

令和4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5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

原子力災害時の防災計画の策定にあたっては、放出された放射性物質による影響について事前に評価を行うとともに、防災対策を実施することでどのくらい被ばくを低減できるのかについても併せて評価しておく必要がある。レベル3PRAはこのような評価を行う方法の一つであり、国内においてもレベル3PRAのための解析コードとしてOSCAARの開発及び改良がおこなわれているところである。

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4年度「被ばく解析手法の整備」を受託した。本事業では、OSCAARに関する改良を施すものであり、時系列情報を活用するための改修に加え、再浮遊核種からの被ばく線量評価モデル、避難及び屋内退避の防護措置モデルに係る検討を実施する。また、レベル3PRAや事故影響評価等に係る情報を収集・整理する。

## 目次

まえがき .....	i
目次 .....	ii
表リスト .....	iv
図リスト .....	vi
1. 事業の概要 .....	1
1.1. 目的 .....	1
1.2. 範囲 .....	1
2. 時系列情報の活用に関する改修 .....	3
2.1. 手法の検討 .....	3
2.1.1. 時系列データの抽出 .....	3
2.1.2. 特定の方位の統計値 .....	3
2.1.3. 集団線量および被ばく線量別の人口分布 .....	3
2.2. OSCAARによる解析 .....	5
2.2.1. 計算条件 .....	5
2.2.2. 時系列データ .....	12
2.2.3. 避難開始時間の被ばく線量への影響 .....	14
2.3. 今後の課題 .....	20
第2章の参考文献 .....	21
3. 被ばく評価モデルの検討 .....	22
3.1. 土壌粒子の再浮遊挙動解析 .....	22
3.1.1. 文献調査 .....	22
3.1.2. プログラムSOLVEG-Rの概要 .....	25
3.1.3. 計算条件 .....	27
3.1.4. 計算結果（実気象解析） .....	29
3.1.5. 計算結果（定常解析） .....	34
3.1. 再浮遊粒子の空間分布に基づく被ばく線量の計算 .....	43
3.1.1. 計算方法 .....	43
3.1.2. 計算条件 .....	48
3.1.3. 計算結果 .....	48
第3章の参考文献 .....	56
4. 防護措置モデルの検討 .....	60
4.1. 国内サイト周辺の建蔽率データの整備 .....	60
4.2. 屋内退避モデルのOSCAARへの組み込み .....	79

4.2.1. 屋内退避モデルの概要.....	80
4.2.2. メッシュごとの評価の流れ.....	83
第4章の参考文献.....	92
5. 防護措置効果検討に用いる解析用データの整備.....	93
5.1. 避難経路データ.....	93
5.1.1. 避難経路解析プログラムの改良.....	93
5.1.2. 避難経路データの作成方法.....	97
5.1.3. 各サイトの避難経路データ.....	98
第5章の参考文献.....	100
6. OSCAAR コードの整備に関する情報収集.....	101

## 表リスト

表 2.1	環境への放出割合 .....	8
表 2.2	共通のOSCAAR計算条件 .....	8
表 2.3	被ばく低減係数.....	8
表 2.4	東海サイト避難経路1.....	9
表 2.5	各地点のプルーム到達時間の統計値 .....	12
表 3.1	再浮遊係数の文献調査結果.....	24
表 3.2	土壌の積算深度別再浮遊係数（2012年） .....	31
表 3.3	2012年と2021年の高度別Cs-137濃度.....	31
表 3.4	風速一定条件での高度別Cs-137濃度.....	35
表 3.5	降水量一定条件での高度別Cs-137濃度.....	35
表 3.6	風速一定条件での高度別Cs-137最大濃度 .....	36
表 3.7	降水量一定条件での高度別Cs-137最大濃度.....	36
表 3.8	dumpファイルに保存する情報 .....	44
表 3.9	組織加重係数（ICRP Pub.103） .....	45
表 3.10	骨組織の構成（ICRP Pub.110 Table4.2） .....	46
表 3.11	年度別の時間実効線量（年平均値） .....	49
表 3.12	年度別の時間実効線量（年最大値） .....	50
表 3.13	年積算外部被ばく実効線量.....	50
表 3.14	風速一定条件での時間実効線量（年平均値） .....	51
表 3.15	降水量一定条件での時間実効線量（年平均値） .....	51
表 3.16	風速一定条件での土壌中Cs-137濃度.....	52
表 3.17	降水量一定条件での土壌中Cs-137濃度.....	52
表 3.18	風速一定条件での時間実効線量（規格化、年平均値） .....	52
表 3.19	降水量一定条件での時間実効線量（規格化、年平均値） .....	53
表 3.20	風速一定条件での時間実効線量（年最大値） .....	53
表 3.21	降水量一定条件での時間実効線量（年最大値） .....	54
表 3.22	風速一定条件での時間実効線量（規格化、年最大値） .....	54
表 3.23	降水量一定条件での時間実効線量（規格化、年最大値） .....	55
表 4.1	物質形態、建築年区分ごとの定数のまとめ .....	91
表 4.2	各建築年区分、建蔽率での補正前後の被ばく低減係数の比（補正前：風速一定条件/風速変動条件、補正後：補正条件/風速変動条件） .....	91
表 5.1	避難経路解析プログラムの入出力ファイル .....	94
表 5.2	避難経路解析プログラムの入力パラメータ .....	95

表 5.3 避難経路数 .....	98
-------------------	----

## 図リスト

図 2.1	防護措置モデルの概要	4
図 2.2	東海サイト全避難経路（赤色：経路1）	10
図 2.3	東海サイト5km圏内からの避難経路（計6経路）	11
図 2.4	各地点のプルーム到達時間の分布	13
図 2.5	各地点の空間線量率の時間変化	13
図 2.6	被ばく線量95%値（最大値方位）	15
図 2.7	集団線量（5km圏内）の統計値	15
図 2.8	シーケンス405の線量分布	16
図 2.9	シーケンス405の被ばく人数（5km圏内）分布	16
図 2.10	シーケンス364の線量分布	17
図 2.11	シーケンス364の被ばく人数（5km圏内）分布	17
図 2.12	シーケンス140の線量分布	18
図 2.13	シーケンス140の被ばく人数（5km圏内）分布	18
図 2.14	シーケンス63の線量分布	19
図 2.15	シーケンス63の被ばく人数分布	19
図 3.1	地表面粒子の移動メカニズム(Shao 2008)	26
図 3.2	再浮遊に関与するメカニズム(Shao 2008)	26
図 3.3	福島県内の深度別Cs-137濃度分布	28
図 3.4	ハイボリュームエアサンプラ(原子力規制庁 2021)	29
図 3.5	SOLVEG計算値と実測値の比較（土壤中濃度）	32
図 3.6	土壤中の深度分布	32
図 3.7	土壤中の深度分布L <sub>90%</sub> の経時変化(原子力規制委員会 2022)	33
図 3.8	大気中Cs-137濃度の年平均値（2012年）	33
図 3.9	大気中Cs-137濃度の経時変化	34
図 3.10	風速一定条件下での再浮遊粒子フラックス	37
図 3.11	風速一定条件下での再浮遊粒子中Cs-137フラックス	38
図 3.12	風速一定条件下での大気中Cs-137濃度分布	39
図 3.13	実気象条件と風速一定条件下での大気中Cs-137濃度分布比較	39
図 3.14	降水量一定条件下での再浮遊粒子フラックス	40
図 3.15	降水量一定条件下での再浮遊粒子中Cs-137フラックス	41
図 3.16	降水量一定条件下での大気中Cs-137濃度分布	42
図 3.17	実気象条件と降水量一定条件下での大気中Cs-137濃度分布比較	42
図 3.18	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.110) .....	47
図 3.19 実効線量を求めるための性の平均化 (ICRP Pub103) .....	47
図 3.20 計算領域 .....	48
図 4.1 2分の1地域メッシュとベクトルタイルのメッシュ例。 .....	62
図 4.2 2分の1地域メッシュから同心円メッシュに換算する流れ。 .....	62
図 4.3 泊原子力発電所付近の建蔽率 .....	63
図 4.4 東通原子力発電所付近の建蔽率 .....	64
図 4.5 六ヶ所原子燃料サイクル施設付近の建蔽率 .....	65
図 4.6 女川原子力発電所付近の建蔽率 .....	66
図 4.7 福島第一原子力発電所付近の建蔽率 .....	67
図 4.8 東海第2原子力発電所付近の建蔽率 .....	68
図 4.9 志賀原子力発電所付近の建蔽率 .....	69
図 4.10 柏崎刈羽原子力発電所付近の建蔽率 .....	70
図 4.11 浜岡原子力発電所付近の建蔽率 .....	71
図 4.12 高浜原子力発電所付近の建蔽率 .....	72
図 4.13 敦賀原子力発電所付近の建蔽率 .....	73
図 4.14 美浜原子力発電所付近の建蔽率 .....	74
図 4.15 大飯原子力発電所付近の建蔽率 .....	75
図 4.16 島根原子力発電所付近の建蔽率 .....	76
図 4.17 伊方原子力発電所付近の建蔽率 .....	77
図 4.18 玄海原子力発電所付近の建蔽率 .....	78
図 4.19 屋内退避モデルのOSCAARへの組み込みの流れ .....	80
図 4.20 屋内退避モデルの概要 .....	82
図 4.21 屋内外の空気交換を模擬したコンパートメントモデル .....	82
図 4.22 風速一定条件と風速変動条件で求めた被ばく低減係数の比 .....	85
図 4.23 風速一定条件と風速変動条件で求めた被ばく低減係数の比とプルーム通過 前後の風速比との関係 .....	86
図 4.24 風速一定条件と風速変動条件で求めた被ばく低減係数の比とプルーム通過 前後の風速比を一次直線で表した場合の比例定数とy切片の建蔽率依存性 (粒子 状物質) .....	87
図 4.25 風速一定条件と風速変動条件で求めた被ばく低減係数の比とプルーム通過 前後の風速比を一次直線で表した場合の比例定数とy切片の建蔽率依存性 (CH <sub>3</sub> I) .....	88
図 4.26 風速一定条件と風速変動条件で求めた被ばく低減係数の比とプルーム通過 前後の風速比を一次直線で表した場合の比例定数とy切片の建蔽率依存性 (I <sub>2</sub> )	

.....	89
図 4.27 風速一定条件、風速変動条件、補正条件で求めた被ばく低減係数の比 ...	90
図 5.1 避難経路解析プログラムによる処理の流れ .....	95
図 5.2 移動経路の計算手順 .....	96
図 5.3 整備した避難経路の例（高浜町からの避難経路） .....	99

## 1. 事業の概要

### 1.1. 目的

重大事故の影響及び防護措置による影響低減効果を評価するため、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。

### 1.2. 範囲

1.1に記載した目的のもと、本事業では、以下の5項目を実施した。

#### (1) 時系列情報の活用に関する改修

OSCAAR コードが出力する線量等の時系列変化を活用し、防護措置、事故進展等が結果に及ぼす影響に関する情報を整理するための手法を検討した。放射性物質の放出条件が特徴的な複数の事故シナリオに対して、線量等の推移を確認しながら防護措置の内容及びタイミングを設定し、影響の変化を分析した。

#### (2) 被ばく評価モデルの検討

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、無限に一様に分布する放射性物質の中に標的が置かれたことを模擬して算出された線量換算係数利用している。しかし、実際には、再浮遊核種が到達する高さは地表面から有限であり、サブマージョンよりも被ばくの程度は小さくなることが予想される。

そこで、数値流体力学等を用いた解析により再浮遊物質の空間分布を導出し、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実施した。

#### (3) 防護措置モデルの検討

原子力災害時の屋内退避について、現状のOSCAAR コードでは全ての解析範囲において一律の被ばく低減係数を利用して被ばく評価を行っている。しかし、近年の研究により、社会条件や気象条件を考慮して家屋内へ侵入してくる放射性物質量を解析するモデルが開発されたところである。そこで、様々な条件で異なる被ばく低減効果の違いを考慮して屋内退避時の被ばく線量を評価できるようにするため、最新知見の調査及び解析モデルへの反映方法を検討し、OSCAAR コードの屋内退避評価モデルの高度化に必要となる作業を整理した。

#### (4) 防護措置効果検討に用いる解析用データの整備

OSCAAR コードの避難解析モデルを利用して、国内サイトの避難経路を考慮した解析を実施できるようにするため、地域の緊急時対応において避難経路が定められたサイトに対して避難経路データの整備を実施した。

#### (5) OSCAAR コードの整備に関する情報収集

国内外における確率論的環境影響評価に関係する会議等が開催される場合にはこれに参加し、評価モデルの検討に関連する情報を入手した。

以下、本報告書では、第2章で「時系列情報の活用に関する改修」、第3章で「被ばく評価モデルの検討」、第4章で「防護措置モデルの検討」、第5章で「防護措置効果検討に用いる解析用データの整備」及び第6章で「OSCAAR コードの整備に関する情報収集」のそれぞれに関する成果を記載する。

## 2. 時系列情報の活用に関する改修

### 2.1. 手法の検討

昨年度実施したOSCAARの改良によって、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・出力可能となった。

また、OSCAARの防護措置モデルでは図 2.1に示すような防護対策の時間進展を考慮して被ばく線量の積算値を計算することが可能である。さらに、避難経路データを整備することによって、避難を選択した場合には移動を考慮した早期被ばく線量の積算値を計算することが可能となっている。

本章ではOSCAAR コードが出力する線量等の時系列変化を活用し、防護措置、事故進展等が結果に及ぼす影響に関する情報を整理するための手法を検討する。

#### 2.1.1. 時系列データの抽出

時系列データには距離別・方位別および気象シーケンス別のデータが含まれている。本作業では、距離番号・方位番号・気象シーケンス番号を指定して特定の位置および気象シーケンスにおけるデータを抽出できるようにした。また、距離番号・方位番号を指定して特定の位置において、空間線量率が0でない値になる時間をプルームの到達時間として評価・出力できるようにした。以上のデータ抽出はPython3によるスクリプトを作成して実施した。

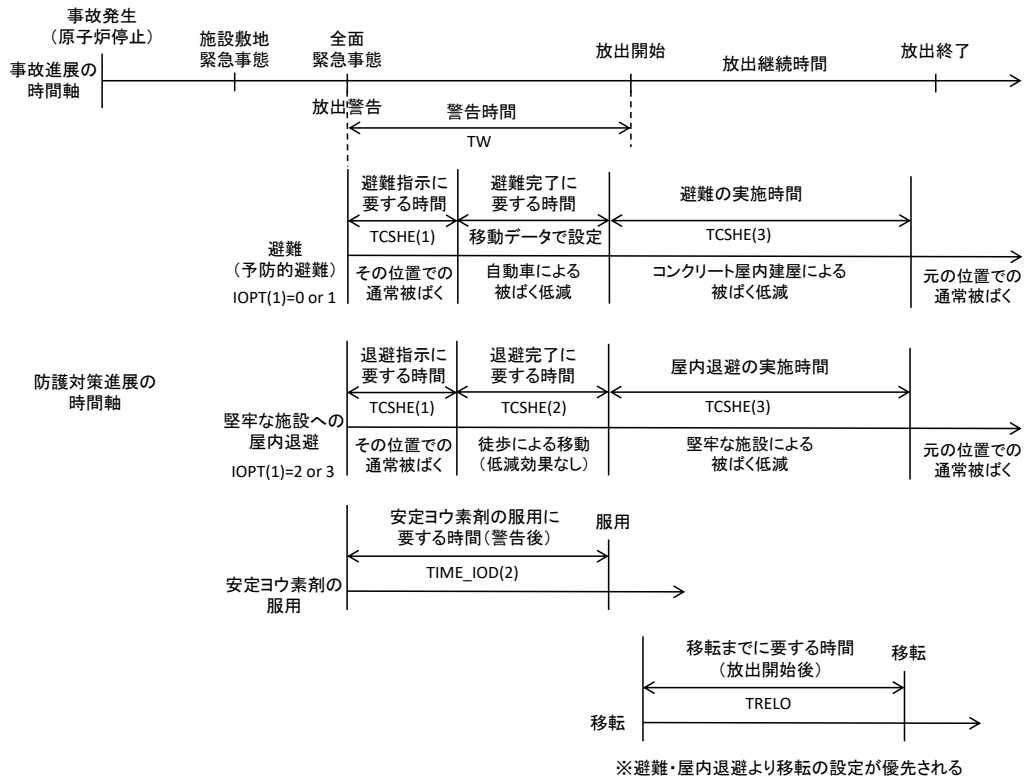
時系列データを抽出する気象シーケンスは、次項で述べる特定の方位の統計値の計算によって、避難経路上の特定の位置の早期被ばく線量が50%値、95%値、最大値になる気象シーケンス番号をそれぞれ求めて決定した。プルームの到達時間はすべての気象シーケンスについて出力して統計値を計算した。

#### 2.1.2. 特定の方位の統計値

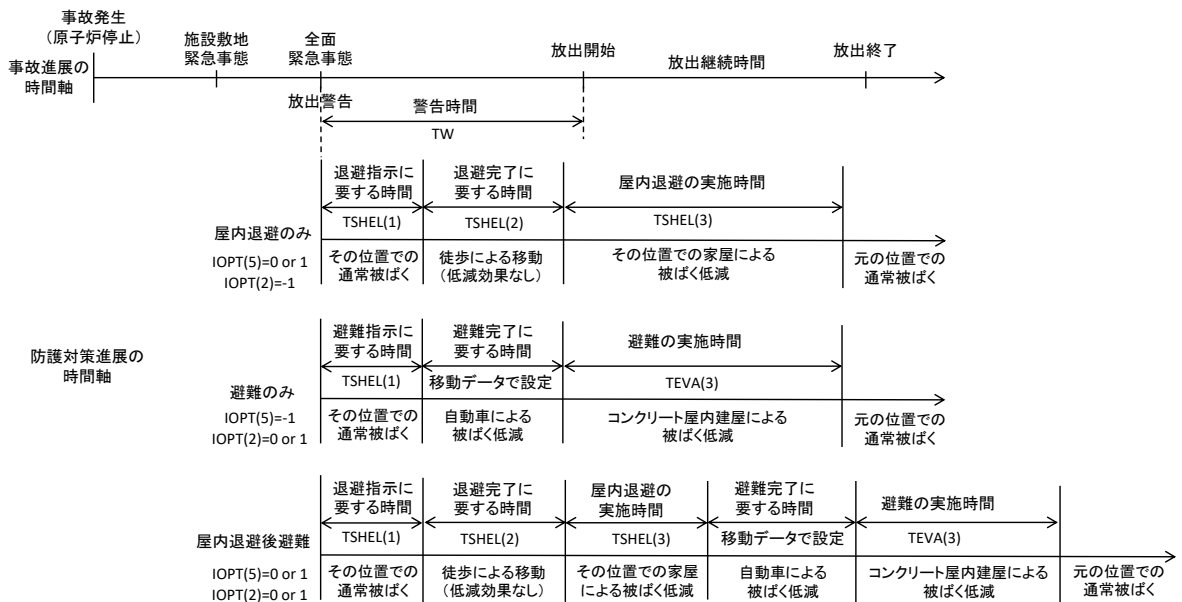
PostOSCAARのstatコマンドでは距離ごとに「方位平均値」または「方位最大値」に対して統計値を計算することができる。これに加えて、方位番号を指定して特定の方位の統計値を計算することができるように改良した。

#### 2.1.3. 集団線量および被ばく線量別の人口分布

PostOSCAARに集団線量および被ばく線量別の人口分布を計算するコマンドを追加した。集団線量は距離ごとにその距離よりも内側にあるすべてのメッシュについて被ばく線量と人口を乗じたものを足し合わせるによって求める。



(a) PAZ内での防護措置フロー



※安定ヨウ素剤の服用と移転の進展はPAZと同様(ただし、安定ヨウ素剤の服用に要する時間はTIME\_IOD(1)で設定)

(b) UPZ内での防護措置フロー

図 2.1 防護措置モデルの概要

## 2.2. OSCAARによる解析

### 2.2.1. 計算条件

#### (1) 事故シナリオ

レベル 3PRA のような事故影響評価では、放射性物質が環境中へ放出された後の挙動や被ばくを評価するが、そのもととなるソースターム情報は、レベル 1 及び 2PRA のような炉内解析に基づいて得られる情報となる。ここでは、SA 解析コード MELCOR による BWR5/Mark-II プラントを対象としたソースターム評価結果をもとに、事故影響評価で用いられる代表的ソースターム情報について整理する。

ソースターム情報は、(i) 炉内内蔵量に対する環境中へ放出される放射エネルギー、(ii) 放出開始時間及び (iii) 発生頻度によって記述される。木村 (2010) によると、これらの (i) ~ (iii) で記述される場合、これら 3 つの軸を包含するようにソースターム情報を選ぶと、代表的な事故シナリオは以下の 4 つとなる。

- ・ 早期大規模放出
- ・ 後期大規模放出
- ・ 管理放出
- ・ 事故終息

以下、これらの事故について、木村 (2010) に基づいて概要を記載する。

#### 早期及び後期大規模放出

エナジェティック現象、過圧破損、ISLOCA の事故シナリオがこの分類に属し、初期炉内内蔵量の 10% 程度のヨウ素が環境へ放出されるものである。これらの事故は、炉心全体が溶融し、溶融した炉心が圧力容器外に放出された上で格納容器が大規模に破損する場合の結果である。エナジェティック現象による格納容器破損については、水蒸気爆発、高圧溶融物噴出等が該当し、これらは早期大規模放出シナリオと呼ばれている。このようなシナリオは、環境への放出開始時刻が早く、発生確率はかなり低い。

過圧破損については、非凝縮性ガス及び水蒸気による格納容器の過圧破損と水蒸気による格納容器の過圧破損の 2 つが存在する。非凝縮性ガス及び水蒸気による格納容器の過圧破損については、環境への放出開始時刻にはある程度 (10 時間以上) 猶予があることから、後期大規模放出シナリオと呼ばれている。また、水蒸気による格納容器の過圧破損は、炉心溶融前に格納容器が破損することから、格納容器先行破損シナリオと呼ばれている。この格納容器先行破損シナリオは、環境への放射性物質の放出量は比較的多い部類に属し、発生頻度も BWR5/Mark-II プラントにおいては最も高いが、環境への放出開始時刻が 40 時間以上と極端に遅いことから、個人リスクの観点からは重要ではない。ISLOCA については、低圧系配管の隔離弁故障による格納容器バイパス事象であるので、放出開始時刻も比較的早い

が、高圧炉心スプレイ系の作動により、12 時間程度まで放出開始時刻を遅らせることが可能との見もある。

### 管理放出

格納容器ベントのように、制御可能な状況下において意図的な放出が行われる場合を、管理放出と呼ぶ。例えば、格納容器ベントは、格納容器の過圧破損を防止するため、圧力抑制プールを経由させて格納容器中の放射性物質を低減させた後に排気筒から環境へ放出させるものである。

### 事故終息

格納容器スプレイの作動等の事故復旧操作により格納容器内の圧力を低く抑えることで事故終息に至る。格納容器は破損しないことから環境への放射性物質の放出は、設計漏洩のみとなる。

これらの事故シナリオに関するソースターム情報を表 2.1 に示す。本解析では、これらのうち、早期大規模放出のソースタームを利用して解析を実施する。現在の原子力災害時の意思決定では OIL に基づく意思決定が行われるが、UPZ 内において OIL2 である 20  $\mu\text{Sv/h}$  を上回る汚染が発生するのは大規模放出程度の放出量が必要である。このため、今後の解析において OIL に基づく意思決定を行う際の検討に関する基礎データを整備するためには、早期又は後期大規模放出を優先的に選択する必要がある。さらに、避難のタイミングが問題となるのは、事故から数時間以内の急な事故進展となるシナリオであるので、ここでは早期大規模放出を代表的なシナリオとして採用した。

#### (2) 気象条件

本解析で用いた気象条件を表 2.2 に示す。気象条件には、2020年東海サイトのデータを利用した。年間8760時間のうちから500シーケンスをランダムサンプルして利用した。

#### (3) 防護措置の設定

本計算では、防護措置と事故進展のタイミングによる被ばく線量の変化を試解析するため、PAZおよびUPZ領域ですべて同一の防護措置を仮定して計算を行うことにした。防護措置として避難を実施し、避難開始のタイミングが被ばく線量に与える影響を確認した。避難開始のタイミングとして

- ケース 1：避難なし（日常生活）
- ケース 2：放出と同時に避難開始（警告時間 3 時間、避難指示に要する時間 3 時間）
- ケース 3：放出 1 時間前に避難開始（警告時間 3 時間、避難指示に要する時間 2 時間）



状況別の被ばく低減係数を表 2.3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。

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とし、茨城県広域避難計画（茨城県, 2019）に基づく、東海サイトの避難経路データ（図 2.2）を用いる。

時系列データは表 2.4に示す避難経路1上の地点について求める。集団線量および被ばく線量別の人口分布はPAZ (5km圏内) を対象として求める。避難経路のうち、PAZ (5km圏内) からの避難経路は図 2.3に示す6経路である。

#### (4) 計算指標

従来、OSCAARを用いた解析では、1週間当たりの実効線量又は等価線量を評価してきた。一方、本事業における回収作業によって新たな時系列解析が可能となったので、本解析では、2.1で行った改修・検討をもとに、(i) 時系列空間線量率、(ii) 特定方位の統計値、(iii) 集団線量、(iv) 1週間当たりの実効線量の人口分布について、新たに解析を行った。

表 2.1 環境への放出割合

シナリオ	放出 開始時間	放出割合						
		希ガス	I類	Cs類	Te類	Ba類	Ru類	La類
早期大規模	3	1.0E-00	7.9E-02	1.1E-02	2.6E-02	1.1E-08	1.0E-02	1.0E-02
後期大規模	27	9.5E-01	3.3E-02	2.8E-02	2.9E-04	1.6E-08	3.8E-11	6.4E-12
管理放出	12	8.7E-01	9.1E-04	7.5E-04	3.2E-04	2.0E-08	3.4E-11	7.1E-12
事故終息	4	1.2E-03	1.2E-05	2.2E-05	3.1E-06	4.6E-09	1.5E-11	1.2E-12

表 2.2 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） ・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 2.1参照

表 2.3 被ばく低減係数

分類	状況	被ばく形態		
		クラウド シャイン	グランド 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 人口割合には、次の値を利用する。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。

表 2.4 東海サイト避難経路1

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

※避難経路1の始点（メッシュ53）・途中（メッシュ215）・終点（メッシュ437）について時系列データを示す

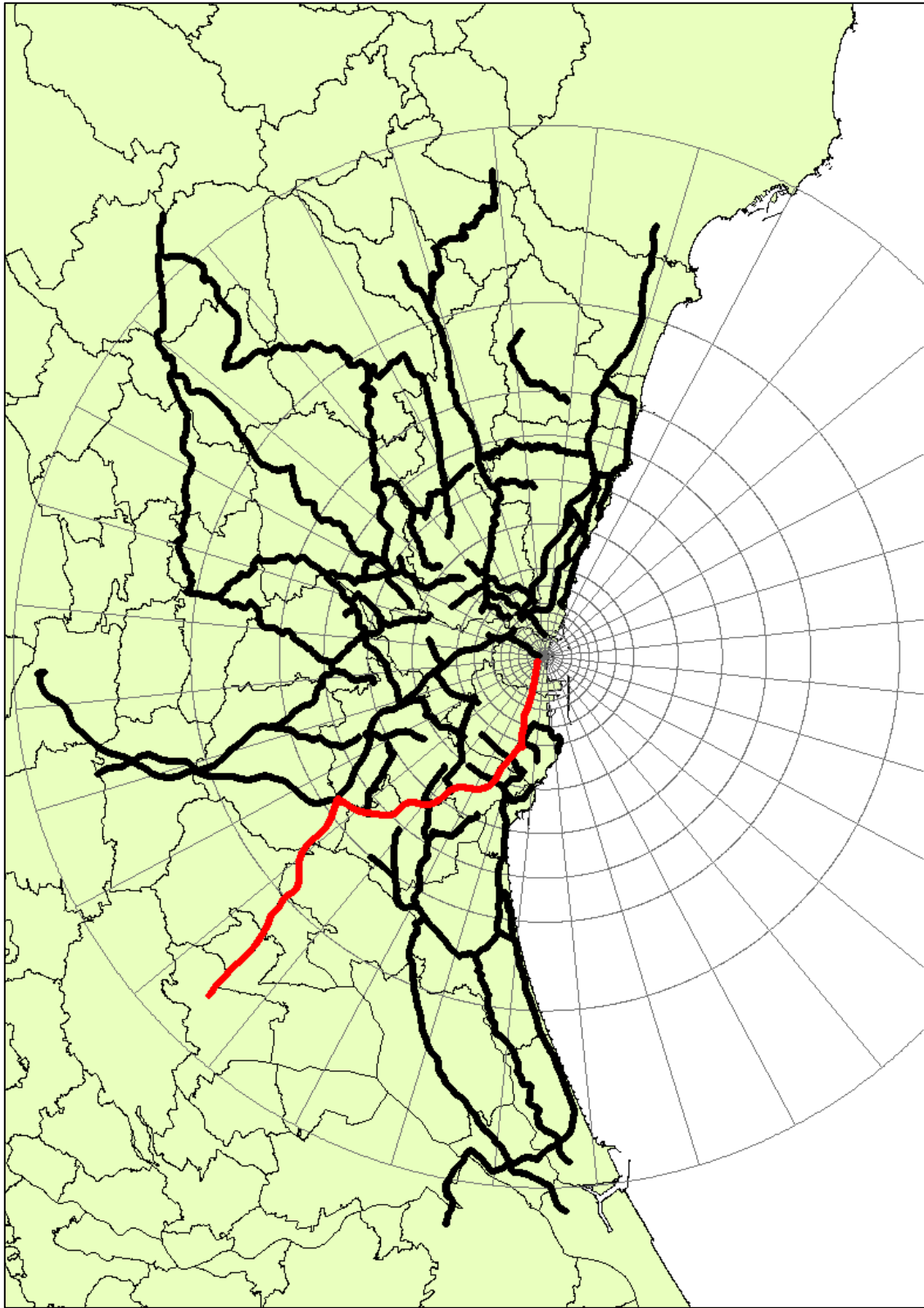


図 2.2 東海サイト全避難経路 (赤色：経路1)

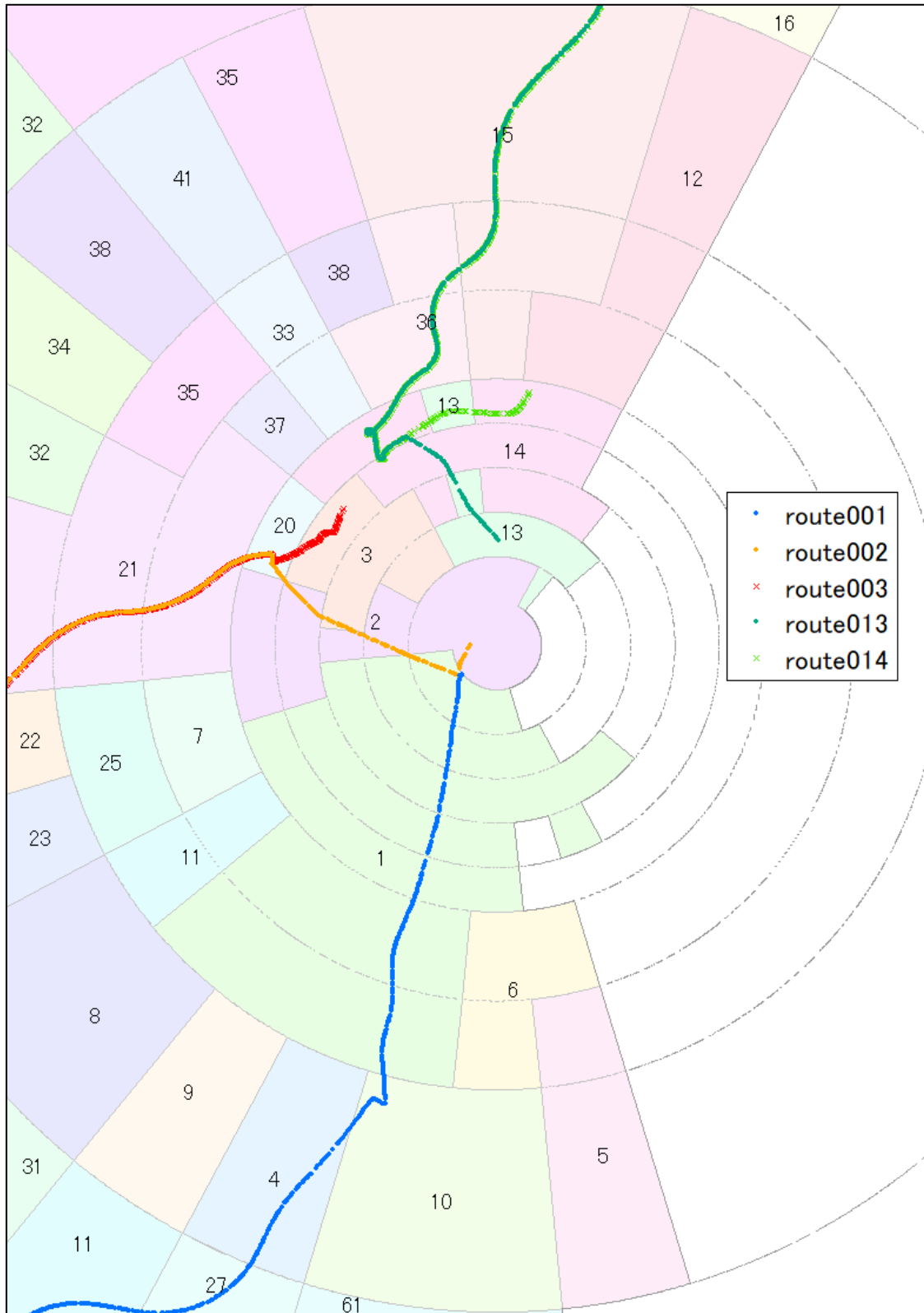


図 2.3 東海サイト5km圏内からの避難経路 (計6経路)

### 2.2.2. 時系列データ

時系列データの例を避難経路1(図 2.2の赤色の経路)の始点・途中・終点の3地点(表 2.4)について示す。各地点のプルーム到達時間の分布を表 2.5、図 2.4に示す。また、各地点について早期被ばく線量が50%値、95%値、最大値となる気象シーケンスにおける空間線量率の時間変化を図 2.5に示す。ここでは空間線量率が0でない値になる時間を到達時間としており、時間が経ってから到達している気象シーケンスでは空間線量率の値は小さいと考えられる。

表 2.5 各地点のプルーム到達時間の統計値

	到達しない シーケンス数	到達時間[h]					
		最小値	5%値	50%値	95%値	最大値	平均値
経路始点	212	1	1	52	—	131	19.5
経路途中	230	1	1	73	—	131	23.5
経路終点	268	1	2	—	—	128	26.9

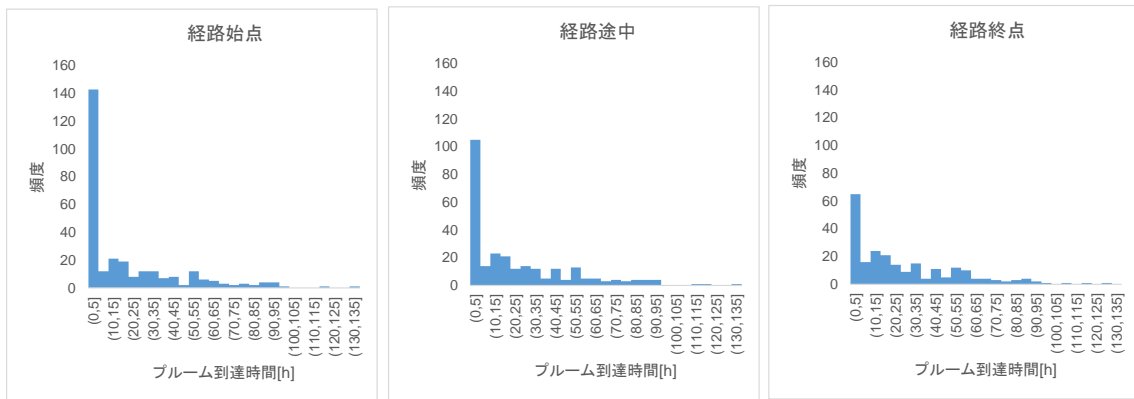


図 2.4 各地点のプルーム到達時間の分布

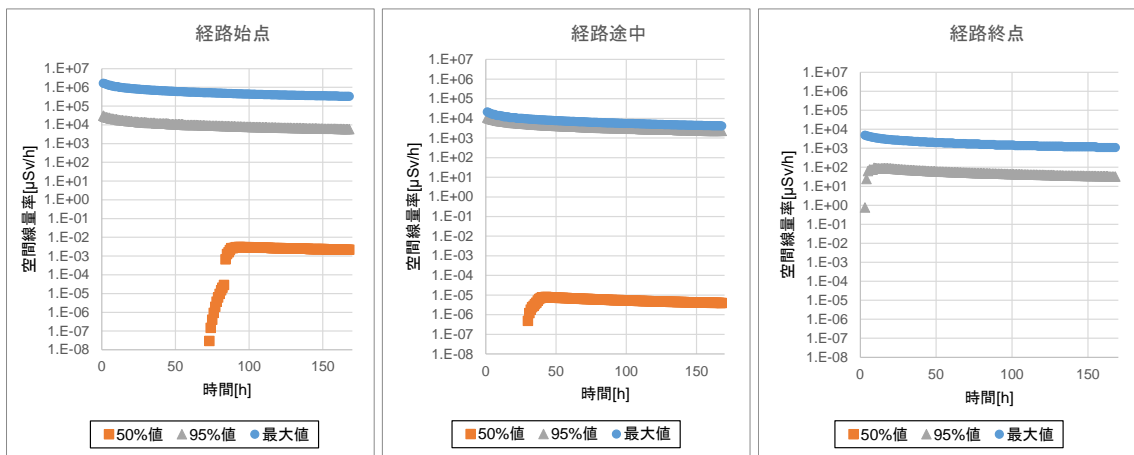


図 2.5 各地点の空間線量率の時間変化

### 2.2.3. 避難開始時間の被ばく線量への影響

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 2.6に示す。最大値方位の早期被ばく線量の95%値は、避難によって減少し、さらに放出と同時に避難開始した場合よりも放出1時間前に避難開始した場合の方が減少している。

5km圏内の集団線量の統計値（50%値、90%値、95%値、99%値、最大値）を図 2.7に示す。避難なしの場合と比較して5km圏内の集団線量は、放出と同時に避難開始した場合は増加し、放出1時間前に避難開始した場合は最大値を除き減少する。図 2.14に示す放出1時間前に避難開始した場合の集団線量最大値シーケンスの分布によれば、避難経路と線量が高くなるメッシュの方向が一致しているために例外的に避難なしの場合よりも集団線量が増加したと考えられる。ほとんどの気象シーケンスでは事前に避難を開始することによって集団線量を低減することができる。

各ケースの集団線量95%値シーケンスの避難開始前の位置ごとの線量分布をそれぞれ図 2.8、図 2.10、図 2.12に示す。また、同じシーケンスの線量ごとの人数の分布を図 2.9、図 2.11、図 2.13に示す。避難したときの集団線量が高くなるシーケンスでは避難経路の方向と線量が高くなるメッシュの方向が一致している。



(1) 被ばく線量（方位最大値）の統計値

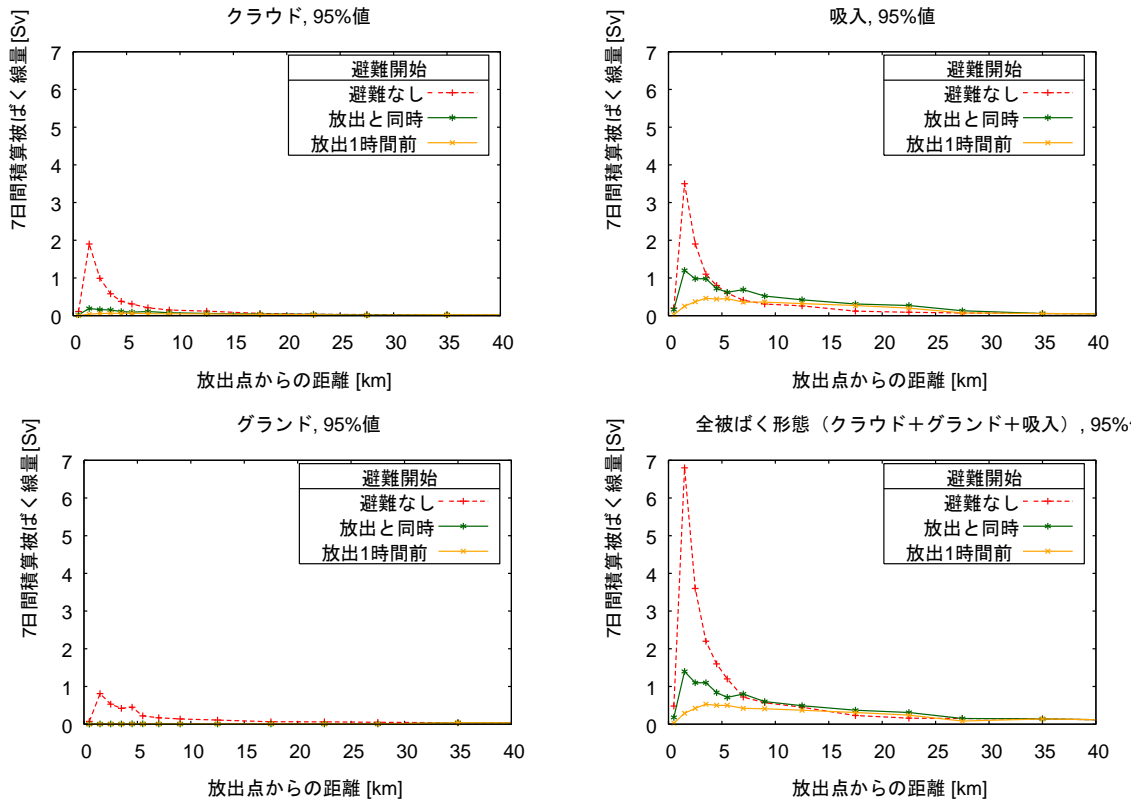


図 2.6 被ばく線量95%値（最大値方位）

(2) 集団線量（5km 圏内）の統計値

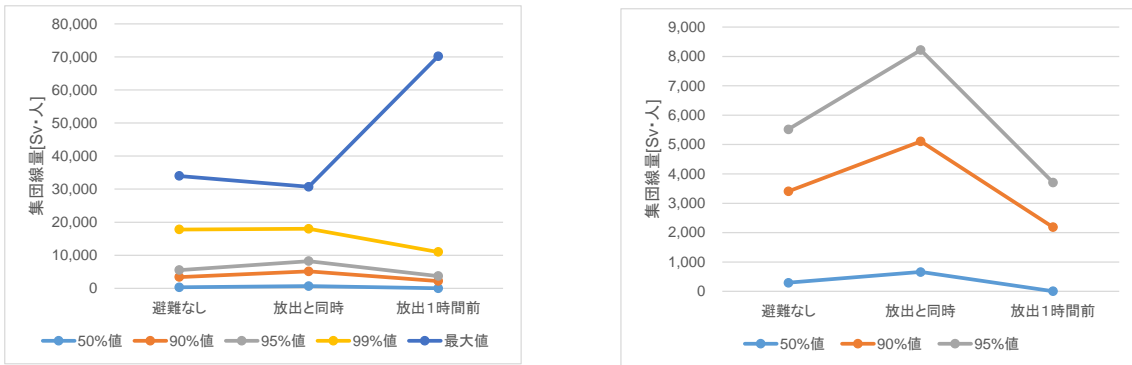


図 2.7 集団線量（5km圏内）の統計値

(3) 気象シーケンス 405 (避難なしのとき、集団線量 95%値)

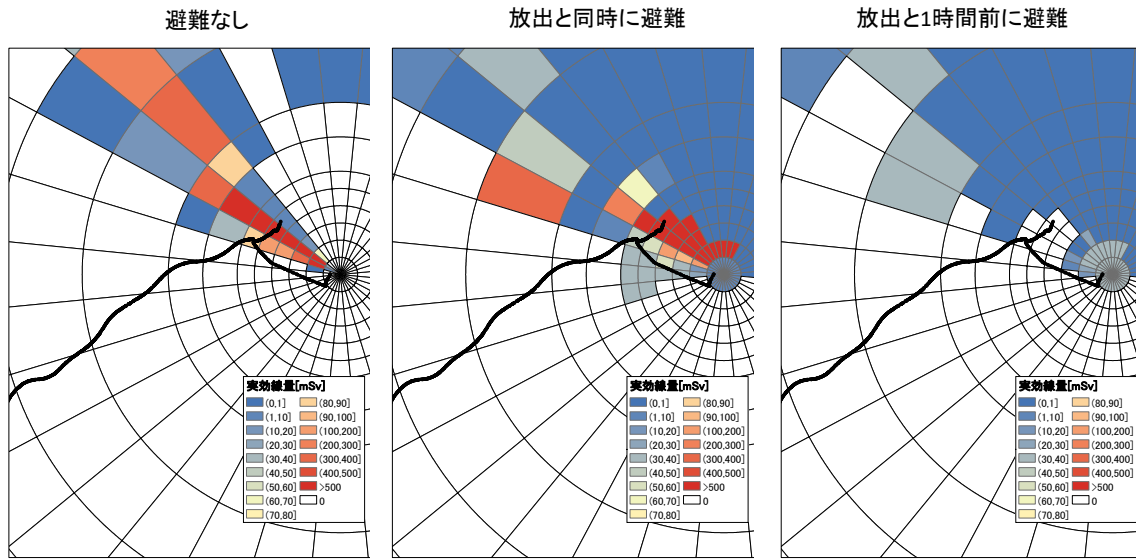


図 2.8 シーケンス405の線量分布

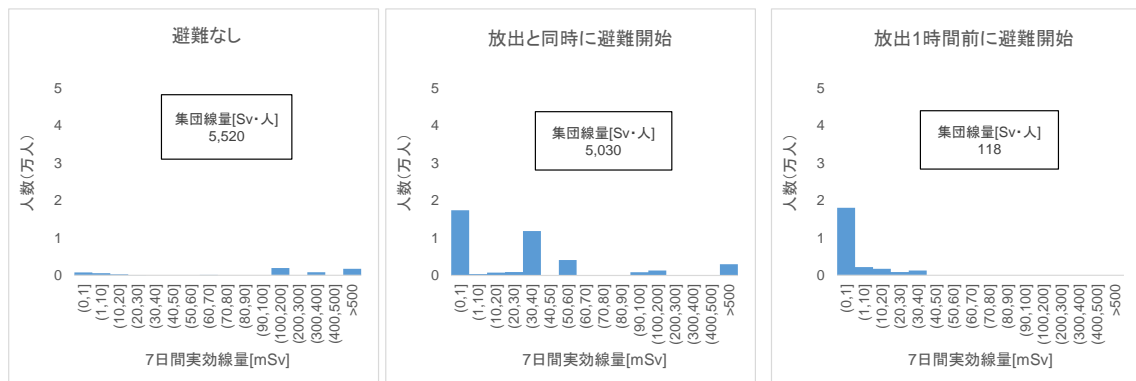


図 2.9 シーケンス405の被ばく人数 (5km圏内) 分布

(4) 気象シーケンス 364 (放出と同時に避難のとき、集団線量 95%値)

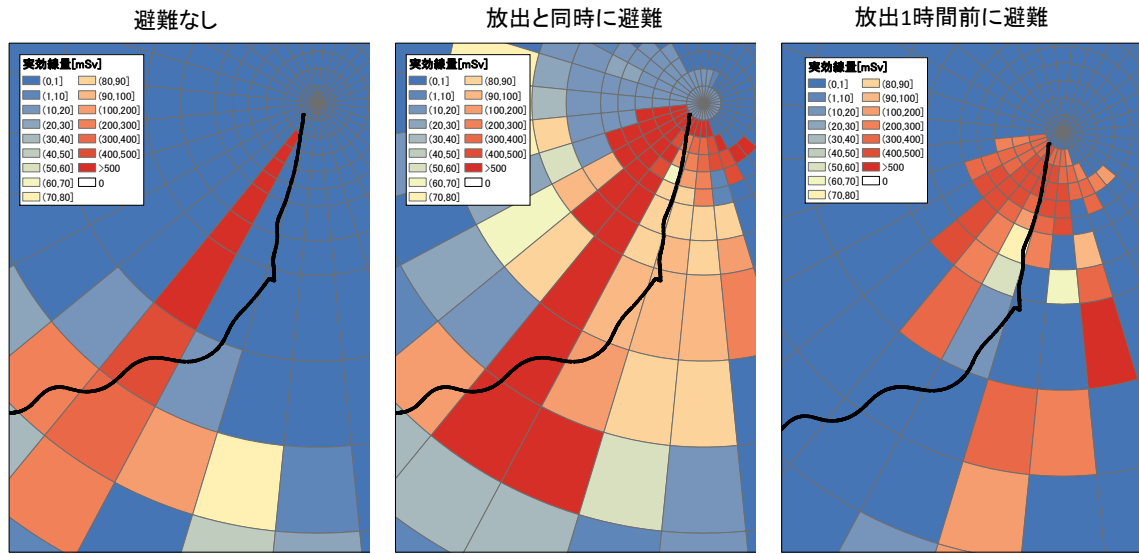


図 2.10 シーケンス364の線量分布

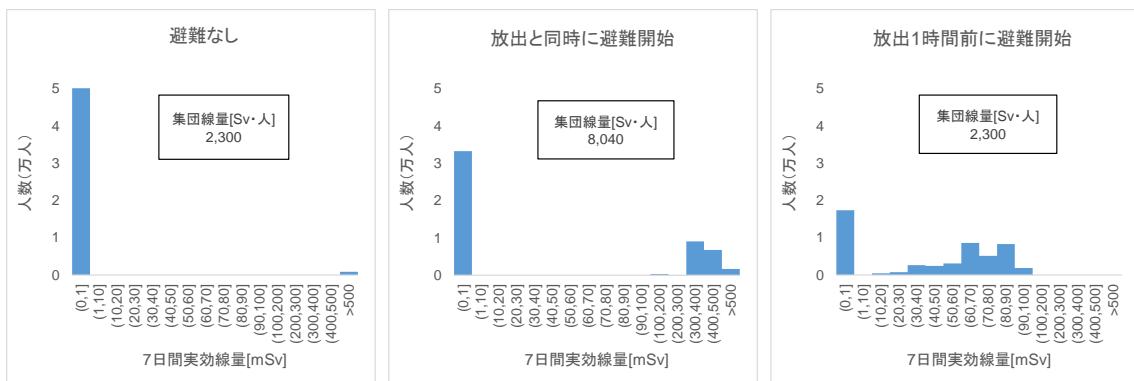


図 2.11 シーケンス364の被ばく人数 (5km圏内) 分布

(5) 気象シーケンス 140 (放出と1時間前に避難のとき、集団線量95%値)

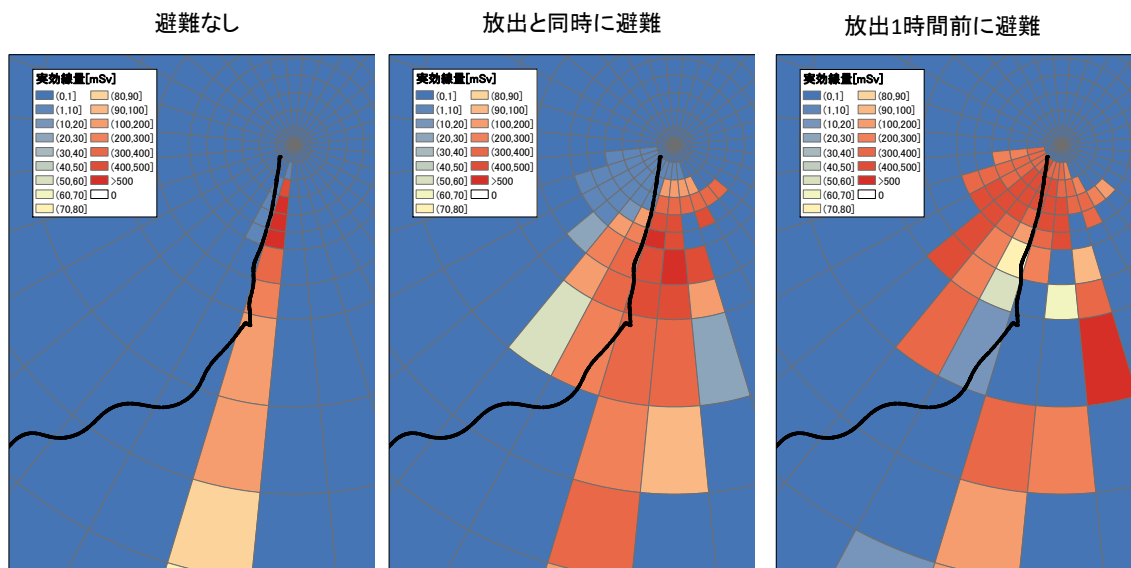


図 2.12 シーケンス140の線量分布

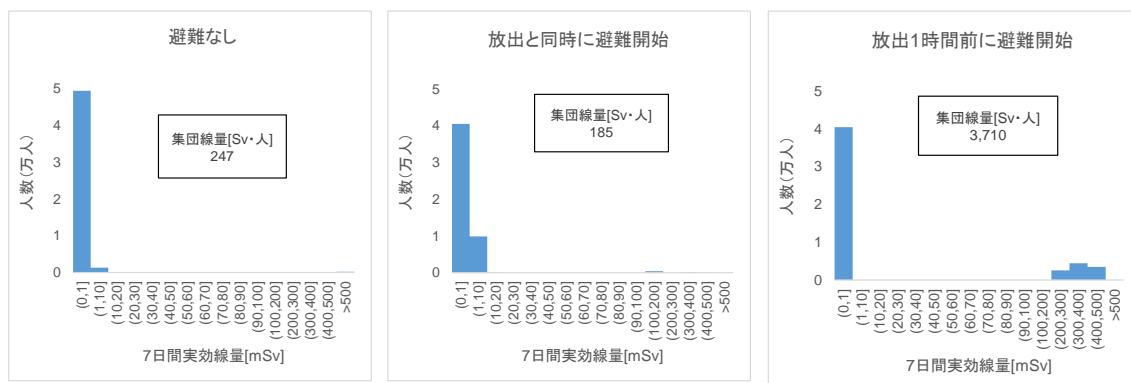


図 2.13 シーケンス140の被ばく人数 (5km圏内) 分布

(6) 気象シーケンス 36 (放出と1時間前に避難のとき、集団線量最大値)

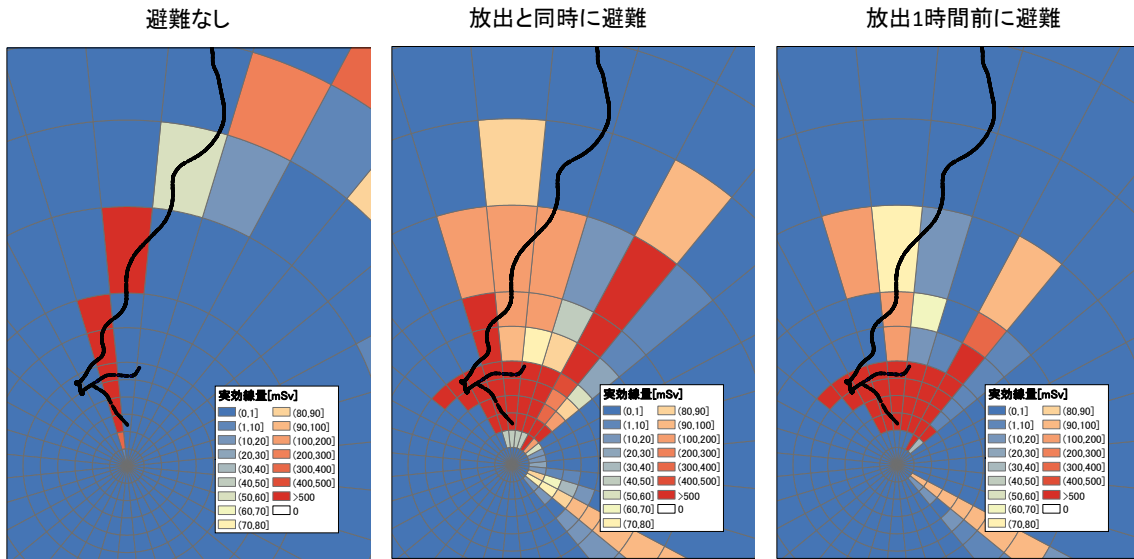


図 2.14 シーケンス63の線量分布

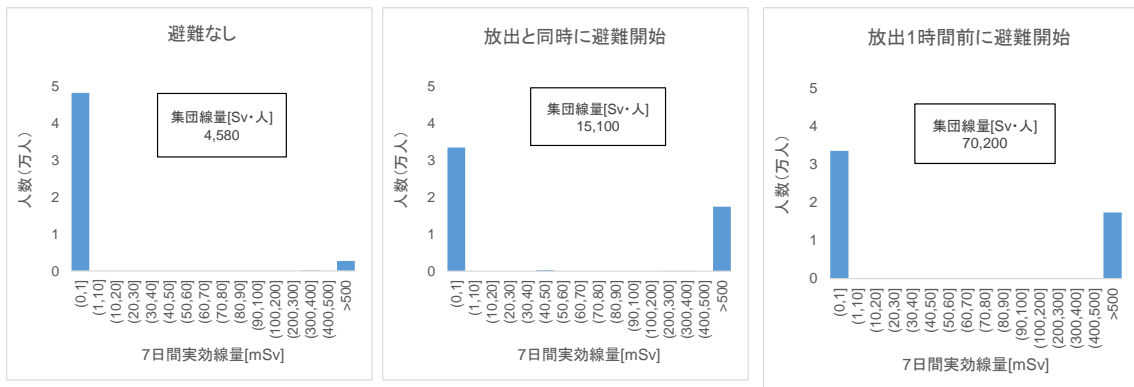


図 2.15 シーケンス63の被ばく人数分布

### 2.3. 今後の課題

現状のOSCAARは、各メッシュの位置の時系列データを出力することができる。また、避難モデルでは、移動を考慮して積算線量を計算することができる。しかし、避難による移動を考慮した時系列データの出力できるようにするためにはさらなる改良が必要である。

本作業では空間線量率が $>0$ となる時間をプルームの到達時間としている。このため、時間が経過してから到達したものには線量が低く影響の小さいものも含まれる。影響の大きいもののみを考慮するためには、空間線量率の基準を0以外の値に変えた場合について確認できるようにする必要がある。

他の事故シナリオ、避難と屋内退避の比較、避難遅れ（日常生活後、避難）などについても今後検討する。

## 第2章の参考文献

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).

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)。

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。

### 3. 被ばく評価モデルの検討

第3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一律の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。)

本事業では、まず、再浮遊粒子による外部被ばく量を適切に評価するため、多層大気-土壌-植生一次元モデルSOLVEG-R(Yamazawa 2001, Nagai 2005, Katata et al. 2011, Ota et al. submitted)を用いて、大気中の再浮遊粒子の空間分布を明らかにする。SOLVEG-Rは大気と陸面間の熱交換や水蒸気の移動、エネルギー循環を計算するプログラムSOLVEG2に、エアロゾル挙動を計算するスキームを追加したプログラムである。同プログラムにより福島第一原子力発電所事故後の放射性核種を含む大気中の再浮遊粒子の空間分布を計算したOta et al. submittedに基づき、土壌の再浮遊過程に対する気象要素の影響について検討する。次に、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、再浮遊粒子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、3.1項では、屋外での粒子の再浮遊に関する文献調査の結果について記載する。3.2項では、SOLVEG-Rを用いて土壌粒子の再浮遊挙動を解析した結果について記載する。3.3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。

令和3年度事業では、風速一定の風洞内において、入口風向や流入幅を変動させた場合の土壌粒子の再浮遊挙動について、CFD解析を実施して土壌粒子の舞い上がりが発生する条件を調査した。その結果、平行風の場合には土壌表面で生じる上向きの力が小さく、粒子の再浮遊高さは足元程度にとどまっていたが、風速の流入方向と流入口の幅によっては、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。さらに本年度事業では、実気象を対象に、より現実的な外部被ばく線量換算係数の導出に必要である再浮遊物質の空間分布を再現し、分布に合わせた外部被ばく線量の計算を行った。

#### 3.1. 土壌粒子の再浮遊挙動解析

##### 3.1.1. 文献調査

はじめに屋外における粒子の再浮遊に関する文献調査を行い、現状のOSCAARコードの再浮遊係数との比較を行った。

いずれの文献でも、時間とともに再浮遊係数は減少することが示されていた。いくつかの



文献では、再浮遊係数を時間 $t$ の関数で表している。Lassey(Lassey 1980)は再浮遊係数の近似式をレビューしたものであり、③はWASH-1400の結果を基にしている。

- Lassey(1980) ①  $K(t) = K_0 \exp(-\lambda t)$   
 初期 (放出後5~6週)  
 ●  $K_0=10^{-4}$ 、 $\lambda = \ln(2)/45$ (日 $^{-1}$ )  
 ●  $K_0=10^{-6}$ 、 $\lambda = \ln(2)/35$ (日 $^{-1}$ )
- ②  $K(t) = K_e + K_A \exp(-\lambda t^{0.5})$   
 初期は $K_a=10^{-4}$ 、長期(17年後)は $K_a=10^{-9}$ 、 $K_e=10^{-9}$ 、 $\lambda = 0.15$
- ③  $K(t) = K_e + K_l \exp(-\lambda t)$   
 $K_e=10^{-9}$ 、 $K_l=10^{-5}$ 、 $\lambda = \ln(2)/1.024$ (年 $^{-1}$ )
- ④  $K(t) = \max(K_0 \exp(-\lambda t), K_e)$   
 $K_e=10^{-9}$ 、 $K_0=10^{-5}$ 、 $\lambda = \ln(2)/50$ (日 $^{-1}$ )
- ⑤  $K(t) = K_0 \exp\left(-\frac{\ln(2)}{T_{1/2}(t)}\right)$
- ⑥  $K(t) = K_e + K_1 \exp(-\lambda_1 t) + K_2 \exp(-\lambda_2 t)$   
 $K_e=10^{-9}$ 、 $K_1=10^{-5}$ 、 $\lambda_1 = \ln(2)/1.024$ (年 $^{-1}$ )  
 $K_2=9 \times 10^{-5}$ 、 $\lambda_2 = \ln(2)/0.12$ (年 $^{-1}$ )
- NUREG CR-4551(1990)  $K(t) = \sum K_i \exp(-\lambda_i t)$   
 $K_i$ は $10^{-5}$ をベースに、 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ の範囲をとる。
- Iranzo et al.(1994)  $K(t) = 1.29 \times 10^{-9} \exp(-0.00976t)$

表 3.1に示すように、事故後数年レベルの期間における再浮遊係数は $10^{-5} \sim 10^{-7}$ 程度の値が報告されており、現状のOSCAARコードの再浮遊係数である初期で $10^{-5}$ 程度(Lasseyの⑥式、木村ら(2011))と同程度であることがわかった。

表 3.1 再浮遊係数の文献調査結果

著者	発行年	再浮遊係数(m-1)
Anspaugh et al.	1975	1E-7～1E-3 (事故直後) 9E-10～5.4E-8 (20年後)
Slinn	1978	1E-5～1E-2 (Gillete(1976))
Sehmel	1980	1E-10～1E-2 うち、9E-11～3E-4 は風由来の再浮遊、1E-10～4E-2 は人間活動由来
Iranzo et al.	1994	初期：1E-7 オーダー 数か月後：1E-9 オーダー 数年後：1E-9 から 1E-10 オーダー (観測値：2.8E-10～2.5E-9)
Garger	1994	6E-9～3E-6 (多くが 1E-7 から 1E-8)
Gavrilov et al.	1995	3E-9 (事故初日と数か月後) 1E-8 (Garland and Cambray(1988)) 6E-10～2E-7 (Garger(1990), Garger(1994)) 3E-9 (Drugachenok et al.(1990))
Garger et al.	1996	2E-10～8E-10 (Cs-137) 2.4E-11～1.1E-9 (Pu-239+240) (1992-1994 の平均) 1E-9～4E-9 (1986)
Garger	1997	1E-5～1E-8 (初期から 3 か月後まで) 1E-10 (後期 (8 年後))
Wagenpfeil et al.	1999	1E-10～6E-10
Kashparov et al.	2000	1E-7～1E-8
Whicker et al.	2021	非擾乱： 森林 2E-10、高木偏在 7E-10、低木偏在 2E-8、草原 1E-9、砂漠 1E-8 擾乱： 森林 6E-10、高木偏在 4E-9、低木偏在 6E-8、草原 3E-8、砂漠 1E-7

注) Eは10の階乗を表し、例えば1E-7は $10^{-7}$ を示す。

### 3.1.2. プログラムSOLVEG-Rの概要

土壌粒子の再浮遊プロセスは、事故時に放出された放射性物質が沈着した後は大気中放射性物質の主な放出源となる。Ota et al. submittedはSOLVEG-Rを用いて福島第一原子力発電所事故時に放出されたCs-137について、地表面に沈着したCs-137を含む土壌粒子の再浮遊挙動を明らかにした。

SOLVEG-Rは環境中に放出された放射性核種について、地表付近の大気、土壌および植生から構成される系内での、鉛直1次元方向の動きを計算する数値モデルである。SOLVEG-Rは、微気象要素および放射性核種の大気中濃度の時系列データを大気上端の入力値・境界値として与え、その下の大気接地層（地上10 m程度）、土壌（地下水面まで、地表面下数m程度）および植生の状態に関する力学方程式群を数値的に解くことで、大気-土壌-植生系内の熱・水の循環によって駆動される放射性核種の挙動を計算する。

地表面の粒子の移動メカニズムには大きく転動(Creep)、跳躍(Saltation)、浮遊(Suspension)の3種類がある。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、地表面から跳ね上がってから地表面に衝突するまでの一連の運動は、サルテーションと呼ばれている(三上 2009)。浮遊は微細な粒子が大気中を漂いながら移動する現象である。図 3.1に移動メカニズムの模式図を示す。一方、再浮遊に関与するメカニズムは、図 3.2に示すように、ダストの空気力学的エントレインメント、サルテーションボンバートメント、団粒のディスインテグレーションの3つがあげられる(Shao 2008)。ダストの空気力学的エントレインメントは地表面の微細な粒子が地表面の乱流によって上空へと舞い上がる過程である。舞い上がった後は浮遊のプロセスによって大気中に長期間滞在する。サルテーションボンバートメントは、比較的大きな土壌粒子(数十 $\mu\text{m}$ 以上)が跳躍した後で地表面に衝突し、その衝撃でそこにあった微細な粒子が舞い上がる過程である。団粒のディスインテグレーションは団粒構造をとる大きな土壌粒子が跳躍し、地表面に衝突した際に微細粒子に分割されてそれぞれの粒子が舞い上がる過程である。Ota et al.(submitted)ではこれらの3プロセスを代数方程式で表し、SOLVEG-Rに組み込むことで土壌粒子の再浮遊挙動を計算可能としている。

SOLVEG-Rでは、地表面に沈着した放射性物質(ここではCs-137を対象とする)の土壌中での化学プロセスも考慮している。土壌中のCs-137は、土壌粒子端の電気二重層に強く固定された場合と土壌粒子とのゆるい結合の2種類を設定しており、さらに土壌中間隙水との溶解平衡に達するように計算される。土壌粒子に働く粒子の付着力は、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が、このうち日本のような温暖湿潤の気候下の屋外土壌において最も影響の大きい液架橋力は、降水により間隙水の飽和度が100%になった場合に粒子の再浮遊が停止するとして表現されている。

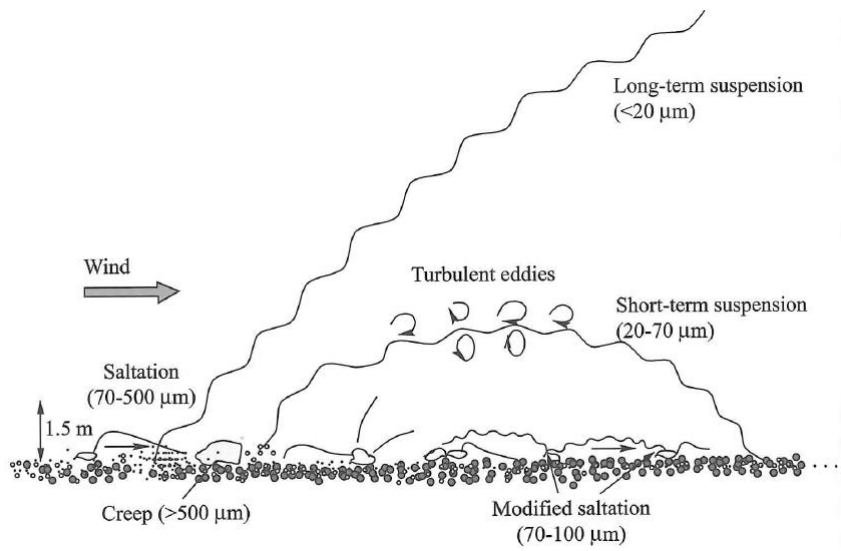


図 3.1 地表面粒子の移動メカニズム(Shao 2008)

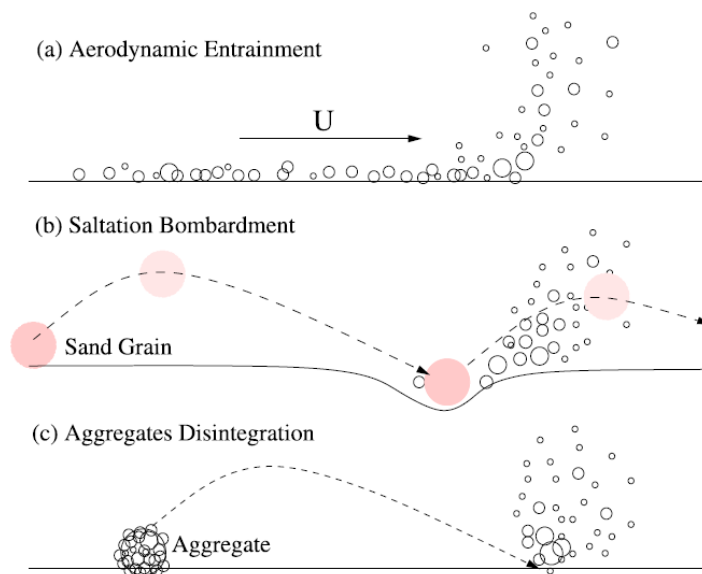


図 3.2 再浮遊に関するメカニズム(Shao 2008)

### 3.1.3. 計算条件

計算条件はOta et al.(submitted)を参照した。

#### (1) 計算期間

計算期間は2011年の事故直後から2021年までの11年間とした。出力は1時間毎とした。

#### (2) 気象条件

ここでは観測値を用いた実気象解析と、風速若しくは降水量を一定値に固定した定常解析を実施する。

実気象解析では、計算期間におけるアメダス浪江の観測値を用いた。気象データのうち、直達日射量及び放射収支量といった微気象要素についてはアメダス観測値が得られないため、Ota et al.(2016)において作成したサブグリッドスケールの気象モデルで作成したデータセットを使用している。定常解析では風速を一定値とした場合(1 m/s、5 m/s、7 m/s、10 m/s)、降水量を一定値とした場合(0 mm/h、1 mm/h、3 mm/h、7 mm/h、10 mm/h)を対象とした。その際の固定条件以外の値は、実気象解析で用いたアメダス浪江の観測地及び気象モデルによる計算値を用いた。

#### (3) 計算体系

計算範囲は鉛直一次元で、メッシュは鉛直大気11層(0-4 cm、4-10 cm、10-20 cm、20-40 cm、40-70 cm、70-130 cm、130-220 cm、220-360 cm、360-500 cm、500-800 cm、800-1200 cm)、土壌18層(0-0.2 cm、0.2-0.32 cm、0.32-0.5 cm、0.5-0.8 cm、0.8-1.2 cm、1.2-1.8 cm、1.8-2.8 cm、2.8-4.4 cm、4.4-6.5 cm、6.5-10 cm、10-15 cm、15-22 cm、22-30 cm、30-40 cm、40-50 cm、50-65 cm、65-80 cm、80-100 cm)である。

#### (4) 粒子径の設定

粒子径は土壌組成に依存する。Kajino et al.(2016)によれば、日本国内の土性は大半の箇所が砂壤土(Sandy loam)であり、ここでも土性分類は砂壤土とした。砂壤土は粘土とシルトの割合がそれぞれ15%以下で砂含量が65~85%の土壌である。粒子径の分布はOta et al(submitted)で用いている分布を用いた。

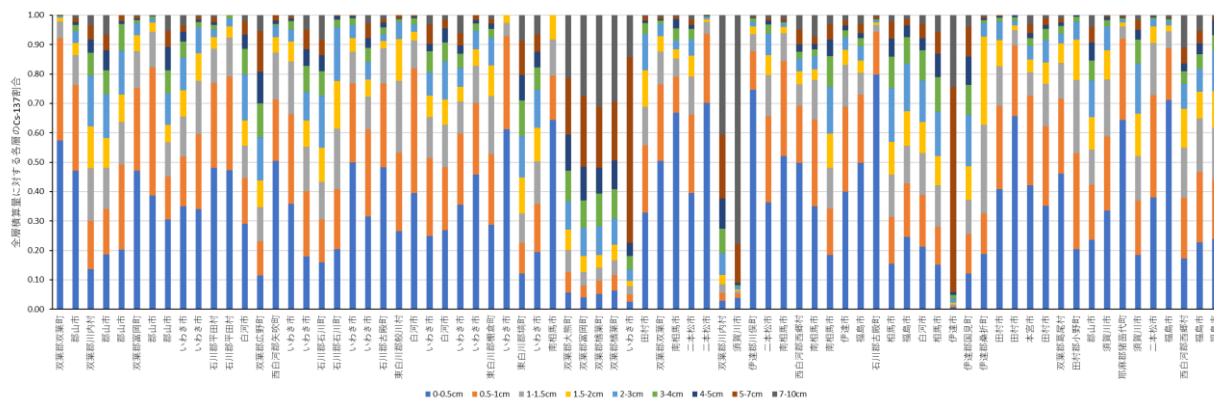
#### (5) 地表面 Cs-137 濃度の設定

Ota et al.(submitted)では土壌中Cs-137濃度として3種類の観測結果を使用しているが、ここでは最も濃度の高いF-PRサイト(福島県)での航空機モニタリングによる観測値を使用した。F-PRサイトでのCs-137濃度は $1.1 \times 10^3 \text{ kBq m}^{-2}$ であるが、三上ら(2015)は航空機モニタリングによる測定値は平坦地上の結果と比較した場合でもその比率は数分の一から数倍までの範囲で変動することと述べている。Cs-137濃度の事故直後の土壌中の深度分布は指数関数

式で近似することができるが、一定期間後の分布をみると、表層濃度が高い箇所、一定濃度となる箇所など土壌採取地点により分布以降が異なる（原子力規制庁、図 3.3）。そこで SOLVEG の深度分布と合わせて、土壌深度をスクレーパープレートによる採取可能な最浅深度である 1.0 cm、「放射性セシウムの土壌濃度マップ」（文部科学省 2011）での土壌採取深度である 5.0 cm（原子力規制委員会(2012)）、参考として 10 cm 及び 30 cm とした場合について計算した。

### (6) 評価高さの設定

放射能測定法シリーズ「緊急時における環境資料採取法」（原子力規制庁 2021）に示されているように、環境中のダスト採取にはハイボリュームエアサンプラが広く用いられている。メーカーの機器仕様によれば、採取口高さは 1210 mm（設置面から）とされている。そこで空気のサンプリング高さを第 6 層（高さ 0.7~1.3 m 層）として、大気中濃度の評価に用いる濃度は第 6 層を用いることとした。さらに同層の Cs-137 濃度と地表面の Cs-137 濃度比から再浮遊係数を算出した。図 3.4 にハイボリュームエアサンプラの外観図を示す。



データ出典：原子力規制庁「放射性セシウムの深度分布調査」（[放射性物質の分布状況等に関する調査](https://www.nra.go.jp/)）[原子力規制委員会 \(nra.go.jp\)](https://www.nra.go.jp/)

図 3.3 福島県内の深度別Cs-137濃度分布



図 3.4 ハイボリュームエアサンプラ(原子力規制庁 2021)

#### 3.1.4. 計算結果（実気象解析）

##### (1) 地表面濃度の設定における深度影響

はじめに、実気象解析により再浮遊係数の分母となる地表面濃度の結果の妥当性確認を行い、Cs-137濃度を積算する土壌深度を設定した。

まず、SOLVEG-Rにより計算した土壌中のCs-137濃度と原子力規制庁及び原子力機構の公開データを比較した。SOLVEG-R計算値は2011年3月15日1:00から2021年12月31日23:00までの時系列計算結果から、土壌深度を0～5 cmとした場合の結果を用いた。原子力規制庁及び原子力機構の公開データは、スクレーパープレートにより深度別のCs-137濃度を測定した結果を用いた。データ種別により測定深度が異なり、浪江のデータセットは50～165 cmで地点により異なっていたが、福島県全域のデータセットはすべて10 cmである。このうち、浪江のデータセットからは0～6 cmまでの積算値を使用した。一方、福島県全域のデータセットからは全層の積算濃度を用いて比較した。2013年の福島県全域データセットにおける層別のCs-137濃度分布を図 3.3に示す。Cs-137の土壌深度分布は土壌採取場所によりばらつきがみられたが、Cs-137は土壌中の粘土鉱物との結合により、間隙水を通した下層への運搬が行われにくいとされており、人為的なかく乱により表層のCs-137濃度が相対的に低くなった可能性があるため、全層の積算値を用いることとした。福島県全域のデータセットでは0-0.5 cm、0.5-1 cm、1-1.5 cm、1.5-2 cm、2-3 cm、3-4 cm、4-5 cm、5-7 cm、7-10 cmと層別に濃度 (Bq/kg) が示されている。積算濃度の算出の際に使用する土壌密度は、一般的な土粒子密度として一律に1.4999(g/cm<sup>3</sup>)を使用しており、結果には密度計算の誤差が含まれる。

SOLVEG-R計算値と実測値との比較結果を図 3.5に示す。実測値のうち、福島県全域データセットについては幾何平均値と幾何平均値の線形近似直線も示した。SOLVEG-R計算値は2011年の浪江のデータセットの値とは大きく離れているが、2013年以降の実測値の変動の範囲内の値をとった。なお、事故直後の測定値は浪江のデータセットを使用した。場所や除染の有無等による濃度差が大きいため、データセットの種類によっては傾向が異なる可能性がある。またSOLVEG計算値の経時変化をみると、実測値の幾何平均値の傾きに近い減少傾向を示した。

SOLVEG-Rによる2012年と2021年の深度分布を図 3.6に示す。横軸は対数で示している。その結果、Cs-137濃度は両結果とも概ね深さ5 cmまでは指数関数で減少しており、その後5 cmから18.5 cmまではほぼ一定値を示していたが、20 cm地点で大きく濃度が減少していた。全層に含まれるCs-137のうち、表層5 cm以内に含まれているCs-137の割合は、2012年、2021年ともに99%であった。平成23年度から令和3年度までの調査結果(原子力規制委員会(2022))より、土壌中の放射性セシウムの90%が含まれる地表面からの深度 $L_{90\%}$ (cm)の経時変化を図 3.7に示す。 $L_{90\%}$ 幾何平均値は、4.85 cmであった。観測結果には「除染等で人の手加わり深度分布が不連続若しくは不自然」であった箇所も含まれるため、下方への分布のバラつきが大きくなっていると考えられる。2012年の土壌の積算深度別の再浮遊係数を表 3.2に示す。再浮遊係数は土壌の積算深度に関わらずほぼ一定値を示した。

以上より、土壌中の放射性セシウムの深度分布は、実測値においてもSOLVEG-R計算値と同様の傾向を示し、計算値の妥当性が確認できた。以降の計算では土壌中Cs-137濃度は、採取深度である0～5 cmまでの積算値とする。

## (2) 大気中 Cs-137 濃度の経時変化

高さ別の大気中Cs-137濃度の年平均値を図 3.8に示す。Cs-137濃度は高度が増加するほど減少し、最上層(第11層)の濃度は上部境界値として与えたバックグラウンド濃度に等しくなっており、再浮遊由来の粒子は高さ8～12mの層には影響しない結果となった。図中で黄色のハッチで示した高度がダストサンプリング高度(高度0.7～1.2m)に相当する。

2012年から2021年の高度0.7～1.2m層での大気中Cs-137濃度の経時変化を図 3.9に示す。また、2012年と2021年の高度別大気中Cs-137濃度を表 3.3に示す。Cs-137濃度の最低濃度には夏高く冬低い季節変動が見られた。年平均値をみると、時間の経過とともにCs-137平均濃度は減少した。これは図 3.5に示すように、再浮遊粒子の放出源である土壌中のCs-137濃度が減少したためである。

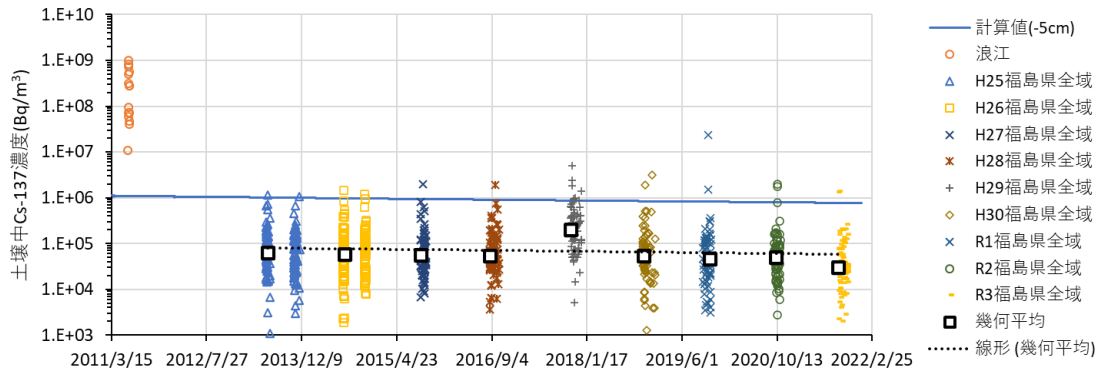


表 3.2 土壌の積算深度別再浮遊係数 (2012年)

積算土壌深度(cm)	平均再浮遊係数(/m)	最大再浮遊係数(/m)
1	1.8E-09	1.6E-07
5	1.7E-09	1.5E-07
10	1.7E-09	1.5E-07
30	1.7E-09	1.5E-07

表 3.3 2012年と2021年の高度別Cs-137濃度

レイヤー No.	レイヤー 頂高 (m)	レイヤー 中点 (m)	2012年		2021年	
			平均濃度 (Bq/m <sup>3</sup> )	最大濃度 (Bq/m <sup>3</sup> )	平均濃度 (Bq/m <sup>3</sup> )	最大濃度 (Bq/m <sup>3</sup> )
1	0.04	0.02	3.1E-03	3.3E-01	1.4E-03	1.1E-01
2	0.10	0.07	3.1E-03	3.2E-01	1.4E-03	1.1E-01
3	0.20	0.15	2.9E-03	3.0E-01	1.3E-03	1.0E-01
4	0.40	0.30	2.7E-03	2.7E-01	1.2E-03	9.1E-02
5	0.70	0.55	2.4E-03	2.1E-01	1.1E-03	7.4E-02
6	1.30	1.00	2.0E-03	1.2E-01	8.2E-04	4.0E-02
7	2.20	1.75	1.5E-03	9.1E-02	6.3E-04	2.8E-02
8	3.60	2.90	1.1E-03	6.3E-02	4.7E-04	1.8E-02
9	5.00	4.30	8.0E-04	4.3E-02	3.4E-04	1.2E-02
10	8.00	6.50	4.6E-04	2.5E-02	2.1E-04	6.1E-03
11	12.00	10.00	4.8E-05	4.8E-05	4.8E-05	4.8E-05



データ出典：原子力規制庁「放射性セシウムの深度分布調査」 ([放射性物質の分布状況等に関する調査 | 原子力規制委員会 \(nsr.go.jp\)](#))

図 3.5 SOLVEG計算値と実測値の比較（土壌中濃度）

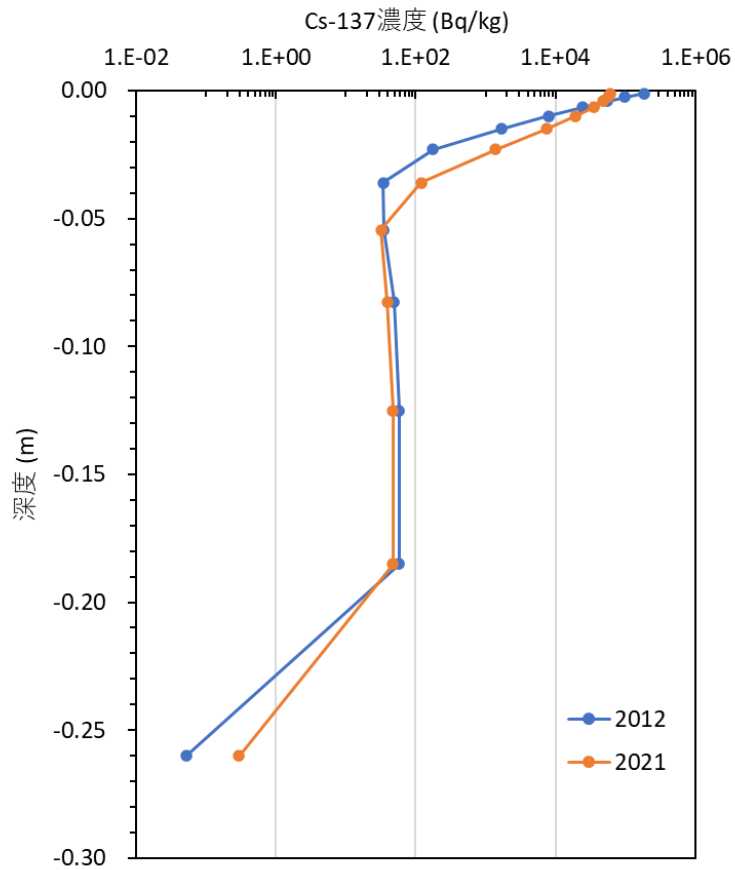


図 3.6 土壌中の深度分布

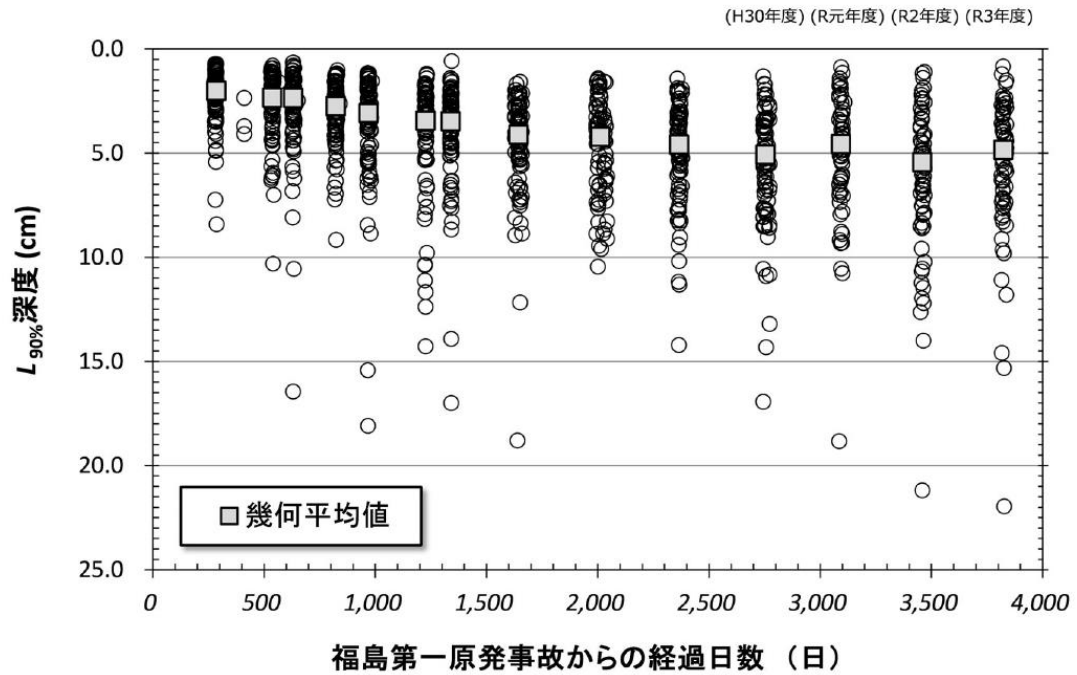


図 3.7 土壌中の深度分布 $L_{90\%}$ の経時変化(原子力規制委員会 2022)

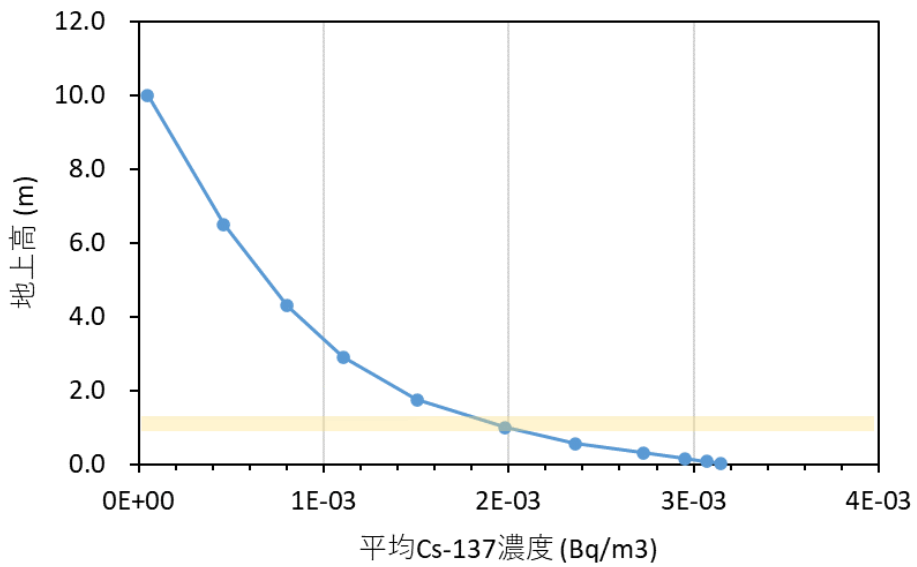


図 3.8 大気中Cs-137濃度の年平均値 (2012年)

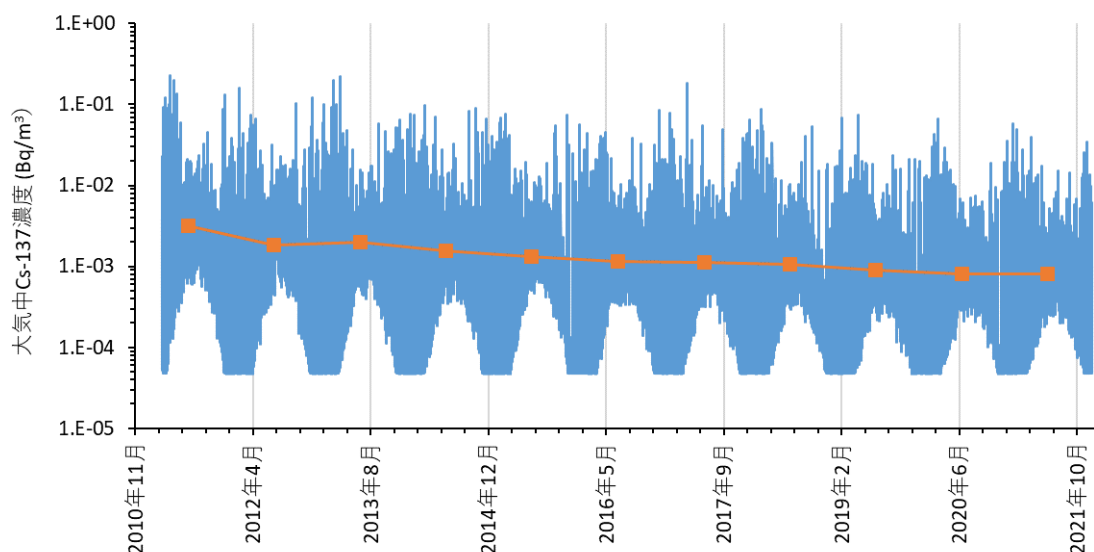


図 3.9 大気中Cs-137濃度の経時変化

### 3.1.5. 計算結果（定常解析）

#### (1) 風速一定条件

Cs-137の沈着直後の2012年の気象条件及び地表面濃度に対し、風速を一定にした場合の定常解析結果を図 3.10及び図 3.11に示す。再浮遊粒子のフラックス量は風速が大きいくほど大きくなり、風速7 m/s及び風速10 m/sではほぼ一定値を示した。なお、フラックスが急激に低下している部分は強い降水のあった時間である。再浮遊粒子のCs-137フラックスは再浮遊粒子フラックスと同様の傾向を示していた。

各風速条件における高度別の年間平均Cs-137濃度の分布を表 3.4及び図 3.12に示す。また、実気象との比較結果を図 3.13に示す。参考として、年間最大Cs-137濃度の分布を表 3.6に示す。

#### (2) 降水量一定条件

Cs-137の沈着直後の2012年の気象条件及び地表面濃度に対し、降水量を一定にした場合の定常解析結果を表 3.5、図 3.14及び図 3.15に示す。フラックスの変動傾向には降水量の変化による特徴的な差は見られなかったが、図 3.16に示すように、再浮遊粒子のフラックスは降水量が多いほど抑制されていた。ただし、降水量なしの場合と1mm/hの場合では大幅に濃度が低下するが、それ以上降水量が増加した場合には濃度の低下割合は小さかった。実気象条件との比較結果を図 3.17に示す。2012年の平均降水量のモデル計算値は0.17mm/hであった。参考に、年間最大Cs-137濃度の分布を表 3.7に示す。

また、再浮遊粒子のCs-137フラックスは再浮遊粒子フラックスと同様の傾向を示していた。

表 3.4 風速一定条件での高度別Cs-137濃度

レイヤー No.	レイヤー 頂高 (m)	レイヤー 中点 (m)	平均濃度 (Bq/m <sup>3</sup> )			
			1m/s	5m/s	7m/s	10m/s
1	0.04	0.02	1.9E-03	5.7E-03	2.9E-02	1.4E-02
2	0.10	0.07	1.9E-03	5.6E-03	2.8E-02	1.3E-02
3	0.20	0.15	1.8E-03	5.3E-03	2.7E-02	1.2E-02
4	0.40	0.30	1.7E-03	4.9E-03	2.5E-02	1.1E-02
5	0.70	0.55	1.5E-03	4.1E-03	2.1E-02	9.0E-03
6	1.30	1.00	1.3E-03	2.9E-03	1.5E-02	6.6E-03
7	2.20	1.75	1.0E-03	1.9E-03	1.1E-02	4.9E-03
8	3.60	2.90	8.1E-04	1.3E-03	7.6E-03	3.4E-03
9	5.00	4.30	6.2E-04	8.6E-04	5.2E-03	2.3E-03
10	8.00	6.50	3.7E-04	4.2E-04	2.6E-03	1.1E-03
11	12.00	10.00	4.8E-05	4.8E-05	4.8E-05	4.8E-05

表 3.5 降水量一定条件での高度別Cs-137濃度

レイヤー No.	レイヤー 頂高 (m)	レイヤー 中点 (m)	平均濃度 (Bq/m <sup>3</sup> )			
			0mm/h	1mm/h	5mm/h	10mm/h
1	0.04	0.02	3.7E-03	1.7E-03	7.8E-04	5.5E-04
2	0.10	0.07	3.6E-03	1.6E-03	7.6E-04	5.4E-04
3	0.20	0.15	3.4E-03	1.6E-03	7.4E-04	5.2E-04
4	0.40	0.30	3.2E-03	1.5E-03	6.9E-04	4.9E-04
5	0.70	0.55	2.7E-03	1.3E-03	6.1E-04	4.4E-04
6	1.30	1.00	2.1E-03	1.0E-03	5.0E-04	3.7E-04
7	2.20	1.75	1.6E-03	7.7E-04	3.9E-04	3.0E-04
8	3.60	2.90	1.2E-03	5.7E-04	3.0E-04	2.3E-04
9	5.00	4.30	8.4E-04	4.2E-04	2.3E-04	1.8E-04
10	8.00	6.50	4.8E-04	2.5E-04	1.5E-04	1.2E-04
11	12.00	10.00	4.8E-05	4.8E-05	4.8E-05	4.8E-05

表 3.6 風速一定条件での高度別Cs-137最大濃度

レイヤー No.	レイヤー 頂高 (m)	レイヤー 中点 (m)	最大濃度 (Bq/m <sup>3</sup> )			
			1m/s	5m/s	7m/s	10m/s
1	0.04	0.02	1.6E-02	2.3E-02	4.4E-02	3.3E-02
2	0.10	0.07	1.6E-02	2.2E-02	4.3E-02	3.2E-02
3	0.20	0.15	1.6E-02	2.1E-02	4.1E-02	3.1E-02
4	0.40	0.30	1.6E-02	1.8E-02	3.7E-02	2.7E-02
5	0.70	0.55	1.5E-02	1.4E-02	3.1E-02	2.2E-02
6	1.30	1.00	1.4E-02	9.5E-03	2.3E-02	1.7E-02
7	2.20	1.75	1.3E-02	6.1E-03	1.8E-02	1.3E-02
8	3.60	2.90	1.1E-02	4.9E-03	1.4E-02	9.4E-03
9	5.00	4.30	9.1E-03	3.5E-03	1.1E-02	6.7E-03
10	8.00	6.50	5.6E-03	2.6E-03	7.4E-03	3.6E-03
11	12.00	10.00	4.8E-05	4.8E-05	4.8E-05	4.8E-05

表 3.7 降水量一定条件での高度別Cs-137最大濃度

レイヤー No.	レイヤー 頂高 (m)	レイヤー 中点 (m)	最大濃度 (Bq/m <sup>3</sup> )			
			0mm/h	1mm/h	5mm/h	10mm/h
1	0.04	0.02	3.9E-01	1.7E-01	7.9E-02	5.4E-02
2	0.10	0.07	3.7E-01	1.7E-01	7.6E-02	5.2E-02
3	0.20	0.15	3.5E-01	1.6E-01	7.2E-02	4.9E-02
4	0.40	0.30	3.1E-01	1.4E-01	6.3E-02	4.3E-02
5	0.70	0.55	2.5E-01	1.1E-01	5.1E-02	3.5E-02
6	1.30	1.00	1.9E-01	8.5E-02	3.8E-02	2.6E-02
7	2.20	1.75	1.4E-01	6.3E-02	2.9E-02	2.0E-02
8	3.60	2.90	9.9E-02	4.4E-02	2.0E-02	1.4E-02
9	5.00	4.30	6.8E-02	3.1E-02	1.4E-02	9.7E-03
10	8.00	6.50	3.5E-02	1.6E-02	7.2E-03	5.0E-03
11	12.00	10.00	4.8E-05	4.8E-05	4.8E-05	4.8E-05

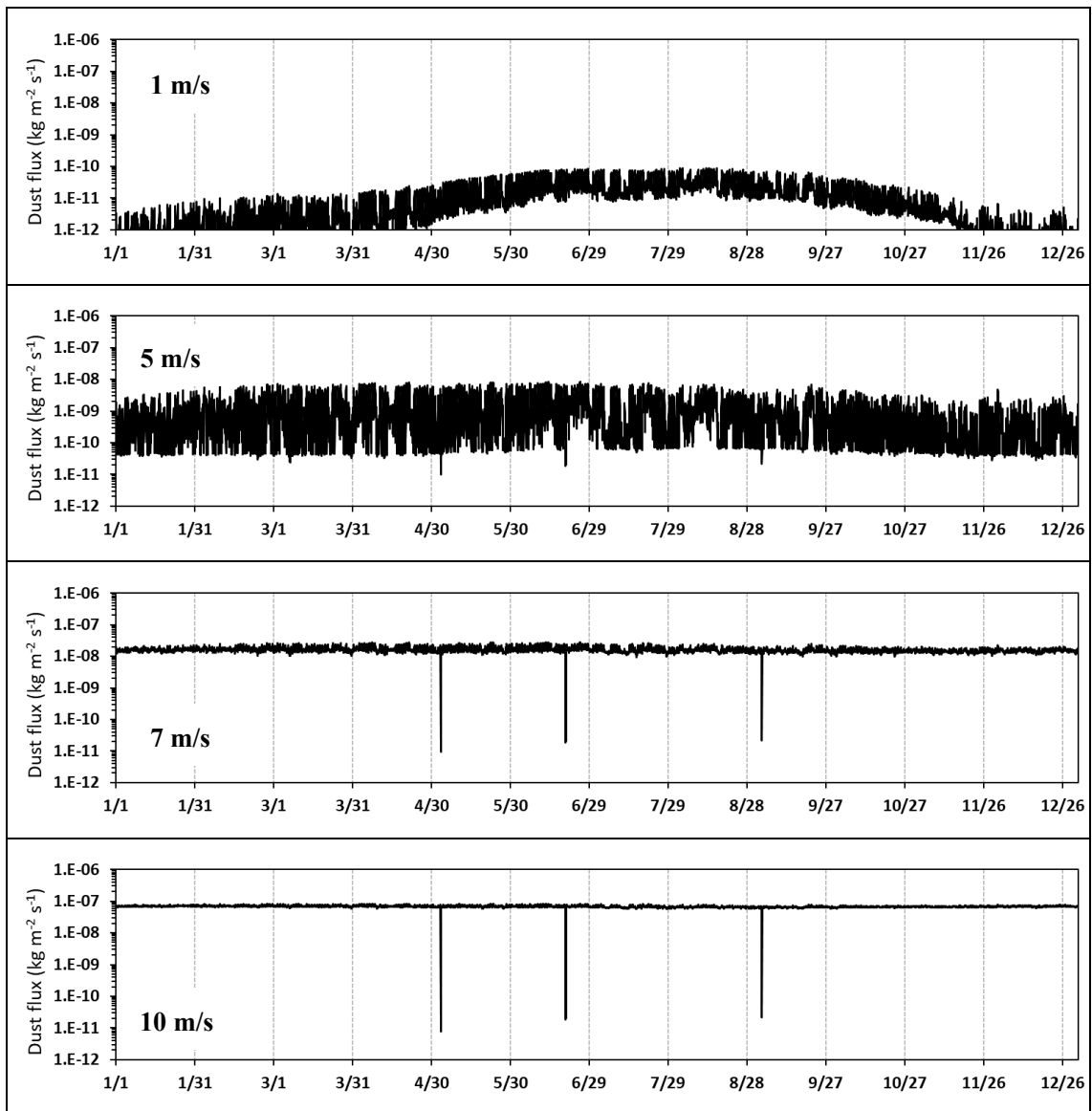


図 3.10 風速一定条件下での再浮遊粒子フラックス

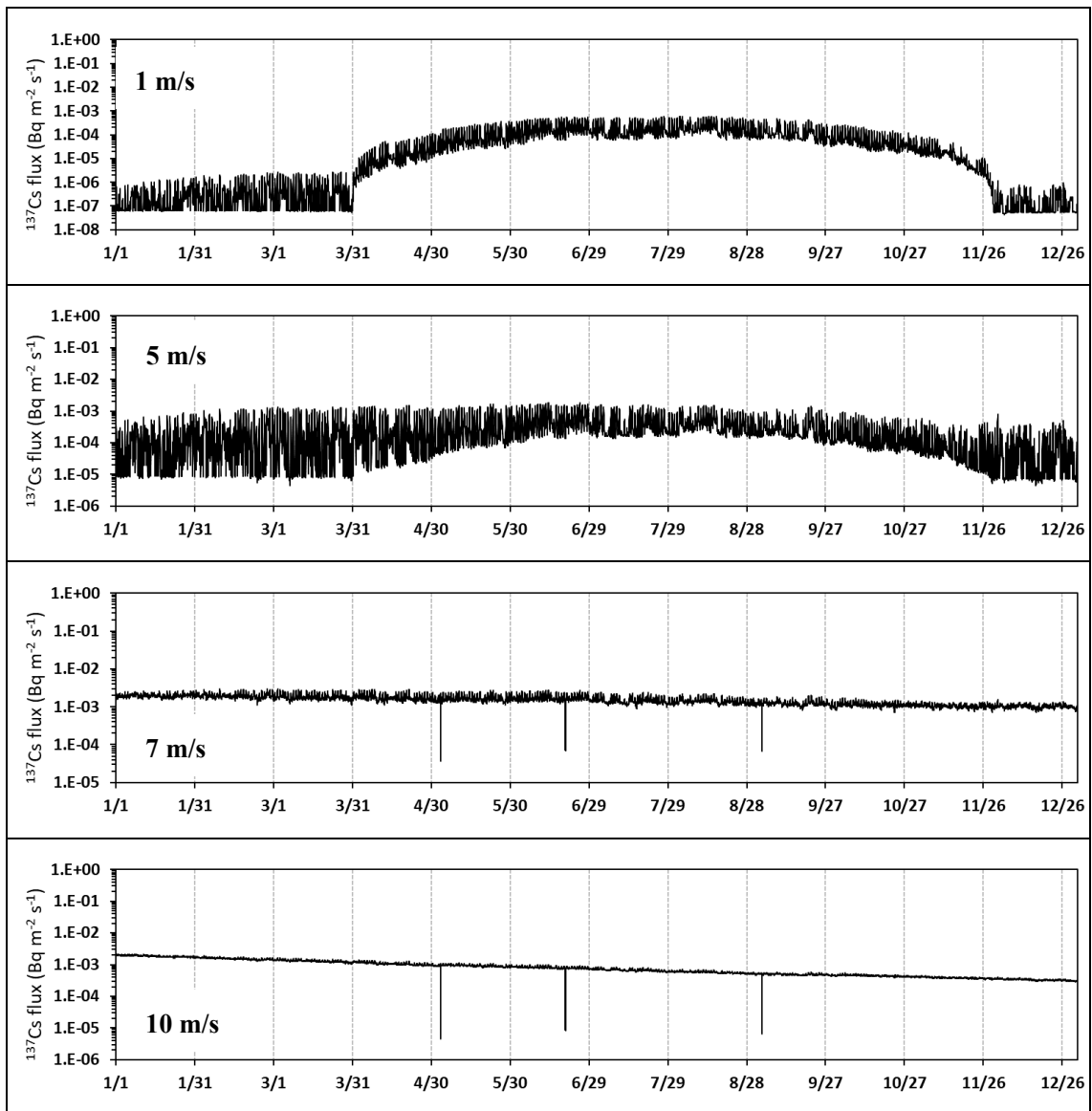


図 3.11 風速一定条件下での再浮遊粒子中Cs-137フラックス



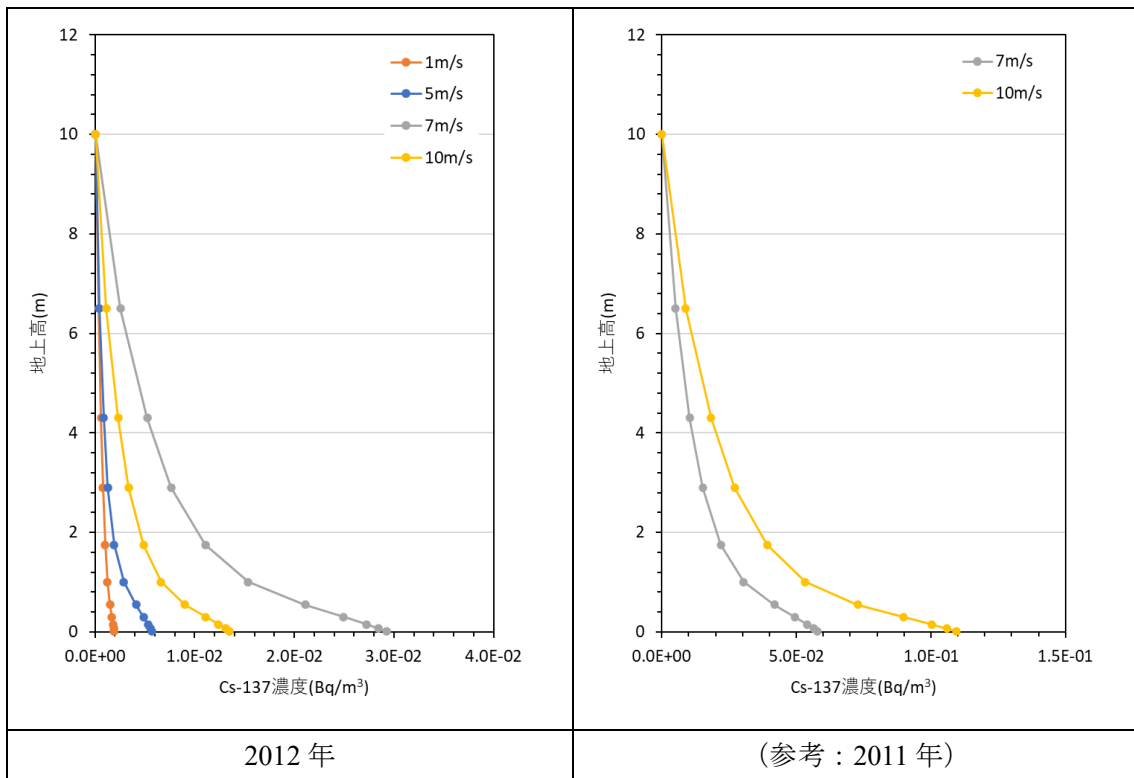
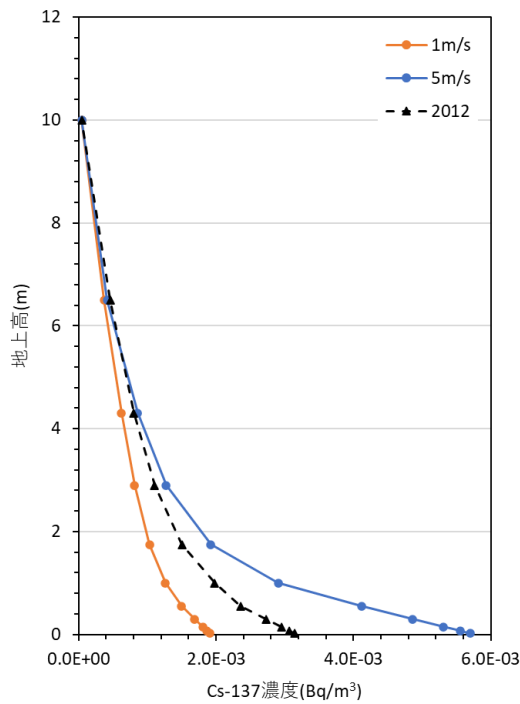


図 3.12 風速一定条件下での大気中Cs-137濃度分布



2012 年の平均風速：1.8m/s

図 3.13 実気象条件と風速一定条件下での大気中Cs-137濃度分布比較

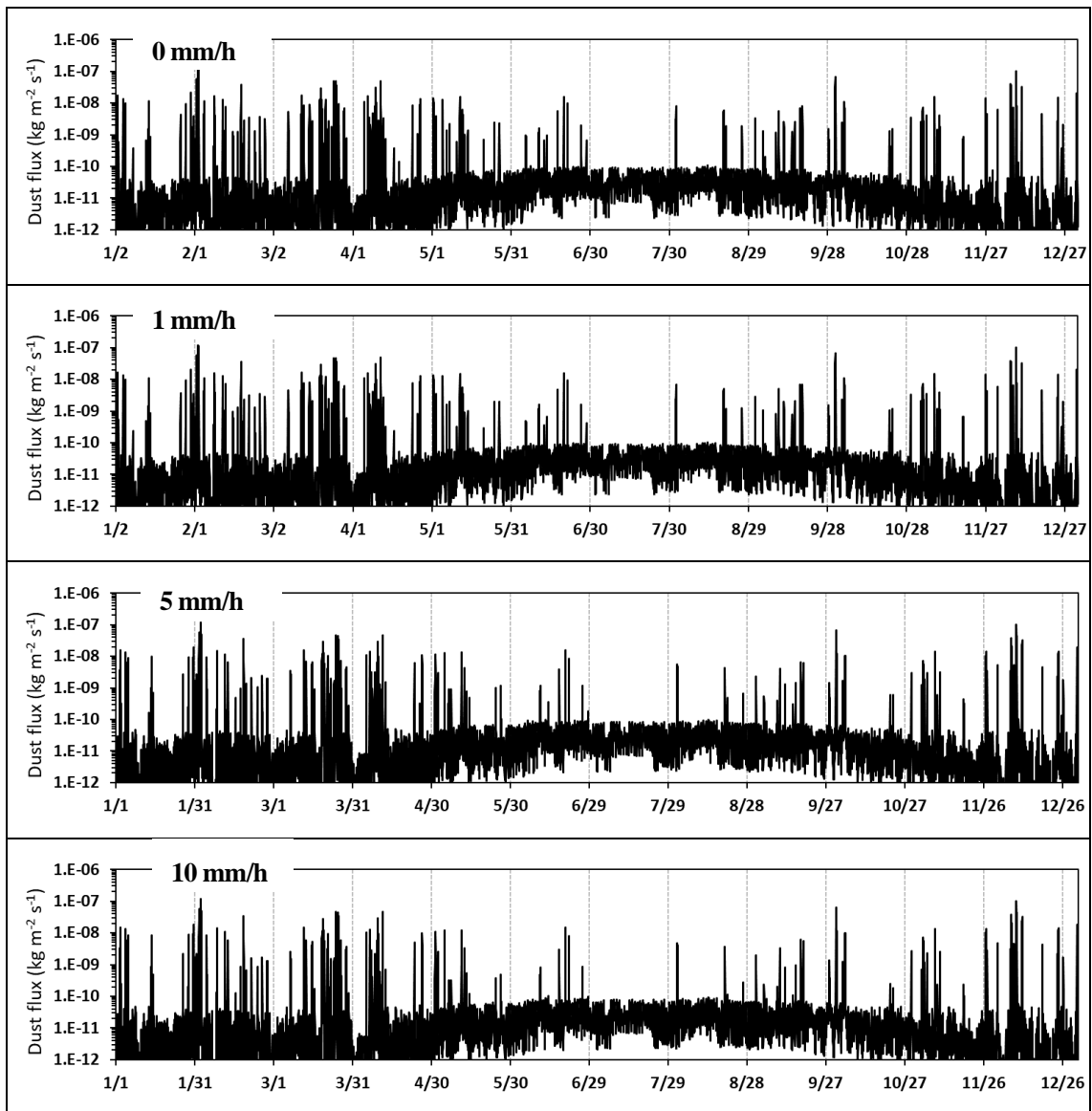


図 3.14 降水量一定条件下での再浮遊粒子フラックス

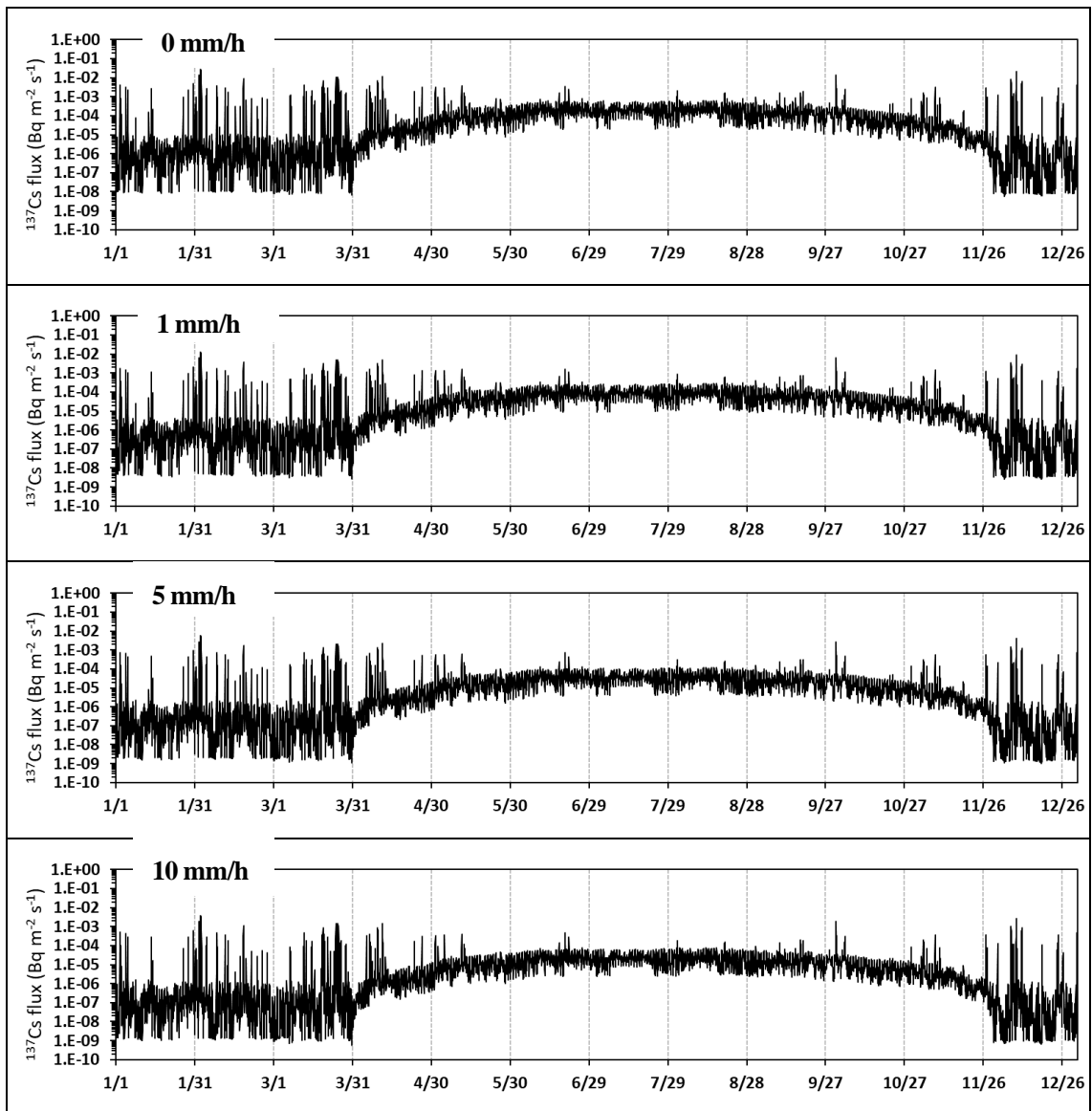


図 3.15 降水量一定条件下での再浮遊粒子中Cs-137フラックス

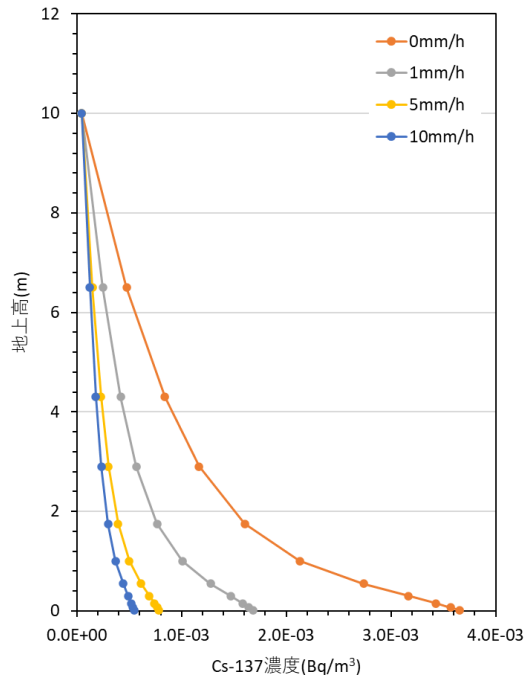
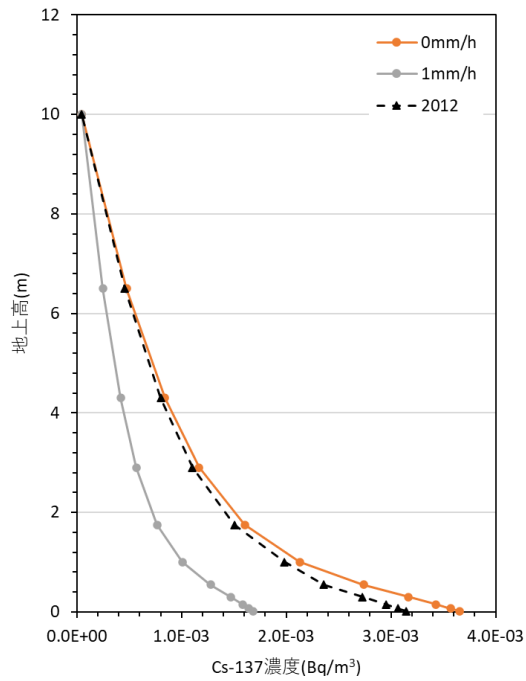


図 3.16 降水量一定条件下での大気中Cs-137濃度分布



2012 年の平均降水量：  
0.17 mm/h

図 3.17 実気象条件と降水量一定条件下での大気中Cs-137濃度分布比較

### 3.1. 再浮遊粒子の空間分布に基づく被ばく線量の計算

#### 3.1.1. 計算方法

屋外滞在時における外部被ばくには、大気中に浮遊している放射性物質からのクラウドシャイン及び地表面に体積した放射性物質からのグラウンドシャインの2つの経路がある。このうち、土壌粒子の再浮遊による外部被ばくでは、大気中の放射性物質由来のクラウドシャインが対象となる。ここではCs-137を対象に、PHITSコード(Sato et al. 2018)を用いて単位濃度あたりの線量換算係数を計算し、前項で求めた高さ別の再浮遊粒子濃度と線量換算係数の積からクラウドシャインによる外部被ばく線量を算出した。

PHITSコードでの計算体系における線源領域の大きさは、それ以上遠方の線源の寄与が十分小さくなる範囲として、評価点を中心とする半径550 m以内とした。半径550 mという大きな体系に対する計算を通常の方法で行うと、評価点にγ線が到達する確率が非常に小さいため、複数のモデルに対して十分な精度の結果を得るためには多くの時間がかかってしまう。これを避けるために、線源領域を評価点から半径30 cm、高さ約180 cmの円柱領域の内側と外側に分割し、外側領域を線源とする計算は2段階に分けて行う。1段階目の計算では外側領域を線源とし、円柱表面を横切った粒子の情報をdumpファイルに保存する。dumpファイルへの保存データを表 3.8に示す。dumpファイルはすべてのモデルで共通の結果を使用することができる。2段階目の計算では1段階目のdumpファイルを読み込み、これを線源として評価点での吸収線量を計算する。内部領域を線源とする計算では直接吸収線量を計算する。内側、外側の計算が終了後、PHITSの複数のタリー結果の統合機能 (sumtally機能) を用いてそれらの結果を足し合わせる。高さ別の線源各層に対してそれぞれ同様に単位濃度あたりの計算を行う。各層の相対誤差範囲はタリーあたり5%以内とした。

大気中の放射性物質による外部被ばくに対して、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(N. Petoussi-Henss et al., 2010)。しかし、前項での計算結果が示すように。再浮遊粒子濃度は地表面付近で高く上空に行くにつれて急激に小さくなるという不均一な分布を示しており、ICRPの線量換算係数を用いた場合、設定方法により被ばく線量が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、線源大気を前項で計算したSOLVEGのメッシュ高さに合わせて分割し、各メッシュから後述するボクセルファントムを用いて、臓器別ガンマ線の吸収線量を算出する。

ボクセルファントムは人間の臓器や組織を小さな直方体 (0.2 cm×0.2 cm×0.8 cm) の集合により表現したもので、実際の人間の形に近い形状にモデル化することができる。図 3.18にICRPのPub.110で提案されたボクセルファントムの模式図を示す(Zankl, 2010)。ボクセルファントムは男女別に作成されており、それぞれの身体はともに141のパーツに分けられている。各パーツと対応する臓器は、ICRP Pub.110のTableD.1に基づき設定した。

等価線量 $H$ は、線源ごとにファントムを用いて計算した平均吸収線量と放射線加重係数 (ガンマ線は1) の積から求められる。実効線量 $E$ は、臓器等価線量の平均値と、表 3.9に示す組織加重係数との積から求められる。その後、男女別の等価線量及び実効線量の平均値を

もって外部被ばく線量とする。計算フローを図 3.19に示す。

$$H_T = \sum_R W_R D_{T,R} \quad (3.1)$$

$$E = \sum_T w_T H_T \quad (3.2)$$

- $H_T$  : 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 3.9の対象組織外のため考慮していない。表 3.10に骨組織の重量の一覧を示す。

表 3.8 dumpファイルに保存する情報

物理量	説明
kf	粒子の種類を識別する番号
x, y, z	空間座標 (cm)
u, v, w	運動量の単位ベクトル
e	エネルギー (MeV)
wt	粒子のウエイト
nocas	バッチの中のヒストリー番号
nobch	バッチ番号

表 3.9 組織加重係数 (ICRP Pub.103)

組織	$w_T$	$\sum w_T$
赤色骨髄、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 3.10 骨組織の構成 (ICRP Pub.110 Table4.2)

部位	重量 (g)					
	男性			女性		
	赤色骨髄	黄色骨髄	骨内膜	赤色骨髄	黄色骨髄	骨内膜
上腕骨上部	26.9	76.8	9.6	20.7	59.1	7.3
上腕骨下部	0	73	11.5	0	55	8.5
尺骨、橈骨	0	131.8	16.4	0	93	12.1
手首と手の骨	0	83.7	12.5	0	47.5	7.1
鎖骨	9.4	18.1	2.5	7.2	13.9	1.9
頭蓋骨	88.9	138	83.4	68.4	106.2	64.2
大腿骨上部	78.4	223.8	44.2	60.3	172.1	34.2
大腿骨下部	0	344	48.5	0	169.3	24
脛骨、腓骨、膝蓋骨	0	516.2	92.4	0	469.9	84.5
足首と足の骨	0	304.6	42.2	0	176.2	24.4
下顎骨	9.4	14.5	2	7.2	11.2	1.6
骨盤	205.2	211.5	51.7	157.5	162.3	39.7
肋骨	188.7	77	29.8	144.9	59.1	22.9
肩甲骨	32.8	50.9	9.8	25.2	39.1	7.6
頸椎	45.6	18.6	11.5	35.1	14.3	8.8
胸椎	188.7	77	26.9	144.9	59.1	20.6
腰椎	143.9	58.7	23.4	110.7	45.1	18
仙骨	115.8	47.2	20.6	89.1	36.3	15.8
胸骨	36.3	14.8	5.5	27.9	11.4	4.3
全体	1170	2480.2	544.4	899.1	1800.1	407.5



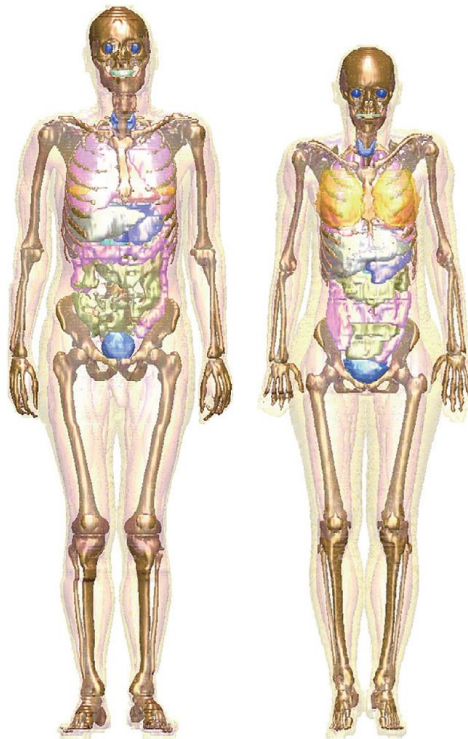


図 3.18 ICRP/ICRU標準コンピュータファントムの成人の男性（左）と女性（右）  
(ICRP Pub.110)

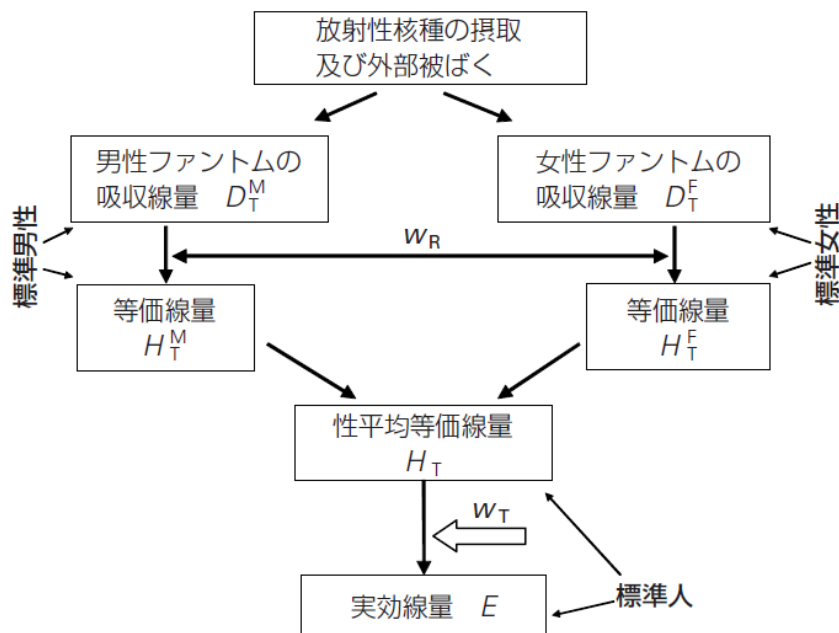
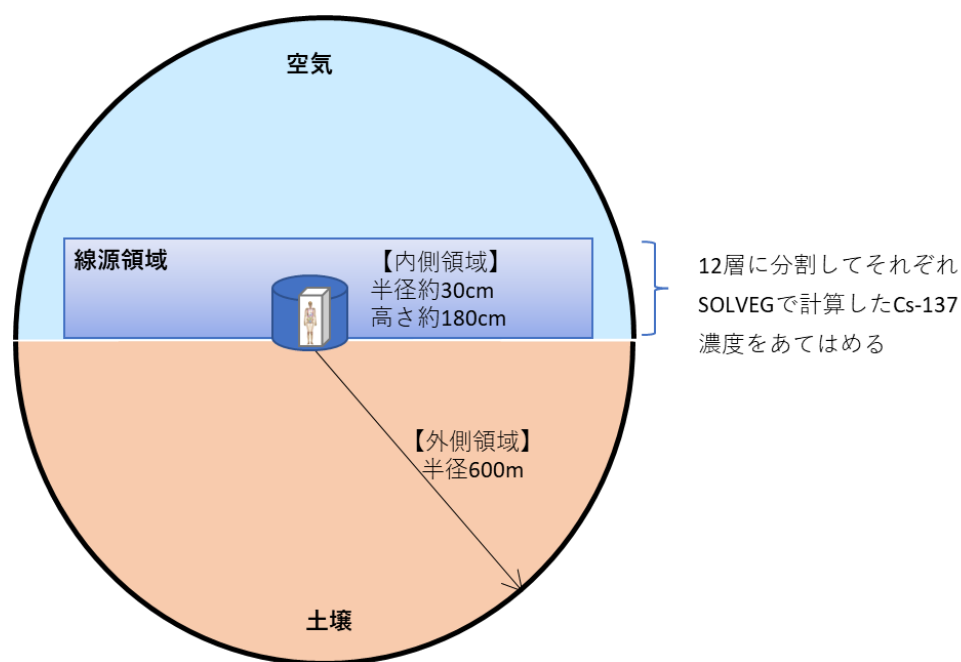


図 3.19 実効線量を求めるための性の平均化 (ICRP Pub103)

### 3.1.2. 計算条件

計算領域は半径600 mの球体領域で、中心から約85 cm離れた水平線を地表面と仮定し、その下方を土壌、上方を空気で構成する。計算領域中央には地表面から約170 cm高さのボクセルファントムを配置した。線源は空気側に配置し、半径550 m、高さ約100 mの円柱型とする。線源の大きさはガンマ線の飛程と大気境界層の厚さを考慮して設定した。線源内の放射エネルギーは一律とする。線源は地表面に対してSOLVEG-Rのメッシュ間隔に合わせて11層に分割し、高さを0-4 cm、4-10 cm、10-20 cm、20-40 cm、40-70 cm、70-130 cm、130-220 cm、220-360 cm、360-500 cm、500-800 cm、800-1200 cm及び12 m以上（1200-10000 cm）として計12層を設定する。各層の線源強度はSOLVEG-Rから出力されたCs-137濃度を用いた。計算領域の模式図を図 3.20に示す。



### 3.1.3. 計算結果

前項の実気象解析計算結果に基づき算出した、2012年及び2021年における年平均濃度に対する時間当たりの再浮遊核種由来クラウドシャインによる被ばく線量について表 3.11に示す。項目のMは男性、Fは女性を示し、太字で示した値は男女の平均値である。2012年の1時間あたりの被ばく線量は $2.2 \times 10^{-14}$  Svとなり、これを単純に24時間 $\times$ 365.25日を乗じて年

間積算被ばく線量に換算した場合、約 $2 \times 10^{-10}$  Svとなった。また、年最大値に対する被ばく線量を表 3.12に示す。2012年の1時間あたりの最大被ばく線量は $1.3 \times 10^{-12}$  Svとなり、これを単純に24時間 $\times$ 365.25日を乗じて年間積算被ばく線量に換算した場合、約 $1 \times 10^{-8}$  Svとなった。表 3.13に2012年と2021年の年間の被ばく線量を示す。

また、定常解析結果について、風速一定条件に基づき算出した、時間当たりの再浮遊核種由来クラウドシャインによる被ばく線量について表 3.14に示す。大気中濃度は年平均濃度とした。また、定常解析結果のうち、降水量一定条件に基づき算出した、時間当たりの再浮遊核種由来クラウドシャインによる被ばく線量について表 3.15に示す。降水一定条件については、降水は土壌水分を増加させ、土壌粒子の再浮遊を抑制するが、土壌水分量は降水強度と降水継続時間等に依存し、降水強度のみでは表現が難しいことに留意する必要がある。各解析条件において、土壌中Cs-137濃度の年平均値で規格化した被ばく線量を算出した。土壌中のCs-137濃度の年平均値を表 3.16及び表 3.17に、被ばく線量を表 3.18及び表 3.19に示す。同様に、風速一定条件及び降水量一定条件において、再浮遊核種濃度が最大になった場合の被ばく線量及び規格化済被ばく線量を表 3.20及び表 3.21に示す。また、土壌中Cs-137濃度の年平均値で規格化した被ばく線量を表 3.22及び表 3.23に示す。

表 3.11 年度別の時間実効線量（年平均値）

	各レイヤーからの実効線量(Sv/h)					
	2012M	2012F	2012	2021M	2021F	2021
レイヤー1	2.8E-16	2.8E-16	<b>2.8E-16</b>	1.2E-16	1.3E-16	<b>1.3E-16</b>
レイヤー2	3.2E-16	4.2E-16	<b>3.7E-16</b>	1.4E-16	1.9E-16	<b>1.7E-16</b>
レイヤー3	6.7E-16	6.8E-16	<b>6.8E-16</b>	3.0E-16	3.0E-16	<b>3.0E-16</b>
レイヤー4	1.3E-15	1.3E-15	<b>1.3E-15</b>	5.6E-16	5.7E-16	<b>5.7E-16</b>
レイヤー5	1.7E-15	1.8E-15	<b>1.8E-15</b>	7.7E-16	8.0E-16	<b>7.9E-16</b>
レイヤー6	3.5E-15	3.5E-15	<b>3.5E-15</b>	1.4E-15	1.5E-15	<b>1.5E-15</b>
レイヤー7	3.7E-15	3.7E-15	<b>3.7E-15</b>	1.6E-15	1.6E-15	<b>1.6E-15</b>
レイヤー8	3.2E-15	3.3E-15	<b>3.3E-15</b>	1.4E-15	1.4E-15	<b>1.4E-15</b>
レイヤー9	2.0E-15	2.0E-15	<b>2.0E-15</b>	8.7E-16	8.8E-16	<b>8.8E-16</b>
レイヤー10	2.2E-15	2.2E-15	<b>2.2E-15</b>	9.8E-16	9.9E-16	<b>9.9E-16</b>
レイヤー11	2.5E-16	2.6E-16	<b>2.5E-16</b>	2.5E-16	2.6E-16	<b>2.5E-16</b>
レイヤー12	2.6E-15	2.6E-15	<b>2.6E-15</b>	2.6E-15	2.6E-15	<b>2.6E-15</b>
合計	2.2E-14	2.2E-14	<b>2.2E-14</b>	1.1E-14	1.1E-14	<b>1.1E-14</b>

表 3.12 年度別の時間実効線量 (年最大値)

	各レイヤーからの実効線量(Sv/h)					
	2012M	2012F	<b>2012</b>	2021M	2021F	<b>2021</b>
レイヤー1	2.9E-14	3.0E-14	<b>3.0E-14</b>	1.0E-14	1.0E-14	<b>1.0E-14</b>
レイヤー2	3.4E-14	4.3E-14	<b>3.9E-14</b>	1.2E-14	1.5E-14	<b>1.3E-14</b>
レイヤー3	6.8E-14	6.9E-14	<b>6.9E-14</b>	2.4E-14	2.4E-14	<b>2.4E-14</b>
レイヤー4	1.2E-13	1.2E-13	<b>1.2E-13</b>	4.2E-14	4.3E-14	<b>4.3E-14</b>
レイヤー5	1.6E-13	1.6E-13	<b>1.6E-13</b>	5.5E-14	5.6E-14	<b>5.5E-14</b>
レイヤー6	2.1E-13	2.2E-13	<b>2.2E-13</b>	7.0E-14	7.1E-14	<b>7.0E-14</b>
レイヤー7	2.3E-13	2.3E-13	<b>2.3E-13</b>	6.9E-14	6.9E-14	<b>6.9E-14</b>
レイヤー8	1.9E-13	1.9E-13	<b>1.9E-13</b>	5.3E-14	5.4E-14	<b>5.3E-14</b>
レイヤー9	1.1E-13	1.1E-13	<b>1.1E-13</b>	3.1E-14	3.1E-14	<b>3.1E-14</b>
レイヤー10	1.2E-13	1.2E-13	<b>1.2E-13</b>	2.9E-14	2.9E-14	<b>2.9E-14</b>
レイヤー11	2.5E-16	2.6E-16	<b>2.5E-16</b>	2.5E-16	2.6E-16	<b>2.5E-16</b>
レイヤー12	2.6E-15	2.6E-15	<b>2.6E-15</b>	2.6E-15	2.6E-15	<b>2.6E-15</b>
合計	1.3E-12	1.3E-12	<b>1.3E-12</b>	4.0E-13	4.1E-13	<b>4.0E-13</b>

表 3.13 年積算外部被ばく実効線量

項目		2012	2021
外部被ばく実効線量 (Sv/year)	年平均値	1.9E-10	9.7E-11
	年最大値	1.1E-08	3.5E-09

表 3.14 風速一定条件での時間実効線量 (年平均値)

	各レイヤーからの実効線量(Sv/h)			
	1m/s	5m/s	7m/s	10m/s
レイヤー1	1.7E-16	5.1E-16	2.6E-15	1.2E-15
レイヤー2	2.3E-16	6.7E-16	3.4E-15	1.6E-15
レイヤー3	4.1E-16	1.2E-15	6.2E-15	2.8E-15
レイヤー4	7.9E-16	2.3E-15	1.2E-14	5.2E-15
レイヤー5	1.1E-15	3.1E-15	1.6E-14	6.7E-15
レイヤー6	2.2E-15	5.1E-15	2.7E-14	1.2E-14
レイヤー7	2.6E-15	4.8E-15	2.7E-14	1.2E-14
レイヤー8	2.4E-15	3.8E-15	2.3E-14	1.0E-14
レイヤー9	1.6E-15	2.2E-15	1.3E-14	5.9E-15
レイヤー10	1.8E-15	2.0E-15	1.2E-14	5.4E-15
レイヤー11	2.5E-16	2.5E-16	2.5E-16	2.5E-16
レイヤー12	2.6E-15	2.6E-15	2.6E-15	2.6E-15
合計	1.6E-14	2.8E-14	1.5E-13	6.5E-14

表 3.15 降水量一定条件での時間実効線量 (年平均値)

	各レイヤーからの実効線量(Sv/h)			
	0mm/h	1mm/h	5mm/h	10mm/h
レイヤー1	3.3E-16	1.5E-16	7.0E-17	4.9E-17
レイヤー2	4.3E-16	2.0E-16	9.3E-17	6.5E-17
レイヤー3	7.9E-16	3.6E-16	1.7E-16	1.2E-16
レイヤー4	1.5E-15	6.9E-16	3.2E-16	2.3E-16
レイヤー5	2.0E-15	9.5E-16	4.6E-16	3.3E-16
レイヤー6	3.8E-15	1.8E-15	8.9E-16	6.5E-16
レイヤー7	4.0E-15	1.9E-15	9.8E-16	7.4E-16
レイヤー8	3.4E-15	1.7E-15	8.9E-16	6.9E-16
レイヤー9	2.1E-15	1.1E-15	5.9E-16	4.6E-16
レイヤー10	2.3E-15	1.2E-15	7.0E-16	5.8E-16
レイヤー11	2.5E-16	2.5E-16	2.5E-16	2.5E-16
レイヤー12	2.6E-15	2.6E-15	2.6E-15	2.6E-15
合計	2.3E-14	1.3E-14	8.0E-15	6.8E-15

表 3.16 風速一定条件での土壤中Cs-137濃度

設定風速	2012 年土壤濃度平均値(Bq/m <sup>2</sup> ) (0-5cm)
1m/s	1.07E+06
5m/s	1.03E+06
7m/s	6.74E+05
10m/s	3.13E+05

表 3.17 降水量一定条件での土壤中Cs-137濃度

設定風速	2012 年土壤濃度平均値(Bq/m <sup>2</sup> ) (0-5cm)
1m/s	1.05E+06
5m/s	1.06E+06
7m/s	1.04E+06
10m/s	9.67E+05

表 3.18 風速一定条件での時間実効線量（規格化、年平均値）

	各レイヤーからの実効線量(Sv/h/(Bq/m <sup>2</sup> ))			
	1m/s	5m/s	7m/s	10m/s
レイヤー1	1.6E-22	5.0E-22	3.9E-21	3.9E-21
レイヤー2	2.1E-22	6.5E-22	5.1E-21	5.1E-21
レイヤー3	3.9E-22	1.2E-21	9.3E-21	9.1E-21
レイヤー4	7.4E-22	2.2E-21	1.7E-20	1.7E-20
レイヤー5	1.0E-21	3.0E-21	2.3E-20	2.1E-20
レイヤー6	2.1E-21	5.0E-21	4.0E-20	3.7E-20
レイヤー7	2.4E-21	4.6E-21	4.1E-20	3.9E-20
レイヤー8	2.2E-21	3.7E-21	3.3E-20	3.2E-20
レイヤー9	1.5E-21	2.1E-21	2.0E-20	1.9E-20
レイヤー10	1.7E-21	1.9E-21	1.8E-20	1.7E-20
レイヤー11	2.4E-22	2.5E-22	3.8E-22	8.1E-22
レイヤー12	2.4E-21	2.5E-21	3.8E-21	8.3E-21
合計	1.5E-20	2.8E-20	2.2E-19	2.1E-19

表 3.19 降水量一定条件での時間実効線量（規格化、年平均値）

	各レイヤーからの実効線量(Sv/h(Bq/m <sup>2</sup> ))			
	0mm/h	1mm/h	5mm/h	10mm/h
レイヤー1	3.1E-22	1.4E-22	6.7E-23	5.1E-23
レイヤー2	4.1E-22	1.9E-22	8.9E-23	6.7E-23
レイヤー3	7.5E-22	3.4E-22	1.6E-22	1.2E-22
レイヤー4	1.4E-21	6.4E-22	3.1E-22	2.4E-22
レイヤー5	2.0E-21	9.0E-22	4.4E-22	3.4E-22
レイヤー6	3.6E-21	1.7E-21	8.5E-22	6.7E-22
レイヤー7	3.8E-21	1.8E-21	9.4E-22	7.6E-22
レイヤー8	3.3E-21	1.6E-21	8.6E-22	7.2E-22
レイヤー9	2.0E-21	1.0E-21	5.6E-22	4.8E-22
レイヤー10	2.1E-21	1.1E-21	6.8E-22	6.0E-22
レイヤー11	2.4E-22	2.4E-22	2.4E-22	2.6E-22
レイヤー12	2.5E-21	2.4E-21	2.5E-21	2.7E-21
合計	2.2E-20	1.2E-20	7.7E-21	7.0E-21

表 3.20 風速一定条件での時間実効線量（年最大値）

	各レイヤーからの実効線量(Sv/h)			
	1m/s	5m/s	7m/s	10m/s
レイヤー1	1.4E-15	2.1E-15	4.0E-15	3.0E-15
レイヤー2	1.9E-15	2.7E-15	5.2E-15	3.9E-15
レイヤー3	3.6E-15	4.8E-15	9.3E-15	7.0E-15
レイヤー4	7.3E-15	8.5E-15	1.7E-14	1.3E-14
レイヤー5	1.1E-14	1.0E-14	2.3E-14	1.7E-14
レイヤー6	2.6E-14	1.7E-14	4.1E-14	3.0E-14
レイヤー7	3.3E-14	1.5E-14	4.5E-14	3.2E-14
レイヤー8	3.4E-14	1.4E-14	4.1E-14	2.8E-14
レイヤー9	2.3E-14	9.0E-15	2.7E-14	1.7E-14
レイヤー10	2.7E-14	1.2E-14	3.5E-14	1.7E-14
レイヤー11	2.5E-16	2.5E-16	2.5E-16	2.5E-16
レイヤー12	2.6E-15	2.6E-15	2.6E-15	2.6E-15
合計	1.7E-13	9.9E-14	2.5E-13	1.7E-13

表 3.21 降水量一定条件での時間実効線量（年最大値）

	各レイヤーからの実効線量(Sv/h)			
	0mm/h	1mm/h	5mm/h	10mm/h
レイヤー1	1.4E-15	2.1E-15	4.0E-15	3.0E-15
レイヤー2	1.9E-15	2.7E-15	5.2E-15	3.9E-15
レイヤー3	3.6E-15	4.8E-15	9.3E-15	7.0E-15
レイヤー4	7.3E-15	8.5E-15	1.7E-14	1.3E-14
レイヤー5	1.1E-14	1.0E-14	2.3E-14	1.7E-14
レイヤー6	2.6E-14	1.7E-14	4.1E-14	3.0E-14
レイヤー7	3.3E-14	1.5E-14	4.5E-14	3.2E-14
レイヤー8	3.4E-14	1.4E-14	4.1E-14	2.8E-14
レイヤー9	2.3E-14	9.0E-15	2.7E-14	1.7E-14
レイヤー10	2.7E-14	1.2E-14	3.5E-14	1.7E-14
レイヤー11	2.5E-16	2.5E-16	2.5E-16	2.5E-16
レイヤー12	2.6E-15	2.6E-15	2.6E-15	2.6E-15
合計	1.7E-13	9.9E-14	2.5E-13	1.7E-13

表 3.22 風速一定条件での時間実効線量（規格化、年最大値）

	各レイヤーからの実効線量(Sv/h/(Bq/m <sup>2</sup> ))			
	1m/s	5m/s	7m/s	10m/s
レイヤー1	1.3E-21	2.0E-21	5.9E-21	9.5E-21
レイヤー2	1.8E-21	2.6E-21	7.7E-21	1.2E-20
レイヤー3	3.4E-21	4.7E-21	1.4E-20	2.2E-20
レイヤー4	6.8E-21	8.3E-21	2.6E-20	4.1E-20
レイヤー5	1.1E-20	1.0E-20	3.5E-20	5.3E-20
レイヤー6	2.4E-20	1.6E-20	6.1E-20	9.6E-20
レイヤー7	3.1E-20	1.5E-20	6.7E-20	1.0E-19
レイヤー8	3.1E-20	1.4E-20	6.1E-20	8.8E-20
レイヤー9	2.2E-20	8.7E-21	4.1E-20	5.4E-20
レイヤー10	2.5E-20	1.2E-20	5.2E-20	5.5E-20
レイヤー11	2.4E-22	2.5E-22	3.8E-22	8.1E-22
レイヤー12	2.4E-21	2.5E-21	3.8E-21	8.3E-21
合計	1.6E-19	9.6E-20	3.7E-19	5.4E-19



表 3.23 降水量一定条件での時間実効線量（規格化、年最大値）

	各レイヤーからの実効線量(Sv/h(Bq/m <sup>2</sup> ))			
	0mm/h	1mm/h	5mm/h	10mm/h
レイヤー1	1.4E-21	2.0E-21	3.8E-21	3.1E-21
レイヤー2	1.8E-21	2.5E-21	5.0E-21	4.0E-21
レイヤー3	3.5E-21	4.5E-21	9.0E-21	7.3E-21
レイヤー4	7.0E-21	8.0E-21	1.7E-20	1.3E-20
レイヤー5	1.1E-20	9.7E-21	2.2E-20	1.7E-20
レイヤー6	2.4E-20	1.6E-20	4.0E-20	3.1E-20
レイヤー7	3.1E-20	1.4E-20	4.4E-20	3.3E-20
レイヤー8	3.2E-20	1.4E-20	4.0E-20	2.9E-20
レイヤー9	2.2E-20	8.4E-21	2.6E-20	1.8E-20
レイヤー10	2.5E-20	1.1E-20	3.4E-20	1.8E-20
レイヤー11	2.4E-22	2.4E-22	2.4E-22	2.6E-22
レイヤー12	2.5E-21	2.4E-21	2.5E-21	2.7E-21
合計	1.6E-19	9.3E-20	2.4E-19	1.8E-19

### 第3章の参考文献

1. Anspaugh, L. R., J. H. Shinn, P. L. Phelps, and N. C. Kennedy. 1975. "Resuspension and Redistribution of Plutonium in Soils." *Health Physics* 29 (4): 571.
2. Garger, E, S Gordeev, W Hollaender, V Kashparov, V Kashpur, J Martinez-Serrano, V Mironov, et al. 1996. "Resuspension and Deposition of Radionuclides under Various Conditions." INIS-BY-020. Proceedings of the First International Conference "The Radiological Consequences of the Chernobyl Accident."
3. Garger, E. K. 1994. "Air Concentrations of Radionuclides in the Vicinity of Chernobyl and the Effects of Resuspension." *Journal of Aerosol Science*, Resuspension in the Outdoor Environment, 25 (5): 745–53. [https://doi.org/10.1016/0021-8502\(94\)90041-8](https://doi.org/10.1016/0021-8502(94)90041-8).
4. Garger, Evgenii K., F. Owen Hoffman, and Kathleen M. Thiessen. 1997. "Uncertainty of the Long-Term Resuspension Factor." *Atmospheric Environment* 31 (11): 1647–56. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(96\)00345-7](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(96)00345-7).
5. Gavrilov, V. P., N. V. Klepikova, N. I. Troyanova, and H. C. Rodean. 1995. "Stationary Model for Resuspension of Radionuclides and Assessments of <sup>137</sup>CS Concentration in the Near-Surface Layer for the Contaminated Areas in the Bryansk Region of Russia and Belarus." *Atmospheric Environment* 29 (19): 2633–50. [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(95\)00168-X](https://doi.org/10.1016/1352-2310(95)00168-X).
6. IAEA. 1990. "Evaluation of Severe Accident Risks: Quantification of Major Input Parameters. MACCS Input." Sprung et al., NUREG/CR-4551, SAND86-1309, Vol. 2, Rev.1, Part 7, Sandia National Laboratories.
7. Iranzo, Emma, Asuncion Espinosa, and Javier Martinez. 1994. "Resuspension in the Palomares Area of Spain: A Summary of Experimental Studies." *Journal of Aerosol Science* 25 (5): 833–41. [https://doi.org/10.1016/0021-8502\(94\)90050-7](https://doi.org/10.1016/0021-8502(94)90050-7).
8. Kajino, Mizuo, Masahide Ishizuka, Yasuhito Igarashi, Kazuyuki Kita, Chisato Yoshikawa, and Masaru Inatsu. 2016. "Long-Term Assessment of Airborne Radiocesium after the Fukushima Nuclear Accident: Re-Suspension from Bare Soil and Forest Ecosystems." *Atmospheric Chemistry and Physics* 16 (20): 13149–72. <https://doi.org/10.5194/acp-16-13149-2016>.
9. Kashparov, V. A, S. M Lundin, A. M Kadygrib, V. P Protsak, S. E Levtchuk, V. I Yoschenko, V. A Kashpur, and N. M Talerko. 2000. "Forest Fires in the Territory Contaminated as a Result of the Chernobyl Accident: Radioactive Aerosol Resuspension and Exposure of Fire-Fighters." *Journal of Environmental Radioactivity* 51 (3): 281–98. [https://doi.org/10.1016/S0265-931X\(00\)00082-5](https://doi.org/10.1016/S0265-931X(00)00082-5).
10. Katata, Genki, Mizuo Kajino, Takatoshi Hiraki, Masahide Aikawa, Tomiki Kobayashi, and Haruyasu Nagai. 2011. "A Method for Simple and Accurate Estimation of Fog Deposition in a Mountain Forest Using a Meteorological Model." *Journal of Geophysical Research*:

- Atmospheres* 116 (D20). <https://doi.org/10.1029/2010JD015552>.
11. Kita, Kazuyuki, Yasuhito Igarashi, Takeshi Kinase, Naho Hayashi, Masahide Ishizuka, Kouji Adachi, Motoo Koitabashi, Tsuyoshi Thomas Sekiyama, and Yuichi Onda. 2020. "Rain-Induced Bioecological Resuspension of Radiocaesium in a Polluted Forest in Japan." *Scientific Reports* 10 (1): 15330. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72029-z>.
  12. Lassey, K. R. 1980. "The Possible Importance of Short-Term Exposure to Resuspended Radionuclides." *Health Physics* 38 (5): 749–61. <https://doi.org/10.1097/00004032-198005000-00003>.
  13. Nagai, Haruyasu. 2005. "Incorporation of CO<sub>2</sub> Exchange Processes into a Multilayer Atmosphere–Soil–Vegetation Model." *Journal of Applied Meteorology* 44 (10): 1574–92. <https://doi.org/10.1175/JAM2293.1>.
  14. Nenot, Jean-Claude, Jean Brenot, Dominique Laurier, Alain Rannou, and Dominique Thierry. 2009. "ICRP Publication 103 The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection." 978-2-7430-1120–8. France. [http://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig\\_q=RN:49042116](http://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:49042116).
  15. Ota, Masakazu, Shogo Takahara, Kazuya Yoshimura, Azusa Nagakubo, Jun Hirouchi, Naho Hayashi, Tomohisa Abe, Hironori Funaki and Haruyasu Nagai. "Soil dust and bio-aerosols as potential sources of the re-suspended <sup>137</sup>Cs occurring near the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant" *Journal of Environmental Radioactivity* (Submitted)
  16. Ota, Masakazu, Haruyasu Nagai, and Jun Koarashi. 2016. "Modeling Dynamics of <sup>137</sup>Cs in Forest Surface Environments: Application to a Contaminated Forest Site near Fukushima and Assessment of Potential Impacts of Soil Organic Matter Interactions." *Science of The Total Environment* 551–552 (May): 590–604. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.068>.
  17. Petoussi-Hens, N., W.E. Bolch, K.F. Eckerman, A. Endo, N. Hertel, J. Hunt, M. Pelliccioni, H. Schlattl, and M. Zankl. 2010. "Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures." *Annals of the ICRP* 40 (2–5): 1–257. <https://doi.org/10.1016/j.icrp.2011.10.001>.
  18. Yaping Shao. 2008. *Physics and Modelling of Wind Erosion*. 2nd ed. Atmospheric and Oceanographic Sciences Library. Springer Dordrecht. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4020-8895-7>.
  19. Sato, Tatsuhiko, Yosuke Iwamoto, Shintaro Hashimoto, Tatsuhiko Ogawa, Takuya Furuta, Shin-ichiro Abe, Takeshi Kai, et al. 2018. "Features of Particle and Heavy Ion Transport Code System (PHITS) Version 3.02." *Journal of Nuclear Science and Technology*. <https://doi.org/10.1080/00223131.2017.1419890>.
  20. Sehmel, G. A. 1980. "Particle Resuspension: A Review." *Environment International* 4 (2): 107–27. [https://doi.org/10.1016/0160-4120\(80\)90005-7](https://doi.org/10.1016/0160-4120(80)90005-7).

21. Slinn, W. G. N. 1978. "Parameterizations for Resuspension and for Wet and Dry Deposition of Particles and Gases for Use in Radiation Dose Calculations." *Nuclear Safety* 19 (2): 205–19.
22. Wagenpfeil, F., H.G. Paretzke, J.M. Peres, and J. Tschiersch. 1999. "Resuspension of Coarse Particles in the Region of Chernobyl." *Atmospheric Environment* 33 (20): 3313–23. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(98\)00293-3](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(98)00293-3).
23. Whicker, Jeffrey J., David D. Breshears, Michael McNaughton, Mary Jo Chastenet de Gery, and Christine Bullock. 2021. "Radionuclide Resuspension across Ecosystems and Environmental Disturbances." *Journal of Environmental Radioactivity* 233 (July): 106586. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106586>.
24. Yamazawa, Hiromi. 2001. "A One-Dimensional Dynamical Soil–Atmosphere Tritiated Water Transport Model." *Environmental Modelling & Software* 16 (8): 739–51. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(01\)00039-1](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(01)00039-1).
25. Zankl, Maria. 2010. "Adult Male and Female Reference Computational Phantoms (ICRP Publication 110)." *Japanese Journal of Health Physics* 45 (4): 357–69. <https://doi.org/10.5453/jhps.45.357>.
26. 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> (最終閲覧日 2023年2月10日)
27. 木村仁宣, 木名瀬栄, 高原省五, 飯島正史, 本間俊充. 2011. "福島第一原子力発電所事故の防護措置と線量再構築 (2) 吸入摂取による公衆の内部被ばく線量評価." 820–820. 一般社団法人 日本原子力学会. <https://doi.org/10.11561/aesj.2011f.0.820.0>.
28. 原子力機構. 放射性物質モニタリングデータの情報公開サイト、<https://emdb.jaea.go.jp/emdb/> (最終閲覧日 2023年2月10日)
29. 原子力規制委員会. 放射性物質の分布状況等に関する調査(放射性セシウムの深度分布調査) <https://radioactivity.nra.go.jp/ja/list/338/list-1.html> (最終閲覧日 2023年3月8日)
30. 原子力規制委員会, 2013. 平成25年度東京電力(株)福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の長期的影響把握手法の確立事業 成果報告書、<https://radioactivity.nra.go.jp/ja/list/504/list-1.html> (最終閲覧日 2023年3月8日)
31. 原子力規制委員会, 2022. 令和3年度東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の分析データの集約事業 成果報告書、<https://radioactivity.nra.go.jp/ja/list/646/list-1.html> (最終閲覧日 2023年3月8日)
32. 原子力規制委員会, 2021. 放射能測定法シリーズNo.35 緊急時における環境試料採取法、<https://www.kankyo-hoshano.go.jp/wp-content/uploads/2021/06/No35.pdf>
33. 三上智, 松田規宏, 安藤真樹, 木名瀬栄, 北野光昭, 川瀬啓一, 松元慎一郎, 山本英明, 斎藤公明. 2015. "V 福島周辺における空間線量率分布の特徴." *RADIOISOTOPES* 64 (9): 589–607. <https://doi.org/10.3769/radioisotopes.64.589>.
34. 三上正男. 2009. "ウインドエロージョン研究の変遷と現状." *雪氷* 71 (2): 91–103.

[https://doi.org/10.5331/seppyo.71.2\\_91](https://doi.org/10.5331/seppyo.71.2_91).

35. 文部科学省, 原子力災害対策支援本部. 2012. “東京電力株式会社福島第一原子力発電所の事故に伴い放出された放射性物質の分布状況等に関する調査研究結果について（第1編）.”, <https://radioactivity.nra.go.jp/ja/contents/6000/5235/view.html>. （最終閲覧日 2023年3月8日）

#### 4. 防護措置モデルの検討

原子力災害時の屋内退避について、現状のOSCAARコードでは全ての解析範囲において、一律の被ばく低減係数を利用して被ばく評価を行っている。しかし、近年の研究により、社会条件や気象条件を考慮して建屋内へ侵入してくる放射性物質量を解析するモデルが開発されたところである。そこで、様々な条件で異なる被ばく低減効果の違いを考慮して、屋内退避時の被ばく線量を評価できるようにするため、最新知見の調査、解析モデルへの反映方法を検討し、OSCAARコードの屋内退避評価モデルの高度化に必要な作業を整理した。

本章では、①国内サイト周辺の建蔽率データの整備と②各メッシュの風速、屋外濃度の時間変化を抜き出し、屋内退避評価モデルに組み込む方法、及びモデルで計算された低減効果をOSCAARに入力する方法の自動化を検討する。

##### 4.1. 国内サイト周辺の建蔽率データの整備

ここでは、建蔽率の定義をある区域内の面積に対するその区域内に存在する建物の占める割合とする。そのため、対象とする区域全体の面積と区域内に存在する建物の総面積（建物面積）が必要である。

OSCAARの評価点は距離別・方位別の同心円メッシュで構成されているため、建蔽率データも同心円メッシュで整備する必要がある。しかし、同心円メッシュ内に存在する建物面積を求めることは数学的に難しいため、始めに格子状メッシュ内に存在する建物面積を求め、それを用いて同心円メッシュ内に存在する建物面積および建蔽率を算出することとした。

格子状のメッシュには緯度・経度の情報を持つ基準地域メッシュを用い、建物面積を求めるために必要である建物の境界線の情報はベクトルタイルを用いた（図 4.1）。これらを用いて以下の手順によって区域内に存在する建物面積を求め、建蔽率データを同心円メッシュで整備した。

- ① 基準地域メッシュを基に、2分の1地域メッシュの作成
- ② ベクトルタイルデータを用いて、2分の1地域メッシュ内の建物面積の計算
- ③ 2分の1地域メッシュから同心円メッシュへの換算

##### ①2分の1地域メッシュの作成

総務省統計局の「市区町村別メッシュコード一覧」（総務省統計局, 2023a）には、基準地域メッシュ（3次地域メッシュとも呼ばれる）の一覧が掲載されている。基準地域メッシュは約1 km四方の区域である。OSCAARで使用している同心円メッシュの1辺の大きさは1 kmを下回ることがあるため、基準地域メッシュでは正確な建蔽率の情報を与えることができない可能性がある。そこで、基準地域メッシュを分割して、2分の1地域メッシュ（4次地域メッシュとも呼ばれ、約500m四方の区域）を作成した。

ここで出力すべき情報は、各メッシュの最小緯度と最小経度である。始めに、対応する基準地域メッシュの最小緯度と最小経度を取得した。最小緯度と最小経度は基準地域メッ

メッシュコードより計算できる(総務省統計局, 2023b)。基準地域メッシュコードは“AABBCCDEF”のような8桁の数字である。この8桁の数字からメッシュの最小の緯度・経度は以下のように与えられる(総務省統計局, 2023b) :

$$\text{最小緯度} = \frac{2}{3}AA + \frac{1}{12}C + \frac{1}{120}E, \quad (4.1)$$

$$\text{最小経度} = 100 + BB + \frac{1}{8}D + \frac{1}{80}F. \quad (4.2)$$

なお、メッシュの1辺が緯度方向で1/120度、経度方向で1/80度であることから、2分の1地域メッシュの最小緯度と最小経度も、使用した基準地域メッシュコードから計算できる。

例) 基準地域メッシュコード54405458であれば、

$$\text{最小緯度} = \frac{2}{3} \times 54 + \frac{1}{12} \times 5 + \frac{1}{120} \times 5 = 36.45833\dots, \quad (4.3)$$

$$\text{最小経度} = 100 + 40 + \frac{1}{8} \times 4 + \frac{1}{80} \times 8 = 140.6. \quad (4.4)$$

使用した基準メッシュコードは、2022年8月31日時点で掲載されている最も新しいものであり、データ自体は2020年10月1日時点のものである。

### ②2分の1地域メッシュ内の建物面積の計算

建物面積を求めるために必要な情報である建物の境界線情報を取得するために、国土地理院ベクトルタイル(国土交通省国土地理院, 2023)を利用した。ここでは、最も詳細なズームレベル16のベクトルタイルを利用した。使用したベクトルタイルは、2022年8月31日時点で掲載されている最も新しいものであり、データ自体は2022年4月1日時点のものである。

ベクトルタイルでは独自のXY座標系が与えられており、XY座標を緯度と経度に換算(国土交通省国土地理院, 2023)した後で、任意の2分の1地域メッシュ内に含まれるベクトルタイルを抜き出した(図 4.1)。その後、2分の1地域メッシュに含まれる建物のポリゴンデータをベクトルタイルより抜き出し、その面積の総和を求めた。今回対象とした建物は、ベクトルタイルの地物コードで普通建物、堅ろう建物、高層建物、普通無壁舎、および堅ろう無壁舎と示されたものである。

### ③2分の1地域メッシュから同心円メッシュへの換算

2分の1地域メッシュから同心円メッシュへ換算する際、OSCAARの支援コードの一つであるCURRENTコード(本間他, 2000)を利用した。本コードは、集団線量の算定に必要な人口分布を同心円メッシュで整備する際にも使用されたものである。

CURRENTコードでは、同心円メッシュに含まれる2分の1地域メッシュ*i*を抜き出し、各2分の1地域メッシュに含まれる建物面積*S<sub>i</sub>*を、同心円メッシュに含まれる2分の1地域メッシュの面積*A<sub>i</sub>*で重みづけ平均することで、同心円メッシュに含まれる建物面積*S*が計算され

る。その後、求めた建物面積を各同心円メッシュのメッシュ面積で除することで、各同心円メッシュの建蔽率を算出した（図 4.2）。各サイトの建蔽率データを図 4.3~図 4.18に示す。

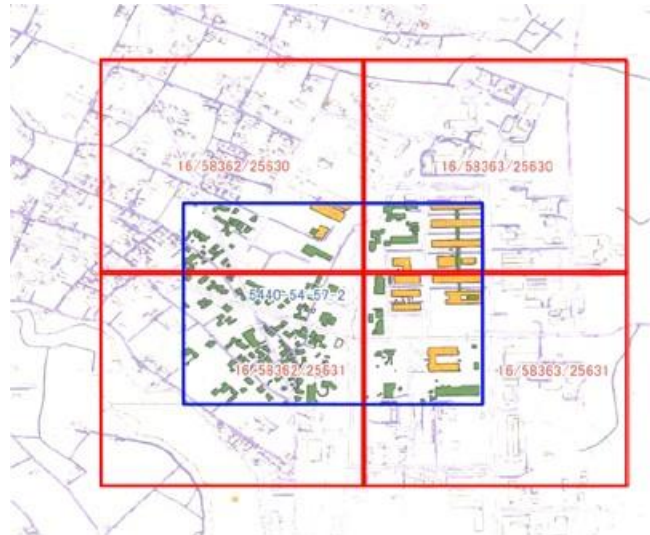


図 4.1 2分の1地域メッシュとベクトルタイルのメッシュ例。  
青線が2分の1地域メッシュ、赤線がベクトルタイルのメッシュ。図中の緑と橙の塗りつぶしは2分の1地域メッシュ内に含まれる建物のポリゴンデータを表す。

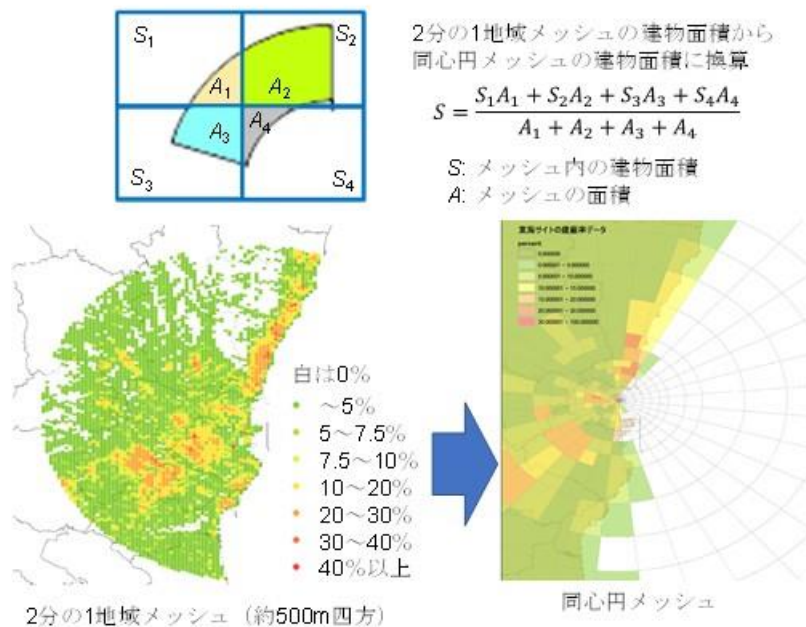


図 4.2 2分の1地域メッシュから同心円メッシュに換算する流れ。  
例は東海サイトである。



建蔽率(%)  
泊原子力発電所

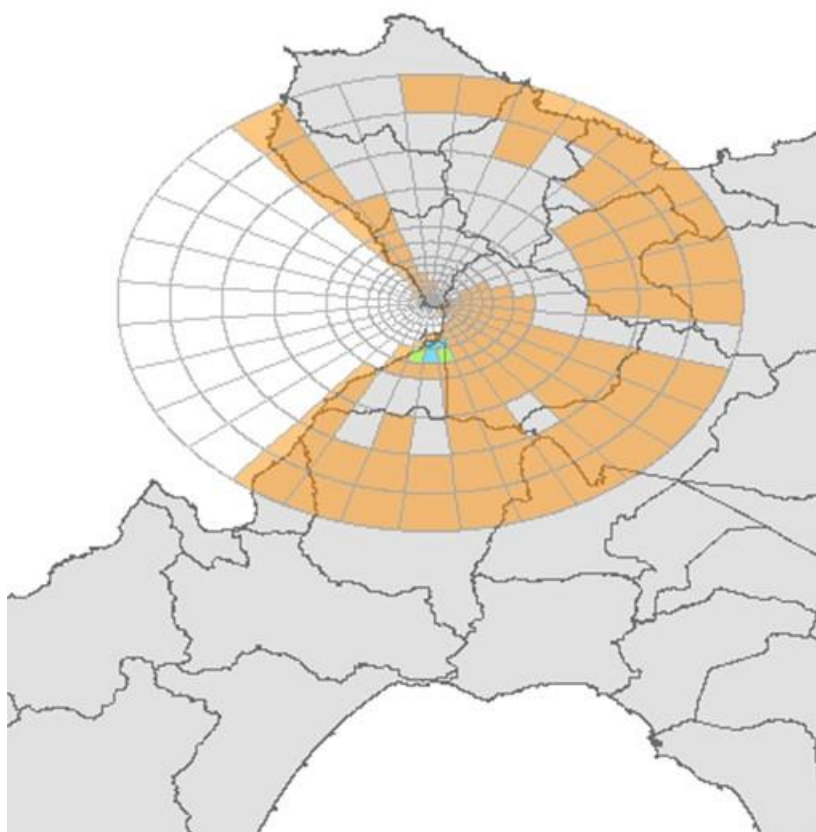
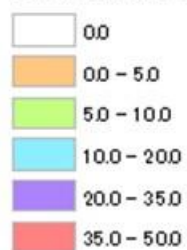


図 4.3 泊原子力発電所付近の建蔽率

(国土交通省国土数値情報ダウンロードサイトを加工して作成

(URL: [https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-N03-v3\\_0.html](https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-N03-v3_0.html))

(令和5年2月8日取得)

建蔽率(%)  
東通原子力発電所

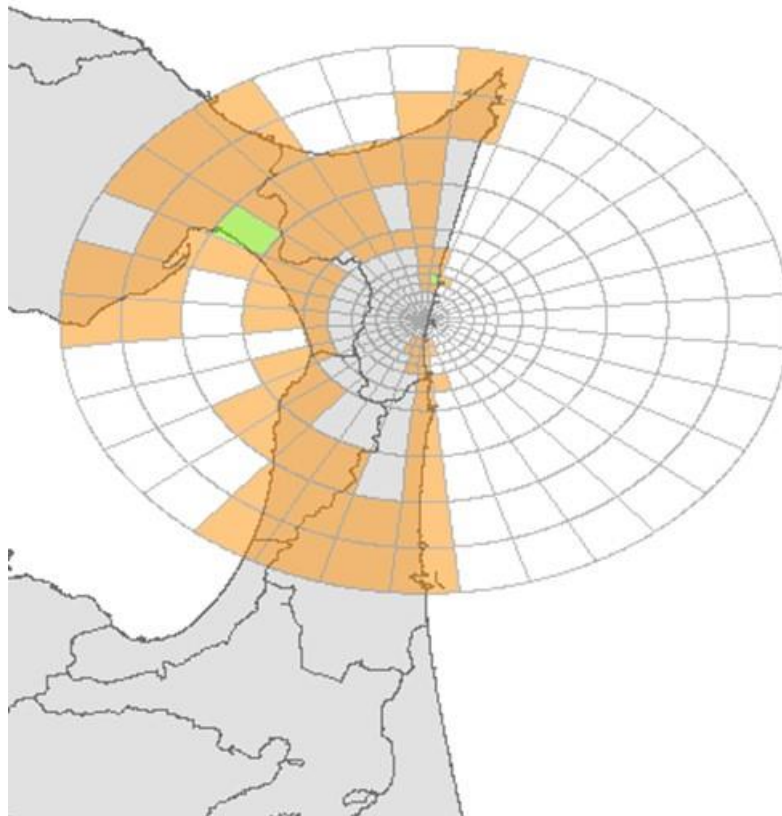
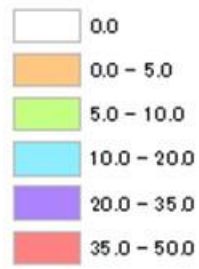


図 4.4 東通原子力発電所付近の建蔽率  
(国土交通省国土数値情報ダウンロードサイトを加工して作成  
(URL: [https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-N03-v3\\_0.html](https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-N03-v3_0.html))  
(令和5年2月8日取得))

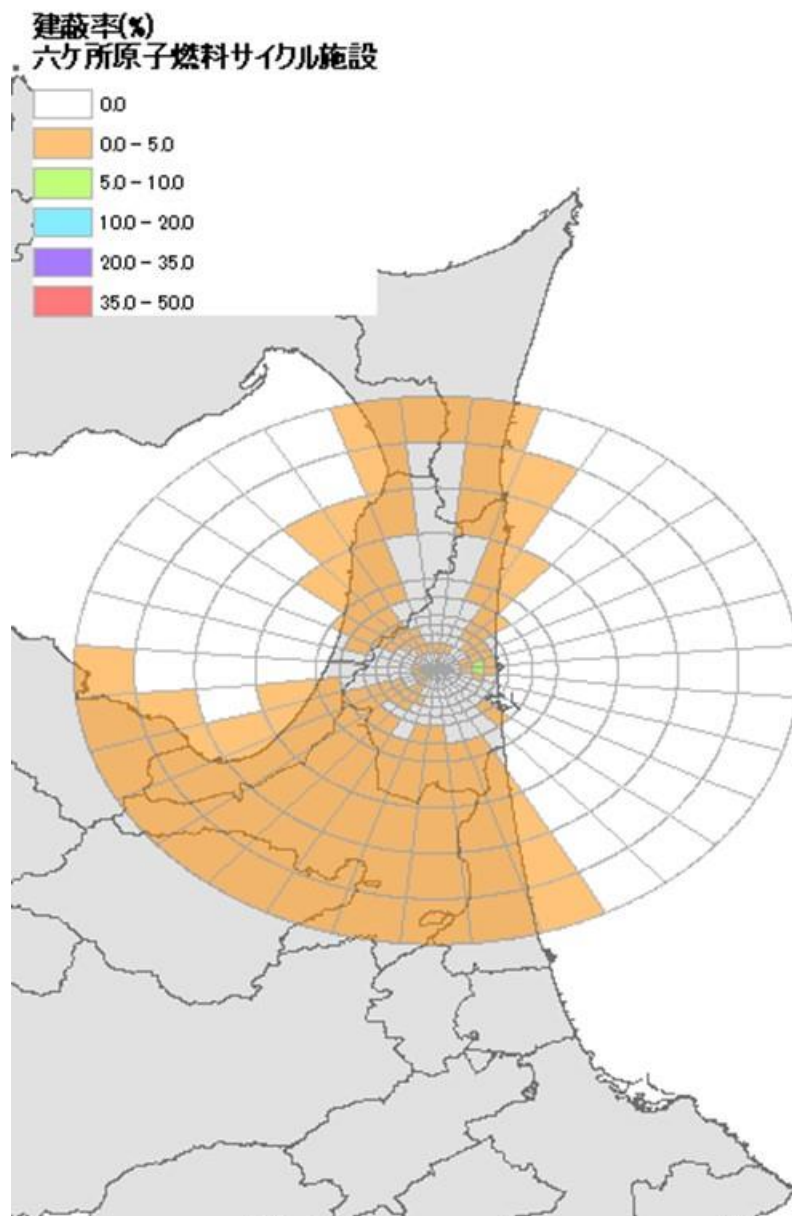


図 4.5 六ヶ所原子燃料サイクル施設付近の建蔽率  
 (国土交通省国土数値情報ダウンロードサイトを加工して作成  
 (URL: [https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-N03-v3\\_0.html](https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-N03-v3_0.html))  
 (令和5年2月8日取得))

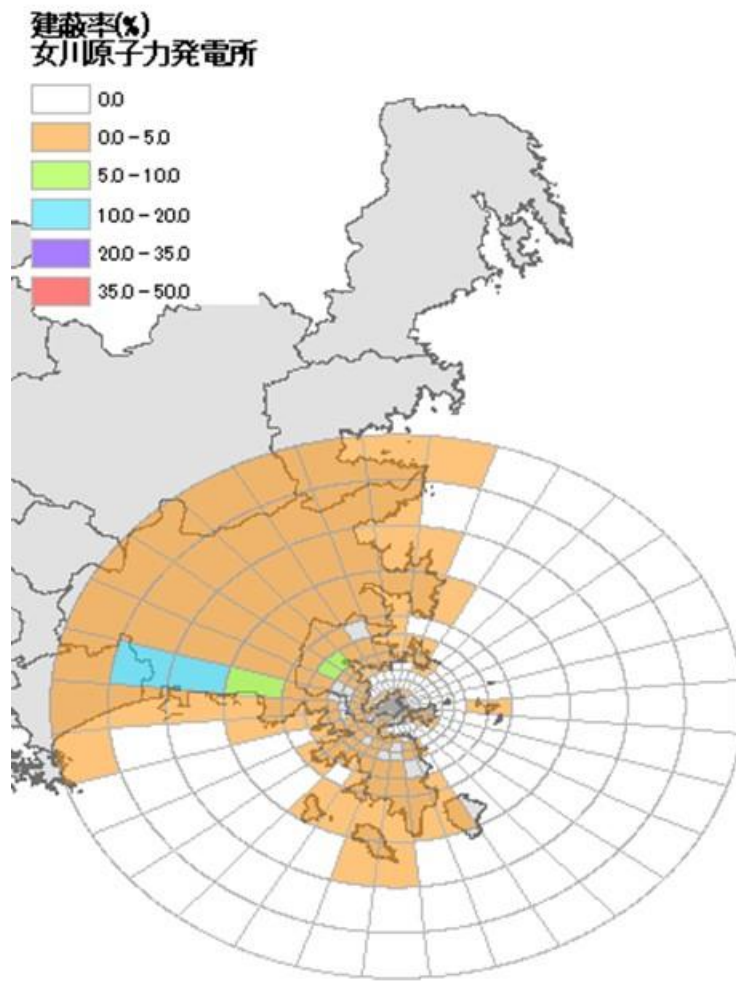


図 4.6 女川原子力発電所付近の建蔽率  
 (国土交通省国土数値情報ダウンロードサイトを加工して作成  
 (URL: [https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-N03-v3\\_0.html](https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-N03-v3_0.html))  
 (令和5年2月8日取得))

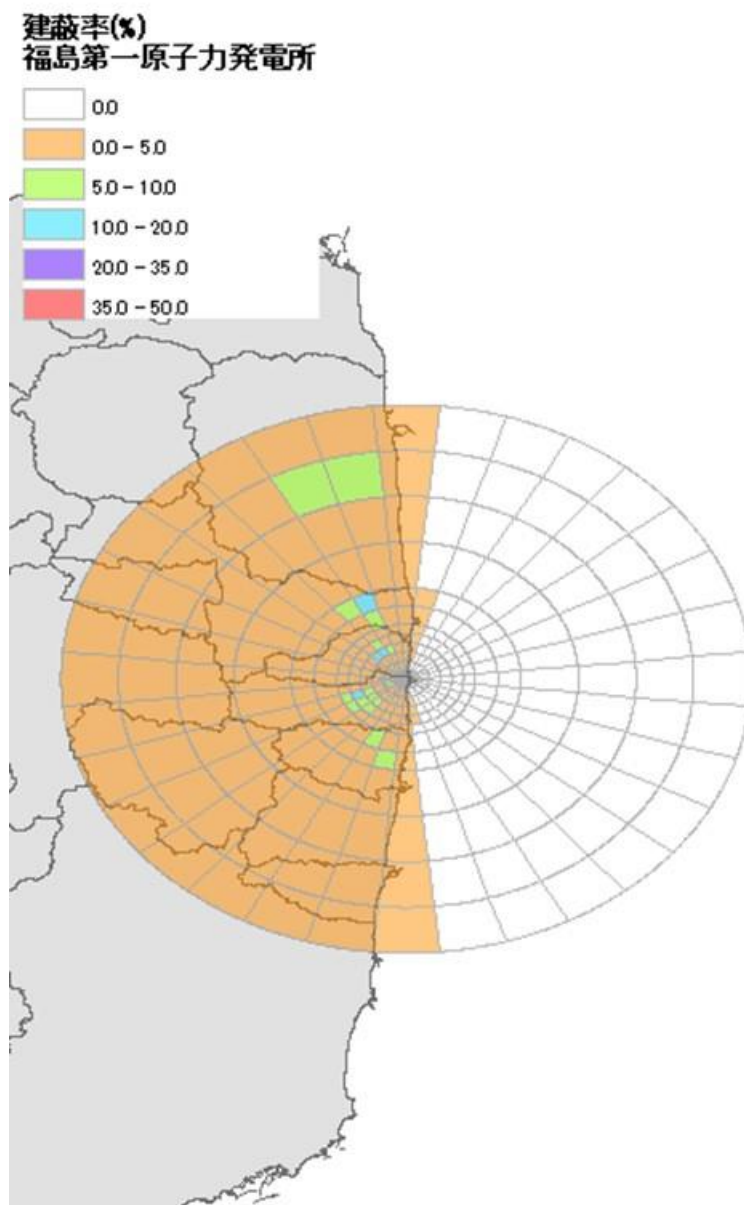


図 4.7 福島第一原子力発電所付近の建蔽率  
 (国土交通省国土数値情報ダウンロードサイトを加工して作成  
 (URL: [https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-N03-v3\\_0.html](https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-N03-v3_0.html))  
 (令和5年2月8日取得))

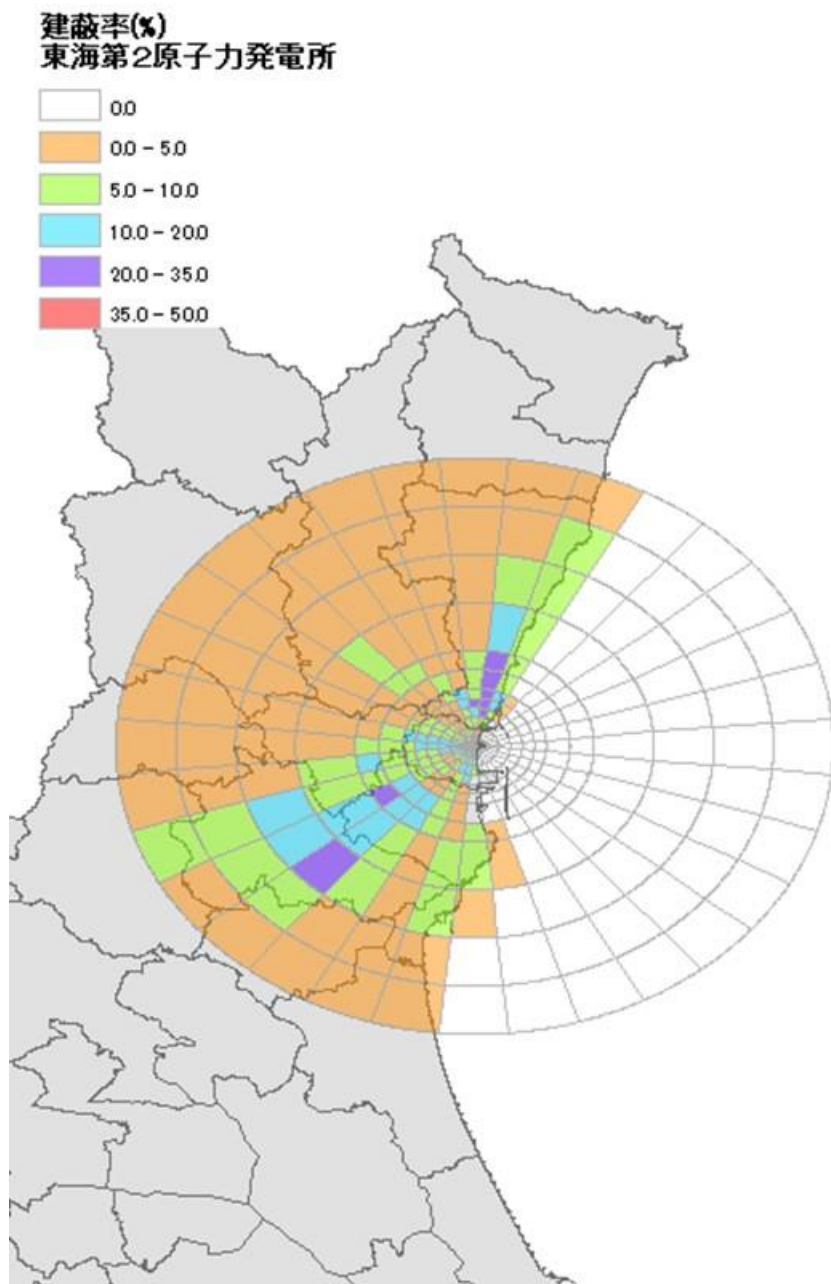


図 4.8 東海第2原子力発電所付近の建蔽率  
 (国土交通省国土数値情報ダウンロードサイトを加工して作成  
 (URL: [https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-N03-v3\\_0.html](https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-N03-v3_0.html))  
 (令和5年2月8日取得))

建蔽率(%)  
志賀原子力発電所

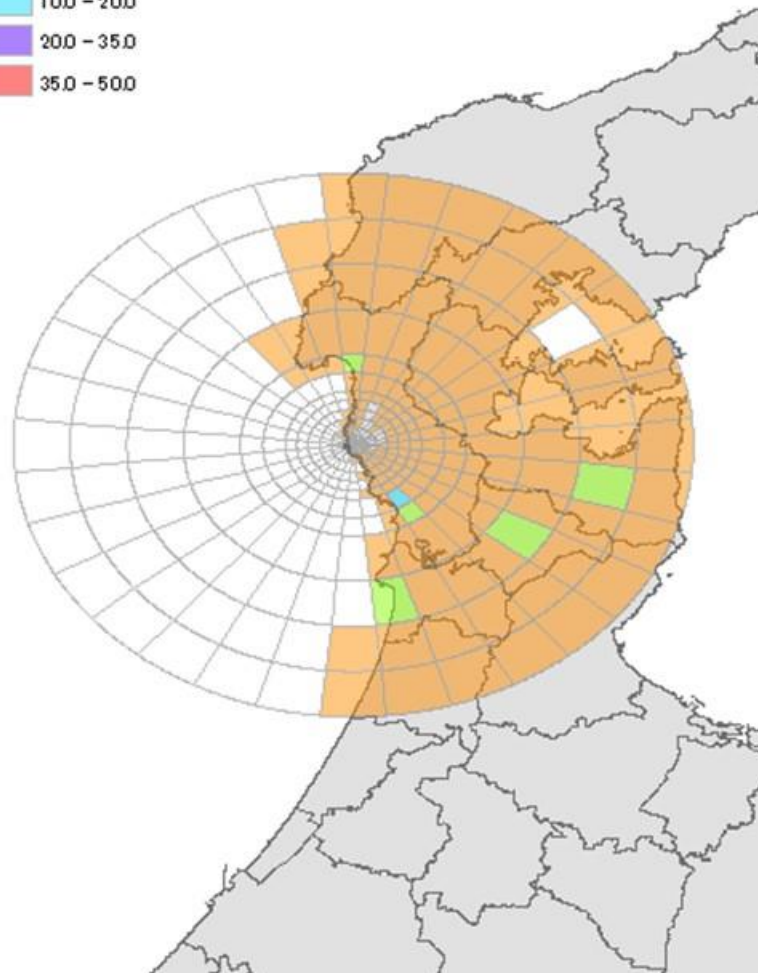
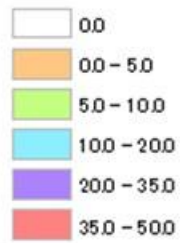


図 4.9 志賀原子力発電所付近の建蔽率  
(国土交通省国土数値情報ダウンロードサイトを加工して作成  
(URL: [https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-N03-v3\\_0.html](https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-N03-v3_0.html))  
(令和5年2月8日取得))

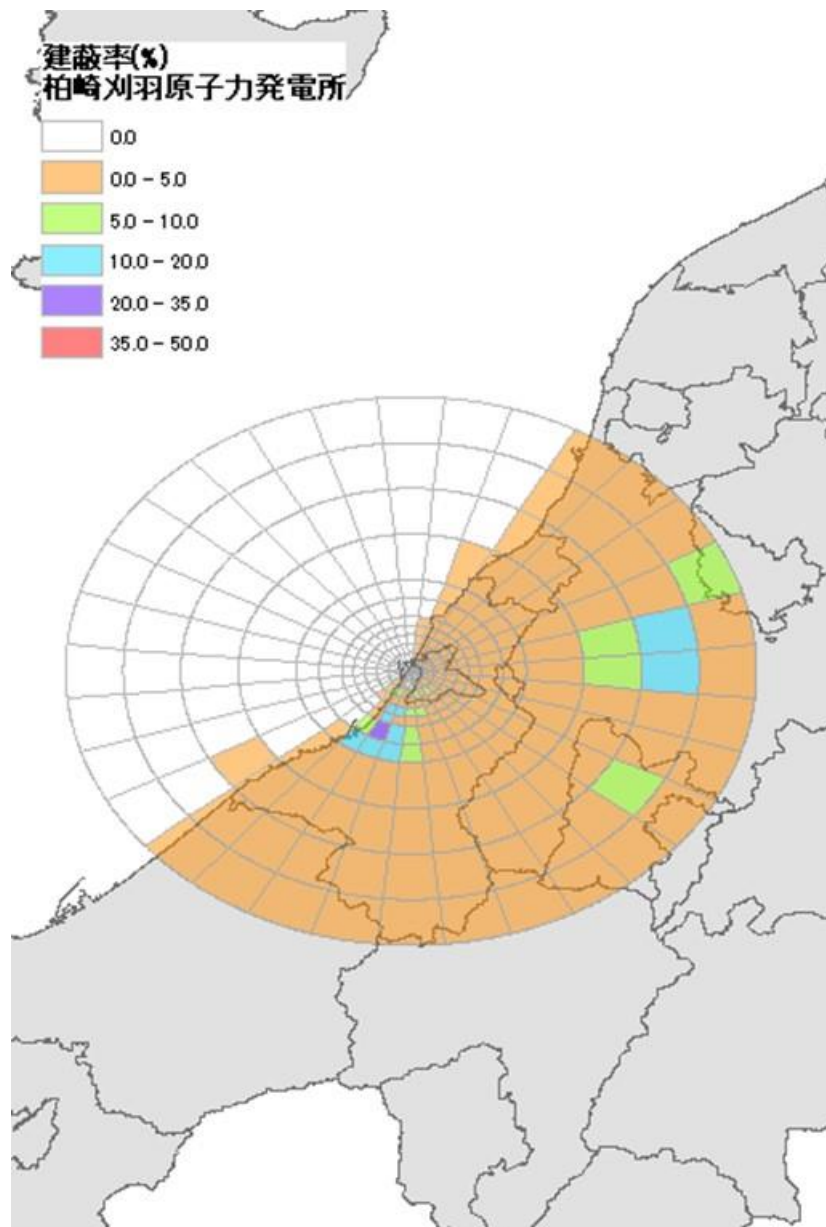


図 4.10 柏崎刈羽原子力発電所付近の建蔽率  
 (国土交通省国土数値情報ダウンロードサイトを加工して作成  
 (URL: [https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-N03-v3\\_0.html](https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-N03-v3_0.html))  
 (令和5年2月8日取得))



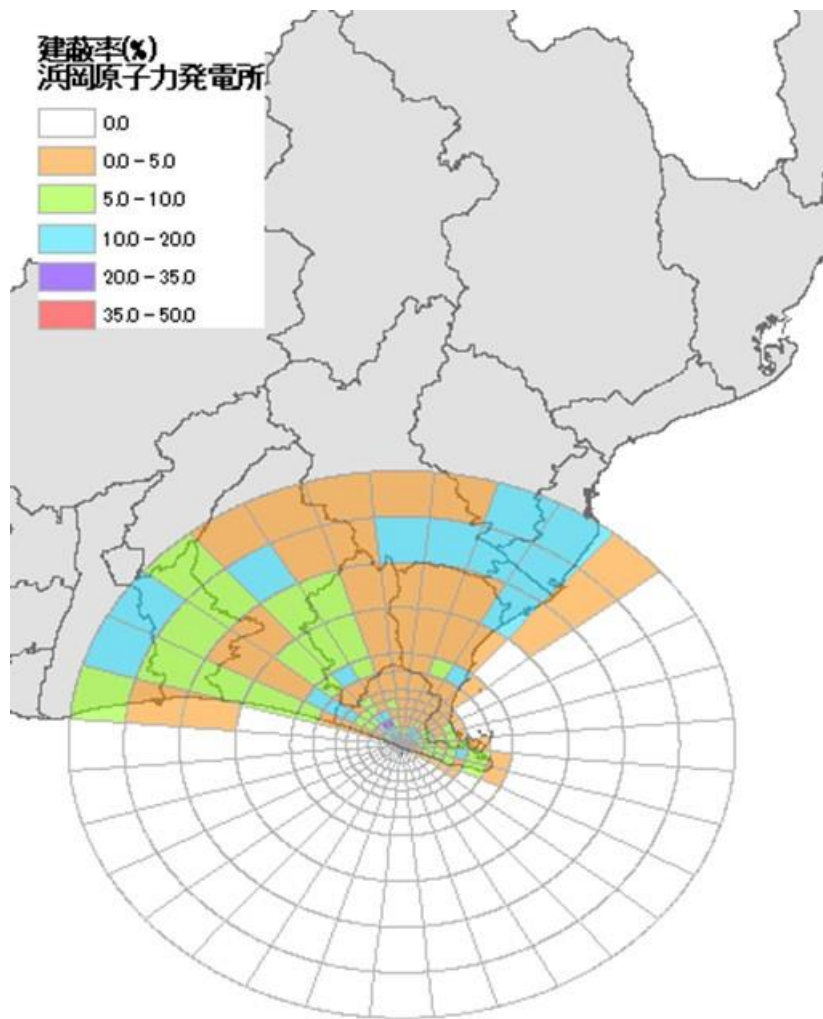


図 4.11 浜岡原子力発電所付近の建設率  
 (国土交通省国土数値情報ダウンロードサイトを加工して作成  
 (URL: [https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-N03-v3\\_0.html](https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-N03-v3_0.html))  
 (令和5年2月8日取得))

建蔽率(%)  
高浜原子力発電所

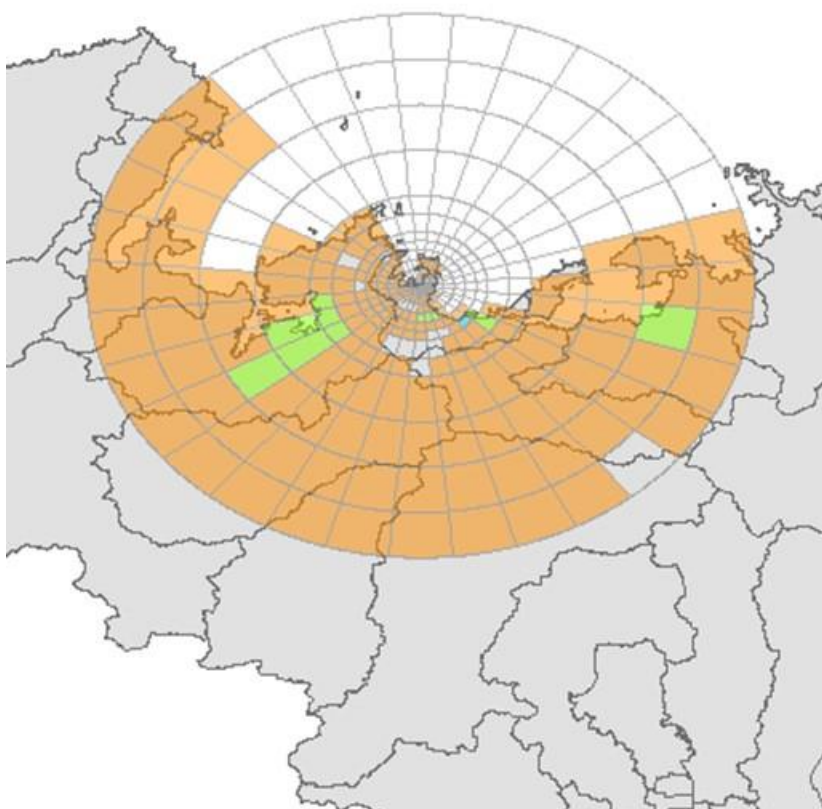
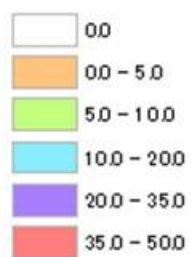


図 4.12 高浜原子力発電所付近の建蔽率  
(国土交通省国土数値情報ダウンロードサイトを加工して作成  
(URL: [https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-N03-v3\\_0.html](https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-N03-v3_0.html))  
(令和5年2月8日取得))

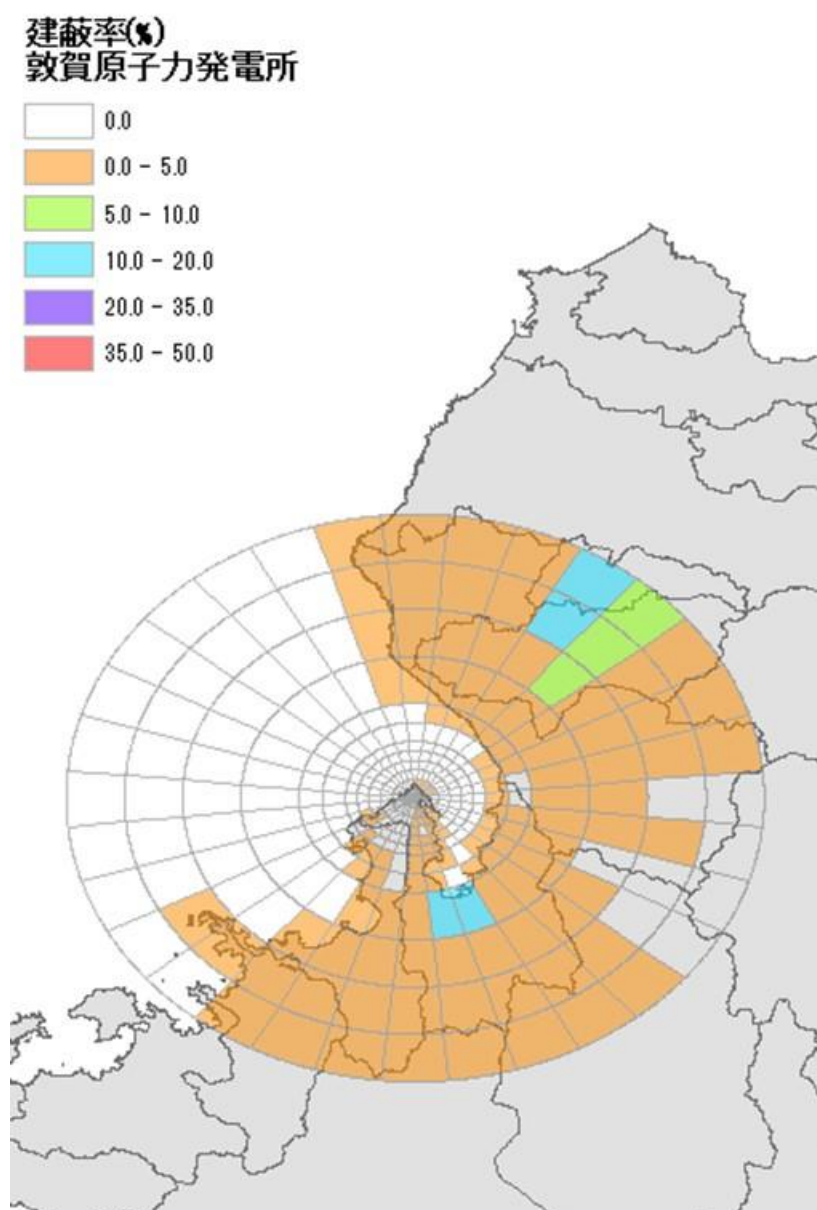


図 4.13 敦賀原子力発電所付近の建蔽率  
 (国土交通省国土数値情報ダウンロードサイトを加工して作成  
 (URL: [https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-N03-v3\\_0.html](https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-N03-v3_0.html))  
 (令和5年2月8日取得))

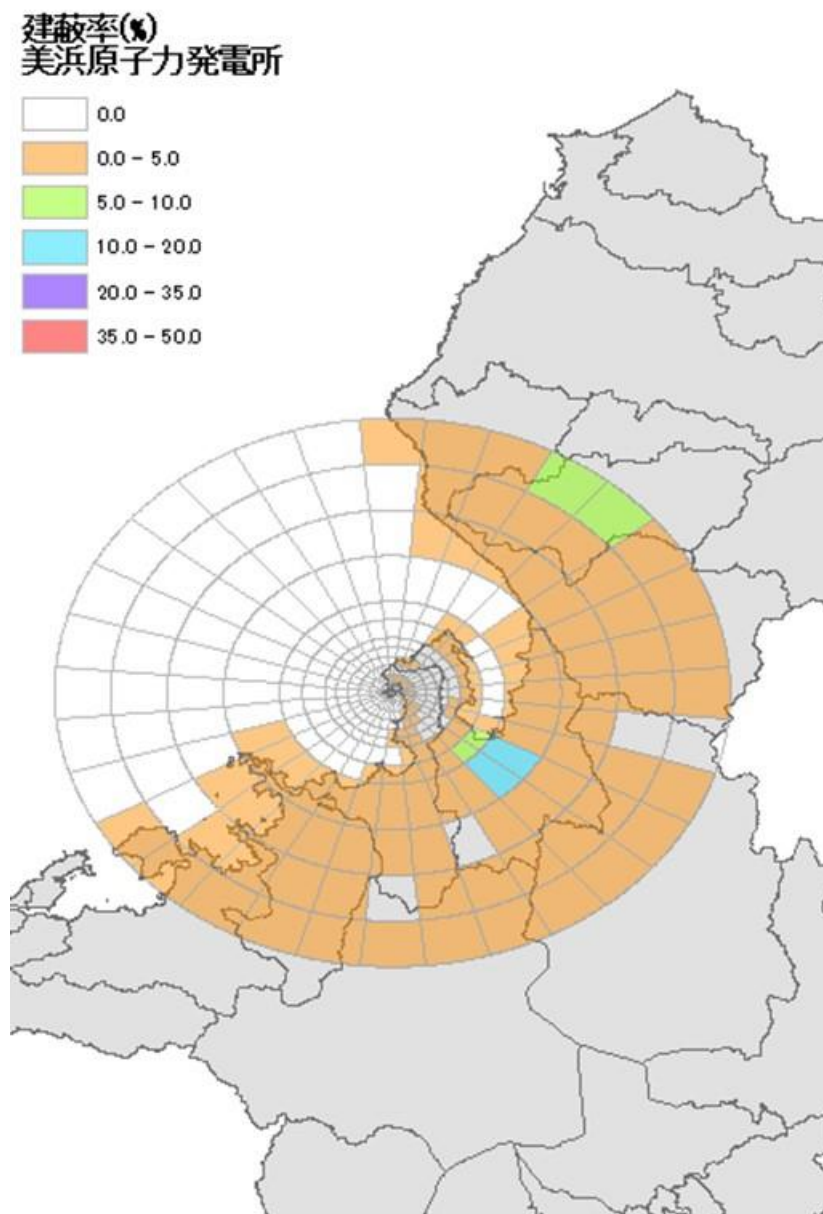


図 4.14 美浜原子力発電所付近の建蔽率  
 (国土交通省国土数値情報ダウンロードサイトを加工して作成  
 (URL: [https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-N03-v3\\_0.html](https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-N03-v3_0.html))  
 (令和5年2月8日取得))

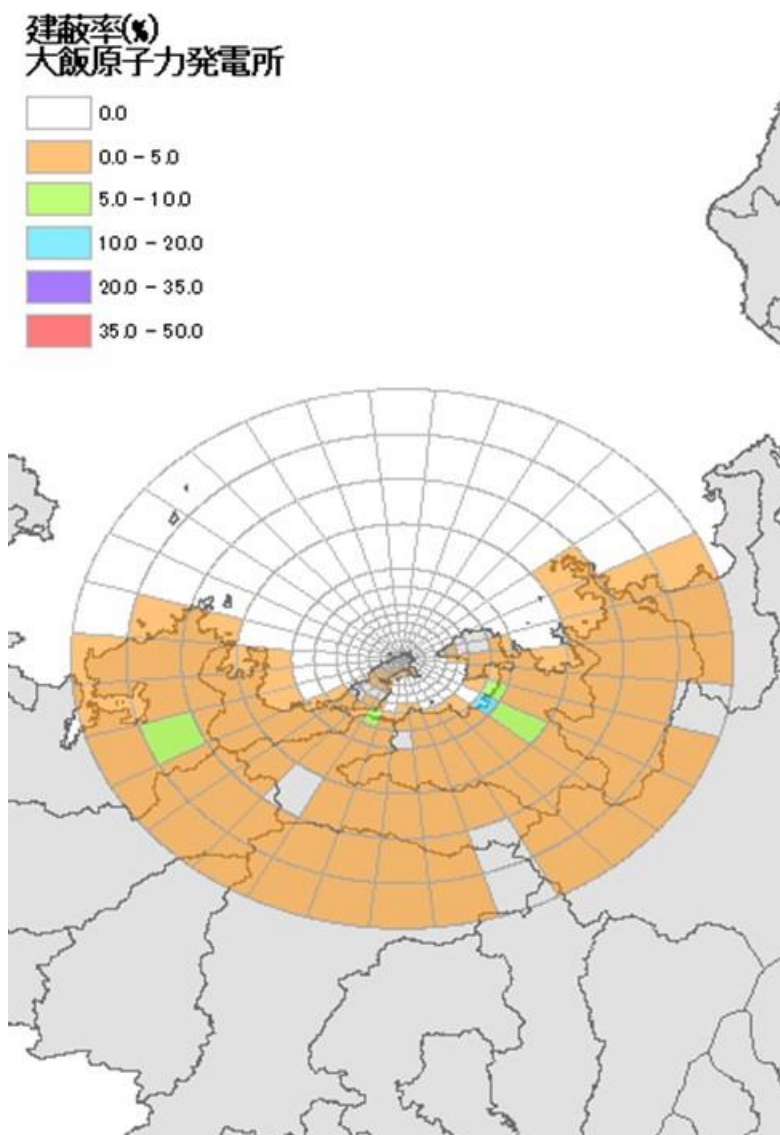


図 4.15 大飯原子力発電所付近の建蔽率  
 (国土交通省国土数値情報ダウンロードサイトを加工して作成  
 (URL: [https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-N03-v3\\_0.html](https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-N03-v3_0.html))  
 (令和5年2月8日取得))

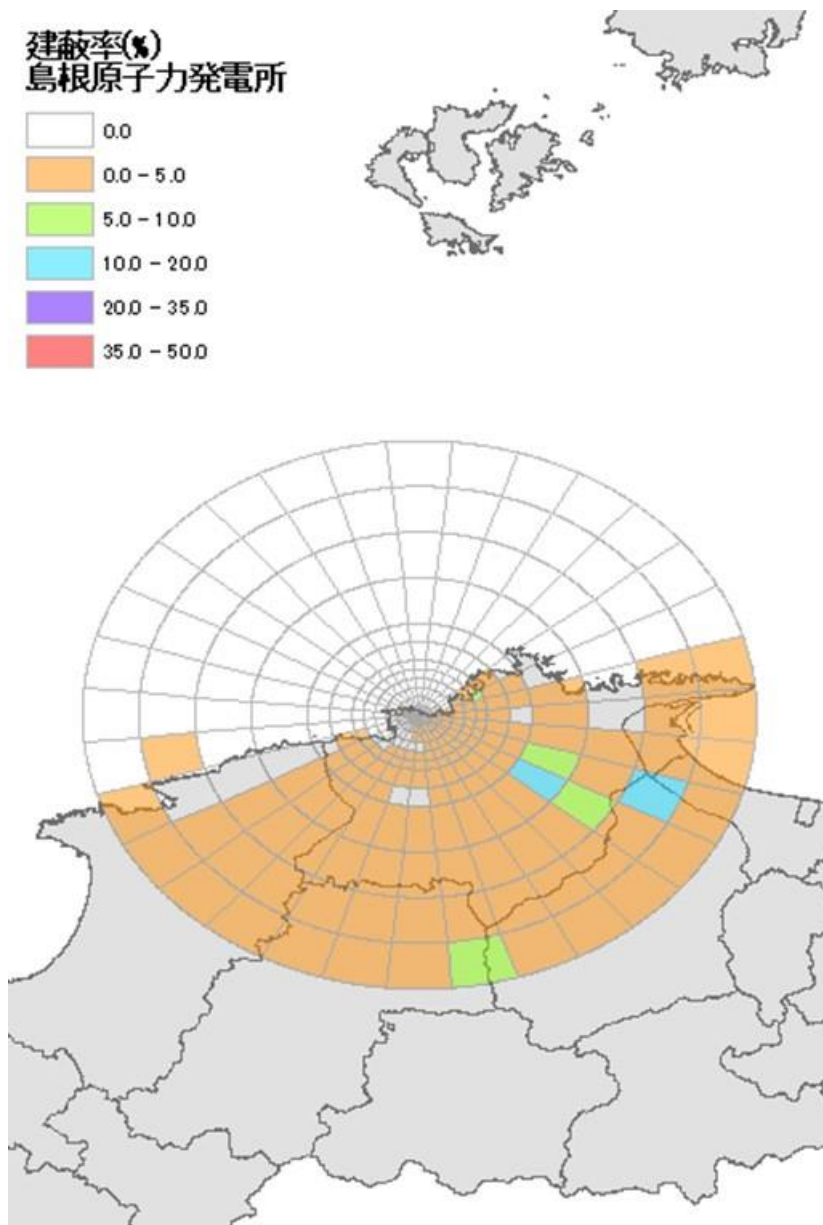


図 4.16 島根原子力発電所付近の建蔽率  
 (国土交通省国土数値情報ダウンロードサイトを加工して作成  
 (URL: [https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-N03-v3\\_0.html](https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-N03-v3_0.html))  
 (令和5年2月8日取得))

建蔽率(%)  
伊方原子力発電所

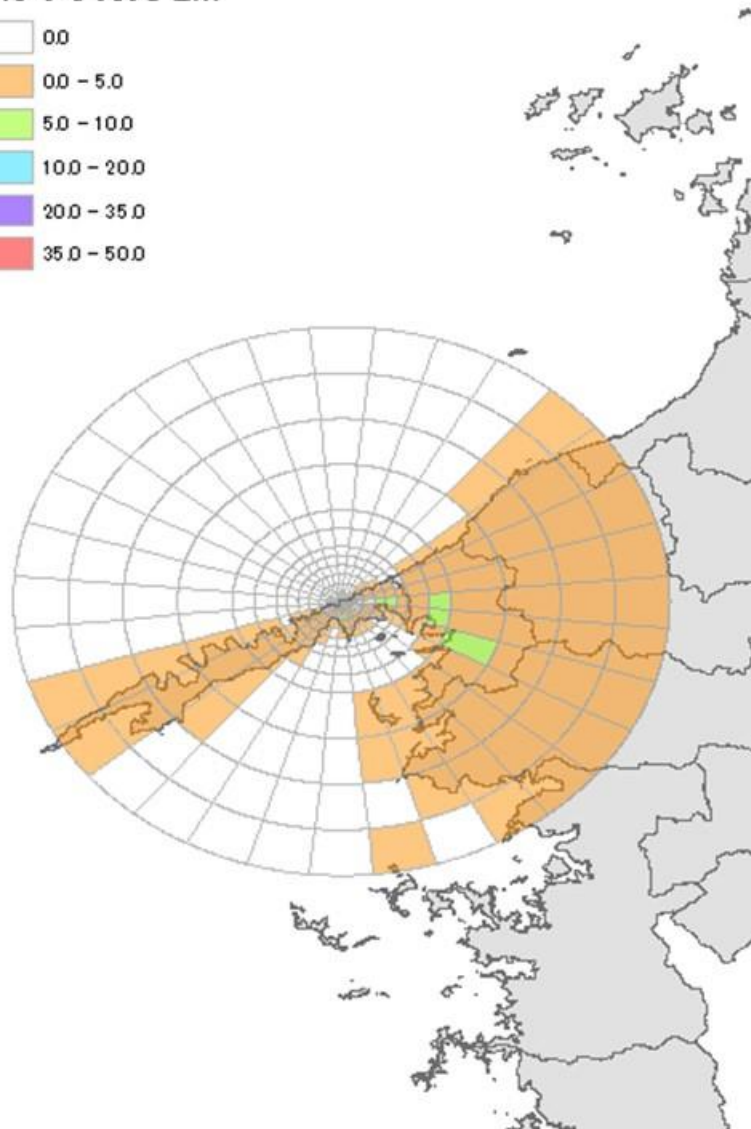
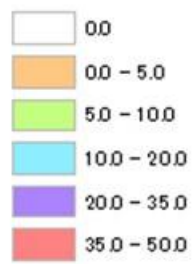


図 4.17 伊方原子力発電所付近の建蔽率  
(国土交通省国土数値情報ダウンロードサイトを加工して作成  
(URL: [https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-N03-v3\\_0.html](https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-N03-v3_0.html))  
(令和5年2月8日取得))

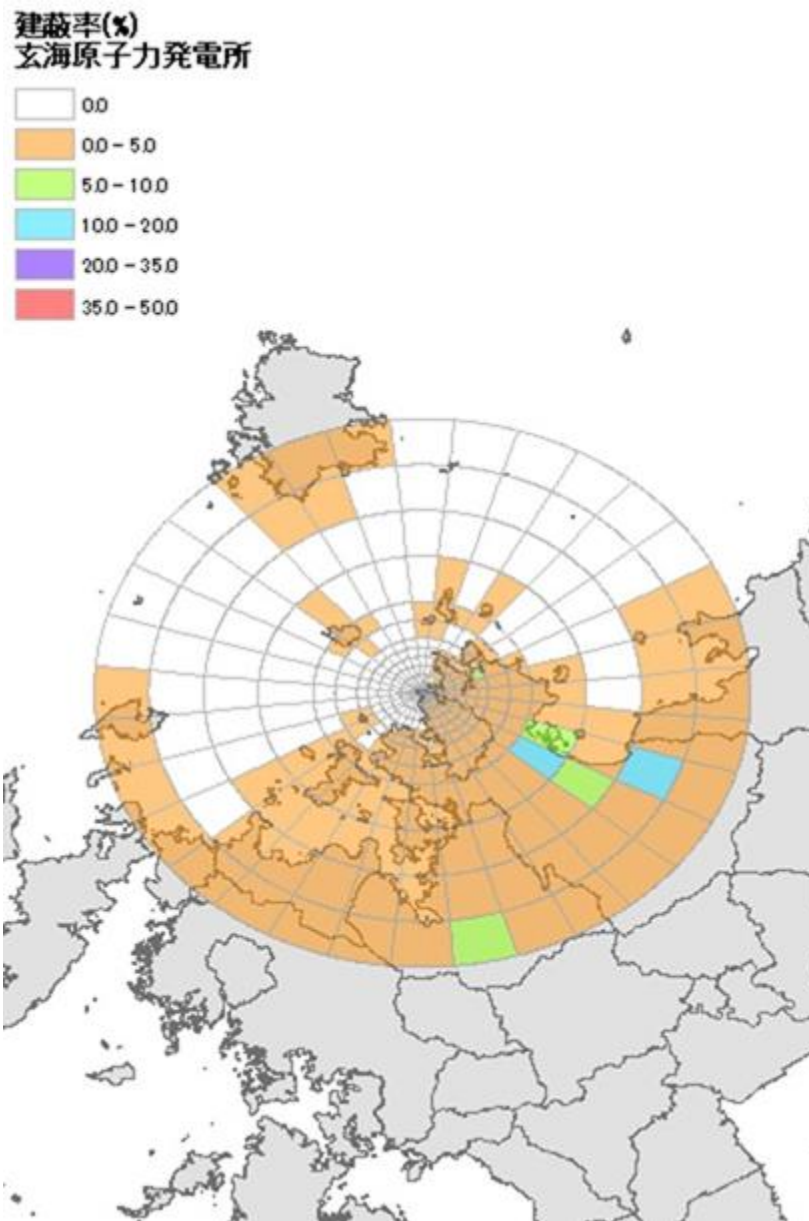


図 4.18 玄海原子力発電所付近の建蔽率  
 (国土交通省国土数値情報ダウンロードサイトを加工して作成  
 (URL: [https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-N03-v3\\_0.html](https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-N03-v3_0.html))  
 (令和5年2月8日取得))



#### 4.2. 屋内退避モデルのOSCAARへの組み込み

各メッシュの風速と屋外濃度の時間変化を OSCAAR から抜き出し、屋内退避評価モデルに組み込む方法、及びモデルで計算された低減効果を OSCAAR に入力する方法の自動化の流れを図 4.19 に示す。本報告書では、メッシュ間の風速と建蔽率の違いに影響される内部被ばく（吸入被ばく）を対象とし、外部被ばくに対する屋内退避の被ばく低減効果は扱わない。屋内退避モデルの OSCAAR への組み込みに関して、メッシュごとに屋内退避による被ばく低減効果を評価し、屋内退避時の被ばく線量の 50% 値や 95% 値の算出に利用することを検討した。

屋内退避による吸入被ばくの低減効果を表す尺度として線量比（以下、被ばく低減係数）を用いた。被ばく低減係数  $R(t)$  の定義は、核種  $i$  のプルーム通過開始時刻から時刻  $t$  までの積算吸入量 ( $S_i(t)$ ) に吸入摂取による甲状腺等価線量または実効線量への換算係数 ( $e_i$ ) をかけた値の屋内と屋外の比  $D_1(t)/D_0(t)$  である。なお、被ばく低減係数が大きいほど被ばく低減効果が小さく、被ばく低減係数が小さいほど被ばく低減効果が大きいことを示している。

$$R(t) = \frac{D_1(t)}{D_0(t)} = \frac{\sum_i S_{i,I}(t) \cdot e_i}{\sum_i S_{i,O}(t) \cdot e_i} \quad (4.5)$$

- $R(t)$  : プルーム通過開始時刻から時刻  $t$  における被ばく低減係数 (-)
- $D_1(t)$  : プルーム通過開始時刻から時刻  $t$  までに屋内で受けた吸入摂取による線量の積算値 (Sv)
- $D_0(t)$  : プルーム通過開始時刻から時刻  $t$  までに屋外で受けた吸入摂取による線量の積算値 (Sv)
- $S_{i,I}(t)$  : プルーム通過開始時刻から時刻  $t$  までの核種  $i$  の屋内での積算吸入量（積算空気中放射能濃度に呼吸量を掛けたもの） (Bq)
- $S_{i,O}(t)$  : プルーム通過開始時刻から時刻  $t$  までの核種  $i$  の屋外での積算吸入量（積算空気中放射能濃度に呼吸量を掛けたもの） (Bq)
- $e_i$  : 核種  $i$  の吸入摂取による甲状腺等価線量または実効線量への換算係数 (Sv Bq<sup>-1</sup>)
- $t$  : プルーム通過開始時刻からの経過時間 (h)。ここでは、プルーム通過開始時刻から屋内退避が継続されているとしており、「屋内退避継続時間」と同義である。

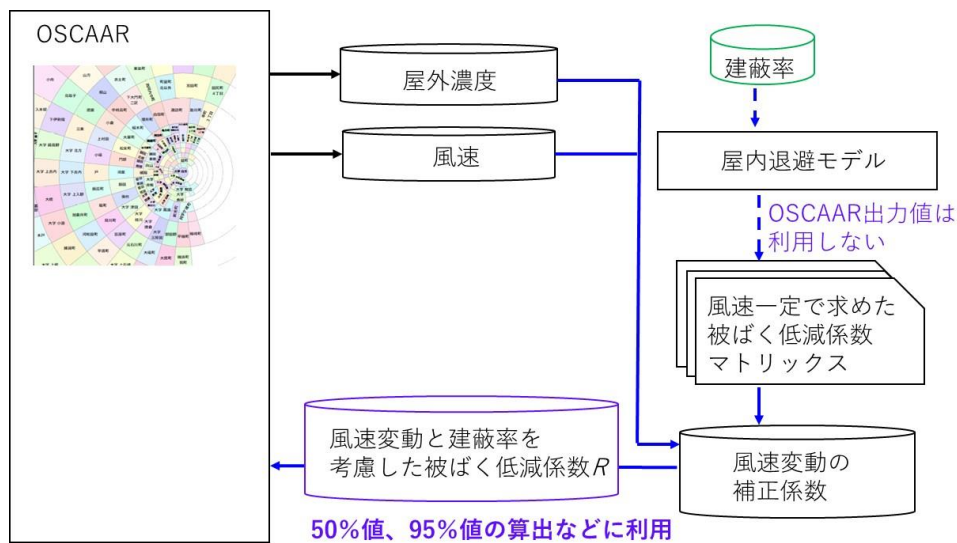


図 4.19 屋内退避モデルのOSCAARへの組み込みの流れ

#### 4.2.1. 屋内退避モデルの概要

屋内退避モデルは、平成27年～令和2年度にかけて行われた原子力施設等防災対策等委託費「防護措置の実効性向上に関する技術的知見の整備」事業（JAEA, 2016; 2017; 2018; 2019; 2020; 2021）において開発されたものを利用した。屋内退避モデルの計算の流れを図 4.20に示す。屋内退避モデルは、屋内での放射能濃度を算出するものと自然換気率を算出するものの二つで構成される。

屋内での放射能濃度を算出するプロセスでは、屋内外の空気交換を模擬したコンパートメントモデル（図 4.21）に基づいて作成された以下の式を用いて、屋内放射能濃度の時間変化が算出される。

$$\frac{dC_1(t)}{dt} = P(t)\lambda_e C_0(t) - (\lambda_e(t) + \lambda_d(t) + \lambda) \cdot C_1(t), \quad (4.6)$$

$C_1(t)$  : 時刻 $t$ における屋内の放射能濃度 (Bq m<sup>-3</sup>)

$C_0(t)$  : 時刻 $t$ における屋外の放射能濃度 (Bq m<sup>-3</sup>)

$\lambda_e(t)$  : 時刻 $t$ における自然換気率 (h<sup>-1</sup>)

$\lambda_d(t)$  : 時刻 $t$ における屋内での沈着率 (h<sup>-1</sup>)

$\lambda$  : 壊変定数 (h<sup>-1</sup>)

$P(t)$  : 時刻 $t$ における浸透率 (-)

この式を解くためには、自然換気率、屋内での沈着率、及び浸透率が必要となる。自然換気率の算出するプロセスでは、風速、屋内外の温度差、建蔽率及び隙間相当面積を入力として、先行研究（赤林他, 1994; 吉野他, 1987）に基づいて作成された以下の式を用いて自然換気率が算出される。

$$\lambda_e = \exp(1.083b - 3.2623) , \quad (4.7)$$

$$b = \ln Y + 0.94 \ln S ,$$

$Y$  : 定数

$S$  : 隙間相当面積 ( $\text{cm}^2 \text{m}^{-2}$ )

ここで、定数 $Y$ は以下の式で算出される。

$$Y = (0.00005K^2 - 0.0037K + 0.079)U^2 + (0.0003K^2 - 0.0218K + 0.6111)U + \frac{\Delta T(20 - U)}{300} , \quad (4.8)$$

$K$  : 建蔽率 (%)

$U$  : 風速 ( $\text{m s}^{-1}$ )

$\Delta T$  : 屋内外の温度差 ( $^{\circ}\text{C}$ )

隙間相当面積は建屋が建築された年に依存しており、1980年以前の建屋では $15 \text{ cm}^2 \text{m}^{-2}$ 、1981年から1992年の建屋では $5 \text{ cm}^2 \text{m}^{-2}$ 、1993年以降の建屋では $2 \text{ cm}^2 \text{m}^{-2}$ 程度であることが報告されており (JAEA, 2016; 2017; 2018; 2019; 2020; 2021)、本事業でもそれらの値を利用する。

浸透率と沈着率は自然換気率に依存しており、粒子状物質と元素状ヨウ素のそれぞれで関係式が異なることが報告されている (Hirouchi et al., 2021; JAEA, 2016; 2017; 2018; 2019; 2020; 2021)。本事業でも、以下に示す関係式を利用して、自然換気率から浸透率及び沈着率を求めることにした。なお、粒子状物質では自然換気率と沈着率の間には関係はないと報告されている。一方、建屋内の材質による違いと家具の有無による違いは観察されており、範囲としては $0.01\sim 0.2 \text{ h}^{-1}$ が報告され、建屋内材質として、カーペット、畳、及びフローリングを採用した場合に幾何平均値として $0.1 \text{ h}^{-1}$ が報告されている (Hirouchi et al., 2021; JAEA, 2016; 2017; 2018; 2019; 2020; 2021)。本事業でも粒子状物質の沈着率は $0.1 \text{ h}^{-1}$ の固定値とした。

粒子状物質の浸透率 $P_p$

$$P_p = -0.2277\lambda_e^2 + 0.719\lambda_e + 0.442 \quad (\lambda_e < 1.4 \text{ の場合}), \quad (4.9)$$

$$P_p = 1 \quad (\lambda_e \geq 1.4 \text{ の場合}).$$

元素状ヨウ素の浸透率 $P_{I2}$

$$P_{I2} = 0.0983\lambda_e^2 + 0.1566\lambda_e . \quad (4.10)$$

元素状ヨウ素の浸透率 $\lambda_{d,12}$

$$\lambda_{d,12} = 0.089\lambda_e^2 + 0.2828\lambda_e + 0.01 \quad (4.11)$$

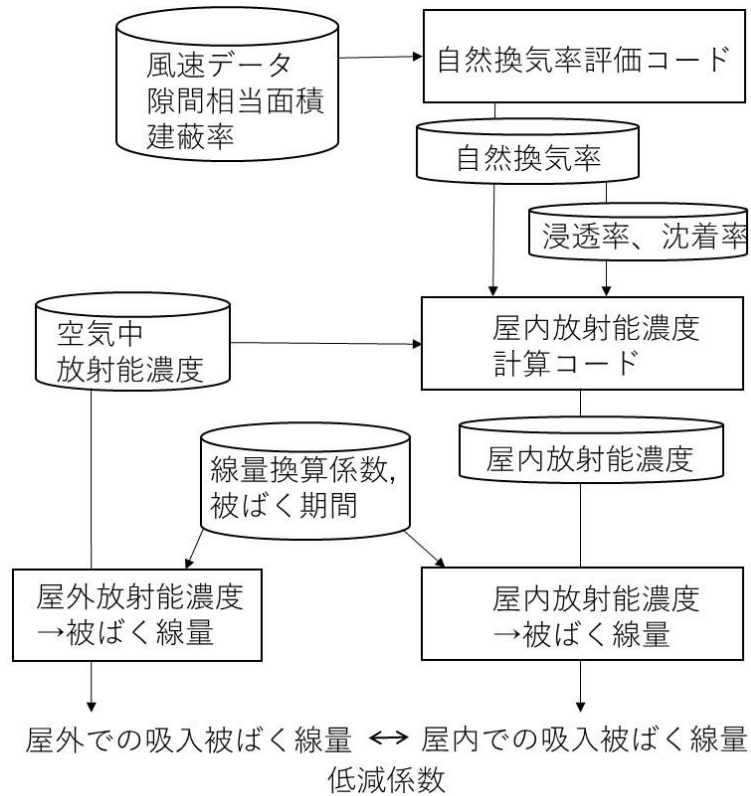


図 4.20 屋内退避モデルの概要

(引用 : JAEA, 2016; 2017; 2018; 2019; 2020; 2021)

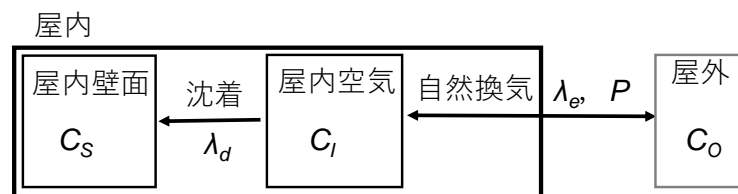


図 4.21 屋内外の空気交換を模擬したコンパートメントモデル

(引用 : JAEA, 2016; 2017; 2018; 2019; 2020; 2021)

#### 4.2.2. メッシュごとの評価の流れ

現状のOSCAARでは、被ばく低減係数は全てのメッシュで一定値が与えられている。しかし、被ばく低減係数は上述のように風速や建蔽率に依存しており、それらは場所によって異なる。そこで、風速や建蔽率の周囲の環境条件に応じた被ばく低減係数を与えられるようにする必要がある。この時、全てのメッシュに対して、OSCAARから出力した風速と屋外濃度の1時間値を屋内退避モデルに入力し、屋内濃度と線量を計算して出力した場合、多大な時間を要する。そこで本事業では、任意の風速と建蔽率に対応する被ばく低減係数を予め整備しておき、その被ばく低減係数をOSCAARに入力することで、周囲の環境条件に応じた屋内退避時の被ばく線量を出力することを目指した。

しかしながら、ここで整備できる被ばく低減係数は、風速が不変であるときの値である。実際の風速は時間とともに変動しており、風速の変動により自然換気率も時間変動し、被ばく低減係数に影響する。風速変動による被ばく低減係数の影響を調査するために、風速を一定として求めた場合の被ばく低減係数（風速一定条件の被ばく低減係数）と、実際の風速変動を考慮した場合の被ばく低減係数（風速変動条件の被ばく低減係数）を比較した（図 4.22）。風速と屋外濃度は、OSCAAR計算でプルーム通過のある地点の気象イベントを抜き出したものである。なお、風速一定時の被ばく低減係数を求める際に利用した風速は、屋外濃度で重みづけ平均したものである。

図 4.22に示されるように、風速一定条件と風速変動条件の被ばく低減係数の比（風速一定条件/風速変動条件）は、古い建屋ほどばらつきが大きく、被ばく低減係数が2倍程度異なるケースも見られた。被ばく低減係数の比が1より大きい場合（風速一定条件では、実際よりも被ばく低減係数を過大評価する場合）、プルーム通過後の風速がプルーム通過時よりも強くなった際に生じる。これは、プルーム通過後に自然換気率が大きくなり、自然換気率を時間によらず一定にした場合よりも早く屋内濃度が小さくなることに起因する。一方で被ばく低減係数の比が1より小さい場合（風速一定条件では、実際よりも被ばく低減係数を過小評価する場合）、プルーム通過後の風速がプルーム通過時よりも弱くなった際に生じる。これは、プルーム通過後に自然換気率が小さくなり、自然換気率を時間によらず一定にした場合よりも屋内濃度が小さくならないことに起因する。

被ばく低減係数の比の大きさはプルーム通過前後の風速の差に依存していたため、プルーム通過前後の風速の比（プルーム通過中/通過後）と、被ばく低減係数の比（風速変動条件/風速一定条件）<sup>1</sup>を比較した（図 4.23）。この時、プルーム通過中の風速は、屋外濃度で重みづけ平均した風速であり、プルーム通過後の風速は最大屋外濃度通過後5時間<sup>2</sup>の平均風速である。図 4.23に示されるように、被ばく低減係数の比とプルーム通過前後の風速の比は概ね比例関係であった。被ばく低減係数の比とプルーム通過前後の風速比を一次直線で

<sup>1</sup> 以降、この比を補正係数として利用するため、便宜上、図 4.22 の被ばく低減係数の比の逆数としている

<sup>2</sup> プルーム通過後の平均期間に関して、1時間～12時間で調査したところ、5時間の時にR<sup>2</sup>が最も大きかったため、5時間を採用した。

表した場合の比例定数とy切片の建蔽率依存性を図 4.24~図 4.26に示す。新しい建屋及び建蔽率が大きい場所では、比例定数は0に、y切片は1に近づく傾向が見られ、さらに比例定数とy切片の和はどの条件でも約1であった。このことより、建築年区分及び建蔽率ごとに、プルーム通過前後の風速の比と被ばく低減係数の比の関係式を整備する必要がある。整備した関係式とOSCAARで出力された風速を基に求めたプルーム通過前後の風速比を用いることで、以下の手順によってプルーム通過前後の風速の変動を考慮した被ばく低減係数を求めることが可能である。

風速一定条件で求めた被ばく低減係数 $R$ から風速変動を考慮した被ばく低減係数 $R'$ への換算は、図 4.23に示した被ばく低減係数の比（補正係数）を利用することで求められる。

$$R' = \text{補正係数} \times R . \quad (4.12)$$

なお、図 4.23~図 4.26に示されるように、補正係数はプルーム通過前後の風速比 $W$ 、建蔽率 $K$ に依存し、下記の式で表される。

$$\begin{aligned} \text{補正係数} &= \text{比例定数} \times W + y\text{切片} , \\ \text{比例定数} &= \alpha K^3 + \beta K^2 + \gamma K + \delta , \\ y\text{切片} &= 1 - \text{比例定数} . \end{aligned} \quad (4.13)$$

$\alpha, \beta, \gamma, \delta$  : 定数（図 4.24~図 4.26参照）

図 4.24~図 4.26に示されるように、定数 $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ は建築年区分と物質形態によって異なるため、各条件での値を整備した（表 4.1）。

以上より、OSCAARから出力された風速と屋外濃度を基に風速比 $W$ を求め、整備された定数 $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ を基に補正係数を求め、風速変動を考慮した被ばく低減係数 $R'$ を求めるまでのプログラムを作成した。

本プログラムの妥当性を確認するために、定数 $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ を求めるために使用した気象イベントとは別の気象イベントに対して、風速変動を考慮した被ばく低減係数を求めた（図 4.27）。風速一定条件と風速変動条件で求めた被ばく低減係数の比（風速一定条件/風速変動条件）は、0.5~3の値であった。一方、本プログラムを利用して補正した被ばく低減係数（補正条件）と風速変動条件で求めた被ばく低減係数の比（補正条件/風速変動条件）は0.75~1.4であり、実際の被ばく低減係数に近づくことが示された。表 4.2に建築年区分と建蔽率ごとに求めた被ばく低減係数の比の統計値を示す。表 4.2に示されるように、全ての建築年区分及び建蔽率に対して、被ばく低減係数の比の平均値は1に近づき、標準偏差は小さくなり、風速変動を考慮した被ばく低減係数を約10%以内で再現できることを示した。

計算コストに関して、気象シーケンス数248、核種数73（形状別も含む）、計算する期間を1気象シーケンスあたり最大10日間とした場合、従来の風速変動も全て考慮して計算する場合では約1日かかるのに対し、ここで示した補正係数を利用する場合では約30分であり、計算コストは大幅に短縮された。なお、この30分のほとんどはOSCAARから出力された風速と屋外濃度の読み込みであるため、OSCAAR内部に本手法を組み込むことができれば、数分で

風速変動を考慮した屋内退避被ばく低減効果の計算が可能になると予想される。

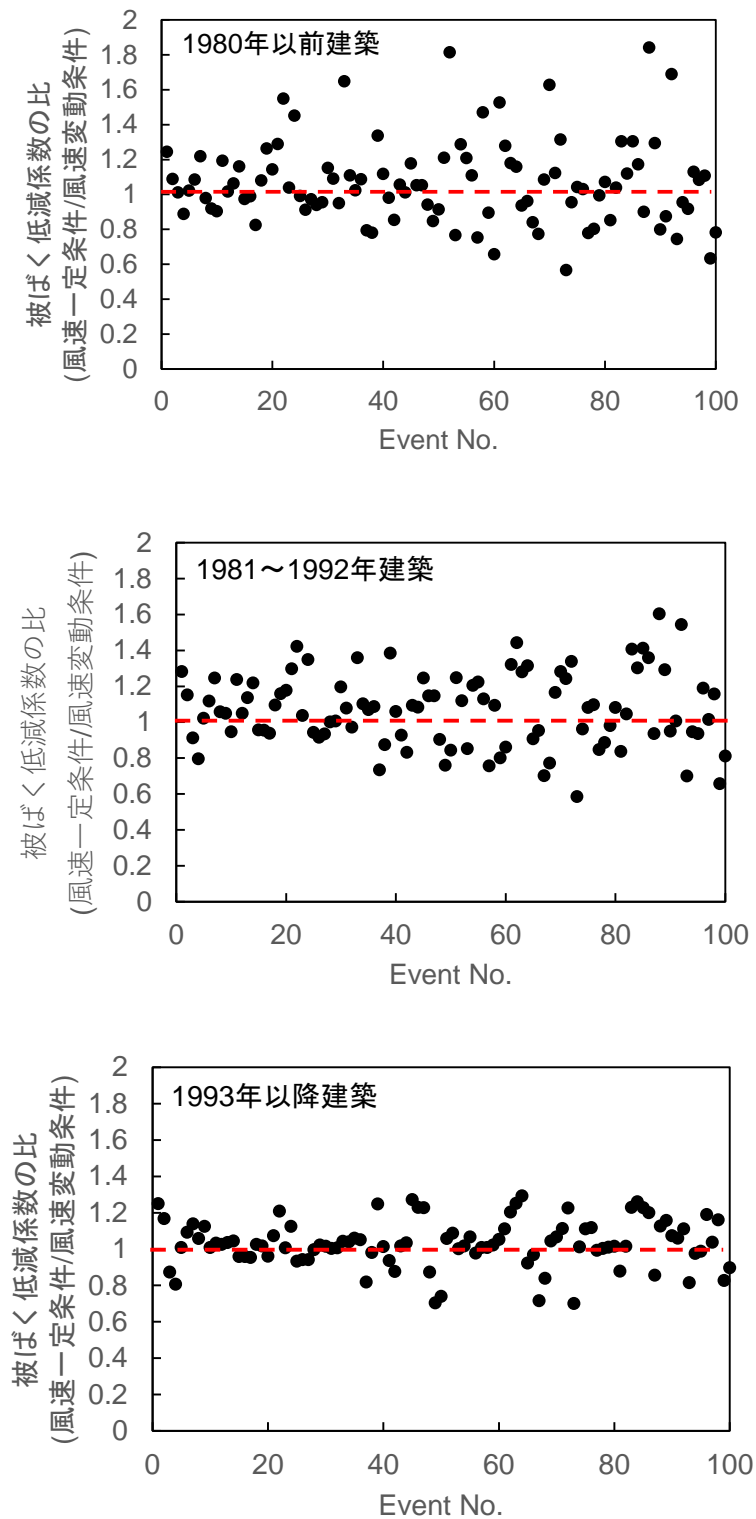


図 4.22 風速一定条件と風速変動条件で求めた被ばく低減係数の比

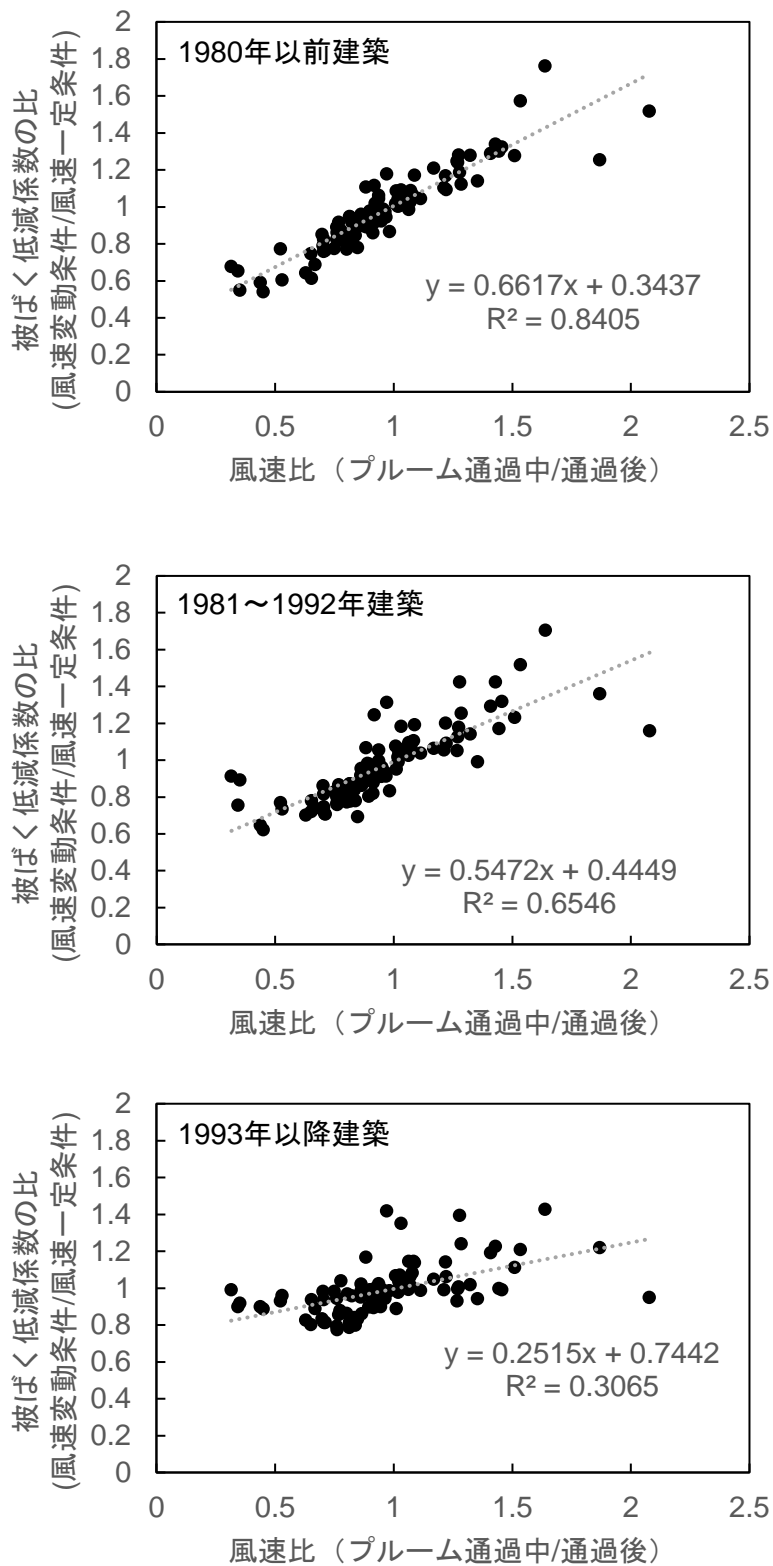


図 4.23 風速一定条件と風速変動条件で求めた被ばく低減係数の比とプルーム通過前後の風速比との関係



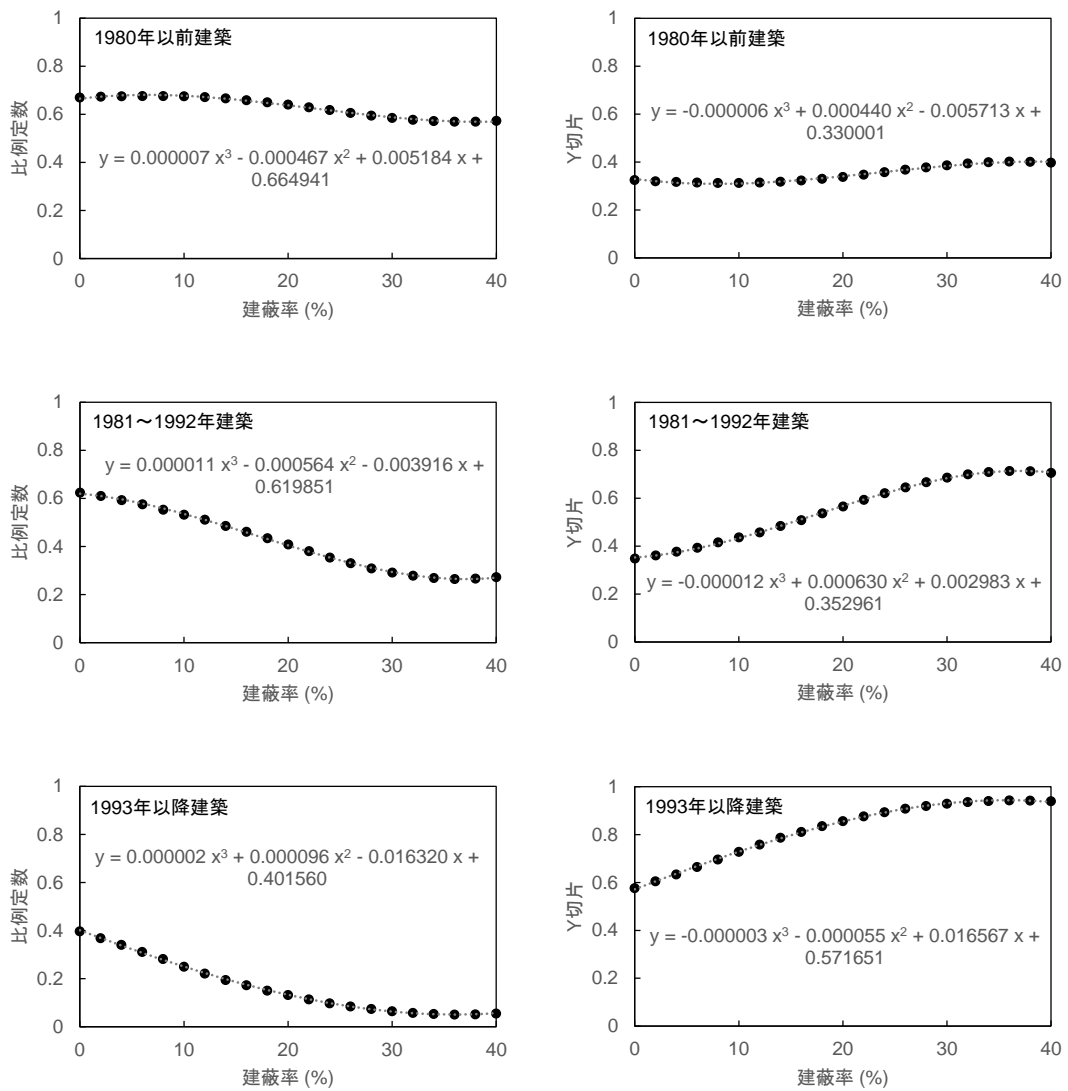


図 4.24 風速一定条件と風速変動条件で求めた被ばく低減係数の比とブルーム通過前後の風速比を一次直線で表した場合の比例定数とy切片の建蔽率依存性 (粒子状物質)

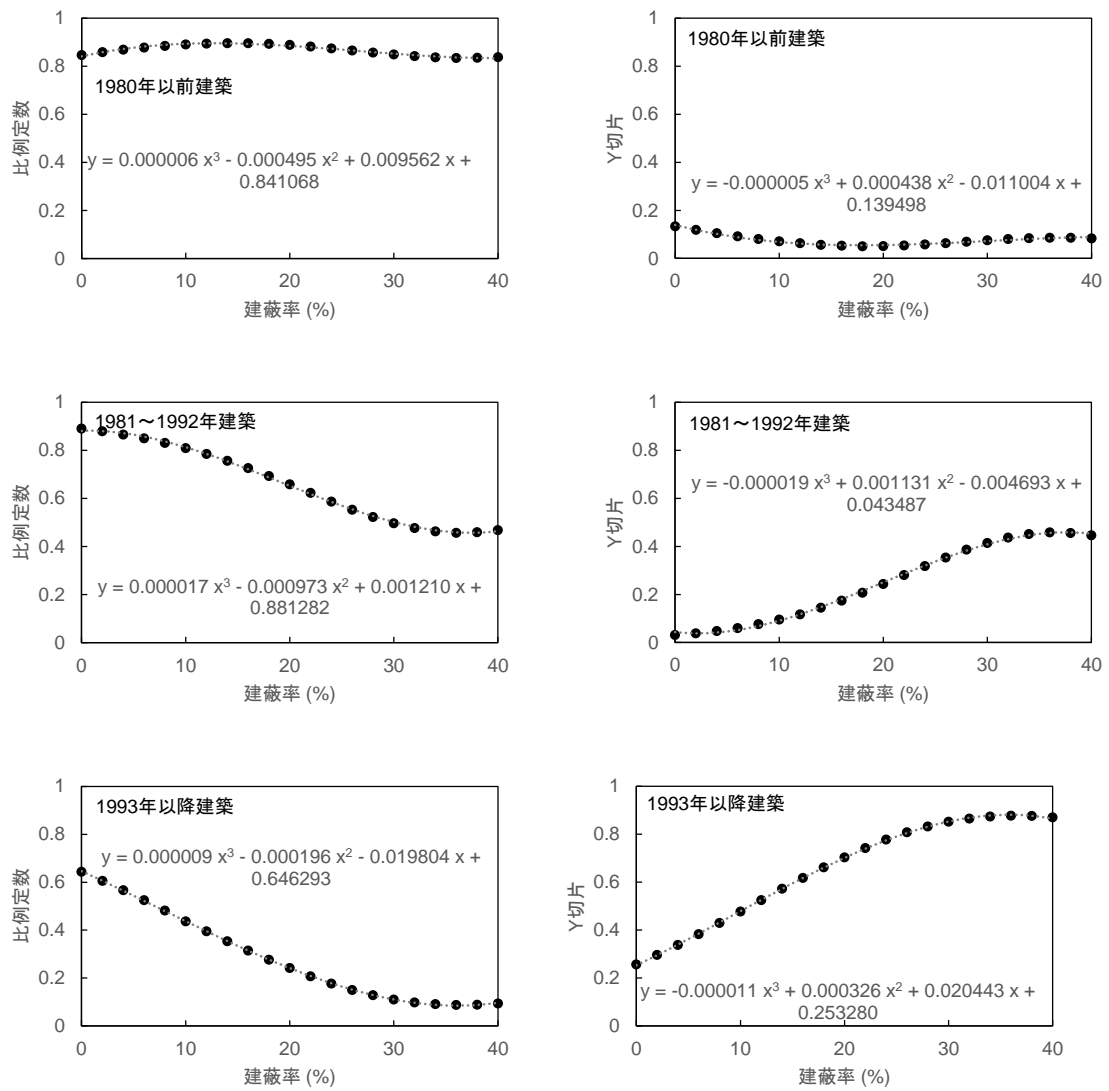


図 4.25 風速一定条件と風速変動条件で求めた被ばく低減係数の比とブルーム通過前後の風速比を一次直線で表した場合の比例定数とy切片の建蔽率依存性 (CH3I)

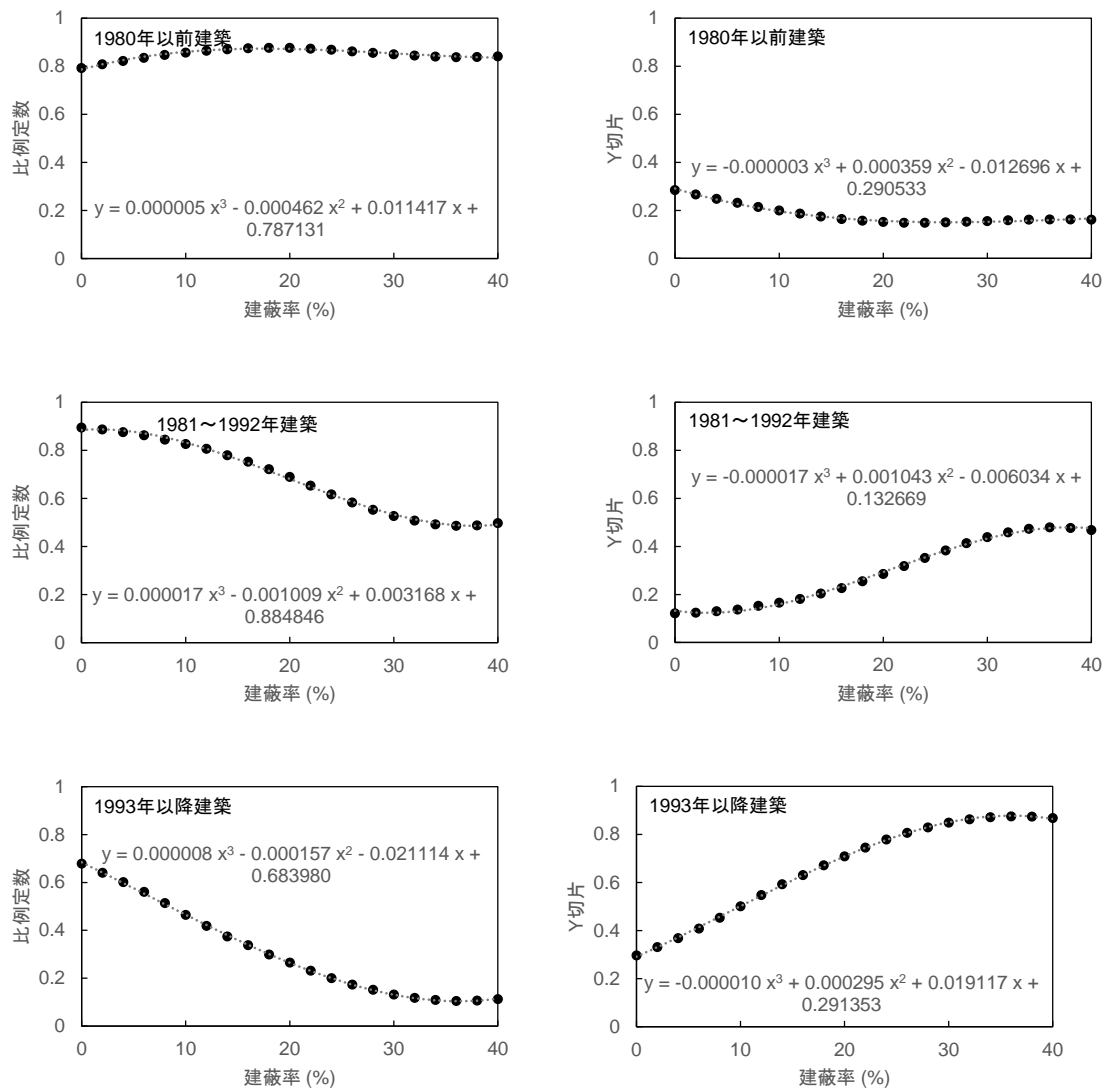


図 4.26 風速一定条件と風速変動条件で求めた被ばく低減係数の比とブルーム通過前後の風速比を一次直線で表した場合の比例定数とy切片の建蔽率依存性 (I<sub>2</sub>)

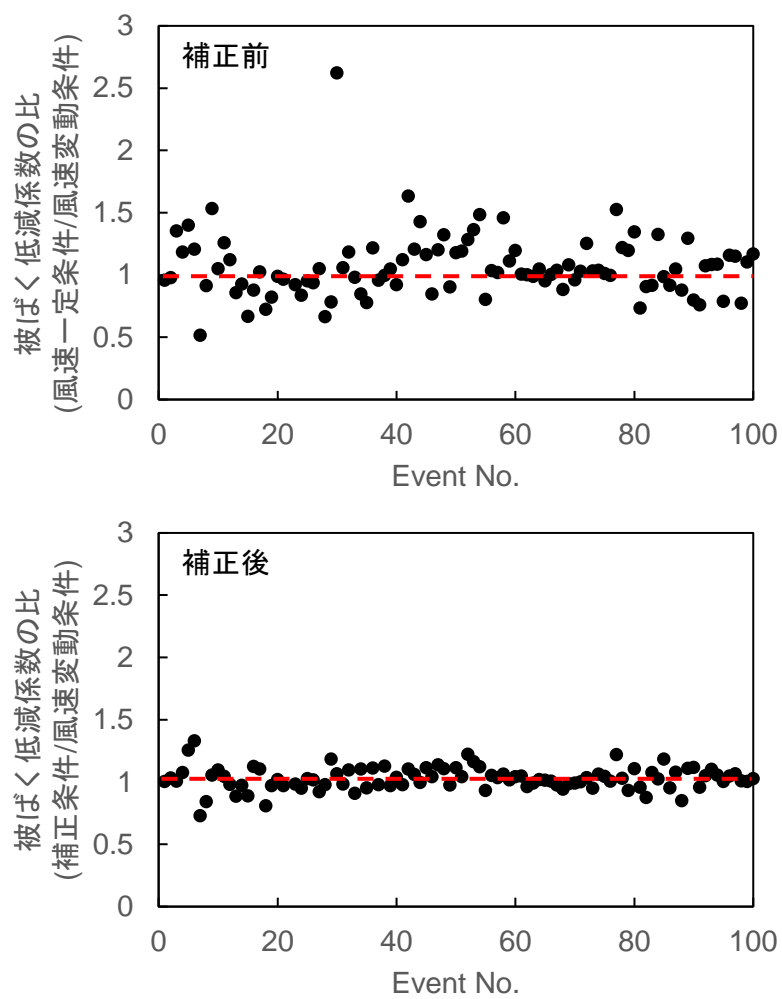


図 4.27 風速一定条件、風速変動条件、補正条件で求めた被ばく低減係数の比

表 4.1 物質形態、建築年区分ごとの定数のまとめ

	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$
粒子				
1980年以前建屋	0.000007	-0.000467	0.005184	0.664941
1981年～1992年建屋	0.000011	-0.000564	-0.003916	0.619851
1993年以降建屋	0.000002	0.000096	-0.01632	0.40156
CH <sub>3</sub> I				
1980年以前建屋	0.000006	-0.00495	0.009562	0.841068
1981年～1992年建屋	0.000017	-0.000973	0.00121	0.881282
1993年以降建屋	0.000009	-0.000196	-0.019804	0.646293
I <sub>2</sub>				
1980年以前建屋	0.000005	-0.000462	0.011417	0.787131
1981年～1992年建屋	0.000017	-0.001009	0.003168	0.884846
1993年以降建屋	0.000008	-0.000157	-0.021114	0.68398

表 4.2 各建築年区分、建蔽率での補正前後の被ばく低減係数の比（補正前：風速一定条件/風速変動条件、補正後：補正条件/風速変動条件）

	1980年以前建屋			1981年～1992年建屋			1993年以降建屋		
	0%	15%	30%	0%	15%	30%	0%	15%	30%
補正前									
平均	1.07	1.07	1.07	1.07	1.05	1.03	1.04	1.02	1.01
標準偏差	0.30	0.26	0.22	0.24	0.18	0.13	0.16	0.11	0.07
補正後									
平均	1.02	1.03	1.03	1.04	1.02	1.01	1.02	1.00	1.01
標準偏差	0.09	0.09	0.10	0.11	0.12	0.11	0.13	0.10	0.07

#### 第4章の参考文献

- Hirouchi, J., Takahara, S., Komagamine, H., Kato, N., Matsui, Y., Yoneda, M., 2021. Penetration factor and indoor deposition rate of elementary and particulate iodine in a Japanese house for assessing the effectiveness of sheltering for radiation exposures. *Journal of Radiological Protection* 41, S139–S149.
- JAEA, 2016,平成27年度原子力規制庁委託業務結果報告書「原子力施設等防災対策等委託費(防護措置の実効性向上に関する調査研究)事業」
- JAEA, 2017,平成28年度原子力規制庁委託業務結果報告書「原子力施設等防災対策等委託費(防護措置の実効性向上に関する調査研究)事業」
- JAEA, 2018,平成29年度原子力規制庁委託業務結果報告書「原子力施設等防災対策等委託費(防護措置の実効性向上に関する調査研究)事業」
- JAEA, 2019,平成30年度原子力規制庁委託業務結果報告書「原子力施設等防災対策等委託費(防護措置の実効性向上に関する調査研究)事業」
- JAEA, 2020,平成31年度原子力規制庁委託業務結果報告書「原子力施設等防災対策等委託費(防護措置の実効性向上に関する調査研究)事業」
- JAEA, 2021,令和2年度原子力規制庁委託業務結果報告書「原子力施設等防災対策等委託費(防護措置の実効性向上に関する調査研究)事業」
- 赤林伸一, 村上周三, 水谷国男, 高倉秀一, 1994, 周辺に建物群のある独立住宅の風圧分布に関する風洞実験及び換気量予測その1, 日本建築学会計画系論文集, 456, pp17-27.
- 国土交通省国土地理院 (2023) 、ベクトルタイルとその提供実験について  
<http://maps.gsi.go.jp/development/vt.html>、(最終閲覧日 2023年2月28日)
- 総務省統計局 (2023a) 、市区町村メッシュ・コード一覧  
[https://www.stat.go.jp/data/mesh/m\\_itiran.html](https://www.stat.go.jp/data/mesh/m_itiran.html)、(最終閲覧日 2023年2月28日)
- 総務省統計局 (2023b) 、地域メッシュ統計の特質・沿革  
<https://www.stat.go.jp/data/mesh/pdf/gaiyo1.pdf>、(最終閲覧日 2023年2月28日)
- 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, JAERI-Research 2000-060.
- 吉野博, 長谷川房雄, 松本博, 内海康雄, 赤林伸一, 牧田一志, 1987, 仙台市の枠組み壁工法による戸建住宅における温度・空気環境およびエネルギー消費量の実態調査, 日本建築学会計画論文報告集, 375, pp.17-27.

## 5. 防護措置効果検討に用いる解析用データの整備

第5章では、防護措置効果検討に用いる解析用データの整備として、避難経路データ整備の結果について記載する。なお、他の解析用データとして、国内サイト周辺の建蔽率データ整備の結果は4.1節に記載している。

### 5.1. 避難経路データ

5.1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、東海サイトについて避難データを整備したのと同様の手法で、他サイトについてもOSCAARで用いる避難経路のデータを作成した。本年度は地域原子力防災協議会が緊急時対応を示している9サイトを対象とした。

#### 5.1.1. 避難経路解析プログラムの改良

昨年度作成した避難経路解析プログラムの入力方法を改良した。これによって、GPXファイル形式だけでなく、既存のTXT形式の避難経路のポイントデータファイルも活用できるようになった。

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ポイントデータファイルを指定し、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 5.1、入力パラメータの一覧を表 5.2、本プログラムの処理の流れを図 5.1にそれぞれ示す。

避難元メッシュごとに使用する避難経路のポイントデータファイル（GPX形式のポイントまたはTXT形式）を指定する。ポイントデータファイルには経路上のポイントの緯度・経度の情報が含まれている。各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。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）の方法により地球楕円体をGRS80楕円体として計算する。

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 5.2）。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)。

$$R_{i+1} - R_i \quad (5.1)$$

- 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)。

$$\frac{2\pi R_i}{n_{dir}} \quad (5.2)$$

- ③ 到達したメッシュに含まれる最初の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 5.1 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 5.2)	入力
route###.gpx または route###.txt	避難経路のポイントデータ 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用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 5.2 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)
6	文字列	rt_fmt	ポイントデータファイルの形式 (txtまたはgpx)

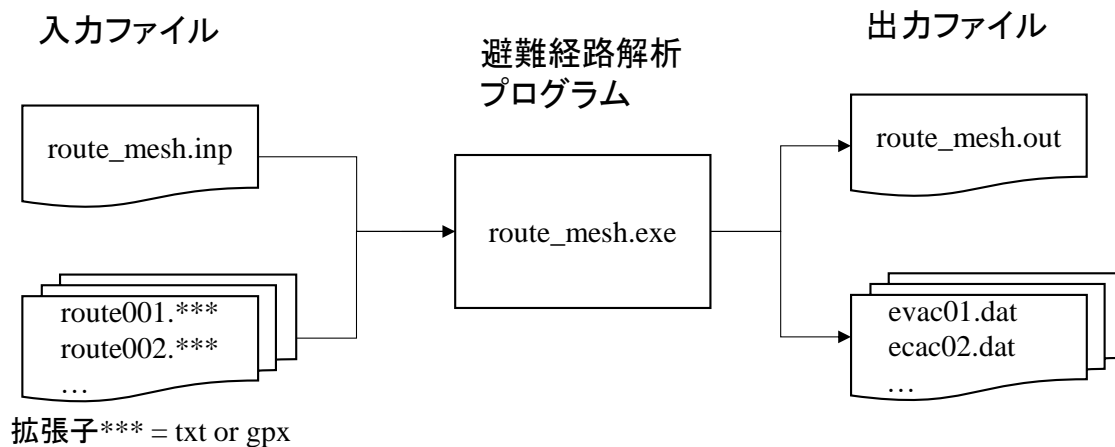


図 5.1 避難経路解析プログラムによる処理の流れ

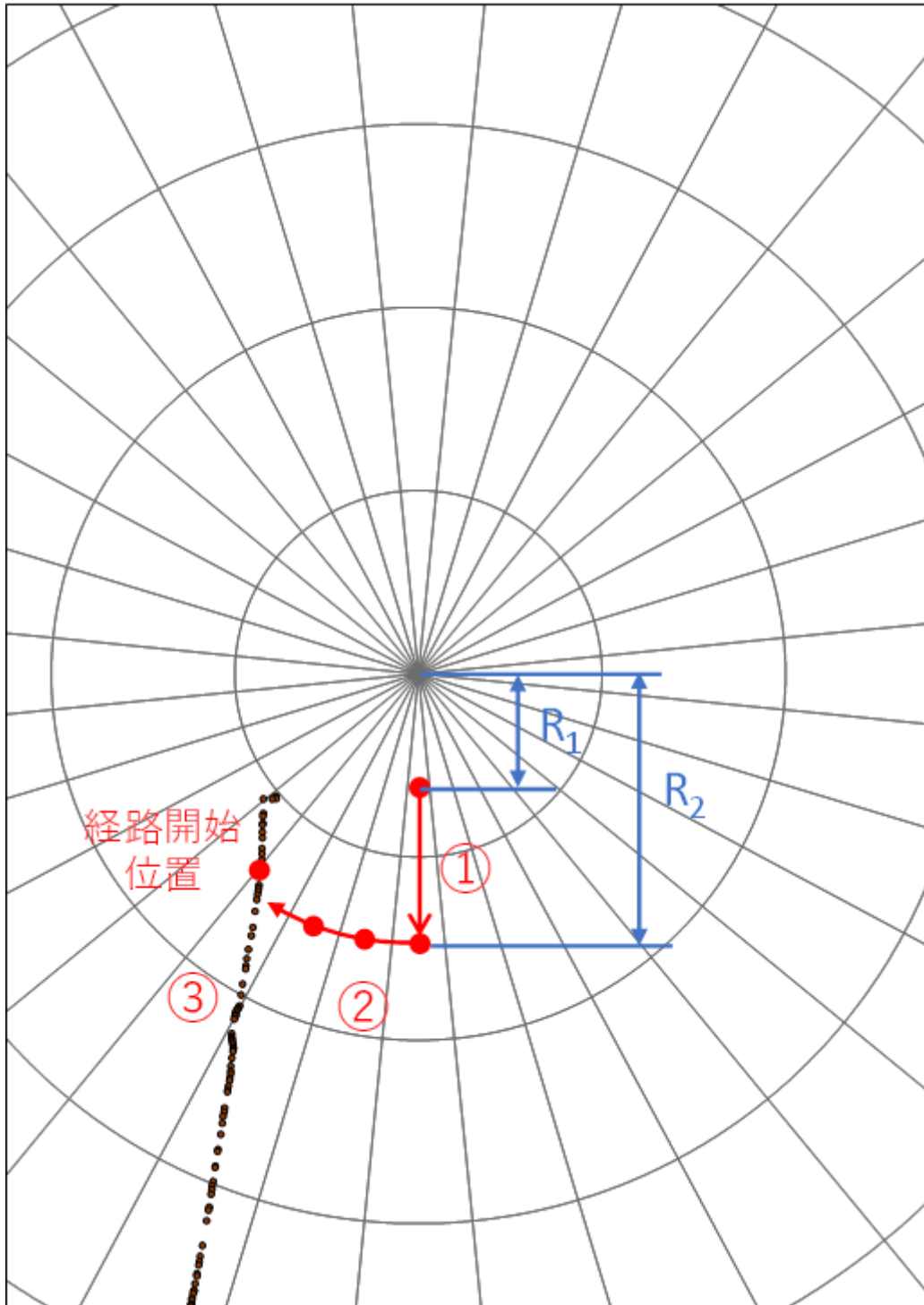


図 5.2 移動経路の計算手順

- 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。

### 5.1.2. 避難経路データの作成方法

地域原子力防災協議会が緊急時対応の避難経路を示しているサイトについてOSCAARで使用する避難経路データを作成した。OSCAARのメッシュと各地域の緊急時対応に記載されている避難元地区名を対応付けるために、OSCAARの各メッシュに地区名等を割り当てた。割り当てられた地区名等を各地域の緊急時対応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、TXTファイル形式の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、TXT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) メッシュごとの地区名の割り当て方法

ESRI社のGISソフトArcGIS (ArcMap 10.8.1) を使ってシェープファイルを処理し、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で出力した各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。

さらに、緊急時対応における経路の割り当てで小学校区名が用いられている場合については、国土交通省「国土数値情報ダウンロードサービス」から小学校区データ第2.1版 (平成28年) を用いて小学校区名を各メッシュに割り当てた。小学校区データが作成されていない自治体の場合は地図を見て判断した。また、地区名や小学校区名以外によって経路が割り当てられている場合も地図を見て判断した。

#### (2) 避難経路の割り当て方法

各メッシュに割り当てられた地区名等を各地域の緊急時対応と照合して、使用する避難経路（主な幹線道路）を選定した。

### (3) 避難経路ポイントデータの作成方法

OpenStreetMapから抽出した経路の緯度経度データを整理して、TXTファイル形式のポイントデータを作成した。離島からの避難で海上の経路データが作成できない場合は、港からの陸路の経路データのみを作成する。

### (4) OSCAAR 用避難データの作成

避難経路解析プログラムでOSCAAR用避難経路データを作成する。

## 5.1.3. 各サイトの避難経路データ

各サイトに対してポイントデータを作成した避難経路の数を表 5.3に示す。UPZについては主に既存のポイントデータを活かし、PAZまたは準PAZの避難経路のポイントデータを新規に作成した。ひとつの地区に複数の経路が割り当てられている場合には、基本経路または経路①などを採用して、OSCAAR用避難経路データを作成した。

ポイントデータを作成した経路には代替経路なども含まれるため、代替経路などを使用した計算をしたい場合には避難経路解析プログラムでOSCAAR用避難経路データを作成することが可能である。

表 5.3 避難経路数

発電所	(準) PAZ	UPZ	合計
泊	15	36	51
女川	24	100	124
美浜	12	24	36
大飯	8	32	40
高浜	19	28	47
玄海	9	39	48
島根	6	43	49
伊方	3	31	34
川内	16	61	77



## 第5章の参考文献

- B. R. Bowring, Total Inverse Solutions for the Geodesic and Great Elliptic, Survey Review, 33, 261, pp 461–476 (1996).
- OpenStreetMap, <https://www.openstreetmap.org>, (最終閲覧日 2023年1月31日)
- 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&serveyId=A002005212015&coordsys=1&format=shape&datum=2000>、(最終閲覧日 2023年1月31日)
- 内閣府、伊方地域原子力防災協議会 (2020)、伊方地域の緊急時対応 (全体版) 、(令和 2 年 12 月 23 日改定)
- 内閣府、大飯地域原子力防災協議会 (2020)、大飯地域の緊急時対応 (全体版) 、(令和 2 年 7 月 30 日改定)
- 内閣府、女川地域原子力防災協議会 (2020)、女川地域の緊急時対応 (全体版) 、(令和 2 年 6 月 17 日改定)
- 内閣府、玄海地域原子力防災協議会 (2021)、玄海地域の緊急時対応 (全体版) 、(令和 3 年 7 月 20 日改定)
- 内閣府、島根地域原子力防災協議会 (2021)、島根地域の緊急時対応 (全体版) 、(令和 3 年 7 月 30 日)
- 内閣府、川内地域原子力防災協議会 (2021)、川内地域の緊急時対応 (全体版) 、(令和 3 年 7 月 20 日改定)
- 内閣府、高浜地域原子力防災協議会 (2020)、高浜地域の緊急時対応 (全体版) 、(令和 2 年 7 月 30 日改定)
- 内閣府、泊地域原子力防災協議会 (2020)、泊地域の緊急時対応 (全体版) 、(令和 2 年 12 月 23 日改定)
- 内閣府、美浜地域原子力防災協議会 (2021)、美浜地域の緊急時対応 (全体版) 、(令和 3 年 1 月 5 日)

## 6. OSCAAR コードの整備に関する情報収集

会議名：IMUG/MACCS Workshop

日時：2022年9月19日～9月22日

場所：web開催

昨年に引き続き、IMUG/MACCS Workshopは2022年もwebによる開催となった。9月19日～21日はMACCSの使用事例や評価手法等の開発状況等について各参加者からの報告があった。最初に、MACCSの開発情報等についての発表があり、概要は以下の通りである。

- 2022年12月にMACCS Version4.2がリリースされる
- MACCS4.0以降はライセンス管理が特定のコンピュータに固定

MACCS4.2の改良点は以下の項目が計画されている。

- ノードロックの解除
- 収録可能な放射性核種を999核種まで増加
- 経済モデルの出力（間接費の分割等）
- 計画線量の設定を柔軟化
- 居住エリアでの除染等

各発表のうち、特に着目したものを以下に示す。

- K. Compton, et. al., Overview of U.S. NRC Level 3 PRA Project Offsite Consequence Analysis Reactor At-Power Level 3 PRA for Internal Events and Floods

NRCが実施しているLevel3PRA Projectに関する発表であり、プロジェクトの中では、新たな炉に関する技術や知見等が考慮された評価を行っていることが示されていた。2022年4月にこのプロジェクトに関するレポートが発表されている。評価には、リファレンスプラントが設定されており、それに対して様々な事故シナリオに対する評価がなされていた。

- Y. Kin, et.al., Influence of Radioactive Decay on Atmospheric Transport of Radioactive Particles

原子力事故で放出される放射性物質を考える際、一般的には電荷の無い粒子として評価していたが、この報告の中では、実際は電荷を帯びており、中性粒子とその挙動が異なることが示されていた。また、電荷とエアロゾルサイズの関係も示しており、放射性粒子の帯電は、粒子の凝固に影響を与えることもあることも示されていた。大気拡散中の粒子の化学形態や大きさ等については、福島第一原子力発電所事故でも様々な議論があった。

- N. Tehrani, et. al.,

自宅での屋内退避について調査、検討した内容を示した発表であった。基本的には、過

去の原子力規制庁受託事業で行われた廣内らによる浸透率や換気率等のデータと Thatcherらの論文で示されていたコンパートメントモデルの手法について整理したものであった。米国はあまり屋内退避を重要視していないと思っていたが、事故時の対策の一つとして見なしていることがわかった。

- O. Pensado, et al., Independent Verification Testing of MACCS Functions

MACCSで使用されているモデルを個々に説明する非常に役に立つ発表であった。各モデルのうち、Plume meander、避難アルゴリズム、ガウスプルームモデルとCFD解析結果の比較を行っていた。特に、CFDとの比較では、水平方向の拡散はCFDの方が小さいことがわかり、さらに、地形や乱流に大きく影響されることが示されていた。

- A. J. Nosek, et al., Anticipated Impacts of Nuclear Accidents

原子力事故が与える社会へのインパクトをMarket ImpactとNon-Market Impactに分けて整理した結果が発表されていた。除染作業、移転、医療に係るコスト等様々な分野で注目すべき項目が示された。同様に、経済影響に着目したのはA. Roseの発表であった。原子力発電所事故に限らず、バイオテロ等の評価にも使用できる分析用フレームワークを紹介していた。その中でも、要因事象から派生する様々な連鎖行動の分析が興味深く、例えば、9.11同時多発テロでは航空機を使用した移動が2年間減少したこと、投資の減少、労働者の公共交通機関の使用減少等が挙げられていた。経済影響は枝葉の様に連鎖し、実際には非常に複雑である。どのように分析、モデル化、評価に適用していくか課題である。