福島第一原子力発電所事故で放出された放射性物質の沿岸域における5カ年の挙動の再構築

津旨 大輔^{1*}・坪野 考樹¹・三角 和弘¹・
立田 穰¹・速水 洋¹・豊田 康嗣²・青山 道夫³

¹電力中央研究所 環境科学研究所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

²電力中央研究所 地球工学研究所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

³福島大学 環境放射能研究所 (〒960-1296 福島県福島市金谷川1番地)

* E-mail: tsumune@criepi.denken.or.jp

福島第一原子力発電所事故によって放射性物質が海洋に放出され、5年以上経過したが、漏洩はまだ継続している。大気からの降下と直接漏洩に加え、河川からの供給を考慮した領域海洋シミュレーションを行い、5年間の各期間において支配的な供給過程を明らかにし、海洋中の¹³⁷Cs濃度分布の変化を再構築した。

Key Words : Fukushima nuclear accident, Ocean model, ¹³⁷Cs, Direct release, Atmospheric deposition

1. はじめに

東日本大震災と津波による東京電力福島第一原子力発電所の事故により、海洋へ放射性物質が漏洩した。海洋における放射性物質濃度のモニタリングは継続され、海水の濃度低下が確認されているが、事故前の濃度までは低下していない。大気からの降下、計算領域外への降下分の流入、直接漏洩を考慮し、福島沖合の領域海洋モデルによって、事故後5年間のシミュレーションを実施し、それぞれの寄与率を見積り、沿岸域における挙動を把握した。

2. 方法

沿岸海洋モデル (ROMS, Shchepetkin, and McWilliams, 2005) にトレーサ計算機能を組み込み (坪野ら, 2010)、福島沖合海域 (35° 54' N- 40° 00' N, 139° 54' E- 147° 00' E) を対象に、水平解像度は1km、鉛直方向は σ 座標系で30層とし、水深1000m以深は計算対象外とした。駆動力として、気象庁のGSMを気象モデル(wrf, Skamarock, et al., 2008)で5kmメッシュに内挿するシステム(NuWFAS, 橋本ら, 2010)の結果を利用した。外洋域の流出入境界条件として、JCOPE2(Miyazawa et al., 2009)による再解析データを用いた。さらに福島沖合の複雑な流況を再現するため、JCOPE2の再解析データに対してNudgingを行った。計算対象核種は¹³⁷Csとした。計算期間は2011年3月から2015年9月末とした。直接漏洩率(Bq/day)は、ある一定期間に対し、単位量漏洩を想定したシミュレーション結果の濃度値(Bq/m³)(Bq/day)と観測結果(Bq/m³)の比

をとることによって求めた(津旨ら, 2011; Tsumune et al., 2012)。また、漏洩率の変化と濃度は比例関係にあるとした。大気からの降下と流入分は、大気モデル(速水ら, 2012)および北太平洋モデルの結果(Tsubono et al., 2016)より設定した。河川流量モデル(HYDREEMS, 豊田ら, 2009)による河川流量に河川の¹³⁷Cs濃度をかけることによって、河川からのフラックスの検討を行う。

3. 結果

福島第一原子力発電所近傍における海水中¹³⁷Cs濃度の測定結果を基に2015年9月までの直接漏洩率を求めた。直接漏洩率の推定結果は、2011年3月26日から4月6日までは 2.2×10^{14} Bq/dayであったが、その後指数関数的に減少し、2015年9月時点においては 10^9 Bq/dayのオーダーとなった。直接漏えい率は2011年11月以降、約4年間に亘り、一定の割合の指数関数的な減少を示している。直接漏えいの影響による¹³⁷Cs濃度の再現結果は、観測結果とよく一致した。シミュレーション結果によって推定された影響範囲は沿岸域に限定的であり、大半の海域において1960年代における大気圏核実験による¹³⁷Cs濃度を下回っていることが分かった。この結果は観測結果と整合的であった。¹³⁷Cs濃度は海流の影響によって変動しているため、海流の再現性の検証を実施した。2014年10月8日から12月10日および2015年4月22日から6月24日にかけて福島第一原子力発電所の前面海域においてADCPによる流速観測を実施した。流速の観測結果は沿岸に沿った南北成分が卓越しており、3-4日周期で南北成分が入れ替

わっていた。シミュレーションは流動の観測結果をよく再現できた。直接漏洩が開始される2011年3月26日以前において、大気からの降下のみを考慮した評価では、観測結果と比較して、 10^{14} Bq程度の供給が足りないと推定された(Tsumune et al., 2013)。ここで用いた大気への放出シナリオ(Terada et al., 2013)は、2倍程度過小評価であると指摘されているが(Aoyama et al., 2015; Tsubono et al., 2016)、領域海洋への降下過程の評価には不確実性が大きい。また、河川モデルを用い、初期の河川からの供給についても検討を行った。太平洋岸の河川の流域へ降下した ^{137}Cs の10%が流出するという過大な仮定によるシミュレーションにおいても過小評価を改善することは出来なかった。

4. おわりに

直接漏洩の推定結果と観測結果との比較・検証を行い、妥当性を確認した。大気から海洋への降下量が過小評価であることを示した。この理由として、大気への放出率の過小評価の可能性が指摘される。事故初期における大気から領域海洋への降下過程は未解明であり、大気モデルによる検討が必要であると考えられる。2011年3月21以前の初期の海水の観測データが存在しないため再構築の検証のためには、海生生物シミュレーション(Tateda et al., 2013)を用いた、海洋モニタリングが開始される前の海水濃度情報の再現も重要となる。

謝辞: 数値シミュレーションにおいて、(株)電力計算センターの田口富貴子氏、丹羽亮介氏の協力を得た。

参考文献

- 坪野 考樹、津旨 大輔、三角 和弘、吉田 義勝 (2010) : 地域海洋モデル ROMS を用いた物質拡散の計算法、電力中央研究所報告書、V09040。
- 津旨 大輔、坪野 考樹、青山 道夫、廣瀬 勝巳 (2011) : 福島第一原子力発電所から漏洩した ^{137}Cs の海洋拡散シミュレーション、電力中央研究所報告書、V11002。
- 豊田 康嗣、平口 博丸、杉本 聡一郎、橋本 篤(2009) : 気象予測モデルと連携した出水予測手法の開発—九州地方に襲来する台風事例—、電力中央研究所報告書、N08058。
- 橋本 篤、平口 博丸、豊田 康嗣、中屋 耕 (2010) : 温暖化に伴う日本の気候変化予測 (その1) -気象予測・解析システム NuWFAS の長期気候予測への適用-、電力中央研究所報告書、N10044。
- 速水 洋、佐藤 歩、津崎 昌東、嶋寺 光 (2012) : 福島第一

原子力発電所から放出された放射性物質の大気中輸送・沈着計算、電力中央研究所報告書、V11054。

- Misumi, K., Tsumune, D., Tsubono, T., Tateda, Y., Aoyama, M., Kobayashi T. and Hirose, K. (2014) : Factors controlling the spatiotemporal variation of ^{137}Cs in seabed sediment off the Fukushima coast: Implications from numerical simulations, *Journal of Environmental Radioactivity*, 136, 218-228, doi:10.1016/j.jenvrad.2014.06.004, 2014.
- Miyazawa, Y., Zhang, R., Guo, X., Tamura, H., Ambe, D., Lee, J-S., Okuno, A., Yoshinari, H., Setou, T., Komatsu, K. (2009) : Water mass variability in the western North Pacific detected in a 15-year eddy resolving ocean reanalysis, *Journal of Oceanography*, 65, 737-756.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M., Huang, H., Wang, W., Powers, J. G. (2008) : A description of the advanced research WRF version 3. NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR, 113pp.
- Shchepetkin, A. F. and McWilliams, J. C. (2005) : The Regional Ocean Modeling System (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography following coordinates oceanic model, *Ocean Modelling*, 9, 347-404. <https://www.myroms.org/>
- Tateda, Y., Tsumune, D., and Tsubono, T. (2013) : Simulation of radioactive Cs transfer in the southern Fukushima coastal biota by dynamic food chain transfer model, *Journal of Environmental Radioactivity*, 124, 1-12, 10.1016/j.jenvrad.2013.03.007.
- Tsubono, T., Misumi, K., Tsumune, D., Bryan, F. O., Hirose, K., Aoyama, M. : Evaluation of radioactive cesium Impact from Atmospheric Deposition and Direct Release Fluxes into the North Pacific from Fukushima Daiichi Nuclear Power Plants, Submitted to Deep Sea Research, accepted, 2016.
- Tsumune, D., Tsubono, T., Aoyama, M., and Hirose, K. (2012) : Distribution of oceanic ^{137}Cs from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant simulated numerically by a regional ocean model, *Journal of Environmental Radioactivity*, 111, 100-108, 10.1016/j.jenvrad.2011.10.007.
- Tsumune, D., Tsubono, T., Aoyama, M., Uematsu, K., Misumi, Y., Maeda, Y., Yoshida, and H. Hayami (2013) : One-year, regional-scale simulation of ^{137}Cs radioactivity in the ocean following the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident, *Biogeosciences*, 10, 5601-5617, doi:10.5194/bg-10-5601-2013.