東電福島第一原発事故以降の海洋生態系における放射性物質の動態

帰山秀樹*§

1. はじめに

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震および津波の影響により発生した東京電力株式会社福島第一原子力発電所（以降，福島第一原発）事故は環境へ大量の人工放射性核種を放出する事態となった。当該事故により放出された人工放射性核種のうち，放出量が多く，半減期が数年以上と比較的長い放射性セシウム（^{134}Csおよび^{137}Cs）は当該事故の環境影響を評価する上で最も重要な核種である。海洋環境においては，福島県沖沿岸部を中心に福島第一原発事故由来の放射性セシウム濃度の上昇が認められた。特に海産生物の放射性セシウム濃度は，食品中の放射性物質の基準値を超過する事態となり，我が国の水産業へ大きな影響を及ぼす事態となった。国立研究開発法人水産研究・教育機構では2011年3月23日より海産生物の緊急生物調査（放射性セシウムおよび放射性ヨウ素を対象）を開始，筆者は翌日の3月24日よりこの緊急生物調査に従事した。さらに当該事故が海洋環境へ及ぼす影響の科学的評価を目的に，生態系を網羅した放射性セシウムの調査を行ってきた。海洋生態系を対象とした研究調査は2011年4月の当機構所管の漁業調査船を用いた海水，餌料生物（動物プランクトン）採集，放射能分析に始まり，これまで様々な観測調査を継続してきた。本稿では我々の調査結果を中心に福島第一原発事故以降の海洋生態系における放射性セシウムの動態について既往の知見をレビューする。

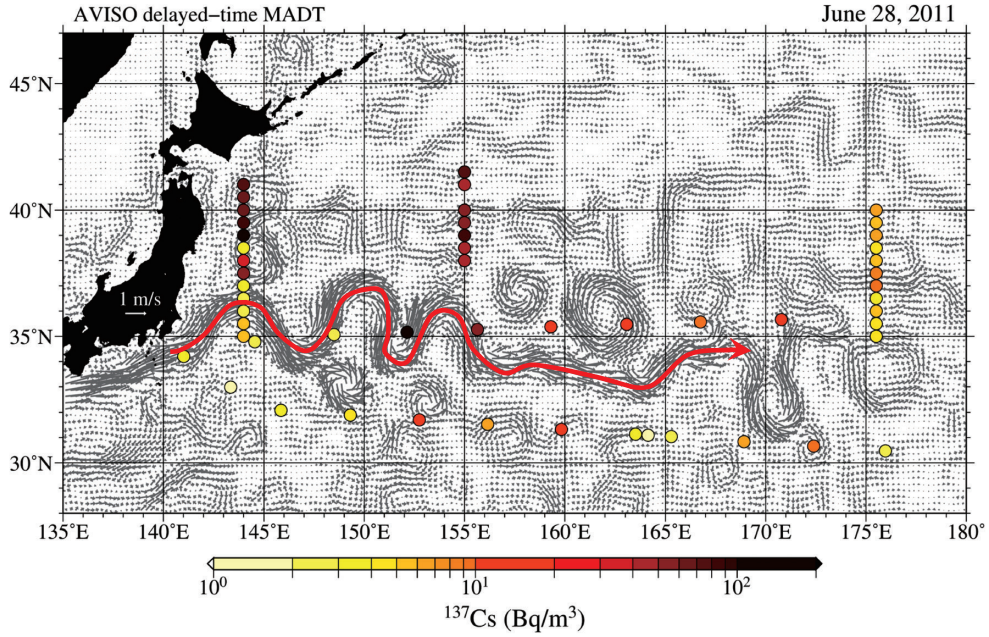
2. 海洋への放出量および広域拡散状況

福島第一原発事故により環境へ放出された主要な放射性セシウムは^{134}Cs（半減期約2年）および^{137}Cs（半減期約30年）の2種である。様々な媒体において事故時に減衰補正したこれら2核種の放射能比は約1.0となっており，^{134}Csと^{137}Csは事故時において同量が放出されたと考えられている。海洋への主な放出ルートは大気降下による海面沈着と，高濃度汚染水の直接漏洩であり，その^{137}Cs放出量は事故直後2011年4月までの期間の推計で前者は12-15 PBq（PBq: 10^{15} Bq），後者は3.5±0.7 PBqと見積もられている(Aoyama *et al.*, 2016; Tsumune *et al.*, 2012)。大気経由で海面に沈着した放射性セシウムは北太平洋の広域に沈着した後，移流拡散に伴い速やかに希釈されたと考えられる。一方，直接漏洩により海洋へもたらされた放射性セシウムは表層の海水の動き，すなわち福島第一原発前面の海域においては南向き，その下流では黒潮続流という東向きの強い流れにより北太平洋へ広く拡散した（第１図）。この表層において東方へと拡がった放射性セシウムは2014年には北太平洋を横断しカナダ西方沖に到達している。一方，水深300m付近の亜表層においては表層とは異なる水塊（亜熱帯モード水）に当該事故由来の放射性セシウムが取り込まれ海洋内部へと輸送された（Kaeriyama, 2017)。その輸送方向は表層とは異なり日本列島の南方へと輸送されているものの，その濃度は極めて低く海産生物の放射性セシウム濃度の顕著な上昇は認められていない。

3. 福島第一原発近傍海域の海水

北太平洋を広域に見ると，海水の放射性セシウム濃度は移流・拡散の希釈効果により比較的速やかに低下したのに対し，福島第一原発近傍海域では，海水の放射性セシウム濃度が比較的高い状況が継続した。事故直後は直接漏洩の影響を強く受け，極めて高い^{137}Cs濃度（10^{7} Bq m^{-3}）を記録したが，高濃度汚染水の直接漏洩の影響が認められなくなった2011年4月以降の半年間で約4桁の濃度低下が認められた。2012年以降も海水の^{137}Cs濃度は緩やかに低下しており，2018年には事故前の濃度(1.5 Bq m^{-3})と同程度まで低下した。空間分布の特徴として海流の影響を受け，浅海域の同一水深帯では福島第一原発の北側に比べ南側で^{137}Cs濃度が高い傾向が認められたが，2015年以降このような空間的不均一は解消されつつある。一方で東西方向には潮汐の影響と考えられるが，東側（沖側）で^{137}Cs濃度が低い傾向が顕著である。すなわち，放射性セシウムは福島第一原発近傍海域にお

＊　国立研究開発法人水産研究・教育機構中央水産研究所（〒236-8646　神奈川県横浜市金沢区福浦2丁目12番4号）
§　E-mail: kaeriyama@affrc.go.jp



第1図　2011年6月の表層海水の^{137}Cs濃度。グレー矢印は表層の流れの方角と速さ，赤矢印は黒潮続流の位置，丸は観測点，色は^{137}Cs濃度。データはKaeriyama *et al.* (2013)およびKaeriyama (2017)より引用。

いて沖方向への拡がりは小さく，浅海域で福島第一原発の南側へと輸送されたことが観測により明らかにされている（山田ら, 2018）。

4. 海底堆積物の放射性セシウム

福島第一原発近傍海域においては，直接漏洩の影響が強く海水の放射性セシウム濃度が大きく変動したが，海底堆積物の放射性セシウム濃度も大きく変動した。しかしながら，海水の放射性セシウムの分布とは異なり，海底堆積物の放射性セシウム濃度は極めて不均一な水平分布を形成した。海底堆積物の放射性セシウム空間分布を決定した主な要因は2つ考えられている。すなわち直接漏洩により底層水へ供給され，海底堆積物に接触した放射性セシウムの通過履歴と海底堆積物の粒度組成の水平分布の組み合わせである。空間的不均一性が大きいものの，海底堆積物の放射性セシウム濃度は経年的に徐々に低下している。千葉県，茨城県，福島県，宮城県沖の陸棚海域の表層堆積物(0-3cm)に存在する^{137}Cs総量について時系列変動を整理すると2.3年で半減する速度で減少していると推定されている（Kusakabe *et al.*, 2017）。その減少要因は主に，①堆積物粒子の再懸濁・輸送による系外への輸送，②堆積物から溶存態への溶出，③堆積物深部への下方移動が考えられるが，それぞれの重要度を評価することが今後の課題である。

5. 餌料生物の放射性セシウム

福島第一原発事故により放出された放射性セシウムは上述の海水および海底堆積物のみならず，海洋生態系を構成する様々な生物からも検出されている。これら生物の放射性セシウム濃度は，海水および餌生物からの取り込みと排泄のバランスにより決定される。そのため，海産生物，特に漁業対象種である高次栄養段階生物の放射性セシウム濃度の推移を把握するためには，餌生物の放射性セシウム濃度を把握することが重要である。

水産研究・教育機構では福島県沖太平洋および仙台湾において，主に浮魚類の餌生物を想定し，動物プランクトンの放射性セシウム濃度について2011年6月からモニタリングを継続している。両海域における動物プランクトンの^{137}Cs濃度は事故前に比べ最大で10^2-10^3倍まで上昇し，その後緩やかに低下した。動物プランクトンの^{137}Cs濃度の低下速度は海域によらず海水の低下速度の約2倍遅いが，時間の経過とともに緩やかな低下を継続している(Kaeriyama *et al.*, 2015)。2017年の観測結果では海水の^{137}Cs濃度が事故前の10^0倍であったのに対し，動物プランクトンの^{137}Cs濃度は10^0-

10^1倍であった。

底魚，根魚の餌生物であるマクロベントスについても放射性セシウム濃度の測定が行われている。Sohtome *et al*.（2014）により福島県沖の様々なベントスについて種類別に放射性セシウム濃度が報告されており，いずれのベントスも時間の経過とともに^{137}Cs濃度の低下が確認されている。ベントスの^{137}Cs濃度の低下速度は底層の海水よりも，海底堆積物の^{137}Cs濃度の低下速度と同程度であった。しかしながらベントスの^{137}Cs濃度については体表面もしくは消化管内に存在する海底堆積物粒子などの混入の影響が強く示唆されるなど，ベントスそのものの^{137}Cs濃度を正しく評価することが技術的に困難であり，底生生態系における放射性セシウムの移行を評価する上で，ベントスの扱いが今後の課題である。

6. 食物網構造と放射性セシウム濃度

これまで海水，海底堆積物，動物プランクトン，ベントスについて，要素ごとに放射性セシウム濃度の時空間変動をまとめたが，「生態系」という観点からこれらに加え，魚類を含めた放射性セシウムの状況を把握する試みを最後に紹介する。動物プランクトンの項目で述べた仙台湾における調査では海水から魚類まで生態系を構成する様々なコンパートメントの放射性セシウム濃度を把握すると同時に，炭素・窒素安定同位体比および消化管内容物調査に基づく食物網構造解析を実施している。炭素・窒素安定同位体比データを用いたベイズ推定に基づき仙台湾における食物網構造を推定すると，ヒラメ，スズキなどを頂点とするプランクトン食系列とマガレイなどを頂点とするベントス食系列が存在することが明らかとなった（Togashi *et al*., 2019）。一般に栄養段階の高い生物ほど放射性セシウム濃度が高くなることが知られている。仙台湾において栄養段階と放射性セシウム濃度の関係を見ると，事故から1年ほどの期間においては栄養段階と放射性セシウム濃度の関係が認められなかったのに対し，事故から3年後にはその関係性が認められるようになった。これは「生態系」として事故前の状況に近づきつつあることを意味している。一方で，福島県沖において同様の解析を行ったところ，事故から3年後において放射性セシウム濃度は低下していたものの，栄養段階と放射性セシウム濃度の関係は不明瞭であった。これは仙台湾と福島県沖の「生態系」における放射性セシウムの状況の違いを反映していると考えられる。今後，福島県沖においても栄養段階と放射性セシウム濃度の関係が明確になってくるものと期待され，引き続きデータの蓄積が期待される。

引用文献

Aoyama, M., Kajino, M., Tanaka, T., Sekiyama, T., Tsumune, D., Tsubono, T., Hamajima, Y., Inomata, Y. and Gamo, T.（2016）. ^{134}Cs and ^{137}Cs in the North Pacific Ocean derived from the March 2011 TEPCO Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident, Japan. Part two: estimation of ^{134}Cs and ^{137}Cs inventories in the North Pacific Ocean. *J. Oceanogr.*, **72**, 67-76.

Kaeriyama,H.（2017）. Oceanic dispersion of Fukushima-derived radioactive cesium: a review. *Fish. Oceanogr.*, **26**, 99-113.

Kaeriyama, H., Ambe, D., Shimizu, Y., Fujimoto, K., Ono, T., Yonezaki, S., Kato, Y., Matsunaga, H., Minami, H., Nakatsuka, S. and Watanabe, T.（2013）. Direct observation of ^{134}Cs and ^{137}Cs in surface seawater in the western anc central North Pacific after the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident. *Biogeosciences*, **10**, 4287-4295.

Kaeriyama, H., Fujimoto, K., Ambe, D., Shigenobu, Y., Ono, T., Tadokoro, K., Okazaki, Y., Kakehi, S., Ito, S., Narimatsu, Y., Nakata, K., Morita, T. and Watanabe, T.（2015）. Fukushima-derived radionuclides ^{134}Cs and ^{137}Cs in zooplankton and seawater samples collected off the Joban-Sanriku coast, in Sendai Bay, and in the Oyashio region. *Fish. Sci.*, **81**, 139-153.

Kusakabe, M., Inatomi, N., Takata, H and Ikenoue, T.（2017）. Decline in radiocesium in seafloor sediments off Fukushima and nearby prefectures. *J. Oceanogr.*, **73**, 529-545.

Sohtome, T., Wada, T., Mizuno, T., Nemoto, Y., Igarashi, S., Nishimune, A., Aono, T., Ito, Y., Kanda, J. and Ishimaru, T.（2014）. Radiological impact of TEPCO's Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident on invertebrates in the coastal benthic food web. *J. Environ. Radioact.*, **138**, 106-115.

Togashi, H., Nakane, Y., Amano, Y. and Kurita, Y.（2019）. Estimating the diets of fish using stomach contents analysis and a Bayesian stable isotope mixing models in Sendai Bay. *In* “Oceanography challenges to future Earth: human and natural impacts on our seas”（eds. Komatsu, T., Ceccaldi, H-J., Yoshida, J., Prouzet, P. and Henocque, Y.）, Springer, Switzerland, 235-245.

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 a regional ocean model. *J. Environ. Radioact.*, **111**, 100-108.

山田　学・森口隆大・帰山秀樹・青野辰雄（2018）. 福島県沿岸域における海水のセシウム137濃度の水平分布について（短報）. 福島水試研報, **No.18**, 59-63.