化が必要であると結論づけられた。

○本項（２）のまとめ

C.V. Srinivas (2006) 18]らは、インドの核関連施設における緊急時対応のために、並列コンピューティングを活用してメソスケールの気象および大気拡散予測を行うシステムを開発・実装した。**B. Yan-shan (2010) 19]**らは、放射性核種の拡散とその可視化について検討し、ラグランジュメソスケール大気拡散パフモデル RIMPUFF を基盤として、放射性核種の特性を統合した改良モデルを開発した。**B.E.J. Bodmann (2012) 20]**らは、原子力発電所からの放射性物質の拡散を K 理論に基づく解析的手法でモデル化し、緊急時の対応や環境影響の評価に役立つ手法を提案した。**Y. Huang (2023) 21]**らは、浮体式原子力発電所における冷却材喪失事故の際に放出される大気中放射性核種の拡散挙動に対し、CALPUFF モデルを用いてシミュレーションした。**Z. Ma (2024) 22]**らは、重大な原子力事故時の放射性物質の大気中輸送について、４次元データ同化（FDDA）技術を適用し、気象パラメータおよび輸送挙動への影響を評価した。

（３）汚染物質（放射性物質）の大気拡散、LES による高精度モデル

本項では、放射性物質の高精度大気拡散予測モデルに関し、LES によるモデルを取り上げた。LES は気象解析あるいは風況場のみに使われるケース、拡散はラグランジュ粒子を用いるケース、移流拡散も LES で解

くケース等、いくつかの組み合わせがある。

D.M. Moreira (2010) 23]らは、トリチウムの大気中拡散を数値的にシミュレーションするため、LES から生成された微気象パラメータを使用し、積分変換技術（Generalised Integral Laplace Transform Technique: GILTT）*と多層輸送モデル（Advection-Diffusion Multilayer Method: ADMM）*を比較検討した。モデル設定としては、まず MesoNH モデルを使用して不規則な地形における風速プロファイルを取得し、ブラジルのアングラ・ドス・レイスで実施されたフィールド実験データを使用してシミュレーション結果を検証した。その結果として、まず GILTT と ADMM の比較では、両手法が放射性物質の大気中拡散を適切にシミュレートできることを確認し、特に GILTT は複雑な気象条件下でモデル精度が向上したことを確認した。また、LES の有効性については、LES から得られた微気象パラメータを用いることで、シミュレーション結果が現実の観測データと良好に一致したことが示された。さらに、地形の影響を考慮することで、不規則な地形における風プロファイルを正確に再現し、実際の拡散挙動に近い結果が提供できている。

その一方、課題としては、GILTT や ADMM を高解像度で運用するには、計算資源が大きな制約となることが挙げられる。また、適用範囲の限定については、本研究が特定の実験データセットに基づいているため、他の地域や条件への適用可能性についてさらなる検証が必要である。さらに、気象データの品質依存に関し、モデル精度が LES から得られる微気象パラメータの品質に大きく依存することが示された。

注）GILTT*、ADMM*とも時間項を省いた定常型の移流拡散方程式を基に定式化している。

V. Fuka (2012) 24]らは、チェコ共和国の国立放射線防護研究所（NRPI）が実施した放射性物質拡散装置（RDD）を用いた実験を再現するために、新しいミクロスケールモデル「Charles University Large Eddy Microscale Model (CLMM)」を使用したシミュレーションを実施し、建物周囲の連続的なスカラー拡散に関する風洞データを用いて検証した結果を報告した。実験とモデルでは、まず実験において RDD を使用して放射性粒子の大気中拡散を観測し、次に CLMM を適用して放射性粒子の沈着や拡散の挙動を再現した。

当該研究の主たる知見としては、まず表面汚染の結果が粒子サイズ分布に非常に敏感であり、大きなばらつきが観測されたことが挙げられる。また、モデルの妥当性確認では、CLMM が実験データと一致する結果を示し、その信頼性が検証された。また、粒子サイズ分布の影響評価においては、粒子サイズの違いが拡散や沈着挙動に与える影響を定量的に評価した。さらに、実験データの再現性については、NRPI の RDD 実験を数値的に再現し、放射性粒子拡散シナリオの理解を深めた。

その一方、課題としては、まず粒子サイズのばらつきが大きいため、結果の一貫性を確保するためには追加の研究が必要であることが示された。また、複雑地形への適用については、本研究が特定の条件下での実験に基づいているため、複雑な地形や異なる気象条件への適用可能性についてさらなる検証が必要であることが挙げられる。さらに、モデルの計算コストに関しては、LES をベースとするモデルには高い計算資源が必要であり、効率化が課題であることが示された。

L. Vervecken (2015) 25]らは、大気中における近距離の放射性ガスの拡散挙動に対し、LES を用いて解析し、放射線線量率の動的評価を行った。当該研究では、瞬時的な乱流混合プロセスが線量率の変動に及ぼす影響を評価するため、LES に基づく拡散シミュレーションとポイントカーネル法およびビルドアップファクターを使用したγ線量モデルを結合した。

対象物質としては、高エネルギーγ線を放出する Ar-41 と低エネルギーγ線を放出する Xe-133 を選定し、異なる高さでの放出をシミュレーションした(26]参照)。評価手法としては、地表レベルでの線量率の時間的変動を異なる時間平均手法を用いて分析した。

研究成果としては、乱流変動の影響評価に LES を用いることで、風況場の乱流変動が短期間の線量推定に大きな影響を及ぼすことが明らかにされた。また、短期線量の過小評価については、長期間の線量測定データに基づく推定が短期間の暴露時に最大 4 倍まで過小評価する可能性があることが示された。さらに、異なる放射性核種や放出条件に対する適応性が実証され、現実の緊急時対応に役立つ柔軟性を持つことが示唆された。

その一方、課題としては、まず計算負荷の増加があり、LES モデルの精度向上に伴う高い計算負荷がリアルタイム応用の制約となることが挙げられる。また、時間平均手法の選定については、線量推定の信頼性を高めるため、適切な時間平均方法をさらに検討する必要があることが示された。また、長期間の影響評価のためには、さらなる研究が必要である。

L. Vervecken (2015) 26]らは、核関連の緊急時対応における外部被ばく線量評価を高精度化するため、大気境界層における放射性汚染物質の拡散を解析する LES モデルを開発した。当該モデルでは、拡散濃度を移流拡散問題として定式化し、速度と乱流粘性の瞬時プロファイルを LES によって生成している。線量評価においては、β線量を、局所濃度を用いて算出し、γ線量はポイントカーネル法とビルドアップファクター*を組み合わせて計算している。対象物質としては、安定性が低い同位体 Ar-41 および Xe-133 を使用し、中立大気条件下の野外における放出をモデル化した。

当該研究結果からは、一定の汚染物質放出率であっても時間的に大きく変動するβ線量およびγ線量が観測された。また、近距離でのγ線量評価は外部β線量率の代表性を示さないことが指摘された。当該研究の成果としては、まず動的線量評価の実現により、時間的に変動する外部被ばく線量を評価する新たな枠組みが提供されたことが挙げられる。次に、LES の活用により大気境界層内での詳細な濃度分布と線量評価が可能となった。また、同位体特性の比較においては Ar-41 および Xe-133 の特性に基づく放射線線量の挙動を詳細に分析した点が挙げられる。

その一方、課題としては、まずγ線量評価には限界があり、近距離においてβ線量の適切な指標とはならないため追加のモデル改善が必要であることが示された点が挙げられる。また、計算負荷の問題として LES を基盤とする計算には高い計算資源が必要であり、リアルタイム対応には課題があることが挙げられた。さらに、他条件での適用性については本研究が中性大気条件に限定されており、異なる気象条件下での適用にはさらなる検証が必要であると考えられる。

*ポイントカーネル法とビルドアップファクター：日本語文献：渡邊正敏(2009)40)を参照。線量計算に用いられる手法の一つで、点減衰核積分法とも呼ばれる。ビルドアップファクターは、線源からの放射線のうち、直接線（無衝突線）に対する散乱線を含めた全放射線量の比で散乱線の寄与割合を示す。

H. Nakayama (2015) 27]らは、都市域や複雑地形における大気中の放射性物質や汚染物質の拡散を高精度で予測するため、ラージ・エディ・シミュレーション（LES）に基づく局所域高分解能大気拡散モデル「LOHDIM-LES」の開発を報告した。当該研究の背景としては、従来の大気拡散モデルは都市部の建物や複雑な地形による微細な乱流構造を十分に再現できず、放射性物質や汚染物質の拡散予測に限界があったことが挙げられる。当該研究では、LES 手法を用いて、都市域や複雑地形における乱流構造を高精度で再現し、放射性物質や汚染物質の拡散挙動を詳細に予測するモデルを開発することを目標とした。

採用した手法としては、まずモデルの構築で、LOHDIM-LES を LES 手法に基づき、ナビエ–ストークス方程式やスカラー輸送方程式を数値的に解き乱流構造や物質拡散をシミュレートする。さらに、建物や地形の影響を考慮するため、境界埋め込み法（immerged boundary method）を導入し、高解像度の格子（数メ

ートルオーダー）で計算を行う。次に、その検証及び適用において、モデルの精度検証のため、風洞実験や実測データと比較を行い、都市域や複雑地形における風の流れや物質拡散の再現性を評価した。さらに、都市部での放射性物質の拡散シナリオを設定し、LOHDIM-LES の適用性を検証した。

当該研究の主な結果としては、乱流構造の再現性に対し、LOHDIM-LES が都市域や複雑地形における微細な乱流構造を高精度で再現できることが確認された。これにより、建物間の風の流れや渦の形成など従来モデルでは表現が難しかった現象を詳細にシミュレート可能となったことが挙げられる。次に物質拡散予測の精度向上では、LES 手法の導入により放射性物質や汚染物質の拡散挙動を詳細に予測でき、特に高濃度汚染域の形成やその時間変化を精度良く再現できることが示された。

当該研究の意義としては、高精度 LES モデルの開発により、都市域や複雑地形における大気拡散予測の精度が向上し、緊急時の被ばく線量評価や防災計画策定に貢献できるツールが提供されたことが挙げられる。

その一方、課題としては、まず計算コストの削減が必要であり、高解像度でのシミュレーションは計算負荷が大きく、計算効率の向上や高速化手法の導入が今後の課題として挙げられる。また、モデルの適用範囲を広げるため、さらなる検証や改良が必要であることも示された。

P. Mlakar (2019) 28]らは、原子力発電所での事故時における放射性物質の大気拡散を予測し、被ばく線量を計算する統合システムの開発を提案した。当該システムは、自動化されたリアルタイムの計測およびモデリング機能を備え、事故発生時の即時対応を想定している。

当該システムの主な機能としては、まず放射性物質の放出シナリオに基づく人口線量の計算が行えることが挙げられる。また、常時利用可能な「正規化された結果」を生成し、事故発生時に迅速な対応を支援するための基盤が整えられている。システムの運用については、スロベニアのクルスコ原子力発電所で実装され、国際原子力機関（IAEA）の定期的な評価および緊急時訓練で高い評価を得ている。

当該研究の具体的成果としては、まず自動化とリアルタイム処理において高度に自動化されたシステムにより、通常運転時でもリアルタイムで「最新」の結果が生成され、事故発生時の緊急計算を不要にしたことが挙げられる。次に、高い可用性については、過去 2 年間の運用データで、30 分間隔の計測データが 96%以上、予測データとして 91%以上が利用可能であることが確認された。さらに緊急対応の改善では、緊急事態時における迅速かつ適切な保護措置の決定を支援するための基盤を提供したことが示された。

その一方、課題としては、モデルの一般化が必要であり、システムが特定の原子力発電所（クルスコ原発）向けに設計されているため、他の施設や地域への適用可能性にはさらなる検証が必要であることが挙げられる。また、計算負荷の増大については、放射性物質の多様な放出シナリオを扱うため計算効率とリソース管理が課題であることが示された。さらに、依存データの質と信頼性に関して、モデルの精度が高品質な気象データや放出データに大きく依存することが明らかとなっている。

P. Armand (2021) 29]らは、化学・生物・放射線・核・爆発性物質（CBRN-E）を含む危険物質の大気拡散に対応するため、新しい 3D モデルを基盤としたシステム「EMERGENCIES」を開発した。当該システムは、多スケール気象予測とラグランジュ大気輸送・拡散（AT&D）モデルを組み合わせ、従来の意思決定支援システム（DSS）の限界を克服することを目的としている。

当該システムの特徴としては、まず微小スケールからメソスケールまで対応し、都市環境（パリ市内および郊外）を対象とした広域シミュレーションが可能であることが挙げられる。また、実際の緊急事態に対応するため、短時間で精度の高いシミュレーションを実現し、公共施設内外での有害物質放出を想定したシナリオをシミュレーションし、現場対応能力を検証している。

当該研究の具体的成果としては、まず高解像度シミュレーションで微小スケールでの詳細な環境情報を考慮し、従来モデルでは不十分だった局所的な精度を向上させたことが挙げられる。次に、リアルタイム性の実現において、大規模ながら手頃な計算リソースを活用し、迅速な緊急対応を支援可能なことが示された。また、汎用性の向上では、CBRN-E リリースに対応したシナリオの柔軟なモデリングが可能で、幅広い応用性が確認されている。

一方、課題としては、まず計算リソースの問題があり、高度なシミュレーションには、依然として大規模な計算資源が必要であることが示された。また、モデルの精度が気象データや地形情報の品質に大きく依存することが挙げられる。さらに、実運用の展開では、緊急時における実運用の効率化には、さらなるユーザーインターフェースやシステム統合の改善が必要であることが示された。

H. Nakayama (2021) 30]らは、原子力施設からの放射性物質の事故時放出に対する安全性評価や緊急時対応を目的に、局所スケールでの大気拡散予測システムを開発した。当該システムは、LES データベースと現地気象観測を組み合わせることで、建物や気象条件による乱流の影響を考慮した 3 次元プルーム分布を正確に予測するものである。

まず具体的方法として、LES データベースは、平均風向ごとに高解像度で乱流場を事前計算し、風向のクラス間隔を 10°と設定した。次に、現地気象データ（Doppler LiDAR など）を収集し、LES データと統合した。さらに、ラグランジュ拡散モデルを用いて、ミストプルームの 3 次元分布を計算した。開発システムの検証としては、日本原子力研究開発機構で行われたミスト噴霧システム（mist-spraying system）によるプルーム放出実験のデジタルカメラ画像と比較し、モデルの予測精度を確認している。

当該研究の成果としては、まず、高精度な予測において、LES データベースと現地観測を組み合わせることで建物構造や局所気象条件による影響を考慮した高精度なプルーム予測を実現できたことが挙げられる。また、実験との一致に対しては、実験で得られたミストプルームの輸送方向がシミュレーション結果と一致し、モデルの妥当性を確認できている。さらに、応用可能性の拡大においては、提案された枠組みが他の核施設や都市環境における局所スケールでの拡散シミュレーションにも適用可能であることが示されている。

一方、課題としては、まず計算負荷の削減が必要であり、LES データベースの構築には、高い計算コストが伴うため、さらなる効率化が求められる。また、汎用性の向上に関しては、他地域や異なる気象条件への適用に対し、追加のモデル調整と検証が必要であることが示された点も挙げられる。さらに、リアルタイム対応については、現地観測とモデル統合のリアルタイム化が、緊急時対応を実現させるため、重要な課題であることが挙げられた。

S. Zhuang (2022) 31]らは、福島第一原子力発電所事故後の放射性物質の局所スケールでの大気拡散モデリングを対象として、風況診断モデル SWIFT と放射性物質輸送モデル RIMPUFF を組み合わせて統合システムを開発した。当該システムでは、粗解像度の風況場データを欧州中期予報センター（ECMWF）の気象データを使用し、WRF モデルを用いている。

当該研究にて用いた手法としては、まず SWIFT で診断した風況場を利用し、RIMPUFF を駆動し、放射性物質の拡散挙動とガンマ線量率を計算する。検証データとしては、現地の気象観測データや福島第一原発周辺のガンマ線量率モニタリングデータ、浮遊粒子状物質の観測データを用いてモデルの検証を実施した。

その成果として、まず風況場の再現性では、ECMWF の 1km 解像度データを用いることで、SWIFT が現地観測データに基づく風況場を概ね再現し、特に、特定のタイミングで風向を良好にシミュレートし、線量率ピークの再現に貢献したことが示された。また、線量率シミュレーションの妥当性において、モデルの線

量率予測が Naraha 観測点で観測データと比較的良く一致し、Fractional Bias（FB）が 0.3 以下、Normalized Mean Squared Error（NMSE）が 6 以下と評価されている。さらに、プルームパターンの解析では、拡散挙動の視覚化により放射性物質の輸送プロセスが明確化されている。

一方、課題としては、まず線量率の過小評価があり、SWIFT による風速の過大評価が一因で、RIMPUFF が福島第一原発周辺で線量率を過小評価したことが示された。また、観測地点間の精度差については、Naraha 地点では良好な一致を示したものの、Futaba 地点での一致は、比較的低いことが挙げられる。また、さらなる改善の必要性については、モデルの適用性を拡大し、異なる気象条件や地形への対応力を向上させる必要があることが示された。

V. Artemchuk (2023) 32]らは、核テロ行為や核施設への軍事攻撃など核緊急時における大気拡散モデリングと線量予測における不確実性の課題に取り組み、複数のソフトウェアや意思決定支援システムが異なる結果を生成する問題に焦点を当て、不確実性がどのようにして計算結果に影響を及ぼすかを明らかにし、不確実性の要因とその緩和手段を明確化することで、大気拡散モデリングと線量予測の精度向上に向けた道筋を示した。

以上、当該研究の目的として、緊急時の対応計画や判断における大気拡散モデリングおよび線量予測の結果のばらつきを解消するため、不確実性の要因を特定することが挙げられた。また、入力データに起因する結果の不確実性を解析し、主な影響要因をリスト化することも挙げられた。

用いた手法としては、まず世界中で利用されているさまざまなモデリングツール（例:JRODOS システム）の出力結果を比較し、緊急事態発生時の放射線モニタリング結果の同化や戦闘状況への対応について検討した。

その結果としては、まずモデリングツールや意思決定支援システム間の結果の不一致は、主に入力データの不確実性に起因することが示された。また、不確実性に寄与する要因には、緊急時の放出源スペクトルの記述やデータ取得のタイミングが含まれることが明らかにされた。一方、放射線モニタリング結果を効果的に同化することで、不確実性を低減できる可能性が示唆された。

当該研究の成果をまとめると、まず不確実性要因の特定では、緊急時における意思決定支援システム間の結果の相違を生む主要因を特定したことが挙げられる。また、JRODOS システムの評価において、原子力発電所の緊急事態を想定した放出源の記述オプションを検討し、実践的示唆としては、放射線モニタリング結果の同化を通じた不確実性の低減や、状況への対応方針に関する実践的な知見を提供している。

一方、課題としては、まず不確実性の解消の困難さが挙げられ、入力データのばらつきや計算モデル自体の制約により、完全な精度保証は困難であり、不確実性を管理可能な範囲に収めるための新たなアプローチが必要であることが示された。また、システム間の整合性について、複数のモデリングツールの結果を統一的に評価するための標準化が求められることが明らかにされた。

S. Zhuang (2023) 33]らは、福島第一原子力発電所事故における放射性核種の局所的な大気輸送挙動を解明するため、高解像度（200m）でのクロススケール解析を行い、複数の気象モデルと異なる条件を用いたシミュレーションを通じて、局所的な輸送パターンを詳細に解析した。当該研究では、福島事故における放射性物質の局所輸送挙動を明らかにし、核関連の緊急対応の実用化に向けた新たな知見の提供を意図している。

当該研究の背景と目的としては、放射性核種の局所輸送挙動の理解は、核関連の緊急時対応に不可欠であり、福島事故における複雑な気象条件と 0～20km のスケールでの輸送挙動に焦点を当てた研究が少ないことが挙げられる。

採用した手法としては、200m の解像度で気象データを生成し、4 種類の風況データを比較した。また、福島第一原発周辺の局所的気象条件や異なるモデル間での挙動の差異を評価し、RIMPUFF ラグランジュパフモデルと SPRAY 粒子モデルを使用した。

主な結果としては、各モデルが異なる輸送パターンを示し、複雑な地形や局所的な気象条件が放射性核種輸送に与える影響を明らかにしたことが挙げられる。また、特定の条件下では、放射性物質が局所的に集中する挙動が観察され、緊急時の対策に影響を与える知見が提供された。

当該研究の成果をまとめると、まず高解像度解析の導入により、200m の解像度で放射性核種の輸送パターンの詳細を捕捉し、局所気象条件が輸送に与える影響を明確化したことが挙げられる。また、気象モデルの評価では、異なる気象モデルを比較することで輸送予測における不確実性を軽減する手法が提案された。さらに、緊急時対応に対し、局所的な輸送挙動に関する知見が、福島事故のような状況での迅速な意思決定支援に寄与できることを示した点が挙げられる。

一方、課題としては、まずモデル間の結果のばらつきがあり、異なる気象モデル間での輸送パターンの不一致が確認され、さらなるモデル統合や精度向上が必要であることが示された。また、クロススケール解析の拡張については、本研究が 0～20km の範囲に焦点を当てたが、それ以上のスケールでの輸送挙動の分析も重要であることが挙げられる。さらに、実運用への適用性に関しては、緊急時の計算負荷やリアルタイム性を考慮したシステムへの適用には、さらなる研究が必要であることが明らかになった。

○本項（３）のまとめ

D.M. Moreira (2010) 23]らは、トリチウムの大気中拡散について、LES による MesoNH モデルを用いて、不規則な地形における風速プロファイルを取得し、定常型の移流拡散方程式に基づく GILTT、ADMM によるシミュレーションを行った。**V. Fuka (2012) 24]**らは、チェコ共和国の国立放射線防護研究所（NRPI）が実施した放射性物質拡散装置（RDD）を用いた実験を再現するために、LES によるミクロスケールモデル「Charles University Large Eddy Microscale Model (CLMM)」を使用し、放射性粒子の沈着や拡散の挙動を再現して風洞データを用いて検証した。**L. Vervecken (2015) 25]**らは、核関連の緊急時対応における外部被ばく線量評価を高精度化するため、LES による放射性汚染物質拡散シミュレーションを行い、時間的に変動する外部被ばく線量を評価するシステムを提供した。さらに **L. Vervecken (2015) 26]**らは、近距離における放射性ガスの拡散挙動を LES により解析して、放射線線量率の動的評価を行った。**H. Nakayama (2015) 27]**らは、都市域や複雑地形における大気中の放射性物質や汚染物質の拡散を高精度で予測するため、LES による局所域高分解能大気拡散モデル「LOHDIM-LES」の開発を報告した。**P. Mlakar (2019) 28]**らは、原子力発電所での事故時における放射性物質の大気拡散を予測し、自動化されたリアルタイムの計測およびモデリング機能を備え、被ばく線量を計算する統合システムの開発を提案した。**P. Armand (2021) 29]**らは、多スケール気象予測とラグランジュ大気輸送・拡散（AT&D）モデルを組み合わせて、化学・生物・放射線・核・爆発性物質（CBRN-E）を含む危険物質の大気拡散に対応するシステム「EMERGENCIES」を開発した。**H. Nakayama (2021) 30]**らは、原子力施設からの放射性物質の事故時放出に対する緊急時対応を意図して、平均風向ごとに高解像度で乱流場を事前計算した LES データベースと現地気象観測を組み合わせ、建物や気象条件による乱流の影響を考慮した高精度なプルーム予測を実現した。**S. Zhuang (2022) 31]**らは、福島第一原子力発電所事故後の放射性物質の局所スケールでの大気拡散モデリングを対象として、風況診断モデル SWIFT と放射性物質輸送モデル RIMPUFF を組み合わせて統合システムを開発した。**V. Artemchuk**

(2023) 32]らは、JRODOS システムなど様々なモデリングツールの出力結果を比較し、緊急時の意思決定支援システムの不確実性要因を特定した。S. Zhuang (2023) 33]らは、福島第一原子力発電所事故における放射性核種の局所的な大気輸送挙動を解明するため、高解像度（200m）での解析を行い、複数の気象モデルと異なる条件を用いたシミュレーションを通じて、局所的な輸送パターンを詳細に解析し、拡散予測における不確実性を軽減する手法を提案した。

（4）日本原子力研究開発機構による高精度局所大気拡散モデル LOHDIM-LES の発展

本項では、日本原子力研究開発機構が開発した高精度局所大気拡散モデルの開発における進展状況を報告した H. Nakayama (2009) 34]~(2021) 39](Part.1～Part.6）らによる、高精度放射性物質拡散予測システム LOHDIM-LES の開発をレビューする（前項では、関連する研究分野の発展の経緯において、その一部の文献のみ簡潔にレビュー)。

H. Nakayama (2009) 34] (Part.1)らは、詳細な乱流の再現が可能な局所スケールでの高精度な大気拡散モデリングを提案した。背景として、局所スケールでの大気汚染物質の拡散シミュレーションが、環境リスク評価や都市計画において重要であり、従来の大気拡散モデルは、特に乱流の再現や高解像度シミュレーションにおいて制約があったことを指摘している。従って、当該研究の目的としては、局所スケールで高解像度の大気拡散モデルを構築し、乱流構造やプルーム拡散（汚染物質の分布）を高精度に再現することにある。さらに、平坦な地形を対象にした乱流フローとプルーム拡散の挙動をモデル化し、その妥当性を検証することを目指している。

当該研究の主な成果としては、まず、高解像度モデルの開発が挙げられる。LES を基盤とした新しい局所スケールモデルを開発し、大気乱流と汚染物質の詳細な拡散挙動を高解像度で再現した。次に、シミュレーション結果において、平坦な地形上での乱流境界層フローと汚染物質の拡散挙動を正確にシミュレーションした。また、モデルの性能を観測データや既存の数値モデルとの比較によって検証した。さらに適用可能性の検証として、本モデルが、都市環境や産業施設周辺での局所的な大気汚染シミュレーションに応用可能であることが示された。

一方、課題としては、まず実地データとの比較があり、モデルの性能が実地観測データと比較して検証されたが、さらなる大規模データセットを用いた評価が必要であることが挙げられる。また、地形や建築物の影響については、本研究が平坦地形に焦点を当てているため、複雑地形や都市環境における乱流と拡散の再現にはさらなる研究が必要であることが示された。さらに、計算コストに関して、LES の計算負荷が高く、現実的な運用に向けたさらなる高速化が課題であることが明らかとなった。

H. Nakayama (2011) 35] (Part.2)らは、都市環境での環境リスク評価を目的として、建物周辺での乱流と汚染物質拡散を高精度で再現可能なモデルを開発した。当該研究の背景としては、建物周辺での乱流とプルーム拡散（汚染物質の移動）は都市環境や産業施設周辺での環境リスク評価において重要な課題であり、従来のモデルでは建物による乱流の影響を正確に表現することが困難であった。従って、当該研究の目的は、LES を基盤とした高解像度局所スケールモデルを用いて、立方体建物周辺の乱流フローと汚染物質の拡散を正確に再現することにある。

主な成果としては、まず新しい境界層生成スキームが提案され、立方体建物周辺の乱流境界層を正確に再現するための基盤が構築されたことが挙げられる。また、建物周辺での乱流と拡散の解析においては、LES モデルを用いて建物周辺の風速場と汚染物質の分布を高解像度でシミュレーションし、建物による乱流の発

生とそれがプルーム拡散に与える影響を詳細に分析した点が挙げられる。さらに、モデルの有効性の検証にて、シミュレーション結果を実験データや観測データと比較し、モデルの精度を確認したことが示されている。

その一方、課題としては、まず複雑地形への適用が挙げられ、研究では単一の立方体建物を対象としているため、複数の建物や複雑な都市地形での応用にはさらなる研究が必要であることが示された。また、計算負荷の最適化については、LES モデルが高精度である一方で計算コストが高いため、リアルタイム利用に向けた効率化が課題であることが明らかとなった。さらに、スケーラビリティの向上に関し、局所スケールから広域スケールへの拡張適用を検討する必要があることが示された。

H. Nakayama (2013) 36] (Part.3)らは、建物群内での複雑な流体挙動を解析し、高精度な環境リスク評価に寄与するモデルを提案した。背景として、建物群（ビル群）における大気中の汚染物質の拡散挙動は、都市環境や産業地域における環境リスク評価において重要であり、従来のモデルでは複雑な建物配置による乱流の影響を正確に再現することが困難だった。従って、当該研究の目的は、LES を基盤とした局所スケール高解像度モデルを用いて、建物群内外での乱流挙動とプルーム拡散を詳細に解析し、都市部での実際の建物配置を考慮したモデルの性能を評価して実用性を検証することにある。

主な成果としては、まずモデルの適用と改良において、高解像度の LES モデル（LOHDIM-LES）を用い、建物群内外の風速場とプルーム拡散をシミュレーションし、複雑な建物配置における乱流構造の再現性を向上させたことが挙げられる。また、シミュレーションの結果において、汚染物質の移動パターンや建物間の風速変化を詳細に再現し、建物群内での乱流強度が拡散挙動に与える影響を定量化している。さらに、実験データとの比較検証では、シミュレーション結果を物理モデル実験データと比較し、モデルの妥当性を確認している。

その一方、課題としては、まず実地適用性の向上が必要であり、実際の都市環境でのモデル適用に際し、建物形状や周囲環境のさらなる詳細データが求められることが示された。また、計算コストの最適化については、高解像度 LES モデルの計算負荷が高いため、大規模応用に向けた計算効率の改善が求められることが挙げられる。さらに、複雑地形や動的条件への対応に関し、風向や気象条件の変動を含む動的環境での適用性向上が今後の課題であることが明らかになった。

H. Nakayama (2014) 37] (Part.4)らは、実際の都市エリアを対象として LES を用いて、都市部における乱流およびプルームの拡散挙動を高解像度で解析し、風洞実験データとシミュレーション結果を比較し、モデルの妥当性を検証した。当該研究の背景としては、都市部での大気汚染物質の拡散挙動が環境保護や公共安全の観点から重要な研究課題であることが挙げられる。実際の都市環境では、建物群や地形が複雑であり、それらが乱流と汚染物質の拡散に大きな影響を与えている。しかし、従来モデルでは、この複雑な構造を十分に再現することが難しかった。従って、研究目的は、LES を基盤とした局所スケールの高解像度モデルを開発し、実際の都市部における乱流挙動とプルーム拡散を解析することである。また、都市環境でのモデルの有効性を実証し、緊急時対応のための実用的なツールを提供することを目指している。

主な成果としては、まず都市部へのモデルの適用が挙げられる。LES モデルを都市環境に適用し、実際の建物配置や地形条件を考慮した乱流シミュレーションを実施し、都市部の複雑な乱流挙動を高い解像度で再現した。また、拡散挙動の詳細解析では、汚染物質の拡散パターンや建物間での風速変化を詳細に評価し、汚染物質が都市環境内でどのように拡散・停滞するかを示す重要なデータを提供した。さらに、緊急時対応への応用可能性においては、実際の緊急事態シナリオに適用することで迅速な意思決定を支援するツールと

しての有効性を確認した。モデル精度の検証では、シミュレーション結果を実測データと比較し、モデルの再現性と信頼性を評価した。

その一方、課題としては、まず大規模な都市環境への適用性が挙げられ、モデルの適用範囲を広げるため、複雑な都市地形やより広範囲での検証が必要であることが示された。また、リアルタイム適用への改良については、LES モデルの計算コストが高く、緊急時のリアルタイム適用にはさらなる効率化が求められることが明らかになった。さらに、多様な気象条件への対応に関しては、さまざまな気象条件下でのモデルの適用性を検証する必要があることが示された。

H. Nakayama (2016) 38] (Part.5)らは、LES による都市部でのリアルな気象条件を考慮した汚染物質の高精度シミュレーションを行い、環境リスク評価や緊急時対応における新たなツールとしての重要性を示した。

背景として、実際の都市環境では建物群の複雑な配置とリアルな気象条件が大気拡散挙動に大きく影響を与えることが挙げられる。従来のモデルでは、これらの条件を同時に考慮した高精度な解析が困難だったことが挙げられる。従って、当該研究の目的は、LES を用いて、実際の都市部での乱流挙動と汚染物質の拡散を解析する高解像度モデルを開発し、リアルな気象条件下でのモデルの性能を検証して、緊急時の意思決定を支援する実用的なツールとしての有用性を評価することにある。

主な成果としては、まず都市環境と気象条件の統合が挙げられる。実際の都市部での建物配置や地形を考慮し、リアルな気象データを用いた LES モデルを適用し、大気中の汚染物質の拡散挙動を詳細に再現したことが挙げられる。また、乱流と拡散の詳細解析においては、建物間の乱流構造や汚染物質の移動・停滞パターンを解析し、実際の気象条件下での局所スケールの汚染地域の空間的広がりとプルームの拡散挙動の詳細な情報を提供した。さらに、モデルの実証と精度向上では、シミュレーション結果を実測データと比較し、モデルの妥当性と信頼性を検証し、都市部での緊急対応シミュレーションの可能性を示した。

その一方、課題としては、まず計算コストの削減が挙げられ、リアルタイム応答を実現するには、LES モデルの高精度解析に伴う高い計算負荷を低減する必要があることが示された。また、他環境への汎用性を持つ適用性の検討においては、特定の都市環境での適用に加え、異なる都市や気象条件での適用性を検討する必要があることが示された。さらに、強風や突風などの異常気象条件下でのモデルの性能も評価し、適応性を向上させる必要があることが明らかになった。

H. Nakayama (2021) 39] (Part.6)らは、局所スケールの大気拡散解析において、放射線線量の詳細な計算方法を導入した高解像度モデルを開発した。当該モデルは、LES を用い、複雑な地形や都市環境における乱流とプルームの挙動の他、放射線量の分布やその経時変化を詳細に解析するものである。

背景としては、放射性プルームの拡散予測は原子力災害のリスク評価や緊急時の意思決定において重要であるが、既存のモデルでは汚染物質の拡散と放射線量評価を統合的に行う高精度な手法の欠如が課題であった。目的は、局所スケール高解像度の大気拡散モデル「LOHDIM-LES」に詳細な線量評価機能を統合し、環境リスク評価の精度向上を目指すとともに、実際の都市環境や放射線源条件を考慮した線量評価の妥当性を検証することである。

特徴としては、プルームの動的挙動と局所的な放射線影響を評価するための新しい線量計算手法を提案し、建物群や不規則な地形による遮蔽効果をシミュレーションした。

主な成果としては、まず線量計算手法の統合により、LES を基盤とした大気拡散モデルに放射性物質の放出・拡散・沈着を考慮した線量計算手法を導入し、プルーム拡散に伴う地表面線量の空間的・時間的分布を高精度で再現したことが挙げられる。また、シミュレーションの精度向上においては、線量評価モデルが実

際の原子力施設における観測データと比較して高い精度を示した。さらに、応用可能性の拡大として、緊急時のリスク評価や避難計画の作成に寄与する実用的なツールとして機能し、原子力施設周辺や都市環境での適用を想定した設計の有効性を確認した。

一方、課題としては、まず計算効率の改善が必要であり、LES を使用した高解像度モデルの計算負荷は高く、大規模な運用やリアルタイムでの適用にはさらなる効率化が求められることが示された。また、さまざまな気象条件への適応については、モデルの性能を異なる気象条件や地形条件下で検証する必要があることが挙げられる。さらに、緊急時データとの統合に関しては、モデルがリアルタイムデータ（気象データや放射性物質放出情報）と効果的に連携できるよう改良が必要であることが明らかになった。

○本項（４）のまとめ

(Part.1)では、詳細な乱流の再現が可能な局所スケールでの高精度な大気拡散モデリングを開発し、ドライバー領域の上流の一部に流入乱流生成手法を組み込み、風洞実験と比較して、平坦な地形上での乱流境界層フローと汚染物質の拡散挙動を正確にシミュレーションした。

(Part.2)は、平坦地形モデル（Part1）を基に、立方体建物の影響を含む複雑な乱流挙動をモデル化して、その有効性を実証した。

(Part.3)は、(Part.2)を基に、障害物（建物アレイ）を置き、複雑な建物配置における乱流構造の再現性を検討し、汚染物質の移動パターンや風速変化を詳細に再現して、建物群内での乱流強度が拡散挙動に与える影響を定量化した。

(Part.4)は複雑地形（都市街区）のモデルを用いて、都市部における乱流およびプルームの拡散挙動を高解像度で解析し、風洞実験データとシミュレーション結果を比較して、モデルの妥当性を検証した。

(Part.5)は、LES による都市部でのリアルな気象条件を考慮した汚染物質の高精度シミュレーション行い、環境リスク評価や緊急時対応における新たなツールとしての重要性を示した。

(Part.6)は、LES を基盤とした大気拡散モデルに、放射性物質の放出・拡散・沈着を考慮した線量計算手法を導入した。複雑な地形や都市環境における乱流とプルームの挙動を詳細に解析プルーム拡散に伴う地表面線量の空間的・時間的分布を高精度で再現した。

（５）都市環境の大気拡散、都市キャノピーモデル(Urban Canopy Model, UCM)

都市環境における大気拡散では、高層建築など市街地の複雑な建物群をモデル化し、乱流やプルームの挙動を再現する必要がある。LES の発展とともに、都市キャノピー層のモデル化も様々に試みられてきた。

B. Kosovic (2003) 40]らは、都市環境の複雑さを反映した高精度な予測モデルの必要性に応え、災害対応やリスク評価を目的として都市部における有害物質の拡散挙動をシミュレーションするための統合的モデリング手法を開発した。背景として、都市部における有害物質の拡散予測は、緊急対応、リスク評価、脆弱性分析において重要な役割を果たす。複雑な都市地形や構造を考慮した拡散モデルは、現状の計算ツールでは不十分であり、新しいモデリング能力が求められている。

採用した手法としては、FEM3MP コードを元に RANS、LES 機能と適応メッシュ細分化（Adaptive Mesh Refinement）を使用し、高解像度の地形や構造物を同時に解析可能な数値流体力学（CFD）手法を開発した。また、ビルや地形、植生、土地利用などを詳細にシミュレートし、大気安定度やさまざまな気象条件をモデルに導入することで、メソスケール数値気象予測モデルと連携し現実的な気象条件を都市スケールモデルに

反映させた。

研究の主な結果としては、新しいモデルが都市部での有害物質拡散のピーク濃度、空間的範囲、時間的変化を高精度で予測可能であることが示されたことが挙げられる。また、スタジアム、地下鉄、飛行機内部など複雑な構造物のシミュレーションも可能であることが明らかになった。

研究の成果としては、まず都市スケールでの精度向上が挙げられ、高解像度の都市モデルにより複雑な構造と地形を正確に表現し、有害物質の拡散挙動を時間的・空間的に高精度で予測可能としたことが挙げられる。また、緊急時対応においては、実時間での災害対応や事象再構築への適用可能性を向上させ、現実的な気象条件を反映したモデルにより実用性を高めた。さらに、統合的アプローチとして、気象予測モデルとのシームレスな連携により都市部の気象条件を反映した。

一方、課題としては、まず計算効率の向上が挙げられ、高精度モデルは計算負荷が大きいため効率的な計算手法が必要であることが示された。また、現実環境への適用性については、モデルをさまざまな都市環境や条件に適応するためのさらなる検証が必要であることが挙げられる。さらに、実際の都市部での観測データが不足しており、モデルの妥当性を検証するための追加データが必要となることが明らかとなった。

F.F. Grinstein (2011) 41]らは、都市環境における化学物質や生物・放射性物質の拡散とフォールアウト（降下物）のシミュレーションを対象とし、緊急事態管理やリスク軽減に向けた手法を検討し、都市部の複雑でカオス的な汚染物質の輸送挙動を理解するためのモデル開発を行った。背景として、戦争、テロ攻撃、または工場事故などで発生する化学・生物・放射性物質の放出が都市環境における重大な脅威となるためである。これらの汚染物質の拡散とフォールアウト予測は、被害軽減、避難計画、緊急時対応において重要である。

モデルとシミュレーションに関しては、ILES（Implicit Large Eddy Simulation）により汚染物質輸送（CT）をモデル化した FAST3D-CT コードを用いて都市部の風の乱流、建物周辺の渦、再循環ゾーンでの流れをシミュレートした。また、固体の変形や破壊を扱う CASH コードにより爆発をシミュレートし、初期条件や境界条件を都市境界層の層状構造や現実的な風の変動に適合させた。さらに、粒子分布（フォールアウト、沈着、再懸濁、蒸発）のモデル化にも注力した。

当該研究の技術的課題としては、都市部の流体力学プロセス（エネルギー源や汚染源、建物の影響）を正確にシミュレーションするのが難しいことが挙げられる。また、建物損傷や爆発の影響をシミュレーションに統合する必要がある。

当該研究の成果としては、まず汚染物質拡散の理解や知見全体の向上が挙げられ、都市部での拡散とフォールアウトの複雑な挙動をモデル化し、シミュレーションの精度向上を実現した。また、実用的な緊急時対応支援においては、緊急時の避難計画や汚染管理の意思決定を支援するためのシミュレーションフレームワークを提供している。さらに、広範な応用可能性では、感染症防止、汚染モニタリング、救助活動の教育と訓練に貢献可能であることが示された。

その一方、課題としては、まず計算効率の向上が必要であり、高精度シミュレーションは計算負荷が大きく、リアルタイム適用には効率化が求められることが示された。また、都市特有の条件への適応については、都市ごとの建物形状、地形特性、気象条件を考慮したモデルの改良が求められることが挙げられる。さらに、データ統合の必要性に関しては、地域的・大気的データの一貫性を保つためのデータ処理手法を開発する必要があることが示された。

P. Bieringer (2018) 42]は、都市規模と建物内部の輸送挙動を結合することで汚染物質の動態を高精度で評価することを目的として、都市および屋内環境における空気中の汚染物質輸送と拡散を予測するために、LES

に基づくシステムを開発した。

研究の背景としては、都市部や建物内部での汚染物質の動態を予測することが、災害対応や安全計画において重要であることが挙げられる。この背景の下、著者らはLES技術を活用し、都市スケールの流体挙動と屋内拡散挙動を結合するシステムを開発した。

当該研究の技術の概要としては、まずLESを用いて空気中の乱流構造と汚染物質輸送を詳細にシミュレートした。また、都市と建物のモデルを結合し、屋内外の連続的な輸送挙動を統合的に評価した。

その主要な結果として、まず都市規模と建物内部の汚染物質拡散を一貫してシミュレーション可能となったことが挙げられる。また、汚染物質の局所的な高濃度領域や流入経路の特定に成功したことも挙げられる。

当該研究の成果としては、まず統合的アプローチの実現が挙げられる。都市全体と建物内部の汚染物質輸送を結合したモデルにより、複雑な輸送シナリオを高精度で再現したことは評価される。また、災害対応への活用については、緊急時の汚染物質拡散のリアルタイム評価や避難計画の策定に寄与可能と判断できる。さらに、シミュレーションの高度化において、LES技術の導入により、様々な状況下での乱流構造の詳細な解析が可能となった。

その一方、課題としては、まず計算負荷の削減が必要であり、LESを用いたシミュレーションは計算負荷が高く、実時間適用のための効率化が求められる。また、多様な環境条件への適応について、モデルを異なる都市環境や気象条件に適応させるための追加の研究が必要であることが示された。さらに、データの統合と検証に関しては、観測データとの統合やモデルの妥当性検証を進める必要があることが明らかになった。

T.J. Bauer (2019) 43]は、緊急時対応の意思決定システムにおいて都市モデルの選択が重要との観点から、都市環境における汚染物質の大気輸送と拡散を、都市のパラメトリゼーション（建物や地形の影響を考慮する手法）を変化させ、シミュレーションし、その影響を評価した。背景として、都市部での汚染物質拡散の予測は、災害対応や公共の安全において重要である点が挙げられる。従って、本研究では、異なる都市パラメトリゼーション手法を用い、大気輸送と拡散挙動がどのように変化するかを評価した。

採用した手法としては、まずWeather Research and Forecasting（WRF）モデルを使用し、2013年7月18～20日のニューヨーク市の熱波をシミュレーションした。また、Quick Urban and Industrial Complex（QUIC）モデルを用いて、中央公園での汚染物質放出シナリオを解析した。さらに、バックパックスプレーによる生物剤放出、タンクトラックの破裂による液体塩素放出、放射性拡散装置（RDD）による放射性同位体放出という3つのソースシナリオを検討した。

得られた主要な結果としては、都市パラメトリゼーションの違いにより、汚染物質プルームの方向が最大33°変化したことが挙げられる。また、汚染物質の濃度分布範囲（毒性閾値に基づく）は最大2.1倍の差異が生じ、表面気温、風速、風向にそれぞれ最大2℃、3m/s、20°の変動が生じた。

得られた成果としては、まずモデル選択の重要性が明確化されたことが挙げられる。都市パラメトリゼーションの選択が汚染物質の拡散予測に大きな影響を与え、緊急時対応計画において重要な要素であることが示された。また、実用的な応用においては、シミュレーション結果が、緊急時対応チームがどこに展開すべきか、またどのエリアで避難が必要かを決定する助けとなることが示される点が挙げられる。さらに、科学的知見の提供としては、都市特有の環境条件が汚染物質輸送に与える影響を詳細に解析したことが挙げられる。

その一方、課題としては、まずパラメトリゼーションの最適化が必要であり、都市モデルのパラメトリゼーションを改善し、より一貫性のある結果を得る必要があることが示された。また、リアルタイム対応の困

難さについては、高精度シミュレーションの計算負荷が高く、リアルタイムでの適用に課題があることが明らかになった。さらに、多様な条件への適応に関し、モデルが異なる都市や気象条件に適応できるかどうかをさらに検証する必要があることが示された。

S. Stöckl (2022) 44]らは、都市キャノピー内の流れと乱流特性を詳細にパラメータ化し、地表近くの物質濃度を予測する能力を強化することを目的として、都市環境での空気中の汚染物質の拡散挙動をより正確にモデル化するため、既存のラグランジュ粒子拡散モデル（LPDM）を、都市キャノピー層を明示的に考慮する形で拡張した。

研究の背景及び目的としては、都市キャノピー層（建物や構造物が影響を及ぼす地表からの層）は汚染物質の拡散に重要な役割を果たすが、従来のモデルでは単純化されることが多い。当該研究では、キャノピー内の流れと乱流特性をパラメータ化することで、モデルを地表レベルまで拡張し、表面起源の汚染源（例:交通）の影響を評価可能にすることを目的とした。

採用した手法としては、モデルにおいて、観測データと数値データを基にキャノピー内の流れと乱流特性を空間的に平均化してパラメータ化し、不安定、中立、安定の気象条件下でのモデル挙動を検証している。更に、得られる濃度予測結果については、バーゼル都市境界層実験（BUBBLE）で得られた屋根レベルの観測データと比較することで検証する。

当該研究で得られた主要な結果としては、拡張モデルが屋根レベルでの濃度予測において、従来モデルよりわずかに高い性能を示したことが挙げられる。以上、特に、キャノピー内や地表レベルでの濃度分布を直接評価可能とした点が大きな改善点である。

成果としては､まず都市キャノピー層の統合を実現し､キャノピー内の流れと乱流特性のパラメータ化が、平均的な拡散環境を現実的に表現可能としたことが挙げられる。また、モデル性能の改善においては、従来モデルと比較して都市キャノピー内の濃度予測能力が向上し、地表近く（歩行者レベル）や交通由来の汚染物質を扱うシナリオで有用性を示した点も挙げられる。さらに､科学的妥当性の確認では､モデルの仮定（混合状態の維持）を検証し、拡張の信頼性を確認した点も重要と判断される。

その一方、課題としては、まず限られた性能向上があったが、屋根レベルでの濃度予測性能の向上は限定的であるため、さらなる精度向上が望まれる。また、モデルの一般化については、拡張モデルが他の都市や異なる環境条件に適用可能かを評価する必要があることが挙げられる。さらに、計算負荷に関しては、キャノピー層の詳細なパラメータ化が、計算負荷を増加させる可能性があり、効率的な計算手法が求められることが明らかとなった。

M. Hadžiabdić (2023) 45]らは、都市キャノピー層のモデリングにおいて、従来の粗度モデルに代わるオブジェクトベースの多孔性モデルを提案し、都市部の流速や乱流場の予測精度を向上させる手法を開発した。

研究の背景と目的として、都市キャノピー層では、地表面と大気間の運動量交換が複雑で、建物や構造物の多様なサイズや形状が影響を及ぼす。従来の粗度モデルは、壁関数アプローチを使用してキャノピーを表現しているが、キャノピー層の挙動を十分に再現できないことが課題であった。当該研究では、多孔性モデルを用いることで、都市キャノピーのモデリング精度を向上させることを目指している。

提案した手法としては、従来の多孔性モデルとは異なり、モデル係数の事前知識を必要としないオブジェクトベースの多孔性モデルを採用した点が挙げられる。また、ハイブリッド RANS/LES シミュレーションを使用した。

当該研究の結果としては、提案モデルは都市環境における流速場および乱流場の予測において既存モデル

よりも高い精度を示した点が挙げられる。2 つの都市構成に対する比較評価において、提案モデルの性能向上が確認された。

成果としては、まず予測精度の向上が挙げられる。都市キャノピー層における流速と乱流特性をより現実的にモデリング可能とし、提案モデルは建物間の風速分布や乱流挙動の詳細な再現に優れる。また、モデル係数不要のアプローチでは、従来の多孔性モデルが抱える係数の事前設定の課題を克服した。さらに、応用可能性に対しては、都市計画や空気質モデリング、災害時の緊急時対応計画などへの広範は応用が期待される。

その一方、課題として、まず計算負荷があり、ハイブリッド RANS/LES シミュレーションを用いるため計算負荷が高く、効率的な計算アルゴリズムの開発が求められる。また、多様な都市環境での検証に関し、提案モデルが異なる都市構造や気象条件でどの程度適用可能かを評価するさらなる研究が必要であることが示された。さらに、詳細な実地検証については、実際の観測データとの比較に基づいたモデルの精度検証が必要である。

M. Owkes (2024) 46]らは、都市部での汚染物質拡散の動態を解明し、緊急時対応における予測精度を向上させることを目的として、都市環境での汚染物質の拡散を高精度にシミュレーションし、磁気共鳴イメージング（MRI）測定と比較することで、モデルの信頼性を検証した。背景として、都市環境における汚染物質の拡散は多くの人々に影響を及ぼす可能性があり、その正確な予測が求められている。本研究では、オクラホマシティのビジネス街（2003 年当時）をモデルとし、高精度な LES と MRI を比較した。

採用した手法としては、まず MRI が挙げられ、実験室規模の三次元空間と時間方向の高解像度データを提供する新しい技術であり、同一の地形と境界条件を用いて LES と MRI を実施し直接的な比較を可能にしている。また、汚染物質の時空間的な濃度変動や新しいクラウド識別アルゴリズム（CIA）*を活用したプルーム解析を実施した。

当該研究の主要な結果としては、まず時間平均された流速場や濃度場において、MRI と LES の結果は非常に良好な一致を示したことが挙げられる。都市環境内の複雑な流れの特徴が明らかになり、周期的な汚染物質放出によるプルーム動態が正確に捉えられる。

得られた成果としては、まず実験とシミュレーションの高い一致が挙げられる。LES と MRI の比較により、都市環境での流体力学モデルの信頼性が強化された。また、新しい解析技術の導入では、クラウド識別アルゴリズム（CIA）の適用により、周期的汚染物質放出の解析が可能となった。さらに、複雑な都市流れの特性解明において、都市内の建物配置が引き起こす複雑な流れと汚染物質分布が詳細に解析された。

その一方、課題として、まず計算負荷の削減が挙げられ、高精度な LES には大きな計算リソースが必要であり、計算効率の向上が求められることが示された。また、モデルの一般化については、他の都市や異なる環境条件への適用可能性を検証する必要があることが明らかになった。さらに、実地データとのさらなる統合に関しては、実際の都市環境での観測データを用いてモデルのさらなる妥当性確認が必要であることが示された。

*クラウド識別アルゴリズム（CIA）：断続的な汚染物質の排出に対して、ある点での濃度測定により、初めの排出イベントからの汚染物質が終了し、次の排出イベントが開始される時間を識別する。汚染物質がいつある場所に到着し、その場所に汚染物質がどのくらい長く留まるかを判断して、クラウドを識別する。

J. Lu (2024) 47]らは、都市の建物高さのばらつきが都市キャノピー層の風環境に及ぼす影響を、LES を用いて詳細に分析し、都市キャノピーモデルの改善案として、高層建築物の影響を考慮した新たな抗力計算手

法を提案した。

当該研究の背景と目的としては、都市の建物の高さのばらつき（Building Height Variability, BHV）が、都市キャノピー層の風の流れに大きな影響を与えることが挙げられる。しかし従来のモデルでは、高さのばらつきを垂直方向の都市密度の変化として扱うことが多く、都市の形状が風速や乱流、抗力に与える影響が適切に考慮されていないという課題があった。本研究では、大規模 LES を用いて、都市形状の違いが都市内の風の流れに及ぼす影響を詳細に調査し、特に高層建築物の存在が流体力学的な特性にどのような影響を及ぼすのかを解析した。

採用した手法としては、都市形状と LES モデルにおいて、98 種類の都市形状（建物の密度と高さ分布が異なるもの）を設定し、LES を用いて都市の風環境を解析した。また、建物の配列パターン（整列 vs.スタガード）による風速や乱流の変化を比較した。風速・乱流・抗力の解析においては、低層建築物は整列配列の都市形状では風速を低下させ、スタガード配列では風速を増加させることが示された。さらに、高層建築物周辺では強い拡散フラックスが発生し、時には乱流運動量フラックスと同程度の大きさを持つことが明らかになった。

得られた成果としては、まず建物の高さのばらつきが風環境に与える影響を定量化したことが挙げられる。建物の高さの分布が風速や乱流の生成、抗力の増加に重要な役割を果たすことを明確化し、都市の風環境のシミュレーションの精度向上に貢献するデータを提供している。また、高層建築物は風の流れに大きな影響を与えることが示され、高層建築物の周囲では、乱流だけでなく大規模な拡散フラックスが発生し、これによりキャノピー層の上部に特徴的な流れのパターンが形成されることが明らかになった。さらに、都市キャノピーモデルの改善提案として、建物の高さの影響を考慮した新たな抗力モデルを提案し、これにより地域気候モデルの精度向上が可能となった。

その一方、課題としては、まず現実の都市形状への適用が挙げられる。当該研究では、理想化された都市形状での LES シミュレーションであり、実際の都市環境にどこまで適用できるかは、さらなる検証が必要である。また、高層建築物の影響のさらなる分析に関しては、高層建築物が風環境に与える影響が特に大きいが、ビル風やヒートアイランド効果との関連も考慮する必要があることが示された。さらに、実用的な都市気候モデルとの統合については、提案された都市キャノピーモデルの改善点を既存の地域気候モデルや風環境シミュレーションに統合するプロセスが今後の課題であることが明らかになった。

○本項（５）のまとめ

B. Kosovic (2003) 40]らは、都市環境の複雑さを反映した高精度な予測モデルの必要性から FEM3MP コードを元に、RANS、LES 機能と適応メッシュ細分化を使用し、高解像度の地形や構造物を同時に解析可能な CFD 手法を開発した。**F.F. Grinstein (2011) 41]**らは、LES による FAST3D-CT コードを用いて都市環境における化学物質や生物・放射性物質の拡散とフォールアウトの予測を対象とした緊急事態管理のモデル開発を行った。**P. Bieringer (2018) 42]**は、LES を活用し、都市規模の流体挙動と屋内拡散挙動を結合するシステムを開発した。**T.J. Bauer (2019) 43]**は、WRF と QUIC モデルにより、都市のパラメトリゼーション（建物や地形の影響を考慮する手法）を変化させながらシミュレーションし影響を評価した。**S. Stöckl (2022) 44]**らは、都市キャノピー層を明示的に考慮し、既存のラグランジュ粒子拡散モデル(LPDM)の地表近くの濃度を予測する能力を強化した。**M. Hadžiabdić (2023) 45]**らは、都市キャノピー層に、従来の粗度モデルに代わるオブジェクトベースの多孔性モデルを提案して、都市部の流速や乱流場の予測精度を向上させた。**M.**

Owkes (2024) 46]らは、都市部での汚染物質拡散の動態を解明するため、高精度の LES シミュレーションと磁気共鳴イメージング（MRI）測定を比較しモデルの信頼性を検証した。**J. Lu (2024) 47]**らは、都市の建物高さのばらつきが都市キャノピー層の風環境に及ぼす影響を、LES を用いて詳細に分析し、高層建築物の影響を考慮した新たな抗力計算手法を提案した。

（6）ガウスプルームモデルの改良と応用

汚染物質の大気拡散問題については、従来から CFD による手法と並んでガウスプルームモデルによる拡散予測が用いられてきた。本稿では、この方法を基に近年の様々な技術発展を盛り込んだ新しい事例を紹介する。本手法は、計算が軽量であることから、精度向上の取り組みにより、新たな応用展開の可能性があり、LES 等の高精度解析手法の利用との比較されるべき重要な手法と考えられ、本項では、その進展についてまとめた。

B. Breznik (2003) 48]らは、核関連の緊急時事象における意思決定を支援するため、大気拡散プロセス、汚染物質の沈着、および放射線量計算からなる統合的なシステムによる線量予測手法を提案した。モデルの構成としては、拡散モデルとして、ガウスプルームモデルを基盤として構築し、異なる気象条件下での放射性物質の輸送と沈着をシミュレーションし、将来は、ラグランジュ粒子モデルに移行する予定とした。

当該研究の適用として、解析対象を数 km ~~以内~~の短距離に重点を置き、風速、風向、地形などの因子が線量予測に及ぼす影響を評価している。

得られた成果としては、まず緊急時対応が挙げられる。線量予測モデルは、事故直後の放射線影響を迅速に評価し、避難計画やリスク評価を支援する。また、高解像度の予測として、短距離に特化した精密な拡散シミュレーションを実現し、特に高密度地域での適用可能性が高いことが示された。さらに、統合的な評価システムとして、気象条件、地形、放射性物質の特性を統合したモデルが多面的な影響評価を可能にした。

その一方、課題としては、まず計算資源を必要としており、高解像度のシミュレーションには、計算資源の増強が求められる。また、気象データの依存性については、気象条件の変動がモデル結果に影響を与えるため、リアルタイムでの高品質データの取得が課題であることが示された。さらに、長距離拡散への拡張に関しては、現行モデルが短距離スケールに特化しているため、長距離輸送や他の拡散シナリオへの適用には改良が必要であることが明らかである。

H. Thielen (2007) 49]らは、診断フローモデルとガウスパフモデル、モンテカルロ粒子シミュレーションモデルを組み合わせた高度なモデルシステムを提案した。これにより、地形効果、非定常条件、ソース配置の影響をより精密に評価できるようになった。また、気象条件の変動を考慮した確率的解析を組み合わせることで、事故時または異常事象時の放射線影響を現実的かつ詳細に評価できる。また、累積補完頻度分布（CCFD）*を使用して、特定の被ばく量に達する、またはそれを超える確率を分析することが可能となった。すなわち、非放射性汚染物質排出に関する既存モデルシステム（AUSTAL2000）に対して、放射性物質特有の要因（γ線クラウドシャイン、放射性崩壊、湿性沈着）を追加するだけで、最新の規制基準に対応するモデルが構築できる。

得られた成果としては、まず評価精度の向上が挙げられる。高度なモデルと確率的解析の組み合わせにより、放射線影響評価の精度が向上し、多様な条件への適応性においては、非定常条件や複雑な地形を含む多様な条件下での評価が可能になった。さらに、既存システムの拡張性に関して、AUSTAL2000 を基盤としたモデルに必要な改良が最小限で済み、実装のハードルは低いことが示された。

その一方、課題として、まず計算コストの増加があり、高度なモデルと確率的解析の組み合わせにより計算負荷が増大する可能性があることが示された。また、データ要件の増加について、精密な評価のためには高品質な気象データが必要であり、データ取得と管理が課題となることが挙げられる。さらに、適用範囲の制限に関しては、現在のモデルが特定の気象条件や地形に特化しているため、全てのシナリオに適応するには追加の検証が必要であることが明らかになった。

*累積補完頻度分布（CCFD:cumulative complementary frequency distributions）: 考えられるすべての気象状況の大気拡散計算とサイト固有の発生頻度に基づいて、地表付近の空気中の濃度、沈着レベル、結果として生じる潜在的線量を求めて、いわゆる累積補完頻度分布(CCFD)を導出できる。CCFD は、確率分布の補完累積分布関数（CCDF）を頻度分布の形式で表したもので、データの極端値（テール部分）を分析するのに適しており、金融、自然災害、品質管理など様々な分野で利用される。

P. Pecha (2011) 50]らは、複雑地形上で拡散する放射性雲からのクラウドシャイン線量をリアルタイムで計算する手法を提案した。当該手法では、プルームを等価な楕円形の円盤に分割するセグメント化されたガウシアンスキームを採用することで、従来の 3 次元積分手法と比較して計算速度が向上し、外部照射線量の迅速な計算が可能になった。

主な特徴としては、まず近距離モデルで、汚染源から数百メートル以内（核施設のフェンスに設置された遠隔測定センサー）において、従来の直線ガウス解法（プルーム軸を風下方向にとる）を改良した方法を使用し、次に遠距離モデルで、気象条件の変化によるさらなる移動を分割ガウススキーム（プルーム中心軸に垂直な仮想的な楕円ディスクに分解）を使用している。さらに、光子輸送モデルとして、空気中での光子輸送を記述する n/μ 法*を適用し、外部被ばく線量・線量率の高速予測を実現している。

得られた成果としては、まず効率的なリアルタイム計算が挙げられる。放射性雲の移動や線量予測をリアルタイムで計算できるため、事故対応の迅速化に対応している。また、観測演算子の構築により、モデル空間から観測空間への正確な変換を実現し、観測データとの同化を可能にした。さらに、早期事故評価の改善に際し、事故初期の放射性物質放出の影響を詳細に評価し、効果的な緊急対策を支援可能としている。

その一方、課題として、まず適用範囲の限界が挙げられる。提案手法は特定の地形やセンサー配置に依存しており、異なる環境での適用には追加の調整が必要である。また、気象依存性に関しては、気象条件の急激な変化や不確実性がモデルの精度に影響を及ぼす可能性があることが示された。さらに、技術導入のハードルについて、n/μ 法やガウススキームの実装に専門知識が必要であり、広範な導入には課題があることが明らかになった。

*n/μ 法 : 5/μ 法(一般に n/μ 法)は、受容体から距離 5/μ までにある放射線源のみを重要なものと見なし、平均自由行程の 5 倍までの範囲で積分を行う。n=5 の計算は、n=10 と比較して 3 倍以上高速である。このレポートでは、Eγ=0.3625MeV の核種 I-131 の放出で検証された。μ=1.40531E-02(m-1)、質量減衰係数 μa=3.30969E-03(m2.kg-1)、平均自由行程 1/μ=7.12E+01m、5/μ=3.56E+02m、10/μ=7.12E+02m としている。

N.D. Alharbi (2011) 51]らは、ガウスプルームモデルを適用し、仮定された 10MW 原子炉事故における放射性雲の拡散および吸入線量の評価を目的として、サウジアラビアのジェッダ上空を通過する放射性雲の大気中拡散と空気中放射性核種濃度を計算した。放射性雲の拡散をモデル化し、空気中放射性核種の濃度分布を計算し、プルーム通過中の吸入線量を評価するために各放射性核種の大気中濃度を算出することにより、放射性雲の動きや放射線被ばくの潜在的リスクを評価する枠組みの提供を可能としている。

実際、吸入線量の詳細評価では、空気中の放射性核種濃度に基づき、吸入線量の詳細計算を実施し、事故後の影響評価を向上させた。また、ガウスプルームモデルの適用により、放射性雲の拡散特性を簡便かつ効果的にモデル化できることを示し、ジェッダ市という都市環境における放射性雲の影響評価を行い、都市部での緊急対応に活用可能な知見を提供した。

その一方、モデルの簡略性はガウスプルームモデルが簡便である一方、複雑な地形や非定常気象条件への適用に限界があること、特定の放射性核種の挙動を評価可能とする一方、すべての核種への対応には追加の解析が必要であること、そしてモデルの精度は、高品質な気象データの利用可能性に依存しており、データ取得が制約となる可能性があることが課題として挙げられた。

S. Durucan (2013) 52]らは、大気中の汚染物質の拡散を予測するために広く利用されている高度なガウスプルームモデル（Advanced Gaussian Plume Model）に焦点を当て、EPA（米国環境保護庁）の追加情報要請（Point 10）に応じた大気質モデルの技術的記述を次のようにまとめた。AGPM は、表面熱流束、表面摩擦、大気安定性、垂直境界層構造などの重要な拡散パラメータを組み込んでいる。

ガウスプルームモデルの適用は、簡便で計算効率の高い方法を使用し、汚染源からの排出とその後の大気中の挙動を予測する。地形効果や気象条件の変化に対応するため、従来のモデルを拡張した形で使用することにより、汎用性と計算効率を維持しながら、大気汚染の影響評価や汚染物質の拡散と沈着の予測、EPA 規制への準拠の一環としての環境影響評価を実施している。

当該モデルは、環境保護庁の基準を満たし、公式な承認を得るための基盤として利用可能であり、実測データをモデルに組み込むことで予測精度を向上させた。ガウスプルームモデルの簡便性ゆえに、非常に複雑な地形や局地的な気象条件には不十分な場合があること、高精度モデルや数値気象モデル、粒子ベースの詳細なシミュレーションとの比較では精度に限界があること、そして正確な予測には高品質の気象および排出データが必須であることが課題として挙げられる。

P. Pecha (2014) 53]らは、放射性雲からの外部被ばく線量および線量率を迅速に推定するための効果的なアルゴリズムの導出に焦点を当て、古典的なガウスプルームモデルを改良し、短期間の気象予測に基づく 1 時間ごとのガウスセグメントに放射能放出を分割する手法を提案した。また、ガウスプルーム形状をプルーム中心軸に垂直な仮想的楕円ディスクに分解し、3 次元積分の計算負荷を軽減する新しい近似手法を導入した。γ 線フォトンの処理については、空気中の平均自由行程に基づき、積分限界を最適化し、従来のマルチ核種アプローチを新しいマルチグループ方式に置き換え、エネルギースペクトルの広範囲を効率的に処理した。このアルゴリズムは、空間ノードの大規模ネットワークにおける線量応答を生成し、近距離領域でのオンラインデータ同化分析に適している。

得られた計算効率の向上については、3 次元積分の負荷を削減し、ローカルスケールでの計算プロセスを高速化したことで達成された。また、放射線のエネルギースペクトルが広い範囲で適用可能なマルチグループ方式を導入することで、広範な応用性を持つことを示した。精度の検証は、部分的な解析解と比較した数値積分技術により信頼性が確認され、線量変換係数についても、有限雲近似に基づく値が半無限プルームによる値に収束することが確認された。

その一方、モデルは近距離拡散に特化しており、長距離移動や複雑な地形の影響には別途対応が必要であること、気象予測データの精度がモデルの性能に直接影響を与えること、そして、他の解析解や実験データとのさらなる比較により、より幅広い適用可能性を確立する必要があることが課題として挙げられた。

D. Nikezić (2014) 54]らは、原子炉から放出される放射性物質の大気中拡散をモデル化し、その環境影響

を評価するために、年間平均濃度、大気中の放射性物質の沈着、および居住者の年間被ばく線量に注目して、これを計算する数学的手法を提案し、アルゴリズムを開発した。モデルは、ガウスプルームモデルを基に、原子力事故時の大気境界層への放射性核種の放出シナリオに基づいて設計された。モデルが示した結果は、国際原子力機関（IAEA）の推奨モデルによる基準値と比較され、小さい差異が確認されたものの、提案モデルの有効性が示された。

また、年間被ばく線量を計算することで、高精度な線量評価が可能となり、放射性物質拡散の影響を定量的に評価できることが示された。また、提案モデルは IAEA の推奨モデルと整合し、その信頼性が確認される。さらに、大気中濃度、土壌沈着、居住者の被ばく線量を包括的に解析できるフレームワークを提供したことで、環境影響の統合的評価が実現したことが評価できる。

しかし、提案されたモデルは、特定のシナリオに基づく等、異なる気象条件や放射性物質の特性に対応するには追加の検証が必要である。また、年間単位の解析に限定されているため、長期的な環境影響を評価するには拡張が求められる。また、モデルの計算負荷を削減し、リアルタイム適用の可能性を高めることも必要である。

J. Klusoň (2019) 55]らは、原子力発電所（NPP）の重大事故による汚染空気雲の周辺での線量分布をシミュレーションするために、モンテカルロ粒子輸送（MCNP）を用いたγ線場のモデルを設計・検証した。ガウスプルームモデルを使用して、放射性核種による汚染空気雲の挙動をシミュレーションし、大気条件や緊急時シナリオのソースタームに基づき、空気カーマ率*分布およびγ線スペクトル分布を計算した。さらに、空中車両（ヘリコプター）内での放射線線量と、その放射線場での遮蔽特性を評価した。当該モデルは、空中モニタリングや緊急時対応における放射線防護計画のデータ提供を目的として開発された。

モンテカルロ法の応用により、γ 線場のシミュレーションが可能となり、空気カーマ率分布やスペクトル分布の詳細な評価が実現した。また、現地観測中の機器内（ヘリコプターなど）での線量評価を含むシミュレーションにより、緊急時の放射線防護計画を支援することが可能となる。また、異なる大気条件および事故シナリオに対応したモデルの適用性も実証された。

しかし、モデルはガウスプルームモデルに基づいているため、複雑な地形や不規則な風向条件への対応には限界があること、高い計算コストが課題であること、そしてモデルの信頼性を向上させるためには実測データとのさらなる比較が必要であることが課題として挙げられる。

*空気カーマ率：空気が単位時間に放射線から受けたエネルギーの量。単位は Gy/h。 空気カーマ率から制動放射により逃げたエネルギー量を差引いたものが空気吸収線量率である。実用的には空気吸収線量率に等しい。

H. Miao (2023) 56]らは、原子力事故時の住民避難における放射線量と避難経路の動的関係を考慮した新たなモデルの開発に焦点を当て、避難計画の最適化を目的として動的放射線量計算に基づいた緊急避難モデル（DDEEM）を提案した。動的放射線量計算をベースに改良された A アルゴリズム*を用いて避難経路を最適化し、気象条件や CALPUFF（ガウシアンパフモデル）による放射線量のシミュレーションに基づいて、放射線影響の軽減を目指した。なお、当該モデルは、中国のある原子力発電所から 5km 圏内の学生を対象に適用された。

DDEEM が生成したすべての避難経路の放射線量は、1mSv 未満に制限されており、典型的な気象条件やランダムな気象条件下で放射線量の低減に効果的な経路が確認された。シミュレーションにより、放射線動態環境下でのモデルの有効性と信頼性が検証された。

当該モデルは、動的モデルを活用した最適経路により住民の放射線被ばくを大幅に軽減し、最大線量が1mSv 未満に抑えられること、原子力事故対応の意思決定支援ツールとして有用であり、緊急時対応の戦略策定における技術的基盤を提供可能なこと、そして動的な気象条件を考慮することで実際の緊急時対応の精度を向上させることが可能な点が成果として挙げられる。

その一方、DDEEM の計算効率やリアルタイム適用性を向上させる必要があること、大規模災害への適用可能性についての検証が求められること、正確な気象データと放射線プルーム挙動のモデリングが結果に大きく依存すること、そしてモデルの汎用性を高め、異なる地形や地域での適用可能性を確認する必要があること等が課題として挙げられる。

A アルゴリズム：H. Tian, et al., An Improved A Path-planning Algorithm for Nuclear Spill Evacuation and Radioactive Source Retrieval in Complex Terrain. Nucl. Eng. Des. 2023, 408, 112314.参照

T. Li (2023) 57]らは、逆転層を伴う複雑な気象条件下での核事故対応において、放射性核種の迅速な影響評価を目的としたガウス拡散モデルの改良版を開発した。当該モデルは、混合層の影響を考慮し、逆転層が核種拡散に及ぼす抑制効果を垂直方向で修正し、放射性核種の崩壊定数を考慮した放出源強度の調整を行う。

当該改良版モデルの特徴は、混合層の拡散促進効果を考慮している点である。半減期が短い核種ほど拡散濃度の低下効果が大きく、モデル検証には Kincaid データセットを使用している。検証結果として、混合層を考慮しないモデルと比較し、拡散距離 5km 以上での予測値が観測値に近づき、精度が向上したことが示された。改良モデルの統計指標は推奨モデル基準を満たしていることも確認された。

得られた成果としては、モデルの精度が向上し、観測値に近い予測が可能となり、拡散距離が長い場合の精度が改善した点が挙げられる。また、改良されたモデルにより、核事故時の放射性核種の影響評価が効率化され、迅速な核事故対応への支援が期待できる。さらに、短寿命核種や複雑な気象条件への適用可能性を広げる新たな修正方法が提示された。

その一方、課題としては、本研究のモデルが特定の気象条件や核種に焦点を当てているため、他の条件や物質への適用にはさらなる検討が必要であること、高精度な気象データがモデルのパフォーマンスに直接影響するため、実時間でのデータ取得が課題となること、そして実地観測データや他の気象条件を考慮した際は、追加検証が必要であることが挙げられる。

○本項（６）のまとめ

B. Breznik (2003) 48]らは、ガウスプルームモデルに基づく緊急時の線量予測システムを開発した。**H. Thielen (2007) 49]**らは、ガウスパフモデル、モンテカルロ粒子シミュレーションモデルを組み合わせて事故時の放射線影響を詳細に評価するシステムを報告した。**P. Pecha (2011) 50, 53]**らは、プルームを等価な楕円形の円盤に分割するセグメント化されたガウシアンスキームを基に、線量評価の計算効率を向上させた。

ガウスプルームモデルを基に、**N.D. Alharbi (2011) 51]**らは、放射性核種の線量評価するシステムを報告し、**S. Durucan (2013) 52]**らは、表面熱流束、表面摩擦、大気安定性、垂直境界層構造などの重要な拡散パラメータを組み込み、地形や非定常気象条件に対応するモデルの拡張を実現した。**D. Nikezić (2014) 54]**らは、年間平均濃度、大気中の放射性物質の沈着、居住者の年間被ばく線量を評価する数学モデルを提案した。**J. Klusoň (2019) 55]**らは、重大事故による汚染プルームの線量分布をシミュレーションするために、モンテカルロ粒子輸送（MCNP）を用いたγ線場のモデルを設計・検証した。**H. Miao (2023) 56]**らは、CALPUFF（ガウシアンパフモデル）による放射線量のシミュレーションに基づいて、避難経路の最適化を求める緊急

避難モデル（DDEEM）を提案した。**T. Li (2023) 57]**らは、逆転層を伴う複雑な気象条件下での核事故対応において、放射性核種の迅速な影響評価を目的としてガウス拡散モデルの改良版を開発した。

（7）並列計算や GPU による高速化の活用

これまでの文献調査の結果、放射性物質拡散の高分解能化、高精度化、リアルタイム予測等には、高い計算負荷が伴うことが指摘されてきたが、この課題を解消するため、並列計算及び GPU を用いた並列計算が導入され、計算の高速化と効率化が試みられてきた。本項では、これらを報告する文献をレビューし、研究開発の現状と課題を整理する。

P. Willemsen (2007) 58]らは、都市における拡散シミュレーションについて、従来の CPU ベースの計算からグラフィックスプロセッシングユニット（GPU）ベースのシステムへの移行を検討し、都市環境のラグランジュ拡散シミュレーションに、GPU のマルチスレッド機能を活用することで、シミュレーション速度の大幅なパフォーマンス向上を実現した。

当該手法の導入により、従来の方法と比較して計算時間が著しく改善され、GPU 並列処理によってシミュレーションは、より大きなデータセットを用いて、より複雑な都市シナリオを効果的に処理できるようになった。当該研究による速度の向上により、化学物質の流出や生物学的脅威等の緊急シナリオで重要なリアルタイム分析が可能となった。

その一方、ラグランジュモデルを GPU に適合させるには、アルゴリズムの大幅な再構成が必要であり、必ずしも簡単ではない場合があることが示された、また、パフォーマンスは GPU ハードウェアの機能と密接に関係しており、その機能の変化により、性能が大幅に変化する可能性があることも示された。従って、開発した方法論が、さまざまなハードウェアおよびソフトウェアプラットフォームで機能することを保証するのは、依然として課題であることが挙げられた。

V. Simek (2009) 59]らは、大気中の汚染物質の挙動を記述するために用いられる移流拡散方程式（ADE）の計算を大幅に高速化する手法を提案した。当該計算は非常に時間がかかるため、CUDA ソフトウェアフレームワーク及び GPU を使用した計算手法を採用した。計算には、4 次のルンゲクッタ法を使用し、線形法による統合を行い、GPU 内の共有メモリブロックとテクスチャキャッシュを活用することで効率的なデータ処理を実現した。時間依存型の汚染物質濃度計算を含む特定の ADE システムを実装し、その性能を評価した結果、GPU を使用したソリューションは、従来の CPU 計算と比較して驚異的な高速化性能を示した。

当該研究成果としては、GPU を活用することで計算速度が大幅に向上し、従来の CPU ベースの方法と比較し、桁違いの高速化が実現したことが挙げられる。また、GPU 内の共有メモリとテクスチャキャッシュを効果的に利用することでメモリ管理効率が向上した。

しかし、メモリ依存性が高く、大量の補助変数を必要とするため、メモリ管理が計算性能のボトルネックになる可能性があること、特定の ADE システムに特化しているため、他のモデルへの適用にはさらなる検証が必要であること、そして CUDA フレームワークの習熟や特定の GPU 構造への適応が要求されるため、導入における技術的な障壁があることが課題として挙げられる。

J. Zeng (2010) 60]らは、大気中のトレーサー輸送や拡散を記述するために使用されるラグランジュ粒子拡散モデルの計算効率を向上させるため、NVIDIA GPU の並列計算能力を活用した。当該研究では、FLEXPART モデルを元に、ボトルネックとなる粒子の位置変化の計算を再設計し、GPU の計算能力を最大限に活用できるようにした。GPU を用いたことにより、計算時間が大幅に短縮される可能性が示された。

当該研究の成果としては、GPU を使用することで計算速度が最大 10 倍に向上し、従来手法と比較し、計算性能が大幅に向上したことが挙げられる。また、FLEXPART モデルを GPU 用に適合させることで拡散モデルの効率的な実装が可能となり、並列処理による高スループットが実現され、大規模データセットを処理する能力が向上したことも成果の一つである。

その一方、モデルを GPU に適合させるためには、既存モデルを再設計する必要があり、時間と労力が必要となること、GPU 特有のハードウェア依存性やプログラミングの複雑性が導入の障壁となる可能性があること、そして他の拡散モデルや異なるハードウェア環境への移植には、さらなる検討が必要であることが課題として挙げられる。

A.L.S. Pinheiro (2017) 61]らは、原子力発電所からの放射性物質放出の影響を予測し、影響を受ける地域からの人々の避難を支援するための大気中放射性物質拡散システム（ARDS）を改善するため、GPU を活用したリアルタイム計算モデルを提案した。当該システムは、放射性物質の拡散やその環境への影響を予測するため、ソース情報、気象条件、地理的特徴に関するデータを処理する。当該研究では、特に計算負荷が高い「風況計算モジュール(WEST：Wind extrapolated from Stability and Terrain)」に着目し、GPU を用いた並列処理を採用することで、計算効率の向上を目指した。

ARDS は、主に以下の 4 つのモジュールで構成される：

- ソース情報（放射性物質の放出量を表す）
- 風況計算
- プルーム（放射性雲）拡散
- 線量計算

その結果、GPU を用いた並列計算により、従来のシーケンシャル計算と比較して、計算速度が最大 40 倍に向上し、高速化を達成しつつも計算精度を犠牲にすることなく結果が得られることが可能となった。また、C++と CUDA ライブラリを使用することで計算プログラムを最適化し、GPU の潜在能力を最大限に引き出すことに成功している。

その一方、課題としては、使用された WEST モデルが特定の地形や気象条件に特化しているため、汎用性に制限があること、GPU の性能や仕様に依存するため、全てのシステム環境で同じ結果を得られるわけではないこと、そして CUDA や並列プログラミングの習熟が必要であり、開発には高度な技術と時間が求められることが挙げられる。

Sunarko (2017) 62]らは、特定のサイトの環境影響評価に注目し、ラグランジュ粒子拡散法（LPDM）を用いて、放射性物質の大気中拡散を数十キロメートル規模のメソスケールでモデル化した。放射性物質の大気拡散モデルは、原子力施設周辺の環境監視や緊急時対応に不可欠で、メソスケール（数十 km 規模）の拡散解析では、原発事故や放射能漏れが発生した際、汚染物質の拡散経路を予測し、適切な防災対策を講じるために必須となるが、当該研究では、Lagrangian Particle Dispersion Method (LPDM)を用いて放射性物質の大気拡散をシミュレーションし、GPU による並列計算を導入することで計算時間の大幅な短縮を目指した。

採用した手法としては、LPDM（ラグランジュ粒子拡散法）の適用により、放射性汚染物質を模した粒子をメソスケール（数十 km）で拡散させるシミュレーションを実施するが、その放射性物質の拡散係数については、大気の安定性ごとに経験的な関係式を用いて決定する。気象データの活用では、質量保存の原理に基づき、診断的な 3D 風速場を作成し、メソスケールの大気運動を再現するため、気象観測所のデータを使

用している。また、カーネル密度推定（KDE）を用いて大気の最下層における時間積分された空気中濃度を計算している。なお、GPU による並列計算には、CUDA プログラミングを使用し、GTX-660Ti GPU（1, 344 スカラープロセッサ）向けに並列コードを開発した。

主な結果としては、計算速度の向上が挙げられ、GPU による並列計算により、従来の CPU 版に比べて約 20 倍の速度向上を実現した。なお、精度の維持では、CPU 版と GPU 版で同じ乱数セットと気象データを用いた場合の粒子の位置と格子上での線量の差異は、極めて小さいことが確認され、大規模シミュレーションが可能となった。当該研究による計算時間の短縮により、メソスケールレベルでのリアルタイムに近い放射性拡散予測が可能となった。

当該研究により得られた成果としては、GPU による並列計算の有効性が実証され、放射性物質の拡散シミュレーションの高速化に成功し、リアルタイム解析への応用が期待できることが挙げられる他、大気の安定度に応じた拡散係数の適用により現実的な拡散挙動を再現したこと、そして KDE（カーネル密度推定）による高精度な濃度計算で粒子拡散による汚染濃度の推定精度が向上したことが挙げられる。

その一方、課題としては、より新しい GPU ハードウェアを活用してさらなる計算速度の向上が期待できる。また、より高解像度でモデル化することで拡散の精度を高める余地があること等が挙げられる 。

D. Yang (2022) 63]らは、CALPUFF モデルを基にした並列計算アルゴリズムを提案し、大気拡散モデル計算の高速化による緊急時対応への活用を検討した。既存の並列化手法では、ソースコードを書き換える方法と、計算タスク内の繰り返し要素を分割する方法の 2 つに分類される。本研究では、後者の方法を改良して適用し、空間分割法としてバッファを使用した空間分割を利用し、CALPUFF モデルの風場モジュールを並列化した。また、拡散モジュールは、ラグランジュパフモデルを採用し、鉛直方向にレイヤーを複数重ねてこの層の分割並列化を実施した。さらに、通信ミドルウェアとして RabbitMQ を使用し、拡散コンピューティング環境を構築し、Alibaba Cloud の 9 ノードを利用して、単一ソースの連続リークケースに対する性能試験を行い、計算時間が約 6 分の 1 に短縮された。

得られた成果としては、当該提案手法により、従来の計算時間を約 6 分の 1 に短縮し、緊急時対応での実用性が向上したこと、バッファセル数を調整することで計算精度を維持しつつ高速化を実現したこと、そして CALPUFF モデルに適用可能な柔軟な並列化手法を提示したことが挙げられる。

しかし、提案手法は、単一ソースの連続リークケースに最適化されており、他のシナリオへの適用には追加の検証が必要であること、Alibaba Cloud 上で試験されたため、他の計算プラットフォームでの適用性は未確認であること、そして並列化に伴う通信コストの影響がより複雑なシナリオでは増大する可能性があることが課題として挙げられる。

L. Hoffmann (2024) 64]らは、大気輸送プロセスを研究するためのラグランジュ粒子拡散モデルの計算効率を向上させるために、MPTRAC（Massive-Parallel Trajectory Calculations）モデルを GPU に移植し、その性能最適化について検討した。特に、多数のエアパーセル(粒子)を扱う際に数値計算の負荷が増大する課題への対処を試み、主要な GPU コードのボトルネックである「移流カーネル」の性能を最適化するために、GPU 計算向けにアルゴリズムを再設計し、効率的な並列処理を実現した。また、データ転送の最適化や GPU メモリの効果的な使用を通じて、処理速度を向上させた。

当該研究の成果としては、GPU による並列化を導入したことで計算速度が大幅に向上し、従来の CPU 計算と比較して計算効率が著しく改善したことが挙げられる。また、大規模計算への対応が可能となり、10^8 単位のエアパーセルを処理する際の計算負荷が大幅に削減され、大規模データセットの実行が可能となった点

が挙げられる。さらに、MPTRAC モデルの GPU 最適化により他の類似モデルへの適応も可能であることが示唆された。

その一方、特定ハードウェアへの依存が課題として挙げられ、本研究が特定の GPU アーキテクチャ向けに最適化されており、異なるハードウェアでのパフォーマンスが未知数であること、従来のコードを GPU 対応に再設計するには高度な技術的スキルと多大な時間が必要であること、そしてデータ転送のオーバーヘッドや移流カーネル以外のボトルネックが性能向上の限界要因となる可能性があることが課題として挙げられる。

J. Escobar (2024) 65]らは、極端気象イベントのシミュレーションに使用される Meso-NH モデル（フランスの研究コミュニティによって開発された非静力学的メソスケール大気モデル）を GPU アーキテクチャに移植することで、計算性能の向上を目指した。Fortran コードに OpenACC（Open Accelerators：並列コンピューティングのための標準規格）指示を追加し、最も計算負荷の高い部分を GPU で実行可能とした。当該手法により、CPU およびハイブリッド CPU/GPU アーキテクチャの両方で同一コードを実行できる。また、CPU と GPU で実行した場合、ビット単位で同一の結果を保証する措置を実施し、大気圧の解法では、従来の高速フーリエ変換手法に代わり、幾何学的マルチグリッドソルバー（geometric multigrid solver）* を採用した。これにより、AMD MI250X GPU を搭載した Adastra プラットフォーム上で、64 ノード使用時に CPU のみの構成と比較して最大 6.0 倍の速度向上（NVIDIA A100 を使用した Leonardo プラットフォームでは 4.6 倍）と、エネルギー効率の 2.3 倍向上を達成した。さらに、精度を半分にし、ノード数を 4 倍に増やすことで、速度が 17.8 倍向上し、エネルギー効率も 1.3 倍向上している。

当該研究の成果としては、計算性能が向上し、極端気象シミュレーションの計算効率が大幅に向上したこと、GPU の活用により大規模計算の持続可能性が向上したこと、NVIDIA と AMD の異なる GPU プラットフォームでの動作が確認され汎用性が向上したこと、1, 024GPU まで効率的にスケール可能で大規模シミュレーションが可能となったことが挙げられる。

その一方、GPU 対応コードの作成には OpenACC 指示の追加やアルゴリズム変更が必要で、技術的負担が高いこと、特定の GPU アーキテクチャに最適化されており、他のプラットフォームでの性能保証が必要であること、新たなアルゴリズムが性能向上に寄与しているが、さらに効率を高めるには追加の研究が必要であることが課題として挙げられる。

*幾何学的マルチグリッドソルバー(geometric multigrid solver)：計算格子を作成する際、複数のスケールから成るグリッドを構成し、その格子形状に即したソルバーに該当する。

○本項（7）のまとめ

ラグランジュ拡散モデル（LPDM）の高速化については、**P. Willemsen (2007) 58]**らは、都市環境のラグランジュ拡散シミュレーションに GPU のマルチスレッド機能を活用し、アルゴリズムの大幅な再構成を行って、シミュレーション速度の大幅な向上を実現した。また **J. Zeng (2010) 60]**らは、ボトルネックとなる粒子の位置変化の計算を再設計し、NVIDIA GPU の並列計算能力を活用した。**Sunarko (2017) 62]**らは、LPGM を用いて、放射性物質の大気中拡散を数十キロメートル規模のメソスケールでモデル化した。**L. Hoffmann (2024) 64]**らは、計算効率を向上させるために、MPTRAC（Massive-Parallel Trajectory Calculations）モデルを GPU に移植しアルゴリズムを再設計して、効率的な並列処理を実現した。

一方、移流拡散方程式の計算効率化については、**V. Simek (2009) 59]**らは、GPU 内の共有メモリとキャッ

シュを効果的に利用することで、計算を大幅に高速化する手法を提案した。**A.L.S. Pinheiro (2017) 61]**らは、緊急時の放射性物質拡散予測システムの「風況計算モジュール」に GPU を用いた並列処理を導入し、計算速度が最大 40 倍に向上した。**D. Yang (2022) 63]**らは、CALPUFF モデルを基に、鉛直方向レイヤーの分割並列化を行った。**J. Escobar (2024) 65]**らは、非静力学的メソスケール大気モデル Meso-NH モデルの Fortran コードに OpenACC を用いて高速化した。

（8）新たな手法を用いた最近の展開

2000 年以降の高分解能・高精度の放射性物質大気拡散予測システムを構成する要素技術は、それぞれの分野でこれまで見てきたように発展してきた。本項では、最近の興味ある展開のいくつかを紹介する。主に、発生源の逆推定法、これまで解析された多数の CFD の結果をディープラーニングにより活用する方法、粒子拡散モデリングや放射性降下物の挙動モデル等が挙げられる。

M. Sharan (2012) 66]らは、移流拡散方程式の随伴方程式を、時間方向を逆に解く逆解析手法により、大気中の濃度測定データから放出源の位置と強度を推定する方法を提案した。環境汚染の監視や緊急対応のためには、大気中の汚染物質の排出源を特定することは重要であり、特に低風速かつ安定した大気条件では、拡散が不規則となり、従来手法では汚染源の特定が困難だった。本研究では、低風速かつ安定な気象条件下における点源（固定された高さからの大気放出）の特定を目的とした。

過去の研究では、最小二乗法、ベイズ推定、リノーマライゼーション手法などが試みられてきたが、本論文では、既存の手法を改良し、高さのある点源の特定に適用した。逆輸送モデルの適用としては、Issartel et al.(2007)による面状汚染源の推定手法を基に、Sharan et al.(2009)による地表点源の推定手法を拡張し、シミュレーションと実験データの活用には、米国アイダホ国立工学研究所（Idaho National Engineering Laboratory）の SF_6 拡散実験の観測データを使用し、高さ 1.5m から放出し、0.76m の高さで濃度を測定した。リノーマライゼーション（重み付け手法）による精度向上として、汚染源の推定時に発生する特異点問題*を解決し、感度解析では風速やバックグラウンド濃度が推定精度に与える影響を分析した。

当該研究の成果としては、シミュレーションデータでは完全な再現が可能で、すべての試行で放出源の位置と強度を正確に復元可能となり、実験データでは誤差 20m 以内で放出源の位置を特定し、放出強度は実際の値の誤差 2 倍以内で推定可能であることが示された点が挙げられる。また、バックグラウンド濃度の考慮が精度向上に寄与し、濃度が極端に低い測定点を含めることで推定精度が向上し、風速と風向の変動が推定誤差に影響することが確認された。なお、風速が 2m/s 以下である際は、拡散が不規則になり、誤差の要因となった。

その一方、代表性誤差（Representativity Error）は、実際の気象条件（風向の変動や乱流）とモデルの間にズレがあり、誤差の一因となること、観測された濃度が単一のピークを持たず、多峰性を示すことがあり、モデルと一致しない場合があること、アイダホ実験のデータのみを使用したため、より多様な環境条件下での検証が必要であること、そして風速や風向の変動を考慮したモデル改良が求められることが課題として挙げられる。

*特異点問題：検知器の位置を発生源と見なして、単位発生量を与え随伴方程式を解くため、数学的にはその位置が特異点（想定した解が得られない）となる。

Z. Li (2021) 67]らは、偏微分方程式（PDE）の解を求めるための新しいディープラーニング手法である Fourier Neural Operator（FNO）を提案した。当該研究は、PDE の解法における新しいアプローチを提供

し、今後の研究や応用において重要な基盤になると考えられる。

従来のニューラルネットワークは、主に有限次元のユークリッド空間間の写像を学習することに焦点を当ててきたが、近年、これを関数空間間の写像を学習するニューラルオペレーターへと一般化する試みが進められている。PDE に対して、このニューラルオペレーターは、任意の関数的なパラメータ依存性から解への写像を直接学習し、従来の手法が方程式の一つのインスタンスを解くのに対し、ニューラルオペレーターは PDE のファミリー全体を学習することが可能となる。当該研究の目的は、積分カーネルをフーリエ空間で直接パラメータ化することで、表現力が高く効率的なニューラルオペレーターを構築することである。

当該研究の成果としては、積分カーネルをフーリエ空間で直接パラメータ化することで表現力と効率性を兼ね備えた新しいニューラルオペレーターを構築したこと、多様な PDE（Burgers 方程式、Darcy 流、Navier-Stokes 方程式など）への適用により FNO の有効性を検証したこと、ゼロショット超解像*により乱流の流れを高精度にモデル化する初の機械学習ベースの手法となったこと、そして従来の PDE ソルバーと比較して計算速度を最大で 3 桁向上させたことが挙げられる。

その一方、FNO の効果は、多くの PDE で確認されているが、より複雑な PDE や高次元の問題に対する適用可能性をさらに検証する必要があること、FNO の理論的な収束性や安定性に関するさらなる研究が求められること、そして実際の物理現象や実験データに対する FNO の適用性を評価し、その有効性を確認する必要があることが課題として挙げられる。

*ゼロショット超解像：ニューラルオペレータは、メッシュ数に依存しないため、より低い解像度でトレーニングし、高解像度のデータを見ることなく、より高い解像度で評価することができる。論文中ではこれを「ゼロショット超解像」と言う。空間領域だけでなく時間領域でも超解像を実行できる、としている。

G. Wen (2022) 68]らは、多相流問題の数値シミュレーションを高速かつ高精度に行うための新しいディープラーニングモデル、U-FNO（U-拡張フーリエニューラルオペレーター）を提案した。多相流の数値シミュレーションは、地球科学分野において重要な役割を果たすが、従来のシミュレーション手法は、計算コストが高く、特に不均質な地質構造や多様な流動条件を扱う際に課題があった。当該研究の目的は、既存のフーリエニューラルオペレーター（FNO）を拡張し、CO_2と水の多相流問題に適用することで、精度、速度、データ効率を向上させることだった。

U-FNO は、ガス飽和度や圧力上昇の予測において、従来の FNO や最新の畳み込みニューラルネットワーク（CNN）モデルよりも高い精度を示した。計算速度の向上では、従来の数値シミュレーションと比較して U-FNO は計算速度を大幅に向上させ、多様な地質条件や注入設定に対して迅速な予測が可能となった。

その一方、U-FNO は 2D 放射状の CO_2注入問題において優れた性能を示したが、より複雑な 3D シナリオや他の多相流システムへの適用可能性を検証する必要があること、モデルの精度と信頼性をさらに向上させるためには、物理法則や制約をモデルに組み込むことが求められることが課題として挙げられる。

但し、当該研究により、U-FNO が多相流シミュレーションの効率化と精度向上に寄与する可能性を示しており、今後の研究でさらなる検証と改良が期待される。

A. Buan (2023) 69]らは、粒子拡散モデリングの最新の進展についてレビューし、様々な環境での粒子挙動を予測し、分析する能力が大きく向上している一方、科学的および技術的な課題が依然として残っていることを指摘し、計算効率やリアルタイム適用性を向上させるための方向性を示した。

粒子拡散モデリングは、環境モニタリング、産業安全、公共の健康準備において重要な役割を果たしており、粒子拡散モデリングの現状を評価し、今後の研究と技術的応用の課題を特定することが当該研究の目的

である。代表的なモデルとして、ラグランジュモデル、オイラーモデル、ガウスモデル、ボックスモデルを検討し、各モデルの長所と限界を概説した。

新技術の活用では、機械学習（ML）や人工知能（AI）の導入が、モデリング精度の向上や計算負荷の軽減に有望な方向性として注目されており、多変数シナリオの扱いやリアルタイムの予測能力に寄与する可能性が指摘されている。

当該研究の成果としては、現在の粒子拡散モデルは、多相流の相互作用や環境・健康への影響をより正確にシミュレーション可能となっているが、AI 技術は、複雑な多変数システムを扱う能力があり、モデルの応用範囲を広げる可能性があること、計算負荷を軽減しつつ精度を向上するためのツールとしての有用性を示唆したことが挙げられる。なお、環境モニタリングや産業安全の分野では、実用性のあるリアルタイム対応モデルを開発する重要性が強調された。

その一方、課題としては、高度なモデリングが依然として計算リソースを大きく消費するため、効率的な計算技術が必要であること、粒子間および粒子と媒体間の相互作用を正確にシミュレーションするためのさらなる進展が求められること、モデルの精度を維持しつつリアルタイムでの予測と意思決定を可能にするための研究が必要であることが挙げられる。

A. Ayoub (2024) 70]らは、放射性プルームの拡散予測を効率化し、環境災害時の迅速かつ精密な対応を可能にするツールとして、以下の提案を行っている。放射性プルームは、環境災害や事故の際に重大なリスクをもたらし、気象条件や地形に応じたプルームの拡散シミュレーションは、リアルタイムの意思決定において重要となる。従来の数値シミュレーション（例：WSPEEDI）は、高精度であるが、計算負荷が高く、緊急時には適応しにくい。従って、放射性プルームの拡散予測を効率化し、緊急時の迅速な意思決定を支援する手法を開発することが目標であり、特に高速かつ正確な統計エミュレーターを構築し、災害対応を最適化することを目指した。

当該研究の成果としては、U-Net を用いて、拡張された Fourier Neural Operator (U-FNO) モデルが開発された。当該モデルは、WSPEEDI 数値シミュレーターの計算を統計的にエミュレートし、約 4000 倍の高速化が実現したが、プルームの方向、範囲、線量率の予測において、高精度を達成することもできた。気象データ（初期条件および境界条件）を入力とし、環境中の放射線量分布の時間変化を正確に再現することで、数値モデルの代替として緊急時の迅速な意思決定に寄与することができる。さらに、当該技術は、放射性プルーム以外の汚染物質の拡散・輸送問題にも適用可能であり、環境リスク評価における不確実性定量化（UQ）にも利用できる。しかし、エミュレーターは事前計算されたシミュレーションに基づいているため、未知のシナリオや高度に変動する条件への対応力が課題である。また、緊急時における迅速なデータ入力・統合の実現や、大規模な地理的範囲や複雑な気象条件への適用にはさらなる検討が必要である。

D.L. McGuffin (2024) 71]らは、核関連災害時の放射性降下物（フォールアウト）の粒子サイズ、組成、輸送の予測モデリングに焦点を当て、既存の経験的モデルの限界を克服し、物理ベースの粒子微物理モデルを利用し、より信頼性の高い予測を可能にする手法を提案し、核関連災害時のフォールアウト予測における物理ベースのアプローチの可能性を示した。なお、核関連災害時のフォールアウトの予測は、公共安全における迅速な意思決定や核鑑識において重要であり、従来モデルは、主にネバダや太平洋での限定的な条件下の測定データを基に構築されており、都市化地域など異なる環境条件への適用に課題がある。当該研究では、物理ベースの粒子微物理プロセスモデリングを導入し、より正確な予測を目指した。

採用した手法としては、粒子微物理学を用いてフォールアウト粒子の生成、進化、放射性物質との相互作

用をモデリングし、核形成、凝縮、凝集といった基礎的プロセスを考慮した。また、従来の経験的モデルと比較し、物理ベースのアプローチが持つ可能性を評価した。

得られた主要な結果としては、物理ベースのモデルはフォールアウトの粒子サイズや放射性核種分布をより正確にシミュレーション可能であり、現在の経験的モデルで生じる不確実性（特に異なる環境条件での粒子サイズや放射能分布）を大幅に削減する可能性があることが挙げられる。

物理ベースの微物理モデルは、異なる地域や環境条件でのフォールアウト挙動を高精度で予測可能であり、粒子の生成と進化を記述する微物理プロセスの導入により、フォールアウトモデリングの現実性と信頼性が向上する。これにより、フォールアウトの詳細なシミュレーションが核鑑識の迅速な対応を可能にすると考えられる。

一方、課題としては、物理ベースのモデルは高い計算リソースを必要とするため、効率的なアルゴリズムの開発が必要である。また、都市化地域や複雑な地形を考慮したモデリングのさらなる改良が求められ、微物理プロセスのモデル化に必要な実験データの不足が課題である。

B. Tenti (2024) 72]らは、緊急時における大気中の汚染物質拡散予測の分野で、迅速かつ効果的な意思決定を支援する新たなツールとして「SAPERI」を提案した。産業事故や火災による大気中への汚染物質の急激な放出は、環境や人間の健康に深刻な影響を及ぼす可能性があり、緊急時には、汚染物質の拡散を迅速かつ正確に予測し、効果的な対応策を講じることが求められる。

SAPERI は、緊急時に大気中への汚染物質の拡散を迅速にシミュレーションするためのモデリングチェーンを構築することを目的としており、特に、事故の詳細情報が限られている初期段階でも汚染物質の拡散状況を提供し、意思決定を支援することを目指している。なお、当該ツールは Lagrangian 粒子拡散モデルである SPRAY-WEB を基盤としており、OpenACC で実装された GPU による並列化を通じてローカルまたはクラウドの計算リソースを活用する。気象データは、イタリアの Meteo Italian SupercompuTing PoRtAL（MISTRAL）コンソーシアムが提供するオープンな予測情報を使用している。

実施したシミュレーションでは、モデルが地上最大濃度やマップを通じて緊急事態の影響を定量的・定性的に評価し、2021 年 12 月にイタリアのトリノ県ベイナスコで発生した実際の事故をケーススタディとして、限られた入力データでのモデルの有効性を検証した。気象予測の評価では、MISTRAL から得られた風速や気温の予測値を現地の気象観測データと比較しモデルの精度を評価した。さらに、拡散モデルから得られた汚染物質の濃度を事故の影響を受けた 3 つの大気質モニタリングステーションの観測値と比較した。

得られた主な成果としては、SAPERI が事故初期の限られた情報でも汚染物質の拡散を迅速に予測し、意思決定者に有用な情報を提供できることを示した点が挙げられる。また、気象予測と実測データの比較によりモデルの信頼性が確認され、拡散シミュレーションの結果も観測データと良好な一致を示した。また、SAPERI は、専門知識の少ないユーザーでも操作可能なシンプルなインターフェースを備えており、緊急時の迅速な対応を支援する。

その一方、課題としては入力データの不確実性があり、緊急時には汚染源の詳細情報が不足することが多く、モデルの初期条件設定に不確実性が生じる可能性がある。また、高精度なシミュレーションには GPU などの高度な計算資源が必要であり、これらのリソースが利用できない場合の対応が課題となる。さらに、異なる種類の事故や多様な地理的条件下でのモデルの適用性をさらに検証し、汎用性を高める必要がある。

○本項（８）のまとめ

M. Sharan (2012) 66]らは、移流拡散方程式の随伴方程式を基に、時間方向を逆に解く解析手法により、大気中の濃度測定データから放出源の位置と強度を推定する方法を示した。**Z. Li (2021) 67]**らは、偏微分方程式の解を求めるための新しいディープラーニング手法である Fourier Neural Operator（FNO）を提案した。**G. Wen (2022) 68]**らは、多相流問題の数値シミュレーションを高速かつ高精度に行う新しいディープラーニングモデル、U-FNO（U-拡張フーリエニューラルオペレーター）を提案した。また、**A. Ayoub (2024) 70]**らは、U-FNO を用いて、WSPEEDI の結果を学習させ、エミュレーターとする方法を示した。

A. Buan (2023) 69]らは、粒子拡散モデリングの最新の進展についてレビューして、今後の研究と技術的応用の課題を示し、**D.L. McGuffin (2024) 71]**らは、粒子の微物理モデルを基に、粒子の形成、凝縮、凝集などの基礎的プロセスを考慮した予測手法を提案した。

B. Tenti (2024) 72]らは、イタリアで開発された緊急時の大気中の汚染物質拡散予測の分野で、迅速・効果的な意思決定を支援する新たなツール「SAPERI」について報告した。

2.4.2 クラウドシャインによる線量評価に係る文献調査

本項では、主に大気中の放射性プルームからクラウドシャインによる線量率分布を計算する方法に注目し、それらの文献をレビューする。当該計算は、放射性プルームが 3 次元的拡がりを持つことから、計算コストが一般に高く、計算コストを低減するための取組が研究されてきた。本項では、FFT を用いた線量計算コードや、高精度な大気拡散予測モデルと連携する線量評価手法まで、その技術的な発展の跡を辿る。

S.S. Raza (2001) 73]らは、大気中における放射性プルームからのガンマ線線量率を直接計算するために、乱流を伴う大気中での放射性核種の拡散挙動を詳細にモデル化する 3 次元ラグランジュ（モンテカルロ）手法を提案した。

放射性核種が大気中に放出されるシナリオに対し、γ 線線量率を評価することは、災害時のリスク評価や対応策において重要となる。従来のガウスプルームモデル（GPM）では、乱流や風の剪断効果（高度による風向変化）を十分に考慮できない場合がある。当該研究では、放射性物質の連続的な放出を多数のラグランジュ粒子としてモデル化し、粒子の軌跡を、乱流特性（風速の変動、渦寿命など）を考慮し追跡することで、約 25 時間にわたる大気中でのシミュレーションを実施した。各粒子を放射線源として扱い、γ 線線量率は空気中の減衰やビルドアップ因子を適用して計算し、地表の線量率はすべての粒子からの寄与を合計して算出した。

得られた結果として、均一な大気条件下で提案手法と GPM の結果は良く一致した。但し、高度による風向変化を考慮すると、垂直な平均風成分による水平拡散の強化により、20km を超える距離で数値的結果が GPM の結果を下回ることが確認され、これにより長距離での修正 GPM の必要性が示唆された。

提案手法は、均一および非均一な大気条件での γ 線線量率の高精度な評価を可能にし、短距離から中距離での結果は既存モデルと一致することで妥当性が確認された。また、風速変動や風向変化を詳細に考慮することで、従来モデルの課題を指摘している。以上より、提案手法は、汚染物質拡散の動態をより現実的に評価し、災害時のリスク評価や対策に活用可能であると考えられる

その一方、モンテカルロ法の計算負荷が高いため、効率的なアルゴリズムの開発が求められる。また、異なる大気条件や核種分布への適用性をさらに検証する必要がある。

J.M. Gillis (2014) 74]らは、ロスアラモス郡における住民のバックグラウンド放射線量を評価し、全国平均との比較を行った。その結果、この地域の住民は全国平均よりも高い自然放射線量を受けているが、これ

は主に標高の影響であり、LANL 由来の放射線影響は限定的であることが示された。

ロスアラモス国立研究所（Los Alamos National Laboratory, LANL）は、アメリカ・ニューメキシコ州ロスアラモス郡に位置する研究および核兵器開発施設であり、その周辺住民は自然放射線だけでなく、職業的放射線被ばくや施設からの放射性排出物の影響を受ける可能性がある。

当該研究では、自然放射線、宇宙線および宇宙起源の放射線、地球由来の放射線、人工放射線、医療関連（例：X 線、CT スキャン）、産業活動、消費製品由来の放射線を評価対象の放射線源として取り上げ、米国放射線防護測定評議会（National Council on Radiation Protection and Measurements, NCRP）の 2009 年の報告書（NCRP 160）を参照し全国平均値との比較を行った。NCRP 160 では、米国一般住民の年間実効線量は平均 6.2mSv と報告されており、この値とロスアラモス郡の実測データを比較し、差異を分析した。

当該研究の主たる結果としては、ロスアラモス郡の住民の自然放射線レベルは、標高の影響により全国平均よりも高い傾向が見られた。特に宇宙線起源の放射線量が高く、標高の影響が顕著であることが確認された。その一方、医療診断や産業活動由来の放射線量は、米国全体の平均と大きな差はなかった。また、施設由来の放射線源放出が住民の背景線量に顕著な影響を与えている証拠は見られなかった。これらの結果から、全国平均を単純適用することの課題が指摘され、特に標高が高い地域では宇宙線の影響を考慮した補正が必要であることが示唆された。

以上、当該研究の成果としては、ロスアラモス郡の住民が受ける自然放射線量を定量的に評価し、全国平均との比較を通じて地域ごとの環境要因が放射線量に影響を与えることを明確にしたことが挙げられる。また、LANL 由来の放射線源放出は住民のバックグラウンド放射線量に大きな影響を与えていないことが示唆され、住民の放射線被ばくの主な要因は、自然放射線（特に宇宙線）と医療診断であることが確認された。さらに、標高が放射線量に与える影響の重要性が指摘され、標高の高い地域では宇宙線の影響で放射線量が上昇するため、全国平均をそのまま適用することの問題が示された。これらの結果は、事故時のクラウドシャインの評価を行う際、バックグラウンド放射線量を加味する際に考慮する必要があると考えられる。

その一方、課題としては、他の環境要因との相関分析の必要性が挙げられる。本研究では、標高と放射線量の関係に注目したが、土壌成分や地質的要因との相関について、詳細な評価が必要である。また、長期的なデータ収集の重要性も指摘されており、時間的変動（季節変化、長期的変動）についての分析が必要である。さらに、LANL の職員は、職業的な放射線被ばくを受ける可能性があり、その影響とバックグラウンド放射線の相互作用についての評価が必要である。

M. Mcnaughton (2017) 75]らは、米国環境保護庁（EPA）の拡散モデル CAP-88 における「クラウドシャイン」（放射性雲からのガンマ線照射）線量計算の精度を評価した。当該研究では、CAP-88 が特定の条件下で線量を過小評価する可能性を調べ、誤差の発生条件を特定することを目的としている。

CAP-88 とは、地上濃度と「半無限雲近似」に基づいて地表線量を計算する拡散モデルで、環境放射線評価に広く用いられている。しかし、安定な大気条件下で、煙突排出のような高度の高いプルームの影響を受ける場合、線量が過小評価されることがある。そこで、当該研究では、CAP-88 によるクラウドシャイン γ 線線量計算の誤差を特定し、その誤差の影響を推定することを目的としている。

採用した手法としては、CAP-88 の計算結果をモンテカルロ N 粒子（MCNP）法による詳細なシミュレーション結果と比較し、排出源から下流 800m および 3, 000m の地点で、0～50m のプルーム高度条件下で比較した。年間線量を算出し、CAP-88 と MCNP の差異を評価した。

得られた結果としては、安定な大気条件下で、煙突から放出されたプルームによる地表線量は、CAP-88 で

過小評価される傾向が確認された。ただし、他の条件下では、CAP-88 による計算値は MCNP の結果に匹敵またはそれ以上である場合も見られた。

当該研究の成果としては、CAP-88 がほとんどの条件下で γ 線線量を適切に評価するが、高高度プルームと安定な大気条件では過小評価する可能性が示されたことが挙げられる。また、MCNP を基準として用いることで、CAP-88 の適用範囲と限界が明確化された。これにより、CAP-88 の計算結果を補完する新しい補正手法の開発や環境評価の信頼性向上に繋がる可能性がある。

その一方、課題としては、高高度プルームや特定の気象条件下での過小評価を補正するためのアルゴリズム改良が必要である。また、本研究で評価されていない気象条件や地形影響のモデル適用性を検討する必要があるが、高精度シミュレーション（MCNP）を用いた検証は、計算負荷が大きいため、効率的な手法が求められる。

X. Li (2018) 76]らは、任意の大気中放射性核種の分布から 3 次元放射線線量率場を正確かつ超高速で推定する手法を提案した。当該研究は、従来の 1 次元または 2 次元の線量率推定法の限界を克服し、3 次元の影響評価を可能にする技術を開発することを目的としている。

大気中の放射性核種による線量率分布を 3 次元で評価することは、環境中の被ばくリスクを評価する上で重要である。しかし、従来手法は、計算速度を重視するため、精度等を犠牲にし、3 次元の評価は困難と考えられてきた。当該研究では、3 次元積分（大気中の 3 次元分布からの影響を推定するには、3 次元の積分計算が必要となる）を効率化することで、高速かつ正確な線量率評価を目標とした。

提案手法としては、時間のかかる 3 次元積分を畳み込み形式に再定義し、FFT（高速フーリエ変換）を使用して計算を加速している。この畳み込み形式は、任意の大気拡散モデルおよび核種分布に適用可能であり、仮定や近似を使用しない正確な手法となっている。

なお、シミュレーションにより、提案手法の有効性が確認され、単純および複雑な拡散シナリオにおいて、正確で高速な計算が可能であることが確認された。

当該研究の成果としては、計算速度を数桁向上させつつ、精度を維持し、あらゆる大気拡散モデルに対応可能で、現実的なシナリオでの適用を支援する高速計算を実現可能であることを示した点が重要と考えられる。また、3 次元評価が可能となることで、放射線防護計画策定にも寄与することが期待される。さらに、任意の核種分布にも適用可能であり汎用性の手法に位置づけられる。

その一方、課題としてはさらなる応用拡大に対応し、他の気象条件や拡散モデルへの適用性を検証し、一般化を進める必要がある。また、非常に大規模なシミュレーションでは、更なる効率化が求められる可能性がある。

T. Sato (2018) 77]らは、最新版の PHITS コードについて解説した。PHITS（Particle and Heavy Ion Transport code System）とは、加速器設計、放射線シールド設計、医療物理学、宇宙線研究等の分野で広く使用されている放射線輸送シミュレーションコードであり、2013 年にリリースされた PHITS 2.52 以降の改良点を含む PHITS 3.02 の新機能を紹介し、特に精度向上と適用可能エネルギー範囲の拡大を目的とした物理モデルの更新について説明した。当該コードは、クラウドシャインによる線量評価の際に使用されるコードの一つであり、本項にて取り上げた。

PHITS 3.02 では、核反応モデルと原子相互作用モデルの改良によりシミュレーションの精度が向上し、エネルギー範囲の拡大により多様な物理現象に対応可能となった。また、電子・陽電子輸送手法の拡張として、広範囲のシミュレーションに使用可能な凝縮履歴法（condensed history method）*と、液体水中での精

密なシミュレーションが可能なトラック構造モード（track-structure mode）*が採用されている。

さらに、ユーザーサポート機能として、統計精度を向上させる対話的操作の追加、新タリー機能、ラジオアイソトープ生成機能、医療物理学用のツール群が追加されている。これにより、PHITS 3.02 は、改良された核反応モデルと新しい機能を活用することで、従来バージョンよりも高い精度と広い適用範囲を実現させ、登録ユーザー数は、3, 000 名を超え、加速器設計、放射線防護、医療物理学、宇宙線研究など幅広い分野で活用されている。

当該研究の成果としては、シミュレーション精度とユーザビリティの向上により、PHITS が多様な科学研究において不可欠なツールとしての地位を確立し、特に医療物理学分野における応用が進展し、実務に貢献していることが挙げられる。その一方、課題としては電子・陽電子輸送におけるトラック構造法が液体水以外の媒体への適用が制限されているため、さらなる拡張が求められている。

*凝縮履歴法（condensed history method）、*トラック構造モード（track-structure mode）：電子・陽電子輸送シミュレーションにおいて、1keV 以上のエネルギーの場合は、EGS5 モードの凝縮履歴法が、また 1meV から 1keV のエネルギーの場合にはトラック構造モードでの計算が推奨される。エネルギーの大きさにより 2 つを切り替える。

S. Fang (2020) 78]らは、3 次元ガンマ線線量率を迅速に評価する手法の開発を報告した。原子力事故の際には大気中の放射性核種が放出され、ガンマ線線量率の評価が放射線防護において重要な課題となるが、これまでの手法では均等に配置されたグリッド（equispaced grids）上での計算に特化しており、実際の環境で必要とされる非均一グリッド（non-equispaced grids）での計算が困難だった。当該研究では、複雑な大気中の放射性核種分布を考慮した、非均一グリッド上での 3 次元 γ 線線量率を迅速に評価する手法の開発を目的とした。

採用した新規手法としては、非均一グリッドに対応した高速な 3 次元 γ 線線量率計算法を開発し、計算精度を維持しながら、従来の均一グリッド法と比較し処理速度の向上を図っている。非等間隔グリッド上の線量率フィールドを評価するため、3 次元積分を正規化された滑らかな関数と小さな補正項を含む 3 自演畳み込みの 2 つの部分の合計に分解し、前者を非一様高速フーリエ変換（NFFT）で解き、後者は原点付近でのみ計算されるため、計算速度全体が 68～142 倍高速化できる。

提案手法の精度と性能を評価するため、異なるシナリオにおけるシミュレーションを実施し、計算結果を既存の均一グリッド手法と比較して誤差の範囲を評価した。これにより、提案手法は非均一グリッドにおいても高い計算精度を維持しながら、従来手法と比較して大幅な計算速度の向上を実現し、複雑な放射線分布をより詳細に表現可能となった。特に放射性雲の広がりが不均一な場合に有効であり、計算結果の精度は標準的な数値解法と比較して十分な信頼性を示した。

当該研究の成果としては、原子力事故時の迅速なガンマ線線量率評価の可能性を大幅に向上させ、不均一な環境条件（不均一グリッドにて表現可能な条件）においても適用可能な新しい手法を確立したことが挙げられる。また、緊急時の放射線モニタリングシステムへの統合に向け有望となる基盤を提供した。

その一方、課題としては、実際の大気中の放射線環境データと比較した場合の適用性をさらに検証する必要があり、高速計算のアルゴリズム最適化により、さらなる計算負荷の軽減が求められる。また、放射線源の移動や気象条件の変化をリアルタイムで対応できるようにモデルの拡張が必要である。

D. Satoh (2021) 79]らは、局所スケールの大気拡散モデルと連携した新しいシミュレーションコード「SIBYL」を開発し、放射性プルームや汚染地面からの外部ガンマ線線量を迅速かつ正確に評価する手法を

提案した。当該研究の目的は、核関連事故発生時、放射性プルームや地面汚染による外部被ばく線量分布を迅速に推定するための新しいシミュレーション手法を提供することである。

SIBYL は、事前に評価された線量応答関数を利用して、対象地域内の線量分布を計算し、建物などの障害物による放射線遮蔽効果も考慮して評価する。ガウスプルームモデルと局所スケールのラージ・エディ・シミュレーション（LES）を用いた局所的な高解像度大気拡散モデルを組み合わせて検証した結果、SIBYL で計算された線量分布マップはフルモンテカルロシミュレーション（PHITS）と比較して、ほとんどの場所で誤差が 10%以内だった。計算速度は PHITS に比べ約 100 倍速く、最も計算負荷の高いタスクでも数十分以内で結果を提供可能である。

SIBYL は、高精度と高速性を両立させており、1 時間以内に地表線量分布を計算できる能力を持つ一方、モンテカルロシミュレーションに匹敵する精度を示している。また、建物などの遮蔽効果を取り入れ、現実的な線量分布を再現可能で、多様な気象条件や複雑な建物配置に対して有効であり、緊急時の被ばく評価に適用可能である。

その一方、課題としては、放射性汚染源から遠く離れた場所や複雑な建物配置の影響下での精度向上が求められる。また、緊急時におけるリアルタイム対応をさらに強化するための最適化が必要であり、他の放射性核種や異なる災害シナリオでの適用可能性を検証する必要がある。

S. Takahara (2022) 80]らは、福島の汚染都市地域における住民の被ばく線量を、複数の最先端の評価モデルを用いて推定し、モデル間の比較と実測データとの照合を行った。その結果、確率論的手法による評価が実測値と良好な一致を示し、より現実的な被ばく評価が可能であることが確認された。

福島第一原子力発電所事故による住民の被ばく線量を適切に評価することは、放射線防護や長期的な健康リスク管理の観点から極めて重要である。しかし、放射性物質の沈着や人々の生活パターンの違いにより、被ばく線量の評価には複数の不確実要因が存在する。本研究では、複数のモデルを用いて予測された線量を比較し、実際の測定データとの整合性を評価することで、モデルの精度や適用範囲を検証することを目的としている。

採用した手法としては、5 種類の異なる線量評価モデル（DPRO, ERMIN2, RESRAD-BUILD, UNSCEAR-TINT, METRO-K）を使用し、福島の都市部での被ばく線量を計算した。また、確率論的手法（Probabilistic Approach）と決定論的手法（Deterministic Approach）の両方を用いて解析を行い、モデル間で予測された線量の比較を行って被ばく線量のばらつきやモデルの特性を評価した。さらに、実際に測定された被ばく線量データとモデルの結果を比較し、モデルの精度を検証した。代表的な個人の線量評価も行い、国際放射線防護委員会（ICRP）および国際原子力機関（IAEA）による「代表的な個人」の概念に基づき、異なる環境での線量評価を実施した。

得られた主な結果としては、確率論的アプローチ（個々の生活習慣や移動パターンを考慮する手法）による線量評価は、実際の測定データと良好な一致を示し、一方で決定論的アプローチ（最大線量を仮定する手法）は確率論的手法よりも常に高い線量を予測する傾向があった。また、屋内作業者と屋外作業者の被ばく線量を評価した結果、確率論的モデルの予測は実測値とほぼ一致し、確率論的手法の方が実際の住民の行動パターンを反映した精度の高い評価が可能であることが示唆された。

成果として、複数の線量評価モデルの比較を通じて、確率論的モデルの方がより現実的な線量推定を提供できることが示され、決定論的手法は保守的な線量評価に適しているが、実際の被ばく線量との乖離がある可能性があることが分かった。また、福島の住民の被ばく線量評価において、屋内・屋外での線量の違いや

生活パターンによる影響を考慮することが重要であることが実証され、異なる評価モデルが適用可能であるが、モデル選択によって線量評価に差が生じるため注意が必要であることが示された。さらに、ICRP や IAEA の推奨する「代表的な個人」の概念を取り入れ、リスク評価の枠組みを確立した。

課題としては、モデルのさらなる精度向上が必要であり、本研究で使用したモデルは概ね良好な精度を示しているが、より詳細な環境データや個人の行動データを活用することで、さらなる精度向上が可能となる。また、長期間にわたる低線量被ばくの影響についても継続的な研究が必要であり、他の都市環境（異なる建築構造や地理的条件）での適用可能性を評価する必要がある。

H. Nakayama (2022) 81]らは、放射性物質の局所的な拡散挙動を高精度で解析し、線量評価を行うためのシステムの開発とその適用性を示し、緊急時の汚染拡散シナリオに対処するための新しい評価技術を提案した。なお、本研究の背景と目的は、放射性物質の大気中拡散が地形や気象条件の影響を強く受け、正確な評価が困難であることに起因する。従って、局所的な地形や気象条件を考慮した高分解能のシステムを開発し、被ばく線量評価の精度を向上させることを目的としている。

採用した手法としては、ラージ・エディ・シミュレーション（LES）を利用した拡散モデリングに基づき、地形や建物の影響を詳細に解析する。また、γ線の吸収および散乱を考慮した線量分布の計算手法を導入し、実際の事故シナリオや測定データと比較することで当該システムの妥当性を検証している。

システムの構成としては、入力ファイル前処理、LES を使用した局所規模の高解像度大気拡散モデル（LOHDIM-LES）、格子ボルツマン法に基づくリアルタイム都市拡散シミュレーションモデル（CityLBM）、そして格子線量応答関数に基づくシミュレーションコード（SIBYL）による線量計算が含まれる。

得られた結果としては、当該システムは、細かい地形条件下での汚染分布を高精度で予測可能であり、従来のガウスモデルを上回る精度を示した。また、緊急時対応に必要な迅速な計算能力を有し、現地での実用的応用が期待される。

成果としては、LES を活用することで局所的な拡散挙動と線量分布を正確に評価可能となり、システムは迅速な計算能力を備え、緊急事態での汚染評価や避難計画の策定を支援可能となったことが挙げられる。また、さまざまな地形や気象条件下で適用可能であり、現場での意思決定をサポート可能と考えられる。

しかし、今後の課題としては、異なる気象条件や地形におけるさらなる適用性評価、多様な環境での検証が必要である。また、高分解能モデルによる計算負荷を軽減し、リアルタイム応用を可能にする改良が求められる。最後に、現地からのリアルタイムデータを統合することで、システムの応答性をさらに向上させる必要がある。

X. Dong (2022) 82]らは、核関連の緊急時における 3 次元線量率場の計算手法を対象に研究し、従来の高速フーリエ変換（FFT）を用いた計算方法が均一グリッドに限定されている点に着目し、非均一グリッドでの適用可能性を、補間手法を通じて検討した。背景と目的は、放射線線量分布の 3 次元評価では、精度と計算速度の両立が求められ、FFT を用いることで高速計算が可能になるが、補間方法が計算結果に与える影響が十分に研究されていないことから、本研究は当該補間方法が FFT 計算結果の正確性と効率に及ぼす影響を評価し、最適な手法を特定することを目的とした。

採用した手法としては、放射線源と観測点の間の空間データを離散化し、FFT を用いて 3 次元線量率場を計算する。また、線量率の計算精度を向上させるために、線形補間、二次補間、高次補間などの異なる補間方法を比較し、結果の精度、計算速度、および適用性を評価する。

得られた主な結果としては、高次補間を用いると計算精度が向上する一方で計算時間が増加する傾向が見

られた。線形補間は最も高速であるが、複雑な分布では精度が劣る場合があることが示された。現実的な計算速度と精度を両立させるには、二次補間が最適であることを示唆した。

得られた成果としては、FFT 計算の最適化において補間方法が 3 次元線量率計算に与える影響を体系的に評価し、計算速度と精度のトレードオフを明確化したことが挙げられる。また、放射線防護や緊急時対応において、高速で信頼性の高い線量評価を実現するための具体的な設計指針を提供し、提案された手法は、医療や原子力災害時の迅速な線量評価に応用可能であることを示した点が挙げられる。

一方、課題としては、非均一グリッドを FFT に適用する際に補間誤差が線量率場の正確性に影響を及ぼす可能性があり、補間の種類やグリッド解像度の選択により誤差を最小限に抑える工夫が求められる。また、速度と精度のトレードオフにおいて、最近傍補間は速度面で優れるが、精度の向上と両立するための最適解像度の設定が必要である。

R. Ye (2024) 83]らは放射線防護や医療診断などで必要とされる高精度な放射線分布の再構築を迅速に実現するために、3 次元畳み込みニューラルネットワーク（3D CNN）の改良版を活用し、スパース（散在する）なデータから放射線場を再構築するアルゴリズムを提案した。背景と目的は、現地での放射線計測データが通常スパースであり、正確な 3 次元放射線分布を再構築することが困難であることから、放射線分布の完全な 3 次元マトリックスを生成するためにセルフアテンションメカニズム（self-attention mechanism）*を統合した改良型 3D CNN を提案した。

提案手法としては、放射線計測データを構造化された 3 次元マトリックスに変換し、改良型 3D CNN に入力する。また、セルフアテンションメカニズムによりデータ間の関連性を効果的に捉え、スパースデータからの正確な補間を実現する。さらに、遮蔽の有無やランダムに配置された放射線源を含む複数のシナリオで性能を評価する。

得られた主な結果としては、提案手法が従来のアルゴリズムと比較してより正確で完全な放射線分布を再構築し、遮蔽が存在する複雑な条件下でも高い信頼性と再現性を示したことが挙げられる。

得られた成果としては、改良型 3D CNN によりスパースデータを使用して放射線分布を高精度で再構築することが可能となり、提案手法が遮蔽や多様な放射線源を含む複雑なシナリオでも適用可能であることを示した点が挙げられる。また、データ間の関連性を適切に捕捉するセルフアテンションメカニズムの有効性を実証し、新しいアルゴリズム設計の基盤を提供することで従来手法の限界を克服し応用範囲を拡大したことが挙げられる。

しかし、課題としては、セルフアテンションメカニズムによる計算リソースの増加が挙げられ、効率的なアルゴリズム設計が必要である。また、緊急時の迅速な意思決定支援を可能にするため、リアルタイム処理の性能向上が求められる。さらに、異なる放射線源や環境条件での応用可能性を評価するさらなる研究が必要である。

*セルフアテンションメカニズム: 機械学習、特に自然言語処理(NLP)やコンピュータビジョンのタスクで使用される重要なメカニズムで、入力シーケンス内の依存関係や関係性を捉えることができる。

○本項（2.4.2）のまとめ

S.S. Raza (2001) 73]らは、大気中における放射性プルームからのガンマ線線量率を直接計算するために、従来のガウスプルームモデルに変えて、乱流を伴う大気中での放射性核種の拡散挙動を詳細にモデル化する３次元ラグランジュ（モンテカルロ）手法を提案した。各粒子を放射線源として扱い、ガンマ線線量率は空

気中の減衰やビルドアップ因子を適用して計算する。一方、**J.M. Gillis (2014) 74]**らは、ロスアラモス郡における住民のバックグラウンド放射線量を評価し、主に標高の影響による全国平均より高い自然放射線量を受けているが、これは主に標高の影響であり、LANL 由来の放射線影響は限定的であると報告した。

線量計算コードに関しては、**M. Mcnaughton (2017) 75]**らが、米国環境保護庁（EPA）の拡散モデル CAP-88 における「クラウドシャイン」線量計算の精度を評価した。また、**X. Li (2018) 76]**らは、任意の大気中放射性核種分布から 3 次元放射線線量率場を正確かつ超高速で推定する手法を提案した。これは、3D 積分を畳み込み形式に再定義し、FFT（高速フーリエ変換）を使用して計算を加速する。**S. Fang (2020) 78]** および **X. Dong (2022) 82]**らは、非一様高速フーリエ変換（NFFT)により非均一グリッド上での 3 次元ガンマ線線量率を迅速に評価する手法を開発した。これは、3D 積分を、正規化された滑らかな関数と小さな補正項を含む 3D 畳み込みの 2 つの部分の合計に分解して解く。**T. Sato (2018) 77]**らは、加速器設計、放射線シールド設計、医療物理学、宇宙線研究などの分野で広く使用されているシミュレーションコード PHITS 3.02 について、最新版の改良版の機能を報告した。

一方、**S. Takahara (2022) 80]**らは福島の汚染都市地域における住民の被ばく線量を、複数の最先端の線量評価モデル（DPRO, ERMIN2, RESRAD-BUILD, UNSCEAR-TINT, METRO-K）を用いて推定し、モデル間の比較と実測データとの照合を行った。**H. Nakayama (2022) 81]**らは、LOHDIM-LES、CityLBM、SIBYL を組み合わせて、放射性物質の局所的な拡散挙動を高精度で解析し、線量評価を行うためのシステムの開発とその適用性を示し、緊急時の汚染拡散シナリオに対処するための新しい評価技術を提案した。**R. Ye (2024) 83]**らは、放射線防護や医療診断などで必要とされる高精度な放射線分布計測データの再構築を迅速に実現することを目的として、3 次元畳み込みニューラルネットワーク（3D CNN）の改良版を活用し、スパース（散在する）なデータから放射線場を再構築するアルゴリズムを提案した。

2.4.3 グラウンドシャインによる線量評価に係る文献調査

グラウンドシャインとは、地表に沈着した放射性物質から放射される放射線による被ばくを指す。本項では、地表に沈着、あるいは土壌中に分布する放射性核種の影響から建物による放射線量低減に関する文献調査報告を行う。また、地表沈着量を考慮した事故後の大気放出量の逆推定等に係わる論文についても関連があると判断し、調査結果を報告する。

T.J. Overcamp (2009) 84]らは、ANSI/ANS-6.4.3-1991 のエネルギー吸収ビルドアップ係数がエネルギー保存則を満たすかどうかを検証した。その結果、空気、水、コンクリート、鉄ではエネルギー保存が確認されたものの、鉛とウランでは確認できなかったことが明らかになった。当該文献の背景と目的は、エネルギー吸収ビルドアップ係数（Energy Absorption Buildup Factors, EABF）が放射線遮蔽設計や線量評価において重要なパラメータである点にあり、フォトンのエネルギー吸収が正しく保存されるかどうか（エネルギー保存則が成り立つか）はシミュレーションや実験結果の妥当性を判断する上で重要な指標となるため、本研究では、ANSI/ANS-6.4.3-1991 のエネルギー吸収ビルドアップ係数を用いて単一エネルギーの光子が無限の吸収媒体中で放射された場合、エネルギー保存が成り立つかどうかを評価した。

手法としては、エネルギー吸収ビルドアップ係数の解析において、ANSI/ANS-6.4.3-1991 の EABF データをもとに自然三次スプライン補間を適用し、エネルギー吸収量を解析的に積分する。また、補助的に線形スプライン補間も用いて精度を比較する。エネルギー保存則の検証に関しては、空気、水、コンクリート、鉄に関しては Hubbell（NSRDS-NBS29）のエネルギー減衰および沈着係数を用いて評価し、鉛とウランに

関しては PHOTX のエネルギー減衰および沈着係数を用いた離散座標積分輸送法（discrete ordinates-integral transport method）*で評価する。

当該研究の成果としては、空気、水、コンクリート、鉄ではエネルギー保存が確認され、Hubbell のエネルギー減衰および沈着係数を用いた場合、ANSI/ANS EABF はエネルギー保存則を満たすことが確認された。しかし、鉛とウランではエネルギー保存を確認できず、PHOTX のエネルギー減衰および沈着係数を用いた結果、ANSI/ANS EABF では鉛とウランに関してエネルギー保存を確認できなかった。これは鉛やウランのような高密度材料における散乱効果の取り扱いに課題があることを示唆している。また、自然三次スプライン補間を用いたエネルギー吸収量の解析は、エネルギー保存の検証において有用であることが示された。

その一方、当該研究の課題として、鉛やウランにおけるエネルギー保存の欠如があり、ANSI/ANS EABF では高密度材料（鉛・ウラン）におけるエネルギー保存が成り立たない可能性が示唆されたため、放射線遮蔽設計での使用には注意が必要であることが分かる。また、特に高密度材料においては、より正確な散乱モデルの導入や異なる減衰係数の適用が求められる。さらに、今回の調査では 0.015～15MeV の範囲が対象だったが、より高エネルギー領域での影響を確認する必要がある。

*離散座標積分輸送法（discrete ordinates-integral transport method：DO-IT 法）は、中性子輸送、放射線輸送、大気放射、流体力学などの分野で用いられる輸送方程式の解法の一つで、放射輸送方程式（Radiative Transport Equation, RTE）を数値的に解く際に利用される。原子炉設計、医療、気象・環境モデリングなど幅広い分野で応用されている。

T. Furuta (2015) 85]らは、事故後の建物内部での放射線線量低減について調査し報告した。当該研究の背景と目的は、福島第一原子力発電所事故後、放射性セシウムが地表に沈着し、人の被ばく量を評価する際、建物内部での放射線量が重要な課題となった点にある。則ち、建物のサイズや建築材料による放射線遮へい効果を明らかにすることは、効果的な防護策の策定に不可欠であるため、本研究では、建物のサイズおよび材質が線量低減に与える影響を数値解析により評価した。

手法としては、モンテカルロシミュレーションコード「PHITS」を用いて、γ線輸送をシミュレーションした。建物モデルとしては、木造住宅、オープンスペースのコンクリート建築、薄壁建築の 3 種類をモデル化し、放射性セシウムが地表に沈着した環境を想定して床面積を変化させた建物等の屋内線量率を解析した。評価項目としては、屋内線量率の変化を建物のサイズおよび材料に応じて分析した。

当該研究の主な結果としては、床面積の影響において、すべての建物モデルで床面積の増加に伴い屋内の線量率が対数スケールで線形に減少したことが示された。則ち、建物が大きくなるほど、放射線遮へい効果が向上する一方、建材の影響では、コンクリート建築が木造建築に比べて線量低減効果が高いことが確認された。薄壁建築は、遮へい効果が最も低く、距離効果においては建物内部の線量分布を分析した結果、外壁からの距離が線量率の決定要因であり、外壁に近いほど線量が高く、中心部では低下することが示された。実測との比較では、計算結果が日本国内の典型的な建物における実測データと一致し、モデルの妥当性が確認された。

当該研究の成果としては、建物サイズが放射線低減に重要であることを定量的に示し、大規模建築がより高い線量低減効果を提供することを明らかにした点が挙げられる。さらに、異なる建材の遮へい効果を比較し、コンクリートが最も効果的であることを実証し、屋内の放射線防護策に向けた建築設計の指針となる知見を提供した。

その一方、課題としては、シミュレーションのみの評価であるため実測値との詳細な比較が必要であり、

放射線源の空間分布が異なる状況での影響を実際の家屋周囲の環境を考慮し、さらに検討する必要がある。また、建物躯体だけでなく、家具や内部構造が遮へいに与える影響も考慮すべきである。

Y. Hinrichsen (2018) 86]らは、除染活動の効率化に向けた新たな戦略を提供し、コスト削減と効果的な放射線防護に貢献する知見を提供するための研究を行った。その背景と目的は、放射性物質が環境中に放出された際の復旧フェーズにおける除染活動の最適化にある。則ち、効率的な除染には、放射線量が最も寄与するエリアに焦点を当てることが不可欠である。当該研究では、「等線量（Isodose）」の概念を導入し、建物周囲の最小限のエリアを特定することで、最大の線量削減効果を得ることを目的とした。

採用した手法としては、モンテカルロシミュレーションを適用し、建物の遮へい効果や外部の異なる方向からの放射線寄与度を分析した。放射性物質（Cs-137、Co-60）の地表および 1cm 深部への沈着を想定し、等線量（Isodose）ラインを適用して建物内部の特定観測点における線量削減に寄与する最小エリアを特定した。壁の厚さ、材質、建物形状、観測点の位置を考慮し、等線量マッピングを実施した。解析条件としては、1m²単位の表面解像度での計算を行い、4 つの異なる観測点を設定して地表および屋根からの放射線影響を評価した。また、汚染深度の影響も考慮し、表面および 1cm 下の沈着モデルを適用した。

当該研究の主な結果としては、除染による線量削減率が除染エリアの拡大とともに非線形的に増加することが示された。例えば、汚染がすべて 1cm の深さとする仮定では、線量を 10%削減する場合と 30%削減する場合を比較すると、30%削減には 10%削減のための 10 倍の面積を除染する必要があることがわかった。また、建物の形状や遮へい効果においては、建物の形状や壁の材質が線量削減に重要な要素として働き、コンクリート建築では壁厚が大きく遮へい効果が高いため、除染エリアの縮小が可能であることが確認された。さらに、等線量ラインの位置は建物の観測点ごとに形状が異なり、より効率的な除染計画立案が可能であることが示された。

当該研究の成果としては、等線量（Isodose）の概念を導入することで除染活動の最適化検討を実現し、必要最小限のエリアを特定することでコストと労力の削減が可能となった点が挙げられる。また、異なる放射性核種の分布も考慮し、効果的な除染計画の立案に貢献した。

その一方、課題としては、本研究が理論シミュレーションに基づいているため、実際の環境での実証研究が必要である他、建物の内部構造や家具等の影響が考慮されていないため、より精密なモデル化が求められることが挙げられる。また、除染活動の実施における人的要因（作業員の安全性など）の検討も、今後の課題として挙げられる。

H. Yoshida-Ohuchi (2018) 87]らは、建物の放射線遮へい能力に関する包括的なレビューを執筆し、被曝低減のための建築設計や政策策定に向けた重要な知見を提供した。当該研究の背景と目的は、放射性降下物として地表に沈着した放射性セシウム（Cs-137 など）によるγ線被曝が原子力事故後の住民の外部被曝評価において重要との点にある。特に、屋内環境における遮へい効果は長期的な被曝低減の観点から重要と考えられる。従って、当該研究の目的は、建物によるγ線遮へいおよび線量低減効果（reduction factors）を包括的にレビューし、ヨーロッパおよびアメリカの既存研究等との比較を行うことである。

用いた手法としては、過去の研究を基にシミュレーションおよび実測データのレビューを実施し、建物の遮へい効果を評価するために以下の要因を調査した：遮へい係数（Shielding Factor, SF）、保護係数（Protection Factor, PF）、低減係数（Reduction Factor, RF）、位置係数（Location Factor, LF）。これにより、住宅やオフィスビルなど異なる建物の材質や構造による影響を比較した。

当該研究の主な結果としては、過去の研究結果の分析から、建物の構造、材質、厚みがγ線遮へいに大きく

影響することが確認された。木造建築物の遮へい効果は低く、低減係数は約 0.3〜0.6 である一方、鉄筋コンクリート建築物の遮へい効果は高く、低減係数は約 0.1〜0.3 であった。また、窓の面積が増えるほど線量低減効果は低下し、建物の高さにおいては、高層階よりも低層階の方が屋外線源に近いため、線量が高くなることが示された。また、建物の遮へい効果は検討する位置や内部構造に応じて変動し、特に、1 階よりも 2 階以上で遮へい効果が高くなる傾向が確認された。得られた放射線低減効果は福島事故の実測データとも一致し、国際基準と比較可能な精度を示すことが確認された。

以上、当該研究の成果としては、建物の遮へい係数や低減係数の国際比較を提供し、放射線防護対策のための科学的根拠を提供した点が挙げられる。また、居住環境の設計において、建物の材質や配置が被曝低減にどの程度寄与するかを定量的に示し、放射線防護に関するガイドライン作成の基礎データとして活用可能であることを明らかにしたと判断できる。

その一方、課題としては、日本特有の建築様式や生活スタイルに対する詳細な検討が不足しており、さらなる研究が必要である点が挙げられる。また、建築物の老朽化や劣化による遮へい効果の変化が考慮されておらず、長期的な放射線の動態変化を含めた調査が求められる。

M. Iijima (2021) 88]らは、福島第一原発事故における放射性セシウム Cs-137 と放射性ヨウ素 I-131 の放出量を、累積沈着データを用いた逆推定手法によって評価した。この新手法は、従来の空気中濃度を用いた手法と比較して、より安定したデータに基づく高精度な評価が可能であることを示した。当該研究の背景と目的は、福島第一原子力発電所事故で大量の放射性核種が環境中に放出され、特に放射性セシウムと放射性ヨウ素の放出量を正確に把握することが、住民の被ばく評価や環境影響を理解する上で不可欠である点にある。従来、逆推定による放射性物質の放出評価は大気中の放射能濃度データを用いて行われていたが、事故直後の放射性プルームの通過時における空気中の放射能濃度の測定が困難でデータが限られていた。当該研究では、新たな逆推定手法として地表面に沈着した放射性物質の総累積沈着量（total cumulative deposition density）を用いた手法を開発し、放出量とそのタイミングを再評価することを目的とした。

採用した手法としては、大気輸送・拡散・沈着モデル（ATDM: Atmospheric Transport, Dispersion, and Deposition Model）を用いて大気中の放射性物質の移動を再現し、測定データとシミュレーション結果を組み合わせて放射性物質の放出量を逆推定した。則ち、大気中の放射能濃度ではなく、地表面に蓄積した Cs-137 と I-131 の沈着データを基に逆推定を実施し、測定データの空間分布を考慮し、複数の異なるタイミングでの放出を特定した。また、過去の研究で大気中濃度や空間線量率を用いて推定されたデータと比較し、本研究の手法の妥当性を検証した。

当該研究の主な結果としては､本研究の手法によって Cs-137 と I-131 の主要な放出が 2011 年 3 月 15 日、20 日、21 日、22 日、25 日、30 日に発生したことが特定された。これは事故の進展とも一致しており、過去の研究結果とも大きな矛盾がないことが確認された。放出量の推定結果として、Cs-137 の放出量は約 4.9 × 10^15 Bq、I-131 の放出量は約 120 × 10^15 Bq と推定され、これらの値は、従来の大気中濃度を基にした推定結果と整合性があり、新しい手法の妥当性が示唆された。累積沈着データを用いた逆推定の有効性として、従来の手法（大気中放射能濃度を用いた逆推定）ではデータが限られていたが、新手法ではより安定したデータセットを使用できるため精度が向上したと考えられる

当該研究の成果としては、新しい逆推定手法の確立により地表沈着データを利用することで従来の空気中濃度データの不足を補い､より信頼性の高い放出量の推定が可能であることを示した点が挙げられる｡また、放出タイミングの明確化により主要な放出イベントが特定され、今後の環境影響評価や健康リスク評価の基

盤となるデータを提供できた点も挙げられる。また、過去の研究との整合性を確認し、他の研究と比較しても本手法の推定結果は大きな差異がなく、科学的に妥当であることが示されている。

その一方、課題としては、長期的な放射性物質の移動に関する評価があり、当該研究では、主に事故直後の放射性物質の放出に焦点を当てているため、長期的な再浮遊や移動の影響を評価する必要がある。また、異なる地理的条件への適用として、当該手法は福島地域の環境データを用いているが、異なる地理的条件（例えば森林地域や都市部）に適用する際の精度検証が求められる。さらに、当該研究では主に、Cs-137 と I-131 に焦点を当てているが、他の核種（Sr-90 やプルトニウム）についても同様の手法が適用できるか検討が必要である。

M. Ota (2021) 89]らは、福島第一原発周辺における放射性セシウム Cs-137 の再浮遊について、土壌粒子だけでなくバイオエアロゾルも重要な要因であることを明らかにした。当該研究の背景と目的には、福島第一原子力発電所事故により大気中に大量の放射性核種が放出され、その後地表に沈着したが、沈着した放射性 Cs-137 が土壌粒子やバイオエアロゾル（生物由来のエアロゾル）によって再浮遊し、大気中に再び取り込まれる可能性がある点にある。則ち、バイオエアロゾルが大気中の Cs-137 にどの程度影響を与えるかを定量的に評価することである。

採用した手法としては、福島第一原発周辺の異なる地点で大気中の粒子をサンプリングし、土壌粒子とバイオエアロゾルの両方を対象にサンプルを収集した。サンプリングしたエアロゾル試料に対し、γ 線スペクトロメトリーを用いて Cs-137 の濃度を分析し、サンプル中のバイオエアロゾル（菌類、植物由来粒子、植物の破片など）を分析し、風速、気温、湿度などの環境要因と土壌粒子およびバイオエアロゾル中の Cs-137 濃度を比較し、再浮遊がどのように発生するのかを解析した。

当該研究の主な結果としては、土壌粒子だけでなくバイオエアロゾルも Cs-137 の再浮遊に寄与することが確認され、バイオエアロゾルにも Cs-137 が付着しており、大気中での移動が確認された。以上、風による土壌粒子の再浮遊が主な要因であることは変わらないが、バイオエアロゾルも無視できない寄与を持つことが示された点が挙げられる。また、乾燥した条件では、土壌粒子の再浮遊が主要なメカニズムとなるが、高湿度条件では、バイオエアロゾルの影響が増加することが確認され、特に夏季には菌類由来のバイオエアロゾルが増加し、大気中の Cs-137 の濃度に影響を与える可能性があることが示された。Cs-137 は、一度地表に沈着した後もさまざまなメカニズムによって大気中に再浮遊することが確認され、長期間にわたる放射線被ばくのリスクを評価する際にはバイオエアロゾルの影響も考慮する必要がある。

以上、当該研究の成果としては、バイオエアロゾルが放射性セシウムの再浮遊に寄与することを初めて定量的に評価し、これまで風による土壌粒子の再浮遊のみが強調されていたが、本研究によりバイオエアロゾルの重要性が明らかになった点が挙げられる。また、気象条件と Cs-137 の再浮遊の関連を解明し、湿度や季節変化によって再浮遊の主要メカニズムが変化することを明らかにし、より詳細な被ばく評価が可能になった点も挙げられる。これらの知見により、長期的な放射線リスク評価の新たな視点を提供し、これまでの評価では考慮されていないバイオエアロゾルの影響を加味することで、より正確な環境リスク評価が可能になった点は評価できる。

その一方、課題としては、バイオエアロゾルの影響の定量化のさらなる精度向上が必要であり、どの種類のバイオエアロゾルが、どの程度の影響を持つのかについてはさらなる詳細な研究が必要である。また、主に、Cs-137 に焦点を当てたが、Sr-90 やプルトニウムなどの他の放射性核種についても同様の影響があるかどうかを評価する必要がある。さらに、広範囲での適用として福島第一原発周辺のデータを基にしているた

め、他の地域（森林地域や都市部）でも、同様の影響が見られるかを調査する必要がある。

D. Satoh (2024) 90]らは、土壌中に無限の深さまで均一に分布する放射性核種に対する外部被ばく線量率係数を計算し、その妥当性を検証した。その結果、1252 種類の放射性核種の線量率係数が算出され、自然放射性崩壊連鎖や電子による制動放射の影響を考慮した高精度なデータセットが提供された。当該研究の背景と目的には、放射線防護の分野で土壌中に一様に分布する放射性核種が、外部被ばく線量に与える影響を定量化することの重要性に基づく点が挙げられる。自然由来および人工由来の放射性核種が環境中に存在する場合、住民の外部被ばく評価のための線量率係数（Dose-rate Coefficients, DRCs）の正確な算出が必要である。

採用した手法としては､データベースを用いた線量率係数の評価において､ICRP(国際放射線防護委員会)の外部被ばくデータベースを活用し、放射性核種の放出する光子と電子の線量率係数を評価した。25 の異なるエネルギーポイント（10^{-2}～8MeV）を対象に単一エネルギーごとの線量率係数を計算し、97 元素にわたる 1252 種類の放射性核種の線量率係数を算出した。電子が土壌中で発生させる制動放射（ブレムストラールング）による追加線量寄与も考慮し、トリウム系列 Th-232、ウラン系列 U-238、アクチニウム系列 U-235 などの自然放射性崩壊連鎖を考慮している。Cs-137 とその娘核種 Ba-137m の放射平衡状態を反映し、ベイトマン方程式*を用いた解析を実施した。既存研究との比較においては、K-40、V-50、トリウムおよびウラン系列、Cs-137/Ba-137m の線量率係数を既存の研究と比較し、誤差が 10%以内であることを確認した。

当該研究の主な結果としては、土壌中の放射性核種の線量率係数を高精度に算出し、1252 種類の放射性核種に関する線量率係数を計算し、放射線防護の基準データとして利用可能であることが示した点が挙げられる。また、外部被ばくの影響評価を詳細に行うための包括的なデータセットを提供している。以上、放射性崩壊連鎖の影響を定量化し、自然放射性核種の崩壊連鎖が線量率に与える影響を考慮することで、より現実的な被ばく評価が可能になった点が重要と考えられる。環境放射線評価への適用可能性としては、廃棄物処理場や埋立地など、自然放射性物質を含む土壌が存在する場所での放射線防護計算に適用可能であることも示唆される。さらに、ブレムストラールングによる追加線量の影響を評価したことで、従来の単純なモデルよりも精度の高い線量評価が可能となった。

当該研究の主たる成果としては、線量率係数の包括的なデータセットを提供し、自然および人工放射性核種の外部被ばく評価を行うための信頼性の高いデータを構築し、ICRP の標準データと整合性があることを確認した他、実用的な指標も確立した。環境放射線の影響評価を向上させ、放射性核種の崩壊連鎖を考慮した精密な線量評価を実施することで、自然放射線が含まれる土地利用（例:埋立地、鉱山地域）の評価にも応用可能となった。また、他の研究との比較による信頼性の向上としては、K-40、V-50、トリウムおよびウラン系列、Cs-137 の線量率係数が、既存の研究と 10%以内の誤差で一致している。

その一方、課題としては、当該研究では、無限深度の土壌を仮定しているが、より詳細な環境因子を考慮し、実際の土壌条件（密度の変化、水分量、鉱物組成）を考慮した追加研究が必要と考えられる。また、異なる地形条件での適用として、都市部、森林、農地など、異なる環境での適用可能性も検証する必要がある。さらに、放射線防護基準への統合として、今回の研究で得られた線量率係数を ICRP や IAEA などの国際機関の防護基準へ組み込むためのさらなる検討が求められる。

*ベイトマン方程式（Bateman Equation）：放射性核種の崩壊連鎖を数式的に記述する重要な方程式で、時間とともに変化する放射能や線量率を正確に予測するために使われ、原子力安全、環境放射線評価、医療用放射線の管理に応用される。

○本項（2.4.3）のまとめ

放射線遮蔽設計や線量評価において重要なパラメータであるエネルギー吸収ビルドアップ係数について**T.J. Overcamp (2009) 84]**らは、ANSI/ANS-6.4.3-1991 のエネルギー吸収ビルドアップ係数を用いて、単一エネルギーの光子が無限の吸収媒体中で放射された場合にエネルギー保存が成り立つかどうかを評価し、空気、水、コンクリート、鉄ではエネルギー保存が確認されたが、鉛とウランではエネルギー保存を確認できなかったと報告した。**T. Furuta (2015) 85]**らは、地表に沈着した事故後の建物内部での放射線線量低減について調査し、床面積の増加に伴い屋内の線量率は減少し、放射線遮へい効果が向上したと報告した。**Y. Hinrichsen (2018) 86]**らは、建物の遮へい効果や、外部の異なる方向からの放射線寄与度を分析し、等線量（Isodose）ラインを提案して、より効率的な除染計画立案を提案した。**H. Yoshida-Ohuchi (2018) 87]**らは、建物の放射線遮へい能力に関する包括的なレビューを提供し、被曝低減のための建築設計や政策策定に重要な知見を提供した。

M. Iijima (2021) 88]らは、福島第一原発事故における放射性セシウム ^{137}Cs と放射性ヨウ素 ^{131}I の放出量を、表面に沈着した放射性物質の総累積沈着量を用いて逆推定し、従来の空気中濃度データの不足を補い、より信頼性の高い放出量の推定が可能であることを示した。**M. Ota (2021) 89]**らは、福島第一原発周辺における放射性セシウム 137Cs の再浮遊について、土壌粒子だけでなくバイオエアロゾルも重要な要因であることを明らかにした。**D. Satoh (2024) 90]**らは、土壌中に無限の深さまで均一に分布する放射性核種に対する外部被ばく線量率係数を計算し、その妥当性を検証した。

2.4.4 屋内でのクラウド及びグランドシャインによる線量評価に係る文献調査

大気中に拡散された放射性物質は、やがて地表に沈着し、その一部は屋内に侵入する。屋内に侵入した物質の挙動を把握することは、屋内退避の効果を確認する上でも重要である。本項では、一般の汚染物質の建物への侵入の過程や室内換気に関する研究も含めて、放射性物質の侵入及び拡散と建物環境における動態やその被ばく線量への影響評価に係わる論文をまとめて報告する。

V.I. Romanov (1995) 91]は、放射性危険区域周辺での放射性物質の伝播特性を解析し、放射性核種の移動が汚染源周囲の局所的な熱および風条件に強く依存することを強調した。その背景として、原子力施設からの環境への放射線物質拡散影響は主にガスエアロゾル排出に起因し、汚染源周辺の風および熱的干渉を無視したまま、実験室レベルの伝播および拡散の結果を直接適用すると、誤った結論につながる可能性があることが挙げられる。

当該研究では、排気筒や換気システムからの排出と原子炉建屋内からの汚染物質の漏洩とその大気中への拡散の 2 つの主要なシナリオを解析し、対流ジェットのアーキメデス数*が風速に応じてどのように変化するかを示す数学的モデルを提供した。その結果として、汚染物質の伝播は局所的な気象条件（例:風向や熱条件）に依存しており、これが建物や地形の影響を受ける形で変化することが示された。屋外での汚染物質拡散には、特に汚染源周囲の微気象条件を考慮した詳細な評価が必要であることが確認された。

当該研究の成果としては、対流ジェットの動態を記述するための数学モデルを構築し、汚染物質伝播の特性を定量化するモデルの提案が挙げられる。これにより、汚染拡散の理解を深めることで放射性物質取扱い施設の設計および運用改善に貢献できることを示したことが挙げられる。また、汚染物質の伝播特性を正確に評価するため、局所的な熱的および風条件の考慮が必須であることを強調した。

その一方、課題としては、異なる施設や気象条件でのモデル適用性を評価する必要があり、多様な条件での検証が求められる。また、放射性物質が環境および生態系に与える長期的影響の評価が不足している点が挙げられる。さらに、緊急時対応のため、リアルタイムでの汚染物質動態解析技術が求められる点も課題として示された。

*アーキメデス数（Archimedes Number, Ar）：浮力と慣性力の比を表す無次元数であり、温度差によって発生する浮力により駆動される噴流（対流ジェット流）の特性を示す。

A. Clouvas (2001) 92]らは、ギリシャ本土 41 都市における屋内および屋外のγ線放射線量を詳細に調査し、天然放射性核種と人工放射性核種（Cs-137）の寄与を分析した。その背景と目的は、環境中のγ線放射線量の評価において、屋内と屋外での放射線レベルの違いを把握することが都市環境における長期的な被ばく評価に役立つ点にある。ギリシャ本土の 41 都市において、ポータブルゲルマニウム（Ge）検出器を用いた現地でのガンマ線分光測定を実施し、ウラン系列、トリウム系列、カリウム 40(K-40)、およびセシウム 137(Cs-137)による空気中吸収線量率を評価した。

採用した手法としては、調査対象地域は、ギリシャ本土 41 都市（島嶼部は対象外）で、各地で屋内および屋外の放射線量を測定した。ポータブル Ge 検出器を使用し、現地でγ線分光測定を実施し、1000 回以上の測定を行い、放射性核種のスペクトルを取得した。分析対象の放射性核種として、ウラン系列、トリウム系列、K-40、および Cs-137 を評価した。取得したγ線スペクトルから空気中の吸収線量率を算出し、放射線源の寄与を分析した。

当該研究の主な結果としては、ギリシャ本土全体で測定された放射線量が、地域ごとにばらつきがあり、地質的要因によって影響を受けていることが確認された点が挙げられる。なお、一部の都市では、ウランやトリウム系列の濃度が高く線量率への寄与が高い傾向が観察された。また、屋内と屋外の比較では、屋外の放射線量が屋内よりも高い傾向があり、地表の天然放射性核種（ウラン・トリウム・K-40）からの放射線が寄与しているためと考えられる。なお、一部の建物では、建材に含まれる放射性物質によって屋内放射線量が高くなるケースも見られた。放射性セシウムの影響としては、Cs-137 は、主にチェルノブイリ事故の影響によるものと考えられるが、屋外での影響は限定的であり、Cs-137 由来の放射線量は天然放射線と比べて相対的に低かった。

当該研究の成果としては、ギリシャ本土における広範な放射線量マッピングが行われ、41 都市における 1000 回以上の測定データをもとに詳細なγ線線量マップが作成された。屋内外の放射線量の違いが明確にされ、屋外の方が、放射線量が高い傾向があるが、一部の屋内では建材由来の放射線が影響していることが確認された。また、Cs-137 の影響が限定的であることが示唆され、チェルノブイリ事故の影響はあるものの天然放射性核種の方が線量率に大きく寄与していることが示された。

その一方、課題としては、島嶼部のデータがない点が挙げられる。ギリシャの島々では異なる地質的特性を持つ可能性があり、今後の調査が必要である。また、時間的な変動の考慮も必要であり、本研究は特定の時点での測定に基づいているため、季節や降雨後の変化など長期的な変動を評価する必要がある。さらに、追加の健康リスク評価として、測定された放射線量が人体への影響にどの程度寄与するのか、リスク評価との統合が今後の課題である。

K.G. Andersson (2004) 93]らは、屋内環境での放射性汚染物質の動態とその被ばく線量への影響を解析し、特に大規模な核関連事故後の屋内環境における放射性汚染物質の蓄積、移動、そして、その健康影響を評価するためのモデルとデータを提供した。当該研究の背景としては、屋内環境における放射性汚染物質の影響

が、従来十分に評価されていなかったが、チェルノブイリ事故後のデータから、皮膚、毛髪、衣類上への沈着が被ばく線量の重要な要因となることが示唆された点が挙げられる。

当該研究では、放射性エアロゾルの沈着に影響を与える因子として、熱拡散（サーモフォレシス）、電気泳動（エレクトロフォレシス）、皮膚の湿度、風速を検討し、特に問題となる可能性があるヨウ素（元素状）の皮膚沈着過程を調査した。また、汚染物質の除去や皮膚を通じた透過（経皮吸収）の影響を実験的に評価し、室内表面の汚染から発生する再浮遊や接触転移が被ばく線量に与える影響を解析した。

当該研究の結果としては、屋内沈着、室内表面からの再浮遊、吸入の各要因が被ばく線量形成において重要であることが明らかとなった点が挙げられる。また、これらの要素を考慮したモデル手法を開発し、異なる条件下での線量を予測するための具体例を提示している。

当該研究の成果としては、被ばく線量に寄与する複数の要因を統合した評価モデルを構築し、特定因子の影響解明としてヨウ素やエアロゾルの皮膚沈着が被ばく線量に与える寄与を定量化した。これにより、室内環境での被ばくリスクをより正確に評価するための指針を提供している。

その一方、課題としては、データのさらなる拡充が必要であり、異なる汚染物質や屋内条件での再浮遊や接触転移の影響をより広範に評価する必要がある。また、長期的な影響の検証として、汚染物質の経皮吸収や再浮遊による長期的な健康影響を評価する研究が必要である。さらに、リアルタイム評価の実現として、緊急時対応のためリアルタイムで汚染物質動態を評価する手法の開発が求められる。

P.N. Price (2006) 94]らは、屋外で放射性物質が放出された際の屋内退避の効果を定量的に評価し、質量収支モデルを用いて空気中濃度の減少を解析した。放射性物質が屋外で放出された場合、住民の防護手段として「屋内退避（sheltering in place）」が推奨されることがある。しかし、建物の遮蔽効果は、どの程度有効なのか、どのような条件でより効果的なのかを定量的に評価する研究は限られていた。本研究では、屋内退避の効果を定量化し、特に商業ビルのような建物内における空気中粒子の動態を評価することを目的として、放射性粒子の沈着、換気、フィルタリングによる減衰を考慮し、屋内被ばくの評価モデルを構築した。

当該研究の主な結果としては、質量収支方程式（Mass Balance Equation）を用いた屋内被ばくの計算を行い、屋内の放射性粒子の挙動を決定するために質量収支方程式を導出し、次の要因を考慮したことが挙げられる。一般に、粒子の沈着（Deposition）と共に、室内表面に付着することで空中濃度は減少し、換気による排出（Exhaust）は、建物の換気システムや隙間から外部への拡散を促す。また、フィルタリング（Filtration）は、建物の空調設備による粒子の除去を指す。以上、標準的な商業ビルを対象にした数値解析を行い、一般的な商業ビルの構造と換気条件を仮定し、屋内被ばく量をシミュレーションした。さらに、シェルター効果の定量的評価を行い、屋外の放射線量と屋内の放射線量の比率（遮蔽効果）を算出し、さまざまなシナリオでの影響を分析した。

一般に、屋内退避は放射線被ばくを大幅に低減できると考えられてきた。従って、適切な屋内退避を行うことで、屋外の放射線量と比較し屋内の空気中濃度を大幅に減少させることができれば、この状況が実現される。特に、密閉性の高い建物では、より高い防護効果を発揮すると考えられる。当然、換気システムの影響は大きく、高い換気率を持つ建物（例：商業施設）は、外気の放射性粒子の侵入が増加するため、屋内被ばくのリスクが高まる。低換気率の建物（例：住宅）は、より効果的に放射性粒子の侵入を防ぐ。しかし、そこでのフィルタリングの効果は限定的であり、一般的な空調フィルターでは、細かい放射性粒子の除去には限界があり、換気の管理がより重要であることが示された。

当該研究では、屋内退避の定量的な防護効果を示すモデルを構築することで、屋外放出の際に建物の特性

（密閉度・換気率・フィルター特性）に応じたリスク評価が可能になった。また、防護対策の具体的な指針を提供し、換気管理が屋内退避の有効性を大きく左右することを明らかにし、災害時の屋内退避戦略の策定に寄与できる結果を示した。実際、商業ビルと住宅を比較すると、商業ビルは高換気率のため、外気からの放射性粒子の侵入が多くなる傾向があるが、低換気率の住宅では屋内退避の効果がより高くなる可能性が示唆された。

その一方、課題としては、実際の環境での検証が必要である。当該研究は、シミュレーションに基づいた結果であり、実際の放射性粒子の挙動を測定する実験的研究が必要である。また、さまざまな建物構造への適用が求められる。本研究では商業ビルを主な対象としたが、さまざまな建築様式や密閉性の異なる建物への適用が求められる。さらに、放射性粒子の大きさや沈着特性に応じて屋内の濃度変化が異なる可能性があり、追加のモデリングが必要である。

M. Takada (2014) 95]らは、事故後の屋内の放射線レベル低減効果を評価して報告した。2011 年の福島第一原子力発電所事故により、周辺地域の住宅内の放射線環境が深刻な懸念事項となったが、避難住民の帰還や長期的な健康影響を考慮するためには、住宅内の放射線レベルの詳細な評価が必要である。当該研究では、福島県南相馬市および飯舘村の住宅内外における放射線環境を測定し、屋内の放射線レベル低減効果を評価することを主たる目的とした。

上記目的達成のため、福島県の南相馬市および飯舘村の住宅において調査を実施し、周辺線量当量率（ambient dose-equivalent rates）を測定し、屋内外の放射線エネルギースペクトルを取得した。それらのデータ解析では、屋内と屋外の線量率の比（家屋による低減係数）を算出し、1 階および 2 階の異なる高さで測定し、それらの線量率の違いを分析した。

当該研究の結果としては、1 階の中心部では、低減係数が 0.35（屋外線量の 35%）、2 階の中心部では 0.45（屋外線量の 45%）となり、2 階の放射線レベルは 1 階より高い傾向が見られたことが挙げられる。当該結果より、測定高さが高くなるにつれ、屋内線量率が増加し、天井に近いほど放射線量が高く、屋内での散乱放射線の影響が示唆された。実際、エネルギースペクトル分析によると、屋内では散乱による低エネルギー成分が増加していることが確認された。屋内の散乱光子成分は屋外よりも多く、建物の構造自体が屋内線量率に影響を与えていることが明らかになった。

以上、住宅内では一定の放射線低減効果があるが、2 階では線量が高くなる傾向が明らかになった。また、屋内の散乱放射線が被ばく評価において重要であることを確認し、今後の放射線防護対策に重要な知見を提供したと考えられる。福島の復興政策において、この知見は、住宅内の線量低減対策の指針として活用すべきものと言える。

その一方、課題としては、測定した住宅の種類や材質の影響が考慮されていないため、さらなる調査が必要である。また、長期的な放射線レベルの変化をモニタリングし、除染等の効果も評価する必要がある。さらに、放射線の人体影響をより詳細に分析するためには、居住者の生活習慣と被ばく量の関連を明らかにする必要があると考えられる。

S. Monzen (2014) 96]らは、事故後の避難所における屋内外の吸収線量率を測定し、建物の放射線遮へい効率を評価して報告した。2011 年 3 月 11 日の東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所（1F）事故により、多量の放射性核種が環境中に放出された。これにより、地元住民は自身の被ばく線量を評価することへの関心を大いに高めることとなった。このような背景の下、当該研究の目的は、避難所における屋内外の吸収線量率を測定し、建物の種類ごとの放射線遮へい効率（屋内の吸収線量率と屋外の吸収線量率の比）を評価す

ることである。

福島県内の避難所 18 か所で、2011 年 3 月から 7 月にかけて、γ線測定装置を用いて屋内外の吸収線量率を測定した。評価対象となる建築構造は、木造建築、アルミニウム建築、鉄筋コンクリート建築の 3 種類とした。線量削減効率は、屋内吸収線量率を屋外吸収線量率で割った値で算出し、異なる建築材ごとの線量削減効率を国際原子力機関（IAEA）報告と比較した。

その結果、各建築構造の放射線量低減効率は、木造建築が 0.55±0.04（IAEA 報告より 1.4 倍高い）、アルミニウム建築が 0.15±0.02（初報告）、鉄筋コンクリート建築が 0.19±0.04（既報値と同等）であった。また、放射線遮へい効率は、1F からの距離に比例して増加する傾向が 8 か所で確認された。また、時間経過により屋外の吸収線量率は減少したが、避難所の遮へい効率は、ほぼ一定であることが分かった。また、避難者の行動や汚染レベルの違いが遮へい効率に影響を与える可能性が示唆された。

当該研究の成果としては、木造建築の放射線遮へい効率が IAEA 報告より高いことが確認され、実際の避難環境での防護効果の知見が指摘された。また、アルミニウム建築の遮へい効率に関する新しい知見を提供する等、避難所の建物構造による被ばく低減の指針として活用可能な知見が得られたと考えられる。

その一方、課題としては、測定期間が事故直後に限られているため、長期的な放射線量の変動を考慮する必要がある。また、避難者の生活行動が内部被ばくに与える影響についてのさらなる調査が必要と考えられる。さらに、遮へい効率の地域差や建物の老朽化が上記効率に与える効果等を評価する必要もあると考えられる。

N. Shinohara (2018) 97]らは、福島避難区域における屋内汚染の現状を明らかにし、住民の健康管理や帰還施策の策定に必要な知見の提供を試みた。福島第一原子力発電所（1F）事故後、屋外の除染作業が進められたものの、屋内の汚染状況に関する情報は限られていた。当該研究は、この屋内のハウスダスト中の放射性セシウム（Cs-137）の挙動を明らかにし、住民の健康リスク評価に寄与することを目的に、粒子サイズと汚染レベルの関係および屋内ダストによる経口被ばくリスクを評価した。

福島県内の避難区域に位置する 21 の木造建築（19 軒の住宅と 2 つの地域センター）を対象に調査を実施し、ハウスダストを粒子サイズ別に分類して分析を行った。粒子サイズは<4–20μm、20–63μm、63–180μm、180–500μm、500–1000μm、1000–2000μm の範囲で分析された。放射能測定によりハウスダスト中の Cs-137 の濃度を評価し、多重線形回帰分析を用いて放射能レベルと避難区域からの距離・方向の関係を分析した。また、純水および 1 M HCl を使用して Cs-137 の溶出性を評価し、一日の摂取量を 20mg と仮定して経口摂取による線量を推定した。結果として、放射能濃度（Bq/g）は、粒子サイズが小さいほど増加する傾向を示し、<4–20μm の粒子で 6.1×10^{3}Bq/g、1000–2000μm の粒子で 4.6×10^{2}Bq/g であった。以上、小粒子ほど吸入や経口摂取のリスクが高まる可能性が示唆された。放射能レベルは 1 F からの距離の二乗に反比例して減少し、北西方向のサンプルで有意に高かった。Cs-137 のうち、19%は水に可溶、33%は 1 M HCl に可溶、48%は非可溶性であった。ダスト摂取による放射能摂取量の推定では、平均 7.2Bq/日、95 パーセンタイルで 18Bq/日となり、居住再開後の内部被ばく管理の重要性が示唆された。

当該研究により、ハウスダスト中の放射性セシウム濃度は粒子サイズが小さいほど高く、健康リスクが増大する可能性があることが示され、屋内の放射能汚染は建物の位置や風向の影響を受けることが明確化された他、室内ダストに含まれる Cs-137 の溶出性を明らかにし、洗浄や換気の効果的な除染手法が示唆された。

その一方、ハウスダストの摂取量は個人差が大きく、実際の健康影響をより詳細に調査する必要がある。また、長期的な汚染レベルの変化や、清掃方法によるダスト中 Cs-137 濃度の低減効果の検証が求められる。さらに、他の建材や家屋の構造による影響を考慮したさらなる調査が必要である。

X. Liu (2019) 98]らは、有害化学物質の漏洩が人命や財産に及ぼす深刻なリスクを軽減するための指針を提供することを目的として、複数部屋が存在する建物内での有害ガスの拡散挙動を解析し、それに基づく曝露リスクを評価した。化学物質の漏洩は、保管や輸送過程で発生しやすく、その影響を正確に予測することは安全対策の観点から重要である。本研究では、建物内外の気流パターンと汚染物質の分布を数値的に解析し、その曝露リスクを評価した。

採用した手法としては、数値流体力学（CFD）（FLUENT 15, RANS SST k-ω）を用い、室内空気質（IAQ）に及ぼす影響を評価し、実験室スケールでの風洞データを用いて数値モデルを検証し、予測された速度分布と実測値との良好な一致を確認した。また、自然換気経路、壁の多孔性、屋外汚染源の特性が汚染物質の拡散に及ぼす影響を分析した。

得られた結果としては、自然換気の経路や外部の汚染源強度に応じて、室内の気流パターンと汚染濃度分布が大きく変化することが挙げられる。さらに、汚染物質の漏洩による死亡率と漏洩源の強度との定量的関係を示したことで、緊急時の避難計画や有害ガス漏洩防止対策の設計に活用できる。

以上、当該研究では、高精度モデルを用い、その数値モデルの信頼性を実験データで確認した他、建物内の汚染分布を高精度で評価した。また、リスク評価では、汚染源の強度と死亡率の関係を明確化し、漏洩時のリスク軽減策の指針を提供した。その実用的応用としては、化学物質漏洩の予防や制御に知見を与え、事故時の適切な避難計画をサポートするものとして活用できる。

その一方、課題としては、複雑なシナリオでの検証が求められ、多様な建物構造や換気条件でのモデルの適用性をさらに検証する必要がある。また、リアルタイムでの評価を検討することが必要であり、緊急時の迅速な対応を可能にするため、計算処理能力の強化が求められる。また、長期的な影響評価についても、汚染物質の残留や反応生成物が室内空気質に与える長期的な影響を評価する必要がある。

M. Manigrasso (2019) 99]らは、都市環境におけるナノ粒子の動態を明らかにし、屋内の空気質と健康への影響を考慮した環境管理の重要性を報告した。都市部のストリートキャニオン（建物に囲まれた道路）では、粒子状物質の挙動が大気の流動特性により異なる。特に、屋外のナノ粒子が屋内に浸透し、人々の呼吸に及ぼす影響は、高さによって異なると考えられ、交通源からの垂直距離が、呼吸による曝露量に与える影響を評価することを研究の目的とした。

ローマ市中心部のストリートキャニオンで調査を実施し、道路レベル（地上階）および約 20 メートルの高さ（高層階）の 2 地点で同時に粒子数サイズ分布を測定した。測定パラメータとしては、粒子の浸透係数（Fin）を用いて屋外粒子の屋内への侵入量を推定し、これを基に日常の呼吸による曝露量（呼吸線量）を算出した。

得られた結果としては、地上階のエアロゾル濃度は 20 メートルの高さに比べて 2 倍以上高く、特に超微細粒子が多く含まれていた。浸透係数（Fin）は 20 メートルの高さのほうが高かったが、より多くの粒子が地上階から屋内に侵入した。その結果、地上階での 1 日の呼吸線量は、20 メートルの高さに比べて約 2.5 倍高かった。また、室内のエアロゾル発生源（例：調理や喫煙）による影響よりも、屋外からの粒子流入の方が重要な寄与を示した。

以上、本研究は、ストリートキャニオンの微小粒子が高さによって大きく異なり、地上階の住民は、より高い曝露リスクを負うことを示唆している。また、屋内の空気質を評価する際、屋外の粒子挙動を考慮することが不可欠であることを示した。さらに、建物の換気対策や都市計画の改善に貢献する知見を提供した。

その一方、課題としては、建築物の材質や換気条件による影響が考慮されていないため、さらなる詳細な評価が必要である。また、他の都市環境における一般化の可能性についても追加研究が求められる。さらに、

長期的な曝露による健康影響の評価が今後の研究課題として残されている。

K. Nakayama (2021) 100]らは、福島第一原子力発電所事故後、木造住宅内の放射能汚染が環境および室内空気線量率に与える影響を評価し、屋外汚染が室内線量率に与える影響、また除染の効果を解析した。福島第一原発事故後、周辺地域の空間線量率が測定され、高線量地域では土壌の除去や道路の洗浄などの除染が実施された。当該研究では、屋外汚染が室内線量率に及ぼす影響を実測データと PHITSv.3.13 によるモデルシミュレーションを用いて解析し、木造住宅内での線量率の水平・垂直分布および除染の効果を評価した。

その結果、室内線量率の水平分布は、家の中心に向かって単調に減少する傾向が確認された。また、除染後は全体的な線量率が低下し、分布のばらつきも小さくなった。この変化は、低線量エリアが拡大したことによるものと考えられる。室内線量率の垂直方向の変化は一様ではなく、地表付近で低下した後、高くなる傾向を示し、さらに高所では再び低下する。この変化は、放射性物質が周辺土壌にあることや、土壌層に浸透する影響もあると推測された。

以上、屋外汚染が室内線量率に及ぼす影響を定量化し、室内線量率が屋外汚染、除染の進行度、建物のサイズ、土壌への放射性物質の浸透程度によって影響を受けることを確認した他、除染が線量率低下に寄与することを定量的に示し、居住環境の安全性向上に寄与する可能性を示唆した。さらに、室内の水平・垂直分布における線量率の特性を明らかにし、建物内部のリスク評価に新たな指針を提供した。

その一方、課題としては、多様な建物タイプでの検証が必要であり、他の建物構造や地域条件での適用性を検証する必要がある。また、土壌や建材に浸透した放射性物質の長期的な影響とその除去可能性をさらに解析する必要がある。さらに、モデルの高度化も求められ、現実的な条件下での精度向上を目指し、より詳細なモデルの構築が必要である。

M. Mohammadi (2021) 101]らは、都市環境での換気戦略が屋内空気質に与える影響を理解し、都市設計や換気システムの最適化に役立てることを目的として、屋外汚染物質が屋内環境にどのように侵入するかを CFD（数値流体力学）を用いて評価した。屋外汚染物質（例:交通排気ガス）が屋内空気質に与える影響は、健康や快適性に重大な影響を及ぼす。当該研究では、都市キャニオン内の自然換気建物をモデリングし、さまざまな換気戦略が汚染物質の屋内侵入に及ぼす影響を解析する。

当該研究では、Ansys Fluent（RANS、k-ωBSL、RNG k-ε、RSM）を使用して 3D-CFD を実施し、実験データ（Concentration Data of Street Canyons database）を用いてモデルを検証した。三層構造の建物が道路を挟んで配置された都市キャニオンをシミュレートし、各建物の異なる階でさまざまな換気戦略（片側換気、クロス換気など）を適用した。

その結果として、アスペクト比 1 のキャニオンでは上流建物の室内空気は下流建物よりも汚染が少なく、キャニオン内部の汚染物質濃度は上流建物近くで 2～3 倍高くなることを確認した。クロス換気（二面に開口部）は、汚染物質の屋内侵入を最小限に抑え、屋外汚染物質の拡散を促進した。一方、片側換気は特にキャニオン内の建物で屋内汚染濃度を大幅に増加させた。

以上、都市計画への示唆としては、換気戦略と建物配置の最適化により、都市キャニオン内での屋内空気質を改善できる可能性を示したことが挙げられる。また、換気の有効性の評価では、クロス換気の有効性が確認され、片側換気のリスクが強調された。これらの知見から設計への活用としては、都市構成や建物設計を改善するための基礎データが提供されたと考えられる。

その一方、課題としては、さらなる環境条件での評価が必要であり、他の季節や気象条件での汚染物質挙動を解析し、知見の汎用性を向上させる必要がある。また、屋内発生源の考慮も重要であり、屋内で発生す

る汚染物質（例:調理や暖房）との相互作用の調査が必要である。さらに、長期的影響の評価についても、屋内外汚染物質が健康に及ぼす長期的影響を評価するためのさらなる研究が求められる。

J. Hirouchi (2021) 102]らは、福島第一原発事故後の住宅における放射性核種の屋内外分布を調査し、建物の材質や構造が放射性沈着に与える影響を明らかにした。特に、屋外の土壌に比べて屋内の放射能濃度は低いものの、建材によっては、放射性物質が沈着しやすいことが確認された。福島第一原子力発電所事故により、放出された大量の放射性核種は大気中を漂い、屋外だけでなく屋内にも侵入し、建物の内部に沈着する可能性がある。特に、室内の放射性物質の分布を把握することは、住民の外部被ばく評価や除染対策の計画にとって重要である。当該研究の目的は、福島県内の住宅の屋内外における放射性核種の分布を詳細に調査し、建物の構造や材質が放射性物質の沈着に与える影響を明らかにして、室内外の線量評価をより正確に行うための基礎データを提供することにある。

当該研究では、福島県内の複数の住宅を対象に、屋内および屋外の放射性物質の沈着状況を調査し、建物の構造や立地条件の違いが放射性物質の沈着にどのような影響を与えるかを評価した。屋外では住宅周囲の土壌サンプルを採取し、放射性核種の濃度を測定し、屋内では建材サンプル（床、内壁、天井、外壁、屋根）を採取し、それぞれの表面における放射性沈着の分布を評価した。収集したサンプルの放射能濃度を、γ 線スペクトロメトリーを用いて測定し、主な放射性核種（Cs-137、Cs-134 など）の分布を特定した。

その結果として、屋外の土壌には依然として高濃度の放射性セシウムが検出されたが、屋内の放射性物質の沈着は、建物の材質や換気状況に依存することが判明した。特に外壁や屋根における沈着量が高く、放射性物質の一部が建物内部に侵入している可能性が示唆された。また、木造住宅よりもコンクリート住宅の方が放射性核種の沈着が少ない傾向が見られ、壁材の種類によっても沈着状況に違いがあり、吸湿性の高い材料では放射性物質がより多く吸着されている可能性があると考えられる。また、地面に対する床、内壁、天井、外壁、屋根の相対的な表面汚染密度は、それぞれ 3×10^{-3}～7×10^{-2}、6×10^{-5}～4×10^{-4}、7×10^{-5}～3×10^{-4}、2×10^{-3}～1×10^{-2}、4×10^{-3}～2×10^{-1} であった。

さらに、すでに除染が行われた地域では、屋内外の放射能濃度が低下しているものの、一部の住宅では放射性物質が蓄積している場所があることが確認された。特に、建物の構造上清掃が困難な場所（屋根裏や床下など）には、除染後も放射性物質が残留している可能性があると考えられる。

以上、当該研究により、福島県内の住宅を対象に、屋内外での放射性物質の分布を詳細に分析したことで、建物の構造による影響が明らかとなった。また、住民の外部被ばく線量評価に対し、精度の高い情報を提供し、効果的な除染対策の計画にも寄与できる。さらに、コンクリートや木造といった建築材ごとの放射性沈着特性を評価したことで、住宅の種類によるリスクの違いを明らかにした。

その一方、課題としては、より広範囲での調査が必要であり、特定の地域の住宅を対象に調査を行ったが、より広範な地域でのデータ収集が必要である。また、時間経過による変化の評価が必要であり、今後の経年変化（風雨による拡散、再浮遊など）を長期的に評価する必要がある。さらに、住民の生活習慣（換気の頻度、清掃状況など）が放射性沈着にどのような影響を与えるかも今後は調査することが求められる。

J. Hirouchi (2021) 103]らは、原子力事故時の放射性ヨウ素（ヨウ素分子 I_2, 粒子状ヨウ素）の室内浸透と沈着を評価するため、日本の住宅で実験を実施し、シェルターとしての有効性を検証した。原子力事故時は、放射性ヨウ素（ヨウ素分子 I_2, 粒子状ヨウ素）の室内侵入による内部被ばくのリスクを低減するため、避難シェルター（sheltering）の有効性が評価される必要がある。一般に、シェルターの効果は減衰率（Reduction Factor）で示され、これは屋外と屋内の放射性物質濃度比あるいは線量比で表される。

屋内の放射性物質濃度は主に次の要因に依存する。空気交換率（Air Exchange Rate, AER）は、建物と外気との換気頻度、浸透係数（Penetration Factor, PF）は、ヨウ素が窓や扉を通過する割合、室内沈着率（Indoor Deposition Rate, IDR）は、ヨウ素が室内表面に沈着する割合である。

当該研究では、2 つのアパートメント、3 つの戸建住宅及び実験室環境（chambers）を使用して、ヨウ素分子（I_2）と粒子状ヨウ素（0.3～1μm）の侵入特性と沈着特性を測定した。浸透係数 PF の測定では、屋内外のヨウ素濃度を比較し、窓や扉を通じた侵入率を評価した。室内沈着率 IDR の測定では、室内に侵入したヨウ素が壁や床などの表面に吸着される割合を算出し、環境条件の変化（換気率 AER の違いなど）に応じた実験を行い、異なる住宅タイプでのデータを収集した。

当該研究の結果としては、浸透係数 PF は、粒子状ヨウ素（0.3～1 μm）において、0.3～1 の範囲で変動し、ヨウ素分子 I_2の場合は、0.15～0.7 の範囲で変動したが、空気交換率が高いほど、浸透係数 PF も高くなる傾向が確認された。室内沈着率 IDR は、粒子状ヨウ素（0.3～1 μm）で 0.007～0.2 h^{-1}、ヨウ素分子 I_2で 0.2～1.5 h^{-1}であり、I_2の方が粒子状ヨウ素よりも室内表面に沈着しやすいことが判明した。

当該研究の成果は、日本の住宅でのヨウ素の侵入と沈着特性を実測し、放射線防護のためのシェルター評価に活用可能とした点が挙げられる。また、ヨウ素の形態（分子状・粒子状）による侵入特性の違いを定量的に示し、シェルターの密閉性を向上させることで、内部被ばくリスクを低減できる可能性を科学的知見として示唆した。

その一方、課題としては、異なる建材や通気システムの影響をさらに検討する必要があり、家具や室内の環境要因（温度・湿度）が沈着率に及ぼす影響の詳細な評価が求められる。また、長時間の放射性ヨウ素の挙動や、屋内での再浮遊（resuspension）の影響を考慮する必要がある。

M. Mohammadi (2022) 104]らは、建物設計や換気戦略、健康リスク評価における空気質管理の重要性を明確にすることを目的として、屋外と屋内の間での汚染物質の移動を定量化する際の移動要因、定量化の方法、課題及び今後の研究の方向性をレビューした。室内汚染は健康への影響が重大であり、特に屋外汚染物質が室内空気質に与える影響が大きい。当該研究では、屋外から屋内への汚染物質移動と、その逆の移動に関与する要因を特定し、それらが室内外の空気質に与える影響を分析した。

レビュー内容としては、汚染物質の移動に影響を与える要因に、換気戦略、気象条件、建物の設計、屋外汚染源の性質などが含まれる。それらの観点から実験研究とモデリング研究を網羅的にレビューし、移動メカニズムと移動強度を定量化する必要性を強調した。長期的な個人曝露の定量化は進展しているが、汚染物質移動の具体的なメカニズムに関する研究は不足していると分析している。

当該レビューの主な結果としては、空気の流動メカニズムの体系的な分類と、それぞれの相対的な強度の正確な評価が、汚染物質制御の戦略策定に不可欠であると結論付けた点にある。

以上、当該研究の成果をまとめると、包括的な要因特定を目的として、室内外汚染物質移動に関わる主要要因を網羅し、その影響の大きさを評価した。また、方法論のレビューでは、実験的および数値的アプローチを比較し、それぞれの利点と制約を明確にした。さらに、今後の研究の方向性として、建物内の汚染物質制御のための効果的な介入戦略を策定する基盤を提供した。

その一方、課題としては、汚染物質移動の詳細メカニズムに対し、実際の建築環境での汚染物質移動メカニズムを詳細に解明する等のさらなる研究が必要である。また、地域性の考慮として、気候条件や都市構造の違いによる汚染物質移動の影響を評価することが求められる。さらに、政策応用への連携として、見つかった知見を具体的な建築設計ガイドラインや空気質管理政策に統合するための応用研究が必要となる。

M. Mohammadi (2023) 105]らは、都市部の特異な建物配置が汚染物質の室内外伝播にどのような影響を与えるかを明らかにするために、自然換気を採用したストリートキャニオン建築における室間汚染物質の伝播ルートを解析した。都市部のストリートキャニオン内では、建物間および室内間の汚染物質の移動が重大な課題となっている。当該研究では、風に依存する汚染物質の伝播特性を解析し、異なる換気戦略の効果を比較した。

3 次元定常 Reynolds-Averaged Navier-Stokes（RANS）モデルを使用した数値シミュレーションを実施し、風洞実験で得られた建物内の表面圧力データを使用し、シミュレーションを検証した。7 つの換気戦略を評価し、それぞれ窓の開閉の組み合わせをシミュレートした。

当該研究の結果としては、換気効率と部屋の位置が室間汚染物質伝播に影響を与えることが分かった点が挙げられる。クロス換気から片側換気に切り替えると、平均換気回数が $42.3h^{-1}$から $1.4h^{-1}$に減少し、汚染濃度がキャニオン中央で 114 倍、端部で 12 倍に増加した。また、キャニオンの端部に位置する部屋は、他の部屋を小規模に汚染する可能性が高いことが示唆された。

当該研究の成果としては、クロス換気が汚染物質の室内蓄積を大幅に抑える一方、片側換気では汚染が急増することが確認された。また、部屋の位置と換気条件が汚染伝播に与える影響を明確化し、建物設計や換気戦略の最適化に役立つ知見を提供した。さらに、風洞実験データが、建築工学分野での他の数値シミュレーション研究の基準となる可能性を示唆した。

その一方、課題としては、多様な気象条件での適用性、気象条件や地形の違いによる汚染物質伝播の影響等をさらに研究する必要がある。また、リアルタイム活用については、緊急時に即時的に活用可能な評価モデルの開発が求められる。さらに、長期的影響の評価については、汚染物質の蓄積やその影響を長期的に評価する研究が必要である。

E. Alonso-Blanco (2023) 106]らは、都市環境における屋内外汚染物質の伝播を理解し、室内空気質（IAQ）の改善に向けた知見を提供することを目的として、都市部での屋外大気汚染物質と屋内空気質の相互作用をリアルタイムで測定し、その動態を評価した。屋内空気質は屋外汚染物質の影響を大きく受け、特に都市部では交通由来の汚染物質が主要な寄与要因となっている。屋外から屋内への汚染物質移動には、気象条件、粒子サイズ、建物の換気状況など多くの要因が関与している。

マドリード市内の大学教室を対象に、学期外の夏（2021 年）と冬（2020 年）に、2 回のフィールドキャンペーンを実施し、ガスおよび粒子状物質のリアルタイム濃度を屋内外同時に測定し、屋外汚染物質の侵入能力と室内の蓄積特性を比較した。

当該研究の結果としては、汚染物質の室内外比率（I/O）は汚染物質の種類によって異なり、ガス状物質は粒子状物質よりも侵入能力が高いことが分かった点が挙げられる。PM2.5 以下の粒子は侵入率が高いが、粒径が大きくなると侵入率が低下する。従って、高い大気安定性の条件下では、交通由来のガス濃度が室内で蓄積しやすくなり、屋外が高風速でよく換気された条件では、室内の汚染濃度が低下した。

本研究の成果としては、屋外汚染物質が屋内に及ぼす影響を定量化し、特に換気状況や気象条件が重要であることを明らかにしたことが重要と考えられる。また、粒子サイズが汚染物質の侵入率に与える影響を明確化し、都市環境での健康リスク管理や政策形成に役立つ知見を提供した。

その一方、課題としては、長期的なデータ収集も必要であり、季節や異なる都市環境での長期データ収集が求められる。また、他の建物設計や利用状況下で同様の結果が得られるかを検証する必要があり、さらに、緊急時対応に向けたリアルタイムモニタリング技術のさらなる向上が求められる。

V. Vasile (2023) 107]らは、変動する汚染物質排出量を伴う建物内での換気が、室内空気質（IAQ）に与える影響を調査し、エネルギー効率を維持しつつ、室内空気質を向上させるための換気戦略を検討した。室内空気質は、換気を通じて外部空気との交換によって主に管理されるが、不適切な換気は、空気質の悪化やシックハウス症候群（SBS）の増加を引き起こす。さらに、高エネルギー効率と室内空気質を両立させるため、汚染源の排出を制限する方法、汚染物質の部分的な中和、またはスマート換気が提案される。当該研究では、室内外の汚染物質移動を考慮した数学モデルを使用して、IAQ とエネルギー消費の最適化を目指した。

当該研究では、オゾン（O_3）、微粒子（PM2.5）、ホルムアルデヒド（HCHO）、二酸化炭素（CO_2）の 4 種類の汚染物質に焦点を当て、室内外の異なる汚染源に基づき数学モデルを構築した。汚染物質の移動と換気システムの影響を予測するため、時間スケールと環境条件を組み込んだシミュレーションを実施した。

当該研究の結果として、換気によるエネルギー消費を抑えつつ、IAQ を維持または向上させることが可能であると結論づけた。また、外部汚染物質の影響を受けやすい環境では、スマート換気が特に効果的であることも示唆された。

本研究の成果としては、室内外汚染物質の影響を定量化し、換気によるエネルギー効率と空気質のバランスを探求した点が挙げられる。また、スマート換気が多様な建物設計や使用状況に適応可能であることを示唆し、汚染物質の種類別に最適な換気戦略の選択が可能であることを示した点が重要と考えられる。

その一方、課題としては、モデルの一般化に向け、異なる気象条件や建物構造でのモデル適用性を検証する必要がある。また、汚染物質が室内環境や健康に与える長期的影響を詳細に評価する必要もあり、緊急時や急激な環境変化へのリアルタイム対応を可能にする技術も求められる。なお、スマート換気の概念は、エネルギー負荷を減らしながら適切に換気し、効率的電力供給を可能にすることで、再生可能電力統合を促進させることも提唱されている。

K.B. Fernandez (2023) 108]らは、都市型ブロック配置による建物が、屋外汚染物質の屋内侵入に及ぼす影響を、ラージ・エディ・シミュレーション（LES）を用いて評価した。以上、当該研究は、屋外汚染物質の屋内蓄積に関する新たな知見を、CFD を利用し提供した。一般に都市環境では、建物の形状や配置が屋外汚染物質の流れに影響を与え、室内空気質に影響を及ぼす可能性がある。従って、当該研究の目的は、都市型ブロック配置の影響下で汚染物質が屋外から屋内にどのように移動するかを解析することにある。

採用した方法としては、LES を用い、速度分布と濃度分布を生成し、汚染物質は 4 つの異なるソース位置（窓中央、窓壁近く、キャニオン地上中央、キャニオン窓高さ中央）に配置され、室内外の渦流が汚染物質の移動に与える影響を評価した。

得られた結果としては、全てのソース位置で室内に濃度が蓄積した。室内外の渦流が汚染物質を窓から室内に運び込む効果が見られ、正規化された平均室内汚染物質濃度（流入濃度 1 に対して）は、ソースの配置位置に応じて異なり、窓近くでは 1.25～1.50、キャニオン地上中央では 0.25～0.50、キャニオン窓高さでは 0.0～0.25 となった。

当該研究の成果としては、室内汚染物質蓄積の要因解明に貢献し、都市型環境のダウンドラフト効果が室内汚染物質の蓄積に重要な役割を果たすことを示した点にある。また、汚染物質流入経路の特定として、窓を通じた汚染物質の屋内流入経路を解明し、換気設計への示唆を提供した。さらに、自然換気研究分野への寄与として、都市型ブロック配置環境での自然換気が屋外汚染物質の流入に及ぼす影響を明確化した点が挙げられる。

その一方、課題としては、多様な都市環境での検証が必要であり、異なる都市構造や気候条件での研究が

求められる。また、リアルタイム評価への活用として、緊急時に対応可能なモデルの高速化とリアルタイムでの適用性が求められる。さらに、長期的影響の評価についても、室内汚染物質蓄積が健康に及ぼす影響を詳細に評価する必要がある。

M. Orabi (2024) 109]は、核関連事故による放射性エアロゾルの屋内濃度を評価するためのモデルを開発し、その実用性を示した。特に福島第一原子力発電所事故を事例に用い、放射性ヨウ素（I-131）および放射性セシウム（Cs-134、Cs-137）を対象に、屋内外のエアロゾル濃度の関係性を解析した。

放射性エアロゾルの建物内部への侵入は、放射線防護と健康リスク評価において重要な課題である。CFD を基盤に、エアロゾルの沈着速度、沈着率、侵入係数を定量化し、それを基に屋内濃度を推定した結果、屋内空気中の放射性エアロゾル濃度は、屋外濃度の約 97%に達することが確認された（定常状態）。また、放射性物質の屋内沈着プロセスに関する詳細なグラフ関係を提示し、特に壁の亀裂を通じた侵入と小空間での粒子沈着について詳述した。その結果、主に放射性ヨウ素（I-131）および放射性セシウム（Cs-134、Cs-137）に焦点を当て、それらの挙動を詳細に分析し、福島第一原子力発電所事故のデータを用いたシミュレーションで提案モデルの実用性と適用性が確認された。

本研究の成果としては、高精度な濃度推定を行い、屋内外濃度の比率と放射性エアロゾルの挙動を定量化し、リスク評価の精度向上に貢献した点が挙げられる。また、汚染源から屋内環境における沈着までの詳細なプロセスを視覚的に提供し、福島事故のシナリオ分析を通じて異なる核関連事故に適用可能なモデルとしての信頼性を示唆した。

その一方、課題としては、長期的影響評価として、放射性エアロゾルの再浮遊や沈着の時間的変化に関するさらなる調査が必要である。また、異なる環境条件下での適用性検証が求められ、異なる気象条件や建物構造でのモデルの妥当性を評価する研究が必要である。さらに、リアルタイム対応能力を向上させ、緊急事態でのリアルタイム処理を可能にする高速モデルの開発も必要になると考えられる。

○本項（2.4.4）のまとめ

まず、CFD による一般の汚染物質の屋内への侵入や屋内での換気についてまとめる。**X. Liu (2019) 98]**らは、複数部屋が存在する建物内で、建物内外の気流パターンと汚染物質の分布を数値的に解析し風洞データを用いて検証し、曝露リスクを評価した。**M. Manigrasso (2019) 99]**らは、ローマ市中心部のストリートキャニオンで調査を実施し、都市環境におけるナノ粒子の動態を明らかにした。**M. Mohammadi (2021) 101]**らは、屋外汚染物質（交通排気ガス）が屋内空気質に与える影響を 3D・CFD モデリングで解析し、道路を挟んで配置された構造物の屋内空気質を評価した。**M. Mohammadi (2022) 104, 105]**らは、屋内外での汚染物質の移動を定量化するため、移動の要因、研究方法、課題をレビューするとともに、RANS モデルにより風に依存する汚染物質の伝播特性を分析し、換気戦略を議論した。**E. Alonso-Blanco (2023) 106]**らは、都市部での屋内外の空気質をリアルタイムで測定し、その屋内外の動態を評価した。**V. Vasile (2023) 107]**らは、エネルギー効率を維持しつつ、室内空気質を向上させるための換気戦略を検討した。**K.B. Fernandez (2023) 108]**らは、LES により都市型ブロック配置の建物について、異なるソース位置（窓中央、窓壁近く、キャニオン地上中央、キャニオン窓高さ中央）に置かれた汚染物質の屋内侵入に及ぼす影響を詳細に検討した。

その一方、放射性物質の屋内侵入や被ばく線量については、**V.I. Romanov (1995) 91]**は、放射線危険物周辺での放射性汚染物質の輸送特性を解析し、放射性核種の移動が、主にガスエアロゾル排出に起因し、汚染源の周囲の局所的な熱的および風条件（微気象条件）に強く依存することを指摘した。**A. Clouvas (2000) 92]**

らはギリシャ本土 41 都市における屋内・屋外のγ線放射線量を詳細に調査し、天然放射性核種と人工放射性核種（Cs-137）の寄与を分析した。K.G. Andersson (2004) 93]らは、屋内環境での放射性汚染物質の動態とその被ばく線量への影響を解析し、屋内沈着、室内表面からの再浮遊、吸入の各要因が被ばく線量形成において重要であることを明らかにした。P.N. Price (2006) 94]らは、質量収支方程式を用いた屋内被ばくの計算を基に、粒子の室内表面への沈着により濃度が減少し、建物の換気システムや隙間から外部へ拡散するため、屋内退避は放射線被ばくを大幅に低減すると報告した。また、M. Takada (2014) 95]らは、事故後の住宅内外における放射線環境を測定し、住宅内では一定の放射線低減効果があるが、2 階では線量が高くなる傾向があり、屋内の散乱放射線が被ばく評価において重要であることを明らかにした。S. Monzen (2014) 96]らは、事故後の避難所における屋内外の吸収線量率を測定し、建物の放射線遮へい効率を評価して報告した。N. Shinohara (2018) 97]らは、福島避難区域にある 21 の木造建築内のハウスダスト中の放射性セシウム（Cs-137）の挙動、溶出特性を調査し、放射性セシウム濃度は、粒子サイズが小さいほど高く、健康リスクが増大する可能性があることを示した。K. Nakayama (2021) 100]らは、事故後、木造住宅内の放射能汚染が環境および室内線量率に与える影響を評価し、屋外汚染が室内線量率に与える影響、また除染の効果を解析した。J. Hirouchi (2021) 102, 103]らは、福島第一原発事故後の住宅における放射性核種の屋内外分布を調査し、建物の材質や構造が放射性沈着に与える影響を明らかにするとともに、放射性ヨウ素（I_2分子, 粒子状ヨウ素）の室内浸透と沈着を評価 するため、日本の住宅で実験を実施し、シェルターとしての有効性を検証した。M. Orabi (2024) 109]は、核関連事故による放射性エアロゾルの屋内濃度を評価するためのモデルを開発し、事故後のデータを用いたシミュレーションを実施して、高精度な濃度推定により、屋内外濃度の比率と放射性エアロゾルの挙動を定量化した。

2.4.5 内部被ばく線量評価に係る文献調査

本項では、放射性物質の大気拡散により生じる内部被ばくに関連する文献調査の結果を報告する。一般に内部被ばくは、吸入や経口による放射性物質の体内への取り込みより生じるが、屋内外でのエアロゾルやガス状分子の吸入と上気道への侵入、そして各臓器への影響の定量的評価やガンリスクの評価まで多岐にわたる。ここでは、汚染物質一般の吸入及び侵入等まで対象を拡大し、これまでに得られた有用な知見を報告する。

K.-H. Cheng (1997) 110]らは、人体の口腔通路（口腔入口から中気管まで）の幾何学的形状、周囲長、断面積を測定し、次元解析パラメータを通じて超微粒子の沈着質量移動特性と関連付ける研究を報告した。人間の上気道内における超微粒子の沈着動態を理解するためには、幾何学的測定データを沈着特性と結び付け、質量移動理論を検証することを目的としている。

当該研究では、口腔通路の複製モデルを使用し、1 つを断面解析用に 3mm 単位で切断し、もう 1 つをそのままエアロゾル沈着測定に使用した。横方向の口腔空間（O-C）と垂直方向の喉頭-気管（L-T）を対象に沈着特性を測定し、シャーウッド数（Sh）*を無次元パラメータとして計算し、レイノルズ数（Re）およびシュミット数（Sc）との関係を解析した。

当該研究の結果として、O-C および L-T 領域で、吸入・呼出時の沈着特性がレイノルズ数とよく相関することが確認され、また、エアロゾル沈着係数とガス・蒸気の上気道吸収特性が類似した流量依存性を示すことで、質量移動と熱移動の類推が可能であることが示唆された。

本研究の成果としては、幾何学的形状がエアロゾル沈着に及ぼす影響を定量化し、沈着特性を次元なしパ

ラメータで表現可能としたことが挙げられる。また、質量移動と熱移動の類推から、気流条件下での沈着特性の理解を促進し、ガス・蒸気吸収や医療用吸入薬デリバリー設計における応用が期待される。

その一方、モデルの一般化については、実際の人体気道条件でのさらなる検証が必要である。また、異なる粒子サイズや吸入条件下での適用性を評価する研究が求められる。さらに、緊急医療対応や吸入薬設計におけるリアルタイムでの評価能力の強化が望まれる。

*シャーウッド数：移流と拡散の比を示す無次元数で、Sh≫1 なら移流支配、Sh≈1 なら拡散支配を表す。化学工学・環境工学・燃焼工学・バイオ工学など幅広い分野で活用される。

C. Mitsakou (2007) 111]らは、調理などの日常的な屋内活動が微小粒子の肺沈着に与える影響を定量的に明らかにし、室内空気質の管理が健康維持に重要であることを示した。一般に室内の活動（特に調理など）は、微小粒子や超微粒子（10–350nm）の濃度を増加させ、肺への沈着量を増大させることが知られている。日常的な屋内活動では、屋外の粒子暴露と比較して、より多くの粒子が肺に沈着する可能性がある。当該研究の目的は、調理イベントと無活動期間における屋内外の微粒子の肺沈着量を比較評価し、その健康影響を評価することである。

研究は、ギリシャ・アテネの一般的な住宅で実施し、屋内外のエアロゾル数濃度（粒子サイズ範囲：10–350nm）を測定し、以下の 4 つのケースについて測定を実施している。

- 調理イベント（ベーコンと卵のガス調理）
- 屋内での無活動期間
- 屋外の同時間帯の測定（調理中）
- 屋外の同時間帯の測定（無活動期間）

測定に対する解析としては、エアロゾルおよび吸入動態を考慮した肺沈着のメカニスティックモデル*を適用し沈着量を算出した。結果として、粒子の物理的負荷、吸湿特性、呼吸レベルに基づいた評価を実施した。

得られた結果として、調理時の屋内での肺沈着量が同時期の屋外と比較して最大 10 倍ほど高くなることが確認され、調理に伴う微粒子発生が、肺の奥深くまで沈着しやすいことが示唆された。無活動時は、屋内外の粒子濃度と肺沈着量の間に線形の関係が確認され、活動がない場合、屋内外の沈着量に大きな差は見られないことが分かった。また、物理的負荷の影響では、身体活動レベルや吸湿特性の違いが沈着の程度に影響し、吸入レートの増加が超微粒子の肺沈着をさらに増加させる要因となることが示唆された。

当該研究の成果としては、調理などの日常活動による室内微粒子汚染が屋外環境よりもはるかに高い肺沈着リスクを持つことを示し、室内空気質管理や換気の重要性を強調し、特に調理時の曝露削減対策が必要であることを示唆した。また、肺沈着モデルを用いた評価により、より現実的な人体への影響を定量化する方法を提供した。これは、室内で発生する放射性物質や汚染物質一般の微粒子発生に対し活用な可能な評価方法として有用とも考えられる。

その一方、課題としては、調理方法や建築設計（換気システムの有無）など、環境要因の影響をより詳細に検討する必要があり、長期間の暴露が肺機能や健康に及ぼす影響についてのさらなる研究が必要である。また、個人の活動レベルや換気習慣の違いによる影響を含めた包括的な評価が求められる。

肺沈着のメカニスティックモデル（肺沈着モデル）：気道を 1 次元で表現してエアロゾルの運動を解く。粒子の沈着は重力沈降、ブラウン拡散、慣性衝突の複合効果の結果と想定する。

W.H. Wang (2009) 112]は、屋外放射性エアロゾル放出による建物内部の汚染分布を評価し、吸入被ばくへ

の影響を解析し、特に緊急時対応の際に迅速かつ簡便に室内空気質を評価できる方法を提案した。これは、大気中に放射性物質が放出された場合、建物内に侵入する当該物質が住民の健康に及ぼす影響を評価する際に活用可能と考えられる。なお、従来の質量移動モデルは複雑すぎて、緊急時対応者や放射線安全担当者が迅速に利用するには適していないことを指摘する。当該研究では、IAQX コード*を使用して、屋外から建物内部へのエアロゾル移動とその吸入被ばくへの影響をシミュレーションした。

シミュレーションでは、マルチゾーンモデルを構築し、各ゾーン内でエアロゾル濃度を均一に混合する前提で解析した。ケーススタディを用いて、シナリオごとに汚染状況を評価し、吸入被ばく線量を時間経過に伴う空気中濃度データから算出した。

得られた結果としては、室内空気質および健康影響に影響を与える主要因として、換気率、エアロゾルの物理的特性、建物の構造が挙げられることが分かった。また、IAQX コードは複雑なマルチゾーン質量移動モデルを効率的にシミュレートできることが確認された。

当該研究の成果としては、IAQX コードを活用することで、緊急時対応における建物内汚染の評価を迅速かつ簡便に実施可能であることを提示したことが挙げられる。また、室内外の汚染要因を特定し、健康リスク低減のための換気戦略の設計にも寄与した。さらに、シミュレーションを通じて異なる条件下での汚染伝播特性を詳細に分析する等の系統的知見を提供している。

その一方、課題としては、さらなる条件での適用性検証が必要であり、建物の設計や気象条件が異なる場合におけるモデルの汎用性を評価する必要がある。また、長期的影響の評価について、放射性エアロゾルの長期的な残存や再浮遊による健康影響をさらに解析する必要がある。さらに、緊急時におけるリアルタイムモニタリングおよび評価技術の向上が求められる（但し、当該文献ではマルチゾーンモデルいわゆるボックスモデルが CFD と比べて、扱い易く緊急時の近似的な結果取得には有効との主張を付記）。

*IAQX コード（Indoor Air Quality X code）：室内空気質（Indoor Air Quality, IAQ）の評価を行うマルチゾーンモデルによる数値シミュレーションツールで、本研究では、屋外で放出された放射性エアロゾルが建物内でどのように拡散し、空気中濃度や吸入被ばくにどのような影響を与えるかを評価する。

X.F. Hu (2013) 113]らは、都市部の屋内環境における吸入線量の評価手法を開発し報告した。原子力発電所での事故による放射性核種の放出は、がんや遺伝的疾患、急性放射線障害など、人体に深刻な健康影響を及ぼす可能性がある。特に、都市部における屋内環境では、空気中の放射性物質が居住者の吸入被曝の主要な要因となることが考えられる。当該研究の目的は、都市部の屋内環境における吸入線量の評価手法を開発し、吸入線量の影響因子を特定することである。

屋内の放射性核種濃度を推定するため、自然換気モデルの基本方程式を適用し、自然換気モデルと経験的な線量評価式を組み合わせて屋内の吸入線量を算出した。また、都市部の建築環境をモデル化し、CFD（RNG k-ε）シミュレーション手法を活用し、建物表面の風圧分布を解析し、風速や都市の形状が線量に与える影響を定量的に評価した。さらに、換気係数、年齢層、風速、街路幅、建物の高さなどの要素を変化させ、影響の度合いを解析した。

得られた結果として、屋内での吸入線量は、以下の要因によって大きく影響を受けることが確認された。

- 換気係数が高いほど吸入線量が増加する。
- 呼吸率の増加により線量も上昇する。
- 風速や街路幅が大きいほど、屋内への放射性核種の侵入が増加する。
- 建物の高さが低いほど、線量が増加する傾向がある。

・　一般に中層階に住む人々は、最上階や最下階に比べて吸入線量が低い傾向が見られる。

以上、提案手法の適用により、屋内の吸入線量の空間的な分布を精度良く予測可能であることが示された。当該研究の成果としては、屋内吸入線量の評価において、実際の都市環境条件に即した予測手法を確立し、建築デザインや都市計画において放射線防護のための基礎データを提供したことが挙げられる。また、CFD を活用することで、都市の形状が放射性物質拡散に及ぼす影響を定量的に評価可能となったことは評価できる。

その一方、課題としては、提案手法が、特定の都市環境に基づいており、異なる都市特性への適用可能性を検証する必要があることが挙げられる。また、屋内の家具配置や換気設備の影響を詳細に評価する必要もある他、長期的な放射線曝露による健康影響の評価が今後の研究課題として残されている。

H. Yoshida-Ohuchi (2013) 114]らは、福島原発事故後の地域住民の被ばく評価に関する貴重なデータを提供し、屋内線量の管理が健康リスク低減に不可欠であることを示唆した。2011 年の福島第一原子力発電所事故後、放射線の健康影響を評価するため、個人線量の正確な測定が必要とされた。宮城県丸森町の住民は木造住宅に住んでおり、屋内外の放射線線量が異なる可能性がある。当該研究の目的は、光刺激ルミネセンス線量計（OSL dosimeters）*を用いて、丸森町の住民の個人等価線量を評価し、屋内外の線量率との関係を調査することである。

まず、福島原発から離れた宮城県丸森町の 36 世帯を対象に、住民の累積被ばく線量を、光刺激ルミネセンス線量計（OSL）を用いて 200 日間（2011 年 9 月 1 日から）測定し、屋内および屋外の周囲線量当量（ambient dose equivalent）**を NaI シンチレーションサーベイメータ***で測定した。データ解析では、屋内外線量率と個人線量の相関を分析し、両者の比率を評価して、住民の被ばく低減対策に向けた提案を行った。

当該研究の主な結果として、住民の累積線量は 536～1490μSv の範囲であり、屋内外の線量率の比率は 0.36～1.0 の間で変動し、屋内線量の方が屋外線量より低い傾向があった。屋内線量率と個人線量にはより強い線形相関（傾き 0.5）が見られ、個人線量は主に屋内線量率に依存した。その一方、屋外線量率との相関は比較的低かった。

当該研究の成果としては、OSL 線量計を用いた個人線量評価により、屋内放射線が個人被ばくに与える影響が大きいことを定量的に明らかにした点が挙げられる。また、屋内線量率の管理が住民の放射線防護において重要であることを実証し、被ばく低減のための対策（建材の改善、生活行動の調整など）を示唆した点も重要である。

一方、課題としては、対象地域が限られており、他の地域におけるデータとの比較が必要である。また、長期的な線量変化や住民の生活習慣との関連を評価するさらなる研究が必要であり、OSL 線量計の測定精度やバイアスに関する追加調査も求められよう。

*光刺激ルミネセンス線量計（OSL）：放射線を照射すると発光する物質の性質を利用して、発光量が、物質が受けた放射線量と発光を照射した光の量との関係から、放射線量を測定する。フィルムバッジと比較して、測定範囲が広い上に精度が良い。

**屋内および屋外の周囲線量当量：作業環境における実効線量にできるだけ近い値が得られるような条件を設定してサーベイメータ等で測定可能とした実用量で、実効線量は、臓器ごとに等価線量と組織加重係数をかけて、全身分を足し合わせたもの。単位はシーベルト（Sv）。

***NaI シンチレーションサーベイメータ：主として γ 線による空間の線量当量率を測定するために用いられ、測定値は[μSv/h]の単位で示される。

T. Sato (2014) 115]らは、マイクロドシメトリ解析を用いて、内部被ばくと外部被ばくの相対的生物学的効果（RBE）を評価した。その結果、内部被ばくの RBE は 1.04 以下であり、外部被ばくとほぼ同等であることが示された。福島第一原子力発電所事故後、放射性セシウム（Cs-137、Cs-134）や放射性ヨウ素（I-131）による内部被ばくの健康リスクが大きな懸念となった。内部被ばくの相対的な生物学的効果（Relative Biological Effectiveness, RBE）が外部被ばくと比較して大きい可能性があるとの議論があったため、本研究では、マイクロドシメトリ解析（Microdosimetric Analysis）*を用いて、内部被ばく（Cs-137、Cs-134、I-131 による）と外部被ばく（662 keV のγ線）との生物学的影響を比較し、RBE がどの程度異なるのかを定量的に評価した。

当該研究では、モンテカルロ粒子輸送シミュレーションを用いて理想的な細胞システム内でのエネルギー吸収を計算した。外部被ばく（662 keV のγ線）と内部被ばく（Cs-137、Cs-134、I-131 由来の電子放出）を比較し、細胞内および細胞核内での吸収線量の確率密度を計算する。放射性同位体の細胞内不均一分布（RI inhomogeneity）や、粒子軌道周辺の高イオン化密度が RBE に及ぼす影響も評価し、非線形な線量反応関係を持つバイスタンダー効果（Bystander Effect）**による影響も評価した。

解析の結果、内部被ばく（Cs-137、Cs-134、I-131）と外部被ばく（662keV のγ線）の RBE は非常に近いことが判明した。RBE の最大値は、細胞核内の RI 濃度と細胞サイズに依存するが、最も保守的な条件でも最大 1.04 であった。また、マイクロドシメトリ的な確率密度はほぼ同一であり、内部被ばくと外部被ばくでの吸収線量分布の確率密度がほぼ一致していることが示された。さらに、細胞内における放射性核種の不均一な分布の影響は限定的であり、RBE に与える影響は小さいことが分かった。バイスタンダー効果による非線形な線量応答の影響も評価したが、外部被ばくと内部被ばくの RBE に大きな違いは見られなかった。

当該研究の成果としては、内部被ばくのリスクが同じ吸収線量の外部被ばくとほぼ同等であることを定量的に証明し、不必要な過大評価を防ぐ科学的根拠を提供した点が挙げられる。また、研究結果は、ICRP（国際放射線防護委員会）の現行勧告と整合的であり、内部被ばくと外部被ばくの影響を同等に扱うことが妥当であることを示唆した点も重要である。さらに、マイクロドシメトリ解析を用いた RBE の詳細評価により、内部被ばくの生物学的影響を定量的に解析するための手法を確立し、放射線防護のための科学的基盤を強化した点も評価できる。

その一方、今後の課題としては、他の放射性核種（プルトニウム、ストロンチウムなど）への適用、実際の細胞や組織での生物学的影響（遺伝子損傷、発がんリスクなど）との比較、低線量・長期被ばくの影響についての評価が求められる。

*マイクロドシメトリ解析：放射線が細胞や DNA レベルでどのようにエネルギーを沈着させ、損傷を与えるかを詳細に評価する手法で、より精密な放射線影響評価が可能となる。従来の線量評価（マクロドシメトリ）が人体全体に対する個人被ばくを対象とするのに対して、細胞核や DNA の線量分布を評価し、医療、環境、宇宙開発の分野でのリスク管理や最適化に貢献する。

**バイスタンダー効果：放射線を直接浴びていない細胞が、近くの被ばく細胞から放射線誘発シグナルを受け取り、遺伝的・生物学的な影響を受ける現象を指す。従来の被ばくの概念を覆し、実際の生物学的影響は単純な線量依存性ではなく、低線量でも影響が大きくなる可能性がある。

O. Kurihara (2017) 116]らは、福島第一原発事故における住民の早期内部被ばく線量を評価するためのツールを開発した。当該ツールは、大気輸送・拡散モデル（ATDM）である WSPEEDI-II（System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information）のデータと、事故後の住民(421 人)の行動履歴を組み合わ

せ、吸入による内部被ばく線量を計算するものである。

当該研究では、WSPEEDI-II データを基に、個人の行動履歴に最も近いグリッド内の 1 時間平均の空気中放射性物質濃度を抽出し、それを基に内部被ばく線量を計算した。検証データとして、421 人の住民の行動履歴を用いて、直接測定値と ATDM ベースの結果を比較し、ツールの妥当性を検討した。

当該研究の成果としては、個人ベースの線量評価が可能となり、行動履歴に基づく精密な内部被ばく評価を実現した点が挙げられる。また、WSPEEDI-II による拡散データと統合することで、事故後の早期段階での迅速な線量計算が可能となった他、直接測定結果との比較検証において、開発ツールが一定の精度を示した点がある。

その一方、課題も存在し、行動履歴データや高解像度の気象データの精度が結果に大きく影響すること、提案ツールは、特定の行動データが利用可能な場合に限定されるため、普遍的な適用にはさらなる開発が必要であること、そして他の放射性物質や異なる事故シナリオへの適用にはモデルの拡張が求められることが指摘された。

K. Manabe (2019) 117]らは、福島事故後に環境中で確認された不溶性セシウム含有微粒子（Cesium-Bearing Particles, CBPs）の内部被ばく線量を評価するため、確率論的バイオキネティック手法を開発した。その結果、CBPs を単一粒子で吸入した場合の線量の不確実性が高いこと、また複数粒子の同時吸入で不確実性が低減することが示された。さらに、不溶性特性を考慮すると、従来の水溶性セシウムモデルよりも内部被ばく線量が高くなる可能性があることが確認された。

福島第一原子力発電所事故後、CBPs が環境中に確認された。これらの粒子は水に不溶性であり、通常の放射性セシウムとは異なる挙動を示すため、人体に取り込まれた際の内部被ばく線量を正確に評価することが困難である。従来の内部被ばく評価は決定論的（deterministic）な生体動態モデルを用いて行われてきたが、CBPs の取り込みは、個々の粒子の移動経路や体内動態に依存するため、確率論的（stochastic）な手法が必要である。本研究では、モンテカルロ法を用いた確率論的バイオキネティック（生体動態）モデルを開発し、CBPs 吸入による内部被ばく線量の確率密度関数を評価することを目的とした。

モンテカルロ法を用いた内部被ばく線量の確率評価の手法として、CBPs が体内に取り込まれた際の線量分布を確率的に評価するために、モンテカルロシミュレーションを開発した。個々の粒子の挙動が、体内の生理学的プロセス（呼吸器沈着、排出経路）にどのような影響を与えるかを解析し、CBPs の不溶性特性を考慮し、既存の一般的な放射性セシウムモデル（可溶性セシウムを仮定）と比較した。吸入後の粒子の滞留時間、組織への移行、排出速度を考慮した新しいバイオキネティックモデルを構築し、CBPs の吸入量が異なる場合の確率密度関数を導出し、内部被ばく線量の不確実性を評価した。また、粒子の個数が増えるにつれ、線量のばらつきがどのように変化するかを解析した。

当該解析の結果、単一の CBPs を吸入した場合、体内の移動経路が大きく変動し、内部被ばく線量の不確実性が高くなることが確認された。一方、複数の CBPs を同時に吸入すると、線量の分布が安定し、不確実性が低減する傾向があった。また、従来の水溶性セシウムを想定したモデルよりも、不溶性の CBPs を考慮した場合、体内での滞留時間が長くなり、結果的に線量が高くなる可能性があることが示された。特に低確率の高線量事象を考慮する際には、確率論的バイオキネティックモデルの方が現実的な評価を提供することが確認された。

当該研究の成果としては、CBPs に特化した確率論的手法を開発し、従来の確定論的アプローチの限界を克服し、内部被ばくリスクの評価において、より現実的な線量評価を可能にした点が挙げられる。また、確

率密度関数を用いた線量評価が可能となり、吸入粒子数に応じた線量のばらつきを確率的に評価し、リスク管理の精度向上に貢献した点も重要である。さらに、CBPs の吸入リスクが過小評価されないように、放射線防護対策の基盤となる科学的知見を提供している。

その一方、今後の課題としては、長期的な生体動態の評価に向けたさらなる研究が必要であり、他の不溶性放射性核種（プルトニウム、ストロンチウムなど）への適用可能性や異なる被ばくシナリオ（経口摂取や皮膚付着）も考慮する必要があることが挙げられる。

H. Yoshida-Ohuchi (2020) 118]らは、福島第一原子力発電所事故後、住宅内の放射性セシウム汚染が内部被ばく線量に与える影響を評価し、ハウスダストの摂取およびエアロゾルの吸入が人体に与える影響を詳細に解析した。福島第一原子力発電所（FDNPP）周辺地域で、住宅内部の放射性セシウム汚染による内部被ばく線量を評価し、ハウスダストの摂取や清掃時のエアロゾル吸入を中心に解析した。

具体的方法としては、2016 年 4 月から 2019 年 1 月にかけて、FDNPP 周辺 1.6～16.1km 圏内の 65 軒の住宅や建物で清掃中に採取したハウスダストとエアロゾルを用いて分析を行った。ダスト中の放射性セシウム（Cs-137）濃度、溶解性（1 M HCl および水への溶解性）、粒子サイズ分布を測定し、吸入および摂取による内部被ばく線量を、DCAL(Dose and Risk Calculation System)ソフトウェアを用いて計算した。

その結果として、ハウスダスト摂取（20mg/日）による最大累積有効線量は 1.13μSv、エアロゾル吸入（1.5 時間の清掃中、マスク着用）による最大線量は 4.55μSv と算出された。なお、被ばく線量は FDNPP からの距離が増加するにつれて減少し、室内の表面汚染レベルと正の相関が見られた。

当該研究の成果としては、ハウスダストとエアロゾルを介した内部被ばく線量の詳細な定量化を実現し、放射性汚染の空間的分布を明らかにすることで、FDNPP からの距離に応じたリスク低減策を提案した点が挙げられる。また、屋内汚染による健康リスクの理解を深め、防護対策の基盤を提供した点も評価される。

その一方、今後の課題としては、時間の経過による放射性セシウム濃度の減衰とその影響を追跡する研究が必要であること、FDNPP 周辺以外の地域や異なる生活環境でのデータ収集を通じて、結果の汎用性を検証する必要があること、そしてハウスダストの効果的な除去方法やエアロゾル吸入防止策の開発が求められることが指摘される。

K. Manabe (2020) 119]らは、個々の患者の臓器質量を反映し、基準線量をスケーリングすることで臓器吸収線量を推定する簡易手法を開発した。その結果、肝臓、脾臓、甲状腺において 14%以下の誤差でモンテカルロシミュレーションと一致し、高精度な評価が可能であることが示された。

放射線防護や核医学における臓器吸収線量（Organ Absorbed Dose）の正確な推定は、患者ごとの個体差を考慮する上で極めて重要である。一般的に、放射性医薬品を用いた診断では、放射性物質の体内動態や臓器サイズの違いが線量評価に影響を与えるため、標準的なモデルを適用するだけでは十分な精度を得られない場合がある。当該研究では、個々の患者の臓器質量を反映した簡便な線量評価手法を提案し、臓器ごとの線量を正確に推定することを目的とした。

当該研究では、基準臓器線量（Reference Organ Dose）を特定の個人の臓器質量に応じてスケーリングする手法を開発した。臓器質量の逆数比を用いることで基準モデルから個別の線量評価を行い、詳細なモンテカルロシミュレーションによる線量評価結果と比較した。^{99m}Tc や ^{123}I で標識された放射性医薬品の投与後の線量を評価し、肝臓、脾臓、赤色骨髄（Red Marrow）、甲状腺について推定値の精度を評価した。

解析の結果、肝臓、脾臓、甲状腺の線量推定誤差は 14%以下であり、モンテカルロシミュレーションと比較して高い精度を示した。特に、固形臓器においては、簡易スケーリング法が有効であることが確認された。

一方、赤色骨髄については、一部のケースで 30%以上の誤差が発生し、骨髄は頭部や体幹部全体に分布しており、単純な質量スケーリングでは精度が低下する可能性が示された。また、当該手法は計算負荷を大幅に軽減し、精度の高い線量推定が可能であることが分かった。

当該研究の成果としては、個人ごとの臓器質量を反映した線量推定手法が確立され、特に固形臓器の線量評価に有効であることが示された。特に、肝臓、脾臓、甲状腺では、14%以下の誤差で高精度な結果を示し、放射線防護のための個別線量評価や患者ごとの線量最適化に貢献できる可能性がある。さらに、計算時間を大幅に削減し、個人ごとの被ばく線量評価を容易に実施できる点が実用的な利点である。

一方、今後の課題としては、赤色骨髄の線量評価の精度向上が必要であり、骨髄は体全体に分布するため、より詳細な分布モデリングが求められることが挙げられる。また、本研究では ^{99m}Tc と ^{123}I に限定して評価を行ったが、他の核種（例:^{131}I や ^{18}F）への適用可能性を検討する必要がある。さらに、個人差を考慮するためには、臓器質量だけでなく、放射性物質の体内分布や代謝特性も評価する必要があることが指摘される。

N. Reteoussi-Henss (2021) 120]らは、妊娠 24 週の胎児と母体の放射線吸収線量を、モンテカルロシミュレーションを用いて評価し、母体の組織による遮蔽効果が胎児の外部被ばく線量を低減することを確認した。また、放射性核種ごとの線量率係数を提供し、胎児被ばくのリスク評価に貢献した。なお、当該研究の背景には、放射線被ばくが胎児に及ぼす影響が特に妊娠中の女性にとって重要な課題であるという認識がある。つまり、胎児の臓器が発達する過程において、外部環境からの放射線曝露による吸収線量を正確に評価することは、放射線防護やリスク管理の観点から不可欠である。しかし、これまでの研究では、妊娠中の女性や胎児の放射線線量評価に関するデータが限られていた。従って、当該研究では、土壌汚染や大気中の放射性物質による外部被ばくに対し、妊娠 24 週の胎児の臓器吸収線量を評価することを目的とした。

研究の手法としては、PHITS および YURI モンテカルロコードを用いて、外部被ばくに関する環境放射線場を再現し、土壌汚染および大気中の放射性核種による被ばくを考慮した。さらに、EGSnrc モンテカルロコードを用いて胎児および母体のボクセルファントムにおける光子輸送をシミュレーションし、0.015～10MeV のモノエネルギー光子を考慮し、放射線場をモデル化した。次に、モノエネルギー線量係数を核種の崩壊データと畳み込み、核種ごとの臓器線量率を導出した。

得られた主な結果としては、シミュレーションの結果、胎児の臓器線量率は母体の臓器よりも低いことが確認された。これは、母体の組織が遮蔽効果を持つため、胎児への直接的な被ばくが低減するためである。また、放射性セシウム（Cs-137、Cs-134）などの中エネルギーγ 線を放出する核種では、胎児と母体の線量比が比較的小さいことが示された。その一方、低エネルギー光子を放出する核種では、母体の皮膚や脂肪組織による遮蔽効果が顕著であり、胎児の被ばく線量は著しく低下した。さらに、母体の腹部周辺の臓器（子宮、腸、腎臓）では外部被ばく線量が比較的高いが、胎児の脳や肝臓の線量は低く抑えられていた。これは、母体の骨盤や軟部組織による遮蔽効果の影響が大きいことを示唆している。

当該研究で得られた線量率係数を用いることで、特定の放射性環境における長期的な累積線量の推定が可能となる。胎児と母体の臓器ごとの放射線吸収線量率を定量化し、土壌や大気中の放射性核種に対する胎児の被ばく線量も評価された。また、外部被ばくにおける母体の遮蔽効果を定量的に評価し、胎児の臓器が母体の軟部組織により一定の遮蔽を受けるため、外部環境からの放射線による直接被ばくが低減されることを確認した。さらに、放射線防護や環境モニタリングのために、特定の放射性核種ごとの線量率係数をリスト化し、実用的なデータを提供した。

その一方、本研究の課題としては、妊娠期間の違いによる影響の検討が挙げられる。本研究では、妊娠 24

週の胎児に焦点を当てたが、妊娠初期や後期の胎児の線量評価も必要である。また、異なる被ばくシナリオの検討も求められる。本研究では外部被ばくのみを対象としたが、内部被ばく（母体が吸入または摂取した放射性物質の影響）も評価する必要がある。さらに、シミュレーションによる評価結果が中心であるため、実際の環境モニタリングデータとの比較が求められる。

D. Fredrich (2022) 121]らは、感染リスクを空間的に分布させることで屋内環境の管理に貢献することを目的として、屋内環境での飛沫およびエアロゾルによる感染リスクをリアルタイムで評価するための数値モデルを提案した。COVID-19 などの空気感染症に関連する屋内感染リスクをリアルタイムで推定するためのフレームワークを構築し、教室、病院、レストラン、映画館など多様な屋内環境に適用可能なツールを目指している。

当該研究の手法としては、まず前処理として数値流体力学（CFD）を用いて室内の平均換気パターンをシミュレーションし、その後、各人から発生する飛沫とエアロゾルの拡散及び濃度を計算し、表面の汚染や空間的な感染リスクを評価した。また、オープンソースソフトウェアを用いて、シンプルでユーザーフレンドリーかつ自動化されたシステムを構築した。

得られた主な結果としては、飛沫およびエアロゾル中のウイルス量の分布を予測可能とし、人体による熱プルームの影響が分析された。その結果、浮力によって引き起こされる流れは、低から中程度の換気率では無視できないことが示された。また、表面汚染および局所的な感染リスクを計算し、最大収容人数、換気量（ACH：Air Changes per Hour）、清掃頻度の指標を提供した。

得られた成果としては、飛沫とエアロゾルの拡散および感染リスクを空間的に把握可能とし、リスク低減に向けた具体的な管理策を提案することで、包括的な感染リスク評価が可能となった点が挙げられる。また、ユーザーフレンドリーでオープンソースの設計により、さまざまなユーザー（施設管理者、研究者、政策立案者）が利用可能となった。さらに、感染拡大防止のための迅速な意思決定を支援するツールとしてのリアルタイム性の強化も果たした。

その一方、課題も存在する。まず、異なる条件下での検証が必要であり、異なる建物構造や気象条件でのモデル適用性をさらに検証する必要がある。また、継続的な換気戦略や清掃方法の効果を評価し、長期的な適用性を評価する必要がある。さらに、大規模環境での計算効率向上も求められ、より広範な空間や多数の感染源を扱う際の計算負荷を低減する技術の開発が必要である。

T. Nishihara (2023) 122]らは、咳による飛沫が室内環境でどのように拡散するかについて、口腔形状が与える影響を数値解析で調査した結果を報告した。福島第一原発事故後、空気中の放射性物質が拡散するメカニズムや COVID-19 ウイルスの感染リスクが問題視される中、咳による飛沫拡散も重要な感染経路として注目されている。この研究は、口腔形状が飛沫の拡散挙動にどのように影響を与えるかを高精度にシミュレーションすることで、感染予防策の向上を目指したものである。

まず、咳による飛沫の拡散を再現するため、詳細な口腔形状を再現したモデルと単純化したモデルを作成した。数値流体力学（CFD）を用いて、口腔内の空気の流れや飛沫の動きをシミュレーションし、口腔形状が飛沫の飛行距離、拡散範囲、着地位置に与える影響を比較した。

詳細な口腔形状を再現したモデルでは、流速分布が現実に近い形で再現され、飛沫の拡散挙動が異なる結果となった。口腔形状が精密に再現された場合、飛沫の分布や飛距離に違いが見られ、感染リスクの評価に影響を与えることが確認された。また、当該研究により、換気設計や感染予防対策の設計において新しい知見が提供された。しかし、詳細なモデルを使用するため、計算に必要なリソースが増加し、広範な応用には

改善が必要である。さらに、さまざまな環境や人口統計に対応したモデルの一般化が求められる。

J. He (2023)123]らは、歯科医療現場における感染予防策の強化を目的として、歯科治療中に発生するエアロゾルや飛沫の拡散特性を調査し、吸引装置の効果を評価する研究を行った。歯科治療では、高速回転する機器によってエアロゾルや飛沫が発生し、感染リスクを高める可能性がある。当該研究では、エアロゾルや飛沫の拡散挙動を解析し、吸引装置の効果を検証することで、感染予防策を最適化することを目指した。高速カメラを用いて、歯科治療中のエアロゾルや飛沫の拡散を観測し、画像解析ソフトウェアを使用して、拡散速度、距離、角度を定量化した。また、実験データに基づいて CFD モデルを構築し、エアロゾルの拡散経路や吸引装置の性能を解析した。また、単一チャネルと三重チャネルの吸引装置を比較し、CFD シミュレーションをもとに三重チャネル吸引装置を設計し、フルオレセイントレーサー法*でその吸引効率を検証した。

得られた結果としては、最大拡散速度は 6.2m/s、拡散距離は 0.55m、拡散角度は 130°であることが確認された。これらの実験結果は CFD シミュレーションと一致した。吸引効率について、単一チャネル吸引装置は-350Pa で 74.05%の吸引効率を示したのに対し、三重チャネル装置は-350Pa および-150Pa で 99.23%の吸引効率を達成した。実験検証では、三重チャネル装置が 97.71%の吸引効率を示した。

当該研究により、三重チャネル吸引装置は、エアロゾルの拡散を効果的に制御し、感染リスクを大幅に低減できることが示された。実験観察と CFD シミュレーションを組み合わせることで、エアロゾルの挙動や制御メカニズムを包括的に理解することができた。一方で、制御された環境での成果が実証されたものの、多様な臨床環境での有効性を検証する必要がある。

*フルオレセイントレーサー法（Fluorescent Tracer Method）：蛍光性のトレーサーを用いて、気流や流体の動きを可視化・測定する技術

M. Sasaki (2023) 124]らは、放射線被ばくによるがんリスク評価を行うための計算コード「SUMRAY」を開発し、R および Python で実装した。SUMRAY は、原爆被爆者の疫学データに基づくリスクモデルを組み込み、モンテカルロ法を用いて不確実性を考慮したリスク評価を可能にする。放射線被ばくによる発がんリスクの評価は、原子力事故後の健康影響評価や放射線防護政策の策定に不可欠であり、リスク評価の際には、統計的不確実性やモデルパラメータのばらつきを考慮することが求められる。

SUMRAY は、広島・長崎の原爆被爆者コホート（Life Span Study, LSS）に基づく放射線リスクモデルを採用しており、全固形がん（all-solid cancer）の死亡率および罹患率を推定するためのモデルを組み込んでいる。また、モンテカルロシミュレーションを導入することで、リスク評価に伴う統計的不確実性を考慮し、信頼区間を算出可能にしている。R および Python で実装され、データサイエンスや数値解析で広く用いられるこれらのプログラムにより、放射線疫学研究者や政策決定者が簡単に利用できるよう設計されている。

SUMRAY の開発と公開により、R と Python の両方で利用可能な放射線リスク評価ツールが提供され、放射線被ばくによるがん死亡率および罹患率を評価するための計算フレームワークが確立された。また、モンテカルロ法による不確実性評価により、単純な平均値推定ではなく、リスク評価に伴う統計的不確実性を考慮し、信頼区間を算出可能となった。さらに、LSS に基づくリスクモデルを組み込むことで、放射線疫学の標準的な知見に基づいた評価が可能である。

当該研究により、放射線リスク評価のためのオープンソース計算ツールが開発され、放射線防護研究や疫学研究で活用可能なツールが公開リソースとして提供された。従来の決定論的手法とは異なり、確率論的アプローチを採用することで、リスク評価の精度が向上し、政策立案や健康影響評価への応用が期待される。

SUMRAY は、放射線被ばく後の公衆衛生政策やリスク管理のための意思決定支援ツールとして活用可能である。

その一方、現在の SUMRAY は、LSS に基づく全固形がんのリスクモデルに限定されているため、白血病や特定部位のがんのリスク評価モデルを統合する必要がある。また、急性被ばく（原爆被曝データ）をベースにしているため、慢性低線量被ばく（福島事故後の被ばくなど）への適用性を検証する必要があり、職業被ばくや医療被ばくに対するリスク評価にも対応できるような拡張が求められる。

M. Orabi (2024) 125]は、核関連事故における放射性エアロゾルの屋内濃度とそれによる内部被ばく線量を予測するモデルを提案し、福島第一原子力発電所事故を事例として放射性エアロゾルの沈着や侵入メカニズムを数値的に解析した。目的は、核関連事故で発生する放射性エアロゾルの挙動を予測するための包括的なモデルを構築し、室内汚染濃度を計算し、それに基づく内部被ばく線量を推定することである。

当該研究では、既存の数値流体力学（CFD）スキームを改良してモデル化し、福島第一原子力発電所事故のデータを用いてエアロゾル粒子の沈着、侵入、分布をシミュレーションした。また、内部被ばく線量の評価には摂取量に基づいた放射性核種の寄与を考慮した。

その結果、モデルは、屋内の放射性エアロゾル濃度を正確に計算可能で、さまざまな環境条件下での結果と一致した。また、特定の核種の挙動を重点的に解析し、被ばく線量への影響を定量化した。これにより、高精度モデルの構築が実現し、放射性エアロゾルの屋内分布を効率的に予測し、事故対応の意思決定支援ツールとして利用可能となった。さらに、福島事故の分析により、実際の核関連事故を基にしたシナリオ分析によりモデルの信頼性と実用性が実証された。内部被ばくの評価では、エアロゾル摂取による内部線量を詳細に評価し、健康リスク管理の基盤を提供した。

その一方、課題としては、多様な環境での検証が必要であり、異なる建物構造や気象条件でのモデル適用性を検討する必要がある。また、放射性エアロゾルの再浮遊や残留が被ばく線量に与える長期的な影響を解析する必要がある。さらに、緊急時対応のためにモデルの高速化とリアルタイム処理能力の向上が求められる。

M. Talaat (2024) 126]らは、CFD により口腔および舌の形状の変更が化学物質の吸入や気道への沈着に与える影響を評価した。呼吸器疾患の治療や有害物質の吸入リスク評価において、吸入された蒸気やナノ医薬品の上気道内での沈着挙動を理解することは重要である。しかし、上気道の形状、特に口腔や舌の形状がこれらの沈着に与える影響については十分に解明されていない。当該研究の目的は、アジョイントソルバー*と数値流体力学（CFD）を組み合わせた手法を用いて、口腔および舌の形状が蒸気沈着に与える影響を定量的に評価することである。

当該研究では、既存の口腔–咽頭モデルを使用し、アジョイントソルバーを用いて口腔および舌の形状を自動的に変形させた。これにより、さまざまな形状の影響を評価可能なモデルを構築した。シミュレーションには、CFD ソフトウェアである ANSYS Fluent を用い、壁面吸収モデルと連携し、蒸気の輸送と沈着をシミュレーションした。対象とした化学物質は、吸収率の異なるアセトアルデヒドとベンゼンの 2 種類である。形状感度解析にはアジョイントソルバーを使用し、口腔および舌の各部位の形状変化が蒸気沈着に与える影響を定量的に評価した。

その結果、口腔および舌の形状を変化させることで、アセトアルデヒドの口腔内フィルター効果が最大 3.2%、ベンゼンでは 0.27%変化することが確認された。これは、化学物質の特性によって形状の影響度が異なることを示している。また、舌の前部の形状変化が、蒸気沈着に対して最も顕著な影響を与えることが明

らかになった。他の部位の影響はケースによって異なることが示された。

この研究により、アジョイントソルバーと CFD を組み合わせた手法により、上気道の形状が蒸気沈着に与える影響を効率的かつ定量的に評価できることが示された。口腔および舌の形状を調整することで、吸入薬の効果を高めたり、有害物質の沈着を減少させる可能性が示唆された。しかし、モデルの一般化が必要であり、さまざまな個人差や病態を考慮したモデルの構築が今後の課題である。また、呼吸や嚥下など動的な要素が上気道の形状や蒸気の流れに与える影響を考慮する必要がある。

*アジョイント(随伴)ソルバー : アジョイント CFD ソルバーは、フローソルバー、アジョイントソルバー、最適化ループによるモーフィング（形状変更）の 3 つ部分から成り、上気道内のフロー/蒸気場のシミュレーション、形状感度の計算、形状感度を元に形状の変更を行う。設定された値までこのループを繰り返す。

C. Zhu (2024) 127]らは、数値流体力学（CFD）シミュレーションを通じて、呼気中のエアロゾル伝播を解析し、感染リスク評価に役立つ知見を提供するために、現実的な口腔・鼻腔構造と温度分布を考慮した呼気中のエアロゾル伝播に関する数値シミュレーションを行った。呼吸器感染症は、感染者の鼻や口から放出される病原体を含む液体粒子（エアロゾル）によって伝播する。これらの粒子は、呼吸、会話、くしゃみ、咳などの際にエアロゾル化され、サイズはサブミクロンから数ミクロンまで多岐にわたる。従来の研究では、人間の呼吸器系の詳細な構造が考慮されていないことが多く、実際の鼻腔構造が呼気中のエアロゾル伝播予測に与える影響は十分に理解されていなかった。

上記の背景下、当該研究では、CFD シミュレーションを実施し、現実的な口腔・鼻腔構造と温度分布をモデル化し、呼気中のエアロゾル伝播をシミュレーションした。また、感受性の高い個体の吸入条件を設定し、エアロゾルの吸入曝露リスクを評価した。シナリオ分析では、環境風速、個体間の距離、呼気流量の変化がエアロゾル伝播に与える影響を複数のシミュレーションシナリオで検討した。

その結果、環境風は、流れ場の複雑さと個体間の粒子伝播・沈着に大きな影響を与えることが確認された。特に、風速 0.5m/s および 1m/s の条件下で、直径 1μm の粒子の 80%以上が感染者の鼻腔内に沈着することが観察された。また、高い呼気流量は、近接距離での粒子沈着率を増加させることが確認された。これは、呼気の強さがエアロゾルの拡散範囲と沈着パターンに直接影響を与えることを示唆している。

当該研究により、現実的な口腔・鼻腔構造と温度分布を考慮することで、呼気中のエアロゾル伝播のメカニズムをより正確に理解することができ、呼吸器感染症の伝播リスク評価や公衆衛生政策の策定に有用な情報を提供した。

その一方、特定の個体の口腔・鼻腔構造に基づくモデルであるため、異なる個体や集団への適用性を検証する必要がある。また、シミュレーション結果を実際の環境条件下で検証し、モデルの精度と信頼性を評価することが求められる。これらの研究により得られた知見は、放射性物質吸入モデルの高精度化に寄与する可能性があると考えられる。

T. Masuda (2024) 128]らは、ICRP の改訂生体動態モデル（biokinetic model）が、一般公衆向けに適用可能かどうかを検証し、食品中の炭素およびトリチウムの代謝データを考慮した修正モデルを開発した。その結果、ICRP の改訂モデルが算出した有機 C-14 の線量係数は、一般公衆向けには保守的である可能性が示された一方、有機結合型トリチウム（OBT）の線量係数は適切であることが確認された。

国際放射線防護委員会（ICRP）は、放射線防護のため、2016 年に炭素（C-14）およびトリチウム（H-3）の生体動態モデルを改訂し、作業者の被ばく線量係数を計算する新しいモデルを導入した。現在、一般公衆向けのモデルも ICRP によって改訂が進められている。しかし、2023 年に公開された ICRP の改訂ドラフト

では、食品中の放射性核種の代謝データが十分に考慮されていないにもかかわらず、作業者向けと同じ生体動態モデルを一般公衆向けにも適用することが提案されている。当該研究では、ICRP の改訂モデルが一般公衆にも適用可能かどうかを検証するものである。こうした研究は、内部被ばく評価の精度向上がどのように進められるかを知る契機ともなるものと考え、その取り組みを紹介する。

当該研究では、ICRP の改訂モデルを基に、一般公衆向けの線量係数を計算し、食品中の炭素およびトリチウムの代謝データを考慮してモデルを修正した。また、食品中の放射性核種の代謝データを反映するため、複数のパラメータを修正し、放射線に対して感受性が低い組織（radio-insensitive tissues）を新たにモデル内に導入した。その際、日本原子力研究開発機構が開発した内部被ばく線量計算プログラムを用いて、一般公衆向けの線量係数を推定し、改訂モデルと修正モデルの結果を比較し、その適用の妥当性を評価した。

その結果、一般公衆向けの線量係数の範囲として、有機 C-14（organic C-14）の摂取による線量係数は 3.2×10^{-11}～7.6×10^{-11}SvBq^{-1}、有機結合型トリチウム（OBT: Organically Bound Tritium）の摂取による線量係数は 3.5×10^{-11}～5.4×10^{-11}SvBq^{-1}であることが算出された。ICRP の改訂モデルが算出した有機 C-14 の線量係数（1.6×10^{-10}SvBq^{-1}）は、一般公衆向けには保守的であることが判明した。一方、ICRP の OBT に対する線量係数（5.1×10^{-11}SvBq^{-1}）は、今回の修正モデルによる結果と凡そ一致しており、妥当であることが確認された。

当該研究により、ICRP の改訂モデルを用いた場合の一般公衆向けの新たな線量係数が算出され、その適用の妥当性が評価された。ICRP の改訂モデルでは考慮されていなかった食品由来の代謝データを統合し、より現実的な評価を実施するための修正モデルが開発されている。その結果、有機 C-14 については、ICRP の線量係数がやや過大評価されている可能性があることが指摘されたが、OBT については、ICRP の改訂モデルが適切な評価を行っていることが確認された。

今後の課題としては、他の年齢層（幼児や高齢者）に対する線量評価や、環境条件の違い（食品の種類や摂取量の違い）が線量係数に及ぼす影響をさらに分析する必要がある。また、本研究の結果を ICRP の最終改訂版と比較し、さらなる検証を行うことが必要である。

○本項（2.4.5）のまとめ

まとめとして、論文を大きく 3 つのグループに分類する。まず、福島原発事故後、その影響が大きい地域における内部被ばく線量の評価と屋内での体内への吸入に関するもの、次に、CFD によるエアロゾルや飛沫などの体内への吸入の解析例、最後に、内部被ばく線量評価の詳細な解析に関するものである。

H. Yoshida-Ohuchi (2013) 114]らは、福島原発事故後の周辺地域住民の個人被ばく線量を評価し、累積線量は、536～1490μSv の範囲であったと報告し、住民の放射線防護において、屋内線量率の管理と被ばく低減のための対策（建材の改善、生活行動の調整など）が重要であるとした。**O. Kurihara (2017) 116]**らは、WSPEEDI-II の解析結果と、事故後の住民(421 人)の行動履歴を組み合わせ、吸入による内部被ばく線量を評価した。大気拡散による屋内侵入、吸入による内部被ばくの評価については、いわゆるゾーンモデルによる **W.H. Wang (2009) 112]**の解析例や、CFD による **X.F. Hu (2013) 113]**らの解析例がある。**H. Yoshida-Ohuchi (2020) 118]**らは、事故後のハウスダストの摂取およびエアロゾルの吸入が人体に与える影響を詳細に解析し、ハウスダスト摂取（20mg/日）による最大累積有効線量は 1.13μSv、エアロゾル吸入（1.5 時間の清掃中、マスク着用）による最大線量は 4.55μSv と算出した。**M. Orabi (2024) 125]**は、福島原発事故後のデータを用いて、CFD による放射性エアロゾルの屋内濃度と、それによる内部被ばく線量を予測するモデル

を提案した。

次に、気道からの吸入に関しては、**K.-H. Cheng (1997) 110]**らが、人体の口腔通路（口腔入口から中気管まで）の幾何学的形状、周囲長、断面積を測定し、超微粒子の沈着質量移動特性と関連した研究結果を報告した。その後、室内活動における超微粒子の肺への沈着を調べた **C. Mitsakou (2007) 111]**らの研究や、屋内環境での飛沫およびエアロゾルによる感染リスクをリアルタイムで評価するための数値モデルを提案した **D. Fredrich (2022) 121]**らの研究、咳による飛沫が室内環境でどのように拡散するかについて、口腔形状が与える影響を数値解析で調べた **T. Nishihara (2023) 122]**らの研究、歯科治療中に発生するエアロゾルや飛沫の拡散特性を調査した **J. He (2023) 123]**らの研究、そして、口腔–咽頭モデルにより、上気道内での蒸気沈着に与える影響を口腔および舌の形状変化をアジョイント(随伴)ソルバーを用いて解析した **M. Talaat (2024) 126]**らの研究がそれに続くものと位置付けられる。

C. Zhu (2024) 127]らは、CFD シミュレーションにより、現実的な口腔・鼻腔構造と温度分布を考慮した呼気中のエアロゾル伝播を解析し、風速 0.5m/s および 1m/s の条件下で、直径 1μm の粒子の 80%以上が感染者の鼻腔内に沈着し、呼気の強さがエアロゾルの拡散範囲と沈着パターンに影響すると報告した。**T. Sato (2017) 115]**らは、マイクロドシメトリ解析を用いて、内部被ばくと外部被ばくの相対的生物学的効果（RBE）を評価した。その結果、内部被ばくの RBE は、ほぼ 1 に近く、外部被ばくと内部被ばくで物理的な線量吸収の違いはほとんどなかったと報告した。**K. Manabe (2019) 117]**らは、福島事故後に環境中で確認された不溶性セシウム含有微粒子（CBPs）の内部被ばく線量を評価するため、確率論的バイオキネティックモデルを開発し、不溶性特性を考慮すると、従来の水溶性セシウムモデルよりも内部被ばく線量が高くなる可能性があることが確認されたと報告した。**K. Manabe (2020) 119]**らは、個々の患者の臓器質量を反映し、基準線量をスケーリングすることで臓器吸収線量を推定する簡易手法を開発し、肝臓、脾臓、甲状腺など固形臓器の線量評価に有効であることを示した。**N. Reteoussi-Henss (2021) 120]**らは、妊娠 24 週の胎児と母体の放射線吸収線量をモンテカルロシミュレーションにより評価し、母体の腹部周辺の臓器（子宮、腸、腎臓）では外部被ばく線量が比較的高いが、胎児の脳や肝臓の線量は低く抑えられており、母体の組織が遮蔽効果を持つため、胎児への直接的な被ばくが低減するためであると報告した。**M. Sasaki (2023) 124]**らは、放射線被ばくによるがんリスク評価を行うための計算コード「SUMRAY」を開発した他、**T. Masuda (2024) 128]**らは、一般公衆向けの線量係数を計算し、ICRP の改訂生体動態モデル（biokinetic model）が一般公衆向けに適用可能かどうかを検証している。

2.5 まとめ

文献調査作業（2 章）では、本事業において関連する日本語文献を約 200 件リストアップし、本文中で特に本事業と関連が深いと判断した 65 件を引用し、研究の背景、目的、方法、結果及び成果と課題について報告した。最終的には、関連性の高い 136 件の日本語文献リストも作成し章末に付加してある。英語文献については、約 300 件のリストアップを行い、本文中で、関連の深い 128 件を引用し、日本語文献と同様の報告を行った。論文リストとしては、データアーカイブサイトの URL あるいは HTML もリストに含め、最終的に 265 件の英語文献リストも作成し章末に記した。

本文献調査により、放射性物質の大気拡散により人の被ばくに至る過程については、放射性物質に限定せず、一般の汚染物質も含めることで有用な文献があることが分かったため、それらも調査対象とした。

以上、計算機が大きく進歩した 2000 年以降、上記観点から、おおよその重要な研究進展をレビューでき

たと考えている。大気拡散については、CFD の活用が展開し進歩している一方、従来型モデルにも進展があり、両者の連携活用を考えていくことも現実的であると考えられる。理由としては、CFD は一般に高精度である一方、計算コストが高く、また、気象現象の反映等に向け、初期及び境界条件の詳細設定が必要である。それに対し、従来型モデルは計算コストが低く、精度は低いがリアルタイム応答が可能な場合が多い。また、CFD の適用範囲は局所的であり、広範囲な適用には限界があり、その場合は、従来型モデルが主要な役割を果たすと考えられ、連携及び相補的な両者の活用が適切であると考えられる。また、大気拡散による結果として、線量評価を実施する際は、CFD との連携から線量評価の高精度化（CFD にあわせた空間解像度の向上）及び高速化も求められ、その観点でも様々な成果が得られている。また、屋内退避等による被ばく低減効果の評価に対しても、線量計算の高精度化による研究が進められていることが分かった。さらに、屋内外での汚染物質拡散による人体への影響についても、空気環境の観点から、CFD 等の活用例が数多く報告され、参考になる知見が豊富に得られている。なお、屋内での CFD 解析は、感染症（COVID-19）との関連から、最近になり膨大な研究が行われ、参考になる知見が豊富に得られてきたことも重要な進展と考えられる。以上より、屋外での大気拡散から屋内での被ばくに関する評価に至るプロセスにおいて、様々な解析方法が提案され、各々、参考となる知見が得られており、それらを網羅し整理した上で、今後の方向性を議論する必要があると考えられる。本報告（2 章）は、その一端となるものであり、更なる成果や知見の分析の他、課題に対する議論と検討が大いに必要と判断する。

文献リスト

文献リストは、日本語論文、英語論文について、本文で引用した順に番号を付けて以下に示した。

（日本語文献）

1) 近藤裕昭, 数値モデルによる大気環境解析, 大気環境学会誌, 36(5), 262-274(2001).
2) 岡本眞一, 速水洋, 大気質モデルの性能評価について, 大気環境学会誌, 42(4), A23-A29(2007).
3) 日下博幸, 領域気象モデルWRFについて, 日本流体力学会誌ながれ, 28, 3-12(2009).
4) 竹見哲也, 中山浩成, 微細規模大気流れの気象モデルとCFDモデルの融合解析, 日本流体力学会誌ながれ, 28, 13-20(2009).
5) 弓本桂也, 気象・輸送モデルにおけるデータ同化, 日本流体力学会誌ながれ, 28, 37-44(2015).
6) 関山剛, 梶野瑞王, アンサンブルカルマンフィルタにおける変数局所化を利用した気象場と大気濃度場の同時データ同化, 統計数理, 70(2), 165-179(2022).
7) 道岡武信, 佐藤歩, 佐田幸一, Large‐Eddy Simulationによる大気境界層中のトレーサガス濃度変動予測, 日本機械学会論文集 B 編, 69(680), 868-875(2003).
8) 滝川雅之, 領域化学輸送モデルを用いた放射性物質の大気輸送および除去過程の推定, 日本地球化学会年会要旨集, 第58回年会, 37(2011).
9) 井口敬雄, 向川均, 榎本剛, 福島第一原発事故による放出物質の大気輸送過程シミュレーションにおける誤差の検証, 京都大学防災研究所年報, 55B, 269-277(2012).
10) 堅田元喜, 茅野政道, 寺田宏明, 永井晴康ほか, 福島第一原発事故初期のプラント近傍における放射性物質の局所大気拡散解析, 日本原子力学会2013年春の年会, https://doi.org/10.11561/aesj.2013s.0.676.0(2013).
11) 日本学術会議・総合工学委員会・原子力事故対応委員分科会, 東京電力福島第一原子力発電所事故によって環境中に放出された放射性物質の輸送沈着過程に関するモデル計算結果の比較, https://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-22-h140902-j1.pdf (2014).
12) 小野浩己, 瀧本浩史, 佐藤歩, 道岡武信, 佐田幸一, 地熱発電所から排出される硫化水素の大気拡散予測のための数値モデル開発, 大気環境学会誌, 52(1), 19-29(2017).
13) 堅田元喜, 茅野政道, 福島第一原子力発電所事故における放射性核種の大気放出・拡散・沈着, エアロゾル研究, 32(4), 237-243(2017).
14) 李秀澈, 周瑋生, 松本健一, 李態妍, 大島堅一ほか, 日中韓の原発で重大事故が起きた場合の同地域での放射性物質被害の推定: HYSPLIT モデルによる推定, 名城論叢, 24(1･2)(2023).
15) 永井晴康, 茅野政道, 山澤弘実, 323. 大気力学モデルを用いた緊急時の放射能大気拡散予測手法の開発, 日本原子力学会誌, 41(7), 777-785(1999).
16) 茅野政道, 安達武雄, 緊急時環境線量情報予測システム SPEEDI の現状と今後の展開, 日本原子力学会誌, 45(5), 296-301(2003).
17) 古野朗子, 茅野政道, 山澤弘実, 緊急時対応のための長距離大気拡散計算による放出源推定手法の開発, 日本原子力学会和文論文誌, 5(3), 229-240(2006).
18) 寺田宏明, 永井晴康, 古野朗子, 掛札豊和, 原山卓也, 茅野政通, 緊急時環境線量情報予測システム 世界版) WSPEEDI 第2版の開発, 日本原子力学会和文論文誌, 5(3), 257-267(2008).

19) 永井晴康, 被ばく線量評価のための大気拡散シミュレーション 福島第一原子力発電所事故初期段階における大気中放射性物質濃度分布の再構築, 日本原子力学会誌 ATOMOΣ, 55(12), 712-717(2013).
20) 中山浩成, 永井晴康, WSPEEDIによる福島原発事故時の放射性物質拡散予測について, 日本風工学会誌, 38(4), 396-403(2013).
21) 根本美穂, 海老根典也, 岡本明子, 保坂泰久, 都築克紀, 寺田宏明, 早川剛, 外川織彦, 北朝鮮地下核実験対応のためのWSPEEDI-II自動計算システムの移管と運用, JAEA-Technology-2021-013(2021).
22) 中山浩成, 佐藤大樹, 都市域での放射線テロ対策の最前線 2. 局所域高分解能大気拡散・線量評価システムLHADDASの開発と放射線テロ対策への応用, 日本原子力学会誌 ATOMOΣ, 65(10), 621-624(2023).
23) 中山昭彦, 複雑地形上気流のシミュレーション例と今後の課題, 日本流体力学会誌ながれ, 22, 397-403(2003).
24) 田村哲郎, 中山浩成, 奥田泰雄, 実在都市における空間発達型境界層乱流中の大気拡散に関するLES解析, 日本建築学会環境系論文集, 604, 31-38(2006).
25) 竹見哲也, 高分解能気象シミュレーションによる複雑地形上の局地規模風速場の解析: 2011年3月福島県東部地域を対象とした事例研究, 理論応用力学講演会講演論文集, 第61回理論応用力学講演会, 65(2012).
26) 大西領, 杉山大祐, 松田景吾, 深層学習を活用した超解像シミュレーションによる都市街区微気象のリアルタイム予測, 日本流体力学会誌ながれ, 38, 431-434(2019).
27) 佐田幸一, 込山有人, 道岡武信, 市川陽一, 安全解析のための数値モデルによる排ガス大気拡散予測および被ばく線量評価 風洞実験と数値モデルによる放出源の有効高さ・被ばく線量, 日本原子力学会和文論文誌, 8(2), 184-196(2009).
28) 田村淳二, 城戸寛子, 波戸真治, 長期野外拡散試験データを用いた大気拡散モデルの妥当性評価, JAEA-Research-2008-103(2009).
29) 青山智夫, 若月泰孝, 放射性plume軌跡のためのシミュレータ開発, Journal of Computer Chemistry, Japan, 14(3), 74-76(2015).
30) 小野浩己, 佐田幸一, 放出源の有効高さを求めるための数値モデルにおける不確かさ評価, 日本原子力学会和文論文誌, 21(3), 127-143(2022).
31) 丸山直也, 気象コードSCALEのGPUを用いた性能評価, 情報処理学会研究報告, HPC-135(46) (2012).
32) 二星義裕, 朴泰祐, 池田亮作ほか, 高解像度LES計算のGPUによる計算加速, High Performance Computing Symposium 2012(2012).
33) 藤川隼人, 片桐孝洋, 永井亨ほか, 時空間ブロッキングを用いたアジョイント法の性能モデル構築の試み, 情報処理学会研究報告, HPC-167(4)(2018).
34) 辻大亮, 多田野寛人, 朴泰祐, 池田亮作ほか, 都市気象 LES コードの並列GPU環境における高速化, 情報処理学会研究報告, HPC-168(8)(2019).
35) 菊池航平, 渡邉孔英, 朴泰祐, 佐藤拓人ほか, 都市気象シミュレーション City-LESにおける詳細モデル計算のGPU高速化, 情報処理学会研究報告, HPC-179(7)(2021).
36) 吉兼隆生, 芳村圭, SVMによる放射性物質拡散予測ツールの開発, 第31回人工知能学会全国大会論文集(2017).

37) 加藤信介, 風工学における汚染物質輸送解析と逆解析, 日本原子力学会誌ATOMOΣ, 63(3), 230-231(2021).
38) 賈鴻源, 菊本英紀, LESによる随伴濃度解析を用いた都市環境汚染物質発生源のベイズ推定, 生産研究, 73(1), 71-76(2021).
39) 斎藤公明, 木名瀬栄, 藤崎達也, 平岡武, 齋藤秀敏, 津田修一, 佐藤薫, 高島房生,「ファントムの開発及び利用に関する専門研究会」に関する報告(1), 保健物理, 41(3), 158-168(2006).
40) 渡邊正敏, 武田聖司, 木村英雄, 放射性廃棄物処分の操業中シナリオにおけるスカイシャイン線量評価コードシステムSKYOSD, JAEA-Data-Code-2009-005(2009).
41) 佐藤薫, 真辺健太郎, 遠藤章, 平均的成人日本人ボクセルファントムの光子比吸収割合評価への適用, RADIOISOTOPES, 61, 315-320(2012).
42) 斎藤公明, 遠藤章, III環境γ線の特徴と被ばく線量との関係, RADIOISOTOPES, 63, 585-602(2014).
43) 若月泰孝, 青山智夫, 滝川雅之, 2011年3月15-16日の福島県中通り地方の空間線量率シミュレーション, Journal of Computer Chemistry, Japan, 13(5), 268-277(2014).
44) 高原省五, 飯島正史, 嶋田和真, 串田輝雄, 白鳥芳武, 福島第一原子力発電所事故後の汚染地域における外部被ばく線量の決定論的評価手法の開発, JAEA-Research-2014-024(2015).
45) 平山英夫, 「測定線量」と「防護量」, FBNews, 462, 1-5(2015).
46) 平井奈々子, 佐藤清香, 外照射治療計画における線量計算アルゴリズムの進化, 医学物理, 36(3), 137–147(2016).
47) 佐藤達彦, 永松愛子, 上野遥, 片岡龍峰, 三宅晶子他, 放射線挙動解析コードPHITSを用いた宇宙線被ばく線量評価, 宇宙航空研究開発機構特別資料, JAXA-SP-16-010(2017).
48) 舟山京子, 梶本光廣, シビアアクシデント時の複数の放射性雲による敷地境界近傍への影響に関する分析, 日本原子力学会和文論文誌, 16(4), 191-196(2017).
49) 後神進史, 仁井田浩二, PHITSにおけるスカイシャイン線量ハイブリッド接続計算機能の開発, 日本原子力学会和文論文誌, 21(3), 144-154(2022).
50) 平山英夫, 佐波俊哉, 波戸芳仁, モンテカルロコードegs5を用いた地表に広く分布した放射性物質による地表1mでのガンマ線スペクトルの評価, 日本原子力学会和文論文誌, 12(3), 222-230(2013).
51) 佐藤大樹, 高橋史明, 遠藤章, Choonsik Lee, Wesley E. Bolch, 土壌に分布した放射性セシウムによる外部被ばく線量換算係数の計算, JAEA-Research-2014-017(2014).
52) 大森敏明, 加藤信介, 糠塚重裕, 地表の放射性核種から放出される直接線の平均光子移動距離の理論解と線量率簡易計算への応用, 保健物理, 54(2), 103-114(2019).
53) 大森敏明, 加藤信介, 有限の地表面に沈着した放射性核種からの線量率の簡易計算法, 保健物理, 55(3), 119-135(2020).
54) 加藤信介, 室内空気汚染の時間的空間的変動特性とその検出, 計測と制御, 46(8), 637-643(2007).
55) 大森敏明, 加藤信介, 金敏植, 糠塚重裕, モンテカルロ法による放射線量の簡易計算法－建物内放射線量の簡易計算法(その１）－, 日本建築学会環境系論文集, 81(727), 835-843(2016).
56) 大森敏明, 加藤信介, 金敏植, 糠塚重裕, 戸建て住宅モデルを対象とした空間線量の予測－建物内放射線量の簡易計算法(その２）－, 日本建築学会環境系論文集, 82(735), 481-489(2017).
57) 加藤信介, 感染症対策も視野に入れたCFD活用室内換気設計, 室内環境, 23(3), 251-260(2020).

58) 田中敦, 高木麻衣, 菅野宗夫, 田尾陽一, イメージングプレートを用いる家屋内放射性物質分布の現場測定, 分析化学, 72(6), 227-232(2023).
59) 庄司研, 加藤信介, 居室における感染リスク評価手法に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 89(819), 251-257(2024).
60) 真辺健太郎, 遠藤章, 放射性核種データの改訂が作業者に対する内部被ばく線量に及ぼす影響, RADIOISOTOPES, 60, 375－384(2011).
61) 松尾俊紀, グエン・ルフォン, 伊藤一秀, 室内熱・空気環境に起因する健康リスクの総合評価を可能とする数値人体モデルの開発（第2報), 空気調和・衛生工学会大会 学術講演論文集, 7, 129-132(2013).
62) 高橋史明, 真辺健太郎, 佐藤薫, ICRP2007年勧告に準拠する内部被ばく線量評価に用いる実効線量係数（受託研究）, JAEA-Review-2020-068, (2020).
63) 坪倉誠, スパコン「富岳」によるウイルス飛沫・エアロゾルのシミュレーション, 情報処理, 62(2), 64-66(2021).
64) 廣内淳, 渡嘉敷雄士, 高原省五, 真辺健太郎, 消化管吸収率に応じた内部被ばく線量係数（受託研究）, JAEA-Research-2021-001(2021).
65) 鈴木元, 2011年東日本大震災後の甲状腺被ばく線量の再構築, 日本内分泌・甲状腺外科学会雑誌, 391), 2-5(2022).
66) 弓本桂也, 竹村俊彦, 江口健太, 鵜野伊津志, エアロゾル輸送モデルとデータ同化, エアロゾル研究, 24(4), 256-261(2009).
67) 服部康男, 平口博丸, Chin-Hoh MOENG, 石原修二, 須藤仁ほか, WRF-LES による中立大気接地層の乱流組織運動とメソ擾乱の干渉過程への洞察, 日本流体力学会誌ながれ, 34, 91-96(2015).
68) 浦西克維, 池盛文数, 嶋寺光, 近藤明, 菅田誠治, 中国東北部のバイオマス燃焼由来のPM2.5 越境汚染に関する大気質モデル解析—2019年3月北海道におけるPM2.5 高濃度汚染事例—, 大気環境学会誌, 55(2), 34-49(2020).
69) 堅田元喜, 原子力事故時の放射性物質の大気中での挙動, 大気環境学会誌, 466), A91-A94(2011).
70) 永井晴康, 放射性物質の大気拡散評価, 保健物理, 47(1), 13-16(2012).
71) 鶴田治雄, 中島映至, 福島第一原子力発電所の事故により放出された放射性物質の大気中での動態, 地球化学, 46, 99-111(2012).
72) 吉田至孝, 原子力防災用放出放射能量迅速予測技術の開発—BWR プラントの放出放射能量比較計算—, Journal of the INSS(2013).
73) 近藤裕昭, 山田哲二, 茅野政道, 岩崎俊樹, 堅田元喜ほか, 日米気象学会共催「福島第一原子力発電所からの汚染物質の輸送と拡散に関する特別シンポジウム—現状と将来への課題—」 報告, 天気, 60(9), 17-23(2013).
74) 山澤弘実, 大気中放射性物質の影響と拡散評価, 安全工学, 52(6), 364-370(2013).
75) 森野悠, 大原利眞, 弓本桂也, 佐竹晋輔, 西澤匡人, 放射性セシウムの大気シミュレーションの精緻化に向けた取り組み, 日本地球化学会年会, 第60回年会講演要旨集, 192(2013).
76) 中西千佳, 佐藤猛, 佐藤宗平, 永井晴康, 掛札豊和, 堅田元喜, 都築克紀, 池田武司, 奥野浩, 山本一也, 川上剛, 岡本明子, 武藤重男, 北朝鮮による地下核実験に備えた放射性物質の拡散予測体制の構築と実対応, JAEA-Technology 2013-030(2013).

77) 金敏植, 加藤信介, 大場良二, 大浦理路, 原子力発電所事故時の放射性物質放出量推定手法の開発, 風工学シンポジウム論文集, 第23回風工学シンポジウム, 475-480(2014).
78) 金敏植, 加藤信介, 大場良二, 大浦理路, 福島第一原子力発電所事故後の長期被ばく評価に関する研究, 生産研究, 66(1), 43-45(2014).
79) 山崎秀夫, 東京電力福島第一原子力発電所事故で放出された放射性物質の移行と蓄積, RADIOISOTOPES, 63, 299-316(2014).
80) 滝川雅之, モデルによる放射性物質の大気中濃度の推定, 大気環境学会誌, 49(6), A85-A86(2014).
81) 中島映至, 中村尚, 新野宏, 三上正男, 山澤弘実ほか, 原子力関連施設の事故に伴う放射性物質の大気拡散に関する数値予測情報の活用策について, 天気, 62(2), 19-29(2015).
82) 佐谷茜, 吉兼隆生, 芳村圭, 放射性物質沈着量分布再現のための大気移流拡散シミュレーション計算改善手法の評価, 水文・水資源学会研究発表会要旨集, 2016年度研究発表会, 55-56(2016).
83) 鶴田治雄, 五十嵐康人, 井上智博, 大河内博, 大原利眞ほか, 福島第一原子力発電所事故による放射性物質の大気環境影響調査研究の現状と課題, 大気環境学会誌, 51(2), A11-A19(2016).
84) 長谷川英尚, 柿内秀樹, 佐藤雄飛, 植田真司, 高久雄一ほか, 1.1. 2 大型再処理施設周辺等データの取得とモデル検証, (財)環境科学技術研究所－研究報告(2017).
85) 反町篤行, 特集にあたって:福島第一原発事故による放射性エアロゾル, エアロゾル研究, 32(4), 236(2017).
86) 梶野瑞王, 大気エアロゾルの環境動態シミュレーション, 安全工学, 576), 433-441(2018).
87) 山澤弘実, モニタリングと大気拡散計算による原子力事故影響の把握とその事故対応への反映, 学術の動向, 2018.3, 30-34(2018).
88) 大浦理路, 金敏植, 大場良二, 加藤信介, 大気汚染物質の放出量推定における精度向上に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 83(744), 171-200(2018).
89) 保科静香, 黒澤景一, 高橋翔太, 加藤浩太ほか, 山岳地域における原子力発電所事故由来の残留放射性物質分布-プルーム, 地形, 地表条件と自然放射線の存在-, RADIOISOTOPES, 67, 537-549(2018).
90) 山澤弘実, 五十嵐康人, 放射性核種の大気放出と大気中動態の理解の現状, RADIOISOTOPES, 69, 19-30(2020).
91) 茅野政道, 寺田宏明, 世界の原子力事故に即時対応可能な大気拡散予測 緊急時環境線量情報予測システム 世界版) WSPEEDI-Ⅱ, 日本原子力学会誌 ATOMOΣ, 51(11), 812-815(2009).
92) 中西千佳, 佐藤宗平, 古野朗子, 寺田宏明, 永井晴康, 武藤重男, 原子力緊急時対応のためのWSPEEDI-IIシステムユーザーズマニュアル, JAEA-Technology-2011-005, (2011).
93) 茅野政道, SPEEDI を真に原子力防災に生かすために, Isotope News, 日本アイソトープ協会, 725, 22-26(2014).
94) 黄弘, 加藤信介, 大岡龍三, 火の粉の飛散を組み込んだ都市火災伝搬のCFD解析, 日本流体力学会数値流体力学部門 Web 会誌, 12(2), 58-68(2004).
95) 足永靖信, 都市建築空間の広域熱環境解析における工学モデルの適用, 日本流体力学会誌ながれ, 29, 15-21(2010).
96) 田村哲郎, 都市における風の乱流構造に関するLES, 日本流体力学会誌ながれ, 29, 3-14(2010).
97) 大嶋拓也, 今野雅, 平栗靖浩, オープンソース・ソフトウエアを活用した 実在市街地環境複合解析, 日

本流体力学会誌ながれ, 31, 293-300(2012).
98) 大風翼, 富永禎秀, 持田灯, 市街地環境の予測・分析に果たしてきたRANSの役割と今後の課題, 日本流体力学会誌ながれ, 35, 255-262(2016).
99) 斎藤公明, 環境γ線被ばく線量の計算機シミュレーション解析, 日本原子力学会誌, 38(12), 970-976(1996).
100)木村英雄, 武田聖司, 高橋知之, 埋設濃度上限値を上回る放射性廃棄物処分の総合安全評価コード: GSA-GCL計算コードユーザーズマニュアル, JAERI-Data-Code-99-033(1999).
101)吉田至孝, 入江隆, 郡山民男, 工藤清一, 西村和哉, シビアアクシデント時の発電所内被ばく線量評価手法の検討, INSS Journal, 174-185(2001).
102)栗原治, 被ばく線量評価のための大気拡散シミュレーション東京電力福島第一原子力発電所事故における周辺住民の初期内部被ばく線量再構築, 日本原子力学会誌 ATOMOΣ, 55(12), 718-722(2013).
103)日本原子力学会, 日本原子力学会標準γ線ビルドアップ係数(AESJ-SC-A005:2013) (2013).
104)古田琢哉、高橋史明, 環境に沈着した事故由来の放射性セシウムからのガンマ線に対する建物内の遮蔽効果及び線量低減効果の解析, JAEA-Research-2014-003(2014).
105)柿島伸次, 大場良二, 静穏時の排ガス拡散・線量評価モデル, 日本原子力学会誌, 39(8), 657-668(1997).
106)大場良二, 加藤信介, 樋山恭助, 市街地における有害ガスの大気拡散予測, 日本風工学会誌, 38(4)(2013).
107)日本原子力学会, [HTML]発電用原子炉施設の安全解析における放出源の有効高さを求めるための風洞実験実施基準, AESJ-SC-P003, (2019).
108)日本原子力学会, [HTML]発電用原子炉施設の安全解析における放出源の有効高さを求めるための数値モデル計算実施基準, AESJ-SC-A004, (2022).
109)二星義裕, 朴泰祐, 塙敏博, 池田亮作ほか, 気象モデルの高解像度計算の GPU 化, 情報処理学会研究報告, HPC-131(2)(2011).
110)辻大亮, 多田野寛人, 朴泰祐, 池田亮作ほか, 都市気象コードCity-LESの並列GPU実装の最適化と性能評価, 情報処理学会研究報告, HPC-170(39)(2019).
111)金敏植, 原子力発電所事故時の放出量推定手法および長期被ばく線量推定の検証に関する研究, (2015).
112)日本原子力研究開発機構, 放射線医学総合研究所, 東京電力（株）福島第一原子力発電所事故に係る個人線量の特性に関する調査, JAEA-Review-2015-007(2015).
113)舟山京子, 原子炉施設の重大事故時のソースターム及び敷地境界近傍の影響解析に関する研究, 筑波大学(2017).
114)後藤亜希, 島﨑一紀, 佐藤達彦, ISS 3D-CADモデル及びPHITSを用いたJEM船内の被ばく線量評価, 宇宙航空研究開発機構特別資料, JAXA-SP-18-009(2019).
115)高原省五, 飯島正史, 串田輝雄, 白鳥芳武, 福島第一原子力発電所事故に係る避難区域等における除染実証業務【個人線量調査事業編】(受託研究), JAEA-Research 2013-029(2013).
116)平山英夫, EGS 5による地表に広く分布した^{134}Cs及び^{137}Csの環境下における個人被曝線量の評価, RADIOISOTOPES, 62(6), 335-345(2013).
117)岩崎遼一, 山川勝史, 松野謙一, G613室内環境下におけるウイルス飛沫の伝播シミュレーション (GS6-3 数値計算, 一般セッション), 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, 549-550(2012).
118)山中勇暉, 古川涼吾, 堀江昌朗, エアロゾルの拡散防止部を有するパーティションに関する基礎的研究,

空気調和・衛生工学会 論文集, 49 (328)(2024).
119)劉城準, 伊藤一秀, 気道モデルを統合した数値人体モデルの開発 気道内対流熱伝達率解析による人体熱モデルの改良, 空気調和・衛生工学会大会 学術講演論文集(2014).
120)坪倉誠, 室内環境におけるウイルス飛沫感染の予測とその対策, 理化学研究所計算科学研究センター(2020).
121)諏訪好英, ウイルス感染対策としての換気の考え方, エアロゾル研究, 36(4), 246–252(2021).
122)坪倉誠, スパコン「富岳」を用いた室内環境におけるウイルス飛沫・エアロゾル感染リスクとリスク低減対策の定量評価, ファルマシア, 58(5)(2022).
123)梶本光廣, 重大事故発生時の汚染拡散時間シミュレーション, 日本風工学会誌, 91, 29-34(2002).
124)森野悠, 大原利眞, 弓本桂也, 大気シミュレーションモデルは放射性物質の沈着量をどこまで再現できるか?, 大気環境学会誌, 49(6), A87-A88(2014).
125)山澤弘実, 木村秀樹, 小山吉弘ほか, 屋内退避か? 避難か? 災害対策における緊急時モニタリングの役割, 日本原子力学会誌, 58(2), 115-120(2016).
126)山口彰, 原子力リスクの評価と原子力防災のあり方, 学術の動向, 2018.3, 36-41(2018).
127)松田尚樹, 原子力・放射線防災と緊急モニタリング, 日本放射線安全管理学会誌, 17(1), 34-41(2018).
128)齋藤恵介, 粒子モデルによる福島第一原子力発電所の放射能汚染機構の推定, (2018).
129)田上恵子, 環境移行データによる放射性核種の環境動態と将来予測, Radioisotopes, 68, 805-814(2019).
130)佐谷茜, 放射性物質移流拡散モデルによる湿性沈着量分布の再現に関する研究, 東京大学, (2020).
131)外川織彦, 大倉毅史, 木村仁宣, 永井晴康, 原子力防災における大気拡散モデルの利用に関する考察, JAEA-Review 2021-021, (2021).
132)梶野瑞王, 福島原発事故由来の放射性セシウムの大気中での挙動: 放出, 沈着, 再浮遊, アイソトープ・放射線研究発表会, 第58回アイソトープ・放射線研究発表会, 15(2021).
133)近藤裕昭, 岩崎俊樹, 佐藤陽祐, 関山剛, 滝川雅之ほか, 放射性物質拡散予測モデルの不確実性の低減と活用, 日本原子力学会誌 ATOMOΣ, 63(4), 318-320(2021).
134)安田勇揮, 大西領, 廣川雄一, Dimitry Kolomensky, 杉山大祐, 畳み込みニューラルネットによる都市微気象シミュレーションの物理超解像, 日本流体力学会誌ながれ, 41, 85-88(2022).
135)山澤弘実, 大気拡散モデルの原発事故環境データによる評価とその緊急時応用, 日本原子力学会誌 ATOMOΣ, 64(2), 84-88(2022).
136)外川織彦, 大倉毅史, 木村仁宣, 原子力施設の環境影響評価における観測・測定とモデル推定の役割及び相互の関係性に関する検討, JAEA-Review-2022-049, (2023).

（英語文献）

1] IAEA Safety Series No.57, Generic Models and Parameters for Assessing the Environmental Transfer of Radionuclides from Routine Releases (1982).

2] American Society for Testing and Materials, Designation D 6589-00., ASTM, 2000: Standard guide for statistical evaluation of atmospheric dispersion model performance, American Societ y for Testing and Materials, Designation D 6589-00. (2000).

3] AMEC Environmental& Infrastructure UK limited, Intermediate report Annex2: Consequence Assessment Methods for Human Health (Task2) Report for the European Commission (DG E nvironment), (2014).

4] K. Dowding, Overview of ASME V&V 20-2009 Standard for Verification and Validation in Co mputational Fluid Mechanics and Heat Transfer, Presented at 2016 Inverse Problems Sympos ium 5-7 June 2016 Virginia Military Institute (2016).

5] J.C. Chang, S.R. Hanna, Air quality model performance evaluation, Meteorology and Atmosp heric Physics, 87, 167-196(2004).

6] J.C. Chang and S.R. Hanna, Technical Descriptions and User's Guide for the BOOT Statistic al Model Evaluation Software Package, Version 2.0, (2005).

7] HARMO.ORG, HARMO.ORG, https://www.harmo.org/

8] H.R. Olesen, A Platform for Model Evaluation, (2001).

9] D.Q. Zheng, J.K.C. Leung, B.Y. Lee, Online update of model state and parameters of a Mont e Carlo atmospheric dispersion model by using ensemble Kalman filter, Atmospheric Environ ment, 43, 2005-2011(2009).

10] A.R. Jones, Assessing meteorological uncertainties in dispersion forecasts using a NWP Ense mble Prediction Systems, International Journal of Environment and Pollution, Proceedings of the 11th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, 246-250(2011).

11] M. Kadowaki, H. Nagai, H. Terada et al., Improvement of atmospheric dispersion simulation using an advanced meteorological data assimilation method to reconstruct the spatiotemporal distribution of radioactive materials released during the Fukushima Daiichi Nuclear Power S tation accident, Energy Procedia, 131, 208-215(2017).

12] C.L. Defforge, B. Carissimo, M. Bocquet et al., Data assimilation at local scale to improve C FD simulations of atmospheric dispersion: application to 1D shallow-water equations and met hod comparisons, International Journal of Environment and Pollution, 64(1-3), 90-109(2019).

13] K. Li, W. Chen, M. Liang et al., A simple data assimilation method to improve atmospheric dispersion based on Lagrangian puff model, Nuclear Engineering and Technology, 53, 2377-23 86(2021).

14] E. Bach, M. Ghil, A multi-model ensemble Kalman Filter for data assimilation and forecastin g, Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 15, 10.1029/2022MS003123(2022).

15] S.J. Leadbetter, A.R. Jones, and M.C. Hort, Assessing the value meteorological ensembles ad

d to dispersion modelling using hypothetical releases, Atmospheric Chemistry and Physics, 22, 577-596(2022).

16] Y. El-Ouartassy, I. Korsakissok, M. Plu, O. Connan, L. Descamps, L. Raynaud, Combining short-range dispersion simulations with fine-scale meteorological ensembles: probabilistic indicators and evaluation during a 85Kr field campaign, Atmos. Chem. Phys., 22, 15793–15816(2022).

17] E. Gorokhovsky, J.L. Anderson, Extending ensemble Kalman filter algorithms to assimilate observations with an unknown time offset, Nonlinear Processes in Geophysics, 30, 37–47(2023).

18] C.V. Srinivas, R. Venkatesan, N.V. Muralidharan et al., Operational mesoscale atmospheric dispersion prediction using a parallel computing cluster, Journal of Earth System Science, 115 (3), 315–332(2006).

19] B. Yan-shan, W. Ying-mei, J. Jie et al., Radioactive nuclides diffusion description based on virtual environment, ICALIP2010, 170-174(2010).

20] B.E.J. Bodmann, U. Rizza, D. Buske et al., Analytical formulation for the radioactive contaminant released from nuclear power plants, Air Pollution, 20, 13-22(2012).

21] Y. Huang, X. Song, S. Zou et al., Study on the Atmospheric Diffusion of Airborne Radionuclide under LOCA of Offshore Floating Nuclear Power Plants Based on CALPUFF, Sustainability, 15, 2572(2023).

22] Z. Ma, Z. Li, X. Tang et al., Numerical study for atmospheric transport of radioactive materials for hypothetical severe nuclear accident under different meteorological conditions, Frontiers in Environmental Science, 12, DOI 10.3389/fenvs.2024.1455273, (2024).

23] D.M. Moreira, M.T. Vilhena, P.M.M. Soares et al., Tritium dispersion simulation in the atmosphere by the integral transform technique using micrometeorological parameters generated by large eddy simulation, International Journal of Nuclear Energy Science and Technology, 5(1), 11-24(2010).

24] V. Fuka, J. Brechler, Large eddy simulation modelling of the dispersion of radioactive particulate matter, International Journal of Environment and Pollution, 48(1-4), 156-163(2012).

25] L. Vervecken, J. Camps, J. Meyers, Dynamic dose assessment by Large Eddy Simulation of the near-range atmospheric dispersion, Journal of Radiological Protection, 35(1), 165-78(2015).

26] L. Vervecken, J. Camps, J. Meyers, Dynamic external dose assessment by LES modelling of radioactive pollutant dispersion over an open field, Radiation Protection Dosimetry, 164, 178 (2015).

27] H. Nakayama and H. Nagai, Local-scale High-resolution Atmospheric Dispersion Model using Large-Eddy Simulation: LOHDIM-Hiromasa NAKAYAMA and Haruyasu NAGAI, JAEA-Data/Code 2015-026(2015).

28] P. Mlakar, M. Zlata B.B. Grašič et al., Integrated system for population dose calculation and decision making on protection measures in case of an accident with air emissions in a nuclear power plant, Science of The Total Environment, 666, 786-800(2019).

29] P. Armand, O. Oldrini, C. Duchenne et al., Topical 3D modelling and simulation of air dispersion hazards as a new paradigm to support emergency preparedness and response, Environmental Modelling and Software, 142, 105129(2021).
30] H. Nakayama, T. Yoshida, H. Terada et al., Toward Development of a Framework for Prediction System of Local-Scale Atmospheric Dispersion Based on a Coupling of LES-Database and On-Site Meteorological Observation, Atmosphere, 12, 899(2021).
31] S. Zhuang, S. Fang, X. Dong, Local-Scale Atmospheric Dispersion Modelling of Radionuclides Following the Fukushima Daiichi Nuclear Accident Using SWIFT-RIMPUFF, 2022 29th International Conference on Nuclear Engineering, ICONE29, 90748(2022).
32] V. Artemchuk, Y. Kyrylenko, I. Kameneva et al., Atmospheric dispersion modelling and dose projection under high uncertainty conditions, IOP conference series, ICSF, 1254-012028(2023).
33] S. Zhuang, S. Fang, X. Dong et al., Local atmospheric transport behaviors of representative radionuclides during the Fukushima accident: A 200-m-resolution cross-scale study from site to 20km., Journal of Environmental Radioactivity, 265, 107212(2023).
34] H. Nakayama, H. Nagai., Development of local-scale high-resolution atmospheric dispersion model using Large-Eddy simulation part 1 : turbulent flow and plume dispersion over a flat terrain, Journal of Nuclear Science and Technology, 46(12), 1170-1177(2009).
35] H. Nakayama, H. Nagai., Development of local-scale high-resolution atmospheric dispersion model using large-eddy simulation Part 2 : turbulent flow and plume dispersion around a cubical building, Journal of Nuclear Science and Technology, 48(3), 374-383(2011).
36] H. Nakayama, K. Jurcakova, H. Nagai., Development of local-scale high-resolution atmospheric dispersion model using large-eddy simulation. Part 3 : turbulent flow and plume dispersion in building arrays, Journal of Nuclear Science and Technology, 50(5), 503-519(2013).
37] H. Nakayama, B. Leitl, F. Harms, et al., Development of local-scale high-resolution atmospheric dispersion model using large-eddy simulation. Part 4 : turbulent flows and plume dispersion in an actual urban area, Journal of Nuclear Science and Technology, 51(5), 626-638(2014).
38] H. Nakayama, T. Takemi, H. Nagai, Development of local-scale High-resolution atmospheric dispersion model using Large-Eddy Simulation. Part 5 : detailed simulation of turbulent flows and plume dispersion in an actual urban area under real meteorological conditions, Journal of Nuclear Science and Technology, 53(6), 887-908(2016).
39] H. Nakayama, D. Satoh, H. Nagai & H. Terada, Development of local-scale high-resolution atmospheric dispersion model using large-eddy simulation part 6 : introduction of detailed dose calculation method, Journal of Nuclear Science and Technology, 58(9), 949-969(2021).
40] B. Kosovic, S.T. Chan, Integrated Urban Dispersion Modeling Capability, AMS Annual Meeting, UCRL-CONF-200827(2003).
41] F.F. Grinstein, G. Patnaik, A.J. Wachtor et al., Dispersal and fallout simulations for urban consequences management, WORKSHOP Direct and Large-Eddy Simulation 8 July 7-9, Eindhoven, The Netherlands(2011).

42] P. Bieringer, Large-Eddy Simulation (LES) Based System for Producing Coupled Urban and I ndoor Airborne Contaminant Transport and Dispersion Solutions, 18th International Conferen ce on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes (201 8).

43] T.J. Bauer, The Effect of the Urban Parametrization on Simulated Contaminant Atmospheric Transport and Dispersion, Boundary-Layer Meteorology, 170(1), 95-125(2019).

44] S. Stöckl, M.W. Rotach, N. Kljun, Including the Urban Canopy Layer in a Lagrangian Partic le Dispersion Model, Boundary-Layer Meteorology, 185, 1-34(2022).

45] M. Hadžiabdić, A. Hodža, B. Ničeno, Modeling urban canopy with object-based porosity mode l, International Journal of Heat and Fluid Flow, 107, 109394(2023).

46] M. Owkes, T. Homan, Michael Benson et al., High-Fidelity Simulations of Contaminant Disp ersion in an Urban Environment with Comparison to Magnetic Resonance Imaging Measure ments, https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4022213/v1, (2024).

47] J. Lu, N. Nazarian, M.A. Hart, E.S. Krayenhoff, A. Martilli, Representing the effects of build ing height variability on urban canopy flow, Quarterly Journal of the Royal Meteorological S ociety, DOI: 10.1002/qj.4584, (2024).

48] B. Breznik, M.Z. Boznar, P. Mlakar et al., Dose projection using dispersion models, 8th Int. Conf. on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, 4 09-413(2003).

49] H. Thielen, R. Martens, W. Brücher et al., Advanced Atmospheric Dispersion Modelling and Probabilistic Consequence Analysis for Radiation Protection Purposes, https://www.researchgate.net/publication/267717011, 31-38(2007).

50] P. Pecha, R. Hofman, Construction of observational operator for cloudshine dose from radioac tive cloud drifting over the terrain, 14th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes (2011).

51] N.D. Alharbi, A.B. Mayhoub, Dose Calculation for Accidental Release of Radioactive Cloud P assing Over Jeddah, AIP Conf. Proc., 1400, 415(2011).

52] S. Durucan, P.R. Johnston, Appendix 3: Compliance with Point 10 of EPA request for additio nal information. Technical description of air quality model used Atmospheric Modelling ADVA NCED GAUSSIAN PLUME MODEL, EPA Compliance Response, 2004_121(2013).

53] P. Pecha, E. Pechova, An unconventional adaptation of a classical Gaussian plume dispersion scheme for the fast assessment of external irradiation from a radioactive cloud, Atmospheric Environment, 89, 298-308(2014).

54] D. Nikezić, B. Lončar, Z. Grsic et al., Mathematical modeling of environmental impacts of a reactor through the air, Nuclear Technology & Radiation Protection, 29(4), 268-273(2014).

55] J. Klusoň, T. Urban, Simulation of dose distribution in vicinity of cloud of contaminated air l eakage from severe NPP accident, Radiation Protection Dosimetry, 186(2-3), 342-345(2019).

56] H. Miao, G. Zhang, P. Yu et al., Dynamic Dose-Based Emergency Evacuation Model for Enha

ncing Nuclear Power Plant Emergency Response Strategies, Energies, 16, 6338(2023).

57] T. Li, X.L. Zheng, S. Yu et al., The mixed layer modified radionuclide atmospheric diffusion based on Gaussian model, Front. Public Health, doi: 10.3389/fpubh.2022.1097643(2023).

58] P. Willemsen, A. Norgren, B. Singh et al., Development of a new methodology for improving urban fast response lagrangian dispersion simulation via parallelism on the graphics processi ng unit, Proceedings of the 11th International Conference on Harmonisation within Atmosphe ric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes (2007).

59] V. Simek, R. Dvorak, F. Zboril et al., GPU Accelerated Solver of Time-Dependent Air Polluta nt Transport Equations, 2009 12th Euromicro Conference on Digital System Design, Architect ures, Methods and Tools (2009).

60] J. Zeng, T. Matsunaga, H. Mukai, Using NVIDIA GPU for Modelling the Lagrangian Particle Dispersion in the Atomosphere, 5th International Congress on Environmental Modelling and Software -Ottawa, Ontario, Canada- July 2010, (2010).

61] AL.S. Pinheiro, F. Desterro, M. Santos et al., GPU-Based Parallel Computation in Real-Time Modelling of Atomospheric Radionuclide Dispersion, Advances in Intelligent Systems and Co mputing, 497, 323-333(2017).

62] Sunarko, Z. Su'ud, Meso-Scale Radioactive Dispersion Modelling using GPU, Journal of Physi cs: Conf. Series, 799, 12020(2017).

63] D. Yang, M. Li, H. Liu, A Parallel Computing Algorithm for the Emergency-Oriented Atmosp heric Dispersion Model CALPUFF, Atmosphere, 13, 2129(2022).

64] L. Hoffmann, K.H. Mood, A. Herten et al., Accelerating Lagrangian transport simulations on graphics processing units: performance optimizations of Massive-Parallel Trajectory Calculatio ns (MPTRAC) v2.6, Geoscientific Model Development, 17, 4077-4094(2024).

65] J.E. Munoz, P. Wautelet, J. Pianezze et al., Porting the Meso-NH atmospheric model on diffe rent GPU architectures for the next generation of supercomputers (version MESONH-v55-Ope nACC), EGU sphere, 2879(2024).

66] M. Sharan J.P. Issartel, S.K. Singh, A point-source reconstruction from concentration measur ements in low wind stable conditions, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 138, 1884–1894(2012).

67] Z. Li, N. Kovachki, K. Azizzadenesheli, B. Liu, K. Bhattacharya, A. Stuart, A. Anandkumar, Fourier neural operator for parametric partial differential equations, conference paper at ICL R 2021(2021).

68] G. Wen, Z. Li, K. Azizzadenesheli, A. Anandkumar, Benson S, U-FNO—An enhanced Fourier neural operator-based deep-learning model for multiphase flow, Advances in Water Resources, 163, 104180(2022).

69] A. Buan, J. Amparan, M. Natividad et al., Recent Advances in Modeling of Particle Dispersi on, Engineering Proceedings, 56, 332(2023).

70] A. Ayoub, H.M. Wainwright, L. Wang et al., An enhanced fourier neural operator surrogate f

or radioactive plume transport forecasting, Stochastic Environmental Research and Risk Asse ssment, 38, 3165–3175(2024).

71] D.L. McGuffin, D.D. Lucas, E. Balboni et al., Predictive modeling of atmospheric nuclear fall out microphysics, Science of The Total Environment, 951, 175536(2024).

72] B. Tenti, M. Romana, G. Carlino et al., SAPERI : An Emergency Modeling Chain for Simula ting Accidental Releases of Pollutants into the Atmosphere, Atmosphere 2024, 15, 1095(2024).

73] S.S. Raza, R. Avila, J. Cervantes, A 3-D Lagrangian (Monte Carlo) method for direct plume gamma dose rate calculations, Journal of Nuclear Science and Technology, 38(4), 254-260(200 1).

74] J.M. Gillis, J.J. Whicker, M. Mcnaughton, W. Eisele, Comparison of Background Radiation Ef fective Dose Rates for Residents in the Vicinity of a Research and Nuclear Weapons Laborat ory (Los Alamos County, USA) with National Averages, Los Alamos National Laboratory, LA-UR-14-28732(2014).

75] M. Mcnaughton, J.M. Gillis, E. Ruedig et al., Accuracy of Cloudshine Gamma Dose Calculati ons in the CAP-88 Dispersion Model., Health Physics, 112(4), 414-419(2017).

76] X. Li, W. Xiong, X. Hu, S. Sun, An accurate and ultrafast method for estimating three-dime nsional radiological dose rate fields from arbitrary atmospheric radionuclide distributions, At mospheric Environment, 199(15), 143-154(2018).

77] T. Sato, Y. Iwamoto, S. Hashimoto, et al., Features of particle and heavy ion transport code system (PHITS)version 3.02, Journal of Nuclear Science and Technology, 55(6), 684–690(2018).

78] S. Fang, X. Li, N. Wu et al., Fast evaluation of three-dimensional gamma dose rate fields on non-equispaced grids for complex atmospheric radionuclide distributions, Journal of Environ mental Radioactivity, 222, 106355(2020).

79] D. Satoh, H. Nakayama, T. Furuta et al., Simulation code for estimating external gamma-ray doses from a radioactive plume and contaminated ground using a local-scale atmospheric di spersion model., PLOS ONE, 16(1), e0245932(2021).

80] S. Takahara, T.W. Charnock, K. Silva, W.T. Hwang, J. Lee et al., Assessment of doses in con taminated urban areas: modelling exercise based on Fukushima data, Journal of Radiological Protection, 42, 020517(2022).

81] H. Nakayama, N. Onodera, D. Satoh et al., Development of local-scale high-resolution atmosp heric dispersion and dose assessment system, Journal of Nuclear Science and Technology, 59 (10), 1314-1329(2022).

82] X. Dong, S. Fang, S. Zhuang, Interpolation Influence on the Fast Fourier Transform Based C alculation of Three-Dimensional Dose Rate Field, 2022 29th International Conference on Nucl ear Engineering, DOI:10.1115/ICONE29-89244(2022).

83] R. Ye, D. Niu, L. Li et al., Research on a three-dimensional radiation field reconstruction alg orithm based on an improved 3D CNN, Applied Radiation and Isotopes, 214, 111540(2024).

84] T.J. Overcamp, Energy Absorption Buildup Factors and Energy Conservation, Journal of Nucl

ear Science and Technology, 46(5), 479-483(2009).
85] T. Furuta, F. Takahashi, Study of radiation dose reduction of buildings of different sizes and materials, Journal of Nuclear Science and Technology, 52(6), 897-904(2015).
86] Y. Hinrichsen, R. Finck, C. Rääf, K.G. Andersson, Introducing the concept of the isodose for optimisation of decontamination activities in a radioactive fallout scenario, Journal of Radiological Protection, 38(4), 1293-1310(2018).
87] H. Yoshida-Ohuchi, N. Matsuda, K. Saito, Review of reduction factors by buildings for gamma radiation from radiocaesium deposited on the ground due to fallout, Journal of Environmental Radioactivity, 187, 32-39(2018).
88] M. Iijima and S. Takahara, Backward Estimation of Atmospheric Release of 137Cs and 131I Using Total Cumulative Deposition in Terrestrial Areas Following the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident, Health Physics, 121(6), 587–596;(2021).
89] M. Ota, S. Takahara, K. Yoshimura, A. Nagakubo et al., Soil dust and bioaerosols as potential sources for resuspended 137Cs occurring near the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant, Journal of Environmental Radioactivity, 264, 107198(2023).
90] D. Satoh, N. Reteoussi-Henss, Dose-rate coefficients for external exposure to radionuclides uniformly distributed in soil to an infinite depth, PLOS ONE, 19(9), e0310552(2024).
91] V.I. Romanov, Characteristics of the propagation of radioactive pollutants near a radiation-hazardous object, Atomic Energy, 78(3), (1995).
92] A. Clouvas, S. Xanthos, M. Antonopoulos-Domis, Extended Survey of Indoor and Outdoor Terrestrial Gamma Radiation in Greek Urban Areas by In Situ Gamma Spectrometry with A Portable Ge Detector, Radiation Protection Dosimetry, 94(3), 233–246(2001).
93] K.G. Andersson, J. Roed, M. Byrne et al., Airborne contamination in the indoor environment and its implications for dose, Risø National Laboratory, Risoe-R No. 1462(2004).
94] P.N. Price, B. Jayaraman, Indoor exposure to radiation in the case of an outdoor release, LBNL-60662, (2006).
95] M. Takada, S. Kamada, K. Yajima et al., Measurement of radiation environment inside residential houses in radioactive contaminated areas due to the Fukushima nuclear accident, Progress in Nuclear Science and Technology, 4, 43-46(2014).
96] S. Monzen, M. Hosoda, M. Osanai, S. Tokonami, Radiation Dose Reduction Efficiency of Buildings after the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, PLOS ONE, 9(7), e101650(2014).
97] N. Shinohara, H. Yoshida-Ohuchi, Radiocesium contamination in house dust within evacuation areas close to the Fukushima Daiichi nuclear power plant, Environment International, 114, 107-114(2018).
98] X. Liu, Z. Peng, X. Liu et al., Dispersion Characteristics of Hazardous Gas and Exposure Risk Assessment in a Multiroom Building Environment, International Journal of Environmental Research and Public Health, 17, 199(2019).

99] M. Manigrasso, C. Protano, M. Vitali, P. Avino, Nanoparticle Behaviour in an Urban Street Canyon at Different Heights and Implications on Indoor Respiratory Doses, Atmosphere, 10, 772(2019).

100] K. Nakayama, Y. Sugita, H. Tezuka et al., Evaluation of the effect of radioactivity to the en vironment in wooden houses within the evacuation area at Fukushima, Journal of Radiologic al Protection, 41, 982–1004(2021).

101] M. Mohammadi, J.K. Calautit, Impact of Ventilation Strategy on the Transmission of Outdoo r Pollutants into Indoor Environment Using CFD, Sustainability, 13, 10343(2021).

102] J. Hirouchi, S. Takahara, K. Yoshimura, Indoor and outdoor radionuclide distribution in hous es after the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident, Journal of Environmental Ra dioactivity, 232, 106572(2021).

103] J. Hirouchi, S. Takahara, H. Komagamine, Nobuyuki Kato, Yasuto Matsui and Minoru Yoned a, Penetration factor and indoor deposition rate of elementary and particulate iodine in a Ja panese house for assessing the effectiveness of sheltering for radiation exposures, Journal of Radiological Protection, 41, S139–S149(2021).

104] M. Mohammadi, J.K. Calautit, Quantifying the Transmission of Outdoor Pollutants into the I ndoor Environment and Vice Versa—Review of Influencing Factors, Methods, Challenges and Future Direction, Sustainability, 14, 10880(2022).

105] M. Mohammadi, J.K. Calautit, J. Owen et al., Inter-room pollutant transmission routes in na turally ventilated street canyon buildings, Journal of building engineering, 79, 107510(2023).

106] E. Alonso-Blanco, F.J. Gómez-Moreno, E. Díaz-Ramiro et al., Real-Time Measurements of Ind oor–Outdoor Exchange of Gaseous and Particulate Atmospheric Pollutants in an Urban Area, International Journal of Environmental Research and Public Health, 20, 6823(2023).

107] V. Vasile, V. Iordache, V.M. Radu, The influence of ventilation on indoor air quality in buildi ngs with variable pollutant emissions, Earth and Environmental Science, 1185, 12006(2023).

108] K.B. Fernandez, N. Ikegaya, K. Ito, Transfer and escape characteristics of outdoor pollutants into an indoor space sheltered by urban-like block arrays using large-eddy simulations, E3S web of conferences, 396, 02004(2023).

109] M. Orabi, Indoor concentrations of radioactive aerosols from nuclear accidents, Radiation Prot ection Dosimetry, 200(9), 836–841(2024).

110] K.-H. Cheng, Y.-S. Cheng, H.-C. Yeh et al., Measurements of Airway Dimensions and Calcula tion of Mass Transfer Characteristics of the Human Oral Passage, Transaction of ASME, 119, 476-482(1997).

111] C. Mitsakou, C. Housiadas, et al., Lung deposition of fine and ultrafine particles outdoors an d indoors during a cooking event and a no activity period, Indoor Air, 17, 143-152(2007).

112] W.H. Wang, Assessment for inside building dispersion of aerosol from an outdoor radiological release, Kerntechnik, 74(1-2), (2009).

113] X.F. Hu, H. Huang, S.F. Shen et al., A Method for the Assessment of the Inhalation Dose E

xposure to Radionuclides in an Indoor Environment, Applied Mechanics and Materials, 477-478, 412-422(2013).

114] H. Yoshida-Ohuchi, N. Hirasawa, I. Kobayashi, T. Yoshizawa, Evaluation of personal dose equivalent using optically stimulated luminescent dosemeters in Marumori after the Fukushima nuclear accident, Radiation Protection Dosimetry, 154(3), 385-390(2013).

115] T. Sato, K. Manabe, N. Hamada, Microdosimetric Analysis Confirms Similar Biological Effectiveness of External Exposure to Gamma-Rays and Internal Exposure to ^{137}Cs, ^{134}Cs, and ^{131}I, PLoS ONE, 9(6), e99831(2014).

116] O. Kurihara, E. Kim, N. Kunishima et al., Development of a tool for calculating early internal doses in the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident based on atmospheric dispersion simulation, Epj Web of Conferences, 153, 08008(2017).

117] K. Manabe & M. Matsumoto, Development of a stochastic biokinetic method and its application to internal dose estimation for insoluble cesium-bearing particles, Journal of Nuclear Science and Technology, 56(1), 78-86(2019).

118] H. Yoshida-Ohuchi, N. Shinohara, Estimated internal exposure doses due to indoor radiocaesium contamination in residential houses after the Fukushima nuclear accident., Scientific Reports, 10, 17212(2020).

119] K. Manabe and S. Koyama, ORGAN ABSORBED DOSE ESTIMATION REFLECTING SPECIFIC ORGAN MASSES WITH SIMPLE SCALING OF REFERENCE DOSES USING THE ORGAN MASSES, Radiation Protection Dosimetry, 189(4), 489-496(2020).

120] N. Reteoussi-Henss, D. Satoh, H. Schlatti, M. Zankl, V. Spielmann, Organ dosed of the fetus from external environmental exposures, Radiation and Environmental Biophysics, 60, 93-113(2021).

121] D. Fredrich, A. M. Akbar, M.F.B.M. Fadzil et al., Modelling of human exhaled sprays and aerosols to enable real-time estimation of spatially-resolved infection risk in indoor environments, https://doi.org/10.48550/arXiv.2212.07787, (2022).

122] T. Nishihara, K. Kuga, K. Ito, Numerical Investigation of Cough Droplets Dispersion Dynamics in Indoor Environment: Effect of Oral Cavity Shape, Environmental science and engineering, 5th International Conference on Building Energy and Environment, 1645-1648(2023).

123] J. He, J. Li, B. Chen et al., Study of Dispersion and Adsorption of Aerosols during Oral Practice, DOI: https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3480808/v1, (2023).

124] M. Sasaki, K. Furukawa, D. Satoh, K. Shimada, S. Kudo, S. Takagi, S. Takahara, M. Kai, SUMRAY: R and Python Codes for Calculating Cancer Risk Due to Radiation Exposure of a Population, Journal of Radiation Protection and Research, 48(2), 90-99(2023).

125] M. Orabi, A model to predict indoor concentrations and internal radiation doses of radioactive aerosols from nuclear accidents, Physica Scripta, 99, 85309(2024).

126] M. Talaat, X. Si, J. Xi, Adjoint Solver-Based Analysis of Mouth–Tongue Morphologies on Vapor Deposition in the Upper Airway, Fluids, 9, 104(2024).

127] C. Zhu, H. Xie, X. Chen et al., Numerical simulation on exhaled aerosol transmission based on realistic oral-nasal structures and temperature distribution, Journal of The Air & Waste Management Association, 74(12):905-919(2024).

128] T. Masuda and K. Manabe, Validating the application of the revised ICRP's biokinetic models for organic 14C and organically bound tritium to members of the public, Journal of Radiological Protection, 44, 031517(2024).

129] S. Galmarini, R. Bianconi, R. Addis et al., Ensemble dispersion forecasting-Part II: Application and evaluation, Atmospheric Environment, 38, 4619–4632(2004).

130] W.J. Coirier, S. Kim, F. Chen, M. Tewari, Evaluation of Urban Scale Contaminant Transport and Dispersion Modeling Using Loosely Coupled CFD and Mesoscale Models, The 86th AMS Annual Meeting, Sixth Symposium on the Urban Environment, Atlanta, Jan. 2006(2006).

131] W.D. Collins, P.J. Rasch, B.A. Boville, J.J. Hack et al., The formulation and atmospheric simulation of the Community Atmosphere Model version 3 (CAM3), Journal of Climate, 19, 2144 (2006).

132] C.-H. Moeng, J. Dudhia, J. Klemp, & P. Sullivan, Examining two-way grid nesting for large eddy simulation of the PBL using the WRF model, Mon. Wea. Rev., 135 (2007).

133] W.C. Skamarock, J.B. Klemp, J. Dudhia, D.O. Gill, D.M. Barker, M.G. Duda, X-Y. Huang, W. Wang and J.G. Powers, A Description of the Advanced Research WRF Version 3, NCAR/TN–475+STR NCAR TECHNICAL NOTE (2008).

134] P. Bechtold, M. Kohler, T. Jung et al., Advances in simulating atmospheric variability with the ECMWF model: From synoptic to decadal time-scales, Quarterly Journal of The Royal Meteorological Society, 134, 1337–1351(2008).

135] F. Chen, H. Kusaka, R. Bornstein, J. Ching et al., The integrated WRF/urban modelling system: development, evaluation, and applications to urban environmental problems, International Journal of Climatology (2011).

136] P.A. Jimenez, J. Dudhia et al., A revised scheme for the WRF surface layer formulation, Monthly weather review, 140, 898-(2012).

137] H. Nakayama1, T. Takemi, and H. Nagai, Large-eddy simulation of turbulent winds during the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident by coupling with a meso-scale meteorological simulation model, Advances in Science and Research, 12, 127–133(2015).

138] A.F. Stein, R.R. Draxler, G.D. Rolph et al., NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system, Bulletin of the American Meteorological Society, 2059–2077(2015).

139] C.L. Defforge, B. Carissimo, M. Bocquet, R. Bresson, P. Armand, Improving Numerical Dispersion Modelling in Built Environments with Data Assimilation Using the Iterative Ensemble Kalman Smoother, Boundary-Layer Meteorology, 179, 209-240(2021).

140] J. Brandt, J.H. Christensen, L.M. Frohn, Modelling transport and deposition of caesium and iodine from the Chernobyl accident using the DREAM model, Atmospheric Chemistry and Physics (2002).

141] S. Thykier-Nielsen, S. Deme, and T. Mikkelsen, Description of the Atmospheric Dispersion M odule RIMPUFF, Riso National Laboratory, RODOS(WG2)-TN(98)-02(2004).

142] R. Bianconi, S. Galmarini, R. Bellasio, Web-based system for decision support in case of eme rgency: ensemble modelling of long-range atmospheric dispersion of radionuclides, Environme ntal Modelling & Software, 19, 401-411(2004).

143] A. Stohl, C. Forster, A. Frank, P. Seibert et al., The Lagrangian particle dispersion model F LEXPART version 6.2, Atmospheric Chemistry and Physics, 5, 2461–2474(2005).

144] R.J. Beare, M.K. Macvean, A.A.M. Holtslag, J. Cuxart et al., An intercomparison of large-edd y simulations of the stable boundary layer, Boundary-Layer Meteorology, 118(2), 247-272(200 6).

145] S.V. Musolino, F.T. Harper, Emergency response guidance for the first 48 hours after the out door detonation of an explosive radiological dispersal device, Health Physics, 90, 377-385(200 6).

146] J.G. Bartzis, Turbulence modeling in the atmospheric boundary layer: a review and some rec ent developments, WIT Transactions on Ecology and the Environment, (2006).

147] E. Demael, B. Carissimo, Local Atmospheric Dispersion Modelling of Trace Constituents Issue d from A Nuclear Power Plant: A Comparison Using A CFD Code and ADMS with Wind Tu nnel Data, Proceedings of the 11th International Conference on Harmonisation within Atmos pheric dispersion models for regulatory purposes., 234-238(2007).

148] P. Pecha, R. Hofman, E. Pechova, Training simulator for analysis of environmental consequen ces of accidental radioactivity releases, Proc. EUROSIM, (2007).

149] E. Yee, F-S. Lien, A. Keats, Re'al D'Amours, Bayesian inversion of concentration data: Sourc e reconstruction in the adjoint representation of atmospheric diffusion, Journal of Wind Engi neering and Industrial Aerodynamics, 96, 1805–1816(2008).

150] H. Terada, M. Chino, Development of an Atmospheric Dispersion Model for Accidental Discha rge of Radionuclides with the Function of Simultaneous Prediction for Multiple Domains and its Evaluation by Application to the Chernobyl Nuclear Accident, Journal of Nuclear Science and Technology, 2, 397-417(2008).

151] T. Tamura, Towards practical use of LES in wind engineering, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 96, 1451-1471(2008).

152] D.M. Moreira, M.T. Vilhena, D. Buske, T. Tirabassi, The state-of-art of the GILTT method to simulate pollutant dispersion in the atmosphere, Atmospheric Research, (2009).

153] L.E. Pagano, A Comparative Study between FLEXPART-WRF and HYSPLIT in an Operation al Setting: Analysis of Fire Emissions across complex geography using WRF, (2010).

154] T. Heus, C.C. Heerwaarden et al., Formulation of the Dutch Atmospheric Large-Eddy Simula tion (DALES) and overview of its applications, Geoscientific Model Development, 3, 415–444 (2010).

155] N. Kinoshita, K. Sueki, K. Sasa at al., Assessment of individual radionuclide distributions fr

om the Fukushima nuclear accident covering central-east Japan, Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS), 108(49), (2011).

156] Y. Morino, T. Ohara, M. Nishizawa, Atmospheric behavior, deposition, and budget of radioacti ve materials from the Fukushima Daiichi nuclear power plant in March 2011, Geophysical re search letters, 38, L00G11(2011).

157] S.M. Salim, K.C. Ong, S.C. Cheah, Comparison of RANS, URANS and LES in the Prediction of Airflow and Pollutant Dispersion, Proceedings of The World Congress on Engineering and Computer Science, WCECS 2011(2011).

158] R.B. Oza, V.D. Puranik, H.S. Kushwaha, K. Prasad and A. Murthy, Dispersion of Radionuclid es and Radiological Dose Computation Over A Mesoscale Domain Using Weather Forecast an d CFD Model, NEA-CSNI-R--2011-14(2011).

159] S.J. Melles, G.B.M. Heuvelink, C.J.W. Twenhofel et al., Optimizing the spatial pattern of net works for monitoring radioactive releases, Computers & Geosciences, 37(3), 280-288(2011).

160] M. Chino, H. Nakayama, H. Nagai, H. Terada et al., Preliminary Estimation of Release Amo unts of ^{131}I and ^{137}Cs Accidentally Discharged from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Pl ant into the Atmosphere, Journal of Nuclear Science and Technology, 45(9), 920–931(2011).

161] O. Masson, A. Baeza, J. Bieringer et al., Tracking of airborne radionuclides from the damage d Fukushima Dai-ichi nuclear reactors by European networks, Environmental science and Te chnology, 45, 7670–7677(2011).

162] G. Katata, M. Ota, H. Terada, M. Chino, H. Nagai, Atmospheric discharge and dispersion of radionuclides during the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident. Part I: Source te rm estimation and local-scale atmospheric dispersion in early phase of the accident, Journal of Environmental Radioactivity, 109, 103-113(2012).

163] H. Terada, G. Katata, M. Chino, H. Nagai, Atmospheric discharge and dispersion of radionuc lides during the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident. Part II: verification of th e source term and analysis of regional-scale atmospheric dispersion, Journal of Environmenta l Radioactivity, 112, 141-154(2012).

164] N.I. Kristiansen, A. Stohl, G. Wotawa, Atmospheric removal times of the aerosol-bound radio nuclides ^{137}Cs and ^{131}I measured after the Fukushima Dai-ichi nuclear accident? a constraint for air quality and climate models, Atmospheric Chemistry and Physics, 12, 10759–10769(201 2).

165] V. Winiarek, M. Bocquet, O. Saunier et al., Estimation of errors in the inverse modeling of a ccidental release of atmospheric pollutant: Application to the reconstruction of the cesium-137 and iodine-131 source terms from the Fukushima Daiichi power plant, Journal of Geophysic al Research, 117, D05122(2012).

166] R.R. Draxler, G.D. Rolph, Evaluation of the Transfer Coefficient Matrix (TCM) approach to model the atmospheric radionuclide air concentrations from Fukushima, Journal of Geophysic al Research, 117, D05107(2012).

167] J. Zheng, K. Tagami, Y. Watanabe, S. Uchida, T. Aono et al., Isotopic evidence of plutonium release into the environment from the Fukushima DNPP accident, Scientific reports, 2, 304(2012).

168] N. Yoshida, Y. Takahashi, Land-surface contamination by radionuclides from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident, Elements, 8, 201–206(2012).

169] A. Stohl, P. Seibert, G. Wotawa, D. Arnold et al., Xenon-133 and caesium-137 releases into the atmosphere from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant: determination of the source term, atmospheric dispersion, and deposition, Atmospheric Chemistry and Physics, 12, 2313–2343(2012).

170] P. Thakur, S. Ballard, R. Nelson, An overview of Fukushima radionuclides measured in the northern hemisphere, Science of the Total Environment, (2013).

171] Y. Benamrane J.-L. Wybo, P. Armand, Chernobyl and Fukushima nuclear accidents: what has changed in the use of atmospheric dispersion modelling, Environmental Radioactivity 126, 239-252(2013).

172] V. Rossi, E. Van Sebille, A.S. Gupta, V. Garcon et al., Multi-decadal projections of surface and interior pathways of the Fukushima Cesium-137 radioactive plume, HAL Id:hal-02296650, (2013).

173] P. Lauret, F. Heymes, L. Aprin, A. Johannet et al., Near field atmospheric dispersion modelling on an industrial site using neural networks, Chemical Engineering Transactions, 31(2013).

174] S.M. Salim, K.C. Ong, Performance of RANS, URANS and LES in the prediction of airflow and pollutant dispersion, IAENG Transactions on Engineering Technologies: Special Edition of the World Congress on Engineering and Computer Science 2011, Vol II WCECS 2011, October 19-21, 2011, San Francisco, USA (2013).

175] O. Masson, W. Ringer, H. Mala, P. Rulik et al., Size distributions of airborne radionuclides from the Fukushima nuclear accident at several places in Europe, Japan Geoscience Union Meeting 2013, AAS24-06(2013).

176] M. Aoyama, M. Uematsu, D. Tsumune, Y. Hamajima, Surface pathway of radioactive plume of TEPCO Fukushima NPP1 released ^{134}Cs and ^{137}Cs, Biogeosciences, 10, 3067–3078(2013).

177] V. Winiarek, M. Bocquet, N. Duhanyan, Y. Roustan et al., Estimation of the caesium-137 source term from the Fukushima Daiichi nuclear power plant using a consistent joint assimilation of air concentration and deposition observations, Atmospheric Environment, 82, 268-279(2014).

178] F. Martin, M.G. Vivanco, J.L. Garrido, Evaluation of The Chimere Model Estimating Wet Deposition in Spain, 16th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes (2014).

179] H.F. Bonifacio, R.G. Maghirang, L.A. Glasgow, Numerical simulation of transport of particles emitted from ground-level area source using AERMOD and CFD, Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 8(4), 488–502(2014).

180] A.S. Rood, Performance evaluation of AERMOD, CALPUFF, and legacy air dispersion models using the Winter Validation Tracer Study dataset, Atmospheric Environment, 89, 707–720(2014).

181] Y.H. Koo, Y.S. Yang, K.W. Song, Radioactivity release from the Fukushima accident and its consequences: A review, Progress in Nuclear Energy, 74, 61-70(2014).

182] V. Simsek, L. Pozzoli, A. Unal, T. Kindap, Simulation of ^{137}Cs transport and deposition after the Chernobyl Nuclear Power Plant accident and radiological doses over the Anatolian Peninsula, The Science of The Total Environment, 499(C), 74-78(2014).

183] Y. Oura, et al., A database of hourly atmospheric concentrations of radiocesium (^{134}Cs and ^{137}Cs) in suspended particulate matter collected in March 2011 at 99 air pollution monitoring stations in eastern, Journal of Nuclear and Radiochemical Sciences, 15(2), 2_1-2_12(2015).

184] N. Yamaguchi, M. Mitome, A.H. Kotone, M Asano et al., Internal structure of cesium-bearing radioactive microparticles released from Fukushima nuclear power plant, Scientific Reports, 6, 20548(2016).

185] M. Kajino M. Ishizuka, Y. Igarashi et al., Long-term assessment of airborne radiocesium after the Fukushima nuclear accident: re-suspension from bare soil and forest ecosystems, Atmospheric Chemistry and Physics, 16, 13149–13172(2016).

186] K.L. Pham, H.Q. Nguyen, D.H. Pham, X.A. Do et al., The ability to use FLEXPART in simulation of the long-range radioactive materials dispersed from nuclear power plants near Vietnam border, Nuclear Science and Technology (Hanoi), 6(4), 40-48(2016).

187] M. Chino, H. Terada, H. Nagai, G. Katata, S. Mikami et al., Utilization of ^{134}Cs/^{137}Cs in the environment to identify the reactor units that caused atmospheric releases during the Fukushima Daiichi accident, Scientific Reports, 6(1), 31376(2016).

188] G. Rolph, A. Stein, B. Stunder, Real-time environmental applications and display system: READY, Environmental Modelling & Software, 95, 210-228(2017).

189] S. Coldrick, RR1099 - Review of consequence model evaluation protocols for major hazards under the EU SAPHEDRA platform, HSE, Available at www.hse.gov.uk(2017).

190] L. Bai, J. Wang, X. Ma, H. Lu, Air pollution forecasts: An overview, International Journal of Environmental Research and Public Health, (2018).

191] P.M. Udiyani, S. Kuntjoro, G.R. Sunaryo, H. Susiati, Atmospheric dispersion Analysis for Expected Radiation dose due to Normal Operation of RSG-GAS and RDE Reactors, Atom Indonesia, (2018).

192] K. Kitayama, Y. Morino, M. Takigawa et al., Atmospheric Modeling of ^{137}Cs Plumes From the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant—Evaluation of the Model Intercomparison Data of the Science Council of Japan, Journal of Geophysical Research, 123(14), 7754-7770(2018).

193] Y. Sato, M. Takigawa, T.T. Sekiyama et al., Model Intercomparison of Atmospheric ^{137}Cs From the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident: Simulations Based on Identical Input Data, J. Geophys. Res. 123(20), 11748-11765., (2018).

194] Y. Igarashi, T. Kogure, Y. Kurihara, H. Miura et al., A review of Cs-bearing microparticles in the environment emitted by the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident, Journal of Environmental Radioactivity, 205–206, 101–118(2019).

195] M. Kajino, T.T. Sekiyama, Y. Igarashi et al., Deposition and Dispersion of Radio - Cesium Released Due to the Fukushima Nuclear Accident: Sensitivity to Meteorological Models and Physical Modules, JGR Atmospheres - 2019 -10.1029/2018JD028998(2019).

196] Y. Sato, T.T. Sekiyama, S. Fang et al., A model intercomparison of atmospheric ^{137}Cs concentrations from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident, phase III: Simulation with an identical source term and meteorological field at 1km resolution, Atmospheric Environment: X 7 (2020) 100086, (2020).

197] M. Kajino, K. Adachi, Y. Igarashi et al., Deposition and Dispersion of Radio-Cesium Released due to the Fukushima Nuclear Accident: 2. Sensitivity to Aerosol Microphysical Properties of Cs-Bearing Microparticles (CsMPs), JGR Atmospheres - 2020 - 10.1029/2020JD033460, (2020).

198] C.A. Biltoft, Customer Report for Mock Urban Setting Test, DPG Document No. WDTC-FR-01-121, WEST DESERT TEST CENTER U.S. ARMY DUGWAY PROVING GROUND DUGWAY, UTAH 84022-5000, DECEMBER 2001(2001).

199] S.R. Hanna, J.C. Chang, Use of the Kit Fox field data to analyze dense gas dispersion modelling issues, Atmospheric Environment 35, 2231-2242(2001).

200] R.R. Draxler, J.L. Heffter, G.D. Rolph, DATEM: Data Archive of Tracer Experiments and Meteorology, NOAA Air Resources Laboratory, 1315 East West Highway, Silver Spring, Maryland 20910(2002).

201] C.A. Biltoft, E. Yee and C.D Jones, Overview of the Mock Urban Setting Test (MUST), Proceedings of the Fourth Symposium on the Urban Environment. May 20-24, Norfolk, VA. (2002).

202] S.E. Gryning and E. Lyck, The Copenhagen Tracer Experiments: Reporting of Measurements, Risø-R-1054(rev.1)(EN), Riso National Laboratory, Roskilde, Denmark, 75 pages. http://www.risoe.dk/rispubl/VEA/veapdf/, (2002).

203] Y. Cheng, F.S. Lien, E. Yee, R. Sinclair, A comparison of large eddy simulations with a standard k-ε Reynolds-averaged Navier-Stokes model for the prediction of a fully developed turbulent flow over a matrix cubes, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 91, 1301–1328(2003).

204] T. Sax, Measurement of Toxic Air Pollutants for Neighborhood Assessment Final Report for Barrio Logan Measurement Study, 00-720(2003).

205] S. Vardoulakis, B.E.A. Fisher, K. Pericleous et al., Modelling air quality in street canyons: a review, Atmospheric environment, 37(2), 1a55-182(2003).

206] F.E. Camelli, R. L¨ohner, and S.R. Hanna, Feflo-urban CFD Model Evaluation of The Must Experiment, Mecanica Computacional, 23, 1701-1725(2004).

207] H-N.S. Chin, M.J. Leach, G.A. Sugiyama, J.M. Leone Jr., H. Walker, J.S. Nasstrom, and M.J.

Brown, Evaluation of an Urban Canopy Parameterization in a Mesoscale Model Using VTM X and URBAN 2000 Data, AMS Journals/Monthly Weather Review, 133(7), 2043–2068(2005).

208] Z. Xie, I.P. Castro, Efficient Generation of Inflow Conditions for Large Eddy Simulation of St reet-Scale Flows, Flow, Turbul. Combust, 76, 291-312(2006).

209] Y.H. Tseng, C. Meneveau et al., Modeling flow around bluff bodies and predicting urban disp ersion using large eddy simulation, Environmental science and Technology, 40, 2653-2662(200 6).

210] J. Franke, A. Hellsten, K.H. Schlunzen et al., Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment, COST Action 732, Quality Assurance and Improvement of Microscale Meteorological Models, (2007).

211] N.S. Dixon, A.S. Tomlin, Evaluation of a lagrangian model for predicting concentration fluctu ations in urban areas, Proceedings of the 11th International Conference on Harmonisation wi thin Atmospheric dispersion models for regulatory purposes., (2007).

212] Z.T. Xie, O. Coceal, I.P. Castro, Large-eddy simulation of flows over random urban-like obsta cles, Boundary-layer meteorology, (2008).

213] G.C. Efthimiou, J.G. Bartzis, S. Andronopoulos and T. Sfetsos, Modelling The Concentration Fluctuation and Individual Exposure in Complex Urban Environments, Croatian Meteorologic al Journal, 43(1), 392-395(2008).

214] B. Blocken, T. Stathopoulos, P. Saathoff, X. Wang, Numerical evaluation of pollutant dispersi on in the built environment: comparisons between models and experiments, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 96(10-11), 1817-1831(2008).

215] Z.T. Xie, I.P. Castro, Large-eddy simulation for flow and dispersion in urban streets, Atmosp heric Environment, (2009).

216] P. Gosseau, B. Blocken, T. Stathopoulos et al., CFD simulation of pollutant dispersion around buildings: comparison between RANS k-ε and LES approaches, The Fifth International Sym posium on Computational Wind Engineering (CWE2010), (2010).

217] J.L. Santiago, A. Dejoan, A. Martilli, F. Martin et al., Comparison between large-eddy simula tion and Reynolds-averaged Navier-Stokes computations for the MUST field experiment. Part I: study of the flow for an Incident Wind Directed Perpendicularly to the Front Array of Co ntainers, Boundary-Layer Meteorol, 135, 109–132(2010).

218] H. Huang, S. Shen, T. Hara, K. Okabayashi, R. Ohba, Development of Lagrangian/Eulerian hybrid atmospheric dispersion model around buildings, The Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2010) (2010).

219] Y. Tominaga, T. Stathopoulos, Numerical simulation of dispersion around an isolated cubic bu ilding: model evaluation of RANS and LES, Building and Environment, 45, 2231-2239(2010).

220] Y. Tominaga, T. Stathopoulos, CFD modeling of pollution dispersion in a street canyon: Comp arison between LES and RANS, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 99, 340-348(2011).

221] P. Gousseau, B. Blocken, G.J.F.V. Heijst, CFD simulation of pollutant dispersion around isola ted buildings: On the role of convective and turbulent mass fluxes in the prediction accuracy, Journal of Hazardous Materials, 194, 422-434(2011).

222] S.M. Salim, S.C. Cheah, A Chan, Numerical simulation of dispersion in urban street canyons with avenue-like tree plantings: comparison between RANS and LES, Building and Environ ment, 46(9), 1735-1746(2011).

223] S. Hanna, J. Chang, Acceptance criteria for urban dispersion model evaluation, Meteorol Atm os Phys., 116, 133–146(2012).

224] Y. Tominaga, T. Stathopoulos, CFD modeling of pollution dispersion in building array: evalua tion of turbulent scalar flux modeling in RANS model using LES results, Journal of Wind E ngineering and Industrial Aerodynamics, 104-106, 484-491(2012).

225] B. Blocken, Y. Tominaga, T. Stathopoulos, CFD simulation of micro-scale pollutant dispersion in the built environment, Building and Environment, 64, 225–230(2013).

226] Y. Tominaga, T. Stathopoulos, CFD simulation of near-field pollutant dispersion in the urban environment: A review of current modeling techniques, Atmospheric Environment, 79, 716-73 0(2013).

227] R. San Jose, J. Luis Perez, Harmonisation of Practices for Atmospheric Dispersion Modelling within the Framework of Risk Assessment, 15th International conference on harmonisation w ithin atmospheric dispersion modelling for regulatory purposes (HARMO 15), May 2013, Mad rid, Spain. Technical University of Madrid. Madrid, 718-723(2013).

228] P. Gousseau, B. Blocken, G.J.F.V. Heijst, Quality assessment of Large-Eddy Simulation of win d flow around a high-rise building: Validation and solution verification, Computers & Fluids, 79, 120–133(2013).

229] S. Di Sabatino, R. Buccolieri, Recent advancements in numerical modelling of flow and dispe rsion in urban areas: a short review, Int. J. Environment and Pollution, 52(3/4), 172-191(201 3).

230] W.C. Cheng, F. Porte-Agel, Adjustment of turbulent boundary-layer flow to idealized urban s urfaces: a large-eddy simulation study, Boundary-Layer Meteorology, 155, 249-270(2015).

231] L. Chen, P. Kumar, M. Leguellec, A-A. Feiz, An Air Quality CFD Model Performance in Com plex Environment with EMU Observations, 17th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, 9-12 May 2016, Budapest, Hungary (2016).

232] M. Lateb, R.N. Meroney, M. Yataghene et al, On the use of numerical modelling for near-fiel d pollutant dispersion in urban environments: A review, Environmental Pollution: 208, 271-28 3(2016).

233] P. Kumar, A-A. Feiz, S.K. Singh, P. Ngae, R. Rani, E. Barbosa, G. Turbelin, J-P. Issartel, N. Bekka, Source Reconstruction in Urban and Non-Urban Environments Using An Inversion M ethodology Coupled with A CFD Approach, 17th International Conference on Harmonisation

within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, 9-12 May 2016, Budapest, Hungary (2016).

234] M.L. Bahlali, E. Dupont, A hybrid CFD RANS/Lagrangian approach to model atmospheric di spersion of pollutants in complex urban geometries, International Journal of Environment an d Pollution, 64(1/3), 74-89(2018).

235] L.W. Chew, L.R. Glicksman, L.K. Norford, Buoyant flows in street canyons: Comparison of R ANS and LES at reduced and full scales, Building and Environment, 146, 77-87(2018).

236] T. Uchida, G. Li, Comparison of RANS and LES in the prediction of airflow field over steep complex terrain, Open Journal of Fluid Dynamics, 8, 286-307(2018).

237] B. Blocken, LES over RANS in building simulation for outdoor and indoor applications: A for egone conclusion?, Building Simulation, 11, 821-870(2018).

238] L. Thouron, M.C. Rochoux, T. Jaravel and O. Vermorel, Large-eddy simulations of the MUST trial 2681829 using AVBP, Meso-NH and YALES2, Technical report, TR-CFD-20-14, CERFAC S, Toulouse, France (2020).

239] M. Hadžiabdić, M. Hafizović, B. Ničeno et al., A rational hybrid RANS-LES model for CFD p redictions of microclimate and environmental quality in real urban structures, Building and Environment, 217, 109042(2022).

240] S. Altland, H.H.A. Xu, X.I.A. Yang, R. Kunz, Modeling of cube array roughness: RANS, large eddy simulation, and direct numerical simulation, Journal of Fluids Engineering, 144(6), 061 106(2022).

241] E. Lumet, T. Jaravel, M.C. Rochoux, O. Vermorel, S. Lacroix, Assessing the Internal Variabili ty of Large-Eddy Simulations for Microscale Pollutant Dispersion Prediction in an Idealized Urban Environment, CECI, Universite de Toulouse, CNRS, CERFACS, Posted Date June 9th (2023).

242] K. Essa, A.A. Marrouf, S. Etman, M. El-Otaify, Fractional solution of the puff model in thre e dimensional for pollutant dispersion in the atmosphere, 26 June 2023, PREPRINT (Version 1) available at Research Square [https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3078327/v1] (2023).

243] W. Liu, S. Lv, Numerical Wind Tunnel Simulation for Pollutants Dispersion with Urban 200 3, Journal of Physics: Conference Series, 2463, 012064(2023).

244] J.S. Scire, D.G. Strimaitis, R.J. Yamartino, A user's guide for the CALPUFF dispersion mode l, Earth Tech, Inc, 196 Baker Avenue, Concord, MA 01742 (2000).

245] J.S. Irwin, Statistical evaluation of centerline concentration estimates by atmospheric dispersi on models, Int. J. Environment and Pollution, 14(1-6), 28-38(2000).

246] J-M. Libre, M.L. Guellec, A. Tripathi, T. Mailliard, S. Guérin, C. Souprayen, A. Castellari., S ource Determination in Congested Environment Through Bayesian Inference, Harmo 13, Réf Paper H13-191(2010).

247] P.E. Bieringer, G.S. Young, L.M. Rodriguez et al., Paradigms and commonalities in atmospher ic source term estimation methods, Atmospheric Environment, 156, 102-112(2017).

248] A. Wawrzynczak, M. Berendt-Marchel, How to Select Superior Neural Network Simulating In ner City Contaminant Transport? Verification and Validation Techniques, International Confer ence on Computational Science, Computational Science-ICCS2023, 339-347(2023).

249] C. Rojas-Palma, H.K. Aage, P. Astrup, K. Bargholz, M. IDrews, H.E. Jørgensen, U. Korsbech, B. Lauritzen et al., Experimental evaluation of gamma fluence-rate predictions from Argon-4 1 releases to the atmosphere over a nuclear research reactor site, Radiation protection dosim etry 108 161-8(2004).

250] D. Xie, H. Wang, K.J. Kearfott, Modeling and experimental validation of the dispersion of ^{222}Rn released from a uranium mine ventilation shaft, Atmospheric Environment, 60, 453-459(2 012).

251] G. Katata, H. Terada, H. Nagai, M. Chino, Numerical reconstruction of high dose rate zones due to the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident, Journal of Environmental Radi oactivity, 111, 2-12(2012).

252] H. Haba, J. Kanaya, H. Mukai, T. Kambara, M. Kase, One-year monitoring of airborne radio nuclides in Wako, Japan, after the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident in 2011, Geochemical Journal, 46, 271-278(2012).

253] O. Saunier, A. Mathieu, D. Didier et al., An inverse modeling method to assess the source t erm of the Fukushima Nuclear Power Plant accident using gamma dose rate observations, A tmos. Chem. Phys., 13, 11403–11421(2013).

254] D. Satoh, H. Nakayama, T. Furuta, et al., Simulation code for estimating external gamma-ra y doses from a radioactive plume and contaminated ground using a local-scale atmospheric d ispersion model., Plos One.2021. DOI:10.1371/journal.pone.0245932.g011(2014).

255] G. Steinhauser, T. Niisoe, K.H. Harada et al., Post-accident sporadic releases of airborne radi onuclides from the Fukushima Daiichi nuclear power plant site, Environmental science & tec hnology, 49(24), 14028-14035(2015).

256] D. Satoh, K. Kojima, A. Oizumi, et al., Development of a calculation system for the estimati on of decontamination effects, Journal of Nuclear Science and Technology, 51(5), 656–670(201 8).

257] C. Monn, Exposure assessment of air pollutants: a review on spatial heterogeneity and indoo r/outdoor/personal exposure to suspended particulate matter, nitrogen dioxide and ozon, Atmo spheric environment, 35, 1-32(2001).

258] S.J. Cao, J. Meyers, Asymptotic conditions for the use of linear ventilation models in the pre sence of buoyancy forces, Building Simulation, 7, 131-136(2014).

259] G.C. Efthimiou, J.G. Bartzis, Atmospheric dispersion and individual exposure of hazardous m aterials. Validation and intercomparison studies, International Journal of Environment and P ollution, 55(1), 76-85(2014).

260] Y. Satou, K. Sueki, K. Sasa, H. Yoshikawa et al., Analysis of two forms of radioactive particl es emitted during the early stages of the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station acciden

t, Geochemical Journal, 52(2), 137-143(2018).

261] H. Tsuruta, Y. Oura, M. Ebihara et al., Time-series analysis of atmospheric radiocesium at t wo SPM monitoring sites near the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant just after the Fu kushima accident on March 11, 2011, Geochemical Journal, 52, 103-121(2018).

262] K. Manabe, K. Sato and F. Takahashi, Development of a function calculating internal dose c oefficients based on ICRP 2007 Recommendations, BIO Web of Conferences, 14, 03011(2019).

263] K. Manabe, K. Sato & F. Takahashi, Estimating internal dose coefficients of short-lived radio nuclides in accordance with ICRP 2007 recommendations, Journal of Nuclear Science and Tec hnology, 56(5), 385-393(2019).

264] K. Ando, R. Bale, C.G. Li, S. Matsuoka, K. Onishi, and M. Tsubokura, Digital transformatio n of droplet/aerosol infection risk assessment realized on "Fugaku" for the fight against COV ID-19, International Journal of High-Performance Computing Applications, 36(5-6), 568–586(2 022).

265] K. Manabe, K. Sato & F. Takahashi, Variation of Internal Doses Caused by Differences in P hysical Characteristics between the Average Japanese and the ICRP's Reference Man Which Is Based on the Standard Data of Caucasians in the Dosimetric Methodology in Conformity to the 2007 Recommendations, Journal of Nuclear Science and Technology, 59(5), 656-664(202 2).

■ 3章　高分解能大気拡散シミュレーションにおける線量評価に係るヒアリング調査

3.1 本章の概要

本章では、2 章に引き続き、高分解能大気拡散シミュレーション及び線量評価に係る知見の蓄積を目的として、関係する分野の専門家をヒアリングし、研究開発の現状（得られている成果と課題）と今後の方向性について議論した結果を報告する。3.2 節では、対象とする専門家が所属する機関として、選定した 5 機関の事由を記し、3.3 節では、各機関のヒアリング内容を記す。なお、各機関共にヒアリング調査は 2 回程度行った（1 回は機関によるプレゼンと質疑応答とし、2 回目以降は、メール等での質疑応答の確認等である）。

3.2 高分解能大気拡散シミュレーションにおける線量評価に係るヒアリング調査機関

本節では、選択した各機関（下記 5 つ）の特徴と調査対象機関とした事由を記す。

(1) 東京大学（産学協創推進本部）

本機関は、LES モデルを大気拡散現象（局所域での熱環境等を含む）に適用し、更に線量評価まで実施している数少ない研究機関であり、本ヒアリングでは、上記 LES 及び線量評価の成果と今後の展開について議論し、その動向を調査する。

(2) 日本原子力研究開発機構（安全研究センター①）

本機関は、放射性物質の大気拡散現象と線量評価技術の開発において、OSCAAR を開発する等、規制サイドにおいて研究開発をリードする立場にある。本ヒアリングにより、最近の研究開発動向について調査する。

(3) 日本原子力研究開発機構（安全研究センター②）

本機関は、放射性物質の大気拡散現象に関し、線量評価技術の高度化を進めている。本ヒアリングにより、研究開発の現状と今後の課題や研究開発の方向性を調査する。なお、(2) と異なる研究チームをヒアリング対象とする。

(4) 日本原子力研究開発機構（原子力基礎工学研究センター）

本機関は、放射性物質の大気拡散現象を解析するシステムとして、本事業に使用するコード LHADDAS を開発している。本ヒアリングにより、LHADDAS 中の SYBIL コード(線量評価)の研究開発の現状と今後の課題や研究開発の方向性を調査する。

(5) 日本原子力研究開発機構（システム計算科学センター）

本機関は、放射性物質が拡散した環境中において、人口及び自然構造物等を詳細にモデル化し、線量計算を詳細に実施可能な 3D-ADRES-Outdoor を開発している他、環境中での被ばく評価に係る研究開発を長年、実施してきた研究者が所属しており、本ヒアリングの調査対象とする。

3.3 東京大学（産学協創推進本部）

日　時：2024 年 12 月 27 日（金）11:00-12:10

形　式：オンライン

参加者：東京大学・産学協創推進本部　A 教授（T-A と記す）

JAEA・原子力安全・防災研究所・安全研究センター受託事業担当者 J-A 他

事務局　C（再委託事業者）

・ヒアリング先：東京大学・産学協創推進本部　T-A

・ヒアリング元：JAEA・原子力安全・防災研究所・安全研究センター　J-A 他

・ヒアリング内容：

1. 自己紹介（参加者全員）
2. ヒアリング目的説明（J-A：2～3 分）
3. ヒアリング資料説明（J-A：15 分）
   「T-A の出版論文について」
4. 議論（全員：45 分）
   1) 全体的な方向性や重点領域
   2) 個別の論文の課題
   3) データとモデルの限界
   4) 異なる手法間の連携
   5) 実社会への影響大気環境シミュレーション全般における成果（手法）と課題
5. 謝辞とあいさつ（J-A）

・議事

(1) ヒアリング目的（J-A）

- 事業目的を説明した。JAEA では原子力災害発生時に、30km 圏内の防護措置について、大気拡散シミュレーション（CFD）を活用した被ばく評価に関して、何が効果的か等を検討しており、これに関連して、どのような高精度化が図れるか、どのような課題があるか、調査とヒアリングをしている。CFD の適用性と課題及びその課題解決策と将来像に関してお聞きしたい。報告書にヒアリング内容を記録する。

(2) ヒアリング資料説明（J-A）

- 今回の事業テーマに関係のある T-A の以下の 9 つの論文（日本語文献のみ選択）について、論文の要約、課題などをまとめて紹介した。
  1) モンテカルロ法による放射線量の簡易計算法[3-1]
  2) 感染症対策も視野に入れた CFD 活用室内換気設計[3-2]
  3) 原子力発電所事故時の放射性物質放出量推定手法の開発[3-3]
  4) 戸建て住宅モデルを対象とした空間線量の予測－建物内放射線量の簡易計算法(その 2)－[3-4]
  5) 大気汚染物質の放出量推定における精度向上に関する研究[3-5]
  6) 風工学における汚染物質輸送解析と逆解析[3-6]

7) 福島第一原子力発電所事故後の長期被ばく評価に関する研究[3-7]
8) 有限の地表面に沈着した放射性核種からの線量率の簡易計算法[3-8]
9) 地表の放射性核種から放出される直接線の平均光子移動距離の理論解と線量率簡易計算への応用[3-9]

(3) T-A コメントおよび質疑（Q:質問、A:回答、C：コメント）

C：これまで、屋外、室内の大気拡散問題に携わってきたが、民間会社との共同研究の一環として、原子力分野の研究も行った。7)の論文にあるように、EU で開発された長期被ばく評価コード「ERMIN」の日本版改良を行い、福島地域に適用した結果についてまとめた。これに関連して、8)、9)のような放射線量の簡易計算に取り組んだ。被ばく線量について、モデル化して早く予測することが大事だ、との意図から検討した。（T-A）

Q：防護措置や対策からの観点では、屋外でのクラウドシャイン、グランドシャインにより、人の高さでの線量がどれくらいかが重要であり、同時に室内に流入したとき、屋内のクラウドシャイン、グランドシャインの解析精度や高速化手法に興味を持っていた。また、論文 2)のような感染症対策への CFD の活用も、屋内での線量予測の高精度化を考えたとき関連する研究として重要である。CFD の活用の観点から、主流方向、横断方向への拡散問題や、エアロゾルの拡散特性などに関して、RANS や LES の手法の有用性や、精度向上に関してどのような課題があるかをお聞きしたい。（J-A）

A：流体シミュレーション、CFD に関して、一般的、基本的なことを言えば、大気拡散によりソース物質が大気と混合した希釈率で考えると、ソース近傍の 10 倍、100 倍希釈の領域はともかく、1000 倍、10000 倍の領域では、誤差が大きいということを考える必要がある。大気拡散には、風のゆらぎ、風向変動、長短周期の変動、大気のゆらぎ、地表面粗度など、様々な要因がからんでいるので、何 km のオーダーなら合っているか、とか、建物を 10m ビッチで解像すればいいのか、とか、一言で言うのは難しい。

室内流に関しては、浮力の影響を受ける。室内の温度差で大きな循環が影響を受ける。風速数 10 ㎝/s 以下の場合、密度差で循環が出来る。温度差 0.1℃でも気流性状が変わる。浮力によるプルームが壁付近の誘因や圧力低下で壁に付着するコアンダ効果が起こる。CFD では対称の流れが、実験では対称な流れの再現は難しい。多孔板噴き出しでは、マージして強い噴流、乱流になるが、いわゆる格子背後流などの後流の場合、マージが不規則で均一にはならない。実現象の擾乱要素のモデル化は不可能に近い。これらをシミュレーションで再現できるか？平均流の場合は、CFD で確からしい結果が得られる。アンサンブルの結果は信頼性があるが、原子力災害の場合、アンサンブル平均をとるのは難しい。CFD では平均化されたものは信頼できる。LES で擾乱要素をアンサンブルすれば良い。拡散範囲について、1000 倍、10000 倍希釈というのは、結果の解釈が難しい。100 倍、1000 倍までは予測可能、そこまでは実現象に対応している。風洞実験では、長い観測時間、おおきなスケールで解析するから合う。煙突からのダイオキシンの大気拡散についても、1 か月、1 年という長い時間なら合う。1 日、2 日の期間で合わせるのは難しい。

室内流の全般換気に関しては、部屋のスケールの大きな循環があり、2、3 時間で良く混ざる。全般換気で考えて問題ない。ソースの場所がどこか分かれば、ソースを良く排出すれば良い。台所の換気扇の例が典型的だ。床が汚れていて、人による発熱がある場合、人体のまわりに熱

上昇がある。顔の前面では胸の辺りの空気を吸う、すなわち床の汚れを吸うことになる。床を汚さないことが重要だ。床の空気を吸うことに関しては、対面の場合、人間の周りのプルームで感染から守られる。咳などがなく、単に話している、あるいは呼吸しているだけの場合なら、1.2m 程度離れれば安全だ。(T-A)

Q：10000 倍希釈の例では、どう考えればよいか？（J-A）

A：予測において、有効数字 4 桁までを求めるのは、難しくないか？こうした例では、慎重にアンサンブルをやる必要がある。(T-A)

Q：シミュレーションではメッシュ数が限られる。現実の複雑さ、境界条件設定の不確かさなどを考えると、有限なサイズでの結果の解釈はどう扱えばよいか？（J-A）

A：10000 倍希釈の例で、たとえば解像度が住宅などで 10m、20m 程度の時、拡散による混合が終わって均一なものが流れてくるかどうかだ。横縦均一なものが拡散している場合はいいが、混合が起こっている場所、混合中の過程、拡散の前縁など、シビアな場所では予測が難しい。(T-A)

C：数キロ圏内の領域での CFD の有効性を考えている。その先は気象モデルに接続していく。これまでは、プルームモデルと線量評価の組み合わせだったが、これを CFD と線量評価に置き換えていくことを考えている。(J-A)

Q：論文の 3）について、補足説明をお願いしたい。(J-A)

A：ここでは、観測データについては、クラウドシャインとグランドシャインの合算値であるが、これを区別することにより、グランド分は蓄積、クラウド分はプルームの通過として考えて、放出量を評価した。(T-A)

Q：10000 倍希釈の話は、良く理解できた。10000 倍のコンターラインを引いて、それが自治体の境界に重なる場合など、議論になることが良くある。粒子モデルで拡散を計算する場合でも、粒子数が少ない場合は、希釈の数値に対する誤差が大きくなる。結果をどう解釈するかが重要だ。質問だが、屋内の場合、人間の発熱量が変わらないとして、寒い部屋の場合は、人間の周りのプルームが多く発生して良く守られる、ということがあるのか？（J-C）

A：部屋が寒い場合も、状況はあまり変わらない。(T-A)

C：勉強になった。よく理解できた。(J-D)

C：放射性物質が再び空気中に舞い上がる(再飛散)ことで、呼吸により吸い込むなど内部被ばくが起こるリスクから、室内において床の清潔さが最も重要であると分かった、勉強になりました。（J-E）

C：10000 倍希釈の話、よく理解できた。(C)

(4) 謝辞とあいさつ

- ヒアリングの結果は議事録にまとめて送る。確認と加筆訂正をお願いしたい。今後質問などのメールのやり取りをお願いしたい。(J-A)

3.4 日本原子力研究開発機構（安全研究センター①）

日　時：2025 年 2 月 4 日（火）10:00-11:10

形　式：オンライン

参加者：JAEA・原子力安全・防災研究所・安全研究センター　A-A

JAEA・原子力安全・防災研究所・安全研究センター受託事業担当者 J-A、J-B 他
事務局　C（再委託事業者）

・ヒアリング先：JAEA・原子力安全・防災研究所・安全研究センター　A-A
・ヒアリング元：JAEA・原子力安全・防災研究所・安全研究センター　J-A、J-B 他
・ヒアリング内容：

1. 自己紹介（参加者全員）
2. ヒアリング目的説明（J-A：2～3 分）
3. ヒアリング資料説明（J-A：15 分）
   「A-A の出版論文について」
4. ヒアリング資料説明（A-A：20 分）
5. 議論（全員：25 分）
   1) 全体的な方向性や重点領域
   2) 個別の論文の課題
   3) データとモデルの限界
   4) 異なる手法間の連携
   5) 実社会への影響　大気環境シミュレーション全般における成果（手法）と課題
6. 謝辞とあいさつ（J-B）

・議事

(1) 自己紹介

- 安全研究センターの J-A です。規制庁の受託事業で、昨年は、原子力施設事故時の放射性物質大気拡散について、CFD を活用して高分解能化を図る目的で文献調査を行った。今年度は被ばく評価に関する文献調査を行っている。（J-A）
- J-A の事業に参加している。大気拡散シミュレーションを担当している。（J-B）
- 安全研究センターの A-A です。住民の被ばく線量の評価、最近は原子力防災に関わっている。OSCAAR に自分の被ばく評価のコードを入れて検討している。（A-A）
- A-A のグループで一般家屋における退避のモデル化に関わっている。（J-F）
- 安全研究センターで被ばく評価の仕事をしている。（J-G）
- 事務局を担当している C です。（C）

(2) ヒアリング目的（J-A）

- 事業目的を説明した。規制庁の受託事業で、原子力施設事故時の放射性物質大気拡散について、昨年は CFD を活用して高分解能化のための文献調査を行った。今年度は被ばく評価の文献調査を行っている。今回は安全研究センターの A-A にプレゼンをお願いし、質疑応答によりヒアリングを実施したい。

(3) ヒアリング資料説明（J-A）

- 今回の事業テーマに関係のある A-A のこれまでの主な論文について、論文の要約、課題などをまとめて紹介した。以下は、今回のヒアリングで注目する論文である。
  1) 原子力災害の防護方策の意思決定―リスクトレードオフとステークホルダー関与―[3-

10]

2) Indoor and outdoor radionuclide distribution in houses after the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident （福島第一原子力発電所事故後の住宅における屋内外の放射性核種分布）[3-11]
3) Penetration factor and indoor deposition rate of elementary and particulate iodine in a Japanese house for assessing the effectiveness of sheltering for radiation exposures（放射線被ばくに対する避難の有効性を評価するための日本家屋における元素ヨウ素および粒子状ヨウ素の浸透率と室内沈着率）[3-12]
4) Backward Estimation of Atmospheric Release of ^{137}Cs and ^{131}I Using Total Cumulative Deposition in Terrestrial Areas Following the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident （福島第一原子力発電所事故後の陸域への総累積沈着量を用いた ^{137}Cs および ^{131}I の大気放出量の逆推定）[3-13]
5) Urban working groups in the IAEA's model testing programmes: overview from the MODARIA I and MODARIA II programmes （IAEA のモデル試験プログラムにおける都市作業部会: MODARIA I および MODARIA II プログラムの概要）[3-14]
6) Assessment of doses in contaminated urban areas: modelling exercise based on Fukushima data （汚染された都市部の線量の評価: 福島のデータに基づくモデリング）[3-15]
7) Uncertainty and sensitivity analyses for the reduction factor of sheltering for radiation exposures （放射線被ばくによる避難の減少係数の不確かさと感度の分析）[3-16]
8) 「保健物理」に掲載された東京電力福島第一原子力発電所事故関連記事を振り返る ―総論― (2023 年 3 月)[3-17]
9) Soil dust and bioaerosols as potential sources for resuspended ^{137}Cs occurring near the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant （福島第一原子力発電所付近で発生する再浮遊 ^{137}Cs の潜在的な発生源としての土壌塵埃とバイオエアロゾル）[3-18]
10) SUMRAY: R and Python Codes for Calculating Cancer Risk Due to Radiation Exposure of a Population (2023)（被ばくに関連するガンリスクの定量的評価を行う計算コード「SUMARY」の開発）[3-19]

(4) ヒアリング資料説明（A-A）

- 屋内退避について、規制庁の受託で住民の調査を行った。最近、内閣府、環境省で原子力災害発生時の防護措置に関して、原発近傍の防護施設でどのくらいの低減が図れるか調査した。陽圧化 20Pa、風速がどれくらいで放射性物質が建物の隙間から入るかを CFD で検討した。
- 内閣府の原子力防災担当によれば、防護施設 21 のうち、石川県内の 20 施設について調査したところ、6 施設がスプリンクラーの破損で使用不可となった。屋内退避できなかった場合の体育館については、陽圧化のテントが必要となる。福島県立医科大や御前崎などの自治体が連携して窓や扉を開けた場合の圧力の変化を調査している。
- 環境省は R4 から R6 に事故時の居住環境について評価した。地表面沈着、再浮遊、室内沈着、室内再浮遊などの問題が生じる。
- 大田の地表面モデルがある（J-B)。

- 屋内の浸透率はどのくらいか？自然換気率、建蔽率により、層流乱流が変わる。室内再浮遊については、J-G が開発している（J-B)。
- こうしたモデルは OSCAAR に入れる予定である。短期、長期の線量を評価する。R4 には屋外の再浮遊について調査し、事故直後については、A-A が再浮遊係数を求める。1 年後の分については大田モデルを使う。
- 屋内の再浮遊については、今年度までの調査テーマだ。室内再浮遊粒子の挙動や風速は、PIV により解析と測定を行う。実験と CFD により再浮遊係数を求める。
- 2 年目は屋内退避の評価を行う。国内の全サイトについて、風速、建蔽率などをサイト別に調査する。風速の違いにより低減係数が異なる、これを報告書に盛り込む予定だ。屋内でのエアコンや掃除機による外乱の影響も考慮する。
- 3 年目、再浮遊係数については、CFD で解析中であるが、結局実験の値を使う予定だ。大気拡散が屋外から屋内、そして屋内沈着のプロセスで、屋外からの沈着が全体の 95%を占める。屋内では再浮遊核種の寄与は少ない。

(5) 質疑（Q:質問、A:回答、C：コメント）

Q：能登地震の際、防護施設の半分程が壊れたとプレゼンにあったが驚いた。この情報は公開されているか？（J-A）

A：報告書が公開されている。原子力防災担当の HP にて、R6.4.12「令和 6 年能登半島地震に係る志賀地域 における被災状況調査（令和 6 年 4 月版）（案）：別添 7」に放射線防護施設の状況の表が出ている。地震で一般家屋が壊れた場合、UPZ での屋内退避は難しい。（A-A）

Q：今後、壊れた施設での被ばく調査は、ニーズとしてあるのではないか？今後の見通しはどうか？（J-A）

A：体育館については、島根の避難施設で構造や材質などを調べた。屋根は薄くクラウドシャインには弱い。PHITS で計算し、テントの効果などを調査した。これは今年度の調査だ。（A-A）

Q：核種の違いは調査するか？概要が知りたい。どの点に着目して被ばく評価を進めるのか？（J-A）

A：ヨウ素については規制庁の事業で、京大の米田先生が京大の実験設備を使って評価した。別の核種については考えていないが、個人的にはクリプトンに興味がある。自己進展が早く、1MeV とエネルギーが高いが、クリプトンは事故後 10 時間位なので、考えなくてよいかとも思える。（A-A）

Q：CFD との関連で準備する課題は何かあるか？（J-A）

A：今のところ特に予定はない。（A-A）

Q：事故後に CFD で解析を行う目的はどこにおいているか？（A-A）

A：今回の事業に関連して、来年度に向けての結論の見通しは、いままでの対策は安全側という解釈だ。拡散が促進されると、今までの調査での評価は保守的な結果となる。基礎的なデータ、統計的にみたら保守的な結果となる。この事業の目的としては、その方向だが、その辺については、研究としてはあまり発展性がない。（J-B）

C：自分の印象としては、テロなどでの放射性物質の拡散や市街地での爆発などでは CFD 解析の意味がある。またこうした場合は、粒径が大きなものが飛んでいく。（A-A）

C：CFD を使うなら、施設内で意味がある。屋外なら気象モデルが重要だ。保守的な結果でもどれ

だけ尤度があるかだ。(J-B)

Q：オンサイトで情報を出すことはできるか？（A-A）

A：出来るが今回の事業テーマには入っていない。今回は線量がどれだけか、CFD と線量計算でデータが取れる。統計的、確率的には今までの考え方で良さそうだ。(J-B)

Q：OSCAAR との違いはどの位になるか？（A-A）

A：数 km などの近傍域では違いが出てくる。数 km 拡がったらサブマージョンも同程度になる。UPZ については、細かくやっても変わらないが、尤度が出てくる。対策の合理性が示せる。(J-B)

Q：ベントの時にメリットはあるか？（A-A）

A：統計的処理をやると変わらない。一つのイベントごとにやると値が小さくなる。今のが保守的なので、対策の合理性が説明できる。もう少し合理化できる。(J-B)

C：CFD の大気拡散モデルは、中国でも文献が出ている。規制庁では、当初 30km 圏内を CFD シミュレーションと考えていたが、気象モデルとは異なる結果となった。最近は、数 km を高分解モデルで考えて、あとは気象モデル、という方向だろう。爆発などでは、乱流現象を CFD で精密に解くと考えていたが、逆に乱流現象で拡散し、実際には濃度が低減してしまう。(J-A)

Q：被ばく評価において、室内のヨウ素の再浮遊の分は線量評価をしたか？（J-B）

A：屋外屋内では、ヨウ素こみで考えた。セシウムについてはやった。ヨウ素は室外について、事故直後のヨウ素の再浮遊はやってはいない。(A-A)

C：門脇モデルでは、沈着、光化学反応も含めてモデル化した。(J-B)

Q：CFD での室内解析の文献を調査したが、風速との関係性はどうか？また建屋の新旧の違いは？（J-A）

A：風速が変わると自然換気率が変わる。新潟大の赤林先生が風速変化と建物建蔽率、隙間相当面積、自然換気率の関係を 1994 年に図にまとめている。(A-A)

Q：室内 CFD については、最近は LES で時空間変化を見るという本格的なものはない。ダクトや通風口を置いて仮想的な想定のシミュレーションをやっている。LES では、境界条件やモデリングをきちんと考える必要がある。屋内流の解析において、今後の戦略は何かあるか？（J-A）

A：今後の方向性は特に考えてはいない。(A-A)

A：CFD はあまりやっていない。(J-G)

A：我々の出発点は OSCAAR なので、CFD や LES を使うという展開をしていくかは未定だ。(A-A)

Q：室内の LES や RANS の解析では、風速が無くても拡散が早い。室内に拡がる拡散時間が短い。これが被ばくの際に影響があるかどうか。LES で解析した結果、室内に大きく拡がる、一様に拡がる。沈着が一様な場合の被ばく評価となる。この辺について、A-A のコメントがほしい。（J-A）

Q：再浮遊係数については、J-G が実験を行った。何か知見は？（A-A）

A：高さの情報については、知見がある。床から 50cm、1m で再浮遊係数の違いを調べたところ、粒径や風速により、2 倍程度違いが出る場合もある。床面から 10 ㎝、15 ㎝と 50 ㎝では変わらない。高い部分は拡散して滞留する場合がある。(J-G)

C：通常、屋外の汚染が屋内に入ってくる。屋内の挙動の詳細は、メッセージ性としては弱いが、住民説明に対応できるものがある。(A-A)

Q：体育館のような外部に接していない大きな部屋での屋内拡散については、どうなるか？（A-A）
A：大きな部屋では乱流拡散が支配的だ。（J-A）
Q：陽圧化している場合に、ドアを開けて良いか、など住民からの質問がある。（A-A）
A：コロナの場合など、ドア、窓の効果が調べられている。境界条件がはっきり定義できる場合は、CFD は有効だ。（J-A）
Q：来年度の事業は？（A-A）
A：OSCAAR との比較を考えている。（J-A）

(6) 謝辞とあいさつ

- 今日はどうもありがとうございました。来年度は OSCAAR との比較も実施予定です。CFD は近距離の有効性を示したい。来年もよろしくお願いします。（J-B）

3.5 日本原子力研究開発機構（安全研究センター②）

日　時：2025 年 2 月 4 日（火）13:00-14:10
形　式：オンライン
参加者：JAEA・原子力安全・防災研究所・安全研究センター　A-B
JAEA・原子力安全・防災研究所・安全研究センター受託事業担当者 J-A、J-B
事務局　C（再委託事業者）

・ヒアリング先：JAEA・原子力安全・防災研究所・安全研究センター　A-B
・ヒアリング元：JAEA・原子力安全・防災研究所・安全研究センター　J-A、J-B
・ヒアリング内容：

1. 自己紹介（参加者全員）
2. ヒアリング目的説明（J-A：2～3 分）
3. ヒアリング資料説明（J-A：15 分）
「A-B の出版論文について」
4. ヒアリング資料説明（A-B：20 分）
「内部被ばく線量評価に関する研究」
5. 議論（全員：25 分）
1) 全体的な方向性や重点領域
2) 個別の論文の課題
3) データとモデルの限界
4) 異なる手法間の連携
5) 実社会への影響　大気環境シミュレーション全般における成果（手法）と課題
6. 謝辞とあいさつ（J-B）

・議事

(1) 自己紹介

- 安全研究センターの J-A です。規制庁の受託事業で、昨年は、放射性物質大気拡散について、CFD を活用して高分解能化を図る目的で文献調査を行った。今年度は被ばく評価に関する文

献調査を行っている。(J-A)

- J-A の事業に参加している。大気拡散シミュレーションを担当している。(J-B)
- 安全研究センターの A-B です。内部被ばくの線量評価担当（A-B）
- 事務局を担当している C です。(C)

(2) ヒアリング目的（J-A）

- 事業目的を説明した。規制庁の受託事業で、原子力施設事故時の放射性物質大気拡散について、昨年は CFD を活用して高分解能化のための文献調査を行った。今年度は被ばく評価の文献調査を行っている。今回は安全研究センターの A-B にプレゼンをお願いしたい。

(3) ヒアリング資料説明（J-A）

- 今回の事業テーマに関係のある A-B のこれまでの主な論文(下記)について、論文の要約、課題などをまとめて紹介した。
  1) Comparison of internal doses calculated using the specific absorbed fractions of the average adult Japanese male phantom with those of the reference computational phantom-adult male of ICRP publication 110 （平均的な成人日本人男性ファントムの特定の吸収率を使用して計算された内部線量と、ICRP 出版物 110 の参照計算ファントム - 成人男性のそれとの比較）[3-20]
  2) Microdosimetric Analysis Confirms Similar Biological Effectiveness of External Exposure to Gamma-Rays and Internal Exposure to ^{137}Cs, ^{134}Cs, and ^{131}I (2014) （マイクロ線量測定分析により、ガンマ線への外部被ばくと ^{137}Cs、^{134}Cs、および ^{131}I への内部被ばくの生物学的効果が同様であることを確認）[3-21]
  3) Development of a stochastic biokinetic method and its application to internal dose estimation for insoluble cesium-bearing particles(2018) （確率的生体動態法の開発と、不溶性セシウム含有粒子の内部線量推定へのその応用）[3-22]
  4) Development of a function calculating internal dose coefficients based on ICRP 2007 Recommendations (ICRP 2007(2019) 勧告に基づく内部線量係数を計算する関数の開発）[3-23]
  5) Estimating internal dose coefficients of short-lived radionuclides in accordance with ICRP 2007 recommendations （ICRP 2007 (2019) 勧告に従って短寿命放射性核種の内部線量係数を推定）[3-24]
  6) Organ Absorbed Dose Estimation Reflecting Specific Organ Masses with Simple Scaling of Reference Doses Using the Organ Masses (2020) （臓器質量を使用して基準線量を単純にスケーリングし、特定の臓器質量を反映した臓器吸収線量の推定）[3-25]
  7) Variation of Internal Doses Caused by Differences in Physical Characteristics between the Average Japanese and the ICRP's Reference Man Which Is Based on the Standard Data of Caucasians in the Dosimetric Methodology in Conformity to the 2007 Recommendations(2021) （平均的日本人とコーカソイドを基準にした ICRP 標準人との体格の違いに起因する 2007 年勧告に準拠した線量評価法における内部被ばく線量の変動）[3-26]

8) Validating the application of the revised ICRP's biokinetic models for organic ^{14}C and organically bound tritium to members of the public (2024)（^{14}C 標識有機物及び有機結合トリチウムに関する ICRP の体内動態モデル改訂版の一般市民への適用検証）[3-27]

(4) ヒアリング資料説明（A-B）

- まず、内部被ばく線量評価とは、非常に複雑な手順で、実効線量を評価することだが、それには線量係数の評価が必要となる。実効線量(Sv)＝摂取量(Bq) X 線量係数(Sv/Bq)の関係式で示される。ここでは大きく 4 つのテーマ、1) 核種の物理的・化学的性状の解明、防護対策に資するデータ取得、2) 内部被ばく線量係数計算プログラムの開発、3) 標準人と異なる体格の考慮、4) 不溶性微粒子の扱い、についてプレゼンする。
- テーマ 1 では、核種についてのデータや放射線吸収割合、放射線加重係数などを調べて必要なデータを収集、テーマ 2 では、ICRP2007 の勧告を取り入れるが、ICRP では、半減期 10 分未満のデータは提供していない。一方日本独自の基準ではこのデータが必要となる。テーマ 3 では、線量当たりの吸収エネルギーは、体格の違いで線量係数に影響する。平均的な成人日本人の体格特性を反映した線量係数を求めた。テーマ 4 では、不溶性微粒子を多数吸入した場合、取り込む経路も考慮して確率的に示す。具体的には、乱数で沈着部位、移行経路、保持時間を求めて決定する。これを確率論的体内動態法(SB 法)と呼んでいる。このコードを通常の評価法である DCAL コードと比較して検証し、SB 法の試行回数の増加により平均値が DCAL 評価値に漸近することを確認した。
- サブマージョン、サブマージョン核種とは、吸い込んでも体内に溶けない微粒子で、ここでは内部被ばくと区別して「内部照射」と呼ぶ。ICRP では現在、濃度限度のみを示している。

(5) 質疑（Q：質問、A：回答、C：コメント）

Q：先ほどのプレゼンで、欧米人、日本人の肝臓の重さの違いが大きかったが、この理由は？（J-A）

A：日本人は放医研の調査だが、ICRP の欧米人の調査はやや疑問があり、値が大きめになっている。(A-B)

Q：後半の資料で、「内部照射」は気道内の空気中に依存するのか？（J-A）

A：体内のどこにあっても変わらない。たとえば Ar-30 は、内部照射 100%、外部被ばくは 0 である。低エネルギーのものは、外部被ばくは小さくなる。希ガスの Kr-85 は内部被ばく 16%、キセノンは外部被ばくが主である。これらは、内部照射を考えなくても大問題にはならない。(A-B)

Q：β の場合はどうか？（J-A）

A：外部、内部とも考慮されている。半無限空間では、外部被ばくは地面からの基礎割合だが、内部被ばくの場合は肺胞表面で制動エックス線が出るが空間としては狭いので β がエネルギー寄与する。電子は沈着エネルギーを評価するが、こうした場合の内訳データはない。(A-B)

Q：長寿命核種で内部照射が効くのは？（J-A）

A：あまりない。(A-B)

Q：希ガスが室内拡散した場合、重い核種の重力沈降などはあるのか？（J-A）

A：濃度次第で薄い場合は関係ない。薄い場合は混ざって空気と一緒に動く、空気中に CO_2 があっ

ても、濃度が薄ければ空気と同じ様に動く。(A-B)

Q：セシウムの不溶粒子の動態は？（J-A）

A：オンサイトの作業者で、セシウムを吸入し、放医研の調査において、年単位で身体に残った例があった。こうした場合の線量評価の必要がある。不溶性微粒子を吸入したとき、数 Bq の塊が身体の中を動く。肺に留まっていた時被ばくが大きくなる。(A-B)

Q：どれくらい大きくなるのか？（J-A）

A：ポイントは、1F 事故とは無関係で、PM の動態調査の結果、リンパを通じて体内を流れていくことが分かった。それを線量評価した。肺胞沈着粒子の一部がリンパへ移行する。これがどれ位の比率で動くのかを、乱数でモデル化した。多数の場合は、ICRP の結果と一致する。(A-B)

Q：ICRP の新基準の日本への導入はどれ位進んでいるのか？（J-A）

A：外部被ばくについて、2007 勧告は、具体的に日本でどう導入していくか議論中で、R7 に検討部会の予定だ。内部被ばくについては、作業者の計算は可能だ。公衆被ばくデータはこれからだ。早くても R8 年中に揃う。データが出そろったら、審議会で外部被ばく、内部被ばくを分けて作ることになる。(A-B)

C：「内部照射」は内部被ばくに入るはずだ。核種ごとに濃度限度が示される。(J-B)

Q：こうした研究は大事だと思うが、研究者は何人くらいか？委員会から法令までの動きは？また国外の研究者や、日本の寄与などについて聞きたい。(J-A)

A：内部被ばくについては、計測やモニタリングを含めて、5 人位でモデルづくりもやっている。法令の検討部会は、放射線防護の関係者だが、数値データを出せる人はほとんどいない。ICRP のコミティグループには日本人はいない。何か貢献する場合は、コミティメンバーを通じて働きかけをする。(A-B)

Q：事業者からの内部照射の影響評価については何か依頼などあるか？（J-A）

A：事業者には希ガスの暴露に問題意識があるようで、問い合わせがあった。最新のデータでモンテカルロをやっている例はない。(A-B)

C：廃炉などでは、課題として重要だ。(J-A)

(6) 謝辞とあいさつ

- 議事録の概要は、2,3 ページにまとめる。3 月末に最終版を作成する予定だ。(J-A)
- どうもありがとうございました。何かあったら相談したい。事業での協力をお願いします。(J-B)

3.6 日本原子力研究開発機構（原子力基礎工学研究センター）

日　時：2025 年 2 月 6 日（木）10:00-11:10

形　式：オンライン

参加者：JAEA・原子力科学研究所・原子力基礎工学研究センター K-A
JAEA・原子力安全・防災研究所・安全研究センター受託事業担当者 J-A、J-B
事務局　C（再委託事業者）

・ヒアリング先：JAEA・原子力科学研究所・原子力基礎工学研究センター K-A

・ヒアリング元：JAEA・原子力安全・防災研究所・安全研究センターJ-A、J-B

・ヒアリング内容：

1. 自己紹介（参加者全員）
2. ヒアリング目的説明（J-A：2～3 分）
3. ヒアリング資料説明（J-A：15 分）
   「K-A の出版論文について」
4. ヒアリング資料説明（K-A：40 分）
   「原子力施設事故に伴う大気拡散に係る被ばく線量評価の高度化について」
5. 議論（全員：10 分）
   1) 全体的な方向性や重点領域
   2) 個別の論文の課題
   3) データとモデルの限界
   4) 異なる手法間の連携
   5) 実社会への影響　大気環境シミュレーション全般における成果（手法）と課題
6. 謝辞とあいさつ（J-B）

・議事

(1) ヒアリング目的（J-A）

- 事業目的を説明した。規制庁の受託事業で、原子力施設事故時の放射性物質大気拡散について、CFD を活用して高分解能化を図る。被ばく評価でも高分解能化をする場合、この可能性を知りたい。何が課題になるか、境界条件、モニタリングの用意など。課題を抽出して規制庁に JAEA の考え方を伝える。
- 昨年は CFD の高分解能化の文献調査を行い、今年度は被ばく評価の文献調査を行っている。これまでのヒアリングでは、①東大の A 教授、②JAEA の A-A、③JAEA の A-B に話を伺い、④今回、JAEA の K-A に話を伺う。研究内容の現状と課題についてヒアリングしたい。

(2) 自己紹介（J-B は遅れて参加）

- J-A
- C
- K-A

(3) ヒアリング資料説明（J-A）

- 今回の事業テーマに関係のある K-A のこれまでの主な論文について、論文の要約、課題などをまとめて紹介した。
  1) Organ doses of the fetus from external environmental exposures（2021）
     外部被ばくが妊娠 24 週の胎児に与える臓器線量を評価する係数を提要する[3-28]
  2) Development of local-scale high-resolution atmospheric dispersion model using large-eddy simulation part.6: introduction of detailed dose calculation method (2021)
     LOHDIM-LES の開発と詳細な線量計算方法の導入[3-29]
  3) Improvements in the particle and heavy-ion transport code system (PHITS) for simulating neutron-response functions and detection efficiencies of a liquid organic scintillator

粒子・重イオン輸送コードシステム(PHITS)の改良[3-30]

4) Development of local-scale high-resolution atmospheric dispersion and dose assessment system（2022）局所スケールの高解像度大気拡散および線量評価システム(LHADDAS)の開発[3-31]

5) SUMARY:R and Python Codes for Calculating Cancer Risk Due to Radiation Exposure of a Population (2023) 被ばくに関連するガンリスクの定量的評価を行う計算コード「SUMARY」の開発[3-19]

6) Dose-rate coefficients for external exposure to radionuclides uniformly distributed in soil to an infinite depth (2024) 環境中の放射性核種、土壌中に均一に分布する放射性核種の線量率係数を算出する[3-32]

(4) ヒアリング資料説明（K-A）

「原子力施設事故に伴う大気拡散に係る被ばく線量評価の高度化について」

- 外部被ばく線量評価は、大気拡散分布（線源分布）の違いで評価手法が異なる。一様分布では人体の周りに線源が一様に分布しているとする。放出源から離れたところでは、十分に拡散する。核種の違い、エネルギーの違いはあるが、分布形態は一様とする。この場合はモンテカルロ法（PHITS）が使われる。また、古くからデータ、コードとも色々ある。US-EPA FGR15、ICRP Publication 144、WSPEEDI、OSCAAR などがある。
- 非一様の場合は、放出源近傍で、一様分布になっていない場合で、分布形状は無数にあり遮蔽物の考慮も必要となる。モンテカルロ法は強力だが分布ごとに計算するため時間がかかる。従って手法としては簡易計算が多い。使われるのは点減衰核法と呼ばれるもので、直接線、大気散乱線を考慮できる。地表面からの戻りは不得意、二媒質なら可能なものがある。
- SIBYL は、これとは異なり、応答関数を使っている。大気を 3D、地上面を 2D で、空間を最小 1m のグリッドに分割する。SIBYL では、モンテカルロ法の結果を応答関数に反映させている。評価範囲は 500m までとしている。その理由は、大気中で散乱しない距離（平均自由工程）は、たとえば ^{137}Cs では 100m ほどで、この 3 倍あれば評価領域として十分である。また SIBYL では、建物など地表面の起伏を考慮できる。障害物中の線量の減衰は、障害物中の距離と材質、密度による。こうした障害物が考慮できるコードはほかではあまり見たことがない。検証としては、ガウスプルームを PHITS の結果と比較した。結果はほぼ同じ分布となり、計算時間は 1 万倍以上速い。また市街地を想定したケース、地表面に沈着しているケースも検討した。

  SIBYL の将来の計画としては、解像度を少し粗くして評価範囲を広げることを考えている。また、局所的に解像度を上げるようなマルチ解像度も考えている。たとえばモニタリングポストがある場合などだ。市街地の例では非定常のプルームに対して、PHITS ではビルで散乱したり、大気で散乱して裏側に回り込むものも評価できるが、SIBYL の場合は、アンダーエスティメイトになってしまうが、重要なのは線量率が高い場所である。SIBYL は、MPI とメモリ共有のハイブリッドの並列計算に対応している。SIBYL には可視化ツールもあり、Paraview を使う。LHADAAS も GUI を開発中、LOHDIM を制御して、大気拡散、線量評価も可視化できる。

(5) 質疑（Q:質問、A:回答、C：コメント）

Q：SIBYL では、応答関数を作るとき、平面大地の応答関数、構造物があるときは減衰関数を考慮して作れば、PHITS と同じ結果が得られるという理解で良いか？（J-A）

A:その通りだ。地域を限定しサイトにより構造物が決まっていれば、その応答関数を使えば PHITS と同じ結果が得られる。たとえば原科研用の応答関数を作ればよい。現状では汎用性を重視して、任意の地域で使えるようにしている。今まで事前計算していない地域であっても迅速に計算できるようにしている。（K-A）

Q：これまでの文献調査で、応答関数の用意がない地域について、中国では FFT を使って 3 次元積分をするという手法があった。オーダー的に速く計算できる。広域で解像度を上げた場合、積分量が増えるが N のオーダーで早くなる、という手法があった。また、SIBYL では積分を総和で置き換えているが、この部分での並列化は、応答関数を分割して並列化しているか、並列化のポイントは？（J-A）

A：3 次元積分に FFT を使う論文は把握していなかった。積分部分は計算時間がかかるので、その論文を読みたい。ありがとうございます。並列化は 2 か所で、まずプルームの領域でグリッド分割する、次に応答関数の総和の部分も並列化している。（K-A）

Q：計算のレスポンスタイムについては？非定常のプルームで濃度が変化するとき、どの程度の応答速度か？（J-A）

A：問題の設定による。全領域の計算が必要な場合と、モニタリングポスト周辺だけの場合などで違う。1 グリッドのみの点を何地点か計算するときは、SIBYL はほぼ逐時で結果が得られる。この場合、SIBYL より大気拡散の方に時間がかかる。全域では相当時間がかかる。大気拡散も線量評価もリアルタイムとはかけ離れて、数時間のオーダーになる。ここでは、即時解析ではなく事前事後の解析をターゲットにしている。（K-A）

Q：大気拡散での放射性物質の濃度分布と、それを線量評価した結果の違いは？濃度分布が分かれば相当分かるのでは？リアルタイムで線量分布を出す必要性は？（C）

A：危ないか危なくないかは濃度分布で判断できるが、人体への影響は線量評価が必要だ。それをモニタリングなどと比較する必要がある。（K-A）

(6) 謝辞とあいさつ

- ヒアリングの結果は議事録にまとめて送る。確認と加筆訂正をお願いしたい。報告書にまとめる。今後質問などのメールのやり取りをお願いしたい。今回の発表資料を送ってほしい。(J-A)
- 今日はどうもありがとうございました。SIBYL をまだ十分理解していない人がいるので今日の発表の機会は良かった。（J-B）

3.7 日本原子力研究開発機構（システム計算科学センター）

日　時：2025 年 3 月 26 日（水）11:30-12:30

形　式：オンライン

参加者：JAEA・システム計算科学センター　S-A

JAEA・原子力安全・防災研究所・安全研究センター受託事業担当者 J-A 他

事務局　C（再委託事業者）

・ヒアリング先：日本原子力研究開発機構・システム計算科学センター　S-A
・ヒアリング元：JAEA・原子力安全・防災研究所・安全研究センター　J-A 他
・ヒアリング内容：

1. 自己紹介（参加者全員）
2. ヒアリング目的説明（J-A：2～3 分）
3. ヒアリング資料説明（S-A：30 分）
   「S-A の出版論文について」
4. 議論（全員：20 分）
5. 謝辞とあいさつ（J-B）

・議事(敬称略)

(1) ヒアリング目的（J-A）

- 2000 年以降、計算の高度化につれて被ばく評価も進んできた。被ばく評価の現状、課題、を知りたい。
- 事業目的について、規制庁の受託事業で、原子力施設事故時の放射性物質大気拡散について、CFD を活用して高分解能化を図る。被ばく評価でも高精度化をする場合、この可能性を知りたい。何が課題になるか、また提言などがあればお願いしたい。これらを報告書にまとめて規制庁に伝えたい。

(2) 自己紹介ほか

- J-A : 今回は、チェルノブイリ、福島などの被ばく、環境、人体の内部被ばくの研究を広範囲に実施されてきた S-A にプレゼンテーションをお願いしました。

(3) ヒアリング資料説明（S-A）

- 今回の事業テーマに関係のある、これまでの主な 7 編の論文をもとにプレゼンテーションを行った。

1) Saito K, Wittmann A, Koga S, Ida Y, Kamei T, Funabiki J, Zankl M: Construction of a computed tomographic phantom for a Japanese male adult and dose calculation system. Radiat. Environ. Biophys. (2001) 40: 69-76.[3-33]
   ✧ CT データを基に日本人ボクセルファントムを開発したことについて記載した論文。東洋人のボクセルファントムが開発されたのは初めてで、これをきっかけに、複数の東洋人を対象としたボクセルファントムが開発された。これらの動きを踏まえ、ICRP は 2009 年に Publication 110 にてボクセルファントムを初めて標準ファントムとして定義した。

2) Saito K, Ishigure N, Petoussi-Henss N, Schlattl H: Effective dose conversion coefficients for radionuclides exponentially distributed in the ground. Radiation and Environmental Biophysics (2012) 51:411-423.[3-34]
   ✧ 地中に指数関数分布した線源に対する被ばく線量を計算するための線量換算係数をドイツの GSF で開発されたボクセルファントムに対して評価し、表としてまとめたものである。深度分布 β の条件を細かく設定している。

3) Saito K, Petoussi-Henss N: Ambient dose equivalent conversion coefficients for radionuclides distributed in the ground. J. Nucl. Sci. Technol. 51, 1274-1287 (2014).[3-35]
   ✧ 地中に指数関数分布した線源に対する沈着量から空間線量率（周辺線量当量率）への換算

係数をシミュレーションにより求めた文献。規制庁の放射能測定法シリーズにも参照され、広く使用されている。

4) Saito K, Tanihata I, Fujiwara M, Saito T, Shimoura S, Otsuka T, Onda Y, Hoshi M, Ikeuchi Y, Takahashi F, Kinouchi N, Saegusa J, Seki A, Takemiya H, Shibata T: Detailed deposition density maps constructed by large-scale soil sampling for gamma-ray emitting radioactive nuclides from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident. J. Environmental Radioactivity, 139, 308-319 (2015) doi: 10.1016/j.jenvrad.2014.02.014.[3-36]

✧ 文科省事業として事故直後に福島地域の 2,200 箇所で土壌試料を採取、分析して放射性核種の沈着量マップを作成した調査の結果についてまとめた論文。福島地区の初期汚染状況を示す基本データとして広く使用されてきた。UNSCEAR2013, 2020 年報告書における外部被ばく評価は、この調査で得られた沈着量分布が基礎データとして用いられている。

5) Saito K, Mikami S, Andoh M, Matsuda N, Kinase S, Tsuda S, Yoshida T, Sato T, Seki A, Yamamoto H, Sanada Y, Wainwright-Murakami H, Takemiya H: Summary of temporal changes in air dose rates and radionuclide deposition densities in the 80 km zone over five years after the Fukushima Nuclear Power Plant accident. J. Environ. Radioact. (2019).[3-37]

✧ 事故直後から 5 年間の空間線量率の変化傾向の特徴を、文科省・規制庁の大規模環境モニタリングの結果をもとにまとめた論文。UNSCEAR2020 年報告書において、線量の経時変化を評価する上で当論文及び関連した複数の論文が参照され、2013 年報告書における予測に比べて顕著に遅い空間線量率の減少傾向モデルが作成された。

6) Petoussi-Henss N, Satoh D, Endo A, Eckerman KF, Bolch WE, Hunt J, Jansen JTM, Kim CH, Lee C, Saito K, Schlattl H, Yeom YS, Yoo SJ: Dose Coefficients for External Exposures to Environmental Sources. ICRP Publication 144 (2020).[3-38]

✧ 環境中に分布した典型的な線源（空中一様分布線源、地表面沈着線源、水中一様分布線源）から人体が受ける被ばく線量を計算するための換算係数を国際放射線防護委員会(ICRP)がまとめた報告書である。文献 1 の手法を発展させてシミュレーションが行われた。この換算係数は UNSCEAR2020 報告書においても被ばく線量評価に使用された。

7) Sakuma K, Kurikami H, Wainwright H, Tanimori S, Nagao F, Ochi K, Sanada Y, Saito K: Integrated radiation air dose rate maps over the 80 km radius of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant and the entire Fukushima Prefecture during 2011–2022. J. Environ. Radioact. 280 (2024).[3-39]

✧ 福島地区で複数の機関で実施されてきた大規模環境モニタリングの結果を統合した空間線量率マップに関する論文。JAEA と LBNL が開発した手法を発展させ、2011-2022 の期間の福島県全域に対する統合マップを作成した。今後、様々な観点から線量評価の高度化に貢献することが期待される。

- 第 1 の論文(2001)について：ファントム人体モデルの作成と被ばく線量評価、環境中での線量評価を行った。日本人のファントムの作成、放射性防護では、西洋人の標準体型の人体モデルに代わって、日本人のファントムを作り、その差がどの位かを評価した。従来は数値ファントムというのがあったが、CT スキャンのデータを用いてセグメンテーションを行い、実際に近

いファントムを作って、EGS4 のモンテカルロコードで評価した。結果としては西洋人と日本人の差は、外部被ばくではそれ程大きくない、低い線量のγ線や内部被ばくについては詳細モデルが必要、しっかりしたモデルが必要と分かった。その後、標準日本人ファントムを作り線量計算を行った。韓国、中国でも東洋人のボクセルファントムが複数作られた。こうした活動を基に、その後 ICRP ボクセルファントム、年齢別標準ファントム構築につながった。

- 第 2 の論文(2012)について：線量換算係数を地中に指数分布した線源について計算した。GSF ヘルムホルツ研究所にて、ドイツのファントムを作った。環境中の被ばく線量評価手法を用いて、実効線量換算係数を計算した。2019 年に ICRP が正式に環境中での放射性核種の濃度からの換算係数をまとめた。まず、ファントムが無い状態で環境中のγ線場をもとめ、それを 2 次線源として、ファントムを置いて評価した。現在あるのは、単純化した環境中の評価を行い、水平方向一様として、環境中の線源でも空中に一様分布したものに基づくが、実際には複雑な線源分布で、横一様でなく、ガウス分布などの場合など、現状の標準的な分布による係数が、実際にどう変わっていくか、検討が必要だ。
- 第 3 の論文(2014)について：空間線量への換算係数を求めた。地中に指数分布した線源での空間の線量分布を求めた。かつては、空気カーマ、空気吸収線量の換算係数で、自分が整備して ICRP のレポートとしてずっと使われてきた。それに代わって近年は周辺線量等量を用いるが、そのための換算係数整備を行った。規制庁の環境放射能測定法シリーズでも、この値が使われている。福島後のデータでも、検証したが、値は良く合っている。ただし、実効線量等量との関係は、周辺線量等量の値が過大評価となっている。環境測定の基準値としては、環境中での標準線量には、物理的に変わらない空気カーマ、の方が適切でないか、と考えている。
- 第 4 の論文(2015)について：福島事故の後、大規模調査を行った。80 ㎞圏、100 ㎞圏内の地表サンプルマップを作成した。2200 地点で 1 万 1000 点の土壌サンプルにより作成した。セシウム、ヨウ素、テレル、リンなど。2011 年 6 月のマップは、標準的な汚染のマップとして使われ、UNSCEAR(国連科学委員会)の 2013 年、2020 年のレポートでは、外部被ばくの基礎データとなっている。今回の調査で、詳細なマップが作成されたことは大きな成果だ。福島事故前までは、実際の大規模事故は想定されていなかった。事故の可能性はあるので、大規模な調査が行える体制を取っておくことは重要だ。大規模調査の経験、調査を将来に役立てて行く必要ある。
- 第 5 の論文(2019)について：福島事故後の 5 年間の変化をまとめた。空間線量率、核種変化、沈着密度の 2011 から 2016 の変化を追った。経時変化の特徴は、人間の生活環境では、物理減衰に比べて空間線量率が相当早く減少する。それは①地中への核種の浸透、これはγ線の遮蔽が大きく、5 年間で 25%程度だ。次に②除染の影響、平均で 20%線量率を下げた。③横方向へのセシウムの移動により最大 30%減少、これは道路や人工構造物に付着したものが流されやすい。こうした原因もある程度わかってきた。この知見を元に UNSCEAR2020 年の報告で空間線量率の経時変化のモデルが作られた。今後も経時変化の観測を続ける必要がある。将来予測を正確にするにも必要だ。
- 第 6 の論文(2019)について：ICRP が換算係数についてまとめたもので、自分の手法を発展させたものが使われ、著者として加わった。
- 第 7 の論文(2024)について：空間線量率の統合マップを作成した。全体の傾向を把握するための航空機サーベイは高度 300m なので、精度、分解能とも劣る。地上での定点観測、歩行測定、

自動車による移動測定などは正確だが出来る範囲が限られる。異なる手法を生かしながら、調査結果を統合したマップを、JAEA と LBNL が共同して手法を開発した。2011 年から 2022 年まで、隔年でマップを作成している。このマップは信頼がおける。位置分解能が良い。このマップで、経時変化など、地域的な特徴などが解析できる。統合マップをもとに将来予測モデルや、経時変化の詳細解析、除染の効果解析にも使える。

- これまでのプレゼンをまとめると、ファントムによる被ばく線量評価、環境測定の研究を行い、福島後は、大規模調査や結果の解析を行ってきたということだ。

(4) 質疑（Q:質問、A:回答、C：コメント）

Q：規制庁受託事業では、事故時大気拡散の被ばく評価を高精度化し、施設近傍での避難計画や防護計画の策定に使う予定だ。被ばく評価、屋内避難の場合の知見として、大気拡散、クラウドシャイン、グランドシャイン、屋内の被ばく線量などに関して、文献調査を行っている。たとえば、事故後に屋内退避した場合の線量評価をするため、地上 1m で、家の中の中心にファントムを入れて被ばく評価をやる必要があるか？（J-A）

A：今回の事業で目的としているのは、事後直後の話だろう。直後の線量評価では、人体のファクター以外の要素の影響、不確かさが大きい。事故後の避難策や防護策では、ファントムを家に持ち込んでもあまり意味がない。事故直後の被ばくでは、線源が人間の近くにどの位なのかが重要で、ファントムよりは線源の分布、人間との関係を現実的にモデル化するのが大事だ。事故中に大気拡散計算をし、どういう防護策をとるかでは、内部被ばくの検討もする。外部被ばくの線源分布と、屋内にヨウ素などがどの位入るかが重要だ。建物の低減効果の評価、線源と人間との位置関係が重要だ。（S-A）

C：高分解能化、高精度化では、線源の分布を解析するのが重要なポイントと分かった。それがどこまでできるかを探る、それを報告する。整備内容、文献調査の結果として、外部被ばくの線量評価までを行うという点をまとめる。（J-A）

Q：マップの作製に関して、土壌中の分布が指数関数になる点について、どの位の時間を考えればよいか？（J-A）

A：一般的には、直後の地表面近くは、平面線源と考える。指数分布となるのは、少なくとも 1 か月たってからだろう。平面線源の場合、0.5g/㎠ となる深さを想定する。これに地表面粗度や初期浸透量などを考慮する。事故当初は指数分布は考えなくてよい。実環境では、沈着のムラがある。複雑な環境の分布、家、物のどこにどれ位沈着したか、J-E の 3D アドレスのモデルで線源分布も計算出来ればよい。深さよりどこに沈着したかが重要だ。（S-A）

Q：空間部分を細かく評価して最小 10m のメッシュで、プルームの拡散、沈着、空気中線量率を求める。この時、外部被ばくに置き換える換算係数をどう使うか？正確なもの、現実的なものを求める場合は、どこに注意すればよいか？（J-B）

A：空間線量は、PHITS の 3D 計算と同じで、空間線量率から被ばく線量率への換算係数を使えばよい。グレイ→シーベルトは、大人で 0.7 から 0.8 だ。ICRP では、典型的には、横方向は一様、人体直立で考えている。環境条件や、人間の条件で変化する。寝ていると数 10%の大、小がある。単一の換算係数でも、環境条件の違いにより、場合によって換算係数を使い分けてもよい。平均的なものでも、データとして、幅を持って場合分けをしておく。（S-A）

Q：事故直後、空中に線源があるとして、①外部被ばくの場合、どの条件を厳しくするか？②空中の線源でも換算係数は使えるか？（J-E）

Q：空中の線源分布、地表面も次々刻々変化する。どの位の分解能か？（S-A）

A：長さ 10m のメッシュで、時間刻みは 2 分とか 10 分で、空間全体の大きさは UPZ 約 10km、10m 単位が必要か、数 km が 10m 刻み、その先は 100m、PHITS の計算は、全体ではできない。（J-B）

A：①空中の線源についての換算係数もある。しかし、サブマージョンが起こり、均一の分布と考える。事故直後の施設近傍には使えない。PHITS が正確だ。②事故直後は、セシウムは物体の表面にある。（S-A）

C：事故直後では、内部被ばくについては、ヨウ素が重要だ。（S-A）

C：以前、環境省のプロジェクトでは、ヨウ素の濃度分布も求めて、建物への侵入を評価したことがある。（J-B）

C：事故直後の防護策としては、これは非常に重要だ。最適な防護策の研究も重要だ（S-A）

(5) 謝辞とあいさつ

- 今日はどうもありがとうございました。また色々とご相談をさせて頂きます。（J-B）

3.8 まとめ

本事業の目的を達成するため、5 機関のヒアリングを行った（東京大学、日本原子力研究開発機構については、安全研究センターの 2 つの異なる研究チームの他、原子力基礎工学研究センター、システム計算科学センター）。

本ヒアリングを通して、CFD や大気拡散シミュレーションを通して、被ばく評価に至るプロセスの研究開発の実態と現状の課題等が明らかとなった（議事録参照）。屋内での線量評価においては、高精度化の方向性（屋内風況に対し、人体の存在が重要等）について、議論があったが、その精度は、放射性物質の濃度分布の高精度化に依存するとの指摘があった。その一方、上記の濃度分布の高精度化に当たっては、CFD の境界条件等を妥当な範囲で気象条件等を加味して定める必要があり、不確かさを常に意識する必要があるとの指摘もあった。また、上記の高精度化に当たり、使用計算機資源の増大とその確保が課題でもあり、その解決のための研究開発も無視できないことも指摘されている。以上、2 章の文献調査にて得られた結果も、おおよそ上記と同様の議論と課題があることが示されており、研究開発の課題と今後の方向性は、2、3 章を通して、それらの調査結果より判明したと考えられる。

文献リスト

[3-1] 大森敏明, 加藤信介, 金敏植, 糠塚重裕, モンテカルロ法による放射線量の簡易計算法－建物内放射線量の簡易計算法（その１）－, 日本建築学会環境系論文集, 81(727), 835-843(2016).

[3-2] 加藤信介, 感染症対策も視野に入れた CFD 活用室内換気設計, 室内環境, 23(3), 251-260(2020).

[3-3] 金敏植, 加藤信介, 大場良二, 大浦理路, 原子力発電所事故時の放射性物質放出量推定手法の開発, 風工学シンポジウム論文集, 23, 475(2014).

[3-4] 大森敏明, 加藤信介, 金敏植, 糠塚重裕, 戸建て住宅モデルを対象とした空間線量の予測－建物内放射線量の簡易計算法（その２）－, 日本建築学会環境系論文集, 82(735), 481-489(2017).

[3-5] 大浦理路, 金敏植, 大場良二, 加藤信介, 大気汚染物質の放出量推定における精度向上に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 83(744), 171-181(2018).

[3-6] 加藤信介, 風工学における汚染物質輸送解析と逆解析, 日本原子力学会誌 ATOMOΣ, 63(3), 230-231(2021).

[3-7] M. Kim, R. Ohba, M. Oura, S. Kato, Study on long-term radiation exposure analysis after the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident: validation of the EU long-term radiation exposure model (ERMIN), Journal of Nuclear Science and Technology, 53(6), 774-782(2016).

[3-8] 大森敏明, 加藤信介, 有限の地表面に沈着した放射性核種からの線量率の簡易計算法, 保健物理 55(3), 119-135(2020).

[3-9] 大森敏明, 加藤信介, 糠塚重裕, 地表の放射性核種から放出される直接線の平均光子移動距離の理論解と線量率簡易計算への応用, 保健物理, 54(2), 103-114(2019).

[3-10] 神田 玲子, 本間 俊充, 高原 省五, 坪倉 正治, 大迫 政浩, 川口 勇生, 加藤 尊秋, 原子力災害の防護方策の意思決定―リスクトレードオフとステークホルダー関与―, 30(3), 133-139(2021).

[3-11] J. Hirouchi, S. Takahara, K. Yoshimura, Indoor and outdoor radionuclide distribution in houses after the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident, Journal of Environmental Radioactivity, 232, 106572(2012).

[3-12] J. Hirouchi, S. Takahara, H. Komagamine, N. Kato, Y. Matsui, M. Yoneda, Penetration factor and indoor deposition rate of elementary and particulate iodine in a Japanese house for assessing the effectiveness of sheltering for radiation exposures, J Radiol Prot, 41, S139(2021).

[3-13] M. Iijima, S. Takahara, Backward Estimation of Atmospheric Release of ^{137}Cs and ^{131}I Using Total Cumulative Deposition in Terrestrial Areas Following the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident, Health Physics, 121(6), 587-596(2021).

[3-14] K.M. Thiessen, M.Z. Boznar, T.W. Charnock et al., Urban working groups in the IAEA's model testing programmes: overview from the MODARIA I and MODARIA II programmes, J. Radiol. Prot., 42, 020502(2022).

[3-15] S. Takahara, T.W. Charnock, K. Silva et al, Assessment of doses in contaminated urban areas: modelling exercise based on Fukushima data, J. Radiol. Prot., 42, 020517(2022).

[3-16] J. Hirouchi, S. Takahara, H. Komagamine, Uncertainty and sensitivity analyses for the reduction factor of sheltering for radiation exposures, J. Radiol. Prot., 42, 041503(2022).

[3-17] 高原省五, 飯本武志, 五十嵐隆元, 川端方子,「保健物理」に掲載された東京電力福島第一原子力発電所事故関連記事を振り返る ―総論―, 58(2), 50-58(2023).

[3-18] M. Ota, S. Takahara, K. Yoshimura, Soil dust and bioaerosols as potential sources for resuspended 137Cs occurring near the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant, Journal of Environmental Radioactivity, 264, 107198(2023).

[3-19] M. Sasaki, K. Furukawa, D. Satoh, SUMRAY: R and Python Codes for Calculating Cancer Risk Due to Radiation Exposure of a Population, Journal of Radiation Protection and Research, 48(2), 90-99(2023).

[3-20] K. Manabe, K. Sato and A. Endo, Comparison of internal doses calculated using the specific absorbed fractions of the average adult Japanese male phantom with those of the reference computational phantom-adult male of ICRP publication 110, Phys. Med. Biol., 59, 1255(2014).

[3-21] T. Sato, K. Manabe, N. Hamada, Microdosimetric Analysis Confirms Similar Biological

Effectiveness of External Exposure to Gamma-Rays and Internal Exposure to 137Cs, 134Cs, and 131I, PLOS ONE, 9(6), e99831. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0099831(2014).

[3-22] K. Manabe, M. Matsumoto, Development of a stochastic biokinetic method and its application to internal dose estimation for insoluble cesium-bearing particles, Journal of Nuclear Science and Technology, 56(1), 78–86(2018).

[3-23] K. Manabe, K. Sato, F. Takahashi, Development of a function calculating internal dose coefficients based on ICRP 2007 Recommendations, BIO Web of Conferences, 14, 03011(2019).

[3-24] K. Manabe, K. Sato, F. Takahashi, Estimating internal dose coefficients of short-lived radionuclides in accordance with ICRP 2007 recommendations, Journal of Nuclear Science and Technology, 56(5), 385–393(2019).

[3-25] K. Manabe, S. Koyama, Organ Absorbed Dose Estimation Reflecting Specific Organ Masses with Simple Scaling of Reference Doses Using the Organ Masses, Radiation Protection Dosimetry, 189(4), 489–496(2020).

[3-26] K. Manabe, K. Sato, F. Takahashi, Variation of Internal Doses Caused by Differences in Physical Characteristics between the Average Japanese and the ICRP's Reference Man Which Is Based on the Standard Data of Caucasians in the Dosimetric Methodology in Conformity to the 2007 Recommendations, Journal of Nuclear Science and Technology, 59(5), 656–664(2021).

[3-27] T. Masuda and K. Manabe, Validating the application of the revised ICRP' s biokinetic models for organic ^{14}C and organically bound tritium to members of the public, J. Radiol. Prot., 44, 031517(2024).

[3-28] N. Petoussi-Henss, D. Satoh, H, Schlattl et al., Organ doses of the fetus from external environmental exposures, Radiat Environ Biophys, 60, 93–113(2021).

[3-29] H. Nakayama, D. Satoh, H. Nagai, H. Terada, Development of local-scale high-resolution atmospheric dispersion model using large-eddy simulation part.6: introduction of detailed dose calculation method, Journal of Nuclear Science and Technology, 58(9), 949–969(2021).

[3-30] D. Satoh, T. Sato, Improvements in the particle and heavy-ion transport code system (PHITS) for simulating neutron-response functions and detection efficiencies of a liquid organic scintillator, Journal of Nuclear Science and Technology, 59(8), 1047–1060(2022).

[3-31] H. Nakayama, N. Onodera, D. Satoh, H. Nagai, Y. Hasegawa, Y. Idomura, Development of local-scale high-resolution atmospheric dispersion and dose assessment system, Journal of Nuclear Science and Technology, 59(10), 1314–1329(2022).

[3-32] D. Satoh, N. Petoussi-Henss, Dose-rate coefficients for external exposure to radionuclides uniformly distributed in soil to an infinite depth, PLOS ONE, 19(9), e0310552. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0310552(2024).

[3-33] K. Saito, A. Wittmann, S. Koga, Y. Ida, T. Kamei, J. Funabiki, M. Zankl:, Construction of a computed tomographic phantom for a Japanese male adult and dose calculation system, Radiat. Environ. Biophys., 40, 69-76(2001).

[3-34] K. Saito, N. Ishigure, N. Petoussi-Henss, H. Schlattl, Effective dose conversion coefficients for radionuclides exponentially distributed in the ground, Radiation and Environmental

Biophysics, 51, 411-423(2012).

[3-35] K. Saito, N. Petoussi-Henss, Ambient dose equivalent conversion coefficients for radionuclides distributed in the ground, J. Nucl. Sci. Technol. 51, 1274-1287(2014).

[3-36] K. Saito, I. Tanihata, M. Fujiwara, T. Saito, S. Shimoura et al., Detailed deposition density maps constructed by large-scale soil sampling for gamma-ray emitting radioactive nuclides from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident, J. Environmental Radioactivity, 139, 308-319(2015).

[3-37] K. Saito, S. Mikami, M. Andoh et al., Summary of temporal changes in air dose rates and radionuclide deposition densities in the 80 km zone over five years after the Fukushima Nuclear Power Plant accident, J. Environ. Radioact., 210, 105878(2019).

[3-38] N. Petoussi-Henss, D. Satoh, A. Endo et al., Dose Coefficients for External Exposures to Environmental Sources, ICRP Publication 144(2020).

[3-39] K. Sakuma, H. Kurikami, H. Wainwright et al., Integrated radiation air dose rate maps over the 80 km radius of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant and the entire Fukushima Prefecture during 2011–2022. J. Environ. Radioact., 280, 107554(2024).

■ 4 章　局所域高分解能大気拡散・線量評価システム「LHADDAS」

4.1 本章の概要

令和 5 年度の原子力施設等防災対策等委託費（高分解能被ばく評価手法の整備）事業において、高分解能大気拡散モデルの整備に利用可能なシミュレーションモデルとして、原子力機構が開発した局所域高分解能大気拡散・線量評価システム「LHADDAS」が選定され整備が進められた。「LHADDAS」は、大気拡散シミュレーションモデルとして、差分法を用いて LES シミュレーションを行う LOHDIM-LES、格子ボルツマン法を用いる CityLBM と、それらのモデルのシミュレーションから得る放射性物質の大気中濃度分布や地表沈着量分布に基づき放射線量が計算可能な SIBYL からなる。

この LHADDAS を用い、上記事業にて、六ケ所再処理施設周辺 60km 四方を対象とした高分解能大気拡散シミュレーションおよび空間線量率の試解析が実施され、その結果から、①計算時間、②計算リソース、③気流・濃度分布の再現性、④結果の有意性の 4 項目に関する課題が抽出された。そして、これらの課題の解決において、原子力機構で進められている局所域モデルと広域モデルを整合的に結合する大気拡散計算手法が有効となることが提示された。その計算手法とは、LHADDAS と、数 10 ㎞四方より広域を主対象とする大気拡散予測システムである世界版緊急時環境線量情報予測システム WSPEEDI (Worldwide version of System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information)を結合することで、効率的に局所域から広域までの広範囲の大気拡散を連続的に解析する手法である。

その提示を受け、本事業では、LHADDAS および WSPEEDI を試解析用のコードとして選択し、その整備を行う他、実際に試解析を実施し、その性能および特徴、そして、高分解能の大気拡散計算により、広域の被ばく評価を実施する上での課題を抽出し整理する。本章では、これらのコード・システムについて概説する。

LHADDAS および WSPEEDI は、日本原子力研究開発機構が開発し、既に公開済みのコードである他、実際に活用された成果も論文等にて出版されている。なお、現状版が公開され、入手可能である他、今後も開発（改良）が行われ、ユーザーは、最新版をその都度利用できる。

本章(4 章)の概要は以下の通りである。4.2 節では、LHADDAS の中核となる LES コードの LOHDIM-LES とその拡張機能、および広域計算のための WSPEEDI との結合について、4.3 節では、LOHDIM-LES の出力から空間線量率を計算する SIBYL について概説する。

4.2 局所域高分解能大気拡散モデル「LOHDIM-LES」

4.2.1　LOHDIM-LES の基本コード

LOHDIM-LES は、拡散風洞実験手法を参考にして設計されている。図 4-1 は、ハンブルグ大学気象研究所の拡散風洞実験施設を示している[4-1]。実験では、地形や建物の模型を設置した風洞内に大気乱流を模擬した制御風を送り、気流場やトレーサーガスの拡散状態を調べることを目的としている。実験では、縮尺比率に基づく地形や建物模型を用い、限定した気象条件下では、実環境での大気乱流拡散現象との相似性が保証されていることから、環境影響評価などで十分な実績がある。

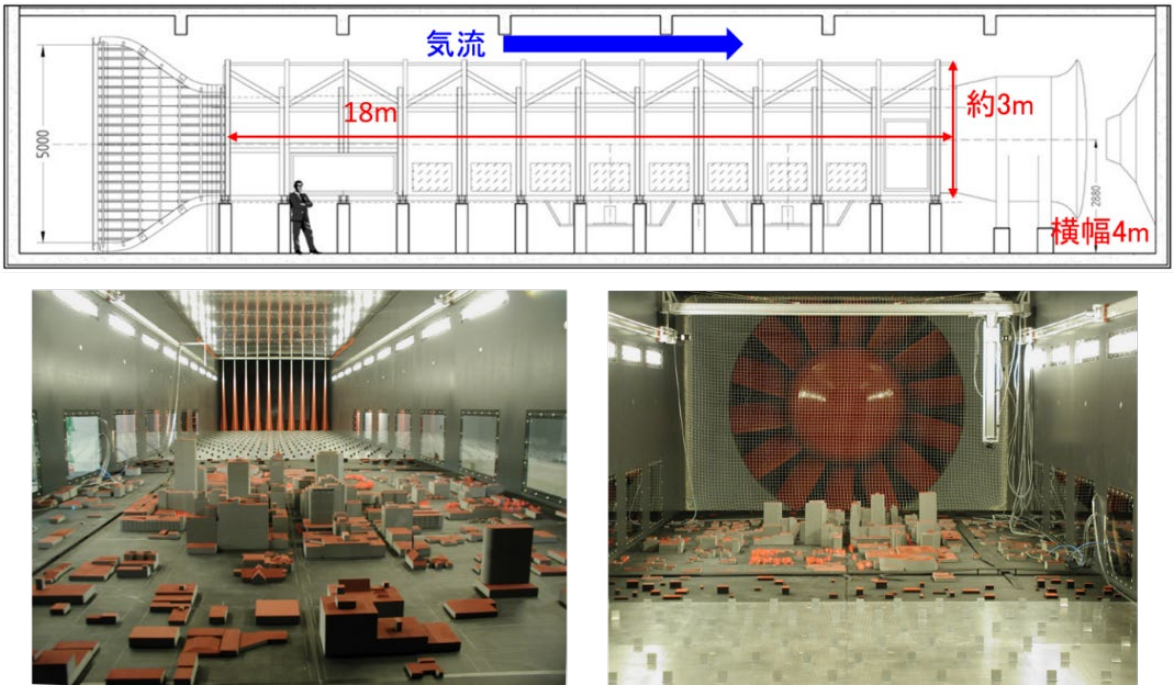


図 4-1　ハンブルグ大学気象研究所の拡散風洞実験施設（上段：実験施設の寸法、下段左側：下流側から見た風洞内の様子、下段右側：風洞気流発生用のファン[4-1]

LOHDIM-LES は、風洞実験手法と同様に、計算領域の上流側に大気乱流を駆動させるための長い助走空間を設け、地表面に障害物を適宜配置させることで、任意の気流・乱流場の生成が行える（図 4-2）。これまで、平坦地形・丘陵地上・単独建物周り・複数の建屋配置などの大気拡散計算が行われ、文献値との比較を通して、流れの衝突・剥離・循環が生じる複雑乱流場での大気拡散挙動に対し、拡散風洞実験と同等の風況場を再現する性能を有することが実証された。実際、本コードを用いると、建物や地形の起伏により生じる乱流効果が直接計算され（図 4-3）、拡散風洞実験と同様の任意の気流・乱流場が生成できる。更に、平坦地形・丘陵・単独建物周りなど、簡易な条件から、流れの衝突・剥離・循環が生じる複雑乱流条件までを対象にした大気拡散計算が可能で、文献値との比較検証により、風洞実験技術と同等の基本性能を有することが実証されている[4-2～4-7]。

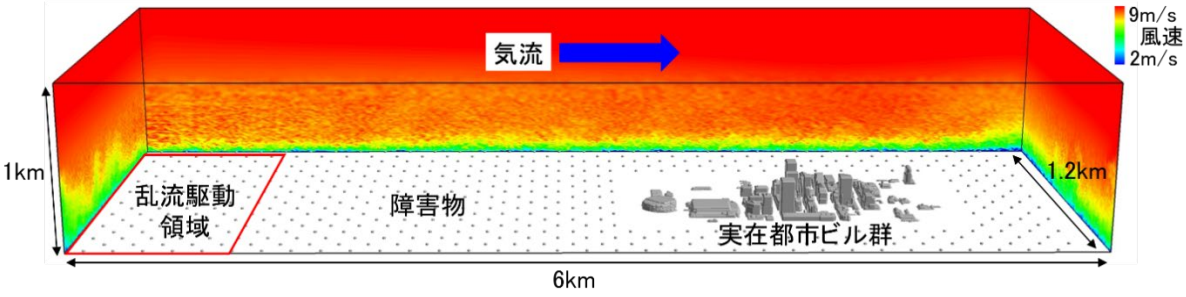


図 4-2　LOHDIM-LES モデルの概念

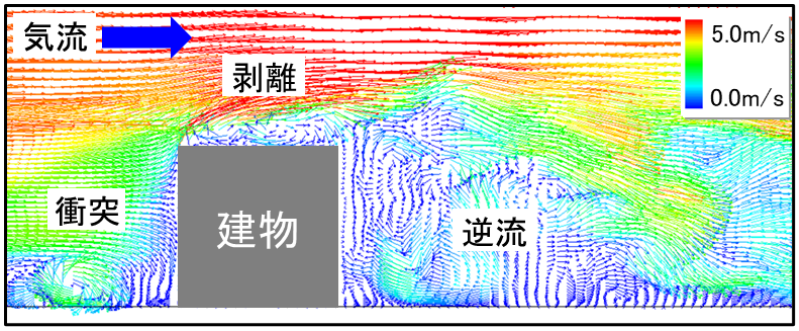


図 4-3　建物周りの風速ベクトル分布

本コードの研究開発の一環として、青森県六ヶ所村の再処理工場で試験運転の際に管理放出された放射性希ガス（^{85}Kr）の大気拡散および線量評価に適用された。まず、放出率・敷地内気象観測データを LOHDIM-LES モデルの入力・境界条件として与え、時間変化する実際の変動気象条件下において排気筒から放出された放射性核種の大気拡散計算が行われた。次に、計算された 3 次元濃度分布から、SIBYL により建物遮蔽効果を考慮した線量計算が実施された。その結果は、敷地内モニタリングポストにおける空間線量率の測定値を良好に再現している[4-8~4-9]。これらの成果を基に、実気象条件下での建物影響を考慮した乱流・拡散・沈着の詳細計算と沈着核種等からの線量評価まで、計算可能な局所域高分解能大気拡散・線量評価システムが開発され、令和 4 年 3 月 5 日にプレス発表が行われている[4-10]。

LOHDIM-LES の基礎方程式は、連続の式(1)、浮力の効果を入れた Navier-Stokes 方程式(2)、温度の輸送方程式(3)、濃度の輸送方程式(4)から構成される。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0, \tag{1}$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j}\tau_{ij} + g\frac{\bar{\theta}-\langle\bar{\theta}\rangle}{\theta_0}\delta_{i3} - F_i, \tag{2}$$

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_j} = -\frac{\partial q_j}{\partial x_j}, \tag{3}$$

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_j} = -\frac{\partial s_j}{\partial x_j}, \tag{4}$$

ここで、u_i, p, ρ, τ_{ij}, g, θ, θ_0, F_i, q_j, c, s_jは、それぞれ風速、圧力、密度、サブグリッドスケール（Sub-grid scale: SGS）のレイノルズ応力、重力、温位、基準温位、外力、SGS ヒートフラックス、濃度、SGS 濃度フラックスを表す。サブスクリプト i および j は座標系を表す（主流方向、$x_1 = x$; スパン方向、$x_2 = y$; 鉛直方向、$x_3 = z$）。オーバーバー $\bar{}$ は、空間フィルター操作により直接計算される大きいスケールの渦と計算格子スケール以下の小さい渦に分離することを意味する。δ_{ij} はクロネッカーのデルタ関数である（δ_{ij} =1, $i = j$; δ_{ij} =0, その他）。アングルブラケッツ⟨　⟩は、空間平均された変数を意味する。

空間フィルター操作により生じた SGS レイノルズ応力τ_{ij}は、浮力効果を考慮した修正型スマゴリンスキーモデル[4-11]を用いると、以下のように近似できる。

$$\tau_{ij} = -2\nu_{SGS}\bar{S}_{ij}, \tag{5}$$

$$\nu_{SGS} = (C_s\bar{\Delta})^2\left(2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij} - \frac{1}{Pr_{SGS}}\frac{g}{\theta_0}\left(\frac{\partial\bar{\theta}}{\partial z}\right)\right)^{\frac{1}{2}}, \tag{6}$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial\bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial\bar{u}_j}{\partial x_i}\right), \tag{7}$$

$$\bar{\Delta} = \left(\bar{\Delta}_x\bar{\Delta}_y\bar{\Delta}_z\right)^{\frac{1}{3}}, \tag{8}$$

ここで、C_s、ν_{SGS}、Pr_{SGS}、$\bar{\Delta}$は、それぞれスマゴリンスキーモデル定数、SGS の渦動粘性係数、乱流プラントル数、計算格子幅を表す。同様に、温位場と濃度場の SGS フラックスに対しても以下のように表せる。

$$q_j = -\frac{\nu_{SGS}}{Pr_{SGS}}\frac{\partial\bar{\theta}}{\partial x_j} \quad , \tag{9}$$

$$c_j = -\frac{\nu_{SGS}}{Sc_{SGS}}\frac{\partial\bar{c}}{\partial x_j} \quad , \tag{10}$$

ここで、q_j, c_j, Sc_{SGS}は、SGS のヒートフラックス、濃度フラックス、乱流シュミット数を表す。外力F_iは、建物、地形や植生群により構成される。

$$F_i = f_{i_ibm} + f_{i_canopy}, \tag{11}$$

建物や地形に起因する乱流効果は、Goldstein が提案した feedback forcing 法[4-12]を用いて、固体表面上で風速が 0 になるようにする。

$$f_{i_ibm} = \alpha\int_0^t \bar{u}_i(x,y,z,t')\,dt' + \beta\bar{u}_i(x,y,z,t'), \tag{12}$$

ここで、α , βは定数である。

植生群に起因する乱流効果は、気流場への抵抗力として表現される。

$$f_{i_canopy} = C_d a(z)\bar{u}_i U, \tag{13}$$

ここで、C_d, $a(z)$, Uは、それぞれ抗力係数、葉面積密度、スカラー風速である。

気流場と温位場に対する地表面の境界条件は、モニン・オブコフ相似則[4-13]に基づき、それぞれ以下のように表せる。

$$\tau_{i3_wall} = -\left(\frac{\kappa\bar{u}_i}{ln(z/z_0)-\psi_M}\right)^2 \tag{14}$$

$$q_{3_wall} = \frac{u_*\kappa(\theta_s-\bar{\theta})}{ln(z/z_0)-\psi_H} \tag{15}$$

ここで、τ_{i3_wall}, κ, z_0, q_{3_wall}, u_*, θ_s は、地表面運動量フラックス、フォンカルマン定数、粗度長、地表面ヒートフラックス、地表面温位である。ψ_M, ψ_Hは、それぞれ運動量、温位場に対する修正関数である。

4.2.2 LOHDIM-LES の拡張機能

高分解能大気拡散計算を迅速に実行するための拡張機能として、LOHDIM-LES 乱流計算により事前作成した風況データベースと、局地気象詳細解析モデル Weather Research & Forecasting Model（WRF）の計算結果を、大気乱流境界層の特性に基づき融合し、3 次元気流場を作成する手法が開発されている。

図 4-4 は、大気乱流境界層特性の概念を示す。大気乱流境界層の底部では、個々の建物影響により、流れの衝突・剥離・循環といった複雑な乱流場が形成される。この地表面から建物高さスケールまではキャノピー層と言われており、気流場の 3 次元性が非常に強く、流れパターンは、建物配置形態により決まる。このキャノピー層の上空では、ラフネス層が形成される。この層では、個々の建物の影響を受ける範囲が建物高さスケールの 2-5 倍程度の高度まで及ぶことが知られている。さらに上空では、建物の影響は弱まり、気流場の特性は、気象条件に支配され易くなる。こうして、気象条件に支配的な建物上空では、WRF 気象データと、気象影響を受けにくく個々の建物影響による 3 次元性の強い複雑乱流が形成されるキャノピー層での LOHDIM-LES 事前計算による平均・乱流成分の風況データベースを融合することで、3 次元気流場の迅速計算が可能となる。

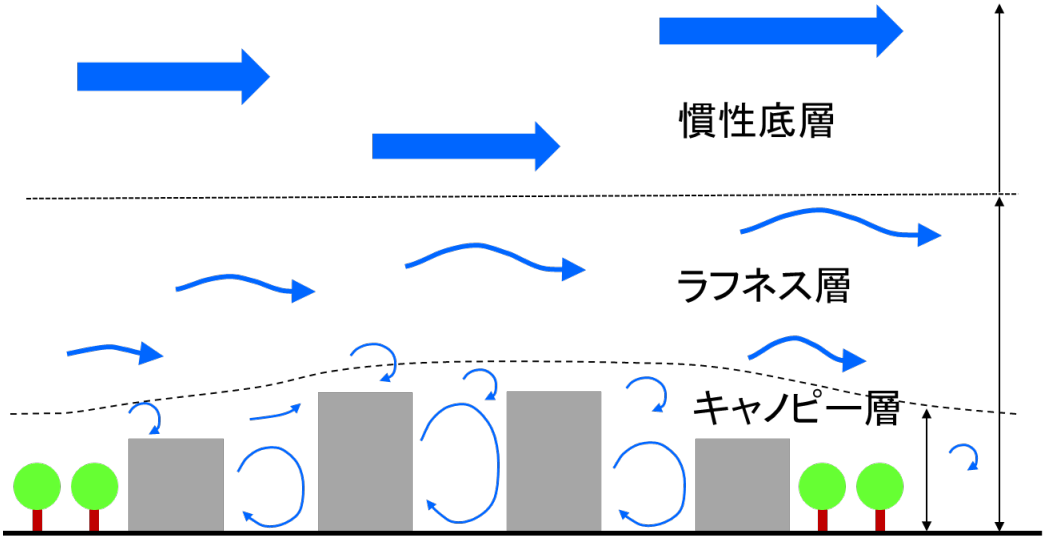


図 4-4　大気乱流境界層の構造

WRF は、大気拡散予測システム WSPEEDI の気象場計算コードとしても採用されており、米国大気研究センターNCAR（National Center for Atmospheric Research）を中心に開発された 3 次元非静力大気力学モデルである[4-14]。WRF は、標高や土地利用等の地理データと数値気象予報値や客観解析値等の気象格子点データを初期・境界条件として、運動量 3 成分、熱エネルギー、水蒸気量、雲水量等についての保存式を解くことにより、対応する風速 3 成分、温位、降水量等の気象要素の時間発展を計算する。この時、雲・降水過程、大気放射過程、地表面過程、大気境界層乱流などの各種物理過程を考慮することが可能である。水平座標系には、地図投影空間における距離直交座標、鉛直座標系には、乾燥大気の静水圧地形準拠座標（η 座標）を採用しており、地球大気の球面を平面として扱う際の歪みや地形の起伏を考慮している。また、予測精度の向上に有用なネスティング計算や 4 次元データ同化（FDDA:

Four Dimensional Data Assimilation）などの機能を有している。ネスティング計算機能は、局地部分を効率的に高解像度で計算する機能であり、粗い格子の広域計算領域の中に詳細格子の局地計算領域を設定して、広域の予測値を狭域の境界条件とした計算を行う。FDDA 機能は、予測結果が客観解析データや観測データから乖離しないように計算値を修正しながら予測計算を進めることで、予測精度を向上させる機能である。

以下、上空の WRF 気象場と下層の LOHDIM-LES 事前計算値によるデータベース気流場の融合計算方法を述べる。まず、LOHDIM-LES により、対象地域の建物・地形起伏を高分解能計算格子で精緻に解像し、代表風速で規定した乱流シミュレーションを実施し、平均・乱流成分の風況データベースを事前に作成する。次に、高さz_{coup}を基準に、各位置(x, y)での WRF による上空の風速データ$U_{WRF}(x, y, z)$と下層の風況データベース$U_{LES}(x, y, z)$を融合させる。以下に、融合計算による平均風速場の推定方法に関する方程式を示す。

$$U_{coup}(x, y, z) = U_{WRF}(x, y, z) \text{ for } z > z_{coup} \tag{16}$$

$$U_{coup}(x, y, z) = U_{LES}(x, y, z) \frac{U_{WRF}(x, y, z_{coup})}{U_{LES}(x, y, z_{coup})} \text{ for } z \leq z_{coup} \tag{17}$$

ここで、$U_{coup}(x, y, z)$は、融合計算による平均風速の推定値である。これにより、実際の気象条件下での平均風速に関する気流場を迅速に計算できる。乱流成分については、風力発電の評価方法の国際規格 IEC61400-1（International Electrotechnical Commission, 2005）[4-15]において用いられている標準乱流モデル式（NTM: Normal Turbulence Model 式）を用いて推定する。IEC61400-1 では、10 分間平均風速に対する主流方向成分の乱流強度分布が求められる。ただし、風車の設計外力条件として保守的に評価しているため、10 分間での風速変動標準偏差の 90 パーセントタイル値が用いられる。

$$\sigma_{90l} = I_{ref}(0.75V_{hub} + 5.6) \tag{18}$$

I_{ref}は 15m/s における乱流強度の指標値であり、通常、0.12 から 0.16 の値をとる。しかし、大気拡散シミュレーションへの適用の観点からは、90 パーセントタイル値を与えることは乱流効果を過大評価することになる。大気乱流によるプルームの拡がりを適切に表現する際は、風速変動標準偏差の平均値を用いることが妥当である。平均値の評価式（新エネルギー・産業技術総合開発機構, 2008; 谷垣ほか, 2009）[4-16]-[4-17]に基づき、3 次元分布推定のために表記すると以下になる。

$$\sigma_l(x, y, z) = I_{ref}(0.75U(x, y, z) + 3.75) \tag{19}$$

σ_lは主流方向成分の風速変動標準偏差の平均値である。ここで、水平方向に等方性を仮定して東西方向$\sigma_u(x, y, z)$と南北方向$\sigma_v(x, y, z)$の標準偏差は流れ方向のσ_lに等しいとして、以下のように評価した。

$$\sigma_l(x, y, z) = \sigma_{u,v}(x, y, z) = I_{ref}(0.75U_{WRF}(x, y, z) + 3.75) \tag{20}$$

鉛直方向成分σ_wは、以下のように与える[4-15]。

$$\sigma_w = 0.5\sigma_l \tag{21}$$

次に、本気流場再現手法に基づく高分解能大気拡散シミュレーション方法と計算条件を述べる。ここ

では、ラグランジュ粒子拡散モデル（Yamada and Bunker, 1988）[4-18]を用いる。基礎方程式は以下の通りである。

$$x_i(t+\Delta t) = x_i(t) + u_{pi}\Delta t \tag{22}$$

$$u_{pi} = U_i + u_i' \tag{23}$$

$$u_i'(t+\Delta t) = a u_i'(t) + b\sigma_i \xi + \delta_{i3}(1-a) t_{Lxi} \frac{\partial \sigma_{ui}^2}{\partial x_i} \tag{24}$$

$$a = exp\left(-\frac{\Delta t}{t_{Lxi}}\right) \tag{25}$$

$$b = (1-a^2)^{1/2} \tag{26}$$

ここで、x_i、t、Δt、u_{pi}、U_i、u_i'、σ_i、ξ、δ_{i3}、t_{Lxi}は、粒子のi方向の位置、時間、計算タイムステップ、粒子位置におけるi方向の風速、平均風速、乱流風速、風速変動の標準偏差、標準偏差を 1 とした正規乱数、デルタ関数、i方向のラグラジアン積分時間スケールである。式（22）中の平均風速U_iに対しては、WRF の上空風データ$U_{WRF}(x,y,z)$と下層の風況データベース$U_{LES}(x,y,z)$を融合した平均風速U_{coup}を与える。式（22）中の風速変動標準偏差σ_iに対しては、式（19）および（20）を用いて与える。

以上の手順により、WRF による上空の 3 次元風速分布と LOHDIM-LES 事前計算による風況データベースとを融合させることで、実気象条件下において個々の建物影響を考慮した高分解能大気拡散の迅速な計算が可能となる。本手法により、原子力機構原子力科学研究所構内においてドップラーライダーを用いた気象観測および簡易的なトレーサ-ガス拡散実験を実施し、簡易拡散計算によるプルームの再現性を定性的に実証している[4-19]。

4.2.3　世界版緊急時環境線量情報予測システム「WSPEEDI」との結合

WSPEEDI は、世界の任意地点において、原子力施設での事故などにより大気中に放出された放射性物質の大気拡散および被ばく線量を、領域スケールから半球スケールを対象として迅速に予測することを目的として開発された大気拡散シミュレーションシステムである。WSPEEDI では、３次元気象場の時間発展を WRF（4.2.2 節参照）で予測し、その気象場に基づき放出地点から大気中に放出された放射性物質の大気拡散および線量を GEARN により計算する。GEARN は、原子力機構で開発されたラグランジュ型粒子拡散モデルである[4-20]。座標系は、水平方向には WRF と同様の地図投影空間での距離直交座標系、鉛直方向には地形準拠座標系（Z*座標系）を用いている。GEARN は放射性物質の大気中での輸送、地表面への沈着（大気からの除去）、放射性壊変による減衰の各過程を考慮している。数値解法としては、大気中に放出された放射性物質を多数の仮想粒子で模擬し、WRF で計算した 3 次元の気象場に基づいて、平均流による移流と乱流による拡散に伴う仮想粒子の移動を追跡することにより、放射性物質の大気拡散を計算する。仮想粒子の位置座標は次式により計算される。

$$x_{i+1} = x_i + u_m\Delta t + R_{x,m}$$

$$y_{i+1} = y_i + v_m \Delta t + R_{y,m} \qquad (27)$$
$$z^*_{i+1} = z^*_i + w^* \Delta t + R_{z*}$$

ここで

x, y, z^* ：粒子の位置座標（m）

Δt ：時間ステップ（s）

$R_{x,m}, R_{y,m}$ ：地図座標系上での水平拡散項（m）

R_{z*} ：地形準拠座標系での鉛直拡散項（m）

である。(9)式の右辺第一項は現在の位置、第二項は平均流による移流、第三項は乱流拡散およびサブグリッドスケールの気流による移動を表し、以下で表される。

$$\left.\begin{aligned} R_{x,m} &= \sqrt{2K_{x,m}\Delta t}\, R_n \\ R_{y,m} &= \sqrt{2K_{y,m}\Delta t}\, R_n \\ R_{z*} &= \left(\frac{\partial K_z^*}{\partial z^*}\right)\Delta t + \sqrt{2K_z^*\Delta t}\, R_n \end{aligned}\right\} \qquad (28)$$

R_n は標準偏差 1 の一様乱数である。上式は、$K_{x,m}=K_{y,m}=K_{h,m}$ を仮定して次式によりコード化されている。

$$R_x = R_y = \sqrt{24K_{h,m}\Delta t}\,\left(0.5 - R(0)\right) \qquad (29)$$
$$R_z^* = \frac{\partial K_z^*}{\partial z^*}\Delta t + \sqrt{24K_z^*\Delta t}\,\left(0.5 - R(0)\right) \qquad (30)$$

$R(0)$は 0～1 までの乱数である。水平拡散係数 K_h は、拡散幅 σ を用いて、$K_h=(1/2)(d_h^2/dt)$から求める。近距離拡散の場合は、Pasquill-Gifford 線図による σ を使用する。鉛直拡散係数 K_z には、WRF の大気境界層（PBL）サブモデルで計算された鉛直拡散係数を用いる。地表面への沈着が発生する核種に対しては、乱流による乾性沈着と降雨による湿性沈着が考慮可能である。WRF で予測される降水量や雲量等を用いることで､GEARN では降雨や雲量の空間･時間的変動を考慮して湿性沈着を予測できる。各計算セルにおける大気中濃度および地表沈着量は、計算された仮想粒子が持つ放射能量による対象計算セルへの寄与を積分して求める。このようにして環境中分布が計算された放射性物質から放出されるガンマ線による線量は、サブマージョンモデルにより各計算セルの大気中濃度および地表沈着量に線量換算係数を乗じて計算する。

本事業では、原子力機構で開発中である、局所域を計算する LOHDIM-LES とそれより広域を対象として計算する WSPEEDI を結合する計算手法を用いた試験計算を行うことで、LES コードを用いて広域までを対象とした解析を行う上で抽出された課題の解決の可能性を検討する。

LOHDIM-LES と WSPEEDI の結合計算は、以下の手順により実施する。

① WRF のネスティング計算機能を用いた力学的ダウンスケールにより、高低気圧や前線の移動など広域スケールの気象現象を考慮可能な数 100 km 四方から、局所域（～数 km 四方）までの気象場を計算する。

② 4.2.2 節で記述した LOHDIM-LES 拡張機能により、①の WRF 気象場と LES 風況データベースを融合させた局所域の気流場を作成する。

③ 局所域ラグランジュ粒子拡散モデルにより、放出地点から発生させた仮想粒子の移動を②で作成した局所域の気流場を用いて計算する。

④ 時間の経過により局所域の計算範囲から外側に流出した仮想粒子の位置座標と放射能量を、広域を担当する WSPEEDI の拡散モデル GEARN に送信する。この時、局所域の計算範囲の内縁に GEARN の 1 格子分の幅を持つ袖領域を設定し、GEARN の時間ステップの間に袖領域に入った仮想粒子の位置情報を受信し、これを初期状態として、広域の WRF 気象場を用いてその後の仮想粒子の移動を計算する。

以上により、局所域から広域までの放射性物質の大気拡散を、局所域の微地形と構造物の影響を考慮しつつ広域の気象変動を考慮して連続的・整合的に計算可能となる。

4.3 線量率評価モデル「SIBYL」

4.3.1 計算手法

局所域スケールの線量評価では、原子炉建屋などの建物による遮蔽効果を考慮した複雑な放射線輸送計算が必要となるため、大気拡散計算と組み合わせた線量計算は困難であった。そのため、線量計算まで行う大気拡散モデルは、国内外ともに SPEEDI のような広域スケールの拡散モデルに限定されていた。この課題に対し、原子力機構では、局所域大気拡散計算による放射性核種の濃度分布から、建物による遮蔽効果を考慮して迅速に線量率分布を計算できる SIBYL コード[4-21]を開発し公開した。

SIBYL は、図 4-5 に示すように LOHDIM-LES による放射性核種の大気拡散計算から導かれる放射性プルームおよび地表面沈着の放射能濃度分布から、地表 1m高さに設定した評価点の空間線量率を計算する。SIBYL において計算可能な放射性核種は、^{85}Kr, ^{132}Te, ^{131}I, ^{132}I, ^{133}I, ^{133}Xe, ^{134}Cs, ^{136}Cs および ^{137}Cs であり、空間線量率として周辺線量当量率 H*(10)（μSv/h）もしくは空気カーマ率（μGy/h）を出力する。LOHDIM-LES で計算した大気中および地表面の計算格子上での放射性核種から放出されるγ線は、環境中を伝播して評価点に到達する。この際、大気および土壌によるγ線の散乱を考慮する必要があるが、広大な環境中のγ線伝播計算は膨大な計算資源を要する。そこで、放射性核種の存在する各計算格子から評価点への環境を伝播した線量率寄与を、モンテカルロ法に基づく放射線挙動解析計算コード PHITS[4-22]を用いて事前に解析し、線量応答関数としてデータベースにまとめた。PHITS による線量応答関数の計算では、環境を模擬した大気と土壌から成る計算体系を構築し、線源である放射性核種から放出されるγ線と、環境中の相互作用で生成される二次放射線（光子および電子）の挙動を、EGS5 モデルを用いて解析した。図 4-6 に、^{137}Cs による線量応答関数の一例を示す。評価点に対して線源の高度および水平距離が離れるほど線量率寄与が小さくなることが分かる。SIBYL では、高度 1000m、水平距離 500m までの各核種による線量応答関数データベースを持つ。このデータベースを用いることで、実行時に膨大な計算資源を要する環境伝播計算を行わずに迅速に地表面の線量率分布が計算可能となる。

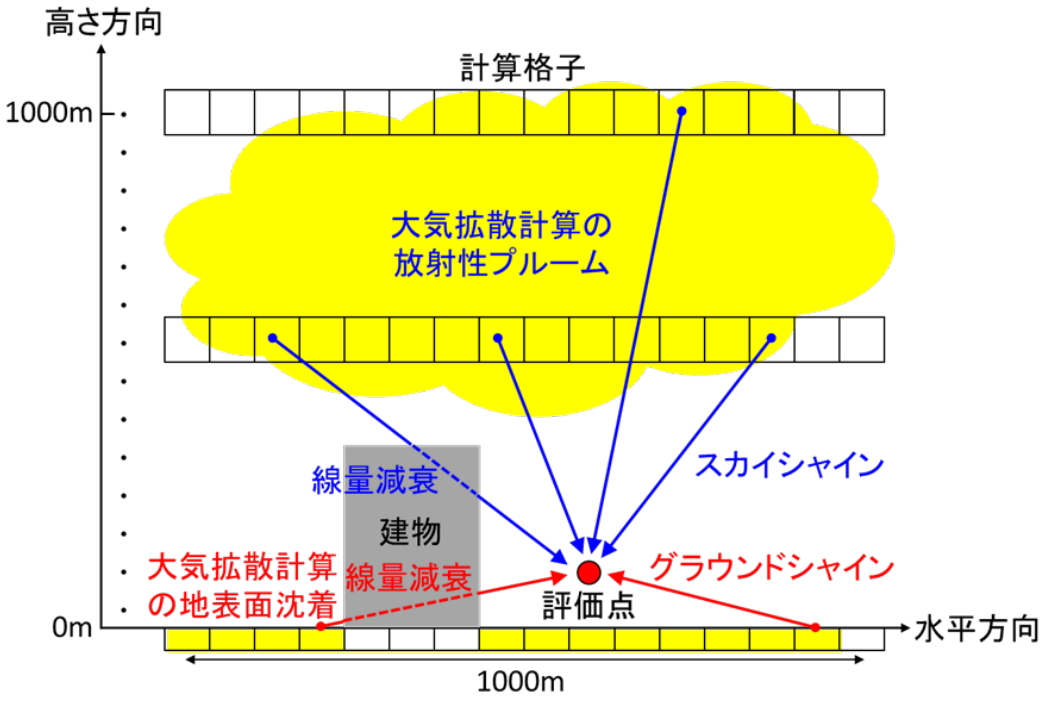


図 4-5　SIBYL コードの概念

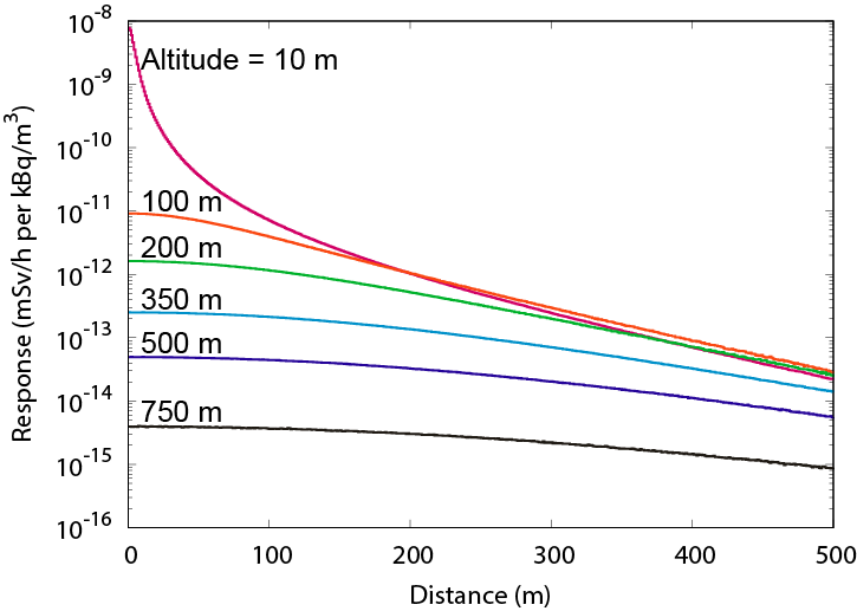


図 4-6　地表から高度 10, 100, 200, 250, 500 および 750m に分布した ^{137}Cs の線量応答関数（横軸は評価点からの水平方向の距離を示す）

図 4-7 は、SIBYL における線量率計算で用いられる各種領域の模式図である。(A) はプルームおよび地表面沈着により放射性核種が存在する「線源領域」、(B) は線量率分布を計算する「標的領域」、(C) は評価点を含む計算格子、および (D) は (C) の計算格子における線量率評価のために必要な線量応答関数を考慮する領域を表す。計算例として、標的領域 (B) 中の座標 (x_i, y_j) で表される計算格子 (C)

における線量率$\dot{D}(x_i, y_j)$を考える。SIBYL では、格子（C）を中心に線量寄与を考慮する応答関数の領域（D）を、水平方向lおよびm軸に沿ってそれぞれ $2L$+1 および $2M$+1 個、鉛直方向n軸に沿って N個に分割する。分割した計算格子に対応する応答関数と放射能濃度のデータから、$\dot{D}(x_i, y_j)$は次式で計算される。

$$\dot{D}(x_i, y_j) = \sum_{l=-L}^{L} \sum_{m=-M}^{M} \sum_{n=0}^{N} R(l,m,n) \cdot C(x_i + l, y_j + m, n) \quad (31)$$

ここで、$R(l,m,n)$は(l,m,n)座標系における応答関数、$C(x_i + l, y_j + m, n)$は(x,y,z)座標系における放射能濃度を表す。

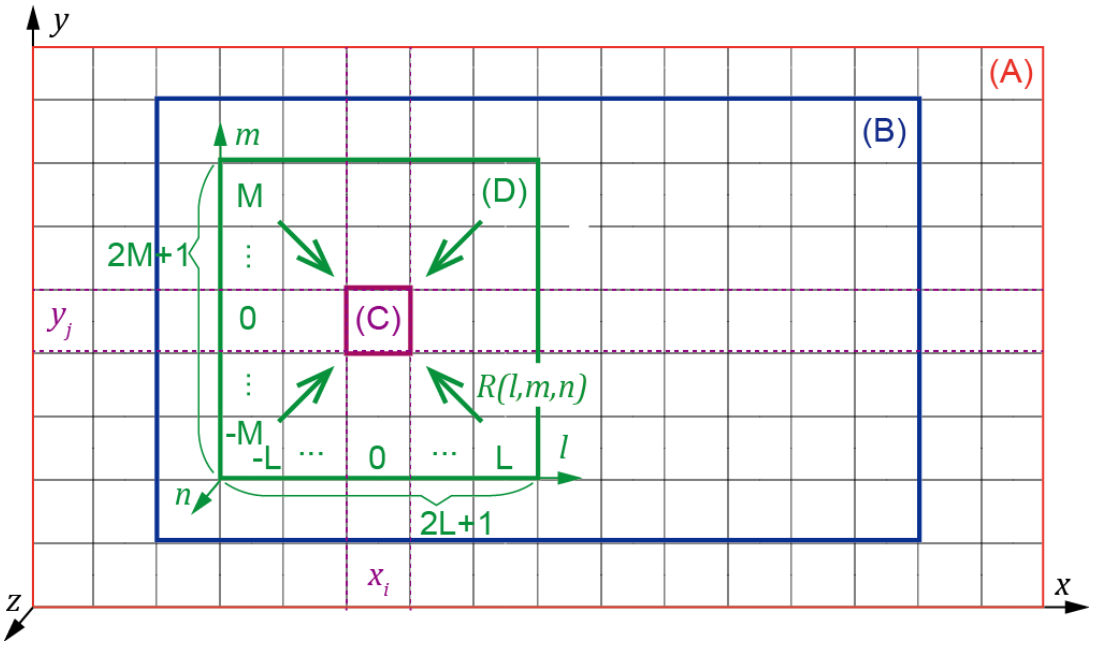


図 4-7　SIBYL による線量率計算で用いられる各種領域の模式図

さらに、線源から評価点の間に建物などの障害物が存在する場合、SIBYL は障害物の透過距離に従い線量寄与を減衰させる。このときの線量率$\dot{D}'(x_i, y_y)$は次式で計算される。

$$\dot{D}'(x_i, y_y) = \sum_{l=-L}^{L} \sum_{m=-M}^{M} \sum_{n=0}^{N} R(l,m,n) \cdot C(x_i + l, y_j + m, n) \cdot \exp(-\mu L_{S \to T}) \quad (32)$$

ここで、μは障害物に対応した線量減衰係数、$L_{S \to T}$は線源と評価点を結ぶ直線上にある障害物の全長を表す。

SIBYL は、式(31)および(32)に基づく演算を高速に実行するため、メモリ非共有（MPI）およびメモリ共有（OpenMP）技術に基づく並列化アルゴリズムが実装されている。

4.3.2　精度検証

SIBYL の採用する線量応答関数による計算手法の妥当性を検証するため、複数の線源分布パターンに対し、PHITS を用いて直接計算した結果との比較を行った[4-21]。図 4-8 は、ガウス型プルーム模型に基づいて大気拡散した ^{85}Kr に対する地表面での周辺線量当量率分布の SIBYL および PHITS による計算

結果である。^{85}Kr はxが正の方向を風下とする風速 1m/s の気象条件下で、高さ 150m の排気筒から毎秒 1Bq 放出されたと仮定した。また、計算格子のサイズは 5m であり、放出点の座標は$(x, y, z) = (0, 0, 150)$である。いずれの計算結果においても、放出軸に沿って風下方向に高線量率領域を形成し、放出軸から離れるに従い線量率も下がっていることが分かる。図 4-9 は、$y = 0$および$x = 500$における SIBYL と PHITS の周辺線量当量率分布の比較を示す。SIBYL は、PHITS の計算結果と 3%以内で一致する結果を 1/100 未満の計算時間で算出した。これらの検証計算から、SIBYL は PHITS と同等の計算精度を保持しつつ迅速の線量率計算が可能であることを示した。

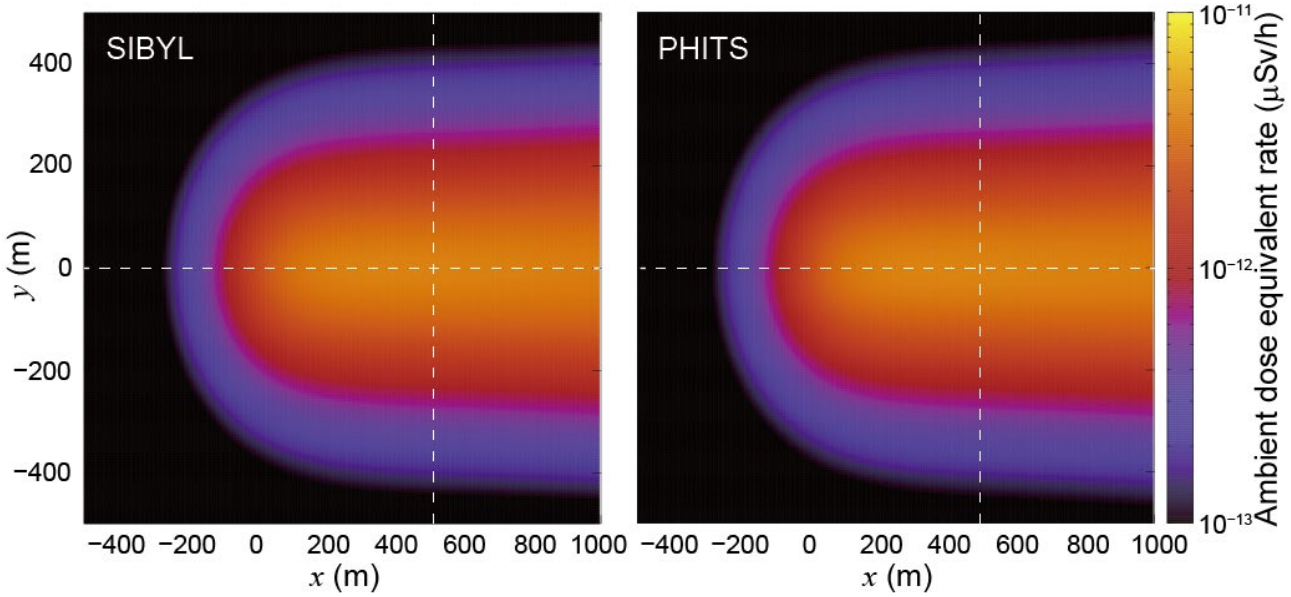


図 4-8　ガウス型プルーム模型に基づく ^{85}Kr の大気拡散における SIBYL と PHITS による線量率分布の計算結果

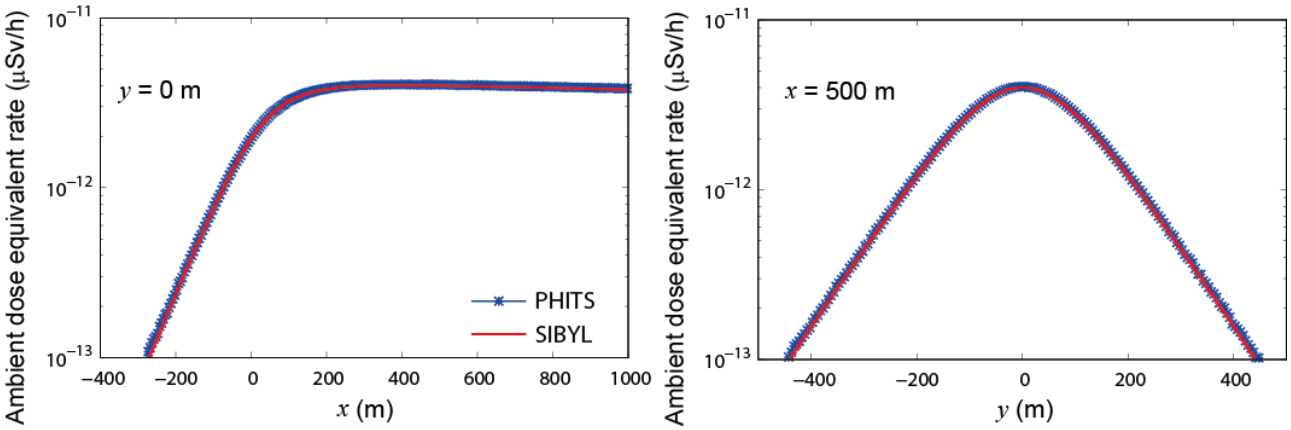


図 4-9　図 4-8 における$y = 0$および$x = 500$での SIBYL と PHITS の周辺線量当量率の計算結果

4.4 まとめ

本章（4 章）では、本事業において整備対象とした計算コード LHADDAS の LES 気流場コード LOHDIM-LES、その拡張機能として、風況データベースと気象モデル WRF との融合による気流場計算とそれを入力したラグランジュ型拡散計算および LOHDIM-LES 拡張機能の広域計算への適用性を検討するための WSPEEDI との結合計算、さらに線量評価コード SIBYL についても概説した。

なお、SIBYL に対し、環境中での詳細情報として、地形（土壌や地表面被覆性状等も反映可能）、家屋（家屋内も含め詳細な構造情報も反映可能）を始めとする建屋一般、樹木等を含む情報を基に高精度な線量評価が可能なコード（3D-ADRES-Outdoor）については、6 章にて説明し、その試計算結果について報告する。

次章（5 章）では、本コード（WSPEEDI と LOHDIM-LES 結合及び SIBYL）を用いた試解析結果を示し、LES による大気拡散シミュレーションや線量評価の特徴の他、課題を抽出して報告する。

参考文献

[4-1] Generation of Wind Tunnel Data Sets in Support of the Joint Urban 2003 Atmospheric Dispersion Study Oklahoma City July 2003, Interim Report 07-2003, Hamburg University.

[4-2] H. Nakayama, H. Nagai, Development of local-scale high-resolution atmospheric dispersion model using large-eddy simulation part1: turbulent flow and plume dispersion over a flat terrain, J. Nucl. Sci. Technol., 46, 1170-1177(2009).

[4-3] H. Nakayama, H. Nagai, Development of local-scale high-resolution atmospheric dispersion model using large-eddy simulation part2: turbulent flow and plume dispersion around a cubical building, J. Nucl. Sci. Technol., 48, 374-383(2011).

[4-4] H. Nakayama, H. Nagai. Large-Eddy Simulation on turbulent flow and plume dispersion over a 2-dimensional hill, Adv. Sci. Res., 4, 71-76(2010).

[4-5] H. Nakayama, K. Jurcakova, H. Nagai, Development of local-scale high-resolution atmospheric dispersion model using large-eddy simulation part3: turbulent flow and plume dispersion in building arrays, J. Nucl. Sci. Technol., 50, 503-519(2013).

[4-6] H. Nakayama, B. Leitl, F. Harms, H. Nagai, Development of local-scale high-resolution atmospheric dispersion model using large-eddy simulation part4: turbulent flows and plume dispersion in an actual urban area, J. Nucl. Sci. Technol., 51, 626-638(2014).

[4-7] H. Nakayama, T. Takemi, H. Nagai, Development of local-scale high-resolution atmospheric dispersion model using large-eddy simulation part5: detailed simulation of turbulent flows and plume dispersion in an actual urban area under real meteorological conditions, J. Nucl. Sci. Technol., 53, 887-908(2016).

[4-8] H. Nakayama, D. Satoh, H. Nagai, H. Terada, Development of local-scale high-resolution atmospheric dispersion model using large-eddy simulation part 6: Introduction of detailed dose calculation method, J. Nucl. Sci. Technol., 58, 949-969(2021).

[4-9] H. Nakayama, N. Onodera, D. Satoh, H. Nagai, Y. Hasegawa, Y. Idomura. Development of local-scale high-resolution atmospheric dispersion and dose assessment system, J. Nucl. Sci. Technol., 59, 1314-1329(2022).

[4-10] 原子力機構，プレスリリース，https://www.jaea.go.jp/02/press2021/p22030501/，令和 4 年 3 月 5 日.

[4-11] J. Smagorinsky, General circulation experiments with the primitive equations, Monthly Weather Review., 91, 99-164(1963).

[4-12] D. Goldstein, R. Handler, L. Sirovich, Modeling a no-slip flow boundary with an external force field, J. Computer Physics, 105, 354-366(1993).

[4-13] A. Monin, M. Obukhov, Basic laws of turbulent mixing in the ground layer of the atmosphere, Tr. Akad.Nauk SSSR Geophiz. Inst., 24, 163–187(1954).

[4-14] W.C. Skamarock, J.B. Klemp, J. Dudhia, D.O. Gill, D.M. Barker, M.G. Duda, X.Y. Huang, W. Wang, and J.G. Powers, A description of the Advanced Research WRF Version 3, NCAR Tech. Note NCAR/TN‐475+STR, Natl. Cent. for Atmos. Res., Boulder, Cololado (2008).

[4-15] International Electrotechnical Commission. IEC61400-1. Wind Turbines Part 1: Design Requirements, 3rd ed. Geneva, Switzerland (2005).

[4-16] 新エネルギー・産業技術総合開発機構「日本型風力発電ガイドライン台風・乱流対策編」https://www.nedo.go.jp/content/100107254.pdf (2008).

[4-17] 谷垣三之介, 小垣哲也, 松宮煇, 今村博, 我国風況の乱流特性と IEC61400-1.Ed3 の乱流モデル - 第 1 報, 第 31 回風力エネルギー利用シンポジウム, 161-164(2009).

[4-18] T. Yamada, S. Bunker, Development of a nested grid, second moment turbulence closure model and application to the 1982 ASCOT Brush Creek data simulation, J. Appl. Meteorol. Climatol., 562–578(1988).

[4-19] H. Nakayama, T. Yoshida, H. Terada, M. Kadowaki, Toward Development of a Framework for Prediction System of Local-Scale Atmospheric Dispersion Based on a Coupling of LES-Database and On-Site Meteorological Observation, Atmosphere, 12, 899(2021).

[4-20] H. Terada and M. Chino, Development of an Atmospheric Dispersion Model for Accidental Discharge of Radionuclides with the Function of Simultaneous Prediction for Multiple Domains and its Evaluation by Application to the Chernobyl Nuclear Accident, J. Nucl. Sci. Technol., 45(9), 1-12(2008).

[4-21] D. Satoh, H. Nakayama, T. Furuta et al., Simulation code for estimating external gamma-ray doses from a radioactive plume and contaminated ground using a local-scale atmospheric dispersion model. Plos One. 16(1), e0245932(2021).

[4-22] T. Sato, Y. Iwamoto, S. Hashimoto et al., Features of particle and heavy ion transport code system (PHITS) version 3.02, Journal of Nuclear Science and Technology, 55(6), 684–690(2018).

■ 5 章　局所域高分解能大気拡散・線量評価システム「LHADDAS」試計算

5.1　本章の概要

本章（5 章）では、本事業で整備する局所域高分解能大気拡散・線量評価システム「LHADDAS」（概要は 4 章参照）の試計算結果について報告する。令和 5 年度事業では、LHADDAS を用いた六ヶ所再処理工場を対象とした試計算の結果、現状の LES を活用する場合、おおよそ 5km 四方程度の領域内で活用すべきであること、数 10km 四方といった広域の解析には、LHADDAS の LES モデル LOHDIM-LES と気象モデルベースの大気拡散モデルである WSPEEDI のシームレス結合計算が有効であることが提示された。

結合計算において、LOHDIM-LES 拡張機能による風況データベースを適用する具体的な空間的範囲と計算結果の有意性については、実際に気流・濃度分布の再現性を考慮した計算による定量的な確認と評価が必要となる。そこで本試計算では、六ヶ所再処理工場からの放射性物質の実放出を対象として LOHDIM-LES 拡張機能および WSPEEDI との結合モデルによる拡散計算を行い、環境モニタリングデータを用いた比較・解析を行うことで、LES モデルを活用した拡散計算手法の広域への適用性を評価する。

以下、本章（5 章）の概要を記す。5.2 節では、LOHDIM-LES と SIBYL および WSPEEDI を用いて六ケ所再処理工場を中心とした領域を計算対象として試計算した結果を示す。5.3 節ではこの試計算結果に基づき当該手法の課題を記し、5.4 節にて試計算のまとめを記す。

5.2　試計算（準備と結果）

5.2.1 環境モニタリングデータ

図 5-1 に六ケ所再処理施設周辺における環境モニタリング地点を示す。主排気筒を中心として、およそ 1km 以内の範囲にドップラーソーダによる気象観測地点とモニタリングポスト（MP）が設置されている。また、主排気筒から 3km 以上離れた地点にモニタリングステーション（MS）が配置されている。本試計算で使用する実測データとして、アクティブ試験による ^{85}Kr の大気放出が行われた期間の MP と MS（二又、尾駮、室ノ久保）での空間線量率と ^{85}Kr 大気中濃度、再処理施設内露場における地上気象観測値とドップラーソーダ観測値、および ^{85}Kr 放出率のデータを日本原燃（株）から提供を受けた。時間間隔は、全て 10 分である。^{85}Kr の大気放出は、地上 150m の主排気筒からの高所放出であり、放出点周辺の微地形や構造物の大気拡散への影響を評価する目的に、必ずしも適したものではないが、実在の原子力施設からの放射性物質の放出量、気象場、および放出地点の近傍から数 km 離れた地点における空間線量率や大気中放射能濃度等の環境モニタリングデータが揃っている点で貴重であり、本試計算で実施する LOHDIM-LES 拡張機能の広域への適用性の評価に用いることとした。

5.2.2 WRF 計算条件の設定

気象モデル WRF の主な計算設定を表 5-1 にまとめた。図 5-2 は計算領域である。GEARN による広域の拡散状況の把握と、5.2.3 節で述べる LODHIM-LES 拡張機能で利用する気象場を計算するため、100m 解像度 65km 四方の領域 3 を設定し、メソスケールの気象変動を考慮するため、2.5km 解像度 250 km 四方の領域 1 から 2 段階のネスティング計算によりダウンスケール計算を行った。計算領域の上端は 100 hPa 面とした。各計算領域の標高データと土地利用データは、国土地理院の数値標高モデル DEM10 データ（10m 解像度）と J-Stream データセット[5-1]を入力データとして WRF のプリプロセ

ッサにより作成した。気象変数の初期・境界条件の作成に必要な気象格子点データは、気象庁数値予報格子点データ GPV（MSM）の初期値を 3 時間ごとに用いた。出力間隔は 10 分とした。

5.2.3 LOHDIM-LES による風況データベース作成条件と WRF との気流場融合解析条件

LOHDIM-LES 拡張機能による風況データベースの作成について述べる。令和 5 年度事業の試験解析において、LES 風況解析では、計算領域が 5 km 四方程度の場合のみ、気象変動の時間空間分布を適切に考慮し計算可能という知見が得られた。その一方、5km 四方を超える広域に LES を適用する際は、気象場の時間空間変動を考慮するための解決策として、計算対象領域をタイル状に分割し、各タイル領域にて LES 計算を実施するという手法が提示された。そこで、本試験解析では、六ヶ所再処理施設を中心とする 65km 四方の解析領域を 5km 四方のタイル状に分割し（図 5-3）、タイル領域ごとに LOHDIM-LES を用いて、北風を 0 度として 10 度単位で流入風向を変えた LES 非定常気流場計算を行い、平均風速の計算結果のデータベースを風向別に作成することを試みた。ただし、対象領域内の全てのタイルの風況データベースを作成するには、多大な計算コストが必要となるのに加えて、計算対象領域内に標高が大気境界層スケールに及ぶ山岳地形が含まれる場合は、通常 LES 計算の適用範囲外となる。今回の試験では、風向およびそれによって生じるプルーム拡散範囲を可能な範囲で限定できるケースを選定（5.2.5 節参照）することとして、解析に必要な空間的範囲および風向についてのみ風況データベースを作成した。LES の水平および鉛直方向の解像度は 10m と設定した。地形データは、65km 四方の計算領域の標高データを国土地理院の 10m 解像度データから作成し、六ケ所再処理工場を中心とした数 km 四方範囲に対しては、細密地理情報データの建物高分布情報を追加した。タイムステップは 0.025 秒とし、気流場が統計的に定常状態に達してから、10 分間の時間平均値の風速場から 3 次元風況場データベースを作成した。

次に、この風況データベースと WRF により計算した気象場の融合解析条件について述べる。65 km 四方領域においては、大気境界層スケールに及ぶ標高の高い山岳地形を含んでいる。そのため、本試験解析では、個々の建物や局所地形起伏による機械的擾乱および日射の影響による地表面にて発生する熱的擾乱運動が活発な大気境界層下層部のスケールに相当する 300m を融合高さとして設定した。これにより、WRF により得られる 300m より上空での大きいスケールの気象擾乱と地表面近傍の機械的・熱的擾乱を反映させた 3 次元気流場の生成が行える。この融合高さ（Zcup）300m の風速場を、WRF の領域 3（100 m 解像度）の 10 分ごとの出力から抽出し、100m 四方ごとに代表風向を求め、風況データベースから対応する風向の風況データベースを抽出して、4 章の式（16）および式（17）により融合させた。

5.2.4 拡散モデル計算条件

LOHDIM-LES 拡張機能のラグランジュ型拡散モデル（以降、LOHDIM 拡散モデル）および WSPEEDI の GEARN による拡散計算の主な設定を表 5-2 に示す。放出地点は、再処理工場主排気筒（北緯 40.96131 度、東経 141.3286 度）、放出高度は地上 150m とした。放出核種は、^{85}Kr を対象として、放出率は日本原燃（株）より提供を受けた 10 分間隔の測定値を用いた。LOHDIM 拡散モデルにおいて、仮想粒子は、排気筒の出口のサイズに基づき放出点を中心とする水平 5 m×5m、鉛直 10m の直方体内に均一に発生させた。発生させる仮想粒子数は 72,000 個／1h とした。

5.2.5 試験ケース

本試計算では、アクティブ試験により放出された ^{85}Kr に起因すると考えられる上昇が環境モニタリング結果に認められたケースを対象に解析を行う。具体的な試験ケースの選定において、まず気象場の概況を調査するためのデータを作成するため、65km 四方エリア 500m 解像度の WRF 計算を 2007 年の 1 年間を対象に実施した。この計算結果と環境モニタリングデータを用いた調査を行い、以下の条件を考慮して試験ケースを選定した。

・MP だけでなく MS でも空間線量率および大気中濃度の上昇が測定されている。
・空間線量率の測定値に対し、降水発生時の自然起源の放射性物質の沈着による影響は小さい。
・主排気筒を含む 5km 四方エリアの代表風向（WRF 風速場計算値から整理した 36 方位の風向の頻度が最多となる風向）が継続的に安定している。

以下に選定した試験ケースの概要を列挙する。

○解析期間：2007 年 10 月 27 日 15 時～10 月 28 日 3 時の 12 時間
（WSPEEDI は上記を含む 2007 年 10 月 27 日 0 時～10 月 29 日 0 時の 48 時間）

○気象概況：風向は、10 月 28 日 3 時までは北風から東風、大気安定度は中立で降雨はなし。

○環境モニタリング結果（後述する図 5-8 および図 5-9 を参照）：空間線量率は 10 月 27 日 15 時か 23 時頃までは MP1、その後は MP2 で放出率の変動に応じた上昇が見られ、10 月 28 日 2 時以降は MP9 でも低い上昇が見られた。10 月 27 日 23 時から 10 月 28 日 2 時に主排気筒の西南西約 4km に位置する MS 室ノ久保で線量率が上昇した。大気中 ^{85}Kr 濃度は、MP では期間内で上昇は見られず、MS 室ノ久保のみで 10 月 27 日 23 時から 10 月 28 日 2 時にかけて上昇した。

図 5-4 に解析期間の ^{85}Kr 放出率の時系列を示す。周期的な変動を繰り返しながら断続的に放出されていたことが分かる。

本試計算では、LOHDIM-LES 拡張機能の広域への適用性を評価するため、計算対象範囲と計算モデルを変えた次の 3 ケースの拡散計算を実施した。図 5-5 に拡散計算で使用した計算領域を示す。ケース【65kmWSPD】では、65km 四方の全域を WSPEEDI により 100m 解像度で計算した。ケース【10kmLES】では、10km 四方までを LOHDIM-LES 拡張機能を用い 10m 解像度で計算し、それより遠方は WSPEEDI と結合して計算した。ケース【5kmLES】では、5 km 四方までを LOHDIM-LES 拡張機能を用い 10m 解像度で計算し、それより遠方は WSPEEDI と結合して計算した。各ケースで使用した計算モデルを表 5-3 にまとめた。なお、10kmLES と 5kmLES の局所域エリアの計算結果は、WSPEEDI との 1-way 結合による影響は受けないため、局所域を LOHDIM-LES 拡張機能のみで計算した結果と同一である。

5.2.6 試験結果

最初に、放出地点から 30km 圏の広域におけるプルーム拡散の概況を確認する。図 5-6 および図 5-7 は、65kmWSPD ケースの ^{85}Kr 大気中濃度分布である。計算期間当初は東風によりプルームの西方向への拡散が継続した後、10 月 27 日 21 時頃から始まる反時計回りの風向の変化に応じてプルームの拡散方向が西から南西に変化し、10 月 28 日 1 時頃に MS 室ノ久保付近を通過している。その後、放出点近傍のプルームは南方向に拡散し、計算領域の南西域では北西風が支配的となり、南西域に拡散したプルームが南東方向に拡散し始めている様子が見て取れる。また本ケースの結果では、プルームが鉛直拡散により放出地点の比較的近傍から地表まで拡散していることが分かる。

続いて、モニタリング地点における空間線量率（図 5-8）と ^{85}Kr 大気中濃度（図 5-9）の時間変化を

比較する。まず、施設敷地内 MP について比較する。5kmLES ケース（10kmLES ケースも同一の結果）の空間線量率の計算値は、期間前半の MP2 における上昇や、期間後半の MP1 および MP9 における上昇など、測定値を極めて良好に再現している。また、図 5-9 から、5kmLES ケースおよび 10kmLES ケースの計算では、MP における ^{85}Kr 大気中濃度は計算されていない。図 5-10 は、10 月 27 日 19:30 の ^{85}Kr 大気中濃度の放出地点周辺 10km 四方の分布図である。これからも、5kmLES ケースおよび 10kmLES ケースの計算では、放出点周辺の数 km 以内において地表付近に ^{85}Kr 大気中濃度は計算されておらず、プルームが MP の上空を通過している状況を再現できていることが分かる。一方で、図 5-8 から、65kmWSPD ケースで MP における空間線量率の上昇が、ほとんど計算されていないのは、GEARN のサブマージョンモデルによる空間線量率の計算手法に起因するものである。図 5-9 および図 5-10 から、65kmWSPD ケースでは、MP で地上大気中濃度の小さい上昇が計算され過大評価している時間帯もあるものの、プルームが MP の上空を通過している拡散状況をおおむね再現している。このような場合は SYBIL による線量評価が不可欠で、サブマージョンモデルによる空間線量率は過小評価となり、適用範囲外である。

次に、MP より遠方の、MS 室ノ久保における 10 月 27 日 23 時から 10 月 28 日 2 時の空間線量率の上昇について比較する。10kmLES ケースでは、図 5-8 から期間前半の 0:10～0:30 の上昇は計算されているが、期間後半では計算されていないことが分かる。図 5-9 から、^{85}Kr 大気中濃度は、期間全体で全く上昇が計算されていない。図 5-11 の 10 月 28 日 1 時における 10kmLES ケースの 85Kr 大気中濃度分布を見ると、0:00～0:30 では MS 室ノ久保の上空を通過していたプルーム（図は省略）が、水平方向の拡散が 5km 四方エリアを越えても、あまり進まず細いプルームのまま MS 室ノ久保のわずかに南側を通過している。これが、この期間後半における MS 室ノ久保での線量率上昇が計算されなかった要因と考えられる。65kmWSPD ケースでは、図 5-8 および図 5-9 から、過小評価傾向ではあるが、10 月 28 日 1:00～1:10 に空間線量率と大気中濃度の両方の上昇が良好に再現されている。図 5-11 からも、プルームが MS 室ノ久保の上空だけでなく地表付近にも到達している状況が計算されていることが分かる。5kmLES ケースの結果について見ると、図 5-8 では MS 室ノ久保での線量率の上昇は判別できないが、10 月 28 日 1:00 に非常に低い値（1.6×10^{-5} μGy/h）ながら空間線量率の上昇が計算されている。また、大気中濃度も低いレベル（2.6×10^{-2} kBq/m3）ではあるが、10kmLES ケースでは計算されなかった上昇が計算されている。

以上、図 5-11 の ^{85}Kr 大気中濃度分布から、WSPEEDI と結合した地点以遠でプルーム幅が大きくなり MS 室ノ久保上空を通過するだけでなく、わずかにではあるがプルームが地表付近まで拡散して MS 室ノ久保に到達していることが分かる。MS 室ノ久保における空間線量率の計算は、結合された GEARN のサブマージョンモデルにより行われるため、上空プルームの線量率への寄与を計算できず過小評価するが、放射性物質の大気中での拡散状況の再現性は、10kmLES ケースに比べて高いことが示唆される。なお、図 5-11 の 10kmLES ケースと 5kmLES ケースの放出高度付近の大気中濃度分布において、5 ㎞四方エリアの外周付近でギャップが計算されている。図 5-5 と比較すると、この地点付近は、放出地点から見て標高が急激に低くなる崖状の地形となっている。LOHDIM 拡散モデルでは、10m 解像度によりこの地形が精緻に考慮されており、仮想粒子が崖に沿って低高度に輸送されているのに対して、100m 解像度の 65kmWSPD では地形が緩やかになっており比較的鉛直方向の輸送は滑らかに計算されている。これがこの大気中濃度分布のギャップの要因と考えられ、LOHDIM-LES 拡張機能を用いることによる地形効果の考慮の精緻化の利点を示している。

最後に、図 5-12 は、65 km 四方全域の 10 月 28 日 1:00 における ^{85}Kr 大気中濃度分布を比較したも

のである。これより、放出地点から 10km 程度までの範囲においては、これまでに示したケースによる差異が見られるが、それより遠方の濃度分布に大きな差異は見られない。この結果より、10km 以遠における大気拡散の評価に対しては、局所域における LES モデル利用の効果は小さいことが示唆される。

以上の結果より、本試計算で用いた LES モデルを基に開発された LOHDIM-LES 拡張機能は、放出地点の周辺 5km 四方程度の空間線量率の評価には有効であることが分かった。しかしながら、本機能を現状のまま 10km 四方に範囲を拡張して適用することは、放出点から数 km 離れた地点の放射性物質の大気拡散の再現において課題があることが示された。一方で、気象モデルと結合した大気拡散モデルである WSPEEDI は、空間線量率の評価に対して、長時間の拡散により広範囲に拡散した状態を仮定する評価手法を採用していることから、上空をプルームが通過する状況での地表付近での空間線量率の上昇は再現できないが、数 km 以上遠方を主対象とした放射性物質の大気拡散現象の再現において高い性能を示した。これらの計算モデルの利点を融合させるべく開発された LOHDIM-LES 拡張機能と WSPEEDI のシームレス結合計算手法の適用において、風況データベース作成のための LES 計算領域を数 km 四方程度に設定することで、放出点近傍の再現性を保持しつつ遠方の地点においても再現性を高めることが実現可能であることが示された。

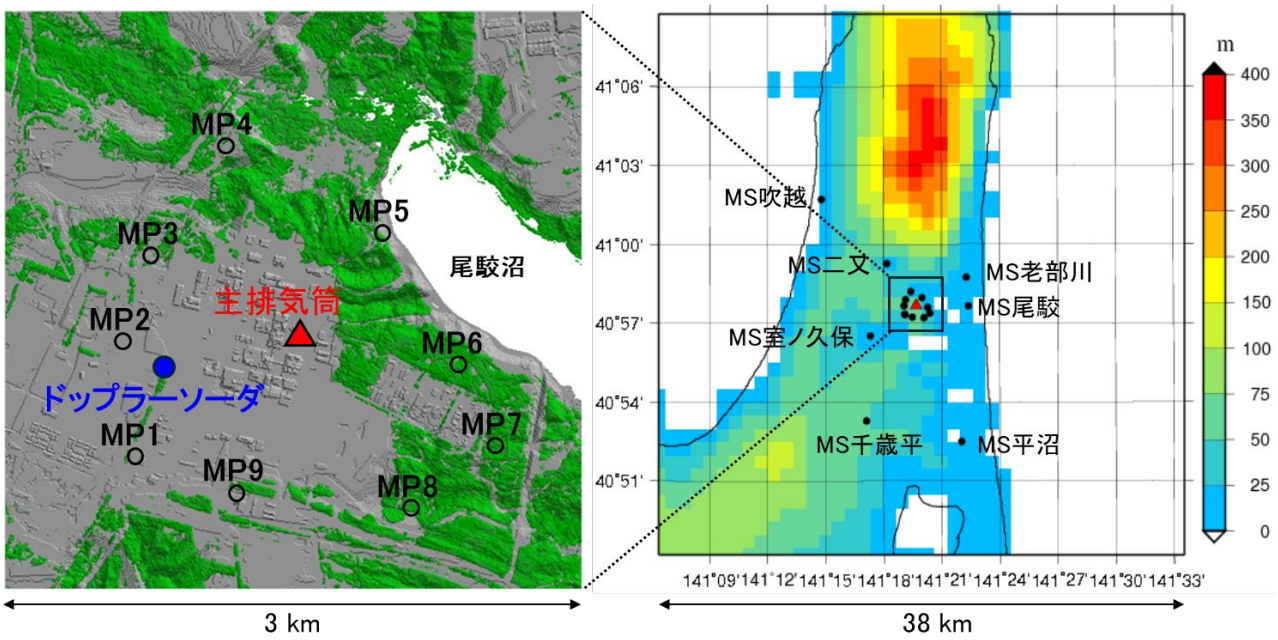


図 5-1　六ケ所再処理施設周辺における環境モニタリング地点
左図の緑色エリアは森林、右図の色塗分けは標高を示す。

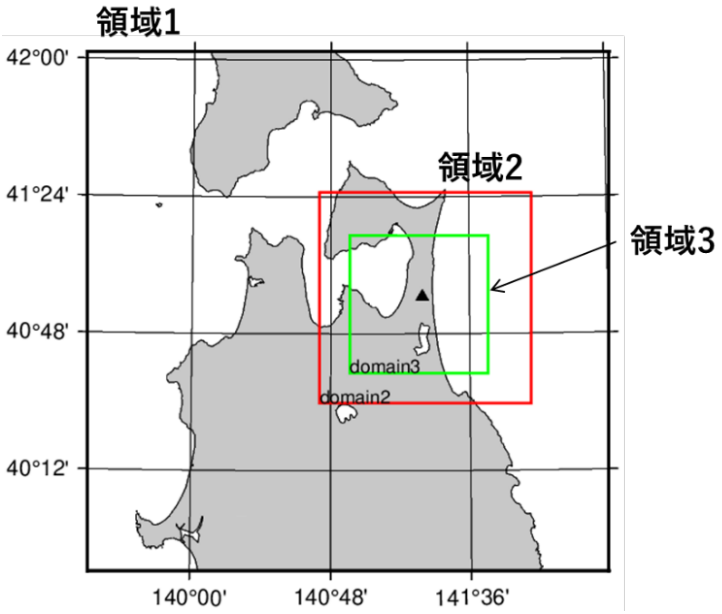


図 5-2　WRF 計算領域

▲は六ヶ所再処理施設の位置を示す。

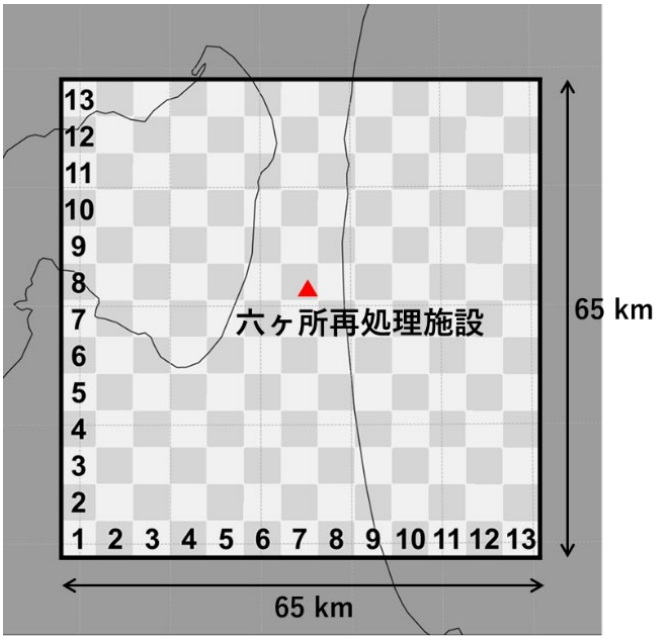


図 5-3　LOHDIM-LES 風況データベース作成時のタイル分割

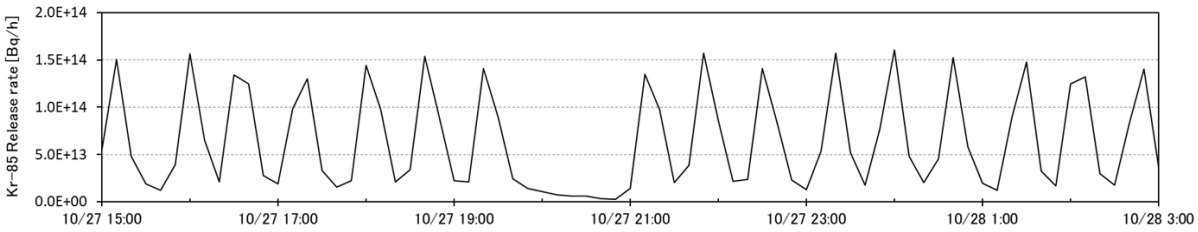


図 5-4　2007 年 10 月 27 日 15:00 から 10 月 28 日 3:00 までの主排気筒 ^{85}Kr 放出率

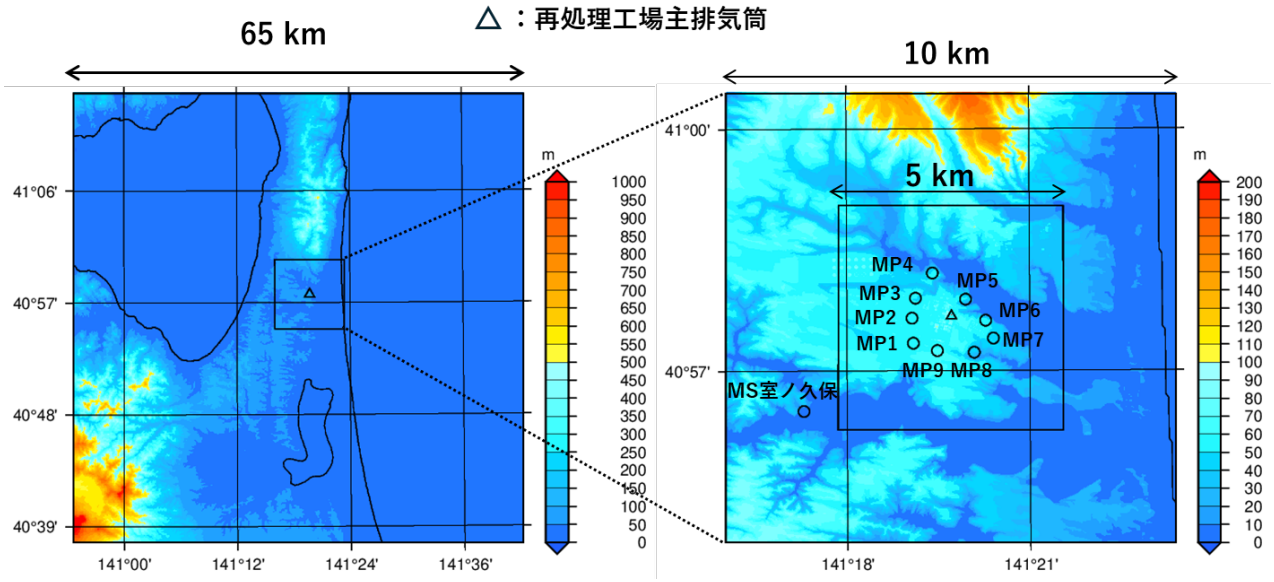


図 5-5　拡散モデルの計算領域
色塗り分けは標高および建物高さ。

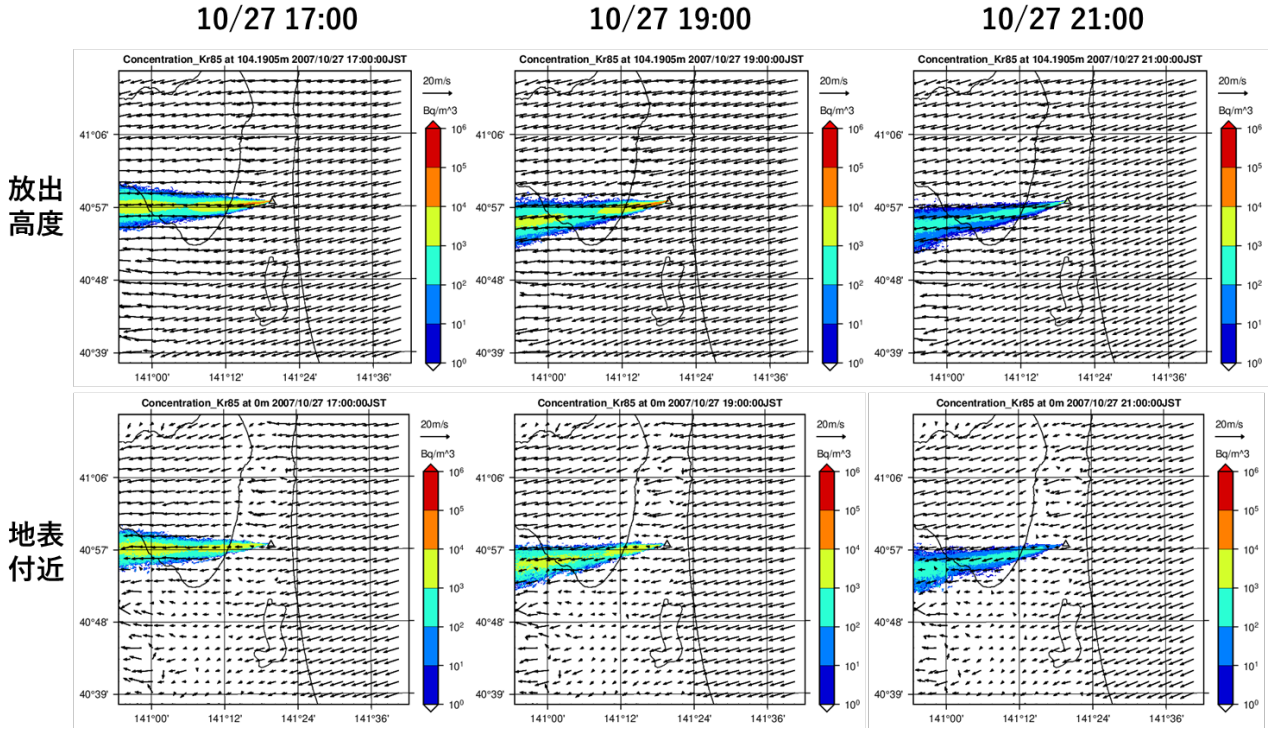


図 5-6　65kmWSPD ケースの計算による ^{85}Kr 大気中濃度と風速の水平分布（10 月 27 日 17 時、19 時、および 21 時）

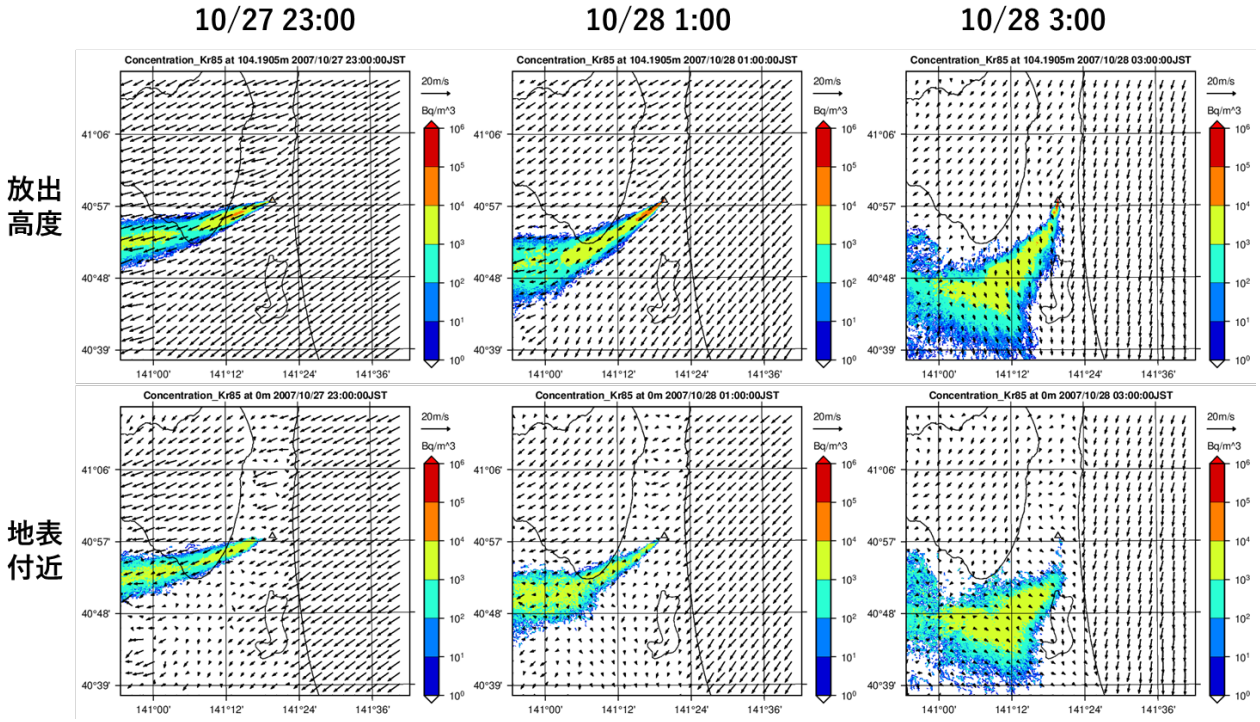


図 5-7　65kmWSPD ケースの計算による ^{85}Kr 大気中濃度と風速の水平分布（10 月 27 日 23 時、10 月 28 日 1 時および 3 時）

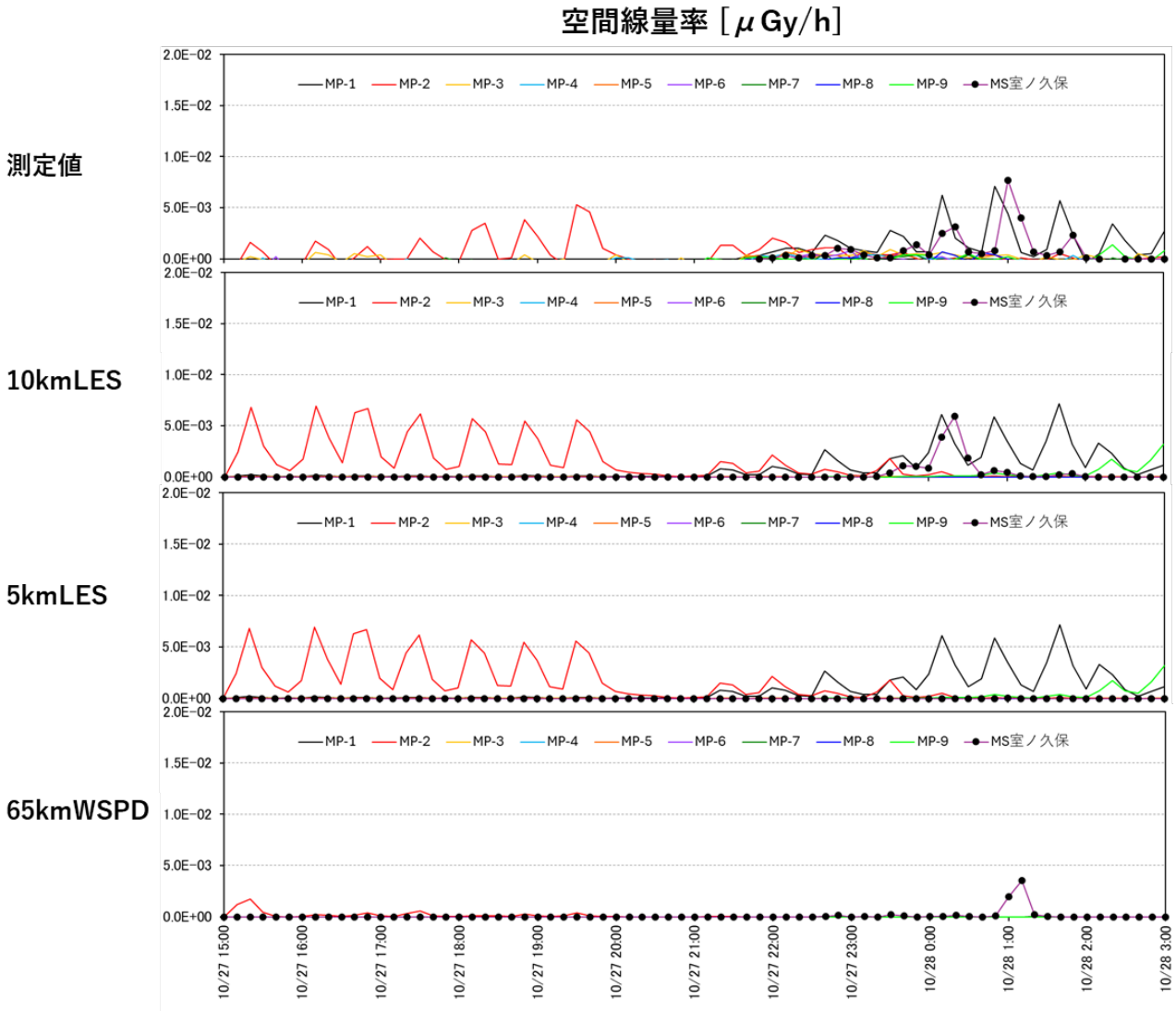


図 5-8　MP および MS における空間線量率の時間変化

5kmLES の MS 室ノ久保と 65kmWSPD の計算値は GEARN のサブマージョン法による計算結果。

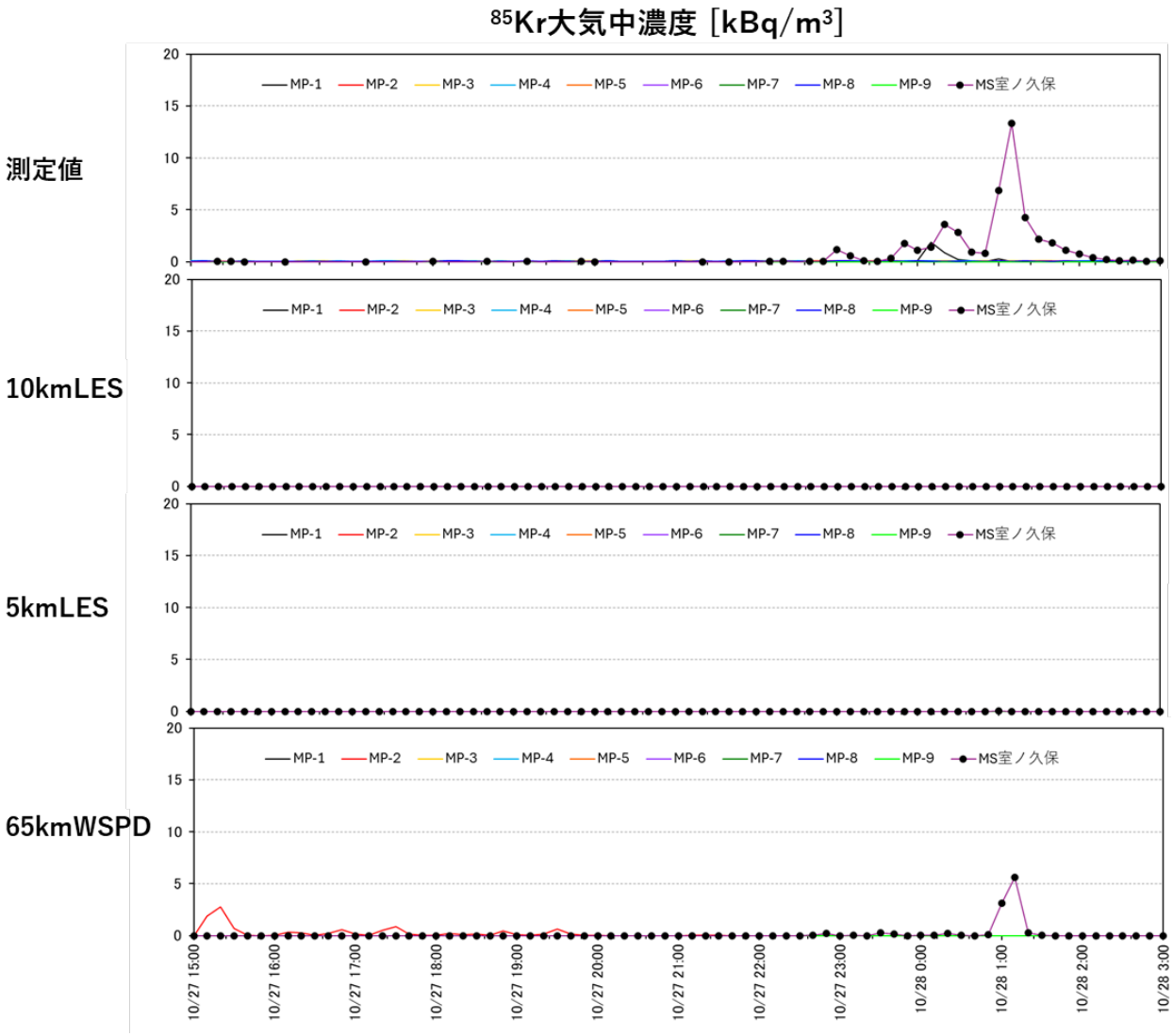


図 5-9　MP および MS における ^{85}Kr 地上大気中濃度の時間変化

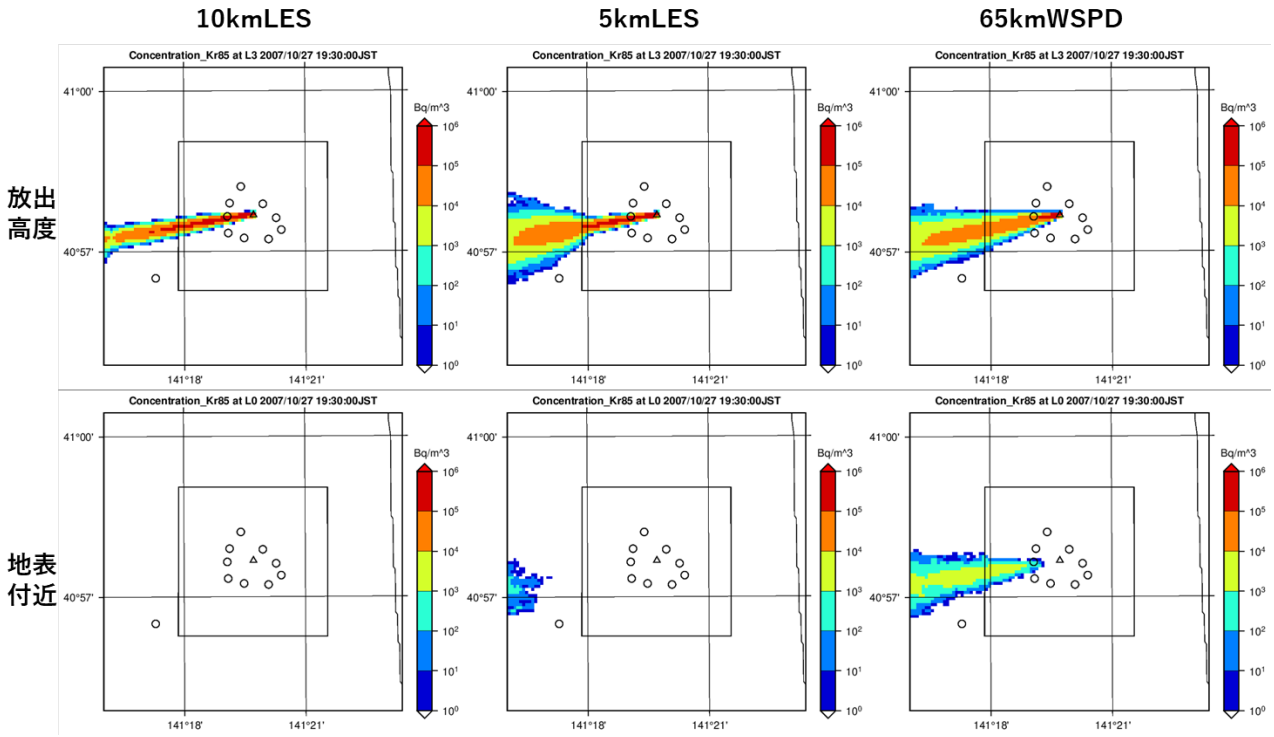


図 5-10　10 月 27 日 19:30 における ^{85}Kr 大気中濃度分布の計算結果（10 km 四方のみ）

10kmLES と 5kmLES の LOHDIM 拡散モデル 10m 解像度の計算結果は、計算した粒子分布を GEARN の 100m 解像度グリッドの濃度に変換している。枠線は 5 km 四方エリアを示す。〇は MP および MS を示す（詳細は図 5-5 参照）、△は六ヶ所再処理工場主排気筒の位置を示す。

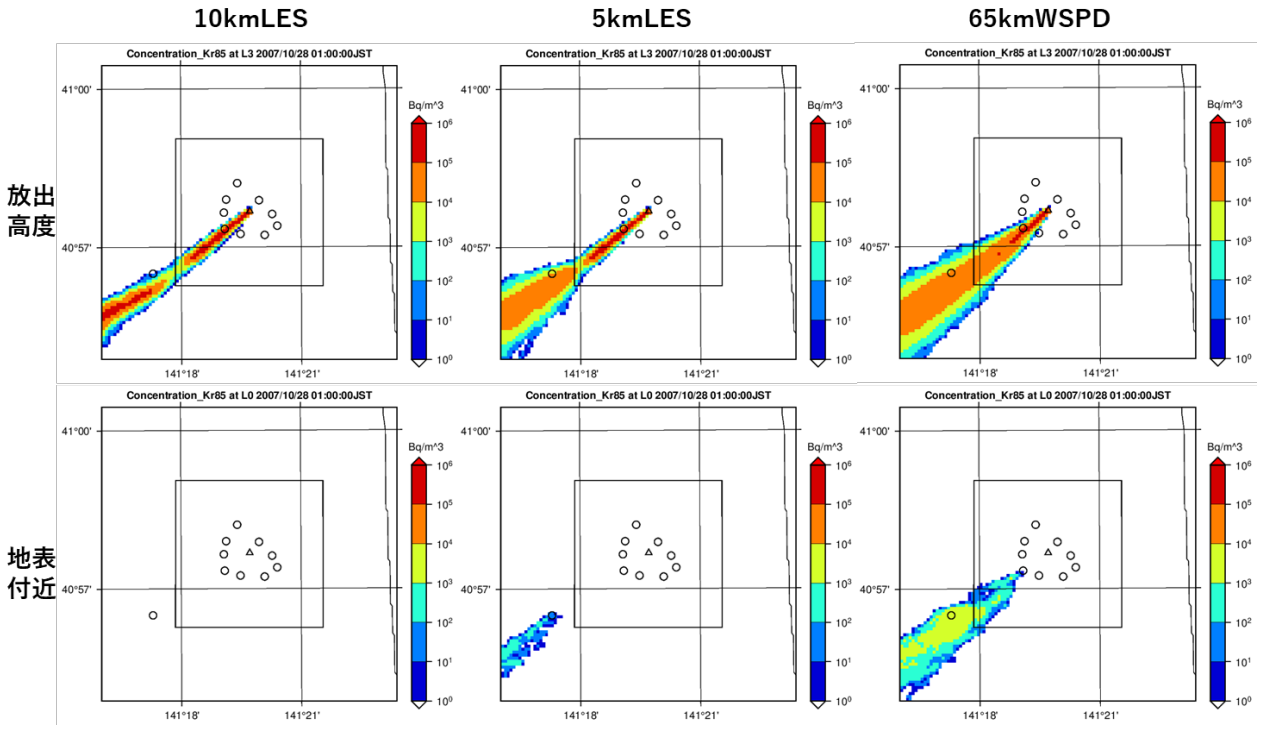


図 5-11　図 5-10 と同様（ただし日時は 10 月 28 日 1:00）。

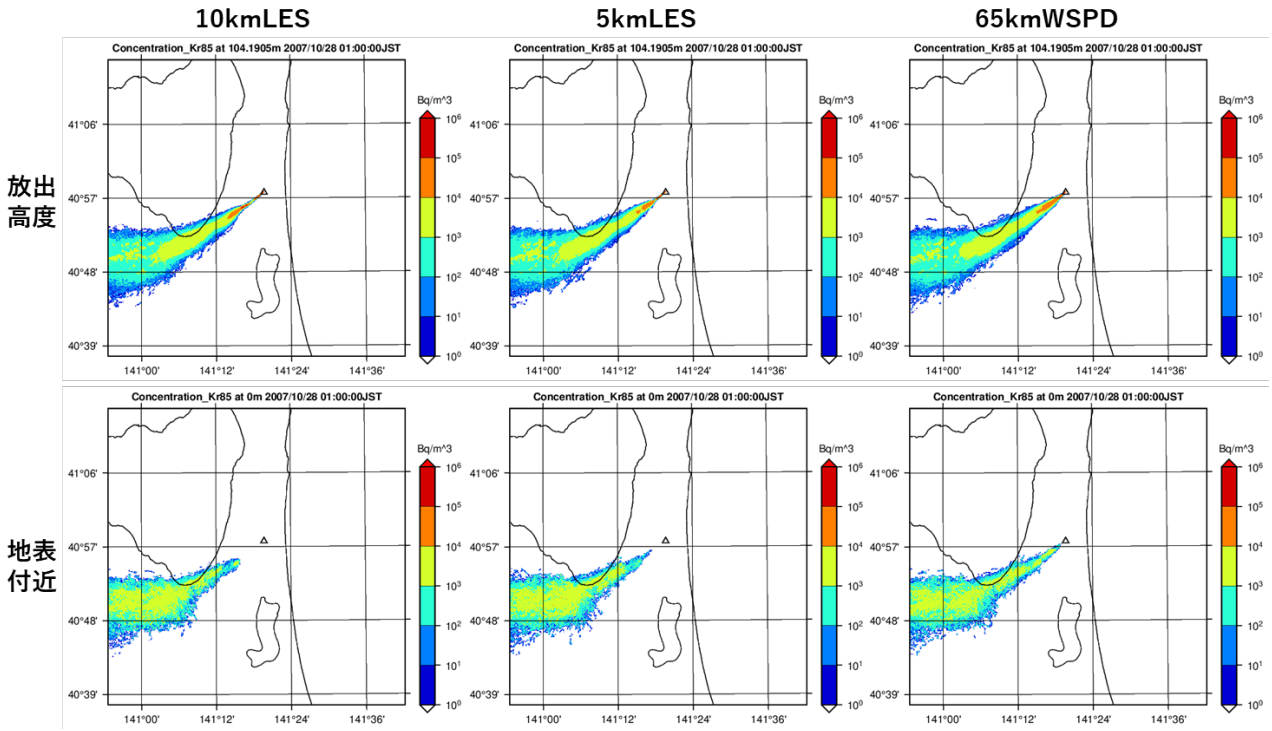


図 5-12　10 月 28 日 1:00 における ^{85}Kr 大気中濃度分布の計算結果（65 km 四方エリア）

10kmLES と 5kmLES の LOHDIM 拡散モデル 10 m 解像度の計算結果は、計算した粒子分布を GEARN の 100 m 解像度グリッドの濃度に変換している。

表 5-1　WRF 計算設定

計算領域	領域 1	領域 2	領域 3
水平格子幅	2.5 km	0.5 km	100 m
格子数	100×100×31	201×201×31	651×651×31
時間ステップ	10 s	2 s	0.4 s

表 5-2　拡散モデル計算設定

計算モデル	LOHDIM 拡散モデル	GEARN
水平格子幅	10 m	100 m
鉛直層数	100	36
トップ高度	1 km	10 km
時間ステップ	0.1 s	0.5 s

表 5-3　各計算ケースで使用するモデル

ケース	気象計算	拡散計算	線量評価
10kmLES	10 km 四方 : 風況データベースと WRF の融合解析 10 km 四方より遠方 : WRF	10 km 四方 : LOHDIM 拡散モデル 10 km 四方より遠方 : GEARN	10 km 四方 : SIBYL 10 km 四方より遠方 : サブマージョン法
5kmLES	5 km 四方 : 風況データベースと WRF の融合解析 5 km 四方より遠方 : WRF	5 km 四方 : LOHDIM 拡散モデル 5 km 四方より遠方 : GEARN	5 km 四方 : SIBYL 5 km 四方より遠方 : サブマージョン法
65kmWSPD	WRF	GEARN	サブマージョン法

5.3 LHADDAS シミュレーションの課題

本節では、今回の試計算により得られた課題について述べる。前節で示した試計算の結果でも述べたように、LOHDIM-LES 拡張機能と WSPEEDI の計算モデルにおける拡散過程の取り扱いの違いから、プルームの広がり具合が大きく異なる計算結果となる。特に WSPEEDI では距離に応じて拡散幅が大きくなるのに対して、LOHDIM 拡張機能では拡散幅が遠方まで大きく変化しない（例えば図 5-10）。この差異について以下に議論する。大気境界層は、様々な空間規模の気象現象が持つ固有の構造のみならず、地形起伏や建物などにより生成される機械的擾乱と、日射の影響により地表面から発生する熱的擾乱の存在により、時空間的に複雑に変動する。気象現象は、幅広い空間規模で生じ、微細なスケールほど高周波での時間変動をもたらす。特に、地形・建物影響により生成される乱流変動は、微細規模の気象現象による変動よりもはるかに高周波での変動をもたらす。このような大気の流れの変動特性は、地上近傍での風速変動の時間スペクトル分布において、気象擾乱に起因する低周波数帯と地表面影響に起因する高周波数帯との間に大きなギャップが存在することが知られている[5-2]。このスペクトル分布においては、約 1 分と約 4 日の周期にピークが存在する。これらの大気の特性に応じて、高周波数帯の乱流変動の再現に対しては CFD モデル、低周波数帯の気象現象の再現に対しては気象モデルが通常用いられる。従って、CFD はそのモデルの設計上、低周波変動する大気の流れの特性を考慮することはできず、計算結果は、3 分から 10 分程度の時間スケールの乱流変動現象を再現するのみである。その一方、気象モデルは、地表面影響による高周波変動特性については、パラメタライズされているため 10 分程度より短い時間スケールの大気の流れの特性を考慮することはできず、計算結果は、数 10 分以上のタイムスケールでの気象現象を意味する。したがって、LOHDIM-LES 拡張機能を用いた計算結果において、プルームの拡散方向は、WSPEEDI による結果と同様であったが、プルームの拡がりの素因は、乱流変動の効果のみで気象擾乱の影響は考慮できないため、放出源から離れ、時空間スケールが大きくなるに従い、拡散幅に差異が出ることとなった。この課題への対処としては、本試計算で用いた LOHDIM-LES 拡張機能と WSPEEDI の結合計算手法において、LES 風況データベースを利用する空間的範囲を必要最低限に限定することが挙げられる。

この LOHDIM-LES 拡張機能と WSPEEDI の結合計算手法の適切な利用に際し、LES モデルによる風況データベースを利用する適切な範囲の知見が必要となる。今回の試計算では、実事象を対象とするため、再処理施設の主排気筒からの ^{85}Kr の放出時の実測データを用いた解析を行った。しかしながら、今回の試験条件やデータにより、評価可能な事項は、放出点近傍の建物や、微地形が気流場および放射性物質の大気拡散に与える影響を評価する目的に対しては限定的となる。より適切な試験シナリオや計算条件（例えば地上放出や中立以外の大気安定度など）を設定し、実測データによらず拡散シミュレーションによる数値実験により調査検討することが有効と考えられる。

今回の試計算では、LOHDIM-LES 拡張機能による風況データベースの作成は、風向について 10 度ごとの風向別に作成した。この風向の離散化は、LOHDIM 拡散モデルと WSPEEDI との接続部における大気中濃度分布の不連続や、風向の時間変化が激しい場合のプルーム拡散方向のずれ（時間的な遅れや早まり）を発生させる要因となる。これを回避するには、できるだけ風向を細かく分割することが必要になるが、ケース数増加により、計算コストが飛躍的に増大する。例えば、今回の試解析の結果から、10 km 四方の計算領域の風況データベースを作成するのに、1 風向につき大型並列計算機（600 並列）を用いて 8～9 時間程度必要になる。LOHDIM-LES 拡張機能と WSPEEDI の結合計算における一連のデータ作成や気象・拡散シミュレーションの中で、この LES 非定常計算による風況データベースの作成が最も時間を要する。したがって、許容される風向の分割幅について知見を収集するとともに、先述

したLES計算範囲の調査検討を行うことにより、投入する計算コストの最適化が必要になる。

5.4 まとめ

本章(5章)では、LHADDASのLES気流場計算コードLOHDIM-LESの拡張機能およびWSPEEDIとの結合計算手法を用いて六ヶ所再処理工場を対象とした試計算を行い、数km四方を超える広域を対象とした計算への適用における手法の特性と課題を抽出した。試計算の結果から、LOHDIM-LES拡張機能におけるLES計算領域を数km四方程度までの範囲とすることで、両モデルの長所を活かして放出点近傍の再現性を保持しつつ、遠方に対して再現性を高めることが可能であることが分かった。また、本手法の適用における課題として、広域の計算を行う場合、LESによる風況データベース作成の計算領域をタイル状に分割することで気象場の空間変動を考慮することはできるが、これに加えて10分程度より短い時間スケールの変動の拡散への影響も考慮する必要があること、地上放出を想定した数値実験により、放出点近傍の建物影響を考慮してLES計算の適用範囲を検討する必要があること、一定の間隔で分割した風向ごとの風況データベースを活用する上で、風向の分割幅の計算への影響に関する知見を収集する必要があることが抽出された。

参考文献

[5-1] S. Chatani, M. Okumura, H. Shimadera, K. Yamaji, K. Kitayama, S.N. Matsunaga, Effects of a Detailed Vegetation Database on Simulated Meteorological Fields, Biogenic VOC Emissions, and Ambient Pollutant Concentrations over Japan, Atmosphere, 9, 179(2018).

[5-2] I. Van der Hoven, Power spectrum of horizontal wind speed in frequency range from 0.0007 to 900 cycles per hour, Journal of the Atmospheric Sciences, 14, 160-164(1957).

■6章　局所域高分解能な線量評価システム「3D-ADRES-Outdoor」試計算

6.1 本章の概要

本章（6 章）では、PHITS および 3D-ADRES-Outdoor を用いてクラウドシャインおよびグランドシャインによる地上線量率と建屋内線量率の推定試計算を実施した結果を報告する。具体的には、地表モデルとして、一様平面モデルと地形変化（段差）モデルを作成し、各々のモデルで屋外線量率（地上 1m 高さ）を計算する。また、一般住宅、集合住宅、公共建屋の 3 種類の建屋モデルを用い、それぞれの建屋内（主に中心点で床 1m 高さ）での線量率を評価する。さらに、CFD コードである LHADDAS の局所域高分解能大気拡散計算コード LOHDIM-LES（Local-scale High-resolution Atmospheric Dispersion Model using Large-Eddy Simulation）と 3D-ADRES-Outdoor を連携させることで、時間変化する大気拡散と共に線量率の動的変化を推定する試みを実施する。また、屋内の気流と拡散をシミュレーションする CFD コード:OpenFOAM を用い、3D-ADRES-Outdoor と連携させ、線量率の屋内分布の動的変化を試計算する。

LHADDAS の線量率評価コードである SIBYL（Simulation code powered BY Lattice dose-response function）は、事前計算により、地上評価点に対する線量率寄与を与える応答関数を使った手法を採用している。それゆえ、その都度、線量率分布計算を行う方法と比べて格段に短時間で結果を得ることが可能である。当該応答関数法については、5 章にて記したが、一様平面地形及び地形変化を含む場合に加え、地上構造物による遮蔽等を考慮するため、線量率寄与を補正する手法も取り入れ、家屋等による遮蔽効果を考慮する。

その一方、3D-ADRES-Outdoor は、線量率評価に PHITS を用い、地形変化や遮蔽物を精度良くモデル化することで、遮蔽効果だけでなく散乱の効果をも精度良く取り入れることができるが、十分な統計精度を有する結果を得るには、多くの計算時間が必要となる。それゆえ、3D-ADRES-Outdoor でも、SIBYL と同様に応答関数を用いる手法を整備した。応答関数を用いる場合、遮蔽物による遮蔽効果や散乱の効果を精度良く取り込む応答関数テーブルを与える手法を採用した。この手法の採用により、少ない計算時間で結果を得る一方、構造物の効果をより正確に取り込むことが可能となる。実際、3D-ADRES-Outdoor の一様平面モデルでは、地上線量率の分布が SIBYL の結果と良く一致することが確認される。また、地形変化モデルでは、地形の影響が線量率に顕著に現れることが示される。特に、地形変化が大きい場所では、線量率が大幅に変化することが確認される。さらに、建屋内線量率の評価では、建屋の種類と配置等による線量率への影響が明確に考慮され、特に屋根と外壁による減衰が顕著となる。また、CFD コード LHADDAS と 3D-ADRES-Outdoor の連携により、実時間での線量率の動的変化を推定することが可能となることが示される。なお、本事業では、建屋モデルとして一般住宅、集合住宅、公共建屋の 3 種類を使用し、それぞれの建屋内での線量率を評価する。一般住宅の外観および内部構造、集合住宅の外観および内部構造、公共建屋の外観および内部構造については、詳細な設定が可能であり、建屋内の材料組成や密度も表形式で設定され、詳細な計算が行われる。

動的な放射性物質拡散に伴う線量率の変化についても、3D-ADRES-Outdoor と LHADDAS の CFD コードとの連携により、線量率の経時変化が推定可能となる。具体的には、LHADDAS の LOHDIM-LES を用いて放射性物質濃度分布の経時変化を計算し、その結果を 3D-ADRES-Outdoor に入力することで、線量率の動的変化が評価可能となる。これにより、災害時の緊急時対応や環境モニタリングにおいて、上記連携システムの活用が期待される。

以下、本章（6 章）の概要を記す。6.2 では、3D-ADRES-Outdoor を用いて、一様平面状の地形にお

いて、クラウド及びグランドシャインの効果を計算し、SIBYL との比較を行い、その後、地形変化を取り込んだモデルの他、建屋を含む建屋内線量率計算を実施する他、典型的居住環境（住宅が集合している市街地のモデル）内での建屋内線量率計算を実施した計算結果を示す。その後、LHADDAS と連携し、クラウドシャイン及びグランドシャインの効果を建屋内にて計算する連携試計算結果を示す。次に、6.3 では、3D-ADRES-Outdoor と屋内 CFD（LES）計算を連携させ、屋内での線量率計算を行い、屋内での線量率分布試計算結果（動的変化を含む）を様々な屋内環境を模擬したモデルにて実施し、その結果を報告する。6.4 は、上記の試計算結果のまとめとし、試計算とその課題について論じる。

6.2 3D-ADRES-Outdoor を用いたクラウド及びグランドシャインによる地上及び建屋内線量率の推定

本節（6.2）で取り扱う計算モデル全体の体系を図 6-1 に示す。PHITS でクラウド及びグランドシャインの計算を行うため、ジオメトリ全体の大きさを半径 1000[m]の直円柱で構成した。円柱には、厚さ 1001[m]の空気層と 1[m]の土壌層が含まれる。空気と地面の境界は平坦な表面のモデルと、地面に変形(段差)を加えたモデルの二つを作成した。この円柱の中に縦 1001[m]×横 1001[m]×高さ 1001[m]の立方体を設定し、立方体の中にクラウドシャインを計算するため、文献[6-1]を参照して、縦 1[m]×横 1[m]×高さ 1[m]の格子を作成した。また、グランドシャインを計算するために縦 1[m]×横 1[m]の格子を設定した。また、この格子の中に汚染物質である Cs-137 が土壌表面に沈着するとし、1.0(kBq/m^2)で一様に分布すると仮定した。空気層については、1.0(kBq/m^3)で一様に分布すると仮定した。後述する建屋モデルを含め、計算に用いた物質の組成と密度を表 6-1 と表 6-2 に示す。なお空気層の半径及び高さは、Cs-137 (γ 線：662keV、放出率 85.1%)の空気中平均自由行程(108m)の約 9 倍以上に相当する。なお、当該領域の大きさは、空気及び土壌による散乱、吸収を考慮した無限の一様汚染を模擬する領域として十分な条件を満たしている。次に、線量率を評価する代表点の高さは、地上線量率の推定計算、建屋内線量率の推定計算の両方で地表から 1[m]の高さとし、立方体の中心とした。

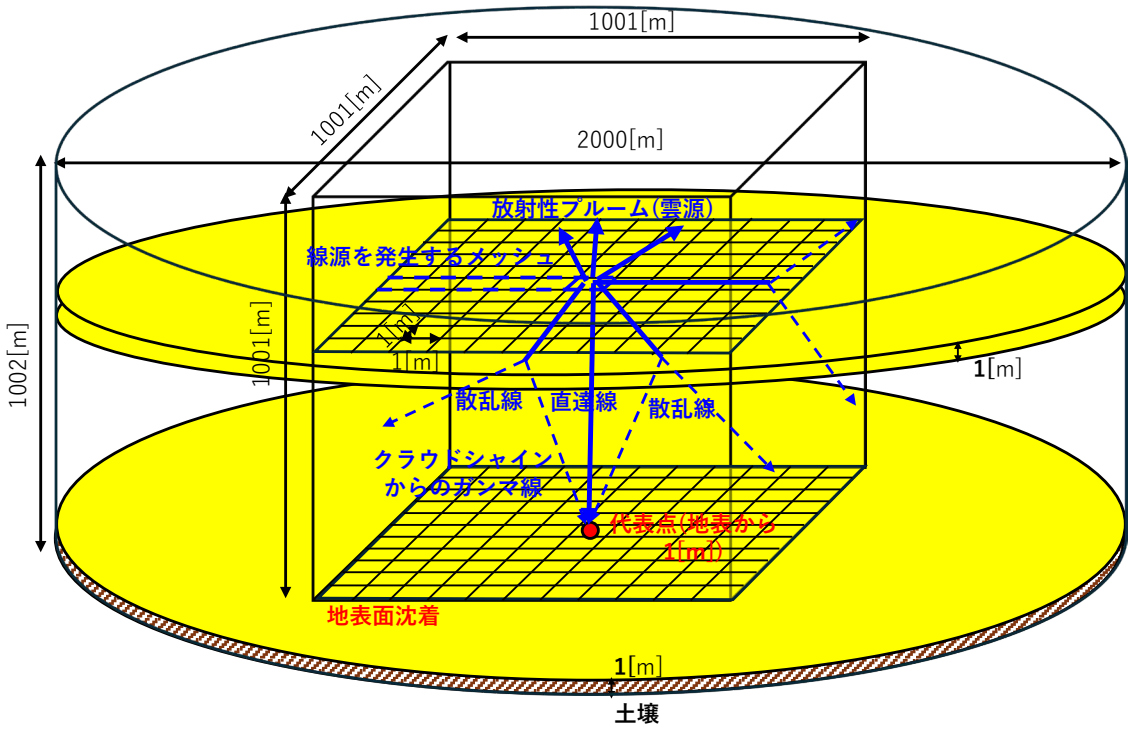

1001[m]
1001[m]
2000[m]
放射性プルーム(雲源)
線源を発生するメッシュ
1[m]
1001[m]
1002[m]
1[m]
散乱線
直達線
散乱線
クラウドシャイン
からのガンマ線
代表点(地表から
1[m])
地表面沈着
1[m]
土壌

図 6-1　計算モデル

表 6-1　物質情報 1：土壌、空気、木材、瓦、コンクリート

物質名	土壌	空気	家屋(木材)	家屋(瓦)	コンクリート
密度 [g/cm^3]	1.6E+00	1.2E-03	5.3E-01	2.2E+00	2.15E+00
元素	組成比	組成比	組成比	組成比	組成比
H	2.10E-02	6.4000E-04	6.0E-02	—	5.34380E-03
C	1.60E-02	1.4000E-04	4.95E-01	—	—
O	5.77E-01	2.3555E-01	4.40E-01	4.84345E-01	4.10620E-02
N	—	7.5086E-01	1.00E-03	—	—
Na	—	—	—	7.60800E-03	—
Mg	—	—	—	1.06910E-02	6.12620E-05
Al	5.00E-02	—	—	1.22125E-01	2.14020E-04
Si	2.71E-01	—	—	2.94194E-01	1.77980E-02
P	—	—	—	1.13000E-04	—
Ar	—	1.2810E-02	—	—	—
K	1.30E-02	—	—	2.04270E-02	—
Ca	4.10E-02	—	—	1.89570E-02	2.21910E-03
Ti	—	—	—	4.66800E-03	—
Mn	—	—	—	6.40000E-05	—
Fe	1.10E-02	—	—	3.68040E-02	6.73600E-04

表 6-2　物質情報 2：ガラス、ガルバ鋼板、サイディングボード

物質名	ガラス	ガルバ鋼板	サイディングボード
密度 [g/cm^3]	2.4	7.85	1.10
元素	組成比	組成比	組成比
H	—	—	2.60E-02
C	—	—	2.04E-01
N	—	—	1.00E-03
O	4.60E-01	—	3.97E-01
Na	9.60E-02	—	1.00E-03
Mg	—	—	8.00E-03
Al	—	3.00E-02	1.50E-02
Si	3.37E-01	—	5.80E-02
P	—	—	1.00E-03
S	—	—	6.00E-03
K	—	—	3.00E-03
Ca	1.07E-01	—	2.69E-01
Ti	—	—	1.00E-03
Fe	—	9.10E-01	1.10E-02
Zn	—	6.00E-02	—

6.2.1 3D-ADRES-Outdoor を用いたクラウド及びグランドシャインによる地上線量率推定計算

① 一様平面モデルの概要

最初に、3D-ADRES-Outdoor の機能や精度を試験するため、図 6-2 に示すように、地上を模したモデルとして、一様な水平面から成る地表を想定し、地上 1[m]の代表点に対するクラウド及びグランドシャインによる地上線量率の推定を行う。クラウドシャインは大気中に定義した各格子から、グランドシャインは地表に定義した各格子から射出される γ 線のうち、代表点にたどり着くもの(直達線、散乱線)を「代表点に対する各格子点からの線量率寄与」と定義した。なお、各格子内の大気中放射性物質濃度や地上沈着放射性物質の量により各格子からの γ 線射出量が決まるが、事前準備として、各格子内の放射性物質濃度や物質量に対し、単位濃度及び単位量(土壌表面には 1.0[kBq/m^2]を与える他、空気層には、1.0[kBq/m^3])を与え、寄与率を求めた。なお、寄与率の計算は、PHITS の放射線シミュレーションを用いて行った。計算モデルにおいて、格子の大きさは、文献[6-1]を参照し、土壌表面の場合、縦 1[m]×横 1[m]の正方形、空気層の場合、縦 1[m]×横 1[m]×高さ 1[m]の立方体とした。本来なら格子数分だけ計算を実施するが、計算時間を短縮するため、PHITS の放射線シミュレーションでは、モデルの対称性を利用し縦一列分（1 から 501 までの 501 個の格子）の寄与率を計算する（図 6-5 参照：詳細を記載)。また、PHITS には、point タリーと track タリーの二つあるが、二つの計算結果（例：10m 高さからのクラウドシャインの寄与率の水平方向距離に対する変化）は、図 6-3 に示すように、point タリーを用いた場合、少ないヒストリー数で、Cs-137 の γ 線の空気中平均自由行程 108[m]の 2 倍程度となる 200[m]位まで、ほぼ同じ値を示すことが分かる。従って、今般の計算では、計算時間が短く、計算精度も十分に要求を見たす point タリーを使用することとした。また、統計誤差の目標値は、3[%]から 10[%]とし、PHITS のオプションである stdcut を利用して、3[%]以下となった粒子の追跡は止めて計算時間を短縮した。

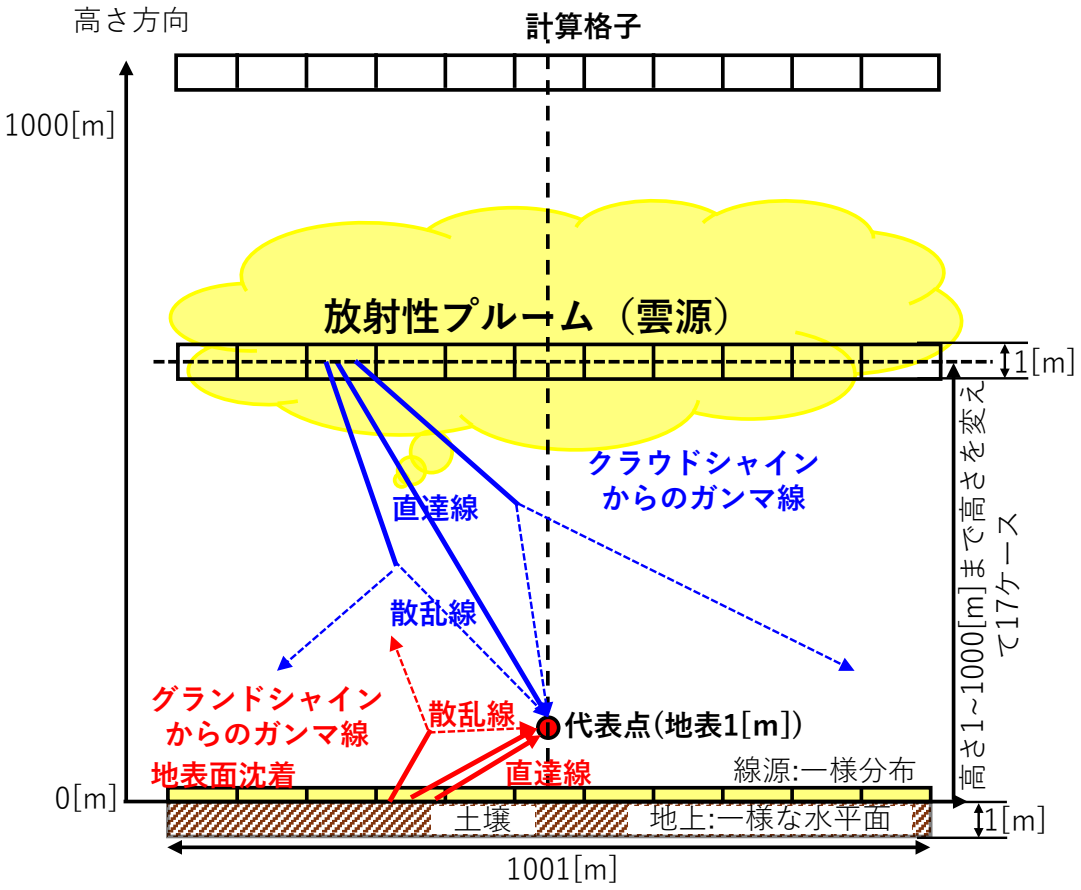
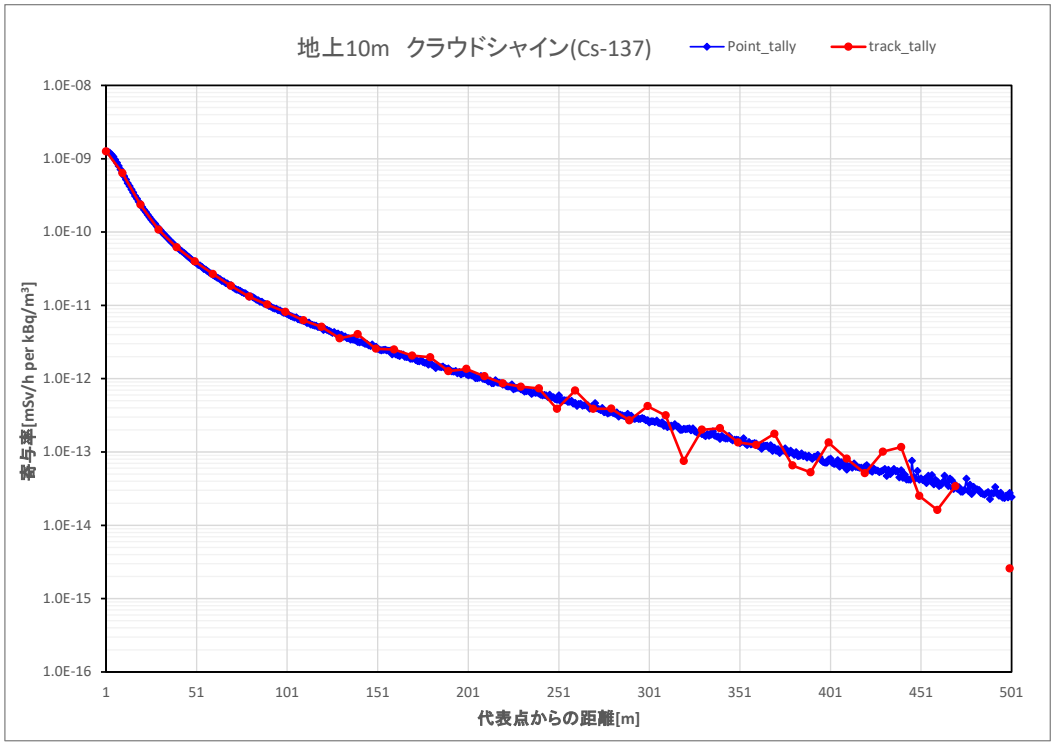


図 6-2　一様な水平面から成る計算モデルの概要



Cs-137のガンマ線の空気中平均自由行程は108m
○track tallyのヒストリー数：62億、代表点からの距離108mでの統計誤差6.65%
○point tallyのヒストリー数：18億、代表点からの距離108mでの統計誤差2.17%

図 6-3 クラウドシャインからの寄与率：地上から 10m高さのクラウドシャインの寄与率の水平方向距離に対する変化（point 及び track タリーを用いた比較）

(1) 一様平面モデルの作成

作成した一様平面モデルの鳥瞰図を PHITS の描画機能を使用して作画し、図 6-4 に示す。ジオメトリの大きさは、半径 1000[m]の直円柱で構成される。円柱は、厚さ 1001[m]の空気層と 1[m]の土壌層が含まれる。空気と地面の境界は平坦な表面のモデルとした。この円柱の中に、縦 1001[m]×横 1001[m]×高さ 1001[m]の立方体を設定し、立方体の中にクラウドシャイン計算用に縦 1[m]×横 1[m]×高さ 1[m]の格子を、グランドシャイン計算用に縦 1[m]×横 1[m]の格子を設定した。この格子の中に汚染物質である Cs-137 を土壌表面の沈着として 1.0(kBq/m2)で、一様に分布すると仮定した。空気層については、1.0(kBq/m^3)で、一様に分布すると仮定した。計算を行う格子は、図 6-5 に示すようにモデルの対称性を利用して縦一列分 1 から 501 までの 501 個の格子の寄与率を計算した。高さ方向は、図 6-6 に示すように地表から 1,000[m]までを(地表, 1, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100, 200, 350, 500, 750, 1000[m])の 16 ケースの計算を行った。なお、代表点からの距離が遠くなるほど統計誤差を小さくするのに計算時間を要するので、Cs-137 のガンマ線の空気中平均自由行程である 108m の 2 倍 200[m]をカットオフ（計算を打ち切る）の目途とし、200[m]までは、統計誤差の目標値 10[%]以下になるまで計算を行った。なお、これ以上遠い格子に関しては適宜計算を打ち切ることとした。

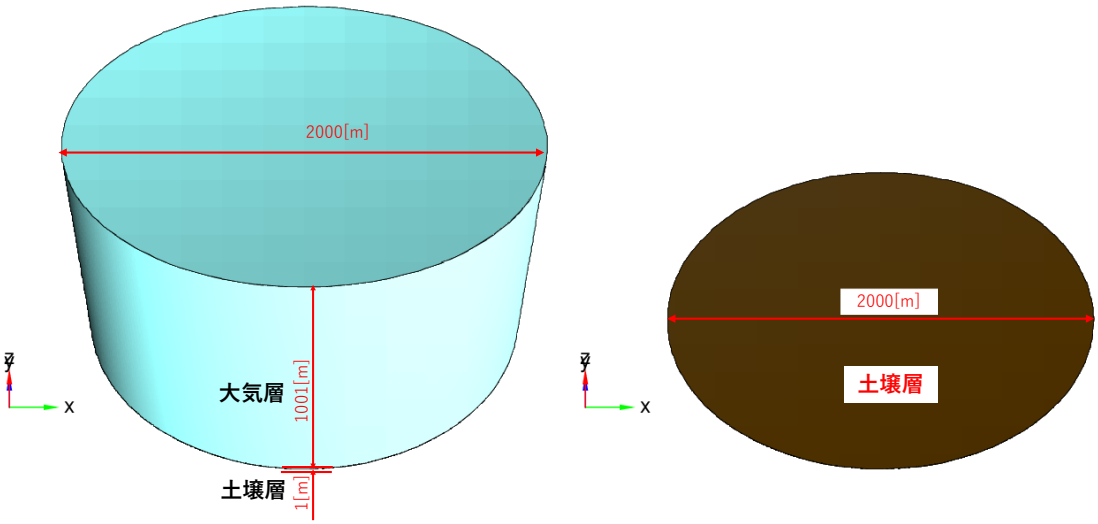


図 6-4　一様平面の計算モデル(鳥瞰図：PHITS)

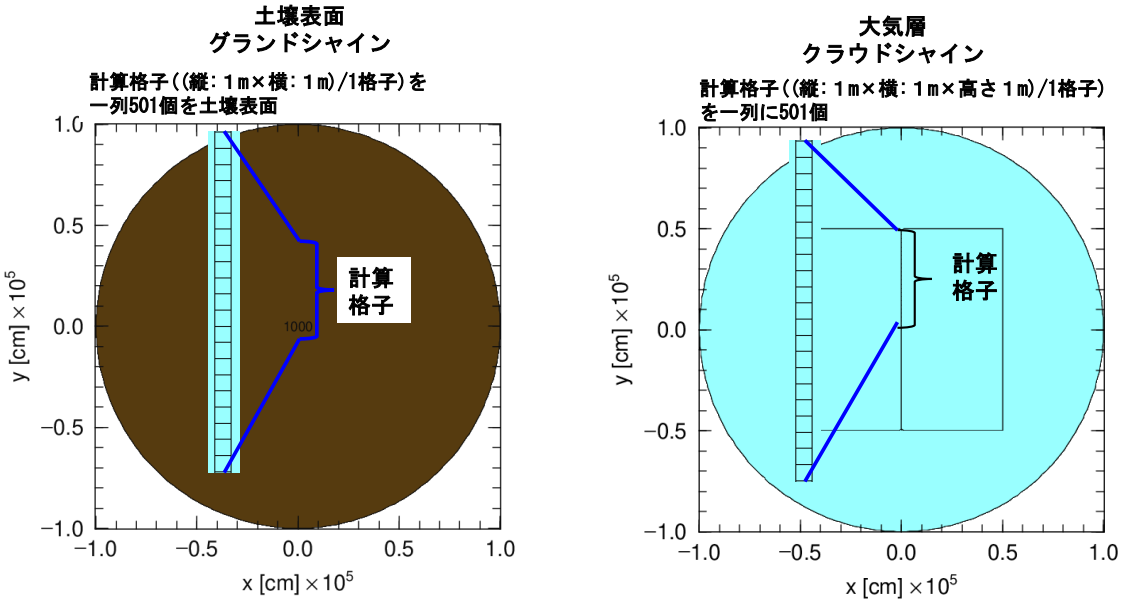


図 6-5　一様な水平面の計算モデル(平面図：PHITS)

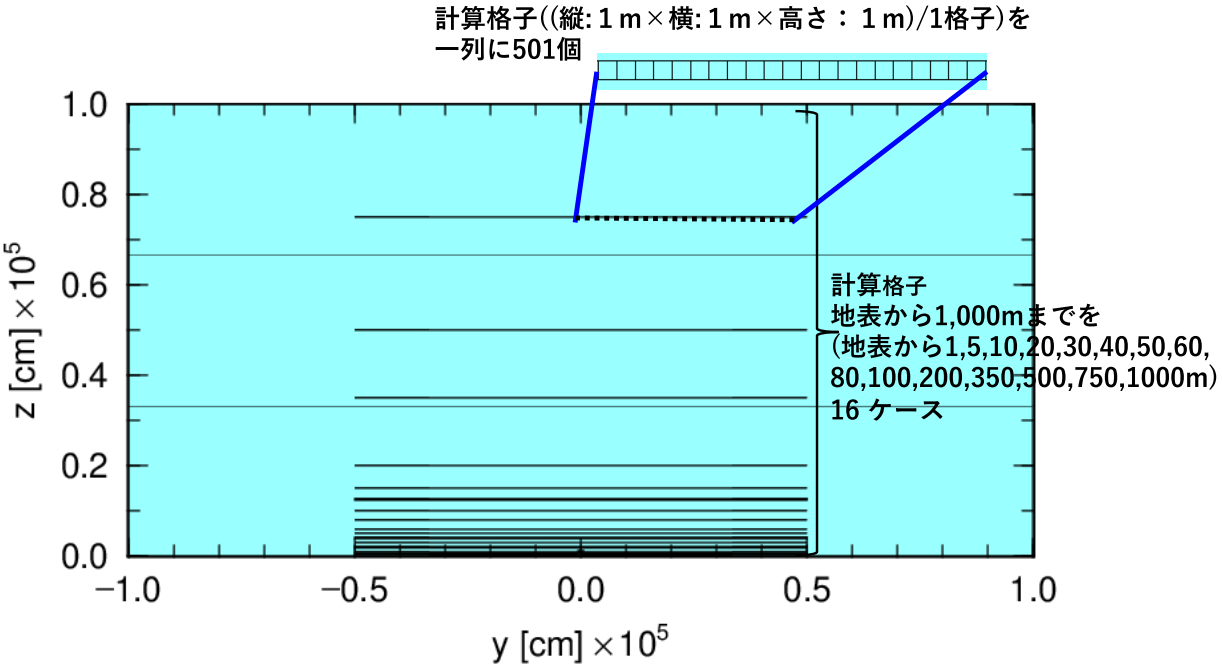


図 6-6　一様な水平面の計算モデル(断面図：PHITS)

(2) 一様平面モデルの計算結果

作成したモデルの妥当性を確認するため、LHADDAS で使用している SIBYL のテーブルをグラフに示し、図 6-7 に全体と図 6-8 に主要部分（比較対象）の拡大図に示す。また、図 6-9 にクラウドシャイン地上 10[m]の SIBYL と PHITS のデータをグラフにして示す。PHITS では代表点から遠い格子からの寄与率は統計誤差が大きいため、多少のふらつきは見られるが、200[m]以内の範囲では、グラフはほぼ重なっているように見え、PHITS は SIBYL の結果をよく再現していることが分かる。

次に、PHITS の計算結果を図 6-10 と図 6-11 に示す。PHITS では、統計誤差の影響からデータのふらつきは大きいが、文献[6-1]にも記載があったように、SIBYL のグラフ図 6-8 と PHITS のグラフ図 6-11 に、同じように代表点から 250[m]離れた地点でクラウドシャイン 10[m]と 100[m]の寄与率が逆転するという現象も再現している（1 辺 1m の立方体から代表点に直達する放射線量が逆転するため）。

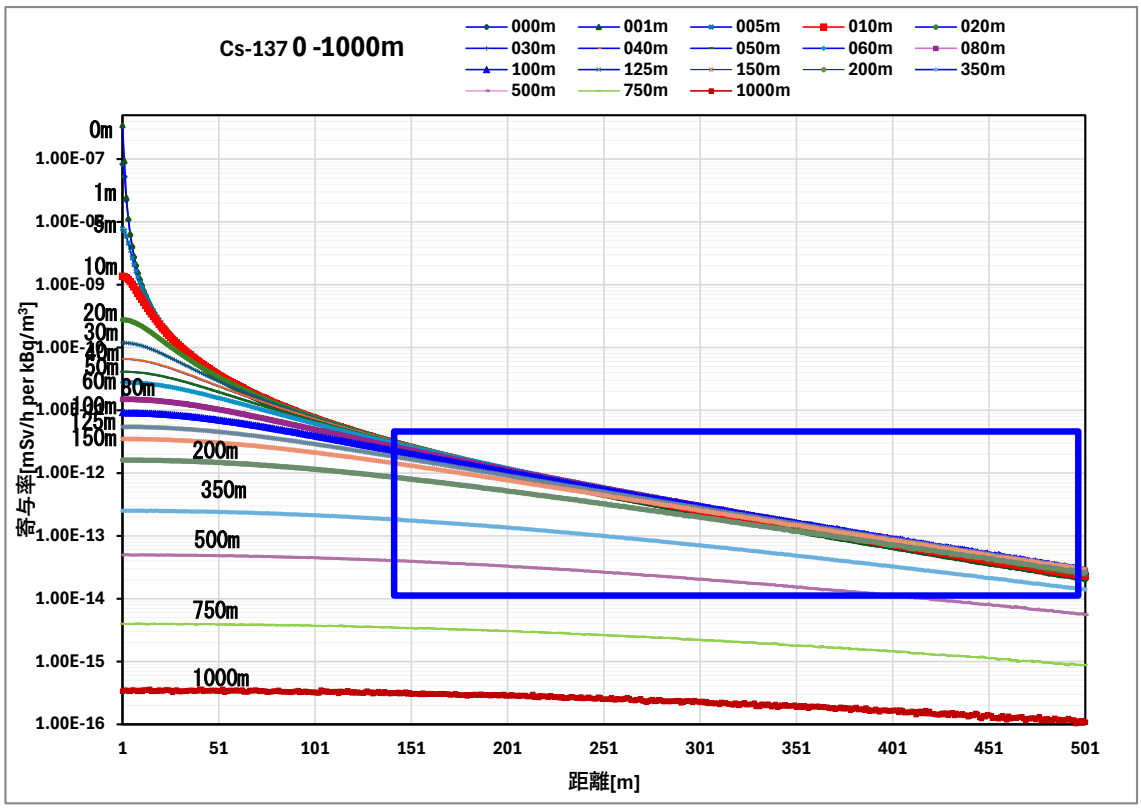


図 6-7　一様な平面の SIBYL のテーブル（グラフ化し表示）

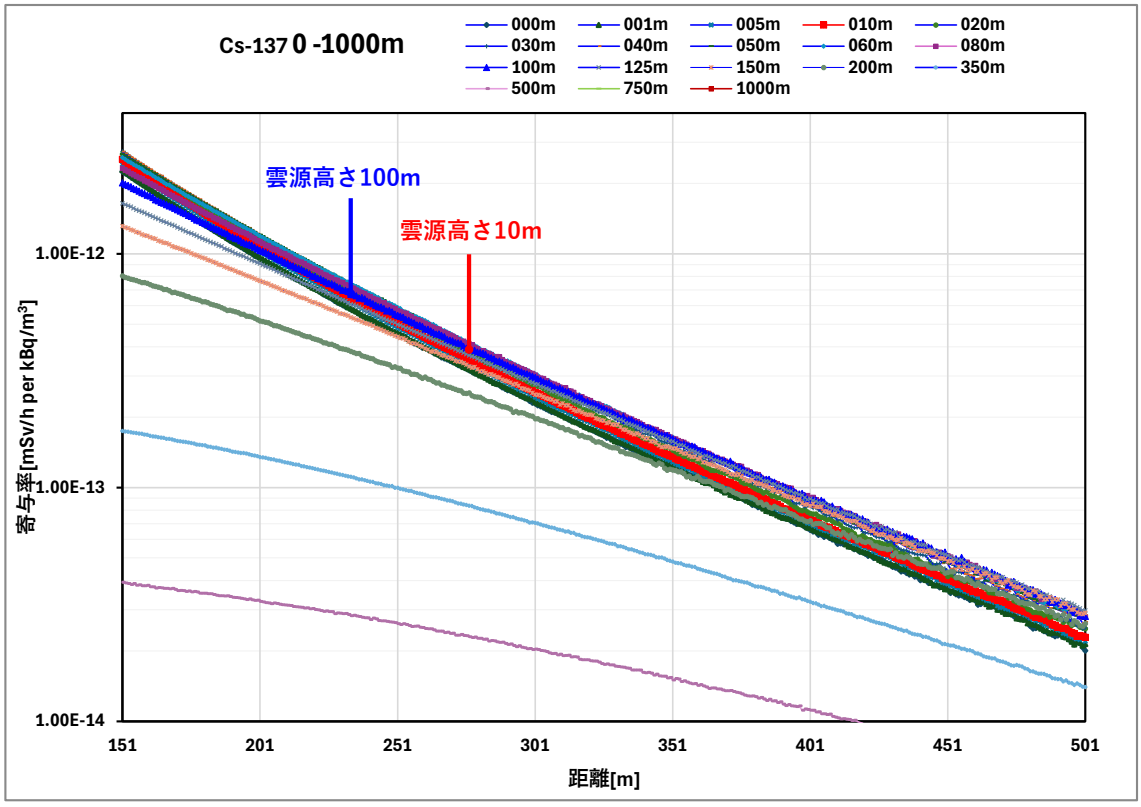
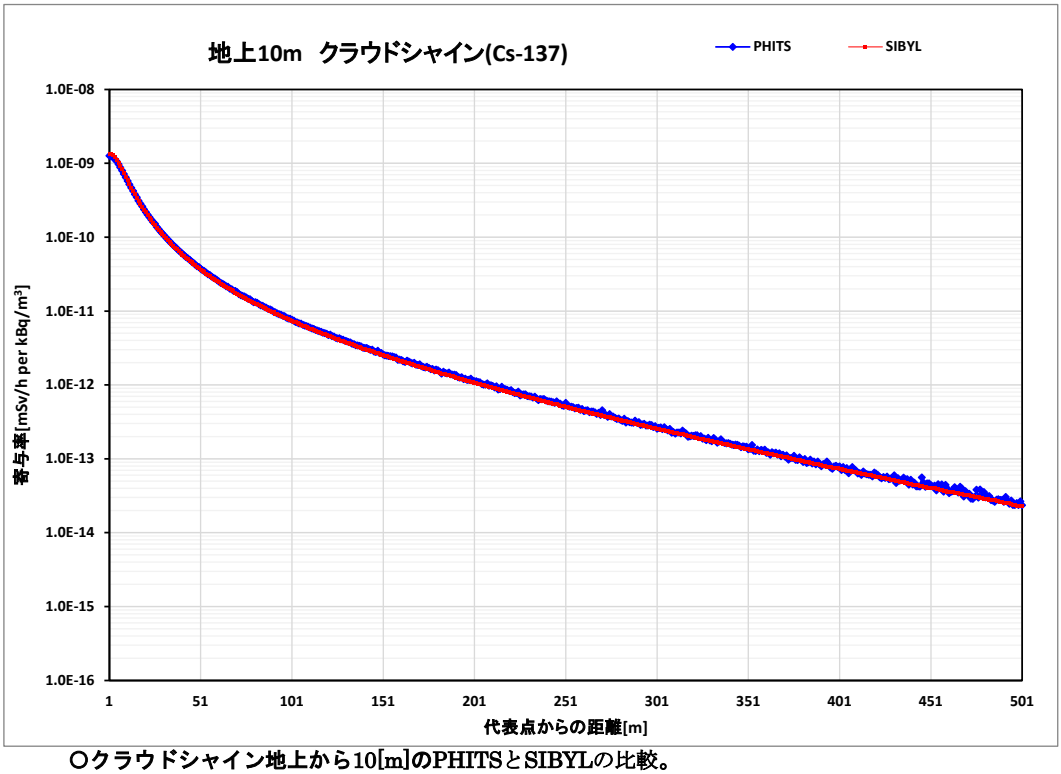


図 6-8　一様な平面の SIBYL のテーブル(図 6-7 の主要部の拡大図)



○クラウドシャイン地上から10[m]のPHITSとSIBYLの比較。
Cs-137のガンマ線の空気中平均自由行程の108mの2倍にあたる200[m]程度の
範囲であればデータのふらつきも少なくSIBYLをよく再現できている。

図 6-9　クラウドシャイン寄与率：地上から 10[m]の PHITS と SIBYL の比較

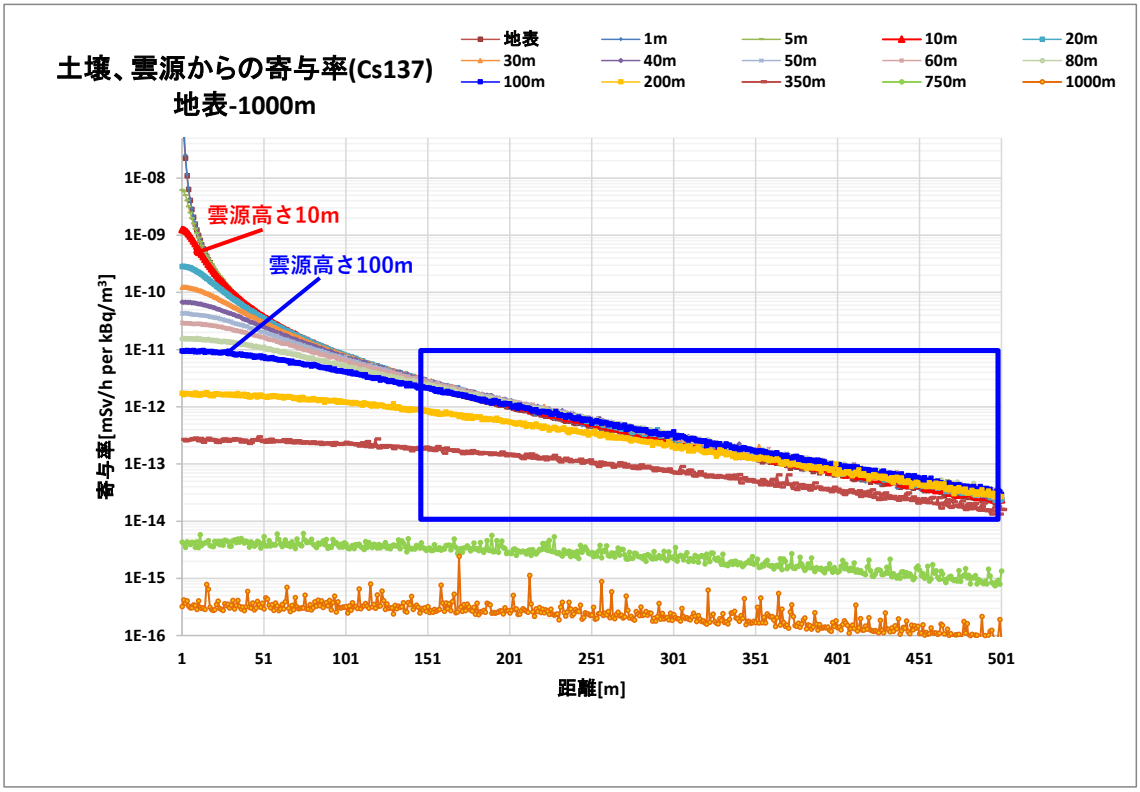


図 6-10　一様な平面モデルでの PHITS 計算結果（寄与率）

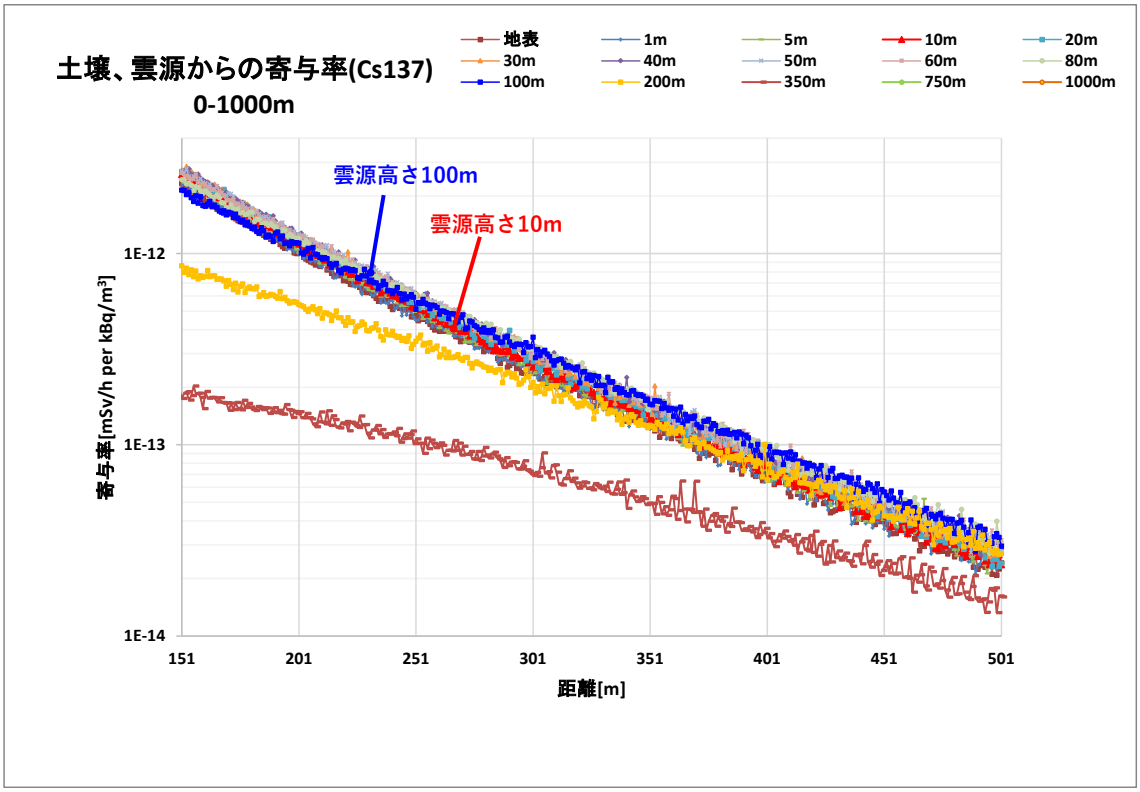


図 6-11　一様な平面モデルでの PHITS 計算結果(図 6-10 の主要部の拡大図)

② 地形変化(段差)有りモデルの概要

図 6-12 に示すように、前節「①一様平面モデルの概要」で作成したモデルに、代表点から 50[m]離れて 10[m]、100[m]離れて 30[m]の段差を各々、地表に加えて地形変化（段差）有りのモデルを作成した。

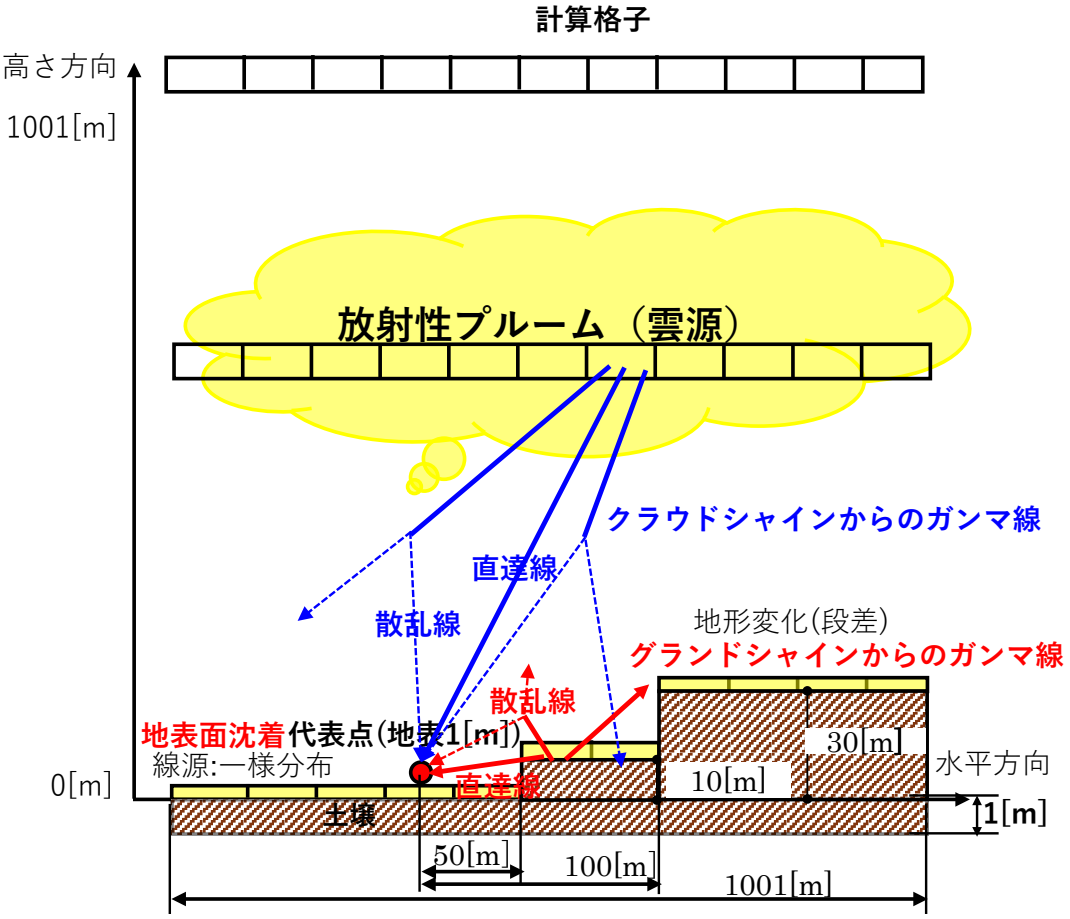


図 6-12　地形変化(段差)から成る計算モデルの概要

(1)　地形変化(段差)有りモデルの作成

作成した地形変化(段差)有りの計算モデルの鳥瞰図を PHITS の描画機能で作画して図 6-13 に示す。概要に示したように、一様な地平面に対して代表点から 50[m]離れて 10[m]、100[m]離れて 30[m]の段差を地表に与える地形変化を加えたモデルを作成した（図 6-14, 図 6-15 参照）。この地形変化以外は一様平面モデルと同じとした。

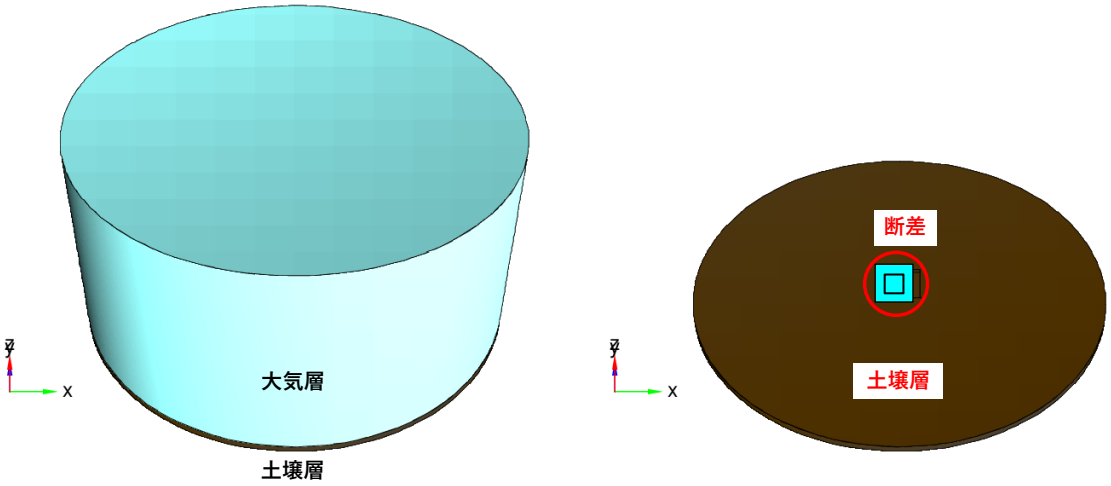


図 6-13　地形変化(段差)の計算モデル(鳥瞰図：PHITS)

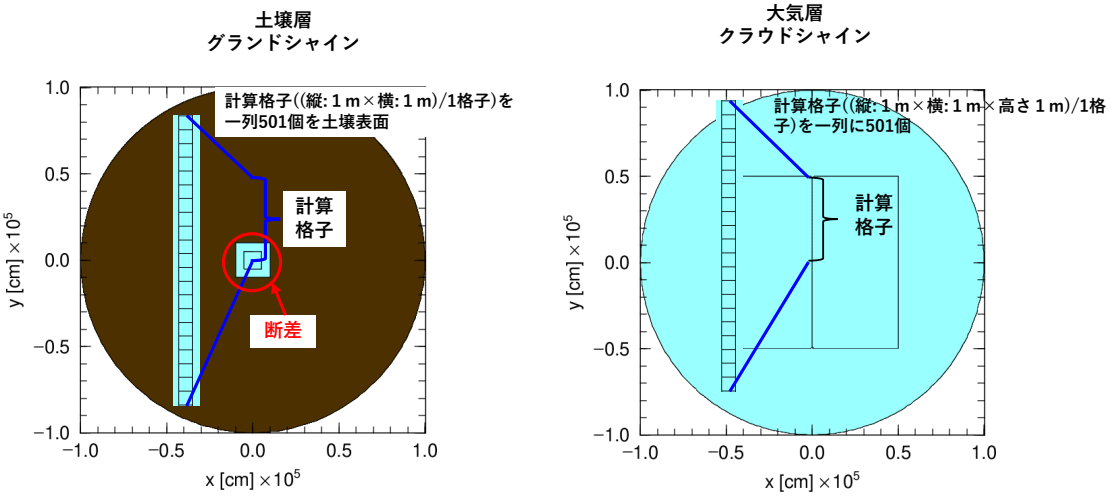


図 6-14　地形変化(段差)の計算モデル(平面図：PHITS)

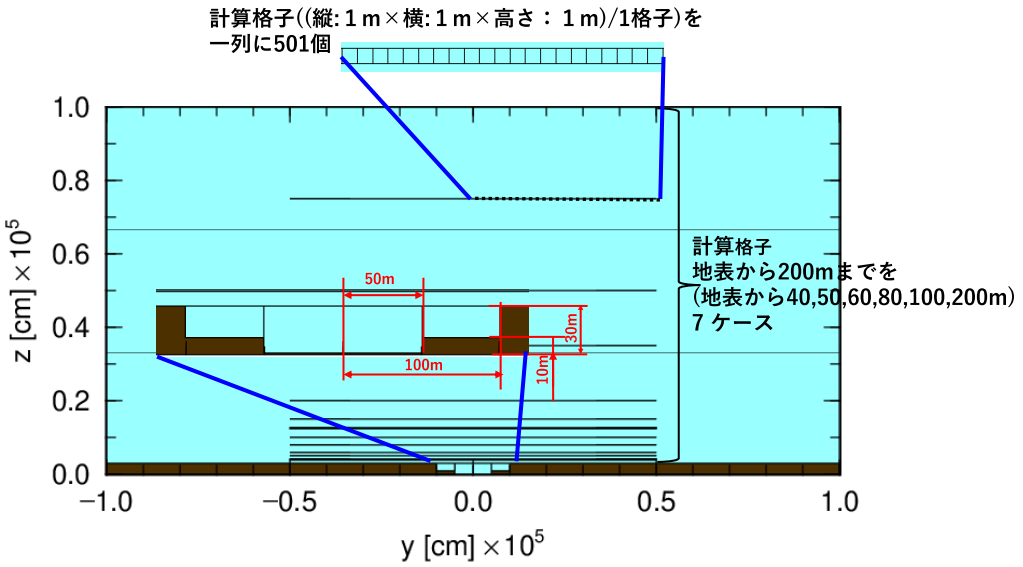


図 6-15　地形変化(段差)の計算モデル(断面図：PHITS)

(2) 地形変化(段差)有りモデルの計算

作成した地形変化(段差)有りモデルを使用し、地表のグランドシャイン(0[m])とクラウドシャインの高さ(40, 50, 60, 80, 100, 200[m])の計算を行った。結果のグラフを図 6-16 と図 6-17 に示す。グラフに示すように地形変化(段差)が寄与率を階段状に減衰させるという結果が得られた。図 6-17 のグラフで寄与率に地形変化(段差)が及ぼしている影響が顕著と思われる部分を拡大して表示した。このグラフからクラウドシャインの高さ方向の位置が高くなるほど地形変化(段差)が寄与率に与える影響が代表点から遠くなることがわかった。また、一様平面と比較したグラフを図 6-18 と図 6-19 に示す。このグラフからクラウドシャインの高さ方向の位置が高くなるほど影響が小さくなり、200[m]になると一様平面より減衰幅は大きいが、段差による階段状の変化は見られなくなる。

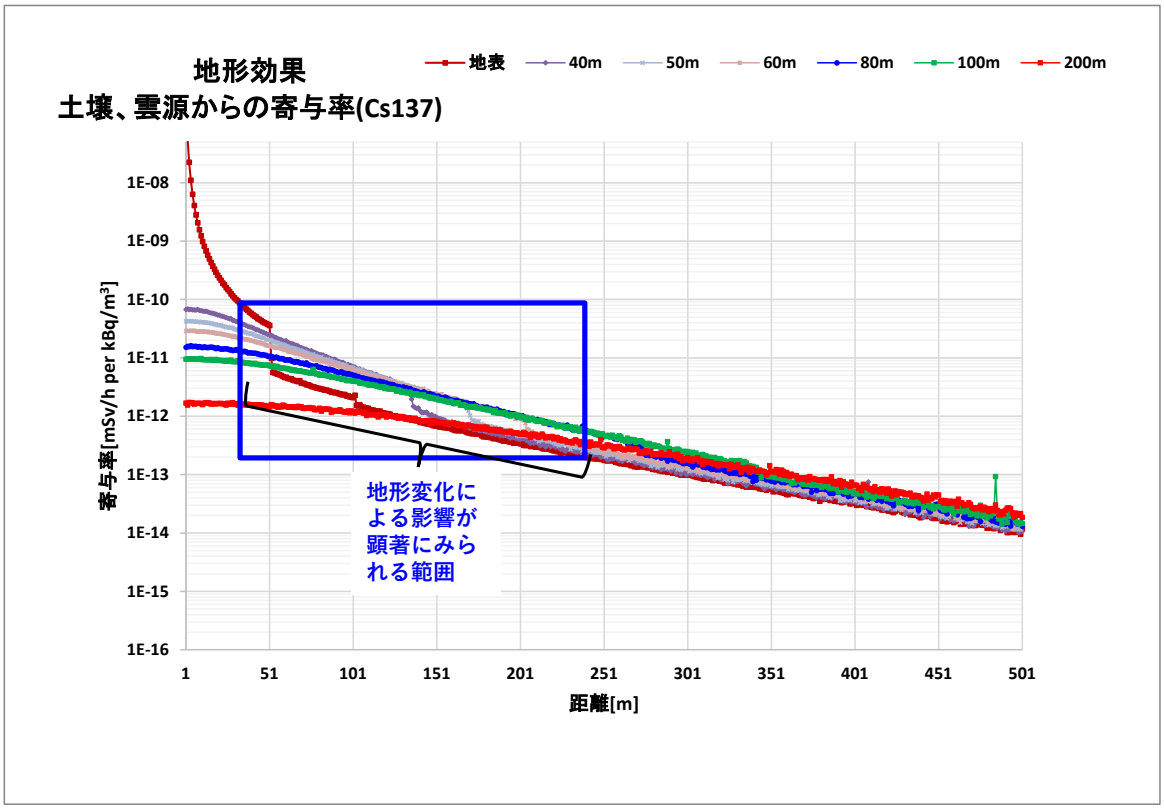


図 6-16 地形変化(段差)の PHITS 計算結果

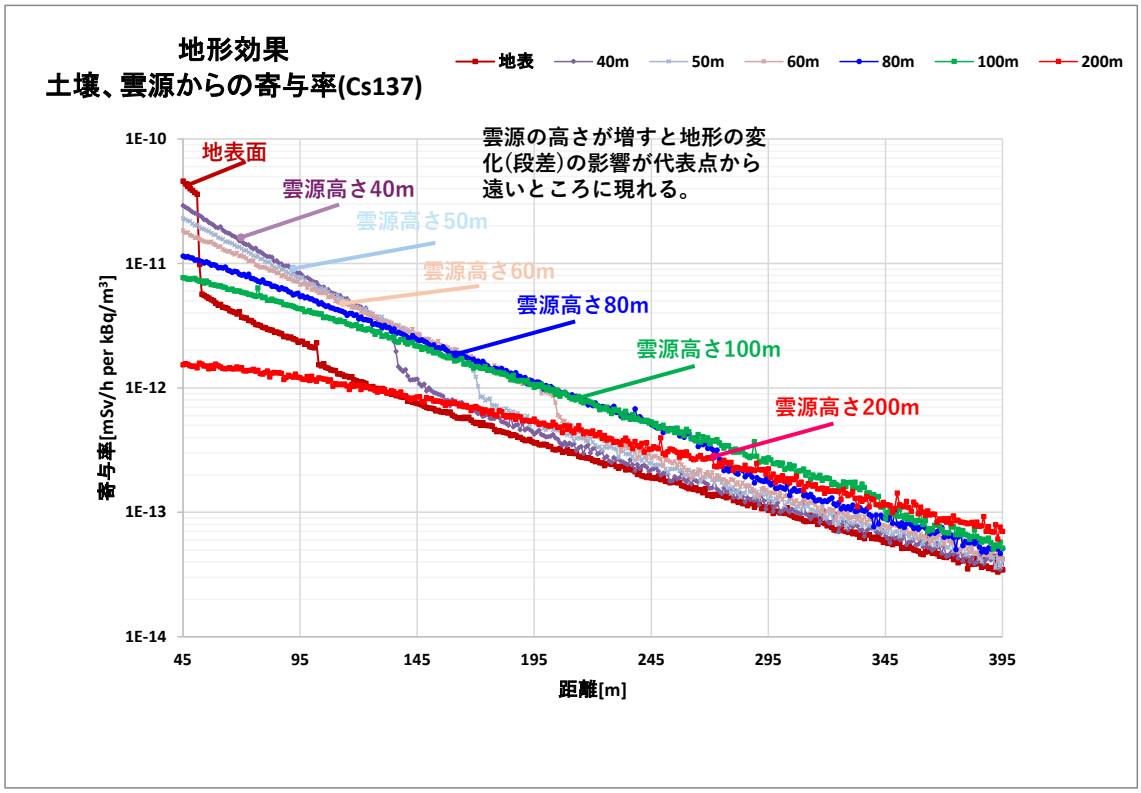


図 6-17　地形変化(段差)の PHITS 計算結果(図 6-16 の一部拡大図)

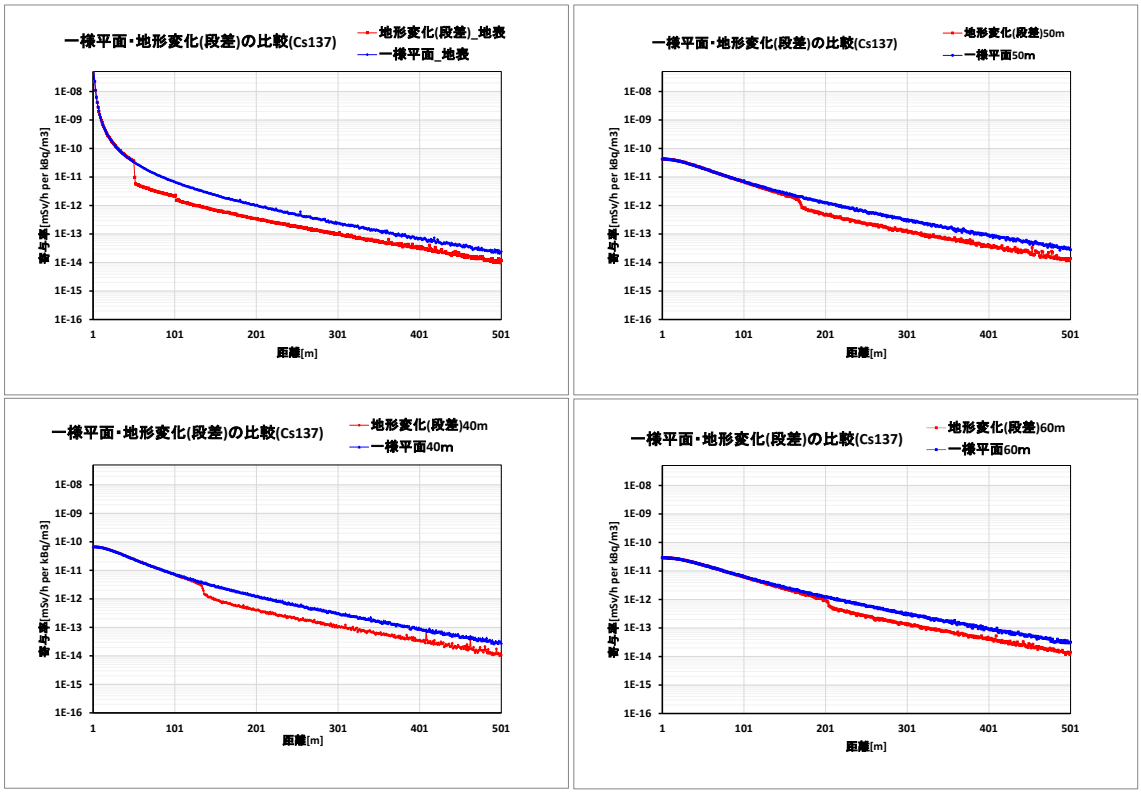


図 6-18　一様平面・地形変化の比較(地表面、40m、50m、60m)

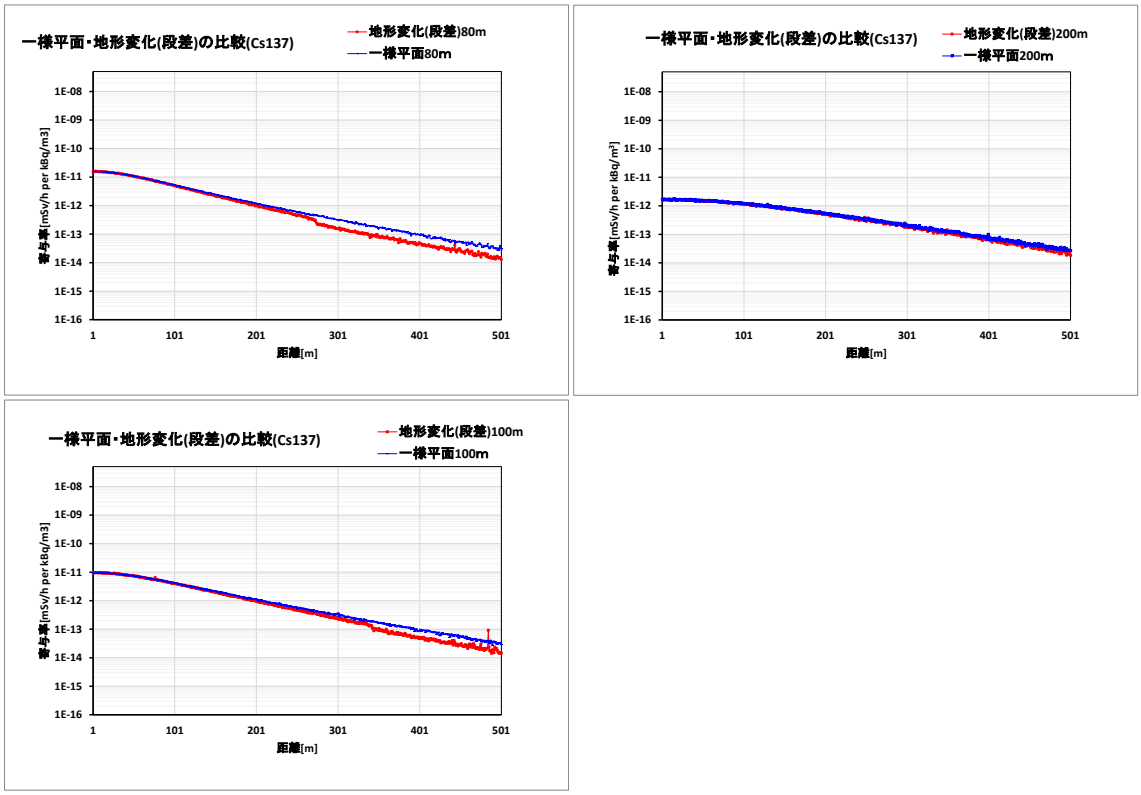


図 6-19　一様平面・地形変化の比較(80m、100m、200m)

6.2.2 3D-ADRES-Outdoor を用いたクラウド及びグランドシャインによる建屋内線量率の推定計算

① 建屋のモデル(一般住宅、集合住宅、公共建屋)

建屋内に対する寄与率を計算するため、3D-ADRES-Outdoor の建屋モデルを使用した。3D-ADRES-Outdoor の試計算の入力データより抜き出した 3 種類の建屋（一般住宅、集合住宅、公共建屋）の鳥瞰図を PHITS の描画機能を使用して描画した。一般住宅の外観を図 6-20 に内部を図 6-21 に示す。集合住宅の外観を図 6-22 に内部を図 6-23 に示す。公共建屋の外観を図 6-24 に内部を図 6-25 に示す。各建屋に用いられている材質の組成は 6.2 に記載した表 6-1 と表 6-2 を使用した。なお、簡単化のため、3 種類の建屋は、各内部の鳥瞰図に示すように 1 階と 2 階の仕切りとなる床はあるが、室内の間仕切りとなる壁等はない。

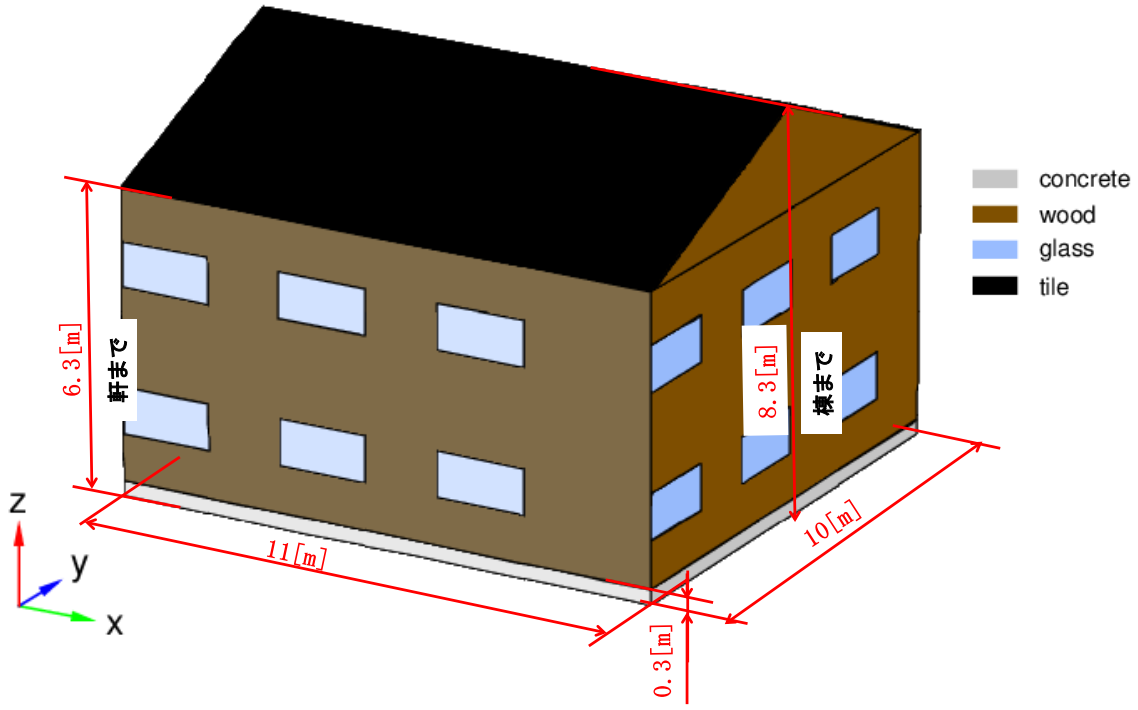


図 6-20　一般住宅外観（鳥瞰図）

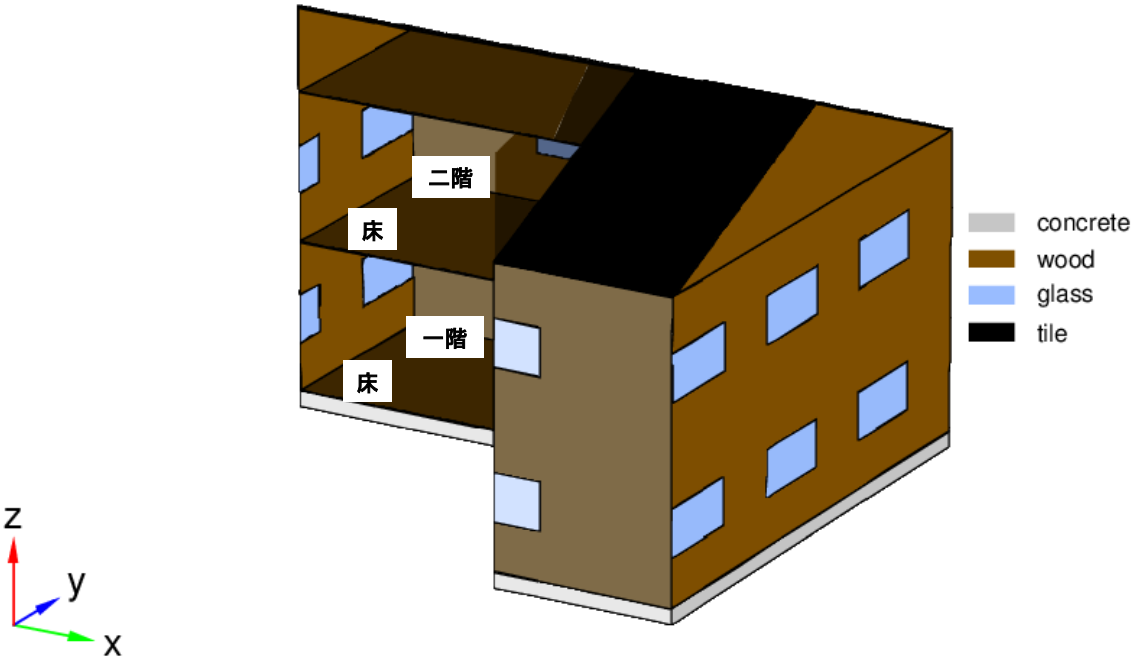


図 6-21　一般住宅内部(鳥瞰図)

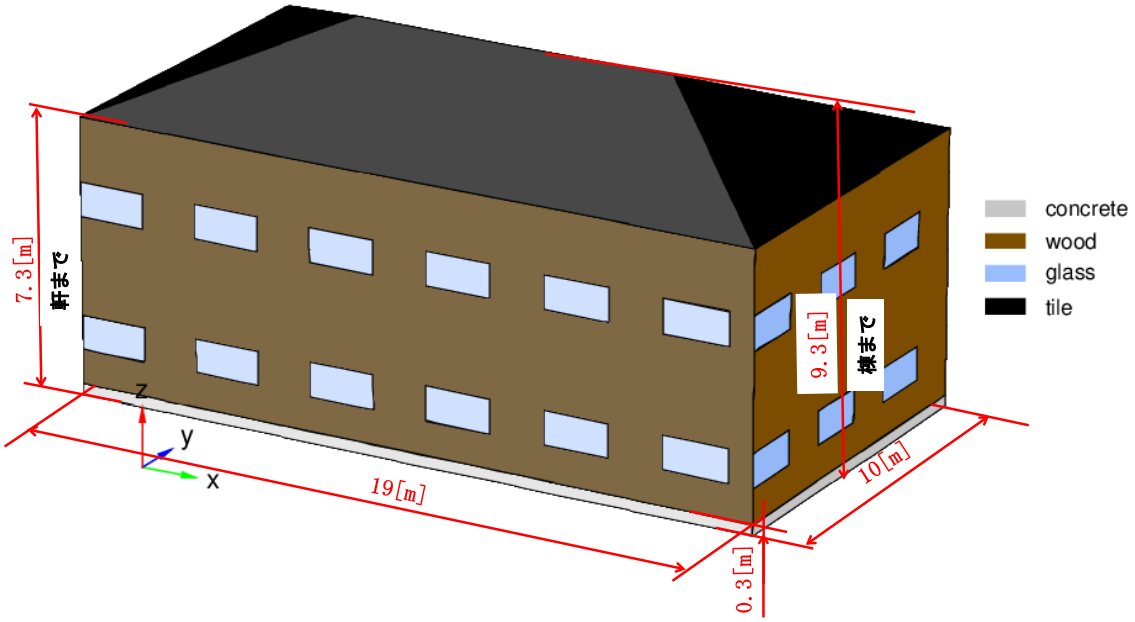


図 6-22　集合住宅外観(鳥瞰図)

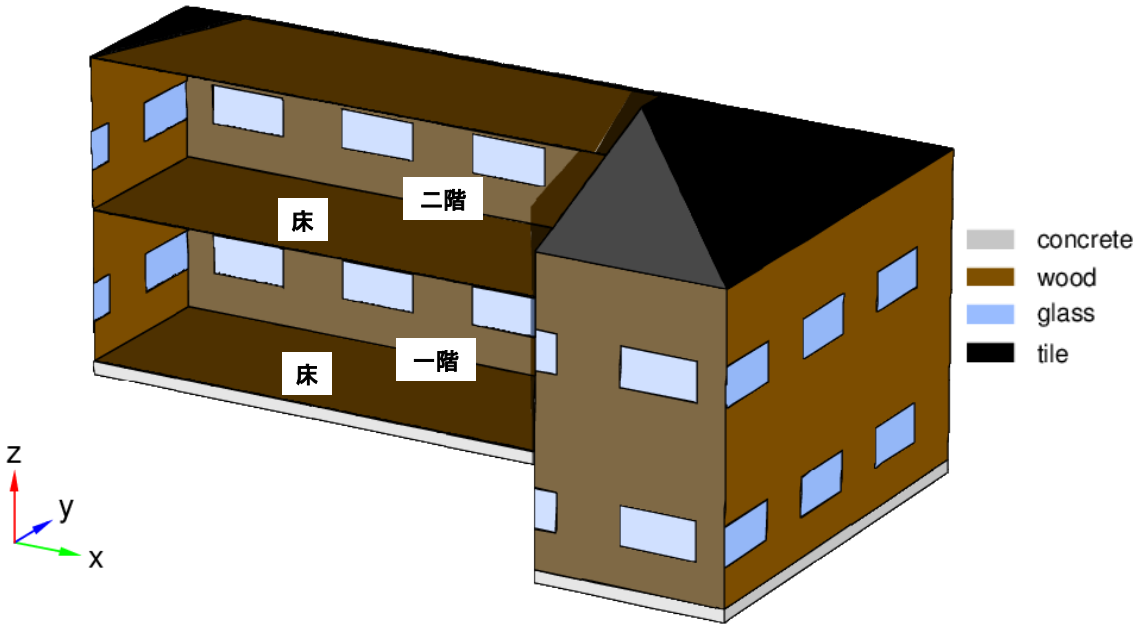


図 6-23　集合住宅内部(鳥瞰図)

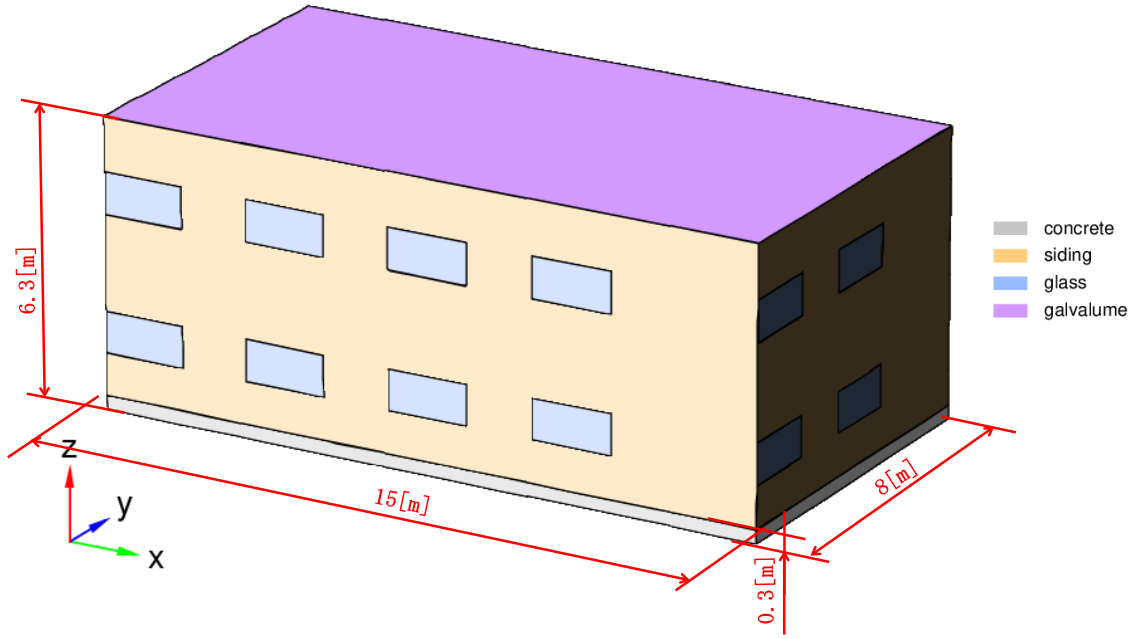


図 6-24　公共建屋外観(鳥瞰図)

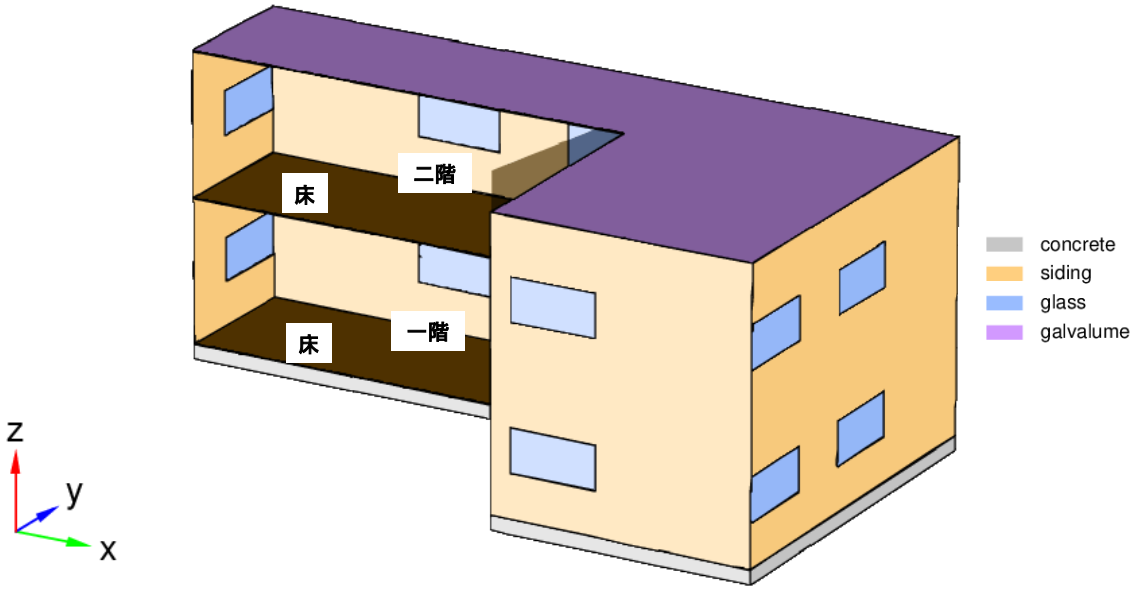


図 6-25　公共建屋内部(鳥瞰図)

② 建屋内線量率計算モデル(一様平面)の概要

6.2.1 において作成した一様平面のモデルを使用して、地上に 1 軒の建屋(一般住宅、集合住宅、公共建屋)がある状況を模擬するモデルとした。建屋はモデルの中心に配置した。代表点もモデルの中心とし建屋の中で地表から高さ 1[m]とした。その概要を図 6-26 に示す。

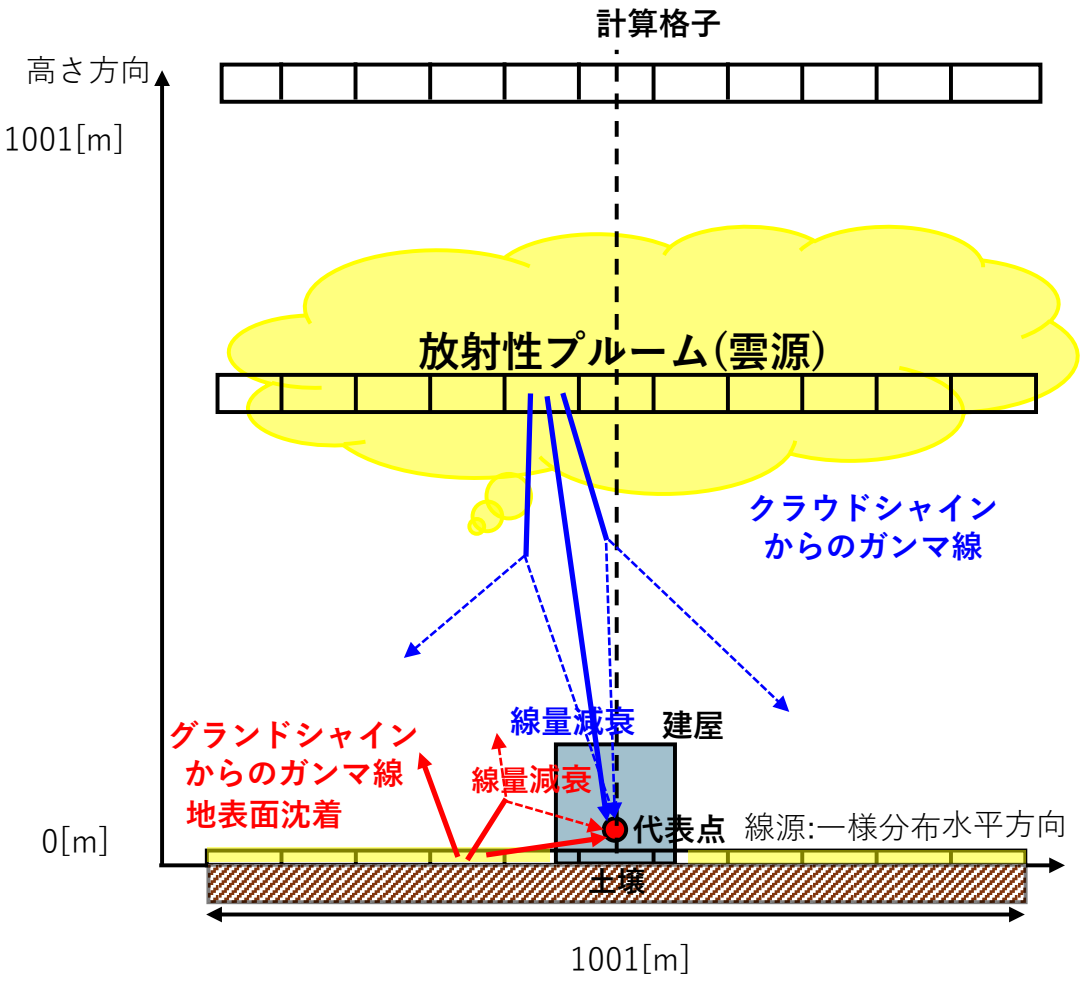


図 6-26　一様平面の建屋内線量率計算モデルの概要

(1) 建屋内線量率計算モデル(一様平面)の作成

6.2.1 で作成した一様平面の地上に 3 種類の建屋(一般住宅、集合住宅、公共建屋)から、1 軒を配置して計算モデルを作成した。配置した一般住宅の鳥瞰図を図 6-27 に、集合住宅の鳥瞰図を図 6-28 に、公共建屋の鳥瞰図を図 6-29 に示す。

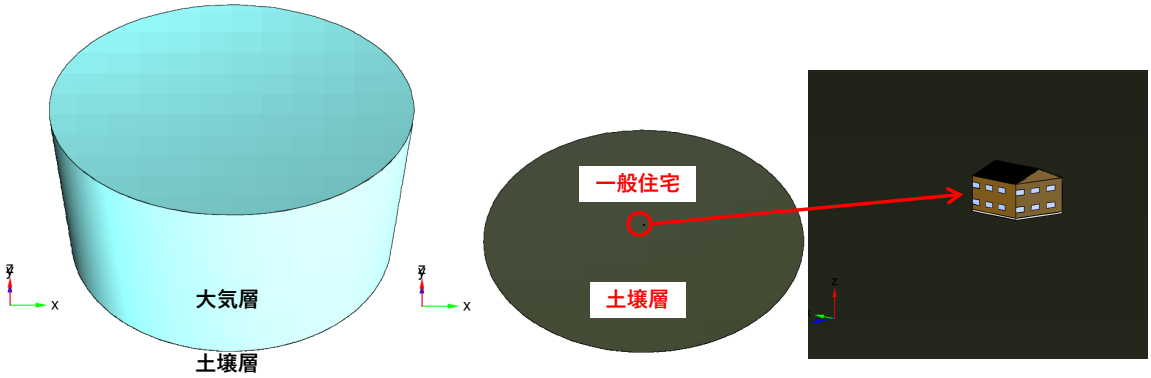


図 6-27　一様平面：一般住宅計算モデル

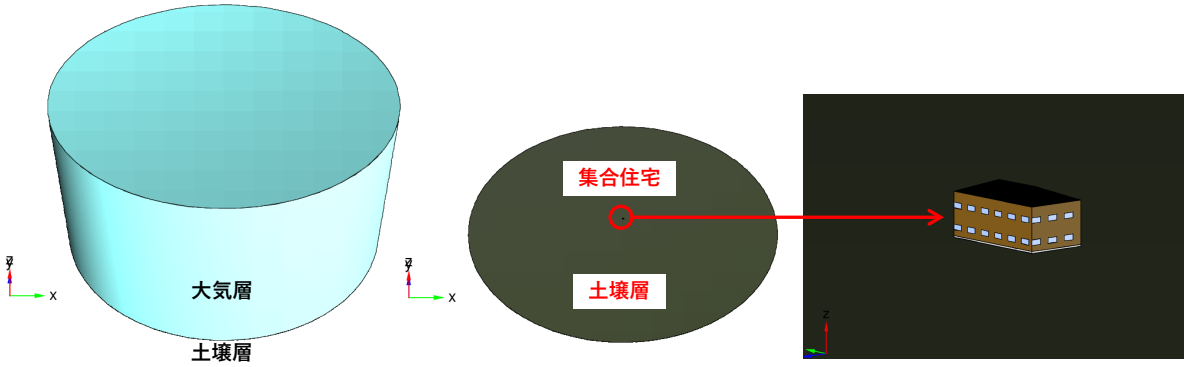


図 6-28　一様平面：集合住宅計算モデル

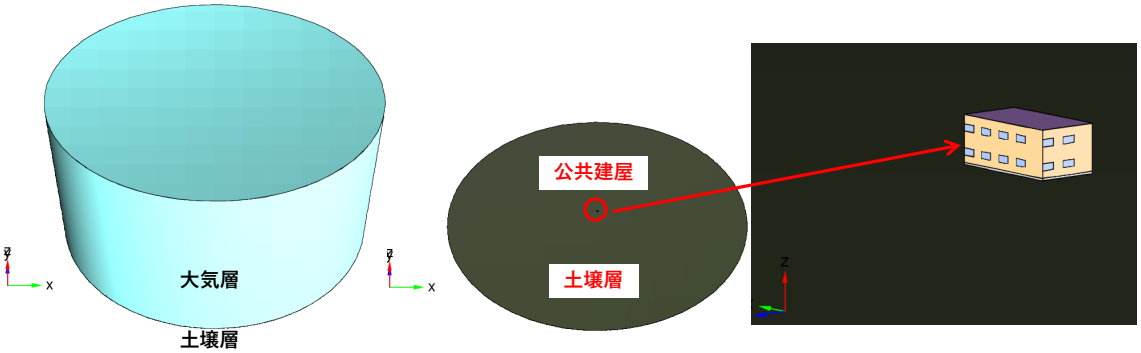


図 6-29　一様平面：公共建屋計算モデル

(2) 一様平面の地上に一般住宅を 1 軒配置した計算結果

一様平面の地上に一般住宅を 1 軒配置したモデルを使用し、グランドシャインとクラウドシャインの地上からの高さ(30, 40, 50, 60, 80, 100[m])の計算を行った。一様平面と一様平面の地上に一般住宅を 1 軒配置し、クラウドシャインの地上からの高さを 50[m]で計算したグラフを図 6-30 に示す。一様平面に比べ、地上に一般住宅を配置した方が寄与率の減衰が大きくでる。図の左側に青色で示してある代表点から 50[m]くらいまでは屋根と外壁による減衰と考えられる。特に屋根による減衰が大きいと考えられる。代表点から 50[m]以降の範囲は屋根による減衰は小さくなり外壁による減衰と考えられる。

次に、クラウドシャインの高さ方向を変えて計算した結果をグラフ図 6-31 と図 6-32 に示す。図 6-32 は図 6-31 のグラフで寄与率に一般住宅が及ぼしている影響が顕著と思われる部分を拡大して表示した。このグラフから、クラウドシャインの高さ方向の位置が高くなるほど屋根による減衰が代表点から遠いところまで現れている。グランドシャインの寄与率が代表点から 6[m]～9[m]くらいの範囲で上昇しているのは、一般住宅の基礎が地表面から 30[cm]までコンクリートでできていることが影響している。代表点（寄与率の測定位置）は地上から高さ 1m にあり、建屋には 30cm の基礎（コンクリート）があり、建屋に近いところほどコンクリートにより遮蔽され減衰率が大きくなる。このコンクリートの影響だと考えられる。

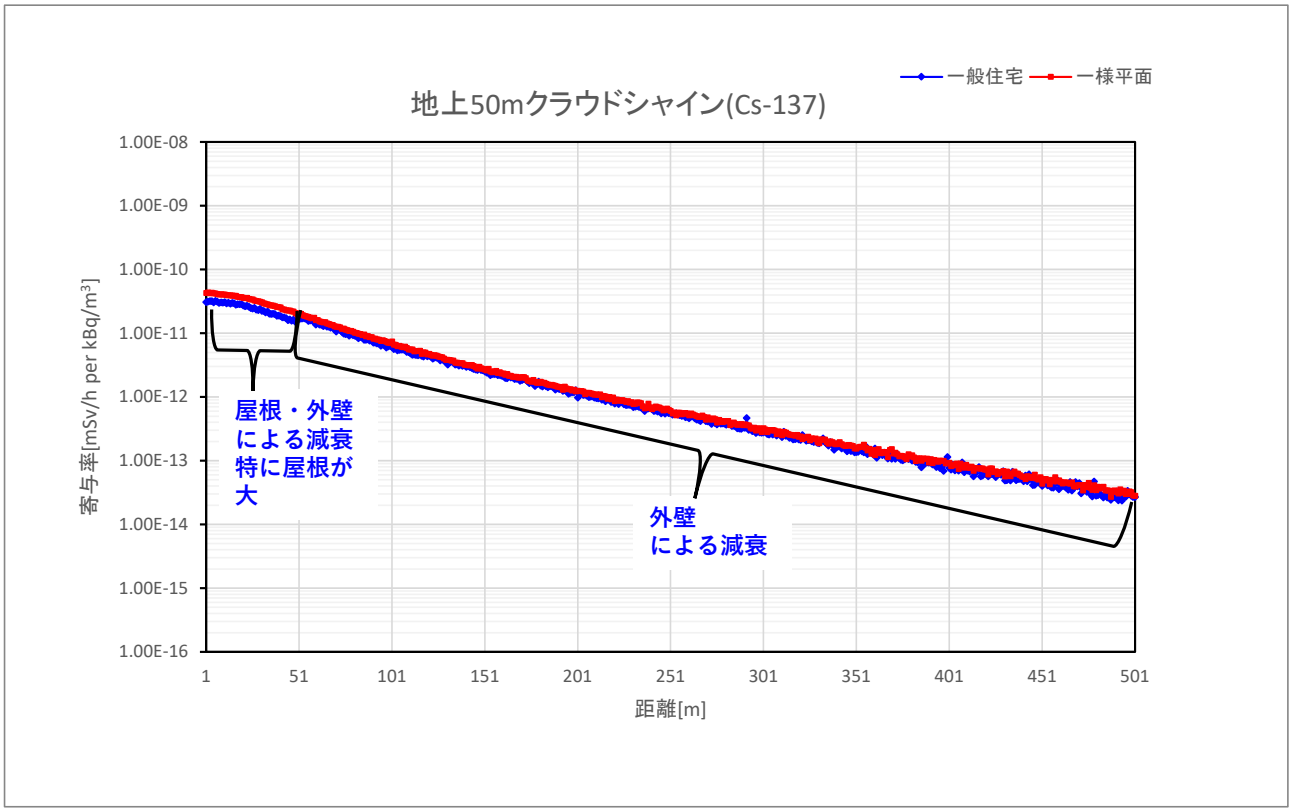


図 6-30　代表点の寄与率の比較（クラウドシャイン地上からの高さ[50m]の一様平面と一様平面地上に一般住宅を 1 軒配置）

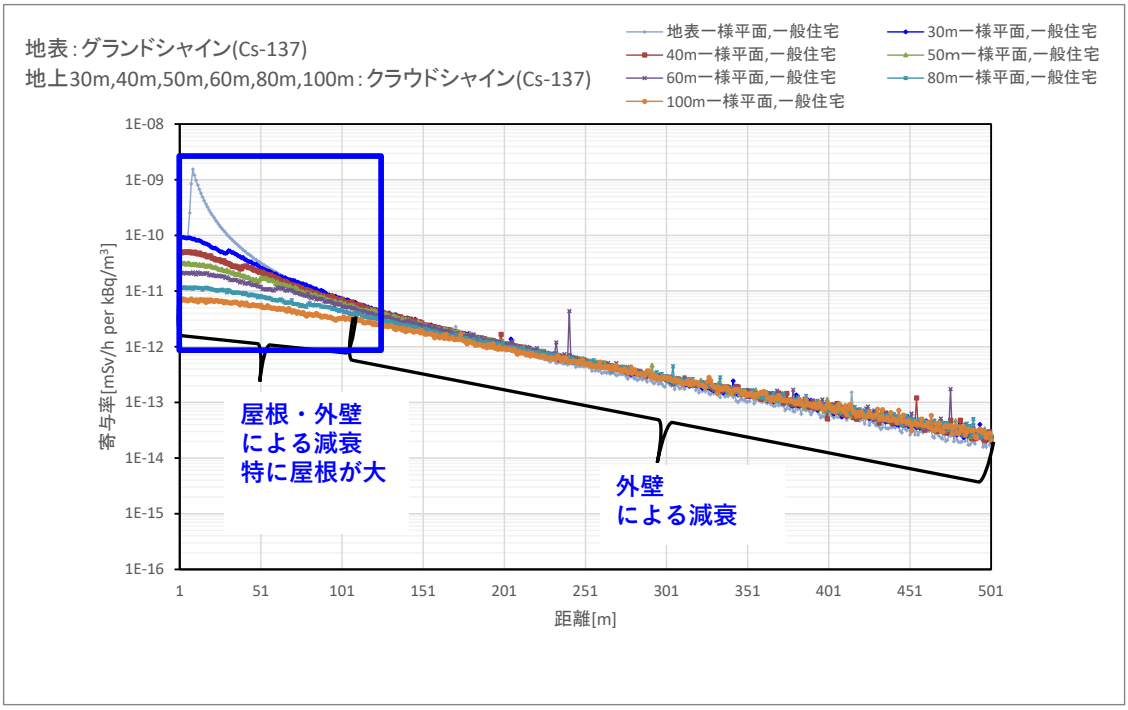


図 6-31　建屋内の寄与率(一様平面地上に一般住宅を 1 軒配置)

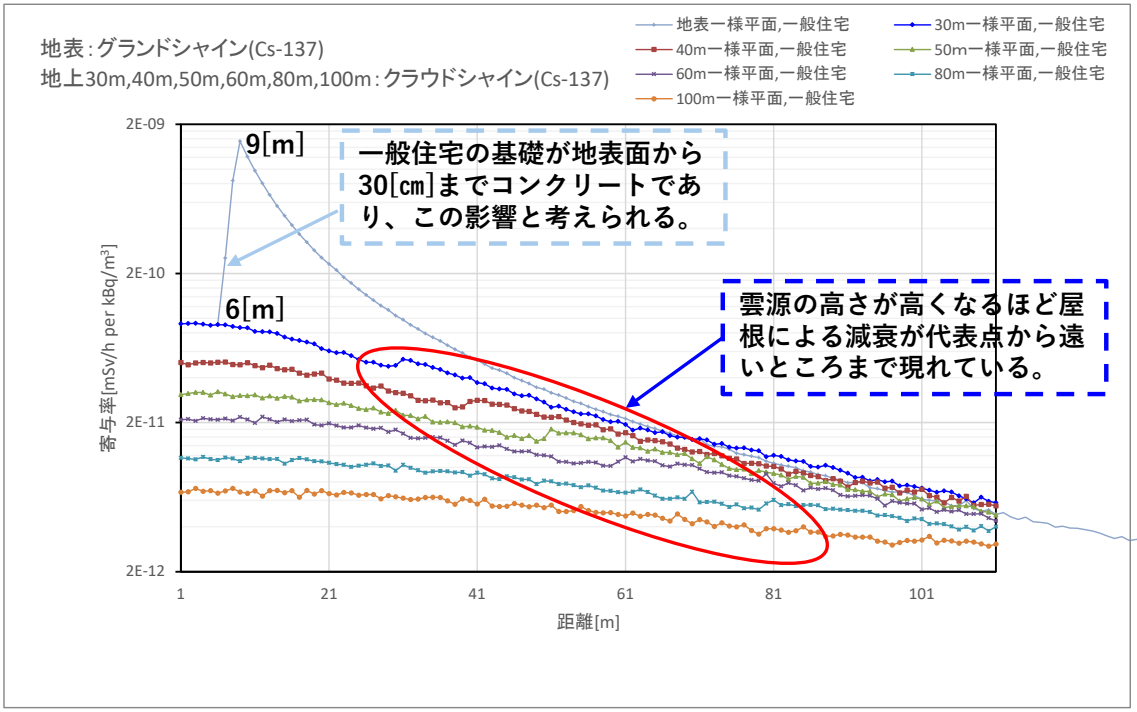


図 6-32　建屋内の寄与率(一様平面地上に一般住宅を 1 軒配置(図 6-31 の一部の拡大図))

(3) 一様平面の地上に集合住宅を 1 軒配置した計算結果

一様平面の地上に集合住宅を 1 軒配置したモデルを使用し、グランドシャインとクラウドシャイン地上からの高さ(30, 40, 50, 60, 80, 100[m])の計算を行った。一様平面と一様平面の地上に集合住宅を 1 軒配置し、クラウドシャイン地上からの高さを 50[m]で計算したグラフを図 6-33 に示す。一様平面に比べ、地上に集合住宅を配置した方が寄与率の減衰が大きくでている。図の左側に青色で示してある代表点から 40[m]くらいまでは屋根と外壁による減衰と考えられる。特に屋根による減衰が大きいと考えられる。代表点から 40[m]以降の範囲は屋根による減衰は小さくなり外壁による減衰と考えられる。

次に、クラウドシャインの高さ方向を変えて計算した結果をグラフ図 6-34 と図 6-35 に示す。図 6-35 は図 6-34 のグラフで寄与率に集合住宅が及ぼしている影響が顕著と思われる部分を拡大して表示した。このグラフから、クラウドシャインの高さ方向の位置が高くなるほど屋根による減衰が代表点から遠いところまで現れている。グランドシャインの寄与率が代表点から 6[m]～9[m]くらいの範囲で上昇しているのは、集合住宅の基礎が地表面から 30[cm]までコンクリートでできていることが影響していると考えられる。

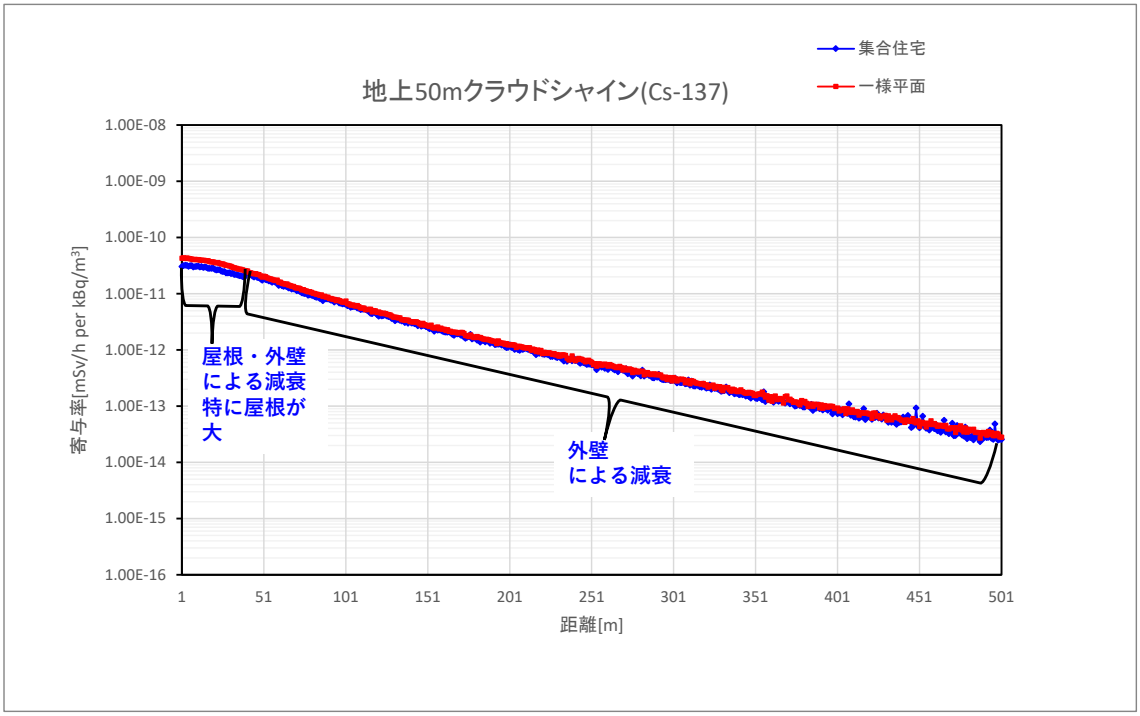


図 6-33　代表点の寄与率の比較(クラウドシャイン地上からの高さ[50m]の一様平面と一様平面地上に集合住宅を 1 軒配置)

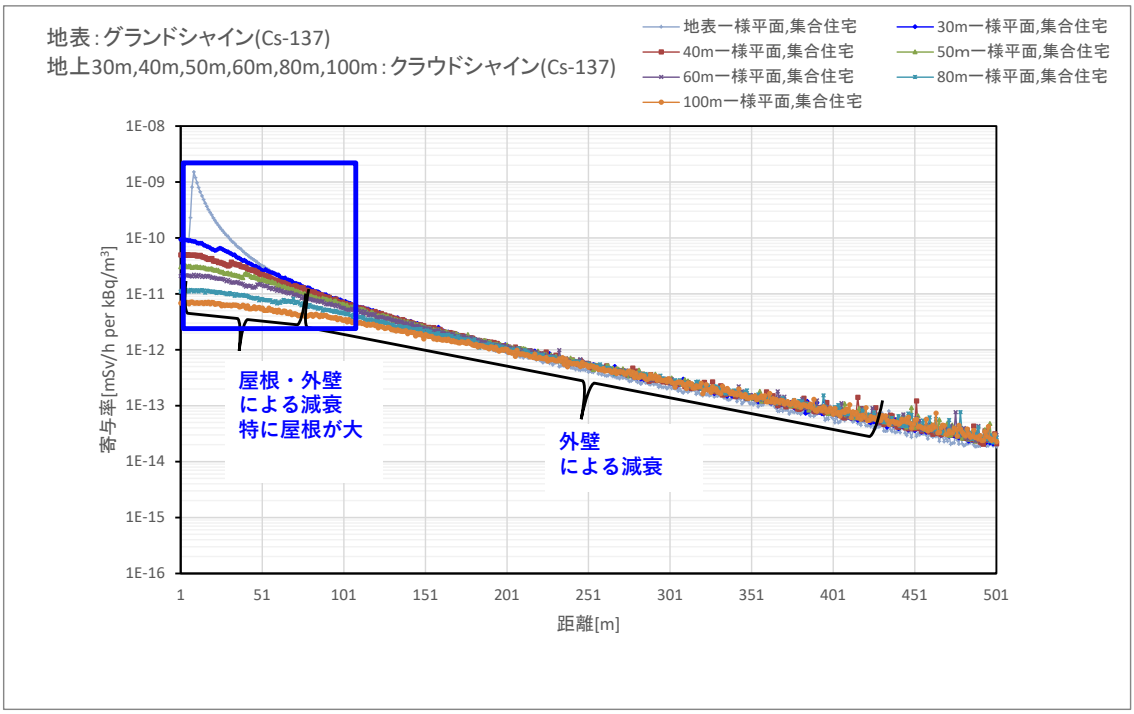


図 6-34　建屋内の寄与率(一様平面地上に集合住宅を 1 軒配置)

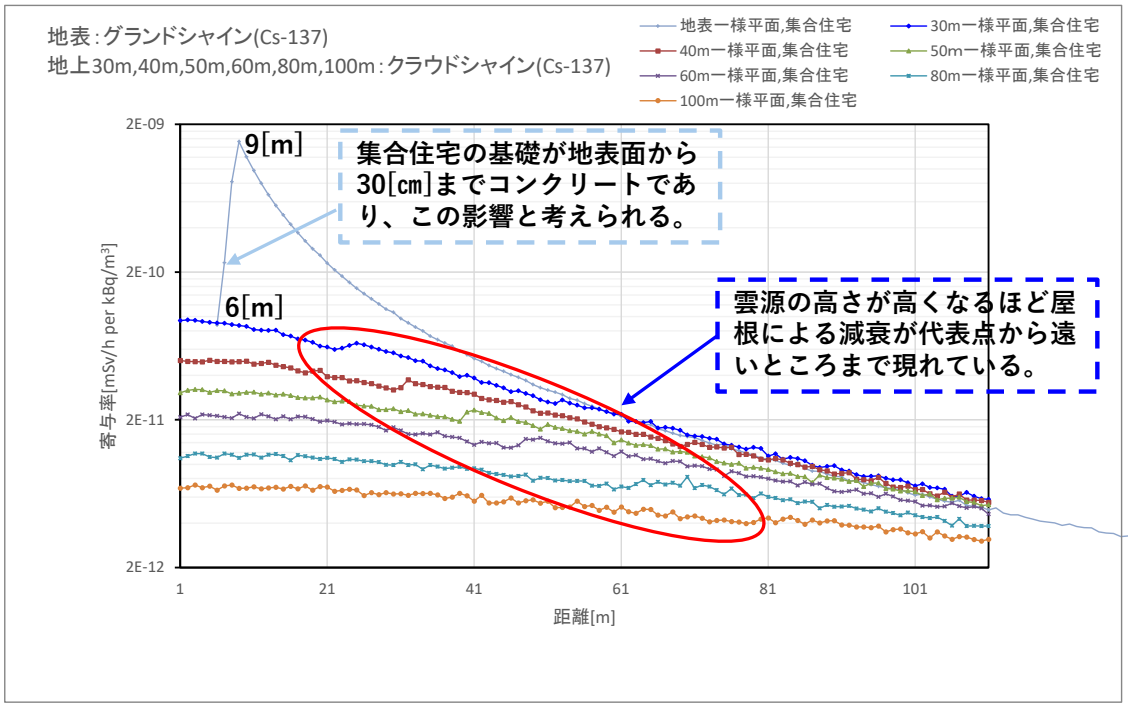


図 6-35　建屋内の寄与率(一様平面地上に集合住宅を 1 軒配置(図 6-34 の一部の拡大図))

(4) 一様平面の地上に公共建屋を 1 軒配置した計算結果

一様平面の地上に公共建屋を 1 軒配置したモデルを使用し、グランドシャインとクラウドシャインの高さ(30, 40, 50, 60, 80, 100[m])の計算を行った。一様平面と一様平面の地上に公共建屋を 1 軒配置し、クラウドシャインの高さ 50[m]で計算したグラフを図 6-36 に示す。図 6-36 の左のグラフに示すように公共建屋は、一般住宅や集合住宅に見られた屋根による著しい減衰は現れなかったが、図 6-36 の右に示すように一様平面と比べ一様平面の地上に公共建屋を 1 軒配置した方が寄与率の減衰は大きく現れている。

次に、クラウドシャインの高さ方向を変えて計算した結果をグラフ図 6-37 と図 6-38 に示す。図 6-38 は図 6-37 のグラフから一般住宅や集合住宅と同じような範囲を拡大したグラフである。一般住宅や集合住宅に見られたような屋根と外壁による減衰率の顕著な違いはないが、若干屋根の減衰が大きいように現れている。また、一様平面と同じような傾向で、クラウドシャインの高さ方向の位置が高くなると寄与率が減衰し、代表点から離れると減衰する。グランドシャインの寄与率が代表点から 5[m]～7[m]の範囲で上昇しているのは、公共建屋の基礎が地表面から 30[cm]までコンクリートでできているためと考えられる。このコンクリートの影響があると考えられる。

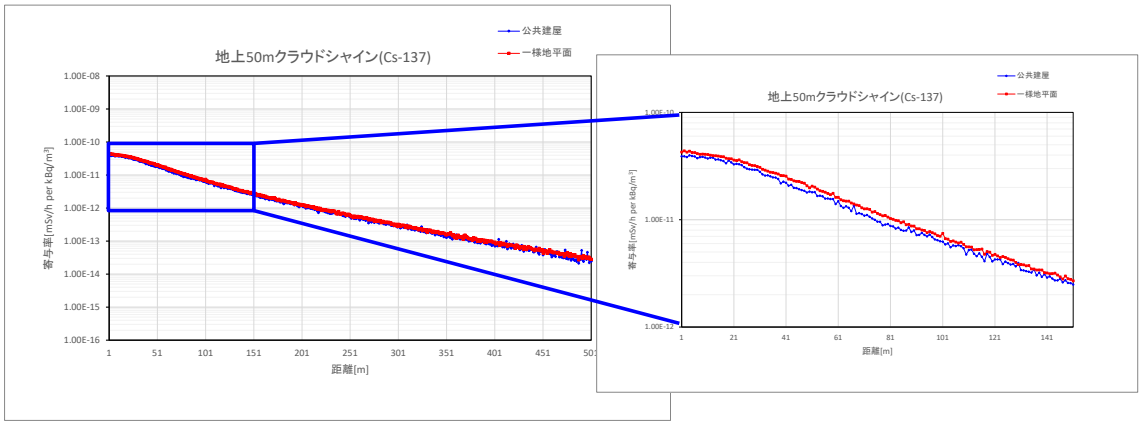


図 6-36　代表点の寄与率の比較(クラウドシャイン地上からの高さ[50m]の一様平面と一様平面地上に公共建屋を 1 軒配置)

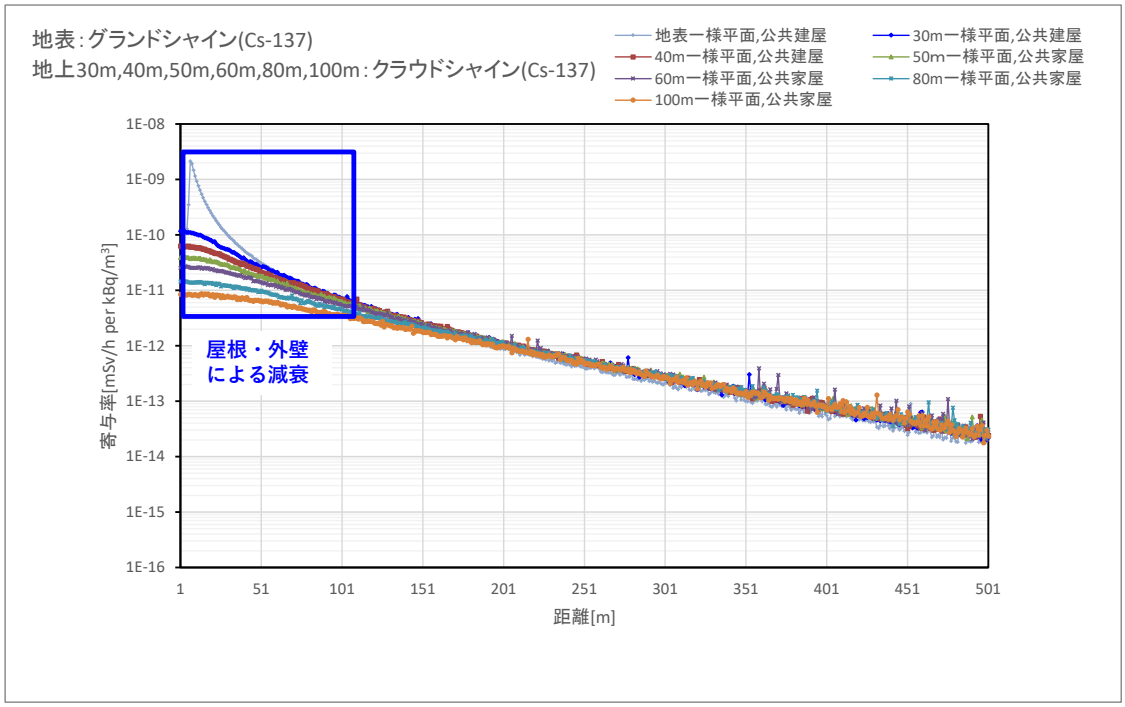


図 6-37　建屋内の寄与率(一様平面地上に公共建屋を 1 軒配置)

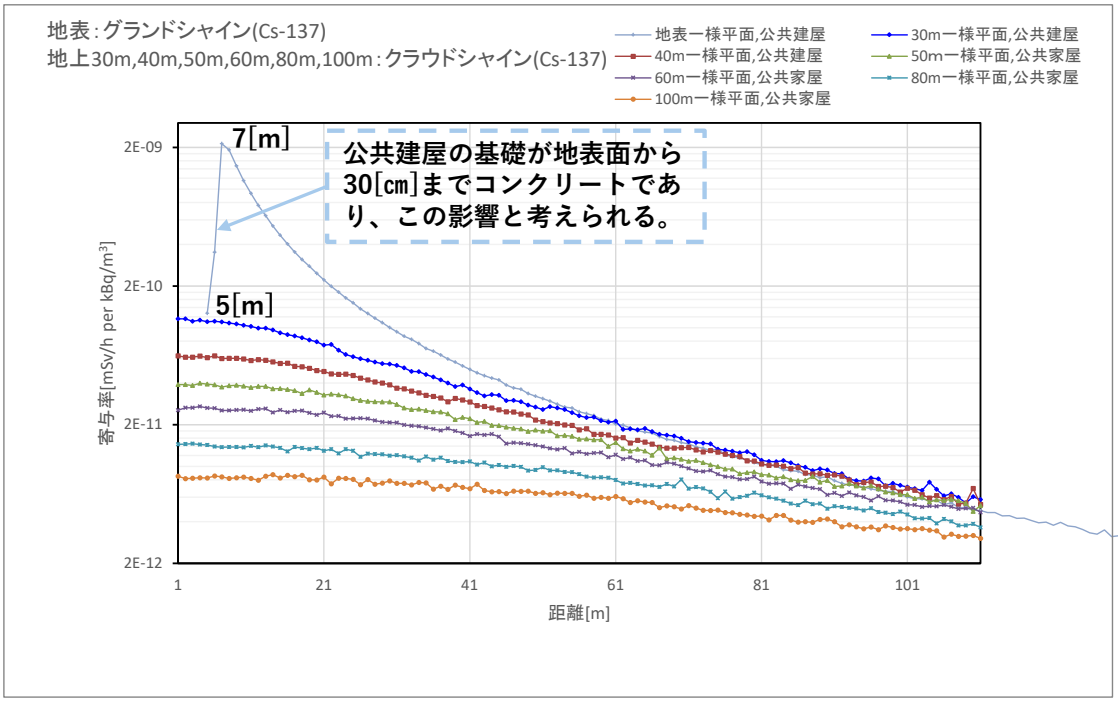


図 6-38　建屋内の寄与率(一様平面地上に公共建屋を 1 軒配置(図 6-37 の一部の拡大図))

③ 建屋内線量率計算モデル(地形変化(段差)有り)の概要

6.2.1 において作成した地形変化(段差)有りのモデルを使用し、地上に 1 軒の家屋(一般住宅、集合住宅、公共建屋)がある状況を模擬するモデルとした。建屋はモデルの中心に配置した。代表点もモデルの中心とし建屋の中で地表から高さ 1[m]とした。その概要を図 6-39 に示す。

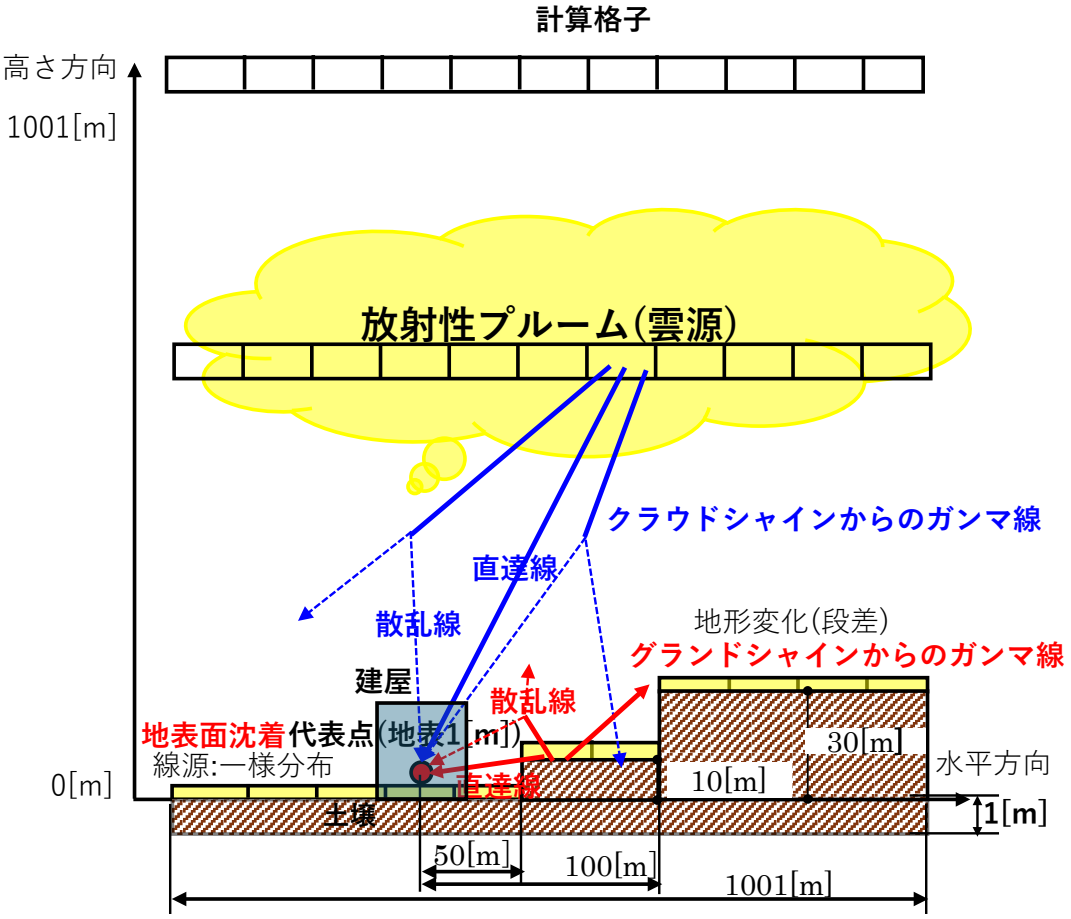


図 6-39　地形変化(段差)の建屋内線量率計算モデルの概要

(1) 建屋内線量率計算モデル(地形変化(段差)有り)の作成

6.2.1 で作成した地形変化(段差)有りの地上に 3 種類の建屋(一般住宅、集合住宅、公共建屋)から 1 軒配置して計算モデルを作成した。配置した一般住宅の鳥瞰図を図 6-40 に、集合住宅の鳥瞰図を図 6-41 に、公共建屋の鳥瞰図を図 6-42 に示す。

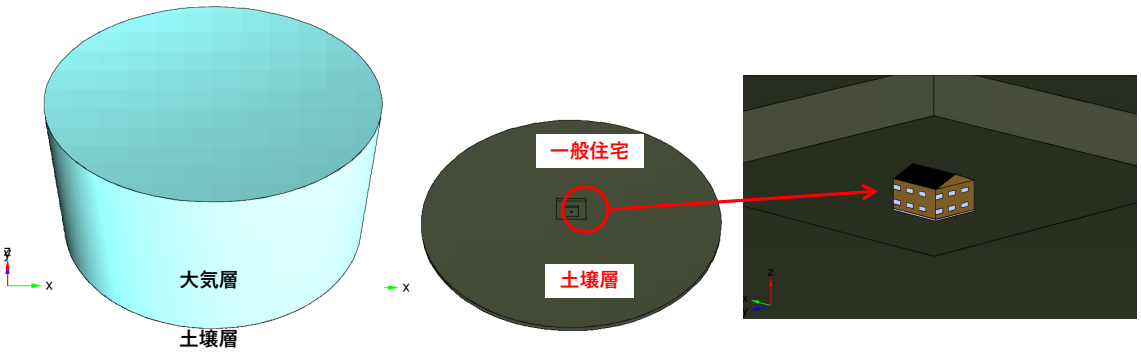


図 6-40　地形変化(段差)あり地上：一般住宅計算モデル

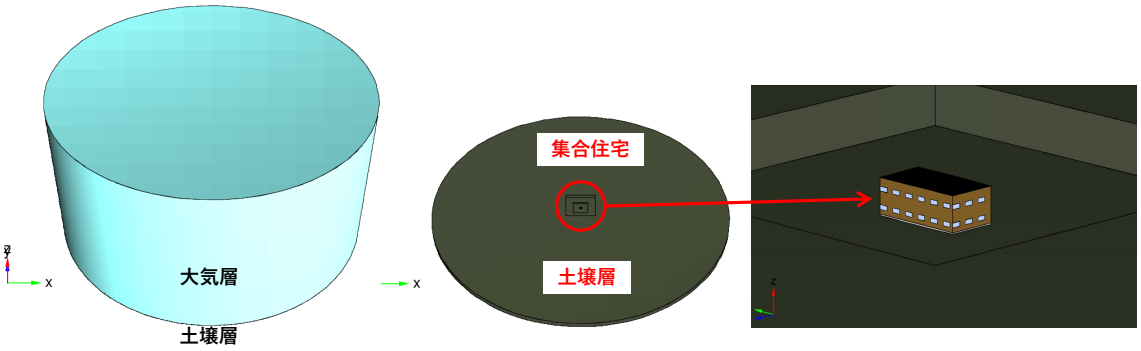


図 6-41　地形変化(段差)あり地上：集合住宅計算モデル

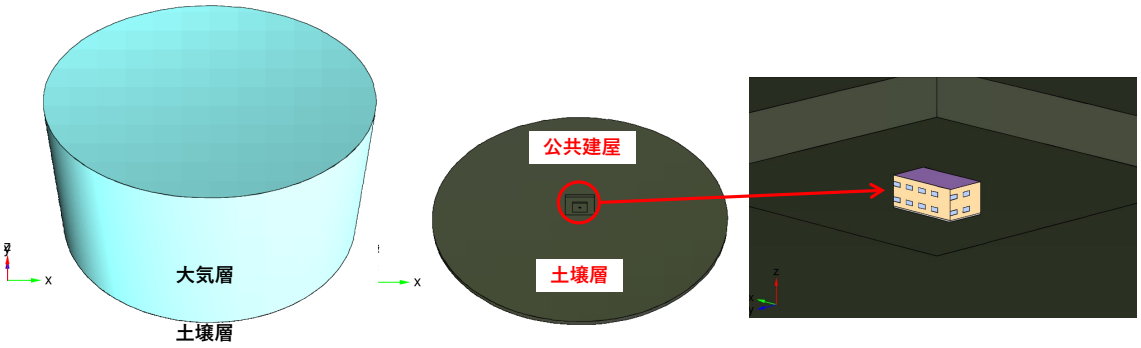


図 6-42　地形変化(段差)あり地上：公共建屋計算モデル

(2) 地形変化(段差)ありの地上に一般住宅を 1 軒配置した計算結果

地形変化(段差)有りと地形変化(段差)有りの地上に一般住宅を 1 軒配置し、グランドシャインとクラウドシャインの地上からの高さ(40,50,60[m])の計算を行った。地形変化（段差）有りと地形変化（段差）有りの地上に一般住宅を 1 軒配置し、クラウドシャイン地上からの高さを 50[m]で計算したグラフを図 6-43 に示す。地形変化(段差)有りに比べ地形変化(段差)有りに一般住宅を配置した方が寄与率の減衰が大きい。図の左側に青色で示してある代表点から 50[m]くらいまでは屋根と外壁による減衰で特に屋根による減衰が大きい部分である。代表点から 50[m]以降の範囲は屋根による減衰は小さくなり外壁による減衰と考えられる。

次に、クラウドシャインの高さ方向を変えて計算した結果をグラフ図 6-44 と図 6-45 に示す。図 6-45 は図 6-44 のグラフで寄与率に一般住宅が及ぼしている影響が顕著と思われる部分を拡大して表示した。このグラフから、クラウドシャインの高さ方向の位置が高くなるほど屋根による減衰が代表点から遠いところまで現れている。グランドシャインの寄与率が代表点から 6[m]～9[m]の範囲で上昇しているのは、一般住宅の基礎が地表面から 30[cm]までコンクリートでできているためと考えられる。このコンクリートの影響だと考えられる。

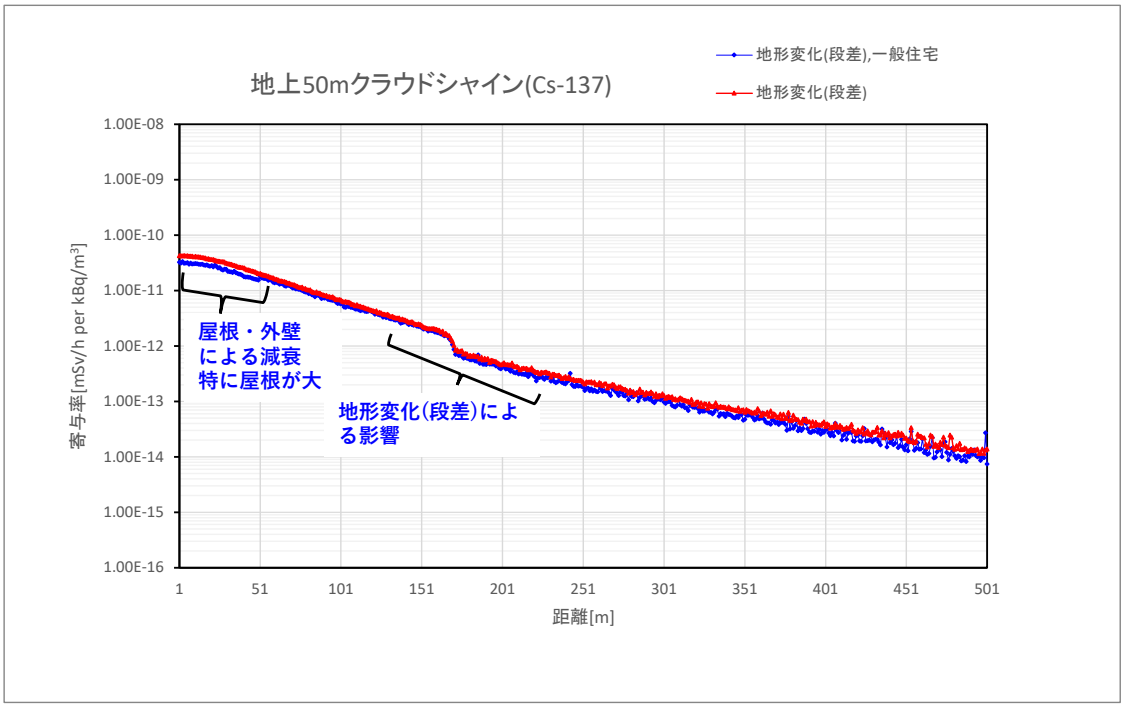


図 6-43　代表点の寄与率の比較(クラウドシャイン地上からの高さ[50m]の地形変化(段差)と地形変化(段差)地上に一般住宅を 1 軒配置)

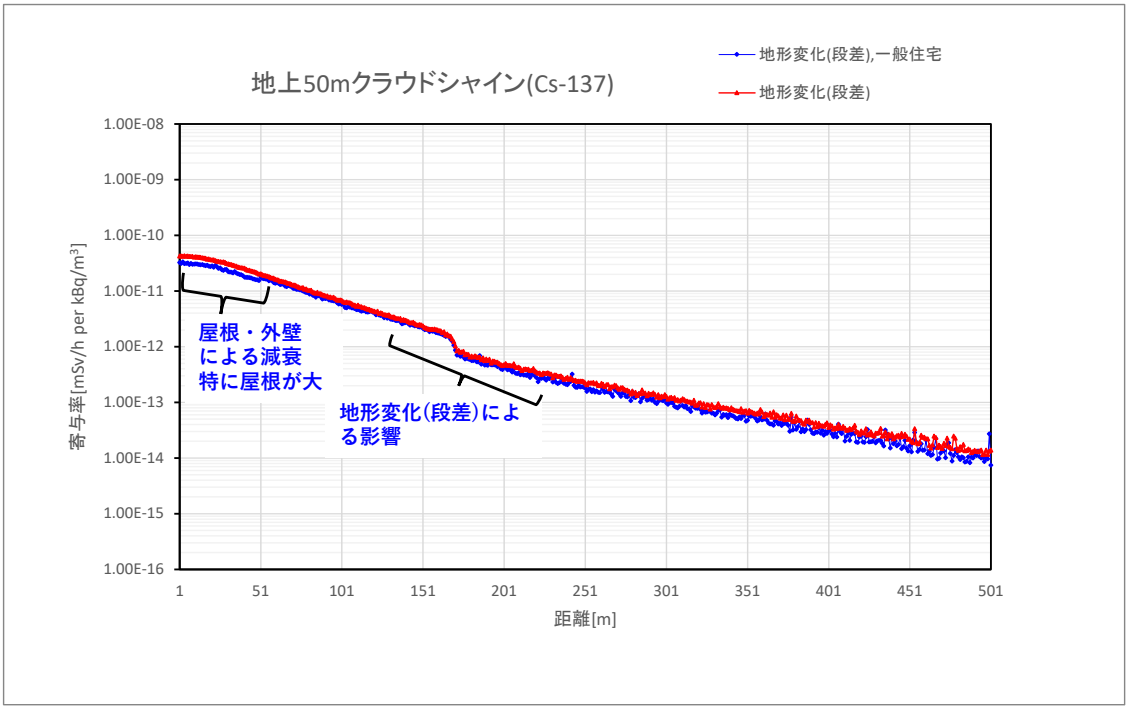


図 6-44　建屋内の寄与率(地形変化(段差)地上に一般住宅を 1 軒配置)

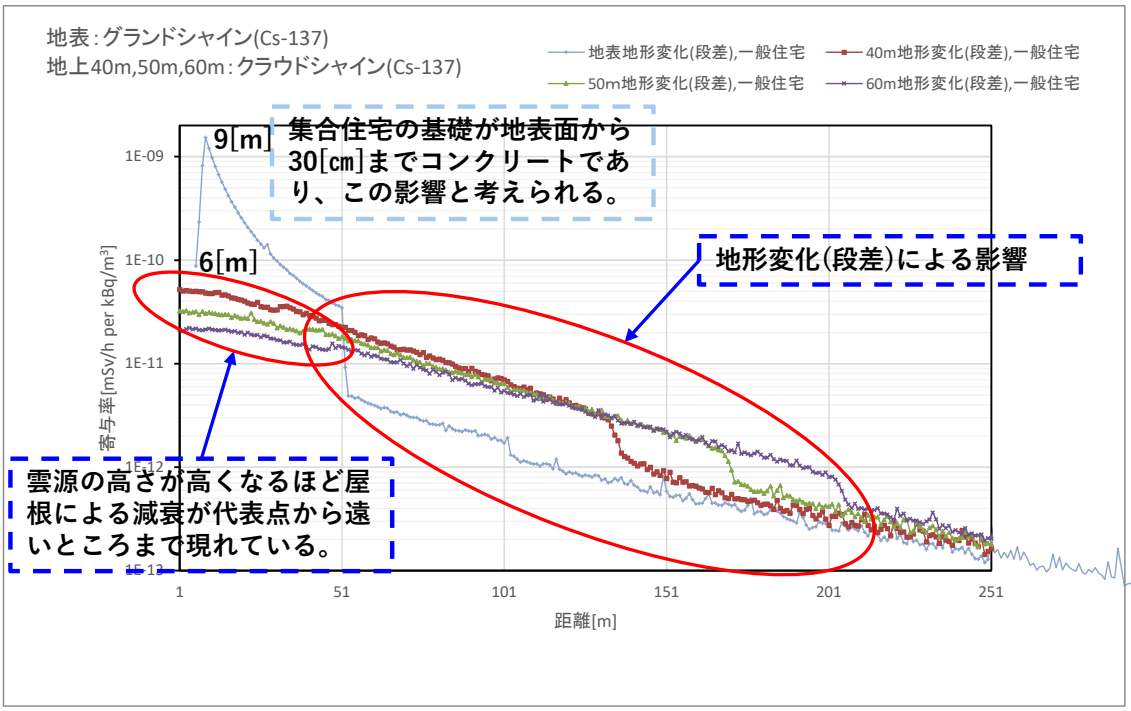


図 6-45　建屋内の寄与率(地形変化(段差)地上に一般住宅を 1 軒配置(図 6-44 の一部の拡大)

(3) 地形変化(段差)ありの地上に集合住宅を 1 軒配置した計算結果

地形変化(段差)有りと地形変化(段差)有りの地上に集合住宅を 1 軒配置し、グランドシャインとクラウドシャインの地上からの高さ(40, 50, 60[m])の計算を行った。地形変化（段差）有りと地形変化（段差）有りの地上に集合住宅を 1 軒配置し、クラウドシャイン地上からの高さを 50[m]で計算したグラフを図 6-46 に示す。地形変化(段差)有りに比べ地形変化(段差)有りに集合住宅を配置した方が寄与率の減衰が大きい。図の左側に青色で示してある代表点から 50[m]くらいまでは屋根と外壁による減衰で特に屋根による減衰が大きい部分である。代表点から 50[m]以降の範囲は屋根による減衰は小さくなり外壁による減衰と考えられる。

次に、クラウドシャインの高さ方向を変えて計算した結果をグラフ図 6-47 と図 6-48 に示す。図 6-48 は図 6-47 のグラフで寄与率に集合住宅が及ぼしている影響が顕著と思われる部分を拡大して表示した。図 6-48 のグラフからクラウドシャインの高さ方向の位置が高くなるほど屋根による減衰が代表点から遠いところまで現れている。

グランドシャインの寄与率が代表点から 6[m]～9[m]くらいの範囲で上昇しているのは集合住宅の基礎が地表面から 30[cm]までコンクリートでできているためと考えられる。このコンクリートの影響だと考えられる。

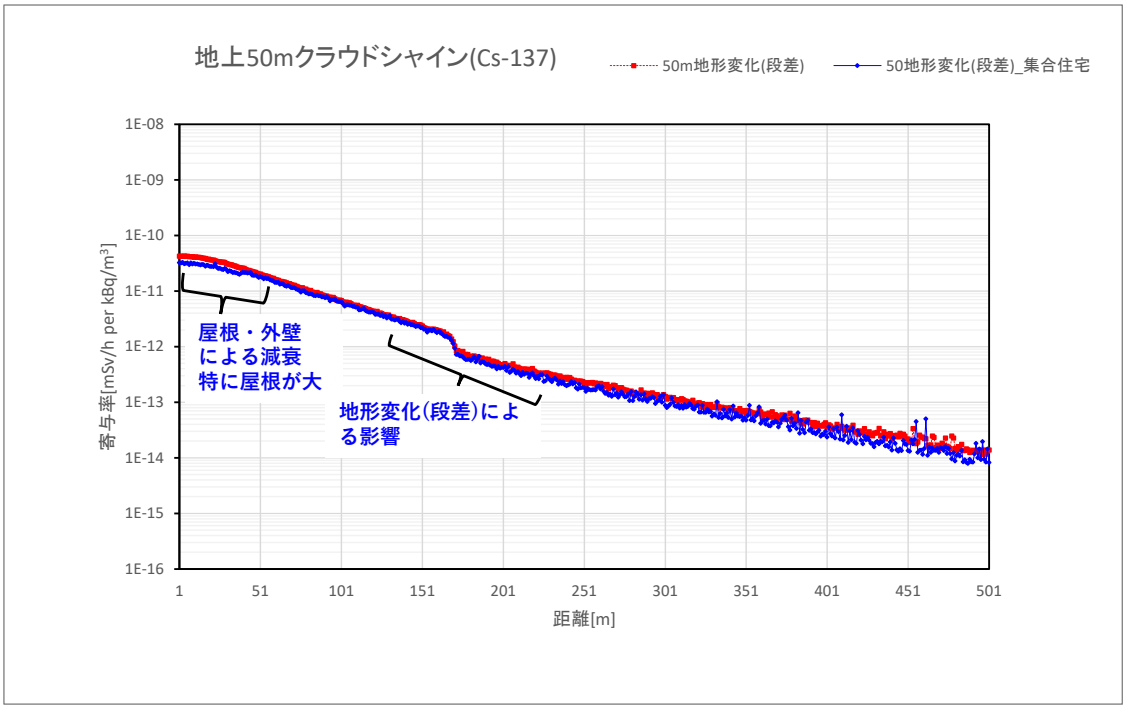


図 6-46　代表点の寄与率の比較(クラウドシャイン地上からの高さ[50m]の地形変化(段差)と地形変化(段差)地上に集合住宅を 1 軒配置)

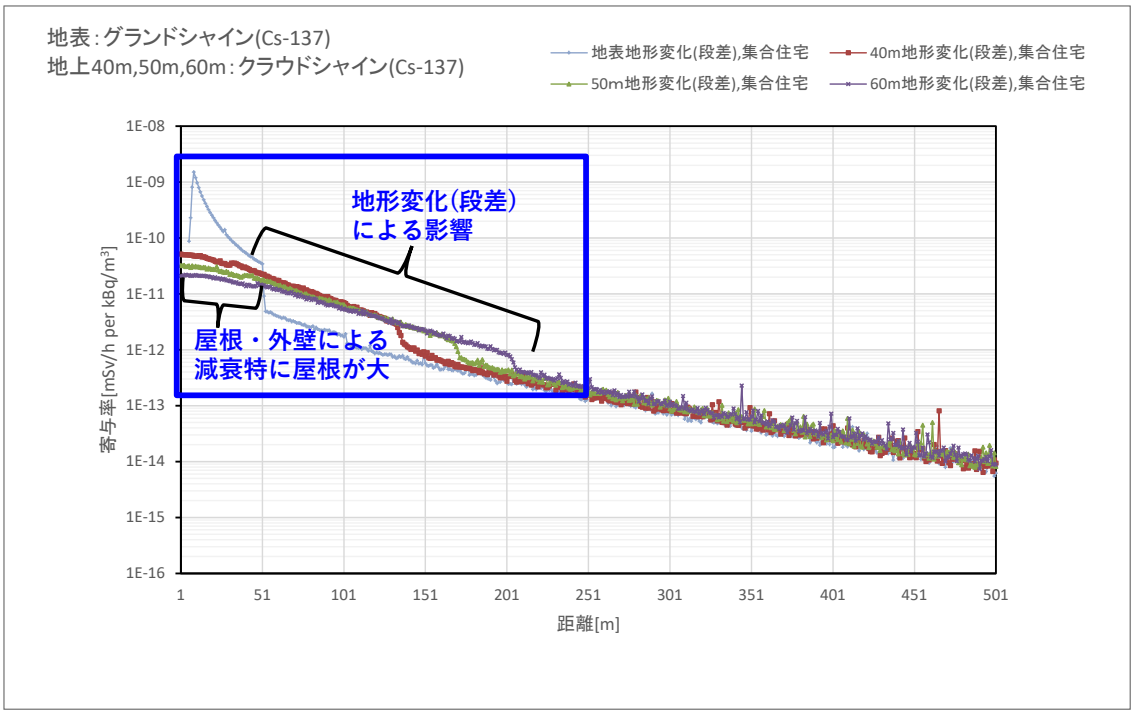


図 6-47　建屋内の寄与率(地形変化(段差)地上に集合住宅を 1 軒配置)

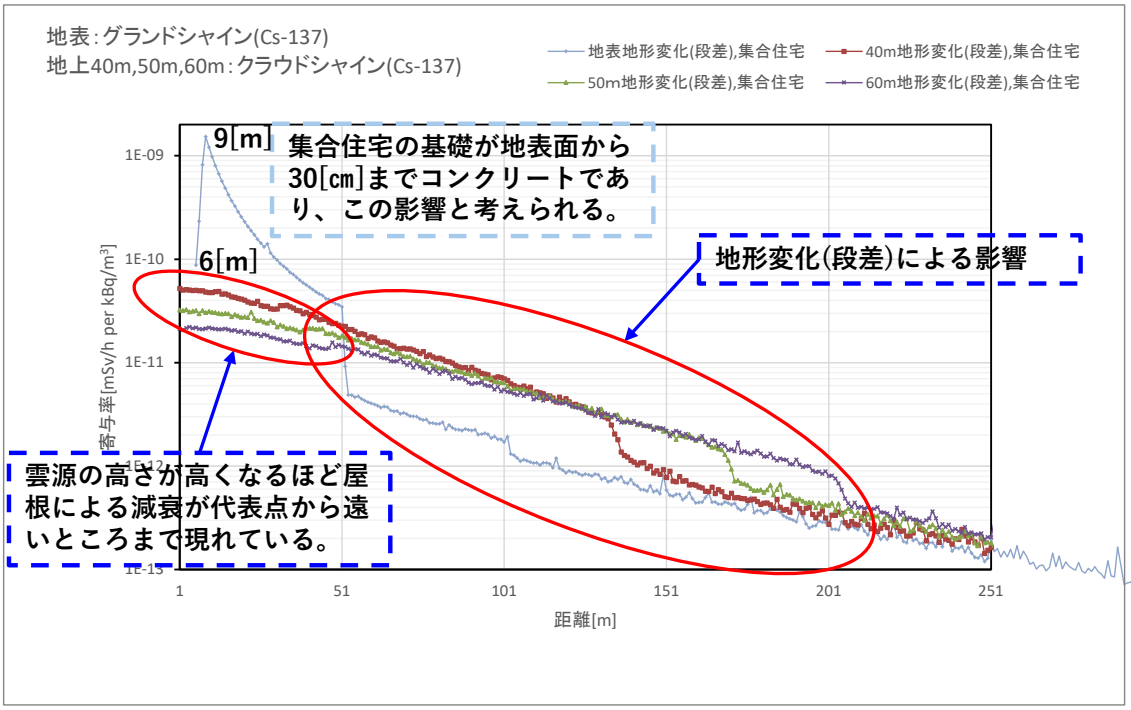


図 6-48　建屋内の寄与率(地形変化(段差)地上に集合住宅を 1 軒配置(図 6-47 の一部の拡大)

(4) 地形変化(段差)ありの地上に公共建屋を 1 軒配置した計算結果

地形変化（段差）有りの地上に公共建屋を 1 軒配置したモデルを使用し、グランドシャインとクラウドシャインの高さ(40, 50, 60[m])の計算を行った。地形変化（段差）有りと地形変化（段差）有りの地上に公共建屋を 1 軒配置し、クラウドシャインの高さ 50[m]で計算したグラフを図 6-49 と図 6-50 に示す。図 6-50 は図 6-49 の代表点から 251[m]までを拡大したグラフである。公共建屋は、一般住宅や集合住宅に見られた屋根による著しい減衰は現れなかったが、図 6-50 に示すように地形変化（段差）有りに比べ地形変化（段差）有りの地上に公共建屋を 1 軒配置した方が寄与率の減衰が大きく現れている。

次に、クラウドシャインの高さ方向を変えて計算した結果をグラフ図 6-51 と図 6-52 に示す。図 6-52 は図 6-51 のグラフから一般住宅や集合住宅と同じような範囲を拡大したグラフである。一般住宅や集合住宅に見られたような屋根と外壁による減衰率の顕著な違いはないが、若干屋根の減衰が大きいように現れている。また、一様平面と同じような傾向で、クラウドシャインの高さ方向の位置が高くなると寄与率が減衰し、代表点から離れると減衰する。グランドシャインの寄与率が代表点から 5[m]～8[m]くらいの範囲で上昇しているのは、公共建屋の基礎が地表面から 30[cm]までコンクリートでできているためと考えられる。このコンクリートの影響だと考えられる。

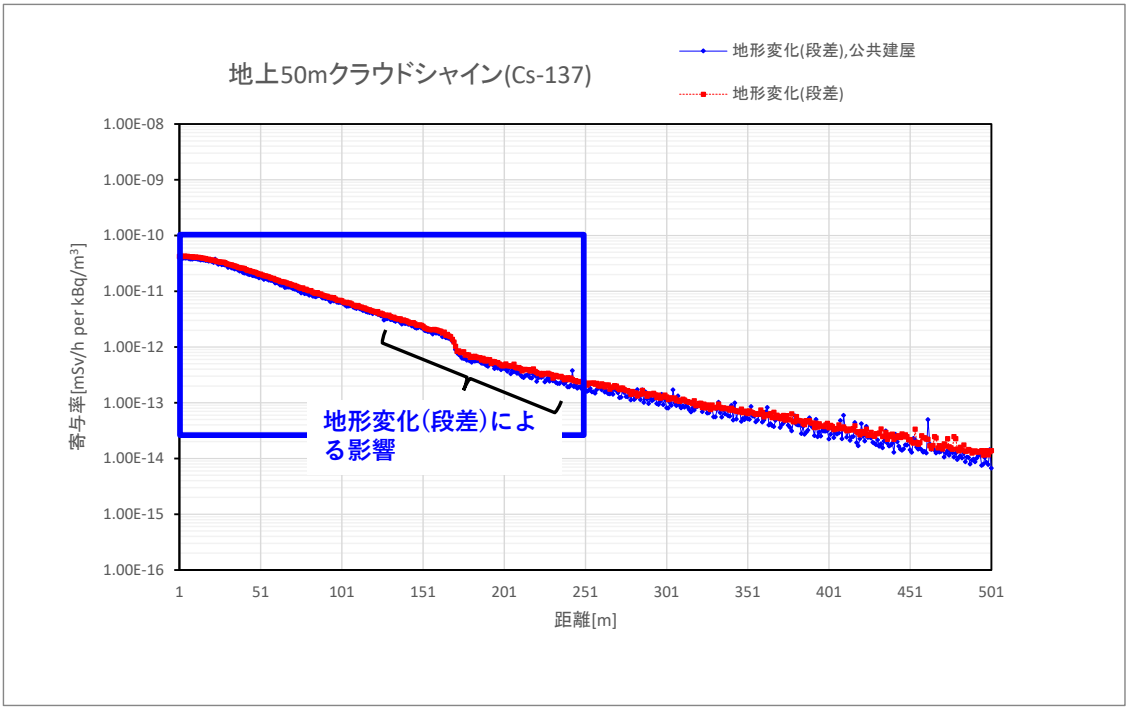


図 6-49　代表点の寄与率の比較(クラウドシャイン地上からの高さ[50m]の地形変化(段差)と地形変化(段差)地上に公共建屋を 1 軒配置)

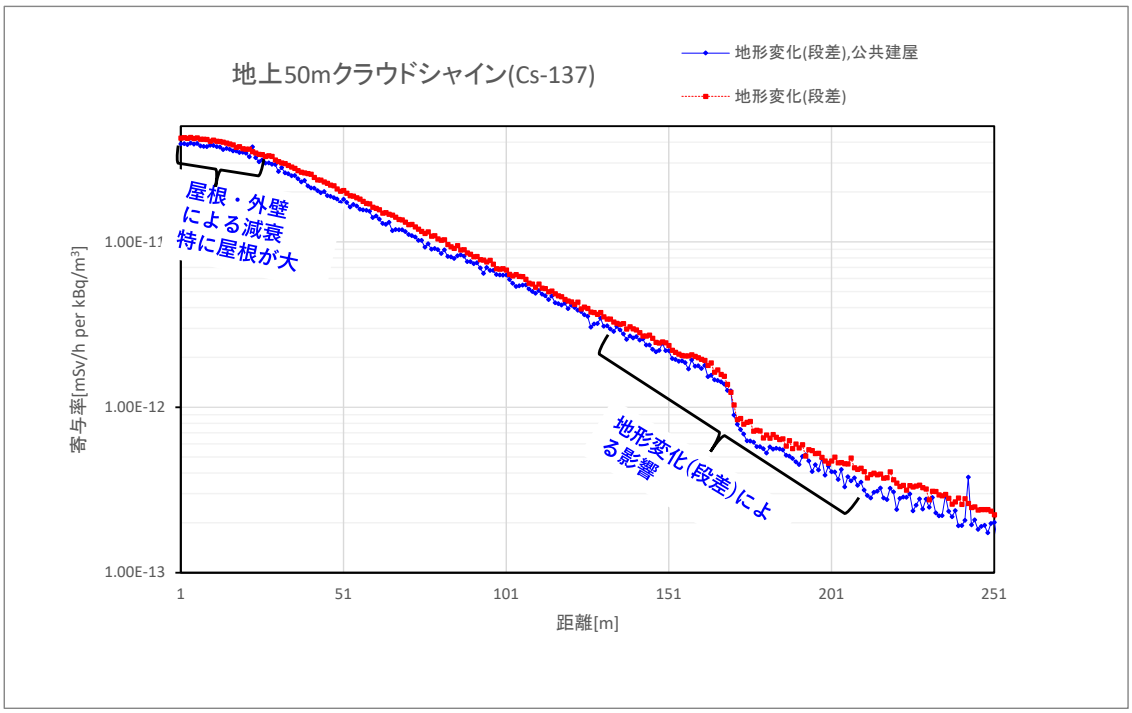


図 6-50　代表点の寄与率の比較(クラウドシャイン地上からの高さ[50m]の地形変化(段差)と地形変化(段差)地上に公共建屋を 1 軒配置)（図 6-49 の一部分の拡大）

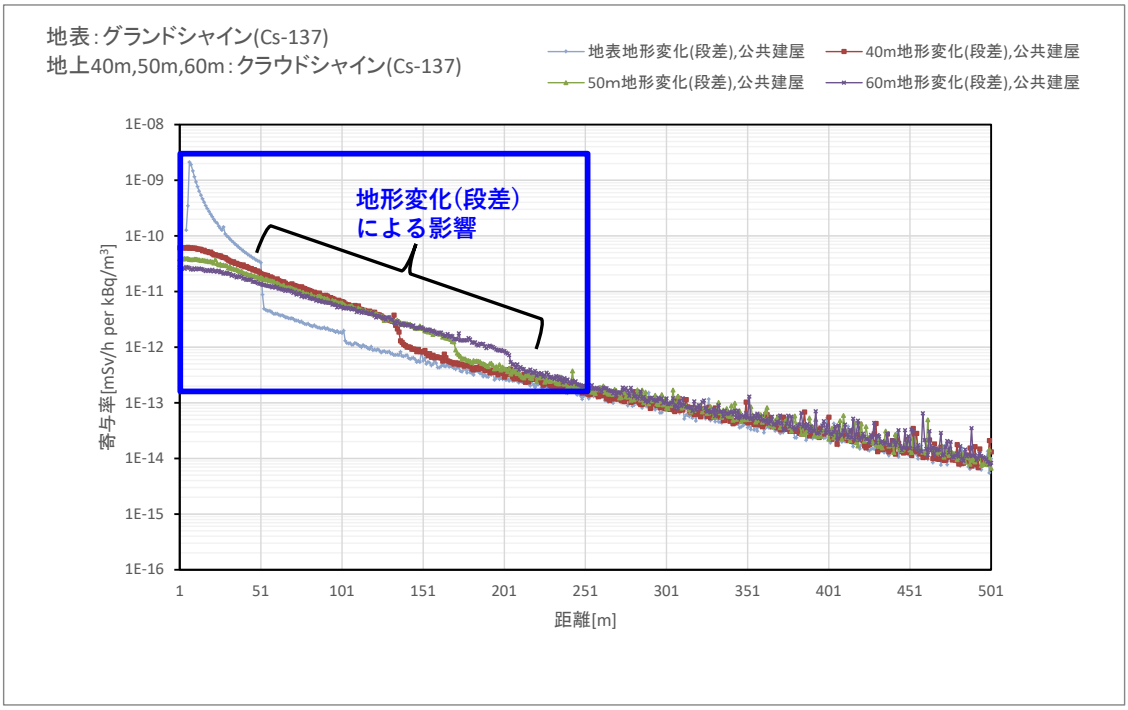


図 6-51　建屋内の寄与率(地形変化(段差)地上に公共建屋を 1 軒配置)

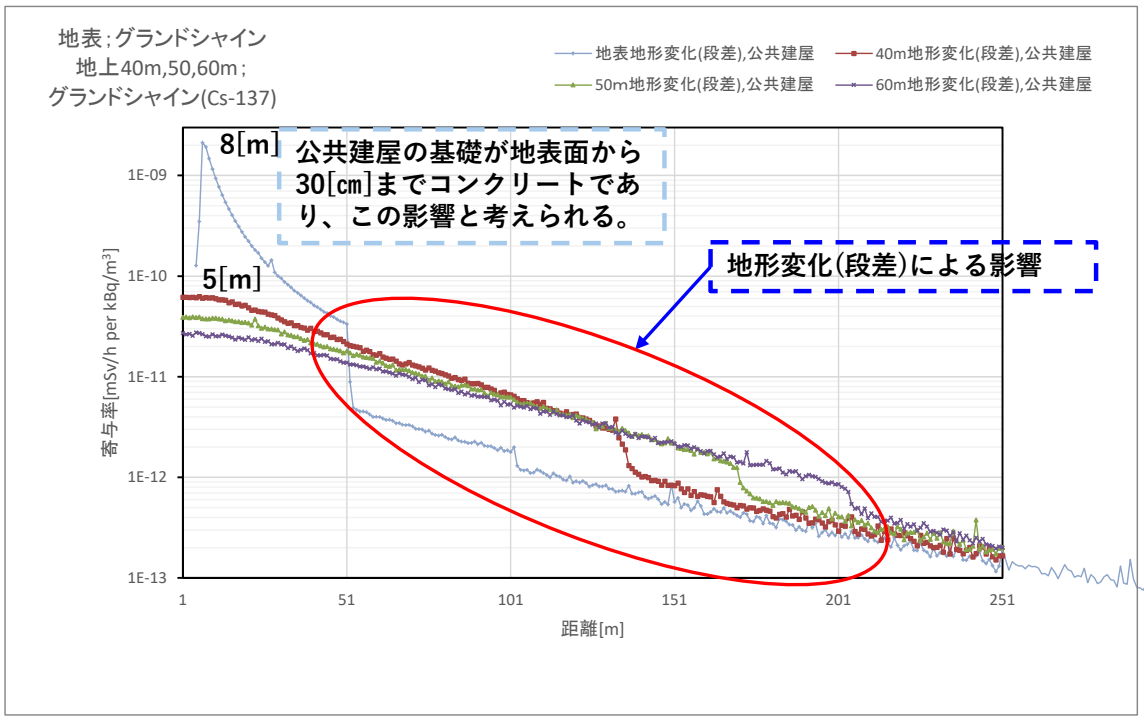


図 6-52　建屋内の寄与率(地形変化(段差)地上に公共建屋を 1 軒配置)(図 6-51 の一部分拡大)

④ 建屋の違いによる建屋内線量率の比較

一様平面の地上に建屋(一般住宅、集合住宅、公共建屋)を 1 軒配置したモデルを使用し、クラウドシャインを地上から高さ 50[m]とし、建屋の違いによる建屋内線量率の比較をグラフ図 6-53 に示す。建屋の違いが顕著と思われる代表点から 1～101[m]の範囲を拡大して図 6-54 に示す。

屋根による減衰が一般住宅の方が集合住宅より代表点より遠いところまで影響が出ているが、この理由として考えられるのは、

・ 一般住宅：軒の高さ 6.3m、棟の高さ 8.3m

・ 集合住宅：軒の高さ 7.3m、棟の高さ 9.3m

一般住宅の方が軒の高さが低いので代表点から遠いところまで屋根の影響が出ると考えられる。公共建屋の屋根の材質はガルバリウム、外壁の材質はサイディングで線量率の減衰はほぼ同じくらいと考えられる。

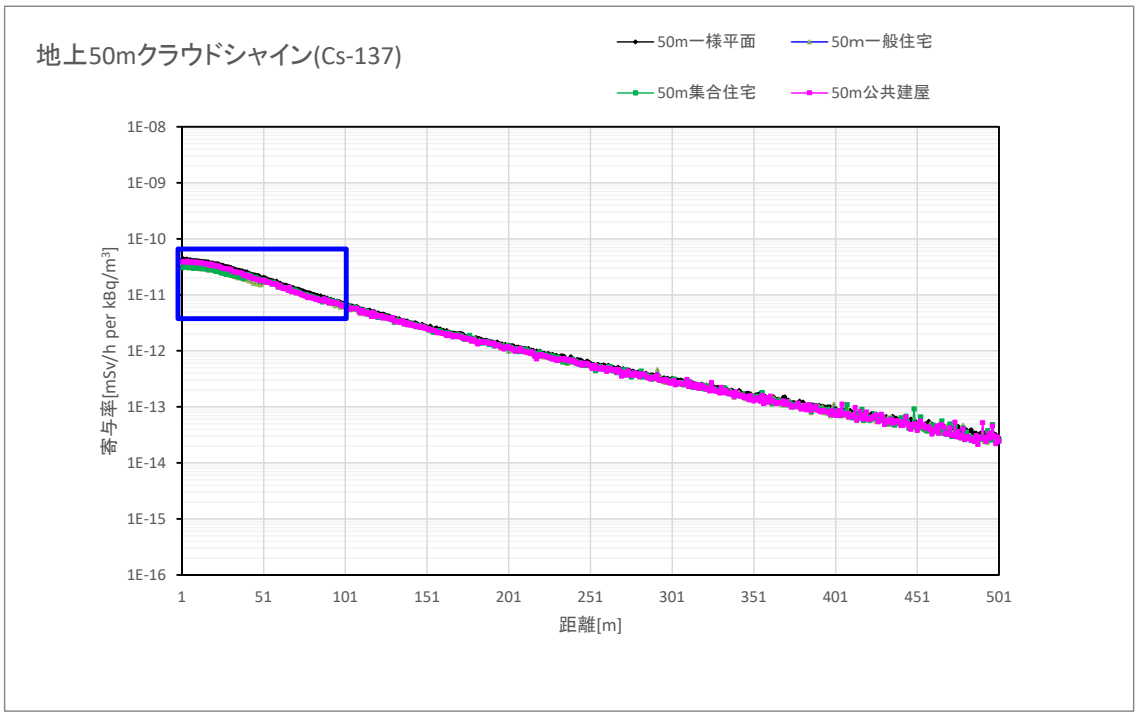


図 6-53　一様平面、一様平面上に建屋一軒(一般住宅、集合住宅、公共建屋)配置

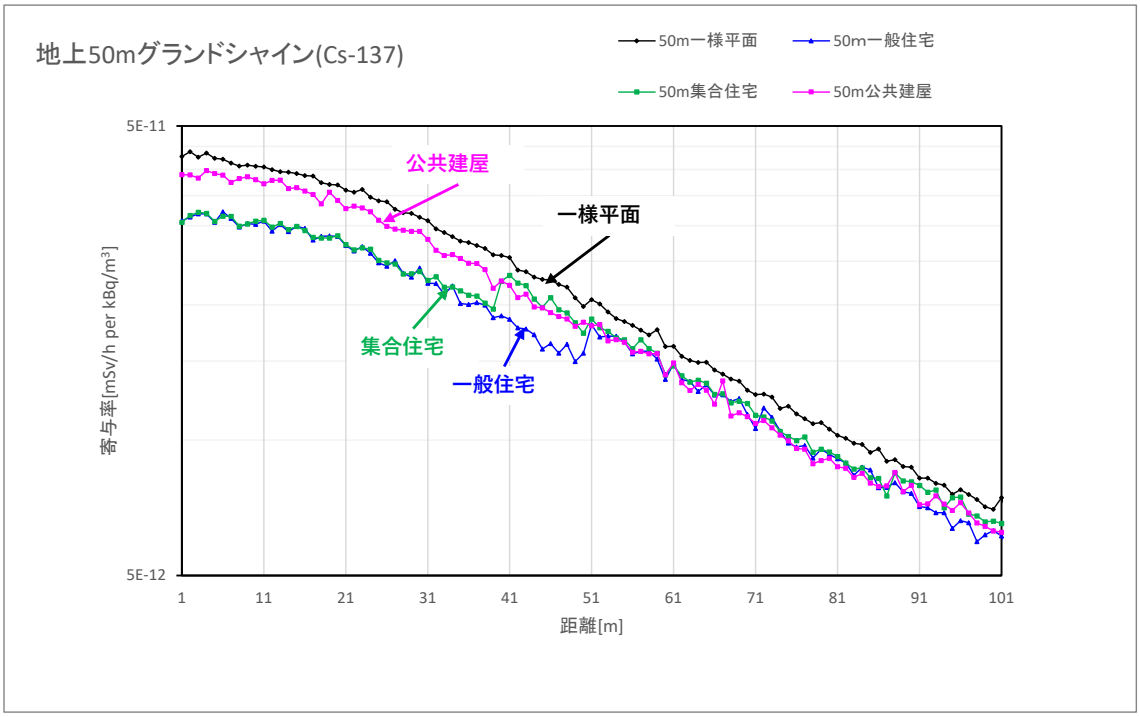


図 6-54　一様平面、一様平面上に建屋一軒(一般住宅、集合住宅、公共建屋)配置(図 6-53 の一部分拡大)

6.2.3 3D-ADRES-Outdoor を用いたクラウド及びグランドシャインによる典型的居住環境の建屋内線量率の推定計算

① 典型的居住環境の建屋線量率計算モデルの概要

6.2.2 にて地上に一軒だけある対象から、図 6-55 の左に示すように複数の典型的居住環境中において、一つの注目する代表点を置く建屋(比較のため、6.2.2 で推定した建屋と同様のものを使用した)内での寄与率を求めるモデルを作成した。典型的居住環境中で複数の建屋の配置に関しては、図 6-55 の右のように代表点を置く建屋に対して各建屋 1 列に左右対称になるように並べることにより対称性ができる。この配置方法により並べ方さえ変えなければ 1 列の計算で 360 度に対応できる。

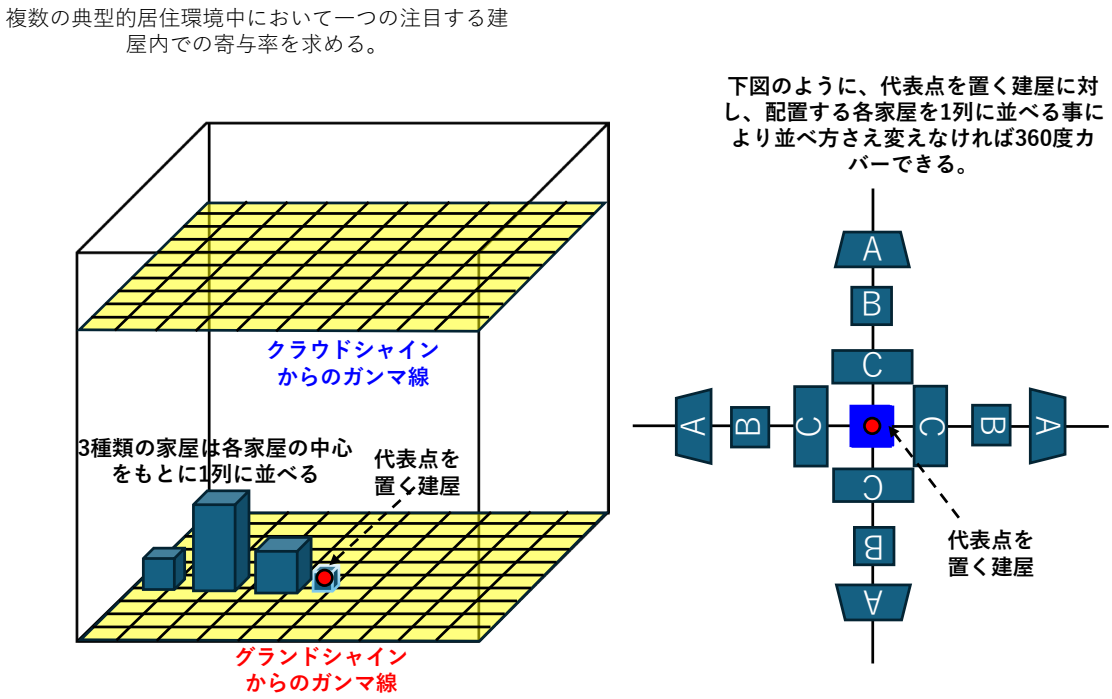


図 6-55　住居環境での建屋内線量率モデルの概要

② 典型的居住環境の建屋内線量率計算モデルの作成

6.2.2 で作成した一様平面の地上に複数の典型的居住環境中(一般住宅、集合住宅、公共建屋)において、一つの注目する代表点を置く建屋(一般住宅とした。また、比較のため、6.2.2 で推定した建屋と同様のものを使用した。) 内で寄与率を求めるため建屋を一般住宅(代表点)、一般住宅、集合住宅、公共建屋の順に配置したモデル図 6-56 を作成した。

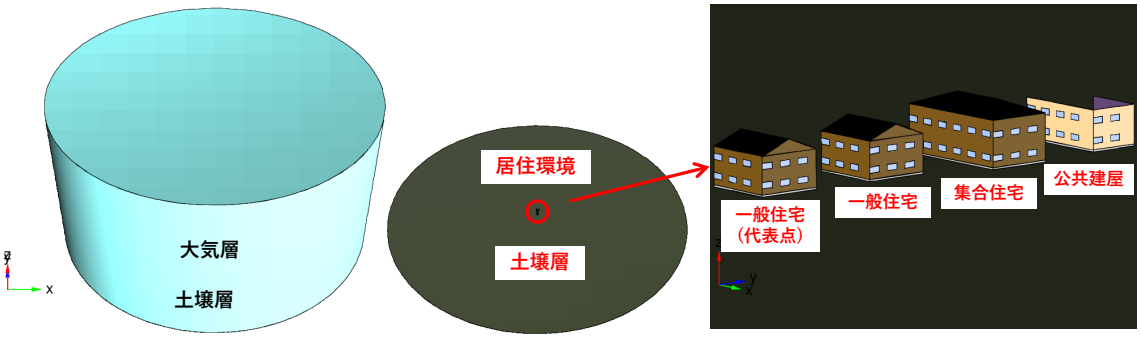


図 6-56　住居環境の計算モデル

③　典型的居住環境の建屋内線量率計算結果

一様平面の地上に典型的居住環境(一般住宅、集合住宅、公共建屋)を配置し、グランドシャイン及びクラウドシャインの高さ(20, 30, 40, 50, 60, 80, 100 [m])の計算を行った。グランドシャインとクラウドシャインの高さ方向を変え計算した結果を図 6-57 と図 6-58 に示す。図 6-58 は図 6-57 のグラフで寄与率に典型的な住居環境が及ぼしている影響が顕著と思われる部分を拡大して表示した。グラフでグランドシャインが破線で切れている部分は建屋が配置されている部分である。図 6-58 のグラフからクラウドシャインの高さ方向の位置が高くなるほど屋根による減衰が代表点から遠いところまで現れている。

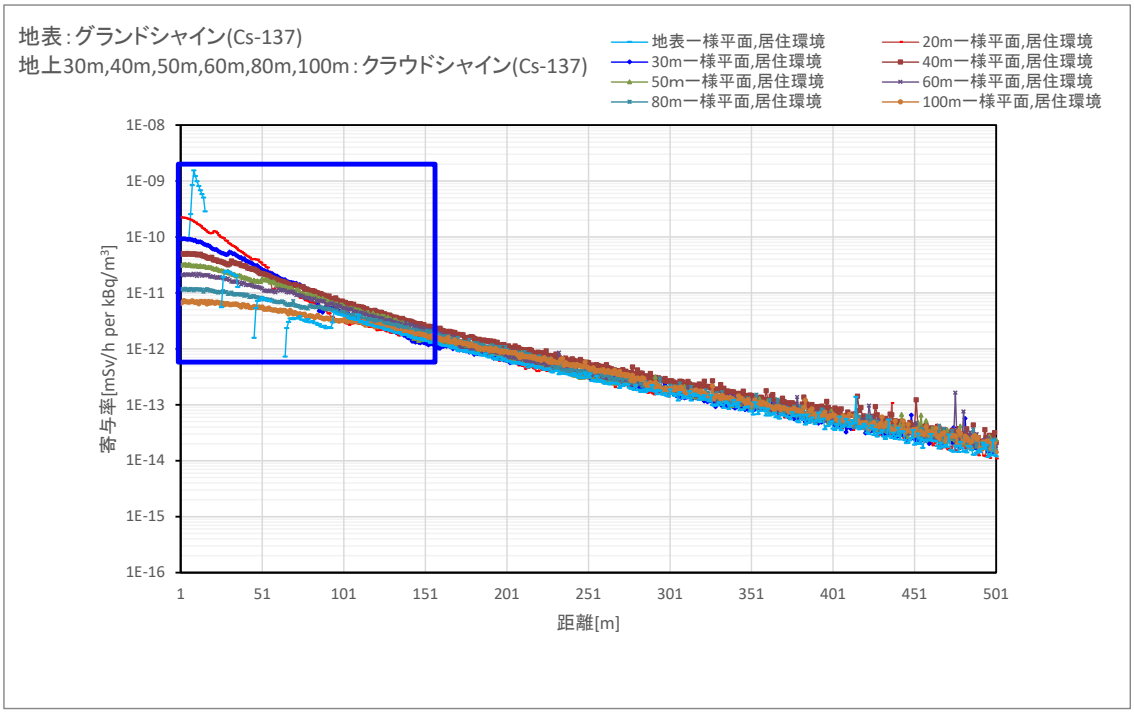


図 6-57　一様平面の地上に典型的居住環境(一般住宅、集合住宅、公共建屋)を配置

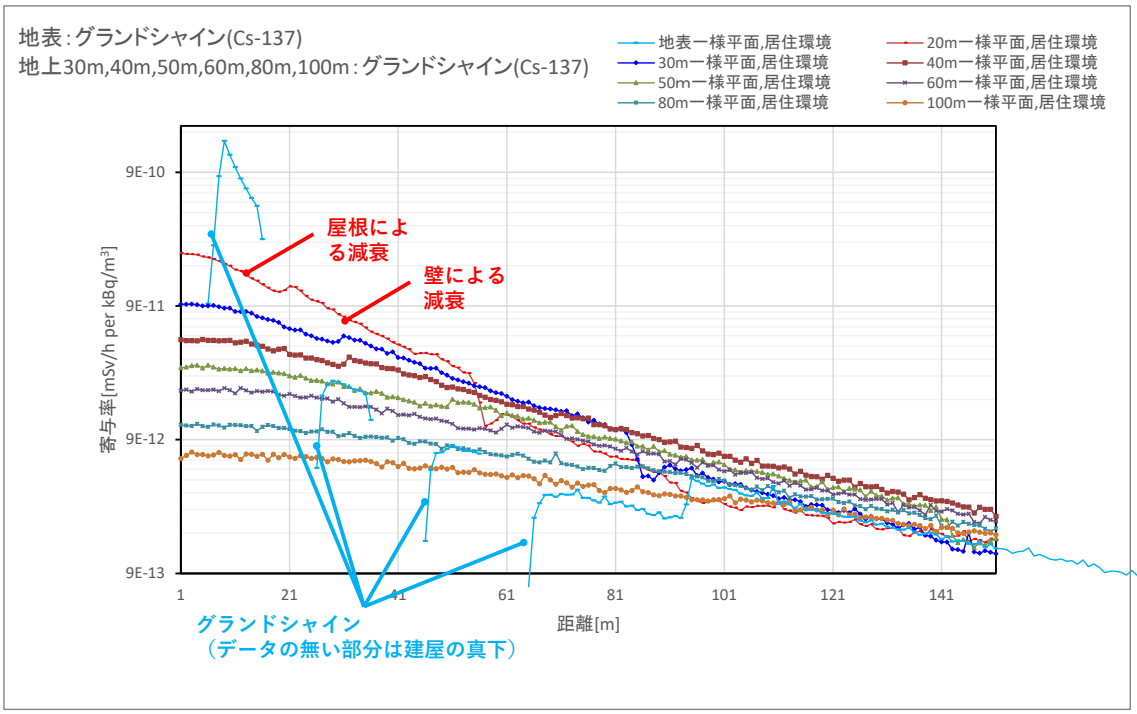


図 6-58　一様平面の地上に典型的居住環境(一般住宅、集合住宅、公共建屋)を配置(図 6-57 の一部の拡大図))

6.2.4 CFD と連携する 3D-ADRES-Outdoor を用いたクラウド及びグランドシャインによる建屋内線量率の動的変化の推定計算試験

6.2.3 までに実施したクラウド及びグランドシャインによる典型的居住環境の建屋内線量率の推定計算において求めた各格子からの建屋内代表点への寄与率情報を用いて、グランド及びクラウドシャインによる建屋内線量率が、CFD により時々刻々と得られる格子点内の放射性物質濃度の経時変化に対し、線量率がどのように変化するかを推定するための計算を実施した。用いる CFD コードは LHADDAS とした。

①　CFD(LHADDAS)と 3D-ADRES-Outdoor の連携の概要

前節までに作成した 3D-ADRES を用いたクラウド及びグランドシャインによる建屋内線量率のデータと動的変化プログラム(LHADDAS)を連携させて線量率の動的変化を推定するための概要を図 6-59 に示す。

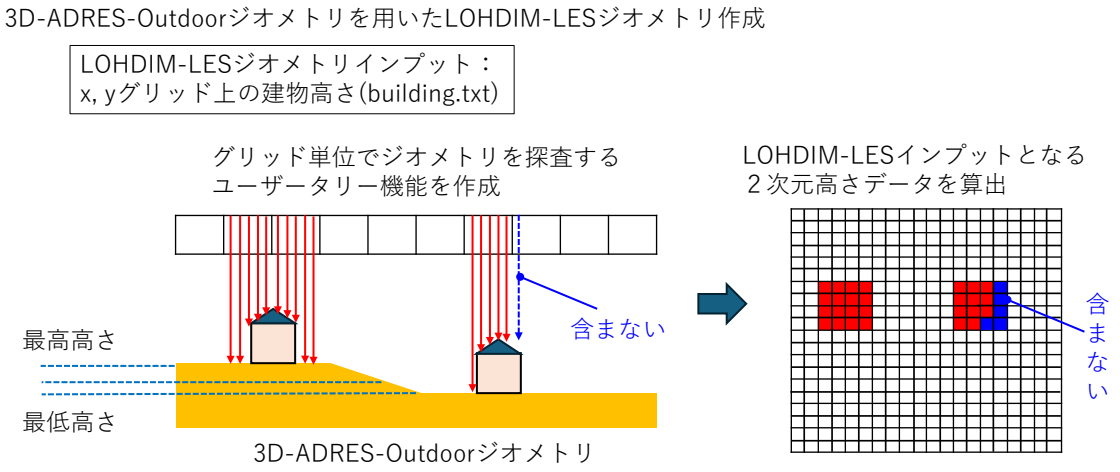


図 6-59　3D- ADRES-Outdoor と LHADDAS の連携の概要

②　放射線計算を実行するための放射性物質濃度分布の経時変化の計算

CFD コードとして LHADDAS の LOHDIM-LES を用い、寄与率テーブルを用いた放射線計算を実行するための放射性物質濃度分布の経時変化を計算した。気象条件の反映手法としては、乱流流入条件型を用いた。LOHDIM-LES のジオメトリインプットは、3D-ADRES-Outdoor で生成した環境モデルに基づいて作成した。環境モデルとしては、一辺 150[m]の計算領域中央付近に 3 棟の一般住宅が配置されたものを用いた。この環境モデルのジオメトリを PHITS ユーザータリーの機能を用いて探査し、LOHDIM-LES ジオメトリインプット形式である XY 平面格子単位での建物の高さデータを算出した。格子間隔は一辺 2[m]とした。図 6-60 に 3D-ADRES-Outdoor 環境モデルに基づいて作成した LOHDIM-LES ジオメトリインプット“building.txt”のデータをプロットした画像を示す。環境モデルの一般住宅の配置を反映したインプットとなっていることがわかる。

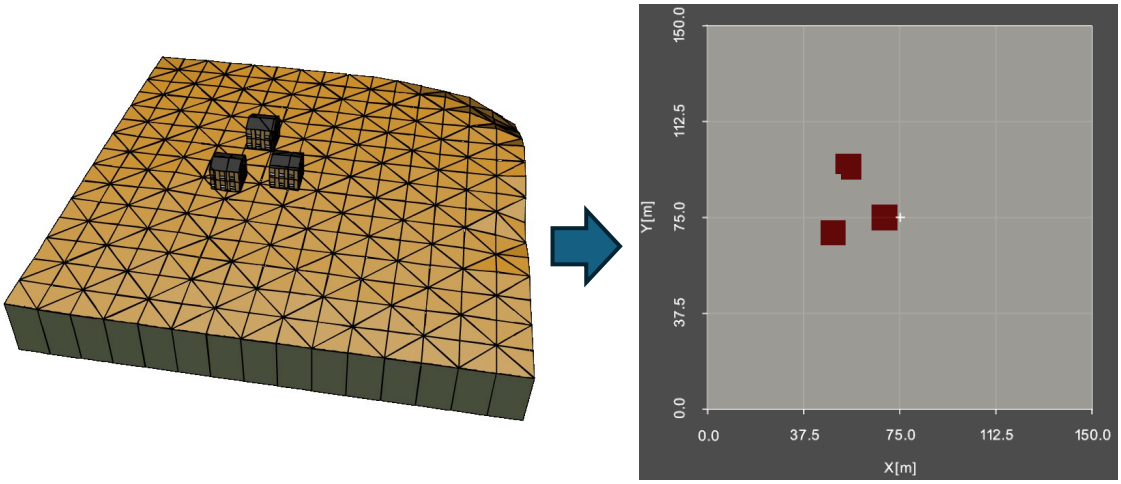


図 6-60　3D-ADRES-Outdoor の環境モデルに基づいて作成した LOHDIM-LES ジオメトリインプット

③　CFD(LHADDAS)と 3D-ADRES-Outdoor の連携した建屋内線量率の動的変化の推定計算試験

②で作成したジオメトリインプット以外の LOHDIM-LES のインプットとして、高さ方向の格子サイズである“zgrid.txt”、流入境界の平均風速の高さ方向分布である“uinflow.txt”が必要となる。計算に用い

たこれらインプットのデータを表 6-3 に示す。また、放射性物質の時系列データである“rerease.txt”については、1 分ごとの放出源濃度[Bq/m^3]を 1, 1, 1, 1, 1, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 5, 5, 5, 5, 5, 5, 6, 6, 6, 6, 6, 6, 7, 7, 7, 7, 7, 7, 8, 8, 8, 8, 8, 8, 9, 9, 9, 9, 9, 9 とした。その他の計算条件となる LOHDIM-LES インプットファイル“input_dis.dat”のパラメータ設定を表 6-4 に示す。プルームの放出格子位置としては、図 6-61 に示すように計算領域中央付近の地表面位置を設定した。インプットファイル及びパラメータの詳細については LHADDAS に同梱されている“LHADDAS マニュアル ver1.0.docx”に記載されている。

以上の計算設定で LOHDIM-LES を実行した結果を図 6-62 と図 6-63 に示す。それぞれ、空気中放射性物質濃度分布[Bq/m^3]（地表面からの高さ約 1m）の経時変化、沈着放射性物質濃度分布[Bq/m^2]の経時変化の結果である。LOHDIM-LES は一定の時間区間で平均した放射性物質濃度を出力する仕様となっており、この計算ではプルーム放出から 5 分間隔で 30 分後までの 6 区間の経時変化が出力される。図から、時間経過により放射性物質濃度分布が変化している様子がわかる。

LOHDIM-LES 計算で出力された放射性物資濃度分布データを用い、放射線計算コード SIBYL と同様の計算手法により、観測点における線量率の経時変化を計算した。SIBYL の線量率計算手法については、参考文献[6-1]に詳細が記載されている。線量率の計算に用いる線量率寄与率データとして、6.3.2 で作成したものを用いた。線量率を算出する観測点の位置座標は図 6-61 に示すように計算領域右下の①x=112[m], y=38[m]位置、計算領域中央の家屋内②：x=68[m], y=75[m]位置とした。地表面からの高さは寄与率データを計算した際の設定である高さ 1[m]に固定される。観測点①及び②の計算結果を図 6-64 に示す。観測点①、②についてプルーム放出から 5 分間隔で 30 分後までの 6 区間の 1cm 線量当量率[μSv/hour]の経時変化を示している。この二つの図から放射性物質濃度は空気中放射性物質濃度が支配的であることがわかる。プルーム放出位置から離れた観測点①では、空気中放射性物質濃度分布の経時変化により線量率の大きさが増減していることがわかる。プルーム放出位置から近い観測点②では空気の流れの影響が小さいため空気中放射性物質が単調増加しているが、プルーム放出位置から遠い観測点①では空気の流れの影響で増減が見られたと考えられる。

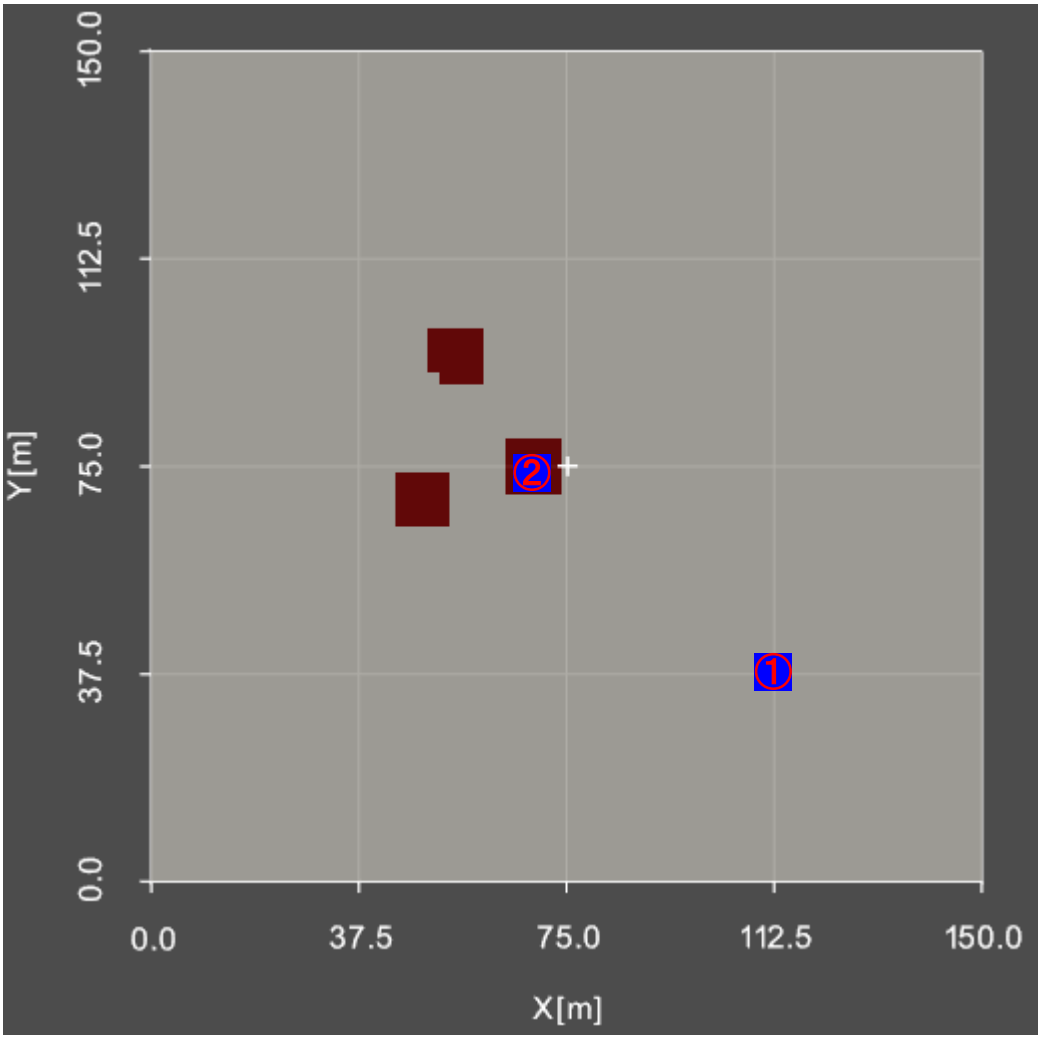


図 6-61　プルーム放出位置と観測点座標の設定

表 6-3　LOHDIM-LES インプットファイル“uinflow.txt”、“zgrid.txt”のデータ

番号	高さ方向格子サイズ[m]	風速分布 [m/sec]	番号	高さ方向格子サイズ[m]	風速分布 [m/sec]
1	2	1.647	21	5	2.770
2	2	1.921	22	5	2.789
3	2	2.063	23	5	2.807
4	2	2.163	24	5	2.824
5	2	2.240	25	5	2.840
6	2	2.304	26	6	2.856
7	2	2.359	27	7	2.872
8	2	2.407	28	8	2.887
9	2	2.449	29	9	2.901
10	2	2.488	30	10	2.915
11	2	2.523	31	11	2.929
12	2	2.555	32	12	2.942
13	2	2.585	33	13	2.955
14	2	2.613	34	14	2.968
15	2	2.639	35	15	2.980
16	2	2.664	36	16	2.992
17	2	2.687	37	17	3.003
18	2	2.710	38	18	3.015
19	2	2.731	39	19	3.026
20	2	2.751	40	20	3.037

表 6-4　LOHDIM-LES インプットファイル“input_dis.dat”の値

パラメータ	説明	値
ip, jp	xy 方向格子数	75, 75
kp	高さ方向格子数	40
iheat	温度成層効果の考慮の有無	0
ifbf	建物・地表面起伏効果による乱流計算の実施の有無	1
igas	大気拡散計算の実施の有無	1
idepo	乾性沈着計算の実施の有無	1
itree	植生効果による乱流計算の実施の有無	0
iran	乱数の使用の有無	0
istackx, istacky, istackz	プルーム放出点の位置座標	39, 39, 1
icalc	継続計算の実施	0
n	計算開始時のステップ	1
n1	乱流統計量の計算開始時のタイムステップ	108000
ngas	大気拡散の計算開始時のタイムステップ	36000
avetime	乱流統計量を取得するための平均時間　[秒]	36000
dt	計算タイムステップ間隔［秒］	0.025
dx, dy	計算格子間隔［m］	2, 2
frivel	摩擦速度［m/s］	0.45
z0	粗度長［m］	0.1
tlai	葉面積指数	4
recyp	制御した境界層高さ［m］	200
imrecyc	リサイクリング座標位置	10

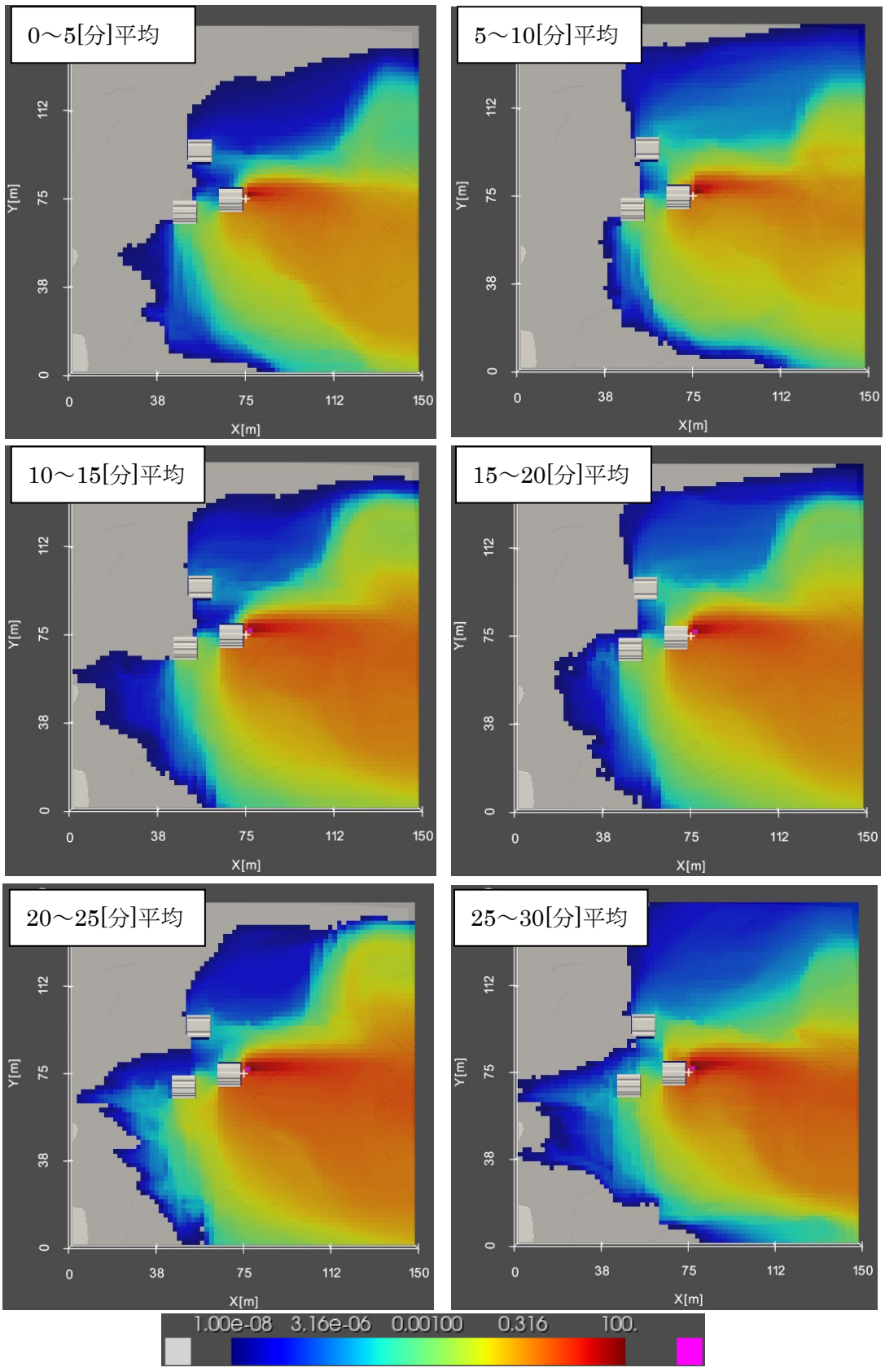


図 6-62　空気中放射性物質濃度分布[Bq/cm3]の経時変化（地表面からの高さ約 1m）

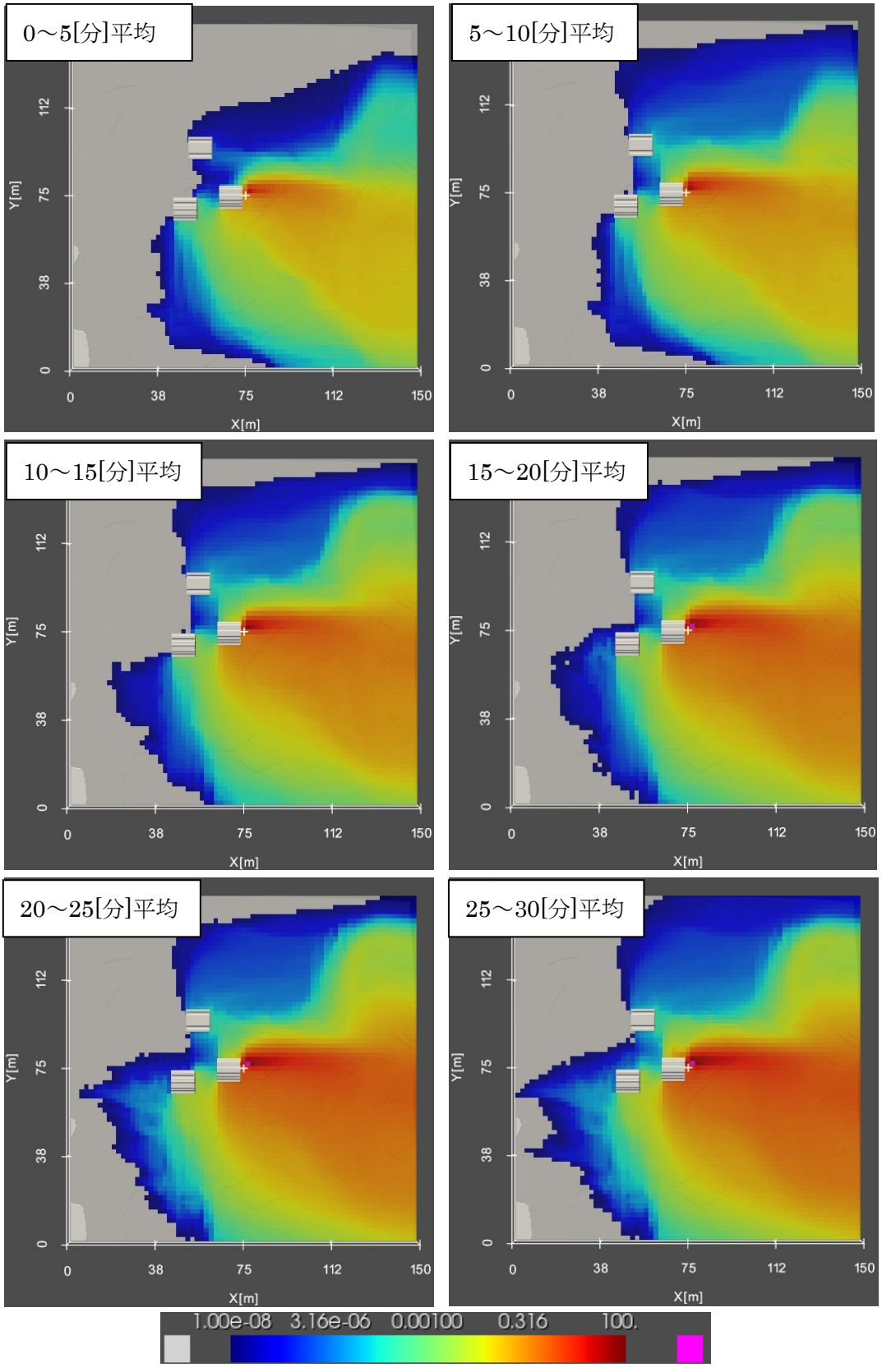
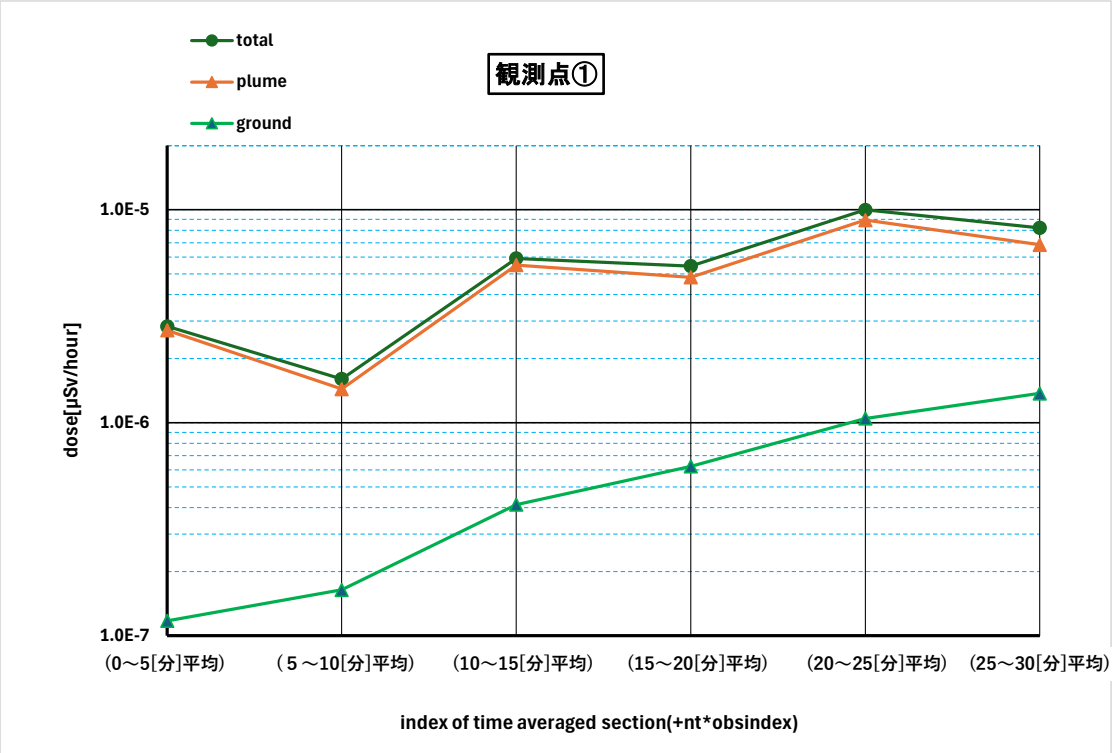


図 6-63　沈着放射性物質濃度分布[Bq/cm²]の経時変化



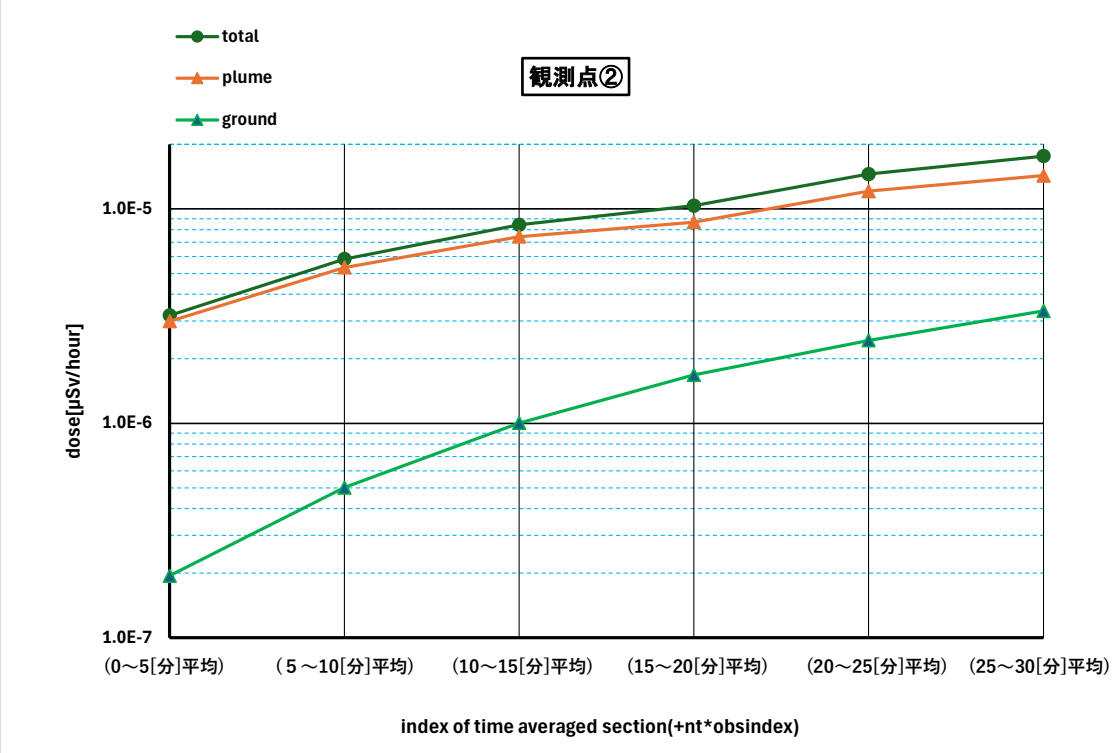


図 6-64　観測点線量率の経時変化

6.2.5 まとめ（6.2 節）

本節（6.2）の試計算の結果、3D-ADRES-Outdoor を用い、一様平面モデルにおける地上線量率の分布は、SIBYL の結果と良く一致することが確認された。地形変化モデルでは、地形の影響が線量率に顕著に現れることが示された。特に、地形変化が大きい地点ではクラウド及びグランドシャインによる線量率が大幅に変化することが確認された。建屋内線量率の評価では、建屋の種類と配置が線量率に与える

影響が明確に現れ、特に屋根と外壁による減衰が顕著であった。一般住宅、集合住宅、公共建屋のいずれにおいても、建屋の構造や材料組成が線量率に大きな影響を与えることが示された。次の CFD コード LHADDAS と 3D-ADRES-Outdoor の連携による動的な線量率の変化についても、線量率の経時変化を推定することが可能であることが示された。

今後の課題としては、さらに複雑な地形や建屋のモデルを導入し、実際の環境により近い条件での評価を行う必要がある。また、LHADDAS と 3D-ADRES-Outdoor の連携を強化し、より精緻な線量率の動的変化を予測するための手法を確立することが求められる。これにより、災害時の緊急対応や環境モニタリングでの活用が期待できる。なお、当該研究開発をさらに発展させる際、計算モデルの精度向上も重要な課題である。特に、計算格子の細分化や材料物性値の精密化が求められる。その一方、実験データとの比較検証を行い、計算モデルの妥当性を確認することも重要である。加えて、計算結果の不確実性評価を行い、結果の信頼性を示す手法も確立することが必要である。これにより、災害時の緊急対応や環境モニタリングにおける実用性を一層向上させることが期待される。また、今後の課題として、建屋内の詳細な線量率分布を評価するために、より高精度な計算手法の開発や新しい技術の導入が求められる。これにより、災害時の安全対策や環境修復のためのより効果的な方法を提供することが可能になると考えられる。加えて、複数のシミュレーション結果を統合し、包括的なリスク評価を行うためのデータ解析手法の確立も重要になるだろう。これにより、現実的なシナリオを考慮した総合的な線量率評価が可能となる。

以上、3D-ADRES-Outdoor (PHITS) を用いたクラウドシャインおよびグランドシャインによる地上線量率と建屋内線量率の推定計算は、災害時の対応や環境モニタリングにおいて重要な役割を果たす可能性があることが示された。しかし、さらなる研究開発と技術の進歩が必要であり、今後の課題に取り組むことで、より正確で信頼性の高い線量率評価が可能となる。これにより、本事業の目的である被ばく評価の高分解能化に貢献することが期待される。

6.3 屋内環境 CFD シミュレーションと 3D-ADRES-Outdoor 連携による屋内線量率の解析

福島第一原子力発電所事故以降、放射性物質の現実的な被ばく線量評価が求められている。特に、30km 圏内では、大気拡散シミュレーションを用いた高分解能の線量評価が重要と認識されている。本事業では、屋外環境における放射性物質の拡散と被ばく線量を精度高く評価するため、CFD(計算流体力学)シミュレーション (LHADDAS) と 3D-ADRES-Outdoor を用いた試解析を前節にて行った。これに対し、本節では、CFD を用いて屋内の放射性物質濃度の経時変化をシミュレーションし、3D-ADRES-Indoor(PHITS)を用いて屋内線量率を計算する。これにより、屋内退避時における放射線防護のためのデータが取得可能になると考えられる。

本節では、屋内環境における放射性物質の動態を理解するため、CFD シミュレーションを通じて室内の放射性物質の流動と拡散の過程を詳しく解析した。特に、窓やドアの開閉状況、通気口の位置、内部の間仕切りの配置などが放射性物質の分布に与える影響を調査し、現実的な被ばく線量を評価するための基本データの取得を目標とした。また、3D-ADRES-Outdoor を用いた CFD との連携の試解析では、屋内での放射性物質の沈着や再浮遊のメカニズムも考慮し詳細な線量評価を行う。

本事業では、大気拡散シミュレーションを用いた現実的な被ばく線量評価を行い、効果的な防護措置を講じるため、現在の評価手法では考慮されていない放射性プルームの分布情報や小規模地形、建造物群の影響を評価できる高分解能の大気拡散シミュレーションに基づく、より現実的で精度の高い被ばく線量評価手法の整備が求められている。従って、精度の高い線量評価を実施するには、屋内に侵入する

放射性物質の移流・拡散をシミュレーションする CFD コードの整備も必要となる。従来は、屋内を一つの領域としてコンパートメント（CP）モデルを利用する方法が取られてきたが、他分野では、CFD を活用した屋内気流解析が数多く行われており、温熱環境やダスト環境等の改善のための研究が進められている。この研究進展の一部を活用し、CFD により屋内に侵入する放射性物質分布（経時変化も含む）をシミュレーションすることで、更に詳細な被ばく線量の推定が可能になると考えられる。

本作業では、上記の屋内 CFD と 3D-ADRES-Outdoor を連携させ、現実に近い屋内 3D モデルを用いた CFD による放射性物質濃度の経時変化とそれに伴う線量評価を試みる。以上、本節(6.3)では、下記項目を実施する。

(1) 屋内環境 CFD シミュレーションの現状及び放射性物質流入解析の現状分析
(2) 屋内環境 CFD シミュレーションを用いた放射性物質濃度の室内経時変化の試解析
(3) 3D-ADRES-Outdoor を用いた屋内クラウド及びグランドシャインによる屋内線量率試解析
(4) 屋内環境での CFD 活用の屋内内部被ばく線量の推定試解析

6.3.1 屋内環境 CFD シミュレーションの現状及び放射性物質流入解析の現状分析

最初に、Google Scholar 検索を用い、言語を日英とし、以下の語句により、屋内環境 CFD シミュレーションに関する記事を検索し、件数をまとめた。なお、本事業では、屋内環境 CFD シミュレーションの試解析を実施する際、商用コードではなく、オープンソースである OpenFOAM を使用することとした。その理由は、解析のブラックボックス化を避けると同時に、改変等が自在に実施可能という点にある。また、OpenFOAM が実際に、様々な屋内外の環境解析に活用されているという点が挙げられる。

以上の事由により、現状分析では、CFD コード : OpenFOAM に関しても調査した。実際、以下に記すように、多くの Web ページ（記事）にて OpenFOAM の活用が確認されたが、放射性物質等に関する屋内 CFD に関連するものは少なく、特に室内への流入等については確認できなかった。なお、件数は、本事業の目的と関連するものという観点に従い選択したものである。

以上、当該事業で用いる CFD コード : OpenFOAM を用いた屋内への「放射性物質」の流入及び屋内分布の解析に当たる記事はないと判断した。

検索語句	Google Scholar 検索結果の補足説明	件数
屋内 3D モデル 温熱 CFD	OpenFOAM 以外の文献も存在	25
屋内 3D モデル 温熱 OpenFOAM	建築分野の数値流体解析における大規模計算(Tsubame スパコン利用)	1
屋内 3D モデル ダスト CFD	労働環境での吸入ダスト ICRP66 モデルによる計算と炉内ダストに関しての文献を確認。	5
屋内 3D モデル ダスト OpenFOAM	富山県立大学機関リポジトリ(2014-2015 年)他	2
放射性物質 流入 屋内 解析	原子力施設事故関連の文献が多数存在	436
放射性物質 屋内 流入 空気 解析 コンパート	原子炉建屋でのコンパートメントモデル、液体による放射能の移行についての文献	18

メント		
OpenFOAM 乱流モデル	RANS や LES について多数の文献（参考）	776
OpenFOAM MPPIC	日本語の記事は無い (通常の google 検索”OpenFOAM MPPIC ダスト”では 363 件)（参考）	393

① 屋内を模した 3D モデルに対する温熱環境やダスト環境等をシミュレーションする CFD コード及びその解析手法の現状の調査

CFD コードには、いくつかのソフトウエア[6-2]があり、以下に、通常の Web（Google）検索による記事で確認できたものを示す。OpenFOAM 以外の商用コードを用いた解析結果がいくつか確認できたが、放射性物質の流入に関する記事は確認できなかった。OpenFOAM については、基本的な設定方法を簡便にまとめた記事や、詳細な乱流の設定方法に関する記事が多く見られた。これは、様々な研究開発に活用されていることを示唆するものと考えられる。以下、各々のソフトウエアを使った代表的な解析例を示す。

ソフトウエア名	メーカー・管理団体	特徴
SCRYU/Tetra	MCS Software	非構造格子系熱流体解析による屋内の解析が確認される。
WindPerfect	株式会社環境シミュレーション	屋外が中心だが、屋内の解析も一部確認できる。
OpenFOAM	OpenFOAM 財団	C++ツールボックス、テンプレートメタプログラミング等が整備されている。

- SCRYU/Tetra を使用した CFD 解析文献

SCRYU/Tetra を使用した CFD 解析の内容が Web 検索で確認できる。CFD 解析による大規模講義室内の温熱環境評価では、外壁・内壁ガラス・ドア・天井・床及び人型発熱体について解析されている[6-3]。なお、ソフトウェアクレイドルによる解析では車室内や口腔の解析が行われている[6-4]。

- WindPerfect を使用した CFD 解析文献

WindPerfect を使用した CFD 解析の内容が Web 検索で確認できる。BIM の建物モデルを風、温熱環境解析でどう活用するか[6-5]や iPhone を用いた温熱環境解析（シミュレーションと実測の比較）[6-6]が行われている。

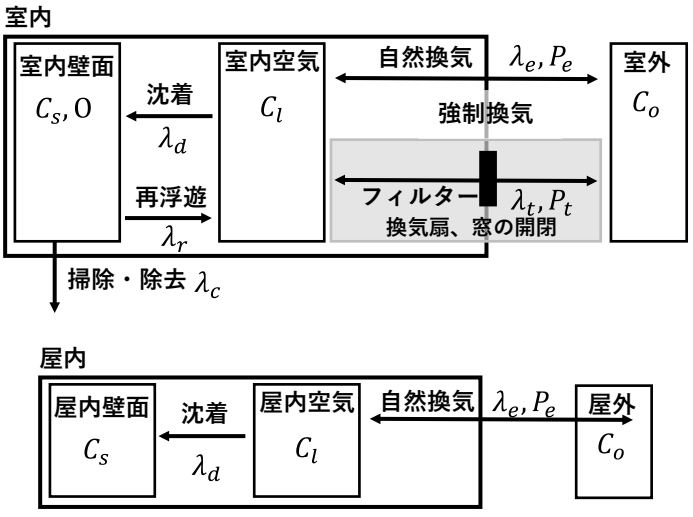
- OpenFOAM を使用した CFD 解析文献

OpenFOAM を使用した CFD 解析の内容が Web 検索で確認できる。室内環境のシミュレーションについては外部からの熱のみの移動が考慮されている。粒子計算ソルバーの比較[6-7]、kinematicCloudProperties の調査[6-8]、室内温熱環境設計フィードバックのための VR を用いた CFD 解析結果の 3 次元可視化[6-9]、寝室が早く冷えるエアコン吹出角度の解析[6-10]が行われている。

② 放射性物質流入解析のコンパートメント(CP)モデルの現状と CFD の活用状況

CFD による室内への放射性物質流入の試解析を進める上で、CP モデルによる解析について調査する必要がある。CP モデルによる解析については、文献[6-11]、[6-12]、[6-13]、[6-14]にて状況がまとめられている。文献[6-11]では、文献内 3.1.1～3.1.6 にて、関係する文献の調査結果及び換気率・経過時間と室内放射能濃度の関係が議論されている。文献[6-12]では、換気に関するパラメータがまとめられている。強制換気に関するパラメータとしてカタログ調査に基づき、0.2-1μm の粒子に対するフィルター効率：0～75%、標準換気扇の強制換気率：8-22/h、24 時間換気扇は 0.5-0.78-22/h との値が記されている。また、自然換気[6-12]についてのパラメータとして、周辺状況の風速を 2.0m/s とし、住宅の自然換気率が、1980 年以前の建築された住宅で 1.3/h、1980-1992 年に建築された住宅で 0.5/h、1992 年以降に建築された住宅で 0.18/h との値が記され、それらのパラメータ値の扱いについても議論されている。

CP モデルでは、空気の流入に関するパラメータから室内の空気の放射能濃度の時間発展を計算することができる。文献[6-11]では、以下のような室内 1 部屋について空気交換を考慮し、放射能量について詳細に調べられている。なお、CP モデルでは、1 部屋のみの解析が確認できたが、原理的には複数の部屋にすることも可能と考えられる。また粉塵の再浮遊を考慮した解析が進められていたが、効果が少ないと判断し、影響を無視した解析[6-14]が行われている。



3.2　吸入被ばくの推移

3.2.1　CPモデルの解析解

図3.1のCPモデルから、室内の放射能濃度C_lは次式で表される。

$$\frac{dc_l}{dt} = (P_e\lambda_e + P_t\lambda_t)\cdot C_o - (\lambda_e + \lambda_d + \lambda_t + \lambda)\cdot C_l + C_o\cdot\lambda_r \qquad (3.3)$$

ここで、

C_o：室外の放射能濃度
C_s：室内壁面の放射能濃度
λ_e：自然換気率
λ_t：強制換気率
λ_d：室内での沈着速度
λ_r：室内での再浮遊速度
λ　：壊変定数
P_e：自然換気に伴う浸透率
P_t：強制換気に伴う浸透率

である。このうち、室内の再浮遊速度λ_rはほかの移行速度に比べて2桁以上小さいため、ほとんどの文献で再浮遊の寄与は無視されている。再浮遊の項を除いた場合の(3.3)式の解析解は

図 6-65　CP モデルの概念図と対応する放射能濃度の式（文献[6-11]、[6-12]、[6-14]を基に複製）

次に、室内へ流入する放射性物質を CFD で解析した記事（文献）を Web 検索・文献検索を行ったが、確認できなかった（日本原子力研究開発機構・安全研究センターにて実施検討中であることは、3 章に記したヒアリングを通して情報を得たが、公開された文献としての記録はない）。

以下、本事業で利用する OpenFOAM を活用する解析について調査すると、MPPIC(Multiphase particle-in-cell method)により、粒子として追跡したと考えられる結果があるが、放射性物質（粉塵粒子の汚染物質）という観点での解析例はないことが分かる。CFD では、乱流モデルの設定が粒子状物質の拡散において重要となるが、OpenFOAM の乱流モデルまとめ[6-15]では、RAS（Reynolds Averaged Simulation：通常は RANS と呼ばれる）/LES（Large Eddy Simulation）で用いられる様々なモデルの詳細があり、設定の際に参考になることが分かった。なお、CFD による粒子状物質の追跡については、OpenFOAM の MPPIC で利用可能だが、解析事例として OpenFOAM を空調解析[6-16]に利用し、粒子の可視化した分析結果が紹介されている。また粒子計算ソルバーの比較[6-17]では、OpenFOAM での粒子計算のソルバーや解析方法が網羅的に紹介されている。

③ OpenFOAM の基本的な設定（粒子状物質及び放射性物質の屋内拡散に関する設定）

以下、本事業で利用する OpenFOAM において、粒子状物質（放射性物質を含むと仮定）の屋内拡散に関する設定について報告する。当該目的のため、文献[6-18]を参考にする。以下、イエローでハイライトした部分は、本作業で変更する可能性のあるパラメータである。

＜物理量に関する入力例＞

```
constantProperties      // Properties of the particles (discrete phase)
{
    rho0                1050; // density of particle                    参照密度
    alphaMax            0.99; // maximum dispersed phase-fraction (e.g. packing limit)
}

subModels // Specify applicable forces on the particles
{
    particleForces
    {
        /*   OF-plus, can be specified multi-forces, for OF-6 different models are included
        Drag models: nonSphereDrag
                     WenYuDrag
                     ErgunWenYuDrag
                     PlessisMasliyahDrag
                     sphereDrag
        Lift models: SaffmanMeiLiftForce
                     TomiyamaLift
        interface .... Vector force apply to particles to avoid the crossing of particles from
                       one phase to the other, The magnitude is calculated as C*mass*grad(alpha)
```

```
        nonInertialFrame    ... particle non-inertial reference frame force
        paramagnetic ... particle paramagnetic (magnetic field) force
        pressureGradient ... particle pressure gradient force
        virtualMass .... particle virtual mass force (https://en.wikipedia.org/wiki/Added_mass)
        */

        WenYuDrag
        {
            alphac          alphac; // Continuous phase fraction
        }

        gravity;

        interface
        {
            C                -10;
            alpha            alpha.water;
        }
    }

    injectionModels
    {
        model1
        {

            type                patchInjection;     //patchFlowRateInjection;
            patch               inlet;
            SOI                 0;              // start time of injection, s
            duration            10;             // duration time, s
            parcelsPerSecond 100;               // injected parcels per second
            U0                  (0 0.5 0);    // initial parcel/particle velocity
            parcelBasisType fixed;          // fixed;    number;
            massTotal           1;              // total mass, kg
            flowRateProfile constant 1; //
            nParticle           1;              // number of particle per percel
            meanParticleDiameter 0.005;

            sizeDistribution            // Parcell size variation(9
types:RosinRammler,binned,exponential,fixedValue,general,massRosinRammler,multiNormal,normal,uniform
)
```

```
        {
            type            fixedValue;
            fixedValueDistribution
            {
                value     0.005; //m
            }
        }
    }
}
```

サイズ設定
(直径)

＜境界との相互作用に関する部分の入力例＞

```
patchInteractionModel localInteraction;     //standardWallInteraction;

localInteractionCoeffs
{
    patches
    (
        walls
        {
            type rebound;   //rebound（反射）, stick（粘着）  or escape（脱出）
            e       0.97;       //入射速度垂直成分に対する反発係数（1.0 完全弾性）
            mu      0.09;       //入射速度接線成分に対する減衰係数（0.0 完全弾性）
        }
        inlet
        {
            type rebound;
            e       0.97;
            mu      0.09;
        }
        "outlet.*"
        {
            type escape;
        }
    );
}

StandardWallInteractionCoeffs
{
```

rebound に変えて stick を用いると吸着させることができる。

```
        type rebound;
        e       0.97;
        mu      0.09;
    }
```

④ OpenFOAM を利用する試解析の準備

(1) 流入条件の調査と設定

CP モデルでは、屋内外の放射性物質濃度に関し、換気に関するパラメータ(λ_e, P_e, λ_t, P_t,等)依存性が議論されている。外部の放射能濃度は、本来は実測値であるが、文献[6-11]では、屋外の空気中放射能濃度を 1.0Bq/m^3 として解析している。これより、屋外の放射能濃度の実測値に対し、解析した線量率を乗じることで実際の線量率に換算できると考えられる。文献[6-11]の I/O 比(放射能濃度(積分値)/屋外放射能濃度(積分値))のように、屋外との比の形式で求めることも有用と思われる。

一方、屋外放射能を Q_0[Bq/m^3]とする設定は、粉塵などの粒子に沈着した放射性元素からなる場合に用いられる。本報告では、Cs-134 と Cs-137(比率は 2:98 で固定)を仮定する。さらに、q[Bq/個]の放射能と、屋外の粒子の個数を n[個/m^3]とすると、q[Bq/個]=Q_0[Bq/m^3]/n[個/m^3]の関係となることを記す。

以下、CP モデルを考慮し、屋内における放射能濃度を考察する。CFD では、強制換気パラメータに λ_t=1, P_t=1 を想定し、全ての粒子が流入する状況を仮定するのが簡便だと考えられる。一方、流速を U[m/sec]、流入時間 T[sec]、流入時の断面積を S[m^2]、流入数 N[個/sec]を CFD の入力パラメータとして指定できる。入り口部分の入射直後の濃度が外部の濃度に等しいと仮定すると、(NT)/(UTS)=N/(US) = n [個/m^3]、$q = Q_0/n = Q_0 \times (US)/N$ が成立する。分母の N は生成する粒子数が多いと、1 つ当たりの粒子が担う Bq が少なくなる意味に解釈できる。例として N=1000[個/sec]、U=1[m/sec]、S=0.3×0.3=0.09[m^2]、Q_0=1[Bq/ m^3]を用いると、q = (1×0.09)/1000×1 = 9e-5 [Bq/個]とベクレルに換算できる。CP モデルでは、自然換気に関するパラメータは建物の築年数などで決まる値としているが、CFD では特に定まらず、構造物の隙間から自動的に自然換気が行われる。本報告では従来の自然換気に関するパラメータとの比較等は行わず、流入口の反対側に出口を設置し、自然換気を模擬する。

(2) 粉塵粒子についての調査と設定

試解析での粒子の物性に関するパラメータを検討する。文献[6-11]には、放射性物質（福島事故時）のエアロゾルやダストに関する粒径の測定値が示されており、放出粒子の種類毎の分布が確認できる。それらの結果から、セシウムについては、粒径 diameter=0.1～10μm 程度が妥当な設定と考えられる。また、その質量密度についても、様々な種類を取るが、文献[6-11]を参考にすると、0.1～10g/cm^3 の範囲が想定できる。粉塵の実測データについては、環境省の放射性物質汚染廃棄物処理情報サイトの調査結果[6-19]や労働安全衛生総合研究所の文献[6-20]も参考にできる。各粒子の放射能については、文献[6-21]が参考になる。

(3) 内部被ばく関連文献

放射性物質吸入接種時の放射能(Bq)を内部被ばくの実効線量に換算するには、摂取方法に応じた実効線量換算係数(mSv/Bq)[6-22]を用いる。その考えは、ICPR Publication 72[6-23]に記載されているが、補足データも JAERI-Data/Code 2002-013[6-24]に記載されているので適宜参照する。

換算係数導出には粉塵の物性、人体でのシミュレーション、組織加重係数が必要で、ICRP2007 年勧告の組織加重係数等に基づく改定値を用いる場合は、内部被ばく線量係数、濃度限度等についての試算[6-25]を参考にする。当該文献の 4 章に、呼吸時の内部被ばくの係数(Sv/Bq)、Cs に関しては、p.77 の第 2 欄に吸入接種時の係数が記載されている。これにより、粉塵粒子シミュレーションで想定する核種毎に Sv 単位に変換できる。これらの文献以外に、Bq と Sv の換算方法や事故後の浮遊じんの測定の実測値については、福島県の Web ページ[6-26]にも記載されている。

6.3.2 屋内環境 CFD シミュレーションを用いた放射性物質濃度の室内経時変化の試解析

① OpenFOAM による CFD シミュレーションの概要

本事業での屋内環境（風況）における CFD 解析では、OpenFOAM を用い、屋内に流入した粒子の経時変化を求めた。OpenFOAM のソルバーは、乱流モデルに LES、粒子モデルに MPPIC を使用した。

流体（空気）の境界条件は、最初のタイムステップのファイル：U.air で設定した。その内容を表 6-5 に示す。

表 6-5　空気の境界条件（U.air）

Inlet	入口
{	
type fixedValue;	
value uniform (1 0 0);	入口の流速：1[m/sec]
}	
outlet	出口
{	
type pressureInletOutletVelocity;	
phi phi.air;	
inletValue uniform (0 0 0);	
value uniform (0 0 0);	
}	
walls	壁
{	
type noSlip;	
}	

粒子の情報はファイル：kinematicCloudProperties で設定した。その内容の一部を表 6-6 に示す。

表 6-6　粒子の情報（kinematicCloudProperties）

constantProperties	
{	
rho0 142.18;	
alphaMax 0.9;	
}	
subModels	

```
{
    injectionModels
    {
        model1
        {
            type                patchInjection;
            massTotal           0;
            SOI                 30;                                  入射開始時間[sec]
            parcelBasisType fixed;
            patch               inlet;
            duration            60;                  //or 300;       入射継続時間[sec]
            parcelsPerSecond 1000;                                   入射粒子数[個/sec]
            U0                  (1 0 0);                             粒子速度：1[m/sec]
            flowRateProfile constant 1;
            nParticle           1;

localInteractionCoeffs
{
    patches
    (
        "(walls|inlet)"
        {
            type rebound;                                            壁との相互作用
            e       1;
            mu      0;
        }
        outlet
        {
            type escape;
        }
    );
```

OpenFOAM を用い、粒子の挙動を解析する部屋のモデルとしては、以下のものを作成した。各々のモデルでの計算条件と計算結果を示す。

- ８畳間モデル
- １０畳間モデル
- １０畳間モデルを横に並べたモデル
- １０畳間モデルを縦に重ねたモデル
- ８畳間２つ分の広さのワンルームモデル
- 天井が高く広い部屋を縦に重ねたモデル

② ８畳間モデルの作成及び計算結果

(1) OpenFOAM の計算モデル及び計算条件

８畳間の寸法で、図 6-66 に示すような計算モデルを作成した。

・　部屋のサイズ　　：3.6[m]×3.6[m]×2.5[m]
・　入口のサイズ　　：0.29[m]（縦）×0.315[m]（横）、上部に 1 か所
・　出口　　：入口 2 つ分の大きさ、下部に 1 か所
・　入口流速　　：計算の収束具合により以下のとおりとした。
　X 方向に 0.8[m/s]：以降(2)、(4)、(5)、(6)のケースも同じ
　X 方向に 1[m/s]：以降(3) のケースも同じ
・　粒子の流入速度　　：計算の収束具合により以下のとおりとした。
　X 方向に 0.8[m/s]：以降(2)、(4)、(5)、(6)のケースも同じ
　X 方向に 1[m/s]：以降(3) のケースも同じ
・　粒子の流入時間　　：計算開始 30 秒後から 60 秒間
・　メッシュ分割数　　：36×36×25=32,400
・　計算 CPU Time　　：4h～6h（タイムステップ 600[sec] までの計算、4 並列）
・　使用計算機　　：13th Gen Intel(R) Core(TM) i7-13700 (24 CPUs), ~2.1GHz

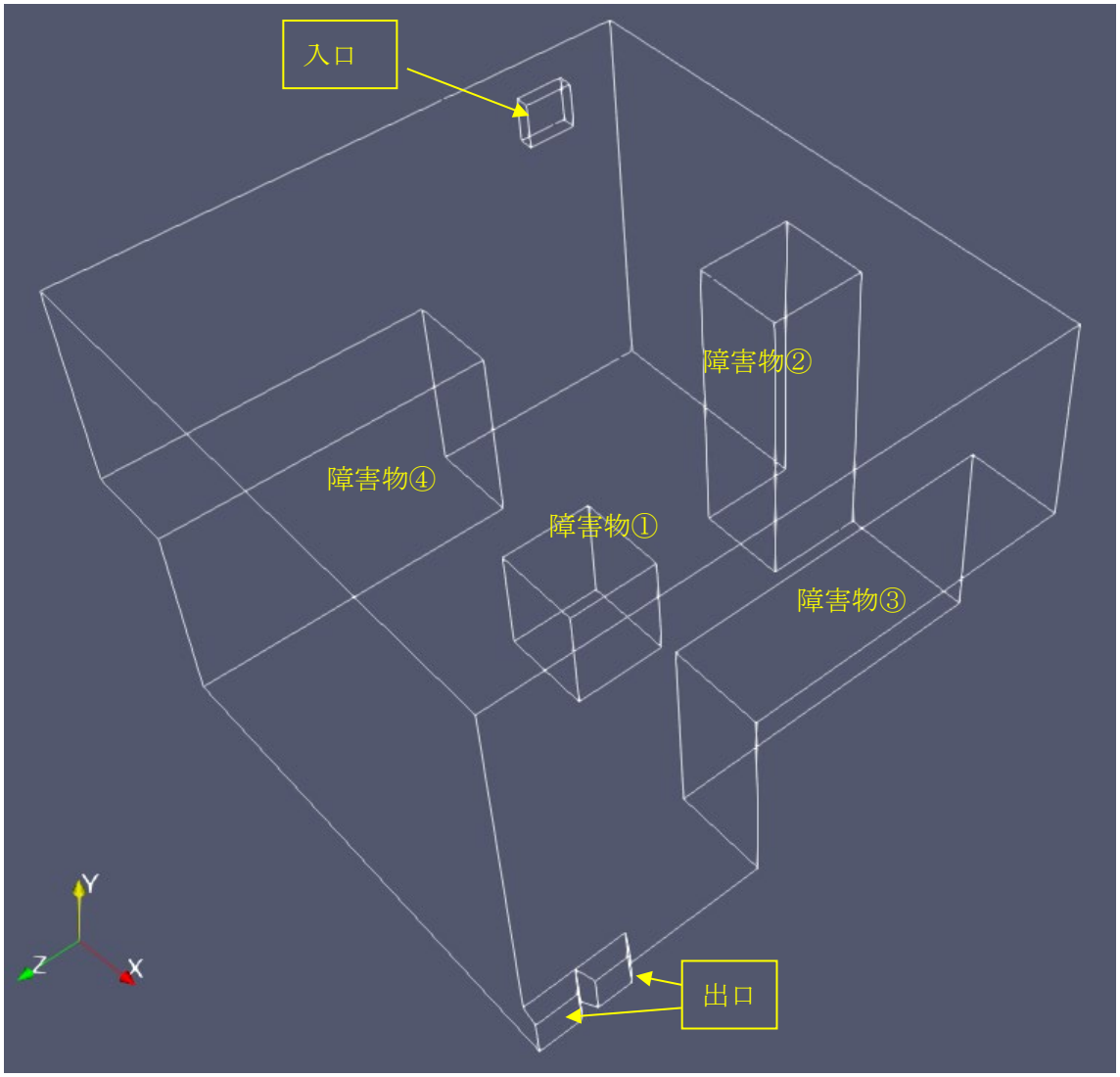


図 6-66 一般家屋 8 畳間モデル

(2) 計算結果（障害物が無い場合）

部屋の中に障害物が全く無い場合の計算結果を示す。部屋の中に存在する粒子数の時間変化を図 6-67

に示す。ここでは、部屋を高さ方向に 3 分割して集計した粒子数も記載している。タイムステップ毎の粒子の分布を図 6-68 から図 6-70 に示す。分布図中の粒子の色は入射からの経過時間を表しており、入射直後の粒子を青とし、入射してから最も時間が経過した粒子を赤とした。粒子数は、部屋の入口から流入が開始する 30 秒から流入が止まる 90 秒まで増加し、90 秒をピークにその後は出口からの流出により、緩やかに減少する。床上 1[m]～2[m]の範囲に存在する粒子数は、180 秒をピークにその後床方向に移動することが分かる。

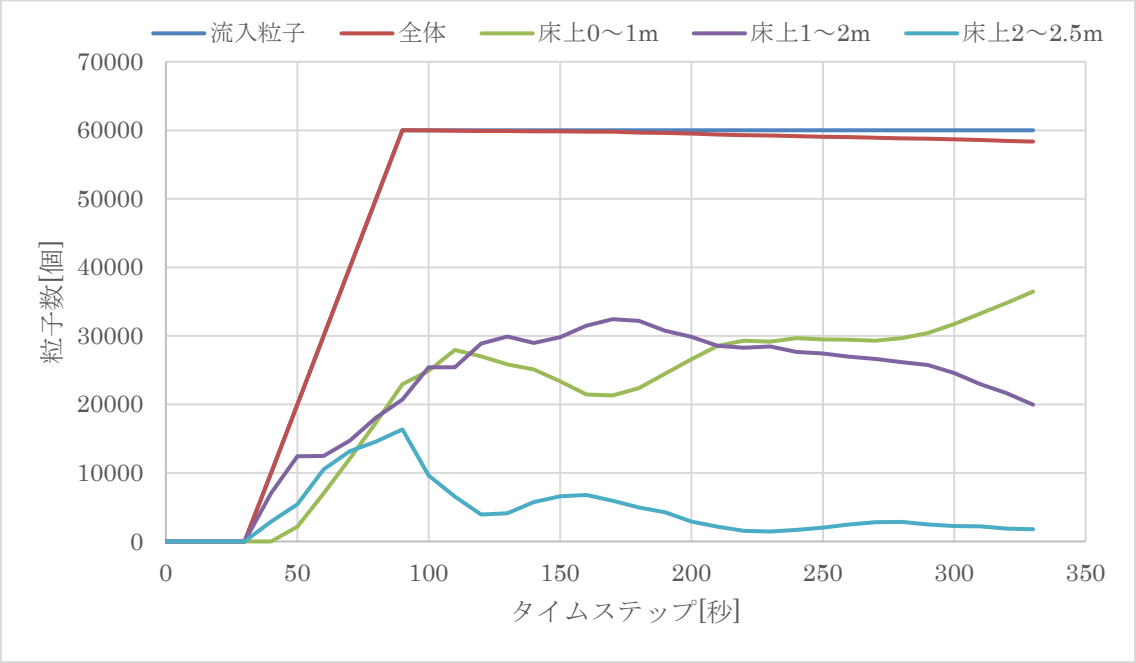


図 6-67 部屋の中に存在する粒子数の時間変化

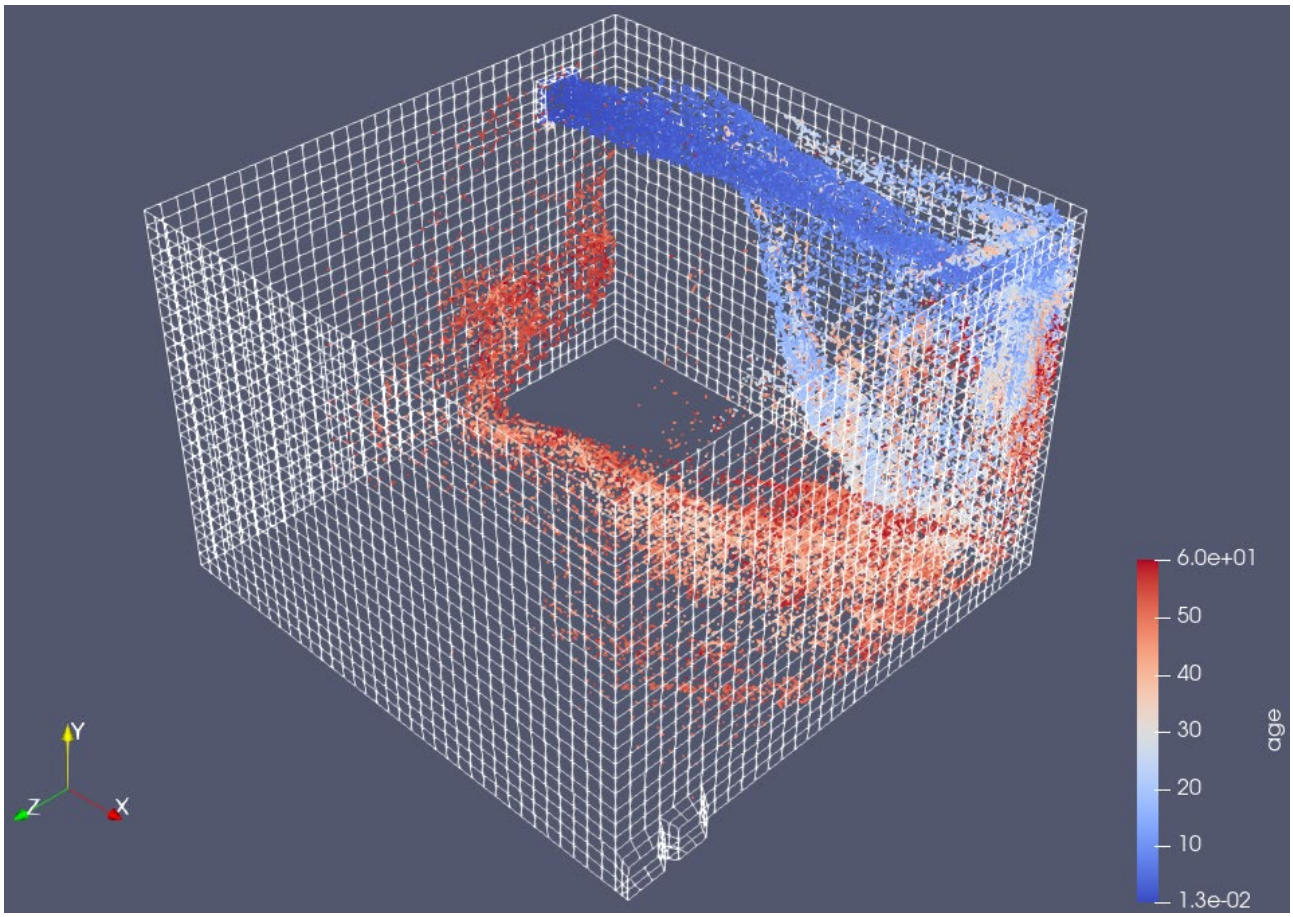


図 6-68 障害物なし、計算開始から 90 秒後（粒子流入開始から 60 秒後）

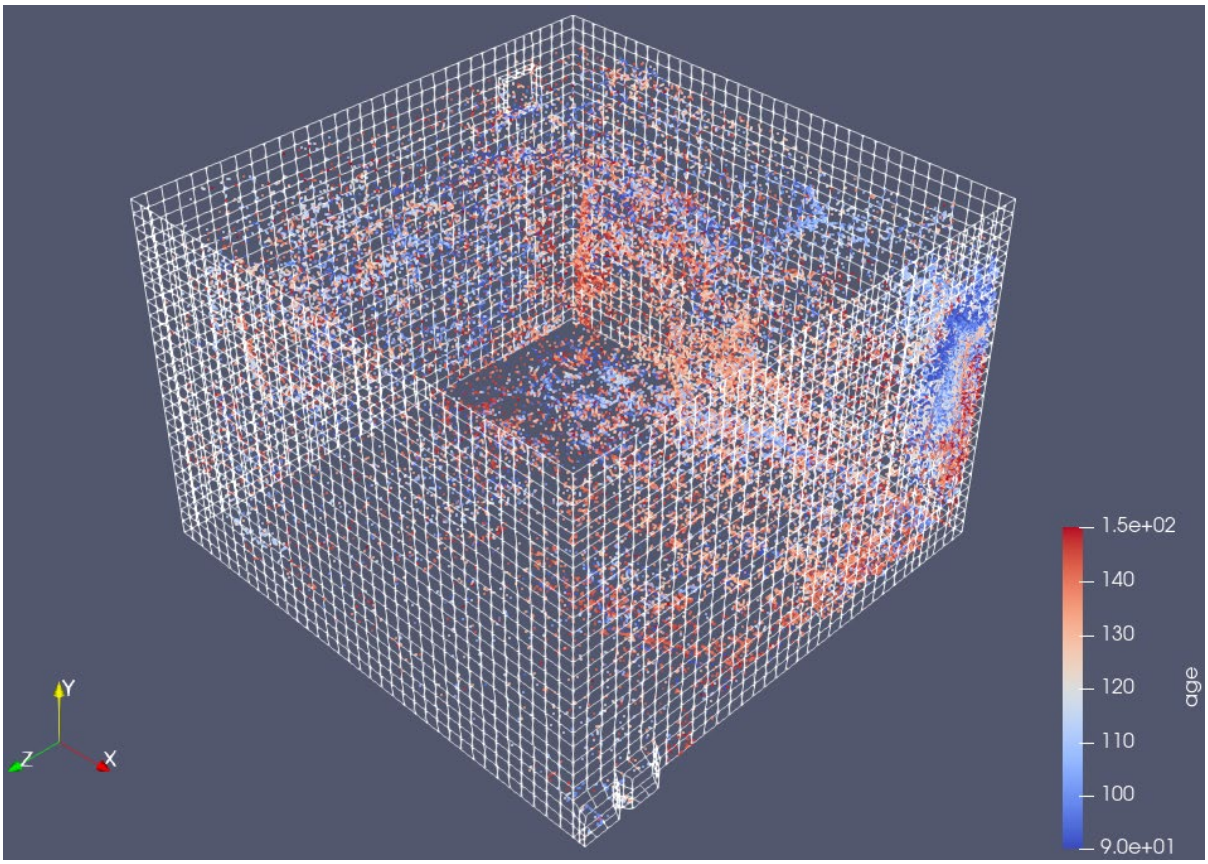


図 6-69 障害物なし、計算開始から 180 秒後（粒子流入開始から 150 秒後）

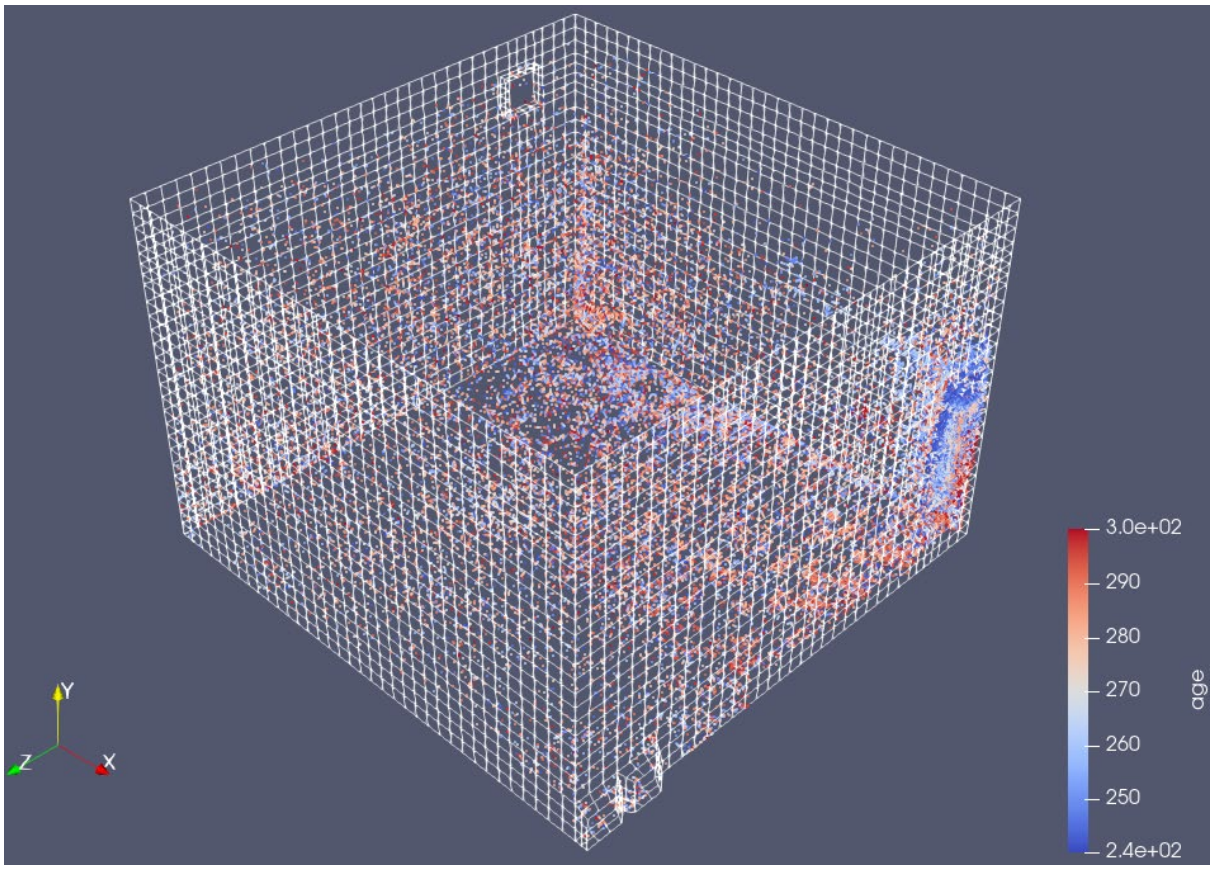


図 6-70 障害物なし、計算開始から 330 秒後（粒子流入開始から 300 秒後）

(3) 計算結果（障害物①が有る場合）

部屋の中に障害物①が有る場合の計算結果を示す。部屋の中に存在する粒子数の時間変化を図 6-71 に示す。なお、部屋を高さ方向に 3 分割して集計した粒子数も記載している。タイムステップ毎の粒子の分布を図 6-72 から図 6-74 に示す。分布図中の粒子の色は入射からの経過時間を表しており、入射直後の粒子を青とし、入射してから最も時間が経過した粒子を赤とした。粒子数は、部屋の入口から流入が開始する 30 秒から流入が止まる 90 秒まで増加し、90 秒をピークにその後は出口からの流出により、緩やかに減少する。障害物①の影響により床上 0[m]～1[m]の範囲への粒子の移動は、障害物がない場合に比べて遅くなる。床上 1[m]～2[m]の範囲に存在する粒子数は、障害物がない場合に比べて多い。

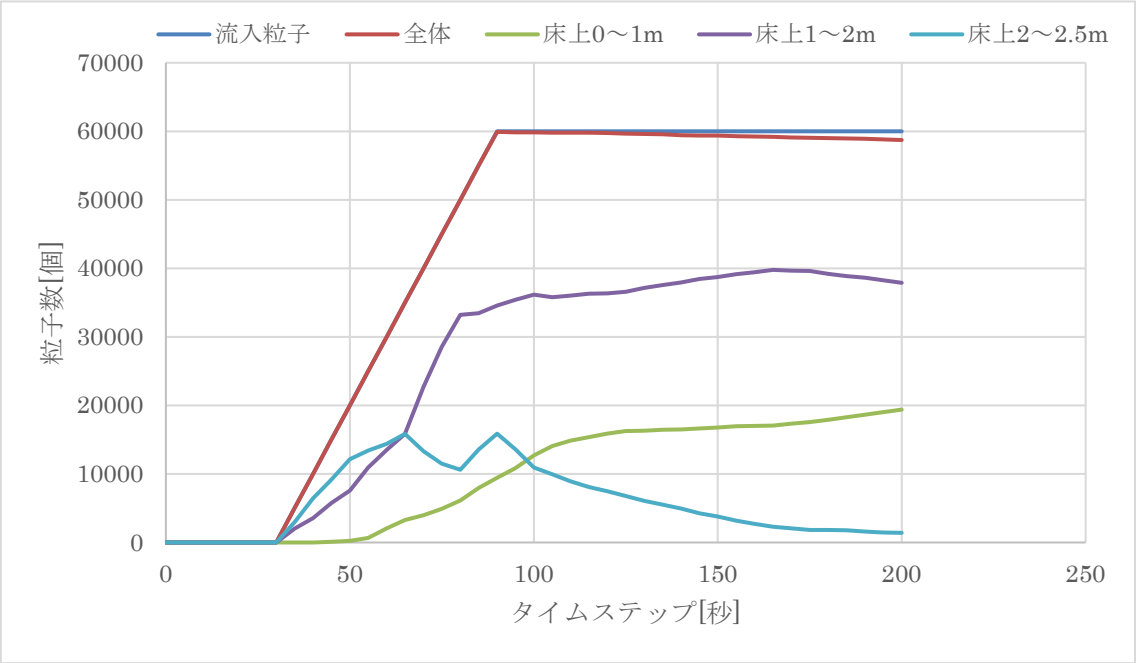


図 6-71 部屋の中に存在する粒子数の時間変化

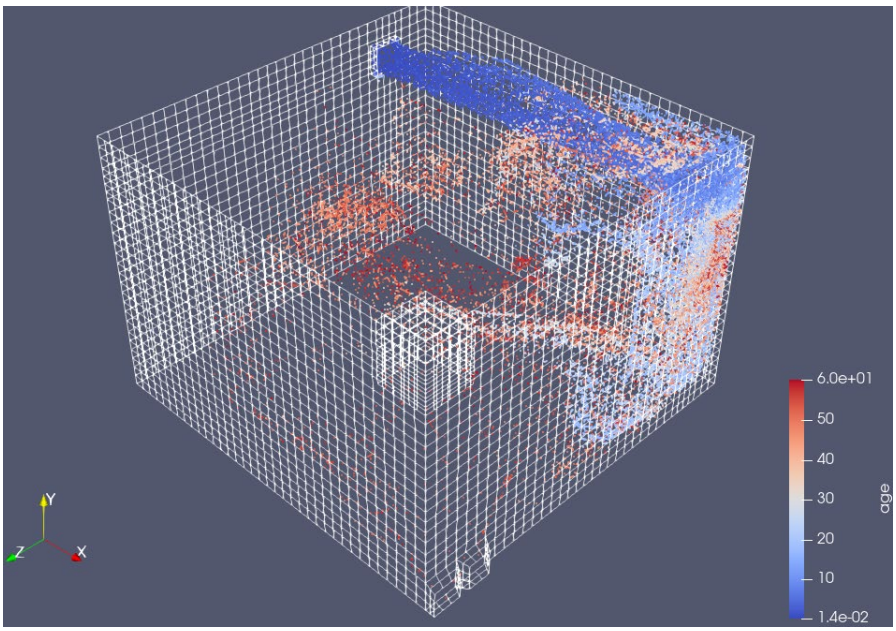


図 6-72 障害物①、計算開始から 90 秒後（粒子流入開始から 60 秒後）

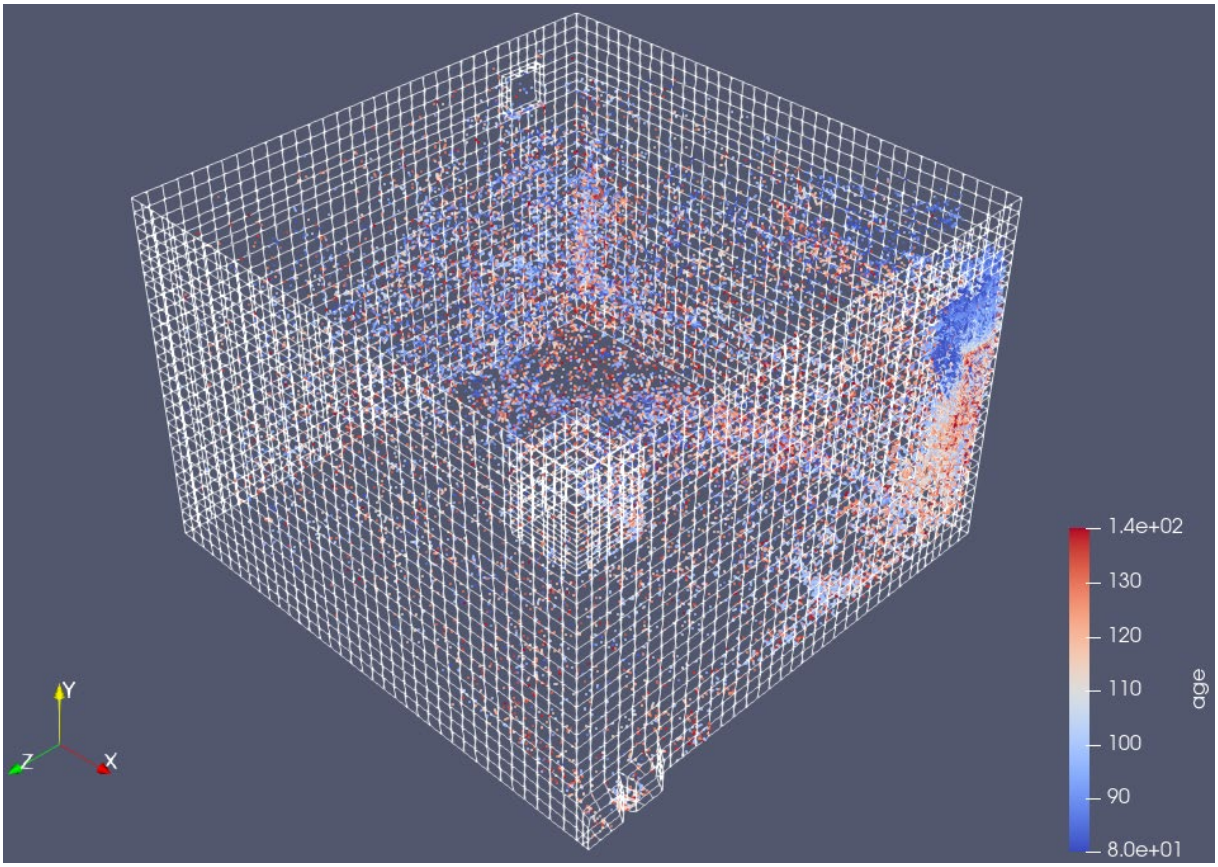


図 6-73 障害物①、計算開始から 170 秒後（粒子流入開始から 140 秒後）

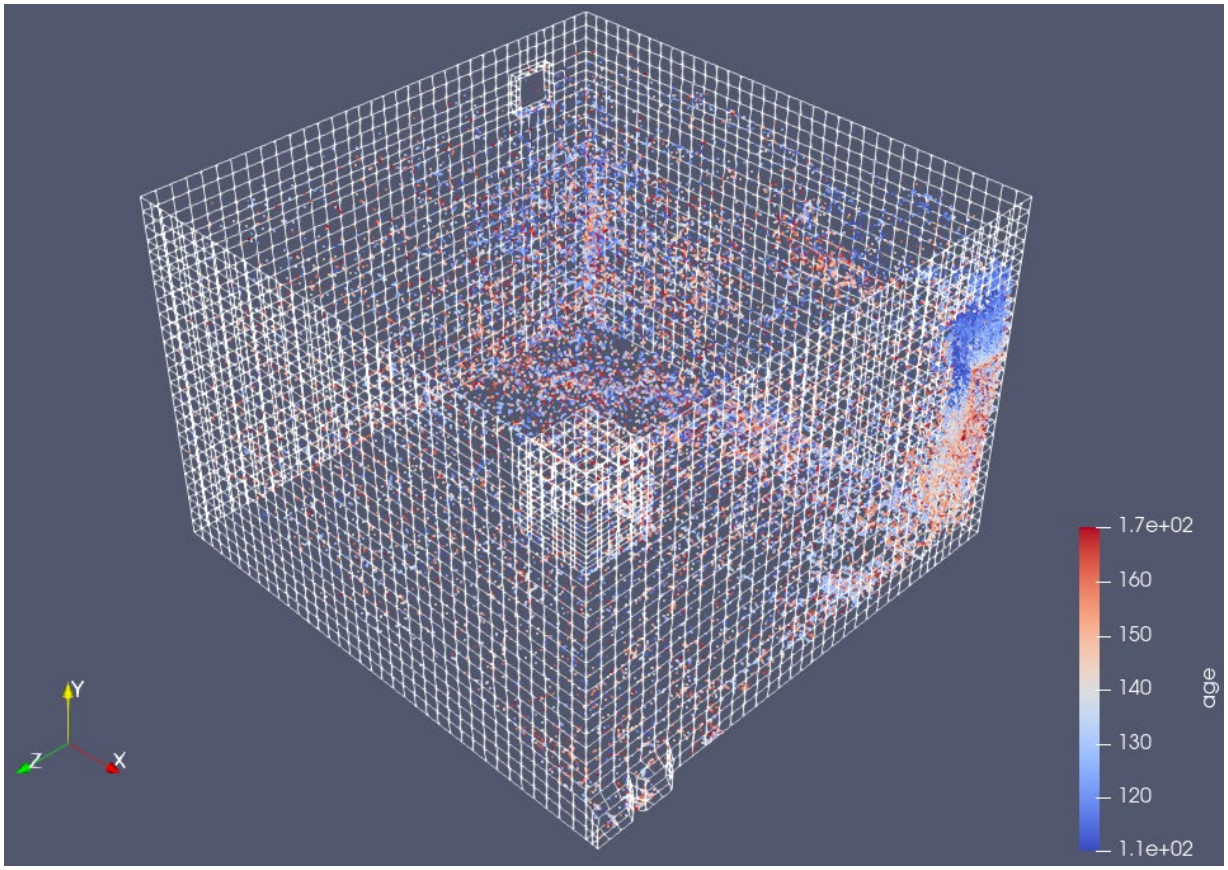


図 6-74 障害物①、計算開始から 200 秒後（粒子流入開始から 170 秒後）

(4) 計算結果（障害物①及び②が有る場合）

部屋の中に障害物①及び②が有る場合の計算結果を示す。部屋の中に存在する粒子数の時間変化を図 6-75 に示す。ここでは、部屋を高さ方向に 3 分割して集計した粒子数も記載している。タイムステップ毎の粒子の分布を図 6-76 から図 6-78 に示す。分布図中の粒子の色は入射からの経過時間を表しており、入射直後の粒子を青とし、入射してから最も時間が経過した粒子を赤とした。粒子数は、部屋の入口から流入が開始する 30 秒から流入が止まる 90 秒まで増加し、90 秒をピークにその後は出口からの流出により、緩やかに減少する。高さ方向の粒子分布の時間変化は、障害物①のみの場合とほとんど変わらない。障害物②の影響により入口付近に長時間存在している粒子が多い。

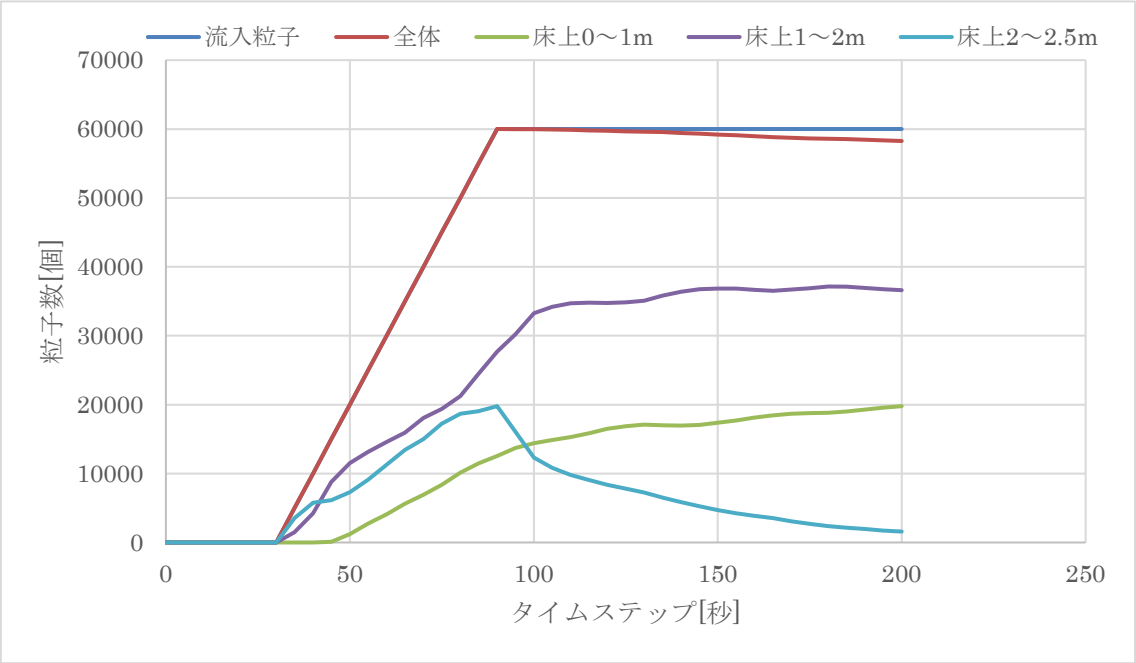


図 6-75 部屋の中に存在する粒子数の時間変化

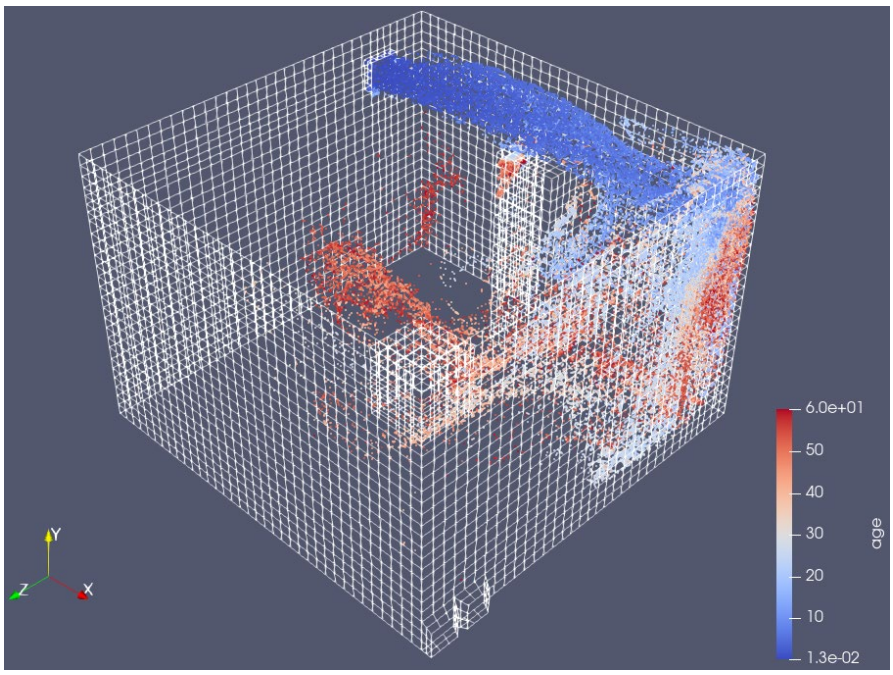


図 6-76 障害物①、②、計算開始から 90 秒後（粒子流入開始から 60 秒後）

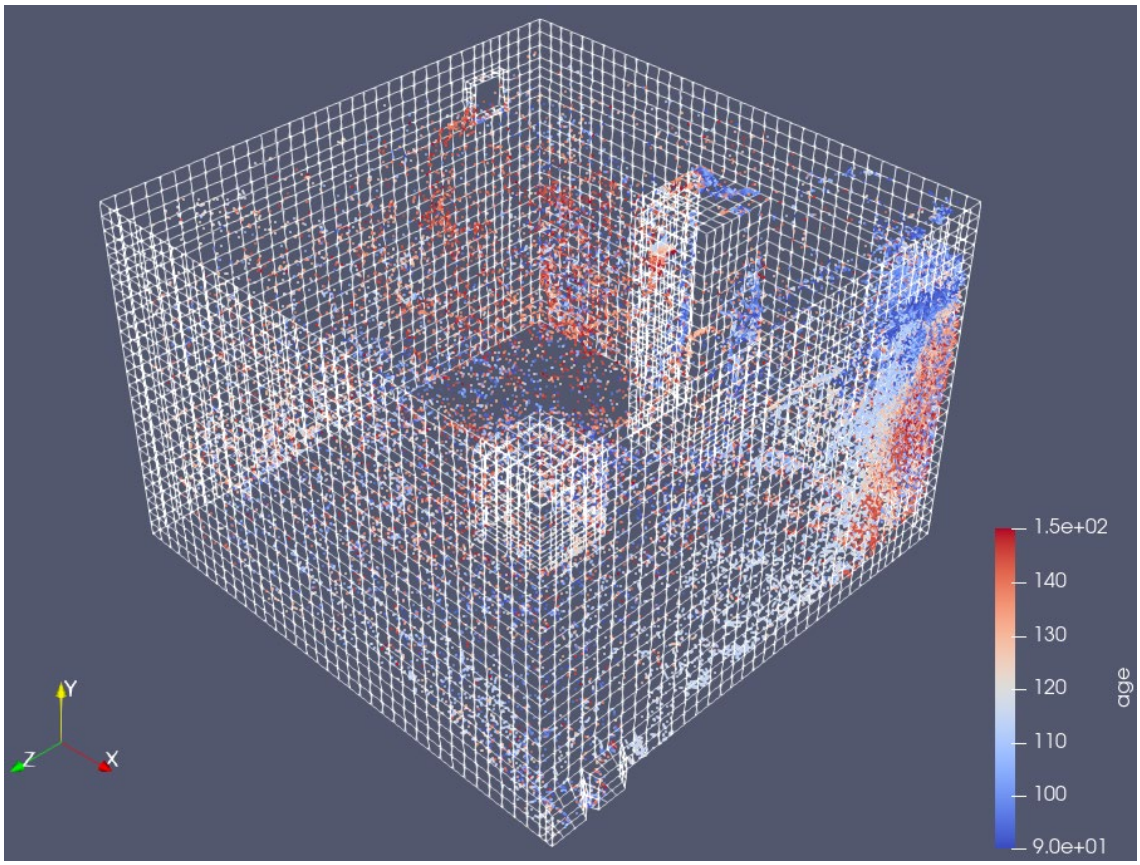


図 6-77 障害物①、②、計算開始から 180 秒後（粒子流入開始から 150 秒後）

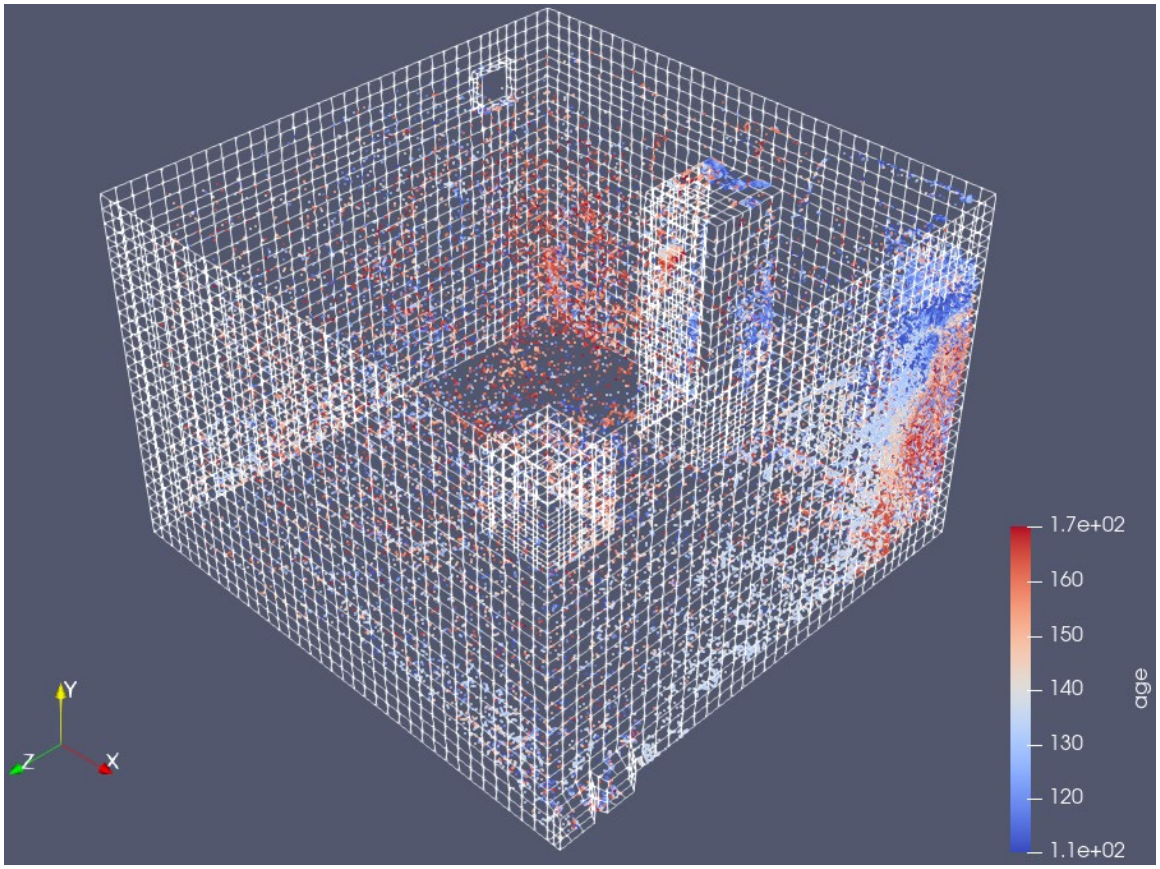


図 6-78 障害物①、②、計算開始から 200 秒後（粒子流入開始から 170 秒後）

(5) 計算結果（障害物①、②および③が有る場合）

部屋の中に障害物①、②および③が有る場合の計算結果を示す。部屋の中に存在する粒子数の時間変化を図 6-79 に示す。ここでは、部屋を高さ方向に 3 分割して集計した粒子数も記載している。タイムステップ毎の粒子の分布を図 6-80 から図 6-82 に示す。分布図中の粒子の色は入射からの経過時間を表しており、入射直後の粒子を青とし、入射してから最も時間が経過した粒子を赤とした。粒子数は、部屋の入口から流入が開始する 30 秒から流入が止まる 90 秒まで増加し、90 秒をピークにその後は緩やかに減少する。障害物③の影響により床上 1[m]～2[m]の範囲に存在する粒子数は多くなる。

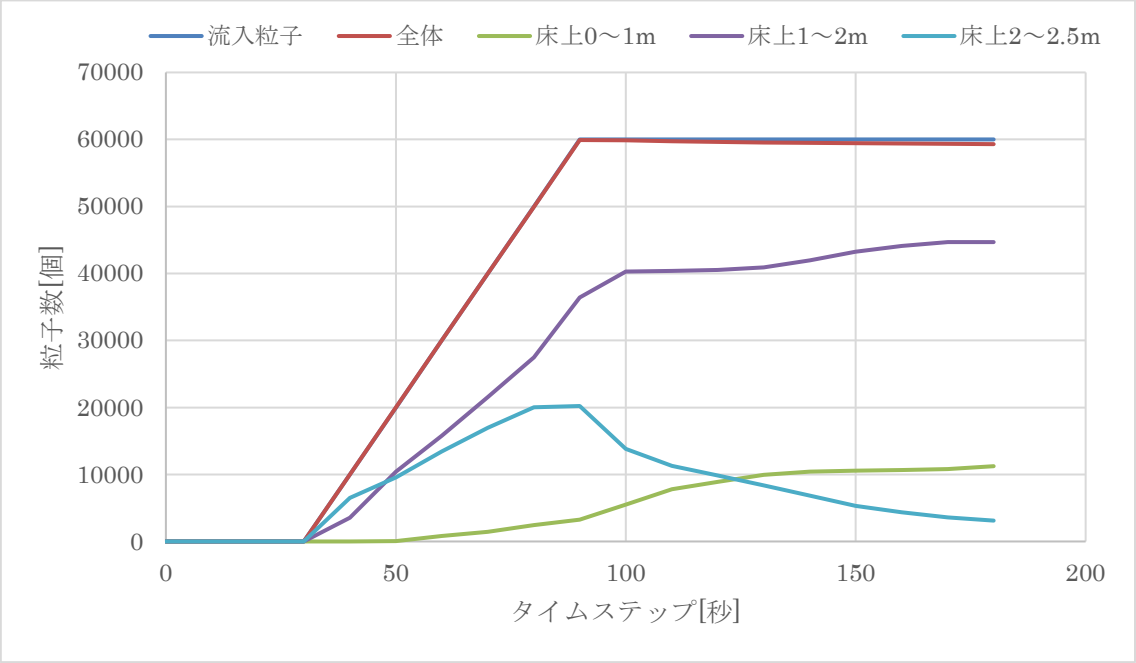


図 6-79 部屋の中に存在する粒子数の時間変化

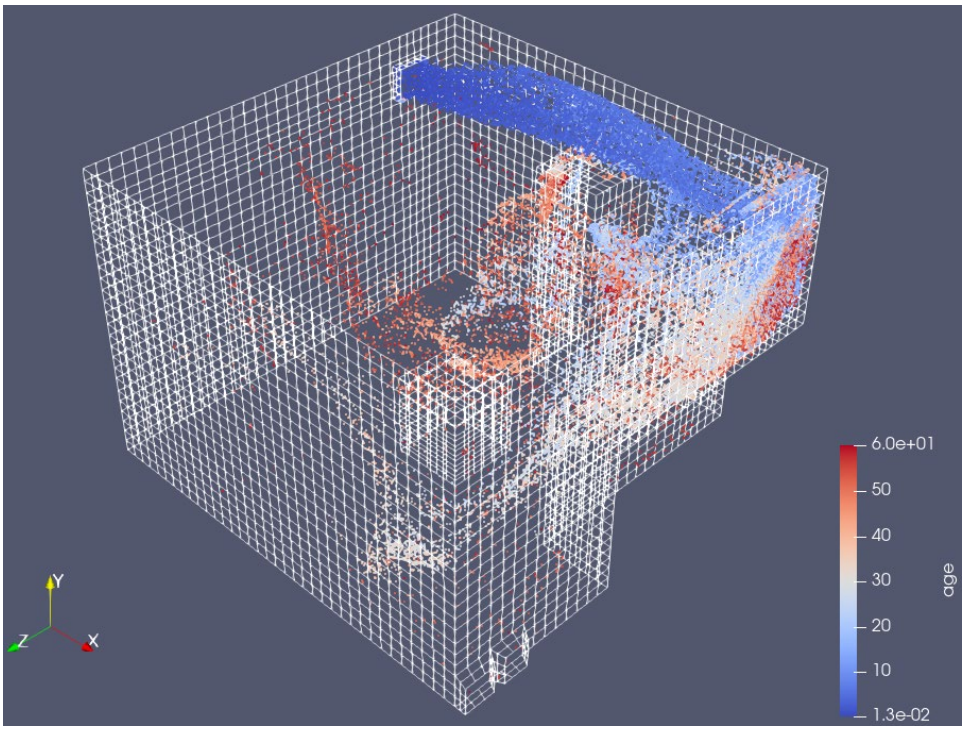


図 6-80 障害物①、②、③、計算開始から 90 秒後（粒子流入開始から 60 秒後）

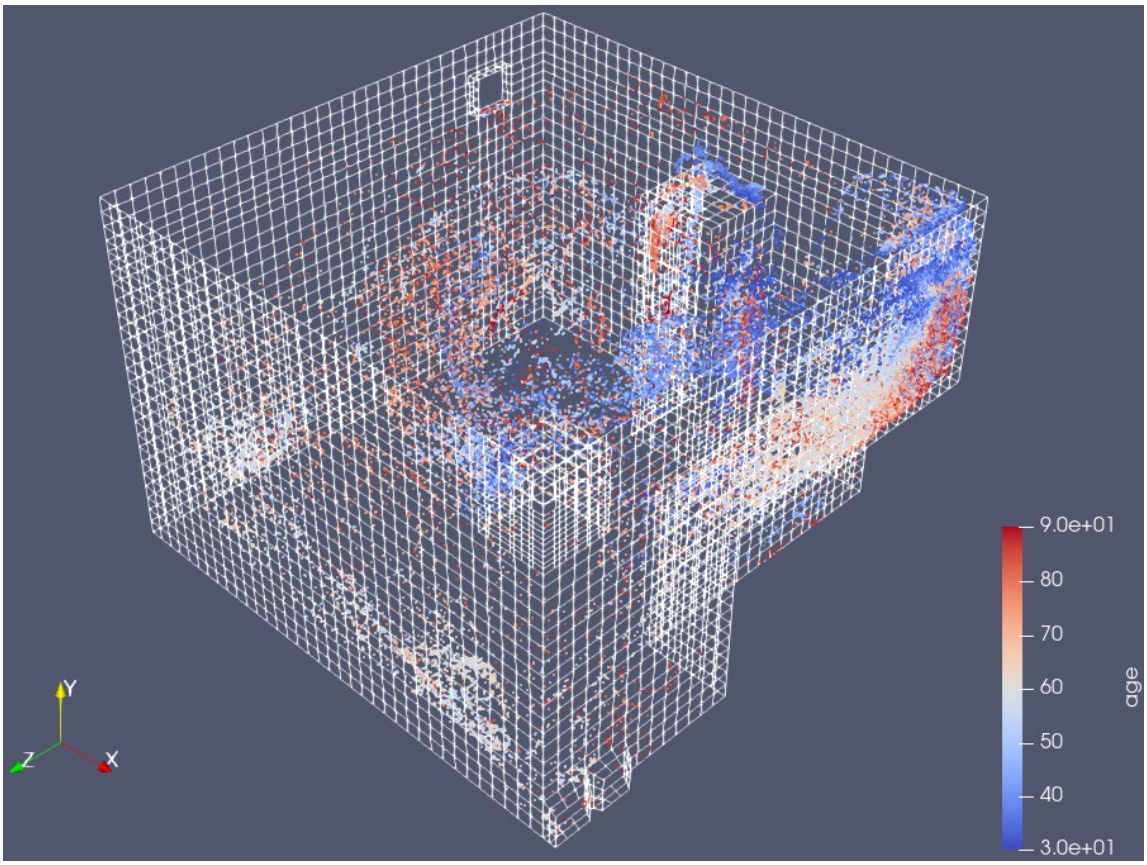


図 6-81 障害物①、②、③、計算開始から 120 秒後（粒子流入開始から 90 秒後）

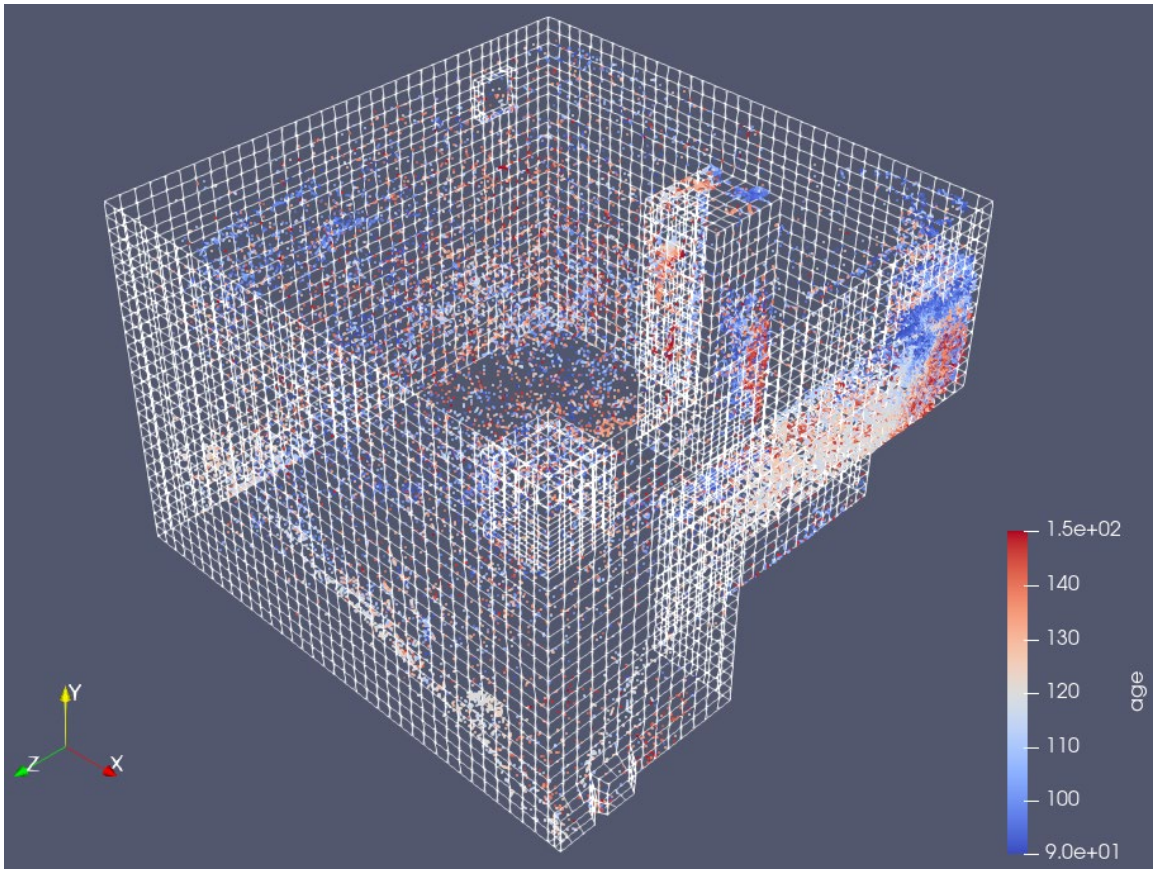


図 6-82 障害物①、②、③、計算開始から 180 秒後（粒子流入開始から 150 秒後）

(6) 計算結果（障害物①、②、③および④が有る場合）

部屋の中に障害物①、②、③および④が有る場合の計算結果を示す。部屋の中に存在する粒子数の時間変化を図 6-83 に示す。ここでは、部屋を高さ方向に 3 分割して集計した粒子数も記載している。タイムステップ毎の粒子の分布を図 6-84 から図 6-86 に示す。分布図中の粒子の色は入射からの経過時間を表しており、入射直後の粒子を青とし、入射してから最も時間が経過した粒子を赤とした。粒子数は、部屋の入口から流入が開始する 30 秒から流入が止まる 90 秒まで増加し、90 秒をピークにその後は出口からの流出が多くなり、緩やかに減少する。障害物④の影響により床上 1[m]～2[m]の範囲に存在する粒子数はより多くなる。

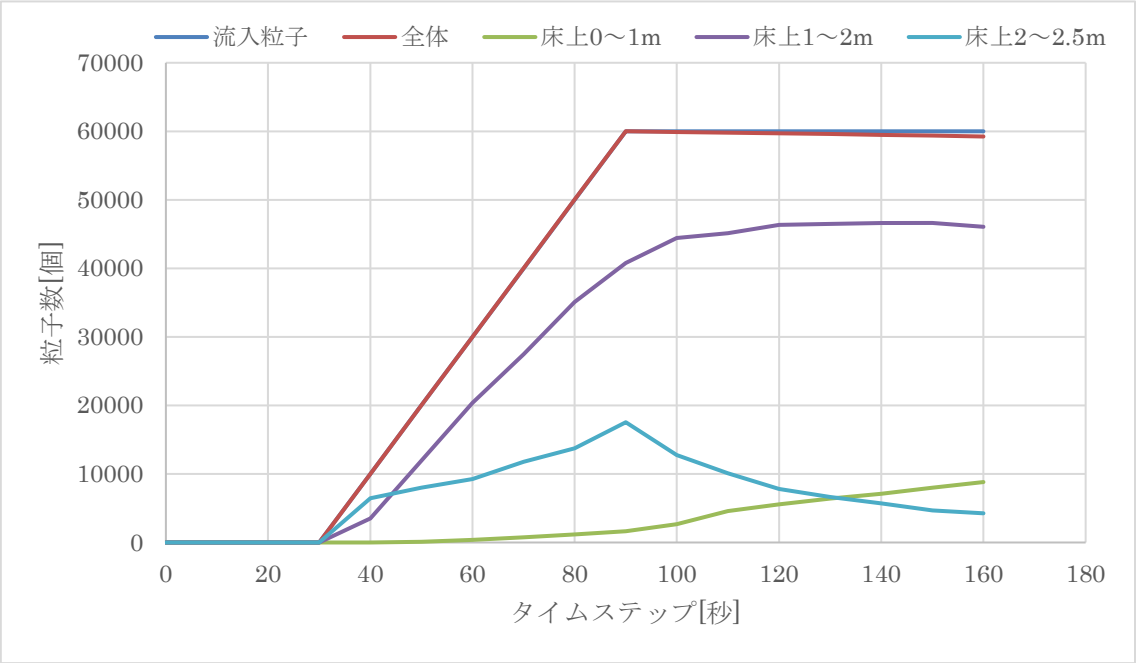


図 6-83 部屋の中に存在する粒子数の時間変化

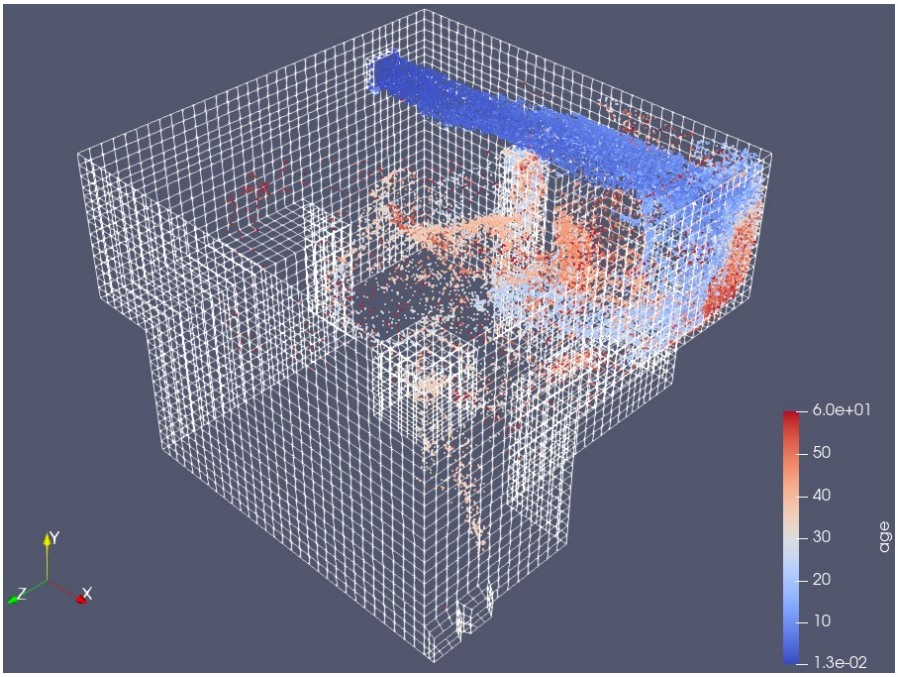


図 6-84 障害物①、②、③、④、計算開始から 90 秒後（粒子流入開始から 60 秒後）

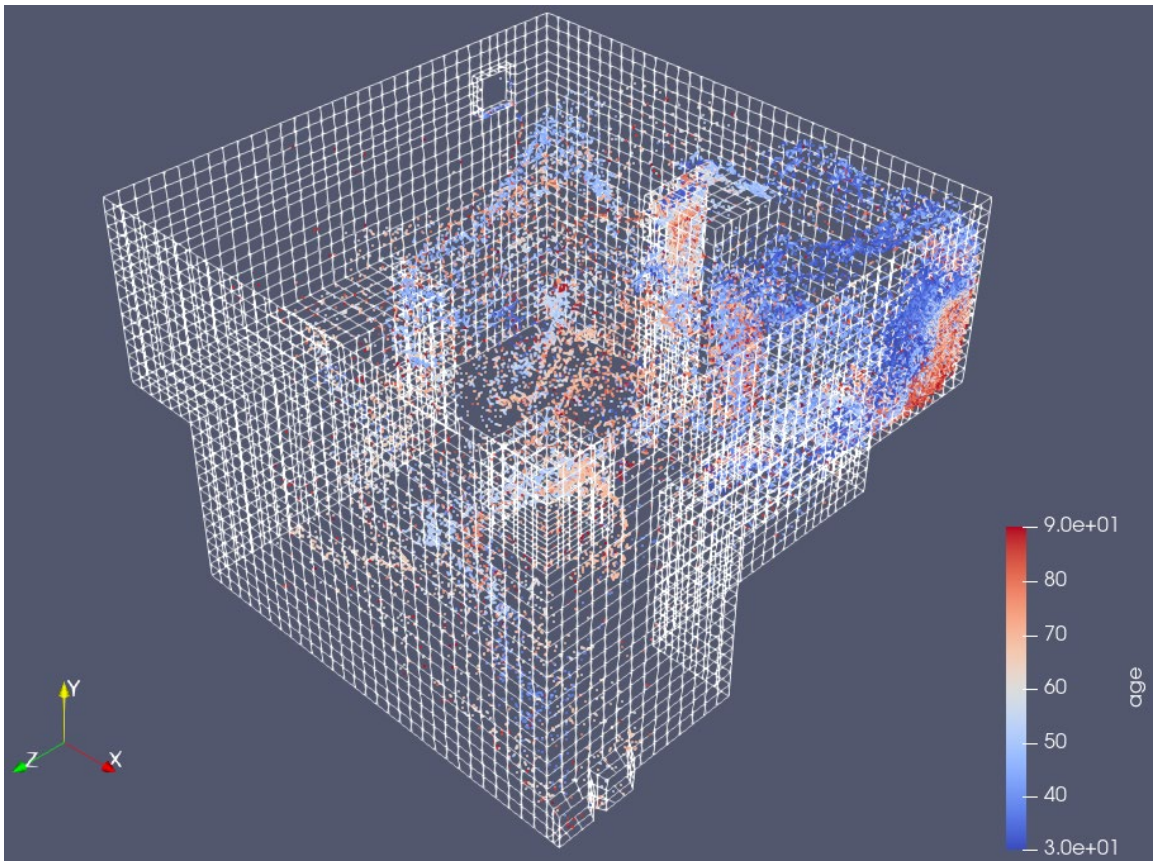


図 6-85 障害物①、②、③、④、計算開始から 120 秒後（粒子流入開始から 90 秒後）

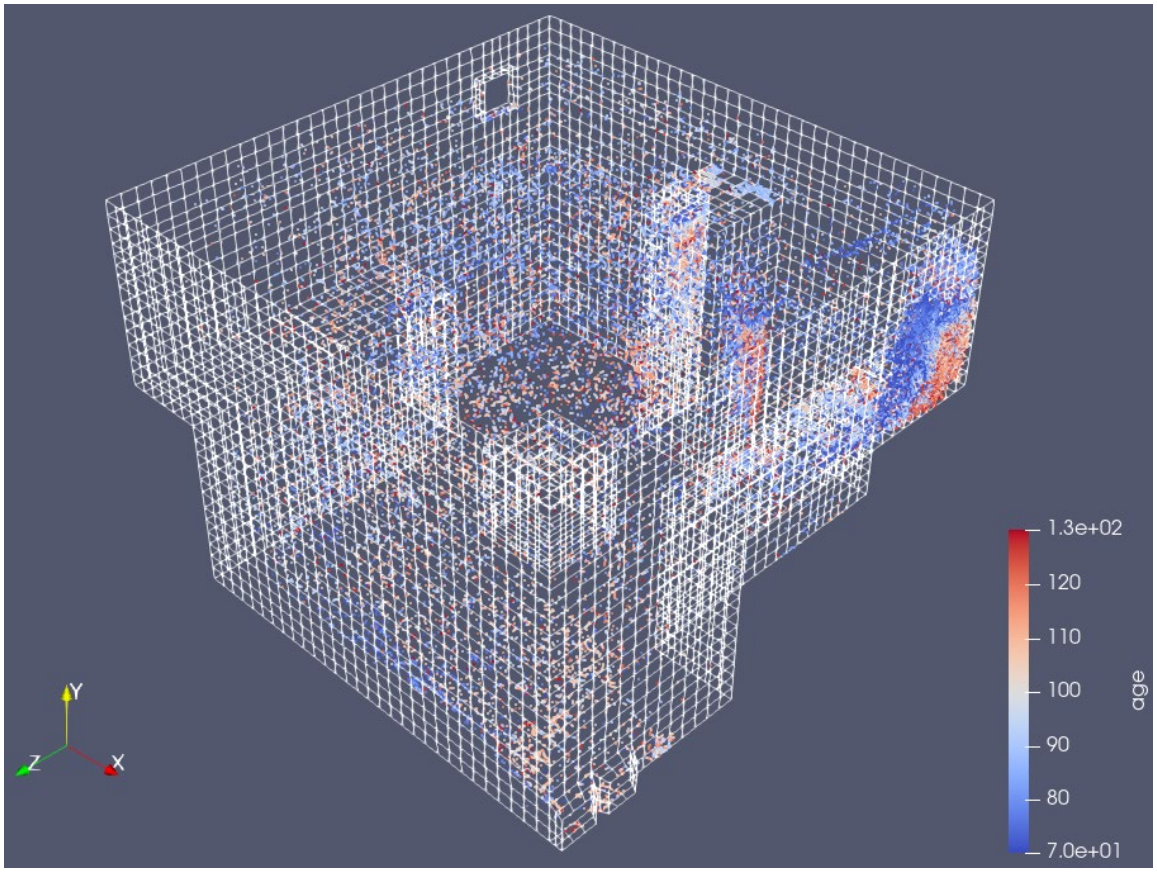


図 6-86 障害物①、②、③、④、計算開始から 150 秒後（粒子流入開始から 120 秒後）

③ １０畳間モデルの作成及び計算結果

(1) OpenFOAM の計算モデル及び計算条件

１０畳間の寸法にて、図 6-87 に示すような計算モデルを作成した。計算条件は以下の通り。

- 部屋のサイズ　　：4.5[m]×3.6[m]×2.8[m]
- 入口のサイズ　　：0.29[m]（縦）×0.315[m]（横）、上部に 1 か所
- 出口　　：入口 2 つ分の大きさ、下部に 1 か所
- 入口流速　　：X 方向に 1[m/s]
- 粒子の流入速度　　：X 方向に 1[m/s]
- 粒子の流入時間　　：計算開始 30 秒後から 60 秒間
- メッシュ分割数　　：45×36×28=45,360
- 計算 CPU Time　　：4h（タイムステップ 600[sec] までの計算、4 並列）
- 使用計算機　　：13th Gen Intel(R) Core(TM) i7-13700 (24 CPUs), ~2.1GHz

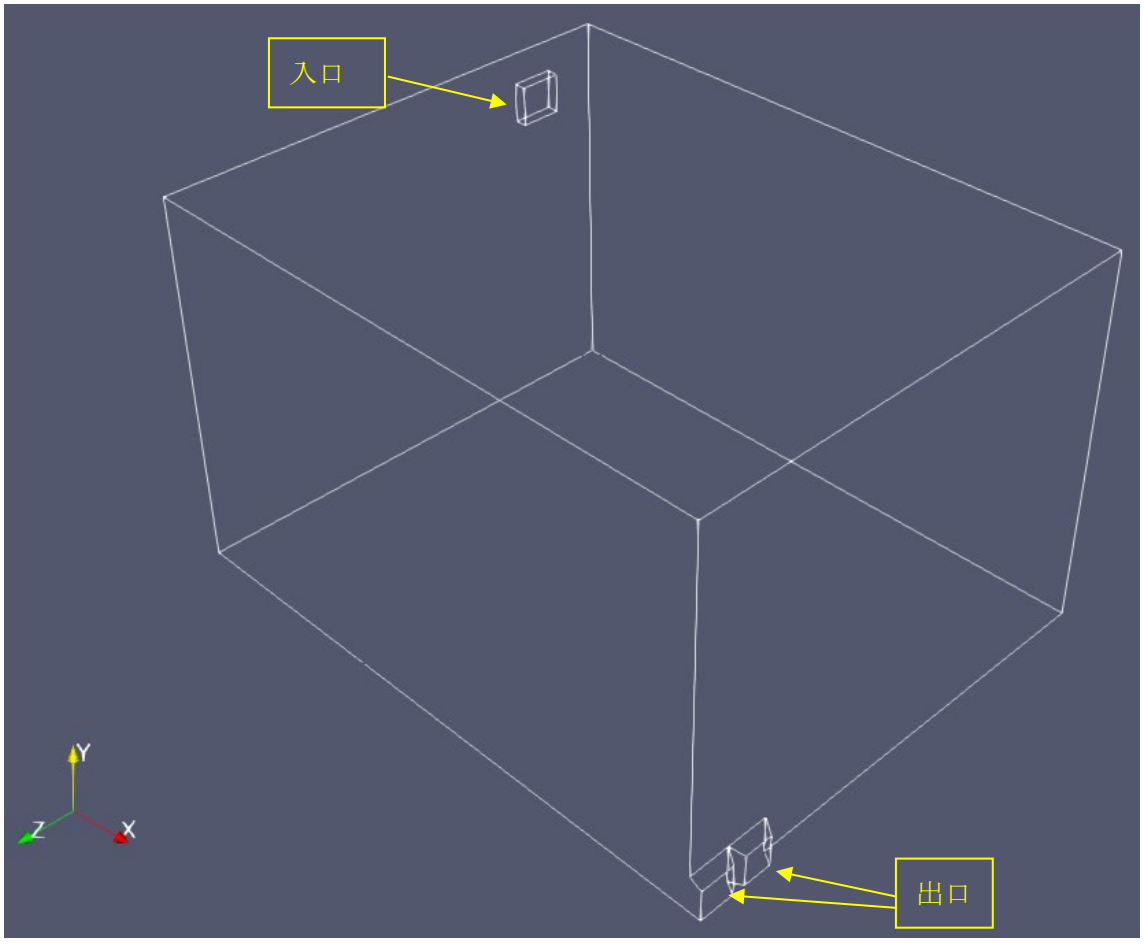


図 6-87 １０畳間モデル

(2) 計算結果

部屋の中に存在する粒子数の時間変化を図 6-88 に示す。ここでは、部屋を高さ方向に 3 分割して集計した粒子数も記載している。タイムステップ毎の粒子の分布を図 6-89 から図 6-91 に示す。分布図中の粒子の色は入射からの経過時間を表しており、入射直後の粒子を青とし、入射してから最も時間が経過した粒子を赤とした。粒子数は、部屋の入口から流入が開始する 30 秒から流入が止まる 90 秒まで増加し、90 秒をピークにその後は出口からの流出が多くなり、緩やかに減少する。床上 1[m]～2[m]の範囲に存在する粒子数は、220 秒をピークにその後床方向に移動する。

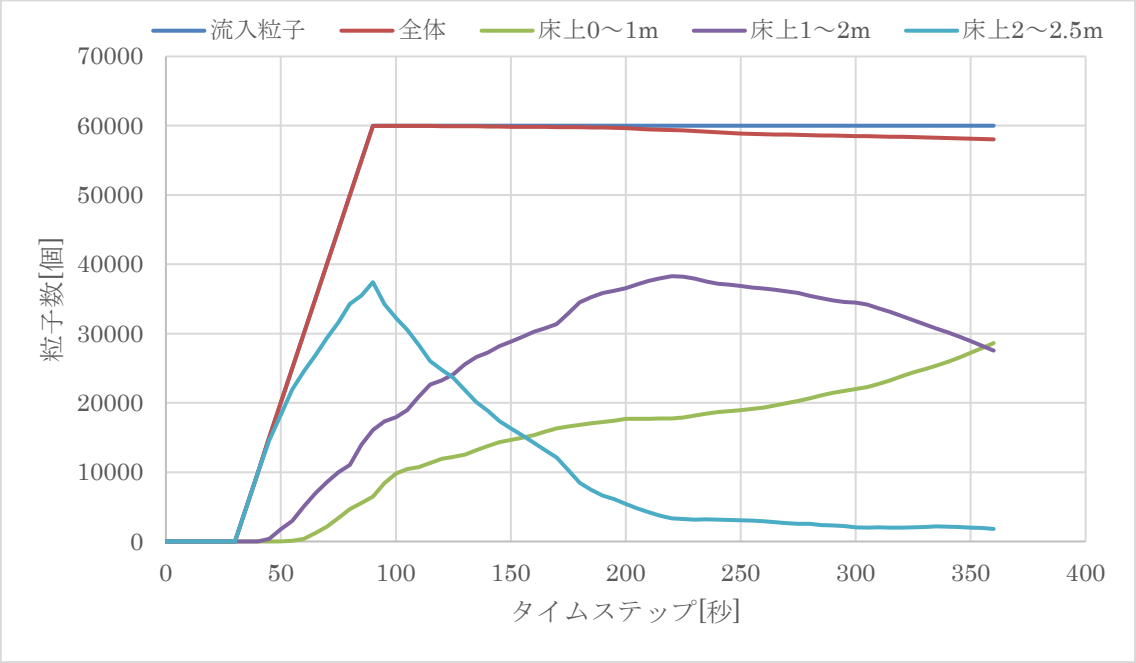


図 6-88 部屋の中に存在する粒子数の時間変化

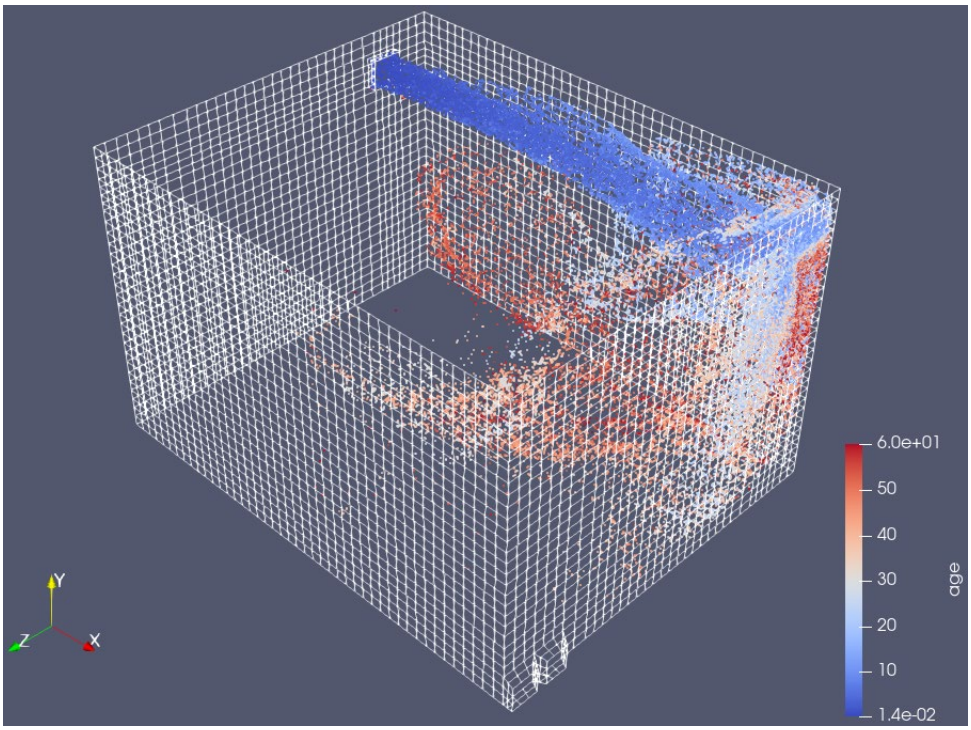


図 6-89 計算開始から 90 秒後（粒子流入開始から 60 秒後）

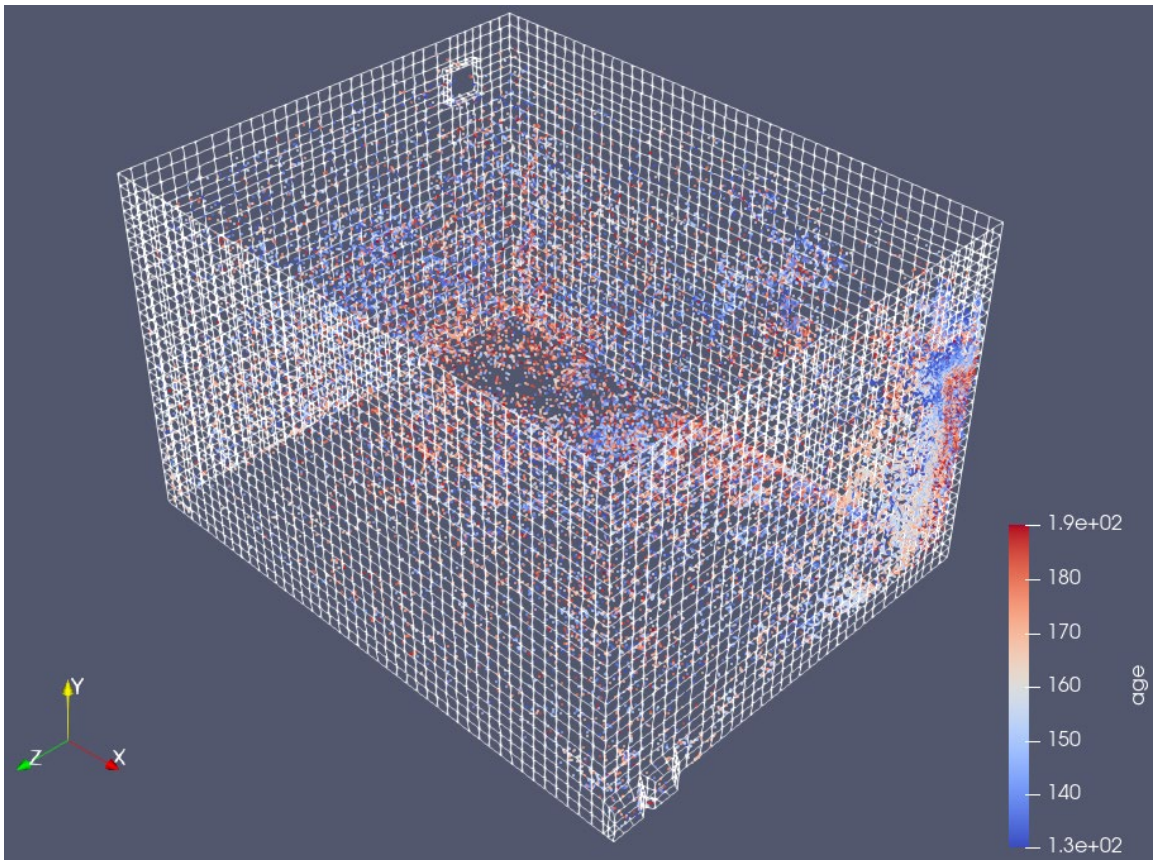


図 6-90 計算開始から 220 秒後（粒子流入開始から 190 秒後）

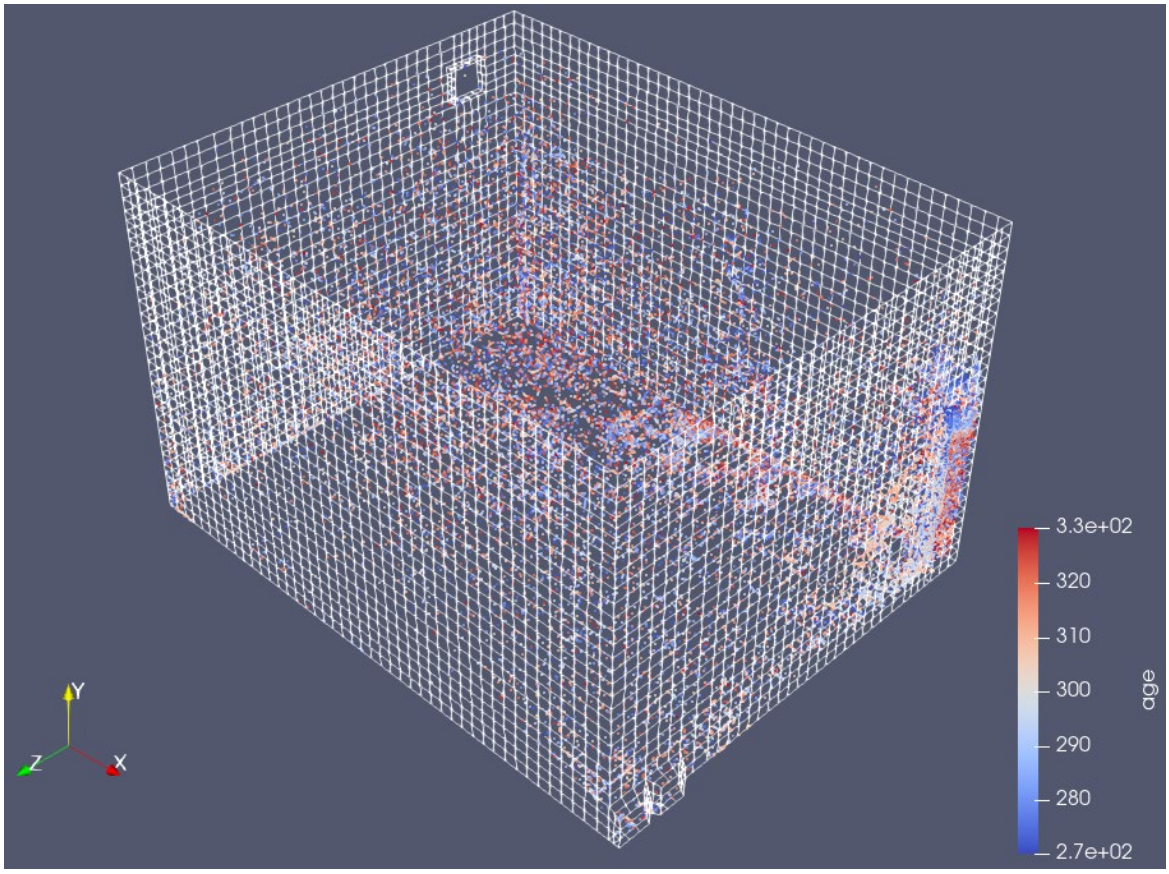


図 6-91 計算開始から 360 秒後（粒子流入開始から 330 秒後）

④ １０畳間を横に並べたモデルの作成及び計算結果

(1) OpenFOAM の計算モデル及び計算条件

１０畳間の寸法の部屋を横に並べた建屋で、図 6-92 に示すような計算モデルを作成した。

- 部屋のサイズ　　：4.5[m]×3.6[m]×2.8[m]を 2 つ横に並べる
- 入口のサイズ　　：0.29[m]（縦）×0.315[m]（横）、上部に 1 か所
- 出口　　：入口 2 つ分の大きさ、下部に 1 か所
- 入口流速　　：X 方向に 1[m/s]
- 粒子の流入速度　　：X 方向に 1[m/s]
- 粒子の流入時間　　：計算開始 30 秒後から 60 秒間
- メッシュ分割数　　：66×36×28=66,528
- 計算 CPU Time　　：5h（タイムステップ 600[sec] までの計算、4 並列）
- 使用計算機　　：13th Gen Intel(R) Core(TM) i7-13700 (24 CPUs), ~2.1GHz

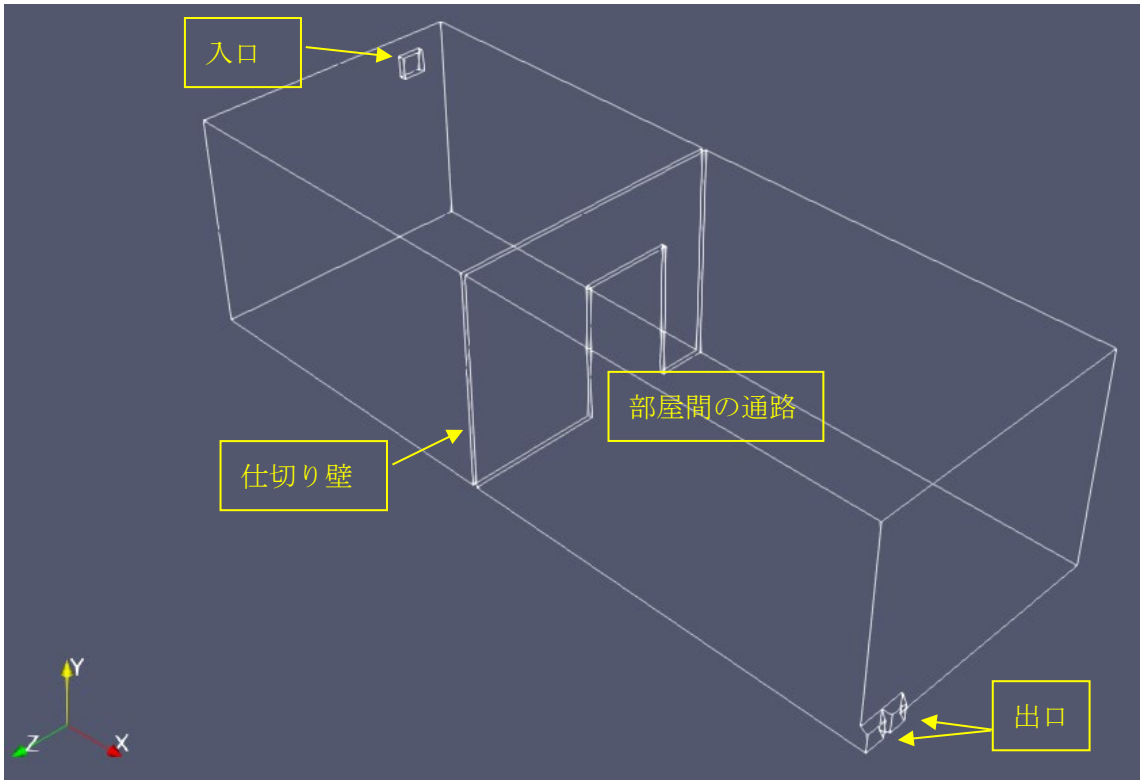


図 6-92 １０畳間モデルを横に並べる

(2) 計算結果

部屋の中に存在する粒子数の時間変化を図 6-93 に示す。図 6-101 及び図 6-102 は、入口側の部屋及び出口側の部屋を高さ方向に 3 分割して粒子数を集計したものである。タイムステップ毎の粒子の分布を図 6-96 から図 6-98 に示す。分布図中の粒子の色は入射からの経過時間を表しており、入射直後の粒子を青とし、入射してから最も時間が経過した粒子を赤とした。粒子数は、部屋の入口から流入が開始する 30 秒から流入が止まる 90 秒まで増加し、90 秒をピークにその後はほぼ一定である。入口側の部屋と出口側の部屋の間に空気の通路があるが、グラフに示した時間内では出口側の部屋へ移動する粒子数が少なく、出口まで粒子がほとんど到達していない。

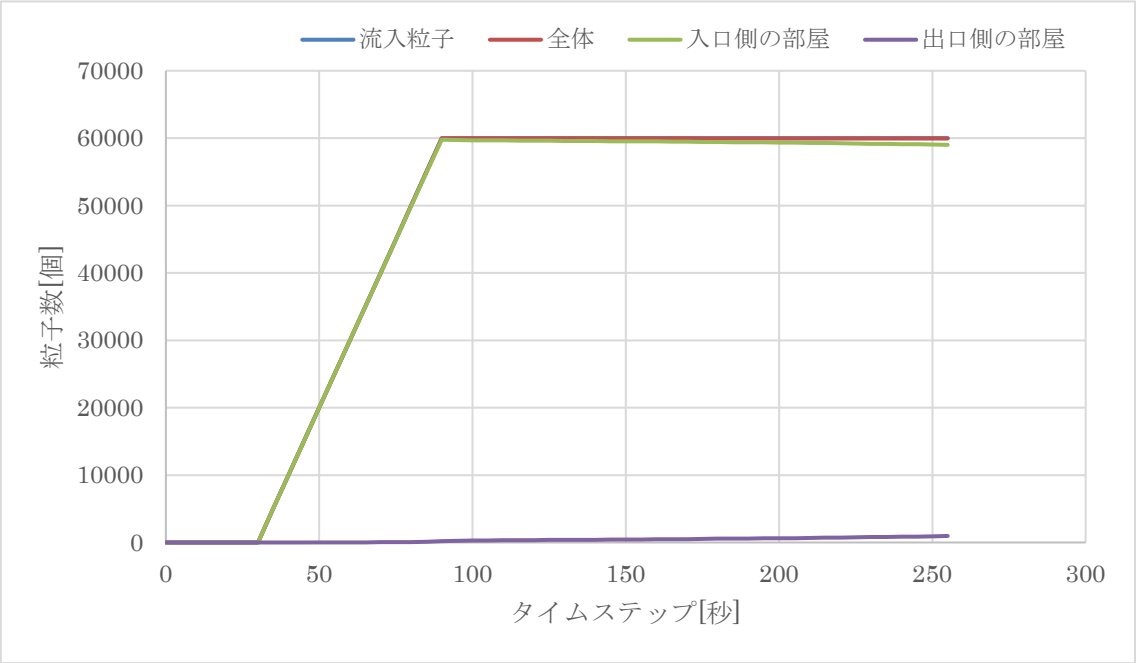


図 6-93 部屋の中に存在する粒子数の時間変化

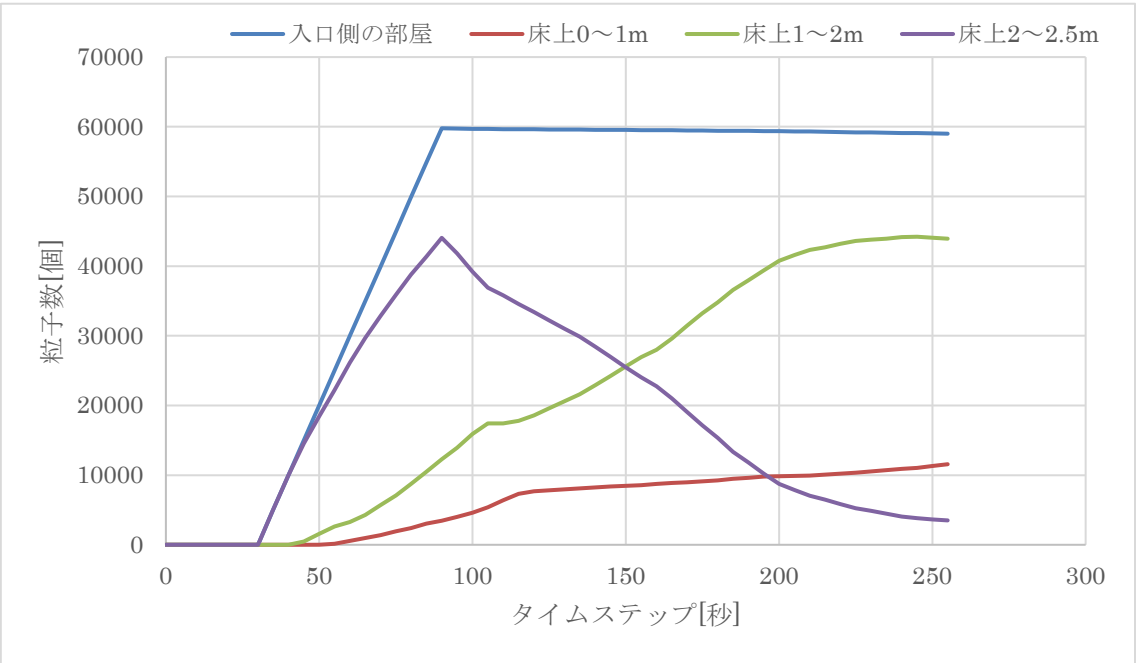


図 6-94 入口側の部屋の中に存在する粒子数の時間変化

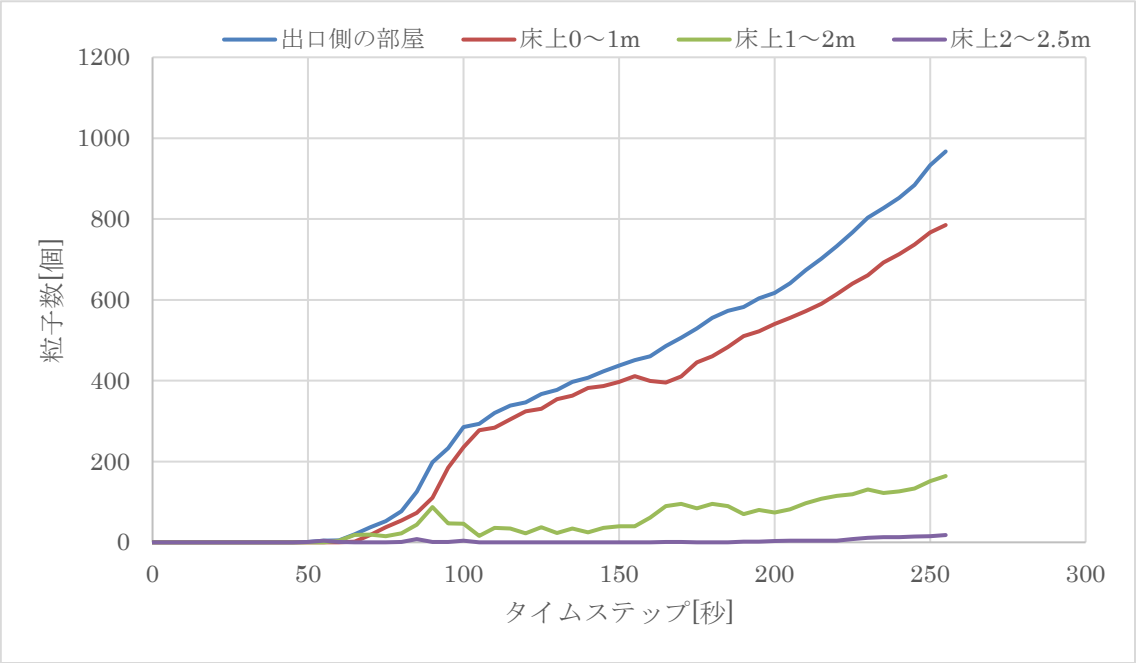


図 6-95 出口側の部屋の中に存在する粒子数の時間変化

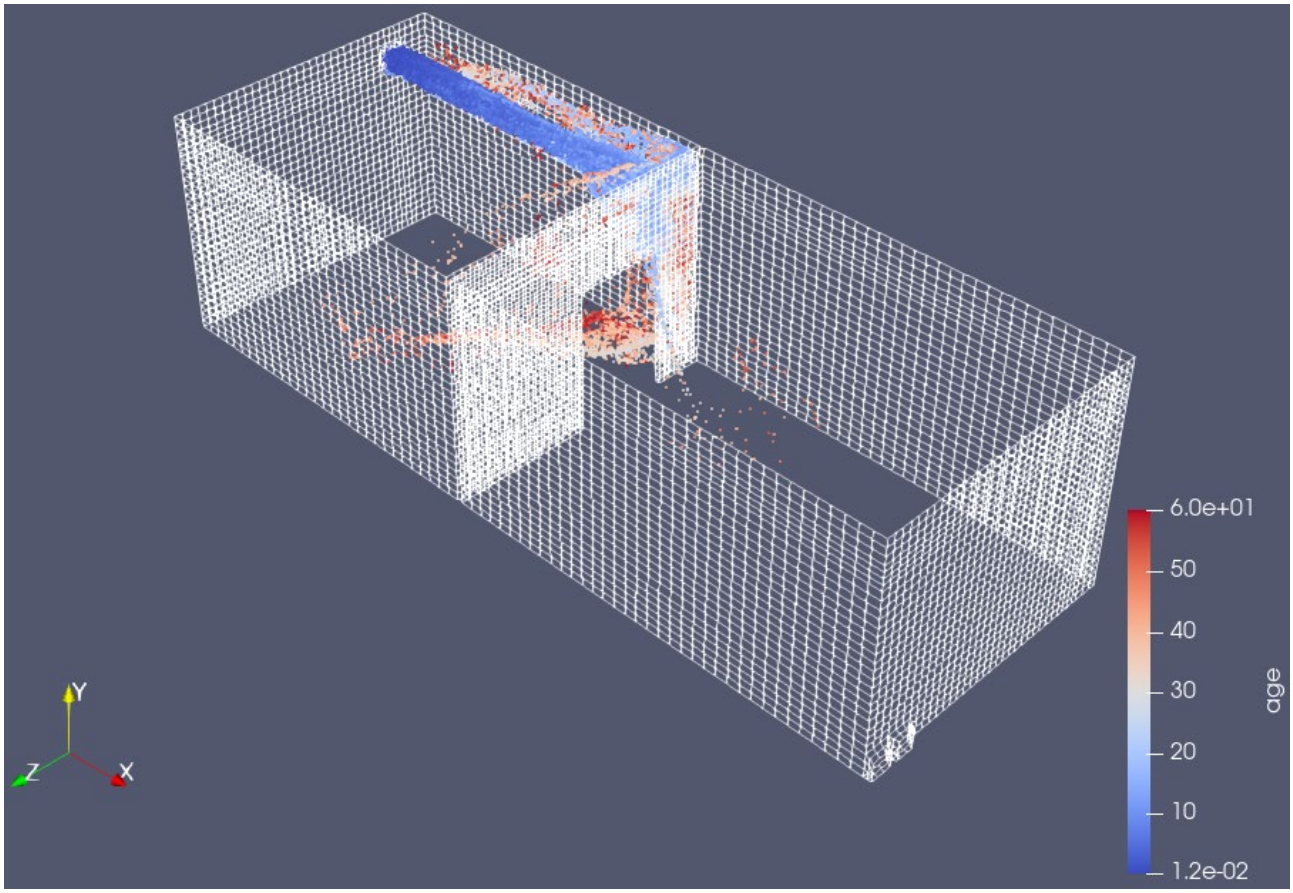


図 6-96 計算開始から 90 秒後（粒子流入開始から 60 秒後）

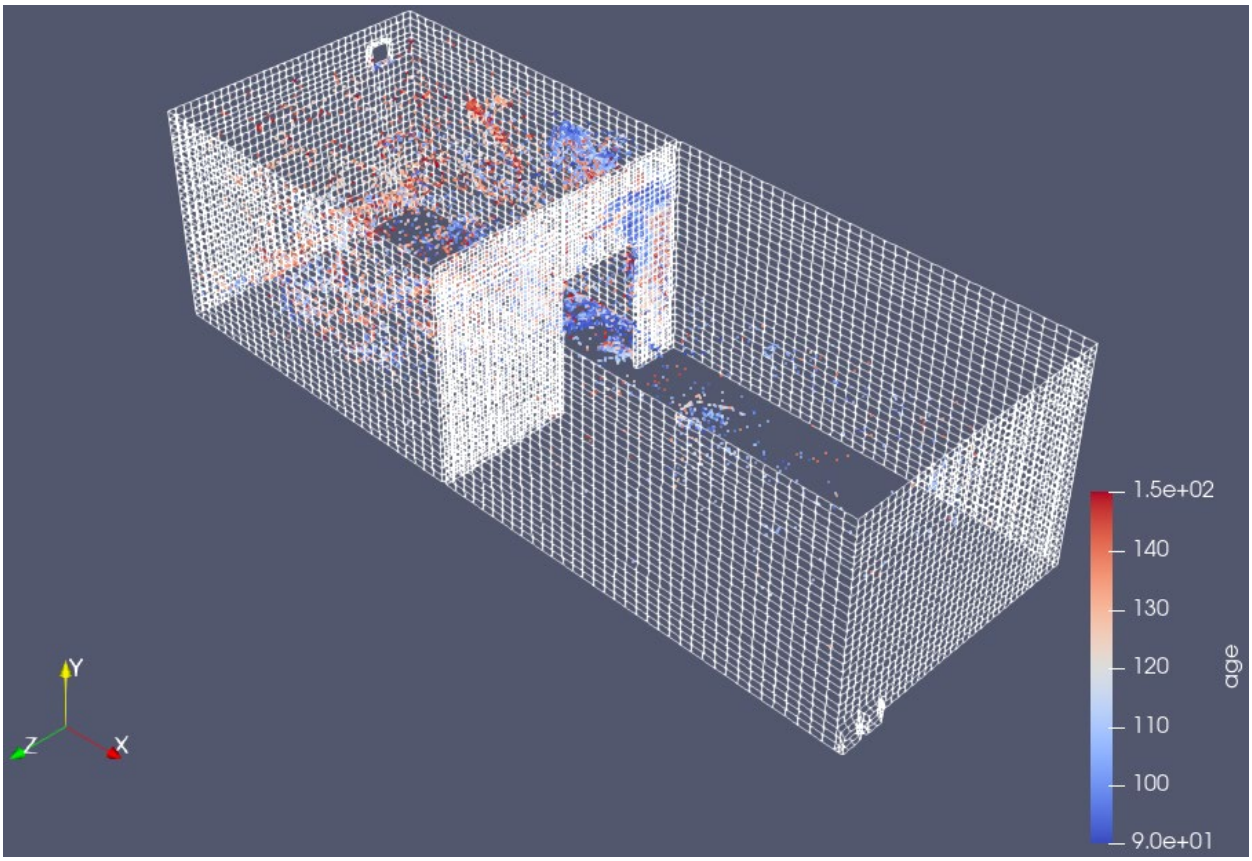


図 6-97 計算開始から 180 秒後（粒子流入開始から 150 秒後）

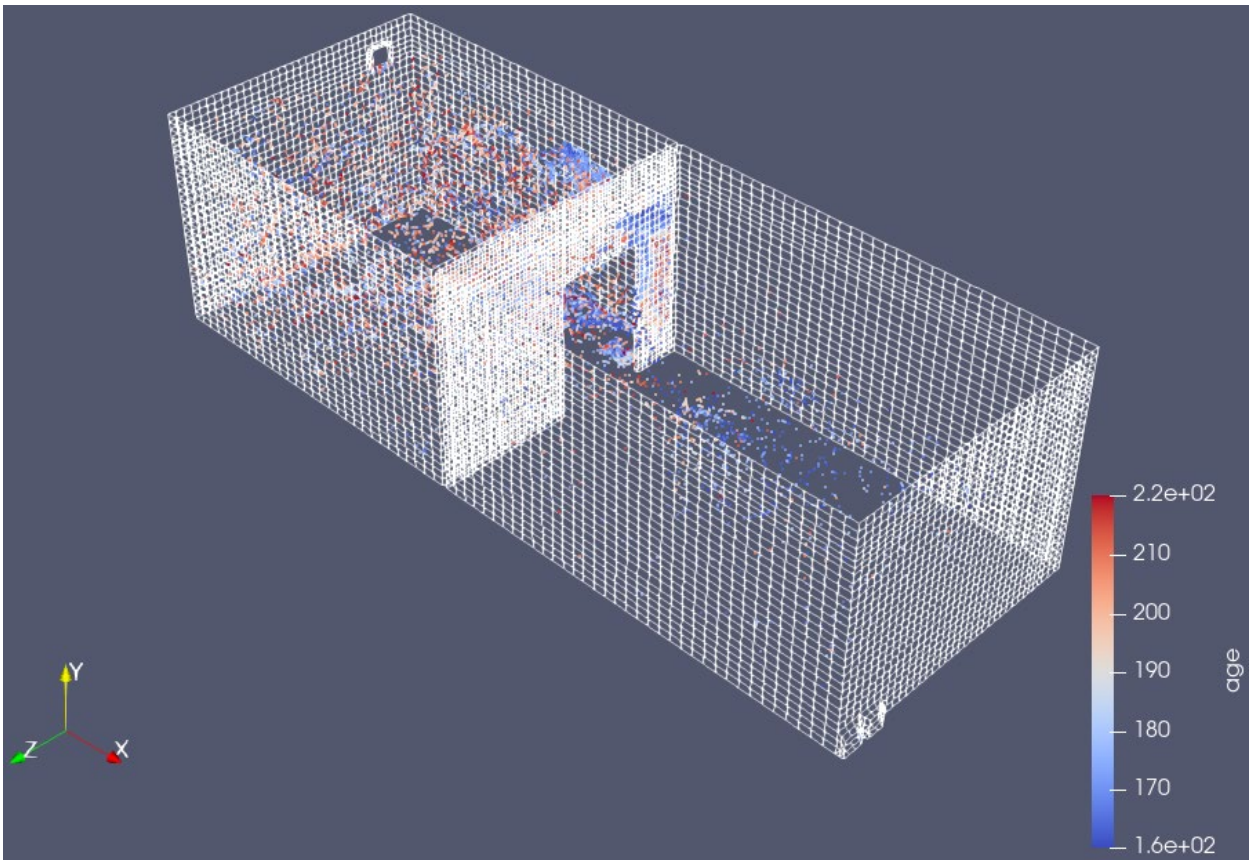


図 6-98 計算開始から 250 秒後（粒子流入開始から 220 秒後）

⑤ １０畳間を縦に重ねたモデルの作成及び計算結果

(1) OpenFOAM の計算モデル及び計算条件

１０畳間の寸法の部屋を縦に重ねた建屋で、図 6-99 に示すような計算モデルを作成した。

- 部屋のサイズ　　：4.5[m]×3.6[m]×2.8[m]を 2 つ縦に並べる
- 入口のサイズ　　：0.29[m]（縦）×0.315[m]（横）、上部に 1 か所
- 出口　　：入口 2 つ分の大きさ、下部に 1 か所
- 入口流速　　：X 方向に 1[m/s]
- 粒子の流入速度　　：X 方向に 1[m/s]
- 粒子の流入時間　　：計算開始 30 秒後から 60 秒間
- メッシュ分割数　　：45×36×56=90,720
- 計算 CPU Time　　：8h（タイムステップ 600[sec] までの計算、4 並列）
- 使用計算機　　：13th Gen Intel(R) Core(TM) i7-13700 (24 CPUs), ~2.1GHz

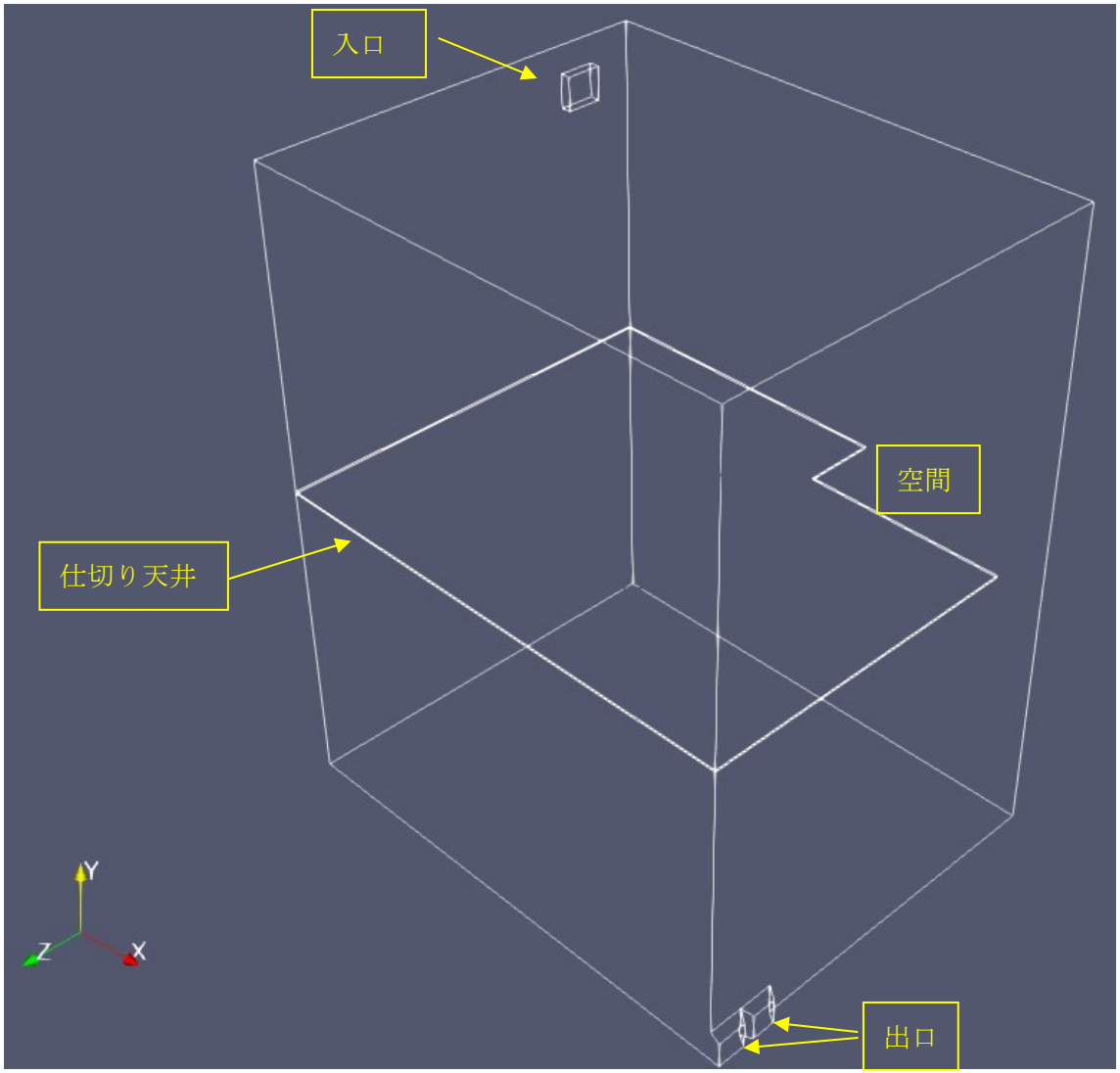


図 6-99 １０畳間モデルを縦に重ねる

(2) 計算結果

部屋の中に存在する粒子数の時間変化を図 6-100 に示す。図 6-101 及び図 6-102 は、1 階及び 2 階を高さ方向に 3 分割して粒子数を集計したものである。タイムステップ毎の粒子の分布を図 6-103 から図 6-105 に示す。分布図中の粒子の色は入射からの経過時間を表しており、入射直後の粒子を青とし、入射してから最も時間が経過した粒子を赤とした。粒子数は、部屋の入口から流入が開始する 30 秒から流入が止まる 90 秒まで増加し、90 秒をピークにその後はほぼ一定である。入口側の 1 階と 2 階を結ぶ空気の通路から粒子が 1 階へ移動しているが、移動した粒子数がまだ少なく、1 階の空気の流れが小さいため、グラフに示した時間内では出口まで粒子がほとんど到達していない。

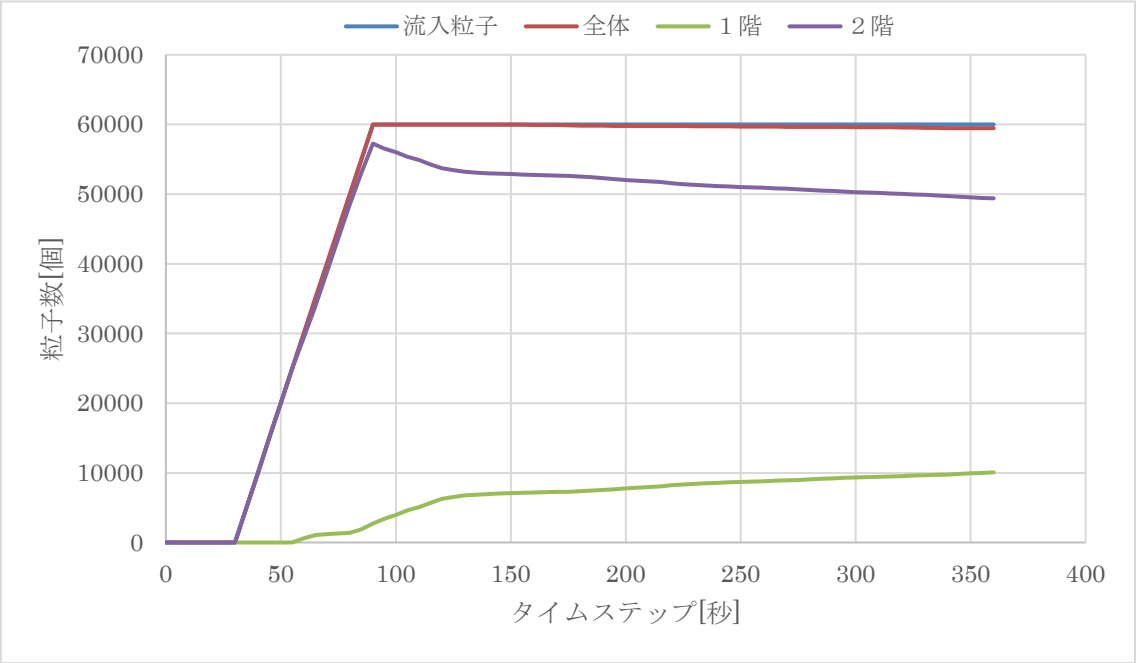


図 6-100　　部屋の中に存在する粒子数の時間変化

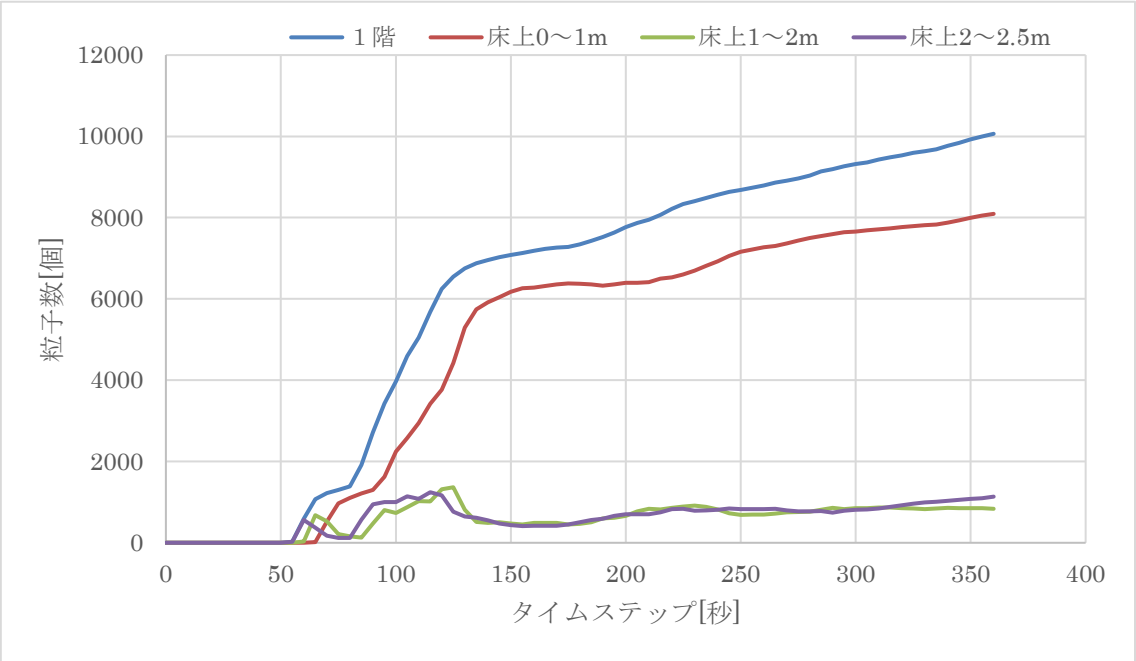


図 6-101　　1 階に存在する粒子数の時間変化

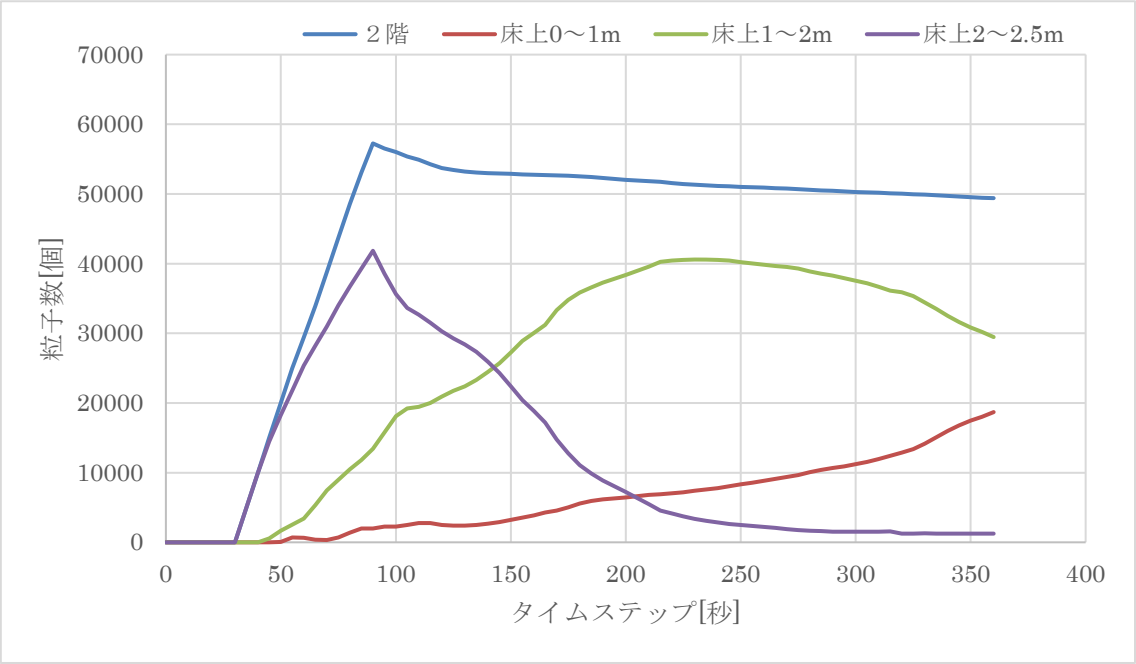


図 6-102　　2 階に存在する粒子数の時間変化

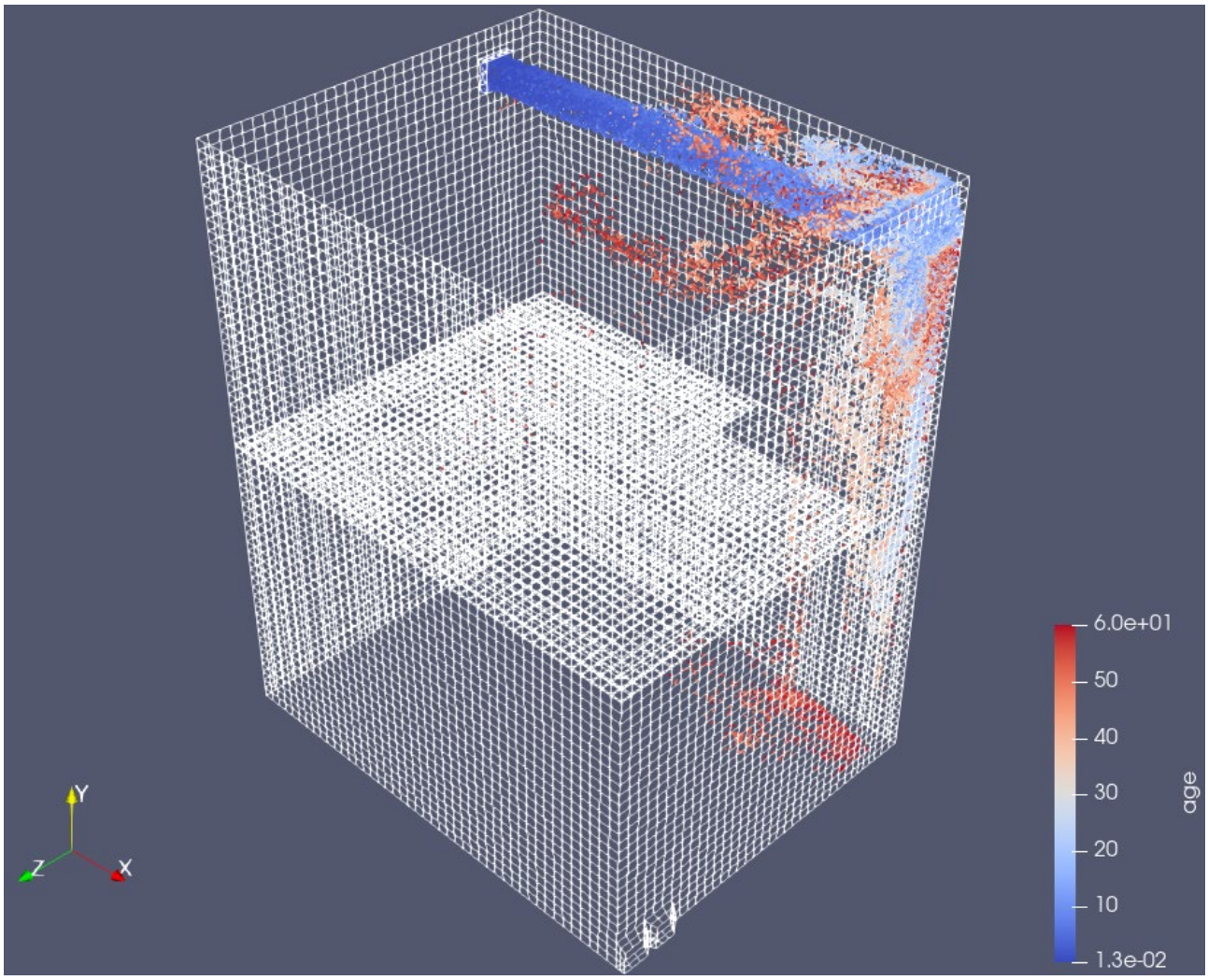


図 6-103　　計算開始から 90 秒後（粒子流入開始から 60 秒後）

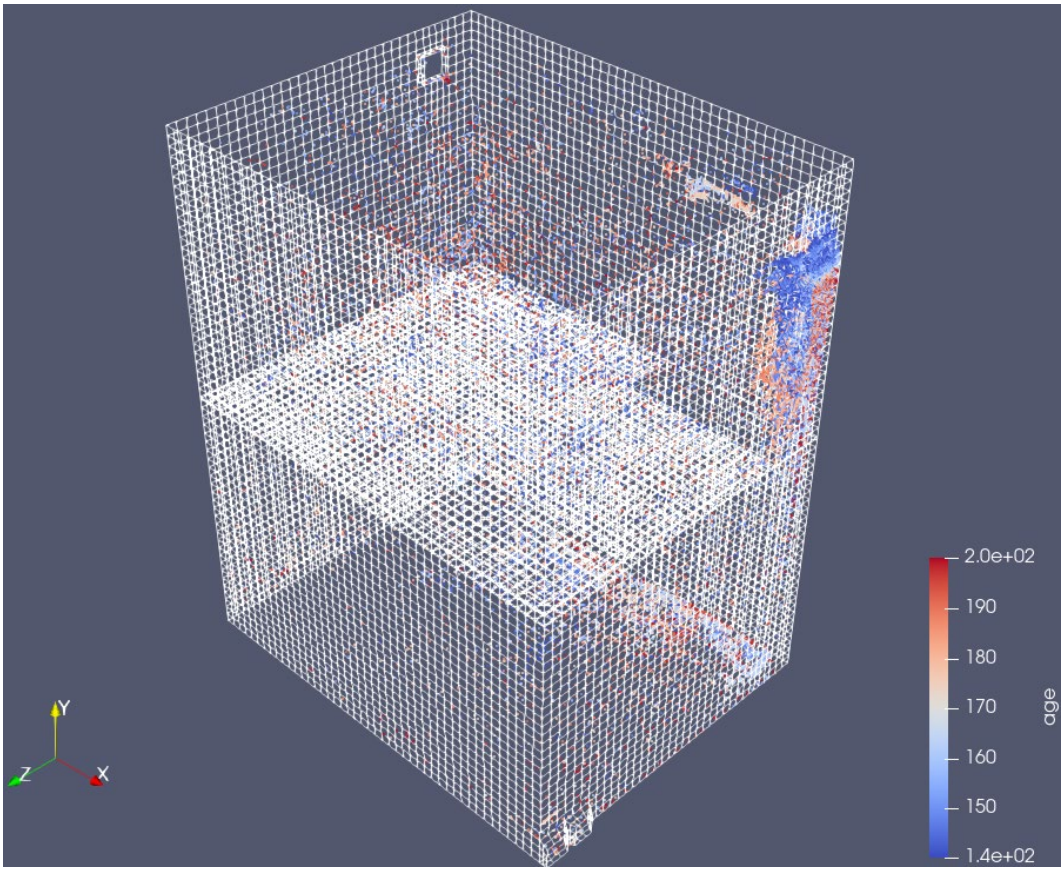


図 6-104　　計算開始から 230 秒後（粒子流入開始から 200 秒後）

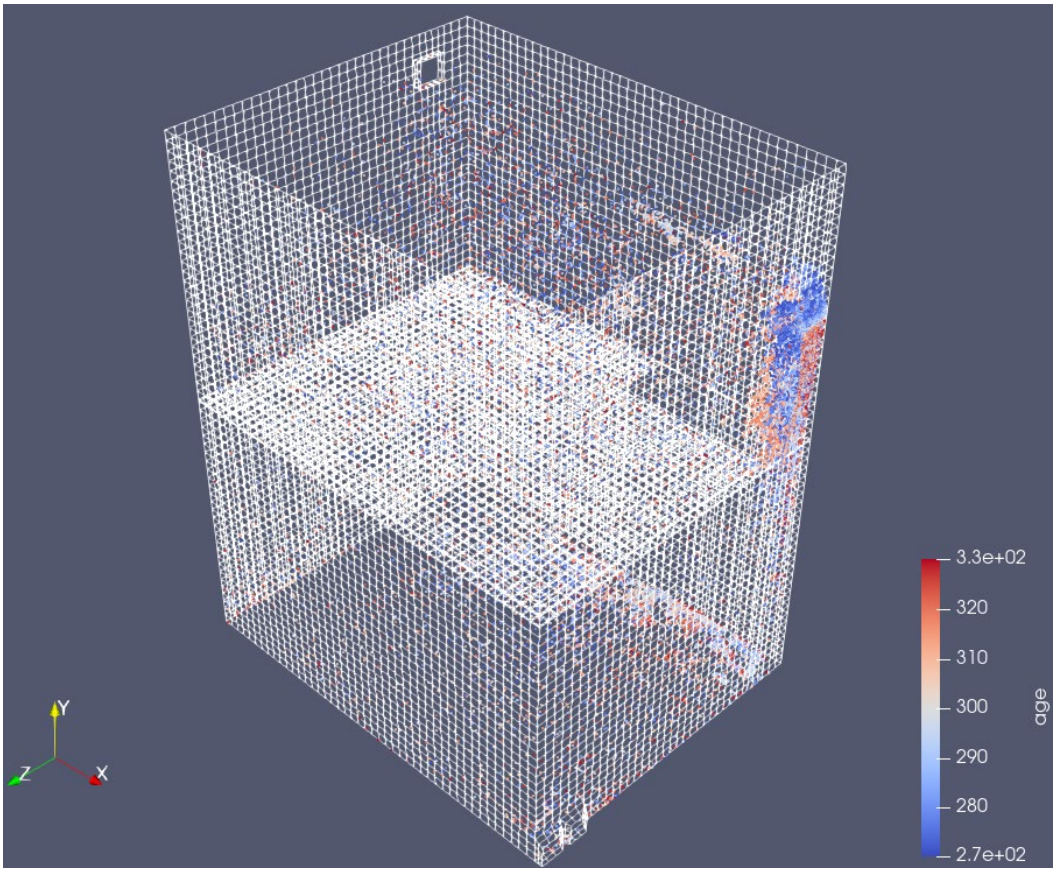


図 6-105　　計算開始から 360 秒後（粒子流入開始から 330 秒後）

⑥ 8 畳間 2 つ分の広さのワンルームモデルの作成及び計算結果

(1) OpenFOAM の計算モデル及び計算条件

8 畳間 2 つ分の広さを持つワンルームの部屋で、図 6-106 に示すような計算モデルを作成した。

- 部屋のサイズ　　: 7.972[m]×3.6[m]×2.965[m]
- 入口のサイズ　　: 0.29[m]（縦）×0.315[m]（横）、上部に 1 か所
- 出口　　: 入口 2 つ分の大きさ、下部に 1 か所
- 入口流速　　: X 方向に 1[m/s]
- 粒子の流入速度　　: X 方向に 1[m/s]
- 粒子の流入時間　　: 計算開始 30 秒後から 60 秒間
- メッシュ分割数　　: 53×36×30=57,240
- 計算 CPU Time　　: 30h（タイムステップ 600[sec] までの計算、4 並列）
- 使用計算機　　: 13th Gen Intel(R) Core(TM) i7-13700 (24 CPUs), ~2.1GHz

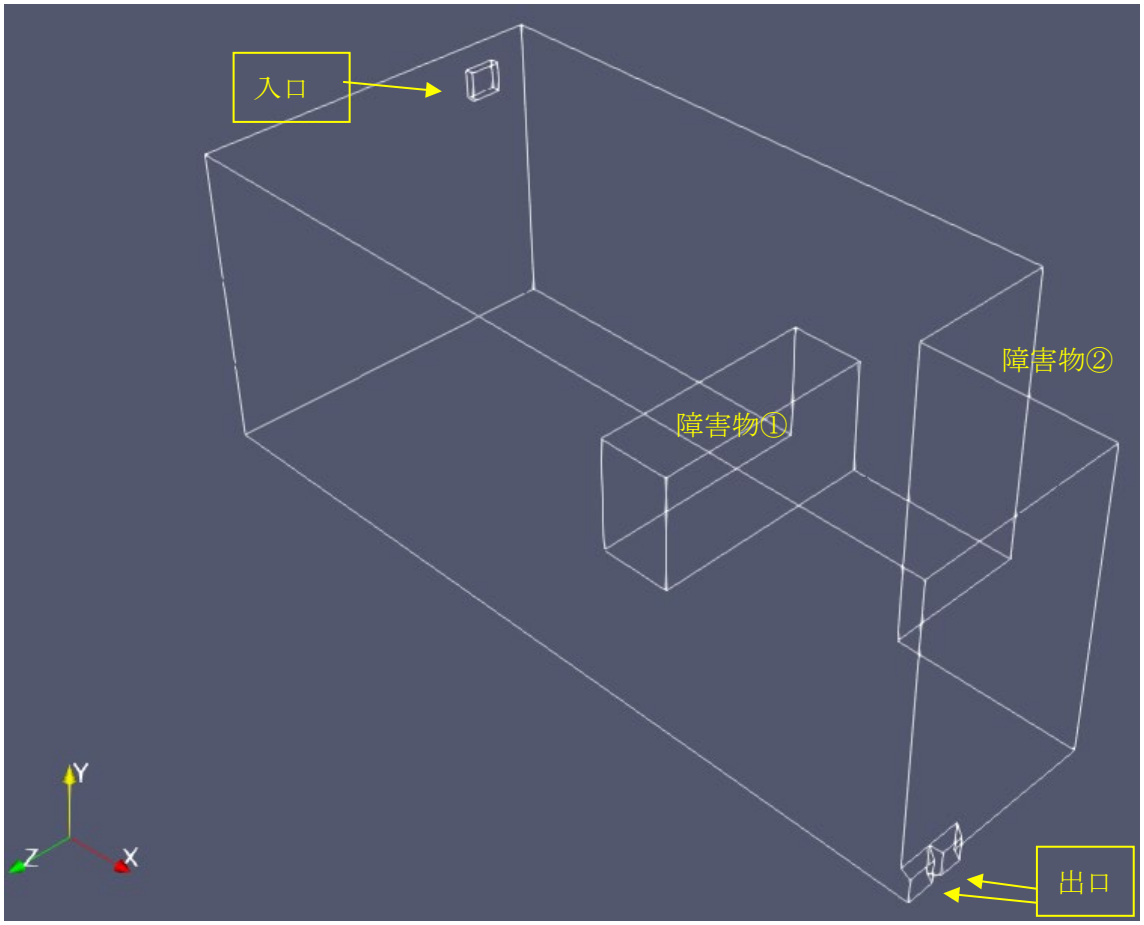


図 6-106　　8 畳間 2 つ分の広さを持つワンルームモデル

(2) 計算結果

部屋の中に存在する粒子数の時間変化を図 6-107 に示す。ここでは、部屋を高さ方向に 3 分割して集計した粒子数も記載している。タイムステップ毎の粒子の分布を図 6-108 から図 6-110 に示す。分布図中の粒子の色は入射からの経過時間を表しており、入射直後の粒子を青とし、入射してから最も時間が経過した粒子を赤とした。粒子数は、部屋の入口から流入が開始する 30 秒から流入が止まる 90 秒まで増加し、90 秒をピークにその後は出口からの流出により、緩やかに減少する。床上 1[m]から 2[m]の範囲に存在する粒子数は、270 秒をピークにその後床方向に移動する。

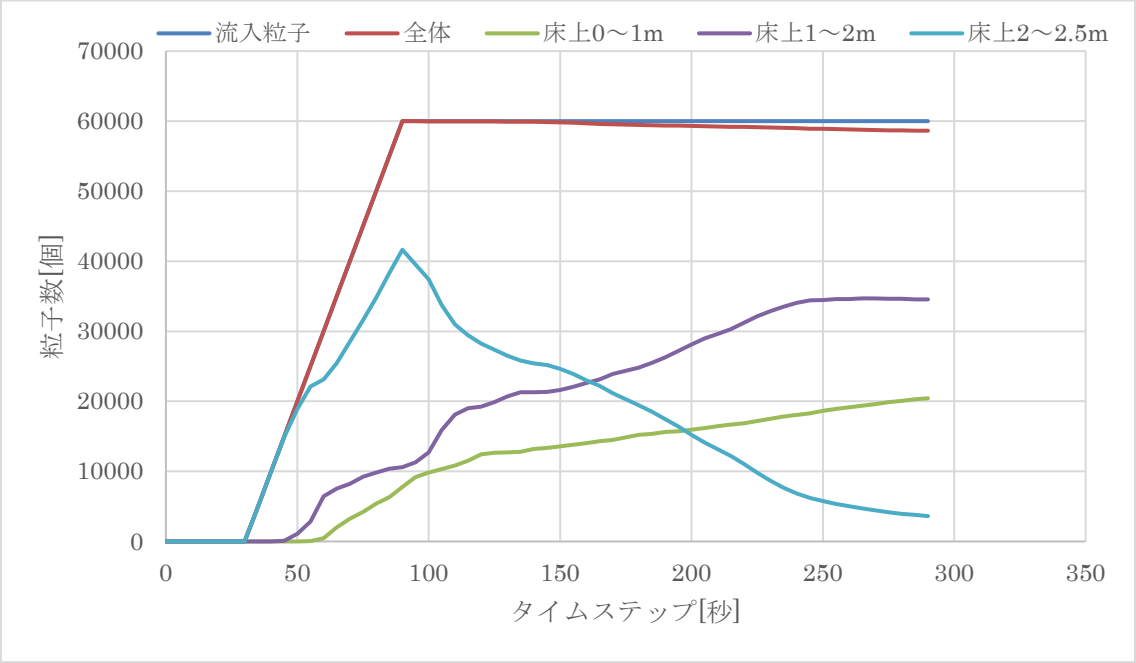


図 6-107　　部屋の中に存在する粒子数の時間変化

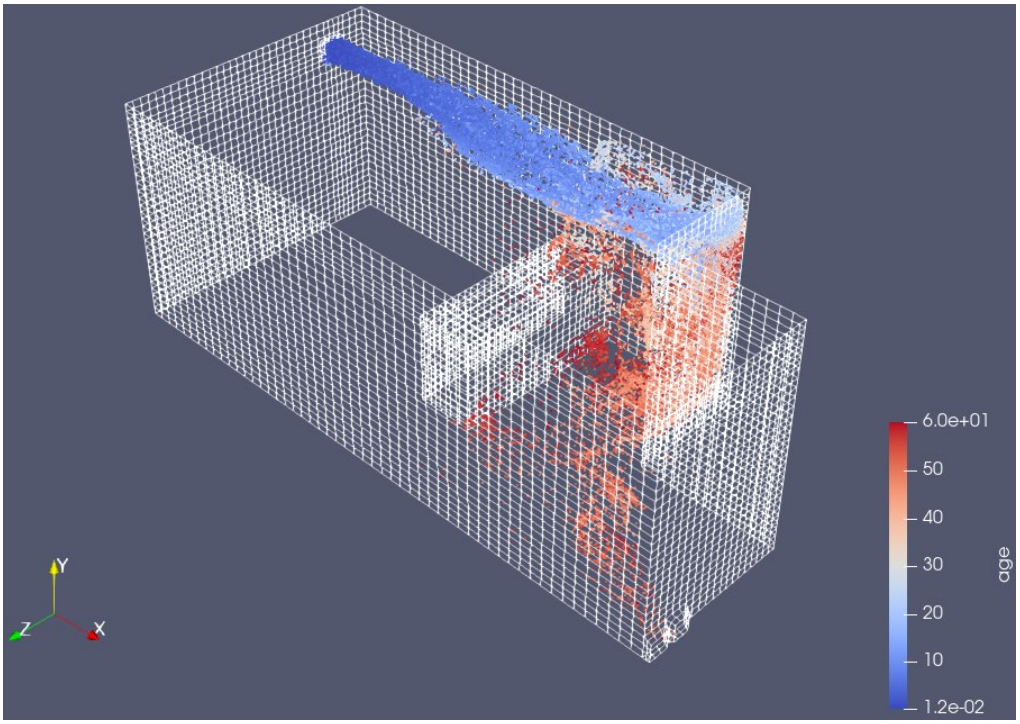


図 6-108　　計算開始から 90 秒後（粒子流入開始から 60 秒後）

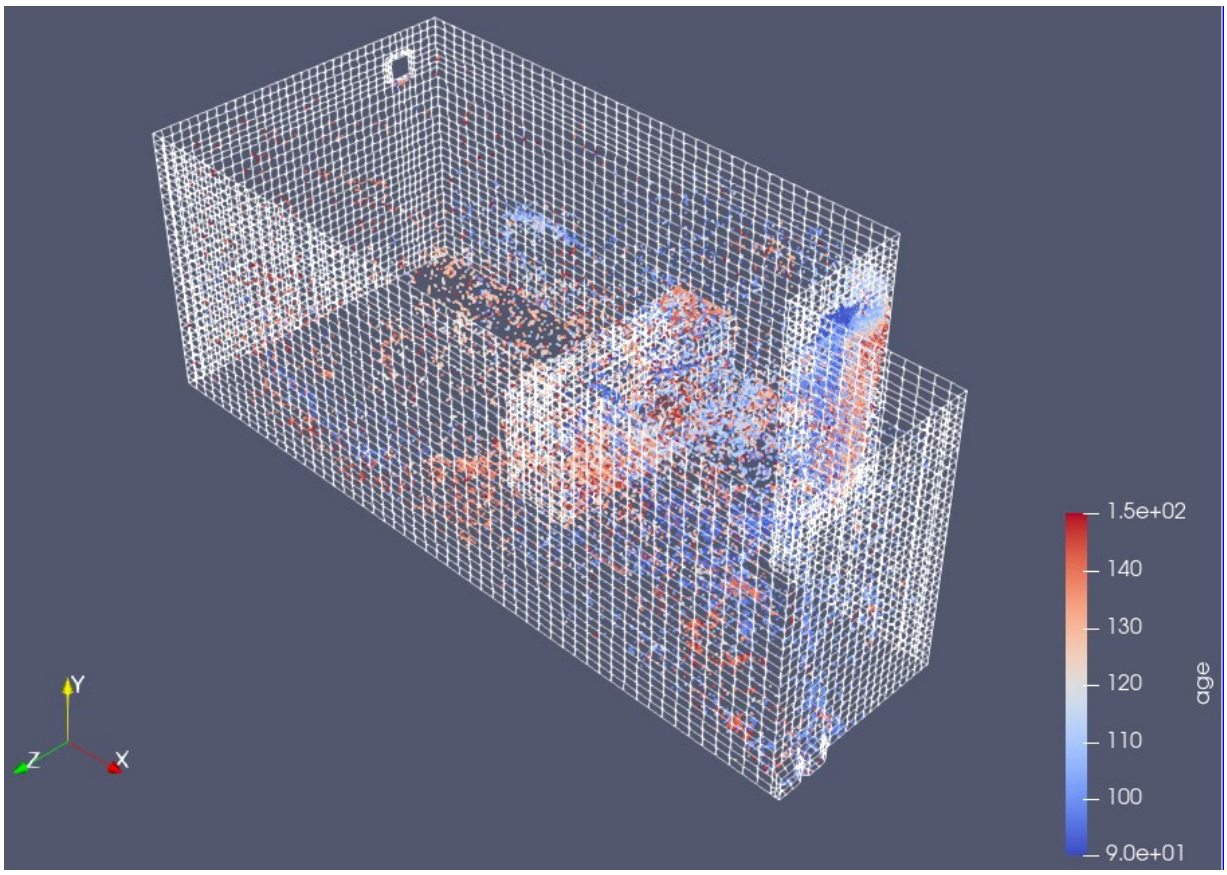


図 6-109　　計算開始から 180 秒後（粒子流入開始から 150 秒後）

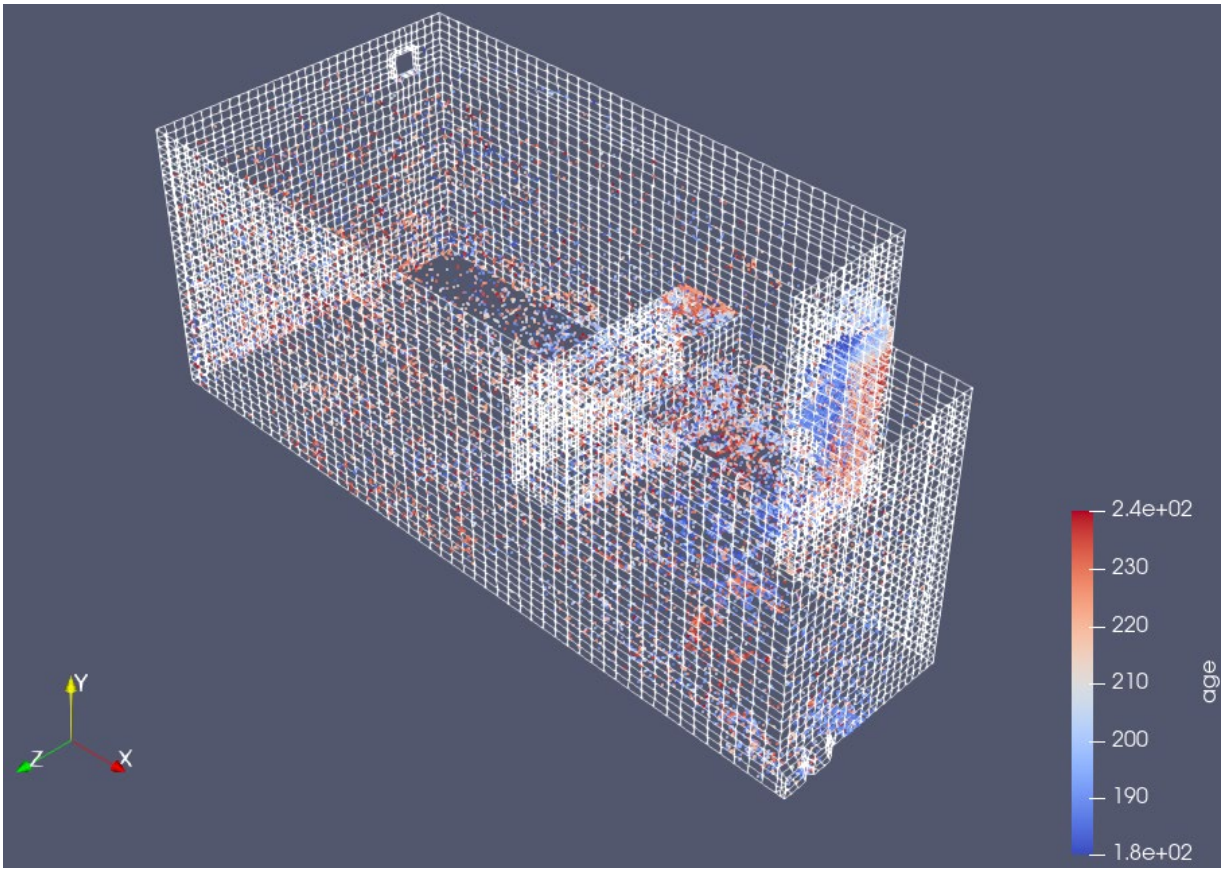


図 6-110　　計算開始から 270 秒後（粒子流入開始から 240 秒後）

⑦ 天井が高く広い部屋を縦に重ねたモデルの作成及び計算結果（入口側に空気の通路）

(1) OpenFOAM の計算モデル及び計算条件

天井が高く広い部屋を縦に重ねた建屋で、図 6-111 に示すような計算モデルを作成した。

- 部屋のサイズ　　：9.96[m]×18.96[m]×3.4853[m]を 2 つ縦に重ねる
- 入口のサイズ　　：0.29[m]（縦）×0.315[m]（横）、上部に 1 か所
- 出口　　：入口 2 つ分の大きさ、下部に 1 か所
- 入口流速　　：X 方向に 5[m/s]
- 粒子の流入速度　　：X 方向に 5[m/s]
- 粒子の流入時間　　：計算開始 30 秒後から 300 秒間
- 空間の位置　　：入口側に空気の通路を設定
- メッシュ分割数　　：33×38×35=43,890
- 計算 CPU Time　　：26h（タイムステップ 900[sec] までの計算、4 並列）
- 使用計算機　　：13th Gen Intel(R) Core(TM) i7-13700 (24 CPUs), ~2.1GHz

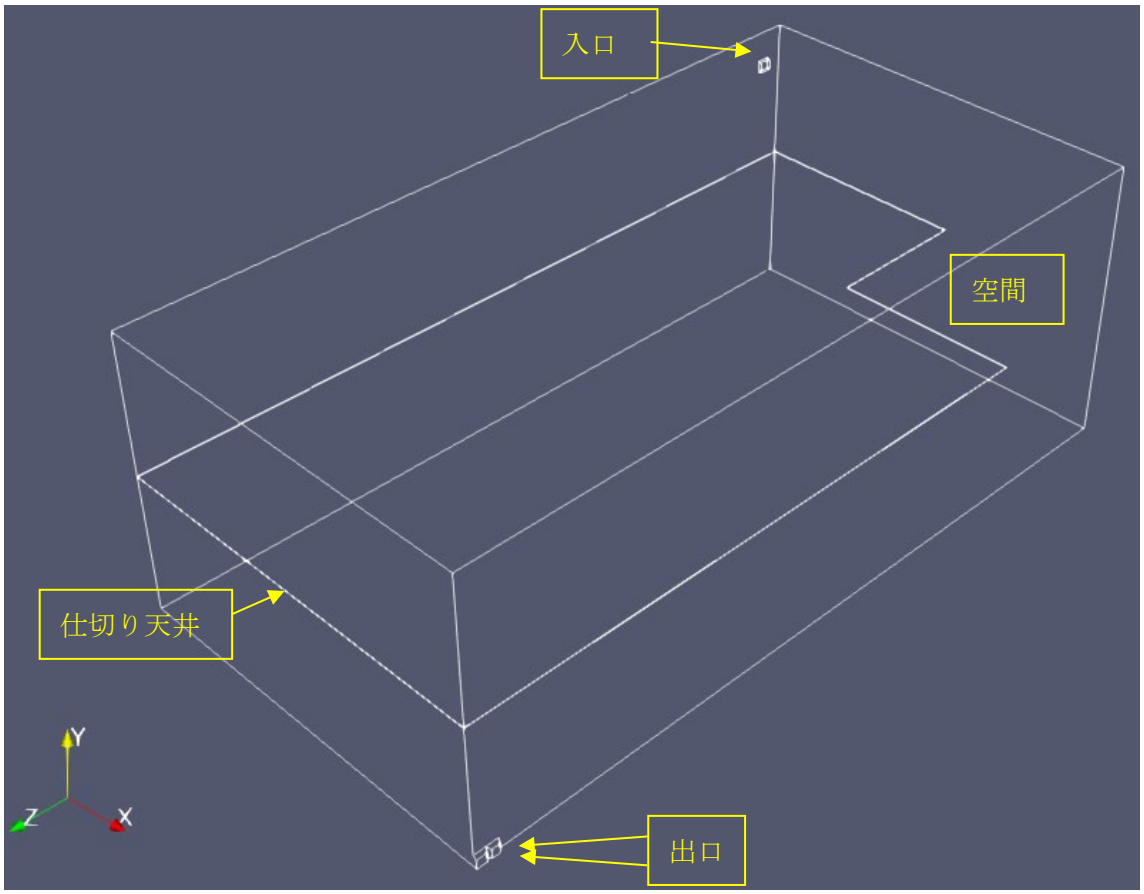


図 6-111天井が高く広い部屋を縦に重ねたモデル（その１）

(2) 計算結果

部屋の中に存在する粒子数の時間変化を図 6-112 に示す。図 6-113 及び図 6-114 は、1 階及び 2 階を高さ方向に 3 分割して粒子数を集計したものである。タイムステップ毎の粒子の分布を図 6-115 から図 6-117 に示す。分布図中の粒子の色は入射からの経過時間を表しており、入射直後の粒子を青とし、入射してから最も時間が経過した粒子を赤とした。粒子数は、部屋の入口から流入が開始する 30 秒から流入が止まる 300 秒まで増加し、300 秒をピークにその後はほぼ一定である。入口側の 1 階と 2 階を結ぶ空気の通路から粒子が 1 階へ移動しているが、1 階の空気の流れが小さく、出口までの距離があるため、グラフに示した時間内では出口まで粒子がほとんど到達していない。

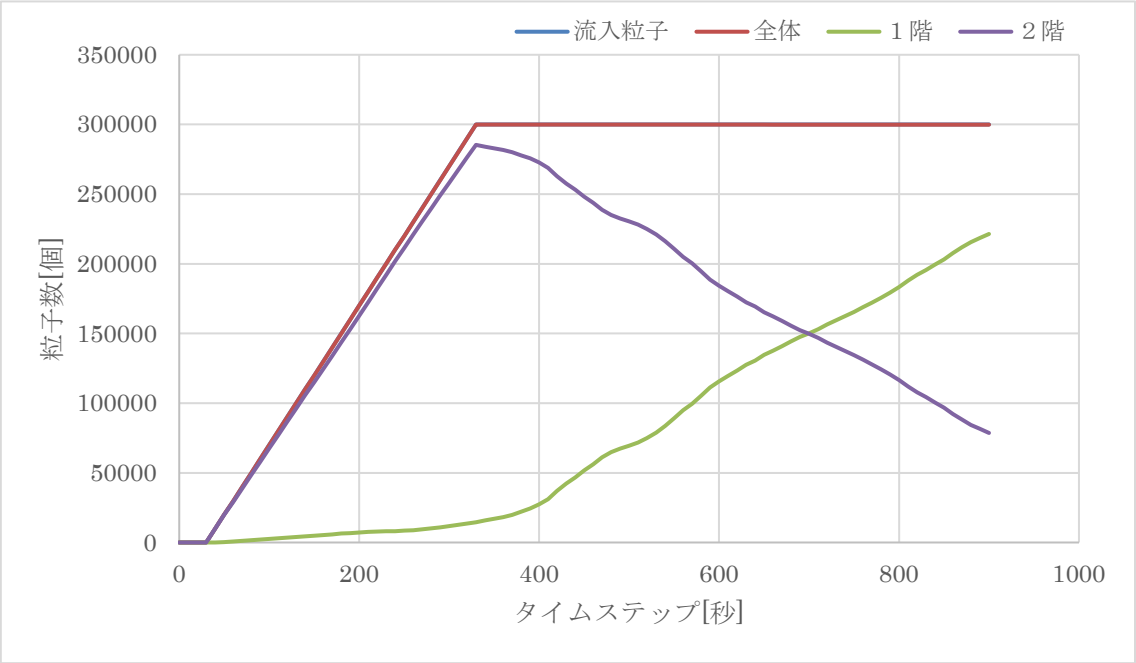


図 6-112　　部屋の中に存在する粒子数の時間変化

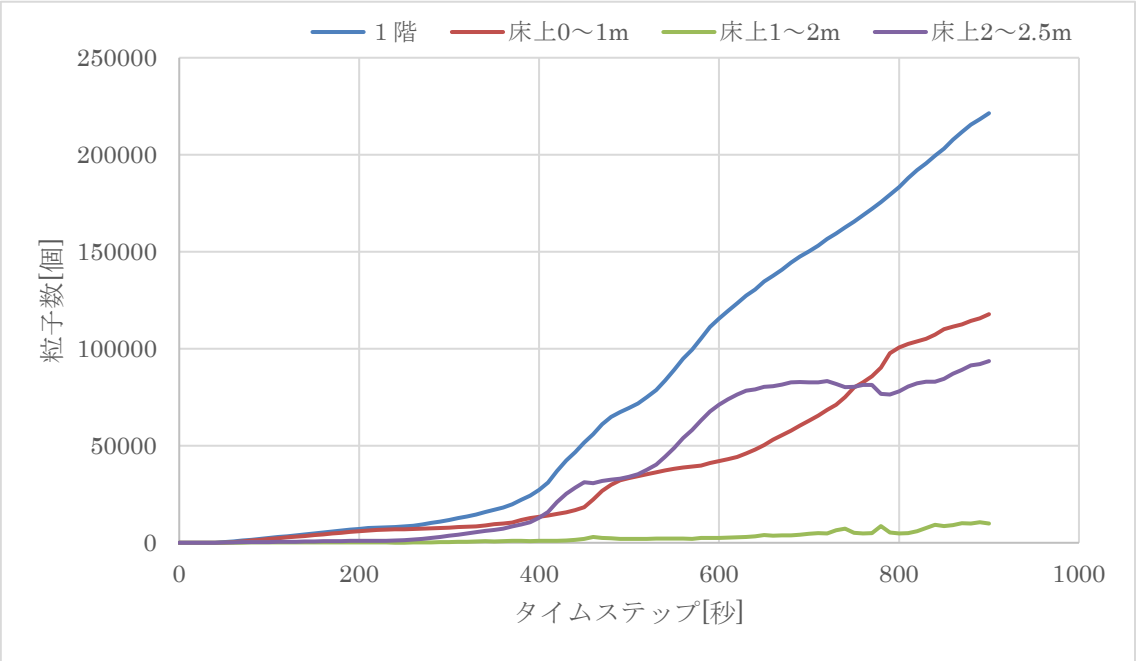


図 6-113　　1 階に存在する粒子数の時間変化

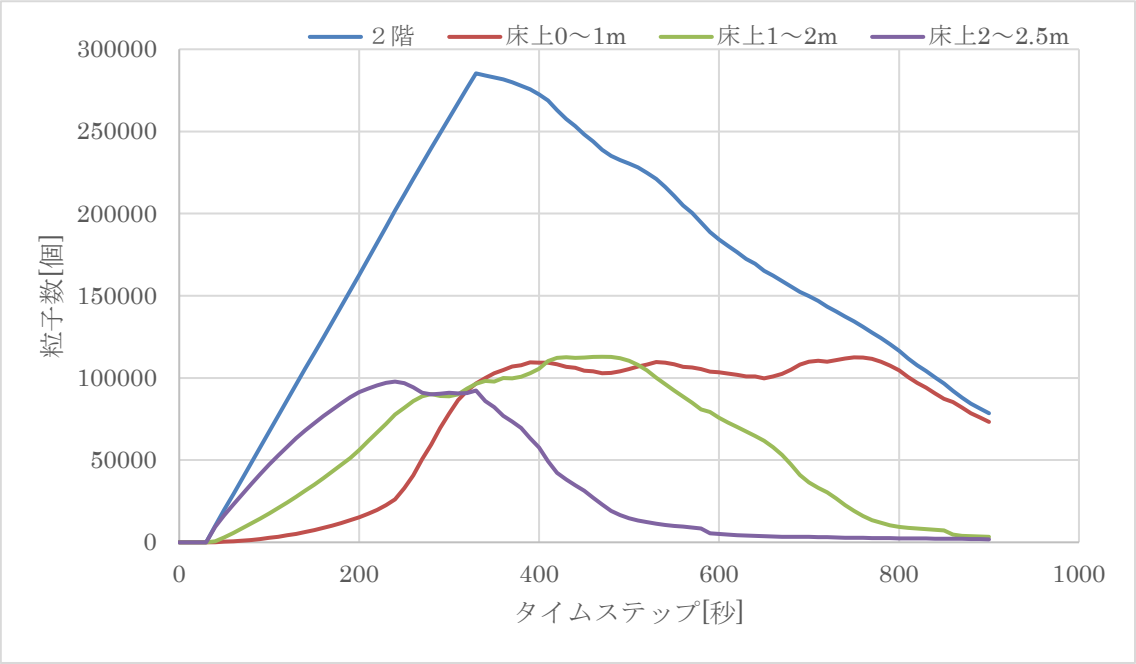


図 6-114　　2 階に存在する粒子数の時間変化

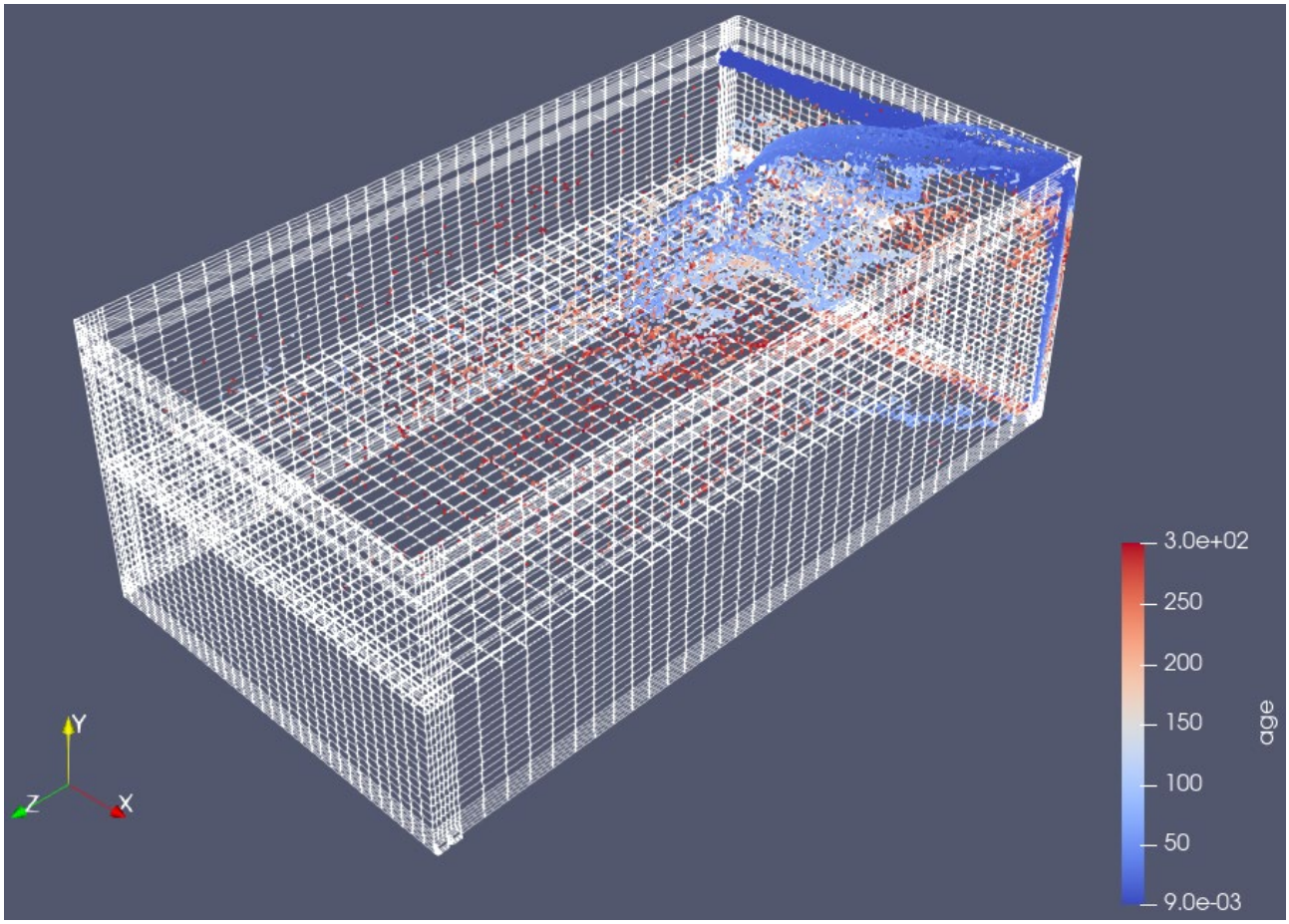


図 6-115　　計算開始から 330 秒後（粒子流入開始から 300 秒後）

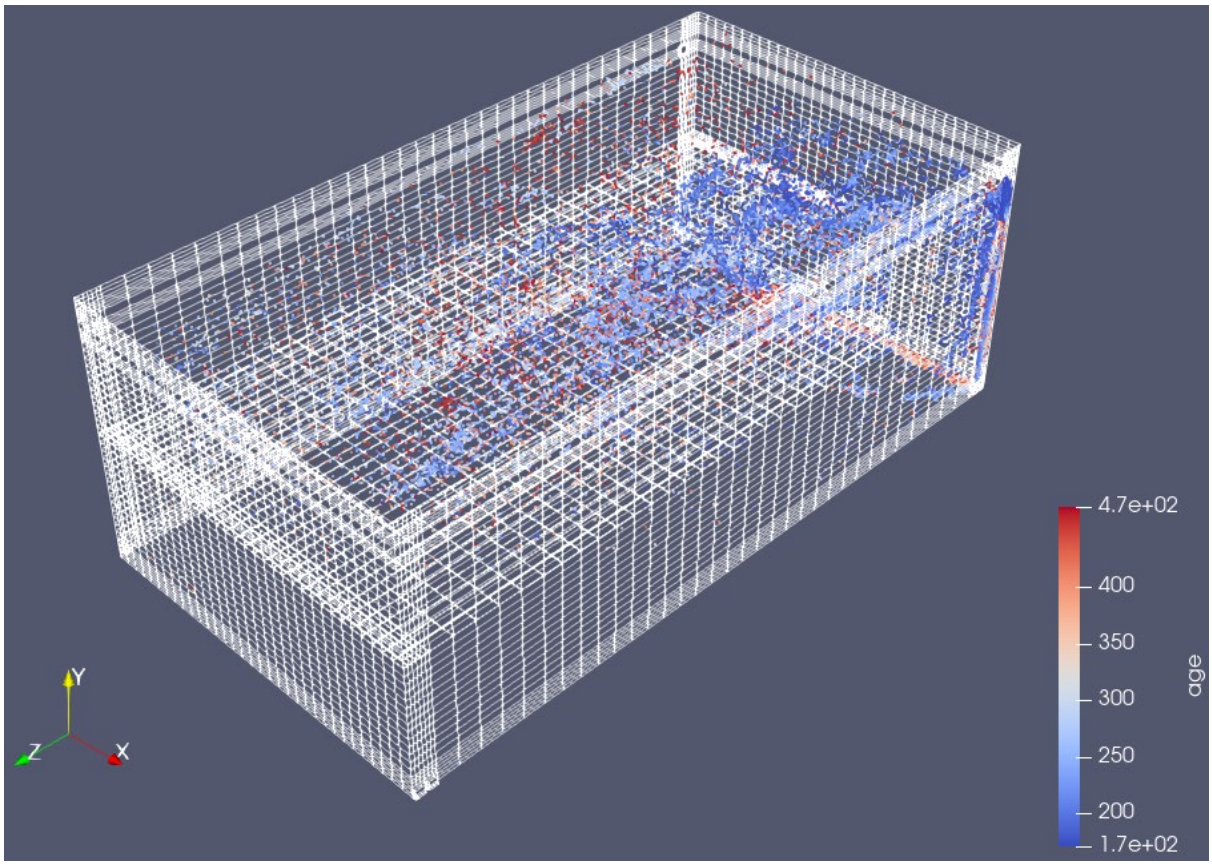


図 6-116　　計算開始から 500 秒後（粒子流入開始から 470 秒後）

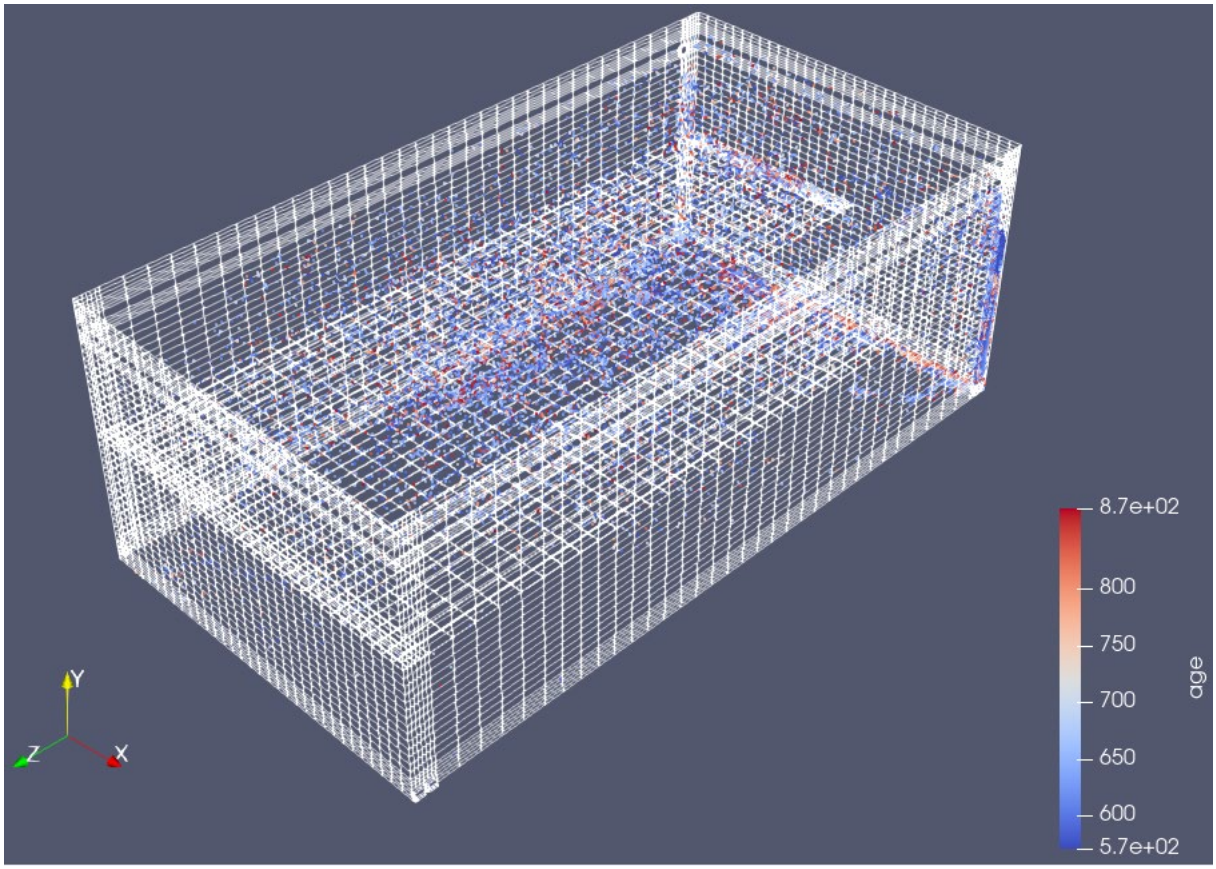


図 6-117　　計算開始から 900 秒後（粒子流入開始から 870 秒後）

⑧ 天井が高く広い部屋を縦に重ねたモデルの作成及び計算結果（出口側に空気の通路）

(1) OpenFOAM の計算モデル及び計算条件

天井が高く広い部屋を縦に重ねた建屋で、図 6-99 に示すような計算モデルを作成した。

- 部屋のサイズ　　：9.96[m]×18.96[m]×3.4853[m]を 2 つ縦に重ねる
- 入口のサイズ　　：0.29[m]（縦）×0.315[m]（横）、上部に 1 か所
- 出口　　：入口 2 つ分の大きさ、下部に 1 か所
- 入口流速　　：X 方向に 5[m/s]
- 粒子の流入速度　　：X 方向に 5[m/s]
- 粒子の流入時間　　：計算開始 30 秒後から 300 秒間
- 空間の位置　　：出口側に空気の通路を設定
- メッシュ分割数　　：33×38×35=43,890
- 計算 CPU Time　　：30h（タイムステップ 900[sec] までの計算、4 並列）
- 使用計算機　　：13th Gen Intel(R) Core(TM) i7-13700 (24 CPUs), ~2.1GHz

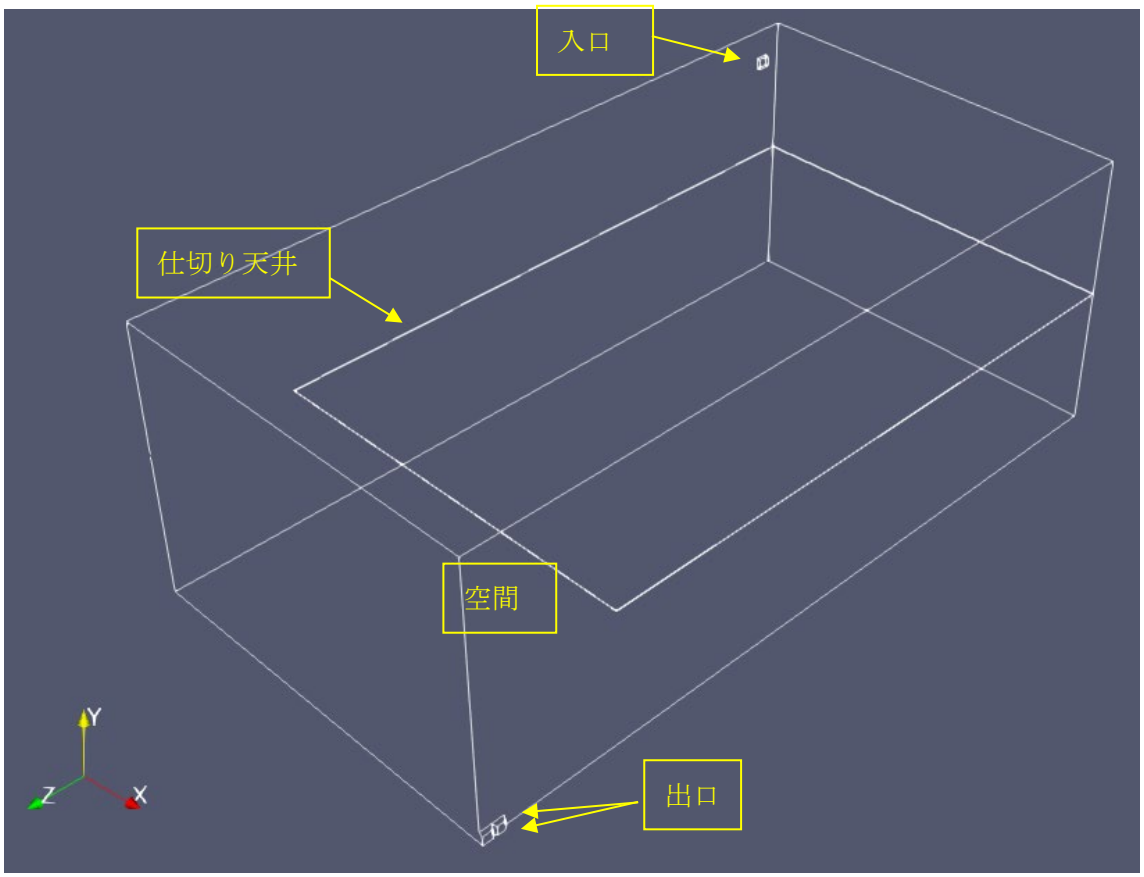


図 6-118　　天井が高く広い部屋を縦に重ねたモデル（その 2）

(2) 計算結果

部屋の中に存在する粒子数の時間変化を図 6-119 に示す。図 6-120 及び図 6-121 は、1 階及び 2 階を高さ方向に 3 分割して粒子数を集計したものである。タイムステップ毎の粒子の分布を図 6-122 から図 6-124 に示す。粒子分布図中の粒子の色は、流入からの経過時間を表している。分布図中の粒子の色は入射からの経過時間を表しており、入射直後の粒子を青とし、入射してから最も時間が経過した粒子を赤とした。粒子数は、部屋の入口から流入が開始する 30 秒から流入が止まる 300 秒まで増加し、300 秒をピークにその後はほぼ一定である。出口側に 1 階と 2 階を結ぶ空気の通路があるが、グラフに示した時間内では 1 階へ移動する粒子数が少なく、出口まで粒子がほとんど到達していない。

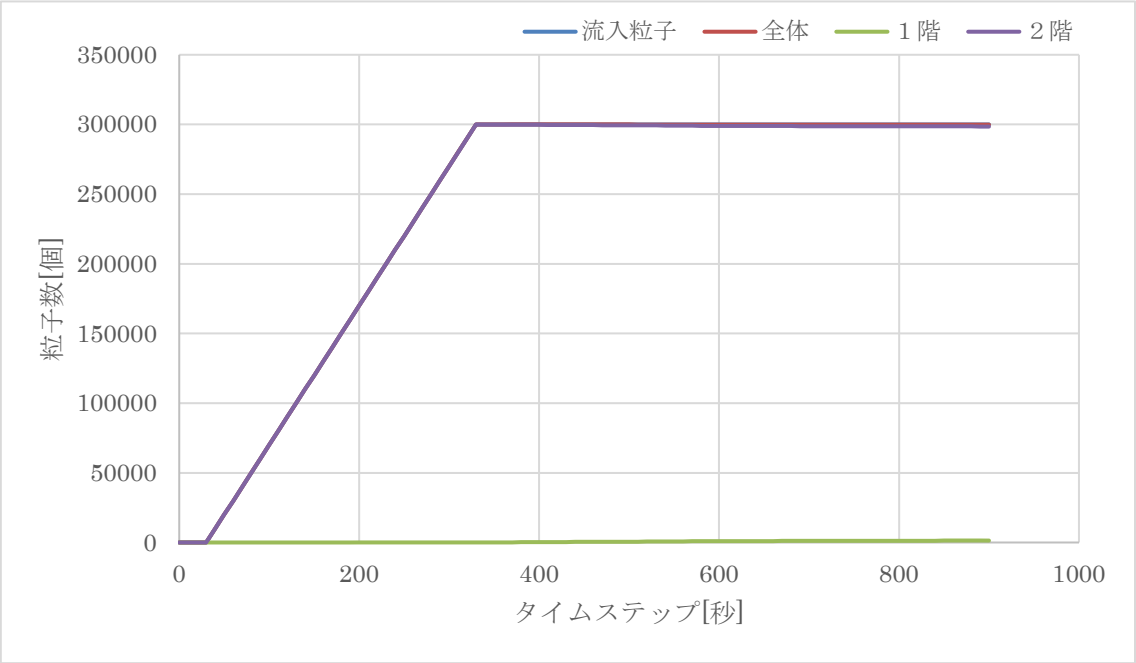


図 6-119　　部屋の中に存在する粒子数の時間変化

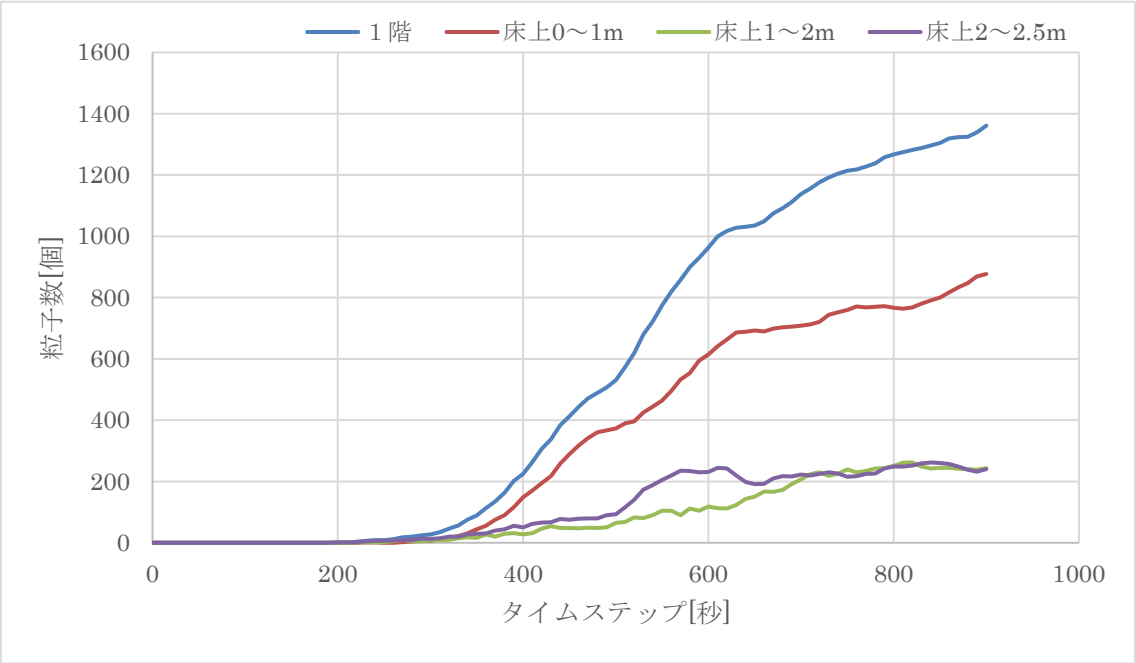


図 6-120　　1 階に存在する粒子数の時間変化

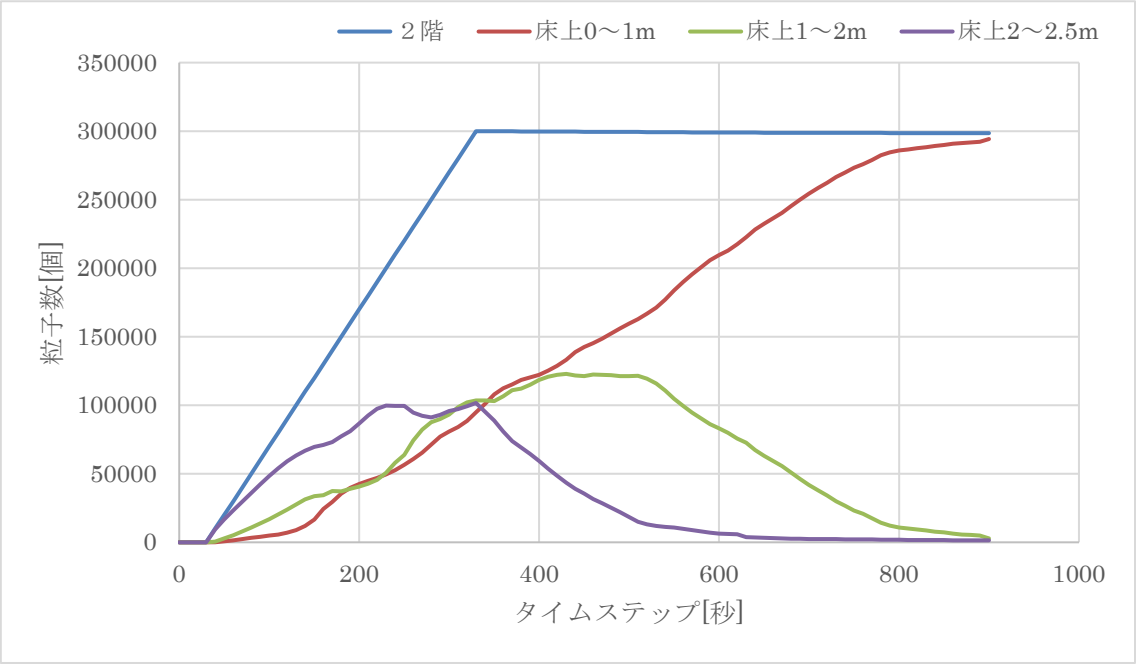


図 6-121　　2 階に存在する粒子数の時間変化

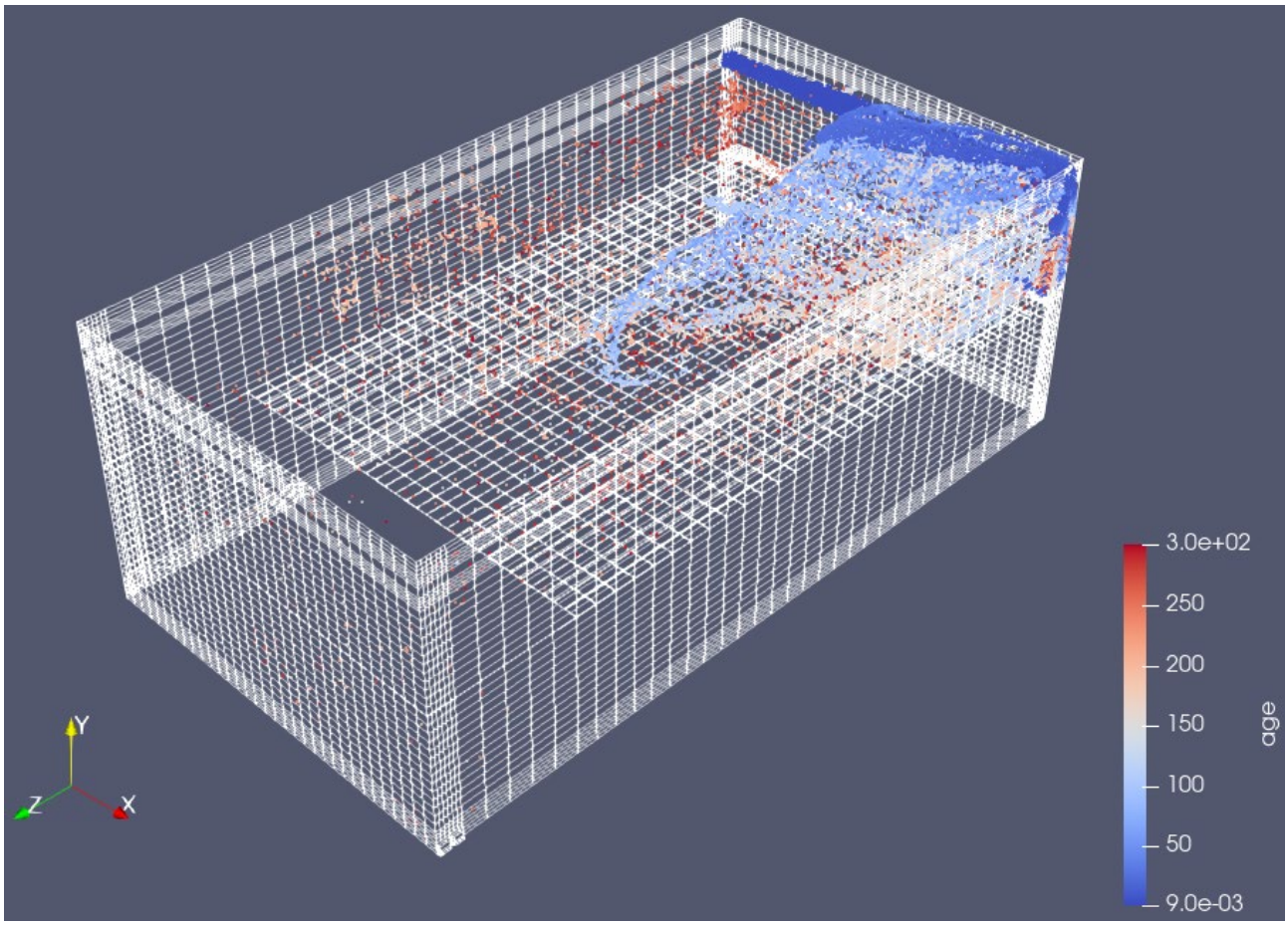


図 6-122　　計算開始から 330 秒後（粒子流入開始から 300 秒後）

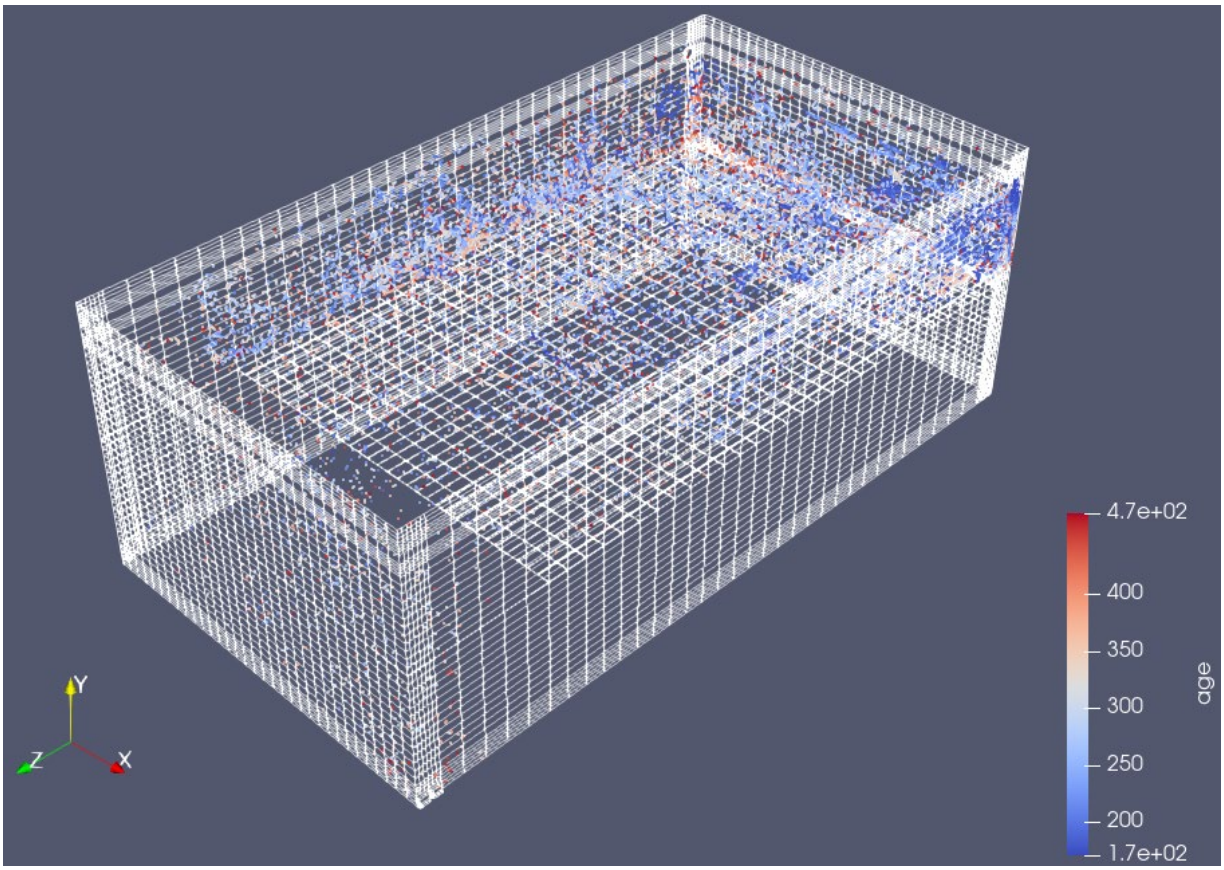


図 6-123　　計算開始から 500 秒後（粒子流入開始から 470 秒後）

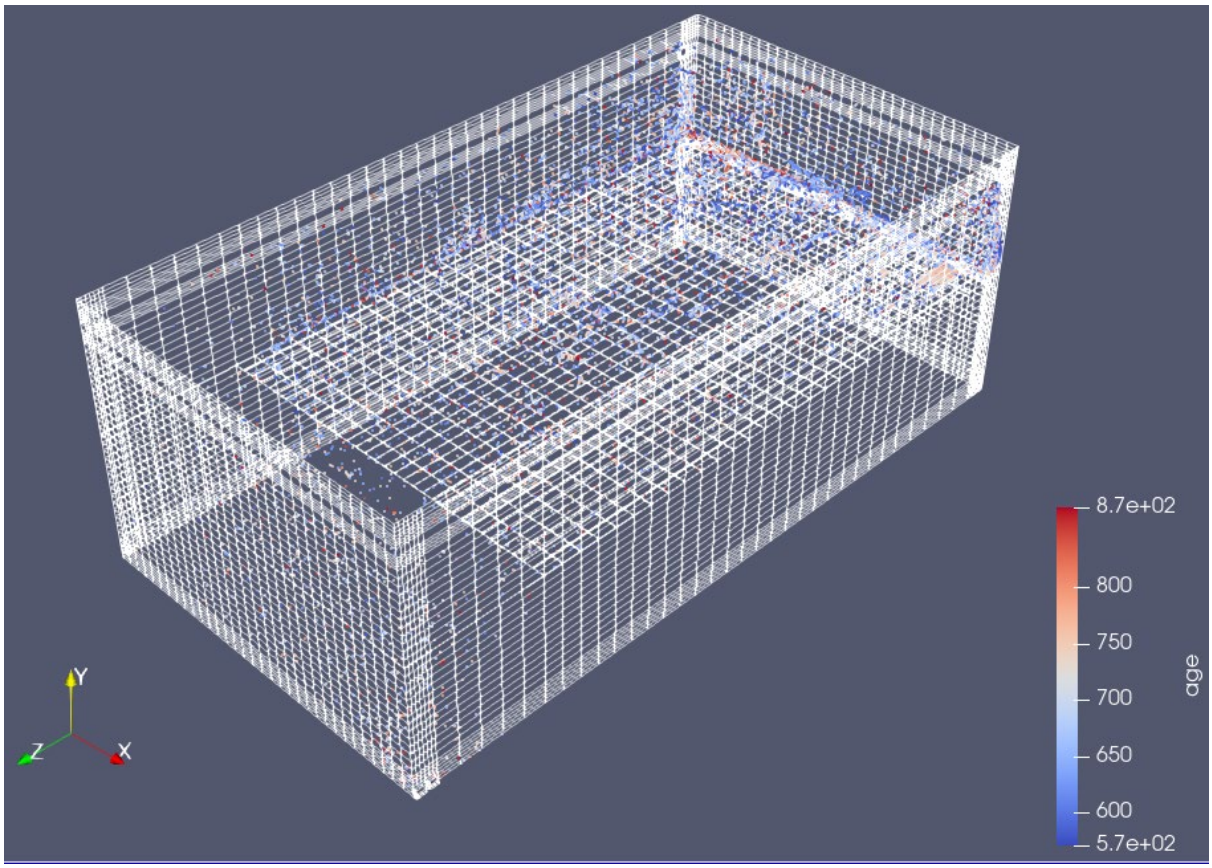


図 6-124　　計算開始から 900 秒後（粒子流入開始から 870 秒後）

6.3.3 3D-ADRES-Outdoor を用いた屋内クラウド及びグランドシャインによる屋内線量率推定試解析

① PHITS による屋内線量率計算の概要

屋内線量率計算には、3D-ADRES-Outdoor を利用し、3 次元モンテカルロコード PHITS コード[6-27][6-27]を使用した。PHITS は、高度情報科学技術研究機構（RIST）、日本原子力研究開発機構（JAEA）、高エネルギー加速器研究機構（KEK）が協力して開発しており、高エネルギー重イオン反応、高エネルギーの陽子、中性子輸送、低エネルギーの中性子輸送に対し、加速器施設でのベンチマーク、また、粒子線治療施設でのベンチマーク[6-28]が実施され、その信頼性が検証されている。

建屋の計算モデルは、3D-ADRES-Outdoor で作成されたものを用い、その内部に CFD 解析を行った寸法の部屋を作成した。線源データは、OpenFOAM で計算した任意時間の粒子分布をもとに、各空間格子に含まれる粒子の個数を集計し、各空間格子にベクレル数を与える方法で作成された。6.3.1 ④(1)項に記したように、粒子 1 個当たりのベクレル数は屋外放射能の大きさと CFD 解析で発生させた粒子数から決まる。

3D-ADRES-Outdoor で作成された建屋としては、以下の 3 種類を使用した。それぞれの建屋の内部寸法は以下のとおりである。

- 横方向：10.96[m]、奥行き方向：9.96[m] 、高さ方向：5.617[m]
- 横方向：14.972[m]、奥行き方向：7.972[m] 、高さ方向：5.9466[m]
- 横方向：18.96[m]、奥行き方向：9.96[m] 、高さ方向：6.987[m]

PHITS で計算した線量率[μSv/hour]の分布は、2 次元の等高線で表示する。等高線の値により色を以下のとおり設定した。

- red : 1.0e-2[μSv/hour]
- magenta : 1.0e-3[μSv/hour]
- orange : 1.0e-4[μSv/hour]
- green : 1.0e-5[μSv/hour]

② ８畳間及び１０畳間の建屋モデルの作成と計算結果

(1) PHITS の建屋モデル

3D-ADRES で作成された建屋の計算モデルを図 6-125 に示す。建屋内部の寸法は、X 方向：10.96[m]、Y 方向：9.96[m] 、Z 方向：5.617[m]である。

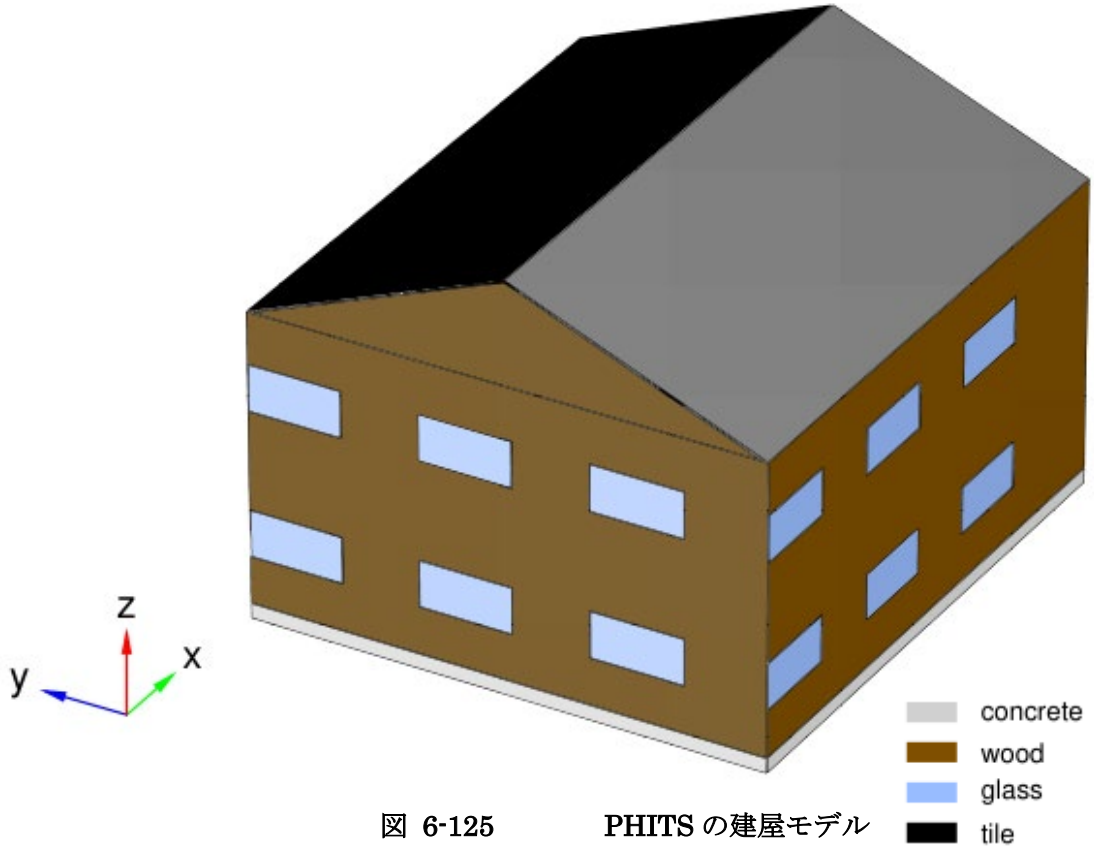


図 6-125　　PHITS の建屋モデル

(2) 8畳間計算モデル及び線量率分布

建屋内に8畳の部屋を作成し、その中で線量率分布を計算した。6.3.2 ②(2)に示した OpenFOAM の各タイムステップの粒子分布をもとに、PHITS で求めた 1 階床から 50[cm]の線量率分布を図 6-127 から図 6-129 に示す。1 階床から 150[cm]の線量率分布を図 6-130 から図 6-132 に示す。2 階床から 150[cm]の線量率分布は図 6-133 から図 6-135 に示す。

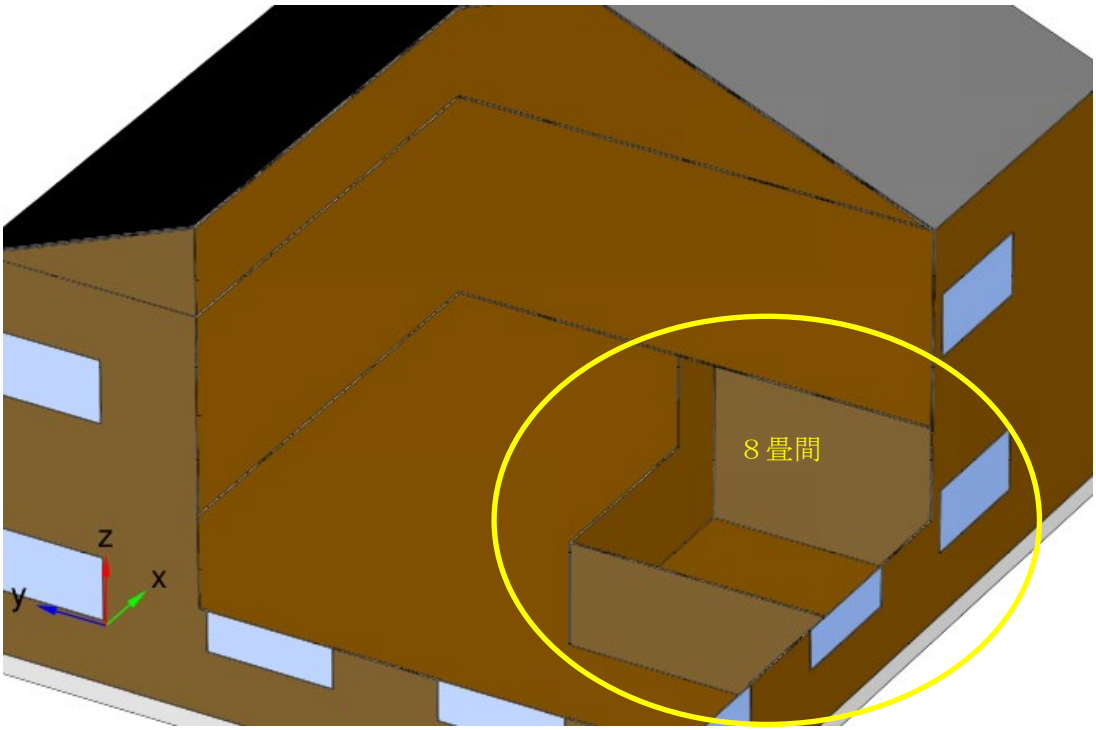


図 6-126　　8畳間モデル

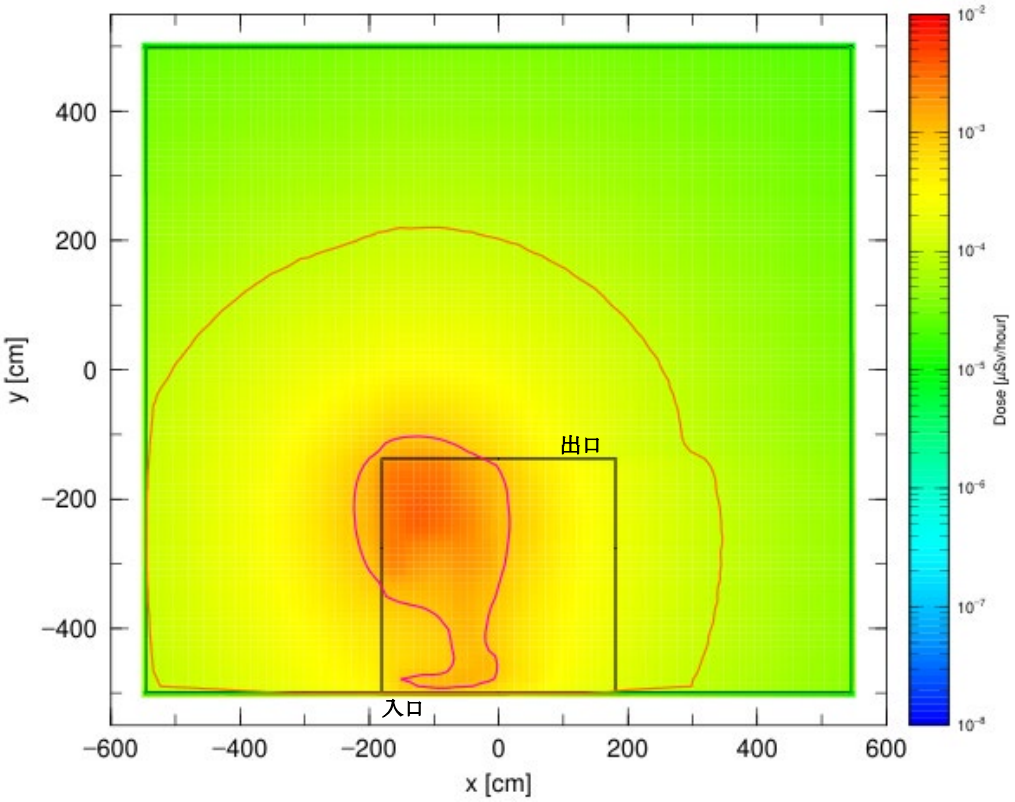


図 6-127　　1 階床から 50cm、計算開始から 90 秒後

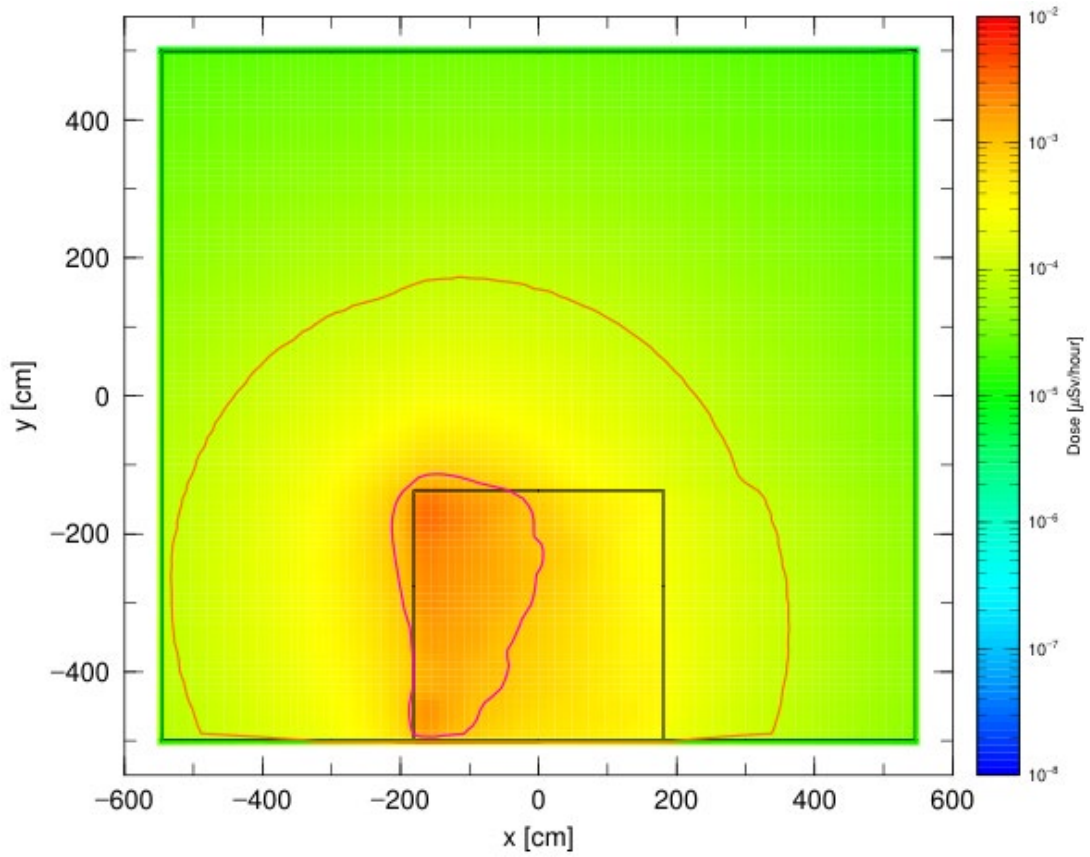


図 6-128　　1 階床から 50cm、計算開始から 180 秒後

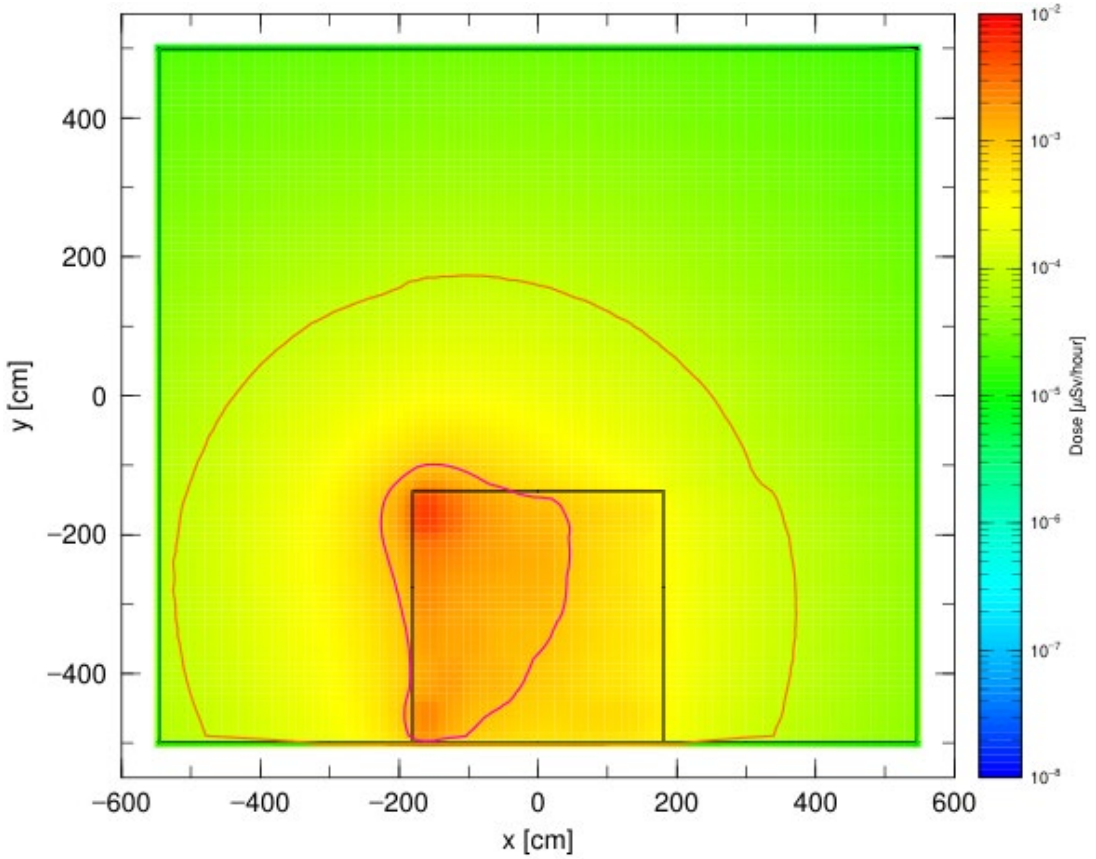


図 6-129　　1 階床から 50cm、計算開始から 330 秒後

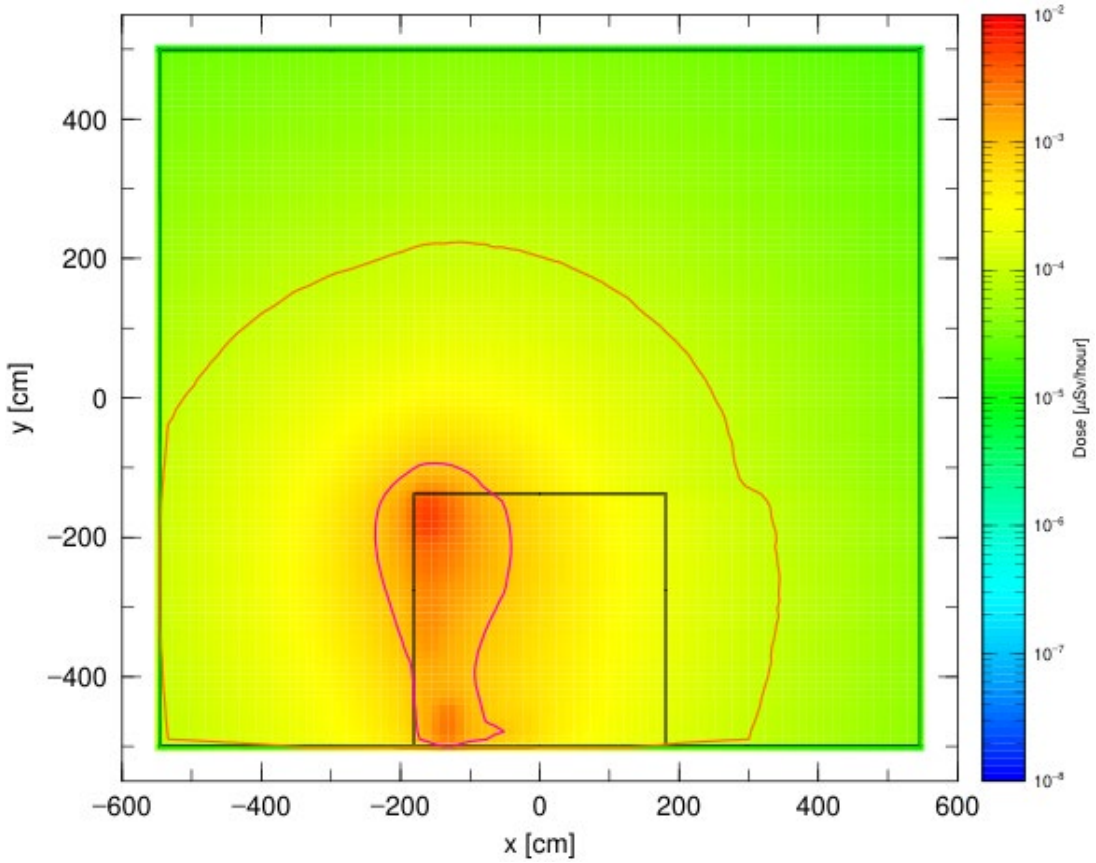


図 6-130　　1 階床から 150cm、計算開始から 90 秒後

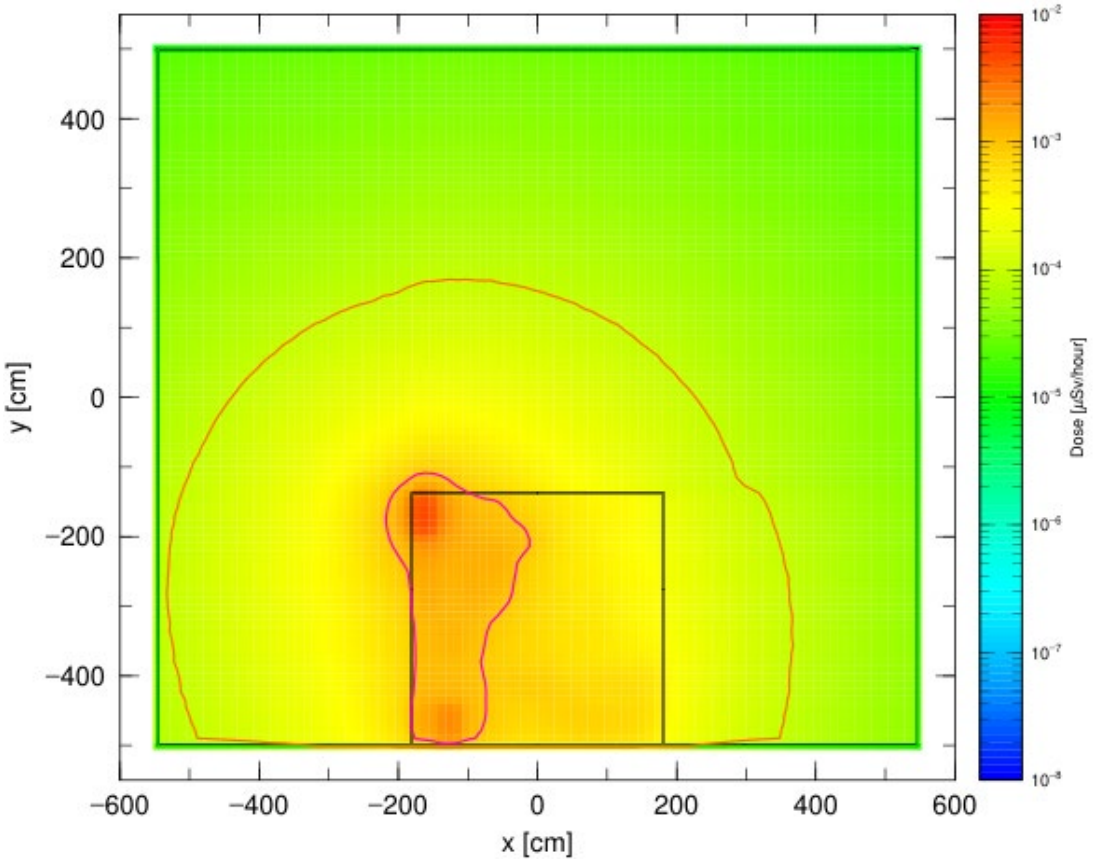


図 6-131　　1 階床から 150cm、計算開始から 180 秒後

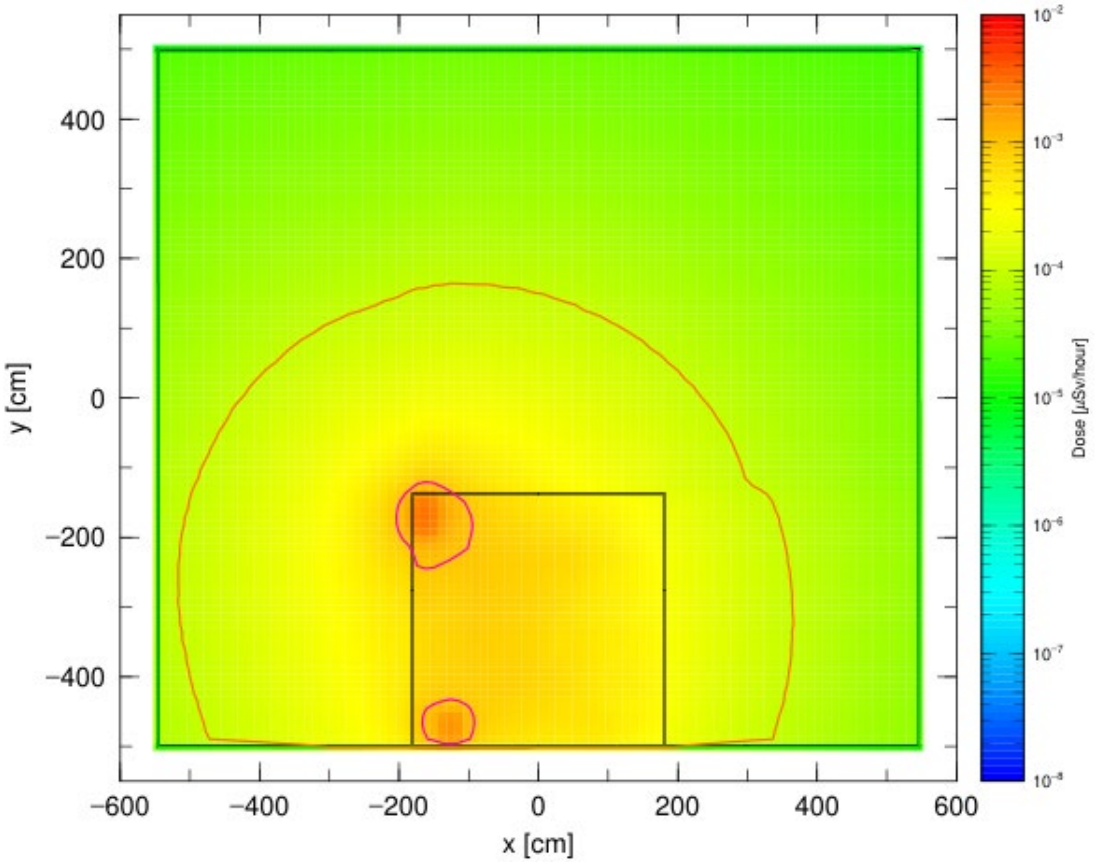


図 6-132　　1 階床から 150cm、計算開始から 330 秒後

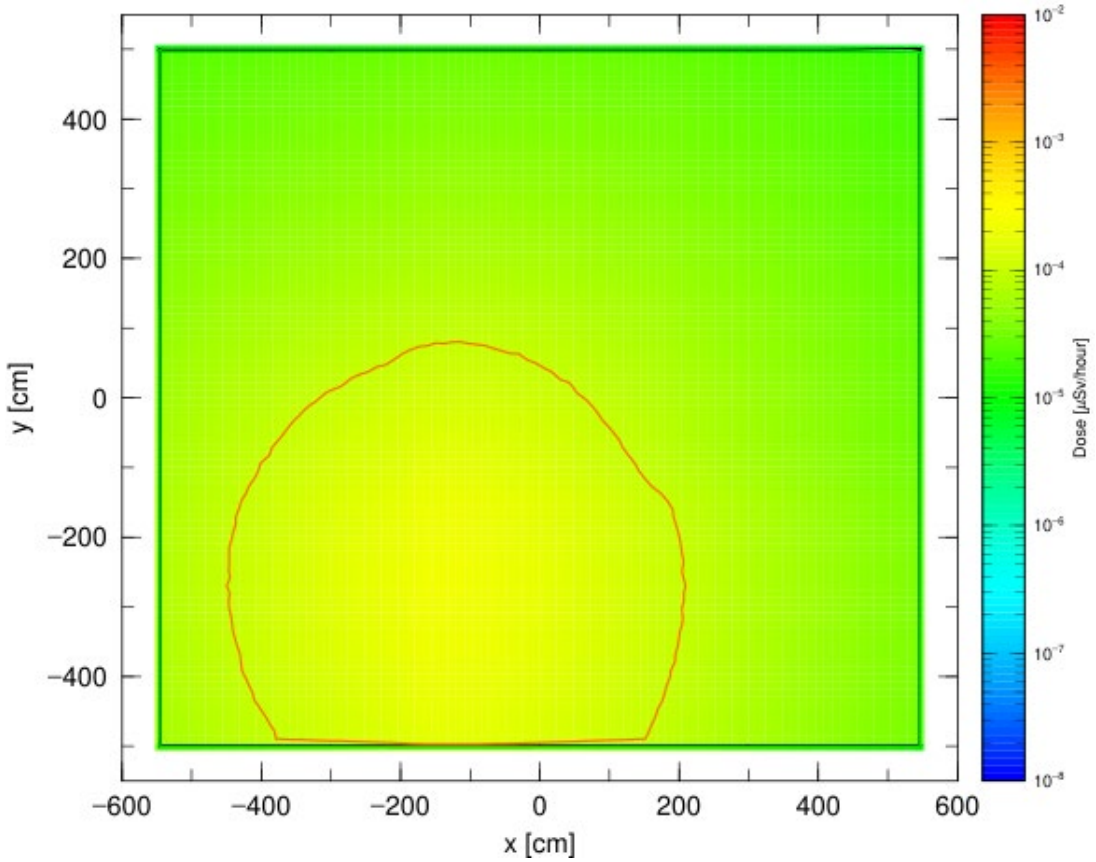


図 6-133　　2 階床から 150cm、計算開始から 90 秒後

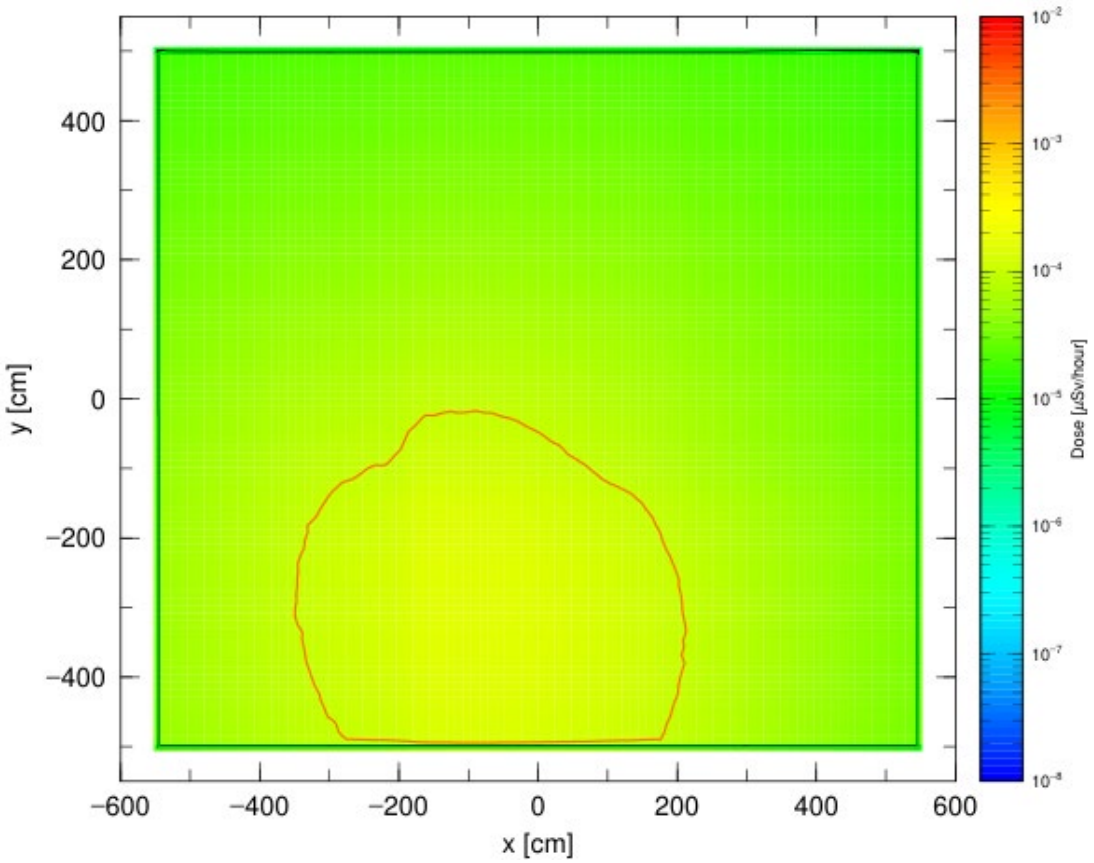


図 6-134　　2 階床から 150cm、計算開始から 180 秒後

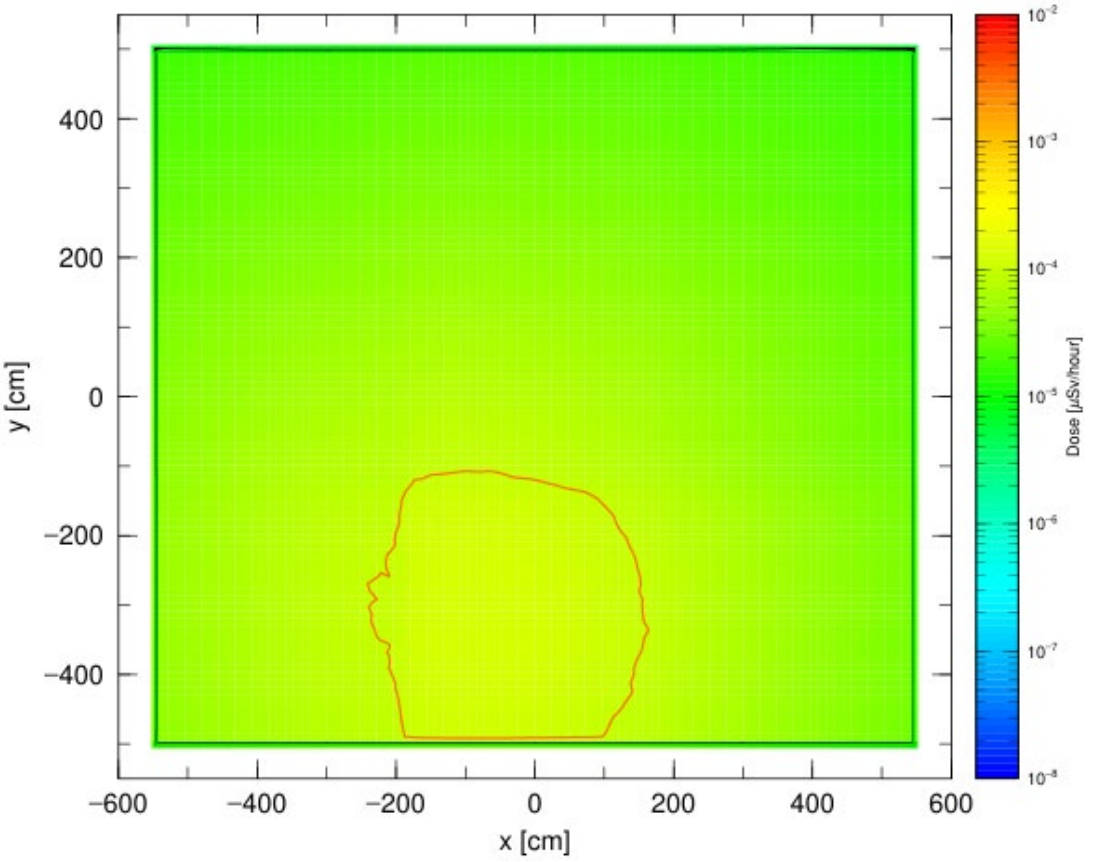


図 6-135　　2 階床から 150cm、計算開始から 330 秒後

(3)　８畳間計算モデル及び線量率分布（障害物①が有る場合）

建屋内に８畳の部屋を作成し、その中に線源を設定して線量率を計算した。6.3.2 ② (3)に示した OpenFOAM のタイムステップ（170[sec]）の粒子分布をもとに、PHITS で求めた１階床から 50[cm]の線量率分布を図 6-137 に示す。1 階床から 150[cm]の線量率分布を図 6-138 に示す。2 階床から 150[cm]の線量率分布を図 6-139 に示す。

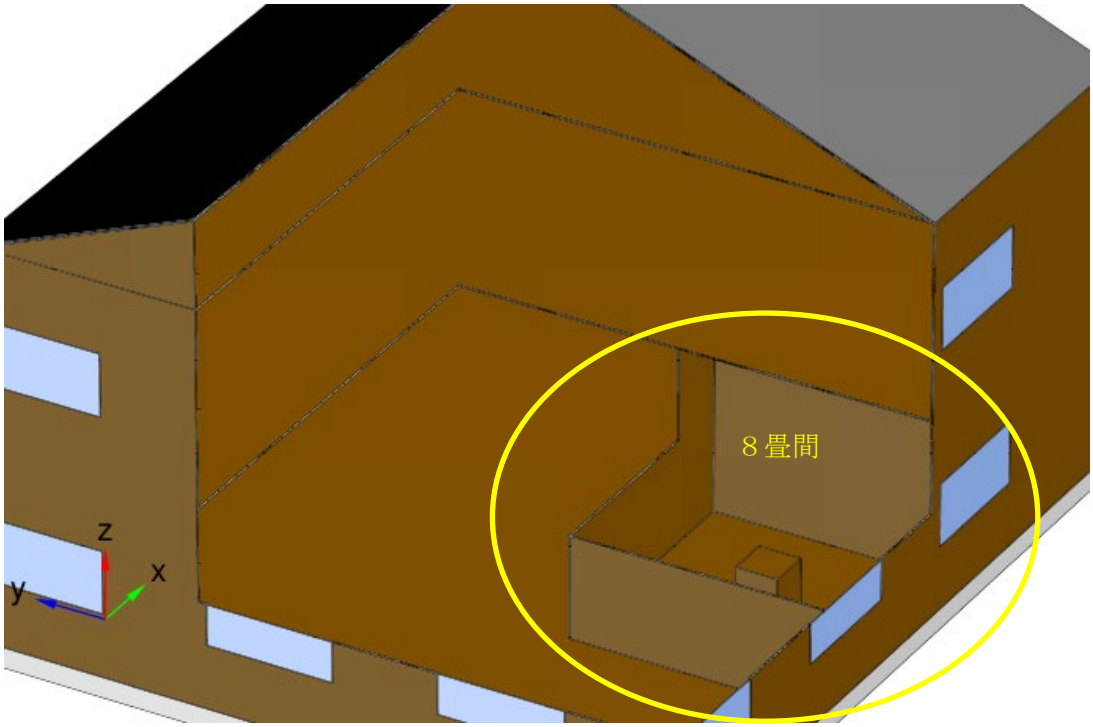


図 6-136　　８畳間モデル（障害物①が有る場合）

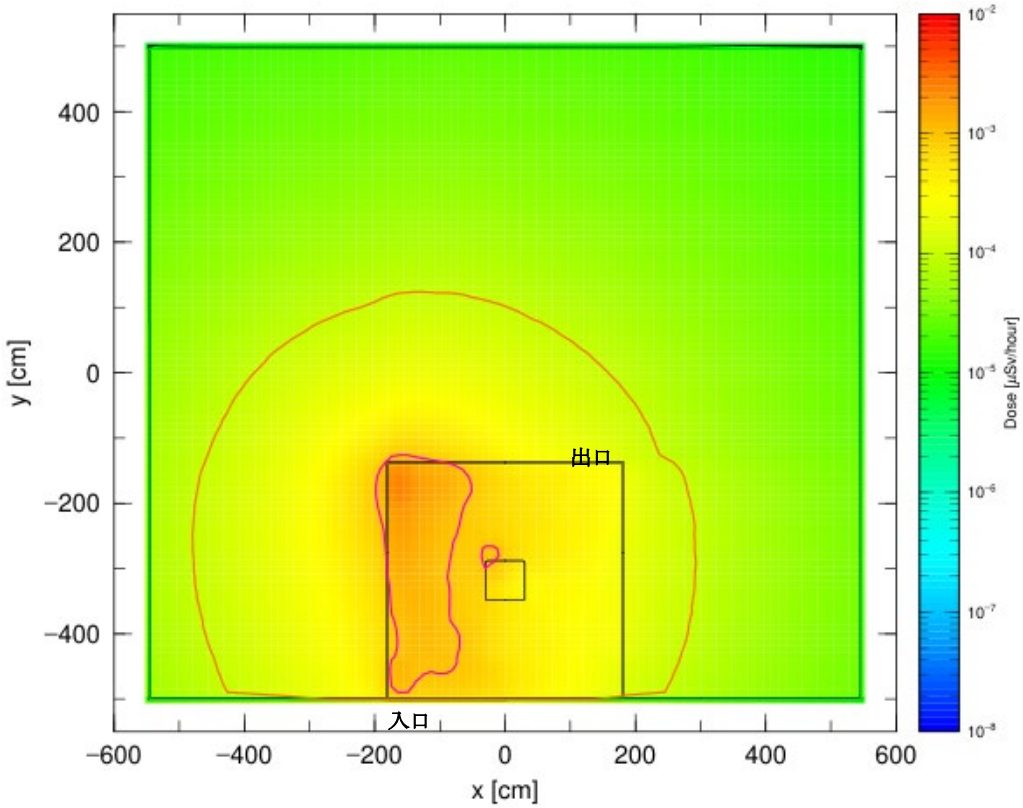


図 6-137　　１階床から 50cm、計算開始から 170 秒後

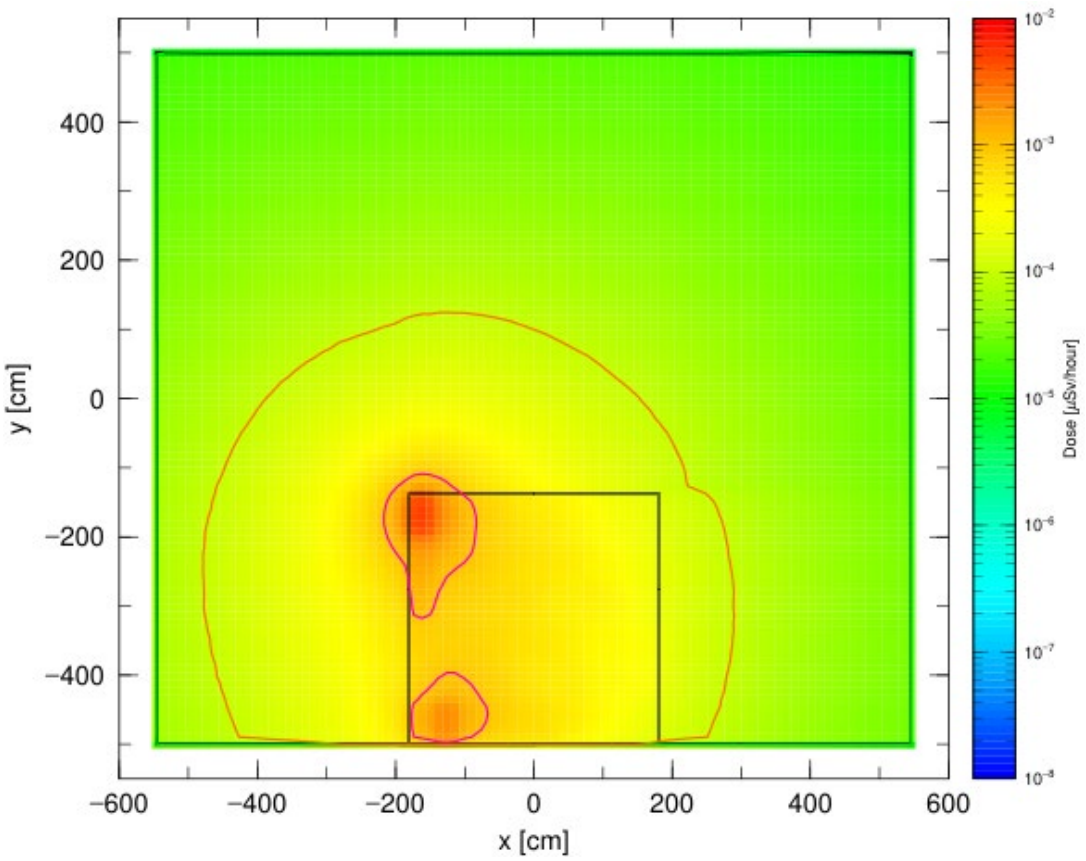


図 6-138　　1 階床から 150cm、計算開始から 170 秒後

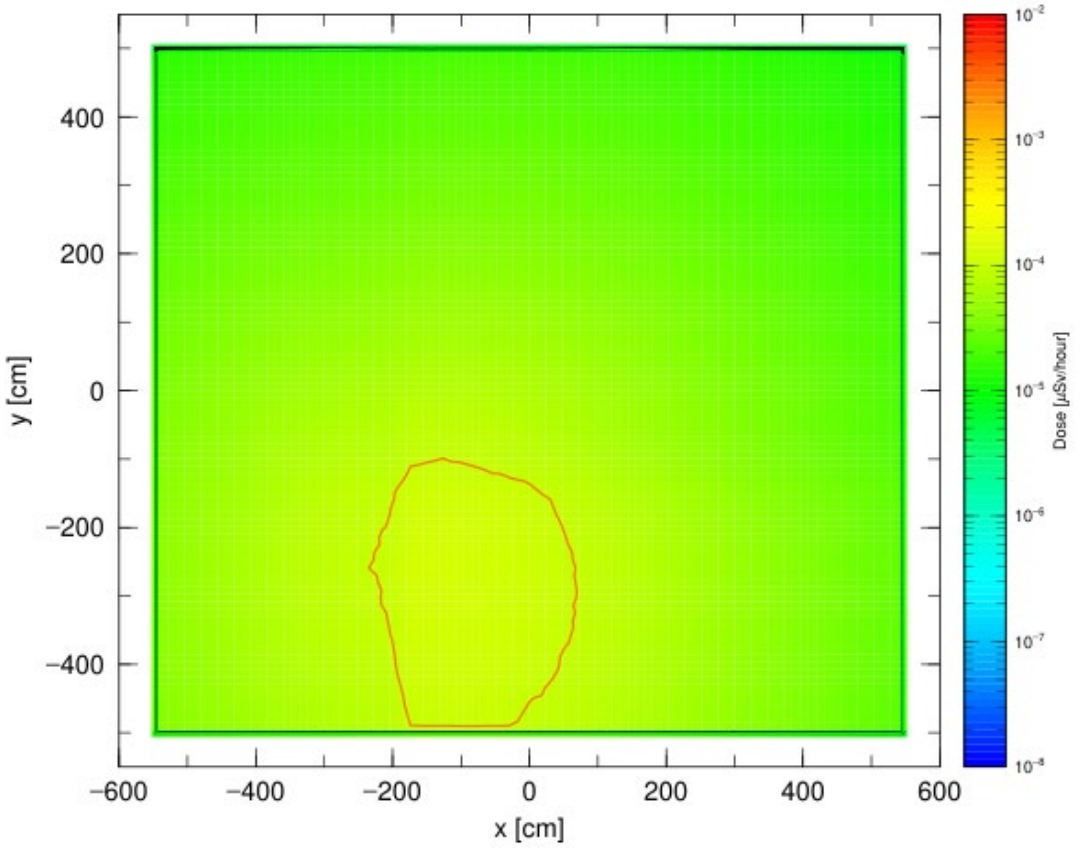


図 6-139　　2 階床から 150cm、計算開始から 170 秒後

(4)　８畳間計算モデル及び線量率分布（障害物①及び②が有る場合）

建屋内に８畳の部屋を作成し、その中に線源を設定して線量率を計算した。6.3.2 ② (4)に示した OpenFOAM のタイムステップ（180[sec]）の粒子分布をもとに、PHITS で求めた１階床から 50[cm]の線量率分布を図 6-141 に示す。1 階床から 150[cm]の線量率分布を図 6-142 に示す。2 階床から 150[cm]の線量率分布を図 6-143 に示す。

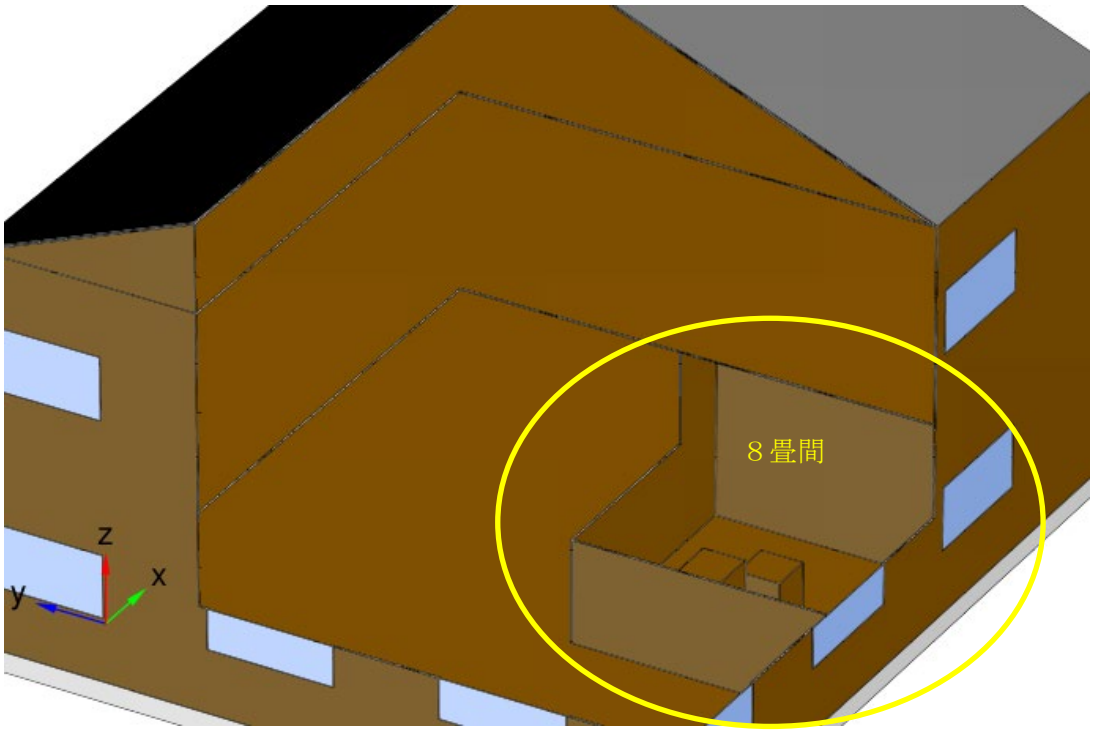


図 6-140　　８畳間モデル（障害物①及び②が有る場合）

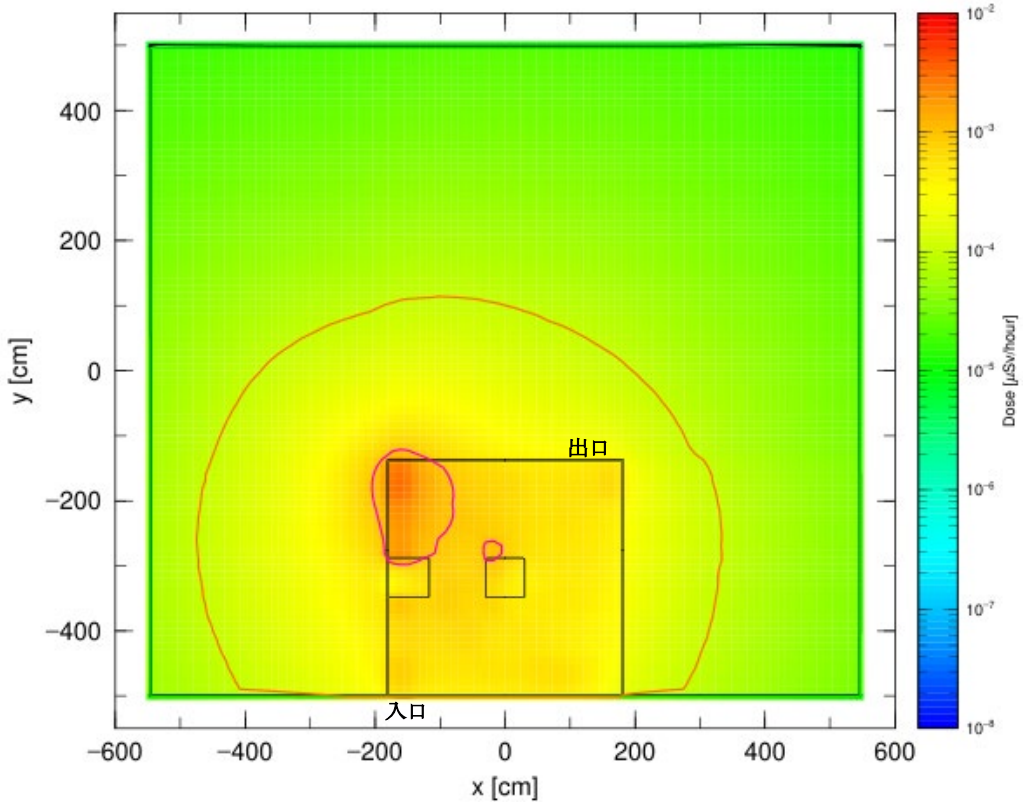


図 6-141　　１階床から 50cm、計算開始から 180 秒後

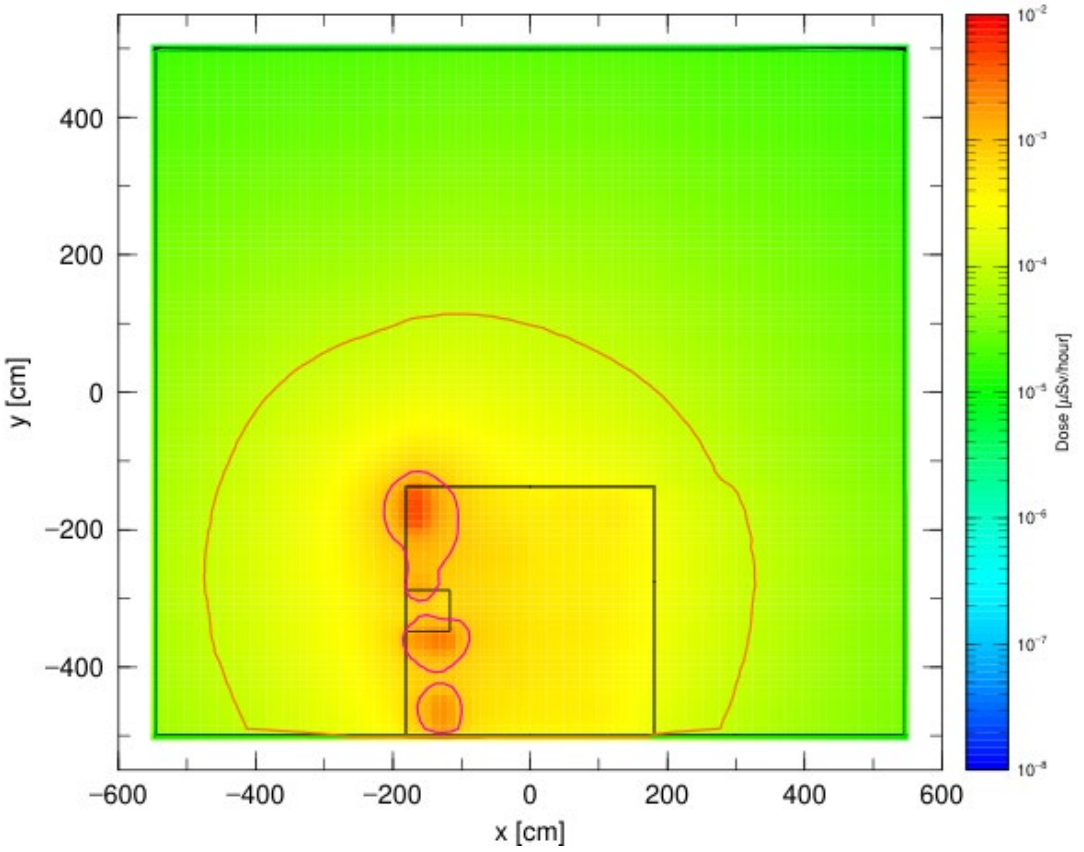


図 6-142　　1 階床から 150cm、計算開始から 180 秒後

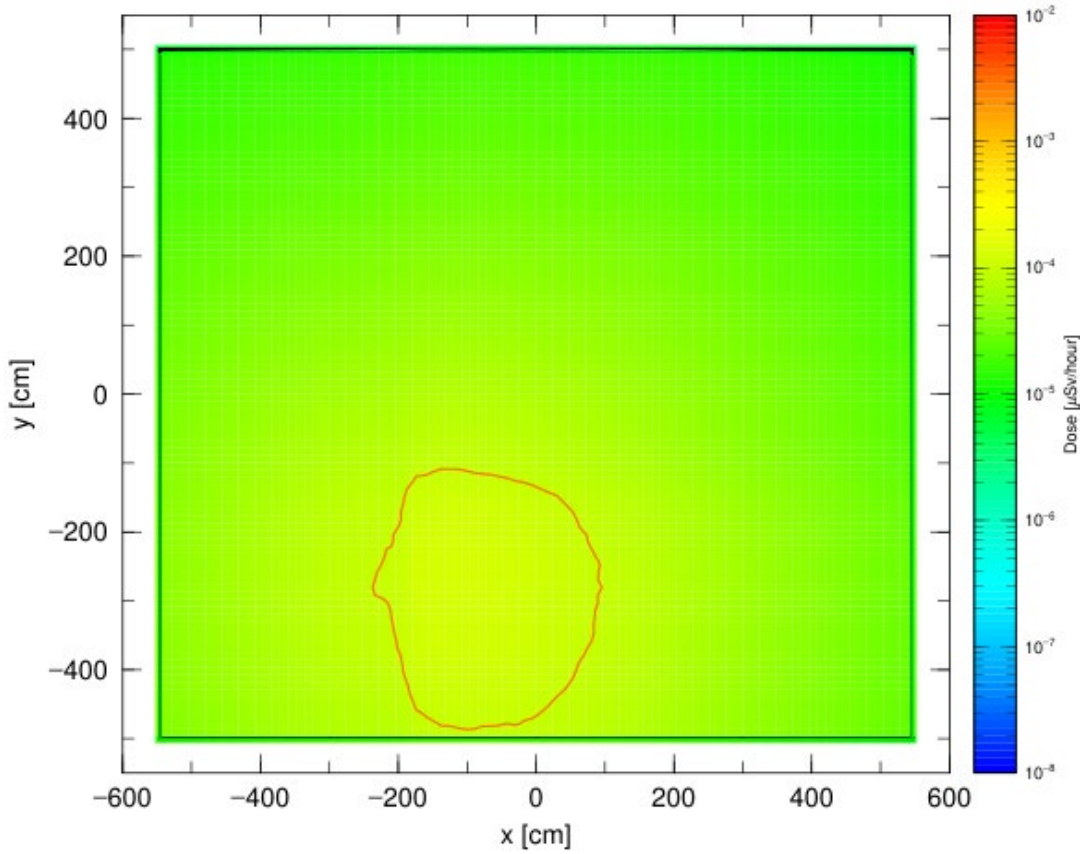


図 6-143　　2 階床から 150cm、計算開始から 180 秒後

(5)　８畳間計算モデル及び線量率分布（障害物①、②及び③が有る場合）

建屋内に８畳の部屋を作成し、その中に線源を設定して線量率を計算した。6.3.2 ② (5)に示した OpenFOAM のタイムステップ（180[sec]）の粒子分布をもとに、PHITS で求めた１階床から 50[cm]の線量率分布を図 6-145 に示す。1 階床から 150[cm]の線量率分布を図 6-146 に示す。2 階床から 150[cm]の線量率分布を図 6-147 に示す。

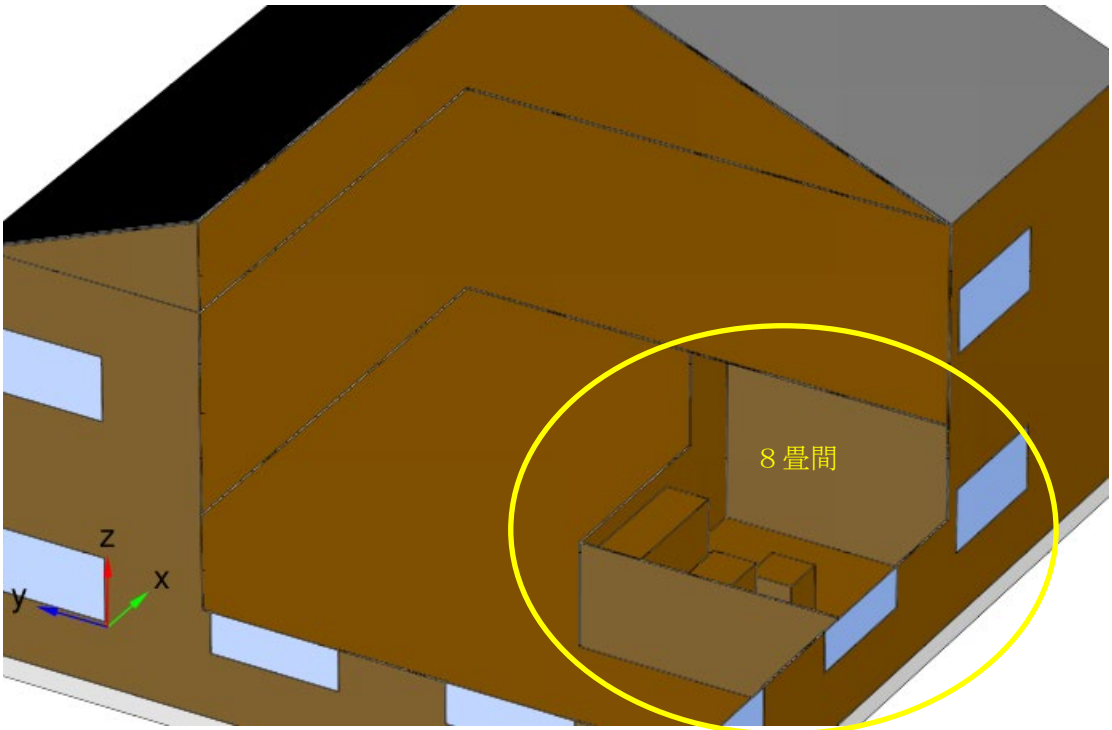


図 6-144　　８畳間モデル（障害物①、②及び③が有る場合）

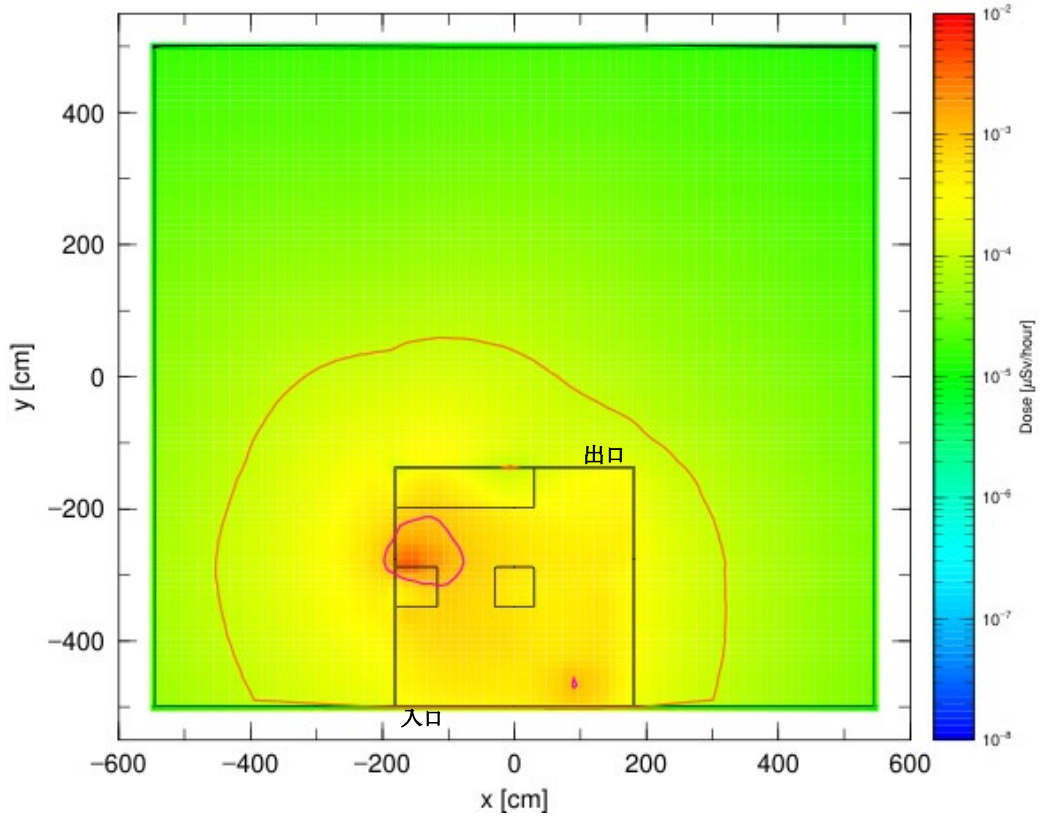


図 6-145　　１階床から 50cm、計算開始から 180 秒後

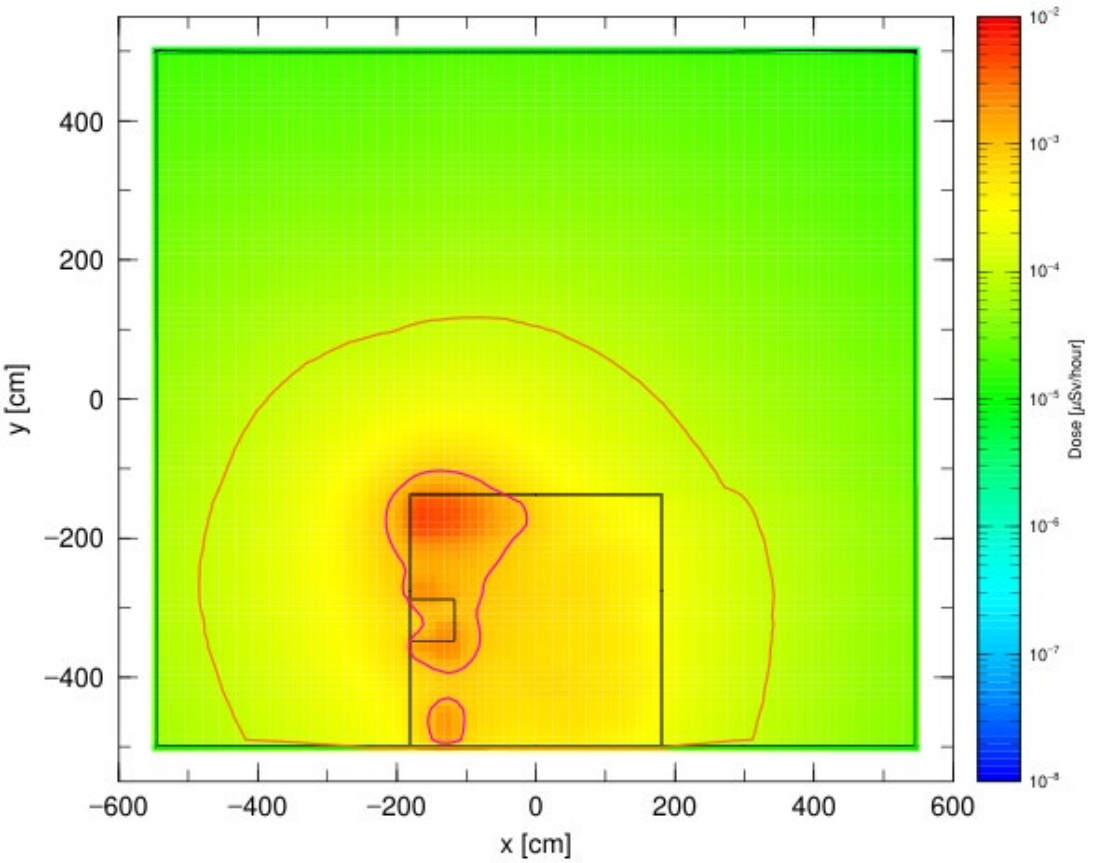


図 6-146　　1 階床から 150cm、計算開始から 180 秒後

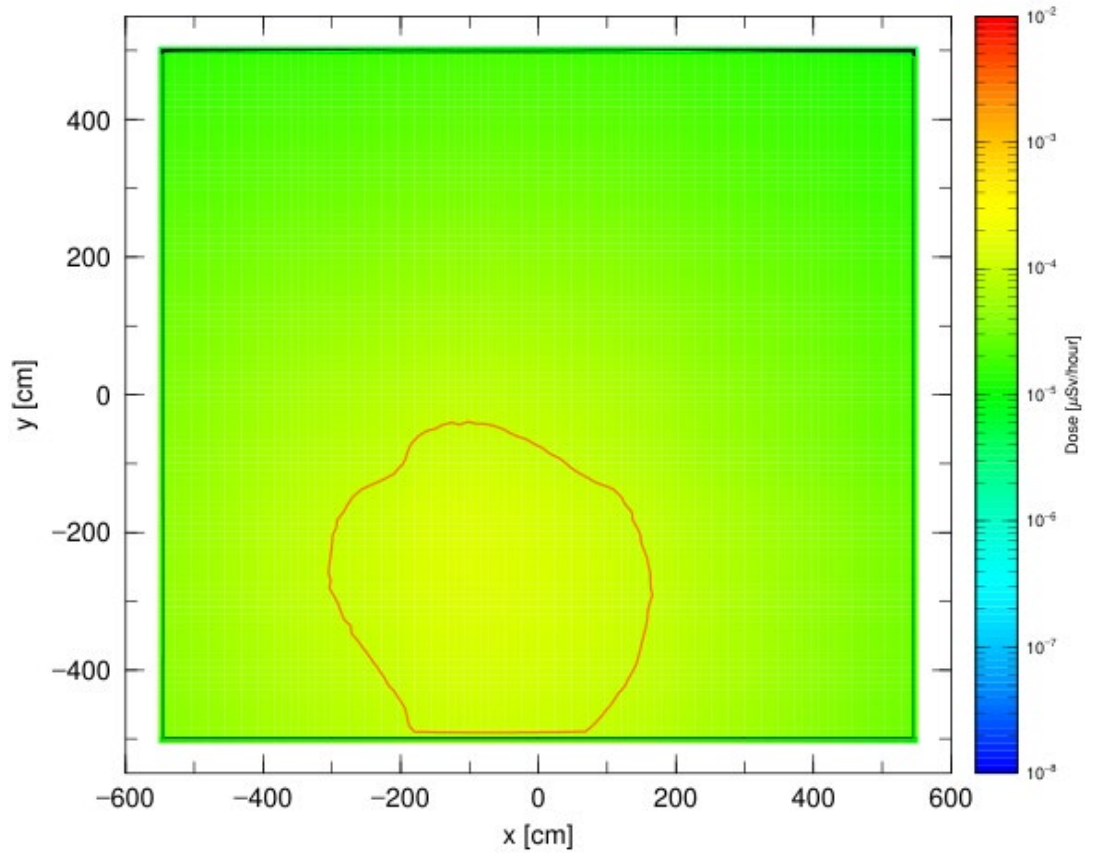


図 6-147　　2 階床から 150cm、計算開始から 180 秒後

(6)　８畳間計算モデル及び線量率分布（障害物①、②、③及び④が有る場合）

建屋内に８畳の部屋を作成し、その中に線源を設定して線量率を計算した。6.3.2 ② (6)に示した OpenFOAM の各タイムステップの粒子分布をもとに、PHITS で求めた 1 階床から 50[cm]の線量率分布を図 6-149 から図 6-151 に示す。1 階床から 150[cm]の線量率分布を図 6-152 から図 6-154 に示す。2 階床から 150[cm]の線量率分布を図 6-155 から図 6-157 に示す。

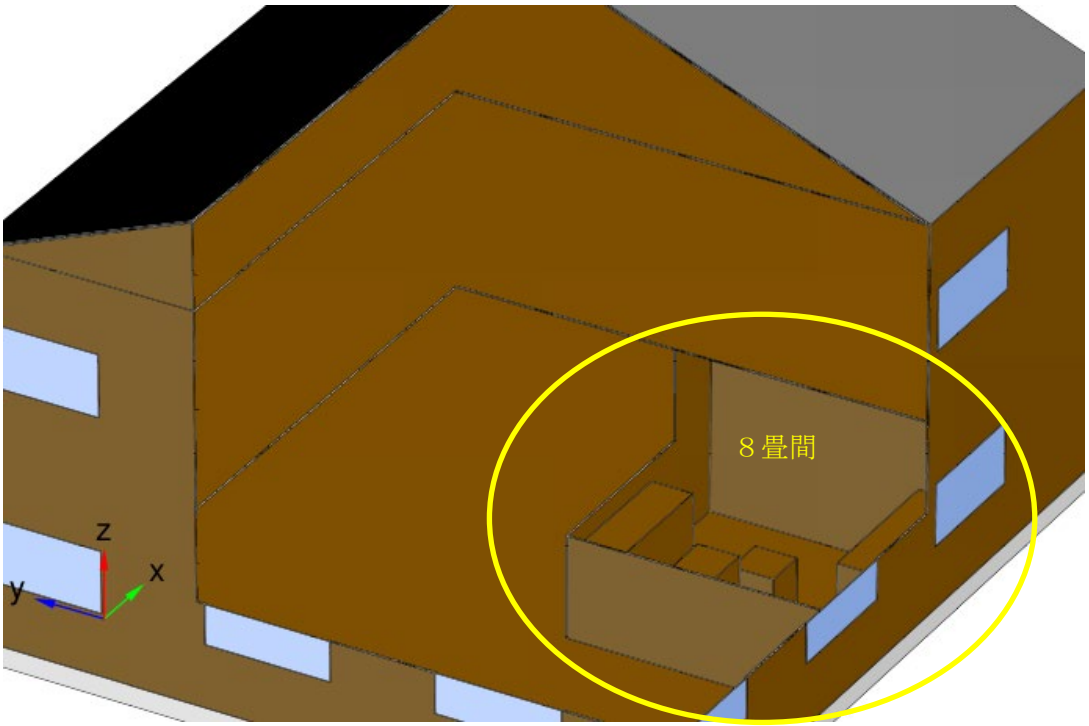


図 6-148　　８畳間（障害物①、②、③及び④が有る場合）

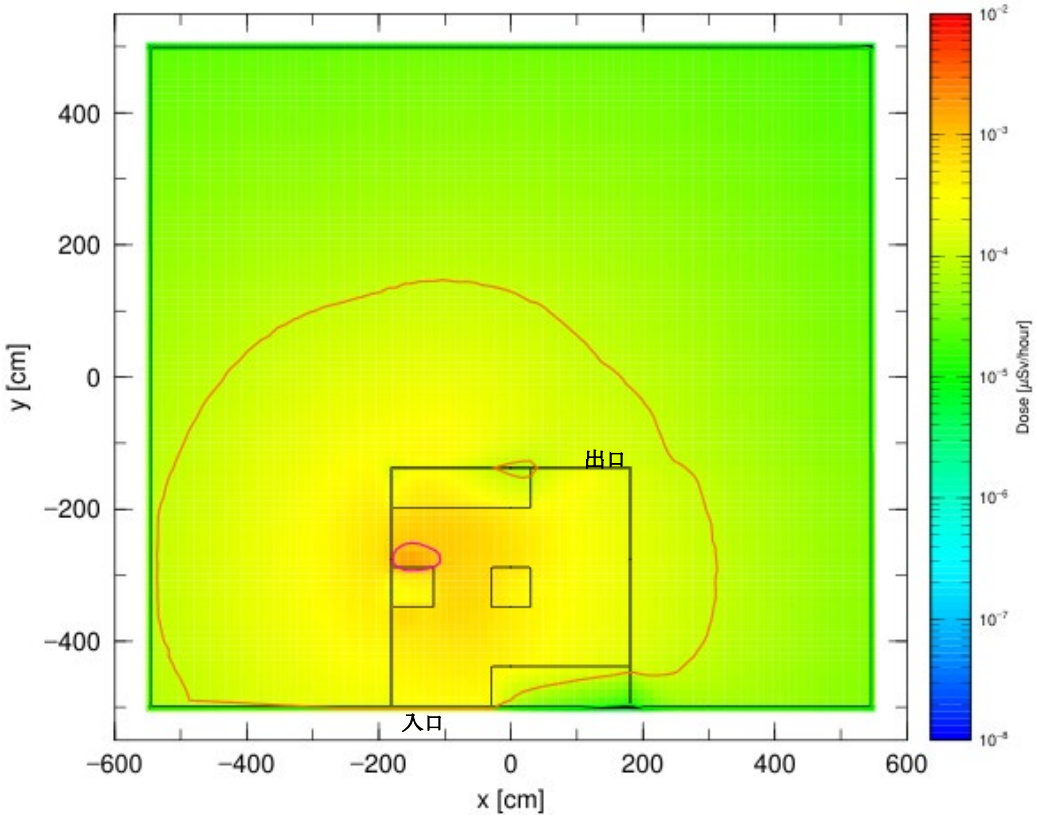


図 6-149　　1 階床から 50cm、計算開始から 90 秒後

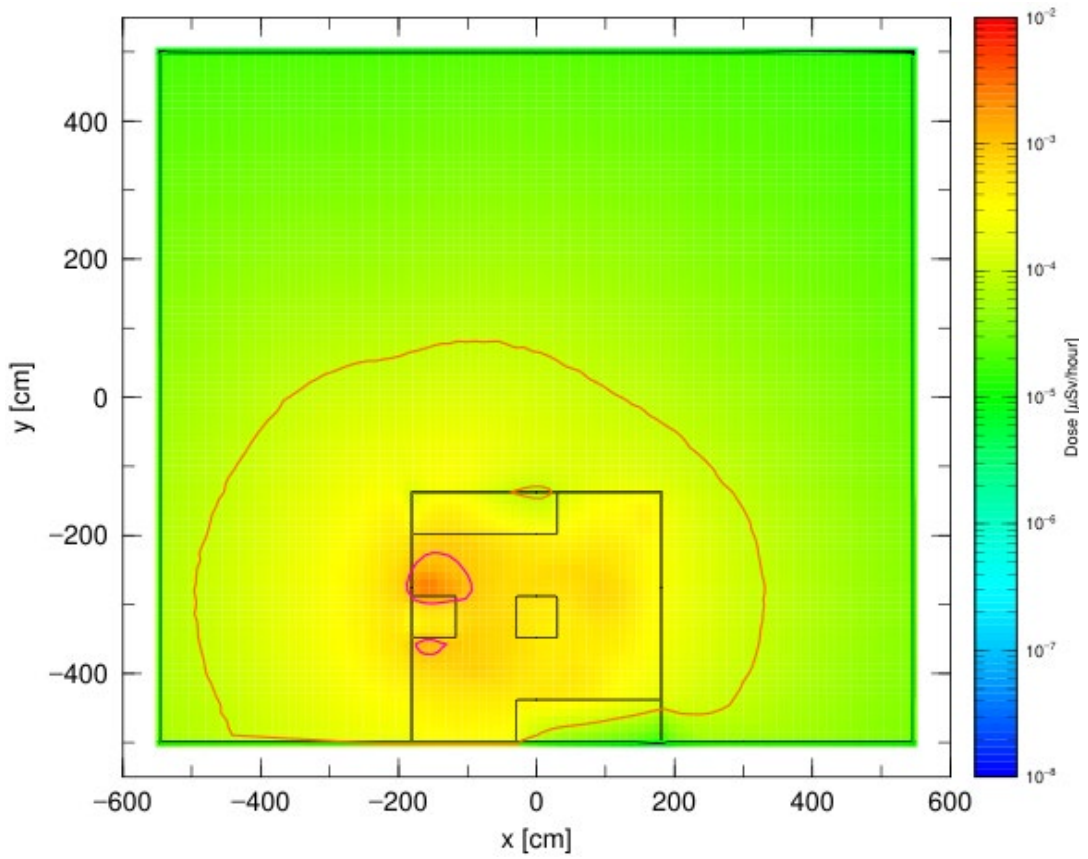


図 6-150　　1 階床から 50cm、計算開始から 120 秒後

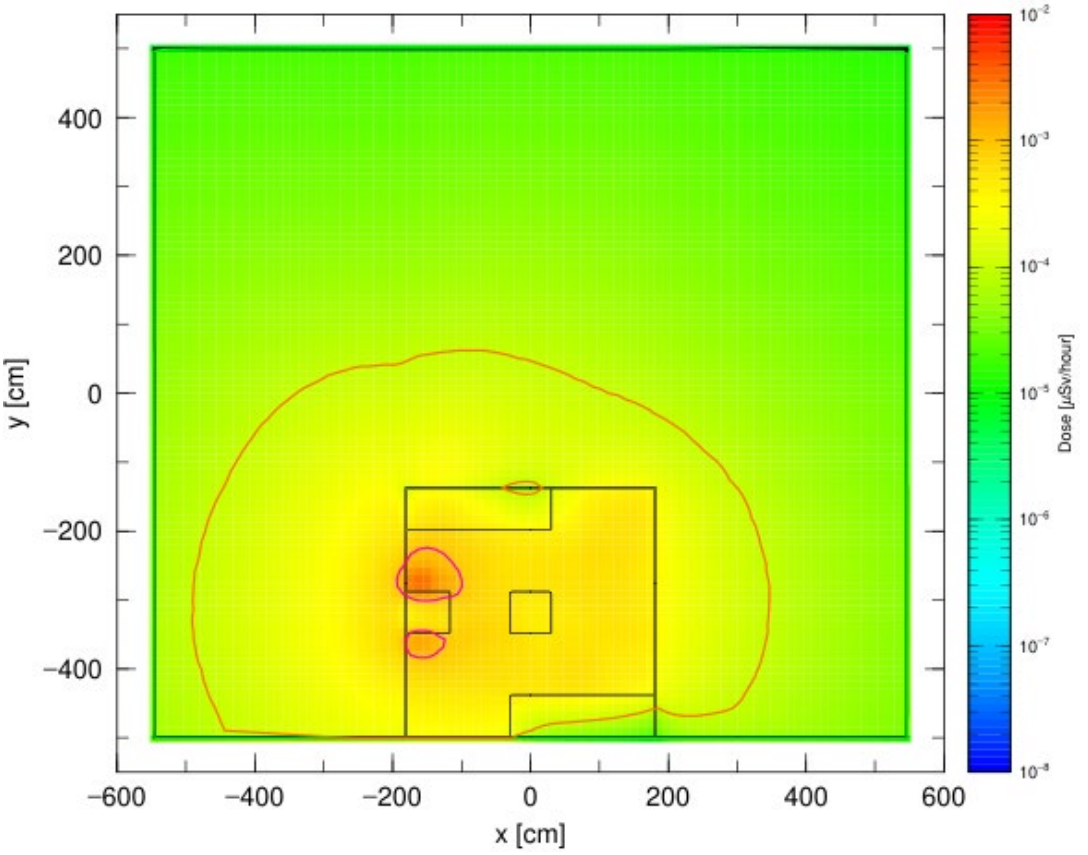


図 6-151　　1 階床から 50cm、計算開始から 150 秒後

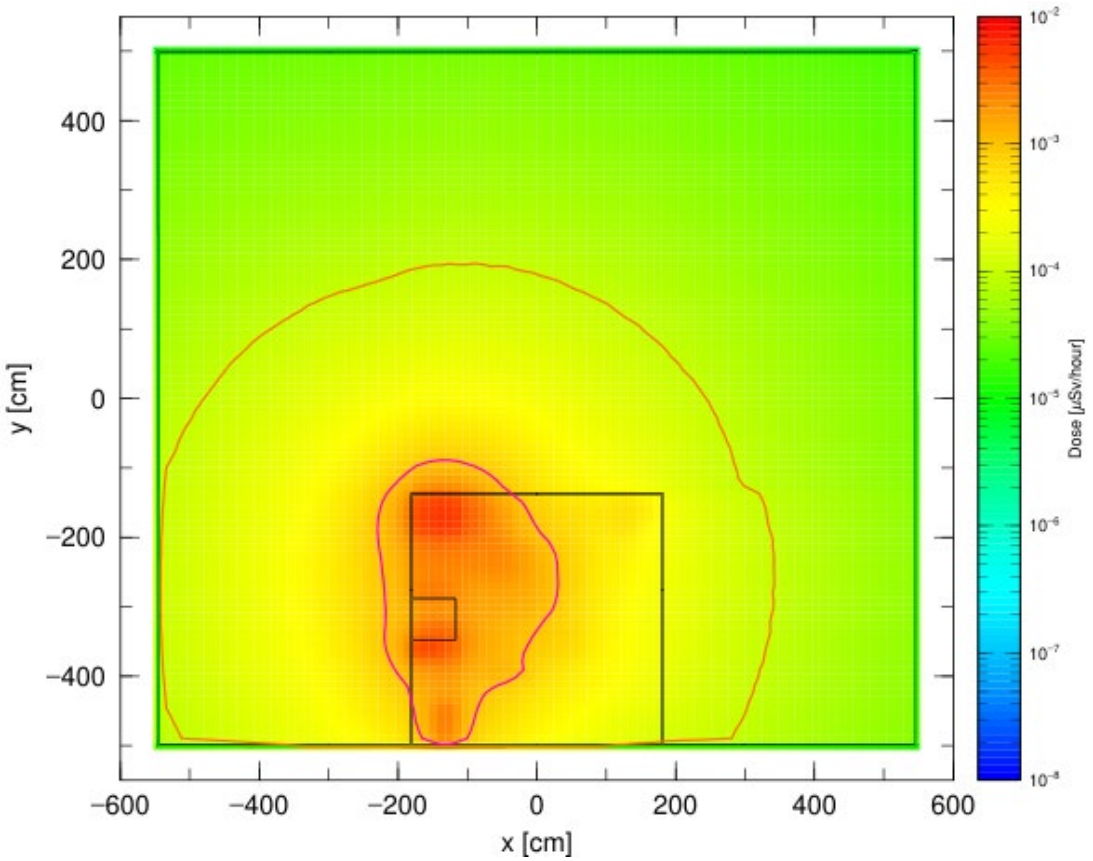


図 6-152　　1 階床から 150cm、計算開始から 90 秒後

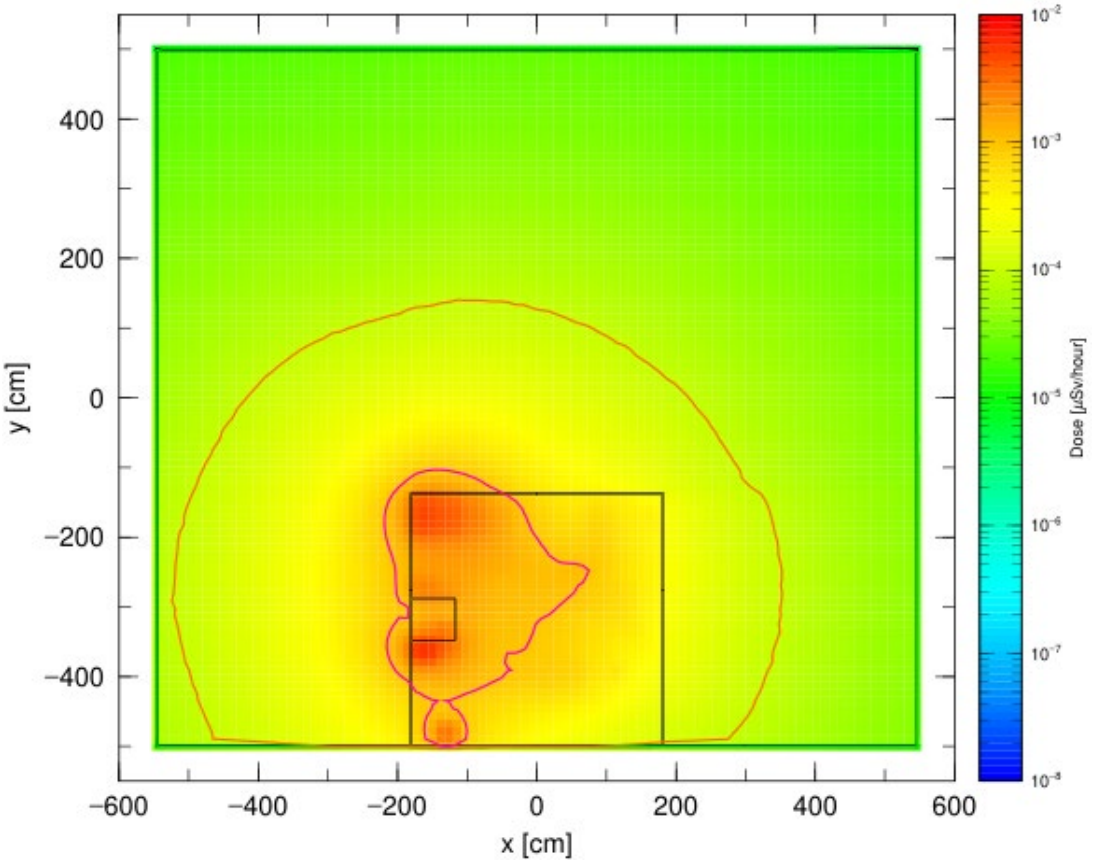


図 6-153　　1 階床から 150cm、計算開始から 120 秒後

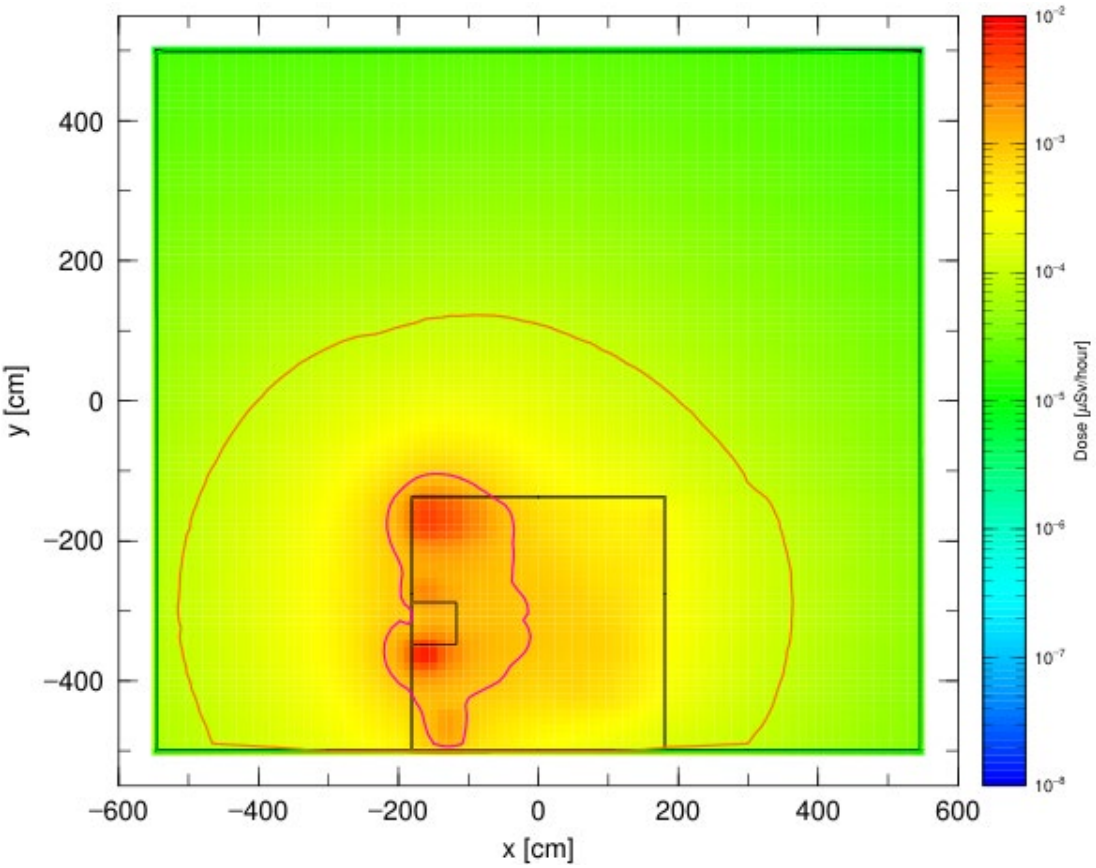


図 6-154　　1 階床から 150cm、計算開始から 150 秒後

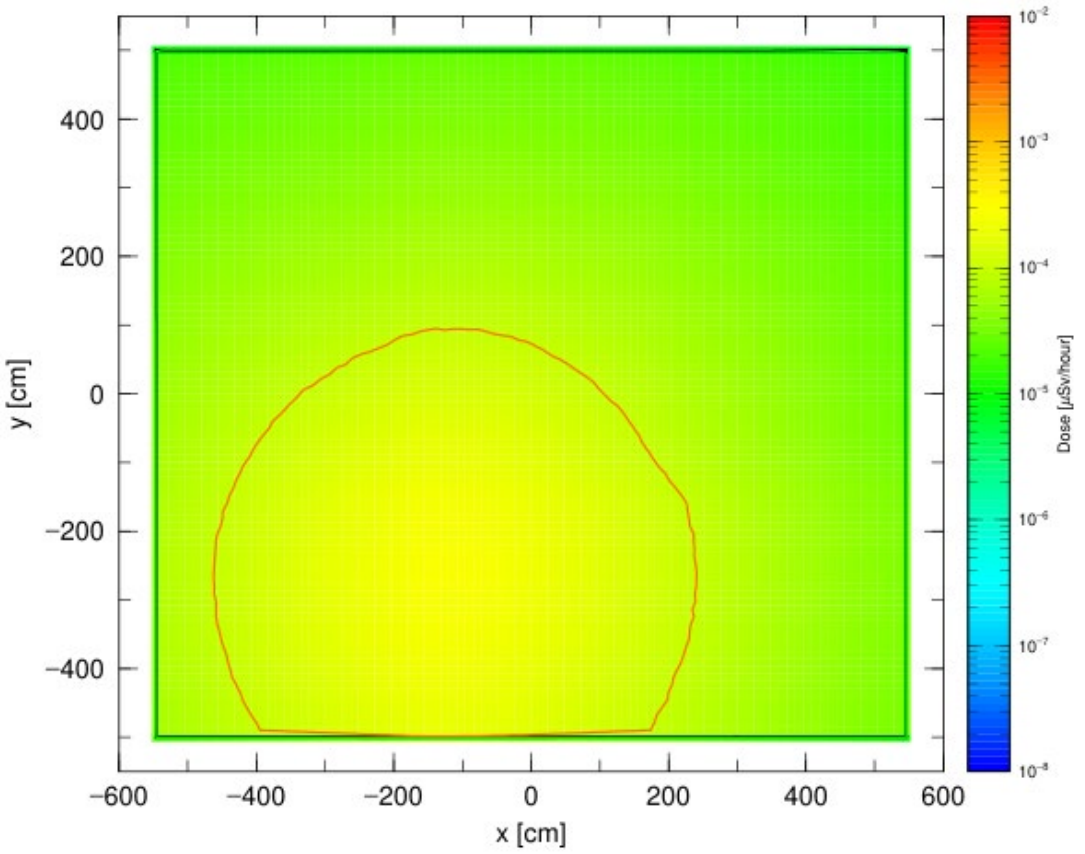


図 6-155　　2 階床から 150cm、計算開始から 90 秒後

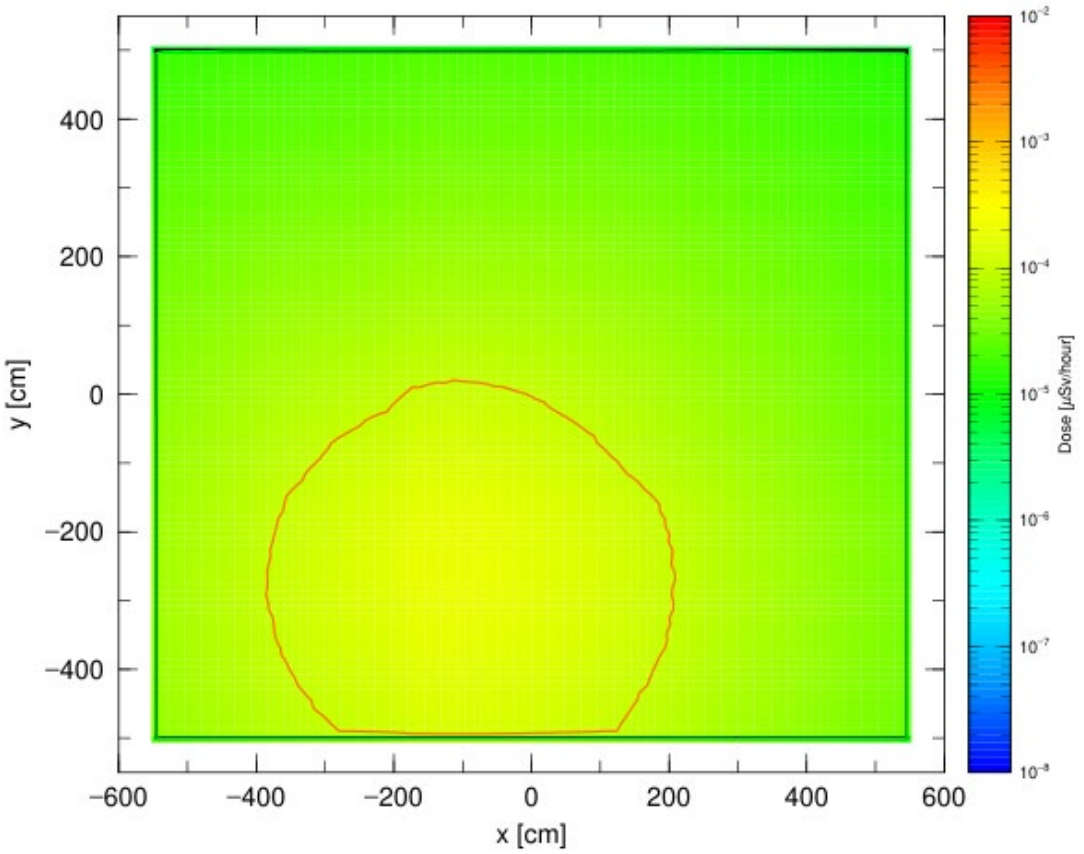


図 6-156　　2 階床から 150cm、計算開始から 120 秒後

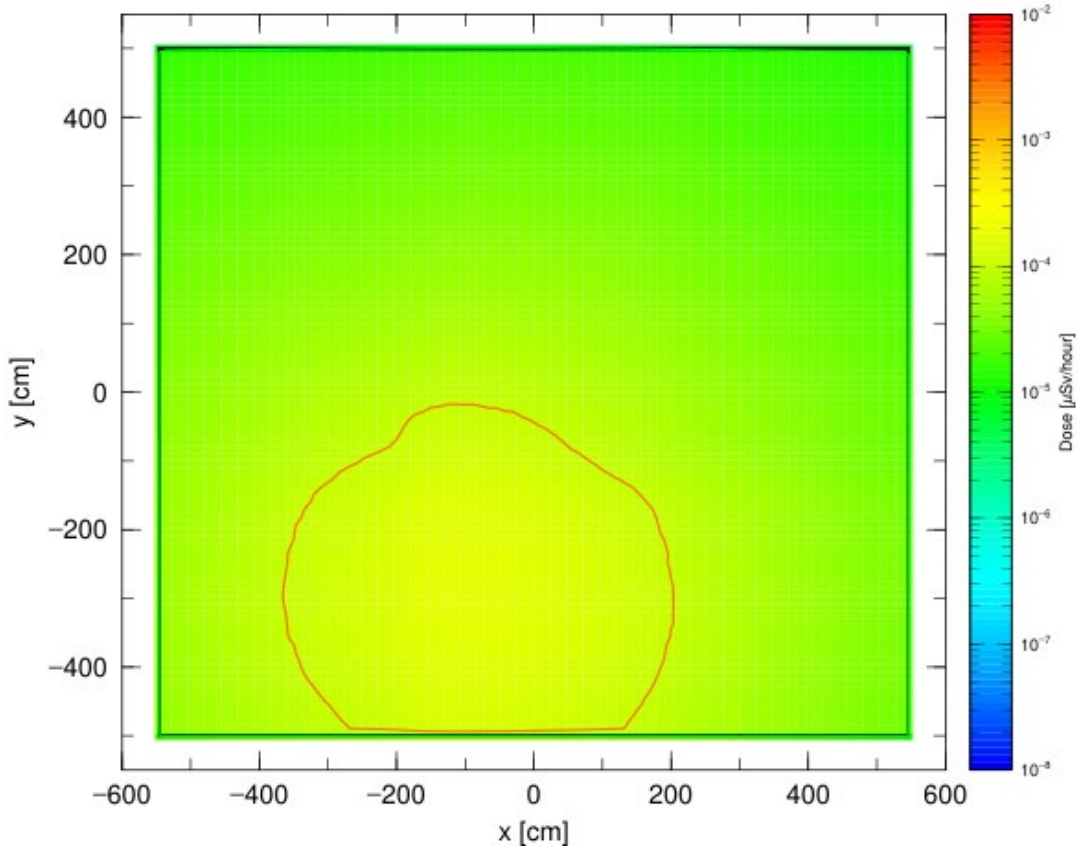


図 6-157　　2 階床から 150cm、計算開始から 150 秒後

(7) １０畳間計算モデル及び線量率分布

建屋内に１０畳の部屋を作成し、その中に線源を設定して線量率を計算した。6.3.2 ③ (2)に示した OpenFOAM のタイムステップ（220[sec]）の粒子分布をもとに、PHITS で求めた 1 階床から 50[cm]の線量率分布を図 6-159 に示す。1 階床から 150[cm]の線量率分布を図 6-160 に示す。2 階床から 150[cm]の線量率分布を図 6-161 に示す。

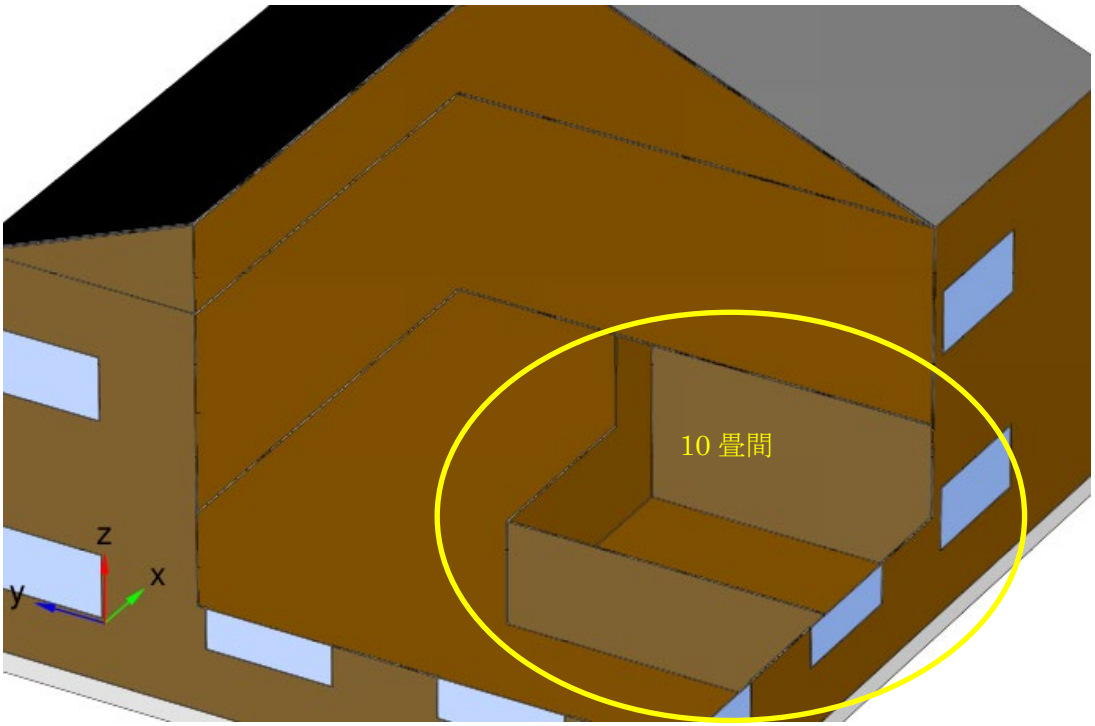


図 6-158　　１０畳間モデル

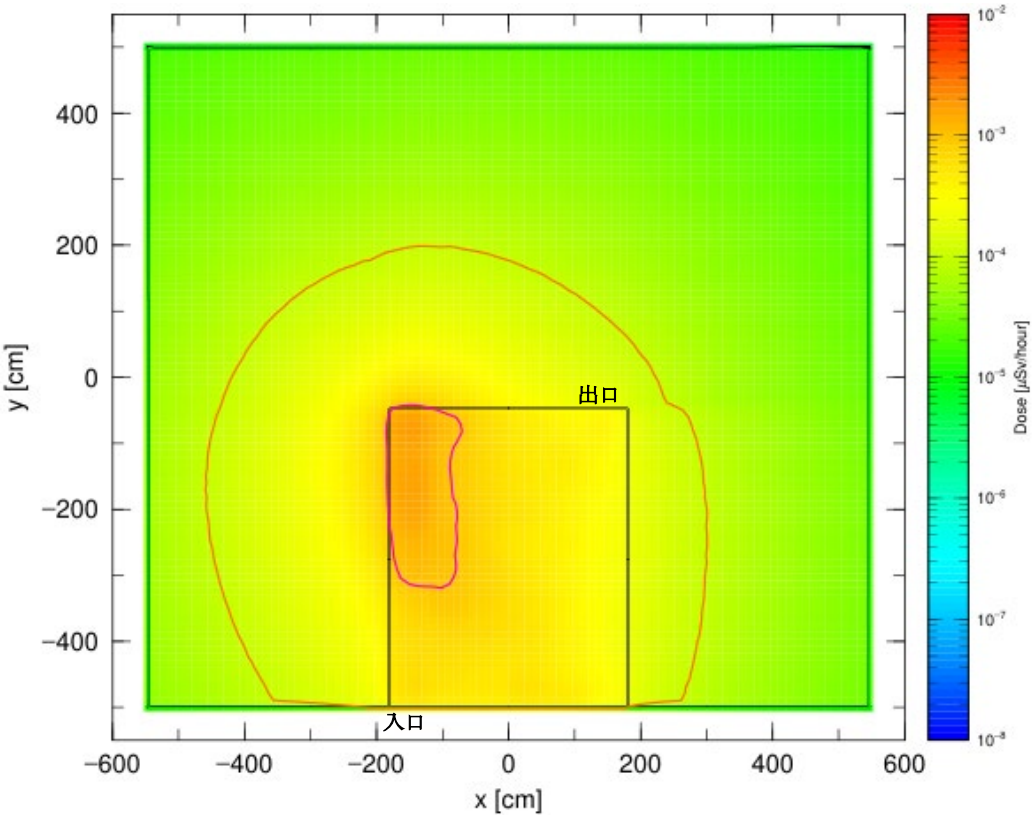


図 6-159　　1 階床から 50cm、計算開始から 220 秒後

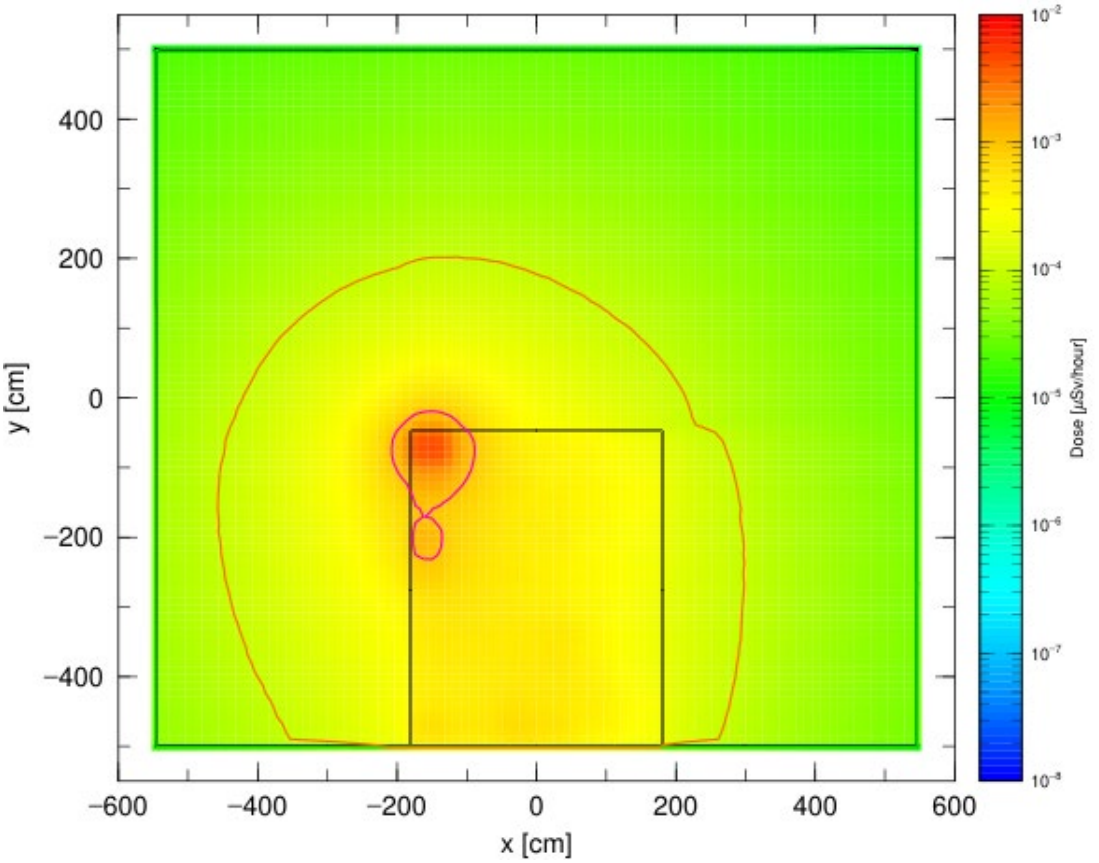


図 6-160　　1 階床から 150cm、計算開始から 220 秒後

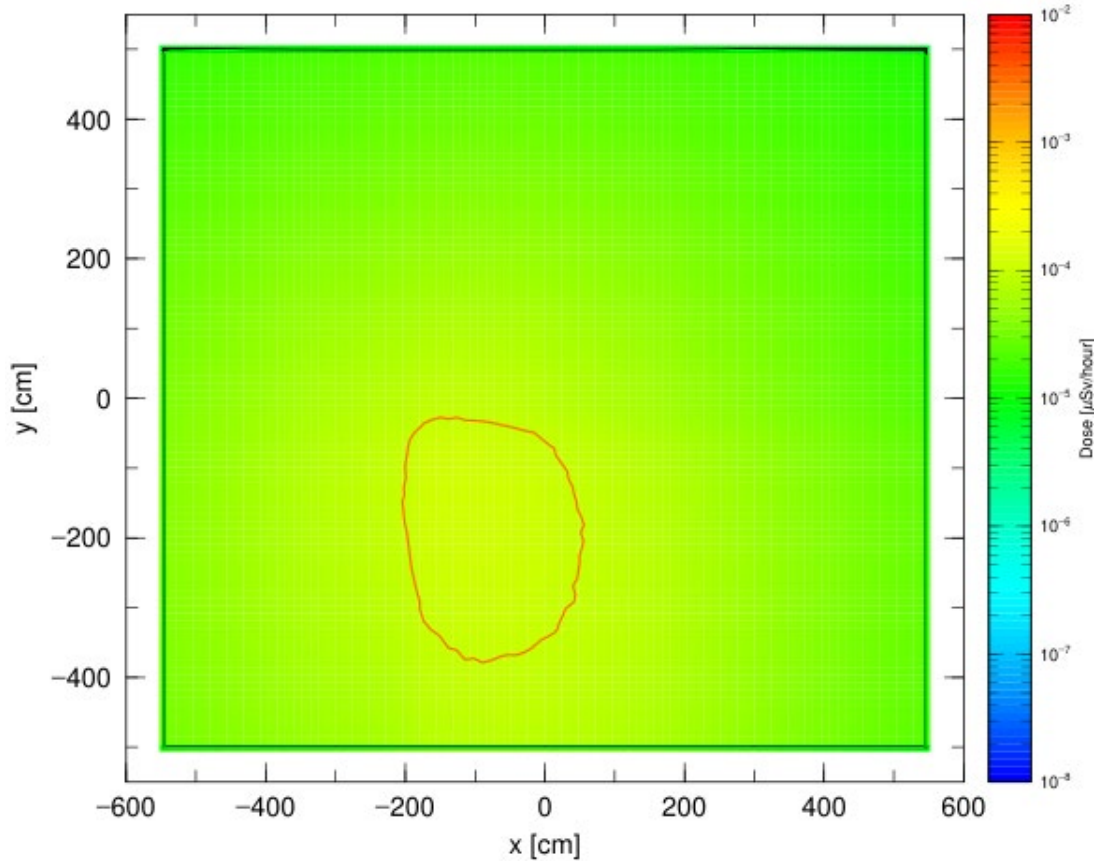


図 6-161　　2 階床から 150cm、計算開始から 220 秒後

(8)　１０畳間を横に並べた計算モデル及び線量率分布

建屋内に１０畳間を横に並べた部屋を作成し、その中に線源を設定して線量率を計算した。6.3.2 ④ (2) に示した OpenFOAM のタイムステップ（250[sec]）の粒子分布をもとに、PHITS で求めた 1 階床から 50[cm]の線量率分布を図 6-163 に示す。1 階床から 150[cm]の線量率分布を図 6-164 に示す。2 階床から 150[cm]の線量率分布を図 6-165 に示す。

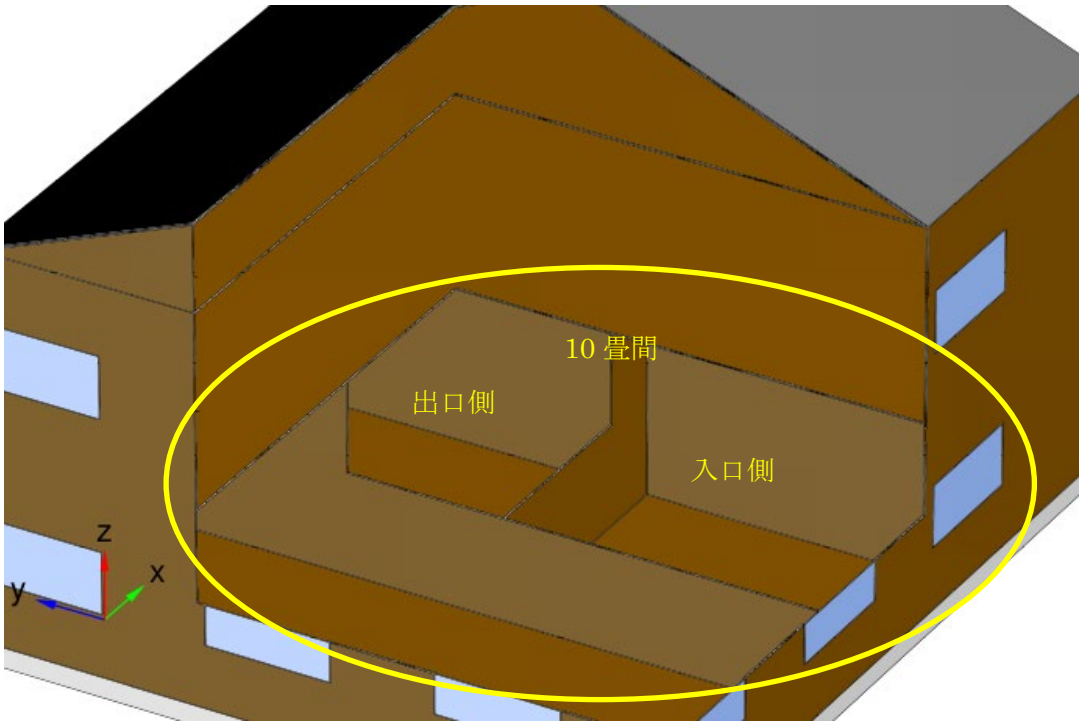


図 6-162　　１０畳間を横に並べたモデル

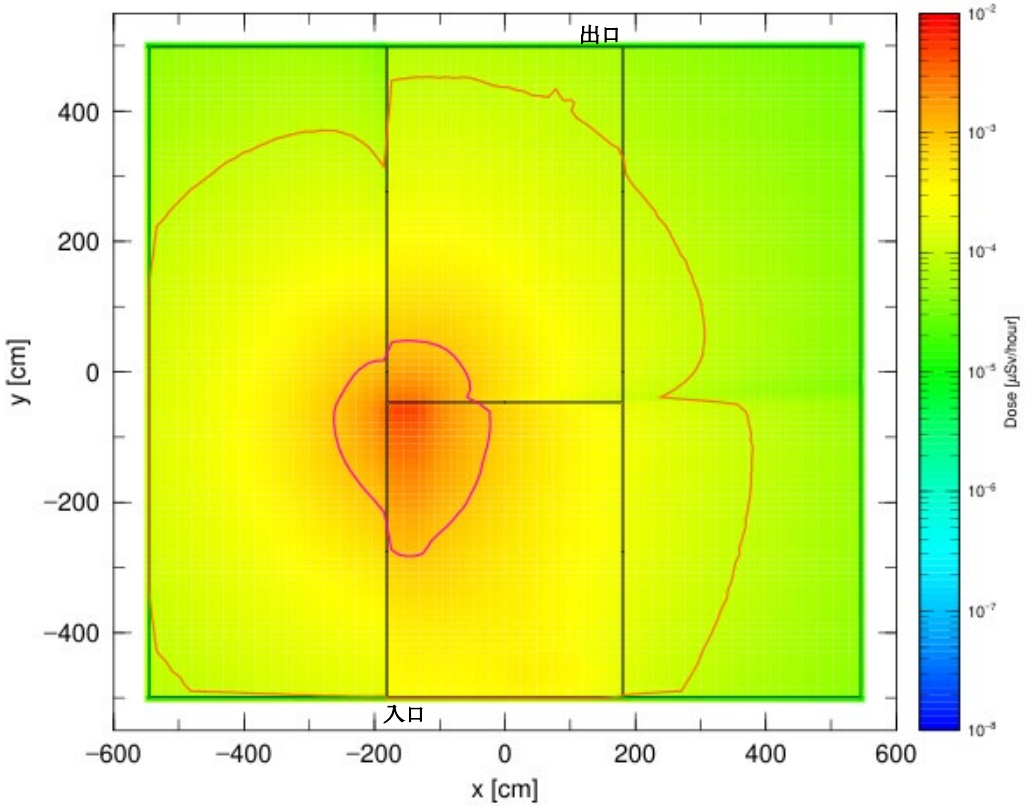


図 6-163　　1 階床から 50cm、計算開始から 250 秒後

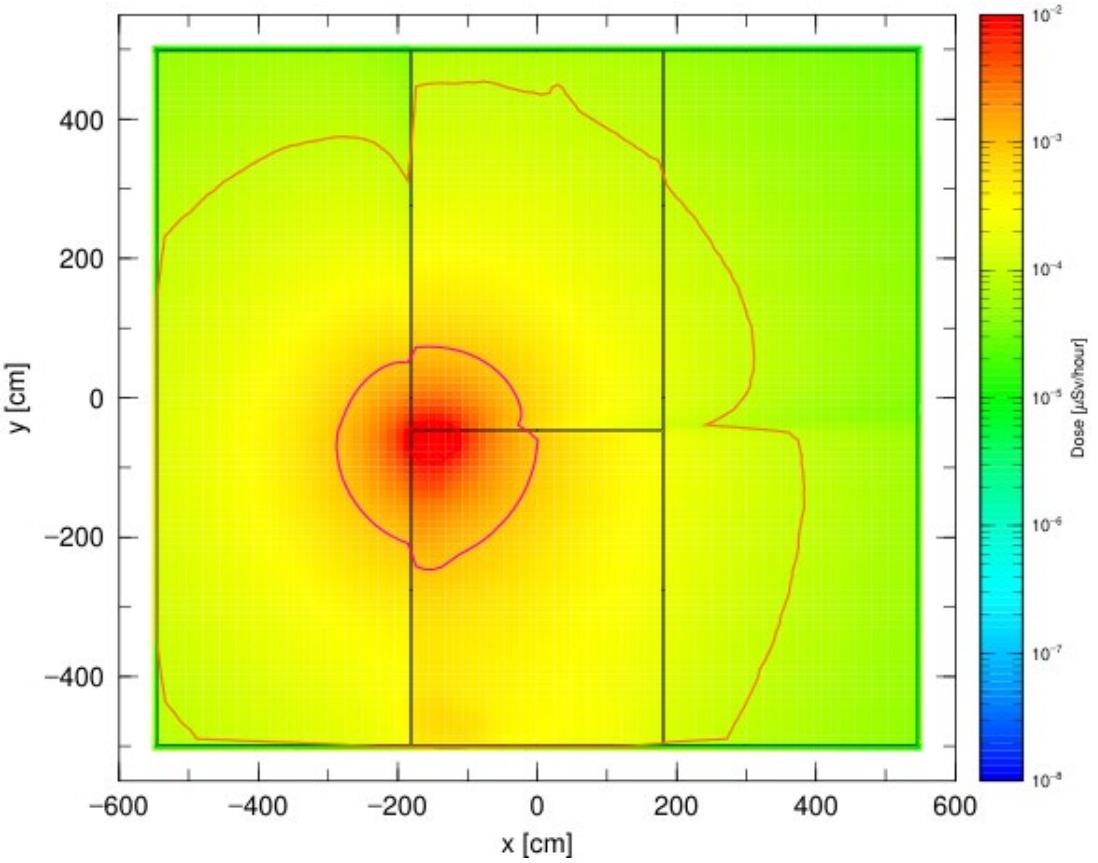


図 6-164　　1 階床から 150cm、計算開始から 250 秒後

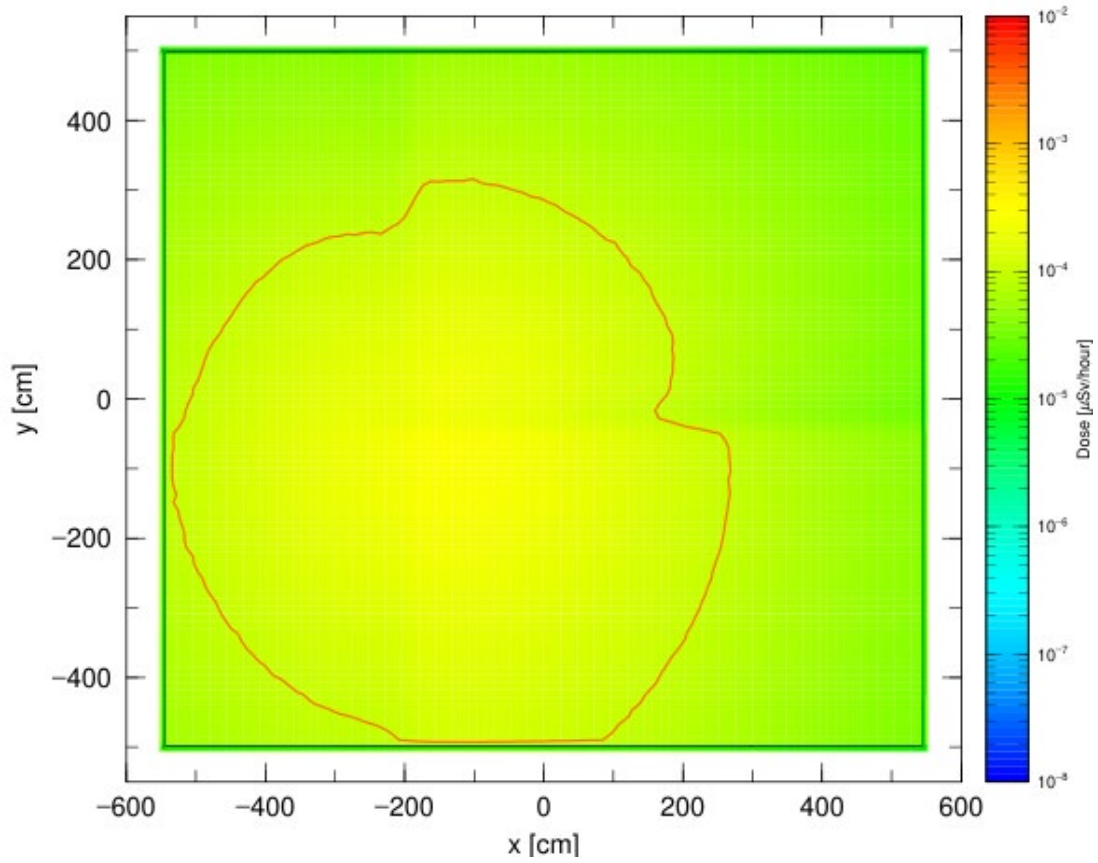


図 6-165　　2 階床から 150cm、計算開始から 250 秒後

(9)　１０畳間を縦に重ねた計算モデル及び線量率分布

建屋内に１０畳間を縦に重ねた部屋を作成し、その中に線源を設定して線量率を計算した。6.3.2 ⑤(2)に示した OpenFOAM のタイムステップ（230[sec]）の粒子分布をもとに、PHITS で求めた 1 階床から 50[cm]の線量率分布を図 6-167 に示す。1 階床から 150[cm]の線量率分布を図 6-168 に示す。2 階床から 150[cm]の線量率分布を図 6-169 に示す。

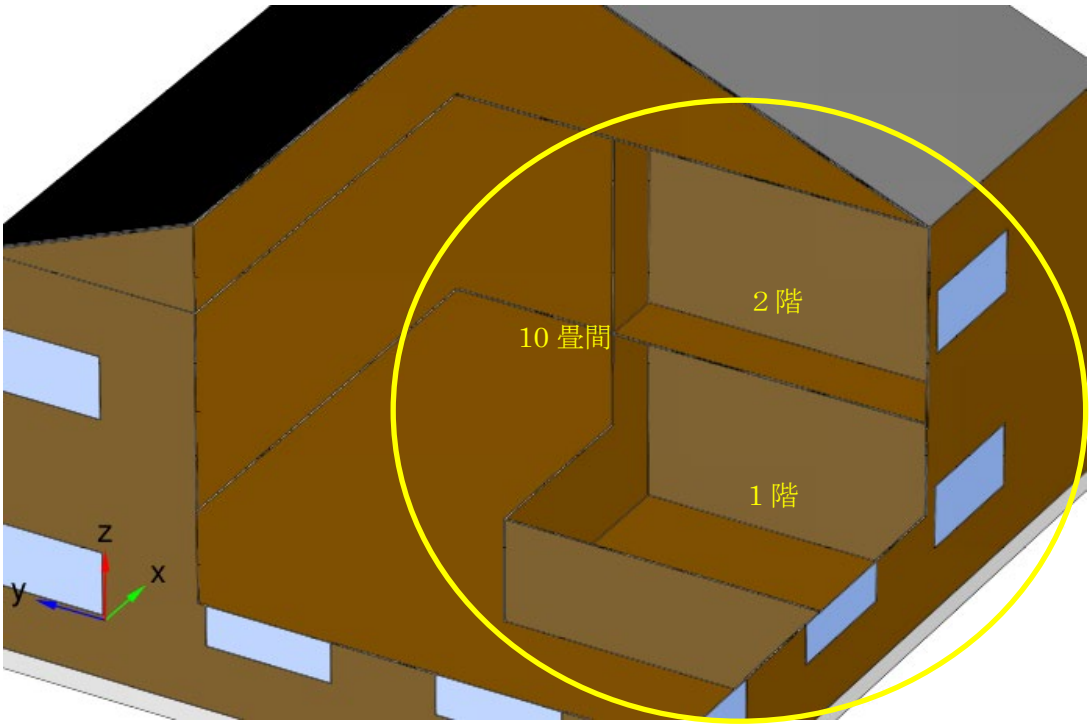


図 6-166　　１０畳間を縦に重ねたモデル

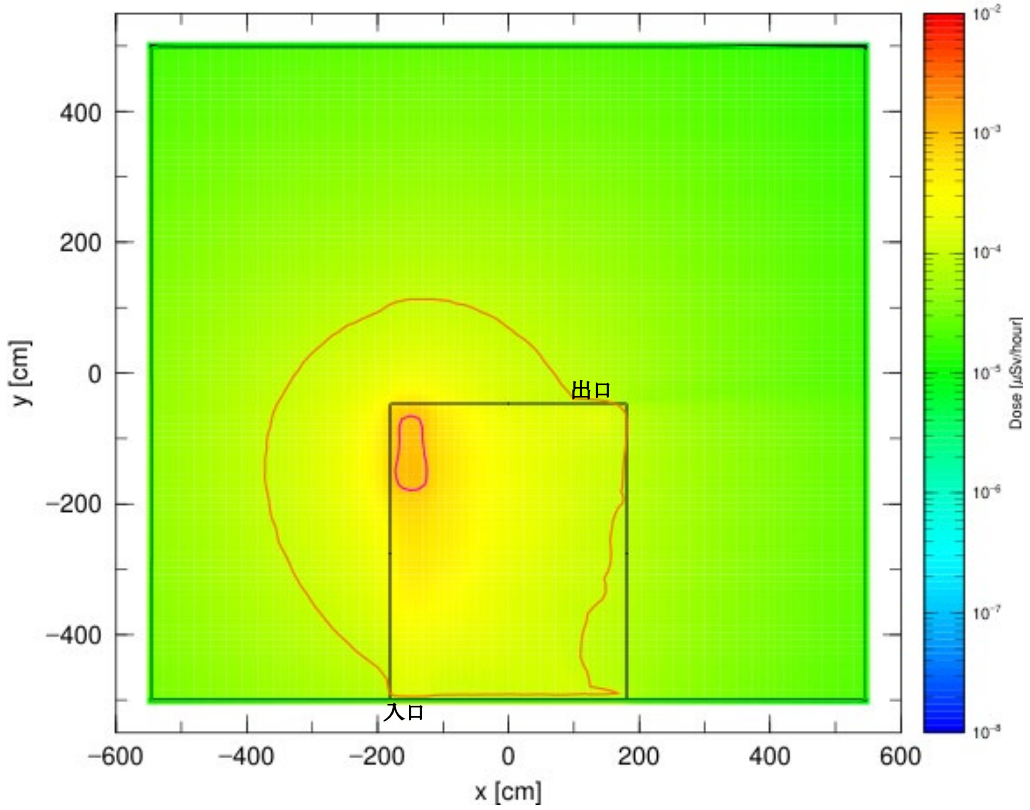


図 6-167　　1 階床から 50cm、計算開始から 230 秒後

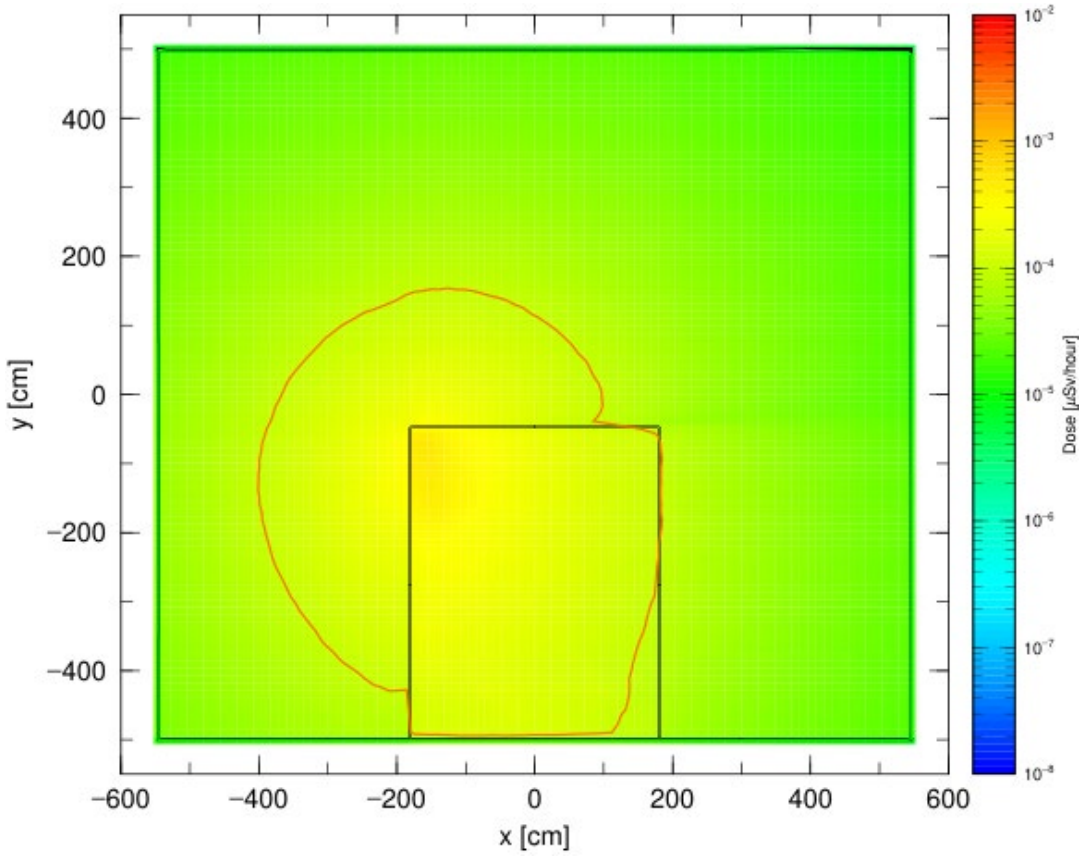


図 6-168　　1 階床から 150cm、計算開始から 230 秒後

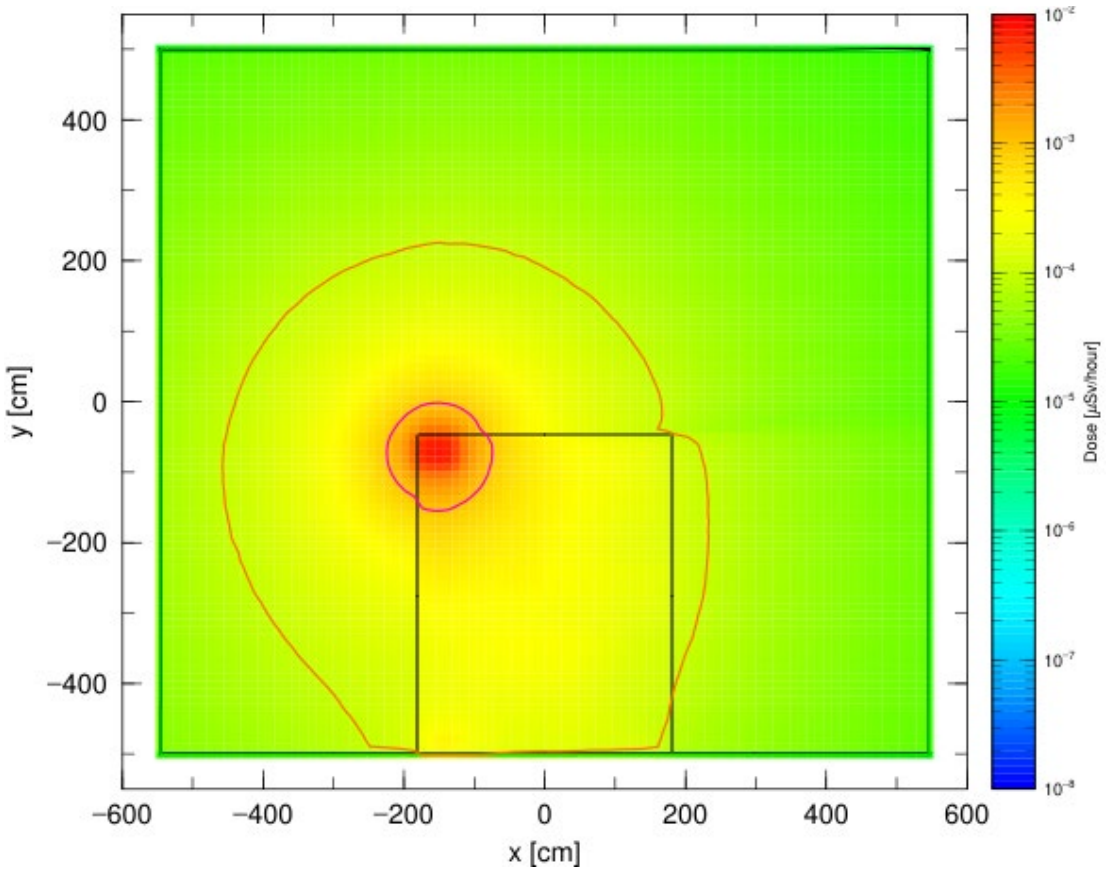


図 6-169　　2 階床から 150cm、計算開始から 230 秒後

③ 8畳間2つ分の広さのワンルームの建屋モデルの作成及び計算結果

(1) PHITSの建屋モデル

3D-ADRESで作成された建屋の計算モデルを図 6-170に示す。建屋内部の寸法は、X方向:14.972[m]、Y方向：7.972[m] 、Z方向：5.9466[m]である。

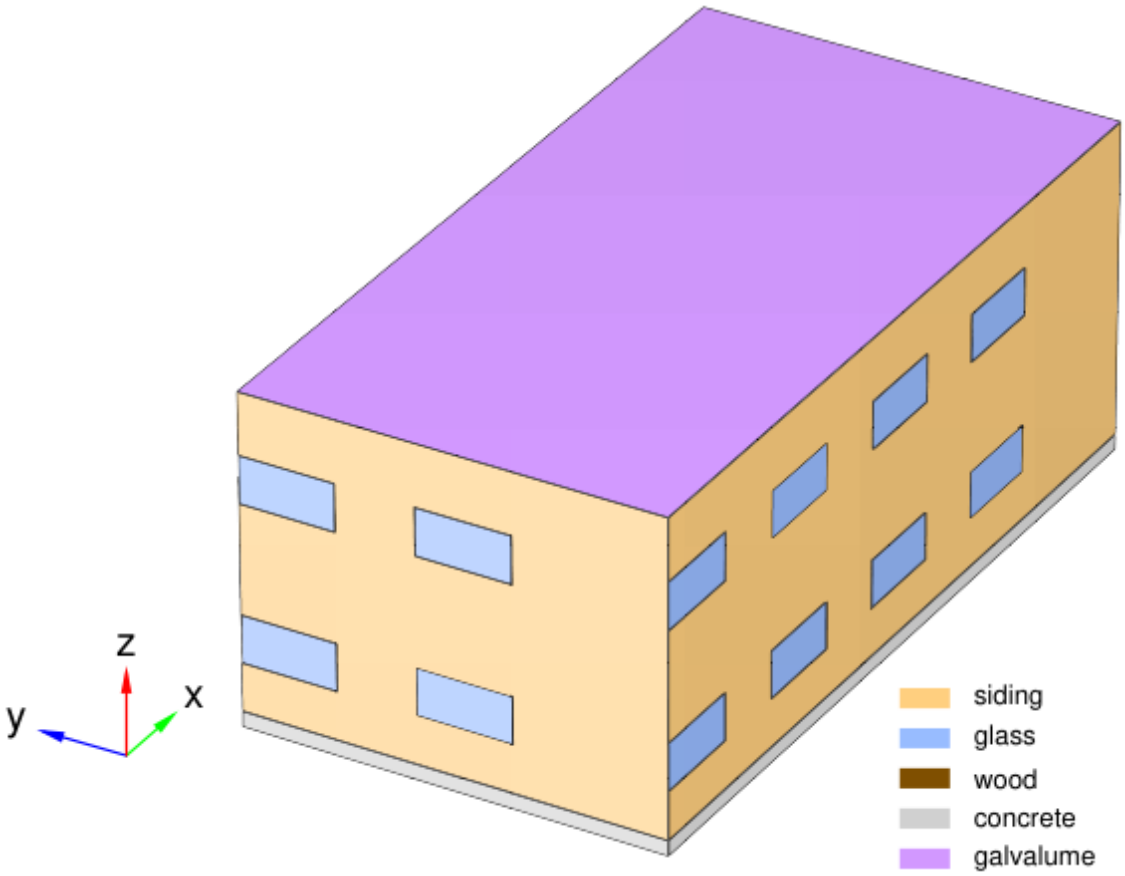


図 6-170　　PHITSの建屋モデル

建屋内に８畳間２つ分の広さのワンルームモデルを作成し、その中に線源を設定して線量率を計算した。

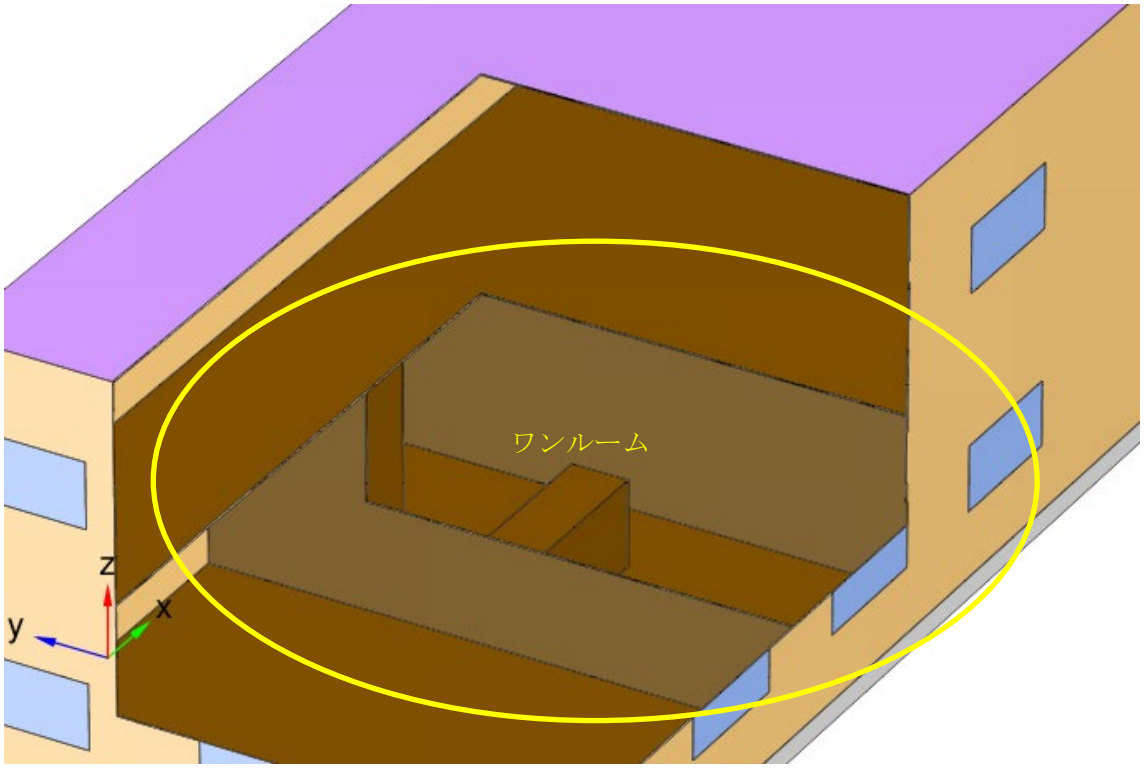


図 6-171　　ワンルームモデル

(2)　８畳間２つ分の広さのワンルームモデルの線量率分布

建屋内に８畳間 2 つ分の広さのワンルームモデルを作成し、その中に線源を設定して線量率を計算した。6.3.2 ⑥ (2)に示した OpenFOAM の各タイムステップの粒子分布をもとに、PHITS で求めた 1 階床から 50[cm]の線量率分布を図 6-172 から図 6-174 に示す。1 階床から 150[cm]の線量率分布を図 6-175 から図 6-177 に示す。2 階床から 150[cm]の線量率分布を図 6-178 から図 6-180 に示す。

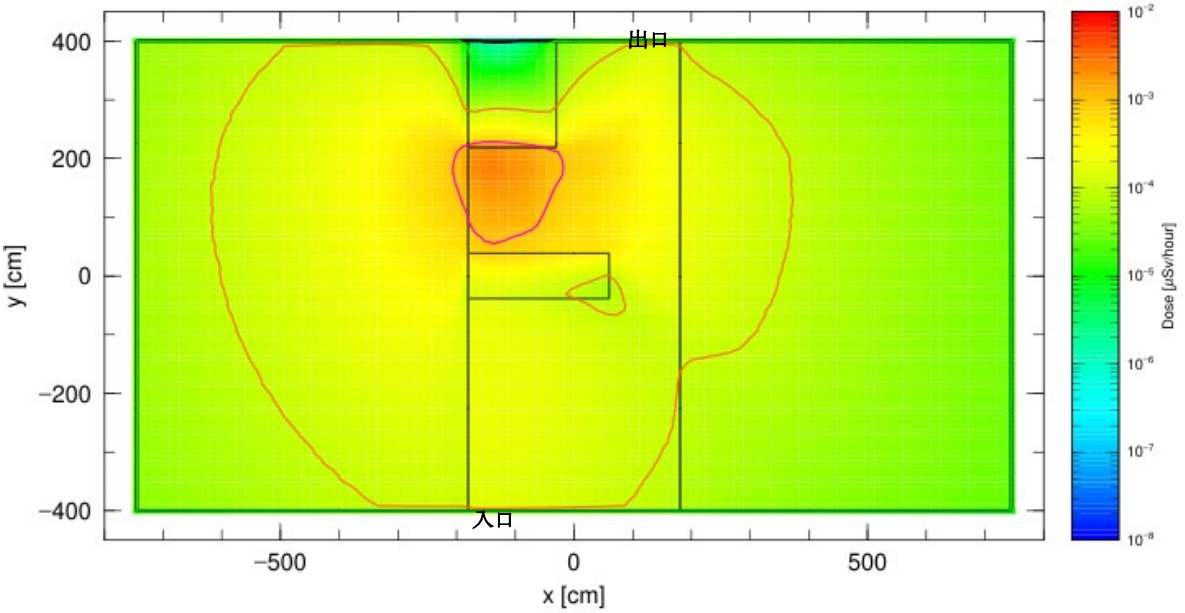


図 6-172　　1 階床から 50cm、計算開始から 90 秒後

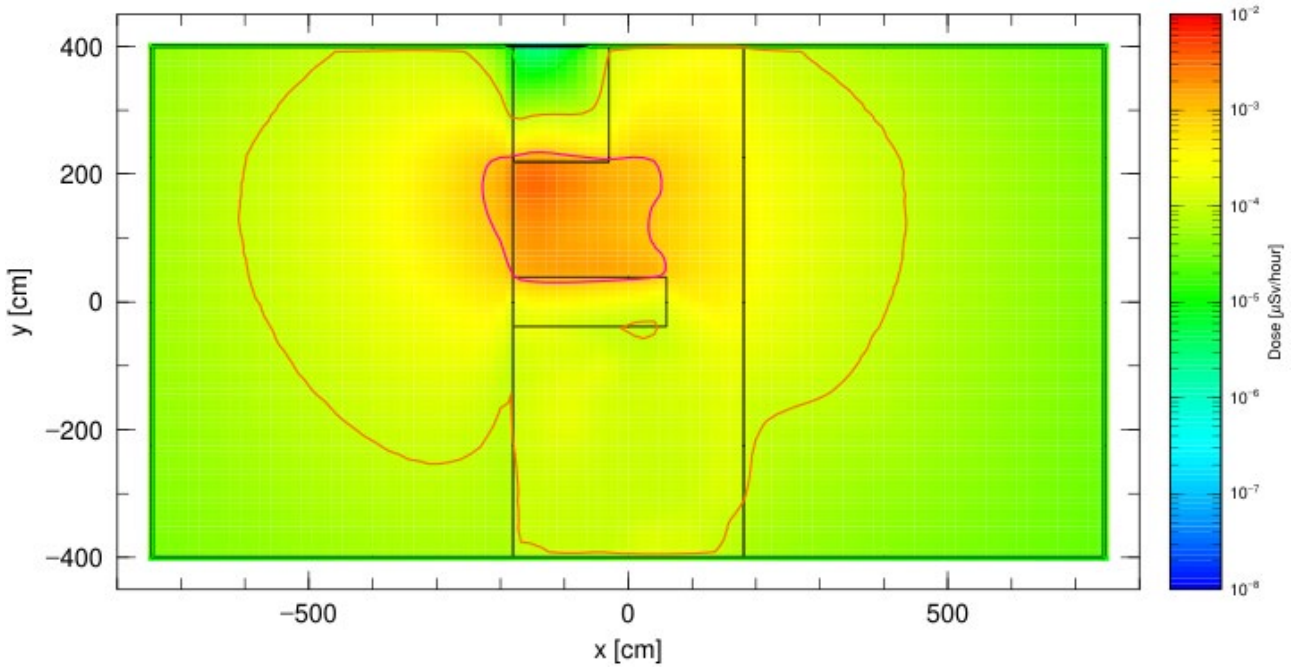


図 6-173　　1 階床から 50cm、計算開始から 180 秒後

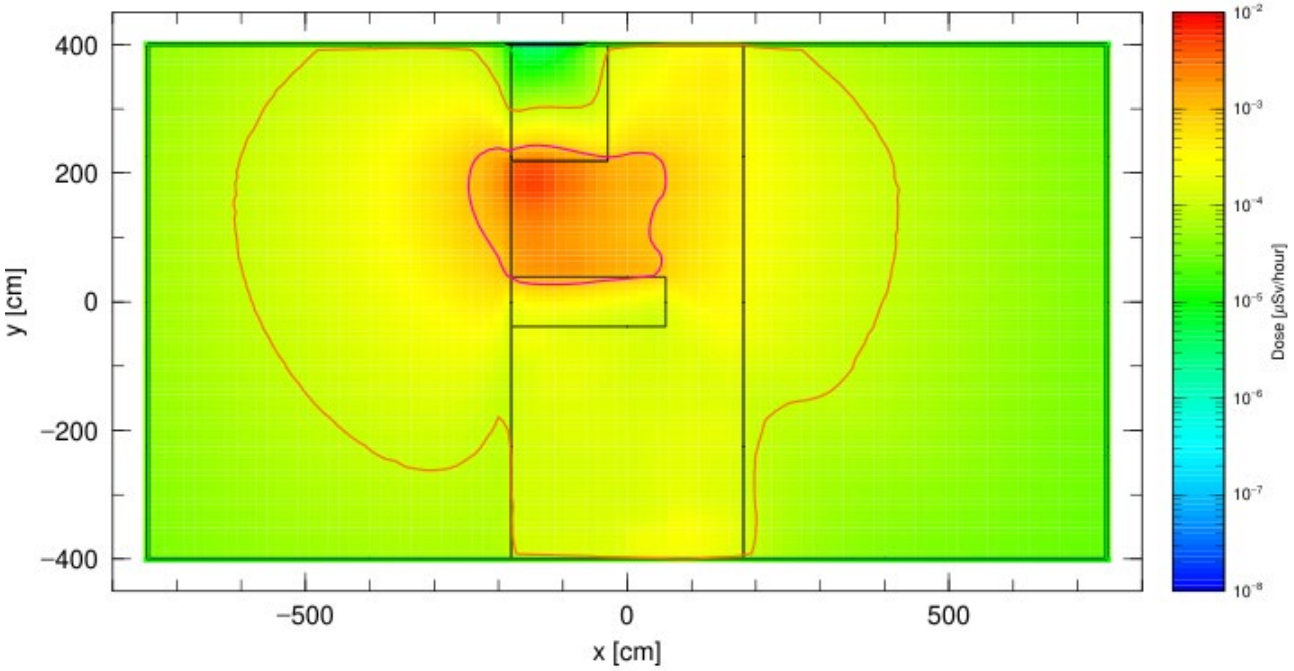


図 6-174　　1 階床から 50cm、計算開始から 270 秒後

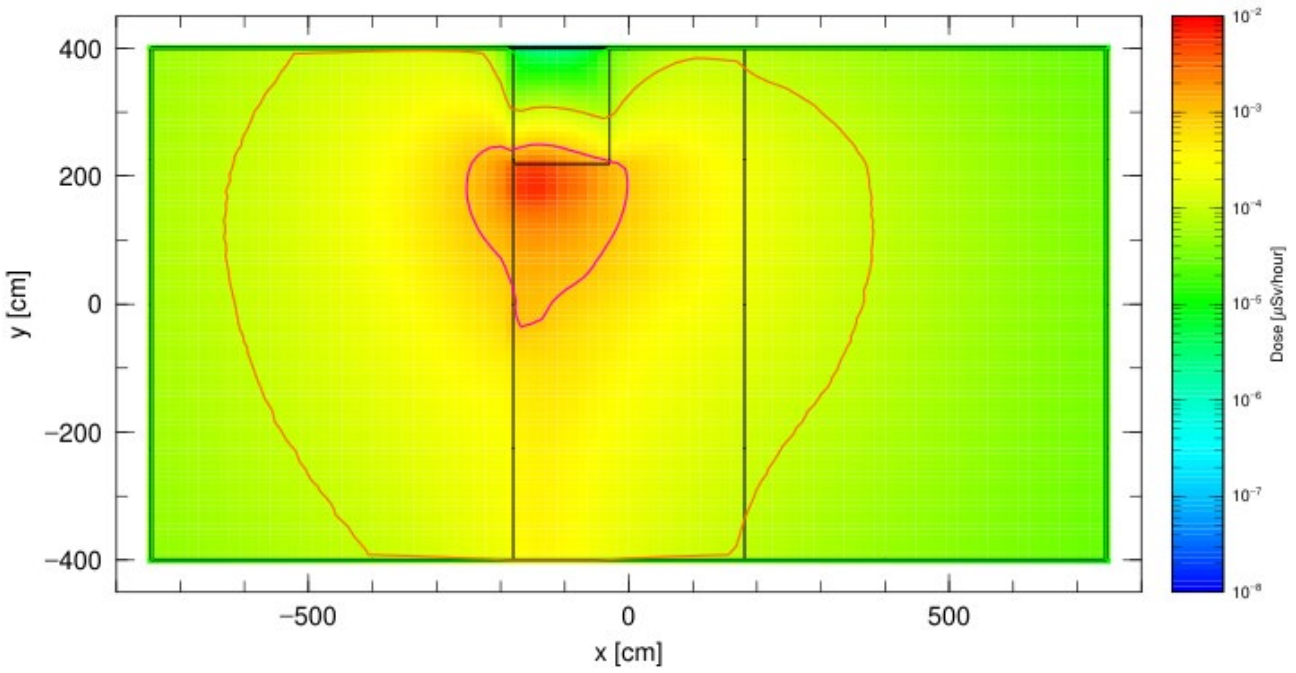


図 6-175　　1 階床から 150cm、計算開始から 90 秒後

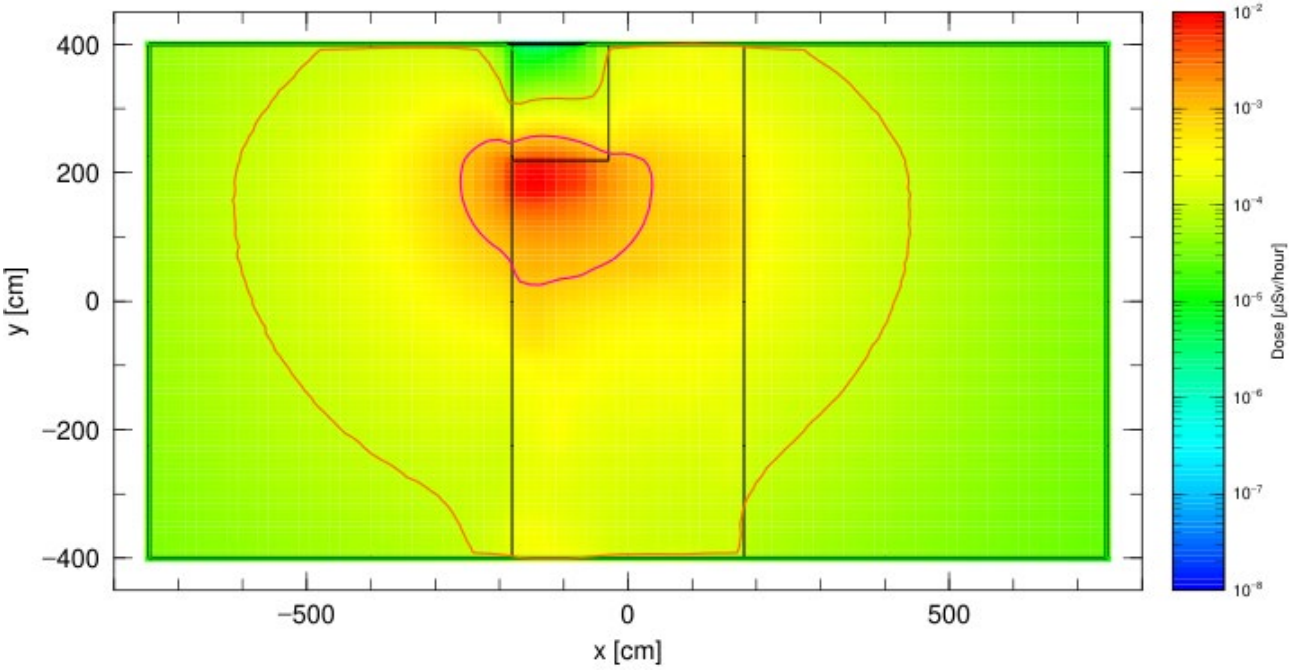


図 6-176　　1 階床から 150cm、計算開始から 180 秒後

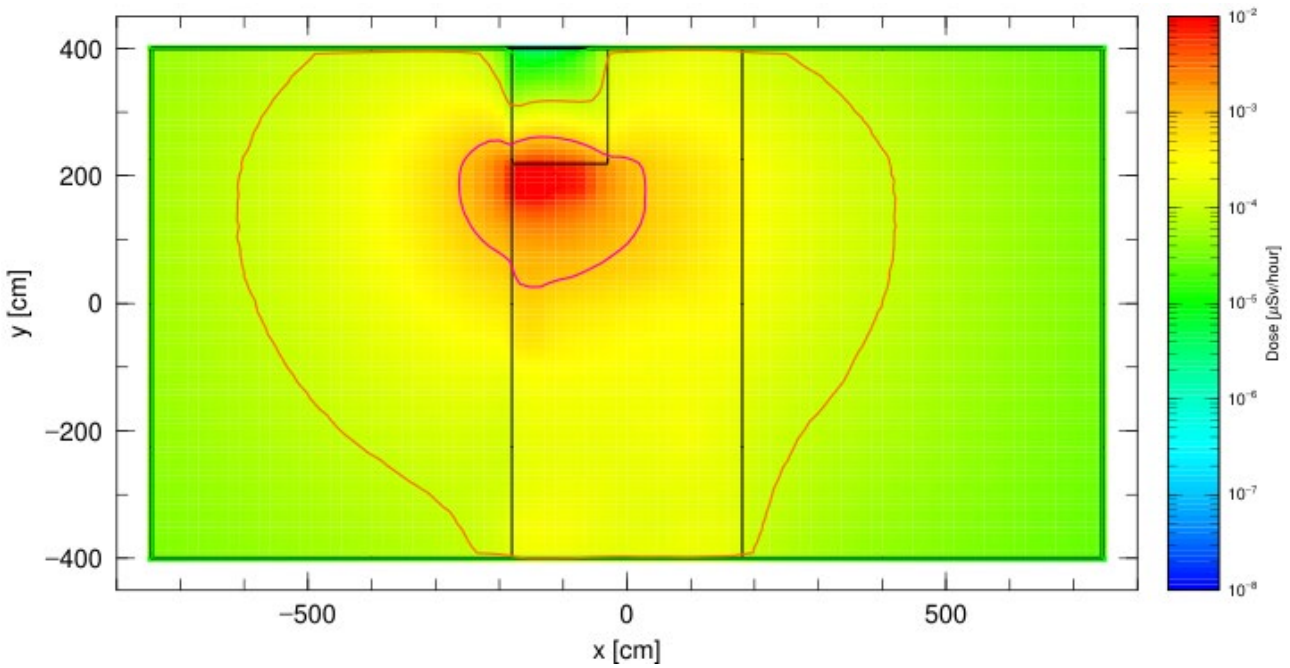


図 6-177　　1 階床から 150cm、計算開始から 270 秒後

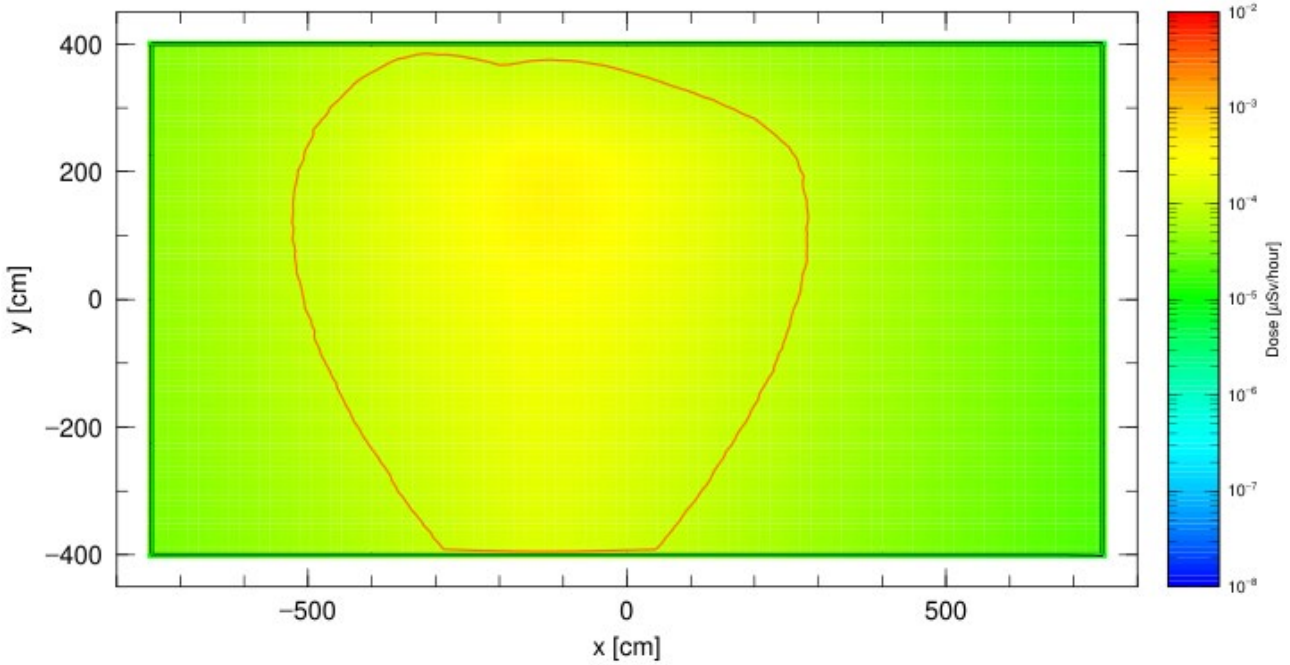


図 6-178　　2 階床から 150cm、計算開始から 90 秒後

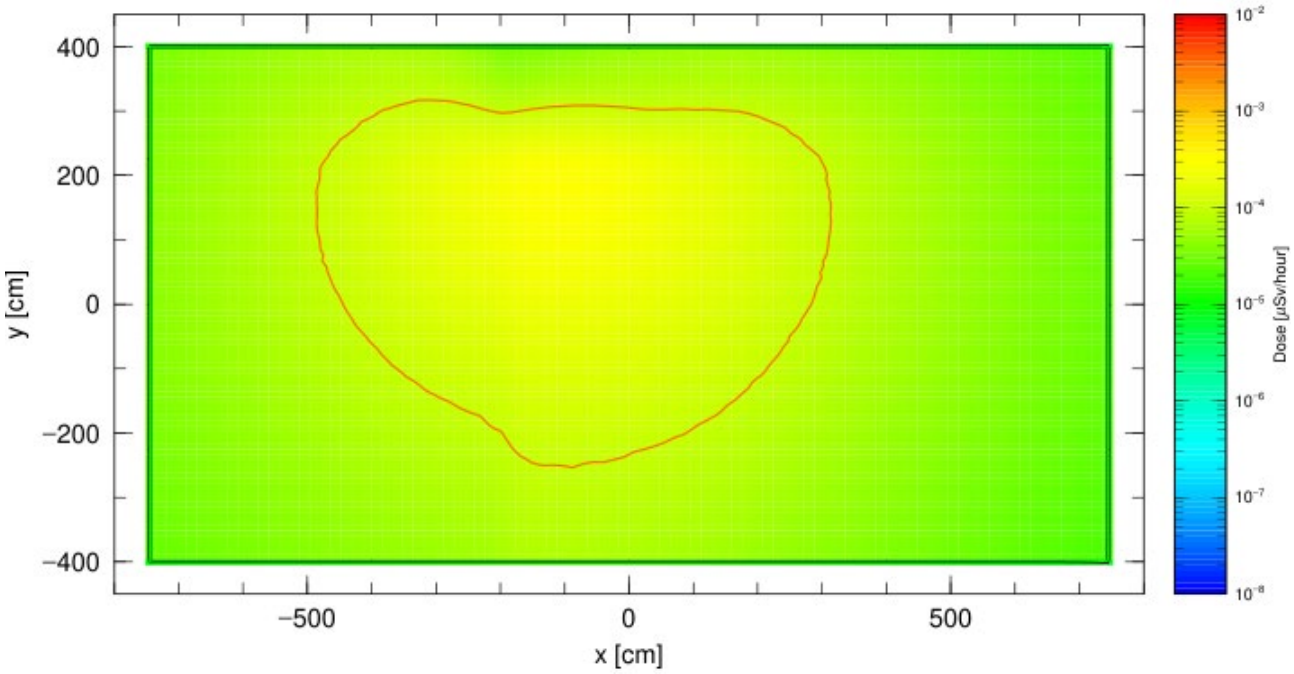


図 6-179　　2 階床から 150cm、計算開始から 180 秒後

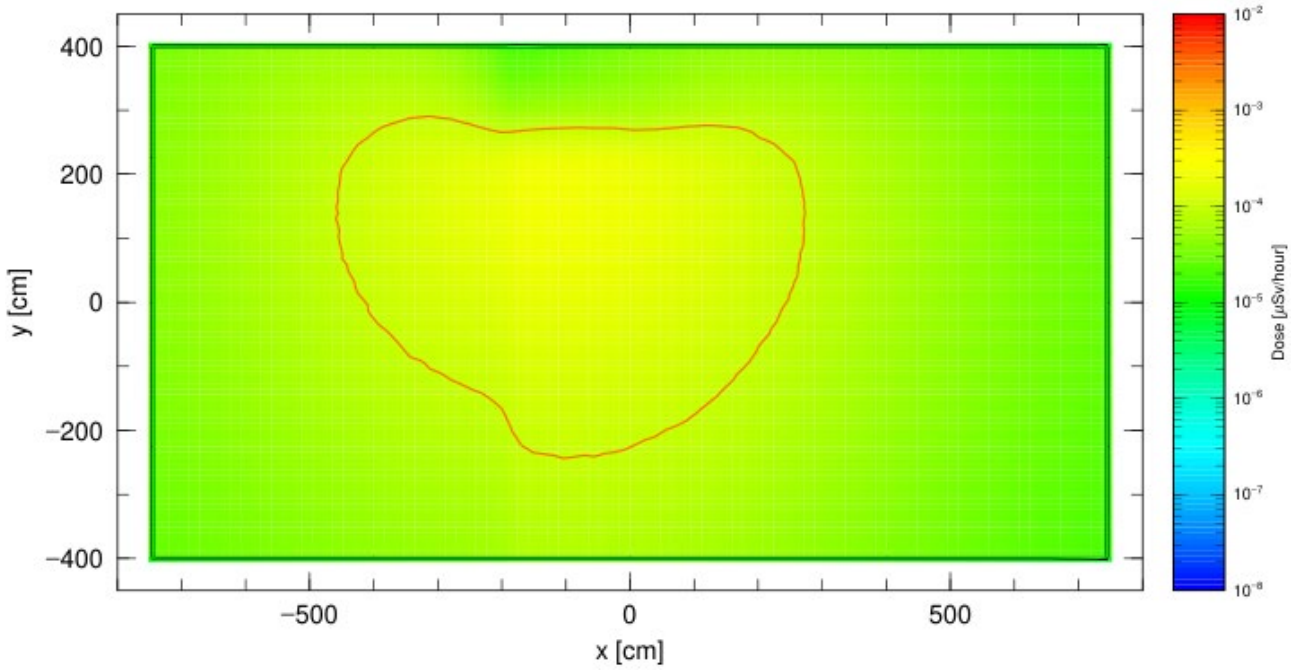


図 6-180　　2 階床から 150cm、計算開始から 270 秒後

④ 天井が高く広い部屋を縦に重ねた建屋モデルの作成及び計算結果

(1) PHITS の建屋モデル

3D-ADRES で作成された建屋の計算モデルを図 6-181 に示す。建屋内部の寸法は、X 方向：18.96[m]、Y 方向：9.96[m] 、Z 方向：6.987[m]である。

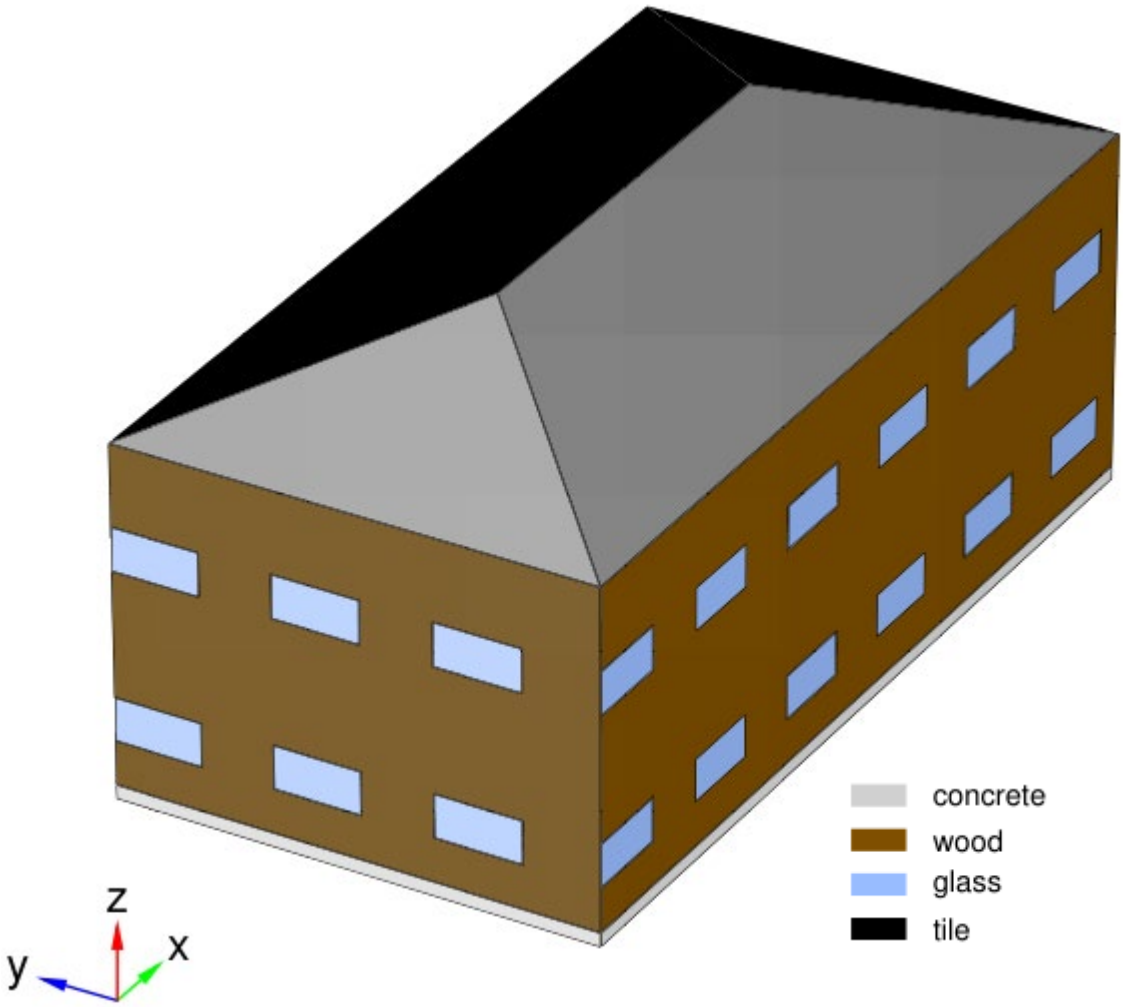


図 6-181　　PHITS の建屋モデル

建屋内部は 1 階と 2 階に仕切られている、その両方に線源を設定して線量率を計算した。

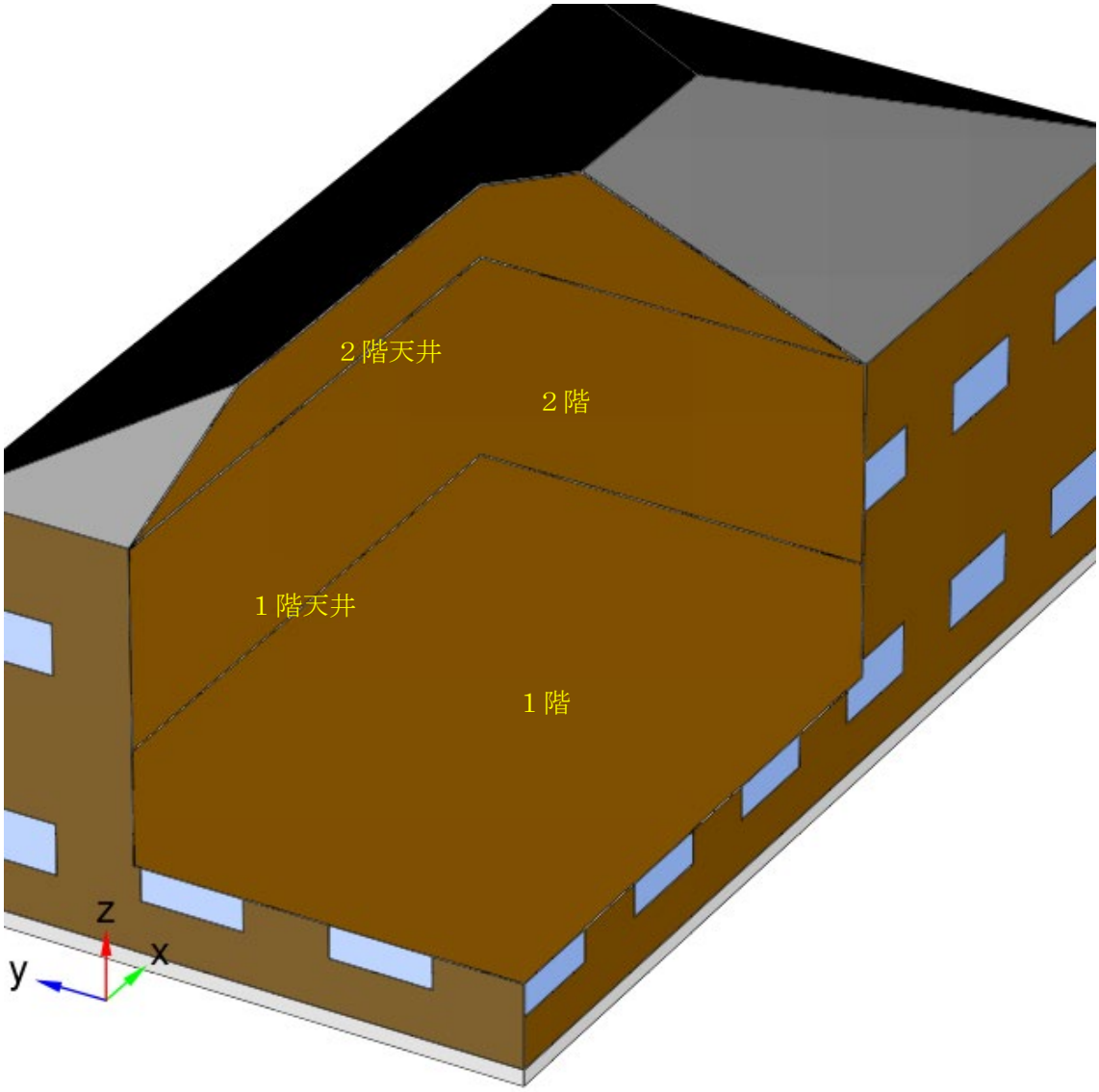


図 6-182　　天井が高く広い部屋を縦に重ねたモデル

(2) 天井が高く広い部屋を縦に重ねたモデルの線量率分布（入口側に空気の通路）

建屋 1 階及び 2 階に線源を設定して線量率を計算した。6.3.2 ⑦ (2)に示した OpenFOAM のタイムステップ（500[sec]）の粒子分布をもとに、PHITS で求めた 1 階床から 50[cm]の線量率分布を図 6-183 に示す。1 階床から 150[cm]の線量率分布を図 6-184 に示す。2 階床から 150[cm]の線量率分布を図 6-185 に示す。

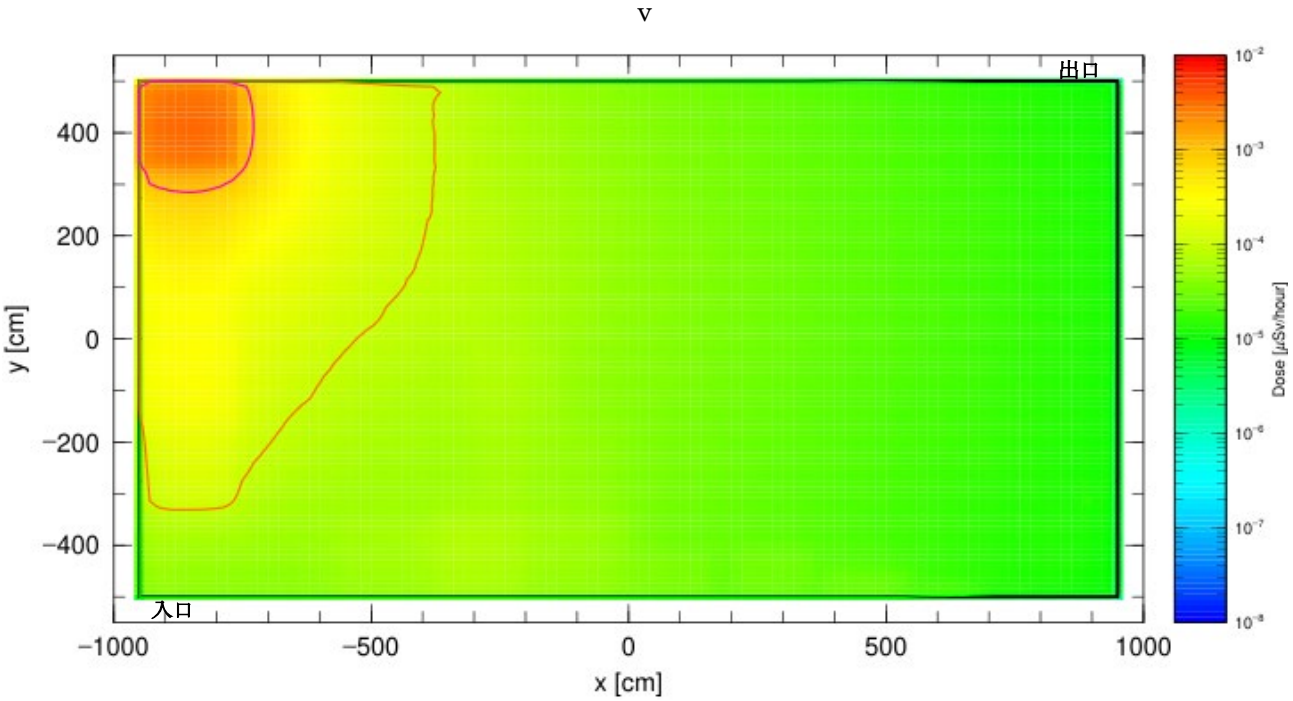


図 6-183　　1 階床から 50cm、計算開始から 500 秒後

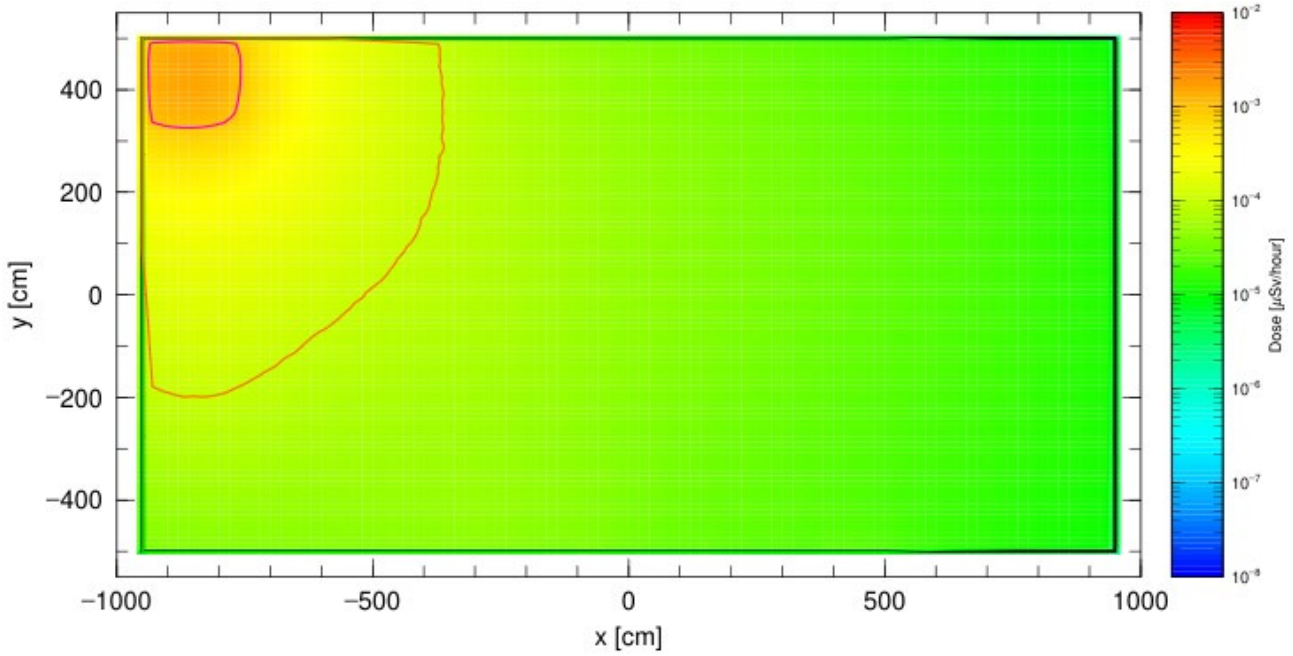


図 6-184　　1 階床から 150cm、計算開始から 500 秒後

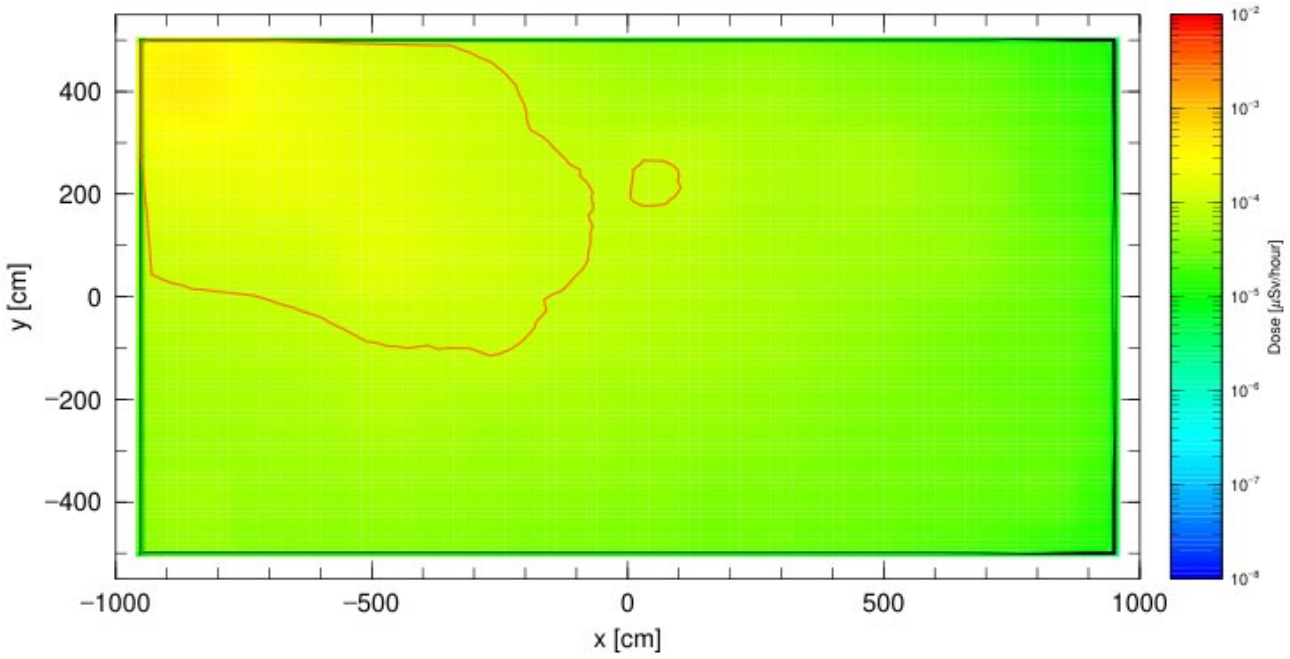


図 6-185　　2 階床から 150cm、計算開始から 500 秒後

(3) 天井が高く広い部屋を縦に重ねたモデルの線量率分布（出口側に空気の通路）

建屋 1 階及び 2 階に線源を設定して線量率を計算した。6.3.2 ⑧ (2)に示した OpenFOAM のタイムステップ（500[sec]）の粒子分布をもとに、PHITS で求めた 1 階床から 50[cm]の線量率分布を図 6-186 に示す。1 階床から 150[cm]の線量率分布を図 6-187 に示す。2 階床から 150[cm]の線量率分布を図 6-188 に示す。

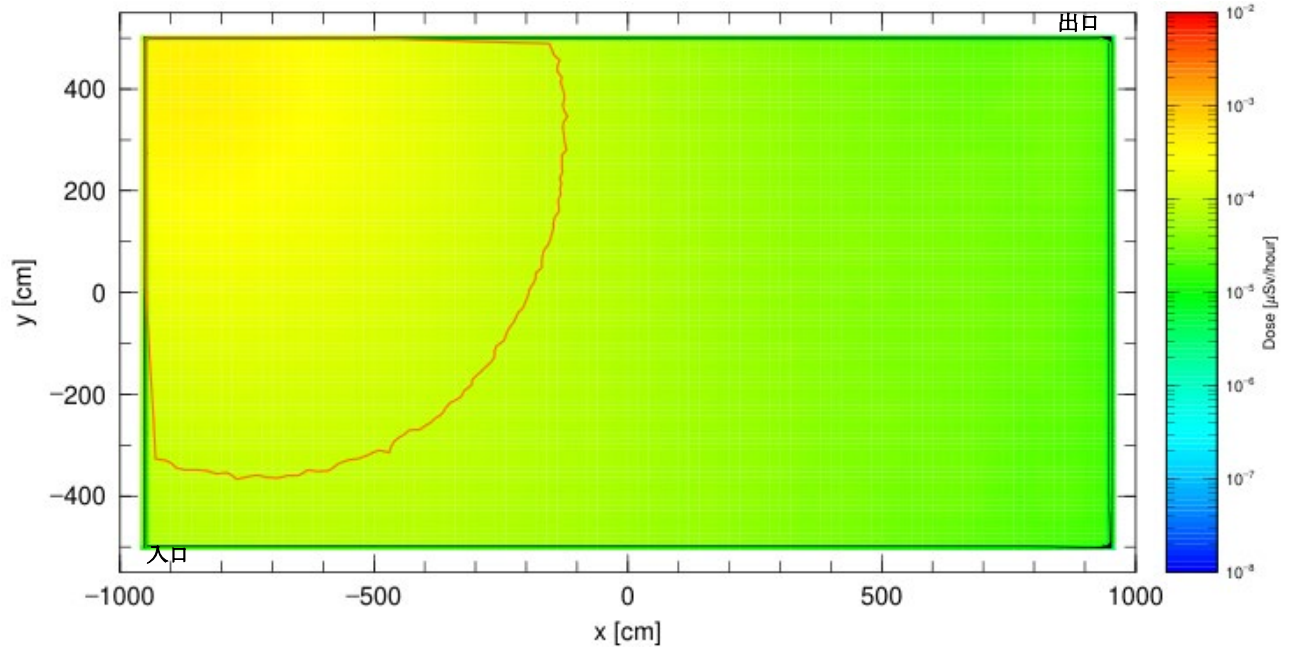


図 6-186　　1 階床から 50cm、計算開始から 500 秒後

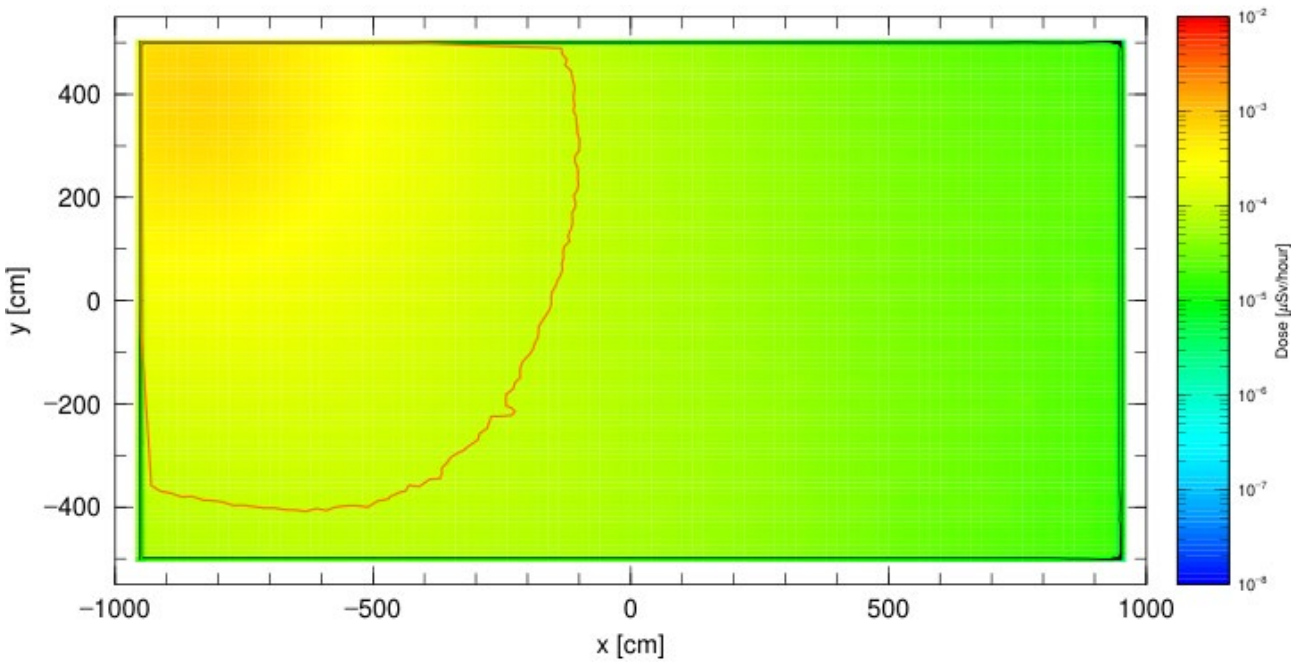


図 6-187　　1 階床から 150cm、計算開始から 500 秒後

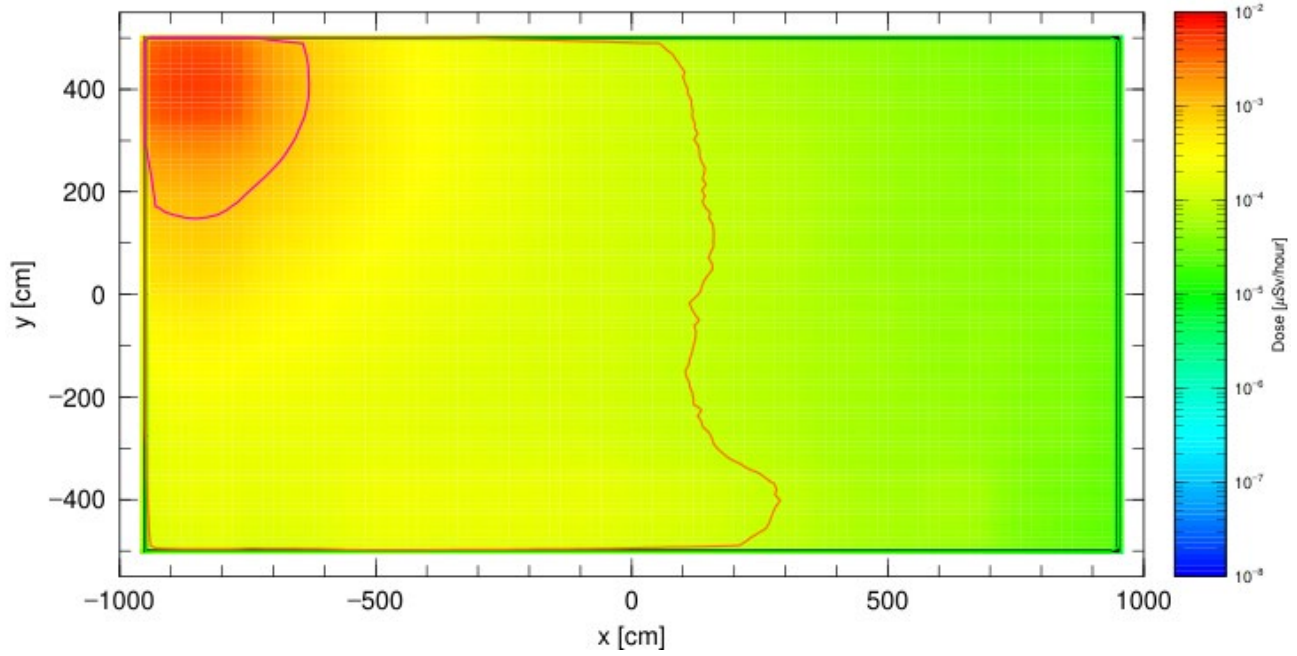


図 6-188　　2 階床から 150cm、計算開始から 500 秒後

6.3.4 屋内環境における CFD 及び 3D-ADRES 活用の屋内内部被ばく線量の推定試解析

① 人の内部被ばく線量の推定試解析の概要

人の内部被ばく線量[mSv/年]は、以下の式で求められる。

内部被ばく線量[mSv/年]= セシウム濃度[Bq/m^3] ×呼吸率[m^3/日]×365 日
×実効線量係数[mSv/Bq]

ここで、セシウム濃度[Bq/m^3]は、6.3.1 ④(1)項に記述した方法で、OpenFOAM による CFD 解析の入力条件（粒子の流入条件）及び結果（粒子の分布）から求められる。ここで、屋外放射能は Q_0[Bq/m^3]=1 とした。粒子の数は OpenFOAM で出力された粒子分布をもとに、床から 150[cm]±50[cm]に存在する粒子数をカウントした。また、各係数の値は文献[6-25]を参照して以下の値とする。なお、^{134}Cs と ^{137}Cs の比率は、0.02：0.98 とした。

- 呼吸率[m^3/日] ：22.2
- 実効線量係数[mSv/Bq] ：^{134}Cs=9.1e-6、^{137}Cs=6.5e-6

以下、②以降では、各屋内環境モデルの結果を用いて内部被ばく線量の推定を試みる（試解析例として示す）。

② ８畳間モデルの内部被ばく線量の推定試解析結果

OpenFOAM の粒子分布をもとに求めた内部被ばく線量の値を表 6-7 に示す。床から 1m-2m の範囲に存在する粒子数が最大になったタイムステップで内部被ばく線量を評価した。障害物が無い場合及び障害物①, ②, ③, ④が有る場合は、3 つのタイムステップで評価した。各々は、粒子の流入が止まった時間、床から 1m-2m の範囲に存在する粒子数が最大になった時間、シミュレーションを停止させた時間である。

表 6-7　８畳間モデルの内部被ばく線量

障害物：有り/無し	タイムステップ[sec]	内部被ばく線量 [mSv/年]
無し	90	6.20E-03
	180	9.64E-03
	330	5.98E-03
①	170	1.48E-02
②	180	1.14E-02
①②③	180	1.40E-02
①②③④	90	1.30E-02
	120	1.48E-02
	150	1.49E-02

③ １０畳間モデルの内部被ばく線量の推定試解析結果

OpenFOAM のタイムステップ（220[sec]）の粒子分布をもとに求めた内部被ばく線量の値を表 6-8 に示す。

表 6-8　１０畳間モデルの内部被ばく線量、計算開始から 220[sec]

内部被ばく線量 [mSv/年]
1.15E-02

④ １０畳間を横に並べたモデルの内部被ばく線量の推定試解析結果

OpenFOAM のタイムステップ（250[sec]）の粒子分布をもとに求めた内部被ばく線量の値を表 6-9 に示す。

表 6-9　１０畳間を横に並べたモデルの内部被ばく線量、
計算開始から 250[sec]

部屋	内部被ばく線量 [mSv/年]
粒子の入口側	1.32E-02
粒子の出口側	3.72E-05

⑤ １０畳間を縦に重ねたモデルの内部被ばく線量の推定試解析結果

OpenFOAM のタイムステップ（230[sec]）の粒子分布をもとに求めた内部被ばく線量の値を表 6-10 に示す。

表 6-10 １０畳間を縦に重ねたモデルの内部被ばく線量、
計算開始から 230[sec]

部屋	内部被ばく線量 [mSv/年]
粒子の入口側（2 階）	1.21E-02
粒子の出口側（1 階）	2.74E-04

⑥ ８畳間 2 つ分の広さのワンルームモデルの内部被ばく線量の推定試解析結果

OpenFOAM の粒子分布をもとに求めた内部被ばく線量の値を表 6-11 に示す。ここでは、OpenFOAM の各タイムステップで内部被ばく線量の値を求めた。

表 6-11 ８畳間 2 つ分の広さのワンルームモデルの内部被ばく線量

タイムステップ[sec]	内部被ばく線量 [mSv/年]
90	2.00E-03
180	4.69E-03
270	6.56E-03

⑦ 天井が高く広い部屋を縦に重ねたモデル（入口側に 2 階から 1 階への空気の通路）の内部被ばく線量の推定試解析結果

OpenFOAM のタイムステップ（500[sec]）の粒子分布をもとに求めた内部被ばく線量の値を表 6-12 に示す。

表 6-12 天井が高く広い部屋を縦に重ねたモデル（入口側に空気の通路)、計算開始から 500[sec]

部屋	内部被ばく線量 [mSv/年]
粒子の入口側（2 階）	1.42E-02
粒子の出口側（1 階）	2.60E-04

⑧ 天井が高く広い部屋を縦に重ねたモデル（出口側に 2 階から 1 階への空気の通路）の内部被ばく線量の推定試解析結果

OpenFOAM のタイムステップ（500[sec]）の粒子分布をもとに求めた内部被ばく線量の値を表 6-13 に示す。

表 6-13 天井が高く広い部屋を縦に重ねたモデル（出口側に空気の通路)、計算開始から 500[sec]

部屋	内部被ばく線量 [mSv/年]
粒子の入口側（2 階）	1.56E-02
粒子の出口側（1 階）	8.34E-06

6.3.5 まとめ（6.3 節）

本節（6.3）の結論としては、CFD シミュレーションと 3D-ADRES-Outdoor(PHITS)を組み合わせることで、屋内環境における放射性物質の濃度分布と被ばく線量の推定が可能であることが示された。また、各種屋内モデルを用いて詳細な解析を行うことで、室内の大きさ、間取り、障害物（屋内構造物）の有無による放射性物質の分布の変化や線量率の違いが発生することも明らかにした。このような解析により、より現実的で効果的な防護措置のための基礎データが得られるものと考えられる。

CFD シミュレーション結果を基にした解析では、屋内の空気の流れが放射性物質の分布に大きな影響を与えることが示された。室内の壁や障害物によって放射性物質が撹乱される様子、場所によって濃度が変化する様子や時間とともに流速を失い床に沈着する（低い位置に溜まる）事象が確認できた。CFD シミュレーションの結果による放射性物質の分布を使うことで、室内の空気の流れを反映した線量率及びその動的変化も確認できた。これにより、換気システムの設計や使用状況により、放射性物質の室内濃度分布が変化し、被ばく線量の評価結果に影響を与えることが分かる。今後の課題としては、以下の点が挙げられる:

1. **シミュレーションの精度向上**: 放射性物質の拡散や屋内の気流特性をより精密に再現するためのモデル改良が必要である。特に、複雑な屋内環境や多様な気象条件を考慮するシミュレーションが求められる。

2. **実測データとの比較**: 実際の放射性物質分布データとシミュレーション結果を比較し、モデルの妥当性を検証することが求められる。これにより、シミュレーションの信頼性（不確かさも含む）が向上し、より精度の高い線量評価が可能となる。

3. **防護措置の最適化**: 得られたデータをもとに、具体的な防護措置の改善案を策定し、住民の安全を確保するための方策を検討することが可能になると考えられる。特に、避難計画や屋内退避の効果を評価し、実効性のある対策を提案するためのシミュレーションが可能になると考えられる。

当該研究をさらに発展させることで、将来的な原子力災害における迅速かつ効果的な防護措置の策定に貢献することが可能になると考えられる。今後は、継続的な改良に加えて実証試験等が必要であり、こうした取り組みを続けることで、放射線防護措置に対する科学的基盤が強化されると考えられる。

参考文献：

[6-1] D. Satoh, H. Nakayama, T. Furuta, T. Yoshihiro, K. Sakamoto , Simulation code for estimating external gamma-ray doses from a radioactive plume and contaminated ground using a local-scale atmospheric dispersion model. PLoS ONE 16(1): e0245932 https://doi.org/10.1371/journal.pone.0245932(2021).

[6-2] wikipedia の数値流体力学の記事: https://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%95%B0%E5%80%A4%E6%B5%81%E4%BD%93%E5%8A%9B%E5%AD%A6

[6-3] https://www.jstage.jst.go.jp/article/jhesp/42/0/42_75/_pdf

[6-4] https://www.cradle.co.jp/dcms_media/other/waseda_casestudy_WasedaUniv_JP.pdf

[6-5] 大塚商会 WindPerfectDX2012 オンラインセミナー（環境シミュレーション）2013 年: https://env-simulation.com/jp/topics/753/

[6-6] 環境シミュレーション:https://env-simulation.com/jp/casestudy/by_category/air/6646/

[6-7] 粒子計算比較: https://ss1.xrea.com/penguinitis.g1.xrea.com/study/OpenFOAM/particle_solver/particle_solver.html

[6-8] kinematicCloudProperties の調査:https://qiita.com/waku2011/items/617d828b0d54802c6ce1

[6-9] 室内温熱環境設計フィードバックのための VR を用いた CFD 解析結果の 3 次元可視化 2015 年: http://news-sv.aij.or.jp/jyoho/s1/proceedings/2015/pdf/H05.pdf

[6-10] ノート記事「寝室が早く冷えるエアコン吹出角度を調べてみた」: https://note.com/tofusw/n/n178cefaa385a

[6-11] 平成 27 年度原子力施設等防災対策等委託費 防護措置の実効性向上に関する技術的知見の整備事業：https://www.nra.go.jp/data/000365194.pdf

[6-12] 平成 28 年度原子力施設等防災対策等委託費 防護措置の実効性向上に関する調査研究事業：https://www.nra.go.jp/data/000365196.pdf

[6-13] 令和 3 年 9 月 9 日 屋内退避による被ばく低減効果に係る委託研究の成果(概要報告) 資料 49-1：https://www.nra.go.jp/data/000364551.pdf

[6-14] 令和 4 年原子力規制庁委託成果報告書 被ばく解析手法の整備事業：

https://www.nra.go.jp/data/000447877.pdf
[6-15]mtk_birdman's blog, OpenFOAM の乱流モデルまとめ：
https://mtkbirdman.com/openfoam-turbulence-models
[6-16]OpenFOAM 空調解析：
https://www.terrabyte.co.jp/OpenFOAM/exe-OF/of-sample25.htm
[6-17]粒子計算ソルバーの比較：
https://ss1.xrea.com/penguinitis.g1.xrea.com/study/OpenFOAM/particle_solver/particle_solver.html
[6-18]https://qiita.com/waku2011/items/617d828b0d54802c6ce1
https://qiita.com/takaf05/items/9732e715084b81f62ef8
[6-19]総粉塵・粉じん中の放射性セシウム及びダイオキシン類：
https://shiteihaiki.env.go.jp/tokuteihaiki_umetate_fukushima/cement_solidification_plant/pdf/monitoring_fu_1901-1906.pdf
[6-20]作業環境中の粉じん測定とばく露対策：
https://www.jniosh.johas.go.jp/publication/mail_mag/2017/pdf_109/siryou_5.pdf
[6-21]放射能分析建屋内への放射性セシウムの混入状況及び混入：
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjrsm/15/2/15_180/_pdf/-char/en
[6-22]原子力規制委員会：https://www.nra.go.jp/activity/ri_kisei/shitsumon/shitsumon6.html
[6-23]ICRP Publication 72： https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/ANIB_26_1
[6-24]JAERI-Data/Code 2002-013：https://jopss.jaea.go.jp/pdfdata/JAERI-Data-Code-2002-013.pdf
[6-25]ICRP2007 年勧告の組織加重係数等に基づく内部被ばく線量係数、濃度限度等の試算 ICRP2007：
https://jopss.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Data-Code-2010-020.pdf
[6-26]Cs に関しては 77 ページの第 2 欄に吸入接種時に係数が記載：
福島県 https://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/attachment/118076.pdf
[6-27]T. Sato, Y. Iwamoto, S. Hashimoto, T. Ogawa, T. Furuta, S. Abe, T. Kai, Y. Matsuya, N. Matsuda, Y. Hirata, T. Sekikawa, L. Yao, P.E. Tsai, H.N. Hunter, H. Iwase, Y. Sakaki, K. Sugihara, N. Shigyo, L. Sihver and K. Niita, Recent improvements of the Particle and Heavy Ion Transport code System - PHITS version 3.33, J. Nucl. Sci. Technol. 61, 127-135(2024).
[6-28]D. Satoh, Y. Maeda, Y. Tameshige, H. Nakashima, T. Shibata, A. Endo, S. Tsuda, M. Sasaki, M. Maekawa, Y. Shimizu, M. Yamazaki, T. Katayose and K. Niita, Shielding study at the Fukui Prefectural Hospital Proton Therapy Center, J. Nucl. Sci. Technol. 49, 1097(2012).

■ 7 章　高分解能大気拡散モデル整備に向けた本事業のまとめと課題

7.1　本章の概要

本事業では、局所域高分解能のシミュレーションにおいて、対象領域周囲の現実の気象場を反映すると共に、Large Eddy Simulation(LES)手法により、数メートル～数十メートルの水平分解能で建物や地形の影響を受ける大気の流れと物質の拡散をシミュレーションするモデルについて、令和 5 年度の調査結果[7-1]に基づき選定した局所域高分解能大気拡散・線量評価システム「LHADDAS」を対象に整備を進め、試計算により課題を抽出した。また、そのシミュレーション結果から得られる大気中及び地表に沈着した放射性物質の詳細な分布に基づき、小規模地形や建造物群等による遮蔽効果を考慮した被ばく線量を評価可能な線量評価モデルも調査し、その結果、LHADDAS の線量評価モデル SYBIL では評価しない遮蔽や散乱の効果も考慮可能な、原子力機構が開発した局所域高分解能の線量評価システム「3D-ADRES-Outdoor」を利用し試解析を行った。また、屋内の放射性物質分布をシミュレーションする CFD コードとして「OpenFOAM」を利用し、上記の 3D-ADRES-Outdoor と連携させることで、屋内での線量率分布の経時変化が解析可能となることが分かった。

以上、上記のモデルを本事業の最終的目的に向けて活用するため、モデルの整備及び試計算を行い、実際のシミュレーション利用時における課題を抽出・整理し、それら課題の解決策について検討した。

本章では、7.2 節において、高分解能大気拡散モデル等による線量評価における課題と解決策について本事業を通して得られた知見と課題を整理し、7.3 節にて、本事業を通して得られた結論を述べる。

7.2　高分解能大気拡散モデルによる線量評価における課題と解決策

本節では、高分解能大気拡散モデル等による線量評価における課題とその解決策について議論する。先ず、2 章及び 3 章にて報告した文献調査及びヒアリング調査により得られた知見をまとめた後、本事業で採用し整備した LHADDAS（4 章で概説）の試解析により得られた知見（5 章参照）および 3D-ADRES-Outdoor の試計算結果（6 章参照）より得られた知見と課題及びその解決策等を記す。

2 章においては、CFD 等のシミュレーションによる放射性物質大気拡散と線量評価についての文献を整理し、その発展の過程と発生した課題について報告した。その際、大気拡散については、CFD の活用が行われているが、初期・境界条件の設定における気象モデルの接続の他、局所環境でも発生する気象現象の取り込み等が課題となっており、様々なアプローチが研究開発されていることを報告した。また、家屋内外での CFD による、汚染物質等の拡散や沈着についての研究開発が最近になり盛んに行われ、詳細な知見が得られていることを報告した。但し、CFD 特に LES は、計算機資源を消費するため、高速化の取り組みや、機械学習によるサロゲーション等の取り組みもあり、今後の展開に注視する必要がある。

次に、3 章では、放射性物質大気拡散に伴う線量評価について、各機関（5 機関）の研究者に対し、研究開発の状況や課題、そして今後の展開についてヒアリングを実施した。その結果、線量評価の高度化として詳細なファントムを用いたシミュレーションが開発された他、クラウドシャインやグランドシャインに対する高速な線量評価シミュレーション技術の開発が進められており、その進展に注視する必要があることが分かった。また、屋内退避者に対する線量評価の際に重要となる、放射性物質の室内への浸透や室内での沈着等の評価が実地での試験を通して進められており、その進展も重要であることが分

かった。

次に、4 章及び 5 章にて報告した LHADDAS の整備と試解析から得られた知見及び課題とその解決策を下記にまとめる。

本事業では、高分解大気拡散モデルの整備に利用可能なシミュレーションモデルとして、原子力機構が開発した局所域高分解能大気拡散・線量評価システム「LHADDAS」の整備を進め、試計算により課題を抽出した。「LHADDAS」は、大気拡散シミュレーションモデルとして、差分法を用いて LES シミュレーションを行う LOHDIM-LES と、格子ボルツマン法を用いる CityLBM 及びそれらのモデルのシミュレーション結果から得られる放射性物質の大気中濃度分布や地上沈着量を基に放射線量を計算可能とする SIBYL からなる。これを用いて、4 章に記したように、令和 5 年度に実施した六ケ所再処理施設周辺 60km 四方を対象とした高分解能大気拡散シミュレーションおよび空間線量率の試解析から、①計算時間、②計算リソース、③気流・濃度分布の再現性、④結果の有意性の 4 項目に関する課題が抽出され、これらの課題の解決においては、原子力機構で進められている局所域モデル LHADDAS と広域モデル WSPEEDI を整合的に結合する大気拡散計算手法が参考となることが示された。そこで本事業では、5 章に記したように LHADDAS と WSPEEDI の結合計算を整備し、試解析を実施し、その結果を報告した。この試解析結果を基に、高分解能の大気拡散計算の性能および特徴ならびに広域の被ばく評価を実施する上での課題を、下記のように抽出し解決策を検討した。

7.2.1 LHADDAS と WSPEEDI 連携における課題

LHADDAS と WSPEEDI の結合計算による六ケ所再処理施設周辺を対象とした試解析の結果、原子力機構で開発中の結合機能（5km 四方までを LOHDIM-LES 拡張機能を用いて 10m 解像度で計算し、それより遠方は、WSPEEDI と結合）は、①計算時間、②計算リソース、および③気流・濃度分布の再現性の観点で有効であったが、本機能を現状のまま高分解能計算の範囲を 10km 四方に拡張して適用することは、放出点から数 km 離れた地点の放射性物質の大気拡散の再現性において課題があることが示された。そのため、令和 5 年度に抽出した課題のうち④結果の有意性（CFD による詳細な分布計算による拡散分布の差異がどの程度の範囲まで有意となるか定量的に確認する）については、当該年度の試解析条件では、十分に定量化することはできなかった。その一方、この結果から以下の課題が抽出された。

① 拡散分布の再現性

LOHDIM-LES 拡張機能と WSPEEDI の計算モデルにおける拡散過程の取り扱いの違いから、対象とするスケールの拡大に伴いプルームの広がり具合が大きく異なる結果となった。特に WSPEEDI では距離に応じて拡散幅が大きくなるのに対して、LOHDIM-LES 拡張機能では拡散幅が遠方まで大きく変化しなかった。この差異は、LOHDIM-LES が対象とする高周波の大気擾乱（約 1 分周期にピークを持つ）と WSPEEDI が扱う低周波の気象擾乱（約 4 日周期にピークを持つ）の時空間スケールの大きなギャップに起因する。LOHDIM-LES の計算結果は、3 分から 10 分程度の時間スケールの乱流変動現象であるのに対して、WSPEEDI の計算結果は数 10 分以上のタイムスケールでの気象現象を表現している。したがって、LOHDIM-LES の計算結果は、気象擾乱の影響が表れない時空間スケール（10 分以下、放出点から数 km 以内）では、WSPEEDI の計算結果との差異は小さいが、放出源から離れ時空間スケールが大きくなるにしたがい拡散幅に差異が出ることとなった。今回の

試験では、60km 四方の解析領域をタイル状に分割し、それぞれのタイル領域を CFD モデルで計算することで、CFD モデルで気象変動の空間分布を考慮することを試みたが、空間分布だけでは不十分で、気象モデルで平均化されている 10 分程度より短い時間スケールの擾乱の導入も必要であると考えられる。このような CFD への気象擾乱の導入法は確立されていないため、このような解析を実現する手法について今後も継続して研究する必要があることが分かった。

② 試験条件

試計算では、実事象を対象とするため、再処理施設の主排気筒からの ^{85}Kr の放出時の実測データを用いた解析を行った。しかしながら、今回の試験条件やデータが放出点近傍の建物や微地形が気流場および放射性物質の大気拡散に与える影響を評価するには限定的であったため、LOHDIM-LES 拡張機能と WSPEEDI の結合計算手法を利用する適切な LES 計算領域の知見は得られなかった。また、LOHDIM-LES 拡張機能による風況データベースの作成は、風向について 10 度ごとの風向別に作成したが、この風向の離散化は、LOHDIM 拡散モデルと WSPEEDI との接続部における大気中濃度分布の不連続や風向の時間変化が激しい場合のプルーム拡散方向のずれ（時間的な遅れや早まり）を発生させる要因となった。これを回避するには、できるだけ風向を細かく分割することが必要になるが、ケース数増加により計算コストが増大する。したがって、許容される風向の分割幅について知見を収集するとともに、先述した LES 計算領域の調査検討を行うことにより、投入する計算コストの最適化が必要になる。

7.2.2 解決策

上記課題①に対しては、LHODIM-LES の拡張機能を適用できる時空間スケールの拡張が必要となる。WSPEEDI の計算では、気象モデルで平均化されている 10 分程度より短い時間スケールの擾乱をパラメタライズして拡散計算に導入している。一方、LHODIM-LES では、この気象擾乱をパラメタライズすることなく計算格子で解像した気流場として計算するため、気象モデル WRF の平均風速場に加えて、乱流統計量を気流場の変動成分に変換して入力する必要がある。原子力機構では、この解析手法の開発を進めており、手法の確立が期待される。また、LOHDIM 拡散モデルでは、WSPEEDI の拡散計算と同様な粒子拡散モデルを用いていることから、WSPEEDI における気象擾乱のパラメタライズ法を適用することで、この課題を解決できる可能性がある。

課題②の試験条件については、実測データに依存しない拡散シミュレーションによる数値実験により調査検討し、より適切な試験シナリオや計算条件（例えば地上放出や中立以外の大気安定度など）を設定することが有効と考えられる。その数値実験においては、上記 LOHDIM 拡散計算への気象擾乱の導入手法を試験することで、令和 6 年度に抽出した「結果の有意性」の課題について定量的評価を行うことが望まれる。

6 章では、詳細な環境を模擬し、線量評価を高精度化することが可能な 3D-ADRES-Outdoor について試解析を実施した結果を報告した。3D-ADRES-Outdoor は、SIBYL と異なり、福島事故以後に環境中での線量率分布を詳細に評価可能とするため、環境中の構造物を可能な限りモデル化し、その構造物による放射線の遮蔽や散乱効果を取り込み、線量率の高精度な分布の推定を行うものである。従って、SIBYL において、計算の高速化のため、簡略化した構造物等を詳細にモデル化することで、家屋等の詳細な遮蔽や散乱等を考慮し、屋内退避時の屋内線量率分布を高精度にシミュレーションすることが可能であることが分かった。しかし、計算時間がかかることから、3D-ADRES-

Outdoor においても、SIBYL と同様に、応答関数法を採用することで、高速計算を実現できることが分かった。実際の試解析では、一様平地上で構造物が存在しない場合、両者の計算結果が完全に一致することを確かめた他、3D-ADRES-Outdoor を用いることで、地形変化や様々な地上構造物による遮蔽や散乱による線量分布の変化を詳細に取得できることが分かった。

また、3D-ADRES-Outdoor と CFD との連携においても、応答関数法を用いることで高速な計算が可能となり、屋外での放射性物質の拡散による線量分布の詳細な時空間変化を追跡できることが分かった。さらに、屋内でも、放射性物質の流入による線量率分布の時空間変化が見られ、屋内の構造物の配置や部屋の配置等により、線量率の変化や低減が可能であることが分かった。

以上、これらの試解析を通して、LHADDAS と WSPEEDI 及び 3D-ADRES-Outdoor を連携させることで、屋内退避時の屋内外の線量率分布の詳細な時空間変化が追跡可能であることが判明した。従って、本事業を継続させ、屋内退避時の屋内線量率解析の高精度化の試解析を行い、その知見を蓄積する他、課題を整理することが重要と考えられる。

7.3 まとめと結論

本事業では、本事業の目的である局所高分解能大気拡散モデルの整備のため、令和 5 年度の調査結果[7-1]に基づき選定した局所域高分解能大気拡散・線量評価システム「LHADDAS」を対象に整備を進め、試計算により課題を抽出した。また、そのシミュレーション結果から得られる大気中及び地表に沈着した放射性物質の詳細な分布に基づき、小規模地形や建造物群等による遮蔽効果を考慮した線量率を評価可能な線量評価モデル「3D-ADRES-Outdoor」も調査した。文献調査（2 章）やヒアリング調査（3 章）では、CFD を用いた高分解能大気拡散モデルにおける進展の調査結果をまとめた他、線量推定計算についても、その進展を重点的に調査し課題を整理した。

「LHADDAS」の試解析による課題整理（4 章及び 5 章参照）においては、令和 5 年度に抽出した課題のうち「解析結果の有意性」について、定量的に確認するためには、CFD への気象擾乱の導入法の改良と適切な試験条件の設定という新たな課題が抽出され、これを解決するための方針が検討された。さらに、詳細な環境構造物を考慮し、家屋内外の線量分布を評価可能な「3D-ADRES-Outdoor」の試解析を進め、「LHADDAS」との連携を行うことで、家屋内外の線量率分布の時空間変化を高精度に推定可能となることが分かった。次年度、これらの連携機能の試解析を継続し、更なる整備を行い、家屋内外での線量率分布の知見を取得すると共に、課題を整理することで、当該事業の目標（被ばく評価の高精度化のための高分解能大気拡散モデル等の整備）が十分に達成可能と判断できる。

[7-1] 日本原子力研究開発機構, 令和 5 年度原子力施設等防災対策等委託費（高分解能被ばく評価手法の整備）事業成果報告書, 令和 5 年 3 月. https://www.nra.go.jp/data/000473704.pdf