# 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
		ニノオ	了壽	(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	1 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					
星口	E治		広島大学原爆放射線医学研究所教授					
桝本	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	沖山	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)

#### 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<sup>†1</sup>・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<sup>†</sup>、 6個の全球規模大気輸送モデル<sup>†</sup>、11個の海洋分散モデル<sup>†</sup>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

<sup>1</sup> 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<sup>†</sup>を用いた逆推計<sup>†</sup>」では、 2011 年 3 月 11 日から 4 月 19 日の期間内の大気への<sup>137</sup>Cs 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<sup>137</sup>Cs 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<sup>137</sup>Cs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<sup>↑</sup>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±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±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±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、<sup>137</sup>Cs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<sup>†</sup>によって計算された湿性沈着<sup>†</sup> 量は総沈着量の93±5%であった。一方、領域規模大気輸送モデル<sup>†</sup>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±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<sup>†</sup>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<sup>†</sup>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<sup>†</sup>と逆推計手法<sup>†</sup>を用いて高時間分解能シナリオ<sup>†</sup>を構築する必要がある。
  - ウ 海洋観測で得られた<sup>137</sup>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<sup>†</sup>

を駆動するための大気モデルによる<sup>137</sup>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<sup>†</sup>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<sup>†</sup>、化学輸送過程<sup>†</sup>、乾性・湿性沈着過程<sup>†</sup>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<sup>↑</sup>は領域規模大気輸送モデル<sup>↑</sup>による解析と全球規模大気輸送モデル<sup>↑</sup>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<sup>↑</sup>の全球規模大気輸送モデル<sup>↑</sup>とベイズ統合逆解析<sup>↑</sup>、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<sup>↑</sup>を用いた解析を行う必要がある。

		目    次	
1	序	論	1
2	£	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)	<sup>137</sup> Cs 積算沈着量	4
	(5)	積算沈着量の放射性物質間の比率( <sup>131</sup> Lと <sup>137</sup> 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)	<sup>137</sup> 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1(	)
	(4)	<sup>137</sup> Cs の全球大気滞留量の時系列変化1(	)
	(5)	<sup>137</sup> Cs の全球沈着量の時系列変化1(	)
	(6)	<sup>137</sup> Cs 総沈着量の水平分布	1
	(7)	観測された大気中濃度との比較1	1
	(8)	アンサンブル解析	2
	(9)	まとめ12	2
5	海	洋分散モデルの相互比較1	3
	(1)	はじめに1	3
	(2)	海面での <sup>137</sup> Cs の分布14	4
	1	3月22日から31日の分布14	4
	2	4月21日から30日の分布1	5
	(3)	時系列観測データとの比較16	6
	(4)	研究船 Ka'imikai-o-Kanaloa による観測結果との比較1	7
	(5)	まとめ	8
6	放	出量解析	9
	(1)	はじめに	9
	(2)	比較実験手法	9
	(3)	結果と議論	0
7	ま	とめと結論	1

(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
く参え	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(TEPC0, 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 1,000kBq m<sup>-2</sup> を越える放射性セシウム <sup>137</sup>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<sup>-3</sup>程度であり、それよりも 2 桁高い <sup>137</sup>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<sup>‡2</sup> (System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information)現業モデル<sup>†3</sup>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<sup>137</sup>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<sup>†</sup>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径路の把握は難しい。

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

<sup>2#</sup>印を付した用語は付録略語集を参照

<sup>3</sup>节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<sup>†</sup>、 6個の全球規模大気輸送モデル<sup>†</sup>、11個の海洋分散モデル<sup>†</sup>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<sup>†</sup>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<sup>†</sup>、全球規模大気輸送モデル <sup>†</sup>、海洋分散モデル<sup>†</sup>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<sup>†</sup>の違いを議論するために、気象庁の逆推計<sup>†</sup>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<sup>†</sup>により得られる知見を整理することを目的として、ワーキングループにおい て領域化学輸送モデル<sup>†</sup>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<sup>‡</sup>)では 放出シナリオ<sup>†</sup>や湿性沈着過程<sup>†</sup>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3kmから5km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<sup>‡</sup>)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<sup>†</sup>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<sup>‡</sup>のモデル結果については全球規模大気輸送モデル<sup>†</sup>とではなく領域規模大気輸 送モデル<sup>†</sup>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<sup>†</sup>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<sup>†</sup>(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1km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(およそ海抜高度 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<sup>131</sup>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) <sup>137</sup>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 <sup>137</sup>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 × 10<sup>5</sup> Bq m<sup>-2</sup> 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<sup>†</sup>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<sup>‡</sup>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は再現 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<sup>†</sup>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<sup>‡</sup>、NIES<sup>‡</sup>、JMA<sup>‡</sup> 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<sup>‡</sup>のモ デルはMRI<sup>‡</sup>や JMA<sup>‡</sup>などのモデルと同じ気象場(気象庁メソスケールモデル<sup>†</sup>)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<sup>†</sup>の計算領域に合わせた気象場を領 域気象モデル<sup>†</sup>(MM5<sup>‡,</sup> (Grell et al., 1994)[35]、WRF<sup>‡</sup>(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<sup>‡</sup>、CEREA<sup>‡</sup>、IRSN<sup>‡</sup>、JAEA<sup>‡</sup>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<sup>‡</sup>や JAMSTEC<sup>‡</sup>などのモデルで明瞭に現れていた。一方で CRIEPI<sup>‡</sup>、 CEREA<sup>‡</sup>、SNU<sup>‡</sup>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<sup>137</sup>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(IRSN<sup>\*</sup>、MRI<sup>\*</sup>など)や過小評価傾向を示すモデル(JAMSTEC<sup>\*</sup>など)があるが、全モデルのアンサンブル平均<sup>†</sup>(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<sup>137</sup>Cs 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<sup>†</sup>WRF<sup>†</sup>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<sup>†</sup>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 PBg 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気へ 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 1.3PBg から 3.8 PBg 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気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、大気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気への総放出量(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<sup>†</sup>と湿性沈着<sup>†</sup>の比率において大きな違いがみられた。MRI<sup>‡</sup>お よび NIES<sup>\*</sup>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<sup>†</sup>によるものと推 定しているのに対し、IRSN<sup>‡</sup>および SNU<sup>‡</sup>は過半数が乾性沈着<sup>†</sup>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 <sup>†</sup>によって計算された湿性沈着<sup>†</sup>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<sup>137</sup>Cs 沈着はおよそ 0.9 PBg から 5.5 PBg 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(<sup>131</sup> L と<sup>137</sup>Cs との比)

日本原子力研究開発機構(JAEA<sup>†</sup>) および 米国エネルギー省国家安全保障局(DOE/NNSA <sup>‡</sup>) は 2013 年 6 月に<sup>131</sup>I 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もので ある。また同期間の<sup>134</sup>Cs 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<sup>134</sup>Cs および<sup>137</sup>Cs 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<sup>131</sup>I/<sup>134</sup>Cs 比を各モデルの積算沈着量<sup>131</sup>I および <sup>137</sup>Cs の比率との検証に用いた。付録 図 3.4 に<sup>131</sup>I を考慮したモデルにおける<sup>131</sup>I およ び<sup>137</sup>Cs 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<sup>131</sup>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<sup>†</sup>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<sup>‡</sup>による放出シナリオ<sup>†</sup>、および気象庁メソスケールモデル<sup>†</sup>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<sup>†</sup>を計算する際に使用した、気象庁メソスケールモデル<sup>†</sup>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<sup>‡</sup>モデル(WRF-CMAQ<sup>‡</sup>; 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<sup>‡</sup>モデル を用いた感度実験の結果、<sup>131</sup>I/<sup>137</sup>Cs 積算沈着量比は放出の際の<sup>131</sup>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<sup>†</sup>(JAEA<sup>‡</sup>および\_MA<sup>‡</sup>)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<sup>‡</sup>では三種類の放出シナリオ<sup>†</sup>を用いた比較実験を行った。用いた放出シナリオ<sup>†</sup> はそれぞれ JAEA<sup>‡</sup> (Terada et al., 2012) [133]、ノルウェー大気研究所(NILU<sup>‡</sup>) (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<sup>†</sup>はすべて数値モデルと観測データを用いた逆推計<sup>†</sup>による推定結果であ る。数値モデルとして、JAEA<sup>‡</sup>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<sup>‡</sup>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<sup>‡</sup>は空間解像度1km(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1kmのものをそれぞ れ使用している。

化学輸送モデル<sup>†</sup>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<sup>‡</sup>の放出シナリオ<sup>†</sup>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 (≥10 kBq m<sup>-2</sup>) 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<sup>‡</sup>の放出シナリオ<sup>†</sup>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 <sup>‡</sup>の放出シナリオ<sup>†</sup>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<sup>†</sup>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<sup>‡</sup>では湿性沈着過程<sup>†</sup>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<sup>†</sup> CMAQ<sup>‡</sup>においては、凝集モード粒子<sup>†</sup>の湿性沈着<sup>†</sup>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<sup>‡</sup>における湿性沈着<sup>†</sup>モジュールはプロセスベースモデル<sup>†</sup>であ り、このモデルを用いたエアロゾルの湿性沈着<sup>†</sup>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<sup>†</sup>モジュールを用いた計算を標準実験とした。加えて、NIES<sup>‡</sup>においては JAEA<sup>‡</sup>モデル(Terada et al., 2012)[133]と同一の湿性沈着<sup>†</sup>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<sup>†</sup>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<sup>†</sup>モジュールは、プロセスベースモデ ル<sup>†</sup>ではなく、経験則ベースモデル<sup>†</sup>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<sup>‡</sup>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<sup>†</sup>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<sup>†</sup>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<sup>†</sup>の湿性沈着過程<sup>†</sup>の利用を検討すべきであると考えられる。

#### (8) <sup>137</sup>Cs 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<sup>137</sup>Cs 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<sup>-2</sup> 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<sup>†</sup>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<sup>†</sup>(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<sup>‡</sup>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<sup>‡</sup>、JAEA<sup>‡</sup>、および JMA<sup>‡</sup>は FB > 20% の過大評価傾向に あり、 CRIEPI<sup>‡</sup>、 JAMSTEC<sup>‡</sup>、そして SNU<sup>‡</sup>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<sup>‡</sup>、IRSN<sup>‡</sup>、CRIEPI<sup>‡</sup>、 JAEA<sup>‡</sup>、および NIES<sup>‡</sup>が FMS > 60 と良い近似性を示していた。JAMSTEC<sup>‡</sup>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<sup>‡</sup>および CEREA<sup>‡</sup>が良い再現性を示していた。NIES<sup>‡</sup>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<sup>‡</sup>、CRIEPI<sup>‡</sup>、JAEA<sup>‡</sup>、MRI<sup>‡</sup>、 およびNIES<sup>‡</sup>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を参加したすべてのモデルによるアンサンブル 平均<sup>†</sup>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<sup>‡</sup>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<sup>†</sup>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<sup>†</sup>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<sup>†</sup>や積 雲対流<sup>†</sup>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<sup>†</sup>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<sup>†</sup>の影響が大きい。

3)領域規模大気輸送モデル<sup>†</sup>によって計算された湿性沈着<sup>†</sup>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)。

4) モデルアンサンブル<sup>†</sup>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<sup>†</sup>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<sup>†</sup>と1つの領域規模大気輸送モ デル<sup>†</sup>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<sup>‡</sup>、EMAC<sup>‡</sup>、MASINGAR-1<sup>‡</sup>、MASINGAR mk-2<sup>‡</sup>)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<sup>†</sup>である TM5<sup>‡</sup>、および領域輸送モデル MRI-PM/r<sup>‡</sup>は同化<sup>†</sup>された気象場、 またはほかの力学モデル<sup>†</sup>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 <sup>†</sup>またはセミ・ラグランジュ型モデル<sup>†</sup>であり、ラグランジュ型拡散モデル<sup>†</sup>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<sup>†</sup>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<sup>‡</sup>による放 出量の逆推計<sup>†</sup>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<sup>†</sup>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<sup>137</sup>Cs の放出 量の時間変化推定値を付録 図 4.1 に示す。

JAEA<sup>‡</sup>は、第一原発事故による<sup>137</sup>Csや<sup>131</sup>I などの放射性物質放出量の時系列変化を、逆 推計手法<sup>†</sup>を用いて求めている。日本国内の観測値のみを用いた JAEA<sup>‡</sup>による<sup>137</sup>Cs 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<sup>‡</sup>と世界各地の観測値を用いて <sup>137</sup>Cs と <sup>133</sup>Xe の放出量を逆推計<sup>†</sup>している。Stohl et al. (2012) [116]の推定による <sup>137</sup>Cs 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<sup>‡</sup>の推定量に対して非常に大きく、おおよそ4倍の差がある。<sup>133</sup>Xe 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<sup>137</sup>Cs の全球総沈 着量と乾性沈着<sup>†</sup>量・湿性沈着<sup>†</sup>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<sup>137</sup>Cs のほとんどは降水による湿性沈着過程<sup>†</sup>によって除去されている。乾性沈着 <sup>†</sup>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<sup>†</sup>と湿性沈着<sup>†</sup>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<sup>†</sup>によって 計算された湿性沈着<sup>†</sup>量と総放出量の比の平均値は 93±5%である(付録 表 4.2 参照)。

#### (4) <sup>137</sup>Cs の全球大気滞留量の時系列変化

付録 図 4.2 は <sup>137</sup>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<sup>‡</sup>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 <sup>137</sup>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<sup>‡</sup>による <sup>137</sup>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、JEAE<sup>‡</sup>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<sup>137</sup>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<sup>137</sup>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 度目の極大値から後は、<sup>137</sup>Cs 総量は時間とともに減少して いる。JAEA<sup>‡</sup>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) <sup>137</sup>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<sup>137</sup>Cs の日別総沈着量の時 系列変化を示している。JAEA<sup>‡</sup>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<sup>137</sup>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1-3PBq day<sup>-1</sup>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8-11PBq day<sup>-1</sup>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) <sup>137</sup>Cs 総沈着量の水平分布

付録 図4.4は3月末時点での<sup>137</sup>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、<sup>137</sup>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<sup>137</sup>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<sup>137</sup>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<sup>137</sup>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<sup>†</sup>の違いによって<sup>137</sup>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<sup>137</sup>Cs 沈着量分布は、太平洋側に輸送された<sup>137</sup>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<sup>†</sup>)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<sup>137</sup>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<sup>137</sup>Csの大気中濃度はCTBTO<sup>†</sup>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<sup>137</sup>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。<sup>137</sup>Cs 濃度の比較的高い領域(>0.01 µBq m<sup>-3</sup>)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<sup>‡</sup>の放出量推定値を用いたものでは、比較的濃度の低い領域(< ~0.01 µBq m<sup>-3</sup>)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<sup>‡</sup>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<sup>†</sup>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<sup>‡</sup>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<sup>‡</sup>/mk-2<sup>‡</sup>および EMAC T106/T255<sup>‡</sup>は異なった傾向を示している。MASINGAR-1<sup>‡</sup>お よび mk-2<sup>‡</sup> 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<sup>‡</sup>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<sup>‡</sup>および T255<sup>‡</sup>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<sup>‡</sup>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<sup>‡</sup>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<sup>†</sup>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°×1°解像度にデータの再サンプルを行い、アンサンブル平均<sup>†</sup>と変動係数を求めた。付録図4.6は2011年3月末時点での<sup>137</sup>Cs の総沈着量分布のアンサンブル平均<sup>†</sup>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、<sup>137</sup>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<sup>‡</sup> (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<sup>†</sup>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<sup>†</sup>によって大気中 から<sup>137</sup>Csを除去しており、全球規模大気輸送モデル<sup>†</sup>によって計算された湿性沈着<sup>†</sup>量 と総放出量の比の平均値は 93±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<sup>†</sup>とその大きさの違いが<sup>137</sup>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<sup>137</sup>Csの大まかな沈着パターンはよく一 致しており、<sup>137</sup>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<sup>137</sup>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(< ~0.01 μBq m<sup>-3</sup>)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<sup>‡</sup>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<sup>†</sup>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<sup>†</sup>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<sup>†</sup>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ーの計算と同様に移 流拡散スキーム<sup>†</sup>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<sup>†</sup> 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<sup>137</sup>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<sup>137</sup>Cs濃度のモニタリング値を参考にしているが、主に、JAEA<sup>‡</sup>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<sup>‡</sup>型)(Kawamura et al., 2011)[59]と、電力中央研究所(CRIEPI<sup>‡</sup>)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<sup>‡</sup>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<sup>137</sup>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<sup>137</sup>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<sup>†</sup>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<sup>†</sup>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<sup>137</sup>Cs流入量の大きな不確実性、 また海洋分散モデル<sup>†</sup>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<sup>137</sup>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<sup>137</sup>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<sup>-3</sup>を超える高い<sup>137</sup>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<sup>-3</sup>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<sup>137</sup>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<sup>-1</sup>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<sup>137</sup>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 通過する大気の総観規模攪乱<sup>†</sup>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<sup>137</sup>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<sup>‡</sup>、Kobe U<sup>‡</sup>、MSSG<sup>‡</sup>および WHOI-3D<sup>‡</sup>の大気降下分を考慮していないモデルでは、<sup>137</sup>Csの分布は福島沿岸域に集中しているが、CRIEPI<sup>‡</sup>、JAEA<sup>‡</sup>、JCOPET<sup>‡</sup>、NIES<sup>‡</sup>および WHOI-2D<sup>‡</sup>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<sup>137</sup>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 O Bq m<sup>-3</sup>となっているが、降下分を考慮したモデルでは 10000 Bq m<sup>-3</sup>程度の値を示している。ただし、IRSN<sup>‡</sup>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の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<sup>137</sup>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<sup>-1</sup>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<sup>137</sup>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<sup>137</sup>Cs濃度の低い海水を南へと運ぶ役割も担っており、<sup>137</sup>Cs濃度の複雑な空 間分布を形作っている。その後、<sup>137</sup>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<sup>137</sup>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<sup>137</sup>Csの分布である。 KIOST/IMMSP<sup>‡</sup>(付録 図 5.5 (f))および MSSG<sup>‡</sup>(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<sup>‡</sup>(付録 図 5.5 (d))および WHOI-3D<sup>‡</sup>(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<sup>137</sup>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<sup>†</sup>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<sup>†</sup>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<sup>‡</sup>、JAEA<sup>‡</sup>、JCOPET <sup>‡</sup> および NIES<sup>‡</sup>の結果では、<sup>137</sup>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<sup>137</sup>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、<sup>137</sup>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<sup>-3</sup> 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<sup>-3</sup> 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<sup>-3</sup> 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<sup>-3</sup>)以下となっている。

4月下旬には、多くのモデルで<sup>137</sup>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<sup>137</sup>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、茨城沖の時計回りの循環は、岸に沿う<sup>137</sup>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<sup>‡</sup>やWHOI-2D<sup>‡</sup>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<sup>137</sup>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<sup>137</sup>Cs 分布の南下傾向、あるいは南東方向への広がりは、IRSN<sup>‡</sup>と MSSG<sup>‡</sup>モデルを除く多くのモデルでみられる。南下した<sup>137</sup>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<sup>137</sup>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<sup>†</sup>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<sup>†</sup>のデータ同化手 法<sup>†</sup>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<sup>†</sup>の結果が領域海洋分散モデル<sup>†</sup>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<sup>†</sup>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<sup>137</sup>Cs 濃度の時間発展の再現性を検証するため、約10km 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16km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<sup>137</sup>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<sup>137</sup>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<sup>137</sup>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<sup>‡</sup>、 KIOST/IMMSP<sup>‡</sup>、Kobe U<sup>‡</sup>および MSSG<sup>‡</sup>)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<sup>137</sup>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<sup>131</sup>I/<sup>137</sup>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<sup>137</sup>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<sup>137</sup>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<sup>‡</sup>)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<sup>137</sup>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<sup>‡</sup>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<sup>‡</sup>による観測領域の北側と北東側を中心に、<sup>137</sup>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<sup>137</sup>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<sup>®</sup>観測結果では、 海面での<sup>137</sup>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<sup>137</sup>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<sup>‡</sup>観測域内での<sup>137</sup>Cs インベントリ<sup>†</sup>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<sup>†</sup>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<sup>†</sup>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<sup>137</sup>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<sup>†</sup>の比較的大きな 値を示した IRSN<sup>‡</sup>、JCOPET<sup>‡</sup> および NIES<sup>‡</sup>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)において亜表層の<sup>137</sup>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。 ー方、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<sup>137</sup>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<sup>137</sup>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<sup>‡</sup>、 KIOST/IMMSP<sup>‡</sup>および MSSG<sup>‡</sup> 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<sup>137</sup>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)の両者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 <sup>†</sup>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<sup>†</sup>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 <sup>137</sup>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<sup>‡</sup>の茅野らは、SPEEDI<sup>‡</sup>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<sup>137</sup>Csと<sup>131</sup>I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<sup>137</sup>Cs 放出量は 9.1PBg 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<sup>137</sup>Cs 放出量は 8.8PBg 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<sup>\*</sup>のStohlらはFLEXPART<sup>\*</sup>とCTBTO<sup>†</sup>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、<sup>137</sup>Cs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<sup>‡</sup>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<sup>†</sup>を用いていることである。ラグランジュ型モデル<sup>†</sup>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<sup>†</sup>、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<sup>†</sup>の全球輸送モデルとベイズ統合逆解 析<sup>†</sup>(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<sup>†</sup>の全球エアロゾル輸送モデル MASINGAR<sup>‡</sup> (Tanaka et al., 2005) [124] を水平解像度約 60km(TL319) で用いた。<sup>137</sup>Cs 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<sup>†</sup>)、これを用いて1日あたりの結果を計算した。 放出された<sup>137</sup>Cs 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 0.7μm として乾燥・湿性沈着<sup>†</sup>を計算した。タグ付シミュレーション<sup>†</sup>結果を利用する メリットの一つとして、総<sup>137</sup>Cs放出量時系列が得られた後に、大気中の<sup>137</sup>Cs濃度と<sup>137</sup>Cs 沈着量を放出量時系列とタグ付シミュレーション<sup>†</sup>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<sup>†</sup>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<sup>†</sup>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 <sup>†</sup>(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<sup>†</sup>と呼ぶ)としてを用いた。一つ目が JAEA<sup>‡</sup>の寺田らによる解析値であり(Terada et al., 2012) [133] 、もう一つが NILU<sup>‡</sup>の Stohl らが用いた先験情報<sup>†</sup> (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<sup>†</sup>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<sup>137</sup>Cs 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<sup>†</sup>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<sup>137</sup>Cs 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<sup>137</sup>Cs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<sup>137</sup>Cs 放出は3月15日に発生し、その規 模は与えた先験情報<sup>†</sup>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<sup>†</sup>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±8.2PBq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±3.2PBq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<sup>†</sup>結果を組み合わせることにより、<sup>137</sup>Cs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<sup>†</sup>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<sup>†</sup>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、時別観測値と領域化学輸送モデル<sup>†</sup>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
  - 7 今回本分科会が行った比較実験である「気象庁モデル<sup>†</sup>を用いた逆推計<sup>†</sup>」では、 2011 年3月11日から4月19日の期間内の大気への<sup>137</sup>Cs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<sup>137</sup>Cs 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<sup>137</sup>Csについて、今回比較に参加したモデルの推計値は2.3~26.9PBq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<sup>†</sup>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±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±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±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、<sup>137</sup>Cs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<sup>†</sup>によって計算された湿性沈着<sup>†</sup>量 は総沈着量の93±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 <sup>†</sup>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±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<sup>†</sup>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<sup>†</sup>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<sup>†</sup>と逆推計手法<sup>†</sup>を用いて高時間分解能シナリオ<sup>†</sup>を構築する必要がある。
  - ウ海洋観測で得られた<sup>137</sup>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<sup>†</sup>を駆 動するための大気モデルによる<sup>137</sup>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<sup>†</sup>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<sup>↑</sup>、化学輸送過程<sup>↑</sup>、乾性・湿性沈着過程<sup>↑</sup>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<sup>†</sup>は領域規模大気輸送モデル<sup>†</sup>による解析と全球規模大気 輸送モデル<sup>†</sup>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<sup>†</sup>の全球規模 大気輸送モデル<sup>†</sup>とベイズ統合逆解析<sup>†</sup>、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<sup>†</sup>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 partilces 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 <sup>137</sup>Cs and <sup>134</sup>Cs in the North Pacific Ocean: Impacts of the TEPCO Fukushima-dailchi 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] Batifoulier, 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.  ${f 2}$ , 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 semiduirnal internal tides in the Sourthern 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 <sup>131</sup>I and <sup>137</sup>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://nsed.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 Fukushiam 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: Atmpsoheric dispersion and ground deposition induced by the Fukushima Nuclear power plant accident: a loca-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 fainfall 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 meterological 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 form the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. *Environ. Sci. Technol.*, 47, 2314-2322, dx. dox. 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 SO<sub>2</sub> 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 (<sup>137</sup>Cs and <sup>131</sup>I) 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. Burkhart, 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 investitgation 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/betul2\_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 137Cs 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 distirbutions of <sup>131</sup>I deposition on the ground by airborne suveys 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 137Cs 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 137Cs 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 137Cs 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 137Cs 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 Meterological 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 3<sup>rd</sup> Meeting 2012. http://www.wmo.int/pages/prog/www/CBS-Reports/documents/WMO\_fnpp\_final\_AnnexIII\_4Feb201 3\_REVISED\_17June2013.pdf
- [150]Yonezawa, C., and Y. Yamamoto, 2011: Meaturements 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

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	ldX	約10km	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 3.1 本相互比較に参加したモデルおよび研究機関

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<sup>137</sup>Cs 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	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	の総沈着量		
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	
平均值	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<sup>137</sup>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<sup>137</sup>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<sup>-2</sup>。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<sup>137</sup>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<sup>131</sup>I および<sup>137</sup>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<sup>131</sup>I/<sup>137</sup>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<sup>131</sup>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

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] T106	JAEA (Terada et al. 2012)[133]	JAEA (Terada et al. 2012)[133]
Resolution (grids)	T213 (640×320)	TL319 (640×320)	T106 (320×160)	(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)
Meteorologi cal 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4.1 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

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<sup>137</sup>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 <sup>†</sup>
MASINGAR mk-2 (JAEA)	7.06	6.93	0.13	98.2
MASINGAR mk-2 (Stohl)	34.61	34.08	0.53	98.5 <sup>†</sup>
MASINGAR-1 (JAEA)	6.63	6.45	0.18	97.3
MASINGAR-1 (Stohl)	32.87	31.97	0.90	97.3 <sup>†</sup>
EMAC T255 (JAEA)	5.46	5.10	0.36	93.4
EMAC T255 (Stohl)	34.58	33.13	1.45	95.8 <sup>†</sup>
EMAC T106 (JAEA)	5.49	5.24	0.25	95.4
EMAC T106 (Stohl)	34.27	32.74	1.53	95.5 <sup>†</sup>
KNMI TM5 (JAEA)	8.28	8.28	0.0	$100.0^{\dagger}$
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<sup>137</sup>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<sup>137</sup>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<sup>137</sup>Cs 沈 着積算量の水平分布。単位は Bq m<sup>-3</sup>。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。



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。



(a) Ensemble averaged <sup>137</sup>Cs total deposition (11 Mar. - 31 Mar.)

(b) Coefficient of variation ( $\sigma/\mu$ )



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<sup>137</sup>Cs 沈着積算量の (a) アンサンブル平均、および(b) 変動係数。

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 表 5.1. モデルの仕様



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 (Buesseler 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<sup>137</sup>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<sup>137</sup>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<sup>137</sup>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。