

原発事故の大気拡散評価

山澤弘実

名古屋大学名誉教授
(公財) 環境科学技術研究所非常勤理事

本発表には環境研究総合推進費1-1802(JPMEERF20181002)による成果及びJAEA永井晴康氏提供資料*1を含む

*1 JAEA永井晴康氏提供資料は主に日本学術会議 総合工学委員会 原子力安全に関する分科会
「原発事故の環境影響に関する検討小委員会」で紹介された内容

1. 原子力施設と大気拡散
2. 大気拡散モデルの現状
3. 大気拡散評価と緊急時応用

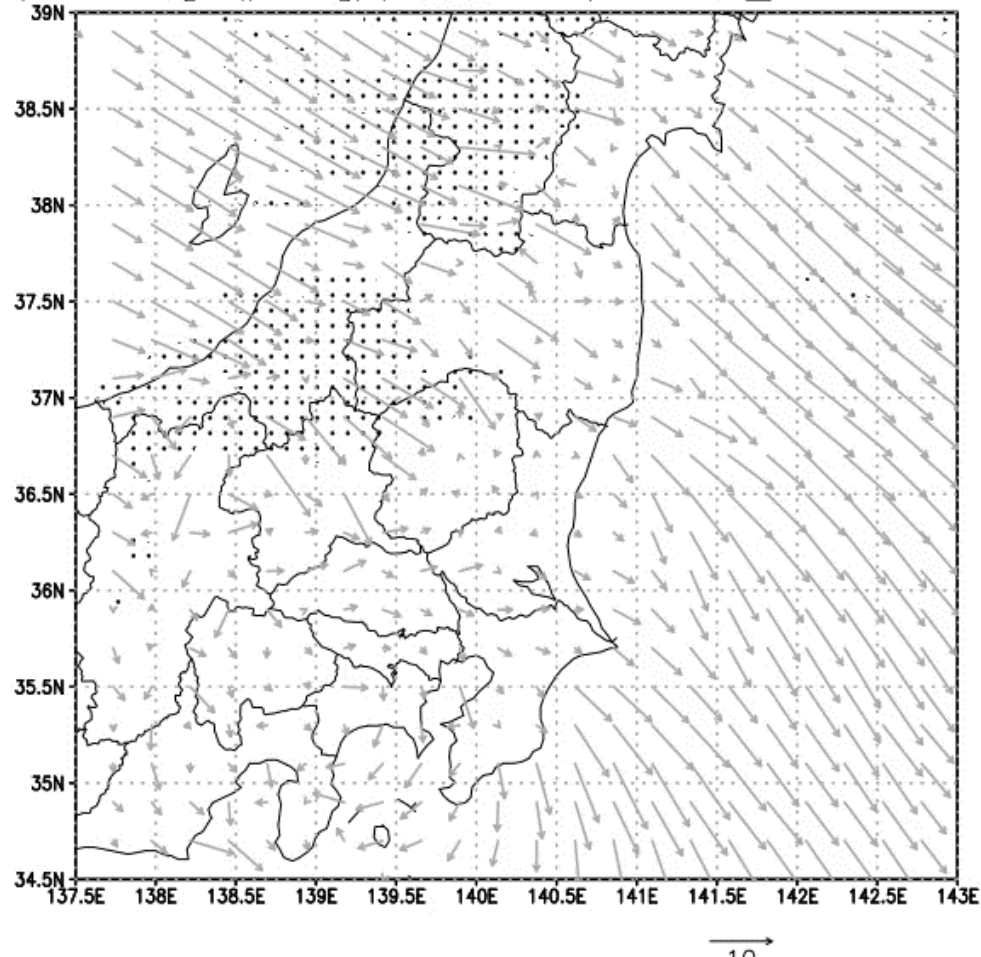
原子力総合シンポジウム2018での講演「原子力防災の科学技術」(山澤)の枠組み

その後現在までの5-6年での大気拡散評価・予測に関する進展

Plume behavior: simulation results

世界の先端的モデル12個によるアンサンブル平均(地上大気中 ^{137}Cs 濃度)

Log10(Cs-137[Bq/m³])(1hour Ave) Cs137_2011031204(JST)



Contribution: Sato, Y., Takigawa, M., Sekiyama, T.T., Kajino, M., Terada, H., Nagai, H., Kondo, H., Uchida, J., Goto, D., Quelo, D., Mathieu, A., Querel, A., Fang, S., Morino, Y., von Schoenberg, P., Grahn, H., Brannstrom, N., Hirao, S., Tsuruta, H., Yamazawa

原子力施設から放射性物質の放出が起こると

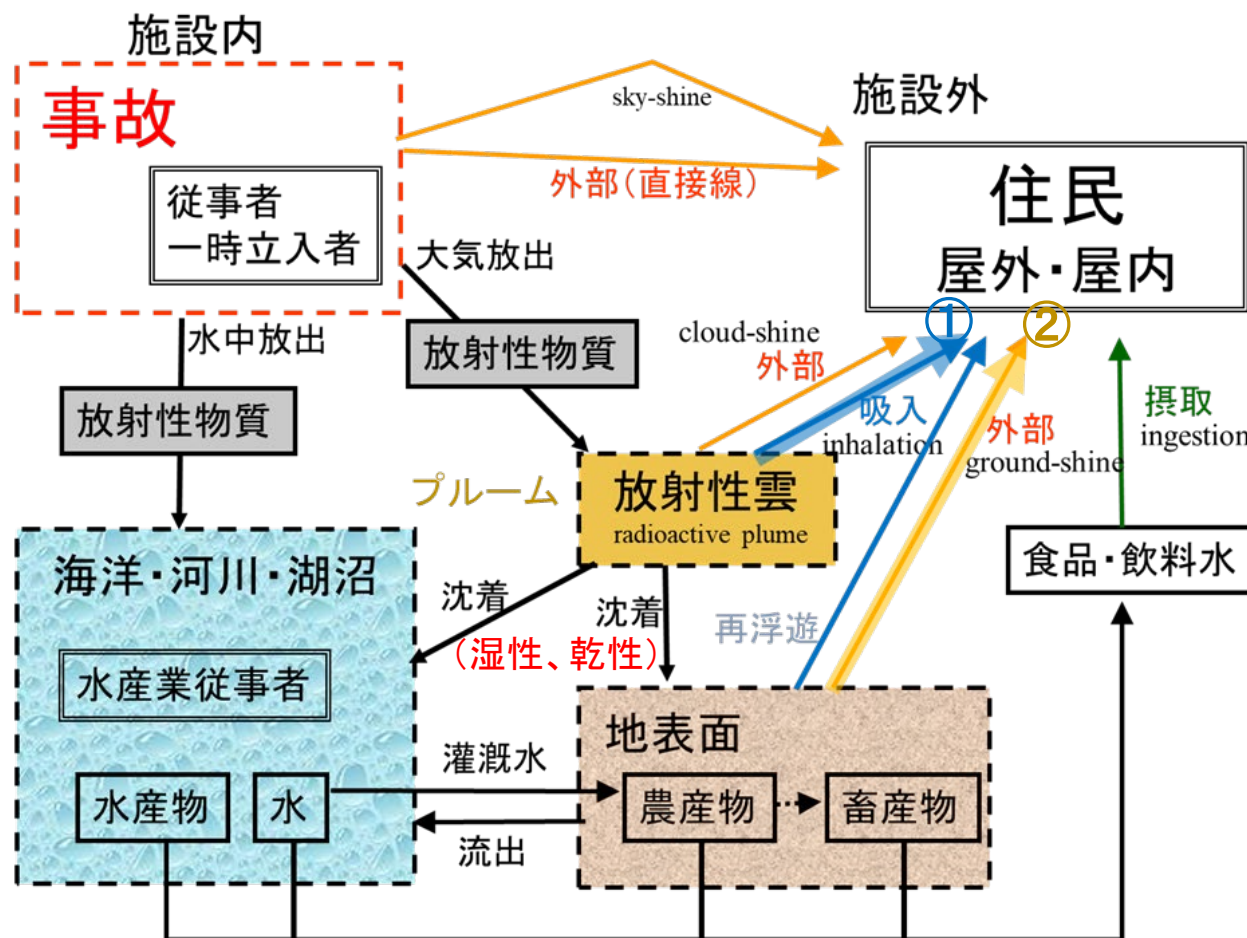
主要被ばく経路の把握が重要

①プルーム内核種の吸入

②沈着核種からのグランドシャイン

実時間or事前予測が必要

汚染後の事後評価でも有効



日本の原発立地の特徴

ほとんどが**海岸・複雑地形**
欧米の内陸・平坦地形での立地と異なる

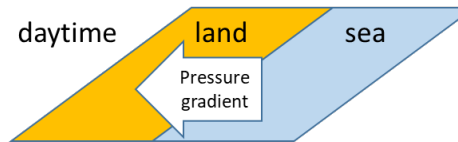
欧米原発とは異なる
複雑な大気拡散特性

熱的局地循環

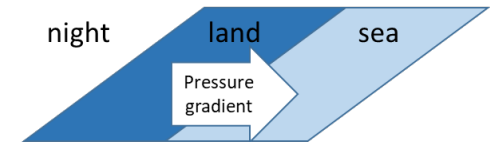
静水圧の式 (静力学平衡式)
hydrostatic equation
(equation of hydrostatic equilibrium)

地上からHの間で積分

$$\frac{1}{p} \frac{dp}{dz} = -\frac{g}{RT} \Rightarrow p_0 = p(H) \exp\left(\frac{gH}{RT}\right)$$

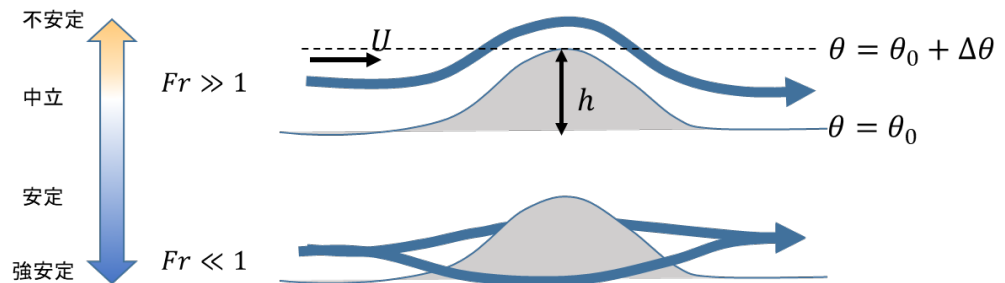


$$T_L > T_S$$
$$p_{0L} < p_{0S}$$



$$T_L < T_S$$
$$p_{0L} > p_{0S}$$

気流への地形影響



Froude数 $Fr = \frac{U}{\sqrt{g \frac{\Delta \theta}{\theta_0} h}}$ 気流の慣性力と重力の比 (無次元)

1F事故拡散態様はこれらの多数の要因が複合して決まった
少数の地上観測や気象専門家の考察のみでは把握困難

大気拡散予測手法に信頼性がなく使用できないという判断根拠となったケース

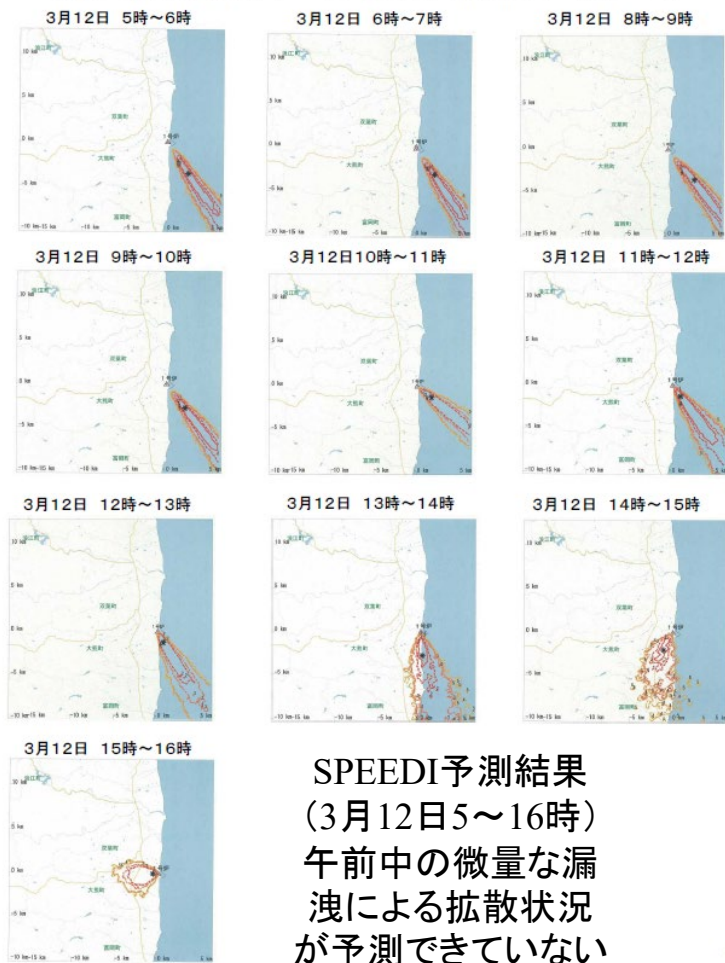
→ 拡散予測の特性(時間変化情報と予測のずれ)を考慮する専門知識が必要

原子力規制庁資料「SPEEDI等の予測的手法の利用について」(平成27年7月)

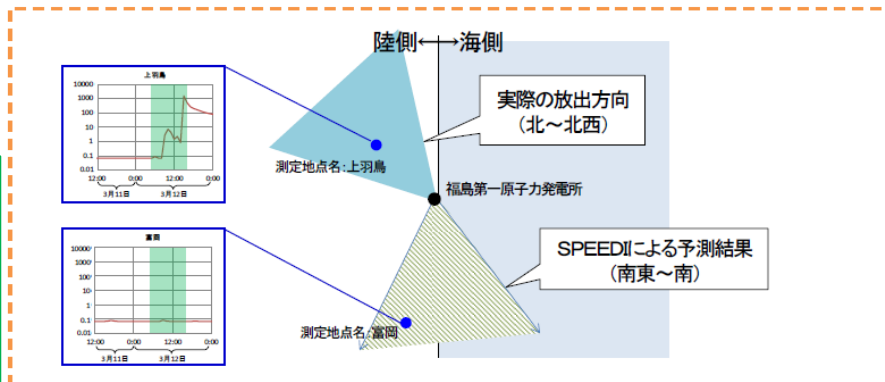
福島第一原子力発電所事故時のSPEEDIによる単位放出量計算結果(3月12日5時～16時)

参考1

東電福島第一原発事故時の実態

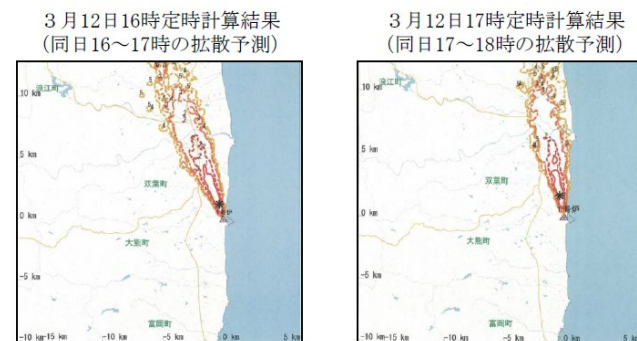


拡散予測の
特性を考慮
しないと誤っ
た判断になる
事前に取得
可能な時間
変化情報も
考慮すべき



- 3月12日の明け方、1号機から最初の放射性物質の漏えいがあった。同日14時30分には、同号機のベント操作による放射性物質の放出があった。
- 単位量放出を仮定したSPEEDIによる予測結果によると、同日5時から15時まで、南東方向(海側)から南方向に拡散すると予測されている。
- 同日明け方から15時にかけて、北～北西方向で空間放射線量率の上昇が観測される一方で、南～南西方向では有意な変化は見られていない。実際の放出方向はSPEEDIの予測と逆方向であった。

SPEEDI予測結果
(3月12日16～18時)
1号炉ベント放出による
拡散状況は1, 2時
間遅れで一致



実際の拡散状況の考察

- ✓ 1Fと2Fの地上とスタック高度(120m)の風速観測値に基づく解析

■ 午前: 予測と測定結果が逆向き

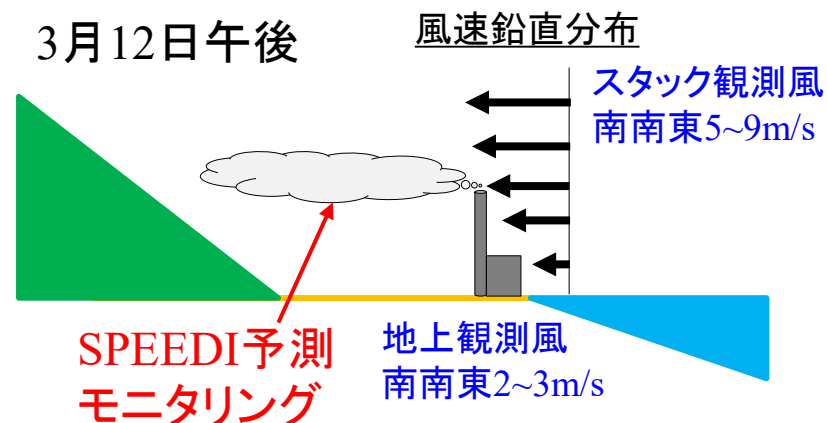
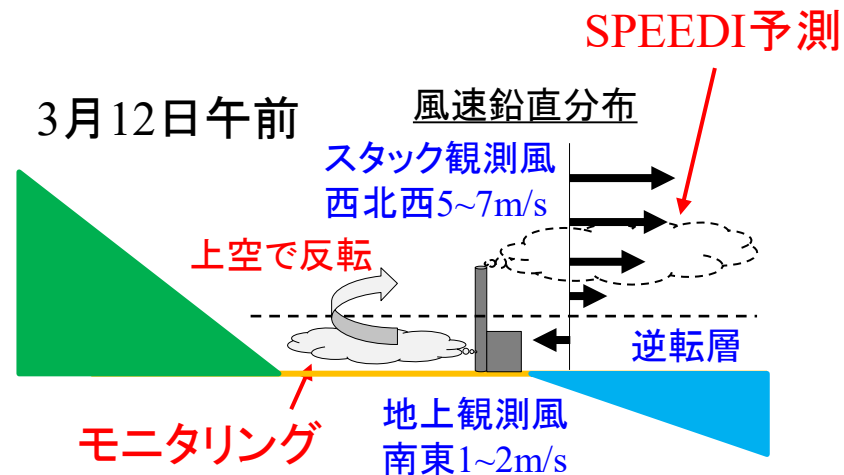
- ✓ 上空の一般風は西北西だが、逆転層の形成により、地上風は逆向きの南東風
- ✓ 計算の分解能では逆転層を再現できず、建屋漏洩の拡散方向とは逆向きの結果
- ✓ 上空及び最終的には予測方向へ拡散

■ 午後: 予測と測定結果が一致

- ✓ 上空の一般風が南南東に変化するとともに、逆転層が解消され地上風も同じ風向
- ✓ ベント放出による拡散方向は、モニタリング結果とSPEEDI予測で一致

■ 拡散予測の特性と限界

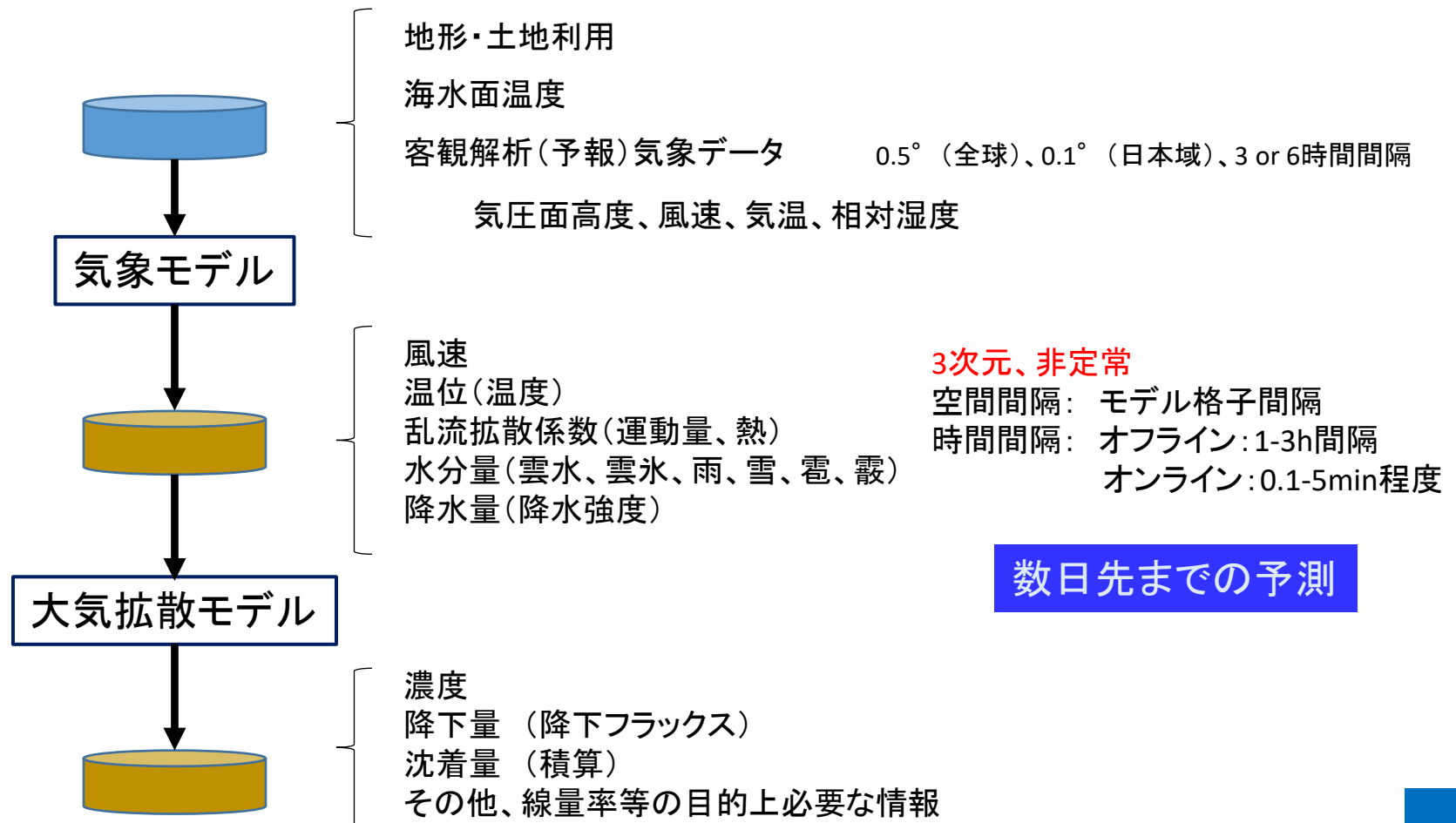
- ✓ 一般風に基づく**広域拡散予測は有効**
- ✓ 局所的な現象の再現性に課題
- **高分解能化による予測性能向上を目指す**



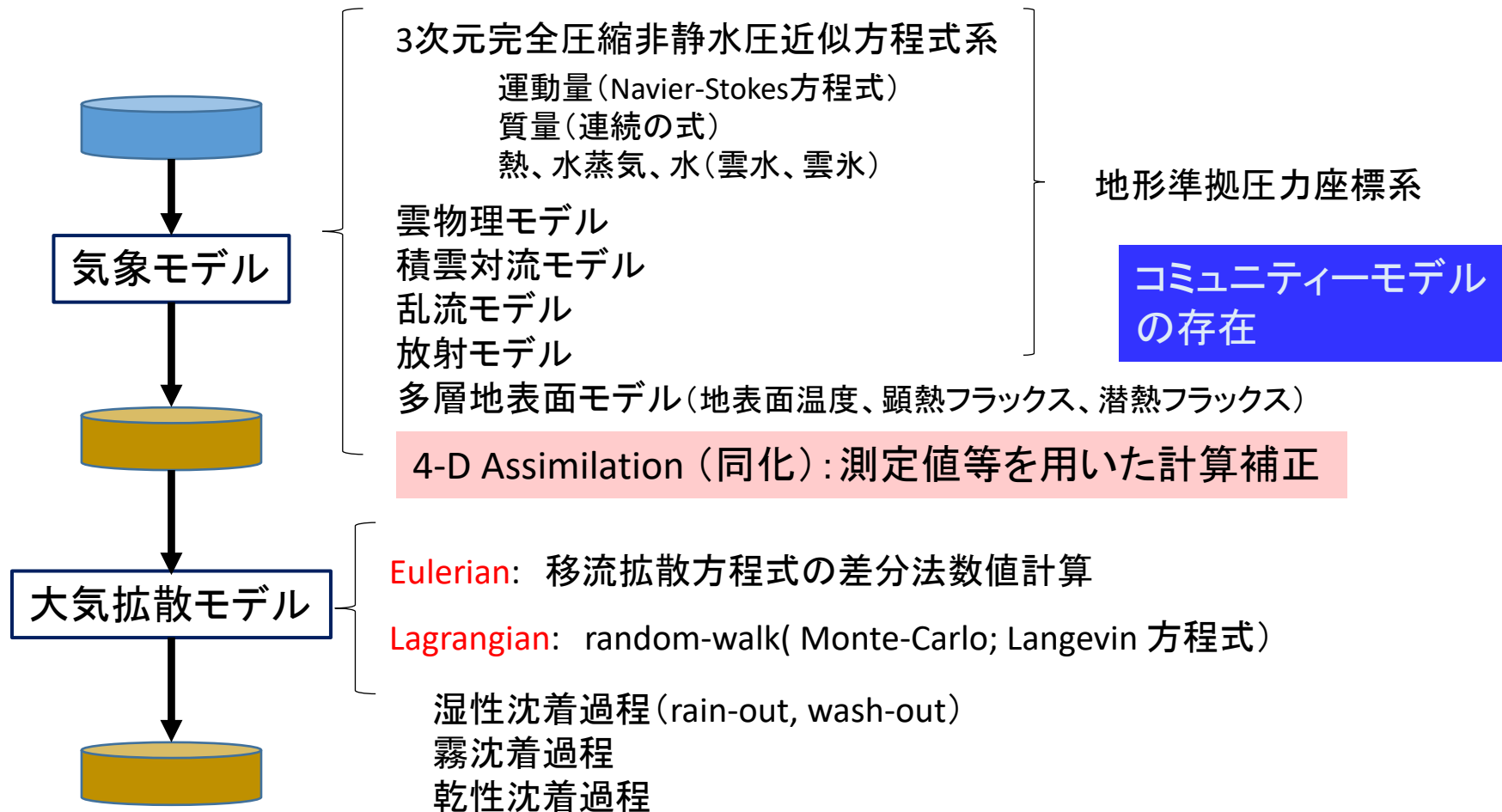
2. モデルの現状

詳細大気拡散モデル

特定のサイトの周辺環境を考慮し、特定の事例を対象にする場合は、現在のほとんどの大気拡散計算は以下の構成で行われる。



詳細大気拡散モデル



ここ30年、40年の間に、世界中の多くの研究者の貢献で進歩し続けてきた。

第2回、第3回モデル国際比較試験(MIP-2,3)

- 環境研究総合推進費1-1802(代表:名大山澤)により2018-20年に実施
- 学会会議主導の第1回(代表:東大中島)の後継
- 1F事故を対象に共通入力データによるモデル相互比較・検証と改良を目的
- 先端的な12モデルの参加

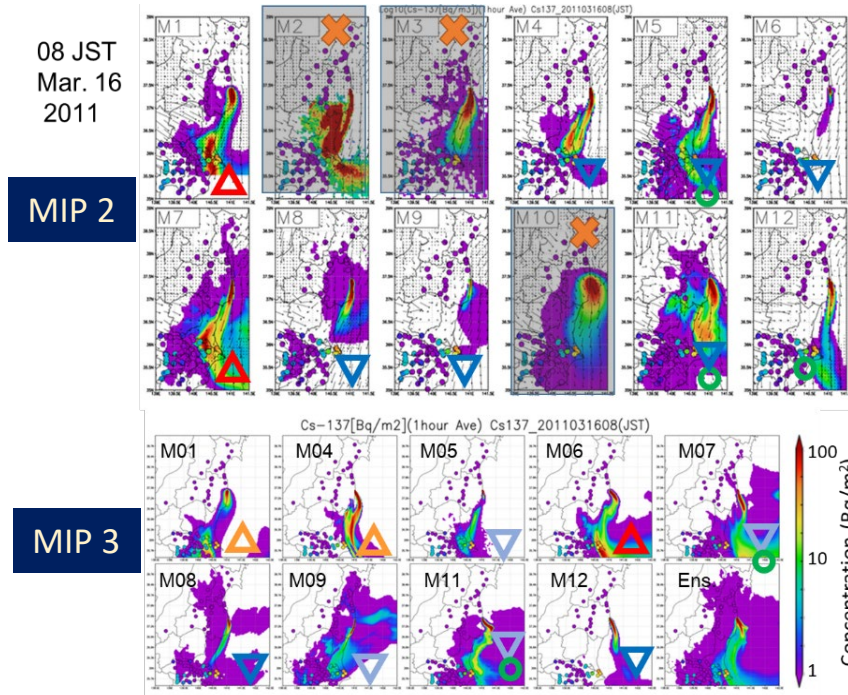
No.	3rd	Model Name	Group/Institute	E/ L	OD/ND	Reference
1	○	AIST-MM	AIST* ¹	E	OD	Kondo (2001)
2		PELLO	FOI* ²	L	ND	Schoenberg et al. (2014)
3		HIRAT	Fukushima U.	L	ND	Hirao et al. (2013)
4	○	IdX	IRSN* ³	E	ND	Mathieu et al. (2012)
5	○	GEARN	JAEA* ⁴	L	OD	Katata et al. (2015)
6	○	WRF-Chem-J	JAMSTEC* ⁵	E	OD	Grell et al. (2005)
7	○	NHM-Chem	MRI* ⁶	E	ND	Kajino et al. (2013)
8	○	WRF-CMAQ	NIES* ⁷	E	OD	Morino et al. (2013)
9	○	SCALE	Nagoya U. Hokkaido U.	E	OD	Nishizawa et al. (2015)
10		Polyphemus	Tsinghua U.	E	ND	Brandt et al. (2002)
11	○	WRF-Chem-T	Tsinghua U.	E	OD	Hu et al. (2014)
12	○	NICAM	U. Tokyo/NIES	E	OD	Uchida et al. (2017)

UPZ及びその近隣を対象に大気拡散予測可能なモデル 国内だけで5-10モデル
 但し、**迅速運用可能なモデル**は現状では1モデル(**日本気象学会放射能汚染対策部会** * 調べ)
 運用体制を整備・調整すれば数モデルは可能

*** 原子力事故時に、国が大気拡散予測情報を利用・公開しない現状では、当該分野の日本気象学会が貢献をすべきでないかという意見が強く、諸々の事項を検討中。**

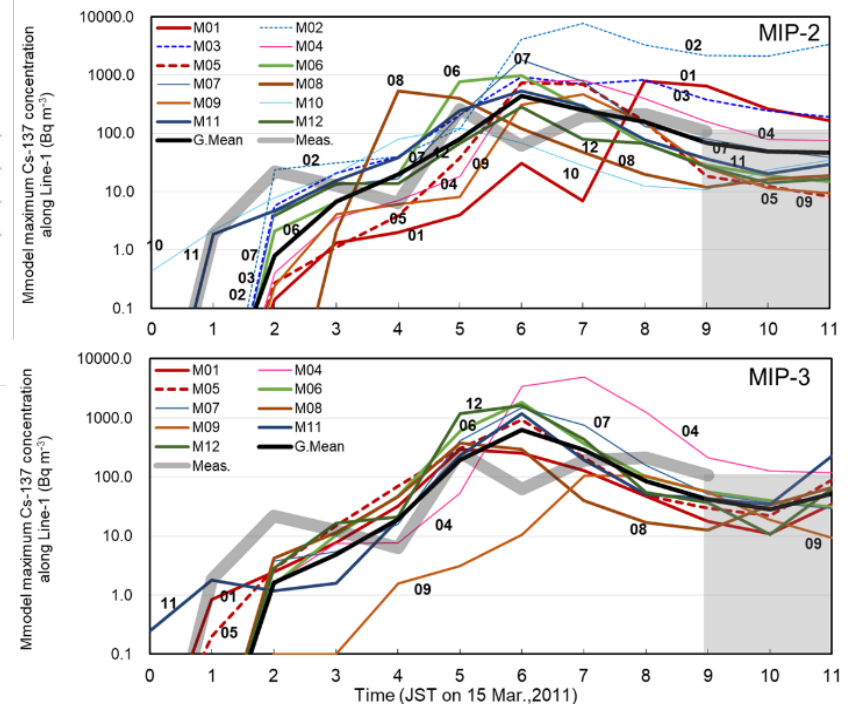
2回の国際モデル比較検証による モデルコミュニティの実力向上

プルーム4(湿性沈着あり)の大気中濃度再現



降水時の大気中濃度。第2回では、多くのモデルで湿性沈着の過大・過少評価が軽減し、大気中濃度の再現性が改善。

プルーム2の軸上濃度再現性(茨城県内)



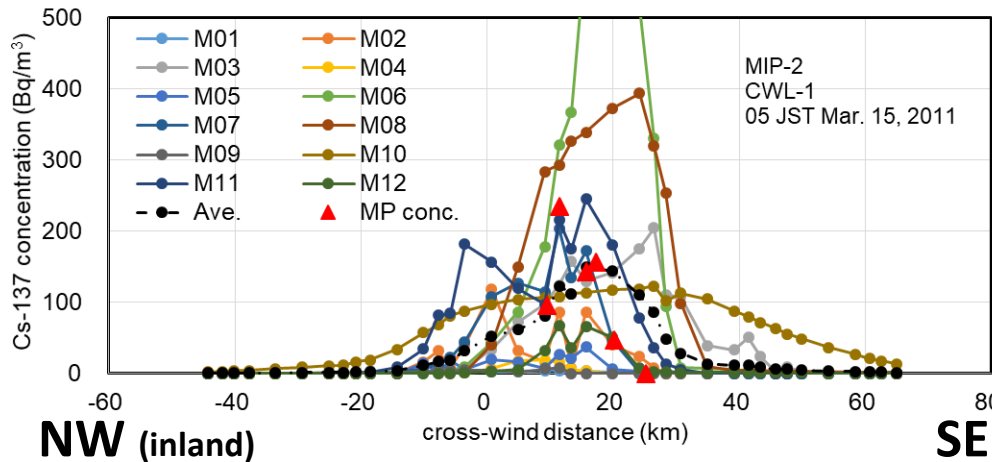
プルーム軸濃度の時系列。第2回では濃度の再現性が向上し、モデル間の差異も明らかに小さくなった。

- モデルコミュニティでモデル性能(問題点)についての情報共有
- MIP-3で湿性沈着、プルーム位置・濃度の再現性改善を確認
- 湿性沈着再現は改善の余地大

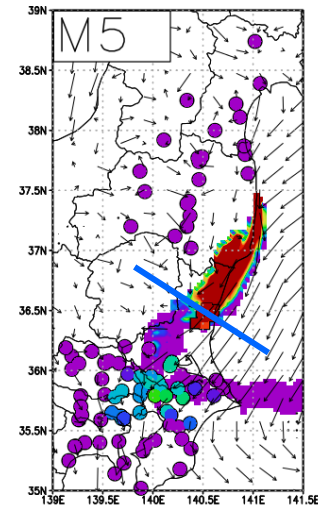
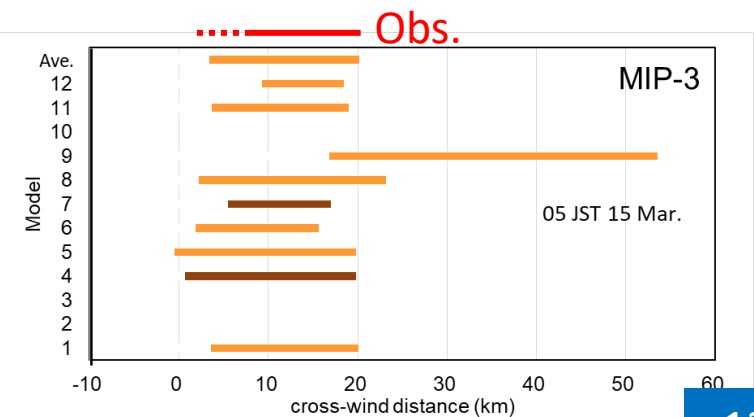
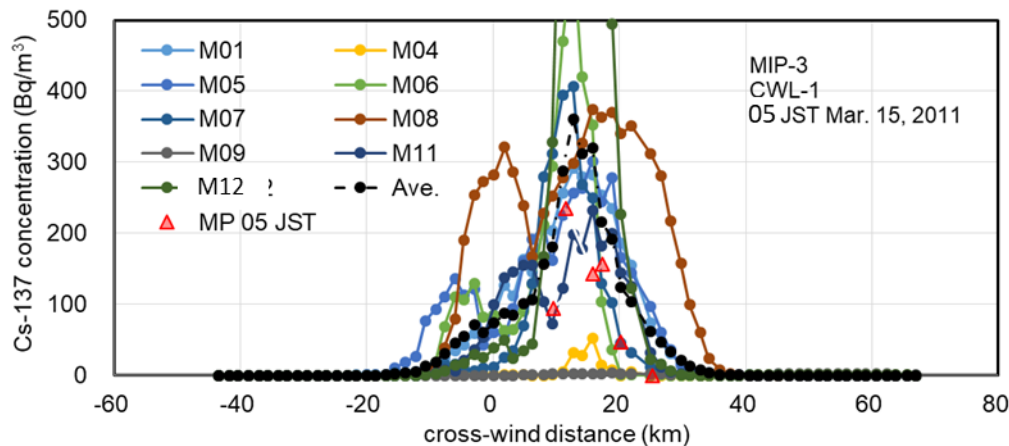
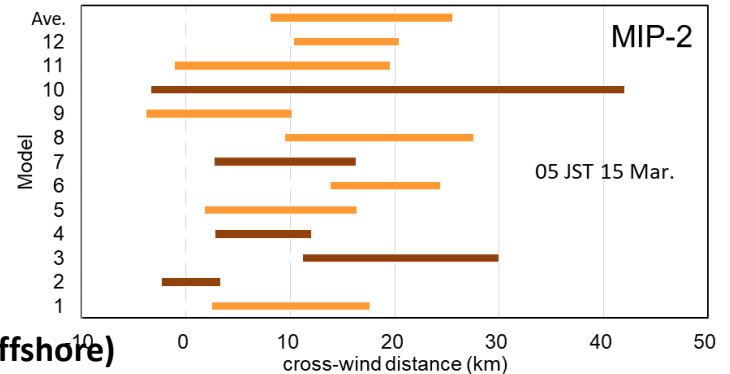
地上大気中濃度 Cross-wind プロファイル(茨城県中央部:P2)

Profiles of surface concentration along Line-1

05 JST Mar. 15



Range of ± 1 -sigma along Line-1



1F事故の大気拡散評価で得られた知見の集約

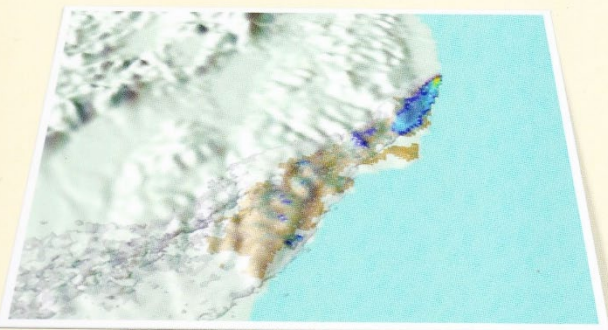
日本気象学会の研究・技術書としてとりまとめ(2023.10.19刊行、全11章181p)

点発生源からの メソスケール拡散シミュレーション ー福島第一原子力発電所事故をふまえてー

気象研究ノート 第248号

編 集

近藤裕昭 佐藤陽祐 永井晴康 山澤弘実



日本気象学会

著者

岩崎俊樹, 打田純也, 大浦泰嗣, 梶野瑞王, 五藤大輔,
近藤裕昭, 佐藤陽祐, 関山 剛, 茅野政道, 鶴田治雄,
寺田宏明, 永井晴康, 森泉 純, 山澤弘実

【目次】

巻頭言 はじめに

第Ⅰ部 緊急時放射能影響予測システム(SPEEDI, WSPEEDI)

第1章 システムの概要

第2章 システムの検証

第3章 実際の大気放出事故等への活用

第Ⅱ部 メソスケール大気拡散モデルの相互比較及び検証

第4章 欧州大気拡散実験(ETEX)によるモデル比較検証

第5章 福島原発事故を対象とした大気拡散モデルの相互比較

第6章 福島原発事故データを用いた検証に基づくモデル改良

第7章 モデル検証のための福島原発事故データ

第Ⅲ部 メソスケール拡散モデルの検証・品質評価と信頼性の確保

第8章 数値モデル計算結果の品質管理と検証用データ

第9章 ベンチマークの事例

第10章 メソスケール拡散モデル使用の注意点と課題

第11章 不確実性を考慮した大気拡散予測情報の緊急時活用法について

「点源メソスケール大気拡散シミュレーション」分野では日本が最先端

3. 大気拡散評価と緊急時応用

緊急時の措置（「原子力災害対策指針」の記述）

避難等の緊急防護措置（数時間～1日）

安定ヨウ素剤配付・服用、屋内退避

一時移転等の早期防護策（～1週間）

「1, 2時間程度のずれは許せないので」

「大気拡散予測は無い方が安全」という意味？

規制委員会の指針改定時の考え方

「いつどの程度の放出があるか等を緊急時対応と情報源把握すること及び気象予測の持つ不確かさを排除することはいずれも不可能であることから、SPEEDIによる計算結果に基づいて防護措置の判断を行うことは被ばくのリスクを高めかねない」

原子力規制委員会（平成26年10月8日）



措置決定のための基礎情報

現状は、

施設の状況（炉内データ等）、環境モニタリング
大気拡散予測（SPEEDIは運用廃止）



プルーム防護への懸念

プルーム暴露後の対応
飛来 of 事前予測情報なし
屋外活動の可否判断困難

SPEEDIは研究者による基本開発後、1980、90年代に国のシステムとして整備。
その後、研究者はSPEEDI運用（防災目的の使用法）の検討にほとんど関与できていない。

1F事故当時、2－3時間先までの予測を毎時繰り返すことをデフォルトの使用法としていた。
「なぜそのような不適切な（無茶な）使い方をするのか？」と当時嘆息。

山澤ほか(2011) 日本原子力学会誌, 53, 479-483
 茅野(2013)日本原子力学会誌, 55, 220-224
 山澤(2013)日本原子力学会誌, 55, 707-711
 山澤ほか(2016) 日本原子力学会誌, 58, 115-120

1F事故初期のSPEEDI計算結果のレビュー

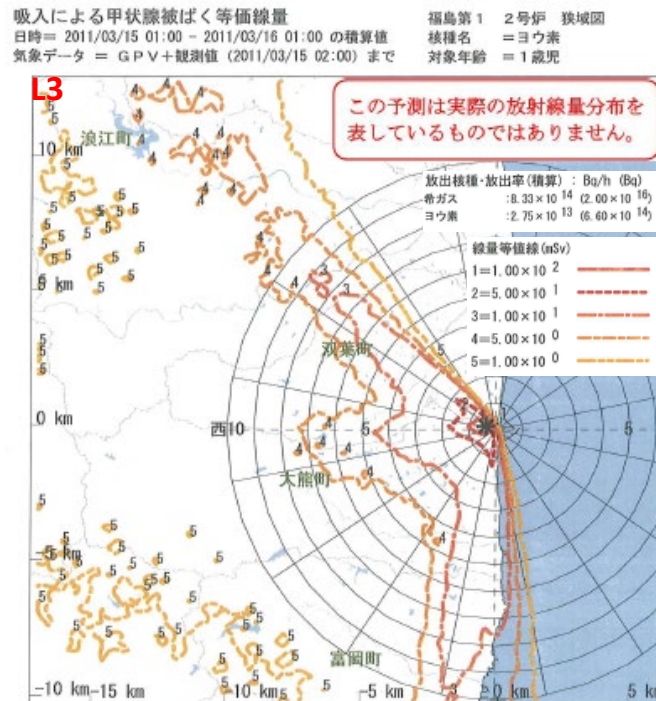
2011年3月15日 大量の放出の継続

予測: 現地対策本部実行(3月15日2:32配信)
 24時間一定連続放出仮定

参考(事後計算): (安全委員会3月23日公表)
 簡易推定した放出率を使用

甲状腺等価線量 15日01時-16日01時の積算

同左: 12日06時-24日00時の積算



- 南(朝), 西(午後), 北西(夕方以降)に影響
- 南と北西方向では比較的遠距離まで影響
- ◆事後計算(右図)と類似の分布が15日未明時点で把握できる

緊急時での大気拡散モデル使用法の検討

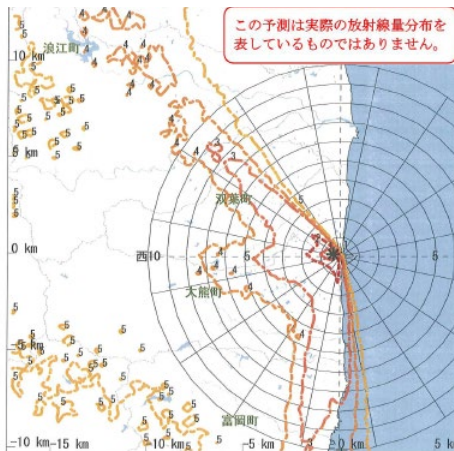
モデル性能の評価結果

1. 大局的動態はモデル間で整合、実態に近い
2. プルーム飛来時刻に1-2時間程度のずれ
3. プルーム位置に1方位程度のずれ

使用法の検討

モデルは有用な情報を提供可能
時間的、空間的な**粗視化**が必要
(精密さと信頼性はトレードオフの関係)

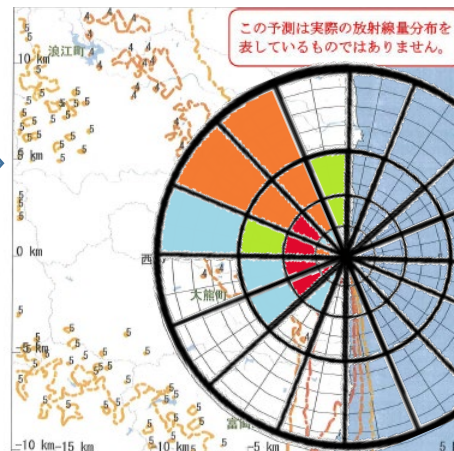
従来の予測結果提示法



X月Y日15時

あたかも精密そうだが、
不可避の誤差の程度が不明

新しい予測結果提示法



X月Y日15-18時

「精密そう」の弊害を回避
予測結果のロバストさを確保

学区、行政区界でも

モデル使用の基本方針

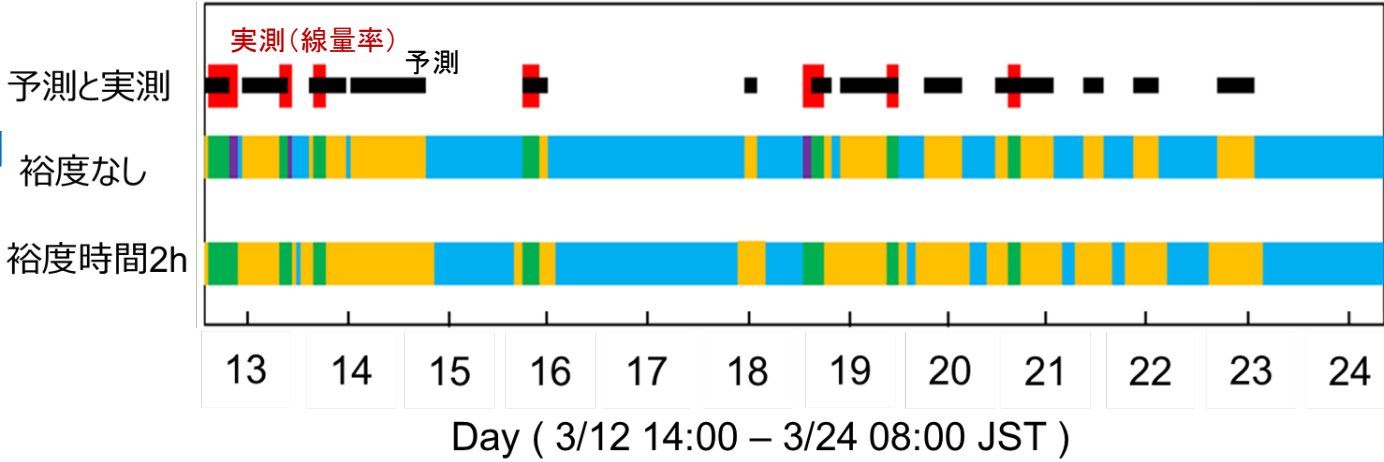
粗視化した評価区域内での
複数時間分の計算値の統計量
から、**予測濃度、不確かさ**
を評価して予測情報として提供。

実際とどの程度整合？
(提示法の合理性？)

放出源情報がない場合 UPZ内プルーム飛来予測
(プルームが飛来しない時間帯の予測は可能？)

一定の連続放出を仮定した大気拡散計算:プルーム飛来するかどうかだけを判定
飛来有無評価(浪江MPの例)

MIP3(1 km格子)9モデル
によるプルーム飛来予測
性能評価結果(浪江)



飛来評価性能: 1F30km圏内線量率測定点(6地点)を対象
表中の値はそれぞれのケースの時間割合

粗視化なし
時間的および空間的粗視化
3時間 6 km四方

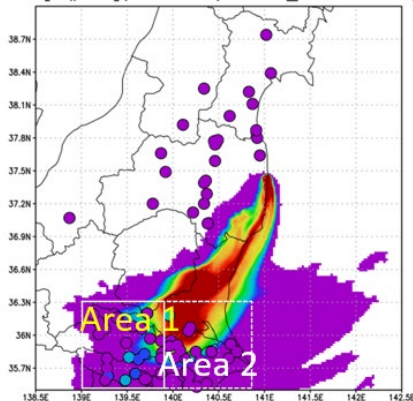
Model.				Model.			
		Plume	No			Plume	No
Obs.	Plume	0.152	0.022	Obs.	Plume	0.176	0.005
	No	0.318	0.509		No	0.633	0.185

有効なプルームなし予測

粗視化情報提示法の検証

首都圏でのプルーム2 (2011/03/15)を対象とした検証(密な大気中濃度実測データ)
3時間単位、80 km四方領域による粗視化(計算値は1時間毎)

Cs-137[Bq/m²](1hour Ave) Cs137_2011031507(J)



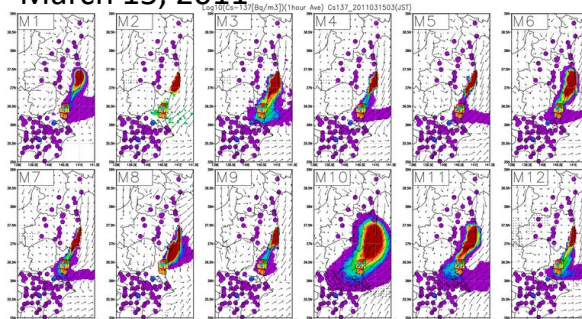
濃度観測値の個数

各エリア内観測点 60-80点
×
3 時刻

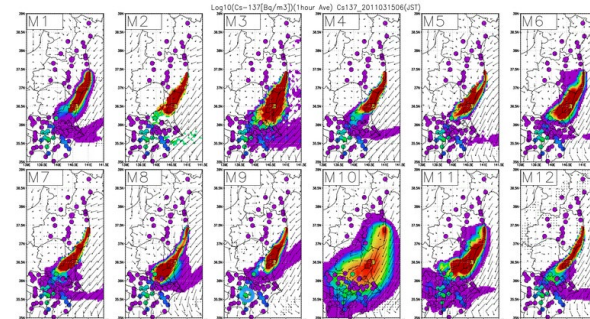
濃度計算値の個数

各エリア内格子点 676点
×
3 時刻

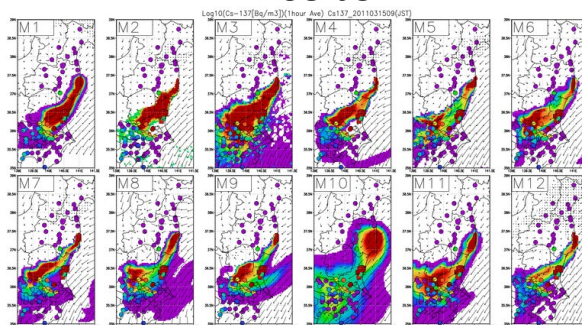
March 15, 2011 03 JST



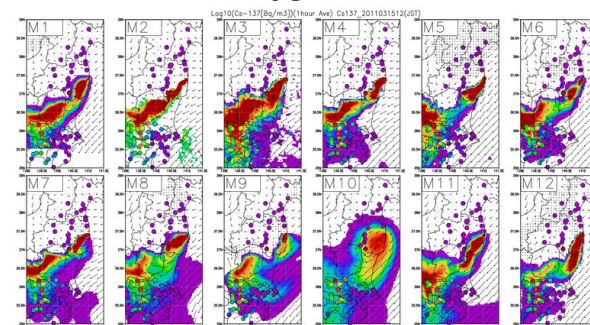
06 JST



09 JST

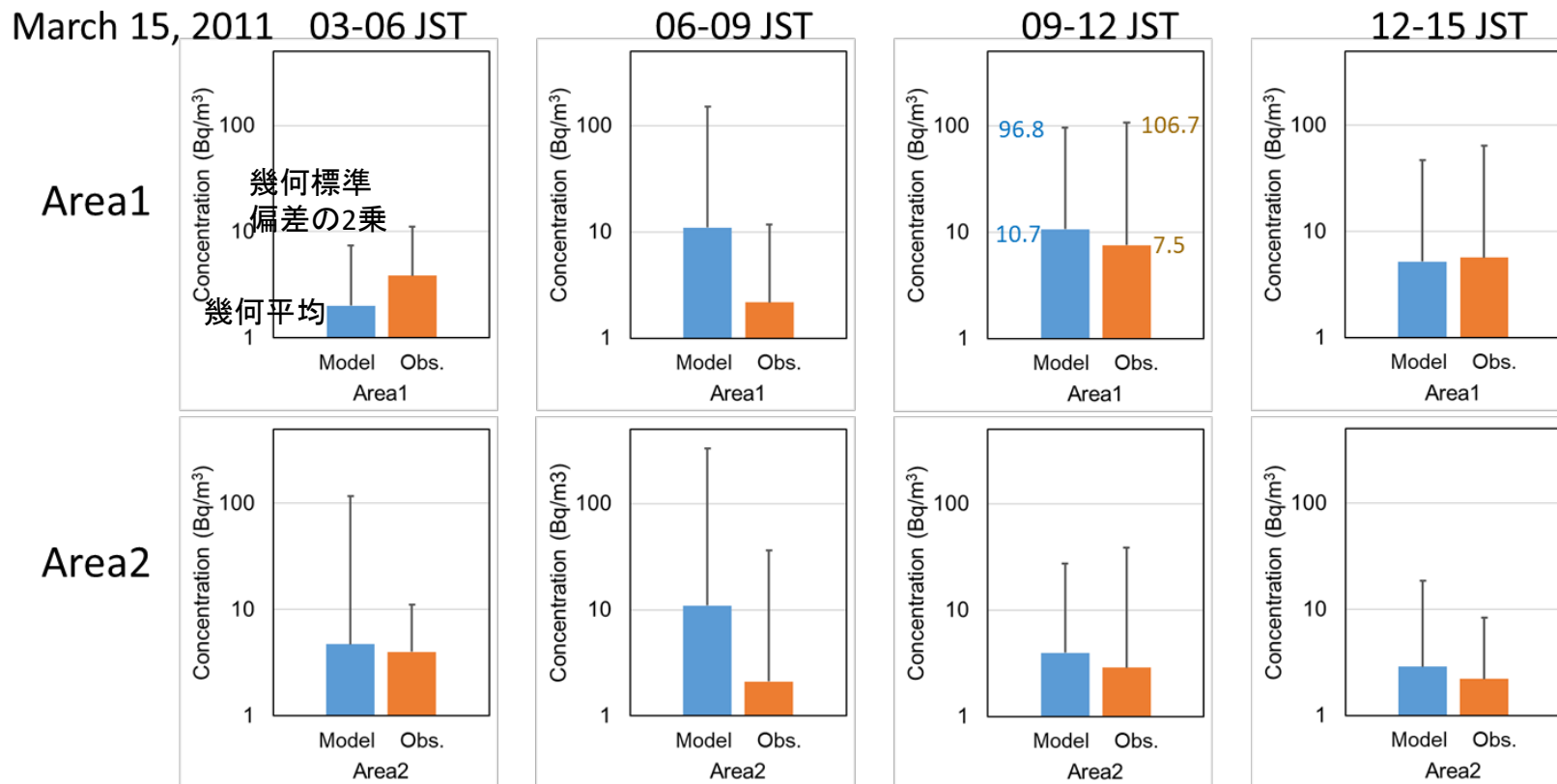


12 JST



粗視化した予測情報提示法の合理性？

放出源情報が既知の前提での濃度値



例えば、最大濃度であった時間帯について「東京都西部では、9時から12時の3時間に、平均10 Bq/m³程度のプルームが予測され、濃度が高い場合(2.5%の確率)は100 Bq/m³程度と予測される」という情報が提供できる。

粗視化によりかなり現実的な情報提示ができています

【背景】 1F事故に対する大気拡散予測の問題点

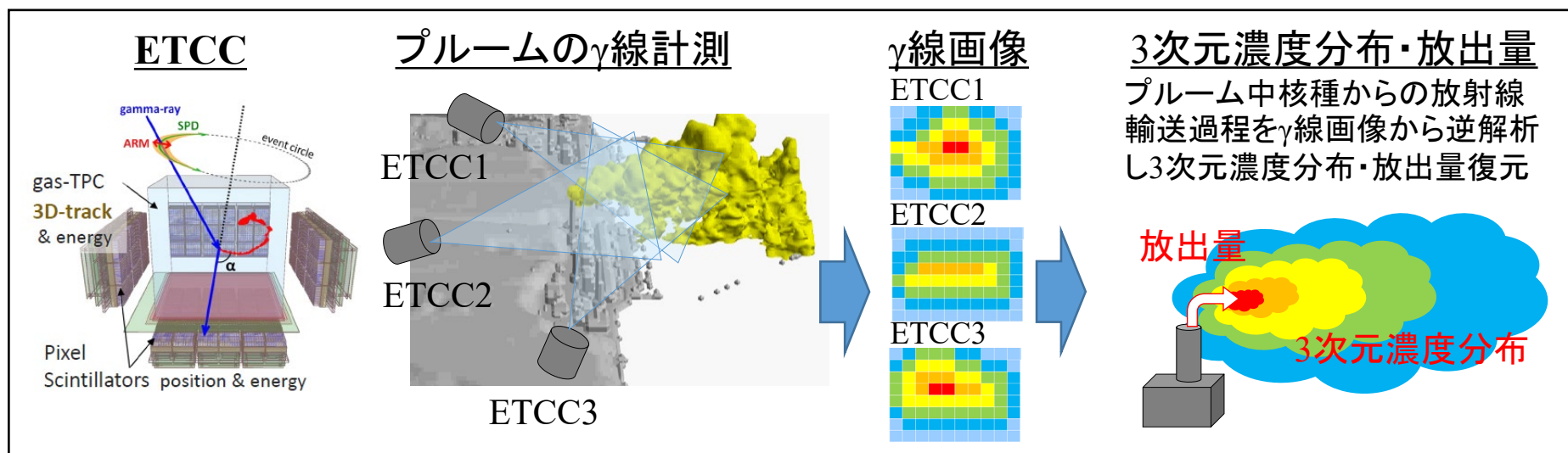
- 放出源情報が不明のため定量的な拡散予測ができなかった。
- 放出源情報を推定するための測定データが十分に得られなかった。

【目的】

- 拡散解析と放射線計測を融合したプルーム定量可視化手法の開発

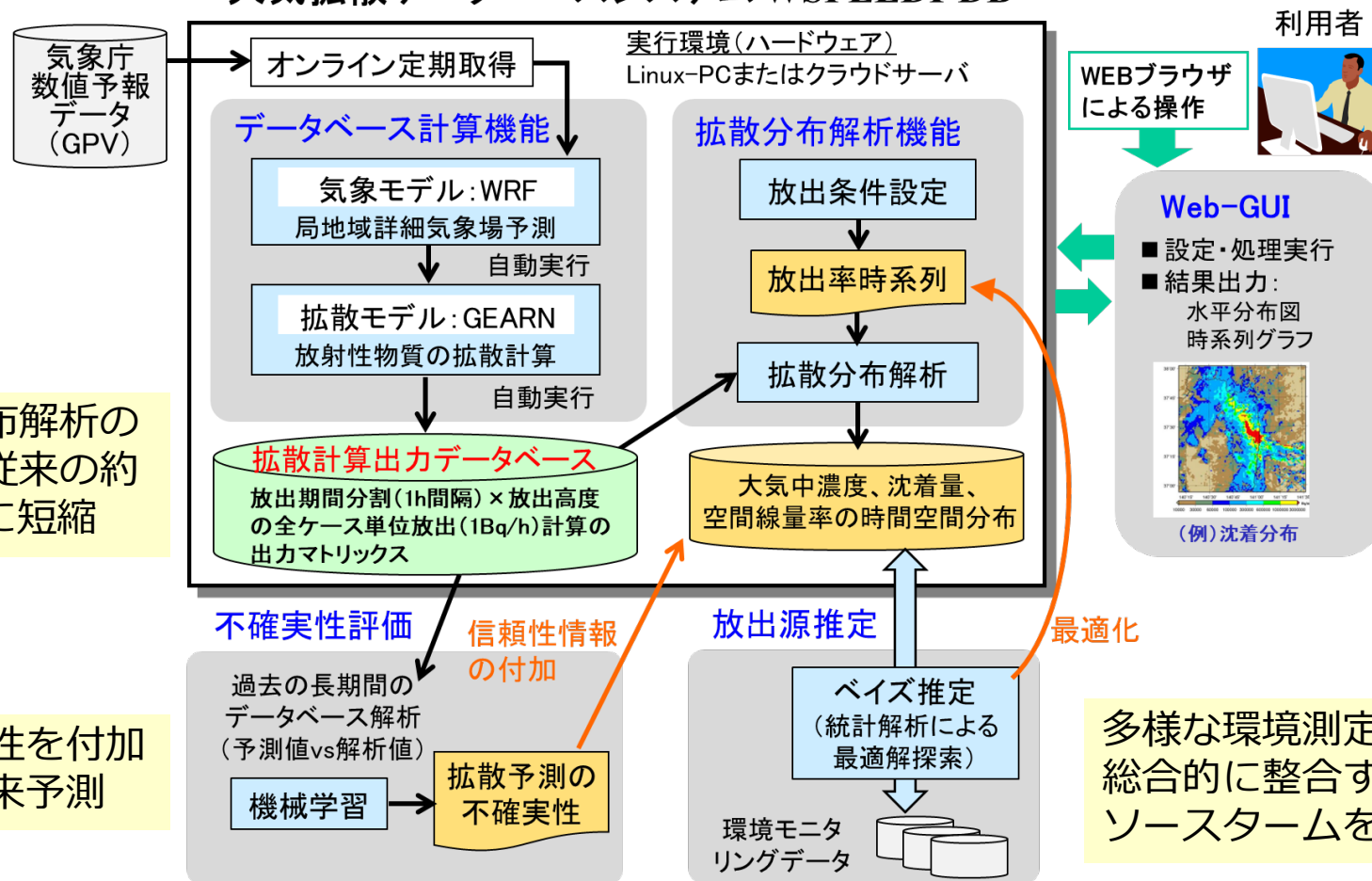
【内容】

- 京都大学が開発した電子飛跡検出型コンプトンカメラ(ETCC)による γ 線の定量的画像から、建屋周辺大気中の放射性核種の3次元濃度分布と放出量を推定
- 放射線計測と大気拡散計算を融合した大気拡散可視化システムを目指す



- 事前実行した大気拡散計算出力データベースで任意条件の計算結果を即座に取得
- 統計解析を組み込んだ推定手法により多様な測定値と整合的な放出源情報を逆推定
- 機械学習を活用した解析手法により大気拡散予測の不確実性を評価

大気拡散データベースシステム WSPEEDI-DB



拡散分布解析の時間を従来の約1/100に短縮

不確実性を付加した将来予測

多様な環境測定値と総合的に整合するソースタームを推定

【1F事故】

- 事故初期放出源情報の概算（安全委員会） **SPEEDI**
- 日本政府のIAEAに対する事故報告書に放出源情報推定値が記載
- 厚生労働省により食品モニタリングの参考情報として拡散解析結果が活用
- 世界保健機関WHO、世界気象機関WMOが放出源情報推定値を利用
- 環境省事業で放出源情報と環境中核種分布データが被ばく線量評価に活用
- 国連科学委員会UNSCEAR（2020年報告書）被ばく線量評価に活用

【その他原子力分野】

- 動燃アスファルト固化処理施設火災爆発事故の放出源情報推定 **SPEEDI**
- JCO事故の放出源情報推定と被ばく線量評価 **SPEEDI**
- スペイン¹³⁷Cs誤焼却事故の放出源情報推定
- 北朝鮮地下核実験時の拡散予測情報がモニタリング計画作成に活用（規制庁システムとして運用中）
- 日本原燃により六ヶ所再処理施設運転時の環境中核種移行詳細解析に活用
- 島根県 原子力環境センターのモニタリングポスト配置の妥当性評価に活用
- 規制庁事業で防災対応要員研修事業における模擬の環境測定データ作成に活用
- ウクライナ国家原子力規制局ヘザポリージャ原発からの放出を仮定した拡散予測情報を毎日提供（継続中）

【原子力分野以外】

- 三宅島火山ガス拡散予測による放出量推定と拡散メカニズム解明
- 稲ウンカ飛来予測による発生源の推定と農林水産省の予測システムとして活用

大気拡散予測のメリット

山澤(2011, 2016, 2018), 茅野(2013)

1. 事前予測及び迅速性

- 想定される放出の影響を将来(数日)にわたり予測
- モニタリング計画の策定への利用
- 屋内退避中の屋外活動時間の事前設定

2. 空間分布及び時間進展の把握が可能

- 線量率、沈着量、線量等の必要な情報
- 事故規模の概算(放出源情報の逆推定)
- モニタリング設備のない遠方(UPZ外)への影響の評価
- 気象情報から単純に推定できない大気拡散の把握
(地形、海陸分布、温位鉛直構造等の拡散への影響)

3. 複合災害等での堅牢性

- 現地の設備を必要としない
(2024年1月能登半島地震でのモニタリング情報通信の一部途絶)

まとめ

1. 大気拡散モデルは事故後も進歩し、有用なツール

- 国際的なコミュニティによるモデル検証・改良
- プルーム動態は概ね良好に再現可能
- 湿性沈着の不確かさが最大の課題

2. 大気拡散モデルの緊急時応用は可能かつ有用

- プルーム飛来有無の予測（放出源情報なしの場合）
空間的・時間的粗視化による情報の信頼性向上
- 濃度の最尤値、不確かさの範囲は実測に近い（放出源情報あり場合）
- 実測による放出率推定等の応用に関する技術開発も進んでいる

実効性のあるプルーム防護のためには実測とモデル予測の相補的使用が合理的

大気拡散予測利用の技術的問題点及び社会的問題点を直視した検討・対応が、事故当事国であり原子力利用を進める社会（アカデミアを含む各セクター）の責務

「大気拡散予測は無い方が安全」という方針は正当化されるか？