

海産生物への放射性セシウム移行に関するモデル解析について

立田 穰
Tateda Yutaka

はじめに

海産食品の摂取に伴う人間への内部被ばく評価においては、人工放射性核種の高産生物への移行について、濃縮係数を用いた生物中濃度の推定が行われてきた¹⁾。濃縮係数は元来、地球化学において、環境中における元素の分配比として整理されていたが²⁾、人類によって新しく生み出された人工放射性核種にも適用されている。すなわち、人工放射性核種は、海域に導入後に海洋における拡散や堆積物への吸着によって海水中濃度が減少する過程で、食物連鎖や海水を通して海産生物に移行する。十分な時間が経過した後は、海水、海底土、海産生物の間で分配率がおよそ一定の割合に達するため、海水中の濃度を分母として、生物中濃度との比を濃縮係数として定義し、これを原子力施設周辺の公衆安全評価などに用いてきたものである³⁾。

放射性セシウムを例にとると、我が国では1960年代に米国、旧ソビエト連邦、英国、フランス、中国による大気圏内核実験及び1986年のチェルノブイリ原発事故に起因する放射性物質が海洋表面へ降下し、これにより日本沿岸の海水や魚類中の濃度が上昇した。しかし、大気圏内核実験禁止後の1990年以降は、海水及び魚類中濃度は、減少に向かっていったことが知られている^{4,5)}。この期間の日本各地の魚類（主に筋肉部）で算出された濃縮係数は、値の幅はあるものの、お

おむね50前後の値であったことが示されている^{6,7)}。人工放射性核種の移行に関する1960年代以降の各国の環境データの充実に伴い⁸⁾、海藻や無脊椎動物の放射性セシウムの濃縮係数は、各々20、1~15であることが整理されている（図1）。

このように、海洋生態系内における放射性核種の相互移行が平衡状態にある場合は、濃縮係数は、環境中濃度に対する海産生物中濃度比の“目安”となるが、一方、チェルノブイリ原発事故直後や、2011年の福島第一原子力発電所事故のように、環境中に放射性セシウムが一時的に放出された際は、海産生物における濃度の推移を説明するためには利用しにくいことが示されている⁹⁾。これは、事故による海洋への放出は一時的であり、事故対策の効果や拡散による海水中濃度の減少が急激であるのに対して、

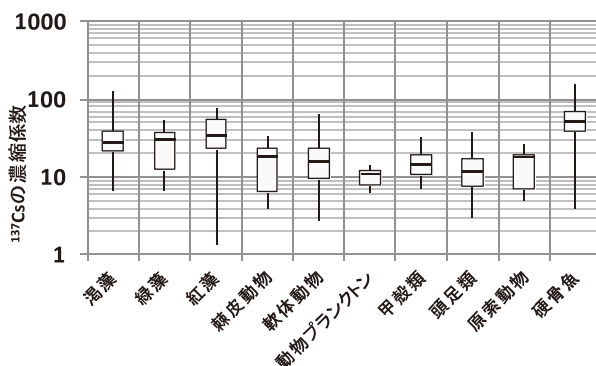


図1 海産生物における¹³⁷Csの濃縮係数^{6,7)}
最大値、四分位範囲(75%, 25%), 最小値

海産生物による海水からの放射性セシウムの吸収の速さは、異なる代謝の特徴を有する生物グループによって差があることから、環境中濃度の変化に対する応答が異なるためである。また、海水からの吸収が遅かった生物でも、食物連鎖を通じて、放射性セシウムの移行があり、また、各々の生物グループの排出速度にも差があるため、濃度の短期的変化は濃縮係数では解釈しにくい。

移行挙動解明のためのモデル解析の必要性

前述のような理由により、環境中の放射性核種濃度が急激に変化する場合は、海産生物中の濃度は、生物の吸収・排出速度や、食物連鎖を経由した移行の影響を受ける。したがって、実際の濃度変化の機序を科学的に理解するためには、単位時間当たりの濃度変化を計算できるモデルによる解析が有効である。このような動的生物移行モデルについては、我が国では、青山³⁾、立田¹⁰⁾らにより検討されてきた。

動的生物移行モデルによる解析の特徴は、海水中の放射性核種濃度が時間とともに変化する場合でも、アイソトープ実験などで求められた移行速度係数を用いることにより、単位時間当たりの生物中濃度の変化を求めることができる点である。放射性セシウムについては、海産生物の吸収・排出速度係数及び生物における吸収率データが、モデル構築に可能な程度に集積されている。また、大型計算機の能力向上により、実際の気象や海流・潮流の条件を用いた海水中濃度の変化の再構築が可能となっているため、生物中濃度の計算に、時系列的な海水中濃度変化を利用することが可能となっている。

解析対象については、複雑な食物連鎖構造を有しない海藻や、プランクトンを餌とする海産生物では、動的移行モデルを構築しやすい。一方、魚類などは、餌とする生物が種類によって異なり、かつ遊泳範囲や生息深度も様々である。このため、移行挙動の特性を把握したい場合、一般的な食物連鎖モデルの適用により概略

的な知見は得られるが、実際の福島第一原発事故に伴う周辺海域での現象解明には、海域や生物に特有の生態情報を組み込んだモデル構築が必要となる。2011年以降、福島県の沿岸では、関連する研究機関による様々な研究調査が進んでいるため、これらの研究過程で提起された挙動への影響要因について、モデルを利用した感度解析が有益である。

動的生物移行モデルの基本的な考え方

動的生物移行モデルにおいては、入力データである海水中濃度は、解析したい地点における、放出開始日から現在までの毎日の濃度を与える。生物の移動が少ないと仮定した場合は、海産生物中の放射性セシウム濃度は、海水からの吸収速度と、摂取した餌からの吸収移行速度、及び生物体内からの排出速度の、単位時間ごとの収支の積算で求めることができる。摂取した餌からの吸収移行速度は、単位時間当たり摂取する餌の量と、餌に占める各生物の種類と割合、各餌生物における放射性セシウムの濃度、そして餌を摂取した生物における吸収率から求められている。これらの移行速度係数は、英国の旧水産放射線生物学研究所、IAEA（国際原子力機関）の現モノコ環境研究所及び日本の放射線医学総合研究所 旧 那珂湊研究センターのような、海水利用可能な各国のラジオアイソトープ施設における長年の水槽実験研究で取得されたものである（図2）。

では、モデルで得られる結果と、従来の濃縮係数はどのような関係にあるのだろうか？濃縮係数との関係を見たい場合は、海水中濃度を計算期間の始めから終わりまで均しく 1 Bq L^{-1} とすると、海産生物中濃度が一定の値に達する様子が分かる（図3）。二枚貝や海藻における放射性セシウムの代謝速度は魚類に比較して速いため、数か月でほぼ平衡状態に近づき、濃縮係数に近い濃度比に達する。一方、魚類では、代謝の速度が遅いため、現場で得られている濃縮係数値に達するのに1年以上掛かることが分

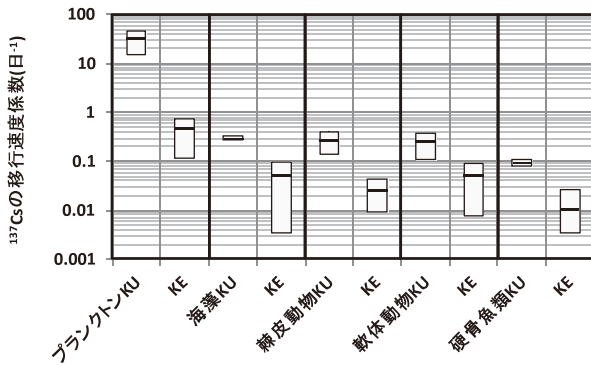


図2 海産生物における ^{137}Cs の移行速度の範囲 ^{7,10)}
 KU: 海水からの取り込み速度係数, KE: 海産生物からの排泄速度係数

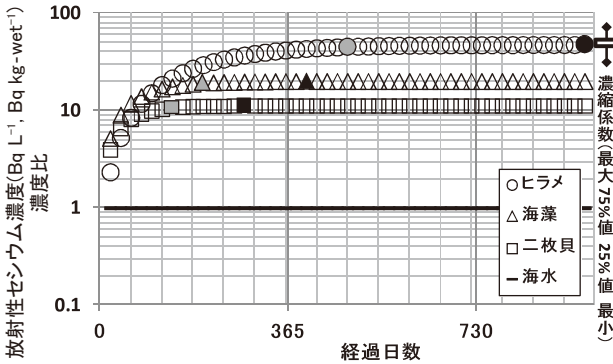


図3 海水濃度が 1 Bq L^{-1} が長期間続いた場合における、海産生物中の放射性セシウム濃度 (Bq kg^{-1})、及び濃度比
 ●▲■: 平衡状態における濃度, ●▲■: 濃縮係数で導かれる濃度に対する 95%相当濃度

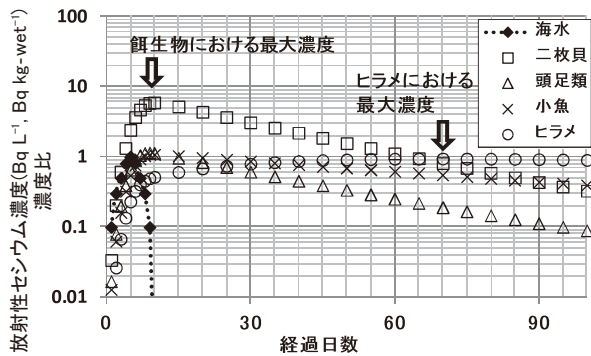


図4 海水中濃度が 5 日間で 1 Bq L^{-1} に達し、5 日後に低下した場合における、海産生物中の放射性セシウム濃度 (Bq kg^{-1})、及び海水中濃度 1 Bq L^{-1} に対する濃度比

かる。では、海水濃度が例えば 5 日後に最大で 1 Bq L^{-1} となり、5 日後に減少した場合はどうであろうか？ 図 4 に示すヒラメのモデル計算結果の例では、餌としている小魚、頭足類、甲殻類・二枚貝における放射性セシウム濃度が 10 日目以降には低下し始めているにもかかわらず、ヒラメ筋肉中の放射性セシウム濃度はおよそ 2 か月後まで上昇が続いていることが分かる。その理由は、2 か月目までは、餌生物からのヒラメへの放射性セシウムの移行量が、ヒラメからの放射性セシウムの排出量より大きいことにより濃度上昇が引き起こされていることによる。また、2 か月目以降は、餌生物中濃度の全般的な低下により、餌生物からヒラメへの移行量が、ヒラメからの排出量を下回ることにより、濃度低下が開始されていることも分かる (図 5)。なお、餌生物である小魚や無脊椎動物でも同様の機序により生物中濃度上昇の遅れがあるが、図 2 に示すように、これらの生物における代謝速度は、魚類における代謝速度より速いこと、及び餌とするプランクトンにおける代謝速度が更に速いことにより、海水中濃度変化に対する応答は、魚類で見られるそれよりも速い。

福島県の沿岸生態系に関する解析の現状

これらのような解析結果は、実験で得られている代謝速度情報、概念的な海水中濃度の変化、及び想定した食物連鎖、生物の移動の影響が地点間の海水中濃度差の影響よりも小さいという条件をモデルに適用して得られる基礎的な情報である。実際の福島沿岸では、海水中の放射性セシウム濃度とその経時変化は海域によって異なっており¹²⁾、また、モデル解析対象となる海産生物が、高い放射性

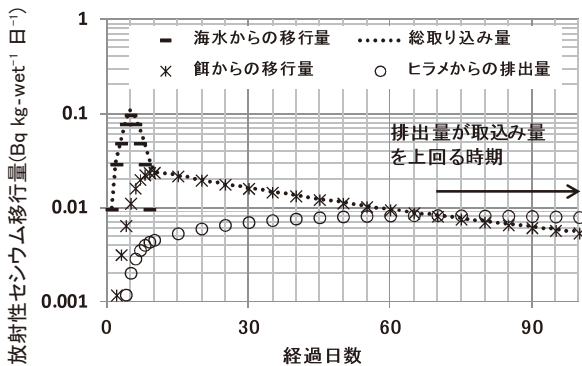


図5 海水濃度が5日間で 1 Bq L^{-1} に達し、5日後に濃度低下した場合における、ヒラメにおける放射性セシウムの取り込み量（海水と餌生物経由）($\text{Bq kg}^{-1} \text{ 日}^{-1}$)及び排出量 ($\text{Bq kg}^{-1} \text{ 日}^{-1}$)

セシウム濃度にさらされた時に生息していた海域や、その時期に餌とした生物の組成は、文献で報告されているとおりではないこともあるため、モデル解析を行う場合は注意を要する。しかしながら、このようなモデル適用の限界があるにもかかわらず、Tatedaら¹³⁾が示した、海産生物中の放射性セシウム濃度モニタリング結果の解釈において、魚類における放射性セシウム濃度の上昇が、その他の生物における濃度上昇よりも遅れて起こるという現象は、基礎的なモデル解析で得られた知見¹⁰⁾とほぼ同一であった。また、海藻やプランクトンを餌とするアワビ、ウニ、ホッキガイ、シラス、コウナゴや、イカ、タコのような代謝速度の速い軟体動物について、モニタリングで得られた放射性セシウム濃度の低減の様子は、食物連鎖移行や理論的な代謝速度に基づいた放射生態学的知見とほぼ一致していた¹³⁾。

一方、実際に観測された海水濃度の変化や、魚種ごとの餌の違いをモデルに反映した解析結果を使っても、従来の放射生態学的知見に基づく理論的な解釈では説明しがたいことも幾つか示されている¹³⁾。例えば、ヒラメとカレイ類はともに海底上に生息しているが、ヒラメにおける放射性セシウム濃度の低下が、理論値に比較的近かったことに対して、ババガレイ、マガレ

イなどでは実際の低減速度が遅いことが提起されている。同様に、硬骨魚類とはほぼ同じセシウムの代謝速度を有する軟骨魚であるコモンカスベにおいても、モニタリングで得られた濃度の低減傾向が、これまでの知見に基づいたモデルによる計算結果よりも遅いことが示されている。これらのババガレイ、マガレイ、コモンカスベなどにおいて、放射性セシウムの排出速度はほかの魚種と大きくは異なる。一方で、このような魚種は、海底に生息するベントスを主に餌としていることから、海底土に関連する何らかの要因による継続的な移行のために、これらの魚種における濃度低減が妨

げられているのではないかと推定されている。2013年12月の時点では、魚種における放射性セシウム濃度はおおむね $100 \text{ Bq kg-wet}^{-1}$ を下回るようになっているものの、このような魚種における放射性セシウム濃度の決定要因について、科学的な根拠の解明が望まれる。今後の研究でこれらの要因が明らかになれば、モデルで再構築される濃度推移は図3と図4の混合型になると推察される。

動的移行モデル解析の利点

事故においては、その初期においてモニタリングが困難な場合が多い。動的生物移行モデルは、観測が可能となった日以降の十分な期間の濃度データがあれば、これらを基に初期濃度の再構築に適用できるため、事象解明に有用である。また、解明できた要因をモデル解析に反映させることにより、事故影響時から平衡に達するまでの生物中濃度推移の科学的解釈の一助となるため、一時的放出による環境への影響の収束期間に関する科学的評価への適用が望まれる。

参考文献

- 1) 清水誠, 海洋の汚染〈生態学と地球化学の視点から〉, 精興社, 東京 (1972)

- 2) Bowen, H., 浅見輝男, 茅野充男(訳), 環境無機化学—元素の循環と生化学—Environmental chemistry of elements, Academic Press, London, 博友社 (1984)
 - 3) 山県昇, 生物濃縮 編, pp.21-40, 産業図書, 東京 (1978)
 - 4) Tateda, Y. and Misonou, J., The ecological half-life of Cs-137 in Japanese coastal marine biota. In "Radionuclides in the study of marine processes", eds. Kershaw, P. and Woodhead, D., pp.340-349, Elsevier. London and New York, 393p. (1991)
 - 5) 笠松不二男, 海産生物と放射能—特に海産魚中の¹³⁷Cs濃度に影響を与える要因について—, *RADIOISOTOPES*, **48**, 266-282 (1999)
 - 6) 立田穰, 御園生淳, 北方海産生物におけるCsの濃縮係数, 電力中央研究所研究報告, U90040 (1995)
 - 7) 原子力環境整備センター, 環境パラメータ・シリーズ6 海洋生物への放射性物質の移行, RWMC-96-P-18 (1996)
 - 8) IAEA, Sediment distribution coefficients and concentration factors for biota in the marine environment, IAEA Technical Report Series 422, IAEA, Vienna (2004)
 - 9) Buesseler, K., Fishing for answers off Fukushima, *Sci.*, **338**, 480-482 (2012)
 - 10) 立田穰, デトリタス食物連鎖における海産生物中¹³⁷Cs濃度の予測基礎モデル, 電力中央研究所研究報告, U97022 (1997)
 - 12) 津旨大輔, 坪野考樹, 青山道夫, 広瀬勝巳 福島第一原子力発電所から漏洩した¹³⁷Csの海洋拡散シミュレーション, 電力中央研究所研究報告, V11002 (2011)
 - 13) Tateda, Y., Tsumune, D., Tsubono, T., Simulation of radioactive cesium transfer in the southern Fukushima coastal biota using a dynamic food chain transfer model, *Journal of Environmental Radioactivity*, **124**, 1-12 (2013)
- ((一財)電力中央研究所 環境科学研究所)