

海底堆積物中の放射性セシウム濃度の推移

乙坂 重嘉
Otosaka Shigeyoshi

1. はじめに

2011年3月の東京電力(株)福島第一原子力発電所(福島第一原発)事故発生から約2年が経過した。政府や自治体による海域モニタリングに加えて、多くの研究機関による調査の結果、事故によって環境中に放出された放射性物質の拡散状況が浮き彫りになってきた。

施設近傍のごく一部の海域を除けば、海水中の放射性核種濃度は事故前のレベルにまで減少しつつある。その一方で、海底堆積物中の放射性核種の濃度減少は遅く、海底環境への長期的な影響が懸念されている。本稿では、海底堆積物中の放射性核種、特に放射性セシウムの分布状況と濃度の推移についてまとめる。なお、特に断りがない限り、本稿で解説する堆積物中の放射性セシウム濃度は乾重量当たりの放射能(Bq/kg-dry)として表し、試料採取日に壊変補正した値とする。

2. 海底堆積物中の放射性セシウム濃度の推移

事故由来とみられる放射性セシウムは、東日本の広い範囲の沿岸海底堆積物から検出され、特に、福島第一原発の南部、福島県から茨城県にかけての沿岸域では、ほかの海域に比べて高い濃度の放射性セシウムが海底から見付かっている¹⁾。以下では、これらの海域での調査結果を中心に解説する。

図1に、1971~2012年までに福島県

及び茨城県の沖合で観測された堆積物中の¹³⁷Cs濃度の時間変化を示す¹⁻⁴⁾。大気圏核実験が数多く行われていた1980年代前半までの海底堆積物中の¹³⁷Cs濃度は0.3~7 Bq/kgで、2000年代後半には2 Bq/kg程度にまで減少したが、2011年3月の事故によって、¹³⁷Cs濃度は1~3桁増加した。

同海域の沿岸(主に水深100 m以浅)で事故後に観測された堆積物上層(0~3 cm層)の¹³⁷Cs濃度分布を図2に示す^{2,3)}。全体の分布の特徴として、海底堆積物中の¹³⁷Cs濃度は、福島第一原発の北側に比べて南側の海域で高いことが分かる。この海域では、沿岸に沿って南に向かう流れが年間を通じて卓越する。この流れは北緯36.0~36.5度付近で離岸し、黒潮統流と呼ばれる帯状の流れに沿って東に向かう。事故後の初期段階で、汚染度の高い海水が施設周辺

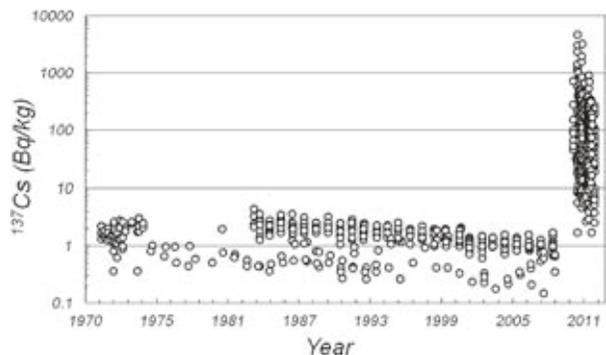


図1 福島県及び茨城県沖合における堆積物中の¹³⁷Cs濃度の時間変化(1971~2012年)¹⁻⁴⁾

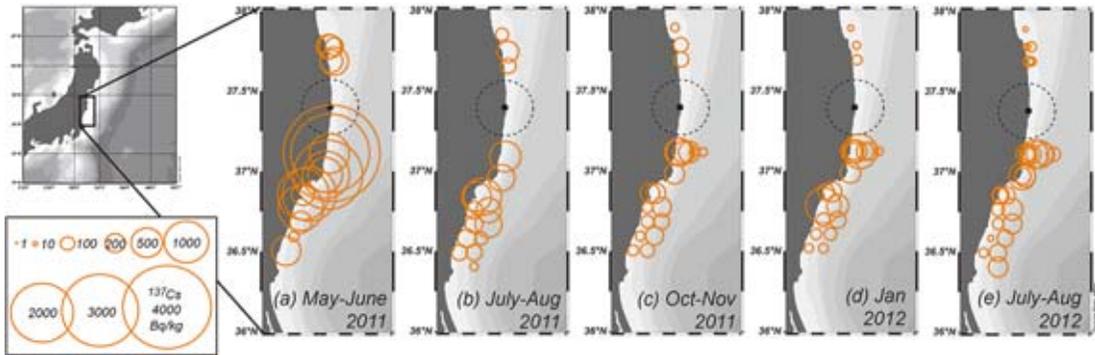


図2 福島県及び茨城県沿岸における堆積物中の¹³⁷Cs濃度分布^{2,3)}

から岸に沿って南に向かって分布し、その後東方に移動したことは、複数のシミュレーション結果からも示されている⁴⁾。図2に見られる沿岸域での海底堆積物中の¹³⁷Cs分布は、海水流動に伴う放射性セシウムの輸送経路に強く影響を受けていることを示している。

福島県及び茨城県沿岸における、2011年5～6月の堆積物中の¹³⁷Cs濃度は2～4,000 Bq/kgであった(図2(a))。全体として福島第一原発から距離が近い観測点ほど高い濃度が見られたが、施設から80 km以上離れた一部の観測点でも1,000 Bq/kgを超える濃度が観測された。同年7～8月には、ほぼすべての観測点で堆積物中の¹³⁷Cs濃度が1,000 Bq/kgを下回った(図2(b))。その後は、局所的な濃度変動が見られたものの、2012年8月まで¹³⁷Cs濃度分布に目立った変化は見られなかった(図2(c)～(e))。

図2に示す観測点のうち、北緯36.5～37.0度までの間に位置する9観測点における、放射性セシウム濃度の時間変化を図3(a)に示す。比較のために、ほぼ同じ海域で採取した底層生息性の魚類(ヒラメ、カレイ類、カサゴほか)中の放射性セシウム濃度(単位Bq/kg-wet)と、表層海水中の放射性セシウム濃度(単位Bq/L)の時間変化を、図3(b)と図3(c)にそれぞれまとめた。図3(b)のデータは水産庁による海産生物のモニタリングの結果⁵⁾の、図3(c)は文部科学省等によるモニタリング結果^{2,6)}の

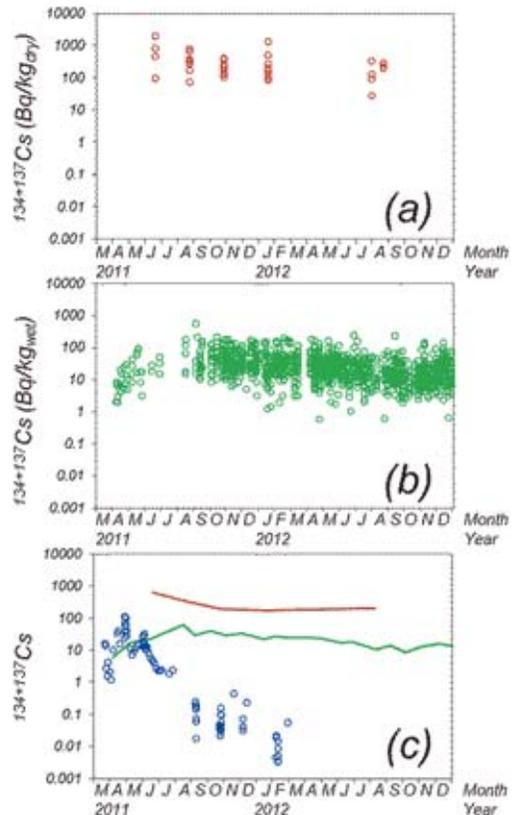


図3 北緯36.5～37.0度における、(a)海底堆積物、(b)底層魚、(c)表層海水中の放射性セシウム濃度の時間変化

図(c)中の青丸印は海水中の濃度(単位Bq/L)を、赤線と緑線は、それぞれ、図(a)及び図(b)に示す濃度の月ごとの中央値の変化を表す。図(a)はOtosaka and Kobayashi²⁾、図(b)は水産庁⁵⁾、図(c)は文部科学省³⁾、及び東京電力(株)⁶⁾のデータを用いた

値を用いた。比較しやすいよう、図3(c)には、図3(a)及び図3(b)のデータの月ごとの中央値の変化を併せて記し、条件を整合させるため、濃度は2つの放射性セシウム (^{134}Cs と ^{137}Cs) の濃度の合計値とした。

海水中の放射性セシウム濃度は、事故から約1か月後の2011年4月中旬に最大となり、同年の年末までは3桁以下に減少した(図3(c))。その一方で、堆積物中の放射性セシウム濃度の減少は、海水中のそれに比べて緩やかであった(図3(a)及び図3(c)赤線)。実際の海底堆積物を用いた室内実験の結果、放射性セシウムはほぼ不可逆的に堆積物粒子に吸着しており、海水への再溶出は遅いことが分かっている³⁾。図3(a)の結果をあわせて考慮すると、堆積物への放射性セシウムの沈着と再分布は主に事故後の半年以内に起こっており、放射性セシウムはその後1年以上にわたって堆積物中に留まっていると言える。

図には示していないものの、コナゴヤシラウオといった表層生息性魚類の放射性セシウム濃度は、海水のそれと同様の傾向で変化した⁵⁾。その一方で、底層魚中の放射性セシウム濃度は、堆積物のそれよりも更に緩やかな減少傾向を示し、その変化は堆積物より数か月遅れて現れるように見える(図3(b)及び図3(c)緑線)。これらの結果は、海底堆積物中の放射性セシウムが、わずかずつではあるが底層付近の生態系に影響を与える可能性があることを示唆しており、その機構の解明が急がれる。

3. 海底の放射性セシウム存在量

政府や自治体による海底堆積物の放射能モニタリングの多くは、上層3cmまでの濃度を調査している。これは、最新の汚染状況を早急に把握するというモニタリングの目的に則したものである⁷⁾。しかしながら、放射性セシウムが堆積物

内部でどのように分布するかを、モニタリング調査の結果から読み取ることは不可能である。そこで、著者らの調査で得た沿岸から沖合までの代表的な4観測点における堆積物中の ^{137}Cs の鉛直分布を図4に示す。

水深が1,000mを超える沖合海域では、堆積物中の ^{137}Cs のほぼすべてが、モニタリングの基準層である3cm層より上部に存在していた。一方、水深75~158mでは3割程度、50m以浅では7割以上の ^{137}Cs が3cm以深の堆積層に取り込まれていた。福島県や茨城県の沿岸の海底は、透水性の高い砂質堆積物が主要成分であることが知られている⁸⁾。これらの海域では、放射性セシウムが堆積物の間隙を通過してより深部へと運ばれ、沈着したと考えられる。

堆積物深部への放射性セシウム濃度を考慮して、堆積物1m²当たり存在する ^{137}Cs 量を、宮城県、福島県及び茨城県の沖合(北緯38.7~

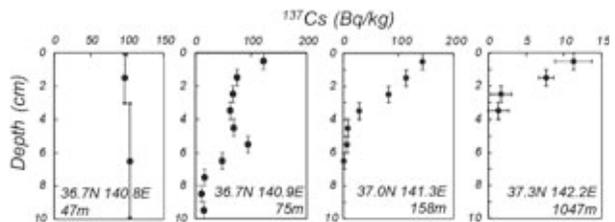


図4 沿岸域から沖合海域(水深47~1,047m)までの4観測点における堆積物中 ^{137}Cs 濃度の鉛直分布

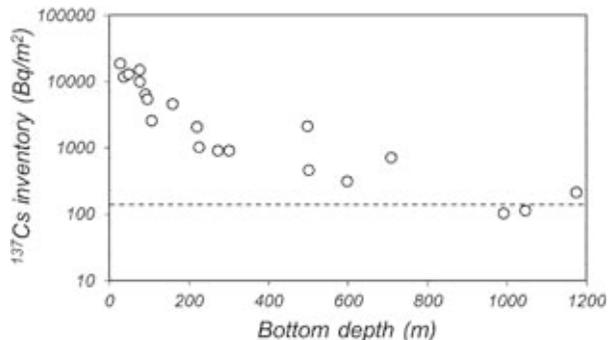


図5 宮城県、福島県、茨城県沖の20観測点における海底堆積物中の ^{137}Cs 存在量と海底水深との関係(2011年10月) 点線は事故前の ^{137}Cs 存在量

35.5度)の20観測点について求め、得られた ^{137}Cs 存在量と海底水深との関係を示したのが図5である。堆積物中の ^{137}Cs 存在量は、海底水深とともに指数関数的に減少し、さらに、その変化率は水深200m付近を境に異なっていた。前述のとおり、海洋表層での汚染度の高い海水の動きが沿岸堆積物中の放射性核種の分布に影響を及ぼすことや、陸域からの放射性核種の輸送が沿岸域に直接影響を与え得ることを考慮すると、沿岸域でより多くの ^{137}Cs が蓄積されていることは不思議ではない。

図5に見られる ^{137}Cs 存在量の深度分布に、同海域における深度毎の面積分布を乗じることにより、堆積物中の ^{137}Cs の総量を見積もることができる。あくまでも概算であるが、2011年10月現在、宮城県から茨城県にかけての沿岸の海底には0.1~0.3PBqの ^{137}Cs が蓄積しており、そのうちの9割以上は水深200m以下の沿岸に存在すると見積もられる。

4. おわりに

最新の報告によると、福島第一原発事故によって海洋に放出された ^{137}Cs の総量(直接放出と大気からの沈着量の合計量)は11PBqと推算されている⁹⁾。海底への ^{137}Cs 沈着量は海洋への放出量の数%にすぎないが、その多くは我々の身近な沿岸域に長くとどまることが予想される。

このため、海底堆積物中の放射性セシウムによる海底付近の生態系への影響を見積もることが重要である。個体レベルでの移行経路や移行速度について理解を深める一方で、資源量等を考慮したマクロレベルでの移行量も把握することも有効であると考えらる。

本稿では触れなかったが、例えば日本海沿岸の河口付近など、福島第一原発からより遠く離

れた海域でも、事故由来の放射性セシウムが堆積物から検出されている。これらの海域では、一旦陸上に沈着した放射性セシウムが河川を通じて流出し、海底に運ばれたと推測される。このような物質の再移動は、特に沿岸域での放射性セシウム濃度を変化させる可能性があるため、継続的な監視が必要である。

参考文献

- 1) 文部科学省, 放射線モニタリング情報, <http://radioactivity.mext.go.jp>
- 2) 文部科学省, 環境放射能データベース, <http://search.kankyo-hoshano.go.jp>
- 3) Otosaka, S. and Kobayashi, T., Sedimentation and remobilization of radiocesium in the coastal area of Ibaraki, 70 km south of the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant, *Environ. Mon. Assess.*, doi:10.1007/s10661-012-2956-7 (2012)
- 4) Masumoto, Y., Miyazawa, Y., Tsumune, D., Tsubono, T., Kobayashi, T., Kawamura, H., Estournel, C., Marsaleix, P., Lanerolle, L., Mehra, A. and Garraffo, A.D., Oceanic dispersion simulations of ^{137}Cs released from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, *Elements*, **8**, 207-212 (2012)
- 5) 水産庁, 水産物の放射性物質調査の結果について, <http://www.jfa.maff.go.jp/j/housyanou/kekka.html>
- 6) 東京電力「福島第一原子力発電所周辺の放射性物質の核種分析結果」, <http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/f1/smp/index-j.html>
- 7) IAEA, Collection and preparation of bottom sediment samples for analysis of radionuclides and trace elements, IAEA-TECDOC-1360 (2003)
- 8) 青柳和義, 五十嵐敏, 福島県沿岸域の粒度組成について, 福島水試研報 **8**, 69-82 (1999)
- 9) Kobayashi, T., Nagai, H., Chino, M. and Kawamura, H., Source term estimation of atmospheric release due to the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident by atmospheric and oceanic dispersion simulations, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **50**, 255-264 (2013)

(日本原子力研究開発機構)