

博士論文

放射性物質移流拡散モデルによる
湿性沈着量分布の再現に関する研究

Simulation of wet deposition distribution using
an advection-diffusion model for radioactive materials

佐谷茜

東京大学大学院 工学系研究科 社会基盤学専攻

2020 年 3 月

論文要旨

大気中の物質による環境影響水循環における役割を明らかにするうえで、大気中の挙動から地表への降下を再現する物質輸送過程モデルにおける降水が与える影響は無視できないものである。こうした過程を明らかにするうえで一つの重要なケースとなるのが 2011 年に発生した福島第一原発事故による放射性物質の大気中への放出である。放出された放射性物質の一部は陸域に拡散し、直接あるいは降水に取り込まれ地表面や河川に沈着していった。環境中に存在する沈着量そのものにも、土壌や河川への流出や再飛散といったリスクがあるが、放射性物質の大気中における動態を把握することが、沈着後の影響評価を行う上で重要である。

そこで本研究では、同位体領域モデル IsoRSM に ^{131}I と ^{137}Cs をトレーサーとして導入し、大気中における挙動と沈着量分布を再現した。特に、放出された放射性物質のうち ^{137}Cs は降水に吸着しやすく湿性沈着過程として降下しやすい核種であり、事故発生直後に東北地方太平洋側や関東地方では降水が観測されていることから ^{137}Cs の湿性沈着過程を詳細に再現することは事故の実態解明にとり重要であるとともに、大気中の物質輸送のうち降水が影響する過程を再現するためのモデル開発という技術開発の観点からも重要である。

しかし、領域大気物質輸送モデルにおいてはいくつかの不確実性があり、特に降水の再現計算における不確実性は無視できないものである。既往研究においては現実に近い値の観測降水データを利用することで高精度化をはかれてきたが、多くは気象場の計算と物質の輸送過程を 2 種のモデルで分けるオフラインシステムを利用しており、降水の不確実性の分析は十分ではなく精度の改善には至っていない。そこで、本研究では気象場と輸送過程を同一のモデルで計算し、かつ出力された湿性沈着量に対して観測降水量による補正をかけることで沈着量を再分布させる、いわば簡易的なデータ同化手法を取り、解像度の高い観測降水量が湿性沈着量分布の再現計算へいかに寄与し精度に影響するかを実験した。

1 章では福島第一原発事故において放射性物質が大気中に放出されるに至った経緯および放出後どのように大気中を輸送され沈着したか本研究の背景となった事象について述べる。さらに、こうした放射性物質による分布状況を把握するための手法として広く使われている物質大気輸送モデルによるシミュレーションを使った既往研究について紹介する。既往研究によって既に事故後の放射性物質の沈着量分布の概況が明らかにされているほか、特に原発から 3 月下旬に首都圏へと放射性プルームが接近したメカニズムについても研究が進められている。しかし、こうしたシミュレーションに伴う不確実性が高精度化を妨げる要因となっており、主要な要因とされる放出量推定値・モデル内の沈着過程・モデルの気象条件についてそれぞれがいかにして不確実性を生みどのように結果に影響しているのかを述べる。特に、気象条件のうち、降水量については本研究で主に扱う湿性沈着過程の再現に大きく関わるため、既往研究において湿性沈着過程の再現精度を向上させるためにどのような気象モデル・気象データが利用されてきたかを詳細に扱う。こうした既往研究の結果が

ら、本研究の目的として気象モデルと物質輸送過程モデルが一体となったモデルを利用し、高解像度の降水量データで湿性沈着量分布を再分布させる手法をとることで降水量の再現精度を向上させることで湿性沈着量分布の再現にどのような影響を与えるかを分析するとし、そしてモデルの再現精度を向上させていくこととした。

2 章では本研究で扱うモデルの詳細と利用した放射性物質の観測データや観測降水量のデータおよびモデルの計算設定を述べる。本研究では IsoRSM とよばれる大気中の水安定同位体の挙動を扱っていたモデルに ^{137}Cs と ^{131}I をトレーサーとして組み込んでいる。このモデルを利用し、事故直後から 3 月末までを計算対象期間に主に関東地方におけるトレーサーとして組み込んだ放射性物質の沈着量分布を再現する。放射性物質の観測データとしては文部科学省から公開されている関東地方 7 地点における定時降下物測定値を使用する。降水量データとして気象庁により公開されている解析雨量を使用し、計算した湿性沈着量分布の空間分布を再分布させる際に解析雨量の分布に合わせることにした。この再分布手法の詳細についても本章で述べる。本手法では大気中から計算領域内において除去された湿性沈着量の割合は変えず解析雨量の分布に応じ空間分布を再分布させている。このため、本手法ではモデルで出力された ^{137}Cs の湿性沈着量、鉛直方向の大気中濃度、そして解析雨量データの値を用いる。

3 章では、4 章以降の前段階として行った沈着過程パラメータの感度実験について述べる。本章の結果は 4 章の実験とは異なる設定を用いているため詳細を改めて述べる。実験の結果、湿性沈着過程のパラメータの感度は乾性沈着過程のパラメータよりも高く、パラメータの値により大気中から放射性物質がより多く降水に取り込まれ沈着濃度が上昇することが再現された。

4 章では主に 2 種の気象条件に関する実験を行った結果を述べる。まず、時空間解像度の異なる大気境界条件を 2 種用意し、それぞれを利用し沈着量分布を再現した。また、それぞれについてさらに、再分布手法を行った場合、行わなかった場合の 2 種のケースを用意し結果を比較した。結果、モデルでの大気境界条件の時空間解像度が細かい場合に観測降水量を用いて ^{137}Cs の湿性沈着量を再分布すると湿性沈着量の分布精度が向上した。また、再分布手法を行わない場合でも、大気境界条件の解像度が粗いものよりも精度は向上した。これは、解像度の高い大気境界条件を利用することで、モデル内で放射性プルームの輸送過程自体をより高精度に再現することが可能となり、実際に放射性プルームが各測定地点に到達した時刻に近いタイミングでシミュレーション上も再現できたと考えられるからである。だが、再分布させる手法を適用させても解像度が粗い大気境界条件を用いている場合は湿性沈着量の再現精度は悪化した。このことから、観測降水量を用いて湿性沈着量分布の再現精度を改良する方法はモデルで計算する気象場の再現精度が高いことが前提となるとわかった。だが、こうした新しい手法を用いても、一部の検証地点において日毎の積算沈着量の値自体が観測値より大幅に少ないなどの限界も見られた。さらに、比較検証した対象期間について、高解像度の気象境界条件を用いた場合でも再現精度が著しく低かった日について

て、文部科学省が公開している測定データの日界が切り替わるタイミングと放射線量が急上昇した時刻がおおむね一致することに着目し、モデル内でわずか数時間程度放射性プルームが到達するタイミングがずれただけでも再現精度が大きく過小評価されてしまう可能性についても指摘した。

5 章では終章として得られた結果から、湿性沈着過程の再現を行うにあたりモデル内の気象条件、特に降水量がどのように影響を与えたかそしてどのような条件下なら向上しうるかを考察したうえで、湿性沈着過程の再現精度の向上のための今後の展望を述べる。

出版リスト

本研究は下記の学術雑誌で発表されている査読付き論文に基づいている。

1. Saya, A., K. Yoshimura, T. Oki, Simulation of radioactive tracer transport using IsoRSM and uncertainty analyses, Journal of JSCE 3, 60-66,
doi:10.2208/journalofjsce.3.1_60, 2015.

2. Saya, A., K. Yoshimura, T. Yoshikane, E.-C. Chang, T. Oki, Precipitation redistribution method for regional simulations of radioactive material transport during the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 123.
doi:10.1029/2018JD028531, 2018.

目次

1. 序章	7
1.1. 研究の背景	7
1.2. 既往研究	9
1.2.1. 大気シミュレーションモデルによる放射性物質の動態把握	9
1.2.2. 放出量推定	10
1.2.3. 沈着過程パラメータの不確実性	11
1.2.4. 気象場の不確実性	11
1.3. 本研究の目的	13
1.4. 本論文の構成	14
2. 研究手法	15
2.1. 水の安定同位体を含む領域大気大循環モデル(IsoRSM)	15
2.2. モデルに導入する沈着過程	16
2.3. 検証に用いるデータ	19
2.3.1. 観測降水データ	19
2.3.2. 放射性物質の観測データ	19
2.3.3. 境界条件に用いる気象データ	19
2.4. 実験の設定	20
2.5. 観測降水データによる再分布手法	23
3. 感度実験による不確実性分析	26
3.1. コントロール実験	26
3.2. 沈着過程のパラメータの不確実性	26
4. 観測降水データによる再分布手法	29
4.1. 降水量分布の検証	29
4.2. ^{137}Cs の沈着量分布	30
4.3. 観測の定義が与えるモデル検証結果への影響	44
4.4. 観測降水データによる補正の寄与	46
5. 終章	48
5.1. 本研究のまとめ	48
5.2. 今後の課題	50
Appendix 1. G1 における ^{137}Cs 鉛直積算濃度	51
Appendix 2. G1 における関東地方の ^{137}Cs 鉛直積算濃度	55
謝辞	59
参考文献 (英文)	61
参考文献 (日本語)	72

図目次

図 1 福島第一原子力発電所事故による放射性物質の放出・拡散・沈着の概念図.	7
図 2 ^{131}I の積算沈着量分布(MBq/km^2)において見られた Gibbs 現象.	16
図 3 式(2)の湿性沈着過程のイメージ図.	17
図 4 式(2)と既往研究における降水量に応じた湿性沈着量の 15 分後の減少率.....	18
図 5 本研究の計算対象領域および関東地方の定時降下物測定地点.....	21
図 6 2011 年 3 月 21 日 9:00 のモデルで計算された降水量分布, 鉛直方向の ^{137}Cs 積算濃度, ^{137}Cs の湿性沈着過程分布, 再分布手法を適用させた後の湿性沈着分布, および RAP による降水量分布.	24
図 7 ^{137}Cs の計算期間中の積算沈着量分布.	27
図 8 2011 年 3 月 21 日 6:00 から 15:00 までの 3 時間ごとの降水量分布.....	30
図 9 2011 年 3 月 21 日 6:00 から 15:00 までの 3 時間ごとの ^{137}Cs 湿性沈着量分布.	31
図 10 2011 年 3 月 21 日 6:00 から 15:00(JST)までの 3 時間ごとの G1 における大気中の ^{137}Cs 鉛直積算濃度.	32
図 11 N1, N2, G1, G2 における 2011 年 3 月 18 日から 27 日までの ^{137}Cs 積算沈着量の比較検証図.	33
図 12 2011 年 3 月 18 日から 27 日における RAP, ^{137}Cs 定時降下物測定値(文部科学省, 2011), 各実験で計算された日毎の ^{137}Cs 積算沈着量の時系列推移.	37
図 13 2011 年 3 月 21 日 1:00 から 13:00 までの観測放射線量と IsoRSM で計算された同地点付近のグリッド ^{137}Cs の大気中濃度.	45

表目次

表 1	実験に使用する大気境界条件のデータセット	20
表 2	実験名およびその違いのまとめ	22
表 3	感度実験における各実験のパラメータ値.	27
表 4	^{131}I の沈着量の実験ごとの割合.	28
表 5	^{137}Cs の沈着量の実験ごとの割合.	28
表 6	図 11 において F2, F10 の範囲に入る検証地点の数.	34
表 7	2011 年 3 月 18 日から 27 日における各実験(N1, N2, G1, G2)による日毎の ^{137}Cs 積算沈着量および定時降下物測定値の値(文部科学省, 2011).	40

1. 序章

1.1. 研究の背景

2011 年 3 月 11 日 14 時 46 分ごろ、宮城県三陸沖を震源とする東北地方太平洋沖地震が発生し、マグニチュード 9.1 の巨大地震が東日本を襲った(内閣府 2011)。地震の影響による死者は 1 万 5 千人以上、太平洋側の東北地方沿岸部を中心に全壊建物は 11 万 8 千戸を超える深刻な被害を東北・関東地方にもたらした(内閣府, 2011)。震災による被害を拡大させた要因の一つは地震発生直後に発生した津波である。太平洋沿岸地域を破壊した津波だが、甚大な被害をもたらした施設のの一つが福島第一原子力発電所であった。福島第一原子力発電所は地震発生後、波高約 13m の津波が到達し、施設内の主要な建屋があるエリアがほぼ全域にわたって浸水した(東京電力, 2011)。この影響により、電源盤等計器類の水没により 1 号機から 5 号機まですべての電源が喪失するに至った(原子力災害対策本部, 2012)。復旧作業が開始されるものの、震災による施設の損壊や放射線量の上昇により作業は難航し、3 月 12 日 15 時 36 分に 1 号機が、14 日 11 時 1 分には 3 号機がそれぞれ水素爆発を起こした(原子力災害対策本部, 2012)。こうした影響により大量の放射性物質が大気中に放出され関東地方まで拡大していった(Nuclear Emergency Response Headquarters Government of Japan, 2011)。日本学術会議(Science council of Japan, 2014)によれば 2011 年 3 月から 4 月にかけて放出された放射性物質のうち ^{137}Cs の総放出量は 9–37PBq と推定されている。

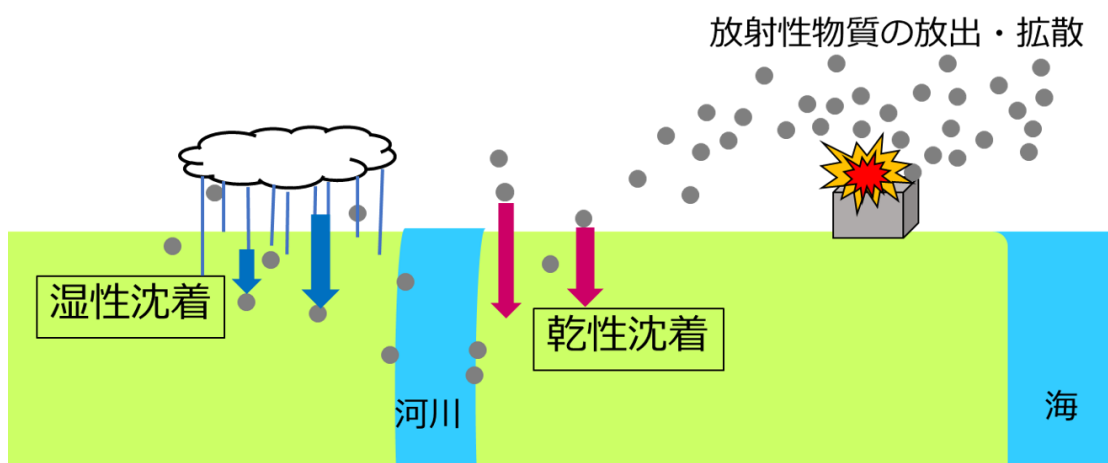


図 1 福島第一原子力発電所事故による放射性物質の放出・拡散・沈着の概念図。

放出された放射性物質は図 1 の概念図のように、風による移流で大気中を輸送され、拡散や鉛直方向への混合を経て、広域に分布し濃度が拡散過程を経て薄まっていき、大気中を輸送された後は直接あるいは降水を通じ陸域・海域に沈着していく（乾性・湿性沈着）（Yoshida & Kanda, 2012）. 沈着した放射性物質は、森林において植生に吸着したり、土壌に浸透したり、あるいは河川へ流出したりする. また、地表面に沈着した放射性物質は降水の影響で沈着した土砂ごと河川へ流出したりする場合がある. 直接、あるいは降水により後から河川へ流出した放射性物質は、河川水中の土砂に吸着したままであり、一部は浄水場の取水口へ流入し、浄水場などで検出される場合がある（Ikemoto and Magara, 2011）. このように環境中へ放出され沈着し残存する放射性物質の影響評価のため、残存する放射性物質の空間分布図が重要となる（Yasunari et al., 2011）. 放出された放射性物質の沈着量の分布は各都道府県の定時降下物の測定値や航空機モニタリング結果が公表されている. しかしながら、事故直後の 3 月 12－17 日頃、定時降下物はあまり測定されておらず、測定地点によっては、例えば福島県では計器の損傷などにより 3 月 27 日まで測定を行うことが出来なかった（文部科学省, 2011）. また、航空機モニタリング結果は広域の放射性物質の分布を把握するには役立つが、事故直後の時系列ごとの分布やある特定の地点の沈着量等を知るには不向きである. このような十分とは言えない観測データの収集状況の中で、大気中の物質輸送過程モデルによって放出された放射性物質の挙動をシミュレーションし沈着量の時空間分布の再現計算が行われている（Tsuruta et al., 2014; Yasunari et al., 2011）. こうしたモデルによる物質の輸送シミュレーションは大気中の風や降水場を計算し、物質の放出・大気中の輸送・陸海域への沈着過程を再現する. このような数値モデルによる再現計算により、事故直後の放射性物質の詳細な動態把握ができ放射性物質の沈着による汚染地域の形成過程の解明や初期被ばく量の算出にも貢献することが期待される.

また、福島第一原発事故における放射性物質の放出によって放射性物質が大気中を輸送され地表に降下、環境中へ様々な影響を与えるプロセスは他の大気中物質の輸送過程と大きく異なるものではない. このため、前述のシミュレーションは、従来他のエアロゾルなどの輸送過程を計算し環境影響評価を行っていた大気物質輸送過程モデルを利用し実施されている. このため、福島第一原発事故における大気中の放射性物質の挙動を再現する試みは、本事故の実態解明だけではなく、こうしたモデルの技術開発にも寄与する側面を持っている.

1.2. 既往研究

1.2.1. 大気シミュレーションモデルによる放射性物質の動態把握

上述した事故当時のリアルタイムの観測データの不足から、大気物質輸送過程モデルによって、大気中に放出された放射性物質の挙動を再現し、沈着量の時空間分布の再現計算が試みられている。既に大気移流拡散シミュレーションによる沈着量分布の推定が行われており、Yasunari et al. (2012) は ^{137}Cs の沈着量を日本列島全域にわたって計算した。列島全域を対象としていることから不確実性が大きいこと、グローバルモデルによる気象データを計算に用いていることなどから日本列島の付近の風向きや降水分布などを詳細に再現するには限度があるが、モデルシミュレーションでは東日本で高い沈着量を示した(Yasunari et al., 2012)。Christoudias & Lelieveld (2013) は全球大気モデルを用いて放射性物質の拡散シミュレーションを行い、放出された放射性物質の 80%は太平洋上に沈着したと指摘した。また、Aoyama et al. (2016)はモデルと観測値から、事故前後の北太平洋の ^{137}Cs の残存量から福島第一原子力発電所から北太平洋上への放出量を推計した。

現在行われている福島第一原発の一般的なシミュレーションモデルは、WRF などの気象モデルから計算された気象場をと放出量の逆推定値を化学輸送モデルなどに入力値として組み合わせタイムステップごとに 3 次元で物質濃度を計算する、というものである。こうしたシステムのモデルをオフライン結合型のモデルと呼ぶ。

日本学術会議は複数のオフライン結合型のモデルの相互比較を行い報告書としてまとめた(Science Council of Japan, 2014)。日本学術会議は 9 つの機関から計算結果の提供を受け、各計算結果の計算領域と計算期間から共通の領域・期間において、更に文部科学省第 5 次航空機モニタリングの結果(文部科学省, 2012)も合わせて ^{137}Cs の積算沈着量分布の比較を行った。なお、第 5 次航空機モニタリング結果は 2012 年春の測定結果だが、事故以降の再飛散や流出などの変化は比較をするうえで特に考慮されていない。比較の結果、原発から北西方向に延びる高濃度の沈着量分布は多くのモデルで再現できている一方で、福島県中通地方や栃木県、原発南部の沈着量分布の再現結果には各モデル間でばらつきが見られた。これらのシミュレーション結果による積算沈着量は航空機モニタリング結果と 0.1 倍 - 10 倍の範囲で一致が見られるが、陸域の湿性沈着量の割合については大きく異なる(Science Council of Japan, 2014)。

既往研究の中には放射性プルームが福島県付近から関東地方に接近、首都圏を通過したプロセスを明らかにしているものもあり、2011 年 3 月 20 日から 23 日にかけて放射性プルームが福島第一原子力発電所から南へ北からの風によって運ばれ、それが北東からの風によって首都圏を通過、同時期に振った降水による沈着過程によってホットスポットと

呼ばれる高濃度の放射性物質の沈着分布を形成したことがわかっている (Kinoshita et al., 2011; Morino et al.; 2013; Srinivas et al., 2012; Terada et al., 2012) . また, Yoshikane et al. (2016) はこうした東北からの風がメソスケールの低気圧との関連があることを指摘し, 首都圏への放射性プルームの輸送過程は同地域でしばしばみられる日変化に大きく影響されていたと結論付けた. このように, 大気中における挙動については既往研究において詳細に明らかにされつつある一方で, 放射性物質の陸域への沈着過程再現計算については, 各輸送過程モデルで定めている放射性物質ごとのパラメータや, 計算に利用している気象モデル等によっていまだ不確実性があるのが現状である.

1.2.2. 放出量推定

福島第一原発事故直後は, 地震と津波の影響による電源喪失や原子炉内の装置の損傷などにより放出量をリアルタイムで観測する機能が失われていた. このため, 周辺の環境モニタリングポストにおいて観測された放射線核種の大気中濃度と大気拡散シミュレーションを組み合わせるなどして放出量を推定する試みが行われた. この先駆けとして原子力規制委員会の(JAEA)は原子力開発機構(NSC)が協力し, 大気中に放出された ^{131}I と ^{137}Cs の放出量を逆推定により推定した(Chino et al., 2011). ここでは, Chino et al.らの逆推定による放出量推定を紹介する. まず, 放射線核種ごとに放出率(Bq/h)を計算する. 放出率は観測地点における大気中濃度を, 単位放出率(1Bq/h)を仮定した場合の同地点のモデル出力の大気中濃度で割る. このようにして求められた放出率を放出時間で乗じたものを積算した値が放出量となる. この放出量を更に環境モニタリングデータの値と比較することによって最終的な時系列放出量の算出を行う.

Chino et al. (2011) による放出量推定のほか, 他研究機関においても放出量推定が様々な手法で行われている. 逆推定に用いる放出率を炉内解析などにより算出された暫定放出率と大気拡散シミュレーション結果および観測値を比較することで算出したり (Stohl et al., 2011) , 対象地域を広げ関東地方までのより広範なモニタリングデータと比較を行ったりした (Hirao et al., 2013) 研究成果が報告されている. また, Korsakissok et al. (2013) はこうした複数の放出量推定値について感度実験を行い, 沈着量の再現に与える影響をしてくしている. さらに, ガンマ線線量率を用いた放出量推定も行われている (Saunier et al., 2013) .

このように放出量推定に関する研究成果は急速に進展し, 放出量の時間変動は原発のプラントの水素爆発やベント等のイベントと合わせて合理的な結果になっている. しかしながら, 採用している手法や観測地点・数の差異さらにはシミュレーションモデルの違いから, 推定された事故直後の総放出量は ^{137}Cs では 9.6-3.6PBq 程度の開きが各結果間にある. 特に, 多くの推定値には大気物質輸送モデルの結果を用いているため, 推定手法や用いる観測データの検討のほか, 大気物質輸送モデルの精度向上が欠かせない状況である.

1.2.3. 沈着過程パラメータの不確実性

モデルで定義している放射性物質の沈着過程の手法にも不確実性の要因がある。経験則に基づく湿性沈着過程の定式化は設定する係数によって沈着量分布に現れる不確実性が大きいという結果が出た(Morino et al., 2013)。乾性・湿性沈着過程におけるパラメータについて Saya et al. (2015) は ^{131}I と ^{137}Cs の沈着量の感度実験を行った。その結果、乾性沈着過程に比べ、湿性沈着過程における設定した湿性沈着係数によって沈着量の空間分布と濃度に与える影響が大きいと指摘した。この感度実験について詳細を 3 章で述べる。

1.2.4. 気象場の不確実性

さらに重要な不確実性の一つがモデルで計算している気象場である。大気中の放射性物質の挙動は大気の移流拡散過程にも大きく依存するため、できる限り現実に近い気象場を再現することが重要である。高精度に気象場を再現したうえで放射性物質の挙動を物質輸送モデルで再現するためにはその不確実性について慎重に分析する必要がある。これまでの研究では、複数の物質輸送過程モデルと気象場のモデルの組み合わせ、それぞれで計算された沈着量分布の再現精度について検証することで不確実性が検討されている(Draxler et al., 2015)。The World Meteorological Organization では日本、英国、カナダ、オーストラリア、米国の専門家達から構成されるタスクチームを編成し、5 種類の大気移流拡散モデルと 5 種類の解像度や予報時間の異なる気象モデルを組み合わせたオフライン結合型のモデルについて、気象モデルに技術的に可能な範囲で合わせて 5 種の気象解析データセットおよび観測降水データ(解析雨量)それぞれ適用させた計 18 種類のシミュレーションを行った。沈着量分布を精度良く再現するにあたり、特に湿性沈着量分布は降水量をいかに現実に近い分布まで再現できるかが重要である。しかしながら Draxler et al. (2015) は、メソスケールモデルなどの予報値による降水量データを気象モデルに適用し湿性沈着量を再現した場合と比べ、高解像度の降水観測データを気象モデルに利用し湿性沈着量を再現した結果は必ずしも改善するとは言えないと指摘した。この理由として、観測データを各オフラインシステムの気象モデルで計算するために利用可能なよう変換するスキーム自体が沈着量の計算結果に影響を与えてしまっていると考察している(Draxler et al., 2015)。別の既往研究においては、Leadbetter et al. (2015) が大気移流拡散モデル NAME に対し 4 種類の気象モデルからのデータセットを組み合わせシミュレーションするとともに、湿性沈着過程のパラメータ感度実験を行った。この結果、原発の南や北東 - 南西方向の沈着量分布の広がり方に差異が現れたり、高解像度のデータセットを使用した場合は降水分布とプルームの分布が合わないことから観測値との相関係数が粗いデータセットを使用した場合より低くなったりすることが分かった。さらに、湿性沈着過程のパラメータの感度実験と比較し、

異なる湿性沈着過程のパラメータを利用した場合と異なる気象データセットを用いた場合のシミュレーション結果に与える影響はほぼ同程度であることも指摘した。

また、同研究では、レーダー観測雨量を利用し気象場を計算し輸送過程を計算したケースについても検証しているが、前述の Draxler et al., (2015) 同様に、高解像度の降水の観測データを利用する場合についてより踏み込んだ実験が必要であると言及している。既往研究の中には、湿性沈着量を計算する場合のみ、降水量を気象モデルで計算された値ではなく高解像度の降水観測データで置き換えることで、Draxler et al. (2015) で指摘された問題に取り組んでいるものもあるが (Arnold et al., 2015; Saito et al., 2015a), やはり、必ずしも湿性沈着量分布の再現精度を改善出来てはおらず、 ^{137}Cs の時系列推移の再現精度が悪化したことも指摘されている (Saito et al., 2015a)。

1.3. 本研究の目的

本研究では、大気中の物質輸送過程モデルを高精度化し大気中に放出された放射性物質の再現精度を向上させるため全項目で挙げた 3 つのモデルの不確実性のうち、輸送過程を計算する際の降水量分布が与える湿性沈着量分布について焦点を当てる。これまで高精度の降水量分布を利用する方法はいくつか取られてきたが、本研究のアプローチでは、再解析データで計算された降水量に基づき計算された湿性沈着量を、計算領域内のグリッドごとに高解像度の降水量観測データの値によって再分布させる方法である。したがって、本研究では高精度の沈着量分布を再現するための最適な気象データセットと輸送モデルの組み合わせを指摘することを目指しているのではない。高解像度の降水量観測データとモデルで計算された気象場両方を用いることでどのように物質輸送過程モデルの湿性沈着過程の再現計算結果の精度に寄与するのかを明らかにし、再現精度を向上させることを本研究の目的とする。

前項で述べたように既往研究においては既に降水の不確実性について検討が始まっている。しかしながら、高解像度の降水観測データを放射性物質の沈着過程のシミュレーションに用いることで再現精度が悪化した原因についてはまだまだ詳細に検討する必要があるとしている。既に述べたように、湿性沈着過程は降水場の再現精度が大きく影響しており、大気モデルで気象場を計算するにあたって高解像度の観測値を利用することの有用性は未だ大きいと考えられる。したがって、こうした湿性沈着過程の再現計算にあたり、高解像度の降水観測データがどのように寄与し、そしてどのような手法であれば湿性沈着過程を高精度に計算することが可能となるかを明らかにすることは非常に重要であり、本研究の目的とするところである。

1.4. 本論文の構成

第 2 章では本研究で用いる数値モデル, IsoRSM について, また検証に用いる降水量データや大気境界条件, 観測された放射性物質の沈着量データの概要, 観測降水量により湿性沈着量を再分布させる手法について述べる. また, 3 章以降で共通の計算条件についてもまとめる. 第 3 章では, IsoRSM で定めている沈着過程のパラメータを扱った感度実験を主に取り上げ, 本研究で扱うモデルの前提となる沈着過程の不確実性について明らかにする. 第 4 章では, 気象庁の観測降水データを用いて ^{137}Cs の湿性沈着量分布を再分布させた計算結果を異なる大気境界条件ごとに検証した結果を示す. 検証では, 関東地方で沈着量が観測された 7 地点について時系列で比較し, 高解像度の降水量データを用いることおよび気象境界条件に用いるデータセットによってどのように精度への寄与が変わるのかを詳細に明らかにする. また, こうした時系列比較結果から見えた, 観測データ自体の不確実性がモデルの検証に与える影響についても言及する.

5 章では 4 章で示された結果から今後の物質輸送過程モデルの精度向上についてどのような手法が効果的と考えられるかについて述べる.

2. 研究手法

2.1. 水の安定同位体を含む領域大気大循環モデル(IsoRSM)

本研究ではシミュレーションに用いる数値モデルとして、水の水素・酸素同位体比の同位体分別過程を導入した同位体大気大循環モデルIsoGSM (Yoshimura et al., 2008)の領域版であるIsoRSM (Yoshimura et al., 2010)を用いる。IsoRSMとは、米国環境予測センター(NCEP)とスクリプス海洋学研究所にて開発されてきた数値予報用領域スペクトルモデル、RSM (Juang et al., 1997)に、新たなトレーサーとして水の安定同位体である HD0 と H_2^{18}O を導入したモデルである。カリフォルニアの冬季における特定のストームイベントの詳細な時空間変化を良い精度で再現することが確認されている(Yoshimura et al., 2010)。

一般的な化学トレーサー輸送モデルでは、降水過程を外力として与えることが多いが、IsoRSM では大気中で水蒸気が凝結し降水として地表面へ落下する一連の過程において、トレーサーが雲粒ないし雨滴に取り込まれていくまたは放出されていく様子を、モデル内のタイムステップごとに定量的・明示的に扱っている。また IsoRSM では再解析データ等の大気境界条件を与える際にスペクトルナッジングを採用しており(Kanamitsu et al., 2010; Yoshimura & Kanamitsu, 2009)、水平2次元空間において1000kmを超えるスケールの波に対して境界域だけでなく領域内部まで風速場の補正を行うため、スペクトルナッジングを行っていない他の領域大気モデルよりも気象場の予測精度が高いことが報告されている(Yoshimura et al., 2010)。RSMは多くの既往研究で領域スケールの気象場を精度よく再現できることが報告されている(e.g., Ham & Yoshimura, 2016; Miller et al., 2009)。さらに IsoRSM を用いる利点は IsoRSM では前章で挙げた既往研究で多く用いられているオフライン結合型のモデルのように気象モデルと物質輸送モデルが切り離されておらず同一のモデルで気象場と物質輸送過程を計算できることである。これにより、気象モデルと輸送モデルの組み合わせによる不確実性の影響を考慮する必要がない。また、本研究では主に降水が物質の湿性沈着過程に与える影響に焦点を与えているが、通常オフライン結合型のモデルでは、物質輸送過程を計算する際に気象モデルからの気象場の入力を1時間あるいは数時間ごとでしか行っていないため、本研究の目的においてはやや不十分である。

RSMにおける水平拡散は、各物理量の高周波成分の波の振幅を各タイムステップで減衰させること、すなわち細かいスケールの空間分布を滑らかにすることで表現されている。振幅の減衰割合(すなわち拡散の強さ)は、各変数によって異なる減衰係数 D_c (単位なし)によって定められているが、計算安定性を重視した経験的な値が用いられている(Juang et al., 1997)。本論文では、 ^{131}I と ^{137}Cs の減衰係数 D_c を変化させ、結果に及ぼす影響を測る。 D_c の値が小さいほど振幅の減少割合が大きくなり、すなわちより拡散が強いことを示していることには注意してほしい。

また、本研究で用いる IsoRSM には Chang & Yoshimura (2015) によって NDSL

(noniteration dimensional-split semi-Lagrangian advection) 輸送スキーム (Juang, 2007, 2008) が実装されている. これによりスペクトルナッシングを用いる IsoRSM において水安定同位体トレーサーの水平分布を再現した場合に発生する Gibbs 現象と呼ばれるエラー(図 2)を低減することを可能とした.

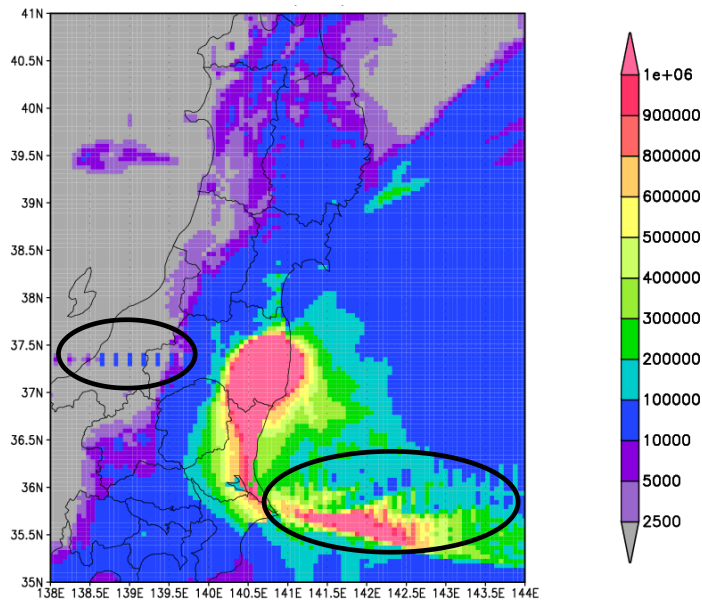


図 2 ^{131}I の積算沈着量分布 (MBq/km²) において見られた Gibbs 現象 (図中黒枠内).

2.2. モデルに導入する沈着過程

本研究では, IsoRSMで従来追跡していた水安定同位体トレーサーにかわり Saya et al. (2015)において実装された ^{131}I と ^{137}Cs に置き換え, 乾性・湿性沈着過程を導入したバージョンのIsoRSMを用いる. Yoshikane et al. (2016) ではこの2種の放射性物質のトレーサーを取り入れたバージョンのIsoRSMを用い, 福島第一原発事故の放射性物質の大気物質輸送過程の十分に再現できることを示した. 下記にSaya et al. (2015) で組み込まれている乾性・湿性沈着過程のスキームを述べる.

乾性沈着はMaryon et al. (1991)らの報告に基づいている(式(1)).

$$F_{dry} = V_d C_{(z=1)} \quad (1)$$

乾性沈着は物質が直接地表面や海面、植物などに沈着する過程を指すが、その沈着速度はそれぞれの粒子の大きさにより異なる。式(1)ではそれぞれ F_{dry} =沈着量($\text{Bq}/\text{m}^2/\text{s}$)、 V_d =沈着速度(m/s)、 $C(z=1)$ =最下層の濃度(Bq/m^3)を表しており、このうちチューニングパラメータである沈着速度について、本研究では ^{137}Cs は $V_d=1\text{e-}3$ (海上)、 $5\text{e-}3$ (陸上)、 ^{131}I は $V_d=5\text{e-}3$ (海上)、 $25\text{e-}3$ (陸上)とMaryon et al. (1991)らの研究成果を参考に設定している。湿性沈着についてもMaryon et al (1991)など既往研究があるが本研究では式(2)を用いる。

$$\frac{dC}{dt} = -\alpha \frac{P}{q} C \quad (2)$$

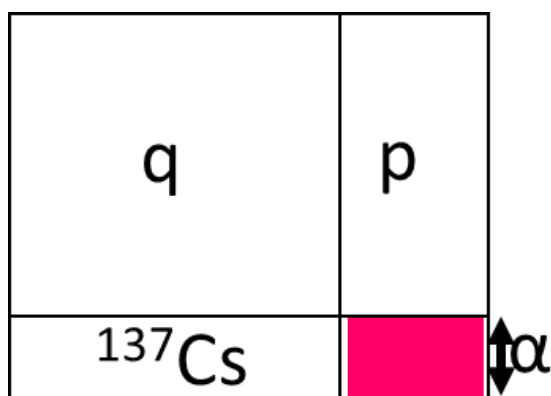


図 3 式(2)の湿性沈着過程のイメージ図。大気中に存在する水蒸気量(q)のうちの凝結量(p)の割合に応じ放射性物質(図中の赤く色づけされた範囲)が沈着する。

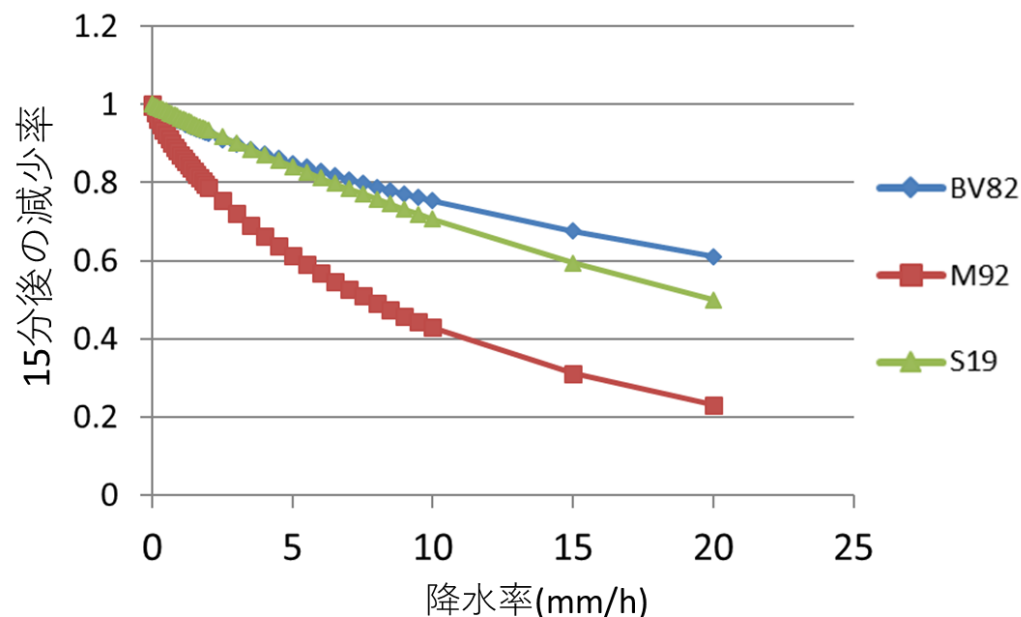


図 4 式 (2) の湿性沈着過程 S19 と既往研究の湿性沈着過程 BV82 (Brenk and Vogt, 1981), M92 (Maryon et al., 1992) における降水量に応じた湿性沈着量の 15 分後の減少率.

湿性沈着は雨や雪に物質が取り込まれ地表面や海面、植物に沈着する過程を指す。厳密には降水の生成過程で取り込まれる場合と降水の落下過程で取り込まれる場合のそれぞれ 2 種類が存在し、定式化する際にこの 2 種類を分けることもある。本研究ではこの 2 種類の過程を区別していない。式 (2) において大気中の高度ごとの $P(\text{kg/kg/s})$ は凝結した水の量、 $q(\text{kg/kg})$ は水蒸気量を表している。式 (2) は大気中の水蒸気量に対してどれくらい凝結したかという割合に応じて、放射性物質が液相（零下においては固相）に取り込まれる様子を表している。図 3 は式 (2) のイメージ図である。大気中に存在する水蒸気量 (q) のうち凝結量 (p) の割合に応じて、さらに湿性沈着係数 α の値によりどれだけ放射性物質が凝結した水に取り込まれやすいかを表す。ちなみに Maryon et al (1991) の式では降水量 R (mm/hr) と 2 種のパラメータに比例した表現となっているが、本研究の表現では凝結率 P/q に比例しているという点が異なる。図 4 で比較しているように、Maryon et al (1991) による湿性沈着過程では大気中からの除去率は降水量に依存するところが多い。本研究では、大気中にグリッド内で均一に存在している放射性物質が、水蒸気のうち凝結した水分量に吸着し湿性沈着として降下するというメカニズムに着目し定式化している。また、パラメータが 1 種のみであり感度実験も複雑になりにくい。なお、本稿 4 章以降の実験では α の値はすべて 0.5 と設定している。

2.3. 検証に用いるデータ

2.3.1. 観測降水データ

IsoRSM で計算された降水量分布の検証および、後述する湿性沈着量の再分布手法で用いる観測降水量データとして気象庁の解析雨量(Radar-Rain gauge Analyzed Precipitation, 以降 RAP)を用いる。RAP はレーダーによって観測された雨量(面的なデータ)を雨量計で観測された点的なデータで補正する手法で開発された合成データであり、日本列島全域をカバーしている (Oki & Sumi, 1994)。現在、RAP は 30 分ごとに 1km の解像度で公表されている (Takido et al., 2016)。本研究で用いられている GRIB フォーマットで記録され DVD にまとめられ配布されているもの (Japan Meteorological Agency (以降 JMA), 2011) を利用しており、本研究で使用している 1 時間ごとの RAP の降水量は前 1 時間の平均値を与えている。RAP のデータの詳細については Saito et al. (2015b) の研究を参照されたい。

2.3.2. 放射性物質の観測データ

2011 年 3 月以降の日毎の放射性物質 (^{131}I , ^{137}Cs) の降下量が都道府県ごとに定時降水物測定値として観測され、文部科学省によって取りまとめられ公表されている。(文部科学省, 2011)。降水採取用に設置された装置を用い各放射性物質の降下物を採取し、ゲルマニウム半導体核種分析装置によって分析を行っている (文部科学省, 2011)。1 日の降下量は各日日本時間午前 9 時に記録され、前日の午前 9 時から記録時の当日午前 9 時までの積算降下量を計算し 1 日の降下量としている。なお、降水観測データの RAP は記録時から前 1 時間の平均降水量であるのに対し、定時降下物は前日 9 時から当日 9 時までの積算量であることに注意されたい。

また、4 章では各都道府県で測定されている放射線量についても一部扱う。放射線量の測定地点数、機器の設置高度、記録方法などは都道府県ごとに異なっている。本研究では、東京都新宿区にある東京都健康安全研究センターで測定された放射線量データ (Tokyo Metropolitan Institute of Public Health, 2011a) を、同地点にいつ放射線プリュームが到達したかを参照するため用いる。このデータでは記録している放射線量の単位をグレイ ($\mu\text{Gy/h}$) とし、1 時間当たりの平均値を算出している。また、本データでは 1 グレイは 1 シーベルトとして変換可能な単位としている (Tokyo Metropolitan Institute of Public Health, 2011b)。

2.3.3. 境界条件に用いる気象データ

IsoRSM の大気(側方)境界条件に本研究では NCEP および GPV-MSM を用いる。NCEP は数値モ

デルで予報した値を様々な気象観測データで同化した値のデータセットである (Kalnay et al., 1996). 現在, この NCEP の最新版である NCEP/DOE が, 従来版で報告されたエラーを修正し使用する観測データを増やして, National Oceanic and Atmospheric Administration から公開されている. 本稿では NCEP/DOE を NCEP と以下呼称する.

GPV-MSM は日本列島及びその近海を対象とするメソスケールモデルであり予報値は気象庁により公開されている. 本研究では Yoshikane et al. (2016) で IsoRSM に境界条件として GPV-MSM が実装されておりその実装に基づいて再現計算を行う. 本稿では GPV-MSM から得られるデータを GPV-MSM と呼称する. GPV-MSM からのデータは東京大学生産技術研究所の喜連川研究所の GPV データアーカイブにより取得可能である. また境界条件を与える際に IsoRSM ではスペクトルナッジングを適用させ, 水平 2 次元空間において定めているナッジングスケールを大気場が超えないよう領域内の風力・気圧・気温・湿度などを強制的に補正している. 本研究では, これら二種類の異なる時空間解像度を持つ境界条件それぞれにナッジングスケールを変えている. NCEP の場合は 1000km, GPV-MSM には 10km のナッジングスケールを設定している.

こうした二つの異なる境界条件を用いることで 4 章の感度実験においてどのように沈着量の再現結果に影響し, 境界条件の時空間解像度が沈着量の再現精度を改善しうるのかを扱っていく. 表 1 ではこれらのデータセットについて時空間解像度の違いを表でまとめている.

表 1 実験に使用する大気境界条件のデータセット.

境界条件	空間解像度	時間解像度
NCEP/DOE 再解析	180km	6 時間
GPV-MSM (気象庁モデルの予報値)	10km	3 時間

2.4. 実験の設定

本稿 4 章では NCEP, GPV-MSM を境界条件として ^{137}Cs の沈着量を再現する二種の実験をまず行う. NCEP の空間解像度はおよそ 180km, 6 時間ごとのデータである. GPV-MSM は空間解像度 10km, 3 時間ごとのデータである. これら 2 つの実験では両方とも Terada et al. (2012) による放出量推定値を計算時の ^{137}Cs の入力値として用いている. 計算対象期間は 2011 年 3 月 11 日 9:00 から同年 4 月 1 日 6:00 までとする. モデルの解像度は 5km, 計算対

象領域は $136^{\circ} 29' 31.2''$ E- $145^{\circ} 37' 19.2''$ E, $33^{\circ} 36' 21.6''$ N- $42^{\circ} 11' 16.8''$ N とする. 図 5 はこの計算領域の範囲と 2.3.2. 項で述べた定時降下物の関東地方における 7 か所の測定地点を示している. また, 4 章末の図 10 以降では大気境界条件は GPV-MSM, 放出量推定値, 計算対象領域, 計算期間は同一の条件下で行っている.

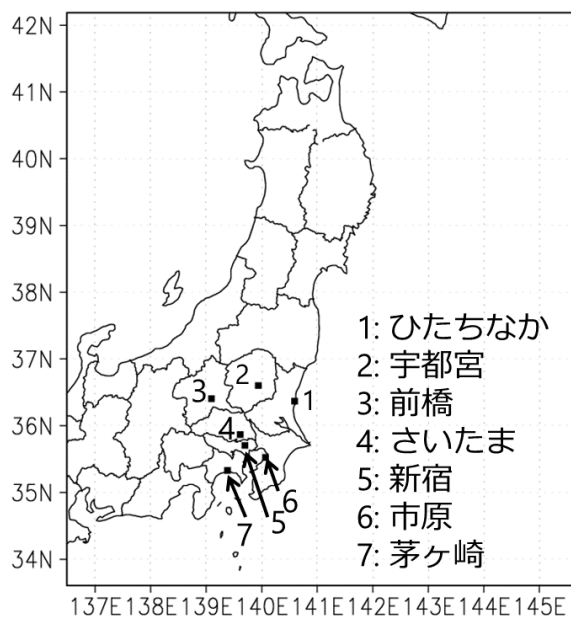


図 5 本研究の計算対象領域および関東地方の定時降下物測定地点 (文部科学省, 2011) (図中地図内の数字付近の黒い四角がそれぞれの測定地点を示す).

表 2 実験名およびその違いのまとめ.

実験名	大気境界条件	再分布手法の適用有無
N1	NCEP	無
N2	NCEP	有
G1	GPV-MSM	無
G2	GPV-MSM	有

また，気象場のシミュレーション時に用いる主な物理過程は以下に述べる既往研究に基づいている．なお，放出された物質は地表面からのフラックスとして扱い放出後の鉛直方向の輸送には Hong and Pan (1996) の乱流過程を利用した．事故の爆発に伴うモメンタムなどは考慮されていない．

- RAS (Relaxed Arakawa-Schubert) 対流性降水過程スキーム (Moorthi & Suarez, 1992)
- Noah land surface model (Ek et al., 2003)
- Chou スキーム (放射) (Chou & Suarez, 1994),
- Nonlocal 境界層スキーム (Hong & Pan, 1996)

本研究 4 章では次項で詳細を述べる再分布手法を前述の 2 種の実験に適用させ湿性沈着量分布の再現に与える影響を分析する．各実験は次の表 2 のように呼称する．各名称の N は NCEP，G は GPV-MSM を意味し，再分布手法を適用しない実験名は 1，適用する実験名は 2 とアルファベットと数字を組み合わせている．

2.5. 観測降水データによる再分布手法

$$W_{redist} = \beta R_{obs} C_{clm} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{\sum W_{sim}}{\sum (R_{obs} C_{clm})} \quad (4)$$

領域大気モデルにおいて、降水は再現計算が困難なもののひとつである。例えば、風速や気温、気圧などの他の変数は既往研究でもモデルによって十分に再現できることが分かっている。したがって、気象場の不確実性に着目した時に、放射性物質の沈着量の再現時に与える不確実性が大きい要素は降水であるとし、本研究ではモデルから得られる降水量を元に湿性沈着量を計算する際に何らかの補正を行うことで再現精度を上げられると仮定する。そこで、本研究では、 ^{137}Cs の湿性沈着量分布を降水量のみに調整を加えることで精度を改善する手法を用いる。

本研究が用いる手法では湿性沈着量を観測降水データで再分布させる。モデルで計算される湿性沈着量の空間分布は同じく計算される降水分布に依拠している。したがって、本研究の再分布手法ではモデルで計算されたあるタイムステップにおける領域内の ^{137}Cs の総湿性沈着量は変えず、空間分布を RAP に一致させるように再分布させる。モデルのシミュレーションの結果算出される湿性沈着量を大気中の ^{137}Cs 鉛直方向の積算濃度と RAP により観測降水で再分布させた湿性沈着量を算出する。具体的には式(3)で示した通り、補正した湿性沈着量(W_{redist})は RAP による観測降水量(R_{obs})と ^{137}Cs の大気中の鉛直方向積算値(C_{clm})をグリッドごとに掛け合わせ係数 β で調整したものである。 β は式(4)で算出される、観測降水量と大気中濃度の鉛直方向の積算値をグリッドごとにかけ合わせたものの領域積算値に対する、IsoRSM により計算された領域内の湿性沈着量(W_{sim})の領域積算値の割合を示す係数である。すなわち、この係数 β を式(3)に乗ずることで、大気中から除去される湿性沈着量の割合はそのままに、湿性沈着量の空間分布のみを RAP に合わせて補正できる構造になっている。なお、 W_{redist} は前1時間の積算量となっている。

本手法の利点は、観測データの値である RAP を使用するのはモデルのシミュレーションが終了した後であるため、RAP の値に何らかの変換を行いモデルの計算に組み込む必要がないことである。こうした降水の観測値を、オフライン結合型のモデルの物質輸送モデルへ取り入れる際に変換スキームが既往研究では必要とされていたが (Arnold et al., 2015; Draxler et al., 2015; Saito et al., 2015a), 本研究では観測値をモデルのアウトプットに適用させるなのでこうした変換の必要がない。一方で、この手法の不利な点は、再分布手法の前後で領域内の総湿性沈着量は変わらないため、モデルによるシミュレーション時に領域内の総湿性沈着量に大きな誤差が発生している場合それを本手法では修正することは

できない。このようなケースでは、再分布手法を用いて空間分布の再現精度が改善しても各地点の湿性沈着量の値までは改善されないと考えられる。

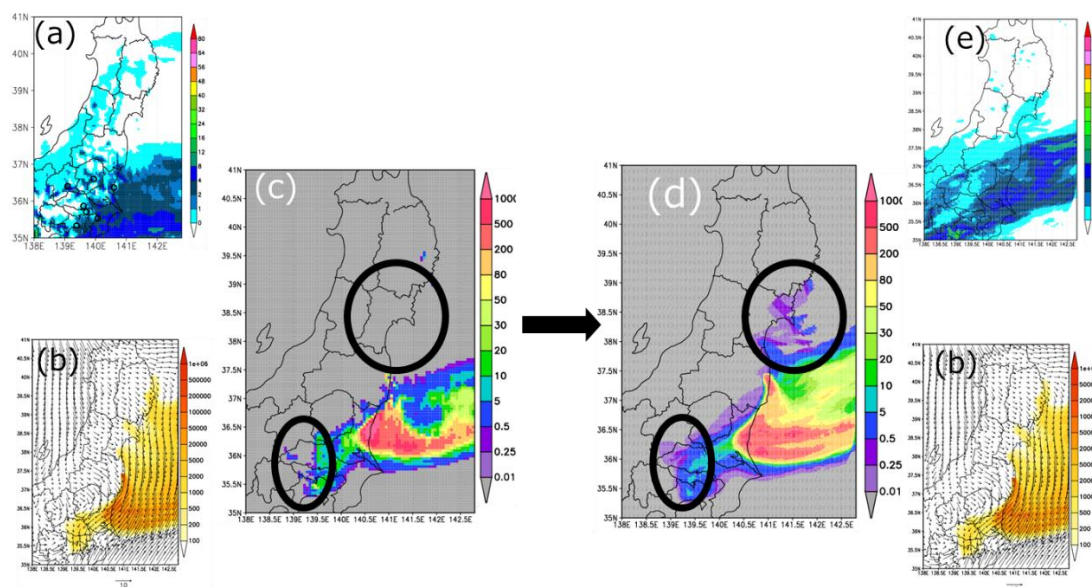


図 6 2011 年 3 月 21 日 9:00 の (a) GPV-MSM を境界条件とした場合のモデルで計算された降水量分布[mm/h], (b) (a) と同一の実験における鉛直方向の ^{137}Cs 積算濃度[MBq/km²], (c) (a) (b) と同一の実験による ^{137}Cs の湿性沈着量分布[MBq/km²], (d) (c) に再分布手法を適用させた後の湿性沈着量分布[MBq/km²], (e) RAP による降水量分布[mm/h].

また、図 6 は再分布手法適用前後の違いを示すための、2011 年 3 月 21 日 9:00 における降水量分布、鉛直方向の積算濃度分布図、湿性沈着量分布図、手法適用後の湿性沈着量分布図、そして RAP の降水量分布図である。湿性沈着過程は大気中において放射性プルームが存在しているところに降水分布が形成されることで、降水に伴い降下するため、この図では積算濃度分布図と降水量分布図が重なり合う所に(c)のように湿性沈着量分布が形成されることになる(湿性沈着量 $0.01\text{MB}/\text{km}^2$ 未満については色分けをしていないので重なり合う部分と図では完全一致はしない)。手法適用後は(e)の RAP の分布に合うように、つまり鉛直方向の積算濃度分布と RAP の分布が重なり合う部分に(d)湿性沈着量分布が補正される。図中黒枠内で示した部分は、大気中濃度分布は存在するが、モデルで降水量分布が再現されなかったために湿性沈着量分布がモデル計算では再現されなかった部分だが、これが手法適用後は RAP では降水量が観測されているため湿性沈着量分布が補正され形成されていることがわかる。このように、手法を適用することで出力後の湿性沈着量分布を観測降水分布図に沿うように補正することが可能となり、再現精度の向上が見込まれる。

3. 感度実験による不確実性分析

大気物質輸送過程モデルにおける大気移流拡散シミュレーションにはモデル内の沈着過程のパラメータと気象場に不確実性が存在し、これらはモデルの精度向上を妨げる。こういった不確実性を最小限にとどめ高精度のシミュレーションを実現するためには、不確実性の原因となりうる各要素がどのように結果に影響を与えるかという情報が必要である。特に湿性沈着過程には降水を含む気象場、モデル内で湿性沈着過程を表すために用いているスキームやパラメータにある不確実性が関わる。そこで、本章では、4章以降扱う IsoRSM における降水の不確実性に着目した湿性沈着過程の感度実験の前提として、Saya et al. (2015) において扱ったモデル内の沈着過程における不確実性について取り上げその影響について明らかにしておくこととする。

3.1. コントロール実験

前章で述べた放射性物質の挙動を扱う IsoRSM を用い、まずコントロール実験を行った。計算領域は $132^{\circ} 43' 33''$ - $151^{\circ} 30' 32''$ E, $28^{\circ} 17' 27''$ - $46^{\circ} 39' 25''$ N をカバーする 160×199 グリッド、解像度は 10km とした。大気境界条件には NCEP/DOE 再解析データを用い、主な物理過程として、RAS 対流性降水過程 (Moorthi and Suarez, 1992), Non-Local 境界層過程 (Hong and Pan, 1996) を用いる。 ^{131}I と ^{137}Cs の放出量の時系列変化は Chino et al (2011) の推定結果を用いた。湿性沈着係数 α の値に ^{131}I , ^{137}Cs 共に 1 を、乾性沈着速度 V_d に Maryon et al (1991) の値を採用する。計算期間は 2011 年 3 月 12 日 0 時から同年 3 月 28 日 0 時までの 16 日間とする。半減期は考慮しない。

3.2. 沈着過程のパラメータの不確実性

本項では表 3 で示したパラメータを利用し、モデル内のトレーサの沈着過程および拡散過程に生じる不確実性を分析する。図 7 は計算期間中の ^{137}Cs の積算沈着量を実験ごとに並べたものである。図 7 では CTL と比較すると、WD10 では分布中心部の沈着量が増加した。これは湿性沈着係数 α の値を上げたことで放射性物質が取り込まれやすくなったためである。DC12 では分布そのものが小さくなっているが、減衰係数を上げたことで拡散が弱くなったからである。このようにトレーサの導入過程にも不確実性が生じる。また、DD01 ではほぼ変化が見られなかった。

表 3 感度実験における各実験のパラメータ値.

実験名	湿性沈着係数 α	乾性沈着速度 (海面, ^{137}Cs のみ)	減衰係数 DC
CTL	1.0	1e-3	0.2
WD10	10.0	1e-3	0.2
DC12	1.0	1e-3	12
DD01	1.0	(1e-3)*0.1	0.2

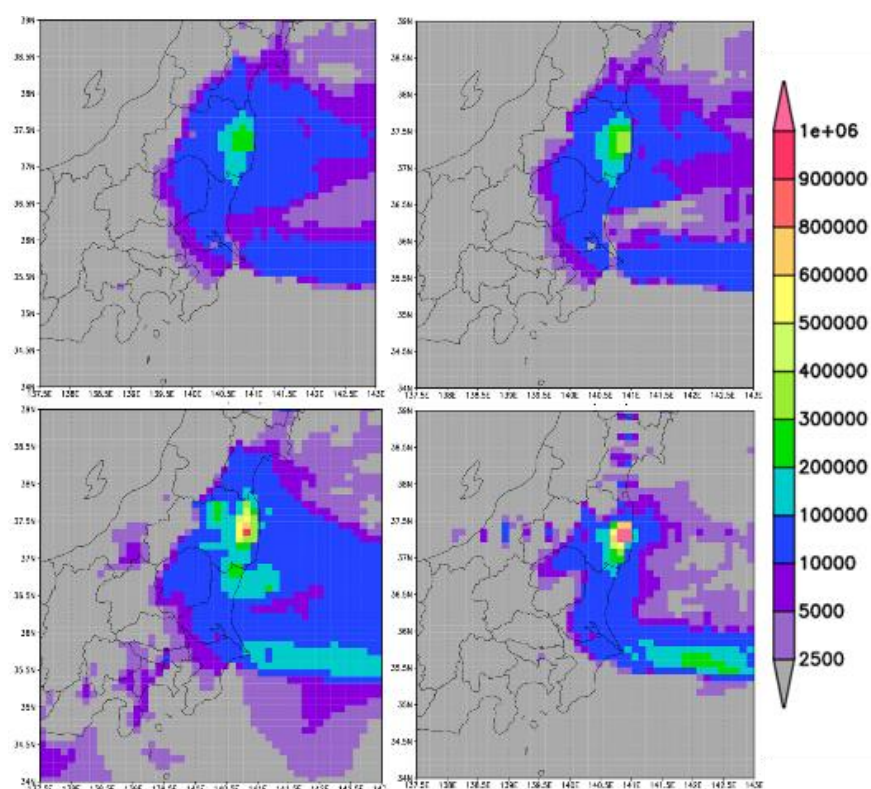


図 7 ^{137}Cs の計算期間中の積算沈着量分布 (MBq/km^2). 左上: CTL, 左下: WD10, 右上: DD01, 右下: DC12.

不確実性による影響は沈着量を各実験で比べた場合でもよくわかる. 表 4 は ^{131}I , 表 5 は ^{137}Cs の $134^\circ - 150^\circ \text{ E}$, $30^\circ - 45^\circ \text{ N}$ の領域に含まれる陸面・海面への湿性・乾性沈着量の割合を実験ごとにまとめたものである. OB は領域外を示す. WD10 では, ^{131}I と ^{137}Cs 共に湿性沈着が大幅に増加しているが, そこまで乾性沈着は減少しておらず, 結果的に領域外への輸送が減少している. DC12 では陸域における乾性沈着量が増加している. これは, コントロールで広く拡散していた物質が, 拡散が弱まったことで狭い範囲に集中して降下したためと推測できる. 更に DD01 では, ^{137}Cs において海面への乾性沈着が大幅に減少している反

面、ほかの沈着量は少しずつ増加しており、パラメータの変更の効果が妥当に現れている。実験の意図通り、沈着速度の変更値が沈着量に影響を与えるほど大きくなかったことが原因として考えられる。いずれの表も実験間のばらつきが大きく沈着過程のパラメータの不確か性の影響の大きさがうかがえる。

表 4 ^{131}I の沈着量の実験ごとの割合。

^{131}I 147.7PBq	湿性沈着		乾性沈着		OB
	陸域	海域	陸域	海域	
CTL	1.7%	9.3%	31.5%	11.7%	45.8%
WD10	7.4%	23.9%	30.4%	11.3%	27.0%
DC12	1.1%	9.9%	38.5%	9.9%	40.5%
DD01	1.7%	9.3%	31.5%	11.7%	45.8%

表 5 ^{137}Cs の沈着量の実験ごとの割合。

^{137}Cs 8.56PBq	湿性沈着		乾性沈着		OB
	陸域	海域	陸域	海域	
CTL	3.1%	23.4%	13.5%	3.9%	56.0%
WD10	14.5%	50.3%	12.6%	3.6%	19.0%
DC12	2.6%	29.5%	17.6%	3.6%	46.7%
DD01	3.2%	24.1%	13.6%	0.4%	58.7%

4. 観測降水データによる再分布手法

4.1. 降水量分布の検証

まず、N1およびG1について降水量分布の検証を行った。図8は関東地方において3月21日の6:00から同日15:00までの3時間ごとにRAP(JMA, 2011)とN1およびG1において計算された降水量分布の計算結果を検証した図である。この期間は計算領域内でRAPと計算結果共に降水量分布が現れている。N1とG1の計算結果は大きく異なるが、それぞれRAPとは類似点がある。RAPでは計算領域の西側に4mm/h以上の降水量分布が見られそれが時間を追うごとに関東地方を通り過ぎ太平洋側へと移動している様子が見て取れる。また、9:00と12:00の段階では10mm/h以上の強い降水が、非常に狭い範囲ではありつつも観測されていたこともわかる。同時時間帯では関東地方全体に降水量分布が見られる。さらに、9:00から15:00の間、1mm/h以下の弱い降水分布が計算領域内で広く観測され、初めは関東地方を中心に、徐々に東北地方南部まで広がっていった。しかしながら、¹³⁷Csの定時降下物測定地点に絞ってみてみると、降水が観測されていない時間帯・地点がある。6:00の段階ではさいたま・新宿・市原・茅ヶ崎で、12:00では宇都宮・さいたま・新宿で降水が観測されていなかった。

G1で計算された降水量分布はRAPと同様、9:00と12:00での10mm/h以上の強い降水を含む4mm/h以上の降水量分布が再現された。東北地方の日本海側では0-1mm/h程度のごく弱い降水量分布も広く表れる結果となった。だが、RAPとは異なり、関東地方では図8で対象としている時間帯は降水量分布が続けて再現された。地点ごとに見てもRAPとは異なり、6:00、12:00、15:00の前橋および6:00のさいたまを除き、降水量分布はいずれの時間帯どの定時降下物測定地点においても降水量分布が現れていた。

N1で計算された降水量分布はRAPとG1とのいくつかの共通点はあるが、前述した2つとは異なる降水量分布の変化の推移が目立つ。RAP同様、6:00では測定地点のいくつかでは降水量分布が現れなかったが、9:00ではRAPでは関東地方全体を覆うように降水が観測されていたがN1では関東地方の一部の地域では降水量分布が再現されなかった。また、RAPで観測された9:00から12:00にかけて2-4mm/hの降水量分布が計算領域内の西側から関東地方へと通過していく様子をG1では再現で来ていたのに対し、N1でははっきりと再現されなかった。またN1ではRAPとG1でも見られた0-1mm/h程度の弱い降水量分布が、特に計算領域内の太平洋、および東北地方日本海側の北部にまで広く見られたことも特徴的である。

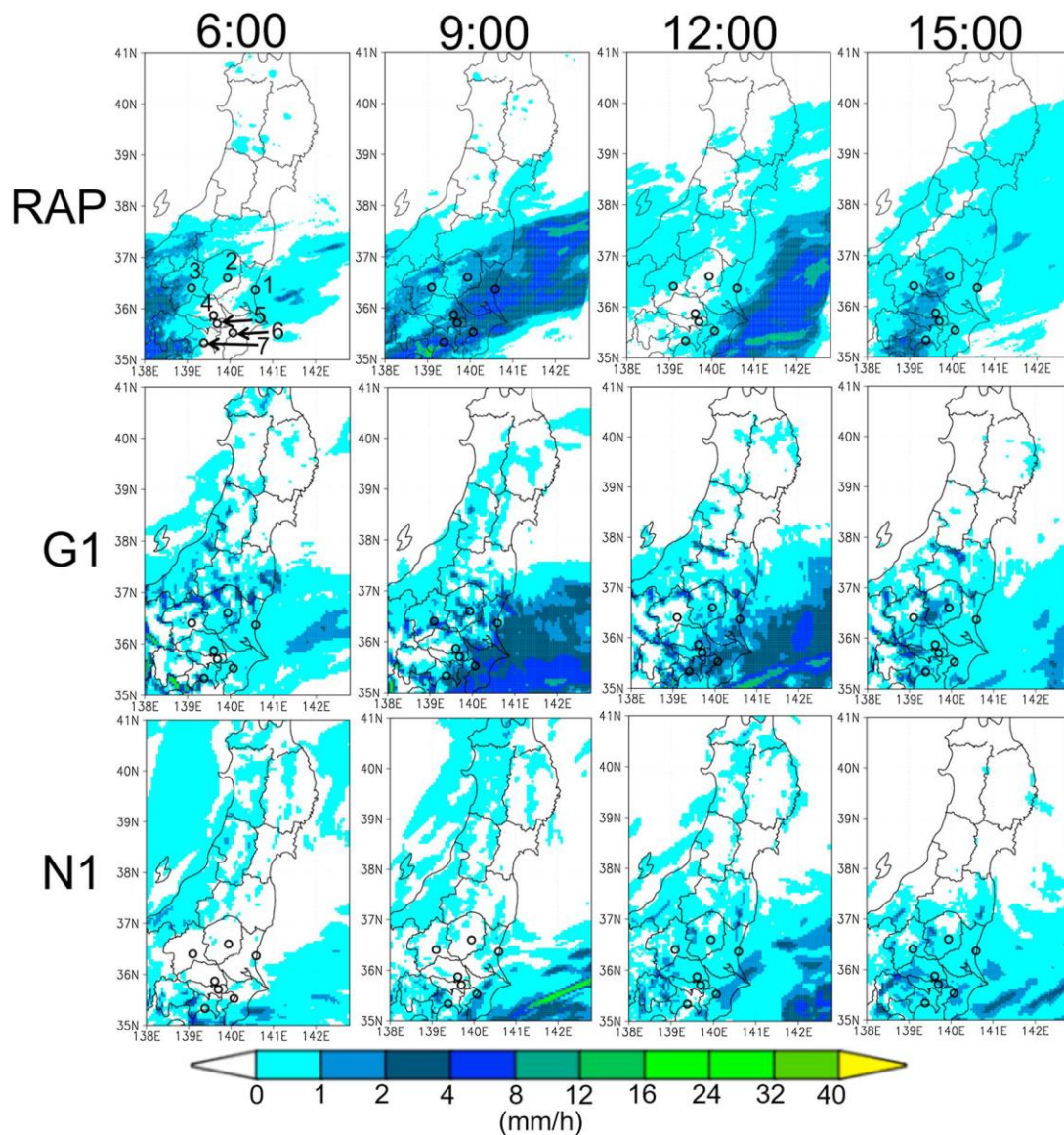


図 8 2011 年 3 月 21 日 6:00 から 15:00 (JST) までの 3 時間ごとの降水量分布 (mm/h) .
 上段: RAP, 中段: G1, 下段: N1. 各図の中で黒い丸印で示されている地点は文部科学
 省による定時降下物測定地点(1: ひたちなか, 2: 宇都宮, 3: 前橋, 4: さいたま,
 5: 新宿, 6: 市原, 7: 茅ヶ崎)を表す.

4.2. ^{137}Cs の沈着量分布

次に, N1, N2, G1, G2それぞれのケースにおける ^{137}Cs の沈着量分布についてモデルで用いた大気境界条件およびRAPによる再分布手法の感度実験を行った. 図9は, 2011年3月21日の9:00から15:00までの3時間ごとの各ケースにおける湿性沈着量分布の推移である. 異なる大気境界条件を用いているN1とG1では湿性沈着量分布の現れ方が大きく異なる. N1では15:00の段階まで関東地方ではほとんど湿性沈着量分布が見られない. 対して, G1では

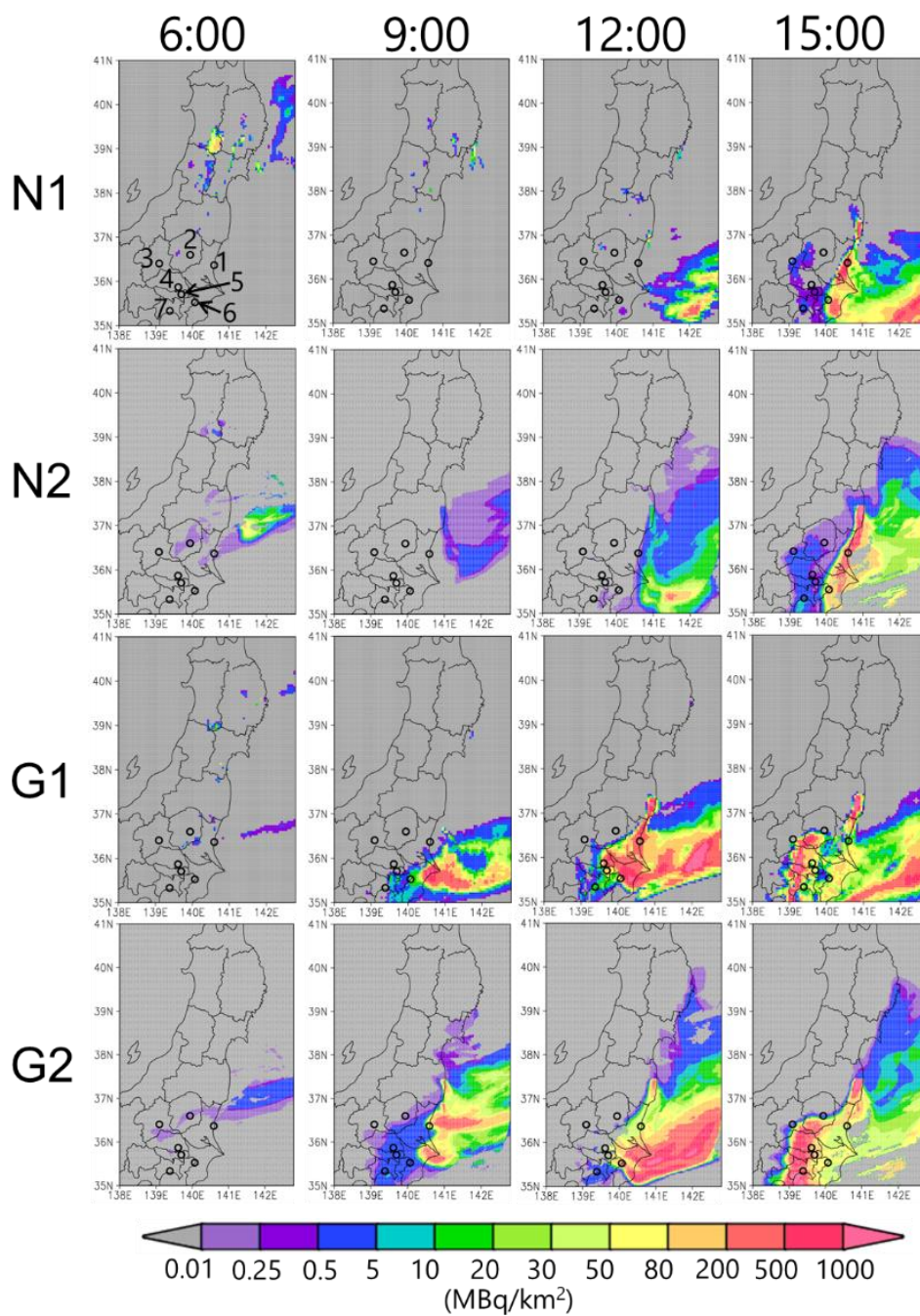


図 9 2011 年 3 月 21 日 6:00 から 15:00 (JST) までの 3 時間ごとの ^{137}Cs 湿性沈着量分布 (MBq/km²)。上段から N1, N2, G1, G2。各図の中で黒い丸印で示されている地点は文部科学省による定時降下物測定地点 (1: ひたちなか, 2: 宇都宮, 3: 前橋, 4: さいたま, 5: 新宿, 6: 市原, 7: 茅ヶ崎)を表す。

9:00に千葉県沖で高濃度の湿性沈着量分布が既に見られ、時間とともに千葉県茨城県をまたがるように広がり、湿性沈着量分布全体は関東地方南部を中心に通り過ぎる様子が見られる。この違いから、先の項目で示した降水量分布の際だけでなく、風の流れも大きく異なり、放射性プルームが関東地方を通過するタイミング自体にも大きなずれが生まれたことが推測される。同じ図9のN2およびG2はそれぞれの気象境界条件で計算した湿性沈着量を、RAPを用いて再分布させたケースであるが、前項で示した降水量分布の検証結果の図8と比較すると、RAPで降水が観測されなかった地域では湿性沈着量分布が形成されていないことがわかる。例えば、G1、N1ともに15:00に計算領域内の太平洋の南東部(各図の右下のエリア)では200MBq/km²を超える湿性沈着量分布が形成されている。しかし、図8のRAPの分布では同じエリアでは降水が観測されていない。N2、G1ではこのようなRAPの分布に沿い、湿性沈着量が発生しておらず現実に近い降水量分布に湿性沈着量分布を合わせるように再分布させることが出来ていることがわかる。

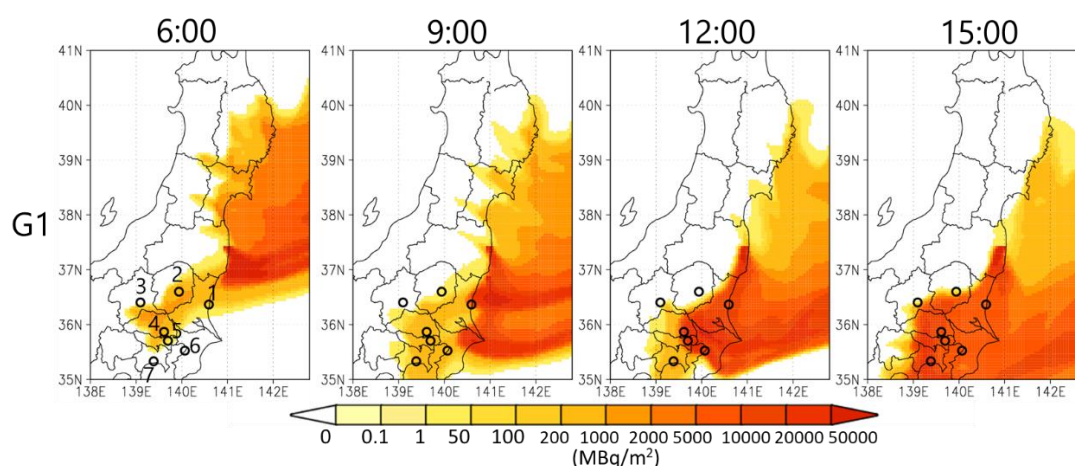


図 10 2011 年 3 月 21 日 6:00 から 15:00 (JST) までの 3 時間ごとの G1 における大気中の ¹³⁷Cs 鉛直積算濃度 (MBq/m²)。黒い丸印で示されている地点は文部科学省による定時降水物測定地点 (MEXT, 2011) (1: ひたちなか, 2: 宇都宮, 3: 前橋, 4: さいたま, 5: 新宿, 6: 市原, 7: 茅ヶ崎) を表す。

また、図10は図7-8と同時間帯の ^{137}Cs の鉛直方向の積算濃度分布図である。再分布手法の結果、図10と図8のRAPが重なり合う部分に図9のG2に再分布後の湿性沈着量分布図として表れているのが分かる。図9では $0.01\text{MBq}/\text{km}^2$ 未満の湿性沈着量分布は色分けでは $0\text{MBq}/\text{km}^2$ と区別していないので、図8の降水量分布図と図10の同時刻の重なり合う部分と完全一致しているわけではないが、例えばG1の12:00における東北地方太平洋沿岸のエリアのように、モデルで大気中に鉛直積算濃度分布が再現されているが、モデルでは降水分布が形成されず観測のRAPでは降水分布が形成されているエリアに図9のG2の12:00の図のように再分布後は湿性沈着量が補正され分布が形成されていることが見て取れる。

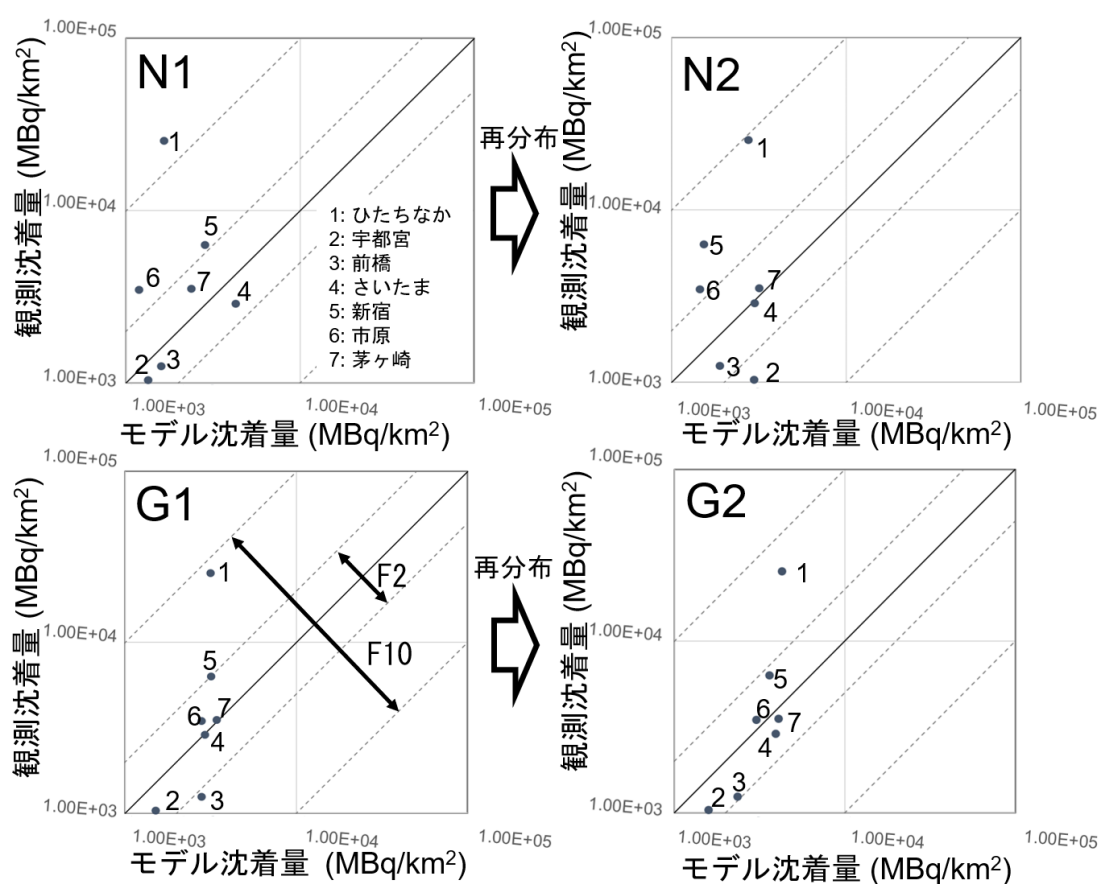


図 11 N1, N2, G1, G2 における 2011 年 3 月 18 日から 27 日までの ^{137}Cs 積算沈着量 (MBq/km^2) の文部科学省による定時降下物測定値(図中の「観測沈着量」)(文部科学省, 2011) との比較検証図。各図内の数字は定時降下物の関東地方における測定地点を表す (1: ひたちなか, 2: 宇都宮, 3: 前橋, 4: さいたま, 5: 新宿, 6: 市原, 7: 茅ヶ崎)。検証にあたり、各実験結果では各測定地点について最も近いグリッドにおける湿性沈着量を比較している。F2 は観測値の 0.5–2 倍の範囲、F10 は観測値から 0.1–10 倍の範囲を示す。

この再分布手法の有無と大気境界条件の違いが湿性沈着量の再現にもたらす不確実性について感度実験を行い、検証を行った結果が図11である。図11は2011年3月18日から27日における関東地方の7地点の ^{137}Cs 積算沈着量を4つの実験結果ごとに示している。沈着量の計算結果は文部科学省が取りまとめた定時降下物(文部科学省, 2011)の同期間の各地点における合計値と比較、検証している。4つの実験結果を検証するにあたり、検証地点は文部科学省の定時降下物測定地点と一致させるよう計算結果から対象地点を選んでいる。図11では定時降下物の観測値に各実験結果の値がどの程度近いかも示している。各図の対角に延びる太い実線に各プロットが乗っていればそれは観測値と同じ値を再現できたことを意味し、この実線から離れるほど再現精度が悪いということになる。

表 6 図 11 において F2, F10 の範囲に入る検証地点の数.

実験名	F2 に入る数	F10 に入る数
N1	4	6
N2	3	7
G1	4	7
G2	6	7

また、この実線を挟む2本の点線の範囲内にある値は観測値から0.5-2倍の範囲(ファクター2, 以降F2), さらに外側の2本の点線の範囲内の値は観測値から0.1-10倍の範囲(ファクター10, 以降F10)にあることも示している. また, 福島第一原発からの放射性物質の放出はこの図11で対象としている18日以前より始まっているが, 関東地方では定時降下物の測定値によれば放出直後は測定可能な下限値を下回っていた(文部科学省, 2011). このため, 各実験結果の検証をする図11では関東地方でも観測された ^{137}Cs 降下量が顕著になり始めた18日以降, 特に降水が観測され湿性沈着量分布が形成され始めた20日以降を含む期間を対象としている.

各実験結果による積算沈着量の再現精度を比較するため, F2, F10それぞれの範囲内におさまる検証地点の数をまとめたものが表6である. N1のひたちなかを除いた各実験結果の全地点の積算沈着量はF10に含まれている. すなわち, 使用する大気境界条件の時空間解像度の違いや観測降水量分布による再分布手法の有無にかかわらず, F10の範囲に収まる程度の精度であればモデルは ^{137}Cs の積算沈着量を再現できたことがわかる. しかし, F2に関してはG2が他の実験結果に比べ明らかに良い再現精度を見せたといえる. 全7地点中6地点がF2の範囲に収まり, かつ実験結果のうち新宿の積算沈着量がF2に入るのはG2だけであった. また, 図11を参照すると, 唯一F2から外れたひたちなかの積算沈着量ですら他の実験結果の同地点の積算沈着量よりもややF2に近くプロットされていることから, 全体的に高い再現精度を実現しているとみられる. G1とG2は同じ大気境界条件であるにもかかわらず, F2の精度としては, G1は同範囲に収まっている数が時空間解像度の低い大気境界条件を用いているN1, N2とほぼ変わらない. このことから, 高解像度の観測降水データを本研究の再分布手法によって適用させ湿性沈着量を補正させる試みは, F2程度の精度基準を満たすうえでは有効と推測できる. しかしながら, 観測値から最も離れていたひたちなかにおける積算沈着量が再分布手法を用いても大きな精度の改善が見られなかったことにも注意すべきである. この結果は, 高い時空間解像度の大气境界条件を利用してもなお明らかに観測値から大きく外れている値については, 再分布手法による改善は限界があるということも示している. また, N1とN2を比較すると, 再分布手法を適用したN2ではN1でF2の範囲内であった宇都宮の積算沈着量がF2の範囲から出てしまい, 一部ではあるが計算結果を悪化させている.

次に各実験で計算された ^{137}Cs 沈着量の日毎の推移についても検証した. 図12は2011年3月18日から27日までの各実験結果から得られた ^{137}Cs 沈着量の1日当たりの積算沈着量と文部科学省の ^{137}Cs 定時降下物測定値(文部科学省, 2011)の推移を折れ線グラフで表し, RAPから得られた日毎の降水量を棒グラフで表し比較したものである. 対象としている関東地方の降下物測定地点すべてにおいて3月20日から21日にかけて観測された ^{137}Cs 降下量が急激に増加している. 22日以降は, 25日のひたちなかの観測値を除き, 降下量はすべての地点において 0.1 kBq/m^2 以下となり大きく減少している.

実験結果もこの観測値の推移とおおむね同様の増減をたどっている. しかしながら, その沈着量と増減のタイミングにはいくつかの明らかな違いが見られる. こうした違いが最も

はっきりと表れているのは3月20日と21日である。観測された降下量ではすべての地点において 0.1kBq/m^2 を超えている。特に、ひたちなかと茅ヶ崎ではそれぞれ 13kBq/m^2 と 1.6kBq/m^2 と大きく増加している。しかし、宇都宮とひたちなかを除き、これと同じタイミングでは4つの実験結果で計算された沈着量は 0.05kBq/m^2 を下回っている。他の地点と比べ沈着量が大きく計算されているひたちなかでも、観測された降下量は4つの実験で計算された沈着量の値の約10倍多い。3月21日になるとひたちなか、新宿、市原で観測された降下量は減少していったが、一方で実験結果では21日に多くのケースにおいて急激に沈着量が増加する結果となっている。

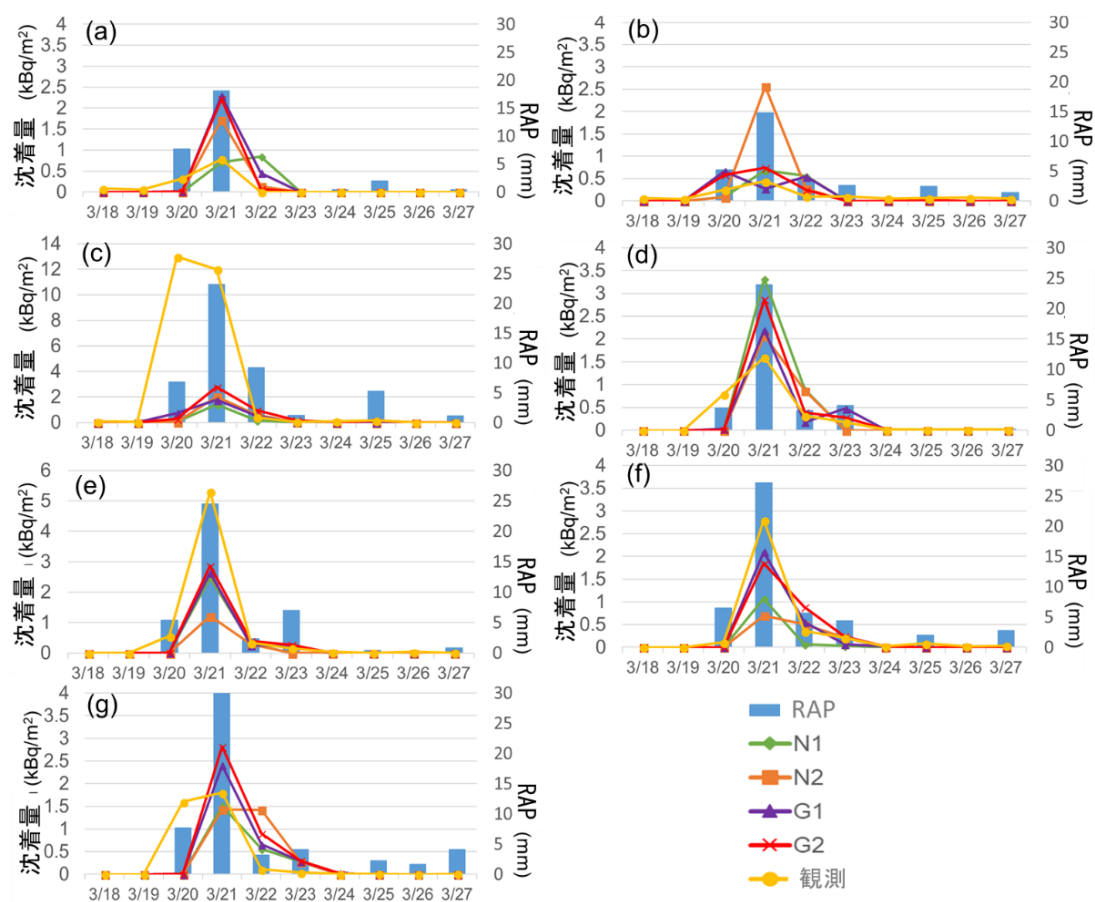


図 12 2011 年 3 月 18 日から 27 日における RAP (mm) (JMA, 2011), ^{137}Cs 定時降下物測定値(文部科学省, 2011), 各実験(N1, N2, G1, G2)で計算された日毎の ^{137}Cs 積算沈着量の時系列推移. 図中凡例の「観測」は定時降下物測定値(MEXT, 2011)を指す. 各グラフのアルファベットは文部科学省の関東地方における 7 か所の定時降下物測定地点(文部科学省, 2011)と同一の検証対象地点を示す. (a) 前橋 (b) 宇都宮 (c) ひたちなか (d) さいたま (e) 新宿 (f) 市原 (g) 茅ヶ崎.

しかしながら、この中で、ひたちなかについては3月20-21日は実験とモデルの実験結果および手法適用後の実験結果全てについて誤差が非常に大きい。文部科学省が公開している本研究で使用したデータと県が公開している同日の沈着量は一致しており、現段階ではデータ自体の誤差などは指摘できない。

このため、当日の放射性プルームの状況についてより詳細に把握するため、近隣の東海第2原子力発電所において計測された空間放射線量を参照した（日本原子力発電株式会社，2011）。これによれば、3月14-15日にも空間線量率上昇のピークが現れているが、3月21日前後にも線量率が急上昇していることがわかる。このことから、同日にひたちなかでも実際に放射性プルームが到達し、大気中濃度が上昇したことは推定できる。観測データは日毎のデータであり、降水が観測された時間帯に大気中濃度が上昇したかまでは確認が難しいため、今後の詳細な検証が望まれる。

この日毎の沈着量の検証結果から、G1とG2で用いた大気境界条件GPV-MSMはNCEPを用いた計算結果よりも高い精度で沈着量を再現できたことがわかる。また、G1とG2を比較して分かる通り、観測降水量による湿性沈着量の再分布手法を用いた場合、特に観測された降下量が多かった3月21日のひたちなかと新宿において、再分布手法を用いなかった場合に比べてより観測降下量に近い推移を示すことが出来たといえる。なお、図12のグラフで示した各実験結果および観測降下量の値を地点ごとに本項目末尾の表7にまとめた。

ここまでの ^{137}Cs の沈着量の検証により、時空間解像度の細かい大気境界条件を用いると沈着量の再現精度が向上し、さらに観測降水量データを用いて湿性沈着量分布を再分布させることで再現精度を向上させることがわかった。時空間解像度の高い大気境界条件を用いることで、大気中の物質輸送過程が改善し放射性プルームが各測定地点に到達するタイミングをより高精度にシミュレーションできたこと、さらに降水により大気中から除去される量が現実に近い値となったことが要因と考えられる。すなわち、降水だけでなく、大気中の輸送過程の向上も非常に重要だったといえる。大気中の物質輸送過程の再現精度が向上し高濃度の放射性プルームの到達を高精度に再現できた場合でも、湿性沈着過程の場合さらに降水量分布の精度が十分でないと湿性沈着として大気中から除去されないケースがある。再分布手法はこうしたケースに対して効果的だったと言える。モデルで降水が再現されなかった地点に観測データの降水分布通りに降水が発生したとし、湿性沈着として降下した分布に補正できるからである。

また、モデルの誤差が発生した原因には、放射性プルームが到達していることを再現はしていたが濃度が足りなかった、あるいは降水量の再現量が足りず大気中から除去しきれなかった、という二つの原因が考えられる。すなわち、大気中の濃度がそもそも足りなかったのか、存在はしていたが湿性沈着として落ち切らなかったのかである。こうした原因究明も、同時時間帯におけるひたちなかの誤差の解明にもつながっていくと考えられる。

一方で、大気境界条件の時空間解像度が粗い場合、再分布手法を適用させても明らかな改善が見られず、対象とする地点や時間帯によっては精度が悪化するケースも見られた。この

ことから、観測降水データで湿性沈着量分布の再現精度を向上しようと試みる場合、より時空間解像度が細かい大気境界条件を用いてモデルにおいて気象場の再現精度をあらかじめ上げておく必要があることが分かった。すなわち、より現実に近い値を与えられる観測降水量データによって湿性沈着量を補正するアイデアは、気象場の高い再現精度を持つモデルで計算する、両輪でもって初めてその効果を発揮できるといえる。また、本研究の手法は、モデルで出力された湿性沈着量に、モデルのシミュレーション後観測降水データで再分布させている。このため、再分布手法自体の効果はIsoRSMそのものに依存しているわけではない。したがって、他の高精度のオフライン結合型のモデルなどでも本研究の手法を適用できると考えられ、前述の観測降水データによる補正の有効性とその範囲についても同様の推測が他のモデルでもできるといえる。

表 7 2011 年 3 月 18 日から 27 日における各実験 (N1, N2, G1, G2) による日毎の ^{137}Cs 積算沈着量および定時降下物測定値の値 (文部科学省, 2011) (kBq/m^2). 表中の “UD” は値が測定できなかったことを示す. “obs” は観測値, すなわち定時降下物の値を指す. 各日の実験結果中, 最も観測値に近い値 (4 つ中 1 位の精度) をハイライトしている.

前橋	N1	N2	G1	G2	Obs
3/18	0	0	0	0	0.084
3/19	0	0	0	0	0.063
3/20	0	0	0.015552	0.015596	0.32
3/21	0.714456	1.726664	2.298492	2.220504	0.79
3/22	0.85086	0.13482	0.457884	0.078084	UD
3/23	0	0	0	0	UD
3/24	0	0	0	0	UD
3/25	0	0	0	5.78E-06	UD
3/26	0	0	0	0	UD
3/27	0	0	0	0	UD

宇都宮	N1	N2	G1	G2	Obs
3/18	0	0	0	0	0.062
3/19	0	0	0	0	0.045
3/20	0.087984	0.086573	0.662976	0.586291	0.25
3/21	0.681804	2.566647	0.277236	0.74338	0.44
3/22	0.555228	0.275756	0.546408	0.243095	0.099
3/23	0	7.27E-05	0	0	0.095
3/24	0	0	0	0	0.054
3/25	0	0	0.008316	0.017081	0.063
3/26	0.000072	0.000072	0	0	0.073
3/27	0	0	0	0	0.052

ひたちなか	N1	N2	G1	G2	Obs
3/18	0	0	0	0	0.086
3/19	0	0	0	0	0.048
3/20	0.052992	0.052999	0.751536	0.283077	13
3/21	1.41228	2.026354	1.781604	2.782953	12
3/22	0.154332	0.60858	0.54594	0.960471	0.42
3/23	0.002592	0.019119	0.01746	0.186026	0.063
3/24	0.012312	0.009792	0.008856	0.008856	0.099
3/25	0	0	0.003744	0.124249	0.16
3/26	0.000072	0.000072	0	0	UD
3/27	0	0	0	0.000215	0.021

さいたま	N1	N2	G1	G2	Obs
3/18	0	0	0	0	UD
3/19	0	0	0	0	UD
3/20	0.002232	0.002233	0.029736	0.007984	0.79
3/21	3.322224	2.07313	2.199096	2.868905	1.6
3/22	0.891468	0.870307	0.18054	0.394679	0.32
3/23	0.000072	0.000859	0.478944	0.28062	0.18
3/24	0	0	0.01062	0.012996	0.017
3/25	0	0	0.000072	0.000072	0.016
3/26	0	0	0	0	0.016
3/27	0	0	0	5.16E-06	0.013

新宿	N1	N2	G1	G2	Obs
3/18	0	0	0	0	UD
3/19	0	0	0	0	UD
3/20	0.00216	0.002163	0.008532	0.007474	0.56
3/21	2.486988	1.211801	2.634336	2.869457	5.3
3/22	0.31248	0.293991	0.257472	0.394679	0.34
3/23	0	0.001288	0.232956	0.28062	0.16
3/24	0	0	0.012996	0.012996	0.037
3/25	0	0	0.000072	0.000072	0.012
3/26	0	0	0	0	0.036
3/27	0	0	0.00036	5.16E-06	0.0055

市原	N1	N2	G1	G2	Obs
3/18	0	0	0	0	UD
3/19	0	0	0	0	0.0038
3/20	0.000144	0.000145	0	0.001241	0.11
3/21	1.07532	0.704694	2.10114	1.848183	2.8
3/22	0.061992	0.505161	0.562968	0.890694	0.36
3/23	0.028872	0.21923	0.068184	0.237781	0.21
3/24	0.002412	0.002448	0.020124	0.017441	0.023
3/25	0	0	0.000504	0.000504	0.086
3/26	0	0	0	0	0.024
3/27	0	0	0.000648	0.004022	0.035

茅ヶ崎	N1	N2	G1	G2	Obs
3/18	0	0	0	0	UD
3/19	0	0	0	0	UD
3/20	0.000144	0.000144	0.005328	0.004466	1.6
3/21	1.5129	1.437015	2.40714	2.820857	1.8
3/22	0.559944	1.422533	0.661968	0.900754	0.11
3/23	0.276	0.278163	0.286404	0.301849	0.042
3/24	0	1.88E-06	0.022932	0.017814	0.0077
3/25	0	0	0	0	0.014
3/26	0	0	0	0	UD
3/27	0	0	0.00072	0	0.012

4.3. 観測の定義が与えるモデル検証結果への影響

前項の図12では日毎の文部科学省の定時降下物と4つの実験結果から得られた ^{137}Cs の日毎の積算沈着量を比較し検証した。この図12および表7から分かる通り、定時降下物が急激に増加した3月20日、前橋、さいたま、新宿、茅ヶ崎では実験結果からは沈着量が0あるいは非常に少ない値でしか計算されなかった。他の実験結果に比べて良い精度で沈着量の推移を再現できたG2でも0に近い値を示した。Arnold et al. (2015)の研究でもRAPを利用した場合でも必ずしもモデルの計算精度は向上しないと指摘していた。何らかの値の変換や調整を行わない限り高解像度の観測降水データは気象モデルのスキームと合わず、観測降水データが優れていたとしても湿性沈着量の計算時にはそれが反映されないということを挙げている。こうした既往研究でも指摘されている、観測データの値をそのままモデルの計算で扱おうとすること自体の問題以外にも、今回の定時降下物を利用した検証では別の問題もありうる。

図13は2011年3月21日1:00から13:00までの東京都新宿区にある東京健康安全研究センターの測定地点における1時間ごとの放射線量（グレイ、 $\mu\text{Gy/h}$ ）（Tokyo Metropolitan Institute of Public Health, 2011a）とIsoRSMのG1と同一の実験設定で計算された同地点付近のグリッドにおける ^{137}Cs の大気中濃度（ Bq/m^3 ）である。これら2つは異なる性質の値であり、観測放射線量は放射性物質の種類の区別をしていない。また、大気中濃度は放射性プルームが対象地点に到達しているときのみ値が現れるが、放射線量は既に沈着している放射線核種からの線量（グラウンドシャイン）も含んでいるという大きな違いがある。しかし、本項ではこれら二種の値そのものではなく時系列推移を比較することで、関東地方に放射性プルームが到達したタイミングを推測していく。なお、同観測放射線量データではグレイを放射線量の値としているが、同データでは1グレイは1シーベルトに換算できるものとしている（Tokyo Metropolitan Institute of Public Health, 2011b）。

図13の示す通り、観測放射線量はおよそ7:00頃から徐々に増え始め、8:00から10:00にかけて線量が急激に増加している。この線量の増加のタイミングは関東地方の他都道府県の測定地点でもおおむね近い。一方、モデルで計算された ^{137}Cs の大気中濃度は11:00以降急激に増加し、それまでは目立った上昇傾向は見られない。したがって、放射性プルームの到達がモデルでは2-3時間遅れて計算されていたことが考えられる。一般的に、本研究で扱っているような領域大気モデルにおいて、2-3時間の誤差はそれほど重大な誤差とはなりえない。（ただし、そのために大気移流拡散過程が完璧に再現できているとも結論付けられない。）しかしながら、こうしたわずかな誤差が図12の3月20日から21日にかけての計算された積算沈着量と定時降下物測定値の大きな差につながってしまっている。

図13のモデルの大気中濃度が増加し始めたタイミングは図12のG1およびG2でも同じである。そして増加し始めた時刻は3月21日11:00以降である。対して、観測放射線量が増加し始めたのは同日9:00以前、大きく増えたのは10:00以降である。すなわち、この増加のタイミ

ングのずれが3月21日9:00前後で起こってしまっており、文部科学省の定時降下物測定値の測定の日界の設定が毎日9:00であったことから3月20日と21日の日毎のモデルの積算沈着量と定時降下物測定値に大きな誤差が生まれてしまったと考えられる。2章で述べたように定時降下物は毎日9時に、前日9時からの積算値をその当日の値としている。つまり、モデルでは大気中濃度が3月21日の9:00以降に大きく上昇し、それまではほとんど上昇が見られていないことから、同時間帯のモデルで計算された沈着量の多くが3月21日の積算沈着量と分類され、3月20日分にはほとんど含まれていないのである。よって、本ケースにおいては、沈着量の観測値として広く利用されている文部科学省の定時降下物測定値の日界が関東地方に高濃度の放射性プルームが到達したタイミングに合致してしまっているため、モデル上では軽微な誤差が日毎の沈着量の検証を行う場合にモデルの成果を過小評価してしまう可能性があると考えられるのである。

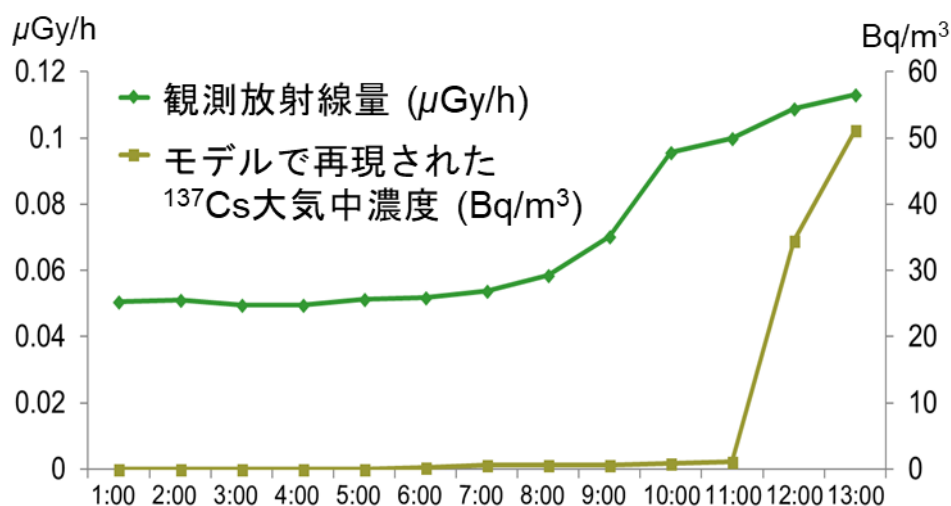


図 13 2011 年 3 月 21 日 1:00 から 13:00 までの東京健康安全研究センターの測定地点における放射線量 ($\mu\text{Gy/h}$) (Tokyo Metropolitan Institute of Public Health, 2011a) と IsoRSM で計算された同地点付近のグリッド¹³⁷Cs の大気中濃度 (Bq/m^3)。なお、放射線量は 1 時間当たりの平均値である。

4.4. 観測降水データによる補正の寄与

1.2.4章で挙げたように既往研究でもRAPを用いた湿性沈着過程のシミュレーションは行われてきた。Arnold et al. (2015) の研究では、オフライン結合型のモデル、FLEXPARTを用い二つの異なる気象データセットにより気象場を入力し、降水量のみをRAPに置き換え沈着量分布を再現した。置き換える方法は使用する気象データセットによってごとく変えている。検証の結果、気象データセットの解像度が高い場合でもRAPで置き換えた場合、解析の結果、空間分布で比較した場合も含め精度が悪化した (Arnold et al., 2015)。ただし、同モデルでは湿性沈着を雲内・雲底下洗浄の二つに分けているため、降水量とは別にモデル内で計算された雲の状態によっては湿性沈着量が過小評価される問題があった (Arnold et al. 2015)。このため、降水量を考慮したうえで新たに雲底と雲の厚さを診断するよう補正する手法を試みたところ精度が向上した (Arnold et al. 2015)。Saito et al. (2015) は気象庁のJMA-RATMを利用し降水量をRAPに置き換え湿性沈着過程を計算したが、空間分布には改善が見られたものの、時系列推移の観測との比較では精度が改善しなかった。精度が改善されない理由をはっきりしないが、RAPのデータの扱いや輸送過程などに原因が考えられるとした (Saito et al., 2015)。

既往研究では、モデルの計算過程で観測降水データを適用させるオンラインのデータ同化に類する手法を取っていると考えられる。だが、モデルでは降水を再現していないステップでも、モデルで計算されている気象場とは関係なく観測データの値を入れ替えて降水を生じさせることになり、観測の降水がモデルの気象場の計算に馴染まないまま、いわば歪みとして結果に影響を与えてしまったと推測できる。また、湿性沈着過程においてはどの高度で凝結したのかも重要なファクターとなるが、RAPは水平2次元の情報しかないため、水蒸気量や雲水量などの鉛直方向の状態までモデルの計算において拘束することが出来ず、湿性沈着過程の精度の向上には寄与しにくかったといえる。一方、本研究では、モデルで計算し出力された湿性沈着量のみに対してRAPで再分布手法により湿性沈着量分布を補正する、簡易的な手法を取っている。このため、モデルで計算する気象場には影響を与えない。また、本手法では地表面に降下した湿性沈着量の分布を精度よく推計することを目的とし、出力した湿性沈着量分布をRAPと大気中の鉛直方向の放射性物質質量に応じて、RAP同様水平2次元の情報として再分布させており、降水過程の3次元情報には関わらない。このように、敢えて簡易的な手法を採用することにより、RAPの湿性沈着過程の計算への寄与を明らかにするとともに精度の向上を実現できたといえる。

また、本研究はモデルの出力後の湿性沈着量に再分布手法を適用するため、オフライン結合型のモデルであっても、各モデルの特性や湿性沈着過程によらず観測降水の寄与を検証可能であるため、既往研究で行われてきたモデル計算時に置き換える手法よりも汎用性が高いといえる。

しかしながら、課題は残っている。すでに指摘したように、精度があまり向上しなかった

検証地点については、その原因が、モデル内で大気中により高濃度の放射性プルームが到達していなかったのか、あるいは大気中から降水で除去しきれていないのか、など各地点・各時間帯について異なる可能性があるため、より詳細に検証を進める必要がある。また、本研究の手法では、計算領域内の湿性沈着量の総量にはRAPは寄与しない。このため、大気中に放射性プルームが到達し同時時間帯同地点にRAPの分布が存在し再分布後の湿性沈着量を表せたとしても、沈着量を過小評価してしまう可能性もある。このため、より高精度に湿性沈着量を計算するには、モデル内で気象場の相互作用を考慮しつつRAPのような観測降水データを利用し湿性沈着量を計算するための技術開発が必要である。

5. 終章

5.1. 本研究のまとめ

本稿では1章で福島第一原子力発電所において2011年3月に発生した東日本大震災による原発事故によって大気中に放出された放射性物質の放出・拡散の経緯，メカニズムについて述べた．環境中の残存状況の把握，今後の対策のため大気モデルによるシミュレーションを用いた沈着量分布の再現計算が既往研究で行われてきた一方で，モデルには不確実性が存在し，未だ詳細な把握は困難であること点から各不確実性について既往研究では多く検討されてきた．モデルの入力となる放出量，沈着過程のモデリングだけでなくモデルで計算される気象場も重要なファクターとなる．特に降水量分布は，湿性沈着量過程にも大きく関わる．既往研究では観測降水量を利用した不確実性の感度実験及び計算精度の向上が進められてきた．観測降水量の利用が重要であることは既往研究の間でも一致する一方で，精度の向上には至っていない．こうした背景から，本研究では解析雨量(RAP)の寄与とその有効な手法を明らかにすることで，湿性沈着量分布の再現精度の向上を目標とした．

2章では本研究で用いるモデルやデータセット，実験設定，再分布手法についてまとめている．本研究では，水の水素・酸素同位体比の同位体分別過程を導入した同位体大気大循環モデルIsoGSMの領域版IsoRSMをシミュレーションに用いる数値モデルとした．本モデルではスペクトルナッジングを用い気象場の計算を補正しているほかNDSL輸送スキームにより水安定同位体比のトレーサの水平分布を再現した際のエラーを低減している．また，既往研究で用いられているオフライン結合型のモデルとは異なり，気象モデルの中で物質輸送を同時に計算している．導入した湿性沈着過程は大気中の水蒸気量のうち凝結量の割合に応じ放射性物質が除去される過程をモデリングしている．検証に用いる放射性物質の沈着量の観測値には文部科学省より公開されている日毎の定時降下物測定値を利用した．大気境界条件には時空間解像度の異なる二つのデータセット，NCEP再解析とGVV-MSMを用いた．湿性沈着量の補正には再分布手法とする手法を用いた．この手法ではモデルで計算された湿性沈着量を観測された降水量の分布に合わせ，計算領域内の総湿性沈着量を変えずに空間分布を再分布させる手法である．この手法に用いる降水量の観測値としてRadar-Rain gauge Analyzed Precipitation (RAP) を用いた．

3章では沈着過程の感度実験を行い各パラメータによって乾性・湿性沈着量が受ける影響を調査した．4章では3章の結果を踏まえ湿性沈着過程のパラメータを固定したうえで，大気境界条件と再分布手法を用いた感度実験を行った．この章では ^{137}Cs のみを扱い，検証では3月18日-27日の関東地方に高濃度の放射性プルームが接近した期間を対象とした．感度実験の結果により，再分布手法によって湿性沈着量分布の再現精度の改善に効果が見られることが分かり，物質輸送過程が改善できることはわかった．しかし，効果を得るには，大気中の輸送過程を改善し放射性プルームの輸送過程を高精度で再現できている前提が必要

となってくるため、大気境界条件に時空間解像度を高いものを利用し気象場全体の再現精度を上げておく必要があることも分かった。一方で、再現精度が改善しなかった地点については大気中の輸送過程の計算精度のさらなる向上が必要と考えられる一方で、検証に用いた文部科学省の定時降水測定値の日界が切り替わるタイミングと前後して実際のプルームの接近とモデル内の大気中濃度の上昇が起こった場合に、日毎の沈着量の積算値で比較した場合に誤差が大きくなるなど、モデルの精度の不足だけでなく観測データの仕様による誤差も指摘できる。

5.2. 今後の課題

2章で述べたように本研究の手法には、領域内の総湿性沈着量は補正できないというデメリットがある。湿性沈着過程は物質が降水過程に伴い大気中から効率的に除去される過程であるため、このデメリットを解決するには、物質が地表に降下する前の大気中の輸送過程を計算する段階で現実的な降水過程を反映させる手法が求められる。また、この手法のみでは、最終的なプロダクトである降水量と湿性沈着量は補正できても、移流、拡散、除去過程などモデル内部の様々な不確実性は低減できていない。そのため、より発展的な技術が必要である。そこで、考えられるのは、データ同化手法によりモデル内で計算する降水過程を観測された降水データセットに馴染ませる形で補正し、そして湿性沈着量を精度よく再現していくという方向性である。中でもデータ同化手法の中でも最新のデータ同化技術の一つである局所アンサンブルカルマンフィルタ(LETKF)(Hunt et al., 2007)を適用し、高解像度の観測降水にモデル内の降水過程を同化させることで、放射性物質の湿性沈着のための高精度の降水データ同化システムを構築していく。LETKFは、線形モデルで与えられるケースに誤差を最小とするデータ同化手法(カルマンフィルタ)を、複数の初期値(アンサンブル)による予報と融合することで大気のような自由度の高い事象にも適用させ、さらに並列計算効率を非常に高くした手法である。このようなシステムを用い、湿性沈着過程における降水過程の不確実性を評価し低減する試みを行うことで、湿性沈着過程の再現精度の向上が見込める。使用する観測降水に本研究で用いたRAPの他、国土交通省が提供するレーダー雨量など他の高解像度の降水観測データを用いていくことも有効と期待できる。

また、こうした降水過程の改善を行うだけでなく、放射性物質の他の観測値を用いて放射性物質のデータ同化を行っていくことも考えられる。事故直後は観測値が不足していたが、浮遊粒子状物質(SPM)の計測を行っていたテプろ紙を利用したセシウムの大気中濃度の観測結果が発表されている(Oura et al., 2015)。こうした観測値は本研究で用いている降下物測定値よりも測定地点が多く、データ同化への利用が期待できる。

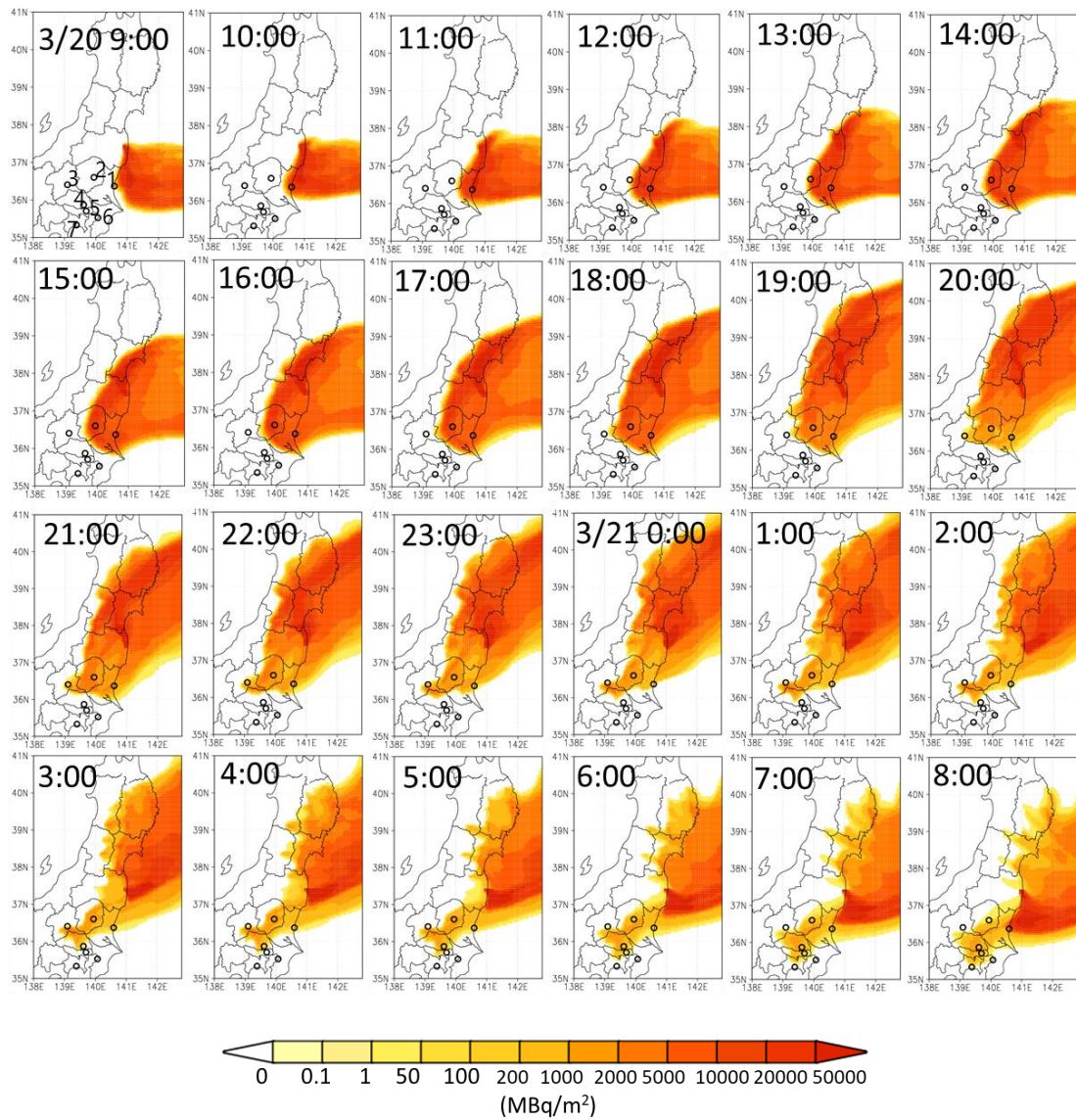
また、4章末ではモデルで計算した大気中濃度と観測された放射線率を比較し、検証地点で大気中濃度が急上昇したタイミングの誤差について議論したが、こうした放射線量を大気モデルでも扱えるようにすることでデータ同化に利用することも考えられる。放射線量率は各地にモニタリングポストが多数設置され、機器が破損したケースを除けば事故直後から多くのデータがあるので、データ同化による利用が可能となればモデルの高精度化に大きく貢献すると考えられる。

本研究では福島第一原発事故における放射性物質の輸送過程に着目した。しかし、ここまで述べた成果は、放射性物質のみに限るものではない。膨大な観測・計算結果が得られている本事例をモデルケースとして詳細に研究することにより、大気中の物質全般の水循環に伴う動態とその影響評価研究に大きく貢献できると共にモデル技術開発の向上の重要な機会となりうる。

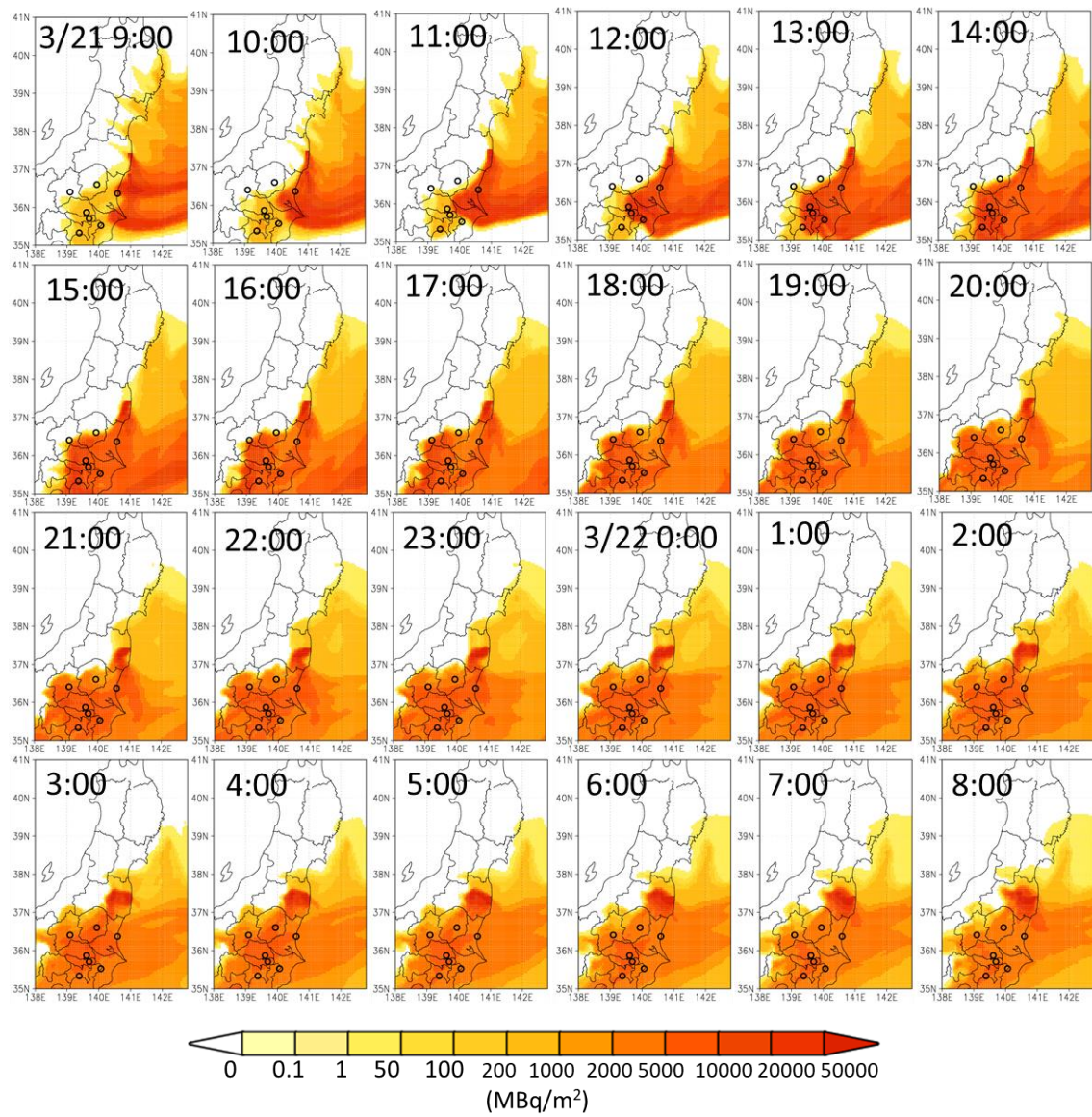
Appendix 1. G1 における ^{137}Cs 鉛直積算濃度

(図中の丸印は図 5 と同一である。)

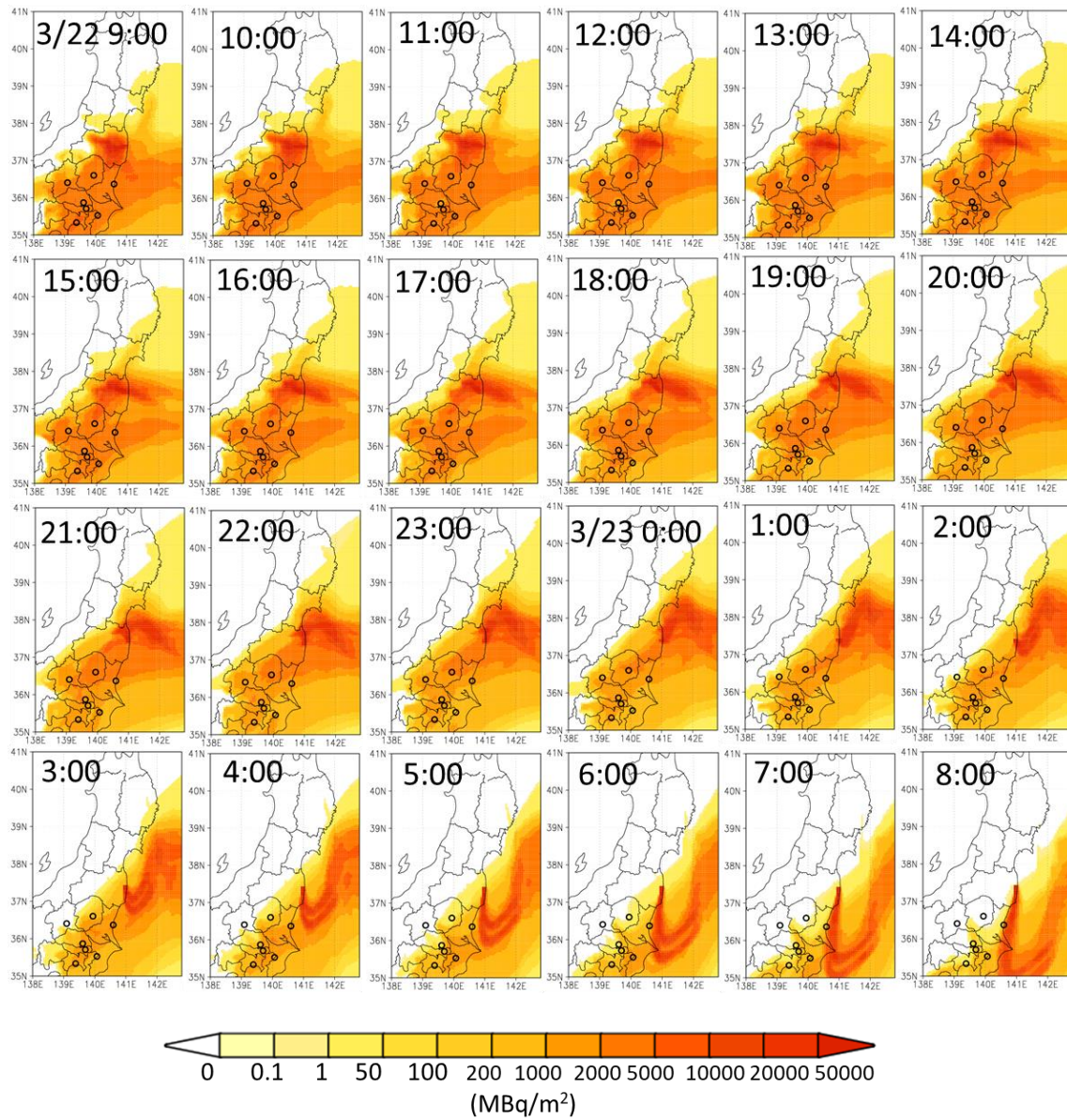
[3月20日 9:00-3月21日 8:00]



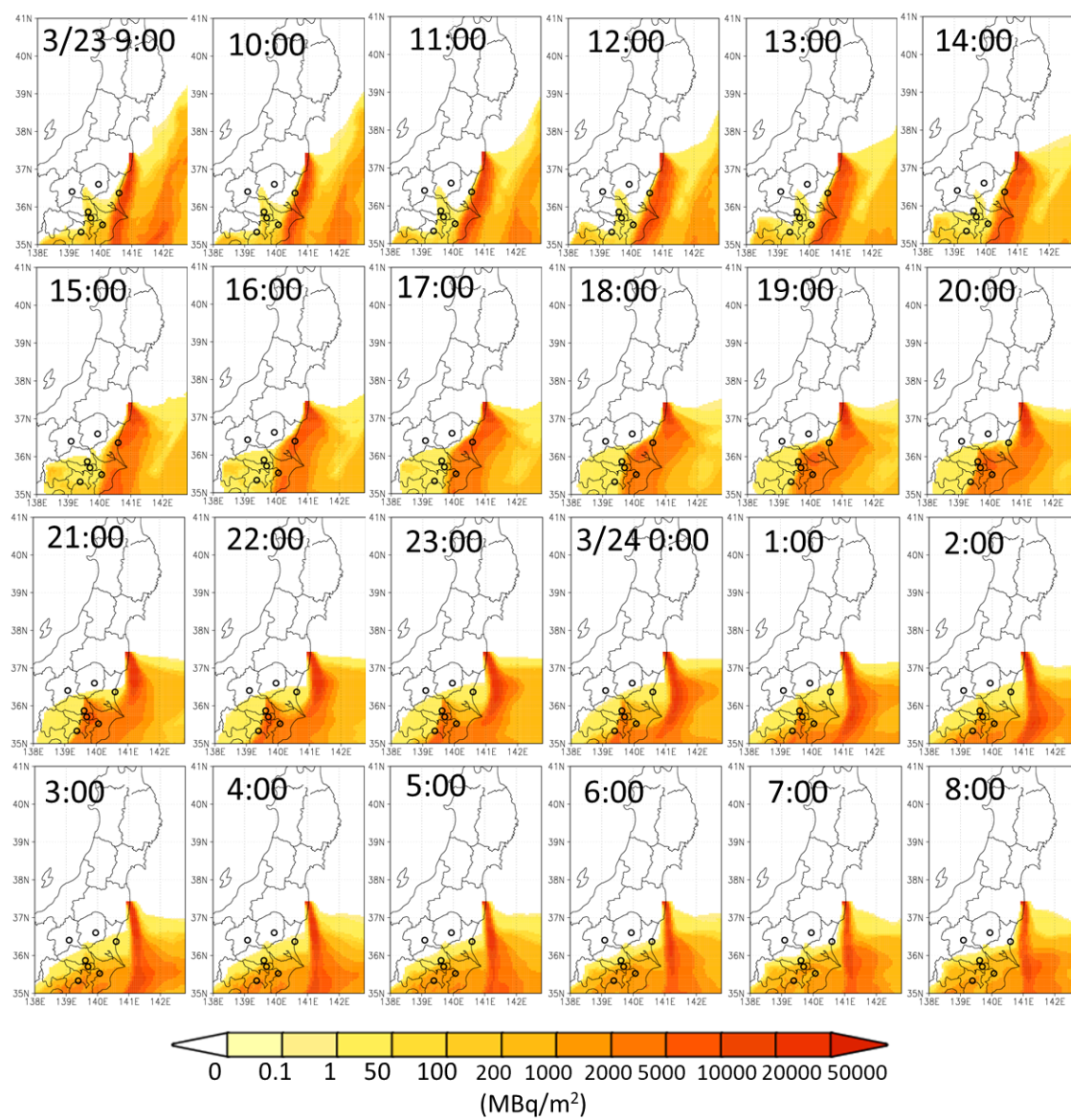
[3月21日 9:00-3月22日 8:00]



[3月22日 9:00-3月23日 8:00]

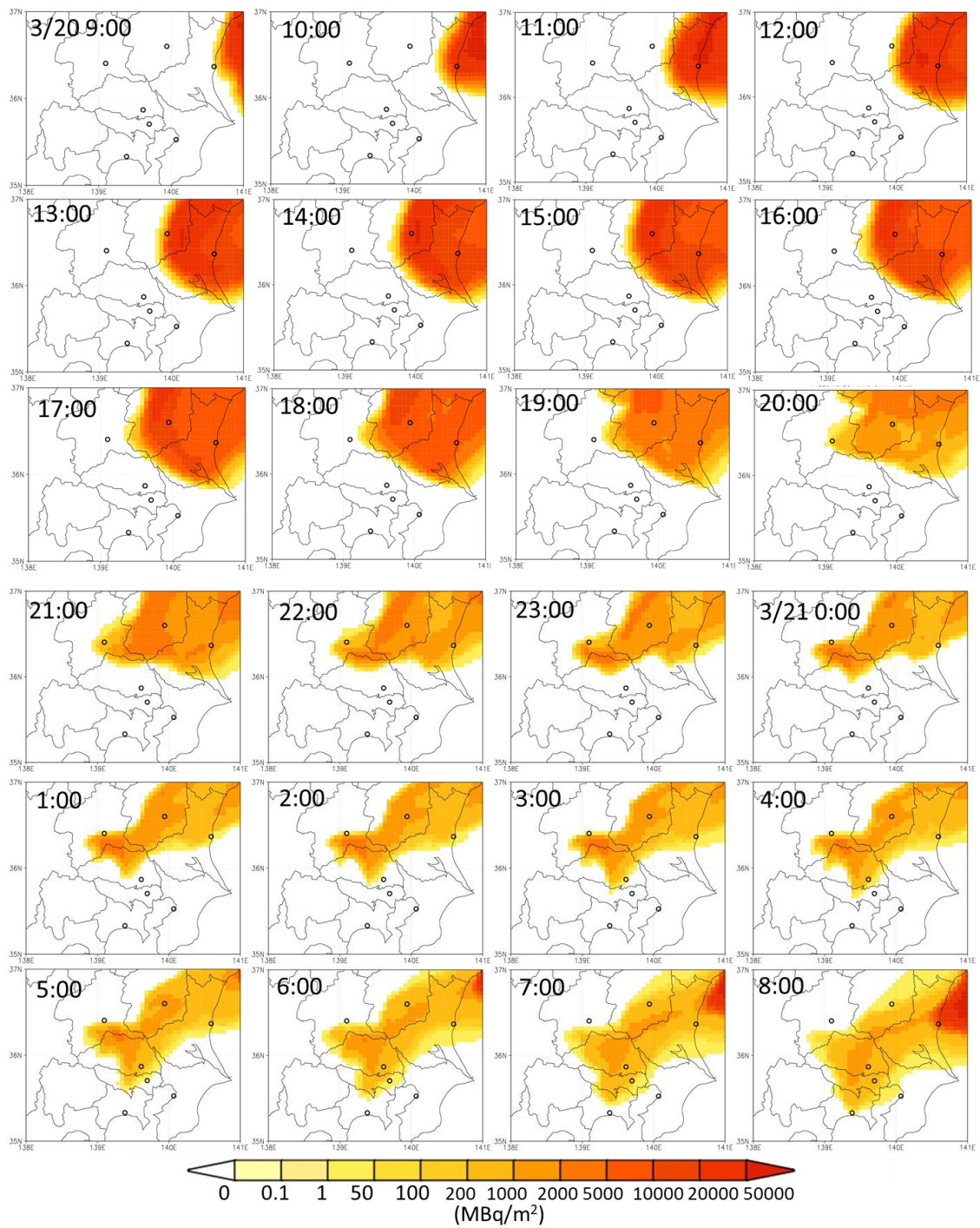


[3月23日 9:00-3月24日 8:00]

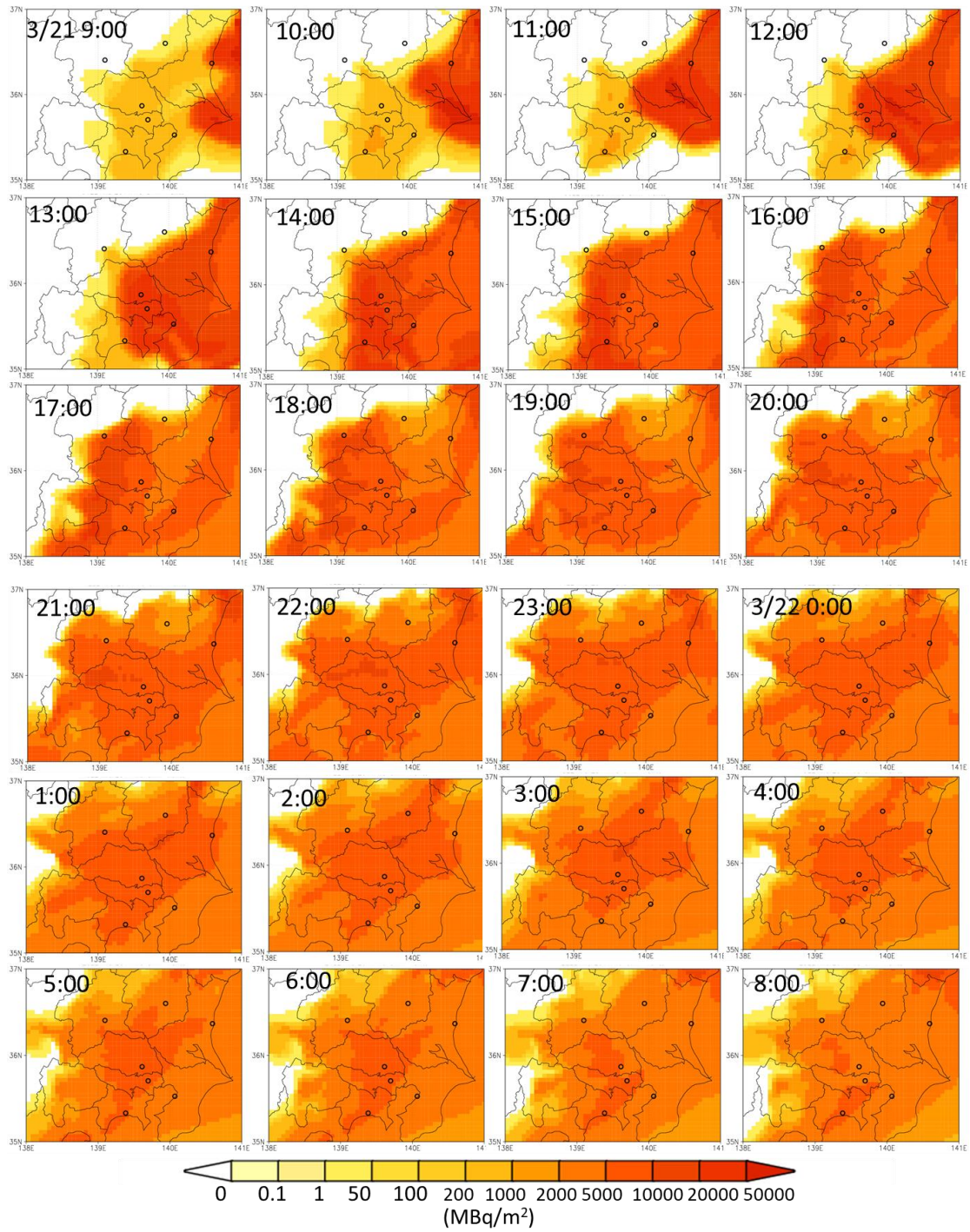


Appendix 2. G1 における関東地方の ^{137}Cs 鉛直積算濃度

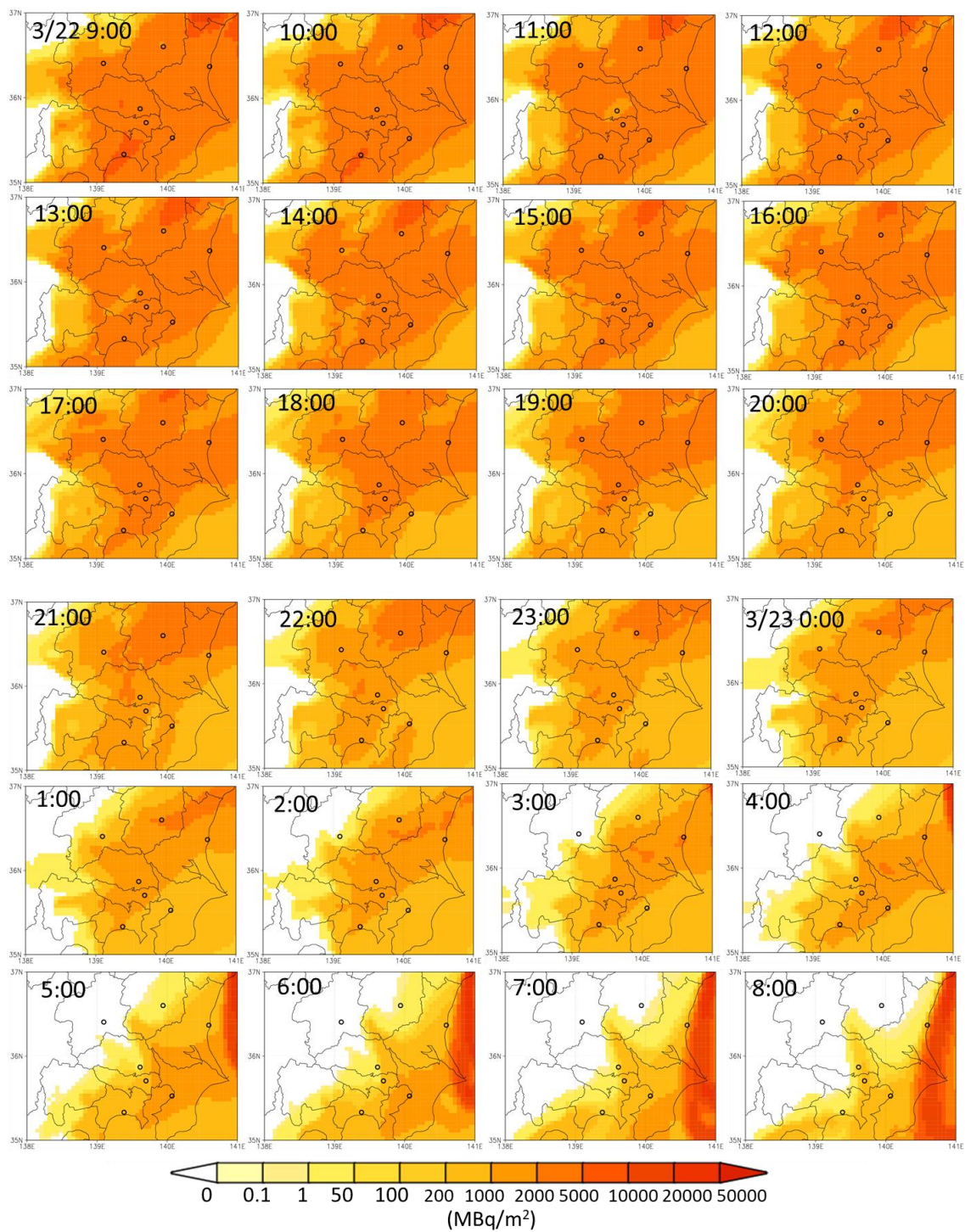
[3月20日9:00-3月21日8:00]



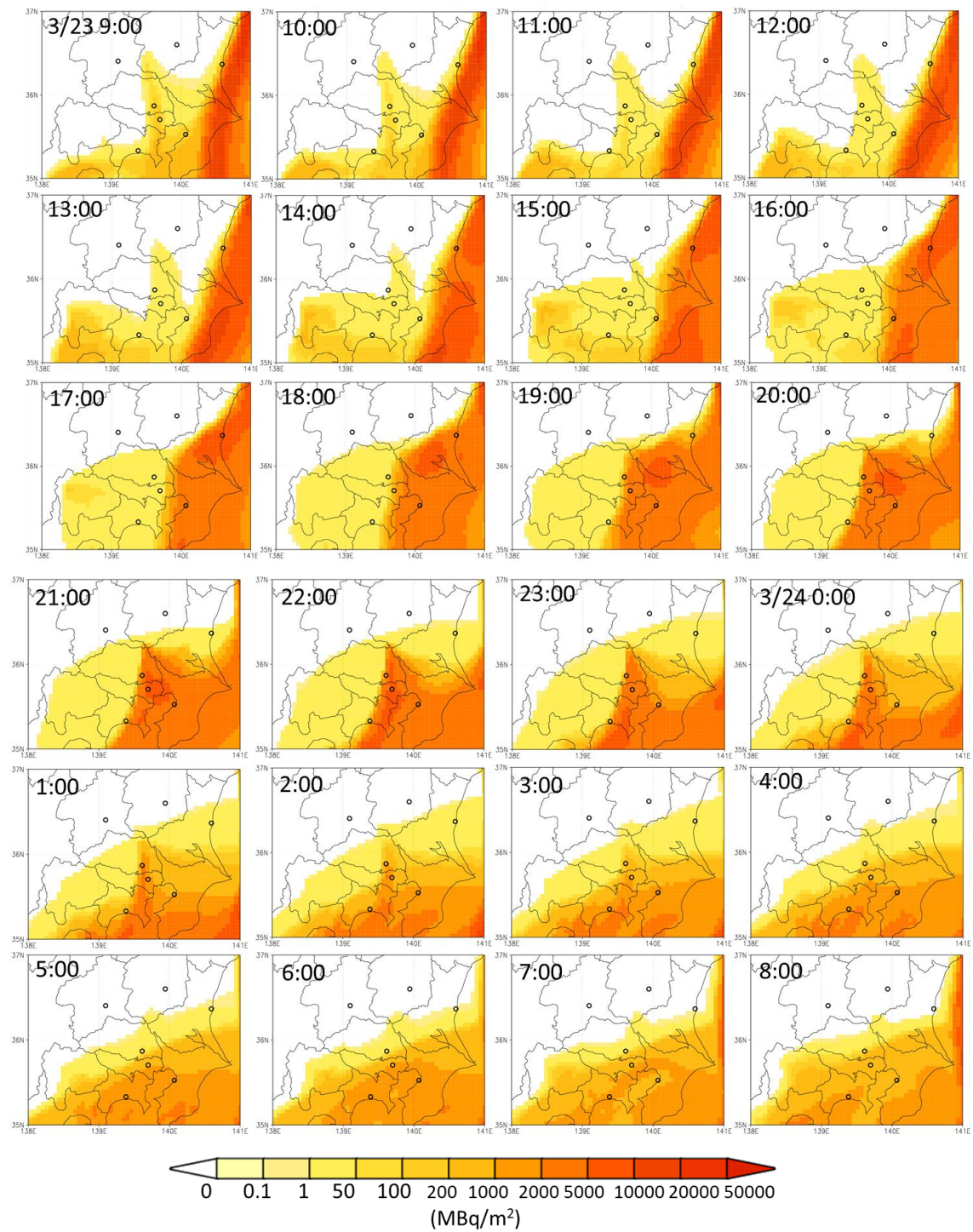
[3月21日 9:00-3月22日 8:00]



[3月22日 9:00-3月23日 8:00]



[3月23日 9:00-3月24日 8:00]



謝辞

本研究を進めるにあたり芳村圭教授には長きにわたり大変お世話になりました。大学院進学時から指導教官としてサポートいただき、なかなか研究が進まない時期も何度もご助言いただき、忙しい時期でも相談に乗っていただきました。先生からは多くを学び、この謝辞には書ききれないほど非常に助けられました。感謝してもしきれないほどです。

沖大幹教授にも大学院進学時から研究にご助言いただきました。社会基盤学専攻を選んだのも沖大幹教授が紹介していた研究でした。博士研究では副査として鋭いご意見をいただき感謝しております。ありがとうございます。

関本義秀准教授には副査として加わっていただき、審査の際はデータ同化に関して大変貴重なご意見をいただきました。本研究のみならず今後の研究を進めるうえで大変励みになりました。論文執筆にもご助言いただき、ありがとうございます。

芝浦工業大学の平林由希子教授には学部生の頃に研究室のミーティングに参加させていただいたり研究室選びの相談に乗っていただいたり、博士研究の副査として研究内容の他論文執筆まで数多くアドバイスいただき、研究生生活の節目でお世話になりとても感謝しております。

気象庁気象研究所の梶野瑞王主任研究官とは福島第一原発事故の放射性物質の拡散シミュレーションのワークショップで初めてお会いしましたが、今回博士研究の副査をしていただきありがとうございます。同事故のシミュレーションについて研究されていることから本研究に鋭いご指摘をいただいた他、大気中の除去過程についても教えていただくことが多かったです。4月以降さらに学ばせていただきたいと思います。

I'd like to appreciate Assoc. Prof. Eun-Chul Chang at Kongju National University. He was the co-author of the published paper and helped me a lot to understand NDSL scheme.

また、山崎大准教授には留学中に生活面でアドバイスいただいた他、博士予備審査ではオブザーバーとして感度実験の考察にご助言いただきました。ありがとうございます。

芳村研究室の皆さんにも、研究だけでなく研究室で過ごしていくうえでもとてもお世話になりました。今後ともどうぞよろしくお願い致します。秘書の宮城久美さん、馬渡美穂さんには特に、書類提出時にお忙しい中対応していただき大変助かりました。研究室に電話した際にも励ましの言葉をかけていただきました。いつも研究室全体に気を配っていただき、ありがとうございます。

吉兼隆生特任准教授には修士課程の頃よりご助言いただいた他、放射性物質の輸送過程について本研究とは別角度から研究を進めていたため大変参考にさせていただいておりました。書類作成時にもお忙しい中時間を割いて相談に乗っていただき非常に助かりました。ありがとうございます。新田友子特任助教は私が大学院に進学した頃からの良き先輩

でした。最終審査の発表でもご助言いただきお世話になりました。

大沼友貴彦特任研究員，馬文超特任研究員には研究室でも気さくに話しかけていただき，最終審査の練習にも参加いただき大変助かりました。取出欣也学振特別研究員にはデータ同化についてご助言いただいたほか，書類作成時にも相談に乗っていただきました。Alexandre Cauquoin 学振外国人特別研究員，Xiaojun Guo 博士研究員，小池雅洋シニア協力員の皆さんにも研究室でお世話になりました。お忙しい中でも話をしていただきありがとうございます。

学生の皆さんにも多く助けられました。森山文晶さん，Inna Syafarina さん，木野佳音さん，竹島滉さん，王小醒さん，花崎梨紗さん，新井峻太さんには，本番直前の発表練習で数多くコメントしていただき，自分の説明に何が不足しているのかがよく分かり，とてもよい準備が出来ました。鋭い視点からの質問もいただき大変心強かったです。

三浦陽介さんには審査本番にオブザーバーとして参加いただきました。ありがとうございます。蘭海茂さんはいらっしゃった直後が私の審査の時期と重なり席替えなどご迷惑をかけたかと思いますが，快く待っていただきありがたかったです。原田央さん，Subhawickrama Chamin Lakmal さんは日ごろから研究室の仕事に修士論文で忙しい中でもまじめに取り組んでおられ，私も助かっておりました。

父と母には苦しい時期がほとんどだった博士課程を大変辛抱強く支えていただきました。生まれた時からここまで返しても返しきれない恩ばかりですが，せめて卒業後自分を信じ力強く楽しく生きるところから少しずつ返していこうと思います。

参考文献（英文）

Aoyama, M., Kajino, M., Tanaka, T. Y., Sekiyama, T. T., Tsumune, D., Tsubono, T., ... & Gamo, T. (2016). ^{134}Cs and ^{137}Cs in the North Pacific Ocean derived from the March 2011 TEPCO Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident, Japan. Part two: estimation of ^{134}Cs and ^{137}Cs inventories in the North Pacific Ocean. *Journal of Oceanography*, 72(1), 67-76.

Arnold, D., Maurer, C., Wotawa, G., Draxler, R., Saito, K., & Seibert, P. (2015). Influence of the meteorological input on the atmospheric transport modelling with FLEXPART of radionuclides from the Fukushima Daiichi nuclear accident. *Journal of environmental radioactivity*, 139, 212-225. <http://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2014.02.013>

Chang, E., & Yoshimura, K. (2015). A semi-Lagrangian advection scheme for radioactive tracers in a regional spectral model. *Geoscientific Model Development*, 8(10), 3247-3255. <http://doi.org/10.5194/gmdd-8-4221-2015>

Chino, M., Nakayama, H., Nagai, H., Terada, H., Katata, G., & Yamazawa, H. (2011). Preliminary estimation of release amounts of ^{131}I and ^{137}Cs accidentally discharged from the Fukushima Daiichi nuclear power plant into the atmosphere. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 48(7), 1129-1134. <http://doi.org/10.1080/18811248.2011.9711799>

Chou, M., & Suarez, M. J. (1994). *An efficient thermal infrared radiation parameterization for use in general circulation models*. National Aeronautics and Space Administration, Goddard Space Flight Center. Retrieved from <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.26.4850&rep=rep1&type=pdf>

Christoudias, T., & Lelieveld, J. (2013). Modelling the global atmospheric transport and deposition of radionuclides from the Fukushima Dai-ichi nuclear accident. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(3), 1425.

Draxler, R., Arnold, D., Chino, M., Galmarini, S., Hort, M., Jones, A., . . . Rolph, G. (2015). World Meteorological Organization's model simulations of the radionuclide dispersion and deposition from the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident. *Journal of Environmental Radioactivity*, 139, 172-184.
<http://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2013.09.014>

Ek, M., Mitchell, K., Lin, Y., Rogers, E., Grunmann, P., Koren, V., . . . Tarpley, J. (2003). Implementation of Noah land surface model advances in the National Centers for Environmental Prediction operational mesoscale Eta model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D22). <http://doi.org/10.1029/2002JD003296>

Ham, S., Lee, J., & Yoshimura, K. (2016). Assessing future climate changes in the east Asian summer and winter monsoon using regional spectral model. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 94, 69-87.
<http://doi.org/10.2151/jmsj.2015-051>

Hirao, S., Yamazawa, H., & Nagae, T. (2013). Estimation of release rate of iodine-131 and cesium-137 from the Fukushima Daiichi nuclear power plant, *Journal of Nuclear Science and technology*, 50(2), 139-147.

Hong, S., & Pan, H. (1996). Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model. *Monthly Weather Review*, 124(10), 2322-2339.

[http://doi.org/10.1175/1520-0493\(1996\)124%3C2322:NBLVDI%3E2.0.CO;2](http://doi.org/10.1175/1520-0493(1996)124%3C2322:NBLVDI%3E2.0.CO;2)

Hunt, B. R., Kostelich, E. J., & Szunyogh, I. (2007). Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: A local ensemble transform Kalman filter. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 230(1-2), 112-126.

<http://doi.org/10.1016/j.physd.2006.11.008>

Ikemoto, T. & Magara, Y. (2011). Measures against impacts of nuclear disaster on drinking water supply systems in Japan. *Water Practice and Technology*, 6(4), wpt20110078. <http://doi.org/10.2166/wpt.2011.0078>

Japan Meteorological Agency. (2011). [Data file] *Radar-Rain gauge Analyzed Precipitation*. DVD. Available at <http://www.jmbasc.or.jp/jp/offline/cd0100.html>

Juang, H. M. H. (2008). [Presentation]. *Mass conserving and positive-definite semi-Lagrangian advection in NCEP GFS: decomposition of massively parallel computing without halo*. Proceedings of the Thirteenth Workshop on Use of High Performance Computing in Meteorology, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, Reading, United Kingdom.

Retrieved from <http://www.ecmwf.int/sites/default/files/elibrary/2008/15346-mass-conserving-and-positive-definite-semi-lagrangian-advection-ncep-gfs-decomposition.pdf>

Juang, H. M. H. (2007). [Abstract of oral presentation]. *Semi-Lagrangian advection without iteration*. Proceedings of the Conference on Weather Analysis and Forecasting, Central Weather Bureau, Longtan, Taoyan, Taiwan. Retrieved from <http://2007tga.cgu.org.tw/cdrom/Oral/A4-3B-10.pdf>

Juang, H. H., Hong, S., & Kanamitsu, M. (1997). The NCEP regional spectral model: An update. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(10), 2125-2143. [http://doi.org/10.1175/1520-0477\(1997\)078%3C2125:TNRSMA%3E2.0.CO;2](http://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078%3C2125:TNRSMA%3E2.0.CO;2)

Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., . . . Woollen, J. (1996). The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77(3), 437-471. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077%3C0437:TNYP%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077%3C0437:TNYP%3E2.0.CO;2)

Kanamitsu, M., Yoshimura, K., Yhang, Y., & Hong, S. (2010). Errors of interannual variability and trend in dynamical downscaling of reanalysis. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D17). <http://doi.org/10.1029/2009JD013511>

Katata, G., Ota, M., Terada, H., Chino, M., & Nagai, H. (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. *Journal of Environmental Radioactivity*, 109, 103-113.
<http://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2012.02.006>

Kinoshita, N., Sueki, K., Sasa, K., Kitagawa, J., Ikarashi, S., Nishimura, T., . . . Yamagata, T. (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.
<http://doi.org/10.1073/pnas.1111724108>

Korsakissok, I., Mathieu, A., & Didier, D. (2013). Atmospheric dispersion and ground deposition induced by the Fukushima Nuclear Power Plant accident: A local-scale simulation and sensitivity study. *Atmospheric Environment*, 70, 267-279.

Leadbetter, S. J., Hort, M. C., Jones, A. R., Webster, H. N., & Draxler, R. R. (2015). Sensitivity of the modelled deposition of caesium-137 from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant to the wet deposition parameterisation in NAME. *Journal of Environmental Radioactivity*, 139, 200-211.
<http://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2014.03.018>

Maryon, R., Smith, F., Conway, B., & Goddard, D. (1991). The UK nuclear accident model. *Progress in Nuclear Energy*, 26(2), 85-104. [http://doi.org/10.1016/0149-1970\(91\)90043-O](http://doi.org/10.1016/0149-1970(91)90043-O)

Miller, N., Jin, J., Schlegel, N., Snyder, M., O'Brien, T., Sloan, L., . . . Yoshimura, K. (2009). An analysis of simulated California climate using multiple dynamical and statistical techniques. *California Energy Commission Report CEC-500-2009-017-F*, Retrieved from <http://www.energy.ca.gov/2009publications/CEC-500-2009-017/CEC-500-2009-017-F.PDF>

Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT). (2011). *Reading of radioactivity level in fallout by prefecture*. Retrieved from <http://radioactivity.nsr.go.jp/en/list/194/list-8.html>. Accessed 16 Nov 2019.

Moorthi, S., & Suarez, M. J. (1992). Relaxed Arakawa-Schubert. A parameterization of moist convection for general circulation models. *Monthly Weather Review*, 120(6), 978-1002. [http://doi.org/10.1175/1520-0493\(1992\)120%3C0978:RASAP0%3E2.0.CO;2](http://doi.org/10.1175/1520-0493(1992)120%3C0978:RASAP0%3E2.0.CO;2)

Morino, Y., Ohara, T., Watanabe, M., Hayashi, S., & Nishizawa, M. (2013). Episode analysis of deposition of radiocesium from the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident. *Environmental Science & Technology*, 47(5), 2314-2322. <http://doi.org/10.1021/es304620x>

Nuclear Emergency Response Headquarters Government of Japan. (2011, June). *Report of Japanese Government to the IAEA Ministerial Conference on Nuclear Safety - The Accident at TEPCO's Fukushima Nuclear Power Stations -*. Retrieved from

http://japan.kantei.go.jp/kan/topics/201106/iaea_houkokusho_e.html. Accessed 16 Nov 2019.

Oki, R., & Sumi, A. (1994). Sampling simulation of TRMM rainfall estimation using radar-AMeDAS composites. *Journal of Applied Meteorology*, 33(12), 1597-1608.

[http://doi.org/10.1175/1520-0450\(1994\)033%3C1597:SSOTRE%3E2.0.CO;2](http://doi.org/10.1175/1520-0450(1994)033%3C1597:SSOTRE%3E2.0.CO;2)

Oura, Y., Ebihara, M., Tsuruta, H., Nakajima, T., Ohara, T., Ishimoto, M., ... & Nitta, W. (2015). A database of hourly atmospheric concentrations of radiocesium (^{134}Cs and ^{137}Cs) in suspended particulate matter collected in March 2011 at 99 air pollution monitoring stations in Eastern Japan. *Journal of Nuclear and Radiochemical Sciences*, 15(2), 2_1-2_12.

http://doi.org/10.14494/jnrs.15.2_1

Saito, K., Shimbori, T., & Draxler, R. (2015a). JMA's regional atmospheric transport model calculations for the WMO technical task team on meteorological analyses for Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. *Journal of Environmental Radioactivity*, 139, 185-199. <http://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2014.02.007>

Saito, K., Shimbori, T., Draxler, R., Hara, T., Toyoda, E., Honda, Y., . . . Chen, P. (2015b). Contribution of JMA to the WMO Technical Task Team on meteorological analyses for Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident and relevant atmospheric transport modeling at MRI. *Technical Reports of the Meteorological Research Institute*, 76.

<http://doi.org/10.11483/mritechrepo.76>

Saunier, O., Mathieu, A., Didier, D., Tombette, M., Quélo, D., Winiarek, V., & Bocquet, M. (2013). An inverse modeling method to assess the source term of the Fukushima nuclear power plant accident using gamma dose rate observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(22), 11403-11421. <http://doi.org/10.5194/acp-13-11403-2013>

Saya, A., Yoshimura, K., & Oki, T. (2015). Simulation of radioactive tracer transport using IsoRSM and uncertainty analyses. *Journal of JSCE*, 3(1), 60-66. http://doi.org/10.2208/journalofjsce.3.1_60

Science Council of Japan. (2014, September 2). [PDF document]. *A review of the model comparison of transportation and deposition of radioactive materials released to the environment as a result of the Tokyo Electric Power Company's Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident*. Retrieved from http://www.jpгу.оrg/scj/report/20140902scj_report_e.pdf

Srinivas, C., Venkatesan, R., Baskaran, R., Rajagopal, V., & Venkatraman, B. (2012). Regional scale atmospheric dispersion simulation of accidental releases of radionuclides from Fukushima Dai-ichi reactor. *Atmospheric Environment*, 61, 66-84.
<http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.06.082>

Stohl, A., Seibert, P., Wotawa, G., Arnold, D., Burkhardt, J. F., Eckhardt, S., . . . Yasunari, T. (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. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(5), 2313-2343.
<http://doi.org/10.5194/acp-12-2313-2012>

Takido, K., Valeriano, O. C. S., Ryo, M., Tanuma, K., Ushio, T., & Kubota, T. (2016). Spatiotemporal evaluation of the gauge-adjusted global satellite mapping of precipitation at the basin scale. *Journal of the Meteorological Society of Japan.Ser.II*, 94(2), 185-195. <http://doi.org/10.2151/jmsj.2016-010>

Terada, H., Katata, G., Chino, M., & Nagai, H. (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. *Journal of Environmental Radioactivity*, 112, 141-154.

<http://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2012.05.023>

Tokyo Metropolitan Institute of Public Health. (2011a). *Measurement results of radiation doses in the air / Measurement results by the hour (Shinjuku)*. Retrieved from http://monitoring.tokyo-eiken.go.jp/en/mp_shinjuku_air_week_list.html. Accessed 16 Nov 2019.

Tokyo Metropolitan Institute of Public Health. (2011b). *Measurement results of radiation doses in the air (Shinjuku)*. Retrieved from http://monitoring.tokyo-eiken.go.jp/en/mp_shinjuku_air.html. Accessed 16 Nov 2019.

Tsuruta, H., Oura, Y., Ebihara, M., Ohara, T., & Nakajima, T. (2014). First retrieval of hourly atmospheric radionuclides just after the Fukushima accident by analyzing filter-tapes of operational air pollution monitoring stations. *Scientific Reports*, 4, 6717. <http://doi.org/10.1038/srep06717>

Yasunari, T. J., Stohl, A., Hayano, R. S., Burkhart, J. F., Eckhardt, S., & Yasunari, T. (2011). Cesium-137 deposition and contamination of Japanese soils due to the Fukushima nuclear accident. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(49), 19530-19534. <http://doi.org/10.1073/pnas.1112058108>

Yoshida, N., & Kanda, J. (2012). Tracking the Fukushima radionuclides. *Science (New York, N.Y.)*, 336(6085), 1115-1116. <http://doi.org/10.1126/science.1219493>

Yoshikane, T., Yoshimura, K., Chang, E. C., Saya, A., & Oki, T. (2016). Long-distance transport of radioactive plume by nocturnal local winds. *Scientific Reports*, 6, 36584. <http://doi.org/10.1038/srep36584>

Yoshimura, K., & Kanamitsu, M. (2009). Specification of external forcing for regional model integrations. *Monthly Weather Review*, 137(4), 1409-1421. <http://doi.org/10.1175/2008MWR2654.1>

Yoshimura, K., Kanamitsu, M., & Dettinger, M. (2010). Regional downscaling for stable water isotopes: A case study of an atmospheric river event. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D18). <http://doi.org/10.1029/2010JD014032>

参考文献（日本語）

原子力災害対策本部：原子力安全に関する I A E A 閣僚会議に対する日本国政府の報告書
－東京電力福島原子力発電所の事故について－，

http://www.kantei.go.jp/jp/topics/2011/iaea_houkokusho.html

(2019年11月17日アクセス)，2011.

東京電力：プレスリリース2011年 当社福島第一原子力発電所，福島第一原子力発電所における津波の調査結果について，<http://www.tepco.co.jp/cc/press/11040904-j.html>

(2019年11月17日アクセス)，2011.

日本原子力発電株式会社：空間線量率と降雨量の測定結果(2011年3月)，

<http://www.japc.co.jp/plant/data/management/mp/mpdata/tokai/2010/tkmp2303g.pdf>

(2020年1月26日アクセス)，2011.

内閣府(防災担当)：東日本大震災の概要 中央防災会議防災対策推進検討会議(第1回)，

<http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/suishinkaigi/1/pdf/sub5.pdf>

(2019年11月16日アクセス)，2011.

文部科学省：①第5次航空機モニタリングの測定結果，および②福島第一原子力発電所から80km圏外の航空機モニタリングの測定結果について，

http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/7000/6289/24/203_0928.pdf,

(2019年11月16日アクセス)，2012