

令和 2 年 6 月 23 日現在

機関番号：82641

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K07895

研究課題名(和文)フサカサゴ科魚類の特異的塩類代謝：環境中人工放射性核種による解明

研究課題名(英文) Study of specific salt bio-kinetics in Scorpaenidae fish: analysis by artificial radionuclide in environment

研究代表者

立田 穰 (TATEDA, YUTAKA)

一般財団法人電力中央研究所・環境科学研究所・特別嘱託

研究者番号：60371522

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：放射性セシウム濃度が高く浄化が遅かった福島沿岸のシロメバルについて、メカニズムを解明した。元素分析と排出実験の結果、他の魚種に比較してカリウムなどの塩類代謝の差に加えて、種特異的なセシウム代謝があることが明らかとなった。同じ岩礁域に生息する他魚種の胃内容物中放射性セシウム濃度と差がなかったことから、食物連鎖の種間差に伴う特異的濃縮ではないことが示された。他種より高かった濃度は、シロメバルの岩礁定着性に基づく初期高濃度海水への暴露に起因することが示された。生物移行モデルによる濃度推移再構築シミュレーション結果と実測値から、環境中とシロメバル間の放射性セシウム移行は平衡に達していることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

硬骨魚の淡水と海水環境での塩類代謝差異は知られているが、硬骨魚間での差はないと理解され、アルカリ金属であるセシウムについても同様と考えられてきた。しかしながら、福島事故後のシロメバルにおける放射性セシウム高濃度が、特異的な塩類代謝に起因することが明らかとなり、硬骨魚類の塩類代謝に種差があることがわかった。進化後期に分岐したフサカサゴ科魚類が、なぜ特異的な塩類代謝形質を獲得するに至ったか、新たな生理・生化学的な命題となった。福島沿岸のシロメバルの種特異的なセシウム高濃度の科学的根拠と、浄化過程のメカニズムの解明結果は、福島事故後の収束状況や水産物安全性の正しい理解につながると期待される。

研究成果の概要(英文)：The controlling factors of the initial high radiocesium concentration and the depuration delay in *Sebastes cheni* were clarified. The stable element analysis and two years radioactivity measurement in living fish demonstrated that the K and stable Cs concentration were higher than in those found in other species. Species specific slow radiocesium excretion was confirmed. Analyzed radiocesium concentrations in stomach content of fishes inhabiting the same bottom reefs exhibited that the specific cesium accumulation along food chain was not substantial. Strong sedentary of *S. cheni* was confirmed as the determining factor to elevate the initial radiocesium concentration that was caused by the exposure to early phase contaminated seawater. Simulated temporal levels and the measured concentrations in *S. cheni* and seawater showed that the radiocesium transfer between this species and the environment was verified as being the equilibrium state.

研究分野：海洋放射生態学

キーワード：シロメバル 放射性核種 セシウム 塩類代謝 フサカサゴ科 定着性 福島

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

1) 福島第一原子力発電所(1FNPP)事故により東日本太平洋岸の海産魚は放射性セシウムで汚染された(Wada 他 2013)。事故初期汚染以降、海水中濃度は急速に低下したが(Aoyama 他 2012、Tsumune 他 2012, 2013)、魚種における濃度低減には差が認められた(Wada 他 2016)。

2) 海洋生態系における放射性セシウムの動的移行挙動モデルを用いた 2011 年以降の福島沿岸の海産生物における濃度推移解析の結果、ヒラメなどにおける速やかな濃度低下は、捕食するプランクトン食性魚濃度の低下とセシウム代謝排出速度で再構築可能であること(Tateda 他 2015)、岩礁域をすみ場とするアイナメでは、初期の高濃度餌摂取で魚体中濃度が高くなるということが明らかになっている(Tateda 他 2016)。

3) しかしながらメバル・ソイなどの岩礁魚では特異的に高濃度であり(Wada 他 2016)、従来の放射生態学的知見では説明できていない。震災後の福島南部沿岸でのシロメバル先行研究の結果、シロメバルにおける塩類代謝の特異性のめやすとして安定セシウム濃度が他魚種より高い傾向があることを見出した。これは、フサカサゴ科魚類が他魚種より高い浸透圧(カサゴ類 400>他魚種 300 mOsm kg⁻¹, Perrot 他 1992)であることと符合し、フサカサゴ科魚類において、体外から侵入する塩類量に対して、鰓・腎臓からの塩類排出が特異的に遅い可能性がある傍証と考えられた。

4) NaI ガンマ線スペクトロメトリを用いた長期活魚飼育実験で求めたシロメバルの代謝排泄速度が、特異的に遅いことが提起されている(Matsumoto 他 2015)、コンプトン散乱分のスペクトルプラトーによる底上げ効果により過大評価の可能性がある。また、メバル高濃度の原因として、海水中濃度が最も高かった 2011 年 3 月における産仔接岸による放射性セシウム暴露も考えられる。

5) これらの背景を踏まえ、次の科学的命題について、学術的検討が必要と考えられた。すなわち、フサカサゴ科魚類では特異的に塩類代謝が遅く、高浸透圧が高セシウム濃度の原因となっている可能性が高い。特にメバルは成長が遅く寿命が長いため、加齢に伴う代謝低下が更にセシウム濃度を高くする可能性もある。ただし、事故初期の暴露位置も重要な高濃度要因であるため、これらを併せて検討し、フサカサゴ科魚類における塩類代謝の特異性を証明する必要がある。

2. 研究の目的

前述の命題の回答を得るために、以下の 3 課題の解明を目的とした。

1) シロメバルの種特異的塩類代謝の解明：海産硬骨魚における放射性セシウムの高濃度は、塩類の取り込み速度/排出速度の比が大きい場合に起こる理論的蓋然性が高い。フサカサゴ科における高セシウム濃度を、高浸透圧と加齢代謝低下に帰する場合、セシウム排出速度のみではなく、他硬骨魚種との取り込み速度の差異も明らかにする必要がある。そこで、野外魚排出速度追跡、塩類濃度測定・耳石年齢査定と併せた放射性核種濃度解析を行うことにより理論的に取り込み速度を求め、フサカサゴ科魚類におけるセシウム濃度を規定する要因を解明する。

2) フサカサゴ科魚類における食物連鎖経由の塩類移行寄与の解明：海産硬骨魚における放射性セシウム浄化過程では、海水中放射性セシウムは福島事故以前の濃度に近くなっているため、海水から魚体への塩類侵入に伴う放射性セシウム移行は考えにくい。しかしながら、シロメバルにおける排出速度が遅い場合、餌からの移行量が排泄量の 25%に達する可能性もあるため、排出遅延の原因となる確率が高い。一方で、同じ棲み場に生息するアイナメも同様のセシウム濃度のベントスを餌生物としていることから、野外環境調査で、フサカサゴ科魚類の棲み場に生息する他魚種との差異を示す必要がある。そこで、シロメバルと同一の棲み場に生息するフサカサゴ科他魚種と他科魚アイナメにおける食物連鎖移行の差異を明らかにする。

3) 初期濃度決定におけるフサカサゴ科魚類の生態学的要因影響の解明：メバルなどのフサカサゴ科魚類は岩礁域を棲み場としている。また、シロメバルは冬季に産仔接岸する。福島事故では放射性セシウム水塊は沿岸に沿って南下し、高濃度期間は～4 月であったことから、海産魚におけるセシウム移行挙動特性を解明する場合、標識魚追跡調査などにより、生態学的条件で規定される初期汚染の定量評価が必須である。そこで、フサカサゴ科魚類のセシウム濃度推移に対する、種特異的定着性を生態学的要因の影響として解析する。

3. 研究の方法

1) シロメバルとその他硬骨魚の塩類濃度特性の調査：福島県南部熊川沖の特定の根におけるシロメバル・キツネメバル・アイナメを採取した。採取魚は解剖し、筋肉・硬骨部・内臓(胃内容物)を採取した。筋肉と胃内容物の餌生物を種同定分取し、Ge ガンマ線スペクトロメトリ(東京海洋大学)、および金沢大学低レベル放射能分析施設で求めた。安定セシウム・安定炭素素素同位体比は ICP-MS と IsoPrime100(電力中央研究所)で測定した。耳石年輪査定により採取魚

の年齢を求め、放射性・安定セシウム濃度と年齢・安定炭素窒素同位体比との関係を求めた。同時にカリウム濃度を測定し、種特異的な塩類代謝の差異を求めた。

2) 棲み場環境の放射生態学調査：研究対象魚が生息する福島県南部熊川沖の根において、定期的に海水を採取した。海水中濃度分析は極低レベル放射性核種スペクトル解析で求めた。魚中海洋物理環境調査と餌生物中安定炭素窒素同位体比分析を実施した。研究対象魚の胃内容物における餌生物画分と連行摂取懸濁粒子を弁別し、棲み場環境の濃度レベルをもとに、食物連鎖移行寄与を評価した。

3) シロメバルの活魚測定と標識放流追跡：福島県南部熊川沖の根で活魚捕獲したシロメバルについて、現場型 Ge ガンマ線測定装置を用いた活魚測定により放射性セシウムレベル排出速度を求めた。また、採捕個体を超音波コード化タグ発信器で標識後に放流し、受信器（東京海洋大学）の係留および超音波受信機装着水中自動航行装置（電力中央研究所）による 2 次元探査により 2 ヶ年追跡調査を行った。野外追跡調査で放流根における残留率と、沿岸寄りの根への移動を探索した。

4) 動的生物移行モデルによる硬骨魚類 3 種中濃度の再現計算法の構築：海洋拡散条件と放射性セシウムソースデータを用いて、2019 年末までの福島南岸海域の海水中放射性セシウム濃度のシミュレーションを行った。得られた移行パラメータを用いて、動的生物移行モデルによりシロメバルの放射性セシウム濃度の再解析手法を構築した。

4. 研究成果

1) シロメバルの塩類代謝特異性：研究対象海域で採取したシロメバル、ウスメバル、キツネメバル、アイナメと、福島沿岸で採取されたイシガレイ、ババガレイにおける安定 Cs と K 濃度を比較した結果、シロメバル筋肉における K 濃度は、他のメバル 2 種・アイナメ、およびマコガレイ・ババガレイにおける濃度より有意に高かったことから、シロメバルが属するフサカサゴ科魚類における塩類代謝の特異性が示された（図 1）。特に、シロメバル・ウスメバル筋肉中安定 Cs 濃度は、キツネメバル・アイナメより 1.3 倍有意に高かったことから、K 濃度差で示される塩類代謝の差異に加えて、Cs のシロメバル・ウスメバルの特異的濃縮が示された。筋肉中安定炭素同位体比の結果は、これらメバル 2 種は同じ岩礁域に生息するキツネメバル・アイナメと比較して、低次栄養段階の餌生物の捕食を示していたが、胃内容物中の放射性セシウム濃度に差異はなかった。従って、フサカサゴ科魚類における高 Cs 濃度は、食物連鎖に伴う濃縮よりは、K などの塩類と、Cs の代謝特異性に起因すると考えられた。

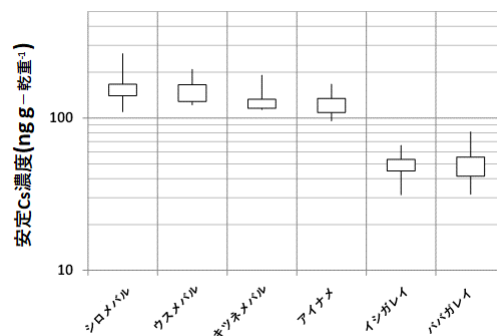


図1 メバル3種、アイナメおよびガレイ類における安定Cs濃度

2) 棲み場の放射生態学的环境：研究対象海域のシロメバルの胃内容物中放射性セシウム濃度の時系列推移は、2018 から 2019 年時点でおおよそ 1 Bq kg-wet^{-1} であり、同海域で測定した海水中濃度 0.01 Bq l^{-1} に本邦で得られている可食部（筋肉）濃縮係数 15 を乗じた平衡時期待濃度 $0.15 \text{ Bq kg-wet}^{-1}$ より高かった。胃内容物分解実験（易分解性画分：有機態 Cs の抽出）の結果、残渣である難分解性画分における放射性セシウム比率はおおよそ 0.3 であったことから、餌生物中の難分解性画分（外骨格・付着粒子）濃度は $0.3 \text{ Bq kg-wet}^{-1}$ 程度と考えられた。残る易分解性画分濃度 $0.7 \text{ Bq kg-wet}^{-1}$ を合理的に説明するためには、当該岩礁域の餌生物がより高い海水濃度へ暴露されたか、あるいは餌生物への食物連鎖における移行供給源（有機態 Cs）の存在を仮定する必要があると考えられた。

3) シロメバルにおける放射性セシウム代謝速度の検証：2017 年 7 月から 2020 年 3 月までの長期活魚測定実験で得られた福島沖捕獲シロメバルにおける放射性セシウムの代謝半減期は、クロソイを用いたアイソトープ実験で得られている代謝半減期 90 日に比較して 210 日と長く、代謝排出が遅いことがゲルマニウム検出器を用いた実験で検証された（図 2）。この結果は、シロメバルにおける安定 Cs の高濃度が、同元素の特異的代謝に起因すると解釈された結果 1) と符合していた。

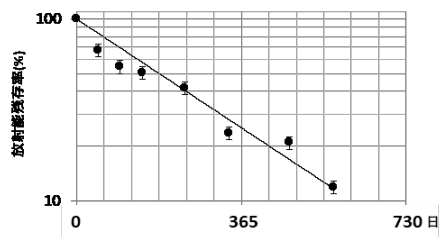


図2 シロメバルにおける放射性セシウム残存率の経時的変化 [T_{1/2} 180日の個体の例]

4) 福島南岸におけるシロメバルの定着性の検証：研究対象海域で採捕し、超音波コード化タグで標識後に、採捕した岩礁に放流したシロメバルを、2017 年 12 月から 2020 年 3 月までの期間に生息地点を追跡した結果、採捕岩礁周辺での長期間生息を示し（図 3）、福島沿岸における同

魚種の長期定着性が検証できた。生態学的要因である福島南岸の定着性が、初期の高濃度海水への暴露を引き起こした証明となった。一方で、2011年に冬季の沿岸接岸で産仔された個体の、3月時点での生息位置は特定できなかった。福島南岸でのシロメバル稚・仔魚の生息位置の特定と、港湾への迷入可能性に関する検討が課題として残った。

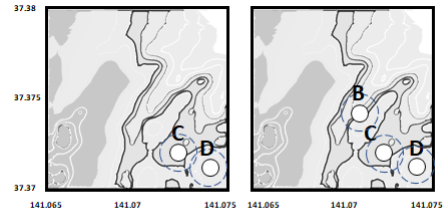


図3 福島南岸岩礁におけるシロメバル生息位置の追跡結果
(左図2018/4/23、右図2019/10/29、受信機B,C,Dで特定された生息範囲)

5)シロメバル中放射性セシウム濃度推移の再構築：研究対象海域のシロメバル筋肉中の放射性セシウムの2019年までの濃度推移は、年齢査定で求めた2011年前後の年級群間で異なっていたが、2019年にはおおむね低減して平衡状態にあることが導かれた(図4)。餌生物中の濃度規定要因の特定には至っていないが、実測された生物可給態画分を組み込んだ生物移行モデルシミュレーションで得られた濃度平衡値である数 Bq kg-wet^{-1} は、2019年実測値とおおむね符合し、フサカサゴ科魚類における放射性セシウム濃度決定要因として塩類およびCs代謝特異性が検証された。

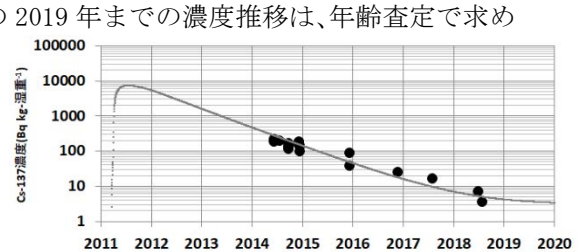


図4 シロメバル(2006年級群)における放射性セシウム残存率の経時的変化(●:実測値,一:計算値)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 石丸隆、立田穰、津旨大輔、青山道夫、浜島靖典、笠松伸江、山田学、芳村毅、水野拓治、神田穰太	4. 巻 203
2. 論文標題 Mechanism of radiocesium depuration in <i>Sebastes cheni</i> derived by simulation analysis of measured ¹³⁷ Cs concentrations off southern Fukushima 2014-2016	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Environmental Radioactivity	6. 最初と最後の頁 200-209
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.03.012	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Mokrane Velharet、Sabine Charmasson、津旨大輔、Mireille Mireille、Clusde Estournel	4. 巻 14(3): e0212616
2. 論文標題 Numerical modelling of ¹³⁷ Cs content in the pelagic species of the Japanese Pacific coast following the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident using a Age structured Food-web Model	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 PLoS ONE	6. 最初と最後の頁 1-31
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1371/journal.pone.0212616	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Vladimr Maedrich、Roman Bezhenar、立田穰、青山道夫、津旨大輔	4. 巻 135
2. 論文標題 ¹³⁷ Cs distribution in the marine environment of the Baltic and Black Seas and off the Fukushima Dai-ichi NPP: similarities and differences assessed by model	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Marine Pollution Bulletin	6. 最初と最後の頁 895-906
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.08.026	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 青山道夫、Roman Bezhenar、Vladimir Maedrich、立田穰、津旨大輔
2. 発表標題 Artificial radionuclides dataset of seawater, sediment and biota in marine
3. 学会等名 European Geophysical Union General Assembly 2018（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 立田穰、津旨大輔、青山道夫、浜島靖典、青野辰雄
2. 発表標題 Biogeochemical factors for determining radiocesium level in biota of the Pacific coast of eastern Japan
3. 学会等名 European Geophysical Union General Assembly 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 津旨大輔、坪野考樹、三角和弘、立田穰、豊田康嗣、青山道夫
2. 発表標題 福島第一原子力発電所事故によって海洋へ直接漏洩したCs-137, Sr-90, H-3の領域海洋における長期挙動
3. 学会等名 地球環境シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 津旨大輔、坪野考樹、芳村毅、三角和弘、立田穰、青山道夫
2. 発表標題 福島第一原子力発電所事故によって海洋へ直接漏洩した放射性物質の領域海洋における長期挙動
3. 学会等名 アイソトープ・放射線研究発表会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 津旨大輔、坪野考樹、三角和弘、立田穰、青山道夫、広瀬克己
2. 発表標題 福島第一原子力発電所事故時に海洋へ直接漏洩した ¹³⁷ Cs, ⁹⁰ Sr and ³ Hの領域海洋シミュレーション
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 津旨大輔、青山道夫、広瀬克己、坪野考樹、三角和弘、立田穰
2. 発表標題 Estimations of direct release rate of 137Cs, 90Sr and 3H from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant for four-and-a-half years
3. 学会等名 ENVIRA2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 津旨大輔、青山道夫、坪野考樹、三角和弘、立田穰
2. 発表標題 Estimations of direct release rate of 137Cs and 90Sr to the ocean from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant for five-and-a-half years
3. 学会等名 EGU General Assembly 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 自動航行装置の位置情報に基づく水中生息生物の位置特定手法	発明者 立田 穰	権利者 一般財団法人電力中央研究所
産業財産権の種類、番号 特許、特願 2 0 1 9 - 0 0 3 7 8 2	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 水産動植物のリリース方法及びリリース装置	発明者 立田 穰	権利者 一般財団法人電力中央研究所
産業財産権の種類、番号 特許、特願 2 0 1 8 - 0 0 4 2 9 7	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	津旨 大輔 (TSUMUNE DAISUKE) (10371494)	一般財団法人電力中央研究所・環境科学研究所・上席研究員 (82641)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	小林 卓也 (KOBAYASHI TAKUYA) (60371530)	一般財団法人電力中央研究所・環境科学研究所・上席研究員 (82641)	
研究 協力者	石丸 隆 (ISHIMARU TAKASHI)		
研究 協力者	伊藤 由加里 (ITO YUKARI)		
研究 協力者	鈴木 翔太郎 (SUZUKI SHOTARO)		
研究 協力者	天野 洋典 (AMANO YASUNORI)		
研究 協力者	浜島 靖典 (HAMAJIMA YASUNORI)		
研究 協力者	青山 道夫 (AOYAMA MICHIO) (80343896)		
連携 研究者	神田 穰太 (KANDA JYOTA) (60202032)	東京海洋大学・学術研究院・教授 (12614)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	内田 圭一 (UCHIDA KEIICHI) (50313391)	東京海洋大学・学術研究院・准教授 (12614)	
連携研究者	青野 辰雄 (AONO TATSUO) (20270605)	量子科学技術研究開発機構・量子医学・医療部門高度被ばく 医療センター福島再生支援研究部・グループリーダー (82502)	