

6. 福島第一原子力発電所から放出された ^{134}Cs の北太平洋における拡散

坪野 考樹^{1*}・三角 和弘¹・津旨 大輔¹・青山 道夫²

¹一般財団法人電力中央研究所 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: tsubono@criepi.denken.or.jp

福島第一原子力発電所事故時に放出された ^{134}Cs の北太平洋における拡散状況を把握するために、領域モデルであるROMSを用いて、2011年3月から2014年2月までの計算を実施した。計算結果は、表層で観測された ^{134}Cs の濃度を良く再現できており、事故後3年間について ^{134}Cs の拡散状況が把握できた。表層における ^{134}Cs は、半減期、環境水との混合、および沈み込みにより、濃度が、2014年2月までに 1 Bq m^{-3} のオーダーまで低減し、その大部分が北太平洋西部に位置する。亜表層まで沈み込んだ ^{134}Cs を含む水塊は、表層と同様に北太平洋西部に位置し、2014年以降亜熱帯・亜寒帯循環により南北に分岐して拡散していくと予想される。

Key Words : ^{134}Cs Activity, North Pacific Ocean, Regional Ocean Modeling Systems

1. はじめに

2011年3月11日に発生した津波により、福島第一原子力発電所（以降、1F NPPと記述）において事故が発生し、 ^{137}Cs 、 ^{134}Cs などの放射性物質が放出され、それら物質は北太平洋に拡散した。

海域に拡散した放射性物質の大半は、水素爆発により大気から海面に降下したものと、発電所からの汚染水が港内取水口近傍から直接漏えいしたものである。

これらの海洋に拡散した ^{137}Cs の総量は、大気へ放出された $9\text{PBq}^{1)}$ のうち、大気からの降下量が $6.4\text{PBq}^{2)}$ と推定されている。また直接漏えいの総量は $3.6\pm 0.7\text{PBq}^{3)}$ と推定されている。そして、 ^{134}Cs の海洋に拡散した総量は、 ^{137}Cs と同程度である²⁾。

本研究では、事故後、北太平洋において放射性Csがどのように拡散したかを把握するために、数値計算を実施した。

2. 数値モデルの概要

本研究所では、地域海洋モデルであるROMを用いて、

Csの拡散挙動を計算した。計算領域を 20°S - 65°N 、 109°E - 75°W の北太平洋領域とし、日本周辺を $1/12^{\circ}$ 、その他領域を $1/4^{\circ}$ の可変メッシュのグリッドを採用した。境界条件に気候値を用いて、北太平洋の気候的な状態を再現した。また、海氷モデルの代わりに、海氷の発達する領域を観測値に同化する手法を用いた。

本研究では、放射性Csのうち、 ^{134}Cs の拡散について計算を実施した。その理由は、 ^{137}Cs の半減期が約30年に対して、 ^{134}Cs が約2年であり、核実験で北太平洋に大量に降下した ^{137}Cs の影響が2011年の事故前においても観測されるのに対して、 ^{134}Cs では完全に消滅しており、その濃度が0であることから、事故によって放出された放射性Csの北太平洋上の影響を把握しやすいためである。

^{134}Cs の計算は以下のように実施した。まず、北太平洋の流動状態について30年のスピニングアップした。そののち、事故後に北太平洋に拡散された ^{134}Cs の計算を3年間分(201103-201402)実施した。ただし、駆動力について気候値を用いていることから、 ^{134}Cs の拡散時期を1年ずつシフトして3年間分の計算を9回実施する、アンサンブル計算を実施した。

^{134}Cs の計算結果の評価については、9メンバーの平均値を用いた。

3. 計算結果

(1) 表層における ^{134}Cs の分布

図-1に表層における ^{134}Cs の濃度結果を示す。図は事故後1年後（2012）および2年後（2013）の3月の結果を示している。事故後1年後、福島からの ^{134}Cs は 135°W まで到達し、 30°N から 45°N の間に分布している。また、事故後2年後では、濃度が半減期による影響と環境水との混合による影響により、2012年と比較して半分程度に減少し、濃度 2 Bq m^{-3} 以上の水塊が 40°N を挟んで 165°E から 140°W に分布している。

(2) 表層における ^{134}Cs の観測結果との比較

図-2に表層で計測された観測結果と計算結果の比較を示す。ここに、白丸が2011年（88箇所）、黒四角が2012年（70箇所）に計測された値を示す。黒直線は、 $\text{obs.}=\text{cal.}$ を示し、灰色点線は、最小二乗法で得られた勾配が1.85の回帰直線を示す。

両者の比較では、 R が0.84と高い相関を示し、計算

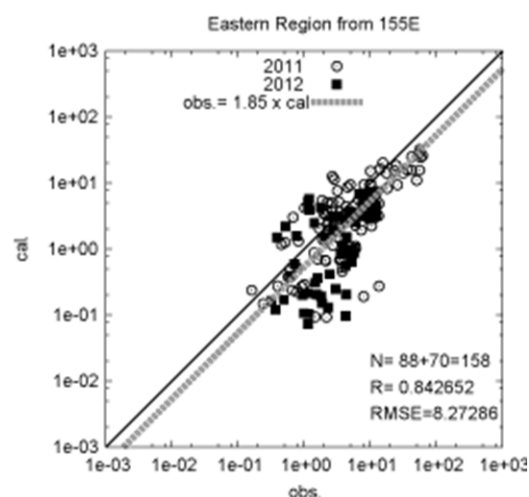


図-2 表層で計測された観測結果と計算結果の比較

結果が観測結果を良く再現できていることが示されている。

最小二乗法で得られた勾配1.85は、今回の計算で北太平洋に流入した ^{134}Cs のフラックスが十分ではないことを示しており、フラックスを1.85倍すると、計算結果が観測結果に対して改善されることを意味する。

両者の誤差RMSEは、 8.3 Bq m^{-3} となった。ここで、北太平洋に流入する ^{134}Cs の時間的な変化が同じであると仮定すると、フラックスの値そのものを1.85倍して得られる計算結果は、図-2の計算結果を1.85倍した値と変わらない。このことから、フラックスを1.85倍、つまり計算で得られた濃度を1.85倍した結果を用いてRMSEを計算すると、RMSEは 6.2 Bq m^{-3} となり、より再現性の高い結果が得られた。

(3) 2014年2月における ^{134}Cs の分布

図-3に表層および $\sigma=26.0$ の水深における ^{134}Cs の濃度結果を示す。ここに、 $\sigma=26.0$ の水深は亜表層（200~400m）の位置である。

事故後3年後の表層では、図-1 b) の2013年の濃度よりもさらに低減しており、濃度 1 Bq m^{-3} 以上の水塊が、北太平洋西部に位置する。また、 $\sigma=26.0$ の水深における ^{134}Cs も、北太平洋西部に位置するが、濃度 2 Bq m^{-3} 以上の水塊が見られ、表層よりも高濃度となる。

亜表層の濃度が表層の結果と比較して、高濃度となる結果から、事故直後に表層にあった ^{134}Cs が海洋下部に沈み込んでいることが分かる。

北太平洋の 40°N 、 $165^\circ\text{E} \sim 180^\circ\text{E}$ 付近では、海水の沈み込みにより、 $\sigma=26.4$ において形成される中央モード水がよく知られている。図-3で見られる濃度 2 Bq m^{-3} 以上の水塊は中央モード水の形成に追従していることが考えられる。Aoyama et al.²⁾は、2011年に観測した 165°E に

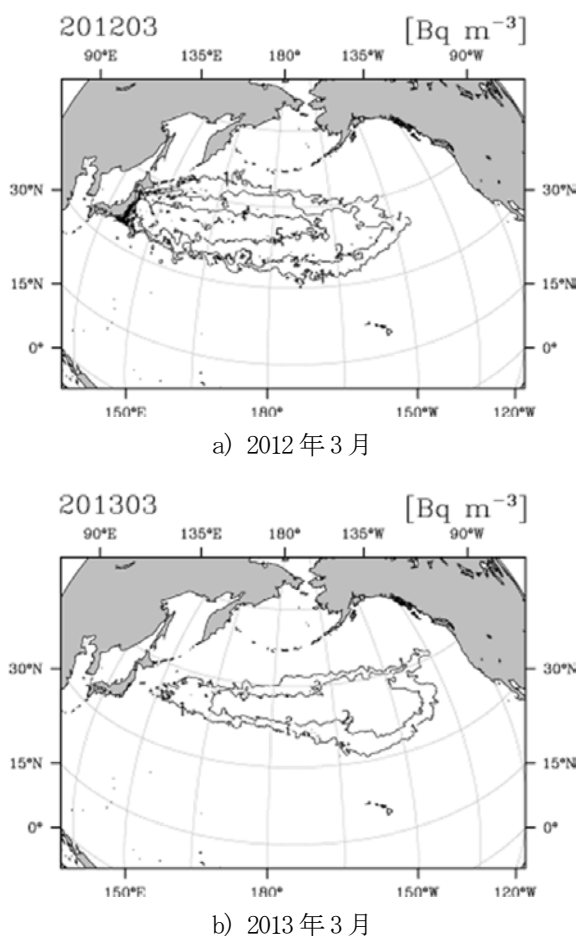


図-1 事故後1年後（2012）および2年後（2013）の3月の表層における ^{134}Cs の濃度結果

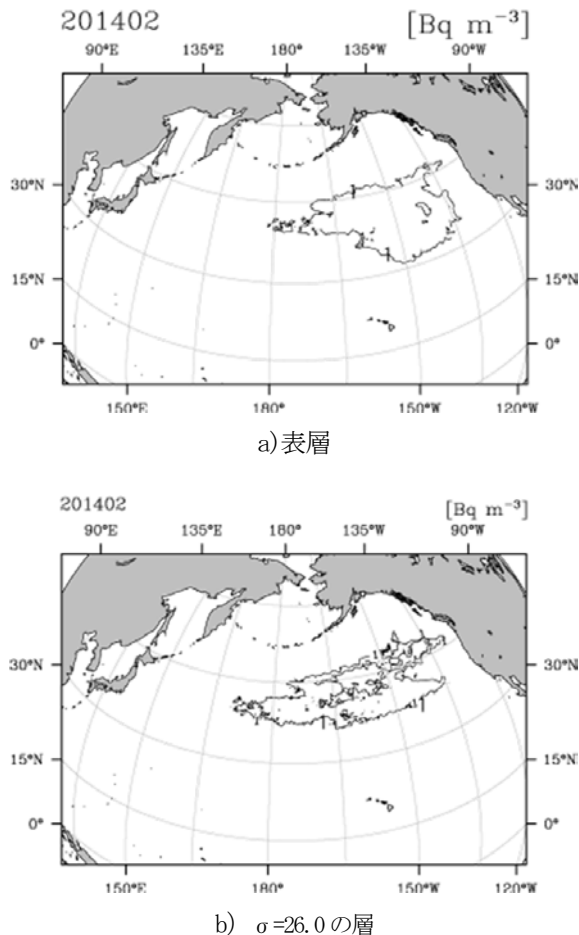


図-3 2014年3月の表層および $\sigma=26.0$ の層における ^{134}Cs の濃度結果

における放射性Csの鉛直断面分布を用いて、Csが中央モード水に追随することにより、その大部分が亜表層以下に存在することを示しており、計算で得られた ^{134}Cs の拡散状況はこの観測事実と一致している。

図-3 b)より、潜行した水塊は、亜寒帯循環により北側、亜熱帯循環により南側に二股となっている様子がみられ、今後、これらの循環に追随しながら亜表層の位置で拡散

していくことが予想される。

4. まとめ

北太平洋を領域とする数値モデルを用いて、福島第一原子力発電所から放出された ^{134}Cs の事故後から2014年2月までの拡散形態を計算した。

計算結果は、表層で観測された結果をよく再現しており、 ^{134}Cs の北太平洋への流入フラックスを増やすことにより、さらなる再現性の向上が見込まれる。

表層における ^{134}Cs は、半減期、環境水との混合、および沈み込みにより、濃度が、2014年2月までに 1 Bq m^{-3} のオーダーまで低減する。また亜表層に潜行した ^{134}Cs は、表層よりも高濃度であるが、表層と同程度のオーダーとなる。亜表層まで沈み込んだ ^{134}Cs を含む水塊は、2014年以降では亜熱帯・亜寒帯循環により南北に分岐して拡散していくと考えられる。

参考文献

- 1) 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: 25 verification of the source term and analysis of regional-scale atmospheric dispersion, *Journal of Environmental Radioactivity*, 112, 141–154, 2012.
- 2) Aoyama, M., M. Uematsu and Y. Hamajima: Surface pathway of radioactive plume of TEPCO Fukushima NPP1 released ^{134}Cs and ^{137}Cs . *Biogeosciences*, 10, 5601–5617., 2013
- 3) Tsumune, D., T. Tsubono, M. Aoyama, M. Uematsu, K. Misumi, Y. Maeda, Y. Yoshida and H. Hayami: One-year, regional scale simulation of ^{137}Cs radioactivity in the ocean following the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. *Biogeosciences*, 10, 5601–5617., 2013