

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 9 日現在

機関番号：82109

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24340115

研究課題名(和文)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

研究課題名(英文) Ensemble data assimilation of radioactive nucleus tracers and sophisticated analysis of the tracers' advection-diffusion-deposition processes

研究代表者

関山 剛 (SEKIYAMA, Tsuyoshi)

気象庁気象研究所・環境・応用気象研究部・主任研究官

研究者番号：90354498

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究において、気象庁現業数値予報モデルを改良することによって精巧な放射性核種トレーサー移流拡散沈着モデルを開発した。さらにそのモデルをアンサンブルカルマンフィルターおよび気象庁現業気象観測データと組み合わせることによって(データ同化)、現業予報よりも高解像度の水平3kmグリッド気象解析値とそのアンサンブル摂動メンバーを作成することに成功した。このアンサンブル気象解析値を用いた移流拡散沈着シミュレーションによって、福島原発事故大気汚染の(おそらく世界最高精度での)再現実験とモデル誤差推定を行うことができた。以上により、本研究の当初目的はほぼ達成されたといえる。

研究成果の概要(英文)：We have developed a high-performance radioactive-tracer advection-diffusion-deposition model by improving the JMA operational numerical weather prediction (NWP) model in this research program. Combining the models, an ensemble Kalman filter, and the JMA operational observation dataset (i.e., data assimilation), we successfully produced a 3-km gridded meteorological analysis and its ensemble perturbation members, of which horizontal resolution is finer than the JMA operational NWP. The advection-diffusion-deposition simulations with the ensemble meteorological dataset enabled the Fukushima-nuclear-accident atmospheric pollution to be simulated at the highest precision level and the simulation error to be estimated by the ensemble analysis. We achieved the original goals of this research program almost completely.

研究分野：気象学

キーワード：データ同化 シミュレーション 大気化学 気象学 原子力事故

1. 研究開始当初の背景

大気化学輸送モデルは天気予報などに用いられる気象モデルに比べて一般的にシミュレーション精度が著しく低い。その原因の一部は大気微量成分の種類が多さと反応の複雑さであるが、それとともに重要な要因として大気微量成分の移流拡散沈着プロセスに関する我々人類の理解不足とこれらプロセス自体の不確実性が挙げられる。一方、シミュレーション精度の向上に有力なツールとしてデータ同化があり、大気化学分野でも徐々に利用されるようになってきた(例: Sekiyama et al., Atmos. Chem. Phys. 2010; SOLA 2011)。しかし、気象要素に比べると大気微量成分の観測データは圧倒的に少ないため、移流拡散沈着プロセスの不確実性を調べるのに十分な解析研究はこれまで困難であった。

このような状況下で福島第一原発事故が発生し、大量の放射性核種トレーサーが大気中へ放出された。このトレーサーは様々な研究機関・研究者らによる精力的な努力のおかげで、その移流拡散沈着プロセスの解明につながる大量の観測データを後世に残すことになった。すなわち、「核種ごとの半減期は厳密に定まっており、気温/気圧に依存しない」「今回の事故で放出された放射性核種は化学的に不活性なものが多い」「発生源=事故現場の緯度経度が確定している」「発生時間もかなりの精度で推定できる」という特徴を持っているトレーサーのため、その発生や変質についての不確実性が小さい。その一方で、放射性核種の測定限界濃度は驚異的に低いため、長距離にわたってその痕跡を追いかけることが可能である。

かつて関東大震災直後、(のちの首相)石橋湛山は、「災害は勿論悲しむべき出来事だが、努むべきは後の処置を誤らざることであり、再び同じような災害を被らないよう工夫をめぐらすことである。この災害は、随分苦い経験ではあったが、これを善用し将来に利用し得る形として保存しよう」と述べ、「此経験を科学化せよ」と広く訴えた。そして今再び、原発事故という不幸を伴って、大震災が起きた。我々科学者にはこの災害を科学化し、学問の発展と防災に貢献する責務がある。

2. 研究の目的

2011年3月に起きた福島第一原発事故は未曾有の環境汚染を引き起こしたが、大気へ放出された放射性核種の挙動は移流拡散沈着プロセスの不確実性が原因となって未だ全容がつかめておらず、正確なモデルシミュレーションも成功していない。そこで本研究では、

- ・最新の気象予報モデル、極めて詳細なトレーサー移流拡散沈着モデル、アンサンブル解析、そして4次元データ同化手法を駆使することによって、福島第一原発から放出された放射性核種の移流拡散沈着を詳細に追跡し、

- ・東日本各地に形成されたホットスポット(放射性核種の沈着量が高い領域)の分布をシミュレーション計算によって正確に再現し、その気象学的な生成原因を明らかにする。

3. 研究の方法

本研究計画ほどに詳細な大気微量成分の移流拡散沈着シミュレーションと数値解析はかつて無かったと思われる。それを可能とするのは原子1個までを追跡できるトレーサー、すなわち福島原発事故によって大気へ放出されてしまった放射性核種の利用である。本研究計画の方法論について概略を以下に述べる。

① 最新の現業用気象予報モデル JMA-NHM を力学フレームとして用い、気象場(特に降水分布)の再現精度を高める

② 放射性核種と環境エアロゾルとの相互作用およびそれらの乾性/湿性沈着プロセスを組み込んだトレーサーモデルを新規開発し、放射性核種の動態をその素過程から詳細にモデル化する

③ 上記2つのモデルにアンサンブル・カルマン・フィルタを組み合わせ、気象庁現業気象予報に使われていない気象観測(AMeDAS、NTTdocomo、TEPCO等によって取得された風向風速観測値)も同時にデータ同化することによって、境界層内のシミュレーション精度を格段に高める

④ このデータ同化結果をさらにアンサンブル解析することによって、決定論的モデルシミュレーションでは表現し切れない不安定な現象も確率論的に再現する

また、これらの数値シミュレーション研究をスムーズかつ高精度に進めるため、観測値(2011年3月における気象および放射性核種に関するあらゆる情報)の収集・分析も行う。

4. 研究成果

(1)

4年間の研究期間中に最新の大気化学的知見を反映させた領域化学輸送モデル(NHM-Chem)の開発・改良を行い、放射性核種の移流拡散沈着シミュレーションに特化したバージョンのNHM-Chemを完成させた。このモデルは気象庁の現業用メソ気象予報モデル JMA-NHM を力学フレームとして用い、オフラインもしくはオンライン処理によって大気微量成分およびエアロゾルの化学反応・移流拡散過程・乾性沈着過程・湿性沈着過程のシミュレーション計算を実行することができる。

この NHM-Chem モデルを用いて福島原発事故による大気汚染事象の詳細な再現シミュレーションを行い(例えば Adachi et al., 2013)、日本学術会議による福島モデル相互比較プロジェクトに参加することによってシミュレーション精度の客観的評価も実施した(Science Council of Japan, 2014)。また、NHM-Chem モデルシミュレーションを3通

りの異なる水平解像度（15km、3km、および500m）で実施することによって福島県内の複雑な山岳地形が移流拡散シミュレーションに与える影響を評価し、モデル解像度の差が福島においては看過できないほどの計算誤差を生むことを実証した (Sekiyama et al., J. Meteor. Soc. Japan 2015)。海外で多く行われている全球モデルによる福島原発事故シミュレーションの大多数は水平解像度が15kmもしくはそれ以上に粗いものであり、それらのモデル解像度では汚染の移流拡散沈着計算が全く信用できないものであることを指摘した意義は大きい。

(2)

移流拡散沈着シミュレーションに必要な気象格子点データ (GPV) には通常、各国の気象予報機関が作成した客観解析値を用いることが普通である。しかし、本研究では高解像度かつ通常では客観解析値作成には利用されない地上気象観測データ (AMeDAS等) を反映させた大気境界層重点型 GPV によって移流拡散沈着シミュレーションを行うため、自ら客観解析値の作成を行った。

気象客観解析値の作成にはデータ同化システムが必要であるが、本研究においては気象庁現業メソ気象予報モデル JMA-NHM と局所アンサンブル変換カルマンフィルターを組み合わせて開発された気象研究所独自のシステムを使用した。このデータ同化システムに気象庁現業データ同化用観測データセットと AMeDAS 観測網の風向風速データ (東日本全体で数百観測地点) を取り込むことによって水平解像度 3km、時間解像度 10 分の気象格子点データを作成した。

この気象格子点データは気象庁現業 GPV の解像度 (5km) よりも高解像度であるだけでなく、数日先の天気予報精度よりも時々刻々の大気境界層内の気象再現性能を重視して作成されたという点で特徴的である。これは福島原発事故による大気汚染プルームの大半が大気境界層内を移流拡散したことを踏まえて、その移流拡散過程の再現精度を高めることを目標としたためである。実際、本研究で作成された気象格子点データはフランス放射線防護・原子力安全研究所 (IRSN) の放射能影響予測専門家によって詳細な検証が行われ、各国政府気象機関の作成した GPV (気象庁の GPV も含む) に比べて福島原発事故シミュレーションの再現精度に関して有意に高い成績を出すことが示された。

(3)

本研究で用いたデータ同化システムはアンサンブルカルマンフィルターを用いたものであったため、気象解析値の他にそのアンサンブル摂動メンバーも同時に算出可能であった。この気象アンサンブルメンバーを利用して NHM-Chem による移流拡散沈着シミュレーションを実施し、福島原発事故汚染のアンサンブル解析を行った。メンバー数は 20 で実施した。

このアンサンブル解析の結果、移流拡散沈着シミュレーションの誤差は気象場の誤差に比べて短時間で遙かに大きく成長する傾向があることが判明した。これは風の小さな誤差が移流拡散において積算され、放出源から遠く離れた場所では物質濃度に大きな誤差を生み出しているためと考えられる。その一例を Figure 1 に示す。これは福島第 1 原子力発電所から 100km ほど離れた茨城県東海村において観測された Cs-137 濃度 (黒丸) とアンサンブルシミュレーション結果 (複数の細線) との比較である。一目してアンサンブルメンバー間の差が非常に大きいことが判る。また、通常のシミュレーション結果 (太点線) は観測値の再現に失敗している一方で、アンサンブルメンバーの幾つかはその再現に成功していることが判る。原子力事故由来の放射性物質に限らず、一般の大気汚染物質やエアロゾルの移流拡散シミュレーションにおいても本研究ほど詳細なアンサンブル解析を行った例はこれまでなく、世界初の例だと考えられる。この結果をまとめた論文は現在投稿中である。

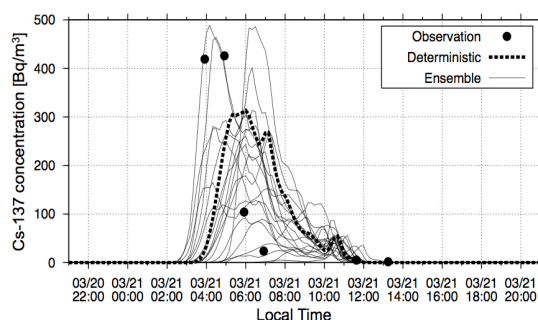


Figure 1. Cesium-137 concentrations at Tokai Village measured by the Japan Atomic Energy Agency (JAEA) and simulated by the 20 ensemble runs and the deterministic run from 21:00 March 20 to 21:00 March 21, 2011 local time.

まとめ

本研究によって得られた移流拡散沈着プロセスに関する知見は放射性核種特有のものではなく一般性が期待できるため、あらゆる大気物質循環モデリングに流用可能である。また、本研究で作成された放射性核種の移流・沈着量マップは他分野 (被曝量研究など) における基礎資料として活用可能である。

<引用文献>

Adachi, et al. (2013), Emission of spherical cesium-bearing particles from early stage of the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident in Japan, Scientific Reports, 3, 2554.

Sekiyama et al. (2010), Data assimilation of CALIPSO aerosol observations, Atmos. Chem. Phys., 10, 39-49.

Sekiyama et al. (2011), The Effects of Snow Cover and Soil Moisture on Asian Dust: II. Emission Estimation by Lidar Data Assimilation, SOLA, 7A, 40-43.

Sekiyama et al. (2015), Horizontal Resolution Dependence of Atmospheric Simulations of the Fukushima Nuclear Accident Using 15-km, 3-km, and 500-m Grid Models, *J. Meteor. Soc. Japan*, 93, 49-64.

Science Council of Japan (2014), 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, 103pp.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 31 件)

① Sekiyama, T. T., K. Yumimoto, T. Y. Tanaka, T. Nagao, M. Kikuchi, and H. Murakami (2016), Data Assimilation of Himawari-8 Aerosol Observations: Asian Dust Forecast in June 2015, *SOLA*, 12, 86-90, doi:10.2151/sola.2016-020. 査読有

② Aoyama, M., M. Kajino, T. Y. Tanaka, T. T. Sekiyama, D. Tsumune, T. Tsubono, Y. Hamajima, Y. Inomata, and T. Gamo (2016), ¹³⁴Cs and ¹³⁷Cs in the North Pacific Ocean derived from the March 2011 TEPCO Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident, Japan. Part Two: Estimation of ¹³⁴Cs and ¹³⁷Cs inventories in the North Pacific Ocean, *J. Oceanogr.*, 72, 67-76, doi:10.1007/s10872-015-0332-2. 査読有

③ Ishizuka, M., M. Mikami, T. Y. Tanaka, Y. Igarashi, K. Kita, Y. Yamada, N. Yoshida, S. Toyoda, Y. Satou, T. Kinase, K. Ninomiya, and A. Shinohara (2016), Use of a size-resolved 1-D resuspension scheme to evaluate resuspended radioactive material associated with mineral dust particles from the ground surface, *J. Environ. Radioact.*, in press, doi:10.1016/j.jenvrad.2015.12.023. 査読有

④ Hirose, K., Y. Kikawada, Y. Igarashi, H. Fujiwara, D. Jugder, Y. Matsumoto, T. Oi, and M. Nomura (2016), Plutonium, ¹³⁷Cs and uranium isotopes in Mongolian surface soils, *J. Environ. Radioact.*, in press, doi:10.1016/j.jenvrad.2016.01.007. 査読有

⑤ Sinha, P. R., L. K. Sahu, R. K. Manchanda, V. Sheel, M. Deushi, M. Kajino, M. G. Schultz, N. Nagendra, P. Kumar, D.

B. Trivedi, S. K. Koli, S. K. Peshin, Y. V. Swamy, C. G. Tzanis, and S. Sreenivasan (2016), Transport of Tropospheric and Stratospheric Ozone over India: Balloon-borne Observations and Modeling Analysis. *Atmos. Environ.*, 131, 228-242, doi:10.1016/j.atmosenv.2016.02.001. 査読有

⑥ Saito, K., T. Shimbori, R. Draxler, T. Hara, T. Toyoda, Y. Honda, K. Nagata, T. Fujita, M. Sakamoto, T. Kato, M. Kajino, T. T. Sekiyama, T. Y. Tanaka, T. Maki, H. Terada, M. Chino, T. Iwasaki, M. C. Hort, S. J. Leadbetter, G. Wotawa, D. Arnold, C. Maurer, A. Malo, R. Servranckx, and P. Chen, (2015), 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. Tech. Rep. MRI (気象研究所技術報告), 76, 230pp., doi: 10.11483/mritechrepo.76. 査読無

⑦ Kajino, M. and M. Aikawa (2015), A model validation study of the washout/rainout contribution of sulfate and nitrate in wet deposition compared with precipitation chemistry data in Japan, *Atmos. Environ.*, 117, 124-134, doi: 10.1016/j.atmosenv.2015.06.042. 査読有

⑧ Igarashi, Y., M. Kajino, Y. Zaizen, K. Adachi, and M. Mikami (2015), Atmospheric radioactivity over Tsukuba, Japan: A summary of three years of observations after the FDNPP Accident. *Progress in Earth and Planetary Science*, 2:44, doi:10.1186/s40645-015-0066-1. 査読有

⑨ Katata, G., M. Chino, T. Kobayashi, H. Terada, M. Ota, H. Nagai, M. Kajino, R. Draxler, M. C. Hort, A. Malo, T. Torii and Y. Sanada (2015), Detailed source term estimation of the atmospheric release for the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident by coupling simulations of atmospheric dispersion model with improved deposition scheme and oceanic dispersion model, *Atmos. Chem. Phys.*, 15, 1029-1070, doi:10.5194/acp-15-1029-2015. 査読有

⑩ Iwagami, S., M. Tsujimura, Y. Onda, M. Nishino, R. Konuma, Y. Abe, M. Hada, I. Pun, A. Sakaguchi, H. Kondo, M. Yamamoto, Y. Miyata, and Y. Igarashi (2015), Temporal changes in dissolved ¹³⁷Cs concentrations in groundwater and stream water in

Fukushima after the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident, *J. Environ. Radioact.*, in press, doi: 10.1016/j.jenvrad.2015.03.025. 査読有

⑪ Sekiyama, T. T., M. Kumii, M. Kajino, and T. Shimbori (2015), Horizontal Resolution Dependence of Atmospheric Simulations of the Fukushima Nuclear Accident Using 15-km, 3-km, and 500-m Grid Models, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 93, 49-64, doi: 10.2151/jmsj.2015-002. 査読有

⑫ Katata, G., M. Chino, T. Kobayashi, H. Terada, M. Ota, H. Nagai, M. Kajino, R. Draxler, M. C. Hort, A. Malo, T. Torii, and Y. Sanada (2015), Detailed source term estimation of the atmospheric release for the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident by coupling simulations of atmospheric dispersion model with improved deposition scheme and oceanic dispersion model, *Atmos. Chem. Phys.*, 15, 1029-1070, doi: 10.5194/acp-15-1029-2015. 査読有

⑬ 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 (2015), World Meteorological Organization's Evaluation of the Radionuclide Dispersion and Deposition from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident, *J. Environ. Radioact.*, 139, 172-184, doi:10.1016/j.jenvrad.2013.09.014. 査読有

⑭ Saito, K., T. Shimbori and R. Draxler (2015), JMA's Regional ATM calculations for the WMO Technical Task Team on meteorological analyses for Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident, *J. Environ. Radioact.*, 139, 185-199, doi:10.1016/j.jenvrad.2014.02.007. 査読有

⑮ Arnold, D., C. Maurer, G. Wotawa, R. Draxler, K. Saito and P. Seibert (2015), Influence of the meteorological input on the local and global atmospheric transport of radionuclides after the Fukushima Daiichi nuclear accident, *J. Environ. Radioact.*, 139, 215-225, doi: 10.1016/j.jenvrad.2014.02.013. 査読有

⑯ 齊藤和雄, 新堀敏基, 原旅人, 豊田英司, 加藤輝之, 藤田司, 永田和彦, 本田有機

(2014), 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, *気象庁測候時報*, 81, 1-30. 査読無

⑰ Adachi, K., Y. Zaizen, M. Kajino, and Y. Igarashi (2014), Mixing state of regionally transported soot particles and the coating effect on their size and shape at a mountain site in Japan, *Journal of Geophysical Research*, 119, 5386-5396, doi: 10.1002/2013JD020880. 査読有

⑱ Abe, Y., Y. Iizawa, Y. Terada, K. Adachi, Y. Igarashi, and I. Nakai (2014), Detection of uranium and chemical state analysis of individual radioactive microparticles emitted from the Fukushima nuclear accident using multiple synchrotron radiation X-ray analyses, *Analytical Chemistry*, 86(17), 8521-8525, doi: 10.1021/ac501998d. 査読有

⑲ Adachi, K., M. Kajino, Y. Zaizen, Y. Igarashi (2013), Emission of spherical cesium-bearing particles from early stage of the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident in Japan, *Scientific Reports*, 3, 2554, doi:10.1038/srep02554. 査読有

⑳ Kajino, M., Y. Inomata, K. Sato, H. Ueda, Z. Han, J. An, G. Katata, M. Deushi, T. Maki, N. Oshima, J. Kurokawa, T. Ohara, A. Takami, and S. Hatakeyama (2012), Development of the RAQM2 aerosol chemical transport model and predictions of the Northeast Asian aerosol mass, size, chemistry, and mixing type, *Atmos. Chem. Phys.*, 12, 11833-11856, doi:10.5194/acp-12-11833-2012. 査読有

[学会発表] (計 74 件)

① 五十嵐康人, 原発事故からの放射性セシウムの物理・化学性状, 日本放射線安全管理学会第14回学術大会, 2015年12月2日, 筑波大学(つくば市)

② Sekiyama, T., Ensemble dispersion simulation of the radioactive aerosol emitted from the Fukushima Daiichi nuclear power plant, 5th Annual Japanese Data Assimilation Workshop, 2015年2月27日, 計算科学研究機構(神戸市)

③ Sekiyama, T. T., Ensemble dispersion simulation of the radioactive aerosol emitted from the Fukushima Daiichi nuclear power plant, 95th American Meteorological Society annual meeting, 1 Jan 2015, Phoenix, USA

④ Sekiyama, T. T., Spatial resolution dependence of Fukushima radionuclide simulations using 15-km, 3-km, and 500-m grid models, 94th American Meteorological Society annual meeting, 3 Feb 2014, Atlanta, USA

⑤ 関山剛, 福島原発事故 Cs137 移流拡散シミュレーションのモデル解像度依存性, 日本気象学会 2013 年度秋季大会, 2013 年 11 月 20 日, 仙台国際センター(宮城県)

⑥ Sekiyama, T. T., Ensemble Simulation of the Atmospheric Radionuclides Discharged by the Fukushima Nuclear Accident, Goldschmidt 2013 Conference, 28 Aug 2013, Florence, Italy

⑦ Sekiyama, T. T., Ensemble Simulation of the Atmospheric Radionuclides Discharged by the Fukushima Nuclear Accident, EGU General Assembly 2013, 10 Apr 2013, Vienna, Austria

⑧ Sekiyama, T. T., Ensemble Simulation of Atmospheric Dispersion of Radionuclides During the Fukushima Nuclear Accident, 93rd American Meteorological Society annual meeting, 6 Jan 2013, Austin, USA

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

無し

6. 研究組織

(1) 研究代表者

関山 剛 (SEKIYAMA, Tsuyoshi)
気象庁気象研究所・環境・応用気象研究部・主任研究官
研究者番号：90354498

(2) 研究分担者

五十嵐 康人 (IGARASHI, Yasuhito)
気象庁気象研究所・環境・応用気象研究部・室長
研究者番号：90343897

眞木 貴史 (MAKI, Takashi)
気象庁気象研究所・環境・応用気象研究部・室長
研究者番号：50514973
出牛 真 (DEUSHI, Makoto)
気象庁気象研究所・環境・応用気象研究部・

主任研究官
研究者番号：00354499

(3) 連携研究者
梶野 瑞王 (KAJINO, Mizuo)
気象庁気象研究所・環境・応用気象研究部・主任研究官
研究者番号：00447939

田中 泰宙 (TANAKA, Yasumichi)
気象庁・地球環境・海洋部・化学輸送モデル開発推進官
研究者番号：50435591

斉藤 和雄 (SAITO, Kazuo)
気象庁気象研究所・予報研究部・部長
研究者番号：70391224