

福島第一原発事故による放出物質の 大気輸送過程シミュレーションにおける誤差の検証

井口敬雄・向川均・榎本剛

要 旨

福島第一原子力発電所の事故によって放出された放射性物質の大気中輸送シミュレーションについて、大気再解析データと初期フラックス予測という2つの要因に起因する誤差について検証を行った。まず、大気状態の解析誤差を含んだアンサンブル再解析データ (ALERA2) を用いて行った輸送実験では、濃度の標準偏差は大部分において平均値の10%以内に収まった (1Bq/m³以上の濃度が対象。以下同じ)。一方、ALERA2平均値データとNCEP/NCAR再解析データ、ERA Interimデータ、およびJCIDASデータを用いたシミュレーション結果の比較では、標準偏差は大部分で平均値の30%以内となった。また、放出日を変えて一日だけ放出させたシミュレーションでは、その後の放出物質の輸送に大きな違いが見られた。

キーワード: 福島第一原発事故, 大気輸送誤差, 大気再解析データ, 逆転法

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震とそれに伴う津波の後発生した福島第一原子力発電所の事故は、日本国内のみならず世界中の大きな関心を集め、事故によって放出された放射性物質の行方について様々な研究機関によって数値モデルを用いた予測や推定が行われた。日本国内における放射性物質の詳細な分布を調査するためには高解像度の領域モデルが(竹見・石川, 2011; 近藤他, 2011; 滝川他, 2011; 梶野他, 2011; 加藤他, 2011), 全球規模の長距離輸送を調べるためにはグローバルな大気輸送モデルが用いられている(Takemura et al., 2011; 田中他, 2011)。

大気中および地表面における放射線量を推定するためには、大気による輸送や拡散に加え、原子核の崩壊による減少、乾性沈着、湿性沈着等の過程を考慮しなければならない。これらの過程は放射性核種によっても特性が異なるため放出された放射性物質の内訳に関する正確な情報も必要であり、推定は非常に困難なものであると考えられる。また田中他(2011)は、輸送モデルの解像度や地形の再現性なども輸送の正確さに影響を与えると指摘している。

これらに加え、放射性物質の輸送シミュレーションは大気再解析データあるいはGCMによって計算

された風速等の大気データを用いて行われているため、どのデータを使用するかも誤差の要因になると考えられる。また、原発事故における放射性物質放出量の詳細な時間経過も正確なシミュレーションのために必要な情報であるが、その見積もりはまだ少ない(Chino et al., 2011)。この問題点に対するアプローチとして、輸送シミュレーション結果を用いた逆解析も提案されている(眞木他, 2011)。

本研究では、グローバルな大気輸送モデルを用いて原発事故で放出された放射性物質の輸送シミュレーションを行い、大気再解析データに起因する誤差や、物質の放出量の詳細な時間変化に起因する誤差について調べた。

2. モデルおよびデータ

2.1 大気輸送モデル

本研究で行うシミュレーションは、井口・木田(1999)が開発した3次元の全球大気輸送モデルを用いて行われた。本輸送モデルは大気をグリッドボックスに分割し、隣り合うグリッドボックス間のフラックスを計算して加えることにより、次のタイムステップのトレーサー量を求める。このスキームはトレーサーの質量を保存する。

本輸送モデルの水平解像度は1.25° × 1.25°, 鉛直

解像度は σ 座標で14層（上端は10hPa），タイムステップは5分とした。

2.2 大気再解析データ

2.1の大気輸送モデルは風速などの大気データを外部から読み込んでトレーサの輸送を行う。本研究では入力データとして，NCEP/NCAR(National Centers for Environmental Prediction, National Oceanic and Atmospheric Administration / The National Center for Atmospheric Research, University Corporation for Atmospheric Research)再解析データ(Kalnay et al., 1996), ALERA2(AFES-LETKF experimental ensemble reanalysis)アンサンブル大気再解析データ(Enomoto et al., 2012), ECMWF(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) ERA Interimデータ(Dee et al, 2011), および気象庁のJCIDAS(Japan Meteorological Agency Climate Data Assimilation System)データ(Onogi et al., 2007)を用いた。ALERA2データは再解析された大気状態の誤差を63のメンバーを用いて表しており，観測データとの同化が行われている。これらのメンバーを用いることにより，大気状態の再解析誤差がシミュレーション結果に与える影響を調べることが出来る。

各データセットの水平解像度を Table 1 に示す。ERA Interim データについては気圧レベルが選択式になっており，ALERA2 データに合わせて取得した。タイムステップはいずれも 6 時間である。これを輸送モデルのグリッドとタイムステップに合わせて空間的・時間的に内挿し，入力データとして用いた。

3. シミュレーションの概要

シミュレーションは，3月12日00:00から3月19日00:00までの間に福島第一原発の周囲4グリッドエリ

アより合計77万テラベクレルの放射性物質を放出させた。この放出量は保安院の発表(2011.6.6)に基づく。放出中のフラックスは一定とした。その後放出を止め、NCEP/NCAR再解析データ，ERA Interimデータ，およびJCIDASデータを用いたシミュレーションは5月1日00:00まで，ALERA2アンサンブル再解析データ（63メンバーおよび全メンバーの平均データ）を用いたシミュレーションは入手したデータの都合上4月30日00:00まで大気による輸送を行った。輸送を行った。なお，原子核の崩壊，乾性・湿性沈着等の過程は入っておらず，純粋に大気による輸送の効果のみを確認する。

さらに，放出日による放射性物質の大気輸送の違いを見るため，1日だけ11万テラベクレルを放出させてその後大気による輸送を行うというシミュレーションを，NCEP/NCAR再解析データを用い，3月12日から3月18日まで7通りの放出日について行った。

4. 結果

4.1 NCEP/NCAR再解析データを用いたシミュレーションの結果

まず，NCEP/NCAR再解析データを用いて行ったシミュレーションの結果（最下層濃度）をFig. 1に示す。放出された放射性物質は太平洋上を高緯度側に移動(Fig. 1a)してシベリア東部から北米大陸さらにグリーンランドに達し，一部は東南アジアに輸送された(Fig. 1b)。さらに北極海を越えてユーラシア大陸に達し(Fig. 1c)，最終的には北半球全域に拡がった(Fig. 1d)。

4.2 ALERA2アンサンブル大気再解析データを用いたシミュレーションの結果

Table 1 Horizontal resolution and vertical levels of reanalysis data sets.

Data Set Name	Horizontal Resolution	Vertical levels
NCEP/NCAR	2.5 degree	17 levels(1000, 925, 850, 700, 600, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20, 10hPa)
JCIDAS	1.25 degree	
ERA Interim	1.5 degree	18 levels(1000, 925, 850, 775, 700, 600, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20, 10hPa)
ALERA2	1.25 degree	

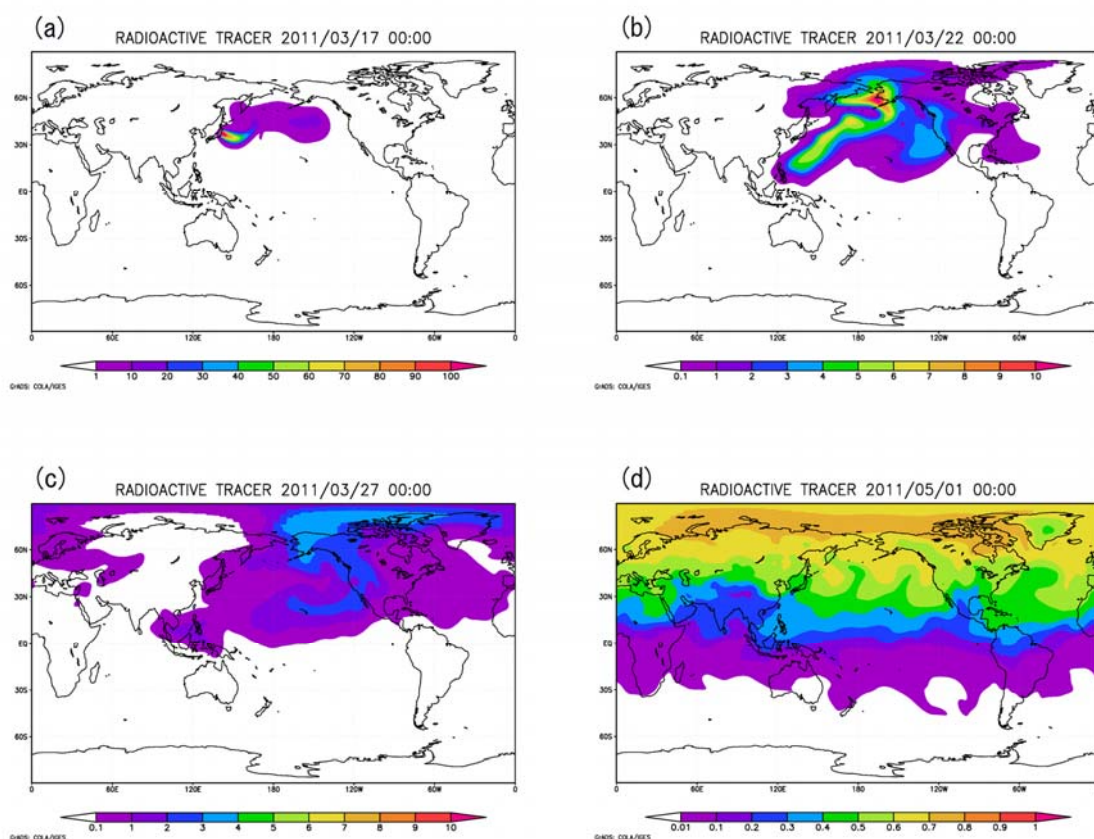


Fig. 1 Simulated concentrations of radioactive tracer in the lowest layer of the transport model using NCEP/NCAR reanalysis data at 00:00 Z on (a) March 17, (b) March 22, (c) March 27, and (d) May 1, 2011. The emission period was from 00:00 Z on March 12 to 00:00 Z on March 19.

Fig. 1からも分かるように、事故で放出された放射性物質は1ヶ月もすれば北半球全体に拡がり濃度も低くなる。そこで基準となる値を決め、それ以上の濃度について追跡する事にした。

基準濃度を決める指標として、空气中濃度限度

$$\rho_{AL} = \frac{D_{EL}}{C_D \times V_R}$$

ρ_{AL} : Air concentration limit (Bq/m³)

D_{EL} : Effective dose limit (mSv/yr)

C_D : Dose coefficient (mSv/Bq)

V_R : Respiratory volume(m³/yr)

を用いた。 D_{EL} は1mSv/yrとし、 V_R はICRP(1995)より成人男性の値として8103m³/yrとした。 C_D については、放出量が¹³¹I換算値であることから、原子力安全委員会が定めた¹³¹Iの実効線量係数 1.5×10^{-5} を代入した。その結果、求められた ρ_{AL} の値は8.22となるため、同じオーダーの単位となる1Bq/m³を追跡する最少濃度とした。

Fig. 2にALERA2全63メンバーを用いて行った結果の平均値(左側)と、63メンバーの平均値データを用いて行った結果(右側)を示す(最下層濃度)。Fig. 2に示された通り、1Bq/m³以上の濃度分布は両者ほとんど同じであった。左側の図では、平均値が1Bq/m³未満でも、1Bq/m³以上の濃度が計算されたメンバーが1つでもあった領域をグレーに色分けしている。しかし、グレーの領域は1Bq/m³以上の色付けされた領域に対して小さく、全メンバーのスプレッドが小さい事を示している。Fig. 3には、全63メンバーの最下層濃度の標準偏差を平均値で割った値を示す。Fig. 3が示す通り、標準偏差は1Bq/m³以上のほとんどの領域で10%以下であった。ALERA2メンバー間のシミュレーション結果の違いは大気状態の誤差に起因するものである。ただし、このデータは観測値との同化を行いながら生成されたデータであり、メンバー間の誤差は初期の誤差がそのまま成長したものではないという点に注意する必要がある。つまり、将来予測のシミュレーションを行った場合

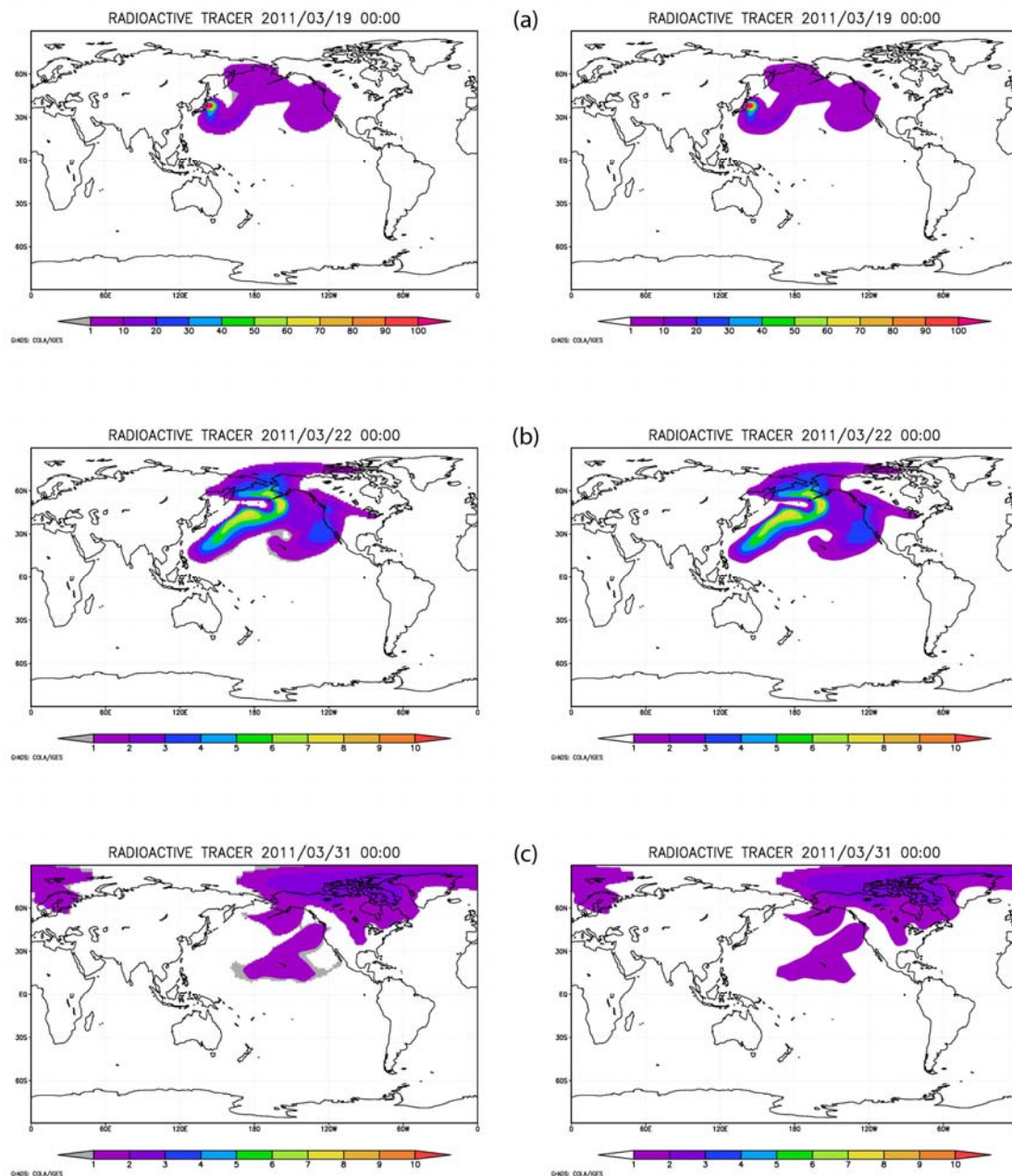


Fig. 2 Mean concentrations simulated using the data of the 63 members of ALERA2 ensemble reanalysis atmospheric data (left-hand side) and concentrations simulated using the mean data of the members (right-hand side). Figures are of the lowest layer of the transport model at 00:00 Z on (a) March 19, (b) March 22, and (c) March 31. Only grid areas with concentrations greater than 1Bq/m^3 are colored. In the distributions on left-hand side, grid areas in which at least one member exceeds 1Bq/m^3 are colored gray even if the mean concentration is below 1Bq/m^3 .

の誤差とは異なるという事である。

4.3 異なる再解析データを用いたシミュレーションの結果の比較

Fig. 4 に (a) NCEP/NCAR 再解析データ, (b) ALERA2 全 63 メンバーの平均値データ, (c) ERA Interim データ, および (d) JCIDAS データを用いて行ったシミュレーションの結果から 3 月 24 日 00:00 (標

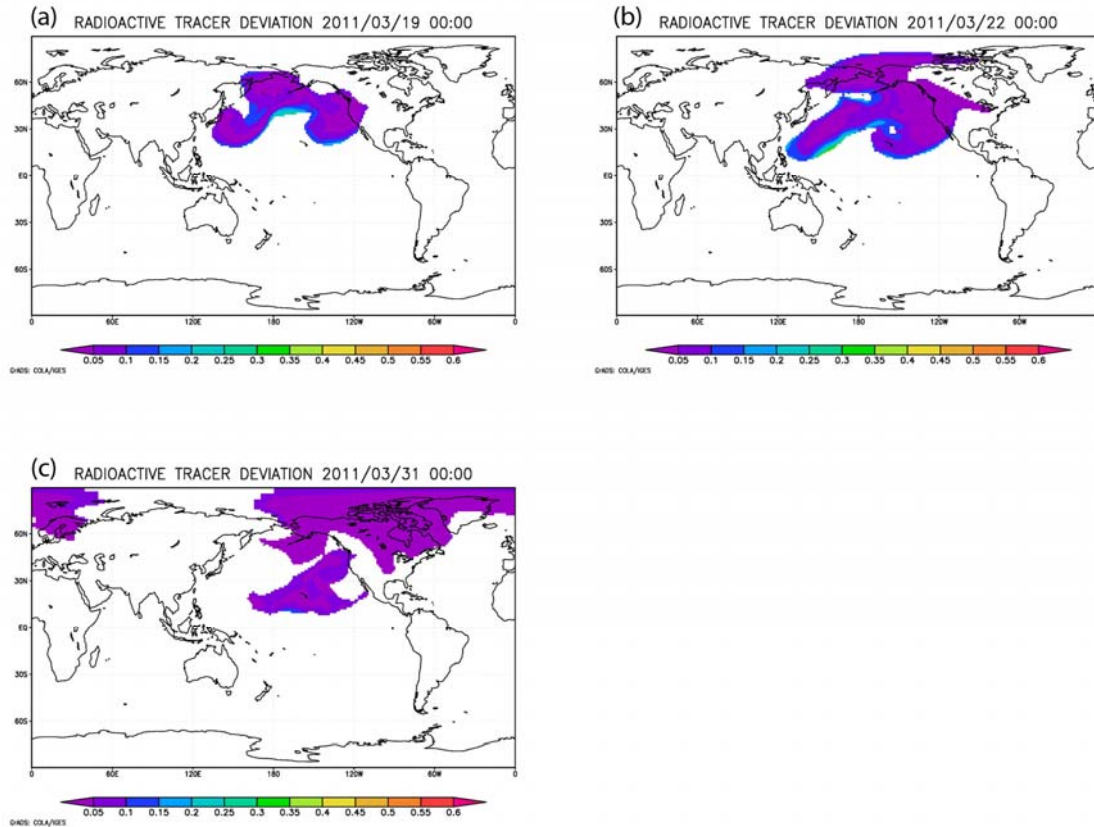


Fig. 3 Ratios between standard deviations and mean concentrations of simulated results using all members of ALERA2 data. Figures are of the lowest layer at 00:00 Z on (a) March 19, (b) March 22, and (c) March 31. The ratios are calculated for the grid areas in which at least one member exceeds 1Bq/m^3 .

準時)の濃度分布を示す(最下層濃度)。いずれの結果も 1Bq/m^3 以上の濃度のみ色を付けている。3月19日にトレーサの放出が終了した後、高濃度のトレーサが北極海方面と北米大陸西岸方向に分かれる(Fig. 2(a)および(b)も参照)。NCEP/NCARデータとJCIDASデータを用いたシミュレーションでは、ベーリング海峡から北米大陸北岸にかけての領域の濃度が北米大陸西岸の濃度より高くなっている(Fig. 4(a)および(d))が、ALERA2 平均値データと ERA Interim データを用いたシミュレーションでは濃度の高低が逆になっている(Fig. 4(b)および(c))。Fig. 5に、4つの再解析データセットを用いたシミュレーション結果の標準偏差を平均値で割った値を示す。両者の誤差は、ALERA2 メンバー間の誤差(Fig. 3)よりかなり大きい。 1Bq/m^3 の大部分では30%以下に収まっているが、周辺部には50%を超える部分もみられる。両者の差の原因としては再解析の手法や用いた大気大循環モデルの違いが考えられる。

4.4 1日のみ放出させたシミュレーションの結果

次に、NCEP/NCAR 再解析データを用い、1日のみ放出した放射性物質の輸送シミュレーションの結果から、3月22日00:00における濃度分布(最下層)をFig. 6に示す。3月12, 13日に放出された物質は北米大陸西岸で最も高い濃度となり、次いでシベリア東部が高い濃度となる(Fig. 6a)。これが3月14, 15日の放出となるとシベリア東部からアラスカにかけての領域の濃度が北米大陸西岸付近の濃度を上回る(Fig. 6b)。さらに3月16, 17日の放出になると東南アジアに向かう物質が多くなり(Fig. 6c)、3月18日の放出になると一転してまた北太平洋に向かう物質が多くなる(Fig. 6d)。このように、放出された日によって、放射性物質の行方は大きく違ってくる。これらのシミュレーションの結果と、太平洋周辺の複数の定点において放射線量を毎日正確に測定したデータがあれば、実際には原子核の崩壊や乾性・湿性沈着の効果も考慮に入れる必要があるものの、逆転法

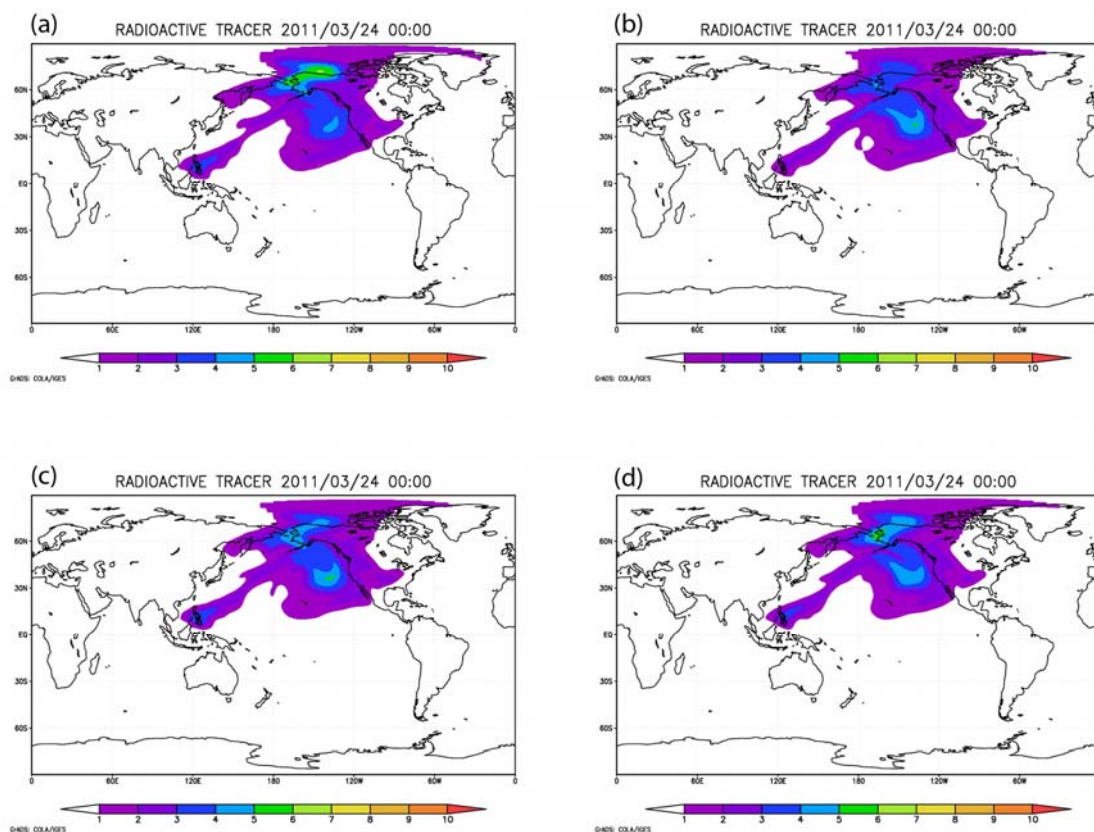


Fig. 4 Concentrations simulated using (a) NCEP/NCAR data, (b) the mean data of ALERA2 63 members, (c) ERA Interim data, and (d) JCIDAS data. Figures are of the lowest layer of the transport model at 00:00 Z on March 24. Only grid areas with concentrations greater than 1Bq/m^3 are colored.

(Enting et al., 1995; Bousquet et al., 1999)によって放射性物質の放出の詳細を推定する事が可能であると思われる。

5. まとめ

大気輸送モデルを用いた放射性物質の長距離輸送シミュレーションにおける、用いた大気再解析データの違いと、詳細なフラックスの時間変化に関する情報の欠如という2つの要素に起因する誤差についてそれぞれ調べた。まず、大気の状態の再解析誤差に起因すると考えられるアンサンブル再解析データを用いたシミュレーション結果の標準偏差は平均値の10%以内に収まった。それに比べ、異なる再解析データを用いて行ったシミュレーションの標準偏差はずっと大きかった。こちらの誤差は主に再解析の手法や用いられる大循環モデルに起因すると考えられる。次に、放出日を変えて1日だけ放出させた実験ではその後の輸送に明確な違いが見られ、十分な数

の大気中放射線量の測定データがあればフラックスの詳細な時間変化を逆転法によって求められる可能性が示唆された。

謝 辞

本研究は、京都大学防災研究所「平成23年度東日本大震災に関する緊急調査」として行われました。本研究で使用したNCEP/NCAR再解析データはNOAA(National Oceanic & Atmospheric Administration) ESRL(Earth System Research Laboratory)のホームページよりダウンロードしました。ALERA2アンサンブル大気再解析データは独立行政法人海洋研究開発機構(JAMSTEC: Japan Agency for Marine-Earth Science and Tchnology)より提供していただきました。ERA Interimデータはヨーロッパ中期予報センター(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)のデータサーバーよりダウンロードしました。JCIDASデータは気象庁のホームページよりダウン

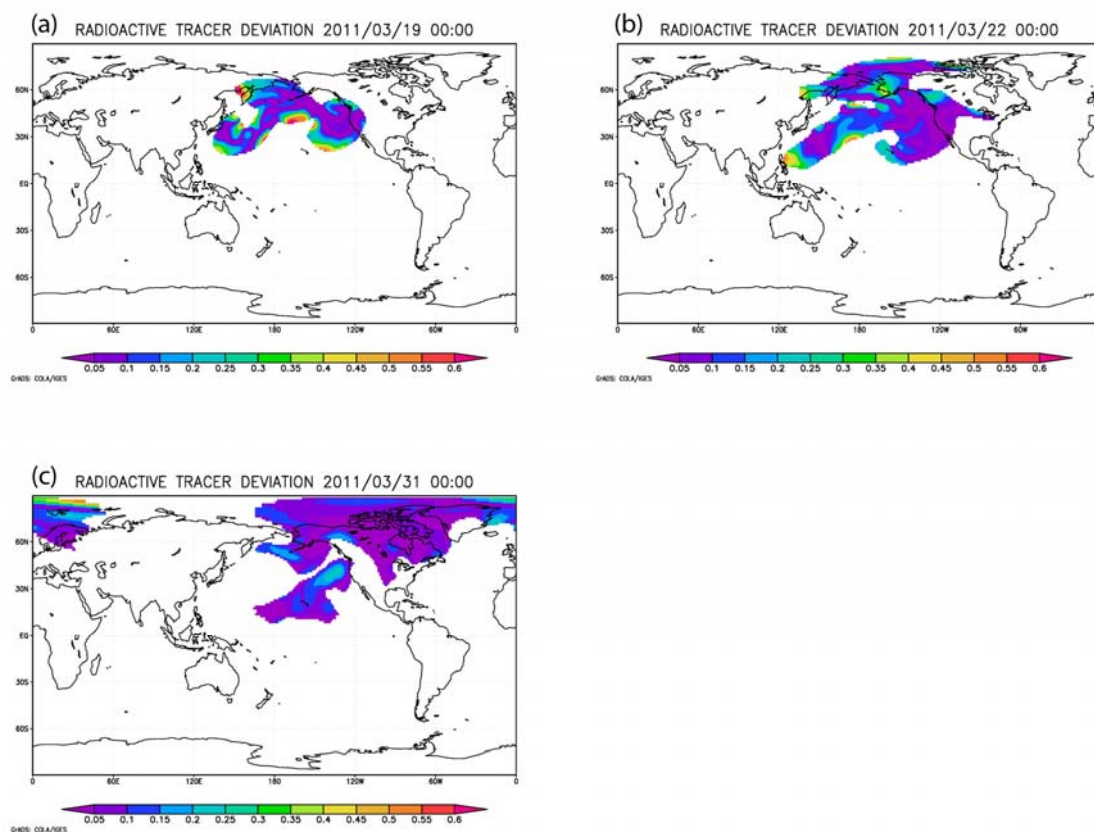


Fig. 5 Ratios between standard deviations and mean concentrations of simulated results using NCEP/NCAR data, the mean data of ALERA2 members, ERA Interim data, and JCIDAS data. Figures are of the lowest layer of the transport model at 00:00 Z on (a) March 19, (b) March 22, and (c) March 31. The ratios are calculated for the grid areas in which at least one result exceeds 1Bq/m^3 .

ロードしました。また、本論文で示した図はIGES (Institute of Global Environment and Society) COLA (Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies)のThe Grid Analysis and Display System (GrADS)を使用しました。以上の機関に感謝いたします。

参考文献

- 井口敬雄・木田秀次 (1999) : 3次元輸送モデルを用いた大気中における CO_2 収支の研究, 京都大学防災研究所年報, 第42号B-1, pp. 385-396.
- 梶野瑞王 他 (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年度秋季大会講演予稿集, A209.
- 加藤雅也 他 (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年度秋季大会講演

予稿集, A210.

原子力安全・保安院 (2011) : 東京電力株式会社福島第一原子力発電所の事故に係る1号機, 2号機及び3号機の炉心の状態に関する評価について, 6月6日プレス発表.

近藤裕昭 他 (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年度秋季大会講演予稿集, A207.

滝川雅之 他 (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年度秋季大会講演予稿集, A208.

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年度秋季大会講演予稿集, A206.

田中泰宙 他 (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年度秋季大会講演予稿集, A211.

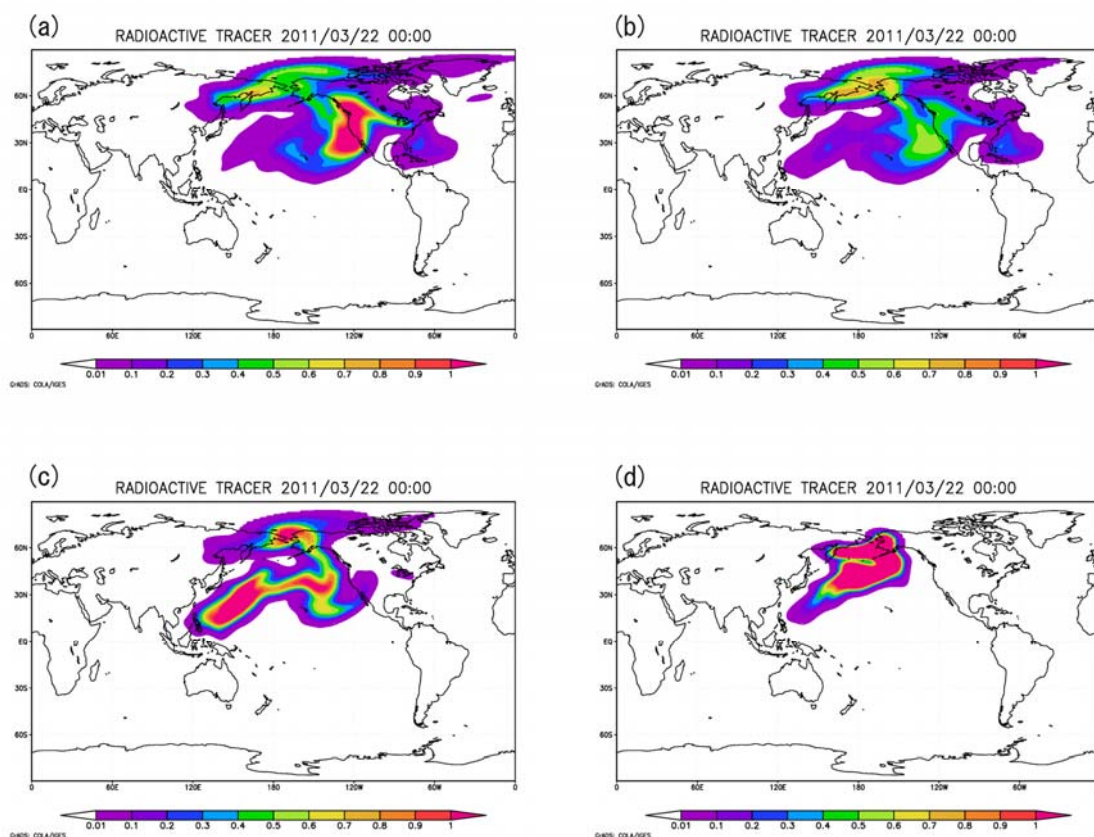


Fig. 6 Simulated concentrations of radioactive tracer in the lowest layer of the transport model using NCEP/NCAR reanalysis data at 00:00 Z on March 22, 2011, when the emissions day was (a) March 12, (b) March 14, (c) March 16, and (d) March 18.

眞木貴史 他 (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年度秋季大会講演予稿集, A204.

Bousquet, P., et al. (1999): Inverse modeling of annual atmospheric CO₂ sources and sinks: 1. Method and control inversion, *Journal of Geophysical Research*, 104(D21), 26161-26178.

Dee D. P. et al. (2011): The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Volume 137, Issue 656: 553-597, DOI: 10.1002/qj.828.

Enomoto T., T. Miyoshi, Q. Moteki, J. Inoue, M. Hattori, A. Kuwano-Yoshida, N. Komori, and S. Yamane (2012): Data Assimilation for Atmospheric, Oceanic and Hydrologic Applications, Vol. II, S. K. Park and L. Xu Eds., Springer, Submitted.

Enting, I., et al. (1995): A synthesis inversion of the concentration and $\delta^{13}\text{C}$ of atmospheric CO₂, *Tellus B*,

47, 35-52.

International Commission on Radiological Protection (1995): Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides - Part 4 Inhalation Dose Coefficients, ICRP Publication 71.

Kalnay, E., et al. (1996): The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77, 437-470.

Onogi K. et al. (2007): The JRA-25 Reanalysis. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 85, 369-432.

Takemura, T., et al. (2011): A numerical simulation of global transport of atmospheric particles emitted from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, *SOLA*, Vol. 7, 101-104, doi:10.2151/sola.2011-026.

(論文受理日 : 2012年6月8日)

Verification of Uncertainties in Simulation of Atmospheric Transport of Emitted Tracer from the Accident at Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant

Takao IGUCHI, Hitoshi MUKOUGAWA and Takeshi ENOMOTO

Synopsis

Uncertainties in a simulation of atmospheric transport of tracer emitted from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident due to reanalysis atmospheric data and estimation of the flux time series were verified. First of all, simulations using ALERA2 ensemble data sets those include analysis error showed standard deviations within 10% of their average values in most part of the area where concentrations exceed 1Bq/m³. Next, standard deviation values of results of simulations using ALERA2 mean data, NCEP/NCAR reanalysis data, ERA Interim data, and JCIDAS data were within 30% of their average values in most part of the area above. Results of simulations with 1-day flux on different dates showed quite different transport of the tracer.

Keywords: Fukushima Nuclear Power Plant accident, uncertainty of atmospheric transport, reanalysis atmospheric data, inverse method.