

平成 30 年 6 月 16 日現在

機関番号：12101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K12200

研究課題名(和文)阿武隈山地溪流魚の放射性Cs移行メカニズムと溪流魚体内のCs低減化に関する研究

研究課題名(英文) Study on migration mechanism of radiocesium in the mountain stream of Evacuation Instruction area and the removal of radiocesium accumulated in the fish body

研究代表者

中里 亮治 (Nakazato, Ryoji)

茨城大学・広域水圏環境科学教育研究センター・准教授

研究者番号：30292410

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：浪江町の避難指示難区域において3年間にわたり溪流魚(ヤマメ・イワナ)の¹³⁷Cs濃度の推移を調べた。その結果、2魚種ともに環境中の放射能強度が高い河川ほど有意に高かった。調査期間内で、いずれの地点・魚種ともに¹³⁷Cs濃度の明瞭な減少傾向は認められず、福島第一原発事故から約7年が経過した現在では2魚種のCs濃度はほぼ平衡状態に達しているものと推測された。ヤマメとイワナのCs低減化実験の結果、ゼオライト混合飼料投与区で飼育した魚の生物学的半減期は、固形飼料投与区で飼育した場合と比較して、ヤマメとイワナでそれぞれ約40～50%短くなった。ゼオライト混合飼料は¹³⁷Csを低減させるのに有効であった。

研究成果の概要(英文)：The ¹³⁷Cs concentrations of two species of mountain stream fish, masu salmon and white-spotted char were monitored on the sites with different air dose rate, in the Evacuation Instruction area during 2015-2018. The ¹³⁷Cs concentrations of both fish were significantly higher in the sites with higher air dose rates than in lower sites. In all sites, ¹³⁷Cs concentrations of both species collected during sampling period did not decrease clearly. Therefore, ¹³⁷Cs concentrations of both species were supposed to reach equilibrium state in the present when approximately seven years passed from the nuclear accident at the FDNPP.

As results of the rearing experiments of masu salmon and white-spotted char involving ¹³⁷Cs, the rearing method using artificial feed including the zeolite was effective for removal of ¹³⁷Cs accumulated in the fish body.

研究分野：陸水生態学

キーワード：ヤマメ イワナ 標識放流実験 モニタリング 山地溪流 放射性セシウム 帰還困難区域

1. 研究開始当初の背景

2011年3月の福島第一原子力発電所事故により、環境中へ多量の放射性物質が放出された。事故から約4年が経過した2015年(平成27年)時点において、避難指示区域内およびその近傍の河川に生息するほぼすべての内水面魚種について採捕・出荷の制限・自粛がなされていた(2018年5月現在もこれらの制限・自粛は解除されていない)。

避難指示解除後の地域の再活性化と内水面漁業の復興のカギの一つとして、イワナ・ヤマメに代表される森林河川での溪流魚釣り、いわゆる遊漁活動の復活があげられており、地元の漁業組合関係者、地域行政関係者や住民の方々も強く熱望している。しかしながら、これまで、避難指示区域において遊漁対象となる溪流魚については、生息地環境を含めたそれらの放射性セシウム濃度の現状が十分調べられておらず、魚への放射性セシウムの移行経路や異なる空間線量環境下における魚への放射性セシウム蓄積速度の差異など、溪流生態系内での放射性セシウム移行メカニズムについても未解明であった。さらに、今後の放射性セシウムの推移や収束時期の予測、魚体内の放射性セシウム低減化方法の開発など多くの課題が手つかずのままであった。被災地での遊漁活動や生産活動を復興・復活させるためには上記のことを十分に理解・考慮・把握をしながら、適切な方策を立案することが重要と考えられた。

2. 研究の目的

(1)魚を含めた生物群集と生息環境中の放射性セシウム濃度の現状を把握するための、遊漁対象魚種のヤマメとイワナ、大型無脊椎動物および河川環境試料の放射性セシウム濃度のモニタリング。

(2)異なる空間線量環境下における魚への放射性セシウム蓄積速度の差異の有無を明らかにするための「標識放流実験」。この実験は放射性セシウムを含まない養殖イワナ・ヤ

マメを異なる空間線量をもつ河川に放流し、定期的に再捕獲することで放射性セシウムの蓄積速度(見かけの増加量)を評価するものである。

(3)森林河川生態系における溪流魚への放射性セシウム移行経路を明らかにするために、(1)で述べた魚類の胃内容物分析による餌資源経路からの推定のほか、河川水に含まれる溶存態の放射性セシウムからの移行の有無を検証するため、溪流魚を飼育ケージに入れて調査河川に設置する無給餌飼育実験(インサイト実験)の実施。これにより、魚への放射性セシウムの移行経路について、餌経由と水経由の二つに分けた量的評価が可能になる。

(4)魚体内に含まれる放射性セシウムを効率的に排出させる方法を開発することを目的とした、活魚測定法を用いた溪流魚の給餌飼育における放射性セシウムの取り込み・排出のモニタリングと魚体内のセシウム低減化に関する実験

3. 研究の方法

(1)ヤマメとイワナ、大型無脊椎動物および河川環境試料の放射性セシウム濃度のモニタリング

避難指示区域内にある山地溪流の4地点(地点A、B、C、D)において定期的に空間線量率の測定と試料採取を行った。河川環境試料として河川近傍の山土(表層約50mm)、河床堆積物(川砂)、水底落葉および河川水を採取した。溪流魚のヤマメとイワナはミミズやブドウ虫を餌とした釣りによって採捕し、冷蔵して研究室に持ち帰った。測定の前処理として、魚類試料についてはホールボディーの放射性セシウム分析後に可食部のみをU8容器に充填した。河川水は、カートリッジ型フィルタ装置によってろ過・濃縮を行った。処理後の河川環境試料および魚類は、Ge半導体検出器(CANBERRA社製)を用いて放射性セシウム濃度を測定した。

これらの調査は地点A、B、Cでは2015

年3~5月から、地点Dでは2016年3月から2018年3月まで実施した。

(2) 溪流魚の標識放流実験

標識放流実験は、4地点の中では空間線量率の最も低い地点Aと最も高い地点Dの2か所を実験フィールドとして、2015年に予備実験を行い、2016年5月と2017年5月に本実験を実施した。また晩秋から厳冬期にかけての水温の低い時期における¹³⁷Csの蓄積速度を調べるために、2017年10月に地点Dでのみ放流実験をした。各実験ともに魚類・甲殻類用麻酔剤FA100で麻酔後にイラストマー蛍光タグ(NMT社製)で標識した養殖イワナとヤマメを各地点に100~200尾程度放流した。ちなみに、これらの養殖魚には¹³⁷Csがほとんど含まれていない(5Bq/kg以下)。これらの魚は釣りによって定期的に再捕獲した。採捕した魚は速やかに冷蔵保温して実験室に持ち帰り、Ge半導体検出器による放射性セシウム分析を行うまで冷凍保存した。

(3) 溪流魚の無給餌飼育実験

餌経路以外でのセシウム移行経路を明らかにする目的で、中-大型の無脊椎動物が通過できない0.5mmメッシュのナイロン布地を張った網籠(25cm x 25cm x 40cm)を用意した。1つの籠に入れる魚は1尾のみとし、2016年5月に合計36基の籠(2魚種 x 9基 x 2地点)を地点Dに設置した。籠は14日、28日および42日後に各地点で3基ずつ回収した。

(4) 魚類の胃内容物分析

魚の胃内容物分析のために、上記の(1)~(3)において採捕した一部の魚については、胃を実体顕微鏡下で解剖し、分類群ごとに分別、計数した。また、魚類の餌資源の利用様式は、胃内容物中に出現した各餌項目の重量を計測し、餌項目ごとの平均重量百分率を求めることによって推定した。

(5) 活魚測定法を用いた溪流魚の給餌飼育における放射性セシウムの取り込み・排出のモニタリングと魚体内のセシウム低減化に

関する実験

魚体内Cs活魚測定法: 水を充填したマリネリ容器に供試魚を入れ、魚体固定用スポンジおよび小型エアポンプを設置してGe半導体検出器で、¹³⁷Cs濃度の活魚測定を行った。ジオメトリの検出効率への影響を考慮するために、玄米認証標準物質(製品番号: JSAC 0732)を用いて様々な体サイズのヤマメを模した体積線源を作製して補正係数を導出した。また、検出器と魚体との間隙による検出効率を考慮するために、体内にCsを含んだ死亡ヤマメを、活魚測定法とマリネリ容器に水を充填せず、検出器に魚体が密着するように固定した死亡魚測定法で測定し、¹³⁷Cs濃度の相対値から補正係数を導出した。

放射性セシウム取り込み実験: 放射性セシウム非汚染の養殖ヤマメ・イワナ各6尾を水温16℃の環境下で1~2ヶ月間、給餌飼育した。餌には放射性セシウムを含んだ魚肉と養鱒用固形飼料(以降、固形飼料)を混合した飼料(¹³⁷Cs濃度: 2,400 Bq/kg)を用い、各供試魚に1日当たり体重の3%程度与えた。飼育期間終了後、活魚測定により魚体内の¹³⁷Cs総量を測定した。

Cs排出実験: 取り込み実験後のヤマメ5尾とイワナ4尾を供試魚とし、Cs非汚染の環境下で50日間、無給餌飼育した。定期的な活魚測定を行い、魚体内の¹³⁷Cs総量の推移をモニタリングした。

Cs低減化実験: 排出実験後のヤマメとイワナ各4尾を供試魚とした。ヤマメとイワナ各2尾にゼオライト粉末と固形飼料を混合した飼料を、その他の供試魚には固形飼料を与えながら50日間、給餌飼育した。定期的に活魚測定を行い、魚体内の¹³⁷Cs総量の推移をモニタリングした。

4. 研究成果

(1) 避難指示区域内の森林河川に生息する溪流魚の¹³⁷Cs濃度の推移

2017年3月～12月の各地点の空間線量率の平均値は地点A、B、C、Dでそれぞれ約0.4、1.2、2.4および3.1 $\mu\text{Sv/h}$ であり、空間線量率の強度は地点D > 地点C > 地点B > 地点Aの順に高かった。各種環境試料も同様の傾向であり、地点間での環境試料の放射性セシウム濃度の強度の違いが各地点での空間線量率の差に影響しているものと考えられた。2015年～2017年度までの山土、水底落葉、川砂、河川水中の溶存 ^{137}Cs 濃度の推移をみると明瞭な減少は見られなかった。

ヤマメとイワナに含まれる ^{137}Cs 濃度は、2魚種ともに環境中の放射能強度が高い河川ほど有意に高かった (K-W test、 $p < 0.01$; 地点D > 地点C > 地点B > 地点A、Steel-Dwass、 $p < 0.01$)。空間線量率のもっとも低い地点Aで採捕した2魚種の ^{137}Cs 濃度は2015年～2017年度までの3年間でヤマメおよびイワナでそれぞれ102-3,829 Bq/kg と73-2,260 Bq/kg の範囲にあった。また3年間に採捕されたヤマメとイワナの平均値はそれぞれ581 Bq/kg と485 Bq/kg であり、魚種による ^{137}Cs 濃度の統計的な有意差はなかった。

空間線量率の最も高い地点Dで採捕した2魚種の ^{137}Cs 濃度はヤマメとイワナで855-27,738 Bq/kg と651-18,865 Bq/kg の範囲にあり、2016年～2017年度までの2年間に採捕された各魚種の平均値はそれぞれ5,137 Bq/kg と4,083 Bq/kg であった。魚種による ^{137}Cs 濃度の平均値に統計的な有意差は見られなかった。

本研究での調査期間内で、いずれの地点、魚種ともに ^{137}Cs 濃度の明瞭な減少傾向は認められず、福島第一原発事故から約7年が経過した現在では2魚種のCs濃度はほぼ平衡状態に達しているものと推測された。

(2) 標識放流実験によるヤマメとイワナの ^{137}Cs 蓄積速度の推定

2016年5月の放流実験の結果を図1と図2に示した。いずれの魚種とも放流後の経過日数が多い個体ほど ^{137}Cs 濃度が高かった。個体によってその濃度には差異が見られたもの

の、放流後から150日目まではほぼ直線的に濃度が増加した。その直線の傾きから計算した一日当たりの見かけ上のヤマメの ^{137}Cs 蓄積速度は、地点Aと地点Dでそれぞれ2.5 Bq/kg/day と24.9 Bq/kg/day であり、空間線量率の高い地点Dにおいて有意に速かった。

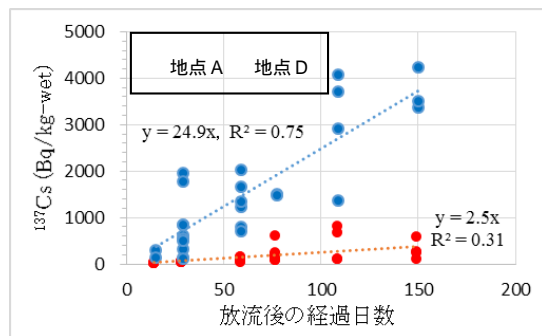


図1 2016年5月に地点AとDに放流した“ヤマメ”の ^{137}Cs 濃度の推移。

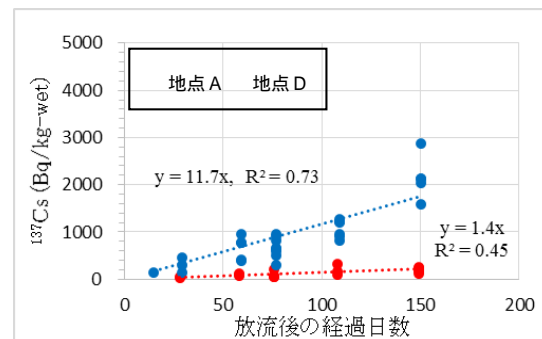


図2 2016年5月に地点AとDに放流した“イワナ”の ^{137}Cs 濃度の推移

一方、イワナの場合は、ヤマメと同様に空間線量率の高い地点Dにおいてその蓄積速度は速かったが、見かけ上の蓄積速度はヤマメと比較して有意に低く、地点Aと地点Dでそれぞれ1.4 Bq/kg/day と11.7 Bq/kg/day であった。このように ^{137}Cs 蓄積速度が魚種間で異なったことは非常に興味深い。現在のところ、この理由については不明であり、今後の検討課題としたい。

2017年5月の放流実験も2016年とほぼ同様の結果となった。また2017年10月に地点Dで実施した放流実験での1日あたりの ^{137}Cs 蓄積速度は、5月の値とは大きく異なり、ヤ

マメ・イワナともに約 2.8 Bq/kg/day と極めて低かった(表 1)。この理由は実験の期間である 2017 年 10 月末から翌年 3 月までの低い水温 (0.5~11.5) により魚の活性が低下したため、利用可能な餌資源や水経由での ^{137}Cs の取り込み量が低下したためと推測された。ちなみに地点 D における 2017 年 5 月下旬~10 月上旬までの 133 日間における水温は 12.3~17.6 の範囲であった。

表1 地点 D における 1 日あたりの ^{137}Cs 蓄積速度 (Bq/kg/day)

放流した時期	放流期間	ヤマメ	イワナ
2016 年 5 月中旬	150 日	24.9	11.7
2017 年 5 月下旬	133 日	26.0	17.8
2017 年 10 月下旬	147 日	2.9	2.8

2015 年から 3 年にわたる帰還困難区域でのモニタリング結果から、震災後 7 年が経過した現在でも溪流魚に含まれる ^{137}Cs 濃度は収束することはなく、高いレベルで平衡状態に達していると考えられた。また放流実験から空間線量の高低や魚種による ^{137}Cs の蓄積速度にも差があることが明らかとなり、これらの成果が遊漁活動の再開方法を模索する上での何らかのヒントになるかもしれない。

(3) 現場無給餌実験 (インサイト実験) について

実験終了後、2 地点ともに 2 魚種の放射性セシウム濃度は初期値よりも増加した。地点 A におけるイワナおよびヤマメの一日当たりの放射性セシウム蓄積速度の幾何平均値はそれぞれ、0.4 Bq/kg/day および 0.5 Bq/kg/day、また地点 D ではそれぞれ 1.6 Bq/kg/day および 0.9 Bq/kg/day であり、イワナとヤマメともに地点 A よりも地点 D での蓄積速度が有意に高かった (ANOVA: $p < 0.01$; Welch: $P < 0.05$)。

インサイト実験での放射性セシウム蓄積速度は放流実験で見られた蓄積速度の 10%

程度であった。実験終了後に回収した魚の胃内容物からは、空胃の個体のほか網籠の 0.5 mm メッシュを通り抜けたと考えられるユスリカ科幼虫などの小型の水生昆虫の他、トビケラ類の携行巣、小石、細かいデトリタス等も観察された。

このことから、現場無給餌実験における魚の放射性セシウム供給源として、河川水中の溶存セシウムのほかに、網カゴのネットを通り抜けて籠内の魚に摂食されたこれらの小型の水生昆虫やデトリタスが放射性セシウム供給源の一つになっていた可能性が考えられる。

(4) 魚類の胃内容物について

ヤマメおよびイワナの胃内容物には、大型無脊椎動物の水生昆虫やコガネムシなどの陸生昆虫が含まれていた。また水生昆虫の多くは、魚の捕獲場所と同一地点で採取された分類群と共通していた。胃内容物の約 60% (重量ベース) が水生昆虫で占められていたことから、これらが主要な餌資源となっていることが推測された。なお、落葉や砂粒・礫などを綴り合わせて作られる携行巣をもつカクツツトビケラやニンギョウトビケラ科幼虫の場合には、胃内容物中ではその全てが携行巣のみであり、巣中の幼虫本体は観察されなかった。これらのことからイワナとヤマメへの放射性セシウム移行経路の一つとして、餌アイテムとなる水生昆虫およびその巣材経由からであると推察された。

(5) 溪流魚への放射性セシウム移行メカニズムについて

本研究において、胃内容物調査と現場無給餌実験から、溪流魚のイワナ・ヤマメへの放射性セシウム移行経路は餌となる水生昆虫経由が主体と推測されたが、一部は河川水を経由して移行する可能性も示唆された。しかし、水生昆虫経由であっても水底落葉で構成される携行巣を持つカクツツトビケラのような昆虫類を捕食した場合は、巣材となる落

葉からも体内に放射性セシウムが取り込まれる可能性があるため、魚の胃中での巢からのセシウムの溶脱量を評価することが必要と思われる。

(6) セシウム取り込み・排出実験とゼオライトによるセシウム低減化実験

Cs 取り込み実験の結果、全ての供試魚で¹³⁷Cs 総量が増加し、餌に含まれていた¹³⁷Cs が魚体内に移行、蓄積されたことが確認された。投与した¹³⁷Cs 総量と実験後の魚体内の¹³⁷Cs 総量から計算した¹³⁷Cs 吸収効率の平均は、ヤマメでは 55 %、イワナでは 73 %となり、魚種間で差が見られた。この差は、餌の消化、吸収効率の違いにより生じたと考えられた。

Cs 排出実験の結果、全ての供試魚で時間の経過に伴う体内¹³⁷Cs 総量の減少が見られ、代謝活動によって¹³⁷Cs が排出されたと考えられた。両魚種ともに実験開始から 10~20 日間で¹³⁷Cs 総量が大きく減少し、以降、緩やかな減少となる傾向が見られた。

Cs 低減化実験の結果、両魚種ともにゼオライト混合飼料投与区、固形飼料投与区の両方で時間の経過に伴う魚体内の¹³⁷Cs 総量の減少が見られた。その減少割合はゼオライト混合飼料投与区の供試魚でより高くなった。ゼオライト混合飼料投与区の場合、飼育期間中の同一個体の¹³⁷Cs モニタリングデータに基づいて算出した生物学的半減期は、固形飼料投与区と比較してヤマメとイワナでそれぞれ約 40~50%短くなった。このことから、ゼオライト混合飼料を用いた飼育法は、魚体内¹³⁷Cs の低減化に効果的であることが示唆された。

5. 主な発表論文等 (研究代表者は下線) 〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 4 件)

1. 樽井美香・中里亮治・鈴木貴大・川上拓磨・Park Soeun・櫛井優志・苅部甚一・鈴木仁根・加藤健一・竹高慎祐・桑原祐

史: 帰還困難区域に生息する溪流魚の放射性セシウムのモニタリングと 標識放流実験による溪流魚の¹³⁷Cs 蓄積速度の推定, 第 17 回世界湖沼会議, 2018 年 10 月(予定) .

2. 中里亮治・鈴木貴大・上田仁・川上拓磨・Park Soeun・上野山諒一・櫛井優志・苅部甚一・鈴木仁根・加藤健一: 避難指示区域内の山地河川に生息する溪流魚の放射性セシウム濃度の推移について, 日本水環境学会第 52 回年次大会, 2018 年 3 月 .
3. 鈴木貴大・中里亮治・上田仁・苅部甚一: 活魚測定法を用いた溪流魚の給餌飼育における放射性セシウムの取り込み・排出のモニタリングと魚体内のセシウム低減化法に関する研究, 日本水環境学会第 52 回年次大会, 2018 年 3 月 .
4. 中里亮治・鈴木貴大・上田仁・川上拓磨・PARK SOEUN・苅部甚一・鈴木仁根・加藤健一: 空間線量率の異なる複数の森林河川における溪流魚の放射性セシウム濃度とその蓄積速度について, 第 6 回 環境放射能除染研究発表会, 2017 年 7 月 .

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況 (計 0 件)
取得状況 (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中里 亮治 (NAKAZATO, Ryoji)
茨城大学・広域水圏環境科学教育研究センター・准教授
研究者番号: 30292410

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

該当なし

(4) 研究協力者

苅部 甚一 (KARUBE, Zin'ichi)
茨城大学・広域水圏環境科学教育研究センター・助教

鈴木 仁根 (SUZUKI, Hitone)
室原川・高瀬川漁業協同組合・幹事

加藤 健一 (KATO, Kenichi)
室原川・高瀬川漁業協同組合・幹事