

令和3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
(被ばく解析手法の整備) 事業

国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構

令和4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。

まえがき

東京電力（株）福島第一原子力発電所事故の教訓を反映し、平成24年に制定された原子力災害対策指針では、従来の「重点的に充実すべき地域の範囲（EPZ）」に代わり、新たに、「予防的防護措置を準備する区域（PAZ）」と「緊急時防護対策を準備する区域（UPZ）」の概念が導入された。これに伴い、対策を考慮すべき範囲の“めやす半径”が、EPZの約10kmからUPZの約30kmへと拡大した。このため、地域防災計画を策定すべき自治体が大幅に増加し、重大事故時における防災対策の在り方の重要性が増している。原子力規制庁は重大事故時の環境影響を評価するため、レベル3PRA解析に必要なコードの改良整備を進めているところである。レベル3PRAコードの防護措置モデルは、一般的に簡易的な評価手法が用いられていることから、防災への適用に向けて、より現実的な被ばく低減効果を評価できる防護措置モデルを整備する必要がある。

このような背景を基に、日本原子力研究開発機構安全研究センターは、原子力規制庁長官官房技術基盤グループより原子力規制庁の原子力施設等防災対策等委託費による委託業務として、令和3年度「被ばく解析手法の整備」を受託した。本事業では、重大事故時の環境影響を評価するため、確率論的環境影響評価コードOSCAAR（以下、OSCAAR コード）を整備する。大気拡散・沈着解析モデル、被ばく評価モデル及び防護措置解析モデルについて、モデルの改良を検討する。また、OSCAAR コードで用いる評価モデルを検討するため、確率論的環境影響評価の実施に必要な項目を整理する。

目次

まえがき	i
目次	ii
表リスト	iv
図リスト	vi
事業の概要	viii
1. はじめに	1
1.1. 目的	1
1.2. 範囲	1
2. OSCAARコードの概要	2
第2章の参考文献	3
3. 時系列情報の出力に関する改良	4
3.1. クラウドシャインおよび吸入被ばく線量の出力改良	4
3.2. 早期グランドシャイン線量の定義変更および出力改良	5
3.3. 空間線量率の出力改良	6
3.4. 長期被ばく線量の定義変更および出力改良	6
3.5. 改良版OSCAARを用いた試計算	6
3.6. ソースコードの改修内容	8
第3章の参考文献	27
4. 被ばく評価モデルの検討	28
4.1. CFDを用いた粒子挙動解析	28
4.1.1. モデル概要	28
4.1.2. 計算条件	33
4.1.3. 計算結果	35
4.2. 再浮遊粒子の空間分布に基づく被ばく線量の計算	55
4.2.1. 概要	55
4.2.2. 計算条件	55
4.2.3. 計算結果	56
第4章の参考文献	65
5. データの整備	66
5.1. 確率的影響に関するパラメータの調査	66
5.1.1. 原爆被爆者の追跡調査の文献レビュー	66
5.1.2. まとめ及び来年度以降の課題点	88
5.2. 防護措置効果の分析に必要なパラメータ等	90

5.2.1. 避難モデルの出力の改良	90
5.2.2. 避難に関するパラメータの整備	93
5.2.3. 作成した避難経路データを用いたOSCAARによる計算	106
第5章の参考文献	113
6. OSCAAR コードの整備に関する情報収集	115
6.1. International MACCS User Group 会合	115
6.2. 原子力学会2021年秋の大会	118

表リスト

表 4.1	気象庁アメダス日立観測所における風速測定結果.....	38
表 4.2	計算条件	38
表 4.3	モデル設定	39
表 4.4	高さ別設定	39
表 4.5	組織加重係数 (ICRP Pub.103)	58
表 4.6	骨組織の構成	58
表 4.7	解析レイヤー設定	59
表 4.8	実効線量 (標準条件)	59
表 4.9	被ばく線量解析結果 (風向及び地表面条件変更ケース)	60
表 4.10	被ばく線量解析結果 (風向変更ケース)	60
表 4.11	被ばく線量解析結果 (風速流入幅変更ケース)	60
表 5.1	LSS被験者のがん及び死因の分類とICDコードとの対応関係 (Ozasa et al.,2012).....	67
表 5.2	LSSにおける白血病の分類	68
表 5.3	DS02線量評価方式に基づいた対象者の結腸線量推定値の分布 (Ozasa et al, 2012)	69
表 5.4	固形がんに対するリスク推定値の比較 (Preston et al.,2004)	69
表 5.5	固形がんの分類とLSSの事例数 (Ozasa et al., 2012)	71
表 5.6	固形がんに対する過剰相対リスク (ERR)算出のためのパラメータ (Ozasa et al., 2012)	73
表 5.7	固形がんに対する過剰絶対リスク (EAR)算出のためのパラメータ (Ozasa et al., 2012)	74
表 5.8	固形がんに対する過剰リスク算出のためのパラメータ (Preston et al., 2007)	75
表 5.9	乳がんを除く固形がんに対する過剰相対リスク算出のためのパラメータ (Preston et al., 2007).....	76
表 5.10	乳がんを除く固形がんに対するEAR算出のためのパラメータ (Preston et al., 2007)	77
表 5.11	白血病に対するERRのパラメータ (Richardson et al., 2009).....	81
表 5.12	白血病モデルのパラメータ (1/2) (Hsu et al., 2013)	82
表 5.13	乳がんの過剰相対リスク算出パラメータ (Preston et al., 2007)	85
表 5.14	乳がんの過剰絶対リスク算出パラメータ (Preston et al., 2007)	85
表 5.15	皮膚がんに関するリスク (Preston et al., 2007).....	86

表 5.16	甲状腺がんに関する過剰リスク算出パラメータ (Preston et al., 2007)	87
表 5.17	2010年東海サイトの距離別人口 (32方位合計)	91
表 5.18	メッシュ内の移動距離 (直線距離)	91
表 5.19	累計移動距離および移動時間 (直線距離、移動速度5km/h)	92
表 5.20	避難経路解析プログラムの入出力ファイル	94
表 5.21	避難経路解析プログラムの入力パラメータ	94
表 5.22	OSCAARのメッシュに割り当てられた避難経路(1/2).....	100
表 5.23	OSCAARのメッシュに割り当てられた避難経路(2/2).....	101
表 5.24	経路1の経路解析結果	102
表 5.25	共通のOSCAAR計算条件	107
表 5.26	環境への放出割合	107
表 5.27	被ばく低減係数	107

図リスト

図 2.1	OSCAARコードの構成	2
図 3.1	早期被ばく線量出力テーブルの一例（低減効果無し、クラウドシャイン、1時間目）	23
図 3.2	経路別早期被ばく線量の時間推移（放出点から4.5km）	24
図 3.3	改良前後のグランドシャイン線量の比較（放出点から4.5km）	24
図 3.4	長期被ばく線量出力テーブルの一例（低減効果無し、再浮遊吸入被ばく、1年目）	25
図 3.5	経路別長期被ばく線量の時間推移（放出点から4.5km）	26
図 4.1	SIMPLE法計算フロー	40
図 4.2	計算領域	40
図 4.3	計算メッシュ	41
図 4.4	伸長率別メッシュ例	41
図 4.5	粒子配置	42
図 4.6	計算領域（床面に凹凸追加）	43
図 4.7	計算領域（風向変更、地表面条件変更）	43
図 4.8	計算領域（入口幅変更）	44
図 4.9	XY平面における粒子の移動の様子	45
図 4.10	三次元での粒子の移動の様子	46
図 4.11	最大粒子高さ	47
図 4.12	床面から1cm以上20cm以下に存在する粒子の割合	47
図 4.13	床面から20cm以上40cm以下に存在する粒子の割合	48
図 4.14	風速1 m/sにおける粒子の移動距離	48
図 4.15	ベクトル図（風向変更、床面に凹凸考慮）	49
図 4.16	最大粒子高さ（風向変更・凹凸なし）	49
図 4.17	最大粒子高さ（風向変更・凹凸あり）	50
図 4.18	各レイヤーの粒子割合（風向変更・凹凸なし）	50
図 4.19	床面から20cm以上に存在する粒子の割合（風向変更・凹凸なし）	51
図 4.20	各レイヤーの粒子割合（風向変更・凹凸あり）	51
図 4.21	床面から20cm以上に存在する粒子の割合（風向変更・凹凸あり）	51
図 4.22	風の流入口幅による流れ場の違い（風向変更・凹凸なし）	52
図 4.23	ベクトル図（入口幅変更）	52
図 4.24	最大粒子高さ（入口幅変更）	53
図 4.25	領域内の粒子数（入口幅変更）	53

図 4.26	各レイヤーの粒子割合（入口幅変更）	54
図 4.27	各レイヤーの粒子数（入口幅変更）	54
図 4.28	床面から20cm以上に存在する粒子数（入口幅変更）	54
図 4.29	解析イメージ	61
図 4.30	計算領域	61
図 4.31	ICRP/ICRU標準コンピュータファントムの成人の男性（左）と女性（右） （ICRP Pub.116(2015)）	62
図 4.32	計算体系	62
図 4.33	実効線量を求めるための性の平均化（ICRP. Pub103）	63
図 4.34	高さ別粒子割合及び線量寄与割合（風向変更及び地表面条件変更ケース）	63
図 4.35	高さ別粒子割合及び線量寄与割合（風向変更ケース）	64
図 4.36	高さ別粒子割合及び線量寄与割合（風速流入幅変更ケース）	64
図 5.1	距離番号12に到達していない人数および避難が完了していない人数	92
図 5.2	避難経路解析プログラムによる処理の流れ	94
図 5.3	移動経路の計算手順.....	95
図 5.4	メッシュに割り当てた地区名（全体図）	97
図 5.5	メッシュに割り当てた地区名（拡大図）	98
図 5.6	経路1とOSCAARのメッシュ番号（拡大図）	103
図 5.7	経路1とOSCAARのメッシュ番号（全体図）	104
図 5.8	避難経路解析プログラム入力ファイル	105
図 5.9	整備した避難データの例（距離番号12）	105
図 5.10	避難が完了していない人数（直線避難と経路避難）	109
図 5.11	被ばく線量95%値（最大値方位）	109
図 5.12	シーケンス167（避難なしケースの95%値シーケンス）の線量分布	110
図 5.13	シーケンス180（直線避難ケースの95%値シーケンス）の線量分布	110
図 5.14	シーケンス035（経路避難ケースの95%値シーケンス）の線量分布	111
図 5.15	各メッシュが使用する経路番号と1.5kmメッシュの主な避難経路の図	111

事業の概要

本事業は、重大事故の影響を評価するため、確率論的環境影響評価コード OSCAAR（以下「OSCAAR コード」という。）の整備を目的として、大気拡散・沈着解析モデル、被ばく評価モデル及び防護措置解析モデルについて、モデルの改良及びパラメータの整備を実施する。

まず、OSCAARコードの改修として早期被ばく（クラウドシャイン、吸入被ばく、早期グランドシャイン）および長期被ばく（再浮遊吸入被ばく、経口被ばく、長期グランドシャイン）について、OSCAAR既定の評価期間の拡張を実施した。これによって、早期被ばくでは、放出開始から168時間まで1時間当たりの被ばく線量を、長期被ばくでは、50年まで1年間当たりの被ばく線量を評価・出力可能となるようにした。

被ばく評価モデルについては、沈着粒子の再浮遊に関する被ばく評価モデルの精緻化を実施した。現状のOSCAAR コードでは、再浮遊核種からの外部被ばくについて線量換算係数を整備するため、数値流体力学（Computational fluid dynamics：以下、「CFD」という。）解析を用いて地上の空気の流れをシミュレーションし、再浮遊係数を明らかにするとともに、放射性核種を含む再浮遊粒子の空間分布から、放射線挙動を模擬したモンテカルロ計算コードPHITS（Particle and Heavy Ion Transport code System）(Sato et al., 2018)及びICRPの標準ボクセルファントム(ICRP., 2010)を用いて、再浮遊核種由来のクラウドシャインによる実効線量を算出した。

このほか、健康影響モデルを改良するため、原爆被ばく者に関するLife Span Study（LSS）の最新状況を調査するとともに、昨年度までに整備した避難モデルを実際に利用するため、東海第二サイト周辺を対象としてデータベースの試作及び試計算を実施した。

1. はじめに

1.1. 目的

重大事故の影響を評価するため、確率論的環境影響評価コードOSCAAR（以下「OSCAAR コード」という。）を整備する。大気拡散・沈着解析モデル、被ばく評価モデル及び防護措置解析モデルについて、モデルの改良及びパラメータの整備を実施する。

1.2. 範囲

1.1に記載した目的のもと、本報告書では、第2章においてOSCAARコードの概要を述べ、その後、第3章、第4章及び第5章において、時系列情報の出力に関する改良、被ばく評価モデルの検討結果、解析用データベースの整備結果についてそれぞれ記載する。また、第6章にはOSCAARコードの整備に関する情報収集の結果を記載した。

第3章では、OSCAAR コードでは、被ばく線量等を計算期間の積算値として出力している。計算期間における結果の時系列変化を確認するため、OSCAAR コードを改良した。

第4章では、現状のOSCAAR コードでは再浮遊物質からの外部被ばくについてサブマージョンを仮定した線量換算係数を利用している。そこで、CFD を用いた解析により再浮遊物質の空間分布に関する検討を実施し、同経路からの被ばくをより現実的に評価するための線量換算係数の整備に必要となる作業を整理した。

第5章では、最新知見に基づく解析を実施するため、解析用データの整備を実施した。原子力災害の中長期対策も含めた防護措置の効果等に係る分析を実施するため、確率的影響に関するパラメータについて、原爆被ばく者に関する寿命調査等の調査を行い、入力パラメータへの反映に必要な作業を整理した。また、防護措置に関する社会的リスク検討のため、避難実施時の放射線被ばく線量をより精緻に評価できるようにするため、OSCAAR コードを用いた解析で用いるデータの整備に必要となる作業を整理した。

第6章は、国内外における確率論的環境影響評価に関して、ウェブで開催された原子力学会及びInternational MACCS User Group 会合に参加して情報収集を行った。

2. OSCAARコードの概要

旧日本原子力研究所（以下、原研）は確率論的リスク評価（PRA）に関する研究の一環として、原子炉事故時の公衆の放射線影響を確率論的に評価する環境影響評価（レベル3PRA）手法の確立を目指し、1990年に確率論的環境影響評価コードOSCAAR（Off-Site Consequence Analysis code for Atmospheric Release in Reactor Accident）コードを開発した（本間, 2000a）。そして、確率論的環境影響評価コードの国際比較計算への参加（OECD, 1994; CEC, 1994）、チェルノブイル事故等で得られた環境中の実測データを基にした、被ばく評価上重要なI-131やCs-137の食物連鎖を含む生態圏における移行モデルに関する検証（Homma et. al, 2000a; Homma and Matsunaga, 2000b）、特定シナリオに対してモンテカルロ法に基づく入力パラメータの不確かさ伝播解析・感度解析手法を導入したレベル3PRAに係わる不確かさ評価（Homma, 1998）等を通じて、OSCAARコードの適用性能の確認や機能の検証作業を行い、2020年に公開されたところである¹（放射線安全・防災研究グループ, 2020）。

OSCAARコードの構成を図2.1に示す。OSCAARコードは事故時に放出された放射性物質の環境中移行（ADD）、それに伴う公衆への被ばく（EARLY及びCHRONIC）、防護対策による被ばく低減効果（PM）、被ばく集団の健康影響（HE）及び経済影響（ECONO）を推定するための一連の計算モジュールとデータファイルで構成される。また、計算に用いる気象条件、線量換算係数、人口分布及び農畜産物生産分布、被ばく集団の生涯リスク等、OSCAARコードに必要な入力データについては、計算モジュールとは独立した支援コードを用いて事前に用意する必要がある。

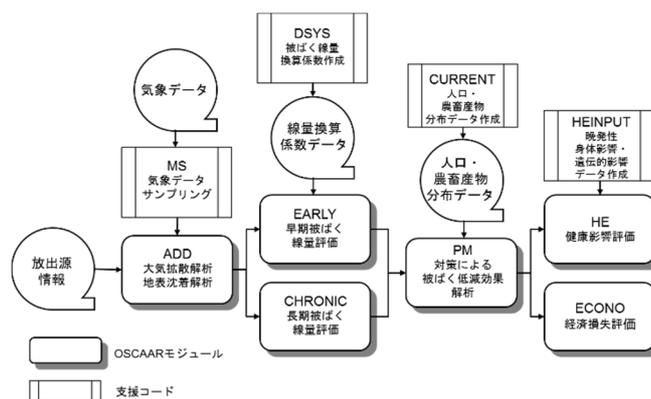


図 2.1 OSCAARコードの構成

¹ 一般財団法人高度情報科学技術研究機構を通じて入手可能。ただし、レベル3PRAに関する技術的能力が認められ、研究利用に限っての提供となる。

第2章の参考文献

- 本間俊充, 石川淳, 富田賢一, 村松健 (2000a). 軽水炉モデルプラントの広範な事故シナリオに対する環境影響評価, 日本原子力研究所報告書 JAERI-Research 2000-060.
- CEC (1994). Probabilistic accident consequence assessment codes, Second international comparison, Technical report, A joint report by the European Commission and the OECD Nuclear Energy Agency.
- Homma, T. (1998). Accident Consequence Assessments and their uncertainty, *Comparative Evaluation of Environmental Toxicants -HEALTH Effects of Environmental Toxicants Derived from Advanced Technologies-*, Edited by J. Inaba and Y. Nakamura, Kodansha Scientific LTD., Tokyo.
- Homma, T., Y. Inoue and K. Tomita (2000a). OSCAAR Calculations for the Hanford Dose Reconstruction Scenario of BIOMASS Theme 2, JAERI-Research 2000-049.
- Homma, T. and T. Matsunaga (2000b). OSCAAR Calculations for the Iput Dose Reconstruction Scenario of BIOMASS Theme 2, JAERI-Research 2000-059.
- OECD (1994). Probabilistic Accident Consequence Assessment Codes, Second International Comparison, Overview Report, A joint report by the OECD Nuclear Energy Agency and the Commission of the European Communities. Nuclear Energy Agency OECD, Paris, France.

3. 時系列情報の出力に関する改良

本章では、早期被ばく（クラウドシャイン、吸入被ばく、早期グランドシャイン）および長期被ばく（再浮遊吸入被ばく、経口被ばく、長期グランドシャイン）について、OSCAAR既定の評価期間の拡張を実施する。

OSCAARでは、EARLYモジュール及びCHRONICモジュールにおいて、それぞれ短期の線量（1日間、7日間、1年間等）及び長期の線量（10年間隔、50年間等）を出力している。しかし、これらの評価期間では、刻々と変化する線量率の変化をとらえることができず、また、OILによる意思決定にも用いることができないという課題があった。

そこで、早期被ばくでは、放出開始から168時間まで1時間当たりの被ばく線量を、長期被ばくでは、50年まで1年間当たりの被ばく線量を評価・出力可能となるように改良を施すことにした。

本章では以下の項目について、それぞれ記載することとする。

- (1) クラウドシャインおよび吸入被ばく線量の出力改良
- (2) 早期グランドシャイン線量の定義変更および出力改良
- (3) 空間線量率の出力改良
- (4) 長期被ばく線量の出力改良
- (5) 改良 OSCAAR を用いた試算

3.1. クラウドシャインおよび吸入被ばく線量の出力改良

大気拡散・沈着解析モジュールADDでは、原子力発電所での事故等により大気中に放出された放射性物質の移流・拡散および地表面への沈着等を解析し、放射性物質濃度（大気中濃度や地表面濃度等）の時間的・空間的な分布を求める。ADDで求めたこれらの時系列データは、線量評価モジュールであるEARLYやPMに引き渡され、早期段階における外部被ばくと内部被ばくの線量評価に用いられる。

防護対策モジュールPMにて、環境への放出以前あるいは直後に導入される屋内退避、コンクリート屋内退避、避難、安定ヨウ素剤の服用といった種々の早期防護対策は、OSCAAR入力ファイルで設定される防護対策進展の時間軸に沿って考慮される。よって、防護対策の低減効果を加味した線量は、防護対策の進展状況と合わせて評価する必要がある。その為、ADDからPMへ引き渡される時系列データは、OSCAARの防護対策進展設定の時間単位と同じ、1時間毎のデータとなっている。現行のOSCAARコードでは、防護対策進展と時系列データに基づいて、1時間毎に「防護対策実施時の線量」を計算し、OSCAAR既定の評価期間に応じて積算・出力している。

本改良では、PMに引き渡される時系列データを拡張し、防護対策実施時の線量

と不実施時の線量について、放出開始から168時間まで1時間当たりの被ばく線量を、被ばく経路別・距離区分別・32方位区分別にて出力される

3.2. 早期グランドシャイン線量の定義変更および出力改良

上述したクラウドシャインおよび吸入被ばくと同様に、グランドシャインについても1時間毎に「防護対策実施時の線量」が計算され、OSCAAR既定の評価期間に応じて積算・出力される。一方、現行のOSCAARにおけるグランドシャインの計算では、全ての放射性雲についての移流計算が終了した時点²（移流期間終了時点）を線量評価の開始時刻として定義している為、移流期間中の被ばくは定義に含まれていない。評価期間P（時刻 t_p まで1時間）、臓器L、核種iの早期グランドシャインによる外部被ばく線量 $Dg_{i,L}^P$ は、現行のOSCAARでは以下の式で計算される。

$$Dg_{i,L}^P = SF \cdot DF_{i,L} \cdot SD_i \int_{t_p-3600}^{t_p} e^{-\lambda_i t} dt$$

SF	グランドシャインに対する遮へい係数 (-)
$DF_{i,L}$	臓器Lに対する核種iのグランドシャイン線量換算係数 (Sv s ⁻¹ Bq ⁻¹ m ²)
SD_i	核種iについて、移流期間終了時点の地表沈着量 (Bq m ⁻²)
λ_i	核種iの減衰定数 (s ⁻¹)

地表面沈着量 SD_i は、ADDで計算した地表面沈着量の時系列データより、崩壊による減衰を考慮した移流期間分の積算値で与えられる。

本改良では、地表面沈着量として、ADDで計算される地表面沈着量の時系列データ（評価期間の開始時刻 t_p における値）をそのまま用いることで、クラウドシャインおよび吸入被ばくと同様に移流期間中の線量評価を可能にし、防護対策実施時の線量と不実施時の線量について、放出開始から168時間まで1時間当たりの被ばく線量を計算・出力可能とした。

評価期間P（時刻 t_p から1時間）、臓器L、核種iの早期グランドシャインによる外部被ばく線量 $Dg_{i,L}^P$ は、改良後のOSCAARでは以下の式で計算される。

$$Dg_{i,L}^P = SF \cdot DF_{i,L} \cdot sd_i(t_p) \int_0^{3600} e^{-\lambda_i t} dt$$

² 放出されたすべての放射性雲がOSCAARで定義された広域風速場の外に移動した時間のこと。広域風速場については本間ら(2000)を参照。

$sd_i(t_p)$ 時刻 t_p における核種 i の地表沈着量 ($Bq\ m^{-2}$)

3.3. 空間線量率の出力改良

現行のOSCAARコードでは、移流期間終了時点の地表面沈着量に起因する空間線量率が評価・出力される。本改良では、上述した早期被ばく線量同様に、ADDで計算される地表面沈着量の時系列データを用いて移流期間中の線量評価を行い、放出開始から168時間まで1時間当たりの空間線量率を計算・出力可能とした。

3.4. 長期被ばく線量の定義変更および出力改良

OSCAAR内部で長期被ばく線量は、CHRONICとPMで計算される。移転や食物摂取制限といった長期防護対策は、PMにて1年単位で考慮される為、PMでは1年毎に被ばく線量を計算し、出力する評価期間に応じて積算している。1年毎の被ばく線量評価に用いる1年単位の時系列情報として、長期グランドシャインについては地表面に沈着した核種からの暴露量が、再浮遊吸入被ばくについては吸入摂取量が、経口被ばくについては濃縮係数が、それぞれCHRONICからPMに引き渡される。

本改良では、防護対策不実施時の1年間線量はこれら時系列情報から新規に計算し、防護対策実施時の1年間線量はPMの出力用に積算される前の値を用いて、50年まで1年当たりの被ばく線量を出力可能とした。

また、現行のOSCAARにて内部被ばく線量は、既定の評価期間（10年間）の間に被ばくする線量が評価されている。評価中の評価期間における被ばく線量は、その評価期間以前に摂取した量からその評価期間中に被ばくする線量と、その評価期間中に摂取した量からその評価期間中に被ばくする線量の和で定義される。本改良で評価する1年間の線量評価の定義は現行OSCAARとは異なり、評価中の評価期間における被ばく線量は、その評価期間中に摂取した量に基づく生涯預託線量（OSCAARに実装されている内部被ばくの線量係数は公衆のものであるため預託期間は50年）とした。

3.5. 改良版OSCAARを用いた試計算

JAERI-Research 2000-060（本間他, 2000）に示される事故シナリオの炉内インベントリ及びソースターム情報を用いて、東海サイトにおける線量評価を行った。

1) 計算条件

ソースターム

- 事故シナリオ：TC-DWF（原子炉スクラム失敗シーケンス）

- 放出開始までの時間：3 時間
- 放出継続時間：23 時間
- 放出高さ：40 m

気象シーケンス

- 気象シーケンス：1 シーケンス（ランダムサンプリング）

評価線量（低減効果無し）

○1時間毎の線量として

- 放射性雲からの直接線による外部被ばく（クラウドシャイン）
- 空気中の核種の呼吸摂取による内部被ばく（吸入被ばく）
- 地表沈着核種からの直接線による外部被ばく（早期グランドシャイン）

○1年毎の線量として

- 地表沈着核種からの直接線による外部被ばく（長期グランドシャイン）
- 地表から再浮遊した核種の吸入による内部被ばく（再浮遊吸入被ばく）、
- 根からの吸収により汚染された食物の摂取による内部被ばく（経口被ばく）

2) 早期被ばく出力例

本改良で追加された出力テーブルの一例（低減効果なし、クラウドシャイン、1時間目）を図 3.1に示す。実際の出力ファイルには、168時間分のテーブルが出力される。

3) 早期被ばく計算例

改良したOSCAARによる試解析結果を図 3.2に示す。なお、右の積算線量はOSCAARの出力には無い為、1時間当たりの線量を1時間ずつ積算した値を用いている。なお、図 3.2に示す結果は、各評価点における32方位区分の結果の算術平均値であり、「方位平均」という用語を用いている。

改良前と改良後のグランドシャイン線量を図 3.3 改良前後のグランドシャイン線量の比較（放出点から4.5km）図 3.3に示す。定義式から明らかなように、1時間当たりの線量について、改良前線量と移流期間以降の改良後線量は一致する。また、計算した気象シーケンスにおける移流期間の長さに依存するが、改良前線量では線量寄与の大きい初期段階の線量が考慮されない為、移流期間が長いほど積算線量が過小評価される恐れがある。

4) 長期被ばく出力例

本改良で追加された出力テーブルの一部（低減効果なし、再浮遊吸入被ばく、1年目）を図 3.4に示す。実際の実出力ファイルには、50年分のテーブルが出力される。

5) 長期被ばく解析例

改良したOSCAARによる試解析結果を

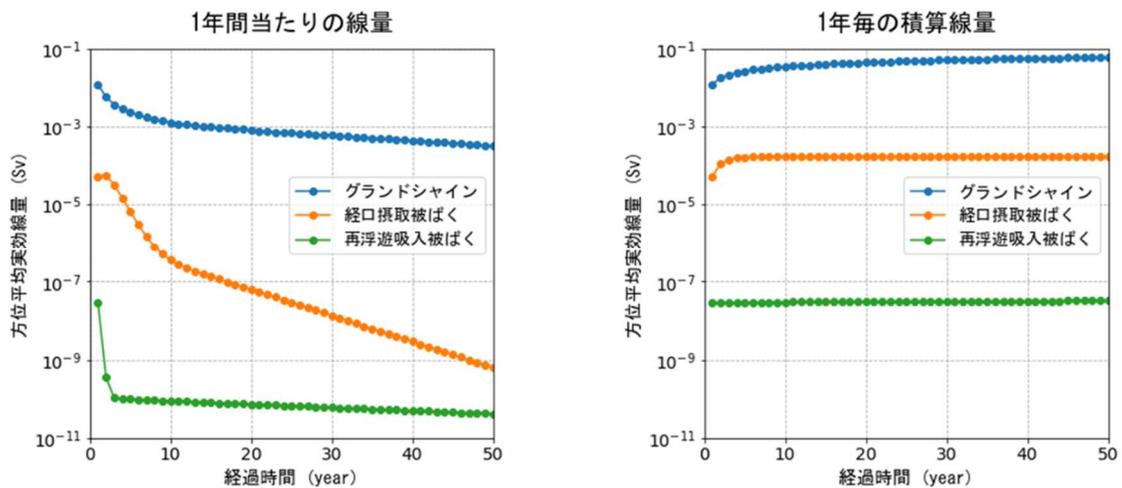


図 3.5に示す。なお、右の積算線量はOSCAARの出力には無い為、1年当たりの線量を1年ずつ積算した値を用いて計算している。

3.6. ソースコードの改修内容

OSCAARソースコードの改修内容について述べる。改修のベースは oscpsa2018バージョンである。本改修で手を加えた部分が明確になるよう、ソースコード内における改修部分は下記のように囲むこととした。2020年4月時点以降のバグ修正等は反映されていない為、異なるベースのOSCAARコードに移植する際は、囲まれた部分（14個ファイル、62箇所）のみ移植すれば対応可能である。

```

! R3_start
  ~ ~ ~ ~
  ~ ~ ~ ~
  改修内容
  ~ ~ ~ ~
  ~ ~ ~ ~
! R3_end 時刻情報
    
```

本節では、今回の改良に関して、線量評価のコード内での流れ、改良に伴う課題と対応をそれぞれ記載する。

(1) 線量評価のOSCAAR内での流れ

1) パフの移流拡散解析

サブルーチンlspuffにて、インプットファイルで設定したパフの移流拡散解析を実施。「HOURLY LOOP FOR SIMULATION」から始まる時間のdoループで、1時間毎のパフのパラメータ（中心座標、分布の広がり、放射能値等）が計算される。このdoループ内で計算されたパフのパラメータを、ループ内のサブルーチンcalextdoseに引き渡す。

2) 各時刻、各評価点における値（放射能値および線量）の計算

lspuffから渡されたパフのパラメータから、calextdoseで各評価点における大気中濃度xcon、沈着量xdep、ガンマ線からの外部被ばく線量cloudを計算する。

3) 放射能値および線量の整理（積算と引継）

lspuffに戻り、doループの最後で、1時間値（大気中濃度xcon、沈着量xdep、ガンマ線からの外部被ばく線量cloud）から、積算値³（xtcon、xtdep、xtcld）を計算する。大気中濃度の積算値xtconはEARLYモジュールに引き継がれ、吸入被ばく評価に用いられる。積算沈着量xtdepはEARLY、CHRONIC、PMに引き継がれ、グランドシャイン、再浮遊吸入被ばく、経口被ばく評価に用いられる。クラウドシャイン線量の積算値xtcldは、EARLYに引き継がれ、クラウドシャイン評価に用いられる。1時間値のxconとcloudは、早期PMでの防護線量評価に使用するので、サブルーチンout_hourdtでPM接続ファイル（機番350）に出力される。沈着量の1時間値xdepはここでお役御免。

4) 複数放出シナリオへの対応

サブルーチンpost_lspuff、post_lspuff1hにて、複数放出点がある場合に備えた処理（放出点毎の値の合算）が行われる。

5) EARLYでの早期被ばく線量評価

³ xtcon と xtcld は 1 時間値の単なる積算値。xtdep は移流期間終了時点の積算沈着量。

積算値xtcon、xtdep、xtconを用いて、防護対策を実施しない場合の早期被ばく線量を評価する。

6) CHRONIC での長期被ばく線量評価

積算値xtdepを用いて、防護対策を実施しない場合の長期被ばく線量線量を評価する。

7) PM で早期防護線量を評価

サブルーチンchgaddにて、早期被ばくの防護線量を計算。引き継いだ1時間値(xconとcloud)と積算沈着量xtdepを基に、「TIME LOOP」から始まる時間のdoループで1時間毎の防護線量を計算する。

クラウドシャインと吸入被ばくの1時間当たりの線量dose1hは、doループ内のサブルーチンrd1hdtで計算される。rd1hdt内で、大気中濃度とクラウドシャイン線量の1時間値(xconとcloud)を読み込み、吸入被ばくについて、ヨウ素剤投与による低減効果を加味した防護線量を計算する。この時点のdose1hで値を持つのは防護対策圏内(~ldist)のみで、クラウドシャインについては裸の線量が計算されている。その後dose1hをchgaddに戻し、その他の被ばく低減係数(屋内退避や避難等によるもの)を乗じて積算防護線量pmdosに積算していく。

グランドシャインでは1時間当たりの線量用の変数は存在しない。1時間毎の暴露量×線量係数が積算線量用変数grdosに直接積算される。grdosはdoループ内のサブルーチンcalgrdで計算される。変数モジュールm_deposiの積算沈着量xtdepをcalgrdに引数で渡し、calgrd内のサブルーチンgrdnucで1時間当たりの暴露量tidepを計算する。暴露量tidep×線量係数fctgrdをその時刻の線量として、grdosに積算する。

その後、クラウドシャインと吸入被ばくの積算防護線量pmdosと、グランドシャインの積算防護線量grdosを、出力用サブルーチンwedoseに渡し、出力する。防護対策圏外(ldist~)のクラウドシャインと吸入被ばく線量は、EARLYで計算した早期被ばく線量を基にここで計算される。

8) PM で長期防護線量を評価

サブルーチンchgchrにて、長期被ばくの防護線量を計算。

(2) 改良に伴う課題とその対応

ソースコード改修の主な目的は、報告書内で述べたように、「時系列線量⁴の出

⁴ 本書内では、早期被ばく(クラウドシャイン、吸入被ばく、早期グランドシャイン)については、放出開始から168時間まで1時間当たりの被ばく線量を、長期被ばく(再浮遊吸

力」である。現行OSCAARでは出力こそ無いものの、PMモジュールにて防護線量の1時間線量と1年間線量は計算されている。この点を踏まえて、早期被ばくについて、現行OSCAARにおける課題（●）と本改修での対応（○）を以下に示す。

1) PMに引き継がれる時系列情報⁵の不足

- 現行 OSCAAR では、防護対策圏内の時系列線量にしか興味が無い為、防護対策圏外の時系列情報を ADD から PM に引き継ぐ必要が無い。また、現行グランドシャインでは、PM 内で移流期間終了時点の沈着量を基準に1時間当たりの暴露量を計算するので、引き継ぐべき時系列情報がそもそも存在しない。防護対策圏外の時系列情報は裸の線量計算に必要であり、グランドシャインの時系列情報は、改修グランドシャインの線量計算に必要である。
- ADD⇒PM 間で時系列情報が引き継がれる際の、防護対策圏内の範囲指定を外す。また、改修グランドシャイン用の時系列情報として、ADD で計算される1時間毎の沈着量を ADD⇒PM 間で引き継ぐ。

2) 裸の線量⁶の計算処理が無い

- 報告書内で述べたように、現行 OSCAAR の PM で計算されるのは、防護対策が実施された場合の時系列線量のみである。これは、防護対策進展の単位時間（1時間）に合わせて防護線量を計算する必要がある為。
- PM 内における既存の計算処理（防護対策を実施する場合の時系列線量の計算処理）を参考に、防護対策を実施しない場合の時系列線量の計算処理を実装する。

3) 移流期間中のグランドシャインが定義に含まれない

- 報告書内で述べたように、現行グランドシャインでは、移流期間中の被ばくが考慮されない仕様となっている。現行グランドシャインで計算さ

入被ばく、経口被ばく、長期グランドシャイン)については、50年まで1年間当たりの被ばく線量を「時系列線量」と呼称する。

⁵ 本書内では、時系列線量の計算に用いる単位時間毎の情報（クラウドシャインは線量そのもの、吸入被ばくは大気中濃度、改修後早期グランドシャインは沈着量、経口被ばくは濃縮係数、改修前早期グランドシャイン、再浮遊吸入被ばくおよび長期グランドシャインは移流期間終了時点の地表面沈着量を基に期間分の値を計算して使用）を各線量に対する「時系列情報」と呼称する。

⁶ 本書内では、それぞれの被ばく経路について、全ての被ばく低減効果を考慮しない場合（低減係数=1）の線量を「裸の線量」と呼称する（防護対策を実施しない場合の線量とは異なることに留意）。

れる「1週間分」の線量は、「移流期間終了時点⁷から1週間分」の線量である為、「放出開始時点から1週間分」の線量であるクラウドシャインおよび吸入被ばくとは異なる時間軸になる。

- 現行グランドシャインについて、暴露量評価式を変更する。移流期間中における1時間毎の沈着量をグランドシャインの時系列情報として用いて、改修グランドシャインの時系列線量を計算する。

4) 時系列線量の出力が無い

- 現行 OSCAAR では時系列線量の出力を想定していない為、出力処理は存在しない。
- サブルーチン `wedose` にある他の線量出力処理を参考に、時系列情報の出力処理を追加実装する。時系列線量は出力量が多いので、被ばく経路（クラウドシャイン、吸入被ばく、グランドシャイン）、防護線量の有無、評価線量（実効線量、甲状腺等価線量）で出力ファイルを別けた。

長期被ばくについて、現行OSCAARにおける課題（●）と改修OSCAARでの対応（○）を以下に示す。

1) 内部被ばく線量が預託線量でない

- 報告書内で述べたように、長期被ばくで評価される10年毎の内部被ばく線量は、その10年における被ばく線量を計算したもので、内部被ばくで一般的に評価される預託線量ではなく、当然その合算前の1年間線量も預託線量ではない。
- 長期被ばくの内部被ばく線量については、今回改修した他の時系列線量とは異なり、「定義」そのものから変更する。防護線量も裸の線量も、「預託線量」の評価式による計算を実装する。

2) 時系列線量の出力が無い

- 現行 OSCAAR では時系列線量の出力を想定していない為、出力処理は存在しない。
- サブルーチン `wcdose` にある他の線量出力処理を参考に、時系列情報の出力処理を追加実装する。時系列線量は出力量が多いので、被ばく経路（グランドシャイン、再浮遊吸入被ばく、経口被ばく）、防護線量の有無

⁷ 移流期間は、パフの放出継続時間や気象条件等に依存する為、個々の計算に依って異なる値を持つ。

で出力ファイルを区別した。

また、本改修の主な目的からは外れるが、関連して実施した改修内容を以下に示す。

1) 空間線量率の時系列線量を計算・出力

- 現行 OSCAAR の空間線量率は OIL に準じた防護対策進展を設定する為に実装されたものであるため、毎時の評価は想定していない。グラウンドシャインの時系列情報として PM に持ってきた 1 時間毎の沈着量は、空間線量率の時系列情報としても使用可能なので、空間線量率計算モジュールを参考に、1 時間毎の空間線量率の計算処理を PM に追加実装する。

2) 早期再浮遊吸入被ばくの時系列線量を計算・出力

- 現行 OSCAAR では早期被ばく経路として、再浮遊吸入被ばくを考慮していない。再浮遊量は沈着量から計算可能なので、グラウンドシャインの時系列情報として PM に持ってきた 1 時間毎の沈着量から 1 時間毎の再浮遊量を計算し、再浮遊吸入被ばくの時系列線量を計算・出力処理を追加実装する。

(3) 具体的な改修の内容

本改修では、14個ファイルの計62箇所に手を加えた。ここでは62の編集箇所の内、特に説明が必要と思われる13か所について言及する。

1) 「PM に引き継がれる時系列情報の不足」に係る改修

改修ファイル：out_hourdt.f90、post_lspuff.f90

大まかな改修の流れ：

① サブルーチン out_hourdt にて、サブルーチン lspuff で計算した早期被ばくの時系列情報（クラウドシャイン線量と大気中濃度の 1 時間値）が PM 接続ファイル（機番 350）に出力される。この時、現行の OSCAAR では防護対策圏内 ldist の値しか出力されないのので、全域 ndist に出力範囲を拡張。また、改修グラウンドシャインの時系列情報用に、沈着量の 1 時間値も PM 接続ファイル（機番 9280）へ出力。

② サブルーチン post_lspuff にて、複数放出点が存在する場合に備えてデータが処理されるので、①と同じように、出力範囲の拡張と沈着量についての処理（機番 928）を行う。

①の改修部分を抜粋し、注意点と合わせて下記に示す（②では同様の処理を post_lspuffで行う）。

<pre> Out_hourdt.f90 41 ! R3_start 42 ! 1. 防護対策圏外の1時間線量用に、出力範囲を拡張。 43 ! 2. グランドシャインと空間線量率の1時間線量用に、沈着量もPM接続ファイルに 出力。 44 ! この際、沈着量用に別途用意したPM接続ファイル（機番9280）を使用。 45 ! write (350) (xcon(i, j, k), i = 1, ldist) 46 ! write (350) (cloud(i, j, k), i = 1, ldist) 47 write (350) (xcon(i, j, k), i = 1, ndist) 48 write (350) (cloud(i, j, k), i = 1, ndist) 49 write (9280) (xdep(i, j, k), i = 1, ndist) ! m_sms_result の xdep 50 ! R3_end 2021-03-02 11:37:47 </pre>
<ul style="list-style-type: none"> ● 沈着量 xcon とクラウドシャイン線量 cloud について、出力範囲を ldist から ndist へ変更。 ● 新規に作成した沈着量用の PM 接続ファイル（機番 9280）に、沈着量 xdep を出力。

2) 「裸の線量の計算処理が無い」に係る改修

改修ファイル：chgadd.f90、rd1hdt.f90

大まかな改修の流れ：

① サブルーチン rd1hdt に、クラウドシャインと吸入被ばくについて、裸の時系列線量計算処理を実装する。

※グラントシャイン、再浮遊の処理については後述。

② 新規に計算した時系列線量（裸クラウドシャイン、裸吸入被ばく、裸グラントシャイン、防護グラントシャイン、裸再浮遊、防護再浮遊）と現行 OSCAAR の時系列線量（防護クラウドシャイン、防護吸入被ばく）を出力用サブルーチン wedose の引数用変数 dos1h と pmdos1h に格納する。

①の改修部分を抜粋し、注意点と合わせて下記に示す。

<pre> Rd1hdt.f90 (サブルーチンrd1hdt) 186 ! R3_start 187 do nr = 1, ndist 188 if(xcon(nr) + cloud(nr) /= 0.0) then 189 do l = 1, lorg 190 ! cloudshine(gamma) 191 ! ldist圏内と圏外で処理を分ける。early.f90を参照。 192 if(nr <= ldist) then 193 194 dose1h_00(1, l, 1, nd, nr) = dose1h_00(1, l, 1, nd, nr) & & + cloud(nr) * gfact(n, l) 195 else 196 197 dose1h_00(1, l, 1, nd, nr) = dose1h_00(1, l, 1, nd, nr) & & + xcon(nr) * dosfac(1, n, l) / 3600.0 </pre>

```

198         end if
199         ! inhalation
200         dose1h_00(3, l, 1, nd, nr) = dose1h_00(3, l, 1, nd, nr) &
201             & + xcon(nr) * br * fctinh(n, l)
202         if(nucnm(n) == 'I-131' .or. nucnm(n) == 'I-125') then
203
204             dose1h_00(1, l, 2, nd, nr) = dose1h_00(1, l, 2, nd, nr) &
205                 & + cloud(nr) * gfact(n, l)
206
207             dose1h_00(3, l, 2, nd, nr) = dose1h_00(3, l, 2, nd, nr) &
208                 & + xcon(nr) * br * fctinh(n, l)
209         end if
210     end do
211     ! cloudshine(beta)
212     dose1h_00(2, 8, 1, nd, nr) = dose1h_00(2, 8, 1, nd, nr) &
213         + xcon(nr) * fctskn(n) / 3600.0
214 ! R3_end 2021-03-02 11:52:49

```

- サブルーチン early にて、防護対策圏内外ではクラウドシャインの評価式が異なっていた。圏内では ADD で計算した線量をそのまま、圏外では大気中濃度から線量を評価していたので、圏外の処理はそれを反映させる。
- 防護線量の形式に倣い、指定の核種の場合における線量を別途評価したが、現状特に意味はない。

②の改修部分を抜粋し、注意点と合わせて下記に示す。

```

chgadd. f90
516 ! R3_start
517     do k = 1, 2
518         do l = 1, lorg
519             ! cloud gamma
520
521             dos1h(1, l, k, nd, nr, it) = dose1h_00(1, l, k, nd, nr)! + dose1h
_00(2, l, k, nd, nr)
522             pmdos1h(1, l, k, nd, nr, it) = dose1h(1, l, k, ii, jj) * ftdos(1)!
+ dose1h(2, l, k, ii, jj) * ftdos(2)
523             ! groundshine
524             dos1h(2, l, k, nd, nr, it) = grdos_00(1, l, k) + grdos_00(2, l,
k)
525             pmdos1h(2, l, k, nd, nr, it) = grdos(1, l, k) + grdos(2, l, k)
! inhalation (50y committed)
526             dos1h(3, l, k, nd, nr, it) = dose1h_00(3, l, k, nd, nr)
527             pmdos1h(3, l, k, nd, nr, it) = dose1h(3, l, k, ii, jj) * ftdos(3)
! resuspension (50y committed)
528             dos1h(4, l, k, nd, nr, it) = dose1h_00(4, l, k, nd, nr)
529             pmdos1h(4, l, k, nd, nr, it) = dose1h(4, l, k, ii, jj) * ftdos(3)
530         end do
531     end do
532 ! R3_end 2021-03-02 11:45:43

```

- 時系列線量を出力サブルーチン wedose の引数用変数 dos1h, pmdos1h に格納。
- クラウドシャインはガンマ線のみを考慮することとした。特に意味はないので、ベータ線を加味することを要検討。
- この時点で、裸の線量 dos1h は距離 nr についてフルレンジ、防護線量 pmdos1h は現行の処理に基づき距離 nr について防護対策圏内のみ値を持つ。圏外の防護線量

は、wedose で dos1h から別途求める。

3) 「移流期間中のグランドシャインが定義に含まれない」に係る改修

改修ファイル：chgadd.f90、calgrd.f90

大まかな改修の流れ：

① サブルーチン chgadd にて、グランドシャインの時系列情報を整備する。

ADD から引き継いだ 1 時間毎の沈着量 xdep から、1 時間毎の積算沈着量 xdep_1h を計算する。

※再浮遊吸入被ばくに関する量 mres に係る部分は後述。

② サブルーチン calgrd に、グランドシャインの時系列線量計算処理を実装する。この時、サブルーチン calgrd 内で、暴露量計算式を修正する。

①の改修部分を抜粋し、注意点と合わせて下記に示す。

<pre>chgadd.f90 371 do it=1,maxtim 372 do k=1,nuc 373 374 reslam = expdc(k) + 0.693/reshaf 375 resint = (1.0-dexp(-reslam * 3600d0))/reslam 376 rescon = rescon0 * dexp(-0.693/reshaf * (it-1) * 3600d0) 377 378 do nd=1,ndir 379 xdep_tmp(1:mxndis) = 0.0 380 read(928,end=928) (xdep_tmp(i), i=1,ndist) 381 928 continue 382 if(it/=1)then 383 do nr=1,ndist 384 xtdep_1h(it,k,nd,nr) = xtdep_1h(it- 1,k,nd,nr) * dexp(- expdc(k) * 3600d0) + xdep_tmp(nr) 385 end do 386 else 387 do nr=1,ndist 388 xtdep_1h(it,k,nd,nr) = xdep_tmp(nr) 389 end do 390 end if 391 392 do nr=1,ndist 393 mres(it,k,nd,nr) = xtdep_1h(it,k,nd,nr) * rescon * resint 394 end do 395 end do 396 end do 397 end do 398 end do</pre>
<ul style="list-style-type: none">● ADD で計算し PM まで引っ張ってきた 1 時間毎の沈着量 xdep_tmp から、その時刻における積算沈着量 xtdep_1h を計算する。この計算式は、ADD にて移流期間終了時点の積算地表面沈着 xtdep を求めたものと同じ⁸。

⁸ ADD から PM を引っ張ってくる時点で積算沈着量 xtdep を引っ張ってきても良かったが、既存の入れ物として用意されていたのが xdep だったので、今回は xdep を引っ張ってきた。

②の改修部分を抜粋し、注意点と合わせて下記に示す。

<pre> calgrd.f90 170 ! R3_start 171 ! ! 今xtdepは該当該時刻における沈着量。 172 ! ! 積分区間として時刻が必要だったのは、xtdepを初期沈着量として用いたから。 173 ! ! 積分区間を0~1hとすることで、grdnucがその時刻における1時間内の暴露量の 計算になる。 174 ! ! tms = t - 1.0 ! 現行グランドシャイン評価式 175 ! ! tme = t ! 現行グランドシャイン評価式 176 ! tms = 0.0 ! 改修グランドシャイン評価式 177 ! tme = 1.0 ! 改修グランドシャイン評価式 178 ! 防護線量（現行） 179 ! ! ここだけ、現行の線量計算に手を加えた。 180 ! ! if(tme <= 24.0)then 181 ! ! if(t <= 24.0)then 182 ! ! call grdnuc(tms, tme, nuc, expdc, xtdep(1, ii, jj), ftdos, tidep1) 183 ! ! else if(tme <= 24.0 * 7.0)then 184 ! ! else if(t <= 24.0 * 7.0)then 185 ! ! call grdnuc(tms, tme, nuc, expdc, xtdep(1, ii, jj), ftdos, tidep2) 186 ! ! end if 187 ! ! 裸の線量（新規） 188 ! ! if(t <= 24.0)then 189 ! ! call grdnuc(tms, tme, nuc, expdc, xtdep(1, ndd, nrr), 1.0, tidep1_00) 190 ! ! else if(t <= 24.0 * 7.0)then 191 ! ! call grdnuc(tms, tme, nuc, expdc, xtdep(1, ndd, nrr), 1.0, tidep2_00) 192 ! ! end if 193 ! R3_end 2021-03-02 13:33:18 </pre>	<ul style="list-style-type: none"> ● 報告書内で述べたように、1時間の暴露量計算式を変更した。沈着量 xtdep としてその時刻における沈着量を引っ張ってきているので、0h~1h の崩壊量はその時刻の評価期間における暴露量となる。 ● 本改修では一貫して、既存の線量計算部分には触れないようにし、既存の出力線量については改修前後で処理に変化がないよう作業したが、グランドシャイン防護線量は例外である。上述した暴露量計算式の変更内容を、既存の暴露量計算にも反映させたので、既存の変数 tidep1 と tidep2 は、改修前後で異なる値を持つ⁹。よって、PM モジュールで計算されるグランドシャインの防護線量は、改修前後で異なる結果になる。 ● 防護線量の形式に倣い、裸の線量でも 24 時間前後で入れ物を別けたが、現状特に意味はない。
--	--

4) 「時系列線量の出力が無い」に係る改修

改修ファイル：wedose.f90

大まかな改修の流れ：

- ① 時系列線量の最終処理。防護対策対象外での防護線量（通常生活によるもの）を計算する。
- ② 線量毎に用意したファイルへ、計算したそれぞれの時系列線量を出力す

⁹ 評価式を現行 OSCAAR に戻す場合は、chgadd と calgrd にある「! 現行グランドシャイン評価式」と「! 改修グランドシャイン評価式」のコメントアウトを入れ替えること

る。

①の改修部分を抜粋し、注意点と合わせて下記に示す。クラウドシャイン、吸入被ばくおよび再浮遊吸入被ばくは同じ構造となっている為、クラウドシャインを抜粋して下記に示す。

wedose. f90	
578	! CLLOUDSHINE
579	=====
580	!
581	tmpdos1h_00(1, l) = dos1h(1, l, 1, nd, nr, m)! * sffac(1)
582	
r) == 1) then	if(islt(nd, nr) == 1 .or. icsl(nd, nr) == 1 .or. ieva(nd, n
583	tmpdos1h_pm(1, l) = pmdos1h(1, l, n, nd, nr, m)
584	else
585	tmpdos1h_pm(1, l) = tmpdos1h_00(1, l) * sffac(1)
586	end if
<ul style="list-style-type: none"> ● tmpdos1h_00 には低減係数を乗じない。これは出力する時系列線量として、「防護対策を実施しない場合の線量」ではなく「裸の線量」を想定したため。 ● 防護措置が実施される場合の防護線量にはサブルーチン chgadd で計算した防護線量 pmdos1h を用いて、防護措置が実施されない場合の防護線量は「裸の線量」×「通常生活時の低減係数」で処理する。このように、実施されない場合の線量が「裸の線量」から別途処理されるのは、現行 OSCAAR の計算値が格納されている pmdos1h には、防護対策圏外の値が入っていない為。 	

グラウンドシャインについて、下記に示す。

Wedose. f90	
588	! GROUNDSHINE
589	=====
590	!
591	tmpdos1h_00(2, l) = dos1h(2, l, 1, nd, nr, m)! * sffac(2)
592	tmpdos1h_pm(2, l) = pmdos1h(2, l, n, nd, nr, m)! * sffac(2)
<ul style="list-style-type: none"> ● グラウンドシャインについては、サブルーチン chgadd と calgrd で防護線量を計算する際に、防護対策圏外も処理されるので、防護対策の有無で処理を別けなくてよい。 	

5) 「内部被ばく線量が預託線量でない」に係る改修

改修ファイル：cald1y.f90

大まかな改修の流れ：

- ① 再浮遊吸入被ばく線量と経口被ばく線量を、預託期間 50 年の預託線量として、新規に計算する。

改修部分を抜粋し、注意点と合わせて下記に示す。再浮遊吸入被ばくと経口被ばくは同じ構造なので、再浮遊吸入被ばくを抜粋して下記に示す。

Cald1y. f90	
151	! R3_start

```

152 ! 再浮遊吸入被ばく。その1年の再浮遊吸入摂取量からその年の50年預託線量を計算。
153     rsdsly_cm(l, 1) = rsdsly_cm(l, 1) + rs1(j, it) * df(2, j, l, 5)
154     if(iodn(2, 1) == j .or. iodn(2, 2) == j)then
155         rsdsly_cm(l, 2) = rsdsly_cm(l, 2) + rs1(j, it) * df(2, j, l, 5)
156     end if
157 ! R3_end 2021-03-02 14:21:41

```

- 1年間の被ばく線量を、「1年間の摂取量 rs1」と「預託期間 50年の吸入被ばく線量係数 df」で計算する。
- 既存の計算処理部分に手を加えるのではなく、完全に新規に処理を実装する。

6) 「時系列線量の出力が無い」に係る改修

改修ファイル：wcdose.f90

- ① 線量毎に用意したファイルへ、計算したそれぞれの時系列線量を出力する。

7) 「空間線量率の時系列線量を計算・出力」に係る改修

改修ファイル：ambientDose.f90、chgadd.f90

大まかな改修の流れ：

- ① 空間線量率計算モジュール ambientDose に、1時間毎の空間線量率計算サブルーチン calcAmbientDose_hourly を実装する。
- ② サブルーチン chgadd にて、空間線量率の時系列線量を計算する。以降 wcdose での出力に至るまで、早期被ばくの時系列線量と同じように扱う。

①の改修部分を抜粋し、注意点と合わせて下記に示す。

```

ambientDose.f90
51 ! R3_start
52 ! chgaddで使用する、1時間毎の空間線量率計算用サブルーチン。
53 !-----
54 subroutine calcAmbientDose_hourly(xtdep_1h, outamd)
55 !-----
56     ! --- local ---
57     integer :: i, j, k
58     real :: outamd(mxndir, mxndis) ! Dose (microSv/h) (size : {dir, dist})
59     integer, parameter :: mxnnuc=65
60     real :: xtdep_1h(mxnnuc, mxndir, mxndis) ! m_sms_result型でなく m_deposi
型
61     !-----
62     outamd(1:ndir, 1:ndist) = 0d0
63     do j = 1, ndir
64         do i = 1, ndist
65             do k = 1, niso
66                 outamd(j, i) = outamd(j, i) + xtdep_1h(k, j, i) * amdf(k)
67             end do
68         end do
69     end do
70 end subroutine calcAmbientDose_hourly
71 ! R3_end 2021-03-02 11:47:35

```

- 現行 OSCAAR の空間線量率計算サブルーチン calcAmbientDose を参考に作成。
- 現行版では、移流期間終了時点の値のみが計算対象なので、引数ではなく変数モジュール m_sms_result から積算沈着量 xtdep を引っ張ってきている。改修版では、chgadd で整備した 1 時間毎の積算沈着量 xtdep_1h を、引数経由引っ張ってきている。
- 現行版では、計算サブルーチン内で出力処理まで実装している。改修版では、出力処理を一か所 (wedose) にまとめる為、計算結果 outamd はサブルーチン chgadd に返すこととした。

②の改修部分を抜粋して下記に示す。

```
chgadd.f90
416 ! 空間線量率計算
417 call calcAmbientDose_hourly(xtdep_1h_tmp, amd1h_tmp)
418 do nd=1,ndir
419   do nr=1,ndist
420     amd1h(nd,nr,it) = amd1h_tmp(nd,nr)
421   end do
422 end do
```

8) 「早期再浮遊吸入被ばくの時系列線量を計算・出力」に係る改修

改修ファイル：chgadd.f90、rd1hdt.f90

大まかな改修の流れ：

- ① サブルーチン chgadd の改修グランドシャイン時系列情報整備と同時に、1 時間毎の再浮遊量 mres を 1 時間毎の積算沈着量 xtdep から計算する。
- ② 計算した再浮遊量 mres を、再浮遊吸入被ばく線量の時系列情報として用いる。再浮遊吸入被ばくも吸入被ばくの一種なので、吸入被ばくでは大気中濃度から導出した吸入摂取量を再浮遊量 mres から導出すれば再浮遊吸入被ばくとなる。

①の改修部分を抜粋し、注意点と合わせて下記に示す。

```
chgadd.f90
362 ! 再浮遊係数初期値(1/m)およびその低減係数(1/s)を設定(暫定値)
363 ! Code Manual for MACCS2:Volume 1, User's Guide より
364 ! rescon0 = 1e-6
365 ! reshaf = 1e10
366 ! NUREG/CR-7009 (SOARCA project) より
367 rescon0 = 0.0001
368 reshaf = 182000
369
370 rewind(928)
371 do it=1,maxtim
372   do k=1,nuc
373
374     reslam = expdc(k) + 0.693/reshaf
375     resint = (1.0-dexp(-reslam * 3600d0))/reslam
376     rescon = rescon0 * dexp(-0.693/reshaf * (it-1) * 3600d0)
377
378   do nd=1,ndir
```

```

379         xdep_tmp(1:mxndis) = 0.0
380         read(928, end=928) (xdep_tmp(i), i=1, ndist)
381 928 continue
382         if(it/=1)then
383             do nr=1, ndist
384                 xdep_1h(it, k, nd, nr) = xdep_1h(it-
1, k, nd, nr) * dexp(- expdc(k) * 3600d0) + xdep_tmp(nr)
385             end do
386         else
387             do nr=1, ndist
388                 xdep_1h(it, k, nd, nr) = xdep_tmp(nr)
389             end do
390         end if
391
392         do nr=1, ndist
393             mres(it, k, nd, nr) = xdep_1h(it, k, nd, nr) * rescon * resint
394         end do
395     end do
396 end do
397 end do
398 end do

```

- 再浮遊係数とその半減期として、SOARCA project の値を暫定的に使用。
- その時刻における積算沈着量 xdep_1h から、その時刻における再浮遊量 mres を計算。

②の改修部分を抜粋し、注意点と合わせて下記に示す。

```

Rd1hdt.f90 (サブルーチンrd1hdt_resusp)
283         if(mres(n, nd, nr) /= 0.0)then
~省略~
318             !resuspension
319             dose1h(4, l, 1, nd, nr) = dose1h(4, l, 1, nd, nr) &
320                 & + mres(n, nd, nr) * br * fctinh(n, l) * fi0d0
321             !
322             ! add_e
323             !
324             if(nucnm(n) == 'I-131' .or. nucnm(n) == 'I-
125 ')then
325                 dose1h(4, l, 2, nd, nr) = dose1h(4, l, 2, nd, nr) &
326                     & + mres(n, nd, nr) * br * fctinh(n, l) * fi0d0
327             end if
328             ! 生線量
329
330             dose1h_00(4, l, 1, nd, nr) = dose1h_00(4, l, 1, nd, nr) + mres(n, nd
, nr) * br * fctinh(n, l)
331             if(nucnm(n) == 'I-131' .or. nucnm(n) == 'I-
125 ')then
332                 dose1h_00(4, l, 2, nd, nr) = dose1h_00(4, l, 2, nd, nr)
&
333                 & + mres(n, nd, nr) * br * fctinh(n, l)
334             end if
335             !
336             ! inhalationの実効線量へのよう素被ばく低減効果を考慮
337             if(iodtab(nd, nr) >= 1) then
338                 do i = 1, 2
339                     !全期間
340                     dose1h(4, ieffd, i, nd, nr) = dose1h(4, ieffd, i, nd, nr) &
341                         - 0.05*mres(n, nd, nr)*br*fctinh(n, ithyd)*(1.0-
tfiod0)
342                 enddo
343             endif
344             end if

```

- 「if(xcon(nr) + cloud(nr) /= 0.0)then」を削除し、「if(mres(n, nd, nr) /= 0.0)then」

に変更。これは、大気中濃度 `xcon` とクラウドシャイン線量 `cloud` では、再浮遊線量の存在可否フラグにはならない為。このフラグの違いがあるので、再浮遊吸入被ばく用のサブルーチン `rd1hdt_resusp` を別途用意した。

- 吸入被ばくの処理をベースに、吸入摂取量を再浮遊吸入被ばく用に変更（大気中濃度 `xcon` から再浮遊量 `mres` へ）。
- 防護対策は、吸入被ばくと同じ「ヨウ素剤の投与」で対応。
- 以降、出力までの扱いは他の時系列線量と同じ。

TABLE 5x-1- 1 ** HOURLY EFF.DOSE DOSE (Sv) ** CLOUD(G) 1 HOURS

DIST. NO.	E	ENE	NE	NNE	N	NNW	NW	WNW
1	0.0E+00							
2	0.0E+00	4.9E-06	9.0E-02	9.7E-04	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
3	0.0E+00	0.0E+00	1.4E-02	6.2E-05	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
4	0.0E+00	0.0E+00	3.5E-03	2.1E-05	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
5	0.0E+00	0.0E+00	1.2E-02	4.4E-05	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
6	0.0E+00	0.0E+00	9.3E-03	2.4E-05	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
7	0.0E+00	0.0E+00	6.1E-03	1.3E-05	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
8	0.0E+00	0.0E+00	3.9E-03	6.0E-06	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
9	0.0E+00	0.0E+00	2.5E-03	2.5E-06	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
10	0.0E+00	0.0E+00	1.5E-03	9.7E-07	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
11	0.0E+00	0.0E+00	8.5E-08	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
12	0.0E+00							
13	0.0E+00							
14	0.0E+00							
15	0.0E+00							
16	0.0E+00							
17	0.0E+00							
18	0.0E+00							
19	0.0E+00							
20	0.0E+00							
21	0.0E+00							
22	0.0E+00							
23	0.0E+00							
24	0.0E+00							
25	0.0E+00							

DIST. NO.	W	WSW	SW	SSW	S	SSE	SE	ESE
1	0.0E+00							
2	0.0E+00							
3	0.0E+00							
4	0.0E+00							
5	0.0E+00							
6	0.0E+00							
7	0.0E+00							
8	0.0E+00							
9	0.0E+00							
10	0.0E+00							
11	0.0E+00							
12	0.0E+00							
13	0.0E+00							
14	0.0E+00							
15	0.0E+00							
16	0.0E+00							
17	0.0E+00							
18	0.0E+00							
19	0.0E+00							
20	0.0E+00							
21	0.0E+00							
22	0.0E+00							
23	0.0E+00							
24	0.0E+00							
25	0.0E+00							

図 3.1 早期被ばく線量出力テーブルの一例 (低減効果無し、クラウドシャイン、1時間目)

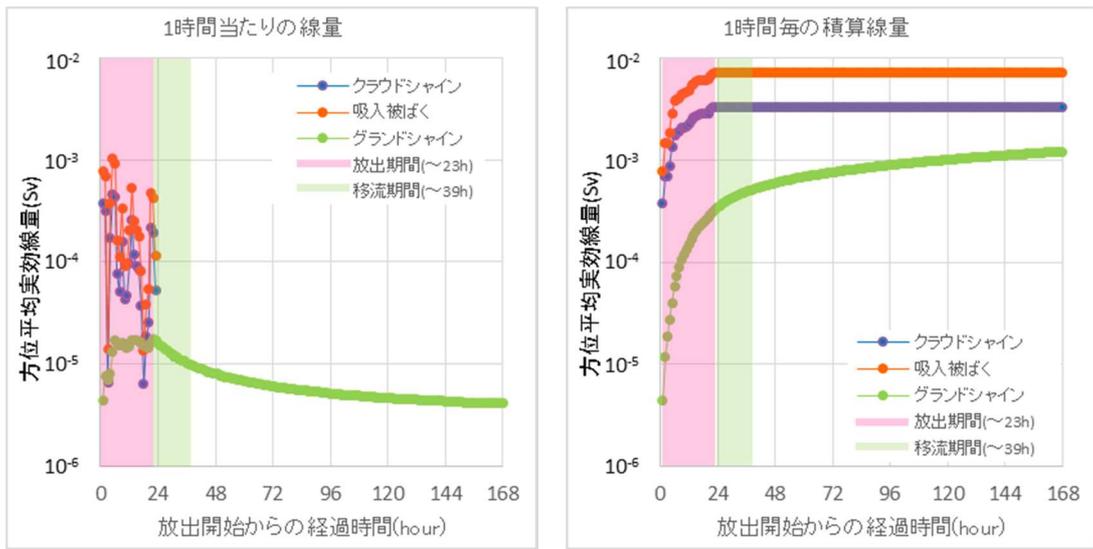


図 3.2 経路別早期被ばく線量の時間推移（放出点から4.5km）

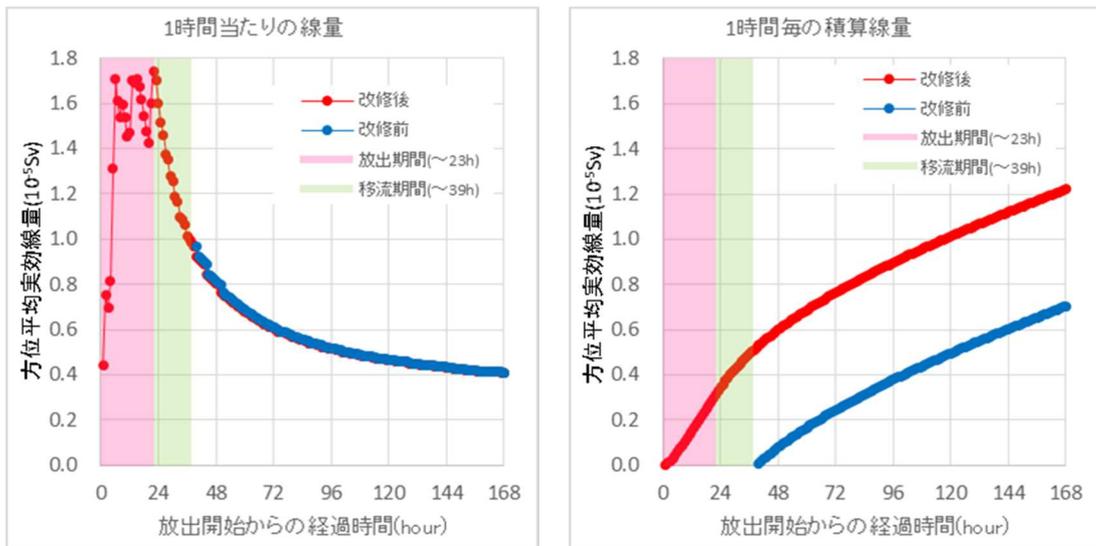


図 3.3 改良前後のグランドシャイン線量の比較（放出点から4.5km）

TABLE 8x-2- 1 ** YEARLY EFFECTIVE DOSE (Sv) ** RESUSPEN 1 YEARS													
DIST. NO.	E	ENE	NE	NNE	N	NNW	NW	WNW					
1	7.1E-12	1.8E-09	3.2E-11	0.0E+00									
2	9.8E-10	1.3E-06	1.6E-06	9.1E-07	1.3E-07	7.8E-10	0.0E+00						
3	3.1E-07	1.0E-06	6.9E-07	3.4E-07	2.3E-07	2.0E-09	0.0E+00						
4	1.3E-07	4.8E-07	3.9E-07	1.1E-07	3.0E-08	2.6E-10	0.0E+00						
5	4.9E-08	4.1E-07	2.5E-07	9.7E-08	1.4E-08	6.2E-11	0.0E+00						
6	1.3E-07	3.8E-07	3.0E-07	5.5E-08	4.3E-08	1.2E-10	0.0E+00						
7	5.9E-08	2.8E-07	2.0E-07	3.9E-08	2.3E-08	5.6E-11	0.0E+00						
8	5.4E-08	2.1E-07	1.4E-07	3.2E-08	1.7E-08	3.8E-11	0.0E+00						
9	3.7E-08	1.5E-07	8.8E-08	1.8E-08	1.1E-08	1.5E-11	0.0E+00						
10	2.5E-08	9.7E-08	5.4E-08	1.0E-08	6.6E-09	6.0E-12	0.0E+00						
11	2.5E-08	4.1E-08	4.0E-08	7.9E-09	4.7E-09	3.1E-12	0.0E+00						
12	1.4E-08	9.5E-09	3.8E-08	6.9E-09	1.9E-09	5.3E-13	0.0E+00						
13	3.4E-09	1.2E-08	2.9E-08	6.3E-09	1.2E-09	8.9E-14	0.0E+00						
14	2.5E-10	2.7E-09	9.5E-09	5.6E-09	8.9E-11	0.0E+00							
15	1.5E-12	1.8E-09	6.0E-09	1.8E-09	1.6E-10	0.0E+00							
16	1.0E-14	1.2E-09	1.6E-09	1.5E-09	2.7E-10	0.0E+00							
17	1.3E-12	2.7E-09	1.5E-09	1.5E-09	3.3E-10	0.0E+00							
18	1.0E-13	2.4E-09	5.0E-10	9.9E-10	1.3E-10	0.0E+00							
19	6.3E-14	3.3E-09	7.0E-10	5.1E-10	2.4E-11	0.0E+00							
20	6.8E-14	1.9E-09	3.6E-09	3.3E-10	5.5E-12	0.0E+00							
21	0.0E+00	7.3E-10	3.8E-09	2.6E-09	3.0E-12	0.0E+00							
22	0.0E+00	1.4E-09	2.0E-09	4.3E-10	0.0E+00								
23	0.0E+00	4.7E-10	1.4E-09	1.1E-10	0.0E+00								
24	0.0E+00												
25	0.0E+00												
DIST. NO.	W	WSW	SW	SSW	S	SSE	SE	ESE					
14	0.0E+00	6.5E-											
2	0.0E+00	1.1E-10											
3	0.0E+00	4.7E-09											
4	0.0E+00	9.2E-09											
5	0.0E+00	7.5E-09											
6	0.0E+00	5.3E-09											
7	0.0E+00	3.1E-09											
8	0.0E+00	1.9E-09											
9	0.0E+00	9.7E-10											
10	0.0E+00	4.8E-10											
11	0.0E+00	9.7E-11											
12	0.0E+00	6.6E-14											
13	0.0E+00	3.0E-											
14	0.0E+00												
15	0.0E+00												
16	0.0E+00												
17	0.0E+00												
18	0.0E+00												
19	0.0E+00												
20	0.0E+00												
21	0.0E+00												
22	0.0E+00												
23	0.0E+00												
24	0.0E+00												
25	0.0E+00												

図 3.4 長期被ばく線量出力テーブルの一例 (低減効果無し、再浮遊吸入被ばく、1年目)

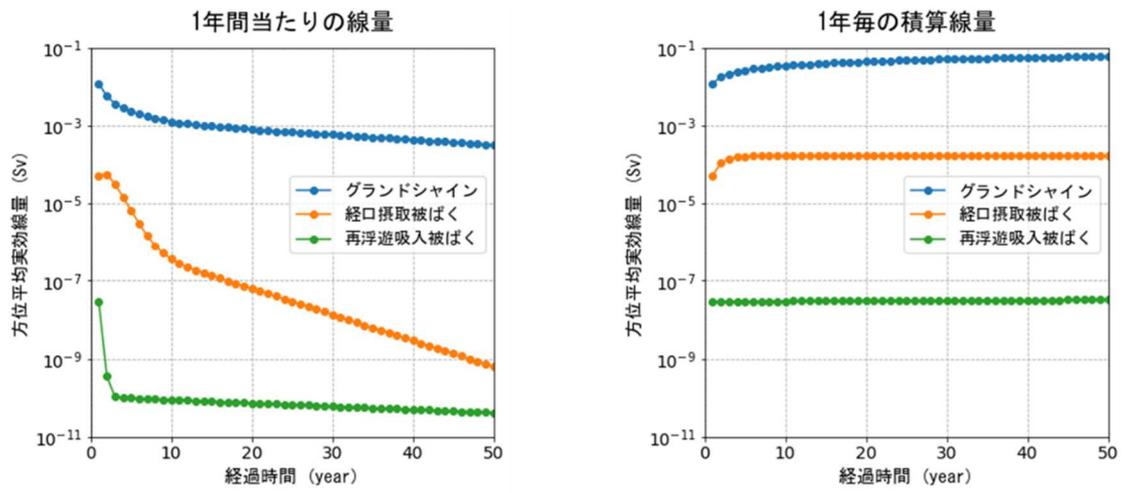


図 3.5 経路別長期被ばく線量の時間推移 (放出点から4.5km)

第3章の参考文献

本間俊充, 石川淳, 富田賢一, 村松健, 2000, 軽水炉モデルプラントの広範な事故シナリオに対する環境影響評価, 日本原子力研究所報告書JAERI-Research 2000-06

4. 被ばく評価モデルの検討

第4章では、沈着粒子の再浮遊に関する被ばく評価モデルの精緻化について説明する。

現状のOSCAAR コードでは、長期被ばく線量評価モジュールCHRONICにおいて、地表面に沈着した放射性物質が舞い上がり空気中に漂っている場合の外部被ばくについて、サブマージョンを仮定した線量換算係数を利用して評価している。サブマージョンは評価点周辺で放射性核種が一様な濃度で無限に広がっていると仮定しているため、再浮遊粒子の空間分布によっては過大評価となる可能性がある。(この時の一様放射性核種濃度は地上における放射性核種濃度とされている。)

そこで本事業では、数値流体力学 (Computational fluid dynamics : 以下、「CFD」という。) 解析を用いて地上の空気の流れをシミュレーションし、再浮遊係数を明らかにする。次に、放射性核種を含む再浮遊粒子の空間分布から、放射線挙動を模擬したモンテカルロ計算コードPHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System) (Sato et al., 2018)及びICRPの標準ボクセルファントム(ICRP., 2010)を用いて、再浮遊核種由来のクラウドシャインによる実効線量を算出する。これらの成果をもとに、再浮遊物質からの外部被ばく線量をより現実的に評価するための線量換算係数の整備に必要となる情報を整備する。

以下、4.1項では、CFDを用いて地表面粒子の再浮遊挙動を解析した結果について記載する。4.2項では再浮遊粒子の空間分布に基づく被ばく線量の計算について記載する。

4.1. CFDを用いた粒子挙動解析

地表面の粒子の移動メカニズムには転動、跳躍、浮遊の3種類がある (例えば吉崎(2005)に詳しい)。転動はmm単位の大きな粒子に対して発生し、粒子が転がって移動するプロセスである。跳躍は一旦跳ね上がった粒子が落下しながら移動する現象であり、粒径は0.1 mm以上の粒子で起こりやすい。Bagnold(1941)は、これらの粒子の移動メカニズムのうち、浮遊は無視できるほどに小さく、転動が1/4、跳躍が3/4を示すとしている。この原因としては、小さな粒子は粘性層の中に埋もれて乱れによって擾乱されにくいこと、他の大きな粒子によってすぐに補足されることなどが挙げられる。そして大きい粒子は転動が起こりやすいが、粒径が大きく重力が大きいため高く浮遊しにくい。例えば吉崎(2005)によれば、飛砂の80-90%は地表面30-50 cmで捕捉されている。しかしHudson(1973)によれば、10 μm 以下の粒子の旅程は無限大であり、一旦浮遊した場合は大気中の滞在時間が長いため、被ばくへの影響が大きい。そこで本解析では浮遊の過程を対象として、粒子挙動の解析を行った。

4.1.1. モデル概要

(1) 粒子径の設定

再浮遊粒子の粒子径について、Kaneyasu et al.(2017)は、福島事故直後から5か月間のつくばでのエアロゾルを分析した結果、再浮遊が主体となる期間の粒径は事故直後に比べて大きく、2.1-11 μm であったことを報告している。またDorrian(1997)は、環境中の放射性エアロ

ゾルの粒子サイズは、1 μmから20 μmに分布し、中央値は1.5 μm、再浮遊エアロゾルの粒径の中央値は6 μmであったと報告している。これらを踏まえ、ここでは粒子径を5 μmに設定した。なお、Kaneyasu et al.およびDorrianで測定された粒子径は空気力学的放射能中央径（Activity Median Aerodynamic Diameter、以下、「AMAD」と呼ぶ。）であるが、AMAD、CFD解析で想定する空気力学的粒子径、実際の粒子形状から求める幾何学的粒子径はすべて等しいとみなした。

(2) 粒子に働く力

床面に付着した粒子が再飛散するか否かは、粒子の付着力と土壌直上の空気の流れによる分離力とのバランスから求められる。粒子の付着力は、ファンデルワールス力、静電気力、液架橋力からなることが知られている。これらの付着力は粒子と平面との接触面の法線方向に作用する。以下、上向きの力を正として表す。

ファンデルワールス力は分子間の引力であり、粒子径に比例する。

$$F_v = -\frac{Ad}{12z^2} \quad (4.1)$$

$$d = \frac{D_1 D_2}{D_1 + D_2} \quad (4.2)$$

F_v : ファンデルワールス力 (J m^{-1})

A : Hamaker定数 (J) (1×10^{-19})

d : 換算粒子径 (m)

$D_1 \cdot D_2$: 各粒子の粒子半径 (m)

ただし粒子と平板間では、 $D_2 = \infty$ より、 $d = D_1$ ($5 \mu\text{m}$)

z : 平面と粒子間の分離距離 (m) (0.4×10^{-9})

表面に凹凸がある粒子・平面の付着力は、凹凸のない粒子の場合に比べてかなり小さくなる。これは分子間力の積分において、物質がない部分が生じるためである（増田., 1997）。両表面に正規分布した表面凹凸（凹凸の平均を b [m])を仮定した場合のファンデルワールス力は、凹凸のない場合の $z/(z+b)^2$ 倍になる。ここでは一般化のため粒子形状を球状と設定したが、実際の粒子は凹凸の大きい複雑な形状をしていることから、ファンデルワールス力が小さくなっている可能性がある。

$$F_{vb} = -\frac{Ad}{12(z+b)^2} \quad (4.3)$$

静電気力は粒子及び平面の表面電荷の積に依存し、分離距離 z が粒子半径和に比べて十分小さいとき、粒子径の2乗に比例する。ただし高湿度環境下では粒子の帯電は妨げられ、静電気力は一般にファンデルワールス力に比べて小さい。

$$F_{ec} = -\frac{\pi\sigma_1\sigma_2}{\varepsilon_0}d^2 \quad (4.4)$$

F_{ec} : 静電気力 (J m^{-1})

$\sigma_1 \cdot \sigma_2$: 表面電荷密度 (C m^{-2}) (26.5×10^{-6})

土壌粒子はコロイド粒子の影響などにより表面電荷は高いが、ここでは土壌表面をわずかに帯電した平板とみなす

ε_0 : 真空の誘電率 (F m^{-1}) (8.85×10^{-12})

高湿度環境下では土壌粒子と土壌表面（平板）の間の接触部に水分が凝縮し、液架橋が形成される。液架橋とは液橋に生じる負圧と液体の表面張力により粒子と平板への接触部分との間に生じる付着力であり、粒子径に比例する。

$$F_L = \pi a_z^2 P_L - 2\pi\gamma d \quad (4.5)$$

F_L : 液架橋力 (J m^{-1})

γ : 水の表面張力 (N m^{-1}) (25°C での値として0.072)

以上から、付着力の各要素を概算すると、 $F_v = 2.6 \times 10^{-7}$ (J)、 $F_{ec} = 6.2 \times 10^{-9}$ (J)、 $F_L = 2.3 \times 10^{-6}$ (J)と計算される。今回の仮定条件下では液架橋力が最も大きく、静電気力は無視できるほど小さい。そこで、本作業では付着力としてファンデルワールス力と液架橋力を設定した。付着力は後述する分離力への抗力として働くため、分離力の方向によって水平方向の付着力が発生する。しかし乱流条件下における水平方向の付着力に関しては一律に設定することが難しいため、ここではすべて鉛直方向に働くものとした。

一方、空気の流れによる分離力とは、流れと平行な方向に働く抗力と垂直な方向に働く揚力が挙げられる。粒子の揚力は粒子周辺の流れの速度差に起因するせん断揚力を対象とし、サフマンの式を適用した。

$$F_{LS} = 1.615 D_p^2 (\rho\mu)^{0.5} |\omega_f|^{-0.5} v_s \omega_f \quad (4.6)$$

ρ : 流体密度 (N m^{-1})

μ : 粘性係数 (J m^{-1})

D_p : 粒子径 (m)

ω_f : 流体速度ベクトル v の回転 ($\omega = \text{rot } v$) (-)

v_s : 流体と粒子の速度差 (m s^{-1})

粒子に生じる抗力は以下のように表される。

$$F_d = \frac{1}{2} \rho v_s^2 C_d A_p \quad (4.7)$$

F_d : 抗力 (J m^{-1})

ρ : 流体密度 (N m^{-1})

v_s : 流体と粒子の速度差 (m s^{-1})

C_d : 抗力係数 (-)

A_p : 流れに垂直な方向からの粒子の投影面積 (m^2)

このとき、抗力係数 C_d は、Schiller-Naumannの相関式を適用した。

$Re_p \leq 1000$

$$C_d = \frac{24}{Re_p} (1 + 0.15 Re_p^{0.687}) \quad (4.8)$$

$Re_p > 1000$

$$C_d = 0.44 \quad (4.9)$$

Re_p : 粒子レイノルズ数 (J m^{-1})

$$Re_p = \frac{\rho v_s D_p}{\mu}$$

μ : 粘性係数 (J m^{-1})

D_p : 粒子径 (m)

(3) 流体の挙動

本作業では非圧縮性の粘性流体による非定常解析を実施した。連続相は空気とし、オイラー一流として計算した。分散相には土壌粒子を想定し、ラグランジュ法によって計算した。

乱流を含む流れ場の解析には、レイノルズ平均ナビエ・ストークスモデル (以下、「RANSモデル」という。) を用いた。

$$\nabla u = 0 \quad (4.10)$$

x方向について風速を平均成分と変動成分の和で置き換える。 $u = \bar{u} + u'$ とすると

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \text{div}(u\bar{u}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \nu \text{div}(\text{grad } \bar{u}) \quad (4.11)$$

$$+ \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial(-\rho \overline{u'^2})}{\partial x} + \frac{\partial(-\rho \overline{u'v'})}{\partial x} + \frac{\partial(-\rho \overline{u'w'})}{\partial x} \right]$$

u, v, w : 流体速度 (x方向、y方向、z方向) (m s^{-1})
 ρ : 流体密度 (N m^{-3})
 ν : 動粘性係数 ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)

レイノルズ応力は渦粘性近似により、渦粘性係数と乱流運動エネルギーの関数とみなせる。渦粘性は乱流運動エネルギーと乱流散逸率の関数である。ここでは乱流運動エネルギーと乱流散逸率の輸送方程式によるRealizable k- ϵ 2層モデルを用いた。このときの乱流散逸率は $0.1 \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$ 、乱流運動エネルギーは 0.001 J kg^{-1} とした。

粘性流体の場合、接触する面との間に境界層が形成される。Realizable k- ϵ 2層モデルでは粘性底層、バッファ層、対数層までの3層でのレイノルズ応力を表現する混合壁関数を用いた。

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(1 + \kappa y^+) + C \left(1 - e^{-\frac{y^+}{y_m^+}} - \frac{y^+}{y_m^+} e^{-by^+} \right) \quad (4.12)$$

u_+ : 壁面上の摩擦速度で無次元化した流体の速度 ($\frac{u}{u^*}$) (m s^{-1})

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (\tau_w : \text{粘性底層でのせん断応力})$$

y : 壁からの距離 (m)

y_+ : 壁面上の摩擦速度で無次元化した壁からの距離 ($\frac{y}{u^*}$) (m)

y_m^+ : 壁から粘性底層が対数層の解と交わる点までの距離 (m)

$$y_m^+ = \max[3267(2.64 - 3.9\kappa)E'^{0.0125}] - 0.987$$

C : $C = \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{E'}{\kappa}\right)$

b : $b = \frac{1}{2} \left(y_m^+ \frac{\kappa}{c} + \frac{1}{y_m^+} \right)$

κ : カルマン定数 (0.42)

E' : $E' = \frac{E}{f}$ (Eは実験値で対数則による補正值、 f は壁面粗度に依存するラフネス関

数)

ただし、RANSモデルでは空間的・時間的に境界層の渦の平均化を行うため、流れの時間的な変化（非定常性）が小さくなり、乱流による揚力が発生しにくくなる可能性があることに注意が必要である。

(4) 解析

流体に関する連立方程式を解くため、有限体積法により離散化を行い、SIMPLE法（Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation）を用いて陰解法で解析した。

- (1) 既知の圧力と運動量方程式から流速の予測値 u^* , v^* , w^* を求める
- (2) 流速の予測値 u^* , v^* , w^* を使って、圧力の補正量 p' を求める。圧力の補正量は質量保存式と運動量保存式から得られる
- (3) 圧力の補正量 p' を使って、 u , v , w , p を更新
- (4) 密度 ρ を更新
- (5) 温度や乱流など、その他の支配方程式を計算

計算フローを図 4.1 に示す。なお、図中の括弧書きの番号は上記のステップの番号と対応している。

4.1.2. 計算条件

まず標準条件として床面は水平、風向は床面に対して水平とした場合の計算を行った。さらに、より再浮遊が生じやすい条件として、再浮遊の生じる風向を下向きに変更した場合、床面の粗度を大きくした場合についても計算を行い、再浮遊係数を比較した。

(1) 標準条件における粒子挙動解析

まず流体を定常流として計算し、その後、床面にラグランジュ粒子を置いた場合の挙動解析を実施した。流体は空気とし（温度・風速一定、非圧縮性）、風向は地表面に対して平行とする。

計算領域のサイズは $30\text{ m} \times 10\text{ m} \times 10\text{ m}$ とした。計算領域の模式図を図 4.2 に示す。計算領域のメッシュはヘキサメッシュを用い、基準間隔を 10 cm とした。メッシュ図を図 4.3 に示す。総メッシュ数は300万とし、高さ方向のレイヤー数は100としたが、高さ方向のメッシュ間隔は床面から伸長比に応じて設定した。伸長比の設定にあたっては、あらかじめ伸長比を変えて予備解析を行った。伸長比は隣り合うセルの格子長さの比を示し、同じメッシュ数では伸長比が大きいほど床面付近のメッシュ間隔を細かく設定することができる。ただし一般に伸長比は1.2以下が推奨されており、伸長比が大きすぎると解が拡散してしまう可能性がある。そこで伸長率を1.05及び1.1とした場合について、結果の違いを比較した。メッシュの一部を図 4.4 に示す。粒子を配置した10m地点から2m離れ、4m離れ、20m離れにおける風速の鉛直分布を比較したところ、両者において風下方向（x方向）への風速分布に差は見ら

れなかった。また乱流パラメータについても同様であった。よって、メッシュの伸長率は1.1と設定した。天井面、左右の壁面はスリップ面で反発係数は0（吸収）、床面をノンスリップ面（粗い壁面：粗度長と粒子径が粘性底層を超える）で反発係数を1とした。風速はアメダス日立における最大風速レベルを参考に、10 m/sと設定した。表 4.1にアメダス日立における年別最大風速を示す。

粒子は計算領域左端の入口面から風下方向10 mから11 mの地点、風下方向に直行する方向に領域の中心1 mの範囲に対し、均等に配置した。予備解析において粒子数による粒子挙動の違いを確認したところ、100～10000の範囲では挙動に違いが見られなかったことから、粒子数は100個とした。粒子の配置位置を図 4.5に示す。粒子形状は球体とし、粒子密度は一般的な土粒子密度から 2.6 g cm^{-3} とした。

解析にはシーメンスPLMソフトウェア・コンピューティショナル・ダイナミクス株式会社の流体解析ソフトウェアSimCenter STAR-CCM+ ver2021.2を用いた。計算条件の一覧を表 4.2に示す。

(2) 条件を変えた場合の粒子挙動の比較

1) 風向変更及び地表面条件変更ケース

標準条件を基に床面条件及び風向条件を組み合わせた解析を実施した。床面条件は標準条件では床面は平坦と設定していたが、粒子の初期配置位置の前後各5 mに1 cm高さの溝を追加したケースについても計算した。溝部分の間隔は10 cmである。溝部分の流れを解析するため、凹部分には高さ方向に3層、風下方向に4層のメッシュを追加した。溝部分のメッシュの詳細について図 4.6に示す。床面は凹部分の壁面を含めてノンスリップ条件とした。

風向は風の流入口を領域上面にとり、粒子位置から135度の位置から幅5 mで斜めに吹き入れた場合について計算した。流入口での風速は標準条件と同じ10 m/sとした。このとき、粒子位置を流束中心が床面付近にかかる位置に設定するため、領域左端から粒子位置までの助走距離を30 m、粒子位置から領域右端までの距離を35 mに変更した。さらに流れ場の安定性を考慮し、流入高さを15 mに、領域高さを50 mに調整した。計算領域を図 4.7に示す。

計算ケースは風向のみを変更した場合、風向と床面条件を変更した場合の2ケースとした。計算時間は粒子が計算領域内から排出される10 秒を目安としたが、すべての粒子が排出された場合はそこで計算を終了した。

2) 入口幅変更ケース

計算領域は1)の設定サイズから風の入口部分となる領域を除いた、60 m×40 m×50 mの範囲とした。計算領域を図 4.8に示す。床面条件は1)と同様に、粒子位置の周辺に凹凸を設定した。風の流入口は領域左端の床面から床面への垂直面の高さ0～1 mまでの範囲とした。計算時間は粒子が計算領域内から排出される20 秒とした。条件設定に至る詳細については前節にまとめた。

4.1.3. 計算結果

(1) 標準条件における粒子挙動解析

まず、平板乱流境界層厚みを解析式により計算した。レイノルズ数は空気の密度 ρ 、粘性係数 μ と、計算領域における基準とする風速 U_∞ 及び風洞の風下長さ x から求められる。

$$Re = \frac{\rho U_\infty x}{\mu} = \frac{1.81415 \times 10 \times 30}{1.855 \times 10^{-5}} = 2.93 \times 10^7 \quad (4.13)$$

このとき、乱流境界層の厚さ δ は、以下のように計算される。

$$\delta = \frac{0.37x}{\sqrt[5]{Re_x}} = 0.37 \times 30 \times (1.95 \times 10^7)^{-1/5} = 0.35631 \quad (4.14)$$

標準条件では乱流境界層の厚さは約36 cmとなった。36 cm以上では平行風となり上向き力が発生しないことから、粒子の浮遊高さも同程度と予想される。

CFD解析における粒子挙動と風速の関係として、XY平面における粒子の移動の様子を図 4.9に、三次元での粒子の移動の様子を図 4.10に示す。すべての粒子が風下方向へ移動するが（転動）、一部は乱流層内において浮遊している様子が確認できた。このとき、浮遊粒子の最大浮遊高さは29 cmであった。図 4.11に各時間ステップにおける粒子の最大高さの推移を示す。解析では粒子の最大浮遊高さが低く、ダストサンプリングの実施高さである1 m前後に到達する粒子は見られなかった。そのため、同高さにおける再浮遊係数は計算できないが、実測値と同様に非常に小さくなることが予想される。また、図 4.12及び図 4.13に示すように、各時間ステップにおける1 cm以上浮遊した粒子の割合は、最大で64%となり、6割以上の粒子が跳躍として浮遊していることがわかった。ただし20 cm以上浮遊する粒子の割合は全体の1割にとどまった。単純に比較することはできないが、山口ら(2015)による農作業中の再浮遊係数の測定値は 10^{-5} から 10^{-6} の範囲にあり、今回の解析による地表1 cm以上への再浮遊係数はこれらの10万倍大きい、サンプリング高さ（1 m程度）への再浮遊係数は0のため、測定値より小さくなる。

なお、粒子が移動し始める速度を示す限界摩擦速度について、Shao and Luの式を用いて計算した(Shao and Lu., 2000)。係数 $A=0.0123$ 、 $\gamma=3 \times 10^{-4}$ とすると、限界摩擦速度 u_* は0.79 m/sと計算される。

$$u_* = \sqrt{A_N \left(\sigma_p g d + \frac{\gamma}{\rho d} \right)} \quad (4.15)$$

本条件での解析においては図 4.14に示すように、風速0.79 m/sにおいて粒子が移動する様

子が確認された。今後さらに付着力の設定について適切なパラメータ化を行い、限界摩擦速度の詳細な解析を行うことが求められる。

(2) 条件を変えた場合の粒子挙動の比較

風向を変更したケースにおける風の流れを示したベクトル図及びさらに床面に凹凸を配置したケースの風の流れを示したベクトル図を図 4.15に示す。風向を変更した場合においても、風が床面に到達した後は床に沿って平行な流れが発生し、平行風の場合に比べて顕著な風向の変化は見られなかった。また、凹凸の有無による流れ場への影響はベクトル図からはほとんど確認できなかった。一方、粒子挙動風向を変更した場合の最大浮遊高さは6.7 m、さらに床面に凹凸を付けた場合は6.3 mとなり、凹凸のない場合においてむしろ最大粒子高さが高くなった。最大粒子高さを図 4.16および図 4.17に示す。風速変更ケースにおけるレイヤー別の粒子割合を図 4.18および図 4.19に示す。また、風向変更及び地表面条件変更ケースにおけるレイヤー別の粒子割合を図 4.20および図 4.21に示す。標準条件と比較すると各レイヤーにおいて粒子が観測されるが、地表面の凹凸の有無による違いはあまりみられなかった。

今回の地表面条件変更の設定では、アスファルト舗装面での凹凸を想定し、床面に1 cm高さの凹凸のみを設定したため、発生する乱流のサイズが小さくなり、凹凸のない場合と比較して大きな差が見られなかった。しかし今回の解析において予備解析から領域サイズとして設定した風下距離は、実環境に当てはめた場合、サンプリングを実施した舗装された駐車場等の領域を超え、多様な土地利用の領域が含まれる可能性が高い。よって実環境を模擬した解析を行う際には、周辺の農地や住居地域の粗度長などを考慮した凹凸の大きいモデル化を行うことが必要である。

風向を変更したケースの計算では、風の入口幅を5 mに設定したが、風速をアメダス日立における最大風速レベルを参考に、 10 m s^{-1} と高く設定しているため、地表面での平行風の幅はほぼ入口幅を反映していた。図 4.22に入口幅を変えた場合の風速のベクトル図を示す。そこで実験的に、標準条件を基に入口幅を1 mと小さく設定した場合について解析を行った。ただしそのままでは(1)に示すように乱流境界層厚さは解析解で示した厚みを超えないため、床面に凹凸を配置した。図 4.23に流れ場のベクトル図を示す。粒子の最大浮遊高さは、図 4.24に示すように、計算時間とともに高くなる傾向を示した。図 4.25に示した領域内の粒子数の推移をみると、計算時間10秒付近においてほとんどの粒子が排出されており、領域出口からの逆流によって一部の粒子が舞い上がっていると考えられる。しかし計算時間10秒以内における最大粒子高さも9.8 mと、他のケースと比較した最も高くなった。図 4.26にレイヤー別の粒子割合の推移を示す。しかし領域内の全粒子数を分母に取った場合、粒子の少ない時間帯で最上層のレイヤー11の粒子割合が大きく表示されてしまうため、図 4.27にレイヤー別の粒子数を示した。図 4.28に示す床上20 cm以上のレイヤーにおける粒子数の推移をみると、他のケースから計算される粒子数と比較して、レイヤー11の粒子数が多くなっている。

た。他のレイヤーにおいても同様に粒子数が多かった。また、レイヤー別の最大値の位相の違いから、粒子が下層から上層へと舞いあがっていることがわかり、またレイヤー11の粒子数は他のレイヤーと比較して減少速度が遅く、滞空時間が長くなっていた。

今回の解析において、平行風のみとした標準条件の場合でも地表面付近では6割以上の割合で再浮遊が見られたが、そのまま舞い上がることなく落下しており、外部被ばく量に影響の大きい、体幹部の高さには達していなかった。しかし、風向や流入幅を変動させたケースでの解析結果に示すように、解析条件によっては、再浮遊粒子は標準的な身長を超えた高さまで上昇することが分かった。

また、風速の入口幅を小さくして平行風の幅を抑えた場合では、粒子は高く舞い上がり、粒子の移動プロセスのうち、浮遊として定義される状態に達することがわかった。今回は入口幅を小さくしたが、他の因子によっても同様の現象が再現できる可能性があり、境界条件の設定が非常に重要である。

今後の課題としては、実気象や土地利用を反映した風速条件や地表面条件に付いて検討し、現実的な境界条件を設定することが挙げられる。そのうえで、地表面条件に合わせた再浮遊係数について、詳細にシミュレーションしていく必要がある。

表 4.1 気象庁アメダス日立観測所における風速測定結果

年	年平均風速	最大風速 (10 分平均)	最大瞬間風速
2008	2.1	12	19.3]
2009	2.1	11	20.8
2010	2.1]	12.6]	23.6]
2011	2.2	12.5	22.1
2012	2.4	12	23.1
2013	2.4	13.9	29.2
2014	2.2	12.8	25.7
2015	2.2	11.6	23
2016	2.2	11.9	27
2017	2.2	13.2	23.7
2018	2.2	12.7	23.9
2019	2.1	12.3	25.1
2020	2.1	10.9	24.2

注釈 (気象庁、気象観測指針より)

- ・最大瞬間風速は 2008 年より観測を開始
- ・資料が許容範囲を超えて欠けた状態で観測及び統計した値を「資料不足値」と分類し、通常、値の右に「]」を付ける

表 4.2 計算条件

項目	単位	設定値
入口風速	m s^{-1}	10
空気密度	kg m^{-3}	1.18415
空気粘性係数	Pa^{-1}	1.86E-05
粒子密度	kg m^{-3}	2650
粒径	m	5.00E-06
計算物理時間	sec	3.0
解析時間ステップ	sec	0.01
内部イタレーション回数	-	5

表 4.3 モデル設定

項目	単位	設定値
乱流散逸率	$\text{m}^2 \text{s}^{-3}$	0.1
乱流運動エネルギー	J kg^{-1}	0.001
粒子のせん断揚力モデル	-	Saffman
天井と壁のせん断応力設定	-	スリップ条件
床のせん断応力設定	-	ノースリップ条件 (滑らかな壁面)
壁面モデル	-	Realizable K- ϵ 2 層
解析モデル	-	陰解法非定常解析

表 4.4 高さ別設定

レイヤーNo.	高さ範囲 (地上から) (cm)
1	1-20
2	21-40
3	41-60
4	61-80
5	81-100
6	101-120
7	121-140
8	140-160
9	161-180
10	181-200
11	200-

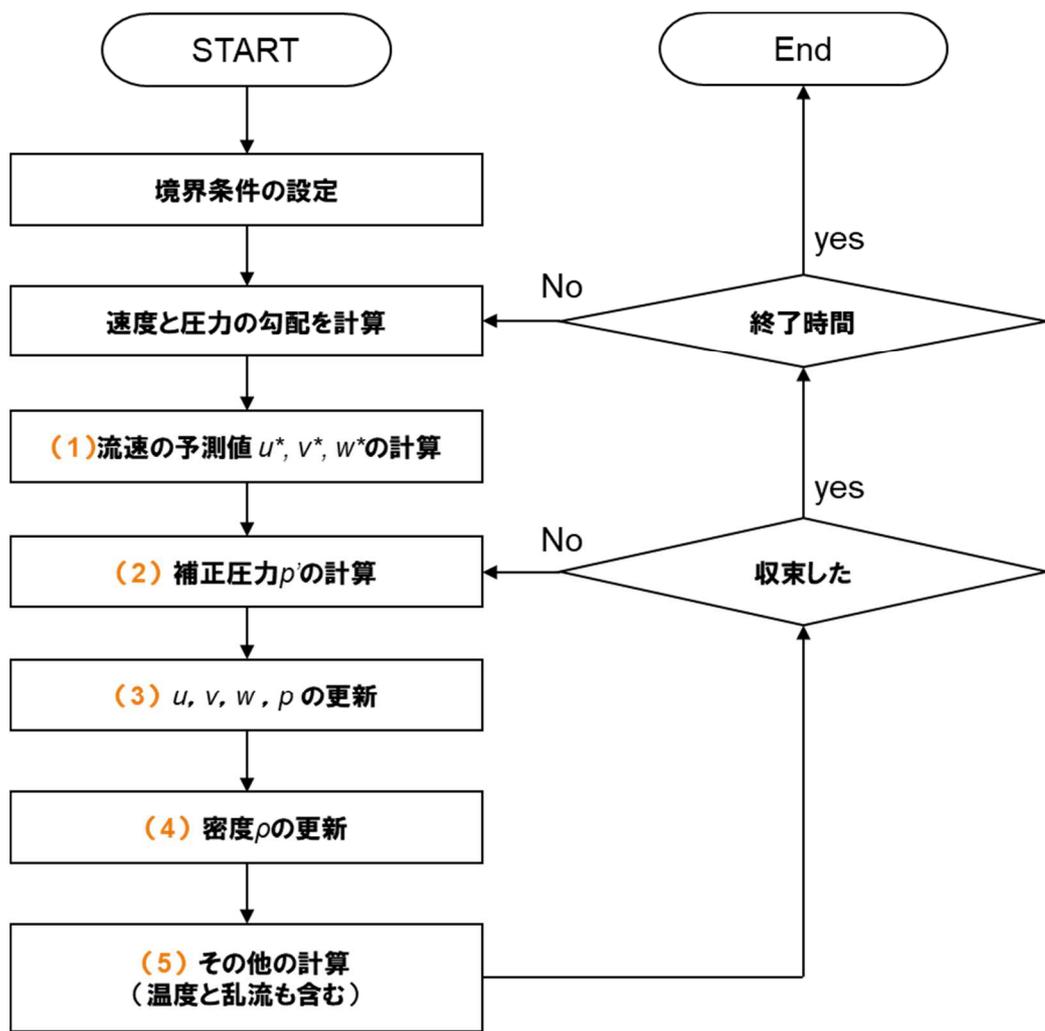


図 4.1 SIMPLE法計算フロー

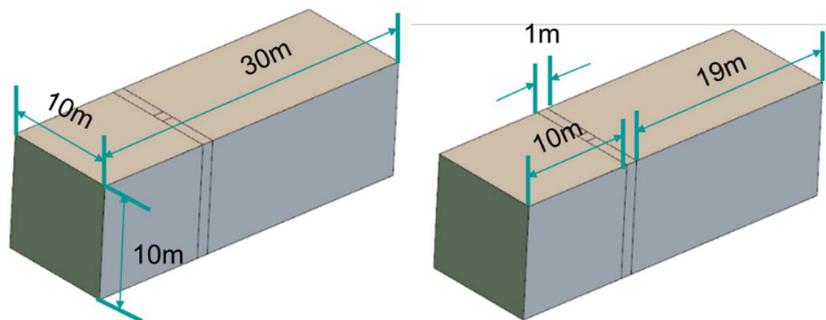


図 4.2 計算領域

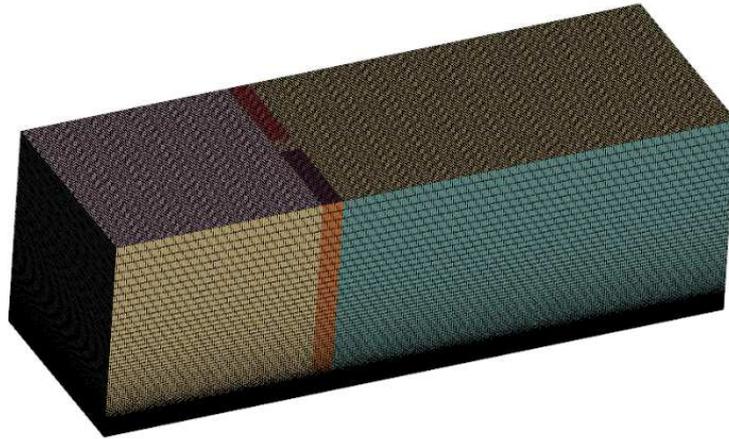


図 4.3 計算メッシュ

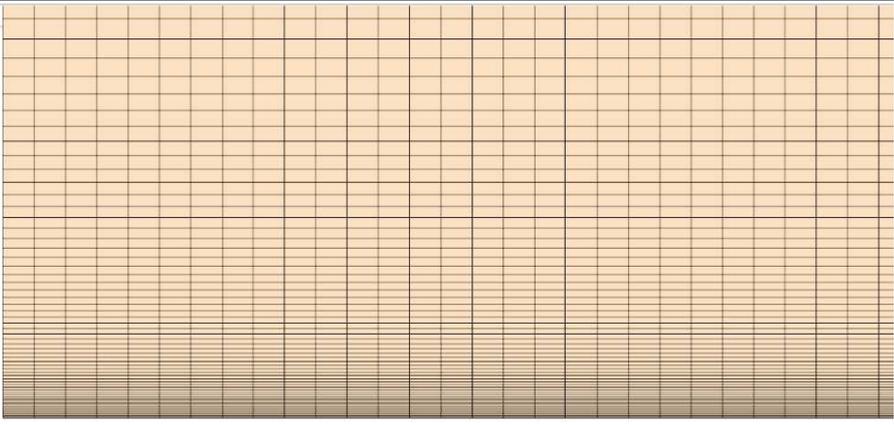
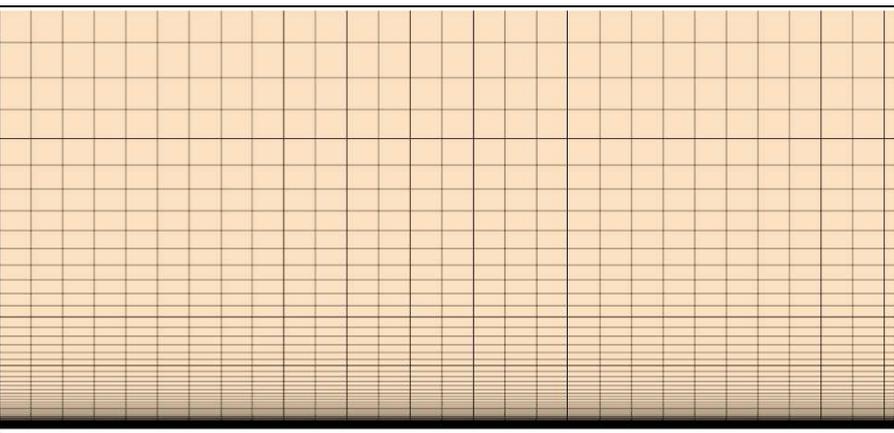
伸長率 1.05	
伸長率 1.1	

図 4.4 伸長率別メッシュ例

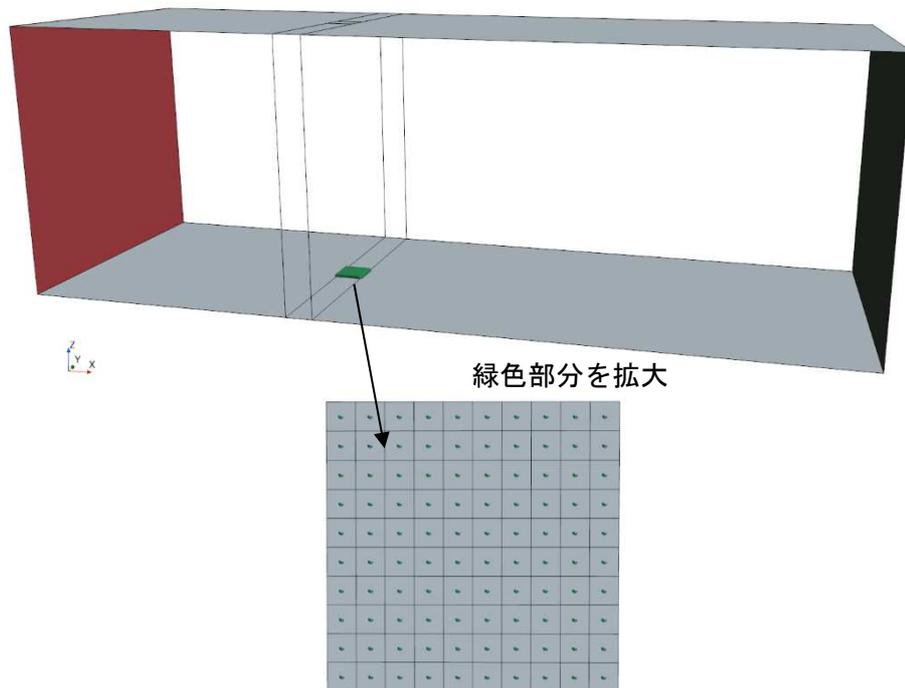


図 4.5 粒子配置

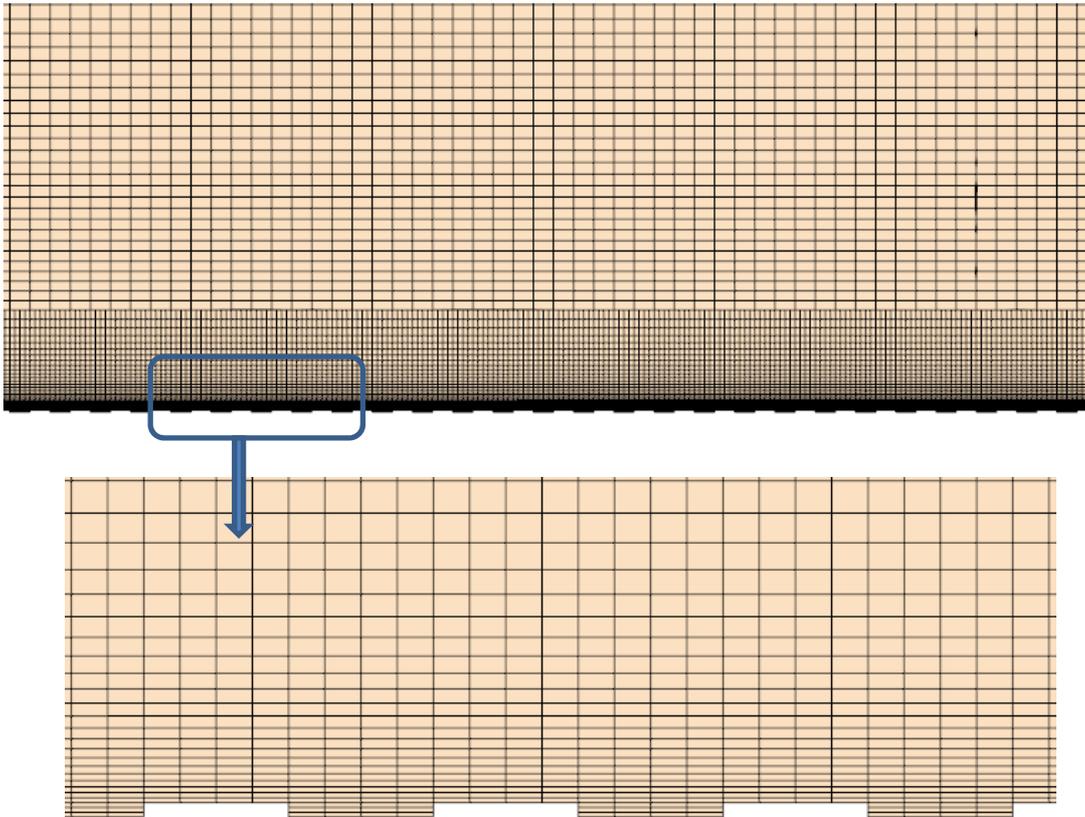


図 4.6 計算領域（床面に凹凸追加）

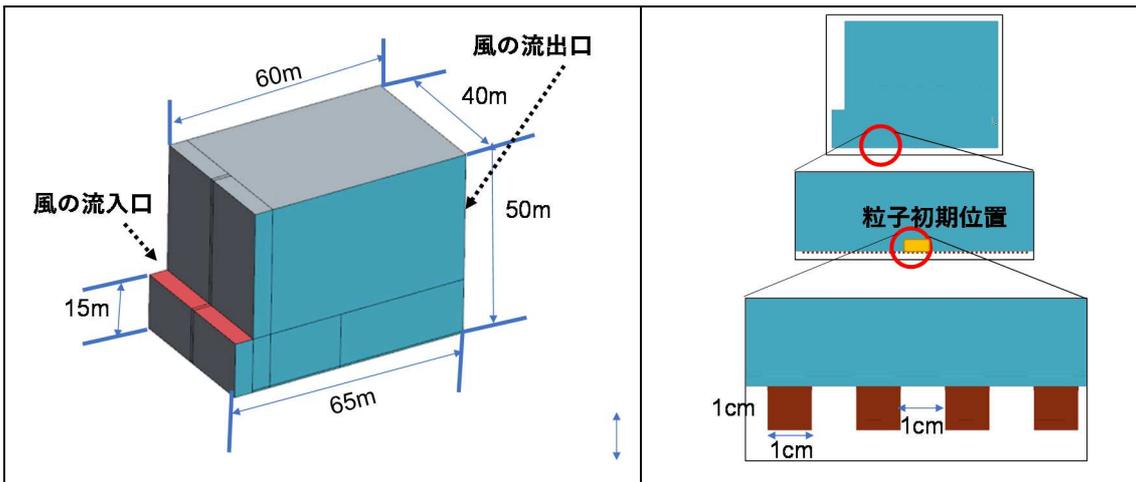


図 4.7 計算領域（風向変更、地表面条件変更）

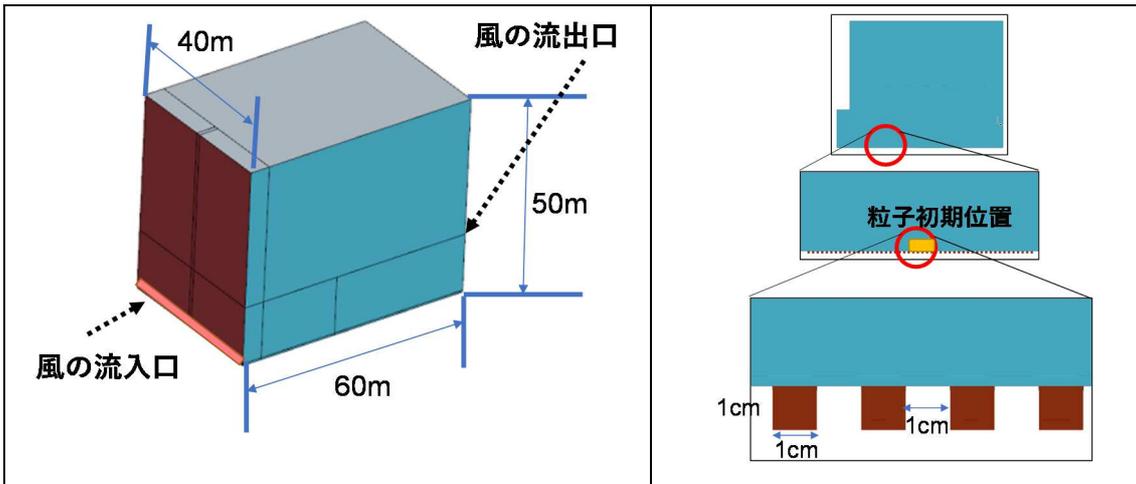
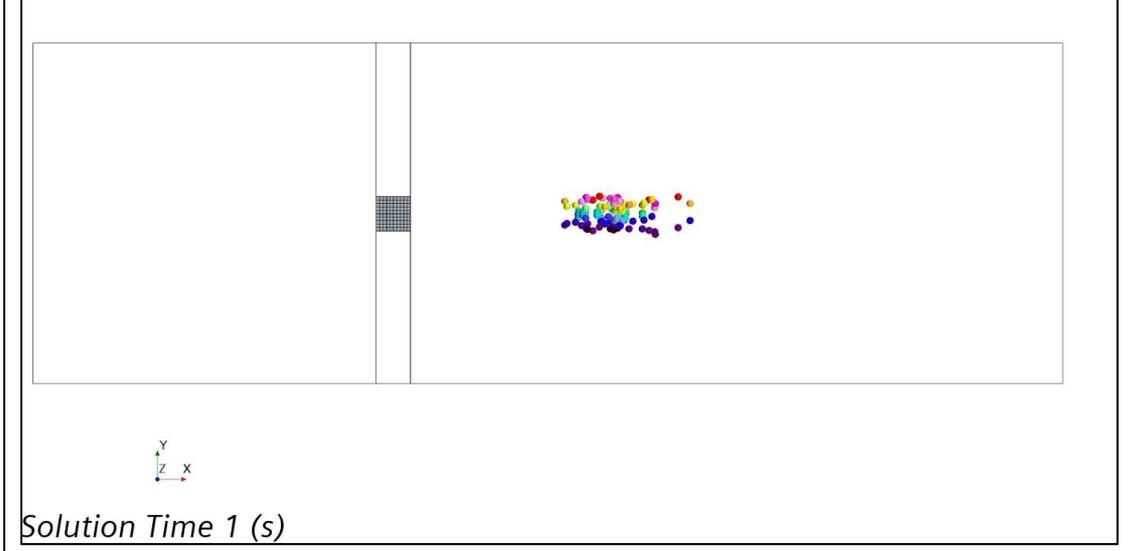
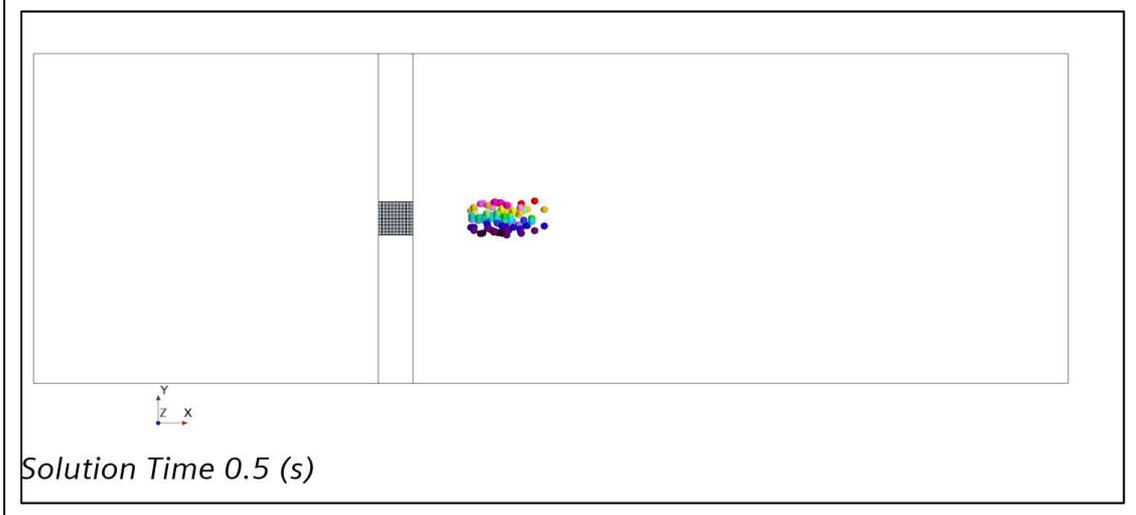
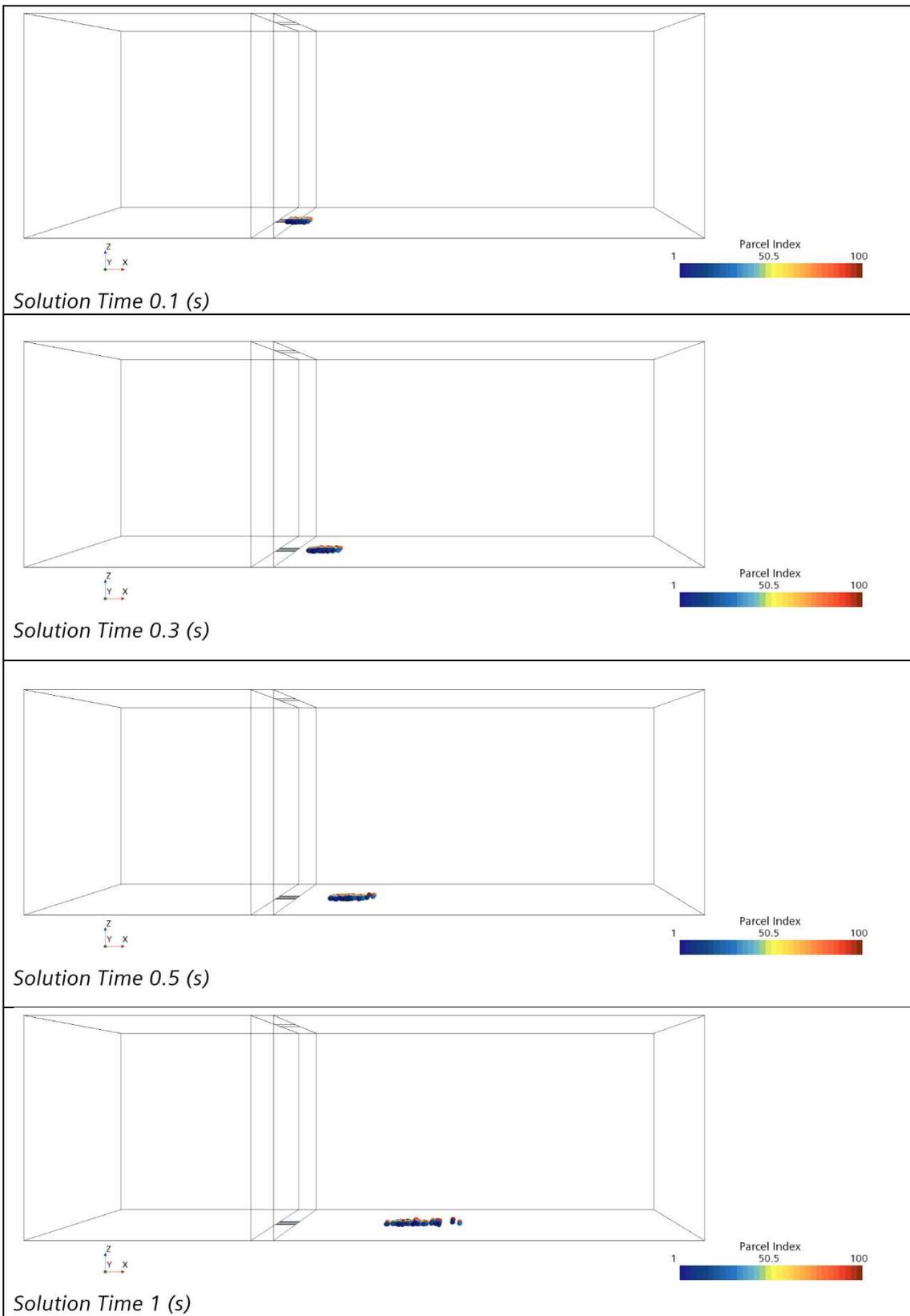


図 4.8 計算領域 (入口幅変更)



※粒子は見やすいように色を変えている

図 4.9 XY平面における粒子の移動の様子



※粒子は見やすいように色を変えている (Parcel index)

図 4.10 三次元での粒子の移動の様子

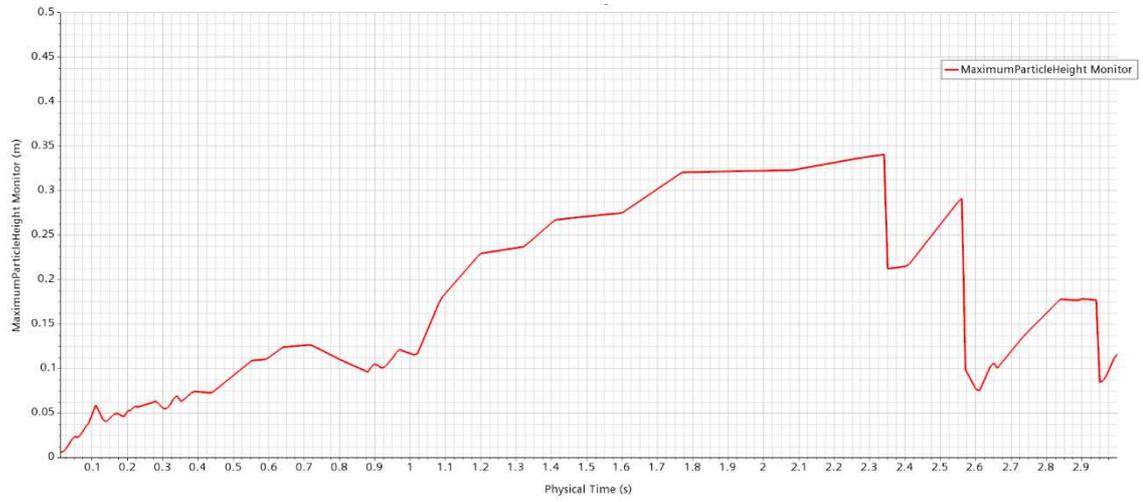


図 4.11 最大粒子高さ



図 4.12 床面から1cm以上20cm以下に存在する粒子の割合

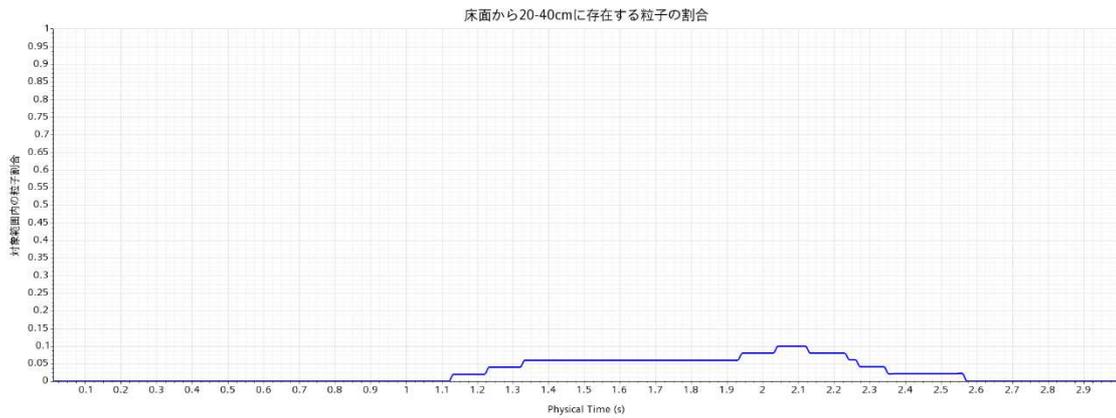
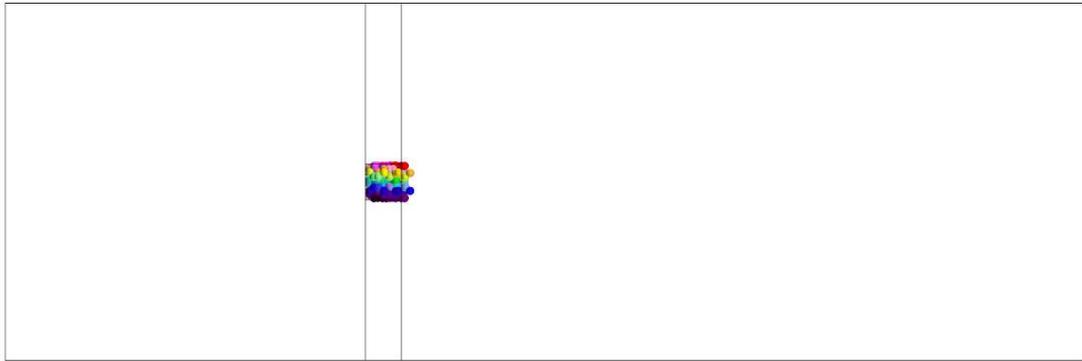


図 4.13 床面から20cm以上40cm以下に存在する粒子の割合



Solution Time 1 (s)

※粒子は見やすいように色を変えている

図 4.14 風速1 m/sにおける粒子の移動距離

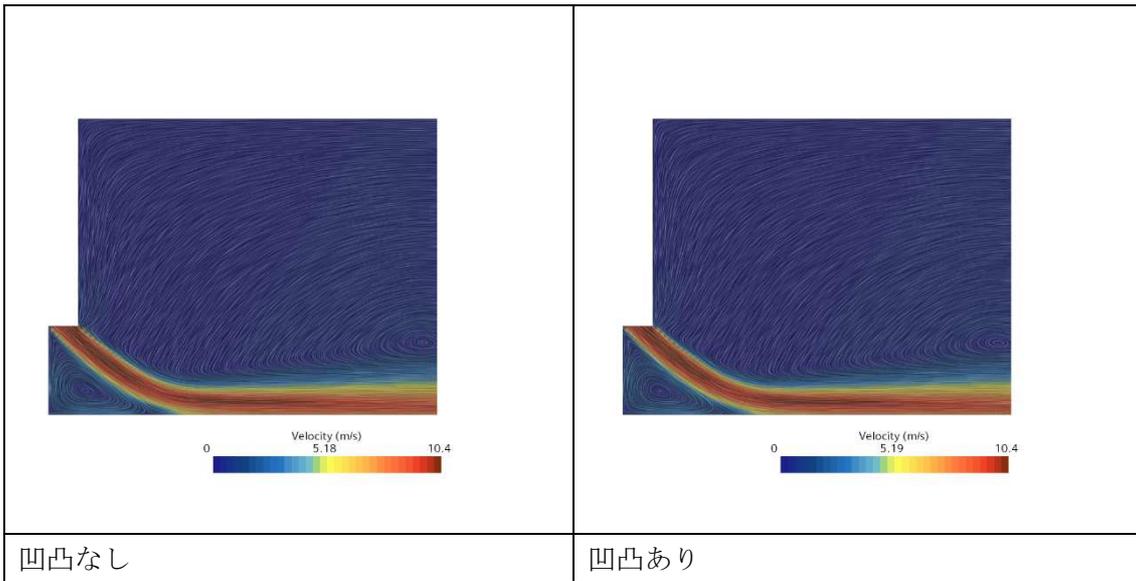


図 4.15 ベクトル図（風向変更、床面に凹凸考慮）

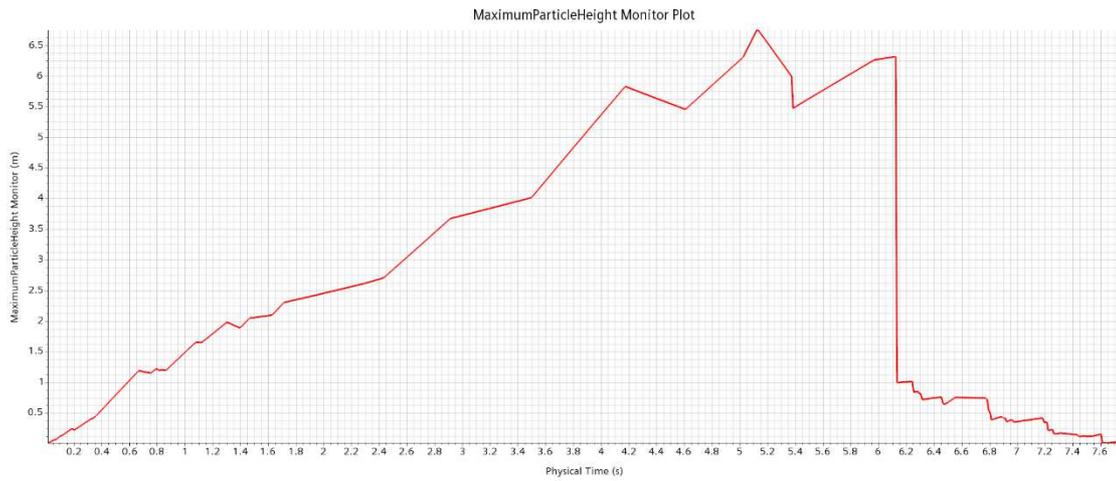


図 4.16 最大粒子高さ（風向変更・凹凸なし）

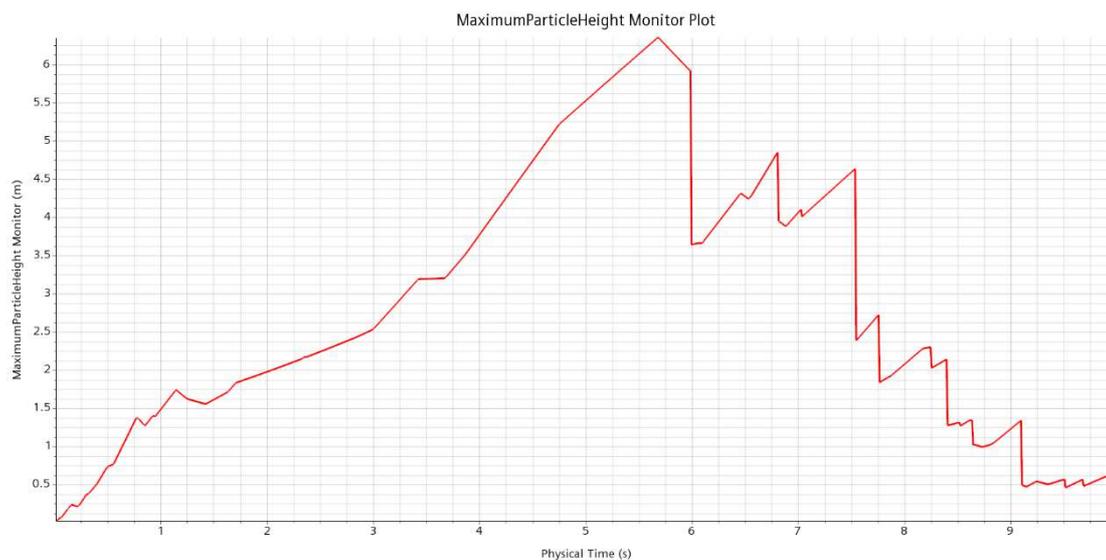


図 4.17 最大粒子高さ（風向変更・凹凸あり）

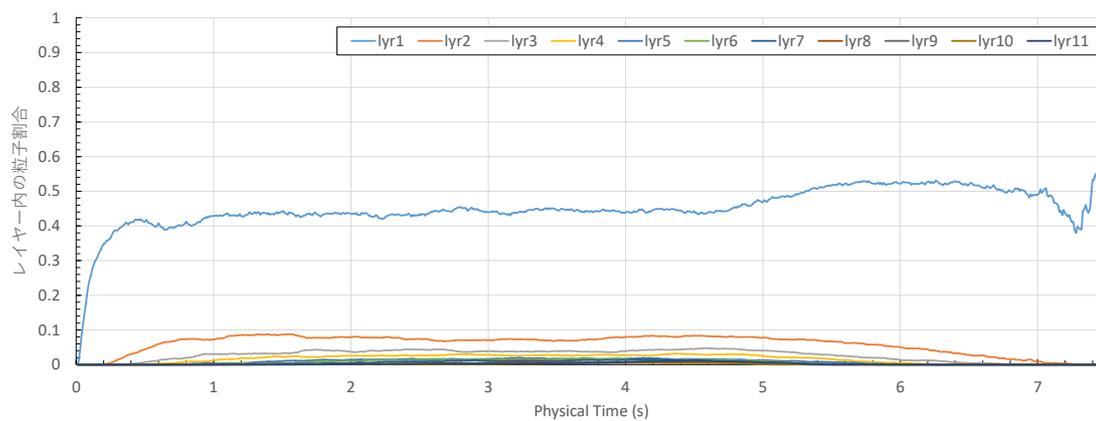


図 4.18 各レイヤーの粒子割合（風向変更・凹凸なし）

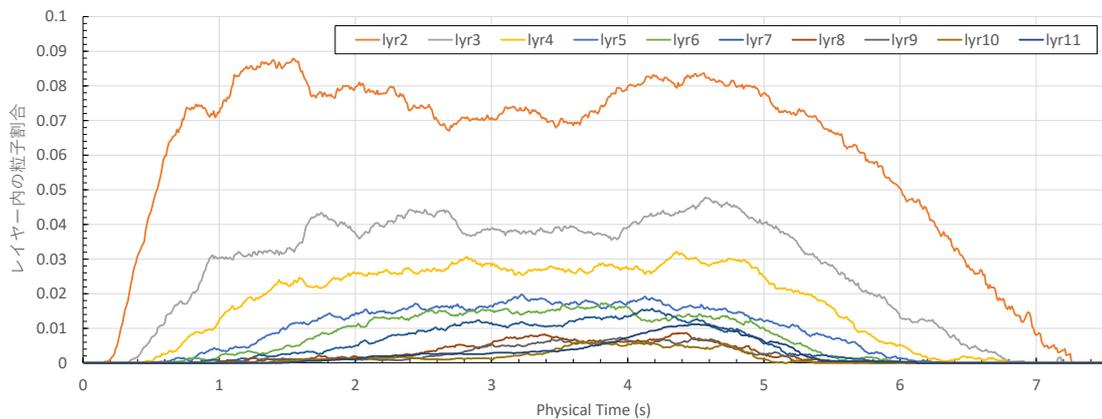


図 4.19 床面から20cm以上に存在する粒子の割合（風向変更・凹凸なし）

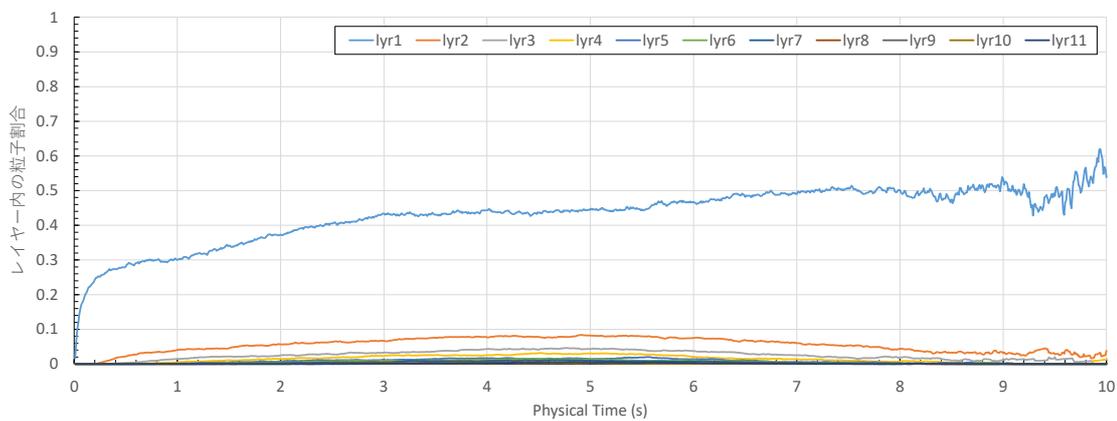


図 4.20 各レイヤーの粒子割合（風向変更・凹凸あり）

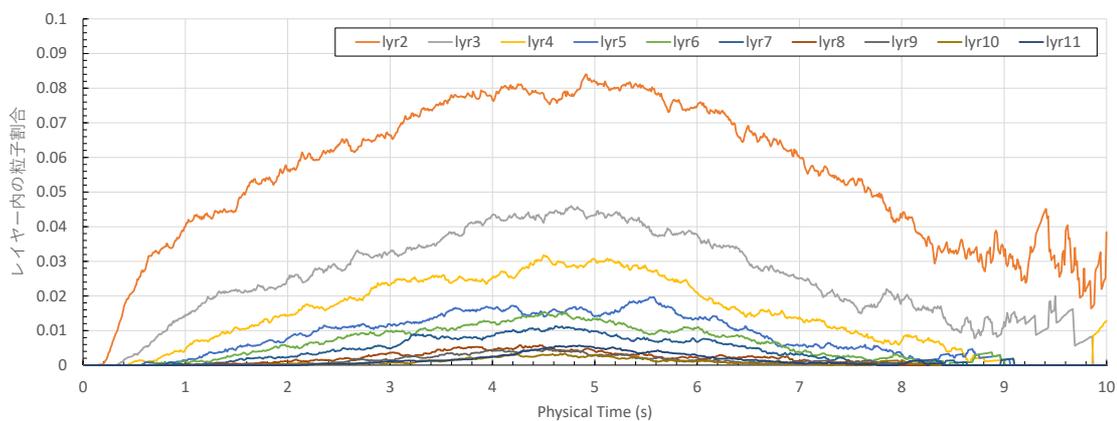


図 4.21 床面から20cm以上に存在する粒子の割合（風向変更・凹凸あり）

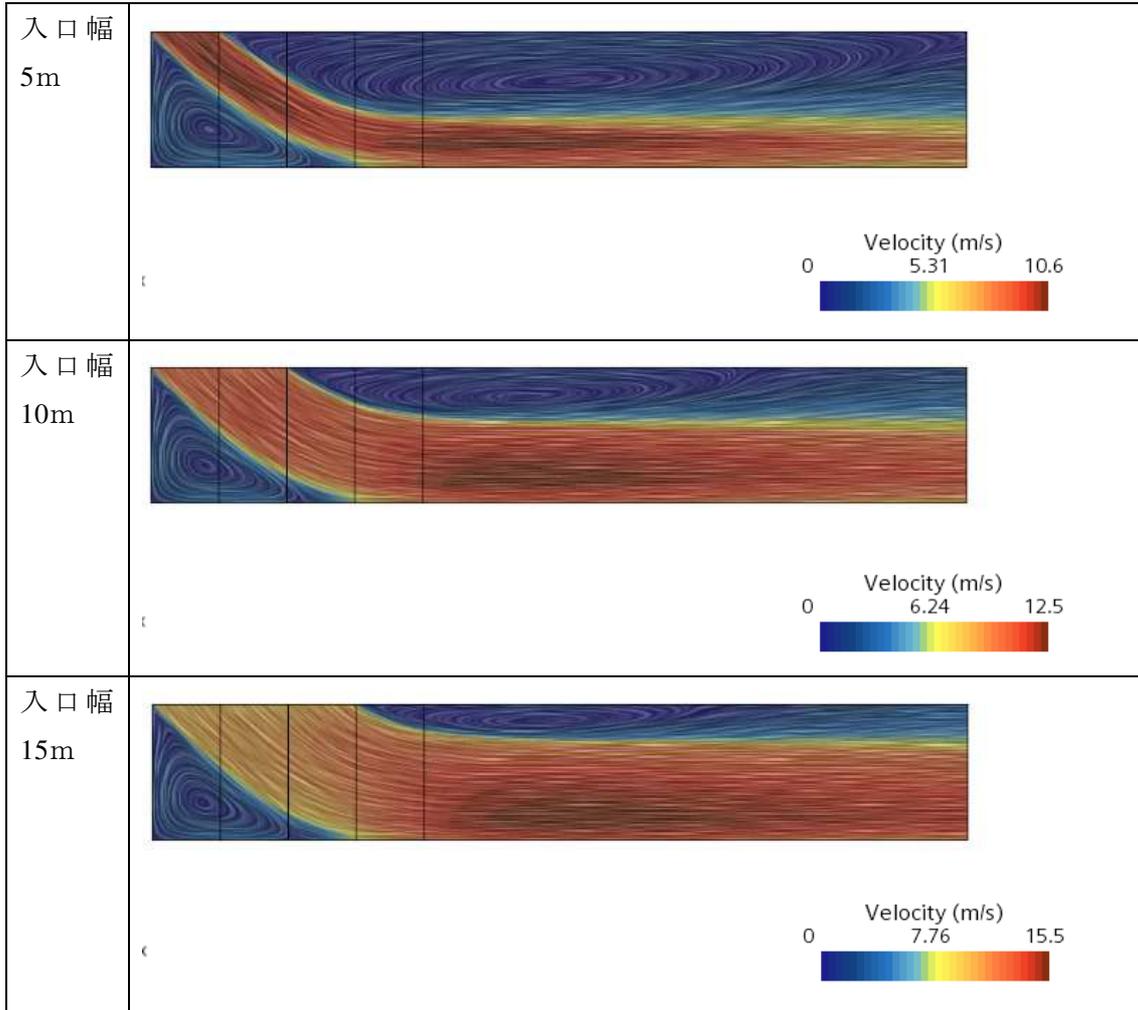


図 4.22 風の流入口幅による流れ場の違い（風向変更・凹凸なし）

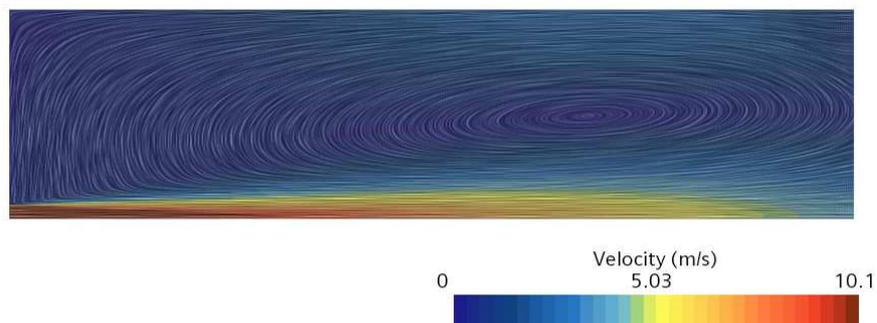


図 4.23 ベクトル図（入口幅変更）

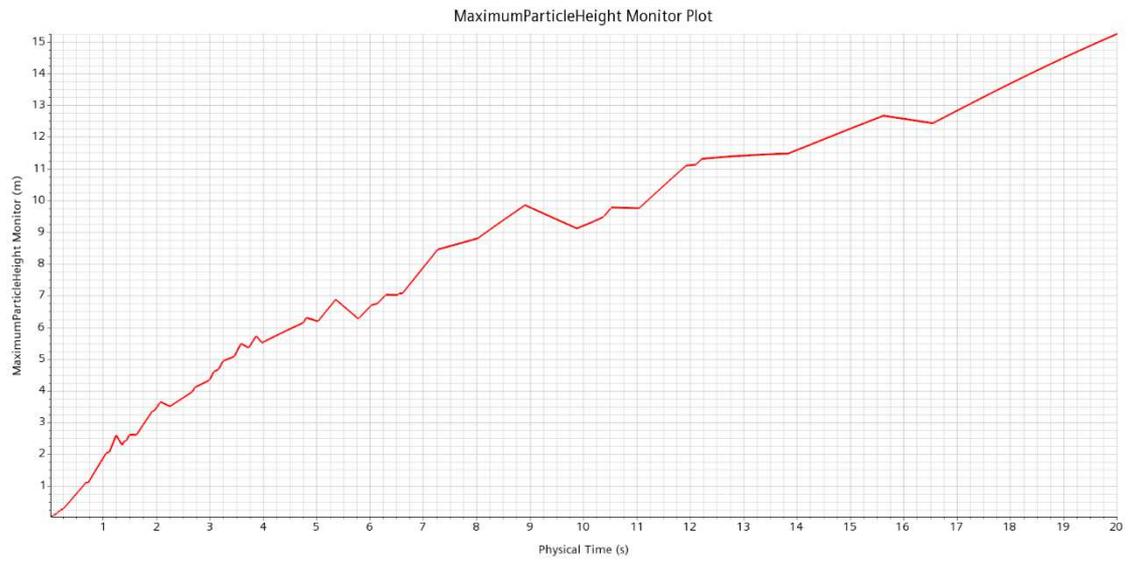


図 4.24 最大粒子高さ (入口幅変更)

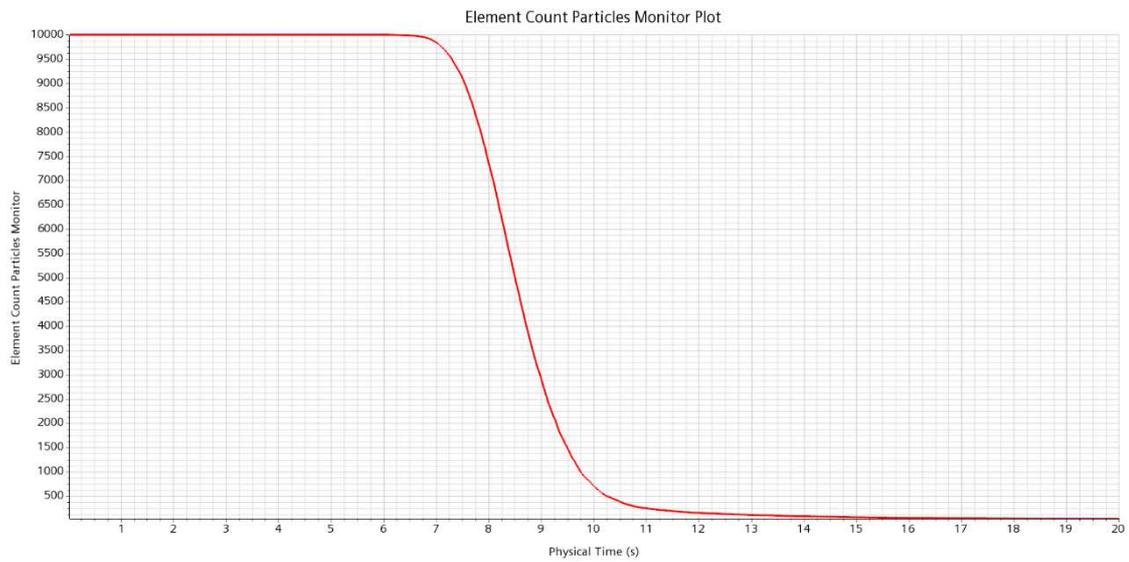


図 4.25 領域内の粒子数 (入口幅変更)

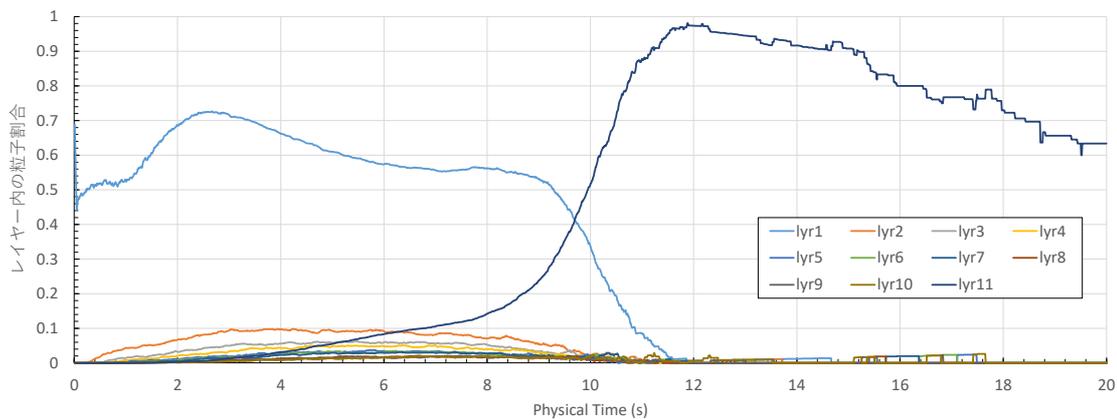


図 4.26 各レイヤーの粒子割合 (入口幅変更)

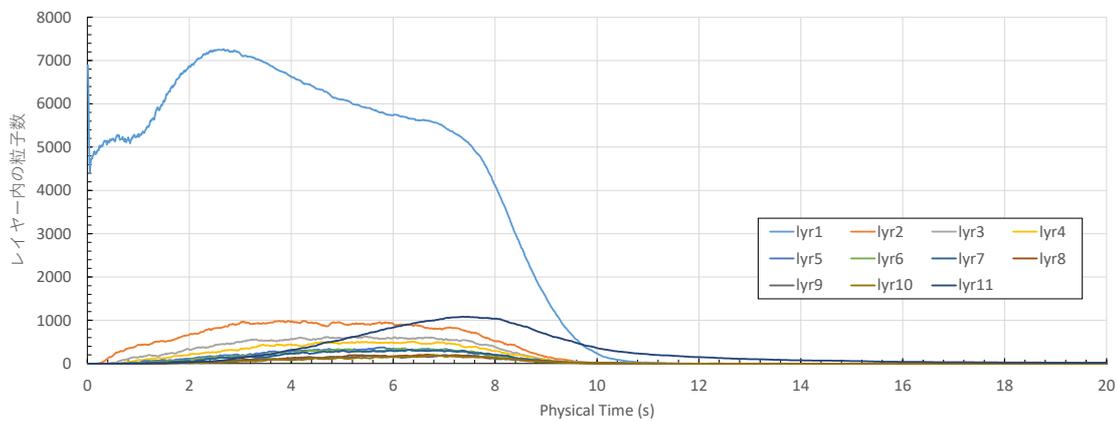


図 4.27 各レイヤーの粒子数 (入口幅変更)

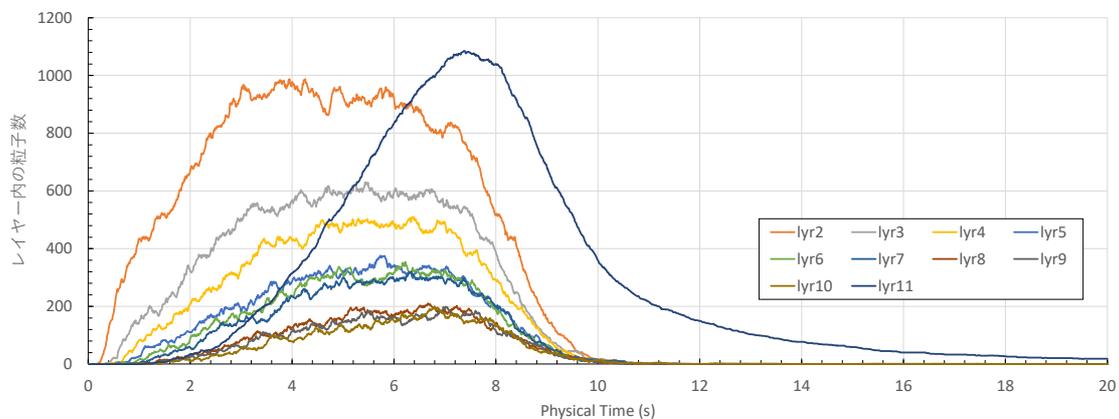


図 4.28 床面から20cm以上に存在する粒子数 (入口幅変更)

4.2. 再浮遊粒子の空間分布に基づく被ばく線量の計算

4.2.1. 概要

大気中の放射性物質による外部被ばくに対し、ICRPではPub.116において2007年勧告に合わせた線量換算係数を整備している(ICRP, 2010)。線源配置は照射ジオメトリにより異なるが、再浮遊粒子濃度のように地表面付近で高く上空に行くにつれて小さくなるという不均一な分布を持つ線源の場合、設定方法により過大評価または過小評価となる可能性がある。そこで本作業では、線源を高さ別にいくつかのブロックに分類し、重イオン粒子計算コードPHITSを用いて、ボクセルファントムにおける各ブロック由来のガンマ線の吸収線量を算出する。図 4.29に線源分布のイメージを示す。

ボクセルファントムは小さな直方体 (0.2 cm×0.2 cm×0.8 cm) の集合から人間の臓器や組織を表現するもので、PHITSによる計算では、各直方体での吸収エネルギーを算出できる。図 4.31にICRP Pub.110に示されたボクセルファントムの模式図を示す(ICRP, 2009)。ICRP110では身体は141のパーツに分けられているが、臓器との対応はICRP110のTableD.1に基づき設定できる。

標準人の実効線量 E は臓器別の吸収線量と表 4.5に示す組織加重係数との積から算出した臓器別の等価線量の

男女平均値の和から求められる。図 4.33に性の平均化の計算フローを示す。

$$H_T = \sum_R W_R D_{T,R} \quad (4.16)$$

$$E = \sum_T w_T H_T \quad (4.17)$$

H_T : 組織Tの等価線量 (Gy)

W_R : 放射線加重係数 (光子 (ガンマ線を含む) の場合は1)

$D_{R,T}$: 放射線のタイプRによる、特定の臓器・組織Tの体積中の平均吸収線量 (J kg^{-1})

w_T : 組織Tの組織加重係数 ($\sum_T w_T = 1$)

なお、赤色骨髄と骨内膜で同一のボクセルを指定している場合、吸収線量は重量比に応じて分配する。黄色骨髄は表 4.5の対象組織外のため考慮していない。表 4.6に骨組織の重量の一覧を示す。

4.2.2. 計算条件

再浮遊核種による外部被ばくは、大気中に浮遊する放射性物質からのクラウドシャイン

によって生じることから、被ばく経路はクラウドシャインを対象とする。PHITSによる計算体系を以下に示す。計算領域は地表面に水平な22 m×22 mの領域で、高さは地下約1.9 m、地上から約10 mとした。鉛直方向には約1 m深さの土壌を仮定している。計算領域中央にはファントムの大きさに等しいタリーをセットした。計算領域の模式図を図 4.30に示す。

線源は20 m×20 mの平面に、地表面（水平方向の領域全体）に対して20 cmごとに10層、2 m以上を1層として計11層を設定した。線源内の放射エネルギーは一律とする。各層の線源に対してそれぞれ単位放射エネルギーに対する輸送計算を行い、各臓器の吸収線量を算出した。さらに臓器別に組織加重係数を乗じて積算したのち、線源別の換算係数に再浮遊割合を乗じて積算し、再浮遊核種からの実効線量を算出した。地表面における放射エネルギーは1 Bq m²と仮定した。

4.2.3. 計算結果

(1) 標準条件における再浮遊核種由来の被ばく線量

前項の計算結果に基づき、再浮遊核種由来のクラウドシャインによる被ばく線量について計算した。計算の結果、地上1 cm以上に浮遊する粒子割合は最大で64%であり、その時の粒子位置はすべて地上1 cm～20 cmの間にあった。ボクセルフアントムのうち、被ばくに対する感度が高い部分は体躯に位置するため、同じ放射能の場合は1 m前後に存在する粒子からの被ばく量が最も高くなる。今回最大浮遊高さは29 cmであることから、先に述べた地上1 cm以上に浮遊する粒子割合が最大となるケース（粒子は地上20cm以下の最下層のみに存在）及び地上20 cm～40 cmの粒子割合が最も高いケース（粒子は最下層と地上20cmから40cmまでの第二層に存在）をケース1およびケース2として線量計算を行った。計算結果を表 4.8に示す。地表面の放射エネルギー1 Bq m⁻²に対する実効線量はケース1で 3.9×10^{-14} mSv s⁻¹、ケース2で 3.3×10^{-14} mSv s⁻¹となった。性別による被ばく線量の差は $1.1 \sim 1.3 \times 10^{-15}$ mSv s⁻¹と小さかった。

地表面の放射エネルギーが福島事故時におけるCs-137の最大土壌沈着量である15 MBq m⁻²（[土壌沈着量の分布と経時変化 | 根拠情報Q&A | JAEA](#)）を仮定した場合、OSCAARの早期被ばくと同様に屋外7日間滞在時の被ばく線量を計算すると、再浮遊粒子由来のクラウドシャインによる被ばく線量はケース1で0.35 mSv、ケース2で0.3 mSvであった。

(2) 地表面条件及び風向を変動させた場合における再浮遊核種由来の被ばく線量

前項の風向及び地表面条件変更ケース、風向変更ケース、風速流入幅変更ケースについてそれぞれ被ばく線量を計算した。CFD解析では計算時間を通じて粒子が舞い上がり落下する一連の挙動を追いかけるため、粒子位置について計算時間全体の積算平均値をとった場合、継続的に粒子の舞い上がりが起こる状態と比較した場合には過小評価となる恐れがある。そこで再浮遊粒子による寄与が最大になる条件として、地上1 mm以上にある浮遊粒子数が最大になる時刻における粒子位置に対して被ばく線量の評価を行うこととした。

風向及び地表面条件変更ケースは、前述の再浮遊粒子数が最大になる4.69秒時点での粒子位置に対する評価を行った。計算結果を表 4.9に示す。粒子の浮遊割合は全粒子の7割弱で

あったが、実効線量は地表面の放射エネルギー1 Bq m⁻²に対する実効線量で4.2×10⁻¹⁴ mSv s⁻¹となり、(1)の標準条件の場合の約1.1倍であった。高さ別の寄与を比較すると、図 4.34に示すように飛散粒子の7割は地上20 cm以下であったが、地表面付近の粒子割合に対する被ばく線量への寄与割合が小さく、体幹部のあるレイヤー4～9では、粒子割合に対する被ばく線量への寄与割合が高くなっていた。

風向変更ケースにおける計算結果を表 4.10及び図 4.35に示す。粒子の浮遊割合は7割程度であり、風向及び地表面条件変更ケースと変わらなかった。また被ばく線量についても実効線量で4.4×10⁻¹⁴ mSv s⁻¹と、風向変更ケース、風向及び地表面条件変更ケースでほとんど違いは見られなかった。

入口幅変更ケースにおける計算結果を表 4.11及び図 4.36に示す。他の条件と比べて浮遊粒子割合が高く、注入した全粒子が浮遊していた。また、体幹部のあるレイヤー4～9における粒子割合が高かった。そのため、レイヤー別の実効線量寄与割合をみると、他のケースに比べてレイヤー4～9における寄与率が高くなっていた。実効線量は標準条件の1.6倍であった。(1)と同様にCs-137の地表面放射エネルギーが15 MBq m⁻²と仮定した場合、7日間滞在時の被ばく線量を計算すると、再浮遊粒子由来のクラウドシャインによる被ばく線量は0.6 mSvとなり、粒子の総浮遊割合に比べて大きくなった。

表 4.5 組織加重係数 (ICRP Pub.103)

組織	w _T	∑w _T
赤色骨髓、結腸、肺、胃、乳房、残りの組織 (副腎、胸郭外領域、胆嚢、心臓、腎臓、リンパ節、筋肉、口腔粘膜、膵臓、前立腺、小腸、脾臓、胸腺、子宮・頸部)	0.12	0.72
生殖腺	0.08	0.08
膀胱、食道、肝臓、甲状腺	0.04	0.16
骨表面、脳、唾液腺、皮膚	0.01	0.04
合計	-	1.00

表 4.6 骨組織の構成

Bone	Mass(g)					
	Male			Female		
	Red bone marrow	Yellow bone marrow	Endosteum	Red bone marrow	Yellow bone marrow	Endosteum
Humeri upper half	26.9	76.8	9.6	20.7	59.1	7.3
Humeri lower half	0	73	11.5	0	55	8.5
Ulnae and radii	0	131.8	16.4	0	93	12.1
Wrists and hand bones	0	83.7	12.5	0	47.5	7.1
Clavicles	9.4	18.1	2.5	7.2	13.9	1.9
Cranium	88.9	138	83.4	68.4	106.2	64.2
Femora upper half	78.4	223.8	44.2	60.3	172.1	34.2
Femora lower half	0	344	48.5	0	169.3	24
Tibiae fibulae and patellae	0	516.2	92.4	0	469.9	84.5
Ankles and foot bones	0	304.6	42.2	0	176.2	24.4
Mandible	9.4	14.5	2	7.2	11.2	1.6
Pelvis (os coxae)	205.2	211.5	51.7	157.5	162.3	39.7
Ribs	188.7	77	29.8	144.9	59.1	22.9
Scapulae	32.8	50.9	9.8	25.2	39.1	7.6
Cervical spine	45.6	18.6	11.5	35.1	14.3	8.8
Thoracic spine	188.7	77	26.9	144.9	59.1	20.6
Lumbar spine	143.9	58.7	23.4	110.7	45.1	18
Sacrum	115.8	47.2	20.6	89.1	36.3	15.8
Sternum	36.3	14.8	5.5	27.9	11.4	4.3
Total	1170	2480.2	544.4	899.1	1800.1	407.5

※ICRP110 Table4.2

表 4.7 解析レイヤー設定

レイヤーNo.	高さ範囲 (地上から) (cm)
1	1-20
2	21-40
3	41-60
4	61-80
5	81-100
6	101-120
7	121-140
8	140-160
9	161-180
10	181-200
11	200-

表 4.8 実効線量 (標準条件)

ケース	粒子割合			ファントム 区分	実効線量 [mSv]	備考
	レイヤー1	レイヤー2	レイヤー3 以上			
1	0.64	0.00	0.00	男性	3.8E-14	地上 1cm 以上に存在する粒子割合が最大
				女性	3.9E-14	
				平均	3.9E-14	
2	0.54	0.10	0.00	男性	3.3E-14	粒子高さが最高となる層での粒子割合が最大
				女性	3.4E-14	
				平均	3.3E-14	

表 4.9 被ばく線量解析結果（風向及び地表面条件変更ケース）

	粒子割合	粒子割合（飛散 粒子のみ）	実効線量[mSv]			実効線量寄 与割合
			男性	女性	平均	
レイヤー1	0.444	0.679	2.6E-14	2.7E-14	2.7E-14	0.637
レイヤー2	0.079	0.120	5.0E-15	5.2E-15	5.1E-15	0.121
レイヤー3	0.044	0.067	2.8E-15	3.2E-15	3.0E-15	0.070
レイヤー4	0.030	0.046	2.3E-15	2.4E-15	2.4E-15	0.056
レイヤー5	0.015	0.023	1.3E-15	1.4E-15	1.3E-15	0.032
レイヤー6	0.015	0.023	1.4E-15	1.5E-15	1.4E-15	0.034
レイヤー7	0.011	0.017	1.0E-15	1.1E-15	1.1E-15	0.025
レイヤー8	0.004	0.006	3.7E-16	3.7E-16	3.7E-16	0.009
レイヤー9	0.004	0.006	3.4E-16	3.4E-16	3.4E-16	0.008
レイヤー10	0.003	0.005	2.3E-16	2.4E-16	2.4E-16	0.006
レイヤー11	0.005	0.008	1.4E-16	1.4E-16	1.4E-16	0.003
合計	0.654	1.000	4.1E-14	4.3E-14	4.2E-14	1.000

表 4.10 被ばく線量解析結果（風向変更ケース）

	粒子割合	粒子割合（飛散 粒子のみ）	実効線量[mSv]			実効線量寄 与割合
			男性	女性	平均	
レイヤー1	0.450	0.665	2.7E-14	2.8E-14	2.7E-14	0.624
レイヤー2	0.081	0.120	5.2E-15	5.4E-15	5.3E-15	0.121
レイヤー3	0.044	0.065	2.8E-15	3.2E-15	3.0E-15	0.069
レイヤー4	0.029	0.043	2.2E-15	2.3E-15	2.3E-15	0.052
レイヤー5	0.017	0.025	1.4E-15	1.5E-15	1.5E-15	0.034
レイヤー6	0.013	0.019	1.2E-15	1.3E-15	1.2E-15	0.028
レイヤー7	0.014	0.021	1.4E-15	1.4E-15	1.4E-15	0.032
レイヤー8	0.007	0.010	6.3E-16	6.3E-16	6.3E-16	0.014
レイヤー9	0.007	0.010	5.5E-16	5.5E-16	5.5E-16	0.013
レイヤー10	0.004	0.007	3.2E-16	3.2E-16	3.2E-16	0.007
レイヤー11	0.010	0.015	2.7E-16	2.7E-16	2.7E-16	0.006
合計	0.676	1.000	4.3E-14	4.5E-14	4.4E-14	1.000

表 4.11 被ばく線量解析結果（風速流入幅変更ケース）

	粒子割合	粒子割合（飛散 粒子のみ）	実効線量[mSv]			実効線量寄 与割合
			男性	女性	平均	
レイヤー1	0.637	0.637	3.5E-14	3.6E-14	3.5E-14	0.551
レイヤー2	0.094	0.094	6.1E-15	6.3E-15	6.2E-15	0.098
レイヤー3	0.055	0.055	3.6E-15	4.1E-15	3.8E-15	0.060
レイヤー4	0.048	0.048	3.7E-15	3.9E-15	3.8E-15	0.060
レイヤー5	0.031	0.031	3.2E-15	3.4E-15	3.3E-15	0.051
レイヤー6	0.030	0.030	2.7E-15	2.8E-15	2.8E-15	0.043
レイヤー7	0.025	0.025	2.7E-15	2.8E-15	2.8E-15	0.043
レイヤー8	0.013	0.013	1.6E-15	1.6E-15	1.6E-15	0.025
レイヤー9	0.014	0.014	1.3E-15	1.3E-15	1.3E-15	0.021
レイヤー10	0.012	0.012	1.0E-15	1.0E-15	1.0E-15	0.016
レイヤー11	0.041	0.041	2.0E-15	2.0E-15	2.0E-15	0.032
合計	1.000	1.000	6.3E-14	6.5E-14	6.4E-14	1.000

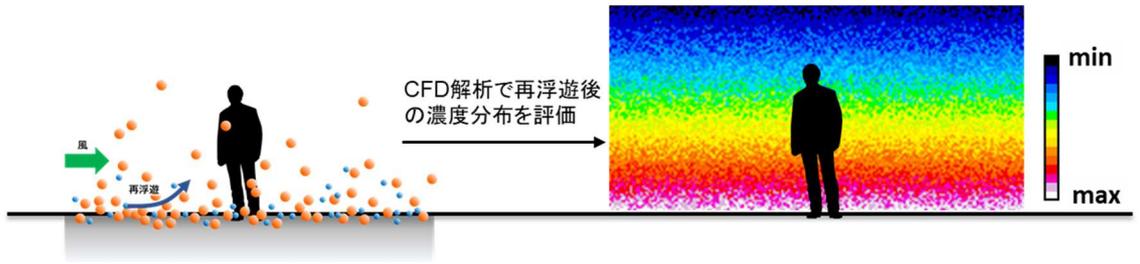
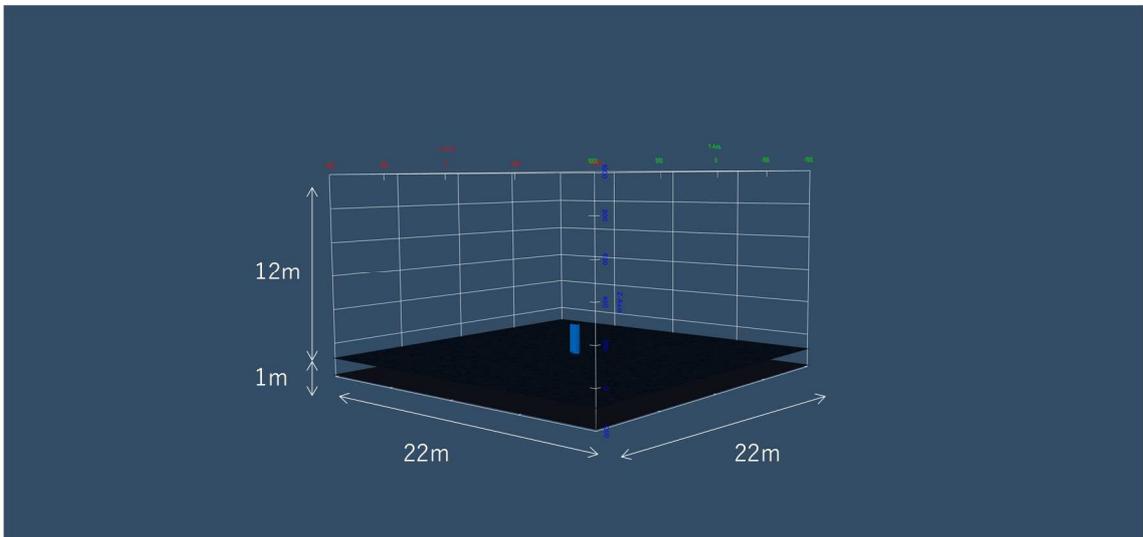


図 4.29 解析イメージ



※青い部分が線源領域

図 4.30 計算領域

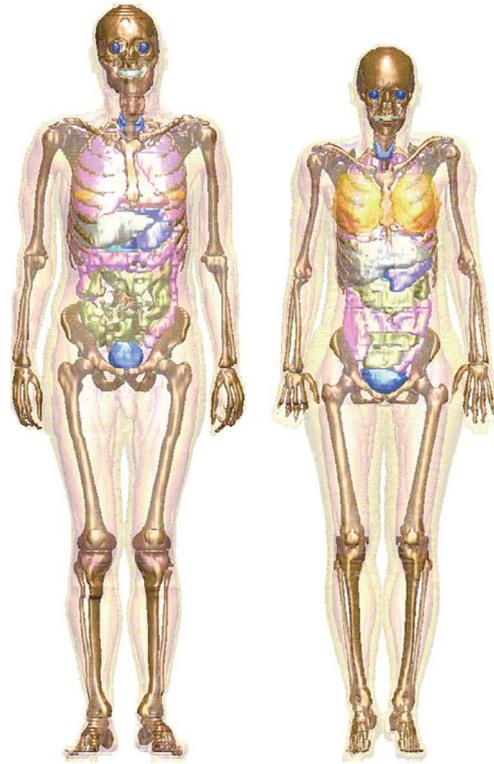


図 4.31 ICRP/ICRU標準コンピュータファントムの成人の男性（左）と女性（右）
(ICRP Pub.116(2015))

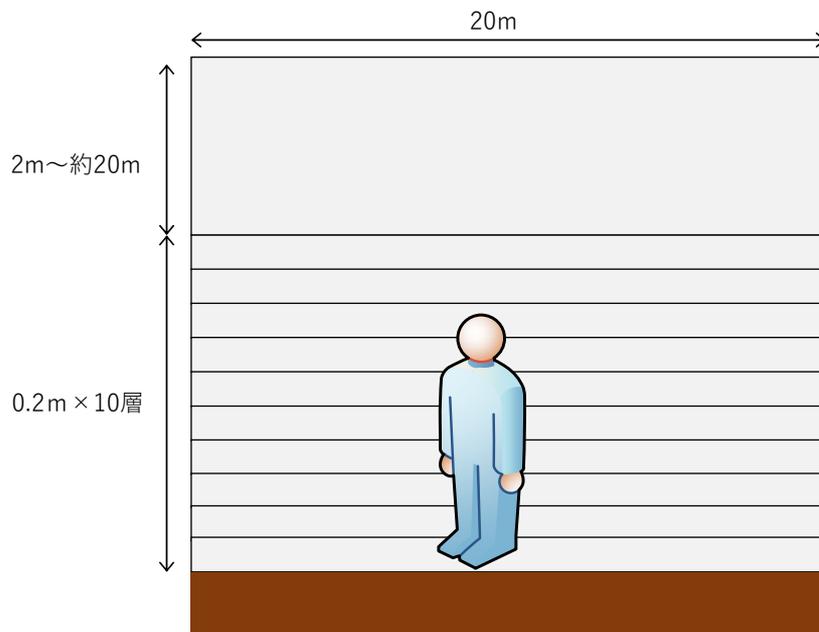


図 4.32 計算体系

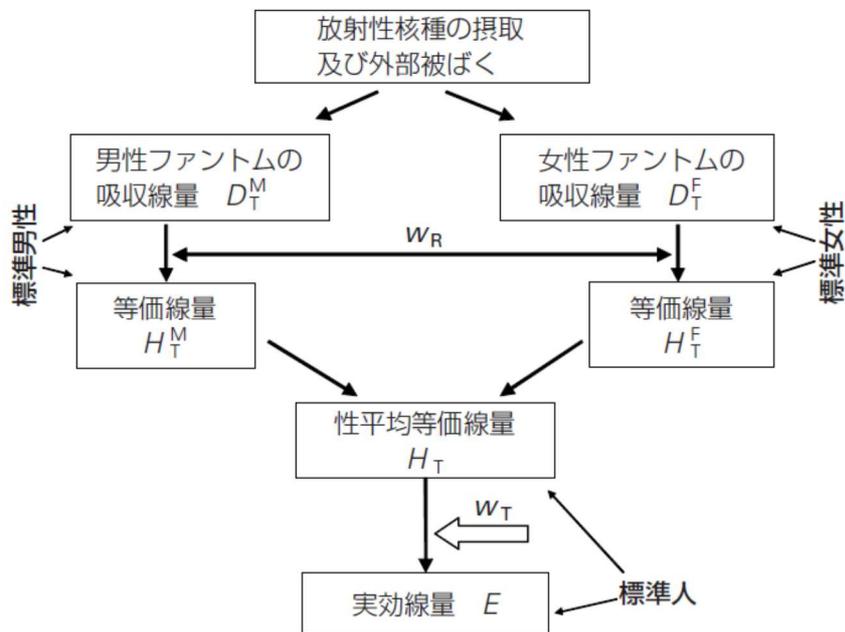


図 4.33 実効線量を求めるための性の平均化 (ICRP. Pub103)

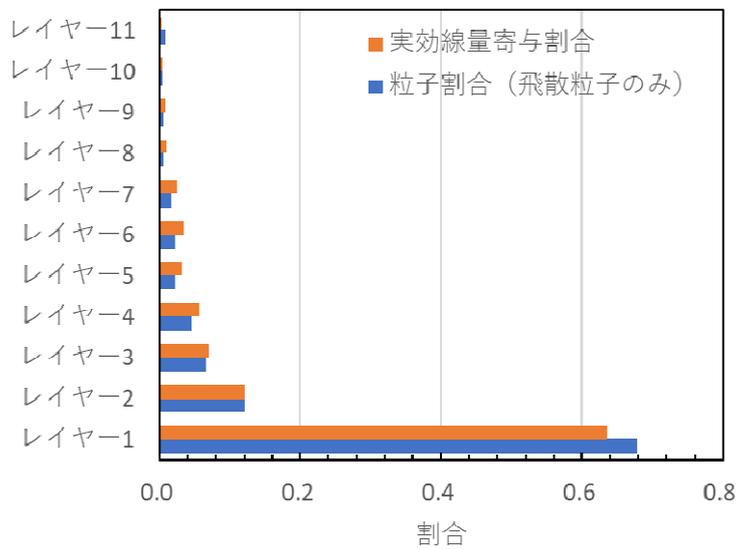


図 4.34 高さ別粒子割合及び線量寄与割合 (風向変更及び地表面条件変更ケース)

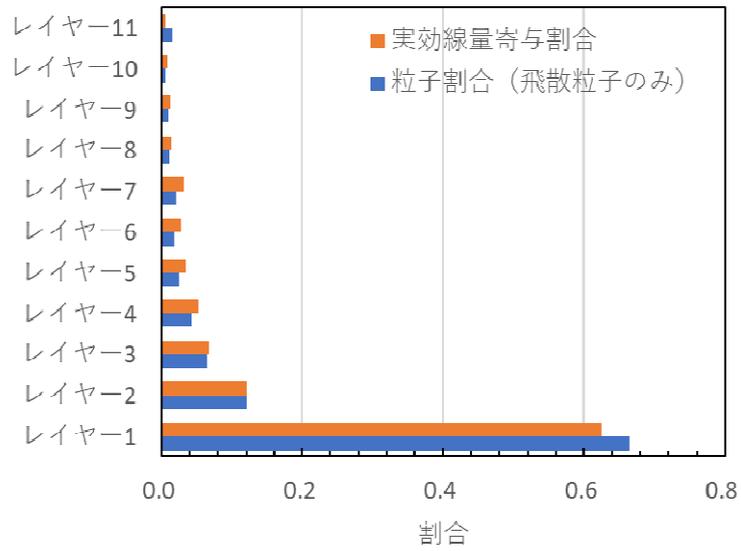


図 4.35 高さ別粒子割合及び線量寄与割合 (風向変更ケース)

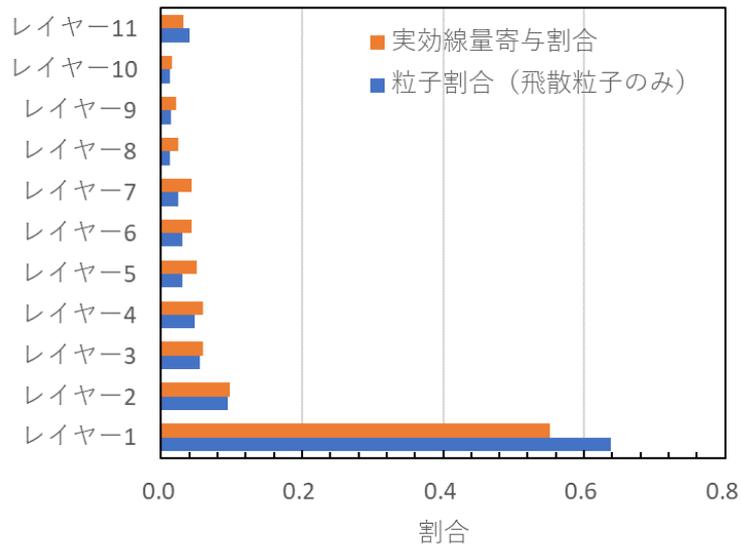


図 4.36 高さ別粒子割合及び線量寄与割合 (風速流入幅変更ケース)

第4章の参考文献

- Dorrian, M.-D., 1997. Particle Size Distributions of Radioactive Aerosols in the Environment. *Radiat Prot Dosimetry* 69, 117–132. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a031892>
- Hudson, N., 1973. *Soil conservation*. 2nd ed. Cornell University Press, Ihtaca.
- ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. *Ann. ICRP* 37 (2-4)
- ICRP, 2009. Adult Reference Computational Phantoms. ICRP Publication 110. *Ann. ICRP* 39 (2).
- ICRP, 2010. Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures. ICRP Publication 116, *Ann. ICRP* 40(2-5).
- Kaneyasu, N., Ohashi, H., Suzuki, F., Okuda, T., Ikemori, F., Akata, N., Kogure, T., 2017. Weak size dependence of resuspended radiocesium adsorbed on soil particles collected after the Fukushima nuclear accident. *Journal of Environmental Radioactivity* 172, 122–129. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.03.001>
- Sato, T., Iwamoto, Y., Hashimoto, S., Ogawa, T., Furuta, T., Abe, S., Kai, T., Tsai, P.-E., Matsuda, N., Iwase, H., Shigyo, N., Sihver, L., Niita, K., 2018. Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.02. *Journal of Nuclear Science and Technology*.
- Shao, Y., Lu, H., 2000. A simple expression for wind erosion threshold friction velocity. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 105, 22437–22443.
- US Environmental Protection Agency, 2018. Federal Guidance Report No. 15: External Exposure to Radionuclides in Air, Water and Soil. (No. 402- R-19– 002).
- Zankl, M., 2010. Adult Male and Female Reference Computational Phantoms (ICRP Publication 110). *Jpn. J. Health Phys.* 45, 357–369. <https://doi.org/10.5453/jhps.45.357>
- 鮑本一裕, 2014. 粒子状放射性物質の再浮遊と移流による 2 次汚染. *保健物理* 49, 17–28. <https://doi.org/10.5453/jhps.49.17>
- 気象庁, 2016. 気象観測統計の解説 平成 28 年改正.
気象庁,過去の気象データ・ダウンロード. URL
<http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php> (accessed 6.13.18).
- 吉崎真司, 2005. 乾燥・半乾燥地域における風食のメカニズムと治砂緑化法. *武蔵工業大学環境情報学部紀要* 113-122.
- 増田弘昭, 1997. 粉体粒子の付着力・凝集力. *電子写真学会誌* 36, 169-174. <https://doi.org/10.11370/isjepj.36.169>
- 土壌沈着量の分布と経時変化 | 根拠情報 Q&A | JAEA, URL
https://fukushima.jaea.go.jp/QA/q1-2_lv3.html (accessed 2.8.22).
- 山口紀子, 江口定夫, 林健太郎, 藤原英司, 塚田祥文, 2015. 農業環境技術研究所畑圃場における農作業に伴い巻き上がる土壌粒子に含まれる放射性物質. *農業環境技術研究所報告* 33-41.

5. データの整備

第5章では、放射線健康影響のうち確率的影響に関するパラメータ調査及び避難モデルの改良に伴うパラメータ調査の結果について記載する。以下、5.1では、確率的影響に関するパラメータ調査について、また、5.2では避難モデルの改良に伴うパラメータ調査の結果について記載する。

5.1. 確率的影響に関するパラメータの調査

5.1節では、原子力災害の中長期対策も含めた防護措置等の効果等に係る分析を実施するため、被ばくによるがん罹患及び死亡リスクなどの確率的影響に関するパラメータについて、原爆被ばく者に関する寿命調査等の文献調査結果及びがんリスク評価モデルの入力パラメータへの反映に必要な作業について記載する。

5.1.1. 原爆被爆者の追跡調査の文献レビュー

令和3年度は、広島及び長崎の原爆による被爆者の生涯追跡調査（Life Span Study, LSS）を対象とした。これは、公益財団法人放射線影響研究所が主体となり1950年より実施されているものであり、調査結果に基づいて被ばくによるがん死亡リスク等の推定が行われており、その結果は継続的に論文報告がなされている。最新報告は、小笹ら（Ozasa et al., 2012）による14番目の報告である（以下、LSS14と記す）。この論文及び関連論文の調査を実施した。

(1) LSS14 の概要

1) 追跡調査対象者

小笹ら（Ozasa et al., 2012）によると、LSSコホート調査及び対象者は以下の通りである。追跡調査は1950年10月1日に開始され、1950年の国勢調査、原爆被爆に関する補足質問票、1950年と1951年に原爆投下委員会（ABCC）によって実施された調査に加えて 広島と長崎でそれぞれ1953年と1950年に実施された居住者調査に基づいて戸籍登録されていた人々が選ばれた。選ばれた対象者は、原爆の爆心地から2.5 km以内にいた原爆被爆者の大部分と、爆心地から2.5～10kmの年齢と性別が確認された人々が含まれている。最終的な対象者数は120,321名（広島で82,214名、長崎で38,107名）であった。最終的な被験者数120,321名の中で、123人の被験者は、誤認または情報が不十分であるため、分析から除外された。なお、LSSの7番目の報告までは、広島、長崎に戸籍登録されているものの、原爆投下時に両都市に居なかった（Not in the cities, NIC）約26,000人も含まれていたが、LSSレポート8以降では、NICグループを放射線リスクの分析から除外している。

2) 追跡調査対象者の死因の分類

LSS追跡調査対象者のがん及びその他死因は、国際的に統一された基準で分類された死因や疫病の分類である国際疾病分類（International Statistical classification of Diseases and

related Health Problems, ICD) が用いられている。最新版は第11版である (WHO)。LSS調査が開始された1950年時点の第7版から第10版に従い、放射線影響研究所の前身である原爆傷害調査委員会(Atomic Bomb Casualty Commission, ABCC) 及び公益財団法人 放射線影響研究所(Radiation Effects Research Foundation, RERF)により分類された。疾患カテゴリー、対応するICD番号、および該当する年のリストを表 5.1に示す。

表 5.1 LSS被験者のがん及び死因の分類とICDコードとの対応関係(Ozasa et al.,2012)

Edition of International Classification of Disease(ICD) and applicable years				
	ICD-7 1950-1968	ICD-8 1969-1978	ICD-9 1979-1997	ICD-10 1998-2003
Neoplasm	140-205,210-239,251	140-239	140-239	C00-C97
All Solid cancer	140-199	140-199	140-199	C00-C80
Esophagus	150	150	150	C15
Stomach	151	151	151	C16
Colon	153	153	153	C18
Rectum	154	154	154	C19-C20
Liver	155(0,8),156	155, 197.8	155(0,1,2)	C22(0-4,7,9)
Gallbladder	155.1	156	156	C23,C24
Pancreas	157	157	157	C25
Other digestive system	158,159	158,159	158,159	C26,C48
Lung	162(0,1,8),163	162	162	C33,C34
Breast	170	174	174, 175	C50
Uterus	171,172,174	180, 182.0, 182(9)	179-180, 182	C53, C54, C55.9
Ovary	175	183	183	C56, C57(0, 1, 2, 3, 4)
Prostate	177	185	185	C61
Bladder	181	188	188	C67
Kidney parenchyma	180	189	189	C64
Renal pelvis, other urinary tract	180	189	189	C65, C66
Other solid cancer	Others in 140-199	Others in 140-199	Others in 140-199	Other in C00-C80 C91(0-3,5,7,9), C92(0-5,7,9)
Leukemia	204	204-207	204-208	C93,C94(0-3,7),C95
Malignant lymphoma	200-202,205	200-202	200-202	C81-C85, C91.4, C96
Multiple myeloma	203	203	203	C88,(7-9),C90
Other neoplasms	210-239	208, 210-239	210-239	C94.4, D00-D48, Q85.0
Non-neoplastic diseases				
Blood diseases	290-299,468(0,1,2)	209, 280-289	280-289	D50-D75, D77, C94.5
Circulatory diseases	330-334,400-467,468.3	390-458	390-459	I00-I99, G45, M30
Respiratory diseases	240-241,470-527	460-519	460-519	J00-J64, J66-J99, R09.1
Pneumonia and influenza	480-493	470-486	480-487	J10-J18
Digestive disease	530-587	520-571	520-571	K00-K92
Liver cirrhosis	581	571	571	K70, K73, K74
Genitourinary disease (*additioanl for female)	590-617,620-637	580-607,610-629*	580-607,610-629*	N00-N50, N60-N98*
Infectious Disease	001-138	000-136	001-139	A00-A32, A35-B99, D86, J65, M35.2
External causes	N800-N999	N800-N999	800-999	S00-T98

白血病に関しては、LSSの結果に基づいてRichardsonら (Richardson, et al., 2009)、Hsuら (Hsu et al., 2013) による分析が行われている。彼らは、白血病を、急性リンパ性白血病、急性骨髄性白血病、慢性骨髄性白血病、慢性リンパ性白血病及び成人T細胞白血病の5種類に分類しており、各分類に対するリスクの分析が行われている。なお、すべての白血病を包含した分析も実施されているが、これはRichardsonらとHsuらで分類方法が異なっており、

Richardsonらの分析では、すべてのタイプ（原文：All Types）としていたが、Hsuらの分析では、慢性リンパ性白血病と成人T細胞白血病以外の白血病（原文：Leukemia other than CLL or ATL）としている。分析に使用された白血病の分類を以下の表 5.2に示す。

表 5.2 LSSにおける白血病の分類
(Richardson, et al., 2009, Hsu et al., 2013)

白血病の分類	英語名称()内は略称
急性リンパ性白血病	Acute lymphocytic leukemia(ALL)
急性骨髄性白血病	Acute myeloid leukemia(AML)
慢性骨髄性白血病	Chronic myeloid leukemia (CML)
慢性リンパ性白血病	Chronic lymphocytic leukemia (CLL)
成人T細胞白血病	Adult T-cell leukemia

*慢性リンパ性白血病は、Richardsonらによる分析は実施されていない。

3) LSS13との相違点

LSSでは、原爆被爆者の被ばく線量の推定結果と生存者の追跡調査結果に基づいて、単位線量当たりの過剰相対リスク及び過剰絶対リスクの推定が行われてきている。最新のLSS14(Ozasa,2012)では、1950年から2003年時点の生存者に対する情報に基づいた評価結果が示されている。LSS14で採用されている被ばく線量推定手法は、2003年3月に導入された2002年線量推定方式（DS02 dosimetry system）と呼ばれるものである（Preston et al., 2004）。一方、直前のLSS13では、1986年に導入された線量推定システム（以下、DS86）に基づいてリスク推定が行われていたが、DS86は広島において中性子による放射化物の測定値と合わない問題点が指摘されていた（Preston et al., 2004）。DS02では、DS86が持つこのような問題点が改善されている。DS86からDS02への主な変更点は、Prestonら(Preston et al., 2004)が示している。概略は次のようである。

- ・ 広島原爆の爆発点高さの推定値を、DS86の580mから600mへの変更。長崎原爆の爆発点推定値は、DS86で使用された503mで変更なしであった。
- ・ 広島原爆の規模の推定値を、DS86で使用された15キロトンから16キロトンへ変更された。長崎原爆の規模は21キロトンで変更なしであった。
- ・ 長崎の原爆により放出された放射線量の推定値の変更
- ・ 放射線輸送計算のため反応断面積データライブラリ及び空気中のフルエンスの計算のためのエネルギー群構造の更新、カーマや線量を計算するための新しい加重係数の導入。
- ・ DS86では考慮されていなかった、家屋内の遮蔽効果や丘や山などの地形の影響を新

たに考慮することとした。

DS02線量評価方式を用いて、被ばく線量が推定された生存者は合計86,611名であった(Ozasa et al.,2012)。DS02線量推定方式を用いた原爆被爆者の被ばく線量推定値を表 5.3に示す。

表 5.3 DS02線量評価方式に基づいた対象者の結腸線量推定値の分布(Ozasa et al, 2012)

重み付き結腸線量	広島	長崎	合計
0.005Gy未満	21,697	16,812	38,509
0.005Gy以上0.1Gy未満	22,733	7,228	29,961
0.1Gy以上0.2Gy未満	5,037	937	5,974
0.2Gy以上0.5Gy未満	5,067	1,289	6,356
0.5Gy以上1.0Gy未満	2,373	1,051	3,424
1.0Gy以上2.0Gy未満	1,152	611	1,763
2.0Gy以上	453	189	624
上記合計	58,494	28,117	86,611
不明	3,442	3,616	7,058
NIC*	20,179	6,350	26,521
合計	82,214	38,107	120,321

* 戸籍に登録されているが、原爆投下時点で広島、長崎にいなかった人

DS02線量評価方式を採用したことにより、中性子による被ばく線量推定値は下がったものの、広島、長崎両方でγ線による被ばく線量推定値が最大で約10%増加したため、放射線被ばくによる過剰リスクの推定値はDS86線量評価方式を使用した評価よりもわずかに低くなった(Ozasa et al., 2012)。DS86線量評価方式とDS02線量評価方式を使用した場合の固形がんのERR, EAR推定値の違いをPresonが示している(Preston,2004)。表 5.4に示す。

表 5.4 固形がんに対するリスク推定値の比較(Preston et al.,2004)

		DS02 線量評価方式に 基づいたリスク推定			DS86 線量評価方式に 基づいたリスク推定		
		推定値	90%信頼区間		推定値	90%信頼区間	
			下限値	上限値		下限値	上限値
ERR per Sv	男性	0.29	0.21	0.39	0.32	0.23	0.42
	女性	0.55	0.42	0.68	0.59	0.45	0.73
	男女平均	0.42	0.33	0.51	0.45	0.36	0.55
EAR per 1.0E4 PYSv	男性	25.8	18	34	27.7	19	37
	女性	28.1	23	34	30.1	24	36
	男女平均	26.9	22	33	28.6	22	34

(2) LSS14におけるがんリスク評価モデル

被ばくによるリスク評価の際は、各がんに対する適切な線量反応関係モデルを選定することが必要である。LSSを始めとする放射線によるがん等のリスク評価では、放射線によるがんなどのリスクの増加を表す基本的な指標として、過剰相対リスク及び過剰絶対リスクの2つの指標が用いられる。過剰絶対リスク(Excess Absolute Risk, EAR)は、放射線被ばくによるがんの発生率が自然発生率とは関係なく一定であると仮定した場合の過剰リスクである。過剰相対リスク(Excess Relative Risk, ERR)は、評価対象とする集団で自然に発生するがん数と放射線被ばくにより過剰発生するがん数が一定の比率にあると仮定のもとに推定された過剰リスクである。一般に、放射線被ばくによる過剰リスクを考慮したがんリスクの式は以下のとおりである。

- ・ 過剰絶対リスク(EAR)に基づくがんリスク λ

$$\lambda = \lambda_0 + EAR \quad (5.1.1)$$

- ・ 過剰相対リスク(ERR)に基づくがんリスク λ

$$\lambda = \lambda_0(1 + ERR) \quad (5.1.2)$$

λ_0 : バックグラウンドリスク

EAR及びERRのモデルによる計算は以下の式で算出する。被ばく線量 d に対するリスクに、被ばく時年齢、到達年齢及び性別に関する影響を補正する項を乗じて算出する。

$$ERR \text{ or } EAR = \rho(d) \cdot \varepsilon(e, a, s) \quad (5.1.3)$$

$\rho(d)$: 線量反応関係

$\varepsilon(e, a, s)$: 被ばく時年齢 e 、到達年齢 a 、性別 s に関する補正項

被ばく線量 d に依存する線量反応関係 $\rho(d)$ の候補となる関係式は、LSS14では以下の3種類が挙げられている(Ozasa et al., 2012)。

- ・ 線形式 (L式)

$$\rho(d) = \beta_1 d \quad (5.1.4)$$

- ・ 線形二次式 (LQ式)

$$\rho(d) = \beta_1 d + \beta_2 d^2 \quad (5.1.5)$$

・二次式(Q式)

$$\rho(d) = \beta_2 d^2 \quad (5.1.6)$$

1) すべての固形がん

LSS14の分析で使用された小笹ら各固形がんの内訳と事例数を表 5.5に示す(Ozasa et al.,2012)。表 5.5において、すべての固形がんの事例数と(=10,929)、各がんの合計数(=10,839)は一致しない。「すべての固形がん」の内訳は不明であり数値は論文記載のままである。また、小笹らの分類では乳がんは固形がんに含まれているが、過剰リスクの年齢依存性が他のがんと比較して傾向が異なることが指摘されており(Preston et al., 2007)、別項目に追加の知見を記載した。表 5.5に記載した以外にも、皮膚がん、甲状腺がん及び白血病も被ばくによるがんリスクが大きいと考えられており、Prestonら(Preston et al., 2007)によりリスクの分析が行われている。別項目で記載する。

表 5.5 固形がんの分類とLSSの事例数(Ozasa et al., 2012)

固形がん	事例数
すべての固形がん	10,929
食道がん	339
胃がん	3,125
結腸がん	621
直腸がん	427
肝臓がん	1,519
胆のうがん	419
すい臓がん	513
肺がん	1,558
乳がん	324
子宮がん	547
卵巣がん	157
前立腺がん	130
膀胱がん	183
腎臓実質がん	80
腎盂がん	33
他の固形がん	864

A. 線量反応関係及び補正項

固形がんの線量反応関係に関する検討事例として、小笹ら(Ozasa et al., 2012)は、L式とLQ式を仮定して、すべての固形がんにおける結腸線量に対してERRデータでフィッティングを実施している。全線量範囲ではL式で良くフィットしており、結腸線量 d (Gy) 線量反応関係は $\rho(d)=0.42d$ 、被ばく線量を2Gy以下に制限するとLQ式で良くフィットしており、 $\rho(d)=0.22d+0.18d^2$ で表されるとしている。

B. 過剰リスク算出式

小笹らが示した過剰リスク (EARまたはERR) の算出式は以下の(5.1.7)式である(Ozasa et al., 2012)。なお、数式は論文のままを掲載しているがこの式で計算すると論文掲載値は再現できなかった。被ばく時年齢 e は30歳を基準とした経過年齢、到達年齢 a は70歳を基準とした比で計算すると論文中に示されたプロットが再現できる。

$$\text{ERRまたはEAR}=\rho(d)\cdot\exp(\tau\cdot e+\nu\cdot\ln(a))\cdot(1+\sigma s) \quad (5.1.7)$$

- e : 被ばく時年齢(year)
- a : 到達年齢(year)
- $\rho(d)$: 線量反応関係
- s : 性別(女性=1, 男性=-1)
- τ : 被ばく時年齢の補正係数(-)
- σ : 性別の補正係数(-)
- ν : 到達年齢の補正係数(-)
- d : 被ばく線量

C. ERR,EARのパラメータ

固形がんに対する1Gy当たりのERR、10,000 person year, 1Gy当たりのEARの推定値及び95%信頼区間は、小笹ら (Ozasa et al., 2012)、Prestonら (Preston et al., 2007) により示されている。フィッティングに使用された式は(5.1.7)式である。表 5.6, 表 5.7 (Ozasa et al., 2012) , 表 5.8, 表 5.9, 表 5.10(Preston et al.,2007)に示す。一部数値に妥当性が疑われる点がみられるが論文記載のままである。

表 5.6 固形がんに対する過剰相対リスク(ERR)算出のためのパラメータ(Ozasa et al., 2012)

	ERR/Gyの 男女平均値			ERR/Gy比 (女性/男性)			補正係数 被ばく時年齢が 10年増加した時の ERR増加割合(%)*1			ν		
	推定値	95%信頼区間		推定値	95%信頼区間		推定値	95%信頼区間		推定値	95%信頼区間	
		下限値	上限値		下限値	上限値		下限値	上限値		下限値	上限値
すべての固形がん	0.42	0.32	0.53	2.1	1.4	3.1	-29%	-41%	-17%	-0.86	-1.6	-0.06
食道がん	0.60	NA	1.64	4.3	0.54	100 以上	35%	-28%	184%	-3.7	-9.6	1.0
胃がん	0.33	0.17	0.52	3.7	1.3	100 以上	-18%	-47%	20%	-0.74	-2.5	1.2
結腸がん	0.34	0.05	0.74	1.4	0.39	6.6	-3%	-51%	63%	-5.8	-10.4	-2.2
肝臓がん	0.38	0.11	0.62	1.6	0.43	7.9	-8%	-62%	42%	0.02	-2.8	4.2
胆のうがん	0.48	0.12	1.02	0.42	0.001 以下	2.4	-27%	-76%	40%	-1.9	-6.6	7.8
肺がん	0.75	0.51	1.03	2.7	1.3	6.8	-7%	-35%	29%	-0.04	-2.2	2.6
乳がん	0.90	0.30	1.78		-		-45%	-67%	-17%	-0.17	-2.7	2.3
膀胱がん	1.19	0.27	2.65	1.7	0.2	9.0	-2%	-62%	92%	0.49	-3.6	6.1
卵巣がん	0.20	NA	1.30		-		-22%	-96%	218%	-4.1	-33	1.9

*1 :表に掲載されているERR増加割合の値をxとすると、標準モデル式(5.1.7)のτは $\tau = \log(1+x)/10$ で計算する。

表 5.7 固形がんに対する過剰絶対リスク(EAR)算出のためのパラメータ (Ozasa et al., 2012)

	EAR/10 ⁴ PY/Gyの			補正係数								
	男女平均値			EAR比			被ばく時年齢が 10年増加した時の ERR増加割合(%)*1			ν		
	推定値	95%信頼区間 下限値 上限値		推定値	95%信頼区間 下限値 上限値		推定値	95%信頼区間 下限値 上限値		推定値	95%信頼区間 下限値 上限値	
すべての固形がん	26.4	20.3	32.8	1.1	0.80	1.74	-19%	-31%	-7%	3.4	2.7	4.1
胃がん	4.1	2.1	6.7	1.8	0.66	32	18%	-18%	62%	2.0	1.0	3.6
結腸がん	1.6	0.5	3.0	0.98	0.34	4.5	-30%	-58%	2%	3.2	1.3	5.3
肝臓がん	3.4	0.7	5.9	0.69	0.19	NA	-25%	-66%	15%	6.0	3.2	12
肺がん	6.5	4.3	9.0	0.78	0.40	1.8	-16%	-37%	6%	6.2	4.5	8.2
乳がん	2.3	1.0	3.8		-		-51%	-68%	-30%	3.0	1.7	4.7
膀胱がん	1.2	0.3	2.4	0.40	0.0	5.3	-1%	-65%	-80%	7.5	3.1	15

*1: 表に掲載されているERR増加割合の値をxとすると、標準モデル式(5.1.7)のτは $\tau = \log(1+x)/10$ で計算する。

表 5.8 固形がんに対する過剰リスク算出のためのパラメータ (Preston et al., 2007)

モデル	Risk per Gy ^{*1} ()内は90%信頼区間			Risk per Gy比 (女性/男性)	補正係数 被ばく時年齢が 10年増加した時 のERR増加割合 (%) ^{*2}	ν
	男性	女性	性別平均			
	すべての固形がん					
ERR	0.35 (0.28, 0.43)	0.58 (0.43, 0.69)	0.47 (0.40, 0.54)	1.6 (1.31, 2.09)	-17% (-25%, -7%)	-1.65 (-2.1, -1.2)
EAR	43 (33, 55)	60 (51, 69)	52 (43, 60)	1.4 (1.10, 1.79)	-24% (-32%, -16%)	2.38 (1.9, 2.8)
	性別に依存しない固形がん (つまり、乳がん、前立腺がん、生殖器官のがんを除いたもの)					
ERR	0.34 (0.27, 0.42)	0.61 (0.50, 0.73)	0.48 (0.39, 0.56)	1.8 (1.31, 2.09)	-10% (-20%, -1%)	-2.09 (-2.6, -1.5)
EAR	48 (36, 61)	44 (37, 52)	46 (38, 55)	0.9 (0.72, 1.2)	-19% (-29%, -9%)	2.52 (2.0, 3.1)

*1: 被ばく時年齢30歳、到達年齢70歳における値

*2: 表に掲載されているERR増加割合の値をxとすると、標準モデル式(5.1.7)のτは $\tau = \log(1+x)/10$ で計算する。

表 5.9 乳がんを除く固形がんに対する過剰相対リスク算出のためのパラメータ(Preston et al., 2007)

がん 部位	ERR per Gy*1 ()内は90%信頼区間			ERR per Gy比 (女性/男性)	補正係数 ()内は90%信頼区間 被ばく時年齢が 10年増加した時の ERR増加割合(%)*2	
	男性	女性	性別平均		ν	ν
胃がん	0.21 (0.1,0.34)	0.47 (0.29,0.68)	0.32 (0.22,0.47)	2.3 (1.2:4.5)	-13% (-35%,-15%)	-1.5 (-2.7,-0.3)
結腸がん	0.73 (0.38,1.17)	0.34 (0.13,0.63)	0.54 (0.30,0.81)	0.5 (0.17:1.01)	1% (-36%, 45%)	-2.68 (-5.1,0.4)
肝臓がん	0.32 (0.12,0.60)	0.28 (0.05,0.63)	0.30 (0.11,0.55)	0.9 (0.16:2.4)	3% (-37%, 68%)	-2.7 (-5.8,0.5)
肺がん	0.28 (0.12,0.49)	1.33 (0.91,1.8)	0.81 (0.56,1.1)	4.8 (2.6:12)	20% (-7%, 54%)	-1.94 (-3.7, -0.2)
非黒色腫皮膚がん	0.1 (0.002,0.41)	0.23 (0.005,0.75)	0.17 (0.003,0.55)	2.2 (0.93:5.7)	-73% (-85%,-55%)	0.27 (-1.4,1.9)
膀胱がん	0.61 (0.11,1.2)	1.9 (0.79,3.4)	1.23 (0.59,2.1)	3.1 (0.17:1)	-3% (-42%, 56%)	0.33 (-2.8,4.4)
甲状腺がん	0.49 (0.15,1.15)	0.65 (0.27,1.25)	0.57 (0.24,1.1)	1.3 (0.56,3.9)	-31% (-59%, 4%)	-1.5 (-2.9,0.0)
その他のがん	0.75 (0.31,1.33)	1.08 (0.56,1.80)	0.91 (0.50,1.4)	1.5 (0.70,3.3)	-26% (-51%, 4%)	-0.79 (-2.4,1.0)

*1: 被ばく時年齢30歳、到達年齢70歳における値

*2: 表に掲載されているERR増加割合の値を x とすると、標準モデル式(5.1.7)の τ は $\tau = \log(1+x)/10$ で計算する。

表 5.10 乳がんを除く固形がんに対するEAR算出のためのパラメータ(Preston et al., 2007)

がん部位	EAR per 10,000 PY per Gy *1 ()内は90%信頼区間			EAR比 (女性/男性)	補正係数 ()内は90%信頼区間	
	男性	女性	男女平均		被ばく時年齢が 10年増加した時の ERR増加割合(%)*2	ν (到達年齢)
胃がん	9.4 (4.4, 16)	9.7 (6.4, 14)	9.5 (6.1, 14)	1.0 (0.5, 2.1)	-2% (-26%, 29%)	1.9 (0.8, 3.1)
結腸がん	13.0 (4.4, 16)	3.0 (6.4, 14)	8.0 (4.4, 12)	0.2 (0.06, 0.52)	-56% (-74%, -34%)	6.9 (4.5, 10)
肝臓がん	6.4 (0.2, 12)	2.1 (0.6, 4.3)	4.3 (0.2, 7.2)	0.3 (0.10, 3.2)	-21% (-57%, 378%)	3.6 (-3.5, 6.1)
肺がん	6.0 (2.3, 11)	9.1 (6.4, 12)	7.5 (5.1, 10)	1.5 (0.82, 3.9)	2% (-20%, 28%)	4.23 (2.8, 5.7)
非黒色腫皮膚がん	0.38 (0.03, 1.3)	0.32 (0.03, 1.0)	0.35 (0.0, 1.1)	0.8 (0.43, 1.7)	-61% (-75%, -42%)	4.36 (2.4, 6.5)
膀胱がん	3.8 (0.2, 8.0)	2.6 (1.1, 4.4)	3.2 (1.1, 5.4)	0.7 (0.21, 10)	-19% (-54%, 41%)	6.3 (3.2, 10.2)
甲状腺がん	0.49 (0.15, 1.15)	0.65 (0.27, 1.25)	0.57 (0.24, 1.1)	1.3 (0.56, 3.9)	-31% (-59%, 4%)	-1.5 (-2.9, 0.0)
その他のがん	6.1 (2.8, 9.3)	4.0 (2.1, 6.4)	5.0 (2.7, 7.7)	0.7 (0.37, 1.58)	-19% (-44%, 9%)	2.8 (1.3, 4.7)

*1: 被ばく時年齢30歳、到達年齢70歳における値

*2: 表に掲載されているERR増加割合の値を x とすると、標準モデル式(5.1.7)の τ は $\tau = \log(1+x)/10$ で計算する。

2) 白血病

白血病のリスクは、小笹ら(Ozasa et al.,2012)及びRichardsonら(Richardson et al., 2009)に報告に記載があった。小笹らによると、単位被ばく線量(骨髄線量)当たりの男性のERR=4.6、95%信頼区間は(3.0, 6.9)であった。女性の単位被ばく線量(骨髄線量)のERR=3.9、95%信頼区間は(2.5,6.1)であった。一方、Richardsonら(Richardson et al., 2009)はモデル式に関して詳細な分析を実施していた。以下、Richardsonらの分析に基づいた白血病の線量反応関係、補正項及び過剰リスクに対する概要を記載する。

A. 線量反応関係及び補正項

Hsuら(Hsu et al.,2013)及びRichardsonら(Richardson et al., 2009)の報告では、被ばく線量 d と白血病リスクの関係を表現する線量反応関係 $\rho(d)$ は、白血病のタイプごとに以下の通りとしている。なお、前述したように、以下の「すべてのタイプ」という用語は、Richardsonらの報告の記述に倣っている。Hsuらの報告では、CLLとATLを除く白血病と分類されていた。

✓ すべてのタイプ

$$\rho(d) = \beta d + \theta d^2 \quad (5.1.8)$$

✓ 急性骨髄性白血病

$$\rho(d) = \theta d^2 \quad (5.1.9)$$

✓ 慢性骨髄性白血病及び急性リンパ性白血病

$$\rho(d) = \beta d \quad (5.1.10)$$

このRichardsonらの報告によると、補正項 ε は、すべてのタイプ及び骨髄性白血病に対して、被ばくからの経過時間を独立変数としたスプライン関数を用いた定式化が試みられていた。慢性骨髄性白血病及び急性リンパ性白血病に対する補正項は与えられていない。

✓ すべてのタイプ

$$\varepsilon(c, e, t) = (1 + \omega c) \exp[\gamma e' + \varphi_1 e' t + \varphi_2 e' t^2 + \varphi_3 e' t^3 + \varphi_5 e' (t - 30)_+^3] \quad (5.1.11)$$

✓ 急性骨髄性白血病

$$\varepsilon(c, e, t) = \exp[\gamma e' + (\varphi_1 e' t + \varphi_2 e' t^2 + \varphi_3 e' t^3 + \varphi_5 e' t (t - 30)_+^3 + \varphi_6 e') (t - 45)_+^3] \quad (5.1.12)$$

✓ 慢性骨髄性白血病及び急性リンパ性白血病

$$\varepsilon(c, e, t) = 1.0 \quad (5.1.13)$$

- d : 骨髄線量(Gy)
- β : 線量反応関係の1次項の係数(-)
- θ : 線量反応関係の2次項の係数(-)
- c : 居住都市(長崎=1,広島=-1)
- ω : 居住都市に関する補正係数(-)
- γ : 被ばく時年齢に対する補正係数(-)
- e : 被ばく時年齢(y)
- t : 被ばくからの経過時間(y)
- $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_6$: スプライン関数の係数(-)
- $(t - k)_+^3 = (t - k)^3$ if $(t - k) > 0, 0$ otherwise

また、被ばく時年齢 e は、以下の(5.1.14)式で補正する。

$$e' = \min\left(0, \frac{e - 30}{10}\right) \quad (5.1.14)$$

一方、Hsuらの報告では、白血病の種類及び過剰相対リスク、過剰絶対リスク毎に以下の式が与えられていた。過剰相対リスクと過剰絶対リスクで補正項の式の形が異なっていた。

✓ 白血病 (CLL, ATL を除く)

$$\varepsilon(a, t) = \exp\left(\nu \ln\left(\frac{a}{70}\right) + \varphi \ln\left(\frac{t}{40}\right)\right) \quad (\text{ERR}) \quad (5.1.15)$$

$$\varepsilon(e, a, c, s) = \exp\left(\tau \frac{(1945 - e - 30)}{10} + \nu \ln\left(\frac{a}{70}\right) + \omega c + \sigma s\right) \quad (\text{EAR}) \quad (5.1.16)$$

- e : 誕生年(西暦,year)
- a : 到達年齢(year)
- t : 被ばくからの経過時間(year)
- c : 都市(=0:広島,=1:長崎)
- s : 性別(=0:男性,=1:女性)

✓ 急性骨髄性白血病

$$\varepsilon(e, a) = \exp\left(\tau_1 \frac{(1945 - e - 30)}{10} + \tau_2 \left[\frac{(1945 - e - 30)}{10}\right]^2 + \nu \ln\left(\frac{a}{70}\right)\right) \quad (\text{ERR}) \quad (5.1.17)$$

$$\varepsilon(a) = \exp\left(v_1 \ln\left(\frac{a}{70}\right) + v_2 \left(\ln\left(\frac{a}{70}\right)\right)^2\right) \quad (\text{EAR}) \quad (5.1.18)$$

a : 到達年齢(year)
 e : 誕生年(西暦,year)

✓急性リンパ性白血病(ERR,EAR 共通)

$$\varepsilon(s, a) = \exp\left(\sigma s + v \ln\left(\frac{a}{70}\right)\right) \quad (5.1.19)$$

s : 性別(=0:男性,=1:女性)
 a : 到達年齢(year)

✓慢性骨髄性白血病(ERR,EAR 共通)

$$\varepsilon(c, t, a) = \exp\left(\omega c + \phi \ln\left(\frac{t}{25}\right) + v \ln\left(\frac{a}{55}\right)\right) \quad (5.1.20)$$

c : 都市(=0:広島,=1:長崎)
 t : 被ばくからの経過時間(year)
 a : 到達年齢(year)

B. 過剰リスク算出式

Richardsonら及びHsuらは、過剰リスクに対する「Preferred Model」として、線量反応関係に補正項 ε を乗じた(5.1.21)式を提示している (Richardson et al., 2009) (Hsu et al., 2013)。EAR に関する式はHsuらの報告のみであり、Richardsonらの報告には記載されていなかった。

$$\text{ERR}(d, c, e, t) = \rho(d) \cdot \varepsilon \quad (5.1.21)$$

Richardsonらは、上記のモデルを使用して、被ばく時年齢が「10歳」、「20歳」及び「30歳以上」に対して、すべてのタイプ (all types) 及び急性骨髄性白血病 (AML) に対する白血病のERR/Gyの被ばくからの経過時間は、被ばく時年齢が上がるに従い低下する傾向を示している。各年齢カテゴリーにおけるERR/Gyの時間依存は、被ばく時年齢が10歳、20歳においては被爆後7年から10数年程度でERR/Gyのピークがみられ、それ以降は低下する傾向であった。白血病の過剰絶対リスクはRichardsonらの報告では記載されてなかった。

次に、Hsuらが示したAML,CLL以外の白血病に対するERR/Gy, EAR/Gyの到達時間及び被ばくからの経過時間の変化を示している。Richardsonらのモデルによる推定とは異なり、ERR/Gy,EAR/Gyと共に時間の経過に伴い単調に減少するモデルとなっている。

C. ERR,EARのパラメータ

Richardsonら及びHsuらが示したERRのパラメータを表 5.11,表 5.12に示す。

表 5.11 白血病に対するERRのパラメータ(Richardson et al., 2009)

すべてのタイプ (All types)	パラメータ	β	θ	ω	γ	φ_1	φ_2	φ_3	φ_5
	値	1.55	0.83	-0.54	-1.06	-0.20	0.02	-3E-4	7E-4
	90% CI	(0.63,2.94)	(0.29,1.53)	(-0.79,-0.21)	(-2.81,0.74)	(-0.50,0.07)	(0.0,0.03)	(-6E-4,-9E-5)	(2E-4,1E3)
急性骨髄性白 血病(AML)	パラメータ	θ	γ	φ_1	φ_2	φ_3	φ_5	φ_6	—
	値	2.81	7.80	-1.91	0.11	-2E-3	4E-3	-0.01	—
	90% CI	(1.63,4.64)	(1.45,nd)	(nd,1.65)	(nd,0.12)	(nd,-2E-3)	(2E-3,9E-3)	(-0.02,-3E-3)	—
慢性骨髄性白 血病(CML)	パラメータ	β	—	—	—	—	—	—	—
	値	6.39	—	—	—	—	—	—	—
	90% CI	(3.00,13.71)	—	—	—	—	—	—	—
急性リンパ性 白血病(ALL)	パラメータ	β	—	—	—	—	—	—	—
	値	3.7	—	—	—	—	—	—	—
	90% CI	(0.81,12.99)	—	—	—	—	—	—	—

表 5.12 白血病モデルのパラメータ(1/2)(Hsu et al., 2013)

		β	θ	男女比 (女性/男性) $\sigma=\ln(\text{男女比})$	τ	ν	ϕ
白血病 (CLL,ATL を除く)	ERR	0.79 (0.03,1.93)	0.95 (0.34,1.8)	—	—	-1.09 (-2.01,-0.27)	-0.81 (-1.31,-0.28)
	EAR 女性	0.70 (0.13,1.53)	0.71 (0.24,1.41)	0.66 (0.41, 1.04)	0.41 (0.2, 0.64)	-1.45 (-2.13,-0.80)	—
	EAR 男性	1.06 (0.16,2.42)	1.09 (0.37,2.13)	—	—	—	—
急性骨髄性 白血病	ERR	—	1.11 (0.53,2.08)	—	τ_1 0.17 (-0.15,0.50)	-0.89 (-2.29, 0.41)	—
					τ_2 0.25 (0.09,0.41)		
	EAR	—	1.59 (0.95,2.41)	—	—	ν_1 2.59 (0.90,4.26)	—
						ν_2 1.43 (0.44,2.32)	
急性リンパ 性白血病	ERR 女性	0.95 (0.23, 3.37)	—	0.40 (0.14,0.99)	—	-3.51 (-5.29, -1.92)	—
	ERR 男性	2.40 (0.63, 7.90)	—	—	—	-3.51 (-5.29, -1.92)	—
	EAR 女性	0.09 (0.03,0.25)	—	0.40 (0.14,0.99)	—	-1.81 (-2.56, -1.08)	—
	EAR 男性	0.23 (0.07,0.58)	—	—	—	-1.81 (-2.56, -1.08)	—

表 5.12 白血病モデルのパラメータ(2/2)(Hsu et al., 2013)

		β	都市比(長崎/広島) $\omega = \ln(\text{都市比})$	ν	ϕ
慢性骨髄性 白血病	ERR(広島)	5.24 (1.92,11.8)	—	-1.42 (-3.04,0.01)	-1.59 (-2.34,-0.95)
	ERR(長崎)	1.17 (-0.10,4.71)	0.22 (0.03,0.75)	-1.42 (-3.04,0.01)	-1.59 (-2.34,-0.95)
	EAR(女性)	0.57 (0.23,1.10)	0.23 (0.03,0.76)	2.1 (0.48,4.21)	-1.63 (-2.38,-0.97)
	EAR(男性)	0.68 (0.24,1.59)	0.23 (0.03,0.76)	-0.20 (-1.03,0.66)	-1.63 (-2.38,-0.97)

3) 乳がん

乳がんに関しては、Prestonら(Preston et al., 2007)が分析を実施しており、35歳より前に特に大きな乳がんの相対リスクが存在することを示している。この大きなリスクにEarly onset effectという名称を与えている。このことを踏まえて、乳がんの過剰リスクを算出するモデルとして、他の固形がんと同じモデル(Standard model)に加えて、Early onset effect modelの2つを提示していた。

A. 線量反応関係及び補正項

Prestonら(Preston et al., 2007)は、胸部の被ばく線量と過剰相対リスクとして、直線関係仮定した場合のとフィッティング式を仮定しないノンパラメトリック推定を検討していた。どちらが良いフィットかという記載は見られなかった。

B. 過剰リスク算出式

Prestonらが示した過剰リスク算出式は(5.1.15)式である。Early onset effectは、35歳以下に対して定数ファクターを掛けることにより影響を模擬する。EARは50歳以上と以下で別々のパラメータを設定するモデルである。50歳以上でEARが減少するモデルは、ベースラインで観察された現象に基づいてモデル化したものである記載されていた。

$$\text{ERRまたはEAR} = \rho(d) \cdot \exp(\tau \cdot e + \nu \cdot \ln(a)) \cdot (1 + \sigma s) \cdot \text{eoe} \quad (5.1.15)$$

e : 被ばく時年齢(year)

a : 到達年齢(year)

$\rho(d)$: 線量反応関係

s : 性別(女性=1, 男性=-1)

τ : 被ばく時年齢の補正係数(-)

σ : 性別の補正係数(-)

ν : 到達年齢の補正係数(-)

d : 被ばく線量(=1Gy)

eoe : Early onset effect(35歳以下の場合, standard modelの場合は1.0)

C. ERR, EARのパラメータ

Prestonらが提示した乳がんに対する過剰リスクの算出パラメータとして、表 5.13に過剰相対リスク、表 5.14に過剰絶対リスクのパラメータを示す。過剰絶対リスクでは、50歳未満と50歳以上で異なるパラメータを設定する。

表 5.13 乳がんの過剰相対リスク算出パラメータ(Preston et al., 2007)

モデル	ERR/Gy ()内は90%信頼区間	被ばく時年齢の 10年の減少率 ()内は90%信頼区間	到達年齢 (指数) ()内は90%信頼区間	Early onset-effect (到達年齢35歳以下)
Standard	0.87 (0.55, 1.3)	0% (-19%, 24%)	-2.3 (-3.5, -1.1)	-
Early-onset effect	0.98 (0.64, 1.40)	-3% (-22%, -20%)	-1.5 (-2.8, -0.3)	4.5 (1.8, 11)

表 5.14 乳がんの過剰絶対リスク算出パラメータ(Preston et al., 2007)

モデル	EAR/ 10,000PY/Gy ()内は 90%信頼区間	被ばく時年齢の 10年の減少率 ()内は 90%信頼区間	到達年齢 (指数) ()内は 90%信頼区間	Early onset-effect (到達年齢35歳以 下)
Standard	9.2 (6.8, 12)	-37% (-48%, -24%)	1.7 (1.0, 2.5)	-
Early-onset effect (0歳~49歳)	5.3 (2.5, 8.6)	-29% (-41%, -14%)	5.2 (2.9, 7.8)	3.5 (1.1, 12)
Early-onset effect (50歳以上)			-2.2 (-5.1,-0.01)	-

4) 皮膚がん

皮膚がんに関しては、Prestonら (Preston et al,2007)が示している。Prestonらは、皮膚がんを非黒色腫皮膚がんと黒色腫皮膚がんに分類している。その中で、非黒色腫皮膚がん (Non-melanoma skin cancer) は、LSSの分析結果を使用している。LSSでは330例が存在し、その内訳は基底細胞がん166例、扁平上皮癌131例、その他が33例であった。その結果、皮膚被ばく線量が約1Gyを超える対象者に対して、非黒色腫皮膚がんの発生率に対する放射線の影響が明確であったことが示されていた。過剰リスクは、主に基底細胞癌の放射線影響の増加によるものであり、扁平上皮癌では過剰は見られなかった。一方、黒色腫皮膚がんに関しては、被ばくが当該がんの発生リスクに影響を及ぼしているという傾向はみられなかった。その理由は、LSSコホートメンバー間で診断された黒色腫の症例数は17例と少ないため、黒色腫皮膚がんのリスクの放射線関連の変化に関する分析はできなかったという理由である。そのため、黒色腫に関しては、その他の固形がんと同じ分類として分析が実施されていた。

A. 線量反応関係及び補正項

Prestonらが示した非黒色腫皮膚がんに対する線量反応関係 (皮膚被ばく線量-ERR) は、線形式、及びスプライン関数を使用した式の両方を示していた。スプライン関数を使用すると、ERR点推定値は線形モデルよりも大幅に高くなる傾向がみられたとしている。

B. 過剰リスク算出式

Prestonら(Preston et al., 2007)の報告では、皮膚がんに関する過剰リスクの算出式は、固形がんの算出式と同じ(5.1.16)式のとおりである。

$$\text{ERRまたはEAR} = \rho(d) \cdot \exp(\tau \cdot e + \nu \cdot \ln(a)) \cdot (1 + \sigma s) \quad (5.1.16)$$

- e : 被ばく時年齢(year)
- a : 到達年齢(year)
- $\rho(d)$: 線量反応関係
- s : 性別(女性=1, 男性=-1)
- τ : 被ばく時年齢の補正係数(-)
- σ : 性別の補正係数(-)
- ν : 到達年齢の補正係数(-)
- d : 皮膚被ばく線量(=1Gy)

C. ERR,EARのパラメータ

非黒色腫皮膚がんに関する過剰リスク算出パラメータは、Prestonら(Preston et al., 2007)により示されており、標準モデルを使用したパラメータ推定が実施されている。以下の表 5.15 表5.14に示す。

表 5.15 皮膚がんに関するリスク(Preston et al., 2007)

モデル	ERR per Gy EAR per 10000 PY Gy			性別比 (女性：男性)	被ばく時年齢が10年増加した時の リスク増加割合(%)	ν
	男性	女性	男女平均			
ERR	0.87 (0.55, 1.3)	0.23 (0.005,0.75)	0.17 (0.003,0.55)	2.2 (0.93, 5.7)	-73% (-85%, -55%)	0.27 (-1.4,1.9)
EAR	0.38 (0.03, 13)	0.32 (0.03,1.0)	0.35 (0.0, 1.1)	0.8 (0.43,1.7)	-61% (-75%, -42%)	4.36 (2.4, 6.5)

5) 甲状腺がん

LSS調査当初から、放射線被ばくによる甲状腺がんのリスクは明らかとされていた(Thompson,1994)。日本では他の先進国と比較すると発生率の増加がみられるとともに、特に被ばく時年齢が重要な影響因子であり、若い世代でのがんリスクが大きいことが指摘されている(Preston et al., 2007)。以下、甲状腺がんに関するPrestonらの報告結果の概要を記載する。

A. 線量反応関係及び補正項

Prestonらは、線量反応関係に線形式及びスプライン関数式を当てはめて検討を実施している。全線量範囲では、線形式でフィットしているが、線量範囲を2 Gy以下に限定すると、下向きの湾曲が示唆されているとしている。

B. 過剰リスク算出式

甲状腺がんは、次項目のERR及びEARのパラメータで示すように、すべての固形がんで使用される標準モデルを用いたパラメータ推定が行われている。すなわち、以下の(5.1.17)式である。

$$ERR \text{ または } EAR = \rho(d) \cdot \exp(\tau \cdot e + \nu \cdot \ln(a)) \cdot (1 + \sigma s) \quad (5.1.17)$$

- e : 被ばく時年齢(year)
- a : 到達年齢(year)
- $\rho(d)$: 線量反応関係
- s : 性別(女性=1, 男性=-1)
- τ : 被ばく時年齢の補正係数(-)
- σ : 性別の補正係数(-)
- ν : 到達年齢の補正係数(-)
- d : 甲状腺被ばく線量(=1Gy)

C. ERR,EARのパラメータ

甲状腺がんに関する過剰リスク算出パラメータは、Prestonら(Preston et al., 2007)により示されており、標準モデルを使用したパラメータである。以下の表 5.16に示す。

表 5.16 甲状腺がんに関する過剰リスク算出パラメータ(Preston et al., 2007)

モデル	ERR per Gy EAR per 10000 PY Gy			性別比 (女性/男性)	被ばく時年齢が10年増加した時の リスク増加割合(%)	ν
	男性	女性	男女平均			
ERR	0.49 (0.15, 1.15)	0.65 (0.27, 1.25)	0.57 (0.24, 1.1)	1.3 (0.56, 3.9)	-31% (-59%, 4%)	-1.5 (-2.9, 0.0)
EAR	0.5 (0.3, 1.5)	1.9 (1.3, 4.2)	1.2 (0.48, 2.2)	3.6 (1.78, 9.5)	-46% (-68%, -12%)	0.50 (-0.58, 1.8)

5.1.2. まとめ及び来年度以降の課題点

本年度は、被ばくによるがんリスクに関して、原爆被爆の追跡調査結果を分析した最新の論文LSS14及び関連した論文調査を行い、被ばくによる主ながんの過剰相対リスク、過剰絶対リスク及び算出モデル式の検討状況を主とした文献調査を実施した。

LSS14では、LSS13まで使用されていたDS86に代わりDS02線量評価方式が採用され、ガンマ線による被ばく線量推定値の評価値が下方修正されたことから、単位線量当たりのリスク推定値がLSS13と比較して低減する傾向がみられた。

小笹ら(Ozasa et al., 2012)及びPrestonら (Preston et al., 2007) が提示した単位線量当たりのがんに対する過剰リスクの男女平均の推定値(表5.16,被ばく年齢30歳、到達年齢70歳の値での値)を見ると、すべての固形がんに対する過剰相対リスクは、Ozasaらが提示した0.42, Prestonらが提示した0.47で大きな違いは無かったが、過剰絶対リスクは、Ozasaらの26.4に対して、Prestonらの52と2倍近く違いがあった。固形がんの線量反応関係に関しては、線形、線形二次式を仮定したパラメータ推定が行われていた。線量範囲を2Gy以下に限定すると上向きの線量反応関係が示唆された。

表5.16 固形がんに対する過剰リスク推定値 (男女平均値)

	ERR (per Gy)		EAR (10 ⁴ PY per Gy)	
	Ozasa et al.,	Preston et al.,	Ozasa et al.,	Preston et al.,
すべての固形がん	0.42	0.47	26.4	52
食道がん	0.60	—	—	—
胃がん	0.33	—	4.1	—
結腸がん	0.34	—	1.6	—
肝臓がん	0.38	—	3.4	—
胆のうがん	0.48	—	—	—
肺がん	0.75	—	6.5	—
乳がん	0.90	—	2.3	—
膀胱がん	1.19	—	1.2	—
卵巣がん	0.20	—	—	—
性別に依存しない 固形がん	—	0.48	—	46

被ばく時年齢、到達年齢及び補正係数を考慮した固形がんの過剰リスク算出式は、以下の(5.1.18)式であった。

$$\text{ERRまたはEAR} = \rho(d) \cdot \exp(\tau \cdot e + \nu \cdot \ln(a)) \cdot (1 + \sigma s) \quad (5.1.18)$$

- e : 被ばく時年齢(year)
- a : 到達年齢(year)
- $\rho(d)$: 線量反応関係
- s : 性別(女性=1, 男性=-1)
- τ : 被ばく時年齢の補正係数(-)
- σ : 性別の補正係数(-)
- ν : 到達年齢の補正係数(-)
- d : 被ばく線量

白血病に関しては、Richardsonら及びHsuらによる分析が実施されており、線量反応関係は白血病のタイプ別に、L式（すべてのタイプの白血病）、LQ式（急性骨髄性白血病）、Q式（慢性骨髄性白血病及び急性リンパ性白血病）が想定されていた。また、過剰相対リスクに関して、被ばく後経過時間の関数として被ばく後10年前後において白血病リスクのピークが生じるモデル式が提案されていた。一方、Hsuらは提案したモデル式は被ばくからの経過時間、到達年齢の単調減少関数としたモデルであった。

乳がんに対しては、Prestonらにより、35歳以下で特に大きな乳がんのリスクが存在することが指摘され、固形がんと同じモデルに加えて、35歳以下の乳がんリスクの増大を模擬したEarly onset effect modelが提案されていた。

皮膚がんに対しては、Prestonらの分析が行われており、固形がんと同じモデル式であった。非黒色腫皮膚がんのデータに基づいたパラメータ推定が行われていた。

甲状腺がんに対しては、Prestonらの分析が行われており、日本において高いがんリスクが指摘されていた。リスク評価モデル式に関しては、固形がんと同じモデル式であるが、甲状腺線量を2Gy以下に限定した線量反応関係はと下向きの湾曲が示唆されている。

今後の課題として、本年度の調査を受けて以下のような課題が挙げられる。

- がんリスクの線量反応関係は、がんの種類に応じて単純線形式、単純2次式、線形2次式、スプライン関数を当てはめた式と様々なモデルによる検討がなされていた。適切なモデル選択のための情報が不足しており、継続的な検討を行う必要がある。
- 確率的影響の評価のためには、ERR及びEARのパラメータ値で示され値及び90%及び95%信頼区間の値を利用することが考えられる。論文に示されていた数値の妥当性に疑義がある点もあり、今後は妥当性を検証する必要がある。

5.2. 防護措置効果の分析に必要なパラメータ等

5.2節では、OSCAARコードの避難モデルに関するパラメータの整備について説明する。昨年度までに整備した避難データでは、実際の経路の移動距離を反映していたものの、移動方向は放射状に直線で避難すると仮定していた。本年度は避難経路上の点の距離と方位を反映して、OSCAARで用いる避難経路のデータを作成する手法を確立した。

以下、5.2.1では避難が完了していない人数の時間変化を確認するために、OSCAARコードに追加した出力機能について記載する。5.2.2では新たに開発した避難経路解析プログラムとそれを使用して作成した東海サイトの避難経路データについて記載する。5.2.3では東海サイトの避難経路データを用いたOSCAARによる被ばく線量計算の結果について記載する。

5.2.1. 避難モデルの出力の改良

OSCAARの避難モデルでは、避難中の移動経路を考慮した被ばく線量を計算するために、避難元から避難先までに通過するメッシュの位置情報とそのメッシュでの滞在時間を考慮している。ここに各メッシュの避難前の人口データを与えることで、避難が完了していない人数の時間変化を計算する機能をOSCAARに新たに実装した。

また、OSCAARの避難モデルでは避難元メッシュごとに異なる距離にある避難先メッシュを指定することができるが、これとは別にすべてのメッシュに共通な距離番号指定し、その距離に到達していない人数の時間変化を出力する機能も合わせて実装した。

出力の妥当性を確認のために、以下の条件で計算を行った。東海第二発電所を放出点とし、30km圏内のメッシュを避難対象メッシュとした。避難前の人口データを距離別に合計したものを表 5.17に示す。すべての避難対象メッシュで放出開始時刻（時刻0）と同時に避難を開始し、放射状に避難すると仮定した。本計算では、PAZ領域で予防的に避難を開始することや、UPZ領域で屋内退避をした後に避難を開始することは考慮していない。すべてのメッシュで避難先は距離番号14の評価点位置とした。また、距離番号12に到達していない人数を出力して確認することとした。

移動速度は5km/hとし、移動距離は表 5.18に示す評価点間の直線距離とした。このとき、距離番号12に到達および避難完了するまでの累計移動距離および移動時間は表 5.19のように求めることができる。OSCAARによって出力された人数の時間変化をグラフにしたものを図 5.1に示す。表 5.19で求めた移動時間と図 5.1で示したOSCAARの出力結果が整合していることが確認できた。

表 5.17 2010年東海サイトの距離別人口（32方位合計）

距離番号	人口
1	335.2
2	4559.4
3	9790.6
4	17181.1
5	19151
6	18069.8
7	57458.4
8	94947.7
9	199911
10	284073.8
11	129960
12	91945

表 5.18 メッシュ内の移動距離（直線距離）

距離番号	評価点位置[km]	移動距離[km]
1	0.5	1
2	1.5	1
3	2.5	1
4	3.5	1
5	4.5	1
6	5.5	1.5
7	7	2
8	9	3.5
9	12.5	5
10	17.5	5
11	22.5	5
12	27.5	7.5
13	35	15
14	50	—

表 5.19 累計移動距離および移動時間（直線距離、移動速度5km/h）

避難元 距離番号	距離番号 12 へ到達		避難完了	
	移動距離[km]	移動時間[h]	移動距離[km]	移動時間[h]
1	27	5.4	49.5	9.9
2	26	5.2	48.5	9.7
3	25	5	47.5	9.5
4	24	4.8	46.5	9.3
5	23	4.6	45.5	9.1
6	22	4.4	44.5	8.9
7	20.5	4.1	43	8.6
8	18.5	3.7	41	8.2
9	15	3	37.5	7.5
10	10	2	32.5	6.5
11	5	1	27.5	5.5
12	—	—	22.5	4.5

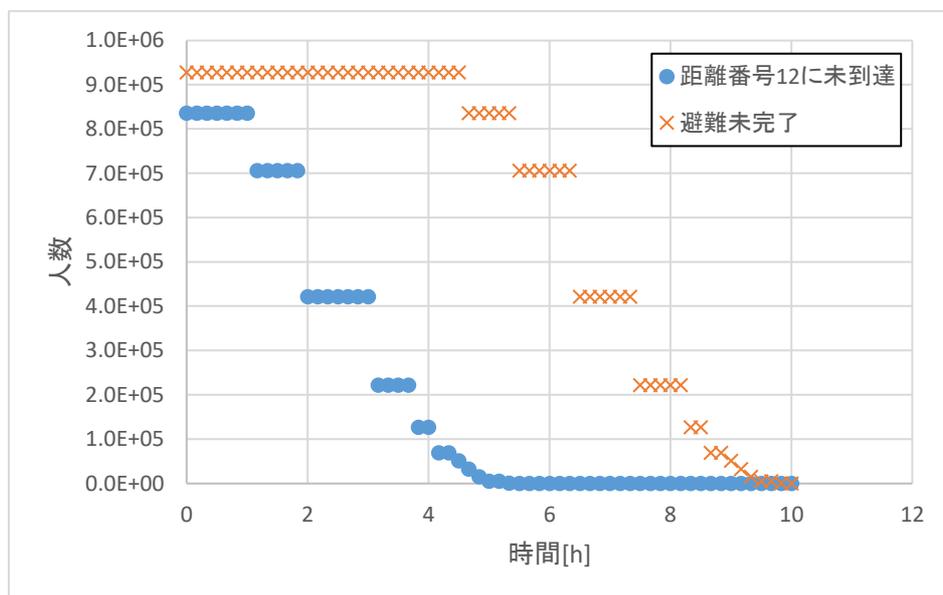


図 5.1 距離番号12に到達していない人数および避難が完了していない人数

5.2.2. 避難に関するパラメータの整備

(1) 避難経路解析プログラムの作成

避難経路データファイルを作成するための避難経路解析プログラムを新たに作成した。OSCAARで使用する避難経路データファイルでは、評価点位置が入力ファイルで指定した範囲内（PAZおよびUPZに相当する領域）にあるすべてのメッシュに対して、避難ステップごとの距離番号、方位番号、移動距離を指定する必要がある。本プログラムでは、メッシュごとに使用する主な幹線道路のGPXファイルを指定し、避難ステップごとの距離番号、方位番号、移動距離を求めることができる。本プログラムで使用する入出力ファイルの一覧を表 5.20、入力パラメータの一覧を表 5.21、本プログラムの処理の流れを図 5.2にそれぞれ示す。

GPXファイルには経路上のトラックポイントの緯度・経度の情報が含まれている。各トラックポイントに対してサイトからの距離と方位角を計算し、OSCAARのどのメッシュに含まれているのかを判定する。トラックポイントが含まれているメッシュが前のポイントが含まれているメッシュと異なるとき、避難ステップを切り替える。避難ステップごとに経路上の2点間の距離を積算することによって、各メッシュ内での移動距離を計算することができる。2点間の距離と方位角の計算は、国土地理院の測量計算サイトでも用いられている（B. R. Bowring, 1996）の方法により計算する（地球楕円体をGRS80楕円体とする）。

指定した主な幹線道路が避難元メッシュに含まれている場合は、そのメッシュに含まれる最初のトラックポイントを出発点として移動経路を求めることができる。指定した主な幹線道路が避難元メッシュに含まれていない場合は以下の手順で、指定した避難経路が通過しているメッシュに到達するまでの移動と避難経路に沿った移動を計算する（図 5.3）。ここで、 R_i はサイト位置から距離番号*i*のメッシュの評価点までの距離、 n_{dir} は方位メッシュ数（OSCAARのデフォルト値は32）とする。

① 避難経路が通過している距離番号に到達するまで移動する。距離番号 i から距離番号 $i+1$ への移動距離は以下の式で求める（平面上の直線距離）。

$$R_{i+1} - R_i \quad (5.2.1)$$

② 避難経路が通過している方位番号に到達するまで移動する。反時計回り、時計回りの移動回数をそれぞれ調べ、移動回数が少ない方を採用する。距離番号 i で方位を 1 メッシュ分変えるときの移動距離は以下の式で求める（平面上の円弧の長さ）。

$$\frac{2\pi R_i}{n_{dir}} \quad (5.2.2)$$

③ 到達したメッシュに含まれる最初のトラックポイントを出発点として、避難経路に沿った移動距離を計算する。

表 5.20 避難経路解析プログラムの入出力ファイル

ファイル名	内 容	入出力
route_mesh.inp	避難経路解析プログラムの入力パラメータ (表 5.21)	入力
route###.gpx	避難経路のトラックポイントデータ 避難経路数nrouteまでの連番ファイル	入力
route_mesh.out	各避難経路が通過するメッシュ情報出力ファイル	出力
evac###.dat	OSCAARで使用する移動データファイル 避難対象距離メッシュ数mdistまでの連番ファイル	出力

表 5.21 避難経路解析プログラムの入力パラメータ

Card	Format	Name	Description
1	実数	slat	サイトの緯度
	実数	slon	サイトの経度
2	整数	nroute	避難経路数
3	整数	ndir	方位メッシュ数
	整数	ndist	距離メッシュ数
	整数	mdist	避難対象の距離メッシュ数
4	実数	R(idist)	評価点までの距離[km]
		outerEdg(idist)	メッシュの外側境界までの距離[km] (それぞれndist個繰り返し)
5	整数	routeid(idir,idist)	方位番号idir、距離番号idistのメッシュから避難する ときに使用する避難経路の番号。0を指定したときは 距離番号mdist+1まで直線距離で移動する。 (1行あたりndir個、mdist行の繰り返し)

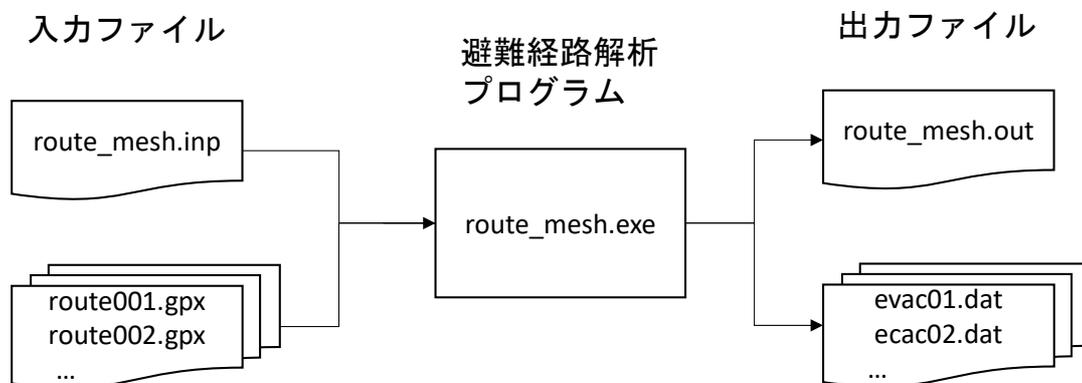


図 5.2 避難経路解析プログラムによる処理の流れ

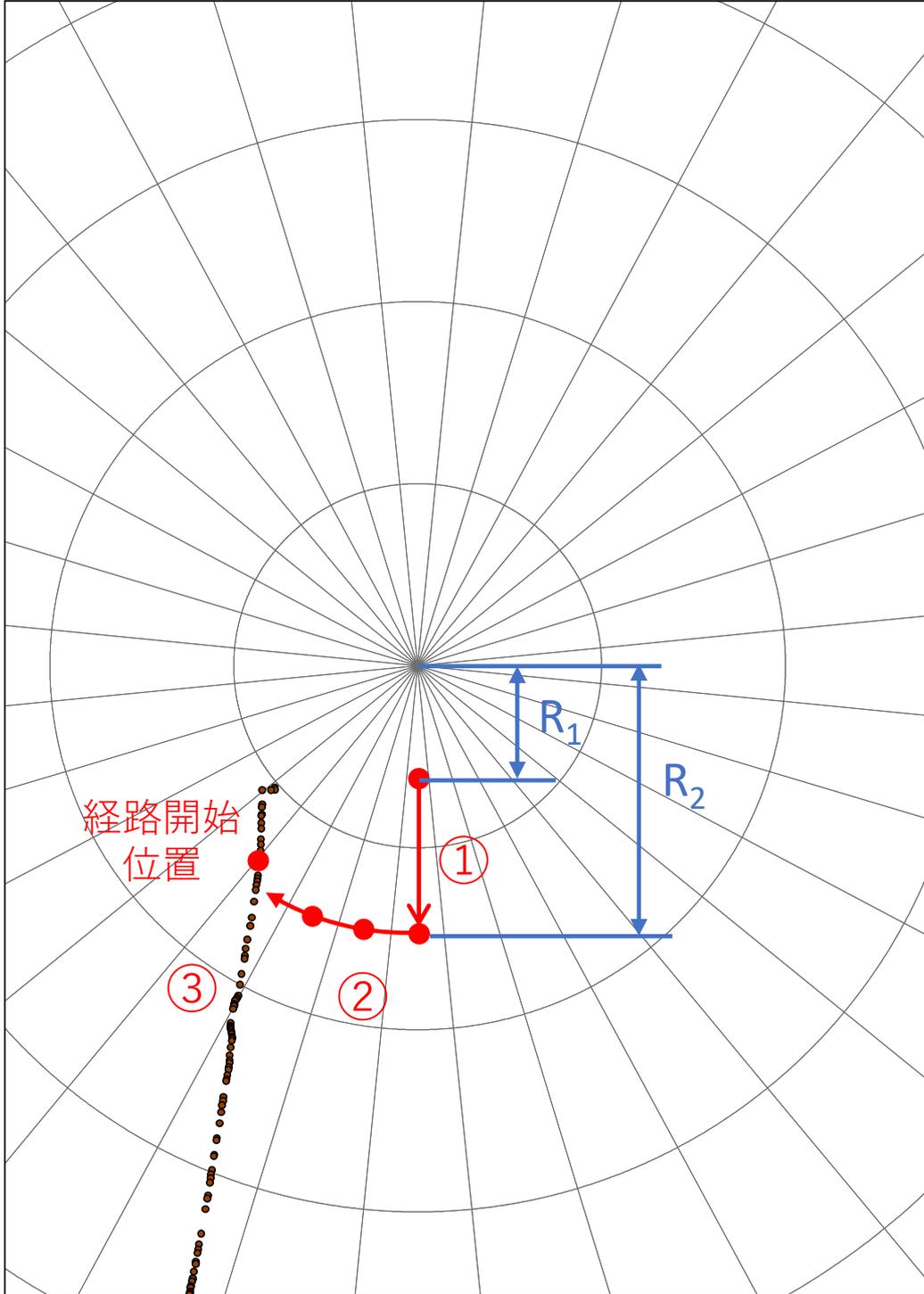


図 5.3 移動経路の計算手順

- ① 避難経路が通過している距離番号に到達するまで移動する。
- ② 避難経路が通過している方位番号に到達するまで移動する。
- ③ 到達したメッシュに含まれる最初のトラックポイントを出発点として、避難経路に沿った移動距離を計算する。

(2) 東海サイトの避難経路データの作成

茨城県広域避難計画（茨城県, 2019）で示されている避難経路に基づき、東海サイトについてOSCAARで使用する避難経路データを作成した。OSCAARのメッシュと茨城県広域避難計画に記載されている避難元地区名を対応付けるために、国勢調査における小地域（町丁・字等別）データを利用して、OSCAARの各メッシュに地区名を割り当てた。割り当てられた地区名を茨城県広域避難計画の避難元地区名と対応付けることによって、OSCAARの各避難元メッシュが使用する避難経路（主な幹線道路）を選定した。

選定された各避難経路（主な幹線道路）について、GPXファイル形式のトラックポイントデータを作成した。避難経路解析プログラムによって、GPXファイルを入力としてOSCAARで使用する避難経路データを作成した。

1) 国勢調査データに基づく地区名の割り当て

ESRI社のGISソフトArcGIS (ArcMap 10.7.1)を使ってシェープファイル进行处理し、OSCAARのメッシュに地区名を割り当てた。地区名のデータとして、政府統計の総合窓口（e-stat）より入手した平成27年国勢調査（総務省統計局, 2015）の茨城県の町丁・字等別境界データのシェープファイルを使用した。OSCAARメッシュデータとして正距方位図法を指定してPostOSCAARで出力した東海サイトのシェープファイルを使用した。

地区名の割り当て処理を繰り返し実行する必要があるため、ArcGISのジオプロセッシングをpythonで実行する機能であるArcpyを用いた。まず、国勢調査データの座標系をOSCAARメッシュデータの座標系と統一するために正距方位図法に変換した。OSCAARメッシュを1つずつ選択し、「クリップ」ツールによって、国勢調査データから各メッシュの範囲内に含まれる地区を抽出した。「フィールド演算」によって、各メッシュの範囲内の地区ごとの面積を計算し、メッシュの範囲内の面積が最大である地区名をそのメッシュの地区名として割り当てた。ただし、人口が0である地区は除外した。

メッシュに割り当てた地区名を図 5.4および図 5.5に示す。30km圏内に含まれる384個のメッシュ（32方位×12距離）のうち、130個は海もしくは人口0の地区しか含まないため、地区名は割り当てられなかった。残りの254個のメッシュに対して、137通りの地区名が割り当てられた。

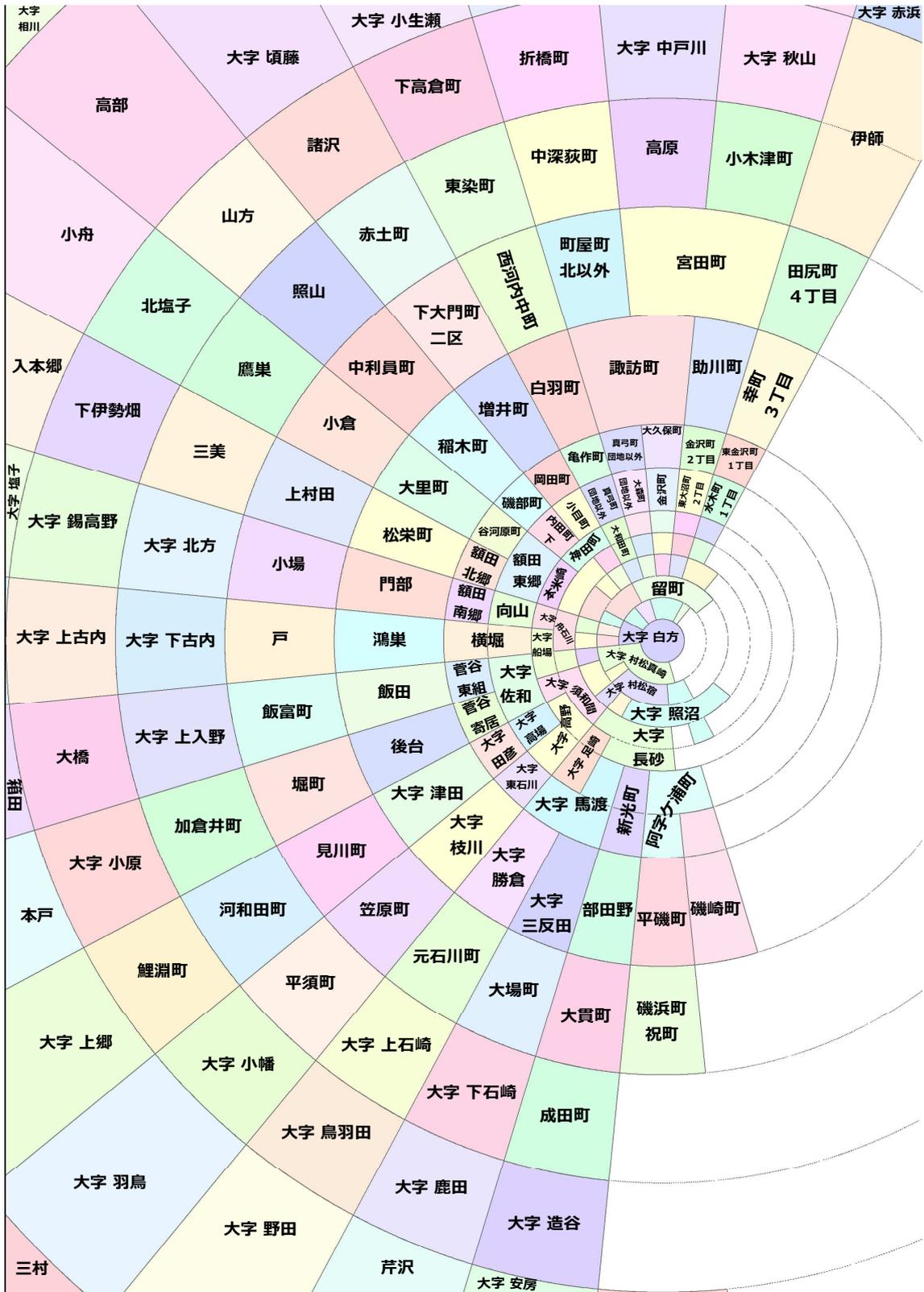


図 5.4 メッシュに割り当てた地区名 (全体図)

2) 茨城県広域避難計画に基づく避難経路の割り当て

各メッシュに割り当てられた地区名を茨城県広域避難計画と照合して、使用する避難経路（主な幹線道路）を選定した。国勢調査の地区名と茨城県広域避難計画の地区名が一対一対応していなかったり、茨城県広域避難計画で同一の地区名に対して複数の経路が記載されているために避難経路を一意に決定できない場合には、避難シミュレーションの結果に基づいて使用する避難経路を選定した。

茨城県広域避難計画では、避難元を235地区に分けて避難経路が記載されており、使用する「主な幹線道路」が同一である地区をまとめると、110通りの避難経路が存在する。このうち、対応する地区名がOSCAARのメッシュに割り当てられた避難経路を表 5.22および表 5.23に示す。別の経路の一部分とみなすことができる経路は集約し、合計62通りの避難経路を割り当てた。

3) 避難経路データの作成

表 5.22および表 5.23に示した各避難経路に対して、GPXファイル形式のトラックポイントデータを作成した¹⁰。また、図 5.8に示す入力パラメータファイルを作成した。これらを入力ファイルとして、避難経路解析プログラムを実行した。

OSCAAR用避難経路データは避難元距離番号ごとに作成される。距離番号12のOSCAAR用避難経路データを例として図 5.9に示す。

各避難経路が通過するメッシュ情報を出力ファイルで確認することができる。経路1（国道245号→東水戸道路（ひたちなかIC）→常磐道）を例として、プログラムで解析した結果を表 5.24に示す。比較のために経路1のGPXファイルのデータをジオプロセッシングツールを利用してArcGISに読み込み、OSCAARのメッシュに重ねて投影した図を図 5.7および図 5.6に示す。避難経路解析プログラムで解析した結果とArcGISを用いて投影した図で経路が通過するメッシュの番号が一致していることが確認できた。

¹⁰ Google Maps で GPX ルート作成 https://www.330k.info/software/create_gpx_with_google_maps/

表 5.22 OSCAARのメッシュに割り当てられた避難経路(1/2)

	主な幹線道路	メッシュ数
1	国道245号→東水戸道路（ひたちなかIC）→常磐道	49
	瓜連馬渡線→国道245号→東水戸道路（ひたちなかIC）→常磐道	5
2	常陸那珂港山方線→常磐道（東海スマートIC）	53
3	国道6号→常磐道（東海スマートIC）	11
4	国道245号→国道51号→東水戸道路（水戸大洗IC）→常磐道	1
5	常陸海浜公園線→常陸那珂道（ひたち海浜公園IC）→常磐道	2
6	常陸海浜公園線→常陸那珂道（ひたち海浜公園IC）→北関東道	3
7	バードライン→常磐道（那珂IC）	2
8	水戸勝田那珂湊線→常磐道（水戸北スマートIC）	2
9	那珂湊那珂線→国道245号→国道51号	1
10	那珂湊大洗線→東水戸道路（ひたちなかIC）→常磐道	2
11	国道6号→北関東道（水戸南IC）→常磐道	3
12	国道245号→常磐道（日立北IC）	4
13	国道293号→常磐道（日立南太田IC）	10
14	国道6号→常磐道（日立南太田IC）	17
15	国道6号→常磐道（日立中央IC）	8
16	国道6号→常磐道（日立北IC）	2
17	国道6号→常磐道（高萩IC）	2
18	日立山方線→国道349号	1
19	十王里美線→国道349号	1
20	常陸那珂港山方線→常磐道（東海スマートIC）→北関東道	2
21	瓜連馬渡線→常磐道（那珂IC）→北関東道	9
22	バードライン→常磐道（那珂IC）→北関東道	1
23	水戸勝田那珂湊線→常磐道（水戸北スマートIC）→北関東道	1
24	日立笠間線→国道50号	1
25	常磐道（那珂IC）→北関東道	2
26	国道123号→常磐道（水戸北スマートIC）→北関東道	1
27	国道51号→東水戸道路（水戸大洗IC）→常磐道	1
28	国道50号→常磐道（水戸IC）→北関東道	2
29	国道50号	1
30	玉里水戸線→北関東道（茨城町西IC）→常磐道	2
31	長岡水戸線→北関東道（茨城町東IC）	1
	北関東道（茨城町東IC）	1

表 5.23 OSCAARのメッシュに割り当てられた避難経路(2/2)

	主な幹線道路	メッシュ数
32	常陸那珂港山方線→国道118号	2
33	国道293号→国道349号	2
34	国道293号→国道118号	1
35	国道349号	7
36	亀作石名坂線→国道349号	3
37	下土木内常陸太田線→国道349号	1
38	日立笠間線→国道349号	2
39	日立山方線→国道118号	1
40	常陸太田大子線→国道118号	1
41	常陸太田那須烏山線→国道349号	1
42	常陸太田那須烏山線→国道118号	1
43	国道461号→上君田大能線	1
44	高萩インター線→常磐道（高萩IC）	1
45	日立笠間線→国道50号→北関東道（笠間西IC）	1
46	国道50号→北関東道（笠間西IC）	1
47	国道293号→国道294号	1
48	国道123号→国道294号	1
49	ビーライン→国道293号	1
50	国道118号→常陸大宮御前山線→国道123号	1
51	国道118号→国道461号	4
52	長沢水戸線→国道123号	1
53	常陸大宮御前山線→国道123号	1
54	水戸神栖線	1
55	長岡大洗線→水戸神栖線	1
56	宮ヶ崎小幡線→茨城鹿島線	1
57	茨城鹿島線	1
58	国道123号	1
59	阿波山徳蔵線→国道123号	1
60	水戸茂木線→国道123号	3
61	国道51号	1
	水戸鉾田佐原線（大洗町）→国道51号	1
	水戸鉾田佐原線（大洗町），長岡大洗線→国道51号	1
62	水戸鉾田佐原線（鉾田市）→国道51号	2

表 5.24 経路1の経路解析結果

避難ステップ	方位番号	距離番号	メッシュ番号	移動距離[km]
1	21	2	53	0.035
2	20	2	52	0.049
3	21	2	53	0.36
4	22	2	54	0.72
5	22	3	86	0.12
6	23	3	87	0.91
7	23	4	119	0.97
8	23	5	151	1.00
9	23	6	183	1.04
10	23	7	215	2.05
11	24	8	248	2.07
12	24	9	280	1.67
13	23	9	279	3.93
14	23	10	311	2.83
15	22	10	310	4.23
16	22	11	342	2.07
17	21	11	341	4.23
18	21	12	373	3.83
19	20	12	372	4.70
20	20	13	404	6.16
21	21	13	405	5.19
22	21	14	437	14.24

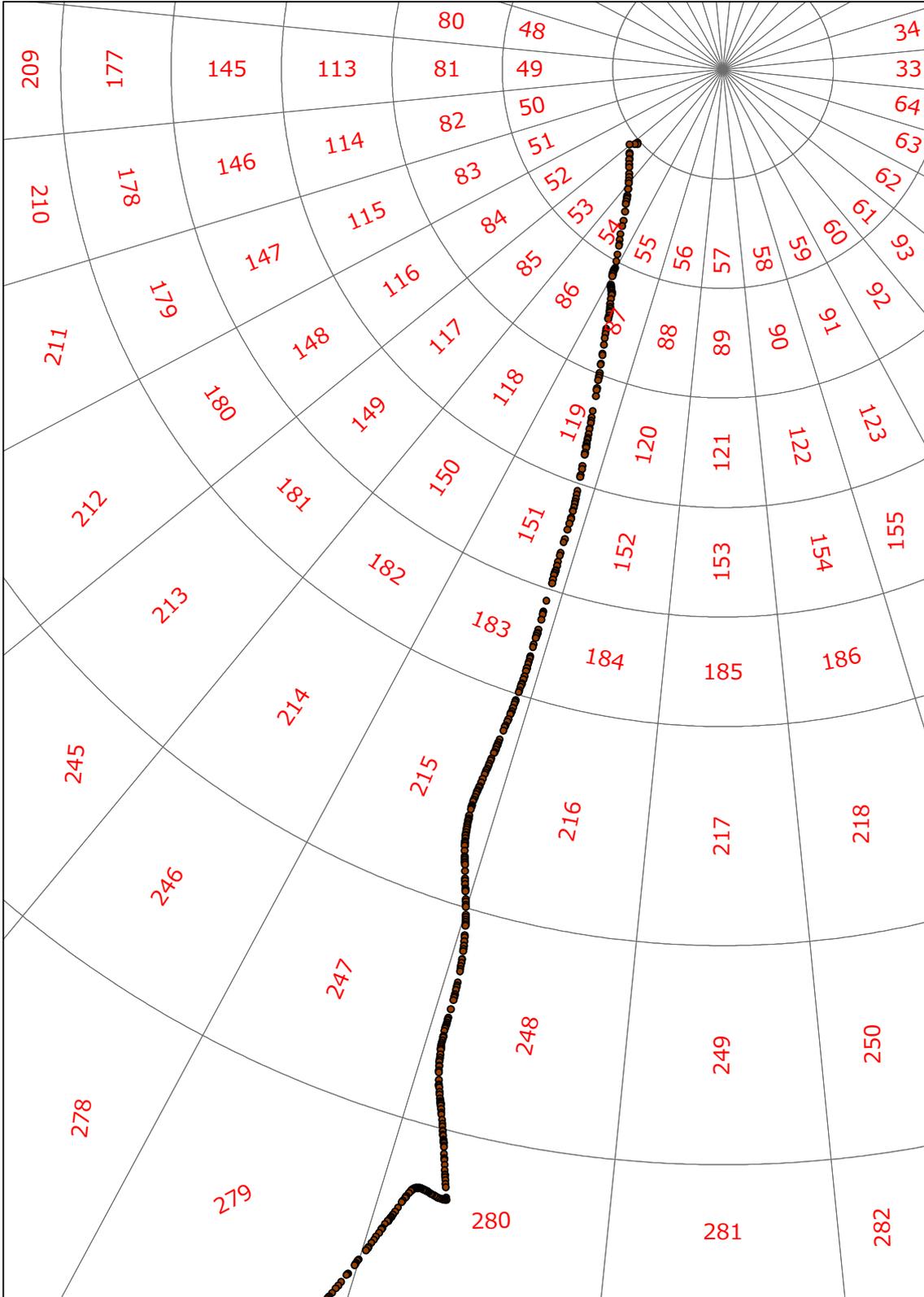


図 5.6 経路1とOSCAARのメッシュ番号 (拡大図)

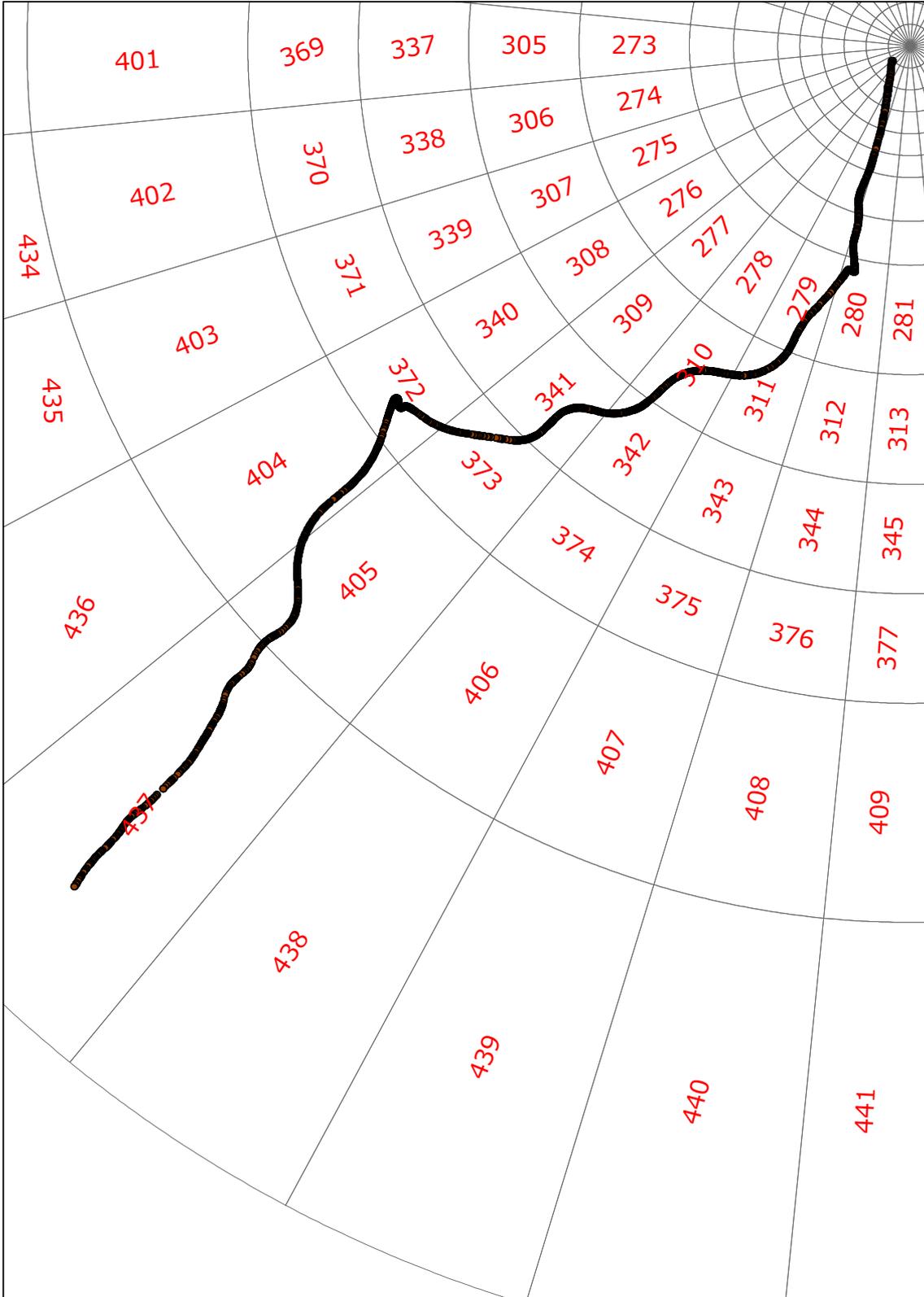


図 5.7 経路1とOSCAARのメッシュ番号 (全体図)

5.2.3. 作成した避難経路データを用いたOSCAARによる計算

(1) 計算条件

整備した避難経路データを用いたOSCAARによる計算を行い、避難による被ばく線量の低減効果を確認した。避難を実施しなかった場合や避難経路を考慮せず直線的に移動した場合と比較するために、以下に示す3ケースの計算を実施する。

- ケース1：避難なし
- ケース2：放射状に直線で避難（直線避難）
- ケース3：移動データを作成した避難経路に沿って避難（経路避難）

気象条件や事故シナリオはすべてのケースで表 5.25、表 5.26に示す条件とする。ケース2およびケース3において避難時の移動速度は5km/hとする。また、放出開始と同時に避難を開始すると仮定する。本計算では、PAZ領域で予防的に避難を開始することや、UPZ領域で屋内退避をした後に避難を開始することは考慮していない。

状況別の被ばく低減係数を表 5.27に示す。ケース1では日常生活の被ばく低減係数、ケース2およびケース3では、避難中は自動車の被ばく低減係数、避難完了後はコンクリート建屋の被ばく低減係数をそれぞれ適用する。

表 5.25 共通のOSCAAR計算条件

放出点	東海第二発電所（北緯36.465830度、東経140.606700度）
気象条件	2020年東海サイト、500シーケンスランダムサンプル (OSCAAR気象データ作成支援プログラムgpv2oscを用いてデータを作成した。中心を東海第二発電所、投影法を正距方位図法とした。)
事故シナリオ	早期大規模放出（木村他, 2010） <ul style="list-style-type: none"> ・ 放出開始時間：3時間 ・ 放出継続時間：1時間 ・ 放出高さ：40m ・ 放出割合：表 5.26参照

表 5.26 環境への放出割合

希ガス	有機 ヨウ素	無機 ヨウ素	Cs-Rb	Te-Sb	Sr-Ba	Ru	La
1.0E-01	3.9E-03	7.5E-02	1.1E-02	2.6E-02	1.1E-02	1.0E-02	1.0E-02

表 5.27 被ばく低減係数

分類	状況	被ばく形態		
		クラウド シャイン (γ 線)	グラウンド シャイン	吸入
入力値	屋外	1	0.7	1
	木造建屋※2	0.9	0.4	0.25
	コンクリート建屋※2	0.6	0.2	0.05
	自動車※3	0.88	0.73	1
入力値から計算※1	日常生活時（日中）	0.7	0.29	0.185
	日常生活時（夜間）	0.88	0.41	0.305

※1 人口割合を以下の値（デフォルト値）とする。

日中の人口割合：{ 屋外：0.1, 木造：0.2、コンクリート建屋：0.7 }

夜間の人口割合：{ 屋外：0.1, 木造：0.8、コンクリート建屋：0.1 }

※2（原子力規制委員会, 2014）

※3 クラウドシャイン、グラウンドシャイン被ばく低減係数は、(S. Takahara et. al., 2018)より最も保守的な値を採用する。吸入被ばく低減係数は保守的に1とする。

(2) 計算結果

5.2.1でOSCAAR実装した機能によって出力した避難が完了していない人数の時間変化を図 5.10に示す。避難距離の短いケース2（直線避難）の方がケース3（経路避難）よりも早く避難が完了する。

気象条件500シーケンスについて計算した最大値方位の早期被ばく線量（7日間積算線量）の95%値を図 5.11に示す。グランドシャインによる早期被ばく線量は、直線避難でも経路避難でもコンクリート建屋に避難したことによって低減されている。一方、クラウドシャインおよび吸入による早期被ばく線量は、本計算のようにプルーム通過中に避難を実施した場合には増加する可能性がある。本計算では自動車の吸入被ばく低減係数を保守的に1としているため、特に吸入による早期被ばく線量が増加した。

直線避難と経路避難の比較では、最大値方位の早期被ばく線量の95%値は直線避難の方が大きくなっている。ただし、最大値方位以外のいくつかのメッシュでは経路避難の方が早期被ばく線量が大きくなる。1.5km地点における各ケースの95%値シーケンスの避難開始前の位置ごとの早期被ばく線量（各時刻における位置を考慮して線量を積算）の分布をそれぞれ図 5.12、図 5.13、図 5.14に示す。

経路避難における1.5km地点からの避難で主に使用する2つの経路を図 5.15に示す。直線避難と経路避難では避難方向が異なるため、異なる気象シーケンスで最大値方位の早期被ばく線量が95%値になったと考えられる。

直線避難の場合には、避難方向と同様にプルームが直線移動するような気象シーケンスで最大値方位の早期被ばく線量のみが大きくなったと考えられる。これに対して経路避難の場合には、避難方向が経路に沿って変化するため、プルームの移動方向と完全には一致せず、最大値方位の早期被ばく線量は直線避難の場合よりも小さくなったものの、複数のメッシュから同じ避難経路へ合流することにより、避難方向とプルームの移動方向が部分的に一致する気象シーケンスで複数のメッシュの早期被ばく線量が同時に大きくなっていると考えられる。

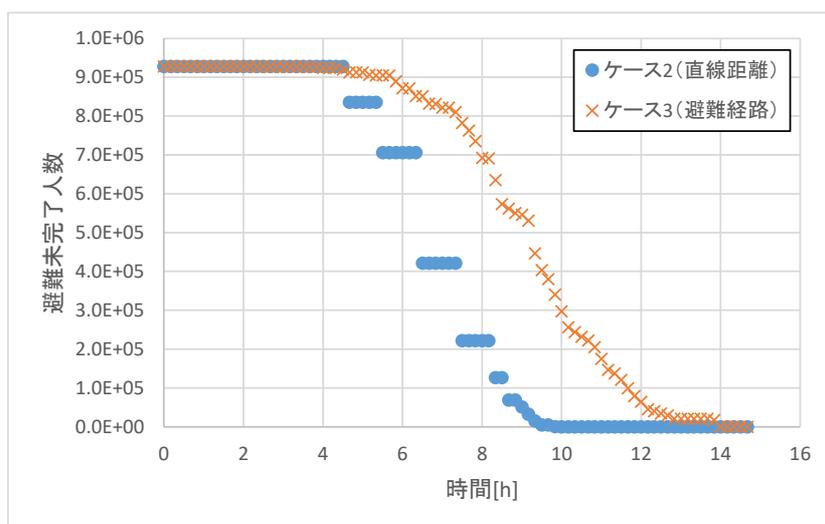


図 5.10 避難が完了していない人数 (直線避難と経路避難)

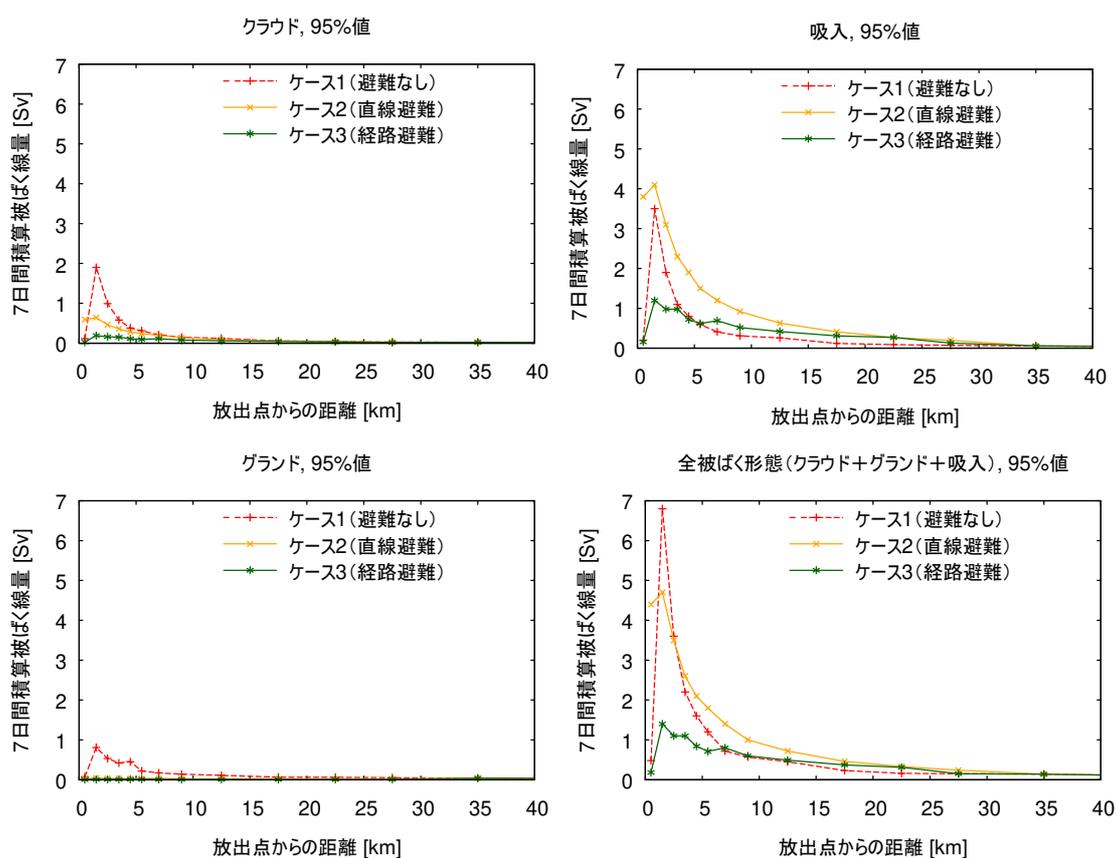


図 5.11 被ばく線量95%値 (最大値方位)

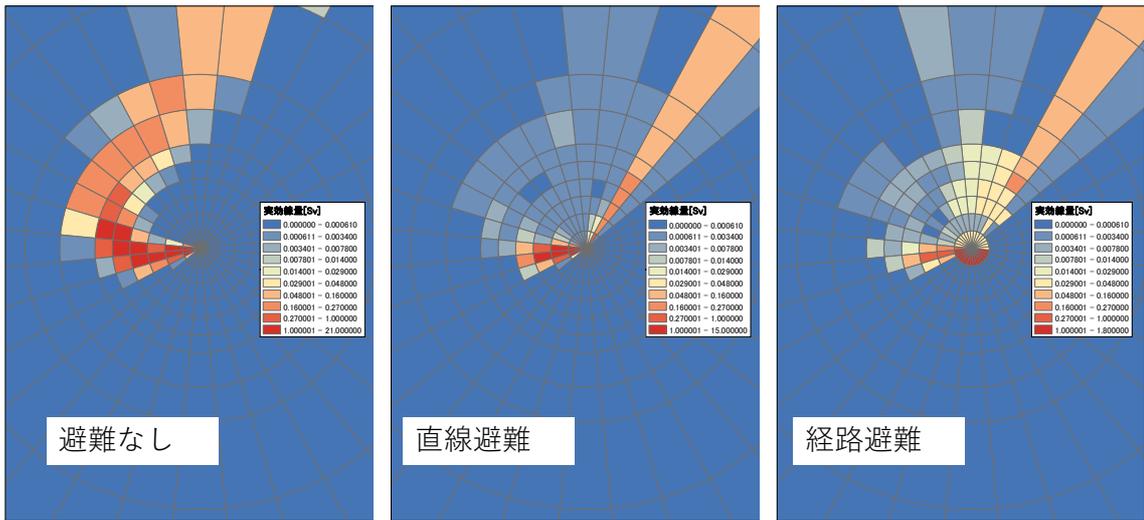


図 5.12 シーケンス167 (避難なしケースの95%値シーケンス) の線量分布

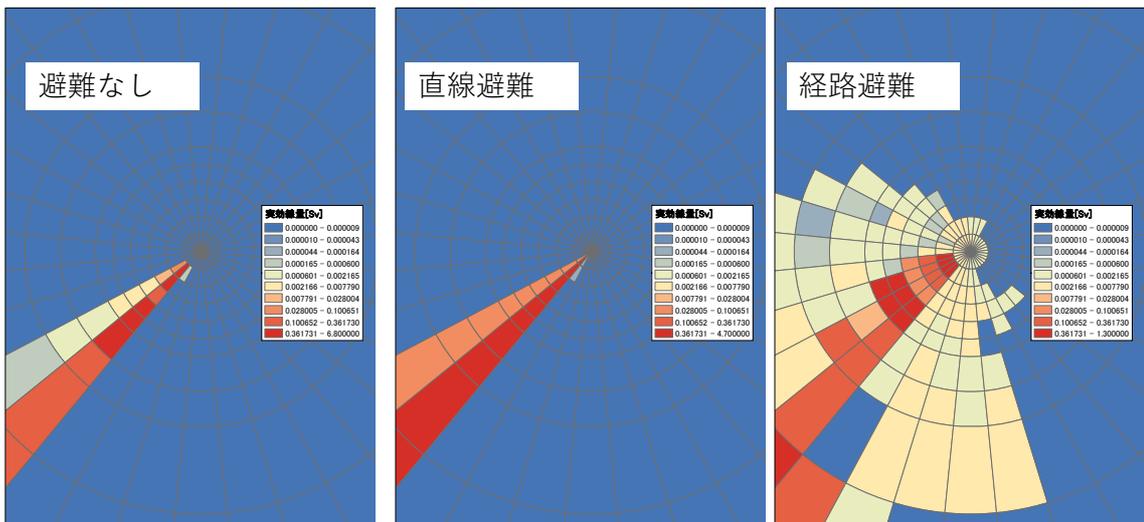


図 5.13 シーケンス180 (直線避難ケースの95%値シーケンス) の線量分布

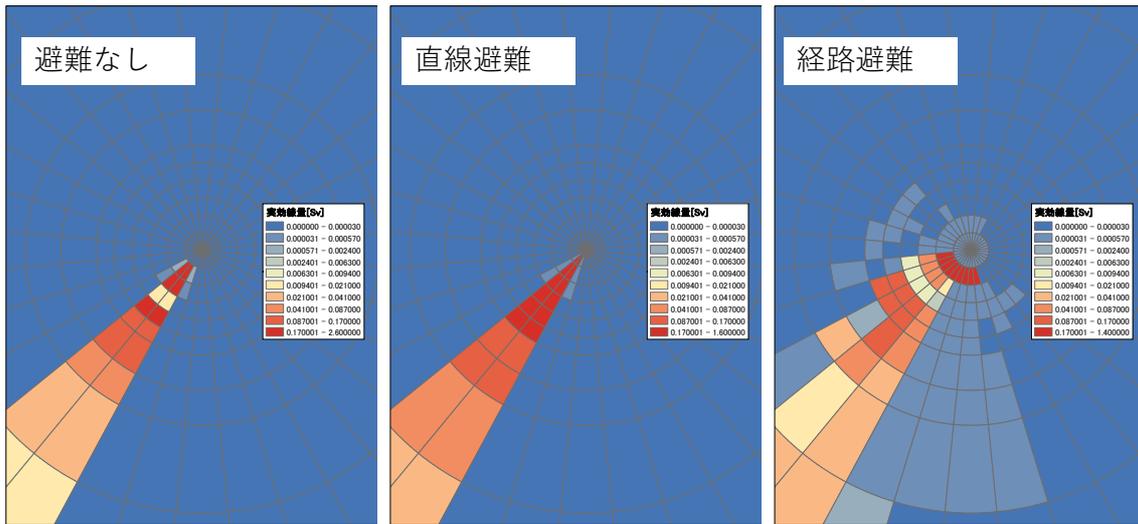


図 5.14 シーケンス035（経路避難ケースの95%値シーケンス）の線量分布

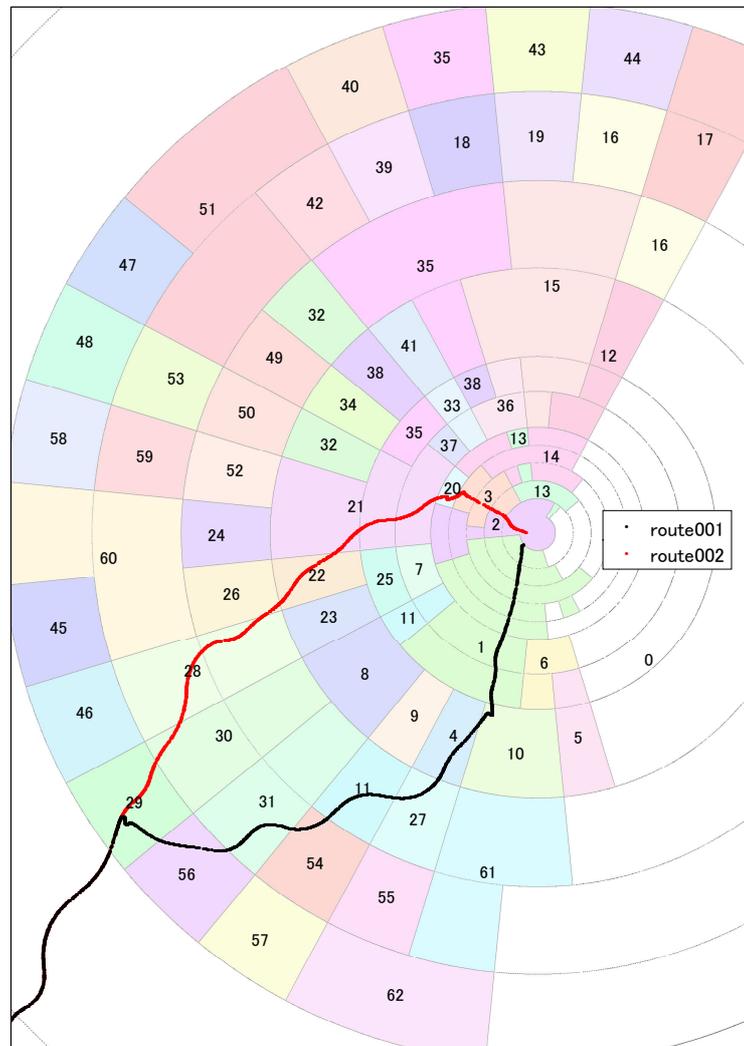


図 5.15 各メッシュが使用する経路番号と1.5kmメッシュの主な避難経路の図

(3) 今後の課題

実際の避難経路に沿った避難方向の変化を考慮した避難モデルでは、避難方向とブルームの移動方向の関係性によって、被ばく線量が増加するため、選択する避難経路によって線量が増加する気象シナリオが異なる。また、最大値方位の線量のみではなく、複数のメッシュで線量が増加する可能性がある。今後、これらのことを考慮して線量を適切に比較する方法について検討し、OSCAARプログラムの出力内容等を改良することが必要である。例えば、個人の被ばく線量ではなく、集団線量によって評価するという方法が考えられる。

今後、東海サイト以外の代表的なサイトの避難経路データを整備し、避難経路の特徴及びその差異による被ばく線量への影響を分析する必要がある。また、避難開始時間、避難時の移動速度、自動車の被ばく低減係数等も避難時の被ばく線量に影響を与えると考えられるため、避難経路データと合わせてこれらのパラメータも整備及び分析していくことが必要である。

第5章の参考文献

- 茨城県 (2019)、原子力災害に備えた茨城県広域避難計画 (平成 27 年 3 月策定、平成 31 年 3 月改定) .
- 総務省統計局 (2015)、平成 27 年国勢調査町丁・字等別境界データ、政府統計の総合窓口 (e-stat) <https://www.e-stat.go.jp/gis/statmap-search?page=1&type=2&aggregateUnitForBoundary=A&toukeiCode=00200521&toukeiYear=2015&surveyId=A002005212015&prefCode=08&coordsys=1&format=shape&datum=2000>、(最終閲覧日 2022 年 1 月 31 日)
- 木村 仁宣、佐藤 宗平、石川 淳、本間 俊充 (2010)、原子力緊急事態に対する準備と対応に関する国際動向調査及び防災指針における課題の検討、JAEA-Review 2010-011.
- 原子力規制委員会 (2014)、緊急時の被ばく線量及び防護措置の効果の試算について (案) , 平成 26 年 5 月 28 日.
- 国土地理院、測量計算サイト 距離と方位角の計算、<https://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/surveycalc/main.html>、(最終閲覧日 2022 年 1 月 31 日)
- B. R. Bowring, Total Inverse Solutions for the Geodesic and Great Elliptic, Survey Review, 33, 261, pp 461–476 (1996).
- S. Takahara et. al., Dose-reduction effects of vehicles against gamma radiation in the case of a nuclear accident, Health Physics, 114 (1), pp. 64-72 (2018).
- D. E. Thompson, K. Mabuchi, E. Ron, M. Soda, M. Tokunaga, S. Ochikubo, S. Sugimoto, T. Ikeda, M. Terasaki and D. L. Preston, Cancer incidence in atomic bomb survivors. Part II: Solid tumors, 1958–1987. Radiat. Res. 137 (Suppl.), S17–S67 (1994).
- Hsu, W. L., Preston, D. L., Soda, M., Sugiyama, H., Funamoto, S., Kodama, K., Kimura, A., Kamada, N., Dohy, H., Tomonaga, M., Iwanaga, M., Miyazaki, Y., Cullings, H., Suyama, A., Ozasa, K., Shore, R. and Mabuchi, K. The Incidence of Leukemia, Lymphoma and Multiple Myeloma among Atomic Bomb Survivors: 1950–2001. Radiat. Res. 179, 361–382 (2013).
- Ozasa, K., Shimizu, Y., Suyama, A., Kasagi, F., Soda, M., Grant, E. J., Sakata, R., Sugiyama, H. and Kodama, K. Studies of the Mortality of Atomic Bomb Survivors, Report 14, 1950–2003: An Overview of Cancer and Noncancer Diseases. Radiat. Res. 177, 229–243 (2012).
- Preston, D. L., Kusumi, S., Tomonaga, M., Izumi, S., Ron, E., Kuramoto, A., Kamada, N., Dohy, H., Matsuo, T., Nonaka, H., Thompson, D. E., Soda, M. and Mabuchi, K. Cancer Incidence in Atomic Bomb Survivors. Part III: Leukemia, Lymphoma and Multiple Myeloma, 1950–1987. Radiat. Res. 137, S68–S97 (1994).
- Preston, D. L., Shimizu, Y., Pierce, D. A., Suyama, A. and Mabuchi, K. Studies of Mortality of Atomic Bomb Survivors. Report 13: Solid Cancer and Noncancer Disease Mortality: 1950–1997. Radiat. Res. 160, 381–407 (2003)

- Preston, D. L., Pierce, D. A., Shimizu, Y., Cullings, H. M., Fujita, S., Funamoto, S. and Kodama, K. Effect of Recent Changes in Atomic Bomb Survivor Dosimetry on Cancer Mortality Risk Estimates. *Radiat. Res.* 162, 377–389 (2004).
- Preston, D. L., Ron, E., Tokuoka, S., Funamoto, S., Nishi, N., Soda, M., Mabuchi, K. and Kodama, K. Solid Cancer Incidence in Atomic Bomb Survivors: 1958–1998. *Radiat. Res.* 168, 1–64 (2007).
- Richardson, D. B., Sugiyama, H., Nishi, N., Sakata, R., Shimizu, Y., Grant, E. J., Soda, M., Hsu, W., Suyama, A., Kodama, K. and Kasagi, F. Ionizing Radiation and Leukemia Mortality among Japanese Atomic Bomb Survivors, 1950–2000. *Radiat. Res.* 172, 368–382 (2009).
- World Health Organization, International Classification of Diseases 11th Revision, ICD-11, URL, <https://icd.who.int/en>, (最終閲覧日 2021年12月7日)

6. OSCAAR コードの整備に関する情報収集

国内外におけるレベル3PRA に関する会議等に参加し、レベル3PRA 評価モデル等に関連する情報を入手した。ここでは、国際 MACCS ユーザーグループ (IMUG) 会議及び日本原子力学会2021年秋の大会に参加して得られた内容を示す。

6.1. International MACCS User Group 会合

- ・ 主要出張先：オンライン会議
- ・ 出張期間：令和3年9月20日（月）～9月23日（木）（4日間）

報告内容

MACCS の新たな機能や適用事例について発表があった。主な発表の概要を下記に記載する。

○AERMOD Model Overview and Downwash Update

U.S. EPA / OAQPS / Air Quality Modeling Group

概要：米国EPAが開発している大気拡散シミュレーションの紹介。原子力発電所近傍での拡散シミュレーションを精緻化するために、建屋の拡散の影響を詳細な流体シミュレーションLarge Eddy Simulations(LES)を用いて推定し、風洞実験及び実際のプラントに対する野外実験で妥当性を検討した。

○MACCS Code Applicability for Nearfield Consequence Analysis

Dan Clayton Sandia National Laboratories

概要：MACCSの大気拡散シミュレーションのうち、放出点近傍の現象を精緻化した。建屋効果、ブルーム浮遊、蛇行について、他の大気拡散モデルと比較した、そして、新しいMACCSに、放出点近傍計算のシミュレーションを追加した。既存のMACCSの機能を維持することも可能である。

- ・ ARCON96で使用されるRamsdellおよびFosmire蛇行モデル
- ・ PAVANに実装されているUSNRC規制ガイド1.145蛇行モデル

○Overview of MACCS Status and Development

J. E. Leute Sandia National Laboratories

MACCS 4.1 – Released on 30 July 2021! 9

概要：建屋近傍のモデルが更新された。新しい予測ピーク線量の出力機能が追加された。線量評価期間が設定可能になった。また、経済モデルがアップデートされた。そして、混相流情報が時間依存で設定可能になった。SecPopのupdate は2020のCensusesDataが出そろってからになる。

○The NOAA HYSPLIT Atmospheric Transport and Dispersion Model: Recent Updates and Nuclear Applications

Mark Cohen NOAA

概要：MACCSの大気拡散モデルに採用されているHYSPLITの最新の研究紹介。HYSPLITは米国内の山火事のブルーム予測、核実験が起こった場合の震源地推定などに活用されている。

○Experiences in Developing and Using an Eigenvector Implementation of a Dynamic Terrestrial Food-chain Model

Neil Harman, Jacobs, UK

概要：開発中のStand-aloneモデルの紹介。牛乳中のヨウ素の残留量の時間変化を計算。福島事故後のソースタームを用いた試計算を紹介。牛乳中のヨウ素は事故後5日をピークに減少することを示した。

○Fukushima Benchmark Analyses using RASCAL 4.3

Elisa Cramatte IDOM

概要：RASCALを用いて福島事故時の環境中のCs137の挙動を計算。Cs137の地表面沈着量の計算値が実測値を過大評価する一方、空間線量率の絶対値はCs137による推定値と実測値は近い値となった。ソースタームをSNLが計算したものを使用したことが、計算値が実測値を過大評価した原因と考えられる。

○Review of MACCS DCF Files for Computation of Total Effective Dose Equivalent (TEDE)

Keith L. Compton U.S. NRC

概要：米国ではTotal effective dose equivalent (TEDE)実効線量等量で基準値と比較することを法律で要求されているため、MACCSの出力である実効線量をそのまま使用することができない。そこで、MACCSの線量換算係数がTEDEをどれくらい近い値で計算できるかを評価した。その結果、一部の短寿命核種による影響の違いがあるが、MACCSの線量換算係数は概ねTEDEを評価できていることを示した。

○Independent Verification of MACCS Air Dispersion and Dose Models

Oswaldo Pensado Southwest Research Institute

概要：クラウドシャインの線量換算係数を策定するため、ブルームサイズに応じたクラウドシャインファクターを設定。ファクターの違いによるクラウドシャイン線量の変化を示した。

○LICENSING MODERNIZATION PROJECT FOR OPERATING REACTORS

Matt Humberstone U.S.NRC

概要：Level 3 PRAの結果を用いた意思決定のフレームワークの紹介。事故発生確率を縦軸、実効線量等量を横軸に設定してFrequency-Consequence Curveを作成。リスク低減効果を表示。

○Update of MACCS Dose Coefficients to US EPA FGR 15

R. Moffett CALIAN

概要：新しいEPA FGR15の線量換算係数をMACCSに導入するにあたり、これまで使用していたFGR13の結果と比較した。外部被ばく線量換算係数の違いは、土壌への核種の浸透具合の違いが影響している。しかし、核種の違いによる換算係数の違いについて詳細な説明はなかった。

○Advanced Reactor Initiatives for MACCS - Radionuclide Screening

J. E. Leute Sandia National Laboratories

概要：MACCSのソースタームとして825核種の中から150種類を選択可能、LWRに対しては71核種を選定して10種の化学種類に分類。最新の原子炉（高温ガス炉、ナトリウム冷却炉、金属燃料炉等）に対する核種と化学種類について報告。

○Demonstration of MACCS Capabilities for Advanced Reactors

Mariah Smith Sandia National Laboratories

概要：最新の原子炉に対するオフサイト影響評価。SOARCAプロジェクトの手法に則り、半径10km以内の放射線リスクを評価。人口集団ごと、距離ごとに被ばく線量を評価。さらに、化学種ごとの被ばく線量への寄与を報告。

MACCS and the licensing process of nuclear facilities in Argentina.

Cristobal Mulleady CNEA-Argentina

概要：アルゼンチンの原子力発電所に対するMACCSの活用。発電所周辺地域の放射線リスクを2次元表示し、避難有り無しで比較した結果を紹介。マルチユニットに対するLevel3PRAも検討中である。

○Nonradiological Health Consequences from Evacuation and Relocation (NUREG/CR-7285)

Amy Sharp, Office of Nuclear Regulatory Research

概要：避難による健康影響の文献調査。82の文献をメタ解析した。避難が生じた事象は、文献数が多い順番で原子力発電所事故、ハリケーン、地震、津波、山火事であった。分析の結果、避難に由来して発生した健康影響は全ての症状を合計した場合のオッズ比は1.49と評価された。また、PTSDに関してのオッズ比は1.73と評価された。

○Solution to Perform a Large Number of MACCS Calculations using MAAP Results

Sung-Yeop Kim KAERI

概要：マルチユニットの事故影響評価を実施するため、MAAPが出力した多数のソースタームを設定してMACCSの計算を実施するツール（MUST Converter）を開発。MUST Converterにより、MACCSにおけるソースタームの設定のうち、放出割合のカットオフ、警告時間、粒径ビン数の設定をスムーズに実施できるようになった。複数のソースタームに対してMACCS内のフォルダを自動で作成し、MACCSを計算。計算結果をエクセルで表示する機能もある。また、複数のMACCSインプットファイルを一度に計算するためのGUIソフトMr Managerを紹介し、デモンストレーションをした。

6.2. 原子力学会2021年秋の大会

- ・ 主要出張先：オンライン会議
- ・ 出張期間：令和3年9月8日（水）～9月10日（金）（3日間）

報告内容: Level3確率論的リスク評価・原子力防災に関する発表の概要と質疑応答

○FARSITEを用いた森林火災評価の自動化ツール整備

(2)FARSITEの組み込みによる全自動化、及び拡張機能

*富永 浩太1、京 久幸1、藤原 大資1、山口 龍之介1、藤田 博之1 (1. テプシス)

概要：原子力発電所周辺の森林火災評価を迅速に反映するためのFARSITEの自動化ツールの報告。GISツールを介さずにExcel画面上から森林火災解析を実行し、火災到達時間などの出力結果を迅速・簡便に得ることができた。

参加者コメント：緊急時だけでなく、事前のリスク評価での活用も期待される。

○IRIDMを活用した原子力事故の複合災害を考慮した事業継続計画の提案

*荒木 浩考1、山本 啓太1、村上 健太2 (1. 長岡技科大、2. 東大)

概要：長岡技術科学大学における東電柏崎刈羽発電所の原子力複合災害を考慮した危機管理の際の意思決定及び事業継続計画の策定にIntegrated Risk Informed Decision Making (IRIDM) プロセスを活用し、その有効性の検証について発表。IRIDMプロセスで考慮するキーエレメントの内、放射線リスクを評価するためにOSCAARコードを活用して屋内退避とコンクリート屋内退避による被ばく線量の違いを示した。OSCAARの計算結果は決定論的であり、確率論的評価は今後の課題であった。

質疑応答：OSCAARの計算条件についての質問があり、72時間の屋内退避後の住民の行動はRelocationを設定して被ばくが無くなると仮定したと回答があった。

○異常降雪リスクに関するハザード曲線分析

*中島 理紗子1、小池 朱里1、堺 公明1 (1. 東海大)

概要：気象データに基づく降雪ハザードの分析として、既存の軽水炉サイト近郊の日降雪量及び積雪深に関する年超過確率によるハザード曲線を作成した。また、それらの結果に基づき、設計基準を超える事故に対して参照すべきリスク基準値と比較した。また、地球温暖化の進展に伴い、短期間に発生する異常降雪の可能性について検討した。

質疑応答：Level3PRAでは降雪が十分に考慮できていない。また、地球温暖化を考慮した気象変動を使ってLevel3PRAを実施することが重要であるとコメントがあった。

学生ポスターセッション

○降雪に着目したレベル3PRAによる被ばくリスク評価

山本 啓太 長岡技術科学大学 修士2年 (M2)

概要：レベル3PRAの包摂性を高めるには、リスク評価の複数の要素に影響を与える外的事象の取り扱いを工夫する必要がある。本研究では降雪に着目し、降雪が放射性物質の移行および防護措置の実効性に与える影響を陽に考慮したリスク評価が、平均的な方法と異なる結果を与えるか考察することを目的とした。評価にはJAEAが開発したOSCAARを使用した。平均的なリスクプロファイルとして、2018年の1時間ごとの全気象条件を計算し、その中央値を用いた。降雪日については、2018年において顕著な降雪が見られた日をサンプリングした。結果として、降雪日は実効線量が増加し、中でも地表への沈着割合が高くなった。

質疑応答：平均的な気象条件とはどのような気象条件かと質問したところ、使用しているOSCAARではリスクが中央値となる気象条件の詳細な情報は得られないと回答があった。