

報 告

WMO「福島第一原発事故に関する気象解析 についての技術タスクチーム」活動

斉藤 和雄 *1・新堀 敏基 *2(5)・原 旅人 *3・豊田 英司 *3・
加藤 輝之 *3(6)・藤田 司 *3(7)・永田 和彦 *4(7)・本田 有機 *4(8)

要 旨

原子放射線の影響に関する国連科学委員会は、2011年5月に行われた第58回総会において、2011年3月の東日本大震災による福島第一原子力発電所事故に関する放射線被曝のレベルと影響に関する評価報告書を作成することを決定し、世界気象機関(WMO)に対し協力を求めた。これに対応するため、WMOは「福島第一原発事故に関する気象解析についての技術タスクチーム」を2011年11月に設置した。タスクチームは3回の会合と4回の電話会議を行って、2013年2月に最終報告書を作成した。この間、気象庁はWMOからの要請に応じて事故当事国の国家気象機関としてタスクチーム活動に中心的に協力した。本報告では、タスクチームの設立の経緯と活動の概要、メソ解析や解析雨量データの提供を含む気象庁のタスクチーム活動への貢献、タスクチーム最終報告書の概要、関連して行った領域移流拡散モデルの実験とその改良などについて紹介する。

1. はじめに

2011年(平成23年)3月11日(金)に発生した東北地方太平洋沖地震とそれに伴って発生した津波は、東日本大震災と呼ばれる大きな災害を各地にもたらした(気象庁, 2012)。東京電力福島第一原子力発電所は、地震とこれに伴う津波によって被災し、極めて重大で広範囲に影響を及ぼす原子力事故が発生した(東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会, 2012)。

原子放射線の影響に関する国連科学委員会(United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation=UNSCEAR)は、2011年5月に行われた第58回総会において、東日本大震

災による福島第一原子力発電所事故(以下、単に「福島第一原発事故」と略称することがある)に関する放射線被曝のレベルと影響に関する評価報告書を作成することを決定し、世界気象機関(WMO)に対し協力を求めた。これに対応するため、WMO事務局では「福島第一原発事故に関する気象解析についての技術タスクチーム」(Technical Task Team on Meteorological Analyses for Fukushima-Daiichi Nuclear Power Plant Accident, 以下「タスクチーム」と略称することがある)をWMOに設置することとし、気象庁にタスクチームへの専門家の推薦を含めた協力について要請があった。タスクチームでは、3回の会合と4回

*1 気象研究所予報研究部 *2 気象研究所地震火山研究部 *3 予報部数値予報課 *4 総務部企画課国際室

(5) 現 気象研究所火山研究部 (6) 現 気象研究所予報研究部 (7) 現 予報部予報課アジア太平洋気象防災センター

(8) 現 予報部数値予報課

(平成26年6月9日発行)

の電話会議を行い、気象解析場の評価のための大気輸送拡散沈着モデル (Atmospheric Transport Diffusion and Deposition Model =ATDM¹) 実験を行い、UNSCEAR に気象解析場として気象庁メソ解析と解析雨量を提供するとともにタスクチームとしての最終報告書を 2013 年 2 月に作成した。

本報告では、タスクチーム設立の経緯と活動の概要、会合と電話会議の内容、メソ解析や解析雨量データの提供を含む気象庁のタスクチーム活動への貢献、タスクチーム最終報告書の概要、タスクチーム活動に関連して行った気象庁領域移流拡散モデル (Regional Atmospheric Transport Model=RATM) の実験とその改良などについて紹介する。

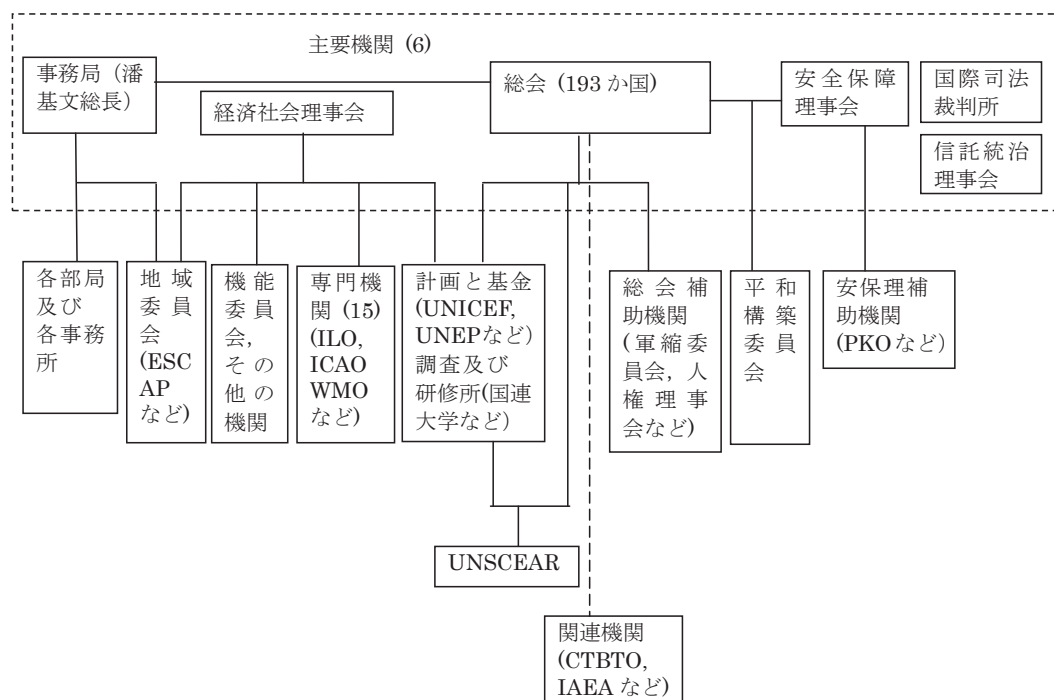
2. タスクチーム設立の経緯

2.1 国連組織と UNSCEAR

まず背景として、国連組織と UNSCEAR につ

いて述べる。国連の組織は 6 つの主要機関 (事務局、総会、安全保障理事会、経済社会理事会、国際司法裁判所、信託統治理事会²) で構成されており、その下に各部局、地域委員会、UNICEF、UNEP (国連環境計画) などの計画・基金と国連大学や軍縮委員会、人権理事会などその他の総会補助機関、ILO、IMF、FAO、ICAO、UNESCO、WMO など 15 の専門機関 (国連との間で連携協定を締結している国際組織)、平和構築委員会、PKO など安保理補助機関がある³。また連携協定を締結していない国際組織として、WTO、CTBTO、IAEA、OPCW の 4 つの関連機関がある (第 1 図)。

原子放射線の影響に関する国連科学委員会 (UNSCEAR) は、放射線による被曝の程度と影響を評価・報告するために 1955 年の第 10 回国連総会で設置が承認された委員会であり、1974 年からは UNEP の一部として活動している。2012 年現在、メンバー国は 27 か国で、ほぼ隔年に報告



第 1 図 国連の組織 (2011 年当時) と UNSCEAR

¹ ATM と略記されることもあり、タスクチーム報告書でも混在している。本稿では、大気輸送拡散沈着モデル一般を指すときはタスクチーム最終報告書に倣い ATDM と略記し、気象庁の ATDM である移流拡散モデルについてはこれまでの呼称に従って ATM とする。

² 1994 年のパラオ独立に伴い、活動を停止している。

³ 気候変動に関する政府間パネル (IPCC) は UNEP と WMO が共同で設立した政府間機構。

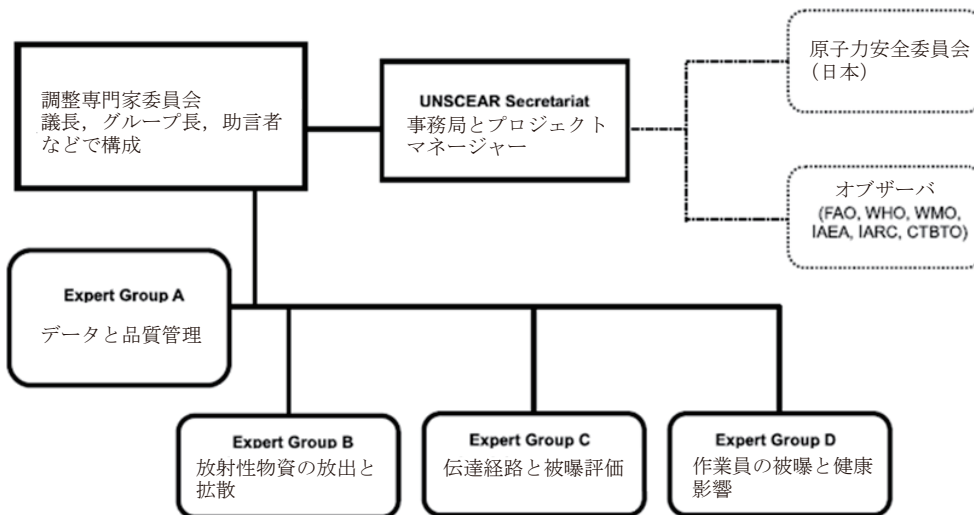
書を作成しており⁴、1986年のチェルノブイリ原子力発電所事故では5つの報告書を作成している。UNSCEARの委託事項は、

- (1) 国連加盟国、専門機関加盟国から提供される下記の情報を受領し、収集すること。
- (イ) 環境における電離放射線及び放射能のレベルに関する報告。
- (ロ) 電離放射線の人間と環境への影響に関する科学的調査・実験に関する報告。
- (2) 資料収集方法、計測装置の規格並びに放射線計測法に関する標準を勧告すること。
- (3) 上記(1)の(イ)の放射能レベルに関する各種報告を総合的方法で編集すること。
- (4) 上記(1)の(ロ)の各国報告を検討評価して、その有用性を決定すること。
- (5) 国連総会への年次報告の策定、人間・環境の放射能レベルと放射線影響に関する報告について、(4)に規定する評価を行い、必要な調査計画を作成すること。
- (6) 前項に掲げる情報とその評価に関する報告

を出版し、かつ国連加盟国又は専門機関加盟国に配布することが適当と認めるときは、事務総長に送付すること。

となっている⁵。

2011年3月の福島第一原発事故を受けて、UNSCEARでは事故評価報告書を作成することを決定し、事務局と専門家委員会及び4つのグループからなる「福島評価作業体制 (Fukushima assessment working arrangements)」を設置した(第2図)⁶。グループAはデータと品質管理、グループBは放射性物質の放出と拡散、グループCは伝達経路と被曝評価、グループDは作業員の被曝と健康影響を作業対象としており、グループBでは、ATDMを用いた放射性物質の拡散沈着実験を行うことになっている。日本国内では、上記作業体制の設置を受けて、原子力安全委員会(当時⁷)放射線防護専門部会に児玉和紀放射線影響研究所主席研究員を主査とするUNSCEAR原子力事故報告書国内対応検討WGを設置し、2011年9月9日に第一回会合を行っている。WGの委



第2図 UNSCEARの福島評価作業体制 Weiss (2012)より改編。

⁴ UNSCEAR 報告書はホームページ (http://www.unscear.org/unscear/en/general_assembly_all.html) に掲載されている。一部は放射線医学総合研究所により和訳が有償配布されている (<https://www.nirs.go.jp/unscear/index.html>)。

⁵ 原子力百科事典 ATOMICA (<http://www.rist.or.jp/atomica/index.html>) からの引用。より詳しい説明は、原子力安全委員会による報告「放射線防護に係わる国際機関等の活動と国内対応」(<http://www.nsr.go.jp/archive/nsc/housya/housya20021202.pdf>) に掲載されている。

⁶ 2012年11月から、住民や緊急時作業員の健康影響やリスクを評価する (HIT=Health Implication Task) グループが加わって、5グループ体制になっている。

⁷ 原子力安全委員会は、2012年9月から原子力規制委員会に移行している。

員は日本原子力研究開発機構 (JAEA), 京都大学原子炉実験所, 放射線医学総合研究所などで構成されている⁸。

2.2 WMO への要請とタスクチームの設置

2011 年 8 月, 福島評価作業体制を定めたことに伴い, UNSCEAR は WMO に対して, 報告書作成に伴う作業活動を支援するための協力要請を行った。協力の可能性として, 主にグループ B とグループ C の活動に関して,

- 1) 放出源, 特に気象学的な情報を含む大気中への放射性物質の放出源の推定手法の提示
- 2) 環境への拡散と沈着の評価, 特にメソスケールの拡散沈着を評価するための最新の数値モデルの適用とそのための気象学的データや降水データ, 地形データの提供

などが挙げられた。この要請を受け, WMO では, 「福島第一原発事故に関する気象解析についての技術タスクチーム」を設置することとし, 8 月 30 日付けで WMO 事務局長より気象庁長官宛て協力要請が行われた。

10 月 21 日, WMO 事務局長より UNSCEAR 議長へ協力要請を受諾する返答が行われ, 11 月にタスクチームが WMO に設置された。この時点での主な協力項目は以下の 3 点である。

- ① 気象データと関連情報の収集
- ② 放射性物質の拡散と地表沈着シミュレーションの推定のための空間的・時間的に十分細かい気象解析値の作成
- ③ 海洋への放射性物質の放出に関する情報の解釈と海洋中の放射性物質の拡散に関するシミュレーションへの協力

タスクチームのメンバーを第 1 表に示す。米国海洋大気庁 (NOAA) 大気資源研究所 (ARL) の R. Draxler 氏を議長として, 英国, オーストリア, 日本, カナダの 5 か国からの委員と WMO からの事務局から構成されている。日本からは斉藤が委員となり, タスクチーム会合や電話会議等に対応した。

3. タスクチーム会合と電話会議

3.1 第 1 回会合

タスクチーム第 1 回会合は, 2011 年 11 月 30 日 (水) ~ 12 月 2 日 (金) にかけて, ジュネーブの WMO 本部で行われた。

タスクチームへの委託事項の検討を行い, 以下の 8 項目を確認した。

- (a) 関連する気象データセットの情報とアーカイブ利用可能性の決定
- (b) ATDM を動かすために利用できる解析とアーカイブの場所と利用可能性の決定
- (c) 既存の解析間のギャップの確認と, 改善した解析を提供可能かの検討
- (d) 観測データと解析に基づく事故期間中の放射性物質の輸送・拡散・沈着に関わる大気条件の報告書の作成
- (e) 放射能観測と計算結果の比較を通じて輸送・拡散・沈着についての計算を行うための観測データと気象解析値の適合性と品質の評価
- (f) 異なる ATDM と気象解析値からの計算結果

第 1 表 WMO 福島第一原発事故に関する気象解析についての技術タスクチームの構成

氏名	所属	備考
Roland Draxler	米国海洋大気庁 (NOAA)	大気資源研究所 (ARL) タスクチーム議長
Matthew Hort	英国気象局 (UKMET)	研究科学マネージャー RSMC エクセクター EER 担当
Gerhard Wotawa	オーストリア気象地球力学中央研究所 (ZAMG)	データ手法モデリング部 EER 輸送モデル担当
斉藤 和雄	気象庁気象研究所	予報研究部長 ^{#1}
René Servranckx ^{#2}	カナダ気象局 (CMC)	基礎科学委員会核緊急対応グループ議長
Peter Chen	WMO	データ処理予報課長 タスクチーム事務局

^{#1} 2013 年 4 月以降。

^{#2} 第 1 回の会合は欠席, 第 2 回の会合には, 代理としてカナダ気象局から A. Malo 氏が出席。

⁸ WG の構成員等については, <http://www.nsr.go.jp/archive/nsc/senmon/shidai/houkokukenWG/houkokukenWG01/index.htm> を参照。WG としての活動は, 原子力規制委員会に引き継がれなかったため, 2012 年 9 月に終了している。

の比較を通じた拡散・沈着計算の不確定の度合いの推定

(g) 事故による被曝状況に関する UNSCEAR への協力

(h) 新たなプロダクトや現業モードを含む EER⁹ システムの強化についての提案

気象解析値を準備する事故関連期間としては、3月11日から4月20日までとし事故関連期間におけるタスクチームメンバー国の ATDM の結果を2012年4月末までに、タスクチーム議長に送付することとした。またタスクチームとして、気象庁メソ解析を領域 ATDM 計算を行うために用意できる最良のものとみなすこととした。当初、委託項目 (c) に関して、既存の気象解析場をどのように改善するかがタスクチームの検討事項になっていたが、気象庁メソ解析では日本における高密度の観測データを非静力学メソ4次元変分法 (JNoVA) で同化しており、タスクチームが新たに再解析を行っても日本周辺の解析場を大きく改善できる余地はあまりないであろうことを日本より説明し、会合参加者の同意を得た。

会合での他の主な決定事項としては以下のものがある。

- ・気象庁は、オリジナルモデル面格子のメソ解析とメソ地表面解析、毎時大気解析の数値予報プロダクトとデータを GRIB2 のフォーマットで2012年6月末までに用意する。
- ・全球解析値については、気象庁 (JMA)、英国気象局 (UKMET)、米国海洋大気庁 (NOAA)、カナダ気象局 (CMC)、欧州中期予報センター (ECMWF) の5機関が同年6月末までに用意する。
- ・タスクチームメンバーは、気象庁メソ解析を用いた領域 ATDM の実行を同年10月末まで

に行う。実験は、0.05度 (約5km) 解像度で (38N, 140E) を中心とする東西30度、南北20度の領域 (第3図) を対象とし、期間中の3時間おきの初期値に対して、単位放出量で行い、会合報告 Annex VII の書式で結果を議長に提出する。

第1回会合の会合報告 (Chen *et al.*, 2011) は、WMO の WWW レポートとして、<http://www.wmo.int/pages/prog/www/CBS-Reports/DPFSERA-index.html> から、http://www.wmo.int/pages/prog/www/CBS-Reports/documents/FinalRep_TT_FDnpp_v6.pdf に掲載されている。Annex VII の ATDM 実験の仕様を除く図表の殆どは、気象庁から提出したもので、事故期間中の気象場の特徴について記述した。

3.2 電話会議 (第1回)

2012年2月13日 (月)、タスクチームメンバーによる電話会議が行われた。事務局の Chen 課長から1月30日 (月) ~ 2月3日 (金) に行われた UNSCEAR 作業体制会合の報告があり、グループ B で行われている ATDM シミュレーションとして ECMWF の全球解析 (0.125度) を用いたものが既に行われているので、タスクチームとしては、当初予定していた全球 ATDM の比較は行わず、実験は領域 ATDM によるものに絞ることとした。実験の対象期間を3月11~31日とし、領域 ATDM の実行は、核種放出後72時間先まででよいこととした。ATDM 実験の基本的な実験仕様を第2表に示す。

3.3 第2回会合

タスクチーム第2回会合は、2012年5月1日 (火) ~ 3日 (木) に英国気象局ロンドン支所において行われた。会合には、タスクチームメンバーの6

⁹ 環境緊急対応 (Environmental Emergency Response) の略で、世界気象監視計画 (World Weather Watch=WWW) の緊急対応活動 (Emergency Response Activities =ERA) の一環として行われている有害物質拡散予測業務。1986年に起きたチェルノブイリ原子力発電所事故の後、原子力発電所の事故などにより世界的な環境汚染が懸念される場合に、大気輸送モデリングの地区特別気象センター (RSMC) が IAEA と WMO 担当地区の登録機関に対して、全球モデルに基づく放射性物質の拡散予測情報を提供することとなった。気象庁は1997年7月1日から第2地区 (RA-II) 担当の RSMC としての業務を開始しており、福島第一原発事故に際しても IAEA からの要請に基づき、2011年3月11日から5月23日まで44回の EER 計算を行った (気象庁 (2012) の第5.12.4項 (3) 参照)。全球モデル (GSM) の予報値でトレーサーを流すラグランジュモデルで、大気中の放射性物質の核崩壊の過程は各物質の半減期に基づいて計算する。EER 業務に用いられる気象庁の全球 ATM とプロダクトについては、Sakamoto (2013) に解説されている。

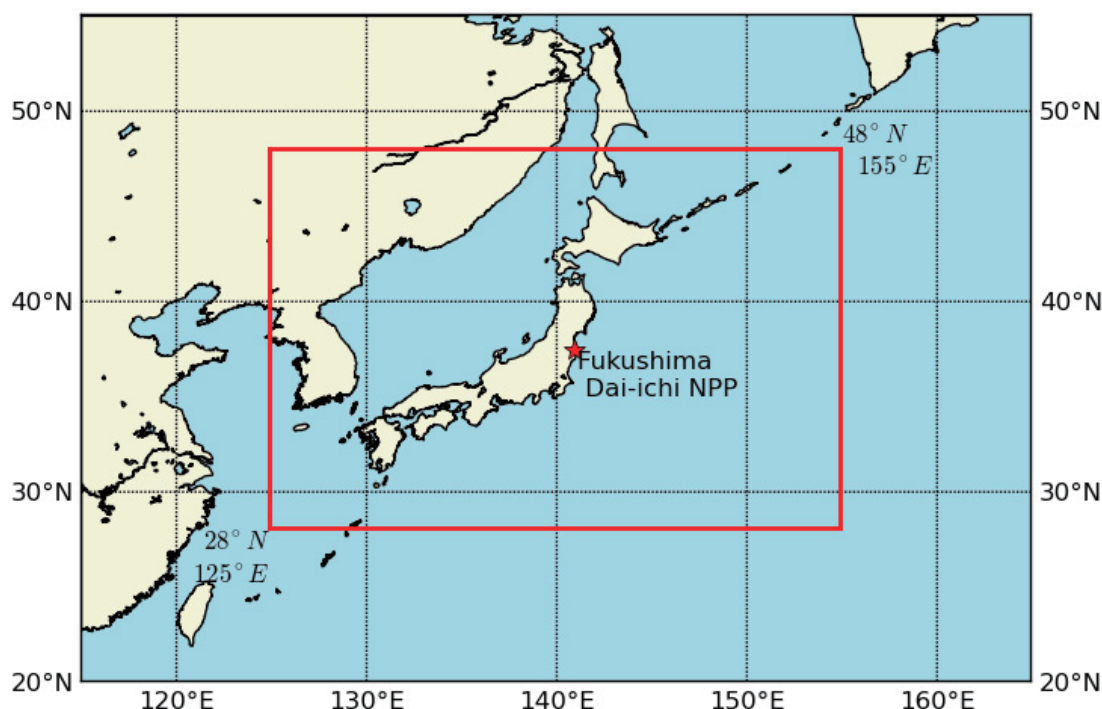
名の他、UNSCEAR のグループ B から、ATDM 担当者として O. Isnard 博士 (フランス放射線防護原子力安全研究所) と F. Gering 博士 (ドイツ連邦放射線防護庁) が、グループ C から被曝影響担当者として P. Bedwell 氏 (英国健康保護庁) が、それぞれ参加した。

3月11～31日を対象とする領域 ATDM の予備的実行が NOAA-HYSPLIT, UKMET-NAME, CMC-MLDP0, JMA-RATM の4センターの ATDM により行われた。このうち、NOAA, UKMET, CMC の結果はそれぞれ各センターの全球解析を入力としており、JMA は気象庁メソ解析を入力にしている。単位放出量に対する計算について、既存研究 (Chino *et al.*, 2011) に基づく放出量による校正を行い、各初期値に対する結果の重み付き線形和により、濃度と沈着分布を計算する。放出高度 (海拔 100m を用いるものや地上高 100m までを一様とするもの)、トレーサー粒子数 (3時間あたり 100,000 又は 300,000)、出力格子数 (721x577 や 601x401) などの入出力の設定にやや違いがあり、当初 JMA-RATM では地表から海拔 100m までの一様分布で 100,000/3 時間のトレーサーを用いて計算を行い、721x577 格子に出力し

た。JMA-RATM のタスクチーム仕様とその改良については、第6章で説明する。タスクチーム第2回会合の報告書 (Chen *et al.*, 2012a; http://www.wmo.int/pages/prog/www/CBS-Reports/documents/FinalReport_TTMetAnalyFDnpp.pdf) では、メソ解析を用いた JMA の結果が最も細かな空間構造を示していると記されたが、セシウム -137 の観測沈着量と比較した検証はこの会合時点では行っていない。

日本からは気象庁メソ解析について説明を行うとともに、全期間についてのメソ解析と解析雨量データを会合出席者に配布した (第4.2節参照)。また、気象庁から提供したメソ解析サンプルファイルを用いた ATDM 実験が NOAA 以外で行われていないことに鑑み、ランベルト投影でハイブリッドモデル面になっているメソ解析ファイルを、より扱いやすい等緯度経度気圧面座標に変換するツールを作成して提供する用意があることを表明した (第4.3節参照)。

メソ解析を用いた領域 ATDM の計算において、上昇流の扱いをどうするかが問題になった。メソ解析に格納されている上昇流は4次元変分法のアウトグループモデル3時間予報の瞬時値が入って



第3図 タスクチーム領域 ATDM 実験の計算出力領域 Draxler *et al.* (2013a) より。

第 2 表 タスクチーム領域 ATDM 実験の基本仕様

		備 考
水平解像度	0.05度 (約5km)	
領 域	125E-155E, 28N-48N	第3図
初期値	2011年3月11-31日, 3時間おき	168初期時刻×3種類
予報時間	72時間	
放出量	単位放出 (1 Bq/hr)	放出量推定に基づく線形和を取る
放出高度	地表から高度100mまで一様	
計 算	希ガス (Ngas), 沈着性ガス (Dgas), 軽量粒子 (Lpar) の下層100m濃度と地表沈着	線形和を取るとき、セシウム-137 (¹³⁷ Cs) とヨウ素-131 (¹³¹ I) の半減期を考慮する

いるため、オフラインのラグランジュモデルでトレーサーの鉛直輸送を計算するのに3時間おきの瞬時値を使うことの妥当性に疑問があるためである。これについては第6.3節で再度議論する。

3.4 電話会議 (第2回, 第3回, 第4回)

2012年6月7日(木), タスクチームメンバーによる2回目の電話会議が行われた。各チームメンバーの領域 ATDM シミュレーション結果について、地表のサンプリングデータに基づく評価が送られ、評価手法についての議論を行った。気象庁メソ解析の利用についての進捗として、オーストリア気象地球力学中央研究所 (ZAMG) から解析ファイルを解読中との報告があった。気象庁としては、第2回会合で提案したファイル変換ツールを準備中であり、6月末までに、解析雨量データとともにアップするとコメントした。

7月23日(月), 3回目の電話会議が行われた。前の週に行われた UNSCEAR のグループ B の会合についての報告がグループ B のメンバーでもある Draxler 議長からあった。ヨウ素-131 (¹³¹I) による検証について、JAEA の東海村と高崎市での観測値について入手したこと (第5.1節7) 参照), 複数の ATDM のアンサンブル結果から、確率値を求めるプログラムを作成したこと, の報告があり、タスクチームとして全ての ATDM 計算を9月末までに終える必要があることなどを確認した。ECMWF 解析を用いた ATDM 計算を ZAMG-FLEXPART と NOAA-HYSPLIT で行っており、ECMWF の全球解析をタスクチームメンバーにも提供する用意があるというコメントがあった。最終的に ECMWF 解析を利用した ATDM

計算は UKMET-NAME でも行われたが、JMA-RATM では実行していない (後述の第6表参照)。気象庁より送付した解析雨量とメソ解析ファイルの WMO のサーバーへのアップについて確認した。

10月4日(木), 4回目の電話会議が行われた。NOAA に加え、UKMET と CMC が気象庁メソ解析を用いた ATDM シミュレーションに成功し、ZAMG は湿性沈着の計算に解析雨量を利用するところまで行っていること、JMA は RATM に不備 (第6.3節⑥) を発見したため再計算を行うことなどを報告した。

米国気象学会第93回年次総会で行われる福島シンポジウム (第5.3節) への対応、日本学術会議による福島原発事故を対象とする ATDM 相互比較 (第6.4節) についての議論などを行った。

3.5 第3回会合

タスクチーム第3回会合は、12月3日(月)~5日(水)にかけてオーストリア気象地球力学中央研究所において行われた。主な内容は以下のとおりである。

- 会合の大半の討議時間をタスクチーム最終報告書案の作成に充てた。ATDM 計算結果がほぼ出揃い、検証結果が示された。セシウム-137 (¹³⁷Cs) の沈着計算の検証においては、ECMWF の全球解析若しくは気象庁メソ解析を用いた NOAA-HYSPLIT, UKMET-NAME, ZAMG-FLEXPART の ATDM が上位を占めた (ただし最上位は、NOAA 全球解析を用いた NOAA-HYSPLIT)。一方、大気濃度の計算では、検証結果の上位はセシウム-137, ヨ

ウ素 -131 とも CMC-MLDP0, JMA-RATM, UKMET-NAME の順番で、ほぼ全てが気象庁メソ解析を利用した計算だった。解析雨量の利用は、地表沈着、大気濃度とも結果の改善をもたらさなかった（理由については、第 5.1 節 9) 参照）。改良した JMA-RATM の計算結果は、解析雨量を利用した場合の大気濃度を除いて、精度が大幅に改善した。タスクチーム ATDM 実験のアンサンブル解析について S. Galmarini 氏（EC 合同研究センター）が話題提供を行った（第 5.1 節 10) 参照）。

- ・日本学術会議の福島原発事故による環境汚染調査検討小委員会が行う ATDM の相互比較（第 6.4 節）については、タスクチームとしての対応はせず、参加するかどうかは個々のメンバー機関の判断に任せることとした。

タスクチーム活動の経験に基づく EER システムのあり得べき強化についての提言は、会合報告において、ERA の EER 専門家チームと事務局で検討される可能性のある項目として以下を挙げるにとどめ、具体的な内容を明示しての提言は見送った。

- ・学際的な科学フォーラムが現業 ATDM のプログラムをサポートする科学を進歩させるのに有用かどうかを検討する。
- ・IAEA と、ユーザーのニーズに関するコンファレンス（前回 1993 年）を企画する（ERA の EER 専門家チームにおいては既にアクションリストに含まれている）。
- ・IAEA と、非公式に EER 活動における ATDM の新しいフレームワーク（大気による希釈率やアンサンブル）について議論する。
- ・シニアマネジメントレベルにおいて WMO が IAEA に気象プロダクトの改良に関して、コンタクトするかもしれない。

第 3 回タスクチーム会合の報告（Chen *et al.*, 2012b）は、<http://www.wmo.int/pages/prog/www/CBS-Reports/documents/FINAL-REPORT.pdf> に掲載されている。また上記会合報告 Annex III に基づくタスクチーム最終報告書（Draxler *et al.*, 2013a）の概要については、第 5.1 節で紹介する。

4. 気象庁の貢献

4.1 事故期間中の気象場の状況と関連情報

事故期間中の気象場の状況と関連情報の収集に関して、2011 年 12 月の第一回会合では日本から、

- 1) 気象庁の観測ネットワーク（高層観測点配置図、レーダー配置図、地上観測点配置図、レーダー合成図の例、解析雨量の例と解説（Nagata, 2011））
- 2) 事故期間における気象場の特徴（3 月 9 ～ 26 日の 09JST の地上天気図、09JST におけるアメダス風の場合と前 24 時間積算解析雨量、3 月 12 ～ 16 日のメソ解析の 950hPa 風と平均海面気圧、3 月 12 ～ 20 日の水戸ウインドプロファイラの風）
- 3) 気象庁数値予報プロダクトと現業解析（全球モデル（GSM）とメソ数値予報モデル（MSM）の解析予報システムの諸元、メソ解析（Honda *et al.*, 2005; Honda and Sawada, 2008）と MSM（Saito *et al.*, 2006; 2007; 2012）、毎時大気解析の諸元、各解析で同化されている観測データの一覧）
- 4) 気象庁 ATM の紹介（EER 業務で用いる全球 ATM と領域 ATM のスペックと計算例）
- 5) 気象研究所での ATDM 研究
- 6) 日本の関連研究の紹介

についてのプレゼンテーションを行った。このうち、5) と 6) については、11 月 17 日に名古屋大学で行われた 2011 年度日本気象学会秋季大会スペシャルセッション「放射性物質輸送モデルの現状と課題」での講演（田中ほか, 2011; 梶野ほか, 2011; 真木ほか, 2011; 鶴田ほか, 2011; 竹見・石川, 2011; 近藤ほか, 2011; 滝川ほか, 2011; 加藤ほか, 2011）について講演者からの協力を得て英文スライドの提供を受け、以下の 9 件を紹介した。

- ・ Global transport model using MASINGAR（Tanaka *et al.*, MRI）
- ・ Regional passive tracer model using WRF（Kajino, MRI）
- ・ MRI regional chemical transport model using NHM-Chem（Kajino *et al.*, MRI）
- ・ Emission flux estimation by inverse model（Maki *et al.*, MRI）

- Regional Deposition of Radioactive Cs and I by the Accident of the Fukushima Daiichi NPP (Tsuruta *et al.*, Tokyo Univ.)
- High-Resolution modeling analyses of wind and diffusion fields over Fukushima (Takemi and Ishikawa, Kyoto Univ.)
- Transport and deposition analysis by AIST-MM (Kondo *et al.*, AIST)
- Deposition estimation using WRF/Chem (Takigawa *et al.*, JAMSTEC)
- Transport and diffusion simulation using CRESS (Kato *et al.*, Nagoya Univ.)

このスペシャルセッションについては、気象学会誌「天気」に報告（近藤ほか, 2012）が掲載されている。

4.2 メソ解析と解析雨量データ

タスクチームと UNSCEAR に提供したメソ解析と解析雨量データの書式を第 3 表, 第 4 表に示す。第 4 図に気象庁メソ解析による 2011 年 3 月 15 日 1500UTC の前 3 時間積算降水量の 1 時間平均値を, 第 5 図に対応する時間帯の解析雨量を示す。この期間, メソ解析では, 東北地方から関東北部にかけては, 降水は海上及び沿岸部では雨と

第 3 表 タスクチームと UNSCEAR に提供した気象庁メソ解析の諸元と書式

1) 諸元

		備 考
水平格子数	719x575	水平スタガード座標 (Arakawa-Cグリッド) における水平風速度をスカラーポイント (Arakawa-Aグリッド) に内挿
解像度	5km	
鉛直層数	48 (z*ハイブリッド)	鉛直スタガード座標 (Lorentz座標) における鉛直速度をスカラーポイントに内挿
投影法	ランベルト等角投影	
期 間	2011年3月11-31日, 3時間おき	
ファイル形式	GRIB2	

2) モデル面ファイル

ファイル名: jma_ma_met_hybrid-coordinate_yyyyMMddhhmm.grib2bin

要 素	内 容	単 位	備 考
U	ランベルト投影座標でのx方向の風速	m/s	
V	ランベルト投影座標でのy方向の風速	同上	
W	鉛直流 (z方向の風速)	同上	
Z	モデル面の高度	m	
PT	温位	K	
QV	水蒸気混合比 (比湿)	kg/kg	MSMの予報変数U, V, Wは密度とマップファクタの逆数がかかっているが、提供ファイルでは風速に換算したものを格納
QC	雲水混合比	同上	
QR	雨水混合比	同上	
QCI	雲氷混合比	同上	
QS	雪混合比	同上	
QG	霰混合比	同上	
P	気圧	Pa	
PSEA	海面更正気圧	同上	
RAIN	前3時間積算降水量	mm	

3) 陸面ファイル

ファイル名: jma_ma_land-surface_yyyyMMddhhmm.grib2bin

要 素	内 容	単 位	備 考
TUGD	4層の地中温度	K	0.02, 0.115, 0.39, 0.89m
KIND	地表面種別 (陸, 海, 雪面, 海水面)	なし	

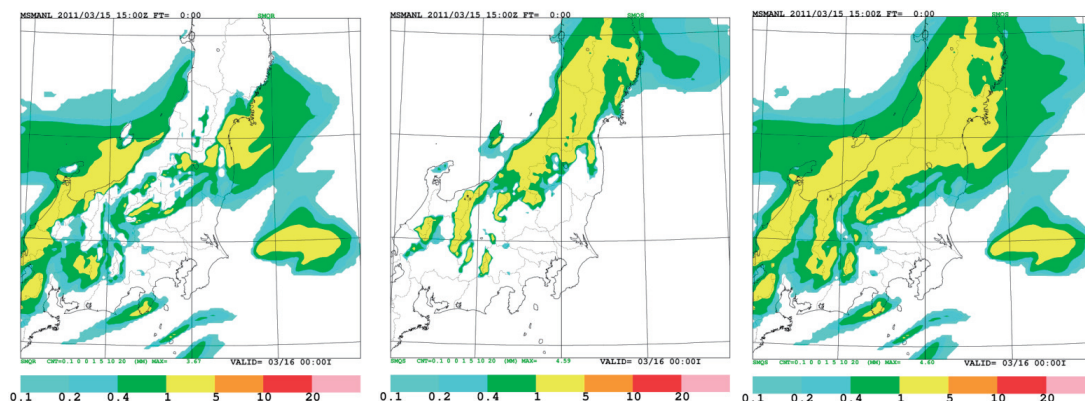
4) 海面ファイル

ファイル名: jma_ma_ocean_sst_yyyyMMddhhmm.grib2bin

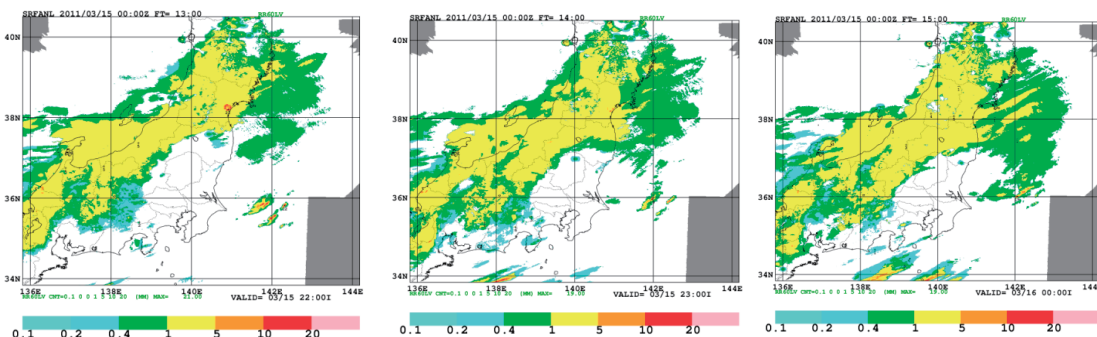
要 素	内 容	単 位	備 考
SST	海面水温	K	

第 4 表 タスクチームと UNSCEAR に提供した解析雨量の書式

ファイル名	Z_C_RJTD_yyyyMMddhhmmss_SRF_GPV_Ggis1km_Prr60lv_ANAL_grib2.bin
領域	118E-150E, 20N-48N
解像度	経度方向45秒, 緯度方向30秒
格子数	2560x3360
投影法	正距円筒図法
期間, 頻度	2011年3月11-31日, 30分おき
ファイル形式	GRIB2



第 4 図 気象庁メソ解析による 2011 年 3 月 15 日 1500UTC の前 3 時間積算降水量の 1 時間平均値 (mm/h) (左) 雨, (中) 雪, (右) 全降水量.



第 5 図 気象庁解析雨量による 2011 年 3 月 15 日 1200UTC-1500UTC の降水強度 (mm/h) シェードは第 4 図のカラーバーに対応させてある.

して、内陸では雪として解析されており、トータルの降水量は解析雨量と良い対応を示している。1200-1300UTC の解析雨量 (第 5 図左) では、仙台付近に小さく同心円状に強い雨量が解析されており、仙台レーダーにおけるブライトバンドと考えられる。

4.3 ファイル変換ツールと英文説明書の作成, ファイルの公開

メソ解析のランベルト投影 z^* ハイブリッド座

標という格子系は、元のメソ解析のモデル面データからの内挿処理を最小限に留めたもので、第 1 回会合での要望に沿ったものであったが、気象庁以外のタスクチームメンバーや UNSCEAR グループ B のユーザーがこれらの格子系データから ATDM を実行する場合の手続きは複雑なものになりがちだった。第 2 回会合と第 2 回電話会議での要望を受けて、気象庁では数値予報課が中心となってメソ解析と解析雨量のデータを読み込んで任意の GrADS 形式で出力するファイル変換ツール

(JMA, 2012) を作成し、タスクチームに提供した。ツールの機能は、水平（ランベルトと等緯度経度間）・鉛直（モデル面から P 面）への座標変換と、ファイル形式の変換である。この 2 つの機能は独立になっており、座標変換だけ行ってその結果を GRIB2 で出力、又は座標変換はせずにフォーマットだけを変換、そして座標変換した上でフォーマットも変換、などが選択可能である。このツールを用いて、各ユーザーは都合の良い中間ファイルを作成することにより各々の ATDM の実行が容易になる（第 6 図）。なお解析雨量の GRIB2 は国際気象通報式への日本独自の拡張を用いており、WMO Manual on Codes だけでは解読できないため、配信資料に関する技術情報第 108 号（気象庁，2002）と第 238 号（気象庁，2006）の内容に関する英文解説（Toyoda, 2012）を別途作成した。

2012 年 7 月、ファイル変換ツールと関連する英文説明書をつけ、メソ解析データ（一部修正を加えたもの）、解析雨量データとともにタスクチーム事務局に送付した。これらは、WMO のサー

バーから UNSCEAR グループ B に提供されたが、研究コミュニティにおける公平性の観点から、これらのデータとファイル変換ツールはタスクチームや UNSCEAR グループ B 以外の研究者でも、気象庁がタスクチームのために提供したデータを利用して利用している旨を表記することを条件に、利用可能とすることにした。

5. タスクチーム最終報告書とフォローアップ

5.1 タスクチーム最終報告書

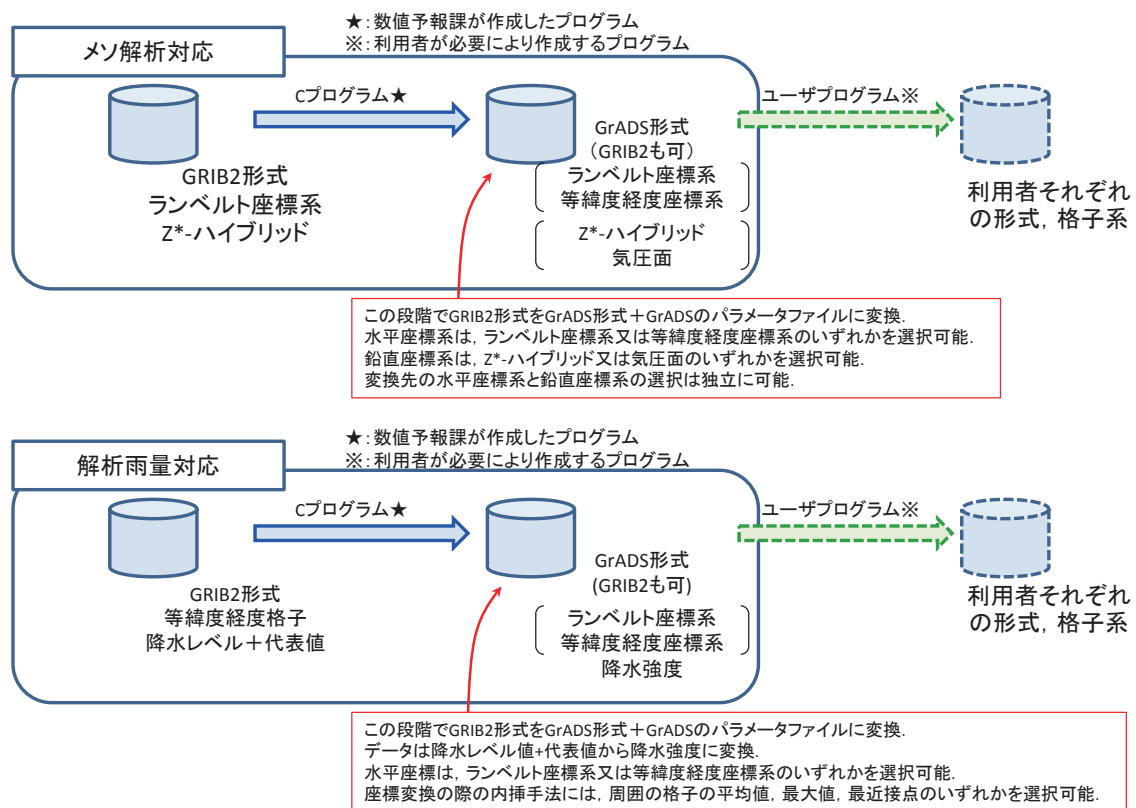
タスクチームとしての UNSCEAR への最終報告は第 3 回会合報告の Annex III としてまとめられた後、WMO の技術報告（Draxler *et al.*, 2013a）として刊行されている。64 ページの報告書の構成と主な内容は以下のとおりである。

1) 序論

タスクチーム設立の経緯や委託事項について記述している。

2) 気象場の特徴

第 1 回会合での気象庁からのプレゼン資料に基づいて、事故期間中の気象場の特徴を記述してい



第 6 図 UNSCEAR 対応における WMO タスクチームのためのデータ変換ツール

る。特に大量の放射性物質の放出があった 2011 年 3 月 14～17 日の期間について、14～15 日にかけて弱い低気圧が本州南岸を東進し、福島県では 15 日夕方から 16 日早朝にかけて降水があったこと、下層風は 15 日朝までは西～南西風であったが、15 日日中に東寄りに変わったことを述べた。

3) 気象解析

タスクチームの ATDM 計算に用いた気象解析について記述した。CMC, NOAA, ECMWF, UKMET の全球解析, 気象庁メソ解析, 気象庁解析雨量の 6 種類である。第 5 表に各気象解析場の要約を示す。

4) タスクチーム領域 ATDM の特徴

タスクチーム実験に用いた領域 ATDM の特徴を記述している。どのモデルも気象場を入力してトレーサーを移流拡散させるオフラインのラグランジュモデルであるが、放射性物質の取り扱いには乾性沈着や湿性沈着過程におけるウォッシュアウトやレインアウト (第 6.1 節参照) のパラメータなどに差がある。

5) ATDM 実験における気象庁メソ解析の利用

各センターは、自センター (ZAMG は ECMWF) の全球解析を ATDM 実行のための気象場として

用いたほか、気象庁から提供されたメソ解析あるいは解析雨量もそれぞれの ATDM の計算に用いた。第 6 表は、各センターが用いた ATDM と気象解析の関係を示す。表で、C で示すのは気象解析の利用で、ZAMG を除く各センターが気象庁メソ解析の利用をテストした。また R で示すのは気象庁解析雨量の利用で、CMC を除く各センターが解析雨量を放射性物質の湿性沈着の計算への利用をテストした。

6) ATDM 実験の記述

各センターは第 2 表に示したデザインに基づいて単位放出 (1 Bq/hr) に対する ATDM 実験を行った。最終的な大気下層濃度と積算沈着量は、各時刻の初期値に対する UNSCEAR の当初推定 (Draxler *et al.* (2013a) の Fig. 1) 及び JAEA の推定 (Chino *et al.* (2011) を Terada *et al.* (2012) が修正したもの) による福島第一原発からのセシウム-137 とヨウ素-131 の放出量をもとに各初期時刻の計算の重み付き線形和によって計算される。第 7 図に、JAEA による放出量推定の時系列を示す。

7) 評価に用いた放射性物質の測定データ

ATDM のセシウム-137 沈着計算結果の評価に用いたデータは、文部科学省による 543 地点の地表測定 (Kinoshita *et al.*, 2011) に 2011 年 4 月 2 日

第 5 表 タスクチーム ATDM 実験に用いた気象解析の諸元 Draxler *et al.* (2013a) より。

センター	CMC	NOAA	ECMWF	UKMET	JMA
略 称	GEM	GDAS	ECMWF	UKMO	MESO
領 域	全球	全球	全球	全球	日本域
水平格子間隔	0.3度	0.5度	0.125度	0.23-0.35度	5 km
鉛直層数	58	56	91	70	50 [#]
鉛直座標	地形に沿う気圧面	ハイブリッド気圧	ハイブリッド気圧	z	ハイブリッドz*
時間間隔	6時間	3時間	3時間	3時間	3時間

[#] Draxler *et al.* (2013a) の Table 1 ではメソ解析のモデル面に合わせて 50 となっているが、提供した GRIB2 ファイル (第 3 表) の鉛直層数は 48 である。

第 6 表 タスクチーム ATDM 実験に用いた気象解析の諸元 Draxler *et al.* (2013a) を改変。C で示すのは気象解析の利用, R で示すのは気象庁解析雨量の利用

ATDM	参考文献	実験で使った気象解析				
		GEM	GDAS	ECMWF	UKMO	MESO
CMC-MLDP0	D'Amours <i>et al.</i> (2010)	C				C
NOAA-HYSPLIT	Draxler and Hess (1998)		C, R	C, R		C, R
ZAMG-FLEXPART	Stohl <i>et al.</i> (2005)		C, R	C, R		
UKMET-NAME	Jones <i>et al.</i> (2007)			C	C	C, R
JMA-RATM	新堀ほか (2010)					C, R

から 5 月 9 日にかけての米国エネルギー省による 374 地点の航空機観測データ (USDOE, 2011) をブレンドしたスクチーム実験の格子点に内挿したもの (第 8 図) である。大気中のセシウム-137 とヨウ素-131 の濃度時系列については, JAEA による東海村の測定 (古田ほか, 2011; Chino, 2012) を用いた。

8) 統計的評価手法

前項の測定結果に対する ATDM 計算結果の統計的検証が行われた。統計スコアとしては, 以下の 6 つの要素を考慮した。

i) 相関係数 (Correlation Coefficient)

測定を M , 予測を P とするとき, 以下で表される。

$$R = \frac{\sum (M_i - \bar{M})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum (M_i - \bar{M})^2 (P_i - \bar{P})^2}} \quad (1)$$

ii) フラクショナルバイアス (Fractional Bias)

平均的な予測のバイアスを示す。

$$FB = 2 \frac{(\bar{P} - \bar{M})}{(\bar{P} + \bar{M})} \quad (2)$$

iii) Figure of Merit in Space (FMS)

予測か測定のいずれかがありの面積 (回数) に対する予測ありかつ測定ありの面積 (回数) の比で, 観測と予測のオーバーラップの指標でスレットスコアに相当する。

$$FMS = 100 \frac{N_P \cap N_M}{N_P \cup N_M} \quad (3)$$

iv) コルモゴロフ-スミルノフパラメータ (Kolmogorov-Smirnov Parameter)

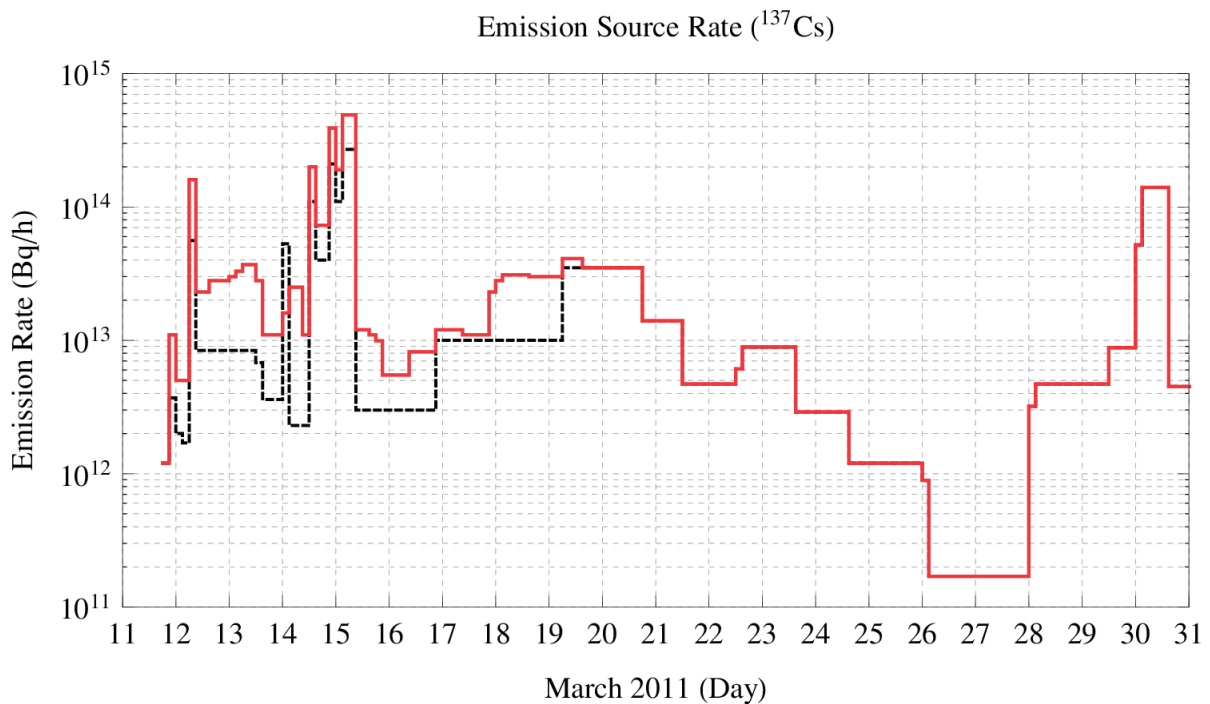
累積分布関数のずれの最大値を表す。

$$KSP = \max |D(M_k) - D(P_k)| \quad (4)$$

v) Percentage of Factor of Two (%FA2)

予測が測定の 1/2 ~ 2 倍に収まっている面積。

$$0.5 \leq \frac{P}{M} \leq 2.0 \quad (5)$$



第 7 図 各時刻の福島第一原発からのセシウム-137 放出量推定

黒破線は JAEA (Terada, 2012) による推定。赤実線は JAEA2 (Kobayashi et al., 2013) による推定 (3 月 20 日以降は JAEA と同じ)。Saito et al. (2014) より。

vi) Factor of Exceedance (FOEX)
 過剰若しくは過少予測頻度の指標.

$$FOEX = \left[\frac{N_{(P_i > M_i)}}{N} - 0.5 \right] \times 100 \quad (6)$$

報告書の本文では、(1) ~ (4) 式のパラメータを用いた総合的な予測精度のノルムとして、

$$METRIC1 = R^2 + 1 - |FB/2| + FMS/100 + (1 - KSP/100) \quad (7)$$

を定義した。METRIC1 の値は 0 から 4 までの間の値をとり、良い予測ほど点数が高くなる。報告書の Appendix では、(7) 式に加え、(5)、(6) 式のノルムを考慮した METRIC も計算している (第 6.3 節参照)。

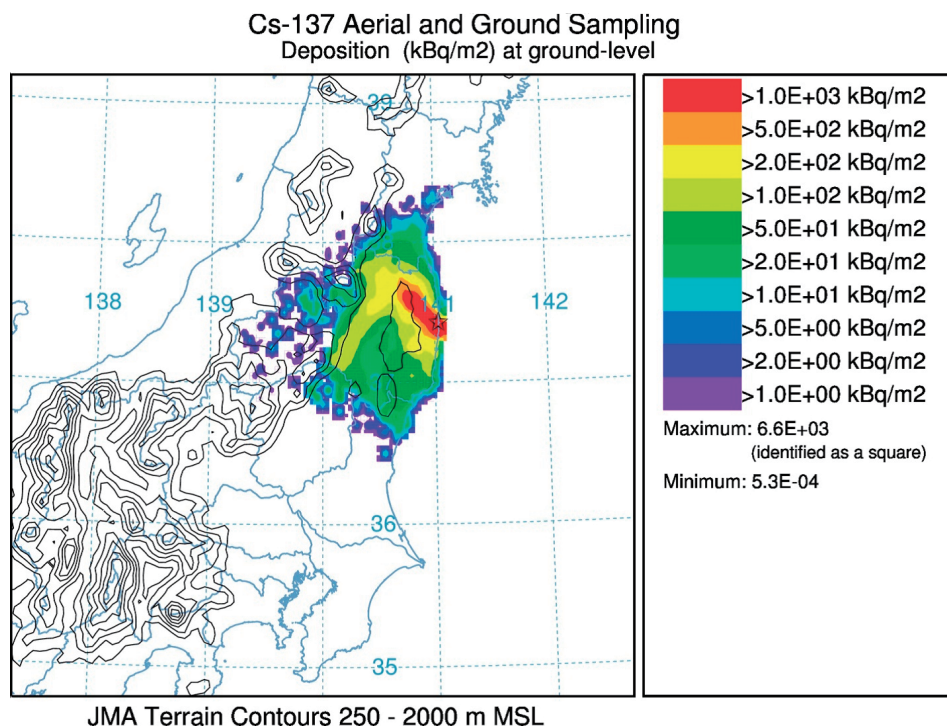
9) ATDM 計算結果の要約

JAEA の放出量推定 (第 7 図の黒破線) を用い

た場合のセシウム -137 の地表沈着と大気濃度に対する各気象センターの ATDM の検証結果を第 7 表と第 8 表に示す¹⁰。表で JMA (PRE) とあるのは、次章で述べる改良前の RATM による計算結果であることを示す。

地表沈着に対するスコアで最上位だったのは、NOAA の全球解析 GDAS を用いた NOAA-HYSPLIT による計算で、ECMWF 解析を用いた ZAMG-FLEXPART と NOAA-HYSPLIT、気象庁メソ解析を用いた UKMET-NAME が上位に入った。気象庁メソ解析を用いた場合、NOAA の結果は ECMWF 解析を用いた場合を改善していないが、CMC-MLDP0 と UKMET-NAME は結果を改善させている。

大気濃度の時系列に対しては、最上位だった CMC を含め、ランク上位の計算は全てメソ解析を用いたもので、JMA-RATM は 2 位に相



第 8 図 ATDM 沈着計算の検証に用いたセシウム -137 の沈着測定データ
 コンターは 250m おきの等高線。☆は福島第一原発の位置を示す。Draxler *et al.* (2013a) より。

¹⁰ この結果は Draxler *et al.* (2013a) の Appendix に基づく。UNSCEAR の放出量当初推定に基づく結果は、Draxler *et al.* (2013a) の Table 5 と Table 6 に示されている。なお Draxler *et al.* (2013a) の Fig. 6 と Fig. 7 には、UNSCEAR の放出量当初推定に基づく NOAA と UKMET による 3 月 11 ~ 31 日のセシウム -137 の沈着計算の結果が示されており、気象庁メソ解析を用いた場合、福島第一原発から北西に伸びる高沈着域が ECMWF 解析を用いた場合よりも良く表現されている。

当する良い成績であった。一方、解析雨量の利用 (MESO-R) はメソ解析の雨量を用いた結果 (MESO) をあまり改善しておらず、特に大気濃度においてはスコアを悪化させている。ただし、

沈着に関しては、ECMWF 解析を用いた ZAMG-FLEXPART はスコアをやや改善している。解析雨量の利用が ATDM のパフォーマンスを改善しない傾向はやや意外であった。原因は不明である

第 7 表 JAEA の放出量を用いた場合のセシウム -137 の地表沈着に対する各気象センターの ATDM 検証結果
METRIC1 の値上位 5 つを太字で示す。Draxler *et al.* (2013a) の Appendix より再作成。気象場で -R のついたものは、気象庁解析雨量を用いたもの。

センター	気象場	R	FB	FMS	FOEX	%FA2	KSP	METRIC1
CMC	GEM	0.76	-0.32	100.00	11.69	48.99	19	3.22
CMC	MESO	0.76	-0.44	100.00	-4.33	45.12	6	3.30
JMA (PRE)	MESO	0.45	-0.02	100.00	-0.46	51.01	10	3.09
JMA (PRE)	MESO-R	0.77	0.54	100.00	9.67	41.99	11	3.22
NOAA	GDAS	0.87	-0.08	100.00	8.01	48.25	6	3.65
NOAA	GDAS-R	0.68	-0.57	100.00	-16.48	31.86	23	2.94
NOAA	MESO	0.55	0.38	100.00	-8.01	41.07	15	2.97
NOAA	MESO-R	0.48	0.43	100.00	-4.14	35.54	16	2.85
NOAA	ECMWF	0.83	-0.30	100.00	-12.06	46.96	10	3.45
NOAA	ECMWF-R	0.55	-0.74	100.00	-20.35	21.92	33	2.60
UKMET	UM	0.44	0.24	100.00	30.48	42.36	30	2.77
UKMET	ECMWF	0.80	0.11	100.00	19.06	54.70	25	3.34
UKMET	MESO	0.76	0.04	100.00	5.80	45.12	11	3.45
UKMET	MESO-R	0.66	0.03	100.00	6.35	34.62	9	3.33
ZAMG	GDAS	0.66	-0.59	100.00	-6.17	45.12	10	3.05
ZAMG	GDAS-R	0.66	-0.84	100.00	-16.85	28.36	20	2.82
ZAMG	ECMWF	0.78	-0.08	100.00	9.85	59.67	15	3.41
ZAMG	ECMWF-R	0.83	0.13	100.00	5.99	52.12	6	3.57

第 8 表 JAEA の放出量を用いた場合のセシウム -137 の大気濃度 (JAEA 東海) に対する各気象センターの ATDM 検証結果
METRIC1 の値上位 5 つを太字で示す。Draxler *et al.* (2013a) の Appendix より再作成。

センター	気象場	R	FB	FMS	FOEX	%FA2	KSP	METRIC1
CMC	GEM	0.07	-1.37	73.17	-30.95	7.14	53	1.52
CMC	MESO	0.23	-0.09	80.49	-4.76	16.67	34	2.47
JMA (PRE)	MESO	0.51	-0.82	80.00	-21.43	21.43	43	2.22
JMA (PRE)	MESO-R	0.59	-1.66	57.50	-45.24	4.76	64	1.46
NOAA	GDAS	0.10	-1.37	60.00	-42.86	7.14	69	1.24
NOAA	GDAS-R	0.10	-1.38	60.00	-42.86	7.14	67	1.25
NOAA	MESO	0.15	-1.63	62.50	-40.48	11.90	67	1.16
NOAA	MESO-R	0.15	-1.63	60.00	-40.48	9.52	67	1.14
NOAA	ECMWF	0.27	-1.33	62.50	-35.71	11.90	60	1.43
NOAA	ECMWF-R	0.27	-1.35	62.50	-35.71	16.67	60	1.43
UKMET	UM	0.06	-1.42	65.85	-30.95	19.05	53	1.42
UKMET	ECMWF	0.13	-0.93	68.29	-28.57	21.43	53	1.70
UKMET	MESO	0.24	-0.50	80.00	-28.57	16.67	52	2.09
UKMET	MESO-R	0.24	-0.53	80.00	-30.95	16.67	52	2.07
ZAMG	GDAS	0.17	-0.37	57.50	-35.71	14.29	57	1.85
ZAMG	GDAS-R	0.18	-0.43	57.50	-35.71	14.29	55	1.84
ZAMG	ECMWF	0.12	-0.54	52.50	-35.71	11.90	60	1.67
ZAMG	ECMWF-R	0.08	-0.55	42.50	-35.71	7.14	69	1.46

が、解析雨量は雨と雪を区別しておらず降雪がある場合の精度に問題があること、0.4mm/hr よりも弱い降水を捉えきれないこと、特定の高度のみの降水粒子の存在を観測しているレーダー反射強度に基づいていること、ブライトバンドの影響を受ける場合があること、海上のデータが限られており計算領域をすべてカバーしていないこと、ATDM への入力値として数値モデルの気象場と整合していないこと、などが可能性として考えられる。

10) アンサンブル解析

報告書の第 10 章はアンサンブル解析で、UNSCEAR 放出シナリオを元に、沈着予測の相関係数やバイアス、平方根平均二乗誤差 (RMSE) などを指標に、全メンバーのアンサンブル平均をとるよりも、独立性が良くパフォーマンスの良いメンバーのみを選択して平均をとることによりアンサンブルのパフォーマンスを上げることが出来るという主張で書かれている。ただし、RATM の改良版 JMA (REV) については、第 3.4 節で述べたとおり提出時期が遅れたため、この章の解析結果には含まれていない。また、パフォーマンスの良い ATDM のセットとして ECMWF 解析を用いた NOAA-HYSPLIT, UKMET-NAME, ZAMG-FLEXPART の結果が挙げられているが、JAEA 放出シナリオに基づく大気濃度に対する結果では、前述のように気象庁メソ解析を用いた CMC-MLDP0 と JMA-RATM がランクの上位を占めており (第 7, 8 表)、傾向がかなり異なっている。Draxler *et al.* (2013a) の Table 5 と Table 6 で ENS ALL と ENS Select として、全メンバーのアンサンブル平均を用いた場合と選択したメンバーを用いた場合の結果が示されているが、両者の差は大きくない。

11) モデルの不確定性

飯館村、仙台市、東京都、東海村の 4 か所での大気濃度の時系列とアンサンブル予報のスプレッドから、ATDM 計算にどの程度の不確定があるかを論じている。

12) 結語

全球解析を用いた場合よりも気象庁メソ解析を用いた場合の方が、概して ATDM の結果は向上

し、特に大気濃度時系列においてその傾向が顕著だったことを述べている。

5.2 タスクチームの ATDM 計算に関する NOAA/ARL のウェブサイト

タスクチームによる ATDM 計算については、NOAA/ARL のウェブサイト http://ready.arl.noaa.gov/READY_fdnppwmo.php に実験の仕様や各 ATDM の仕様などとともに、計算結果が掲載されている。異なる放出シナリオに対して、対象期間を選んで結果の表示や検証を誰でもインタラクティブに行えるようになっている。

5.3 第 93 回米国気象学会年次総会スペシャルセッションとフォローアップ

第 93 回米国気象学会年次総会が、2013 年 1 月 6 日から 10 日にかけてテキサス州オースチン市で開催され、6 日に「福島第一原発からの汚染物質の移流と拡散に関するスペシャルシンポジウム」(Special Symposium on the Transport and Diffusion of Contaminants from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant: Present Status and Future Directions) が持たれた。オーバービュー、放出源推定、観測、領域モデル解析、全球海洋モデル解析と人体への影響、国際協力の 6 つのセッションが設けられ、国際協力のセッションで、タスクチームに関する 2 件の講演が行われた。Draxler 議長は、'World Meteorological Organization's Evaluation of the Radionuclide Dispersion and Deposition from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident' の標題で、WMO タスクチームの放射性物質拡散予測の概要と検証について報告した (Draxler *et al.*, 2013b)。斉藤は、'JMA's Regional ATM Calculations for the WMO Technical Task Team on Meteorological Analyses for Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident' の標題で、気象庁の WMO タスクチーム活動への貢献、気象庁メソ解析と解析雨量、RATM とその改良などについて述べた (Saito *et al.*, 2013)。シンポジウムの開催報告は、近藤ほか (2013) にまとめられている。

タスクチームの ATDM 比較実験については、

欧州の地球科学連合大会でも Wotawa *et al.* (2013) により報告されている。環境放射能に関する学術誌 *Journal Environmental Radioactivity* の福島原発事故特集号には、タスクチームの実験に関して 5 編の論文 (Draxler *et al.*, 2014; Arnold *et al.*, 2014; Saito *et al.*, 2014; Leadbetter *et al.*, 2014; Solazzo and Galmarini, 2014) が刊行予定になっている。

5.4 UNSCEAR 第 60 回会合と報告書

UNSCEAR の第 60 回総会は、2013 年 5 月 27 日から 31 日にかけてウィーンで行われ (http://www.unscear.org/unscear/en/about_us/sessions.html)、会合報告は 2013 年 10 月に UNSCEAR のホームページに掲載された (<http://daccess-ods.un.org/TMP/9420922.3985672.html>)。福島第一原発事故に関する UNSCEAR の評価報告書 (UNSCEAR, 2014) は 2014 年 4 月に刊行された。ANNEX A の Appendix B (Radionuclide releases, dispersion and deposition) に、タスクチーム最終報告書から、気象場 (Meteorological conditions) についての説明と NOAA の ATDM 計算の結果などが掲載された。

6. 気象庁 RATM の改良とフォローアップ

6.1 タスクチーム仕様の気象庁 RATM

気象庁では、大気汚染気象センターのオキシダント予測や地震火山部から発表される降灰予報の業務において、MSM の予報値を入力する移流拡散モデル (新堀ほか, 2010) を運用している。今回タスクチームの活動に参加するにあたり用いた JMA-RATM は、このモデルをもとに、メソ解析や解析雨量の入力値にも対応し、放射性物質の半減期、沈着性ガスの湿性沈着や軽量粒子の重力落下の取り扱いなどを追加して改変したオフラインのラグランジュモデルである。タスクチーム仕様でも、移流、拡散過程は基本的に新堀ほか (2010) と共通なので、以下では沈着性ガスや軽量粒子の放射性物質を対象とする場合に特有点についてのみ記述する：

湿性沈着 (ウォッシュアウト)

放射性物質が雲底下で降水により地表面へ除去される過程で、軽量粒子 (セシウム -137) のみに対して考慮している。雲底下の洗浄速度係数 Λ_w は、降水強度 P [mm h^{-1}] を用いて

$$\Lambda_w = AP^B \quad (8)$$

と表される。ここで、雨滴によるトレーサーの捕集効率に関係する A 係数と、雨滴の平均粒径と降水強度の関係に依存する B 係数は北田 (1994) によって、 $A = 2.98 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 、 $B = 0.75$ で与えている¹¹。 P は、メソ解析又は解析雨量から与えられる、降水強度 (単位時間あたりの降水量) である (次節)。

湿性沈着 (レインアウト)

放射性物質が雲内で雲粒の凝結核となり大気中から除去される過程で、沈着性ガス (ガス状態のヨウ素 -131) のみに対して考慮している。雲内の洗浄速度係数は、ZAMG-FLEXPART と同様に Hertel *et al.* (1995) に従って

$$\Lambda_r = \frac{1}{(1-LWC)/HRT_a + LWC} \frac{P}{Z_r} \quad (9)$$

で計算する。ここで LWC は雲水量、 $H = 0.08 \text{ M atm}^{-1}$ はヘンリー定数、 $R = 0.082 \text{ atm M}^{-1} \text{ K}^{-1}$ は気体定数 ($\text{M} \equiv \text{mol l}^{-1}$)、 T_a は気温、 Z_r は雲の厚さで、 LWC 、 T_a 、 Z_r はメソ解析から算出している。レインアウトはこれまで RATM に実装していなかったスキームであり今後、調整・検証が必要である。

湿性沈着は高度約 3000 ~ 1500 m (700 ~ 850 hPa 面) 以下のトレーサー粒子若しくはガスに適用される (第 6.3 節参照)。

乾性沈着

大気最下層にある放射性物質が地表面に吸着される過程で、ガス・粒子のいずれの状態に対しても考慮している。乾性沈着の沈着率は、

$$\Lambda_d = \frac{V_d}{Z_d} \quad (10)$$

¹¹ Draxler *et al.* (2013a) § 4.4 及び Saito *et al.* (2013) § 3.1 にある A 係数の値は誤植。

が適用される (例えば, Iwasaki *et al.*, 1998). ここで V_d は乾性沈着速度で, Z_d は接地層の厚さである. V_d の値は NOAA-HYSPLIT など参考に, 沈着性ガスに対しては 0.01 m s^{-1} , 軽量粒子に対しては 0.001 m s^{-1} を与え (Sportisse, 2007; Draxler and Rolph, 2012), Z_d は 100 m としている.

軽量粒子の鉛直移流には重力落下が考慮される. トレーサー粒子の落下速度 V_t は, その粒径 D が空気分子の平均自由行程 λ_a と同程度の大きさでは, 粒子表面での空気分子のスリップにより V_t が変化するため, カニンガム補正係数:

$$C_c = 1 + \frac{2\lambda_a}{D} \left[a + b \exp\left(-c \frac{D}{2\lambda_a}\right) \right], \quad (11)$$

$$a = 1.257, \quad b = 0.400, \quad c = 1.100$$

を考慮したストークスの抵抗法則:

$$V_t = \frac{1}{18} \frac{D^2 \rho_p g}{\eta_a} C_c \quad (12)$$

に従うとする (例えば, Sportisse, 2007). (11) 式中の空気分子の平均自由行程は

$$\lambda_a = \lambda_0 \frac{\eta_a p_0}{\eta_0 p_a} \left(\frac{T_a}{T_0} \right)^{1/2} \quad (13)$$

で算出した. ただし, η_a は空気の粘性率, p_a は気圧, 添字 0 は基準空気 ($T_0 = 293.15 \text{ K}$, $p_0 = 1013.25 \text{ hPa}$) のときの値: $\eta_0 = 18.2 \mu \text{ Pa} \cdot \text{s}$, $\lambda_0 = 0.0662 \mu \text{ m}$ を取った. 軽量粒子の粒径 D の分布は, 平均直径 $1 \mu \text{ m}$, 標準偏差 1 の対数正規分布 (上限 $20 \mu \text{ m}$) を仮定し, 密度 ρ_p は $1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 均一としている. また, トレーサー粒子が鉛直移流や拡散過程によってモデル地表面の下に移動した時は, 地表 (海面) 上の対称地点に強制的に反射させている.

第 6.3 節で述べる改良した気象庁 RATM のタスクチーム仕様を気象研究所環境・応用気象研究部化学輸送モデル (第 6.4 節に後述) とともに第 9 表に示す. 計算に用いるモデル格子は, 気象庁メソ解析や MSM と同じランベルト等角投影図法に対する地形に沿ったハイブリッド座標である.

6.2 メソ解析と解析雨量の利用

湿性沈着の計算において, メソ解析の降水量 (第 4 図) を用いる場合と, 解析雨量 (第 5 図) を用いる場合の 2 種類を計算した. メソ解析の降水量を用いる場合, RATM では雪・霰についての取り扱いを導入していないため, タスクチーム実験では, 雨のみの前 3 時間積算降水量を 1 時間平均値にして沈着計算に用いた.

メソ解析の降水量に替えて解析雨量を用いる場合, RATM では全て雨とみなして, 前 1 時間雨量を 30 分おきに更新して用いた. 5 km 解像度の MSM の各格子点の降水強度を, 1 km 解像度の解析雨量の周囲 25 格子点の平均によって求めた.

6.3 気象庁 RATM の改良

タスクチームの活動を通して, 当初 (PRE) の RATM から改良 (REV) したのは以下の 7 点である:

- ① トレーサー放出数を 3 時間あたり, $100,000$ から $300,000$ に変更
- ② 放出高度を, モデル地表面～海拔 100 m からモデル地表面～地上高 100 m に変更
- ③ 入力するメソ解析の鉛直流は, 9 格子平均し, 最下層では地表に沿うように調節
- ④ 湿性沈着の適用高度の上限を, 約 3000 m (700 hPa) から約 1500 m (850 hPa) に変更
- ⑤ ウォッシュアウトにおける時間雨量 10 mm 以上での強制沈着を廃止
- ⑥ 地形に沿ったハイブリッド座標系に基づく鉛直内挿方法の修正
- ⑦ 出力データの格子数を 721×577 から 601×401 に変更

上記の改良点のうち, ⑦は計算結果に影響しない. また①及び②については, 他 ATDM の仕様に合わせて, 計算結果へのインパクトは小さかった¹².

③については第 3.3 節で前述したように, 気象庁メソ解析は, JNoVA のアウターループモデル (5 km 解像度の非静力学モデル: NHM) の 3 時間予報で作成されている. これらの値は, 同化ウィンドウの平均値ではなく, 解析時刻 (同化ウィンドウの最後) におけるモデル予報の瞬時値であ

第 9 表 気象庁 RATM と気象研究所環境・応用気象研究部化学輸送モデルの諸元の比較

モデル	気象庁領域移流拡散モデル (JMA-RATM) タスクチーム仕様	環境・応用気象研究部化学輸送モデル (NHM-Chem) オフラインバージョン
ベースとなったモデル	<ul style="list-style-type: none"> ・ 全球ATM (EER) を元にしたRSM入力版移流拡散モデル ・ 2000年三宅島火山ガス予測に利用 ・ その後、MSM入力版がオキシダント予測や降灰予測に現業利用 ・ 今回、放射性物質の扱いを追加 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 化学輸送計算には梶野研究官が京都大学在籍時から開発を続けている領域大気質モデル (RAQM2) の簡易物理バージョンを流用 ・ エアロゾル用NHM-Chem及びオゾン用NHM-Chemとフレームワークが共通
計算手法	ラグランジュ輸送モデル	オイラー輸送モデル
計算領域	MSM (ランベルト図法, 3600×2880 km) #	本州東半分 (ランベルト, 639×771 km)
水平解像度	5 km	3 km
鉛直層数	50	20 (NHMの60層を格子変換)
鉛直座標	地形に沿うハイブリッド	地形に沿うハイブリッド
入力データ	気象庁メソ解析と解析雨量	NHMの予報変数・解析変数 気象場はNHM-LETKFを用いMSM領域及びネスティングによる東日本領域でデータ同化計算を行うことにより作成
入力時間間隔	3時間おき (解析雨量は30分おき)	1時間おき
タイムステップ	10分	24秒
トレーサー粒子数	300,000個/3時間	オイラー型なので粒子の概念無し
放出源	単位放出, 0-100m AGL, 一様分布	原子力機構がbottom-up及びtop-down逆解析で作成した時系列放出量推定値
予測時間	3時間おきを初期時刻とする72時間	time window3時間のLETKFで連続同化
出力時間間隔	3時間ごと	任意; 現在は1時間ごと
水平拡散	Gifford (1982, 1984) ブラウン運動とアナログ的なスキーム	MPMAAスキームによる乱流拡散及び数値拡散
鉛直拡散	Louis et al. (1982) 分子拡散とアナログ的なスキーム	同上
乾性沈着	乾性沈着率を用いた地表での捕捉 適用高度: 100m以下, 地表での反射考慮 希ガス: 適用なし 沈着性ガス: $V_d=0.01 \text{ m s}^{-1}$ 軽量粒子: $V_d=0.001 \text{ m s}^{-1}$	エアロゾルモデル, オゾンモデルで使われているスキームを流用 (平均粒子径500nmの硫酸塩エアロゾルとI ₂ ガスの存在を仮定) Xeは乾性沈着させず
湿性沈着	洗浄速度係数を用いたウォッシュアウト (対粒子) 又はレインアウト (対ガス) 適用高度: 約1500m (850hPa面) 以下 希ガス: 適用なし 沈着性ガス: Hertel et al. (1995) 軽量粒子: 北田 (1994)	放射性Csは硫酸塩と内部混合したエアロゾル粒子 (平均粒子径500nm) となっており, 全粒子が雲核活性化すると仮定し, NHMの雨・雪・霰の量に応じて地上へ落下 放射性I ₂ は雨滴への溶解平衡を仮定して地上へ落下 Xeは湿性沈着させず
重力落下	カニングム補正したストークス抵抗法則 中央粒径1µmの対数正規分布を仮定	硫酸塩は平均粒子径500nmを仮定して重力落下
放射性崩壊	半減期 (積算時に考慮)	¹³⁴ Cs, ¹³⁷ Cs, ¹³¹ I, ¹³² Te, ¹³³ Xeの放射性崩壊を考慮
その他	出力格子数: 601x401 放出シナリオに対する解は, 初期時刻ごとの単位放出に対する計算結果に, 放出量に応じた重みづけして積算することにより得る	気象場作成にアンサンブルカルマンフィルタを用いているため, 放射性核種のシミュレーションもアンサンブルで実行可能

2013年3月28日00UTCに領域が4080×3300 kmに拡張.

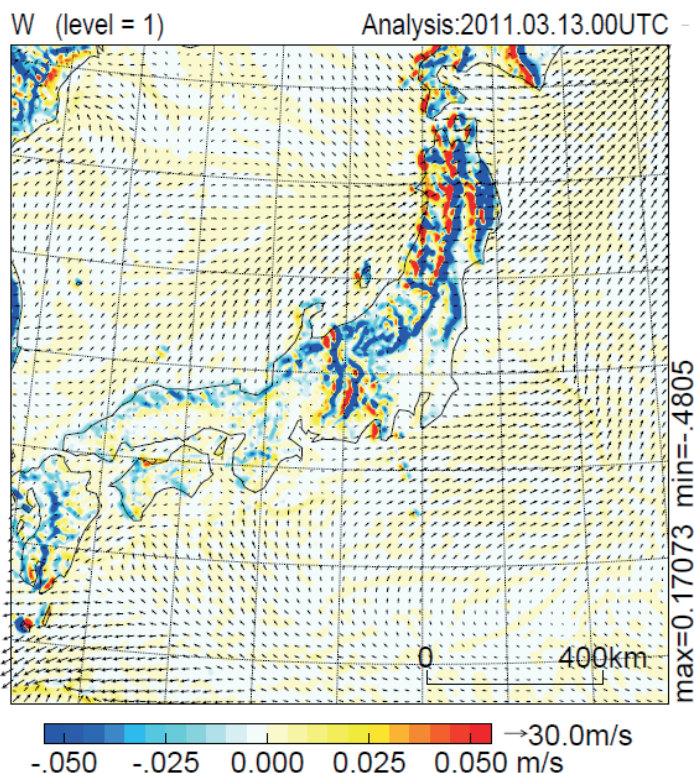
¹² Saito et al. (2014) では, 放出高度について, 福島第一原発のブローアウトパネルの高さを参考に, 地上高30 mまで下げる比較実験を追加している. 沈着計算の結果に大きな違いは見られなかったが, 関東の弱い沈着域の表現には若干の改善が見られた.

る。瞬時値の鉛直流は重力波や寿命の短い対流セルの影響を受ける。第 9 図に、2011 年 3 月 13 日 00UTC における気象庁メソ解析の最下層（高度 20m のフルレベルに内挿後の値、第 3 表参照）の鉛直流の例を示す。山がある場所では風上側で上昇流、風下側で下降流の対が見られるが、海上など地形のない場所でも弱い鉛直流が見られる。これらは振幅としては 1cm s^{-1} 以下であるが、3 時間間隔の解析値を単純に時間内挿する RATM の場合、トレーサの鉛直移流を過大に見積もってしまう恐れがある。また、タイムステップの長い RATM では鉛直流を調節せずに用いると、山など地形の前面で偽の沈着を生じる恐れがある。これらの問題を緩和するために、改良版 RATM では、メソ解析の鉛直流は隣接する周囲の格子点を含む 9 点による空間スムージングを行うとともに、RATM の大気中の最下層に相当するハーフレベル第 2 層（高度 40m）では地形に沿う風速成分 W^* をゼロとして計算し、流れが地形に沿うことを仮定することにした。第 10 図に、鉛直流の扱いを変えた場合の 2011 年 3 月 14 日 00～03UTC にお

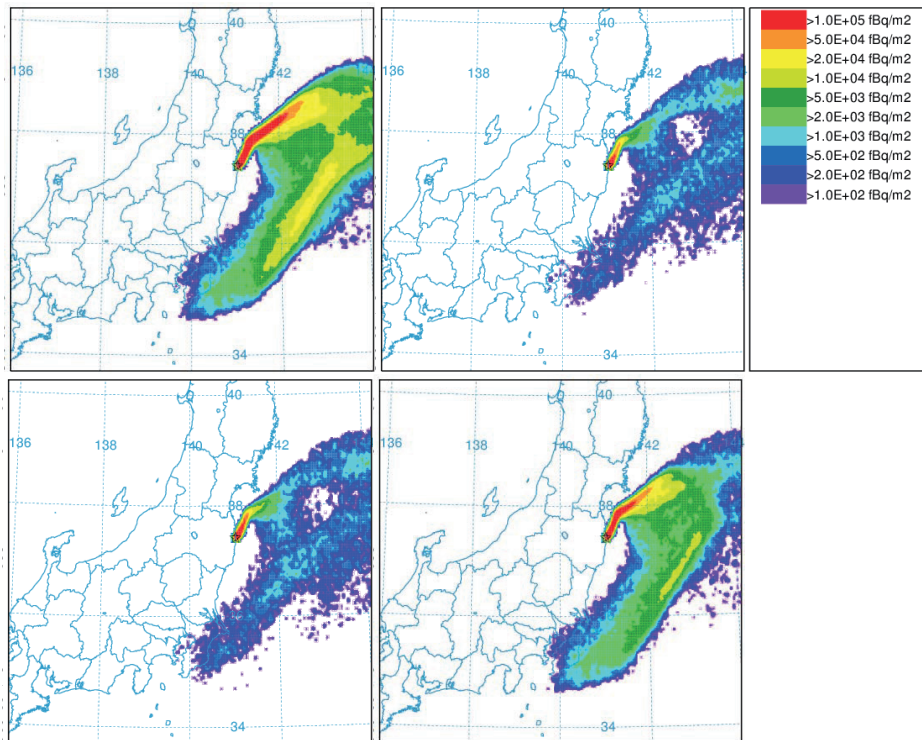
ける単位放出に対する軽量粒子の 24 時間積算沈着量の例を示す。水平 9 格子平均による違いはこのケースでは大きくないが、最下層の鉛直流が地形に沿うという条件を入れない場合の計算（右上と左下）では、放出された軽量粒子の海上での沈着が著しく小さく表現されてしまっている。

湿性沈着に関する④の効果については後述する（第 11 図）。⑤については、特に解析雨量を使用する場合、第 5.1 節 9）で触れたように第 5 図で解析されているようなブライต์バンドによる過剰沈着を防ぐために廃止した。

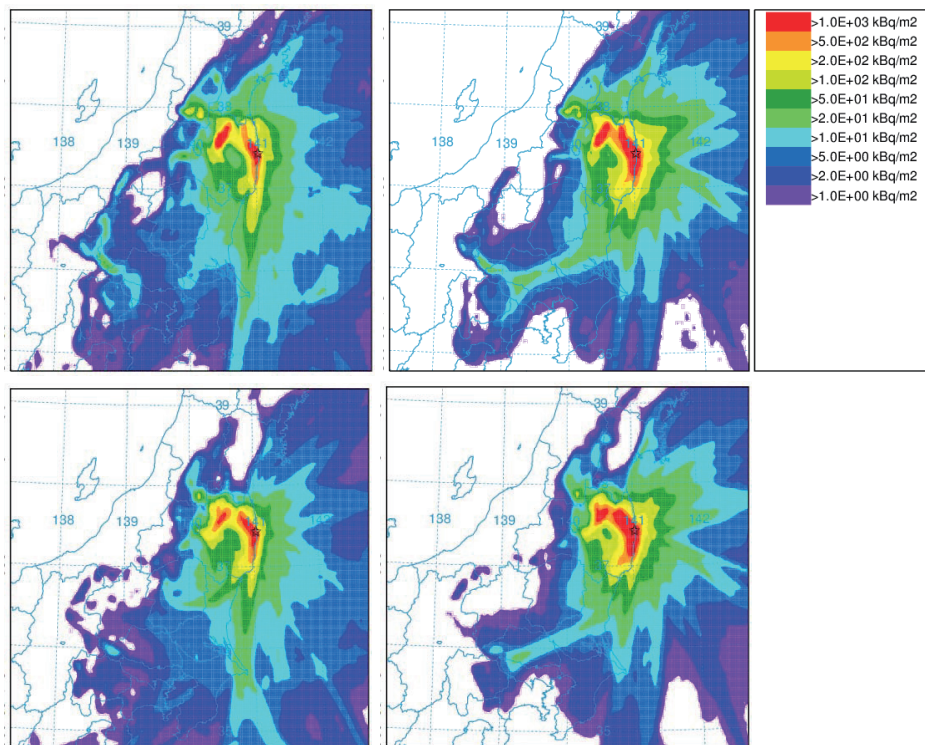
⑥について、改良前の RATM ではトレーサの輸送計算は大部分が z 座標系で計算されていたが、メソ解析値のトレーサ位置への鉛直内挿に際して、メソ解析の地形に沿ったハイブリッド座標系の高度を参照していたため、山や地表面付近の取り扱いが不適切であった。このため、RATM の予測計算においても、トレーサの入出力以外は、すべて地形に沿った座標系で計算するように修正した。合わせてフルレベルの大気最下層（20 m）と地表面の間については、陸面／海面の粗度



第 9 図 気象庁メソ解析の最下層の鉛直流の例 2011 年 3 月 13 日 00UTC.



第 10 図 2011 年 3 月 14 日 00～03UTC における単位放出に対する軽量粒子の 24 時間積算沈着量(15 日 00UTC まで)
 気象庁メソ解析の雨量を用いた改良版 RATM による予測. 左上) 鉛直流を考慮しない場合, 右上) 鉛直流を調節せずを用いた場合, 左下) 鉛直流を 9 格子平均した場合, 右下) 鉛直流を 9 格子平均しかつ最下層の鉛直流は地形に沿うとした場合.



第 11 図 2011 年 3 月 11 日～4 月 3 日のセシウム -137 の積算沈着量
 JAEA の放出量推定を用いた場合. 左上) 気象庁メソ解析の雨量を用いた場合の改良前の RATM による結果, 右上) 同じく解析雨量を用いた場合, 下) 同じく改良版 RATM の場合.

を考慮した風速の対数補正や気温減率などを考慮して、大気最下層の物理量をトレーサーの高度まで外挿するようにした。

以上のほか、乾性沈着の適用高度を 100 m 以下から MSM のハーフレベルの大気最下層 (40 m) 以下に下げ比較実験なども行ったが、沈着計算の結果の違いは小さかった。

第 11 図に、JAEA の放出量推定を用いた場合の 2011 年 3 月 11 日～4 月 3 日にセシウム -137 の積算沈着量の分布を示す。左上に示すメソ解析の雨量を用いた場合の改良前の RATM による結果に比べ、改良版 (左下) では、宮城県の過剰な沈着が緩和しており、これは主に④の湿性沈着の適用高度を下げたことによる効果大きい。図の右側に示す解析雨量を用いた場合には、福島第一原発から北西に延びる高濃度の沈着がより明瞭に表現されている。

前掲した第 7 表と第 8 表には、改良前の領域 ATDM 計算結果の地表沈着と大気濃度のスコアが示されているが、最終報告書の Appendix には、改良版 (REV) も含め (7) 式で定義した METRIC1 以外の結果も示されているので、その中から JMA-RATM に関する部分を抜き出したものを第 10 表と第 11 表に示す。ここで、METRIC2, METRIC3, METRIC4 はそれぞれ (14) 式で与えられるノルムである。

(14) 式で METRIC2 は METRIC1 の FMS を FA2 で置き換えたもの、METRIC3 は METRIC1 に FOEX の項を加えたもの、METRIC4 は METRIC3 に FA2 の項を加えたものと解釈できる。改良版では、解析雨量 (RAP) を用いた場合の濃度時系列を除き、スコアを明瞭に改善した。改良版 MESO (REV) の METRIC1-METRIC4 の値は、沈着計算では第 7 表 (正確には ATMD と MA,

$$\begin{aligned}
 METRIC2 &= R^2 + 1 - |FB/2| + FA2/100 + (1 - KSP / 100), \\
 METRIC3 &= R^2 + 1 - |FB/2| + FMS/100 + (1 - |FOEX/50|) + (1 - KSP / 100), \\
 METRIC4 &= R^2 + 1 - |FB/2| + FMS/100 + FA2/100 + (1 - |FOEX/50|) + (1 - KSP / 100)
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

第 10 表 JAEA の放出量を用いた場合のセシウム -137 の地表沈着に対する JMA-RATM の検証結果
METRIC の値が第 7 表で上位 5 位以内に相当するものを太字で示す。Draxler *et al.* (2013a) より再作成。

	R	FB	FMS	FOEX	%FA2	KSP	METRIC 1	METRIC 2	METRIC 3	METRIC 4
MESO (PRE)	0.45	-0.02	100.00	-0.46	51.01	10	3.09	2.60	4.08	4.59
RAP (PRE)	0.77	0.54	100.00	9.67	41.99	11	3.22	2.63	4.02	4.44
MESO (REV)	0.70	-0.04	99.63	-0.83	37.94	10	3.37	2.75	4.35	4.73
RAP (REV)	0.84	0.56	99.08	9.12	35.73	13	3.28	2.65	4.10	4.46

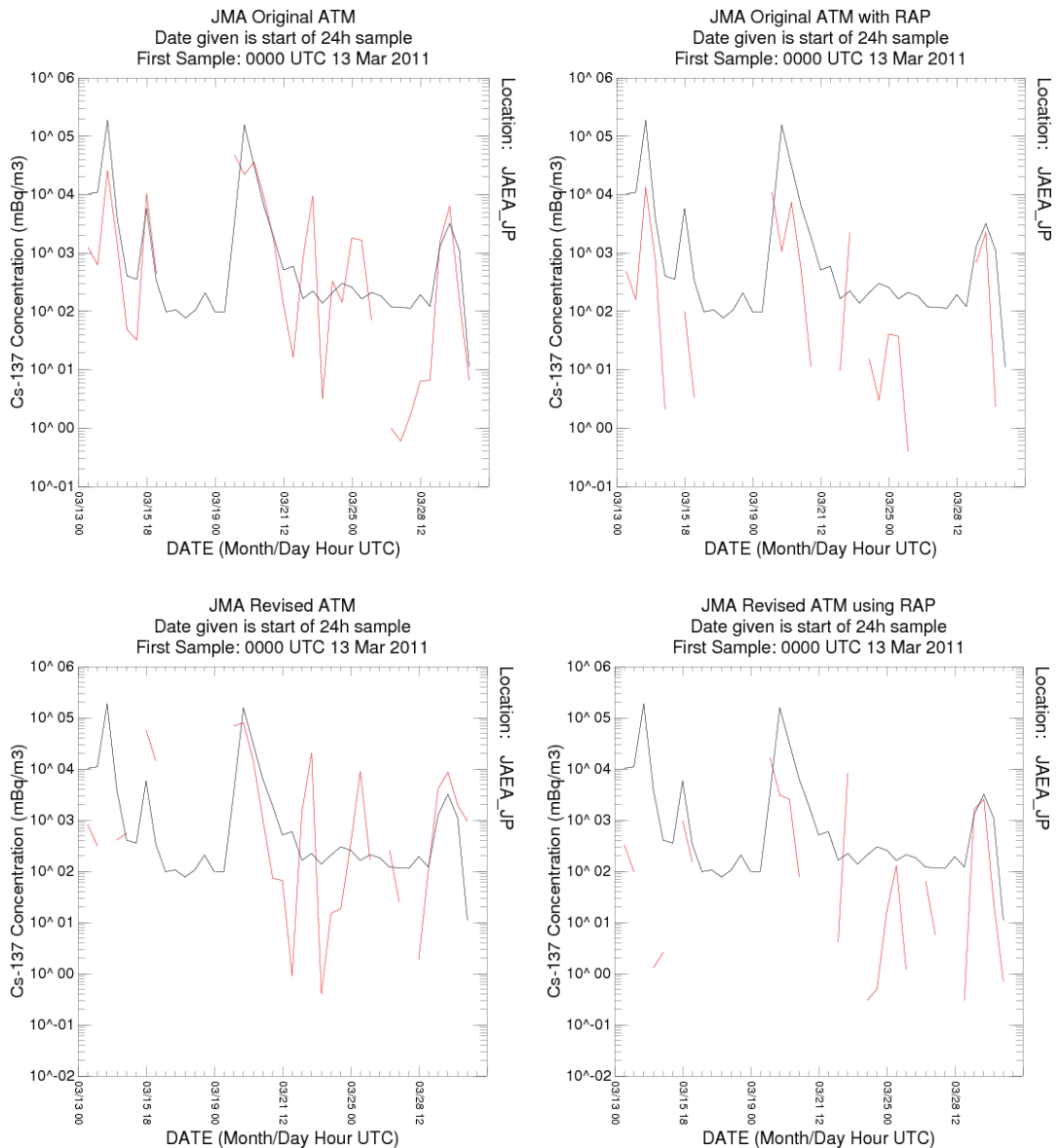
第 11 表 JAEA の放出量を用いた場合のセシウム -137 の大気濃度 (JAEA 東海) に対する JMA-RATM の検証結果
METRIC の値が第 8 表で上位 5 位以内に相当するものを太字で示す。Draxler *et al.* (2013a) より再作成。

	R	FB	FMS	FOEX	%FA2	KSP	METRIC 1	METRIC 2	METRIC 3	METRIC 4
MESO (PRE)	0.51	-0.82	80.00	-21.43	21.43	43	2.22	1.63	2.79	3.01
RAP (PRE)	0.59	-1.66	57.50	-45.24	4.76	64	1.46	0.93	1.55	1.60
MESO (REV)	0.39	-0.40	77.50	-19.05	14.29	43	2.30	1.67	2.92	3.06
RAP (REV)	0.07	-1.68	62.50	-42.86	9.52	67	1.12	0.59	1.26	1.36

RAの組合せ20種類の中)ではそれぞれ6位,7位,3位,5位に相当する。濃度時系列については改良前のものでも良い成績であったスコアをさらに改善しているが,解析雨量の利用は改良版でも良い結果をもたらしていない。JAEAの東海村におけるセシウム-137の測定値と改良前後のRATMの計算値を比較した結果を第12図に示す。ただし,大気濃度に対する検証(第8,11表,第12図)は,1地点の測定値の時間変化に対して行ってお

り,地表沈着と異なり計算領域全体で見えていないことに注意する必要がある。

本節で述べたRATMの改良のうち特に⑥については,この修正に伴い沿岸部のオキシダント予測や山越え気流による降灰予報も改善したため,MSM領域拡張のルーチン変更に合わせて,2013年3月28日02UTCからオキシダント予測業務及び降灰予報業務¹³で使用されている。



第12図 JAEA東海におけるセシウム-137の濃度時系列(2011年3月13日~3月31日)

黒線は測定値。赤線はJAEAの放出量推定を用いた場合の計算値で,左上)気象庁メソ解析の雨量を用いた場合の改良前のRATMによる結果,右上)同じく解析雨量を用いた場合,下)同じく改良版RATMの場合。

¹³ 変更後の最初の降灰予報は,桜島に対して2013年5月8日16:55JST発表のもの。

6.4 日本学術会議モデル相互比較への参加

日本学術会議では、福島第一原発事故で放出された放射性物質の輸送モデルのシミュレーション（特に拡散と沈着過程）に含まれる不確実性の評価を目的として、福島原発事故による環境汚染調査検討小委員会の下に「環境モデリングワーキンググループ（主査、中島映至東大気海洋研究所教授）」を設置しており、気象研究所からも環境・応用気象研究部から4名がメンバーになっている。タスクチームに対しても、Chen 課長宛に、モデル比較に関するレターが2012年10月に届いたため、対処についての議論が行われた。議論の結果、タスクチームとしての対応はせず、参加するかどうかは個々のメンバー機関の判断に任せることとなった（第3.5節）。

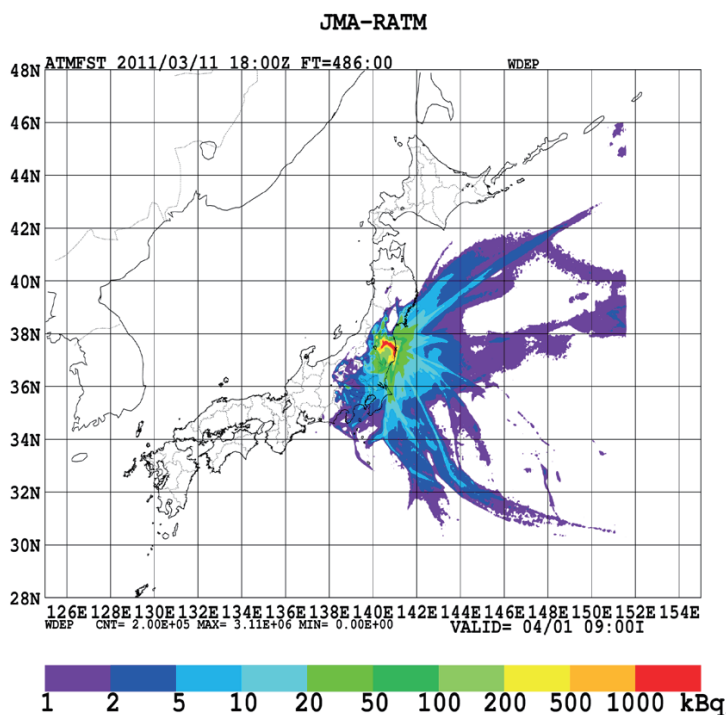
気象研究所では、このモデル比較に、環境・応用気象研究部の化学輸送モデル（NHM-Chem；Kajino *et al.*, 2012; Sekiyama *et al.*, 2013）とタスクチーム仕様のJMA-RATMが参加した。タスクチーム仕様のJMA-RATMとNHM-Chemの諸元は第9表に示されている。

日本学術会議モデル相互比較に際しては、前節の改良版RATMに関してさらに、以下の3点の改良を追加して、セシウム-137とヨウ素-131（粒子状態）の大気濃度と地表沈着を再計算するとともに、学術会議モデル比較で要請されているGrADSフォーマットへの変換などを行った。

- ⑧ 放出量推定を「JAEA2」（Kobayashi *et al.*, 2013）に変更
- ⑨ 計算タイムステップを5分に短縮
- ⑩ メソ解析の積算降水量の利用に際し、雨だけではなく雪・霰も使用

日本学術会議に提出したRATMによるセシウム-137の沈着分布を第13図に示す。⑧のJAEA2は、海洋観測や大気・海洋拡散シミュレーションにより再推定された放出量で、タスクチーム活動で用いたJAEAよりも増えており、第11図で過少であった福島第一原発近傍でのセシウム-137の積算沈着量の計算結果は改善した。

⑨⑩は、時間的制約でタスクチーム報告書に間に合わなかった改良点である。このうち、⑨の計算タイムステップを短縮することにより、沈着



第13図 日本学術会議のモデル相互比較に提出した気象庁メソ解析の雨量を用いたRATM計算によるセシウム-137の積算沈着量 2011年3月11日～3月31日。

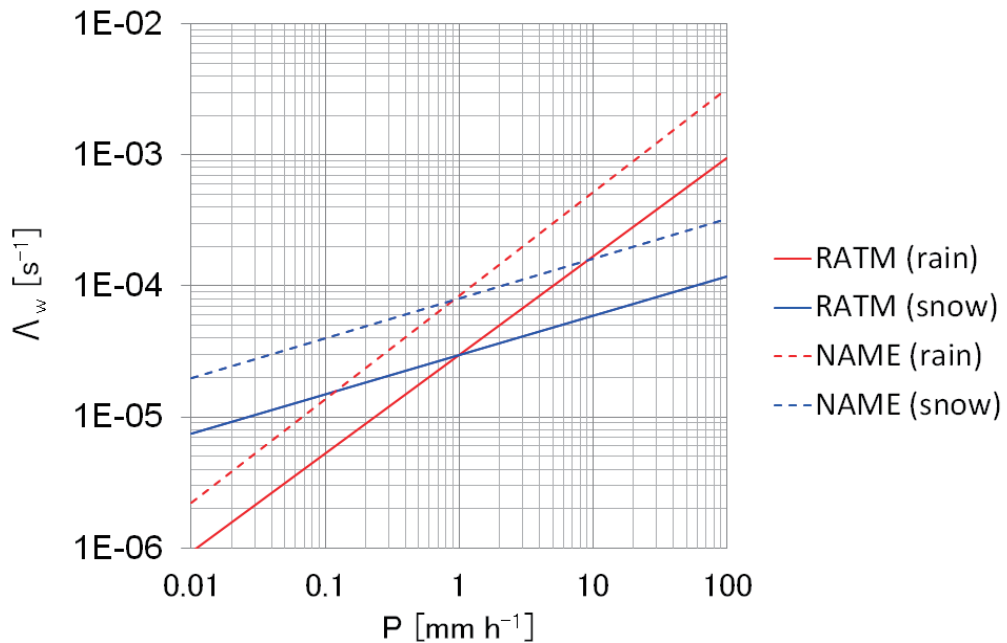
領域の広がりコンパクトになった。また⑩に関して、自重による落下速度の小さい放射性物質の沈着計算では、特に雨と比べて表面積が大きく滞留時間が長い雪による湿性沈着の影響が大きいと考えられるが、その推定が難しいためメソ解析を入力する RATM では実装していなかった。しかし、寒候期に発生した福島第一原発事故では、降雪の影響が無視できないと考えられることから(第 4, 5 図)、雲底下の洗浄速度係数は雪に対しても(8)式と同じ形を仮定して、雪片によるトレーサーの捕集効率に関する A 係数は雨滴と同じ値を用い、雪片の平均粒径と降水強度の関係に依存する B 係数は UKMET-NAME の値(Draxler *et al.* (2013a) の Table 2) を参考に 0.30 に設定した。RATM で用いる雨と雪・霰に対する雲底下の洗浄速度係数と降水強度の関係を第 14 図に示す。また雪雲内の洗浄速度係数は、未調整のまま(9)式を用いた。しかしながら、以上の設定の下で再計算した雪による湿性沈着(ウォッシュアウト)の効果は大きくなかった。特に雨と雪・霰で共通の値を用いた A 係数の値は、Iwasaki *et al.* (1998) や EER 業務(Sakamoto, 2013) の全球 ATM でも用いられているが、他の ATDM と比べて小さく、

RATM ではウォッシュアウトを過少予測している可能性がある。RATM においてより適切な A, B 係数の設定、地上降水量に加え大気中雲水量も参照した湿性沈着(ウォッシュアウト・レインアウト)の改良・検証は将来の課題である。

モデル相互比較の進捗については、大気環境学会で滝川ほか(2013)により報告が行われた。今後、日本学術会議の総合工学委員会原子力事故対応分科会から報告の形で提出される見込みである。

7. おわりに

タスクチームとしての活動は、2013 年 2 月の最終報告書の作成とそれに基づく 2013 年 12 月の WMO 技術報告(Draxler *et al.*, 2013) の出版をもって、一応の終息を見た。第 5.4 節に述べたように、UNSCEAR の第 60 回会合は 2013 年 5 月に行われており、会合報告は、第 68 回国連総会の後 2013 年 10 月に公開された。UNSCEAR では放出推定の見直しを行い、福島第一原発事故に関する評価報告書は 2014 年 4 月に刊行された(UNSCEAR, 2014)。タスクチーム最終報告書からは、気象場についての説明と NOAA の ATDM 計算の結果などが引用されたほか、データ提供機関として気象



第 14 図 日本学術会議のモデル相互比較における気象庁 RATM 計算で使った雨(赤線)と雪・霰(青線)の降水強度に対する雲底下の洗浄速度係数
参考のため、UKMET-NAME の係数(点線)も示した。

庁がリストアップされた。

当初、タスクチーム活動に関して、WMO から求められる貢献が十分に出来るか懸念もあったが、事故当事国の国家気象機関として、一応の役割を果たすことが出来たと考える。この間、著者がやりとりした関連メールは 3,400 通を超えている。今回のタスクチームの結成は UNSCEAR からの要請に基づくものであるが、その活動を契機に各 RSMC で領域 ATDM の整備と性能評価が行われた。気象庁の RATM は、オキシダント予測や降灰予報の業務に用いられているモデルに放射性物質の扱いを追加した急造の ATDM であったが、他センターの ATDM と比較して遜色ない性能を得ることが出来た。また第 6 章で触れたように、RATM の改良の一部は気象庁の現業移流拡散計算にも反映させ、オキシダント予測や降灰予報の改善にもつなげることができた。これらは、今回のタスクチーム活動への参加の成果と言える。タスクチームの委託事項の一つであった「EER システムの強化についての提案」については報告書への具体的な提言の記載は見送られたが、今後、科学的・技術的な見地からの現状認識に基づいて関係方面で議論が行われる可能性がある。

今回のタスクチーム活動を行うに当たっては、本稿の著者の他、謝辞に記す多くの方々のご助力が不可欠であった。これらの方々をサポートに深く感謝するものである。

謝辞

本タスクチーム活動に関して、気象庁予報部数値予報課には竹内義明課長（当時）のご理解のもと多くの協力を頂いた。坂本雅巳調査官（当時）、片山桂一予報官からは EER 活動や EER モデルに関する貴重な情報を、根本昇技官にはメソ解析と解析雨量データの提供用 GRIB2 への変換の実施に関しての労を頂いた。また総務部企画課の長谷川直之課長、吉田隆技術開発調整官（当時）、国際室の木村達哉室長、新保明彦外事官（当時）、予報部業務課の石田純一調査官（当時）にも様々なご助力ご手配の労を頂いた。気象研究所の環境・応用気象研究部の眞木貴史室長、五十嵐康人室長、田中泰宙主任研究官、関山剛主任研究官、梶野瑞

王研究官、海洋・地球化学研究部の青山道夫主任研究官（当時）からはさまざまな情報や技術資料の提供などを頂いた。また三上正男研究総務官、中村誠臣研究調整官、企画室の井上卓研究評価官（当時）、小原公克調査官（当時）、露木義気候研究部長、地震火山研究部の横田崇部長（当時）、山本哲也室長からも様々なご助力ご助言を頂いた。

タスクチーム第 1 回会合に際して、東京大学大気海洋研究所の中島映至教授、鶴田治雄特任研究員、京都大学防災研究所の竹見哲也准教授、名古屋大水循環研究センターの加藤雅也研究員、坪木和久教授、産業技術総合研究所の近藤裕昭博士、海洋研究開発機構の滝川雅之博士の各位からは、気象学会秋季大会スペシャルセッションの資料の提供を頂いた。日本原子力研究開発機構の茅野政道原子力基礎工学研究部門長（当時）と放射線医学総合研究所の三枝新博士には本稿についての有益なコメントを頂いた。

本報告の大部分は、WMO ウェブサイトに掲載されているタスクチームの会合報告と WMO 技術報告に基づくものである。米国海洋大気庁の Roland Draxler 議長、英国気象局の Matthew Hort 博士、カナダ気象局の René Servranckx 博士と Alain Malo 博士、オーストリア気象地球力学中央研究所の Gerhard Wotawa 博士、及び WMO の Peter Chen 課長らタスクチームメンバーに感謝の意を表したい。

本報告に関連する研究の一部は、気象研究所の重点研究「メソスケールデータ同化とアンサンブル予報に関する研究」として行われた。成果の発表に際して、科学研究費補助金基盤研究 (B) 「放射性核種トレーサーのアンサンブルデータ同化と移流拡散沈着過程の高精度解析」と文部科学省 HPCI 戦略プログラム「超高精度メソスケール気象予測の実証」よりサポートを受けた。

参 考 文 献

梶野瑞王・五十嵐康人・田中泰宙・眞木貴史・関山剛・千葉長・青柳曉典・出牛真・大島長・三上正男、2011: 気象研領域モデルによる福島第一原発事故に伴う放射性物質の輸送・沈着実験。日本気象学会 2011 年度秋季大会予稿, A209.

- 加藤雅也・篠田太郎・坪木和久・相木秀則, 2011: CReSS を用いた移流拡散シミュレーション. 日本気象学会 2011 年度秋季大会予稿, A210.
- 気象庁, 2002: 全国合成レーダー GPV の提供開始について. 配信資料に関する技術情報, **108**, 17pp.
- 気象庁, 2006: 国土交通省レーダー (河川局・道路局レーダー雨量計) と気象庁レーダーを統合した解析雨量について. 配信資料に関する技術情報, **238**, 7pp.
- 気象庁, 2012: 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震調査報告. 気象庁技術報告, **133**, 481pp.
- 北田敏廣, 1994: 酸性降水の輸送・反応・沈着モデル. 気象研究ノート, 182, 95-117.
- 近藤裕昭・滝川雅之・渡邊明・中村尚・竹村俊彦・里村雄彦・吉田尚弘・中島映至, 2011: 福島第一原子力発電所から福島県内への 3 月 15 日の放射性物質の輸送と沈着 AIST-MM による解析. 日本気象学会 2011 年度秋季大会予稿, A207.
- 近藤裕昭・里村雄彦・竹村俊彦・山澤弘実・渡邊明, 2012: 2011 年度秋季大会スペシャルセッション「放射性物質輸送モデルの現状と課題」報告. 天気, **59**, 239-250.
- 近藤裕昭・山田哲司・茅野政道・岩崎俊樹・堅田元喜・眞木貴史・斉藤和雄・寺田宏明・鶴田治雄, 2013: 日米気象学会共催「福島第一原子力発電所からの汚染物質の輸送と拡散に関する特別シンポジウム - 現状と将来への課題 -」報告. 天気, **60**, 723-729.
- 新堀敏基・相川百合・福井敬一・橋本明弘・清野直子・山里平, 2010: 火山灰移流拡散モデルによる量的降灰予測 - 2009 年浅間山噴火の事例 -. 気象研究所研究報告, **61**, 13-29.
- 滝川雅之, 2011: 領域化学輸送モデルを用いた放射性物質沈着量の推定. 日本気象学会 2011 年度秋季大会予稿, A208.
- 滝川雅之・永井晴康・森野悠・関山剛・速水洋・田中泰宙・中島映至・柴田徳思, 2013: 放射性物質シミュレーションの国際相互比較. 第 54 回大気環境学会年会特別集会「福島原発事故による環境影響調査結果と放射性物質の動態研究の再構築に向けて」講演.
- 田中泰宙・猪股弥生・五十嵐康人・梶野瑞王・眞木貴史・関山剛・三上正男・千葉長, 2011: 気象研究所全球モデルによる放射性物質輸送シミュレーションの現状と課題. 日本気象学会 2011 年度秋季大会予稿, A211.
- 竹見哲也・石川裕彦, 2011: 2011 年 3 月の福島県東部地域における風速特性・拡散特性のモデル解析. 日本気象学会 2011 年度秋季大会予稿, A206.
- 鶴田治雄・司馬薫・佐藤陽祐・橋本真喜子・荒井俊昭・山田裕子・中島映至, 2011: 原発事故による放射性物質の地表面沈着の広域分布とその要因. 日本気象学会 2011 年度秋季大会予稿, A203.
- 東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会, 2012: 東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会最終報告. 448pp. (<http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/icanps/>)
- 古田定昭・住谷秀一・渡辺均・中野政尚・今泉謙二・竹安正則・中田陽・藤田博喜・水谷朋子・森澤正人・國分祐司・河野恭彦・永岡美佳・横山裕也・外間智規・磯崎徳重・根本正史・檜山佳典・小沼利光・加藤千明・倉知保, 2011: 福島第一原子力発電所事故に係る特別環境放射線モニタリング結果 - 中間報告 (空間線量率, 空气中放射性物質濃度, 降下じん中放射性物質濃度) -. JAEA-Review 2011-035, 90p.
- 眞木貴史, 2011: 逆解析を用いた初期放射線量推定システムの構築. 日本気象学会 2011 年度秋季大会予稿, A204.
- Arnold, D., C. Maurer, G. Wotawa, R. Draxler, K. Saito, and P. Seibert, 2014: Influence of the meteorological input on the local and global atmospheric transport modelling with FLEXPART of radionuclides from the Fukushima Daiichi nuclear accident. *J. Environ. Radioact.*, doi: 10.1016/j.jenvrad.2014.02.013. (in press).
- Chen, P., R. Draxler, M. Hort, K. Saito, and G. Wotawa, 2011: Meeting of The WMO Task Team on Meteorological Analyses for Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident. *WMO CBS Report*, 27pp. (available online at http://www.wmo.int/pages/prog/www/CBS-Reports/documents/FinalRep_TT_FDnpv_v6.pdf)
- Chen, P., R. Draxler, M. Hort, A. Malo, K. Saito, and G. Wotawa, 2012a: Second Meeting of The WMO Task Team on Meteorological Analyses for Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident. *WMO CBS Report*, 13pp. (available online at <http://www.wmo>.

- int/pages/prog/www/CBS-Reports/documents/FinalReport_TTMetAnalyFDnpp.pdf)
- Chen, P., R. Draxler, M. Hort, K. Saito, R. Servranckx, and G. Wotawa, 2012b: Third Meeting of the WMO Task Team on Meteorological Analyses for Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident. *WMO CBS Report*, 9pp. (available online at <http://www.wmo.int/pages/prog/www/CBS-Reports/documents/FINAL-REPORT.pdf>)
- Chino, M., 2012: Air concentration measurements at the Japan Atomic Energy Agency, private communication.
- 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. Technol.*, **48**, 1129–1134, doi:10.3327/jnst.48.1129.
- D'Amours, R., A. Malo, R. Servranckx, D. Bensimon, S. Trudel, and J.-P. Gauthier, 2010: Application of the atmospheric Lagrangian particle dispersion model MLDP0 to the 2008 eruptions of Okmok and Kasatochi volcanoes, *Journal of Geophysical Research*, **115** (D00L11), 11pp, doi:10.1029/2009JD013602.
- Draxler, R.R., and Hess, G.D., 1998: An overview of the HYSPLIT_4 modelling system for trajectories, dispersion, and deposition, *Australian Meteorological Magazine*, **47**, 295–308.
- Draxler, R. R., and G. D. Rolph, 2012: Evaluation of the Transfer Coefficient Matrix (TCM) approach to model the atmospheric radionuclide air concentrations from Fukushima. *J. Geophys. Res.*, **117**, 10pp, doi:10.1029/2011JD017205.
- 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, 2013a: Evaluation of meteorological analyses for the radionuclide dispersion and deposition from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. *WMO Technical Publication*, **1120**, 64pp. (available online at https://www.wmo.int/e-catalog/detail_en.php?PUB_ID=669)
- Draxler, R., P. Chen, M. Hort, A. Malo, K. Saito, and G. Wotawa, 2013b: World Meteorological Organization's evaluation of the radionuclide dispersion and deposition from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. *Proceeding, Special Symposium on the Transport and Diffusion of Contaminants from the Fukushima Dai-Ichi Nuclear Power Plant*. (available online at <https://ams.confex.com/ams/93Annual/webprogram/Paper215372.html>)
- Draxler, R., D. Arnold, M. Chino, 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, 2014: World Meteorological Organization's model simulations of the radionuclide dispersion and deposition from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. *J. Environ. Radioact.*, doi: 10.1016/j.jenvrad.2013.09.014. (in press)
- Gifford, F. A., 1982: Horizontal diffusion in the atmosphere: A Lagrangian-dynamical theory. *Atmos. Environ.*, **16**, 505-512.
- Gifford, F. A., 1984: The random force theory: Application to meso and large-scale atmospheric diffusion. *Boundary-Layer Meteorol.*, **30**, 159-174.
- Hertel, O., J. Christensen, E. H. Runge, W. A. H. Asman, R. Berkowicz, and M. F. Hovmand, 1995: Development and testing of a new variable scale air pollution model – ACDEP. *Atmos. Env.*, **29**, 1267–1290.
- Honda, Y., M. Nishijima, K. Koizumi, Y. Ohta, K. Tamiya, T. Kawabata, and T. Tsuyuki, 2005: A pre-operational variational data assimilation system for a non-hydrostatic model at the Japan Meteorological Agency: Formulation and preliminary results. *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **131**, 3465–3475,
- Honda, Y., and K. Sawada, 2008: A new 4D-Var for mesoscale analysis at the Japan Meteorological Agency, *CAS/JSC WGNE Res. Act. Atmos. Ocea. Model.*, **38**, 01.7–01.8.
- 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.
- Jones, A. R., D. J. Thomson, M. C. Hort, and B. Devenish, 2007: The U.K. Met Office's next-generation atmospheric dispersion model, NAME III. In C

- Borrego and A L Norman, editors, Air Pollution and its Applications XVII. *Proceedings of the 27th NATO/CCMS International Technical Meeting on Air Pollution Modelling and its Application*, 580–589. Springer.
- JMA, 2012: conv jma grib2 --a tool to convert GRIB2 provided for UNSCEAR by JMA -- Users' Manual, 8pp.
- Kajino, M., M. Deushi, T. Maki, N. Oshima, Y. Inomata, K. Sato, T. Ohizumi, and H. Ueda, 2012: Modeling wet deposition and concentration of inorganics over Northeast Asia with MRI-PM/c Geosci. Model Dev., 5, 1363-1375. doi:10.5194/gmd-5-1363-2012.
- 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*, **108**(49), 19526-19529, doi:10.1073/pnas.1111724108.
- 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.
- Leadbetter, S, M. Hort, A, Jones, H. Webster, and R. Draxler, 2014: Sensitivity of the deposition of Caesium-137 from Fukushima Dai-ichi nuclear power plant on the wet deposition parameterisation in NAME. *J. Env. Rad., Special Fukushima Issue*. (to be submitted)
- Louis, J. F., M. Tiedtke and J. F. Geleyn, 1982: A short history of the operational PBL parameterization at ECMWF. Workshop on planetary boundary layer parameterization. ECMWF, 59-79.
- Nagata, K., 2011: Quantitative precipitation estimation and quantitative precipitation forecasting by the Japan Meteorological Agency. *RSMC Tokyo – Typhoon Center Technical Review* **13**, 37–50. (available online at <http://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/rsmc-hp-pub-eg/techrev/text13-2.pdf>)
- Saito, K., T. Fujita, Y. Yamada, J. Ishida, Y. Kumagai, K. Aranami, S. Ohmori, R. Nagasawa, S. Kumagai, C. Muroi, T. Kato, H. Eito, and Y. Yamazaki, 2006: The operational JMA Nonhydrostatic Mesoscale Model. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 1266-1298.
- Saito, K., J. Ishida, K. Aranami, T. Hara, T. Segawa, M. Narita, and Y. Honda, 2007: Nonhydrostatic atmospheric models and operational development at JMA. *J. Meteor. Soc. Japan*, **85B**, 271–304.
- Saito, K., 2012: The Japan Meteorological Agency nonhydrostatic model and its application to operation and research. *InTech, Atmospheric Model Applications*, 85-110. doi: 10.5772/35368.
- Saito, K., T. Shimbori and R. Draxler, 2013: JMA's regional ATM calculations for the WMO technical Task Team on meteorological analyses for Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. Extended abstract, Special Symposium on the Transport and Diffusion of Contaminants from the Fukushima Dai-Ichi Nuclear Power Plant, 5pp.
(available online at https://ams.confex.com/ams/93Annual/webprogram/Manuscript/Paper219086/AMS_ExtAbs_JMARATM.pdf)
- Saito, K, T. Shimbori, and R. Draxler, 2014: JMA's Regional ATM 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)
- Sakamoto, M., 2013: Atmospheric Transport Model. Outline of the Operational Numerical Weather Prediction at the Japan Meteorological Agency, 95-98. (available online at http://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/nwp/outline2013-nwp/pdf/outline2013_03.pdf)
- Sekiyama, T., M. Kajino, and M. Kunii, 2013: Ensemble Simulation of the Atmospheric Radionuclides Discharged by the Fukushima Nuclear Accident, *Geophys. Res. Abstracts*, 15, EGU2013-1695. (available online at <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2013/EGU2013-1695.pdf>)
- Solazzo, E. and S. Galmarini, 2014: The Fukushima-Cs137deposition case study: properties of the Multi-Model ensemble. *J. Environ. Radioact.*, doi: 10.1016/j.jenvrad.2014.02.017. (in press)

- Sportisse, B., 2007: A review of parameterizations for modelling dry deposition and scavenging of radionuclides, *Atmos. Env.*, **41**, 2683–2698.
- Stohl, A., C. Forster, A. Frank, P. Seibert, and G. Wotawa, 2005, Technical note: The Lagrangian particle dispersion model FLEXPART version 6.2, *Atmospheric Chemistry and Physics*, **5** (9) , 2461–2474.
- 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.
- Toyoda, E., 2012: Radar / Rain gauge-Analyzed Precipitation Dataset by JMA, 11pp. (available online with permission of WMO at <http://www.wmo.int/metdata1/>)
- UNSCEAR, 2014: Levels and effects of radiation exposure due to the nuclear accident after the 2011 great east-Japan earthquake and tsunami. *UNSCEAR 2013 Report, Vol. 1, Annex A*. (available, online at http://www.unscear.org/unscear/en/publications/2013_1.html)
- USDOE, 2011: US DOE/NNSA Response to 2011 Fukushima Incident, *United States Department of Energy*. (available online at <https://explore.data.gov/d/prrn-6s35>)
- Weiss, W., 2012: Preparing a scientific report to the General Assembly on ‘Exposures due to the nuclear accident following the Great East-Japan earthquake and tsunami’. *J. Radiol. Prot.*, **32**, 113-118. doi:10.1088/0952-4746/32/1/N113 (http://iopscience.iop.org/0952-4746/32/1/N113/pdf/0952-4746_32_1_N113.pdf)
- Wotawa, G., R. Draxler, D. Arnold, S. Galmarini, M. Hort, A. Jones, S. Leadbetter, A. Malo, C. Maurer, G. Rolph, K. Saito, R. Servranckx, T. Shimbori and E. Solazzo, 2013: Transport and deposition of radionuclides after the Fukushima nuclear accident: international model inter-comparison in the framework of a WMO Task Team. *Geophys. Res. Abstracts*, **15**, EGU2013-3193. (available online at <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2013/EGU2013-3193.pdf>)

略語表

(自明なものや本文中に説明のあるものを除く)

AIST	National Institute of Advanced Industrial Science and Technology	産業技術総合研究所
ARL	Air Resources Laboratory	大気資源研究所
CMC	Canada Meteorological Center	カナダ気象局
ECMWF	European Center for Medium range Weather Forecasting	欧州中期予報センター
ESCAP	Economic and Social Commission for Asia and the Pacific	アジア太平洋経済社会委員会
IAEA	International Atomic Energy Agency	国際原子力機関
ICAO	International Civil Aviation Organization	国際民間航空機関
ILO	International Labour Organization	国際労働機関
IMF	International Monetary Fund	国際通貨基金
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change	気候変動に関する政府間パネル
JAMSTEC	Japan Agency for Marine–Earth Science and Technology	海洋研究開発機構
MRU	Meteorological Research Institute	気象研究所
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration	米国海洋大気庁
OPCW	Organisation for the Prohibition of Chemical Weapons	化学兵器禁止機関
UKMET	United Kingdom Met Office	英国気象局
UNEP	United Nations Environment Programme	国際連合環境計画
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization	国際連合教育科学文化機関
UNICEF	United Nations Children’s Fund	国際連合児童基金
ZAMG	Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik	オーストリア気象地球力学中央研究所