

令和 5 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 6 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	3
■ 2章 CFDを活用する高分解能大気拡散シミュレーションに係る文献調査	4
2.1 本章の概要	4
2.2 大気拡散シミュレーション概要	5
2.3 大気拡散シミュレーション文献調査（日本語）	15
2.4 大気拡散シミュレーション文献調査（英語）	54
2.5 火災に係る大気拡散シミュレーションの文献調査（日本語）	87
2.6 火災に係る大気拡散シミュレーションの文献調査（英語）	90
2.7 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（日本語）	95
2.8 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（英語）	99
2.9 本章のまとめ	102
■ 3章 CFDを活用する高分解能大気拡散シミュレーションに係るヒアリング調査	158
3.1 本章の概要	158
3.2 CFDを活用する高分解能大気拡散シミュレーションに係るヒアリング調査機関	158
3.3 筑波大学（計算科学研究センター）	159
3.4 電力中央研究所（サステナブルシステム研究本部）	161
3.5 名古屋大学（大学院環境学研究科）	165
3.6 新潟工科大学（風・流体工学研究センター）	167
3.7 日本原子力研究開発機構（原子力基礎工学研究センター①）	170
3.8 日本原子力研究開発機構（原子力基礎工学研究センター②）	172
3.9 日本原子力研究開発機構（システム計算科学センター）	174
3.10まとめ	176
■ 4章 局所域高分解能大気拡散・線量評価システム「LHADDAS」	177
4.1 本章の概要	177
4.2 高分解能大気拡散シミュレーション「LOHDIM-LES」	177
4.3 高分解能大気拡散シミュレーション「CityLBM」	184
4.4 線量率評価モデル「SYBIL」	191
4.5 まとめ	194
■ 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	196
5.1 本章の概要	196
5.2 LOHDIM-LES 試計算（準備と結果）	196
5.3 CityLBM 試計算（準備と結果）	199
5.4 高分解能大気拡散シミュレーションの課題	230
5.5 まとめ	231
■ 6章 CFDを活用する高分解能大気拡散モデル整備に向けた課題	232

6.1 本章の概要	232
6.2 CFD 活用における課題と解決策	232
6.3 まとめと結論	235

■ 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においては、複雑な挙動が観測されており、適切なモデルの構築が、1つの大きな課題として残されている。本事業では、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、文献調査、ヒアリング調査、試算等を通して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にも、より実効的な防護措置の枠組みの構築が求められ、予測を含め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]が、「環境放射線モニタリング指針」[2]にて定められた方法により、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、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）、及び福島原発事故独立検証委員会（民間事故調）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、様々な課題が残る結果となったが、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。現在、計算機資源の発達が目覚ましく、精度の高いシミュレーションを活用した現実的な被ばく評価が現実的となってきたことを念頭に置き、防護措置の判断基準の見直しを行うため、最新のシミュレーションの知見を蓄積し、課題の整理と共に研究開発の方向性を議論する必要があると考えられる。

以上、本事業では、現在の評価手法では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を実施し、その活用により得られる結果をもとに課題の整理を行い、知見の蓄積を目指す。

上記の目的を達成するため、本事業では、まず、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あわせて進展させる。また、上記モデルの整備と共に試算を行い、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。

1.2 本事業の概要

1.1 にて記したように、本事業では、最初に局所域高分解能の大気拡散シミュレーション技術を調査する。特に、周囲の現実の気象場を反映し、高分解能なシミュレーションを可能とする Large Eddy Simulation(LES)手法に着目し、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た大気の流れをシミュレーションするモデルを中心として調査を進める。また、実際に、上記 LES 手法を用い、放射性核種の大気中拡散を詳細に評価できる大気拡散シミュレーションモデルを整備することも目標とする。更に、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も目標とする（なお、本報告書では、大気拡散シミュレーションを主眼として報告する）。

以上、本事業では、最初に LES を始めとして、局所高分解能の大気拡散シミュレーション技術を調査し、現状で得られる知見を整理した上、放射性物質拡散と線量評価に向け、妥当なシミュレーション技術とコードを選択し、試計算を行い、その性能や特徴を評価すると同時に課題を整理する。

本事業における実際の作業としては、上記観点に基づき、文献調査を行う他、国内における主要な研究開発機関 7 カ所程度（各 2 回程度）のヒアリングを行い、開発中のシミュレーションモデルの特性、活用目的、適用範囲、適用実績、課題の他、今後の課題解決に向けた取り組み等についての情報を収集し、上記文献調査と共に取得した知見を整理し報告する。

局所高分解能の大気拡散シミュレーション技術においては、その妥当性の評価が常に実施され、改良が加えられてきた経緯から、検証用データを調査することも本事業の一つの目的となる。従って、大気拡散シミュレーションの検証に適した物質濃度や空間線量率等の実験及び観測データについても調査を行い、収集可能なデータについては収集し、その特徴や検証時の課題についても整理する。

更に、上記の調査結果より、妥当なシミュレーションモデルを一つ選択し、本事業の目標達成に向け、整備及び試計算を行うことで、シミュレーションモデルの準備や実際の動作時の知見を蓄積し、課題を整理する。尚、選択するシミュレーションモデル（すなわち、コード）は、公開され入手可能なものとする。以上、調査項目と試解析項目について、下記にまとめる。

(1) 調査項目

① モデル：

大気拡散シミュレーションモデル及び線量評価モデルの文献調査を行い、それらの現状と課題について整理する。その際、放射性物質の拡散という対象のみに限定せず、広く物質の大気拡散現象に関連する文献も含めて広く調査を行い、関連する知見を収集する。また、関連する研究開発を実施している主要な研究開発機関 7 カ所程度（各 2 回程度）へのヒアリングを行い、開発中のモデルの特性、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

上記①モデル（大気拡散シミュレーションモデル）の検証に適した濃度や空間線量率の実験データ及び観測データについて調査を行い、その特性を調査する他、公開データについては収集を試みる。

(2) 試開発

上記①の調査結果に基づいて、大気拡散シミュレーションモデル及び線量評価モデルを1モデルずつ選定して試開発を行う。尚、調査項目②にて取得した検証用データを基に、2 ケース程度を模擬する 24 時間程度の試計算を行い、その結果から、各々の性能や特徴を評価して実プラント体系に適用する上での課題について整理する。尚、大気拡散シミュレーションモデルについては、60km 四方の領域に対し、地形・建物を捉えることができる 10m 以下の格子解像度で、計算対象期間とほぼ同程度の計算時間で解析が実施できるものを選択する（最先端のシミュレーション技術の指標として、上記性能を条件として果たす）。

1.3 本事業報告書の概要

以下にて、本事業報告書の概要を記す。2 章以下では、1.1 にて記した本事業の目標に従い、1.2 の本事業の実施項目の詳細な実施結果（文献調査とヒアリング調査及び実際の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、関連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、各々で述べられている現状・課題に対し、その概要を抽出・整理し報告する。

3 章では、国内で、CFD 等を活用する高分解能大気拡散モデルに係るシミュレーション研究を実施している研究機関を7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から整理した内容を記す。

4 章では、2, 3 章にて報告した調査結果より、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」を選択し、その特徴と課題を整理する。「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 と格子ボルツマン法を用いる City-LBM からなり、それらについての特徴と課題を報告する。更に、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濃度や地上沈着量をもとに、放射線量を計算可能とする SIBYL についても、その特徴及び課題をまとめ、報告する。

5 章では、上記「LHADDAS」の試計算結果について報告する。上記各 LES コードの試計算を行った際の準備とその結果について記し、各コードの課題を議論する。

6 章は、本事業全体のまとめと考察である。

参考文献

- [1] 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）。
- [2] 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）。

■2章 CFD を活用する高分解能大気拡散シミュレーションに係る文献調査

2.1 本章の概要

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 圏内においては、より実効的な防護措置の検討を目的として、高分解能な大気拡散シミュレーションを活用する現実的な被ばく評価の可能性を調査し、防護措置にかかる基準の見直しに必要な知見を蓄積する必要がある。

上記の要請に応えるため、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を実施することが求められている。本章では、高分解能の大気拡散シミュレーションに係る文献を中心に収集し、現状調査を実施した結果を報告する。なお、調査対象文献は、膨大な数になるため、本報告に深く関連する文献のみを選択し、中でも重要と判断する主要文献のみ、その概要を報告する。

なお、本報告では、放射性物質に限定せず、広く汚染物質の大気拡散シミュレーションの国内外の現状調査を実施する他、汚染物質として、微小の粉塵等が拡散する火災シミュレーションモデル等の現状調査も対象とする。汚染物質の大気拡散シミュレーションでは、汚染物質が気象場及び風況に依存し、受動的に拡散するケースが殆どだが、火災等では、その事象が気象場及び風況をも変化させ、汚染物質の拡散にも影響を及ぼすことから、原子力災害との関連性も深いと考え調査の対象とした。更に、本事業では、大気拡散シミュレーションと共に、被ばく評価を実施している文献についても、簡単に調査する。被ばく評価に関する文献も相当数に上ると考えられるが、大気拡散シミュレーションとの関連性を念頭に置き、主要な文献のみを調査対象として報告する。

なお、本調査では、CFD を活用する高分解能大気拡散モデルに係る文献調査が目的となるが、その目的達成に向けては、CFD のみに限定せず、広く大気拡散シミュレーションモデルの発展を概観し、CFD の活用やその発展に、どのように関わってきたかについて、広く文献を調査し報告する。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、様々な課題があることも指摘したい。以下、調査対象とした文献を分類し、各節において、各々の調査結果を順次報告する。

2.2 大気拡散シミュレーションの概要

2.3 大気拡散シミュレーションの文献調査（日本語）

2.4 大気拡散シミュレーションの文献調査（英語）

2.5 火災に係る大気拡散シミュレーションモデルの文献調査（日本語）

2.6 火災に係る大気拡散シミュレーションモデルの文献調査（英語）

2.7 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（日本語）

2.8 大気拡散シミュレーションに係る被ばく評価モデルの文献調査（英語）

2.9 本章のまとめ

文献リスト

なお、関連する文献数は膨大な数に上ることから、発表日時については、2000 年以降の主要論文とする。

これは、2000年以降が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、実際の活用例が急速に増えると共に課題も明らかにになってきたと考えられるからである。調査対象とする言語は、日本語と英語とする。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て、シミュレーションを適用し得られた研究成果を報告しており、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。

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]のように区別し記すこととする。章末に、日本語文献、英語文献のリストを各々、まとめて示した。また引用論文内でのレビュー部分等での他論文参照には、その文献が章末リストにない場合もあるが、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、(タイトル)、西暦年)のみの表示とし、引用文献上での確認が必要となることを注意する。また、章末リストでの参照を必要としないが、本文の議論においてのみ、引用すべきと判断した文献も、同様の記載とすることを注意する。

2.2 大気拡散シミュレーション概要

本節では、長い歴史を有する大気拡散シミュレーションの発展を概観し、CFDを活用する大気拡散シミュレーションが研究開発されてきた経緯や過程について、その概要を記し、本文献調査の導入節とする。以下、本節(項)の構成を記す。

2.2.1 大気拡散シミュレーションの分類とその発展(概要)

2.2.2 大気拡散シミュレーションの検証と評価(概要)

2.2.1では、これまでに開発され活用されてきた大気拡散シミュレーション手法を分類し、その発展の概要を記す他、2.2.2では、各シミュレーション手法の検証及びその評価法について、その概要を記す。

2.2.1 大気拡散シミュレーションの分類とその発展(概要)

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文献調査の切り口として、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。まず、汚染物質とそれが拡散する空間スケールに注目し、これまでの発展を分類すると、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。実際、汚染物質の大気拡散と密接な関係を持っている気象分野では、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)

なお、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、微気象 (microscale meteorology)が重

要な関連用語として挙げられる。微気象とは、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、上記の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。

汚染物質の大気拡散現象は、物理的には主に移流拡散方程式という時間と空間をパラメータとする偏微分方程式により記述できると考えられる。この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 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、単純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 年代の渦度一流線関数を用いた 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。その中でも、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 (Marker And Cell) 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 (SOLution Algorithm) (Hirt et al., SOLA-A Numerical Solution Algorithm for Transient Fluid Flows, 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、Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) equations) と呼ばれ、それを活用することで膨大な研究が行われてきた。

一方、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 LES (Large-Eddy Simulation) 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 (DNS、Direct Numerical Simulation) が注目されている。なお、本事業では、上記 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について具体的に本報告の後半にて論じる。

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 10km 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、いずれのスケールでも、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。（*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、まず、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。

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、マイ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 のようにまとめている。マイクロスケールでは 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 キャンピー	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	NO _x	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
(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、その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、適切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、その活用対象を分類する必要がある。本報告では、シミュレーション対象を、従来の文献から、大きく次の4つに分類する。各々は、2.2以降の各節にて論じる。なお、下記の分類対象は、大気汚染に係り、社会的課題となってきた経緯から、シミュレーションモデルが各々、研究開発され、相互に関係しながら発達してきた。

- (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）放射性物質の拡散だが、（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。従って、本報告では、（1）～（3）についても、その主要文献とその概要を記し、（4）との関係性について報告する。なお、（1）～（3）についての文献は、膨大な数に上るため、主要文献のみを報告する（但し、英語文献の場合、（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）に対応する項は、更に膨大な量となる他、対象物が海外となるため、議論が発散することを避け略した。技術的には、およそ日本語文献の調査報告と同様の発展があることのみ記す）。

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を考える。それらは、以下の6つに大きく分類できることが分かる。それらの各項目は、2.3以降の各節（項）内での留意報告事項とする。

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

上記の各々の構成要素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の分類とその概要

汚染物質の発生源のモデル化	<ul style="list-style-type: none"> ・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	<ul style="list-style-type: none"> ・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	<ul style="list-style-type: none"> ・Pasquill の大気安定度、モニン・オブコム の相似則等 ・データ同化手法
移流拡散、物質移行過程のモデル化	<ul style="list-style-type: none"> ・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	<ul style="list-style-type: none"> ・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	<ul style="list-style-type: none"> ・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。検証方法は、以下のように、およそ分類できることが分かる。

- ・ 風洞実験
- ・ 野外トレーサ実験
- ・ 気象観測
- ・ 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）

これらの分類は、2.3 以下の調査の軸として念頭におき、それらの調査結果は各節（項）にて、まとめて報告する。

2.2.2 大気拡散シミュレーションの検証と評価（概要）

次に、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手法や規準などを総括的に記する文献や情報は、およそ、次の 4 種類に分けられる（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。

- ・ IAEA Safety Series No. 57(1982)による Generic Models and Parameters for Assessing the Environmental Transfer of Radionuclides from Routine Releases 1]
- ・ ASTM(2000)による ASTM, 2000: Standard guide for statistical evaluation of atmospheric dispersion model performance 2]
- ・ 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]
- ・ 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]

3]については、「危険物質が関与する重大な事故の危険の制御に関する指令 2012/18/EU の第 4 条に基づく評価方法の開発」に関する欧州委員会の成果物の一部であり、当該作業は AMEC、INERIS、EU-VRi によって行われ、文献(Task2)の範囲で問題となった物質は、影響評価ツールを使用してモデル化される。モデリングの目的は、物質が重大な事故を引き起こす可能性があるかどうかを判断できるさまざまなしきい値について、影響の距離を推定し、評価ツールは、危険な現象(爆発、火災など)毎の影響距離の計算または推定のみを行う。なお、それらは、物質固有のツールではなく、評価に最適なツールの選択に向け、サイトにおける危険物質に対し、使用可能なさまざまなモデリングツールを提示している。本文献は、産業事故が人間の健康に与える影響に焦点を当て、適切なモデルの概要と説明を提供している。

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。

- ・ 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である。
- ・ 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、上記の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(以下は、文献 5]内での各指標を記載、式番号は文献記載に従った)。

$$FB = \frac{(\bar{c}_o - \bar{c}_p)}{0.5(\bar{c}_o + \bar{c}_p)} \quad (14)$$

$$MG = \exp(\overline{\ln C_o} - \overline{\ln C_p}), \quad (15)$$

$$NMSE = \frac{\overline{(C_o - C_p)^2}}{\bar{C}_o \bar{C}_p}, \quad (16)$$

$$VG = \exp\left[\overline{(\ln C_o - \ln C_p)^2}\right] \quad (17)$$

$$FAC2 = \text{満たされるデータの割合 } 0.5 \leq \frac{C_p}{C_o} \leq 2.0 \quad (18)$$

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、評価の国際的な取り組みとして、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とを記す。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、以下にて簡単に紹介する。

Olesen によると、モデルの評価の問題は本質的に難しく、P.Chatwin が第 1 回ワークショップで表明した声明「大気の分散は、あらゆる場合において確率的現象であるという事実を考慮すると、それを決定論的な数学モデルで説明するのは間違いなく科学的に間違っている」を引用し、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（文献中の式番号を記載）。

$$C_o(\alpha, \beta) = \hat{C}_o(\alpha) + c(\Delta c) + c(\alpha, \beta) \quad (1)$$

観測された濃度	アンサンブル平均	計測誤差	固有の不確実性
---------	----------	------	---------

$$C_m(\alpha) = \hat{C}_o(\alpha) + d(\Delta\alpha) + f(\alpha) \quad (2)$$

モデル化された濃度	アンサンブル平均	入力の不確実性	モデル形式の誤差
-----------	----------	---------	----------

$$C_o(\alpha, \beta) - C_m(\alpha) = c(\Delta c)_o + c(\alpha, \beta) - d(\Delta\alpha) - f(\alpha) \quad (3)$$

残差	計測誤差	固有の不確実性	入力の不確実性	モデル形式の誤差
----	------	---------	---------	----------

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。その文献によれば、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 等の考え方を下記のように紹介している。

- ・ 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する。
- ・ 一定の範囲内での最高濃度の予測値・実測値の比較を行う。
- ・ 累積濃度分布曲線（PC 曲線）での予測値・実測値の比較を行う。

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:	$\text{NMB} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{M_i - O_i}{O_i}$
Mean Normalized Gross Error:	$\text{MNGE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{M_i - O_i}{O_i}$
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:	$\text{RATIO} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{M_i}{O_i}$
Mean Bias:	$\text{BIAS} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i - O_i)$
Normalized Mean Bias:	$\text{NMB} = \frac{\sum_{i=1}^N (M_i - O_i)}{\sum_{i=1}^N O_i} = \text{BIAS} / \bar{O}$
Mean Fractional Bias:	$\text{FBIAS} = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(M_i - O_i)}{(M_i + O_i)}$
Mean Error:	$\text{ERR} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N M_i - O_i $
Normalized Mean Error:	$\text{NME} = \frac{\sum_{i=1}^N M_i - O_i }{\sum_{i=1}^N O_i} = \text{ERR} / \text{OBS}$
Mean Fractional Error:	$\text{FERROR} = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N \frac{ M_i - O_i }{(M_i + O_i)}$
Correlation Coefficient:	$\text{CORRCOEFF} = \frac{\sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}}$
Root Mean Square Error:	$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i - O_i)^2}$
Normalized Ratio of Standard Deviation:	$\sigma^* = \frac{1}{\bar{M}} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})^2} \bigg/ \frac{1}{\bar{O}} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}$
Percentage within a Factor of 2:	計算値と観測値の全ペア(N)のうち、 $0.5 \leq M_i/O_i \leq 2$ 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。

2.3 大気拡散シミュレーション文献調査（日本語）

本節では、大気拡散シミュレーションに関する文献（日本語）に対し、シミュレーション対象（2.2 節に記したシミュレーションの活用対象の分類より）の4つの分類毎に、主要文献の内容を概説すると同時に、その対象毎（各項）に課題を整理し報告する。

2.3.1 汚染物質の拡散問題一般

本項では、汚染物質の拡散問題一般を対象として、シミュレーションの方法論をもとに分類し、その歴史的発展も含めてその文献調査結果を報告する。報告する方法論としては、モデルの発展の歴史から

- (1) プリウムモデル
- (2) メソスケール気象モデル
- (3) CFDモデル (RANSとLES)

の順とする。本報告の目的の一つである CFD(LES)の発展を知る上で、(1)、(2)、(3)CFD(RANS)の活用とそれらの課題を概観することは不可欠であり、モデルの特徴の他、モデル間のギャップに対する知見を蓄積する必要がある。さらに、これらの発展をレビューすることで、汚染物質拡散という20世紀に大きな社会課題となった大気環境の改善に向けた取り組みについても、おおよそ概観することが可能である。放射性物質の拡散も、この過程の中の一つの課題であったことを記す。

(1) プリウムモデル

東野晴行(2000) 3)らは、揮発性有機化合物トリクロロエチレンなどを対象に、特定の地域の長期平均的な環境濃度を推定するモデルを開発した。その際、2次元プリウム・パフモデルをもとに、関東地方を5km×5kmの解像度で分割し、AMeDASの毎時の気象データを用い、拡散時間を4時間として、発生源メッシュから5kmへの寄与を求め、冬季と夏季における月平均の濃度分布を求めた。実測値との比較により、計算の再現性を検討した結果、季節、地点により相関係数 $R=0.37, 0.51, 0.86, 0.88$ などの結果が得られたと報告している。なお、報告されたモデルは、この後も利用され、これ以降の各文献にて報告がある。日本におけるプリウムモデルの代表的活用例の一つと見ることができる。

河野仁(2000) 4)らは、文献タイトル「欧米における大気拡散モデル—新世代の近距離大気拡散モデルについて」にあるように、平坦地における風下距離約20kmの範囲で、煙突や自動車からの拡散予測に広く使われ、30年以上の実績を持つガウス型プリウムモデル (Pasquill-Gifford) を、大気境界層の観測による相似理論の発展に基づき、摩擦速度 u^* 、モニン・オブコム長さ L 、対流速度スケール w^* 、混合層高さ z を用いて拡散幅を記述する新しい拡散モデル (OMLモデル) を紹介し、標準的なモデルである米国環境保護庁の Industrial Source Complex Model(ISCST)との比較結果を紹介している。上記文献によれば、予測値が実測値の1/2から2倍の範囲に入るデータの割合は、OMLモデルで60%、ISCSTモデルで37%と大幅な改善が見られたことを報告している。

伏見暁洋(2002) 5)らは、2001年度から実施された PRTR(Pollutant Release and Transfer Register)法（「特定化学物質の環境への排出量の把握等及び管理の改善の促進に関する法律」）に基づく化学物質の排出データについて、米国環境保護庁の ISCLT3(Industrial Source Complex Long-Term Model version 3: プリ

ュームモデル)を用いて、NO_xを対象にモデルの予測精度を検証し、リスク評価・管理への利用可能性を検討すると同時に、排出データを用いた濃度予測を行い、PRTR データを検証する目的で、東京都と川崎市を対象としてNO_xの拡散予測を行った。対象地域は、東西 116km、南北 84km で、分解能は 2km であり、川崎市と東京都のそれぞれ 9 地点の予測値/実測値の比として、0.83~1.11 (平均 0.96) の結果が得られたと報告している。

東野晴行(2003) 6)らは、曝露・リスク評価大気拡散モデル(ADMER) (正式名称:産総研-曝露・リスク評価大気拡散モデル、National Institute of Advanced Industrial Science and Technology-Atmospheric Dispersion Model for Exposure and Risk Assessment: AIST-ADMER)の開発を報告した。このモデルは、関東地方のようなスケールでの化学物質濃度の時空間分布を推定するため、5km×5km の空間分解能と任意の期間(基本は 1 ヶ月間)で 6 つの時間帯の平均値が推定される。移流拡散過程は、混合層内を均一濃度とする 2 次元プルーム・パフモデルで、区分された気象条件毎に拡散計算を行い、その各気象区分の月単位出現頻度の重み付け平均値として期間平均値(月平均値など)を算出する。鉛直混合高さは、大気安定度 A の時、600m、B は、500m、C は、400m などと変化させる。汚染物質としては、NO_xや揮発性有機化合物を対象として、実測データとの比較検討を行い、計算値と実測値は良い一致を得たと報告している。

以上、プルームモデルは、大気中の汚染物質の環境影響評価の手法として実用的に使われ、NO_x(窒素酸化物)総量規制マニュアル、ごみ焼却施設環境アセスメントマニュアルや道路環境影響評価技術手法等で、その評価方法が活用されている。しかし、当該モデルの使い方については、次のような課題が指摘されている。鈴木秀男(2004) 7)は、予測精度に大きな影響を与える条件設定に対し、以下のような課題が挙げられることを紹介し、その解決策や新しい方針等を述べている。

- ・NO_x総量規制マニュアルでは、総量規制を目的とするため、気象条件の処理、安定度の判定、拡散幅の設定等について、実測値と整合性が取れるように調整をする前提となっているが、大半のアセスメントにおいて、このような手順を明確に定めることは困難である。
- ・気象条件の風速測定高さ、安定度判定・気象条件階級分けの高さ、実煙突高さ、有効煙突高さなどの設定や補正手順等を明確に定めることは困難である。
- ・運用上の問題点としては、多くの予測担当技術者は、総量規制の予測担当者ほどには専門的ではない場合が多く、手法や条件の選択が適切でない、予測結果の再現ができない、計算が正しくない、といったケースが見られる。

これらの現状を改善するには、予測担当者の技術の向上が望ましいことは言うまでもないが、運用現場の実態に即し、マニュアルの記述を分かりやすくする、操作が容易なプログラムを用意する、予測作業および審査段階等においてチェックを適切に行う等の対策が必要であると述べている。

吉門洋(2006) 8)らは、発生源近傍解析モデル METI-LIS と広域拡散モデル ADMER を用いて、2002 年度の PRTP 届出大気排出量の大きかった地域、全国モニタリングデータが高濃度であった地域について解析を行った。工業地域などの特定の事業所からの排出が際立つテトラクロロエチレン、ベンゼン、1,3-ブタジエン、アクリロニトリル等に関しては、モニタリングによる年平均濃度とモデル計算濃度の間に良好な対応

が見られた。ただし、ベンゼンでは、ADMER から見積もられるバックグラウンド濃度に加えて更に全国一律的なベース濃度 $1\mu\text{g}/\text{m}^3$ を仮定する必要があった。これらの物質では PRTR の排出量推算、拡散モデル、モニタリング年平均濃度の三者の合理的な関係が示された。有害大気汚染物質の中でも大気中での反応生成が無視できないホルムアルデヒド、アセトアルデヒド、未把握発生量が大いといと推定されるクロロホルムでは、直接排出の大きい事業所周辺でも拡散モデルにより良好なシミュレーション結果は得られなかったと報告している。

東野春行(2009) 9)は、ADMER について、さらに次のように報告している。従来化学物質の暴露およびリスクは観測データのみに基づいて評価されてきたが、物質の数、対象地域により莫大な労力を要するため、化学物質の大気中の濃度を排出量と気象条件から計算する ADMER (産総研－曝露・リスク評価大気拡散モデル) を開発した。この利用により、評価可能な地域、物質の数が飛躍的に増加し、定量的評価が可能となったと述べている。日本においては、PRTR (環境汚染物質排出移動登録) 制度が施行され、化学物質の排出量データが入手可能となったことから、自治体、事業所など様々な大気系化学物質のリスク評価に利用されている。

以上、前述の近藤裕昭(2001) 1)によると、1960 年代に大気汚染が公害問題として深刻化するにつれて、プルームモデルが使われるようになり、20-30km 程度の局地的な大気環境濃度の評価で、実用的に用いられてきた。上記の発展と実用上の課題については、CFD を活用する局地高解像度の大気拡散シミュレーションを評価する上でも有用な知見になると考えられる。

(2) メソスケール気象モデル

前述のプルームモデルの活用による課題として、非メタン炭化水素等が紫外線によって反応する光化学大気汚染では、発生源が多様で複雑化した他、自動車など発生源の空間的な広がりと共に、大気中の反応が時間の経過とともに進むことから、発生源からかなり離れたところで大気汚染が起きるようになった。更に、汚染物質は発生源から数～百 km 輸送されながら光化学反応を起こすこともある。その際、輸送を担う大気現象は、メソスケールと呼ばれ、メソスケールの気象モデルの開発が進んだ。この現象の高さは、大気の厚さとして数 km であるが、水平方向と比べると極めて小さく、鉛直方向成分の運動方程式の Dw/Dt 項を省略した「静水圧」近似が用いられた。実際、前述の近藤裕昭(2001) 1)には、対象範囲が東西 480km、南北 400km、関東平野を中心として房総半島から能登半島を含む領域を、マルチネステッドモデルという方式で多重の領域分割をした解析例が示されている。

新野宏(2001) 10)らは、積乱雲などの大気の渦について、数値シミュレーションの結果を報告している。中でも、竜巻は積乱雲に伴って発生する激しい渦であり、代表的な直径は 100m 程度で、最大風速は 140m/s を超えるものもある。再現に用いたモデルは、アメリカ・オクラホマ大学で開発された ARPS(Advanced Regional Prediction System)Ver.4.5.1 で、当該モデルは準圧縮系非静力学 3 次元モデルで、風速、温度、水蒸気、雲水、雨水などを予報変数としている。計算領域は、水平方向 64km 四方、鉛直方向 14.1km、水平格子間隔 500m、鉛直格子間隔は地表面付近では 50m、モデル上端では 550m であった。さらに、当該モデルを用いて水平格子間隔を 150m として竜巻の再現も試みられた他、気象庁が現業数値予報に用いている領域予報モデル(RSM:Regional Spectral Model)と気象研究所非静力学モデル(MRI-NHM: Meteorological Research Institute – Non-Hydrostatic Model)を用いて、多数の積乱雲が組織化された大きな渦 (ポラーロウ) が解析されている。その際、領域予報モデルの予報結果を初期値及び境界値として、

格子間隔 5km 及び 2km の MRI-NHM による解析を行っている。当該モデルは、完全圧縮系の非静力学モデルで、計算領域は水平方向 720km 四方、鉛直方向は約 19km である。積乱雲は水平スケールが数 10km、竜巻は水平スケール 100m、ポーラーロウは、数 100km の現象である。積乱雲と竜巻、積乱雲とポーラーロウのように、スケールは大きく異なるが、同時に両者を解像することが本質的である現象の数値シミュレーションが現実的になりつつあると報告している。

大屋裕二(2002) 11)は、大気境界層研究のための室内実験として温度成層風洞を用いた実験的研究について報告し、大気の一日のサイクルにおける代表的な 2 つの境界層、安定境界層 (SBL: Stable Boundary Layer) と対流境界層 (CBL: Convective Boundary Layer) を風洞内に再現する方法を検討した。その結果、大気観測で得られている SBL、CBL の流れ構造、乱流特性が実験で良く再現されたと報告している。また、白形昌二(2002) 12)らは、大気安定度の変化が排ガス拡散に与える評価を検討するため、大型の温度成層風洞を用いて強不安定から強安定までの 6 つの安定度に対する Pasquill-Meade の鉛直拡散幅の再現を試みた。それぞれの安定度における気流の乱れ強さと乱流スケールを計測し、拡散幅との関連を議論した。その結果、風洞内で得られた鉛直拡散幅は、リファレンスと良く一致し、その傾向は気流の乱れ強さによって定められることが確認された。主流成分による乱流スケールは、野外観測結果に示される値の近辺に分布し、鉛直成分による乱流スケールは大気安定度に応じて変化した。風速の分散は境界層特性に応じたスケールリングにより、ほぼ一定の関数値に収束し、本稿で考慮した相似則の範囲内で、野外観測の傾向に一致した。これらの結果により、風洞内で Pasquill-Meade の安定度を再現することは可能と結論付けた他、風洞実験による非中立時大気環境アセスメントへの活用について、技術的可能性があることを示した。これらの研究は、風洞実験を気象現象の下で大気拡散現象を議論 (検証) する際に重要と位置付けられる。

歌野原陽一(2006) 13)らは、安定成層大気での山越え気流の 2 次元数値シミュレーションを行い、山岳波 (山越え気流が山の風下側で波動する) が黄砂の輸送に及ぼす影響を調べた。黄砂の輸送は、スカラー濃度により模擬し、大気モデルには、計算領域全体で密度減率が一定な 1 層モデルと、高度 11km で密度減率を変化させた 2 層モデルを用いた。両モデルとも、大気安定度が増すにつれ山背後の下降流が強くなり、スカラー濃度は、より低く降下した。2 層モデルでは山岳波が下層にトラップされ、地表面にローター (山越え気流が山の風下側で波動する) が出現し、スカラー濃度はローターに取り込まれると強く拡散した。スカラー濃度の地表面濃度は 1 層モデルより 2 層モデルの方が高く、特にローター発生位置で高濃度になると報告している。

香月壮亮(2009) 14)らは、大気境界層中の拡散性状が、その温度成層によって大きな影響を受けるとして、大気境界層の特性を把握するため、風洞実験において熱線風速計の x 型プローブ*と冷線温度計**を用いた同時計測システムにより、様々な大気安定条件下で風洞実験を行い、速度変動と温度変動の同時計測と流れの可視化により大気境界層の発達過程を検討し、さらにその実験結果と標準 k-ε モデルとの比較により、様々な大気安定度に適用可能な新しいモデルを提案した。(*熱線風速計の x 型プローブ: 電氣的に加熱した 2 対の細い金属線を X 字の頂点に置いて交差させ、熱損失により風速を計る。 **冷線温度計: 1 対の細い金属線に流れる微小電流変化から温度を測定する。両者を組み合わせて、風速と温度を同時測定する。)

(3) CFD モデルの利用 (RANS モデルと LES モデル)

市川陽一(2000) 15)らは、RANS モデルにラグランジュ型粒子モデルを組み込み、排煙上昇過程を含む大気拡散予測モデルを開発した。粒子のランダムな運動を表す確率微分方程式を基に鉛直成分に浮力項を付加

している。実煙源のライダー観測と野外トレーサ実験により、モデルとの良い一致が得られたと報告している。ラグランジュ型粒子モデリングの有効性を示す一例と見ることができる。

中山昭彦(2003) 16)は、複雑地形上の気流シミュレーションについて、RANS 及び LES の活用における今後の課題を指摘するため、地表境界面の複雑さと LES、 $k-\epsilon$ モデル、各々のメリット・デメリット、直交座標系と一般座標系のメリット・デメリットを比較検討した。乱流エネルギーの 80%は、積分長さスケールの 1/6 から 6 倍程度の長さスケールを持っている*とされていることから、シミュレーション領域の長さが積分長さの 10 倍程度であれば、ほとんどの乱れを解像することができる。一方、地表近傍では境界に近づくほど乱れ長さスケールも小さくなるので、局所的にはエネルギー保有乱れ、あるいは小さなスケールの渦を十分解像することは難しい。壁面に近い位置では長さスケールは壁面からの距離に比例して減少するので、境界に隣接する格子はいくら細かくしても粘性スケールまで分解しなければエネルギー保有乱れを解像することはできない。従って全体の流れの再現には、80%以上の乱れを解像できる流れの主要部の SGS モデリングよりも、解像不可能な境界近傍乱れのモデリングが重要となると指摘している。この対策の一例として、瞬時の壁面近傍速度特性の一般化ができれば、境界条件として使える可能性があるとして、瞬時速度場の平均速度場の分布である壁法則からのずれを圧力勾配の関数とする方法を提案している。さらに、LES シミュレーションのひとつの考え方として、実際の瞬時の流れの再現を目指すのではなく、あくまでもフィルター平均された流れ場の再現を目標とすれば、壁面境界自体フィルター平均してしまう方法が考えられる。これは完璧には再現できない複雑な地形を表現する際に必須な考え方であると述べている。(*乱流中では、大きなスケールの渦から小さなスケールの渦へとエネルギーが伝達される。複雑な乱流現象を特徴付ける長さスケールとして、積分スケールと呼ばれる大規模な流体塊の運動を表現するスケールと、コルモゴロフ長さと呼ばれる粘性作用により運動エネルギーから熱エネルギーへと変換される最小スケールがある (S. Pope : Turbulence, Cambridge University Press, 2000))。

道岡武信(2003) 17)らは、計算格子を比較的粗く設定した LES で、瞬間高濃度値を精度良く予測するため、風洞を模擬した領域での LES 拡散計算を行った。解析手法は、対流項、粘性項とも 2 次中心差分で、時間方向は 2 次精度の Runge-Kutta とする一方、拡散方程式中の対流項に FCT(Flux-Corrected Transport)を採用し、LES は、モデル中のパラメータを流れ場に応じて自動的に決定できる dynamic SGS を用いた。FCT は、濃度勾配が大きく、濃度が負の値、あるいは初期濃度より大きな値となる領域に適切な数値粘性を加えるものである。さらに濃度分布にある確率密度関数 (ベータ PDF モデル) を仮定して、小さな密度変動の間歇性を考慮した。この結果、比較的粗い計算格子の場合でも、ベータ関数モデルを考慮することにより、ゼロ濃度出現頻度 (間歇性) や瞬間高濃度値も精度よく予測することができたと報告している。

都市域における CFD モデルの活用例として、黄弘(2004) 18)らは、市街地の火災について、モデル化した市街地を対象として、 $k-\epsilon$ モデルによる流体方程式に Magunussen の火炎燃焼モデル (Magnussen et al.,1977)、放射モデル、火の粉をオイラー的に濃度分布として求めるモデルと、ラングランジュ粒子として火の粉飛散モデルとを組み合わせて、市街地における火災のシミュレーションを行い、火の粉が火炎プルームによる上昇流によって巻き上げられる現象を再現した。

田村哲郎(2006) 19)らは、都市域での危険性物質の拡散問題に対し、巨大構造物が点在する霞ヶ関と、ストリートキャニオンを有する低中層建物密集地域や高層建物が狭い間隔で建ち並ぶ神田の 2 つの都市域を対象として LES の解析を行った。複雑な粗度様相を呈し、剥離現象や循環流など複雑な乱流場をもつ都市域において、各種粗度形態に応じた気流特性や濃度拡散の分布パターンの把握、および危険度予測の観点から

瞬間高濃度の出現の評価を目的とした。計算アルゴリズムは MAC 法をもとに、圧力 Poisson 方程式の反復解法には SOR 法を用いた。空間微分項は 4 次精度中心差分、時間発展は 2 次精度 Adams-Bashforth 法、拡散場では、移流項は CIP、拡散項は 4 精度中心差分を用いている。計算領域は主流・水平方向 1000m、鉛直方向は 800m の規模とし、流入部に境界層の変動風を生成するドライバー部を設けた。まず、数値モデルの検証として、一様配列粗度ブロックの拡散実験との比較を行い、平均流速、乱流強度、濃度の時系列変化と瞬間高濃度の出現特性などを検討した。さらに実在都市のモデルでの拡散特性を検討した結果、濃度分布は実在都市では、建物やストリートなどの配置形態に強く依存し、一様配列粗度ブロックを用いての検討では全ての拡散機構を把握することができないと述べ、非定常性の強い濃度変動、異なるピーク濃度値を持つガス塊の頻出がみられたと報告している。

佐田幸一(2008) 20)らは、原子力発電所施設に関する安全解析において、周辺の複雑な地形や建屋の影響を考慮した放出源の有効高さの算定に対し、風洞実験の代替を意図した数値モデルの開発を行い、風洞実験結果との比較を行った。気流モデルについては、鉛直方向に σ 座標系を用いるものの、地表付近の計算格子で建屋形状を再現するため、一部に座標変換を用いる一般座標系とした。また、建屋の複雑形状や数多くの建屋が存在する気流解析の場合には、乱流モデルの選択よりも、建屋周辺の計算格子の取り方に結果が依存するという知見を基に、計算時間の実用性の観点から、2 方程式系の $k-\epsilon$ 乱流モデルを選択した。なお、排ガスの拡散モデルは、Thomson のラグランジュ型粒子モデルを採用した。対象領域は、風下方向 x 、横断方向 y および鉛直方向 z について、それぞれ 8.2km(200m 格子、41)、0.8km(200m 格子、4)および 2km(地表付近 10m、不等間隔、21)とし、濃度計算の格子幅は x 、 y 方向 50m、 z 方向 10m の一様格子とした。放出源の有効高さの評価結果では、風洞実験結果をほぼ再現できたと報告している。

足永靖信(2010) 21)は、都市設計の観点から都市建築空間の熱環境を広域スケールで解析するため、RANS モデルを適用し CFD 解析を実施した。解析はメソスケール気象モデルにより 1 日分の気象条件を求め、それを基に 1 日のある時点の広域熱環境を定常計算により再現した。3 次元直交座標系 (スタaggerド)、標準 $k-\epsilon$ モデル、移流項に 1 次風上差分を使用し、SIMPLE 法で解いた。東京 23 区全域を含む水平 33km 四方を対象に、鉛直高さは標高 500m まで、水平方向 5m 格子、鉛直方向は 1~10m 程度で分割した。総格子数は約 50 億で、地球シミュレータで計算を実行し、湾岸地域における海風の流入現象と都市空間の間隙を流れる風をともに再現したと報告している。なお、LES の発展と共に、LES への期待は強まるが、環境設計において、時間平均し環境を把握する需要は今後もあり続けるものと指摘している。

田村哲郎(2010) 22)は、都市型の乱流境界層の LES を計算する上でのモデルの課題を指摘している。都市上空の境界層の特徴は、地表面の複雑な粗度による乱流構造を有し、それを再現するため、粗度ブロックによる粗面乱流境界層を検討した。さらに、都市細密データを利用した都市型乱流境界層の LES をもとに、風洞実験結果、気象モデルの解析結果との比較検証を行った。現状では、気象モデルの分解能は 1km、その一方、都市の地表被覆形態を再現した LES では、2m から 5m の水平格子で対象とする系の大きさは 2km 程度と、まだ両者にギャップがあることが分かる。

大嶋拓也(2012) 23)らは、オープンソースソフトウェア OpenFOAM の利用により、実在市街地における風・音複合環境解析を行い、市街地モデルの形状作成から、解析及び結果の可視化の一連の作業を示した。対象は、東京都渋谷区・渋谷駅周辺の 1km 四方の領域で、解析には RNG $k-\epsilon$ モデルを用いている。

大風翼(2016) 24)らは、市街地環境の予測・分析の上での RANS の役割を考察した。市街地内の Microclimate(微気象)は、風だけではなく短波・長波の放射による熱輸送、建物壁体や地表面への伝導、植物か

らの蒸散や水面からの蒸発、空調や自動車からの排熱等の様々な要因に強く左右される。これら多様な要素の各々のモデル化の精度と必要とされる計算時間を考えると、依然として LES よりも RANS を選択するケースも多いはずと指摘している。今後大規模な並列化や CFD のオープンソースコードの普及により LES の研究がさらに進むと思われるが、RANS モデルの概念は、LES により瞬間的現象を追うだけでは見落としてしまう現象の大局的理解や Key parameters の抽出、現象の抽象化に対し、非常に有益であることを述べている。即ち、予測ツールとしての LES、考察のためのツールとしての RANS modeling は、大規模 LES が可能となってきた今だからこそ、改めて RANS modeling に求められる役割を再定義し研究を進めたい。さらに、都市環境は、メソ気象スケール、都市スケール、建物スケールと異なるスケール内の各種の物理プロセスが相互に関連して形成されていることから、次の図 2-1 のようなダウンスケールによるネスティング解析が考えられると述べている。

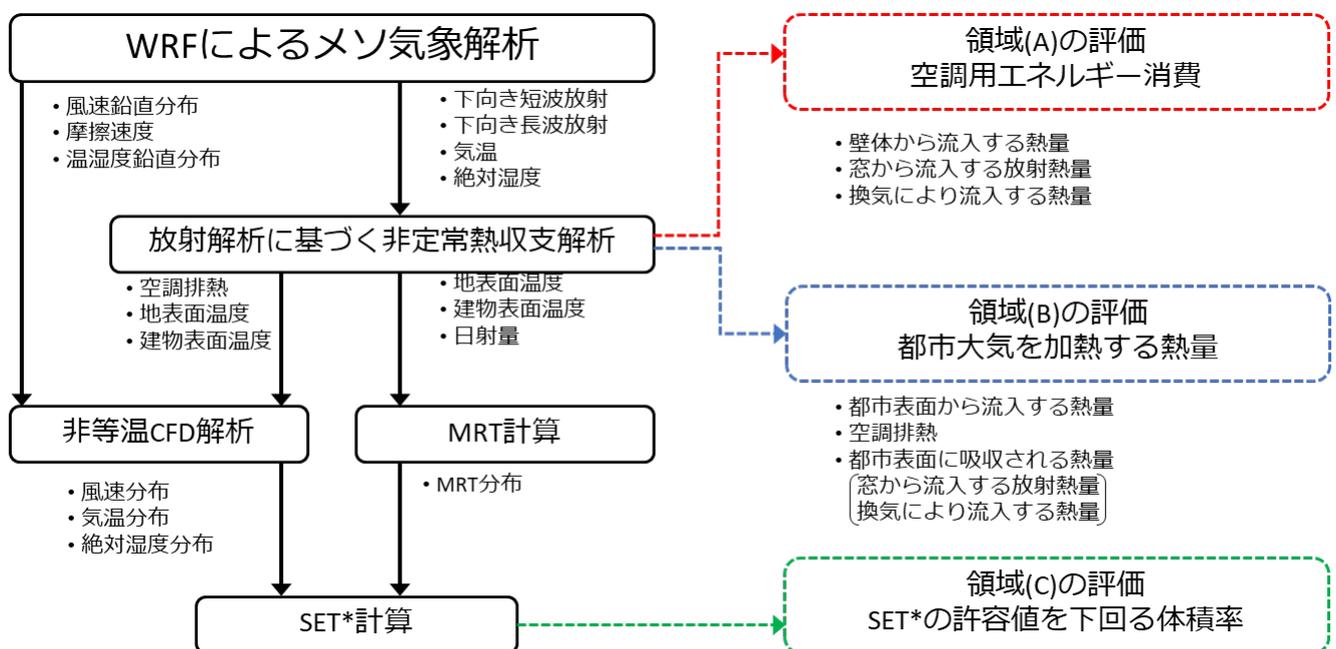


図 2-1 ダウンスケール解析を用いた 3 つの観点からの評価フロー（文献 24）の図 8 を元に複製）

小野浩己(2017) 25)らは、地熱発電所の環境アセスメントの際に行われる冷却塔からの硫化水素拡散予測に対して、従来の予測手法である風洞実験を代替する目的で、CFD をベースとした数値モデル開発を行った。地熱発電所は、山間部に建設される場合が多いこと、冷却塔高さが低く、周囲に同程度の大きさの建屋が存在することなどを考慮し、地形および建屋が硫化水素拡散に及ぼす影響を的確に捉えるため LES を採用した。その際、LES に適した地形適合格子および建屋の形状を精密に再現した非構格子のハイブリッド格子を用いた。実際の地熱発電所を模擬した複雑地形での風洞実験を行った結果、環境アセスメントで重要となる最大着地濃度に対して、すべてのケースで FAC2 範囲内となり、半数のケースでは、風洞実験に対して 10%以内の予測精度を有することを示した。現在、環境アセスメントへの CFD の適用では RANS が広く用いられているが、一般的に、RANS は LES に比べて格子数が削減できることおよび定常解法が利用可能なことで、計算コストの面では LES に比べて優位であり、より数多くの風向・風速条件における検討が可能になる等のメリットが考えられる。しかし、建屋および地形の影響が複合した複雑乱流場での普遍

的な解析精度を期待することは現時点では難しい。なお、当該研究開発にて開発した LES ベースの数値モデルは、実行に要した期間およびコストが、従来の風洞実験に比べて約 1/2～1/3 程度となったとの報告があり、風洞実験の代替手法として十分に価値のあるものと考えられると指摘している。

○本項 (2.3.1) のまとめ

以下、本項(2.3.1)のまとめを記す。汚染物質の拡散を対象とする文献において、分類した各シミュレーション手法に関し、その発達した歴史や経緯を踏まえて分類した、モデルの構成要素、検証に用いたデータ、そして得られた成果を次の表にまとめた。(なお、シミュレーションのみで検証データの利用がないものやシミュレーションモデルの紹介、考察のみの論文は除いてある。)

文献 No.	構成要素	検証データ	成果
3)	2次元プルーム・パフモデル 発生源でのメッシュ形成 AMeDAS 気象データ	広域モニタリングデータ	冬季と夏季における月平均の濃度分布実測-推定の相関係数を取得
5)	コード名：ISCLT3 プルームモデル 化学物質の排出データ 鉛直拡散幅と大気安定度	モニタリングデータ 温度成層風洞	PRTR 発生源データ検証 $0.83 \leq \text{FAC2} \leq 1.11$ 風洞実験による非中立時の評価
6)	コード名：ADMER 2次元プルーム・パフモデル 発生源でのメッシュ形成	広域モニタリングデータ	実測データとの比較検討
8)	コード名：METI-LIS、 ADMER 発生源データベース	広域モニタリングデータ	モニタリングによる年平均濃度とモデル計算濃度の間に良好な対応 PRTR の排出量推算、拡散モデル、モニタリング年平均濃度の関係を確認
10)	コード名：ARPS 気象モデル(準圧縮系非静力学 3次元モデル) コード名：MRI-NHM 気象研究所非静力学モデル ネスティング	気象データ	竜巻と積乱雲の再現
12)	Pasquill-Meade の鉛直拡散幅の再現	温度成層風洞 野外観測結果	鉛直拡散幅と大気安定度の関係 風洞実験による非中立時の評価
15)	排煙上昇過程 実地形モデル ラグランジュ粒子拡散	煙源のライダー観測 野外トレーサ実験	気流場の静力学モデルの妥当性確認 排煙上昇過程の確認
17)	LES(dynamic SGS)、 FCT スキーム 比較的粗い格子	風洞実験	瞬間高濃度値を精度よく再現
19)	LES 建物アレイ、実都市モデル MAC, SOR, CIP 流入部ドライバー	野外実験 一様配列粗度ブロック	非定常性の強い濃度変動、異なるピーク濃度値を持つガス塊の頻出がみられた
20)	放出源有効高さ 地形・建物モデル k-ε モデル	風洞実験	再現性確認 放出源有効高さの推定
22)	LES 都市型乱流境界層	気象データ(風速・気温)	LES の適用性を検討

	流入境界条件 地表(ラフネスブロック)	風洞実験	キャノピー内での乱流構造の表現
25)	LES 地形適合格子+非構合格子 複雑地形 排気上昇過程	風洞実験	最大着地濃度 FAC2 範囲内 濃度鉛直プロファイル 環境アセスでLESモデルは風洞実験 の代替手法となり得る

2.3.2 風況予測、風車の適地検討、市街地や道路構造物、建物の設計（風荷重の検討など）

本項では、大気拡散シミュレーションの活用対象の分類に従い、上記対象に係る文献（日本語）を調査した結果を報告する。

村上周三(2003) 26)らは、急峻な山岳地形にも適用可能な局所的風況予測システム LAWEPS (Local Area Wind Energy Prediction System)を開発した。当該システムは、下図(図 2-2)に示したように、領域を5段階に分け、500km(5km 格子：1 段階)から 200km (2km 格子領域：2 段階目)、そして 50km (500m 格子領域：3 段階目)を Mellor-Yamada (Lvel2.5) の気象モデル(静力学モデル)改良版を用い、4 段階目を気象モデルと工学モデル(非静力学モデル)の接続領域とし、最内側の 5 段階目を 1km (10m 格子)の工学モデルとして、改良型 k-ε モデルを用いるシミュレーションを行った。風洞実験との比較や、野外観測データとの比較によるシステムの検証を基に、年間平均風速の値を既存の風況予測モデルである WAsP (Wind Atlas Analysis and Application Program : Sandström,1994)や AVENU (Lissaman et al.,1989)と比べた結果、年平均風速を 10%以内の誤差で予測する目標が達成できたとしている。なお風況予測においては、1年分の風速の時系列データが必要となるが、計算時間が膨大となるため、6 日おきに、1 日 4 回の計算のみを行う形として、年間の平均風速などを求めている。

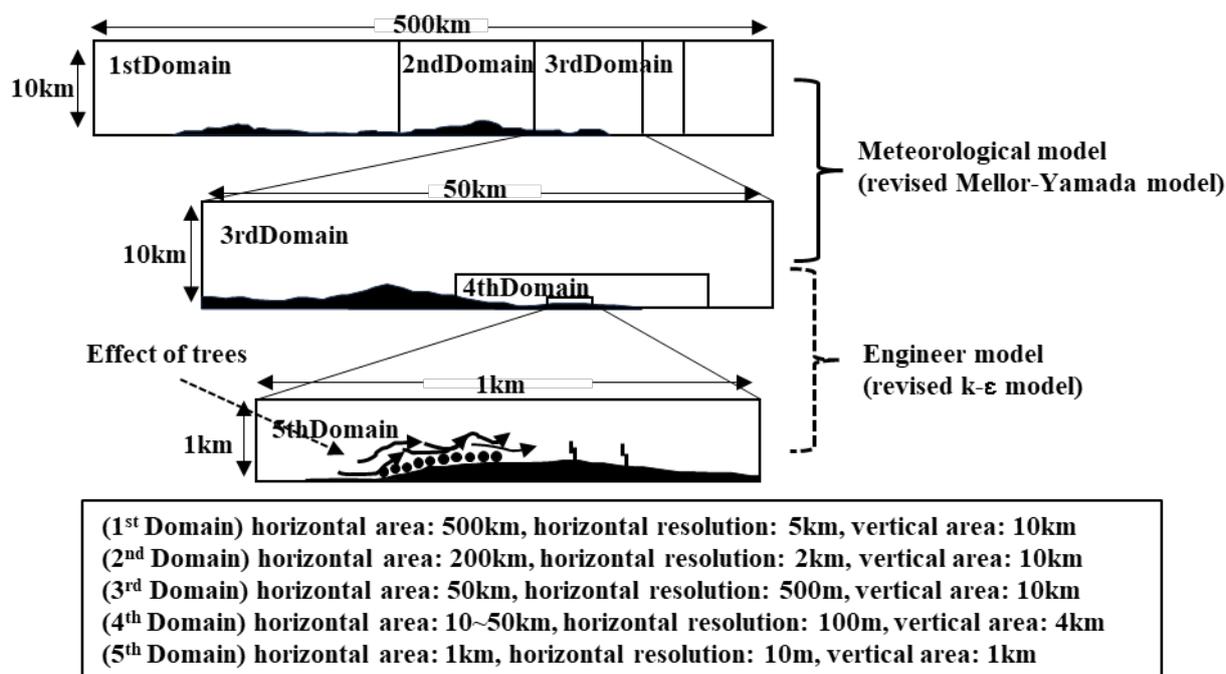


図 2-2 多段風況シミュレーションモデルの各計算領域 (論文 26) の図 1 を複製

石原孟(2003) 27)が開発した非線形風況予測モデル MASCOT は、一般座標系、有限体積法、半陰解法 SIMPLE 法を用い、乱流モデルは、標準または修正 k-ε モデルを用いた。対象領域の境界条件としては、全球モデル ECMWF (ヨーロッパ中期気象予報センター) による 6 時間ごとの客観解析値をもとに、非静水圧大気力学モデルである RAMS を用いて、8km 格子 (480km×640km)、4km 格子 (200km×200km)、2km 格子 (40km×40km)、1km 格子 (20km×20km) という 4 段のネスティングを行い、10km の領域に対して、地域気象モデルと同様の 1km の分解能による地表面条件(粗い地形と粗度条件)と 10m 格子によ

る地形形状（細かい地形と粗度）の結果を比較し、統計的処理により、地域風況から局所風況への変換を行い、年平均風速を求め、実測値と比較した。当該手法を著者らは、力学的・統計的局所化と呼んでいる。その結果、青森県竜飛岬の竜飛ウィンドパークでは、年平均風速の平均予測誤差は約 8%となり、従来手法の予測誤差の約 3 分の 1 以下に減少できたとしている。

内田孝紀(2003) 28)らは、風力発電設置（適地選定に向け）のための風況精査や発電予測のため、数 100m から数 10km までの局所域スケールに注目して、RIAM-COMPACT (Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Computational Prediction of Airflow over Complex Terrain) を開発した。当該システムは、座標系として、直交座標系と一般座標系の 2 つを選択可能とし、ネスティングを利用し、LES にて最内領域を計算する特徴を持つ。また、圧縮性非静力学方程式系のメソスケールの地域気象モデル CSU-RAMS (Colorado State University, Regional Atmospheric Modeling System) との接合を意図して、156km 四方の領域 1 (4km 格子) から、41km 四方の領域 2 (1km 格子) との間で、2 方向ネスティングと 6 時間おきの 4 次元同化を行いベクトル並列型スーパーコンピュータを用いて 24 時間の風況データを計算している。さらに領域 3 として、9.5km×5.5km×1.46km (水平 50m 格子、鉛直 1.3m~219m 不等間隔格子) に RIAM-COMPACT を適用し、一般座標系モデルによる局地風況予測を LES にて計算し、流下方向鉛直断面では、地表面近傍で流れの剥離や逆流など、風に対する地形降下が明確に再現された。また、急峻な孤立峯を過ぎる流れを解析したケースでは、スーパーコンピュータと、PC クラスタ機、SMP 並列機による計算を実施して計算時間と CPU 性能の比較検討を行い、PC クラスタ機、SMP 並列機がスーパーコンピュータの 1.6 倍、1.1 倍の CPU 時間で結果が得られたと報告している。

神田学(2007) 29)らは、都市における乱流境界層の乱流構造の解明は、科学的な観点からも実学的にも重要であるとして、都市気象のモデル精度向上のための包括的データセット作成を目的として、COSMO(Comprehensive Outdoor Scale Model Experiment for urban climate)実験施設による野外模型都市実験を行った。この実験結果と LES による解析結果を比較し、LES による様々な建物配列を有する都市境界層内の低速ストリーク構造（乱流組織構造）が、屋外実験の結果でも得られたと報告している。当該文献の都市境界層の概念図（図 2-3 参照）を以下に示す。地表面に近い層から 1) キャノピー層、2) 遷移層、3) 接地層、4) 混合層に分類*する。（*一般的な流体力学では、流れが乱流の場合、壁面付近の乱流境界層と中心付近の主流に分けられる。乱流境界層は、壁面から、粘性底層、遷移層、乱流層からなる内層と、主流近くの外層の 4 層で構成される。都市における乱流境界層の乱流構造の解明を目的として、著者らは、内層の部分と、粘性底層に対応する地表面の植生や建物からなるキャノピー層、遷移層、接地層、そして外層に対応する混合層の 4 つの部分に分けて考察している）

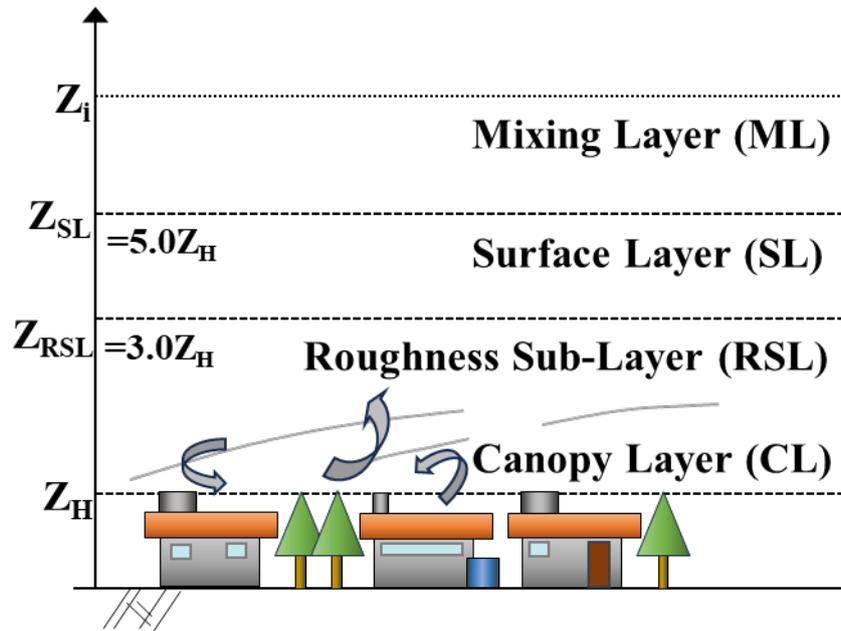


図 2-3 都市境界層の概念図 (論文 29) の図 1 を複製

中西幹郎(2007) 30)は、境界層における乱流モデルの解説を記し、当該論文にて、今後の課題を次のように述べている。当時まで、凡そ 20 年間のモデルを利用した大気境界層研究では、1970 年代前半に発表された LES や MY(Mellor-Yamada)モデルを利用したものが中心であったが、前者は境界層の乱流構造の解明などの基礎研究、後者は数値予報などの応用研究に各々利用されてきたと指摘している。これらの文献の発表と共に、多少の修正・改良が加えられているものの基本的な考え方は変わっていないとしている。その改良の中で、著者の改良 MY モデルの性能は、満足できる水準にあると考えられるが、様々な状況での検証を重ねる必要があるとし、例えば盛んに水の変相がある状況や夜間の強安定な場合が課題であると報告している。その領域では、予想外の循環による (ノンローカルな) 輸送が卓越する場合*もあると考えられると指摘している。(*水の変相による熱移動で生じる密度変化・循環が成層不安定を起こす場合 (積乱雲、雷、急激な温度変化) や、強安定で放射冷却が盛んになる場合と思われる)

田村哲郎(2010) 31)らは、都市域の建築物の強風時の耐風設計への CFD 適用を意図して、乱流計算の高精度化を目的とする解析モデルについて議論した。注目する建物周辺は、非構造格子とし、流入する乱流条件を設定するための助走領域を等間隔直交格子として、オープンソースコードの OpenFOAM により LES 解析を実施した。風洞実験結果との比較により、風向に正対する扁平な高層建物の正面では風圧が大きいという風圧力分布特性は、定量的にも良好な一致を示し、耐風設計に CFD を適用する見通しが得られたとしている。

榎木康太(2012) 32)らは、風力発電施設の適地検討において、山間部の複雑地形上の高精度な風況予測、とりわけ局地的な強風を精度よく推定するために LES を適用した。一般に気象モデルと LES との組み合わせでは、LES の境界条件として気象モデルの結果を用いるネスティング手法と、気象モデルの結果のある格子点の値を参照点とし、それと LES との風速比から任意の点の風速を予測する参照点法の 2 つがある。参照点法では、LES の計算領域の周辺に境界層厚さの数倍程度の吹走距離をとって一定の粗度を設定し、気象モデルの格子点における風速、風向に基づき風速比と風向偏角を設定する。当該文献では、LES 解析

は安定度を中立とし、2000年の台風3号を対象として、参照点法による予測を行った結果、①気象モデルの結果は高層気象観測とよく対応する。②参照点を地上250m、500m、750mの3点を設定して強風解析精度を検討した結果、250mの場合が適切である。③接続の際は、気象モデルでの境界層の状態とLES解析の前提条件との適合性に関して、気象モデルの大気安定度との整合性や、風速・温度の鉛直プロファイル、注目する参照点における風速比や風向偏角などに留意が必要であること等を指摘している。

服部康男(2015) 33)らは、建築物や各種インフラ設備に対する耐風設計などに際し、重要となる中立条件下での接地層を含む地表面近傍における大気境界層乱流の生成過程・組織構造と鉛直方向流体運動との関係を解明するため、高解像度格子を付与した数値気象モデルによるLES解析を行った。再現解析には、WRFをコアとする電中研気象予測・解析システムNuWFASを用いて、東北地方全域をカバーする領域1から太平洋側の仙台平野にフォーカスした領域5までの五重のネスト(図2-4参照)を施し、乱流モデルは、メソスケールではPBL(YSU)スキーム*、マイクロスケールでは、LES(TKE)**を用いた。解析の結果、接地層を含む大気境界層下層での乱流特性は、上空からの地表面近傍へのメソ擾乱(detached eddies)の侵入や地表面近傍での縦渦の重畳構造(super structure)の発達に対する干渉などに随伴する変調として観察されると報告している。(*WRFに組み込まれた大気境界層の乱流モデルの1種:Yonsei University(YSU) boundary-layer scheme、S.Y.Hong et al., On local boundary layer vertical diffusion in a medium range forecast model(2010) **WRF-LESに組み込まれた乱流エネルギー式にもとづく1.5次の乱流クロージャモデル、サブグリッドスケールの拡散を表すために3次元渦粘性が用いられる。D.K.Lilly, On the numerical simulation of buoyant convection(1962))

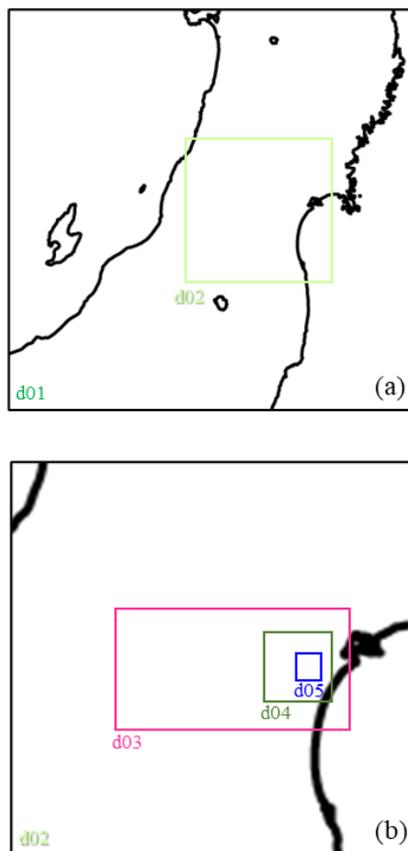


図2-4 メソ(a)およびマイクロスケール(b)を対象とした解析領域(論文33)の図1を複製)

大西領(2019) 34)らは、都市街区内の気温分布の予測を目的とし、街区微気象シミュレーションから得られた高さ 2m における 1 分平均気温分布に対する解析を行った。特に、東京駅周辺地域（東京駅を中心とする 2km×2km 四方）に対し解像度 5m での微気象シミュレーションを行い、高解像度の予測結果を取得した。このデータをもとに、2m 高さにおける 1 分平均気温の水平分布を対象とし、東京大手町で 35 度以上を記録した時間帯の再現計算を大量に実施し、4300 枚の可視化画像を得た。この画像を深層ニューラルネットワークに学習させ、気温分布を超解像する深層学習器を開発した。これを基に、高解像度 5m と、低解像度 20m の結果について、従来の内挿補間法(Nearest neighbor, Bicubic, Lanczos)を用いた場合と、超解像器を用いた場合を比較し、RSME で約 3 割程度、補間精度が高いことが確認された。

安田勇輝(2022) 35)らは、LES 街区微気象シミュレーションによる高解像度予測をリアルタイムに取得することを目指し、深層学習を用いた超解像(Super Resolution, SR)シミュレーション法を開発した。大西領ら（上記）による報告に対し、気温分布に加えて建物高さ分布、水平風速分布、地表面下向き日射量の水平分布を学習させることにより、「物理超解像」器を開発したと述べている。下向き日射量の学習により、建物の作る日向、日陰のコントラストや、建物の境界付近の温度分布を精度よく再現可能であるとし、物理過程の学習の結果であると報告している。

○本項 (2.3.2) のまとめ

前項 (2.3.1) と同様、本項(2.3.2)でも、本項の活用対象に係る大気拡散シミュレーションの精度向上に関するモデルの構成要素、検証データ、得られた成果について、次の表にまとめた。なお、シミュレーションのみで検証データの利用がないものやシミュレーションモデルの紹介、考察のみの論文は除いてある。

文献 No.	構成要素	検証データ	成果
26)	コード名 : LAWEPS 気象モデルと工学モデルの結合 改良型 Mellor-Yamada L2.5 モデル 改良 k-e モデル 樹木 Canopy のモデリング 複雑地形 ネスティング 気象データによる初期境界条件設定	風洞実験 野外観測	予測結果は風洞実験と非常によく一致 年平均風速を 10 % 以内の誤差
27)	コード名 : MASCOT 気象モデル(RAMS)と工学モデルの結合 一般座標系、有限体積法 修正 k-e ネスティング 全球モデル結果を初期境界条件	風洞実験 野外観測	年間平均風速を予測、平均予測誤差は約 8%
28)	コード名 : RIAM-COMPACT 気象モデル(RAMS)と工学モデルの結合 一般座標系/直交格子系 修正 k-e ネスティング 4次元データ同化	温度成層風洞	急峻な複雑地形に起因した様々な風況パターン (流れの衝突、剥離、再付着、逆流など) が精度良く再現されその有効性が示された
29)	都市乱流境界層の乱流構造と相似則 地表面粗度、熱粗度、都市域熱環境 LES	屋外都市模型実験	都市境界層内の低速ストリーク構造 (乱流組織構造) が、屋外実験の結果でも得られた
31)	都市の建築物の耐風設計 OpenFOAM (LES) 構造格子・非構造格子の重合	風洞実験	建物側面の風圧力分布特性が定量的にも実験と一致した
32)	気象モデル(WRF)と工学モデルの結合 LES 参照点法による接続	気象データ (台風) 観測マスト(30m)	上空の風向風速が高層気象観測とよく対応し、LESにより地表面付近の強風予測精度も向上
33)	コード名 : NuWFAS 気象モデル(WRF)と工学モデルの結合 PBL(YSU)、LES(TKE) ネスティング	気象データ	地表面近傍における大気境界層の乱流特性の検討、メソ擾乱の侵入、縦渦の発達

2.3.3 広域の拡散問題、気象モデル (CFD 含む)、黄砂など

本項では、前項に引き続き、大気拡散シミュレーションの活用対象として分類した上記対象に対し、文献調査した結果を報告する。

坪倉誠(2003) 36)は、「数値流体進歩にみる気象・環境分野の CFD」と題して、気象・環境分野での CFD 活用の最近の傾向を述べている。当該文献によれば、気象モデルでは、局所的な気象現象を高精度で捉えるため、1000km 未満のメソスケールを高分解で解析する手法の開発が盛んで、従来の非弾性・静力学平衡を仮定した式系から、高精度非静力学メソスケールモデルへの移行が行われている一方、風工学的観点からは、風力発電の適地選定や汚染物質の拡散予測に関して、LES、RANS の利用による高精度化が進められていると指摘している。

秋元肇(2006) 37)は、「大気汚染物質の大陸間輸送と半球規模汚染」というタイトルで、対流圏オゾン、エアロゾル、水銀、残留性有機汚染物質(POPs)などの物質の長距離輸送について、その実態と観測やモデル開発などの研究の進捗、さらには政策的な課題についてのレビューを行っている。1990 年代後半から、アジアから北米へのオゾン・一酸化炭素・黄砂の大陸間輸送、北米からヨーロッパへ、ヨーロッパから東アジアへのオゾン・一酸化炭素などの大陸間輸送が研究され、特にオゾンの大陸間輸送に関しては、その環境基準に与える影響が定量的に議論なされるようになった。2002 年にドイツで開催されたワークショップの総括文書によれば、1)現在の大気汚染物質の放出レベルは北半球の多くの場所で大気環境基準を超える、2)オゾン、エアロゾル、水銀、POPs について多くの研究により実証がなされている、3)オゾンはその地表付近の平均濃度は、大陸間輸送によって左右されており、恒常的オゾンの負荷より重要である、4)エアロゾルは、間欠的な大陸間輸送が大気質にとってより重要である。エアロゾルの空間分布はオゾンに比べ不均一であり、エアロゾルの輸送は大陸規模での地域的負荷をもたらしている。5)大気汚染物質の局所的放出量と大気質との関係の非直線性を考慮すると、大気汚染抑止戦略は予測モデルを用いたシミュレーションに基づいて構築される必要がある。シミュレーションは局地、地域、半球スケールを繋ぐ統合モデルによってなされるのが理想的である。6)現在のモデルによる地表オゾン・エアロゾルの影響評価は、その非直線性のためまだ不確実性が大きく、観測によってさらに検証される必要がある、と報告した。世界各地の観測地点のオゾンに対し成層圏オゾン降下、大陸間輸送、大陸内輸送がそれぞれどれだけ寄与しているかの定量的評価は、なお今後の研究課題であり、途上国、先進国を共に含む大気汚染物質排出削減の国際取り決めを目指す方向に、欧米と共に我が国も方針を明確化すべきものと考えられるとまとめている。

呉戦平(2006) 38)らは、対流圏オゾン濃度の増加に関して、メソスケール気象モデル(MM5:version3.7)と大気化学輸送モデル Model-3/CMAQ(ver4.4)を組み合わせ、東アジア地域の通年の大気汚染シミュレーションを実行する環境を構築した。対象領域は、東南アジアの大部分を含む東アジア地域とし、格子長 54km×54km を使い、88×88 格子(水平方向)とし、詳細領域は、関東平野、濃尾平野、大阪平野の三大排出源地域を含む日本中央部とし、格子長 18km×18km で 58×58 格子(水平方向)とした。鉛直方向は σ 座標系 23 層、地表面近くは格子間隔が 60~100m、上空約 15km の上端近くで、約 2000m となる不等間隔格子とした。汚染物質の排出源データには、Street らの 2000 年を対象とした $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ の東アジアのエミッションインベントリ(Streets, 2003)を用いた。2004 年 1 月~12 月のシミュレーションを実施し、常時観測点でのオゾンの観測値および 2004 年 3 月に実施された東海沖の航空機観測データとの比較を行うとともに、モデルの再現性能を評価するためにいくつかの指標を計算した。その結果、夏季は比較的一致度が高くなったが、冬季には特に都心部でバイアスが大きくなり、一致度が低くなっている事がわかったと報告している。

成田祥(2007) 39)らは、「海を越える大気汚染」というタイトルで、汚染物質の大気への放出、大気中での化学的変質と大気汚染、その後、これらの物質が東アジア縁辺海と北太平洋へ輸送される過程について、その実態を報告し、「大気汚染というと、以前は発生源近傍での話だったが、酸性雨や対流圏オゾン濃度上

昇など、年を追うごとにアジア、ヨーロッパや北米からの越境汚染の影響が大きくなってきた。東アジアにおいても、近年では、陸起源物質が日本を越えてはるか遠くハワイや北太平洋全域にまで輸送され、酸性物質との反応の影響が海洋生態系にまで及んでいることが示唆されている。大気汚染は、もはや陸上だけの問題ではなく、船舶からの排ガスなども含め、地球規模で取り組む必要があり、総合的に評価する時期に来ている。」とまとめている。

茶谷聡(2008) 40)らは、一次汚染物質だけではなく、二次汚染物質の生成過程や越境輸送も表現できる 3次元大気シミュレーションモデルを用いた感度解析により、日本、中でも関東地方の汚染物質濃度に対する自動車、自動車以外の人為発生源、自然発生源(植物 VOC、海塩粒子)、および越境輸送の影響を明らかにするため、非静水圧モデルの RAMS(v4.4)と CMAQ(v4.6)を用いて、気流解析および化学物質の移流解析を行った。対象領域は、東アジアと日本である。東アジアは格子長 64km で、116×116 格子、鉛直方向は、100m から 1800m を 24 層、日本は、外側を格子長 16km で 70×66 格子、鉛直方向は 100m から 1000m を 27 層、内側を格子長 4km で 42×46 格子、鉛直方向 23m から 1000m までを 33 層とし、外側と内側で双方向のネスティングを行った。初期条件と連続的ナッジングのための境界条件には、ヨーロッパ中期予報センター(European Centre for Medium Range Weather Forecast, ECMWF)の 6 時間ごとのデータを使用し、2000年4月1日からの1年間の計算を実施した。排出量としては、アジア各国の人為起源排出量データに、地球環境フロンティア研究センターの REAS ver.1.1 および GEIA データベース、日本国内では JCAP(Japan Clean Air Program)が構築した推計データを用いた。解析の結果、越境輸送される O₃の重要性について、O₃として影響を及ぼすだけではなく、都市部における NO₂の生成にも重要な役割を果たし、二次粒子生成にも影響することが明らかになったとし、O₃、NO₂、SPM は、それぞれ個別の汚染物質であるが、これらの物質の関連を一つの化学反応サイクルとして捉え、濃度低減策を検討する必要がある、と指摘している。

森川多津子(2008) 41)は、広域大気質予測モデル CMAQ による粒子状物質(PM)濃度予測における PM のモデル化について、次のように述べている。「PM はさまざまな由来・性質のものの集合体であるため、大気質予測モデル内では、一次粒子の発生および二次粒子を生成する成分の発生を考慮し、無機・有機の生成過程別のサブモデルを必要とする。算出される PM 重量濃度は、気象・発生源・気相反応・液相反応・物理的な除去過程などの要因が絡んだ最終結果であり、光化学オキシダントのみの予測と比較してはるかに複雑化・高度化している。」と報告している、

日下博幸(2009) 42)は、代表的な領域気象モデルの一つである WRF (Weather Research and Forecasting model Version3.0) の開発の経緯、モデルの特徴、ソフトウェアのコードの概要、基礎方程式、物理モデル、計算処理の流れ、関連ソフトウェアなどを詳しく解説した。ここでは、経緯と主な特徴を簡単に述べる。米国では、ペンシルベニア州立大学 (PSU) と米国大気研究センター (NCAR) により MM5 が、コロラド州立大学 (CSU) により RAMS が、オクラホマ大学 (OU) により ARPS などのメソモデルが開発され、また米国海洋大気庁環境予測研究センター (NCEP) で天気予報モデル Eta が開発されてきた。この状況の中、学術研究と天気予報の両方に対応したメソモデル開発の要請により、上記機関等の共同開発プロジェクト (WRF プロジェクト) が発足し、NMM-WRF と ARW(Advance Research WRF) の 2 つが成果として公開されている。当該文献では、ARW を中心に特徴が述べられている。WRF は Fortran90 と CPP で記述され、ソースコードが公開され誰でも利用できるソフトウェアである。実行環境も PC、Mac、Linux から大型機まで様々なマシンで利用可能となっている。さらに、WRF は、完全圧縮

の非静力学モデルであり、鉛直方向に気圧を基準とした時間変化する η 座標系を用いる。時間積分スキームは 3 次精度ルンゲ・クッタとタイプ・スプリッティング、格子系は Arakawa-C グリッド (スタaggerド)、2-6 次まで変更可能な風上差分、乱流モデルは、ローカルクロージャモデルとして Mellor-Yamada Level 2.5 を採用し、これは乱流エネルギーと長さスケールの積による 2 方程式の渦粘性近似モデルであり、またノンローカルクロージャモデルとして MRF と YSU(MRF の改良モデル)を備える。なお、Smagorinsky モデルも利用可能である。WRF に組み込まれたこうした様々なオプションを利用して、山岳波、海陸風、スコールライン (積乱雲が横に並んで進み突風や落雷をもたらす)、重力流の 2 次元シミュレーションや偏西風、スーパーセル (竜巻をもたらす超巨大積乱雲) などのシミュレーションができる、と報告している。

滝川雅之(2009) 43)は、MM5/chemistry で使われていた化学モジュールを WRF に移植した領域化学輸送モデル WRF/Chem を紹介している。なお、対流圏領域化学輸送モデルとしては、既に WRF-CMAQ (Community Multiscale Air Quality model)があるが、これは、WRF の気象場を用いて CMAQ を動かす一方、WRF/Chem は、化学反応過程が WRF モデル本体に直接組み込まれており、オゾンやエアロゾルの放射強制力など、気象と化学種の相互作用が考慮できることを報告している。

竹見哲也(2009) 44)らは、メソスケールの WRF モデルと微細規模の CFD モデルとの結合について論じている。本来、「気象擾乱に起因する乱れと地表面粗度に起因する乱流変動の両者を同時に数値モデル上で再現し、スケール間相互作用を表現することは極めて困難である」として、気象モデルによる気象擾乱の構造を反映した自然風の変動を CFD モデルにおける流入境界条件として与え、かつ粗度形態に応じた乱流変動性状を生成しなければならないと指摘している。実際、気象モデルで、100m 程度の分解能で、竜巻のような微細擾乱の再現は可能であるが、レイノルズ平均モデルでの瞬発性の風速変動の再現は困難である一方、気象擾乱の組織構造に対応した変動は表現できるとしている。CFD モデルへの接合では、気象現象の構造に起因する大気流れの特性を捉えられる領域を確保しつつ、地表面粗度の効果を取り入れてダウンスケールすることが必要であり、都市・市街地モデルでは、建物群による地表面粗度の扱いとして、運動方程式に粗度表面積密度・抗力係数・風速によって決まる抗力項として与えるキャノピーモデルを紹介し、近年では、風洞実験や LES により乱流構造や抗力係数との関係が研究されていると述べている。

弓本桂也(2009) 45)は、数値気象予報で使われている最近のデータ同化手法について、データ同化の目的は次の 4 点にあると述べた。

- ・ 予報計算に必要な初期条件や境界条件を精度良く求める(初期値問題)
- ・ 欠損が無く、4 次元で均一且つ高精度なデータセットの作成(再解析)
- ・ モデル内のパラメータや外力の最適化(逆推定)
- ・ 感度実験(観測網の評価と改善)の実行

以上、データ同化は、持ちうるすべての知識・情報である物理法則(すなわち数値モデル)と観測データを組み合わせることによって相互補完を行い、相乗効果を得ようとするものである。計算機環境の発達、観測データの拡充、そしてデータ同化モデルの標準パッケージ化*などを通して、データ同化はこれから、より身近な、そして有用なツールであると認識されていくだろう、と紹介している。*後述の西沢匡人(2004) 79)によれば、MM5 には、FD DA (Four Dimensional Data Assimilation) というデータ同化モジュールが

用意されている (<https://www2.mmm.ucar.edu/mm5/>, 98] G.A. Grell et al, A description of the Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5), NCAR/TN-398 + STR NCAR TECHNICAL NOTE, 1994.)。

竹村俊彦(2009) 46)は、1週間先までの大気中のエアロゾル分布を予測する全球3次元エアロゾル気候モデル SPRINTARS の開発を報告した。当該モデルは、1日1回運用され、ホームページ上で全球およびアジア域のエアロゾル分布予測の動画が閲覧可能で、日本各地のエアロゾル濃度は、4段階に分類して表現し理解しやすくしている。当該システムは、東京大学気候システム研究センター/国立環境研究所/地球環境フロンティア研究センターにより開発されている大気大循環モデル (CCSR/NIES/FRCGC AGCM) (K-1 Model Developers 2004) と結合しており、エアロゾルの輸送過程 (発生・移流・拡散・硫黄化学反応・湿性沈着・乾性沈着・重力落下) や直接効果 (太陽放射・赤外放射の散乱・吸収)・間接効果 (雲凝結核・氷晶核の機能を通じた雲・降水特性の変化) が計算される。取り扱うトレーサは、対流圏主要エアロゾルである黒色炭素・有機炭素・硫酸塩・土壌性・海塩の各粒子と、硫酸塩の前駆物質である二酸化硫黄・硫化ジメチルである。標準的に用いる分解能は、水平方向が T106 (全球 360°を 106 分割、約 1.1°格子) もしくは T42 (同 42 分割、約 2.8°)、鉛直方向が σ 座標で L56 (56 層) もしくは L20 (20 層) であるが、本研究で開発する予測システムでは、計算コストと要求される水平分解能を考慮して、当面 T106L20 としている。最近、アジア大陸での急速な経済発展に伴う日本への越境大気汚染の増大が懸念されており、本システムが日々の社会活動にとって有益な情報を作成することが期待されると述べている。

菅田誠治(2011) 47)らは、国立環境研究所が中心となって開発した大気汚染予測システム VENUS (Visual atmospheric Environment Utility System) を紹介している。気象モデル RAMS と大気質モデル CMAQ により光化学 O_x などの濃度を毎日計算し、毎朝 9 時に、当日から翌日 24 時までの予測を行う。100km 格子の東アジア域、25km 格子の日本域、5km の日本国内 6 地域 (東北、関東、中部、関西、四国、九州) の 3 段階のネスティングで計算する。観測データとの比較検証により、日中の高濃度をかなりの確に予報できるとしている。

早川信博(2011) 48)らは、気流場データベースを活用し、ノート PC で実行可能な高速気流解析プログラムと化学反応計算を含む拡散解析システムを開発した。当該システムは、対象施設周辺の詳細気流場を風向き (ここでは 16 方位を作成) 毎にデータベース化して保存し、随時そのデータベースを基に当該時刻の気流場を作成するもので、16 方位の詳細気流解析には、メソスケール気象モデル RAMS6.0 を用いた。気流場データベースは規格化した値を保存し、シミュレーション時に風向・風速を与えることでデータベースから気流場を作成する。拡散解析手法としては、粒子法 (Lagrangian モデル) を選択し、粒子状物質の沈着現象 (乾性沈着) を考慮できるとしている。

菅田誠治(2014) 49)は、環境情報科学 42 巻 4 号の特集「越境大気汚染の今後」の中で、「大気汚染物質の観測と数値予測の現状と課題」として、微小粒子状物質 (PM2.5) を対象としたいくつかの予測システムを紹介した。一つの着目する予測システムは、CFORS (Chemical weather FORecasting System) と呼ばれ、九州大学にて、2001 年から定常運用が続けられていたが、2002 年に国立環境研究所に移設され、現在まで定常運用されている。CFORS は気象モデル RAMS をベースに構築され、黄砂、硫酸塩エアロゾル、黒色炭素 (BC) 等の 3 日後の 9 時までの予測結果を毎朝 8 時頃に公開する。基本的には反応性のない物質を扱うが、化学反応する物質については簡略的な計算が行われている。計算対象領域は、東アジア域であり、水平方向に 40km メッシュの解像度で計算される。次に紹介する SPRINTARS (Spectral Radiation-Transport

Model for Aerosol Species) は、九州大学で開発されている数値モデルで、東京大学大気海洋研究所・国立環境研究所・海洋研究開発機構が共同開発している大気海洋結合モデル MIROC(Model for Interdisciplinary Research on Climate) を基にしたエアロゾルモデルであり、全球モデルであることが特徴である。BC や有機エアロゾル、硫酸塩エアロゾル、黄砂等のエアロゾルの 1 週間先までの予測を毎朝 8 時頃に公開している。水平解像度は 0.56 度であり、日本周辺では約 50km に相当する。次に紹介する VENUS (Visual atmospheric Environment Utility System) は、国立環境研究所が中心となり、電力中央研究所、地方環境研究所、環境省等とともに開発したシステムである。上述の二つのシステムと比較して、詳細な化学計算を行うのが特徴である。翌日 24 時までの PM2.5 および光化学オキシダントの予測を毎朝 7 時に公開している。

浦西克維(2020) 50)らは、2019 年 3 月上旬に北海道地方で発生した PM2.5 高濃度汚染の要因を解明するため、同時期に中国東北部で大規模発生したバイオマス燃焼 (BB) に注目し、領域気象モデル WRF(v3.8.1) と CMAQ(v5.0.2) を用いて感度解析を実施した。BB 排出インベントリには GFAS(The Global Fire Assimilation System) を用いた。当時、2019 年 2 月下旬の中国東北部の平均気温は、平年値より約 10°C 高く、早期に雪解けが発生し、農地等での BB が起こりやすい条件が整っており、大規模なホットスポットが衛星で観測されている。また、GFAS も例年の 10 倍以上の規模の BB 排出量を推計していた。中国東北部および周辺で発生した BB が中国国内の PM2.5 濃度および日本（北海道地方、東北地方）の PM2.5 濃度を与えた影響を解析するため、標準ケースに加え、BB 排出量を増加させた複数のケースについても計算を実施した。標準ケースでは、2019 年 2 月下旬-3 月上旬の中国東北部、日本の PM2.5 濃度を過小評価したが、中国東北部の農地由来の BB 排出量を増加させたケースでは、この期間の過小評価が改善したと報告している。結論として、2019 年 2 月下旬-3 月上旬の日本の PM2.5 濃度は中国東北部内の BB の影響を強く受けていること、GFAS は中国東北部の農地由来を主とする BB 排出量の推計値を過小評価している可能性が高いことが明らかとなった。今後、中国東北部で同規模の BB の発生が常態化すると、日本への PM2.5 高濃度汚染が継続的に発生する恐れがあると報告している。

○本項（2.3.3）のまとめ

前項（2.3.2）と同様に、本項（2.3.3）でも、本項のシミュレーション対象に係るシミュレーションの精度向上に関連するモデルの構成要素、検証データ、そして得られた成果について次の表にまとめた。なお、シミュレーションのみで検証データの利用がないものやシミュレーションモデルの紹介、考察のみの論文は除いてある。

文献 No.	構成要素	検証データ	成果
38)	気象モデル(MM5)と大気化学輸送モデル CMAQ の結合 ネスティング 排出源データ(インベントリ)	常時観測点 航空機観測データ	夏季は一致度が高く、冬季の都心部で差が出た。排出源データの季節変動か？
40)	気象モデル(RAMS)と大気化学輸送モデル CMAQ の結合 データ同化 (ナッジング) ネスティング 排出量データ(インベントリ)	広域モニタリングデータ	感度解析 オゾン、NO ₂ 、SPM 濃度の再現性検討
50)	気象モデル(WRF)と大気化学輸送モデル CMAQ の結合 データ同化 (ナッジング) ネスティング 排出量データ(インベントリ)	広域モニタリングデータ	PM _{2.5} の発生源寄与解析 中国東北部の農作業由来のPMの広域輸送を解明した

2.3.4 放射性物質の拡散

本項（2.3節大気拡散シミュレーションの最終項2.3.4）では、活用対象として、放射性物質の拡散に注目し、発表された文献調査の結果を報告する。2000年ぐらいから最近までの代表文献を選択し、その概要を記しまとめる。

永井晴康(1999) 51)らは、原子力施設の事故等により、大気中への放射性物質の放出が起こった場合、緊急時のモニタリングや防災対策を迅速に実施するため、大気中放射能濃度の現況や被曝線量分布の推定を迅速かつ高精度に行う必要があるとして、従来の「緊急時迅速放射能影響予測ネットワークシステムSPEEDI」をアップデートした新システムを開発した。これは、局地気象予報計算、風速場計算、濃度計算、被ばく線量計算の4つのモジュールから構成され、大気力学方程式に基づく3次元気象予測による風況場の精度向上を目的とするモジュール(PHYSIC・WIND21)、仮想粒子群の追跡による濃度拡散計算と、個々の粒子を放射線源とした線量寄与の積算による γ 線の空気吸収線量率と外部被ばく線量の計算および最新データによる線量換算係数を用いた内部被ばく計算モジュール(PRWDA21)を、各々、実施するシステムである。当該新システムの特徴は、次のようにまとめられると報告している。

- ・ 大気力学モデルの導入により、3次元の局地気象予報が可能となった。
- ・ GPV(気象庁気象数値予報格子点データ)の導入により広域気象変動を局地予報の中に反映可能とした。
- ・ 現地観測データをPHYSICに入力し、緩和法により局地気象予報を改善可能とした。
- ・ 濃度・線量モデルで、従来の鉛直拡散計算及び被曝線量計算が改善され、空間分解能が向上した。

古野朗子(2006) 52)らは、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)をもとに、放出源を推定する手法を提案した。これは、次の5つの手法から成る。まず、気象場は非静力学気象モデルMM5を用いる。次に、想定された放出点、開始時刻、放出継続時間のシナリオを元に初期条件を作成する。次に、放出量を単位放出として大気拡散計算を行う。その後、計算結果と測定結果を統計的に比較し、もっとも誤差の少ない条件を初期条件と推定する。当該初期条件で計算した結果については、計算と測定のピーク値の比から放出量が推定される。以上、当該手法では、計算および測定で出現した濃度検出の立ち上がり時間についての誤差の大きさ及び濃度検出の継続時間の一致度を求め、最も誤差の少ないものを放出情報として抽出する。

寺田宏明(2008) 53)らは、世界の任意地点で、原子力事故により放出された放射性物質の広域大気拡散を即時に予測できる世界版SPEEDI(WSPEEDI)を開発した。当該システムの特徴としては、①大気力学モデルの導入により、適切な分解能で狭域から広域までの風速場、乱流場、降水・雲量分布の予測を可能にし、より高い性能で放射性物質の移流・拡散・沈着を予測できること、②越境型の原子力事故で、事故情報よりも先に、風下側の環境モニタリングポストの線量上昇から異常が確認される場合を想定して、発生源や放出量を、計算シミュレーションとモニタリングの比較により推定できること、③欧米の同種システムと予測情報を交換するためのネットワーク化により、大気拡散の将来予測に対する計算結果の確度評価ができること、④世界の任意地点での原子力事故への対応とともに、東アジアに特化した機能を整備し、近隣諸国の事故に迅速に対応できることであると述べている。

茅野政通(2009) 54)らは、既に関発・運用されている緊急時環境線量情報予測システム SPEEDI (System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information) の世界版 SPEEDI (WSPEEDI : Worldwide version of SPEEDI) の機能向上版として、放射性物質の大気拡散や放出地点を迅速に推定し、欧米との情報交換も可能な緊急時環境線量情報予測システム WSPEEDI-II についての概要を報告している (尚、内容は上記を参照のこと)。

田村淳二(2009) 55)らは、大気中の放射性物質の移流拡散モデルについて、プルーム・パフモデルをベースとする OSCAAR コードと地域気象モデル RAMS・物質輸送モデル HYPACT と長期野外実験結果との詳細な比較検討を行った。HYPACT は、オイラーモデルとともにラグランジュ粒子モデルも備え、放出源からの粒子の移動により拡散計算を行い、拡散が十分大きくなった時点でオイラー型の濃度に変化できる。また、検討の結果、数 km 四方の平坦な地形を対象とした点線源による放出物質の予測に対して、2つのモデルは概ね同程度の性能を備えているが、複雑地形を対象とした妥当性検証を行う必要があると報告している。

永井晴康(2012) 56)は、東京電力福島第一原子力発電所事故に伴い環境中に放出された放射性物質について、WSPEEDI-II を用いて単位放出率 (1Bq/h) を仮定した大気拡散計算により、観測結果の濃度をもとに放出量の推定を行った。局地解析結果から、福島県中通りおよびサイト北西方向の高線量地帯は、事故により放出された高濃度プルームが降雨帯と重なり、大気中の放射性物質が大量に湿性沈着したことにより形成されることを指摘した。なお、放射性核種の日降下量計算値は、環境放射能水準調査による測定データと概ね一致し、推定放出量が妥当であると報告している。

山澤弘美(2013) 57)は、「大気中放射性物質の影響と拡散評価」の中で、放射性物質の影響の経路を次のようにまとめている (図 2-5 参照)。

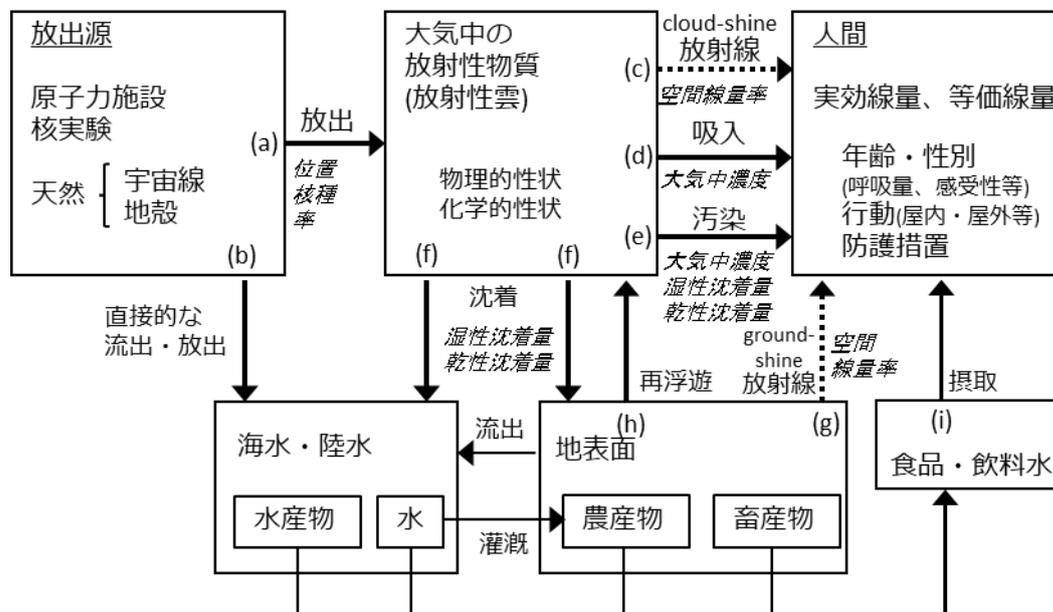


図 2-5 大気中放射性物質の放出源と影響に至る経路 (文献 57) の図 1 を複製)

さらに、核実験および原子力事故による代表的な核種の大気中放出量を次の表 (表 2-5 参照) にまとめ報告している。

表 2-5 核実験および原子力事故による代表的な核種の大気中放出量（文献 57）の表 2 を複製）

核種	大気圏核実験	チェルノブイリ	福島第一原発
	PBq	PBq	PBq
^{133}Xe	—	4 400	11 000
^{90}Sr	622	8	0.14
^{131}I	675 000	1 200-1 700	170
^{137}Cs	948	74-85	13

また、東京電力福島第一原子力発電所の事故直後の放出量と移流拡散量について次のような見解を述べた。3月12日朝から10TBq/h以下の放出が始まり、同日および14日に水素爆発に対応して300TBq/hの放出が30分継続したと見積もられ、14日夜～15日にかけて放出が特に大きく、100TBq/hを超える放出が継続したと述べている。また、1～10TBq/hの放出が20～21日にもあり、3月下旬に向かって漸減している他、月末に再度大きな放出があった可能性があるとして報告している。なお、16～19日と26～28日は、放射性物質が主に太平洋に移流した期間で、逆に20～21日には放射性物質は日本の陸上を移流し、降水による顕著な沈着が起こったと指摘している。この事故で特徴的な点は、サイト近傍から100kmあるいはそれ以上離れた比較的長距離に対する影響のほとんどは、放射性物質の湿性沈着により引き起こされた点である。

近藤裕昭(2013) 58)らの日米気象学会共催の「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」(2013年1月6日～10日)の報告によれば、各セッションは、概要、放出源推定、観測結果、領域モデルによる解析、全球・海洋モデルによる解析と健康影響と国際協力の6つからなり、それぞれ議論が交わされたと報告している。当該シンポジウムの概要では、移流拡散・数値モデルの予測の公表を巡り、科学と社会に巻き起こった様々な議論についても報告され、数値モデルの活用について、予測の不確実性に配慮した活用法とその手順を具体的によく検討し説明する必要があるとまとめている。領域モデルによる解析のセッションでは、WSPEEDI-IIを用いて3月12日から4月30日までの ^{131}I と ^{137}Cs の東日本域大気拡散シミュレーションを実施し、単位放出率によるシミュレーションと大気中核種濃度及び空間線量率の測定値を基に推定された放出率を用いたシミュレーションを実施している。その結果は、東日本の陸上で観測された日降下量及び月間降下量の分布を良好に再現し、推定放出率の妥当性を示したと報告している。さらに、沈着過程に着目したパラメータ解析を元に、レインアウト/ウォッシュアウト及び氷相/液相の区別や霧沈着を考慮した適切な沈着スキームを用いることで、計算モデルは、放射性核種の時空間分布をより高精度に再現できることを報告している。

飽本一裕(2013) 59)は、福島県内各地の事故後半年間の放射線量率データを解析し、その変化率や地理的分布から、Cs放射性崩壊の速さ以上の強いウェザリング(風化)効果(水や風の影響による土壌侵食に伴う移動効果)があることを指摘した。この効果は、土壌侵食、降水、風、道路交通等の影響により、多方向に拡散及び集積する2次汚染とも考えられる。こうしたCsの挙動は、放射性物質が大気中を拡散した後、地表面や植生などに沈着してからの拡散・移行の実態を示し、大気拡散モデルに付随する沈着や移行モデル

の開発や検証、観測値の評価に当たっても有用な情報と思われる。

黒島硯人(2014) 60)らは、福島県浪江町の里山に大気沈着した放射性セシウムを調査し、以下のように報告した。2012年6月27日から2013年7月30日にかけて、福島県浪江町南津島地区の里山でスギと落葉広葉樹の生葉、落葉、表層土壌、底砂を一月ごとに採取し、NaI(Tl)シンチレーション検出器で放射性セシウム(134Csおよび137Cs)濃度を測定した。放射性セシウム濃度は落葉>表層土壌>生葉>底砂の順であり、放射性セシウムは落葉に蓄積している状況にあったことを記し、冬季の積雪と春先の融雪は、落葉の放射性セシウム濃度に影響を及ぼさなかったと述べている。森林内を流れる小川の上流域の底砂と1ヶ月後の下流域の底砂では放射性セシウム濃度に正の相関関係があり($r=0.87$, $n=9$)、この里山では放射性セシウムが浮遊砂として平均的に1ヶ月で500mを移動したことが示唆された。放射性物質の拡散により影響された地域では、長期にわたりその影響が残る。こうした拡散実態の調査は、現状の把握とともに、大気中、水中、土壌中、植物内の放射性物質の移行の実態解明に有益であり、そのフィードバックを通じて、大気拡散モデルの精度向上にも役立つと思われる。

日本学術会議(2014) 61)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個の海洋分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。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考えられると報告している。結論は以下の通りである。

(1) 拡散した放射性物質の推計値

- ・「気象庁モデルを用いた逆推計」による比較実験では、2011年3月11日から4月19日の期間内の大気への137Csの総放出量は $19.4\pm 3.0\text{PBq}$ と推計された。なお、過去の研究も考慮すると大気に放出された137Cs量は、 $17.8\pm 8.2\text{PBq}$ となる。平均値から標準偏差の2倍以内の値を用いた場合は、 $14.6\pm 3.2\text{PBq}$ となるが、どのモデルがより適切であるか現時点で示すことは困難であると指摘している。
- ・海洋に、2011年3月21日から6月30日の期間内に直接放出された137Csについて、今回比較に参加したモデルの推計値は $2.3\sim 26.9\text{PBq}$ の範囲にある推定された。
- ・領域規模大気輸送モデルの結果によると、大気への総放出量に対する陸域沈着量比は、 $27\pm 10\%$ であると推定された。一方、文部科学省の2012年5月31日の航空機観測では陸域で 2.65PBq の値が得られている。従って、この値と、各モデルの総放出量を用いた陸域沈着量比の平均は、 $18\pm 6\%$ と見積もられる。平均値から標準偏差の2倍以内の値を用いた場合は $19\pm 5\%$ となった。陸域沈着量比のこれらの見積もりの差の原因は、137Csの輸送・沈着過程のモデリング上の問題、総放出量の見積もり誤差、航空機観測からの陸域沈着量の見積もり誤差等が考えられ、今後、詳細な調査が必要であると述べられた。
- ・地球全体を対象とした全球規模大気輸送モデルによって計算された湿性沈着量は、総沈着量の $93\pm 5\%$ であった。一方、領域規模大気輸送モデルで、対象とする陸域と海洋を含めた領域全体への総沈着量は、全体の $68\pm 19\%$ であった。我が国の陸域に沈着したものに限っても、この数値はほぼ同じであった。この違いは領域の違いが主要因であるが、モデルの違いも無視できないことが分かる。

(2) モデル評価とその課題

- ・モデルによる結果の違いは、観測された放射性物質の分布の主要な特徴を反映する。定量的には、モデ

ル間の差は大きく、特に大気では、湿性沈着過程についてのモデル間の差が大きいことが示された。また、沿岸海洋においては、渦のシミュレーションの差異によるモデル間の違いも大きい。

- ・風速とその鉛直方向の構造は、移動性の気団によって頻繁に変化した。陸域と海域における放射性物質の沈着量分布に関するシミュレーション結果は、仮定した気象データと放出シナリオによって極めて敏感に変化する。従って、今後、観測データにモデル値を最適化するための同化手法と放出量の逆推計手法を用いて高時間分解能シナリオを構築する必要がある。

- ・海洋観測で得られた Cs-137 濃度の測定値を再現するためには、海洋への直接放出と大気からの沈着の両方が必要である。2011 年 4 月以前では、海洋分散モデルを駆動するための大気モデルによる Cs-137 の沈着量が過小評価されていた。従って、放射性物質の海洋による輸送評価の改善には、大気から海洋への全球規模の沈着量の評価の改善を同化手法などによって行う必要がある。

- ・モデルの性能は、モデルの力学過程、化学輸送過程、乾性・湿性沈着過程などに依存する。これは、モデルの改善のため、異なる研究分野の連携が今後、必須であることを物語っている。

- ・算定された放出シナリオは、領域規模大気輸送モデルによる解析と全球規模大気輸送モデルによる解析では異なる。従って、より詳細な放出量推定のためには、今回の全球比較実験で用いたような全球規模の観測データ、オイラー型の全球規模大気輸送モデルとベイズ統合逆解析、領域の観測データを組み合わせた領域規模大気輸送モデルを用いた解析を行う必要がある。

堅田元喜(2017) 62)らは、福島第一原発事故時に大気へと放出された放射性物質の放出量と拡散・沈着過程に関する既往の知見を解説した。事故時の大気拡散過程について、3月12日午後の1号機ベント・水素爆発から時系列的にイベントを整理し、各地で測定された空間線量率や大気中濃度のモニタリングデータと大気拡散シミュレーションの結果を比較することで検証し、大気中濃度の観測値の時空間変化と合わせて推定したプルームの動き、プルーム構造の時空間的变化を再現して、おおむね妥当であると確認した。さらに、沈着過程についても、当時の気象条件とプルームの挙動に合わせて、3月12日午後にはプラント北北西部で乾性沈着、3月14日夜から15日午前にかけてプラント南南西部の乾性および雲水沈着、15日午後には、プラント南西部の乾性沈着および雲水沈着などと、時系列的に詳細を再現したが、降水強度の観測データが汚染された山岳地帯ではきわめて限られており、降水イベントの再現性を検証できないことから、沈着過程の同定結果は、研究により解釈が異なっていると報告した。そのため、炉内解析と大気拡散シミュレーションの連携、弱い雨や霧雨・霧の観測データの復元、それらを用いた気象・大気拡散シミュレーションと放出量の妥当性検証、沈着計算スキーム中の雲水沈着過程等、解決すべき課題は多く残っている、と指摘している。

梶野瑞王(2018) 63)は、大気エアロゾルの動態シミュレーションの概要にて、福島第一原発事故による Cs-137 を含むエアロゾルの拡散・沈着の解析結果を紹介している。文献中図 5 にて、2011 年 3 月の全期間に放出された Cs-137 の領域総沈着量に対する各沈着プロセス寄与率を報告している。領域全体 (Reg0) については、雲内除去が最も寄与率が大きく、次いで霧沈着と乾性沈着となっている。雲底下除去は、最も寄与率が低い、雲底下除去過程については、除去率の理論値が、実測ベースの値に比べて 1 桁以上低い、という課題がまだ残っており、理論値を用いている本研究では、雲底下除去過程を、そもそも過小評価している可能性があると考えられる。その不確定性を差し引き、福島県においては、海岸から内陸に行くに従い (Reg 1 から 3)、雪の割合と霧沈着の割合が増える。また東北地方を南から北に行くに従い (Reg 8、1、2

から3、4、5)、雪の割合が増える。栃木、群馬 (Reg 6 と 7) については霧沈着の寄与率が最も高い。茨城県南・千葉の平野部 (Reg 9) については霧沈着の寄与率は、ほとんど見られず、乾性沈着と雲内除去の寄与率が最も高いことを指摘している。これらの詳細は、放射性物質の分布を予測するモデル化の高度化に際し、重要な情報であることが分かる。

山澤弘美(2020) 64)らは、事故後に大気中に放出された放射性セシウムの物理・化学性状について、その後得られた知見を紹介している。1F事故で放出された放射性Csは、サブミクロン程度の微小粒子に担われ、水溶性とされてきた。しかし、その後の調査により、直径数 μ の水に不溶な球状の形態を持つセシウム含有粒子の存在や、主要な構成元素としてFe, Zn, Cs, O等を含み、さらにBa, Te, Sn, Mo, Rb, U等の重元素を含むこと、非晶質であること、複数の原子価を有する中重元素は高度に酸化された状態であること、また球状だけではなく、非球状の形状粒子もあることなどが解明された。すなわち、福島第一原発事故由来の放射性核種では、主に放射性Csを含有したガラス状物質が粒子状ないし微粒子状となり、一般環境中へも大気経路で放出されたことが明らかとなってきたと報告している。この事実は、原子力施設の事故時の放射性物質の大気拡散を論じる上で、普遍的な現象である場合には、重要な知見と考えられる。

鶴田治雄(2021) 65)は、全国の大気汚染常時監視網の一環として、大気中の浮遊粒子状物質 (Suspended Particulate Matter : SPM,直径10 μ m以下のエアロゾル) 連続測定のために設置された測定機器の記録用テープを、1F事故後の放射性物質の環境濃度測定に用いることを提案し、日本地球惑星科学連合と日本放射化学会および日本地球化学会等の分野を越えて共同し、東日本を中心に大気中の放射性物質の測定及び解析を行った。測定記録は、機器の内部に設置されたテープ状のろ紙上にSPMが時間ごとに連続採取され、 β 線吸収法によって自動で測定されたもので、各所に設置されたSPM計の採取済テープろ紙を収集し、Ge半導体検出器により放射性核種 (Cs-134 と Cs-137) を測定、分析した。この1時間毎の記録から、事故直後の2011年3月12日以後のCs-134とCs-137の時空間分布を復元した。さらに、観測データ解析と大気輸送沈着モデルによるシミュレーション結果から、主要なプルームの模式的輸送経路を推定した。これらの分析結果は、Cs-137の土壌沈着量と降水との関係の調査や大気輸送沈着モデル検証に利用されている。

山澤弘美(2023) 66)らは、大気環境学会分科会集会「東京電力福島第一原子力発電所事故による放射性物質の動態」開催報告の中で、大気、陸域、海洋の三つの領域のうち、大気に関する点について、次のように述べている。大気核種組成に関し、大気中放射性ヨウ素の有機ガス状、無機ガス状、無機粒子状の性状割合の推定から、性状把握は、性状ごとに線量寄与(線量係数)や大気からの沈着効率が異なることから、内部被ばく評価および大気拡散計算で重要なパラメータである。また大気拡散モデルの検証と利用について、大気拡散モデルによる事故直後段階での計算結果は、プルームの動態をおおむね再現していたが、大気中濃度および沈着量の測定データとの定量的比較では、再現性が低いモデルも含まれていた。その後、10年程度を経て、淘汰されたモデルや改良を続けたモデル等が混在する中、実測データ等を用いた国際比較試験を1年半程度の間隔で2回実施した。1回目の比較結果 (MIP-2;Sato et al.,2018) では、モデル湿性沈着過程および境界層過程に起因する誤差が指摘され、その結果、2回目 (MIP-3;Sato et al.,2020) の比較結果では両者とも改善され、モデル間の差異が顕著に小さくなった (Fig.1)。その一方、前者に起因する誤差は実測との比較でも未だに大きく、今後の課題として指摘している。放出源情報推定で用いられた日本原子力研究開発機構のモデルは、これらの比較試験の中で優秀なモデルの一つであることが確認され、その放出源情報を用いた他モデルの結果もおおむね合理的であったことは、放出源情報推定結果の信頼性の傍証と考えることができる。ただし、優秀なモデルであっても、沈着量分布再現性の評価項目 (相関係数、Figure of

Merit in Space (FMS)、バイアス等)の全てで高性能ではなく、また大気中濃度の高再現性を示すモデルは、プリュームごとに異なること、すなわち単一の最優秀モデルはないが、モデルアンサンブル(複数のモデルによる推定結果)が安定して高い再現性を示すことが、このモデル比較試験で得られた重要な知見であると述べた。

○本項(2.3.4)のまとめ

前項(2.3.3)と同様に、本項(2.3.4)のシミュレーション対象(放射性核種)に対するシミュレーション精度向上に関連するモデルの構成要素、検証データ、得られた結果について、次の表にまとめた。なお、シミュレーションのみで検証データの利用がないものやシミュレーションモデルの紹介、考察のみの論文は除いてある。

文献 No.	構成要素	検証データ	成果
53)	WSPEEDI-II 気象モデル(MM5)/大気拡散モデル(GEARN)(ラグランジュモデル) データ同化 ネスティング 空気吸収線量率と外部被ばく線量計算 放出源推定	野外拡散実験(ETEX) 事故イベント(チェルノブイリ) 広域モニタリング	WSPEEDI-Iからの精度向上 気象モデルによる風況予測と時間分解能の向上による
55)	OSCAAR(プルームパフモデル) 気象モデル(RAMS)+物質輸送モデル(HYPACT)	長期野外拡散実験	2つのコード検証 両モデルは概ね同程度の性能
56)	WSPEEDI-II 気象モデル(MM5)/大気拡散モデル(GEARN)(ラグランジュモデル) データ同化 ネスティング 空気吸収線量率と外部被ばく線量計算 放出源推定	事故イベント(福島第一) 広域モニタリング	放出量推定
61)	国内外の9の大気輸送モデル結果の比較	事故イベント(福島第一) 広域モニタリング	放出放射性物質と沈着量の推定 拡散過程の解明、モデルの評価

2.3.5 大気拡散シミュレーションの到達点・課題・展望

本項では、2.3節（大気拡散シミュレーション）にて示してきた、各活用対象に行った文献調査の結果から分かったシミュレーション手法の発達過程を踏まえ、あらためて手法に焦点を絞り、その到達点、課題、展望についてまとめる。その際、CFDの活用に着目し、RANSからLESへと視点を変え、上記事項をまとめる。また、CFD活用時の課題である気象モデルとの接続と放射性物質の拡散に係る上記事項についても報告する。

(1) RANSとLES

・RANSモデル発展の経緯

RANS・ $k-\epsilon$ モデルについては、80年代、90年代に、工学モデルとして、CFDで利用される場面が増えるにつれて、その課題も指摘され、改良モデルが次々に発表されてきた。とりわけ、バックステップ流れなどに関して、後方の循環域における再付着距離が実験と合わないことが指摘されてきた。2000年代に入ってから建物後流や山越え気流などの解析では、改良型のDurbin $k-\epsilon$ モデルでも、後方循環流域における乱流拡散は過小となり、結果として後方再付着距離が過大に評価されるとの指摘がある（村上周三ら、2002）67）。

金湘栢(2002) 68)らは、大気境界層の解析に、RANSモデルの中でも、Mellor-Yamada (MY) モデルと $k-\epsilon$ 代数応力方程式モデル($k-\epsilon$ Algebraic Stress Model, KEASM)*を比較検討し、次のように指摘している。大気境界層では、地表面の摩擦作用と熱的作用により乱流が発生し、この乱流エネルギー輸送過程を通してエネルギーが上空に運ばれ、大気境界層内部の気象特性が決定される。特に、乱流輸送による昼間の対流混合層の発達過程と夜間の安定成層の生成過程の解析は、大気拡散計算による大気質の評価において非常に重要な要点である。大気境界層において、乱流輸送過程は、1973年以後に発展してきたMYモデル(Mellor, 1973)が広く利用されてきた。MYモデルは少ない定数を利用し、比較的容易に乱流輸送過程が解析できるという長所から海洋でも幅広く使われている(Mellor, 2001)。しかし、最近の研究ではいくつかのMYモデルの問題点が指摘されている。SunとOgura(1980)は、混合層高度の過小評価を、MoengとWyngaard(1989)は、フラックスの浮力による圧力再分配効果の無視について指摘した。一方、Nakanishi(2001)は、この浮力による圧力再分配効果をMYモデルへ考慮し、LES(Large Eddy Simulation)を利用してMYモデルの定数を修正している。他方、Launderら(1975)により研究されてきたKEASMは、室内気流解析と流体力学分野で広く利用され、MYモデルで無視された浮力による圧力再分配効果に加え、地面効果による圧力再分配効果が考慮されている乱流モデルである。KEASMは、MYモデルに比べて同様の平均気象量を計算したが、混合層高度や乱流エネルギーフラックスを大きく解析していることが分かった。その影響で、粒子の水平移流および拡散においてKEASMの方がMYモデルより強く解析されている。平坦な地形では、両モデルの違いはあまりないが、起伏の複雑な地形上での汚染物質の拡散計算では、適切な乱流モデルを選択する必要があることを指摘している。* $k-\epsilon$ 乱流モデルの定数項をパラメータの代数式で表現し、壁面乱流とプリームのような自由せん断乱流の両方に対する精度を向上させた。B.E. Launder et al., Progress in the development of a Reynolds-stress turbulence closure (1975)

日本建築学会では、2007年に市街地風環境予測のための流体数値解析ガイドブックをまとめ、種々の乱流モデルについて検討している。本書は、CFD(Computational Fluid Dynamics:数値流体力学)は、流体力学の強力な解析ツールとして、工学の様々な分野で用いられるようになったが、適切な利用にはガイドライ

ン (Best Practice Guidelines) が必要であるとして、日本建築学会内のワーキンググループの活動をもとに、市街地風環境の予測に流体数値解析を適切に利用するための注意点や解析精度の検証方法について解説したガイドブック。都市の風環境の CFD 解析を行う上での基礎知識の解説のほか、検証用データベースとして、単体建物から実在市街地、樹木までの計 13 種類のテストケースを対象とした風洞実験・実測結果が検証用データベースとして整備されており、実施されたベンチマークテスト結果(Case A~G)も入手できる。(*日本建築学会、市街地風環境予測のための流体数値解析ガイドブックーガイドラインと検証用データベースー(2007))

道岡武信(2012) 69)らは、RANS モデルを建物周辺のガス拡散シミュレーションに適用し報告しているが、それまでの RANS モデルの発展の経緯についても触れており、ここで、その概要を報告する。標準 $k-\epsilon$ モデル(Launder and Spalding,1974)では、建物前面において乱流エネルギーを過大評価すること、屋根面ではなく離や逆流が、再現できない問題点があることが指摘されている。それに対し、改良型 $k-\epsilon$ モデル(例えば、Launder and Kato モデル(Launder and Kato,1993)、Durbin モデル(Durbin,1996)、RNG $k-\epsilon$ モデル(Yakhot et al.,1992)を適用することにより、上記の標準 $k-\epsilon$ モデルの問題点を解消できることが明らかとなったと指摘している。Sada et al.(2006, 2008)、佐田(2009)は、乱流モデルに MMK モデル(Tsuchiya et al., 1997)を適用し気流場を解き、拡散場に関しては、ラグランジアン粒子モデル(Thomson,1987)を用いた。それらの研究によれば、単純建物周り・単純地形上の気流・ガス拡散を対象とした風洞実験値との比較により、RANS は比較的良い精度で再現できる。さらに、単純建物周りのガス拡散について、平均濃度に対する乱流シュミット数 (S_{ct}) の依存性を調べるために、 S_{ct} を 0.2、0.5、0.9、1.3 の 4 つの値を与えて検討した。なお、 S_{ct} は、渦粘性係数 ν_T に応じて与えられるパラメータである。その結果、下記の事項が判明したと報告している。

- (1) 単純建物周りおよび実市街地内の気流・拡散場に対して $k-\epsilon$ 系の乱流モデルを用いた RANS を適用した場合、比較的高層の建物後流域での平均速度および乱流エネルギーは過小評価する。
- (2) 乱流モデルとして、標準 $k-\epsilon$ モデル、Durbin モデル、RNG $k-\epsilon$ モデル、MLK モデルを適用して得られた平均速度、乱流エネルギー(速度変動の標準偏差)、平均濃度の再現値に大きな差異はない。
- (3) 平均濃度値を予測するためには、乱流モデルの選択より、最適な乱流シュミット数の値を適用することが重要である。
- (4) RANS では乱流エネルギーを過小評価する傾向にあるため、乱流スカラフラックスを適切に与えるためには、乱流シュミット数には比較的小さな値を選択する必要がある。
- (5) 乱流シュミット数に一般的に用いられる 0.9 より小さな 0.2~0.5 を適用した場合に、風洞実験値に比較的良い一致を示すが、その範囲内でも平均濃度値に最大 2 倍程度の差異が生じる場合がある。

前述の大風(2016) 4)では、RANS モデルの発展の経緯について報告(下記の通り)があった。1990 年代の初め頃から、建物のような Bluff body 周辺の流れ場へ、RANS モデルが適用されてきた他、LES を用いた Bluff body 周辺の乱流現象の再現とその比較に基づき、RANS モデルの評価や改良が盛んに行われ、CWE (Computational Wind Engineering)という学問領域の中で、一つの重要な骨子を形成している。標準 $k-\epsilon$ モデルをはじめとした $k-\epsilon$ 型の RANS モデルは、レイノルズ応力を渦粘性近似し方程式系を閉じる。その標準 $k-\epsilon$ モデルでは、渦粘性近似として勾配拡散近似が用いられているが、Bluff body 周辺の流れ

場では、流れが壁面に衝突する領域において、乱流エネルギー k が過大評価されるという欠点が指摘され（持田灯ら、1991）、流れの衝突と剥離の再現に着目した様々な改良モデルが提案されてきた。Launder and Kato(1993)は、渦度の大きさが淀み点で小さくなることに着目し、 k の輸送方程式の生産項 P_k に渦度を導入したLKモデルを提案した。しかし、LKモデルは、 P_k にのみ修正を施しており、運動方程式中のレイノルズ応力の勾配拡散近似とモデル化の概念に一貫性が欠けていた。これに対し、論文24)著者らのグループは、渦粘性係数を修正することで、レイノルズ応力のモデル化の一貫性を確保したMMK(Murakami, Mochida, Kondo)モデルを提案している。(Tsuchiya et al., 1997) その一方、Durbin(1996)は、Realizabilityの制約を課し、渦粘性係数の時間スケールの上限を決定するモデルを提案している。当該モデルでは、時間スケールの上限を超えない範囲で、渦粘性係数が標準 k - ϵ モデルと等しい定式で与えられる。その他、良く知られた改良型の k - ϵ モデルとして、RNG(Renormalization Group)理論を適用したYakhot et al.(1992)らのRNG k - ϵ モデルやRealizabilityの制約に着目したShih et al.(1992)のRealizable k - ϵ モデルがある。これらのモデルは様々な汎用ソフトウェアにも搭載されており、建物周辺の剥離の性状等を比較的よく再現できることが確認され、近年、建物周辺流れの予測の様々な局面で利用されている。その例として、前述の日本建築学会のベンチマークテストとして取り上げられている高層建物を模擬した1:1:2角柱周辺流れの解析結果を紹介する。文献中の図3では、地表面付近($z/b = 0.125$)のスカラー風速を、建物が無い場合の同一高さの風速で基準化した値(風速増加率)の実験値と計算値を比較してある。ビル風の評価の際に重要な、風速増加領域(風速増加率が1.0以上の領域)に限って言えば、概ね $\pm 10\%$ 程度の精度で予測できている。そして、風速増加領域の予測精度は、改良型の k - ϵ モデルを用いることで、さらに向上させることができている。すなわち、問題の特徴に応じて適切な手法を選択すれば、RANSモデルにより実務で要求される精度の解が得られると認識されるようになってきていることが報告されている。

・RANSからLESへ

田村哲郎(2005)70)らは、建物周辺における排ガス拡散問題に関する研究に対し、RANSは、計算負荷は小さいものの、建物屋根面、側面での循環流や後方の逆流などが存在するような複雑な流れ場の再現性については十分ではなく、また拡散場においても、乱流シュミット数を始めとして、輸送過程で重要なモデル定数を経験的に与えているため、平均濃度については、ある程度定量的に再現されている一方、普遍的に確立された予測手法とは言えず、乱流粘性に内在する特性から、基本的に変動濃度の再現性は十分ではないと論じている。特に漏洩事故などによる危険性物質のピーク濃度の出現に対しては、予測が困難であり、対象とする拡散問題によっては、その適用に限界があることを認識する必要がある。その一方、LESは、計算負荷は高いものの、剥離現象や循環流など、複雑な乱流場に対しても十分に再現できる予測手法として挙げられる。LESでは、空間平均を施すことにより、普遍的な構造を有する小さい渦スケールをモデル化し、流れ場の現象に支配的な大きいスケールの渦に対しては、直接計算を行うため、詳細な乱流構造の把握やそれに基づく高濃度出現の予測が可能である。また、方程式のモデル定数は、乱流場・拡散場の性状に応じ、時間・空間の関数として動的に評価することも可能であるため、種々の複雑乱流場への適用性が高い予測手法であるとも考えられている。現在、乱流境界層中における排ガス拡散現象に対しLESが適用され、数値計算による詳細な濃度変動場の構造の把握や瞬間高濃度の予測などが可能な段階にあるとして、上流側で点源排出されたトレーサガスの障壁周りの拡散問題に対して、LESを適用し、風洞実験結果と比較した結果を報告し、煙源を設定した場所での気流の鉛直分布が実験値によく整合した1/7勾配を持つ変動風が得られた

との報告がある。また、乱流強度やパワースペクトルなどの速度変動性状は、境界層上部の限られた範囲を除けば、煙源高さ周辺を含め、実験結果に対し概ね一致したとの報告がある。

安部論(2008) 71)らは、逆転層を有する対流境界層(CBL)での LES 解析を行い、中立境界層(NBL)での結果と比較し、下記のようにまとめている。

- ・ 中立境界層での拡散解析を行い、Fackrell(1982)らの実験と比較した結果、LES 解析モデルは高精度で拡散解析ができることを確認した。
- ・ 解析領域の中間部に温度勾配が存在する発達型の CBL をよく再現できることを確認した。
- ・ NBL では、上流から下流にかけて徐々に拡散が広がるのに対し、CBL では放出源近傍でただちに拡散が広がり下流位置では逆転層の影響により上方への拡散が抑えられる。さらに、逆転層が強い場合は逆転層が弱い場合と比べ、上方への拡散がより押さえられる。その結果、混合層内での平均濃度、濃度変動が大きくなることが示された。
- ・ 逆転層高さ(z_i)からの拡散解析を行った。放出源近くでは、拡散幅が小さく高濃度を維持し、プルーム軸上で変動が大きくピーク濃度も大きくなる。また、下流位置の地表面近傍において間欠的に高濃度が出現することが見出された。
- ・ z_i より上からの拡散では逆転層が弱い場合には、拡散物質が地表面まで到達する場合が見られるのに対し、逆転層が強い場合には逆転層内に拡散物質がとどまり、高濃度を下流まで維持している。また、プルーム軸上で下流まで高濃度を維持し、その変動、ピーク濃度も大きいことが分かる。
- ・ スパン方向への拡散では、混合層内で、激しい乱流混合により下流方向に進むにつれて拡散幅が NBL に比べ大きくなり、プルーム軸付近では逆転層の影響により高濃度を示した。さらに、逆転層高さ(z_i)からの拡散では放出源付近では逆転層強さによる違いはないが、下流方向に進むにつれて上下方向の拡散が大きいため、逆転層が弱い case1 よりも case2 のほうが放出源高さで高濃度を維持していることが分かる。
- ・ NBL、CBL での拡散における鉛直濃度フラックスに基づき濃度変動の特性を考察した。その結果、CBL では、浮力による寄与が大きく、地表面近傍からの拡散では NBL と比べると上向きのフラックスが大きな分布を示す。また、どの放出源高さからの拡散でも、 z_i 付近では逆転層が強い場合、フラックスが小さく抑えられるために、濃度変動も小さくなることが示された。逆転層が存在する対流境界層 (CBL) では、放出された拡散物質の挙動も複雑となる。当該論文では、逆転層を数値モデルとして再現するための境界条件設定法を検討し、Dynamic SGS モデルを導入してモデル係数 C 、 C_0 を決め、さらにスパン方向に C_0 の平均化操作を施し、CBL 内や逆転層高さ、逆転層より上部からの放出シミュレーションを実施して比較検討を行うことにより、CBL における拡散問題について上記のような有用な結果が得られた。

持田灯(2009) 72)らは、「LES を用いた都市環境の解析—建築環境工学分野の過去 20 年の歩み—」というレビュー論文中で、風工学における LES の発展過程を振り返っている。まず RANS モデルに比べて LES が格段に高精度の予測が可能として、4:4:1 角柱周辺流れを対象としたベンチマークテストにおける角柱後方壁面からの再付着距離 X_F を比較し、再付着距離 X_F は、全ての $k-\epsilon$ 系モデルで実験よりも過大となって

いるが、LESでは、精度が大幅に向上していると評価している。建物後方の循環流の大きさは、建物からの渦放出に伴う周期的変動による後方 wake 内の運動量輸送の影響を強く受ける。従って、渦放出を再現することが建物後方の弱風領域を正確に予測する上で非常に重要であるが、ここで比較した全ての k-ε 系モデルの結果では、非定常解析を行っても、この渦放出が再現されておらず、このため横方向への運動量輸送が過小評価され、建物後方の循環流域が広がっていることが分かる。風洞実験と LES、Durbin 型 k-ε モデルとの建物中心鉛直断面における平均濃度分布の比較では、LES の結果は Durbin 型 k-ε モデルの結果に比べて、遥かに風洞実験に近い。Durbin モデルの結果は、建物からの渦放出に伴う周期的変動が再現されておらず、排出口付近の水平方向のガスの拡散が実験と比較して少なくなるため、実験や LES と異なる分布となっていると報告している。さらに、dynamic 型の Smagorinsky モデル(Germano, 1991)等、LES の様々な改良に触れた後、流入境界における乱流変動の問題を指摘して、LES による非定常解析では、流入側境界における流入変動風の扱いが極めて重要だが、実際の境界層における乱流変動の統計的性状(乱れの強さ、空間相関等)を適切に模擬したものでなければならぬと論じている。LES において、解析対象とする流入風の乱流統計量を再現した流入変動風を与える方法は、流入境界面での風速変動を乱数で模擬する方法と、流入変動風そのものを流体計算で求める方法の 2 通りに大別される。風速変動の生成に乱数を用いる方法は、風速変動波形の生成の際、何を目標とするかで 3 通りの方法に分かれる。

- ・ 時間領域において自己相関・相互相関を目標として生成する方法、
- ・ 波数空間で 3 次元エネルギー Spektrum を目標として生成する方法、
- ・ 周波数領域でパワースpektrum・クロス Spektrum を目標として生成する方法

これらの方法の中でも、構造物周り流れの LES に用いられているのは、波数空間もしくは周波数領域で生成した例である。また、別途ドライバー部を設けて、流れのシミュレーションによって流入変動風を作成する方法では、境界層の空間的な発達が小さいとの仮定の下、簡略化し、風速の変動成分のみ準周期的境界条件を採用し、平均成分には目標とする風速分布を与える方法があり、現在広く用いられていると述べている。

さらに、今後の展望に際し、実際の市街地の予測に関しては、屋外気候を規定する要因の多さから、風だけではなく短波・長波の放射による熱輸送、建物壁体や地表面への伝導、植物や水面からの蒸散、空調や自動車からの排熱等の様々な要因に強く左右される。これら多様な要素の各々のモデル化の精度のバランスと必要とされる計算時間を考えると、著者らは依然として LES よりも RANS を選択することが多いと報告している。従って、単なる予測ツールとして LES を使用するのには、現段階でも、なお *too expensive* と考えざるを得ないとの指摘である。LES を実施するには、問題となる流体现象の構造を分析し、環境デザインのための基礎理論を構築することを念頭に取り組む必要があると述べている。この指摘から、LES を放射性物質の拡散予測に活用する際、明らかに、理論的知見を十分に蓄積する必要があることが分かる。

(2) 気象モデルとの接続

CFD による工学モデルが、都市市街地等に対する様々な大気環境解析に活用されるようになった一方、風力発電等に関わる風況予測システムでは、並行して発展してきた気象モデルとの接続が広く検討されるようになってきた。本項では、気象モデル等を用いる大気環境解析に係り、CFD 活用時の重要事項について

の調査結果をまとめる。

・気象モデルにおける大気境界層スキーム

橋本篤(2004) 73)らは、計算領域の狭い工学モデル (CFD) の風速計算精度が境界条件に大きく依存すると考えられるため、工学モデル自体の高精度化と共に、その境界条件となる気象モデルの風速計算精度についても改善を目指す必要性があるとして、メソ気象モデル MM5 に実装される 5 つの大気境界層(PBL)スキームについて、風速計算精度の比較・検討を行った。検討した PBL スキームを以下の表 2-6 に示す。

Blackadar(Zhang et al.,1982)と MRF(Hong et al.,1996)スキームは K - 理論(1 次クロージャー)(Hanna et al.,1981)*に基づくスキーム、Burk-Thompson(Burk et al.,1989)、Eta(Janjic,1990)および Gayno-Seaman(Ballard et al.,1991)スキームは M-Y のレベル 2.5 モデル(1.5 次クロージャー)に基づいている。接地境界層については、Burk-Thompson スキームが Louis(1979)の手法**を用いており、他はモニン・オブコフ相似則を用いる。安定度については、Burk-Thompson と Eta スキームが単純に安定、不安定の 2 状態に対し、Blackadar、MRF、Gayno-Seaman スキームでは、より詳細に安定、機械的乱流状態、強制対流状態、自由対流状態の 4 つを考慮している。鉛直混合については、Burk-Thompson と Eta スキームが隣接した層間での局所的な混合(local mixing)だけを考慮しているのに対し、Blackadar、MRF および Gayno-Seaman スキームでは、大気境界層全体の熱的な構造に依存する非局所混合(non-local mixing)も考慮されている。その結果、各スキームで計算された計算期間内の平均風速は、最大で 1.5m/s(平均風速比 27%)もの大きな差が現れることが明らかとなった。しかも、この各スキーム間の風速差は、大型風車のハブ高度に相当する高度 70m 付近で最大になることが示され、気象モデルによる風況計算において、大気境界層スキームの選択が非常に重要であることが明らかとなった。なお、当該比較において、高次の乱流クロージャーや非局所混合過程の導入が即、計算精度向上に直結しないことが示された点は、今後の方向性を考える上で示唆に富む結果であったとも報告している。(* K - 理論：大気境界層の速度場や温度場を計算する渦粘性・渦拡散型のモデル、** Louis の手法：地表面フラクスと拡散係数にもとづく接地境界層の鉛直一次元モデル。大気の鉛直構造、温度・湿度の時間変化が良く再現されたとする)

表 2-6 大気境界層(PBL)スキームの比較 (文献 73) の表 2 を複製)

PBL Scheme	Blackadar	Burk-Thompson	Eta	MRF	Gayno-Seaman
Closure Scheme	K-theory	M-Y lev.2.5	M-Y lev.2.5	K-theory	M-Y lev.2.5
	1 st order	1.5 order	1.5 order	1 st order	1.5 order
Surface Layer	M-O	Louis	M-O	M-O	M-O
Regime	4 stability regimes	Stable/unstable	Stable/unstable	4 stability regimes	4 stability regimes
Non-local Mixing	Nonlocal	Local	Local	Nonlocal	Nonlocal

・気象モデルと工学モデルの接続における格子解像度

橋本篤(2005) 74)らは、MM5 と LES との接続に関して、格子解像度について次のように述べている。複雑地形上での MM5 の風況計算精度と高解像度化の限界に関する検討を目的として、三重県山岳部を対象とした計算精度検証を行なった。得られた結論を以下に列記する。

- ・ MM5 では、地表面及び大気境界層内の熱力学過程起因の小スケールの気象現象の再現が可能。
- ・ 年平均風速分布に見られる高解像度化の効果は、領域全体の平均風速が一定に保たれ、微地形に対応した風速コントラストが明確になる。
- ・ 解像度 3km から 333m への高解像度化に伴い、風況計算精度は全ての統計値において向上する傾向がある。
- ・ 解像度 333m の風況計算値は、工学モデルへの入力となる境界条件として十分な精度を有す。
- ・ 解像度を 1km から 333m へ上げる段階で、RMS 誤差と相関係数は、頭打ちの傾向が見られる。
- ・ MM5 風況計算では、計算精度・計算コストから、333m 程度の解像度が高解像度化の実質的上限である。

以上、上記文献では、限られた地点での検証結果という制約はあるが、計算精度の面から見た気象モデルの高解像度化の限界が示された。約 300m というその値は、気象モデルに工学モデルをネスティングする手法が主流になっている風況シミュレータにおいて、両者を結ぶ接続解像度の一つの目安を与えるものである。

・気象モデルと工学モデルの接続における境界条件の設定

富永禎秀(2006) 75)は、気象モデルと工学モデルの接続に対し、次のように指摘した。ミクロスケールの風環境の予測・評価において、解析対象とするのは 1km 以下程度の範囲であり、建物や街路のスケールが流れや乱れに重要と考えられるため、これらの形状は正確に再現した上で、その場における運動方程式や熱、水蒸気、汚染質等の輸送方程式を解き、その空間分布を得ることが目的となる。これより大きなスケールの風の性質については、流入出の方向と境界における諸量の適当な鉛直分布を考えて与える。通常、風速や気温の観測の高さ方向の点数や高さ自体は限定されているため、大気の安定度等に伴う境界層厚さや風速の鉛直分布の時間的な変化、温度の鉛直分布などは、十分表現できないことが一般的である。しかし、市街地内部の熱や汚染質の拡散等においては、微細なスケールの影響が大きいと考えられるため、メソスケール気象モデルとのマイクロ解析 (CFD) を組み合わせることにより、その精度や適用範囲は大きく向上すると期待される。なお、接続のための技術的な課題は下記の通りである。

- ① 各種物理変数の接続気象モデルでは、乱流モデルで用いる乱流量として q ($q^2 = u^2 + v^2 + w^2$) と長さスケール l が一般に用いられるため、これを工学モデルで用いられる k と ε に換算する必要が生じる。
- ② メソスケール解析では、ある一定時間間隔 (例えば 10 分) 毎の非定常の解析データが得られる。メソスケールの解析結果から代表的な日時 (実測の行われた日、典型的な夏日) 等の一時点を取り出して、マイクロ解析において定常解を求める場合は、計算負荷はそれほど大きくない。しかし、より

詳細な検討を行う場合、特に拡散問題等のように非定常な境界条件の変化が結果に大きく影響を及ぼすと考えられる場合は、計算量は増大する。

特に、上記②に関し、メソスケールの解析結果を時間的に補間し、その各時刻の境界条件の下でより細かい時間ステップで、ミクロスケールの流れ場の計算と熱や汚染質の拡散等の計算を行うこととなるが (Unsteady Coupling)、その際、計算量は膨大となることに注意する必要がある。富永の当該論文にて、Coirierらは、前述の市街地の拡散問題を対象に様々な接続方法を比較しており、Quasi-steady mode と呼ばれる接続方法を推奨している(Coirier et al., 2006)ことが紹介されている。この方法は、まず、メソ気象モデルから得られた15分間隔の流れ場を境界条件として、各々、ミクロ解析を行い、定常流れ場を作成する。それらの結果を、時間的に線形補間し、より細かい時間間隔の流れ場を作成し、各時点では流れ場を固定させ、非定常な汚染質拡散の方程式を解く。これに関連して石原らは、風況予測を対象としたメソ気象解析とミクロ解析の接続に関して、力学統計的局所化手法を提案している(石原孟ら, 2003)。当該方法は、メソ気象モデルで解析された全ての時刻でネスティングをするのではなく、1年分のメソスケール解析によって得られた風況に統計処理を行い、その結果とミクロ解析を接続するものである。その際、微細地形の効果は風向のみに依存すると仮定し、ミクロ解析の計算ケースを削減し、また気象モデルで解像できる粗い局所地形の効果と実際の局所地形の効果との差を補正することによって実地形上の局所風況を予測する標準実風況変換という操作を行っている。メソ気象解析とミクロ解析の結合は、特に拡散や換気・通風等の弱風問題の解明や予測においては、極めて有効な手法となると考えられる。また個別の目的を持つミクロ解析のそれぞれにおいて、メソ解析を実施することは限界があるが、信頼できるメソ気象モデルの解析結果の時系列データがデータベースとして広域的かつ標準的に整備され、共有できるようになれば、各種のミクロ解析に基づくアセスメント等にも非常に有効であると考えられる。これらの議論から、今後の研究の進展に期待が持たれていることは認識すべき点である。

田村哲郎(2008) 76)らは、都市部での局所的な強風を正確に推定するには、数 m から数千 km の幅広いスケール間の流れの構造を再現する必要があり、格子解像度 100m から 5km 程度のメソ気象モデルと、都市環境を表現した数 m の解像度を持つ LES とを融合した解析が必要として、2種類の低気圧を対象に MM5 と LES とのハイブリッド解析を行った。MM5 と LES とを接続する物理量の一つに鉛直熱フラックスプロファイルを用いた。熱フラックスプロファイルから逆算して与えた温度プロファイルにより、2004年の事例の前線等、気象要因に基づく乱流成分が増幅した状態と 2006年の事例のやや安定な状態を、風に対して適切に反映させたとしている。従って、当該手法は、低気圧移動時の流入風作成等に有効であると考えられる(図 2-6 参照)。以上、ハイブリッド解析によって都市の建物群の影響を考慮した風況場を再現することが可能となったと報告している(図 2-7 参照)。さらに、2つのタイプの低気圧通過時の、各々の安定度に応じたガスト(風速が短時間に不規則に変化する現象：風の息)の違いまで表現できることが観測値との比較から分かったとしている。これらは、メソ気象モデルの限界を大いに改善したものと考えられる。特に、解析によってどの地点が特に強いガストを記録するかも判断できるため、強風による被害評価に対しても有効なデータ提供が可能になるものと期待されると述べている。

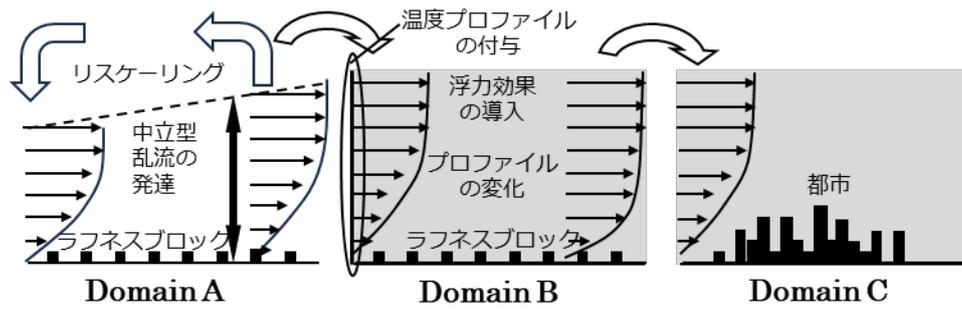


図 2-6 LES 都市モデルの概念図 (文献 76) の図 6 を複製)

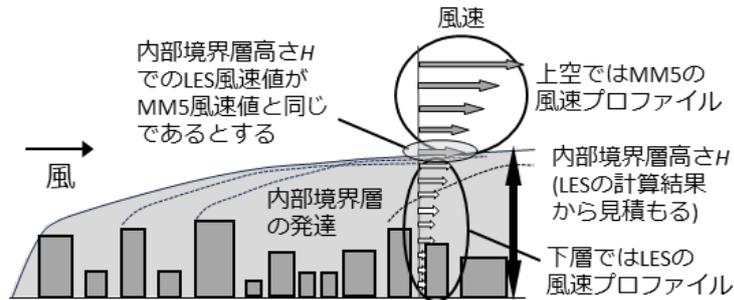


図 2-7 風速有次元化の概念図 (文献 76) の図 12 を複製)

・ 放射性物質拡散モデルの課題

山澤弘実 (2013) 77)によれば、旧原子力安全委員会の気象指針には、事故時、プルームモデルを用いて線量を評価し、その統計値 (影響の小さい方から 97 パーセントイル線量値) に基づくものと記載されており、30 年以上見直されていないことを指摘している。これは、著者が四半世紀以上に最初に指針を見たときに感じた当該方法の根拠と正当性に関する疑問 (環境アセスメントに類似の考え方が存在するが、これは常に存在する環境物質の濃度変動の統計的特徴に着目したものであり、事故時のみ特異的に放出される事象に適用できるのか?) については、いまだに解けていないことを指摘している。また、大気拡散現象の理解、特に湿性沈着過程は、いまだに定量的把握の観点から不十分な部分も残されているが、現状で研究者が利用可能なモデルは、相当程度の実力を有していることも指摘している。しかし、残念ながら、1F 事故前あるいは事故後も原子力分野では、それが十分に認識されていないように見えるとの印象があると報告している。即ち、原理と方法が区別されないまま、四半世紀以前に「方法」として明文化されたものが、そのままガラパゴス的に残り、実際の現象とは無関係に、方法が優先されているように思えるとのことである。実際の現象を原理に基づいて把握・評価するためには、原子力分野での大気拡散の扱い方を、自然科学的考え方に則り組み立て直す必要があるとの指摘である。

前述の飽本 59)によれば、ウェザリング効果(風化) と 2 次汚染機構、特に再浮遊の過程を下記のように詳細にまとめている。

- ・ 再浮遊
- ・ 再浮遊後の移流・拡散
- ・ 降下とその影響

これらの知見に対応し、放射性物質の沈着後も、高精度に放射性物質による影響を評価するには、明らかに上記の知見と併せて放射性物質拡散モデルの解析・運用が必要になると考えられる。

以下、放射性物質拡散とそのシミュレーションに係る知見をまとめ、その課題について記す。前述の日本学術会議の報告、文献 61)によると、国内外 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にもとづくシミュレーション結果の検討の結果、観測された放射性物質の分布の主要な特徴を再現しているが、定量的には、モデル間の差が大きく、特に大気では、湿性沈着過程についてのモデル間の差が大きいことが課題として指摘された。更に、陸域と海域における放射性物質の沈着量分布については、仮定した気象データと放出シナリオにより、極めて敏感に変化するため、今後は、観測データを基に、モデル値を最適化するための同化手法と逆推計手法により高時間分解能のシミュレーションシナリオを構築する必要があることが述べられている。特に、モデルの性能は、モデルの力学仮定、化学輸送仮定、乾性・湿性沈着過程等に依存しているとの指摘があり、これらは観測データの存在の下、シミュレーション（モデル）を準備すべきと考えられる。

前述の堅田 62)では、一般に、大気拡散モデルには、大気中のガスまたはエアロゾル状の放射性物質の除去過程として、大気乱流や重力沈降により地表面に沈着する乾性沈着と、降水粒子（雨、雪、あられ、ひょう）に取り込まれて地表に降下する湿性沈着の計算スキームが搭載されている。一部のモデルには、降水粒子以外の雲粒（霧粒）が地表に沈着する雲水（霧水）沈着も考慮されている。乾性沈着および雲水沈着は、それぞれ大気第 1 層のガス・エアロゾル濃度または雲水量がある閾値以上の場合に計算すると仮定されている一方、湿性沈着は、降水粒子と雲粒の水分量がある閾値以上である大気層で計算する。これまで、1F 事故に適用されたモデルの多くは、比較的簡易な方法、具体的には、乾性沈着速度を文献に基づき一定値で与え、湿性沈着量を計算するための洗浄係数は、地上における降水強度のみの関数として、沈着量を計算してきた。即ち、雲水沈着過程は多くのモデルで無視されているが、この過程が 1F 事故時の地表汚染に及ぼした影響は大きい可能性があり、弱い雨や霧雨・霧の観測データの復元、それらを用いた気象・大気拡散シミュレーションと放出量の妥当性検証等、課題は多く残っていると指摘されている。

前述の梶野 63)では、1F 事故による Cs-137 エアロゾルの拡散・沈着の解析結果を紹介する中で、2011 年 3 月の全期間に放出された Cs-137 の領域総沈着量に対する沈着プロセス寄与率について議論している。領域全体では、雲内除去が最も寄与率が大きく、次いで霧沈着と乾性沈着の順であり、雲底下除去は、最も寄与率が低い。除去率の理論値がそもそも実測ベースの値に比べて 1 桁以上低い、という課題がまだ残っていると指摘している。大気エアロゾル動態の理解には、地球物理や大気化学を含む様々な素過程の理解が必須であり、大気エアロゾルのモデリングは、質量濃度の予測から始まり、次第に精緻化され、粒径分布の予測を経て、現在は個別粒子単位の予測モデルにまで発展して来たが、複雑な素過程表現と、全球モデルや MM5 あるいは WRF 領域モデルのような大規模 3 次元気象モデル（CFD）計算とを結びつける部分で何らかのブレークスルーが必要だろうと指摘している。

2.4 大気拡散シミュレーション文献調査（英語）

本節では、大気拡散シミュレーションに関する文献（英語）に対し、シミュレーション対象を 3 つに絞り（2.1 節に記したシミュレーションの活用対象の分類 4 つから 3 つに絞り）、主要文献の内容を概説すると同時に、その対象毎（各項）に課題等を整理し報告する。

2.4.1 汚染物質の大気拡散問題一般

汚染物質の大気拡散に係る文献（英語）は非常に多く、扱う内容も、日本語文献より多岐に亘るため、以下の観点（１）～（３）にて分類し、報告者らが重要文献と判断した文献のみ取り上げる。従って、網羅的な文献調査報告ではなく、本事業の目的に即して選択した文献の調査報告となることを注意する。

- （１）プリュームモデルと RANS（レイノルズ平均ナビエ・ストークス）モデル
- （２）LES(ラージエディシミュレーション)及び LES と RANS の比較
- （３）その他のトピック（ソースターム推定、データ同化法の利用、市販ソフト、その他）

（１） プリュームモデルと RANS モデル

A.Venkatram(2003) 9]らは、野外実験を対象としたプリュームモデルと CFD による拡散シミュレーションの結果を比較して報告している。単純な地形及び複雑な地形の数値モデルとガウスプリュームベースの大気質モデルの比較とそれらのパフォーマンスを説明し、単純な地形の場合、モニターされた六フッ化硫黄 (SF_6)と、ノルウェーのルールストロムと米国のキンケイドでの気象データが、モデルの予測性能を判断するため考慮された。複雑な地形の場合は、窒素酸化物(NO_x)と粒子状物質(PM10)と英国ハインドヘッドの気象データが使用され、2つのモデルの性能が比較されている。一般に、ガウスベースの大気質モデルは、確率論的概念を使用し、汚染物質濃度を推定する一方、CFD モデルは、運動量とエネルギー移動を支配する偏微分方程式を解く。測定された SF_6 濃度と予測された SF_6 濃度を比較することで、モデルの性能を評価するため、統計分析が実行され、最後に、 NO_x と PM10 のセクターごとの濃度分布も推定され、複雑な地形の特徴に対する発生源放出と気象条件との相互関係が研究された。その結果、単純地形（ノルウェーのルールストロムと米国のキンケイド）では、CFD (PANAIR)の予測結果は、野外実験結果と一致した。複雑地形の場合（英国ハインドヘッド）、CFD は、ガウスモデル (ISCST3) と比較して、地形の特徴と気象条件が正確に考慮できた。全体的には CFD ベースの数値モデル予測がガウスモデルよりも信頼できることが示唆された。

J.L.Santiago(2007) 10]らは、Mock Urban Setting Test(MUST)野外実験に対応した風洞実験について、RANS モデルを用いて不規則配列と無限規則配列での流れを調査し、配列における空間平均特性の違いを調査した。市街地における全ての建物を解像するのは困難なため、建物群の一部による平均的な風速特性の獲得を意図して、単一の建物、MUST 実験の不規則配列、その一部について周期境界条件を設定したケースなどを検討した。流下方向風速は実験とよく一致したものの鉛直成分は過少であった。また平均的な特性については、不規則配列の全域解析と、部分領域に周期条件を設定した場合とでは、乱流応力成分にわずかな違いしか見られなかったと報告している。

B.Blocken(2008) 11]らは、商用コード Fluent 6.1 (RANS) を使用し、中立的に安定した大気境界層における汚染物質の拡散の定常状態について、孤立した煙突からのプリューム拡散、孤立した立方体上の屋上ベントからの低運動量の排気、低層の長方形の建物の屋上煙突からの高運動量排気の3ケースについて調査し、いずれの場合も、横方向への拡散が大幅に過小評価されていると報告した。

C.Gorle(2010) 12]らは、RANS シミュレーションを使用してパッシブトレーサーの乱流拡散をモデル化する場合、スカラー輸送方程式を解く方法と、ラグランジュ粒子追跡アルゴリズムによる方法があるが、前者では、平均速度場と乱流拡散係数(乱流粘度と乱流シュミット数 Sct の比)、後者では、乱流の運動エネ

ルギーとラグランジュ積分時間 TL から決定されることをベースとして、計算された流れ場の下、Sct と TL を推定するアプローチによって、修正モデル定数を適用し、Atmospheric Boundary Layer (ABL) の正しいモデリングを通して、速度場と濃度場の予測が改善されることを示した。

M. Lateb(2014) 13]らは、建物後流が拡散に与える影響を調査するため、風上に高層建物（タワー）、間にスタック、風下に 2 つの低層建物を配置し、風洞実験データ、定常 RNG k-e、DES(Detached-eddy simulation)モデルを比較して、後流域の風況とスタックから放出される汚染物質拡散の再現性を検討した。DES は、URANS から LES への切り替えを、流れの局所的な乱流特性ではなく、局所的なグリッド間隔に従って実現する。タワーの風下側壁面の頂上付近では、RNG は DES と比較して実験値との良い一致を示した。これは、RNG が再循環流を定常的な大きな流れと表現したためと考えられる。DES はタワーの風下壁に沿った垂直方向の濃度分布をよく再現したが、RNG は大幅な過大評価を示した。同様に、DES はタワーの後流の再循環域を再現する一方、RNG はこれを過大評価した。これは、高い異方性が示される後流領域において、RNG が流れ場の過渡特性による周期的変動を再現しないためと思われた。タワーの側面によって引き起こされる渦の放出は、RNG では適切に再現されず、DES では明確に観察された。

C.Gromke(2015) 14]らは、街路樹を含む都市近隣スケールでの流れと汚染物質拡散 CFD シミュレーションのための包括的精度検証を行い、RANS モデルを使用する際のグリッド幅や適切な乱流シュミット数について検討した。グリッド幅の感度解析では、都市近郊の流れを確実に予測するには、建物の高さごとに 20 個、峡谷の幅ごとに 12 個のセル数を持つ 1.5 m グリッドが適切であることが示唆された。また、乱流シュミット数 Sct は、空間的に変化し、流れの平均特性と乱流特性、汚染源の位置と種類、空間内の汚染物質の分布の存在量と不均一性に依存するパラメータであることが分かった。乱流シュミット数 Sct = 0.3、0.5、0.7 に対し、ストリートキャニオンに面した建物の壁における濃度を、4 つの構成条件（垂直風/平行風及び樹木のあり/なし）から成る風洞データと比較した結果、Sct = 0.5 が適切とされることが分かった。

B.W.Yan(2016) 15]らは、標準 k-e モデルに基づいて、水平方向における均一流れをシミュレートするためのモデリング方法論を検討し、異なる流入境界プロファイルによりシミュレーションされた ABL 流れの妥当性を確認した。続いて RNG k-e モデルにより、複雑な地形上の表面風速に対する地形効果を評価し、風洞試験の結果と現場での測定結果との一致を確認した。中立大気境界層を再現する場合の流入境界条件の設定や、適切な k-e モデルの選択についての知見が得られた。

A.Castorrinia(2021) 16]らは、メソスケール(WRF-ARW)レベルと局所スケール(Open-FOAM)レベルで風況をシミュレーションするため、2 つの異なるオープンソースプラットフォームを利用して、風力発電所で利用可能な風力を詳細に予測した。大陸レベルから数百メートルまでの範囲の空間解像度で長期予測期間(最大数日)にわたる風をシミュレートし、メソスケールの数値天気予測 (NWP : Numerical Weather Prediction) モデルによって提供される予測風の空間解像度を風力エネルギーアプリケーションの典型的な長さスケールまでダウンスケールさせ、地理情報システム (GIS)、先端気象調査結果とシミュレーション (WRF-ARW および OpenFOAM) を含む多数のツールを組み合わせる予測システムを構築した。

○本項 (1) のまとめ

本項 (2.4.1) (1) のまとめとして、大気拡散シミュレーションの各種モデルとその精度向上に関連するモデルの構成要素、検証データ、得られた成果を下記表にまとめた。なお、シミュレーションのみで検証デ

ータの利用がないものやシミュレーションモデルの紹介、考察のみの論文は除いた。

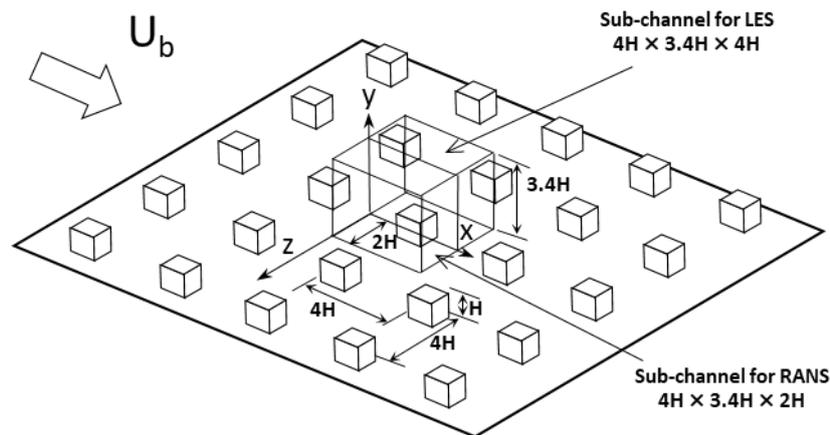
文献 No.	構成要素	検証データ	成果
9]	プリュームモデルと CFD(RANS)の比較 単純地形、複雑地形	野外トレーサ実験	拡散手法の比較検討
10]	RANS モデル 建物アレイ(不規則配列と無限規則配列)	MUST 野外実験 風洞実験	アレイにわたる空間平均特性の挙動を分析
11]	商用コード Fluent 6.1 (RANS) 定常拡散 放出条件の差による拡散状況の違い (煙突、屋上ベント、放出速度の違い)	風洞実験	いずれの場合も、横方向への拡散が大幅に過小評価されたと報告した
12]	建物後流れ RANS モデル ラグランジュ粒子モデル 乱流拡散係数(Sc : シュミット数)検討	風洞実験	Sc を一部領域で変更することにより、ABL モデルを完成
13]	定常 RNG k-e、DES(Detached-eddy simulation)モデル (LES と URANS)の比較 2つの建物、屋上煙突、建物後流	風洞実験	LES で解く領域を指定 建物後流の再循環域を高精度で解く
14]	realizable k-e モデル 建物アレイ、樹木モデル グリッドサイズ、乱流シュミット数検討	風洞実験	建物の高さごとに 20 個、 道路幅ごとに 12 個のセル数、 $Sc_t = 0.5$
15]	標準/RNG k-e モデル 複雑地形 ABL の流入境界条件を検討	風洞実験	流入境界条件、複雑地形の 地面近傍流れを検討
16]	メソスケール(WRF-ARW)レベルと ローカルスケール(Open-FOAM)の結合 広域、複雑地形 ネスティング	現地観測点	風況予測システムを構築

(2) LES 及び LES と RANS の比較

Y.Cheng(2003) 17]らは、立方体アレイ (図 2-8 参照) 上の乱流解析に対し、3つの LES(LDM、DMT、SMG) *と RANS(標準的な k-e)による解析を行い、実験と比較し、下記の結果を得ている。(*LDM: Localized Dynamic Model (局所的に SGS の係数を変更する)、DMT: Dynamic SGS Model with time-averaging procedure (Dynamic SGS に時間平均化を加えたもの)、SMG: standard Smagorinsky Model (標準スマゴリンスキーモデル))

- ・実験で観察された流れの構造として、立方体前面で側壁を包み込む馬蹄形の渦、後流のアーチ型渦、屋根の前縁端と側壁の垂直端から発生する屋上・側壁上の薄い分離気泡は、すべてのモデルでかなりよく捕らえられた。特に、LDM は詳細な実験測定と最もよく適合し、立方体のすべての表面における分離/再付着プロセスを予測できた。
- ・定量的に、平均速度とレイノルズ応力のプロファイルは、すべての LES モデルでよく再現された。

- ・ RANS の結果は、かなり異なることが判明した。RANS シミュレーションでは、立方体後流（アーチ型渦の一部）の再循環ゾーンのサイズが過大評価された。
- ・ 標準的な $k-\epsilon$ モデルに加えて、改良された Kato-Launder モデルも完全に発達した乱流では、効果は小さい。
- ・ 大きな分離ゾーン、再循環領域に隣接する再付着ラインのトポロジー、領域付近の微細スケールの流れ等の複雑な構造については、計算コスト（計算時間）は、LES が遥かに大きいですが、RANS 計算よりも LES 計算の方がよく再現される。



- (1) SMG: the standard Smagorinsky model;
- (2) DMT: dynamic SGS model with time-averaging procedure;
- (3) LDM: localized dynamic model;
- (4) RANS: $k-\epsilon$ model applied with standard wall functions;
- (5) EXP: experimental data from [4].

図 2-8 文献 17]の Fig.1 を複製

E.Fernando(2004) 18]らは、MUST 実験(120 の建物アレイ) に対し、空間変動と非定常性を捉えることを目的に、大規模 LES(VLES) (多目的 FEM コード : FEFLO-URBAN)によるシミュレーションを行い、結果を評価した。4つの異なるメッシュ解像度 (要素数 : 500K、4M、8.1M、および 32M)を用いた実験と比較し、要素数が最大の 32M ケースで、72 観測点のうち 56 観測点の観測平均を 1 標準偏差以内で予測することが分かった。

Y.H.TSENG(2006) 19]らは、都市環境における大気汚染物質の輸送と拡散のモデル化を検討するため、新しい動的サブグリッドクロージャーと境界処理を備えた LES によりシミュレーションを実施した。平坦地形上の単一な角柱モデル、建物アレイ、ボルチモアダウンタウンの市街を模擬した形状について、SM(Smagorinsky model)、SILM(scale-invariant Lagrangian model:スケール不変ラグランジュモデル)、SDLM(scale-dependent Lagrangian model : ラグランジュスケール依存動的モデル)の 3 種の LES 渦粘性モデルをテストした。SDLM は、物理的により現実的な SGS 粘度場を与え、ボルチモアのダウンタウンの都市市街地上の大気の流れに対し、より高い信頼度を示すことが分かった。一般に、LES は従来のモデルよりもはるかに多くのコンピューターリソースを必要とするが、結果の量と質は疑いなく優れていることが結論づけられた。

Z.T.Xie(2008) 20]らは、LESを用いて、都市のようなランダムな障害物上の流れのシミュレーションを行い、DNSの結果と比較した。流れは、均一な高さのブロックの場合よりも大幅に複雑であることが分かった。例として、表面抗力や障害物の平均高さを超える乱流運動は、不均衡な乱れを生成するが、ランダム配列のすぐ上の領域では、その乱流構造は均一配列よりもはるかに均一であった。一方、個々のブロックでの局所的なキャノピー流れが、比較的離れたブロックによって大きな影響を受ける可能性があることも示唆する結果を得た。

P.Gousseau(2010) 21]らは、複雑さが異なる3つのテストケースについて、2つの異なるモデリングアプローチ(RANS $k\text{-}\epsilon$ 、LES)を用いて、そのパフォーマンスを評価し、風洞実験と比較した。長方形の建物の下流の場合、 $Sct = 0.5$ の標準 $k\text{-}\epsilon$ モデルで満足いく結果が得られている。しかし、屋上の通気口からの拡散の場合は、LESだけが現実的な濃度場を予測できることが分かった。モントリオールのダウンタウンの実際の都市環境では、標準 $k\text{-}\epsilon$ モデルを使用したRANSとLES両方共に、風洞実験と比べて十分な一致は見られなかったが、LESの方が明らかに優れていることが分かった。LESは、拡散方程式を解くためのパラメータ入力を必要とせず、すべてのケースで良好なパフォーマンスを示した。実際の都市環境のケースでは、LESによる予測濃度値は、実験との差異が2倍未満であるのに対し、標準 $k\text{-}\epsilon$ モデルでは4倍未満であると報告している。

J.L.Santiago(2010) 22]らは、RANSとLESを使用して、単純化された都市環境を表すMUSTフィールド実験のシミュレーションを行った。目的は、比較的低い計算コストで都市のようなジオメトリ内の流れをシミュレーションするため、RANSと比較してLESを使用することの実現性と潜在的優位性を調査することにある。平均流量については、小さな幾何学的不規則性の影響をミクروسケールレベル(建物流量スケール)とメソスケールレベル(空間平均流量特性)の両方で調査した。LESとRANSによる平均流れ方向速度とせん断応力は、文献による統計量と良好な一致を示した。ただし、LESは、垂直速度成分で観察された不規則性の影響を、よりよく捉えられることが分かった。この速度成分の大きさは、一般にRANSでは過小評価される。メソスケールレベルでは、小さな幾何学的不規則性が、空間平均された流れの方向と鉛直方向の速度成分および空間平均されたレイノルズせん断応力の両方に対してあまり影響を与えないことが分かった。

P.Gousseau (2011) 23]らは、RANSとLESの輸送プロセスにおける対流および乱流フラックスの相対的影響を分析し、予測精度におけるこれらのフラックスの役割を明らかにした。これまでの殆どの研究では、輸送プロセス自体ではなく、結果として得られるシミュレーション平均濃度と測定平均濃度の比較に焦点を当ててきたが、本文献では、輸送プロセスの点で際立った特徴を持つRANSとLESを用いて、孤立した建物の周囲の乱流パターンにおける汚染物質の輸送プロセスの詳細な分析を行った。LESは、乱流質量移動に対し、流れ方向にのみ現れる逆勾配メカニズムを再現できることが示された。この現象は、立方体の前縁から発せられる大規模な構造によるものであると考えられている。逆勾配メカニズムは、乱流ABL流中におかれた屋上に汚染源を備えた立方体の建物だけでなく、汚染源の高さが建物より高く、建物が発生する乱流の影響を直接受けていない場合にも発生することが示されている。しかし、横方向、垂直方向とは逆に、流下方向の移流が、物質輸送の支配的なメカニズムとして機能するため、RANSモデルによる流れ方向の乱流質量流束の誤った予測は、結果に大きな影響を与えなかった。したがって、汚染源が分離領域の外側、またはRANSモデルがうまく再現できない流れ場の外側に位置する場合、RANSモデルは汚染源の周囲の対流束をかなり正確に予測可能で、結果として正確な濃度分布を示す。ただし、これには、乱流シミュ

ット数による乱流束の正しいパラメータ化が必要となる。一方、拡散プロセスに対して建物の影響が大きい場合、LESの精度は明らかに優れていることが分かった。これは、LESが屋上と建物後流の剥離領域のより正確な対流束を計算できるからである。このような場合、Sctの修正はRANSモデルによって予測される汚染物質の拡散に影響を与えるが、流れ場に関しては、その欠陥を補うことはできないことを報告している。

Y.Tominaga(2011) 24]らは、RANSとLESを使用した三次元街路キャニオンにおける汚染物質の拡散のCFD計算を行い、実測との比較を試みた。LESの結果は、以下に記すように、街路キャニオンにおけるプルームの分散が非常に不安定であることを示した。

- ・ 風洞実験と比較して、LESは従来の平均濃度分布を得るRANS(RNG)よりも優れた結果をもたらす。例えば、キャニオンの底では、発生源からの風上エリアで、RNGの値は、LESおよび実験値よりも最大で約4倍高い。濃度の水平方向の拡散は、LESがキャニオンにおける非定常な濃度変動をよく再現する。
- ・ RNGはLESと比較してキャニオンでの乱流拡散を過小評価した。LESによって得られる乱流拡散束は、RNGよりも横方向に広がる。
- ・ LES、RANSともキャニオンと建物の周囲の風の場合と濃度場は、同様の変動傾向を示すが、キャニオンにおける両者の差は、建物周囲の流れの差よりも大きい。これはキャニオン内の水平方向のスカラー輸送が建物の屋上よりも支配的であるためである。

J.Fang(2015) 25]らは、中立成層大気境界層における超大規模運動(VLSM:Very Large Scale Motion)をLESで解析した。垂直高さは境界層の厚さに相当する $L_z = 1000 \text{ m}$ 、水平サイズは $L_x = 32\pi L_z$ 、 $L_y = 4\pi L_z$ である、水平方向は周期境界条件、上端は摩擦無しでの固定、下端はモンイン・オブコフ相似則を設定した。10 L_z を超える流れ方向の波長からの分解された乱流運動エネルギーとせん断応力への寄与は、それぞれ最大27%と31%であることが示された。縞状構造のスケールは非常に大きく、ストリーム方向で最大20 L_z 、スパン方向で0.6 L_z であった。低～中程度のレイノルズ数で行われた実験やDNSによって、実験室スケールの境界層の対数領域やその外側で観察されたものとの類似性が認められた。

L.W.Chew(2018) 26]らによると、加熱された壁面を持つストリートキャニオンでは、縮小スケールの実験と実物大の現場測定で相反する浮力効果が表れる。縮小スケールの実験では重大な熱影響が示され、実物大のフィールド測定では、流れ場全体に対する熱影響は無視できる程度である。ここでは、RANSとLESによる数値シミュレーションでこれを調査した。RANSモデルは縮小スケールでは良好なパフォーマンスを示したが、フルスケールでは加熱された壁の熱影響を過剰に予測した。一方、LESの結果は両方のスケールの測定値とよく一致した。したがって、風に向かう壁面が加熱されたストリートキャニオン流れの本格的なシミュレーションにはLESを使用する必要がある。キャニオンの再循環流の3次元的な乱流特性を再現する精度の違いにより、加熱された壁面における熱移動の評価さらには浮力の評価にも差がでる。熱による浮力を伴うキャニオン流れでは、縮小スケールの実験の結果を本格的な街路キャニオンに適用する場合、レイノルズ数だけでなくグラスホフ数*も考慮すべきことが確認された>(*グラスホフ数：粘性力と浮力の比を表わす無次元数)

L.Thouron(2020) 27]らは、MUST野外実験に対して、3つのLESモデルを適用し、次のような結果を報

告した。Meso-NH (非弾性、構造格子、IBM:Immersed Boundary Method 埋め込み境界法)、YALES2 (低マッハ定式化、非構造格子、ボディフィット)、AVBP (圧縮性モデル、非構造格子、ボディフィット) を用いて、推奨数値スキームとモデル、高解像度の計算グリッド (コンテナの配列内で 20~30cm)、各種物理的・数値的選択 (モデル方程式、計算グリッド、数値スキーム、物理的仮定) に対する LES 結果の感度を分析した。なお、AVBP*では、人工圧縮率アプローチ*注) を使用した。数値スキーム (WENO5、CEN4、TFV4A、TTGC、LW) がテストされ、CEN4、LW スキームは、WENO5、TTGC よりも拡散性が高いという特性が示された。全体として、LES は短期プリュームのダイナミクスを表現できることを示した他、ローカルセンサー(レーザー濃度が高い(1ppm 以上))、バックグランドセンサー((1ppm 未満))に対して、統計的基準を分析した結果、LES は、高濃度のソース近傍でも良好な FAC2 値を示したと報告している。(*AVBP は完全な圧縮性 LES ソルバーであるため、タイムステップは音波伝播のクーラント・フリードリッヒ・レヴィ(CFL)条件によって制限される。音波を正確に捕捉することは、大気境界層シミュレーション (非常に低いマッハ数) では関係がないため、圧力勾配スケージング (PGS) あるいは「極低温」とも呼ばれる人工圧縮率アプローチを使用した。これにより、タイムステップが増加し、計算時間が短縮できる)

M.Hadžiabdić(2022) 28]らは、スタンドアロンの URANS とハイブリッド RANS-LES (HRL) という 2 つの乱流モデリングアプローチを使用し、実際の都市構成における風の場合と汚染物質の拡散の計算を実行した。どちらのアプローチも同じ楕円緩和 $k\text{-}\epsilon\text{-}f$ 渦粘性 RANS モデルを採用した。URANS は計算領域全体で RANS を使用し、HRL は外側の流れの地表/壁隣接領域でのみ、動的 Smagorinsky LES を用いた。URANS による 2 つのベンチマークケースは、実験データとかなりよく一致して主流と汚染物質の拡散を予測できる。一方、HRL は、物体から放出される準周期的に組織化された渦構造の固有の非定常ダイナミクスの分解能が優れているため、時間分解フィルタリング (LES 領域) およびアンサンブル平均 (URANS 領域) をより適切に再現できる。これにより、全体の乱流運動エネルギーと乱流応力、および特徴的な乱流スケールの予測が向上し、汚染物質の蓄積の影響を受けやすい分離ゾーン/建物の後流での混合がより現実的に計算できると報告している。

E.Lumet(2023) 29]らは、次のように報告した。大気質の予測は、広範囲の長さで時間スケールにわたるため、近距離場から遠距離場にわたるマルチスケールの問題になる。大気境界層(ABL)プロセスと地表面の不均一性による複雑な乱流力学により、汚染物質の濃度は時間と空間で局所的に何桁も変化する可能性がある。数値シミュレーションと実験測定を平均変動と乱流変動に関して詳細に比較することで、コンピュータモデルの強みと限界を評価できるが、LES モデルの不確実性は、i) 偶発的不確実性、検討する現象に固有の還元不可能な不確実性、ii) 構造的な不確実性、コードの選択、乱流モデリングなど基礎となるモデルに固有の不確実性、iii) 境界条件の不確実性、気象条件や都市形状の表現、汚染源の特徴付けに関連する。当該研究では、ほぼ中立の MUST トライアルケースを使用し、現場規模のマイクロスケールプロセスの内部変動を考慮して、定常ブートストラップ法*を観測値と LES 推定の両方に適用し、一般的に文献で使用される平均時間 (200 秒) より短い時間 (10 秒) でリサンプリングすることで、時間平均量の内部変動を推定し風況と汚染物質拡散の LES 推定値の信頼性を評価した。結果は、風の流れの数値予測と濃度の相対変動およびピーク予測ともに非常に正確であった。今後、重要となる視点は、特に長時間の分析において、メソスケールの変動を定量化することであり、さまざまな大気の安定性条件について、さまざまな不確実性源、特にモデルの構造的な不確実性と大規模な大気強制力 (平均流速、乱流の強さ、長さスケール) に関連する不確実性を定量化することであると指摘している。 (*定常ブートストラップ法 (Stationary Bootstrap) 時

系列データについてリサンプリングを行い、元データをブロックに分割して解析する。(CONFIDENCE LIMITS FOR AIR QUALITY MODEL EVALUATIONS, AS ESTIMATED BY BOOTSTRAP AND JACKKNIFE RESAMPLING METHODS, S.R.Hanna,1989))

○本項のまとめ

前項 (2.4.1) (1) と同様に、当項 (2.4.1) (2) でも、シミュレーションの精度向上に関連するモデルの構成要素、検証データ、得られた成果について次の表にまとめた。なお、シミュレーションのみで検証データの利用がないものやシミュレーションモデルの紹介、考察のみの論文は除いた。

文献 No.	構成要素	検証データ	成果
17]	3つのLES(LDM、DMT、SMG)とRANS(標準的なk-e)による解析 立方体アレイ	風洞実験	立方体前面の馬蹄形渦、後流のアーチ型の渦ほどのモデルでも表現された微細な乱流構造はLESが良く再現できる
18]	大規模LES(VLES)(多目的FEMコード:FEFLO-URBAN)による)4つの異なるメッシュ解像度(要素数:500K、4M、8.1M、および32M)	MUST 野外実験	実験との比較において、約76%の確率で1桁以内の一致が得られた
19]	LESモデル3種 SM(Smagorinsky model)、SILM(scale-invariant Lagrangian model)、SDLM(scale-dependent Lagrangian model) 単一建物、建物アレイ、都市市街地	風洞実験 (ボルチモアダウンタウン形状)	SDLMは都市市街地上の大気の流れに対し、より高い信頼度と適用性があることが分かった。
20]	LES 都市市街地を想定したランダム配列	DNS 結果と比較	流れは、均一な高さのブロックの場合よりも大幅に複雑であることが分かった。
21]	LESとRANSとの比較 複雑地形(都市市街地) k-eモデルのSct(シュミット数)を変えて検討	風洞実験	実際の都市環境のケースでは、LESの実験との差異は2倍未満、標準k-eモデルでは4倍未満となった。
22]	LESとRANSとの比較 SM(Smagorinsky model)、SILM(scale-invariant Lagrangian model)、SDLM(scale-dependent Lagrangian model) 単一建物、建物アレイ、都市市街地	MUST 野外実験	平均流はLES、RANSともに再現する一方、LESは垂直速度成分の不規則性を良く捉えられることが分かった。
23]	LESとRANSとの比較 RANS(SKE, RLZ, RNG, RSM) 単一建物、2排出源	風洞実験	LESが乱流質量移動について、流れ方向のみに現れる逆勾配メカニズムを再現できることが示された。
24]	RANS(RNG)とLES 複数建物(キャニオン)	風洞実験	LESがキャニオンにおける非定常な濃度変動をよく再現した。
25]	LES 中立成層大気境界層における超大規模運動(VLSM)を解析 ドメインサイズの検討	風洞実験、DNS	大きな縞状構造が再現された。

26]	RANS と LES 熱影響下のキャニオンで、RANS と LES の精度を検討	風洞実験 野外実験	熱による浮力を伴うキャニオン流れではLESが必要不可欠であることが分かった。
27]	LES (Meso-NH, YALES2, AVBP) 様々な LES 様々な数値スキーム 構造格子、非構造格子 建物アレイ	MUST 野外実験	LESは、高濃度のソース近傍でも良好なFAC2値を示した
28]	URANS とハイブリッド RANS- LES(HRL) 楕円緩和 $k\text{-}\epsilon\text{-}\zeta\text{-}f$ 複雑地形 (都市市街地)	風洞実験	HRLは準周期的な渦構造を再現した他、全体の乱流運動エネルギーと乱流応力、および特徴的な乱流スケールの予測が向上した。
29]	LES 定常境界条件 マイクロスケール過程での内部変動を検討 複雑地形 (都市市街地)	MUST 野外実験	LES評価の時間平均量に関する示唆が得られた。

(3) その他のトピック（ソースターム推定、データ同化法の利用、市販ソフトの活用評価）

当項では、大気拡散における CFD 活用において、上記トピックに関し、重要な要件となるポイントごとに主要文献を選択し、その内容を概説する。

・ソースターム推定

P.Kumar(2016) 30]らは、緊急時、規制当局が未知の偶発的、意図的な放出を検出する際、都市部や非都市部の大気汚染源を正確かつ迅速に再構築することが不可欠であることを指摘した。当該研究では、最近提案された繰り込み逆変換手法と、非都市部や幾何学的に複雑な都市領域におけるソース探索のため、建物を解像できる数値流体力学(CFD)アプローチを組み合わせた方法論を説明する。ソースパラメータ(ソースの位置、高さ、放出速度)は、複数のセンサーから取得した濃度のポイント測定値の有限セットと、CFD モデル fluidyn-PANACHE から計算された随伴関数から再構築された。次に、この方法を評価するため、2つの異なる実験データセット(i)平坦な地形での Fusion Field Trial-2007(FFT-07)、(ii)都市規模での実際の状況での Mock Urban Setting Test(MUST)フィールド実験が実施され、様々な大気安定条件で、予測された測定値と実際の測定値の両方が比較され、予測されたソース位置は、平坦な地形での FFT-07 と MUST フィールド実験とで、実際の放出場所の近傍を予測できることが分かった。当該研究では、都市部と非都市部の未知のソースパラメータ推定に対し、CFD システムと組み合わせた繰り込み逆変換手法の有効性とソース探索の実現可能性を示している。

P.E.Bieringer(2017) 31]らは、STE(Source Term Estimation : 汚染物質の発生源推定) に対し、次のような議論を行った。汚染物質の未知の放出に起因する風下の危険区域をモデル化するには、濃度または線量等の観測から局所的な発生源を推定し、その後の汚染物質の輸送と拡散をモデル化する必要がある。この問題に対処する方法は、主としてフォワードモデリング、逆モデリング、非線形最適化の3つに分類される。なお、数学的随伴モデルも STE で利用可能で、計算効率の高い方法であるという利点があるが、実装するためには手間がかかる。これらのトラジェクトリ、逆モデル手法は通常、計算効率が高いが、利用可能な気象データの精度に非常に敏感である。非線形最適化は、輸送と分散の順モデルのみを使用してソース項を推定し、試行ソリューションの初期母集団を指定し、収束するまで繰り返す。このようなベイジアン推論手法には、解の不確実性を推定する簡単な手段を提供するという固有の利点があることを報告している。

・データ同化法の利用

C.L.Defforge(2019) 32]らは、局所スケールでの大気汚染モデリングに対し、速度場等の正確な気象条件の入力が必要となるため、気象場の境界条件として、より大規模なモデルまたは観測によって提供されるケースについて議論した。例えば、局所スケールのドメイン内で、風速、乱流、または汚染物質の濃度の観測結果が利用可能な場合、データ同化を介して補足情報が提供され、境界条件を変更することでシミュレーションの精度が向上する。その際、既存のデータ同化手法の中でも、反復アンサンブルカルマンフィルター(IEnKS) を都市規模のシミュレーションに適用し、手法の精度改善能力を評価した。MUST(模擬都市設定テストフィールドキャンペーン)によって提供された観測結果を使用し、中立条件と安定条件で、水平速度成分と乱流からなる境界条件を検討した結果、IEnKS が、速度と汚染物質濃度の観測値を同化する能力を実証している。汚染物質濃度推定の精度は、当該データ同化により 40~60%向上し、風速と濃度の観測値を同化することで、モデルによる乱流予測をさらに改善できることも示している。

・市販ソフトの利用、その他

P.Kumar(2015) 33]は、MUST 野外実験における都市のような環境において、短距離プルーム拡散の3DCFD シミュレーションを実行した。CFD モデル Fluidyn-PANACHE (市販ソフト) が使用され、MUST 実験で、中立から安定、強安定の条件まで変化する様々な大気安定度において、トレーサー拡散が評価された。シミュレーションは、計算領域の入口で、風のプロファイルと乱流プロファイルの流入境界条件を果たし、3つの組み合わせからなる3ケースが実行された。これらの流入境界条件は、大気境界層全体に適用可能な風速の2つの垂直プロファイルで構成される。それらの垂直乱流プロファイルは、標準的な1次元 $k\text{-}\epsilon$ 方程式の数値近似解によってモデル化される。以上、上記3ケースに対し、全体で20回の試行を行い、大気の安定性に関するサンプリングラインの最大濃度が詳細に比較された。包括的な統計分析では、3つのケースの全てで MUST 野外実験に対して、大気質アプリケーションの統計的測定の許容範囲内にあることを示したと報告している。許容可能な統計的性能測定値は、平らでない地形の場合に、単純なガウスモデルよりも CFD モデルの全体的な有用性を示した他、大気境界層全体に適用可能な現実的な風のプロファイルを使用した流入境界条件のパラメータ化により、CFD モデルが全体的に良好なパフォーマンスを示すことを報告している。当該評価結果は、CFD モデル Fluidyn-PANACHE が緊急時対応の計画と管理に使用できることをしめした結論づけられている。

L.Chen(2016) 34]らは、建物近傍や形状が複雑な化学サイトにおける有毒ガスや有害ガスの近距離拡散の3D-CFD シミュレーションを行った。CFD モデル fluidyn-PANACHE (市販) を用い、平坦な地形にある単一の建物から、特定の複雑な地形の工業用地に関連するケースにまで及ぶ解析を実施している。シミュレーションは、大気安定度 (中立) にて実施され、シミュレートされた濃度は、256の観測値に対して FAC2 内のポイントが66%となり、散布図も風洞観測とよく一致したが、地表面に近い高さでは過大予測の傾向があったことを報告している。近距離場と遠距離場でのクロスプロファイルと垂直プロファイルの測定濃度とシミュレート濃度の比較からは、ソースに近いポイントでは過大予測の傾向を示したが、ソースから遠く離れた場所では、わずかに過小予測になる傾向を示したと報告している。

L.Bai(2018) 35]らは、大気汚染予測手法をレビューし、大気汚染排出量インベントリ、健康影響、大気汚染評価から大気汚染制御効率と大気汚染早期警報システムの観点から、大気汚染の現在の研究状況をレビューした。大気汚染予測手法にはポテンシャル予測モデル、三次元予測手法、ハイブリッドシステムの3つのカテゴリに大別でき、これらの方法とモデルの結論を報告している。特筆すべき点は、気象変数と地理的要因を考慮すると、予測パフォーマンスはより良くなる。結論として、大気環境は複雑なシステムであり、大気環境の質に影響を与える要因は多数あり、それらの間の関係は複雑で、地域や汚染物質に基づいて大気汚染を予測するには、適切な予測方法を選択する必要があるが、精確な予測を行うための唯一の最良アプローチは今の所、定まっていないとも報告している。なお、最近になり発達してきた NN (Neural Network) アプローチ等の AI 手法についても評価している。

2.4.2 広域の拡散モデル、気象モデル

本項では、参考情報 (広域との接続を考える際の) として、広域での大気拡散モデルや気象モデルについて、その発達状況を概観する。メソスケールの気象モデルは、1990年代には、NCAR の MM5 モデル、RAMS、WRF 等が開発・発表され、日本においても、様々な研究で用いられるようになってきた。ここでは、マイクロスケール分野の工学 (CFD) モデルとの接続に注目して、気象モデルの概要レビューを試み

る。

M. Xue(2000) 36]らは、高度地域予測システム (ARPS: Advanced Regional Prediction System)として、オクラホマ大学の暴風雨分析予測センターで近年開発されたメソスケールモデルについて報告している。ARPS は、研究の効果的なツールとして、対流性嵐や他のスケールの気象予測に適したシステムとして機能するよう設計されている。ARPS には、データ取り込み、品質管理と客観的分析のためのパッケージ、データ同化システム、予測コンポーネント、自己完結型の後処理、診断および検証のパッケージが含まれている。ARPS の予測では、一般化された地形追従座標で定式化された 3 次元の非静水圧圧縮性モデルを用い、従来の共有メモリのスカラープロセッサやベクトルプロセッサで良好なパフォーマンスを示したと報告している。なお、スカラー輸送の単調移流スキームや 4 次精度の移流項などの高度な数値手法を採用した他、最新のソフトウェアエンジニアリング手法を採用しており、システムがモジュール式で拡張可能で使いやすく、過去数年間、米国本土とアジアの一部で、総観から嵐の規模までのリアルタイム予測テストが行われてきた。

A.Martilli(2002) 37]らは、メソスケールモデルにおける都市地表面パラメータ化を変更し、都市の建物が大気の流れに及ぼす影響をメソスケール大気モデルで表現するスキームを示した。当該スキームでは、建物は、明示的に表現しないが、グリッドごとの変数として建物の影響がパラメータ化される。都市は、建物の水平サイズ、街路の峡谷の幅、高さの関数としての建物密度によって特徴付けられ、風速、温度、乱流運動エネルギーに対する水平 (屋根と溪谷の床) および垂直 (壁) 表面の影響が計算される。また、都市表面の温度を計算するため、必要な短波放射と長波放射の計算において、都市峡谷によって引き起こされる影と日射のトラップ効果が考慮される。TKE 方程式の乱流の長さスケールの計算も、建物の存在を考慮するように修正され、平坦地形の都市の 2 次元ケースでテストされた。上記パラメータ化は、粗度長の変更のみに基づく従来のアプローチと比べて、都市部で観察される重要な特徴を良好に再現できることが示された。これによりモニン・オブコフの相似性理論が維持され、新しい地表面交換パラメータ化によっては、都市部における大気汚染物質の拡散特性に強い影響を与えると報告している。

W. R. Cotton(2003) 38]らは、地域大気モデリングシステム(RAMS)の概要を紹介し、1992 年以来、RAMS と計算アルゴリズムの開発に注目した成果を報告している。また、総観スケールの気象システムや気候研究、LES モデルとして構成された RAMS を使用した局所域の解析、さらには都市の建物の周りの流れ等、RAMS の最近の応用例についても報告している。当該システムには、雲や雲システム、嵐に関する基礎研究、熱帯深層対流システムと海洋循環の間の相互作用の調査、熱帯低気圧のシミュレーション、異常な降水量の推定、生物圏や雪で覆われた地表と大気との相互作用に関する地域気候研究、リアルタイムの中規模数値天気予報のプロトタイプ開発、大気汚染アプリケーション、建物群周辺の流れ解析などが含まれている。

W.J.Coirier(2006) 39]らは、気象モデルとマイクロモデルの 1 方向のネスティングを検討し、以下のような研究成果を報告した。従来から指摘されていたが、マイクロ (都市) スケールとメソ (気象) スケールの間にはスケールギャップが存在し、メソスケールのモデルの不確実性と都市スケールの輸送および拡散モデリングの精度との間には、密接な関係があることが明らかにされてきた。当該論文では、このギャップを埋め、不確実性に対処するため、ミクروسケールの数値流体力学 (CFD) モデルとメソスケールの数値天気予測 (NWP) モデルの間の一方向結合の手法を評価した。その結果、より緊密な時間ベースの結合とは対照的に、緩い準静的結合には多くの利点があることが分かった。これらの結合と、ミクروسケール領域の移流・拡散精度に対するダウンスケールデータ転送 (メソスケールから都市スケールへ) の影響を評価した所、どちら

のスケールにも、他方が必要とする情報が不足していることが分かった。都市スケールの動きは、より大きくて遅い大気強制力によって部分的に影響を受けるが、都市スケールでの計算で、この情報は、ほとんど活かされていない。即ち、都市スケールの計算では、単純化された境界条件が適用されることが多く、メソスケールでの強制力が適用されることは殆どない。なお、都市規模では、気象観測所での測定データの使用は、不完全で一貫性がないことが非常に多く、通常は限られた場所でしか利用できずに、関心のある地域の近くでさえないこともよくある。その一方、都市スケールのドメインサイズが数キロメートルの範囲に拡大するにつれ、ドメイン全体で変化しない境界条件を適用することは、より非現実的となる。建物によって引き起こされる抗力の増加と連動した挙動など、テラススケールに対する都市スケールの影響も非常に重要となる。その結果、エクマン回転*がさらに大きくなることが分かる。これにより、都市上空の流れの方向が下層の風とは大きく異なる可能性があり、都市内での汚染物質の輸送と拡散に直接影響を及ぼすことが考えられる。その一方、都市スケールでの多くの重要なプロセスは、メソスケールに影響を与える可能性がある。これは、ヒートアイランドを引き起こす都市スケールの表面の不均一性、熱によって引き起こされるメソスケールスケールの循環、強化される収束ゾーン等が含まれる。場所による加熱・冷却の差も、大気の構造や、より大きなスケールの流れに影響を与える可能性がある。これらの小規模な現象を精確だが省力化したモデルで記述することは難しい。当該論文では、中規模の NWP モデルから都市スケールモデルへのデータのダウンスケール転送を実施し、この転送が都市と都市規模の移流と拡散のモデリングの精度に及ぼす影響を定量的に評価した。その結果、メソスケールモデルから都市スケールモデルに転送する 2 つの異なるモード、非定常モードと準定常モードが取り上げられ、この 2 つのモードに対するアプローチは、ソルトレイクシティでの Urban2000 フィールドテストのトレーサーガス SF6 の輸送と拡散の精度を表す統計的尺度を計算することによって評価されている (Allwine 2002)。(*大気境界層より上空の自由大気層では、気圧の差 (気圧傾度) と地球の自転によるコリオリ力との釣り合いで風 (地衡風) が吹く。その下の大気境界層では、気圧傾度、コリオリ力と乱流抵抗とのバランスによる風となり、地表面に近づくにつれて摩擦抵抗により風向が変わり風速が弱まる。高さの異なる風速ベクトルの先端を結ぶと螺旋状を示す (エクマンスパイラル))。

Moeng, C.-H.(2007) 40]らは、WRF モデルと LES モデルの 2 方向ネスティングについて、下記のように報告した。PBL 乱流の LES による双方向ネスティングのパフォーマンスを WRF モデルフレームワークを使用して調査した。LES 内で、1 対の LES 実験が実行され、小さな水平ドメインをカバーするより細かいグリッドの LES は、より大きな水平ドメインをカバーするより粗いグリッドの LES の内側の入れ子とされ、両方の LES は同じ環境条件下で駆動され、相互に作用し、統計的に同じ動作をするように設定された。自由対流 PBL の最初の実験では、2 つの LES ドメイン間の平均温度の偏りが明らかになり、これにより、ネストドメインではゼロ以外の平均垂直速度が生成され、一方外側のドメインで平均された平均垂直速度は、ゼロのままとなることが見られた。この問題は、ネストドメインの水平方向の範囲が小さすぎて、エネルギーを含む渦の適切なサンプルを捕捉できない場合に発生する。この問題は、x と y の両方で PBL 深さの少なくとも 5 倍のネストドメインを使用することで軽減できること分かる。中立 PBL の次の実験では、2 つの LES ドメイン間の表面応力の予測における偏りが明らかとなった。これは、Smagorinsky 型のサブグリッドスケール (SGS) モデルのグリッド依存性に起因することがわかる。当該論文では、この問題を解決するために、新しい 2 つの部分からなる SGS モデルが開発された。

F. Chen(2011) 41]らは、WRF と都市モデルを結合した WRF/URBAN modeling system を開発し、次のような知見を報告した。従来のメソスケールモデリングとミクロスケールモデリングの間のギャップを埋め

るため、国立大気研究センター(NCAR)は、他の機関や研究グループと協力して、都市の環境問題に対処するため、コミュニティツールとして気象調査と予測(WRF)モデルを組み合わせた統合都市モデリングシステムを開発した。このWRF/都市モデリングシステムの中核は次の要素で構成される。

- ・ 単純なバルクパラメータ化から、直接相互作用する屋内屋外交換サブモデルを備えた洗練された多層都市キャノピーモデルまで、都市表面プロセスをパラメータ化するための異なる自由度を持つ3つの方法からなる。
- ・ 輸送と拡散(T&D)アプリケーションのためのファインスケール数値流体力学(CFD): RANS と LES モデルと結合する。
- ・ National Urban Database and Access Portal Tool (NUDAPT)の手順に従う。
- ・ 都市化された高解像度土地データ同化システム(u-HRLDAS)を使用して、高解像度の都市の土地利用、建物の形態、および人為的加熱データを組み込む。

以上、結合されたWRF/都市モデルを初期化し、WRF/都市モデルを実行するために必要となる潜在的に膨大な数のパラメータ指定という困難な課題に対処し、これらの都市パラメータに対するモデルの感度を調査した。また、都市ヒートアイランド、高層の複雑な境界層構造、いくつかの主要大都市地域における都市プルームのT&Dを捕捉するWRF/都市の能力を評価した。当該モデリングシステムの応用例は、将来の都市化が地域の気象条件や将来の気候変動シナリオの下で、大気質に及ぼす影響を調査するための地域気候モデリングツールとして、その有望な用途を示したと言える。

P. A. Jiménez (2012) 42]らは、WRFの表面層定式化の改訂スキームを示した。新しいスキームは、大気の安定性の全範囲に対して有効な自己一貫性のある定式化を与え、以前の方式よりも、午後の変化がより急激となった。古いスキームは、安定した条件に達する前に時間がかかった。改訂されたスキームは、より鋭い遷移を示した。修正された定式化により、日周振幅に関する典型的な地表近くの気象変数の推定精度が全体的に改善された。これは特に2 mの温度の場合に当てはまる。しかし、表面の風などの変数の決定には依然として偏りがあり、さらなる改善が単なる表面層の定式化を超えて必要であることを示唆している。複雑な地形における地表風の偏りは、進行中の研究の対象である。

2.4.3 放射性物質の拡散

本項では、放射性物質の拡散についての文献調査報告を行う。各主要文献発表の時系列に従い、文献の概要について報告する。

先ず、K.M. Thiessen(1999) 43]らによる文献を紹介する。当該文献は、環境中の放射性核種の分布と輸送の数学的モデルについて、当時の技術水準、能力、残っている主要な課題などについて述べており、その当時までの発展段階を知るための文献として有用である。

A.Baklanov(2001) 44]らは、デンマーク大気圏緊急対応モデル(DERMA: Danish Emergency Response Model of the Atmosphere)に対し、異なるサイズの放射性粒子の乾式・湿式沈降プロセスのパラメータの改良を行った。これは、原子力発電所における事故時の放出の場合、半径0.5 μm より小さい粒子は、長距離輸送と線量形成に重要な役割を果たす一方、ウォッシュアウト係数は粒子サイズに強く依存するが、ほとんどの長距離大気汚染輸送モデルでは、ウォッシュアウト係数は粒子半径に依存していなかったからである。

従って、当該研究では、異なるサイズの粒子に対する湿式沈降パラメータを改訂している。実際、重い粒子（粒径 $>1\mu\text{m}$ ）の場合、重力沈降は顕著で、地表面への沈降プロセスへの影響が大きい。従って、重力沈降の影響は、重力沈降速度 V_g による乾式沈降パラメータ化に含まれ、ストークスの法則(粒子直径 $3.5\mu\text{m}$ 未満の場合)と小さな粒子(粒径 $<0.5\mu\text{m}$)のカニングム補正、および終端の方程式の反復手順*の組み合わせによって重力沈降速度をモデル化している。改良した DERMA モデルを検証するために、スペインのアルヘシラスでのセシウム 137 の偶発放出に関するシミュレーションと、ヨーロッパの 9 つの監視所からの測定データとの比較が行われた。(*大気と沈降粒子の速度と密度、抵抗係数、浮力などによる落下速度の常微分方程式を反復解法で解く。(On the Settling Velocity in a Nonstationary Atmosphere, Näslund & Thaning, 1991))

J.Brandt(2002) 45] らは、近距離ラグランジアンモデルと長距離オイラーモデルを組み合わせた放射性物質拡散モデル DREAM(Danish Rimpuff and Eulerian Accidental release Model)について報告した。当該モデルの性能は、放出からの不活性・非沈着性トレーサの輸送と分散を含む欧州トレーサ実験 (ETEX) で検証されている。当該文献では、チェルノブイリ事故に関連した Cs-137、Cs-134、および I-131 の観測結果について、核種の総沈着に関するモデルのパフォーマンスを検証し、ETEX-1 の結果と同程度となる精度を得たと報告している。また、乾式および湿式沈着について、2 つの湿式沈着のパラメータ化と 3 つの乾式沈着のパラメータ化の組み合わせについて検討し、比較的単純な乾式沈降スキームと湿式沈降の組み合わせが重要であることを指摘している。なお、チェルノブイリからの放射能の長距離輸送では、主にサブミクロン範囲の粒子に関連し、雲の下でのスクャベンジングプロセスよりも雲内でのスクャベンジングプロセスがはるかに重要であったと報告している。放射性サブミクロン粒子にとって、雲内のスクャベンジングプロセスがより重要であり、おそらく雲内の凝縮プロセスによると考えられると報告している。

H.TERADA(2008) 46]らは、原子力事故時の国境を越えた放射性核種の大気中長距離拡散を予測する緊急対応システム WSPEEDI を開発し、粒子ランダムウォークモデル GEARN を 2 つの入れ子ドメインを通して、物理的に一貫して同時計算できるように改良している。一つの例として、チェルノブイリ事故のデータに対し、MM5 の降水量の予測精度を向上させ、GEARN により総観領域から局所領域への放射性プルームの拡散プロセスを考慮したネスティング計算を行い、計算結果の精度向上を確認したと報告している。

M.CHINO(2011) 47]らは、福島第一原子力発電所事故により大気中に放出されるヨウ素とセシウムに対し、単位放出率 (1 Bq/h) の仮定の下、環境モニタリングデータと大気拡散シミュレーションを結合させ、ソースタームの推定を試みた。当該文献では、2011 年 3 月 12 日から 4 月 5 日までに大気中に放出された I-131 と Cs-137 の放出速度と総量を推定した。推定放出率の時間変動は、損傷した原子炉からのすべての放出と、プール内の使用済み燃料からの放出を反映する。最初の期間の I-131 の放出率 $10^{13} \sim 10^{14}$ Bq/h は、おそらく 3 月 14 日以前の 1 号機と 3 号機のウェットウェルベントに対応し、水素爆発による瞬間的な追加放出も発生したと考えられる。I-131 の 10^{16} Bq/h への大幅な増加は、3 月 15 日の 2 号機の抑制室の損傷によって引き起こされたと考えられ、3 月 16 日から 24 日まで、I-131 の放出率は 10^{14} Bq/h 程度となり、4 月初旬には、 $10^{11} \sim 10^{12}$ Bq/h 程度まで減少したことを報告している。この傾向は、3 月 24 日以降、損傷した原子炉が安定し、放射性物質の大気への放出が減少したことを意味している。以上、当該論文は、福島原発事故の凡その大気放出率の経時変化を明らかにした。

N.Kinoshita(2011) 48]らは、福島第一原子力発電所事故により汚染された東日本の表層土壌における放射性ヨウ素、テルル、セシウムの地理的分布について測定された結果を示した。気象条件を考慮すると、福

島県では 3 月 15 日に輸送された放射性物質が汚染の主な原因となったと結論付けられる一方、茨城県、栃木県、埼玉県、千葉県、東京では 3 月 21 日に輸送された放射性物質が主な汚染源であったと指摘している。

O. Masson(2011) 49]らは、福島第一原子力発電所事故後に、ヨーロッパ全土で行われた測定によって、明らかとなった点を報告した。放出された様々な放射性核種のうち、I-131、Cs-137 及び Cs-134 は太平洋を越えて輸送され、汚染された気団の経路に沿った拡散と流出に従い、北アメリカ大陸に向かいヨーロッパに到達した。ヨーロッパでは、放出の最初の兆候は 7 日後に検出され、最初のピークは 3 月 28 日から 3 月 30 日の間に観察された。以上、20 日間にわたる時間変動と、ヨーロッパの 150 以上のサンプリング地点における空間変動により、汚染された大気団の特徴を明らかにしている。この結果から、空間と時間的変動において、総 I-131 に対するガス状 I-131 の比率に関する新しいデータが得られている。また、これらのデータにより、Cs-137 と Cs-134 の比率がチェルノブイリ事故後に観察されたものとは異なることが判明した。当該期間中にヨーロッパに移行した I-131 の放出量は、おおよそ、放出された総量の 1% 未満であることを報告している。以上、測定結果によれば、空気中の汚染レベルはヨーロッパの公衆衛生にとって懸念されるものではないと報告している。

R.B.Oza(2011) 50]らは、MM5 等の数値気象予測モデルを、fluidyn-PANEPR (商用ソフト) 等の CFD ベースのモデルと結合することで、原子力発電所サイトの緊急事態への備えを強化できる有用な結果が得られることを示した。結合システムは、予測モードで動作できるため、気象を含めた放射性物質拡散の予測によって、偶発的放出の場合の対策を計画する際に役立つことを述べている。当該システムのもう 1 つの利点は、汚染物質の大気拡散の推定において、非常に高い解像度で建物構造に関する地形標高等の情報を組み込むことであり、グリッド解像度が比較的低い気象モデルでは不可能である点が指摘されている。

V.Winiarek(2012) 51]らは、福島第一原発事故の放射性核種の放出量を再構築するための効率的な逆モデリング手法を提案した。Cs-137 は 267 件、I-131 は 428 件の公開された大気濃度測定値を用いて、2 つのパラメータ (観測誤差の標準偏差、バックグラウンド誤差の標準偏差) に焦点を当て、それらのパラメータを推定するための 3 つの方法を試した。3 月 11 日から 3 月 26 日の間に大気中に放出された総放射エネルギーの下限は、方法の違いにより、Cs-137 について、 1.0×10^{16} Bq から 1.9×10^{16} Bq の間、I-131 については 1.9×10^{17} Bq から 7.0×10^{17} の間であると推定された。これは、日本の原子力安全委員会による最初の推定値 (それぞれ 1.2×10^{16} Bq および 1.5×10^{17} Bq) に匹敵するが、おそらく実際の放出量の過小評価を表している。このような長距離シミュレーションでは、数値モデルによってもたらされる不確実性*が非常に重要になる可能性がある。(*少なくとも約 10 種類の異なる種に対する各種係数、湿式沈降、乾式沈降などの堆積プロセス、降水量、降雨量などの不確実性、などモデル作成上様々な不確実性がある)

O.Saunier(2012) 52]らは、原子力事故のソース項を再構成する効果的な方法を提案した。まず、逆モデリング手法を使用して、リリースが発生した可能性のある期間を特定し、次に潜在的な放出期間中のソース項を推定する。具体的には、IRSN C3X 運用プラットフォームの ldX 大気拡散モデル、ConsX 線量計算モデルを用い、日本全土をカバーする 57 の線量率監視ステーションのデータを使用して、その推定を試みた。その結果、主に線量に寄与する 8 つの放射性核種 Cs-134、Cs-136、Cs-137、Ba-137m、I-131、I-132、Te-132、Xe-133 に対し、3 月 11 日 00:00 UTC から 3 月 26 日 21:00 UTC までの 1 時間ごとの推定放出率を報告している。放出量は、I-131 で 105.9 PBq、I-132 で 35.8 PBq、Cs-137 で 15.5 PBq、希ガスで 12,134 PBq に達したと推定している。これらの値は、環境観測の結果と比較することで検証された。それらを合計すると、全体として、観測値の 80% について、シミュレーションと観測値の線量率 (simulated and

observed dose rate) の2倍以内で一致することが分かった。また、時間の経過に伴う線量率の変化は、おおよそ一致することが分かった。放出量の同位体組成に関しては、観測結果との比較により、Cs と I-131 放出については、現実的であるが、I-132 と Te-132 については過小評価されており、希ガスについては、おそらく誤差が大きいことが示唆されると報告している。

H.Nakayama らは、LES による放射性物質拡散シミュレーションシステム(LOHDIM-LES)を開発し、2009年のPart.1に当たる論文より、Part.6までのシリーズ発表を行っている。なお、2021年のPart.6とする最後の論文では、線量評価モデルを含めて、システム開発の完了報告となっている。Part.6については別途報告する。

・ H. Nakayama ら Part.1(2009) 53]

本論文では、局所スケールの LES 大気拡散モデルを開発したと報告した。平坦地形で、流入側境界にドライバー領域を設定し、乱流境界層流の生成を試み、平均風速、乱流強度、レイノルズ応力などの乱流特性が風洞実験と一致することを確認している。さらに、模擬大気境界層におけるプルームの拡散を LES で行い、平均濃度、濃度変動の分散、濃度フラックスなどの特性が実験と一致することも確認している。以上、LES モデルを用いて、模擬大気乱流境界層流における平坦地のプルーム拡散の非定常挙動を予測することに成功したと報告している。

・ H.Nakayama ら Part.2(2011) 54]

本論文では、Part1 に続き、局所スケールの高解像度大気拡散モデルの開発について報告している。特に、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、空間的に発達する乱流境界層流を生成する新しいスキームを提案した。ドライバー領域には、障害物を適度に設定することで、様々なタイプの風洞流をシミュレートできるとしている。立方体建物の建物高さ付近の背後の乱流強度は、実験データと比較して若干過大評価されたが、乱流の主な特徴である建物背後の鋭いピークや下流距離に応じた均一な乱流場の形成は、風洞実験結果に対応している。点源に近い鋭いピークや下流の距離に応じた濃度プロファイルの形成などの拡散特性及び LES モデルの濃度変動の確率分布パターンの濃度変動強度値への依存性も風洞実験と一致していると報告している。

・ H.Nakayama ら Part.3(2013) 55]

本論文では、局所スケールの高解像度大気拡散モデル (LOHDIM-LES) を様々な障害物配列における乱流とプルーム拡散のシミュレーションへと拡張し、LES モデルの基本性能を風洞実験データと比較した。その結果は、以下の通りである。

- ① LES 流入流の乱流特性の一部は、実験で得られたものとは定量的に異なるが、ESDU*推奨データとの比較に基づくと、中立大気境界層に相当することが分かる。LES モデルは、粗い表面上の中立大気境界層を合理的に生成できることが分かった。
- ② 平均風速とレイノルズ応力の鉛直プロファイルは、風洞実験データおよび理論曲線とよく一致した。
- ③ LES モデルからの平均濃度と実効値濃度の分布パターンは、実験の分布パターンとほぼ類似した。障害物配列における乱流とプルームの拡散の LES モデルを用い、典型的な都市表面の形状にて、

満足のいく結果が得られた。

(* ESDU (Engineering Sciences Data Unit) は、専門家によって収集、検証、再評価された航空宇宙工学や機械工学などで使用される基礎データベースで、流体力学、航空力学、複合材などの広い分野にわたる。ここでは ESDU 85020 を用いた。このデータは、強風を含む中性大気条件における乱流特性を提供するシリーズの 1 つである。Engineering Science Data Unit., Characteristics of atmospheric turbulence near the ground – Part 2: single point data for strong winds (neutral atmosphere). ESDU Item85020 1985.)

・H.Nakayama ら Part.4(2014) 56]

本論文にて、局所スケールの高解像度大気拡散モデル (LOHDIM-LES) を実際の都市部の乱流とプリューム拡散に適用し、風洞実験データと比較して、粗いグリッド解像度が LES モデルの基本性能に及ぼす影響を調査した。その結果は以下の通り。

- ① 前報(Part3)と同じ方法でドライバー領域に流入流を生成した。モデル化された境界層の上部については、ESDU 推奨データと実験データとの比較に基づいて中立大気境界層に相当する。
- ② 建物の角付近の平均風速と建物の高さより下の位置での乱気流の強さは、個々の都市の建物やストリートキャニオンのグリッド解像度が不十分であるため過小評価された。ただし、建物上の格子点では、基本的な乱流パターンを再現するのに十分であるため、平均風速の垂直プロファイルと乱流強度プロファイルの形状は実験と類似した。
- ③ 空間解像度の点から高濃度領域の正確な位置の推定には限界があるが、ストリートキャニオン内の平均濃度と実効値濃度の一般的な分布パターンは風洞実験データに類似していた。これは、複雑な都市表面形状で、グリッド解像度が粗い場合でも、風速とプリューム濃度プロファイルが十分に模擬できることを示している。これらの結果から、計算コストと精度の間のトレードオフを考慮すれば、LES モデルは複雑な都市部における乱流とプリュームの分散について妥当な結果を提供できると結論付けられる。

なお、実際の気象は、時間的および空間的スケールが異なるさまざまな種類の気象の動きで構成されるため、その流れの特性は、地形や表面の粗さの要素だけでなく、気象の擾乱によっても決定される。なお、大気の運動パターンは、1m から 10 km 程度のマイクロスケールと 10-100 km 程度のメソスケールの大きく 2つのグループに分類できる。CFD モデルは、乱流、建物後流、熱プリューム、境界層の流れ等の、風のせん断と熱安定性によって特徴付けられるマイクロスケールの気象の動きを数値計算するように設計されており、降水量、陸海風、前線、台風等の気象条件や大規模な気象擾乱によって決定されるメソスケールの気象現象を考慮するには、メソスケールの気象シミュレーションモデルと CFD 間の連成シミュレーションによるアプローチが必要となると報告している。(Part5 へ続く)

・H.Nakayama ら Part.5(2016) 57] :

本論文では、局所スケールの高解像度大気拡散モデル (LOHDIM-LES) を気象モデル(MM) (ここでは

WRF : Weather Research and Forecasting)と結合させ、その適用可能性を実際の気象条件下の都市部の乱流とプルームの拡散に適用した。その結果は以下の通りである。

- ① MMの結果を時間依存の乱流流入として、LESベースのCFDモデルに取り込んだ。しかし、LES計算が中立条件で実行されているため、日中の対流境界層がよく発達している場合には、WRFデータとLESデータの間には差異があり、また、LESのパワースペクトルは高周波側で急激に減少し、特に、100m~300mの高さで、カルマンタイプに沿って分布しない等、気象モデルとの結合には、まだ改善すべき点があることが分かる。しかし、高さ10mのLESの分布は、一般にカルマン型に沿って分布しており、地上から放出されるプルームの拡散挙動が物理的にシミュレートされたと考えられる。
- ② 風速と風向のわずかな計算誤差により、いくつかの位置で、野外実験とLESモデルの間でプルームの濃度値に大きな差が生じた。地上レベルでの風速を正確に再現するには、都市乱流の影響をMMモデルに適切に組み込む必要があるが、測定場所による濃度の変動パターンは実験データと同様であった。
- ③ プルームの輸送および拡散プロセスを正確に再現するには、未だ重要な課題が残っているが、LESモデルは、一般にプルームの基本的な空間分布パターンをシミュレートし、実際の気象条件下での局所スケールでの汚染地域の空間的拡がりやプルームの拡散挙動に関する詳細な情報を提供できると結論づけている。

Y.Sato(2018) 58]らは、福島第一原子力発電所(FDNPP)事故後に放出されたCs-137の大気拡散モデルの相互比較プロジェクト(MIP: Model Intercomparison Project)の第2回目の結果について、次のように報告した。大気中のCs-137の挙動をより詳細に理解するため、全体として、ラグランジュタイプ(拡散モデル)を含む11グループより、12のモデルが相互比較に参加した。気象データと排出量データの違いに起因するモデル間の差異を排除するため、細かい時空間分解能と排出量インベントリを備えた同じ気象データ(初期、境界、ナジングデータ、オフラインデータ)がすべてのモデルに適用された。さらに、気象モデルと同じ解像度の水平グリッド(3km)を全モデルに採用した。この設定により、各モデルに含まれる物理プロセスに起因する結果の違いに焦点を当てることができる。マルチモデルアンサンブルは、測定によって観測された大気中のCs-137事象の40%を捕捉し、Cs-137の総沈着に対する空間性能指数(figure of merit in space)は、80を超えた。大気中のCs-137のスコアが沈着のスコアよりも低いのは、観測された大気中のCs-137と計算された大気のタイミングの違いに起因する。結果の分析においては、大気中のCs-137を再現するため、気象データ(風向と風速)が最も重要であることが示された。さらに、モデル間のCs-137濃度の違いは、気象場が適切にシミュレートされた場合の堆積および拡散プロセスに起因することが明らかとなった。堆積フラックスが小さいモデルは、大気中のCs-137がより高いスコアを生成し、強い拡散を備えたモデルは、濃度を過大評価する傾向があったが、観測された高Cs-137濃度を捕捉することに成功している。拡散の適切な強さを決定するには、観測を基に、プルームの幅と位置を正確に明らかにする必要があり、さらに大気中のCs-137の挙動をより深く理解するには、水平方向の拡散に加えて、垂直方向の拡散と三次元構造を十分に調査する必要があると指摘している。

M.Kajino(2019) 59]らは、1F事故に伴う放射性セシウム放出の輸送と沈着における気象シミュレーショ

ンの不確実性を評価するため、複数の気象モデルと単一の化学輸送モデル(CTM: chemical transport model)によるモジュールアンサンブル解析を実施した。これまでにいくつかのマルチモデルアンサンブル研究が行われたが、現在のタイプ(複数の気象場を持つ1つのCTM)が初めて適用され、CTMの各コンポーネントの不確実性を評価する有用な方法になると考えられる。これまでの解析では、CTMの堆積効率の過小評価がシミュレーションされた放射性Cs堆積の過小評価の原因であると結論づけていたが、計算された拡散と降水量および推定されたソースタームはすべて合理的であった。しかし、すべてのシミュレーションは、堆積量を過小評価している一方、降水量と放射性セシウム濃度は、一部は過小評価されているが、過大評価したものもあった。こうして、気象アンサンブル平均場を使用して実行されたCTMシミュレーションは、結果の偏りを減らすことに成功し、おおよそ妥当な結果が得られている。次に、気象アンサンブルを使用したシミュレーションによる堆積は、アンサンブル平均によって、弱い降水領域を拡大し、土地汚染が主に弱い降水によって引き起こされたため、他のものより優れていたと報告している。現在のアンサンブル研究は、雲内での捕集が、放射性セシウムの沈着の最も支配的な機構であり、陸域全体にわたる乾性沈着と霧の沈着がこれに続くことを示している。一部の堆積領域では霧による堆積が支配的であり、シミュレーションによっては、80%を超えている。シミュレーション結果の濃度と堆積物は気象分野のモデル選択に応じて2倍以上、変化していると報告している。

○本項 (2.4.3) のまとめ

当項 (2.4.3) においても、シミュレーションの精度向上に関連するモデルの構成要素、用いた検証データと得られた成果を、次の表にまとめた。なお、シミュレーションのみで検証データの利用がないものやシミュレーションモデルの紹介、考察のみの論文は除いた。

文献 No.	構成要素	検証データ	成果
44]	緊急時対応大気拡散モデル (DERMA) (プリュームモデル) 乾式・湿式沈降モデルの改良 重力沈降モデル ウォッシュアウトモデル	野外実験データ 広域モニタリング	乾式・湿式沈降モデルの改良
45]	気象モデル(MM5)/大気拡散モデル (ラグランジュノイラー)(DREAM) FEM 乾式・湿式沈降モデル	野外実験データ(ETEX) 事故イベント(チェルノブイリ) 広域モニタリング	核種の総沈着に関するモデルのパフォーマンスを検証 放射能の長距離輸送には、雲内スキャベンジング過程、凝縮過程重要
46]	気象モデル(MM5)/大気拡散モデル(GEARN)(ラグランジュモデル) データ同化 ネスティング 空気吸収線量率と外部被ばく線量計算	事故イベント(チェルノブイリ) 広域モニタリング	WSPEEDI-Iからの精度向上 ネスティングにより MM5 の局所的な降水予測精度の向上と GEARN による局所・広域の Cs-137 表面沈着分布の高精度化
47]	ソースターム推定 SPEEDI、WSPEEDI-II による	事故イベント(福島第一) 広域モニタリング	I-131 と Cs-137 の放出速度と総量を推定
51]	ソースターム推定 最尤法 (3 種)	事故イベント(福島第一) 広域モニタリング	I-131 と Cs-137 の放出速度と総量を推定
52]	ソースターム推定 逆モデリング法 大気拡散モデル(ldX) 線量計算モデル(ConsX)	事故イベント(福島第一) 広域モニタリング	8 つの核種について 3/11 から 3/26 までの 1 時間毎の放出率と量を推定

(Part1 から Part5 のまとめ)

文献 No.	構成要素	検証データ	成果
53] Part1	局所大気拡散モデル(LOHDIM-LES) 平坦地形 LES 大気乱流境界層のモデル化 流入側乱流境界の設定	風洞実験	模擬大気乱流境界層の平坦地におけるプルーム拡散の非定常挙動を予測
54] Part2	局所大気拡散モデル(LOHDIM-LES) 複雑地形(立方体建物) LES 大気乱流境界層のモデル化 流入側乱流境界の設定	風洞実験	障害物(立方体建物)に対応した乱流特性、拡散特性が実験と一致した
55] Part3	局所大気拡散モデル(LOHDIM-LES) 複雑地形(建物アレイ) LES 大気乱流境界層のモデル化 流入側乱流境界の設定	風洞実験	障害物(建物アレイ)に対応した乱流特性、拡散特性が実験と一致した
56] Part4	局所大気拡散モデル(LOHDIM-LES) 複雑地形(都市街区) LES 大気乱流境界層のモデル化 シミュレーション結果の格子依存性	野外実験 (Oklahoma City)	複雑地形(都市街区)に対応した乱流特性、拡散特性が実験と一致した 粗い解像度での再現性を確認
57] Part5	局所大気拡散モデル(LOHDIM-LES) を気象モデル(WRF)と結合 複雑地形(都市街区) LES 大気乱流境界層のモデル化 ネスティング	野外実験 (Oklahoma City)	気象モデルと結合し、都市の大気境界層を再現した 複雑地形(都市街区)に対応した乱流特性、拡散特性が実験と一致した

2.4.4 大気拡散シミュレーションの到達点・課題・展望

本項では、2.4 節（大気拡散シミュレーションに関する英語文献）を通して調査してきた各々のテーマに関して、本事業の目的（局所高分解能大気拡散シミュレーションに関する知見と課題）と関連し、CFD シミュレーション手法の発達過程を踏まえ、手法に焦点を絞り、その到達点、課題、展望といった観点についてまとめる(項 2.3.4（日本語文献）と同様の観点でまとめた)。

(1) RANS と LES

まず、2000 年代初めまでの CFD (RANS) 研究を概観するにあたり、J. G. Bartzis(2006) 60]のレビューが紹介すべき論文と考えられる。論文では、風の流れと汚染物質の拡散は、大気質の問題が現代社会にとって必要不可欠となったことから、CFD (RANS) の重要な応用分野として、CFD (RANS) の研究開発を継続して進展させてきたとしている。一方、CFD (LES) は、局所規模の問題や中立的な流れに対し、より魅力的であるが、CFD (RANS) は、実際的な問題に使用される主なツールとなってきたと評価されている。CFD (RANS) アプリケーションの乱流クロージャスキームの選択は、大気の流れにおいては、依然として未解決課題であり、局所スケールの問題では、2 方程式乱流モデリングが支配的なアプローチで、特に標準的な k-ε モデルが使用されてきた（尚、当該文献ではレイノルズ応力モデルと同様に、より単純なモデル (0 方程式、1 方程式モデル) または高度なモデルについての知見も得ることができる)。当該文献によれば、その当時、k-ε モデルが再検討され、信頼性と（その結果としての）適用範囲を向上させることを目的として、2 方程式乱流モデルを開発する際の新しい一般的なアプローチが提案されたとも報告している。

COST(European Cooperation in Science and Technology)は、ヨーロッパにおける科学技術協力のプラットフォームであり、COST Action 732 は、マイクロスケール気象モデルの適用におけるモデル品質の決定と改善を目的として活動し、大気拡散モデルの研究をまとめ、ベストプラクティスガイドラインを提供している。J.Faranke(2007) 61]らによる、当該ガイドラインは、CFD の分野全般および都市の流れへの適用に関するこれまでの取り組みから得られた結果をまとめたもので、中立層に対する統計的に安定した RANS 方程式の適用に焦点を当てているが、非定常 RANS (URANS) モデルや LES モデル等の他のモデルのユーザーにも有効であると考えられる。本報告では、2007 年当時の到達点を示すために、URANS と LES の部分を引用する。

・統計的に定常な RANS アプローチによる乱流モデルでは、非定常 RANS (URANS) *もあり、URANS の基本方程式は、アンサンブル平均を適用することによって導出される。アンサンブル平均を行った場合のみ、結果の方程式は、時間の偏微分を含む定常 RANS 方程式に準拠するが、これは、時間平均の有無にかかわらず、有限の時間間隔にわたって時間平均が実行される場合には当てはまらない(Gryning & Batchvarova,2005; Aldama,1990)*。これらの理論上の微妙な点に加えて、URANS は使用される乱流モデルに大きく依存する。また、このアプローチには、高い空間解像度も必要となるため、DES あるいは LES を直接使用することも薦められる。ただし、URANS では、たとえば異なる表面温度によって引き起こされる流れ場の時間的変化をシミュレートすることもできる(Kim & Baik,1999; Louka et al., 2002; Bohnenstengel et al., 2004; Tsai et al., 2005)ことは有用である。(*RANS (レイノルズ応力平均モデル) は、レイノルズ平均 (あるいは時間平均) に基づくものと記されるが、厳密にはアンサンブル平均の概念に基づく。ここでは、1)前段(引用なし)で定常 RANS モデルについて「時間平均」によるモデルと

説明している、2)URANSは非定常 RANS であり、非定常の流体問題にも適用できる、としていることから、「時間平均」ではなく、「アンサンブル平均」を強調していると考えられる)

・LES アプローチは、空間的にフィルタリングされたナビエ・ストークス方程式に基づいており、グリッドサイズ以下の微小スケールの影響は、LES のサブフィルターでモデル化する。一方、ハイブリッド RANS-LES アプローチでは、壁の近くでは URANS アプローチを使用し、それ以外の場所では LES アプローチを使用する。これは、レイノルズ数が小さくない場合、壁の近くでは、最大の乱流渦であっても、そのスケールは非常に小さいためである。この事実により、高レイノルズ数の壁境界流れに対し、純粋な LES が困難または不可能になることが分かる。Spalart ら(1997)によって提案された分離渦シミュレーション (DES: Detached Eddy Simulation) の概念は、はおそらく最も広く知られているハイブリッドモデリング戦略である。DES は、Spalart & Allmaras (1992) の一方程式乱流モデルを使用する。このモデルでは、微小スケールの特徴的な長さスケールとして、局所的な壁との距離と局所的なセルのサイズの最小値が使用され、DES 等とのハイブリッド手法は、LES 壁関数手法のより高度な代替手段と見なすことができる。ただし、URANS と LES は根本的に異なるアプローチであり、マッチングは常に近似的であり、モデリングの誤差にさらに寄与してしまうことが分かる。壁から離れたサブフィルター応力については、代数関係が主に使用される。ただし、1 方程式、2 方程式モデルも存在する。別のオプションは、基本方程式のサブフィルター応力のモデリングを完全に無視し、対流項の高度な数値近似の組み込み散逸を使用することである。このアプローチは MILES (Monotonically Integrated Large Eddy Simulation) として知られており、都市拡散(Patnaik & Boris,2005)を含む多くの流れの問題 (Grinstein & Fureby, 2004) に適用され成功している。Breuer et al.(2003)が示したように、LES アプローチとハイブリッドアプローチは両方とも、同じ時間ステップサイズと同じメッシュで解決すると同様の結果をもたらす可能性がある。どちらの方法も、一般に RANS、URANS 方法よりも優れたパフォーマンスを示す (Franke et al.,2004)。その理由は、非定常乱流運動の大部分が解かれ、小さなスケールのみがモデル化されるためである。さらに、LES およびハイブリッド方法は、平均場のみを直接与え、乱流輸送の統計的推定のみを提供する RANS アプローチよりも、流れ場と拡散プロセスに関するより多くの情報を提供する。これは弱い平均場よりも、変動が流れ場を支配する可能性がある街路峡谷などの都市拡散問題において重要なポイントとなる。非定常シミュレーションにより、これらのアプローチでは、瞬間的な最大濃度と最小濃度の予測も可能になる。ただし、RANS よりも大幅に長い計算時間が必要で、流入を適切にシミュレートするには、境界条件としての時間・空間データが必要であり、その条件を提供するには、高解像度の実験データが必要であることを意味する。このようなデータは、実際にはほとんど入手できないため、上記の要件を満たすのは非常に困難になると考えられる。

Y.Tominaga(2013) 62]らは、都市環境における汚染物質拡散の CFD シミュレーションにおける現在のモデリング技術をレビューし、将来に向けた研究開発のための方向性について議論した。当該論文が対象とする分野(CWE : Computational Wind Engineering)は、近年になり発展し、その対象範囲は、負と正の強い浮力をもつプルーム、化学反応、微粒子の分散等、様々なプロセスにまで広がってきたと指摘している。特に、これまでの研究から得られた建物周囲の汚染物質拡散における主要な特徴として、平均流量の三次元性、大規模な流れ構造の非定常性、乱流スカラー流束の異方性に注目が集まり、議論されてきた。建物周囲の汚

染物質濃度では、時間的・空間的に、桁違いに変化する可能性があるため、モデルの評価は、その不確実性に注意しながら慎重に実行する必要があると指摘している。不確実性の定量化は、あらゆる検証および検証プログラムの基礎となる活動であるとし、以下のような項目に対する詳細なレビューを報告した。まず、CFD を使用した建物周囲の近傍域汚染物質の拡散に関するこれまでの研究に対し、孤立した建物、単一のストリートキャニオン、建物アレイ、および複合建物の4つの典型的なケースに分類し、分析を加えた他、以前の研究から、建物周囲の近傍域汚染物質拡散の主な特徴を特定し、CFD モデリングにおけるそれらの関連性を説明し、乱流モデルと境界条件を適切に選択することの重要性を強調した他、モデルの評価方法について説明し、実用化の将来の方向性を提案している。以下、その内容を概説する。

・ケース 1 (孤立した建物)

1990 年代以降、レイノルズ平均ナビエ・ストークス (RANS) アプローチによる単一の建物周囲の汚染物質の拡散に対する適用性を調査するため、多くの数値的研究が行われてきた。これらの研究では、当時の計算リソースの制限により、現在と比較し、比較的粗いメッシュで実行されている。その結果、一般に、RANS シミュレーションでは、風洞試験と比較し、横方向の乱流拡散が大幅に小さくなることが知られており、最近では、LES および直接数値シミュレーション (DNS) により、建物周囲の汚染物質拡散のメカニズムを詳細に調査する解析が実行されている。CFD のパフォーマンスを検証するには、濃度場だけでなく拡散と流れの構造との関係を調査する必要があるため、モデルの結果を濃度場と速度場の両方の実験データと比較する必要があることが指摘される (図 2-9 参照)。

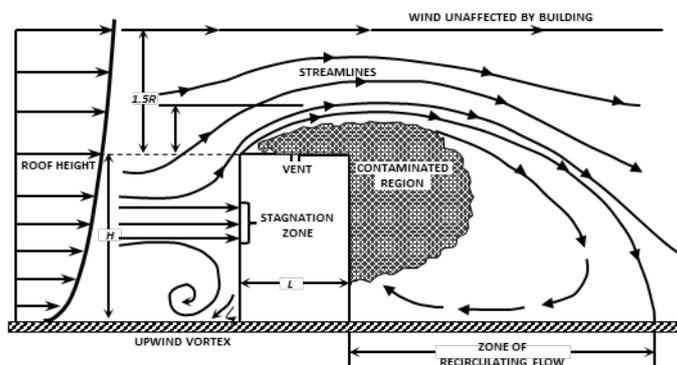


図 2-9 文献 62]の Fig.1 を複製

・ケース 2 (単一のストリートキャニオン)

ストリートキャニオンは、都市環境における典型的建築構造であり、建物周囲の高度に汚染されるゾーンとなる。汚染物質の影響を最小限に抑えるには、建物の谷間の汚染物質の拡散特性を解析し、正確に予測する必要がある。風洞を使用し、谷間の流れと汚染物質の拡散を実験的に分析する多くの基礎研究が行われてきた。また、RANS を使用した汚染物質輸送モデリングによる影響と流入条件、谷間の構成、その他の影響を検討する数多くの研究が行われてきた。

・ケース 3 (建物アレイ)

都市の構成を表す規則的に配置された建物群とその周囲の拡散に関し、多くの実験研究が行われてきた。

拡散パラメータが適切な場合、建物アレイから十分に離れた時間平均プルームプロファイルは、ガウス分布によって適切に表現できることが知られているが、複雑な形状を含むケースにおいては、CFD が適していることが認識されている。最近では、建物アレイ上の拡散フィールドに関する LES および DNS を使用した多くの研究が行われている。これらの研究では、拡散プロセスに対する形態の影響や物理的に重要なスカラー乱流束情報などを分析できる LES の力が実証され、チャネリング、横方向の拡散、ディレイメント、二次ソースの拡散、プルームの歪みなど、プルーム構造のプロセスを理解することが可能となったことを報告している。

・ケース 4 (複合建物)

実際の都市環境における汚染物質の拡散を予測するには、複合ビル周辺での拡散の評価研究が重要となる。RANS に基づき、実際の建物群の周囲の汚染物質の拡散に適用され、妥当な定性的結果が得られているが、その結果は、定量的に評価する必要がある。最近では、検証のための信頼できる実験結果として、モンリオールのダウンタウンにあるビル群、オクラホマシティ (OKC)、ニューヨーク市、ロンドンなどでトレーサ実験が行われ、CFD シミュレーションで参照されている。

以上、当該文献にて報告されている内容をまとめると下記のようになる。建物周囲の近接場汚染物質の拡散の主な特徴としては、建物周囲の流れ構造は、高度に三次元的であることが分かる。DNS 計算によって、立方体前面領域で負の乱流生成が予測され、馬蹄形渦が発生することが示されている。この複雑な流れは、殆どの RANS モデルによる単純な境界層とは区別される必要があり、RANS ではあまり適切に扱われないことが指摘されている。単一の建物や建物群の周囲の流れ場のもう 1 つの特徴は、非定常流れと渦放出のプロセスに関連する後流との相互作用によって引き起こされる高い不安定性である。これは都市部での汚染物質の移流や乱流拡散に複雑な挙動を引き起こす。このタイプの大規模な非定常変動は、定常 RANS 計算では再現できないことが強調されている。RANS は、アンサンブル (レイノルズ) 平均によって導出されるため、基本的には決定論的な構造を含む周期または準周期流れ等の非定常流れには適用できる。このアプローチは非定常 RANS (URANS) と呼ばれる。ただし、方程式を閉じるために使用される乱流モデルのほとんどは、平均値の変化が発生する時間が、エネルギーの大部分を含む乱流運動の時間スケールと比較して大きい場合にのみ有効である。即ち、URANS をうまく使用するには、使用する乱流モデルに特別な注意を払う必要があることが分かる (図 2-10 参照)。

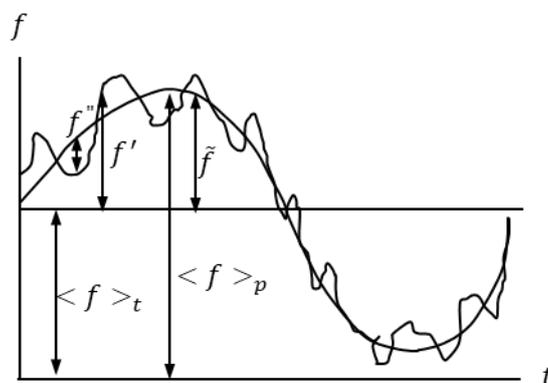


図 2-10 文献 62]の Fig.6 を複製

建物周囲の拡散モデリングに関し、RANS と LES を比較した研究によると、平均速度の LES と RANS の結果の差はそれほど大きくないが、濃度分布の計算では、LES の方が RANS よりも良い結果が得られる。これは、RANS 計算と比較し、LES が、主に建物周囲の非定常な濃度変動を再現するため、濃度の水平方向および垂直方向の拡散は、LES によりよく再現されるためである。RANS SKE(Standard KE)と LES により、モントリオールの中央建物の屋上スタックからの建物の表面と周囲の街路上の正規化された濃度の等高線から、どちらのモデルでも、最大濃度は、高層ビルの風下ファサードで発生することが分かるが、LES で予測された建物の表面と周囲の道路の濃度値は、SKE で予測されたものより全体的に低くなることが分かった報告している。

次に、大気境界層流れの正確なシミュレーションを、CFD を用いて実現するには、地表境界条件と完全に発達した入口プロファイルとの間の一貫性が必要であり、実際の気象条件に対応した平均流特性と乱流特性を流入境界で適切に与える必要があることを指摘している。

M. Lateb(2016) 63]らは、都市環境における大気汚染物質の拡散に関する最先端の実験および数値研究のレビューの中で、特に計算風工学(CWE)における品質と誤差について、建物群の周囲の風の流れと拡散場の挙動を理解し、汚染物質の拡散をモデル化する場合、一般的に使用される仮定としては、次の2つがあることを指摘している (図 2-11 参照)。

- ・汚染物質は、ほとんどが化学的及び動的に受動的なガスとして扱われるが、大気は、断熱的かつ水平に均一であるとみなされる。また、数値モデリングの誤差には、使用された乱流モデルと適用された境界条件から生じる物理モデリング、計算領域のサイズ、格子設計、離散化スキーム、数値反復アルゴリズム等、数値シミュレーションによる2種類があることを指摘している。

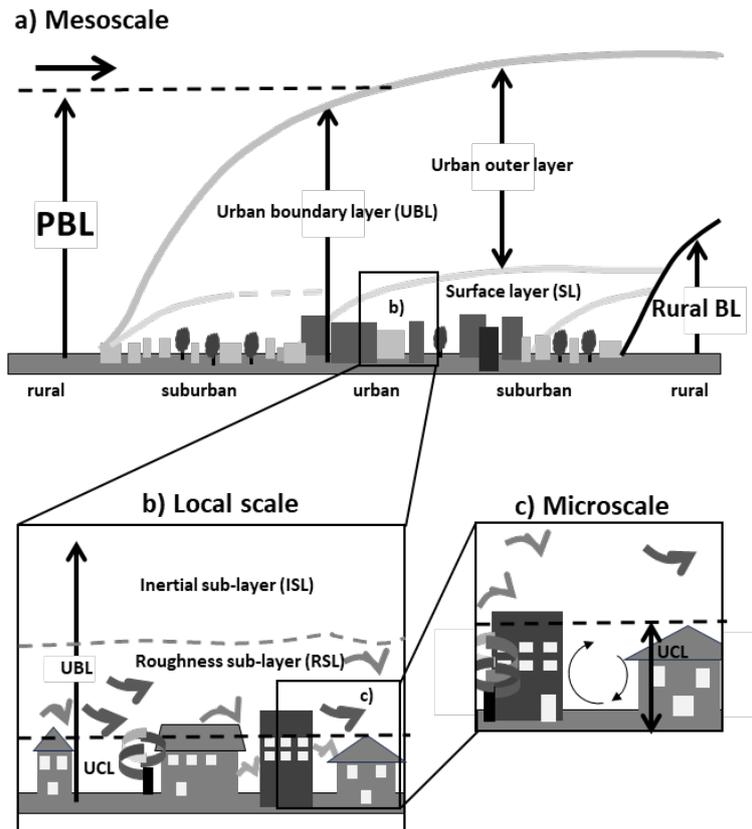


図 2-11 文献 63]の Fig.1 を複製

Blocken(2018) 64]は、「建築分野の CFD (屋内・屋外問題) では、RANS から LES へは、当然の結論か?」というレビューを発表した。LES は RANS アプローチに基づくシミュレーションよりも正確で信頼性の高い結果が得られる可能性があることは間違いないことを基に、以下のポイントを指摘している。LES では、シミュレーションの複雑さが増し、計算コストが大幅に増大する。LES によって RANS が時代遅れになるという過去数十年にわたる主張にもかかわらず、RANS は依然として研究とエンジニアリングの実践の両方で広く使用されている。屋外・屋内アプリケーションにおいて、建築シミュレーションの観点から、なぜこれが当てはまるのか、またこれが正当化されるのかという疑問への回答を試みている。まず、支配方程式と LES と RANS の歴史の簡単な概要を示し、以前の見解に関する論文の関連ハイライトを示す。続いて、なぜ、RANS が依然として頻繁に使用されているのか、そして、それが正当化されるのかどうかを歩行者レベル(PLW: pedestrian-level wind)の風の快適さ、近距離の汚染物質の分散、都市の熱環境、建物の自然換気、屋内の空気の流れという建物シミュレーションの 5 つの応用例によって説明する (図 2-12 参照)。最後に、LES と RANS の将来に関する展望を含む議論と結論を示し、これまでの数十年にわたる研究の歴史と、RANS と LES で行われた研究の詳細をレビューした後、「なぜ LES は RANS を時代遅れにしなかったのか?」という問いに対して、次のように述べている。LES は本質的に優れているが、シミュレーションの複雑性が高く、計算コストがはるかに高くなる。また、BPG(Best Practice Guideline)の欠如により、RANS による結果よりも、精度や信頼性が低い結果が得られることもある。実際、いくつかの実用的なアプリケーションにおいて、RANS の結果が十分に正確であることが示されている。さらに、RANS から LES に切り替えても、「数値風洞」の幻想は、現実には近づくことはないことを指摘している。風洞実験や実地実験に

よる検証は依然として不可欠であるが、それでも、確かに LES は本質的に優れており、環境研究において、過去数十年間で LES に徐々に注目が集まっている理由としている。しかし、デザインやコンサルティング業界では、そのような体系的変化は観察されておらず、RANSは、様々な応用分野で依然として非常に人気がある。過去 20 年間に科学文献に掲載された RANS と LES の事例から、屋外・屋内の建築シミュレーションの多くの側面において、研究者や実務エンジニアが、より大規模な RANS シミュレーションを実行するため、計算能力の増進を有効利用していることを示している。即ち、それほど非定常な乱流状態が深刻な影響を及ぼすことのない問題に対しては、RANS から LES に切り替えるのではなく、より複雑な問題を解決することも可能であると報告している (図 2-13 参照)。

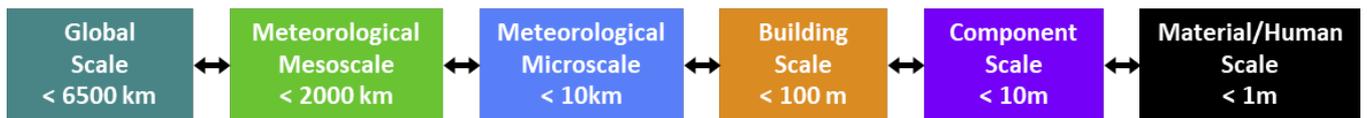


図 2-12 文献 64]の Fig.1 を複製

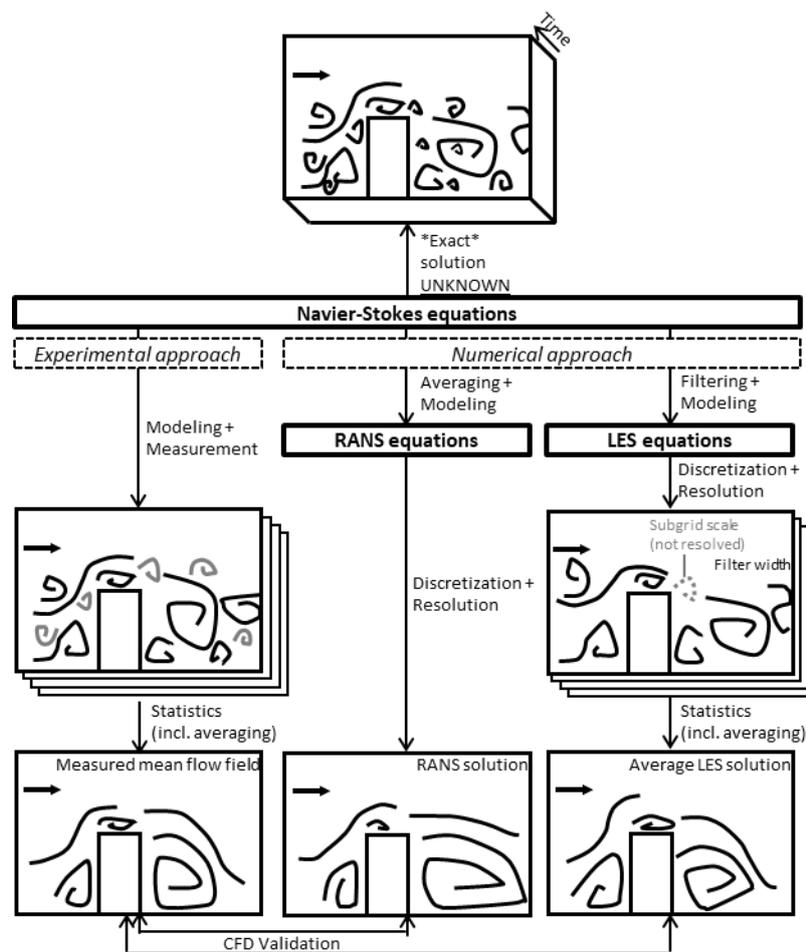


図 2-13 文献 64]の Fig.2 を複製

(2) 気象モデルとの接続・ネスティング

Z. Xie(2006) 65]らは、気象モデルと工学モデルの接続に関し、次のように提案した。接続の目的は、気象スケールの計算と街路スケールの大規模渦シミュレーションを結合することであり、その結合において大きなボトルネックとなるのは、街路スケールの計算効率である。レイノルズ数依存性、必要な最小スケールの解像度、ブロック表面の壁層の重要性などの問題がある一方、指数関数的な速度相関関数に基づいて、流入に適切な乱流を挿入する方法が提案され、デジタルフィルターを基に修正した効率的な方法も提示されている。当該方法は、初期の完全3次元デジタルフィルター法よりもはるかに効率的であり、都市型構造物の流れの実際的なシミュレーションに非常に役立つことを指摘している。すべてのデジタルフィルターを基にした方法は、人工的に乱流を生成し、最も重要な量(長さスケール、スペクトル、平均速度、レイノルズ応力)が、多かれ少なかれ満足のいく形で近似される点が強調されるが、さらなる発展の余地があることも指摘される。例えば、人工的に生成された乱流には発散がない可能性があり、これが下流に何らかの影響を与える可能性がある。このような問題は文献でほとんど扱われていないことを指摘する。より一般的な課題としては、統計的にどの程度詳細か、また実際に考慮すべき独立した量を幾つにするかとするかという課題があると報告している。

Wu X.(2017) 66]は、流入乱流の生成法について報告している。流入乱流生成手法に関する研究は、DNS、LES、および RANS-LES ハイブリッドを使用した、空間的に発達する乱流の渦分解計算(eddy resolving computations)の進歩に伴い、過去四半世紀に渡り、当該研究は、活発に行われてきた。標準的な非圧縮性境界層に関するスケーリング議論に根ざした weak recycling 法は、超音速境界層、粗面境界層、およびメソスケールの数値天気予報と組み合わせたマイクロスケールの都市 canopy LES に適用されている(図 2-14 参照)。均一等方性乱流の解析的近似に基づく合成手法は、合成ランダムフーリエ法、合成デジタルフィルタリング法、合成コヒーレント渦法、合成ボリュームフォーシング法等、いくつかの堅牢な手法に分岐される。当該文献では、基本的な考え方、主要なマイルストーン、代表的応用と重要な課題に重点を置き、流入乱流生成方法の主要な進歩がレビューされている。また、当該分野における将来の研究の方向性も強調されている。

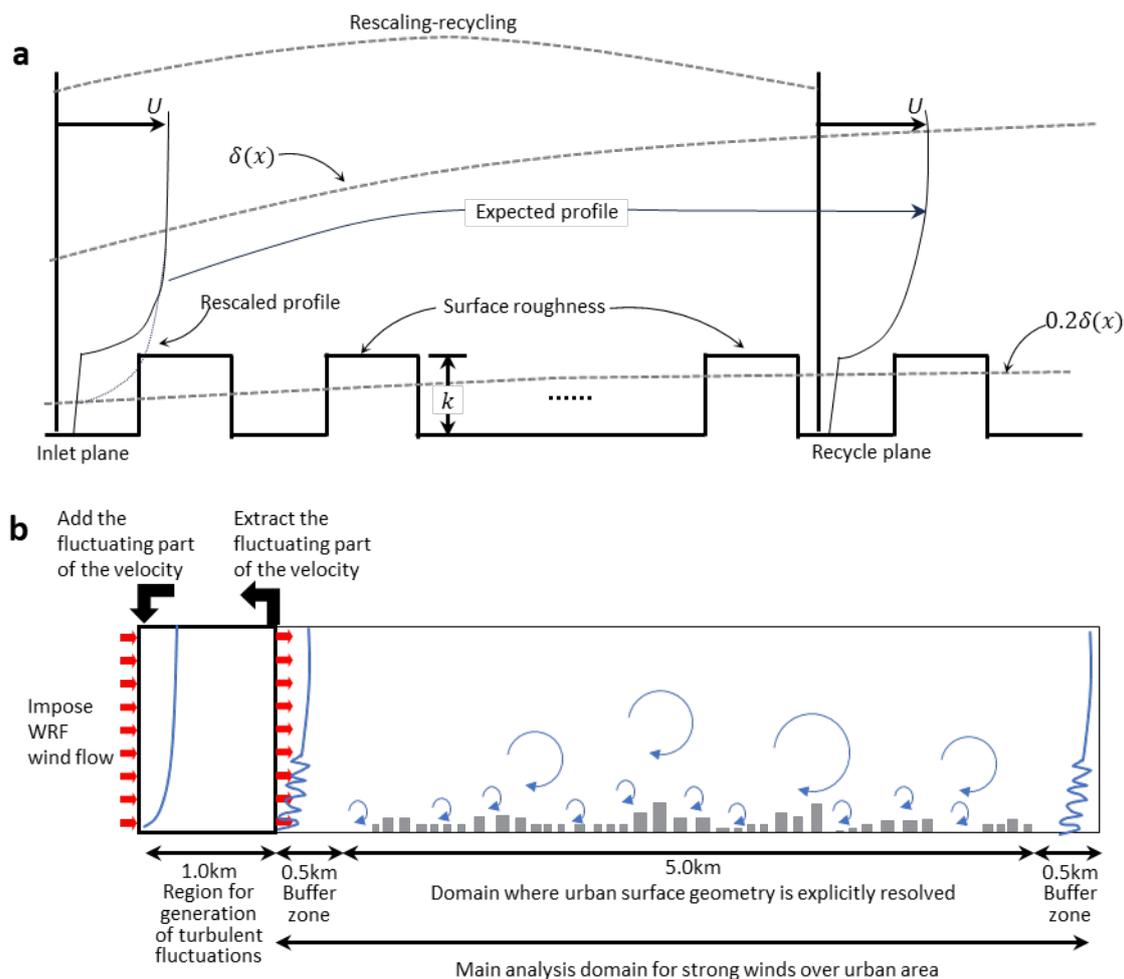


図 2-14 文献 66]の Fig.1 を複製

Zhang, Y.(2018) 67]らは、ミクروسケールのシミュレーションにおける流入風の条件についてレビューしている。その中から、気象モデルとのネスティングに係わる境界条件の設定の部分に記す。ミクروسケールの環境シミュレーションのための時間変化する流入条件は、メソスケールの気象モデルから導き出すことができる (Kunz et al., 2000; Liu et al., 2012; Wyszogrodzki et al., 2012; Zheng et al., 2015; Sanchez et al., 2017)。Kunz et al.(2000)らは、結合方法は、3D 空間補間スキーム、表層内の風速や温度などの値の空間調整、補間された値をミクروسケールに導入するための側方境界条件の定式化を含む 3 つの要素で構成されていると述べている。補間スキームでは、全体ボリュームに対する部分ボリュームの割合が、補間重み付け係数として採用されている。補間値の調整には類似性理論(similarity theory)が使用され、表層のミクروسケール風速は、べき乗則または対数則によって計算される。メソスケール内の乱流モデルとミクロスケールシミュレーションの違いも組み合わせる必要がある(Temel et al., 2016, 2018)。さらに、WRF などの中規模気象モデルの風データを使用すると、時間とともに変化するミクロスケールシミュレーションの横方向および上面の境界条件をある風データから次の風データに漸次変更しながら実行できる。この場合、流入条件の変化は漸進的に変化するものと仮定する。また、開放/ゼロ勾配境界条件 (Wyszogrodzki et al., 2012) は、流出境界に適用できる。レビューされた文献のほとんどでは、流入風の時間的変化に対して段階的変動モード (または線形補間法) が選択されることが多い (Tewari et al., 2010; Liu et al., 2012; Wyszogrodzki et

al., 2012; Cui et al., 2013)と述べている。

2.5 火災に係る大気拡散シミュレーションの文献調査（日本語）

本節（2.5）では、火災事象により生成された汚染物質（放射性含む）の大気拡散に係る文献調査結果を報告する。本節では日本語文献、次節（2.6）では、その英語文献の調査報告とする。

菅沼秀樹(2004) 78)らは、林野火災の予防対策立案のために開発された「林野火災応急対策シミュレーション」について、2002年に岐阜県各務原市で発生した林野火災をモデルケースとして、感度特性分析と適合性の検証を行った。シミュレーションは、風系モデル、地表火延焼モデル、飛火モデルからなり、風系モデルは、観測地点の風向・風速から、風系推定計算領域 20km×20 km、鉛直方向 2km の範囲を変分法により連続条件を満たすように風系が計算される。さらに、地表火延焼モデルでは、消防研究所の火災実験により求められた経験式から延焼速度と延焼方向が求まる。さらに、飛火着火モデルにより、風向・風速と延焼領域の結果から飛火着火が予測される。感度分析の因子を、植生、風向、風速、可燃物延焼速度比として、4種の特性値、延焼面積、拡大延焼速度A（出火から12時間）、拡大延焼速度B（出火から12時間～24時間）を設定して、分散分析を行うとともに、適合性検証により、シミュレーションモデルの課題を明らかにした。

西沢匡人(2004) 79)らは、メソスケール気象モデルと結合した大気化学物質の輸送モデルを開発し、三宅島雄山からの火山ガスの大気拡散に適用した。メソスケールモデルは、PSU/NCAR MM5（mesoscale model version5）を使用し、MM5に大気化学物質の移流、拡散、化学反応、沈着過程を追加したものである。MM5の主な特徴として、(1)非静力学モデル、(2)ネスティング手法による計算領域の高解像度化、(3)四次元データ同化(FDDA)の利用、(4)積雲対流、境界層、放射、雲物理過程に対し、多様なオプションの選択、(5)多くの計算機上で実行可能等が挙げられる。水平方向に地図座標系、鉛直方向に σ 座標系を用い、対象領域は、800km四方、80×80の等間隔格子で分割した。鉛直方向は、地上から300hPaまでを設定し、23個の不等間隔なセルで分割した。気象データは、気象庁の全球客観解析(GANAL)（水平分解能1.25度）を用いた。火山ガスは、放出物質をSO₂のみとし、観測による噴煙高度をもとに水平10km×10km、鉛直810mから1500mに設定した。2000年8月中旬の放出開始から、9月下旬までの筑波から京都に至る5地点の観測点との比較により、火山ガスの到達によるスパイク状の濃度上昇が再現され、また、埼玉県内12地点での硫酸イオンの湿性沈着量との散布図による比較では、FAC2（実測値/計算値が1/2から2）に入り、観測値が良く再現された。

小泉俊雄(2006) 80)らは、菅沼らがモデルケースにした林野火災について、別の手法を提案した。手法の考え方は、林野火災の延焼には、風と地形が大きく関係することから、延焼に及ぼす地形要素はなだらかな険しい、という地形形状と、風向が変化した場合の地形の効果（風向と地形の複合影響）の2つの点からの火災延焼区域の予測手法を提案した。著者らは、表2-7に2つの論文の条件の比較をまとめている。

表 2-7 文献 80) と菅沼らの論文の予測に用いた条件の比較、文献 80 の表 6 を複製

予測条件	本論文	菅沼らの論文 (8)
風向・風速データ	岐阜気象台のデータ。岐阜気象台は火災現場より南西の方向約10kmの位置にあり、周囲には風を遮るものはない。なお、本論文で各務原消防署のデータを用いなかった理由は各務原消防署の風向、風速計の近くに各務原市役所の建物があり、この影響が入ってきていると考えたからである。	各務原消防署の林野火災発生期間中の1時間最頻度風向と1時間平均風速より北西の風8m/sに固定。ただし、4, 6, 8, 10m/sでも実施し比較している。
延焼状況	現地調査のデータを採用。	現地調査のデータを採用。
予測に用いた風向・風速・延焼時	出火・飛火地点ごとに風向の変化に伴い変化させた。	出火から鎮火まで21時間に固定。
飛び火時刻と位置	現地調査（消防署のデータ）をもとに設定。	計算より予測。
地形データ	国土地理院発行の数値地図50mメッシュ（標高）。	国土地理院発行の20万分の1数値地図及び数値地図50mメッシュ（標高）。
植生	樹木の区別なし。重み1。	針葉樹林、陽樹、鬱閉林、高樹高、成木など詳細に分類。
消防活動	考慮していない。	考慮していない。

インドネシアのカリマンタン島、スマトラ島では、乾期に大規模な森林火災が起これると、周辺諸国に広がる煙害につながるため、煙害予測・警報システムにより、その影響を最小限に食い止める必要があるが、塚井誠人(2008) 81)らは、実用的な煙害予測・警報システムのサブモデルとして、スマトラ島の森林火災規模を予測できる統計モデルを開発した。具体的には、出火地点周辺の時間的・空間的な特性を考慮した生存関数モデルを提案している。また、実データに基づいて、モデルの適用可能性を検証したところ、森林火災継続モデルの精度は良好であった一方、森林火災発生モデルの精度は不十分であり、改良が必要なが明らかとなった。

伏見暁洋(2011) 82)らは、大気中の粒子に対する農作物残渣の野焼きの影響を理解するために、野焼き実験により屋外チャンバーで燃焼された農業残渣（稲藁、麦わら、大麦わら、もみ殻）の粒子質量とその組成（元素炭素、有機炭素、元素、およびイオン）を排気中の粒子サイズにより測定した。その結果、PM2.1の排出係数は、残渣の種類・産地によって最大7倍程度異なることがわかった。同じ残渣・実験条件であれば再現性は比較的良好であった。その一方、残渣の含水率を約20%に高めると排出係数は増加し、稲藁では3.2倍となった。このように、PM2.1排出係数は、実験条件によって変わるが、稲藁と小麦藁に関する海外で測定された排出係数（AP42）の報告値は本実験値の範囲内であった。よって、これらの残渣についてAP42の値を日本で用いても大きな問題はないと考えられる。その一方、本実験による大麦藁の排出係数は、AP42の値の半分程度であった。以上のように、残渣の種類や産地、燃焼条件によって排出係数や組成が大きく変わり得ることは、排出インベントリーにおいて考慮すべきと考えられると報告している。

下村祐介(2015) 83)らは、JAEA 大洗研究開発センターの廃棄物管理施設において、森林火災の及ぼす影響評価を行った。はじめに森林火災の延焼シナリオを想定し、現地調査、森林火災評価モデル等から、森林火災の強度を評価した。森林火災の強度の評価に用いたモデルは、Rothermel の拡大方程式及び Canadian Forest Fire Behavior Prediction (FBP) System である。輻射熱による施設への影響評価を行い、想定した森林火災に対する施設外壁の温度変化を試算した。施設外壁温度は最大160℃程度と評価され、一般にコンクリートの強度に影響がないとされている許容温度（200℃）には達しない事を明らかにした。さらに、防火帯突破確率を試算し、約20%程度であったと報告している。

好野奈美子(2018) 84)らは、野焼きを想定した雑草の燃焼による放射セシウム動態を調査し、次のよう

に報告している。雑草に含まれる放射性セシウムの灰化による灰への残存および大気への飛散割合、ならびに灰化前後の水への溶出割合の変化を調査し、雑草を灰化することで放射性セシウム濃度は、7～19 倍に上昇し、燃焼累積時間が長くなるほど灰の放射性セシウム濃度は上昇し、灰化の際に飛散する放射性セシウムも増加することが分かった。灰からの放射性セシウムの溶出量は灰化前の植物体からの溶出量よりも低く、溶出後に試料（灰化前の植物体あるいは灰）内に残存する放射性セシウム量は、灰化前後で大きく変動していることが分かった。以上より、雑草の灰化によって放射性セシウムが濃縮された灰が生成されること、それらが灰化時あるいは灰化後に大気中へ飛散することで周囲環境への拡散や汚染の主な要因になり得ることが示唆された。

○当節のまとめ

本節（2.5）では、シミュレーションの精度向上に関連するモデルの構成要素、複数の検証データと得られた成果について次の表にまとめた。なお、シミュレーションのみで検証データの利用がないものやシミュレーションモデルの紹介、考察のみの論文は除いた。

文献 No.	構成要素	検証データ	成果
78)	風系モデル、地表火延焼モデル、飛火モデル 感度分析（分散分析）	事故イベント（林野火災） 風向風速観測	シミュレーションモデルの課題を明らかにした。
79)	気象モデル(MM5)と大気化学輸送モデルの結合（雲物理過程を含む） σ座標系 ネスティング データ同化	全球客観解析（GANAL）による気象データ SO ₂ 観測点（京都 5 点、埼玉 12 点）	火山ガスによるスパイク状の濃度上昇を再現した。 FAC2 を満たす結果を得た。
83)	森林火災の延焼シナリオ想定 森林火災強度評価モデル (Rothermel, FBP) 輻射熱評価	現地調査	森林火災に対する施設外壁の温度変化を試算し、コンクリートの許容温度（200℃）には達しないことを確認した。

2.6 火災に係る大気拡散シミュレーションの文献調査（英語）

本節では、前節（2.5）に引き続き、火災に係る大気拡散シミュレーションモデルの英語文献に係る調査報告を行う。

R.Sun(2006) 71]らは、FDS(Fire Dynamics Simulator)と大気と山火事の結合モデルを用いて、火災プルームの挙動の予測をメテオトロン(Benech,1976)の観測結果と比較することによって評価した。結合モデルで現実的なプルーム特性を実現するには、正確な顕熱量と加熱率、火災に適したエネルギー消散深度に基づいて、地表近くのより細かいグリッド解像度が必要となる。対流プルームの浮力や垂直プルーム速度などのプルーム平均特性を決定する外部パラメータの1つは、ソースでの浮力フラックスで、垂直方向の質量流束がわかっている場合は流入速度を決定できる。質量流束、垂直速度、流入速度はすべて、大気の安定性を通じてプルームの高さに関連している。地表での流入速度は、火災の燃焼と地表での顕熱流束に関連する延焼率にも関係しており、古典的なプルーム理論に基づくこれらの概念は、火災プルームの挙動を理解するのに役立つことが分かる。メテオトロン火災から評価できなかったプルームのダイナミクスをモデル化するための重要な側面は、(水蒸気の凝縮による)潜熱の役割と浮力への影響であることが分かった。草の火災の場合、かなりの量の水蒸気と熱を下層大気に追加することによって、動的環境を変更できることを示した一方、潜熱が浮力に与える影響を説明しようとして試みている。以上、山火事と大気の連成モデルは、火災のこれらの側面をより詳細に調べることができるが、結合された大気と山火事のモデルは、局地的でおそらく不安定な風と火と風の相互作用を正確に予測する能力を備えているため、激しい火事の挙動や大規模な火積雲の発達を研究するための貴重なツールとなることが指摘された。

A.K.Kochanski(2011) 72]らは、WRF-fire、UU-LES、WFDS、WindNinja の4つのモデルを比較した。Askervein Hill 上の風況シミュレーションを対象として、WRF-fire、UU-LES、WFDS、WindNinja モデルの機能を調査した結果、WindNinja を除くすべてのモデルは、丘の風上側での観測結果と非常によく一致したが、風下側では大きく異なり、WRF-fire モデルは風速を最大 4m/s 過大評価し、UU-LES と WFDS は最大 3m/s 過小評価した。なお、WindNinja の公式運用バージョン(v.2.1)は、観測に対応する流れ特性の提供に問題があり、丘を横切る不十分な風速上昇を示した。一時的な風速変動は、UU-LES モデルによって適切に表現されたが、WRF-fire は、Askervein Hill の実験で観測されたものより、一桁小さい風速の標準偏差を示した。境界条件と WRF-fire にて利用可能なサブグリッドスケールのパラメータ化による追加のテストでは、時間平均風速フィールドに対し、モデル間で観察された不一致を説明するのに十分なほど強い影響がないことが示された。境界条件をオープンからサイクリックに変更しても、時間平均風速フィールドに顕著な影響はなかったが、WRF でシミュレートされた一時的な風速変動に大きな影響を与え、特に丘の風上側で観測値との一致が大幅に改善された。異なるサブグリッドスケールクロージャを使用したモデルの結果と、異なるサブグリッドスケールパラメータ化と境界条件を使用した WRF シミュレーションの結果の比較は、WRF-fire で使用される地形追従座標系が原因である可能性があることが示唆された。Askervein の丘の頂上の下流で観測された流れの剥離とそれに伴う強い渦の欠如は、この地域の風速の大幅な過大評価に繋がることが分かった。

A.K. Kochanski(2013) 73]らによる研究では、Fire Flux 野外実験中に収集された観測値を使用して、結合された大気と火災のモデル WRF-Sfire の性能を評価する。実験に対する WRF-Sfire によるシミュレーションは、現実的な火災前線の拡散速度と火災プルームの垂直温度構造、地上 10m までの火災による表面の流れとプルーム内の垂直速度を表現できることが分かった。当該モデルは、Fire Flux で使用されてい

る2つの計装フラックスタワーで、風速、温度、上昇気流の最大値の到達時間とともに、防火帯通過前、通過中、通過後の風速と風向の変化を捉えていることも分かった。当該モデルは、10mを超えるタワーの高さで測定された垂直方向の風速を過大評価し、水平方向の風速は過小評価した。モデルの解像度の限界により火災前線の深さを過大評価したため、熱放出が過度に高くなり、上昇気流が強すぎる事が分かる。ただし、全体として、WRF-Sfire fire プリユームの動作は、Fire Flux 観測と一致したことが報告されている。

C.C.Sympson(2013) 74]らは、風下の空気温度とパイロ対流プリユーム*のダイナミクスに対する、爆発火災の挙動についての低層のジェット風プロファイルの影響を数値的にモデル化した。モデル化パイロ対流プリユームは、横風流入の収束点での正の浮力により、火の風下から始まり、流入は、背景の風と火の縁の間の相互作用から生じた。ファイアプリユームのダイナミクスと火災に近い暖気領域は、ジェット上のウィンドシアア、ジェットの高度と強度に非常に敏感で、こうした低層のジェットは平坦な地形に限定されず、谷、尾根の頂上、林冠の上などの複雑な地形で一般的に見られる。結果は、モデル化された火源から 25km 下流までの熱対流プリユームの進展の様子を示した。火災の強度と形状、一定方向ウィンドシアア、周辺乱流、湿潤プロセスの時間的変化はモデル化されていないが、火災と大気ダイナミクスに影響を与える可能性がある。大気と火災の結合モデルを使用して、さまざまな低層のジェット条件下での火災の強度、前方への火災の拡散速度、煙の拡散に対する双方向の結合された大気と火災のフィードバックの影響をより直接的に調べることも価値があることが分かった。(*パイロ対流プリユームは、火災により引き起こされ、強化される対流、いわゆる火災積雲：Pyrocumulus (pyroCu)を発生させ、大気境界層にも影響を与える。Pyroconvection Classification Based on Atmospheric Vertical Profiling Correlation With Extreme Fire Spread Observations (Castellnou et al.,2022)

Y.I.Bondar(2014) 75]らによると、森林火災や山火事は、放射性物質で汚染された土地で発生する場合、放射性物質の再浮遊と再分布の原因となる可能性があることと認識され、1986年のチェルノブイリ事故で汚染されたベラルーシとウクライナの地域では懸念事項となっている。従って、放射性汚染物質に対する火災の影響をモデル化することは、関与する変数の数を考えると複雑な問題であると指摘している。当該論文では、ベラルーシの Polessie State Radiation-Ecological Reserve(PSRER: ポレスシエ州放射能生態保護区)で最大エントロピー法から得られた経験的データを使用して、確率モデルを開発したと報告している。当該モデルを使用して、地上空気中の Cs-137 と Pu-239,240 のレベルの全体的な変動に対する火災事象の寄与の推定値、ベラルーシの汚染地域内の特定水域へのこれらの放射性核種の沈着の推定値を導出している。結果は、火災が調査地域内の放射性汚染物質の潜在的に重要な再分配要因であり、水域にさらなる汚染をもたらされる可能性があることを示している。

Y.Okano(2015) 76]らは、1Fの事故後、1Fの安全性に対する懸念が高まったことから、安全機能と構造的完全性に潜在的な可能性がある外部ハザードの1つとしての森林火災のリスク評価方法論の開発の一環として、FARSITE シミュレータを使用して森林火災伝播シミュレーションを実行した。当該シミュレーションは「熱」と「炎」に関連する2つの強度パラメータ(火炎放射の強度と反応強度)と、その他の3つの重要なパラメータ(炎の長さ、広がり速度、森林火災の到着時間)を評価する。強度その他の重要なパラメータの可変範囲を特定するために、広範囲の気象条件に対する感度分析が実行された。調査対象の場所は、1F周辺の典型的な地形と植生をもつ地域の中から選択した。1Fは海に面しており、都市部から離れた丘に囲まれ、主に広葉樹林、いくつかの水田、いくつかの牧草地がある。この分析では、低頻度から高頻度の気象条件が利用され、森林火災の伝播シミュレーションは、典型的な1Fサイトで記録された観測データに従って

「卓越風あり/なし」(風速 0~24m/s)、「周囲温度と相対湿度の高/低値」(4.3~37°C、5~99%)の条件で実行された。火炎強度と拡散率の最大値は 4.7102kW/m と 2.4m/分であり、卓越風速と相対湿度(それぞれ約 2.3 倍と 1.8 倍)に大きく依存するが、周囲温度にはあまり依存しない(約 1.1 倍)。反応強度と炎の長さは、気象パラメータのすべての変動に対しても、比較的狭い範囲内で変化した(それぞれ約 1.7 倍と 1.5 倍)。サイトへの森林火災の到着時間は、記録された風速からの卓越風速の変化に伴い、5 分の 1 に短縮された。到着時間は、記録された最低条件と比較して最高湿度で約 3.4 倍増加したが、周囲温度が変化しても変化しなかったと報告した。

Y.Okano(2016) 77]らは、森林火災の原子力発電所冷却装置への影響を評価する手法を開発した。火災には FARSITE、粉塵 (PM) の拡散には ALOFT-FT を用いた。卓越風での火災、PM 拡散を検討し、冷却装置フィルターでの PM 累積値を評価したところ、数 100g/m²となり、使用限界を相当下回ることが確認された。

B.J.Viner(2018) 78]らは、サバンナリバーサイト(SRS)の汚染された地表について、山火事による放射性核種の拡散の影響を調査した。火災のシミュレーションにより、可能性のある潜在的な放射線量を予測した結果、予測された累積線量は、米国エネルギー省の規制限度(0.25mSv)について、最悪の状況下でも規制限界を超えないことが分かった。

A.K.Kochanski(2021) 79]らは、山火事の煙をシミュレートするマルチスケール大気質モデリングフレームワークの作成のため、大気質予測システム内に結合された火気環境モデルを統合することの実現可能性を評価した。火災と大気の結合モデルである WRF-SFIRE が、AIRPACT 大気質モデリングシステムに統合される。WRF-SFIRE は、地域の気象、火災の成長、噴煙の上昇、煙の拡散を解き、AIRPACT に火災の入力を提供する。WRF-SFIRE で予測された火災エリアと垂直煙分布が、AIRPACT で使用されるパラメータ化された BlueSky 火災入力に替えられた。WRF-SFIRE/AIRPACT 統合フレームワークは、2 つの別々の山火事イベント(2015 年の Cougar Creek Fire と 2016 年のパイオニアの火災)でテストされ、WRF-SFIRE シミュレーションの実行時間は、48 時間の予測に対して 3 時間未満となり、これは、毎日の AIRPACT サイクル内に結合された火気圏シミュレーションを統合することが実現可能であることを示唆した。WRF-SFIRE 予測は 2 日前に火災の成長を現実的に捉えていたが、大気質シミュレーションの最大の改善は、山火事の噴煙の上昇に関連しており、WRF-SFIRE で推定されたプルームトップは、両方のケーススタディについて、衛星で推定されたプルームトップの高さの 300m 以内だった。WRF-SFIRE 入力を使用した場合と使用しない場合の AIRPACT によって生成された大気質シミュレーションは、マルチスケールの煙モデリングフレームワークのパフォーマンスを評価するために、PM_{2.5} 測定データで評価された。WRF-SFIRE と AIRPACT を組み合わせた場合の最大の改善点は、モデルエラーが 50%削減された Cougar Creek Fire で評価される。2 番目のケース(パイオニア火災)の場合、WRF-SFIRE 結合による最も顕著な変化は、検出確率が 16%から 52%に増加したことであると報告している。

K.R.Baker(2021) 80]らは、放射性物質の放出事故は、広範囲の地域を汚染する可能性があり、除染の取り組みは通常人口密集地域に集中することで、放射性核種が森林地帯に長期間放置される可能性があることを指摘し、3 次元光化学輸送モデル(Community Multiscale Air Quality: CMAQ)を使用し、放射線放出シナリオ仮説を基に、山火事による Cs-137 の再放出の潜在的環境影響を推定した。山火事の近くあるいは都市部のさらに風下の両方で、事故後にモデル化された Cs-137 のレベルは、住民の避難が必要になるか、他の措置が必要になるレベルをはるかに下回ることが分かった。以下は、当該論文の帰結である。

- ・モデリングシステムは、山火事による PM2.5 の局地的、地域的規模の輸送とそのレベルを推定可能とした。
- ・山火事直近、あるいは風下の双方で、Cs-137 再放出の高いリスクにさらされるとは予想されないことが示唆された。

M.Talerko(2021) 81]らは、2020 年 4 月に CEZ(Chernobyl Exclusion Zone: チェルノブイリ立入禁止区域)で発生した森林火災によって大気中に放出された Cs-137 放出推定値を使用し、CEZ での森林火災の結果として、大気中の放射性エアロゾルの大気輸送のシミュレーションについて報告した。LEDI モデル(放射性核種の再懸濁、大気輸送、放射性核種の沈着モデル)によるシミュレーション結果では、地表における Cs-137 の濃度の最大値は、3 時間間隔で平均化され、キエフの大気は、4 月 5 日には 4.1mBq/m³、4 月 10 日には 2.6mBq/m³、4 月 18 日には 2.2mBq/m³ であった。森林火災の結果としての Cs-137 の沈着は、2.25Bq/m² と推定され、火災期間中の総実効線量は、外部被曝と Cs-137 および Sr-90 の吸入から 5.7 nSv と見積もられた。得られた結果と 2020 年 4 月の CEZ での火災時の推定放出量の比較に基づいて (Protsak et al., 2020)、Cs-137 放射能排出係数 Cr は $9.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ MJ}^{-1}$ と推定された。

○当節のまとめ

前節(2.5)と同様に、シミュレーションの精度向上に関連するモデルの構成要素、検証データと得られた成果について次の表にまとめた。なお、シミュレーションのみで検証データの利用がないものやシミュレーションモデルの紹介、考察のみの論文は除いた。

文献 No.	構成要素	検証データ	成果
71]	非静力学気象モデル(CLARK)と火災シミュレータ(FDS:Fire Dynamics Simulator)の結合 火災(浮力)プルームの挙動 カップリング(境界条件設定)	野外火災実験(Meteotron)	火災プルームの周辺大気への影響を評価した。
72]	WRF-fire、UU-LES、WFDS、WindNinjaの4つのモデルを比較 LES	野外実験(Askervein Hill)	コード評価の結果を報告。
73]	気象モデル(WRF)と火災モデル(Sfire)の結合 火災(浮力)プルームの挙動	野外実験(Fire Flux)	WRF-Sfireの性能を評価した。
79]	気象モデル(WRF)/火災モデル(Sfire)と大気質モデリング(AIRPACT)の結合 LES ネスティング	山火事イベント(2015年のCougar Creek Fireと2016年のパイオニアの火災)	気象モデルと大気質モデリングシステムにより、火災監視と延焼予測を行った。
81]	放射性エアロゾルの大気輸送モデル(LED1:原子力発電所・安全問題研究所で開発された放射性核種の再懸濁、大気輸送、放射性核種の沈着モデル)	広域モニタリング	森林火災によるCs-137の再循環を予測した。

2.7 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（日本語）

汚染物質（放射性）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にあたり、まず大気拡散シミュレーションと関連する被ばく線量評価の計算モデルと線量評価手法について、文献調査結果をまとめた。当節では、日本語文献の調査報告とし、次節にて英語文献の調査報告をおこなう。

原子力委員会(1976) 85)は、「発電用軽水型原子炉施設周辺の線量目標値に対する評価指針について」にて、原子炉施設の基本的設計段階における平常運転時の原子炉施設周辺の被曝線量を評価するため、放射性物質の放出量と、それによる被曝線量の評価に使用する標準的な計算モデルとパラメータを定め、放射性希ガスからのガンマ線による全身被曝線量は、放出源から拡散移動する放射性雲のガンマ線による外部被曝線量を求めるものとした。また、外部被曝による全身被曝線量及び呼吸摂取による甲状腺被曝線量の評価は、原子炉施設周辺で、各々、最大の被曝を与える地点に居住する人を対象とし、食物摂取による内部全身被曝線量及び甲状腺被曝線量の評価は、現実に存在する被曝経路について、集落における各年齢グループの食生活の態様等が標準的である人を対象として行うものとするとして規定している。また、線量評価に際しての気象条件に関しては、原子力安全委員会(1982) 86)が、「発電用原子炉施設の安全解析に関する気象指針」として、気象観測方法、観測値の統計処理方法及び大気拡散の解析方法を定めている。

放射性物質の拡散シミュレーションの一環として、永井ら 51)によれば、濃度および被ばく線量の計算式は下記の (25)、(26)、(27) 式で表されるとしている。以下は文献 51) の抜粋を記す。

出力時間幅 ΔT 間のセル内の平均濃度および積算沈着量は下式により計算される。

$$C = \frac{1}{V} \sum_{m=1}^M \left[\sum_{n=1}^N (b_n q_n \Delta t) \right]_m / \Delta T \quad (25)$$

$$C_{g,\Delta T} = \frac{1}{S} \sum_{m=1}^M \left[\sum_{n=1}^N (b_{g,n} q_d \Delta t) \right]_m \quad (26)$$

ここで、 V : セルの体積(m^3)

S : 地上第 1 層セルの設置面積(m^2)

C : 出力時間幅 ΔT 間のセルの放射能濃度(Bq/m^3)

$C_{g,\Delta T}$: 出力時間幅 ΔT 間の地上第 1 層セルの接地面への放射能沈着量(Bq/m^2)

M : ΔT 間のステップ数

N : 対象セルおよび隣接セルに含まれる粒子数

b_n : 対象セルへの粒子放射能 q_n の分配割合

q_d : 乾燥沈着および降雨洗浄により地上第 1 層セルの接地面に沈着した放射能量(Bq/s)

分配割合 b_n は、粒子がセルと同じ体積をもつと仮定し、対象セルと重なる部分の体積をセルの全体積で除して求める。積算沈着量の計算で用いる $b_{g,n}$ も、これに準じてる。

出力時間幅 ΔT 間の外部被曝線量は下式により計算される。

$$D_r = \sum_{m=1}^M \left(\sum_{n=1}^N (q_n df_{air} \Delta t) \right)_m + df_{gr} C_{g,\Delta T}$$

ここで、 D_r : 出力時間幅 ΔT 間の r 線による外部被曝線量(Sv)

df_{air} : 単位放射能の点源から任意地点への外部被曝線量率 (Sv/s · Bq)

df_{gr} : 地表沈着量から地上 1.5m の外部被曝線量換算係数 (Sv · m²/Bq · s)

第1項は放射性雲からの被曝線量、第2項は地表沈着放射能からの被曝線量である。放射性雲からの被曝線量計算は、空間中の粒子群を点線源として全粒子からの寄与を積算することにより求める。計算時間短縮のため、線量換算係数 df_{air} は、粒子と評価点の直線距離、粒子の地上高度、核種、対象年齢の関数としてテーブル化している。空気吸収線量率の計算も上式に準じている。

吉澤道夫(1999) 87)らは、放射線審議会基本部会の「外部被ばく及び内部被ばくの評価法に係る技術的指針」についてその要点を解説した。従来の「1cm線量当量」を「実効線量」として用いる線量換算係数を、「1cm線量当量等への換算係数」から「実効線量への換算係数」に置き換えた。内部被ばくの諸量には、線量限度、化学形毎の線量係数、施設を設計する際の基準としての空气中濃度限度、施設からの放射性物質の排出基準としての排気・排水濃度限度があり、内部被ばくでは、放射性核種の摂取から将来の期間にわたってもたらされる線量(預託線量)をその時の被ばく線量として評価する。この預託線量を計算する期間(預託積分期間)は、成人で50年、子供は摂取時から70歳の誕生日までとしている。

法令等で定める内部被ばくの諸量をイ線量係数、ロ空气中濃度限度、ハ排気中濃度限度、ニ排水中濃度限度と定め、イの線量係数は、体内動態モデルにもとづく線源臓器の核変換総数 U_s と比実効エネルギーSEE(線源臓器から放出された放射線が標的臓器に吸収されるエネルギー)から計算により求められる。ロの空气中濃度限度は、線量限度を線量係数、呼吸率と作業時間の積で除して求められる。ハとニの排気中濃度限度、排水中濃度限度では、公衆被ばくを対象としているため、年齢依存を考慮して、次式のように70歳までの期間の年平均1mSvの被ばく線量に基づき限度値を算出した。

$$\begin{array}{ll} \text{排気中濃度限度 (Bq/cm}^3\text{)} & \text{排水濃度限度 (Bq/cm}^3\text{)} \\ =1(\text{mSv/年}) \times 70(\text{年}) / \sum_{70} \{ \text{各年齢層の線量係数} & =1(\text{mSv/年}) \times 70(\text{年}) / \sum_{70} \{ \text{各年齢層の線量係数} \\ (\text{mSv/Bq}) \times \text{各年齢層の年間呼吸量 (cm}^3\text{)} \} & (\text{mSv/Bq}) \times \text{各年齢層の年間摂水量 (cm}^3\text{)} \} \end{array}$$

吉田至孝(2001) 88)らは、原子力発電所のシビアアクシデントを想定し、事象進展を踏まえた放射性物質の拡散状況を解析で求め、推定した放射線源から発電所構内の放射線量率を評価する手法を検討した。その検討手順を図2-15に示した。これに従うと、施設内で発生したシビアアクシデントでは、放射線源からの距離・遮蔽厚さに対し、被ばく評価として、直接線被ばく、スカイシャイン線被ばくと放射性雲による被ばくの3通りの経路を考慮するとしている。

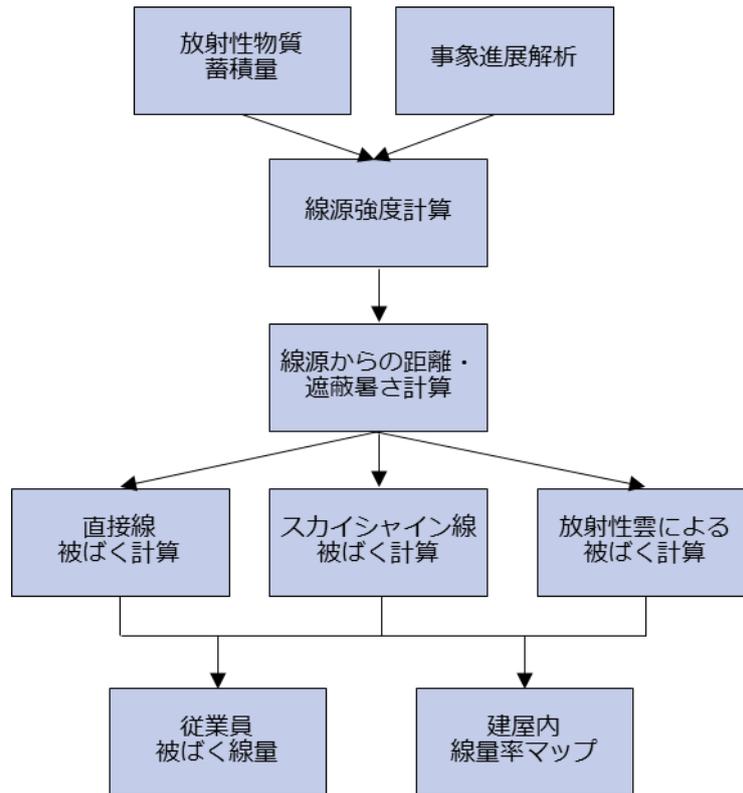


図 2-15 評価手順の概要 (文献 88) の図 1 を複製)

高橋知之(1999) 89)らは、原子力施設の安全評価のため、Cs-137 に起因する外部被ばく線量の長期的な経時変化を評価するモデル及びパラメータ値の適用性において、チェルノブイル原子力発電所近傍において測定された表層土壌中 Cs-137 濃度のモニタリングデータを用いて検討した。その結果、核種の土壌深部への浸透による線量率の減少を、表面からの核種除去モデルによって評価し得ること、その際、積算線量に最も大きい影響を与えるパラメータは、移行が速い成分の割合であり、この値を合理的に推定することが長期的な被ばく線量評価上重要であることを指摘している。また、解析領域において、表面モデルにおける移行が速い成分の割合の範囲は、0.09～0.69程度であり、核種の浸透による積算線量の減少の効果は、減少を考慮しない場合の30%～90%程度であるとした。ここでは核種の浸透による効果のみを検討しているが、実際には Cs-137 の再飛散、表面流出の効果により、積算線量はより低くなることが推察される。一般的な環境条件に普遍化するためには、土質の差異等によるパラメータの変動要因について明らかにする必要があると述べている。

山口武憲(2001) 90)は、内部被ばく線量の測定方法として、個人モニタリング法である体外計測法(直接法)とバイオアッセイ法(間接法)があり、また、空气中放射性物質濃度からの計算法があるとして以下の図 2-16 のようにまとめている。

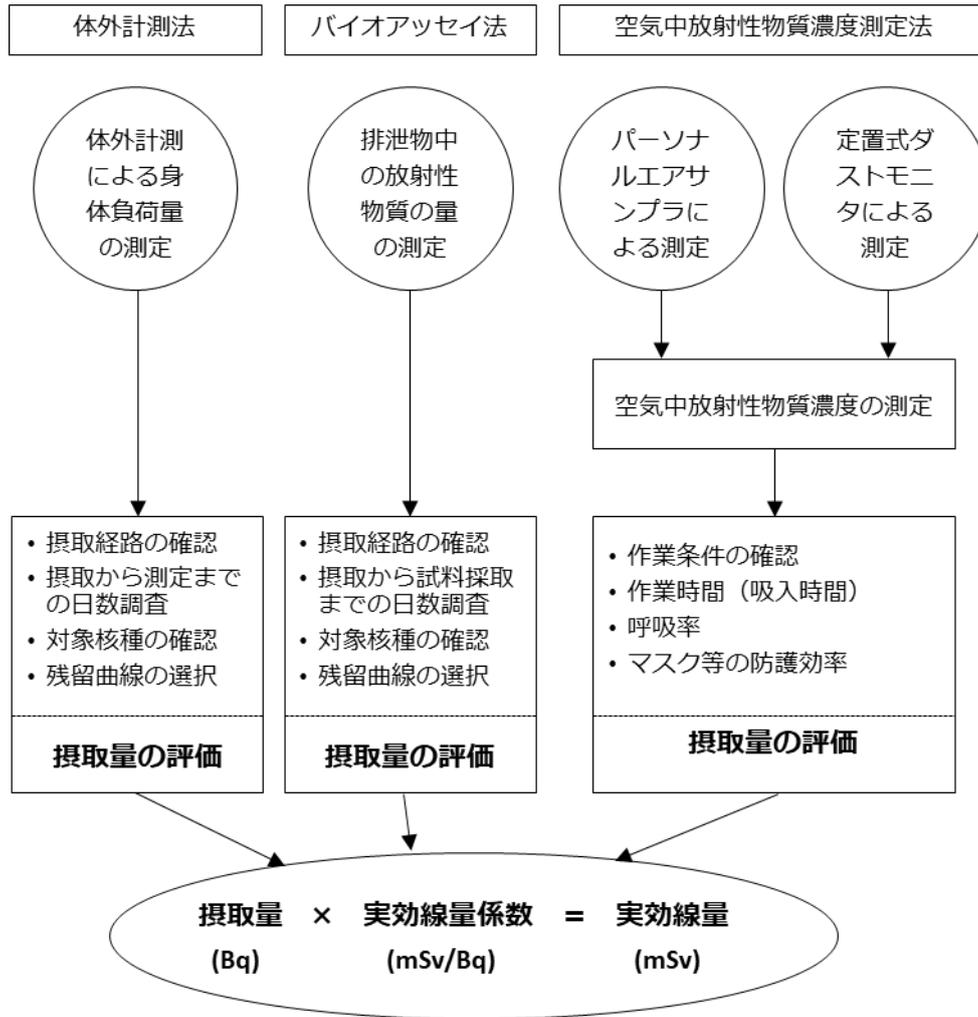


図 2-16 内部被ばくに関する測定から線量評価までの流れ (文献 90) の図 1 を複製

中山敬博(2006) 91)は、内部被ばく実効線量算出の改良手法として、空気中の放射性物質濃度が汚染発生時刻からの時間と換気能力、作業室容積の関数で漸減していく現象を数式化し、作業者の作業時間帯における空気中放射性物質濃度と単位時間あたり呼吸空気量の積の時間積分値と実効線量係数の積から内部被ばく実効線量を算出する方法を提案した。

佐田幸一(2009) 92)らは、原子力発電所施設に関する安全解析において、周辺の複雑な地形や建屋の影響を考慮した放出源の有効高さの算定について、風洞実験の代替を意図した数値モデルの開発を行い、風洞実験結果との比較を行った。気流モデルについては、鉛直方向に σ 座標系を用いるものの、地表付近の計算格子で建屋形状を再現するため、一部に座標変換を用いた一般座標系とした。また、建屋の複雑形状及び数多くの建屋が存在する気流解析の場合には、乱流モデルの選択よりも、建屋周辺の計算格子の取り方に結果が依存するという知見と合わせて、計算時間の実用性の観点から、2 方程式系の $k-\epsilon$ 乱流モデルを選択した。一方、排ガスの拡散モデルでは、Thomson のラグランジュ型粒子モデルを採用した。対象領域は、風下方向 x 、横断方向 y および鉛直方向 z に対し、それぞれ 8.2km(200m格子、41)、0.8km(200m格子、4)および 2km(地表付近 10m、不等間隔、21)とし、濃度計算の格子幅は x 、 y 方向 50m、 z 方向 10m の一様格子とした。放出源の有効高さの評価結果は、風洞実験結果とほぼ再現できるとしている。(この報告分については

20) と重複) さらに、「線量目標値に対する評価指針」85)および「発電用原子炉施設の安全解析に関する気象指針」86)に従って、風洞実験および数値モデルで求めた有効高さ、実際に原子力施設にて観測された年間気象データ、排気筒から評価地点までの距離等の条件を用いて平常運転時および想定事故時の被ばく評価を行った。その結果、平常運転時の希ガス γ 線による実効線量については、数値モデルと風洞実験による分布がほぼ一致するという結果を得た。しかし、これらの有効高さの差異のばらつきや風向出現頻度等の計算条件により、実効線量の最大値の出現風向は、風洞実験と数値モデルで変化する。有効高さの差異(-15 ~ +20 m)により得られる実効線量の変化は、約 $\pm 15\%$ の範囲に相当する。また、想定事故時の相対濃度の計算結果についても、数値モデルと風洞実験による相対濃度の分布は、ほぼ一致したと報告している。

線量評価モデルについては、原子炉施設の安全解析に関し、現在のところ文献85)、86)に従うとされており、これに適用するための放出源の有効高さを求める基準が、日本原子力学会(2019、2022)により、風洞実験および数値モデル計算の各々について示されている93)、94)。

栗原治(2013)95)は、実測データに基づく線量推計を補完する方法として、限られた実測データと大気拡散シミュレーションを併用し、福島県住民の初期内部被ばく線量、特に甲状腺等価線量(以下、甲状腺線量)の再構築を試みた。その結果は、文献中の第1表に示されており、一部は、大気拡散シミュレーションからの推計値を参考としている。大気拡散シミュレーションと人の実測データの各々から推計された甲状腺線量はオーダーとしてはおおむね一致したものの、両者には未だ乖離が大きい。従って、大気拡散シミュレーションによる内部被ばく線量推計は、現時点では参考情報と位置付けるのが適切かと思われると述べている。

○本節のまとめ

前節(2.7)と同様、シミュレーションの精度向上に関連するモデルの構成要素、検証データと得られた成果について次の表にまとめた。シミュレーションのみで検証データの活用がないものやシミュレーションモデルの紹介、考察のみの論文は除いた。

文献 No.	構成要素	検証データ	成果
91)	線量評価のモデルとパラメータの確認	事故イベント(チェルノブイリ) 広域モニタリング	土壌深部への浸透による線量率の減少効果が重要と考察(再飛散、表面流出は考慮せず)。
92)	放出源有効高さの評価 複雑地形、 σ 座標系、一般座標系 k-eモデル ラグランジュ粒子モデル 被ばく評価:「評価指針」48) 「気象指針」49)(プリューム)	風洞実験	放出源有効高さを風洞実験とシミュレーションにより算定し、「指針」に基づき線量評価を実施。

2.8 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(英語)

本節では、汚染物質(放射性)大気拡散シミュレーションに係る被ばく評価モデルの英語文献調査の報告を行う。なお、大気拡散に係る線量評価モデル検証に関する実験及び観測データを探索したが、有用な放射性物質の拡散実験等の数は少ないことを記す。

大気中の放射性核種の拡散に関する実験的研究が Rojas-Palma C (2004)82)らによって行われた。ベルギーのモルにある BR1 研究炉において、人工的に生成されたエアロゾル(white smoke)が、原子炉の高

さ 60m の排気筒内で日常的に放出される Ar-41 と混合され放出された。詳細なプルームの形状は、エアロゾルプルームのリモートセンシング (Lidar) で測定された一方、表面放射線レベルは、放出点から最大 1500m の風下距離でガンマ線検出器を使用し、プルームの下で測定された。結果のデータベースは、気象パラメータの現場観測とともに、プルームの形状と Ar-41 崩壊からの放射線場の同時測定によって構築された。この共同トレーサ/放射線実験データセットは、大気拡散および線量率モデル RIMPUFF によって得られる拡散パラメータおよびガンマ線率の予測精度を評価するために使用された。

Dong Xie(2012) 83]らは、ウラン鉱山の坑道の換気排気ガスに含まれるラドン(²²²Rn)の拡散動態について、中国江西省の鉱山周辺の複雑地形のモデルを用いて、シミュレーション結果と現地測定値を比較し報告している。シミュレーションは、Fluent ソフトウェアの標準 k - ε モデルにより実施し、解析領域は 400m(L) x 300m(W) x 150m(H)、換気口は 2.7m(L) x 2.7m(W)で地上 2m の位置にある。計算領域を 470,000 のセルに分割し、風況条件を大気安定度は中立、北風、風速 0.5、1.0、2.0、4.0(m/s)、地表面粗度を 0.1、1.0(m)として計 8 ケースのシミュレーションを実施した。換気口での排出速度は 3.m/s、濃度は 8000Bq/m³とした。風向出現頻度が最も高い北風では、山岳地帯のため排気ガスは山の中腹の換気口から頂上付近まで高度差 100m 程度を吹き上げられる。風速 2.0m (風速 1~2m の出現頻度 61%) で粗度 0.1m のケースでは、風下 50m から 200m の範囲で、濃度が約 180 から約 30(Bq/m³) と現地観測の結果と同様の濃度低減傾向を示したと報告している。

D.Satoh(2014) 84]らは、大気中および地上の放射性核種によって放出される外部ガンマ線量を推定するシミュレーションコード「SIBYL」を開発した。SIBYL は局所スケールの大気拡散モデル LOHDIM-LES と組み合わせ、大気拡散モデルで計算された放射性核種の拡散と沈着に基づいて地上の線量率を推定できる。線量率の推定に当たっては、空気と土壌にて散乱する一次および二次ガンマ線からの線量寄与を含む線量応答関数を採用し、障害物による線量減衰と計算領域内の地形標高を考慮し、線量分布を計算する機能を有する。なお、線量分布を評価する際、モンテカルロ放射線輸送コード PHITS を用いて比較検証を実施した。

L. Vervecken(2015) 85]らは、LES モデルを用いた詳細なプルーム計算を基に、線量測定における異なる平均時間に対する地表レベルでの線量率の変動を分析した。前述の Rojas-Palma C (2004) 81]らの実験を元に、熱的に中立な大気境界層での平坦地形における LES シミュレーションを行うことで、地上でのガンマ線影響率(fluence ratio)の変動性について、高エネルギーガンマ線を放出する Ar-41 と低エネルギーガンマ線を放出する Xe-133 について、4 つの異なる放出高さを検討し、放出高さの約 15 倍の距離では、放出高さやガンマエネルギーに関係なく、この変動は最大であることが分かったと報告している。

H.Nakayama(2021) 87]らは、前述の 53]から 57]までの局所スケールの高解像度大気拡散モデル (LOHDIM-LES)に、SIBY モデルを組み込んだ線量評価モデルを備えたシミュレーションプログラムを開発した。遮蔽効果や空気中、地盤・建物表面における放射性物質の不均一分布を考慮し空間線量率分布をシミュレーションできる線量計算手法を導入したことが特徴であり、建物アレイ内での放射性プルーム拡散と乾性沈着を、LES 計算を行うことで取得する。当該モデルの検証に当たっては、原子力施設内のモニタリングポスト(MP)から得られた空間線量率の経時変化と比較し、空間線量率の時間変動パターンには、観測データと、ほぼ同様であったと報告している。これにより、LOHDIM-LES は、個々の建物や構造物の遮蔽効果を考慮した合理的な空間線量率の推定が可能であるとの結論が得られた。

○当節（2.8）のまとめ

これまでと同様、本節（2.8）のシミュレーションの精度向上に関連するモデルの構成要素、検証データと得られた成果について次の表にまとめた。シミュレーションのみで検証データの利用がないものやシミュレーションモデルの紹介、考察のみの論文は除いた。

文献 No.	構成要素	検証データ	成果
82]	人工的にトレーサを生成 プルーム横断面の測定(Lidar) 大気拡散・線量率モデル RIMPUFF	野外実験 拡散シミュレーション	放射性物質の拡散実験及び 拡散シミュレーションと比較 している。
83]	標準 k - εモデル(Fluent) 鉱山排気ガス中のラドン(²²² Rn)の拡散 山岳の複雑地形 粗度 0.1m、1m の検討	現地観測	代表的風向風速に対して、現地 観測の結果と同様の濃度低減傾 向を示した。
84]	プルームモデルと LES による、定 常・非定常のシミュレーション結果に 基づく 格子線量反応関数による線量評価モデル SIBYL を開発 並列処理	シミュレーション 結果の濃度分布に よる	モンテカルロ型輸送コード PHITS と比較し、妥当性を 検証した。
85]	2 種の γ 線、 ⁴¹ Ar(高エネルギー)と ¹³³ Xe(低エネルギー)を設定 平坦地形、放出源高さ 4 通り 熱的に中立的な大気境界層 LES 線量評価モデル	野外実験を参考 注) 検証データで はない	異なる平均時間に対する地表 線量率の変動を分析した。
87]	高解像度大気拡散モデル (LOHDIM- LES) 線量評価モデル SIBYL	施設内モニタリン グポスト(9 点)	空間線量率の時間変化パター ンと変動の大きさが観測デー タとほぼ同様であることを確 認した。

2.9 本章のまとめ

本文献調査作業では、約 500 件の日本語文献をリストアップし、本文中で凡そ 97 件を引用した。また英語文献については、約 600 件のリストアップを行い、本文中で 83 件を引用した。これらの文献調査を通して CFD を用いた大気拡散シミュレーションの現状と課題をまとめ、本章を通して報告した。

調査結果をまとめると、現状として、計算機の発達とともに LES の活用が進んでいるが、初期条件や境界条件の設定等に課題があるほか、計算コストも高く、詳細な乱流計算を行い、拡散現象を精度良く予測するには、大気環境流体計算から計算科学等に至るまでの専門的知識が必要であり、非専門家が簡単に、その優れた性能を無条件に得ることは、簡単ではないことが分かる。しかし、LES は、RANS（乱流挙動を時空間で平均化する）と比べ、明らかに構造物付近の流れ場の再現性が良く、局所的な拡散現象（特に非定常な拡散）をシミュレーションする際の精度の高さに優位性があり、本事業の目的である、局所域での高分解能の放射性物質拡散のシミュレーション技術として、整備する価値が十分にあると結論づけられる。特に、建物周囲や地形変化による拡散濃度の違いは、その近傍に位置する人の被ばく線量を決定づける線量率の分布に大きな影響を及ぼすことから、より精度の高い LES を用いて被ばく評価を行う体制を整備することは、本事業の目的を鑑みると、価値あるものと判断できる。また、LES は、上記の局所域（特に地面に近い境界層）での乱流拡散を精度良く再現することから、シミュレーションを様々なケースで行うことで、対象となる局所域での拡散プロセス、ひいては、線量率分布挙動の知見の蓄積に活用すべきとも考えられる。

しかし、LES は、非定常の乱流拡散を精度良く記述するものの、初期及び境界条件に大きく影響を受けることから、それらの設定や接続に注意を払う必要があるほか、気象モデルで取り込まれている重要な物理モデルが含まれずに、現実の現象との乖離が起こることがあることに、十分に注意する必要がある。これらの課題は、LES の特徴（長所や短所）に関する知識だけでなく、大気境界層での気象現象についても深い知識を必要としており、LES の長所を活かして、高精度な拡散予測を行うことは、簡単ではないという現状を認識した上で、その優れた精度とのバランスを明確化する必要があることを記す。以上より、LES の有効性を担保するためには、接続する気象モデルの精度と接続方法への依存影響が幾分消失し、乱流拡散挙動が普遍的かつ支配的となり、LES の有効性が強調される時空間スケールに対して、拡散挙動の知見を得る必要があると結論づけられる。

最後に、本文献調査を通して、試解析する（本事業で整備すべきコード）コードの選択について、報告する。本事業の目的である LES と被ばく線量評価が同時に実施可能で且つコードが公開され、一般に入手可能なものは、LOHDIM-LES、City-LBM(LES)と SIBYL を結合させたシステムである LHADDAS（日本原子力研究開発機構が開発し公開している）のみであることが分かった。また、様々な系での検証も既に実施済みであり、本事業の目的に効率よくアプローチするには、LHADDAS が適していると判断できる。従って、4 章以降では、当該 LHADDAS を用いて、整備を行った後、試解析を行い、文献調査で得た知見とその課題についての調査を実地に実施し、その結果（知見と課題）を報告する。

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。

- 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,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,2007
- 3)東野晴行,北林興二,横山長之,高月峰夫,米澤義堯,化学物質運命予測モデルの開発 長期平均的大気環境濃度推定モデルの開発,大気環境学会誌,2000
- 4)河野仁,欧米における大気拡散モデル 新世代の近距離大気拡散モデルについて,大気環境学会誌,2000
- 5)伏見暁洋,梶原秀夫,吉田喜久雄,中西準子,大気拡散モデルを用いた濃度予測及び PRTR データの検証—ベンゼンを例に—,環境科学会誌,2002
- 6)東野晴行,北林興二,井上和也,三田和哲,米澤義堯,曝露・リスク評価大気拡散モデル (ADMER) の開発,大気環境学会誌,2003
- 7)鈴木秀男,大気拡散モデル,風洞実験と環境アセスメント環境アセスメントにおける大気拡散計算の問題と改善策について—予測実務の立場から—,環境技術,2004
- 8)吉門洋,東野晴行,高井淳,米澤義堯,有害大気汚染物質高排出地域のモデル解析,大気環境学会誌,2006
- 9)東野晴行,リスク評価ツールとしての大気拡散モデルの開発,大気環境学会誌,2009
- 10)新野 宏,野田 暁,柳瀬 亘,大気の大気対流と渦の数値シミュレーション,2001
- 11)大屋裕二,温度成層風洞,日本流体力学会,2002
- 12)白形昌二,永井清之,水本伸子,様々な大気安定度を考慮した大気拡散の風洞実験,大気環境学会誌,2002
- 13)歌野原陽一,木村繁男,木綿隆弘,安定成層大気における山岳波が黄砂の輸送に及ぼす影響の 2 次元数値シミュレーション,日本流体力学会,2006
- 14)香月壮亮,大岡龍三,高橋岳生,加藤信介,様々な大気安定度での大気境界層発達に関する風洞実験と数値シミュレーション,日本建築学会環境系論文集,2009
- 15)市川陽一,赤井幸夫,佐田幸一,ラグランジュ型粒子モデルによる排煙上昇過程を含む大気拡散の予測,土木学会論文集,2000
- 16)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,2003
- 17)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,2003
- 18)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,2004
- 19)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,2006
- 20)佐田幸一,込山有人,道岡武信,市川陽一,安全解析のための大気拡散解析手法 (1) 排ガス拡散の数値計算,日本原子力学会 年会・大会予稿集,2008
- 21)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,2010
- 22)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,2010
- 23)大嶋拓也,今野雅,平栗靖浩,オープンソース・ソフトウェアを活用した 実在市街地環境複合解析,日本流体力学会,2012
- 24)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,2016

25)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,2017

26)村上周三,持田灯,加藤信介,木村敦子,局所風況予測システム LAWEPS の開発と検証,日本流体力学会,2003

27)石原孟,非線形風況予測モデル MASCOT の開発とその実用化,日本流体力学会,2003

28)内田孝紀,大屋裕二,風況予測シミュレータ RIAM-COMPACT の開発－風況精査とリアルタイムシミュレーション－,日本流体力学会,2003

29)神田学,稲垣厚至,都市境界層における乱流相似則と組織構造,日本流体力学会,2007

30)中西幹郎,大気境界層: モデル研究を中心に,天気,2007

31)田村哲郎,野津剛,都市域建築物まわりの乱流計算の高精度化,日本流体力学会,2011

32)榎木康太,小野佳之,大塚清敏,気象モデルと LES 解析に基づく 複雑地形上の多地点強風予測,日本流体力学会,2012

33)服部康男,平口博丸,Chin-Hoh MOENG,石原修二,須藤仁,杉本聡一郎,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,2015

34)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,2019

35)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,2022

36)坪倉 誠,数値流体シンポにみる気象・環境分野の CFD,日本流体力学会数値流体力学部門 Web 会誌,2003

37)秋元肇,大気汚染物質の大陸間輸送と半球規模汚染,大気環境学会誌,2006

38)呉戦平,倉田学児,北田敏廣,東アジアを対象とした大気シミュレーションシステムの総合的性能評価,地球環境シンポジウム講演論文集,2006

39)成田祥,植松光夫,海を越える大気汚染,日本海水学会誌,2007

40)茶谷聡,森川多津子,芦崎翠,平井洋,國見均,わが国の汚染物質濃度に対する発生源・越境輸送の感度解析,大気環境学会誌,2008

41)森川多津子,広域大気質予測モデルにおける粒子状物質 (PM) 濃度予測のための発生源データ,エアロゾル研究,2008

42)日下博幸,領域気象モデル WRF について,日本流体力学会,2009

43)滝川雅之,オンライン化学輸送モデルについて,日本流体力学会,2009

44)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,2009

45)弓本桂也,気象・物質輸送モデルにおけるデータ同化,日本流体力学会,2009

46)竹村俊彦,大気エアロゾル予測システムの開発,天気,56,455-461,(2009),2009

47)菅田誠治,大原利眞,黒川純一,早崎将光,大気汚染予測システム (VENUS) の構築と検証,大気環境学会誌,2011

48)早川信博,足立武司,糠塚重裕,佐藤晃祥,化学物質の大気拡散予測シミュレーションシステムの開発,理論応用力学講演会 講演集,2011

49)菅田誠治,大気汚染物質の観測と数値予測の現状と課題,環境情報科学,2014

50)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 PM_{2.5} 越境汚染に関する

- る大気質モデル解析—2019年3月北海道におけるPM_{2.5}高濃度汚染事例—,大気環境学会誌,2020
- 51)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,1999
- 52)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,2006
- 53)寺田宏明,永井晴康,古野朗子,掛札豊和,原山卓也,茅野政道,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),2008
- 54)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ATOMOS,2009
- 55)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,2009
- 56)永井晴康,放射性物質の大気拡散評価,保健物理,2012
- 57)山澤弘実,大気中放射性物質の影響と拡散評価,安全工学,2013
- 58)近藤裕昭,山田哲二,茅野政道,岩崎俊樹,堅田元喜,眞木貴史,斉藤和雄,寺田宏明,鶴田治雄,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,2013
- 59)鮑本一裕,福島第一原発事故によるCs起源放射線の福島県における時間,位置および気象依存性,環境放射能除染学会誌,2013
- 60)黒島碩人,緒方裕子,大河内博,床次眞司,反町篤行,細田正洋,福島県浪江町の里山に大気沈着した放射性セシウムの森林内分布と挙動,大気環境学会誌,2014
- 61)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,2014
- 62)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,2017
- 63)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,2018
- 64)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,2020
- 65)鶴田治雄,大気化学的知見を用いた大気環境保全技術の開発への貢献—2018年度堀内賞受賞記念講演—,天気,2021
- 66)山澤弘実,恩田裕一,青山道夫,津旨大輔,大原利眞,渡邊明,梶野瑞王,分科会集会「東京電力福島第一原子力発電所事故による放射性物質の動態」開催報告,大気環境学会,2023
- 67)村上周三,持田灯,加藤信介,風力発電サイト立地選定のための局所風況予測モデルの開発,日本風工学会年次研究発表会・梗概集,2002
- 68)金湘栢,山口克人,惣田訓,317 ラグランジュ粒子モデルによる大気汚染物質の拡散シミュレーションに適用する乱流モデルの比較研究,環境工学総合シンポジウム講演論文集,2002
- 69)道岡武信,佐藤歩,市街地内の気流・ガス拡散を対象とした数値シミュレーション,大気環境学会誌,2012
- 70)田村哲郎,中山浩成,障壁まわりの乱流場・拡散場のLES解析,日本風工学会論文集,2005
- 72)持田灯,富永禎秀,石田泰之,LESを用いた都市環境の解析-建築環境工学分野の過去20年の歩み,日本風工学会誌,2009

- 71)安部 諭,田村哲郎,中山浩成,逆転層を有する対流境界層中の乱流構造と拡散挙動に関する LES 解析,日本風工学会論文集,2008
- 73)橋本篤,大澤輝夫,安田孝志,林泰一,MM5 の各大気境界層スキームによる風速計算精度の比較・検討,風力エネルギー,2004
- 74)橋本篤,大澤輝夫,安田孝志,複雑地形上でのメソ気象モデルMM5の風況計算精度と高解像度化の限界に関する検討,日本風工学会論文集,2005
- 75)富永禎秀,風環境予測のためのマイクロ解析からみたメソ気象解析との接続 Coupled Analysis of CFD and Mesoscale Models applied to Wind Environment Problem,Wind Engineers,JAWE,2006
- 76)田村哲郎,武井泰之,岸田岳士,奥田泰雄,溜正俊,都市域での強風に関するメソ気象モデル・LESハイブリッド解析,風工学シンポジウム論文集,2008
- 77)山澤弘実,大気拡散計算の役割と制約 原子力事故時に役立つ計算は可能か-,日本原子力学会誌 ATOMOS,2013
- 78)菅沼秀樹,安部征雄,吉武孝,「林野火災応急対策シミュレーション」モデルの検証,日本林學會誌,2004
- 79)西沢匡人,茅野政道,メソスケール気象モデルと結合した大気化学物質輸送モデルの開発と三宅島火山ガスの大気拡散への適用,大気環境学会誌,2004
- 80)小泉俊雄,竹渕将人,林野火災の延焼に及ぼすおもな地形要素と風向の重要性—各務原市の林野火災を例として—,日本森林学会誌,2006
- 81)塚井誠人,小林潔司,煙害警報システムのための森林火災モデルの開発,土木計画学研究・論文集,2008
- 82)伏見暁洋,齊藤勝美,林健太郎,須藤重人,小野圭介,梶浦雅子,藤谷雄二,世良浩一郎,高見昭憲,田邊潔,農作物残渣の野焼きで排出される粒子の化学組成,NMCC 共同利用研究成果報文集,2011
- 83)下村 祐介 羽成章 佐藤 勇 北村 了一,大洗研究開発センター廃棄物管理施設における森林火災の及ぼす影響評価,jaea-technology-2015-062,2015
- 84)好野奈美子,堀井幸江,村上敏文,松波寿弥,万福裕造,信濃卓郎,野焼きを想定した雑草の燃焼による放射性セシウムの動態,環境放射能除染学会誌,2018
- 85)原子力委員会,発電用軽水型原子炉施設周辺の線量目標値に対する評価指針について,1976
- 86)原子力安全委員会,発電用原子炉施設の安全解析に関する気象指針,1982
- 87)吉澤道夫,水戸誠一,日本学術会議,「外部被ばく及び内部被ばくの評価法に係る技術的指針」について,保健物理,1999
- 88)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,2001
- 89)高橋知之,本間俊充,チェルノブイル原子力発電所近傍の表層土壌中 137 Cs 濃度に関するモニタリングデータを用いた外部被ばく線量評価モデルの妥当性検証,保健物理,1999
- 90)山口武憲,被ばく線量の測定・評価マニュアル内部被ばくについて,保健物理,2001
- 91)中山敬博,空气中放射性物質濃度からの摂取量推定の高度化,Radioisotopes,2006
- 92)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),2009
- 93)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

- 94)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
- 95)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 ATOMOS,2013
- 96)広野求和,藤原玄夫,長沢親生,内野修,前田三男,レーザーレーダーによる中層大気観測,レーザー研究,1979
- 97)甲斐倫明,任意の濃度分布をもつ放射性雲からの外部被曝線量計算コード (CIDE),1984
- 98)菅井研自,草間朋子,甲斐倫明,吉澤康雄,B 線被ばくの場合の表層部線量当量の放射線管理実務の観点からの評価法とその限度 モンテカルロ計算を用いて,保健物理,1985
- 99)日高昭秀,飯嶋敏哲,AIRGAMMA: 事故時に放出される放射性雲からの外部被ばく線量迅速計算コード,保健物理,1985
- 100)篠原邦彦,浅野智宏,成田脩,[引用] ORION-II: 原子力施設からの放射性物質の大気放出に起因する環境中濃度及び被ばく線量を評価するための計算コード,PNCTN841087-17,1987
- 101)茅野政道,放射能の大気拡散 放射能異常放出時の大気拡散予測,流れの可視化,1988
- 102)茅野政道,林隆,緊急時の大気拡散・被曝評価数値モデルの高速・軽量化,日本原子力学会誌,1990
- 103)笠原三紀夫,粒子状物質による大気汚染問題,大気汚染学会誌,1992
- 104)神田学,稲垣聡,日野幹雄,植生-大気境界面における大規模渦構造と運動量交換に関する LES モデルによる検討,土木学会論文集,1993
- 105)S OIKAWA,Y MENG,K UEHARA,T OHARA,都市郊外における建物近傍の野外拡散実験,windeng.tu-tokyo.ac.jp,1995
- 106)片谷教孝,地域大気環境に係わるエアロゾルの数値シミュレーション,エアロゾル研究,1995
- 107)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,1996
- 108)上原清,交差点周辺の大気汚染濃度分布に関する風洞実験: 市街地における汚染物の拡散に関する実験的研究 その 1,日本建築学会計画系論文集,1996
- 109)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,1997
- 110)山澤弘実,欧州広域拡散実験と世界版緊急時環境線量情報予測システム,保健物理,1997
- 111)安達隆史,境界層理論と野外実験の適用による大気拡散推定法の研究,大気環境学会誌,1999
- 112)大越実,高橋知之,木村英雄,関武雄,坂井章浩他,主な原子炉施設におけるクリアランスレベルの算出方法について,保健物理,1999
- 113)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 計算コードユーザズマニュアル,JAERI-Data/Code,1999
- 114)吉田伸治,大岡龍三,持田 灯,富永禎秀,村上周三,樹木モデルを組み込んだ対流・放射・湿気輸送連成解析による樹木の屋外温熱環境緩和効果の検討,日本建築学会計画系論文集,2000
- 115)柴田徳思,東海村 JCO 臨界事故,日本物理学会誌,2000
- 116)福士政広,臨界事故に関連して (トピックス: 放射線被ばく),東京保健科学学会誌,2000
- 117)持田灯ほか,環境工学委員会・空気環境小委員会・風環境数値計算 WG,CFD を利用した高層建物周辺の風環境予測手法の開発-その 1: ベンチマークテストによる各種 $k-\epsilon$ モデルの相互比較-,2001
- 118)玉置元則,化学物質がもたらした大気環境の混乱と秩序の回復 I. 20 世紀後半の大気汚染の概要 (前編),環

境技術,2001

119)高橋知之,本間俊充,チェルノブイル原子力発電所近傍モニタリングデータを用いた ^{137}Cs の外部被ばく線量評価パラメータの土質による差異に関する検討,保健物理,2001

120)坂本隆一,斎藤公明,堤正博,長岡鋭,原研におけるチェルノブイリ研究協力 I 原子力事故後の環境中外部被曝線量の測定・評価に関する研究,保健物理,2001

121)斯波宇司,ARIA Wind を用いた風力発電量評価のご紹介 風況評価: 当社の取り組み,風力エネルギー,2001

122)中野政尚,渡辺均,圓尾好宏,地球規模の海洋環境における放射性物質移行モデル,サイクル機構技報,11,2001

123)半場藤弘,チャンネル乱流における LES と k- ϵ モデルの結合,2001

124)本間俊充,高橋知之,外川織彦,原研におけるチェルノブイリ研究協力 II 事故影響評価モデルの検証,保健物理,2001

125)笠原三紀夫,粒子状大気汚染の現状と今後の課題 PM_{2.5} 導入の意義を考える,大気環境学会誌,2002

126)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,日本風工学会年次研究発表会・梗概集,2002

127)吉田至孝,入江隆,郡山民男,工藤清一,西村和哉,362. シベリアアクシデント時従業員被ばく線量評価手法の検討,日本原子力学会和文論文誌,1(2),2002

128)久保隆,小野敏路,浦野紘平,多環芳香族炭化水素類による大気汚染特性,大気環境学会誌,2002

129)兼保直樹,吉門洋,近藤裕昭,守屋岳,鈴木基雄,白川泰樹,組成別 SPM 濃度シミュレーション・モデルの開発と初冬季高濃度大気汚染への適用 (I) 発生源モデルの構築,大気環境学会誌,2002

130)持田 灯,建設・環境分野の CFD 研究の動向,2002

131)森邦広,森千恵子,谷川岳から見た赤城山北面から榛名山麓の排煙,環境技術,2002

132)神田学,渡辺力,マルコス・オリバー・レッツェル,ジークフリード・ラッシュ,LES による熱収支インバランス問題に対する検討 第 1 報 大気境界層スケールの対流構造の影響,水文・水資源学会誌,15(3),2002

133)早川健一,ポリ塩化ビフェニルの大気環境における挙動とその発生源に関する研究,2002

134)中山昭彦,岸修士郎,LES による安定成層条件下の気流の再現計算,水工学論文集,2002

135)中西幹郎,1 方向ネスティング手法に適した側面境界条件,天気,2002

136)渡辺力,神田学,LES による熱収支インバランス問題に対する検討 第 2 報 水平一様な植生キャノピー層を含む中立接地境界層における検討,水文・水資源学会誌,2002

137)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,2003

138)古澤卓士,田村哲郎,坪倉誠,曹曙陽,空間発達する安定・不安定成層乱流境界層の LES 解析,日本風工学会誌,95,2003

139)山口 敦,石原 孟,鶴野 伊津志,藤野 陽三,新しい風況精査手法の提案と実測による検証 その 2 実測による検証,エネルギー利用シンポジウム,91-94,2003

140)市川陽一,環境影響評価のための物質輸送・大気拡散予測手法の開発,大気環境学会誌,2003

141)石原孟,非線形風況予測モデル MASCOT の開発とその実用化,2003

142)石原孟,山口敦,藤野陽三,鶴野伊津志,新しい風況精査手法の提案と実測による検証,風力エネルギー

一,27(4),2003

143)石原孟,山口敦,鶴野伊津志,藤野陽三,新しい風況精査手法の提案と実測による検証 その1 力学・統計的局所化手法,日本風工学会年次研究発表会梗概集,2003

144)石原孟・山口敦・藤野陽三,複雑地形における局所風況の数値予測と大型風洞実験による検証,土木学会論文集,2003

145)谷川亮一,LOCALSTMによる風況シミュレーションモデルの開発と風況評価,日本流体力学会,2003

146)中山浩成,田村哲郎,佐田幸一,上流側点源放出されたトレーサガスの障壁後流域への連行特性について,日本風工学会誌,2003

147)内田孝紀,大屋裕二,安定成層場における山越え気流の三次元数値シミュレーション,日本流体力学会,2003

148)内田孝紀,飯田明由,複雑地形上の風況予測法—特集の企画にあたって,日本流体力学会,2003

149)K YOSHIDA,乱流拡散と Lagrange 速度相関,2004

150)河野仁,大気拡散モデル,風洞実験と環境アセスメント 欧米のアセスメントで使われる大気拡散モデルの新しい動き,環境技術,2004

151)丸山敬,LESによる粗面上の乱流境界層の数値計算,風工学シンポジウム論文集,2004

152)今井俊昭,島村泰介,福原隆彰,短時間に生じる風速変化量に関する統計的分析,日本風工学会誌,99,2004

153)今村博,妻沼朋己,黒川淳一,松宮輝,猪俣登,複雑地形における風況測定と風力タービン性能評価に関する研究(第2報,風況特性および乱れ度の影響),日本機械学会論文集(B編),2004

154)新藤貴子,曹曙陽,田村哲郎,二次元丘陵地まわりの乱流場の LES 解析 各種 SGS モデルの評価,日本風工学会年次研究発表会・梗概集,2004

155)神成陽容,馬場剛,植田洋匡,外岡豊,松田和秀,日本における大気汚染物質排出グリッドデータベースの開発,大気環境学会誌,2004

156)大塚清敏,斉藤隆雄,出野勝,延命正太郎,濱谷一治,松井隆,観測データによる風況予測手法,風力エネルギー利用シンポジウム,26,2004

157)長野靖尚,服部博文,板橋孝明,鈴木潤,平形直人他,山岳部への風力発電導入のための風況予測手法の開発 その2 工学的乱流モデルの適用と観測データによる検証,風力エネルギー利用シンポジウム,26,2004

158)内田孝紀,大屋裕二,田辺正孝,葛生和人,橋本晃慈,実地形を対象にした非定常風況・拡散シミュレータ RIAM-COMPACT の紹介:最新のインテル Pentium4 プロセッサ搭載 Windows PC の製作と性能評価,2004

159)内田孝紀,大屋裕二,田辺正孝,葛生和人,橋本晃慈,風力タービン適地選定のためのコンピュータによるマイクロサイティング技術 実地形を対象にした非定常風況・拡散シミュレータ RIAM-COMPACT の紹介,風力エネルギー,2004

160)半場藤弘,乱流中のスカラーの非局所的な渦拡散モデル,生産研究,2004

161)福山力,泉克幸,内山政弘,大気エアロゾルの乾性沈着-最近の文献拾い読み,エアロゾル研究,2004

162)黄弘,加藤信介,大岡龍三,蔣太峰,平均拡散場解析による高架道路周辺における Visitation Frequency と Purging Flow Rate の解析,生産研究,2005

163)中山浩成,田村哲郎,奥田泰雄,実在都市へのキャノピーモデルの適用と LES 拡散解析,日本風工学会年次研究発表会・梗概集,2005

164)長谷川豊,鈴木一司,今村博,菊山功嗣,幡原邦彦,真島裕輔,複雑地形上を流れる接地層の乱流特性解析(ス

- ペクトルおよびコヒーレンスの評価),日本機械学会(B編),2005
- 165)田村哲郎・大野修・奥田泰雄・岡田恒,都市域における強風乱流のLES解析モデルの提案,日本建築学会構造系論文報告集,2005
- 166)日下博幸,平口博丸,次世代の天気予報モデル WRF への都市キャノピーモデルの導入効果,環境システム研究論文集,2005
- 167)丸山敬・石川裕彦・内田孝紀・河井宏充・大屋裕二,台風 0418 号通過時の宮島周辺の強風場に関する数値シミュレーション,日本風工学会論文集,2006
- 168)岸田岳士・田村哲郎・奥田泰雄・喜々津仁密,都市細密データより地上被覆形状を再現した実在都市域における風速の鉛直分布,風工学シンポジウム論文集,2006
- 169)近藤裕昭,メソ気象解析からみたマイクロ解析との接続,日本風工学会年次研究発表会・梗概集,2006
- 170)小野佳之・田村哲郎,粗面を有する三次元丘陵地まわりの強風乱流へのLESの適用,日本建築学会構造系論文集,2006
- 171)大塚清敏,風況予測からみたメソ・マイクロ接続の技術的課題 A meso-scale to micro-scale nesting in wind prediction, Wind Engineers, JAWE, 2006
- 172)服部康男,和田浩治,橋本篤,杉本聡一郎,平口博丸他,領域気象モデル WRF と局所風況解析コード NuWiCC との複雑地形上局所風況場の再現性比較,風力エネルギー利用シンポジウム,,2006
- 173)片岡浩人,田村哲郎,奥田泰雄,大橋征幹,RANS および LES に基づく高層建物群後流域の特性に関する予測評価 風洞実験結果との比較検討,第 19 回 風工学シンポジウム論文集,2006
- 174)林隆,基本拡散式による地上濃度推定のための実効風速の決定方法,大気環境学会誌,2006
- 175)小田雅之,古賀大介,内田孝紀,大屋裕二,複雑地形上のガス拡散に対する数値予測手法の開発 その 2 野外観測を対象にした場合,日本風工学会年次研究発表会・梗概集,2007
- 176)小嵐淳,放射性炭素—環境中移行のモデル化に関する国際的な取り組み—,保健物理,2007
- 177)森泰成,越田吉郎,市川勝弘,個人線量計の特性をふまえた IVR 従事者の被ばく線量評価,日本放射線技術学会雑誌,2007
- 178)太田健一,中山浩成,田村哲郎,安定境界層中における LES 大気拡散解析,日本風工学会年次研究発表会・梗概集,2007
- 179)日野雄太,岸田岳士,田村哲郎,竹見哲也,中村修他,実在都市での風環境評価のための最大瞬間風速空間構造 LES 解析,日本風工学会誌,32(2),2007
- 180)萩島理・谷本潤・永山浩二・古賀正浩,高さの分布のある直方体粗度群の抗力係数に関する風洞実験,日本建築学会環境系論文報告集,2007
- 181)白澤多一・遠藤芳信・義江龍一郎・持田灯・田中英之,高層建物後流弱風域におけるガス拡散性状に関する LES と Durbin 型 $k-\epsilon$ モデルの比較,日本建築学会環境系論文賞,2008
- 182)遠藤芳信・持田灯・白澤多一・義江龍一郎・田中英之,LES による高密度市街地内の運動量の移流・拡散と全体の抗力を決定する要因の分析,風工学シンポジウム論文集,2008
- 183)丸山敬・前田潤滋・友清衣利子・中野満寿男・金田幸恵,メソスケール気象モデルにより再現された台風 0418 号の強風場,風工学シンポジウム論文集,2008
- 184)近藤裕昭,稲垣厚至,井原智彦,大岡龍三,小田僚子他,第 7 回都市環境シンポジウム/第 7 回沿岸大気・海洋予測とプロセス会議(合同開催)報告,天気,2008

- 185)荒井友香,安達隆史,茨城県東海村における 1992 年の夏と冬の上層風,山梨大学教育人間科学部紀要,2008
- 186)篠原 卓,竹村 俊彦,衛星データを利用した森林火災起源エアロゾル排出量の推定及び全球エアロゾルモデルによるシミュレーション,日本気象学会 2008 年秋季大会予稿集,2008
- 187)竹見哲也,猪上華子,楠研一,加藤亘,鈴木博人他,メソ気象擾乱に伴う地上近傍の強風変動に関する高解像度気象モデル解析,風工学シンポジウム論文集,2008
- 188)本間俊充,チェルノブイリ事故で放出された 131I データを用いた環境評価モデルの妥当性検証及び防護措置効果の評価,保健物理,2008
- 189)M WATANABE,S TAKEDA,H KIMURA,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,2009
- 190)飯塚悟,中村恭志,次世代気象モデルの開発事例と気象シミュレーションの最先端一特集の企画にあたって,日本流体力学会,2009
- 191)弓本桂也,竹村俊彦,江口健太,鶴野伊津志,エアロゾル輸送モデルとデータ同化,エアロゾル研究,2009
- 192)義江龍一郎,持田灯,富永禎秀,白澤多一,田中 英之,小林 剛,建物後方弱風域における熱拡散・ガス拡散に関する風洞実験と数値解析,日本風工学会年次研究発表会・梗概集,2009
- 193)近藤通史,安達隆史,大気汚染濃度推定のための上層の大気安定度と鉛直方向乱流強度との比較,2009
- 194)手柴充博,坂本晃平,滝川雅之,川瀬宏明,第 9 回 WRF ユーザー会議報告,天気,2009
- 195)上野広行,PM2. 5 の環境基準の設定と今後の課題について,東京都環境科学研究所公開研究発表会資料,2009
- 196)神田学,WRF の都市気象研究への応用,日本流体力学会,2009
- 197)田村哲郎,岸田岳士,奥田泰雄,中村修,宮下康一,LES による実在都市域での強風推定-孤立する高層建物を対象として,日本建築学会構造系論文集,2009
- 198)道岡武信,佐藤歩,1302 都市キャノピー内および上空の物質輸送に関する数値計算 (OS13-1 大気海洋の流体現象と環境流体,オーガナイズドセッション),流体工学部門講演会講演論文集 2009,2009
- 199)八田政知,LES に基づく安定化有限要素法による都市の大気環境流れ解析に関する研究,大学院研究年報理工学研究科編,2009
- 200)安部諭,加藤信介,リバースシミュレーションにおけるフィルター操作を用いた数値安定性確保についての研究,理論応用力学講演会 講演論文集,第 59 回理論応用力学講演会,2010
- 201)安部諭,加藤信介,リバースシミュレーションにおける数値安定性確保についての研究,生産研究,2010
- 202)黄弘,加藤信介,CFD による火災旋風と火の粉の飛散解析,日本風工学会誌,2010
- 203)河野仁,渡邊さつき,岩井恒敬,都市境界層の大気安定度推定のためのタワーを使った気温鉛直分布の年間観測,天気,2010
- 204)丸山敬,石川裕彦,内田孝紀,出口啓,メソスケールモデルと LES を用いたウィンドファーム周辺の気流解析,風工学シンポジウム論文集,2010
- 205)義江龍一郎,安部諭,飯塚悟,伊藤嘉晃,大風翼他,CWE2010 参加報告,日本風工学会誌,35(4),2010
- 206)菊本英紀,大岡龍三,黄弘,香月壮亮,LES を用いたマイクロスケール大気汚染予測システムの開発 LES を用いた乱流場における二分子化学反応モデルの検討,生産研究,2010
- 207)菊本英紀,大岡龍三,黄弘,香月壮亮,伊藤一秀,LES による 2 次元閉空間内の乱流場における二分子化学反応現象の数値解析 マイクロスケール大気汚染予測システムの開発 その 1,日本建築学会環境系論文集,2010

- 208)市川陽一,大気拡散と環境アセスメント,龍谷理工ジャーナル/龍谷大学理工学会 編,2010
- 209)石島伯紀,大倉走,熊倉俊郎,本吉弘岐,中井専人,局地気象数値モデルを用いた Dynamic Adaptation による地上風速の推定,雪氷研究大会講演要旨集,2010
- 210)中西幹郎,新野宏,ラージ・エディ・シミュレーションに基づく改良 Mellor-YamadaLevel3 乱流クロージャーモデル (MYNN モデル) の開発と大気境界層の研究,2010
- 211)内田孝紀,烏谷隆,大屋裕二,九州大学伊都キャンパスにおける流体力学モデル RIAM-COMPACT(R)を用いた 100kW 級風レンズ風車のマイクロサイティング: 第 2 報 土地造成を考慮した場合,2010
- 212)内田孝紀,大屋裕二,連続的な風向変化を考慮した数値風況予測モデルの開発ー風車の耐風設計用風速評価への適用ー,風力エネルギー利用シンポジウム,2010
- 213)内田孝紀,丸山敬,竹見哲也,奥勇一郎,大屋裕二,李貫行,気象モデルと流体力学モデルを用いた風車設置地点における設計風速評価手法の提案,風力エネルギー,2010
- 214)飯塚悟,金原和矢,日下博幸,原政之,秋本祐子,夏季の名古屋の温熱環境を対象とした現状再現の精度検証と疑似温暖化手法を併用した将来予測の試み 領域気象モデル WRF による名古屋都市圏の温熱環境シミュレーション (その 1) ,日本建築学会環境系論文集,2010
- 215)堀田亮年,中田耕太郎,佐田幸一,シミュレーションの信頼性確保のあり方とは? 当学会としての Verification & Validation への取り組み,日本原子力学会誌 ATOMOS,2010
- 216)安部諭,加藤信介,拡散源特定を目指したリバーシミュレーション実現のためのフラックスへのフィルター操作による数値安定性確保についての研究,日本建築学会環境系論文集,2011
- 217)永川栄泰,鈴木隆司,金城康人,宮崎則幸,関口正之他,福島第一原子力発電所事故による放射性物質漏えいに係わる都内環境放射能測定及び被ばく線量測定,Radioisotopes,2011
- 218)花岡宏史,上原知也,荒野泰,放射エネルギー・放射線量の数値をどのようにみるか?,ぶんせき,2011
- 219)菊本英紀,大岡龍三,LES を用いたマイクロスケール大気汚染予測システムの開発 その 2 二分子化学反応が 2 次元市街地空間における大気汚染物質の濃度及び輸送に与える影響,生産研究,2011
- 220)菊本英紀,大岡龍三,ストリートキャニオン内部での大気汚染物質拡散に街区形態と二分子化学反応が与える影響に関する LES マイクロスケール大気汚染予測システムの開発 その 2,日本建築学会環境系論文集,2011
- 221)近藤純正,境界層の風,天気,2011
- 222)熊谷貴美代,関東内陸部における大気中炭素性エアロゾルの特性および粒子状物質汚染に関する研究,エアロゾル研究,2011
- 223)経済産業省,[引用] 添付 2 福島第一原子力発電所における現状の放射性物質の放出量評価及び敷地境界における被ばく線量評価について,2011
- 224)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,2011
- 225)堅田弘大,義江龍一郎,不安定乱流境界層の風速・温度同時測定および LES による熱流体数値解析,日本風工学会年次研究発表会・梗概集,2011
- 226)呉秉哲,大岡龍三,香月壮亮,菊本英紀,連続した都市ストリートキャニオン空間の形態と大気安定度が流れと拡散に与える影響に関する CFD 解析 ストリートキャニオン空間の流れと拡散に関する研究 その 1,日本建築学会環境系論文集,2011
- 227)高橋克行,伏見暁洋,森野悠,飯島明宏,米持真一,速水洋,長谷川就一,田邊潔,小林伸治,北関東における微小

- 粒子状物質のレセプターモデルと放射性炭素同位体比を組み合わせた発生源寄与率推定,大気環境学会誌,2011
- 228)山口 慶人,竹村 俊彦,煙霧と黄砂の観測時間の経年変化,天気,58,965-968,(2011),2011
- 229)石坂俊輔,安定化有限要素法による非等温場における都市域の大気環境流れ解析手法の構築,大学院研究年報 理工学研究科編,2011
- 230)石島伯紀,大倉走,熊倉俊郎,本吉弘岐,中井専人,局地気象数値モデルを用いた地上風速の推定に対する地表粗度の影響に関する研究,雪氷研究大会講演要旨集,2011
- 231)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,2011
- 232)池谷直樹,萩島理,谷本潤,立方体粗度群床面-大気間のスカラー輸送現象に関する LARGE-EDDY SIMULATION,日本建築学会環境系論文集,2011
- 233)茶谷聡,森川多津子,中塚誠次,松永壮,3次元大気シミュレーションによる 2005 年度日本三大都市圏 PM_{2.5} 濃度に対する国内発生源・越境輸送の感度解析,大気環境学会誌,2011
- 234)田副博文,細田正洋,反町篤行,中田章史,吉田光明他,福島第一原子力発電所事故による人工放射性物質の拡散と環境中の線量評価,日本地球化学会年会要旨集,第 58 回年会,2011
- 235)土居主尚,吉永信治,線量誤差の影響を考慮したリスク評価モデルの比較,日本放射線影響学会大会講演要旨集,2011
- 236)島田幸治郎,高見昭憲,加藤俊吾,梶井克純,畠山史郎,東アジアから輸送される汚染大気中の炭素質エアロゾルの変動と発生源推定,大気環境学会誌,2011
- 237)片岡浩人,田村哲郎,RANS/LES ハイブリッド計算法による市街地気流の予測 その 2,日本流体力学会,2012
- 238)片岡浩人,田村哲郎,RANS/LES ハイブリッド計算法による市街地気流の予測 その 3,日本流体力学会,2012
- 239)井上亮,河野仁,池本和生,k-ε 乱流モデルを用いた沿道の自動車排ガス拡散予測-野外拡散実験データによる検証,大気環境学会誌,2012
- 240)岡林一木,永山圭憲,原智宏,堀英一,大屋裕二他,複雑地形へ適用可能な非定常乱流拡散数値シミュレーション技術の開発-風洞実験代替に向けて,三菱重工技報,49(1),2012
- 241)義江龍一郎,野村佳祐,堅田弘大,都市街区内の非等温流れ場における汚染物質拡散・熱拡散に関する風洞実験と LES,風工学シンポジウム論文集,第 22 回風工学シンポジウム,2012
- 242)菊本英紀,大岡龍三,反応性大気汚染物質の濃度変動相関に関するレイノルズ平均モデルの提案と数値実験による検証 マイクロスケール大気汚染予測システムの開発 その 3,日本建築学会環境系論文集,2012
- 243)山口敦,気象シミュレーションと数値流体解析を利用した風環境の予測,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,2012
- 244)神田学,稲垣厚至,瀧本浩史,都市の上空を流れる風,日本風工学会誌,2012
- 245)神尾武史,飯田誠,荒川忠一,小垣哲也,LES シミュレーションを用いた複雑地形上の乱流特性の解析,風力エネルギー利用シンポジウム,2012
- 246)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,2012

- 247)竹見哲也,高分解能気象モデルによる 2011 年 3 月福島県東部の局所的な気流の解析,京都大学防災研究所年報. B,2012
- 248)竹村俊彦,物を運ぶ風 大気中での微粒子の輸送過程,日本風工学会誌,2012
- 249)鳥居建男,眞田幸尚,杉田武志,近藤敦哉,志風義明他,広域環境モニタリングのための航空機を用いた放射性物質拡散状況調査,JAEA-Technology,2012
- 250)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,2012
- 251)武田聖司,木村英雄,高濃度の放射性セシウムを含んだ汚泥の処理・処分に伴う被ばく線量の評価,保健物理,2012
- 252)高橋知之,公衆の被ばく線量評価の現状と課題,保健物理,2012
- 253)安田憲二,「大気中物質の広域拡散とその影響」 特集にあたって,安全工学,2013
- 254)伊藤好孝,福島放射線測定データの現状とメタデータベース作り,アーカイブズ学研究,2013
- 255)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 ATOMOS,2013
- 256)永岡美佳,藤田博喜,中野政尚,渡辺均,住谷秀一,東海再処理施設周辺における東電福島第一原発事故後の降下じん中放射性物質濃度調査結果,保健物理,2013
- 257)菊地亮太,三坂孝志,大林茂,牛尾知雄,嶋村重治他,空港周辺で発生する低層風擾乱の気象モデルと LES による融合解析,日本航空宇宙学会論文集,2013
- 258)菊本英紀,大岡龍三,高橋岳生,林鍾衍,伊藤一秀,Large-eddy simulation における解析格子解像度下での濃度分散評価手法の検討 マイクロスケール大気汚染予測システムの開発 その 4,日本建築学会環境系論文集,2013
- 259)桑原不二朗,板津典彦,局地的都市気象予測のための多孔質都市気象乱流モデルの導出,日本機械学会論文集 B 編,2013
- 260)斎藤公明,環境中に分布する放射性核種に対する外部被ばく線量評価に関する研究,2013
- 261)勝地弘,片岡浩人,野田稔,12th Americas Conference on Wind Engineering 参加報告,日本風工学会誌,2013
- 262)小森昌史,小豆川勝見,野川憲夫,松尾基之,134Cs/137Cs 放射能比を指標とした福島第一原子力発電所事故に由来する放射性核種の放出原子炉別汚染評価,分析化学,2013
- 263)上野健一,磯野純平,今泉文寿,井波明宏,金井隆治他,大学間連携事業を通じた中部山岳域の気象データアーカイブ,地学雑誌,2013
- 264)新里忠史,大山卓也,舟木泰智,北村哲浩,放射性セシウムの環境動態研究の現状-福島長期環境動態研究 (F-TRACE) プロジェクトについて,日本地球化学会年会要旨集,2013
- 265)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,2013
- 266)川崎郁夫,吉田至孝,シビアアクシデント時 発電所内被ばく線量評価技術の開発と適用~ アクシデントマネジメントガイドライン知識ベースの整備~,INSS Journal,2013
- 267)竹安正則,住谷秀一,古田定昭,福島第一原子力発電所事故後の大気中放射性物質濃度測定結果に基づく線量の評価-東海村周辺住民を対象として-,保健物理,2013

- 268)竹村俊彦,大気エアロゾル予測システムの概略と近年の越境大気汚染,日本風工学会誌,2013
- 269)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),2013
- 270)道岡武信,佐藤歩,実在都市内の物質拡散シミュレーション (< 小特集> 社会に貢献するシミュレーション),日本機械学会誌,2013
- 271)内田孝紀,Bolund Experiment を対象にした LES 乱流モデルの予測精度の検証—風洞実験との比較—,風力エネルギー,2013
- 272)内田孝紀,市販 CFD ソフトウェアによる複雑乱流場の再現性: 急峻な傾斜角度を有する 3 次元孤立地形を対象として,2013
- 273)日比野研志,大気境界層におけるストリーク構造の生成・発達・崩壊過程に関する数値的研究,2013
- 274)飯島和毅,新里忠史,佐藤治夫,油井三和,福島長期環境動態研究 (F-TRACE) における現地調査の現状,2013
- 275)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 1 m 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
- 276)蒲原将隆,服部裕司,統計的機械学習を用いた新しい SGS モデルの構築に向けて,日本流体力学学会,2014
- 277)金谷整一,中澤暦,永淵修,齊藤哲,越境大気汚染物質 PM2.5 を中心に,森林遺伝育種,2014
- 278)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,2014
- 279)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,2014
- 280)山口弘誠,高見和弥,中北英一,都市気象 LES モデルの開発による豪雨の「種」を捉えるための基礎研究,京都大学防災研究所年報,2014
- 281)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,2014
- 282)小野浩己,瀧本浩史,道岡武信,佐藤歩,安定成層流中に置かれた単純建物模型からの汚染質拡散の風洞実験 建物屋上面からの排ガス拡散への大気安定度の影響 その 1,日本建築学会環境系論文集,2014
- 283)新里忠史,阿部寛信,石井康雄,渡辺貴善,三田地勝昭,山地の森林域における放射性セシウムの移動現象と流出量評価-福島県,阿武隈山地の事例,日本地球化学会年会要旨集,2014
- 284)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,2014
- 285)大原利眞,現状の俯瞰的理解のために,大気環境学会誌,2014
- 286)大島長,ブラックカーボン粒子のモデル研究: ミクロスケールから全球スケールまで,エアロゾル研究,2014
- 287)大風翼,持田灯,乱流フラックスのコレスキー分解によるスカラー変動を含む変動風生成法の開発 スカラー変動を考慮した LES のための流入変動風の生成 その 1,日本建築学会環境系論文集,2014
- 288)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,2014
- 289)坪井誠司,園田朗,華房康憲,石川洋一,長谷英昭他,地球情報研究センターにおける海洋地球観測データの管理・公開,JAMSTEC Rep. Res. Dev.,18,2014

- 290) 福井哲央, 國領和夫, 馬場剛, 神成陽容, 大気汚染物質排出インベントリー EAGrid2000-Japan の年次更新, 大気環境学会誌, 2014
- 291) 片岡浩人, 田村哲郎, 又吉直樹, 毛利英明, LES による都市キャノピー内外の風の乱流構造の予測—LDV 計測による乱流統計量との比較検討, 第 23 回風工学シンポジウム (2014), 2014
- 292) 挾間貴雅, 伊藤嘉晃, 近藤宏二, 山本学, 川本陽一他, LES を用いた高層建築物の風圧予測における中層街区の影響評価, 風工学シンポジウム論文集, 第 23 回風工学シンポジウム, 2014
- 293) 中山浩成, 永井晴康, Large-Eddy Simulation を用いた局所域高分解能大気拡散モデル: LOHDIM-LES, JAEA-Data/Code, 2015
- 294) 齊藤和雄, 新堀敏基, Roland Draxler, 原旅人, 豊田英司他, WMO 福島第一原発事故に関する気象解析技術タスクチーム活動と気象研究所の大気拡散モデリング, 2015
- 295) 井上実, コヒーレント構造 Smagorinsky モデルを用いた微気象場の数値計算手法, 水文・水資源学会研究発表会要旨集, 2015
- 296) 井上和也, 東野晴行, 2 次生成対応大気モデル ADMER-PRO の開発と検証, 大気環境学会誌, 2015
- 297) 稲葉次郎, 放射性核種の環境移行パラメータ, RADIOISOTOPES, 2015
- 298) 山崎大, 梶原英貴, 切井仁崇, 大平慎一, 戸田敬, 加熱脱着—GC/MS による PM_{2.5} 中多環芳香族炭化水素類の直接分析と熊本における日内変動・季節変動や野焼きの解析, 分析化学, 2015
- 299) 市川有二郎, 井上智博, 大橋英明, 渡邊剛久, 石井克己, 内藤季和, 2013 年 11 月 4 日に東日本として初めて注意喚起が実施された千葉県の PM_{2.5} 高濃度エピソードの要因推定, 大気環境学会誌, 2015
- 300) 小野浩己, 瀧本浩史, 道岡武信, 佐藤歩, 有限体積法に基づく Large Eddy Simulation のための対流項離散化スキームの検討 建物屋上面からの排ガス拡散への大気安定度の影響 その 2, 日本建築学会環境系論文集, 2015
- 301) 大原利真, 福島原発事故に対する大気環境学会の取組み, 日本原子力学会誌 ATOMOS, 2015
- 302) 中島慶悟, 大岡龍三, 菊本英紀, LES データベースを用いた都市キャニオン内外における運動量の輸送機構に関する検討, 生産研究, 2015
- 303) 中島慶悟, 大岡龍三, 菊本英紀, LES データベースを用いた都市キャニオン内外におけるレイノルズストレスの勾配拡散近似に関する検討, 日本建築学会環境系論文集, 2015
- 304) 長尾誠也, 福島第一原発事故により放出された放射性 Cs の河川流域における移行挙動, Isotope News, 2015
- 305) 内田孝紀, 鶴沢憲, 大規模な崖状地形に建設された大型ウインドファームを対象とした気流場解析, 2015
- 306) 内田孝紀, 渡邊文人, 見上伸, 市販 CFD ソフトウェアによる急峻な 3 次元孤立峰を対象とした気流場解析 (第 2 報), 2015
- 307) 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, 2015
- 308) 畠山史郎, 長距離越境大気汚染と大気化学反応, 日本流体力学会, 2015
- 309) 鈴木雄治郎, コスタ アントニオ, 火山噴煙数値モデルのベンチマークテスト, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, MIS26-P01, 2016
- 310) 鶴野伊津志, Xiaole Pan, 板橋秀一, 弓本桂也, 原由香里, 栗林正俊, 山本重一, 下原孝章, 田村圭, 緒方美治, 長田和雄, 上口友輔, 山田早紀, 小林拓, 九州北部で 2014 年 5 月下旬から 1 週間継続した黄砂と高濃度大気汚染現象

- のオーバービュー,大気環境学会誌,2016
- 311)吉田至孝,岩崎良人,山田輝之,運用上の介入レベルに基づく被ばく線量計算手法の検討-計算式および線量換算係数等の整備,Journal of INSS,2016
- 312)宮原裕一,デジタル粉塵計による大気粉塵の時間・空間分布の観測,信州大学環境科学年報,38,2016
- 313)宮武裕和,義澤宣明,河合理城,平川幸子,滝澤真理他,福島第一原発事故後の栃木県内の外部被ばく線量評価,安全工学,2016
- 314)近藤明,気象/大気質モデルの開発とその応用に関する研究,大気環境学会誌,2016
- 315)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
- 316)斎藤公明,栗原治,松田規宏,高原省五,佐藤哲朗,VI. 個人の外部被ばく線量評価の現状と課題,RADIOISOTOPES,65,93-112,2016
- 317)坂本功,高橋正人,佐久間隆,安藤孝志,野焼きに伴う大気汚染物質濃度の急上昇事例について,宮城県保健環境センター年報,34,2016
- 318)寺島洋史,清水雅樹,吉田圭介,RANS 特集の企画にあたって,日本流体力学会,2016
- 319)新堀敏基,火山灰輸送: モデルと予測,火山,2016
- 320)中島慶悟,大岡龍三,菊本英紀,様々な温度成層条件下の都市キャニオン内外における LES と標準 k- ϵ モデルの比較,生産研究,2016
- 321)鶴田治雄,五十嵐康人,井上智博,大河内博,大原利真他,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),2016
- 322)東野晴行,井上和也,曝露評価とリスク評価のための大気拡散モデル (ADMER) Ver. 3 の開発,日本リスク研究学会誌,2016
- 323)藤原慶子,東京電力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による内部被ばく線量の評価,2016
- 324)富永禎秀,大風翼,菊本英紀,白澤多一,義江龍一郎他,RANS モデルにおける各種の計算条件の違いが濃度分布の予測精度に及ぼす影響 市街地における汚染質・熱拡散の CFD 予測のガイドライン整備のためのベンチマークテスト,日本建築学会技術報告集,22(51),2016
- 325)操上広志,新里忠史,鶴田忠彦,加藤智子,北村哲浩他,放射性物質の環境動態に伴う被ばく経路を考慮したコンパートメントモデルの構築,JAEA-Research,2016-20,2017
- 326)尾亦範泰,白山晋,深層学習を用いた低次元表現による非定常流れの比較法,日本流体力学会,2017
- 327)佐々木亘,種本純,大西領,植田祐子,今村博,MSSG を用いた 50m 解像度気象シミュレーションによる風況予測及び検証,風力エネルギー利用シンポジウム,2017
- 328)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
- 329)山本貴士,竹内幸生,田野崎隆雄,鈴木剛,金松雅俊,高田光康他,福島第一原子力発電所近傍における解体工事従事者の外部被ばく量の評価,保健物理,2017
- 330)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,2017
- 331)新堀敏基,火山灰輸送モデルの現状と今後-2016 年 10 月 8 日阿蘇山の降灰予報を例に-,日本火山学会講演予稿集 2017,2017

- 332)森川多津子,PM2.5 排出インベトリの最新状況と課題,大気環境学会誌,2017
- 333)神田玲子,三枝新,坂内忠明,川口勇生,古場裕介,立崎英夫他,ICRU 専門家ワークショップ『環境中への大量に放出された放射性物質から公衆を防護するためのモニタリング: 福島第一原子力発電所事故からのフィードバック』開催報告,保健物理,2017
- 334)大原利眞,大気環境学会の取り組み,日本原子力学会誌 ATOMOS,2017
- 335)中島慶悟,大岡龍三,菊本英紀,LES を用いた温度成層下の都市キャニオンにおける標準 k-ε モデルの乱流フラックスモデリングの妥当性評価,日本建築学会環境系論文集,2017
- 336)中島慶悟,大岡龍三,菊本英紀,温度成層条件下の都市キャニオン流れに関する LES と標準 k-ε モデルの予測精度評価,日本風工学会論文集,2017
- 337)長谷川英尚,柿内秀樹,佐藤雄飛,植田真司,高久雄一他,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)環境科学研究所—研究報告,2017
- 338)長谷川就一,野外焼却の実態と PM2.5 濃度への影響に関する考察,大気環境学会誌,2017
- 339)日下博幸,高根雄也,局地気象学分野における数値シミュレーション: 地形と土地利用の影響調査,日本流体力学会,2017
- 340)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,2017
- 341)富山一,田邊潔,茶谷聡,小林伸治,藤谷雄二,古山昭子,佐藤圭,伏見暁洋,近藤美則,菅田誠治,森野悠,早崎将光,小熊宏之,井手玲子,日下博幸,高見昭憲,野焼き発生の時間分布調査および稲作残渣野焼きによる大気汚染物質排出量の日変動推計,大気環境学会誌,2017
- 342)服部康男,中尾圭佑,須藤仁,平口博丸,石原修二,数値気象モデル WRF による大気接地層 LES を通じた主流擾乱影響下高 Re 数対数域の組織構造への洞察,年次大会 2017,2017
- 343)河西昌隆,大風翼,石田泰之,山本ミゲイル,持田灯,WRF と LES を結合したメソ・マイクロ気象一貫解析手法の開発と実街区における温熱環境の将来予測,風工学シンポジウム論文集,第 25 回風工学シンポジウム,2018
- 344)岩崎俊樹,福島第一原発事故時の放射性物質移流拡散問題— 日本気象学会の事故後の活動と数値予報モデルの活用策について,学術の動向,2018
- 345)近藤明,大気汚染物質の拡散シミュレーション技術,安全工学 57(6),2018
- 346)金子真司,後藤義明,田淵隆一,赤間亮夫,池田重人,篠宮佳樹,今村直広,帰還困難区域で発生した森林火災が樹木樹皮と表層土壌の放射性セシウムの蓄積に及ぼす影響,森林総合研究所研究報告,2018
- 347)甲山治,インドネシアの熱帯泥炭地火災と大気汚染,水文・水資源学会研究発表会要旨集,2018
- 348)国末達也,高橋真,アーカイブ試料を活用した POPs 汚染の時系列評価と今後の課題,廃棄物資源循環学会誌,2018
- 349)佐々木亘,種本純,大西領,植田祐子,今村博,MSSG を用いた 50m 解像度気象計算による年間の風況予測及び検証,風力エネルギー利用シンポジウム,2018
- 350)佐藤拓人,日下博幸,気象学 RANS モデルと翼非回転風車モデルを用いた風車後流による風速欠損の再現性(気象学 LES モデルとの比較),日本風工学会論文集,2018
- 351)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
- 352)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,2018

- 353)中島映至,大気化学の観点からの物質輸送モデリングの現状と課題,学術の動向,2018
- 354)渡邊明,森林火災による放射性物質の飛散,東北地域災害科学研究,2018
- 355)嶋寺光,領域化学輸送モデルによる大気中 PM2.5 シミュレーション,混相流,2018
- 356)林剛平,東京電力福島第一原子力発電所事故被災動物の被ばく線量評価研究,2018
- 357)K SHIMADA,T SASAKI,M IJIMA,M MUNAKATA,東京電力福島第一原子力発電所事故時におけるオフサイトの防災業務関係者の外部被ばく線量評価(受託研究),2019
- 358)鈴木隆洸,大道勇哉,金森正史,鈴木宏二郎,曇み込みニューラルネットワークを用いた非圧縮 CFD におけるポアソンソルバーの高速化,日本流体力学会,2019
- 359)浦西克維,化学輸送モデルとレセプターモデルによる PM2.5 発生源寄与解析,2019
- 360)加藤弘亮,森林環境中の放射性セシウム動態解析に基づく林内空間線量率予測モデルの開発,2019
- 361)杵淵郁也,水野吉規,高垣直尚,機械学習の流体力学研究への応用 特集の企画にあたって,日本流体力学会,2019
- 362)後藤亜希,島崎一紀,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
- 363)新堀敏基,鈴木雄治郎,入山宙,石井憲介,佐藤英一他,移流拡散モデルによる大規模噴火を想定した降下火砕物予測の課題(その3)噴煙ダイナミクスモデルに基づく初期条件,日本火山学会講演予稿集,2019
- 364)瀧本浩史,小野浩己,佐藤歩,道岡武信,運動量による上昇過程と建屋影響を考慮した排ガス拡散予測のための Large-eddy simulation,日本風工学会論文集,2019
- 365)長谷川一登,深見開,村田高彬,深淵康二,機械学習を用いた円柱周り流れのレイノルズ数依存性の予測,日本流体力学会,2019
- 366)長谷川英尚,柿内秀樹,佐藤雄飛,植田真司,高久雄一他,1.1.2 総合的環境移行・線量評価モデルの検証,(財)環境科学研究所—研究報告,2019
- 367)塚原隆裕,川口靖夫,乱流物質拡散源推定に向けた CNN 画像認識,日本流体力学会,2019
- 368)鄭朱娟,伊藤一秀,化学反応と乱流拡散を考慮した汚染物質濃度場形成の Net Escape Velocity 概念を用いた構造理解,日本建築学会環境系論文集,2019
- 369)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,2019
- 370)片岡浩人,市街地の風の高解像度実況システムの試案,日本風工学会誌,2019
- 371)竹村俊彦,大気エアロゾルによる気候変動の数値シミュレーション,日本流体力学会,2020
- 372)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,2020
- 373)星純也,齊藤伸治,レボグルコサンと放射性炭素同位体比を用いた東京都内の大気有機粒子に対する野焼きの寄与推定,大気環境学会誌,2020
- 374)大浦泰嗣,鶴田治雄,海老原充,大原利真,中島映至,浮遊粒子状物質自動測定機で使用されたテープロ紙を利用する大気中放射性セシウムの定量,BUNSEKI KAGAKU,56(1・2),1-9,2020
- 375)日本学術会議,東京電力福島第一原子力発電所事故による環境汚染の調査研究の進展と課題,2020
- 376)林将史,道岡武信,LES による風車後流域の排ガス拡散挙動の解明,大気環境学会誌,2020
- 377)橋本周,木名瀬栄,宗像雅広,村山卓,高橋聖他,原子力緊急時における公衆の被ばく線量評価に関する調査と検討,JAEA-Review,2020-071,2021

- 378)井上智博,大原利眞,梶野瑞王,堅田元喜,篠原直秀他,10年シンポ「東京電力福島第一原子力発電所事故による放射能大気環境汚染—これまでとこれから—」の報告,大気環境学会誌,56(4),2021
- 379)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,2021
- 380)近藤裕昭,岩崎俊樹,佐藤陽祐,関山剛,滝川雅之他,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,318-320,2021
- 381)古渡意彦,谷村嘉彦,環境放射線モニタリングにおける線量当量率及び空气中放射性物質濃度の同時決定法に関する検討,Radioisotopes,2021
- 382)後藤和恭,瀧本浩史,岸田岳士,小野浩己,佐藤歩,大気拡散シミュレーションのための風向変動特性に関する研究,日本風工学会論文集,46(2),2021
- 383)山村由貴,九州地域を中心とした高濃度大気汚染の観測解析とその数値シミュレーション,2021
- 384)山本真緒,浦西克維,菊谷有希,菅田誠治,レセプターモデルを用いたPM_{2.5}への打上花火イベントの影響事例評価,大気環境学会誌,2021
- 385)市川陽一,大気乱流拡散-神と魔女への挑戦-,大気環境学会誌,2021
- 386)瀧本浩史,小野浩己,佐藤歩,Large-eddy simulationによる遮風フェンスを考慮した貯炭場内風速分布の予測,大気環境学会誌,2021
- 387)谷口智之,平方勝,万順一,深層強化学習に基づく自動ネスティング手法,日本船舶海洋工学会論文集,2021
- 388)藤田瞭紀,機械学習によるPM_{2.5}予測精度向上に関する研究,2021
- 389)南雲洋介,荒木啓司,赤星明紀,田中英之,菊本英紀他,風工学における評価に用いる風速の考え方,日本風工学会論文集,46(2),2021
- 390)保田浩志,予期せぬ放射線被ばくに対する線量評価の方法,日本放射線看護学会誌,2021
- 391)眞田幸尚,操上広志,舟木泰智,吉村和也,阿部智久他,避難指示区域の解除に向けた特定復興再生拠点の放射線モニタリングと被ばく評価,日本原子力学会和文論文誌,20(2),2021
- 392)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,2021
- 393)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ATOMOS,2022
- 394)市川陽一,環境アセスメントにおける大気質の予測・評価の残された課題,環境アセスメント学会誌,2022
- 395)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,2022
- 396)大貫敏彦,矢野豊彦,山野直樹,「福島第一原子力発電所事故に関する洞察」日本原子力学会が日本語で出版した科学者と技術者による事故後5年間の論説の英文アーカイブ報告書の発刊,日本原子力学会誌ATOMOS,2022
- 397)辻本昌礼,山本浩平,亀田貴之,気象モデル推定値を取り入れたLand Use Regressionモデルによる国内大気汚染物質濃度分布推定,大気環境学会誌,2022
- 398)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,2022
- 399)佐藤里奈,眞田幸尚,吉村和也,中山真理子,避難指示区域解除における住民の個人被ばく線量評価の在り

方について (受託研究),JAEA-Review,2022-055,2023

400)高田モモ,保高徹生,旧避難区域における山菜の自家消費による長期的な内部被ばく線量の推定,リスク学研究,2023

401)瀧本浩史,小林謙仁,佐藤歩,気象モデル WRF を用いた複雑地形上の風速再現精度に関する検討,日本風工学会年次研究発表会・梗概集,2023

402)馬場将平,大気境界層の影響を受ける 2 基風車後流の相互作用に関する数値シミュレーション,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 Society for Testing and Materials,Designation D 6589-00.,2000
- 3]AMEC Environmental& Infrastructure UK limited,Intermediate report Annex2: Consequence Assesment Methods for Human Helth (Task2) Report for the European Commission (DG Environment),2014
- 4]Kevin Dowding,Overview of ASME V&V 20-2009 Standard for Verification and Validation in Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer,Presented at 2016 Inverse Problems Symposium 5-7 June 2016 Virginia Military Institute,2016
- 5]JC Chang,SR Hanna,Air quality model performance evaluation,Meteorology and Atmospheric Physics,2004
- 6]Joseph C. Chang and Steven R. Hanna,Technical Descriptions and User's Guide for the BOOT Statistical Model Evaluation Software Package,Version 2.0,2005
- 7]HARMO.ORG,HARMO.ORG,
- 8]H.R. Olesen,A Platform for Model Evaluation,2001
- 9]Akula Venkatram,Shivnagendra,Amita Tripathi,Comparison and Performance Evaluation of CFD based Numerical Model and Gaussian based Models for Urban Air Quality Prediction,2003
- 10]JL Santiago,A Martilli,Simulation of MUST experiment using RANS K-Epsilon model: validation against wind tunnel measurements and analysis of spatial average properties,Proceedings of the 11th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes,2007
- 11]B Blocken,T Stathopoulos,P Saathoff,X Wang,Numerical evaluation of pollutant dispersion in the built environment: comparisons between models and experiments,Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,96(10-11),1817-1831,2008
- 12]C Gorle,J van Beeck,P Rambaud,Dispersion in the wake of a rectangular building: validation of two Reynolds-averaged Navier-Stokes modelling approaches,Boundary-layer meteorology,2010
- 13]M Lateb,C Masson,T Stathopoulos,C Bedard,Simulation of near-field dispersion of pollutants using detached-eddy simulation,Computers & Fluids,2014
- 14]C Gromke,B Blocken,Influence of avenue-trees on air quality at the urban neighborhood scale,part I : Quality assurance studies and turbulent Schmidt number analysis for RANS CFD simulations,Environmental Pollution,2015
- 15]BW Yan,QS Li,YC He,PW Chan,RANS simulation of neutral atmospheric boundary layer flows over complex terrain by proper imposition of boundary conditions and modification on the k-ε model,Environmental Fluid Mechanics,2016

- 16]A Castorrini,S Gentile,E Geraldi et al.,Increasing spatial resolution of wind resource prediction using NWP and RANS simulation,Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics,2021
- 17]Y Cheng,FS 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
- 18]Fernando E. Camelli,Rainald Léohner,and Steve R. Hanna,FEFLO-URBAN CFD MODEL EVALUATION OF THE MUST EXPERIMENT,Mecanica Computacional ,23,1701-1725,2004
- 19]YH Tseng,C Meneveau et al.,Modeling flow around bluff bodies and predicting urban dispersion using large eddy simulation,Environmental science and Technology,40,2653-2662,2006
- 20]ZT Xie,O Coceal,IP Castro,Large-eddy simulation of flows over random urban-like obstacles,Boundary-layer meteorology,2008
- 21]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 Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2010),2010
- 22]JL Santiago,A Dejoan,A Martilli,F Martin et al.,Comparison between large-eddy simulation 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 Containers,Boundary-Layer Meteorol,135,109-132,2010
- 23]P Gousseau,B Blocken,GJF Van Heijst,CFD simulation of pollutant dispersion around isolated buildings: On the role of convective and turbulent mass fluxes in the prediction accuracy,Journal of Hazardous Materials,2011
- 24]Y Tominaga,T Stathopoulos,CFD modeling of pollution dispersion in a street canyon: Comparison between LES and RANS,Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,2011
- 25]J Fang,F Porte-Agel,Large-eddy simulation of very-large-scale motions in the neutrally stratified atmospheric boundary layer,Boundary-Layer Meteorology,2015
- 26]LW Chew,LR Glicksman,LK Norford,Buoyant flows in street canyons: Comparison of RANS and LES at reduced and full scales,Building and Environment,2018
- 27]Laetitia Thouron,Melanie C. Rochoux,Thomas Jaravel and Olivier Vermorel,,Large-eddy simulations of the MUST trial 2681829 using AVBP,Meso-NH and YALES2,,Technical report,TR-CFD-20-14,CERFACS,Toulouse,France,2020
- 28]M Hadžiabdić,M Hafizović,B Ničeno et al.,A rational hybrid RANS-LES model for CFD predictions of microclimate and environmental quality in real urban structures,Building and Environment,217,2022
- 29]Eliott Lumet,Thomas Jaravel,Melanie C. Rochoux,Olivier Vermorel,Simon Lacroix,Assessing the Internal Variability 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
- 30]Pramod Kumar,Amir-Ali Feiz,Sarvesh Kumar Singh,Pierre Ngae,Raj Rani,Emerson Barbosa,Grégory Turbelin,Jean-Pierre Issartel,Nadir Bekka,SOURCE RECONSTRUCTION IN URBAN AND NON-

URBAN ENVIRONMENTS USING AN INVERSION METHODOLOGY COUPLED WITH A CFD APPROACH,17th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes,9-12 May 2016,Budapest,Hungary,2016

31]PE Bieringer,GS Young,LM Rodriguez et al.,Paradigms and commonalities in atmospheric source term estimation methods,Atmospheric Environment,2017

32]Cecile L. Defforge,Bertrand Carissimo,Marc Bocquet,Raphael Bresson,Patrick Armand,,Improving Numerical Dispersion Modelling in Built Environments with Data Assimilation Using the Iterative Ensemble Kalman Smoother,,Boundary-Layer Meteorology,Received: 24 September 2019 / Accepted: 4 November 2020,2019

33]Pramod Kumar,Amir-Ali Feiz,Pierre Ngae,Sarvesh Kumar Singh,Jean-Pierre Issartel,CFD simulation of short-range plume dispersion from a point release in an urban like environment,Atmospheric Environment 122 (2015) 645e656,2015

34]Liyong Chen,Pramod Kumar,Malo Leguellec,Amir-Ali Feiz,AN AIR QUALITY CFD MODEL PERFORMANCE IN COMPLEX ENVIRONMENT WITH EMU OBSERVATIONS,17th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes,9-12 May 2016,Budapest,Hungary,2016

35]L Bai,J Wang,X Ma,H Lu,Air pollution forecasts: An overview,International Journal of Environmental Research and Public Health,2018

36]M Xue,KK Droegemeier,V Wong,The Advanced Regional Prediction System (ARPS)-A multi-scale nonhydrostatic atmospheric simulation and prediction model. Part I: Model dynamics and verification,Meteorology and atmospheric physics,2000

37]A Martilli,A Clappier,MW Rotach,An urban surface exchange parameterisation for mesoscale models,Boundary-layer meteorology,2002

38]WR Cotton,RA Pielke Sr,RL Walko,GE Liston at al.,RAMS 2001: Current status and future directions,Meteorol Atmos Phys,2003

39]William J. Coirier,Sura Kim,Fei Chen,Mukul 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

40]Moeng,C.-H.,Dudhia,J.,Klemp,J.,& Sullivan,P.,Examining two-way grid nesting for large eddy simulation of the PBL using the WRF model,Mon. Wea. Rev.,135 (2007) 2295-2311,2007

41]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

42]PA Jimenez,J Dudhia et al.,A revised scheme for the WRF surface layer formulation,Monthly weather review,140,898-,2012

43]KM Thiessen,MC Thorne,PR Maul,G Prohl et al.,Modelling radionuclide distribution and transport in the environment,Environmental Pollution,100,151-177,1999

- 44]A Baklanov,JH Sorensen,Parameterisation of radionuclide deposition in atmospheric long-range transport modelling,Phys. Chem. Earth ,Part B: Hydrology,Oceans and Atmosphere,26(10),787-799,2001
- 45]J Brandt,JH Christensen,LM Frohn,Modelling transport and deposition of caesium and iodine from the Chernobyl accident using the DREAM model,Atmospheric Chemistry and Physics,2002
- 46]H Terada,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,Journal of Nuclear Science and Technology,2,397-417,2008
- 47]M Chino,H Nakayama,H Nagai,H Terada et al.,Preliminary Estimation of Release Amounts of ¹³¹I and ¹³⁷Cs Accidentally Discharged from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant into the Atmosphere,Journal of Nuclear Science and Technology,45(9),920-931,2011
- 48]N Kinoshita,K Sueki,K Sasa et al.,Assessment of individual radionuclide distributions from the Fukushima nuclear accident covering central-east Japan,Proceedings of the National Academy of Sciences(PNAS),108(49),2011
- 49]O Masson,A Baeza,J Bieringer et al.,Tracking of airborne radionuclides from the damaged Fukushima Dai-ichi nuclear reactors by European networks,Environmental science and Technology,45,7670-7677,2011
- 50]R.B. Oza,V. D. Puranik,H.S. Kushwaha,Krishna Prasad and Arun Murthy,DISPERSION OF RADIONUCLIDES AND RADIOLOGICAL DOSE COMPUTATION OVER A MESOSCALE DOMAIN USING WEATHER FORECAST AND CFD MODEL,NEA-CSNI-R--2011-14,2011
- 51]V Winiarek,M Bocquet,O Saunier et al.,Estimation of errors in the inverse modeling of accidental 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 Geophysical Research,117,2012
- 52]O Saunier,A Mathieu,D Didier et al.,An inverse modeling method to assess the source term of the Fukushima Nuclear Power Plant accident using gamma dose rate observations,Atmos. Chem. Phys.,13,11403-11421,2013
- 53]Nakayama H,Nagai H.,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. 2009;46(12):1170-1177.,2009
- 54]Nakayama H,Nagai H.,Development of local-scale high-resolution atmospheric dispersion model using large-eddy simulation Part 2: turbulent flow and plume dispersion around a cubical building,J Nucl Sci Technol.2011;48:374-383.,2011
- 55]Nakayama H,Jurcakova K,Nagai H.,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.2013;50(5):503-519.,2013
- 56]Nakayama H,Leitl B,Harms F,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. 2014;51(5):626-638.,2014

- 57] Nakayama H, Takemi T, Nagai H. , Development of LO cal-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*. 2016;53(6):887-908., 2016
- 58] Sato, Y. et al., Model Intercomparison of Atmospheric ¹³⁷Cs From the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident: Simulations Based on Identical Input Data, *J. Geophys. Res.* 123(20), 11748-11765., 2018
- 59] Kajino 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
- 60] JG Bartzis, Turbulence modeling in the atmospheric boundary layer: a review and some recent developments, *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 2006
- 61] J Franke, A Hellsten, KH 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
- 62] Y Tominaga, T Stathopoulos, CFD simulation of near-field pollutant dispersion in the urban environment: A review of current modeling techniques, *Atmospheric Environment*, 2013
- 63] Lateb et al, On the use of numerical modelling for near-field pollutant dispersion in urban environments: A review. , *Environmental Pollution*: 208, 271-283, 2016
- 64] B Blocken, LES over RANS in building simulation for outdoor and indoor applications: A foregone conclusion?, *Building Simulation*, 2018
- 65] Z. Xie, I.P. Castro, Efficient Generation of Inflow Conditions for Large Eddy Simulation of Street-Scale Flows, *Flow, Turbul. Combust.* 76 (2006) 291-312 , 2006
- 66] Xiaohua Wu, Inflow Turbulence Generation Methods, *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 49, pp. 23-49, 2017
- 67] Zhang, Y., Gu, Z. and Yu, C. W., Review on Numerical Simulation of Airflow and Pollutant Dispersion in Urban Street Canyons under Natural Background Wind Condition, *Aerosol and Air Quality Research*, 18, pp. 780-789, (2018), 2018
- 68] 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
- 69] Kajino 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
- 70] Sato, Y. et al., A model intercomparison of atmospheric ¹³⁷Cs concentrations from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident, phase III: Simulation with an identical source term and meteorological field at 1-km resolution, *ATMOSPHERIC ENVIRONMENT: X* 7 (2020) 100086, 2020
- 71] R Sun, MA Jenkins, SK Krueger, W Mell et al., An evaluation of fire-plume properties simulated with

- the Fire Dynamics Simulator (FDS) and the Clark coupled wildfire model, *Canadian Journal of Forest Research*, 36(11), 2894-2908, 2006
- 72] Adam Kochanski, Mary Ann Jenkins, Steven K. Krueger, William E. Mell and Randall J. McDermott, Capabilities of several models used for wildfire spread to simulate flow over Askervein Hill, *Journal of advances in modeling earth systems*, 2011
- 73] Adam K. Kochanski, Mary Ann Jenkins, Jan Mandel, Jonathan D. Beezley, Craig B. Clements and Steven Krueger, Evaluation of WRF-Sfire Performance with Field Observations from the FireFlux experiment, *Geosci. Model Dev.*, 6, 1109-1126, 2013, 2013
- 74] Colin C. Simpson, Marwan Katurji, Michael T. Kiefer, Shiyuan Zhong, Joseph J. Charney, Warren E. Heilman, and Xindi Bian, Atmosphere-fire simulation of effects of low-level jets on pyro-convective plume dynamics, 20th International Congress on Modelling and Simulation, Adelaide, Australia, 1-6 December 2013, 2013
- 75] Yu. I. Bondar, A. D. Navumau, A. N. Nikitin, J. Brown and M. Dowdall, Model assessment of additional contamination of water bodies as a result of wild fires in the Chernobyl exclusion zone, *Journal of Environmental Radioactivity* 138 (2014) 170-176, 2014
- 76] Yasushi Okano, Hidemasa Yamano, Forest fire propagation simulations for a risk assessment methodology development for a nuclear power plant, *Case Studies in Fire Safety* 4 (2015) 1-10, 2015
- 77] Yasushi Okano, Hidemasa Yamano, Numerical simulations of forest fire propagation and smoke transport as an external hazard assessment methodology development for a nuclear power plant, *Mechanical Engineering Journal Bulletin of the JSME Vol. 3, No. 3*, 2016, 2016
- 78] Brian J. Viner, Tim Jannik, Allan Hepworth, Olorunfemi Adetona, Luke Naeher, Teresa Eddy, Eric Doman and John Blake, Predicted cumulative dose to firefighters and the offsite public from natural and anthropogenic radionuclides in smoke from wildland fires at the Savannah River Site, South Carolina USA, *Journal of Environmental Radioactivity* 182 (2018) 1-11, 2018
- 79] Adam K. Kochanski, Farren Herron-Thorpe, Derek V. Mallia, Jan Mandel and Joseph K. Vaughan, Integration of a Coupled Fire-Atmosphere Model Into a Regional Air Quality Forecasting System for Wildfire Events, *Frontiers in Forests and Global Change*, 10 November 2021, 2021
- 80] KR Baker, SD Lee, P Lemieux, S Hudson et al., Predicting wildfire particulate matter and hypothetical re-emission of radiological Cs-137 contamination incidents, *Science of the Total Environment*, 795, 2021
- 81] M Talerko, I Kovalets, T Lev, Y Igarashi et al., Simulation study of radionuclide atmospheric transport after wildland fires in the Chernobyl Exclusion Zone in April 2020, *Atmospheric Pollution Research*, 2021
- 82] Rojas-Palma C, Aage H K, Astrup P, Bargholz K, IDrews M, Jrgensen H E, Korsbech U, Lauritzen B, Mikkelsen T and Thykier-Nielsen, Experimental evaluation of gamma fluence-rate predictions from Argon-41 releases to the atmosphere over a nuclear research reactor site, *Radiation protection dosimetry* 108 161-8, 2004
- 83] Dong Xie, Hanqing Wang, Kimberlee J. Kearfott, Modeling and experimental validation of the dispersion of ²²²Rn released from a uranium mine ventilation shaft, *Atmospheric Environment* 60 (2012) 453-459, 2012

- 86]Satoh D,Kojima K,Oizumi A,et al.,Development of a calculation system for the estimation of decontamination effects,*Journal of Nuclear Science and Technology*,51(5),656-670,2018
- 85]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
- 84]Satoh D,Nakayama H,Furuta T,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*.2021. DOI:10.1371/journal.pone.0245932.g011,2014
- 87]Hiromasa Nakayama,Daiki Satoh,Haruyasu Nagai & Hiroaki 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
- 88]S Di Sabatino,R Buccolieri,Recent advancements in numerical modelling of flow and dispersion in urban areas: a short review,*Int. J. Environment and Pollution*,52(3/4),2013
- 89]AWM Yazid,SM Salim,S Mansor,Numerical Simulation of Thermal Atmospheric Conditions in an Idealized Street Canyon: Comparison Between RANS and LES,*Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*,1(1),19-27,2014
- 90]Z Gao,R Bresson,Y Qu,M Milliez,C de Munck et al.,High resolution unsteady RANS simulation of wind,thermal effects and pollution dispersion for studying urban renewal scenarios in a neighborhood of Toulouse,*Urban Climate*,23,114-130,2018
- 91]Gryning,S.E.,and Lyck,E.,Atmospheric dispersion from elevated sources in an urban area: comparison between tracer experiments and model calculations,*Journal of Climate and Applied Meteorology*,Vol. 23:651-660,1984
- 92]K Imai,M Chino,H Ishikawa,SPEEDI: A computer code system for the real-time prediction of radiation dose to the public due to an accidental release,1985
- 93]R Lange,MH Dickerson,PH Gudiksen,Dose estimates from the Chernobyl accident,1987
- 94]HN Jow,JL Sprung,LT Ritchie,JA Rollstin,DI Chanin,MELCOR accident consequence code system (MACCS),1990
- 95]RA Pielke,WR Cotton,RL Walko,CJ Tremback et al.,A comprehensive meteorological modeling system-RAMS,*Meteorology and Atmospheric Physics*,49,69-91,1992
- 96]Hanna,S.R. Strimaitis,D.G. and Chang,J.C.,Hazard response modelling uncertainty (a quantitative method). Vol II - Evaluation of commonly used hazardous gas dispersion models,*Air Force Engineering & Services Center,Tyndall*,1993
- 97]Hanna,S.R.,Chang,J.C.,Strimaitis,D.G.,Hazardous gas model evaluation with field observations,*Atmospheric Environment* 27,,1993
- 98]G.A. Grell,J. Dudhia,D.R. Stauffer,A description of the Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5),*NCAR/TN-398 + STR NCAR TECHNICAL NOTE*,1994
- 99]Michael Pirhalla,David Heist,Steven Perry,Wei Tang, Lydia Brouwer, Simulations of dispersion through an irregular urban building array,,*Atmos Environ* (1994). August 01: 258 . Doi 10.1016/j.atmosenv.2021.118500.EPA Public Access Author manuscript,,1994

- 100]Francis S. Binkowski,Uma Shankar,The Regional Particulate Matter Model: 1. Model description and preliminary results,First published: 20 December 1995 <https://doi.org/10.1029/95JD02093>Citations: 442,1995
- 101]LDevell,S. Guntay,D.A. Powers,THE CHERNOBYL REACTOR ACCIDENT SOURCE TERM:DEVELOPMENT OF A CONSENSUS VIEW,NE-/CSNI/R(95)24,1995
- 102]Hall,R. C.,Evaluation of Model Uncertainty (EMU)-CFD modelling of near-field atmospheric dispersion. Project EMU Final Report. Tech. Rep. ,WS Atkins Doc No. WSA/AM5017/R7,European Commission,WS Atkins,Woodcote Grove,Ashley Road,Epsom,Surrey KT18 5BW,UK.,1997
- 103]A Stohl,M Hittenberger,G Wotawa,Validation of the Lagrangian particle dispersion model FLEXPART against large-scale tracer experiment data,Atmospheric Environment,1998
- 104]Graziani,G.,Galmarini,S.,Grippa,G.,and Klug,W.,Real-time long-range dispersion model evaluation of ETEX second release,EUR 17755 EN,Office for Official Publications of theEuropean Communities,Luxembourg,302 pp.,1998. 2798,2807,1998
- 105]JA Pudykiewicz,Application of adjoint tracer transport equations for evaluating source parameters,Atmospheric environment,1998
- 106]JP Lafore,J Stein,N Asencio,P Bougeault et al.,The Meso-NH atmospheric simulation system. Part I: Adiabatic formulation and control simulations,Annales Geophysicae,16,90-109,1998
- 107]M De Cort et al.,Atlas of caesium deposition on Europe after the Chernobyl accident,Luxembourg,Office for Official Publications of the European Communities,1998
- 108]Olesen,H.R.,Model validation kit-status and outlook . ,In proceedings of 5th International Conference on Harmonisation within atmospheric dispersion modelling for regulatory purposes,held on 18th to 21st May,1999 in Rhodes,Greece.,1998
- 109]RR Draxler,GD Hess,An overview of the HYSPLIT_4 modelling system for trajectories,Australian meteorological magazine,1998
- 110]D. W. BYUN and J. K. S. CHING(Ed.),Science Algorithms of the EPA Model-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) Modeling System,EPA/600/R-99/030 March 1999,1999
- 111]DF Brown,WE Dunn,MA Lazaro,AJ Policastro,The smoke-fireplume model: tool for eventual application to prescribed burns and wildland fires.,1999
- 112]RR Draxler,HYSPLIT4 users's guide,1999
- 113]S Thykier-Nielsen,S Deme,T Mikkelsen,Description of the atmospheric dispersion module RIMPUFF,Riso National Laboratory,1999
- 114]John S. Irwin,Statistical evaluation of centerline concentration estimates by atmospheric dispersion models,Int. J. Environment and Pollution,14(1-6),2000
- 115]JS Scire,DG Strimaitis,RJ Yamartino,A user's guide for the CALPUFF dispersion model,Earth Tech,Inc,2000
- 116]Mark A. Finney,Efforts at Comparing Simulated and Observed Fire Growth Patterns,Final Report 2/25/2000 INT-95066-RJVA,2000
- 117]NL Seaman,Meteorological modeling for air-quality assessments,Atmospheric environment,2000

- 118]VA Kashparov,SM Lundin,AM Kadygrib et al.,Forest fires in the territory contaminated as a result of the Chernobyl accident: radioactive aerosol resuspension and exposure of fire-fighters,Journal of Environmental Radioactivity,51,281-298,2000
- 119]VDI Guideline 3783/12,Physical modelling of flow and dispersion processes in the Atmospheric boundary layer,,Application of wind tunnels.,2000
- 120]C Monn,Exposure assessment of air pollutants: a review on spatial heterogeneity and indoor/outdoor/personal exposure to suspended particulate matter,nitrogen dioxide and ozon,Atmospheric environment,35,1-32,2001
- 121]C Yu,AJ Zielen,JJ Cheng,DJ LePoire et al.,User's manual for RESRAD version 6.,Environmental Assessment Division,Argonne National Laboratory,2001
- 122]CHRISTOPHER 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
- 123]Hanna,S.R.,Chang,J.C.,Use of the Kit Fox field data to analyze dense gas dispersion modelling issues. ,Atmospheric Environment 35,,2001
- 124]S Raasch,M Schroter,P3. 13 A LARGE-EDDY SIMULATION MODEL PERFORMING ON MASSIVELY PARALLEL COMPUTERS,15th Conference on Boundary Layer and Turbulence ,2001
- 125]Biltoft,C.A.,Yee,E. and Jones,C.D,Overview of the Mock Urban Setting Test (MUST),Proceedings of the Fourth Symposium on the Urban Environment. May 20-24,Norfolk,VA.,2002
- 126]Gryning,S.E.,and Lyck,E.,The Copenhagen Tracer Experiments: Reporting of Measurements,Ris-R-1054(rev.1)(EN),Riso National Laboratory,Roskilde,Denmark,75 pages.http://www.risoe.dk/rispubl/VEA/veapdf/ris-r-1054_rev1.pdf ,2002
- 127]Roland R. Draxler,Jerome L. Heffter,Glenn D. Rolph,DATEM:Data Archive of Tracer Experiments and Meteorology,NOAA Air Resources Laboratory,1315 East West Highway,Silver Spring,Maryland 20910,2002
- 128]Gryning,S-E.,E. Batchvarova,M. W. Rotach,A. Christen and R. Vogt,Roof-level SF6 tracer experiments in the city of Basel,Draft Summary 72 pages. <http://www.unibas.ch/geo/mcr/Projects/BUBBLE/index.htm> ,2003
- 129]Janice L. Coen,SIMULATION OF WILDFIRE INCIDENTS USING COUPLED ATMOSPHERE-FIRE MODELING,Environmental Science,2003
- 130]JC Lin,C Gerbig,SC Wofsy et al.,A near - field tool for simulating the upstream influence of atmospheric observations: The Stochastic Time - Inverted Lagrangian Transport (STILT) model,JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH,108(D16),4493,2003
- 131]John S. Irwin,David Carruthers,Jenny Stocker and James Paumier,Application of ASTM D6589 to evaluate dispersion model performance,Int. J. Environment and Pollution,Vol. 20,Nos. 1-6,2003,2003
- 132]MP Johansen,TE Hakonson et al.,Pulsed redistribution of a contaminant following forest fire: Cesium - 137 in runoff,Journal of Environmental Quality,32,2150-2157,2003
- 133]P Seibert,A Frank,Source-receptor matrix calculation with a Lagrangian particle dispersion model

- in backward mode, *Atmos. Chem. Phys. Discuss*, 2003
- 134] S Vardoulakis, BEA Fisher, K Pericleous et al., Modelling air quality in street canyons: a review, *Atmospheric environment*, 37(2), 155-182, 2003
- 135] T Sax, FINAL REPORT FOR BARRIO LOGAN MEASUREMENT STUDY, 2003
- 136] U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, A Program for the Statistical Evaluation of Point Source Dispersion Models Using ASTM D 6589, 2003
- 137] M P Ireland et al., Guidelines for the Preparation of Dispersion Modelling Assessments for Compliance with Regulatory Requirements - an Update to the 1995 Royal Meteorological Society Guidance. ,ADMLC (2004) Available from: <https://admlc.com/model-guidelines/>, 2004
- 138] Chip Lagdon, Software Quality Assurance Improvement Plan: ALOHA Gap Analysis. , Office of Environment, Safety and Health; U.S. Department of Energy, Washington. EH-4.2.1.3., 2004
- 139] Ralph Gailis, Wind Tunnel Simulations of the Mock Urban Setting Test - Experimental Procedures and Data Analysis, DSTO-TR-1532 CBRN Defence Centre Platforms Sciences Laboratory, Defence Science and Technology Organisation, Department of Defence, Australian Government, 2004
- 140] JJ Kim, JJ Baik, A numerical study of the effects of ambient wind direction on flow and dispersion in urban street canyons using the RNG k- ϵ turbulence model, *Atmospheric Environment*, 2004
- 141] M. W. Rotach, S.-E. Gryning, E. Batchvarova, A. Christen, and R. Vog, Pollutant dispersion close to an urban surface - the BUBBLE tracer experiment, *Meteorol Atmos Phys* 87, 39-56 (2004) DOI 10.1007/s00703-003-0060-9, 2004
- 142] Mark A. Finney, FARSITE: Fire Area Simulator-Model Development and Evaluation, Rocky Mountain Research Station, Research Paper, RMRS-RP-4 Revised, 2004
- 143] P Seibert, A Frank, Source-receptor matrix calculation with a Lagrangian particle dispersion model in backward mode, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2004
- 144] R Bianconi, S Galmarini, R Bellasio, Web-based system for decision support in case of emergency: ensemble modelling of long-range atmospheric dispersion of radionuclides, *Environmental Modelling & Software*, 2004
- 145] S Galmarini, R Bianconi, R Addis et al., Ensemble dispersion forecasting-Part II: Application and evaluation, *Atmospheric Environment*, 38, 4619-4632, 2004
- 146] Terry L. Clark, Janice Coen and Don Latham, Description of a coupled atmosphere-fire model, *International Journal of Wildland Fire*, 13, 49-63, 2004
- 147] Thykier-Nielsen, S., Deme, S., and Mikkelsen, T., RIMPUFF Atmospheric Dispersion Module, Riso National Laboratory, 2004
- 148] Steven R. Hanna, Olav R. Hansen and Seshu Dharmavaram, FLACS CFD air quality model performance evaluation with Kit Fox, MUST, Prairie Grass and EMU observations. , *Atmospheric Environment*, 38, 2004
- 149] A Stohl, C Forster, A Frank, P Seibert et al., The Lagrangian particle dispersion model FLEXPART version 6.2, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 5, 2461-2474, 2005
- 150] AJ Cimorelli, SG Perry, A Venkatram et al., AERMOD: A dispersion model for industrial source

applications. Part I: General model formulation and boundary layer characterization, *JOURNAL OF APPLIED METEOROLOGY*, 44, 682, 2005

151] Hung-Neng S. Chin, Martin J. Leach, Gayle A. Sugiyama, John M. Leone Jr., Hoyt Walker, J. S. Nasstrom, and Michael J. Brown, Evaluation of an Urban Canopy Parameterization in a Mesoscale Model Using VTMX and URBAN 2000 Data, *AMS Journals/Monthly Weather Review*, 133(7), 2043-2068, 2005

152] JL Santiago, F Martin, Modelling the air flow in symmetric and asymmetric street canyons, 9th Int. Conf. on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, 2005

153] K.L. Clawson, R.G. Carter, D.J. Lacroix, C.A. Biltoft, N.F. Hukari, R.C. Johnson, J.D. Rich, S.A. Beard, T. Strong, JOINT URBAN 2003 (JU03) SF6 ATMOSPHERIC TRACER FIELD TESTS, NOAA Technical Memorandum OAR ARL-254, NOAA Field Research Laboratory, Idaho Falls, Idaho, 2005

154] Mark W. Eltgroth, Ron Petersen, James Sanders, Validation of the CHARM- Software Module Including Near-Field Dispersion With Varying Roughness, Air & Waste Management Association's 98th Annual Conference & Exhibition, Minneapolis, Minnesota, 2005

155] MW Rotach, R Vogt, C Bernhofer et al., BUBBLE-an urban boundary layer meteorology project, *Theoretical and Applied Climatology*, 81, 231-261, 2005

156] SS Raza, M Iqbal, Atmospheric dispersion modeling for an accidental release from the Pakistan Research Reactor-1 (PARR-1), *Annals of nuclear energy*, 2005

157] T Takemura, T Nozawa, S Emori et al., Simulation of climate response to aerosol direct and indirect effects with aerosol transport - radiation model, *Journal of Geophysical Research*, 110, D02202, 2005

158] William Mell, Joseph J. Charney, Mary Ann Jenkins, Phil Cheney and Jim Gould, Numerical simulations of grassland fire behavior from the LANL - FIRETEC and NIST - WFDS models, East FIRE Conference, May 11- 13, 2005, 2005

159] Byun, D.W. and Schere, K.L., A Review of the Governing Equations, Computational Algorithms, and Other Components of the Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) Modeling System, Mar-06 *Applied Mechanics Reviews*-59(2):51-77, 2006

160] CC Douglas, JD Beezley, J Coen, D Li, W Li et al., Demonstrating the validity of a wildfire DDDAS, ICCS 2006, Part 3, 2006

161] HANNA, S.R., M.J. BROWN, F.E. CAMELLI, S.T. CHAN, W.J. COIRIER, S. KIM, O.R. HANSEN, A.H. HUBER and R.M. REYNOLDS. , Detailed simulations of atmospheric flow and dispersion in downtown Manhattan: An application of five computational fluid dynamics models. , *Bulletin of the American Meteorological Society*., 2006

162] J Cuxart, AAM Holtslag, RJ Beare, E Bazile et al., Single-column model intercomparison for a stably stratified atmospheric boundary layer, *Boundary-Layer Meteorology*, 118, 273-303, 2006

163] J Mandel, LS Bennethum, JD Beezley, JL Coen et al., A wildfire model with data assimilation, UCDHSC/CCM Report, 233, 2006

164] M Sofiev, P Siljamo, H Ranta et al., Towards numerical forecasting of long-range air transport of birch pollen: theoretical considerations and a feasibility study, *International journal of Biometeorol*, 2006

165] NS Holmes, L Morawska, A review of dispersion modelling and its application to the dispersion of

- particles: An overview of different dispersion models available, *Atmospheric environment*, 2006
- 166]RJ Beare, MK Macvean, AAM Holtslag, J Cuxart et al., An intercomparison of large-eddy simulations of the stable boundary layer, *Boundary-Layer Meteorology*, 118(2), 247-272, 2006
- 167]Ruiyu Sun and Steven K. Krueger and Mary Ann Jenkins and William Mell and Joseph J. Charney, AN EVALUATION OF FDS AND CLARK COUPLED WILDFIRE MODEL, 17th Symposium on Boundary Layers and Turbulence, 2006
- 168]Ruiyu Sun, Steven K. Krueger, Michael A. Zulauf, Mary Ann Jenkins and Joseph J. Charney, WILDFIRE EVOLUTION IN THE CONVECTIVE BOUNDARY LAYER, 2006
- 169]S Sklavounos, F Rigas, Simulation of Coyote series trials-Part I:: CFD estimation of non-isothermal LNG releases and comparison with box-model predictions, *Chemical Engineering Science*, 2006
- 170]STEVE WARNER, NATHAN PLATT, AND JAMES F. HEAGY, JASON E. JORDAN, GEORGE BIEBERBACH, Comparisons of Transport and Dispersion Model Predictions of the Mock Urban Setting Test Field Experiment, *JOURNAL OF APPLIED METEOROLOGY AND CLIMATOLOGY VOLUME 45*, pp1414, (Manuscript received 8 October 2005, in final form 10 February 2006), 2006
- 171]SV Musolino, FT Harper, Emergency response guidance for the first 48 hours after the outdoor detonation of an explosive radiological dispersal device, *Health Physics*, 2006
- 172]VI Yoschenko, VA Kashparov, SE Levchuk et al., Resuspension and redistribution of radionuclides during grassland and forest fires in the Chernobyl exclusion zone: part II. Modeling the transport process, *Journal of Environmental Radioactivity*, 87, 260-278, 2006
- 173]W Tang, A Huber, B Bell, W Schwarz, J1. 8 APPLICATION OF CFD SIMULATIONS FOR SHORT-RANGE ATMOSPHERIC DISPERSION OVER OPEN FIELDS AND WITHIN ARRAYS OF BUILDINGS, AMS 14th Joint Conference on the Applications of Air Pollution Meteorology with the A&WMA, 2006
- 174]WD Collins, PJ Rasch, BA Boville, JJ Hack et al., The formulation and atmospheric simulation of the Community Atmosphere Model version 3 (CAM3), *Journal of Climate*, 19, 2144, 2006
- 175]A Baklanov, O Hanninen, LH Slordal et al., Integrated systems for forecasting urban meteorology, air pollution and population exposure, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7, 855-874, 2007
- 176]A Hodzic, S Madronich, B Bohn et al., Wildfire particulate matter in Europe during summer 2003: meso-scale modeling of smoke emissions, transport and radiative effects, *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 7, 4705-4760, 2007
- 177]A Silva Lopes, J Palma, FA Castro, Simulation of the Askervein flow. Part 2: Large-eddy simulations, *Boundary-Layer Meteorology*, 2007
- 178]A. Hodzic, S. Madronich, B. Bohn, S. Massie, L. Menut, and C. Wiedinmyer, [PDF] Wildfire particulate matter in Europe during summer 2003: meso-scale modeling of smoke emissions, transport and radiative effects, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2007
- 179]A.L. Sullivan, A review of wildland fire spread modelling, 1990-present, 1: Physical and quasi-physical models, arXiv:0706.3074v1 [physics.geo-ph] 21 Jun 2007, 2007
- 180]A.L. Sullivan, A review of wildland fire spread modelling, 1990-present, 2: Empirical and quasi-

- empirical models,arXiv:0706.4128v1 [physics.geo-ph] 28 Jun 2007,2007
- 181]A.L. Sullivan,A review of wildland fire spread modelling,1990-present,3: Mathematical analogues and simulation models,arXiv:0706.4130v1 [physics.geo-ph] 28 Jun 2007,2007
- 182]B Blocken,T Stathopoulos,J Carmeliet,CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems,Atmospheric environment,2007
- 183]CS Witham,MC Hort,R Potts et al.,Comparison of VAAC atmospheric dispersion models using the 1 November 2004 Grimsvotn eruption,METEOROLOGICAL APPLICATIONS,14,27-38,2007
- 184]D Morvan,A numerical study of flame geometry and potential for crown fire initiation for a wildfire propagating through shrub fuel,International Journal of Wildland Fire,2007
- 185]D Sowby,M Thorne,BA Bridges,The Windscale reactor accident-50 years on,Journal of Radiological Protection,27,211-215,2007
- 186]E Demael,B Carissimo,LOCAL ATMOSPHERIC DISPERSION MODELLING OF TRACE CONSTITUENTS ISSUED FROM A NUCLEAR POWER PLANT: A COMPARISON USING A CFD CODE AND ADMS WITH WIND TUNNEL DATA,Proceedings of the 11th International Conference on Harmonisation within Atmospheric dispersion models for regulatory purposes.,2007
- 187]Hill.R.,et.al.,Field and wind tunnel evaluation of CFD model predictions of local dispersion from an area source on a complex industrial site.,Proceedings of the 11th International Conference on Harmonisation within Atmospheric dispersion models for regulatory purposes.,2007
- 188]JL Santiago,A Martilli,F Martin,CFD simulation of airflow over a regular array of cubes. Part I: Three-dimensional simulation of the flow and validation with wind-tunnel measurements,Boundary-layer meteorology,2007
- 189]JS Nasstrom,G Sugiyama,RL Baskett et al.,The National Atmospheric Release Advisory Center modelling and decision-support system for radiological and nuclear emergency preparedness and response,International Journal of Emergency Management (IJEM) Special Issue,2007
- 190]NS Dixon,AS Tomlin,Evaluation of a lagrangian model for predicting concentration fluctuations in urban areas,Proceedings of the 11th International Conference on Harmonisation within Atmospheric dispersion models for regulatory purposes.,2007
- 191]P Pecha,R Hofman,E Pechova,Training simulator for analysis of environmental consequences of accidental radioactivity releases,Proc. EUROSIM,2007
- 192]Patricia L. Andrews,BehavePlus FIRE MODELING SYSTEM: PAST,PRESSENT,AND FUTURE,Proceedings of 7th symposium on fire and forest,2007 - ams.confex.com,2007
- 193]Robert A. Mickler,Miriam Rorig,Christopher D. Geron,Gary L. Achtemier,Andrew D. Bailey,Candice Krull,and David Brownlie,Development and Demonstration of Smoke Plume,Fire Emissions,and Pre- and Postprescribed Fire Fuel Models on North Carolina Coastal Plain Forest Ecosystems,USDA Forest Service Proceedings RMRS-P-46CD. 2007.,2007
- 194]V Mallet,D Quelo,B Sportisse et al.,The air quality modeling system Polyphemus,Atmospheric Chemistry and Physics,7,5479-5487,2007
- 195]Y Tominaga,T Stathopoulos,Turbulent Schmidt numbers for CFD analysis with various types of

- flowfield, *Atmospheric Environment*, 41, 8091-8099, 2007
- 196] A Bytnerowicz, MJ Arbaugh, C Andersen et al., Integrating research on wildland fires and air quality: needs and recommendations, *Developments in Environmental Science*, 8, 585, 2008
- 197] Alberto Mazzoldi, Tim Hill, Jeremy J. Colls, CFD and Gaussian atmospheric dispersion models: A comparison for leak from carbon dioxide transportation and storage facilities, *Atmospheric Environment*, 1-9, 2008
- 198] B Porterie, A Kaiss, JP Clerc, L Zekri et al., Universal scaling in wildfire fractal propagation, *Applied Physics Letters*, 93, 2008
- 199] B Szintai, P Kaufmann, TKE as a measure of turbulence, *COSMO Newsletter*, 8, 2008
- 200] D Morvan, Physical phenomena in wildfire modelling, *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 2008
- 201] EE Remsberg, BT Marshall et al., Assessment of the quality of the Version 1.07 temperature - versus - pressure profiles of the middle atmosphere from TIMED/SABER, *Journal of Geophysical Research*, 113, 2008
- 202] Eugene Yee, Fue-Sang Lien, Andrew Keats, Re'al D'Amours, Bayesian inversion of concentration data: Source reconstruction in the adjoint representation of atmospheric diffusion, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96, 1805-1816, 2008
- 203] George C. Efthimiou, John G. Bartzis, Spyros Andronopoulos and Thanasis Sfetsos, MODELLING THE CONCENTRATION FLUCTUATION AND INDIVIDUAL EXPOSURE IN COMPLEX URBAN ENVIRONMENTS, *Croatian Meteorological Journal*, 43(1), 2008
- 204] J Mandel, LS Bennethum, JD Beezley, JL Coen et al., A wildland fire model with data assimilation, *UCDHSC/CCM Report*, No. 233, 2008
- 205] Jacques NICOLAS, Anne-Claude ROMAIN, Julien DELVA, Catherine COLLART, Vincent LEBRUN, Odour annoyance assessment around landfill sites: methods and results, 2008
- 206] Mazzoldi, A., et al., CFD and Gaussian atmospheric dispersion models: A comparison of leak from carbon di oxide transporatation and storage facilities, *Atmospheric Environment*, 42(34), 8046-8054, 2008
- 207] 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
- 208] SD Sabatino, R Buccolieri, B Pulvirenti, RE Britter, Flow and pollutant dispersion in street canyons using FLUENT and ADMS-Urban, *Environmental Modeling and Assessment*, 13, 369-381, 2008
- 209] T Markkanen et al., 2.6 FOOTPRINT MODEL PERFORMANCE UNDER INHOMOGENEOUS FLOW CONDITIONS, 28th Conference on Agricultural and Forest Meteorology, 2008
- 210] T Tamura, Towards practical use of LES in wind engineering, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96, 1451-1471, 2008
- 211] T Vesala, N Kljun, U Rannik, J Rinne, A Sogachev et al., Flux and concentration footprint modelling: State of the art, *Environmental Polution*, 152(3), 653-666, 2008
- 212] WC Skamarock, JB Klemp, A time-split nonhydrostatic atmospheric model for weather research and

- forecasting applications, *Journal of computational physics*, 227, 3465-3485, 2008
- 213] William C. Skamarock, Joseph B. Klemp, Jimmy Dudhia, David O. Gill, Dale M. Barker, Michael G. Duda, Xiang-Yu Huang, Wei Wang and Jordan G. Powers, A Description of the Advanced Research WRF Version 3, NCAR/TN-475+STR NCAR TECHNICAL NOTE, 2008
- 214] XX Li, CH Liu, DYC Leung, Large-eddy simulation of flow and pollutant dispersion in high-aspect-ratio urban street canyons with wall model, *Boundary-Layer Meteorology*, 2008
- 215] K He, RM Yantosca, P Le Sager, Regional CO pollution and export in China simulated by the high-resolution nested-grid GEOS-Chem model, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9, 3825-3839, 2009
- 216] C Gorle, J Van Beeck, P Rambaud, G Van Tendeloo, CFD modelling of small particle dispersion: the influence of the turbulence kinetic energy in the atmospheric boundary layer, *Atmospheric Environment*, 43, 673-681, 2009
- 217] C Perrino, S Canepari, M Catrambone et al., Influence of natural events on the concentration and composition of atmospheric particulate matter, *Atmospheric Environment*, 43, 4766-4779, 2009
- 218] DM Moreira, MT Vilhena, D Buske, T Tirabassi, The state-of-art of the GILTT method to simulate pollutant dispersion in the atmosphere, *Atmospheric Research*, 2009
- 219] I Sladek, K Kozel, Z Janour, On the 2D-validation study of the atmospheric boundary layer flow model including pollution dispersion, *Engineering Mechanics*, 2009
- 220] Jean Baptiste Filippi, Frédéric Bosseur, Céline Mari, Christine Lac, Patrick Le Moigne, Bénédicte Cuenot, Denis Veynante, Daniel Cariolle and Jacques-Henri Balbi, Coupled Atmosphere-Wildland Fire Modelling, *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 1(11), 2009
- 221] Jean-Marie Libre, Amita Tripathi, Malo Le Guellec, Thibault Mailliard, Stéphanie Guérin, Claude Souprayen, Aldo Castellari, Real Time Simulation of the Dispersion of Accidental Emission Release of Hazardous Substance on Industrial Site Using 3D Modelling, *International Petroleum Technology Conference*, IPTC-13851-PP, 2009
- 222] JH Balbi, F Morandini, X Silvani, JB Filippi, F Rinieri, A physical model for wildland fires, *Combustion and Flame*, 156(12), 2217-2230, 2009
- 223] Jon E. Keeley, Fire intensity, fire severity and burn severity: a brief review and suggested usage, *International Journal of Wildland Fire*, 18, 116-126, 2009
- 224] Jose Luis Santiago, Anne Dejoan, Alberto Martilli, Fernando Martín, Alfredo Pinelli, LES AND RANS SIMULATIONS OF THE MUST EXPERIMENT STUDY OF INCIDENT WIND DIRECTION EFFECTS ON THE FLOW AND PLUME DISPERSION, *The seventh International Conference on Urban Climate*, 2009
- 225] LG Mastin, M Guffanti, R Servranckx, P Webley et al., A multidisciplinary effort to assign realistic source parameters to models of volcanic ash-cloud transport and dispersion during eruptions, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 186(1-2), 10-21, 2009
- 226] M Kiša, L Jelemenský, CFD dispersion modelling for emergency preparedness, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 22, 97-104, 2009
- 227] Mary Ann Jenkins, Sangay Bhutia and Ruiyu Sun, IMPACTS OF FIRE/ATMOSPHERE COUPLING

- AND BOUNDARY-LAYER TURBULENCE ON FIREBRAND PROPAGATION,<https://ams.confex.com-ams-pdfpapers>,2009
- 228]Nakanishi,M. and Niino,H.,Development of an Improved Turbulence Closure Model for the Atmospheric Boundary Layer,*J. Meteor. Soc. Jpn.*,87,895-912,2009
- 229]P Webley,L Mastin,Improved prediction and tracking of volcanic ash clouds,*Journal of Volcanology and Geothermal Research*,2009
- 230]Q Yang,J Zhang,Simulation of horizontally homogeneous atmosphere boundary layer based on k-ε variant models combined with modified wall functions,*Wind Engineering*,2009
- 231]R.P. Donnelly,T.J. Lyons,T. Flassak,,Evaluation of results of a numerical simulation of dispersion in an idealised urban area for emergency response modelling,*Atmospheric Environment*,volume 43,Issue 29,September 2009,PP4416-4423,2009
- 232]Ruiyu Sun,Steven K. Krueger,Mary Ann Jenkins,Michael A. Zulauf and Joseph J. Charney,Theimportanceoffire-atmospherecouplingandboundary-layer-turbulencetowildfirespread,*International Journal of Wildland Fire* 2009,18,50-60,2009
- 233]S Hoe,P McGinnity,T Charnock,F Gering et al.,ARGOS decision support system for emergency management,*Argentine Radiation Protection Society*,2009
- 234]Sharad Tripathi,Lobnat Ait Hamou,Malo Leguellec and Claude Souprayen,REAL TIME FOLLOWUP OF LEAKS AND DISPERSION ACCIDENTS,SYMPOSIUM SERIES NO.155,Hazards XXI # 2009 IChemE,2009
- 235]SR Freitas,KM Longo,MAF Silva Dias et al.,The coupled aerosol and tracer transport model to the Brazilian developments on the regional atmospheric modeling system (CATT-BRAMS)-Part 1: Model description and evaluation,*Atmospheric Chemistry and Physics*,9,2843-2861,2009
- 236]Y Thiry,C Colle,V Yoschenko,S Levchuk et al.,Impact of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) plantings on long term ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr recycling from a waste burial site in the Chernobyl Red Forest,*Journal of Environmental Radioactivity*,100,1062-1068,2009
- 237]ZT Xie,IP Castro,Large-eddy simulation for flow and dispersion in urban streets,*Atmospheric Environment*,2009
- 238]A Parente,C Benocci,On the RANS simulation of neutral ABL flows,*The Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2010)*,2010
- 239]F Vendel,G Lamaison,L Soulhac,P Volta et al.,Modelling diabatic atmospheric boundary layer using a RANS CFD code with k-ε turbulence closure,13th Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes,2010
- 240]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
- 241]HJS Fernando,JC Weil,Whither the stable boundary layer- A shift in the research agenda,*Bulletin of the American Meteorological Society*,2010
- 242]IR Ajayi,AT Raji,Evaluation of the ¹³⁷Cs activity-depth profiles by the diffusion-convection

- model, Intern J Phys Sci, 2010
- 243] Jean-Marie Libre, Amita Tripathi, Malo Le Guellec, Thibault Mailliard, Stéphanie Guérin, Claude Souprayen, Aldo Castellari, Dispersion of Accidental Release of H₂S on a Gas production site followed in real-time by 3D modelling, FABIG Newsletter Issue 55-May 2010, 2010
- 244] Jean-Marie Libre, Malo Le Guellec, Amita Tripathi, Thibault Mailliard, Stéphanie Guérin, Claude Souprayen, Aldo Castellari., SOURCE DETERMINATION IN CONGESTED ENVIRONMENT THROUGH BAYESIAN INFERENCE, Harmo 13, Réf Paper H13-191, 2010
- 245] LE Pagano, A Comparative Study between FLEXPART-WRF and HYSPLIT in an Operational Setting: Analysis of Fire Emissions across complex geography using WRF, 2010
- 246] LT Molina, S Madronich, JS Gaffney et al., An overview of the MILAGRO 2006 Campaign: Mexico City emissions and their transport and transformation, Atmospheric Chemistry and Physics, 10, 8697-8760, 2010
- 247] M Calaf, C Meneveau, J Meyers, Large eddy simulation study of fully developed wind-turbine array boundary layers, Physics of fluids, 2010
- 248] Nakayama H, Nagai H., Large-Eddy Simulation on turbulent flow and plume dispersion over a 2-dimensional hill, Advances in Science and Research. 2010;4(1):71-76., 2010
- 249] T Heus, CC van Heerwaarden et al., Formulation of the Dutch Atmospheric Large-Eddy Simulation (DALES) and overview of its applications, Geoscientific Model Development, 3, 415-444, 2010
- 250] Tateki Mizuno, Hiroaki Kondo, Kenji Horiuchi, Yoneko Hiranod, Norihisa Maeyamaa, Kazuhiko Ogatae and Satoru Iizuka, Investigation of the Applicability of DiMCFD to Atmospheric Environmental Assessment, The Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2010), Chapel Hill, North Carolina, USA May 23-27, 2010, 2010
- 251] Y Liu, J Stanturf, S Goodrick, Wildfire potential evaluation during a drought event with a regional climate model and NDVI, Ecological Informatics, 2010
- 252] Y Rastigejev, R Park, MP Brenner, DJ Jacob, Resolving intercontinental pollution plumes in global models of atmospheric transport, Journal of Geophysical Research , 115, D02302, 2010
- 253] Y Tominaga, T Stathopoulos, Numerical simulation of dispersion around an isolated cubic building: model evaluation of RANS and LES, Building and Environment, 2010
- 254] A Parente, C Gorle, J van Beeck, C Benocci, A comprehensive modelling approach for the neutral atmospheric boundary layer: consistent inflow conditions, wall function and turbulence model, Boundary-layer meteorology, 2011
- 255] A Parente, C Gorle, J Van Beeck, C Benocci, Improved k-ε model and wall function formulation for the RANS simulation of ABL flows, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 99(4), 267-278, 2011
- 256] A Stohl, AJ Prata, S Eckhardt, L Clarisse et al., Determination of time- and height-resolved volcanic ash emissions and their use for quantitative ash dispersion modeling: the 2010 Eyjafjallajökull eruption, Atmospheric Chemistry and Physics, 11, 4333-4351, 2011
- 257] AA Baklanov, B Grisogono, R Bornstein, L Mahrt et al., The nature, theory, and modeling of atmospheric

- planetary boundary layers, *Bulletin of the AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY*, 2011
- 258] Alberto Mazzoldi and Curtis M. Oldenburg, *Leakage Risk Assessment of CO₂ Transportation by Pipeline at the Illinois Basin Decatur Project*, Decatur, Illinois, Lawrence Berkeley National Laboratory, 2011
- 259] B Blocken, T Stathopoulos, J Carmeliet, J Hensen, *Application of computational fluid dynamics in building performance simulation for the outdoor environment: an overview*, *Journal of Building Performance Simulation*, 4(2), 157-184, 2011
- 260] C McLean, Y T Lee, S Jain, C Hutchigs, *Modeling and Simulation of Hazardous Material Releases for Homeland Security Applications*, National Institute of Standards and Technology, NISTIR 7786, 2011
- 261] D Morvan, *Physical phenomena and length scales governing the behaviour of wildfires: a case for physical modelling*, *Fire technology*, 2011
- 262] Dominique Morvana, Chad Hoffman, Francisco Rego and William Mell, *Numerical simulation of the interaction between two firefronts in grassland and shrubland*, *Fire Safety Journal* 46 (2011) 469-479, 2011
- 263] G Grell, SR Freitas, M Stuefer, J Fast, *Inclusion of biomass burning in WRF-Chem: impact of wildfires on weather forecasts*, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11, 5289-5303, 2011
- 264] G Nikulin, E Kjellstro M, ULF Hansson et al., *Evaluation and future projections of temperature, precipitation and wind extremes over Europe in an ensemble of regional climate simulations*, *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 63A, 41-55, 2011
- 265] J. Mandel, J. D. Beezley, and A. K. Kochanski, *Coupled atmosphere-wildland fire modeling with WRF 3.3 and SFIRE 2011*, *Geosci. Model Dev.*, 4, 591-610, 2011, 2011
- 266] Jan Mandel Jonathan D. Beezley and Adam K. Kochanski, *An overview of the coupled atmosphere-wildland fire model WRF-Fire*, Paper J7.1, 91st American Meteorological Society Annual Meeting, Seattle, WA, January 2011., 2011
- 267] Jan Mandel, Jonathan D. Beezley, and Adam K. Kochanski, *Coupled atmosphere-wildland fire modeling with WRF-Fire version 3.3*, arXiv:1102.1343v3 [physics.ao-ph] 10 Mar 2011, 2011
- 268] Jean-Baptiste Filippi, Frédéric Bosseur, Xavier Pialat and Paul-Antoine Santoni, *Simulation of coupled fire/atmosphere interaction with the MesoNH-ForeFire models.*, *Journal of Combustion* 2011 (2011) Article ID 540390, 13 pages, 2011
- 269] Jean-Marie Libre, Stéphanie Guérin, Brahim Konaté, Aldo Castellari, Cédric Mames, Malo Le Guellec, Thibault Mailliard, Amita Tripathi, Claude Souprayen, Olivier Connan, C. Leroy, P. Laguionie, P. Defenouillère, B. Letellier, D. Hébert, Denis Maro, *VALIDATION CAMPAIGN OF A CFD TOOL ON A PETROCHEMICAL SITE WITH WIND FLUCTUATIONS INTEGRATION*, 14th Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, 2-6 October 2011, Kos, Greece, 2011
- 270] JM Stockie, *The mathematics of atmospheric dispersion modeling*, *Siam Review*, 53(2), 2011
- 271] M Chavez, B Hajra, T Stathopoulos, A Bahloul, *Near-field pollutant dispersion in the built environment by CFD and wind tunnel simulations*, *Journal of Wind Engineering and Industrial*

Aerodynamics,99(4),330-339,2011

272]Malo LE GUELLEC,Patrick ARMAND,Guillaume VATON,Claude SOUPRAYEN,TOXIC RELEASE EVENT RECONSTRUCTION IN A RAIL STATION BY CFD SIMULATIONS AND BAYESIAN INFERENCE,Harmo 14,Réf Paper H14-206,2011

273]Michael Schatzmann and Rex Britter,Quality assurance and improvement of micro-scale meteorological models,Int. J. Environment and Pollution,44(1-4),139-146,2011

274]N Huneeus,M Schulz,Y Balkanski et al.,Global dust model intercomparison in AeroCom phase I,Atmospheric Chemistry and Physics,11,7781-7816,2011

275]P Gousseau,B Blocken,T Stathopoulos et al.,CFD simulation of near-field pollutant dispersion on a high-resolution grid: A case study by LES and RANS for a building group in downtown Montreal,Atmospheric Environment,45,428-438,2011

276]RL Lozano,MA Hernandez-Ceballos,JA Adame et al.,Radioactive impact of Fukushima accident on the Iberian Peninsula: evolution and plume previous pathway,Environment International,37,1259-1264,2011

277]S Zibtsev,CD Oliver et al.,Wildfires risk reduction from forests contaminated by radionuclides: a case study of the Chernobyl nuclear power plant exclusion zone,The 5th International Wildland Fire Conference,2011

278]SJ Melles,GBM Heuvelink,CJW Twenhofel et al.,Optimizing the spatial pattern of networks for monitoring radioactive releases,Computers & Geosciences,37(3),280-288,2011

279]SM Salim,KC Ong,SC 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

280]SM Salim,SC Cheah,A Chan,Numerical simulation of dispersion in urban street canyons with avenue-like tree plantings: comparison between RANS and LES,Building and Environment,46(9),1735-1746,2011

281]T Takemura,H Nakamura,M Takigawa,H Kondo et al.,A numerical simulation of global transport of atmospheric particles emitted from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant,Sola,7,101-104,2011

282]TJ Yasunari,A Stohl,RS Hayano et al.,Cesium-137 deposition and contamination of Japanese soils due to the Fukushima nuclear accident, Proceedings of the National Academy of Sciences(PNAS),108(49),2011

283]Vendel et al,Validation of the safety lagrangian atmospheric model (SLAM) against a wind tunnel experiment over an industrial complex area,14th Conference on harmonisation within atmospheric dispersion modelling for regulatory purposes,2011

284]Y Morino,T Ohara,M Nishizawa,Atmospheric behavior,deposition,and budget of radioactive materials from the Fukushima Daiichi nuclear power plant in March 2011,Geophysical research letters,2011

285]ZL Gu,YW Zhang,Y Cheng,SC Lee,Effect of uneven building layout on air flow and pollutant dispersion in non-uniform street canyons,Building and Environment,2011

- 286]A Hiyama,C Nohara,S Kinjo,W Taira,S Gima et al.,The biological impacts of the Fukushima nuclear accident on the pale grass blue butterfly,Scientific reports,2,570,2012
- 287]A Hohl,A Niccolai,C Oliver,D Melnychuk et al.,The human health effects of radioactive smoke from a catastrophic wildfire in the Chernobyl Exclusion Zone: a worst case scenario,J. of Earth Bioresources and Life Quality,1,1-34,2012
- 288]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
- 289]C Bonadonna,A Folch,S Loughlin,H Puempel,Future developments in modelling and monitoring of volcanic ash clouds: outcomes from the first IAVCEI-WMO workshop on Ash Dispersal Forecast and Civil Aviation,Bulletin of volcanology,74,1-10,2012
- 290]C Witham,H Webster,M Hort,A Jones,D Thomson,Modelling concentrations of volcanic ash encountered by aircraft in past eruptions,Atmospheric Environment,48,219-229,2012
- 291]D.C.Wong1,J.Pleim,R.Mathur,F.Binkowski,T.Otte,R.Gilliam,G.Pouliot,A.Xiu,J.O.Young,and D.Kang,WRF-CMAQ two-way coupled system with aerosol feedback:software development and preliminary results,Geosci. Model Dev.,5,299-312,2012
- 292]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 Radioactivity,111,2-12,2012
- 293]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 term estimation and local-scale atmospheric dispersion in early phase of the accident,Journal of Environmental Radioactivity,109,103-113,2012
- 294]G Kirchner,P Bossew,M De Cort,Radioactivity from Fukushima Dai-ichi in air over Europe; part 2: what can it tell us about the accident?,Journal of Environmental Radioactivity,114,35-40,2012
- 295]H Haba,J Kanaya,H Mukai,T Kambara,M Kase,One-year monitoring of airborne radionuclides in Wako,Japan,after the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident in 2011,Geochemical Journal,46,271-278,2012
- 296]H Kato,Y Onda,T Gomi,Interception of the Fukushima reactor accident - derived¹³⁷Cs,¹³⁴Cs and ¹³¹I by coniferous forest canopies,Geophysical research letters,39(20),2012
- 297]H Terada,G Katata,M Chino,H Nagai,Atmospheric discharge and dispersion of radionuclides during the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident. Part II: verification of the source term and analysis of regional-scale atmospheric dispersion,Journal of Environmental Radioactivity,112,141-154,2012
- 298]J Lelieveld,D Kunkel et al.,Global risk of radioactive fallout after major nuclear reactor accidents,Atmospheric Chemistry and Physics,12,4245-4258,2012
- 299]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
- 300]K Okabayashi,Y Nagayama,T Hara,E Hori et al.,Development of Numerical Simulation Technique

- for Unsteady Turbulent Dispersion over Complicated Terrain-As an Alternative to Wind Tunnel Experiments,itsubishi Heavy Industries Technical Review,49(1),2012
- 301]M Balogh,A Parente,C Benocci,RANS simulation of ABL flow over complex terrains applying an Enhanced $k-\epsilon$ model and wall function formulation: Implementation and comparison for fluent and OpenFOAM,Journal of Wind Engineering and IndustrialAerodynamics,104-106,360-368,2012
- 302]M Chavez,B Hajra,T Stathopoulos,A Bahloul,Assessment of near-field pollutant dispersion: Effect of upstream buildings,Journal of Wind Engineering and IndustrialAerodynamics,104-106,509-515,2012
- 303]M.A. Cochrane,C.J. Moran,M.C. Wimberly,A.D. Baer,M.A. Finney,K.L. Beckendorf,J. Eidenshink and Z. Zhu,Estimation of wildfire size and risk changes due to fuels treatments,International Journal of Wildland Fire,21,357-367,2012
- 304]N Koutsourakis,JG Bartzis,NC Markatos,Evaluation of Reynolds stress, $k-\epsilon$ and RNG $k-\epsilon$ turbulence models in street canyon flows using various experimental datasets,Environmental fluid mechanics,12,379-403,2012
- 305]N Pandya,N Gabas,E Marsden,Sensitivity analysis of Phast's atmospheric dispersion model for three toxic materials (nitric oxide,ammonia,chlorine),Journal of Loss Prevention in the Process Industries,25,20-32,2012
- 306]N Yoshida,Y Takahashi,Land-surface contamination by radionuclides from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident,Elements,8,201-206,2012
- 307]NI Kristiansen,A Stohl,G Wotawa,Atmospheric removal times of the aerosol-bound radionuclides ^{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,12,10759-10769,2012
- 308]P Szanto,S Deme,E Lang,I Nemeth,T Pazmandi,SINAC-Simulator Software for Interactive Modelling of Environmental Consequences of Nuclear Accidents (Second Generation),2012
- 309]P Thakur,S Ballard,R Nelson,Radioactive fallout in the United States due to the Fukushima nuclear plant accident,Journal of Environmental Monitoring,2012
- 310]RR Draxler,GD Rolph,Evaluation of the Transfer Coefficient Matrix (TCM) approach to model the atmospheric radionuclide air concentrations from Fukushima,Journal of Geophysical Research,117,D05107,2012
- 311]SL Goodrick,GL Achtemeier,NK Larkin et al.,Modelling smoke transport from wildland fires: a review,International Journal of Wildland Fire,22,83-94,2012
- 312]Srikanth Madala,A. N. V. Satyanarayana,V. Krishna Prasad,Micro-Scale Dispersion of Air Pollutants over an Urban Setup in a Coastal Region,Open Journal of Air Pollution,1,51-58,2012
- 313]Steven Hanna,Joseph Chang,Acceptance criteria for urban dispersion model evaluation,Meteorol Atmos Phys (2012) 116:133-146,2012
- 314]W Lu,S Zhong,JJ Charney,X Bian,S Liu,WRF simulation over complex terrain during a southern California wildfire event,Journal of Geophysical Research,117,D05125,2012
- 315]Y Tominaga,T Stathopoulos,CFD modeling of pollution dispersion in building array: evaluation of turbulent scalar flux modeling in RANS model using LES results,Journal of Wind Engineering and

Industrial Aerodynamics,104-106,484-491,2012

316]YT Wu,F Porte-Agel,Atmospheric turbulence effects on wind-turbine wakes: An LES study,energies,5,5340-5362,2012

317]A Rakai,J Franke,Numerical error quantification of RANS modelling in an idealized Central European city centre,15th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes,2013

318]B Blocken,Y Tominaga,T Stathopoulos,CFD simulation of micro-scale pollutant dispersion in the built environment,Building and Environment,64,225-230,2013

319]Benamrane et al,Chernobyl and Fukushima nuclear accidents: what has changed in the use of atmospheric dispersion modelling. ,Environmental Radioactivity 126,239-252.,2013

320]DMS Madalozzo,AL Braun,AM Awruch,Pollutant Dispersion Simulation in Street Canyons Using the Finite Element Method and Shared Memory Parallelization,Mecanica Computational,32,1271-1295,2013

321]J Sumner,G Espana,C Masson,S Aubrun,Evaluation of RANS/actuator disk modelling of wind turbine wake flow using wind tunnel measurements,Int. J. Engineering Systems Modelling and Simulation,5(1-3),2013

322]J Yao,M Brauer,SB Henderson,Evaluation of a wildfire smoke forecasting system as a tool for public health protection,Environmental Health Perspectives,121(10),1142,2013

323]Janice L. Coen,Modeling Wildland Fires: A Description of the Coupled Atmosphere-Wildland Fire Environment Model(CAWFE),NCAR Technical Notes,2013

324]JM Lacomme,B Truchot,Harmonization of practices for atmospheric dispersion modelling within the framework of risk assessment,HAL Id: ineris-00973694,2013

325]Kanda M,Inagaki A,Miyamoto T,Grvschka M,Raasch S,A new aerodynamic parameterization for realurban surfaces,Boundary-layer meteorology,148,357-377,2013

326]Karaca et al.,Numerical simulation of hazardous material atmospheric dispersion following an accidental release in an industrial site. ,15th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes. Madrid,Spain.,2013

327]Kobayashi,T,Nagai,H.,Chino,M.,Kawamura,H.,Source term estimation of atmospheric release due to the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident by atmospheric and oceanic dispersion simulations,J.Nucl. Sci. Technol.,50(3),255-264,2013

328]M Aoyama,M Uematsu,D Tsumune,Y Hamajima,Surface pathway of radioactive plume of TEPCO Fukushima NPP1 released ¹³⁴Cs and ¹³⁷Cs,Biogeosciences,10,3067-3078,2013

329]M Lateb,C Masson,T Stathopoulos et al.,Comparison of various types of k-ε models for pollutant emissions around a two-building configuration,Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,115,9-21,2013

330]MF Yassin,Numerical modeling on air quality in an urban environment with changes of the aspect ratio and wind direction,Environmental Science and Pollution Research,20,3975-3988,2013

331]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
- 332] P Gousseau, B Blocken, GJF Van Heijst, Quality assessment of Large-Eddy Simulation of wind flow around a high-rise building: Validation and solution verification, *Computers & Fluids*, 79, 120-133, 2013
- 333] 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
- 334] P Thakur, S Ballard, R Nelson, An overview of Fukushima radionuclides measured in the northern hemisphere, *Science of the Total Environment*, 2013
- 335] Pullen, J. et al., AIR-SEA TRANSPORT, DISPERSION, AND FATE MODELING IN THE VICINITY OF THE FUKUSHIMA NUCLEAR POWER PLANT-A Special Conference Session Summary, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 94, 31-39, 2013
- 336] SAN JOSE, R., LUIS PEREZ, J. , Harmonisation of Practices for Atmospheric Dispersion Modelling within the Framework of Risk Assessment. , 15th International conference on harmonisation within atmospheric dispersion modelling for regulatory purposes (HARMO 15), May 2013, Madrid, Spain. Technical University of Madrid. Madrid, pp.718-723, 2013
- 337] SM Salim, KC 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*, 2013
- 338] T Christoudias, J Lelieveld, Modelling the global atmospheric transport and deposition of radionuclides from the Fukushima Dai-ichi nuclear accident, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(3), 1425-1438, 2013
- 339] V Šmidl, R Hofman, Tracking of atmospheric release of pollution using unmanned aerial vehicles, *Atmospheric Environment*, 67, 425-436, 2013
- 340] V Rossi, E Van Sebille, AS Gupta, V Garçon et al., Multi-decadal projections of surface and interior pathways of the Fukushima Cesium-137 radioactive plume, HAL Id:hal-02296650, 2013
- 341] ZY Peshev, TN Dreischuh, D Stoyanov, Lidar observations and characterization of biomass burning aerosols over Sofia: Long-range transport of forest wildfire smoke, *17th International School on Quantum Electronics: Laser Physics and Applications*, 2013
- 342] A Rakai, J Franke, Validation of two RANS solvers with flow data of the flat roof Michelstadt case, *Urban Climate*, 10(4), 758-768, 2014
- 343] AS Rood, Performance evaluation of AERMOD, CALPUFF, and legacy air dispersion models using the Winter Validation Tracer Study dataset, *Atmospheric Environment*, 89, 707-720, 2014
- 344] B Blocken, 50 years of computational wind engineering: past, present and future, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 129, 69-102, 2014
- 345] C Peralta, A Parente, M Balogh, RANS simulation of the atmospheric boundary layer over complex terrain with a consistent k-epsilon model, *6th International Symposium on Computational Wind Engineering*, 2014
- 346] CR Melanie, Towards a more comprehensive monitoring of wildfire spread: contributions of model

- evaluation and data assimilation strategies,HAL Id: tel-01130329,2014
- 347]EN Stavros,D McKenzie,N Larkin,The climate-wildfire-air quality system: interactions and feedbacks across spatial and temporal scales,Advanced Reviews: Climate Change,2014
- 348]F Martin,MG Vivanco,JL Garrido,EVALUATION OF THE CHIMERE MODEL ESTIMATING WET DEPOSITION IN SPAIN,16th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes,2014
- 349]G Steinhauser,A Brandl,TE Johnson,Comparison of the Chernobyl and Fukushima nuclear accidents: a review of the environmental impacts,Science of the total environment,470-471,800-817,2014
- 350]Garcia-Menendez,F.,Hu,Y.,Odman,M. T.,Simulating smoke transport from wildland fires with a regionalscale air quality model: Sensitivity to spatiotemporal allocation of fire emissions,Science of the total environment,493,544-553,2014
- 351]GC Efthimiou,JG Bartzis,Atmospheric dispersion and individual exposure of hazardous materials. Validation and intercomparison studies,International Journal of Environment and Pollution,55(1),76-85,2014
- 352]HF Bonifacio,RG Maghirang,LA 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
- 353]J Mandel,S Amram,JD Beezley et al.,New features in WRF-SFIRE and the wildfire forecasting and danger system in Israel,Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions,2(2),2014
- 354]J. Mandel,S. Amram,J. D. Beezley,G. Kelman,A. K. Kochanski,V. Y. Kondratenko,B. H. Lynn,B. Regev,and M. Vejmelka,Recent advances and applications of WRF-SFIRE,Natural Hazards and Earth System Sciences,14,2829-2845,2014
- 355]Jason M. Forthofer,Bret W. Butler and Natalie S. Wagenbrenner,A comparison of three approaches for simulating fine-scale surface winds in support of wildland fire management. Part I. Model formulation and comparison against measurements,International Journal of Wildland Fire,2014
- 356]Jason M. Forthofer,Bret W. Butler,Charles W. McHugh,Mark A. Finney,Larry S. Bradshaw,Richard D. Stratton,Kyle S. Shannon and Natalie S. Wagenbrenner,A comparison of three approaches for simulating fine-scale surface winds in support of wildland fire management. Part II. An exploratory study of the effect of simulated winds on fire growth simulations,International Journal of Wildland Fire 2014,23,982-994,2014
- 357]JG Goldammer,V Kashparov,S Zibtsev,S Robinson,Best practices and recommendations for wildfire suppression in contaminated areas,with focus on radioactive terrain,2014
- 358]JL Coen,PJ Riggan,Simulation and thermal imaging of the 2006 Esperanza Wildfire in southern California: application of a coupled weather-wildland fire model,International Journal of Wildland Fire,2014
- 359]MA Ashraf,S Akib,MJ Maah,I Yusoff et al.,Cesium-137: radio-chemistry,fate,and transport,remediation,and future concerns,Critical Reviews in Environmental Science and Technology,44,1740-1793,2014

- 360]Patricia L. Andrews,Current status and future needs of the BehavePlus Fire Modeling System,International Journal of Wildland Fire,23,21-33,2014
- 361]RA Loehman,E Reinhardt,KL Riley,Wildland fire emissions,carbon,and climate: Seeing the forest and the trees-A cross-scale assessment of wildfire and carbon dynamics in fire-prone,forested ecosystems,Forest Ecology and Management,2014
- 362]Shigeki Mori,Eisaburo Miyata,Optimization of Gas Detectors' Location by Application of Atmospheric Dispersion Modeling Tools,The 5th World Conference of Safety of Oil and Gas Industry,June 8-11,2014,Okayama,Japan,2014
- 363]SJ Cao,J Meyers,Asymptotic conditions for the use of linear ventilation models in the presence of buoyancy forces,Building Simulation,2014
- 364]SK Guttikunda,P Jawahar,Atmospheric emissions and pollution from the coal-fired thermal power plants in India,Atmospheric Environment,2014
- 365]Song,C. F.,Peng,L.,Cao,J. J.,Mu,L.,Bai,H. L.,Liu,X.F.,Numerical simulation of airflow structure and dust emissions behind porous fences used to shelter openstorage piles,Aerosol and Air Quality Research,14,1584-1592,2014
- 366]T Shinonaga,P Steier,M Lagos,T Ohkura,Airborne plutonium and non-natural uranium from the Fukushima DNPP found at 120 km distance a few days after reactor hydrogen explosions,Environmental science & Technology,48,3808-3814,2014
- 367]V Simsek,L Pozzoli,A Unal,T Kindap,Simulation of ¹³⁷Cs 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
- 368]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
- 369]WY Ng,CK Chau,A modeling investigation of the impact of street and building configurations on personal air pollutant exposure in isolated deep urban canyons,Science of the Total Environment,468-469,429-448,2014
- 370]YH Koo,YS Yang,KW Song,Radioactivity release from the Fukushima accident and its consequences: A review,Progress in Nuclear Energy,74,61-70,2014
- 371]AF Stein,RR Draxler,GD Rolph et al.,NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system,Bulletin of the American Meteorological Society,2059-2077,2015
- 372]AK Kochanski,MA Jenkins,K Yedinak et al.,Toward an integrated system for fire,smoke and air quality simulations,International Journal of Wildland Fire,25(5),534-546,2015
- 373]B Blocken,Computational Fluid Dynamics for urban physics: Importance,scales,possibilities,limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations,Building and Environment,91,219-245,2015
- 374]B Blocken,A van der Hout,J Dekker,O Weiler,CFD simulation of wind flow over natural complex terrain: Case study with validation by field measurements for Ria de Ferrol,Galicia,Spain,Journal of

- Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,147,43-57,2015
- 375]BJ Viner,T Jannik,D Stone,A Hepworth,Modelling and mitigating dose to firefighters from inhalation of radionuclides in wildland fire smoke,International Journal of Wildland Fire,24(5),723-733,2015
- 376]DV Mallia,JC Lin,S Urbanski et al.,Impacts of upwind wildfire emissions on CO,CO₂,and PM_{2.5} concentrations in Salt Lake City,Utah,JGR Atmosphere,120(1),147-166,2015
- 377]Finn,D.,Clawson,K.L.,Eckman,R.M.,Carter,R.G.,Rich,J.D.,Strong,T.W.,Beard,S.A.,Reese,B.R.,Davis ,D.,Liu,H.,Russell,E.,Gao,Z.,Brooks,S.,Project Sagebrush Phase 1,NOAA Tech Memo OAR ARL-268,2015
- 378]G Steinhäuser,T Niisoe,KH Harada et al.,Post-accident sporadic releases of airborne radionuclides from the Fukushima Daiichi nuclear power plant site,Environmental science & technology,49(24),14028-14035,2015
- 379]GC Efthimiou,E Berbekar,F Harms,JG Bartzis et al.,Prediction of high concentrations and concentration distribution of a continuous point source release in a semi-idealized urban canopy using CFD-RANS modeling,Atmospheric Environment,100,48-56,2015
- 380]H Zhang,T Xu,Y Zong,H Tang,X Liu,Y Wang,Influence of meteorological conditions on pollutant dispersion in street canyon,Procedia Engineering,121,899-905,2015
- 381]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
- 382]J Wang,S Ogawa,Effects of Meteorological Conditions on PM_{2.5} Concentrations in Nagasaki,Japan,International Journal of Environmental Research and Public Health,12,9089-9101,2015
- 383]Jiri Barta,The Use of Simulation Programs of Leakage of Harmful Substances for Crisis Management,International Journal of Economics and Management Engineering Vol:9,No:12,2015,2015
- 384]JN Smith,RM Brown,WJ Williams et al.,Arrival of the Fukushima radioactivity plume in North American continental waters, Proceedings of the National Academy of Sciences(PNAS),112(5),1310-1315 ,2015
- 385]Katata,G. et al.,Detailed source term estimation of the atmospheric release for the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident by coupling simulations of an atmospheric dispersion model with an improved deposition scheme and oceanic dispersion model,Atmospheric Chemistry and Physics,15,1029-1070.,2015
- 386]Lankadasu A,Amita Tripathi,Samuel Saysset,Angeles Yackow,Bruno De La Roussiere,Numerical modeling of supercritical CO₂ leaks and its subsequent dispersion in the ambient air,Procedia IUTAM,15,49 - 56,2015
- 387]M Abkar,F Porte-Agel,Influence of atmospheric stability on wind-turbine wakes: A large-eddy simulation study,Physics of fluids,27(3),2015
- 388]M. GOLLNER,A. TROUVÉ et al.,Towards Data-Driven Operational Wildfire Spread Modeling,A REPORT OF THE NSF-FUNDED WIFIRE WORKSHOP,2015
- 389]MA Finney,JD Cohen,JM Forthofer et al.,Role of buoyant flame dynamics in wildfire spread, Proceedings of the National Academy of Sciences(PNAS),112(32),9833-9838,2015

- 390]Mahdi Ojaghi,Mahmoud Ojaghi,Ziba Beheshti,Mohammad hossein,Mohammadi ashnani,The distribution of particulate matter and its impact on air pollution,Nature and Science,13(6),34-38,2015
- 391]N Evangeliou,Y Balkanski,A Cozic,WM Hao,Fire evolution in the radioactive forests of Ukraine and Belarus: future risks for the population and the environment,Ecological Monographs,85(1),49-72,2015
- 392]Nathan Dahl,Haidong Xue,Xiaolin Hu and Ming Xue,Coupled fire-atmosphere modeling of wildland fire spread using DEVS-FIRE and ARPS,Natural Hazards,77(2),1013-1035,2015
- 393]O Evrard,JP Lacey,H Lepage,Y Onda et al.,Radiocesium transfer from hillslopes to the Pacific Ocean after the Fukushima Nuclear Power Plant accident: A review,Journal of Environmental radioactivity,148,92-110,2015
- 394]Ondrej ZAVILA,Pavel DOBES,Jakub DLABKA,Jan BITTA,THE ANALYSIS OF THE USE OF MATHEMATICAL MODELING FOR EMERGENCY PLANNING PURPOSES,THE SCIENCE FOR POPULATION PROTECTION,2015
- 395]Oura,Y. et al.,A database of hourly atmospheric concentrations of radiocesium(¹³⁴Cs and ¹³⁷Cs) in suspended particulate matter collected in March 2011 at 99 air pollution monitoring stations in Eastern Japan,Journal of Nuclear and Radiochemical Sciences,15(2),2_1-2_12,2015
- 396]T Imanaka,G Hayashi,S Endo,Comparison of the accident process,radioactivity release and ground contamination between Chernobyl and Fukushima-1,Journal of radiation research,56(Suppl 1),i56-i61,2015
- 397]Tejeswi Ramprasad,Madhavi Gaonkar,Diptendu Das,Assessment of Toxic Gas Dispersion using Phast and Panache,International Journal of Research in Advent Technology,3(6),2015
- 398]U Im,R Bianconi,E Solazzo,I Kioutsioukis,Evaluation of operational on-line-coupled regional air quality models over Europe and North America in the context of AQMEII phase 2. Part I: Ozone,Atmospheric Environment,115,404-420,2015
- 399]WC Cheng,F Porte-Agel,Adjustment of turbulent boundary-layer flow to idealized urban surfaces: a large-eddy simulation study,Boundary-Layer Meteorology,155,249-270,2015
- 400]Batt,R.,Grant,S.E.,Lacome,J-M.,Truchot,B.,Tucker,H. ,CFD Modelling of Dispersion in Neutral and Stable Atmospheric Boundary Layers: Results for Prairie Grass and Thorney Island,17th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes,2016
- 401]Finn,D.,Clawson,K.L.,Eckman,R.M.,Liu,H.,Russell,E.S.,Gao,Z.,Brooks,S.,Project Sagebrush: revisiting the value of the horizontal plume spread parameter σ_y ,Journal of Applied Meteorology and Climatology,55,1305-1322,2016
- 402]J Zhong,XM Cai,WJ Bloss,Coupling dynamics and chemistry in the air pollution modelling of street canyons: A review,Environmental Pollution,214,690-704,2016
- 403]Jeanjean APR,Monks PS,Leigh RJ.,Modelling the effectiveness of urban trees and grass on PM_{2.5} reduction via dispersion and deposition at a cityscale,Atmospheric Environment,147,1-10,2016
- 404]Joel Dreessen,John Sullivan & Ruben Delgado,Observations and impacts of transported Canadian wildfire smoke on ozone and aerosol air quality in the Maryland region on June 9-12,2015,Journal of the Air & Waste Management Association,66(9),842-862,2016

- 405]JX Wen,P Le Fur,H Jie,CMR Vendra,Further development and validation of CO2FOAM for the atmospheric dispersion of accidental releases from carbon dioxide pipelines,International Journal of Greenhouse Gas Control,52,293-304,2016
- 406]Kajino 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
- 407]KL Pham,HQ Nguyen,DH Pham,XA 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
- 408]Liying Chen and Malo Le Guellec,VALIDATION OF PANACHE CFD POLLUTION DISPERSION MODELLING WITH DENSE GAS EXPERIMENTS,17th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes,2016
- 409]M Chino,H Terada,H Nagai,G Katata,S Mikami et al.,Utilization of ¹³⁴Cs/¹³⁷Cs in the environment to identify the reactor units that caused atmospheric releases during the Fukushima Daiichi accident,Scientific Reports,6(1),31376,2016
- 410]N Evangelidou,S Zibtsev,V Myroniuk,M Zhurba et al.,Resuspension and atmospheric transport of radionuclides due to wildfires near the Chernobyl Nuclear Power Plant in 2015: An impact assessment,Scientific Reports,6(1),26062-26075,2016
- 411]N Yamaguchi,M Mitome,AH Kotone,M Asano et al.,Internal structure of cesium-bearing radioactive microparticles released from Fukushima nuclear power plant,Scientific Reports,6,20548,2016
- 412]PY Cui,Z Li,WQ Tao,Buoyancy flows and pollutant dispersion through different scale urban areas: CFD simulations and wind-tunnel measurements,Building and Environment,104,76-91,2016
- 413]Q Di,I Kloog,P Koutrakis,A Lyapustin et al.,Assessing PM_{2.5} Exposures with High Spatiotemporal Resolution across the Continental United States,Environmental science & technology,50(9),4712-,2016
- 414]R Batt,SE Gant,JM Lacombe,T Benjmin,Modelling of stably-stratified atmospheric boundary layers with commercial CFD software for use in risk assessment,Chemical Engineering Transactions,48,61-66,2016
- 415]R Paugam,M Wooster,S Freitas et al.,A review of approaches to estimate wildfire plume injection height within large-scale atmospheric chemical transport models,Atmospheric Chemistry and Physics,16(2),907-925,2016
- 416]R Pavlovic,J Chen,D Davignon et al.,FireWork-A Canadian Operational Air Quality Forecast Model With Near-Real-Time Biomass Burning Emissions,Canadian Wildland Fire & Smoke Newsletter,2016
- 417]S Brusca,F Famoso,R Lanzafame,S Mauro et al.,Pm10 dispersion modeling by means of cfd 3d and Eulerian-Lagrangian models: analysis and comparison with experiments,Energy procedia,101,329-336,2016
- 418]Viktor Šíp,Luděk Beneš,RANS solver for microscale pollution dispersion problems in areas with vegetation: Development and validation,arXiv preprint arXiv:1609.03427,2016
- 419]Y Tominaga,T Stathopoulos,Ten questions concerning modeling of near-field pollutant dispersion in

- the built environment, *Building and Environment*, 105, 390-402, 2016
- 420]Zhang, Y, Oldenburg, CM and Pan, L, Fast estimation of dense gas dispersion from multiple continuous CO₂ surface leakage sources for risk assessment, Lawrence Berkeley National Laboratory Recent Work, 2016
- 421]A.M.G.Lopes, L.M.Ribeiro, D.X.Viegas and J.R.Raposo, Effect of two-way coupling on the calculation of forest fire spread: model development, *International Journal of Wildland Fire*, 26, 829-843, 2017
- 422]AA Dvornik, EA Klementeva, AM Dvornik, Assessment of ¹³⁷Cs contamination of combustion products and air pollution during the forest fires in zones of radioactive contamination, *Radioprotection*, 52(1), 29-36, 2017
- 423]C DUCHENNE, P ARMAND, M MARCILHAC et al., A new method for assessing the uncertainty associated with 3D dispersion simulations in variable meteorological conditions, *Harmo'18*, 2017
- 424]C Garcia-Sanchez, G Van Tendeloo, C Gorle, Quantifying inflow uncertainties in RANS simulations of urban pollutant dispersion, *Atmospheric environment*, 161, 263-273, 2017
- 425]D. Ibarra, S. Aubrun, I. Fedioun, Modelling the dispersion of steady and unsteady pollutant releases in a mixed industrial and residential area, *International Workshop on Physical Modelling of Flow and Dispersion Phenomena*, 2017
- 426]G Rolph, A Stein, B Stunder, Real-time environmental applications and display system: READY, *Environmental Modelling & Software*, 95, 210-228, 2017
- 427]H Yu, J The, Simulation of gaseous pollutant dispersion around an isolated building using the k- ω SST (shear stress transport) turbulence model, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 67(5), 517-536, 2017
- 428]Simon Coldrick, RR1099 - Review of consequence model evaluation protocols for major hazards under the EU SAPHEDRA platform. , HSE, Available at www.hse.gov.uk, 2017
- 429]Kaneyasu, N., H. Ohashi, F. Suzuki, T. Okuda and F. Ikemori, Weak size dependence of resuspended radiocesium adsorbed on soil particles collected after the Fukushima nuclear accident, *Journal of Environmental Radioactivity*, 172, 122-129, 2017
- 430]Leitl, Bernd, Harms, Frank, Hertwig, Denise, Schatzmann, Michael, Field Data versus Wind Tunnel Data: The Art of Validating Urban Flow and Dispersion Models, 9th Asia-Pacific Conference on Wind Engineering, 2017
- 431]Liying Chen and Malo Le Guellec, VALIDATION OF FLUIDYN-PANACHE CFD MODEL AGAINST LARGE-SCALE AND WIND TUNNEL EXPERIMENTS, Poster_HARMO 18, Bologna, Italy, 9th -12th October 2017, 2017
- 432]M Bahlali, E Dupont, B Carissimo, Adaptation of the Lagrangian module of a CFD code for atmospheric dispersion of pollutants in complex urban geometries and comparison with existing Eulerian results, 18th International conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, 2017
- 433]M Shirzadi, PA Mirzaei, M Naghashzadegan, Improvement of k-epsilon turbulence model for CFD simulation of atmospheric boundary layer around a high-rise building using stochastic optimization and

- Monte Carlo Sampling technique, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 171, 366-379, 2017
- 434] O Oldrini, P Armand, C Duchenne, C Olry, Description and preliminary validation of the PMSS fast response parallel atmospheric flow and dispersion solver in complex built-up areas, *Environmental Fluid Mechanics*, 17(4), 2017
- 435] R Wang, B Chen, S Qiu, Z Zhu, L Ma et al., Real-Time data driven simulation of air contaminant dispersion using particle filter and UAV sensory system, *IEEE/ACM 21st International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications (DS-RT)*, 2017
- 436] Simon E. Gant and Harvey Tucker, COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD) MODELLING OF ATMOSPHERIC DISPERSION FOR LAND-USE PLANNING (LUP) AROUND MAJOR HAZARDS SITES IN THE UK, 18th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, 2017
- 437] Y Tominaga, T Stathopoulos, Steady and unsteady RANS simulations of pollutant dispersion around isolated cubical buildings: Effect of large-scale fluctuations on the concentration field, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 165, 23-33, 2017
- 438] A Bouabdellah, A BENZERDJEB et al., A numerical analysis on the effect of turbulent schmidt number on numerical prediction of pollutant dispersion within street canyons, *The Eurasia Proceedings of Science Technology Engineering and Mathematics*, 4, 230-240, 2018
- 439] A Kochanski, DV Mallia, MG Fearon, T Brown et al., Do we need weather prediction models to account for local weather modifications by wildland fires?, *Advances in Forest Fire Research*, 987, 2018
- 440] Amita Tripathi, Claude Souprayen, Andy Stanley and Naomi Warrilow, Computational Fluid Dynamics or Gaussian - is there a right way to model gas dispersion?, <https://doi.org/10.19124/ima.2018.001.26>, 2018
- 441] Chang-Bok Rim, Kum-Chol Om, Guoyu Ren, Su-Song Kim, Hyok-Chol Kim and Kang-Chol O., Establishment of a wildfire forecasting system based on coupled weather-Wildfire modeling, *Applied Geography*, 90, 224-228, 2018
- 442] Dominique Cancellieri, Valérie Leroy-Cancellieri, Xavier Silvani, and Frédéric Morandini, New experimental diagnostics in combustion of forest fuels: microscale appreciation for a macroscale approach, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18, 1957-1968, 2018
- 443] DV Mallia, AK Kochanski, SP Urbanski, JC Lin, Optimizing smoke and plume rise modeling approaches at local scales, *Atmosphere*, 9(5), 166, 2018
- 444] Gant, S.E., Tucker, H., Computational fluid dynamics (CFD) modelling of atmospheric dispersion for land-use planning around major hazards sites in Great Britain, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2018
- 445] Hamza Kouichi, Pierre Ngae, Pramod Kumar, Amir-Ali Feiz, and Nadir Bekka, Optimization of an Urban Monitoring Network for Retrieving an Unknown Point Source Emission, *Geosci. Model Dev. Discuss.*, 2018
- 446] JB Filippi, F Bosseur, C Mari, C Lac, Simulation of a large wildfire in a coupled fire-atmosphere

- model, *Atmosphere*, 9(6), 218, 2018
- 447] JG Bartzis, G Efthimiou, S Andronopoulos et al., Lagrangian modelling embedded in RANS-CFD for air puff releases in urban environments, 11th International Conference on Air Quality - Science and Application, 2018
- 448] Kitayama, K. et al., Atmospheric Modeling of ¹³⁷Cs 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
- 449] M El Houssami, A Lamorlette, D Morvan et al., Framework for submodel improvement in wildfire modeling, *Combustion and Flame*, 190, 12月24日, 2018
- 450] ML Bahlali, E Dupont, A hybrid CFD RANS/Lagrangian approach to model atmospheric dispersion of pollutants in complex urban geometries, *International Journal of Environment and Pollution*, 64(1/3), 74, 2018
- 451] N Khakzad, M Dadashzadeh, G Reniers, Quantitative assessment of wildfire risk in oil facilities, *Journal of Environmental Management*, 223, 433-443, 2018
- 452] Ngan, F., A. Stein, D. Finn, and R. Eckman, Dispersion simulations using HYSPLIT for the Sagebrush Tracer Experiment., *Atmospheric environment*, 186, 18-31., 2018
- 453] PM Udiyani, S Kuntjoro, GR Sunaryo, H Susiati, Atmospheric dispersion Analysis for Expected Radiation dose due to Normal Operation of RSG-GAS and RDE Reactors, *Atom Indonesia*, 2018
- 454] R Batt, S Gant, JM Lacome, T Benjmin, CFD modelling of dispersion in neutrally and stably-stratified atmospheric boundary layers: results for Prairie Grass and Thorney Island, *International Journal of Environment and Pollution*, 63(1/2), 1, 2018
- 455] Sato T, Iwamoto Y, Hashimoto S, 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
- 456] T Uchida, G Li, Comparison of RANS and LES in the prediction of airflow field over steep complex terrain, *Open Journal of Fluid Dynamics*, 2018
- 457] Tsuruta, H. et al., Time-series analysis of atmospheric radiocesium at two SPM monitoring sites near the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant just after the Fukushima accident on March 11, 2011, *Geochemical Journal*, 52, 103-121., 2018
- 458] W Syarifah, E Apriliani, Fire spread estimation on forest wildfire using ensemble kalman filter, *Journal of Physics: Conference Series*, 2018
- 459] Y Satou, K Sueki, K Sasa, H Yoshikawa et al., Analysis of two forms of radioactive particles emitted during the early stages of the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station accident, *Geochemical Journal*, 52(2), 2018
- 460] MM Talerko, TD Lev, SI Kireev et al., Evaluation of radioactive air contamination due to a forest fire within the Exclusion Zone on June 5-8, 2018, 2019
- 461] A Bakhshaii, EA Johnson, A review of a new generation of wildfire-atmosphere modeling, *Canadian Journal of Forest Research*, 49(6), 2019
- 462] A Fanfarillo, Quantifying Uncertainty in Source Term Estimation with Tensorflow Probability, 2019

IEEE/ACM HPC for Urgent Decision Making,2019

463]A Parente,R Longo,M Ferrarotti,Turbulence model formulation and dispersion modelling for the CFD simulation of flows around obstacles and on complex terrains,CFD for Atmospheric Flows and Wind Engineering,2019

464]AA Ager,R Lasko,V Myroniuk,S Zibtsev et al.,The wildfire problem in areas contaminated by the Chernobyl disaster,Science of the Total Environment,696,133954,2019

465]AK Kochanski,DV Mallia,MG Fearon et al.,Modeling wildfire smoke feedback mechanisms using a coupled fire - atmosphere model with a radiatively active aerosol scheme,JGR Atmospheres ,124(16),9099-9116,2019

466]AM Chiodi,NK Larkin,JM Varner,J Hiers,Sensitivity of prescribed burn weather windows to atmospheric dispersion parameters over southeastern USA,International Journal of Wildland Fire,28(8),2019

467]FP Piguet,P Eckert,C Knusli,B Deriaz,W Wildi et al.,Modeling of a major accident in five nuclear power plants from 365 meteorological situations in western europe and analysis of the potential impacts on Polution,Soils and Affected Countries,2019

468]G Yang,X Li,L Ding,F Zhu,Z Wang,S Wang,Z Xu et al.,CFD simulation of pollutant emission in a natural draft dry cooling tower with flue gas injection: Comparison between LES and RANS,Energies,12(9),3630,2019

469]GC Efthimiou,P Kumar,SG Giannissi,AA Feiz,Prediction of the wind speed probabilities in the atmospheric surface layer,Renewable energy,132,921-930,2019

470]IG McKendry,A Christen,SC Lee,M Ferrara,Impacts of an Intense Wildfire Smoke Episode on Surface Radiation,Energy and Carbon Fluxes in Southwestern British Columbia,Canada,Atmospheric Chemistry and Physics,19,835-846,2019

471]Meessam Louisa Bahlali,Eric Dupont,Bertrand Carissimo,Atmospheric dispersion using a Lagrangian stochastic approach:Application to an idealized urban area under neutral and stable meteorological conditions,2019

472]ML Bahlali,E Dupont,B Carissimo,Atmospheric dispersion using a Lagrangian stochastic approach: Application to an idealized urban area under neutral and stable meteorological conditions,Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,193,103976,2019

473]Ngan,F.,C. P. Loughner,and A. Stein,The evaluation of mixing methods in HYSPLIT using measurements from controlled tracer experiments,Atmospheric Environment,219,117043,2019

474]Valerii Kashparov,Brit Salbu,Sviatoslav Levchuk,Valentyn Protsaka,Igor Maloshtan,Caroline Simonucci,Christelle Courbet,Huong Lien Nguyen,Natalia Sanzharova and Vladislav Zabrotsky,Environmental behaviour of radioactive particles from chernobyl,Journal of Environmental Radioactivity,208-209,106025,2019

475]VT Nguyen,TC Nguyen,J Nguyen,Numerical simulation of turbulent flow and pollutant dispersion in urban street canyons,Atmosphere,10(11),683,2019

476]A Ricci,I Kalkman,B Blocken,M Burlando et al.,Impact of turbulence models and roughness height

in 3D steady RANS simulations of wind flow in an urban environment, *Building and Environment*,171,106617,2020

477]B Chen,Y Wang,R Wang,Z Zhu,L Ma,X Qiu,W Dai,The gray-box based modeling approach integrating both mechanism-model and data-model: The case of atmospheric contaminant dispersion, *Symmetry*,12(2),254,2020

478]DA Jaffe,SM O'Neill,NK Larkin,AL Holder et al.,Wildfire and prescribed burning impacts on air quality in the United States, *Journal of the Air & Waste Management Association*,70(6),683-615,2020

479]DV Mallia,AK Kochanski,KE Kelly et al.,Evaluating wildfire smoke transport within a coupled fire - atmosphere model using a high - density observation network for an episodic smoke event along Utah's Wasatch Front, *JGR Atmospheres*,125(20),2020

480]Gian Marco Ludovici,Susana Oliveira de Souza,Andrea Chierici,Maria Grazia Cascone,Francesco d'Errico,Andrea Malizia,Adaptation to ionizing radiation of higher plants: From environmental radioactivity to chernobyl disaster, *Journal of Environmental Radioactivity*,222,106375,2020

481]HC Kim,T Chai,A Stein et al.,Inverse modeling of fire emissions constrained by smoke plume transport using HYSPLIT dispersion model and geostationary satellite observations, *Atmospheric Chemistry and Physics*,20(17),10259-10277,2020

482]L Giovannini,E Ferrero,T Karl,MW Rotach,C Staquet,Atmospheric pollutant dispersion over complex terrain: Challenges and needs for improving air quality measurements and modeling, *Atmosphere*,11(6),646,2020

483]LM Ferreira,AP Coimbra,AT de Almeida,Autonomous system for wildfire and forest fire early detection and control, *Inventions*,5(3),41,2020

484]LO Muser,GA Hoshyaripour,J Bruckert et al.,Particle aging and aerosol-radiation interaction affect volcanic plume dispersion: evidence from the Raikoke 2019 eruption, *Atmospheric Chemistry and Physics*,20(23),15015-15036,2020

485]M Ghaderi,M Ghodrat,JJ Sharples,LES simulation of wind-driven wildfire interaction with idealized structures in the wildland-urban interface, *Atmosphere*,12(1), 21,2020

486]M Shirzadi,PA Mirzaei,Y Tominaga,RANS model calibration using stochastic optimization for accuracy improvement of urban airflow CFD modeling, *Journal of Building Engineering*,32,101756,2020

487]N Evangeliou,S Eckhardt,Uncovering transport,deposition and impact of radionuclides released after the early spring 2020 wildfires in the Chernobyl Exclusion Zone, *Scientific Reports*,10(1),2020

488]N.A.Beresford,C.L.Barnett,S.Gashchak,A.Maksimenko,E.Guliaichenko,M.D.Wood and M.Izquierdo,Radionuclide transfer to wildlife at a 'Reference site' in the Chernobyl Exclusion Zone and resultant radiation exposures, *Journal of Environmental Radioactivity*,211,105661,2020

489]P Grasso,MS Innocente,Physics-based model of wildfire propagation towards faster-than-real-time simulations, *Computers & Mathematics with Applications*,80(5),790-808,2020

490]P Jain,SCP Coogan,SG Subramanian,M Crowley,A review of machine learning applications in wildfire science and management, *Environmental Reviews*,28(4),2020

491]R Longo,A Bellemans,M Derudi,A Parente,A multi-fidelity framework for the estimation of the

turbulent Schmidt number in the simulation of atmospheric dispersion, *Building and Environment*, 185, 107066, 2020

492] S Guan, DC Wong, Y Gao, T Zhang, G Pouliot, Impact of wildfire on particulate matter in the southeastern United States in November 2016, *Science of The Total Environment*, 724, 138354, 2020

493] Stylianos Stoulos, Athanasios Besis and Alexandra Ioannidou, Determination of low ¹³⁷Cs concentration in the atmosphere due to Chernobyl contaminated forest-wood burning, *Journal of Environmental Radioactivity*, 222, 106383, 2020

494] WT Hung, CHS Lu, B Shrestha, HC Lin, CA Lin et al., The impacts of transported wildfire smoke aerosols on surface air quality in New York State: A case study in summer 2018, *Atmospheric Environment*, 227, 117415, 2020

495] X Zheng, H Montazeri, B Blocken, CFD simulations of wind flow and mean surface pressure for buildings with balconies: Comparison of RANS and LES, *Building and Environment*, 173, 106747, 2020

496] Y Han, MK Stoellinger, RANS simulations of neutral atmospheric boundary layer flow over complex terrain with comparisons to field measurements, *Wind Energy*, 23(214), 2020

497] Y Kyrylenko, I Kameneva, O Popov, A Iatsyshyn, Source term modelling for event with liquid radioactive materials spill, *Systems, Decision and Control in Energy 1*, 261-279, 2020

498] Y Li, DQ Tong, F Ngan, MD Cohen et al., Ensemble PM_{2.5} Forecasting During the 2018 Camp Fire Event Using the HYSPLIT Transport and Dispersion Model, *JGR Atmospheres*, 125(15), 2020

499] Yasunori Igarashi, Yuichi Onda, Yoshifumi Wakiyama, Alexei Konoplev, Mark Zheleznyak, Hlib Lisovyi, Gennady Laptev, Volodyill Damiyanovich, Dmitry Samoilov, Kenji Nanba and Serhii Kirieiev, Impact of wildfire on ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr wash-off in heavily contaminated forests in the Chernobyl exclusion zone, *Environmental Pollution*, 259, 113764, 2020

500] C Lin, R Ooka, H Kikumoto, H Jia, Eulerian RANS simulations of near-field pollutant dispersion around buildings using concentration diffusivity limiter with travel time, *Building and Environment*, 202, 108047, 2021

501] D Elfverson, C Lejon, Use and scalability of OpenFOAM for wind fields and pollution dispersion with building-and ground-resolving topography, *Atmosphere*, 12(9), 1124, 2021

502] J Sanchez-Balseca, A Perez-Foguet, Compositional Spatio-Temporal PM_{2.5} Modelling in Wildfires, *Atmosphere*, 12(10), 1309, 2021

503] JJ Whicker, DD Breshears, M McNaughton et al., Radionuclide resuspension across ecosystems and environmental disturbances, *Journal of Environmental Radioactivity*, 233(11), 106586, 2021

504] L Magaritz - Ronen, S Ravech-Rubin, Wildfire Smoke Highlights Troposphere - to - Stratosphere Pathway, *Geophysical research Letters*, 48(23), 2021

505] MP van der Laan, M Baungaard, M Kelly, Inflow modeling for wind farm flows in RANS, *Journal of Physics Conference Series*, 1934(1), 012012, 2021

506] O Masson, O Romanenko, O Saunier et al., Europe-wide atmospheric radionuclide dispersion by unprecedented wildfires in the chernobyl exclusion zone, April 2020, *Environmental science and Technology*, 55(20), 13834-13848, 2021

- 507]R Baro,C Maurer,J Brioude,D Arnold,M Hirtl,The environmental effects of the April 2020 wildfires and the Cs-137 re-suspension in the Chernobyl exclusion zone: a multi-hazard threat,Atmosphere,12(4),467,2021
- 508]S Schalaus,A Habib,S Michel,Atmospheric wind field modelling with OpenFOAM for near-ground gas dispersion,Atmosphere,12(8),933,2021
- 509]Z Ke,Y Wang,Y Zou,Y Song et al.,Global Wildfire Plume - Rise Data Set and Parameterizations for Climate Model Applications,Journal of Geophysical Reserch Atmosheres,126(6),2021
- 510]A Kumar,RB Pierce,R Ahmadov et al.,Simulating wildfire emissions and plume rise using geostationary satellite fire radiative power measurements: a case study of the 2019 Williams Flats fire,Atmospheric Chemistry and Physics,22(15),10195-10219,2022
- 511]C Eriksen,J Turnbull,Insure the volume: Sensing air,atmospheres,and radiation in the Chornobyl Exclusion Zone,Climate,Society and Elemental Insurance,167-182,2022
- 512]D Morvan,G Accary,S Meradji,N Frangieh,Fifty years of progress in wildland fire modelling: from empirical to fully physical CFD models,Comptes Rendus. Mécaniqu,1-9,2022
- 513]D Wu,X Niu,Z Chen,Y Chen,Y Xing et al.,Causes and Effects of the Long - Range Dispersion of Carbonaceous Aerosols From the 2019-2020 Australian Wildfires,Geophysical Reseaech Letters,49(18),2022
- 514]G Wei,V Krishnan,Y Xie,M Sengupta,Y Zhang,X Liu,Physics-Informed Statistical Modeling for Wildfire Aerosols Process Using Multi-Source Geostationary Satellite Remote-Sensing Data Streams,arXiv preprint arXiv ,11766,2022
- 515]J Jońca,M Pawnuk,Y Bezyk,A Arsen,I Sowka,Drone-Assisted Monitoring of Atmospheric Pollution- A Comprehensive Review,Sustainability,14(18),11516,2022
- 516]M Nakata,I Sano,S Mukai,A Kokhanovsky,Characterization of wildfire smoke over complex terrain using satellite observations,ground-based observations,and meteorological models,Remote Sensing,14(10),2344,2022
- 517]MJ Moody,JA Gibbs,S Krueger,D Mallia et al.,QES-Fire: a dynamically coupled fast-response wildfire model,International journal of wildland Fire,31(3),306-325,2022
- 518]Mohammad Reza Kavian Nezhad,Carlos F. Lange and Brian A. Fleck,Performance Evaluation of the RANS Models in Predicting the Pollutant Concentration Field within a Compact Urban Setting: Effects of the Source Location and Turbulent Schmidt Number,Atmosphere,13(7),1013,2022
- 519]S Altland,HHA Xu,XIA Yang,R Kunz,Modeling of cube array roughness: RANS,large eddy simulation,and direct numerical simulation,Journal of Fluids Engineerring,144(6),061106,2022
- 520]S Datta,B Sinha,P Talukder,Environmental inferno-Wildfire emitted aerosols,American Journal of Applied Bio-Technology Research,3(2),14-19,2022
- 521]A Casallas,T Cordoba et al.,Understanding the atmospheric characteristics of high polluted events in a tropical megacity,Revista Facultad de Ingenieréa Universidad de Antioquia,2023
- 522]A Wawrzynczak,M Berendt-Marchel,How to Select Superior Neural Network Simulating Inner City Contaminant Transport? Verification and Validation Techniques,International Conference on

Computational Science,Computational Science-ICCS2023,2023

523]K Essa,AA Marrouf,S Etman,M El-Otaify,Fractional solution of the puff model in three dimensional for pollutant dispersion in the atmosphere,2023

524]K Vogiatzoglou,C Papadimitriou et al.,An interpretable wildfire spreading model for real-time predictions,arXiv preprint arXiv,2023

525]MI Asensio,JM Cascon,D Prieto-Herraez,L Ferragut,An historical review of the simplified physical fire spread model PhyFire: Model and numerical methods,Applied Sciences,13(4),2035,2023

526]U Rizza,F Donnadieu,M Morichetti,E Avolio,Airspace Contamination by Volcanic Ash from Sequences of Etna Paroxysms: Coupling the WRF - Chem Dispersion Model with Near - Source L - Band Radar observations,2023

527]W Liu,S Lv,Numerical Wind Tunnel Simulation for Pollutants Dispersion with Urban 2003,Journal of Physics: Conference Series,2463,2023

■ 3 章 CFD を活用する高分解能大気拡散シミュレーション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、CFD を活用する高分解能大気拡散モデル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、本事業が対象とする専門家が所属する機関として、選定した 7 か所の事由を記し、3.3 節では、各機関毎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、メール等での質疑確認等である）。

3.2 CFD を活用する高分解能大気拡散シミュレーション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 7 つ）の特徴と調査対象機関とした事由を記す。

(1) 日本原子力研究開発機構（原子力基礎工学研究センター①）

本機関は、放射性物質の大気拡散現象のシミュレーション技術の開発において、WSPEEDI を開発する等、世界をリードする立場にある。本ヒアリングにより、局所大気拡散からグローバル領域への拡散に至るまで、最近の研究開発動向について調査する。

(2) 日本原子力研究開発機構（原子力基礎工学研究センター②）

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関連するコード LHADDAS を開発している。本ヒアリングにより、LHADDAS 中の LOHDIM-LES と SYBIL コード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。

(3) 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、汚染物質の大気拡散現象を超高速に解析可能とする格子ボルツマン法を採用した City-LBM を開発し、上記原子力基礎工学研究センター②と連携し、LHADDAS の開発にも参画している。本ヒアリングでは、特に、大規模 LES の計算科学の先端動向について調査する。

(4) 筑波大学（計算科学研究センター）

本機関は、LES モデルを気象現象（特に、局所域での熱環境等）に適用し、その知見を蓄積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 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。

(5) 電力中央研究所（サステナブルシステム研究本部）

本機関は、放射性物質等の拡散問題をはじめとして、環境流体现象のシミュレーションを長年にわたり研究開発してきた実績がある。本ヒアリングでは、LES の活用とその評価結果について調査し、今後の課題とその解決方法についての知見を取得する。

(6) 名古屋大学（大学院環境学研究科）

本機関は、火災現象等において、CFD を活用する等の研究開発を進め、社会的課題解決へ向けた研究開発を進めている。本ヒアリングでは、CFD を実現象へ応用する上での課題やその解決策を調査し、関連する知見を取得する。

(7) 新潟工科大学（風・流体工学研究センター）

本機関は、風洞実験施設を有し、かつ、LES 等のシミュレーション研究を広範に実施している。本ヒアリングでは、LES と RANS の比較により得られた知見をヒアリングする他、LES 研究開発の将来動向を調査する。

3.3 筑波大学（計算科学研究センター）

日 時：2023 年 11 月 30 日（木）9:00-10:00

形 式：オンライン

参加者：筑波大学 計算科学研究センター 地球環境研究部門 A 教授（筑-A と記す）

JAEA・安全研究・防災支援部門・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：筑波大学 計算科学研究センター 地球環境研究部門 筑-A

・ヒアリング元：日本原子力研究開発機構 安全研究・防災支援部門 安全研究センター J-A、J-B

・ヒアリング内容：

1. 自己紹介（全員）
2. ヒアリング目的説明（J-B：5 分）
3. ヒアリング先プレゼンテーション（筑-A：20～25 分）
「筑-A 研究開発内容のご紹介」
4. 議論（全員：30 分）
 - 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
 - 局地風況環境のシミュレーションにおける成果と課題
 - 今後の展開（上記課題解決の方向性等）
 - 汚染物質（放射性物質）拡散計算高精度化へのコメント
 - その他
5. 謝辞とあいさつ（J-A）

・議事

(1) 筑-A によるプレゼンテーション

- 今年 8 月に行われた国際都市気候学会（ICUC）（シドニー）での筑-A の発表内容の紹介があった。
- 街区の熱環境にて、熱中症をどう防ぐかをテーマに、LES モデルを開発している。
- 境界層における風、霧などの気象現象を再現、予測することも目標としている。
- これらの研究では、ソフトウェアとして ENVi-MET（ドイツ）が良く使われている。このソフトは商用ソフトで、使い勝手が良い。建物やミストの機能があり、室内環境との連成もできる。ただし、精度的には問題がある。場所ごとの午後 2 時の気温について、実測との比較を検討したレポート(Yang,2018)によれば、実測値と合わず傾向や相関も合わない。標準 k-ε モデ

ルを使い、強風解析、熱環境、浮力効果、壁面・道路面の反射、大気放射冷却などを考慮している。

- 一方、筑-A のモデル City-LES は、独自の LES で、ブシネスク近似で、霧、雲、日射などの気象モデルが入っている。温位を変数としている特徴を有する。
- 熱環境の指標としては、UTC、WBGT、MRT の 3 つが良く使われている。
WBGT は、環境省の熱中症アラートのベース、遮熱指標。UTS はヨーロッパで多く、WBGT の上位互換、MRT は下位互換の関係にある。上記対策としては、ドライミスト、屋上緑化、壁面緑化など。
- City-LES を用いて、東京駅前のビル街における気温分布を実測と比較した事例の紹介があった。御幸通り、日比谷通りで、ビル風による移流の違いや、日陰の影響などが良く再現されている気温においては、平均誤差 0.51°C 、RMSE 0.59°C 、相関 0.93 、WBGT は平均誤差 0.38°C 、RMSE 0.53°C 、相関 0.88 となった。風況分布は、建物による大きな流れを解いているが、道路などは大体合っていて、中通りの風が無い所も再現できている。
- WRF とのネスティングに関しては、①Periodic、②Re-Cycling、③Digital filter、④LES-LES ネスティングの機能を持つ。
- まとめ：WBGT の再現性などの精度検証などを行い、本モデル(City-LES)は暑さ対策に使えることが分かった。

(2) 質疑 (Q : 質問、A : 回答、C : コメント)

Q : WBGT とは? (J-B)

A : WBGT は Wet Bulb Globe Temperature(湿球黒球温度)、(暑さ指標)、気温、湿度と、黒体(人間が感じる放射の要素)を入れて指標とした。ただし、風の効果(風が吹くと涼しい)は、WBGT は弱い。これに対して、UTCI(Universal Thermal Climate Index)という WBGT に風の効果を入れた指標もある。(筑-A)

Q : City-LES の空間スケール、計算時間は? (J-A)

A : $500\text{m} \times 500\text{m}$ の範囲で、計算時間は、1 日はかからない。放射計算や雲の計算が重いので、その点が通常の CFD(LES)とは異なる部分だ。近場からの反射に限定すれば、計算負荷は大きく減る。数時間程度で、実時間より少し長い程度。最も近傍の赤外線が影響するが、ビル間の反射などは、どの位遠くからの影響を考慮するかで変わる。(筑-A)

Q : このモデルを広域に広げる場合の課題は? (J-A)

A : 数 10km は厳しい。格子は 1m なので、5 万格子 \times 5 万格子程度になる。気象場との結合では、広域を解く場合とエリアごとに解く場合との差に関して、研究が進んでいる。関東全体を広く解くような場合や、積乱雲を解く場合などは、 1m 格子は不要、 50m で良い。原発などの施設では、近傍は 1m として、排出量を丁寧に扱う、ということは考えられる。(筑-A)

Q : ENVi-MET はどの位使われているか? (J-B)

A : 研究だけでなく、応用的に使われることが多いようだ。ドイツでは、PALM (パルム) も使われている。PALM4U (PALM for URBAN) というのもある。(筑-A)

Q：雲による日射への影響は？（J-A）

A：粗いが入っている。雲や霧を計算で求める場合と、WRF から乱層雲や積乱雲を考慮する場合がある。この場合は経験式で日射を評価する。晴れた日の雲の塊など境界層内や上端の雲を評価する。（筑-A）

Q：並列化については？（J-B）

A：コードの半分以上は、熱に関するもので、分岐が多いため並列化は難しい。都市環境では、通常の移流拡散だけではなく放射の扱いがあり、この部分が並列化しにくい。（筑-A）

(3) 今後の課題（精度—物理と計算の両面で、また計算機上の課題について）

- ① 現状で弱い点は放射計算、放射冷却の部分だ。都市内部は複雑になる。地面安定成層の厚さや夜間の逆転層は重要だ。平坦地形ならうまくいくが、複雑な建物の場合は難しい。
- ② 現在は直方体の建物群で、三角屋根や丸いドーム形状には対応していない。差分格子なので扱いが難しい。
- ③ 風環境について、剥離などを捉える場合、格子をどう細かく切るかが課題。
- ④ 物質輸送や拡散モデルに関して、ドライミストの扱い、すべてが蒸発しないで、隣の格子に移流する場合などが課題である。
- ⑤ 現状では、ビル風などの解析と、大気拡散、温熱環境などのグループは3つに分かれて開発しているので、今後統一的にやっていくことが重要だ。
- ⑥ 格子ボルツマンなどもあるが、うまくいくかどうかは不明である。いずれにしても、暑さ対策は今後重要となる。計算機環境については、単なるユーザーなので、HPC 部門に要求を出すだけだ。GPU はアクセラレータに向いているが、汎用スパコンも残してほしい。放射問題をGPU で解くのは、他のグループで検討しており、今は難しいが、どの位で解決できるか数年は検討を続けたい。（筑-A）

(4) 謝辞とあいさつ

- ・今後、拡散モデルでの連携を考えたい。（J-A）
- ・今後、意見交換などメールのやり取りをお願いします。（J-B）

3.4 電力中央研究所（サステナブルシステム研究本部）

日時：2023年12月6日（木）16:30-17:30

形式：オンライン

参加者：電力中央研究所 電-A、電-B、電-C

JAEA・安全研究・防災支援部門・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：電力中央研究所 サステナブルシステム研究本部 研究統括室 電-A 様
サステナブルシステム研究本部 気象・流体科学研究部門 電-B 様
サステナブルシステム研究本部 気象・流体科学研究部門 電-C 様
- ・ヒアリング元：日本原子力研究開発機構 安全研究・防災支援部門 安全研究センター J-A、J-B

・ヒアリング内容：

1. 自己紹介（全員）
2. ヒアリング目的説明（J-B：5分）
3. ヒアリング先プレゼンテーション（電-A他：20～25分）
「電-A、電-B、電-Cの研究開発内容のご紹介」
4. 議論（全員：30分）
 - 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
 - 局地風況環境のシミュレーションにおける成果と課題
 - 今後の展開（上記課題解決の方向性等）
 - 汚染物質（放射性物質）拡散計算高精度化へのコメント
 - その他
5. 謝辞とあいさつ（J-A）

・議事

(1) ヒアリング目的の説明（J-B）

- JAEA では放射性物質拡散について、CFD の RANS、LES を検討している。これに関連して、どのような課題、どのような高精度化が図れるか、調査とヒアリングをしている。課題と適用性、課題解決策と将来像についてお聞きしたい。報告書にヒアリング内容を記録する。
- ヒアリング内容をまとめて、質問などのやり取りをし、報告書に載せる前に確認して頂く。
- 電中研での火力、原子力、地熱に関する研究で、LES を適用した例をプレゼンテーションしたい（電-A）。

(2) 電-Bによるプレゼンテーション

- 地熱発電所のアセスメントでは、冷却塔からの H_2S の拡散予測が必要であり、山間部での地形を再現した風洞実験について、それを LES ベースに置き換える取り組みを 10 年ほど前からやってきた。
- 計算メッシュの半自動生成システムなども構築し、非構造格子、非圧縮ブシネスク近似、OpenFOAM ベースのシステムを開発した。速度は、2 次中心+1 次風上、濃度は 2 次 TVD とした。精度検証では、風洞実験を正として、LES の結果を検証した。参考文献 1) の Fig.11~13 により、風洞実験とよく合っていることが分かる。このシステムは、地熱発電所のアセスメントでは標準となり、現在では風洞実験でなく、ほぼ LES で行っている。今後の課題としては、実現象との比較がテーマである。
- 次に原子力発電所に関して紹介する。原子力発電所のアセスメントでは、有効高さを風洞実験で求めるが、これを LES で代替する検討を行った。地形と建屋を想定した平坦地形から複雑地形の A から D の 4 つのモデルで風洞実験を行い、LES の結果を検証した。参考文献 2) の Fig.23 で説明すると、LES による有効高さの予測は、風洞実験の結果と良く合っている。（相関 0.99）さらに、日本原子力学会の基準である不確かさの評価を分かり易く図示するために、Fig.27 のような棒グラフの列で示した。A から D の 4 ケースについて、有効高さの風洞実験結果と LES 結果を並べ、さらにエラーバーで不確かさの範囲を示した。こうした評価例を今後事業者に使ってもらうことを想定している。

(3) 電-Cによるプレゼンテーション

- 火力発電所の事例を紹介する。火力発電所の排ガスは 30m/s 程度で上昇するが、石炭火力に比べて最近の LNG 火力の煙突は高くないため、建屋の影響を受けることが多い。環境影響評価では、建物ダウンウォッシュを考慮したブルームモデルを用いるが、影響が複雑な場合、風洞実験が必要となる。これを LES で代替する検討を行った。計算領域は風下 10km 程度の範囲だが、建物影響があるときは、約 5km で最大地表濃度が出る。OpenFOAM ベースのシステムで、煙突の直径は 6m、refine メッシュ機能で 1/2 ずつ細かくし、20 ケースを検討した。参考文献 3) の Fig.6 のように煙突のメッシュを作成した。地表面のブルーム軸上濃度は、Fig.11 のように良く合っている。FAC2、FB の評価でも合っている。
- 別の例として、火力発電所の貯炭場の解析例を示す。(参考文献 4) 野積みの貯炭場での粉塵の拡散については、アセスメントが必要となる。粉塵の飛散量は風速の 4 乗に比例するが、その風速分布を求めた。これも風洞実験を LES で代替する検討である。一般にフェンスは風速を遅くするが、遮風フェンスありと、遮風フェンスと建屋がある場合の 2 ケースを検討した。また遮風フェンスには開口部を設けるモデルを開発した。

(4) 質疑 (Q:質問、A:回答、C:コメント)

Q: CFD を使う上では、どの位の空間スケール、メッシュを使うか? (J-B)

A: ケースバイケースであるが、地熱で 2km、原子力では 5km 程度だ。計算は風洞のスケールに合わせるが、実スケールでは、建屋を 1m 格子で切る程度だ。(電-B)

A: 火力では、メッシュは少なめで、300 万から 1000 万格子程度だ。(電-C)

Q: 境界の範囲はどう定めるのか? (J-B)

A: 地熱・原子力では、風洞実験の範囲を計算領域とする。拡散現象は遠くまで起こるが、環境アセスメントでは、地表最大濃度を求めるため、地熱の場合は 1 から 1.5km なので、2km あれば良い。原子力の場合は 5km 程度で最大濃度が発生する。(電-B)

A: 火力の場合は、年平均値や日平均値も必要であり、30 km 程度となる。煙突高さが 200m で、風が弱いときは遠くに最大着地濃度が発生する。建屋が影響する場合、風が強いときは最大濃度出現場所が近くなる。

Q: 境界条件の設定はどうしているか? (J-B)

C: (補足) これまでのプレゼンは環境アセスメントに関連するが、原子力の事故時の評価の場合は、広域の評価が必要で、実際の気象場を使う。この点は電中研モデルではどう考えているか? (J-A)

A: CFD の活用評価では、原子力では数 10km を超える拡散は扱っていない。それらは、ブルームベースで対処する。CFD は、敷地内のサイズになるので、計算領域は広くはない。気象場は今後の課題だ。(電-A)

Q: 気象モデルからのダウンスケールは?

A: 今後の課題として検討している。(電-B)

A: 現在、NEDO の 2021 年から 2025 年の 5 年計画のプロジェクトで、地熱環境影響調査で、山間

部の気象調査が大変なため、それを気象モデルに置き換えが出来ないか検討している。気象モデルと CFD を組み合わせ、さらに AI を利用して、高精度で予測できないか、また、気象場を入力して大気安定度を再現し、パフモデルや CFD で、長期拡散予測ができないか、を検討している。(電-A)

Q: 地熱では、気象は現地観測を 1 年間やるのか? (J-A)

A: 最大濃度が必要であり、平均的気象場と最大濃度が出る気象条件の 2 パターンに風速 2 ケース程度の合計 4 ケースを実施する。原子力では、有効高さのみを求める。(電-B)

A: 火力では 1 年間でプルーム式で評価する。特殊な気象条件の場合は、1 時間濃度を予測する場合もある。(電-C)

C: (補足)火力の場合、低い煙突で、市川・佐田モデルの適用が困難な場合は、LES が必要となる。(電-A)

Q: 計算領域の側方、上方の境界条件はどうとるか? (J-B)

A: 風洞を代替する既存のモデルはシンプルで、地熱の場合は計算領域が風洞の範囲であり、天井・側壁とも単純な壁としている。原子力の場合は、風洞より狭い範囲なのでスリップ条件を用いる。(電-B)

A: 火力の場合は、風洞に準じて、一様流入に乱流発生をつけ、側面、上方はスリップ条件、流出はゼロ勾配としている。(電-B)

Q: 1 ケース当たりの計算時間は何時間か? リアルタイムの解析は? (J-B)

A: 地熱、原子力では、定常解を求める。定常に達した場合の平均値を使うため十分な時間積分が必要、1 ケースで 4 日から 5 日かかる。1000 から 2000 の並列機を使う。(電-B)

A: 原子力では、320 並列のマシンで 1 ケース 2 日程度だ。(電-C)

Q: 現状で風洞の再現を達成した。今後の CFD について高精度化の課題と解決策を伺いたい。(J-B)

A: 火力の場合は、LES は精度は良いがコストがかかる。特定の気象条件について 1 年間を通しての解析を行う、また実際の気象条件を用いた LES 解析で、気象モデルからの境界条件設定や地点による風の乱れを解析するなどが今後の課題だ。(電-C)

A: 地熱・原子力の場合も同じで、現象に対して解像度不足を解決するとか、リアルな大気の再現、雲、雨、線量への影響などを工学 LES にも取り入れたい。先ほどの計算機の性能に関しては、ノード当たり 3TFLOPS のマシンで、2030 ノードを 1 回の計算で使用する。(電-B)

(5) 謝辞とあいさつ

- 地熱について、現実地形での検証に関して、NEDO のプロジェクトで長期 5 か月の観測を行ってモデルを検証する予定なので、将来的に使わせて頂きたい。(J-A)
- 今後、メールのやり取りで、細かい質問をさせて頂きたい。本日はありがとうございました。(J-B)
- 今日のプレゼンを聞いて、相互に協力できる部分があると感じた。今後とも密な協力をお願い

したい。(J-A)

(6) 参考文献

- 1) 小野浩己ほか、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、第 52 巻、第 1 号 (2017)
- 2) 小野浩己ほか、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、Vol.21、No.3 (2022)
- 3) 瀧本浩史ほか、運動量による上昇過程と建屋影響を考慮した排ガス拡散予測のための Large-eddy simulation、日本風工学会論文集、第 44 巻、第 3 号 (2019)
- 4) 瀧本浩史ほか、Large-eddy simulation による遮風フェンスを考慮した貯炭場内風速分布の予測、大気環境学会誌、第 56 巻、第 1 号 (2021)
- 5)

3.5 名古屋大学 (大学院環境学研究科)

日 時：2024 年 1 月 12 日 (金) 10:30-11:30

形 式：オンライン

参加者：名古屋大学 大学院環境学研究科 A 教授 (名-A と記す)

JAEA・安全研究・防災支援部門・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：名古屋大学 大学院環境学研究科 名-A
- ・ヒアリング元：日本原子力研究開発機構 安全研究・防災支援部門 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 (全員)
 2. ヒアリング目的説明 (J-B：2～3 分)
 3. ヒアリング先プレゼンテーション (名-A：20～25 分)
「名-A の研究開発内容のご紹介」
 4. 議論 (全員：30 分)
 - ・ 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
 - ・ 局地風況 (市街地火災等) 環境のシミュレーションにおける成果と課題
 - ・ 今後の展開 (上記課題解決の方向性等)
 - ・ 汚染物質 (放射性物質) 拡散計算高精度化へのコメント
 - ・ その他
 5. 謝辞とあいさつ (J-A)

・議事

(1) ヒアリング目的の説明 (J-B)

- 事業目的(ヒアリング目的)を説明した。JAEA では放射性物質拡散について、CFD の RANS、LES を検討している。これに関連して、どのような課題、どのような高精度化が図れるか、調査とヒアリングをしている。課題と適用性、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。
- ヒアリング内容をまとめて、質問などのやり取りをし、報告書に載せる前に確認して頂く。

(2) 名-A によるプレゼンテーション (その 1)

- 建物火災の LES 解析について紹介する。この例は、建物そのものの火災で、集合住宅での排煙、煙のシミュレーションに注目した。名古屋市消防局では、火災時に煙の排煙が重要として加圧排煙戦術に力を入れている。アメリカでは昔からこの方法をとっている。集合住宅の火災住戸の前の廊下に、送風機 A、B を設置して排煙するシミュレーションを、オープンソースの FDS (Fire Dynamics Simulator) により解析した。火災のシミュレータとしては、この FDS と、OpenFOAM ベースの FireFOAM が世界的に使われている。FDS は、SGS 型の LES (ディアドロフモデル) である。O 方程式型簡易型の LES がデフォルトとなっている。この解析例では、高層 14 階建ての 11 階で火災が発生、住戸は東西それぞれに面して並び、その間は吹抜けの構造となっている。玄関ドア正面に送風機 A、廊下の奥に送付機 B を設置して解析した。実際の現場では、この位置には置けず、ドアを開けると廊下側に黒煙が噴き出し、室内には人がいた。解析条件は、西風 2m/s、格子点数 6328125、162x250x150+81x125x25 の規模である。階段室の扉は手動で、どこを閉めたら効果的かも検討し、結果は煙の見通し距離 (視程) で示した。送風機は、酸素を供給し火勢を増す場合もあるので、注意が必要である。火災は精度検証が出来ないのが問題で、定性的な確認のみとなっている。

(3) 名-A によるプレゼンテーション (その 2)

- 市街地火災の例、FDS により飛火の延焼をモデル化して解析した。市街地火災は、南海トラフ地震でも重要な問題であり、最近の例では糸魚川市の大規模火災の例もある。この時は乾燥したフェーン現象の影響で大火となった。
- 飛火のモデルとしては、次のような過程をモデル化した。1) 火の粉発生、2) 飛散・沈降、3) 建物外部可燃物への着火、4) 建物内部への火の粉侵入、5) 内部可燃物への着火、このうち、2) と 3) は CFD で解析可能、1)、4)、5) は別途モデルが必要となる。この解析では、確率モデルを用いている。
- 火の粉のモデルとしては、直径 1cm、密度 80kg/m³、寿命 50 秒、熱流束 430kW/m²、周辺建物群に着火する火の粉の個数条件を 1 か 3、周辺建物群での火の粉の堆積確率を 10% と 80% の場合を想定し、発生から 1200 秒までを解析した。さらに、周辺建物について、主流方向に平行、あるいは垂直な開口部について、その差を検討した。開口部の向きと位置により延焼に差が出ることを確認した。

(4) 質疑 (Q:質問、A:回答、C:コメント)

Q: 火災による風況も FDS で解いているか? 燃焼の化学反応も解いているか? (J-B)

A: 流体の方程式により風況も解いている。燃焼は、理想的な条件での実験をもとにしているの、どのくらい実態を反映しているかは不明である。(名-A)

Q: 煙の計算はどうしているか? (J-A)

A: 煤の発生にもとづき、その移流拡散式を解いている。(名-A)

Q: 火災の場合、計算条件やシナリオの設定が難しい。条件設定は消防のニーズによるのか? (J-C)

A:高層階の住戸火災のケースでは、消防からの送風機の配置検討のニーズ、延焼の例は、こちらで想定した。延焼の例では、建物の建ぺい率は名古屋市がベースだが、火の粉の発生や開口部の条件はこちらで決めた。この例は、火の粉の直径、密度、寿命などの条件のうち、どれが効くかを確認するためである。検証に関しては、実際の現場などのドローン撮影の結果を元に、それをデータ同化を用いて再現検討することを、今後の研究テーマの一つとしている。(名-A)

Q:実際の市街地火災の例などでは、情報公開の難しさもあるのでは? (J-C)

A:その通りだ。(名-A)

Q:延焼の例で、パワーポイントの10、11のシートでは、煙の拡がり、大気安定度や建物の表面の温度との関係はどうしているのか? (J-E)

A:熱収支を含めて解いている。火災近傍の気象条件を使用している。外部条件としての気象の運動が再現されている訳ではない。境界条件としては、助走区間を設定して、地面の温度など与えた流入条件でのバランスが表現されている。今後、LESで気象もモデル化する必要がある。(名-A)

Q:気象条件は、ある一定の条件を設定したということか? (C)

A:その通りだ。(名-A)

Q:燃焼については、関連する化学種を解いているか?火の粉はラグランジュ的に解いているか? (J-B)

A:解いている。飛火はラグランジュ的にモデル化している。(名-A)

(5) 謝辞とあいさつ

- ・ ヒアリングの結果は報告にまとめて送る。確認と加筆訂正をお願いしたい。発表資料について可能なものを送って頂きたい。今後質問などのメールのやり取りをお願いしたい。(J-B)
- ・ データ同化について、興味深い (J-B)
- ・ 科研費を申請して通った。申請資料はHPで閲覧可能だ。(名-A)
- ・ 気象場との融合など今後も協力可能な分野がある。今後とも密な協力をお願いしたい。(J-A)

3.6 新潟工科大学 (風・流体工学研究センター)

日時:2024年1月31日(水)13:30-14:40

形式:オンライン

参加者:新潟工科大学 風・流体工学研究センター A教授(新-Aと記す)

JAEA・安全研究・防災支援部門・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:新潟工科大学 風・流体工学研究センター 新-A
- ・ ヒアリング元:日本原子力研究開発機構 安全研究・防災支援部門 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(全員)

2. ヒアリング目的説明 (J-B : 2~3 分)
3. ヒアリング先プレゼンテーション (新-A : 20~25 分)
「新-A の研究開発内容のご紹介」
4. 議論 (全員 : 30 分)
 - ・ 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
 - ・ 局地風況環境のシミュレーションにおける成果と課題
 - ・ 今後の展開 (上記課題解決の方向性等)
 - ・ 汚染物質 (放射性物質) 拡散計算高精度化へのコメント
 - ・ その他
5. 謝辞とあいさつ (J-A)

・ 議事

(1) 自己紹介 (JAEA、事務局は省略)

自己紹介 (新-A)

- 専門は建築環境工学、都市環境工学、メインの学会としては建築学会
- 学生時代から CFD に関わり、ガス拡散、ビル風、風環境工学をやってきた。新潟工科大に来てからは CFD の雪、砂への応用分野を研究している。
- 拡散シミュレーションについては、カナダの Concordia University の Ted Stathopoulos 教授の元で研究した。

(2) ヒアリング目的の説明 (J-B)

- 事業目的 (高分解能被ばく評価手法の整備) を説明した。JAEA では放射性物質拡散について、CFD の RANS、LES を検討している。これに関連して、どのような課題、どのような高精度化が図れるか、調査とヒアリングをしている。課題と適用性、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。

(3) 新-A によるプレゼンテーション

- 2017 年のアジアパシフィック風工学会の国際会議での発表資料をもとに紹介する。
- 主な問題意識としては、都市の大気汚染で、その発生源 (ソース) は多様であり、空間スケールは 1km 以下のマイクロスケール、時間スケールは 1 日程度
- Meso > Local > Micro で、マイクロスケールでは、建物による風速分布の影響による拡散を検討する。これには、次の 3 点が重要、①3 次元的な流れを正確に捉える、②ストリートキャニオン内の比較的大きなスケールの変動 (Large Scale velocity fluctuation) を捉える、③濃度フラックスのモデル化、特に RANS では重要、LES に関して言えば、①PBL での変動、②建物周りの流れの変動、③拡散のプロセス、ということになる。
- CFD のメリットとしては、実験では困難である熱的影響の評価の場面で重要で、例えば、建物の壁からの加熱による局所的な大気不安定性などの解析に使える。しかし、CFD のモデルの選定ではセンシティブな面があり、例えば、RANS の乱流シュミット数 (Sct) の選定では、値の依存性なども問題で、チューニングが必要となる。また、LES と比べて RANS では横方向の拡散が小さいなどの問題がある。
- これらの判断材料として、BPG (Best Practice Guideline) が必要で、COST(2007)や、AIJ ガ

イドライン(2008)がある。AIJ はビル風など風工学分野のもので、拡散問題のガイドラインは現時点では見当たらない。V&V や検証用 DB の整備なども重要だ。LES の計算では、濃度分布だけでなく、風速の変動成分についても風洞実験などに基づく検証が重要だ。

- RANS による大規模計算の例、地下駐車場からの排ガスの汚染を解析した。街区そのものの換気されやすさのインデックス（空気齢）を評価する。建て込んだ街並みでの換気の程度を評価する。
- 最近の研究では、LES で高層建物の周辺に低層建物を配置して風速、濃度分布を求めた。周辺建物の影響で、流れ構造が大きく変わり、高層建物の壁面に沿って上へ拡散し、風下側への拡散が小さくなる結果が得られた。
- 最後の例として、二面に開口部がある建物に、各面と対角方向に 8 つの周辺建物を置き、風向を変えて、開口部のある建物の室内換気を検討した。開口部の向きと直交する方向の風向きでは、RANS では、開口部から風が流入せず、換気がされなかったが、LES では、微小の変動により間歇的に風が流入し、換気が行われた。

(4) 質疑 (Q:質問、A:回答、C:コメント)

Q: LES と RANS で、バリデーションのデータは、どの位の時間スケールで考えればよいか? (J-B)

A: LES の平均化時間については、気象系の先生はシビアで、風工学のセンスの平均だと短い、という先生もいる。拡散の問題では、どの位の平均をとるか、議論の余地がある。(新-A)

Q: 実気象場をどう取り入れているか? メソスケールとマイクロスケールの結合は? (J-A)

A: 実気象場との結合は経験がない。雪のシミュレーションでは、気象条件の結合であるが、言わば「疑似非定常 RANS」を用いて、パラメータを工学モデルに置き換えて与えている。LES の接続では、変動成分を境界でどう与えるかが問題だろう。雪の場合は、境界での降雪量を設定している。注目点は、境界での一様の降雪が、吹き溜まりなど建物周辺でどう再配分されるか、を見ている。雪の粒子を追跡する。(新-A)

Q: プレゼンにもあったが、熱の問題について、マルチスケールでの検討などはどうか? (J-D)

A: 局所的な加熱の問題は、マイクロスケールでの大気の安定、不安定にも関係するが、風と比べて熱の問題は、Re 数が大きい場合は実験も難しいため、検証するための実験が少ない。いろいろな論文もあるが、対流熱伝達の扱いもバラバラで、風の扱いと比べて、まだ定説になっていない、という感じだ。熱の扱いは今後の課題で、バリデーションも難しい。熱フラックスが分かっていたら境界固定で与える、フラックスが分からない場合は壁関数などで与える (新-A)

Q: 流れ場の風洞実験のデータは蓄積しているが、これを用いてデータ同化を行う試みは、都市の風工学分野ではどうか? (J-D)

A: やりはじめた人がポツポツいるが、たくさんではない。(新-A)

Q: 沈着現象について、例えば壁につく物質などを用いて風洞実験などは行われているか?

A: あまり聞かない。(新-A)

Q：風工学会には、最近は参加していないが、拡散の研究分野で最近のトレンドは？ (J-C)

A：拡散だけの研究は少なくなってきた。別のフィジックスを取り込む方向で、化学変化や複数の物質などに注目している。(新-A)

Q：RANS、LESとも、拡散問題について、オイラー的、ラグランジュ的それぞれの向き不向き、適用性に関しての知見は蓄積されつつあるのか？ (J-B)

A：ラグランジュ型の経験はわずかしかない。粒子そのものがどう付着するか、粒子が重いかか粒子の挙動や特徴に興味がある場合に使われるだろう。LESで渦の影響を粒子が受けやすい、受けにくい、というような詳しい知見はまだない。粒子の濃度にもよる。(新-A)

Q：プレゼンの中で、屋上での排出のリバースフローによる上流側への拡散は興味深かった。こうしたリバースフローを再現するには、格子分割の目安はどの位か？ (J-F)

A：一般的な格子分割の目安としては、建築学会のCFDガイドラインなどがある。それによれば、建物の一辺の解像度が30分割程度とれば、剥離が再現できる。実際には、建物のコーナー部分などを細かくする。(新-A)

Q：J-B氏の質問とも関連するが、LESでの後処理の平均時間については、どう考えればよいか、注目する現象によって異なるか？ (C)

A：気象系の場合はシビアだが、建築系では、いろいろと議論の余地がある。(新-A)

Q：LESにより高分解化を考えた場合、どこに注意すればよいか？ (J-B)

A：風速変動の細かい結果がなくて、濃度の結果のみの場合は検証しにくい。データベースとして、風速変動のデータがあるので、それを用いて検証する必要がある。(新-A)

(5) 謝辞とあいさつ

- 時間を多少オーバーしてしまっただが、ありがとうございました。ヒアリングの結果は報告にまとめて送る。確認と加筆訂正をお願いしたい。発表資料について可能なものをお送り頂きたい。(J-B)
- 今後とも研究でご協力をお願いしたい。(J-A)

3.7 日本原子力研究開発機構（原子力基礎工学研究センター①）

日時：2024年3月18日（月）15:30-16:10

形式：オンライン

参加者：JAEA・原子力科学研究部門・原子力基礎工学研究センター担当者 G-A, G-B 他

JAEA・安全研究・防災支援部門・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・原子力科学研究部門・原子力基礎工学研究センター担当者 G-A
- ・ヒアリング元：JAEA・安全研究・防災支援部門・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（全員）
2. ヒアリング目的説明（J-B：5分）
3. ヒアリング先プレゼンテーション（G-A：20～25分）
「G-A 研究開発内容のご紹介」
4. 議論（全員：30分）
大気環境シミュレーション研究開発の最新動向
上記シミュレーションにおける成果と課題
今後の展開（上記課題解決の方向性等）
汚染物質（放射性物質）拡散計算高精度化へのコメント
その他
5. 謝辞とあいさつ（J-A）

・議事

(1) G-A によるプレゼンテーション概要

- プレゼンのタイトルは、「マルチスケール大気拡散モデルの現状と展望」であった。
- 環境動態研究の中長期計画である「デジタルツイン」の一環として開発中に得られた成果についてのプレゼンであった。
- 上記「デジタルツイン」では、大気・海洋・陸域統合シミュレーション（仮想空間）と実空間データ取得（実空間）を対応させることが目標となっている。
- 仮想空間では、これまで開発したシステム（WSPEEDI、STEAMER、LOHDIM、SOLVEG など）があり、実空間では放射線イメージング、ドップラーライダーなどの観測機器がある。
- 大気部分については、従業者および公衆の放射性被ばくの可能性を解析対象とする。解析する事象には、通常運転、事故・武力攻撃、医療現場における放射性物質取り扱いや核実験などが該当する一方、対応すべき事項としては、平常時、緊急時のモニタリング計画策定、環境影響評価、放出量推定などがある。
- 現状の緊急時対策は、主にモニタリングだけに依存しているの現状である。
- 大気拡散モデルの対象とするスケールは、1m から 10000km までであり、LOHDIM、WSPEEDI、GEARN-FDM の各システムは、それぞれの対象領域と適用分野がある。
- 本プレゼンテーションでは、上記、各大気拡散モデルの開発の概要が説明された。

(2) 質疑（Q：質問、A：回答、C：コメント）

Q：マルチスケール（ミクロから）の拡散では、粒子の連続性、風の整合性はどうするか？（J-C）

A：つなぎ部分の基準高さをもとに、WRFの風のデータベースでチェックする。（G-B）

Q：側面の境界では？（J-A）

A：まだ確認していない（G-B）

Q：WRFの風にのる乱れの情報、乱流成分をどうつなげるか？（J-C）

A：WRFのPasquill-Giffordのチャートを利用する予定だが、未確認。（G-B）

Q：データ同化は？（J-C）

A : WRF の 4DVAR でやった。今後はカルマンフィルターも考えている (G-A)

Q : 鉛直方向の観測点は 1 点か? 3D 網羅データはとれないか? 観測機器の能力に合わせたデータ同化は可能か? (J-C)

A : 色々なタイプのデータが入力できる。衛星データもつかえる (G-A)

C : カルマンフィルターでは、観測データによっては、精度が出ない問題がある (J-C)

Q : マルチスケールの解析では、リアル空間のデータが少なく。バーチャルの方が、データが非常に豊富である。そのような場合の取り扱いとなっているが、「デジタルツイン」としては極めて非対称となっているが、その際の困難さは何か? (J-B)

A : 原子力の場合、実データはほとんどない。一般に、環境問題の場合はデータが少ないのが前提であり、それ自身が大きな課題である。(G-A)

(3) 謝辞とあいさつ (J-A)

マルチスケールの解析の中でも、LES の研究については、今後とも連携できる部分があれば連携していきたい。どうもありがとうございました。

3.8 日本原子力研究開発機構 (原子力基礎工学研究センター②)

日 時 : 2024 年 3 月 18 日 (月) 16:10-17:00

形 式 : オンライン

参加者 : JAEA・原子力科学研究部門・原子力基礎工学研究センター 担当者 G-A, G-B 他
JAEA・安全研究・防災支援部門・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 : 日本原子力研究開発機構・原子力基礎工学研究センター 担当者 G-B
- ・ヒアリング元 : 日本原子力研究開発機構・安全研究・防災支援部門・安全研究センター J-A、J-B
- ・ヒアリング内容 :

1. 自己紹介 (全員)
2. ヒアリング目的説明 (J-B : 5 分)
3. ヒアリング先プレゼンテーション (G-B : 20~25 分)
「G-B 研究開発内容のご紹介」
4. 議論 (全員 : 30 分)
 - 局地風況環境 (LHODIM-LES) のシミュレーションにおける成果と課題
 - 今後の展開 (上記課題解決の方向性等)
 - 汚染物質 (放射性物質) 拡散計算高精度化へのコメント
 - その他
5. 謝辞とあいさつ (J-A)

・議事

(1) G-B によるプレゼンテーション概要

- 日本原子力研究開発機構・基礎工学研究センターにおける放射性物質環境動態シミュレーション研究の目標はマルチスケールの大気拡散モデルの開発に該当し、各々のシステムの課題としては、

- LOHDIM : 広域計算時の気象場の非一様性、コスト
- WSPEEDI : 局所域の適用限界、広域計算のコスト、化学過程の考慮が困難
- GEARN-FDM : 点状放出の計算精度

等があるが、いずれの場合も、正確な放出量の把握が鍵となる。

- マルチスケール大気拡散モデルが開発されれば、これまで開発したシステムがシームレスに結合できる。その波及効果としては、局所からの領域結合により、被ばく線量の高精度な評価、プルーム定量可視化により放出の監視や推定が可能になると考えている。
- 領域一半球域結合により、点源と面源の同時考慮、人工核種と自然核種を考慮した空間線量率を評価、事故時の放出量推定や被ばく評価の精度向上に貢献できる。
- 上記のマルチスケールシミュレーションの開発を実施する一方、実空間側では、ドップラーライダーや ETCC γ 線イメージングによりプルームの定量可視化ができると考えている。
- これらと LES を始めとするマルチスケール解析を融合させることで、環境における「デジタルツイン」の構築を目指している。
- これらのマルチスケールモデルの説明の後、局所域高分解能解析コード LHADDAS の説明(特に LOHDIM-LES の説明があった。

(2) 質疑 (Q : 質問、A : 回答、C : コメント)

Q : LOHDIM と WRF のつながりは、片方向か両方向か、また、汚染物質だけを考慮すればよいのか? (J-D)

A : 現状では、ワンウェイ (片方向) であり、2 ウェイ (両方向) は、拡散した後で入ってくるものがある場合など。細部の構造は、ここでは重要ではないと考えている。(G-A)

Q : 植生、建屋などの構造物で、LES を使うメリットについて、何か実例はあるか? (J-B)

A : LES とそうでないモデルとの差については、建物の構造を反映させて、瞬間濃度値を求める場合に LES のメリットがでると考えている。(G-B)

C : LES を使うメリットに関しては、原子力ではあまり意味がないと考えられる。平均化でいいと考えられる。一方、化学物質については、瞬間値が重要な場合がある。別途ヒアリングした際の新潟工大の富永先生の降雪時の雪だまりの事例のように、乱流そのものを再現して、吹きだまりを解析するには役立つかもしれない (3.9 参照)。また、マルチスケールで、色々なスケールの現象をつなげて解析し、その逆解析をやることは意味がある (J-A)

Q : マルチスケールのシステムを開発するもとの目的はどこにあるのか、マルチグリッド、ネスティングの場合はスケールの違う空間領域をつなげて解析する、ということだが、拡散問題では、発生源のモデル化が重要で、それを局所域 (LES) から拡大していく、というのは理解できるか? (J-C)

A : 発生源からの拡散の範囲拡大という方向と、気象場の大きな領域から局所域へのつながりという面もあり、これらは、空間スケールの違いだけでなく、異なる物理現象のモデルをどうつなげるかの検討するという意味を有する課題でもある。(J-A)

Q : 物質の拡散の際、解像度は双方 (LES-WRF) でかなり違うことにより生じる課題は? (J-D)

A : 可視化のとき、鉛直面で見るときの、地形の粗さのギャップがでる。粒子の扱いは見かけ上地中に入る場合もあるが、その場合は反射させる。鉛直断面では標高の違いなどギャップがでる。これをどうつなげるかは検討中だ。境界の処理は難しい。詳細な部分に不連続が出る場合がある。(G-A)

Q : SIBYL (LHADDAS の一部で被ばく評価コード) の適用範囲のオーダーは数 km、数十 km、数 100km、どの位か? (J-B)

A : SIBYL は現状では局所域を対象としている。(G-A)

Q : 1F の検証の場合、沈降の問題に雲、霧が重要と言われた。気象モデルには対応するモデルがあるが、LES にどう反映させるか? (J-B)

A : LES では、雲、雨はまだやられていない。WRF の最小領域のモデルを雲、雨にて対応させる。(G-A)

A : タイムスケールが違うので LES でやる必要はないだろう。それらの現象の微小な変動は、求めても意味がない。(G-B)

(3) 謝辞とあいさつ (J-A)

LES の研究については、今後とも連携できる部分があれば連携していきたい。どうもありがとうございました。

3.9 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 : 2024 年 3 月 18 日 (月) 17:10-18:00

形 式 : オンライン

参加者 : JAEA・システム計算科学センター 担当者 C-A

JAEA・安全研究・防災支援部門・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 : 日本原子力研究開発機構 システム計算科学センター 担当者 C-A
- ・ヒアリング元 : 日本原子力研究開発機構 安全研究・防災支援部門 安全研究センター J-A、J-B
- ・ヒアリング内容 :

1. 自己紹介 (全員)
2. ヒアリング目的説明 (J-B : 5 分)
3. ヒアリング先プレゼンテーション (C-A : 20~25 分)
「C-A 研究開発内容のご紹介」
4. 議論 (全員 : 30 分)
 - 局地風況環境のシミュレーションにおける成果と課題
 - 今後の展開 (上記課題解決の方向性等)
 - 汚染物質 (放射性物質) 拡散計算高精度化へのコメント
 - その他
5. 謝辞とあいさつ (J-A)

(1) C-A によるプレゼンテーション概要

- City-LBM の開発状況について概要説明があった。
- 最近、City-LBM の風況解析について、まず WRF の風況結果を境界条件として、10m 解像度で領域サイズを 5km から 60km の範囲の解析での計算時間と必要な GPU 数の比較を行った。
- 5km の範囲の計算では、GPU1 つで 20 分の計算時間がかかる一方、リアルタイムの半分程度で済むことが分かった。その一方、60km に拡張すると、同じ実対象時間に対し、144GPU で 30 分かかることが分かった。
- 10km 四方の領域中心を通る鉛直断面の計算結果を見ると、いずれの方向とも、高度 400m を境に風向が上下で逆転していることが分かる。5km から 60km 四方の結果の風速時刻歴では、境界条件とした WRF の結果と、5km、10km など狭い領域での結果は、ほぼ対応する傾向だが 60 km など広い領域の結果は、WRF の結果と大きくずれてしまうことが分かる。
- 観測結果は、WRF と同様の結果だが、変動がやや大きい。次に鉛直風速の結果でみると、領域の広さによらず、結果はあまり変わらない。風速の標準偏差を見ると、5km から 60km までで、あまり変わらないが、観測結果と比べて下方推定となった。いずれの場合も 10 分平均の値を用いている。
- 今後は、5km の領域で、解像度を 2m から 10m まで変えて検討を行う等、局所域 (5km) 内の解像度依存性を調査していく。

(2) 質疑 (Q : 質問、A : 回答、C : コメント)

Q : 側面の境界条件は？ 周期境界か？ (J-B)

A : 四方とも境界から 512m の 4 鉛直断面で流出、流入を与えている。地上面は温位を与える (C-A)。

Q : 境界の四方と上空を WRF の結果、地表で温位を与えて、領域内部の一般風がどれだけ追従しているのか、内部も与えるのか？ (J-A)

A : 今後は、WRF をダウンスケールして内部も与える計画だ。 (C-A)

Q : 流れ場の風向の変動幅と境界でのずれはどうか (J-B)

A : WRF の結果を見ても、400m を境に東風、西風で分かれている。 (C-A)

Q : 領域が広いとずれてくる。上空の風にひかれる傾向がある。フリーの内部が WRF からずれてくるのは？ (J-B)

A : 1000m の上空で与えているので、計算が進めばずれてくる。 (C-A)

Q : 標高の高い山の上空等はうまく解けているか？ (J-B)

A : 計算の安定性については、問題がなかった。 (C-A)

(3) 謝辞とあいさつ (J-A)

LES の研究については、今後とも情報交換をしていきたい。どうもありがとうございました。

3.10 まとめ

本事業の目的を達成するため、7 機関のヒアリングを行った（日本原子力研究開発機構については、原子力基礎工学研究センター内の二つのチームとシステム計算科学センター）。各々の機関共に、CFD を活用した大気拡散シミュレーションのほか、社会的課題（ヒートアイランド、火災等）解決に向けた解析を実施しており、解析による成果（詳細な環境変化の再現等）が得られている他、計算における課題も明確となっており、その解決に取り組んでいる様子も分かった。これらの知見は、本事業の局所域高分解能大気拡散シミュレーションモデルの整備等に役立てることを今後、検討していく。

なお、日本原子力研究開発機構が開発を進めている LHADDAS は、2 つの LES コード（LOHDIM-LES:差分計算、City-LBM:格子ボルツマン）と被ばく評価コード SYBIL コードからなり、公開されており、対象に併せてコードを整備することができる他、LES コードの使い分けも可能であり、本事業の知見の蓄積と課題の整理という目的に合致する他、コードの整備と試計算が事業内で可能であることが分かった。

■ 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

本報告書の2及び3章の文献調査及びヒアリング調査の結果を受け、被ばく評価が可能な放射性物質拡散に関する高分解能局所大気拡散コードの候補として、LHADDAS が本事業において最も適切であることが結論づけられた。本章では、本事業にて、整備対象とする放射性物質の局所域高分解能大気拡散シミュレーションコード LHADDAS について概説する。LHADDAS は、二つの LES コード (LHODIM-LES, City-LBM) と1つの線量評価コード (SYBIL) から構成され、その各々を下記にて概説する。LHADDAS 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おり、コードの特徴等が詳細に調査可能である他、活用対象にあわせて自ら整備することができる。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。本事業では、当該 LHADDAS を試解析用のコードとして選択し、その整備を行う他、試解析を実施し、その性能及び特徴、そして、高分解能の大気拡散に基づき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 コードである LOHDIM-LES について概説し、4.3 節では、もう一つの LES コード City-LBM について記す。最後の4.4 節は、SYBIL コードの概説とする。

4.2 高分解能大気拡散シミュレーション「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]。風洞実験では、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。

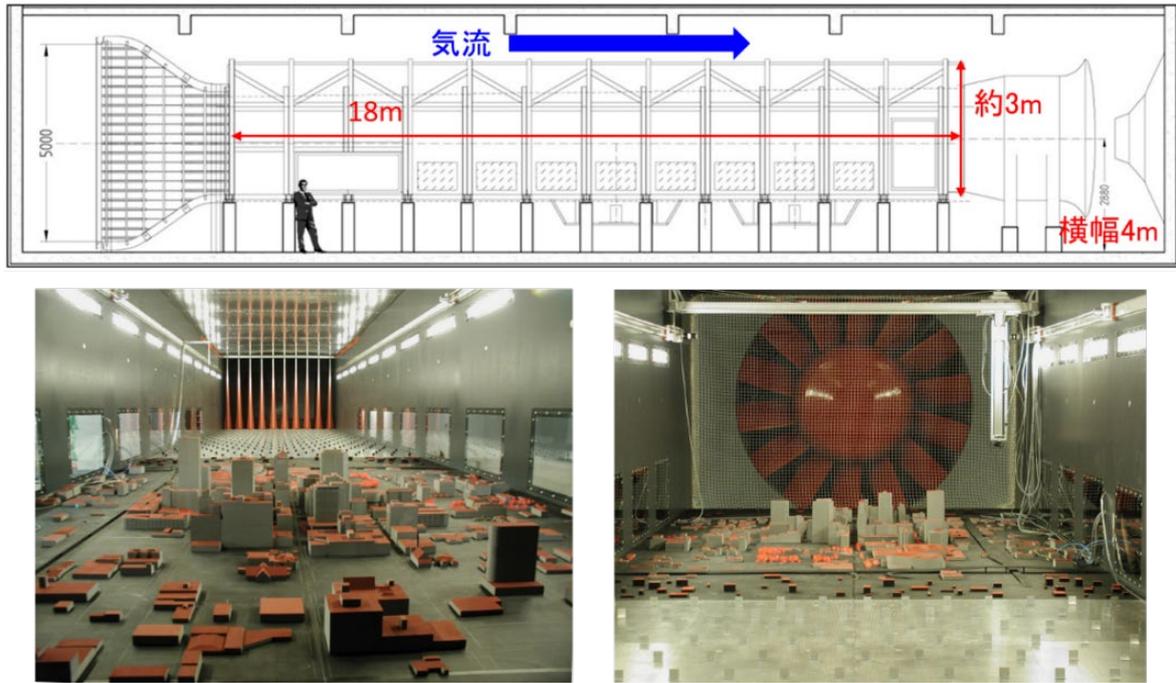


図 4-1 ハンブルグ大学気象研究所の拡散風洞実験施設（上段：実験施設の寸法、下段下側：下流側から見た風洞内の様子、下段右側：風洞気流発生用のファン[9]

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に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]。

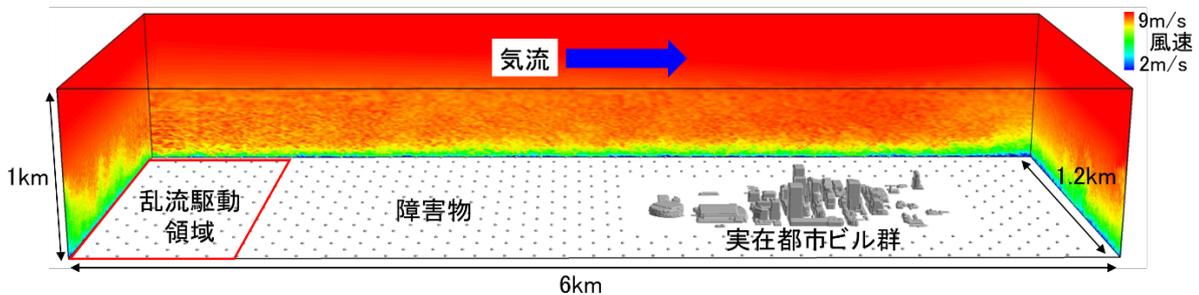


図 4-2 LOHDIM-LES モデルの概念

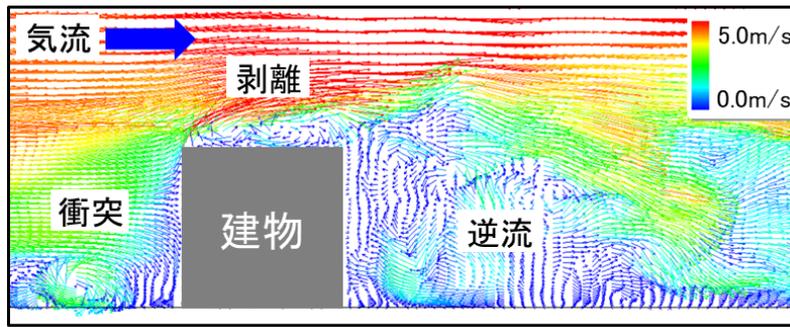


図 4-3 建物周りの風速ベクトル分布

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) の大気拡散及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、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されている [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。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_j} \tau_{ij} + g \frac{\bar{\theta} - \langle \bar{\theta} \rangle}{\theta_0} \delta_{i3} - F_i, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_j} = -\frac{\partial q_j}{\partial x_j}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_j} = -\frac{\partial s_j}{\partial x_j}, \quad (4)$$

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 ($\delta_{ij} = 1, i = j$; $\delta_{ij} = 0$, その他)。アングルブラケット $\langle \rangle$ 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。

$$\tau_{ij} = -2\nu_{SGS} \bar{S}_{ij}, \quad (5)$$

$$\nu_{SGS} = (C_s \bar{\Delta})^2 \left(2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij} - \frac{1}{Pr_{SGS}} \frac{g}{\theta_0} \left(\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} \right) \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (6)$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right), \quad (7)$$

$$\bar{\Delta} = (\bar{\Delta}_x \bar{\Delta}_y \bar{\Delta}_z)^{\frac{1}{3}}, \quad (8)$$

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。

$$q_j = - \frac{\nu_{SGS}}{Pr_{SGS}} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_j}, \quad (9)$$

$$c_j = - \frac{\nu_{SGS}}{Sc_{SGS}} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_j}, \quad (10)$$

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。

$$F_i = f_{i_ibm} + f_{i_canopy}, \quad (11)$$

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。

$$f_{i_ibm} = \alpha \int_0^t \bar{u}_i(x, y, z, t') dt' + \beta \bar{u}_i(x, y, z, t'), \quad (12)$$

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。

$$f_{i_canopy} = C_d a(z) \bar{u}_i U, \quad (13)$$

ここで、 C_d 、 $a(z)$ 、 U は、それぞれ抵抗力係数、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。

$$\tau_{i3_wall} = - \left(\frac{\kappa \bar{u}_i}{\ln(z/z_0) - \psi_M} \right)^2 \quad (14)$$

$$q_{3_wall} = \frac{u_* \kappa (\theta_s - \bar{\theta})}{\ln(z/z_0) - \psi_H} \quad (15)$$

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て 3 次元気流場を作成する手法が開発されている。図 4-4 に、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。

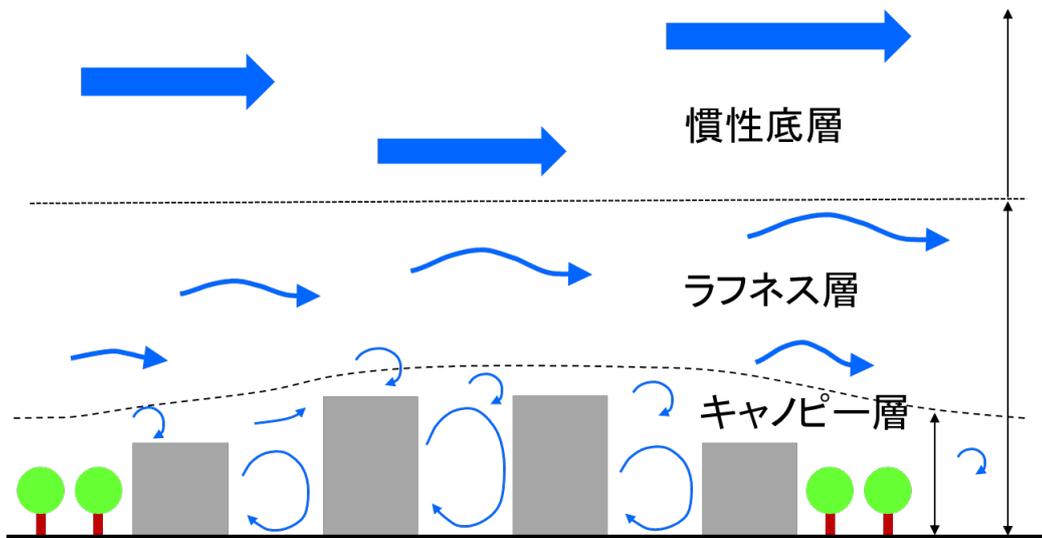


図 4-4 大気乱流境界層の構造

以下、上空の実気象場と下層の 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。

$$U_{coup}(x, y, z) = U_{WRF}(x, y, z) \text{ for } z > z_{coup} \quad (16)$$

$$U_{coup}(x, y, z) = U_{LES}(x, y, z) \frac{U_{WRF}(x, y, z_{coup})}{U_{LES}(x, y, z_{coup})} \text{ for } z \leq z_{coup} \quad (17)$$

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) [4-14]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。

$$\sigma_{90l} = I_{ref}(0.75V_{hub} + 5.6) \quad (18)$$

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) [4-15]-[4-16]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。

$$\sigma_l(x, y, z) = I_{ref}(0.75U(x, y, z) + 3.75) \quad (19)$$

ここで、 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。鉛直方向成分 σ_w は、以下のように与える[4-14]。

$$\sigma_w = 0.5\sigma_l \quad (20)$$

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) [4-17]を用いる。基礎方程式は以下の通りである。

$$x_i(t + \Delta t) = x_i(t) + u_{pi}\Delta t \quad (21)$$

$$u_{pi} = U_i + u'_i \quad (22)$$

$$u'_i(t + \Delta t) = au'_i(t) + b\sigma_i\xi + \delta_{i3}(1 - a)t_{Lxi} \frac{\partial \sigma_{ii}^2}{\partial x_i} \quad (23)$$

$$a = \exp\left(-\frac{\Delta t}{t_{Lxi}}\right) \quad (24)$$

$$b = (1 - a^2)^{1/2} \quad (25)$$

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*方向のラグラン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及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[4-18]。

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] Nakayama H, Nagai H. 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. 2009; 46: 1170-1177.
- [4-3] Nakayama H, Nagai H. 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. 2011; 48: 374-383.
- [4-4] Nakayama H, Nagai H. Large-Eddy Simulation on turbulent flow and plume dispersion over a 2-dimensional hill, Adv. Sci. Res. 2010; 4: 71-76.
- [4-5] Nakayama H, Jurcakova K, Nagai H. 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. 2013; 50: 503-519.
- [4-6] Nakayama H, Leitl B, Harms F, Nagai H. 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. 2014; 51: 626-638.
- [4-7] Nakayama H, Takemi T, Nagai H. 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. 2016; 53: 887-908.
- [4-8] Nakayama H, Satoh D, Nagai H, Terada H. 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., 2021, 58, 949-969.
- [4-9] Nakayama H, Onodera N, Satoh D, Nagai H, Hasegawa Y, Idomura Y. Development of local-scale high-resolution atmospheric dispersion and dose assessment system, J. Nucl. Sci. Technol., 2022; 59: 1314-1329.
- [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] Smagorinsky J. General circulation experiments with the primitive equations, Monthly Weather Review. 1963; 91: 99-164.

- [4-12] Goldstein D, Handler R, Sirovich L. Modeling a no-slip flow boundary with an external force field, *J. Computer Physics*, 1993, 105, 354-366.
- [4-13] Monin A, Obukhov M: Basic laws of turbulent mixing in the ground layer of the atmosphere, *Tr. Akad.Nauk SSSR Geophys. Inst.*, 1954, 24, 163-187.
- [4-14] International Electrotechnical Commission. IEC61400-1. Wind Turbines Part 1: Design Requirements, 3rd ed. Geneva, Switzerland, 2005.
- [4-15] 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」2008, <https://www.nedo.go.jp/content/100107254.pdf>.
- [4-16] 谷垣, 小垣, 松宮, 今村. 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, 2009 161-164, 2009.
- [4-17] Yamada, T.; Bunker, S. Development of a nested grid, second moment turbulence closure model and application to the 1982 ASCOT Brush Creek data simulation. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 1988, 562-578.
- [4-18] Nakayama H, Yoshida T, Terada H, Kadowaki M. 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* 2021; 12:899.

4.3 高分解能大気拡散シミュレーション「CityLBM」

4.3.1 CityLBM の概要

CityLBM は都市街区内の放射性物質の拡散予測に基づく核テロ対策、原子力発電所の廃炉作業で必要となる放射性物質拡散の事前評価など、原子力分野の課題解決に向けて開発されてきた風況解析コードである。都市部は高層ビルが密集した複雑な形状をしており、様々な気象条件によって街区内の風況が大きく変化するため、km オーダーのメソスケール気象条件から m オーダーの細かな建物形状等を反映したマルチスケールの風況解析が必要となる。CityLBM では、適合格子細分化 (AMR) 法を用いた格子ボルツマン法 (LBM) に基づく解析手法を GPU スーパーコンピュータ向けに開発することで、マルチスケール風況解析の実時間計算を実現している。

CityLBM による汚染物質拡散解析の検証として、風洞実験や野外実験に対する実証解析を実施した。汚染物質拡散の風洞実験に対する実証研究では、乱流が発達する物体周りの局所領域に対して AMR 法による高解像度の格子を配置することで、一様格子の 5% の格子数で風速と汚染物質濃度の空間分布を再現することに成功した [4-1,4-2]。野外実験に対する実証研究では、米国オクラホマシティで市街地中心部から汚染物質を模擬したトレーサガスを拡散させた野外実験 JU2003 [4-3] を解析した。この解析では、オクラホマシティ周辺 4km 四方を対象とする局所風況解析を実施した。AMR 法の格子配置として、高さ 100m 以下に 2m 解像度、高さ 350m 以下に 4m 解像度、高さ 2.5km 以下に 8m 解像度を設定することで、一様格子と比較し、格子数を 10% 以下に削減し、36 台の GPU による実時間計算を実現した (図 4-5)。CityLBM による高解像度計算では、乱流の影響により汚染物質濃度が高い領域が間欠的に移流し、計測機器が配置されている位置の汚染物質濃度の時系列に大きな影響を与えることがわかった。こうして、低コストで実時間計算を実現した CityLBM の特徴を活用し、乱流の不確実性を考慮したアンサンブル計算を実施した。この結果、解析対象とした実験の全観測データ (8 観測点×3 時刻) のうち、70% の観測データでファクター 2 以内の評価精度を達成し、アンサンブル計算により汚染物質拡散の予測精度を向上できる事を世界で初めて示した (図 4-6) [4-4]。以下では、CityLBM の計算モデ

ルの詳細を説明する。

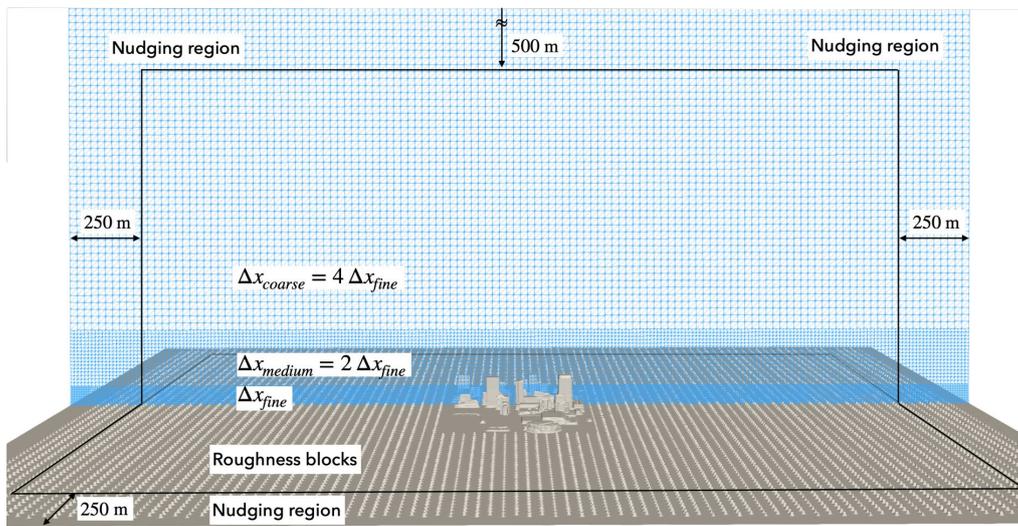


図 4-5 : オクラホマシティ野外実験の解析モデル[4-4]。

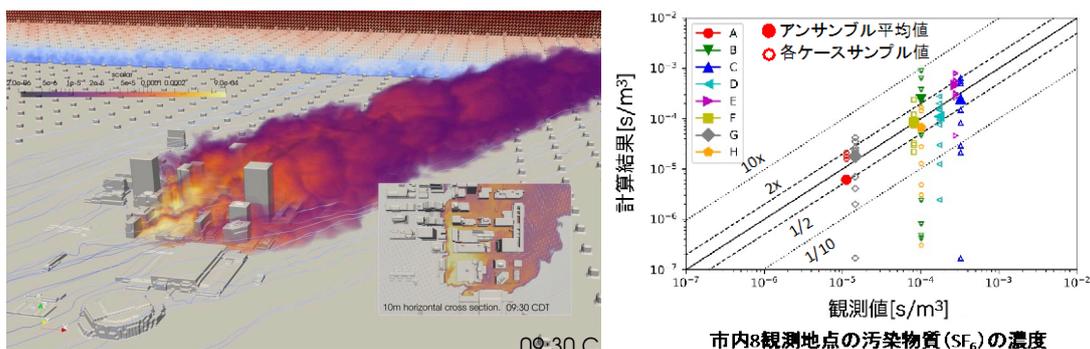


図 4-6 : オクラホマシティ野外実験の解析結果[4-4]。左図は汚染物質の可視化結果を示す。右図は観測値と計算値の比較を示す。各アンサンブルケースの計算値（白抜き記号）が観測値（黒線）から離れて 10 倍の範囲（黒点線）を超えて分布しているのに対して、アンサンブル平均により 2 倍の範囲内（黒破線）に収まることが確認できる。

4.3.2 格子ボルツマン法

格子ボルツマン方程式 (LBE) は、ボルツマン方程式を有限個の離散速度に簡約化することによって得られる。流体は一様なデカルト格子系上の擬似粒子で表され、巨視的な値は擬似粒子の和または速度分布関数の一次モーメントで定義される。流体は弱圧縮性であると仮定しているため、離散化された速度分布関数の時間発展は、陽解法による時間積分を用いて次のように計算される。

$$f_{ijk}(\vec{x} + \vec{c}_{ijk}\Delta t, t + \Delta t) = f_{ijk}(\vec{x}, t) + \Omega_{ijk}(\vec{x}, t), \quad (1)$$

ここで、 \vec{x} は配位空間、 Δt は時間間隔、 \vec{c}_{ijk} は擬似粒子の格子ベクトル、 f_{ijk} は格子ベクトルに対応する速度分布関数、 Ω_{ijk} は衝突演算子を示す。

LBE はストリーミング処理と衝突処理から構成される。ストリーミング処理では、擬似粒子は 1 ステップ後に隣接する格子点に移動する。このため、この処理は格子間の補間に関連する誤差なしに完了するが、計算効率と精度のトレードオフを考慮して適切な格子速度モデルを選択することが重要である。

3次元 27速度 (D3Q27) 離散速度モデルは、複雑形状の流路における高レイノルズ数の弱圧縮性流れを計算するのに適している[4-5]。速度ベクトルの成分は次のように定義される。

$$\vec{c}_{ijk} = (ic, jc, kc), \quad i, j, k \in \{-1, 0, 1\} \otimes \{-1, 0, 1\} \otimes \{-1, 0, 1\}, \quad (2)$$

ここで、格子速度は $c = 1$ と規格化される。メモリアクセスが単純かつ連続的であるため、ストリーミング処理は GPU 計算に適している[4-1]。

巨視的拡散は格子 BGK モデルによる局所衝突過程によって表現される。単一緩和時間モデルは定式化が簡単で計算コストが低いため、先行研究の多くで広く用いられている。単一緩和時間モデルの衝突演算子は次のように定義される。

$$\Omega_{ijk} = -\frac{1}{\tau}(f_{ijk} - f_{ijk}^{eq}), \quad (3)$$

$$\tau = \frac{1}{2} + \frac{3\nu}{c^2\Delta t}, \quad (4)$$

ここで、 ν は動粘性率、 τ は Δt で正規化した緩和時間、 f_{ijk}^{eq} は次式で与えられる局所平衡分布関数である。

$$f_{ijk}^{eq} = \omega_{ijk}\rho \left(1 + \frac{3\vec{c}_{ijk} \cdot \vec{u}}{c^2} + \frac{9(\vec{c}_{ijk} \cdot \vec{u})^2}{2c^4} - \frac{3\vec{u}^2}{2c^2} \right). \quad (5)$$

ここで、 ρ は密度、 \vec{u} は巨視的速度、 ω_{ijk} は D3Q27 離散速度モデルの重み付け係数である。単一緩和時間モデルは、その緩和時間 $\tau \rightarrow 0.5$ が速度分布関数の過緩和を引き起こすため、高レイノルズ数において数値不安定性を引き起こす可能性がある。単一緩和時間モデルは、非物理的な数値振動を抑制するために過剰な粘性を持つサブグリッドスケール (SGS) モデルを必要とするが、過剰な渦粘性はしばしば結果を拡散的にする。多重緩和時間モデルは数値安定性を向上させるが[4-6]、経験的なパラメータチューニングが必要であり、高レイノルズ数での数値安定性のために SGS 粘性を使用する必要がある。

キュムラント緩和時間モデルは、精度と安定性を両立する最も効率的な衝突演算子の 1 つである[4-7,4-8,4-9]。衝突過程は運動量空間では計算されず、キュムラント空間で計算される。ここで、高次キュムラントの平衡分布をゼロとすることで、低散逸で数値安定性を向上し、超高レイノルズ数の乱流に対して安定した長時間計算を実現する。CityLBM ではキュムラント緩和時間モデルを採用している。

4.3.3 サブグリッドスケールモデル

ラーゼエディシミュレーション (LES) は、格子スケールで大規模な流れ構造のダイナミクスを解像し、さらに SGS 乱流構造の影響を次のように定義される渦粘性率で表現する。

$$\nu_{SGS} = C\bar{\Delta}^2|\bar{S}|, \quad (6)$$

ここで、 C はモデル係数、 $\bar{\Delta}$ はフィルター幅、 $|\bar{S}|$ は速度ひずみテンソルの大きさである。従来のスマゴリンスキーモデル[4-10]では、モデル係数は計算領域全体で定数であり、SGS 粘性は壁面近傍での正しい漸近的挙動を記述できなかった。動的スマゴリンスキーモデルは、2種類のグリッドフィルタを用いてモデルパラメータを動的に計算することにより、この欠点を克服する[4-11,4-12]。動的スマゴリンスキーモデルは LES 研究における最も顕著なブレークスルーであるが、このモデル係数の計算には数値安定性のために大域的平均が必要であり、複雑形状を扱うことを困難にしている。

コヒーレント構造スマゴリンスキーモデル (CSM) [4-13]は、複雑形状の壁面近傍での精度と安定性を両立する渦粘性モデルである。モデル係数 C_{CSM} は、速度勾配テンソル Q の第 2 不変量と速度勾配テン

ソル E の大きさによって次のように局所的に計算される。

$$C_{CSM} = C'|Q/E|^{3/2}, \quad (7)$$

ここで、モデル係数 $C' = 1/25$ は固定モデル係数である。この渦粘性率は局所的に決定され、壁近傍での正しい漸近的挙動を記述するので、CSMは複雑形状を扱うことができる。これをLBEに適用すると、全緩和時間は動粘性と渦粘性の和で次のように表される。

$$\tau = \frac{1}{2} + \frac{3(\nu + \nu_{SGS})}{c^2 \Delta t}, \quad (8)$$

$$\nu_{SGS} = C_{CSM} \bar{\Delta}^2 |\bar{S}|. \quad (9)$$

ここで、速度ひずみテンソルは、速度分布関数によって次のように計算される。

$$\bar{S}_{\alpha\beta} = -\frac{3}{2\rho c^2 \tau \Delta t} \sum \left(\frac{\bar{c}_{ijk} \cdot \bar{c}_\alpha}{c} \right) \left(\frac{\bar{c}_{ijk} \cdot \bar{c}_\beta}{c} \right) (f_{ijk} - f_{ijk}^{eq}). \quad (10)$$

4.3.4 植生キャノピーモデル

植生キャノピーモデル[4-14,4-15,4-16]は地表面付近の境界層の評価において重要である。植生要素は次のようにパラメータ化した抗力によってモデル化される。

$$\vec{F}_d = -\rho C_d a_f |\vec{u}| \vec{u}, \quad (11)$$

ここで、 C_d は等方抗力係数、 a_f は片側植物面積密度である。この抗力は単純に外力としてLBEに導入される。

$$f_{ijk}(\vec{x} + \vec{c}_{ijk} \Delta t, t + \Delta t) = f_{ijj}(\vec{x}, t) + \Omega_{ijk}(\vec{x}, t) + F_{d,ijk} \Delta t, \quad (12)$$

ここで、 $F_{d,ijk}$ は、以下のように評価される各速度成分に対する外力である。

$$F_{d,ijk} = 3 \omega_{ijk} \frac{(\vec{F}_d \cdot \vec{c}_{ijk})}{c^2}. \quad (13)$$

4.3.5 熱対流モデル

対流熱伝達は単純に移流拡散方程式でモデル化される。

$$\frac{DT}{Dt} = \left(\chi + \frac{\nu_{SGS}}{Pr_{SGS}} \right) \nabla^2 T, \quad (14)$$

ここで、 D/Dt は対流微分、 χ は熱拡散率、 Pr_{SGS} は乱流プラントル数である。LBMで対流熱伝達をモデル化することも可能であるが、そのような拡張はより多くの擬似粒子を必要とし、大きなメモリ使用量につながる。LBMの利点は、圧力ポアソン方程式と陰的時間積分の反復計算を必要としないことである。しかし、熱対流モデルの移流項と拡散項の安定条件は、数メートルの格子分解能ではそれほど厳しくないため、陽解法時間積分を採用することも可能であり、LBMの利点を阻害しない。CityLBMでは式(14)に対して陽解法時間積分を伴う有限差分法を適用する。ここで、移流項を空間と時間における2次のテイラー展開によって離散化する。熱輸送に対する乱流の影響を評価するため、拡散項にSGS粘性を加え、プラントル数を $Pr_{SGS} = 0.7$ とする。

温度変化による浮力はブシネスク近似によって取り扱い、外力としてLBEに導入する。

$$f_{ijk}(\vec{x} + \vec{c}_{ijk} \Delta t, t + \Delta t) = f_{ijj}(\vec{x}, t) + \Omega_{ijk}(\vec{x}, t) - g_{ijk} \alpha (T - T_0) \Delta t, \quad (15)$$

$$g_{ijk} = 3\omega_{ijk} \frac{(\vec{c}_{ijk} \cdot \vec{G})}{c^2}, \quad (16)$$

ここで、 $\vec{G} = (0, 0, -9.8)$ は重力加速度、 α は熱膨張係数、 T_0 は基準温度である。有限差分法と LBM のハイブリッド法は、LBM のみの手法[4-17]と比較して、計算速度の向上とメモリ使用量の削減を実現している[4-18]。この熱対流モデルは 2 次元キャビティにおける自然対流やレイリー数が 2×10^9 程度に至る 3 次元自然対流実験においても検証されている[4-19]。

4.3.6 汚染物質拡散モデル

汚染物質濃度は質量保存則に従い、有限体積法によって次のように単純に離散化される。

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{u} \cdot q) = \nabla \cdot \left(\frac{v_{SGS}}{Cq_{SGS}} \nabla q \right) + s, \quad (17)$$

ここで、 s はソース項であり、係数を $Cq_{SGS} = 2$ とする。移流項は空間と時間における 2 次のテイラー展開によって離散化し、点状の汚染源に由来する非物理的な振動を防ぐために、1 次風上スキームの数値粘性を加える。汚染物質は空気と同じ物性のトレーサーと仮定し、そのダイナミクスは速度場に影響を与えないものとする。上記の有限体積法と LBM のハイブリッド法は、汚染物質拡散の風洞実験に対して検証された[4-2]。

4.3.7 適合格子細分化法

LBM はもともと一様直交格子で計算されていたが、近年、LBM に適合格子細分化 (AMR) 法が適用され、都市部を対象としたマルチスケール流れのシミュレーションが行われるようになった[4-20,4-21]。高解像度格子を微細な流れのある領域のみに配置することで格子点数を大幅に削減することができる。LBM は時間的にも空間的にも無次元な手法であるため、AMR における格子解像度毎に時間ステップ幅が異なる[4-22]。このため、LBM、有限体積法、有限差分法の時間発展で多重時間ステップ法が適用される。

セルベースの AMR 法は、全計算領域をセルに分割し、1 セルを 2 次元では 4 セル、3 次元では 8 セルに細分化する。細かいセルの値から粗いセルの値を補間する場合、後者の値は単純に前者の平均によって与えられる。一方、粗いセルの値から細かいセルの値を補間する場合、補間関数は粗いセル上で 2 次関数によって与えられる。

データ構造は GPU 上の計算効率の観点から非常に重要である。ブロック構造の AMR 法では、全計算領域をブロック単位に分割することで、データ構造を効率化する。1 ブロック単位には複数のセルが含まれるため、連続的なメモリアクセスが可能となる。CityLBM では、複雑形状への適応性とメモリアクセスの連続性のトレードオフを考慮し、1 ブロック単位のセル数を 4^3 に設定している。これにより、200GPU まで良好なスケーラビリティを達成した[4-23]。

4.3.8 境界条件

まず、地表面および建物表面の境界条件を議論する。LBM は複雑形状の境界条件に適している。バウンスバック法および補間バウンスバック法[4-24]は、すべりなし境界条件の実装を容易にする。また、埋め込み境界法[4-25]によっても、LBM に外力を加えることで、複雑な境界条件を扱うことができる。CityLBM では、その柔軟性と精度の高さから、地表面、建物表面の境界条件として補間バウンスバック法を適用する。固体表面に接触した擬似粒子は、単純に逆向きの速度で流体領域に反射される。1 次

元の場合の速度分布関数は次式で表される。

$$f_{-i}^*(\vec{x}, t + \Delta t) = \begin{cases} 2\phi f_i(\vec{x}, t) + (1 - 2\phi) f_i(\vec{x} - \vec{c}_i \Delta t, t), & \phi < \frac{1}{2}, \\ \frac{1}{2\phi} f_i(\vec{x}, t) + \frac{(2\phi - 1)}{2\phi} f_{-i}(\vec{x}, t), & \phi \geq \frac{1}{2}, \end{cases} \quad (18)$$

ここで、 $f_{-i}^*(\vec{x}, t + \Delta t)$ は反射後の速度分布関数であり、 ϕ はグリッド幅 Δx で正規化された距離関数を示す。D3Q27 離散速度モデルの速度ベクトルは直交格子に揃わない対角方向を含むため、複雑な境界条件でも高精度な解析が可能となる。

地表面温度はメソスケール気象モデルによって与えられ、建物の表面温度も地表面温度と同じと仮定する。これらの温度を用いてディリクレ境界条件を課す。また、地表面、建物表面には汚染物質濃度のゼロフラックス条件を課す。

次に、水平方向および上空の境界条件を議論する。都市風況は非一様かつ非定常であるため、気象観測データやメソスケール気象モデルに基づいて、より現実的な境界条件を与える必要があり、データ同化が必要となる。連続的データ同化手法の一つであるナッジング法[4-26,4-27]は、観測結果や異なるモデルに基づいて決定された目標状態に向けて、経験的な緩和係数を用いてモデルの状態を変化させる。この手法を用いて、局所的風況解析とメソスケール気象モデルを連成させ、マルチスケールの風況シミュレーションを構築する。これにより温度分布関数と流速分布関数は、次のように時間的・空間的に徐々に補正する。

$$T^*(\vec{x}, t) = T(\vec{x}, t) + w(\hat{T} - T(\vec{x}, t)), \quad (19)$$

$$f_{ijk}^*(\vec{x}, t) = f_{ijk}(\vec{x}, t) + w(\hat{f}_{ijk}^{eq} - f_{ijk}(\vec{x}, t)), \quad (20)$$

$$\hat{f}_{ijk}^{eq} = \omega_{ijk} \hat{\rho} \left(1 + \frac{3\vec{c}_{ijk} \cdot \hat{\vec{u}}}{c^2} + \frac{9(\vec{c}_{ijk} \cdot \hat{\vec{u}})^2}{2c^4} - \frac{3\hat{u}^2}{2c^2} \right), \quad (21)$$

ここで、 T^* と f_{ijk}^* はデータ同化後の温度と平衡分布関数であり、 \hat{T} 、 $\hat{\rho}$ 、 $\hat{\vec{u}}$ は目標状態の温度、密度、速度ベクトル、 \hat{f}_{ijk}^{eq} はこれらによって定義した平衡分布関数、 w はナッジングデータ同化の経験的係数である。 $w = 1$ の場合、ナッジングデータ同化はディリクレ境界条件のように振る舞う。

WRF[4-28]に代表されるメソスケール気象モデルは、気象観測データに基づき数百 km、数時間のメソスケール気象条件を解析する。メソスケール気象モデルは気象観測データの平均値を再現するように調整されているが、レイノルズ平均ナビエ・ストークス (RANS) 方程式に基づいているため、LESに基づく局所的風況解析で必要とされる高周波の乱流揺らぎは含まれていない。この乱流揺らぎの境界条件の問題を解決するため、CityLBM では解析対象の市街地周辺に乱流生成およびデータ同化のためのバッファ領域を考慮し、水平方向に周期的な境界条件を課している。ナッジングデータ同化モデルがバッファ領域に適用されるが、ナッジング係数は周期境界条件によって流入する乱流揺らぎを維持しつつ、平均的な温度、密度、速度ベクトルがメソスケール気象データに向けて徐々に緩和するように調整されている。

参考文献

- [4-19] Onodera N and Idomura Y (2018a) Acceleration of wind simulation using locally mesh-refined lattice Boltzmann method on GPU-rich supercomputers. Lecture Notes Comp Sci 10776:128–145, https://doi.org/10.1007/978-3-319-69953-0_8

- [4-20] Onodera N and Idomura Y (2018b) Acceleration of plume dispersion simulation using locally mesh-refined lattice Boltzmann method. Proc.26th Int Conference Nuclear Eng (ICONE26):82145
- [4-21] Leach MJ (2005) Final report for the joint urban 2003 atmospheric dispersion study in oklahoma city: Lawrence Livermore National Laboratory participation. Oct 2005
- [4-22] Onodera, N., Idomura, Y., Hasegawa, Y. et al. Real-Time Tracer Dispersion Simulations in Oklahoma City Using the Locally Mesh-Refined Lattice Boltzmann Method. Boundary-Layer Meteorol 179, 187–208 (2021). <https://doi.org/10.1007/s10546-020-00594-x>
- [4-23] Kang SK and Hassan YA (2013) The effect of lattice models within the lattice Boltzmann method in the simulation of wall-bounded turbulent flows. J Comput Phys 232:100–117, <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2012.07.023>
- [4-24] Kuwata Y and Suga K (2016) Imbalance-correction grid-refinement method for lattice Boltzmann flow simulations, J Comput Phys 311:348–362, <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2016.02.008>
- [4-25] Geier M, Schonherr M, et al. (2015) The cumulant lattice Boltzmann equation in three dimensions: Theory and validation. Comput Math Appl 70:507–547, <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2015.05.001>
- [4-26] Geier M, Psquali A, et al (2017a) Parametrization of the cumulant lattice Boltzmann method for fourth order accurate diffusion Part I: Derivation and validation. J Comput Phys 348:862–888, <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2017.05.040>
- [4-27] Geier M, Psquali A, et al (2017b) Parametrization of the cumulant lattice Boltzmann method for fourth order accurate diffusion Part II: Application to flow around a sphere at drag crisis. J Comput Phys 348:889–898, <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2017.07.004>
- [4-28] Smagorinsky J (1963) General circulation experiments with the primitive equations. Mon Weather Rev 91:99–164, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1963\)091<0099:GCEWTP>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1963)091<0099:GCEWTP>2.3.CO;2)
- [4-29] Germano M, et al. (1991) A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model. Phys Fluids A: Fluid Dynamics 3:1760–1765, <https://doi.org/10.1063/1.857955>
- [4-30] Lilly DK (1992) A proposed modification of the Germano subgrid-scale closure method. Phys Fluids A: Fluid Dynamics 4:633–635, <https://doi.org/10.1063/1.858280>
- [4-31] Kobayashi H, Ham F, and Wu X (2008) Application of a local SGS model based on coherent structures to complex geometries. Int J Heat Fluid Flow, 29, pp 640–653, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2008.02.008>
- [4-32] Shaw RH and Pereira AR (1982) Aerodynamic roughness of a plant canopy: A numerical experiment. Agric Meteorol 26:51–65, [https://doi.org/10.1016/0002-1571\(82\)90057-7](https://doi.org/10.1016/0002-1571(82)90057-7)
- [4-33] Kanda M, Moriwaki R, and Kasamatsu F (2004) Large-eddy simulation of turbulent organized structures within and above explicitly resolved cube arrays. Boundary-Layer Meteorol 112:343–368, <https://doi.org/10.1023/B:BOUN.0000027909.40439.7c>
- [4-34] Watanabe T (2004) Large-eddy simulation of coherent turbulence structures associated with scalar ramps over plant canopies. Boundary-Layer Meteorol 112:307–341,

<https://doi.org/10.1023/B:BOUN.0000027912.84492.54>

- [4-35] Yoshino M and Inamuro T (2003) Lattice Boltzmann simulations for flow and heat/mass transfer problems in a three-dimensional porous structure. *Int J Numer Methods Fluids* 43:183–198, <https://doi.org/10.1002/flid.607>
- [4-36] Onodera N and Idomura Y (2019) Fuel debris' air cooling analysis using a lattice Boltzmann method, *Proc.27th Int Conference Nuclear Eng (ICONE27)*:2306
- [4-37] Onodera N, Idomura Y, et al. (2020) Locally mesh-refined lattice Boltzmann method for fuel debris air cooling analysis on GPU supercomputer. *Mech Eng J*, Article ID 19-00531, <https://doi.org/10.1299/mej.19-00531>
- [4-38] Jacob J, and Sagaut P (2018) Wind comfort assessment by means of large eddy city area. *Build Environ* 139:110–124, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.05.015>
- [4-39] Lenz S, Schonherr M, Geier M, et al. (2019) Towards real-time simulation of turbulent air flow over a resolved urban canopy using the cumulant lattice Boltzmann method on a GPGPU. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 189:151–162, <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2019.03.012>
- [4-40] Yu D, Mei R, and Shyy W (2002) A multi-block lattice Boltzmann method for viscous fluid flows. *Int J Numer Methods for Fluids* 39(2):99–120, <https://doi.org/10.1002/flid.280>
- [4-41] Onodera N, Idomura Y, et al. (2018c) Communication reduced multi-time-step algorithm for real-time wind simulation on GPU-based supercomputers. *Proc 9th Workshop on Latest Advances in Scalable Algorithms for Large-Scale Systems*. IEEE Press:9–16, <https://doi.org/10.1109/ScalA.2018.00005>
- [4-42] Chun B and Ladd AJC (2007) Interpolated boundary condition for lattice Boltzmann simulations of flows in narrow gaps. *Phys Rev E* 75:066705, <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.75.066705>
- [4-43] Kim J, Kim D, and Choi H (2001) An immersed-boundary finite-volume method for simulations of flow in complex geometries. *J Comput Phys* 171:132–150, <https://doi.org/10.1006/jcph.2001.6778>
- [4-44] Paniconi C, et al. (2003) Newtonian nudging for a Richards equation-based distributed hydrological model, *Adv Water Resour* 26:161-178, [https://doi.org/10.1016/S0309-1708\(02\)00099-4](https://doi.org/10.1016/S0309-1708(02)00099-4)
- [4-45] Brian PR and David RS (2010) Data assimilation strategies in the planetary boundary layer. *Boundary-Layer Meteorol* 137:237 –269, <https://doi.org/10.1007/s10546-010-9528-6>
- [4-46] Skamarock WC, et al. (2008) A description of the advanced research WRF Version 3. NCAR Tech Note NCAR/TN-475+STR, <http://dx.doi.org/10.5065/D68S4MVH>

4.4 線量率評価モデル「SYBIL」

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。この問題に対して、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[4-1]を開発し、公開した。

SIBYL は、図 4-7 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 $H^*(10)$ ($\mu\text{Sv/h}$) と空気カーマ率 ($\mu\text{Gy/h}$) を取り扱う。LOHDIM-LES で計算した大気中および地表面の計算格子上的放射性核種から放出されるガンマ線は、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ガンマ線の散乱を考慮する必要があり、広大な環境中のガンマ線伝播計算は、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、放射線挙動解析計算コード PHITS[4-2]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。図 4-8 に、 ^{137}Cs による線量応答関数の一例を示す。SIBYL では、高度 1000m、評価点からの水平距離 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。

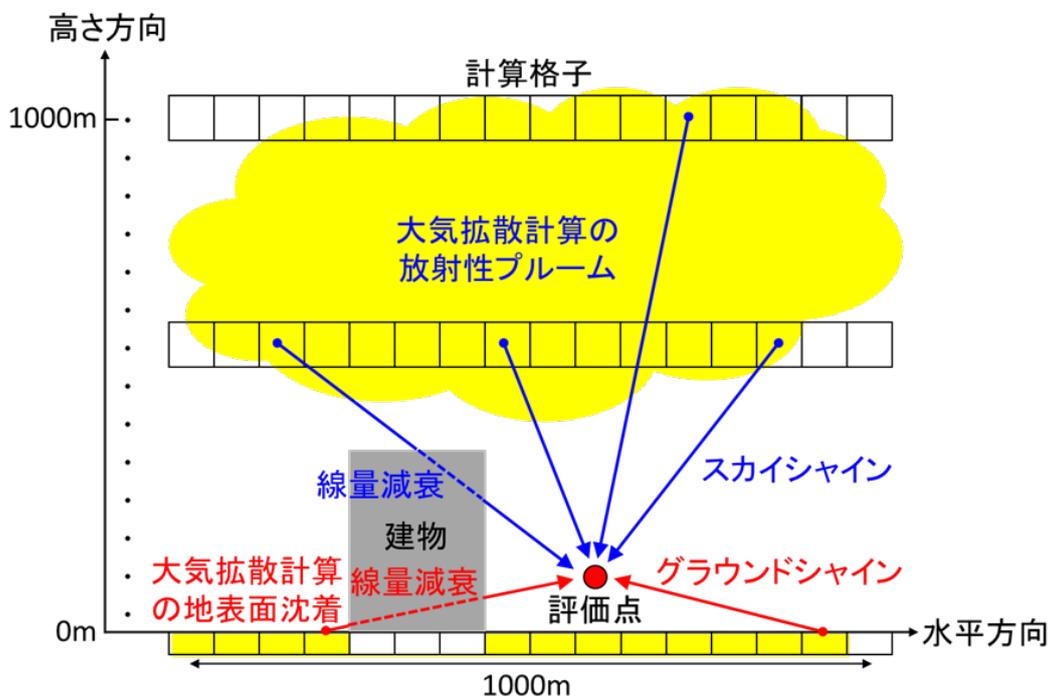


図 4-7 SIBYL コードの概念

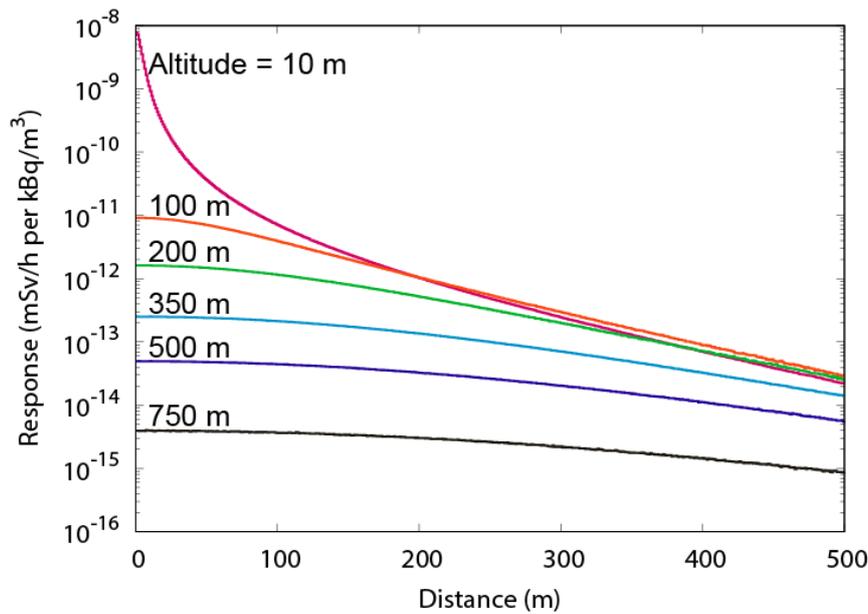


図 4-8 地表から高度 10, 100, 200, 250, 500 および 750m に分布した ^{137}Cs の線量応答関数（横軸は評価点からの水平方向の距離を示す）

図 4-9 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。

$$\dot{D}(x_i, y_j) = \sum_{l=-L}^L \sum_{m=-M}^M \sum_{n=0}^N R(l, m, n) \cdot C(x_i + l, y_j + m, n) \quad (1)$$

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。

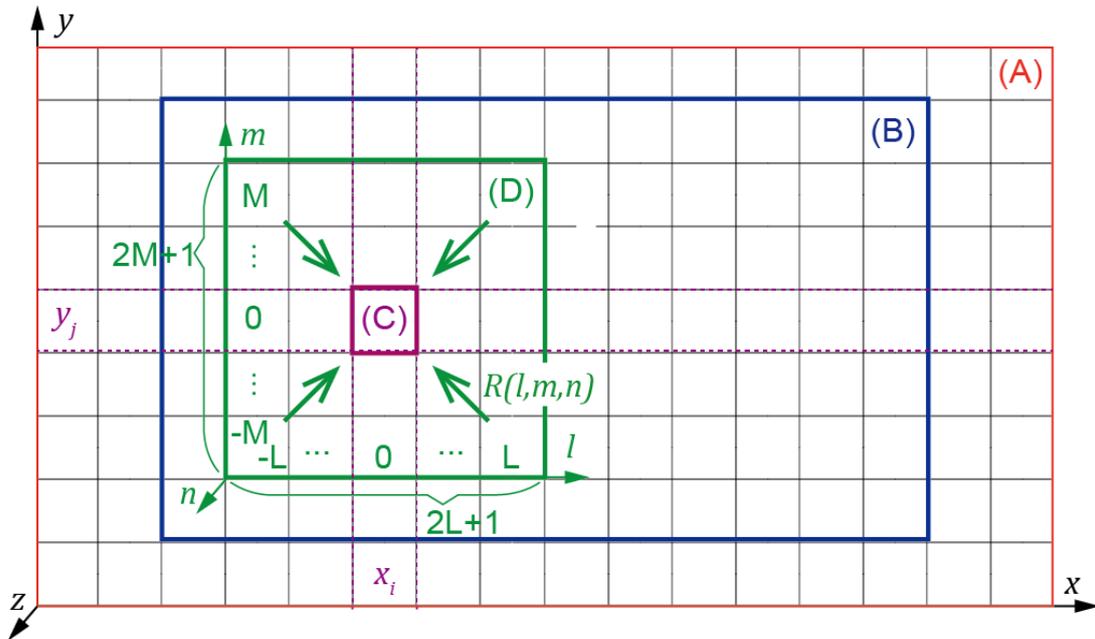


図 4-9 SIBYL による線量率計算で用いられる各種領域の模式図

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 $\dot{D}'(x_i, y_j)$ は次式で計算される。

$$\dot{D}'(x_i, y_j) = \sum_{l=-L}^L \sum_{m=-M}^M \sum_{n=0}^N R(l, m, n) \cdot C(x_i + l, y_j + m, n) \cdot \exp(-\mu L_{S \rightarrow T}) \quad (2)$$

ここで、 μ は障害物に対応した線量減衰係数、 $L_{S \rightarrow T}$ 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。

参考文献

- [4-1] Sato T, Iwamoto Y, Hashimoto S, et al. Features of particle and heavy ion transport code system (PHITS) version 3.02. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2018;55(6):684–690..
- [4-2] Satoh D, Nakayama H, Furuta T, 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*. 2021.

4.5 まとめ

本章（4章）では、本事業において整備対象としたコード LHADDAS について概説した。LHODIM-LES は、流体の方程式に対し、差分法をベースとして数値的に解く標準的 LES コードと位置付けられる一方、City-LBM は、流体計算を格子ボルツマン法という手法で解き、計算コストを抑え、高速に動作し、リアルタイムシミュレーションを可能にしたコードと位置付けられる。なお、LHODIM-LES を利用した場合、SYBIL コードとの連結により、線量率の評価も直接可能となっている一方、City-LBM の場合は、データの受け渡しを手動で行う必要があることを注意する。以上、本事業の主目的である、

放射性物質の局所域高分解能シミュレーションコードとしては、最も整備や実証等が進んでいるコードの一つであると位置づけられ、今後も様々な改良等が行われ、ユーザーは最新版にアクセス可能である。また、コードは公開されており、ユーザーの対象や進捗に併せてカスタマイズ可能という便利なコードである。次章（5章）では、本コードを用いた試解析結果を示し、LESによる局所域大気拡散シミュレーションの特徴や課題を抽出して報告する。

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。5.2節は、LOHDIM-LESの試計算結果、5.3節にて、City-LBMの試計算結果を各々、報告する。両者ともに、六ヶ所再処理工場を中心とした領域を計算対象とし、試計算した結果を示す。これらの試計算結果をもとに、5.4節では、各々の手法の課題を記し、5.5節にて、試計算のまとめを記す

5.2 LOHDIM-LES 試計算（準備と結果）

LOHDIM-LESの拡張機能として開発された、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WRFの融合計算手法を用いて試験計算を実施した。図5-1、5-2は、本計算対象の六ヶ所再処理工場敷地スケールの地表面状況および細密地理情報データを用いて10m計算格子により地表面状況を解像した計算モデルをそれぞれ示している。排気筒周辺に9つのモニタリングポスト（MP）があり、西側にドップラーソーダ気象観測装置がある。

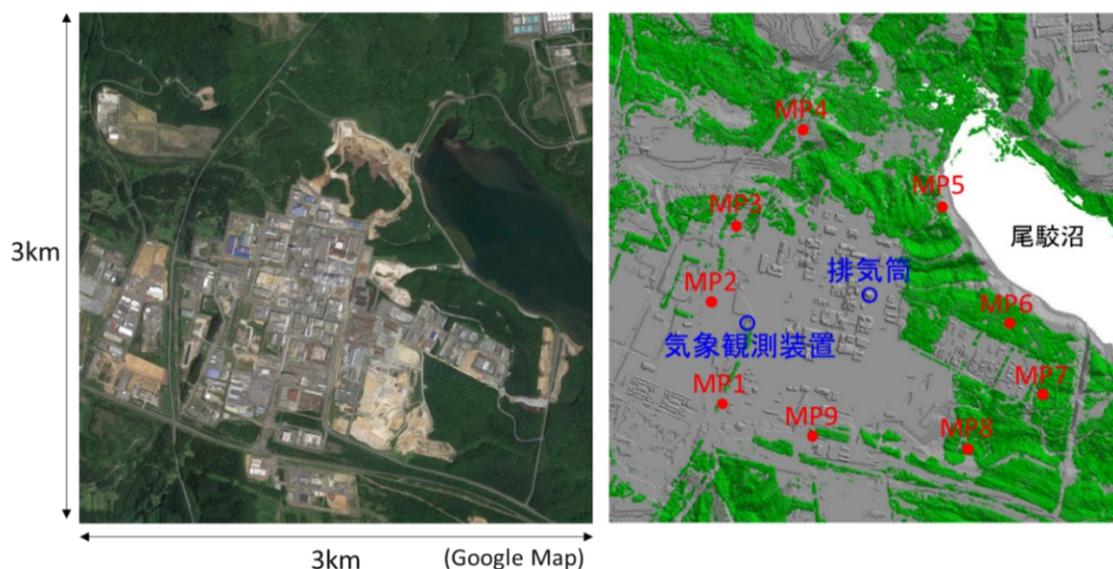


図 5-1 六ヶ所再処理工場の敷地スケールでの地表面状況（左側：航空写真、右側：細密地理情報データ、MP：モニタリングポスト）

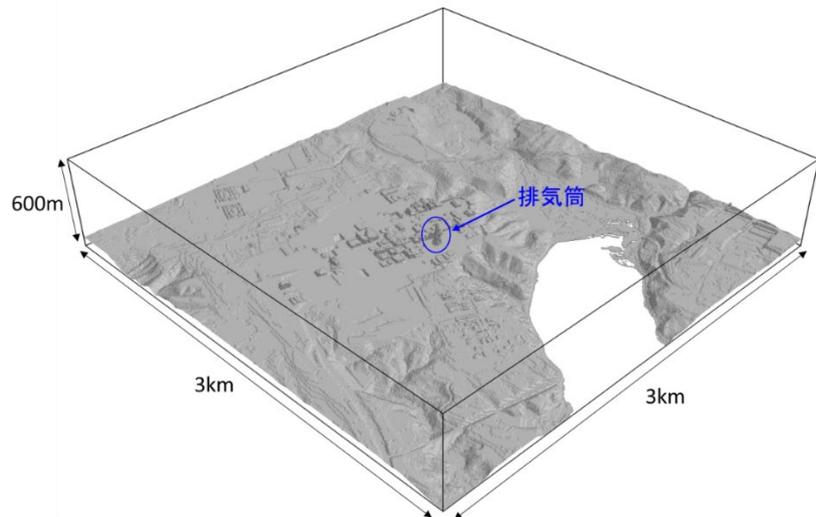


図 5-2 計算モデル

計算対象としている敷地スケールでの平均建物高さは約 12m であり、建物が気流場に影響を与える高さは最大で 60m 程度と推定できる。ただし、敷地内の地形は平坦ではなく数 10m 程度の起伏差があるため、WRF の上空風速と下層の LOHDIM-LES 風況データベースを融合させる高さ z_{coup} を排気筒の位置の標高を基準に一律 120m とした。対象期間は、六ヶ所再処理工場のアクティブ試験時の Kr85 が大気放出された期間内の 2008 年 6 月 17 日 9:00-19:00 とした。WRF 風速値は 10 分毎に時間更新をし、実際の放出量データとプルーム上昇推定値を与えて拡散シミュレーションを実施した。計算タイムステップは 0.1 秒とした。10 分間の平均濃度値を迅速空間線量率評価コード SIBYL に与え、LOHDIM-LES と組み合わせた線量計算を行った。

図 5-3 に、排気筒高さにおける風向・風速の時系列変化を示す。ドップラーソーダ気象観測による風速値は 10 分毎に時間変化をしているが、WRF の風速値はそのような短周期的な変動は捉えきれず比較的緩やかな変化を示している。風向についても同様であり、気象観測値では東風から東南風の間で短周期的に時間変化をしている。一方、WRF の値は、特に 9:00 から 15:10 まで一定に近く、気象観測値との差異も非常に大きい。しかし、15:20 以降は気象観測値との差異は小さくなり、この時間帯は風向の再現性は高いと言える。

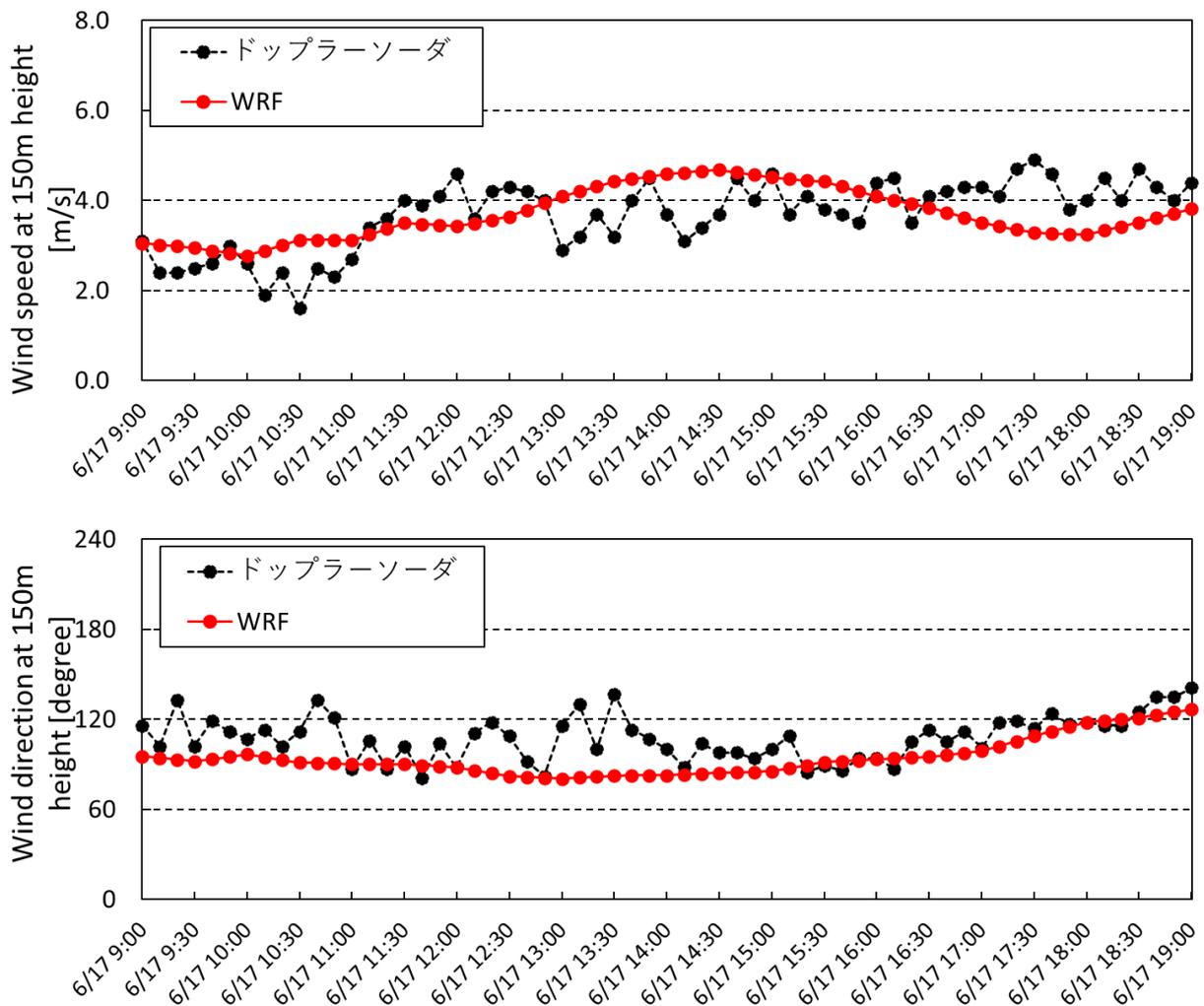


図 5-3 排気筒高さにおける風速（上）と風向（下）の時系列変化

図 5-4 に、MP2 と MP3 における空間線量率の時系列変化を示す。実際の気象条件では、東風から東南風が支配的であったため、プルームも大部分が MP2 および MP3 の上空を通過する。そのため、この 2 つの MP では、ピーク値が間欠的に発生している。一方、LOHDIM-LES と SIBYL を組み合わせた計算値では、WRF の風向が 9:00 から 15:10 の間はほぼ東風であったため、MP2 では空間線量率のピークが頻繁に発生している。しかし、16:00 以降では、WRF の風向の再現性が向上し東南東風が吹くようになり、MP3 での空間線量率が定量的に一致するようになる。

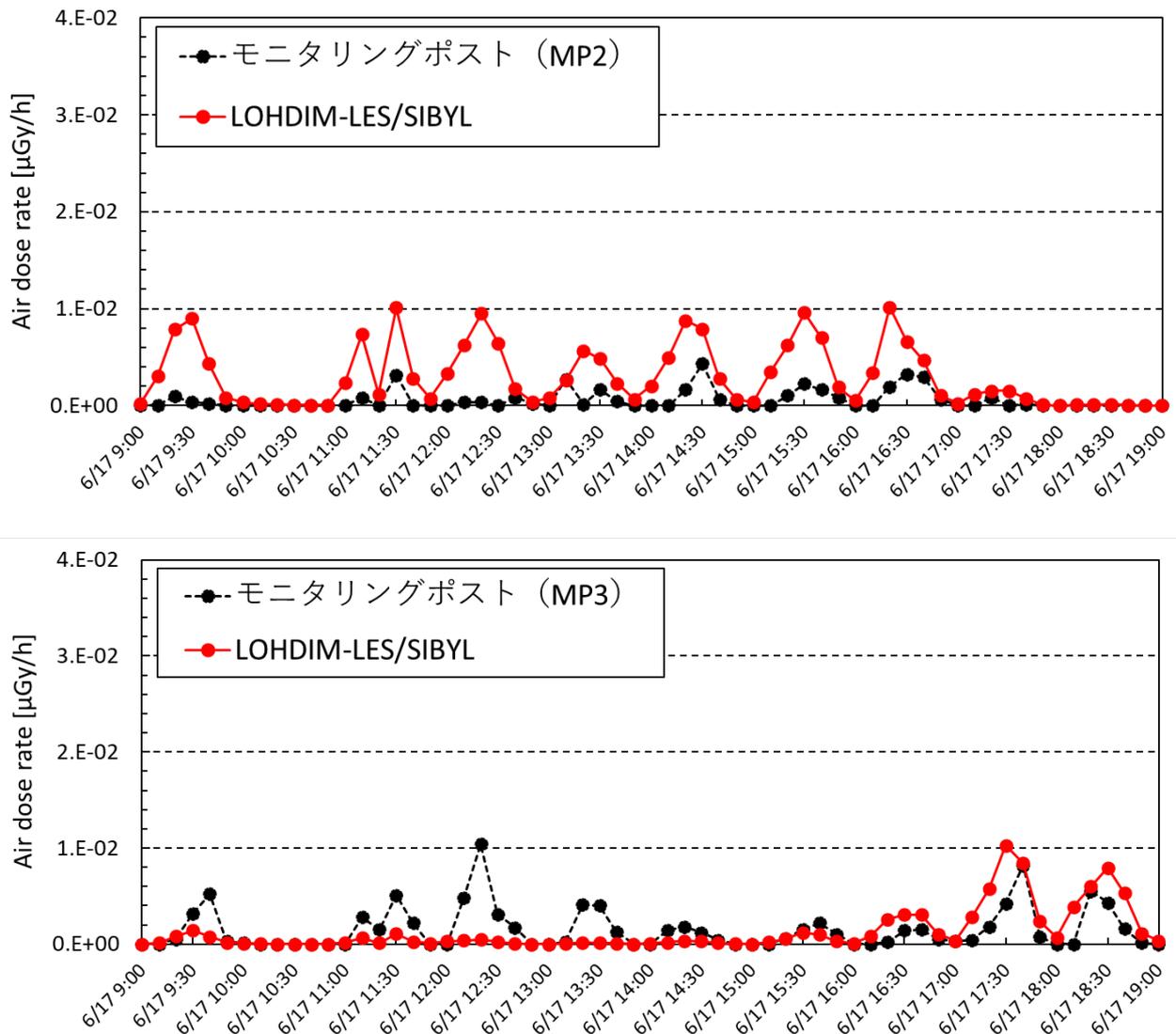


図 5-4 空間線量率の時系列変化（上：MP2、下：MP3）

以上により、WRF の風向の再現性の問題により、MP2 ではピーク値やその発生頻度を大幅に過大評価したが、それらの変動の規模は MP2 と同程度である。すなわち、風向の再現性の向上により、WRF 上空風速と下層の LOHDIM-LES 風況場データベースの融合に基づく本迅速大気拡散計算手法の再現性の向上の期待できると言える。

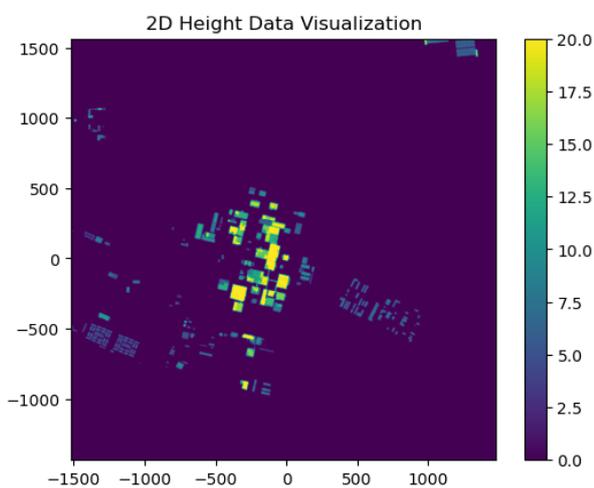
5.3 CityLBM 試計算（準備と結果）

5.3.1 計算条件の設定

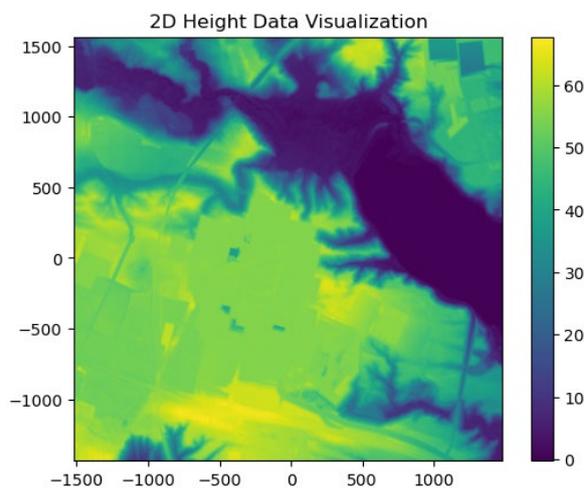
CityLBM の有効性を検証することを目的として 2008 年 6 月 17 日に実施された六ヶ所再処理工場周辺の気象観測に対する試解析を実施した。今回の試解析では汚染物質拡散解析とその結果を用いた空間線量率の評価は行わず、汚染物質拡散解析の前提として重要な風況解析の精度検証を実施した。再処理工場周辺の建物・地形・植生を模擬するために、排気筒周辺の約 3km 四方の領域に対して、5m 解像度の建物高さ分布、地形高さ分布、および植生高さ分布を読み込むと共に、その周辺領域に対しては、CityLBM の境界条件を与えるメソスケール気象モデル WRF の地形高さ分布を与えた。図 5-5 に主排気筒を原点とした局所の境界条件データおよび気象観測点配置を示す。

解析領域は主排気筒を原点として 60km 四方、30km 四方、10km 四方、5km 四方を設定し、上空の境界は 1200m に設定した。高さ方向に 2 レベルの格子解像度をもつ AMR 法を設定し、基準解像度としては地表面から高さ 600m まで 10m 格子を設定し、それ以上の高さでは 20m 格子を設定した。5km 四方の局所解析に関しては、さらに中解像度および高解像度の解析を実施し、中解像度では地表面近傍から高さ 384m まで 4m 格子を設定し、それ以上の高さでは 8m 格子を、高解像度では地表面近傍から高さ 128m まで 2m 格子を設定し、それ以上の高さでは 4m 格子を設定した。10km 四方で基準解像度の計算格子および速度境界条件・地表面境界条件の可視化例を図 5-6 に示す。ここで、水平方向の境界から 512m の範囲、および上空の境界から 256m の範囲にバッファ領域を設定し、WRF データとのナッジングデータ同化により風速と温位の境界条件を与えた。解析時刻として、午前 4 時 (04:00) から午後 8 時 (20:00) までの 16 時間を設定した。

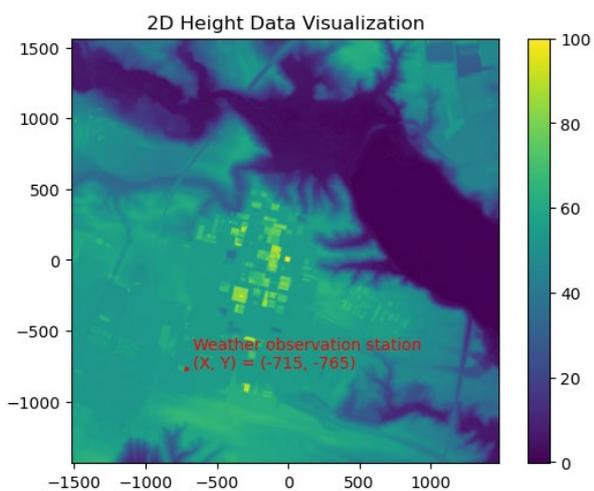
CityLBM のハイパーパラメータとして、植生キャノピーモデルに関連した等方抗力係数と片側植物面積密度の積を $C_d a_f = 0.01$ 、WRF データを CityLBM へと徐々に反映させるナッジング係数は 30 秒間の時間ステップの累積で 100% 反映される値を設定した。



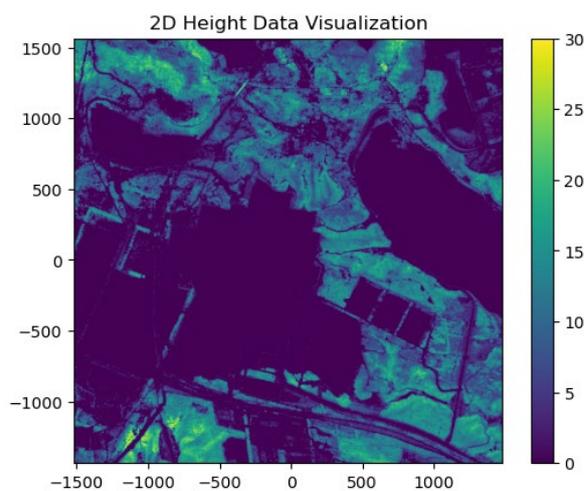
(a) 建物高さ分布



(b) 地形高さ分布



(c) 建物+地形高さ分布および気象観測点配置



(d) 植生高さ分布

図 5-5 主排気筒 (X, Y) = (0, 0) 周りの詳細な建物・地形・植生高さ分布

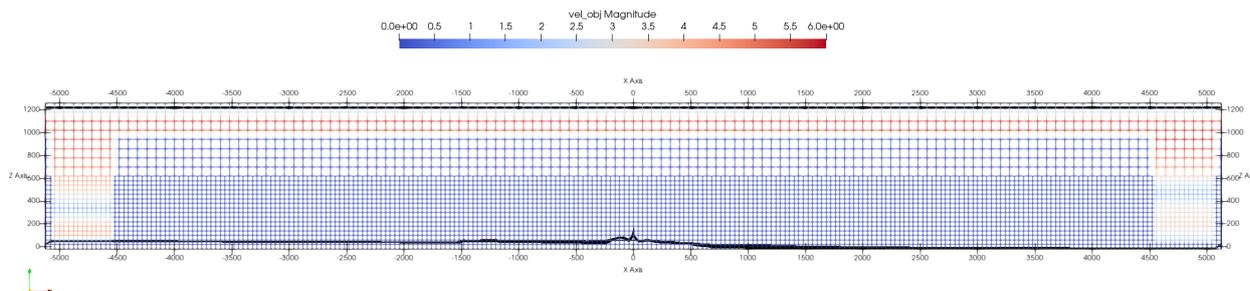


図 5-6 CityLBM の計算格子および速度境界条件・地表面境界条件の可視化例（10km 四方の解析）。高さ 600m 以下に 10m 解像度の格子、600m 以上に 20m 解像度の格子を配置している。流入・流出境界条件を、水平方向の計算領域の端から 512m、高さ方向の上端から 256m の範囲に与えている。

5.3.2 計算速度の測定

基準解像度 ($\Delta x_{\text{fine}}=10\text{m}$) を用いた 5km 四方から 60km 四方の解析、および中解像度 ($\Delta x_{\text{fine}}=4\text{m}$)、高解像度 ($\Delta x_{\text{fine}}=2\text{m}$) を用いた 5km 四方の解析の計算時間を、日本原子力研究開発機構の大型計算機 HPE SGI8600 の GPU (NVIDIA V100) を用いて測定した。計算時間には、CityLBM の風況解析、モニタリングポスト上での物理量の測定、可視化用のファイル出力等の全ての処理が含まれる。

表 5-1 は基準解像度を用いた 5km 四方から 60km 四方の解析における 60 分間の風況の計算時間を示す。ここで、GPU 数は格子点数にほぼ比例するように増大させた。最も小さい計算領域である 5km 四方の条件では、格子点数 2.1×10^7 に対して、1 台の GPU で実時間の約 1/3 の計算時間で解析が可能であり、60 分間の風況の再現に約 20 分の計算時間を要した。10km 四方の条件では計算領域がほぼ 4 倍となるが、4 台の GPU で並列処理を行うことで、5km 四方/1GPU とほぼ同じ計算時間を維持しており、理想的なスケーラビリティが得られている。このスケーラビリティは 100 台以上の GPU を用いても維持されており、最も大きい計算領域である 60km 四方の条件では、格子点数 3.25×10^9 に対して、144 台の GPU で実時間の約 1/2 の計算時間を達成した。以上の結果から、CityLBM では実時間計算を上回る計算速度で 30km 圏内の風況解析を実施できることが確認された。

表 5-2 に基準解像度、中解像度、高解像度を用いた 5km 四方の解析における 60 分間の風況の計算時間を示す。ここで、GPU 数は格子点数にほぼ比例するように増大させた。高解像度の解析においては、格子解像度の変化により、計算格子点数が解像度の 3 乗に増えるだけでなく、シミュレーションの時間刻み幅が格子解像度に応じて小さくなるため、必要となる計算資源量が解像度の比の 4 乗となる。上記のように基準解像度の条件では、格子点数 2.1×10^7 に対して、1 台の GPU で実時間の約 1/3 の計算時間となっていたが、中解像度の条件では、格子点数 2.4×10^8 に対して、16 台の GPU で実時間の約 2/3 の計算時間となり、計算速度が 1/2 に低下した。さらに、高解像度の条件では、格子点数 1.05×10^9 に対して、64 台の GPU で実時間の 1.5 倍まで計算時間が低下した。以上より、大きな建物や路地等を捉えることのできる中解像度においては 16 台の GPU の利用により実時間解析が可能となるが、細かな路地等を捉えることのできる高解像度においては実時間解析に多くの GPU が必要になることが確認された。

表 5-1 CityLBM の広域の基準解像度 ($\Delta x_{\text{fine}}=10\text{m}$) に対する計算性能

計算領域サイズ [km ²]	GPU 数 [台]	格子点数 [10 ⁶]	実現象に対する計算時間比 [-]	60 分の解析にかかる時間 [分]
5	1	21.2	0.33	19.6
10	4	90.3	0.33	19.9
20	16	361.3	0.40	24.1
30	36	812.9	0.44	26.2
40	64	1445.2	0.43	25.6
50	100	2258.2	0.45	26.9
60	144	3251.7	0.49	29.4

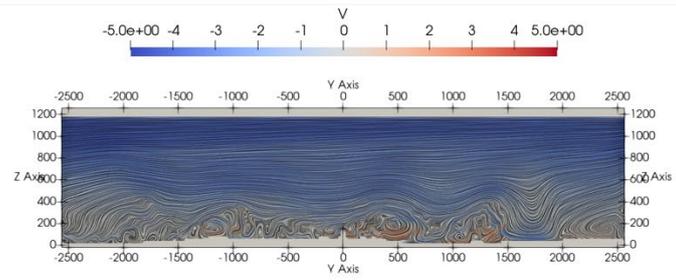
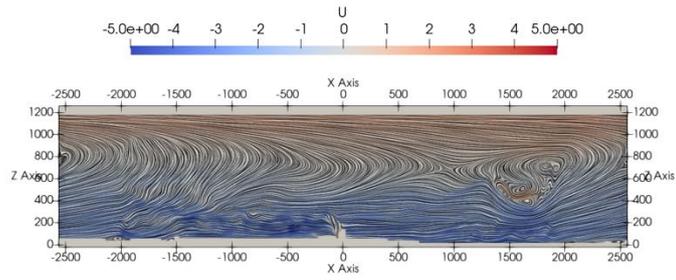
表 5-2 CityLBM の局所域 (5km 四方) の基準解像度 ($\Delta x_{\text{fine}}=10\text{m}$)、中解像度 ($\Delta x_{\text{fine}}=4\text{m}$)、高解像度 ($\Delta x_{\text{fine}}=2\text{m}$) に対する計算性能

計算格子解像度 [m]	GPU 数 [台]	格子点数 [10 ⁶]	実現象に対する計算時間比 [-]	60 分の解析にかかる時間 [分]
10	1	21.2	0.33	19.6
4	16	240.2	0.68	40.7
2	64	1047.7	1.51	90.9

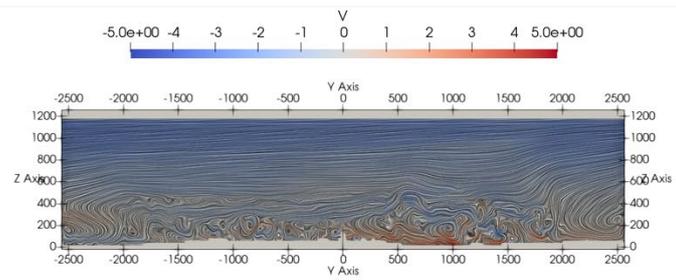
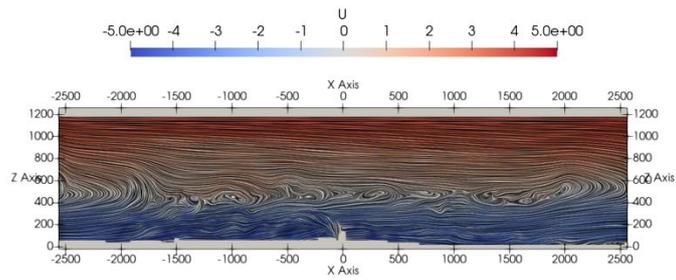
5.3.3 広域の風況分布の可視化

基準解像度を用いた 10km 四方以上の広域の風況解析結果を記載する。図 5-7、図 5-8、および、図 5-9 に広域の風況解析での計算領域 5km 四方、60km 四方、および、WRF の風況の東西断面 (X-Axis) および南北断面 (Y-Axis) の風速の LIC (Line Integral Convolution) 可視化を示す。10km 四方の解析結果では、WRF の風況が境界条件として与えられる計算境界近傍のバッファ領域において細かい渦構造が弱まるが、計算境界から離れた中心部においては乱流が発達していることが確認できる。60km 四方の解析結果では、可視化されている約 10km の断面内にバッファ領域は存在せず、全領域で乱流が発達している。しかしながら、10km 四方と比較して地表面近傍の速度がより大きく評価されていることが確認される。また、10km 四方および 60km 四方の解析結果において、高さ 400~600m の断面において速度が低くなる領域が確認され、この高度を境に風向が大きく反転している。WRF の風況では、CityLBM と同様に高さ 400~600m の断面を境に風向が大きく反転しているが、平均場のみを直接計算し変動場はモデル化する RANS のため、LIC の流線が滑らかになることが確認できる。

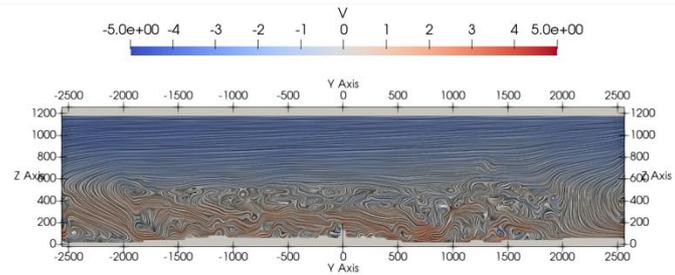
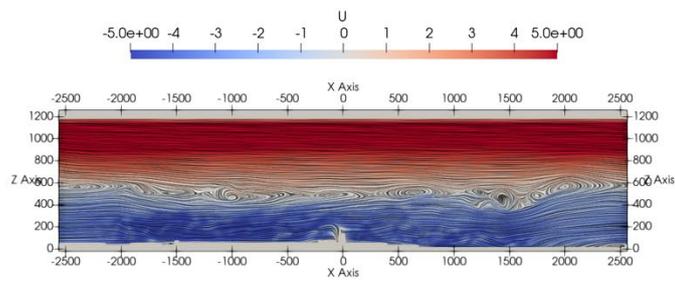
図 5-10 および図 5-11 に計算領域 5km 四方の解析および 60km 四方の解析と WRF の風況の高さ 150m 断面の風速の LIC 可視化を示す。10km 四方の解析結果では、WRF の風況が境界条件として与えられる計算境界近傍のバッファ領域で速度場の細かい乱れが弱まっているが、計算境界から離れた領域においては乱流が発達し、風向が細かく変化していることが確認される。60km 四方の解析結果でも同様に、計算境界から離れた領域において乱流が発達し、非常に複雑な流れ場が形成されていることが確認される。しかしながら、60km 四方の解析結果の中心領域 10km 四方を 10km 四方の解析結果と比較すると、平均的な風速と風向が大きく異なることがわかる。また、60km 四方の解析結果と WRF の風況を比較すると、北東部分 (海上) の領域の風速が異なっており、CityLBM のモデルの改良が必要であることが示唆される。



(a) 08:00

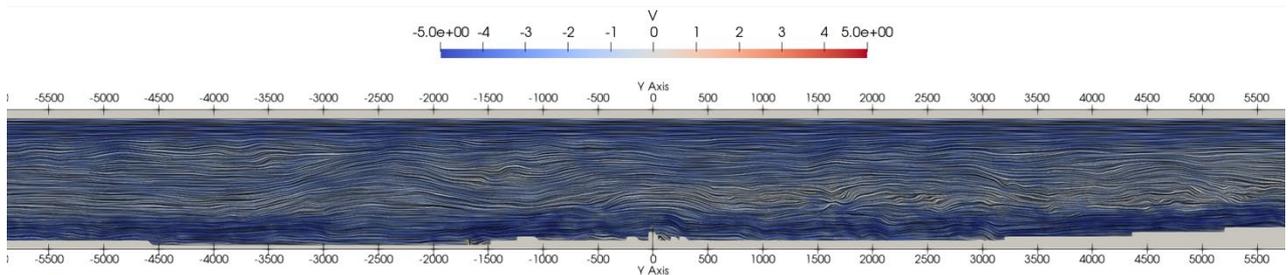
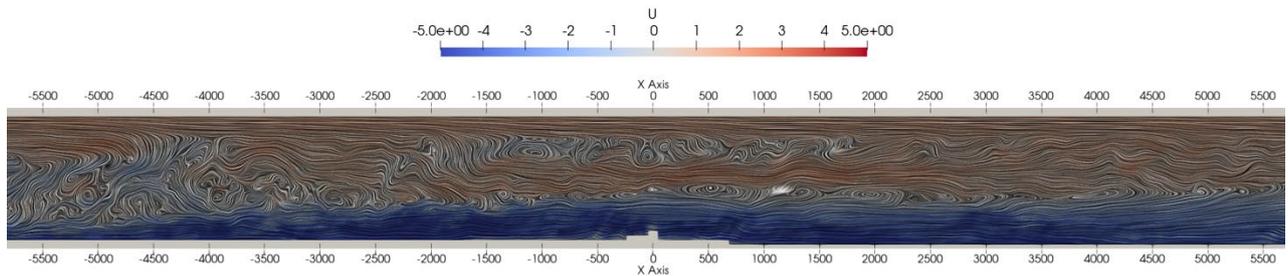


(b) 12:00

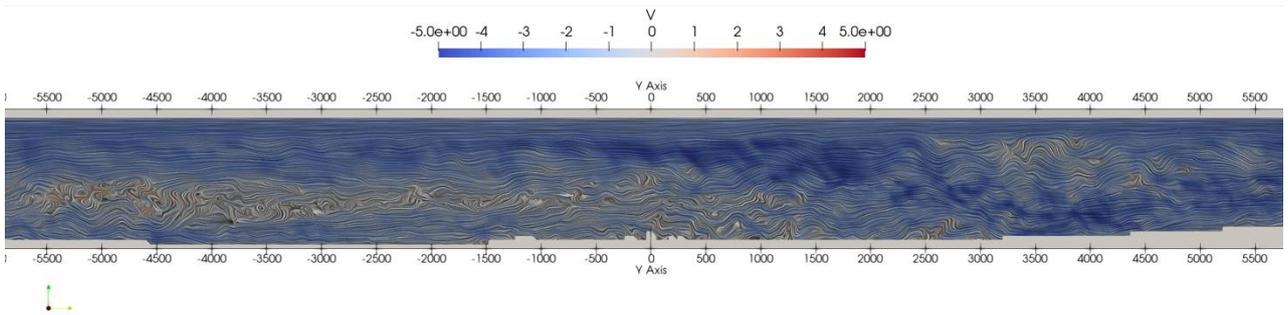
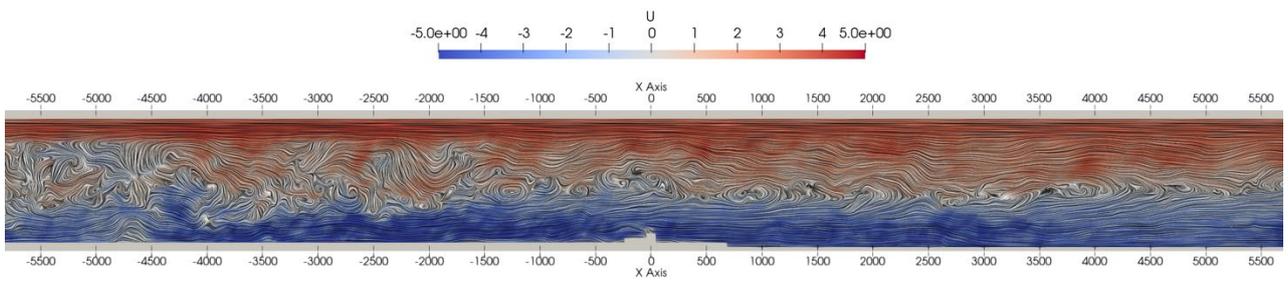


(c) 16:00

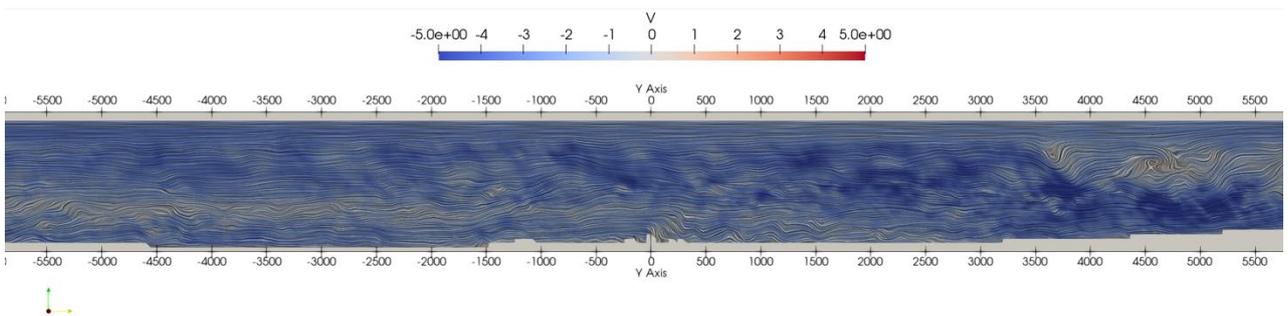
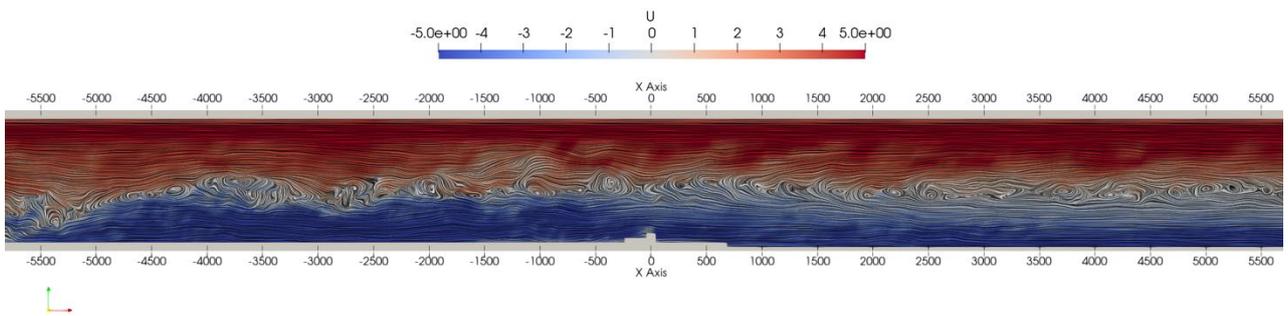
図 5-7 広域の風況解析での計算領域 5km 四方の東西断面（上図）および南北断面（下図）の断面方向の風速の LIC（Line Integral Convolution）可視化



(a) 08:00

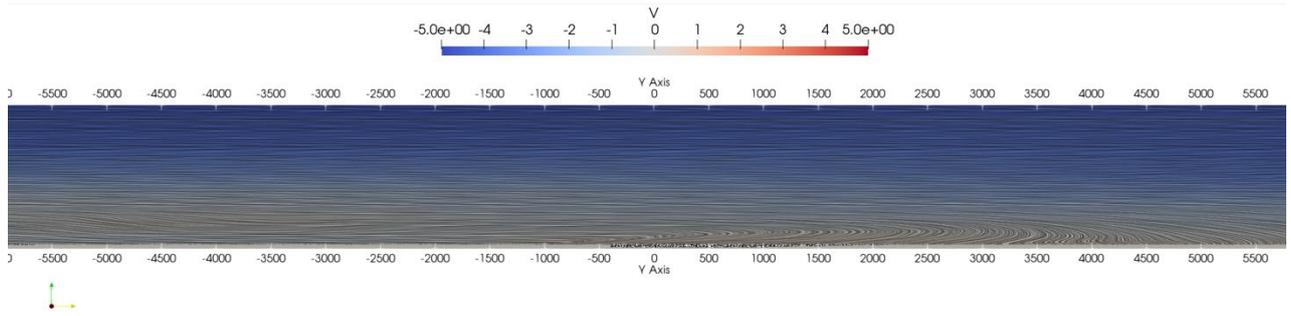
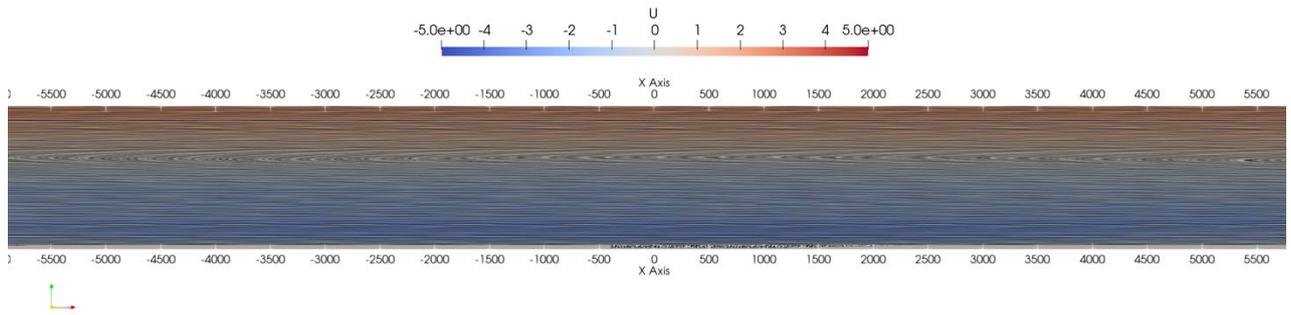


(b) 12:00

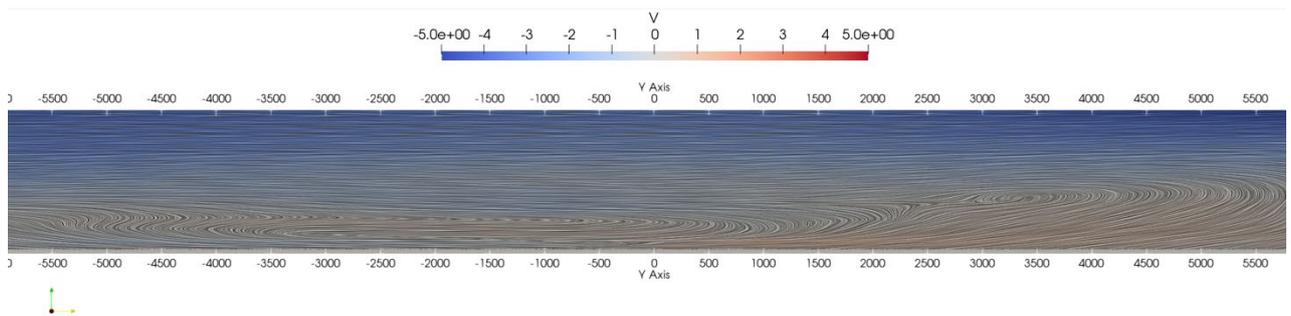
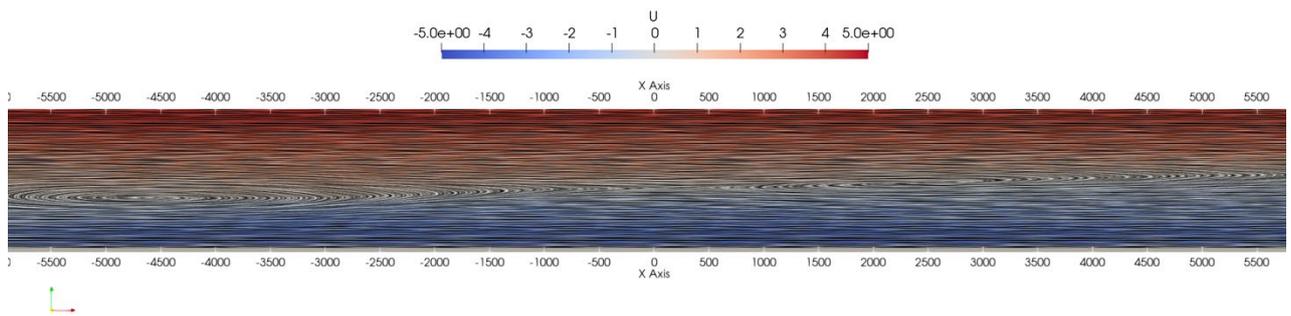


(c) 16:00

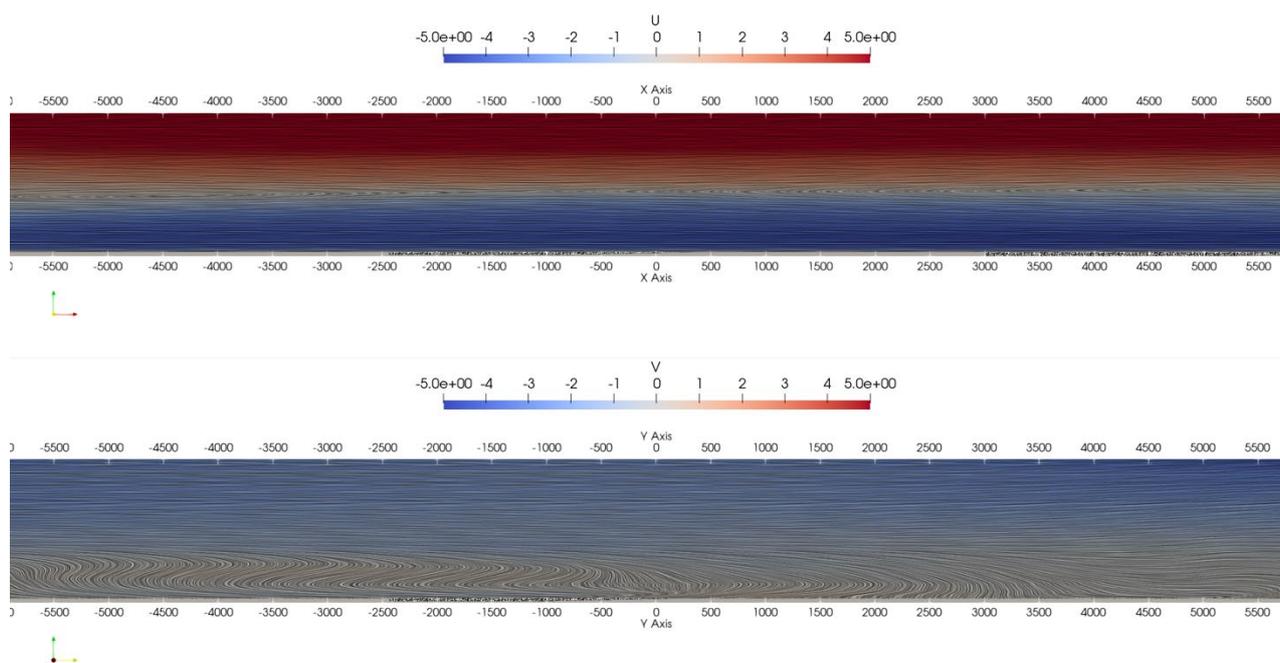
図 5-8 広域の風況解析での計算領域 60km 四方の東西断面（上図）および南北断面（下図）の断面方向の風速の LIC（Line Integral Convolution）可視化



(a) 08:00

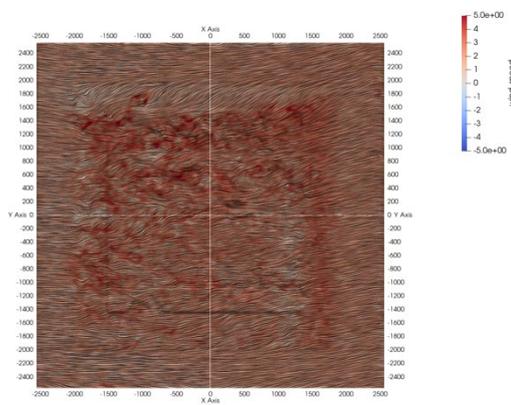


(b) 12:00

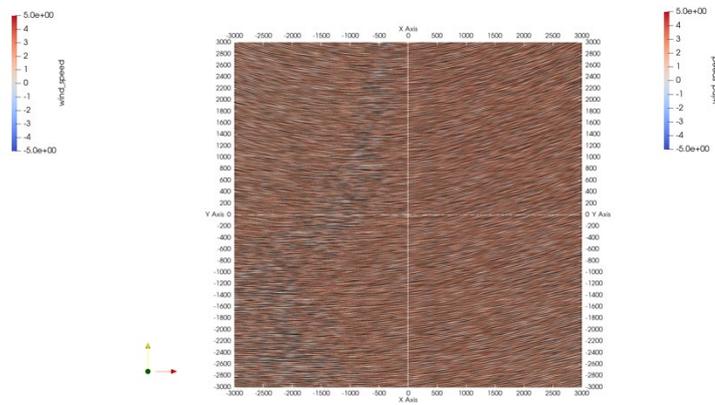


(c) 16:00

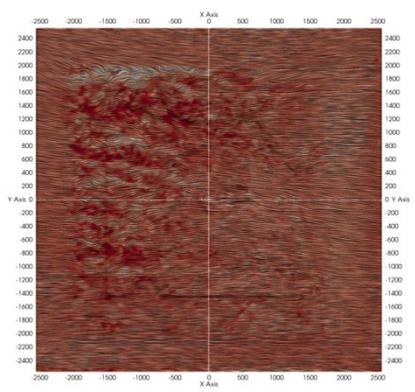
図 5-9 メソスケールモデル WRF の高さ 0~1280m の東西断面（上図）および南北断面（下図）の断面方向の風速の LIC（Line Integral Convolution）可視化



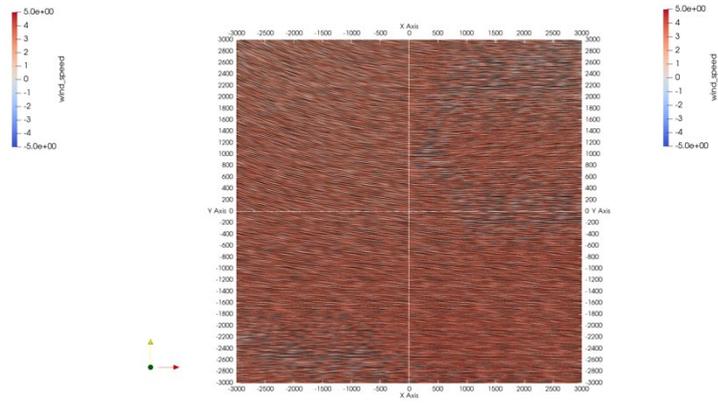
(a) 08:00 (CityLBM)



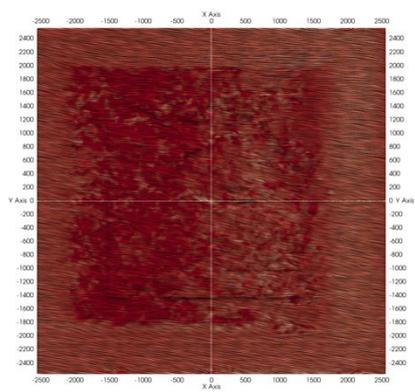
(b) 08:00 (WRF)



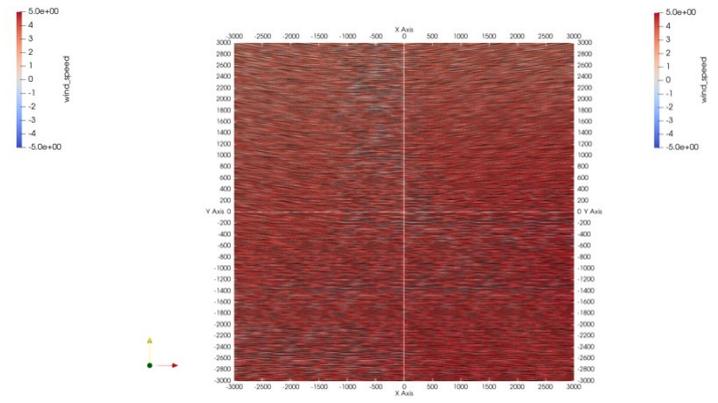
(c) 12:00 (CityLBM)



(d) 12:00 (WRF)

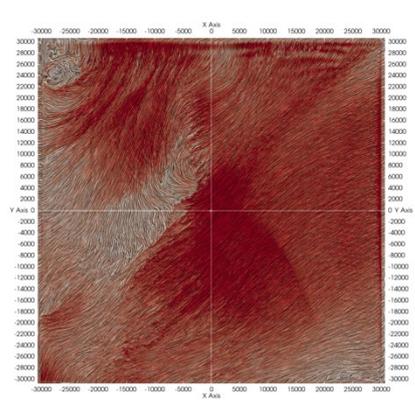


(e) 16:00 (CityLBM)

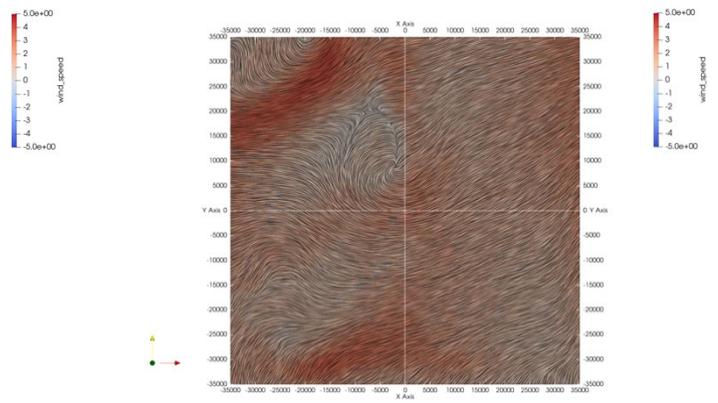


(f) 16:00 (WRF)

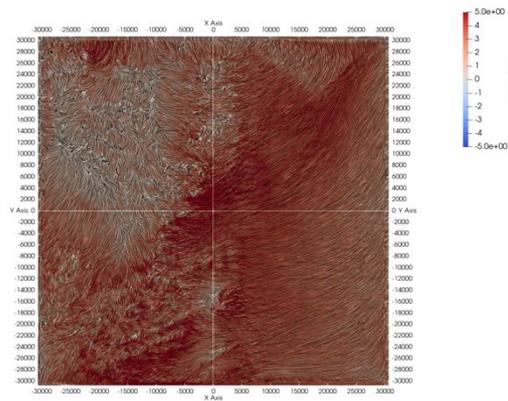
図 5-10 計算領域 5km 四方の解析およびメソスケールモデル WRF の高さ 150m 断面の風速の LIC (Line Integral Convolution) 可視化



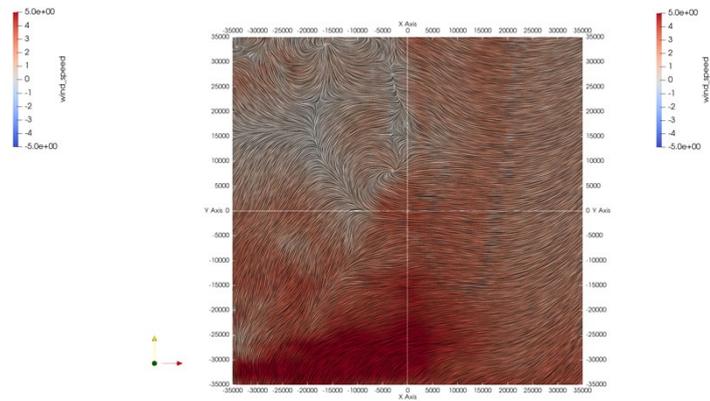
(g) 08:00 (CityLBM)



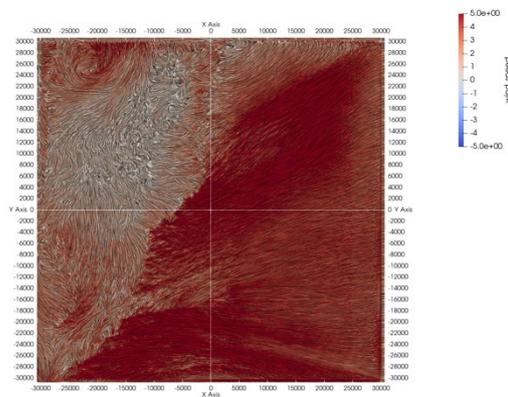
(h) 08:00 (WRF)



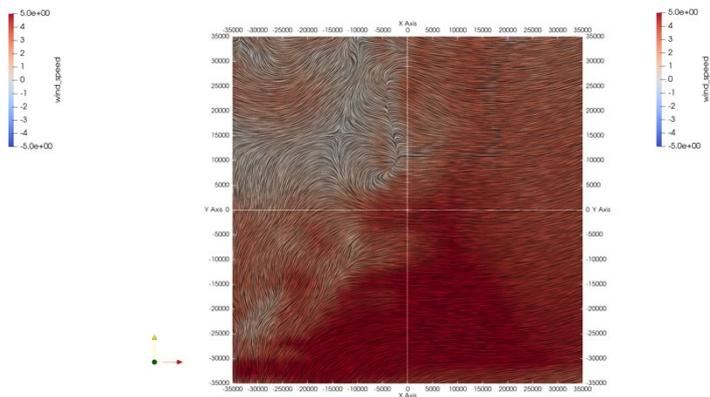
(i) 12:00 (CityLBM)



(j) 12:00 (WRF)



(k) 16:00 (CityLBM)



(l) 16:00 (WRF)

図 5-11 計算領域 60km 四方の解析およびメソスケールモデル WRF の高さ 150m 断面の風速の LIC (Line Integral Convolution) 可視化

5.3.4 広域の風況分布の気象観測値との比較

基準解像度を用いた 10km 四方以上の広域に対する風況解析結果を六ヶ所村再処理工場近傍に設置された気象観測点の観測値 (OBS) と比較する。図 5-12 から図 5-17 に、水平風速、鉛直風速、水平風向、水平風速の標準偏差、鉛直風速の標準偏差、水平風向の標準偏差に対する 10 分間の統計量を示す。ここで、観測高さとして、地表面近傍の 50m、排気筒高さの 150m、および上空の 300m を比較した。また、CityLBM の流入境界条件として用いている WRF の風況も参考として示す。時刻 4:00 から 6:00 までの灰色の区間は、初期値として与えられた WRF の速度場が LBM に計算により乱流を発達するまでの区間となるため、以下の評価には含めない。

図 5-12 に水平風速の比較を示す。WRF データは平均的に観測値に追従していることがわかる。計算領域が小さい 5km 四方および 10km 四方の解析結果は境界条件として課している WRF データの影響により WRF データに比較的近い結果となることが確認された。このため、CityLBM と観測値の一致の度合いは WRF データと観測値の一致の度合いに左右されることがわかった。また、WRF データで捉えられていない風速の細かい変動は CityLBM でも捉えられていないことがわかった。次に、計算領域が大きい 30km 四方および 60km 四方の解析結果では、境界条件として課している WRF データの影響が弱まることから、特に、高度 50m および 150m の解析結果において WRF データからの乖離が大

きく、風速を過大評価していることが確認された。

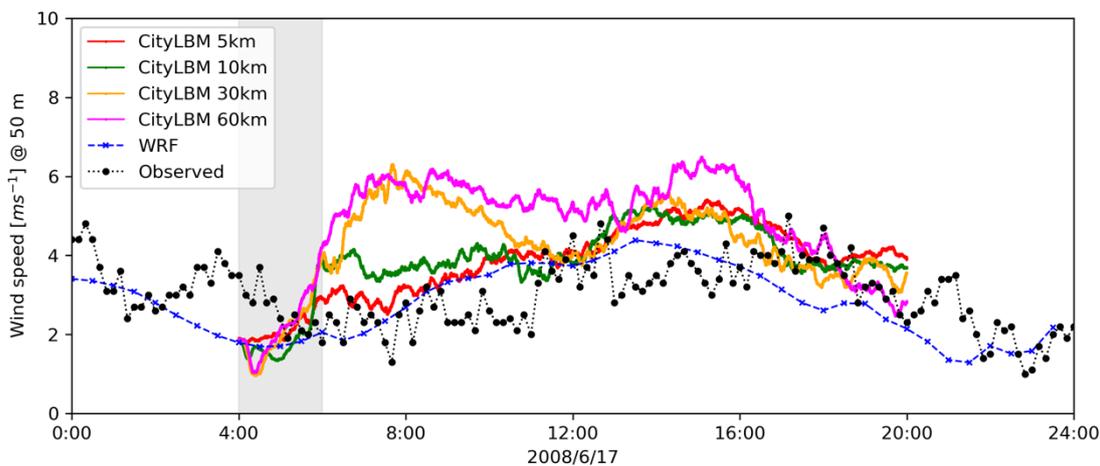
図 5-13 に鉛直風速の比較を示す。WRF データでは鉛直風速は過小評価しており、鉛直風速の評価には LES が必須であることがわかった。鉛直風速はほぼ乱流成分で決まっていることから、解析領域の違いによる明確な違いは見られず、どのケースも観測値と同程度の振れ幅の鉛直速度となることが確認された。

図 5-14 に水平風向の比較を示す。水平風速と同様に WRF データは平均的に観測値に追従していることがわかる。計算領域が小さい 5km 四方および 10km 四方の解析結果は境界条件として課している WRF データの影響により WRF データに比較的近い結果となることが確認された。一方、30km 四方および 60km 四方の解析結果では、境界条件として課している WRF データの影響が弱まることから、WRF データからの乖離が大きくなる、あるいは、WRF データには見られない風向の過渡的変動が現れるといった結果が確認された。また、水平風速とは異なり、高度 300m で最もずれが大きくなることが確認された。

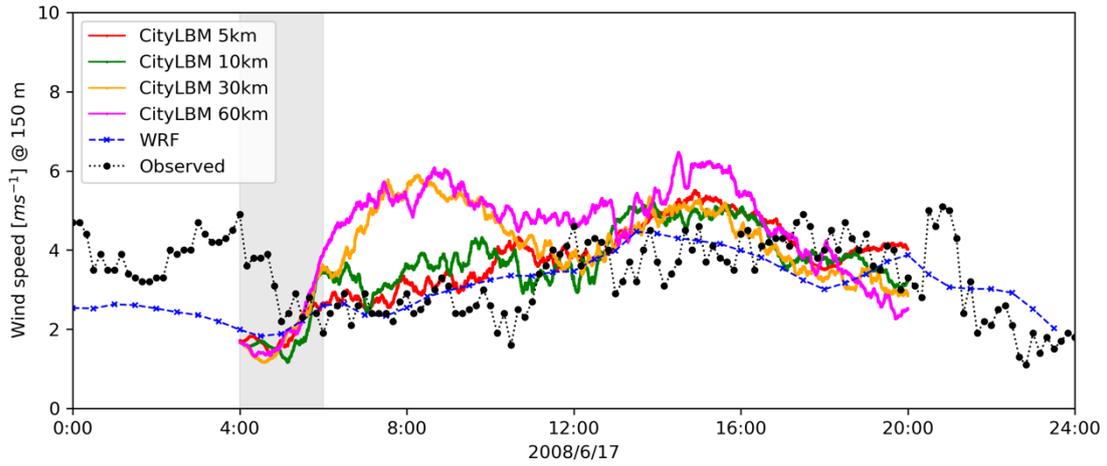
図 5-15 に水平風速の標準偏差の比較を示す。観測値は 1~2m/s 程度の乱流強度を示す。一方、解析結果は全てのケースで 0.5m/s 程度の乱流強度を示し、乱流強度を大幅に過小評価することがわかった。ここで、計算領域の違いによる明確な違いは見られなかった。

図 5-16 に鉛直風速の標準偏差の比較を示す。観測値は鉛直方向に対しても 1~2m/s 程度の乱流強度を示し、-0.5~0.5m/s で推移している鉛直風速を大きく上回る、すなわち、鉛直風速は乱流成分が支配的であることを示す。一方、解析結果は全てのケースで 0.5m/s 程度の乱流強度を示し、鉛直方向に対しても乱流強度を大幅に過小評価することがわかった。

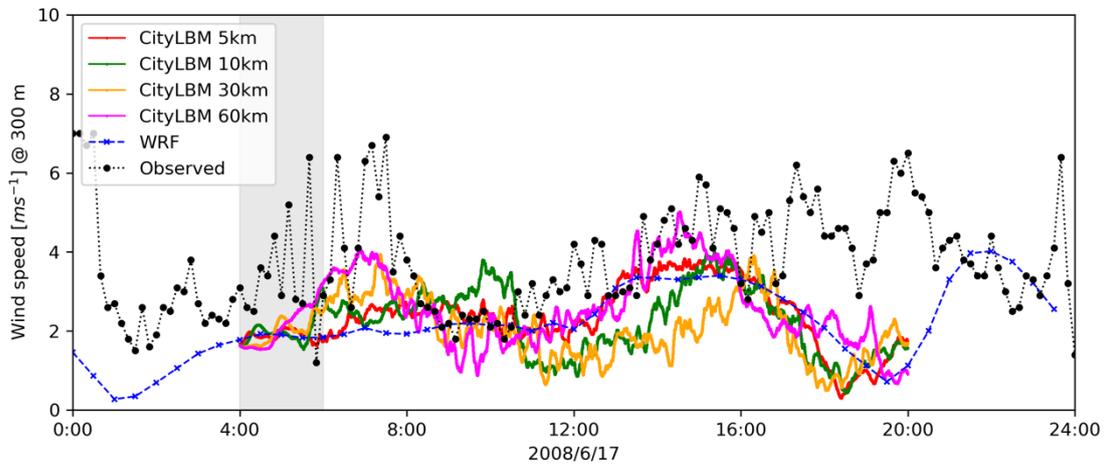
図 5-17 の水平風向の標準偏差の比較を示す。観測値は 20~30 度程度の風向の揺らぎを示している。一方、解析結果における風向の揺らぎは 10 度以下となっており、乱流強度と同様に風向の揺らぎも大幅に過小評価している。また、全てのケースにおいて、高度 300m で風向が過渡的に 180 度近く反転する時間帯が見られ、観測と定性的に異なる振る舞いが見られた。



(a) 50m

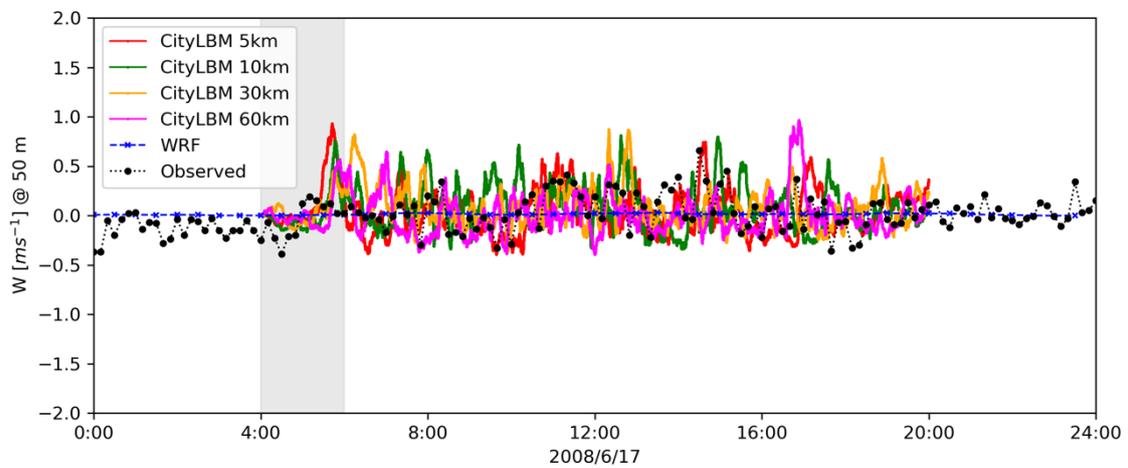


(b) 150m (排気筒高さ)

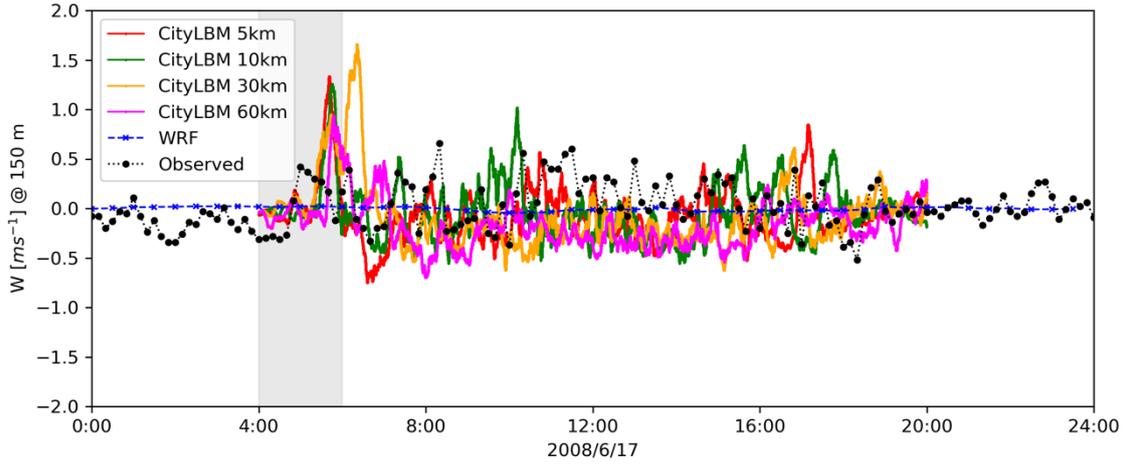


(c) 300m

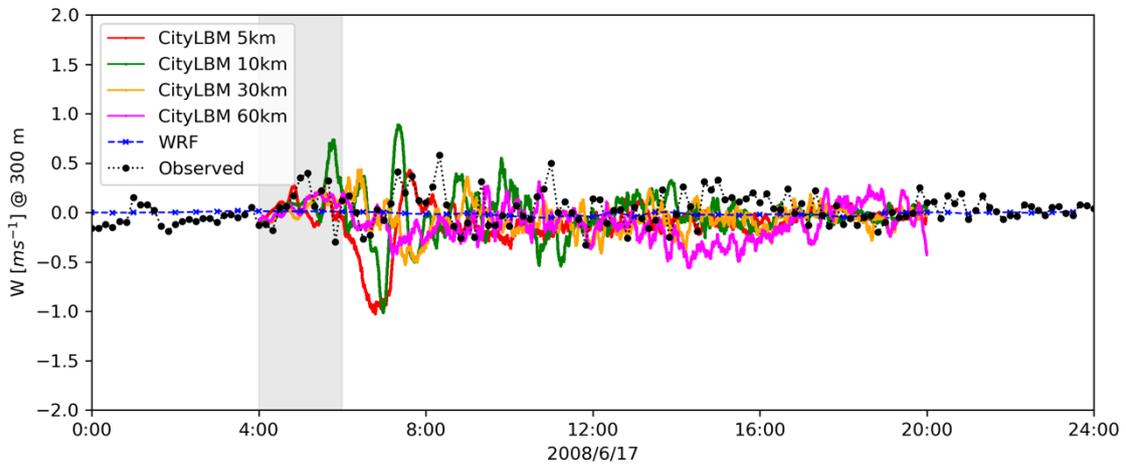
図 5-12 水平風速 U の計算領域 5~60km 四方に対する時系列変化



(a) 50m

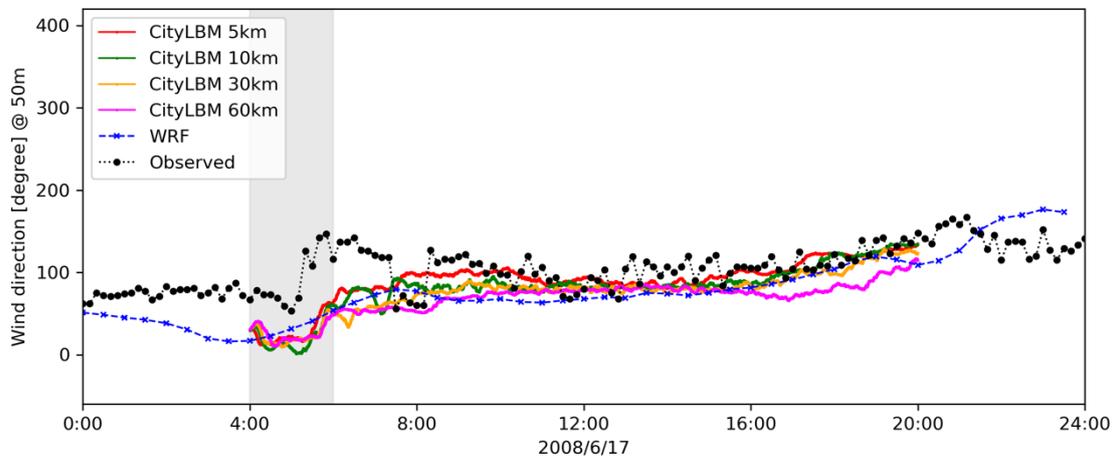


(b) 150m (排気筒高さ)

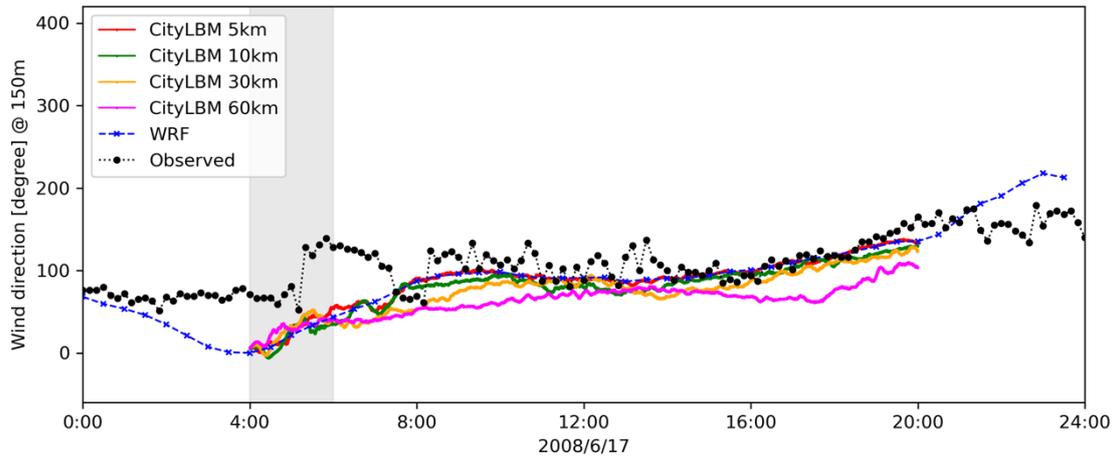


(c) 300m

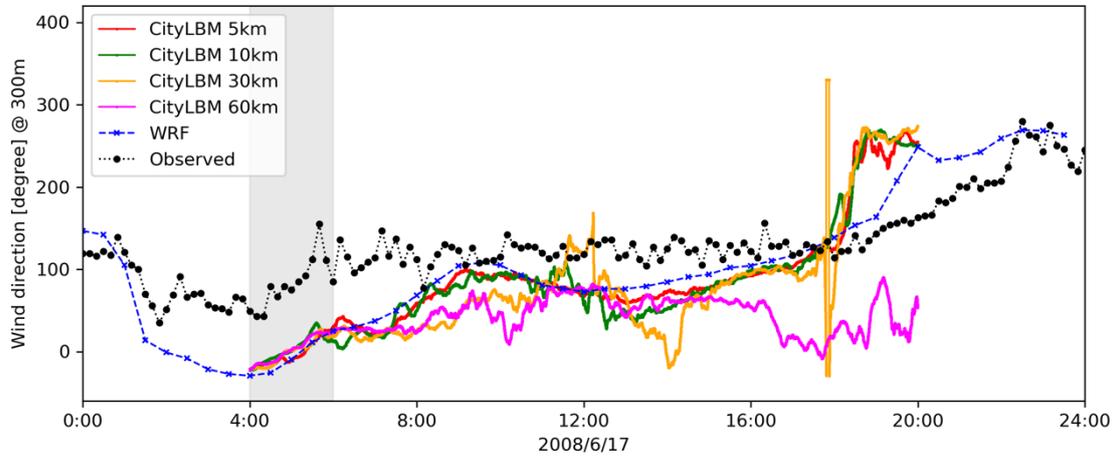
図 5-13 鉛直風速 W の計算領域 5~60km 四方に対する時系列変化



(a) 50m

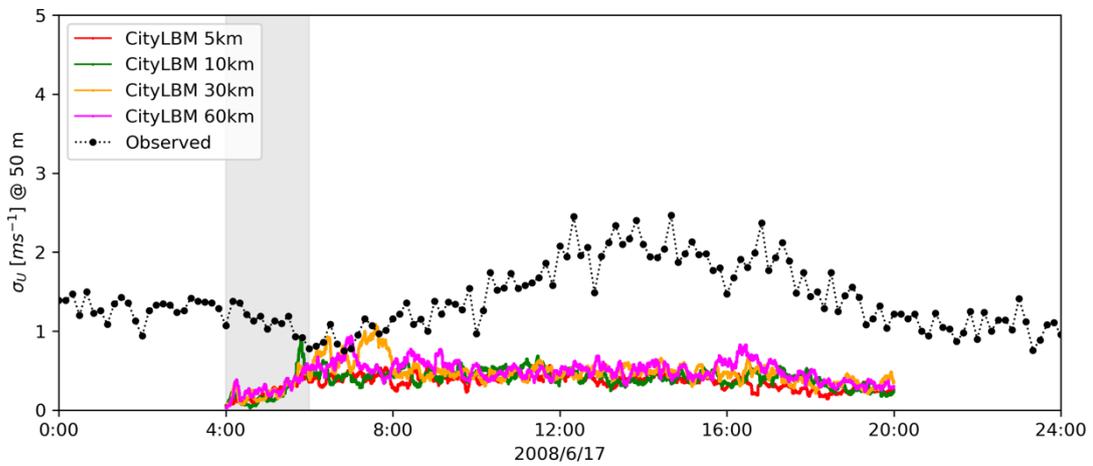


(b) 150m (排気筒高さ)

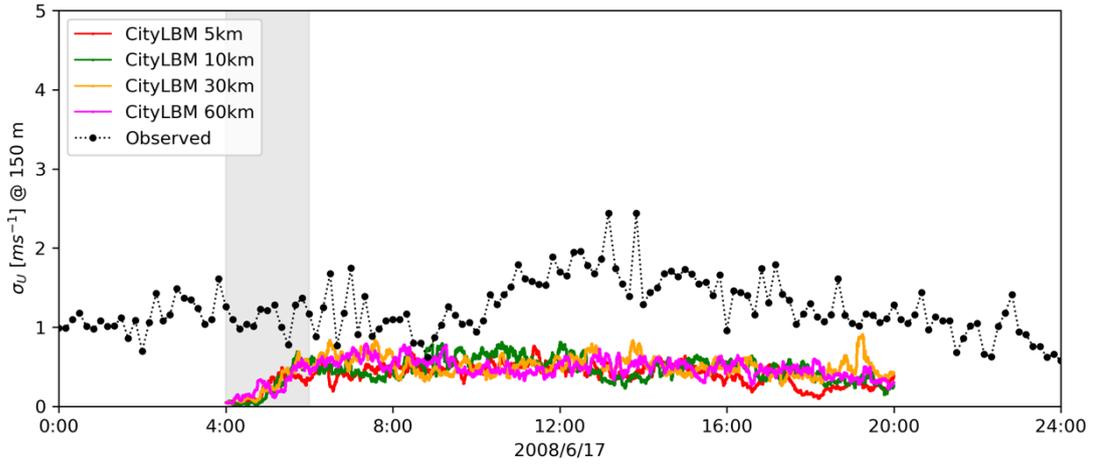


(c) 300m

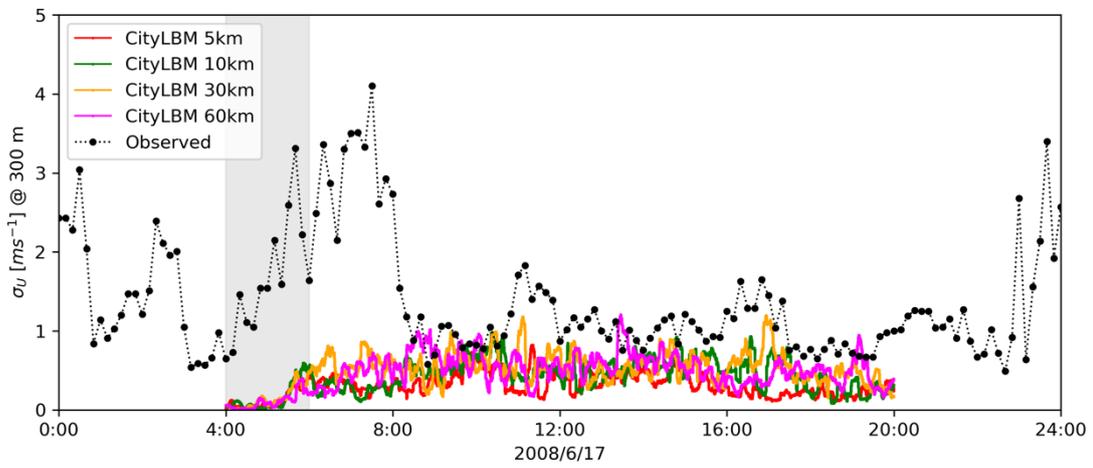
図 5-14 水平風向 Dir の計算領域 5~60km 四方に対する時系列変化



(a) 50m

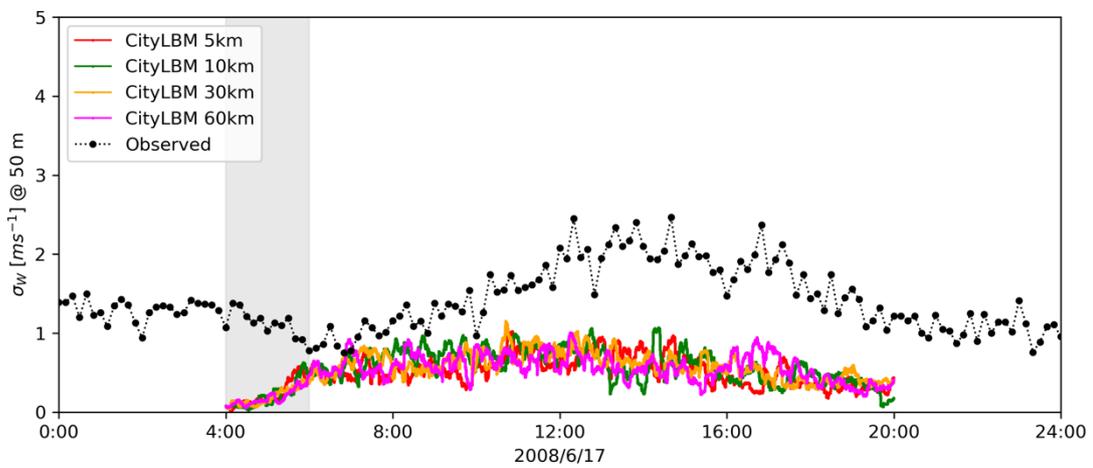


(b) 150m (排気筒高さ)

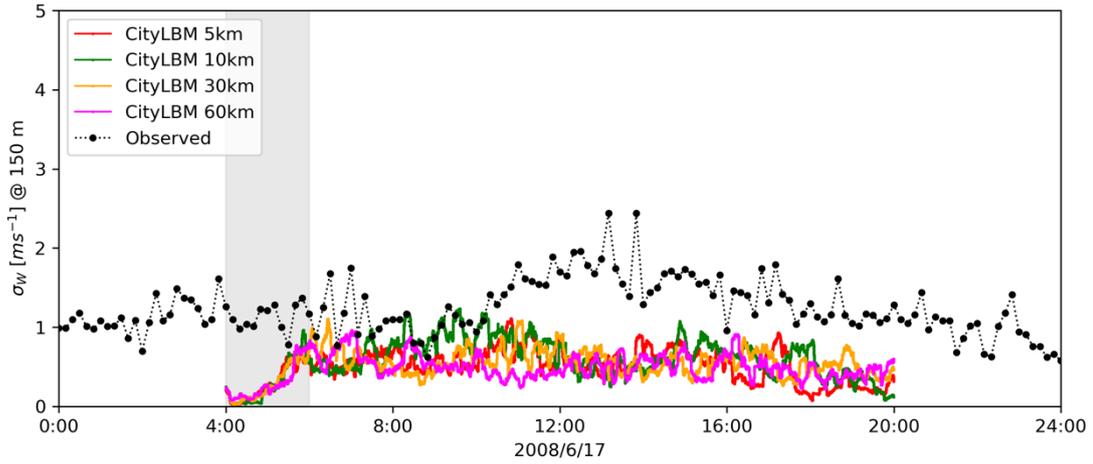


(c) 300m

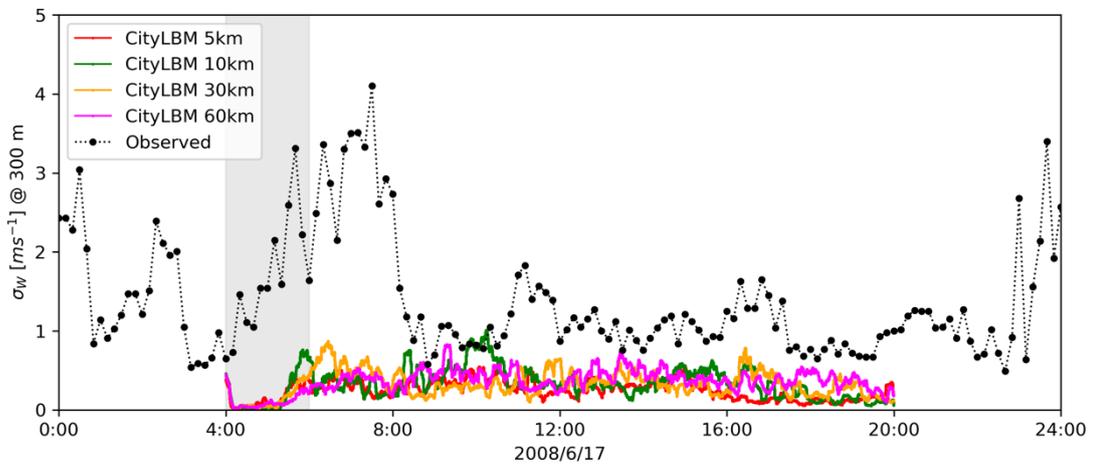
図 5-15 水平風速の標準偏差 σ_U の計算領域 5~60km 四方に対する時系列変化



(a) 50m

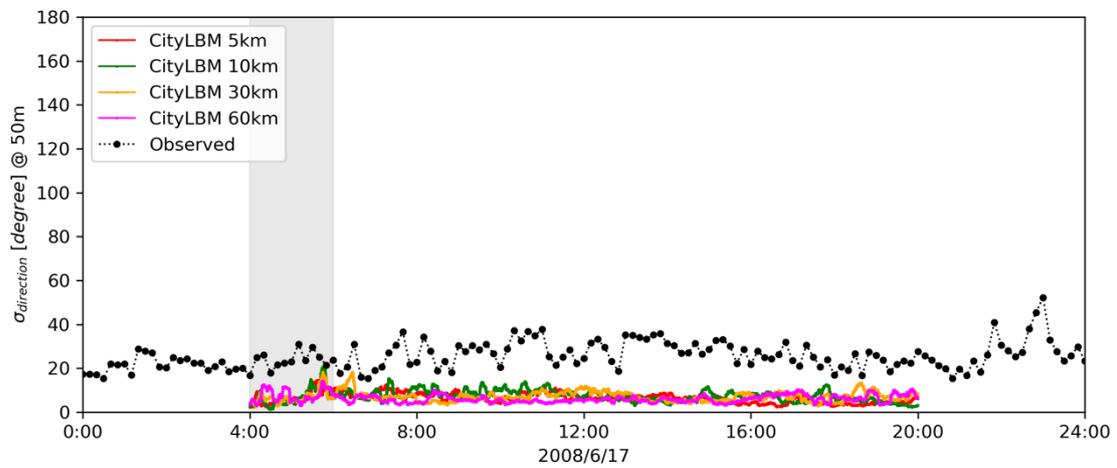


(b) 150m (排気筒高さ)

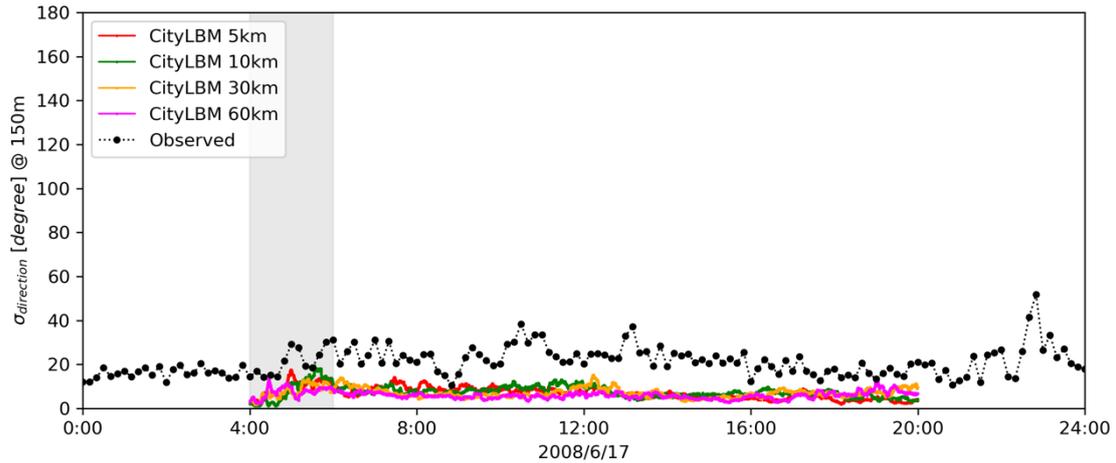


(c) 300m

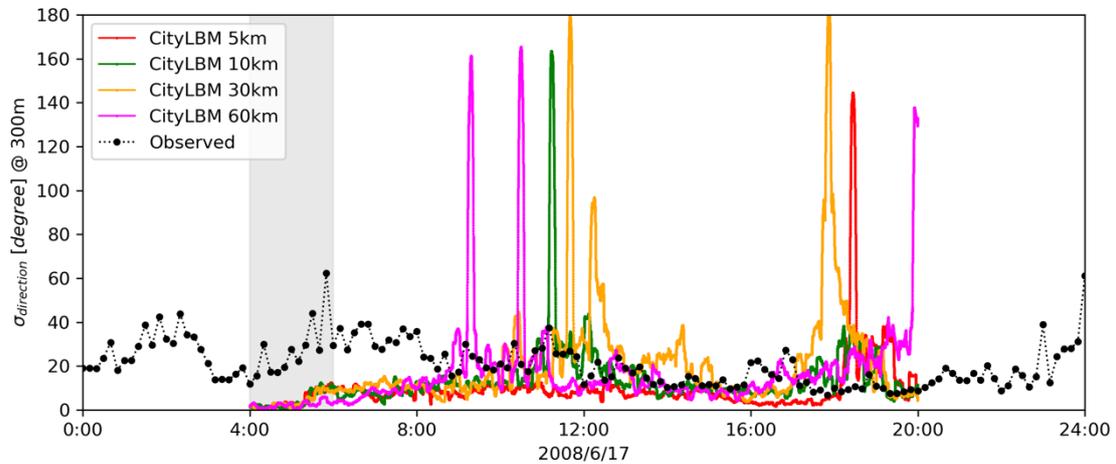
図 5-16 鉛直風速の標準偏差 σ_w の計算領域 5~60km 四方に対する時系列変化



(a) 50m



(b) 150m (排気筒高さ)

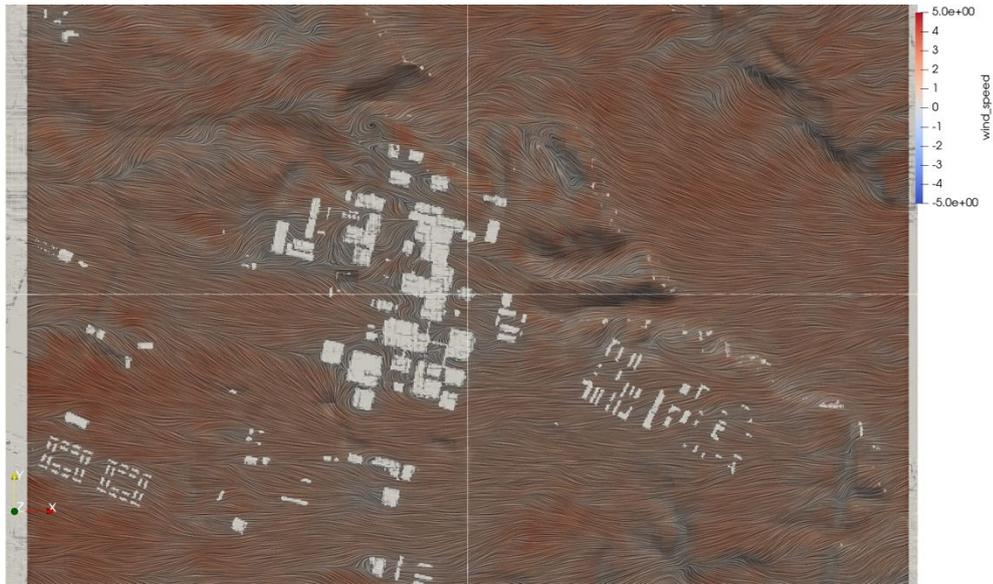


(c) 300m

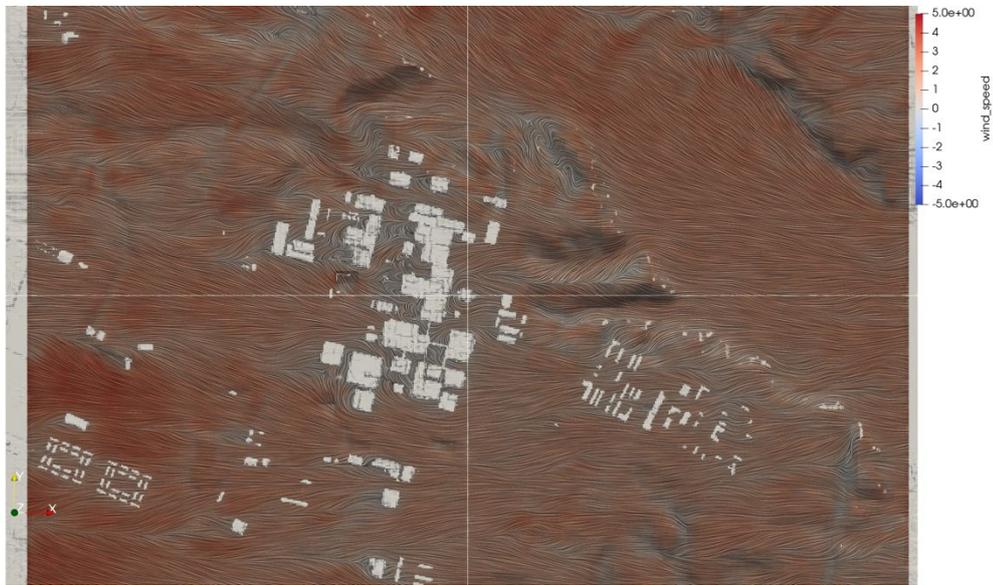
図 5-17 水平風向の標準偏差 σ_{Dir} の計算領域 5~60km 四方に対する時系列変化

5.3.5 局所域の地表面近傍の風況分布の可視化

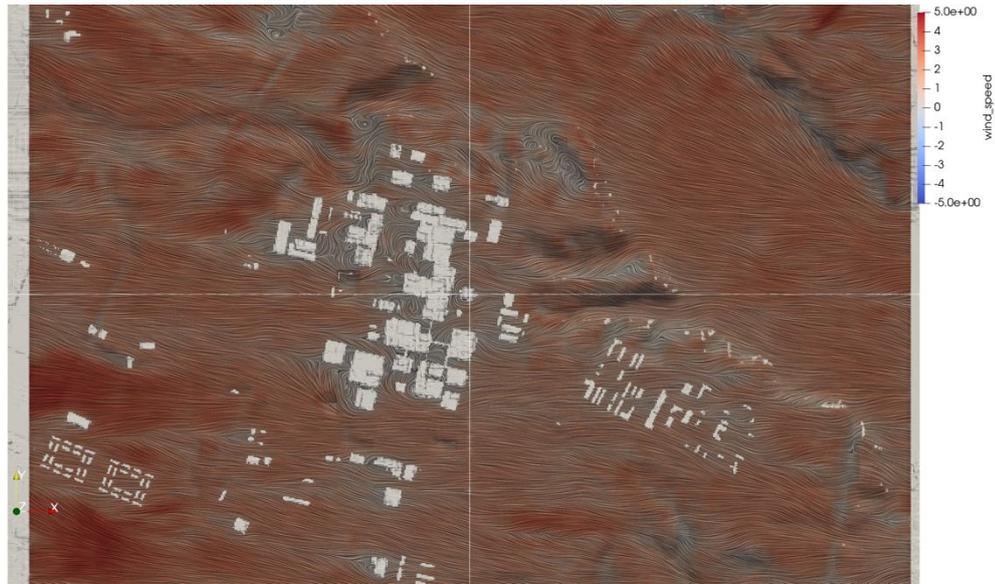
局所域の中解像度および高解像度格子に対する風況解析結果を記載する。図 5-18、図 5-19、図 5-20 に格子解像度 10m、4m、および、2m の高さ 5m 断面の風速の LIC 可視化を示す。建物・地形と捉えた解析となるため、それらの流れの後流の領域は青の低速域として、また建物配置やもしくは地形の変化により流れが集まる領域は、赤の高速域として可視化される。いずれの計算結果においても、建物間の複雑な流れを解像しているが、高解像度の解析の方がより速度を大きく評価していることが確認された。以上より、メートル解像度の風況解析により、建物間の流れを解像する事は可能となるが、格子解像度に対する収束は確認できていないため、地表面近傍の流れを再現するためには、より詳細な調査が必要となることが判明した。



(a) 08:00

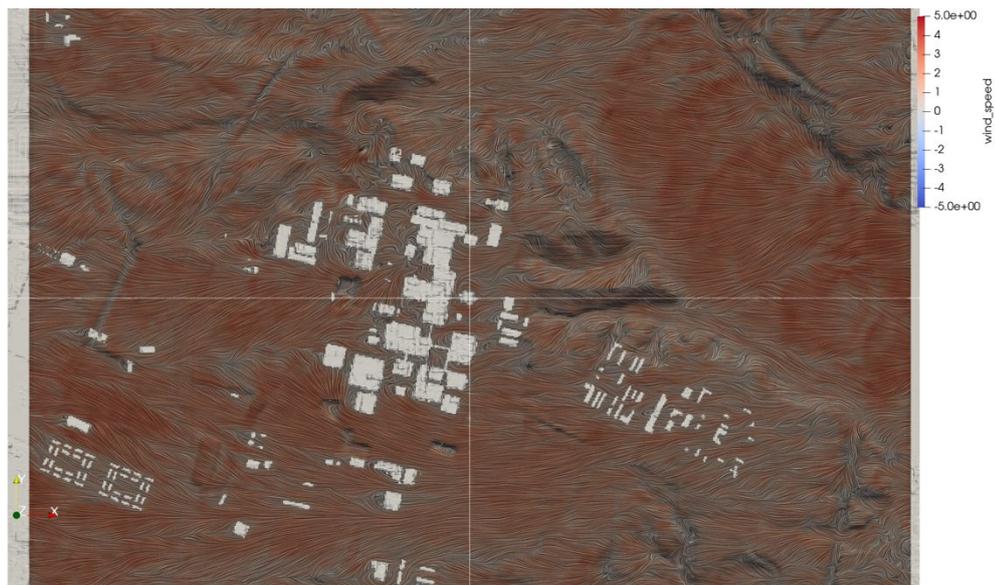


(b) 12:00

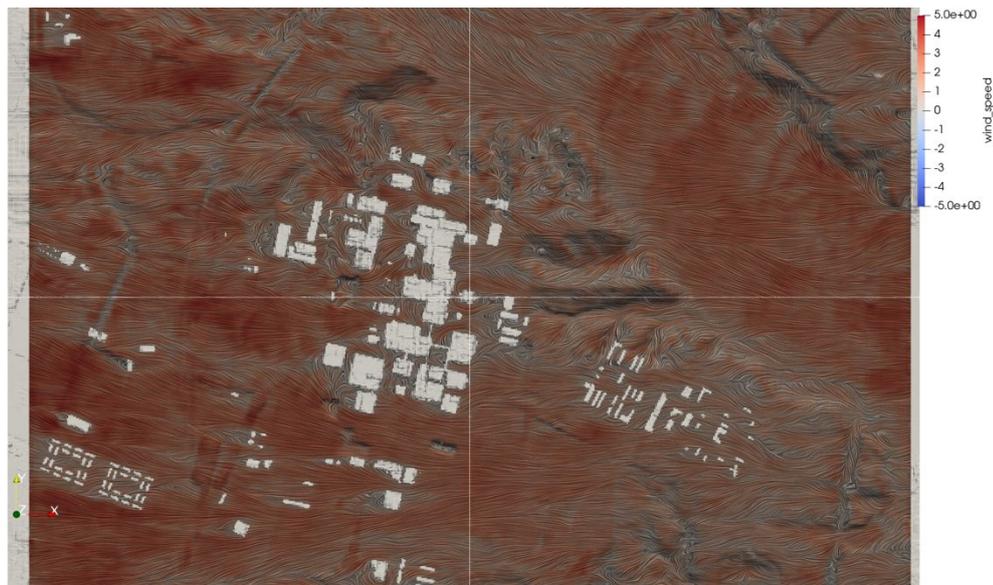


(c) 16:00

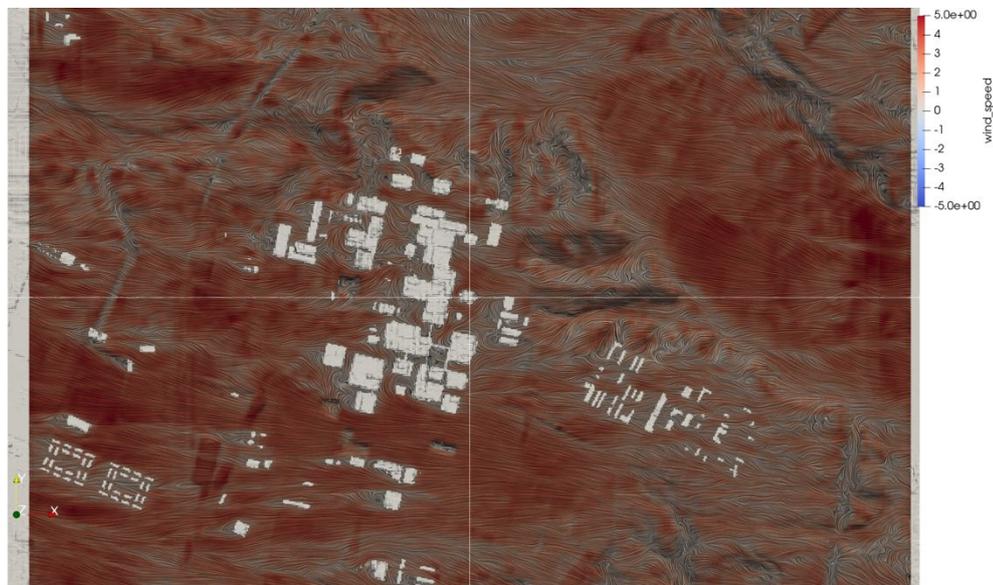
図 5-18 局所域 (計算領域 5km 四方) の格子解像度 10m の解析の高さ 5m 断面の風速の LIC (Line Integral Convolution) 可視化



(a) 08:00

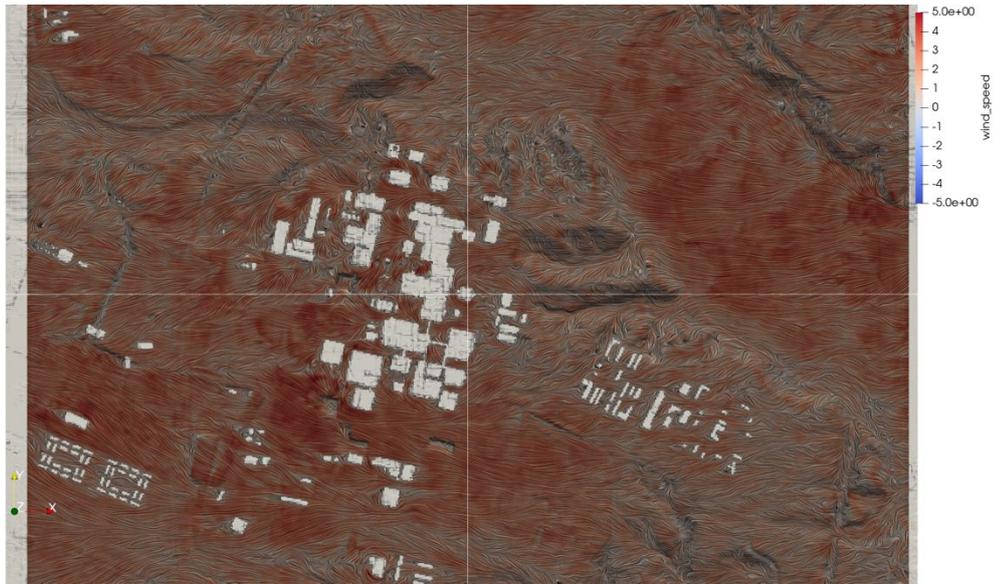


(b) 12:00

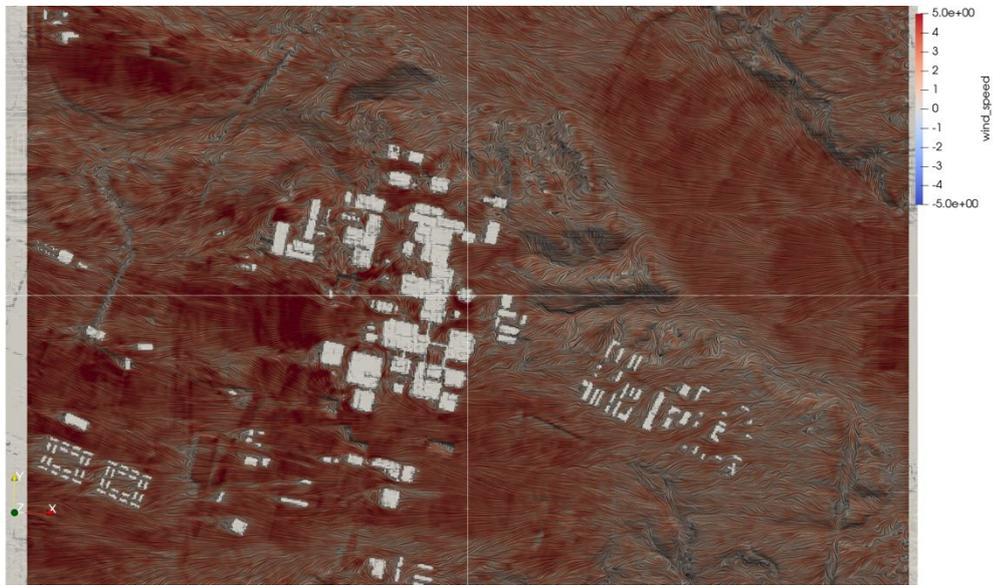


(c) 16:00

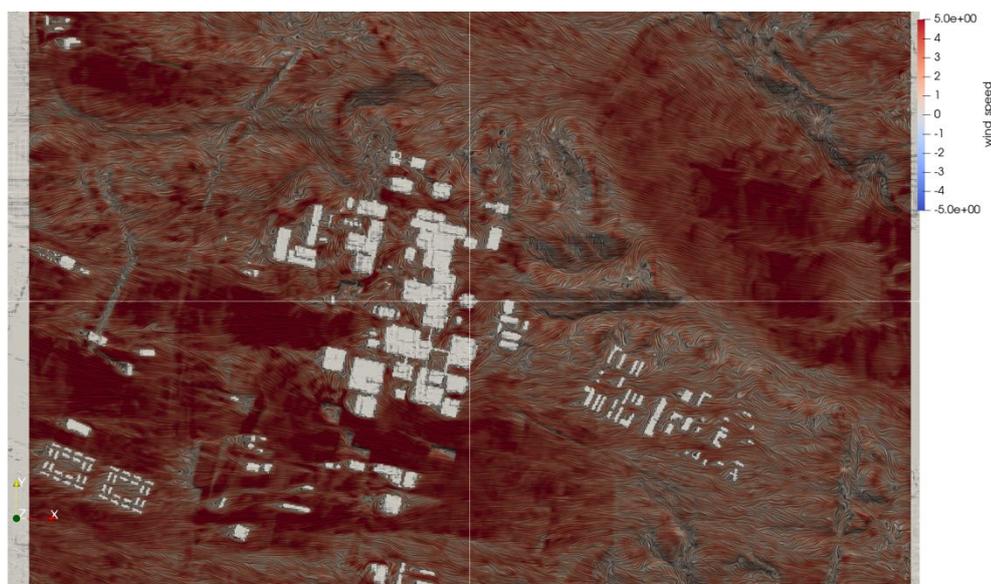
図 5-19 局所域（計算領域 5km 四方）の格子解像度 4m の解析の高さ 5m 断面の風速の LIC（Line Integral Convolution）可視化



(a) 08:00



(b) 12:00



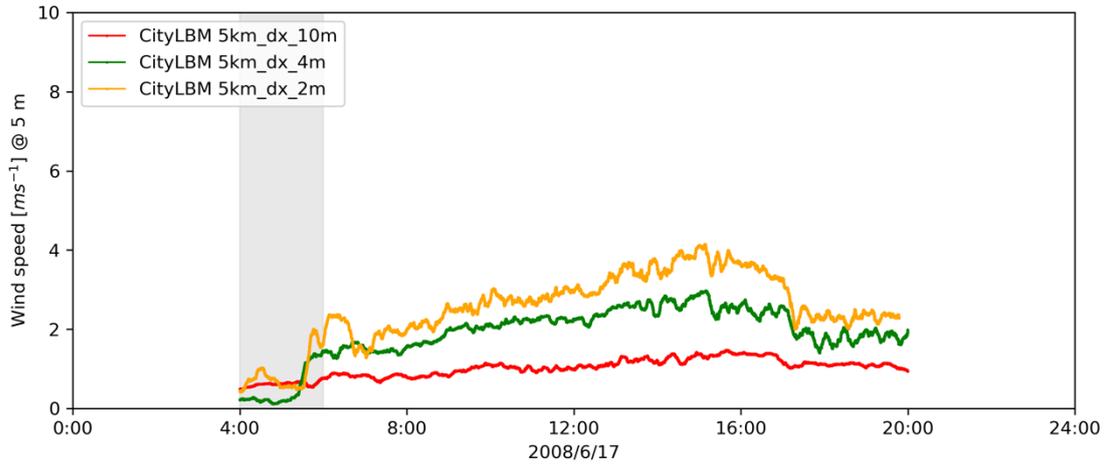
(c) 16:00

図 5-20 局所域（計算領域 5km 四方）の格子解像度 2m の解析の高さ 5m 断面の風速の LIC（Line Integral Convolution）可視化

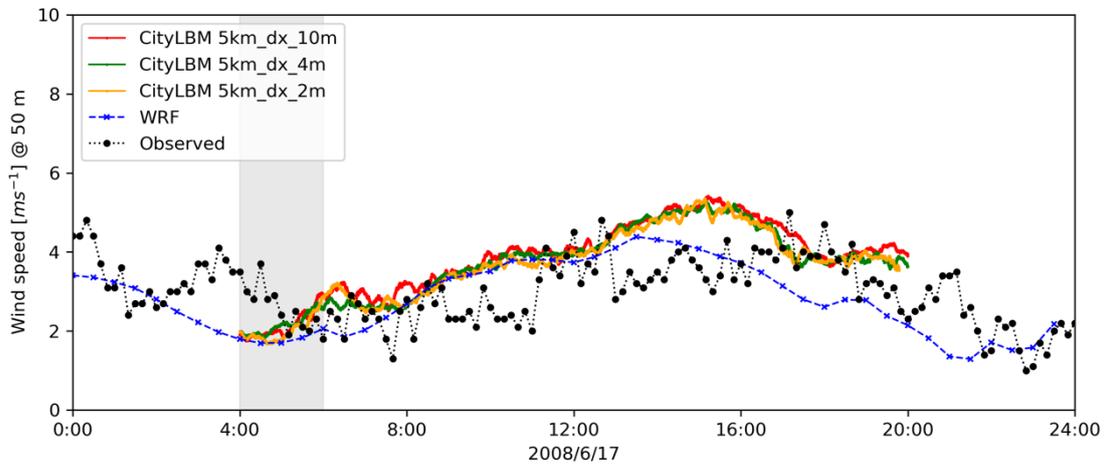
5.3.6 局所域の風況分布の気象観測値との比較

5km 四方の風況解析結果を六ヶ所村再処理工場近傍に設置された気象観測点の観測値と比較する。広域の風況解析結果の比較と同様に、図 5-21 から図 5-22 に、水平風速、鉛直風速、水平風向、水平風速の標準偏差、鉛直風速の標準偏差、水平風向の標準偏差に対する 10 分統計量を記載する。ここで、観測高さとして、地表面近傍の 5m と 50m、排気筒高さの 150m、および上空の 300m を比較した。時刻 4:00 から 6:00 までの灰色の区間は、初期値として与えられた WRF の速度場が LBM に計算により乱流を発達するまでの区間となるため、以下の評価には含めない。

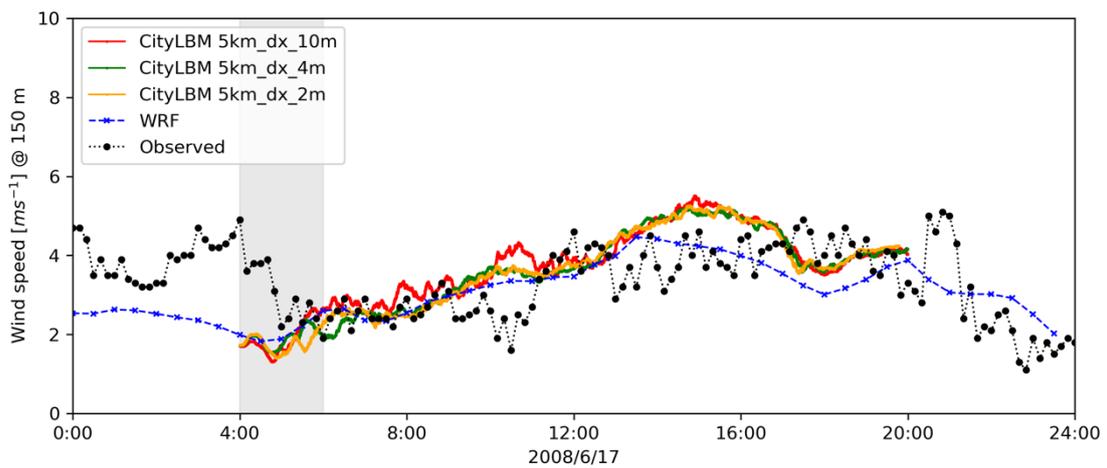
図 5-21 の水平風速、図 5-22 の鉛直風速、図 5-23 の水平風向に示した高さ 50m 以上のデータに関しては、解像度の影響はほとんどなく、基準解像度で中解像度、高解像度と同様の解析結果が得られることが確認された。この点は風況の変動成分についても同様であり、図 5-24 の水平風速の標準偏差、図 5-25 の鉛直風速の標準偏差、図 5-26 の水平風向の標準偏差においても解像度の違いによる明確な変化は見られなかった。この結果から、高さ 50m から 300m の風況においては、基準解像度で十分に解析が収束していることが確認できた。一方、地表面近傍の高度 5m では、高解像度になるほど水平風速が大きくなる傾向が見られた。また、水平風向の標準偏差については、中解像度と高解像度の計算では、高度 300m で過渡的に風向が逆転する現象が見られなくなった。



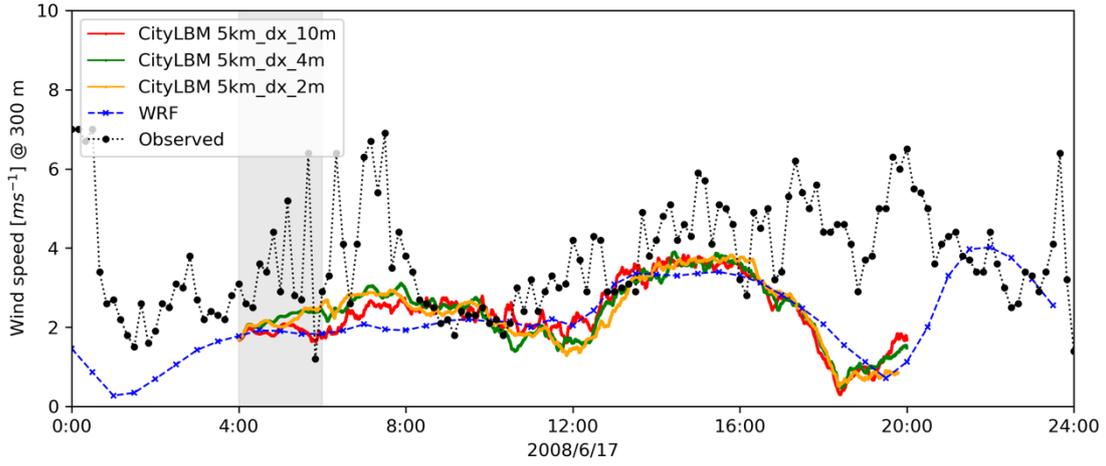
(a) 5m



(b) 50m

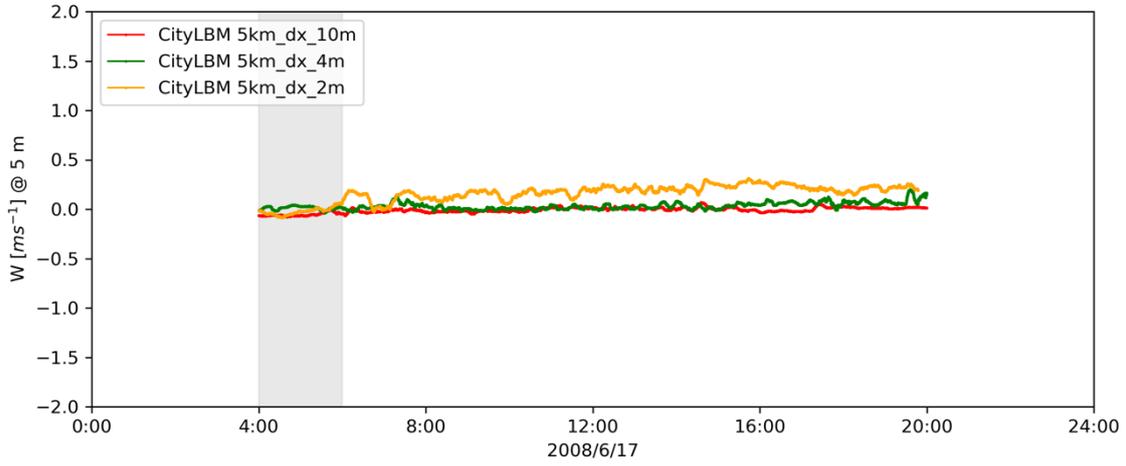


(c) 150m (排気筒高さ)

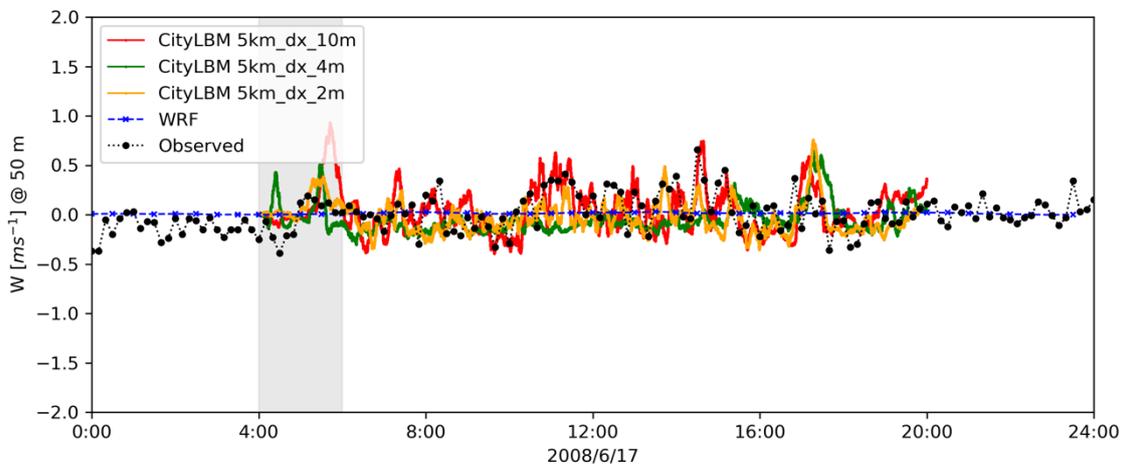


(d) 300m

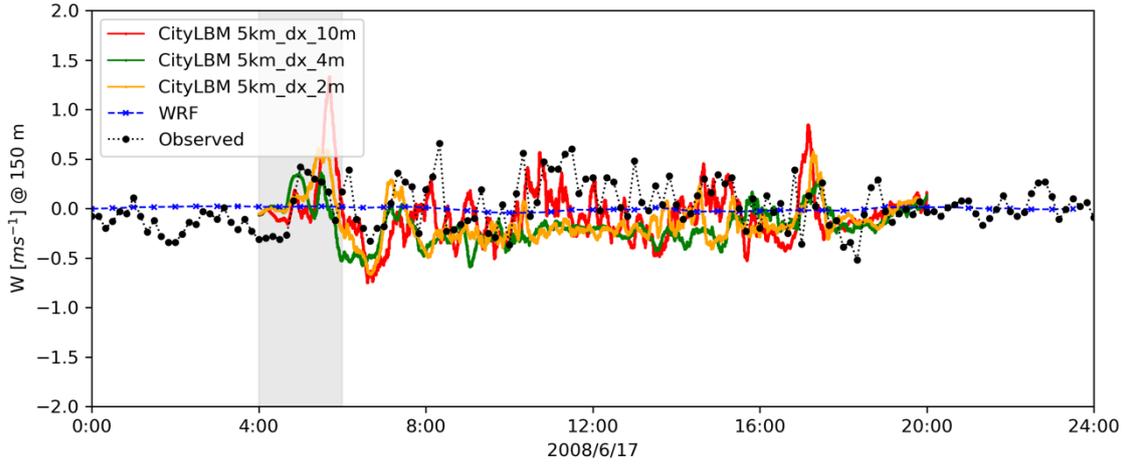
図 5-21 水平風速 U の計算領域 5km 四方、格子解像度 10m、4m、2m に対する時系列変化



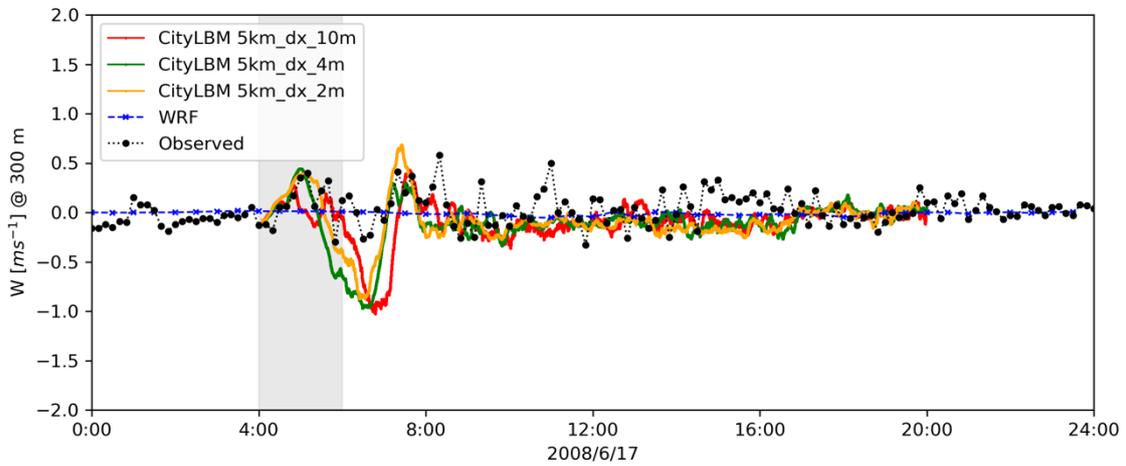
(a) 5m



(b) 50m

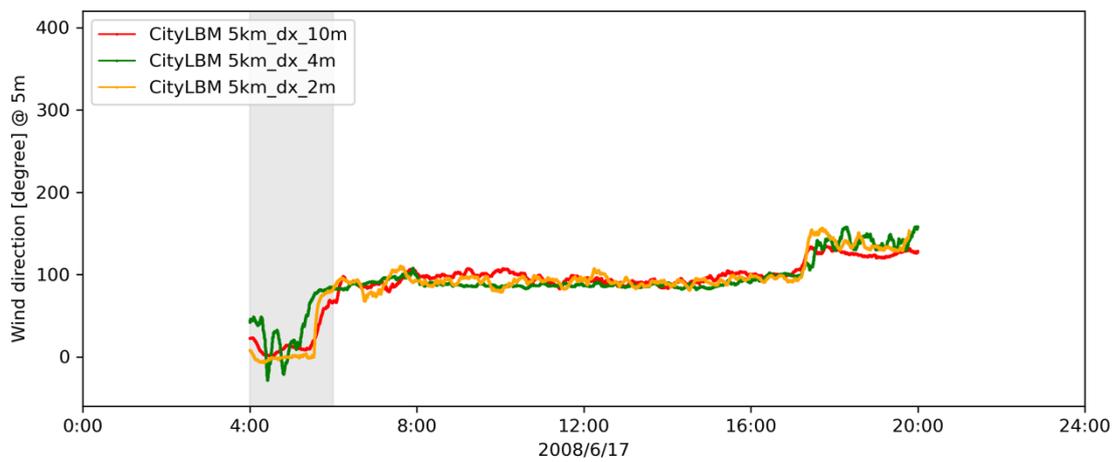


(c) 150m (排気筒高さ)

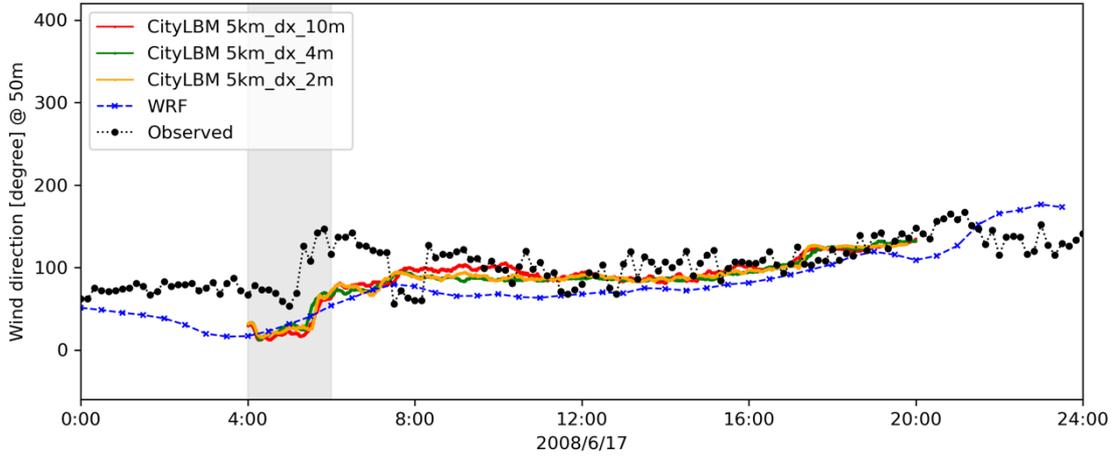


(d) 300m

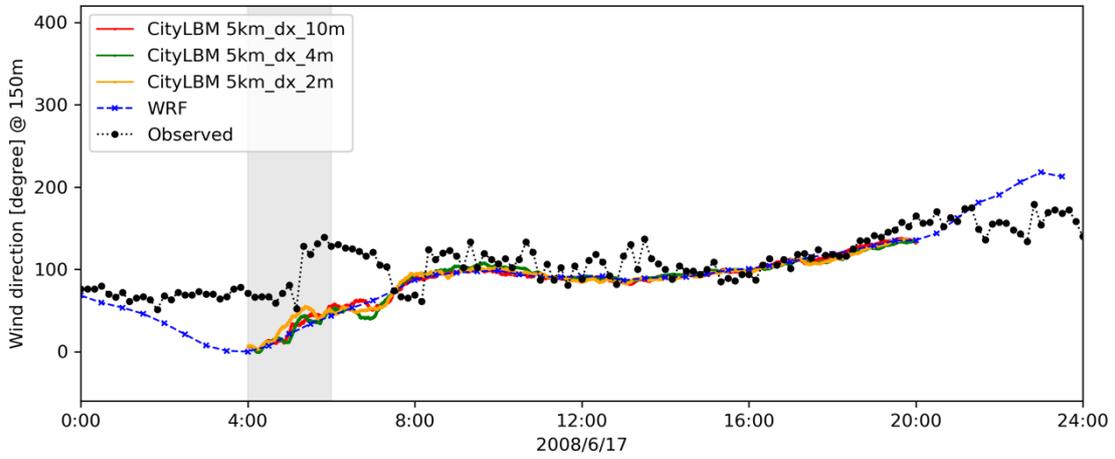
図 5-22 鉛直風速 W の計算領域 5km 四方、格子解像度 10m、4m、2m に対する時系列変化



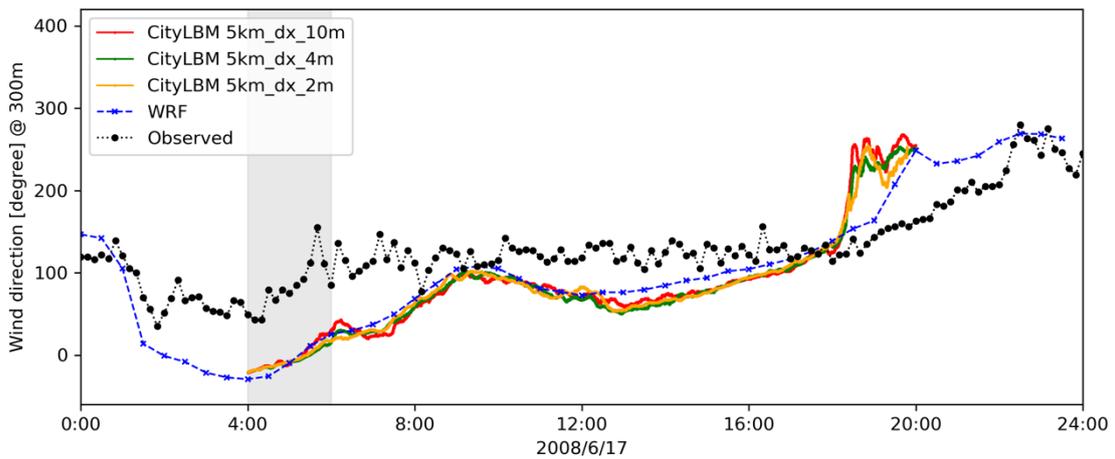
(a) 5m



(b) 50m

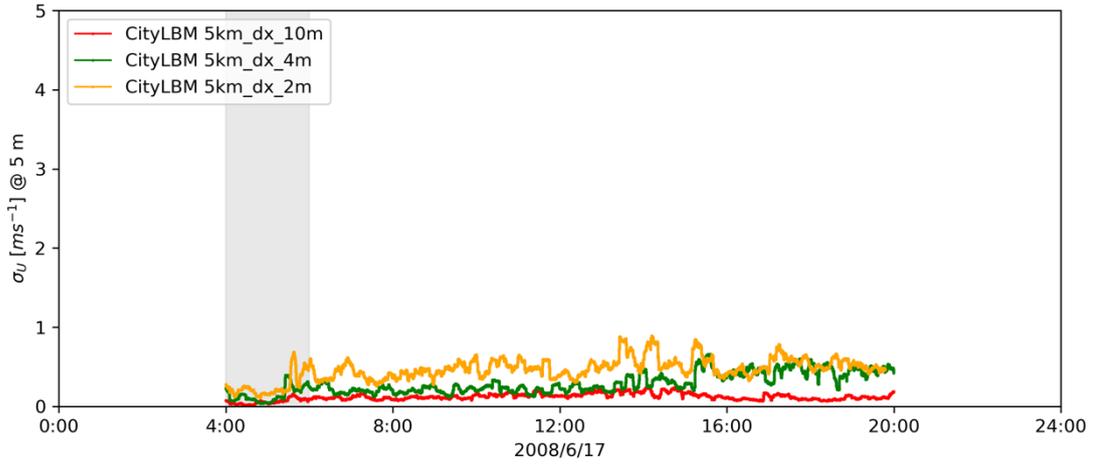


(c) 150m (排気筒高さ)

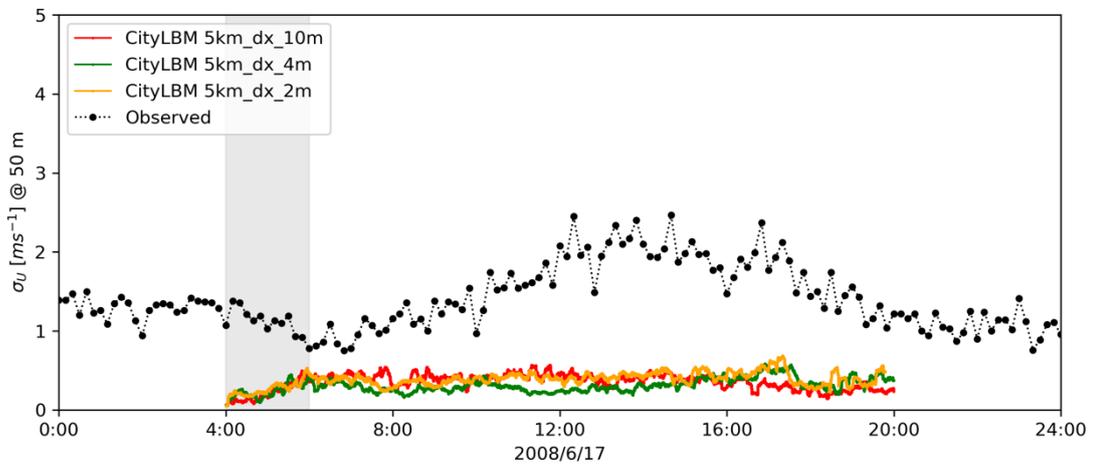


(d) 300m

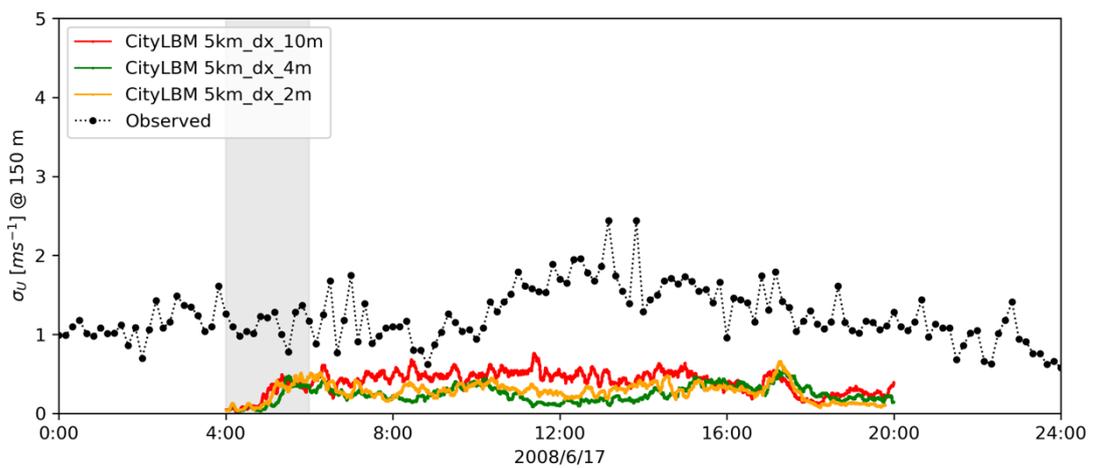
図 5-23 水平風向 Dir の計算領域 5km 四方、格子解像度 10m、4m、2m に対する時系列変化



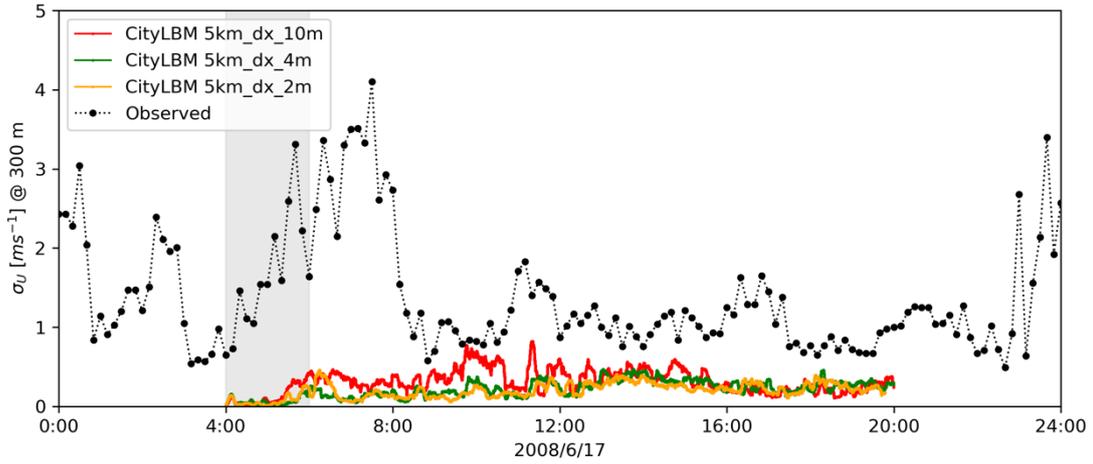
(a) 5m



(b) 50m

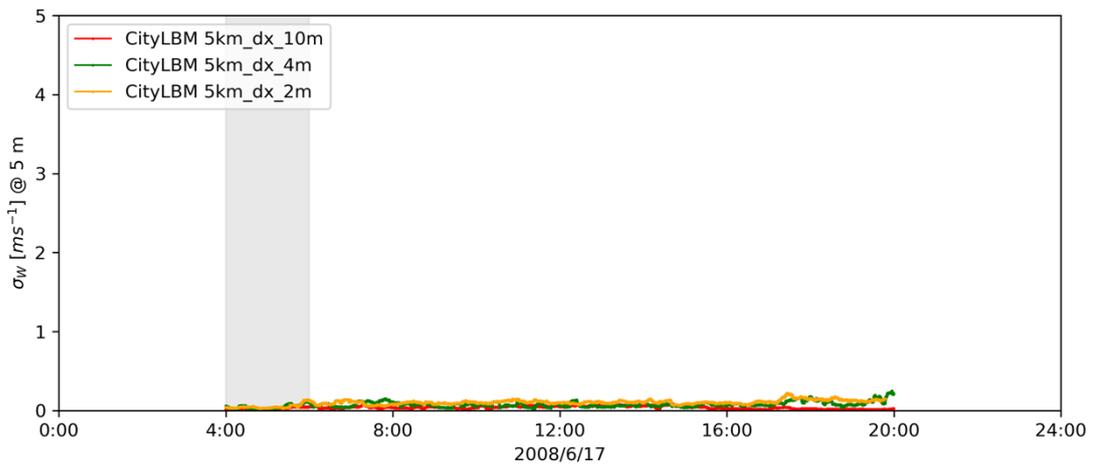


(c) 150m (排気筒高さ)

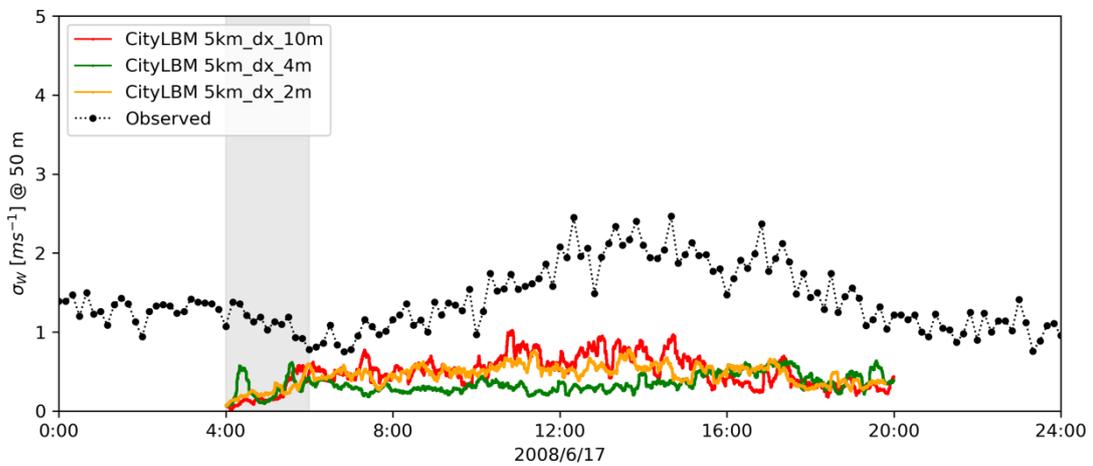


(d) 300m

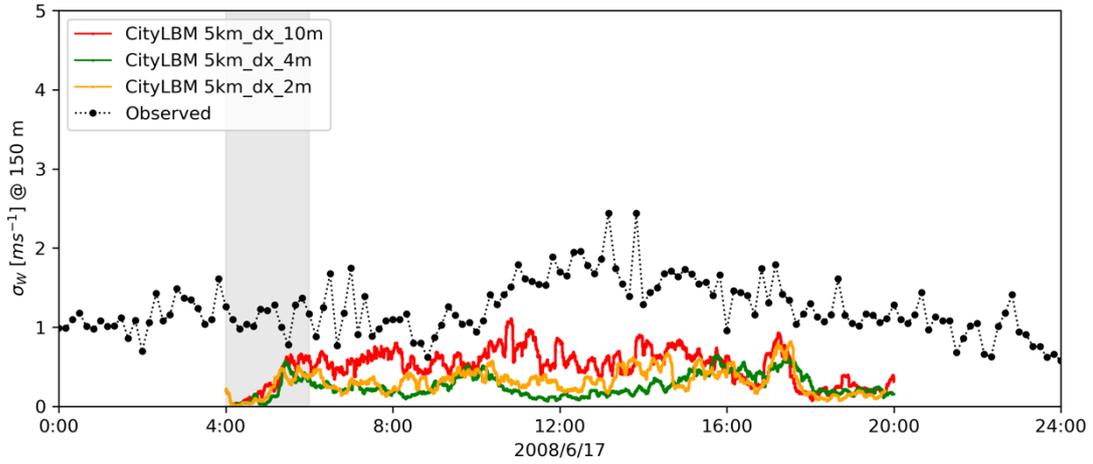
図 5-24 水平風速の標準偏差 σ_U の計算領域 5km 四方、格子解像度 10m、4m、2m に対する時系列変化



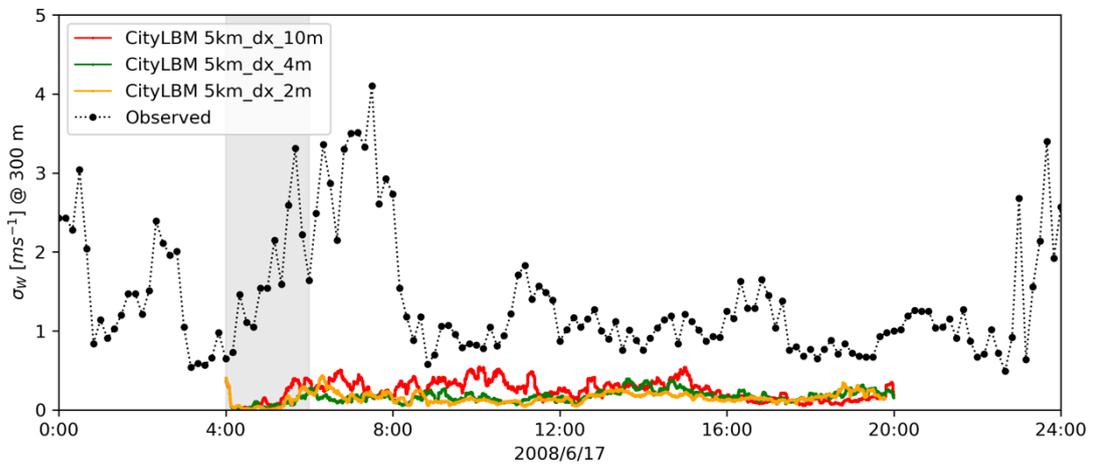
(a) 5m



(b) 50m

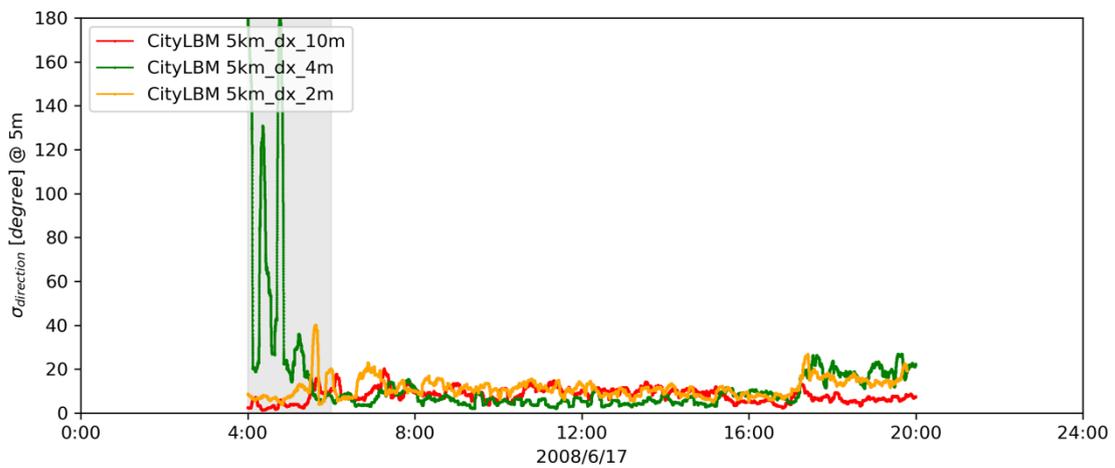


(c) 150m (排気筒高さ)

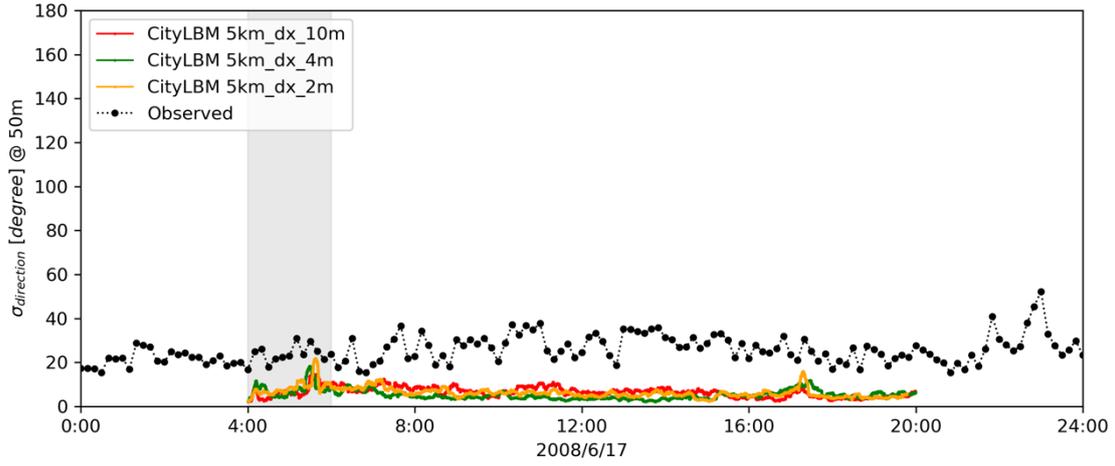


(d) 300m

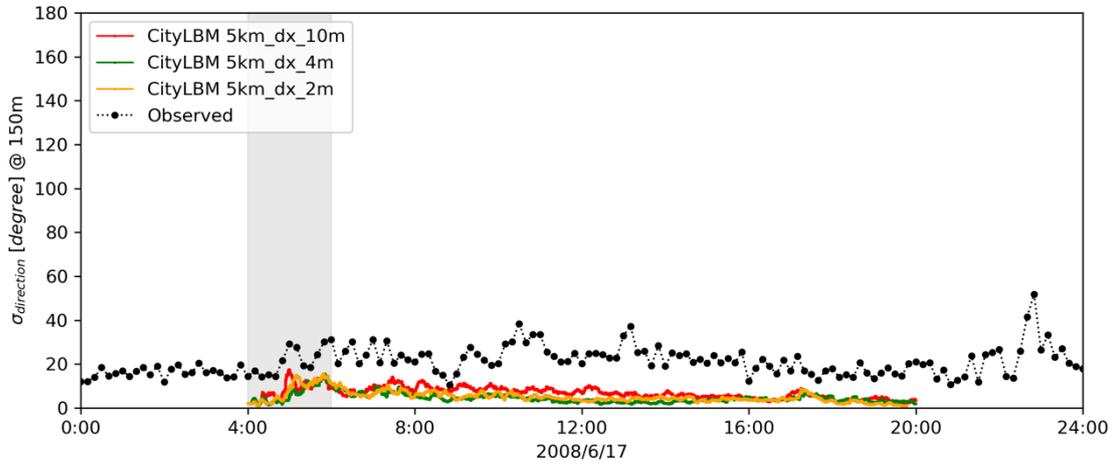
図 5-25 鉛直風速の標準偏差 σ_w の計算領域 5km 四方、格子解像度 10m、4m、2m に対する時系列変化



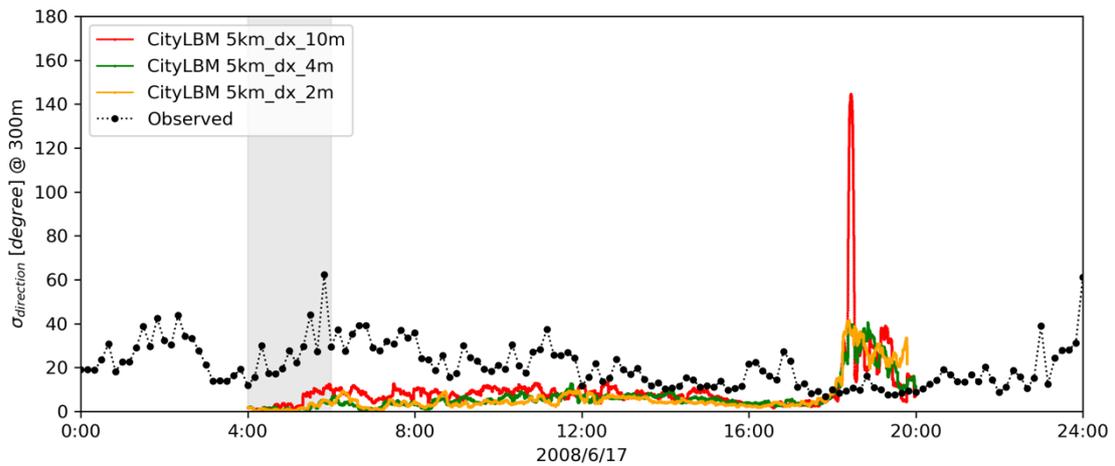
(a) 5m



(b) 50m



(c) 150m (排気筒高さ)



(d) 300m

図 5-26 水平風向の標準偏差 σ_{Dir} の計算領域 5km 四方、格子解像度 10m、4m、2m に対する時系列変化

5.3.7 まとめ

六ヶ所再処理工場周辺の気象観測に対する試解析を実施した。この結果、以下の点が確認された。

- 実時間を上回る計算速度で基準解像度 ($\Delta x_{\text{fine}}=10\text{m}$) を用いた 60km 四方の広域風況解析を実行可能である。また、5km 四方の局所風況解析においては中解像度 ($\Delta x_{\text{fine}}=4\text{m}$)、高解像度 ($\Delta x_{\text{fine}}=2\text{m}$) の実時間計算が可能である。
- 境界条件のみをメソスケール気象データに対してデータ同化する現在のモデルでは、広域になるほど中心領域でメソスケール気象データに基づいて設定した境界条件の影響が弱まり、風況解析結果がメソスケール気象データや気象観測データから大きく乖離する。
- メソスケール気象データを境界条件とする風況解析では、メソスケール気象データが気象観測データからずれると風況解析結果も一緒にずれる。また、気象観測データに現れる平均風速の過渡的な変動を捉えることができない。
- 今回の風況解析モデルは乱流強度を過小評価する。
- 地表面付近の風況を正確に捉えるには 10m 解像度では不十分であり、メートル解像度の高解像度解析が必要となるが、高さ 50m 以上の風況に関しては 10m 解像度で十分に収束する。

以上の結果に基づく考察を以下に示す。

- 境界条件のみをメソスケール気象データに対してデータ同化する現在モデルを観測データの解析や観測データに基づく実時間予測に適用する際には、5km 四方程式の局所解析とすることが適切である。一方、観測データに基づかない一様流入条件等を用いたシミュレーションとしては 60km 四方の広域解析も可能である。
- 平均風速の細かい変動を捉えた解析を実現するには、メソスケール気象データを用いずに観測値に基づいて境界条件を与えるモデルが必要となる。
- 乱流強度を正しく再現する上で、地形モデル、植生モデルやナudgingデータ同化等を含む境界条件のさらなる向上が必要となる。
- 汚染物質の放出源が高さ 150m の主排気筒となる六ヶ所再処理工場の場合には、10m 解像度でも放出源付近の風況を正しく捉えられるが、地表面付近に汚染物質の放出源がある場合には、メートル解像度の高解像度解析が必要となる。

5.4 高分解能大気拡散シミュレーションの課題

本節では、LOHDIM-LES 及び City-LBM の試計算（六ヶ所再処理工場）を行い得られた課題を整理する。LOHDIM-LES では、本試計算やこれまでの研究開発を通して、以下の課題があることが分かっている。

- ① 湿性沈着過程の導入：WSPEEDI との結合システムで実装予定
- ② 沈着過程の検証：有効な検証データがないので困難だが、1F データでできないか検討
- ③ 領域の拡張：不要と考えているがそれを定量的に示す必要はある（6章に記載）
- ④ 結合計算における共境界での連続性の確認
- ⑤ WRF との結合における観測データの同化

上記課題(①-②)は、放射性物質の拡散において反映すべき沈着過程を取り込むための課題に該当し、

課題解決策（予定）と共に記した。また、領域を拡張する際の課題と他のモデルとの結合における連続性の課題があることも指摘する（③・④参照）。前者については、6章にて解決策を記したが、将来の課題であり、LESを環境課題に活用する際の共通の課題として位置づけられる。また、メソスケール気象モデルとの接続（④）と観測データの同化（⑤）の課題があることも記す。次に、City-LBMにおける課題を以下に記す。

- ① 風況解析モデルは乱流強度を過小評価する。
- ② 地表面付近の風況を正確に捉えるには10m解像度では不十分であり、地表面付近に汚染物質の放出源がある場合に対しては、メートル解像度の高解像度解析が必要となる。

風況解析では、主流成分と乱流成分があるが、乱流成分はSGSモデル化により近似されるためと考えられ、①は普遍的な課題の一つと考えられる。その一方、②は、工学的課題でもあり、地表面近傍ほど、その風況を正確に予測するには、メートル解像度の格子が必要となることが分かる。これについては、汚染物質の放出源が高さ150mの主排気筒となる六ヶ所再処理工場の場合は、10m解像度でも放出源付近の風況を正しく捉えられることから、対象となる系によって、上記課題②は、適切にとり扱う必要があることが分かる。

5.5 まとめ

本章（5章）では、LHADDASコードを構成する二つのLESコードの試計算を共通の領域対象（六ヶ所再処理工場）について実施し、コードの特性と共に、現状でのLES適用上の限界領域があることを指摘した。この結果より、現状のLESを活用する場合は、汚染物質発生源のおおよそ、5km程度の領域内で活用すべきであり、それ以上の領域で活用する際は、気象の影響が無視できず、更なる整備が必要であることが分かった。また、地表面付近の風況等を正確に捉えるためには、10m解像度は十分とは言えないが、放出源高さや環境に依存するため、適切な解像度を選択する必要があることも分かった。

以上より、より広域にて、CFD活用を想定する際、精度向上を求める際は、適切な気象場モデルと接続する他、観測データのデータ同化技術も必要となり、LHADDASの更なる開発が必要であることが分かった。また、解像度の設定にも注意する必要があることが分かった。

■ 6章 CFDを活用する高分解能大気拡散モデル整備に向けた課題

6.1 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、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を対象に調査を進めた。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外部被ばく線量等を評価可能な線量評価モデルも調査した。その結果、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」を大気拡散及び線量評価の両面で利用可能なモデルとして選定した。選定したモデルを本事業の最終的目的にむけ活用するために、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、6.2節において、CFD活用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を整理し、6.3節にて、本事業を通して得られた課題をまとめる。

6.2 CFD活用における課題と解決策

本節では、CFD活用における課題とその解決策について議論する。まず、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述べた後、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)より、課題と解決策等を記す。

文献調査及びヒアリング調査により、LESを局所大気拡散シミュレーションに用いる優位性は具体的に明確となった。LESは、接地境界層での乱流構造を高精度に再現することが可能であるため、放射性物質の大気拡散のように、非定常現象をシミュレーションし、その乱流拡散を精確に捉える必要がある場合、LESの活用は有効と結論づけられる。特に、原子力施設での事故時、家屋や公共建屋等の構造物周囲での乱流拡散を考慮し、線量率分布を詳細に検討する際は、LESを用いた高精度な大気拡散シミュレーションとそれに基づく高分解能な被ばく評価はRANSやプルームモデルに比べて精度の高い結果を提供可能にすると考えられる。事実、文献調査(2章参照)とインタビュー調査(3章参照)によると、LESの乱流の非定常構造の再現力は他に比べて優れており、特に、近隣の建屋周囲での拡散や、複数の家屋や構造物が複雑に立地するような場合の他、地形や土地利用形態が局所的に変化するような場合、大気拡散による放射性物質濃度分布の経時変化挙動を高精度に予測することが可能となり、RANSやプルームモデルとは異なる結果が得られることは明白であり、LESを活用する大気拡散モデルの整備が求められる。しかし、LES利用する際、様々な課題も存在していることを下に記す。LESを利用すれば、一般に乱流の非定常構造を高精度に再現可能となり、それに伴う拡散現象の精度も向上するが、精度における優位性と引き換えに下記の4点が課題になることが分かった。

- (1) 初期及び境界条件の適切な設定(メソスケール気象モデルの適切なダウンスケーリング)
- (2) 高精度なソースターム情報の入力
- (3) 高い計算コスト(計算機性能の向上と高速化需要)の低減
- (4) 局地気象現象を再現する物理モデルの実装

課題（１）は、適切なシミュレーションを実現するための必須事項であり、ダウンスケーリングにより初期及び境界条件の精度が良質でない場合、LESによる高分解能の予測性能の価値が失われてしまう。従って、メソスケール気象モデルの研究進展とその知見を収集し、適切なダウンスケーリング手法を準備する必要がある。もちろん、どのメソスケール気象モデルを採用するか、その採用による課題は何かも明らかにした上で、最も適切なLESへの接続領域を定める必要がある。なお、接続領域の範囲については、本事業の試解析により調査した（５章参照、６章下記参照）一方、今後の事業でも継続して調査する必要があると考えられる。

課題（２）は、LESによる高分解能シミュレーションを用い、その優れた性能を存分に引き出すため、必要不可欠な情報となることが明らかである。しかし、事故時という緊急時において、これらの十分な情報を入手することは、困難な場合が想定される一方、LESの活用を念頭とした最適なモニタリング体制を定め緊急時に動作可能とするための取り組みが求められる。

課題（３）は、上記（１）及び（２）と比べ、比較的単純な課題であり、ハードウェア的には、最新の計算機アーキテクチャーへの対応とそのアーキテクチャーでのソフトウェア的な高速化の取り組みを実施することで解決できると考えられるが、スーパーコンピュータの利用等が前提になることが一つの欠点とも考えられる。

最後に課題（４）については、気象物理モデルの影響についての知見を蓄積する必要があるが、その影響を最小限として、LESを活用する領域があることは明らかであり、５章等で、課題解決の方向性が示唆される（下記も参照）。

次に、４章及び５章にて実施した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」を選定し整備を進めた。

「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から得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。５章に記したように、LOHDIM-LESとCityLBMについては、六ヶ所再処理施設周辺60km四方を対象とした大気拡散シミュレーションと、その計算結果の濃度分布を入力としたSIBYLによる空間線量率の試算を実施した。なお、60km四方の領域の高分解能計算は、CityLBMによって気流場計算と簡単な物質拡散のみ実施し、LOHDIM-LESの計算では、六ヶ所再処理施設周辺3km四方の領域に限定し気流場、大気拡散及び空間線量率の計算を行った。この試算結果を基に実際に利用する際の課題を、下記のように抽出し解決策を検討した。

（１）課題

60km四方の解析領域で「LHADDAS」の高分解能計算を実施する際の課題として、計算時間、計算リソース、気流・濃度分布の再現性及び解析結果の有意性についての問題を抽出し、以下に整理した。

① 計算時間

高速計算が可能なCityLBMを用いた試算では、60km四方の計算領域における1時間の大気拡散シミュレーションを30分程度で実行可能であることが分かった。この計算時間は、いくつかの

気象条件のケーススタディーまでなら有効であるが、今後検討予定の様々な気象条件に対する結果を統計的に解析する際は、現実的ではない。また、当該コードは、モデルも含めて高速計算に適したアルゴリズムを採用する等の最適化を十分に進めており、現状の計算技術の範囲では、これ以上の計算コードの抜本的な高速化は期待できないため、以下の課題も含めて、実現可能で有効な解析方法の検討が必要であることが分かる。

② 計算リソース

60km 四方の解析領域の出力データ（City-LBM を用いて試解析を実施）は、1 時刻の 1 核種の濃度分布データだけでも膨大なデータ容量となる。また、被ばく線量評価を行う際には、多数の核種について、各濃度分布の時間変化データを出力し解析する必要があるが、その際、膨大なデータ（時刻歴も含め）の保存とそれを用いて解析を行う際の計算リソースが膨大となり、その確保が課題となる（スーパーコンピュータの活用が前提となる場合が想定される）。

③ 気流・濃度分布の再現性

通常の CFD 計算においては、数 km スケールの気象場の変動を一様一定と仮定して境界条件を設定し、数 km 四方の解析領域内の地形や建物の影響で形成される気流場と乱流場を対象に解析を行っている。そのため、「LHADDAS」の通常の利用においては、LOHDIM-LES の試計算のように数 km 以内の解析領域を対象としている。その領域程度での計算の妥当性を確認するため、CityLBM により放出点を中心とした 5km 四方、10km 四方、30km 四方、及び 60km 四方の計算領域の気流場の計算を実施した。境界条件により気象変動の時間空間分布を導入しているが、放出点近傍の解析領域中心部まで、その変動を的確に取り入れ、妥当な気流場を再現できたのは 5km 四方の領域だけで、領域の拡大とともにその再現性は低下した。そのため、60km 四方の領域で拡散計算を実施した場合、放出点近傍のプルーム挙動を再現できないとともに、広域スケールの濃度分布における気象場の変動に伴う空間分布の変動が再現できないことが考えられる。なお、現状にて、広域の CFD 計算領域の内部で気象場の変動を考慮する技術は確立されていないことを記す。

④ 結果の有意性

大気拡散計算では、拡散距離に従い気象場の変動に伴うプルーム分布の時空間的な変動と不確かさが拡大するとともに、拡散幅が大きくなり局所空間内の濃度は均一化する。局所空間内の濃度が均一化すると、その空間の気流場と乱流場が複雑な変動を持っていたとしても、濃度分布への影響は小さくなる。従って、拡散分布に対する建物や地形等による局所的に複雑な気流場と乱流場の影響は、放出点近傍では気象場の変動による影響に対して卓越するが、遠方では気象場の変動による不確かさの中に埋もれて無視できるレベルとなる。従って、CFD による詳細な分布計算による拡散分布の差異は、放出源近傍では重要となるが、遠方では気象変動による拡散分布の不確かさに対して有意な違いとならないと考えられる。この考えに基づき、文献調査した研究や拡散モデルでは、放出点近傍を高分解能で計算する一方、拡散距離とともに解析格子を粗くして効率的に計算するようにしている。ただし、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は、上記の広域 CFD 計算における気象場変動の導入の限界もあり、実際に計算を行い、定量的に示した事例はないことを記す。

以上のように、60km 四方の解析領域での CFD による高分解能計算には、計算時間、計算リソース、及び気流・濃度分布の再現性に問題があり、現状では技術的な改善が見込めないという課題がある。さらに、膨大な計算コストをかけて、60km 四方の解析領域を高分解能で解析しても、有意な結果が得られない可能性が高いことを指摘する。最終目的とする被ばく線量評価に対して、有意な解析を効率的に実現可能な解析手法の検討が今後も継続して研究する必要がある。

(2) 解決策

上記課題に対する解決策を検討する上で、原子力機構で開発している LOHDIM-LES と WSPEEDI のシームレス結合計算が参考となる。放出点近傍の数 km 程度までを CFD により高分解能の気流・乱流場を計算し、それ以遠は解像度を下げた気象モデルに接続して連続的に拡散計算を実施する解析手法は、各々の領域で有意性のある計算結果を出力できるとともに計算時間と出力データ容量を削減でき合理的である。また、LHODIM-LES の拡張機能は、局所域における高分解能詳細解析の精度を維持しつつ計算時間の大幅な短縮が可能であり有効である。課題④の結果の有意性に対する考え方に従えば、この CFD と気象モデルの結合計算を用いることで課題①から④までを解決できると考えられる。従って、課題④の結果の有意性については、実際に課題③の気流・濃度分布の再現性を考慮した計算により定量的に確認することを考える。60km 四方の解析領域において気象変動の時間空間分布を考慮するには、解析領域をタイル状に分割してそれぞれのタイル領域を CFD モデルで計算する手法が考えられる。また、プルームが明確な存在範囲は限定されるため、タイル分割計算をプルームの存在範囲だけに適用すれば計算リソースも削減できる。このタイル領域を適用する範囲を変えた計算結果と比較すれば、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を確認できると考えられる。この解析結果に基づき CFD による高分解能計算と気象モデルの結合計算における CFD 計算領域の範囲を検討するとともに、将来的には、CFD による広域計算を実現するため、CFD 計算に気象場変動を的確に導入する手法の開発も進める必要がある。

6.3 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、CFD を活用する高分解能大気拡散モデルについて、国内（日本語）及び国外（英語）の文献を調査し、現状・課題について整理した。CFD の大気拡散シミュレーションへの活用は、CFD 及び計算機性能の向上と共に拡大する方向にあり、さらに今後の知見の集積が求められる。また、ヒアリング調査（3 章参照）により、実際の研究者からも、CFD の活用手法と課題を確認し、今後の方針決定に有用な情報を得ることができた。これらの情報に基づき、本事業における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」を選定し、整備を進めた。「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、計算時間、計算リソース、気流・濃度分布の再現性、及び解析結果の有意性についての課題を抽出し、これらの課題を解決するための方針を検討した。その結果として、CFD（LES）を活用する領域についての知見が得られた他、課題解決策が議論された。CFD を活用するためには、その性能及び特性を理解し、適切に利用することが必要だが、その優れた精度を活かすことができれば、シミュレーションによる予測解析精度は格段に向上し、本事業の目的となっている従来の様々な課題を打破できるものと考えられる。