

報告

東京電力福島第一原子力発電所事故によって
環境中に放出された放射性物質の輸送沈着過
程に関するモデル計算結果の比較



平成26年(2014年) 9月 2日

日 本 学 術 会 議

総合工学委員会

原子力事故対応委員分科会

この報告は、日本学術会議総合工学委員会原子力事故対応分科会原発事故による環境汚染調査に関する検討小委員会の審議を踏まえ総合工学委員会原子力事故対応分科会においてとりまとめ公表するものである。

日本学術会議 総合工学委員会原子力事故対応分科会

委員長	矢川 元基（連携会員）	公益財団法人原子力安全研究協会理事長
副委員長	山地 憲治（第三部会員）	公益財団法人地球環境産業技術研究機構(RITE) 理事・研究所長
幹 事	松岡 猛（第三部会員）	宇都宮大学非常勤講師
幹 事	柴田 徳思（連携会員）	公益社団法人日本アイソトープ協会専務理事
	岩田 修一（連携会員）	事業構想大学院大学教授
	笹尾真実子（連携会員）	東北大学名誉教授
	白鳥 正樹（連携会員）	横浜国立大学名誉教授、同安心・安全の科学研究教育センター客員教授
	関村 直人（連携会員）	東京大学大学院工学系研究科教授
	竹田 敏一（連携会員）	福井大学附属国際原子力工学研究所特任教授
	二ノ方 壽（連携会員）	東京工業大学名誉教授
	山本 一良（連携会員）	名古屋大学理事(教育・情報関係担当)・副総長
	澤田 隆（特任連携会員）	一般社団法人日本原子力学会理事・事務局長
	成合 英樹（特任連携会員）	筑波大学名誉教授

日本学術会議 総合工学委員会原子力事故対応委員会 原発事故による環境汚染調査に関する検討小委員会

委員長	柴田 徳思（連携会員）	公益社団法人日本アイソトープ協会専務理事
副委員長	中島 映至（第三部会員）	東京大学大気海洋研究所教授
幹 事	五十嵐康人	気象研究所環境応用気象研究部第四研究室長
幹 事	鶴田 治雄	東京大学大気海洋研究所特任研究員
	石丸 隆	東京海洋大学海洋科学部教授
	植松 光夫	東京大学大気海洋研究所教授
	内田 滋夫	独立行政法人放射線医学総合研究所 研究基盤センター センター長
	占部 逸正	福山大学工学部授
	海老原 充	首都大学東京理工学研究科教授

大塚 孝治	(連携会員)	東京大学原子核科学研究センター教授
恩田 裕一		筑波大学大学院生命環境科学研究科教授
斎藤 公明		独立行政法人日本原子力研究開発機構福島 支援本部上席研究主席
篠原 厚		大阪大学大学院理学研究科教授
高橋 知之		京都大学原子炉実験所准教授
谷畑 勇夫		大阪大学核物理研究センター教授
服部 隆利		一般財団法人電力中央研究所 放射線安全 研究センター副センター長
星 正治		広島大学原爆放射線医学研究所教授
榎本 和義		高エネルギー加速器研究機構放射線科学 センター教授
吉田 尚弘		東京工業大学総合理工学研究科教授

本報告書および参考資料の作成に当たり、以下の方々にご協力をいただきました。

※五十嵐 康人	気象庁気象研究所
※梶野 瑞王	気象庁気象研究所
※栗原 治	独立行政法人放射線医学総合研究所
※小林 卓也	独立行政法人日本原子力研究開発機構
※関山 剛	気象庁気象研究所
※竹村 俊彦	九州大学応用力学研究所
※滝川 雅之	独立行政法人海洋研究開発機構
※田中 泰宙	気象庁気象研究所
※津旨 大輔	一般財団法人電力中央研究所
※永井 晴康	独立行政法人日本原子力研究開発機構
※眞木 貴史	気象庁気象研究所
※升本 順夫	独立行政法人海洋研究開発機構／東京大学
※森野 悠	独立行政法人国立環境研究所
※速水 洋	一般財団法人電力中央研究所
内山 雄介	神戸大学
木田 新一郎	独立行政法人海洋研究開発機構
斉藤 和雄	気象庁気象研究所
新堀 敏基	気象庁気象研究所
東 博紀	独立行政法人国立環境研究所

宮澤 泰正	独立行政法人海洋研究開発機構
Bailly du Bois, Pascal	IRSN, France
Bocquet, Marc	CEREA, France
Boust, Dominique	IRSN, France
Brovchenko, Igor	IMMSP, Ukraine
Choe, Anna	SNU, Korea
Christoudias, Theo	Cyprus Institute, Cyprus
Didier, Damien	IRSN, France
Dietze, Heiner	GEOMAR, German
Garreau, Pierre	IFREMER, France
Jung, Kyung Tae	KIOST, Korea
Le Sager, Philippe	KNMI, Netherland
Lelieveld, Jos	Max-Planck-Institute for Chemistry, Germany
Maderich, Vladimir S.	IMMSP, Ukraine
Park, Soon-Ung	SNU, Korea
Quelo, Denis	IRSN, France
van Velthoven, Peter	KNMI, Netherland
Winiarek, Victor	CEREA, France
Yoshida, Sachiko	WHOI, USA

※印はワーキンググループのメンバーである。

本報告書の作成に当たっては、以下の職員が事務および調査を担当した。

事務	盛田 謙二	参事官(審議第二担当)
事務	齋田 豊	参事官(審議第二担当)付参事官補佐(平成26年8月まで)
事務	松宮 志麻	参事官(審議第二担当)付参事官補佐(平成26年8月から)
事務	冲山 清観	参事官(審議第二担当)付専門職(平成26年6月まで)
事務	菊地 隆一	参事官(審議第二担当)付専門職(平成26年7月まで)
事務	熊谷 鷹佑	参事官(審議第二担当)付専門職(平成26年7月から)

要 旨

1 作成の背景

福島第一発電所事故でシミュレーションモデル SPEEDI が避難の際に、有効に用いられなかったことが多くのメディアで取り上げられた。事故後に国内外のグループにより多くのシミュレーションが実施された。この報告はこれらのシミュレーションの不確実性を評価したので、その結果を国内外の専門家に伝えることを目的とした報告である。

日本学術会議総合工学委員会原子力事故対応分科会(以下「本分科会」という。)では、2011 年 3 月に発生した東京電力福島第一原子力発電所事故に伴って環境中に放出された放射性物に関するさまざまな調査結果について、各分野の専門家による検討を行い、対策に必要な調査項目の選定、放射性物質の挙動に関するモデルに対する課題の抽出、公開データが公表された場合の社会に対する影響の大きさと公開の手続きのあり方などを検討するために、2011 年 5 月に「原発事故による環境汚染調査に関する検討小委員会」が設置された。小委員会では検討の結果、必要な調査項目として放射性物質の輸送^{†1}・沈着に関する数値シミュレーションの相互比較を行うことが重要であるという結論に達した。これを受けて、小委員会では、専門家によって構成された「環境モデリングワーキンググループ」を設置した。このワーキンググループの目的は、広域における環境汚染の低減に必要なさまざまな作業のために重要な情報となるような、現存するモデルによる計算結果の不確実性を評価することである。そのためにワーキンググループは比較のためのモデル計算結果の提供を世界の研究者に呼びかけた。今回の比較実験から得られた結果のオリジナリティはワーキンググループにある。

2 報告の概要

(1) はじめに

本報告は、呼びかけに呼応して提供された国内外の 9 個の領域規模大気輸送モデル[†]、6 個の全球規模大気輸送モデル[†]、11 個の海洋分散モデル[†]によるシミュレーション結果に関するものである。はじめに我々は、モデル計算結果の提供の呼びかけに対して示された国内外からの支援と援助に対する感謝を表明したい。本報告では、集められたシミュレーション結果を比較・解析することによって、放射性物質の輸送・沈着に関するモデル間差、観測結果との差異についてまとめた。シミュレーションの不確実性に関するこのような知見は、今後の輸送モデルの改善への指針を与えるとともに、災害の把握と軽減対策における輸送モデル利用の信頼度を判定するために役立つと考えられる。

(2) 比較結果のまとめ

^{†1} 印を付した用語は付録 用語解説を参照

過去の研究および本報告においてみいだされた点と結論をまとめる。

① 推計値について

ア 今回本分科会が行った比較実験である「気象庁モデル[†]を用いた逆推計[†]」では、2011年3月11日から4月19日の期間内の大気への¹³⁷Csの総放出量は 19.4 ± 3.0 PBqと推計される。過去の研究も考慮すると大気に放出された¹³⁷Cs量は、 17.8 ± 8.2 PBqである。平均値から標準偏差の2倍以内の値を用いた場合は 14.6 ± 3.2 PBqであるが、どのモデルがより適切であるか現時点では示すことはできない。

イ 海洋に、2011年3月21日から6月30日の期間内に直接放出された¹³⁷Csについて、今回比較に参加したモデルの推計値は2.3～26.9 PBqの範囲にある。

ウ 領域規模大気輸送モデル[†]の結果によると、大気への総放出量に対する陸域沈着量比は、 $27 \pm 10\%$ である。一方、文部科学省の2012年5月31日の航空機観測では陸域で2.65 PBqの値が得られている。この値と、各モデルの総放出量を用いた陸域沈着量比の平均は $18 \pm 6\%$ と見積もられる。平均値から標準偏差の2倍以内の値を用いた場合は $19 \pm 5\%$ になる。陸域沈着量比のこれらの見積もりの差の原因は、¹³⁷Csの輸送・沈着過程のモデリング上の問題、総放出量の見積もり誤差、航空機観測からの陸域沈着量の見積もり誤差が考えられ、今後調査が必要である。

エ 地球全体を対象とした全球規模大気輸送モデル[†]によって計算された湿性沈着[†]量は総沈着量の $93 \pm 5\%$ であった。一方、領域規模大気輸送モデル[†]では、対象とする陸域と海洋を含めた領域全体への総沈着量の $68 \pm 19\%$ であった。我が国の陸域に沈着したものに限ってもこの数値はほぼ同じであった。この違いは領域の違いが主要因であるが、モデルの違いも無視できない。

② モデル評価について

ア モデル結果は、観測された放射性物質の分布の主要な特徴を再現している。しかし定量的には、モデル間の差が大きい。とくに大気では、湿性沈着過程[†]についてのモデル間差が大きい。また、沿岸海洋における渦シミュレーションの差異によるモデル間の違いも大きい。

イ 風速とその鉛直方向の構造が移動性の気団によって頻繁に変化した。陸域と海域における放射性物質の沈着量分布に関するシミュレーション結果は仮定した気象データと放出シナリオ[†]によって極めて敏感に変化する。従って、今後、観測データにモデル値を最適化するための同化手法[†]と逆推計手法[†]を用いて高時間分解能シナリオ[†]を構築する必要がある。

ウ 海洋観測で得られた¹³⁷Cs濃度の測定値を再現するためには、海洋への直接放出と大気からの沈着の両方が必要である。2011年4月以前では、海洋分散モデル[†]

を駆動するための大気モデルによる ^{137}Cs の沈着量は過小評価されている。従って、放射性物質の海洋による輸送評価の改善には、大気から海洋への全球規模の沈着量の評価の改善を同化手法[†]などによって行う必要がある。

エ モデル性能はモデルの力学過程[†]、化学輸送過程[†]、乾性・湿性沈着過程[†]などに依存する。このことは、モデルの改善のためには異なる研究分野の連携が今後必要であることを物語っている。

オ 算定された放出シナリオ[†]は領域規模大気輸送モデル[†]による解析と全球規模大気輸送モデル[†]による解析では異なる。従って、より詳細な放出量推定のためには今回の全球比較実験で用いたような全球規模の観測データ、オイラー型[†]の全球規模大気輸送モデル[†]とベイズ統合逆解析[†]、領域の観測データを組み合わせた領域規模大気輸送モデル[†]を用いた解析を行う必要がある。

目 次

1	序論	1
2	モデル比較に関する諸条件	2
3	領域規模大気輸送モデルの相互比較	2
(1)	はじめに	2
(2)	本相互比較に参加したモデルの概要	2
(3)	気象場に関する概要	3
(4)	^{137}Cs 積算沈着量	4
(5)	積算沈着量の放射性物質間の比率 (^{131}I と ^{137}Cs との比)	5
(6)	放出シナリオの違いが放射性物質の沈着量分布に与える影響	6
(7)	沈着過程のパラメタリゼーション依存性に関する感度実験	7
(8)	^{137}Cs 沈着量の統計解析による検証	7
(9)	まとめ	8
4	全球規模大気輸送モデルの相互比較	9
(1)	はじめに	9
(2)	放射性物質の放出量推定値	9
(3)	全球質量収支	10
(4)	^{137}Cs の全球大気滞留量の時系列変化	10
(5)	^{137}Cs の全球沈着量の時系列変化	10
(6)	^{137}Cs 総沈着量の水平分布	11
(7)	観測された大気中濃度との比較	11
(8)	アンサンブル解析	12
(9)	まとめ	12
5	海洋分散モデルの相互比較	13
(1)	はじめに	13
(2)	海面での ^{137}Cs の分布	14
①	3月22日から31日の分布	14
②	4月21日から30日の分布	15
(3)	時系列観測データとの比較	16
(4)	研究船 Ka'imikai-o-Kanaloa による観測結果との比較	17
(5)	まとめ	18
6	放出量解析	19
(1)	はじめに	19
(2)	比較実験手法	19
(3)	結果と議論	20
7	まとめと結論	21

(1) 推計値について	21
(2) モデル評価について	22
参考文献.....	23
<参考資料>審議経過	36
付録 図表.....	37
付録 用語解説.....	64
付録 略語集.....	67
付録 各モデルの詳細など	69

1 序論

東北地方太平洋沖地震は、2011年3月11日、日本時間14:46に発生し、波高13mの津波が東京電力福島第一原子力発電所(以下「第一原発」という。)に15:27に到達し、15:41に発電所のディーゼル発電機が停止した(TEPCO, 2011)[127]。3月12日15:36に1号機原子炉において、3月14日11:01に3号機原子炉において水素爆発が発生して大量の放射性物質が放出された。監視データによると、原子炉のベントなどによる大気への放出や、汚染された冷却水の海洋への直接放出が起こったことが示されている。2011年の春季は北西季節風が卓越する状況であったために、大気へ放出された放射性物質の少なくとも60%以上が太平洋域に運ばれた(Takemura et al., 2011; JAEA workshop, 2012)[123][53]。現地調査および航空機観測によると地表面に沈着した放射性物質は、この期間に卓越した移動性気団と降雨によって特徴的な分布を作り出した。

観測データによると $1,000\text{ kBq m}^{-2}$ を越える放射性セシウム ^{137}Cs が第一原発の30km圏を越えて分布した。文部科学省による第3回(2011年5月から7月)および第4回(10月から11月)の航空機観測結果(MEXT, 2011)[86]によると、空間線量率は阿武隈山地で減少し、海岸域で増加した。このことは、この期間に河川による放射性物質の顕著な輸送が行われたことを示している。また、一部の放射性物質は直接、海に放出された。航空機の観測によると、2011年5月31日時点での我が国の陸域への総沈着量は約2.7 PBqであった(付録表3.2 参照)。2011年4月の船舶観測によると、北太平洋の広域にわたって放射性セシウムが観測された。周辺海域での値は 196 Bq m^{-3} 程度であり、それよりも2桁高い ^{137}Cs の高濃度のホットスポットがみられた(Aoyama et al., 2012; JAEA workshop, 2012)[5][53]。

上に概観したように、第一原発から放出された放射性物質によって広域の環境が汚染された。放射性物質の特徴的な沈着分布は、SPEEDI^{‡2}(System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information) 現業モデル^{†3}を含めたさまざまなモデルによってシミュレーションされた。大気中に放出された放射性セシウム ^{137}Cs の評価量は9~37 PBqの範囲にある(Aoyama et al., 2012; Stohl et al., 2012; Terada et al., 2012; Kobayashi et al., 2013; Winiarek et al., 2014)[5][116][133][64][147]。また、海域に直接放出された量は2.3~26.9 PBqの範囲にあると評価されている(Kawamura et al., 2011; Tsumune et al., 2012; Estournel et al., 2012; Bailly du Bois et al., 2012; Miyazawa et al., 2012; JAEA workshop, 2012)[59][137][30][7][8][88][89][53]。評価におけるこのような大きな隔たりは、津波と停電による監視ポストの喪失で起こった監視データの欠損や、モデルと逆推計手法[†]に含まれる誤差が原因である。放射性キセノンガスや短寿命の放射性ヨウ素も事故後早期の被ばく評価にとって重要であるが、モデルシミュレーション以外にはその輸送経路の把握は難しい。

このような状況において、現存するモデルによる放射性物質の拡散沈着に関する計算結

²印を付した用語は付録 略語集を参照

³印を伏した用語は付録 用語解説を参照

果を詳細に比較することは、汚染の影響評価と除染対策にとって重要である。

本報告は、国内外の協力グループによって提供された9個の領域規模大気輸送モデル[†]、6個の全球規模大気輸送モデル[†]、11個の海洋分散モデル[†]による計算結果の比較を行う。

2 モデル比較に関する諸条件

協力グループは、それぞれのグループで最良とみなされる福島原発事故に関するモデル計算結果の提供を依頼された。その際、なんらの統一的な数値計算条件は課していない。従って、シミュレーションが実施された際のモデル条件(計算格子サイズ、積分時間など)や必要なデータ(気象データ、放出シナリオ[†]など)の間に大きな差がある。このことは、モデリングの性能を把握するためには適しているが、一方で、シミュレーション結果の違いの原因を把握することを難しくしている。この問題を軽減するために、重要なモデル過程をコントロールするモデル・パラメータを変化させた感度実験をいくつか実施した。

続く第3章から第5章において、領域規模大気輸送モデル[†]、全球規模大気輸送モデル[†]、海洋分散モデル[†]による結果の比較を示す。また、第6章において放出シナリオ[†]の違いを議論するために、気象庁の逆推計[†]モデルを用いた放出量の推定結果を示した。

3 領域規模大気輸送モデルの相互比較

(1) はじめに

先行研究例(一例としてChino et al., 2011; Morino et al., 2011 [19] [90]など)での報告では、第一原発事故により放出された放射性物質の輸送および沈着過程は原発周辺の地形や局所気象の影響を強く受けていることが示唆されている。このため、高解像度化学輸送モデル[†]により得られる知見を整理することを目的として、ワーキンググループにおいて領域化学輸送モデル[†]を用いた輸送・沈着過程に関するモデル計算結果の相互比較を行った。本相互比較においては、国内外の研究機関から合わせて9つのモデルによる計算結果の提供を受けた。それらのモデルの水平解像度、鉛直層数、計算領域などを付録表3.1に示す。大気中濃度などについても提供を受けているが、広域の観測結果が利用可能な積算沈着量を中心に相互比較を行った。また結果の比較に加え、国立環境研究所(NIES[†])では放出シナリオ[†]や湿性沈着過程[†]などを変えた感度実験を行っているので、それらの結果についても3.7節で触れる。

(2) 本相互比較に参加したモデルの概要

付録表3.1は参加モデルの水平解像度、水平格子数、鉛直層数などをまとめたものである。ほぼすべてのモデルが第一原発および関東域を含む東日本域を対象領域としており、水平解像度は3 km から5 km のものが主である。付録図3.1にそれぞれのモデルの

計算対象領域を示すが、ソウル国立大学(SNU[†])は東アジア域での輸送・沈着過程を評価するためのモデル計算結果を提供しており、ほかのモデルと比較すると計算対象領域が広くかつ水平解像度も分解能は低い(27km 付録 表 3.1 参照)。しかしながら全球規模大気輸送モデル[†]による計算と比較すると水平解像度はやや高い(付録 表 4.1 参照)ため、SNU[†]のモデル結果については全球規模大気輸送モデル[†]とではなく領域規模大気輸送モデル[†]との比較を行うものとした。すべてのモデルが事故発生直後の局所的な輸送および沈着過程[†]の理解のため、2011 年 3 月の事故直後から 4 月初頭までの計算を行っている。それぞれのモデルの概要については、付録 3A にまとめた。

放射性物質の積算沈着量をモデル間で比較するため、各モデルの計算対象領域から共通の領域(北緯 34.5 度から北緯 40.5 度、および東経 138.0 度から東経 142.5 度)を設定した。また格子位置についても差異があるため、当該領域内における各モデルの結果を 0.1 度格子に補間した上で相互比較を行った。計算期間についても各モデルで若干の差異があったため、共通の計算期間であった 2011 年 3 月 12 日 0 時(世界標準時)から 2011 年 4 月 1 日 0 時までの期間についての比較を行った。また文部科学省による航空機観測(<http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/list/362/list-1.html>)の結果についても共通する範囲および格子に補間し、積算沈着量についてモデル計算結果との比較を行った。ここでは 2012 年春に実施された第 5 次モニタリングとの比較を行ったが、(http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/7000/6289/24/203_0928.pdf)この比較の際、2011 年 4 月時点のモデル結果からのおよそ 1 年間の間における再飛散、土壌移行、河川流出などによる沈着量分布変化などは考慮していない。

(3) 気象場に関する概要

第一原発事故の事故直後における気象場の概要については WMO 報告書[†](WMO, 2011) [148]および先行研究論文(Morino et al., 2011; Kinoshita et al., 2011; Korsakissok et al., 2011; Stohl et al., 2012; Sugiyama et al., 2012) [90][60][66][116][117]などですでに述べられているが、その概要については以下のようにまとめられる。2011 年 3 月 9 日から 11 日：弱い低気圧が東日本を通過し、それに伴う弱い雨が 9 日から 12 日午前まで観測される。3 月 12 日：3 月 12 日から 13 日にかけて高気圧が本州南部を東進。1 号炉で水素爆発が発生する 12 日午後時点では周辺域の風向きは高度 1 km 以下で南風、それより高い高度においては西風が卓越していた。3 月 14 日から 17 日：14 日から 15 日にかけて再び弱い低気圧が本州の南海上を東進し、15 日には急速に発達しつつ北東に進んだ。本低気圧は 15 日から 17 日朝方にかけて日本の東海上に抜け、それに伴い周辺域で弱い降雨が観測されている。とくに福島県においては 3 月 15 日 17 時(日本時間)から 3 月 16 日 4 時(日本時間)にかけて降雨がみられた(Kinoshita et al., 2011) [60]が、当該時間帯は第一原発での放出量が非常に大きい時間帯でもあった。3 号炉で水素爆発が生じた 3 月 14 日明け方の時間帯には、地表付近では南西風が吹いていた。気圧が 950 hPa 等圧面(およそ海拔高度 550m)における風向は 15 日早朝まで西寄り

だったが、その後北風に転じた。Chino et al. (2011) [19] では ^{131}I 放出量は 15 日 9 時から 15 時にかけての時間帯に最大であったと推定している。その後風向きは東よりに転じ、16 日 0 時 (日本時間) ごろには北寄りに転じている。3 月 18 日から 19 日：高気圧に覆われ西風が卓越していた。3 月 20 日から 22 日：3 月 20 日ごろから 22 日にかけて本州を低気圧が通過し、関東域 (茨城県、千葉県、栃木県、埼玉県、東京都) では 23 日まで降雨がみられた。

(4) ^{137}Cs 積算沈着量

付録 図 3.2 に事故後 2011 年 4 月 1 日 0 時 (世界標準時) までの期間について積算した ^{137}Cs 沈着量の水平分布図を示す。航空機観測においては、第一原発から北西方向に福島市周辺まで高い沈着量を示す地域がみられており、その最大値はおよそ $8 \times 10^5 \text{ Bq m}^{-2}$ 程度である。この高沈着量領域の形成には、領域化学輸送モデル[†]などを用いた先行研究においては 3 月 14 日から 15 日にかけての期間に周辺を通過した低気圧の影響が示唆されている (Chino et al., 2011; Katata et al., 2012; Morino et al., 2011; Takemura et al., 2011) [19] [58] [90] [123]。ほかのモデルに比較して低解像度 (27km) である SNU[‡] のモデルを除き、ほぼすべてのモデルで高沈着量領域の原発から北西方向への広がり再現できていた。

航空機観測では福島県中通り地方や栃木県などにも同様の高沈着量領域がみられている。これらの地域においては 15 日午後に弱い降雨がみられており、その期間の湿性沈着[‡]によって引き起こされていたと考えられる。いくつかのモデル (MRI[‡]、NIES[‡]、JMA[‡] など) はこのような中通り地方周辺の高い沈着量分布を再現できていた。JAMSTEC[‡] のモデルは MRI[‡] や JMA[‡] などのモデルと同じ気象場 (気象庁メソスケールモデル[†]) をベースにしていたにもかかわらず中通り地方周辺での沈着量を過小評価する傾向にあった。これは同じ気象場をもとにしていても化学輸送モデル[†]の計算領域に合わせた気象場を領域気象モデル[†] (MM5[‡], (Grell et al., 1994) [35]、WRF[‡] (Skamarock et al., 2008) [112] など) を用いて再構築しているため、各々のモデルにおいては気象場に微小な差異が生じているためである。

航空機観測ではそのほかにも、第一原発から南方に茨城県方面、また北方には岩手県方面に高い沈着量を示している地域がみられている。南方への輸送は 3 月 14 日、16 日、20 日、そして 21 日にみられていた。CRIEPI[‡]、CEREA[‡]、IRSN[‡]、JAEA[‡] などのモデルは南方域への海岸線沿いの高沈着量領域を良く再現していた。岩手県などの北東北方面への沈着については JAEA[‡] や JAMSTEC[‡] などのモデルで明瞭に現れていた。一方で CRIEPI[‡]、CEREA[‡]、SNU[‡] などのモデルは北東北域での沈着は過小評価傾向にあった。

付録 図 3.3 に 2011 年 4 月 1 日 0 時 (世界標準時) までの ^{137}Cs 積算沈着量の散布図を示す。横軸が航空機観測での測定値、縦軸が各モデルの積算沈着量の値であり、格子位置については 3.2 節で触れたように同一の格子となるよう空間補間を行っている。大多数のモデル格子点は航空機観測で得られた結果に対して 0.1~10 倍までの範囲内にある。

過大評価傾向を示すモデル(IRS[†]、MRI[‡]など)や過小評価傾向を示すモデル(JAMSTEC[‡]など)があるが、全モデルのアンサンブル平均[†](付録 図 3.3 黒丸)については概ね良好な再現性を示していた。

付録 表 3.2 に、各モデルおよび文部科学省航空機観測による共通領域内での陸面および海表面への ¹³⁷Cs 積算沈着量について示す。これは、これまで(3.2 節および付録 図 3.3)述べた共通の格子点に補間した値を積算したものである。海陸の判定には領域気象モデル[†]WRF[†]の土地利用を利用した。差異の要因としては用いた気象場の違い、放出シナリオ[†]の違い、大気からの除去過程の取り扱い方の違いなどが考えられる。航空機観測での海洋上の観測はなく、2011 年 5 月 31 日の時点で、本領域内においては陸域のみで 2.65 PBq であった。この値と各モデルの総放出量を用いた陸域への総沈着量の大气への総放出量との比の平均は 18±6%となる。また、平均値から 2σを超えるモデルを除くとこの比は 19±5%となる(付録 表 6.1 参照)。一方、モデルによる陸域への沈着量推定値は 1.3PBq から 3.8 PBq の範囲にあり、概ね観測からの推定値と同程度であった(付録 表 3.2 参照)。本モデル比較における陸域への総沈着量の大气への総放出量との比の平均値は 27±10%となる(付録 表 3.2 参照)。すなわち、大气への総放出量に対する陸域沈着量の比は、総放出量を観測値を用いた 20%以下の評価と不整合性がある。すなわち、モデルでは比較的小さな大气への総放出量(付録 表 3.2 から 11.3±4.6PBq)を仮定しているにも関わらず、観測と整合的な陸域沈着量を再現している。また、モデル間の差異をみると、とくに乾性沈着[†]と湿性沈着[†]の比率において大きな違いがみられた。MRI[‡] および NIES[‡]はほぼすべて(陸域への沈着の 9 割以上)の沈着が湿性沈着[†]によるものと推定しているのに対し、IRS[†]および SNU[†]は過半数が乾性沈着[†]によるものと推定していた(付録 表 3.2 参照)。陸域と海洋を含めた領域全体について、領域規模大気輸送モデル[†]によって計算された湿性沈着[†]量の総放出量との比は、平均で 68±19%であった(付録 表 3.2 参照)。今回設定した共通領域は主に陸域が中心であり、海洋は周辺の沿岸域しか考慮していないが、その海洋への ¹³⁷Cs 沈着はおよそ 0.9 PBq から 5.5 PBq であり(付録 表 3.2 参照)、こちらについても差異がみられた。

(5) 積算沈着量の放射性物質間の比率 (¹³¹I と ¹³⁷Cs との比)

日本原子力研究開発機構(JAEA[†]) および 米国エネルギー省国家安全保障局(DOE/NNSA[‡]) は 2013 年 6 月に ¹³¹I 積算沈着量分布の推定値を公表した(Torii et al., 2013) [134]。これは 2011 年 4 月 2 日から 3 日にかけて行った航空機観測の結果をにしたもとのものである。また同期間の ¹³⁴Cs の積算沈着量分布推定値についてもあわせて示している。この期間における ¹³⁴Cs および ¹³⁷Cs の積算沈着量分布はそれほど差異がないと考えられるため、航空機観測の結果から推定した ¹³¹I/¹³⁴Cs 比を各モデルの積算沈着量 ¹³¹I および ¹³⁷Cs の比率との検証に用いた。付録 図 3.4 に ¹³¹I を考慮したモデルにおける ¹³¹I および ¹³⁷Cs の 2011 年 4 月 3 日 0 時(世界標準時)までの積算沈着量の比率の空間分布を示す。各モデルの計算期間に差異があるため、すべてのモデルに共通する 2011 年 4 月 1 日 0

時までの計算結果に ^{131}I の放射性壊変による比率の変動を考慮して当該時刻における比率を推定した。各地における比率の違いは放出シナリオ[†]における放出比率の変化および放射性物質ごとの除去過程の違いから生じると考えられる。付録 図 3.4 に示されているモデルはすべて JAEA[‡]による放出シナリオ[†]、および気象庁メソスケールモデル[†]の気象場をもとにしており、モデル間の差異はモデル間の除去過程の違い、および各化学輸送モデル[†]を計算する際に使用した、気象庁メソスケールモデル[†]をもとに空間補間もしくは再計算された気象場のモデル間の差異によるものと考えられる。観測においては第一原発から北西方向に比較的小さめの値(約 0.7)が、また発電所から南方向に比較的大きめの値(約 15)がみられている。このような南北方向の値の違いについてはほぼすべてのモデルで再現されていた。NIES[‡]モデル(WRF-CMAQ[‡]; 付録 3A.8 参照)についてはほかのモデルと比較してとくに発電所北側の地域で高めの値を示す傾向にあったが、発電所南方にみられる高い値(20 以上)については観測を良く再現していた。NIES[‡]モデルを用いた感度実験の結果、 $^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ 積算沈着量比は放出の際の ^{131}I のガス-粒子状物質比率に強く依存する様子がみられた。このため、今後はより詳細な感度実験などによる解析が必要と考えられる。参加したすべてのモデルが日本海側でほかの地域と比べて高めの値を示す傾向にあり、とくにラグランジュ輸送モデル[†](JAEA[‡]および JMA[‡])では明瞭な海陸コントラストが現れていた。

(6) 放出シナリオの違いが放射性物質の沈着量分布に与える影響

NIES[‡]では三種類の放出シナリオ[†]を用いた比較実験を行った。用いた放出シナリオ[†]はそれぞれ JAEA[‡] (Terada et al., 2012) [133]、ノルウェー大気研究所(NILU[‡]) (Stohl et al., 2012) [116]、および東京電力(TEPCO, 2012) [128]によるものである。これら三種の放出シナリオ[†]はすべて数値モデルと観測データを用いた逆推計[†]による推定結果である。数値モデルとして、JAEA[‡]は第一原発周辺の局所スケールおよび東日本スケールの領域モデル、NILU[‡]は全球モデルを、そして東京電力は原発周辺の局所スケール領域モデルをそれぞれ使用している。また JAEA[‡]は空間解像度 1 km(局所スケール)および 3 km(東日本スケール)の数値モデルを、そして東京電力は空間解像度 1 kmのものをそれぞれ使用している。

化学輸送モデル[†]を用いたそれぞれのシナリオによる計算結果の検証は、航空機観測データとの比較により行った。JAEA[‡]の放出シナリオ[†]を用いた場合がもっとも観測結果との整合性が高く、今回行った比較実験における標準実験とした。高沈着地域 ($\geq 10 \text{ kBq m}^{-2}$) において、標準実験と観測結果との差異は一桁以内に収まる地点がほとんど(全地点の 96%)であった。一方でNILU[‡]の放出シナリオ[†]を用いた場合は高沈着域のうち 12%、東電を用いた場合も 11%の地点において一桁以上の差異がみられた(Morino et al., 2013) [91]の図 2 および表 2 参照)。東日本域における沈着量空間分布についても、JAEA[‡]の放出シナリオ[†]を用いたシミュレーション結果がいちばん観測結果に整合的であった。これらの結果から、東日本域における微小粒子の沈着分布をより現実的に再現する

ためには、第一原発周辺のみを対象とした局所スケールの数値モデルや地球規模の全球数値モデルだけではなく、解析対象の時空間スケールに対応する空間解像度および計算領域の数値モデルを用いて推定した放出シナリオ[†]を用いるべきであることが示唆される。

(7) 沈着過程のパラメタリゼーション依存性に関する感度実験

NIES[‡]では湿性沈着過程[†]を三通りに変えた感度実験を行った。領域化学輸送モデル[†]CMAQ[‡]においては、凝集モード粒子[†]の湿性沈着[†]速度は雲底下での除去速度を降水中および雲粒中における水分量の比率から求めることによって計算している (Byun and Schere, 2006) [17]。CMAQ[‡]における湿性沈着[†]モジュールはプロセスベースモデル[†]であり、このモデルを用いたエアロゾルの湿性沈着[†]による除去量については先行研究 (Appel et al., 2011[6]など) ですでに検証されている。今回行った比較実験では、この湿性沈着[†]モジュールを用いた計算を標準実験とした。加えて、NIES[‡]においてはJAEA[‡]モデル (Terada et al., 2012) [133] と同一の湿性沈着[†]モジュールを用いた実験もあわせて行った (WD2 実験)。このモジュールにおいて湿性沈着過程[†]は降水の関数である洗浄率 (Λ) を用いて求められる。この湿性沈着[†]モジュールは、プロセスベースモデル[†]ではなく、経験則ベースモデル[†]であり、調整用のパラメタが用意されている。WD2 実験においては標準実験と比較して第一原発より遠方の地域で高沈着域がみられた。このため3つ目の実験としてJAEA[‡]モジュールの洗浄率を10倍にした実験を行ったところ、観測でみられる沈着分布の再現性が改善された。この結果から、Terada et al. (2012) [133]は洗浄率 Λ を1/10程度に過小評価している可能性がある。洗浄率 Λ の値は実験によってさまざまであり (Morino et al., 2013) [91]、洗浄率 Λ の設定が不確定要因の一つであるといえる。チェルノブイリ原子力発電所事故ののち行われた放射性物質の大気シミュレーションにおいては、比湿を用いた湿性沈着[†]スキームのほうが降水率を用いたスキームよりも再現性が高かった (Brandt et al., 2002) [12]。これらの結果から、降水量のみを用いた湿性沈着[†]モジュールは不確実性が大きく、可能であればプロセスベース[†]の湿性沈着過程[†]の利用を検討すべきであると考えられる。

(8) ¹³⁷Cs 沈着量の統計解析による検証

各モデルによる2011年4月1日0時(世界標準時)までの¹³⁷Cs 積算沈着量と航空機観測による観測値とを用い、統計解析によるモデル精度検証を行った。これまですでに繰り返し触れているように、モデル結果およびモニタリングデータについては同一の空間格子上の値を空間補間にて求めている。また航空機観測については海上での値がないため、陸域のみ比較を行っている。また航空機観測における観測下限は10,000 Bq m⁻²であり、それより高い沈着量がみられた格子についてのみ比較を行っている。各モデルおよびそれらのアンサンブル平均[†]に対する各種評価指標を用いた統計解析の結果を付録表3.3にまとめている。WMO 報告書[†] (WMO, 2013) [149] をもとに、相関係数(r)、バイ

アス (fractional mean bias; FB)、性能指数 (figure of merit in space; FMS)、超過率 (factor of exceedance; FOEX)、ファクタ 2 (percentage of cells within factor 2; %FA2)、Kolmogorov-Smirnov パラメタ (KSP) およびこれらの指標を組み合わせた 4 種の統計評価指標 (metric 1, 2, 3, and 4) を用いて予測精度評価を行った。すべてのモデルは観測で得られた沈着量分布と良い相関を示していた。IRSN[†]モデルは相対的に低めの相関係数($r < 0.5$)を示していたが、これは主に新潟県周辺での過大評価傾向に起因するものである。バイアス (FB) は過大評価もしくは過小評価に関するモデルの傾向を評価するものである。IRSN[†]、JAEA[†]、および JMA[†] は $FB > 20\%$ の過大評価傾向にあり、CRIEPI[†]、JAMSTEC[†]、そして SNU[†] は $FB < 20\%$ の過小評価傾向にあった。性能指標 (FMS) は観測における空間分布との近似性をみるもので、CEREA[†]、IRSN[†]、CRIEPI[†]、JAEA[†]、および NIES[†] が $FMS > 60$ と良い近似性を示していた。JAMSTEC[†] は福島県中通り地方および関東北部での沈着を再現できておらず、FMS は低めであった。FOEX および %FA2 は個々の格子点におけるモデル予測値が観測値をどの程度再現できているかをみるための指標であり、JAEA[†] および CEREA[†] が良い再現性を示していた。NIES[†] モデルの %FA2 は 57% であったが、これは対象領域にある全格子点のうち 57% でのモデル予測値が観測値と 2 倍以内で一致していたことを示している。また各種統計 (r , FB, FMS, FOEX, %FA2, および KSP) を組み合わせた総合評価では、CEREA[†]、CRIEPI[†]、JAEA[†]、MRI[†]、および NIES[†] が良い再現性を示していた。

これらの統計指標による予測精度評価に参加したすべてのモデルによるアンサンブル平均[†]値についても適用したところ、高い再現性を示したモデル、たとえば NIES[†] モデルなどと比較しても高い観測との一致度を示していた。

(9) まとめ

領域大気シミュレーションに関する本ワーキンググループに参加した 9 機関による 9 つのモデルシミュレーション結果について比較を行った。計算領域や水平・鉛直解像度、気象場、放出シナリオ[†]が異なるため、それらの違いに起因する結果の違いなども考慮する必要がある。このため、今回の比較の主眼は大気科学関連の研究を行っている日本国内外の研究機関における、領域モデルを用いた結果の概要を取りまとめることにある。より詳細な影響評価のためには、放出シナリオ[†]や気象場などについて同一の計算条件でのモデル間相互比較や感度実験などが必要であると考えられる。

今回の相互比較により得られた知見としては

- 1) 気象場は沈着過程に非常に大きな影響を与え、気象モデルにおける雲微物理[†]や積雲対流[†]などの設定の違いに起因する気象場の微小な差異や、化学輸送モデル[†]における沈着過程の設定の差異などが沈着量分布の再現性に大きく影響する。
- 2) 2011 年 3 月 15 日の沈着については湿性沈着[†]の影響が大きい。
- 3) 領域規模大気輸送モデル[†]によって計算された湿性沈着[†]量の総放出量との比は、平均で $68 \pm 19\%$ であった (付録 表 3.2 参照)。

4) モデルアンサンブル[†]は沈着量分布の推定精度向上に有益である。

4 全球規模大気輸送モデルの相互比較

(1) はじめに

第一原発事故によって放出された放射性物質の全球規模大気輸送モデル[†]による長距離輸送の相互比較には、5つの全球規模大気輸送モデル[†]と1つの領域規模大気輸送モデル[†]が参加し、総計で12のシミュレーション結果が提出された。5つの全球モデルのうち、4つ (SPRINTARS[‡]、EMAC[‡]、MASINGAR-1[‡]、MASINGAR mk-2[‡]) は大気大循環モデルによって駆動されるオンラインのエアロゾル輸送モデルである。また、残りの全球規模大気輸送モデル[†]である TM5[‡]、および領域輸送モデル MRI-PM/r[‡] は同化[†]された気象場、またはほかの力学モデル[†]によって前もって計算された気象場を用いるオフラインのモデルである。参加した数値モデルの詳細は Appendix A に、仕様項目は付録 表 4.1 に示す。

このモデル間相互比較では、すべてのモデルは格子状での濃度が計算されるオイラー型[†]またはセミ・ラグランジュ型モデル[†]であり、ラグランジュ型拡散モデル[†]は含まれていない。しかしながら、これまでの研究例では Stohl et al. (2012) [116] のようにラグランジュ型大気拡散モデル[†]によるシミュレーションも報告されている。

(2) 放射性物質の放出量推定値

今回の相互比較実験では放射性物質の放出量データは指定されていないため、参加研究機関は放出量を各々で仮定している。実験で使われた放出量データは JAEA[‡]による放出量の逆推計[†]データ (Chino et al., 2011; Terada et al., 2012) [19] [133]、または Stohl et al. (2012) [116] の逆推計[†]による放出量データが用いられている。Chino et al. (2011) [19]、(Terada et al., 2012) [133]、Stohl et al. (2012) [116] による ¹³⁷Cs の放出量の時間変化推定値を付録 図 4.1 に示す。

JAEA[‡]は、第一原発事故による ¹³⁷Cs や ¹³¹I などの放射性物質放出量の時系列変化を、逆推計手法[†]を用いて求めている。日本国内の観測値のみを用いた JAEA[‡]による ¹³⁷Cs の 2011 年 4 月末までの放出量推定は、Chino et al. (2011) [19] では 12.6 PBq と推定され、Terada et al. (2012) [133] では 8.8 PBq に更新されている。

Stohl et al. (2012) [116] は大気拡散モデル FLEXPART[‡] と世界各地の観測値を用いて ¹³⁷Cs と ¹³³Xe の放出量を逆推計[†]している。Stohl et al. (2012) [116] の推定による ¹³⁷Cs の 4 月 20 日までの総放出量値は 36.6 PBq (不確実性の範囲は 20.1–53.1 PBq) と、総放出量は JAEA[‡] の推定量に対して非常に大きく、およそ 4 倍の差がある。¹³³Xe の総放出量は 15.3 EBq (不確実性の範囲は 12.2 – 18.3 EBq) と推定されている。

(3) 全球質量収支

付録 表 4.2 に、各シミュレーションによる 2011 年 3 月 31 日時点の ^{137}Cs の全球総沈着量と乾性沈着[†]量・湿性沈着[†]量を示す。すべてのシミュレーションにおいて、放出された ^{137}Cs のほとんどは降水による湿性沈着過程[†]によって除去されている。乾性沈着[†]によって除去される割合は数値モデルによって異なり、沈着量全体に対する割合は 0 ～ 12% の範囲にある。乾性沈着[†]と湿性沈着[†]の割合のばらつきの範囲は、領域輸送モデルによるシミュレーションと比較すると小さい。全球規模大気輸送モデル[†]によって計算された湿性沈着[†]量と総放出量の比の平均値は $93 \pm 5\%$ である (付録 表 4.2 参照)。

(4) ^{137}Cs の全球大気滞留量の時系列変化

付録 図 4.2 は ^{137}Cs の日平均全球大気中滞留総量の時系列変化を示している。JAEA[†]の放出量推定値を用いたシミュレーション (付録 図 4.2b) は複雑な時系列変化を示している。シミュレーションによる大気中の ^{137}Cs 対流総量は 2011 年 3 月 15 日から 20 日にかけて最大となる。その最大値はおおよそ 0.7 – 2.7 PBq に達し、シミュレーションによって 3 – 4 倍の差が生じている。この差異の原因は数値モデルによる沈着過程の扱いに起因する可能性がある。また、JAEA[†]による ^{137}Cs 放出量推定値では 3 月終盤に極大があり、これに対応して大気中対流総量は 0.7 – 2.1 PBq に達している。

一方、Stohl et al. (2012) [116] の放出量推定値を用いたシミュレーションでは、放出量から想定される通り、JAEA[†]の推定値を用いたシミュレーションよりも多量の大気滞留総量を示している。シミュレーションによる大気中の ^{137}Cs 対流総量は 2011 年 3 月 15 日に最大となり、その値はおおよそ 10 – 16 PBq に達している。15 日の最大値の 5 日後には、大気中の ^{137}Cs 総量は再び上昇し、3 月 19 日から 20 日にかけて 6 – 10 PBq の極大値を示している。この 2 度目の極大値からは、 ^{137}Cs 総量は時間とともに減少している。JAEA[†]の放出量推定値を用いたシミュレーションにみられる 3 月終盤の極大値は、Stohl et al. (2012) [116] の推定値を用いたシミュレーションではみられない。

(5) ^{137}Cs の全球沈着量の時系列変化

付録 図 4.3a および付録 図 4.3b はシミュレーションによる ^{137}Cs の日別総沈着量の時系列変化を示している。JAEA[†]の放出量推定値を用いているほとんどのシミュレーションは ^{137}Cs の日別総沈着量の極大が 2011 年 3 月 15 日、20 日、30 日に起きている。しかしながら、一部のシミュレーションによる日別総沈着量では 3 月 25 日や 4 月 2 日に極大値をもつなど差異がある (付録 図 4.3a)。ほとんどのシミュレーションでは日別総沈着量は 3 月 15 日に最大となり、約 $1\text{--}3\text{ PBq day}^{-1}$ となっている。

Stohl et al. (2012) [116] の放出量推定値を用いたシミュレーションでも、日別総沈着量は おおよそ 3 月 15 日に最大となり、最大値は約 $8\text{--}11\text{ PBq day}^{-1}$ となっている (付録 図 4.3b)。また、3 月 20 – 21 日には 2 度目の極大値を示している。

(6) ^{137}Cs 総沈着量の水平分布

付録 図 4.4 は 3 月末時点での ^{137}Cs 総沈着量の水平分布を示している。すべてのシミュレーションで、 ^{137}Cs は北半球全体に広く沈着しているが、そのほとんどはとくに太平洋北西部に集中し、第一原発からアリューシャン列島近傍を通過してカムチャツカ半島の東を通り、北米の北西部に伸びる領域に ^{137}Cs 沈着量が多いという共通した特徴が示されている。しかしながら、使用した数値モデルおよび ^{137}Cs 放出量推定値の違いによる差異も示されている。シミュレーションによる ^{137}Cs 沈着量分布は、欧州やロシアのように、第一原発から風下に向かう距離が離れるほど違いが大きくなることを示している。この違いの原因の可能性としては、湿性沈着過程[†]の違いによって ^{137}Cs の大気中の寿命が異なることによる差異が挙げられる。

シミュレーションによる ^{137}Cs 沈着量分布は、太平洋側に輸送された ^{137}Cs の一部は冬季アジアモンスーンによる北東風によって太平洋の南西部に到達したことを示唆している。台湾 (Huh et al. 2011) [47]、ベトナム (Long et al. 2012) [73]、およびフィリピンの包括的核実験禁止条約機関 (CTBTO[†]) の観測所では第一原発を起源とするとみられる放射性物質を検出している。しかしながら、東南アジアにおける ^{137}Cs 沈着量はシミュレーションごとに大きく異なっている。

(7) 観測された大気中濃度との比較

シミュレーションによる ^{137}Cs の大気中濃度は CTBTO[†] および欧州の放射性物質観測ネットワーク (Masson et al. 2011) [80] による観測値と比較された。観測値の概要は Appendix B に記載する。付録 図 4.5 は ^{137}Cs の日平均大気中濃度の観測値とシミュレーションを比較した散布図を示している。 ^{137}Cs 濃度の比較的高い領域 ($> 0.01 \mu\text{Bq m}^{-3}$) では、シミュレーションによる大気中濃度は観測された濃度のおおよそ 0.1 から 10 倍の範囲に収まっている。しかしながら、いくつかのシミュレーションの結果、とくに JAEA[‡] の放出量推定値を用いたものでは、比較的低い領域 ($< \sim 0.01 \mu\text{Bq m}^{-3}$) で過小評価の傾向を示している。この傾向の原因としては、JAEA[‡] による放出量推定値は日本国内の観測のみを用いて逆推計[†] されているため、太平洋側に輸送される時の放出量を過小評価する傾向にある可能性があることを示唆している。散布図の比較からは、水平解像度の高い数値モデルが常に良い精度の結果を示すとは限らないことを示唆している。

JAEA[‡] および Stohl et al. (2012) [116] の双方の放出量推定値を用いている数値モデル、MASINGAR-1[‡]/mk-2[‡] および EMAC T106/T255[‡] は異なった傾向を示している。MASINGAR-1[‡] および mk-2[‡] は Stohl et al. (2012) [116] の放出量推定値を用いた場合は観測値に対して過大評価を示す傾向にあるのに対し、JAEA[‡] による放出量推定値を用いた場合には過小評価を示す傾向にある。一方、EMAC T106[‡] および T255[‡] は、Stohl et al. (2012) [116] の放出量推定値を用いた場合に観測値と良い整合性を示し、JAEA[‡] による放出量推定値を用いた場合には過小評価を示す傾向にある。これらの結果からは、JAEA[‡] および Stohl et al. (2012) [116] による放出量推定値のどちらが現実により近いかを判断することは

困難である。

(8) アンサンブル解析

本相互比較実験に参加した輸送シミュレーションの統計的平均とばらつきを求めるため、アンサンブル平均[†]による解析を行った。参加したシミュレーションはそれぞれに解像度が異なるため、総量が保存するように $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 解像度にデータの再サンプルを行い、アンサンブル平均[†]と変動係数を求めた。付録 図 4.6 は 2011 年 3 月末時点での ^{137}Cs の総沈着量分布のアンサンブル平均[†]と変動係数(標準偏差と平均の比)を示したものである。太平洋北西部地域の高い沈着によって汚染された地域では、変動係数が比較的小さく、 ^{137}Cs の総沈着量分布の不確実性が比較的小さいことを示している。福島第一原発から遠く離れた地域では変動係数が大きく、シミュレーションによって沈着量が大きく異なり、不確実性が高いことを示している。

(9) まとめ

第一原発事故から放出された放射性物質の全球シミュレーションの相互比較のために、5 つの全球輸送モデルと 1 つの領域輸送モデルが相互比較実験に参加し、12 のシミュレーション結果が提出された。シミュレーションでは JAEA[‡] (Chino et al., 2011; Terada et al., 2012) [19] [133] および Stohl et al. (2012) [116] によって逆推計[†]された放出量推定値が用いられた。提出されたシミュレーション結果は、相互に比較され、また入手可能な観測値とも比較された。ほとんどの数値モデルは主に湿性沈着[†]によって大気中から ^{137}Cs を除去しており、全球規模大気輸送モデル[†]によって計算された湿性沈着[†]量と総放出量の比の平均値は $93 \pm 5\%$ である(付録 表 4.2 参照)。シミュレーション結果は湿性沈着過程[†]とその大きさの違いが ^{137}Cs の寿命の大きさとして大きく現れていることを示している。

一般的に、提出されたシミュレーション結果は ^{137}Cs の大まかな沈着パターンはよく一致しており、 ^{137}Cs は太平洋北西部からアリューシャン諸島に伸び、北米西部に到達する沈着量の高い地域があることを示唆している。欧州やロシアのようにさらに遠方の地域ではシミュレーション間で大きな差異がみられた。シミュレーションでは冬季アジアモンスーンによって東南アジア地域に輸送される大きさにも違いがみられた。

観測による ^{137}Cs の大気中濃度とシミュレーション結果との比較では、比較的良い一致がみられたが、比較的濃度の低い($\sim 0.01 \text{ } \mu\text{Bq m}^{-3}$)領域では過小評価の傾向が示されていた。この相互比較実験からは、JAEA[‡] および Stohl et al. (2012) [116] による放出量推定値のどちらが現実により近いかを結論づけることは難しいことが示唆された。

5 海洋分散モデルの相互比較

(1) はじめに

今回行った海洋分散モデル[†]相互比較(以下、「本モデル比較」という。)には、国内外の 10 グループから 11 モデルが参加している。海洋内での放射性核種の分散を計算するモデルは、通常、海洋の流れ場を計算する流動モデル[†]と、放射性核種の広がりを計算する分散モデルから構成される。このうち流れ場の計算では、多くの場合、データ同化手法[†]を用いて観測された水温や塩分、海面高度などの物理量を取り入れ、時々刻々の現実的な流れ場を再現している。また、この再現された状況を初期値として、数週間から数ヶ月程度の期間の予測を行う場合もある。分散モデルは、このようにして得られた流れ場を用いて、放射性核種がいつどこでどのように流され、広がっていくかを計算する。本モデル比較に参加したモデルの基本的な特徴と設定を付録 表 5.1 に、また各モデルの計算領域を付録 図 5.1 に示し、各モデルの簡単な説明を付録 5A にまとめている。

各グループの研究目的の違いを反映して、モデルの領域や格子系、格子間隔などは大きく異なる。また放射性核種の分散計算には、水温などのトレーサの計算と同様に移流拡散スキーム[†]を用いるもの(11 モデル中 7 モデル)と、ラグランジュ型粒子追跡法[†]を用いるもの(4 モデル)と、概念的に大きく異なる 2 種類のモデルが用いられている。

第一原発から海洋へ流入した ^{137}Cs として、すべてのモデルで直接漏洩による流入は考慮されている。その時間発展シナリオとしては第一原発の放水口付近での ^{137}Cs 濃度のモニタリング値を参考にしているが、主に、JAEA[‡]の研究者らが示した短い時間規模の変動も考慮したシナリオ(JAEA[‡]型)(Kawamura et al., 2011) [59]と、電力中央研究所(CRIEPI[‡])の研究者らが用いた短周期変動を考慮しない単純化したシナリオ(CRIEPI[‡]型)(Tsumune et al., 2012) [137]の 2 通りに大きく分けられる(付録 図 5.2)。各モデルで用いた ^{137}Cs の直接漏洩総量としては、2.3PBq から 26.9PBq までとなっており(付録 表 5.1 参照)、この値もモデルによって大きく異なっている。

さらに 11 モデル中 7 モデルでは、第一原発から一旦大気中へ放出された ^{137}Cs が海面から取り込まれる効果も考慮されている。この大気沈着の空間分布と沈着量は、領域規模大気輸送モデル[†]によって求められた値を用いている(第 3 章参照)。付録 図 5.3 には事故発生から 2011 年 4 月 1 日までの累積沈着量の空間分布を示したが、これも用いた領域規模大気輸送モデル[†]により、その分布や沈着量が大きく異なっていることが分かる。

以上のように、直接漏洩と大気沈着の双方に含まれる ^{137}Cs 流入量の大きな不確実性、また海洋分散モデル[†]そのものの設定の違いなどが大きく、その影響が以下の結果に反映されていることに注意されたい。

(2) 海面での ^{137}Cs の分布

東北沖海域での最上層(各モデルにおける海面にもっとも近い格子点)における 10 日ごとに平均した ^{137}Cs と流れの水平空間分布を、付録 図 5.4 から付録 図 5.7 に示す。それぞれの期間で得られたモニタリング観測値も、比較のため付録 図 5.4 および付録 図 5.6 に示した。本節では3月下旬(3月 22 日から 31 日)および4月下旬(4月 21 日から 30 日)の状況について比較を行う。なお、6月末までの10日ごとのすべての分布については、付録 5B を参照されたい。

① 3月 22 日から 31 日の分布

付録 図 5.4(1) に示したモニタリング観測値では、第一原発近くの沿岸部に 20000 Bq m^{-3} を超える高い ^{137}Cs 濃度がみられる。一方、福島沿岸から 30 km 沖合のモニタリング地点では 10000 から 15000 Bq m^{-3} 程度の濃度が数地点で観測されている。しかし3月下旬では、まだ観測点数がかなり限られているため、モデルによって再現された ^{137}Cs 濃度の分布を詳しく検証することが難しい。

多くのモデルで福島沿岸の高濃度域は現実的な値を示しており、岸に沿って南へと広がっていることが分かる(付録 図 5.4)。これらのモデルでは、第一原発付近の沿岸域の表層流として 10 cm s^{-1} 以下の岸に沿う弱い南下流となっており(付録 図 5.5)、これによって ^{137}Cs も南側へと広がっている。このような沿岸域の流れは、東北沿岸域を通過する大気の大規模攪乱[†]に伴う変動、さらにそれによって励起される海洋の沿岸捕捉波に伴って、数日程度の変動が卓越している。

3月下旬における海面での ^{137}Cs の空間分布は、大気からの降下分の扱いの違いによって大きく二通りに分けられる。KIOST/IMMSP[†]、Kobe U[†]、MSSG[†]および WHOI-3D[†]の大気降下分を考慮していないモデルでは、 ^{137}Cs の分布は福島沿岸域に集中しているが、CRIEPI[†]、JAEA[†]、JCOPET[†]、NIES[†]および WHOI-2D[†]の降下分を取り入れているモデルでは、沖合海域の広い範囲で ^{137}Cs の比較的高い濃度が得られている。この違いの顕著な例として、仙台湾での濃度分布の違いがみられる。大気降下分を考慮しないモデルではほぼ 0 Bq m^{-3} となっているが、降下分を考慮したモデルでは 10000 Bq m^{-3} 程度の値を示している。ただし、IRSN[†]モデルでは大気降下分も考慮されているものの、降下を取り入れている海域が第一原発付近に限られた海域となっており、広域への影響はほとんどみられない(付録 図 5.3)。

沿岸域から離れた沖合海域における ^{137}Cs の分布に影響を与えている要因として、 141.5° E より東、 36.5° N より北の海域にみられる比較的強い南下流の存在も挙げられる(明確な例は 付録 図 5.5 (a), (i), (k) など)。この流れは、海面で 20 から 50 cm s^{-1} の流速を持ち、数百キロの幅で顕著にみられており、この南下流と沿岸域との間の海域で ^{137}Cs が南へと広がる傾向を示している。一方この南下流は、より北の海域から比較的 ^{137}Cs 濃度の低い海水を南へと運ぶ役割も担っており、 ^{137}Cs 濃度の複雑な空間分布を形作っている。その後、 ^{137}Cs の比較的濃度の高い領域は黒潮の北縁に取り込

まれて東へと流されている(付録 図 5.4 (d), (i), (j) など)。

各モデルで再現された表層の流れ場と ^{137}Cs の分布には、概略として上記のように共通する特徴がみられるものの、数百キロ程度の空間規模でみた場合、モデル間の違いが顕著な場合があることも分かる。たとえば、茨城県沖の 36.7°N 付近から黒潮にかけての海域にみられる渦のような流速分布と、それに関連した ^{137}Cs の分布である。KIOST/IMMSP[†] (付録 図 5.5 (f)) および MSSG[‡] (付録 図 5.5 (h)) の結果では、 36.4°N 、 141°E 付近を中心とする時計回りの渦が発達しており、同様の渦は、弱いながらもほかの複数のモデルにも現れている(付録 5B の 4 月 1 日から 10 日の平均分布も参照のこと)。一方、JAEA[‡] (付録 図 5.5 (d)) および WHOI-3D[‡] (付録 図 5.5 (k)) の結果では、時計回りと反時計回りの渦対として現れており、モデル間で異なる ^{137}Cs の分布をもたらしている。一方、この時期の観測データとして、人工衛星からの海面水温分布やクロロフィル濃度[†] 分布が得られている(付録 5C)。これらの観測データからは、渦の内側が暖かく、かつクロロフィル濃度[†] が周辺より低い、時計回りの高気圧性渦の特徴が 3 月末から 5 月まで持続していたことが示されている。CRIEPI[‡]、JAEA[‡]、JCOPEX[‡] および NIES[‡] の結果では、 ^{137}Cs の分布はこの渦構造に強く影響されている一方、ほかのモデルでは ^{137}Cs の高濃度域がまだ福島沖に留まっており、3 月末の時点では渦のある茨城県沖まで到達していないことが分かる。

② 4 月 21 日から 30 日の分布

モニタリング観測結果では、 ^{137}Cs の高濃度域は 3 月下旬と比べて若干広がっている。とくに新たに設けられた 15 km 沖合の測線で 40000 Bq m^{-3} を超える値が観測されている。一方、30km 沖合の測線では、3 地点で 20000 Bq m^{-3} を超える値を示しているものの、そのほかの地点では 10000 Bq m^{-3} 以下へと若干下がっている(付録 図 5.6 (1))。茨城県沖でも新たな観測点が設けられているが、これらの地点ではすべてこの時期の検出限界値(10000 Bq m^{-3}) 以下となっている。

4 月下旬には、多くのモデルで ^{137}Cs の北東方向への広がりが示されている(付録 図 5.6)。この分布は、主に第一原発付近の北東向きの表層流によって移流されているものと考えられる(付録 図 5.7)。また、北東向きの流れは、茨城県沖の時計回りの循環とも関連があることを示した結果もみられる(付録 図 5.7 (a), (e), (f), (g), (i) など)。北東向きの ^{137}Cs の分布は、2011 年 4 月 18 日に第一原発付近の沿岸部で行われた航空機観測結果(付録 5D)と定性的な一致をみせている。一方、茨城県沖の時計回りの循環は、岸に沿う ^{137}Cs の高濃度域の南下を抑える傾向を示している(付録 図 5.6 (e), (f) など)。このことは、IRSN[‡] や WHOI-2D[‡] のように、時計回りの循環がみられない、あるいは弱い場合には高濃度の ^{137}Cs が茨城県沿岸にみられることとも整合的である。

沖合域における ^{137}Cs 分布の南下傾向、あるいは南東方向への広がりは、IRSN[‡] と MSSG[‡] モデルを除く多くのモデルでみられる。南下した ^{137}Cs は、その後黒潮の北縁に取り込まれ、急速に東へと広がっていく。以上のことから、福島県沖から茨城県沖

にかけての海域の表層循環場および ^{137}Cs の分布は、黒潮そのものの変動と、主に海洋中規模渦に関連した比較的空間規模の小さな流れの両者に強く影響を受けていることが分かる。このような流れ場の再現性は、本モデル比較で用いた領域海洋分散モデル[†]に対する境界条件を与えている、より広域の海洋分散モデル[†]のデータ同化手法[†]に大きく依存していることに注意が必要である。これは、境界条件を通じて、より広域の海洋分散モデル[†]の結果が領域海洋分散モデル[†]内の変動に大きく影響を及ぼしているためである。

また、この時期、モニタリング観測は関係者の最大限の努力で継続、拡張しているものの、限られたリソースの下での観測でもあり、観測範囲や観測頻度に大きな制約があった。その結果、海洋分散モデル[†]による放射性核種の分散シミュレーションの検証のためには十分ではない部分もあり、より広域でのモニタリング活動が求められる。ただしこのことは、太平洋に面し、南側に黒潮という強流域をもつ福島付近における本モデル比較に関しての言及であり、異なる海域では流れ場の特徴も異なるため、モニタリング観測の対応も異なってくることが示唆される。

(3) 時系列観測データとの比較

第一原発付近での ^{137}Cs 濃度の時間発展の再現性を検証するため、約 10 km 南側の東京電力福島第二原子力発電所(以下、「第二原発」という。)、約 16 km 南側の岩沢海岸、および 30km 沖合測線での観測結果と各モデルで再現された時系列データとの比較を行った(付録 図 5.8 および付録 図 5.9)。第二原発付近の時間変動に関して(付録 図 5.8)、3 月後半から 4 月上旬にかけての局所的な風の影響とみられる短周期変動も含めて、多くのモデルで 4 月半ばまでは現実的に再現されていた。その後の ^{137}Cs 濃度の漸減傾向はすべてのモデルで再現できているものの、4 月半ば以降は、多くのモデルで過小評価していることが分かる。この原因として、以下の 2 つの要因が考えられる。まず、3 月後半から 4 月始めにかけて、福島沿岸部や沖合海域も含めた広い範囲で大気からの ^{137}Cs の降下による影響が残っている可能性がある。後述するように、大気降下の影響を考慮しているモデルであっても、降下分の見積りが過小評価されている可能性があり、それゆえ第二原発や岩沢海岸における時系列データも影響を受けていることが考えられる。もう 1 つの可能性は、5.2 節で指摘した福島沿岸域での沿岸に沿う南北流変動である。4 月後半には、多くのモデルで南から北へと流れる流れが卓越しており(付録 図 5.7)、比較的 ^{137}Cs 濃度の低い海水が南から移流されたため、モデルでは過小評価となったと考えられる。しかし、この時期に福島沿岸域での流速の観測データが無いため、モデルで再現された沿岸域における流速場の妥当性を検証することができない。

30 km 沖合の測線では、時系列比較における観測とシミュレーション結果との違いがより大きくなる(付録 図 5.9)。大気降下分を考慮していない 4 モデル(GEOMAR[†]、KIOST/IMMSP[†]、Kobe U[†]および MSSG[†])の結果では、3 月後半における 30 km 沖合での値を全く再現できていない。このことと、第一原発からの放射性核種の直接漏洩は 3 月

26 日頃から始まっていることから、4 月始めまでの沖合域における ^{137}Cs 濃度は、大気からの降下分と考えられる。このことは、(Tsumune et al. 2012) [137] が $^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ 比の解析から得た結果と整合的である。また、大気降下分を考慮したモデルの結果であっても 4 月半ば以前の 30km 沖合測線での ^{137}Cs 濃度が過小評価傾向であることは、大気モデルから得た降下分の見積りが小さかった可能性を示唆している。

30 km 沖合測線においても、4 月後半から 5 月にかけて、ほぼすべてのモデル結果でモニタリング観測結果と比べて過小評価している。これらの違いの原因を明らかにするためには、沿岸域とは異なる沖合域での流れ場および ^{137}Cs 分布の変動要因に関して、より詳細な比較と解析が必要となろう。

(4) 研究船 Ka'imikai-o-Kanaloa による観測結果との比較

モデル結果検証のための異なる観測データとして、2011 年 6 月に米国ハワイ大学所属の海洋観測船 Ka'imikai-o-Kanaloa (KOK[‡]) によって黒潮続流域と福島および茨城沖で得られたデータがある (Buesseler et al., 2012) [14]。海面付近および 100 m 深における ^{137}Cs 濃度の水平分布のモデル間比較を付録 図 5.10 および付録 図 5.11 にそれぞれ示す。また、これらの図中には KOK[‡] による観測結果も重ねて表示している。多くのモデルで、KOK[‡] による観測領域の北側と北東側を中心に、 ^{137}Cs の分布が観測領域よりもかなり広範囲に広がっていることが分かる。海面付近の ^{137}Cs の分布では、すべてのモデルで福島および茨城沿岸の高濃度域は再現されているが、100 m 深の分布では同様の沿岸域における高濃度域が再現されていないモデルも複数ある (付録 図 5.11)。KOK[‡] 観測結果では、海面での ^{137}Cs 濃度の最大値は第一原発前面の海域ではなく、36.3° N, 141.7° E 付近の測点で得られている。Buesseler et al. (2012) [14] で示唆されているように、中規模渦およびこれに伴うストリーマー状の ^{137}Cs の広がりがみられているモデル結果もいくつかみられ (顕著な例は付録 図 5.10 (a), (f) など)、比較的強いこれらの流れによって短時間のうちに広がっていくことが示唆される。しかし、前述のようにモデルの設定の違いや流れの非線形過程の影響などにより、各モデルで再現される流れ場が異なっていることには注意が必要である。

KOK[‡] 観測域内での ^{137}Cs インベントリ[†] は、1.9 から 2.1 PBq と見積もられている (Buesseler et al., 2012) [14]。同様の 6 月半ばにおける観測域内でのインベントリ[†] を各モデルの結果を用いて求めた値を付録 図 5.11 の各パネル右上に表示した。各モデルのインベントリ[†] は 1.33 PBq から 4.52 PBq まで比較的大きなばらつきを示しているものの、観測値はモデル結果の範囲内に入っている。そのばらつきの原因として、観測域内での ^{137}Cs の鉛直分布の違いが考えられる (付録 図 5.12)。インベントリ[†] の比較的大きな値を示した IRSN[‡]、JCOPET[‡] および NIES[‡] の 3 つのモデル結果では、沖合の海域 (35.0° N-38.0° N, 143.5° E-147.0° E) において垂表層の ^{137}Cs 濃度が過大評価となる傾向がみられるが、そのほかのモデルでは、25 m 深よりも深い領域で逆に過小評価となっている。一方、沿岸に近い領域 (36.0° N-38.0° N, 141.4° E-143.5° E) では、すべてのモデルで

観測値よりも小さな値を示していることが分かる。このようなモデル間での鉛直分布の違いの一因に、鉛直混合パラメタリゼーションや混合係数の違いが考えられる。また、海面で与えられる風応力や熱フラックスなどの境界条件も、冬期の混合層の発達過程などを通じて海洋表層における混合過程に影響を及ぼしている。さらに、海水中での掃引(スキャベンジング)過程や海底堆積物と海水との間の放射性核種の輸送過程も鉛直分布に影響を与えていると考えられる。現在のところ、掃引過程や海底堆積物との間の輸送過程が ^{137}Cs の鉛直分布全体に対して直接的な影響を及ぼしているとする観測事実は得られていない。しかし、第一原発から非常に高濃度の ^{137}Cs が海洋へ直接流入した直後の沿岸域では、海底でのいわゆる「ホットスポット」を形成する原因としてこれらの過程が重要であると考えられる。本モデル比較に参加したグループのうち、JAEA[‡]、KIOST/IMMSP[‡]および MSSG[‡]は掃引過程や海底堆積物との間の放射性核種の輸送過程を考慮しているものの、これら以外のモデルでは考慮されていない。

(5) まとめ

本章では、第一原発から海洋へと入り込んだ ^{137}Cs の分散について、国内外の10グループから提供された11モデルの結果の比較を行った。その際、各グループの負担を最小限とするため、各グループがこれまでに行った計算結果を単純に比較することとした。各モデルの結果には、ある程度共通する分散過程がみられるものの、空間分布(5.2節)と時間変動(5.3節)の両方で大きな違いが確認された。本章で行った単純なモデル比較の範囲内では、放射性核種の海洋内での分散に関わる素過程の詳細まで考慮した定量的な比較は困難である。さらに詳しい比較と解析を行うためには、同じ直接放出シナリオ[†]と大気降下フラックスを用いた計算を各モデルで行うことや、同一モデルを用いて異なる放出シナリオ[†]での計算を行うことなど、系統立てた比較研究が求められる。モデルそのもの、モデルの流れ場を駆動する外力、さらには放射性核種の流入シナリオなどに多くの不確実性があることを考慮すれば、第一原発事故に伴って海洋へと流入した ^{137}Cs の分散に関して、どのモデルがより適切であるかは現段階で示すことはできない。国際的な協力の下、更なるモデル比較研究が必要であろう。

6 放出量解析

(1) はじめに

これまでのモデル相互比較の章で述べられたように、放射性物質輸送モデルシミュレーションの結果は放出量推定の結果に強く依存する。第一原発の事故が発生して以来3年以上が経過するにもかかわらず、まだ第一原発からの放射性物質放出の確実な推定値は得られていない。JAEA[†]の茅野らは、SPEEDI[†]によるシミュレーション結果と放射性物質の観測データを比較し、2011年3月11日から4月19日にかけての第一原発事故からの¹³⁷Csと¹³¹Iの放出量時系列を推定した(Chino et al., 2011) [19]。この結果によると、2011年3月11日から4月19日にかけての第一原発からの総¹³⁷Cs放出量は9.1PBqであり、最大の放出は同年3月14日から15日にかけて発生した。茅野らは、ほかにも3月21日～22日、30～31日にも大規模な放出を解析した。この結果は、寺田らによって修正され、同期間の総¹³⁷Cs放出量は8.8PBqに改訂された(Terada et al., 2012) [133]。この両者の解析における問題点の一つとして、日本の観測所のデータのみを利用したことが挙げられる。そのため、彼らの解析では、第一原発から太平洋に輸送された放射性物質を捉えることが難しい。一方、NILU[†]のStohlらはFLEXPART[†]とCTBTO[†]による全球規模の観測データを観測データとの差とあらかじめ与えておいた既知の情報との差から構成される評価関数の最小値を求めるベイズ統合逆解析[†]により組み合わせた解析を行った(Stohl et al., 2012) [116]。その結果によると、¹³⁷Csの総放出量は36.6PBqとなった。この結果は茅野らや寺田らの結果の約4倍となっている。Stohlらの解析では、その北半球に広く配置された観測地点とFLEXPART[†]を用いることにより、太平洋に輸送された放射性物質をも解析することができる。一方、考え得る問題点としては、Stohlらは大量の粒子を放出し、その輸送・拡散・沈着過程をシミュレートするラグランジュ型輸送モデル[†]を用いていることである。ラグランジュ型モデル[†]は輸送過程に関しては正確に取り扱うことができるものの、拡散過程(乱流、積雲対流[†]、境界層)や沈着過程(乾燥、湿潤)を詳細に取り扱うことは難しい。この拡散、沈着過程を詳細に取り扱うことが難しいという特徴は、エアロゾルの長距離輸送に大きな影響を与えるものと考えられる。この章では、全球規模の観測データ、オイラー型[†]の全球輸送モデルとベイズ統合逆解析[†](Maki et al., 2011) [75]を組み合わせた新しい解析結果を紹介する。

(2) 比較実験手法

この解析今回の比較実験では、オイラー型[†]の全球エアロゾル輸送モデルMASINGAR[†](Tanaka et al., 2005) [124]を水平解像度約60km(TL319)で用いた。¹³⁷Csの輸送モデル実験はモデルの最下層(概ね地表から50m)から3時間ごとに単位放出量(1TBg/hr)を与えて個別に行われ(タグ付シミュレーション[†])、これを用いて1日あたりの結果を計算した。放出された¹³⁷Csは親水性のエアロゾルに付着して輸送されるものと仮定し、その粒径を

0.7 μm として乾燥・湿性沈着[†]を計算した。タグ付シミュレーション[†]結果を利用するメリットの一つとして、総¹³⁷Cs放出量時系列が得られた後に、大気中の¹³⁷Cs濃度と¹³⁷Cs沈着量を放出量時系列とタグ付シミュレーション[†]結果の線形結合で容易に得られる点である。この特長を生かすことにより、適切に配置された観測ネットワークと現業的に運用されるタグ付シミュレーション[†]システムを組み合わせることで準リアルタイムの予測システムを構築することも可能になると考えられる(現業運用[†]のためには放出量の予測シナリオも必要になる)。本比較実験では、世界中の 51 地点の観測データ(CTBTO[†](Hoffmann et al., 2000)[44]、RING OF FIVE(Masson et al., 2011)[79]、カリフォルニア大(Smith et al., 2014)[114]、台湾中央研究院(Hsu et al., 2012)[46]、気象研究所(Igarashi et al., 2009)[49]、Ian Hoffman 氏(Helth Canada))より個人的に受領したデータの日平均値が用いられた(付録 図 6. 1)。解析期間は 3 月 11 日から 4 月 19 日までの 40 日間とした。本比較実験では、2 つの放出量をあらかじめ与える既知の情報(先験情報[†]と呼ぶ)としてを用いた。一つ目が JAEA[‡]の寺田らによる解析値であり(Terada et al., 2012)[133]、もう一つが NILU[‡]の Stohl らが用いた先験情報[†](解析値ではなく)である。Stohl らの解析値では本比較実験とほぼ同じ観測地点のデータがすでに使われているためである。観測誤差は測定誤差と空間代表性誤差を勘案して 20%を与えた。先験情報[†]誤差は、観測値と先験情報[†]の重みを決める役割を担っているため、本比較実験では先験情報[†]誤差を 10%から 5000%に変化させた感度実験を行った。

(3) 結果と議論

観測データと解析された¹³⁷Cs濃度の違いを比較した結果、本比較実験では、Stohl らによる解析値を用いることとした。感度実験の結果、先験情報[†]誤差を 100%とした。第一原発から 3 月 11 日から 4 月 19 日にかけて放出された¹³⁷Cs総量は 19.4PBq で誤差幅は 3.0PBq となった。本比較実験においては¹³⁷Csの放出高度の違いは解析結果に大きな違いをもたらさなかった。本比較実験では、最大の¹³⁷Cs放出は 3 月 15 日に発生し、その規模は与えた先験情報[†]よりも大きくなった。ほかにも 3 月 18~22 日や 28~30 日にも放出事例が発生したが、28~30 日の事例は茅野らや寺田らによる解析結果よりもかなり小さくなった(付録 図 6. 2)。

タグ付シミュレーション[†]結果と全球観測データ、逆解析を組み合わせた本比較実験の結果は、寺田らと Stohl らの解析結果のほぼ中間となっている。推計期間の長さが異なるが、3 月 20 日以降の放出量は小さいのでこれを無視すると、本比較実験を含めたほかの 6 個のモデル解析結果の平均値は $17.8 \pm 8.2\text{PBq}$ となる。また、 2σ を超えて大きな放出量の Stohl の結果を除くと、 $14.6 \pm 3.2\text{PBq}$ となり、本結果はほかの解析結果と概ね一致しているといえる(付録 表 6. 1)。本比較実験の結果とタグ付シミュレーション[†]結果を組み合わせることにより、¹³⁷Csの大気中濃度と沈着量に関する推定値も得ることができる。しかしながら、本比較実験の結果にも検討すべき点がある。大きな問題点としては、本比較実験でも単一の輸送モデルを用いているという点である。このため、輸

送モデルのバイアス[†]が放出量推定値に影響を与えている可能性がある。より確かな推定値を得るためには、共通の実験設定の元で複数のタグ付シミュレーション[†]実験を収集して逆解析を行い、その結果を比較検証する必要がある。もう一つの問題点としては、輸送モデルの水平解像度が考えられる。より細かい空間解像度や時間解像度の放出量推定値を得るためには、特別観測値と領域化学輸送モデル[†]を利用する必要がある。現在、太平洋上においては十分な観測データがないため、このような解析を行うためには海洋沈着データも有効に活用する必要がある。

7 まとめと結論

過去の研究および本報告においてみいだされた点と結論をまとめる。

(1) 推計値について

- ア 今回本分科会が行った比較実験である「気象庁モデル[†]を用いた逆推計[†]」では、2011年3月11日から4月19日の期間内の大気への¹³⁷Csの総放出量は 19.4 ± 3.0 PBqと推計される(6章(3)参照)。過去の研究も考慮すると大気に放出された¹³⁷Cs量は、 17.8 ± 8.2 PBqである(付録表6.1参照)。平均値から標準偏差の2倍以内の値を用いた場合は 14.6 ± 3.2 PBqであるが、どのモデルがより適切であるか現時点では示すことはできない。
- イ 海洋に、2011年3月21日から6月30日の期間内に、直接放出された¹³⁷Csについて、今回比較に参加したモデルの推計値は2.3~26.9 PBqの範囲にある(付録表5.1参照)。
- ウ 領域規模大気輸送モデル[†]の結果によると、大気への総放出量に対する陸域沈着量比は、 $27 \pm 10\%$ である(付録表3.2参照)。一方、文部科学省の2012年5月31日の航空機観測では陸域で2.65 PBqの値が得られている。この値と、各モデルの総放出量を用いた陸域沈着量比の平均は $18 \pm 6\%$ と見積もられる。平均値から標準偏差の2倍以内の値を用いた場合(付録表6.1)は $19 \pm 5\%$ になる。陸域沈着量比のこれらの見積もりの差の原因は、¹³⁷Csの輸送・沈着過程のモデリング上の問題、総放出量の見積もり誤差、航空機観測からの陸域沈着量の見積もり誤差が考えられ、今後調査が必要である。
- エ 地球全体を対象とした全球規模大気輸送モデル[†]によって計算された湿性沈着[†]量は総沈着量の $93 \pm 5\%$ であった(付録表4.2参照)。一方、領域規模大気輸送モデル[†]では、対象とする陸域と海洋を含めた領域全体への総沈着量の $68 \pm 19\%$ であった(付録表3.2参照)。我が国の陸域に沈着したものに限ってもこの数値はほぼ同じであった。この違いは領域の違いが主要因であるが、モデルの違いも無視できない。

(2) モデル評価について

- ア モデル結果は、観測された放射性物質の分布の主要な特徴を再現している。しかし定量的には、モデル間の差が大きい。とくに大気では、湿性沈着過程[†]についてのモデル間差が大きい。また、沿岸海洋における渦シミュレーションの差異によるモデル間の違いも大きい。
- イ 風速とその鉛直方向の構造が移動性の気団によって頻繁に変化した。陸域と海域における放射性物質の沈着量分布に関するシミュレーション結果は仮定した気象データと放出シナリオ[†]によって極めて敏感に変化する。従って今後、観測データにモデル値を最適化するための同化手法[†]と逆推計手法[†]を用いて高時間分解能シナリオ[†]を構築する必要がある。
- ウ 海洋観測で得られた ^{137}Cs 濃度の測定値を再現するためには、海洋への直接放出と大気からの沈着の両方が必要である。2011 年 4 月以前では、海洋分散モデル[†]を駆動するための大気モデルによる ^{137}Cs の沈着量は過小評価されている。従って、放射性物質の海洋による輸送評価の改善には、大気から海洋への全球規模の沈着量の評価の改善を同化手法[†]などによって行う必要がある。
- エ モデル性能はモデルの力学過程[†]、化学輸送過程[†]、乾性・湿性沈着過程[†]などに依存する。このことは、モデルの改善のためには異なる研究分野の連携が今後必要であることを物語っている。
- オ 算定された放出シナリオ[†]は領域規模大気輸送モデル[†]による解析と全球規模大気輸送モデル[†]による解析では異なる。従って、より詳細な放出量推定のためには今回の全球比較実験で用いたような全球規模の観測データ、オイラー型[†]の全球規模大気輸送モデル[†]とベイズ統合逆解析[†]、領域の観測データを組み合わせた領域規模大気輸送モデル[†]を用いた解析を行なう必要がある。

参考文献

- [1] Adachi, K., M. Kajino, Y. Zaizen, and Y. Igarashi, 2013: Emission of spherical cesium-bearing particles from an early stage of the Fukushima nuclear accident. *Nature Scientific Reports*, **3**, 2554, doi:10.1038/srep02554.
- [2] Adachi, Y., S. Yukimoto, M. Deushi, A. Obata, H. Nakano, T.Y. Tanaka, M. Hosaka, T. Sakami, H. Yoshimura, M. Hirabara, E. Shindo, H. Tsujino, R. Mizuta, S. Yabu, T. Koshiro, T. Ose, and A. Kitoh, 2013: Basic performance of a new earth system model of the Meteorological Research Institute (MRI-ESM1). *Papers in Meteorology and Geophysics*, **64**, 1–19, doi:10.2467/mripapers.64.1
- [3] Amante, C. and B. W. Eakins, 2009: ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis. *NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24*, 19 pp.
- [4] Antonov, J. I., R. A. Locarnini, T. P. Boyer, A. V. Mishonov, H. E. Garcia, and S. Levitus, 2006: World Ocean Atlas 2005, Volume 2: Salinity. NOAA Atlas NESDIS 62, U.S. Government Printing Office, Washington, DC, 182 pp.
- [5] Aoyama, M., D. Tsumune and Y. Hamajima, 2012: Distribution of ^{137}Cs and ^{134}Cs in the North Pacific Ocean: Impacts of the TEPCO Fukushima-daiichi NPP accident. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, doi: 10.1007/s10967-012-2033-2.
- [6] Appel, K.W., K.M. Foley, J.O. Bash, R.W. Pinder, R.L. Dennis, D.J. Allen, and K. Pickering, 2011: A multi-resolution assessment of the Community Multiscale Air Quality (CMAQ) model v4.7 wet deposition estimates for 2002–2006. *Geosci. Model Dev.*, **4**, 357–371, doi:10.5194/gmd-4-357-2011.
- [7] Bailly du Bois, P., F. Dumas, L. Solier, and C. Voiseux, 2012a: In-situ database toolbox for short-term dispersion model validation in macro-tidal seas, application for 2D-model. *Continental Shelf Res.*, **26**, 63–82. doi:10.1016/j.csr.2012.01.011.
- [8] Bailly du Bois, P., P. Laguionie, D. Boust, I. Korsakissok, D. Didier, and B. Fiévet, 2012b: Estimation of marine source-term following Fukushima Dai-ichi accident. *J. Environ. Radioactivity*, **114**, 2–9. doi:10.1016/j.jenvrad.2011.11.015.
- [9] Barron, C. N., A. B. Kara, H. E. Hurlburt, C. Rowley, and L. F. Smedstad, 2004: Sea surface height predictions from the Global Navy Coastal Ocean Model (NCOM) during 1998–2001. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **21**, 1876–1894.
- [10] Barron, C. N., A. B. Kara, P. J. Martin, R. C. Rhodes, and L. F. Smedstad, 2006: Formulation, implementation and examination of vertical coordinate choices in the global Navy Coastal Ocean Model (NCOM). *Ocean Modeling*, **11**, 347–375.
- [11] Batifoulrier, F., P. Lazure, and P. Bonneton, 2012: Poleward coastal jets induced by westerlies in the Bay of Biscay. *J. Geophys. Res.*, **117**, doi:10.1029/2011JC007658.
- [12] Brandt, J., J.H. Christensen, and L.M. Frohn, 2002: Modeling transport and deposition of

- cesium and iodine from the Chernobyl accident using the DREAM model. *Atmos. Chem. Phys.* **2**, 397–417.
- [13] Brenk, H. D., and Vogt, K. J., 1981: The calculation of wet deposition from radioactive plumes. *Nuclear Safety*, **22**, 362–371.
- [14] Buesseler, K. O., S. R. Jayne, N. S. Fisher, I. I. Rypina, H. Baumann, Z. Baumann, C. F. Breier, E. M. Douglass, J. George, A. M. Macdonald, H. Miyamoto, J. Nishikawa, S. M. Pike, and S. Yoshida, 2012: Fukushima-derived radionuclides in the ocean and biota off Japan. *P. Natl. Acad. Sci.*, **109**, 5984–5988.
- [15] Buijsman, M., Y. Uchiyama, J. C. McWilliams, and C. R. Hill-Lindsay, 2012: Modeling semidiurnal internal tides in the Southern California Bight. *J. Phys. Oceanogr.*, **42**, 62–77.
- [16] Byun, D., J. K. S. Ching, and Eds., 1999: Science algorithms of the EPA Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) Modeling System. EPA-600/R-99/030, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Washington D.C.
- [17] Byun, D., and K. Schere, 2006: Review of the governing equations, computational algorithms, and other components of the models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) modeling system. *Appl. Mech. Rev.* **59**(1–6), 51–77.
- [18] Chang, J. S., R. A. Brost, I. S. A. Isaksen, S. Madronich, P. Middleton, W. R. Stockwell, and C. J. Walcek, 1987: A three-dimensional Eulerian acid deposition model: Physical concepts and formulation. *J. Geophys. Res.*, **92**, 14,681–14,700.
- [19] Chino, M., H. Nakayama, H. Nagai, H. Terada, G. Katata, and H. Yamazawa, 2011: Preliminary estimation of release amounts of ^{131}I and ^{137}Cs accidentally discharged from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant into the atmosphere. *J. Nucl. Sci. Tech.*, **48**, 1129–1134.
- [20] Choi, Y., S. Kida, and K. Takahashi, 2013: The impact of oceanic circulation and phase transfer on the dispersion of radionuclides released from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant. *Biogeosciences*, **10**, 4911–4925, doi:10.5194/bg-10-4911-2013.
- [21] Christoudias, T., and J. Lelieveld, 2013: Modelling the global atmospheric transport and deposition of radionuclides from the Fukushima Dai-ichi nuclear accident. *Atmos. Chem. Phys.*, **13**, 1425–1438, doi:10.5194/acp-13-1425-2013.
- [22] Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization Preparatory Commission, 2011a: Fukushima-related measurements by the CTBTO.
<http://www.ctbto.org/press-centre/highlights/2011/fukushima-related-measurements-by-the-ctbto>.
- [23] Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization Preparatory Commission, 2011b: The 11 March Japan Disaster.
<http://www.ctbto.org/verification-regime/the-11-march-japan-disaster/>.
- [24] de Meij, A., Krol, M., Dentener, F., Vignati, E., Cuvelier, C., and Thunis, P., 2006: The sensitivity of aerosol in Europe to two different emission inventories and temporal

- distribution of emissions. *Atmos. Chem. Phys.*, **6**, 4287–4309, doi:10.5194/acp-6-4287-2006.
- [25] Dietze, H., and I. Kriest, 2012: Cs-137 off Fukushima Dai-ichi, Japan - model based estimates of dilution and fate. *Ocean Sci.*, **8**, 319–332, doi:10.5194/os-8-319-2012.
- [26] Draxler, R., D. Arnold, S. Galmarini, M. Hort, A. Jones, S. Leadbetter, A. Malo, C. Maurer, G. Rolph, K. Saito, R. Servranckx, T. Shimbori, E. Solazzo, and G. Wotawa, 2013: Evaluation of meteorological analyses for the radionuclide dispersion and deposition from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. *WMO Technical Publication*, **1120**, 64pp, https://www.wmo.int/e-catalog/detail_en.php?PUB_ID=669.
- [27] Egbert, G. D., and S. Y. Erofeeva, 2002: Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, **19**, 183–204.
- [28] ENVIRON International Corporation, 2009: CAMx USER’ S GUIDE. pp.280.
- [29] ENVIRON, 2011: CAMx 5.40 User’ s Guide. http://www.camx.com/files/camxusersguide_v5-40.aspx.
- [30] Estournel, C., E. Bosc, M. Bocquet, C. Ulses, P. Marsaleix, V. Winiarek, I. Osvath, C. Nguyen, T. Duhaut, F. Lyard, H. Michaud, and F. Auclair, 2012: Assessment of the amount of Cesium-137 released into the Pacific Ocean after the Fukushima accident and analysis of its dispersion in Japanese coastal waters. *J. Geophys. Res.*, **117**, C11014, doi:10.1029/2012JC007933.
- [31] Ferry N., E. Rémy, P. Brasseur, and C. Maes, 2007: The Mercator global ocean operational analysis system: Assessment and validation of an 11-year reanalysis. *J. Marine Systems*, **65**, 540–560.
- [32] Flemming, J., Inness, A., Flentje, H., Huijnen, V., Moinat, P., Schultz, M. G., and O. Stein, 2009: Coupling global chemistry transport models to ECMWF’ s integrated forecast system. *Geosci. Model Dev.*, **2**, 253–265, doi:10.5194/gmd-2-253-2009.
- [33] Furuno, A., H. Terada, M. Chino, and H. Yamazawa, 2004: Experimental verification for real-time environmental emergency response system: WSPEEDI by European tracer experiment. *Atmos. Environ.* **38**, 6989–6998.
- [34] Garreau, P., V. Garnier, and A. Schaeffer, 2011: Eddy resolving modelling of the Gulf of Lions and Catalan Sea. *Ocean Dynamics*, **61**, 991–1003, doi:10.1007/s10236-011-0399-2.
- [35] Grell, G. A., J. Dudhia, and D. R. Stauffer, 1994: A Description of the Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5). *NCAR Tech. Note NCAR/TN-3921STR*, 122pp.
- [36] Grell, G. A., S. E. Peckham, R. Schmitz, S. A. McKeen, G. Frost, W. C. Skamarock, and B. Eder, 2005: Fully coupled “online” chemistry within the WRF model. *Atmospheric Environment*, **39**, 6957–6975.
- [37] Griffies, S. M., A. Gnanadesikan, K. W. Dixon, J. P. Dunne, R. Gerdes, M. J. Harrison, A. Rosati, J. L. Russell, B. L. Samuels, M. J. Spelman, M. Winton, and R. Zhang, 2005: Formulation of an ocean model for global climate simulations. *Ocean Sci.*, **1**, 45–79, doi:10.5194/os-1-45-2005.

- [38] Guo, X., S. M. Varlamov, and Y. Miyazawa, 2010: Coastal ocean modeling by nesting method. *Bull. Coast. Oceanogr.*, **47**, 113–123 (in Japanese with English abstract and figure captions).
- [39] Guss, P., 2011: DOE response to the radiological release from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant, DOE/NV/25946–1236, *Proc. the NEI RETS/REMP Workshop*, Oak Brook, IL, 30 June 2011.
- [40] Hashimoto, A., H. Hirakuchi, Y. Toyoda, and K. Nakaya, 2010: Prediction of regional climate change over Japan due to global warming (Part 1) – Evaluation of Numerical Weather Forecasting and Analysis System (NuWFAS) applied to a long-term climate simulation. *CRIEPI report*, N10044 (in Japanese).
- [41] Hayami, H., A. Sato, M. Tsuzaki, and H. Shimadera, 2012: Atmospheric transport and deposition modeling of radioactive materials released from the Fukushima Daiichi nuclear power plant. *CRIEPI report*, V11054 (in Japanese).
- [42] Higashi, H., Y. Hanamachi, H. Koshikawa, S. Murakami, and K. Kohata, 2012: A numerical study on relationships between climate change and short-necked clam (*Ruditapes philippinarum*) biomass in 1990s in Ise Bay. Japan, *Proc. 9th International Symposium on Ecohydraulics 2012*, 13389.
- [43] Hirt, C. W., and B. D. Nichols, 1981: Volume of fluid method for the dynamics of free boundaries. *J. Comput. Phys.*, **39**, 201–225.
- [44] Hoffmann, W., R. Kebeasy, and P. Firbas, 2000: Introduction to the verification regime of the Comprehensive 5 Nuclear-Test-Ban Treaty. *Phys. Earth and Planetary Interiors*, **113**, 5–9.
- [45] Honda, M., T. Aono, M. Aoyama, Y. Hamajima, H. Kawakami, M. Kitamura, Y. Masumoto, Y. Miyazawa, M. Takigawa, and T. Saino, 2012: Dispersion of artificial caesium-134 and -137 in the western North Pacific one month after the Fukushima accident. *Geochemical J.*, **46**, e1–e9.
- [46] Hsu, S.-C., C.-A. Huh, C.-Y. Chan, S.-H. Lin, F.-J. Lin, and S. C. Liu, 2012: Hemispheric dispersion of radioactive plume laced with fission nuclides from the Fukushima nuclear event. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L00G22, doi:10.1029/2011GL049986.
- [47] Huh, C.-A., Hsu, S.-C., and C.-Y. Lin, 2012: Fukushima-derived fission nuclides monitored around Taiwan: Free tropospheric versus boundary layer transport. *Earth and Planetary Science Letters*, 319–320, 9–14. doi: 10.1016/j.epsl.2011.12.004
- [48] Huijnen, V., J. Williams, M. van Weele, T. van Noije, M. Krol, F. Dentener, A. Segers, S. Houweling, W. Peters, J. de Laat, F. Boersma, P. Bergamaschi, P. van Velthoven, P. Le Sager, H. Eskes, F. Alkemade, R. Scheele, P. Nédélec and H.-W. Pätz, 2010: The global chemistry transport model TM5: description and evaluation of the tropospheric chemistry version 3.0. *Geosci. Model Dev.*, **3**, 445–473, doi:10.5194/gmd-3-445-2010.
- [49] Igarashi, Y., Y. Inomata, M. Aoyama, K. Hirose, H. Takahashi, Y. Shinoda, N. Sugimoto, A. Shimizu, and M. Chiba, 2009: Plausible change in Asian dust source suggested by atmospheric

- anthropogenic radionuclides—observation of single wet deposition events during spring of 2007. *Atmospheric Environment*, **43**, 2971–2980.
- [50] International Commission on Radiological Protection (ICRP), 1995: ICRP Publication 71: Age-Dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 4 Inhalation Dose Coefficients. *Ann. ICRP*, vol. 25/3–4, Pergamon, Oxford, U. K.
 - [51] Ishikawa, Y., T. Awaji, T. Toyoda, T. In, K. Nishina, T. Nakayama, S. Shima, and S. Masuda, 2009: High-resolution synthetic monitoring by a 4-dimensional variational data assimilation system in the northwestern North Pacific. *J. Mar. Syst.*, **78**, 237–248.
 - [52] Iwasaki, T., T. Maki, and K. Katayama, 1998: Tracer transport model at Japan Meteorological Agency and its application to the ETEX data. *Atmos. Env.*, **32**, 4285–4295.
 - [53] JAEA workshop, 2012: JAEA Open Workshop 'Reconstruction of the Emission and diffusion processes of materials released by the Fukushima Daiichi Atomic Power Plant accident', March 6, 2012, Tokyo,
<http://nsd.jaea.go.jp/ers/environment/envs/FukushimaWS/index.htm>.
 - [54] JODC, 2011: JODC-Expert Grid data for Geography (J-EGG500), 500m gridded bathymetric data set of Japan. http://www.jodc.go.jp/data_set/jodc/jegg_intro.html.
 - [55] Kajino, M., 2011: MADMS: Modal Aerosol Dynamics model for multiple Modes and fractal Shapes in the free-molecular and near-continuum regimes. *J. Aerosol Sci.*, **42**, 224–248.
 - [56] Kajino, M., and Y. Kondo, 2011: EMTACS: Development and regional-scale simulation of a size, chemical, mixing type, and soot shape resolved atmospheric particle model. *J. Geophys. Res.*, **116**, D02303, doi:10.1029/2010JD015030.
 - [57] Kajino, M. Y. Inomata, K. Sato, H. Ueda, Z. Han, J. An, G. Katata, M. Deushi, T. Maki, N. Oshima, J. Kurokawa, T. Ohara, A. Takami, and S. Hatakeyama, 2012: Development of the RAQM2 aerosol chemical transport model and predictions of the Northeast Asian aerosol mass, size, chemistry, and mixing type. *Atmos. Chem. Phys.*, **12**, 11833–11856, doi:10.5194/acp-12-11833-2012.
 - [58] Katata, G., M. Ota, H. Terada, M. Chino, and H. Nagai, 2012: Atmospheric discharge and dispersion of radionuclides during the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident. Part I: Source term estimation and local-scale atmospheric dispersion in early phase of the accident. *J. Environ. Radioactivity*, **109**, 103–113, doi:10.1016/j.jenvrad.2012.02.006.
 - [59] Kawamura, H., T. Kobayashi, A. Furuno, T. In, Y. Ishikawa, T. Nakayama, S. Shima, and T. Awaji, 2011: Preliminary numerical experiments on oceanic dispersion of ¹³¹I and ¹³⁷Cs discharged into the ocean because of the Fukushima daiichi nuclear power plant disaster. *J. Nucl. Sci. Tech.*, **48**, 1349–1356.
 - [60] Kinoshita, N., K. Sueki, K. Sasa, J-I. Kitagawa, S. Ikarashi, T. Nishimura, Y-S. Wong, Y. Satou, K. Handa, T. Takahashi, M. Sato, and T. Yamagata, 2011: Assessment of individual radionuclide distributions from the Fukushima nuclear accident covering central-east Japan.

- Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 4pp, doi:10.1073/pnas.1111724108.
- [61] Kitada, T., 1994: Modelling of transport, reaction and deposition of acid rain. *Kishou Kenkyu Note*, **182**, 95-117 (in Japanese).
 - [62] Klug, W., G. Graziani, G. Gripa, D. Pierce, and C. Tassone, 1992: Evaluation of long range atmospheric transport models using environmental radioactivity data from the Chernobyl accident. *the ATMES report*, Technical report, Elsevier Applied Science.
 - [63] Kobayashi, T., S. Otosaka, O. Togawa, and K. Hayashi, 2007: Development of a non-conservative radionuclides dispersion model in the ocean and its application to surface cesium-137 dispersion in the Irish Sea. *J. Nucl. Sci. Technol.*, **44**, 238-247.
 - [64] Kobayashi T., H. Nagai, M. Chino, and H. Kawamura, 2013: Source term estimation of atmospheric release due to the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident by atmospheric and oceanic dispersion simulations. *J. Nucl. Sci. Technol.*, **50**, 255-264, doi:10.1080/00223131.2013.772449.
 - [65] Kondo, J., 1975: Air-sea bulk transfer coefficients in diabatic conditions. *Bound.-Layer Meteor.*, **9**, 91-112.
 - [66] Korsakissok, I., D. Didier, A. Mathieu, D. Quelo, J. Groell, E. Quentric, M. Tombette, J.P. Benoit, and O. Saunier, 2011: Evaluation of the atmospheric releases of the Fukushima accident and their consequences. *Institute de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN)*, PRP-CRI/SESC n 2011-00299, 38p.
 - [67] Korsakissok, I., A. Mathieu, and D. Didier, 2013: Atmospheric dispersion and ground deposition induced by the Fukushima Nuclear power plant accident: a local-scale simulation and sensitivity study. *Atmos. Environ.*, **70**, 267-279.
 - [68] Krol, M., S. Houweling, B. Bregman, M. van den Broek, A. Segers, P. van Velthoven, W. Peters, F. Dentener and P. Bergamaschi, 2005: The two-way nested global chemistry-transport zoom model TM5: algorithm and applications. *Atmos. Chem. Phys.*, **5**, 417-432, doi:10.5194/acp-5-417-2005.
 - [69] Kunii, M., 2013: Mesoscale data assimilation for a local severe rainfall event with the NHM-LETKF system. *Weather and Forecasting*, e-View, doi: <http://dx.doi.org/10.1175/WAF-D-13-00032.1>.
 - [70] Large, W.G., J. C. McWilliams, and S. C. Doney, 1994: Ocean vertical mixing: A review and a model with a nonlocal boundary layer parameterization. *Rev. Geophys.*, **32**, 363-403.
 - [71] Lazure, P., and F. Dumas, 2008: An external-internal mode coupling for a 3D hydrodynamical model for applications at regional scale (MARS). *Adv. Water Resources*, **31**, 233-250.
 - [72] Locarnini, R. A., A. V. Mishonov, J. I. Antonov, T. P. Boyer, H. E. Garcia, and S. Levitus, 2006: World Ocean Atlas 2005, Volume 1: Temperature, NOAA Atlas NESDIS 61, U.S. Government Printing Office, Washington, DC, 182 pp.

- [73] Long, N.Q., Y. Truong, P.D. Hien, N.T. Binh, L.N. Sieu, T.V. Giap, and N.T. Phan, 2012: Atmospheric radionuclides from the Fukushima Dai-ichi nuclear reactor accident observed in Vietnam. *J. of Environmental Radioactivity*, **111**, pp.53-58, doi: 10.1016/j.jenvrad.2011.11.018.
- [74] Lyard, F., F. Lefevre, T. Letellier, and O. Francis, 2006: Modelling the global ocean tides: modern insights from FES2004. *Ocean Dynamics*, **56**, 394-415. doi:10.1007/s10236-006-0086-x.
- [75] Maki, T., T. Y. Tanaka, T. T. Sekiyama, and M. Mikami, 2011: The impact of ground-based observations on the inverse technique of Aeolian dust aerosol. *SOLA*, **7A**, 21-24.
- [76] Margvelashvily, N., V. Maderich, and M. Zheleznyak, 1997: THREETOX - computer code to simulate three-dimensional dispersion of radionuclides in homogeneous and stratified water bodies. *Radiation Protection Dosimetry*, **73**, 177-180.
- [77] Maryon, R.H., F.B. Smith, B.J. Conwy, and D.M. Goddard, 1992: The UK nuclear accident response model (NAME). *Progress in Nuclear Energy*, **26**, 85-104.
- [78] Maryon, R.H., J. Saltbones, D.B. Ryall, J. Barnicki, H.A. Jakobsen, and E. Berge, 1996: An intercomparison of three long range dispersion models developed for the UK meteorological office, DNMI and EMEP. *UK Met Office Turbulence and Diffusion Note*, **234**, ISBN: 82-7144-026-08, pp. 44.
- [79] Mason, E., J. Molemaker, A.F. Shchepetkin, F. Colas, J.C. McWilliams, and P. Sangra, 2010: Procedures for offline grid nesting in regional ocean models. *Ocean modelling*, **35**, 1-15.
- [80] Masson., O., et al., 2011: Tracking of Airborne Radionuclides from the Damaged Fukushima Dai-Ichi Nuclear Reactors by European Networks. *Environ. Sci. Technol.*, **45**, 7670-7677, doi: 10.1021/es2017158.
- [81] Masumoto, Y., Y. Miyazawa, D. Tsumune, T. Kobayashi, C. Estournel, P. Marsaleix, L. Lanerolle, A. Mehra, and Z. D. Garraffo, 2012: Oceanic dispersion simulation of Cesium 137 from Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. *Elements*, **8**, 207-212.
- [82] Mathieu, A., I. Korsakissok, D. Quélo, J. Groëll, M. Tombette, D. Didier, E. Quentric, O. Saunier, J.-P. Benoit. and O. Isnard, 2012: Atmospheric dispersion and deposition of radionuclides from the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident. *Elements*, **8**, 195-200.
- [83] Medici, F., 2001: The IMS radionuclide network of the CTBT. *Radiat. Phys. Chem.*, **61**, 689-690.
- [84] Mellor, G. L., 2001: One-dimensional, ocean surface layer modeling: A problem and a solution. *J. Phys. Oceanogr.*, **31**, 790-809.
- [85] Mellor, G. and A. F. Blumberg, 2004: Wave breaking and ocean surface layer thermal response. *J. Phys. Oceanogr.*, **34**, 693-698.
- [86] MEXT, 2011: Results of airborne monitoring by the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology and the U.S. Department of Energy. Available at http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/4000/3710/24/1305820_20110506.pdf, http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/5000/4858/24/1305819_0708.pdf,

http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/5000/4901/24/1910_1216.pdf.

- [87] Miyazawa, Y., R. Zhang, X. Guo, H. Tamura, D. Ambe, J.-S. Lee, A. Okuno, H. Yoshinari, T. Setou, and K. Komatsu, 2009: Water mass variability in the western North Pacific detected in a 15-year eddy resolving ocean reanalysis. *J. Oceanogr.*, **65**, 737–756, doi:10.1007/s10872-009-0063-3.
- [88] Miyazawa, Y., Y. Masumoto, S.M. Varlamov, T. Miyama, M. Takigawa, M. Honda and T. Saino, 2012a: Inverse estimation of source parameters of oceanic radioactivity dispersion models associated with the Fukushima accident. *Biogeosci. Discuss.*, **9**, 13783–13816, doi:10.5194/bgd-9-13783-2012.
- [89] Miyazawa, Y., Y. Masumoto, S. M. Varlamov, and T. Miyama, 2012b: Transport simulation of the radionuclide from the shelf to open ocean around Fukushima. *Cont. Shelf Res.*, **50–51**, 16–29.
- [90] Morino, Y., T. Ohara, and M. Nishizawa, 2011: Atmospheric behavior, deposition, and budget of radioactive materials from the Fukushima Daiichi nuclear power plant in march 2011. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, doi:10.1029/2011GL048689.
- [91] Morino, Y., T. Ohara, M. Watanabe, S. Hayashi, and M. Nishizawa, 2013: Episode analysis of deposition of radiocesium from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. *Environ. Sci. Technol.*, **47**, 2314–2322, dx.doi.org/10.1021/es304620x.
- [92] Noh, Y., and H.J. Kim, 1999: Simulations of temperature and turbulence structure of the oceanic boundary layer with the improved near-surface process. *J. Geophys. Res.*, **104**, 15621–15634, doi:10.1029/1999JC900068.
- [93] Onogi, K., J. Tsutsui, H. Koide, M. Sakamoto, S. Kobayashi, H. Hatsushika, T. Matsumoto, N. Yamazaki, H. Kamahori, K. Takahashi, S. Kadokura, K. Wada, K. Kato, R. Oyama, T. Ose, N. Mannoji, and R. Taira, 2007: The JRA-25 Reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, **85**, 369–432.
- [94] Park, S.-U., 1998: Effects of dry deposition on near-surface concentrations of SO₂ during medium-range transport. *J. Applied Meteor.*, **37**, 486–496.
- [95] Park, S.-U., A. Choe, M.-S. Park, and Y. Chun, 2010: Performance tests of the Asian Dust Aerosol Model 2 (ADAM2). *J. of Sustainable Energy and Environ.* **1**, 77–83.
- [96] Park, S.-U., A. Choe, and M.-S. Park, 2013: Atmospheric dispersion and deposition of radionuclides (¹³⁷Cs and ¹³¹I) released from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant. *Computational Water, Energy, and Environ. Engineering*, **2**, 61–68.
- [97] Quélo, D., M. Krysta, M. Bocquet, O. Isnard, Y. Minier, and B. Sportisse, 2007: Validation of the Polyphemus platform on the ETEX, Chernobyl and Algeciras cases. *Atmos. Environ.*, **41**, 5300–5315.
- [98] Ralph, E. A., and P. P. Niiler, 1999: Wind-driven currents in the tropical Pacific. *J. Phys. Oceanogr.*, **29**, 2121–2129.
- [99] Roeckner, E., G. Bäuml, L. Bonaventura, R. Brokopf, M. Esch, M. Giorgetta, S. Hagemann, I.

- Kirchner, L. Kornblueh, E. Manzini, A. Rhodin, U. Schlese, U. Schulzweida and A. Tompkins, 2003: The atmospheric general circulation model ECHAM5. PART I: Model description. *Technical report, Max Planck Institute for Meteorology*.
- [100] Roeckner, E., R. Brokopf, M. Esch, M. Giorgetta, S. Hagemann, L. Kornblueh, E. Manzini, U. Schlese., and U. Schulzweida, 2006: Sensitivity of simulated climate to horizontal and vertical resolution in the ECHAM5 atmosphere model. *J. Climate*, **19**, 3771–3791.
- [101] Roland, A., Y. J. Zhang, H. V. Wang, Y. Meng, Y.-C. Teng, V. Maderich, I. Brovchenko, M. Dutour-Sikiric, and U. Zanke, 2012: A fully coupled 3D wave-current interaction model on unstructured grids. *J. Geophys Res.*, **117**, C00J33, p. 1–18 doi:10.1029/2012JC007952.
- [102] Romero, L., Y. Uchiyama, C. Ohlmann, J.C. McWilliams, and D.A. Siegel, 2013: Particle-pair dispersion in the Southern California coastal zone. *J. Phys. Oceanogr.*, **43**, 1862–1879.
- [103] Saito, K., T. Shimbori, and R. Draxler, 2014: JMA’s regional atmospheric transport model calculations for the WMO Technical Task Team on meteorological analyses for Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. *J. Environ. Radioact.*, doi: 10.1016/j.jenvrad.2014.02.007. (in press).
- [104] Saunier, O., A. Mathieu, D. Didier, M. Tombette, D. Quélo, V. Winiarek, and M. Bocquet, 2013: An inverse modeling method to access the source term of the Fukushima nuclear power plant accident using gamma dose rate observations. *Atmos. Chem. Phys.*, **13**, 11403–11421.
- [105] Sehmel, G. A., 1980: Particle and gas dry deposition: A review. *Atmos. Environ.* **14**, 983–1011.
- [106] Seinfeld, J. H., and S. N. Pandis, 1998: Atmospheric Chemistry and Physics, From Air Pollution to Climate Change. John Wiley and Sons, Inc., NY.
- [107] Seino, N., H. Sasaki, J. Sato, and M. Chiba, 2004: High-resolution simulation of volcanic sulfur dioxide dispersion over the Miyake Island. *Atmos. Env.*, **38**, 7073–7081.
- [108] Shchepetkin, A. F., and J. C. McWilliams, 2005: The Regional Ocean Modeling System (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography following coordinates oceanic model. *Ocean Modelling*, **9**, 347–404.
- [109] Shimbori, T., Y. Aikawa, and N. Seino, 2009: Operational implementation of the tephra fall forecast with the JMA mesoscale tracer transport model. *CAS/JSC WGNE Res. Act. Atmos. Ocea. Model.*, **39**, 5.29–5.30.
- [110] Shimbori, T., Y. Aikawa, K. Fukui, A. Hashimoto, N. Seino, and H. Yamasato, 2010: Quantitative tephra fall prediction with the JMA mesoscale tracer transport model for volcanic ash: A case study of the eruption at Asama volcano in 2009. *Pap. Met. Geophys.*, **61**, 13–29 (in Japanese with English abstract and figure captions).
- [111] Simmons, A., S. Uppala, D. Dee, and S. Kobayashi, 2007: ERA-Interim: New ECMWF reanalysis products from 1989 onwards. *ECMWF newsletter*, **110**, 25–35.
- [112] Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G. Duda, X. Y. Huang, W. Wang, and J. G. Powers, 2008: A description of the advanced research WRF version 3, NCAR Tech.

Note NCAR/TN-475+STR, 113pp.

- [113] Smagorinsky, J., 1963: General circulation experiments with the primitive equations, I. The basic experiment. *Mon. Weather Rev.*, **91**, 99–164.
- [114] Smith, A. R., K. J. Thomas, E. B. Norman, D. L. Hurley, B. T. Lo, Y. D. Chan, P. V. Guillaumon, and B. G. Harvey, 2014: Measurements of Fission Products from the Fukushima Daiichi Incident in San Francisco Bay Area Air Filters, Automobile Filters, Rainwater, and Food. *Journal of Environmental Protection*, **5**, 207–221.
- [115] Sportisse, B., 2007: A review of parameterizations for modeling dry deposition and scavenging of radionuclides. *Atmospheric Environment*, **41**, 2683–2698.
- [116] Stohl, A., P. Seibert, G. Wotawa, D. Arnold, J. F. Burkhardt, S. Eckhardt, C. Tapia, A. Vargas, and T. J. Yasunari, 2012: Xenon-133 and caesium-137 releases into the atmosphere from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant: determination of the source term, atmospheric dispersion, and deposition. *Atmos. Chem. Phys.*, **12**, 2313–2343, doi:10.5194/acp-12-2313-2012.
- [117] Sugiyama, G., J. Nasstrom, B. Pobanz, K. Foster, M. Simpson, P. Vogt, F. Aluzzi, and S. Homann, 2012: Atmospheric dispersion modeling: challenges of the Fukushima Daiichi response. *Health Physics*, **102**, 493–508, doi:10.1097/HP.0b013e31824c7bc9.
- [118] Takahashi, K., X. Peng, R. Onishi, M. Ohdaira, K. Goto, H. Fuchigami, and T. Sugimura, 2008: Impact of coupled nonhydrostatic atmosphere-ocean-land model with high resolution. *High Resolution Numerical Modelling of the Atmosphere and Ocean*, K. Hamilton and W. Ohfuchi, Eds, Springer-Verlag, 261–274.
- [119] Takano, I., Y. Aikawa, and S. Gotoh, 2007: Improvement of photochemical oxidant information by applying transport model to oxidant forecast. *CAS/JSC WGNE Res. Act. Atmos. Ocea. Model.*, **37**, 5.35–5.36.
- [120] Takemura, T., H. Okamoto, Y. Murayama, A. Numaguti, A. Higurashi, and T. Nakajima, 2000: Global three-dimensional simulation of aerosol optical thickness distribution of various origins. *J. Geophys. Res.* **105**, 17853–17873.
- [121] Takemura, T., T. Nakajima, O. Dubovik, B.N. Holben, and S. Kinne, 2002: Single-scattering albedo and radiative forcing of various aerosol species with a global three-dimensional model. *J. Climate*, **15**, 333–352.
- [122] Takemura, T., T. Nozawa, S. Emori, T.Y. Nakajima, and T. Nakajima, 2005: Simulation of climate response to aerosol direct and indirect effects with aerosol transport-radiation model. *J. Geophys. Res.*, **110**, D02202, doi:10.1029/2004JD005029.
- [123] Takemura, T., H. Nakamura, M. Takigawa, H. Kondo, T. Satomura, T. Miyasaka, and T. Nakajima, 2011: A numerical simulation of global transport of atmospheric particles emitted from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. *SOLA*, **7**, 101–104, doi:10.2151/sola.2011-026.
- [124] Tanaka, T. Y., and M. Chiba, 2005: Global simulation of dust aerosol with a chemical transport

- Model, MASINGAR. *J. Meteor. Soc. Japan*, **83A**, 255–278.
- [125]Tanaka, T. Y., K. Orito, T.T. Sekiyama, K. Shibata, M. Chiba, and H. Tanaka, 2003: MASINGAR, a global tropospheric aerosol chemical transport model coupled with MRI/JMA98 GCM: Model description. *Pap. Meteor. Geophys.* **53**, 119–138.
- [126]Tanaka, T. Y., T. Maki, T.T. Sekiyama, Y. Igarashi, M. Kajino, and M. Mikami, 2013: Numerical analysis of the global transport of radionuclides from Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident. *93rd American Meteorological Society Annual Meeting*.
- [127]TEPCO, 2011: Press release 'Submission of a report to Ministry of Economy, Trade and Industry, Nuclear and Industrial Safety Agency, on the tsunami investigation at Fukushima Daiichi and Daini Atomic Power Plants. July 8, 2011 (in Japanese). Available at <http://www.tepco.co.jp/cc/press/11070802-j.html>.
- [128]TEPCO, 2012: Estimation of the released amount of radioactive materials into the atmosphere as a result of the accident in the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (in Japanese). Available at http://www.tepco.co.jp/cc/press/betu12_j/images/120524j0105.pdf.
- [129]Terada, H., A. Furuno, and M. Chino, 2004: Improvement of worldwide version of system for prediction of environmental emergency dose information (WSPEEDI), (I) new combination of models, atmospheric dynamic model MM5 and particle random walk model GEARN-new. *J. Nucl. Sci. Technol.*, **41**, 632–640.
- [130]Terada, H., and M. Chino, 2005: Improvement of Worldwide Version of System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information (WSPEEDI), (II) evaluation of numerical models by ^{137}Cs deposition due to the Chernobyl nuclear accident. *J. Nucl. Sci. Technol.* **42**, 651–660.
- [131]Terada, H., and M. Chino, 2008: Development of an atmospheric dispersion model for accidental discharge of radionuclides with the function of simultaneous prediction for multiple domains and its evaluation by application to the Chernobyl nuclear accident. *J. Nucl. Sci. Technol.*, **45**, 920–931.
- [132]Terada, H., H. Nagai, A. Furuno, T. Kakefuda, T. Harayama, and M. Chino, 2008: Development of worldwide version of system for prediction of environmental emergency dose information: WSPEEDI 2nd version. *Trans. At. Energy Soc. Japan*, **7**, 257–267 (in Japanese with English abstract).
- [133]Terada, H., G. Katata, M. Chino, and H. Nagai, 2012: Atmospheric discharge and dispersion of radionuclides during the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident Part II: verification of the source term and analysis of regional-scale atmospheric dispersion. *J. Environ. Radioact.*, **112**, 141–154.
- [134]Torii, T., T. Sugita, C. E. Okada, M. S. Reed, and D. J. Blumenthal, 2013: Enhanced analysis methods to derive the spatial distributions of ^{131}I deposition on the ground by airborne surveys at an early stage after the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident. *Health Physics*,

105, 192–200.

- [135] Tsumune, D., M. Aoyama, K. Hirose, F. O. Bryan, K. Lindsay, and G. Danabasoglu, 2011a: Transport of ^{137}Cs to the Southern Hemisphere in an ocean general circulation model. *Progress In Oceanography*, **89**, 38–48, 10.1016/j.pocean.2010.12.006.
- [136] Tsumune, D., T. Tsubono, M. Aoyama, and K. Hirose, 2011b: Distribution of oceanic ^{137}Cs from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant simulated numerically by a regional ocean mode. *CRIEPI Environmental Science Research Laboratory Rep.*, No.V11002, (in Japanese, with English abstract and figure captions).
- [137] Tsumune, D., T. Tsubono, M. Aoyama, and K. Hirose, 2012: Distribution of oceanic ^{137}Cs from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant simulated numerically by a regional ocean model. *J. Environm. Radioact.*, **111**, 100–108.
- [138] Tsumune, D., T. Tsubono, M. Aoyama, M. Uematsu, K. Misumi, Y. Maeda, Y. Yoshida, and H. Hayami, 2013: One-year, regional-scale simulation of ^{137}Cs radioactivity in the ocean following the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident. *Biogeosciences*, **10**, 5601–5617, doi:10.5194/bg-10-5601-2013.
- [139] Uchiyama, Y., T. Ishii, D. Tsumune, and Y. Miyazawa, 2012: Oceanic dispersion of radioactive cesium-137 from Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. *J. JSCE*, **68**, 931–935 (in Japanese with English abstract).
- [140] Uchiyama, Y., T. Yamanishi, D. Tsumune, Y. Miyazawa, and T. Ishii, 2013: Influences of coastal jet and mesoscale eddies on initial dispersion of the radionuclides released from Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. *J. JSCE*, **69**, 1051–1055 (in Japanese with English abstract).
- [141] Uchiyama, Y., E. Idica, J.C. McWilliams, and K.D. Stolzenbach, 2014: Wastewater effluent dispersal in Southern California bays. *Cont. Shelf Res.*, **76**, 36–52. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2014.01.002>.
- [142] Uppala, S. M., et al., 2005: The ERA-40 re-analysis. *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **131**, 2961–3012, doi:10.1256/qj.04.176.
- [143] Vignati, E., M. Karl, M. Krol, J. Wilson, P. Stier, and F. Cavalli, 2010: Sources of uncertainties in modelling black carbon at the global scale. *Atmos. Chem. Phys.*, **10**, 2595–2611, doi:10.5194/acp-10-2595-2010
- [144] Watanabe, M., T. Suzuki, R. O’ishi, Y. Komuro, S. Watanabe, S. Emori, T. Takemura, M. Chikira, T. Ogura, M. Sekiguchi, K. Takata, D. Yamazaki, T. Yokohata, T. Nozawa, H. Hasumi, H. Tatebe, and M. Kimoto, 2010: Improved climate simulation by MIROC5: Mean states, variability, and climate sensitivity. *J. Climate*, **23**, 6312–6335.
- [145] Wetherbee, G. A., D.A. Gay, T.M. Debey, C.M.B. Lehmann, and M.A. Nilles, 2012: Wet deposition of fission-product isotopes to north America from the Fukushima Dai-ichi incident. *Environ. Sci. Technol.*, **46**, 2574–2582, doi:10.1021/es203217u.

- [146]Winiarek, V., M. Bocquet, O. Saunier, and A. Mathieu, 2012: Estimation of errors in the inverse modeling of accidental release of atmospheric pollutant: Application to the reconstruction of the cesium-137 and iodine-131 source terms from the Fukushima Daiichi power plant. *J. Geophys. Res.*, **117**, D05122.
- [147]Winiarek, V., M. Bocquet, N. Duhanyan, Y. Roustan, O. Saunier, and A. Mathieu, 2014: Estimation of the caesium-137 source term from the Fukushima Daiichi nuclear power plant using a consistent joint assimilation of air concentration and deposition observations. *Atmos. Env.*, **82**, 268-279.
- [148]WMO, 2011: Final report of the Meeting of the WMO Task Team on Meteorological Analyses for Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident. Geneva, Switzerland, 30 November-2 December 2011, Available at http://www.wmo.int/pages/prog/www/CBS-Reports/documents/FinalRep_TT_FDnpp_v6.pdf.
- [149]WMO, 2013: The World Meteorological Organization's evaluation of meteorological analyses for the radionuclide dispersion and deposition from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. Annex III, ERA/TT-MA-NPP-accident 3rd Meeting 2012. http://www.wmo.int/pages/prog/www/CBS-Reports/documents/WMO_fnpp_final_AnnexIII_4Feb2013_REVISIED_17June2013.pdf
- [150]Yonezawa, C., and Y. Yamamoto, 2011: Measurements of the anthropogenic atmospheric radionuclides by the observational network of radionuclides for nuclear weapons test watch. *Bunseki*, **440**, 451-458 (in Japanese).
- [151]Yukimoto, S., H. Yoshimura, M. Hosaka, T. Sakami, H. Tsujino, M. Hirabara, T.Y. Tanaka, M. Deushi, A. Obata, H. Nakano, Y. Adachi, E. Shindo, S. Yabu, T. Ose, and A. Kitoh, 2011: Meteorological Research Institute-Earth System Model Version 1 (MRI-ESM1) - Model Description. *Technical Reports of the Meteorological Research Institute*, **64**, ISSN 0386-4049, Meteorological Research Institute, Japan, 88pp.
- [152]Yukimoto, S., Y. Adachi, M. Hosaka, T. Sakami, H. Yoshimura, M. Hirabara, T.Y. Tanaka, E. Shindo, H. Tsujino, M. Deushi, R. Mizuta, S. Yabu, A. Obata, H. Nakano, T. Koshiro, T. Ose, and A. Kitoh, 2012: A new global climate model of the Meteorological Research Institute: MRI-CGCM3 -Model description and basic performance. *J. Meteor. Soc. Japan*, **90**, pp.23-64.
- [153]Zhang, L., S. Gong, J. Padro, and L. Barrie, 2001: A size-segregated particle dry deposition scheme for an atmospheric aerosol module. *Atmos. Environ.*, **35**, 549-560.
- [154]Zhang, L., J. R. Brook, and R. Vet, 2003: A revised parameterization for gaseous dry deposition in air-quality models. *Atmos. Chem. Phys.*, **3**, 2067-2082.
- [155]Zhang, Y., and A. M. Baptista, 2008: SELFE: A semi-implicit Eulerian - Lagrangian finite-element model for cross-scale ocean circulation. *Ocean Modelling*, **21**, 71-96.

＜参考資料＞審議経過

平成 26 年 4 月 15 日総合工学委員会原子力事故対応分科会

報告案「東京電力福島第一原子力発電所事故によって環境中に放出された放射性物質の輸送沈着過程に関するモデル計算結果の比較」メール審議

平成 26 年 4 月 1 日 総合工学委員会原子力事故対応分科会 原発事故による環境汚染調査に関する検討小委員会

報告案「東京電力福島第一原子力発電所事故によって環境中に放出された放射性物質の輸送沈着過程に関するモデル計算結果の比較」メール審議

※環境モデリングワーキンググループにおいて 11 回討議した。

平成 26 年 7 月 25 日 日本学術会議幹事会（第 197 回）

報告案「東京電力福島第一原子力発電所事故によって環境中に放出された放射性物質の輸送沈着過程に関するモデル計算結果の比較」について承認

付録 図表

図表の目次

3	領域規模大気輸送モデルの相互比較に関わる図表	38
4	全球規模大気輸送モデルの相互比較に関わる図表	43
5	海洋分散モデルの相互比較に関わる図表	50
6	放出量解析関わる図表	61

付録3 領域規模大気輸送モデル相互比較に関わる主要な図表

付録 表 3.1 本相互比較に参加したモデルおよび研究機関

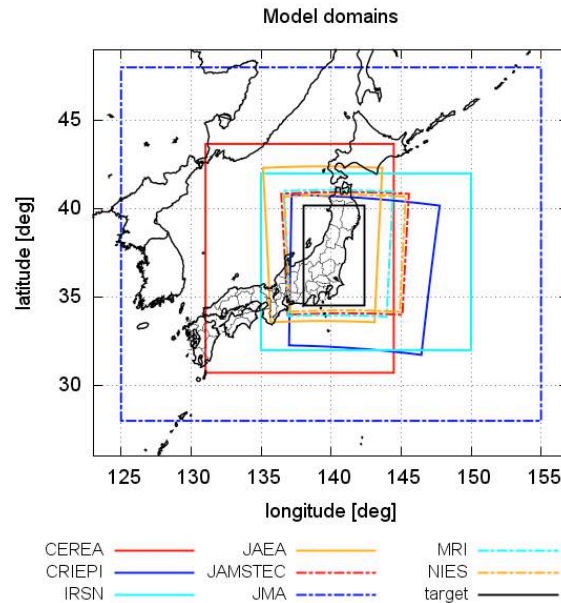
機関名	モデル名	水平解像度	格子数	層数	輸送モデル
CEREA	Polyphemus	約 4 km	270×260	15	Eulerian
CRIEPI	CAMx	5 km	190×180	30	Eulerian
IRSN	IdX	約 10 km	301×201	11	Eulerian
JAEA	GEARN	3 km	227×317	28	Lagrangian
JAMSTEC	WRF-Chem	3 km	249×249	34	Eulerian
JMA-MRI	NHM-LETKF-Chem	3 km	213×257	19	Eulerian
JMA	JMA-RATM	5 km	601×401	50	Lagrangian
NIES	CMAQ	3 km	237×237	34	Eulerian
SNU	ETM	27 km	164×119	25	Eulerian

付録 表 3.2 2011年4月1日0時(世界標準時)までに陸域および海洋表面に沈着した¹³⁷Cs 積算沈着量。単位は PBq。文部科学省航空機観測については2012年5月31日時点での値を示している。各領域における総沈着量は乾性沈着量と湿性沈着量とを合計したもので、そのうちの湿性沈着量の占める割合および各モデルで使用した総放出量に対する各領域への沈着率についてもあわせて示している。

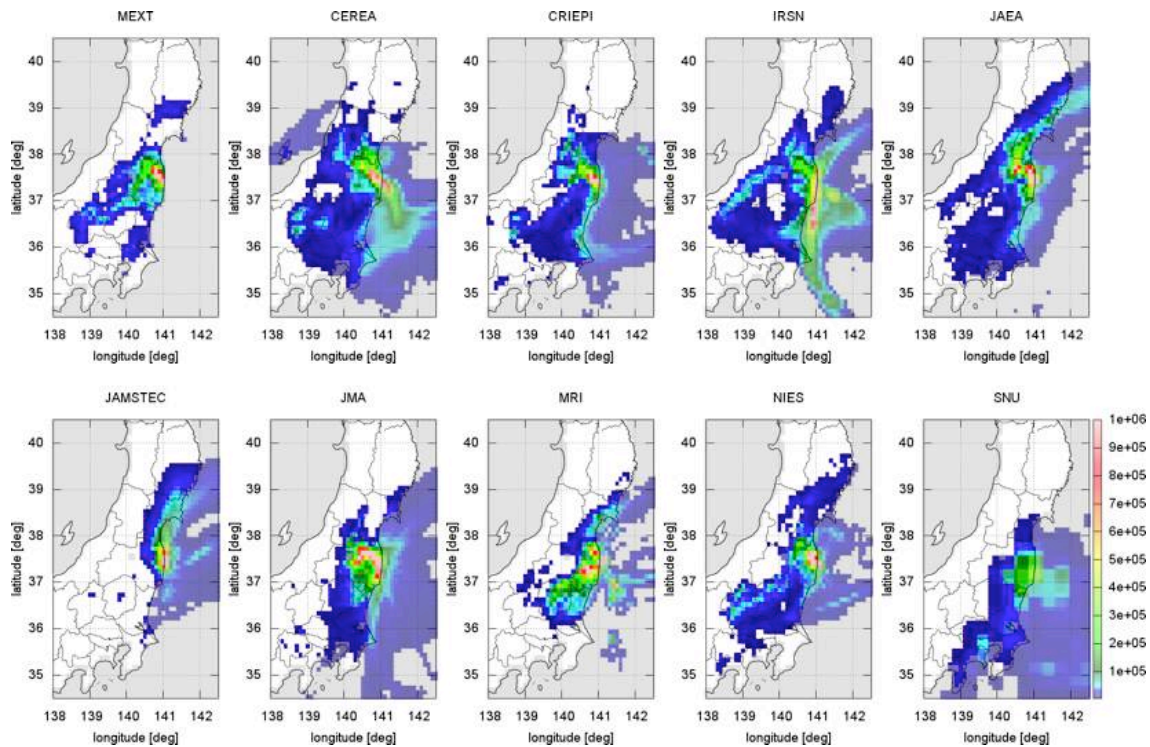
	陸域		海洋表面		対象領域への総沈着量	総放出量
	総沈着量	湿性沈着の割合	総沈着量	湿性沈着の割合		
文科省	2.65		-		-	-
CEREA	3.35(17%)	68%	2.62(14%)	85%	5.97 (31%)	19.3
CRIEPI	2.37 (27%)	79%	0.90 (10%)	54%	3.27 (37%)	8.8
IRSN	3.14 (15%)	46%	5.52 (27%)	71%	8.66 (42%)	20.6
JAEA	3.79 (43%)	67%	1.22(14%)	65%	5.01 (57%)	8.8
JAMSTEC	1.95 (22%)	67%	1.45 (16%)	67%	3.40 (39%)	8.8
JMA	2.65(30%)	50%	1.18 (13%)	36%	3.83(44%)	8.8
MRI	3.31 (38%)	92%	1.72 (20%)	97%	5.03 (57%)	8.8
NIES	2.90(33%)	98%	1.06(12%)	96%	3.96 (45%)	8.8
SNU	1.29 (15%)	32%	1.76 (20%)	36%	3.05(35%)	8.8
平均値	2.75(27%)	67%	1.94(16%)	67%	4.69(43%)	11.3
標準偏差	0.73(10%)	20%	1.36(5 %)	22%	1.68(9 %)	4.6

付録 表 3.3 統計解析による各モデルにおける ^{137}Cs 積算沈着量に対するモデル予測精度検証。 r , FB, FMS, FOEX, %FA2, および KSP はそれぞれ相関、バイアス、性能指数、超過率、ファクター2、Kolmogorov-Smirnov パラメタをそれぞれ示す。Metrics1-4は先述の各統計指標を組み合わせたもので、値が高いほうがモデルによる再現性が高いことを示す。

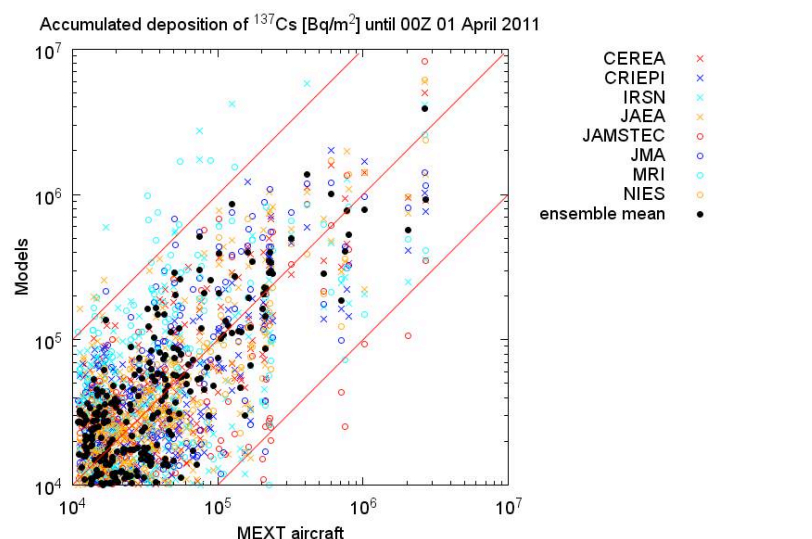
	r	FB	FMS	FOEX	%FA2	KSP	Metric1	Metric2	Metric3	Metric4
CEREA	0.79	0.09	74.32	-8.74	49.45	12.84	3.28	3.03	4.10	4.60
CRIEPI	0.60	-0.25	63.39	-19.95	40.44	22.40	2.85	2.62	3.45	3.85
IRSN	0.39	0.30	63.39	-17.49	38.52	28.69	2.28	2.05	2.99	3.32
JAEA	0.76	0.22	68.85	-8.74	40.16	22.68	3.10	2.81	3.92	4.33
JAMSTEC	0.62	-0.38	26.50	-37.43	13.93	54.37	2.44	2.32	2.70	2.84
MRI	0.49	0.17	45.90	-18.58	18.03	36.34	2.53	2.25	3.16	3.34
JMA	0.68	0.44	49.45	-17.76	27.87	35.79	2.64	2.43	3.29	3.57
NIES	0.85	0.03	68.31	-18.58	57.10	19.13	3.37	3.25	3.99	4.57
SNU	0.27	-0.81	42.08	-26.50	19.40	39.34	2.05	1.83	2.52	2.72
ensemble	0.77	0.04	70.41	-13.56	49.86	22.19	3.22	3.04	3.98	4.49



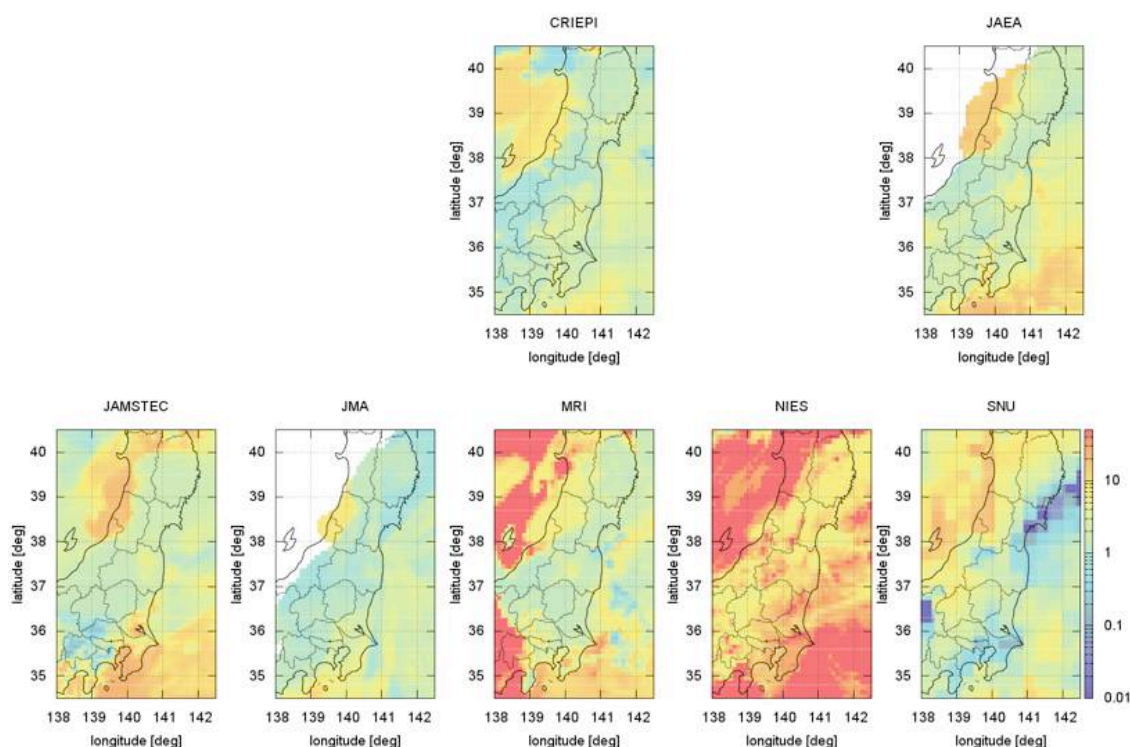
付録 図 3.1 領域大気シミュレーション相互比較に参加した各モデルの計算対象領域。SNU は東アジア域を計算対象領域としており、本図からは省いている。



付録 図 3.2 各モデルを用いて計算された、2011 年 4 月 1 日 0 時(世界標準時)までの ^{137}Cs 積算沈着量の緯度-経度分布図。文部科学省による航空機観測の結果についてもあわせて示す。単位は Bq m^{-2} 。灰色で示された領域は領域気象モデル WRF において海洋が格子面積の 50%を超えると判定された領域を示す。



付録 図 3.3 領域内各格子点における ^{137}Cs 積算沈着量の観測—モデル散布図。横軸は文部科学省航空機観測、縦軸は各参加モデルの同一格子点における積算沈着量を示す。黒丸は全参加モデルによるアンサンブル平均を示す。赤色線はモデル—観測比 10、1、0.1 をそれぞれ示す。



付録 図 3.4 全参加モデルのうち ^{131}I および ^{137}Cs の双方を計算しているモデルにより計算された、2011 年 4 月 3 日 0 時 (世界標準時) における $^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ 積算沈着量比の緯度—経度分布図。配色については Torii et al. (2013) [134] の図 4 を参考にした。比率については 2011 年 4 月 1 日時点の値から ^{131}I の放射性壊変を考慮して推定している。

付録 4 全球規模大気輸送モデルの相互比較に関わる主要な図表

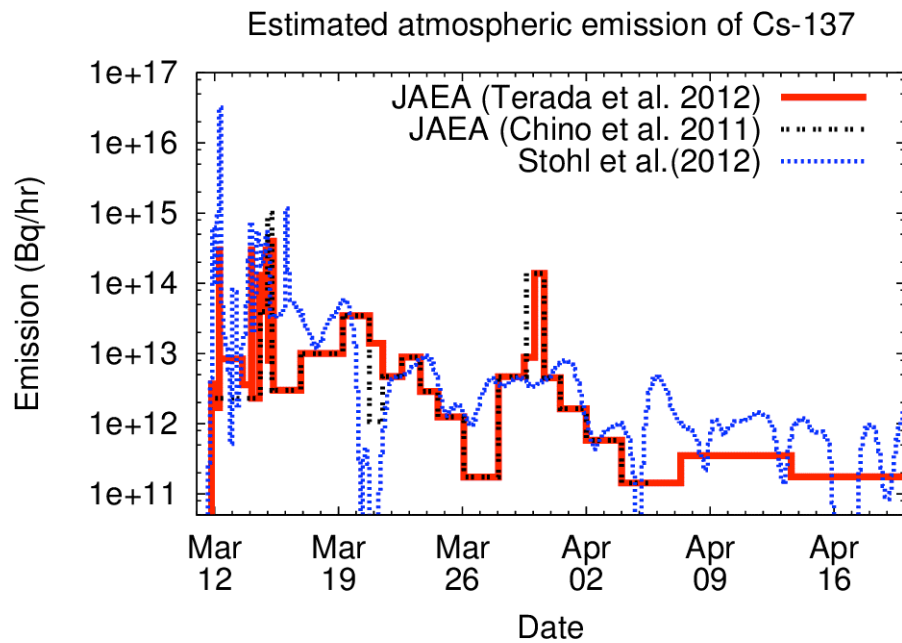
付録 表 4.1 全球規模大気輸送モデル相互比較実験に参加した数値モデルの仕様

Model name	SPRINTARS	MASINGAR mk-2	MASINGAR-1	MPIC/EMAC v1.92	TM5	MRI-PM/r
Institute	Kyushu University	MRI, JMA	MRI, JMA	Cyprus Institute	KNMI	MRI, JMA
Region	Global	Global	Global	Global	Global	Regional
Source term	JAEA (Terada et al. 2012)[133]	JAEA (Terada et al. 2012)[133], Stohl et al.(2012)[116]	JAEA (Terada et al. 2012)[133], Stohl et al.(2012)[116]	JAEA (Chino et al. 2011)[19], Stohl et al.(2012)[116]	JAEA (Terada et al. 2012)[133]	JAEA (Terada et al. 2012)[133]
Resolution (grids)	T213 (640×320)	TL319 (640×320)	T106 (320×160)	T106 (320×160), T255 (768×384)	3° × 2° (120×90)	60km (234×120)
Layers	20 (~8hPa)	40 (~0.4hPa)	30 (~0.4hPa)	31 (~10hPa)	60	20 (~10km)
Eulerian or Lagrangian	Euler	Euler	Euler	Euler	Euler	Euler
Dynamics	Online (MIROC)	Online (MRI-AGCM3)	Online (MRI/JMA 98)	Online (ECHAM5)	Offline (ECMWF)	Offline (WRFv3)
Meteorological Analysis	NCEP reanalysis, nudging technique	JCDAS (extended, near real time JRA-25), Newtonian nudging technique	JCDAS (extended, near real time JRA-25), Newtonian nudging technique	ECMWF ERA-Interim (for nudging dynamics only, precipitation is model generated)	ECMWF Operational Data	NCEP FNL analysis, grid nudging technique

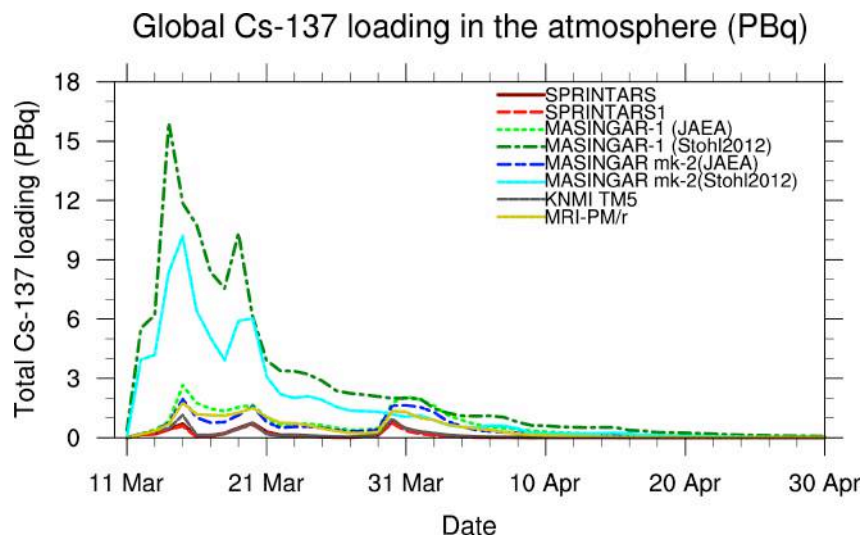
付録 表 4.2 シミュレーションによる 2011 年 3 月 31 日までの ^{137}Cs の総沈着量および湿性の乾性沈着量と総沈着量に対する乾性沈着量の割合。

		Total Deposition [PBq]	Total wet Deposition [PBq]	Total dry Deposition [PBq]	Wet/Total ratio[%]
SPRINTARS		8.33	7.30	1.03	87.6
SPRINTARS1		8.42	7.43	0.99	88.2 [†]
MASINGAR (JAEA)	mk-2	7.06	6.93	0.13	98.2
MASINGAR (Stohl)	mk-2	34.61	34.08	0.53	98.5 [†]
MASINGAR-1 (JAEA)		6.63	6.45	0.18	97.3
MASINGAR-1 (Stohl)		32.87	31.97	0.90	97.3 [†]
EMAC T255 (JAEA)		5.46	5.10	0.36	93.4
EMAC T255 (Stohl)		34.58	33.13	1.45	95.8 [†]
EMAC T106 (JAEA)		5.49	5.24	0.25	95.4
EMAC T106 (Stohl)		34.27	32.74	1.53	95.5 [†]
KNMI TM5 (JAEA)		8.28	8.28	0.0	100.0 [†]
MRI-PM/r		4.45	3.85	0.6	86.5
ensemble mean		15.87	15.21	0.72	93.4
standard deviation		13.51	13.19	0.49	4.6

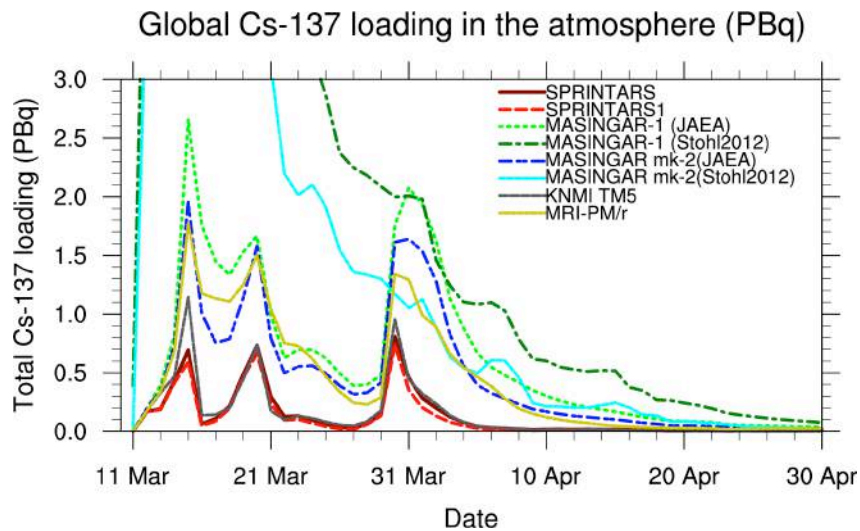
†: アンサンブル計算からは除く



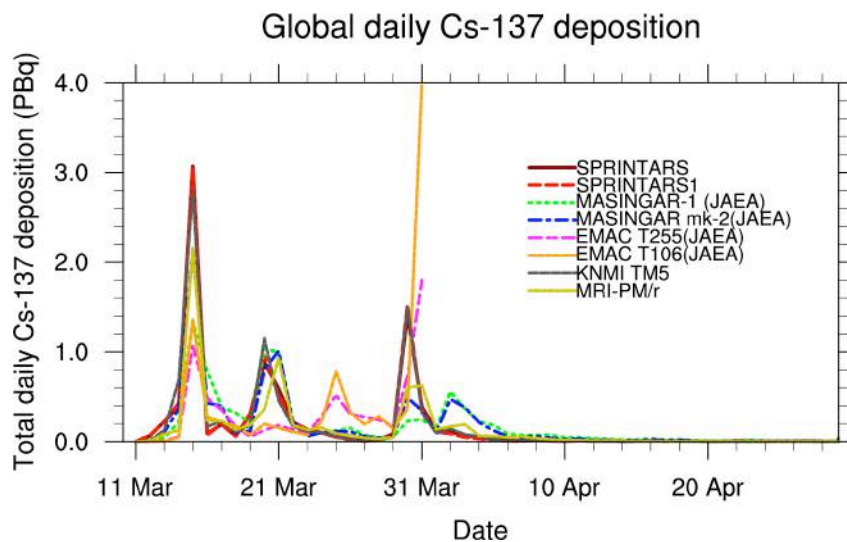
付録 図 4.1 全球規模大気輸送モデル比較実験に用いられた ^{137}Cs 放出量推定値の時系列変化の比較。



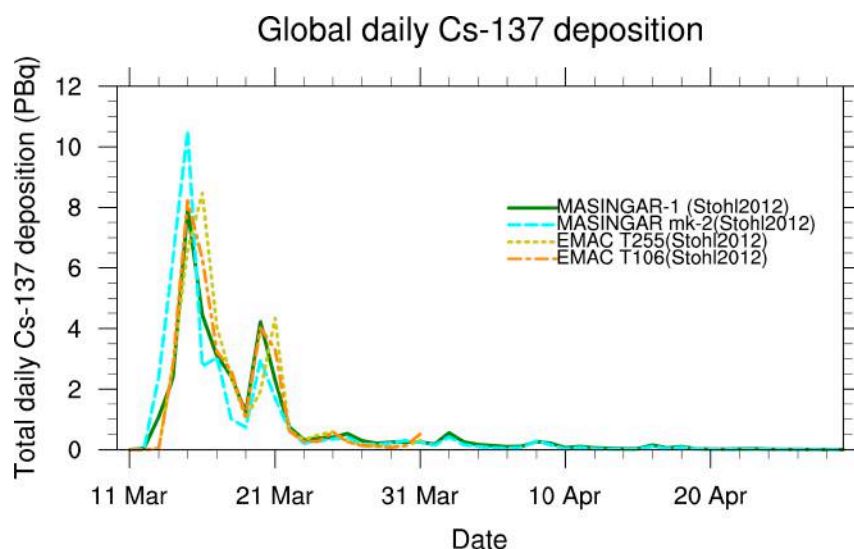
付録 図 4.2a 全球規模大気輸送モデル比較実験に参加したシミュレーションによる ^{137}Cs 全球大気滞留総量の時系列変化。



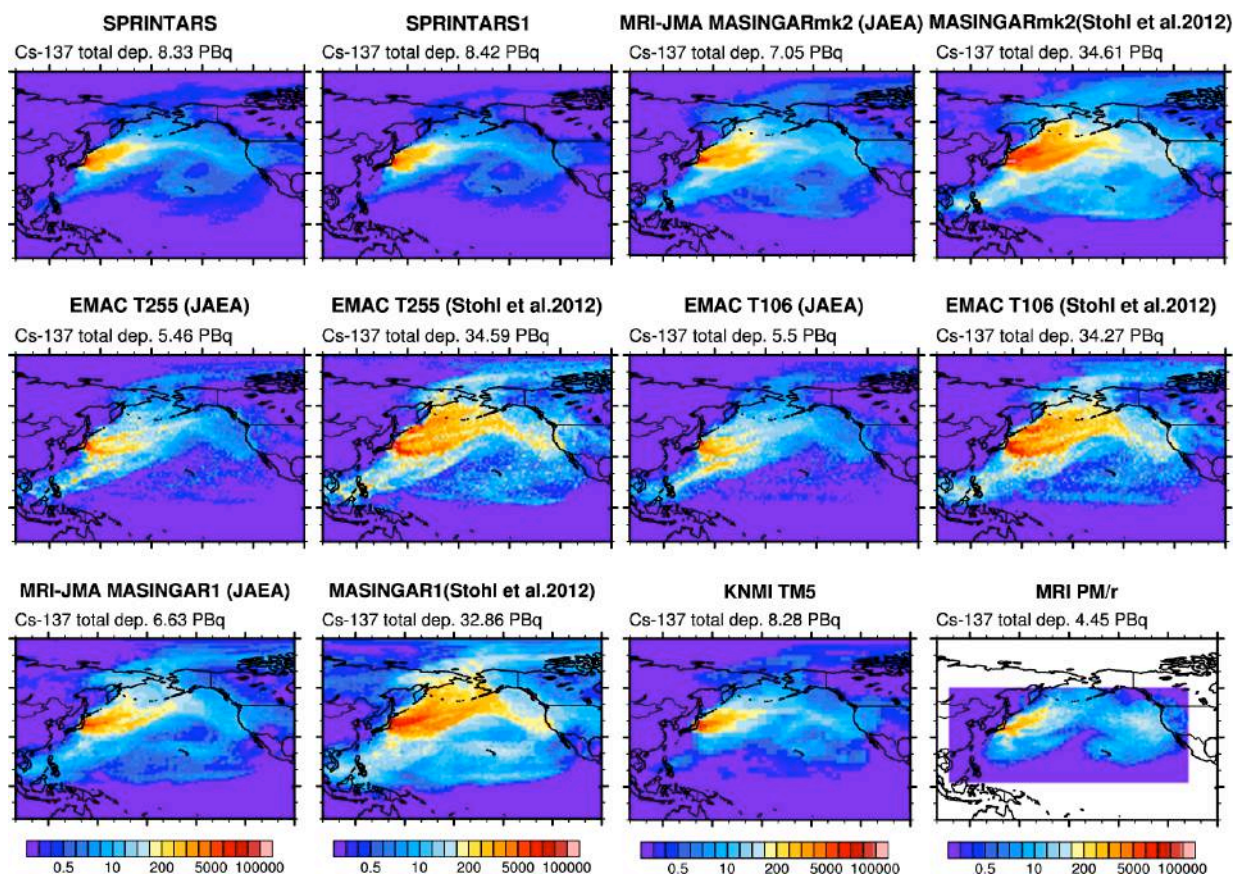
付録 図 4. 2b 4. 2a と同じ図で、JAEA の放出量推定値を用いたシミュレーションを比較するために縦軸を拡大したもの。



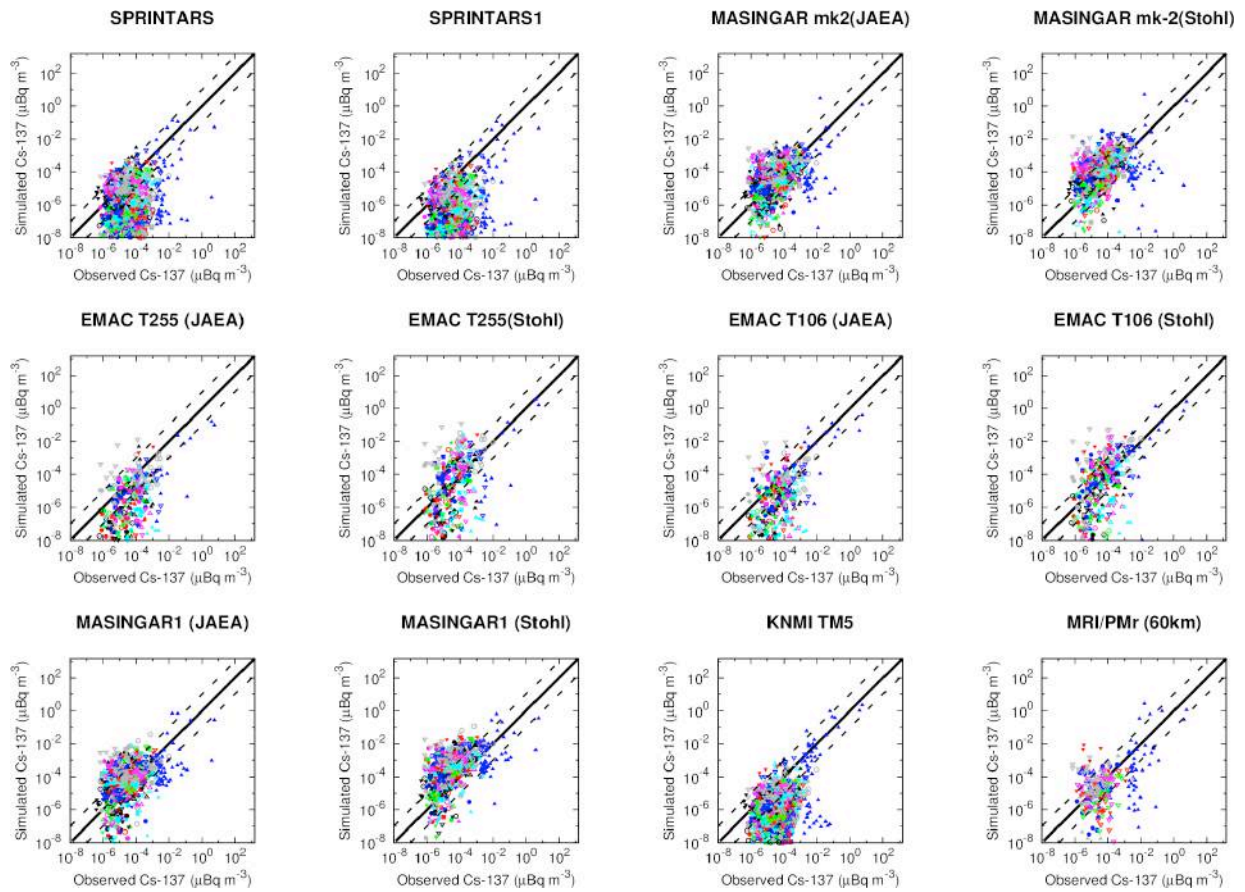
付録 図 4. 3a JAEA(Chino et al. 2011; Terada et al. 2012) [19] [133] の放出量推定値を用いたシミュレーションの日別全球層沈着量の時系列変化の比較。



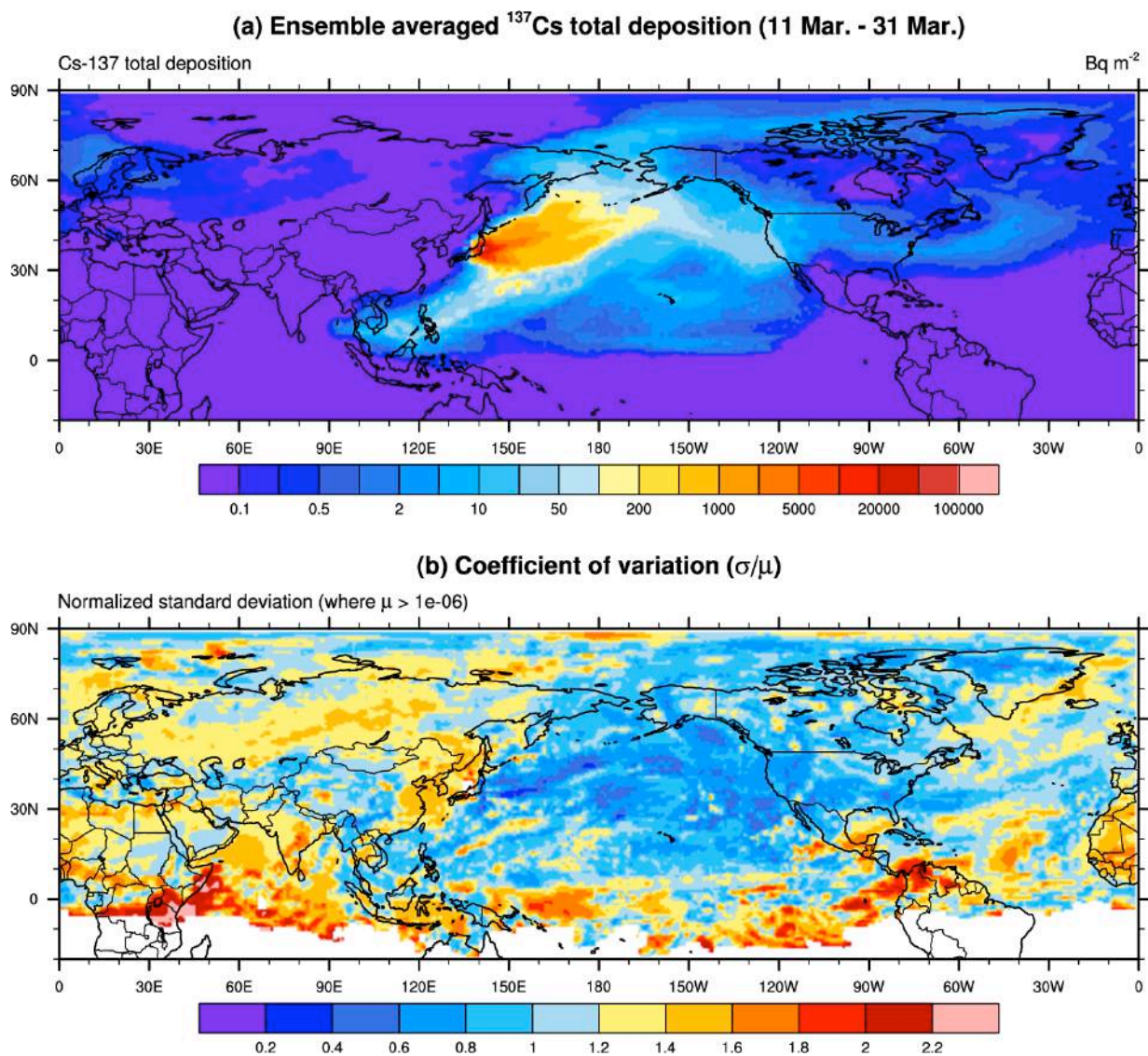
付録 図 4.3b Stohl et al. (2012) [116]の放出量推定値を用いたシミュレーションの日別
 全球層沈着量の時系列変化。



付録 図 4.4 参加したシミュレーションによる 2011 年 3 月 11 日から 31 日までの ^{137}Cs 沈
 着積算量の水平分布。単位は Bq m^3 。EMAC および MASINGAR モデルについては放出量推定
 値(JAEA, Stohl et al. 2012) [116]を変えた実験についてもあわせて示す。使用した数
 値モデルの詳細については表 4.1 を参照のこと。



付録 図 4.5 ^{137}Cs 大気中濃度の観測とシミュレーションの比較散布図。中央の太実線は 1 対 1、上下の破線はファクター10の過大・過小評価を示している。

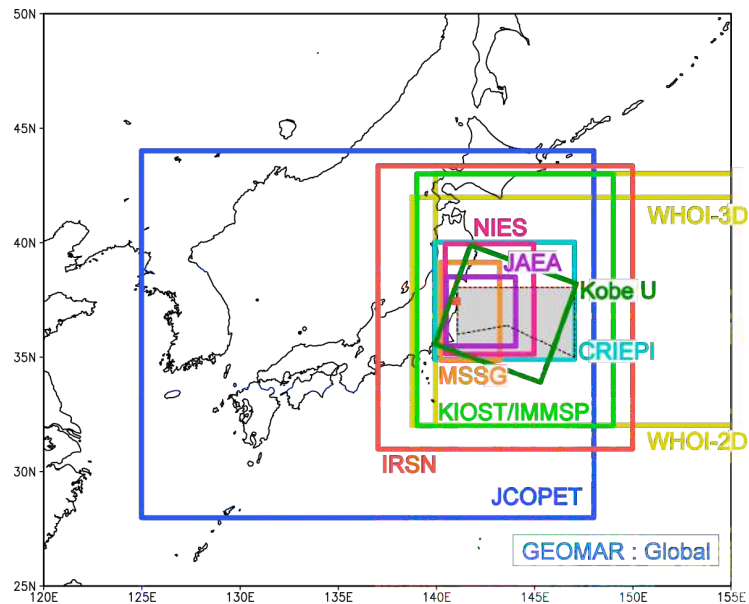


付録 図 4.6 参加したシミュレーションによる 2011 年 3 月 31 日までの ^{137}Cs 沈着積算量の
(a) アンサンブル平均、および (b) 変動係数。

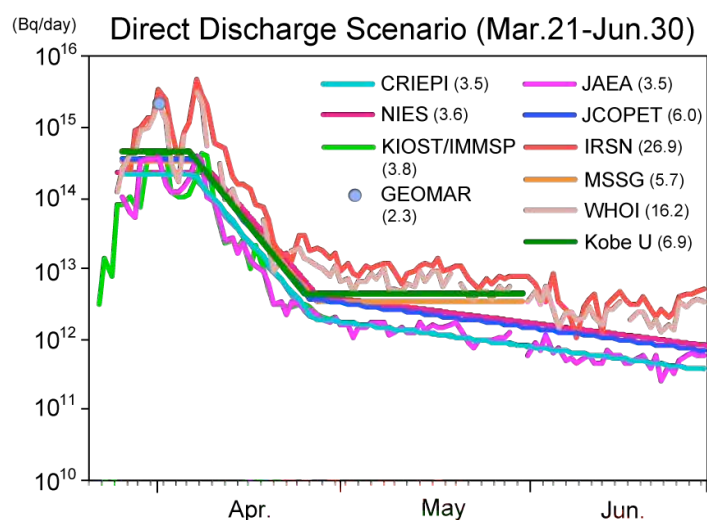
付録5 海洋分散モデル相互比較に関わる主要な図表

付録 表 5.1. モデルの仕様

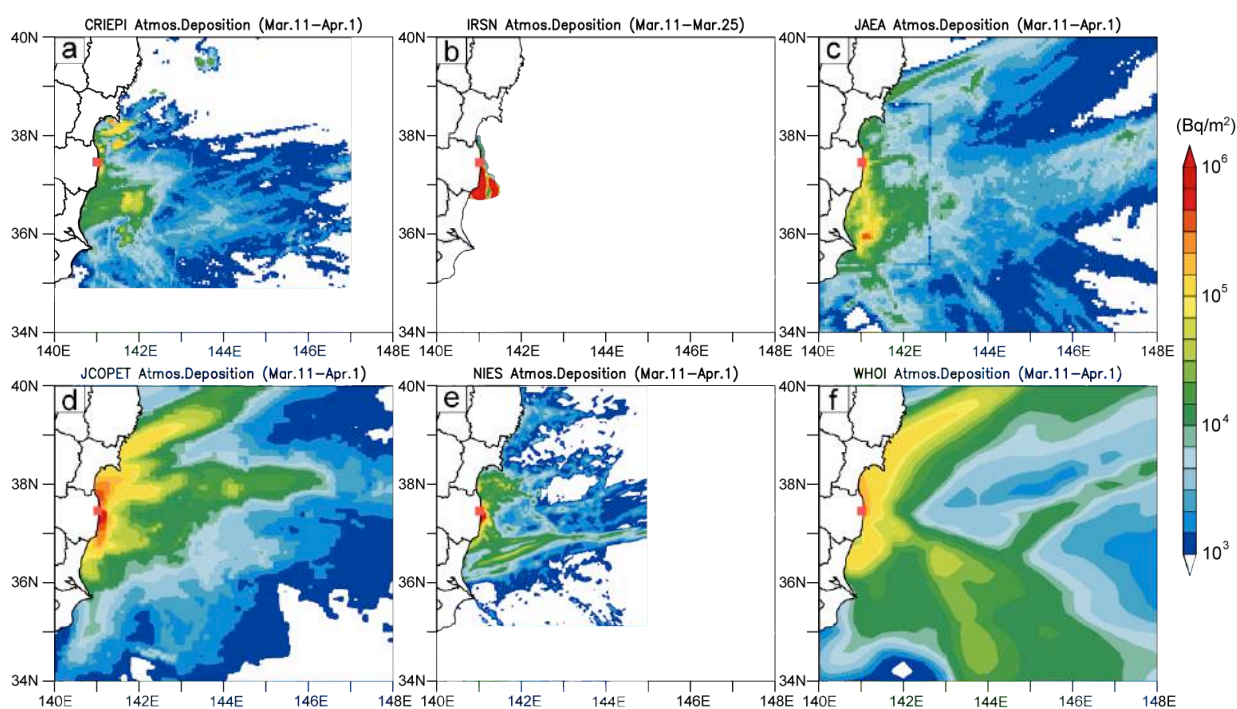
モデル名	格子間隔(度)	格子数	分散モデル タイプ	大気からの 降下	直接流入 シナリオ	備考
CRIEPI	1/120 x 1/120	855 x 615	移流拡散	CRIEPI	CRIEPI 型 (3.5PBq)	
GEOMAR	1/8 x 1/10	480 x 284	移流拡散	N/A	瞬時放出 (2.3PBq)	2011年の状況に近い場を再現した1993年のECMWFの外力による結果 (Dietze and Kriest, 2012) [25]
IRSN	1/48 x 1/60	623 x 743	移流拡散	IRSN pX	IRSN (26.9PBq)	風応力補正実験結果
JAEA	1/54 x 1/72	191 x 218	粒子追跡	JAEA	JAEA 型 (3.5PBq)	
JCOPET	1/36 x 1/36	830 x 578	移流拡散	JAMSTEC	CRIEPI 型 (6.0PBq)	
KIOST/IIMMSP	1/60 x 1/60	601 x 661	移流拡散	N/A	JAEA 型 (3.8PBq)	非構造格子モデルの結果を緯度経度格子へ変換
Kobe U	1 km x 1 km	512 x 512	移流拡散	N/A	CRIEPI 型 (6.9PBq)	モデル領域は福島沿岸に沿うように回転した座標系
MSSG	1/55.6 x 1/55.6	168 x 239	粒子追跡	N/A	CRIEPI 型 (5.7PBq)	
NIES	1/20 x 1/20	91 x 97	移流拡散	NIES	CRIEPI 型 (3.6PBq)	
WHOI-2D	1/10 x 1/10	351 x 111	粒子追跡	Stohl et al. (2012)	JAEA 型 (16.2PBq)	衛星海面高度データから地衡流を計算
WHOI-3D	1/10 x 1/10	170 x 101	粒子追跡	N/A	JAEA type (16.2PBq)	NCOM のデータを使用



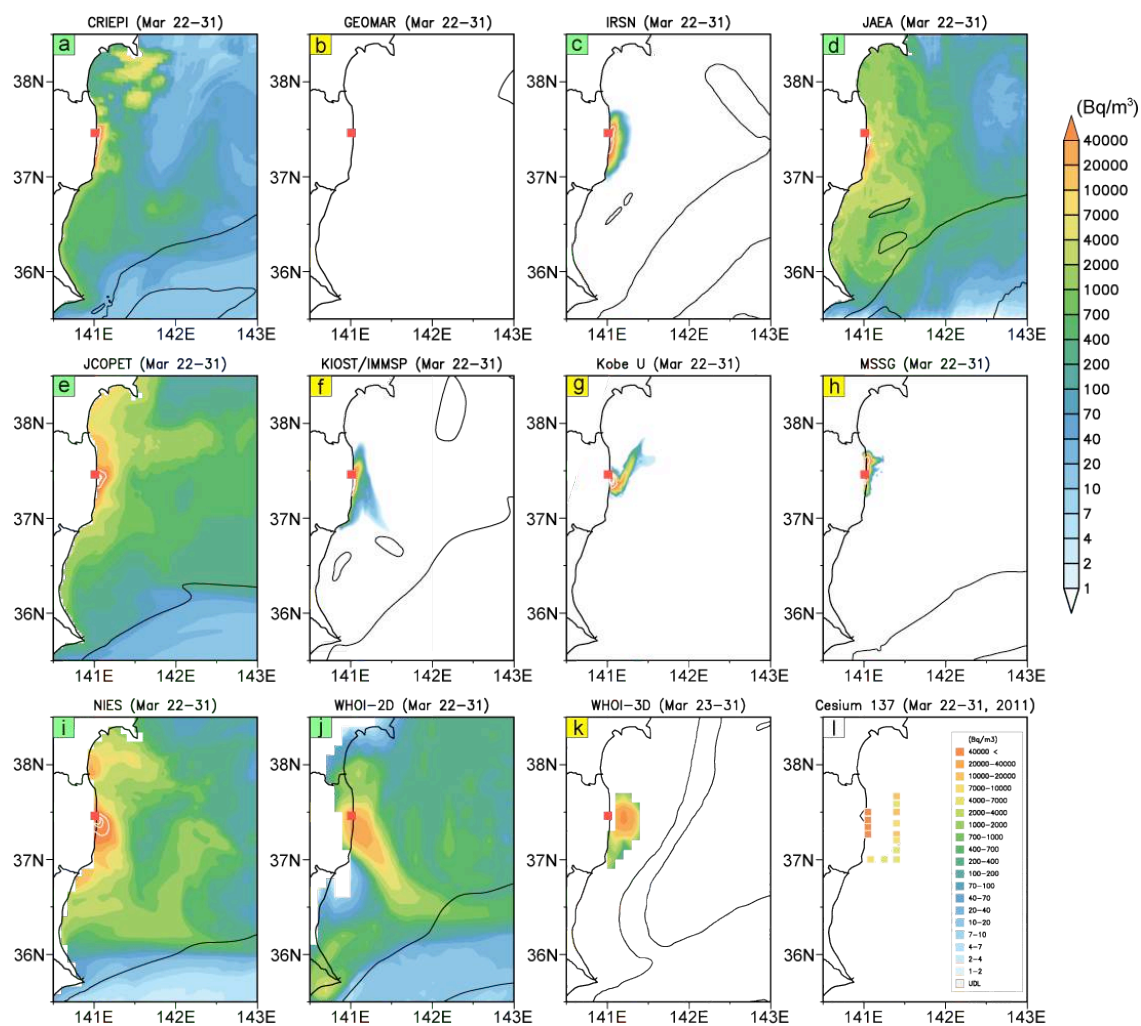
付録 図 5.1 モデル比較に参加したモデルの領域。赤四角印は第一原発の位置を示す。細い黒点線で囲まれた多角形領域は、研究船 KOK 航海によって観測された海域 (Buessler et al., 2012) [14]を、また灰色の四角領域はモデル内で KOK 航海結果と比較する際に用いた領域を示す。



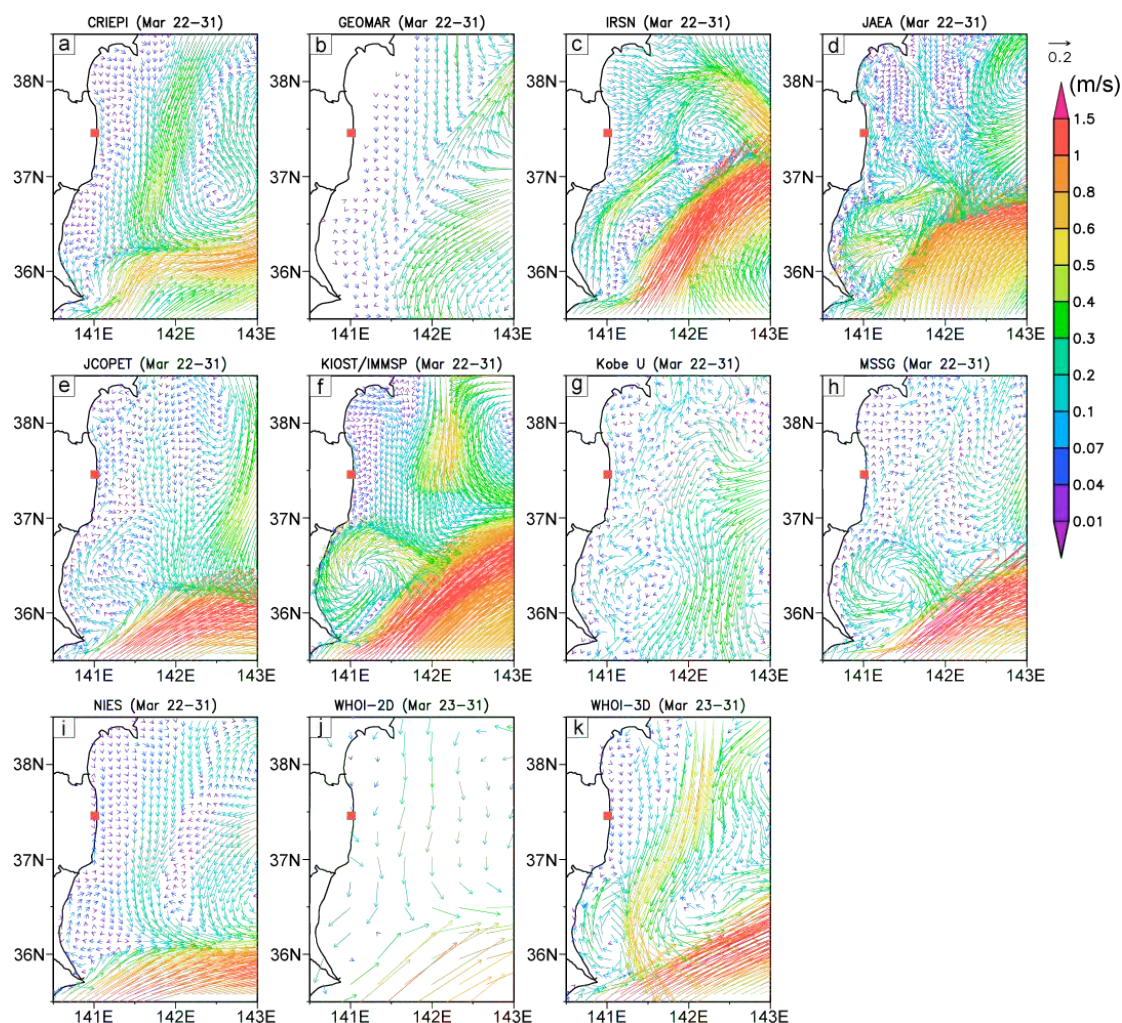
付録 図 5.2 第一原発から直接海洋へ流入した ^{137}Cs の 2011 年 3 月 21 日から 6 月 30 日までの流入シナリオ。凡例にある括弧内の数字は、各モデルでの ^{137}Cs の流入総量を表す(単位: PBq)。



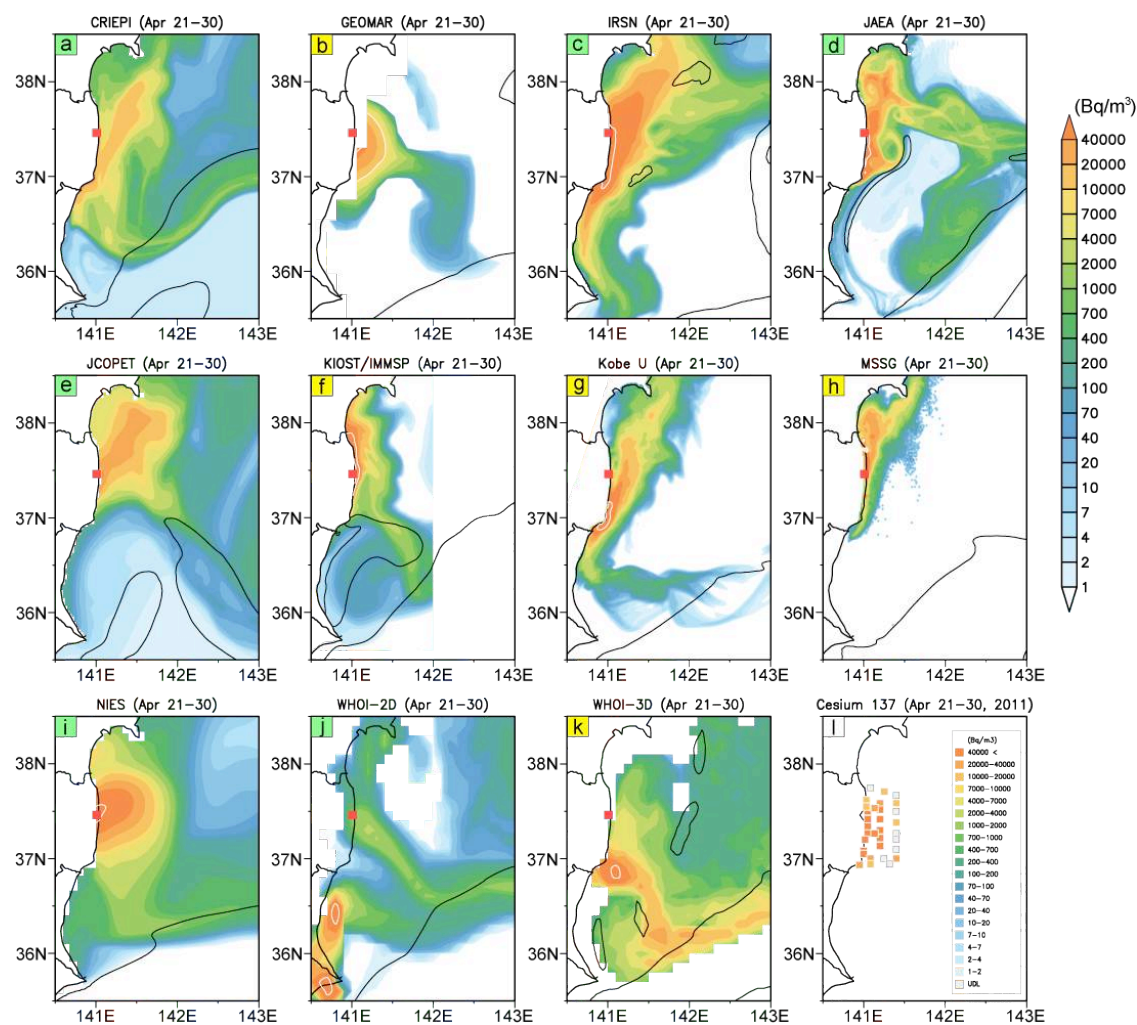
付録 図 5.3 2011 年 3 月 11 日から 4 月 1 日までの ^{137}Cs の大気降下分総量。(a) CRIEPI, (b) IRSN, (c) JAEA, (d) JCOPET, (e) NIES, および (f) WHOI の各モデルで用いた分布。海洋上での値のみ描画。ただし、IRSN の場合は 3 月 11 日から 25 日の期間のみの総量。WHOI-2D および WHOI-3D モデルでは、同じ (f) の降下量を使用。



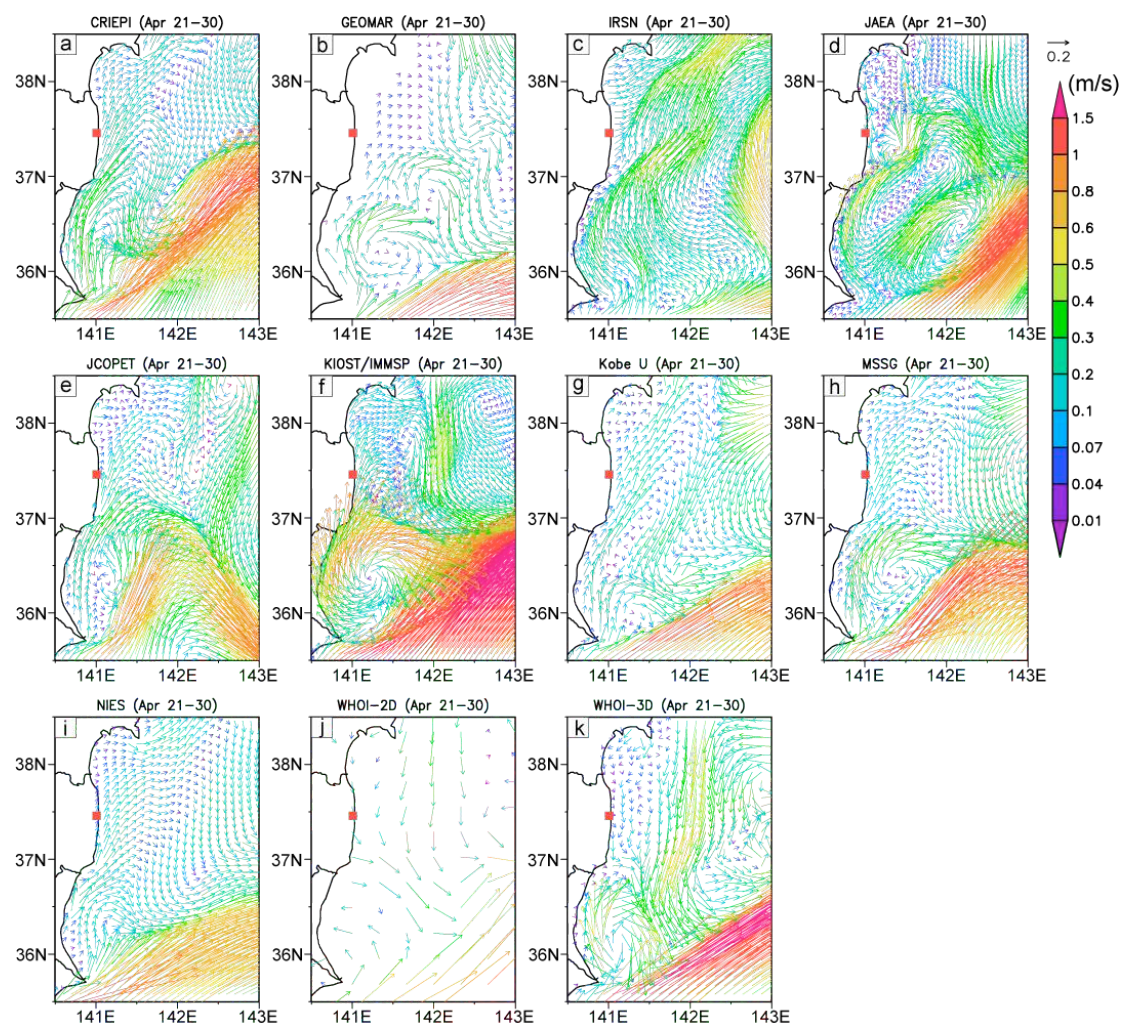
付録 図 5.4 (a)–(k) 2011 年 3 月 22 日から 31 日の 10 日平均した海面での ^{137}Cs 濃度の空間分布。各モデル名はそれぞれの図の上部に記載。赤四角印は第一原発の所在を表す。黒実線は海面流速の大きさが毎秒 0.5 m を超えた領域を示しており、黒潮やほかの主だった流れの境界を表す。各パネルを表すアルファベットの背景が緑(黄)のものは大気降下の影響を考慮した(考慮していない)モデルであることを示す。(l) 同じ期間に得られたモニタリング観測による ^{137}Cs 濃度分布。



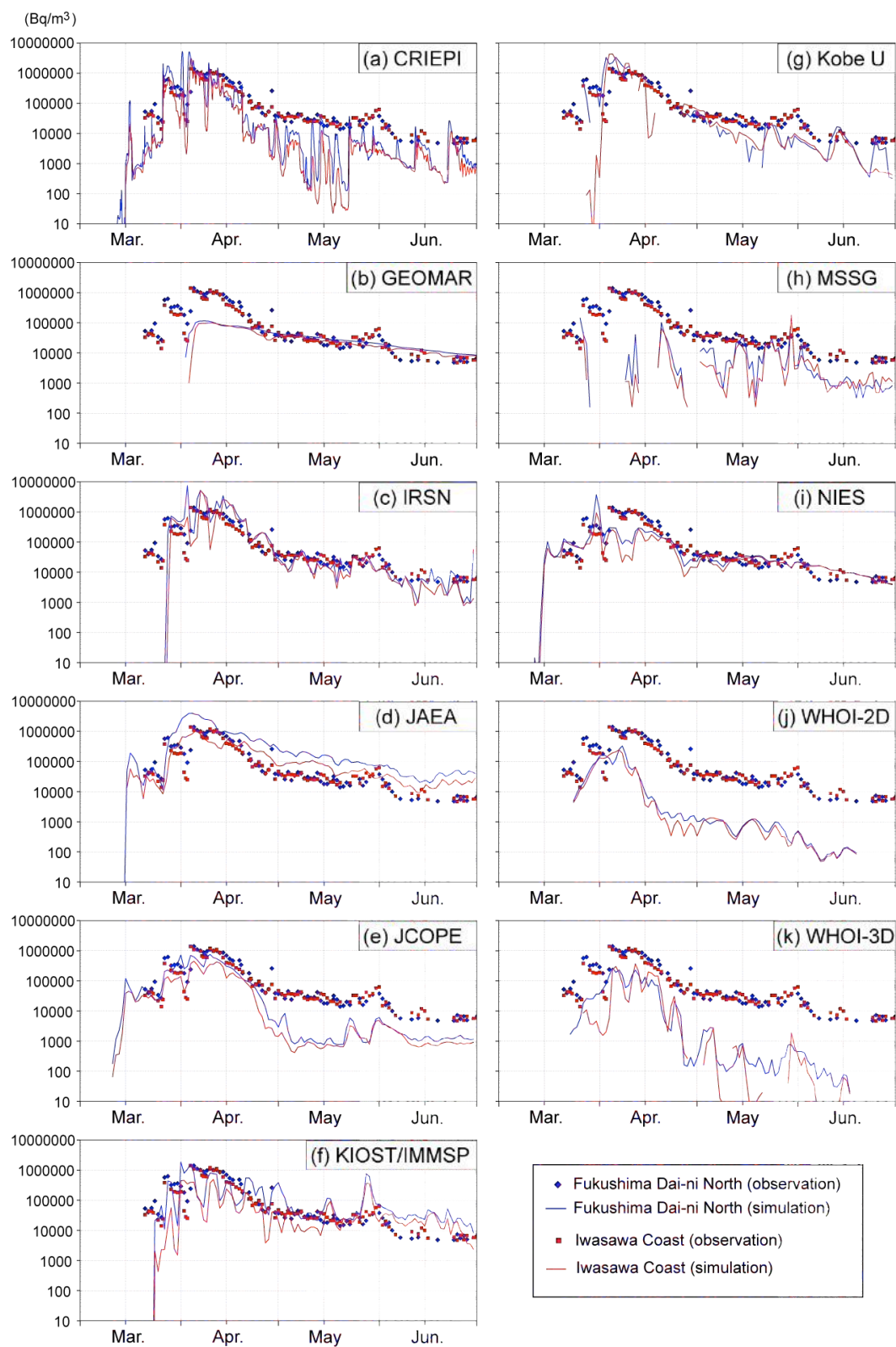
付録 図 5.5 (a)–(k) 2011 年 3 月 22 日から 31 日の 10 日平均した海面流速分布。各モデル名はそれぞれの図の上部に記載。赤四角印は第一原発の所在を表す。WHOI-2D は人工衛星から観測された海面高度データを用いて地衡流計算により得られた分布。GEOMAR モデルは 1993 年の ECMWF 客観解析データを外力として用いており、2011 年の海洋の状況に近い場が再現されている (Dietze and Kriest, 2012) [25]。



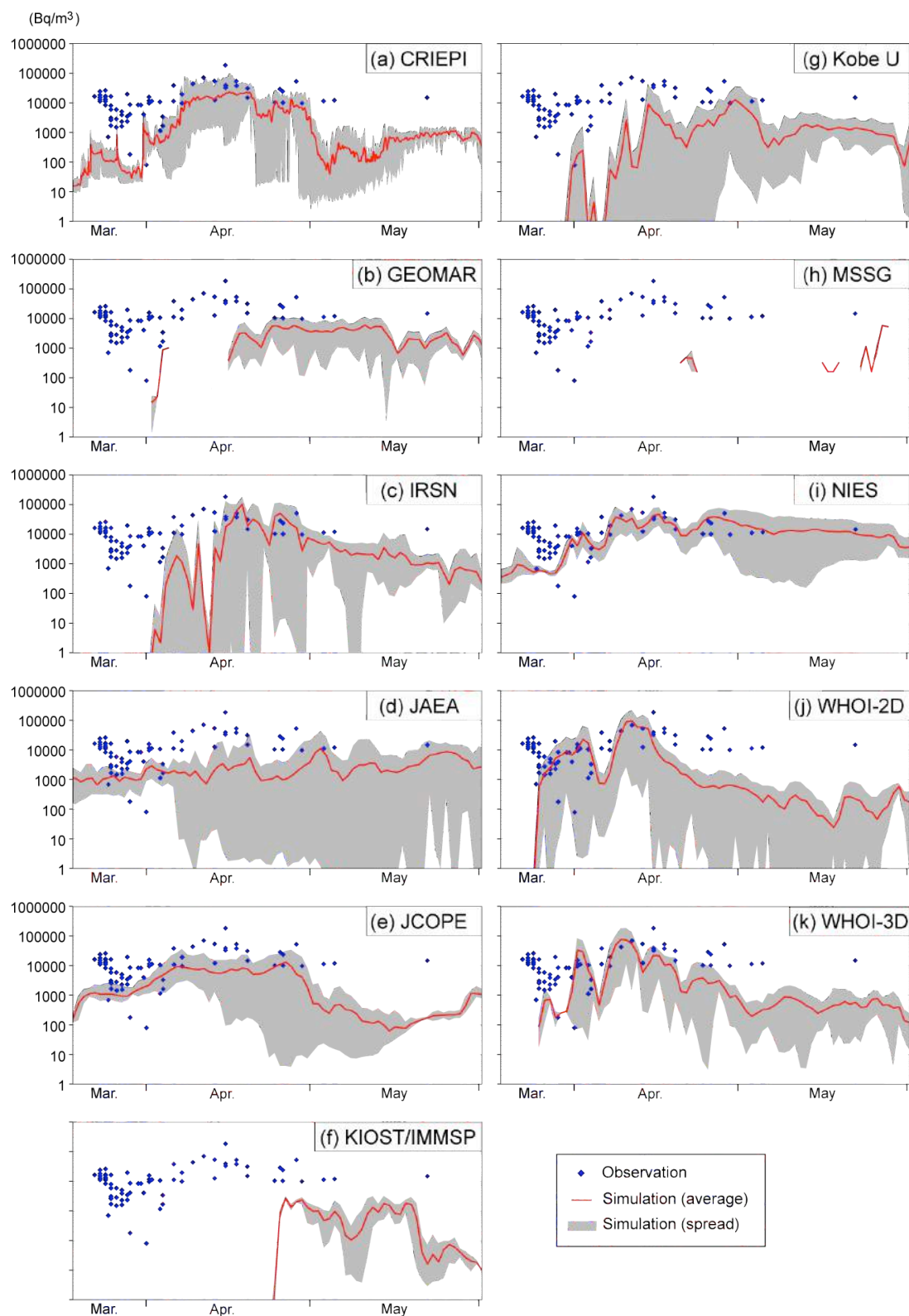
付録 図 5.6 図 5.4 と同様。ただし、2011 年 4 月 21 日から 30 日の 10 日平均分布を示す。



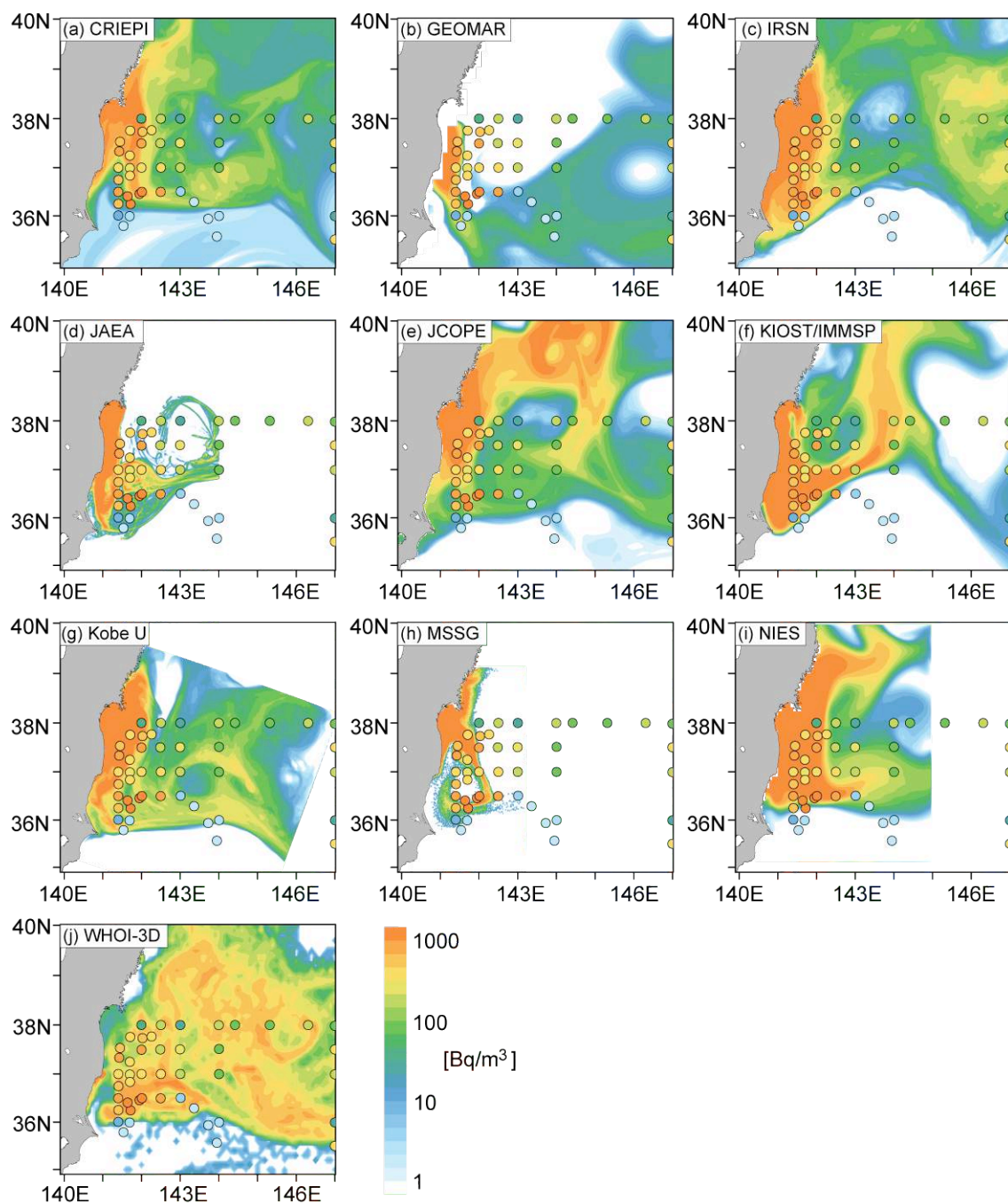
付録 図 5.7 図 5.5 と同様。ただし、2011 年 4 月 21 日から 30 日の 10 日平均分布を示す。



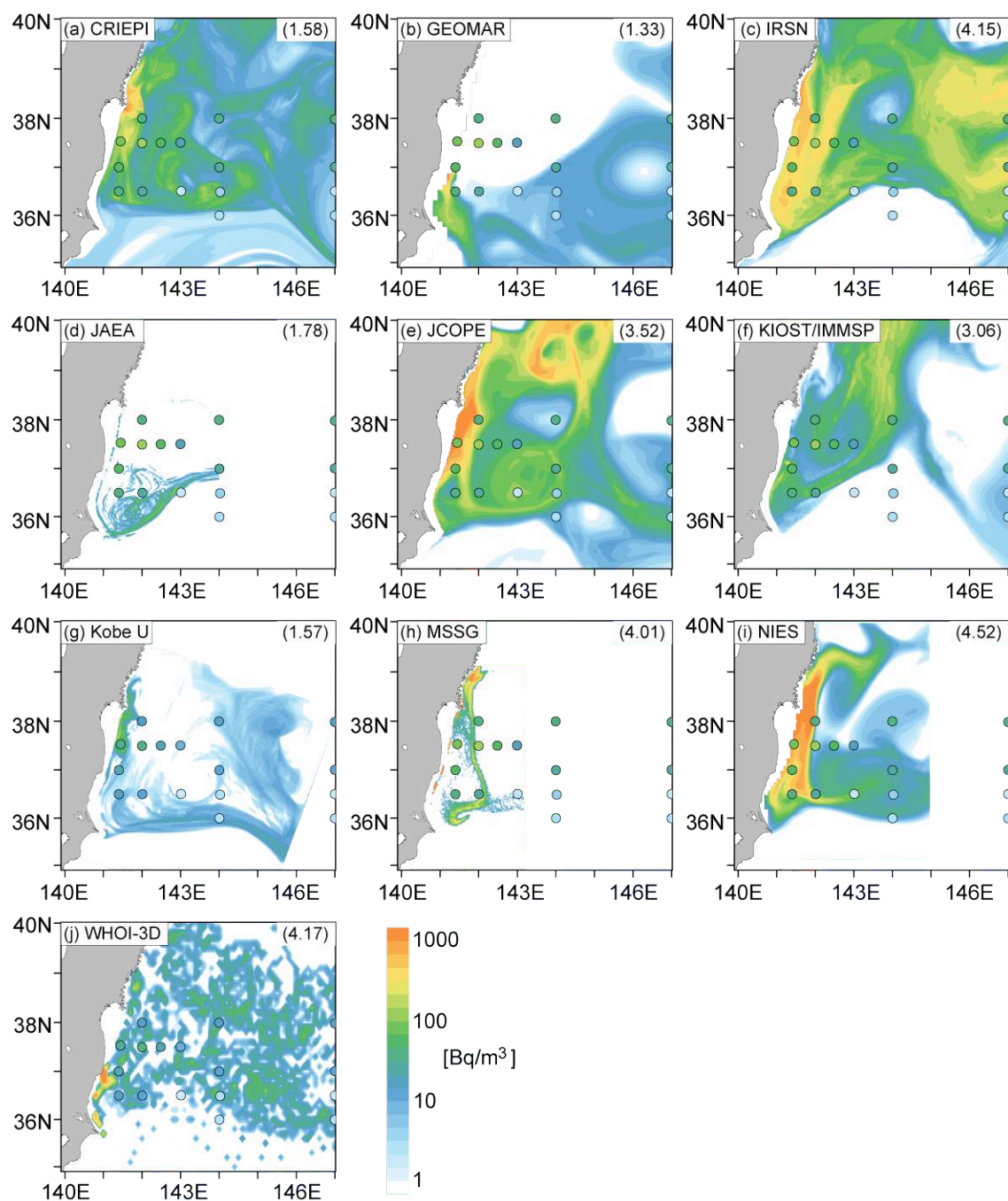
付録 図 5.8 2011 年 3 月から 6 月にかけての第二原発および岩沢海岸付近での ^{137}Cs 濃度の時系列図。モニタリング観測結果は青菱形と赤四角印で表し、モデルの結果を細い実線で示す(青：第二原発付近、赤：岩沢海岸)



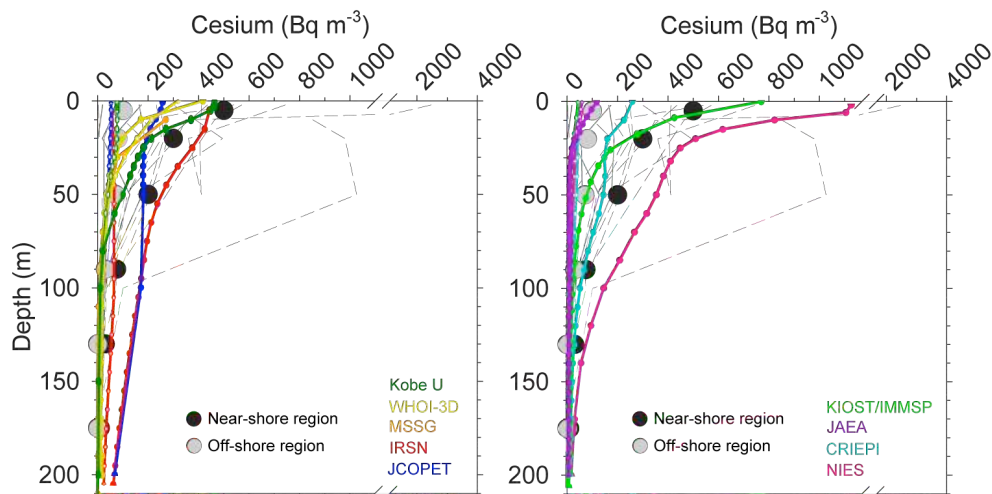
付録 図 5.9 2011 年 3 月 18 日から 6 月 1 日までの、第一原発の沖合 30 km にあるモニタリング観測線での ^{137}Cs 濃度の時間変動。観測線上の 10 地点での観測値を菱形印で示し、モデルにより得られた 10 地点の値を平均した時系列を黒実線で示す。灰色の影の領域は、各モデルの 10 地点の値のバラツキ範囲を表している。



付録 図 5.10 2011 年 6 月 8 日から 18 日の期間で平均した海面での ^{137}Cs 濃度の水平分布。
観測値を丸印で、モデルの結果をカラーマップで表す。なお、観測値もモデル結果と同じ
カラースケールを用い、丸印の内部を色表示している。



付録 図 5.11 図 10 と同様。ただし 100 m 深の水平分布。各パネルの右上にある括弧内の数字は、それぞれのモデルでの KOK 観測領域における海面から 200 m 深までの ^{137}Cs 存在量(インベントリ)を表す(単位：ペタベクレル)。

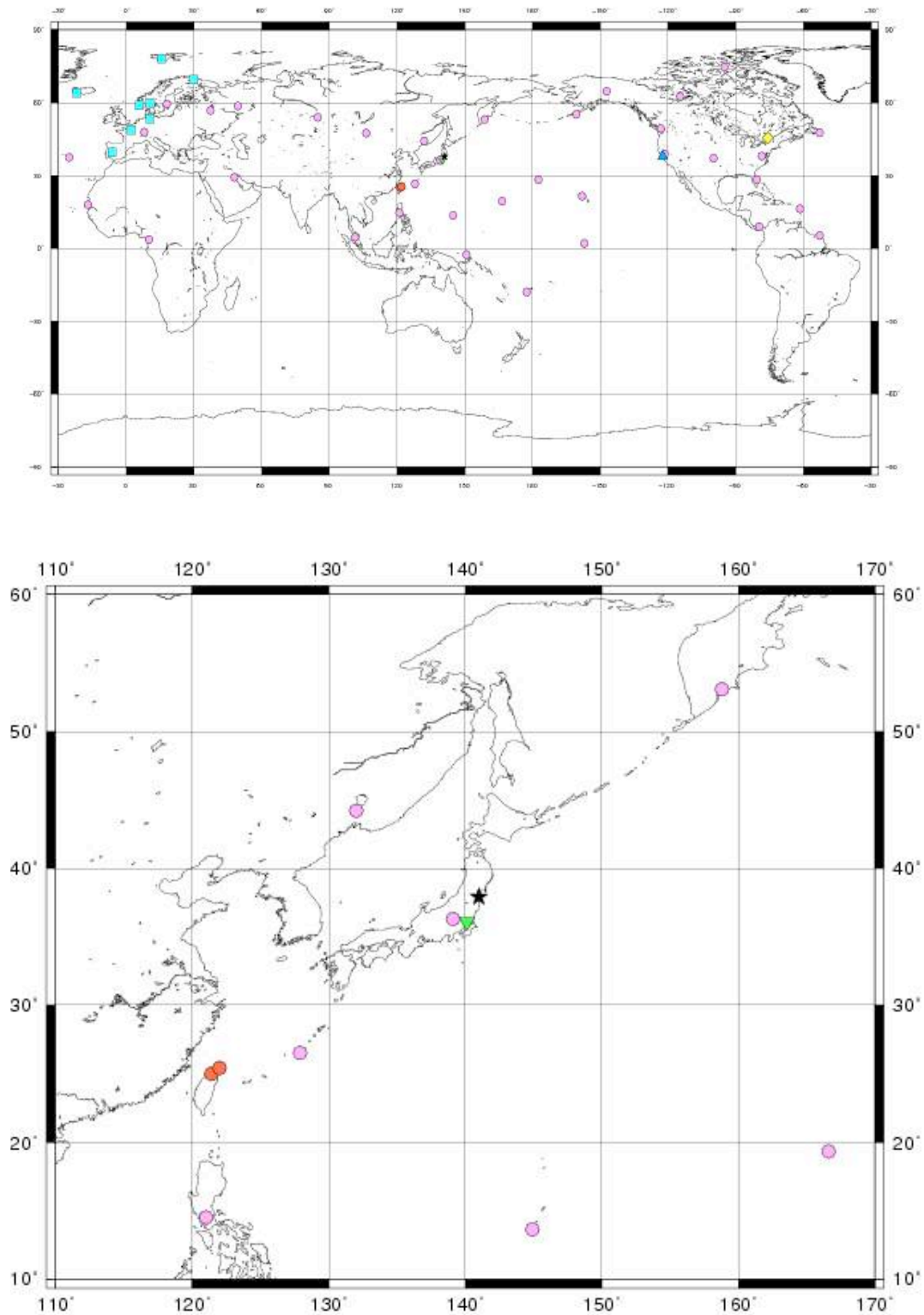


付録 図 5.12 KOK 観測領域で平均した ^{137}Cs 濃度の鉛直分布。黒および灰色の丸印は KOK 観測によって得られた ^{134}Cs の値を示し、黒は沿岸に近い海域、灰色は沖合海域での値 (Buesseler et al., 2012[14] より)。各モデルの結果は、沖合海域で平均した鉛直分布は中空の丸印の付いた実線で、また沿岸に近い領域で平均した鉛直分布は塗りつぶした丸印の付いた実線あるいは点線でそれぞれ示している。なお、左図と右図で観測値は同じものを示している。比較として用いた Buesseler et al. (2012) [14] には ^{137}Cs の鉛直分布図の記載が無いが、2011 年 6 月の対象海域における ^{134}Cs と ^{137}Cs の濃度比はほぼ 1 であることから、ここでは ^{134}Cs の鉛直分布を比較対象として用いた。

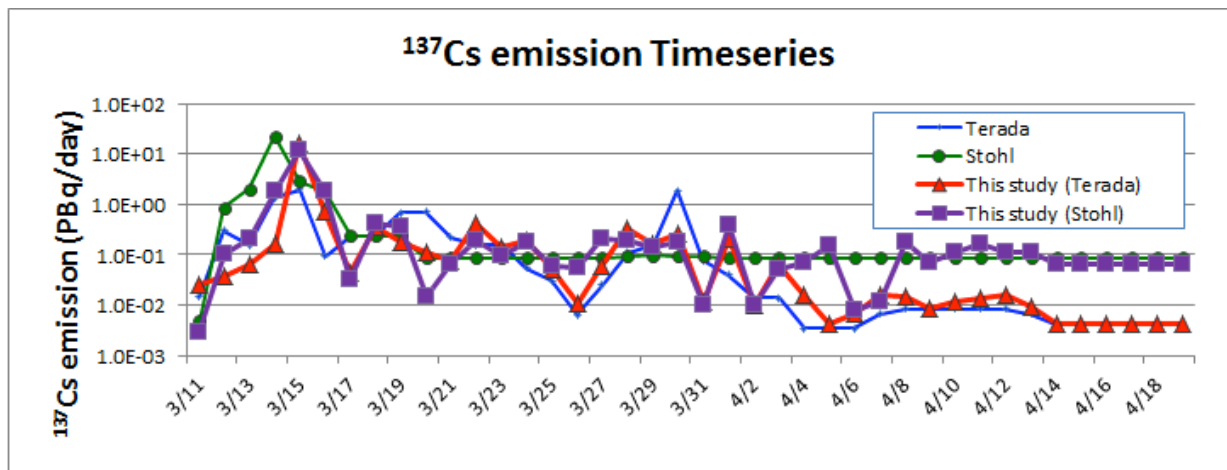
付録6 放出量解析に関わる主要な図表

付録 表 6.1 第一原発からの総 ^{137}Cs 放出量推定値一覧

文献	全大気フ ラックス F_A	範囲	陸域沈 着量 2.65PBq の対 F_A 比(%)	期間	手法
This study	19.4	16.4-22.4	13.7	3/11-4/19	Cs137 conc.; Global Eulerian model + Inversion
MEXT (2011)[86] and Chino et al. (2011)[19]	15.5	14-17	17.1		From obs. and numerical model analysis Cs137 conc and sea surface conc.; Regional Lagrangian model, oceanic dispersion simulation + Reverse method
Kobayashi et al. (2013)[64]	13.0	—	20.4	3/12-3/20	Gamma dose ratio obs.; Regional Eulerian model + Inversion.
Saunier et al. (2013)[104]	15.5	—	17.1	3/11-3/27	Cs137 conc.; Global Lagrangian model + Inversion
Stohl et al. (2012)[116]	36.6	20.1-53.1	7.2	3/10-4/20	Cs137 conc.; Regional Lagrangian model + Reverse method
Terada et al. (2012)[133]	8.8	—	30.1	3/10-3/31	Cs137 conc and sea surface deposition; Regional Eulerian model + Inversion.
Winiarek et al. (2014)[147]	15.5	11.6-19.3	17.1	3/11-3/26	
平均±標準偏差(σ)	17.8 ±8.2		17.5±6.4		
平均から 2 σ 以内データ	14.6±3.2		19.2±5.2		



付録 図 6.1 薄紫円は CTBT0 の、水色四角、青色正三角、赤色丸、緑色逆三角、黄色菱形はそれぞれ RING OF FIVE、カリフォルニア大、台湾中央研究院、気象研究所、Ian Hoffman 氏提供の観測所の位置を示す。黒色星は福島第一原子力発電所の位置を示す。上図は世界全体で下図は日本付近の拡大図を示す。



付録 図 6.2 第一原発から放出された ^{137}Cs 放出時系列。青線、緑線、赤線(太線)、紫線(太線)はそれぞれ寺田先験情報、Stohl 先験情報、逆解析後の推定値(寺田先験値)、逆解析後の推定値(Stohl 先験値)を示す。

付録 用語解説

CTBTO	包括的核実験禁止条約機関
WMO 報告書	国連の世界気象機関(WMO)が出す世界の気象に関する報告書
WRF	Weather Research and Forecast の略で、アメリカ大気研究局(NCAR)を中心として開発された領域気象モデル
アンサンブル平均	ある時点で取り得る状態の集団をアンサンブル(統計集団)という。ここでは、比較実験に参加したシミュレーションモデルによって得られた結果をアンサンブルとみなし、それぞれのモデルによるある時点での結果の集合的な平均を求めたものをアンサンブル平均としている
移流拡散スキーム	下流側へ流れに乗って微粒子などが流れるのを移流といい、分子運動と流れの乱れなどで微粒子が空間的に広がるのを拡散という。これらをコンピュータ上で計算する枠組み
インベントリ	商品などの目録の意味であるが、蓄積量や放出総量などの意味に用いられる
雲微物理	水蒸気が水(もしくは氷、あられその他)粒子となる過程、およびそれに伴う降水過程をモデル化したもの
オイラー型・オイラー型モデル	空間を小ブロックに分け、それぞれの小ブロックの中の物理量が時間とともにどう変わっていくか計算するような方法(ラグランジュ型参照)
海洋分散モデル	複雑な海洋の水温、塩分、海流の状態とその変動を表現する数値モデル
乾性沈着	地表面付近の放射性物質が大気乱流や重力沈降により地表面に沈着する状態を指す(湿性沈着参照)
化学輸送モデル	大気微量成分の空間分布と変動を再現する数値モデルで、大気中で生じる化学反応による微量成分の生成・消滅と輸送の効果を同時に計算できるモデル
気象庁モデル	ここでは MASINGAR mk-2 のこと(第 6 章参照)
気象庁メソスケールモデル	気象庁が日々の天気予報のために用いている領域を区切ってその範囲内でのみ計算をする数値モデル(ここではその解析場も含む)
逆推計・逆推計手法	通常の数値モデルなどでは原因から結果の順に計算が行われるが、結果と過程を計算する数値モデルを用いて原因を推定する手法のこと
凝集モード粒子	大気中にみられるエアロゾルのうち、粒径が $0.2\mu\text{m}$ 程度の粒

	子。重力による降下の影響はあまり大きくなく、大気中にはおよそ数日から数週間の長期間浮遊し、乾性もしくは湿性沈着によって大気中から除去される
クロロフィル濃度	植物プランクトンに含まれる葉緑体の量の分布。人工衛星からは海色観測データを用いて推定される
経験則ベースモデル	事象の物理的・化学的意味を数式化するのではなく、過去の観測結果などを説明するための数式に基づくモデル
高時間分解能シナリオ	イベント的放出などを説明しうる、放出量変動の細やかな時間変化を考慮した放出シナリオ
現業運用	業務としてしかるべき機関によって運用されること
現業モデル	業務(天気予報など)として運用されている数値モデルのこと
湿性沈着・湿性沈着過程	粒子状の放射性物質が雨滴の核になったり、降雨に付着して雨とともに地表に落ちる状態を指す(乾性沈着参照)
積雲対流	水蒸気の凝結を伴う対流活動のこと。積乱雲の発生に伴い降雨や上昇流・下降流による物質の輸送が生じる
セミ・ラグランジュ型モデル	オイラー型とラグランジュ型を組み合わせたモデルのこと。計算する領域はある大きさの格子で覆うが、輸送過程に関しては風上に向かって出発点を計算する
全球規模大気輸送モデル	地球全体を計算領域とするモデルのこと。計算する領域を区切るモデルは領域モデルと呼ぶ
先験情報	逆解析をする際に、不自然な解とならないように与えるあらかじめわかっている情報のこと
総観規模攪乱	高・低気圧などの数日間程度の時間スケールをもつ大気場の乱れ
タグ付シミュレーション	逆推計をする際に、放出源(今回の場合は放出期間)が観測データに与える寄与を判別するため放出源ごとに輸送モデルによる実験を区別して行うこと
同化手法(同化する)	数値シミュレーションを行う際に、観測データがある場所と時間でシミュレーション結果と観測値との差を考慮して、観測値に近づくようにシミュレーション結果を補正する手法
プロセスベースモデル	現象の物理的な理解をもとに作成したモデルのこと
ベイズ統合逆解析	観測データとタグ付シミュレーションの結果を、単に観測データとモデルの結果を合うようにするのではなく、先験情報からのズレをも小さくなるように解析値を求める方法のこと

放出シナリオ	時系列で大気へ放出した量を推定したもの(付録図 4. 1)、および時系列で第一原発から直接海洋へ流入した量を推定したもの(付録 5. 2 図)
モデルアンサンブル	複数のモデルによる推定結果を統計処理し、予測不確実性を低減させる技術
輸送	環境中で放射性物質が大気中や海洋中で流動・拡散などにより移動していくことをいう
輸送モデルのバイアス	気象場などの初期値および側面境界における誤差、およびモデル自身の誤差などにより、輸送モデルの予測結果に含まれる誤差の事
ラグランジュ型・ラグランジュ型粒子追跡法・ラグランジュ輸送モデル・ラグランジュ型大気拡散モデル	
力学過程	流体を粒子の集まりとみなし、それぞれの粒子の位置が変わっていくのを追いかけるような計算の方法(オイラー型参照) 大気の流れに関する運動方程式、大気および水蒸気の質量保存、熱力学収支など大気の流れの時間変化をモデル化したもの。それ以外の要因による大気場の変化は物理過程と呼ばれる
流動モデル	大気における気象モデルのように、海流の流れを計算するための数値モデル
領域気象モデル	気象庁メソスケールモデルのように、特定の領域を計算対象として大気場の時間変化を計算する数値モデル
領域規模大気輸送モデル	特定の領域を計算対象とし、大気汚染物質、放射性物質などの大気微量成分の大気中における移流、拡散、沈着（および放射性物質であれば壊変）などを計算する数値モデル（参照: 全球規模大気輸送モデル）

付録 略語集

モデルの略号

ETM	ソウル国立大学の領域規模大気輸送モデル
EMACT255	地理座標系で約 0.5 度の解像度 (T255) で適用した大気化学-全循環モデル
EMAC T106	EMAC の解像度を変更した (T106; およそ 1 度) もの
FLEXPART	全球移流拡散モデルでノルウェー大気研究所のモデル
IRSN-IFREMER	フランス放射線防護原子力安全研究所の海洋分散モデル
JCOPET	プリンストン海洋分散モデルを基として日本沿岸域の海洋変動予測研究のために構築された高解像度の沿岸域海洋入れ子モデル
1dX	フランス放射線防護原子力安全研究所の大気輸送モデル
KNMI TM5	オランダ王立気象研究所の全球規模大気輸送モデル
KIOST/IMMSP	韓国海洋科学技術研究所とウクライナ科学院計算機およびシステム問題研究所が協力して開発した海洋の放射性物質分散モデル
GEARN	日本原子力研究開発機構で開発された、ラグランジュ型大気輸送モデル
MASINGAR-1	気象庁気象研究所のモデル
MASINGAR mk-2	気象庁気象研究所のモデル
MPIC/EMAC	キプロス研究所の全球規模大気輸送モデル
MRI-PM/r	気象庁気象研究所の領域規模大気輸送モデル
MSSG	JAMSTEC・地球シミュレータセンターで開発された大気海洋結合モデル
NHM-LETKF-Chem	気象庁気象研究所の領域規模大気輸送モデル
JMA-RATM	気象庁の領域規模大気輸送モデル
SPEEDI	日本原子力研究開発機構の放射性物質を対象とした大気拡散予測システム
SPRINTARS	九州大学の全球規模大気輸送モデル
SPRINTARS1	九州大学の全球規模大気輸送モデル
CAMx	電力中央研究所が相互比較に使用した領域規模大気輸送モデル
WRF-Chem	海洋研究開発機構が相互比較に使用した領域規模大気輸送モデル
CMAQ	国立環境研究所が相互比較に使用した領域規模大気輸送モデル

Polyphemus フランス大気環境研究センターの領域規模大気輸送モデル
これらのモデル名のほかに機関の名前もモデル名として用いられている

機関の略語

CEREA	Centre d'Enseignement et de Recherche e Environnement Atmosphérique(フランス大気環境研究センター)
CRIEPI	電力中央研究所
DOE/NNSA	米国エネルギー省国家安全保障局
GEOMAR	Research Center for Marine Geosciences(ドイツ海洋地球科学 研究センター)
IMMSP	Institute of Mathematical Machine and System Problems(ウク ライナ科学院計算機およびシステム問題研究所)
IRSN	Institut de Radioprotection et Sûreté Nucléaire(フランス放 射線防護原子力安全研究所)
JAEA	日本原子力研究開発機構
JAMSTEC	海洋研究開発機構
JMA	気象庁
JMA-MRI	気象庁気象研究所
KIOST	Korea Institute of Ocean Science and Technology(韓国海洋科 学技術研究所)
KNMI	オランダ王立気象研究所
Kobe U	神戸大学
KOK	米国ハワイ大学所属の海洋観測船 Ka'imikai-o-Kanaloa
NIES	国立環境研究所
NILU	ノルウェー大気研究所
SNU	Seoul National University(ソウル大学校)
WHOI	Woods Hole Oceanographic Institution(米国ウッズホール海洋 研究所)

付録 各モデルの詳細など

目	次
付録 3A. 領域規模大気輸送モデル相互比較に参加した各モデルの概要	71
3A. 1. Centre d'Enseignement et de Recherche en Environnement Atmosphérique (CEREA)	71
3A. 2. 電力中央研究所 (CRIEPI)	71
3A. 3. Institut de Radioprotection et Sûreté Nucléaire (IRSN)	72
3A. 4. 日本原子力研究開発機構 (JAEA)	72
3A. 5. 海洋研究開発機構 (JAMSTEC)	73
3A. 6. 気象庁 (JMA)	73
3A. 7. 気象庁気象研究所 (JMA-MRI)	74
3A. 8. 国立環境研究所 (NIES)	74
3A. 9. Seoul National University (SNU)	75
付録 4A. 全球規模大気輸送モデルの相互比較に参加した各モデルの概要	76
4A. 1. SPRINTARS	76
4A. 2. MASINGAR-1 および MASINGAR mk-2	77
4A. 3. EMAC	77
4A. 4. KNMI TM5	78
4A. 5. Meteorological Research Institute - Passive-tracers Model for radionuclides (MRI-PM/r)	78
付録 4B. 比較に用いた観測データ	79
4B. 1. 大気中濃度データ	79
4B. 2. 沈着量データ	79
付録 5A. 海洋分散モデル相互比較に参加した各モデルの 概要	80
5A. 1. CRIEPI	80
5A. 2. GEOMAR	81
5A. 3. IRSN-IFREMER	82
5A. 4. JAEA	83
5A. 5. JCOPET	83
5A. 6. KIOST/IMMSP	84
5A. 7. Kobe University	85
5A. 8. MSSG	85
5A. 9. NIES	86
5A. 10. WHOI-2D	87

5A. 11. WHOI-3D	87
付録 5B. ^{137}Cs の海面での水平分布図	88
5B. 1. 海面における 10 日平均 ^{137}Cs 分布図	89
5B. 2. 10 日平均海面流速分布図	95
付録 5C. 人工衛星観測にみられる茨城沖の高気圧性渦	101
付録 5D. 福島沿岸域での放射能の航空機観測結果	103

付録 3A. 領域規模大気輸送モデル相互比較に参加した各モデルの概要

3A.1. Centre d'Enseignement et de Recherche en Environnement Atmosphérique (CEREA)

第一原発事故に関する放射性物質シミュレーションには、化学輸送モデル[†]Polar3D を用いた。Polar3D は Polyphemus モデルプラットフォーム上で利用可能なオイラー型モデルである。放射性物質に関しては、アルヘシラスおよびチェルノブイリにおける放射性物質の大気中への漏洩事故の再計算やモデル間相互比較プロジェクトである European Tracer Experiment (ETEX) に参加し、検証を行っている (Quélo et al., 2007) [97]。

モデル内では ^{137}Cs および ^{131}I をトレーサーとして扱い、放射性壊変についても考慮している。各々の放射性壊変における時定数はそれぞれ 11,000 日および 8.04 日である。乾性沈着は一定速度を与えており、 ^{137}Cs の乾性沈着速度は $v^{\text{dep}} = 0.2 \text{ cm s}^{-1}$ 、 ^{131}I の乾性沈着速度は $v^{\text{dep}} = 0.5 \text{ cm s}^{-1}$ としている。湿性沈着による洗浄率 Λ^s は Brandt et al. (2002) [12] をもとにしている。移流過程は3次の移流スキームを用い、Koren-Sweby のフラックスリミッタを適用している。フラックスリミッタは、放出源周辺などの濃度勾配が大きな箇所での偽拡散などを防ぐのに重要である。拡散については2次の Rosenbrock を用いている。水平解像度は 0.05° 、水平格子数は 270×260 であり、鉛直層数は地表から 8,000 m までの 15 層である。

第一原発からの ^{137}Cs および ^{131}I の放出量は、メソスケールモデルによる大気中放射性物質濃度の逆解法を用いて独自に推定したものをを用いている (Winiarek et al., 2012) [146]。また本相互比較には使用していないが、より細かい ^{137}Cs 放出量の変動分布についても大気中濃度や沈着量などの複数のデータセットをもとに推定している (Winiarek et al., 2014) [147]。本計算には3時間ごと、空間解像度 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ の ECMWF による気象場を気象モデル WRF[†]の初期値および側面境界とし、空間解像度 $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ 、一時間ごとの濃度場および沈着量分布を推定した。より詳細なモデル設定については Winiarek et al. (2014) [147] に記載している。

3A.2. 電力中央研究所 (CRIEPI)

放射性物質の大気輸送シミュレーションに関し、電力中央研究所では化学輸送モデルとして Comprehensive Air Quality Model with Extensions (CAMx) version 5.40.1 (ENVIRON, 2011) [29] を、気象モデルとして WRF[†] version 3.2.1 (Grell et al., 2005) [36] を使用した。CAMx においてガスおよび粒子状 ^{131}I 、粒子状の ^{132}I 、 ^{132}Te 、 ^{134}Cs および ^{137}Cs の移流、拡散、放射性壊変、乾性および湿性沈着について考慮するようモデルを拡張している。粒子状放射性物質の大気中での振る舞いについては、微小粒子状物質 $\text{PM}_{2.5}$ (粒径 $2.5 \mu\text{m}$ 以下の粒子状物質) にて近似している。計算対象領域は東日本域であり、水平解像度は 5 km 、鉛直層数は高度 100 hPa までの 34 層である。湿性沈着過程は Seinfeld and Pandis (1998) [106] をもとに、降雨による高度方向への再配分を考慮するよう修正している。粒子状物質の乾性沈着速度は Zhang et al. (2001) [153] を、ガス状物質の乾性沈着速度は Zhang et

al. (2003) [154]をそれぞれ元になっている。気象モデル WRF[†]の初期値および側面境界として気象庁メソ解析 (MANAL) を使用している。また計算領域内における MANAL を用いた気象場に対するナッジングもあわせて適用している。¹³¹I および ¹³⁷Cs の放出シナリオは Terada et al. (2012) [133]を用いている。

3A.3. Institut de Radioprotection et Sûreté Nucléaire (IRSN)

IRSN 大気輸送モデリング部門では、C3X モデルプラットフォーム上のオイラー型化学輸送モデルである 1dX を用いて放射性物質の大気拡散シミュレーションを行なった。本相互比較ワーキンググループには、気象庁メソスケールモデル ($0.05^\circ \times 0.05^\circ$) の気象場を用いたシミュレーション結果を提供している。放出シナリオは Mathieu et al. (2012) [82] をもとにしている。本シナリオでは 2011 年までの知見に基づき、線量観測をもとにして第一原発事故における放出量推定を行っている。乾性沈着過程は一定速度を仮定し、 $2 \times 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$ としている。湿性沈着過程は、ECMWF の気象場における降水量 P (mm h^{-1}) および放射性物質の種別ごとの除去定数 L_0 (粒子状物質に対しては $5 \times 10^{-4} \text{ h s}^{-1} \text{ mm}^{-1}$) を用い、除去率 L を $L=L_0P$ として求めている。モデルの詳細については Korsakissok et al. (2013) [67]に記述がある。また本モデルを用いて推定した最新の放出シナリオは Saunier et al. (2013) [104]としてまとめている。

3A.4. 日本原子力研究開発機構 (JAEA)

放射性物質を対象とした大気拡散予測システム WSPEEDI (Terada et al., 2008) [132]は緊急時環境線量情報予測システム SPEEDI を拡張したもので、非静力メソスケール気象モデル MM5 (Grell et al., 1994) [35]とラグランジュ型粒子拡散モデル GEARN (Terada and Chino, 2008) [131]とを組み合わせたものである。MM5 はコミュニティモデルとして世界中で広く使われており、いくつかの国においては気象予報モデルとして現業的に使用されている。MM5 はネスティングによる入れ子計算、四次元データ同化に対応しており、また雲微物理[†]、積雲対流[†]、接地境界層、放射過程、および地表面過程について複数のスキームの中から対象とする研究領域に適切なものを選択することが可能である。ラグランジュ型粒子拡散モデル GAREN は、放出源からの放射性物質の大気拡散を多数(通常数百万程度)の粒子の動きから求めるものである。水平方向の座標系は MM5 と同一のものを、鉛直方向には z^* 座標系をそれぞれ適用している。個々の粒子の動きには MM5 によって計算された気象場を用い、グリッドスケールの気象場による移流とサブグリッドスケールの乱流による渦拡散とを考慮している。GEARN は MM5 のネスト計算にも対応しており、ネスト計算における各領域は並列計算機上で各々独立した実行プログラムとして扱われ、内側ネスト領域の側面を出入りする粒子は外側ネスト領域と相互にデータ交換を行っている。大気中の放射能については大気擾乱による地表への沈着(乾性沈着)と降雨による沈着(湿性沈着)とを考慮している。乾性沈着は(Sehmel, 1980) [105]をもとに、乾性沈着速度 (希ガスに対しては 0 m s^{-1} 、ヨウ素に対しては $3 \times 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$ 、その他の放射性物質については形態によらず 10^{-3}

m s⁻¹)を設定している。湿性沈着については希ガスを除き、MM5における対流性および非対流性の降雨強度を用い、洗浄率を計算している。洗浄係数 (Λ) は (Brenk and Vogt, 1981) [13]をもとにし、

$$\Lambda = \alpha (F_c I_c + F_n I_n)^\beta$$

として求めている。ここで α ($=5 \times 10^{-5}$) および β ($=0.8$) は経験式に基づく定数であり、 I_c および I_n はそれぞれ MM5 における対流性および非対流性の降水強度 (mm h⁻¹) である。 F_c および F_n はそれぞれ対流性および非対流性の雲の下に格子点が位置しているかのフラグである。各格子点における大気中濃度については、出力時間ごとに存在する粒子の寄与の平均値を求め、地表および海洋表面上への積算沈着量については各格子点に沈着した粒子による影響をすべて積算することによって求めている。放射性壊変については大気中濃度と地表面への沈着過程の双方でタイムステップごとに計算しているが、崩壊系列上のほかの核種への壊変は考慮していない。放射線量については大気中濃度と土壌沈着量に変換係数を乗じて求めている (ICRP 1995) [50]。本モデルの予測精度に関する検証例としては、ヨーロッパにおけるトレーサー実験 ETEX (Furuno et al. 2004) [33]およびチェルノブイリ原子力発電所事故 (Terada et al., 2004; Terada and Chino 2005, 2008) [129][130][131]などがある。

3A. 5. 海洋研究開発機構 (JAMSTEC)

JAMSTEC では領域化学輸送モデル WRF/Chem version 3.4.1 (Grell et al., 2005) [36]を使用した。WRF/Chem の化学モジュールを拡張し、¹³¹I および ¹³⁷Cs の移流、拡散、乾性沈着および湿性沈着を組み込んでいる。計算対象領域は東日本域であり、水平分解能は 3 km である。また鉛直層数は高度 100 hPa までの 35 層である。湿性沈着過程は Maryon et al. (1996) [78]をもとにしている。また ¹³¹I の乾性沈着速度については Maryon et al. (1992) [77]を、¹³⁷Cs の乾性沈着速度については Klug (1992) [62]をそれぞれもとにしている。気象場の側面境界および初期値は気象庁メソスケールモデルを使用している。また計算領域内の気象場については、気象庁メソスケールモデルおよび気象庁による地表観測へのナッジングを行っている。¹³¹I および ¹³⁷Cs の放出シナリオについては Terada et al. (2012) [133]を使用した。

3A. 6. 気象庁 (JMA)

気象庁は原子放射線の影響に関する国連科学委員会 (UNSCEAR; United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation)の要請により、世界気象機関 (WMO; World Meteorological Organization)に設立された第一原発事故に関するタスクチームに協力し、現業メソ解析 (MESO) およびレーダー・アメダス解析雨量 (RAP)、気象庁領域移流拡散モデル (JMA-RATM; Regional Atmospheric Transport Model)による計算結果を提供している。JMA-RATMはメソ解析の気象場を用いる大気輸送モデルである。本モデルは

ラグランジュ型モデルであり (Iwasaki et al., 1998; Seino et al., 2004) [52][107]、多数の粒子の移流、鉛直および水平拡散、重力沈降、乾性および湿性沈着などの諸過程を考慮することにより放射性物質の大気拡散を計算している。本来、JMA-RATM は日本域における光化学オキシダント予測情報 (Takano et al., 2007) [119]ならびに降灰予報 (Shimbori et al., 2009) [109]などを提供するために開発されたものである。RATM モデル自体の詳細については Shimbori et al. (2010) [110]にまとめられている。

放射性物質の予測のため、モデルに導入されている乾性および湿性沈着過程の修正を行っている。湿性沈着過程としては雨滴による除去（雲下過程）のみを考慮しており、除去率は Kitada (1994) [61]をもとにしている。粒径分布としては平均粒径 $1\ \mu\text{m}$ 、標準偏差 1（上限 $20\ \mu\text{m}$ ）の対数正規分布を、また粒子の密度は $1\ \text{g cm}^{-3}$ をそれぞれ仮定している。WMO[†]タスクチームにおいては、タスクチーム内のプロトコルに従って 5 km 格子の JMA-RATM を用いた単位放出による計算を行い、その結果を提供している (Draxler et al., 2013) [26]。本モデル間相互比較においては、放出シナリオを JAEA による Kobayashi et al. (2013) [64]に変更し、ラグランジュ粒子計算における計算時間間隔を 10 分から 5 分に変更したものを提供している。また雨による湿性沈着に加え、気象庁メソ解析における雪やあられの降雪量についても湿性沈着への影響を考慮している。JMA-RATMにおけるこれら修正点については Saito et al. (2014) [103] に詳細がある。

3A. 7. 気象庁気象研究所 (JMA-MRI)

気象研究所では領域化学輸送モデル Regional Air Quality Model 2 (RAQM2; Kajino et al., 2012, Adachi et al., 2013) [57][1]を使用した。本モデルは 3 モーメントのモーダル法エアロゾルモデルであり、各モードにおける粒径分布は正規分布を仮定している。本モデルではエアロゾルの核形成、凝縮、凝集、乾性沈着、雲水および氷雲粒子生成とそれに付随する雲微物理[†]過程によるエアロゾル粒子の取り込み（雲内過程による湿性沈着）、雨滴による除去過程（雲下過程による湿性沈着）などの過程を考慮している。気象場については気象庁非静圧気象モデル (NHM-LETKF) を用いたアンサンブルカルマンフィルタ (EnKF; ensemble Kalman filter) によるデータ同化 (Kunii, 2013) [69]を行ったものを使用した。NHM-LETKF および RAQM2 はともに 3 km 格子、 213×257 格子での計算を行った。NHM-LETKF の鉛直層数は 50 hPa までの 50 層であり、また RAQM2 の鉛直層数は高度 10 km までの 20 層である。放射性エアロゾルについては、本研究においては乾燥時幾何平均径 $D_{g,n,dry}$ を 100 nm、標準偏差 σ_g を 1.3、粒子密度 ρ_p を $2.0\ \text{g cm}^{-3}$ 、吸湿性 κ を 0.4 と仮定した。また混合過程として内部混合を仮定している。 I_2 の化学形態としてはガス状であると仮定しており、放出時には ^{131}I のうち 20% がガス状 I_2 、80% が微小粒子状物質であると仮定している。 ^{131}I 、 ^{137}Cs 、および ^{134}Cs の放出シナリオは Terada et al. (2012) [133]をもとにしている。

3A. 8. 国立環境研究所 (NIES)

国立環境研究所では ^{137}Cs の大気拡散に関するシミュレーションを領域気象モデル WRF

version 3.1 (Skamarock et al., 2008) [112] および三次元領域化学輸送モデル Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) (Byun and Schere, 2006) [17] を用いて行った。計算期間は2011年3月10日から4月20日までの間である。CMAQにおける沈着過程については Byun and Ching (1999) [16] および Byun and Schere (2006) [17] にまとめられている。乾性沈着については沈着速度抵抗モデルを用いている。CMAQ における雲過程はサブグリッドスケールの対流性雲およびグリッドスケールの雲のそれぞれを考慮している。¹³⁷Cs はすべて粒子状であり、Sportisse (2007) [115] をもとに粒径を1 μm と仮定している。計算対象領域は東北地方のほぼすべてを含む $711 \times 711 \text{ km}^2$ であり、水平解像度は3 km である。また鉛直層数は34 層であり、大気最下端での層厚はおよそ60 m である。WRF による領域気象シミュレーションの際には、気象庁メソスケールモデルによる5 km 格子、3 時間間隔の3次元気象場へのナッジングを行っている。第一原発からの放出シナリオは Terada et al. (2012) [133] を用いている。

領域化学輸送モデル CMAQ において、粒子状物質の湿性沈着過程については以下の式で表される：

$$\frac{dQ_i}{dt} = Q_i \left(\frac{\exp(-\tau_{\text{cld}}/\tau_{\text{washout}}) - 1}{\tau_{\text{cld}}} \right) \quad (\text{S1})$$

ここで Q_i は雲内での汚染物質 i の濃度、 τ_{cld} は雲の時間スケール、そして τ_{washout} は湿性沈着による除去時間である。また τ_{washout} は以下の式で表される：

$$\tau_{\text{washout}} = \frac{W_T \Delta z}{\rho_{\text{H}_2\text{O}} p_0} \quad (\text{S2})$$

ここで、 W_T は平均総水分量、 Δz は雲の厚さ、 $\rho_{\text{H}_2\text{O}}$ は水密度、 p_0 は降水強度 (mm hr^{-1}) をそれぞれ示す。

3A.9. Seoul National University (SNU)

SNU では領域化学輸送モデル Asian Dust Aerosol Model 2 (ADAM2) (Park et al., 2010) [95] をもとにした Eulerian transport model (ETM) を開発し、その計算結果を本ワーキンググループに提供した。ADAM2 は11の粒径サイズをもつビン法エアロゾルモデルであり、各ビンにおける粒径サイズは正規分布を仮定し、各々の中心半径は0.1 μm から37 μm の間でほぼ等間隔になるよう設定している。ETM での放射性物質シミュレーションに際しては、¹³⁷C の粒径分布について Stohl et al. (2012) [116] をもとに正規分布を仮定し、空気動学的平均直径を0.4 μm 、標準偏差を0.3 と仮定した。またガス状物質についても取り扱えるよう ADAM2 から修正を加え、¹³¹I についてはガス状を仮定している。ETM の水平解像度は27 km であり、計算対象領域の中心を第一原発に設定した。気象場については領域気象モデル MM5 (Grell et al., 1994) [35] を使用した。放射性物質の湿性沈着過程については降

水強度および ADAM2 の診断的雲モデルによる雲水量を用いている (Chang et al., 1987) [18]。雲下過程による湿性沈着過程については Park (1998) [94] に詳細がある。第一原発からの ^{131}I および ^{137}Cs の放出シナリオについては JAEA (Chino et al., 2011; Katata et al., 2012) [19] [58] のものを使用した。ETM モデルについては Park et al. (2013) [96] に詳細がある。

付録 4A. 全球規模大気輸送モデルの相互比較に参加した各モデルの概要

4A. 1. SPRINTARS

SPRINTARS (Spectral Radiation-Transport Model for Aerosol Species) は、九州大学応用力学研究所で開発されている全球エアロゾルモデルである (Takemura et al., 2000; Takemura et al. 2002; Takemura et al. 2005) [120] [121] [122]。このモデルは東京大学大気海洋研究所・国立環境研究所・海洋研究開発機構が開発している大気海洋結合モデル MIROC (Watanabe et al. 2010) [144] をベースとし、エアロゾルの気候システムへの影響および大気汚染の状況を地球規模でシミュレートする。

SPRINTARS はエアロゾルの輸送プロセスとして放出・移流・拡散・湿性沈着・乾性沈着および重力沈降を計算する。エアロゾルの直接効果、すなわちエアロゾルによる太陽放射・地球放射の散乱・吸収によって引き起こされる効果と、間接効果、すなわちエアロゾルが雲粒核および氷晶核として作用する効果は計算に含まれている。SPRINTARS は気候変動に関する政府間パネル (IPCC) 第 4 次評価報告書 (AR4) のエアロゾルによる気候への影響評価において、アジアから唯一採用されたエアロゾルモデルである。第一原発事故の直後の 2011 年 6 月に、Takemura et al. (2011) [123] はこのモデルを用いた全球におけるトレーサーの輸送シミュレーションの研究論文を出版している。この放射性物質輸送シミュレーションでは、水平方向は緯度経度で約 $0.56^\circ \times 0.56^\circ$ (力学コアのスペクトル切断が T213)、鉛直方向は地表から 8 hPa まで 20 層、1 km 以下に 4 層 (おおよそ 50, 200, 500, 1000 m に相当) の空間解像度である。力学コアによって内部で計算される水平風速と気温は 6 時間ごとの NCEP GFS データにナッジング手法により近づけられている。

本比較実験では、 ^{137}Cs 、 ^{131}I および ^{133}Xe が提出されている。 ^{137}Cs および ^{131}I の乾性および湿性沈着のパラメタリゼーションは硫酸塩エアロゾルと同じとし、 ^{133}Xe は放射性壊変のみによって除去されると仮定している。 ^{137}Cs および ^{131}I の放出量データには JAEA による放出量推定値を用いている (Terada et al. 2012) [133]。 ^{133}Xe の放出量データには Stohl et al. (2012) [116] の逆推計による放出量推定値を用いている。比較実験には、標準的なパラメータによる実験 (“SPRINTARS”) と、湿性沈着が強くなるように調整された実験 (“SPRINTARS1”) が提出されている。

4A.2. MASINGAR-1 および MASINGAR mk-2

MASINGAR (Model of aerosol species in the global atmosphere) は気象庁気象研究所が開発している、全球での大気エアロゾル分布を求めるための数値モデルである。このモデル間相互比較実験にはベースとなる大気大循環モデルの異なる2つのバージョンのモデルによるシミュレーション結果を提出している。MASINGAR-1 は気象庁・気象研究所の大気大循環モデル MRI/JMA98 AGCM と結合されたエアロゾル輸送モデルであり、気象庁の現業黄砂予測にも用いられている数値モデルと基本的に同じものである (Tanaka et al. 2003) [125]。この放射性物質輸送シミュレーションでは、水平解像度 T106 (約 $1.125^\circ \times 1.125^\circ$)、鉛直 30 層の条件でのシミュレーションを行っている。より新しいバージョンである MASINGAR mk-2 は大気大循環モデル MRI-AGCM3 と結合されたモデルであり、気象研究所の地球システムモデル MRI-ESM1 の全球エアロゾルモデルとして、大気海洋結合モデル比較実験 CMIP5 など、気候変動研究にも用いられている (Yukimoto et al. 2011; Yukimoto et al. 2012; Adachi et al. 2013) [151][152][2]。この放射性物質輸送シミュレーションでは、水平方向は TL319 (約 $0.56^\circ \times 0.56^\circ$)、鉛直方向は地表から 0.4hPa 高度までの 40 層の空間解像度でのシミュレーションを行っている。

この相互比較実験では、水平風速場成分は $1.25^\circ \times 1.25^\circ$ 、6 時間ごとの JCDAS (Onogi et al. 2007) [93] を参照値として水平風速をニュートン法的ナッジング手法によって現実の気象場に近づけている。また、JCDAS は海面表層温度データとしても用いられている。放出された ^{137}Cs はただちに環境中のエアロゾルに付着すると仮定され、その粒径分布は数密度モード半径が $0.07\mu\text{m}$ 、分散が 2.0 の対数正規分布であると仮定されている (Tanaka et al., 2013) [126]。

比較実験には、MASINGAR-1, MASINGAR mk-2 それぞれについて、 ^{137}Cs の放出量としては JAEA (Terada et al. 2012) [133] および Stohl et al. (2012) [116] による放出量推定値の2つの実験を提出している。 ^{133}Xe は Stohl et al. (2012) [116] による逆推計によって求められた値を用いている。

4A.3. EMAC

Cyprus Institute によるシミュレーションでは、全球大気大循環・大気化学モデル EMAC (The ECHAM/MESSy Atmospheric Chemistry) バージョン 1.9 を用いている (Christoudias and Lelieveld, 2013) [21]。このモデルの大気循環場は第5世代の European Centre Hamburg general circulation model (ECHAM5; Roeckner et al., 2003, 2006) [99][100] バージョン 5.3 によって計算される。この放射性物質輸送シミュレーションでは、水平方向 T255 (約 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$)、鉛直方向 31 層の条件、水平方向 T106 (約 $1.125^\circ \times 1.125^\circ$)、鉛直方向 31 層の解像度でのシミュレーションを行っている。

EMAC によるシミュレーションでは、大気大循環モデルによって再現される気象場は $1.25^\circ \times 1.25^\circ$ で 6 時間ごとの ECMWF ERA-Interim 解析データ (Simmons et al., 2007) [111]

を用いて渦度、発散、気温、地上気圧をニュートン法的ナッジング手法によって同化している。放射性物質は ^{131}I 、 ^{137}Cs および ^{133}Xe を扱っている。比較実験には、T255 および T106 解像度それぞれについて、 ^{137}Cs の放出量としては Chino et al. (2011) [19] による JAEA の放出量推定値、および Stohl et al. (2012) [116] による放出量推定値の 2 つの実験を提出している。 ^{133}Xe は Stohl et al. (2012) [116] による逆推計によって求められた値を用いている。

4A. 4. KNMI TM5

オランダ王立気象研究所 (KNMI) は、全球モデル TM5 (Global chemistry Transport Model, version 5) (Huijnen et al., 2010; Krol et al., 2005) [48] [68] を用い、放射性物質シミュレーション相互比較実験に参加した。TM5 は全球オフライン輸送モデルであり、多くの大気化学・エアロゾルの研究 (たとえば de Meij et al., 2006; Vignati et al., 2010) [24] [143] や、化学天気予報や気候研究に用いられている。TM5 は欧州中期予報センター (ECMWF) の ERA-Interim データあるいは Integrated Forecasting System (IFS) (Flemming et al., 2009) [32] 気象モデルで駆動されている。TM5 モデルではモデル内で相互の領域ネスティング計算が可能である (Krol et al. 2005) [68]。しかしながら、このシミュレーションではネスティングによる計算は行われていない。

この放射性物質輸送シミュレーションでは、水平方向 $3^\circ \times 2^\circ$ 、鉛直方向 31 層の解像度でのシミュレーションを行っている。シミュレーションでは、3 時間ごとの ECMWF ERA-Interim 解析データ (Simmons et al., 2007) [111] を用いて輸送計算を行っている。

相互比較実験には、 ^{137}Cs および ^{131}I のシミュレーション結果が提出されている。放射性物質の放出量には Terada et al. (2012) [133] による JAEA の推定値を用いている。沈着過程では ^{137}Cs および ^{131}I はすべて降水による湿性沈着によって除去されると仮定している。また、湿性沈着のパラメータには水溶性の CO と同じ値を仮定している。

4A. 5. Meteorological Research Institute - Passive-tracers Model for radionuclides (MRI-PM/r)

MRI-PM/r (Meteorological Research Institute (MRI) - Passive-tracers Model for radionuclides; MRI-PM/r) は気象庁気象研究所で開発されている領域オフライン化学輸送モデルである。全球規模輸送の相互比較実験には計算領域として、メルカトル図法で経度方向 $107^\circ \text{E} - 252^\circ \text{E}$ 、緯度方向 $3^\circ \text{N} - 61^\circ \text{N}$ に 234×120 、約 $60 \text{ km} \times 60 \text{ km}$ の水平格子を用いている。鉛直方向は地形に沿う 13 層で、10 hPa までを含んでいる。このモデルによるシミュレーションでは気象場は WRF (Advanced Research Weather Research and Forecasting) モデル (Skamarock et al., 2008) [112] によって計算されている。気象場は時 6 間ごと、 $1^\circ \times 1^\circ$ の National Center for Environmental Prediction (NCEP) final operational global analysis data (FNL) データセット (ds083.2, <http://dss.ucar.edu>

/datasets/ds083.2) が WRF の初期値および境界値、またナッジング手法の参照値として用いられている。

このモデルでは、カテゴリー法 (Kajino and Kondo, 2011) [56]によって放射性物質と環境中のエアロゾルとの相互作用を扱っている。エアロゾルは primary hot particles (PRI), エイトケンモード (ATK), 蓄積モード (ACM), ダスト (DU), 海塩粒子 (SS), 花粉 (POL) の 6 つのカテゴリーに分類されている。核生成、凝縮、凝集、沈着などのエアロゾルの化学および力学的プロセスはモーダル・モーメント法 (Kajino and Kondo, 2011; Kajino, 2011) [56] [55]によって計算される。ダスト、海塩、人為起源・生物起源・バイオマス燃焼起源の SO_x , NO_x , NH_x , 黒色炭素、有機炭素の放出過程は Kajino and Kondo (2011) [56]と同様の手法で計算される。セシウムの 5%は放射性の primary particles (PRI)として放出されると仮定し、残りは環境中に存在するエアロゾル(ATK、ACM、DU、SS、POL)の表面積密度に比例して凝縮すると仮定されている。このシミュレーションでは放射性物質としては ^{137}Cs および ^{131}I を扱い、放出量としては JAEA (Terada et al. 2012) [133]による推定値を用いている。

付録 4B. 比較に用いた観測データ

4B.1. 大気中濃度データ

全球規模シミュレーション相互比較実験の検証のため、包括的核実験禁止条約機関 (CTBTO) による放射性物質の大気中濃度の観測データが用いられている。第一原発事故の時点では、CTBTOは 64 地点で粒子状の放射性物質、27 地点で放射性キセノンの観測が、核兵器の製造や実験、原子力施設稼働の監視のため国際監視システム (International Monitoring System, IMS) として設置されていた (Medici, 2001; CTBTO, 2011; Yonezawa and Yamamoto, 2011) [83] [22] [23] [150]。日本における CTBTO の拠点は高崎 (群馬県) と沖縄の 2 カ所に設置され、今回の第一原発事故以後の測定値が公開されている (Yonezawa and Yamamoto, 2011; 軍縮・不拡散促進センター) [150]。第一原発事故に起因するとみられる放射性物質は、日本以外での濃度は拡散によって希釈されて濃度が大幅に低く、人体への影響はないと考えられるレベルになっているものの、北半球のほとんどの観測所で検出されている。

4B.2. 沈着量データ

放射性物質の沈着量の比較には、米国環境保護庁 (EPA) の RadNet (National Air and Radiation Environmental Laboratory; 大気環境放射線観測ネットワーク) および米国の大気沈着量観測プログラム National Atmospheric Deposition Program (NADP) のネットワーク観測による ^{131}I および ^{137}Cs , ^{134}Cs の沈着量観測 (Wetherbee et al. 2012) [145]を用いた。Wetherbee et al. (2012) [145]は、NADP および RadNet による観測を解析し、米国で観測さ

れた ^{131}I は長距離輸送物質の典型的な特徴を示し、西から東へ向かうにつれて沈着量が減少していることを示している。また、米国における第一原発事故起源の放射性物質降下量はチェルノブイリ原発事故起源よりも多いことを報告している。

付録 5A. 海洋分散モデル相互比較に参加した各モデルの概要

5A. 1. CRIEPI

電力中央研究所(CRIEPI)は、第一原発から漏洩した ^{137}Cs の挙動を再現するために、領域海洋分散モデル(Regional Ocean Modeling System (ROMS); Shchepetkin and McWilliams, 2005) [108]を用いたシミュレーションを行っている(Tsumune et al., 2011; Tsumune et al., 2012; 2013) [135][136][137][138]。ROMS は自由表面をもつ3次元ブージネスク近似モデルであり、海底地形に沿った鉛直座標系(σ -座標系)を採用している。モデル領域は福島沖合海域($35^{\circ} 54' \text{ N}$ - $40^{\circ} 00' \text{ N}$, $139^{\circ} 54' \text{ E}$ - $147^{\circ} 00' \text{ E}$)であり、水平格子間隔は約1 km、鉛直分解能は30層である。本計算領域では水深が1500mを超える地点があるが、シミュレーション時間の短縮化を図るため、最大水深は1000 mまでを考慮することにした。流動・トレーサの移流項に3次の風上差分を設定し、調和型の粘性・拡散項を4次の中心差分とした。また、水平粘性・拡散係数は $5.0 \text{ m}^2/\text{s}$ としている。鉛直粘性・拡散は、K-profile parameterization mixing (KPP)モデル(Large et al., 1994) [70]を用い、鉛直粘性・拡散係数の最小値(背景値)は $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ とした。

海表面における駆動力は、気象庁による短期気象予測(JMA-GSM)をメソスケール気象モデル(Weather Research and Forecasting (WRF); Skamarock et al., 2008) [112]によって内挿する当研究所の短期気象予測システム (Numerical Weather Forecasting and Analysis System (NuWFA); Hashimoto et al., 2010) [40]の結果(風速・短波・長波・気圧・気温・湿度・降水量)を用いた。NuWFA のアウトプットの時間間隔が1時間ごと、また水平格子間隔が5 km であるため、本シミュレーションでは1時間ごとに水平方向に内挿した結果を与えた。外洋における側面境界条件には、リアルタイムに更新されている海洋の1日ごとの再解析データ(JCOPE2, Japan Coastal Ocean Prediction Experiment 2; Miyazawa et al., 2009) [87]の結果(水温、塩分、海面高度)をシミュレーション格子に内挿して用いた。さらに、外洋における中規模渦などの複雑な挙動を再現するため、シミュレーション結果をJCOPE2による水温および塩分の再解析結果に1日の時定数で緩和させた。潮汐は、先行研究の結果からその影響が小さいことを確認したため(Tsumune et al., 2011; 2012) [135][136][137]、本シミュレーションでは考慮していない。初期値は JCOPE2 の 2011 年 3 月 1 日の水温、塩分、水平流速、および水位を設定してシミュレーションを行った(Tsumune et al., 2013) [138]。

^{137}Cs は生物化学過程の影響を受けず、水塊とともに挙動するトレーサと考え、オイラー的移流拡散方程式を解いた(Tsumune et al., 2011) [135][136]。約30年の半減期も考慮しているが、ここでは1年規模のシミュレーションであるため、その影響はほとんどない。

^{137}Cs は大気圏核実験の影響により、第一原発事故以前の背景濃度値として 0.0015 Bq L^{-1} 程度が存在していた。この背景濃度値を考慮するため、計算の初期値として全域に 0.0015 Bq L^{-1} の濃度を与えている。

シミュレーションにあたっては、直接漏洩と大気からの降下の影響を考慮した。直接漏洩シナリオは、シミュレーションと観測データの比較によって逆推計した結果を用いた (Tsumune et al., 2012; 2013) [137] [138]。総量は、2011 年 5 月末までで $3.5 \pm 0.7 \text{ PBq}$ 、2012 年 2 月末までで $3.6 \pm 0.7 \text{ PBq}$ であった。大気からの降下分は、 9.0 PBq とした大気への放出量の推定結果 (Terada et al., 2012) [133] を元に実施した大気拡散シミュレーション (CAMx; ENVIRON, 2009) [28] の結果を用いた (Hayami et al., 2012; Tsumune et al., 2013) [41] [138]。2011 年 3 月 11 日から 4 月 1 日までの本計算領域への降下量の積算値は、 1.14 PBq である。さらに、広範囲に大気から降下した影響も考慮するため、本計算領域に対する流入境界条件として、北太平洋モデルによる再現計算結果を与えている (Tsumune et al., 2013) [138]。

5A.2. GEOMAR

GEOMAR モデルとは、Dietze and Kriest (2012) [25] で用いられている MOM4p0d (GFDL Modular Ocean Model v.4; Griffies et al., 2005) [37] をもとにした、鉛直 z -座標系、自由海面を取り入れた全球モデルである。水平格子間隔は日本付近で海洋中規模渦が再現できる程度で、そのほかの海域は粗くなっている。鉛直方向には 59 レベルで、海洋部分の最深層には部分格子を用いた。海底地形としては、ETOPO5 データ (National Geophysical Data Center から入手、<http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/fliers/93mgg01.html>) をモデル格子に内挿して用いている。海面で与える大気からの強制には、欧州中期気象予測センターから提供されている ERA-40 再解析データ (<http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/fliers/93mgg01.html>) の 6 時間ごとの風応力、熱および淡水フラックスを与えた (Uppala et al., 2005 など) [142]。熱強制については、上記の熱フラックスに加え、海面水温を衛星観測データから作成された月平均海面水温 (C. Rathbone, personal communication, 2006) に 30 日の時定数で緩和させている。海面での塩分にも、90 日の時定数で World Ocean Atlas 2005 (Antonov et al., 2006) [4] の年平均気候値へ緩和させる緩和項を考慮している。鉛直混合係数は KPP スキーム (Large et al., 1994) [70] を用いた。これに関連するパラメータとしては、バルクリチャードソン数として 0.3、背景場の混合係数として $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ を与えており、さらに二重拡散や非局所的フラックスの効果も考慮した。World Ocean Atlas 2005 の年平均水温、塩分分布 (Locarnini et al., 2006; Antonov et al., 2006) [72] [4] を初期値として与え、5 年間のスピニングアップ計算の後、1993 年から 1998 年の 6 年間の計算を行った。その後、1993 年の強制を用いて 5 年間積分している。得られた流速場と海面高度計衛星データから求めたものとの比較から、第一原発事故が起こった 2011 年の状況として、1993 年の結果がもっとも近いことが示されている (Dietze and Kriest, 2012) [25]。

これは実用的なアプローチであることに注意願いたい。理想的には、現実の強制力を用いて駆動されるべきであるが、その場合でも初期値に含まれる不確定性や海洋内の非線形性のため、完全に現実を再現することは不可能である。

^{137}Cs の分散には、MOM4p0d 循環モデル内の人工的なトレーサーとしてオイラー的移流拡散計算を行った。 2.3 PBq の ^{137}Cs が、第一原発前面の 10 km 四方の海面に 4 月 1 日に放出されたとした。本計算では、扱う期間が ^{137}Cs の半減期である 30.1 年に比べて短いため、保存性のトレーサーとして扱っており、流れによる移流と拡散にのみ影響される。また、 ^{137}Cs の全量を 1 グリッド内に瞬間的に与えているため、その後数日間は強い分散過程が進行しているが、これによる不安定などは発生していない。

5A.3. IRSN-IFREMER

第一原発から海洋へ流入した ^{137}Cs の分散シミュレーションには、Model for Application at Regional Scale (IFREMER-MARS3D; Lazure and Dumas, 2008) [71] を用いた。MARS3D は、鉛直 σ -座標系、自由海面スキームを用いた 3 次元海洋循環モデルであり、通常は欧州周辺海域の潮流や熱塩分布の再現などに用いられている (Bailly du Bois et al., 2012a; Batifoul et al., 2012; Garreau et al., 2011) [7][11][34]。まず基準となる計算として、この MARS3D に変更を加えずに、福島の状態に適用した。モデルの領域は 31°N – 43.2°N 、 137°E – 150°E ($1000 \text{ km} \times 1200 \text{ km}$) とし、水平格子間隔は東西、南北方向共に $1/60^\circ$ (およそ 1.852 km) である。鉛直には 40 層とし、表層近くで細かくしている。海底地形データには JODC のデータ (JODC, 2011) [54] を用いた。このモデルを海面での強制と側面境界での潮汐強制により駆動し、黒潮変動や津軽海峡を通過する流れなどの日本付近の領域規模および日本沿岸域の循環を再現している。潮汐には主要 16 分潮を考慮し、水平格子間隔 $1/8^\circ$ の FES2004 numerical atlas (Lyard et al., 2006) [74] のデータを与えた。さらに大規模な太平洋規模の海洋循環などは、水平格子間隔 $1/12^\circ$ の MERCATOR-Ocean により提供されている日ごとの全球海洋予測データ (<http://www.mercator-ocean.fr/eng>; Ferry et al., 2007) [31] を用い、水温、塩分、流速および海面高度を側面境界で時空間的に補間して与えている。一方、海面での強制には、格子間隔 $1/2^\circ$ の NCEP meteorological global model (<http://www.ncep.noaa.gov/>) のデータを時空間的に補間して与えた。

^{137}Cs の流入量としては、直接漏洩分には Bailly du Bois et al. (2012b) [8] で求められた 27 PBq を用い、大気降下分は IRSN の Gaussian puff model pX (Korsakissok et al., 2013) [67] を用いて求められた 1 時間ごとの降下フラックスを与えており、降下分総量は 2011 年 3 月 23 日までで 3 PBq となっている。

海面での風による抵抗係数 (C_d) として、基準モデルでは $C_d = 0.0015 \times W^p$ を $p = 0$ として用いている。ここで W は海面から 10 m の高さにおける風速を表している。第一原発前の $50 \times 100 \text{ km}$ の領域における観測値との比較から、この抵抗係数 C_d に使われる p の値として、 $p = 0.8$ を用いた。環境中の ^{137}Cs 濃度が半減するまでの時間に関して、シミュレーション結果を実際に観測された値に合わせるためにこの修正を行った。この修正による

黒潮流軸位置や黒潮の強度、中規模渦や蛇行の発生などの流れ場への影響はほとんどないことを確認しているが、当然海面の流速変動は大きくなっている。

5A. 4. JAEA

青森県六ヶ所村に立地する使用済み燃料再処理施設から海洋へ放出される放射性排液の拡散を予測するために、日本海洋科学振興財団、京都大学、日本原子力研究開発機構が共同で海洋中放射性物質拡散予測システムを開発した。京都大学と日本海洋科学振興財団が開発した海洋大循環モデルは、海流、水温・塩分などを予測し、日本原子力研究開発機構が開発した海洋中放射性物質拡散モデル SEA-GEARN は放射性物質の拡散を予測する (Kobayashi et al., 2007) [63]。このシステムでは、六ヶ所沖の計算を実施するために北太平洋領域 ($1/8^\circ \times 1/6^\circ$) からネスティング手法を用いて北西北太平洋領域 ($1/24^\circ \times 1/18^\circ$) の高分解能計算を実行している。同様に、福島沖の沿岸域における海洋場を予測するため、水平格子間隔 $1/72^\circ \times 1/54^\circ$ のダウンスケーリング計算を実行した。高分解能モデルに与える海面境界条件は、NCEP-DOE (National Centers for Environmental Prediction-Department of Energy) Reanalysis 2 の再解析データセットの 1 日平均値を用いた。風応力は、気象庁のメソ数値予報モデル (MSM) の 3 時間平均値を与えている。また、北西北太平洋モデルでは、4 次元変分法のデータ同化手法を用いて再解析データセットを作成した (Ishikawa et al., 2009) [51]。データ同化に用いる観測データは、海面水温データ、海面高度計データ、現場観測データである。海面水温データは東北大学が作成した NGSST (New Generation Sea Surface Temperature) を用いた。また、海面高度計データには AVISO/CLS (Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data / Collecte, Localisation, Satellites) の Ssalto/Duacs Absolute Dynamic Topography を用いた。現場観測データは GTSP (Global Temperature and Salinity Profile Program) によって配信されたデータをもとに品質管理を行った上で用いている。

海洋へ直接放出された ^{137}Cs の流入項として、Kawamura et al. (2011) [59] が推定した値を用いた。Kawamura et al. (2011) [59] では、第一原発近傍で得た海洋モニタリング値から流入量の推定を行っている。海表面に降下した大気由来の ^{137}Cs に関しては、世界版緊急時環境線量情報予測システム第 2 版 (WSPEEDI-II) を用いて計算した (Terada et al., 2008) [131]。

5A. 5. JCOPET

JCOPET は、プリンストン海洋分散モデルを基として日本沿海域の海洋変動予測研究のために構築された高解像度の沿岸域海洋入れ子モデルであり、鉛直座標には一般化 σ -座標を用いている (詳細は Guo et al., 2010 [38]; Miyazawa et al., 2012 [88] [89] を参照)。水平格子間隔は緯度経度方向とも $1/36^\circ$ で 28° N - 44° N , 125° E - 148° E の領域を対象とし、鉛直には 46 レベルとしている。JCOPET は、水平格子間隔が $1/12^\circ$ の北西太平洋領域を対象とした JCOPET2 モデルの入れ子モデルとなっている。JCOPET2 モデルは、人工衛星から観

測された海面高度偏差や海面水温、船舶観測による海洋内部の水温、塩分を同化し、現実的な海況場を再現できるようになっており、JCOPET の境界条件として、この JCOPE2 モデルの結果を与えている。JCOPET 自体は観測データの同化機能をもっていないが、JCOPE2 の水温、塩分場へと緩和させることで現実的な大規模場の構造を取り入れている。また、主要 16 分潮の潮汐を側面境界で与え、潮汐流も取り入れている。さらに日本の主だった 35 河川からの淡水流入も考慮している。水平混合係数は (Smagorinsky, 1963) [113] 型、鉛直混合係数は (Mellor and Blumberg, 2004) [85] の乱流クロージャーモデルを用いた。海面での強制力としては、気象庁の 5 km 格子非静水メソスケールモデル (JMA_MSM) の結果を用いている。

^{137}Cs の分散計算のための流速データには JCOPET による流れ場を用い、半減期 30.1 年の単純なトレーサーとして扱った (Masumoto et al., 2012) [81]。また、第一原発からの直接漏洩分と大気からの降下分の両者をセシウムの流入源として与えている。このうち、直接漏洩のシナリオは Tsumune et al. (2012) [137] で用いられたものと同様であるが、全漏洩量は 5.7 PBq とした。大気からの降下フラックスには、海洋研究開発機構で進められている「化学天気予報」で用いられている大気化学物質輸送モデル (AQF) からのデータを用いており (Honda et al., 2012) [45]、2011 年 3 月 11 日から 5 月 6 日までの北西太平洋域での降下量は 0.3 PBq となっている。

5A.6. KIOST/IMMSP

KIOST/IMMSP は有限要素法を用いた SELFIE model (Zhang and Baptista, 2008; Roland et al., 2012) [155] [101] をもとにして、Korea Institute of Ocean Science and Technology (KIOST, S. Korea) と Institute of Mathematical Machine and System Problems (IMMSO, Ukraine) で構築された放射性物質分散シミュレーションのための高解像度沿岸海洋分散モデルである。モデルの領域は 135°E – 148°E 、 32°N – 43°N の範囲で、第一原発付近のもっとも細かい格子を持つ領域で約 500m の格子となっており、要素数は 97989 に達する。鉛直座標は海面付近で細かく取った 36 レベルをもつ s -座標系を用い、鉛直混合係数は $k-\epsilon$ モデルにより求めている。海面での強制力は ERA-Interim 再解析データを用いた。KIOST/IMMSP モデルによる領域シミュレーションの側面境界条件には HYCOM nowcast/forecast system の結果を用い、領域内の水温も HYCOM の場に緩和している。また、側面境界では NAO.99b 潮汐予測システムによる潮汐データを与えた。

放射性核種の分散過程を再現するオイラー的移流拡散モデルは、溶存態および海中の浮遊粒子、海底堆積物中の放射性核種の輸送と、それらの再浮遊および海底堆積物内部への拡散まで扱えるものである (Margvelashvily et al., 1997) [76]。第一原発からの ^{137}Cs の直接漏洩シナリオには Kawamura et al. (2011) [59] と同様のものを用い、漏洩総量は 3.8 PBq とした。

5A. 7. Kobe University

領域海洋循環モデル UCLA-ROMS (Shchepetkin and McWilliams, 2005) [108] をもとに、溶存態の ^{137}Cs を模したパッシブトレーサーのオイラー的移流拡散モデルを組み込み、2 段ネスティングによって総観規模の海洋ダウンスケーリング再解析を実施した (Uchiyama et al., 2012; 2013) [139][140]。もっとも外側の境界条件および計算初期条件には、3 次元変分法によるデータ同化を組み込んだ JCOPE2 (Miyazawa et al., 2009) [87] 再解析値 (1 日平均値) を用いた。第 1 段ネスト領域 (親グリッド) を構成する ROMS-L1 モデルは水平格子間隔 $dx = 3 \text{ km}$ (格子数: $256 \times 256 \times$ 鉛直 32 層) であり、12 時間平均された L1 モデル出力を水平格子間隔 $dx = 1 \text{ km}$ (格子数: $512 \times 512 \times$ 鉛直 32 層) の第 2 段ネスト領域 (子グリッド) の開境界上に時空間的に写像し、1-way offline ネスティングにより一方向的なダウンスケーリングを行った (Mason et al., 2010; Buijsman et al., 2012; Romero et al., 2013) [80][15][102]。ROMS-L1、L2 領域はともに、福島県沿岸の平均的な海岸線と平行になるように領域全体を回転させ、鉛直方向には σ -座標系を導入し、海表面および海底面近くで鉛直層厚が小さくなるように設定した。また、移流項の高次風上差分スキームに内在する人工粘性以外の水平渦粘性および水平渦拡散は考慮していない。鉛直乱流モデルには、海洋表層および底層の両惑星境界層に対する KPP モデルを用いた。数値モデルに用いた海底地形データは JODC による水平解像度 500 m の J-EGG 地形データをもとにしており、これを 30 秒間隔の SRTM30 全球地形データで補完したものを用いた。海表面における風応力には、気象庁 GPV-MSM 再解析値の 1 時間値を用いた。そのほかの熱、淡水、放射の各フラックスおよび海面塩分には COADS による月平均気候値を与えた。モデル領域内に河口を有するすべての一級河川の流量を考慮し、河川流量データベースに基づく月平均気候値を与えた。ヨウ素-セシウム比に基づく Tsumune et al. (2012) [137] によるセシウム漏洩シナリオによる直接海洋漏洩を考慮し、大気からの降下分および半減期は無視した。 ^{137}Cs 漏洩サブモデルには、サブグリッドスケールの初期分散を簡易的に評価する Uchiyama et al. (2014) [141] による近傍場初期分散サブモデルを用いた。第一原発の位置において単位漏洩フラックス (1 Bq/s) を与えて相対濃度分布の発展を計算した。相対濃度は第一原発前面海域で取得された表層 ^{137}Cs 濃度データとの比較を行って補正し、実際の濃度および漏洩フラックスを推定する方法を採用した。L1 モデルは 2010 年 10 月 1 日から、L2 モデルは 2011 年 1 月 1 日から計算を開始し、スピンアップのための十分な助走期間を取った。モデルによる海面高度や ^{137}Cs 濃度は、AVISO 衛星海面高度データおよび表層採水に基づく現場濃度データと比較して、良好な一致を確認した。

5A. 8. MSSG

MSSG は、JAMSTEC・地球シミュレータセンターで開発された大気海洋結合モデルである (詳細は Takahashi et al. 2008[118] を参照)。ここでは、海洋分散モデル部分のみを使用しており、鉛直方向には z -座標系、水平方向には緯度経度座標系を用いている。計算領域は東西に 140.2° E - 143.2° E 、南北に 34.85° N - 39.14° N の範囲で、水平格子間隔は 2

km である。海底地形には ETOP01 (Amante and Eakins, 2009) [3] を使用し、鉛直方向に 73 レベル取り、海面近くの鉛直格子間隔は 3m である。流れ場、水温場、塩分場の側面境界値には JCOPE2 (Miyazawa et al. 2009) [87] を使用しており、海面水温・塩分も JCOPE2 に緩和させている。海上風には気象庁より提供されているメソスケールモデル (GPV/MSM) の 10 m 風を用いている。サブグリッドスケールのパラメタリゼーションとしてスマゴリンスキー型の水平粘性・拡散係数と Noh-Kim スキーム (Noh and Kim, 1999) [92] による鉛直粘性・拡散係数を使用している。河川からの淡水流入や大気からの降下分は考慮していない。積分期間は 2010 年 12 月 1 日から 2011 年 6 月 30 日である。

放射性物質の海洋拡散はラグランジュ型の粒子追跡モデルを使用して計算した (詳しくは Choi et al. 2013 [20] を参照)。このモデルでは、放射性物質が海中で 3 つの相を移行していく過程が組み込まれている。すなわち、海水に溶解している状態 (溶解相)、水中の浮遊粒子に吸着している状態 (粒子相)、および海底堆積物に吸着している状態 (固相) の 3 つである。海水—浮遊粒子、海水—堆積物の間では吸着と脱着、浮遊粒子と海底堆積物の間では沈降と侵食によって放射性物質の移行が行われている。ただし、海底堆積物に吸着している放射性物質は移流されない。第一原発から海洋へ放射性物質が流出するシナリオは Tsumune et al. (2012) [137] に基づいたもので、総量で 5.5 PBq であり、すべてが海水に溶解しているものと仮定している。

5A.9. NIES

国立環境研究所 (NIES) では、海洋の水質・底質環境、とくに閉鎖性海域や陸棚域における富栄養化現象の定量評価・予測を目的として、海洋環境モデルの開発研究に取り組んできた。本モデルは流動、水質・底質、および生態系 (二枚貝の個体群動態) を評価・予測する 3 つのサブモデルで構成されている (Higashi et al. 2012) [42]。流動サブモデルは、静水圧・Boussinesq 近似を施したプリミティブ方程式を支配方程式とするコロケート格子系・レベル座標系モデルであり、自由海面の追跡については VOF 法 (Hirt and Nichols, 1981) [43] を用いて求めている。鉛直混合および水平混合スキームには Mellor (2001) [84] のレベル 2.5 乱流クロージャーモデルおよび Smagorinsky (1963) [113] の手法を、海面における運動量・熱フラックスの算定には Kondo (1975) [65] の手法をそれぞれ採用している。

本報告書における NIES の ^{137}Cs 海洋拡散シミュレーションは、水温や塩分輸送と同様にオイラー的移流拡散方程式を支配方程式として、水平格子間隔 2.2×2.2 km で解析を行った。海洋における ^{137}Cs の流入項には次に示す第一原発からの直接漏洩と大気からの降下分の 2 つを考慮した。 ^{137}Cs の直接漏洩量については Tsumune et al. (2012) [137] の推定結果と同じものを用いた。 ^{137}Cs の大気降下分の時空間分布については、Morino et al. (2013) [91] の WRF-CMAQ モデルによる ^{137}Cs 大気拡散再現結果 (水平格子間隔 3×3 km) を使用した。 ^{137}Cs の除去項には、放射性崩壊のみを考慮した。流動場の計算に必要な入力条件は以下のデータを使用した。大気条件のうち風速、気温、湿度、海面気圧については気象庁のメソ数値予報モデル (GPV-MSM) の予測データ (水平格子間隔 5 km、時間分解能 1 時間)

を用い、短波放射量と長波放射量については気象庁気候データ同化システム (JCDAS) の再解析データ (水平解像度 110 km、時間解像度 6 時間) を用いた。また、FRA-JCOPE2 (Miyazawa et al., 2009) [87] による海洋流動の再解析データ (水平解像度 $1/12^\circ$ 、時間解像度 1 日) を活用して、流動場の開境界条件を与えると同時に、水温・塩分の 3 次元同化 (ナッジング) を行った。なお、本シミュレーションの計算は NIES が保有するスーパーコンピュータ (NEC SX-8R/128M16) を用いて行っている。

5A. 10. WHOI-2D

観測値に基づく 2 次元海面流速場は、6 時間ごとの AVISO の地衡流速 (正規メルカトル $1/3^\circ \times 1/3^\circ$ グリッド) と 6 時間ごとの NOAA NCEP/NCAR 風応力から計算したエクマン流速 ($2^\circ \times 2^\circ$) との和として求めた。エクマン流速 (u_{Ek} , v_{Ek}) については、Ralph and Niiler (1999) [98] の方法、すなわち $u_{Ek} + i v_{Ek} = \beta e^{-i\theta} / (f\rho) (\tau_x + i\tau_y) / \sqrt{|\tau|}$ を用いて、海面上 10 m の風応力 (τ_x , τ_y) から 15 m 深のエクマン流速に変換した。ここで、 $\rho = 1,027 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ は海水密度、 f はコリオリパラメーター、 $\theta = 55^\circ$ はエクマン流の回転の角度、 β は $0.065 \text{ s}^{-1/2}$ とした。この観測値に基づく流速の見積もり方の長所は、その信頼性の高さと空間被覆領域の広さである。短所は時空間分解能が密でないこと、2 次元であること、さらに非地衡流成分が考慮されていない点である。水平方向の拡散および解像できない空間規模の現象による影響を考慮するため、確率論的な小さな流速 (ランダムな符号で 5 cm/s の標準偏差をもつ正規分布を仮定) を加えた。感度実験の結果、シミュレーション結果はこのランダムな流速に対して敏感ではないことが示されている。

^{137}Cs の拡散は、ラグランジュ粒子追跡法を使用してモデル化されており、放出源より仮想粒子が放出の全期間にわたって繰り返し放出される仕組みである。これらの仮想粒子は前述した流速場によって移流され、その軌跡は可変ステップ (ランダムな速度擾乱を加えたケース) もしくは固定ステップ (ランダムな速度擾乱がないケース) を用いた Runge-Kutta 積分法により求めている。また、30.16 年の ^{137}Cs の半減期も考慮した。このラグランジュモデルは、汚染水の位置を、時間を追って追跡することで、放出源からの分散に関わる物理的メカニズムを直感的に示すのに有効である。一方この手法の欠点は、放出する仮想粒子数を多く必要とすることによる数値計算の負荷と、簡略化した拡散過程にある。放出された仮想粒子数や放出頻度を増やすと、 ^{137}Cs のラグランジュ分布は相応の混合係数を仮定したオイラー法による見積り分布に近づく。本計算結果は、これ以上仮想粒子を増やしても結果が大きく変わらない程度の粒子数を用いたものである。すなわち、無限個の仮想粒子を用いた実験の結果と同等であることを示唆している。

5A. 11. WHOI-3D

^{137}Cs の分散計算は WHOI-2D モデルと同じであるが、3 次元の速度場には、高分解能の米海軍沿岸海洋分散モデル (NCOM) の結果 (Barron et al., 2004; 2006 [9] [10]) を用いている。この数値モデルは、格子間隔 $1/8$ 度の全球 HYCOM モデルの内部に、格子間隔 3 km の沿岸域

モデルを入れ子にしたものである。鉛直方向には合計 50 層あり、上層 15 層は z レベル、その下層は密度レベルによる 35 層のハイブリッド鉛直座標系である。駆動源となる海面での風と熱フラックスは Coupled Ocean/Atmosphere Mesoscale Prediction System for the Western Pacific (COAMPS_WPAC) のデータを用い、側面境界での潮汐にはオレゴン州立大学モデル (Egbert and Erofeeva, 2002) [27] によって提供されているデータを使用した。また、海軍海洋局から提供される海面水温、海面高度、海中の水温と塩分データを、最適内挿法を用いて同化している。本モデルでは、前日からのデータを同化し、さらに 48 時間の予測を行うサイクルを毎日実行した。このとき、データ同化を行っている 1 日ごとの結果を毎日蓄積し、2011 年 3 月中旬から 6 月末までの期間を含む長期間の時系列データを作成した。このようにして作成した時系列データには、1 日の最終時と次の日の開始時との間で流速場に不連続が発生してしまうが、その大きさは小さく、粒子追跡手法による ^{137}Cs の分散計算結果に影響は及ぼしていない。観測値に基づく WHOI-2D モデルと異なり、本モデルの流速場は 3 次元での分布を提供し、観測値から得られるものよりも時空間方向ともに高解像度という利点がある。一方、モデルの領域が小さいこと、黒潮や中規模渦の正確な位置など、この海域の特徴的な現象の再現性に限度があること、などが欠点として挙げられる。WHOI-2D の流速場と比べ、NCOM による流速場は黒潮速度を過大評価する傾向がある一方、そのほかの領域ではわずかに流速を過小評価している。また観測と比較すると、NCOM の流速場は黒潮流路の形状は現実的に捉えられているものの、流軸の蛇行や中規模渦の位置はわずかにずれている。中規模渦などに伴う流速の時間変動成分の振幅は、WHOI-2D と WHOI-3D モデルで同程度の値を示し、黒潮続流領域でもっとも高い値となっている。

付録 5B. ^{137}Cs の海面での水平分布図

本文中に、2011 年 3 月下旬および 4 月下旬の海面における 10 日平均 ^{137}Cs 水平分布および水平流速分布図を、付録 図 5.4 と 5.6 および付録 図 5.5 と 5.7 にそれぞれ示した。流速分布にみられる短周期変動や細かい空間スケールの変動、またそれらに関連する ^{137}Cs の分散過程にみられるモデル間の共通性や違いをより詳細に確認するためには、モデル比較の対象期間としている 6 月までのすべての 10 日平均場を示すことが重要である。そこで、ここに 3 月 22-31 日から 6 月 20-29 日までの 10 日平均の場を示す。なお、付録 図 5.4 から付録 図 5.7 に示されたものも再掲した。

5B.1. 海面における 10 日平均 ^{137}Cs 分布図

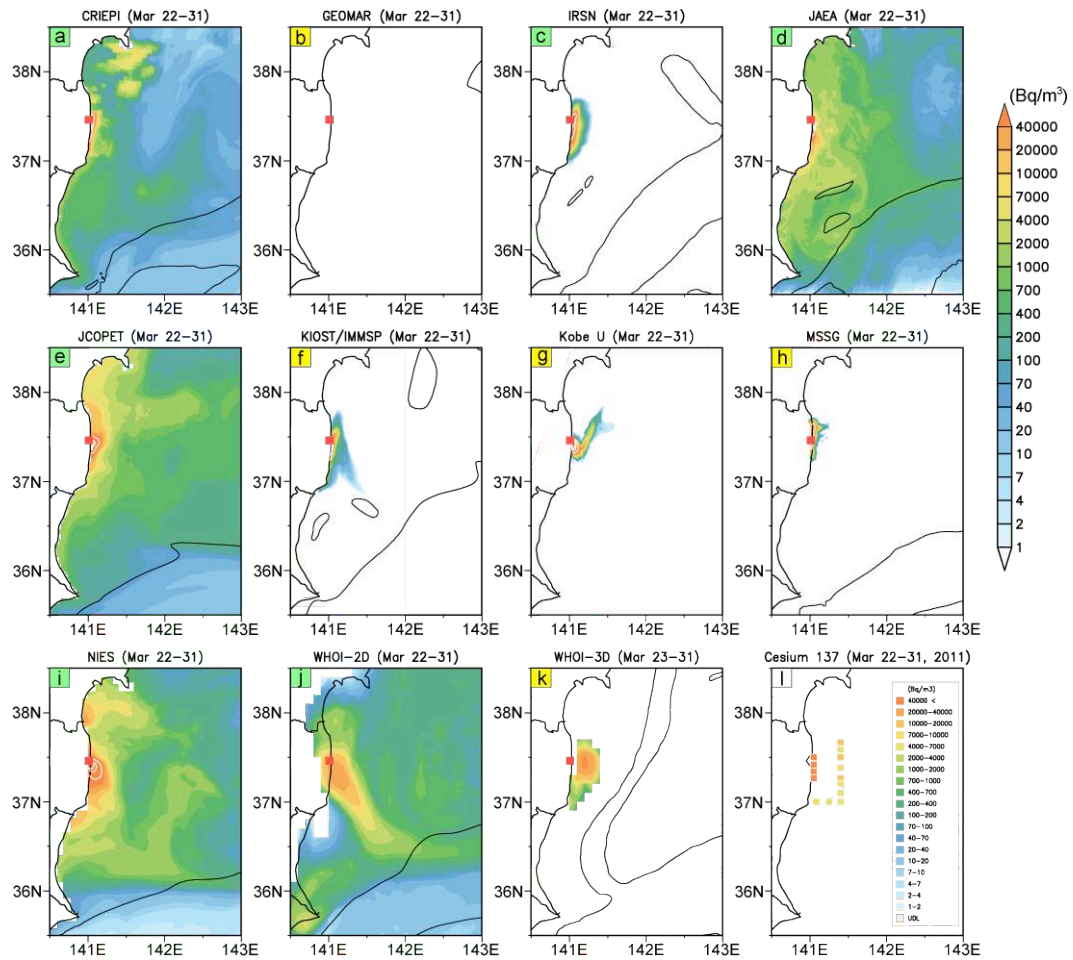


図 5B.1 (a)–(k) 2011 年 3 月 22 日から 31 日の 10 日平均 ^{137}Cs 濃度の水平分布。モデル名はそれぞれの図の上に記載。赤四角印は第一原発の場所を示す。黒実線は 0.5 m/s の海面流速の等値線であり、対象領域内の黒潮や他の比較的強い流れの場所を示している。図を表す記号の背景色が緑色(黄色)のものは、大気からの降下分を含む(含まない)モデルであることを示している。(l) 同じ 3 月 22 日から 31 日の 10 日の期間に観測された海面での ^{137}Cs 濃度の分布。

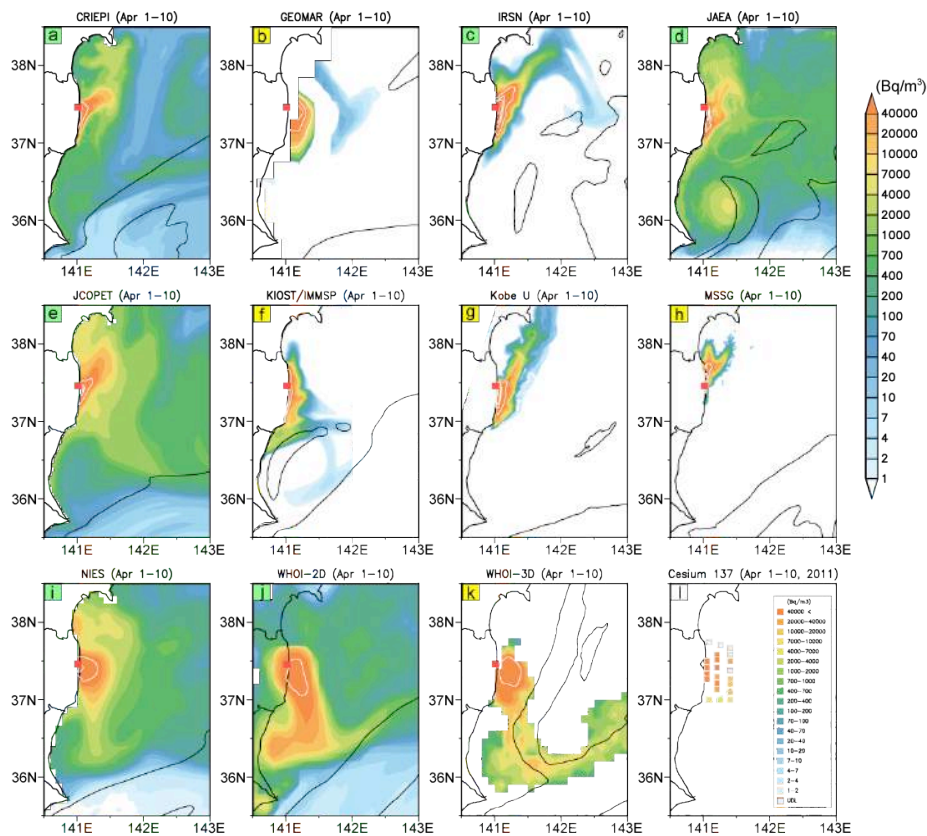


図 5B.2 図 5B.1 と同様。ただし 4 月 1 日から 10 日までの 10 日間平均場。

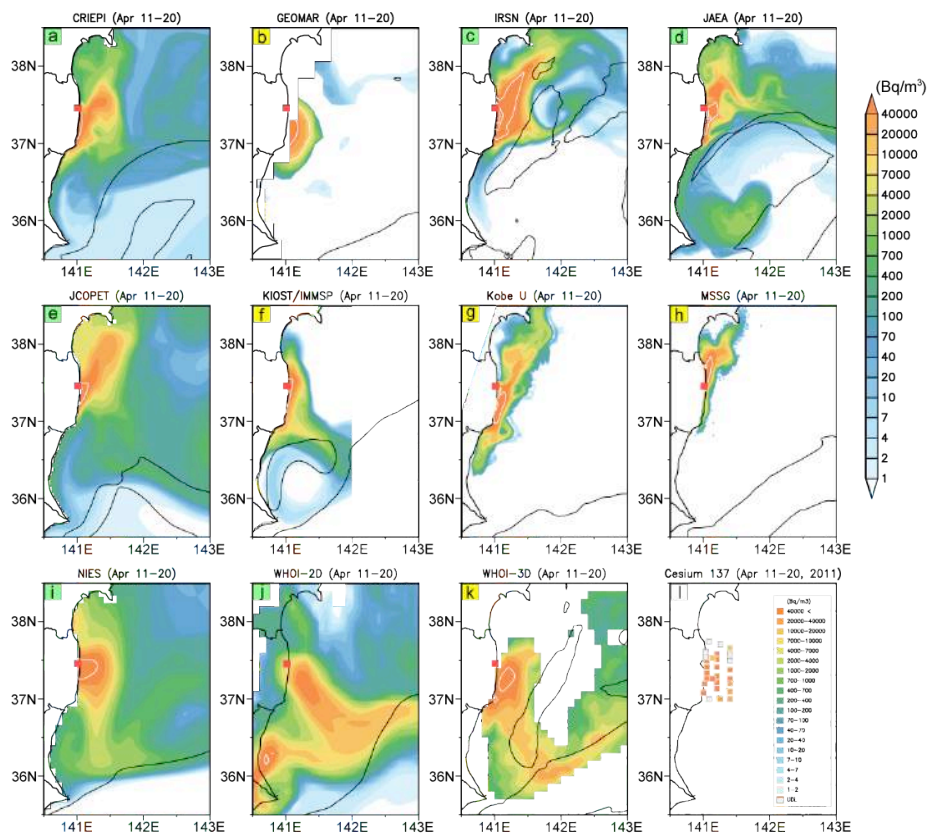


図 5B.3 図 5B.1 と同様。ただし 4 月 11 日から 20 日までの 10 日間平均場。

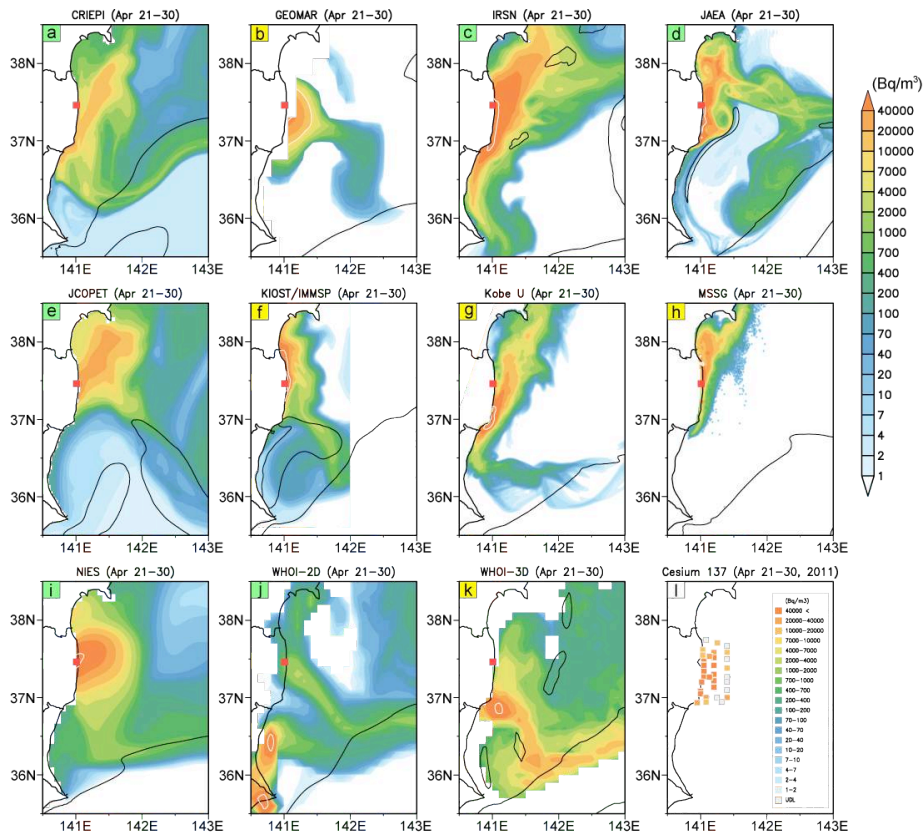


図 5B.4 図 5B.1 と同様。ただし 4 月 21 日から 30 日までの 10 日間平均場。

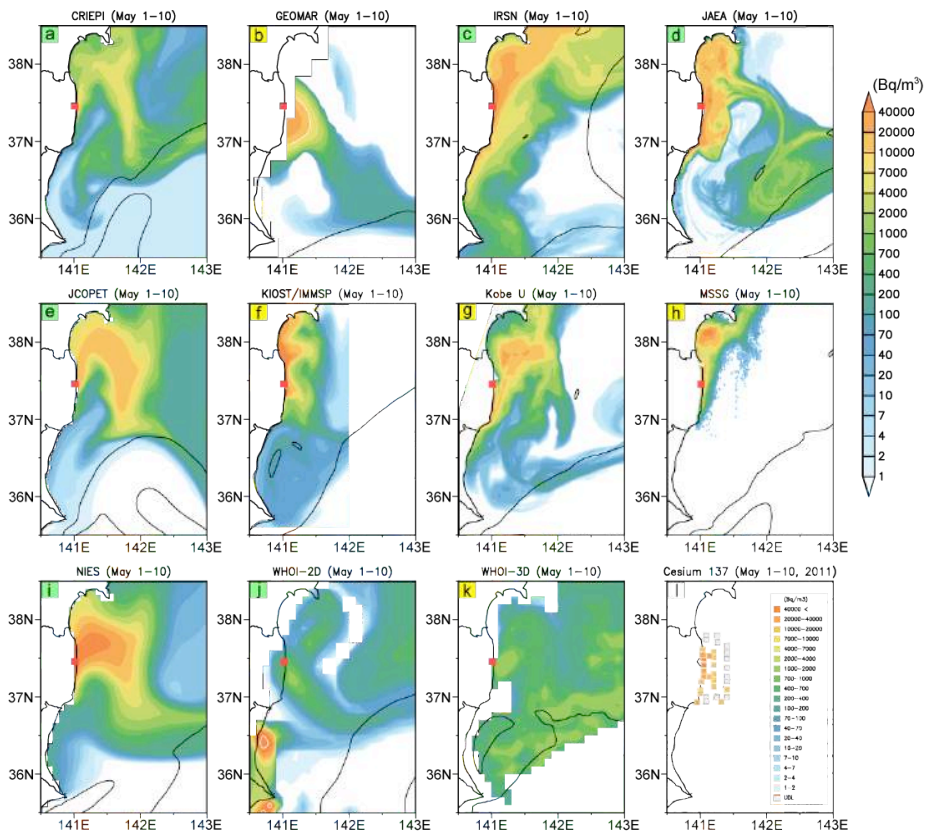


図 5B.5 図 5B.1 と同様。ただし 5 月 1 日から 10 日までの 10 日間平均場。

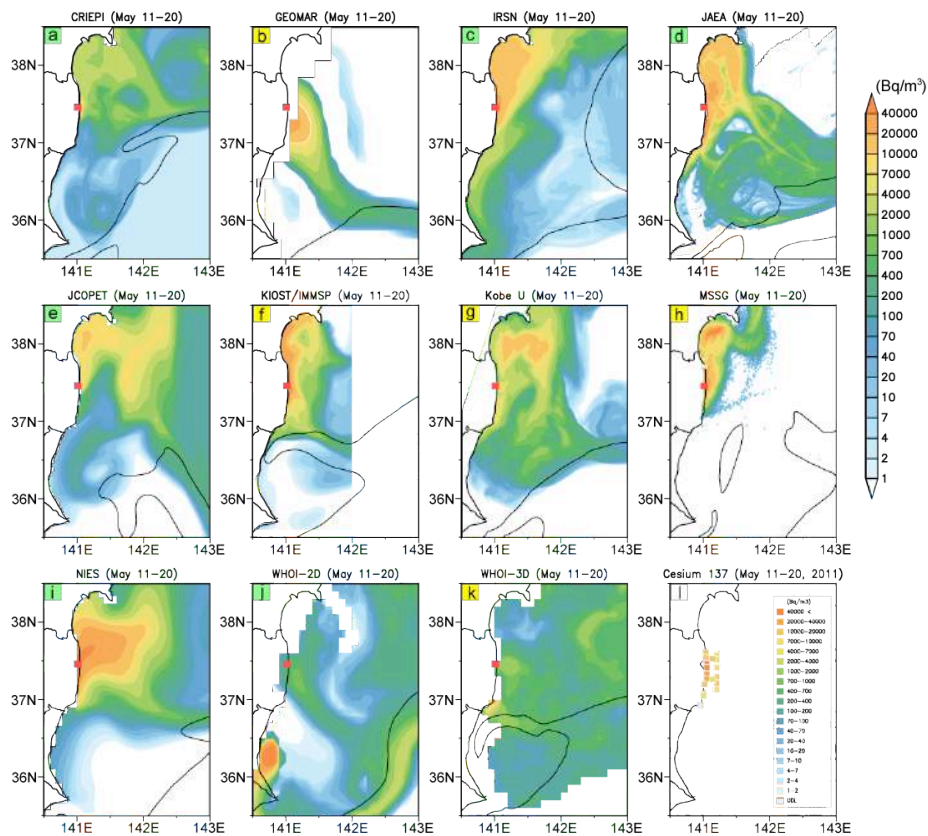


図 5B.6 図 5B.1 と同様。ただし 5 月 11 日から 20 日までの 10 日間平均場。

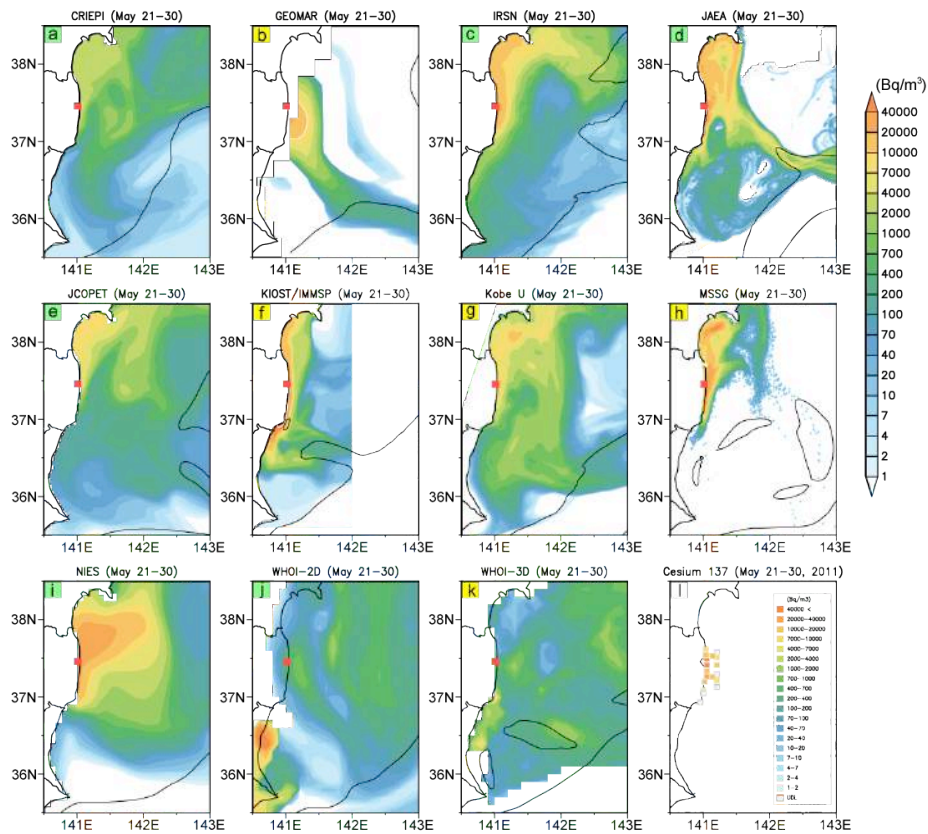


図 5B.7 図 5B.1 と同様。ただし 5 月 21 日から 30 日までの 10 日間平均場。

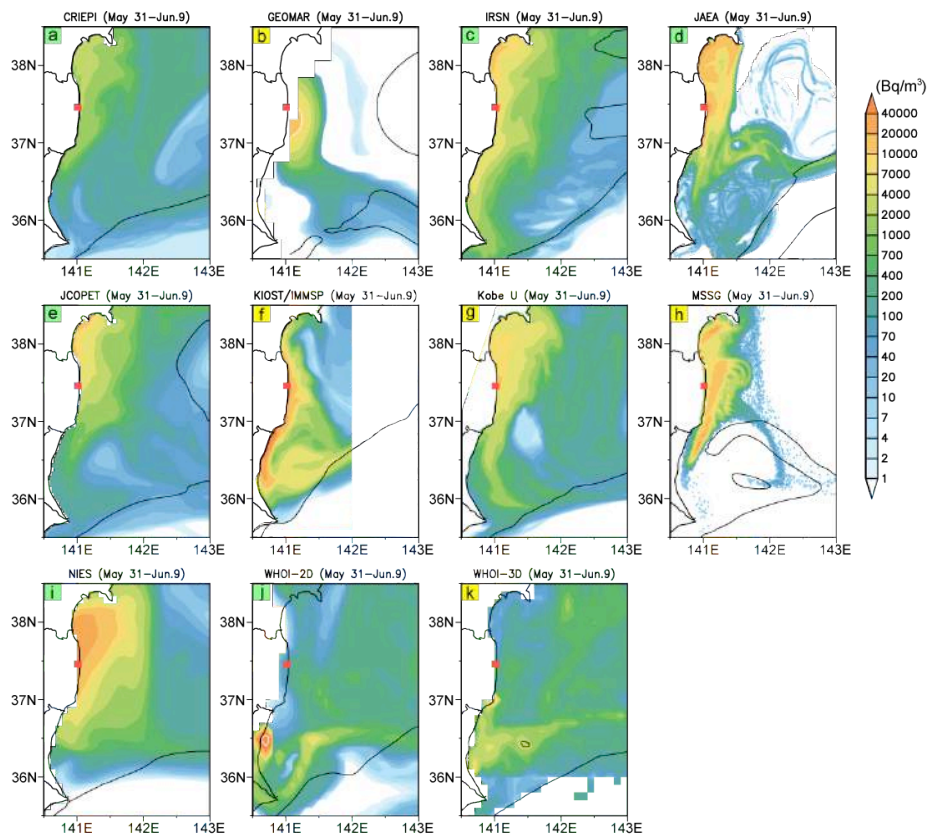


図 5B.8 図 5B.1 と同様。ただし 5 月 31 日から 6 月 9 日までの 10 日間平均場。

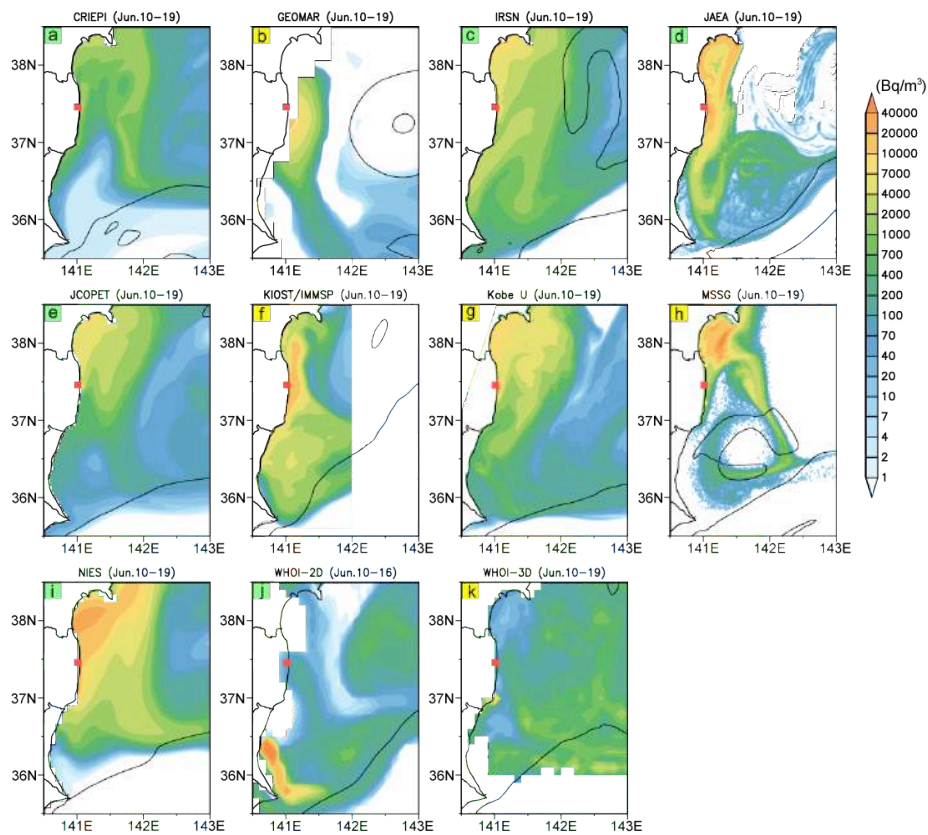


図 5B.9 図 5B.1 と同様。ただし 6 月 10 日から 6 月 19 日までの 10 日間平均場。

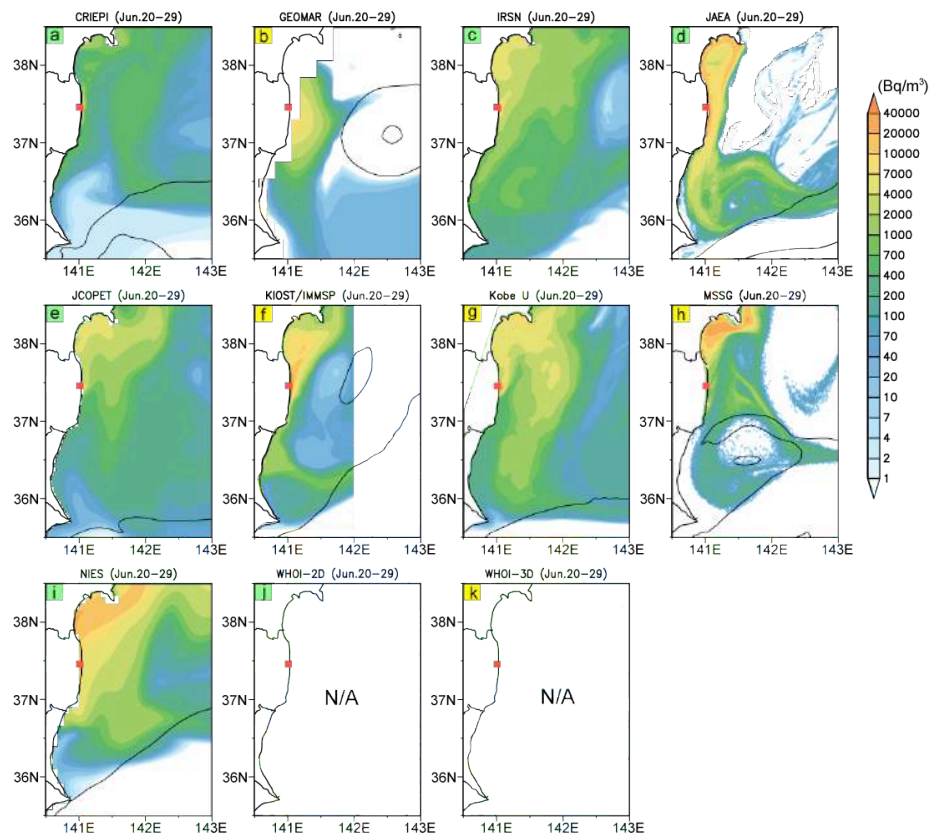


図 5B.10 図 5B.1 と同様。ただし 6 月 20 日から 29 日までの 10 日間平均場。

5B.2. 10 日平均海面流速分布図

海面流速場としては、各モデルでの最上層の値を用いた。

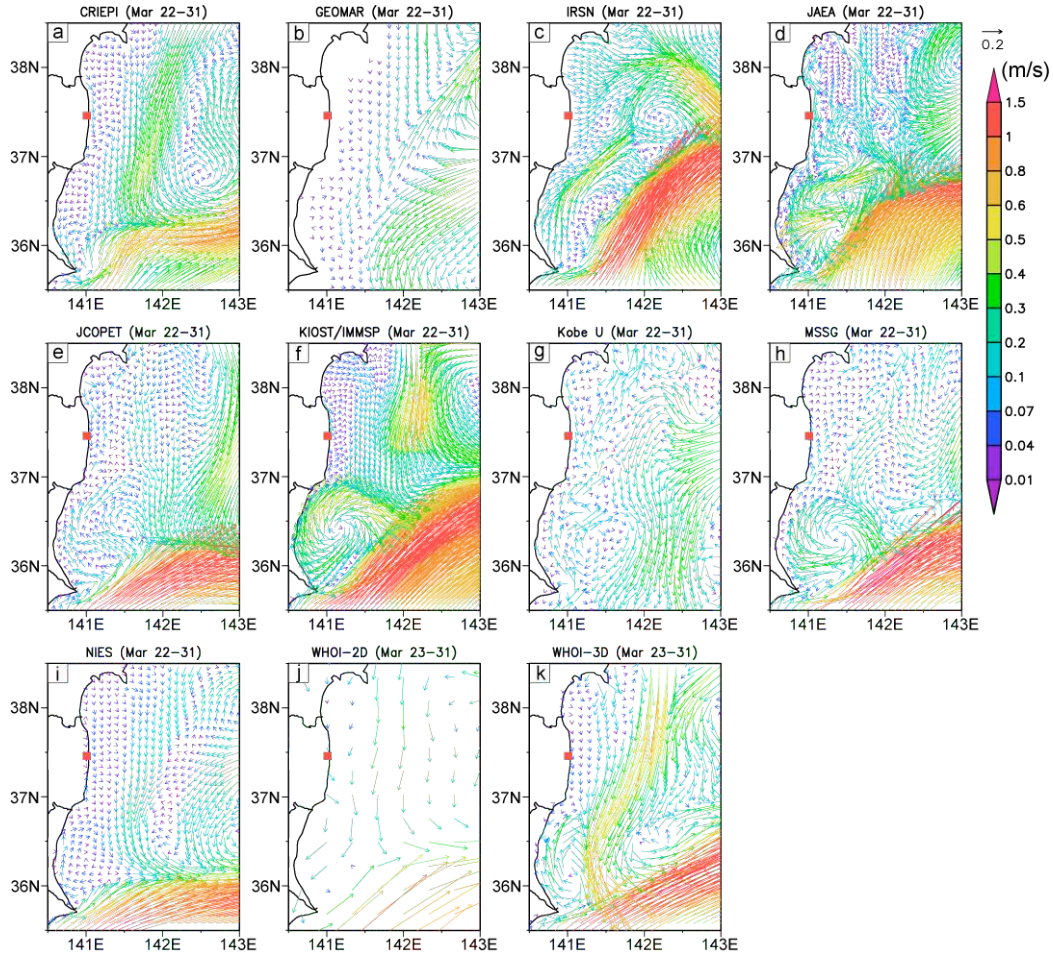


図 5B.11 2011 年 3 月 22 日から 31 日の 10 日平均海面水平流速分布。モデル名はそれぞれの図の上に記載。赤四角印は第一原発の場所を示す。WHOI-2D モデルは衛星による海面高度データより求めた地衡流分布のため、格子間隔は粗い。ほかのモデル結果は高解像度モデルの結果であるが、作図上の制約から、矢印は間引いて表示している。GEOMAR は ECMWF の外力により駆動されているが、2011 年の状況に近い 1993 年の結果を表示 (Dietze & Kriest 2012) [25]。

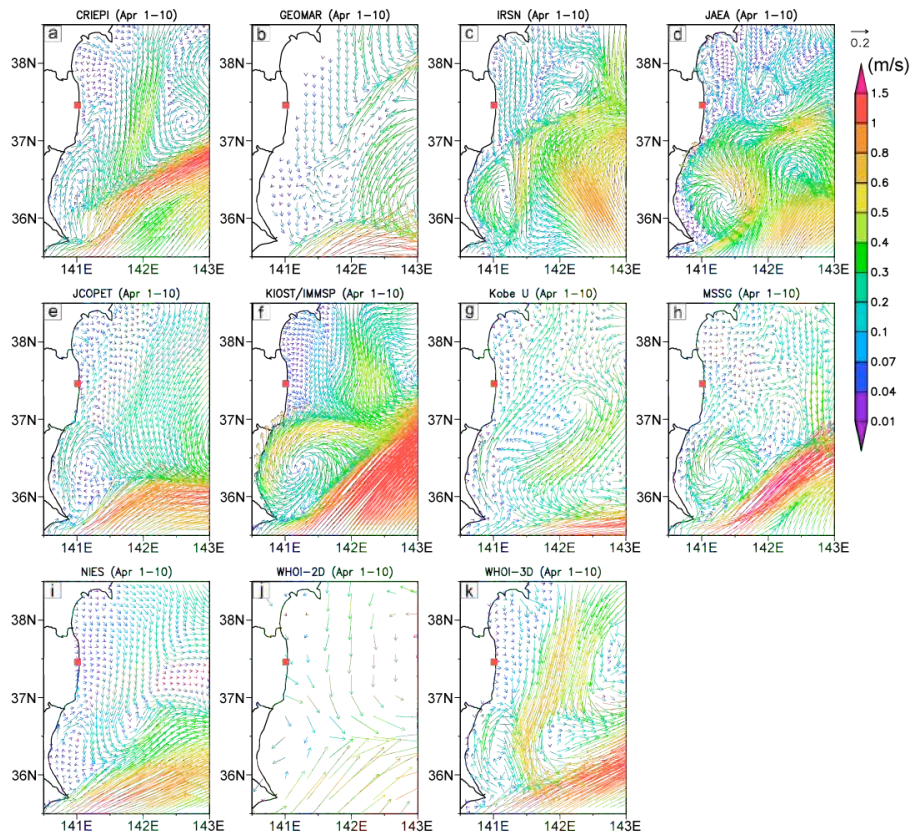


図 5B.12 図 5B.11 と同様。ただし 4 月 1 日から 10 日までの 10 日間平均場。

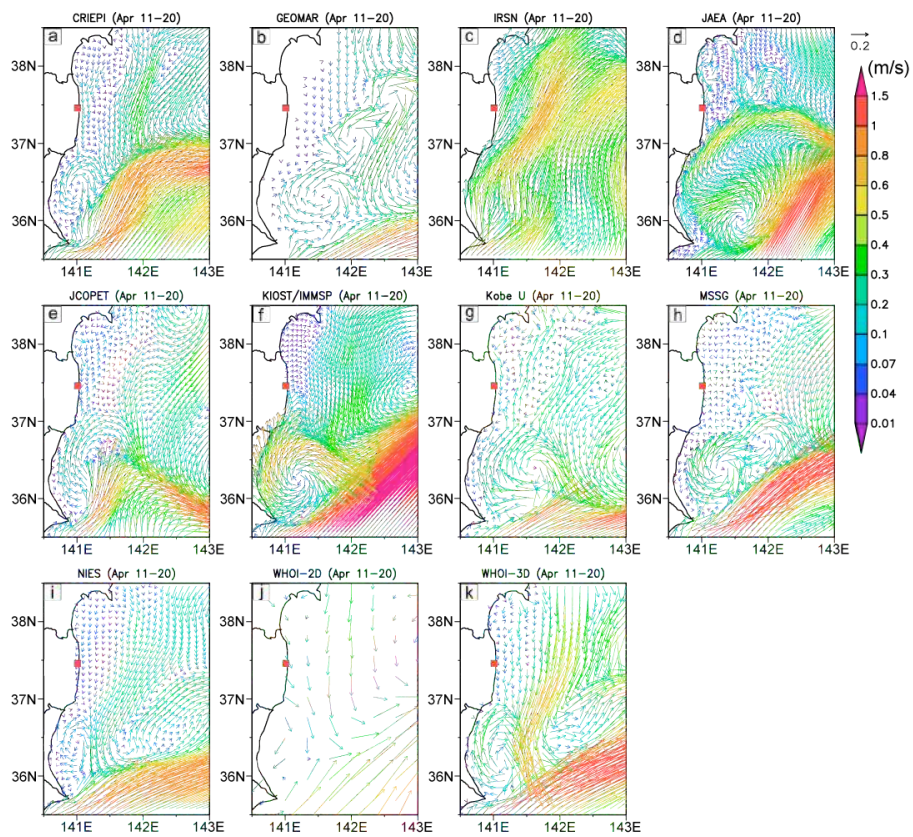


図 5B.13 図 5B.11 と同様。ただし 4 月 11 日から 20 日までの 10 日間平均場。

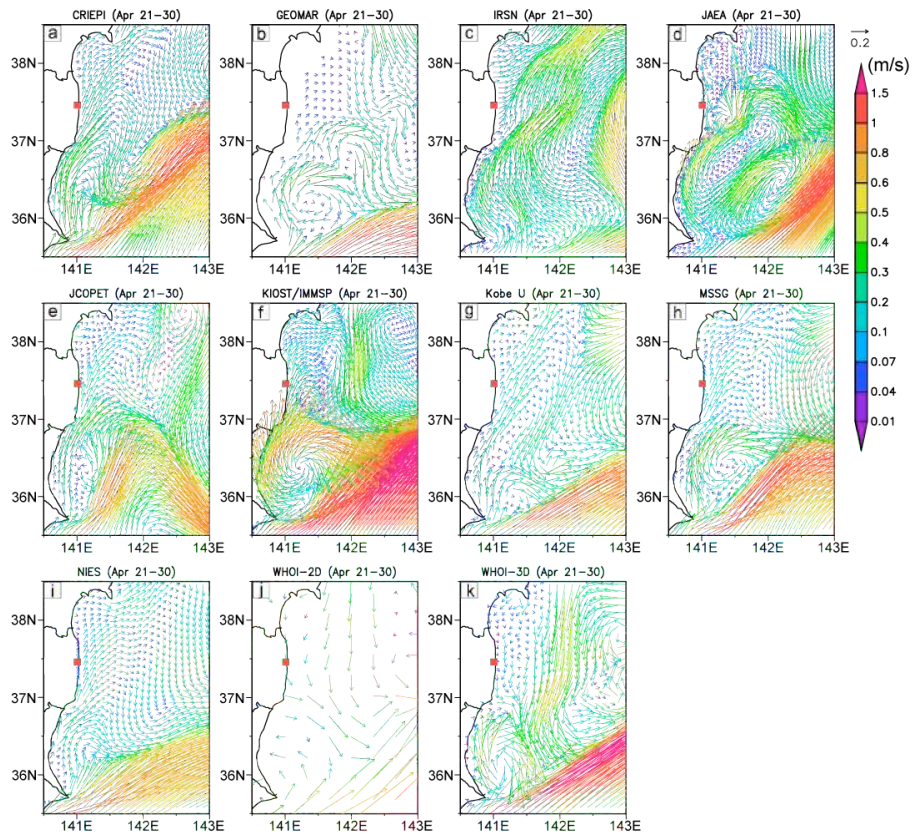


図 5B. 14 図 5B. 11 と同様。ただし 4 月 21 日から 30 日までの 10 日間平均場。

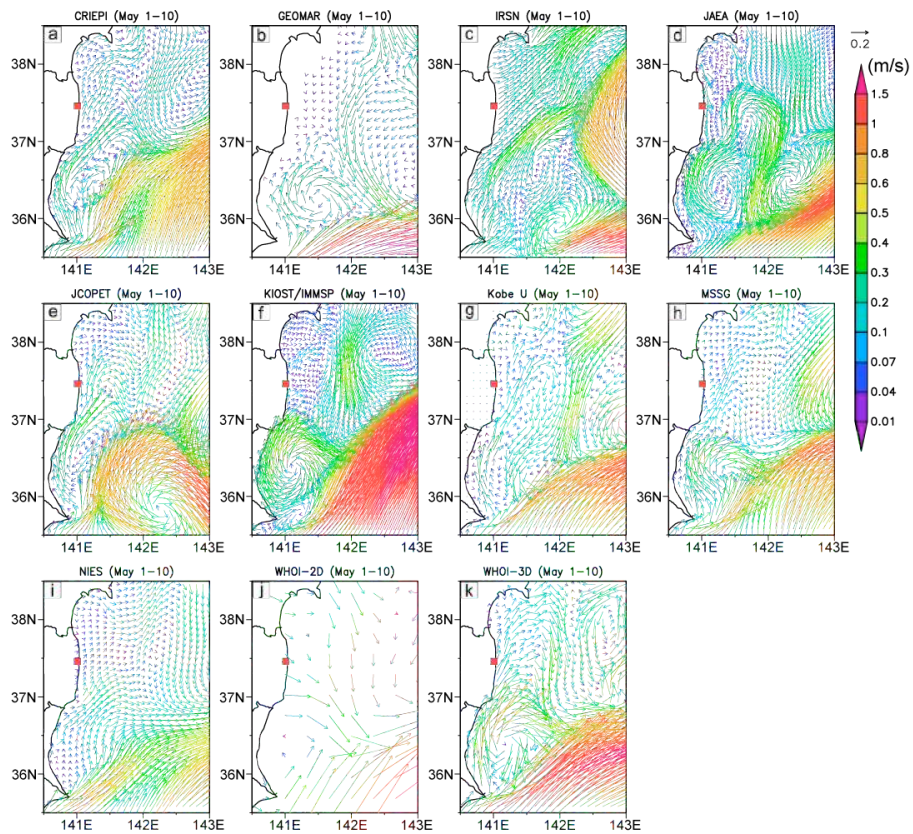


図 5B. 15 図 5B. 11 と同様。ただし 5 月 1 日から 10 日までの 10 日間平均場。

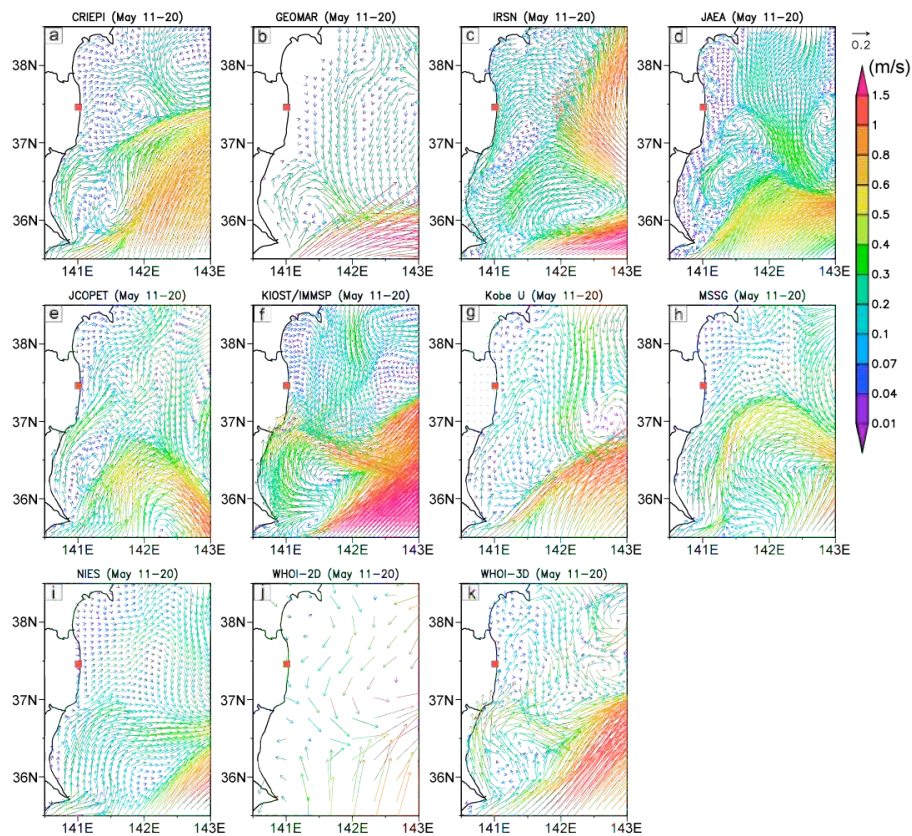


図 5B.16 図 5B.11 と同様。ただし 5 月 11 日から 20 日までの 10 日間平均場。

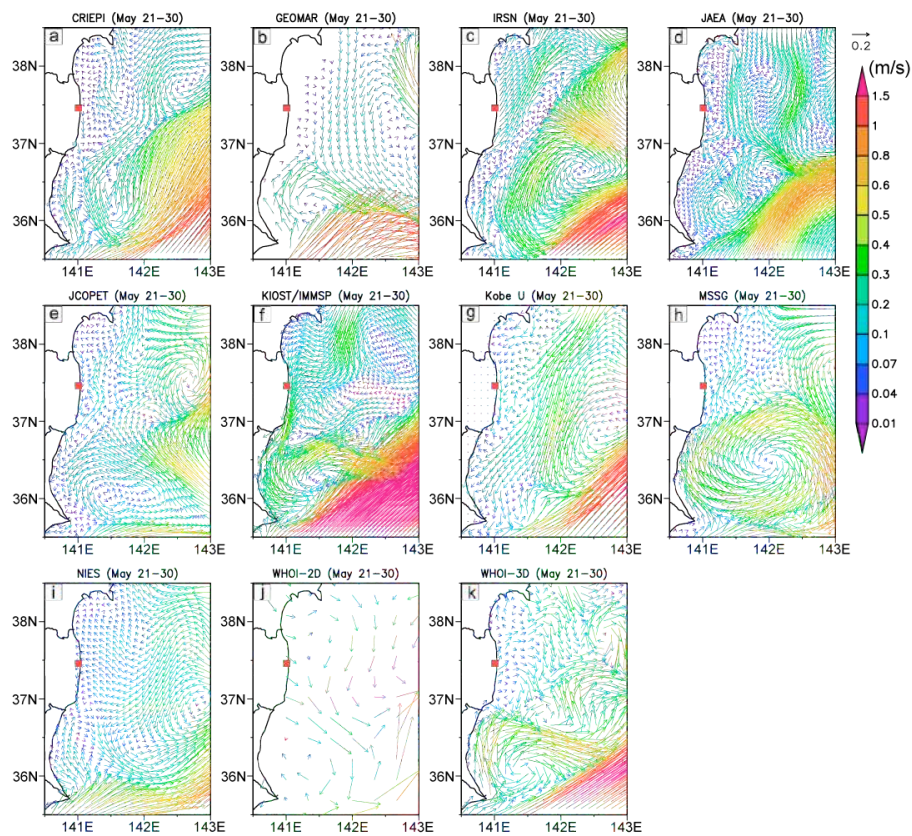


図 5B.17 図 5B.11 と同様。ただし 5 月 21 日から 30 日までの 10 日間平均場。

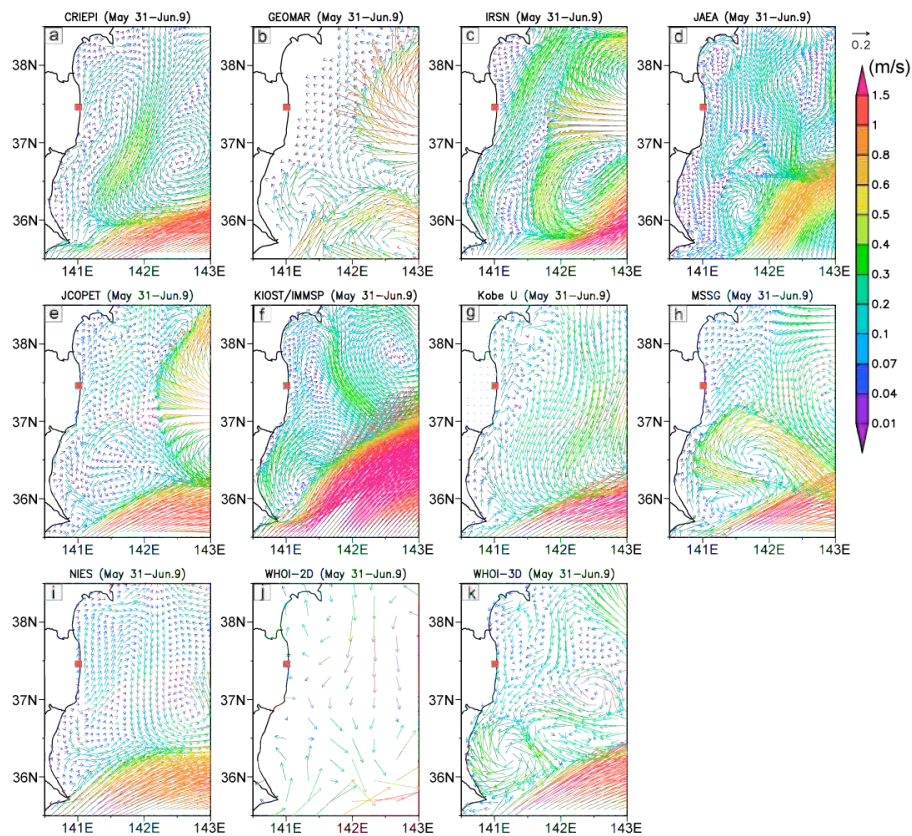


図 5B.18 図 5B.11 と同様。ただし 5 月 31 日から 6 月 9 日までの 10 日間平均場。

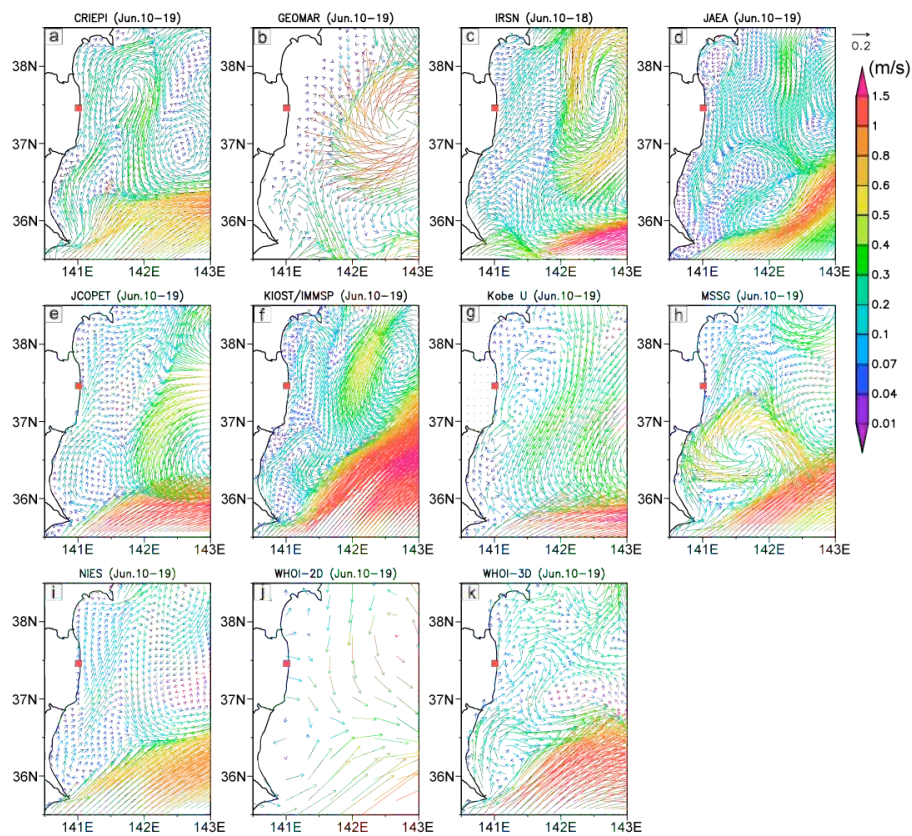


図 5B.19 図 5B.11 と同様。ただし 6 月 10 日から 19 日までの 10 日間平均場。

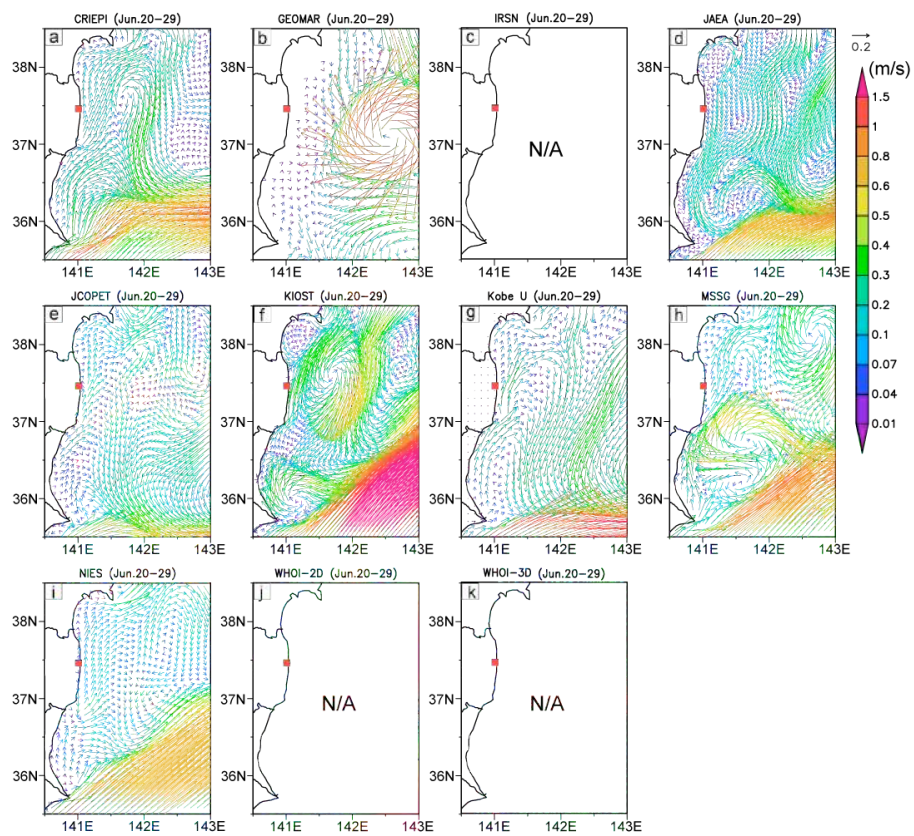


図 5B. 20 図 5B. 11 と同様。ただし 6 月 20 日から 29 日までの 10 日間平均場。

付録 5C. 人工衛星観測にみられる茨城沖の高気圧性渦

人工衛星からの海面水温やクロロフィル-a 濃度分布に、2011 年 5 月後半から 6 月にかけて茨城沖でみられた高気圧性渦の特徴がみられている。ここでは、Terra/MODIS 衛星によって観測された海面水温とクロロフィル-a 濃度分布を示す。内部に暖水(図 5C. 1)および低いクロロフィル-a 濃度(図 5C. 2)を取り込んだ中規模渦構造が茨城沖海域に明瞭に示されている。本モデル比較に用いた多くのモデルで、この高気圧性渦を捉えているが、その詳細な構造や場所にはモデル間で違いがみられる(付録 図 5. 7 を参照のこと)。

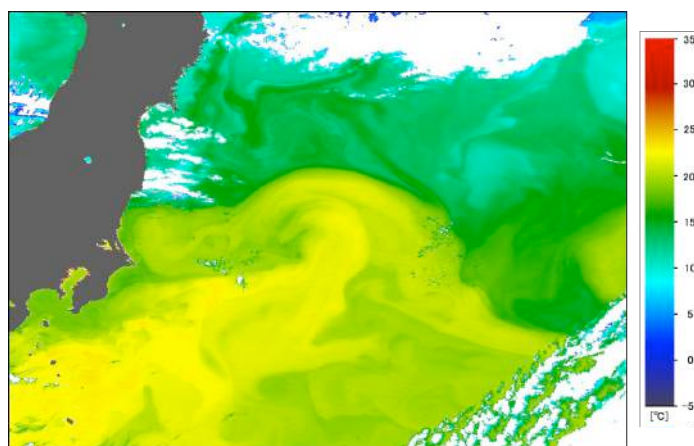


図 5C. 1 Terra/MODIS 衛星により観測された 2011 年 5 月 15 日の海面水温分布。
(画像データは、千葉大学環境リモートセンシング研究センターのデータベース
(<http://www.cr.chiba-u.jp/~database-jp/wiki/wiki.cgi>)より取得)

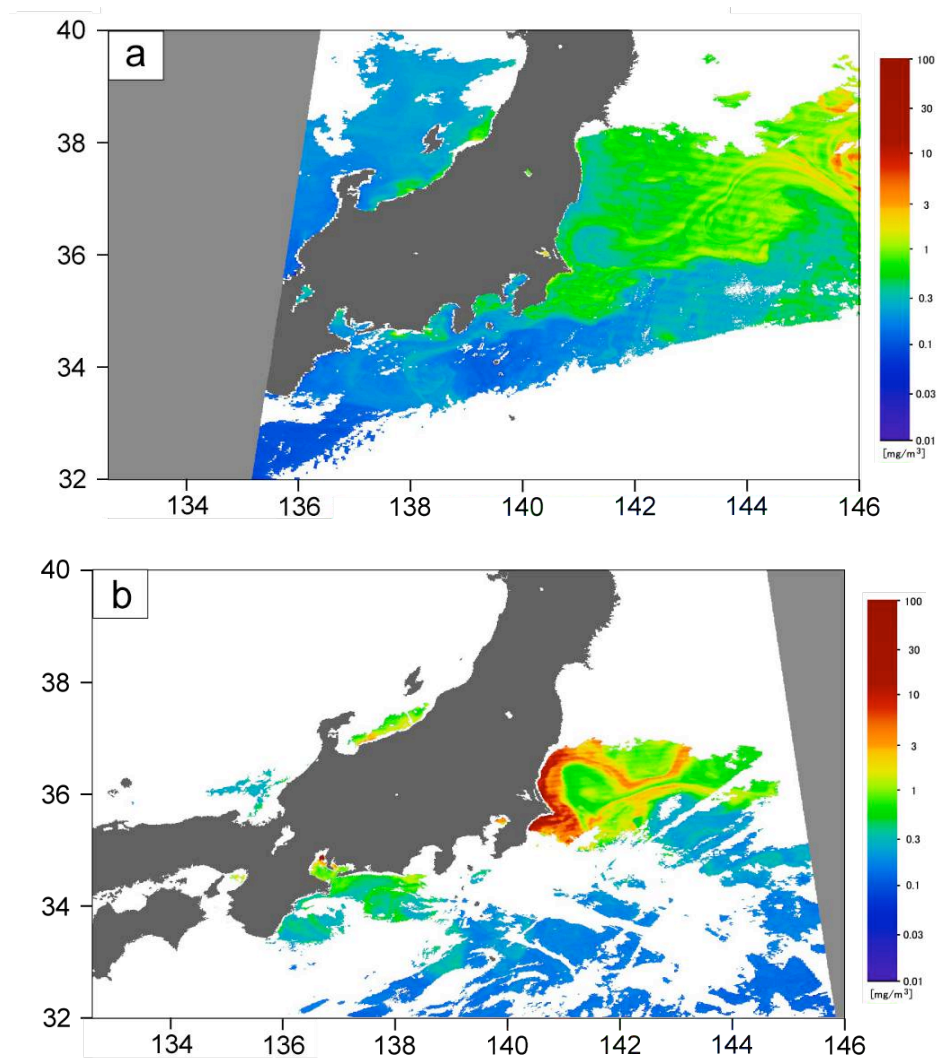


図 5C.2 Terra/MODIS 衛星により観測された (a) 2011 年 5 月 19 日および (b) 2011 年 5 月 21 日のクロロフィル-a 濃度の水平分布。

(画像データは、千葉大学環境リモートセンシング研究センターのデータベース
(<http://www.cr.chiba-u.jp/~database-jp/wiki/wiki.cgi>)より取得)

付録 5D. 福島沿岸域での放射能の航空機観測結果

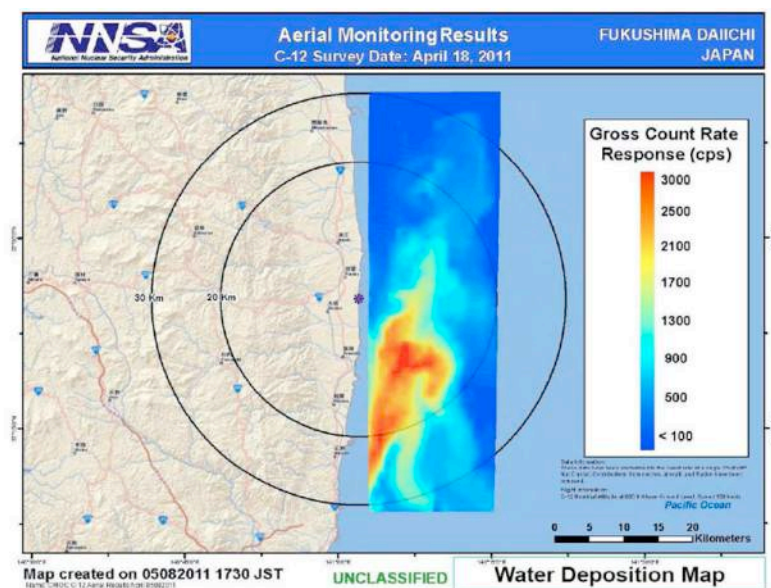


図 5D.1 2011 年 4 月 18 日に航空機により測定された第一原発近傍の海上での放射能強度分布(グロスカウント率、単位は cps)。single $2 \times 4 \times 10$ NaI Crystal のカウント率で規格化された値であり、ラドンの影響は除かれている (Guss, 2011) [39]。また、飛行高度は海面上 150 m から 700 m (MEXT, 2011) [86]。