

平成30年度—令和2年度
環境研究総合推進費
1－1802

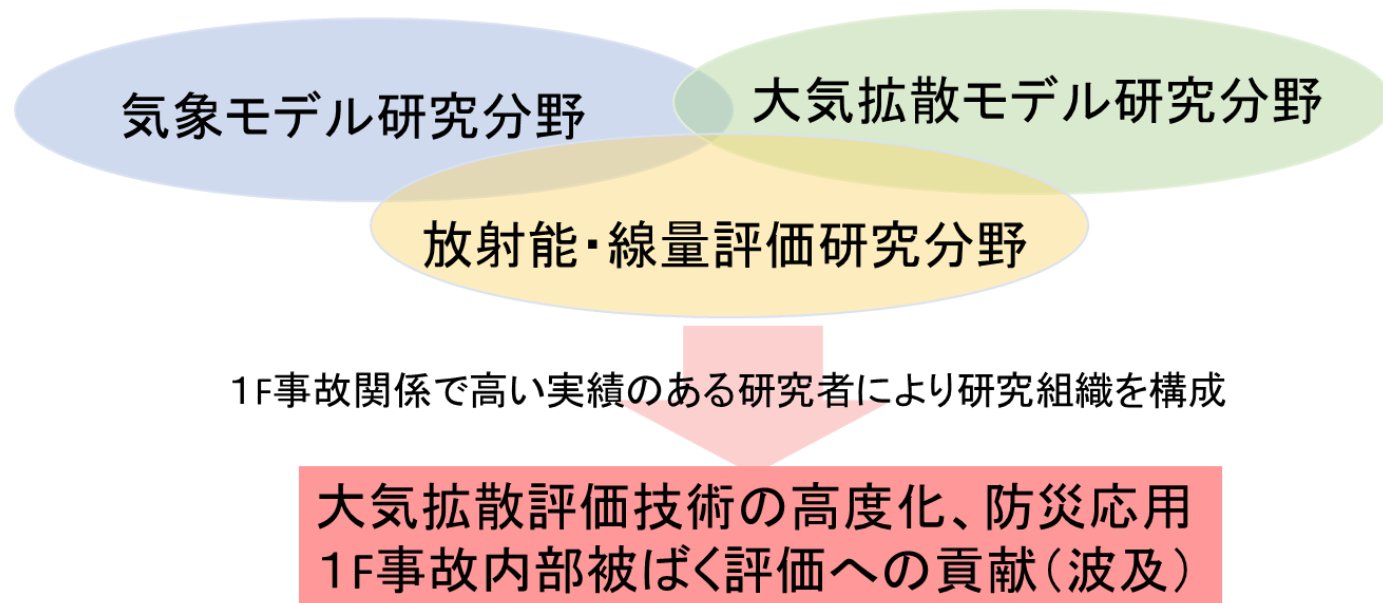
原子力事故データの総合解析による 事故時の有害物質大気中動態評価法の高度化

終了報告

代表者	サブテーマ1 <u>山澤 弘実</u> (名古屋大学)
	サブテーマ2 大浦 泰嗣(東京都立大)
	サブテーマ3 森口 祐一(東京大学)
	サブテーマ4 寺田 宏明(原子力機構)
	サブテーマ5 関山 剛(気象研究所)
	サブテーマ6 五藤 大輔(国立環境研究所)

目的

- 1F事故大気環境データの整備
- 大気拡散モデルの検証・改良
- 有害物質放出事故時の大気中動態評価の要素技術の高度化
- 拡散予測の防災利用法プロトタイプを作成

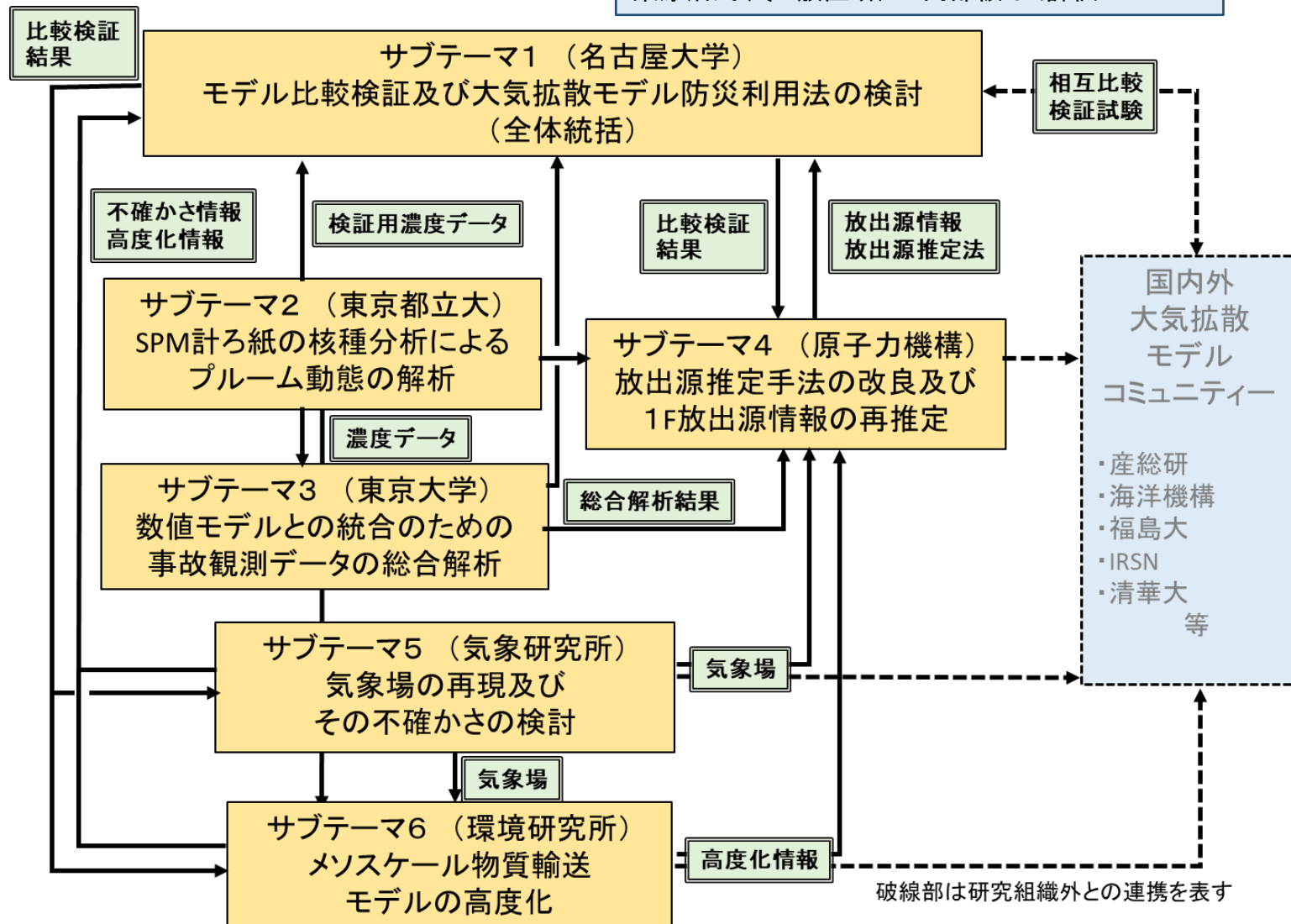


研究組織

3

アドバイザー

茅野政道氏(QST理事): 放出源情報、防災利用
滝川雅之氏(JAMSTEC): 大気拡散モデル、気象場
栗原治氏(QST放医研): 内部被ばく評価



サブテーマ1: モデル比較検証及び (名大) 大気拡散モデル防災利用法の検討

4

目標

1. 大気拡散モデル国際比較試験を実施し、モデル性能を評価
2. 国内・国際ワークショップを開催し、評価結果を開発者に還元
3. 放射線監視データから1F事故初期茨城県内大気中濃度を解析し、公開
4. 防災利用のためモデルアンサンブル計算の精度検証
5. 不確かさを含めた防災利用の結果処理・提示方法のプロトタイプ提案

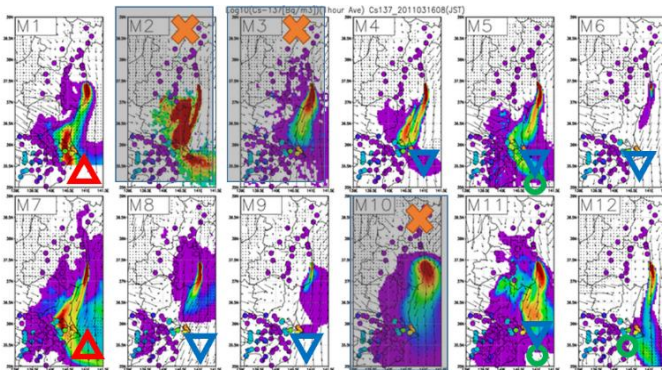
成果

＜成果の項目番号は目標の番号に対応＞

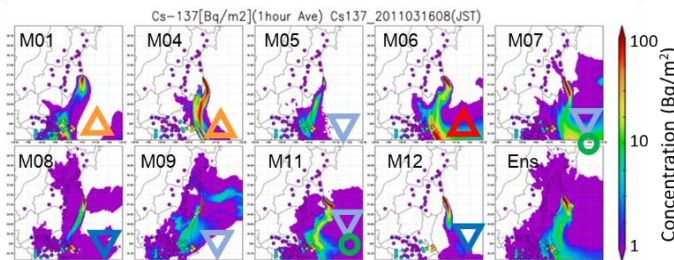
項目1, 2 共通入力データ(気象、放出)による第1回(水平3km格子:12モデル)、第2回(1km:9モデル)の国際比較試験を実施し、沈着量、大気中濃度の再現性を評価し、参加者に還元。第2回で湿性沈着、プルーム位置再現の改善を確認。

08 JST
Mar. 16
2011

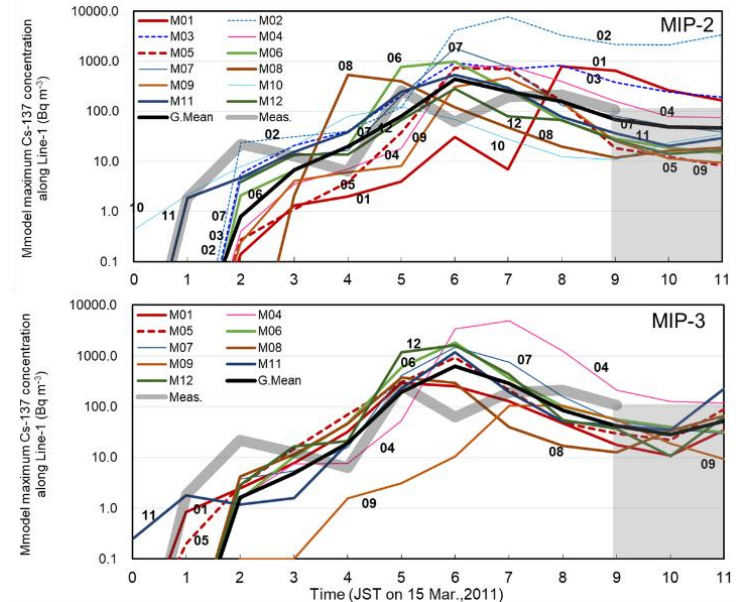
上段
第1回



下段
第2回



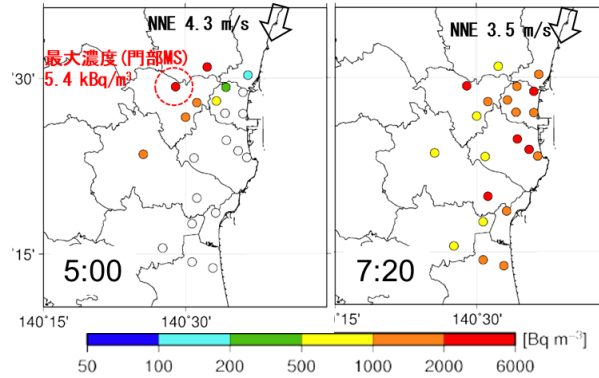
降水時の大気中濃度。第2回では、多くのモデルで湿性沈着の過大・過少評価が軽減し、大気中濃度の再現性が改善。



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。

項目3 茨城県内の10分毎大気中濃度 (^{133}Xe , ^{131}I , ^{132}I , ^{133}I , ^{132}Te , ^{134}Cs , ^{136}Cs , ^{137}Cs) を評価。プルームの詳細な動態が把握され、国際モデル比較試験で参照データとして活用。**UNSCEARの1F事故評価に提供。**論文としてデータ公開済み。

環境政策への貢献

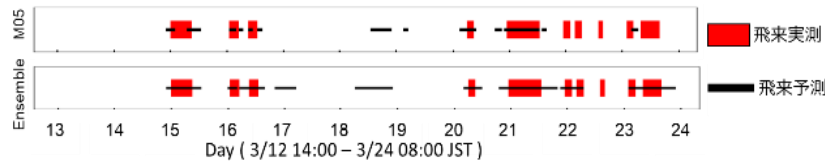


2011年3月15日5:00に茨城県内での最高 ^{131}I 濃度 5.4 kBq/m^3 。核種組成が大きく異なる気塊が短時間で入れ替わること、位置が揺れ動くこと、水平濃度勾配が急峻であること等、プルームの詳細な特徴が明らかとなった。

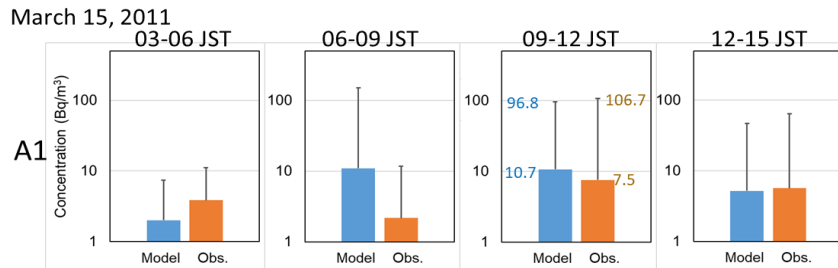
項目4 大気中濃度の再現性が高いモデルはプルーム毎に異なること、アンサンブルは何れのプルームでも再現性が高いこと等が明らかとなった。

項目5 大気拡散モデルアンサンブルの**原子力防災応用法のプロトタイプ**を提案。

環境政策への貢献



プルーム飛来予測性能の検証。単一の最優秀モデル(上段)よりもアンサンブル予測(下段)が見逃し率が格段に低い。



時間・空間的粗視化により不確かさを含めた予測情報を提示。首都圏での実際の観測濃度(平均、ばらつき)を良好に再現。

大気拡散計算の原子力防災応用スキーム案

警戒事態、(施設敷地緊急事態)

単位放出率、連続放出仮定の長時間計算(e.g.72h)

半日
～
数日

予測区域毎、時間帯毎のプルーム飛来有無

全面緊急事態、施設敷地緊急事態

簡易放出率推定による濃度、線量率評価

MPデータ → 放出率簡易推定 → 簡易放出率

詳細放出率推定による濃度、線量率評価

MPデータ → 放出率推定 → 放出率

MPデータ 濃度データ

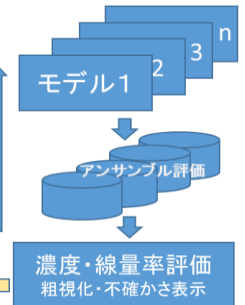
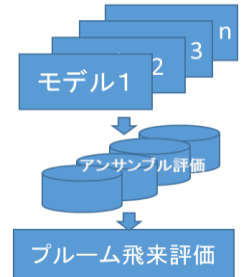
サブテーマ4

詳細気象場の提供(事後評価)

JMA op. → 気象モデル → 気象場

サブテーマ5

予測区域毎、時間帯毎のプルーム濃度・線量率

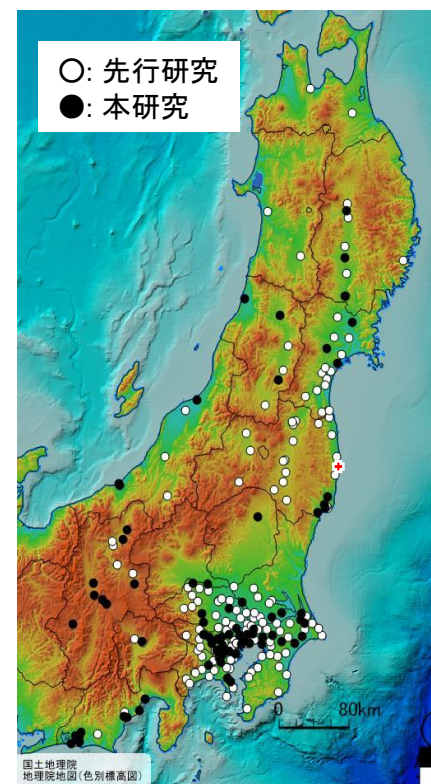


観測値が無い間のプルーム飛来の有無のみの予測と、放出源情報推定を含めた濃度・線量予測の2段階の利用法。

成果

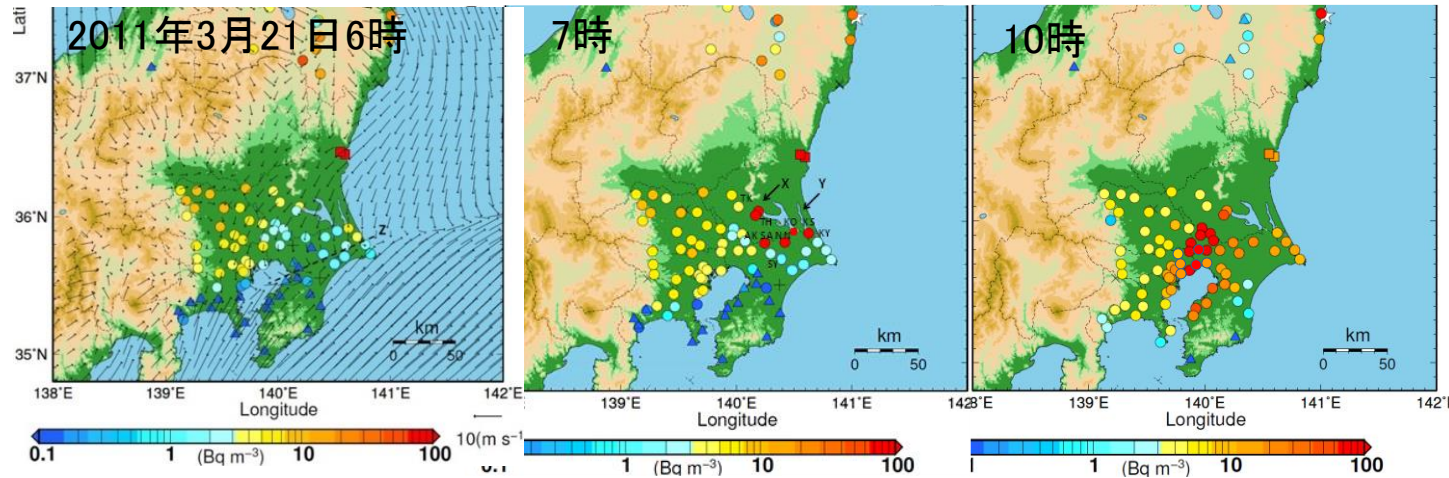
環境政策
への貢献

-
- March, 2011**
- | Plume | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 北 | 南 | 中通り | 関東 |
|-------|---|---|-----|----|
| p1 | ○ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ○ | | | |
| P1v | ● | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ● | | | |
| P1' | ● | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ● | | | |
| P1'' | | ● | | | | | | | | | | | | | | | | | | ● | | | |
| p2 | | | | ○ | | | | | | | | | | | | | | | | ○ | | | ○ |
| P2 | | | | ● | | | | | | | | | | | | | | | | ● | | | ● |
| P3 | | | | ● | | | | | | | | | | | | | | | | ● | | + | |
| P4 | | | | | ● | | | | | | | | | | | | | | | ● | + | | ● |
| P4' | | | | | ● | | | | | | | | | | | | | | | ● | | | |
| P5 | | | | | | | ● | | | | | | | | | | | | | ● | | | |
| P5' | | | | | | | | ● | | | | | | | | | | | | ○ | | | |
| P6 | | | | | | | | ● | | | | | | | | | | | | ● | | | |
| P7 | | | | | | | | | ○ | | | | | | | | | | | ○ | | | ○ |
| P8 | | | | | | | | | ● | | | | | | | | | | | ● | | | |
| P8' | | | | | | | | | | ○ | | | | | | | | | | ○ | | | |
| P9 | | | | | | | | | | ● | | | | | | | | | | ● | + | | ● |
| P9' | | | | | | | | | | ● | | | | | | | | | | ● | + | | ● |
| P10 | | | | | | | | | | | | ● | | | | | | | | ● | | | |
| P11 | | | | | | | | | | | | | ● | | | | | | | ● | | | |
| P12 | | | | | | | | | | | | | | ○ | | | | | | ○ | | | |
| P13 | | | | | | | | | | | | | | | ○ | | | | | ○ | | | |
| P13' | | | | | | | | | | | | | | | ● | | | | | ● | | | |
| P13'' | | | | | | | | | | | | | | | ● | | | | | ● | | | |
| P14 | ○ | | | ○ |
| P15 | ● | | | |
| P15' | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ● | | | |
| P16 | ○ | | | |
- Legend:**
- Red circle: $\text{Cs-137} \geq 1 \text{ kBq/m}^3$
 - Black circle: $1 \text{ kBq/m}^3 > \text{Cs-137} \geq 0.1 \text{ kBq/m}^3$
 - White circle: $0.1 \text{ kBq/m}^3 > \text{Cs-137}$
 - continuation to next morning
 - + precipitation observed
- Green dashed boxes:** 本研究で新たな知見 (New findings from this study)
- Red solid box:** 本研究で発見 (Discovery from this study)



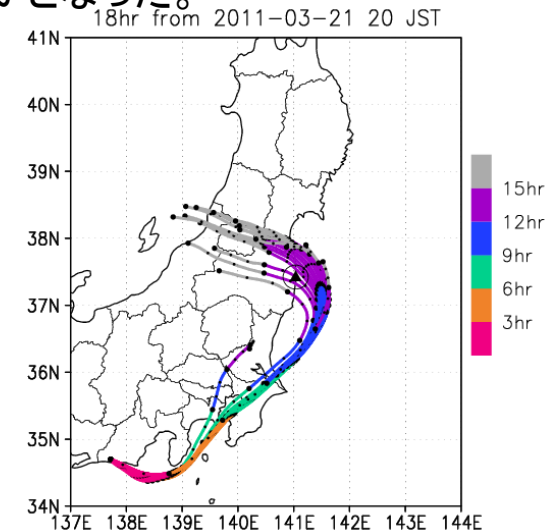
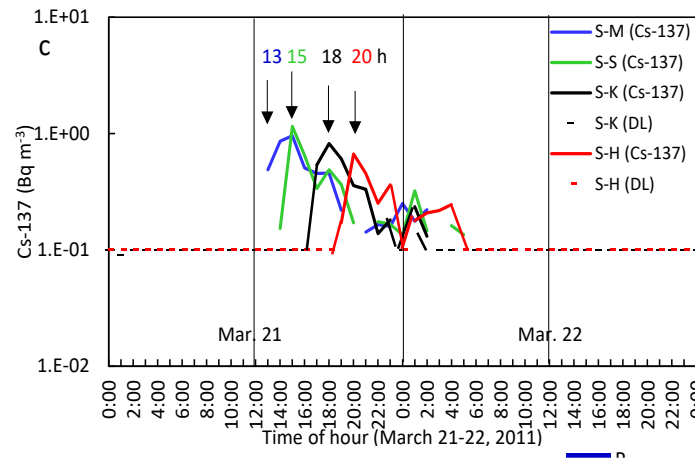
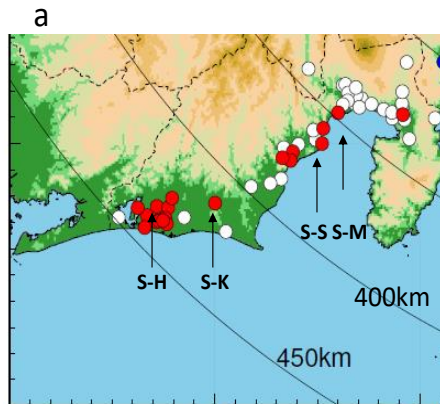
本研究での分析地点：サイト南部近傍での動態、首都圏での動態、及び遠方での動態を把握するための地点を対象とした。

項目2 関東地方でのプルームP4及びP9(下図)の内部構造が明らかとなった。



P9では、収束帯Zの北側に存在した高濃度部分が収束帯の南下に伴って移動した。プルームの西側の境界は明瞭だが、東側の内部構造は高濃度域のXとYでの風向に直角な方向の巾は40-50 kmもあり、非常に複雑であった。

項目4 中部地方(下図)及び東北地方へのプルーム輸送過程が明らかとなった。



上述のP9は関東地方を通過した後、東海地方の測定地点を濃度を低下させながら順次通過したことが判明。この時に観測された降水による湿性沈着により茶葉に放射性Csが付着したと推定される。

後方流跡線解析結果によると、P9は1Fを3月21日6-7時頃に発出。

サブテーマ3: 数値モデルとの統合のための (東大) 1F事故観測データの総合解析

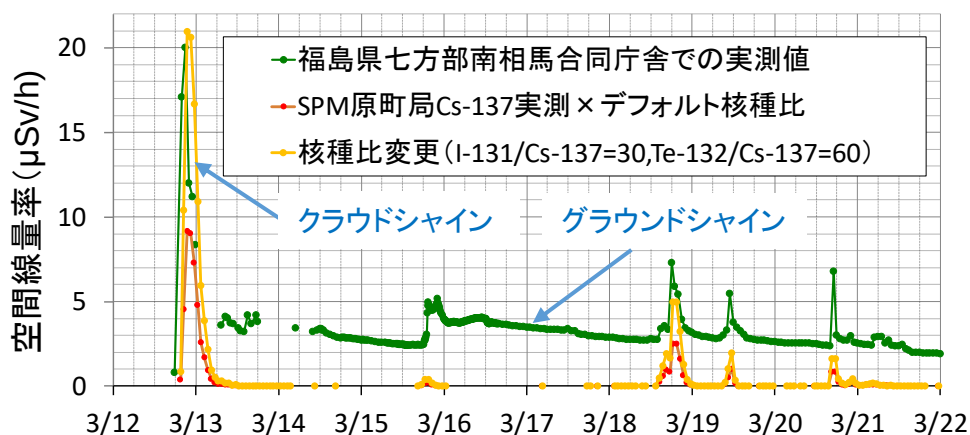
8

目標

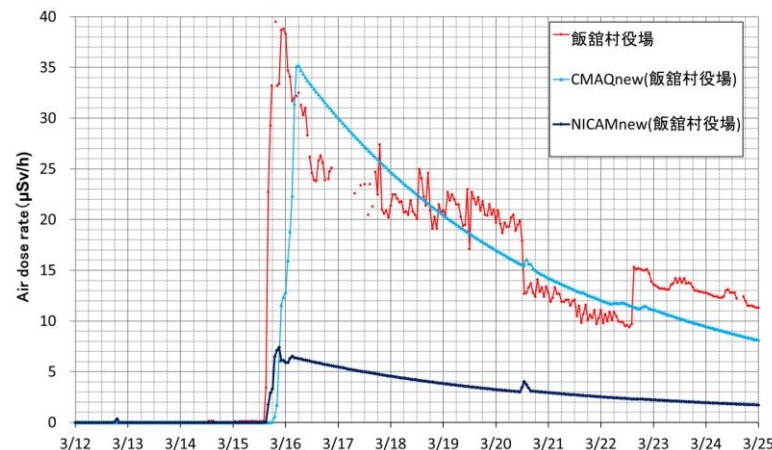
1. 大気拡散モデル計算結果について、大気中濃度、地表沈着量、空間線量率の三者の観測値との整合性を再検証。降水の有無に留意して、これら三者の相互関係を整理
2. 事故後初期の吸入被ばく線量について、先行研究で提示した線量推計結果の妥当性を再検証

成果

項目1 SPMろ紙のCs-137実測値と核種構成比を用いて、降水なしの場合のクラウドシャイン線量率の推計法と、降水ありの場合のグラウンドシャインを含む線量率推計法を開発。核種構成比の検討により、本手法の有効性を確認。



SPMろ紙のCs-137実測値と核種構成比を用いたクラウドシャイン線量率の推計と実測値との比較(楢葉町、南相馬市原町区)。プルーム飛来時の線量率は再現されるが、沈着核種からのグラウンドシャインは別途考慮が必要。



グラウンドシャインを含む線量率推計手法を構築し、2種類の拡散モデルへ計算結果に適用。SPM測定局のない地域を含む福島県内の数地点での線量率実測値との比較により、本比較法の有効性を確認。

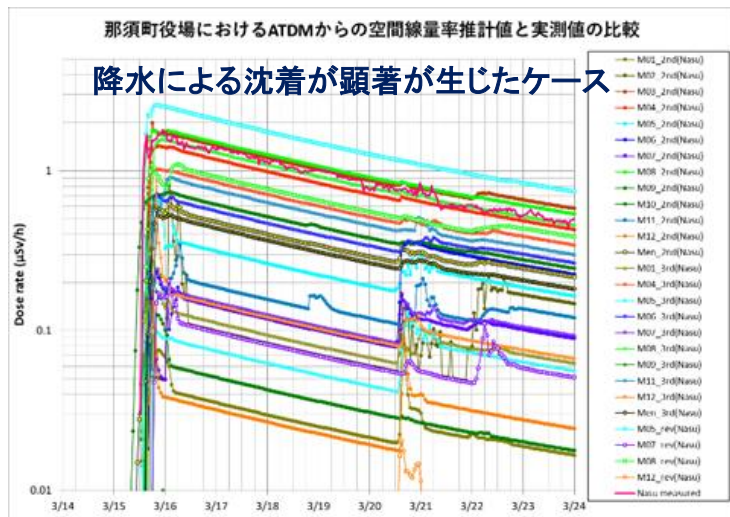
サブ3(東大)

9

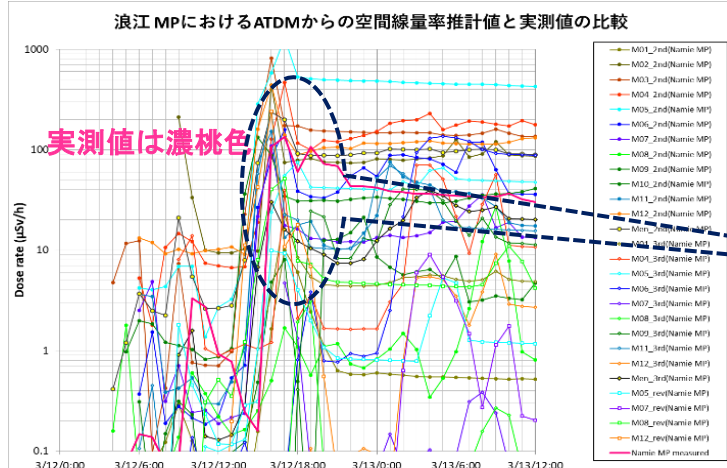
項目1 大気中Cs-137濃度及び沈着量のモデル計算値からの線量推計手法を多数モデルに適用し、降水時も含め主要プルームの再現性の検証が進展。

項目2 初期被ばく推計で特に重要な2011年3月12日午後の1F北～北西方向へのプルームP1についての再現性検証により、初期被ばく推計に用いたモデルの妥当性を確認。

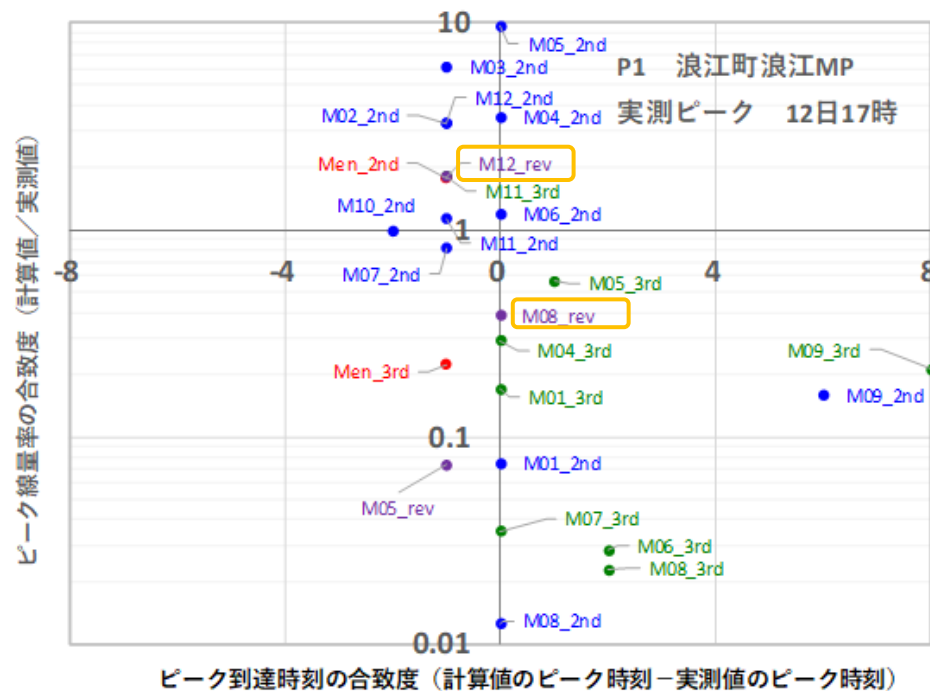
環境政策への貢献



大気中濃度実測値のない場合でもモデル検証が可能なことを確認



国内外延べ27モデル計算値の線量率推計値と実測値の比較



到達時刻とピーク値の合致度
浪江町浪江モニタリングホストの例

初期被ばく線量推計に用いた2種のモデル (M08_rev, M12_rev)の再現性は良好である(原点に近い)ことを確認。

サブテーマ4: 放出源推定手法の改良及び1F事故の 放出源情報の再推定

10

目標

1. 複数空間スケールの大気拡散計算と、大気中濃度、沈着量等の複数種の環境測定データを総合的に用いた有害物質放出率の逆推定法を開発する
2. 他サブテーマの大気中濃度データ等を用いて1F事故の放出率の再推定を行い、その不確かさ評価を加えた放出源情報を得る

成果

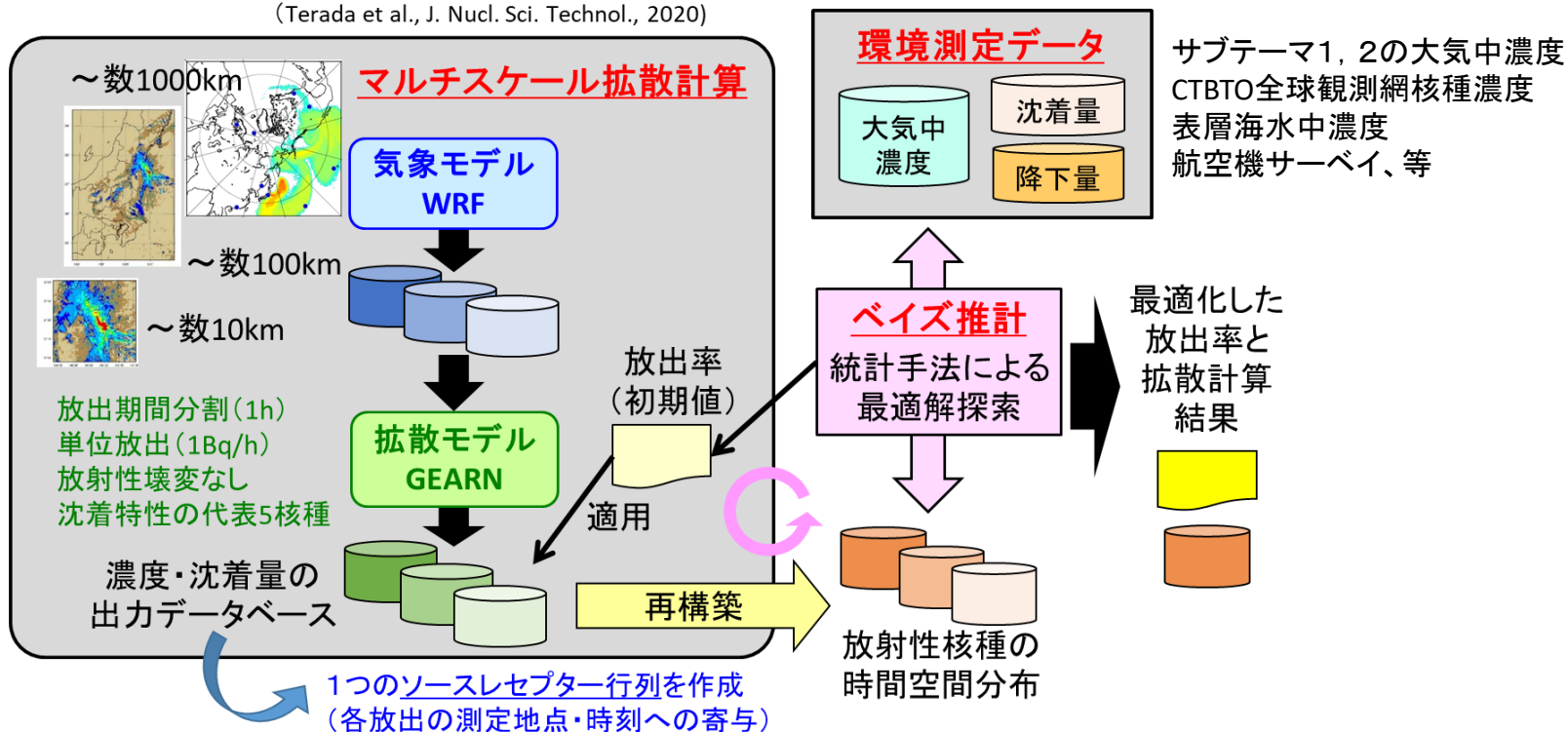
環境政策
への貢献

項目1 ベイズ推計による最適化手法の導入と機能拡張により、局地から半球スケールの複数の大気拡散計算と複数種の環境測定データの総合的な比較が可能な**放出率最適化手法**を構築し、1F事故への適用試験により有効性を確認した

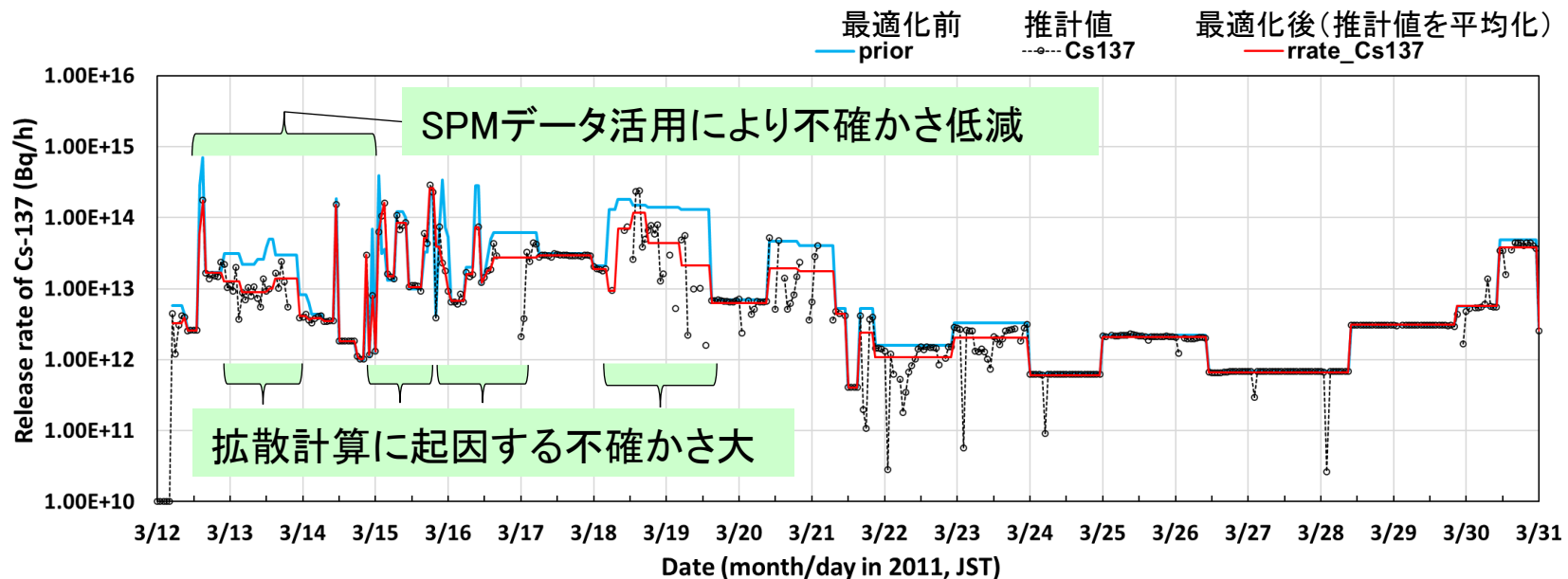
大気拡散データベースシステムWSPEEDI-DB

(Terada et al., J. Nucl. Sci. Technol., 2020)

様々な地点、時間、測定項目



項目2 I-131、Cs-137の1時間毎の放出率を最適化(再推定)。得られた放出率を用いた大気拡散計算の再現性確認、不確かさの要因検討、実測データの種類毎の最適化での重要度検討を実施。



■ 大気中濃度の再現性

	Katata et al. (2015)	本研究
FA2 (%)	12.9	19.6
FA5 (%)	29.4	38.3
FA10 (%)	35.9	46.6
相関係数	0.54	0.61

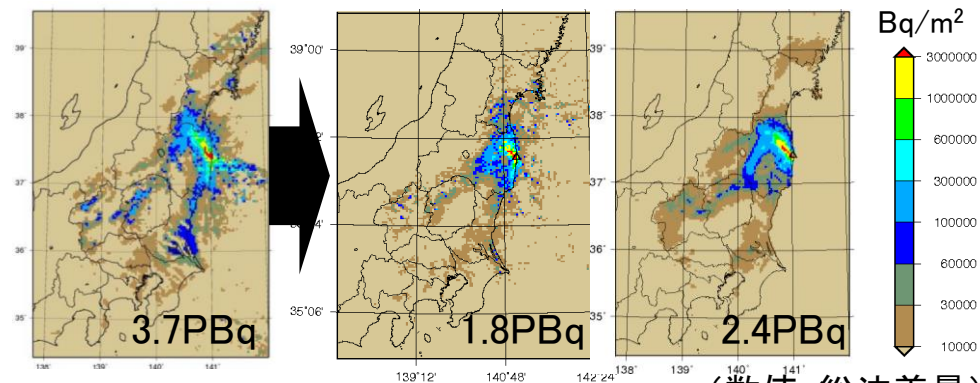
実測SPMデータ(6時間平均値)との比較により、最適化された放出率を用いた大気中濃度再現性向上を確認。

■ 沈着量の再現性確認

Katata et al. (2015)

本研究

航空機モニタリング



従来放出率を用いた場合の過大評価は改善されたが、逆にやや過少評価が過大。

サブテーマ5: 気象場の再現及びその不確かさの検討 (気象研)

12

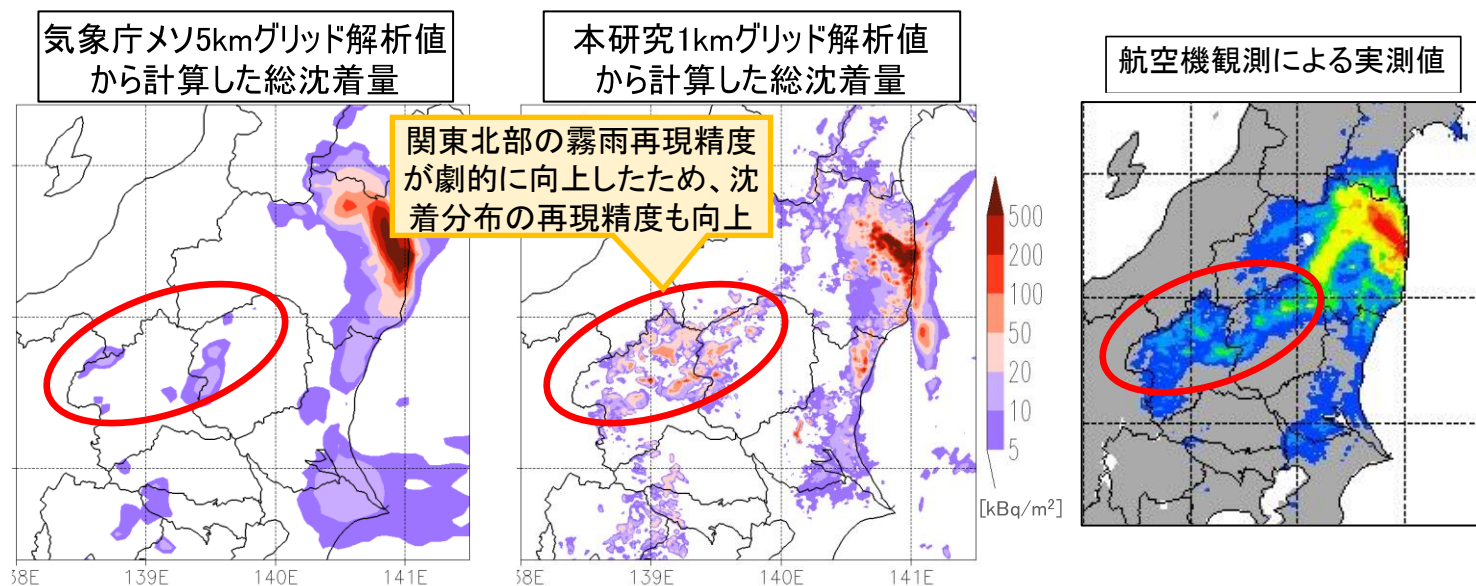
目標

1. データ同化システムの改良と気象予報モデルの高解像度化(格子間隔1kmおよび0.5km以下)により、1F事故気象場を作成し、他サブテーマに提供
2. 複雑地形上での乾性沈着過程の高精度化を実現し、放射性物質の湿性／乾性沈着量の再現精度を向上させ、降水再現性と沈着再現性の量的関係を解明

成果

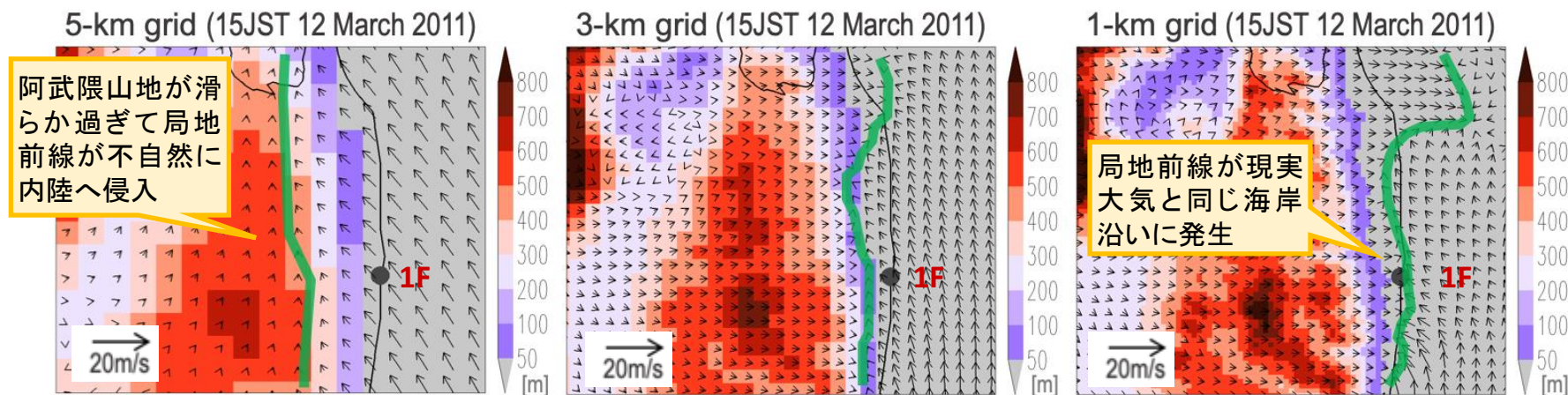
環境政策
への貢献

項目1, 2 アンサブルカルマンフィルター同化法と気象庁数値予報モデル(NHM)に、地上気象観測データを取り入れる改良を行い、**水平格子間隔1km及び0.25km気象場を作成**し、国際モデル比較試験(サブ1)等に提供。山地等の複雑地形での降水(霧雨)再現性向上を確認。



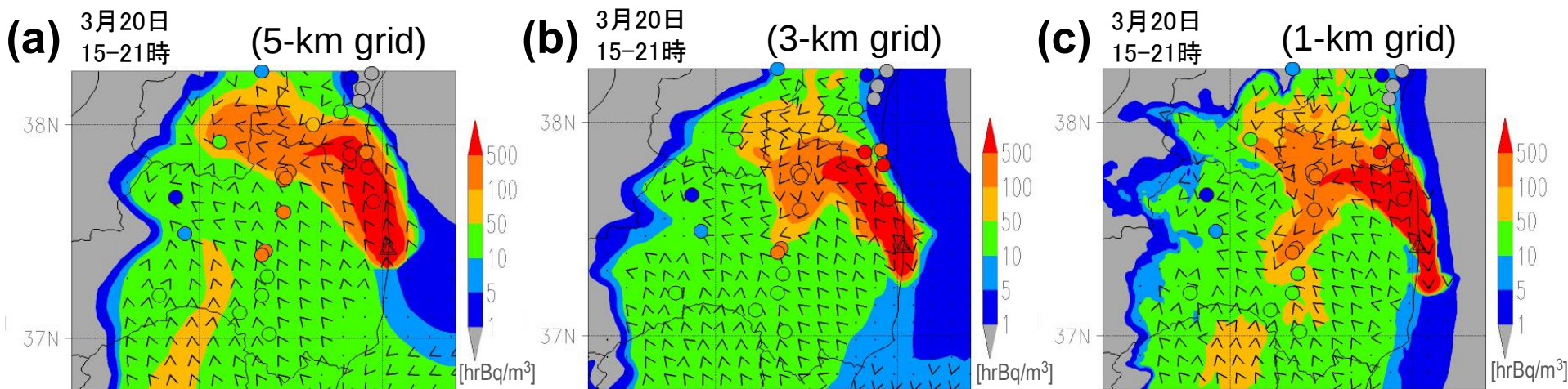
詳細な降水観測値が無い場合、沈着量分布で降水分布再現性を間接的に評価。水平格子5kmの気象庁解析値(左)では地形再現が不十分で山地(赤丸の範囲)での沈着が再現されていない。本課題で作成した水平格子1km気象場(中)では実測(右)に近い沈着が再現された。

項目2 地形再現の詳細さにより、水平風の収束帯(局地前線)の位置が大きく異なることが見出された。海岸複雑地形に立地する原発等の拡散計算での重要な留意事項として抽出。



水平格子間隔の異なる計算による地上風の分布(1号機ベント・水素爆発時)。地形再現が不十分な場合は、局地前線が現実と異なる位置に計算され、放出点での風向が全く異なる計算結果となっており、拡散計算に重大な誤差を引き起こすことが判明。

項目2 より長距離のプルーム挙動に対しても、地形再現性の確保が重要であることを指摘。



水平格子分解能の異なる計算による大気中濃度計算結果(P8)。5km格子では、プルームの北上が強調され過ぎて中通りでの南下が再現できない。3km格子では南下ある程度再現されるが不十分。1kmでは浜通りでの北上と中通りの南下を良好に再現。

サブテーマ6: メソスケール物質輸送モデルの高度化 (国環研)

14

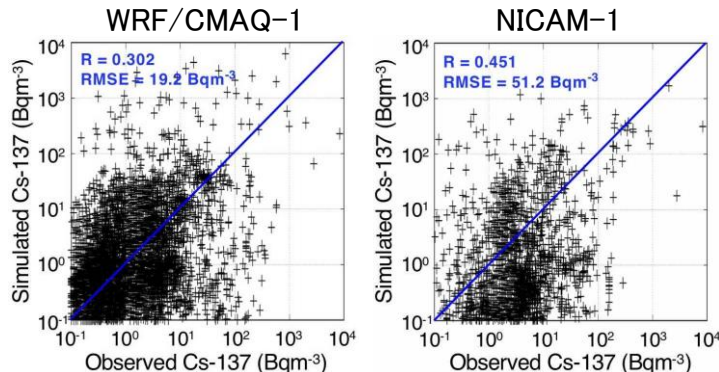
目標

1. アンサンブル手法の導入を行い、再現性向上が必要な期間・領域を把握
2. 粒子状Cs-137およびガス・粒子状I-131に対して、詳細気象場を用いて、2つの大気拡散モデル(WRF-CMAQ、NICAM)により、モデルパラメータの違いに濃度場・沈着場のばらつき(各パラメータに対する不確かさ)の範囲を定量化

成果

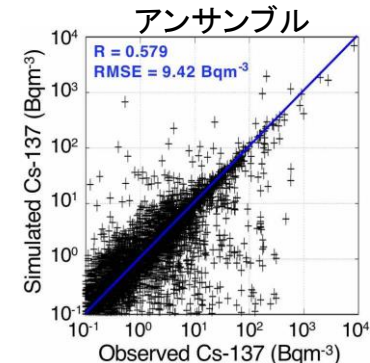
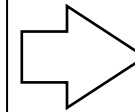
環境政策
への貢献

項目1 2種類の領域規模モデルによるCs-137濃度シミュレーションの結果を観測結果と比較検証し、再現性向上が必要な期間・領域を把握。複数モデルによる大気拡散のアンサンブル評価法としての線形最小分散推定法を開発

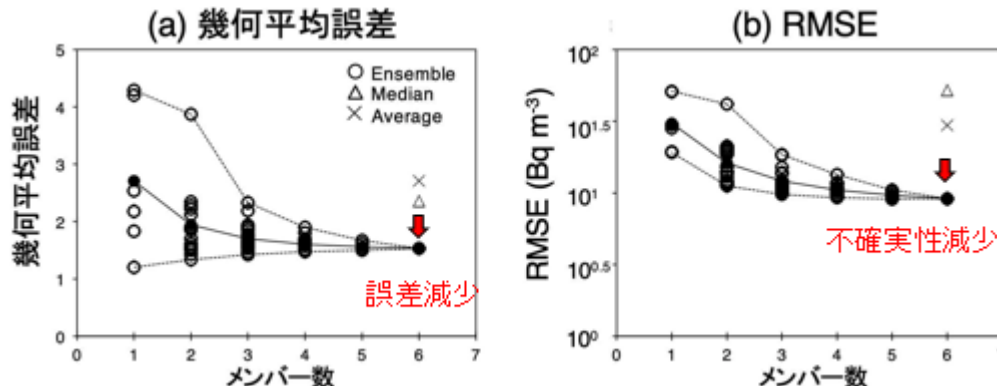


線形最小分散推定方法

$$C_{\text{ensemble}} = \sum_{i=1}^N a_i C_i$$
$$a_i = (1/\sigma_i^2) / \sum_{j=1}^N (1/\sigma_j^2)$$
$$\sigma_i^2 = \sum_{\Delta t, \Delta S} (C_i - C_{\text{observation}})^2$$



個々のモデルで再現性が悪い部分(左2図で対角線から外れている地点・時刻)が把握された。線形最小分散推定法を用いたアンサンブル(右図)では再現結果が顕著に改善。



線形最小分散推定法でメンバー数が3以上では誤差が大幅に減少し、単純平均よりも高精度の評価が可能であることが示された。実測値がある場合のモデルによる濃度評価法として、本手法は有用な方法であることを確認。

項目2 高解像度化と放射性ヨウ素粒子化パラメタリゼーション導入により、粒子状I-131/Cs-137比を概ね再現できることを確認

高解像度化:

水平格子3km→1km

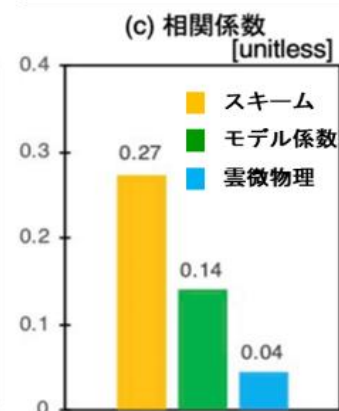
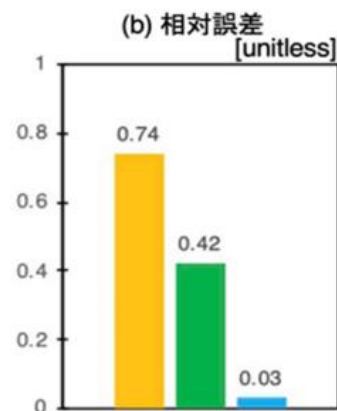
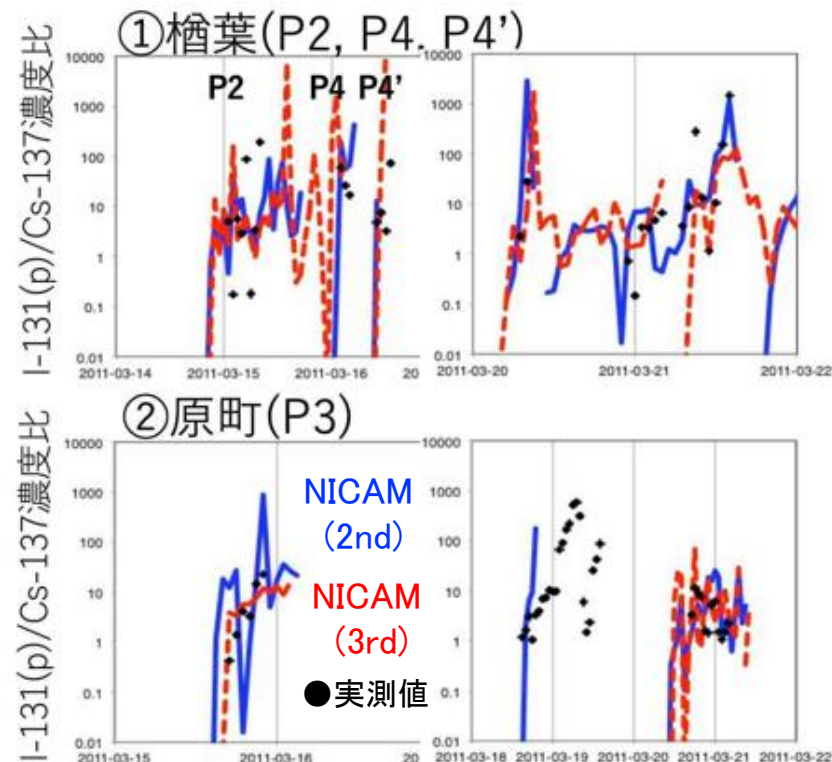
鉛直40層→58層(最下層31m→14m)(NICAMのみ)

粒子化パラメタリゼーション (NICAMのみ)

ガス・粒子変換速度 0.2 h^{-1}

項目2 エアロゾルの雲内洗浄(Rainout)のモジュールに関する感度実験により、モジュール設計(スキーム)の差が他のパラメータ、雲微物理よりも計算結果に大きな影響を与えることが判明

複数の異なる湿性沈着モジュール、雲微物理モジュール、および関連パラメータに対するCs-137濃度変化を調べ、Cs-137濃度の差異の多くは雲内洗浄過程のモデル化の形式とそのモデル係数により生じており、雲微物理に関するモジュールの差は極めて軽微であることが判明。



目標 成果

1. 各サブテーマの成果から、大気中濃度を主対象にした1F事故実測データセットを完成する

以下の内容の事故初期(2011年3月)を対象とした**大気環境データセット**を作成した。

環境政策
への貢献

モデル改良の比較データとして有用であることに加え、I-131吸入内部被ばくの線量評価や防災スキーム検討の基礎資料として用いられることを想定。気象・大気環境・環境放射能分野の学術的資料としてのみならず、事故の社会的影響検証のためのファクトデータとして事故後10年を経過した現時点において世界で最も完成度の高いものであり、事故当事国の当該研究分野の責務として将来に残すべきデータを整備することができた。

種別	概要(日付は2011年)	サブ	文献
気象場	水平3km格子、東日本域、3月11－31日、1時間毎 風向・風速、気温、湿度、気圧、降水量	*	Sekiyama et al. 2017
	水平1km格子、東日本域、同上期間・要素	5	Sekiyama, Kajino, 2020
	水平0.25km格子、関東・南東北、同上期間・要素	5	Sekiyama, Kajino, 2021
放出源情報	リバース法、3月12日－4月30日、不定時間間隔、 Cs-137、Cs-134、I-131、Te-132	*	Katata et al., 2015
	インバース法、3月12-31日、1時間間隔、同上核種	(4)	Terada et al., 2020
	インバース法、同上期間、1時間間隔、Cs-137、I-131	4	Terada et al., under preparation
大気中濃度 観測値	首都圏、東北SPM149地点、3月12－23日、1時間毎 Cs-134,137	*	Oura et al., 2015 Tsuruta et al., 2014,2018 推進費1-1501報告書
	上記に加え、東海・甲信越、78地点及び上記重複19地点、3月24－31日	2	Under preparation
	茨城県中央部MP6地点、3月15,16,20-22日、10分毎 Xe-133,I-131,132,133,Te-132,Cs-134,136,137	*	Terasaka et al., 2016
	茨城県中央部MP15地点、3月15日、10分毎 Xe-133,I-131,132,133,Te-132	1	Moriizumi et al., 2020
大気中濃度・沈着量 計算値	水平3km格子、3月12-31日、1時間毎、12モデル 大気中濃度、湿性沈着量、乾性沈着量、地上風	1	Sato et al., 2018
	水平1km格子、3月12-24日、1時間毎、9モデル 同上データ項目	1	Sato et al., 2020

「サブ」欄はサブテーマ番号。＊は先行研究によるもの。