



JAEA-Data/Code

2025-010

DOI:10.11484/jaea-data-code-2025-010

原子力緊急事態への対応における 専門家支援ツールEXTREME

EXTREME: Expert Support Tool for Responding to a Nuclear Emergency

リスク評価・防災研究グループ

Risk Analysis Research Group

原子力安全・防災研究所

安全研究センター

Nuclear Safety Research Center

Nuclear Safety and Emergency Preparedness Institute

October 2025

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Data/Code

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートはクリエイティブ・コモンズ 表示 4.0 国際 ライセンスの下に提供されています。
本レポートの成果（データを含む）に著作権が発生しない場合でも、同ライセンスと同様の
条件で利用してください。（<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja>）
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト（<https://www.jaea.go.jp>）
より発信されています。本レポートに関しては下記までお問合せください。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究開発推進部 科学技術情報課
〒319-1112 茨城県那珂郡東海村大字村松 4 番地 49
E-mail: ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>).

Even if the results of this report (including data) are not copyrighted, they must be used under
the same terms and conditions as CC-BY.

For inquiries regarding this report, please contact Library, Institutional Repository and INIS Section,
Research and Development Promotion Department, Japan Atomic Energy Agency.

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1112, Japan

E-mail: ird-support@jaea.go.jp

原子力緊急事態への対応における専門家支援ツール **EXTREME**

日本原子力研究開発機構 原子力安全・防災研究所
安全研究センター

リスク評価・防災研究グループ

(2025 年 6 月 13 日受理)

原子力施設で緊急事態が発生した場合には、施設周辺の公衆への放射線被ばくを低減するため、避難や屋内退避などの防護措置が実施される。これらの防護措置の必要性を判断する際には、刻々と変化する施設内外の状況及びそれに伴って得られる各種の情報を適切に反映し、放射性物質の大気への放出源情報（ソースターム）から周辺環境への放射線影響までを迅速かつ一貫して評価する必要がある。しかし、施設内外の状況や各種情報は膨大な量であり、かつ、判断の根拠として利用可能なものとして提供するためにはそれらの情報を適宜、適切に処理しなければならず、炉内情報や被ばく評価に関する専門知識とそれら进行处理するための事前の準備が不可欠である。

本研究では、上記のような背景の下、原子力緊急事態の防護措置の判断において、膨大な情報を迅速に処理し判断の根拠となる情報を提供することを目的として、原子力緊急事態への対応における専門家支援ツール **EXTREME** (**EX**pert support Tool for Responding to a nuclear **EMER**gency)を開発した。このツールは、炉内情報をもとに簡易ソースタームを評価する機能と、その結果に基づいて施設周辺での被ばく線量を評価する機能を有しており、また、緊急時においてもユーザーが容易に操作できるように **PC** ベースのグラフィカル・ユーザー・インターフェース (**GUI**) も実装している。本報告書では、これらの機能において用いられている解析モデルと入出力データファイル並びに試計算結果について記載した。

EXTREME: Expert Support Tool for Responding to a Nuclear Emergency

Risk Analysis Research Group

Nuclear Safety Research Center

Nuclear Safety and Emergency Preparedness Institute

Japan Atomic Energy Agency

Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received June 13, 2025)

When a nuclear emergency occurs at a nuclear power plant (NPP), protective actions such as evacuation and sheltering are implemented to reduce radiation exposures to the public around the vicinity areas of the NPP. The necessity of the protective actions should be judged, taking into account the various types of information from the on-site and the off-site with reflecting the drastically change of accident situation. In such decision making, the impacts to the public and surrounding environment also should be assessed quickly and consistently through the source-term, which including the amount and timing of release of radioactivity, and the contamination of environment by those. However, it is difficult to provide the information needed to decision-making, because those from the on-site and off-site are enormous. Therefore, expertise for the accident process in the on-site and for exposure assessment, and advance preparation for processing this information are indispensable.

In this study, to deal with a huge amount of information and provide the basis for decisions on protective actions in a nuclear emergency, an expert support tool EXTREME (EXpert support Tool for Responding to a nuclear EMERgency) for nuclear emergency response was developed. This tool has a function to evaluate a simplified source term based on in-core information and a function to evaluate exposure doses around a facility based on the results of the evaluation. The system also has a PC-based graphical user interface (GUI) for easy operation by users even in an emergency. This report describes the models implemented the EXTREME, the input/output data files needed, and trial calculation results used in these functions.

Keywords:

Nuclear Emergency, Response Phase, Expert Support Tool, Off-site Protective Action, Source Term, Radiation Exposures to the Public, Graphical User Interface

目次

1. はじめに	1
2. EXTREME の概要	3
2.1 EXTREME の構成と計算の流れ	3
2.2 各計算コードの機能と入力パラメータの概要	5
2.3 グラフィカル・ユーザー・インターフェース (GUI) 及び地理情報システム (GIS) の整備	7
3. 各計算コードのモデル及び主要な設定と条件	9
3.1 簡易ソースターム評価	9
3.2 風向・風速場作成	10
3.2.1 風向・風速の質量保存則	10
3.2.2 座標変換	14
3.2.3 初期風向・風速場作成	16
3.2.4 調節風向・風速場作成	17
3.3 大気拡散解析及び被ばく線量評価	22
3.3.1 大気拡散解析	22
3.3.2 被ばく線量評価	43
3.4 食物連鎖解析	45
3.4.1 ダイナミック・プロセス	48
3.4.2 離散的プロセス	51
3.4.3 畜産物中濃度の推定	53
3.4.4 コンパートメント・モデル式	56
4. 入力データファイルと計算結果の出力データファイル	57
4.1 入力データファイルの整備	57
4.1.1 原子力発電所サイト、原子炉名及び炉型	57
4.1.2 炉型別事故タイプ及び事故シーケンス	60
4.1.3 放射性核種の線量 (率) 換算係数	66
4.1.4 各サイト周辺の気象観測局情報	68
4.1.5 食物連鎖パラメータ	70
4.1.6 社会環境及び地形データ (行政区画、人口、標高)	73
4.2 計算結果の出力データファイルの概要	74
4.2.1 放射性核種の存在割合及び環境への放出量	74
4.2.2 各サイト周辺の風向・風速場	76
4.2.3 放射性物質の大気中濃度、地表面沈着量及び被ばく線量	77
4.2.4 放射性物質の農畜産物中濃度	79

5. EXTREME による試計算	80
5.1 試計算に用いた計算条件	80
5.2 試計算結果とその考察	83
5.2.1 風向・風速場作成コードによる試計算	83
5.2.2 大気拡散解析コードによる試計算	83
6. おわりに	91
6.1 EXTREME の開発・整備のまとめ	91
6.2 今後の検討課題	92
謝辞	94
参考文献	95
付録 有限要素法による風向・風速場作成	99

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of EXTREME	3
2.1 Structure of EXTREME and its calculation flow	3
2.2 Functions of each calculation code and outline of input parameters	5
2.3 Development of Graphical User Interface (GUI) and Graphical Information System (GIS)	7
3. Models in each calculation code and main settings and conditions	9
3.1 Simplified assessment of source terms	9
3.2 Preparation of wind direction/speed fields	10
3.2.1 Mass conservation law for wind direction/speed	10
3.2.2 Coordinate transformation	14
3.2.3 Preparation of initial fields of wind direction/speed	16
3.2.4 Preparation of adjusted fields of wind direction/speed	17
3.3 Analysis of atmospheric dispersion of radionuclides and assessment of exposure doses to radiation	22
3.3.1 Analysis of atmospheric dispersion of radionuclides	22
3.3.2 Assessment of exposure doses to radiation	43
3.4 Analysis of food chains	45
3.4.1 Dynamic processes	48
3.4.2 Discrete processes	51
3.4.3 Estimation of radionuclide concentrations in livestock products	53
3.4.4 Equations of compartment models	56
4. Input data files and output data files of calculation results	57
4.1 Preparation of input data files	57
4.1.1 Nuclear station sites, nuclear reactor names and types	57
4.1.2 Accident types and sequences for each nuclear reactor type	60
4.1.3 Dose/dose-rate conversion factors for each radionuclide	66
4.1.4 Information on meteorological observation posts around each nuclear station site	68
4.1.5 Parameters for food chain models	70
4.1.6 Data for social environment and topography (administrative district, population and altitude)	73
4.2 Outline of output data files of calculation results	74
4.2.1 Inventory ratio of each radionuclide and its release amount to the environment	74

4.2.2	Wind direction/speed fields around each nuclear station site	76
4.2.3	Concentrations of radionuclides in the atmosphere, their deposition densities on the ground and exposure doses to radiation	77
4.2.4	Concentrations of radionuclides in agricultural and livestock products	79
5.	Trial calculations by EXTREME	80
5.1	Calculation conditions used in trial calculations	80
5.2	Results of trial calculations and their considerations	83
5.2.1	Code for preparation of wind direction/speed fields	83
5.2.2	Code for analysis of atmospheric dispersion of radionuclides	83
6.	Concluding remarks	91
6.1	Summaries of development and preparation of EXTREME	91
6.2	Future issues to be considered	92
	Acknowledgements	94
	References	95
Appendix	Preparation of wind direction/speed fields by the finite element method	99

表目次

表 3-1	ガウスの精度係数	21
表 3-2	拡散係数のパラメータ	29
表 3-3	沈着に関するパラメータ	33
表 3-4	食物連鎖モデルで考慮するダイナミック・プロセス	47
表 3-5	食物連鎖モデルで考慮される農畜産物	47
表 4-1	評価対象の原子力発電所	58
表 4-2	サイト及びプラント情報データファイルの内容	59
表 4-3	原子炉型と考慮される事故タイプ及び事故シーケンス (BWR3/mk1 の例)	61
表 4-4	各原子炉型に対する代表的な事故タイプ及び事故シーケンス	62
表 4-5	原子炉外への移行割合	63
表 4-6	プラント内放出継続時間	64
表 4-7	格納容器へ移行するヨウ素の内訳	64
表 4-8	非常用ガス処理系 (SGTS) フィルターによる除去割合	64
表 4-9	自然沈着及びスプレイ除去の除去率	64
表 4-10	評価対象核種と核種のグループ分け	65
表 4-11	線量 (率) 換算係数データファイルの内容	66
表 4-12	崩壊系列データファイルの内容	67
表 4-13	評価対象サイト周辺における気象観測局データファイルの内容	69
表 4-14	大気安定度による混合層高さの自動設定	69
表 4-15	農畜産物関連データファイルの内容	71
表 4-16	土壌関連データファイルの内容	72
表 4-17	標高データファイルの内容	73
表 4-18	SSTCAL からの出力情報及び GUI における表示方法	74
表 4-19	MASCON_FEM による計算結果の内容	76
表 4-20	Puff による計算結果の内容	77
表 4-21	CMPMDL で使用する地表面沈着量の計算結果の内容	78
表 4-22	CMPMDL による計算結果の内容	79
表 5-1	ガウス・プルームモデル及び OSCAAR コードとの比較に用いた計算条件	80
表 5-2	仮想事故に対する試算に用いた計算条件	81
表 5-3	試算に使用した放出条件	81
表 5-4	試算に使用した沈着パラメータ	82
表 5-5	ソースターム評価コードで設定した代表的な事故シナリオ	82
表 5-6	ケース (2) の計算に使用した風向・風速	82
表 A-1	図 A-2 に対応した四角形要素に属する節点番号	109

図目次

図 2-1	EXTREME の構成と計算の流れ	4
図 2-2	GUI による専門家支援ツールの起動画面の表示例	7
図 2-3	GIS による空气中放射性物質濃度分布の表示例	8
図 3-1	地形上の評価領域	13
図 3-2	平坦な地形における反射	24
図 3-3	地表面と混合層上面の間の反射	25
図 3-4	地形影響の補正	27
図 3-5	大気安定度の変化に伴う伝播距離に関する拡散係数	30
図 3-6	大気安定度の変化に伴う実効距離に関する拡散係数	31
図 3-7	大気安定度の変化に伴う仮想距離を考慮した場合の拡散係数	31
図 3-8	$U = 1$ 、 $\sigma_h = 100$ とした時の各時刻のパフ拡がり と規格化時間積算空气中濃度	40
図 3-9	食物連鎖モデルにおけるコンパートメントの構成	46
図 3-10	農作物の成長と家畜への飼料供給の概念図	55
図 4-1	各放出核種グループの存在割合に関する計算結果（図形式）の出力例	75
図 5-1	初期風向・風速場と調節風向・風速場の発散（単位は無次元）	85
図 5-2	Puff、Plume 及び OSCAAR コードによる時間積算空气中濃度の比較	86
図 5-3	preArea で作成された地形データ	87
図 5-4	地表面付近の時間積算空气中濃度	88
図 5-5	クラウドシャインによる外部被ばく線量	89
図 5-6	吸入による内部被ばく線量（成人）	90
図 A-1	$x-y$ 空間の四角形要素と $\xi-\eta$ 空間の四角形要素	109
図 A-2	解析領域が 4 つの四角形要素から構成される例	110
図 A-3	有限要素法による風向・風速場作成の手順	110

1. はじめに

原子力緊急事態が発生すると、放射性物質が環境中へ放出され大気中を拡散し、施設周辺の住民に放射線被ばくが生じる可能性がある。このような被ばくを低減するため、オフサイトでは避難や屋内退避などの防護措置が実施される。これらの防護措置の実施に関する判断は、東京電力福島第一原子力発電所（以下、1F という）事故以前、大気拡散モデルによる予測と環境モニタリングの結果をもとに行われていた¹⁾。しかし、1F 事故以降は、当時の国際的な標準に基づく改訂が行われ²⁾、防災基本計画³⁾、原子力災害対策指針⁴⁾、原子力災害対策マニュアル⁵⁾などの原子力防災に関する国の基本的な文書に必要な修正が施された。この結果、現在の我が国では、緊急時活動レベル（EAL: Emergency Action Level）及び運用上の介入レベル（OIL: Operational Intervention Level）を利用して、原子力施設の状態や環境モニタリングの結果に応じて、放出前の予防的措置や放出後の追加的な防護措置の判断を行うことになっている⁶⁾。

このように、現在の原子力緊急事態等への準備と対応では EAL 及び OIL に基づいて行われ、したがって、予測ではなく実測に基づいて判断される¹⁾。その判断では、オンサイトとオフサイトでの情報がそれぞれ個別に利用され、意思決定に反映されることになる。一方で、刻々と変化する事故の進展を適切に反映して住民の防護に結びつけるためには、オンサイトとオフサイトを独立に扱うのではなく、両者における情報の即時共有と連携評価が不可欠である。このような考え方のもと、米国では「緊急時対応のための技術マニュアル（RTM: Response Technical Manual）」が作成され、オンサイトとオフサイトでの情報共有と連携評価の体制を構築が試みられている¹¹⁾。

我が国においても、両者間での情報共有と連携評価の重要性は認識されているところであり、原子力規制庁において「緊急時対応技術マニュアル」が整備された¹²⁾。ただし、原子力規制庁の緊急時対応技術マニュアルは、同庁における緊急時対応のうち、オンサイト側における活動を技術的に支援するため、原子炉の状態や放射性物質の放出時の影響を簡便に評価するための手法を整備したものである。このため、初期におけるオフサイトでの線量評価や防護措置に係る評価については、今後拡充を図るとともに中長期的な課題としてニーズに応じて検討することとされているところである。

そこで、日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構という）では、このような拡充や中長期的な課題の解決に資するため、「原子力緊急事態への対応における専門家支援ツール **EXTREME**（EXpert support Tool for Responding to a nuclear EMergency）」を開発した。ここでは、簡易なモデルに基づいた支援ツールを開発し、またユーザーが容易に操作できるように PC ベースのグラフィカル・ユーザー・インターフェース（GUI）を整備した。本報告書では、開発・整備した支援ツールの計算モデル、入出力データファイル及び試計算結果について記述する。第 2 章では、**EXTREME** の構成と計算の流れ、各計算コードの機能と入力パラメータの概略など **EXTREME** の概要などを記述する。第 3 章では、**EXTREME** を構成する主たる 4 種類の計算コードについて、使用した各計算コードのモデル及び主要な設定と条件を説明する。第 4 章では、主要な入力データファイルの内容と整備、主要な計算結果の出力データファイルの概要を示す。第 5 章では、

¹⁾ 大気拡散モデルでの予測の有用性が完全に否定された訳ではなく、同モデルによる予測の結果は多岐に亘って活用され続けている⁷⁾。例として、緊急事態に先立つ準備の計画段階においては、大気拡散解析を含む確率論的事故影響評価に基づいて、屋内退避や避難などの個々の防護措置を組み合わせた「戦略」の有効性の評価が行われ、計画の妥当性を示すために利用されてきた^{8)・10)}。

EXTREME を使用した 2 種類の試計算について、試計算結果とその考察を記載する。本支援ツールを利用することにより、原子力緊急事態において防護措置の判断や決定を行う意思決定者をより効果的に支援できることが期待される。

2. EXTREME の概要

2.1. EXTREME の構成と計算の流れ

EXTREME の構成と計算の流れを図 2-1 に示す。図に示すように、EXTREME は 4 種類の主たる計算コードで構成されており、ソースターム評価を行うサブツールと環境影響評価を行うサブツールに大別される。

図 2-1 に示す構成図において、簡易ソースターム評価コード (SSTCAL) は、原子炉の炉型、事故タイプ、工学的安全設備の作動状況などの事故情報を入力し、評価対象プラントの各ボリューム内の存在量及びソースタームの積算値を、初期炉内内蔵量に対する割合で評価する。なお、計算時間を短縮させるため、線源強度別ではなく放射性核種を 10 グループで代表させている。

風向・風速場作成コード (MASCON_FEM) は、評価対象領域内における数地点の観測風から質量保存則を満たす風向・風速場を作成する。解法として有限要素法を使用している。

大気拡散及び被ばく線量評価コード (Puff) は、SSTCAL で評価されたソースターム、MASCON_FEM で作成された風向・風速場を入力データとして使用し、パフモデルによって大気拡散解析を行い、評価対象サイト周辺における大気中放射性物質濃度と地表面沈着量、及び被ばく線量を求める。本コードは、地形の影響、プルームライズ²、乾性沈着、湿性沈着、崩壊による減衰、1 世代のみの子孫核種の生成を考慮することができる。

食物連鎖解析コード (CMPMDL) は、Puff で解析された地表面沈着量データを使用して農畜産物への移行を評価し、農畜産物中の放射性物質濃度を計算する。ここでは、7 種類の農産物と 2 種類の畜産物を考慮している。放射性物質の農畜産物への移行は、コンパートメント・モデルを解くことによって求められる。

4 種類の主たる計算コードの他に、構成コードの入力ファイルを作成するためのプリプロセッサが準備されている。評価領域設定コード (preArea) は、MASCON_FEM による 2 次元風向・風速場の調節を行う前に、評価対象領域における各格子点の標高データを作成するプリプロセッサである。

ソースターム評価を行うサブツールを構成する SSTCAL は、全体のツールとは切り離して単独で実行することが可能であるため、独立したソースターム評価コードとして使用できる。一方、環境影響評価を行うサブツールは、SSTCAL で評価されたソースタームを使用して、preArea による評価領域設定、続いて MASCON_FEM による風向・風速場作成並びに Puff による大気拡散及び被ばく線量評価、最後に CMPMDL による食物連鎖解析というように一連の計算を実行することができる。各々のサブツールにおける計算条件設定では、基本的には新規に計算条件を設定するが、過去に設定した計算条件を読み込むことも可能である。また、CMPMDL については、「評価する／しない」を選択することにより、食物連鎖解析を「実行する／しない」を選ぶことができる。

² 排気塔からプルームが放出される時に吹き上げが加わり、排気塔高さに吹き上げ高さを考慮した実効放出高さが実際の放出時の高さとなる。この吹き上げ効果をプルームライズと呼ぶ。詳細については、第 3.3.1.7 目を参照。

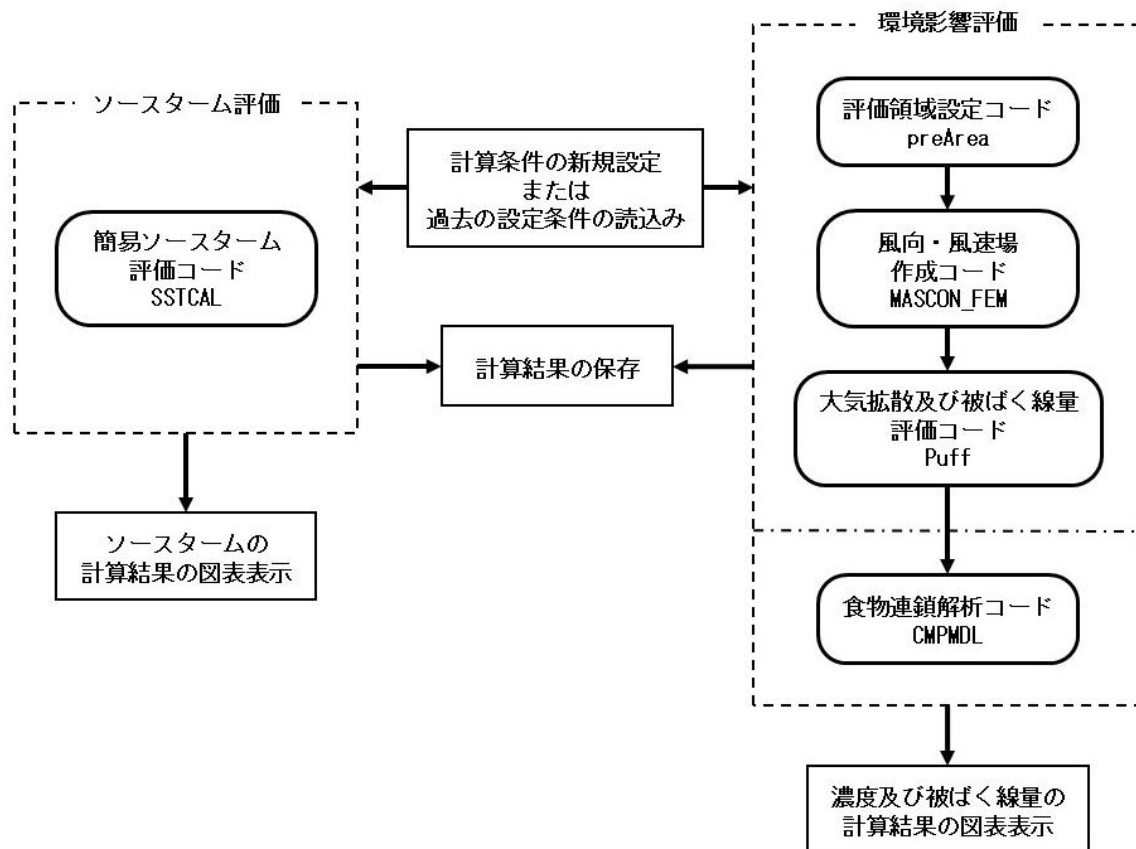


図 2-1 EXTREME の構成と計算の流れ

2.2. 各計算コードの機能と入力パラメータの概要

上記に示した 4 種類の主たる計算コードとプリプロセッサの機能及び各々の計算コードに対する入力パラメータの概要を以下に示す。

(1) 簡易ソースターム評価コード

簡易ソースターム評価コード SSTCAL は、原子炉の炉型（加圧水型原子炉、沸騰水型原子炉など）、事故タイプ（格納容器破損の種類、地震等の外部事象など）、事故シナリオ（崩壊熱除去機能喪失、全交流動力電源喪失など）、工学的安全設備の作動状況（炉心冷却スプレイ、フィルターベントなど）等の事故情報を入力とし、評価対象プラントの各ボリューム内における放射性核種の存在量及び環境への放出量（ソースターム）の積算値を、初期炉内内蔵量に対する割合で算出する。なお、計算時間を短縮させるため、個別の放射性核種の線源強度別ではなく放射性核種を 10 種類のグループ（希ガス、有機ヨウ素、元素状ヨウ素、粒子状ヨウ素、アルカリ金属、テルル類、Ba/Sr、貴金属、セリウム類及びランタノイド）で代表させて取り扱う。

本コードを実行するには、計算条件設定ファイル、原発施設に関するデータファイル（評価対象の原発、サイト及びプラント情報など）、原発事故に関するデータファイル（事故タイプ及び事故シーケンス、原子炉外への移行割合、プラント内放出継続時間、格納容器へ移行するヨウ素の内訳、各種の工学的安全設備による除去割合など）等の数多くのデータファイルが必要である。原発施設及び原発事故に関するデータファイルの内容は、第 4.1.1 項及び第 4.1.2 項に示す通りである。計算条件設定ファイルでは、当該計算で評価対象とする原発サイト及びプラントを指定することにより、その原発の性能や特性などを関連データファイルから抽出する。

(2) 評価領域設定コード

評価領域設定コード preArea は、評価地点を中心とした矩形格子の評価対象領域を設定し、各格子点上の標高データを求める。本コードは MASCON_FEM のプリプロセッサとしての役割を担っている。

本コードを実行するには、計算条件設定ファイル及び地形データとして準備される標高データが必要である。計算条件設定はテキストファイルで準備され、この設定ファイルの中は標高データのパスとファイル名を指定する。この標高データは、NetCDF3³形式で予め作成しておく必要がある。

(3) 風向・風速場作成コード

風向・風速場作成コード MASCON_FEM は、有限要素法を用いて風向・風速場調整を行うことにより、2 次元の風向・風速場を作成する。風向・風速場調節とは、評価対象領域内におけるいくつかの地点で観測された風向・風速データを格子点上に補間し、補間値に対して質量保存則を満たすように調整することである。

³ NetCDF (Network Common Data Form) はバイナリファイルフォーマットの一つであり、NetCDF3 はその第 3 版 (Version 3) である。本ファイル形式は、気象、海洋、気候変動などの分野で国際的に広く使われており、コンピュータの機種に依存しないバイナリ形式（機種非依存）、データを配列として読み書きすることが可能（配列指向）、さらにデータに加えてそのデータに関する説明を格納することが可能（自己記述的）という特徴がある。

本コードを実行するには、計算条件設定ファイルと **preArea** で作成した各格子点での標高データファイルが必要である。計算条件設定ファイルでは、評価対象領域における代表的な気象観測データを入力するとともに、**preArea** で作成した評価対象領域の情報を設定する。気象観測データとして混合層高さを入力する必要があるが、この値が観測データに存在しない場合には、簡易的に大気安定度から定める方法を用いる。

(4) 大気拡散及び被ばく線量評価コード

大気拡散及び被ばく線量評価コード **Puff** は、**SSTCAL** で評価したソースターム及び **MASCON_FEM** で作成した風向・風速場を入力データとして、パフモデルによって放射性物質の大気中移流・拡散及びそれに伴う被ばく線量を評価する。このコードでは、地形の影響、ブルームライズ、放射性物質の乾性沈着・湿性沈着、放射性核種の崩壊及び子孫核種の生成（1 世代のみ）を評価できる。

本コードを実行するには、計算条件設定ファイル、崩壊系列データファイル、線量（率）換算係数データファイル及び **MASCON_FEM** で作成した風向・風速場データ（**NetCDF3** 形式）が必要である。計算条件設定ファイルでは、**SSTCAL** の出力結果であるソースタームをこの計算条件設定ファイルの形式に合わせて入力するまたはその他のソースタームを入力することができる。さらに、**MASCON_FEM** で作成した風向・風速場データ及び崩壊系列データが存在するディレクトリを指定する。崩壊系列データの内容は第 4.1.3 項のようになっており、設定したソースタームに対応した放射性核種の崩壊系列データを予め準備しておく。線量（率）換算係数データファイルでは、サブバージョン及び地表面沈着核種による外部被ばく線量率換算係数のデータを指定するとともに、吸入による内部被ばく線量換算係数データを指定する。データファイルの内容は第 4.1.3 項に示す。

(5) 食物連鎖解析コード

食物連鎖解析コード **CMPMDL** は、**Puff** で計算された放射性物質の地表面沈着量を入力として、農作物及び畜産物への移行を評価し、農作物及び畜産物中の放射性物質濃度を計算する。ここでは、5 種類の食用農作物（穀物、豆類、果物、根菜及び葉菜）、4 種類の飼料用農作物（牧草、干草、穀物及び豆類）並びに 2 種類の畜産物（牛肉と牛乳）を考慮している。放射性物質の農畜産物への移行は、コンパートメント・モデルを解くことによって求められる。なお、**CMPMDL** では農畜産物中の放射性物質濃度の経時変化が推定されるが、農畜産物摂取による内部被ばく線量は計算しない。

本コードを実行するには、核種、農畜産物、土壌等に関連した多くのデータやパラメータを設定する必要がある。入力データファイルは、計算条件設定ファイル、地表面沈着量データファイル、農畜産物関連データファイル及び土壌関連データファイルに大別される。計算条件設定ファイルでは、事故発生日、評価核種、評価する農畜産物の種類、評価期間などを設定する。地表面沈着量データは **Puff** で計算されて出力されたものであり、データファイルの内容は第 4.2.3 項に示す通りである。農畜産物関連データファイルと土壌関連データファイルの内容は第 4.1.5 項に示した通りであり、農畜産物に関する多種類のパラメータ、土壌に関する多種類のパラメータから構成される。

2.3. グラフィカル・ユーザー・インターフェース（GUI）及び地理情報システム（GIS）の整備

EXTREME は 4 つの主たる計算コードから構成され、それぞれ入力データファイルによって制御されている。入力データファイルは基本的にはテキストで作成されており、これらを用いて順次計算コードを実行していけば計算が可能である。しかし、本支援ツールを初めて扱うユーザーにとっては、容易に取り扱い難い場合がある上に、計算結果は別のソフトウェアを使って描画しなければならない。さらに、原子力緊急事態に使用することを考慮すると、GUI によって全体を制御して図表化できると便利である。

以上のような状況を考慮して、本支援ツールにおいて GUI の開発を行った。ここでは、日本全国原発（17 サイトにおける 55 機）の原子炉データ、位置データ、周辺観測所の位置データ、周囲 60 km 四方の標高データを整備し、評価対象とする原発を GUI から選択できるようにした（図 2-2 参照）。開発・整備した支援ツールは原子力緊急事態の防護措置の判断において、膨大な情報を迅速に処理し判断の根拠となる情報を提供することを目的としているため、「原子力緊急事態への対応における専門家支援ツール EXTREME」と名付けた。本支援ツールにおける GUI の具体的な機能と使用方法については、別途公開される報告書¹³⁾を参照されたい。

GUI の開発には、現在広く利用されている C# 言語を使用した。GUI から各入力データファイルの項目設定を行うことにより、各計算コードを実行して計算結果を表とグラフに表示する。また、GIS である MapInfo®を用いて、地図上に環境媒体や農畜産物中の放射性物質濃度、また被ばく線量の平面分布を図示できるようにした（図 2-3 参照）。本支援ツールにおける GIS の具体的な機能と使用方法については、別途公開される報告書¹³⁾を参照されたい。



図 2-2 GUI による専門家支援ツールの起動画面の表示例

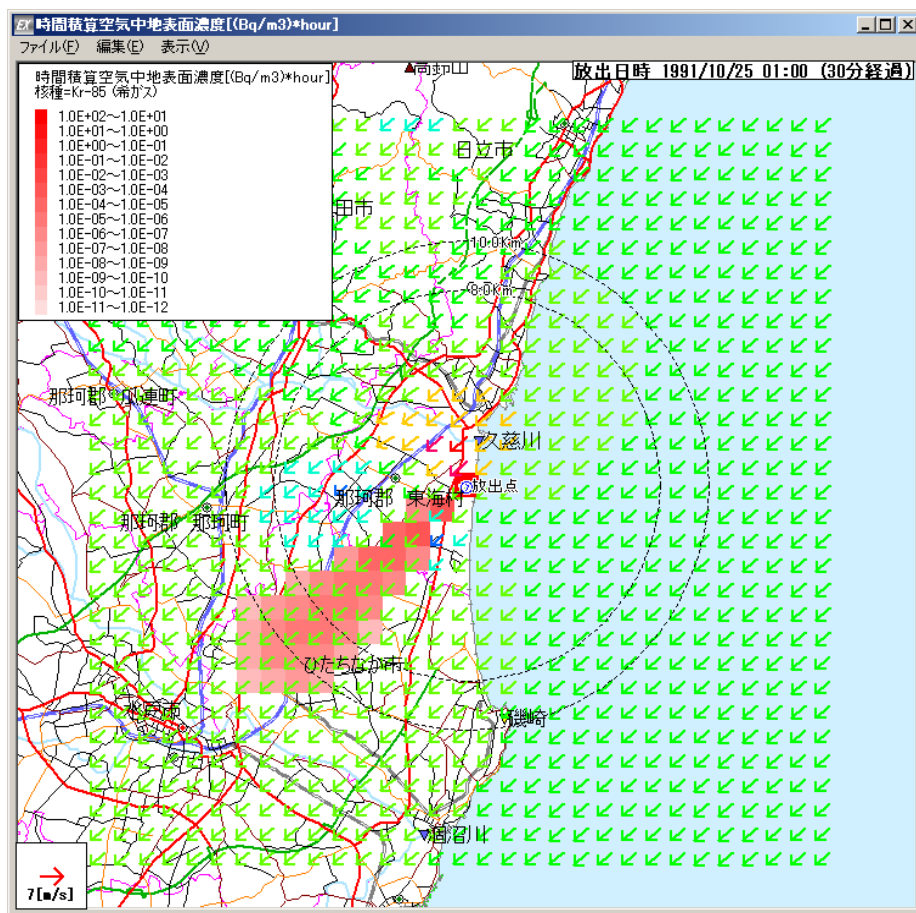


図 2-3 GIS による空气中放射性物質濃度分布の表示例

3. 各計算コードのモデル及び主要な設定と条件

原子力施設で事故が発生した時に周辺環境への放射線影響を推定するには、① 施設の事故状態から大気へ放出される放射性物質を推定するソースターム評価、② 周辺環境の風の状態を推定する風向・風速場作成、③ 風に乗って周辺環境に放射性物質が移流・拡散することを推定する大気拡散解析及び④ 周辺環境に移流・拡散した放射性物質から人体への被ばくを推定する被ばく線量評価が順次必要である。それぞれ詳細なモデルが提案されているが、モデルが詳細になればなるほどパラメータ数や計算量が増え、さらに全体の不確かさが増大する傾向にある。ここで開発した専門家支援ツール **EXTREME** は、原子力緊急事態において現場の専門家が、短時間で簡潔に、周辺環境への放射線影響を推定できることを目的としている。このため、詳細ではないが評価上信頼できるモデルを使用することとした。本章では、**EXTREME** を構成する各計算コードのモデルについて説明する。

3.1. 簡易ソースターム評価

SSTCAL は、原子炉の炉型（各種の加圧水型原子炉（以下、**PWR** という）、各種の沸騰水型原子炉（以下、**BWR** という）など）、事故タイプ（各種の格納容器破損、地震等の外部事象、仮想事故など）、事故シナリオ（崩壊熱除去機能喪失、各種の冷却材喪失事故（以下、**LOCA** という）、全交流動力電源喪失など）、工学的安全設備の作動状況（炉心冷却スプレイ、フィルターベント、プールスクラビングなど）等の事故情報を入力とし、評価対象プラントの各ボリューム内における放射性核種の存在量及び環境への放出量（ソースターム）の積算値を、初期炉内内蔵量に対する割合で算出する。なお、計算時間を短縮させるため、個別の放射性核種の線源強度別ではなく放射性核種を 10 種類のグループ（希ガス、有機ヨウ素、元素状ヨウ素、粒子状ヨウ素、アルカリ金属、テルル類、**Ba/Sr**、貴金属、セリウム類、及びランタノイド）で代表させて取り扱う。

ソースターム評価には、これまで旧日本原子力研究所⁴で開発されてきた計算コード **THALES-2**¹⁴⁾などが使用されてきた。本コードは炉内での放射性核種の様々な挙動を考慮し、解析を行っている¹⁵⁾。そのため膨大な計算時間が必要であり、原子力緊急事態への対応には適さない。しかし、本コードを使用した多くの計算実績及びそれらの解析により多くの知見が得られ、それらに基づいた簡易的なソースターム評価コード **SSTCAL** が開発された。**SSTCAL** に採用された計算モデル、主要な設定や計算条件などの詳細については、石川の文献¹⁶⁾を参照していただきたい。

⁴ 日本原子力研究所（原研：JAERI）は、日本の原子力平和利用の推進を目的として、1956 年（昭和 31 年）6 月に特殊法人として設立された。2005 年（平成 17 年）10 月 1 日に核燃料サイクル開発機構（サイクル機構：JNC）との統合に伴って解散し、日本原子力研究開発機構（原子力機構：JAEA）となった。

3.2. 風向・風速場作成

風向・風速等の気象場作成モデルには、診断型と予報型の 2 種類がある。診断型は、作成時点の観測値に物理的な拘束条件を考慮して作成時点の気象場を求める。一方予報型は、時間に依存した物理的な方程式を解くことによって時間依存の気象場を求める。予報型では、詳細な物理モデルを用いればより現実に近い気象場を求めることが可能となるが、多くの計算資源（計算時間や記憶容量）が必要となる。一方、診断型は予報型に比べると少ない計算資源で求めることができる。原子力緊急事態対応においては限られた関連情報に基づいて迅速に作成することが望ましいため、風向・風速場作成コード MASCON_FEM には診断型を採用することとした。

診断型として、Sasaki¹⁷⁾によって開発された質量保存則を満たすように風向・風速場を求める方法がある。この方法は、評価対象領域内における数地点で観測された風向・風速を格子点上に補間し、それらの補間風向・風速場に対して質量保存則を満たすように調節を行う。本方法を用いた計算コードには、MASCON¹⁸⁾や MC_Wind¹⁹⁾等がある。

一般的に風向・風速は 3 次元位置 (x, y, z) の関数であるが、ここでは z 方向に平均化を行い x, y だけの関数となった風向・風速を考える。これは z 方向の風向・風速変化に関して代表値で近似することであり、大気が比較的安定な場合に良い近似となる。このような状態になるのは、高度が上昇するに従って気温が上がる逆転層が形成される時である。しかし、ここでは大気拡散で考慮される混合層内において風向・風速場を x, y の関数として近似する。また、風向・風速を x, y の関数とすることによって、地形による風向・風速への影響が弱められてしまう。これは、地表面における境界条件が考慮されなくなることが原因である。より現実的な作成とするならば x, y, z の関数として風向・風速場を求める方が良いが、ここでは迅速に作成が行えることを考慮して風向・風速場は x, y の関数とした。なお、このような風向・風速場作成は MASCON に採用された方法である。

3.2.1. 風向・風速の質量保存則

初めに一般的な質量保存則を導き、次にここで必要となる z 方向に平均化した場合の質量保存則を導く。

(1) 一般的な風向・風速の質量保存則

密度 ρ の流体においてある閉領域を考えると、この閉領域の表面から出て行く流体は、化学反応等の質量変化がない場合、領域内部の質量減少分に等しくならなければならない。つまり質量が保存されなければならず、それは次式によって表される。

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \, dV + \int_S (\rho \mathbf{v}) \cdot \mathbf{n} \, dS = 0 \quad (3.1)$$

ここで、

ρ	: 流体の密度
V	: 考えている閉領域の体積
S	: 考えている閉領域の表面積
$\mathbf{v}$	: 風向・風速ベクトル

$\mathbf{n}$: 閉領域表面上の外向き単位法線ベクトルである。

式 3.1 の左辺の第 2 項にガウスの発散定理を適用すると、表面積分が体積積分で表され、次式のような連続の式が得られる。

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho dV + \int_V \text{div}(\rho \mathbf{v}) dV = \int_V \left\{ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{v}) \right\} dV = 0 \quad (3.2)$$

閉領域は任意に定めたので積分がゼロとなるのは、被積分関数がゼロとなる時である。そうすると次のような連続の式が得られる。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (3.3)$$

なお非圧縮性流体では時間空間的に密度変化がないので、連続の式は次式となる。

$$\text{div} \mathbf{v} = 0 \quad (3.4)$$

(2) z 方向に平均化した風向・風速の質量保存則

物理量 $A = A(x, y, z, t)$ の z 方向の平均 $\langle A \rangle_z$ を次式で定義する。

$$\langle A \rangle_z = \frac{1}{h} \int A(x, y, z, t) dz \quad (3.5)$$

ここで、

$\langle A \rangle_z$: 物理量 A の z 方向に対する平均値

h : $h = h(x, y, t) = \int dz$

である。

物理量は風向・風速ベクトル $\mathbf{v}$ と密度 ρ である。これらの z 方向に平均化された値を改めて $\mathbf{v} = \mathbf{v}(x, y, t)$ と $\rho = \rho(x, y, t)$ として、図 3-1 のような地形上の評価領域を考える。この時の h は評価領域内（地形から上境界まで）の高さである。このような場合、境界上のフラックスから質量保存則は次式となる。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \rho \cdot h dx dy + \int (\rho_{+x0} \cdot u_{+x0} \cdot h_{+x0} - \rho_{-x0} \cdot u_{-x0} \cdot h_{-x0}) dy \\ & + \int (\rho_{+y0} \cdot v_{+y0} \cdot h_{+y0} - \rho_{-y0} \cdot v_{-y0} \cdot h_{-y0}) dx + \rho w dx dy = 0 \end{aligned} \quad (3.6)$$

ここで、下付き添え字 $+x0$ 、 $+y0$ は x 、 y の正方向の境界上の値で、下付き添え字 $-$ は負方向の境界上の値である。なお、 z の負方向は境界が地形上であるため、フラックスはゼロであることにより上式では考慮していない。左辺の第 2 項を次のように変形する（第 3 項も同様なので省

略する)。

$$\begin{aligned}
 & \int (\rho_{+x0} \cdot u_{+x0} \cdot h_{+x0} - \rho_{-x0} \cdot u_{-x0} \cdot h_{-x0}) dy \\
 &= \int \{ (\rho_{+x0} \cdot u_{+x0} \cdot h_{+x0} - \rho_{x1} \cdot u_{x1} \cdot h_{x1}) + (\rho_{x1} \cdot u_{x1} \cdot h_{x1} - \rho_{-x0} \cdot u_{-x0} \cdot h_{-x0}) \} dy \\
 &= \int \left\{ \begin{aligned} & (\rho_{+x0} \cdot u_{+x0} \cdot h_{+x0} - \rho_{x1} \cdot u_{x1} \cdot h_{x1}) + (\rho_{x1} \cdot u_{x1} \cdot h_{x1} - \rho_{x2} \cdot u_{x2} \cdot h_{x2}) \\ & + (\rho_{x2} \cdot u_{x2} \cdot h_{x2} - \rho_{x1} \cdot u_{x1} \cdot h_{x1}) + (\rho_{x1} \cdot u_{x1} \cdot h_{x1} - \rho_{-x0} \cdot u_{-x0} \cdot h_{-x0}) \end{aligned} \right\} dy \\
 &= \dots (\text{infinite summation}) \\
 &= \frac{\partial(\rho \cdot u \cdot h)}{\partial x} dx dy \tag{3.7}
 \end{aligned}$$

すなわち、式 3.6 は次式となる。

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \cdot h dx dy + \frac{\partial(\rho \cdot u \cdot h)}{\partial x} dx dy + \frac{\partial(\rho \cdot v \cdot h)}{\partial y} dx dy + \rho w dx dy = 0 \tag{3.8}$$

積分領域は任意に定めたため、積分値がゼロとなるのは被積分関数がゼロとなる時である。ゆえに、 z 方向に平均化された連続の式は次式となる。

$$\frac{\partial(\rho \cdot h)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot u \cdot h)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \cdot v \cdot h)}{\partial y} + \rho w = 0 \tag{3.9}$$

非圧縮性流体では、時間空間的に密度の変化がない時であるため次式となる。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(u \cdot h)}{\partial x} + \frac{\partial(v \cdot h)}{\partial y} + w = 0 \tag{3.10}$$

なお、 u と v は z 方向に平均化された風向・風速成分であるが、 w は評価領域上面の風向・風速成分である。

z 方向に平均化された連続の式は式 3.9 または式 3.10 で表され、これらの式が成り立つ条件は、水平方向の風向・風速 (u, v) または密度が z 方向に平均化された値 (代表値) で与えられた時となる。

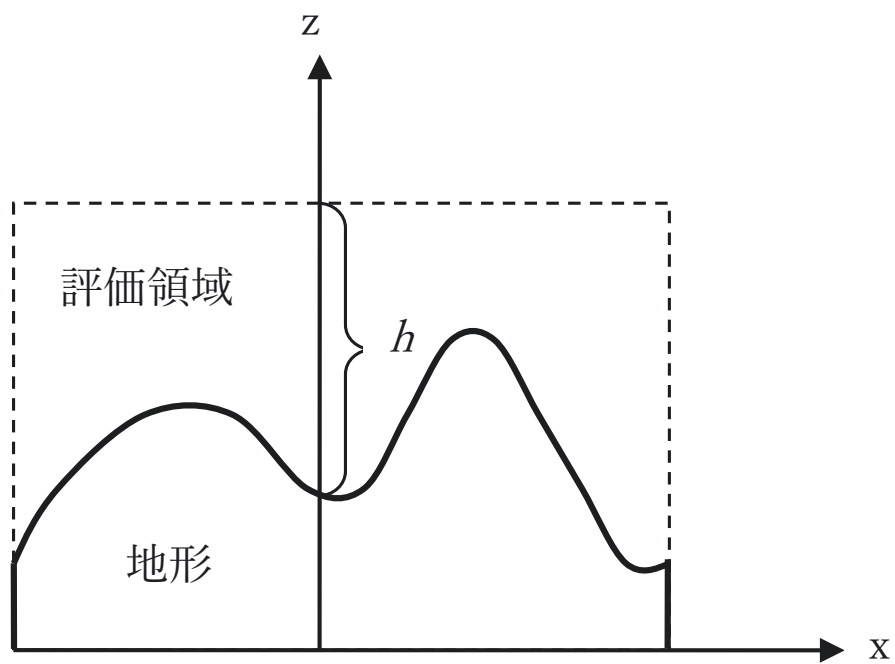


図 3-1 地形上の評価領域

3.2.2. 座標変換

標高や気象観測所位置は球座標の緯度経度で指定され、その球座標上で標高や風向・風速が与えられる。しかし、解析は xy 座標（直交座標系）で行うため、解析を行うには球面を平面に投影した地図座標への変換が必要となる。この時、ベクトル量である風向・風速については、 x と y のそれぞれの正方向が東向と北向に一致するとは限らないので、回転変換を行う必要がある。さらに、地図座標上の距離と実際の距離も差異があるため、質量保存則についても変換が必要となる。

(1) 緯度経度から xy 座標への座標変換

球から平面への投影では、方位、距離及び面積等の諸量がすべて保存されないので、歪が生じる。このため用途に応じて投影法が選ばれる。本コードでは、対象施設を中心とした 30 km から 50 km 程度を評価することを目的としているため、投影原点近傍で歪が小さいポーラーステレオ図法による地図座標を採用することとした。

ポーラーステレオ図法による地図座標への変換は次のようになる。

$$x_m = R(1 + \sin \varphi_0) \tan \frac{\xi}{2} \sin(\lambda - \lambda_0) \quad (3.11)$$

$$y_m = R(1 + \sin \varphi_0) \left\{ \tan \frac{\xi_0}{2} - \tan \frac{\xi}{2} \cos(\lambda - \lambda_0) \right\} \quad (3.12)$$

$$\varphi = \frac{\pi}{2} - 2 \tan^{-1} \left\{ \frac{\sqrt{(y_m - y_0)^2 + x_m^2}}{R(1 + \sin \varphi_0)} \right\} \quad (3.13)$$

$$\lambda = \lambda_0 + \sin^{-1} \left\{ \frac{x_m}{\sqrt{(y_m - y_0)^2 + x_m^2}} \right\} \quad (3.14)$$

$$m = \frac{1 + \sin \varphi}{2 \cos^2 \frac{\xi}{2}} \quad (3.15)$$

ここで、

- R : 地球の半径 (=6,371 km)
- φ_0, λ_0 : 投影原点の緯度、経度 (radian)
- φ, λ : 評価地点の緯度、経度 (radian)
- x_m, y_m : 地図上の xy 座標 (km)
- y_0 : 極から投影原点までの距離 ($y_0 = R(1 + \sin \varphi_0) \tan(\xi_0/2)$)
- m : マップファクター
- $\xi_0 = \pi/2 - \varphi_0$
- $\xi = \pi/2 - \varphi$

である。

マップファクターは地図投影に伴う距離の歪を表す係数で、(投影後の距離) / (実距離) で表される。地図座標の x_m, y_m と実距離に対する x, y の関係は次のようになる。

$$x_m = m \cdot x \quad (3.16)$$

$$y_m = m \cdot y \quad (3.17)$$

このマップファクターを微分量の発散に考慮すると²⁰⁾、 z 方向に平均化された質量保存則（式 3.10）は、地図座標上では次のようになる。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + m^2 \left\{ \frac{\partial \left(\frac{u_m}{m} \cdot h \right)}{\partial x_m} + \frac{\partial \left(\frac{v_m}{m} \cdot h \right)}{\partial y_m} \right\} + w = 0 \quad (3.18)$$

ここで、

u_m, v_m : 地図座標上での風向・風速の x 成分と y 成分である。

(2) 風向・風速の回転変換

水平風向・風速の東向き成分及び北向き成分をそれぞれ U 及び V とすると、地図座標上での x 方向成分 u_m 及び y 方向成分 v_m への変換は、次のような回転変換になる。

$$\begin{bmatrix} u_m \\ v_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta & -\sin \delta \\ \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ V \end{bmatrix}, \quad \delta = a(\lambda - \lambda_0) \quad (3.19)$$

ここで、

U, V : 水平風向・風速の東向きと北向き成分
 u_m, v_m : 地図座標における水平風向・風速の x 、 y 成分
 λ_0, λ : 投影原点の経度、評価地点の経度
 $a = 1.0$ (ポーラーステレオ図法の時)

である。

なお、地図座標上の風向・風速を緯度経度の球座標上の風向・風速成分にするには、逆変換を行わなければならない。

3.2.3. 初期風向・風速場作成

評価対象領域内の気象観測所は通常数地点であり、それぞれの観測高さも様々である。風向・風速場を作成するには、これら気象観測所で観測された風向・風速を評価格子上に補間する必要がある。また、本コードでは z 方向については平均化した風向・風速を計算する必要がある。

初めのステップとして風向・風速の z 方向への平均化を行う。観測風向・風速の z 方向に平均化した風向・風速は、風向・風速のべき乗則を考慮して、次のようにして計算する¹⁸⁾。

$$\begin{aligned}\bar{v}_j^{obs} &= \frac{v_j^{obs}}{h_j} \int_{z_0}^{h_j} \left(\frac{z}{z_0}\right)^p dz \\ &= \frac{v_j^{obs}}{h_j} \frac{z_0}{p+1} \left\{ \left(\frac{h_j}{z_0}\right)^{p+1} - 1 \right\}\end{aligned}\quad (3.20)$$

ここで、

- $\bar{v}_j^{obs}$: 観測地点 j で観測された風向・風速の z 方向に平均化した風向・風速
- v_j^{obs} : 観測地点 j で観測された風向・風速
- h_j : 観測地点 j における地表面から混合層までの高さ
- z_0 : 観測高さ（すべての地点で 6.0 m を仮定）
- p : べき乗則の指数（0.14 を仮定）

である。

次に、 z 方向に平均化した風向・風速を水平方向に補間する。水平方向への補間は、観測地点と評価地点との距離の逆数に対する重み平均として、次のようにして求める。

$$\bar{v}_i^0 = \frac{\sum_j \frac{\bar{v}_j^{obs}}{r_{ij}}}{\sum_j \frac{1}{r_{ij}}}\quad (3.21)$$

ここで、

- $\bar{v}_i^0$: 評価地点 i 上の補間風向・風速（初期風向・風速）
- r_{ij} : 評価地点 i と観測地点 j との間の距離

である。

なお、補間風向・風速場は質量保存則の調節を行う前の初期風向・風速場ということで、上付き添え字ゼロを付けて表した。

3.2.4. 調節風向・風速場作成

初期風向・風速場は、観測風向・風速を補間しただけであるため、質量保存則を当然満たさない。ここでは、初期風向・風速場に対して質量保存則を満たすように調節する方法について説明する。初めに直交座標系における調節風向・風速場を求める方法について説明し、次に評価を行いたい地図座標系上へ拡張する。

(1) 直交座標系の調節風向・風速場作成

直交座標系における初期風向・風速場を $v^0 = [u^0, v^0, w^0]^t$ とし、質量保存則を満たす風向・風速場を $v = [u, v, w]^t$ とした時、評価対象領域に亘って初期風向・風速場と質量保存則を満たす風向・風速場との差の2乗が、質量保存則の拘束条件の下で最小になる v を求めることを考える。

$$\min \int_{\Omega} [(u - u^0)^2 + (v - v^0)^2 + (w - w^0)^2] d\Omega \quad (3.22)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(u \cdot h)}{\partial x} + \frac{\partial(v \cdot h)}{\partial y} + w = 0 \quad (3.23)$$

すなわち、いくつか存在する質量保存則を満たす v の中から初期風向・風速場に最も近い質量保存則を満たす風向・風速場（調節風向・風速場と呼ぶ）を求めることになる。このような拘束条件の下で極値を求める問題は、ラグランジュの未定乗数法によって定式化でき、次のようなラグランジュ乗数 λ を用いて u 、 v 、 w 、 λ の汎関数の停留値を求める問題に置き換えられる。

$$I(u, v, w, \lambda) = \int_{\Omega} \left[\frac{\alpha_H}{2} \{(u - u^0)^2 + (v - v^0)^2\} + \frac{\alpha_V}{2} (w - w^0)^2 + \lambda \left\{ \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(u \cdot h)}{\partial x} + \frac{\partial(v \cdot h)}{\partial y} + w \right\} \right] d\Omega \quad (3.24)$$

ここで、

Ω	: 評価対象領域
α_H	: 水平速度成分のガウス精度係数
α_V	: 鉛直速度成分のガウス精度係数
λ	: ラグランジュ乗数

である。

式 3.24 は水平風向・風速に対する汎関数であるが、最小値を求めることは同じであり、扱いやすくなるため、以下では水平フラックスに対する汎関数を考えることにする¹⁸⁾。

$$I(U, V, w, \lambda) = \int_{\Omega} \left[\frac{\alpha_H}{2} \{(U - U^0)^2 + (V - V^0)^2\} + \frac{\alpha_V}{2} (w - w^0)^2 + \lambda \left\{ \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + w \right\} \right] d\Omega \quad (3.25)$$

ここで、

$$\begin{aligned} U^0 &= u^0 \times h, & U &= u \times h \\ V^0 &= v^0 \times h, & V &= v \times h \end{aligned}$$

である。

式 3.25 の汎関数が最小値になるのは第 1 変分がゼロになる場所である。汎関数 (3.25) の第 1 変分は 2 次の微少量を無視すると次のようになる。

$$\begin{aligned} \delta I(U, V, w, \lambda) &= I(U + \delta U, V + \delta V, w + \delta w, \lambda + \delta \lambda) - I(U, V, w, \lambda) \\ &= \int_{\Omega} [\alpha_H^2 (U - U^0) \delta U + \alpha_H^2 (V - V^0) \delta V + \alpha_V^2 (w - w^0) \delta w \\ &\quad + \lambda \left(\frac{\partial \delta U}{\partial x} + \frac{\partial \delta V}{\partial x} + \delta w \right) + \delta \lambda \left(\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + w \right)] d\Omega \end{aligned} \quad (3.26)$$

式 3.26 で $\lambda \cdot (\partial \delta U / \partial x)$ 、 $\lambda \cdot (\partial \delta V / \partial y)$ に対して部分積分を行い、各微少量を含む項で整理すると次のようになる。

$$\begin{aligned} \delta I(U, V, w, \lambda) &= \int_{\Omega} \left[\left\{ \alpha_H^2 (U - U^0) - \frac{\partial \lambda}{\partial x} \right\} \delta U + \left\{ \alpha_H^2 (V - V^0) - \frac{\partial \lambda}{\partial y} \right\} \delta V + \{ \alpha_V^2 (w - w^0) + \lambda \} \delta w \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + w \right) \delta \lambda \right] d\Omega + \int_s \lambda \delta U_n ds \end{aligned} \quad (3.27)$$

式 3.27 の最後の積分は、2 次元空間なので領域 Ω の周囲に沿った線積分で表され、 δU_n は風向・風速の外向き法線成分である。 $\delta I = 0$ となるのは、次のような条件の時となる。

$$U = U^0 + \frac{1}{\alpha_H^2} \frac{\partial \lambda}{\partial x}, \quad V = V^0 + \frac{1}{\alpha_H^2} \frac{\partial \lambda}{\partial y}, \quad w = w^0 - \frac{\lambda}{\alpha_V^2} \quad (3.28)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + w = 0 \quad (3.29)$$

$$\lambda \delta U_n = 0 \quad (\text{領域 } \Omega \text{ の周囲において}) \quad (3.30)$$

式 3.29 は U 、 V 、 w に対する質量保存則を表し、それらは初期風向・風速 U^0 、 V^0 、 w^0 を λ の含む項によって調節する形となっている。未知数の λ は、式 3.29 の質量保存則に式 3.28 の U 、 V 、 w を代入した次の偏微分方程式を解くことによって求められる。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial U^0}{\partial x} + \frac{\partial V^0}{\partial y} + w^0 + \frac{1}{\alpha_H^2} \left(\frac{\partial^2 \lambda}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \lambda}{\partial y^2} \right) - \frac{\lambda}{\alpha_V^2} = 0 \quad (3.31)$$

ここで、境界条件は式 3.30 から、領域 Ω の周囲において、 $\lambda = 0$ (調節風向・風速は初期風向・風速に等しい) または $\delta U_n = 0$ (調節風向・風速の法線成分がゼロ) である。

なおガウスの精度係数 α_H と α_V は、それらが大きければ掛け算されている風向・風速は相対

的に小さく求められ、逆に小さければ風向・風速は大きく求められる。大気安定度は、風向・風速が速い時は不安定で、逆に遅い時は安定であることが知られており、ガウスの精度係数は大気安定度と関連付けられる。ガウスの精度係数の定め方は後に示す。

(2) 地図座標系の調節風向・風速場作成

地図座標と実距離との間には式 3.16 及び式 3.17 の関係があり、地図座標上での質量保存則は式 3.18 のように表され、地図座標上では調節風向・風速場の方程式が異なる。地図座標上における式 3.25 に対応した汎関数は次のようになる。

$$\begin{aligned}
 I\left(\frac{U_m}{m}, \frac{V_m}{m}, w, \lambda\right) &= \int_{\Omega} \left[\frac{\alpha_H}{2} \left\{ \left(\frac{U_m}{m} - \frac{U_m^0}{m} \right)^2 + \left(\frac{V_m}{m} - \frac{V_m^0}{m} \right)^2 \right\} + \frac{\alpha_V}{2} (w - w^0)^2 \right] \frac{1}{m^2} dx_m dy_m \\
 &\quad + \int_{\Omega} \lambda \left[\frac{\partial h}{\partial t} + m^2 \left\{ \frac{\partial \left(\frac{U_m}{m} \right)}{\partial x_m} + \frac{\partial \left(\frac{V_m}{m} \right)}{\partial y_m} \right\} + w \right] \frac{1}{m^2} dx_m dy_m
 \end{aligned} \tag{3.32}$$

ここで、

$$\begin{aligned}
 U_m^0 &= u_m^0 \cdot h, & U_m &= u_m \cdot h \\
 V_m^0 &= v_m^0 \cdot h, & V_m &= v_m \cdot h
 \end{aligned}$$

である。

上式を扱いやすいように書き直すと次のようになる。

$$\begin{aligned}
 I\left(\frac{U_m}{m}, \frac{V_m}{m}, \frac{w}{m^2}, \lambda\right) &= \frac{1}{2} \int_{\Omega} \left[\frac{\alpha_H}{m^2} \left\{ \left(\frac{U_m}{m} - \frac{U_m^0}{m} \right)^2 + \left(\frac{V_m}{m} - \frac{V_m^0}{m} \right)^2 \right\} + \alpha_V m^2 \left(\frac{w}{m^2} - \frac{w^0}{m^2} \right)^2 \right] dx_m dy_m \\
 &\quad + \int_{\Omega} \lambda \left\{ \frac{\partial \left(\frac{h}{m^2} \right)}{\partial t} + \frac{\partial \left(\frac{U_m}{m} \right)}{\partial x_m} + \frac{\partial \left(\frac{V_m}{m} \right)}{\partial y_m} + \frac{w}{m^2} \right\} dx_m dy_m
 \end{aligned} \tag{3.33}$$

式 3.33 の汎関数が最小になるのは第 1 変分がゼロになる場所である。同様にして 2 次の微少量を無視し、部分積分を行うと次のようになる。

$$\begin{aligned}
 &\delta I\left(\frac{U_m}{m}, \frac{V_m}{m}, \frac{w}{m^2}, \lambda\right) \\
 &= \int_{\Omega} \left[\frac{\alpha_H^2}{m^2} \left\{ \left(\frac{U_m}{m} - \frac{U_m^0}{m} \right) \frac{\delta U_m}{m} + \left(\frac{V_m}{m} - \frac{V_m^0}{m} \right) \frac{\delta V_m}{m} \right\} + \left\{ \alpha_V^2 m^2 \left(\frac{w}{m^2} - \frac{w^0}{m^2} \right) \right\} \frac{\delta w}{m^2} \right] dx_m dy_m \\
 &\quad + \int_{\Omega} \delta \lambda \left\{ \frac{\partial \left(\frac{h}{m^2} \right)}{\partial t} + \frac{\partial \left(\frac{U_m}{m} \right)}{\partial x_m} + \frac{\partial \left(\frac{V_m}{m} \right)}{\partial y_m} + \frac{w}{m^2} \right\} dx_m dy_m \\
 &\quad + \int_{\Omega} \lambda \left\{ \frac{\partial \left(\frac{\delta U_m}{m} \right)}{\partial x_m} + \frac{\partial \left(\frac{\delta V_m}{m} \right)}{\partial y_m} + \frac{\delta w}{m^2} \right\} dx_m dy_m
 \end{aligned} \tag{3.34}$$

$$\begin{aligned}
& \delta I \left(\frac{U_m}{m}, \frac{V_m}{m}, \frac{w}{m^2}, \lambda \right) \\
&= \int_{\Omega} \left[\left\{ \frac{\alpha_H^2}{m^2} \left(\frac{U_m}{m} - \frac{U_m^0}{m} \right) - \frac{\partial \lambda}{\partial x} \right\} \frac{\delta U_m}{m} + \left\{ \frac{\alpha_H^2}{m^2} \left(\frac{V_m}{m} - \frac{V_m^0}{m} \right) - \frac{\partial \lambda}{\partial y} \right\} \frac{\delta V_m}{m} \right. \\
&+ \left. \left\{ \alpha_V^2 m^2 \left(\frac{w}{m^2} - \frac{w^0}{m^2} \right) + \lambda \right\} \frac{\delta w}{m^2} + \left\{ \frac{\partial \left(\frac{h}{m^2} \right)}{\partial t} + \frac{\partial \left(\frac{U_m}{m} \right)}{\partial x_m} + \frac{\partial \left(\frac{V_m}{m} \right)}{\partial y_m} + \frac{w}{m^2} \right\} \delta \lambda \right] dx_m dy_m \\
&+ \int_s \lambda \frac{\delta U_m}{m} ds
\end{aligned} \tag{3.35}$$

ゆえに、 $\delta I = 0$ となるのは次のような条件の時となる。

$$\frac{U_m}{m} = \frac{U_m^0}{m} + \frac{m^2}{\alpha_H^2} \frac{\partial \lambda}{\partial x_m}, \quad \frac{V_m}{m} = \frac{V_m^0}{m} + \frac{m^2}{\alpha_H^2} \frac{\partial \lambda}{\partial y_m}, \quad \frac{w}{m^2} = \frac{w^0}{m^2} - \frac{\lambda}{\alpha_V^2 m^2} \tag{3.36}$$

$$\frac{\partial \left(\frac{h}{m^2} \right)}{\partial t} + \frac{\partial \left(\frac{U_m}{m} \right)}{\partial x_m} + \frac{\partial \left(\frac{V_m}{m} \right)}{\partial y_m} + \frac{w}{m^2} = 0 \tag{3.37}$$

$$\lambda \frac{\delta U_{m,n}}{m} = 0 \quad (\text{領域 } \Omega \text{ の周囲において}) \tag{3.38}$$

すなわち、直交座標系上の諸量を次のように置き換えた方程式を解くと、地図座標系上の調節風向・風速場が求められる。

$$\begin{array}{lll}
U & \rightarrow & U_m/m \\
V & \rightarrow & V_m/m \\
W & \rightarrow & w/m^2 \\
H & \rightarrow & h/m^2 \\
\alpha_H & \rightarrow & \alpha_h/m^2 \\
\alpha_V & \rightarrow & \alpha_v \times m^2
\end{array}$$

初期風向・風速場に対して質量保存則を満たすようにするためには、上記の式 3.36 及び式 3.37 の偏微分方程式を解き、調節風向・風速場を求めなければならない。その場合、この偏微分方程式は解析的に解くことはできないため、数値計算によって解くことになる。本コードでは、境界条件設定の容易さ、フラックス保存性、計算の高速化等から有限要素法を使用する。有限要素法を用いた風向・風速場作成の方法については付録に示す。

(3) ガウスの精度係数

ガウスの精度係数 α_H と α_V は、それぞれ風向・風速の水平成分と鉛直成分の大きさを決める係数である。この係数は大気安定度と関連付けられ、Chan and Sugiyama¹⁹⁾では最も簡単な方法として、全評価対象領域内で係数は一定と仮定し、 $\alpha_H = 1$ 、 $\alpha_V = 1/\alpha$ とし、 α は大気安定度毎に

表 3-1 のように定めている。本コードでもこの方法を採用した。

表 3-1 ガウスの精度係数

大気安定度*	係数： α
非常に不安定 (A、B)	5.0
少し不安定 (C)	2.0
中立 (D)	1.0
少し安定 (E)	0.5
非常に安定 (F、G)	0.2

*A、B、C、D、E、F、Gは大気安定度の分類

3.3. 大気拡散解析及び被ばく線量評価

3.3.1 大気拡散解析

放射性物質の大気拡散解析には、迅速な評価が可能なパフモデルを採用した。パフモデルは、放出物質の一塊を表すパフが次々と放出され、それらが風に乗って移流し、ガウス分布型で拡がっていくというモデルである。境界条件として、平坦な地表面と混合層上面での反射が考慮可能である。しかし、凹凸のある地形上の評価は直接的にはできないが、放出高さを調節することによって近似的に評価が可能である。

3.3.1.1 パフモデル

障害物が何もない空間において、放射性物質濃度がガウス分布型で拡がると仮定した時、1 つのパフによる濃度分布は次のように与えられる。

$$\chi(x, y, z) = \frac{Q}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp \left[-\frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{x - x_0}{\sigma_x} \right)^2 + \left(\frac{y - y_0}{\sigma_y} \right)^2 + \left(\frac{z - z_0}{\sigma_z} \right)^2 \right\} \right] \quad (3.39)$$

ここで、

x, y, z	: 評価地点の座標 (m)
x_0, y_0, z_0	: パフ中心の座標 (m)
$\chi(x, y, z)$	: 評価地点 (x, y, z) における空気中濃度 (Bq/m ³)
Q	: パフの放射性物質質量 (Bq)
σ_x	: x 方向の拡散係数 (m)
σ_y	: y 方向の拡散係数 (m)
σ_z	: z 方向の拡散係数 (m)

である。

式 3.39 がパフモデルの基本式であり、移流によってパフの中心が移動し、拡散によってパフが拡がっていく。なお、 x 、 y 方向を水平方向とし z 方向を鉛直方向とする時、以下では水平方向の拡散は等方的であると仮定する ($\sigma_x = \sigma_y = \sigma_h$)。

式 3.39 のパフモデルの基本式は、何も障害物がない空間での拡散を表していたが、平坦な地表面だけがあつた場合の地表面反射を考える。実効放出高さ（放出高さ+吹き上げ高さ）を h_e とする時、地表面での反射は地表面を鏡と仮定し、そこに映る像からパフが放出されるとして求める鏡映法（図 3-2 参照）を用いると、濃度は次式のように表される。

$$\chi(x, y, z) = \frac{Q}{(2\pi)^{3/2} \sigma_h^2 \sigma_v} \exp \left[-\frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{x - x_0}{\sigma_h} \right)^2 + \left(\frac{y - y_0}{\sigma_h} \right)^2 + \left(\frac{z - h_e}{\sigma_v} \right)^2 \right\} \right] \\ \times \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z + h_e}{\sigma_v} \right)^2 \right] \quad (3.40)$$

ここで、

- σ_h : 水平方向の拡散係数 (m)
 σ_v : 鉛直方向の拡散係数 (m)
 h_e : 実効放出高さ (m)

である。

次に、 z 方向には地表面と混合層上面の 2 つがあり、それら 2 面間で反射する場合を考える。上記と同様にして鏡映法によって評価できるが、地表面だけの場合と異なり混合層上面があることによって多重反射となる。地表面から反射していく場合は図 3-3 (1/2) のように表されるが、一方、混合層上面から反射していく場合は図 3-3 (2/2) のように表される。反射はこれらの重ね合わせで表され、次のようになる。

$$\begin{aligned}
 \chi(x, y, z) = & \frac{Q}{(2\pi)^{3/2}\sigma_y\sigma_z} \exp \left[-\frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{x-x_0}{\sigma_y} \right)^2 + \left(\frac{y-y_0}{\sigma_y} \right)^2 + \left(\frac{z-h_e}{\sigma_z} \right)^2 \right\} \right] \\
 & \times \exp \left[-\frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{z-(-h_e)}{\sigma_z} \right)^2 + \left(\frac{z-(2H+h_e)}{\sigma_z} \right)^2 + \left(\frac{z-(-2H-h_e)}{\sigma_z} \right)^2 + \left(\frac{z-(4H+h_e)}{\sigma_z} \right)^2 \right. \right. \\
 & \quad \left. \left. + \left(\frac{z-(-4H-h_e)}{\sigma_z} \right)^2 + \dots \right\} \right] \\
 & \times \exp \left[-\frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{z-(2H-h_e)}{\sigma_z} \right)^2 + \left(\frac{z-(-2H+h_e)}{\sigma_z} \right)^2 + \left(\frac{z-(4H-h_e)}{\sigma_z} \right)^2 + \left(\frac{z-(-4H+h_e)}{\sigma_z} \right)^2 + \dots \right\} \right]
 \end{aligned} \tag{3.41}$$

ここで、

- H : 混合層厚さ (m)

である。

上式を整理すると、次のようになる。

$$\begin{aligned}
 \chi(x, y, z) = & \frac{Q}{(2\pi)^{3/2}\sigma_h^2\sigma_v} \exp \left[-\frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{x-x_0}{\sigma_h} \right)^2 + \left(\frac{y-y_0}{\sigma_h} \right)^2 \right\} \right] \\
 & \times \exp \left[-\frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{z-(-h_e)}{\sigma_v} \right)^2 + \left(\frac{z-(2H+h_e)}{\sigma_v} \right)^2 + \left(\frac{z-(-2H-h_e)}{\sigma_v} \right)^2 + \left(\frac{z-(4H+h_e)}{\sigma_v} \right)^2 \right. \right. \\
 & \quad \left. \left. + \left(\frac{z-(-4H-h_e)}{\sigma_v} \right)^2 + \dots \right\} \right] \\
 & \times \exp \left[-\frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{z-(+h_e)}{\sigma_v} \right)^2 + \left(\frac{z-(2H-h_e)}{\sigma_v} \right)^2 + \left(\frac{z-(-2H+h_e)}{\sigma_v} \right)^2 + \left(\frac{z-(4H-h_e)}{\sigma_v} \right)^2 \right. \right. \\
 & \quad \left. \left. + \left(\frac{z-(-4H+h_e)}{\sigma_v} \right)^2 + \dots \right\} \right] \\
 = & \frac{Q}{(2\pi)^{3/2}\sigma_h^2\sigma_v} \exp \left[-\frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{x-x_0}{\sigma_h} \right)^2 + \left(\frac{y-y_0}{\sigma_h} \right)^2 \right\} \right]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \times \exp \left[-\frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{z - (-h_e)}{\sigma_v} \right)^2 + \left(\frac{z - (2H - h_e)}{\sigma_v} \right)^2 + \left(\frac{z - (-2H - h_e)}{\sigma_v} \right)^2 + \left(\frac{z - (4H - h_e)}{\sigma_v} \right)^2 \right. \right. \\
& \quad \left. \left. + \left(\frac{z - (-4H - h_e)}{\sigma_v} \right)^2 + \dots \right\} \right] \\
& \times \exp \left[-\frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{z - (+h_e)}{\sigma_v} \right)^2 + \left(\frac{z - (2H + h_e)}{\sigma_v} \right)^2 + \left(\frac{z - (-2H + h_e)}{\sigma_v} \right)^2 + \left(\frac{z - (4H + h_e)}{\sigma_v} \right)^2 \right. \right. \\
& \quad \left. \left. + \left(\frac{z - (-4H + h_e)}{\sigma_v} \right)^2 + \dots \right\} \right] \\
& = \frac{Q}{(2\pi)^{3/2} \sigma_h^2 \sigma_v} \exp \left[-\frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{x - x_0}{\sigma_h} \right)^2 + \left(\frac{y - y_0}{\sigma_h} \right)^2 \right\} \right] \\
& \times \exp \left[-\frac{1}{2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left\{ \frac{z - (2nH - h_e)}{\sigma_v} \right\}^2 \right] \times \exp \left[-\frac{1}{2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left\{ \frac{z - (2nH + h_e)}{\sigma_v} \right\}^2 \right] \quad (3.42)
\end{aligned}$$

式 3.42 において、 n が大きくなるにつれて指数項は急速にゼロに近づくため、本コードでは $n = -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4$ までを考慮することとした。

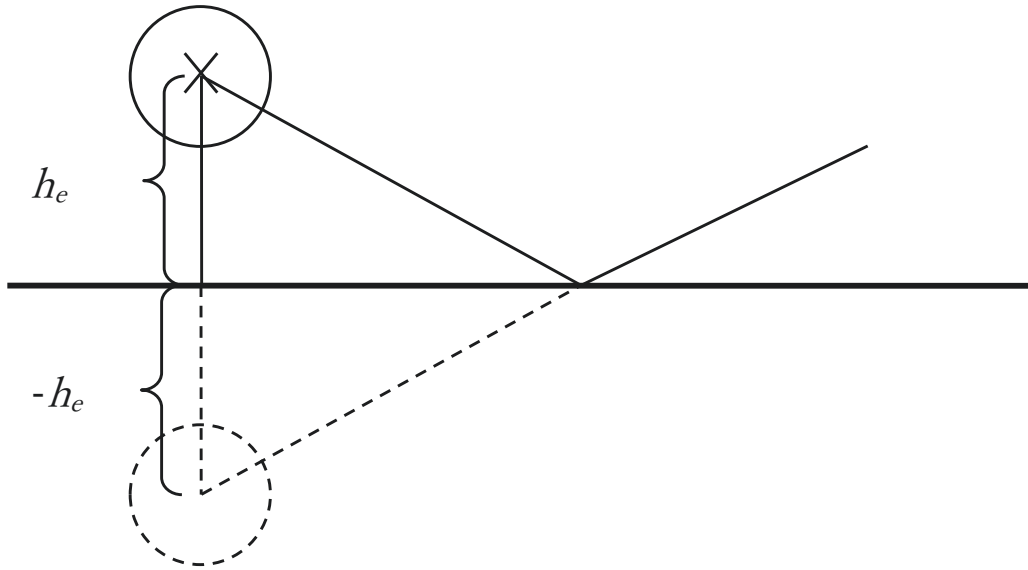
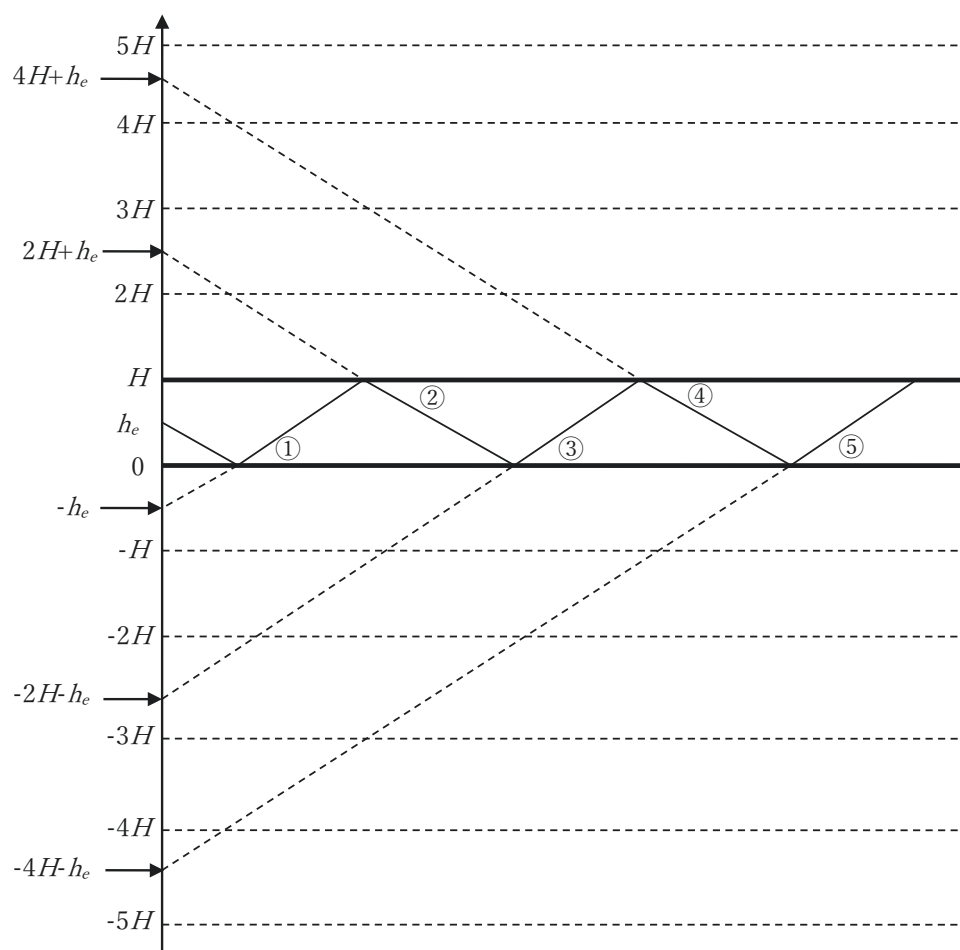
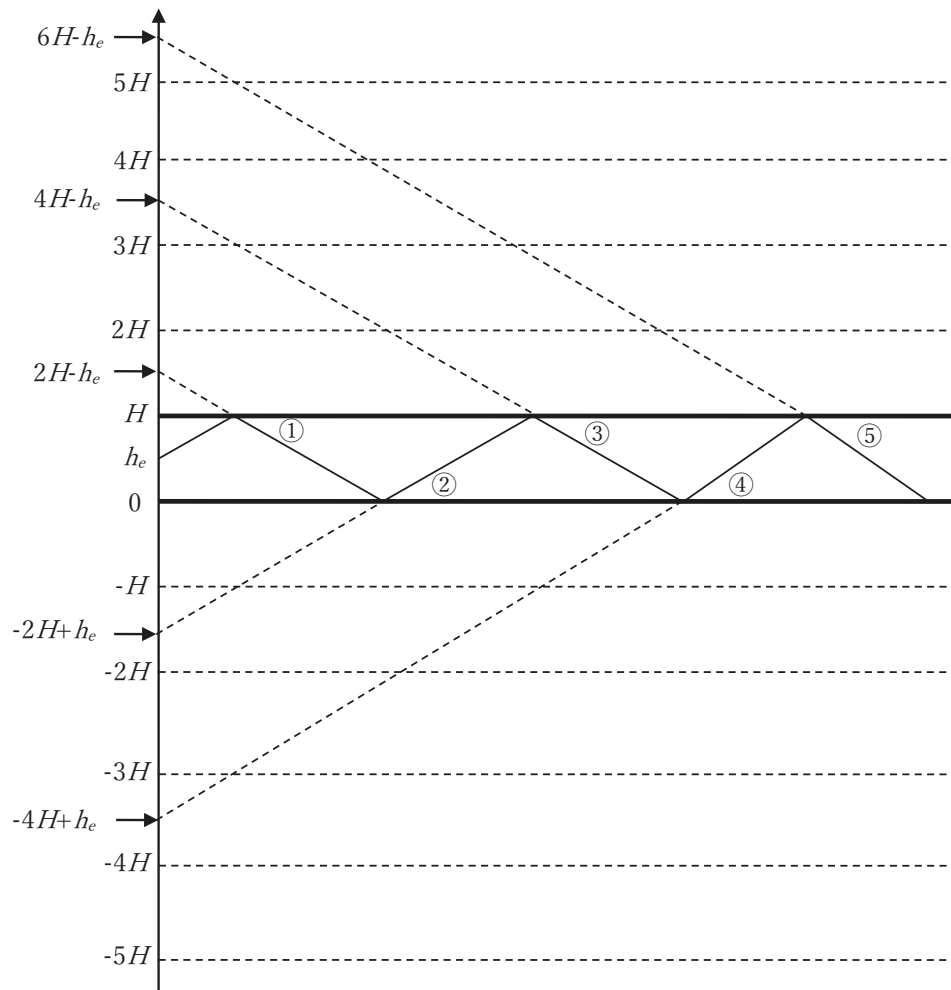


図 3-2 平坦な地形における反射



反射順番	仮想放出高さ
①	$-h_e$
②	$2H+h_e$
③	$-2H-h_e$
④	$4H+h_e$
⑤	$-4H-h_e$

図 3-3 地表面と混合層上面の間の反射 (1/2)



反射順番	仮想放出高さ
①	$2H h_e$
②	$-2H+h_e$
③	$4H h_e$
④	$-4H+h_e$
⑤	$6H h_e$

図 3-3 地表面と混合層上面の間の反射 (2/2)

3.3.1.2 地形を考慮した補正

パフの評価地点 (x, y, z) における放射性物質濃度は式 3.42 で表される。パフの移流は中心位置 (x_0, y_0) の移動で表され、水平方向の風向・風速を用いて $x_0(t + \Delta t) = x_0(t) + u \times \Delta t$ 及び $y_0(t + \Delta t) = y_0(t) + v \times \Delta t$ で与えられる。山等の障害物があった時には、それを避けるように吹く風に乗ってパフは移動するが、障害物の両側にパフが分裂したり伸びたり合体したりは考慮できない。また、式 3.42 ではパフの z 方向の位置は実効放出高さで固定されている。

地形の影響は、パフ中心直下の標高と評価地点の標高を考慮した次のような局所実効放出高さ

を用いて、その影響を補正する。

$$h_e' = h_e + T_c - T_r \quad (3.43)$$

ここで、

h_e' : 局所実効放出高さ (m)
 T_r : 評価地点の標高 (m)
 T_c : パフ中心直下の標高 (m)

である。

式 3.43 の局所実効放出高さは、パフ中心直下の標高を加えることによってパフは地形に沿って移動することとなり (図 3-4 (1/2))、ある瞬間のパフの位置における放射性物質濃度は評価地点の標高を引くことにより、パフ中心からの高さを調節することで求めている (図 3-4 (2/2))。局所実効放出高さは、評価地点の標高によって正負の値を取り得るが、式 3.42 の z 成分の対称性により負の値となっても、正の値と寄与が同じとなる。

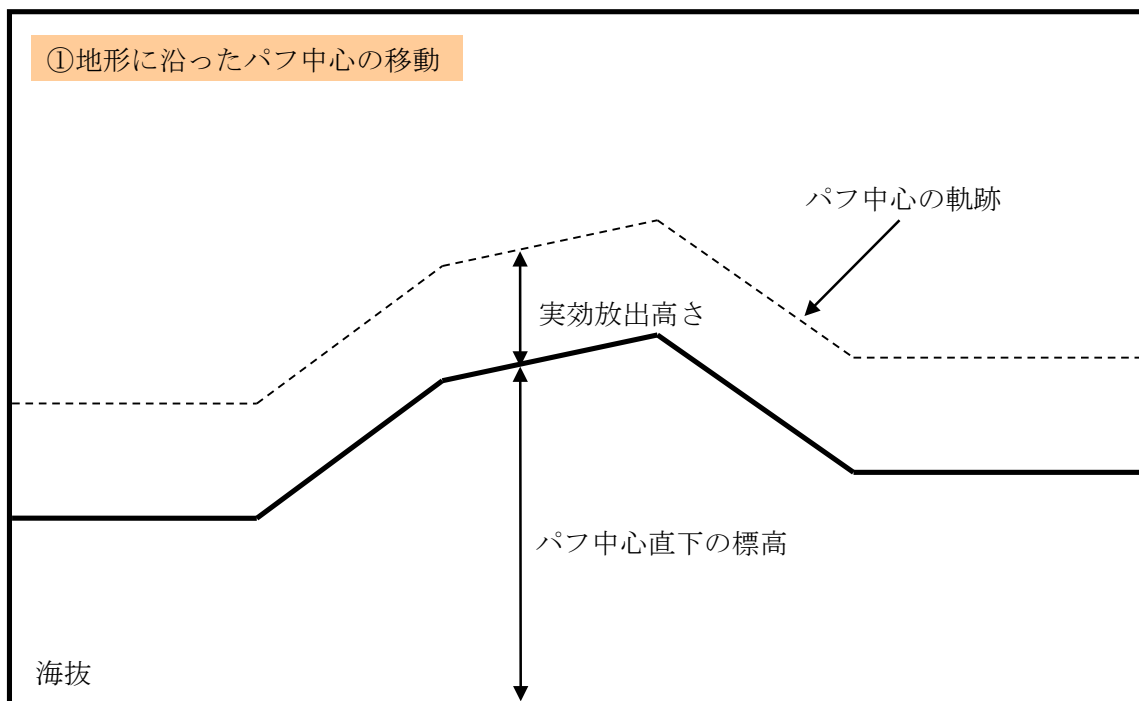


図 3-4 地形影響の補正 (1/2) (地形に沿ったパフ中心の移動)

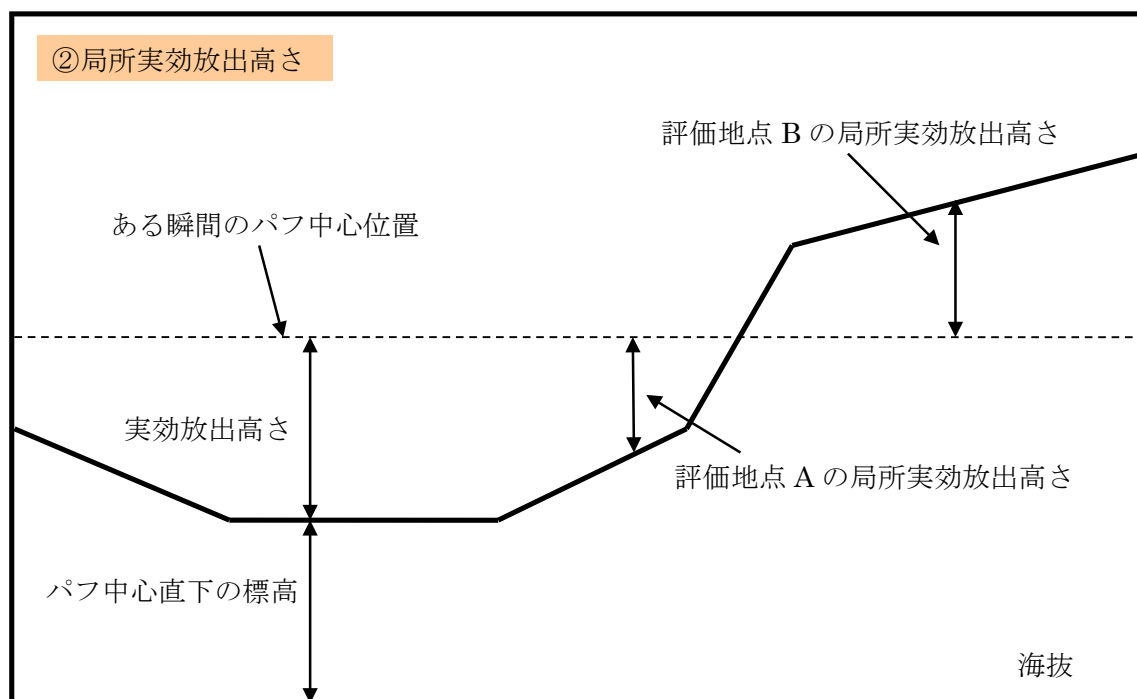


図 3-4 地形影響の補正 (2/2) (局所実効放出高さ)

3.3.1.3 拡散係数

拡散係数は (x, y, z) の 3 成分であるが、水平方向については等方的であるとし、水平及び鉛直成分の 2 成分と仮定する。さらに、拡散係数はパフの伝播距離と大気安定度の関数と仮定する。大気安定度は A から G の 7 つの離散的な値で定義され、拡散係数は大気安定度に関して不連続となる。すなわち、大気安定度が変化するところで拡散係数が不連続となる。この不連続性を解消するために仮想距離が導入される。

(1) 拡散係数の評価式

拡散係数は、MESOI2.0²¹⁾及び RASCAL3.0.5²²⁾でも採用されている、米国原子力規制委員会 (NRC) の評価式を使用した。

$$\sigma_h = a_h x^{0.9031} \quad (3.44)$$

$$\sigma_v = a_v(x) \cdot x^{b_v(x)} + c_v(x) \quad (3.45)$$

ここで、

- σ_h : 水平方向の拡散係数 (m)
- σ_v : 鉛直方向の拡散係数 (m)
- x : 放出地点からの伝播距離 (m)

である。

パラメータ $a_h, a_v(x), b_v(x), c_v(x)$ の値は大気安定度と伝播距離に依存し、表 3-2 のように与え

られている。

鉛直方向の拡散に関しては、無限に広がっていくのではなく、拡がりには制限を設ける。すなわち、鉛直方向の拡散係数が混合層厚さの 0.8 倍以上になった時、以後の鉛直方向の拡散係数は混合層厚さの 0.8 倍にする。

$$\begin{aligned} \sigma_v &= 0.8 \times H & (\sigma_v \geq 0.8 \times H) \\ \text{式 (3.45)} & & (\sigma_v < 0.8 \times H) \end{aligned}$$

表 3-2 拡散係数のパラメータ ²⁾

係数	伝播距離	大気安定度						
		A	B	C	D	E	F	G
a_h	すべての x	0.3658	0.2751	0.2089	0.1471	0.1046	0.0722	0.0481
$a_v(x)$	$x \leq 100 \text{ m}$	0.192	0.156	0.116	0.079	0.063	0.053	0.032
	$100 \text{ m} < x \leq 1,000 \text{ m}$	0.00066	0.0382	0.113	0.222	0.211	0.086	0.052
	$1,000 \text{ m} < x$	0.00024	0.055	0.113	1.26	6.73	18.05	10.83
$b_v(x)$	$x \leq 100 \text{ m}$	0.936	0.922	0.905	0.881	0.871	0.814	0.814
	$100 \text{ m} < x \leq 1,000 \text{ m}$	1.941	1.149	0.911	0.725	0.678	0.74	0.74
	$1,000 \text{ m} < x$	2.094	1.098	0.911	0.516	0.305	0.18	0.18
$c_v(x)$	$x \leq 100 \text{ m}$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	$100 \text{ m} < x \leq 1,000 \text{ m}$	9.27	3.3	0.0	-1.7	-1.3	-0.35	-0.21
	$1,000 \text{ m} < x$	-9.6	2.0	0.0	-13.0	-34.0	-48.6	-29.2

(2) 仮想距離の導入

例えば、大気安定度が $G \rightarrow D \rightarrow B \rightarrow D \rightarrow F$ と変化した時、水平方向の拡散係数は図 3-5 の破線のように変化する。大気安定度が変わる毎に拡散係数は不連続な変化を示し、不安定から安定へと大気安定度が変動するところでパフは収縮することになる。外的な作用がない限り拡散した放射性物質が再び集結することはない。

式 3.44 と式 3.45 をそのまま適用すれば、上記のようなことが起こり、大きな誤差を生じる可能性がある。このような不適切な現象を解消するため、仮想距離を導入してその仮想距離を用いて拡散係数を計算する。拡散係数は伝播距離と大気安定度の関数であるから、 $\sigma_i = \sigma(x_i, s_i)$ とし (x_i : 伝播距離、 s_i : 大気安定度)、伝播距離に対する逆関数を $x_i^v = \sigma^{-1}(\sigma_i, s_i)$ とする。この時仮想距離を次のように定義する。

$$x_{i-1}^v = \sigma^{-1}(\sigma_{i-1}, s_i) \quad (3.46)$$

ここで、

x_{i-1}^v : ステップ $(i-1)$ での仮想距離 ($x_0^v = 0$)

である。

大気安定度が前ステップではなく、現ステップであることに注意する。前ステップと現ステップで大気安定度が等しいならば、仮想距離は伝播距離と等しい。この仮想距離を用いて、実効距離を次のように定義する。

$$x_i^e = x_{i-1}^v + (x_i - x_{i-1}) \quad (3.47)$$

ここで、

x_i^e : ステップ i での実効距離

である。

大気安定度が一定であるならば、実効距離と伝播距離は等しい。この実効距離を用いて、ステップ i における拡散係数を求める。この実効距離から求めた実効距離に関する拡散係数を図 3-6 に示す。実効距離に関する拡散係数は不連続となっているが、距離の増加に伴って増加していることが分かる。

式 3.47 の実効距離を用いて求めた拡散係数を、元の伝播距離に関する拡散係数にすると図 3-7 のようになり、連続かつ増加関数となっている。

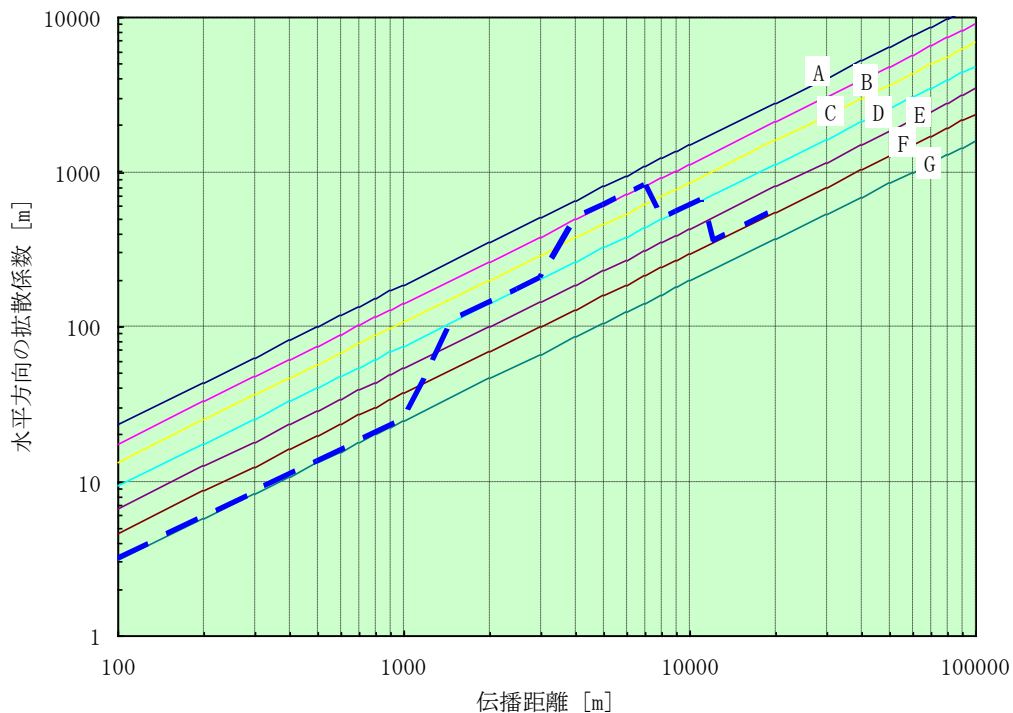


図 3-5 大気安定度の変化に伴う伝播距離に関する拡散係数

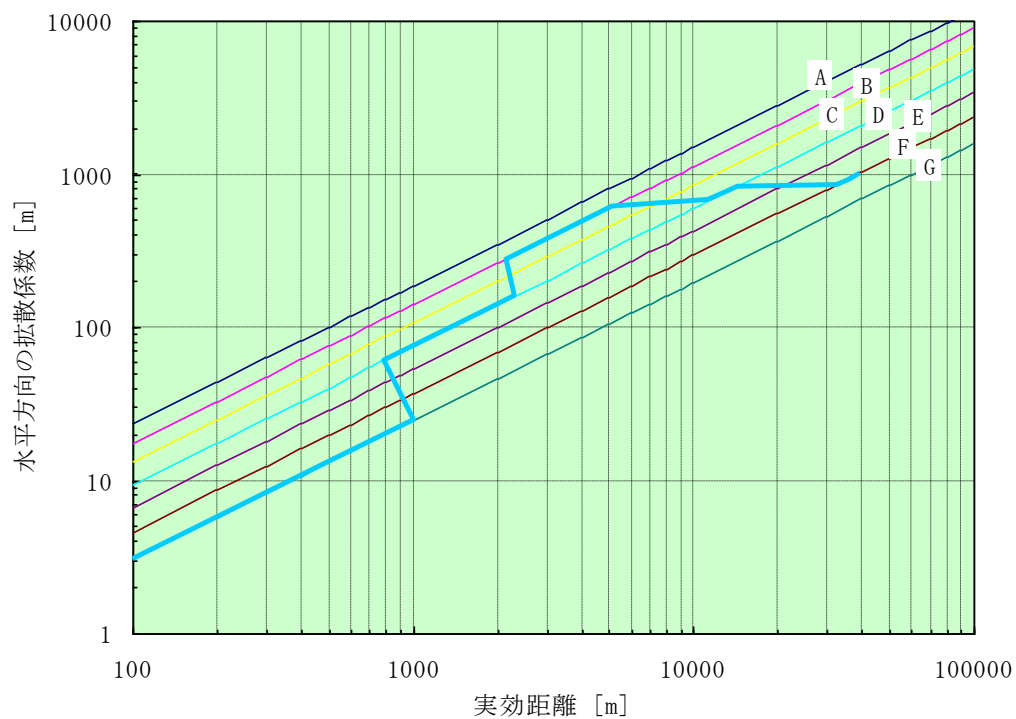


図 3-6 大気安定度の変化に伴う実効距離に関する拡散係数

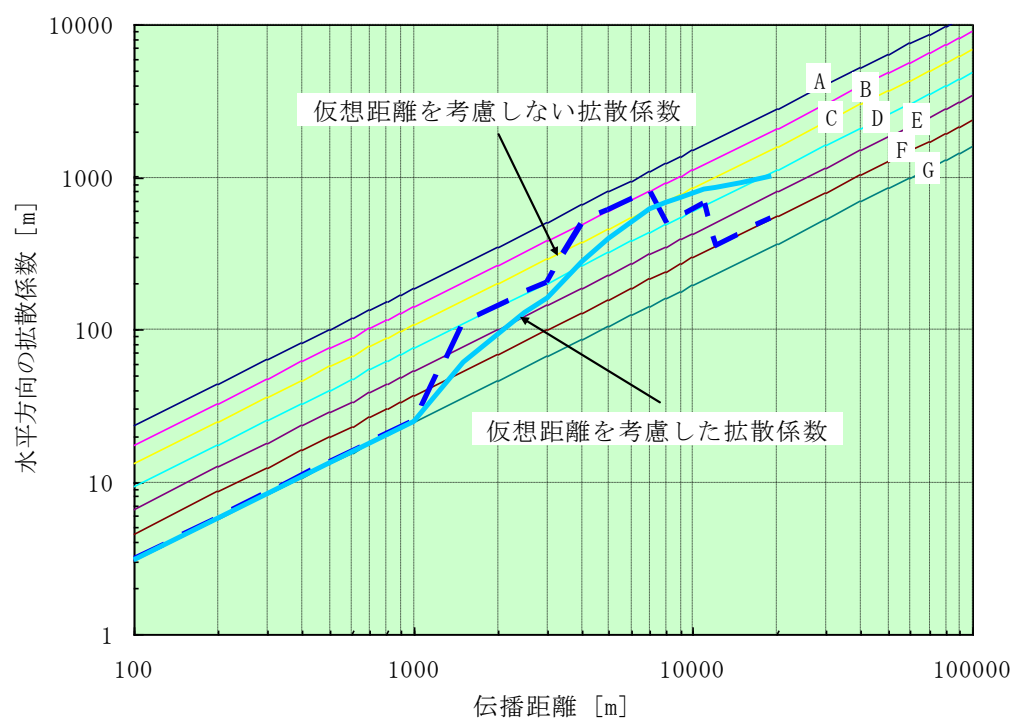


図 3-7 大気安定度の変化に伴う仮想距離を考慮した場合の拡散係数

3.3.1.4 鉛直方向の濃度が一樣になる場合

鉛直方向には地表面と混合層上面の 2 つの境界が存在しており、濃度分布はこの境界内に限定されている。放出されたパフは拡散に伴い拡がり、水平及び鉛直方向のガウス分布は徐々に広がっていき、鉛直方向は濃度分布範囲が限られているため一様な濃度分布となっていく。また、実効放出高さが混合層上面よりも高い場合には、放射性物質濃度分布が混合層内に限定されることを考慮すると、直ちに鉛直方向に混合が起こるとする。以上から鉛直方向の濃度分布が一様になるのは、次の条件の時である。

① 実効放出高さ h_e が混合層厚さ H よりも小さく ($h_e < H$)、鉛直方向の拡散係数 σ_z が混合層厚さ H の 0.8 倍以上になった ($\sigma_z \geq 0.8 H$) 時

② 実効放出高さ h_e が混合層厚さ H 以上 ($h_e \geq H$) の時

この時の鉛直方向の一様な濃度分布は鉛直方向の濃度平均値として、次のように与えられる。

$$\begin{aligned}
 \bar{\chi}_z(x, y) &= \frac{1}{H} \int_{-\infty}^{\infty} \chi(x, y, z) dz \\
 &= \frac{Q}{(2\pi)^{3/2} \sigma_h^2 \sigma_v H} \exp \left[-\frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{x-x_0}{\sigma_h} \right)^2 + \left(\frac{y-y_0}{\sigma_h} \right)^2 \right\} \right] \times \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z-z_0}{\sigma_v} \right)^2 \right] dz \\
 &= \frac{Q}{(2\pi)^{3/2} \sigma_h^2 \sigma_v H} \exp \left[-\frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{x-x_0}{\sigma_h} \right)^2 + \left(\frac{y-y_0}{\sigma_h} \right)^2 \right\} \right] \times \sqrt{2\pi} \sigma_v^2 \\
 &= \frac{Q}{2\pi \sigma_h^2 H} \exp \left[-\frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{x-x_0}{\sigma_h} \right)^2 + \left(\frac{y-y_0}{\sigma_h} \right)^2 \right\} \right] \quad (3.48)
 \end{aligned}$$

ここで、

$\bar{\chi}_z(x, y)$: 鉛直方向に一様な空気中濃度 (Bq/m³)

H : 混合層厚さ (m)

である。

3.3.1.5 地表面沈着

大気中の浮遊物質の地表面への沈着は、乾性沈着と湿性沈着の 2 つの機構に分けられる。前者は浮遊物質と地表面との相互作用によって引き起こされ、後者は雨滴等の水分に浮遊物質が溶け込むことによって生じる。

(1) 乾性沈着

乾性沈着は乾性沈着速度によってモデル化され、乾性沈着による地表面フラックスは次のように与えられる。

$$\dot{\omega}_{dry} = v_d \cdot \chi(x, y, 0) \quad (3.49)$$

ここで、

$\dot{\omega}_{dry}$: 乾性沈着による地表面フラックス (Bq/m²/s)

v_d : 乾性沈着速度 (m/s)

$\chi(x, y, 0)$: 地表面における空气中濃度 (Bq/m³)

である。

乾性沈着速度は、物質の種類、大気安定度、風向・風速及び地表面粗度に依存するが、表 3-3 に示すように物質に依存した値として与える。

表 3-3 沈着に関するパラメータ ²³⁾

物質	乾性沈着速度 (m/s)	ウォッシュアウト 係数 (1/s) *
希ガス	—	—
元素状ヨウ素	0.01	$8.0\text{E-}5 \times I^{0.6}$
有機ヨウ素	0.0005	$8.0\text{E-}7 \times I^{0.6}$
エアロゾル	0.001	$8.0\text{E-}5 \times I^{0.8}$

* I : 降雨強度 (mm/h)

(2) 湿性沈着

湿性沈着は、降雨強度と物質の種類に依存し、ウォッシュアウト係数を用いてモデル化される。

$$\lambda_w = \Lambda \times I^\alpha \quad (3.50)$$

ここで、

λ_w : ウォッシュアウト係数 (1/s)

I : 降雨強度 (mm/h)

である。

式 3.50 に現れる係数 Λ 及び α は、物質毎に表 3-3 のように与えられる。この時に湿性沈着による地表面フラックスは、次のように与えられる。

$$\dot{\omega}_{wet} = \lambda_w \int_{-\infty}^{\infty} \chi(x, y, z) dz = \frac{\lambda_w Q}{2\pi\sigma_h^2} \exp \left[-\frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{x-x_0}{\sigma_h} \right)^2 + \left(\frac{y-y_0}{\sigma_h} \right)^2 \right\} \right] \quad (3.51)$$

ここで、

$\dot{\omega}_{wet}$: 湿性沈着による地表面フラックス (Bq/m²/s)

である。

(3) 地表面沈着量及び時間積算地表面沈着量

パフの放出開始からある評価時間までの地表面沈着量は、乾性及び湿性沈着による地表面フラックスの合計を時間積分して得られる。なお、空气中濃度はパフの移動と拡がりによって時々刻々と変化し、沈着による減衰と放射性核種の崩壊による減衰によっても時間的に変化している。こ

れらは離散時間的に評価されるため、離散時間の時間積分として地表面沈着量を次のように評価する。

$$\omega(x, y) = \sum_i (\dot{\omega}_{dry} + \dot{\omega}_{wet}) \Delta t_i \quad (3.52)$$

ここで、

$\omega(x, y)$: 評価地点 (x, y) における地表面沈着量 (Bq/m²)

である。

放射性物質の放出を考えた場合、地表面沈着によって地表面が汚染され、そこに人が留まっている限りずっと被ばくし続ける。また、そこに滞在している間には放射性核種の崩壊による減衰もある（簡単化のために子孫核種の生成はここでは記述しないが、これについては第 3.3.1.6 目に説明する）。このことから、沈着後の汚染地域に滞在している間の時間積算地表面沈着量は、次のように評価する。

$$\Omega(x, y) = \omega(x, y) \times \frac{1 - \exp(-\lambda \cdot T)}{\lambda} \quad (3.53)$$

ここで、

$\Omega(x, y)$: 評価地点 (x, y) における時間積算地表面沈着量 ((Bq/m²)*h)

λ : 放射性核種の崩壊定数 (1/h)

T : 滞在時間 (h)

である。

3.3.1.6 放射性核種量の減少と子孫核種への壊変

パフの持っている放射性核種量は、乾性沈着、湿性沈着及び放射性核種の崩壊によって減少する。また、放射性核種は崩壊によって子孫核種に壊変される。乾性沈着、湿性沈着及び放射性崩壊による単位時間当たりの放射性核種量の減少は、次のようになる。

$$\begin{aligned} \frac{dQ}{dt} &= - \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (\dot{\omega}_{dry} + \dot{\omega}_{wet}) dx dy - \lambda \cdot Q \\ &= - \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ v_d \cdot \chi(x, y, 0) + \frac{\lambda_w Q}{2\pi\sigma_h^2} \exp \left[-\frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{x-x_0}{\sigma_h} \right)^2 + \left(\frac{y-y_0}{\sigma_h} \right)^2 \right\} \right] \right\} dx dy - \lambda \cdot Q \\ &= - \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} v_d \cdot \chi(x, y, 0) dx dy - \lambda_w \cdot Q - \lambda \cdot Q \end{aligned} \quad (3.54)$$

右辺第 1 項の乾性沈着による減少の水平方向積分は、各地点の標高を考慮するため解析的に積分することはできない。計算時間の短縮の観点から乾性沈着による減少を評価する時の濃度は、平坦な地形として近似する。この時、積分が実行でき上式は次のようになる。

$$\begin{aligned}
 \frac{dQ}{dt} &= -\frac{v_d Q}{\sqrt{2\pi}\sigma_v} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z_0}{\sigma_v}\right)^2\right] - \lambda_w \cdot Q - \lambda \cdot Q \\
 &= -2\pi\sigma_v^2 v_d \cdot \chi_{flat}(x_0, y_0, 0) - \lambda_w \cdot Q - \lambda \cdot Q
 \end{aligned}
 \tag{3.55}$$

ここで、

$\chi_{flat}(x_0, y_0, 0)$: 平坦な地形におけるパフ中心の濃度 (Bq/m³)

である。

式 3.55 によって、乾性沈着、湿性沈着及び放射性崩壊によるパフの放射性核種量減少を評価する。

放射性物質は環境へ放出された後、大気中で崩壊し子孫核種へと壊変する。親核種は γ 線を強く放射しないが、子孫核種が γ 線を強く放射するような状況では、外部被ばく線量を計算する場合には、子孫核種を考慮することは重要になる。このような例として Cs-137 の子孫核種 Ba-137m がある。ここでは、大気中の壊変において 1 世代の子孫核種までを考慮することとすると、その放射性核種量は次のようになる。

$$Q_2 = Q_1 \frac{B_{2,1}\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \{ \exp(-\lambda_1 t) - \exp(-\lambda_2 t) \} \tag{3.56}$$

ここで、

Q_1, Q_2 : 親核種と子孫核種の放射性核種量 (Bq)

λ_1, λ_2 : 親核種と子孫核種の崩壊定数 (1/s)

$B_{2,1}$: 親核種から子孫核種への分岐比

である。

さらに Cs-137 の半減期が 30 年で Ba-137m の半減期は 2.55 分であるため、両者は放射平衡 (永続平衡) の関係にある。このような場合、環境に出てくる前にすでに Ba-137m は存在していることになるため、放射平衡にある子孫核種に対しては、次式のように評価することとする。

$$Q_2 = Q_1 \frac{B_{2,1}\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \exp(-\lambda_1 t) \tag{3.57}$$

3.3.1.7 プルームライズ

排気塔からプルームが放出される時には吹き上げが加わり、排気塔高さに吹き上げ高さを考慮した実効放出高さが実際の放出時の高さとなる。この吹き上げをプルームライズと呼び、そのプロセスは 2 つの成分に分けられる。1 つ目は排出ガスの鉛直方向の運動量に起因するプルームの下降プロセス (以下、ダウンウォッシュ効果という)、もう一方は排出ガスと大気密度の差に起因した浮力によるプルームの上昇プロセスである。どちらのプロセスが支配的になるかは、排気ガスと大気温度の差及び臨界温度の差の比較によって決まる。これらプルームライズのモデルは、Ramsdell Jr. et al. ²⁴⁾ を参考にした。

初めに、排気塔出口の流速が排気塔高さの風向・風速の 1.5 倍よりも小さい時には、プルームライズに次のようなダウンウォッシュ効果の補正がなされる。

$$\Delta h_d = \begin{cases} 4 \times r_s \left[\frac{w_p}{U(h_s)} - 1.5 \right] & \text{for } w_p < 1.5 \times U(h_s) \\ 0 & \text{for } w_p \geq 1.5 \times U(h_s) \end{cases} \quad (3.58)$$

ここで、

- Δh_d : ダウンウォッシュ効果の補正 (m)
- r_s : 排気塔の内側半径 (m)
- w_p : 排気塔出口の垂直方向の流速 (m/s)
- $U(h_s)$: 排気塔高さの風向・風速 (m/s)

である。

排気塔から排出されるガスの浮力に関する物理量は、次のような浮力フラックスパラメータによって表される。

$$F_b = g \cdot \frac{T_p - T_a}{T_p} \cdot w_p r_s^2 \quad (3.59)$$

ここで、

- F_b : 浮力フラックスパラメータ (m⁴/s³)
- g : 重力加速度 9.8 (m/s²)
- T_p : 排気塔出口のプルーム温度 (K)
- T_a : 排気塔高さの気温 (K)

である。

プルームライズの評価は、以下のように大気安定度によって 2 つの場合に分けられる。

(1) 不安定または中立の場合

大気安定度が不安定または中立の時の臨界温度差は、次のようにして計算される。

$$\Delta t_c = 0.0297 \times w_p^{1/3} T_p (2 \times r_s)^{-2/3} \quad (3.60)$$

ここで、

- Δt_c : 臨界温度差 (K)

である。

この臨界温度差から不安定または中立の時のプルームライズは、次式となる。

$$\Delta h = \begin{cases} 6 \times r_s \frac{w_p}{U(h_s)} + \Delta h_d & \text{for } T_p - T_a < \Delta t_c \\ 1.6 \times F_b^{1/3} \cdot x_f^{2/3} \cdot U(h_s)^{-1} + \Delta h_d & \text{for } T_p - T_a \geq \Delta t_c \end{cases} \quad (3.61)$$

ここで、

Δh : プルームライズ (m)

$$x_f = 49 \times F_b^{5/8}$$

である。

(2) 安定の場合

大気安定度が安定な場合の臨界温度差は、次式のように計算される。

$$\Delta t_c = 0.0196 \times w_p T_a S^{1/2} \quad (3.62)$$

ここで、

S : 安定度パラメータ

である。

安定度パラメータは、大気安定度と気温から次式のようにして計算される。

$$S = g \cdot T_a^{-1} \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (3.63)$$

ここで、

$\partial \theta / \partial z$: 温位の減少率 (K/m)

である。

0.02 K/m	安定
0.035 K/m	やや安定
0.05 K/m	非常に安定

$T_p - T_a$ が Δt_c よりも小さい時、プルームライズは運動量が支配的となり、式 3.61 または式 3.64 のうち、小さい方をプルームライズの評価値とする。

$$\Delta h = 1.5 \times S^{-1/6} \left[\frac{F_0 w_p T_a}{\pi \times U(h_s) T_p} \right]^{1/3} + \Delta h_d \quad (3.64)$$

ここで、

F_0 : 排気塔の流率 (m³/s)

である。

逆に、 $T_p - T_a$ が Δt_c 以上の時には、次式の臨界風向・風速によって、プルームライズが決まる。

$$U_c = 0.275 \times F_b^{1/4} S^{1/8} \quad (3.65)$$

$$\Delta h = \begin{cases} 2.6 \times F_b^{1/3} [S \cdot U(h_s)]^{-1/3} + \Delta h_d & \text{for } U(h_s) > U_c \\ 4 \times F_b^{1/4} S^{-3/8} + \Delta h_d & \text{for } U(h_s) \leq U_c \end{cases} \quad (3.66)$$

ここで、

U_c : 臨界風向・風速 (m/s)

である。

3.3.1.8 パフの移流

パフは風に乗って移動していく。このようなパフの移流は離散時間毎に計算することとなり、同じ時間間隔ならば風向・風速が大きいほど移動距離が長くなる。つまり、前ステップとのパフの重なりは風向・風速及び時間間隔の大きさによって異なってくる。これにより、時間積算空気中濃度を考えた時に大きな誤差を生じる可能性がある。このことを定量化するために、今 x 軸方向に一定な風が吹き、拡がりがある場合の平坦な地形上のパフの移流を考える。この時、風下軸上における地表面付近の時間積算空気中濃度は次のように表すことができる。

$$\begin{aligned} \tilde{\chi}(x, 0, 0) &= \int_0^\infty \chi(x, 0, 0, t) dt \\ &= \int_0^\infty \frac{Q}{(2\pi)^{-3/2} \sigma_h^2 \sigma_v} \left[\exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{x - U \cdot t}{\sigma_h} \right)^2 \right\} \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{z_0}{\sigma_v} \right)^2 \right\} \right] dt \\ &= A \cdot \int_0^\infty \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{x - U \cdot t}{\sigma_h} \right)^2 \right\} dt \\ &\cong A \cdot \sum_n \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{x - U \cdot n \Delta t}{\sigma_h} \right)^2 \right\} \Delta t \end{aligned} \quad (3.67)$$

ここで、

$\tilde{\chi}(x, 0, 0)$: 風下軸上における地表面付近の時間積算空気中濃度 ((Bq/m³)・h)

U : x 軸方向に吹く一定な風 (m/s)

σ_h : 一定な水平方向の拡散係数 (m)

A : 時間積分の外に出る定数 (Bq/m³)

である。

なお x が放出地点から十分に離れた地点においては、地表面付近の時間積算空気中濃度は以下のように与えられる。

$$A \cdot \sqrt{2\pi} \frac{\sigma_h}{U} \quad (3.68)$$

例えば、 $U = 1$ 、 $\sigma_h = 100$ とした時の各時刻のパフ拡がりと同規格化時間積算空気中濃度 (式 3.68 で規格化) を図 3-8 に示す。図は時間間隔 $\Delta t = 100, 200, 300, 400$ の時を示した。規格化時間積算空気中濃度は、放出地点近傍以外において、 $\Delta t = 100, 200$ でほぼ 1 になり、 $\Delta t = 300, 400$ で波状となり極小・極大が現れる。この例では、適切な数値的な時間積分を行うには、 Δt が 200 よ

りも小さくする必要がある。しかし、この時間間隔は U 及び σ_h が変化すれば、最適な Δt は異なることになる。そこで、 $U \times \Delta t / \sigma_h$ という量を導入すると、上記 4 つの Δt はそれぞれ 1、2、3、4 となる。すなわち、一般的に最適な Δt となるのは、次の条件を満たした時となる。

$$\frac{U \cdot \Delta t}{\sigma_h} \leq 2 \quad (3.69)$$

式 3.69 の条件は、各ステップにおけるパフ中心間の距離が、拡散係数の 2 倍以内でなければならないということである。パフ中心間隔がこれを超えるような Δt だったならば、数値的な時間積分は大きな誤差を生じる。この条件は、風向・風速が一定かつ拡散係数が一定な平坦地形を仮定していた。しかし、これらに変動する場合にも誤差を生じさせないための目安になる。

3.3.1.9 パフの放出

パフ放出時点においては、その拡散係数は理論的にはゼロであり、放出点は濃度評価の特異点となっている。しかし、パフが排気塔等から大気へ放出される時点において、排気塔等の大きさの拡がりを持っている。そのため、放出時点のパフの拡がりを排気塔等の大きさに設定することが妥当であると考えられる。パフ放出時点における拡散係数に関する理論的研究やその検証方法については課題が残されているが、本モデルにおいては拡がりの暫定値を 1.0 m と仮定した。

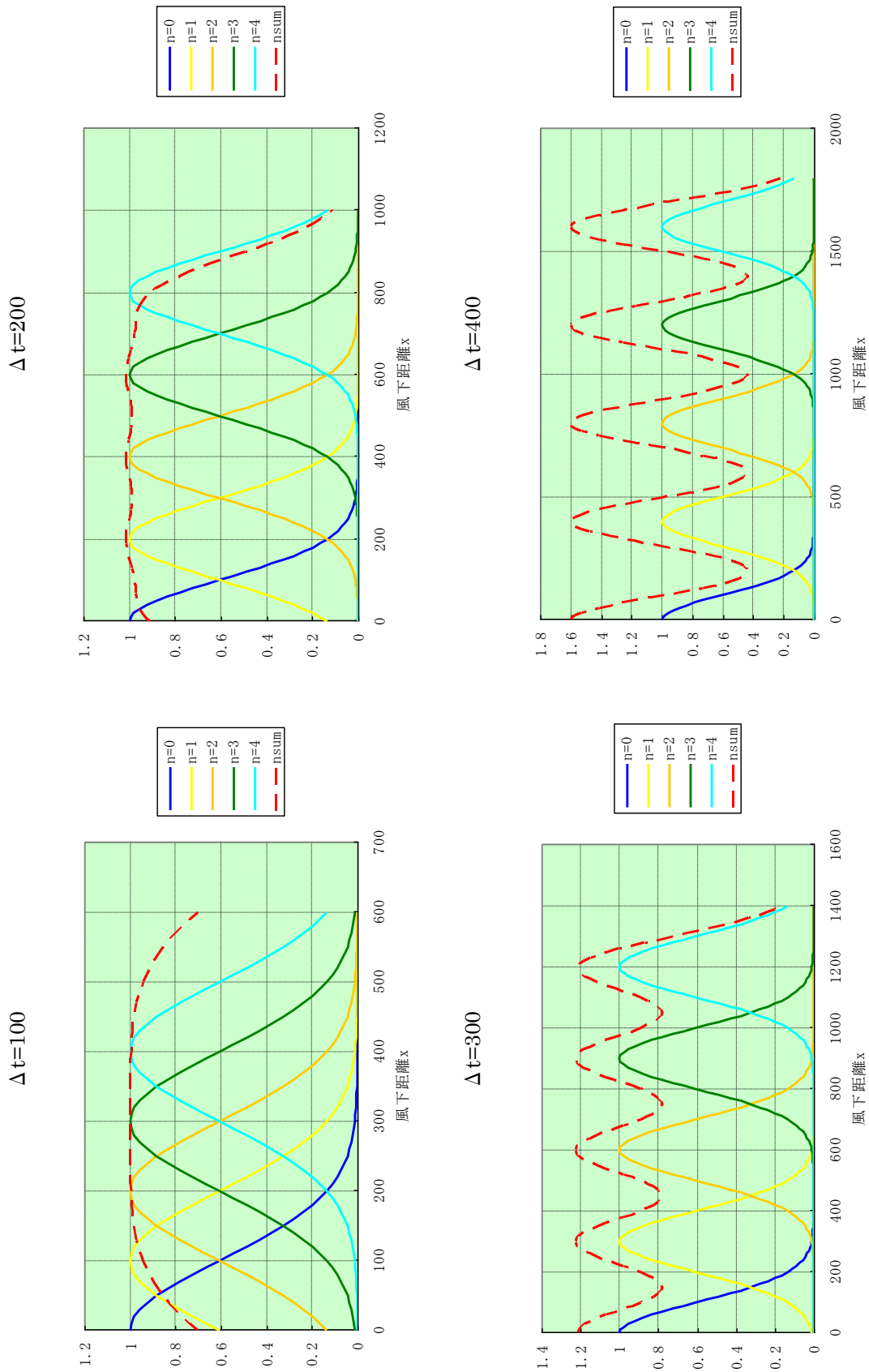


図 3-8 $U = 1$ 、 $\sigma_h = 100$ としての各時刻のパフ拡がり と規格化時間積算空気中濃度
(実線が各時刻のパフ拡がり、破線が規格化時間積算空気中濃度)

3.3.1.10 パフモデルとガウス・プルームモデルの関係

専門家支援ツール **EXTREME** における大気拡散及び被ばく線量評価コード **Puff** では、大気拡散解析にパフモデルを採用している。ここでは、パフモデルとガウス・プルームモデルの関連を調査する。

パフモデルを平坦な地形に適用する時、すべての気象条件が一様に定常であって、放射性物質が放出源から定常的に放出される場合の長時間平均濃度は次のようにして計算される。

$$\begin{aligned}
 \bar{\chi}(x, y, z) &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{T} \int_{nT}^{(n+1)T} \frac{Q}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp \left[-\frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{x - U \times t}{\sigma_x} \right)^2 + \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2 + \left(\frac{z - z_0}{\sigma_z} \right)^2 \right\} \right] dt \\
 &= \frac{1}{T} \int_0^{\infty} \frac{Q}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp \left[-\frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{x - U \times t}{\sigma_x} \right)^2 + \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2 + \left(\frac{z - z_0}{\sigma_z} \right)^2 \right\} \right] dt \\
 &= \frac{1}{2T} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{Q}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp \left[-\frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{x - U \times t}{\sigma_x} \right)^2 + \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2 + \left(\frac{z - z_0}{\sigma_z} \right)^2 \right\} \right] dt \\
 &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{q}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp \left[-\frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{x - U \times t}{\sigma_x} \right)^2 + \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2 + \left(\frac{z - z_0}{\sigma_z} \right)^2 \right\} \right] dt \\
 &= \frac{q}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp \left[-\frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2 + \left(\frac{z - z_0}{\sigma_z} \right)^2 \right\} \right] \times \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - U \times t}{\sigma_x} \right)^2 \right] dt \\
 &= \frac{q}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp \left[-\frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2 + \left(\frac{z - z_0}{\sigma_z} \right)^2 \right\} \right] \times \sqrt{2\pi} \sigma_x^2 \frac{1}{U} \\
 &= \frac{q}{2\pi \sigma_y \sigma_z U} \exp \left[-\frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2 + \left(\frac{z - z_0}{\sigma_z} \right)^2 \right\} \right] \tag{3.70}
 \end{aligned}$$

ここで、

- $\bar{\chi}(x, y, z)$: 評価地点 (x, y, z) における平均濃度 (Bq/m³)
- Q : パフの放射性物質質量 (Bq)
- T : パフの放出時間間隔 (s)
- U : 一定な風速 (m/s)
- $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$: 一定な拡散パラメータ (m)
- z_0 : 放出高さ (m)
- q : 放射性物質の放出率 (Bq/s) ($q = Q/2T$)

である。

式 3.39 及び式 3.40 から分かるように、式 3.70 は放射性核種の崩壊と地表面におけるプルームの完全反射を考慮しない場合の長時間平均濃度を表す式である。

一方、ガウス・プルームモデルは、一様・定常な気象条件、放出源からの定常的な連続放出、かつ地形が平坦であるとした場合に、放射性物質の空气中濃度分布が水平方向、鉛直方向ともにガウス分布（釣鐘型関数）になると仮定した基本拡散式として求める^{25),26)}。すなわち、放射性プルームは風下方向に直線的に流され、放射性プルームの軸のまわりにガウス分布状に拡がっていくと表現する。ガウス・プルームモデルの基本方程式は以下のように表される。

$$\chi(x, y, z) = \frac{Q_r}{2\pi\sigma_y\sigma_z U} \exp\left(-\lambda \frac{x}{U}\right) \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left[\exp\left\{-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right\} + \exp\left\{-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right\} \right] \quad (3.71)$$

ここで、

- $\chi(x, y, z)$: 位置 (x, y, z) における放射性物質濃度 (Bq/m³)
- Q_r : 放射性物質の放出率 (Bq/s)
- U : 放出源高さを代表する風速 (m/s)
- λ : 放射性核種の崩壊定数 (s⁻¹)
- H : 放出高さ (m)
- σ_y : 濃度分布の y 方向の拡がりのパラメータ (m)
- σ_z : 濃度分布の z 方向の拡がりのパラメータ (m)

である。

式 3.71 における大括弧中の第 2 項は、地表面におけるプルームの完全反射を表す項である。また、この式では大気中における放射性核種の崩壊が考慮されている。したがって、式 3.71 は放射性核種の崩壊と地表面におけるプルームの完全反射を考慮している場合の定常濃度を表す。これを考慮すると、放射性核種の崩壊と地表面におけるプルームの完全反射を考慮しない場合のパフモデルによる長時間平均濃度 (式 3.70) は、同条件の場合のガウス・プルームモデルによる定常濃度 (式 3.71) と同じである。

3.3.2 被ばく線量評価

被ばく線量評価には外部被ばくと内部被ばくを考慮し、それぞれ線量（率）換算係数を使用して評価する。以下、外部及び内部被ばくの線量評価式と使用する線量（率）換算係数の出典を示す。

3.3.2.1 外部被ばく

外部被ばくには、空気中の放射性核種からの外部被ばく及び地表面に沈着した放射性核種からの外部被ばくがある。それぞれ空気中または地表面に放射性核種が一様に分布していると仮定して求めた線量率換算係数を使用して評価を行う。なお、空気中に一様に分布している放射性核種からの外部被ばくはサブマージョンと呼ばれる。これらの線量率換算係数は、米国環境保護庁（U.S. EPA, Environmental Protection Agency）の Federal Guidance Report No. 12²⁷⁾から引用した。

サブマージョンによる外部被ばくは、パフが通り過ぎればなくなるが、地表面沈着核種からの外部被ばくでは、汚染地域から離れなければ被ばくし続ける。このため、そこに滞在している期間とその間の崩壊による減衰を考慮する必要がある。

(1) サブマージョンによる外部被ばく線量

$$D_{sub}(x, y, z) = \sum_i DC_i^{sub} \cdot \tilde{\chi}_i(x, y, z) \quad (3.72)$$

ここで、

$D_{sub}(x, y, z)$: 評価地点 (x, y, z) におけるサブマージョンによる外部被ばく線量 (mSv)

DC_i^{sub} : 放射性核種 i のサブマージョンによる線量率換算係数 ((mSv/h)/(Bq/m³))

$\tilde{\chi}_i(x, y, z)$: 評価地点 (x, y, z) における放射性核種 i の時間積算空気中濃度 (Bq/m³・h)

である。

(2) 地表面沈着核種による外部被ばく線量

$$D_{gro}(x, y) = \sum_i DC_i^{gro} \cdot \omega_i(x, y) \cdot \frac{1 - \exp(-\lambda_i \cdot T)}{\lambda_i} \quad (3.73)$$

ここで、

$D_{gro}(x, y)$: 評価地点 (x, y) における地表面沈着核種による外部被ばく線量 (mSv)

DC_i^{gro} : 放射性核種 i の地表面沈着による線量率換算係数 ((mSv/h)/(Bq/m²))

$\omega_i(x, y)$: 評価地点 (x, y) における放射性核種 i の地表面沈着量 (Bq/m²)

λ_i : 放射性核種 i の崩壊定数 (1/h)

T : 滞在時間 (h)

である。

3.3.2.2 内部被ばく

内部被ばくでは、体内に摂取した放射性核種はすべて代謝されるまで被ばくし続けるという特徴があり、ある期間（通常生涯）内の預託線量で評価される。この預託線量は、単位摂取に対する線量である線量換算係数によって評価される。

原子力緊急事態における内部被ばくの重要な摂取経路は吸入であるため、本コードでは吸入のみを考慮することとする。吸入による放射性物質の摂取量は呼吸率によって定められるため、吸入による内部被ばく線量は次のようになる。

$$D_{inh}(x, y, z) = B \sum_i DC_i^{inh} \cdot \tilde{\chi}_i(x, y, z) \quad (3.74)$$

ここで、

$D_{inh}(x, y, z)$: 評価地点 (x, y, z) における吸入摂取による預託線量 (mSv)

B : 呼吸率 (m³/h)

DC_i^{inh} : 放射性核種 i の吸入による線量換算係数 (mSv/Bq)

$\tilde{\chi}_i(x, y, z)$: 評価地点 (x, y, z) における放射性核種 i の時間積算空気中濃度 ((Bq/m³)・h)

である。

吸入摂取はパフが通過中に生じるので時間積算空気中濃度で評価され、線量換算係数にはICRP勧告値 (Publ.71、Publ.72) ^{28),29)}を使用した。

3.4. 食物連鎖解析

食物連鎖解析コード CMPMDL では、農作物や家畜等の生態系から人体への放射性物質の移行は、図 3-9 に示すコンパートメント・モデルにより推定する。各コンパートメントの放射性物質インベントリは、再浮遊やウェザリング、土壌への浸透等、時間に依存した移行プロセスに対するモデル式で表現している。なお、今回作成する食物連鎖モデルでは、入力として放射性物質の単位沈着量を与え、それに対する放射性物質の移行を計算するものとした。

一般に、コンパートメント h における放射性物質インベントリの時間微分 Q'_h は次の式で表され、この微分方程式を数値的に解くことにより、各コンパートメントにおける放射性物質インベントリの時間変化を求めることができる。

$$Q'_h = \sum_{i=1}^n R_{in,i} - \sum_{j=1}^m R_{out,j} \quad (3.75)$$

ここで、

$R_{in,i}$: コンパートメント h への i 番目の移行率 (Bq/(m²・d))

$R_{out,j}$: コンパートメント h からの j 番目の移行率 (Bq/(m²・d))

である。

時間に依存したダイナミック・プロセスとしては、表 3-4 に示すプロセスを考慮した。また、時間に依存しない離散的プロセスとして、沈着 (Deposition)、耕作 (Tillage)、収穫 (Harvest) の 3 つのプロセスを考慮した。

CMPMDL の食物連鎖モデルでは、表 3-5 に示すように、7 種類の農作物と 2 種類の畜産物を考慮している。農作物については、穀物、豆類、果物、根菜及び葉菜の 5 種類を食用農作物とし、牧草、干草、穀物及び豆類の 4 種類を飼料用農作物とした。

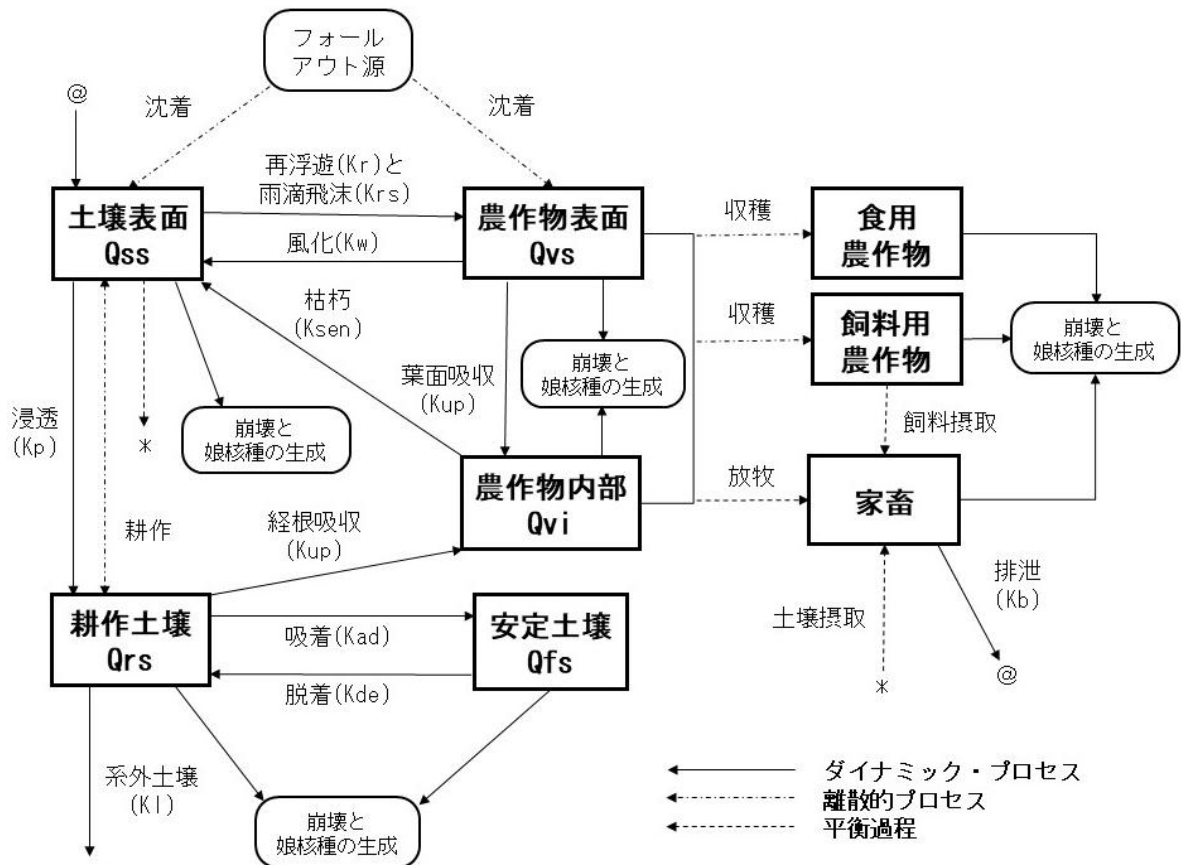


図 3-9 食物連鎖モデルにおけるコンパートメントの構成

表 3-4 食物連鎖モデルで考慮するダイナミック・プロセス

プロセス（英名）	放射性物質の 移行元	放射性物質の 移行先
農作物の成長（Plant growth）	—	—
放射性核種の崩壊（Decay）	—	—
再浮遊（Resuspension）	土壌表面	農作物表面
雨滴飛沫（Rain splash）	土壌表面	農作物表面
ウェザリング（Weathering）	農作物表面	土壌表面
枯朽（Senescence）	農作物内部	土壌表面
葉面吸収（Foliar absorption）	農作物表面	農作物内部
浸透（Percolation）	土壌表面	安定土壌
経根吸収（Root uptake）	耕作土壌	農作物内部
吸着（Adsorption）	耕作土壌	安定土壌
脱着（Desorption）	安定土壌	耕作土壌
深層土壌への浸透（Leaching）	耕作土壌	系外土壌
家畜の排泄（Excretion）	家畜体内	土壌表面
家畜による飼料用農作物の摂取 （Ingestion）	土壌表面	家畜体内
	農作物表面	家畜体内
	農作物内部	家畜体内

表 3-5 食物連鎖モデルで考慮される農畜産物

大分類	中分類	小分類	小分類英名
農作物	飼料用	牧草	Pasture
		干草	Hay
	飼料用 食用	穀物	Grain
		豆類	Legume
	食用	果物	Fruit
		根菜	Root crop
		葉菜	Leafy vegetable
畜産物	（食用）	牛肉	Beef
		牛乳	Milk

3.4.1. ダイナミック・プロセス

環境中に放出された放射性物質は、自然界に発生する様々なプロセスの影響を受け、環境中を移行する。例えば、地表面に沈着した放射性物質は風により再浮遊したり、雨により地下へ浸透したりする。また、地下へと浸透した放射性物質は経根吸収により農作物内部に取り込まれる。このように、時間の経過とともに一定の割合で連続して発生し、放射性物質の移行に影響を及ぼすプロセスを、本コードではダイナミック・プロセスとして取り扱った。各ダイナミック・プロセスに対するモデルを以下に示す。

(1) 農作物の成長 (Plant growth)

農作物の成長は、以下の式によって表される。

$$\frac{dB}{dt} = K_g \cdot B \left(\frac{B_{max} - B}{B_{max}} \right) \quad (3.76)$$

ここで、

- K_g : 成長率定数 (1/d)
- B : 当該時刻における農作物の存在量 (kg-dry/m²)
- B_{max} : 農作物の存在量の上限値 (kg-dry/m²)

である。

対象となる農作物が牧草の場合には、放牧による牧草の減少を考慮した。

$$\frac{dB}{dt} = K_g \cdot B \left(\frac{B_{max} - B}{B_{max}} \right) - AD \cdot PIR \quad (3.77)$$

ここで、

- AD : 家畜の放牧密度 (animals/m²)
- PIR : 家畜による牧草の摂取率 (kg/d)

である。

(2) 放射性核種の崩壊 (Decay)

各コンパートメントのインベントリは、コンパートメントの種類を問わず、放射性核種が崩壊することにより時間とともに減少する。インベントリの減少は、崩壊定数 λ (1/d) を用いて計算される。本コードでは、崩壊による子孫核種の生成を最大 4 世代まで考慮した。

$$\lambda = \frac{\ln 2}{HL} \quad (3.78)$$

ここで、

- HL : 放射性核種の半減期 (d)

である。

(3) 再浮遊 (Resuspension)

地表面に沈着した放射性物質は風により再浮遊し農作物表面へと移行する。再浮遊による移行率は、再浮遊係数 RF (1/m) と沈着速度 V (m/d) の積を使用する場合もあるが、本コードでは、移行率 K_r (地表面に沈着した放射性物質の単位時間当たりの移行率: 1/day) を用いた。 K_r には、地形や粒子径、風速等により、 $10^{-7} \sim 10^{-1}$ (1/day) の範囲の値を採用した。

(4) 雨滴飛沫 (Rain splash)

地表面から農作物表面への放射性物質の移行経路としては、風による再浮遊の他に雨滴飛沫の跳ね返りも考慮する必要がある。この現象は降雨時に一時的に発生するもので、発生間隔は一定していないが、本コードでは一定の割合で連続的に発生するものとした。雨滴飛沫による跳ね返り率を K_{rs} (1/d) で表すと、地表面から農作物表面への放射性物質の移行率は、 K_r と K_{rs} の和となる。

(5) ウェザリング (Weathering)

農作物表面に沈着した放射性物質はウェザリング作用によって地表面に移行する。移行率はウェザリング率 K_w (1/d) とした。

(6) 枯朽 (Senescence)

成長期間を過ぎると、農作物は枯朽して土壌へ還元される。この事象により、農作物内部に取り込まれた放射性物質は土壌表面へと移行する。通常、枯朽は牧草のみに適用し、収穫時に刈り取られる食用農作物や飼料用農作物には適用しない。枯朽による農作物内部から土壌表面への移行率を K_{sen} (1/d) と表し、放牧期間中は $K_{sen} = 0$ とした。

(7) 葉面吸収 (Foliar absorption)

農作物の表面に沈着した放射性物質は、葉面からの吸収により農作物内部に取り込まれる。葉面吸収率を K_{ab} (1/day) で表す。葉面吸収率は、ユーザーが指定した農作物の成長期間中だけ起こるものとし、それ以外の期間は $K_{ab} = 0$ とした。

(8) 浸透 (Percolation)

土壌表面の放射性物質は、浸透プロセスによって耕作土壌に移行する。移行率は、土壌表面から耕作土壌への浸透率 K_p (1/d) で表される。

(9) 経根吸収 (Root uptake)

農作物は耕作土壌中の放射性物質を根から吸収する。経根吸収による放射性物質の移行率は農作物の成長過程で変化するため、土壌から農作物への移行係数 CR と、時間の導関数として表される農作物の成長率 dB/dt を考慮した以下の式を使用して、移行率を計算した。

$$K_{up} = \frac{(dB/dt) \cdot CR}{x_{ts} \cdot P_{ts}} \quad (3.79)$$

ここで、

K_{up}	: 経根吸収による移行率 (1/d)
dB/dt	: 農作物の成長率 ($\text{kg-dry}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$)
CR	: 土壌から農作物への移行係数 (Bq/g plant per Bq/g soil)
x_{ls}	: 耕作土壌の層厚 (m)
P_{ls}	: 耕作土壌密度 (kg/m^3)

である。

(10) 吸着・脱着 (Adsorption/Desorption)

放射性物質は、浸透または耕作によって耕作土壌 (0.1～25 cm) 中に移行する。耕作土壌では、経根吸収、深層土壌への浸透、安定土壌への吸着等のプロセスにより、放射性物質が他のコンパートメントへ移行するが、安定土壌においては経根吸収及び深層土壌への浸透は発生しないものとした。安定土壌への吸着率及び耕作土壌への脱着率は、それぞれ吸着係数 K_{ad} (1/d) と脱着係数 K_{de} (1/d) で表す。

(11) 深層土壌への浸透 (Leaching)

耕作土壌中の放射性物質は、さらに深部へ浸透することにより深層土壌へと移行する。深層土壌は系外とし、系外へ出た放射性物質の他のコンパートメントへの移行はないものとした。深層土壌への移行率は、浸透率 K_l (1/d) で表される。

(12) 家畜の排泄 (Excretion)

家畜の体内に取り込まれた放射性物質は、家畜の排泄によって土壌表面に移行する。この事象は牧草地土壌の場合のみ考慮した。排泄による移行率は K_b (1/d) で表される。

3.4.2. 離散的プロセス

ダイナミック・プロセスに対し、発生時期が不定期で発生頻度が低いプロセスを、本コードでは離散的プロセスとして取り扱った。離散的プロセスの発生によって、発生時に存在する放射性物質はある割合で他のコンパートメントへ移行する。離散的プロセスの発生時期は、ユーザーが入力データで指定するものとした。各離散的プロセスに対するモデルを以下に示す。

(1) 沈着 (Deposition)

放出された放射性物質の沈着は、土壌と農作物の表面に分配される。分配比率は、沈着時における農作物の存在量 B_d (kg-dry/m²) と、農作物の葉の遮断定数 α (m²/kg) に依存させた。土壌表面に沈着する割合 F_s と農作物表面に沈着する割合 F_v は、それぞれ次式で表される。

$$F_s = e^{-\alpha B_d} \quad (3.80)$$

$$F_v = 1 - F_s \quad (3.81)$$

ここで、

α : 農作物の葉による遮断定数 (m²/kg)
 B_d : 沈着時の農作物の存在量 (kg-dry/m²)

である。

(2) 耕作 (Tillage)

土壌表面及び土壌中の放射性物質は、農地が耕作されることによって各層に再分配される。沈着後、間もない時期に耕作が実施されると、土壌表面に沈着した放射性物質の大部分が耕作土壌（農作物による経根吸収が行われる深さで、再浮遊や雨滴飛沫による跳ね返りは起こらない）に移行するため、放射性物質の農作物表面への移行量を低減する効果がある。耕作によって表面土壌及び耕作土壌に再分配される割合は、以下の式で表される。

$$FT_{ss} = \frac{M_{ss}}{M_{ss} + M_{rs}} \quad (3.82)$$

$$FT_{rs} = 1 - FT_{ss} \quad (3.83)$$

ここで、

FT_{ss} : 放射性物質が耕作によって表面土壌に再分配される割合
 FT_{rs} : 放射性物質が耕作によって耕作土壌に再分配される割合
 M_{ss} : 表面土壌の土の量＝表面土壌の層厚 x_{ss} (m) × 表面土壌密度 P_{ss} (kg/m²)
 M_{rs} : 耕作土壌の土の量＝耕作土壌の層厚 x_{rs} (m) × 耕作土壌密度 P_{rs} (kg/m²)

である。

(3) 収穫 (Harvest)

食用農作物や飼料用農作物は、ユーザーが指定した収穫日に収穫されるものとした。収穫時における農作物中濃度 QC (Bq/kg-wet) は次の式で表される。ただし、飼料用農作物の場合には $TVC = 1$ とし、また FD を用いずに計算するものとした。

$$QC(TEC) = FD \cdot \left\{ \frac{Q_{vs}(TEC) \cdot TVC + Q_{vi}(TEC)}{B_{max}} \right\} \quad (3.84)$$

ここで、

- Q_{vs} : 農作物表面における放射性物質の濃度 (Bq/m²)
- Q_{vi} : 農作物内部における放射性物質の濃度 (Bq/m²)
- TVC : 農作物表面における放射性物質の可食部への残留率 (－)
- B_{max} : 農作物の存在量の上限值 (kg-dry/m²)
- FD : 乾燥重量と湿重量の比率 (－)
- TEC : 農作物の収穫日 (Julian Day)

である。

人間または家畜によって摂取される時点における農作物中濃度は、次のように表される。

$$Q_{ci} = QC(TEC) \cdot e^{-\lambda \cdot t_h} \quad (3.85)$$

ここで、

- QC : 収穫時における農作物中濃度 (Bq/kg-wet)
- λ : 崩壊定数 (1/d)
- t_h : 農作物が収穫されてから摂取されるまでの時間 (d)

である。

3.4.3. 畜産物中濃度の推定

3.4.3.1. 家畜による飼料用農作物の摂取

家畜が摂取する飼料用農作物としては、家畜への給餌形態から、牧草、干草、保存飼料（具体的には穀物と豆類）の 3 種類を考慮した。また、放牧を行う家畜については、これらの飼料用農作物の他に牧草地の表面土壌の摂取を考慮した。本コードでは、各飼料用農作物及び牧草地土壌の摂取率は入力データで与えるもととした。また、飼料用農作物の摂取率は月別に入力可能とし、牧草地土壌の摂取率は年間を通して一定とした。

農作物の成長と家畜への飼料供給の概念図を図 3-10 に示す。また、家畜が飼料を摂取することにより家畜の体内に取り込まれる放射性物質は、以下の計算式で表される。

(1) 牧草 (Pasture)

牧草は、ユーザーが入力データで指定した放牧期間中のみ摂取される。牧草を摂取することにより家畜体内に取り込まれる 1 日当たりの放射性物質 Q_{ap} (Bq/d) は、次の式で表される。

$$Q_{ap}(t) = PIR \cdot \frac{Q_{vs}(t) + Q_{vi}(t)}{B(t)} \quad (3.86)$$

ここで、

Q_{vs}	: 牧草表面における放射性物質濃度 (Bq/m ²)
Q_{vi}	: 牧草内部における放射性物質濃度 (Bq/m ²)
B	: 牧草の存在量 (kg/m ²)
PIR	: 家畜による牧草の摂取率 (kg/d)

である。

(2) 干草 (Hay)

干草は年に数回収穫が行われ、一定期間保管された後に家畜に与えられる。干草を摂取することにより家畜体内に取り込まれる 1 日当たりの放射性物質 Q_{ah} (Bq/d) は、次の式で表される。

$$Q_{ah}(t) = HIR \cdot QH(t) \quad (3.87)$$

ここで、

QH	: 干草における放射性物質濃度 (Bq/kg)
HIR	: 家畜による干草の摂取率 (kg/d)

である。

干草の年間収穫回数を $NCUT$ とすると、 $NCUT$ 番目の収穫が終了した時点、すなわち干草の成長期間の終了時点における干草中の放射性物質濃度 QH_h (Bq/kg) は、次のように表される。

$$QH_h = \frac{\sum_{k=1}^{NCUT} QCUT(k)}{NCUT} \quad (3.88)$$

ここで、

$QCUT(k)$: k 番目に収穫された干草中の放射性物質濃度 (Bq/kg)

である。

(3) 保存飼料 (Stored feed)

保存飼料は年に一回収穫が行われ、一定期間保管された後に家畜に与えられる。家畜に与えられる保存飼料として、穀物と豆類を考慮した。保存飼料を摂取することにより家畜体内に取り込まれる 1 日当たりの放射性物質 Q_{ac} (Bq/d) は、次の式で表される。

$$Q_{ac} = CIR \cdot QC(t) \quad (3.89)$$

ここで、

QC : 保存飼料中の放射性物質濃度 (kg/kg-wet)

CIR : 家畜による保存飼料の摂取率 (kg/d)

である。

(4) 牧草地土壌 (Pasture soil)

牧草地土壌は、放牧期間を問わず年間を通して摂取されるものとした。牧草地土壌を摂取することにより家畜体内に取り込まれる 1 日当たりの放射性物質 Q_{as} (Bq/d) は次の式で表される。

$$Q_{as}(t) = SIR \cdot \frac{Q_{ss}(t)}{x_{ss} \cdot P_{ss}} \quad (3.90)$$

ここで、

Q_{ss} : 牧草地の表面土壌における放射性物質濃度 (Bq/m²)

x_{ss} : 牧草地における表面土壌の層厚 (m)

P_{ss} : 牧草地における表面土壌の密度 (kg/m³)

SIR : 家畜による牧草地土壌の摂取率 (kg/d)

である。

3.4.3.2. 畜産物中濃度

(1) 牛肉 (Beef)

人間によって摂取される時点における牛肉中濃度 Q_{mt} (Bq/kg) は、次のように表される。

$$Q_{mt} = Q_a(t) \cdot K_b \cdot S \cdot F_{mt} \cdot e^{-\lambda \cdot t_h} \quad (3.91)$$

ここで、

Q_a : 食肉処理時における牛体内の放射性物質濃度 (Bq/m²)

K_b : 排泄による家畜体内からの除去率 (1/d)

S : 牛 1 頭当たりの牧草地面積 (m²)

F_{mt} : 牛肉への移行係数 (d/kg)
 λ : 崩壊定数 (1/d)
 t_h : 牛肉が生産されてから人間が摂取するまでの期間 (d)

である。

(2) 牛乳 (Milk)

人間によって摂取される時点における牛乳中濃度 Q_{mk} (Bq/L) は、次のように表される。

$$Q_{mk} = \{Q_{ap}(t) + Q_{ah}(t) + Q_{ac}(t) + Q_{as}(t)\} \cdot F_{mk} \cdot e^{-\lambda \cdot t_h} \quad (3.92)$$

ここで、

F_{mk} : 牛乳への移行係数 (d/L)
 λ : 崩壊定数 (1/d)
 t_h : 牛乳が生産されてから人間が摂取するまでの期間 (d)

である。

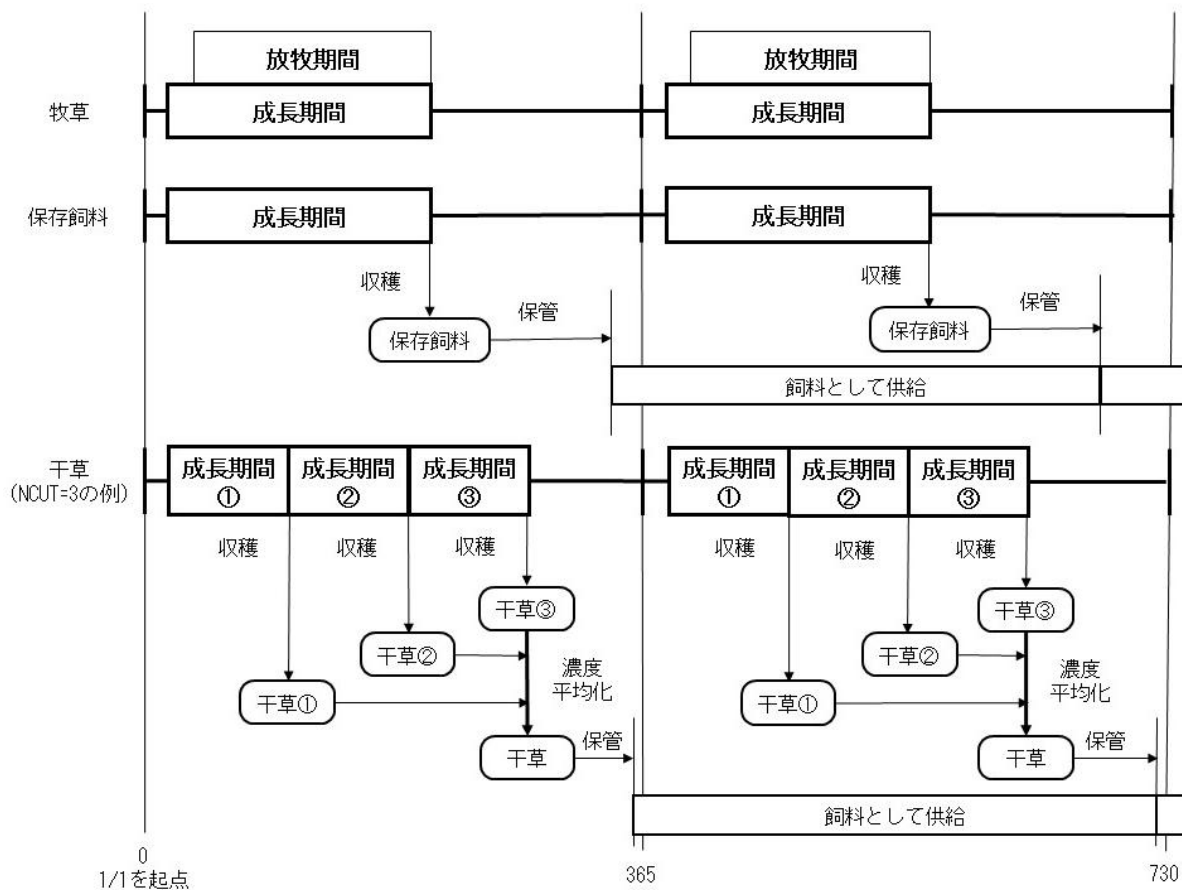


図 3-10 農作物の成長と家畜への飼料供給の概念図

3.4.4. コンパートメント・モデル式

本コードで考慮する連続的な事象による、各コンパートメントにおけるインベントリの時間変化のモデル式を以下にまとめる。

$$\text{(農作物表面)} \quad \frac{dQ_{vs}}{dt} = (K_r + K_{rs}) \cdot Q_{ss} - (K_w + K_{ab} + \lambda) \cdot Q_{vs} \quad (3.93)$$

$$\text{(農作物内部)} \quad \frac{dQ_{vi}}{dt} = K_{ab} \cdot Q_{vs} + R_{up} - (K_{sen} + \lambda) \cdot Q_{vi} \quad (3.94)$$

$$\text{(土壌表面)} \quad \frac{dQ_{ss}}{dt} = K_w \cdot Q_{vs} + K_{sen} \cdot Q_{vi} + K_b \cdot Q_a - (K_r + K_{rs} + K_p + \lambda) \cdot Q_{ss} \quad (3.95)$$

$$\text{(耕作土壌)} \quad \frac{dQ_{rs}}{dt} = K_p \cdot Q_{ss} + K_{de} \cdot Q_{fs} - (K_{ad} + K_l + \lambda) \cdot Q_{rs} - R_{up} \quad (3.96)$$

$$\text{(安定土壌)} \quad \frac{dQ_{fs}}{dt} = K_{ad} \cdot Q_{rs} - (K_{de} + \lambda) \cdot Q_{fs} \quad (3.97)$$

$$\text{(家畜体内)} \quad \frac{dQ_a}{dt} = \frac{\sum_i Q_{feed}^i}{S} - (K_b + \lambda) \cdot Q_a \quad (3.98)$$

ここで、

K_r	: 再浮遊による移行率 (1/d)
K_{rs}	: 雨滴飛沫の跳ね返り係数 (1/d)
K_w	: ウェザリング率 (1/d)
K_{ab}	: 葉面吸収率 (1/d)
λ	: 崩壊定数 (1/d)
R_{up}	: 農作物の経根吸収率 (Bq/m ² ・d)
K_{sen}	: 農作物の枯朽率 (1/d)
K_b	: 排泄による家畜体内からの除去率 (1/d)
K_p	: 土壌表面から耕作土壌への浸透率 (1/d)
K_{ad}	: 安定土壌への吸着率 (1/d)
K_{de}	: 耕作土壌への脱着率 (1/d)
K_l	: 耕作土壌から深層土壌への浸透率 (1/d)
Q_{feed}	: 飼料または土壌摂取により家畜体内に取り込まれる放射性物質 (Bq/d)
S	: 家畜 1 頭当たりの牧草地面積 (m ²)

である。

4. 入力データファイルと計算結果の出力データファイル

4.1. 入力データファイルの整備

EXTREME を構成する各計算コードの入力データには、様々なパラメータ値やデータが必要である。これらのパラメータやデータについては、EXTREME を用いて計算を迅速かつ効率的に行うために、計算の都度に入力するものはできるだけ少数に絞るとともに、予め設定可能なものはデータ入力の時間短縮と入力ミスの防止という観点からも、入力データファイルとして整備しておくべきである。そこで、第 4.1 節では、EXTREME を実行するために整備した主な入力データファイルについて説明する。なお、本節では入力データファイルの内容を表 4-1～表 4-17 に示したが、これらの内容はどのような種類のパラメータやデータが整備されたかについて概要を示すための情報であり、パラメータ・データの入力順序や入力仕様を正確かつ詳細に示したものではない。入力パラメータ・データのより詳細な説明や数値の確認方法などについては、別途公開される報告書（EXTREME ユーザーマニュアル）¹³⁾を参照していただきたい。

4.1.1. 原子力発電所サイト、原子炉名及び炉型

EXTREME において評価対象としている原子力施設は、表 4-1 に示すように日本の原発である。表から分かるように、全国の 17 サイトにおける 55 機の原発を評価対象としている。表 4-1 に示した原発には建設中や計画中のものは記載されていないが、現在稼働中のもの及び廃炉決定済みを含めて停止中のものが含まれている。なお、表 4-1 において、「プラントの状況」は令和 6 年（2024 年 10 月）のデータである。また、評価対象の原発に対するサイト及びプラント情報データファイルは、表 4-2 に示すデータ内容で構成されている。

表 4-1 評価対象の原子力発電所

データ項目	原子力発電所のサイト名とプラント名	プラントの状況	自治体
1	泊原子力発電所 1 号機	停止中	北海道
2	泊原子力発電所 2 号機	停止中	
3	東通原子力発電所	停止中	青森県
4	女川原子力発電所 1 号機	廃炉決定済	宮城県
5	女川原子力発電所 2 号機	再稼働済	
6	女川原子力発電所 3 号機	停止中	
7	福島第一原子力発電所 1 号機	廃炉決定済	福島県
8	福島第一原子力発電所 2 号機	廃炉決定済	
9	福島第一原子力発電所 3 号機	廃炉決定済	
10	福島第一原子力発電所 4 号機	廃炉決定済	
11	福島第一原子力発電所 5 号機	廃炉決定済	
12	福島第一原子力発電所 6 号機	廃炉決定済	
13	福島第二原子力発電所 1 号機	廃炉決定済	
14	福島第二原子力発電所 2 号機	廃炉決定済	
15	福島第二原子力発電所 3 号機	廃炉決定済	
16	福島第二原子力発電所 4 号機	廃炉決定済	
17	東海第二発電所	新規制基準合格	茨城県
18	柏崎刈羽原子力発電所 1 号機	停止中	新潟県
19	柏崎刈羽原子力発電所 2 号機	停止中	
20	柏崎刈羽原子力発電所 3 号機	停止中	
21	柏崎刈羽原子力発電所 4 号機	停止中	
22	柏崎刈羽原子力発電所 5 号機	停止中	
23	柏崎刈羽原子力発電所 6 号機	新規制基準合格	
24	柏崎刈羽原子力発電所 7 号機	新規制基準合格	
25	志賀原子力発電所 1 号機	停止中	石川県
26	志賀原子力発電所 2 号機	停止中	
27	敦賀発電所 1 号機	廃炉決定済	福井県
28	敦賀発電所 2 号機	停止中	
29	美浜発電所 1 号機	廃炉決定済	
30	美浜発電所 2 号機	廃炉決定済	
31	美浜発電所 3 号機	再稼働済	
32	大飯発電所 1 号機	廃炉決定済	
33	大飯発電所 2 号機	廃炉決定済	
34	大飯発電所 3 号機	再稼働済	
35	大飯発電所 4 号機	再稼働済	
36	高浜発電所 1 号機	再稼働済	
37	高浜発電所 2 号機	再稼働済	
38	高浜発電所 3 号機	再稼働済	
39	高浜発電所 4 号機	再稼働済	
40	浜岡原子力発電所 1 号機	廃炉決定済	静岡県
41	浜岡原子力発電所 2 号機	廃炉決定済	
42	浜岡原子力発電所 3 号機	停止中	
43	浜岡原子力発電所 4 号機	停止中	
44	浜岡原子力発電所 5 号機	停止中	
45	島根原子力発電所 1 号機	廃炉決定済	島根県
46	島根原子力発電所 2 号機	新規制基準合格	
47	伊方発電所 1 号機	廃炉決定済	愛媛県
48	伊方発電所 2 号機	廃炉決定済	
49	伊方発電所 3 号機	再稼働済	
50	玄海原子力発電所 1 号機	廃炉決定済	佐賀県
51	玄海原子力発電所 2 号機	廃炉決定済	
52	玄海原子力発電所 3 号機	再稼働済	
53	玄海原子力発電所 4 号機	再稼働済	
54	川内原子力発電所 1 号機	再稼働済	鹿児島県
55	川内原子力発電所 2 号機	再稼働済	

表 4-2 サイト及びプラント情報データファイルの内容

データ項目	データ内容	データ単位
1	サイト名	(テキスト)
2	原子炉名	(テキスト)
3	炉型	(テキスト)
4	電力会社	(テキスト)
5	プラントタイプ	(テキスト)
6	緯度	(度)
7	経度	(度)
8	燃焼度	GWD/MTU
9	許認可出力	MWt
10	格納容器の設計漏洩率	容積%/day
11	格納容器自由空間体積	m ³
12	格納容器最高使用圧	kg/(cm ² ・g)

4.1.2. 炉型別事故タイプ及び事故シーケンス

簡易ソースターム評価を行う SSTCAL の入力データファイルは、① 原子炉型に対応したいくつかの事故パターンの設定（事故タイプと事故シーケンスの設定）、② 炉心から放出される放射性核種の割合、③ 安全設備による放出放射性核種の低減という 3 つに分けることができる。

始めに、原子炉型、事故タイプ及び事故シーケンスから、被覆管破損開始時間、圧力容器破損開始時間及び格納容器破損開始時間が決められる。また、BWR の場合には格納容器破損の前にベント作動が考慮される事故タイプがある。さらに、これらの事故に対応した漏洩率が設定される。これらの被覆管破損等の時刻や漏洩率の値は計算コード内部に記載されており、原子炉型、事故タイプ及び事故シーケンスを入力で指定することによって設定される。これらの設定値の例として、原子炉型を BWR3/mk1 とした場合の設定値を表 4-3 に示す。この表において、黄色で着色した行が BWR3/mk1 の「代表的な事故」として設定される。各原子炉型に対する代表的な事故タイプ及び事故シーケンスを表 4-4 に示す。ここで、事故タイプとして格納容器後期破損の場合には、事故タイプを変更することができる。

次に、炉心から放射性核種が放出される割合を設定する。炉心からの放出は、ギャップ放出、早期炉内放出、炉外放出及び晚期炉内放出の 4 段階に分けられる。さらに、放射性核種は 8 種類に分類されてそれぞれに対して放出割合を設定する。これらの放出割合はデフォルト値として NUREG-1465³⁰⁾、NUREG-1465 修正版及び仮想事故が計算コード内部に記載されている。これらの設定値は表 4-5 に示すようになっており、NUREG-1465 は当該文献から引用した値、そして NUREG-1465 修正版は NUREG-1465 の値に対して、早期炉内放出のヨウ素と Cs 放出を 1.5 倍（BWR の場合）、Te 放出を 5 倍、Ce 及び La の炉外放出を 1/10 にした値である。上記の 4 段階の放出に対して、どの段階までの放出かを放出特性として決める。考慮する放出特性としては、炉内+炉外または炉内のみとなっている。各 4 段階の放出継続時間は、プラント内放出継続時間で設定され、デフォルト値として NUREG-1465 及び仮想事故がある。それらの計算コード内部における設定値は表 4-6 に示す通りである。放出の最後の設定として、ヨウ素の形態を考慮して分類する割合がある。それらのデフォルト値は表 4-7 に示す通りであり、pH 制御あり／なしと仮想事故の指定によって計算コード内部で設定される。

炉心からどれだけ放射性核種が放出されるのかを設定した後、最後に工学的安全設備による除去を設定する。除去機構としては、スプレイ、フィルター、スクラビング（BWR のみ）及び自然沈着が考慮されている。フィルターによる除去は表 4-8 のように与えられ、スクラビングによる除去は BWR のみに設定され除去係数として設定する。自然沈着は格納容器内及び建屋内において考慮され、それらの除去率は表 4-9 に示す。スプレイは事故後どれくらい経ってから起動されるかを指定し、その除去率のデフォルト値は表 4-9 に示す通りである。放出や除去は、デフォルト値が計算コード内で設定されているが、ユーザーによる入力も可能である。

上記の設定によって簡易ソースターム評価が行われるが、PWR に対しては環境への移行経路を指定する必要がある（直接放出または建屋経由で放出）。PWR の事故タイプとして格納容器バイパス、蒸気発生器伝熱管破損事故（SGTR）及び仮想事故の時は「建屋経由で放出」が計算コード内部で設定される。最後に、評価を行う時間を 5 日、10 日、30 日の中から選択する。

EXTREME では原発事故で放出される放射性核種として、ヨウ素に対する 3 種類の物理化学的分類を含めて、10 グループの 73 核種を評価対象としている。評価対象核種と核種のグループ分けを表 4-10 に示す。

表 4-3 原子炉型と考慮される事故タイプ及び事故シナジェンシ (BWR3/mk1 の例)

原子炉型	事故タイプ	事故シナジェンシ	被覆管破損 開始時間[hr]	圧力容器破損 開始時間[hr]	格納容器破損 開始時間[hr]	ベント作動開始 時間[hr]	漏洩率	事故過程
BWR3 /mk1	格納容器先行破損	TOC(過圧破損、AMなし)	1.7	2.5	0.8	-	100容積%/day	スクラム失敗→高圧系作動→プールの水温上昇→格納容器過圧破損→ECCS機能喪失(仮定)→炉心損傷→圧力容器破損
BWR3 /mk1	格納容器先行破損	TW(過圧破損、AMなし)	79.5	79.9	64.2	-	100容積%/day	崩壊熱除去失敗→高圧系作動→プールの水温上昇→格納容器過圧破損→高圧系停止→炉心損傷→圧力容器破損
BWR3 /mk1	格納容器後期破損	TQUV(過温破損、AMなし)	2.2	2.6	18.7	-	100容積%/day	過渡事象→高圧注水失敗→原子炉減圧(ADS、LI)→低圧注水失敗→炉心損傷→圧力容器破損→格納容器注水失敗→格納容器過温破損
BWR3 /mk1	格納容器後期破損	TQUV(過温破損、AMなし)	2.2	2.6	18.7	-	100容積%/day	過渡事象→高圧注水失敗→原子炉減圧(ADS、LI)→低圧注水失敗→炉心損傷→圧力容器破損→格納容器注水失敗→格納容器過温破損
BWR3 /mk1	格納容器後期破損	TB(過圧破損、AMなし)	14.1	15	15	-	100容積%/hr	外部電源喪失+非常用ディーゼル発電機起動失敗+高圧注水系作動後停止(HPCI、DC電源枯渇)→炉心損傷→圧力容器破損→格納容器除熱失敗→格納容器過圧破損
BWR3 /mk1	格納容器後期破損	TQUX(過温破損、AMなし)	3.3	5.7	16.9	-	100容積%/day	過渡事象→高圧注水・減圧失敗→炉心損傷→圧力容器破損→格納容器注水失敗→格納容器過温破損
BWR3 /mk1	格納容器後期破損	TQUV(過圧破損、AMなし)	2.2	2.6	115	-	100容積%/hr	過渡事象→高圧注水失敗→原子炉減圧(ADS、LI)→低圧注水失敗→炉心損傷→圧力容器破損→格納容器注水失敗→格納容器過温破損
BWR3 /mk1	格納容器後期破損	AE(過圧破損、AMなし)	0.6	1.3	82	-	100容積%/hr	大破断LOCA→高圧注水失敗→原子炉減圧(ADS、LI)→低圧注水失敗→炉心損傷→圧力容器破損→格納容器注水失敗→格納容器過温破損
BWR3 /mk1	格納容器後期破損	TBU(過圧破損、AMなし)	2.2	2.6	74	-	100容積%/hr	全交流電源喪失+高圧注水系不動作(原子炉隔離時冷却系(RCIC))→炉心損傷→圧力容器破損→格納容器除熱失敗→格納容器過圧破損
BWR3 /mk1	格納容器ハイパス	ISLOCA(低圧、AMなし)	0.6	1.3	999	-	建屋漏洩100容積%/day	格納容器ハイパス(RCS低圧)
BWR3 /mk1	格納容器ハイパス	ISLOCA(高圧、AMなし)	1	3	999	-	建屋漏洩100容積%/hr	格納容器ハイパス(RCS高圧)
BWR3 /mk1	地震	PCVR+TB(AMなし)	14.6	15.1	0	-	100容積%/day	格納容器破損(地震)+外部電源喪失+非常用ディーゼル発電機起動失敗+原子炉隔離時冷却系(RCIC)作動→高圧注水系作動後停止(原子炉隔離時冷却系(RCIC)、DC電源枯渇)+炉心損傷→圧力容器破損
BWR3 /mk1	地震	RBR+TB(過圧破損、AMなし)	14.2	14.9	14.9	-	100容積%/hr	原子炉建屋破損(地震)+外部電源喪失+非常用ディーゼル発電機起動失敗→原子炉隔離時冷却系(RCIC)作動→高圧注水系作動後停止(原子炉隔離時冷却系(RCIC)、DC電源枯渇)→炉心損傷→圧力容器破損→格納容器除熱失敗→格納容器過圧破損
BWR3 /mk1	仮想事故	-	0	999	999	-	-	-
BWR3 /mk1	格納容器ベント	TQUV_V	1	3.75	-	20	-	低圧炉心損傷→圧力容器破損→格納容器注水(復水補給水系(MUWC)、間欠スプレイ)→格納容器除熱失敗→格納容器ベント→事象収束(ベント放出)
BWR3 /mk1	格納容器ベント	SE_V	0.68	2.98	-	15.4	-	小破断LOCA→炉心損傷→圧力容器破損→格納容器注水(復水補給水系(MUWC)、間欠スプレイ)→格納容器除熱失敗→圧力制御弁(PCV)ベント作動→(事象収束、最高使用圧の1.5倍で作動)

(*) 黄色の着色行が代表的な事故として設定される。

表 4-4 各原子炉型に対する代表的な事故タイプ及び事故シナリオ

原子炉型	事故 タイプ	事故 シナリオ	被覆管 破損開始時間 (hr)	圧力容 器破損 開始時間 (hr)	格納容 器破損 開始時間 (hr)	ベント 作動開始 時間 (hr)	漏洩率	事故過程
BWR3/mk1	格納容器 後期破損	TQUV (過温破 損、AM なし)	2.2	2.6	18.7	—	100 容積% /day	過渡事象→高圧注水失敗→原子炉減圧 (ADS、L1) →低 圧注水失敗→炉心損傷→圧力容器破損→格納容器注水失敗 →格納容器過温破損
BWR4/mk1	格納容器 後期破損	TQUV (過温破 損、AM なし)	1.6	2.3	14.1	—	100 容積% /day	過渡事象→高圧注水失敗→原子炉減圧 (ADS、L1) →低 圧注水失敗→炉心損傷→圧力容器破損→格納容器注水失敗 →格納容器過温破損
BWR4/mk1 改	格納容器 後期破損	TQUV (過温破 損、AM なし)	1.6	2.3	14.1	—	100 容積% /day	過渡事象→高圧注水失敗→原子炉減圧 (ADS、L1) →低 圧注水失敗→炉心損傷→圧力容器破損→格納容器注水失敗 →格納容器過温破損
BWR5/mk2	格納容器 後期破損	TQUV (過圧破 損、AM なし)	0.68	3.98	27.7	—	100 容積%/hr	過渡事象→高圧注水失敗→原子炉減圧 (ADS、L1) →低 圧注水失敗→炉心損傷→圧力容器破損→格納容器注水失敗 →格納容器過温破損
BWR5/mk1 改	格納容器 後期破損	TQUV (過温破 損、AM なし)	1.4	2	17.3	—	100 容積% /day	過渡事象→高圧注水失敗→原子炉減圧 (ADS、L1) →低 圧注水失敗→炉心損傷→圧力容器破損→格納容器注水失敗 →格納容器過温破損
BWR5/mk2 改	格納容器 後期破損	TQUX (過温破 損、AM なし)	1.4	2.9	7.5	—	100 容積% /day	過渡事象→高圧注水・減圧失敗→炉心損傷→圧力容器破損 →格納容器注水失敗→格納容器過温破損
ABWR	格納容器 後期破損	TB (過圧破損、 AM なし)	13.6	15.3	22.5	—	100 容積%/hr	外部電源喪失＋非常用ディーゼル発電機起動失敗＋高圧注 水系作動後停止 (原子炉隔離時冷却系 (RCIC)、8 時間 後 DC 電源枯渇) ＋炉心損傷→圧力容器破損→格納容器除 熱失敗→格納容器破損
2 ループ PWR	格納容器 後期破損	SL-δ (AM なし)	7.2	9.7	50	—	100 容積%/hr	小破断 LOCA→高圧／低圧／格納容器スプレイ再循環失敗 →炉心損傷→圧力容器破損→格納容器加圧破損 (3 倍)
3 ループ PWR	格納容器 後期破損	SL-δ (AM なし)	13.5	14.6	50	—	100 容積%/hr	小破断 LOCA→高圧／低圧／格納容器スプレイ再循環失敗 →炉心損傷→圧力容器破損→格納容器加圧破損 (2 倍)
4 ループ PWR	格納容器 後期破損	SL-δ (AM なし)	1	7.4	51	—	100 容積%/hr	小破断 LOCA→高圧／低圧／格納容器スプレイ再循環失敗 →炉心損傷→圧力容器破損→格納容器加圧破損 (3 倍)
アイスコンデンサ 型 PWR	格納容器 後期破損	SL-δ (AM なし)	1	10	23	—	100 容積%/hr	小破断 LOCA→高圧／低圧／格納容器スプレイ再循環失敗 →炉心損傷→圧力容器破損→格納容器加圧破損 (2 倍)

表 4-5 原子炉外への移行割合

NUREG-1465 : BWR								
放出段階	希ガス	I 類	Cs 類	Te 類	Sr 類	Ru 類	Ce 類	La 類
ギャップ放出	0.05	0.05	0.05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
早期炉内放出	0.95	0.25	0.2	0.05	0.02	0.0025	0.0005	0.0002
炉外放出	0.0	0.3	0.35	0.25	0.1	0.0025	0.005	0.005
晩期炉内放出	0.0	0.01	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
NUREG-1465 : PWR								
放出段階	希ガス	I 類	Cs 類	Te 類	Sr 類	Ru 類	Ce 類	La 類
ギャップ放出	0.05	0.05	0.05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
早期炉内放出	0.95	0.35	0.25	0.05	0.02	0.0025	0.0005	0.0002
炉外放出	0.0	0.25	0.35	0.25	0.1	0.0025	0.005	0.005
晩期炉内放出	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
NUREG-1465 修正版* : BWR								
放出段階	希ガス	I 類	Cs 類	Te 類	Sr 類	Ru 類	Ce 類	La 類
ギャップ放出	0.05	0.05	0.05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
早期炉内放出	0.95	0.375	0.3	0.25	0.02	0.0025	0.0005	0.0002
炉外放出	0.0	0.3	0.35	0.25	0.1	0.0025	0.0005	0.0005
晩期炉内放出	0.0	0.01	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
NUREG-1465 修正版* : PWR								
放出段階	希ガス	I 類	Cs 類	Te 類	Sr 類	Ru 類	Ce 類	La 類
ギャップ放出	0.05	0.05	0.05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
早期炉内放出	0.95	0.35	0.25	0.25	0.02	0.0025	0.0005	0.0002
炉外放出	0.0	0.3	0.35	0.25	0.1	0.0025	0.0005	0.0005
晩期炉内放出	0.0	0.01	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
仮想事故 : BWR 及び PWR								
放出段階	希ガス	I 類	Cs 類	Te 類	Sr 類	Ru 類	Ce 類	La 類
ギャップ放出	1.0	0.5	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
早期炉内放出	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
炉外放出	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
晩期炉内放出	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

* : NUREG-1465 修正版の移行割合は NUREG-1465 の値に対して、早期炉内放出のヨウ素と Cs 放出を 1.5 倍 (BWR の場合)、Te 放出を 5 倍、Ce 及び La の炉外放出を 1/10 にした値である。

表 4-6 プラント内放出継続時間

BWR：放出継続時間 (hr)				
引用文献	ギャップ放出	早期炉内放出	炉外放出	晩期炉内放出
NUREG-1465	0.5	1.5	3.0	10.0
仮想事故*	0.0	0.0	0.0	0.0
PWR：放出継続時間 (hr)				
引用文献	ギャップ放出	早期炉内放出	炉外放出	晩期炉内放出
NUREG-1465	0.5	1.3	2.0	10.0
仮想事故*	0.0	0.0	0.0	0.0

*：仮想事故は瞬時放出を仮定

表 4-7 格納容器へ移行するヨウ素の内訳

事故または状態	移行割合 (%)		
	有機ヨウ素	元素状ヨウ素	粒子状ヨウ素
pH 制御あり (pH>7)	0.15	4.85	95.0
pH 制御なし (pH=5)	4.0	1.0	95.0
仮想事故	10.0	90.0	0.0

表 4-8 非常用ガス処理系 (SGTS) フィルターによる除去割合

処理の有無	除去割合 (%)			
	有機ヨウ素	元素状ヨウ素	粒子状ヨウ素	その他の粒子
なし	0.0	0.0	0.0	0.0
あり	0.99	0.99	0.99	0.99

表 4-9 自然沈着及びスプレイ除去の除去率

除去機構の種類	粒径	除去率 (1/sec)		
		元素状ヨウ素	粒子状ヨウ素	その他の粒子
格納容器内自然沈着	1 μm	0.0	2.47E-06	2.47E-06
	4 μm	0.0	4.00E-05	4.00E-05
建屋内自然沈着	1 μm	0.0	2.47E-06	2.47E-06
	4 μm	0.0	4.00E-05	4.00E-05
格納容器内スプレイ	—	5.2E-5	1.3E-3	1.3E-3

表 4-10 評価対象核種と核種のグループ分け

グループ 項目	グループ 名称	計算対象核種
1	希ガス	Kr-85, Kr-85m, Kr-87, Kr-88, Xe-131m, Xe-133, Xe-133m, Xe-135, Xe-138 (9) *
2	有機状ヨウ素	I-131, I-132, I-133, I-134, I-135 (5)
3	元素状ヨウ素	I-131, I-132, I-133, I-134, I-135 (5)
4	粒子ヨウ素	I-131, I-132, I-133, I-134, I-135 (5)
5	アルカリ金属	Cs-134, Cs-136, Cs-137, Rb-86 (4)
6	テルル類	Te-127, Te-127m, Te-129, Te-129m, Te-131m, Te-132, Sb-127, Sb-129 (8)
7	Ba/Sr	Sr-89, Sr-90, Sr-91, Sr-92, Ba-139, Ba-140 (6)
8	貴金属	Co-58, Co-60, Mo-99, Tc-99m, Ru-133, Ru-135, Ru-136, Rh-105 (8)
9	セリウム類	Ce-141, Ce-143, Ce-144, Np-239, Pu-238, Pu-239, Pu-240, Pu-241 (8)
10	ランタノイド	Y-90, Y-91, Y-92, Y-93, Zr-95, Zr-97, Nb-95, La-140, La-141, La-142, Pr-143, Nd-147, Am-241, Cm-242, Cm-244 (15)
	(総計)	(73)

* : 括弧内の数値は各グループ内における計算対象核種数を表す。

4.1.3. 放射性核種の線量（率）換算係数

EXTREME では、ヨウ素に対する 3 種類の物理化学的分類を含めて 73 核種を評価対象としている。それらの放射性核種に関して、外部及び内部被ばく線量は線量（率）換算係数を用いて評価する。外部被ばくでは、サブマージョンによる実効線量と地表面沈着核種からの実効線量をそれぞれ評価する。一方内部被ばくでは、吸入による 1 歳児と成人の赤色骨髄、甲状腺及び実効線量を評価する。これら被ばく線量を評価する際に用いる線量（率）換算係数を整備した。外部被ばくに係る線量率換算係数は、サブマージョンまたは地表面沈着核種による単位空気中濃度または単位地表面沈着密度当たりの実効線量率、また吸入による線量換算係数は、1 歳と成人の単位吸入摂取量当たりの赤色骨髄、甲状腺の等価線量及び実効線量と定義される。データファイルの内容は表 4-11 に示す通りである。

また、EXTREME を構成する 2 つのコード Puff 及び CMPMDL において、計算対象核種の崩壊による子孫核種の生成を計算するために、崩壊系列データファイルを整備した。データファイルの内容を表 4-12 に示す。

表 4-11 線量（率）換算係数データファイルの内容

データ項目	データ内容	データ単位
1	核種名	(テキスト)
2	核種グループ番号	—
3	炉内インベントリ	Bq/MWt
4	半減期	(—、「m」、「h」、「d」、「y」のいずれか)
5	サブマージョンによる実効線量の線量率換算係数	(Sv/s)/(Bq/m ³)
6	地表面沈着核種による実効線量の線量率換算係数	(Sv/s)/(Bq/m ²)
7	吸入による 1 歳児の赤色骨髄、甲状腺及び実効線量の線量換算係数	Sv/Bq
8	吸入による成人の赤色骨髄、甲状腺及び実効線量の線量換算係数	Sv/Bq

表 4-12 崩壊系列データファイルの内容

データ項目	データ内容	単位
1	親核種名	(テキスト)
2	崩壊系列の順番	—
3	核種名	(テキスト)
4	半減期	—
5	半減期の単位	「us」、「ms」、「s」、「m」、 「h」、「d」、「y」のいずれか
6	子孫核種数	—
7	子孫核種の ID	—
8	分岐比	—

* 「us」は「 μ s：マイクロ秒」を表す。

4.1.4. 各サイト周辺の気象観測局情報

EXTREME を構成する Puff では、各評価対象サイト周辺におけるいくつかの代表的な風向・風速等の気象観測データを入力し、MASCON_FEM で作成された評価対象領域内における風向・風速場データを用いて、大気拡散及び被ばく線量評価を行う。評価対象サイト周辺における気象観測局データファイルの内容を表 4-13 に示す。ここでは、全国の 13 サイト周辺における気象観測局データファイルが準備されている。評価対象サイト周辺における代表的な風向・風速等の気象観測データについては、原子力施設周辺において観測され、ウェブサイト上で公開しているいくつかの気象観測データを入力する。開発当時の Puff では、「環境防災 N ネット⁵」の気象観測データを入力していたが、現状の Puff では「放射線モニタリング情報共有・公表システム（以下、RAMIS⁶という）³¹⁾」及び「地域気象観測システム（以下、AMeDAS⁷という）³²⁾」のデータを入力するようになっている。

EXTREME で入力する必要のある気象データは、風向、風速、気温、降雨強度、大気安定度、混合層高さである。このうち、大気安定度は A～G の中から選択し、選択された大気安定度から混合層高さが自動的に設定される（混合層高さは手動による変更も可能である）。大気安定度による混合層高さの自動設定は表 4-14 に示す通りである。風向、風速、気温、降雨強度については、風向は 16 方位から選択するが、その他は数値データを入力しなければならない。風向・風速はいくつかの観測所のうち、少なくとも 1 つの観測所における風向・風速を入力しなければならない。また、気温と降雨強度も必ず入力する必要がある。これらのデータが入力されていなければエラーとなり、エラーメッセージボックスが表示される。

⁵ 環境防災 N ネットは、文部科学省が以前に運用していた原子力防災や環境放射能に関する一般向け情報を提供するホームページである。文部科学省原子力安全課からの委託事業として、関連機関との連携の下に原子力安全技術センターが作成した。原子力防災に対する取組み状況、緊急被ばく医療体制、日本各地の環境放射能・放射線情報、原子力防災研修事業等に関する情報が掲載された。環境放射能・放射線情報については、全国の原子力施設の周辺地域における環境放射線モニタリングに関する情報、さらにリアルタイム気象情報等が提供された。平成 24 年（2012 年）9 月に原子力規制庁が発足した後、これらの情報は原子力規制庁が運営する「モニタリング情報共有システム (RAMISES)」に移管された。さらに RAMISES は、後に「放射線モニタリング情報共有・公表システム (RAMIS)」に機能拡張された。

⁶ RAMIS は、原子力規制庁が運営する「放射線モニタリング情報共有・公表システム」の通称である。全国の環境放射線モニタリングポストによる空間放射線量率の測定値等をリアルタイムで配信するとともに、原子力災害発生時には緊急時モニタリングの結果も公開する。また、本システムには風向・風速、降雨量という気象情報も含まれている。

⁷ AMeDAS は、気象庁が運営する無人観測施設「地域気象観測システム」の通称である。本システムは、日本国内約 1,300 か所の気象観測所（通称 AMeDAS 観測所）で構成されている。主として、降水量、気温、日照時間、風向・風速の 4 気象要素を観測している。観測網の密度については、降水量が約 17 km (= 17 km 四方の正方形につき 1 か所)、他の要素が約 21 km である。

表 4-13 評価対象サイト周辺における気象観測局データファイルの内容

データ項目	データ内容	データ単位
1	観測局名	(テキスト)
2	観測局の設置経度	(度)
3	観測局の設置緯度	(度)
4	観測項目の数	—
5	観測項目	(テキスト)

表 4-14 大気安定度による混合層高さの自動設定

大気安定度	混合層高さ (m)
A	1,600
B	1,200
C	800
D	560
E	320
F	200
G	200

4.1.5. 食物連鎖パラメータ

CMPMDL を実行するために必要な 3 つの主たる入力データのうち、放射性物質の地表面沈着量データは Puff で計算された値を使用することになる。一方、残りの 2 つの入力データ（農畜産物関連データ及び土壌関連データ）については、核種、農畜産物、土壌等に関連した非常に多くのパラメータを設定する必要がある。このため事前に設定できる値は、可能な限り設定することとした。

農畜産物関連データファイルの内容は表 4-15 に示す通りであり、このうち事故発生日は EXTREME で設定されることになる。評価対象核種は 73 核種であるが、物理化学的形態を考慮した有機ヨウ素、元素状ヨウ素及び粒子状ヨウ素に関する個別のパラメータは参考文献には掲載されていないため、ヨウ素の値を設定することとした。

土壌関連データファイルの内容を表 4-16 に示す。土壌関連データは評価対象領域のメッシュ及びそのメッシュの土壌種類に対応した値を設定する必要があるが、公開されている土壌依存のパラメータは少なく、また簡単化のため、ここでは 1 種類だけの土壌を仮定し「loam」を代表とした。表 4-16 の「同一土壌とするメッシュ番号」では、評価対象領域が構成されるメッシュ番号を設定する必要があり、EXTREME の評価対象領域に対応したメッシュ番号を設定する。

農畜産物関連データ及び土壌関連データについては、関連文献^{33)・35)}に与えられているパラメータ値を、各々のデータファイルにデフォルト値として収納した。その他、COMIDA2 コード用のサンプル問題 BASECASE における設定値³⁶⁾、OSCAAR コードにおける設定値³⁷⁾を適宜用いた。文献等に与えられていない値については、放出分類（希ガス、ハロゲン（I, Br）、アルカリ金属（Cs, Rb）、テルル類（Te, Sb, Se）、Br/Sr、貴金属（Co, Mo, Tc, Ru, Rh, Pd）、セリウム類（Ce, Np, Pu）及びランタノイド（Y, Zr, Nb, La, Pr, Nd, Eu, Pm, Sm, Am, Cm）の中で与えられている値を設定することとした。

表 4-15 農畜産物関連データファイルの内容

データ項目	データ内容	データ単位
1	事故発生日	(1 月 1 日からの日数)
2	事故発生日からの評価期間	y
3	計算結果出力点数 (最大 50)	—
4	土壌表面から耕作土壌への浸透率	1/d
5	再浮遊による移行率	1/d
6	雨滴飛沫の跳ね返り係数	1/d
7	ウェザリング率	1/d
8	安定土壌への吸着率	1/d
9	耕作土壌への脱着率	1/d
10	表面土壌の密度	kg/m ³
11	表面土壌の層厚	m
12	耕作土壌の層厚	m
13	核種名、グループ番号	(テキスト、—)
14	農作物の成長率	1/d
15	農作物の枯朽率	1/d
16	農作物の乾燥重量と湿重量の比率	—
17	農作物表面における放射性物質の 可食部への残留率	—
18	農作物の葉による遮断定数	m ² /kg
19	農作物の存在量の初期値	kg-dry/m ²
20	農作物の存在量の上限值	kg-dry/m ²
21	成長期間外における農作物の存在量	kg-dry/m ²
22	農作物の成長期間の開始日	(1 月 1 日からの日数)
23	農作物の収穫日	(1 月 1 日からの日数)
24	耕作実施日	(1 月 1 日からの日数)
25	農作物の葉面吸収率	1/d
26	放牧期間の開始日	(1 月 1 日からの日数)
27	放牧期間の終了日	(1 月 1 日からの日数)
28	家畜の土壌摂取率	kg/d
29	家畜一頭当たりの牧草地面積	m ²
30	家畜の農作物の摂取方法	—
31	家畜の土壌摂取	—
32	農作物の保管期間	(1 月 1 日からの日数)
33	家畜の農作物摂取率	kg/d
34	畜産物への移行係数	d/kg または d/L
35	排泄による家畜体内からの除去率	1/d
36	年間平均降雨量	m/d
37	年間平均灌漑水量	m/d
38	年間平均蒸発量	m/d
39	年間平均地表面流水量	m/d

表 4-16 土壌関連データファイルの内容

データ項目	データ内容	データ単位
1	核種名、グループ番号	(テキスト、－)
2	耕作土壌密度	kg/m ³
3	耕作土壌の年間平均含水率	m ³ water per m ³ soil
4	分配係数	ml/g
5	土壌から農作物への移行係数	Bq/g plant per Bq/g soil
6	同一土壌とするメッシュ番号*	－

*「同一土壌とするメッシュ番号」とは、土壌種類グループを構成するメッシュ番号を意味する。**EXTREME** では、評価対象領域が構成されるメッシュ番号を設定する必要がある、**EXTREME** の評価対象領域に対応したメッシュ番号を設定する。

4.1.6. 社会環境及び地形データ（行政区画、人口、標高）

専門家支援ツール EXTREME で使用する社会環境及び地形データは、市区町村行政界地図データ（行政区画データ）、国勢調査集計データ（人口データ）及び標高データである。

（1）市区町村行政界地図データ

EXTREME に収納されている市区町村行政界地図データは、三井造船 E&S システム技研株式会社が有償頒布する MapInfo®シリーズ用の地図データである。このデータは、以下に示す 2 つの機能で利用する。

- 1) 地図描画をする際の背景
- 2) 人口統計処理をする際の都道府県番号検索

（2）国勢調査集計データ

EXTREME に収納されている国勢調査集計データは、「地域メッシュ統計平成 2 年国勢調査集計」であり、一般財団法人日本統計協会が有償頒布するデータである。原子力機構で開発した長期被ばく線量及び環境影響評価コード COLINA の一環として作成した「国土交通省数値情報変換プログラム」を利用して変換する。

ただし、上記プログラムは平成 2 年のデータに対応したプログラムであるため、最新のデータには対応していない。

（3）標高データ

EXTREME に収納されている標高データは、所定の緯度・経度における標高データ（NetCDF3 形式）である。標高データファイルの内容は表 4-17 に示す通りである。このデータは、評価領域設定コード preArea によって、評価地点を中心とした矩形格子の評価対象領域における各格子点上の標高データ（同じく NetCDF3 形式）に変換される。

表 4-17 標高データファイルの内容

データ項目	データ内容	データ単位
1	緯度	(度)
2	経度	(度)
3	標高	m

EXTREME では、計算結果を地図上に描画する機能が準備されているが、計算結果の分布図を描画するためには、MapInfo®というソフトウェア及び社会環境データ（上記（1）と（2）のデータ）が必要になる。なお、MapInfo®や社会環境データがインストールされていない場合には、簡易表示機能を利用できる。しかし、この場合には放射性物質濃度や被ばく線量という計算結果は表示されるが、背景の地図は描画されない。

4.2. 計算結果の出力データファイルの概要

専門家支援ツール **EXTREME** を構成する各計算コードでは様々な計算結果がファイルに出力され、一覧表として示すとともに経時変化や平面分布を図示するために使用される。第 4.2 節では、**EXTREME** の各構成コードから出力される主たる出力データファイルを説明する。なお、本節における出力データファイルの内容を示した表 4-18～表 4-22 及び図 4-1 は、どのような種類のデータが出力されるかについて概要を示すための情報であり、データの出力順序や出力仕様を正確かつ詳細に示したものではない。出力データのより詳細な説明や数値の確認方法などについては、別途公開される報告書（**EXTREME** ユーザーマニュアル）¹³⁾を参照していただきたい。

4.2.1. 放射性核種の存在割合及び環境への放出量

簡易ソースターム評価コード **SSTCAL** は、原子炉の炉型、事故タイプ、事故シーケンス、工学的安全設備の作動状況などの事故情報を入力し、評価対象プラントの各ボリューム内の存在量及びソースタームの積算値を初期炉内内蔵量に対する割合で計算し、放射性核種の存在割合及び環境への放出量を出力する。なお、計算時間を短縮させるため、線源強度別ではなく放射性核種を 10 グループで代表させている。計算結果は、ヨウ素の分類を 3 種類に拡張した 10 グループのそれぞれに対して、格納容器内、建屋内、環境、フィルター捕集及び炉外への放出積算値が、時間毎に出力される。

表 4-18 に示すような情報が **SSTCAL** から出力されるが、GUI における表示形式は同表に示す通りである。主な計算結果は表及び図形式でそれぞれ出力される。各放出核種グループの存在割合に関する図形式の出力例を図 4-1 に示す。

表 4-18 **SSTCAL** からの出力情報及び GUI における表示方法

データ項目	SSTCAL からの出力情報	GUI における表示形式
1	事故進展時間計算部の概要	テキスト
2	評価プラント及び事故シーケンスに関する情報	テキスト
3	ソースターム基本情報の設定	テキスト
4	工学的安全設備の作動条件等の設定	テキスト
5	CV 漏洩率及び RB 漏洩率の設定情報	テキスト
6	PWR での CV から環境への移行経路の設定	テキスト
7	出力制御及び除去率等の設定情報	テキスト
8	計算終了時初期炉内内蔵量に対する存在割合	表（図）
9	放射性核種の存在割合の時系列データ	図（表）
10	環境への放出量（崩壊なし）	図（表）
11	環境への放出量（崩壊あり）	図（表）
12	環境影響評価用関連データ	テキスト
13	プルーム排出流量	図（表）

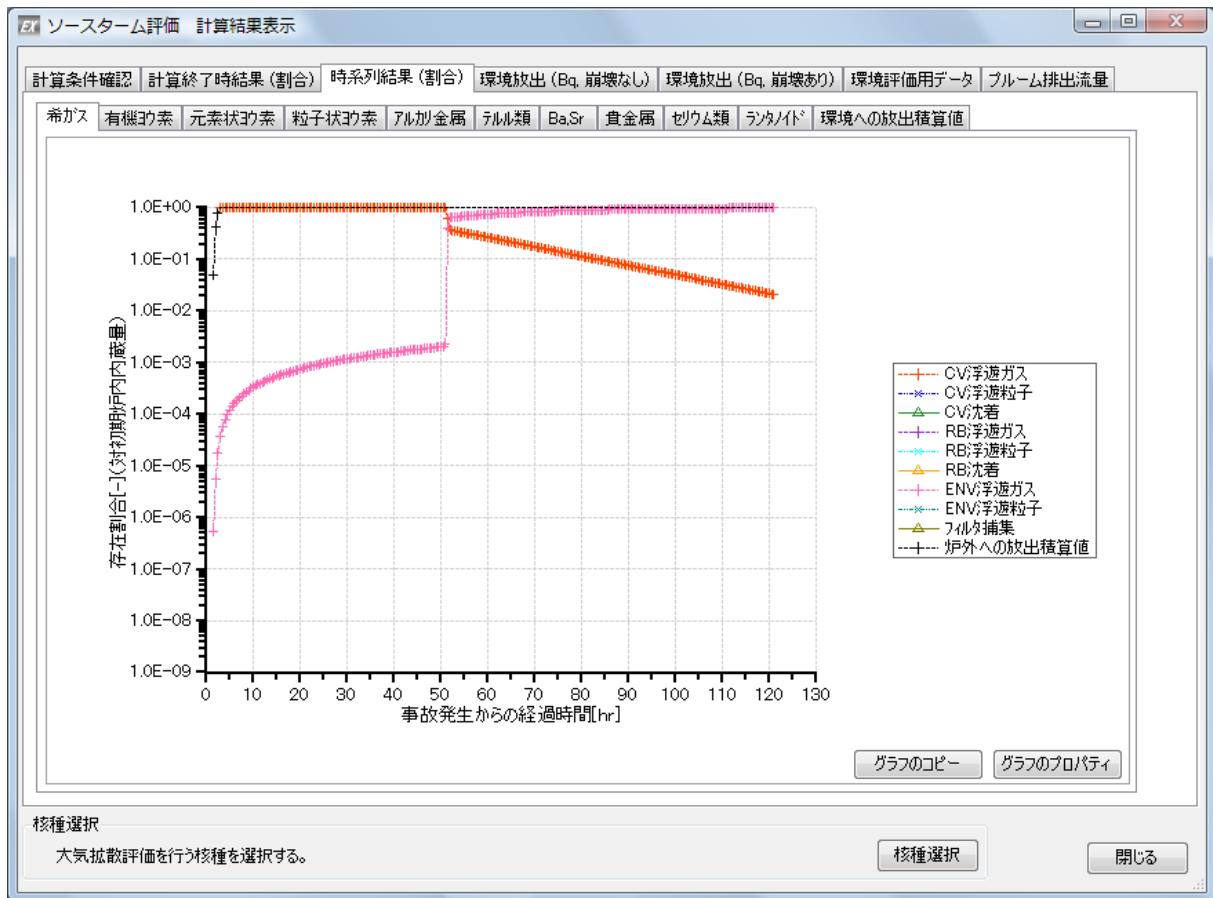


図 4-1 各放出核種グループの存在割合に関する計算結果（図形式）の出力例

4.2.2. サイト周辺の風向・風速場

風向・風速場作成コード MASCON_FEM は、質量保存則を満たすように調整した風向・風速場を矩形格子点メッシュで作成し、これらの計算結果をファイルに出力する。出力データファイルの内容を表 4-19 に示す。

表 4-19 MASCON_FEM による計算結果の内容

データ項目	データ内容	データ単位
1	測定点の緯度	(度)
2	測定点の経度	(度)
3	放出点を中心とした測定点の X 座標	m
4	放出点を中心とした測定点の Y 座標	m
5	高度	m
6	計算結果の風向	(度)
7	計算結果の風速	m/s
8	計算結果の U	m/s
9	計算結果の V	m/s
10	質量保存則を満たすように変換した風向	(度)
11	質量保存則を満たすように変換した風速	m/s
12	質量保存則を満たすように変換した U	m/s
13	質量保存則を満たすように変換した V	m/s

4.2.3. 放射性物質の大気中濃度、地表面沈着量及び被ばく線量

大気拡散及び被ばく線量評価コード **Puff** は、矩形格子点メッシュの評価地点における空気及び地表面における放射性物質濃度並びに外部及び内部被ばく線量を計算し、これらの計算結果をファイルに出力する。出力データファイルの内容は表 4-20 に示した通りである。放射性物質濃度については時間積算濃度が計算され、基本的には空気中濃度は評価地点においてプルームが存在している時間の積算値、そして地表面沈着量は評価地点において沈着が生じている期間の積算値である。複数の評価期間が設定されている場合には、空気中濃度は当該評価期間の開始から終了までの濃度の時間積算値である。一方、地表面沈着量は全評価期間の開始から当該評価期間の終了までの時間積算値が計算される。被ばく線量評価における時間積算濃度の考え方とその計算方法については、第 3.3.2 項を参照していただきたい。また、**Puff** から出力されるデータファイルのうち、食物連鎖解析コード **CMPMDL** で使用される地表面沈着量の計算結果の内容を表 4-21 に示す。ここで出力される地表面沈着量も時間積算濃度であり、全評価期間の開始から当該評価期間の終了までの時間積算値が計算される。

表 4-20 **Puff** による計算結果の内容

データ項目	データ種類	データ内容	データ単位
1	サイト情報	サイト名	(テキスト)
2		緯度	(度)
3		経度	(度)
4	核種情報	核種数 (最大 80)	—
5		核種名、グループ番号	(テキスト、—)
6	放射性物質濃度	地表面付近の時間積算空気中濃度	(Bq/m ³)・h
7		時間積算地表面沈着量	(Bq/m ²)・h
8	外部被ばく線量	サブマージョンによる外部被ばく線量 (実効線量)	mSv
9		地表面沈着核種による外部被ばく線量 (実効線量)	mSv
10	内部被ばく線量	吸入による 1 歳児の内部被ばく線量 (赤色骨髄、甲状腺及び実効線量)	mSv
11		吸入による成人の内部被ばく線量 (赤色骨髄、甲状腺及び実効線量)	mSv

表 4-21 CMPMDL で使用する地表面沈着量の計算結果の内容

データ項目	データ内容	データ単位
1	サイト名	(テキスト)
2	緯度	(度)
3	経度	(度)
4	核種数 (最大 80)	—
5	メッシュ数 (X 方向 : 最大 101)	—
6	メッシュ数 (Y 方向 : 最大 101)	—
7	評価対象領域の X 座標最小値	m
8	評価対象領域の X 座標最大値	m
9	評価対象領域の Y 座標最小値	m
10	評価対象領域の Y 座標最大値	m
11	核種名	(テキスト)
12	放出カテゴリー	—
13	時間積算地表面沈着量	(Bq/m ²)・h

4.2.4. 放射性物質の農畜産物中濃度

食物連鎖解析コード CMPMDL は、矩形格子点メッシュの評価地点における農畜産物中の放射性物質濃度を計算し、これらの計算結果をファイルに出力する。出力データファイルの内容を表 4-22 に示す。

表 4-22 CMPMDL による計算結果の内容

データ項目	データ種類	データ内容	データ単位
1	サイト情報	サイト名	(テキスト)
2		緯度	(度)
3		経度	(度)
4	核種情報	核種数 (最大 80)	—
5		核種名、グループ番号	(テキスト、—)
6	農畜産物情報	農畜産物数	—
7		農畜産物名	(テキスト)
8	農作物中の 放射性物質濃度	牧草	Bq/kg
		干草	
		穀物	
		豆類	
		果物	
		根菜	
		葉菜	
9	畜産物中の 放射性物質濃度	牛肉	Bq/kg
		牛乳	Bq/L

5. EXTREME による試計算

5.1. 試計算に用いた計算条件

EXTREME を構成する計算コードのうち、風向・風速場作成コード MASCON_FEM と大気拡散及び被ばく線量評価コード Puff を用いた試計算を実施した。最初に MASCON_FEM では、風向・風速場が質量保存則を満たすように調節を行う手法について、その性能評価を行うための試計算を行った。試計算の条件として、大飯原子力発電所の 15 km 四方を対象として、定常かつ単純な気象条件（北風の一方向風、大気安定度 A、混合層高さ 1,600 m）を用いた。

次に Puff では、次に示す 2 つのケースについて試計算を実施した。

(1) ガウス・プルームモデル及び OSCAAR コードとの比較

(2) 仮想事故に対する試計算

ケース (1) では、大気拡散解析コードを対象として、平坦な地形及び定常状態を想定した Puff で大気拡散解析を行い、その結果とガウス・プルームモデル及び OSCAAR コードの結果を比較した。比較に用いた計算条件を表 5-1 に示す。ここで比較計算に使用したガウス・プルームモデルは、MACCS2 (MELCOR Accident Consequence Code System)^{38),39)}に採用されている大気拡散解析モデルである。MACCS2 は、米国 Sandia National Laboratories (SNL) が原子力発電炉の安全性評価を目的として作成した確率論的環境影響評価コードである。また、OSCAAR (Off-Site Consequence Analysis code for Atmospheric Release in reactor accident)⁴⁰⁾⁻⁴³⁾は、原子力機構で開発された確率論的環境影響評価コードである。OSCAAR の中では、大気拡散解析モデルとして Puff と同様にパフモデルが用いられている。

ケース (2) では、本支援ツールを使用し、大飯原子力発電所で事故が起きた場合を想定して試計算を行った。試計算に用いた計算条件やデータ等を表 5-2～表 5-6 に示す。

表 5-1 ガウス・プルームモデル及び OSCAAR コードとの比較に用いた計算条件

項目	条件
ソースターム	放出高さ：60 m 放出核種：Kr-85、I-131（粒子状） 放出時間：24 時間 放出条件：表 5-3 プルームライズは考慮しない
地形	平坦
評価時間	24 時間
移流時間間隔	15 分
気象条件等	風向・風速場：北風 1 m/s（一様風：定常状態） 大気安定度：A と F を想定 降雨量：なし（0 mm/h） 乾性沈着速度：表 5-4

表 5-2 仮想事故に対する試算に用いた計算条件

項目	条件
ソースターム	簡易ソースターム評価コード SSTCAL で計算した値 (代表シーケンスを設定：表 5-5) 評価対象炉：大飯原子力発電所 4 号炉 (炉型：4 ループ PWR、許認可出力：3,423 MWt) プルームライズを考慮 濃度出力核種：Kr-85、I-131 (有機)、I-131 (元素状)、I-131 (粒子状)、 Cs-137、Te-132、Sr-92、Mo-99、Pu-241、Am-241 子孫核種は 1 世代のみ考慮
地形データ	大飯原子力発電所周辺
気象条件等	日時：2009 年 11 月 18 日 13 時 50 分 風向・風速：環境防災 N ネット (当時) ⁸ から入手 (表 5-6) 気温：9.7 °C：AMeDAS (小浜) ⁹ 大気安定度は D と仮定 乾性沈着速度・湿性沈着係数：表 5-4

表 5-3 試算に使用した放出条件

核種	初期炉内 インベントリ (Bq)	放出割合 (—)
Kr-85	4.046E+16	9.997E-01
I-131 (粒子)	3.904E+18	1.128E-01

⁸ 第 4.1.4 項及び脚注 5 を参照。⁹ 第 4.1.4 項及び脚注 7 を参照。ここでは、試算を実施した当時における気象庁ホームページを参照して、「ホーム>気象統計情報>過去の気象データ検索」から、地点と日付を選択し、10 分毎の値から抽出した値を採用した。

表 5-4 試計算に使用した沈着パラメータ

	乾性沈着速度 (m/s)	湿性沈着係数 (ー) *	
		A	α
希ガス	0.0	0.0	0.0
元素状ヨウ素	0.01	8.0E-05	0.6
有機ヨウ素	0.0005	8.0E-07	0.6
粒子 (エアロゾル)	0.001	8.0E-05	0.8

* ウォッシュアウト係数 ($\lambda_w = A \times I^\alpha$) に使用されている係数である。式 3.50 参照。

表 5-5 ソースターム評価コードで設定した代表的な事故シナリオ

設定項目	設定シナリオまたはデータ
事故タイプ	格納容器後期破損
事故シーケンス	SE-6 (AM なし)
炉外への移行割合	NUREG-1465 修正版
放出特性	炉内及び炉外放出
放出継続時間	NUREG-1465
CV へ移行するヨウ素内訳	pH 制御あり
フィルター	希ガスを除き 99 % 除去
スプレー作動条件	不作動
PWR 移行経路	環境へ直接放出

表 5-6 ケース (2) の計算に使用した風向・風速

観測局名	風向	風速 (m/s)
小浜市 阿納尻	北	5.4
小浜市 小浜	北	0.8
おおい町 宮留	北	7.0
おおい町 日角浜	南南東	2.5
おおい町 長井	北東	4.7

5.2. 試計算結果とその考察

5.2.1. 風向・風速場コードによる試計算

MASCON_FEM では、評価対象領域内の数地点における観測風を領域内の格子点上に補間し、質量保存則を満たすように調節を行う。このため、初期風向・風速場の発散よりも調節風向・風速場の発散の方がゼロに近くなっていなければならない。MASCON_FEM の性能評価のための試計算として、双方の風向・風速場の発散を調べた。

試計算の条件は、大飯原子力発電所の 15 km 四方において、北風の一方向風、大気安定度 A、混合層高さ 1,600 m とした。その条件における初期風向・風速場と調節風向・風速場の発散の結果を図 5-1 に示す。初期風向・風速場の発散に比べて、調節風向・風速場の発散は最大 17 桁も小さくなりゼロに近くなることが計算された。これにより、風向・風速場が質量保存則を満たすように調節を行う手法が適切に機能していることが分かった。

5.2.2. 大気拡散解析コードによる試計算

(1) MACCS 及び OSCAAR との比較

Puff は矩形格子点メッシュの評価地点で計算されるが、MACCS2 は同心円メッシュの評価地点で計算される。MACCS2 では、風下軸上における放射性物質の空気中濃度が算出されるため、風下軸上における時間積算空気中濃度を比較した。また、比較に用いた OSCAAR は、評価地点が同心円メッシュ上で計算するバージョンであるため、MACCS2 の場合と同様に風下軸上における放射性物質の時間積算空気中濃度の結果を比較した。Puff による計算結果を MACCS2 及び OSCAAR による計算結果と比較したものを図 5-2 に示す。ここでは、計算対象とした Kr-85 と I-131 (粒子) の時間積算空気中濃度について、大気安定度が A と F に対する比較結果を示す。また、図 5-2 では MACCS2 の計算結果を「Plume」と表記している。

3 種類の大気拡散解析コード (Puff、MACCS2 及び OSCAAR) による計算結果は、ここで用いた計算条件の下では、全体として比較的良く一致していることが分かった。これにより、ここで開発した大気拡散解析コード Puff は、従来から広く使用されている実績を有する MACCS2 及び OSCAAR と同等の性能を有することが理解された。

3 種類の計算コードによる結果において、大気安定度 A と F を比較すると、大気安定度が A の時は放出点に最も近い 1 km 地点で濃度が最大となっているが、大気安定度が F の時は 4~5 km 地点で最大となっている。これは、以下の理由によると推定される。大気安定度 A では最も大気が不安定であるため、大気中に放出され風下に移流された放射性物質は放出源近傍において地表面に接地すると推定される。一方、大気安定度 F では大気が安定であるため、風下に移流された放射性物質が接地する距離は放出源から離れると考えられる。

Puff と OSCAAR では混合層高さを設定しており、混合層高さでの反射が考慮されているが、MACCS2 ではそれが考慮されていない (MACCS2 では地表面での反射のみ)。また、Puff では MASCON_FEM で生成された風向・風速場を使用し、それらは地表面と混合層上面までをべき乗則の重みを付けて平均化するため、移流・拡散解析に使用する風速は 1 m/s よりも大きくなっている (詳細については第 3.2.3 項を参照)。混合層高さを考慮している 2 つのパフモデル (Puff と OSCAAR) による計算結果は、ガウス・プルームモデルを用いた MACCS2 の結果と良く一致しているが、上記のように、Puff では風速に対してべき乗則の重みを付け平均の風速を使用しているため、大気安定度 A では混合層高さが高くなり、風速が 1 m/s よりも大きくなることにより、

時間積算空气中濃度が小さくなっていると推定される。

また Puff では、2 つの核種及び 2 つの大気安定度において、評価対象領域の境界において濃度が他の 2 つの計算コードに比べて低くなっている。これは、Puff では領域外に移流したパフを追跡しない方法を取っているため、その分境界の外側のパフによる寄与が考慮されないことによると推察される。

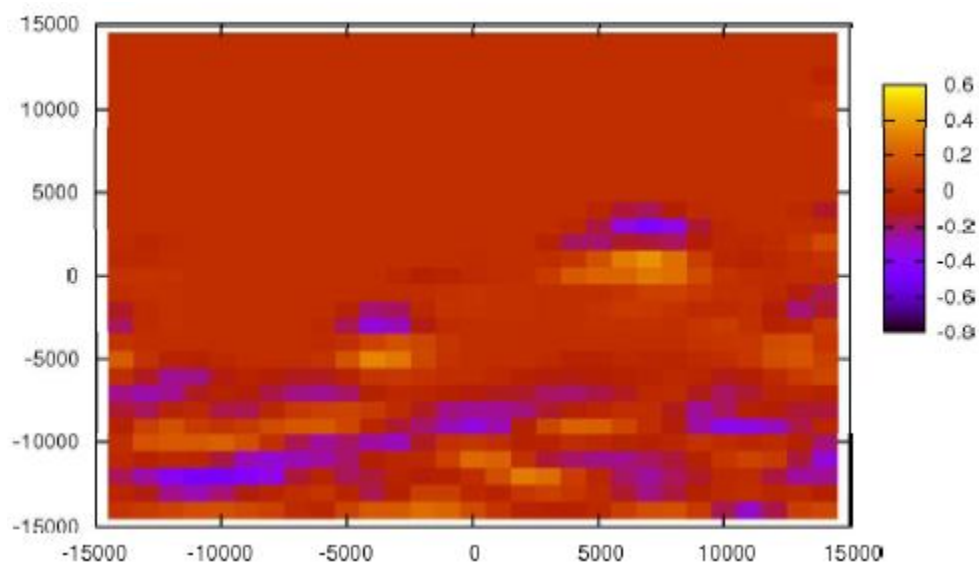
(2) 仮想事故に対する試計算

表 5-2 に示したように、試計算に使用した気象場は、海から陸へ風が吹き込んでいた 2009 年 11 月 18 日とした。また、preArea で作成された地形データを図 5-3 に示す。この図から、気象条件として大気安定度 D を仮定した場合、南西方向の領域において混合層高さ (560 m) より標高が高い場所が見られることが分かる。

地表面付近の時間積算空气中濃度、クラウドシャインによる外部被ばく線量及び吸入による内部被ばく線量 (成人) の計算結果をそれぞれ図 5-4、図 5-5 及び図 5-6 に示す。各図では、地形データを採用した結果 (以下、「地形データあり」と記載) を左側に、地形データを採用していない結果 (以下、「地形データなし」と記載) を右側に示した。3 種類の図において「地形データなし」の結果を見ると、風向に沿って放出点から風下側に放射性物質が移流・拡散していることが分かる。一方、「地形データあり」の結果を見ると、地形に沿って風が迂回して吹いている様子が見て取れる。以上の結果から、Puff では地形データの影響が考慮された移流・拡散計算が実施されていることが分かり、同時に大気拡散解析において地形データを的確に用いることの重要性が理解された。ただし、Puff で採用したパフモデルでは、山等の障害物がある場合にはそれを避けるように吹く風に乗ってパフは移動するが、障害物の両側にパフが分裂したり伸びたり合体したりという現象は考慮できないことに留意すべきであろう。

また、図 5-4 において 1 か所白抜きとなっているメッシュがあり、そのメッシュの空气中濃度は 0 Bq であった。そのメッシュでは標高が高く海拔約 570 m である (図 5-3 参照)。気象条件には大気安定度 D を仮定したため、混合層高さは 560 m と設定されている (表 4-14 参照)。Puff では、混合層高さで放射性物質は反射すると設定しているため、混合層高さよりも標高の高いこのメッシュでは、放射性物質が到達せずに濃度が 0 Bq となっている。クラウドシャインによる外部被ばく線量 (図 5-5) 及び吸入による内部被ばく線量 (成人 : 図 5-6) にも同様の結果が表れている。以上のように、大気拡散解析において混合層高さと標高を考慮する場合には、標高が高い地域では空气中濃度や被ばく線量が 0 と計算される場合があることに留意すべきである。

初期風向・風速場の発散



調節風向・風速場の発散

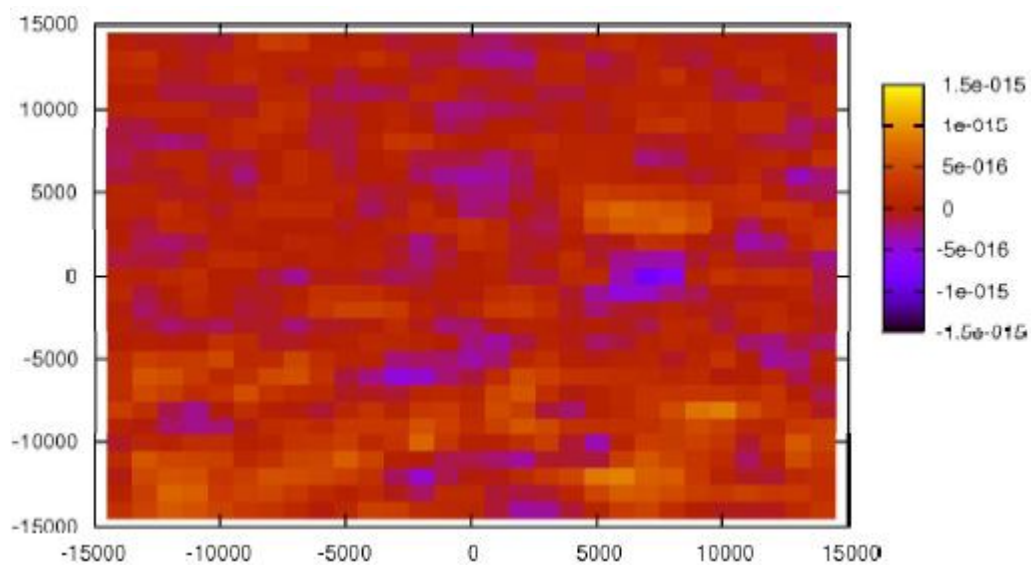


図 5-1 初期風向・風速場と調節風向・風速場の発散（単位は無次元）

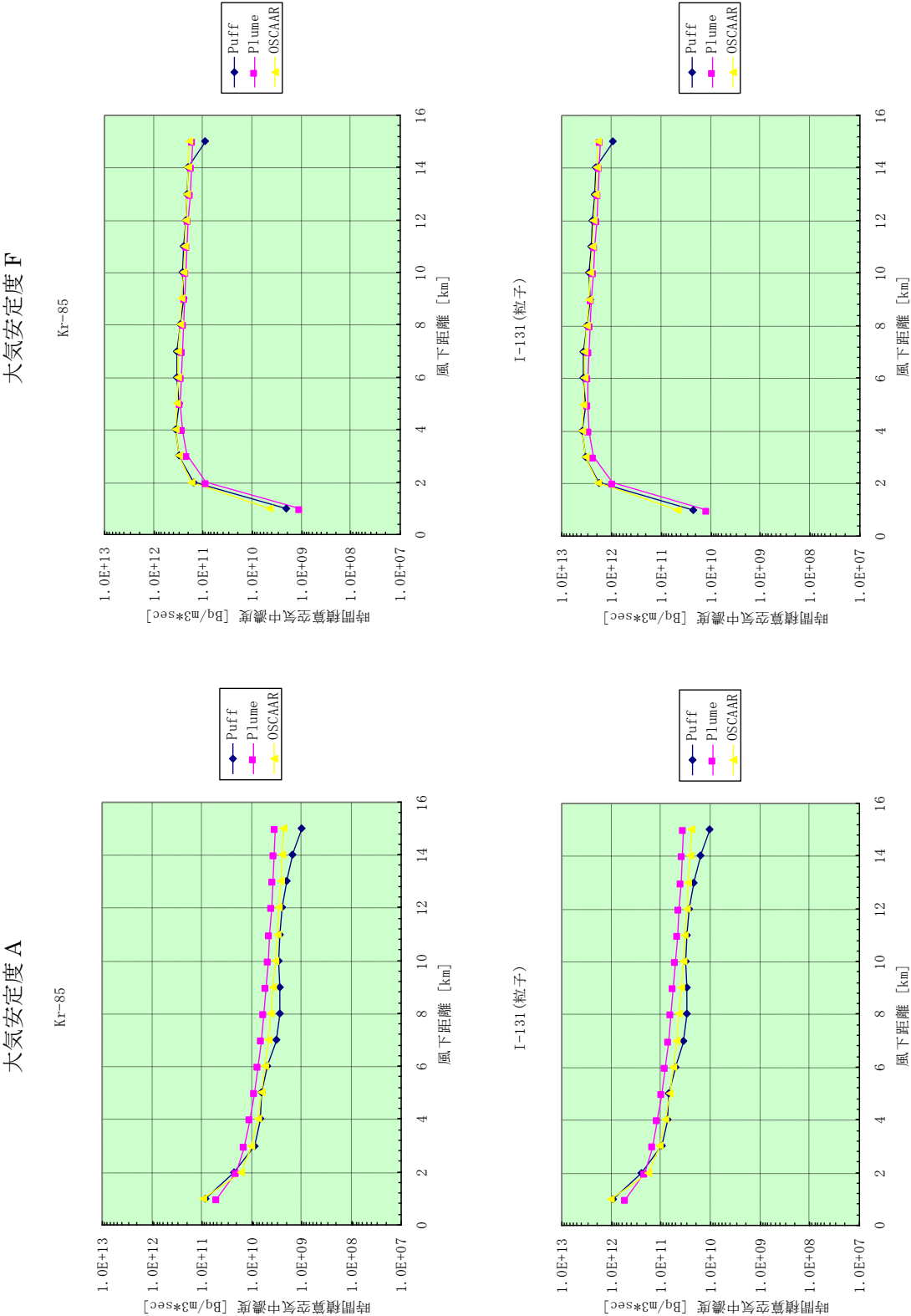
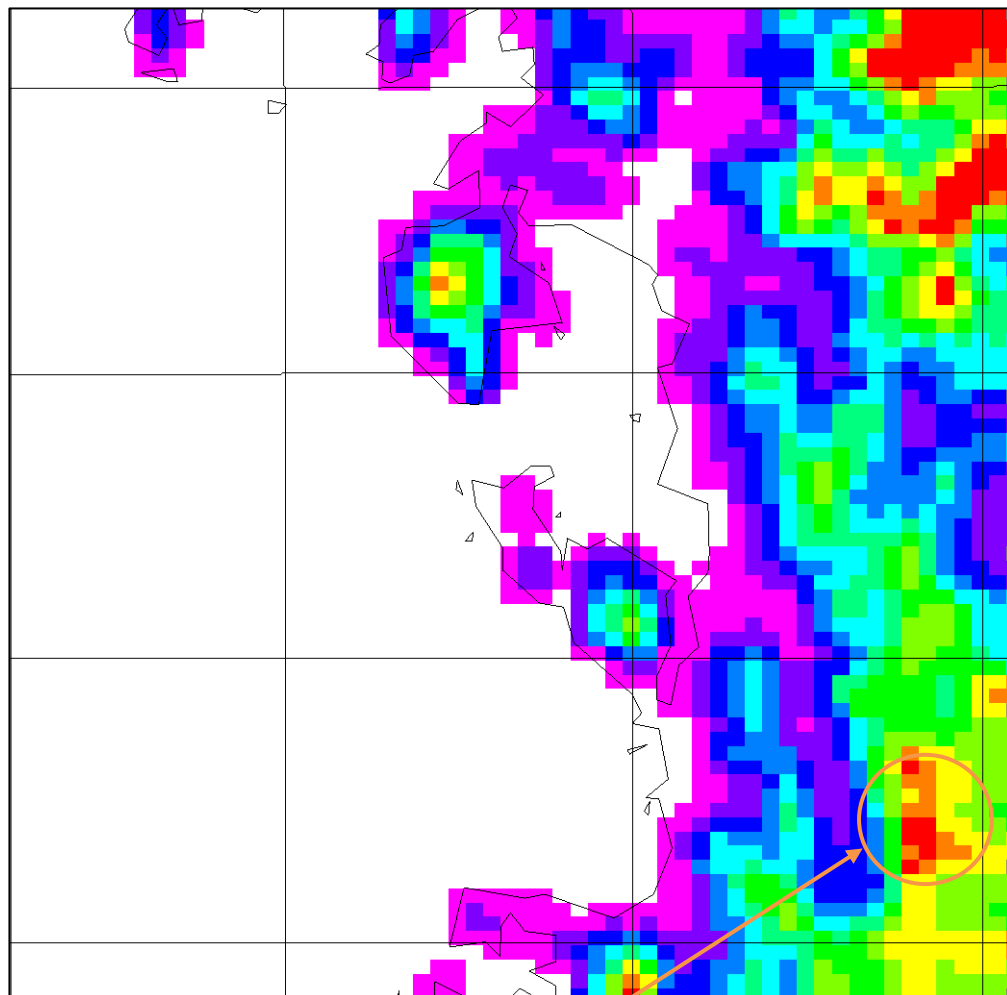


図 5-2 Puff、Plume 及び OSCAAR コードによる時間積算空気中濃度の比較



混合層高さ (560 m)
よりも標高が高い。

図 5-3 preArea で作成された地形データ

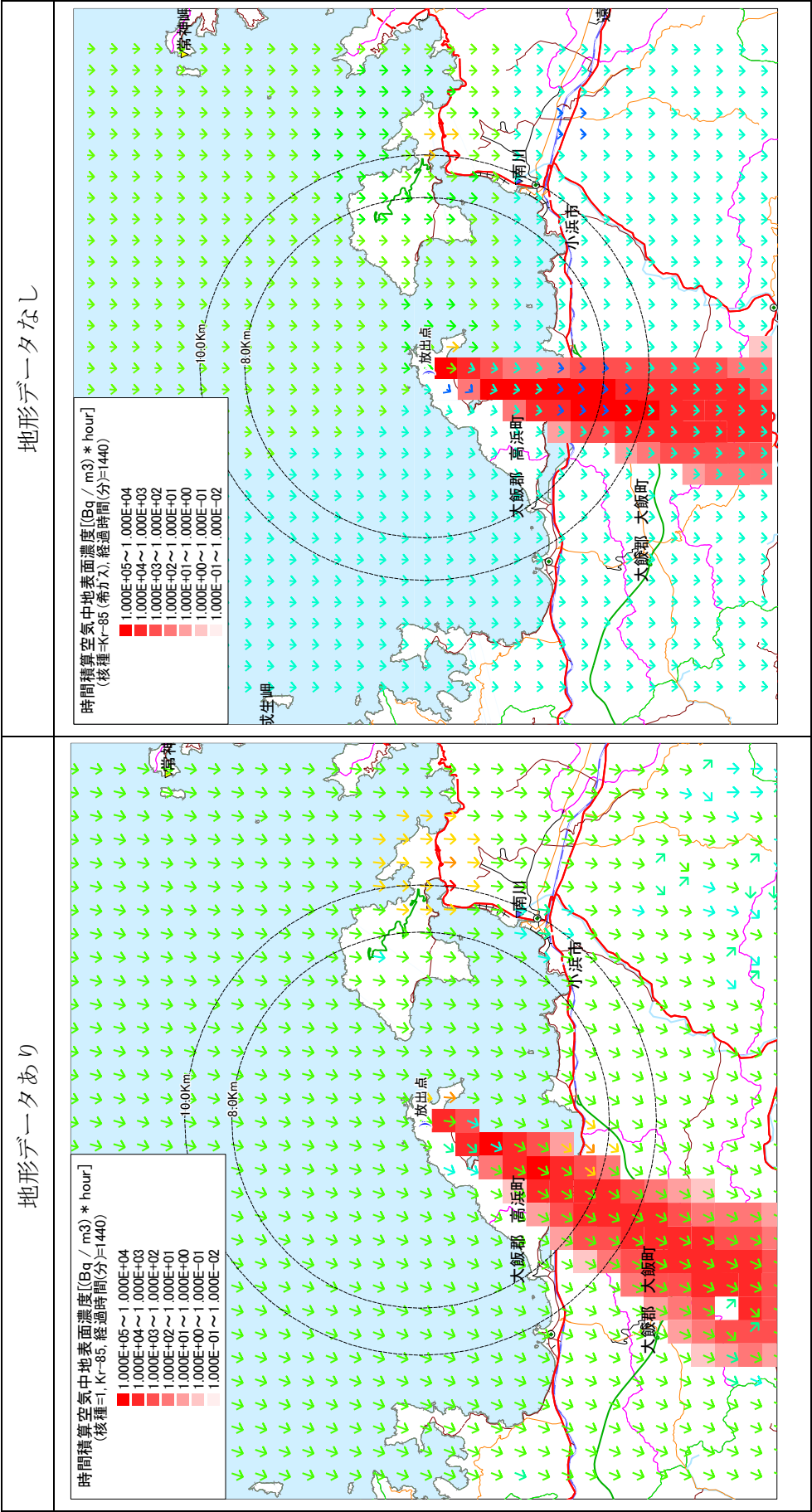


図 5-4 地表面付近の時間積算空気中濃度

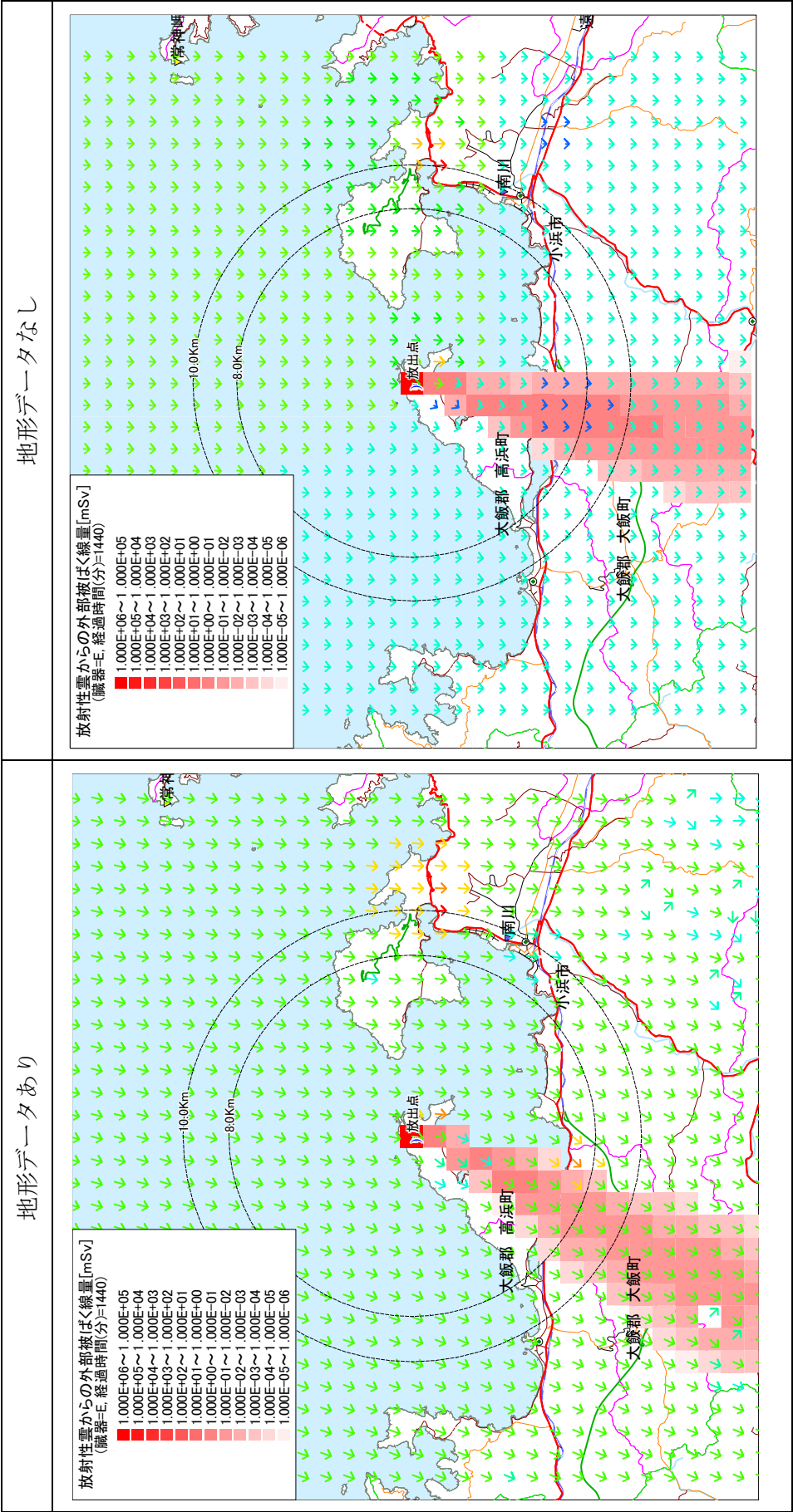


図 5-5 クラウドシャインによる外部被ばく線量

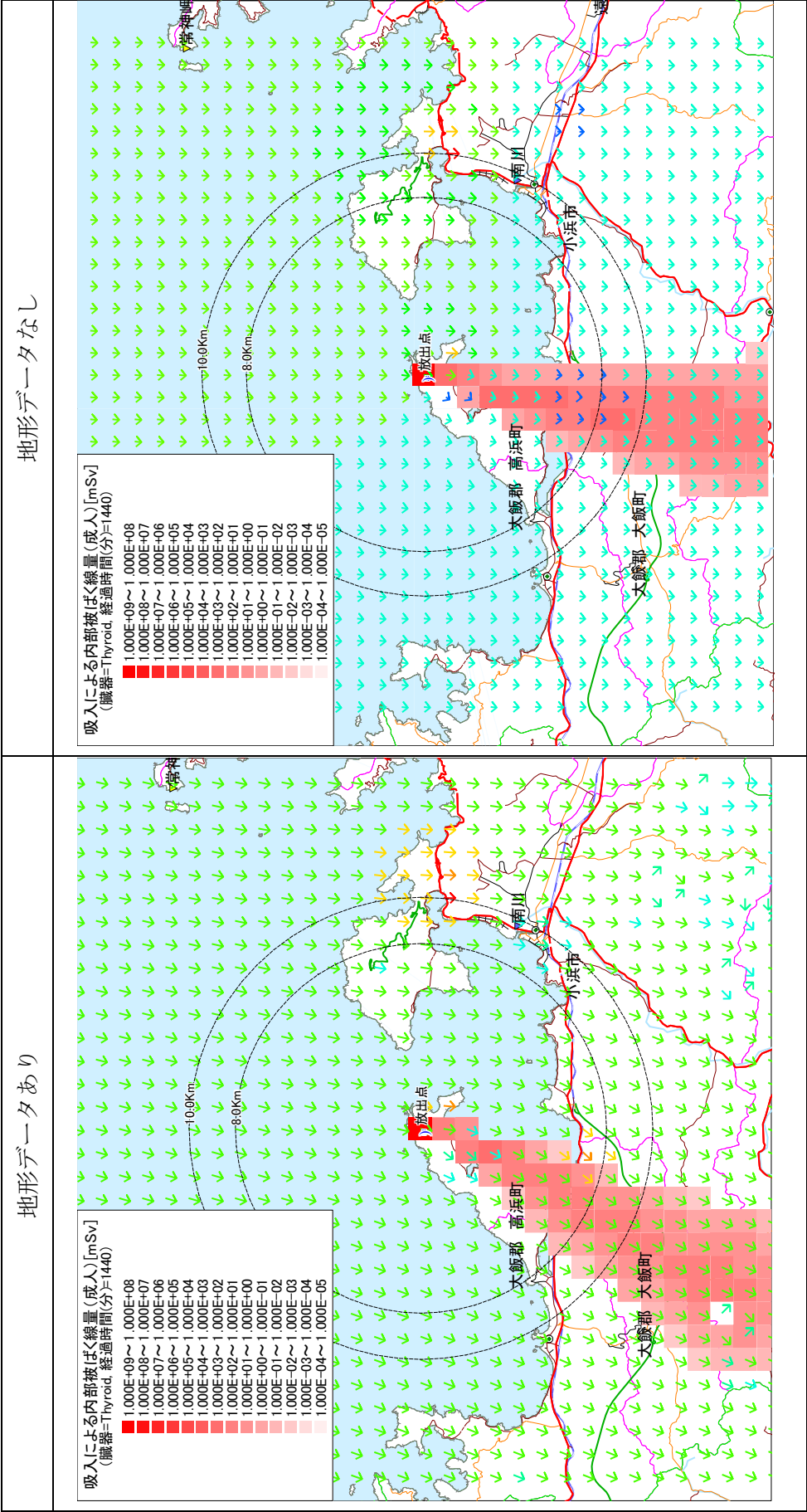


図 5-6 吸入による内部被ばく線量 (成人)

6. おわりに

6.1. EXTREME の開発・整備のまとめ

原子力緊急事態においてオフサイトでの防護措置を判断・決定する際には、刻々と変化する施設内外の状況及びそれに伴って得られる各種の情報を適切に反映し、放射性物質の大气への放出源情報（ソースターム）から周辺環境への放射線影響までを迅速かつ一貫して評価することが有用である。このような目的を達成するために、原子力機構は原子力緊急事態への対応における専門家支援ツール **EXTREME** を開発した。ここでは、簡易なモデルに基づいた支援ツールを開発し、またユーザーが容易に操作できるように PC ベースの GUI を整備した。これにより、我が国における原発で事故が発生した場合に、ソースタームから環境影響評価まで一貫して評価することが可能になり、緊急時対応センター（ERC）やオフサイトセンター（OFC）等において、意思決定者に対して支援・助言を行う専門家等が容易かつ迅速に環境影響評価を行うことができるようになった。

専門家支援ツール **EXTREME** は、簡易ソースターム評価コード **SSTCAL**、風向・風速場作成コード **MASCON_FEM**、大気拡散及び被ばく線量評価コード **Puff** 並びに食物連鎖解析コード **CMPMDL** という 4 種類の主たる計算コードから構成されている。この他に、**MASCON_FEM** による 2 次元風向・風速場の調節を行う前に、評価対象領域における各格子点の標高データを作成する評価領域設定コード **preArea** がプリプロセッサとして準備されている。

本報告書では、開発・整備した **EXTREME** の計算モデル、入出力データファイル及び試計算の結果について記述した。第 2 章では、**EXTREME** の構成と計算の流れ、各計算コードの機能と入力パラメータの概略など **EXTREME** の概要などを記述した。第 3 章では、**EXTREME** を構成する主たる 4 種類の計算コードについて、使用した各計算コードのモデル及び主要な設定と条件を説明した。第 4 章では、主要な入力データファイルの内容と整備、主要な計算結果の出力データファイルの概要を示した。第 5 章では、**EXTREME** を使用した 2 種類の試計算について、試計算結果とその考察を記載した。

本報告書では、本支援ツールの重要な構成コードである **SSTCAL** については、計算手法の概要及び入出力データファイルの概要のみを記述した。また、本支援ツールの使用方法を記述した使用者マニュアルは含まれていない。**SSTCAL** に採用された計算モデル、主要な設定や計算条件などの詳細及び本支援ツールの使用者マニュアルについては、別途報告書が公表されるのでそれらの文献^{13),16)}を参照していただきたい。本支援ツールを利用することにより、原子力緊急事態において防護措置の判断や決定を行う意思決定者をより効果的に支援できることが期待される。

6.2. 今後の検討課題

我が国における原発で事故が発生した場合に、ソースタームから環境影響評価まで一貫して迅速に評価することができる専門家支援ツール **EXTREME** を開発・整備した。本支援ツールをより使いやすくするように改良するために、今後検討すべき課題を以下に示す。

(1) 大気安定度の推定方法

EXTREME において気象観測データとして用いる **RAMIS** 及び **AMeDAS** の観測項目に大気安定度はないため、気象指針^{25),26)}に記載された内容に従って、日射量もしくは放射収支量を入力して **Pasquill-Meade** の方法⁴⁴⁾を使用することにより、大気安定度を推定する方法が考えられる。しかし、日射量は気象官署など各県 1 か所もしくは数か所でしか観測されていないため、対象サイトから数十 km 離れた場所のデータを使用する可能性があるため、データの信頼度は低くなると考えられる。また、放射収支量（夜間）はデータがないため、夜間において大気安定度を算出することができない恐れがある。したがって、大気安定度をどのように与えるか検討を要する。

(2) 人口データの変換プログラム

EXTREME の開発・整備で用いた人口データは、「地域メッシュ統計 平成 2 年国勢調査集計（一般財団法人日本統計協会）」である。国勢調査集計データは数年毎に更新されており、現時点での最新版である令和 2 年のデータを有償で入手可能である。しかし、平成 2 年版と令和 2 年版ではデータを収める様式が異なるため、当時作成した統計データ変換プログラムをそのまま利用することができない。よって、最新の統計データを利用するならば、統計データ変換プログラムを修正する必要がある。

(3) 気象データの取り込みと解析

EXTREME で用いる気象観測データについては、**RAMIS** 及び **AMeDAS** に登録されている観測地点が入力対象となっている。しかし、登録された観測地点以外にも任意の観測地点データも入力できるようにすることが望ましい。また、本支援ツールで採用している診断型の気象場作成モデルにおいて、気象観測データ数とモデルの予測精度の関係をある程度解析・把握しておくことが望ましい。

(4) 食物連鎖パラメータの入力

食物連鎖解析を行うには、核種、農作物、畜産物及び土壌などに依存した数十個のパラメータを設定しなければならない。**EXTREME** の開発・整備では、これらパラメータについてはデフォルト値が使用されているが、現時点ではデフォルト値を変更するためには、各々のデータファイルに収納されている値を変更しなければならない。食物連鎖解析を迅速かつ効率的に行うためには、ユーザーが GUI 上で変更できるように改良を行う必要がある。

(5) 有償なソフトウェア及びデータ

現状版の **EXTREME** では、背景地図を描画するためには有償の **MapInfo®** (描画ソフトウェア) を購入してインストールしておく必要がある。また **MapInfo®** と同様に、有償の地図データを購入してそのライセンスを取得しておく必要がある。ユーザーの業務的・財政的負担を軽減するため

には、有償の描画ソフトウェア及び地図データを無償のものに置き換えることを検討する必要がある。

(6) OIL 基準値との比較

原子力災害対策指針⁴⁾では、放射性物質の放出後には環境モニタリング結果を踏まえて、OIL 基準値に応じた防護措置を講ずることとしている。開発・整備した EXTREME では、防護措置の判断や決定を行う意思決定者を支援することを目的としているが、OIL 基準値と比較するようには設計されていない。OIL 基準値と直接比較できる計算結果を出力するように改良するか検討を要する。

(7) 訓練等での使用と課題のフィードバック

開発・整備した EXTREME は、実際の原子力緊急事態への対応や原子力防災訓練等において専門家にこれまで使用された実績がない。上記の検討課題の他に、他の検討課題を抽出してより使いやすく改良するためには、原子力防災訓練や演習等で専門家等に使用してもらうことにより、検討課題を支援ツールの改良にフィードバックする必要がある。

謝辞

EXTREME を開発・整備するに当たり、株式会社ヴィジブルインフォメーションセンターの波戸真治氏にご協力いただきました。ご協力に感謝致します。

参考文献

- 1) 原子力安全委員会：「原子力施設等の防災対策について」（昭和 55 年 6 月、平成 15 年 7 月一部改訂），available from: <https://www.jrrs.org/assets/file/fukushima/document002.pdf> (accessed on 2025-04-28).
- 2) International Atomic Energy Agency (IAEA): “Criteria for Use in Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency”, IAEA Safety Standards, General Safety Guide, GSG-2 (2011).
- 3) 中央防災会議：「防災基本計画」（昭和 38 年 6 月、令和 6 年 6 月 28 日一部修正），available from: https://www.bousai.go.jp/taisaku/keikaku/pdf/kihon_basicplan.pdf (accessed on 2025-04-29).
- 4) 原子力規制委員会：「原子力災害対策指針」（平成 24 年 10 月 31 日制定、令和 6 年 9 月 11 日全部改正），available from: <https://www.nra.go.jp/data/000473921.pdf> (accessed on 2025-04-29).
- 5) 原子力防災会議幹事会：「原子力災害対策マニュアル」（平成 24 年 10 月 19 日、令和 2 年 7 月 27 日一部改訂），available from: https://www.kantei.go.jp/jp/singi/genshiryoku_bousai/pdf/taisaku_manual.pdf (accessed on 2025-04-29).
- 6) 原子力規制庁，内閣府政策統括官（原子力防災担当）：「防災基本計画の改定を踏まえた今後の対応について」，平成 27 年度第 20 回原子力規制委員会，資料 2（平成 27 年 7 月 22 日），available from: <https://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11235834/www.nsr.go.jp/data/000115657.pdf> (accessed on 2025-02-01).
- 7) 外川織彦，大倉毅史，木村仁宣，永井晴康：「原子力防災における大気拡散モデルの利用に関する考察」，JAEA-Review 2021-021 (2021)，61p.
- 8) 日本原子力研究開発機構 安全研究センター：「レベル 3PSA 手法による防護措置の被ばく低減効果の分析」，第 2 回原子力災害事前対策等に関する検討チーム，資料 1（平成 24 年 11 月 30 日），available from: <https://www.da.nsr.go.jp/data/NRA057000007-002-002.pdf> (accessed on 2025-04-29).
- 9) 原子力規制委員会：「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」（平成 26 年 5 月 28 日），available from: <https://www.nra.go.jp/data/000390844.pdf> (accessed on 2025-04-29).
- 10) 高原省五：「被ばく線量シミュレーションの解析条件、解析結果及び考察」，第 5 回原子力災害時の屋内退避の運用に関する検討チーム，資料 1-2（令和 6 年 9 月 30 日），available from: <https://www.da.nra.go.jp/data/NRA100005285-002-003.pdf> (accessed on 2025-04-29).
- 11) U. S. Nuclear Regulatory Commission (USNRC): “RTM-96: Response Technical Manual”, NUREG/BR-0150, Vol. 1, Rev. 4 (1996).
- 12) 原子力規制庁 緊急事案対策室：2023, 「緊急時対応技術マニュアル（第 1 版）」（令和 5 年 10 月 20 日発行），available from: <https://www.nra.go.jp/data/000467230.pdf> (accessed on 2025-04-10).

- 13) リスク・防災研究グループ:「原子力緊急事態への対応における専門家支援ツール EXTREME ユーザーマニュアル」, JAEA-Testing 2025-004 (2025), 74p.
- 14) M. Kajimoto, K. Muramatsu, N. Watanabe, M. Funasako and T. Noguchi: "Development of THALES-2, A Computer Code for Coupled Thermal-Hydraulics and Fission Product Transport Analysis for Severe Accident at LWRs and its Application to Analysis of Fission Product Revalorization Phenomena", Proceeding of International Topical Meeting on Safety of Thermal Reactors, Portland, U.S.A., July 21-25 (1991).
- 15) 石川淳, 村松健, 坂本亨:「THALES-2 コードによる BWR Mark-II を対象としたレベル 3PSA のための系統的なソースターム解析」, JAERI-Research 2005-021 (2005), 133p.
- 16) 石川淳:「軽水炉炉心損傷事故を対象とした簡易ソースターム計算手法の構築」, JAEA-Research 2025-008 (2025), 131p.
- 17) Y. Sasaki: "Some Basic Formalism in Numerical Variational Analysis", Monthly Weather Review, Vol.98, No.12, pp.875-883 (1970).
- 18) M. H. Dickerson: "MASCON – A Mass Consistent Atmospheric Flux Model for Regions with Complex Terrain", Journal of Applied Meteorology, Vol.17, No.3, pp.241-253 (1978).
- 19) S. T. Chan, and G. Sugiyama: "User's Manual for MC_Wind: A New Mass-Consistent Wind Model for ARAC-3", UCRL-MA-129067 (1997).
- 20) M. Danard: "On Computing Viscous Forces in Map Coordinates with a Variable Scale", Monthly Weather Review, Vol.117, No.12, pp.2829-2834 (1989).
- 21) J. V. Ramsdell, G. F. Athey and C. S. Glantz: "MESOI Version 2.0: An Interactive Mesoscale Lagrangian Puff Dispersion Model with Deposition and Decay, NUREG/CR-3344 (1983).
- 22) S. A. McGuire, J. V. Ramsdell Jr. and G. F. Athey: "RASCAL 3.0.5: Description of Models and Methods", NUREG-1887 (2007).
- 23) S. Thykier-Nielsen, S. Deme and T. Mikkelsen: "Description of the Atmospheric Dispersion Module RIMPUFF", RODOS(WG2)-TN(98)-02 (1999).
- 24) J. V. Ramsdell, Jr., C. A. Simonen and K. W. Burk: "Regional Atmospheric Transport Code for Hanford Emission Tracking (RATCHET)", PNWD-2224 HEDR (1994).
- 25) 原子力委員会:「発電用原子炉施設の安全解析に関する気象指針について」(昭和 52 年 6 月 14 日), available from:
<https://warp.da.ndl.go.jp/collections/content/info:ndljp/pid/13336154/www.aec.go.jp/jicst/NC/about/ugoki/geppou/V22/N06/197703V22N06.html> (accessed on 2025-02-04).
- 26) 原子力安全委員会決定:「発電用原子炉施設の安全解析に関する気象指針」(昭和 57 年 1 月 28 日、平成 13 年 3 月 29 日一部改訂), 原子力安全委員会指針集, 改訂 13 版, 大成出版社, pp.374-403 (2011).
- 27) K. F. Eckerman and J. C. Ryman: "Federal Guidance Report No. 12, External Exposure to Radionuclides in Air, Water, and Soil", EPA-402-R-93-081 (1993).
- 28) International Commission on Radiological Protection (ICRP): "Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 4 Inhalation Dose Coefficients", ICRP Publication 71 (1995).
- 29) International Commission on Radiological Protection (ICRP): "Age-dependent Doses to

- Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 5 Compilation of Ingestion and Inhalation Dose Coefficients”, ICRP Publication 72 (1996).
- 30) L. Soffer, S.B. Burson, C.M. Ferrell, R.Y. Lee and J.N. Ridgely: “Accident Source Terms for Light-Water Nuclear Power Plants, Final Report”, NUREG-1465 (1995).
- 31) 原子力規制委員会：「放射線モニタリング情報共有・公表システム」, available from: <https://www.erms.nsr.go.jp/nra-ramis-webg/> (accessed on 2025-04-02).
- 32) 気象庁：「ホーム＞各種データ・資料＞最新の気象データ＞アメダス」, available from: https://www.jma.go.jp/bosai/amedas/#area_type=japan&area_code=010000 (accessed on 2025-04-02).
- 33) F. W. Whicker, and T. B. Kirchner: “Pathway: A Dynamic Food-chain Model to Predict Radionuclide Ingestion after Fallout Deposition”, Health Physics, Vo.52, No.6, pp.717-737 (1987).
- 34) International Atomic Energy Agency (IAEA): “Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Temperate Environments”, IAEA Technical Reports Series No.364 (1994).
- 35) 村松健：「原子力損害賠償制度に関する技術的基礎調査研究＜文部科学省＞原子力安全に関する委託調査等調査票（平成 13 年度～平成 14 年度）」, 日本原子力研究所東海研究所安全性試験研究センター計画調整室（編）：「原子力安全研究の概要（平成 13 年度～平成 14 年度）」, pp.282-285, JAERI-Review 2003-040 (2004), 298p.
- 36) D. Chanin, M.L. Young and J. Randall: “Code Manual for MACCS2: Volume 2, Preprocessor Codes COMIDA2, FGRDCF, IDCF2”, NUREG/CR-6613, SAND97-0594, Vol. 2 (1998).
- 37) PRODAS（日本原子力研究開発機構プログラム等検索システム）：「OSCAAR：確率論的事故影響評価コード」, available from: <https://prodas.jaea.go.jp/PRUS1003> (accessed on 2025-02-19).
- 38) H-N. Jow, J. L. Sprung, J. A. Rollstin, L. T. Ritchie and D. I. Chanin: “MELCOR Accident Consequence Code System (MACCS): Model Description”, NUREG/CR-4691, SAND86-1562, Vol. 2 (1990).
- 39) D. Chanin, M. L. Young and J. Randall: “Code Manual for MACCS2: Volume 1, User's Guide”, NUREG/CR-6613, SAND97-0594, Vol.1 (1998).
- 40) 本間俊充, 石川淳, 富田賢一, 村松健：「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 (2000), 80p.
- 41) T. Homma, K. Tomita and S. Hato: “Uncertainty and Sensitivity Studies with the Probabilistic Accident Consequence Assessment Code OSCAAR”, Nuclear Engineering and Technology, Vol.37, No.3, pp.245-258 (2005).
- 42) 安全研究センター リスク評価研究ディビジョン 放射線安全・防災研究グループ：「OSCAAR コードパッケージの使用マニュアル」, JAEA-Testing 2020-001 (2020), 65p.
- 43) M. Kimura, T. Oguri, J. Ishikawa and M. Munakata: “Development of an Evaluation Method for Planning of Urgent Protection Strategies in a Nuclear Emergency Using a Level 3 Probabilistic Risk Assessment”, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.58, No.3, pp.278-291 (2021).

- 44) P. J. Meade: "The Effects of Meteorological Factors on the Dispersion of Airborne Material", Paper Presented in International Symposium on Safety and Siting of Nuclear Plants, Rome, Italy (1959).

付録 有限要素法による風向・風速場作成

第 3.2 節で示したように、初期風向・風速場に対して質量保存則を満たすようにするためには、式 3.36 及び式 3.37 の偏微分方程式を解き、調節風向・風速場を求めなければならない。その場合、この偏微分方程式は解析的に解くことはできないため、数値計算によって解くことになる。風向・風速場作成コード MASCON_FEM の開発では、境界条件設定の容易さ、フラックス保存性、計算の高速化等から有限要素法を使用した。ここでは、有限要素法を用いた風向・風速場作成の方法について説明する。

A.1 有限要素法による離散化

有限要素法を用いた離散化の方法には、レイリー・リッツ法とガラーキン法の 2 種類がある。レイリー・リッツ法は汎関数を用いて離散化する方法で、ガラーキン法は重み付き残差を用いて離散化する方法である。本コードでは、調節風向・風速場を求めるために汎関数を用いるので、レイリー・リッツ法により有限要素化を行う。

有限要素法を用いて解くべき、調節風向・風速場の汎関数は式 3.34 であり、次のように表される。

$$I(\tilde{U}, \tilde{V}, \tilde{w}, \lambda) = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \left[\frac{\alpha_H}{m^2} \{ (\tilde{U} - \tilde{U}^0)^2 + (\tilde{V} - \tilde{V}^0)^2 \} + \alpha_V m^2 (\tilde{w} - \tilde{w}^0)^2 \right] dx dy + \int_{\Omega} \lambda \left\{ \frac{\partial \tilde{h}}{\partial t} + \frac{\partial \tilde{U}}{\partial x} + \frac{\partial \tilde{V}}{\partial y} + \tilde{w} \right\} dx dy \quad (\text{A.1})$$

ここで、

$$\tilde{U} = \frac{U_m}{m}, \quad \tilde{U}^0 = \frac{U_m^0}{m}, \quad \tilde{V} = \frac{V_m}{m}, \quad \tilde{V}^0 = \frac{V_m^0}{m}, \quad \tilde{w} = \frac{w_m}{m^2}, \quad \tilde{w}^0 = \frac{w_m^0}{m^2}, \quad \tilde{h} = \frac{h}{m^2}$$

である。

式 A.1 の積分領域 Ω に対して、領域を m 個の有限要素（全体の節点数 n 個）に分割し、領域 Ω 上の積分を m 個の有限要素上の積分の和に分解する。すなわち、既知数 $\tilde{U}^0$ 、 $\tilde{V}^0$ 、 $\tilde{w}^0$ 、 $\tilde{h}$ 及び未知数 $\tilde{U}$ 、 $\tilde{V}$ 、 $\tilde{w}$ 、 λ に対して、節点上に $\tilde{U}$ 、 $\tilde{U}^0$ 、 $\tilde{V}$ 、 $\tilde{V}^0$ 、 $\tilde{h}$ の値を配置し、要素上に $\tilde{w}$ 、 $\tilde{w}^0$ 、 λ の値を配置する。そして、有限要素に対して、節点及び要素上に次のような重み関数を定義する。

$$\varphi_i(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{at node } i \\ 0 & \text{at node } k \ (k \neq i) \end{cases} \quad (\text{A.2})$$

$$\psi_j(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{in element } j \\ 0 & \text{in element } l \ (j \neq l) \end{cases} \quad (\text{A.3})$$

この時、節点及び要素上に配置した値と重み関数を用いて、各値の有限要素内における補間値は、次のように定めることができる。

$$\begin{aligned}\tilde{U} &= \sum_i \tilde{U}_i \varphi_i, & \tilde{U}^0 &= \sum_i \tilde{U}_i^0 \varphi_i, & \tilde{V} &= \sum_i \tilde{V}_i \varphi_i, & \tilde{V}^0 &= \sum_i \tilde{V}_i^0 \varphi_i, & \tilde{h} &= \sum_i \tilde{h}_i \varphi_i \\ \tilde{w} &= \tilde{w}_j \psi_j, & \tilde{w}^0 &= \tilde{w}_j^0 \psi_j, & \lambda &= \lambda_j \psi_j\end{aligned}$$

これらの補間値を有限要素毎に積分を分解した汎関数に代入すると、汎関数は配置した未知数の関数となる。すなわち、有限要素 j に対して有限要素上の積分領域を e とすると、次のようになる。

$$\begin{aligned}I_j(\tilde{U}_i, \tilde{V}_i, \tilde{w}_j, \lambda_j) \\ = \frac{1}{2} \int_e \left[\frac{\alpha_H}{m^2} \left\{ \left(\sum_i \tilde{U}_i \varphi_i - \sum_i \tilde{U}_i^0 \varphi_i \right)^2 + \left(\sum_i \tilde{V}_i \varphi_i - \sum_i \tilde{V}_i^0 \varphi_i \right)^2 \right\} + \alpha_V m^2 (\tilde{w}_j \psi_j - \tilde{w}_j^0 \psi_j)^2 \right] dx dy \\ + \int_e (\lambda_j \psi_j) \left\{ \sum_i \frac{\partial \tilde{h}_i}{\partial t} \varphi_i + \sum_i \tilde{U}_i \frac{\partial \varphi_i}{\partial x} + \sum_i \tilde{V}_i \frac{\partial \varphi_i}{\partial y} + \tilde{w}_j \psi_j \right\} dx dy\end{aligned}\quad (\text{A.4})$$

上記関数が最小となるのは、4 つの未知数の偏微分がゼロを同時に満たすところである。それは次式となる。

$$\int_e \frac{\alpha_H}{m^2} \varphi_i \sum_k (\tilde{U}_k - \tilde{U}_k^0) \varphi_k dx dy + \int_e (\lambda_j \psi_j) \frac{\partial \varphi_i}{\partial x} dx dy = 0 \quad (\text{A.5})$$

$$\int_e \frac{\alpha_H}{m^2} \varphi_i \sum_k (\tilde{V}_k - \tilde{V}_k^0) \varphi_k dx dy + \int_e (\lambda_j \psi_j) \frac{\partial \varphi_i}{\partial y} dx dy = 0 \quad (\text{A.6})$$

$$\int_e \alpha_V m^2 \psi_j (\tilde{w}_j - \tilde{w}_j^0) \psi_j dx dy + \int_e (\lambda_j \psi_j) \psi_j dx dy = 0 \quad (\text{A.7})$$

$$\int_e \psi_j \left\{ \sum_i \frac{\partial \tilde{h}_i}{\partial t} \varphi_i + \sum_i \tilde{U}_i \frac{\partial \varphi_i}{\partial x} + \sum_i \tilde{V}_i \frac{\partial \varphi_i}{\partial y} + \tilde{w}_j \psi_j \right\} dx dy = 0 \quad (\text{A.8})$$

上の4つの式に対して、積分項を置き直して整理すると次のようになり、さらにその他の有限要素について足し上げると、行列を用いた連立方程式で表すことができる。注意点として、行列 $\mathbf{M}$ の成分は M_{ik} ではなく、各有限要素を足し合わせた時に重複節点の和になることである。このことは「A.4.2 全体行列」のところで具体的に詳述する。

$$\alpha_H \sum_k M_{ik} (\tilde{U}_k - \tilde{U}_k^0) + C_{ij}^{(1)} \lambda_j = 0, \quad \alpha_H \mathbf{M}(\tilde{\mathbf{U}} - \tilde{\mathbf{U}}^0) + \mathbf{C}^{(1)} \boldsymbol{\lambda} = \mathbf{0} \quad (\text{A.9})$$

$$\alpha_H \sum_k M_{ik} (\tilde{V}_k - \tilde{V}_k^0) + C_{ij}^{(2)} \lambda_j = 0, \quad \alpha_H \mathbf{M}(\tilde{\mathbf{V}} - \tilde{\mathbf{V}}^0) + \mathbf{C}^{(2)} \boldsymbol{\lambda} = \mathbf{0} \quad (\text{A.10})$$

$$\alpha_V A_{jj} (\tilde{w}_j - \tilde{w}_j^0) + A_{jj}^0 \lambda_j = 0, \quad \alpha_V \mathbf{A}(\tilde{\mathbf{w}} - \tilde{\mathbf{w}}^0) + \mathbf{A}^0 \boldsymbol{\lambda} = \mathbf{0} \quad (\text{A.11})$$

$$\sum_i B_{ji} \frac{\partial \tilde{h}_i}{\partial t} + \sum_i C_{ij}^{(1)} \tilde{U}_i + \sum_i C_{ij}^{(2)} \tilde{V}_i + A_{jj}^0 \tilde{W}_j = 0, \quad \mathbf{B} \tilde{\mathbf{h}} + \mathbf{C}^{(1)T} \tilde{\mathbf{U}} + \mathbf{C}^{(2)T} \tilde{\mathbf{V}} + \mathbf{A}^0 \tilde{\mathbf{W}} = \mathbf{0} \quad (\text{A.12})$$

ここで、

$$M_{ik} = \int_e \frac{1}{m^2} \varphi_i \varphi_k dx dy, \quad C_{ij}^{(1)} = \int_e \frac{\partial \varphi_i}{\partial x} \psi_j dx dy, \quad C_{ij}^{(2)} = \int_e \frac{\partial \varphi_i}{\partial y} \psi_j dx dy \quad (\text{A.13})$$

$$A_{jj} = \int_e m^2 \psi_j \psi_j dx dy, \quad A_{jj}^0 = \int_e \psi_j \psi_j dx dy, \quad B_{ji} = \int_e \psi_j \varphi_i dx dy \quad (\text{A.14})$$

$$(i, k=1, \dots, n) \quad (j=1, \dots, m)$$

である。

なお、 $\mathbf{C}^{(1)T}$ 及び $\mathbf{C}^{(2)T}$ は、それぞれ行列 $\mathbf{C}^{(1)}$ と $\mathbf{C}^{(2)}$ の転置を表す。

式 A.9、式 A.10 及び式 A.11 から調節風向・風速場は次のようになり、これらを式 A.12 に代入すると λ を求める方程式が得られる。

$$\tilde{\mathbf{U}} = \tilde{\mathbf{U}}^0 - \frac{1}{\alpha_H} \mathbf{M}^{-1} \mathbf{C}^{(1)} \lambda \quad (\text{A.15})$$

$$\tilde{\mathbf{V}} = \tilde{\mathbf{V}}^0 - \frac{1}{\alpha_H} \mathbf{M}^{-1} \mathbf{C}^{(2)} \lambda \quad (\text{A.16})$$

$$\tilde{\mathbf{W}} = \tilde{\mathbf{W}}^0 - \frac{1}{\alpha_V} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{A}^0 \lambda \quad (\text{A.17})$$

$$\left[\frac{1}{\alpha_H} \{ \mathbf{C}^{(1)T} \mathbf{M}^{-1} \mathbf{C}^{(1)} + \mathbf{C}^{(2)T} \mathbf{M}^{-1} \mathbf{C}^{(2)} \} + \frac{1}{\alpha_V} \mathbf{A}^0 \mathbf{A}^{-1} \mathbf{A}^0 \right] \lambda = \mathbf{B} \tilde{\mathbf{h}} + \mathbf{C}^{(1)T} \tilde{\mathbf{U}}^0 + \mathbf{C}^{(2)T} \tilde{\mathbf{V}}^0 + \mathbf{A}^0 \tilde{\mathbf{W}}^0 \quad (\text{A.18})$$

調節風向・風速場は式 A.15、式 A.16 及び式 A.17 から求められるが、未知数 λ が含まれている。この未知数 λ は式 A.18 の方程式を解くことによって求められる。そして、この方程式を解くには、行列の要素である積分値を求めておく必要がある。上式では境界条件もまだ考慮されておらず、このままでは解くことができない。

A.2 重み関数と形状関数

解析領域を有限要素に分割し、その節点及び要素上に未知数を配置し重み関数を定義することによって、離散化を行った。重み関数は式 A.2 と式 A.3 を満たす関数であるが、式 A.2 の重み関数は具体的な関数形は示していないので、このままでは積分を実行することができない。さらに、領域分割する有限要素の形状も具体的にはまだ示していない。

ここでは、 x - y 空間の解析領域を四角形要素に分割することにする。三角形要素の方が解析領域を密に敷き詰めることが可能であるが、その分要素数も多くなり、また要素分割の際の自由度も大きい。一方、四角形要素では要素数も少なく、要素分割の自由度も小さい。さらに、パラメトリック要素を使用することが可能で、要素上の積分にガウス・ルジャンドル積分法が使用できるという利点がある。

四角形要素に対するパラメトリック要素は、 x - y 空間の四角形要素を ξ - η 空間の $[-1, 1]$ 範囲の正方形要素に写像した要素である（図 A-1 参照）。ここで ξ - η 空間の 4 節点を持つ正方形要素の形状関数を次のように定義する。

$$N_1(\xi, \eta) = \frac{1}{4}(1 - \xi)(1 - \eta) \quad (\text{A.19})$$

$$N_2(\xi, \eta) = \frac{1}{4}(1 + \xi)(1 - \eta)$$

$$N_3(\xi, \eta) = \frac{1}{4}(1 + \xi)(1 + \eta)$$

$$N_4(\xi, \eta) = \frac{1}{4}(1 - \xi)(1 + \eta)$$

$$(-1 \leq \xi \leq 1, -1 \leq \eta \leq 1)$$

式 A.19 の 4 節点を持つ形状関数は、次のような特徴を持つように作られている。

- ・ $N_1 + N_2 + N_3 + N_4 = 1$
- ・ 自身の節点上では 1 となり、その他の節点上ではゼロ
- ・ 1 階微分が可能
- ・ 要素上で形状関数及び形状関数の 1 階微分が積分可能

節点上の形状関数は、節点上の重み関数と同じ性質を持っているので、 x - y 空間での重み関数は、 ξ - η 空間では形状関数として扱う。

形状関数と節点上の座標値 x_i, y_i ($i = 1, \dots, 4$) を用いて、要素内部における座標値を（線形）補間として、次のように表すことができる。

$$x(\xi, \eta) = x_1 \cdot N_1(\xi, \eta) + x_2 \cdot N_2(\xi, \eta) + x_3 \cdot N_3(\xi, \eta) + x_4 \cdot N_4(\xi, \eta) \quad (\text{A.20})$$

$$y(\xi, \eta) = y_1 \cdot N_1(\xi, \eta) + y_2 \cdot N_2(\xi, \eta) + y_3 \cdot N_3(\xi, \eta) + y_4 \cdot N_4(\xi, \eta) \quad (\text{A.21})$$

式 A.20 と式 A.21 から正方形要素内の点 (ξ, η) に対応した、四角形要素内の点 (x, y) が求められる。

A.3 座標変換

有限要素法で解くためには、式 A.13 及び式 A.14 の積分値を求めておく必要がある。 ψ は自身の四角形要素上で 1 となり、その他の要素上ではゼロとなるので、積分の実行は容易である。一方 φ を含んだ積分は、 x - y 空間上の積分を ξ - η 空間上の積分に座標変換して行う。 ξ - η 空間から x - y 空間への座標変換は、式 A.20 と式 A.21 を用いて次式のヤコビ行列で表される。

$$\frac{\partial(x, y)}{\partial(\xi, \eta)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^4 x_i \frac{\partial N_i}{\partial \xi} & \sum_{i=1}^4 y_i \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \\ \sum_{i=1}^4 x_i \frac{\partial N_i}{\partial \eta} & \sum_{i=1}^4 y_i \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \end{bmatrix} \quad (\text{A.22})$$

すなわち、ヤコビ行列の行列式は式 A.23 で与えられ、 ξ - η 空間から x - y 空間への微分要素の変換は式 A.24 で与えられる。

$$\det \left(\frac{\partial(x, y)}{\partial(\xi, \eta)} \right) = \frac{\partial x}{\partial \xi} \frac{\partial y}{\partial \eta} - \frac{\partial y}{\partial \xi} \frac{\partial x}{\partial \eta} \quad (\text{A.23})$$

$$dxdy = \det \left(\frac{\partial(x, y)}{\partial(\xi, \eta)} \right) \cdot d\xi d\eta \quad (\text{A.24})$$

また逆に、 x - y 空間から ξ - η 空間への座標変換は、式 A.22 の逆行列で与えられ、次式となる。

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{bmatrix}^{-1} = \frac{1}{\det \left(\frac{\partial(x, y)}{\partial(\xi, \eta)} \right)} \begin{bmatrix} \frac{\partial y}{\partial \eta} & -\frac{\partial y}{\partial \xi} \\ -\frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial x}{\partial \xi} \end{bmatrix} \quad (\text{A.25})$$

次に、式 A.13 に現れる φ_i の x - y 空間における微分を ξ - η 空間における微分に変換する。
 x - y 空間の φ_i は、 ξ - η 空間では N_i であるから、微分は次のようになる。

$$\frac{\partial \varphi_i}{\partial x} = \frac{\partial N_i(\xi, \eta)}{\partial x} = \frac{\partial N_i(\xi, \eta)}{\partial \xi} \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\partial N_i(\xi, \eta)}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad (\text{A.26})$$

$$\frac{\partial \varphi_i}{\partial y} = \frac{\partial N_i(\xi, \eta)}{\partial y} = \frac{\partial N_i(\xi, \eta)}{\partial \xi} \frac{\partial \xi}{\partial y} + \frac{\partial N_i(\xi, \eta)}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial y} \quad (\text{A.27})$$

すなわち、上式は次のように表され、実際に計算を行うには式 A.25 の逆行列が必要となる。

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \xi}{\partial x} & \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ \frac{\partial \xi}{\partial y} & \frac{\partial \eta}{\partial y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \end{bmatrix} \quad (\text{A.28})$$

A.4 行列の導出

有限要素法によって離散化した結果、解くべき方程式は、節点上及び要素上に配置した未知数の代数方程式となった（式 A.15、式 A.16、式 A.17 及び式 A.18 参照）。これら行列で表した代数方程式の行列成分は、式 A.13 及び式 A.14 に示すように重み関数 φ 及び ψ の積分値で与えられる。ここでは、実際に計算するための行列を求める。

A.4.1 積分計算

式 A.13 と式 A.14 の積分を計算するには、 x - y 空間の四角形要素上の積分を ξ - η 空間の正方形要素上の積分に変換する。この時、重み関数 φ は形状関数に置き換えられ、 ψ は 1 となる。また積分範囲は $[-1, 1]$ となり、微分要素は式 A.24 で与えられ、それぞれ次のように計算される。

$$M_{ik} = \int_e \frac{1}{m^2} \varphi_i \varphi_k dx dy = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \frac{1}{m^2} N_i N_j \det \left(\frac{\partial(x, y)}{\partial(\xi, \eta)} \right) \cdot d\xi d\eta \quad (\text{A.29})$$

$$C_{ij}^{(1)} = \int_e \frac{\partial \varphi_i}{\partial x} \psi_j dx dy = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \frac{\partial N_i}{\partial x} \det \left(\frac{\partial(x, y)}{\partial(\xi, \eta)} \right) \cdot d\xi d\eta \quad (\text{A.30})$$

$$C_{ij}^{(2)} = \int_e \frac{\partial \varphi_i}{\partial y} \psi_j dx dy = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \frac{\partial N_i}{\partial y} \det \left(\frac{\partial(x, y)}{\partial(\xi, \eta)} \right) \cdot d\xi d\eta \quad (\text{A.31})$$

$$A_{jj} = \int_e m^2 \psi_j \psi_j dx dy = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 m^2 \det \left(\frac{\partial(x, y)}{\partial(\xi, \eta)} \right) \cdot d\xi d\eta \quad (\text{A.32})$$

$$A_{jj}^0 = \int_e \psi_j \psi_j dx dy = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \det \left(\frac{\partial(x, y)}{\partial(\xi, \eta)} \right) \cdot d\xi d\eta \quad (\text{A.33})$$

$$B_{ji} = \int_e \psi_j \varphi_i dx dy = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 N_i \det \left(\frac{\partial(x, y)}{\partial(\xi, \eta)} \right) \cdot d\xi d\eta \quad (\text{A.34})$$

ここで、式 A.30 と式 A.31 に現れる形状関数の x, y 微分は式 A.28 により計算する。なお、上記の 2 重積分を数値積分するには、ガウス・ルジャンドルの積分法を利用できる。

A.4.2 全体行列

解くべき行列方程式は式 A.15、式 A.16、式 A.17 及び式 A.18 である。これらの式中の行列 $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{C}^{(1)}$ 、 $\mathbf{C}^{(2)}$ 、 $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{A}^0$ 、 $\mathbf{B}$ の行列成分は、第 A.1 項で示した積分値から構成される。ここでは、4 つの四角形要素から構成される場合の例（図 A-2 参照）を用いて、これら行列がどのように構成されるかを見てみる。

行列をつくるには、初めに要素と節点に番号付けを行う必要がある。使用する例では図 A-2 のように番号付けを行う。さらに行列を構成する時、各要素に属する節点番号の表が必要となる。図 A-2 のような場合には表 A-1 となる。

各行列は次のように構成される。

(1) 行列 $\mathbf{M}$

行列 $\mathbf{M}$ は節点数×節点数の行列で、今の場合 9×9 の行列となる。表 A.1 に基づいて行列を構成すると以下のようになり、重複節点については足し合わせとなる。例えば、節点 5 は 4 つの要

素のすべてに属しているため、行列の成分は 4 つの和となる。なお行列 $\mathbf{M}$ は、いつでも対称行列となる。

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	M_{11}	M_{12}		M_{14}	M_{15}				
2	M_{21}	$M_{22}+M_{22}$	M_{23}	M_{24}	$M_{25}+M_{25}$	M_{26}			
3		M_{32}	M_{33}		M_{35}	M_{36}			
4	M_{41}	M_{42}		$M_{44}+M_{44}$	$M_{45}+M_{45}$		M_{47}	M_{48}	
5	M_{51}	$M_{52}+M_{52}$	M_{53}	$M_{54}+M_{54}$	$M_{55}+M_{55}+M_{55}+M_{55}$	$M_{56}+M_{56}$	M_{57}	$M_{58}+M_{58}$	M_{59}
6		M_{62}	M_{63}		$M_{65}+M_{65}$	$M_{66}+M_{66}$		M_{68}	M_{69}
7				M_{74}	M_{75}		M_{77}	M_{78}	
8				M_{84}	$M_{85}+M_{85}$	M_{86}	M_{87}	$M_{88}+M_{88}$	M_{89}
9					M_{95}	M_{96}		M_{98}	M_{99}

(2) 行列 $\mathbf{C}^{(k)}$ ($k = 1, 2$)

行列 $\mathbf{C}^{(k)}$ は節点数×要素数の行列で、今の場合 9×4 の行列となる。表 A-1 に基づいて行列を構成すると以下のようになる。

	1	2	3	4
1	$C_{11}^{(k)}$			
2	$C_{21}^{(k)}$	$C_{22}^{(k)}$		
3		$C_{32}^{(k)}$		
4	$C_{41}^{(k)}$		$C_{43}^{(k)}$	
5	$C_{51}^{(k)}$	$C_{52}^{(k)}$	$C_{53}^{(k)}$	$C_{54}^{(k)}$
6		$C_{62}^{(k)}$		$C_{64}^{(k)}$
7			$C_{73}^{(k)}$	
8			$C_{83}^{(k)}$	$C_{84}^{(k)}$
9				$C_{94}^{(k)}$

(3) 行列 $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{A}^0$

行列 $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{A}^0$ は、それぞれ要素数×要素数の対角行列で、今の場合 4×4 の対角行列となる。行列 $\mathbf{A}$ と $\mathbf{A}^0$ は成分の並びは同じであるから、 $\mathbf{A}$ だけを以下に示す。

	1	2	3	4
1	A_{11}			
2		A_{22}		
3			A_{33}	
4				A_{44}

(4) 行列 $\mathbf{B}$

行列 $\mathbf{B}$ は要素数×節点数の行列で、今の場合 4×9 の行列となる。表 A-1 に基づいて行列を構成すると以下のようになる。

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	B_{11}	B_{12}		B_{14}	B_{15}				
2		B_{22}	B_{23}		B_{25}	B_{26}			
3				B_{34}	B_{35}		B_{37}	B_{38}	
4					B_{45}	B_{46}		B_{48}	B_{49}

A.5 質量集中化法

質量集中化法は、有限要素法において良く使用される近似法で、質量行列（対角行列）に対して、行列成分を行方向または列方向に合計して、対角行列にする操作である。対角行列にすることによって、記憶容量の節約や逆行列の計算が非常に簡単になる。

本コードでは、質量行列に相当するのが行列 $\mathbf{M}$ である。行列 $\mathbf{M}$ に対して、質量集中化を行った行列を $\mathbf{M}_L$ とすると、式 A.15、式 A.16、式 A.17 及び式 A.18 は、それぞれ次のようになる。

$$\tilde{\mathbf{U}} = \tilde{\mathbf{U}}^0 - \frac{1}{\alpha_H} \mathbf{M}_L^{-1} \mathbf{C}^{(1)} \boldsymbol{\lambda} \quad (\text{A.35})$$

$$\tilde{\mathbf{V}} = \tilde{\mathbf{V}}^0 - \frac{1}{\alpha_H} \mathbf{M}_L^{-1} \mathbf{C}^{(2)} \boldsymbol{\lambda} \quad (\text{A.36})$$

$$\tilde{\mathbf{w}} = \tilde{\mathbf{w}}^0 - \frac{1}{\alpha_V} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{A}^0 \boldsymbol{\lambda} \quad (\text{A.37})$$

$$\left[\frac{1}{\alpha_H} \{ \mathbf{C}^{(1)T} \mathbf{M}_L^{-1} \mathbf{C}^{(1)} + \mathbf{C}^{(2)T} \mathbf{M}_L^{-1} \mathbf{C}^{(2)} \} + \frac{1}{\alpha_V} \mathbf{A}^0 \mathbf{A}^{-1} \mathbf{A}^0 \right] \boldsymbol{\lambda} = \mathbf{B} \tilde{\mathbf{h}} + \mathbf{C}^{(1)T} \tilde{\mathbf{U}}^0 + \mathbf{C}^{(2)T} \tilde{\mathbf{V}}^0 + \mathbf{A}^0 \tilde{\mathbf{w}}^0 \quad (\text{A.38})$$

A.6 境界条件

境界条件は、解析領域周辺の水平風速に対して、 $\lambda = 0$ または法線成分がゼロである。前者は調節風向・風速が初期風向・風速に等しくなることであり、後者は地形等の障害物がある場所で風は突き抜けないという条件である。それぞれ方程式を解く場合にどのように考慮するかを以下に示す。

A.6.1 $\lambda = 0$

$\lambda = 0$ の境界条件は、解析領域周辺が自由境界の時に設定され、その場所では調節風向・風速場は初期風向・風速場に等しくなる。本コードでは 2 次元領域の周囲がこれにあたる。

この境界条件を設定するには、対角行列 $\mathbf{M}_L^{-1}$ で対応する節点の行列成分をゼロとする。そうすると、式 A.35 と式 A.36 において調節風向・風速場は初期風向・風速場と等しくなる。

A.6.2 風速の法線成分がゼロ

風速の法線成分がゼロの境界条件は、地形等の障害物がある場合に設定される。本コードのような 2 次元の評価では、標高が混合層上面よりも高い場合にこの境界条件が現れる。

法線方向の風速成分は、風速ベクトルと単位法線ベクトルの内積を計算することによって求められる。すなわち単位法線ベクトルが必要であり、それは以下のようにして求められる。

初めに、閉領域 Ω における風速 $\mathbf{v}$ の発散を考え、それにガウスの発散定理を適用し、表面上の積分で表すと次のようになる。

$$\int_{\Omega} \text{div } \mathbf{v} \, d\Omega = \oint \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} \, ds \quad (\text{A.39})$$

今考えているのは 2 次元なので、 x, y 成分で表すと次のようになる。

$$\int_{\Omega} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) dx dy = \oint (u \cdot n_x + v \cdot n_y) ds \quad (\text{A.40})$$

ここで、風向・風速の成分 u 及び v は、領域内において節点上の値と重み関数を用いて、 $u = \sum u_i \cdot \varphi_i$ 及び $v = \sum v_i \cdot \varphi_i$ と近似することができる。これらを上式の左辺に代入すると次式のようになる。

$$\sum_i \left[u_i \left(\int_{\Omega} \frac{\partial \varphi_i}{\partial x} dx dy \right) + v_i \left(\int_{\Omega} \frac{\partial \varphi_i}{\partial y} dx dy \right) \right] = \oint (u \cdot n_x + v \cdot n_y) ds \quad (\text{A.41})$$

上式から閉領域 Ω 周辺のある節点において、次式の関係を得ることができる。

$$n_x \propto \int_{\Omega} \frac{\partial \varphi_i}{\partial x} dx dy \quad (\text{A.42})$$

$$n_y \propto \int_{\Omega} \frac{\partial \varphi_i}{\partial y} dx dy \quad (\text{A.43})$$

ゆえに、閉領域 Ω の内側方向の単位法線ベクトルは次のようになる。

$$n_x = -\frac{1}{n} \int_{\Omega} \frac{\partial \varphi_i}{\partial x} d\Omega \quad (\text{A.44})$$

$$n_y = -\frac{1}{n} \int_{\Omega} \frac{\partial \varphi_i}{\partial y} d\Omega \quad (\text{A.45})$$

$$n = \sqrt{n_x^2 + n_y^2}$$

この時、対応する単位接線ベクトルは次のように定義できる。

$$\mathbf{t} = \frac{\mathbf{k} \times \mathbf{n}}{|\mathbf{k} \times \mathbf{n}|} \quad (\text{A.46})$$

$$\mathbf{k} \times \mathbf{n} = \begin{bmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ 0 & 0 & 1 \\ n_x & n_y & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -n_y \\ n_x \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.47})$$

$$\mathbf{t} = \begin{bmatrix} -n_y \\ n_x \end{bmatrix} \quad (\text{A.48})$$

ここで $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ は x, y, z 方向の単位ベクトルで、 $\mathbf{k} \times \mathbf{n}$ はベクトル積を表す。以上から、風速の x, y 成分 (u, v) に対する接線と法線方向 (u_t, u_n) への変換及びその逆変換は、次のように表すことができる。

$$\begin{bmatrix} u_t \\ u_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -n_y & n_x \\ n_x & n_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \quad (\text{A.49})$$

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -n_y & n_x \\ n_x & n_y \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} u_t \\ u_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -n_y & n_x \\ n_x & n_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_t \\ u_n \end{bmatrix} \quad (\text{A.50})$$

よって、法線方向の風速成分がゼロの境界条件を設定するには、それらの境界の節点に対する初期風速に対して式 A.49 を用いて接線成分と法線成分に変換し、その法線成分をゼロに設定し、さらにその接線成分とゼロと置いた法線成分に対して、式 A.50 を用いて x, y 成分に変換し直す。さらに、その境界上の節点に対応する対角行列 $\mathbf{M}_L^{-1}$ の成分をゼロに設定する。

A.7 計算手順

有限要素法による風向・風速場作成の手順を図 A-3 に示す。評価を行う前に、評価領域の格子座標、標高及び要素に属す節点番号の表を作成しておき、入力データとして保存しておく。

評価領域内における数地点の観測風向・風速、領域を代表する大気安定度と混合層高さを入力

する。それら観測風に関しては格子点上に補間を行い、ベキ則を考慮してそれら補間風速を z 方向に平均化する。そして、有限要素法による離散化で出てきた積分計算し、全体行列を作成し、質量集中化及び境界条件を考慮する。このようにして作成された行列方程式を解き、調節風向・風速場を求める。

表 A-1 図 A-2 に対応した四角形要素に属する節点番号

要素番号	節点番号			
	I	II	III	IV
①	1	2	5	4
②	2	3	6	5
③	4	5	8	7
④	5	6	9	8

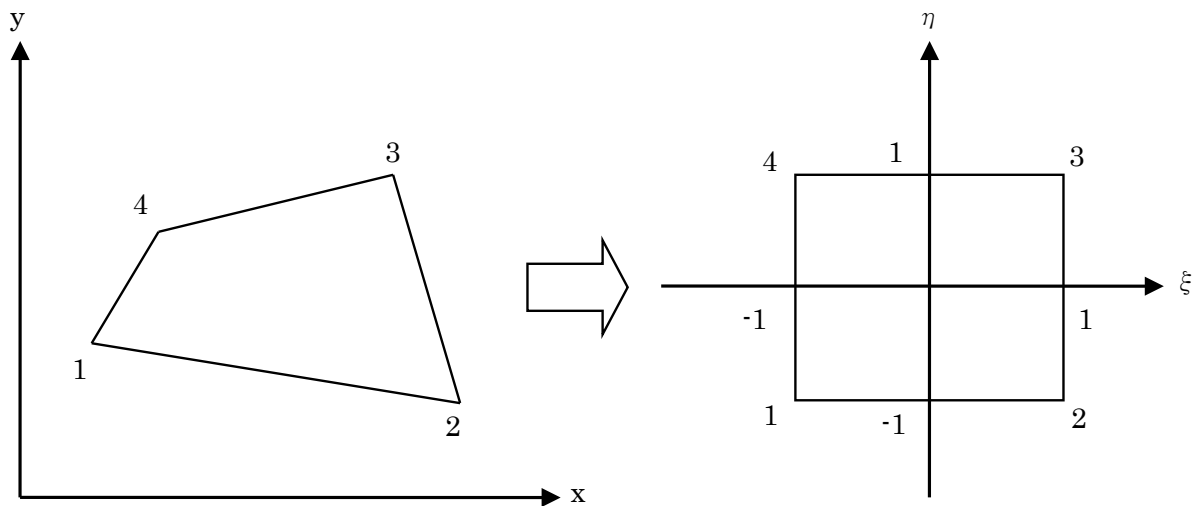


図 A-1 x - y 空間の四角形要素と ξ - η 空間の四角形要素

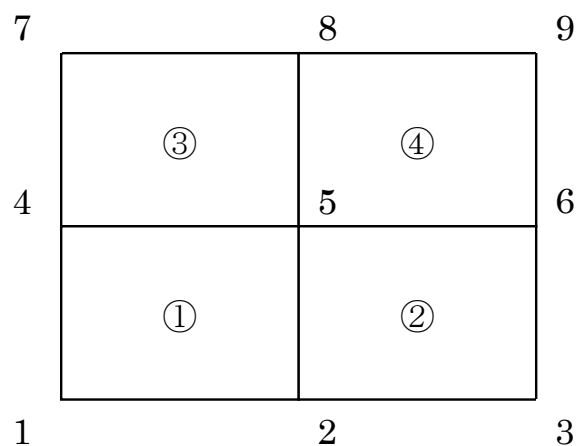


図 A-2 解析領域が 4 つの四角形要素から構成される例

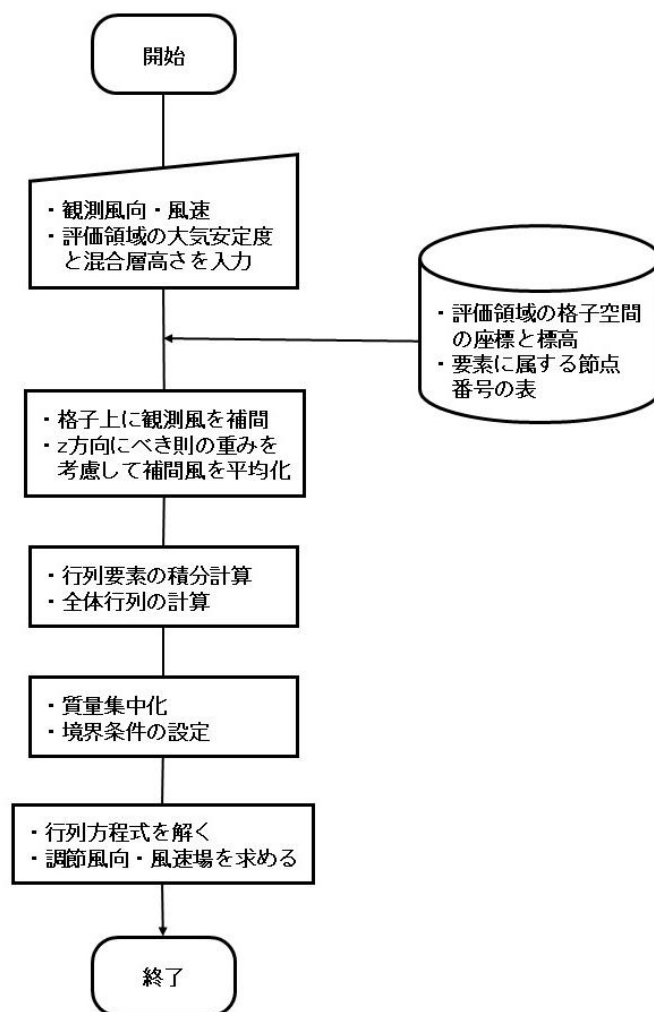


図 A-3 有限要素法による風向・風速場作成の手順

