

領域海洋モデルにおける物質循環評価に対する 河川影響

津旨 大輔^{1*}・坪野 考樹¹・三角 和弘¹・
立田 穰¹・豊田 康嗣²・恩田 裕一³・青山 道夫⁴

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)

⁴筑波大学 アイソトープ環境動態研究センター (〒305-8577 茨城県つくば市天王台1-1-1)

⁴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る海洋中の放射性物質濃度の再現計算において、直接漏洩と大気からの降下に加え、河川からの流入を考慮した。河川中の濃度の時系列変化は、いくつかの河川に対する懸濁態と溶存態のデータから、流域毎の降下インベントリに比例させて設定した。懸濁態は河口部に堆積するため、溶存態のみが海洋へ影響することとした。2012年以降の直接漏洩率の減少のみかけの半減期が約1年なのに対して、河川からの供給率の見かけの半減期は約2年であった。河川による淡水供給によって、南下流の強化が見られたが、観測地点においては有意な差とはならなかった。河川による¹³⁷Csの供給量は大きくないが、いくつかの観測点の濃度変化は、河川の供給量の時間変化と一致しており、河川からの供給を考慮することによって、見かけの半減期を再現することが出来た。ただし、再現された濃度は過小評価となっており、粒子態として供給された¹³⁷Csの海洋における溶脱の可能性を示唆している。福島事故由来の¹³⁷Csは、河川から海洋への物質供給過程のモデル化のためのトレーサとして有効であることが分かった。

Key Words : Fukushima nuclear accident, Regional ocean model, ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ³H, Direct release

1. はじめに

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。海洋への主な供給経路は大気からの降下と直接漏洩があり、その量と海洋中の挙動に関する見積もりが行われてきた。陸上に降下した放射性物質の河川を通じた流出については、各河川における研究が行われているが、海洋への影響については明らかになっていない。福島沖における¹³⁷Cs濃度の観測結果は事故前よりも高い値が継続している。その要因は継続している直接漏洩、河川からの供給、北太平洋に供給された¹³⁷Csの境界からの流入、の3つの影響が考えられ、その区別が難しいことも、未解明の要因の一つである。

ここでは、領域海洋モデルに対し、¹³⁷Csの直接漏洩と河川供給を考慮し、その影響を把握することを目的とした。河川から海洋への淡水や栄養塩などの供給過程のモデル化には課題が残されている。福島第一原子力発電所事故由来の¹³⁷Csが、河川から海洋への物質供給過程のモデル化のためのトレーサとして有効かどうかを確認することも目的の一つである。

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(NuWFEAS, 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、海洋中では水塊と同じ挙動を示すパッシブトレーサとして扱った。

福島第一原子力発電所近傍の¹³⁷Cs濃度 (Bq m⁻³) の観測値を、領域海洋モデル(ROMS)によって得られた単位漏洩率に対する放射性物質濃度 ((Bq m⁻³)/(Bq day⁻¹)) で除することによって、¹³⁷Csの直接漏洩率(Bq day⁻¹)を推定した(津旨ら, 2012; Tsumune et al., 2012; 2013)。

また、流出解析モデル(HYDREEMS; 豊田と平口, 2009)を用いて、宮城県、福島県、茨城県の河川流量を求めた。さらに、河川毎の溶存態¹³⁷Cs濃度を観測結果からの経

験的な回帰式から求めた(Onda et al., in revision)。各河川の流量と溶存態 ^{137}Cs 濃度を掛け合わせることによって、河川からのフラックスを求めた。「河川あり」と「河川なし」のそれぞれのケースの計算を行い、その差を比較した。

事故直後の河川の観測結果が得られていないため、計算期間は2013年1月から2015年12月末の3カ年とした。

3. 結果と考察

図1に福島第一原子力発電所前面海域における流動の観測結果計算結果の比較を示す。再現結果は、南北流成分が卓越し、3-4日周期で転流する現象をよく再現することが出来た。また、河川による淡水供給の影響によって、南下流が強化される現象が一部の期間で確認出来たが、その差は小さかった。つまり流動の再現性に対して、河川影響は小さいことが分かった。これは、福島第一原子力発電所近傍では、2級河川が多く、河川水の影響が少ないこと、南北流が入れ替わることによって、南流の強化の効果が見えにくいこと、などが要因と考えられる。

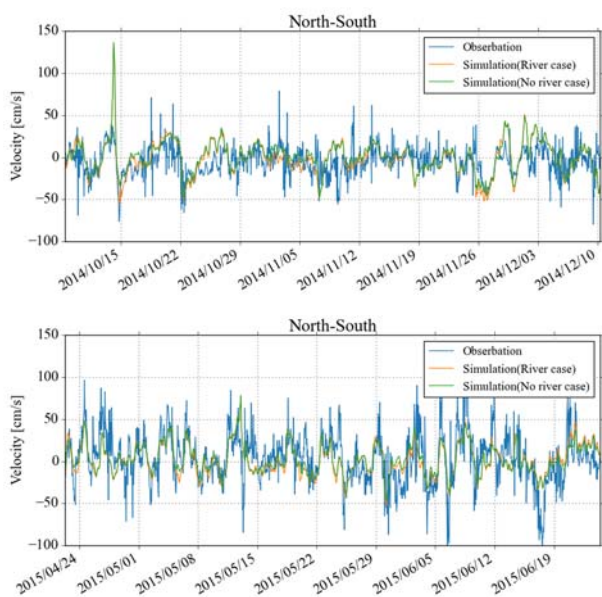


図1 福島第一原子力発電所近傍地点における南北成分の流動の観測結果と計算結果（「河川あり」と「河川なし」）。観測期間は2014年10月9日から12月10日、および2015年4月23日から6月24日。

福島沖においては、海流の南北成分が卓越し、中規模渦も存在するため、 ^{137}Cs の表層濃度分布形状は時系列に複雑に変化する。一方、年間平均分布を見ると、2013年、2014年、2015年で分布形状は北向きには沖合に広く、南向きには沿岸に沿う形であり、相似であった(図2)。ま

た、観測結果の年平均値との比較においてもよい一致を示すことが分かった。シミュレーション結果とよく一致することが分かった。つまり、瞬間的な分布の推定は困難であるが、年平均分布についての予測可能性が示された。河川供給によって、濃度上昇が見られたが、その差は有意なものではなかった。

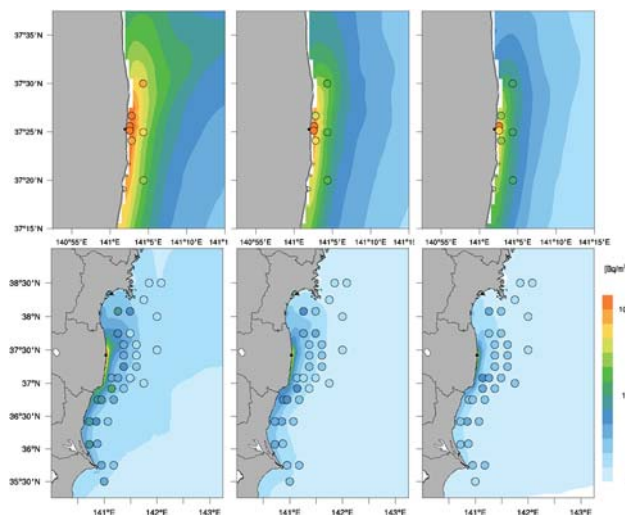


図2 福島沖における年間平均表層 ^{137}Cs 濃度分布。○は観測地点、その色は濃度を示す。左から2013年、2014年、2015年。

時系列変化において、2013年以降の直接漏洩率減少の見かけの半減期が0.95年であった。一方、河川供給率の見かけの半減期は2.39年であった。海洋観測点の ^{137}Cs 濃度の見かけの半減期は、直接漏洩と境界からの流入に加え、河川の供給率の影響を受けており、地点においてその値が異なっていた。つまり、直接漏洩の影響を受ける海洋観測点の ^{137}Cs 濃度の見かけの半減期は約1年であり、河川影響を受ける海洋観測点では約2年であった。また、外洋においては北太平洋の広域への大気降下の影響を受けているため、見かけの半減期は5年以上となっていた。相馬における海洋観測点の見かけの半減期は、約2年であり、この地点においては直接漏洩の影響は小さく、河川の影響が大きいと考えられる。河川からの供給を考慮したシミュレーションは、河川の影響が大きい、相馬沖の観測点における見かけの半減期を再現することが出来た。ただし、 ^{137}Cs 濃度のシミュレーション結果は一桁程度過小評価となっており、河川からの供給率の推定に対する改良の必要性が示唆された。

4. おわりに

直接漏洩を考慮した領域海洋モデルによる ^{137}Cs の再現計算は、2013年から2015年の観測結果の分布および

時系列変化をよく再現することが出来た。また、この再現計算において、河川の影響を考慮しても、その効果は小さかった。一方、 ^{137}Cs 濃度の見かけの半減期の解析から、相馬沖においては、直接漏洩の影響が小さく、河川の影響を受けていることが分かった。再現計算結果は、見かけの半減期を再現することが出来たが、その値は、一桁程度過小評価となっていた。

河川からの供給フラックスを増やすため、特に、河川から海洋へ供給された粒子態 ^{137}Cs からの溶脱プロセスの解明が求められる。また、河口部の塩水くさびをモデル化し、河川水の海洋への供給過程の詳細なモデル化 (Estuary Box Model, Qiang et al., 2017) も課題の一つとなる。

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、宮田かおり氏の協力を得た。

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 (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.
- 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.
- Onda, Y., et al., Land use predicts terrestrial recovery from Fukushima fallout, in revision.
- 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/>
- Tsubono, T., Misumi, K., Tsumune, D., Bryan, F. O., Hirose, K., Aoyama, M. (2016) : 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 I, 115, 10-21.
- 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., T. Tsubono, M. 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.
- Qiang, S., M. M. Whitney, F. O. Bryan, T. Yu-heng (2017) : A box model for representing estuarine physical processes in Earth system models, *Ocean Modelling*, 112, 139–153, doi: 10.1016/j.ocemod.2017.03.004.