

## 43. 福島第一原子力発電所事故によって海洋に放出された放射性セシウムの1年間の挙動

津旨 大輔<sup>1\*</sup>・坪野 考樹<sup>1</sup>・青山 道夫<sup>2</sup>・植松 光夫<sup>3</sup>  
三角 和弘<sup>1</sup>・前田 義明<sup>1</sup>・吉田 義勝<sup>1</sup>・速水 洋<sup>1</sup>

<sup>1</sup>電力中央研究所 環境科学研究所 (〒277-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

<sup>2</sup>気象研究所 地球化学部 (〒305-0052 茨城県つくば市長峰1-1)

<sup>3</sup>東京大学 大気海洋研究所 (〒277-8564 千葉県柏市柏の葉5-1-5)

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

福島第一原子力発電所の事故によって、放射性物質が海洋に放出された。海洋への供給経路として、大気からの降下、直接漏洩、計算領域外への降下分の流入を考慮し、福島沖合の領域海洋モデルによって、1年間のシミュレーションを実施した。シミュレーションと観測結果との比較から、<sup>131</sup>I, <sup>134</sup>Cs, <sup>137</sup>Csに対して、一年間の直接漏洩シナリオを推定した。推定された総量は、それぞれ $11.1 \pm 2.2$  PBq,  $3.5 \pm 0.7$  PBq, and  $3.6 \pm 0.7$  PBqとなった。<sup>131</sup>I/<sup>137</sup>Cs放射能比の解析や数値シミュレーションの比較から、大気からの降下、直接漏洩、流入のそれぞれの寄与率を見積もった。直接漏洩の影響による<sup>137</sup>Cs濃度はよく再現できた。このことから直接漏洩の推定は妥当であると考えられる。一方、大気からの降下の影響による<sup>137</sup>Cs濃度のシミュレーション結果は過小評価となった。大気から海洋への降下についての見積もりにはデータの少なさから不確実性が多く今後の課題となる。今回対象とした海洋における観測結果は、大気から海洋への降下の推定に役立つものである。広域への大気からの降下の流入の影響による<sup>137</sup>Cs濃度はよく再現された。流入の影響は時間がたつにつれて、支配的となり、2012年2月末の時点では99%以上を占めていた。一方、直接流入の影響は沿岸域に見られるのみであった。

**Key Words :** Fukushima Daiichi NPP accident, <sup>137</sup>Cs, Oceanic Pollution, Regional Ocean model, Direct release rate

### 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、濃度低下が確認されている。海洋には過去の大気圏核実験によって<sup>137</sup>Csなどの放射性物質（フォールアウト）が降下して存在しており、福島事故前のシミュレーションも行われていた（Tsumune et al., 2011）。福島事故の影響によって北太平洋の全域に濃度増加が見られた（Aoyama et al., 2012; 2013）が、海生生物への影響は小さい。

ここでは海生生物の影響も継続している福島沖合スケールを対象とする。モニタリング結果を補間し、現象解明に資するためには数値モデルによる再現シミュレーションは有効である。これまでに、観測された<sup>131</sup>I/<sup>137</sup>Cs放射能比の分析によって、大気からの降下と直接漏洩の影響を区別し、拡散シミュレーション結果と観測値を比較することによって、<sup>137</sup>Csの

直接漏洩量の時系列変化とその総量（2011年3月26日から5月末までで $3.5 \pm 0.7$  PBq ( $\times 10^{15}$  Bq)）が推定された（津旨ら、2012, Tsumune et al., 2012）。また、シミュレーション結果は、放出量の減少に伴う、濃度低下を再現している。

海水濃度は減少しているが、海底土の濃度の減少速度は海水と比べて遅く、さらなる注視が必要となる。また、海生生物においても、事故後2年が経過しても基準濃度を超えるケースが継続しており、海水や海底土からの移行メカニズムの解明が望まれている。そのためには今後、海底土や海生生物に対してのモデル研究も有効であると考ええる。海生生物に対するモデル計算は実施されており、食物連鎖を考慮し、福島沖の魚種毎の汚染度の低減率の再現に成功している（Tateda et al., 2013）。しかし、広域の再現には、海水濃度の再現性の向上が望まれている。これらのモデルは、海水濃度のモデル結果をベースとするため、海水濃度のモデルの再現性の向上および検証が重要となる。

海水濃度のモデル計算のもととなる直接漏洩量の推定結果も複数公表されており、その推定結果のばらつきも大きい (Masumoto et al., 2012; 表 1)。推定結果は福島第一原子力発電所近傍のモニタリングデータをもとにしているが、数値シミュレーションによって他のモニタリングデータとの比較検証を行うことによって、その妥当性を検証することが重要である。また、大気から海洋への降下量は、海洋の観測データによって検証されていない。

海洋への供給経路として、大気からの降下、直接漏洩、計算領域外への降下分の流入を考慮し、福島沖合の領域海洋モデルによって、1 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もった。本論文は既発表の論文 (Tsumune et al., 2013) をベースとしている。

## 2. 方法

再現シミュレーションでは、沿岸海洋モデル (ROMS; Shchepetkin and McWilliams, 2005) を用いた海洋トレーサ計算手法 (坪野ら、2010) を用いた。福島沖合海域を対象に、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(NuWFS)の結果 (橋本ら、2010) 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 $^{137}\text{Cs}$  とした計算期間は2011年3 月から2012年2 月末とした。

直接漏洩シナリオは、Tsumune et al. (2012) の推定結果に対して、福島第一原子力発電所近傍のモニタリングデータから指数関数的な減少カーブを求め、2012年2 月末まで延長させた。 $^{131}\text{I}$ 、 $^{134}\text{Cs}$ 、 $^{137}\text{Cs}$  に対して推定された総量は、それぞれ $11.1 \pm 2.2 \text{ PBq}$ 、 $3.5 \pm 0.7 \text{ PBq}$ 、and  $3.6 \pm 0.7 \text{ PBq}$  となった。また、大気からの降下シナリオについては、放射性物質の大気中濃度と沈着量の計算には、大気質モデルCAMx (Comprehensive Air Quality model with extensions) ENVIRON International Corporation, 2009) バージョン5.20.1 22)を使用した (速水ら、2012)。2011 年4 月末 (日本時間) までの総放出量は $^{137}\text{Cs} = 8.8 \times 10^{15} \text{ Bq}$  に見直された推定結果を用いた (Terada et al., 2012)。

## 3. 結果と考察

直接漏洩の影響による $^{137}\text{Cs}$  濃度の再現計算結果は、観測結果とよく一致した。このことから直接漏洩の推定は妥当であると考えられる。一方、大気からの降下の影響による $^{137}\text{Cs}$  濃度のシミュレーション結果は過小評価となった。大気から海洋への降下についての見積もりにはデータの少なさから不確実性が多く今後の課題となる。今回対象とした海洋における観測結果は、大気から海洋への降下の推定に役立つものである。広域への大気からの降下の流入の影響による $^{137}\text{Cs}$  濃度はよく再現された。流入の影響は時間がたつにつれて、支配的となり、2012 年2 月末の時点では99%以上を占めていた。一方、直接流入の影響は沿岸域に見られるのみであった。2011 年6 月に福島沖の比較的広い海域における観測航海で見積もられた $^{137}\text{Cs}$  のインベントリは $1.9\text{--}2.1 \text{ PBq}$  であった (Buesseler et al., 2012)。シミュレーションによる見積もり結果は $1.6 \text{ PBq}$  とやや過小評価となった。これは大気からの降下量が過小評価であることと整合的である。このインベントリに対する直接漏洩、大気からの降下、流入の寄与率はそれぞれ約60%、約10%、約30%であった。

## 4. まとめ

現象解明のためには、鉛直分布なども含めた、より多面的な観測結果と比較検証が必要となる。本シミュレーションの精度向上のためには、大気からの降下シナリオの改良、河川からの淡水フラックスの考慮などが課題となる。モデルによるシミュレーション結果は不確実性が伴うため、今後、ある程度条件を統一したモデル間の相互比較が望ましい。

謝辞：北海道大学池田元美名誉教授を初めとする日本海洋学会震災対応WG数値モデリングSWGのメンバーから貴重な助言を得た。リアルタイム気象予測システム (NuWFS) のデータの利用においては、電中研の平口博丸上席研究員と橋本篤主任研究員の協力を得た。数値シミュレーションにおいて電力計算センターの田口富貴子氏と丹羽亮介氏の助力を得た。ここに合わせて感謝する。シミュレーションには、電中研の大型計算機システム (SGI Altix ICE) を用いた。

## 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 $^{137}\text{Cs}$ の海洋拡

- 散シミュレーション、電力中央研究所報告書、V11002.
- 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.
- Aoyama, M., Tsumune, D., and Hamajima, Y.: Distribution of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{134}\text{Cs}$  in the North Pacific Ocean: impacts of the TEPCO Fukushima-Daiichi NPP accident, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 1-5, 10.1007/s10967-012-2033-2, 2012.
- Aoyama, M., Uematsu, M., Tsumune, D., and Hamajima, Y.: Surface pathway of radioactive plume of TEPCO Fukushima NPP1 released  $^{134}\text{Cs}$  and  $^{137}\text{Cs}$ , *Biogeosciences*, 10, 3067-3078, doi:10.5194/bg-10-3067-2013, 2013.
- Bailly du Bois, P., Laguionie, P., Boust, D., Korsakissok, I., Didier, D., and Fiévet, B.: Estimation of marine source-term following Fukushima Dai-ichi accident, *Journal of Environmental Radioactivity*, 114, 2-9, 10.1016/j.jenvrad.2011.11.015, 2012.
- Buesseler, K. O., Jayne, S. R., Fisher, N. S., Rypina, I. I., Baumann, H., Baumann, Z., Breier, C. F., Douglass, E. M., George, J., and Macdonald, A. M.: Fukushima-derived radionuclides in the ocean and biota off Japan, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109, 5984-5988, 2012.
- ENVIRON International Corporation, CAMx USER'S GUIDE, pp.280, 2009.
- Estournel, C., E. Bosc, M. Bocquet, C. Ulses, P. Marsaleix, V. Winiarek, I. Osvath, C. Nguyen, T. Duhaut, F. Lyard, H. Michaud, F. Auclair: Assessment of the amount of Cesium-137 released into the Pacific Ocean after the Fukushima accident and analysis of its dispersion in Japanese coastal waters, *J. Geophys. Res.*, 117, C11014, doi:10.1029/2012JC007933, 2012.
- Japanese Government, Report of Japanese Government to the IAEA Ministerial Conference on Nuclear Safety - The Accident at TEPCO's Fukushima Nuclear Power Stations -, 2011. [http://www.kantei.go.jp/foreign/kan/topics/201106/iaea\\_houkokusho\\_e.html](http://www.kantei.go.jp/foreign/kan/topics/201106/iaea_houkokusho_e.html) (last access: 20 December 2012)
- Kawamura, H., Kobayashi, T., Furuno, A., In, T., Iishikawa, Y., Nakayama, T., Shima, S., and Awaji, T.: Preliminary Numerical Experiments on Oceanic Dispersion of  $^{131}\text{I}$  and  $^{137}\text{Cs}$  Discharged into the Ocean because of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Disaster, *Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY*, 48, 1349-1356, 80/18811248.2011.9711826, 2011.
- Masumoto, Y., Miyazawa, Y., Tsumune, D., Tsubono, T., Kobayashi, T., Kawamura, H., Estournel, C., Marsaleix, P., Lanerolle, L., Mehra, A., and Garraffo, Z. D.: Oceanic Dispersion Simulations of  $^{137}\text{Cs}$  Released from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, DOI: 10.2113/gselements.8.3.207, *ELEMENTS*, 8, 207-212, 2012.
- Miyazawa, Y., Zhang, R., Guo, X., Tamura, H., Ambe, D., Lee, J-S., Okuno, A., Yoshinari, H., Setou, T., Komatsu, K.: Water mass variability in the western North Pacific detected in a 15-year eddy resolving ocean reanalysis, *Journal of Oceanography*, 65, 737-756, 2009.
- Miyazawa, Y., Masumoto, Y., Varlamov, S. M., Miyama, T., Takigawa, M., Honda, M., and Saino, T.: Inverse estimation of source parameters of oceanic radioactivity dispersion models associated with the Fukushima accident, *Biogeosciences*, 10, 2349-2363, doi:10.5194/bg-10-2349-2013, 2013.
- Rypina, I. I., Jayne, S. R., Yoshida, S., Macdonald, A. M., Douglass, E., and Buesseler, K.: Short-term dispersal of Fukushima-derived radionuclides off Japan: modeling efforts and model-data intercomparison, *Biogeosciences Discuss.*, 10, 1517-1550, doi:10.5194/bgd-10-1517-2013, 2013.
- Shchepetkin, A. F., McWilliams, J. C.: The Regional Ocean Modeling System (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography following coordinates oceanic model, *Ocean Modelling*, 9, 347-404, 2005.
- 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.
- Tateda, Y., Tsumune, D., and Tsubono, T.: 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, 2013.
- Terada, H., G. Katata, M. Chino, and H. Nagai: 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, 2012.
- Tsumune, D., Aoyama, M., Hirose, K., Bryan, F. O., Lindsay, K., and Danabasoglu, G.: Transport of  $^{137}\text{Cs}$  to the Southern Hemisphere in an ocean general circulation model, *Progress In Oceanography*, 89, 38-48, 10.1016/j.pocean.2010.12.006, 2011.
- Tsumune, D., Tsubono, T., Aoyama, M., and Hirose, K.: Distribution of oceanic  $^{137}\text{Cs}$  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, 2012.
- Tsumune, D., Tsubono, T., Aoyama, M., Uematsu, M., Misumi, K., Maeda, Y., Yoshida, Y., and Hayami, H.: One-year, regional-scale simulation of  $^{137}\text{Cs}$  radioactivity in the ocean following the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident, *Biogeosciences*, in press.

Table 1. Estimated total amount of  $^{137}\text{Cs}$  activity directly released into the ocean by release scenario

| Organi-<br>zation               | Period                                       | Total amount of<br>directly<br>released $^{137}\text{Cs}$<br>(PBq)                                      | Method                                                                                                                                                                                              | References                        |
|---------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| CRIEPI                          | 26 Mar 2011<br>to 31 May<br>2011             | $3.5 \pm 0.7$                                                                                           | Inverse method based on<br>averaged measured activity<br>from 26 Mar to 6 Apr<br>adjacent to the 1F NPP*                                                                                            | Tsumune et<br>al., 2012           |
| CRIEPI                          | 26 Mar 2011<br>to 29 Feb<br>2012             | $3.6 \pm 0.7$<br>( $11.1 \pm 2.2$ for<br>$^{131}\text{I}$ ,<br>$3.5 \pm 0.7$ for<br>$^{134}\text{Cs}$ ) | Based on the method by<br>Tsumune et al. (2012) and<br>expanded                                                                                                                                     | Tsumune et<br>al., 2013           |
| TEPCO                           | Noon 1 April<br>2011 to Noon<br>6 April 2011 | 0.94                                                                                                    | Flow rate estimated by visual<br>observation $\times$ measured<br>activity of contaminated water                                                                                                    | Japanese<br>Government<br>, 2011  |
| TEPCO                           | 26 Mar 2011<br>to 30 Sep<br>2011             | 3.6<br>(11 for $^{131}\text{I}$ ,<br>3.5 for $^{134}\text{Cs}$ )                                        | Based on the method by<br>Tsumune et al. (2012) and<br>expanded                                                                                                                                     | TEPCO,<br>2012                    |
| JAEA                            | 21 Mar 2011<br>to 30 April<br>2011           | 4<br>(11 for $^{131}\text{I}$ )                                                                         | Based on the estimation by<br>TEPCO (1–6 Apr) and the<br>expansion period (21 Mar to<br>30 Apr) in proportion to<br>measured activity adjacent to<br>the 1F NPP*                                    | Kawamura<br>et al., 2011          |
| Miyaza<br>wa et<br>al.,<br>2013 | 21 Mar 2011<br>to 30 April<br>2011           | 5.5–5.9                                                                                                 | Inversion method based on<br>measured activity mainly<br>adjacent to the 1F NPP* and<br>others                                                                                                      | Miyazawa et<br>al., 2013          |
| IRSN                            | 25 Mar 2011<br>to 18 Jul<br>2011             | 27<br>(12–41)                                                                                           | Estimation of inventory in the<br>ocean by observations (11 Apr<br>to 30 Jun) and the expansion<br>period (25 Mar to 18 Jul) in<br>proportion to measured<br>activity adjacent to the 1F<br>NPP*    | Bailly du<br>Bois et al.,<br>2012 |
| Sirocco                         | 20 Mar 2011<br>to 30 June<br>2011            | 5.1–5.5                                                                                                 | Inversion method based on<br>measured activity adjacent to<br>the 1F NPP*                                                                                                                           | Estournel et<br>al., 2012         |
| Rapina<br>et al.,<br>2013       | 21 Mar 2011<br>to 30 June<br>2011            | $16.2 \pm 1.6$                                                                                          | Minimizing the model-data<br>mismatch based on the KOK<br>cruise data (4–18 Jun) and the<br>expansion period (25 Mar to<br>18 Jul) in proportion to<br>measured activity adjacent to<br>the 1F NPP* | Rapina et<br>al., 2013            |

\* Adjacent to the 1F NPP ; at the 5,6 and south discharge canal