

[R3-4]

農作物のセシウム量の低減と土壌改良および遊漁対象となる溪流魚のセシウム・ストロンチウム濃度のモニタリングとそれらの移行メカニズム解明-農・水産業の持続的発展に向けて

Reduction of Radio Cesium Contamination to Agricultural Products, Soil Improvement and Monitoring of Cesium and Strontium Contamination of Mountain Stream Fish and the Migration Pathway into the Forested Mountain Stream Ecosystem of Difficult -to-Return Zone for Sustainable Agriculture and Fisheries

中里亮治^{#,A)}, 小松崎将一^{B)}, 苅部甚一^{C)}, 佐藤志彦^{D)}

Ryoji Nakazato^{#,A)}, Masakazu Komatsuzaki^{B)}, Zin'ichi Karube^{C)}, Toshihiko Satho^{D)}

^{A)} Water Environmental Field Station, Global and Local Environment Co-creation Institute (GLEC), Ibaraki University

^{B)} Center for International Field Agriculture Research and Education, Ibaraki University

^{C)} Department of Biotechnology and Chemistry, Faculty of Engineering, Kindai University

^{D)} Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science, Fukushima Research Institute, Sector of Fukushima Research and Development, Japan Atomic Energy Agency

Abstract

The nuclear accident at the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant (FDNPP) occurred as a consequence of the massive earthquake and associated tsunami that struck the Tohoku and northern Kanto regions of Japan on March 11, 2011. The released radioactive nuclides were deposited over a wide area of the Tohoku and Kanto regions. Ibaraki prefecture where located south to Fukushima prefecture, also was covered the radioactive nuclides. After the accident, serious contaminations of radio actives were observed of drinking water, vegetables, and milks and so on. Fortunately, these serious contaminations were quickly reduced because radioactive iodine was main contamination due to short time of half-life period. Radio cesium contamination that shows relatively longer half-life period, was observed several agricultural products after this accident in Ibaraki prefecture, however, there are still serious contamination in the coastal area of Fukushima prefecture. The present paper indicates that the contamination of fresh water fishes did not reduce during recent 8 years. On the other hand, Transfer Factor of soybean was significantly correlated with the depth of the vertical distribution of both radiocesium and exchangeable cesium.

Keyword: radioactive cesium, radioactive strontium, soybean, mountain stream fish, monitoring

1. はじめに

1.1 研究の背景

H23 年から R2 年までの連携重点研究 (H23-5) では、福島原発事故による放射性セシウムが、様々な農作物や水産物におよぼす影響を詳細に調べ、今後長く続くと予想されるその影響を軽減する方法を探る事を目的として研究を実施してきた。具体的にはセシウムを低減化するための土壌改良法を開発する一環として、ダイズを材料として、耕うん方法、カバークロップの種類、施肥の有無などの条件を変えて栽培し、ダイズ子実への放射性セシウム濃度や土壌からの移行係数が最も低くなるような最適な栽培方法を検証する実験を 2011 年～2020 年まで行った。また、研究期間の後半では、水産生物として帰還困難区域内の森林小河川に生息する溪流魚に注目し、それらの放射性セシウムやストロンチウム濃度のモニタリングと溪流魚への移行メカニズム解明を目的とした野外調査を実施した。これらの研究は、継続することに重要な意義があり、令和 3 年度～5 年度

#ryoji.nakazato.cwes@vc.ibaraki.ac.jp

の研究期間においてもこれまでと同様の研究を実施する。そして、農水産物への原発事故の影響を少しでも早く軽減し、福島県における農・水産業の持続的発展に資するのが最終的な目的である。

本連携重点研究グループで実施する研究内容は大きく次の 3 つの小テーマに分けられている。

小テーマ 1：帰還困難区域における溪流魚の放射性セシウムの移行メカニズムと魚体内のセシウム低減化に関する研究 (担当：中里亮治、佐藤志彦)

小テーマ 2：請戸川上流域における福島第一原子力発電所事故に由来する放射性ストロンチウムの分布 (担当：苅部甚一)

小テーマ 3：実栽培環境土壌におけるセシウム移行挙動の解明 (担当：小松崎将一)

1.2 研究の目的

1.2.1 帰還困難区域における溪流魚の放射性セシウムの移行メカニズムと魚体内のセシウム低減化に関する研究

2011 年 3 月の福島第一原子力発電所事故により、

[R3-4]

環境中へ多量の放射性物質が放出された。事故から 11 年が経過した 2022 年 4 月時点においても、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・自粛がなされている。溪流魚釣りの復活は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、帰還困難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は未解明であった。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思われる。研究グループ構成員の中里と荻部は、2015 年～2020 年度に、避難指示区域内の空間線量率の異なる複数の森林小河川を研究フィールドとして主に以下に述べる①と②についての研究を実施してきた。

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、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小河川に放流する「標識放流実験」の実施と定期的な再捕獲による放射性セシウムの取り込み速度の推定。

これらの研究によって、帰還困難区域の森林河川に生息する溪流魚や環境試料の ^{137}Cs 濃度の各種モニタリングデータから、震災後 10 年が経過した時点で、空間線量率や、環境試料の川砂については ^{137}Cs 濃度が低下傾向にあったが、溪流魚の ^{137}Cs 濃度は収束することはなく非常に高いレベルで推移していることが明らかになった。また、養殖ヤマメとイワナの放流実験から、溪流魚の ^{137}Cs 蓄積速度は個体毎に大差があることが分かった^[1]。

そこで、本研究の実施期間（令和 3～5 年度【2021～2023 年度】）において、溪流魚の ^{137}Cs の推移を把握しその収束時期を推測するために、今後も地道な野外調査から溪流魚の ^{137}Cs モニタリングを継続する。また魚の ^{137}Cs 蓄積速度に個体差が生じる理由を明らかにするために、個体毎の ^{137}Cs 蓄積速度や季節変化能の跡が可能となるような個体識別放流実験を実施する。さらに不溶性セシウム粒子（CsMP）にも着目して、これらの CsMP の山土や川砂中での存在状況の把握や、CsMP が魚の餌となる水生昆虫や魚の ^{137}Cs 濃度の個体差におよぼす影響についても検討する。

今年度の報告書では、2015 年度から 2022 年度までの 8 年間の帰還困難区域内の森林小河川内の環境

や溪流魚の ^{137}Cs 濃度のモニタリング結果を報告し、溪流魚 ^{137}Cs 濃度の推移と今後の収束時期について考察した。

1.2.2 請戸川上流域における福島第一原子力発電所事故に由来する放射性ストロンチウムの分布

2011 年 3 月の福島第一原子力発電所（原発）事故によって放射性セシウムなどとともに放射性ストロンチウムが大気中に放出され、原発から北西地域の地表に放射性ストロンチウムが多く沈着した。しかし、この地域の河川やそこに生息する生物の放射性ストロンチウム汚染実態の解明はほとんど行われていない。その原因は主に放射性セシウムに比べて放出量が少ないことによる社会関心の低さと放射性 Sr 分析法の難しさにある。そこで、私どもは簡略化・迅速化された新しい放射性ストロンチウム分析法を用い、2015 年から、放射性ストロンチウム沈着量が多い地域を流れる福島県浪江町の請戸川流域において、土壌、河川水および魚類の放射性ストロンチウム濃度から原発事故に由来する放射性ストロンチウムの分布状況について明らかにすることを目的とした調査を継続してきた。その結果、福島第一原子力発電所事故に由来する放射性ストロンチウムが請戸川流域の一部地域の土壌、河川水、イワナの骨に多く残っていること可能性が明らかになった。2022 年度は請戸川支流の小集水域において、この集水域に沈着した放射性ストロンチウムの域外への流出についての検討を行った。

1.2.3 実栽培環境土壌におけるセシウム移行挙動の解明

原子力発電所の事故後、いくつかの研究では生態系での放射性セシウム移動と推移のモデルを確立した。しかし、これらモデルの多くは森林・海洋・大気生態系に基づいており、農業生態系に適したモデルは開発されていない。この研究では、海外への農産物の出荷自粛が続いている茨城県において、大学農場における長期的な放射性セシウムモニタリングデータに基づいて、農業生態系での放射性セシウム動態モデルを構築する。これは、農業生態系における放射性セシウムの挙動の予測の役立ち、また、放射生態学の発展に貢献することができる。本研究の成果は、日本の原発事故後の農産物の安全の管理と科学的理解に貢献するだけでなく、世界中の原子力安全と食品安全にも貢献することを目指す。

研究グループ構成員の小松崎は、茨城大学農学部附属国際フィールド農学センターにおいて福島第一原子力発電所事故以降の 9 年間にわたる放射性物質の長期モニタリングを行い、半減期が 30.1 年である ^{137}Cs の作物吸収が、耕うんなどの営農作業を通じて、事故以降急速に減少していることを明らかにしている。これらに基づく放射生態系モデルの開発と評価は、原子力の利用をより安全し、人々の安全と健康を保証することにもつながり非常に有用な研究となる。

今年度はこれまでの研究を継続し、茨城大学 FSC

[R3-4]

のダイズ圃場(3つの耕うん、カバークロープ処理)において、土壌中、カバークロープ中、ダイズ中の放射性セシウムを2011年～2021年まで測定し、①耕うんの方法②カバークロープの種類から、放射性セシウム濃度、土壌からの放射性セシウムの移行量を調査した。また、それらの経年変化についても調査した。

2. 研究の概要

2.1 帰還困難区域における溪流魚ヤマメ・イワナの放射性セシウムの移行メカニズムに関する研究

2.1.1 帰還困難区域内の森林小河川内の環境や溪流魚の ^{137}Cs 濃度の推移 —2015年度から2022年度までの8年間の ^{137}Cs 濃度のモニタリング結果から—

浪江町の帰還困難区域内にある山地溪流の空間線量率の異なる3河川(Site 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。なお、Site B、C、Dはいずれも請戸川の支流である。

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)、および河川水を採取した。魚はミミズやブドウ虫を餌とした釣りによって採捕し、冷蔵あるいは冷凍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 ^{137}Cs 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 ^{137}Cs 濃度を測定した。これらの調査はSite BとCでは2015年3月から、Site Dでは2016年3月から現在までモニタリングを継続中である。

空間線量率の推移

Figure 1にSite B、Site CおよびSite Dの合計3つのSiteにおける2016年から2023年3月までの空間線量率の推移を示した。2023年3月の値はSite Dで $1.5\ \mu\text{SV/h}$ と最も高く、Site CとSite Bでそれぞれ $1.2\ \mu\text{SV/h}$ と $0.5\ \mu\text{SV/h}$ となり、Site Bが最も低かった(Figure.1)。

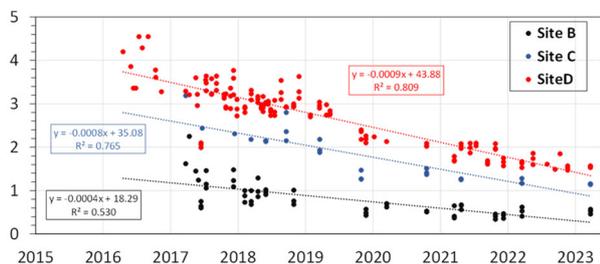


Figure 1. Changes of the air dose rates in Site B, C and D during 2015 – 2023. A vertical axis and a cross axis express air dose rates ($\mu\text{SV/h}$) and investigation years, respectively.

これらの空間線量率の値は線量率の測定を開始した2016年と2017年と比較してこれらの値は明瞭に

低下していた。例えば、2017年3月のSite BとCではそれぞれ $1.6\ \mu\text{SV/h}$ および $3.2\ \mu\text{SV/h}$ 、2016年4月のSite Dでは $4.2\ \mu\text{SV/h}$ であった。ただし、2022年3月と2023年3月のデータを比較すると、空間線量率の差はほとんどないことから、空間線量率の低下は、下げ止まりの傾向にあると推測された(Figure.1)。

環境試料における ^{137}Cs 濃度の推移

Figure 2に図2にSite B、Site CおよびSite Dにおける2016年から2023年3月までの環境試料の ^{137}Cs 濃度の推移を示した。いずれの試料の場合でも、調査日によって値のばらつきが大きかった。山土、川砂および河川水の ^{137}Cs 濃度は、2020年度までは減少傾向にあったが、2023年3月の測定値は2021年3月のデータと比較して、全体的に値が高かった。これらのことから、2022年以降はこれらの環境試料の ^{137}Cs 濃度の値は空間線量率と同様に下げ止まりの傾向にあると考えられた。

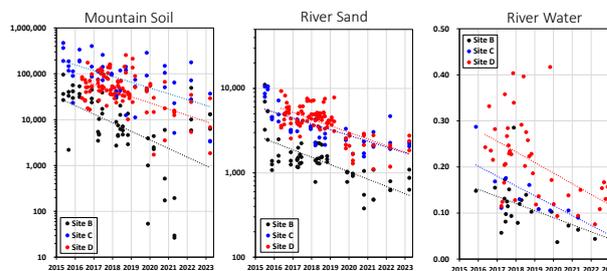


Figure 2. Changes of the concentrations of ^{137}Cs of environmental samples in Site B, C and D during 2015 – 2023. Vertical axes and cross axes express concentrations of ^{137}Cs (Bq/kg) and investigation years, respectively.

天然ヤマメとイワナにおける ^{137}Cs 濃度の推移

Figure 3と4にSite B、Site CおよびSite Dの合計3つのSiteにおいて2016年から2023年3月までに採捕した天然ヤマメとイワナの ^{137}Cs 濃度の推移を示した。2022年度に採捕した天然ヤマメの ^{137}Cs 濃度は、Site Dの平均値が $3,791\ \text{Bq/kg}$ ($n=50$)、Site Cのそれが $1,127\ \text{Bq/kg}$ ($n=4$)、Site Bが $1,227\ \text{Bq/kg}$ ($n=12$)であった。天然イワナの ^{137}Cs 濃度は、Site Dの平均値が $1,156\ \text{Bq/kg}$ ($n=11$)、Site Cのそれが $1,206\ \text{Bq/kg}$ ($n=10$)、Site Bが $831\ \text{Bq/kg}$ ($n=7$)であった。

以上のことから、空間線量率の高い採捕区域の溪流で採捕した個体の ^{137}Cs 濃度が高い傾向があることが分かった。参考までに、2021年度に採捕した天然ヤマメの ^{137}Cs 濃度は、Site Dの平均値が $3,622\ \text{Bq/kg}$ ($n=37$)、Site Cは捕獲無し、Site Bが $1,104\ \text{Bq/kg}$ ($n=27$)であった。また、イワナの ^{137}Cs 濃度は、Site Dの平均値が $2,790\ \text{Bq/kg}$ ($n=12$)、Site Cのそれが $1,114\ \text{Bq/kg}$ ($n=21$)、Site Bが $895\ \text{Bq/kg}$ ($n=15$)であった。2021年度と2022年度のデータと比較した場合、地点や魚種による ^{137}Cs 濃度の上昇や低下に関する一定の傾向は見られなかった。さらに2015年からの ^{137}Cs 濃度の推移をみても2種ともに明瞭な減少傾向は見られなかった(Figures 3、4)。

[R3-4]

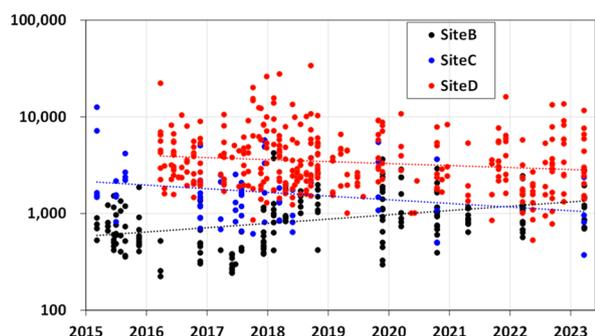


Figure 3. Changes of the concentrations of ^{137}Cs of masu salmon (Yamame) captured in Site B, C and D during 2015 – 2023. A vertical axis and a cross axis express concentrations of ^{137}Cs (Bq/kg) and investigation years, respectively.

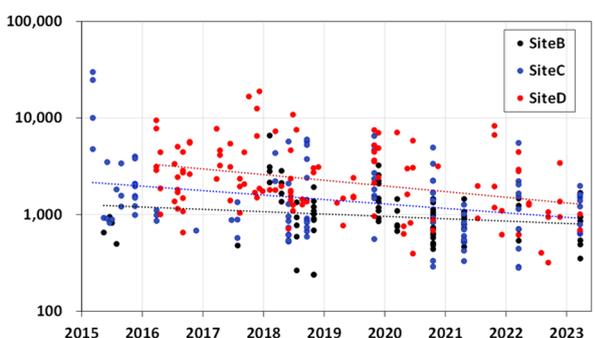


Figure 4. Changes of the concentrations of ^{137}Cs of white spotted char (Iwana) captured in Site B, C and D during 2015 – 2023. A vertical axis and a cross axis express concentrations of ^{137}Cs (Bq/kg) and investigation years, respectively.

2.2 請戸川上流域における福島第一原子力発電所事故による放射性ストロンチウムの分布

今年度は 2022 年に福島県浪江町を流れる請戸川流域の地点 D の小河川において、放射性ストロンチウムの流出量の推定を行った。まず、小河川の源頭部において流量の計測を行った。同時に、河川水及び周辺の斜面表層の土壌を採取し、以下の手順で放射性 Sr 分析を行った。土壌は風乾、2 mm 篩によるふるい分けを行い、2 mm 以下の細土を分析試料とした。この土壌試料を灰化 (450°C、24 時間以上) し、その灰化物について硝酸による酸抽出を行った。河川水についてはメンブレンフィルター (孔径:0.45 μm , Durapore もしくは MF-Millipore, Merck) を用いた吸引ろ過を行った。その後、キレートファイバー (MetaSEP CH-1, GL Sciences) を用いて河川水の中の Sr や Y (イットリウム) 等を含む陽イオンの濃縮を行った。これらの酸抽出液および濃縮液に対して DGAResin (Eichrom) によるイットリウム (Y) の分離を行った^[2]。得られた溶離液から水酸化鉄の沈殿により Y-90 を分離し、低バックグラウンド 2 π ガスフローカウンター (LBC-4211B、日立アロカメディカ

ル) を用いてそのベータ線を計測した。同時に、各試料における安定 Sr および Y 濃度を ICP 発光分光分析装置 (Agilent 5110 ICP-OES, Agilent) により求め、最終的に放射性ストロンチウム (^{90}Sr) の濃度を算出した。小河川源頭部の調査地における河川流量はおおよそ 0.1 L/s であった。同時に採取した河川水の ^{90}Sr 濃度は 0.002 Bq/kg、河川近傍の土壌では 449 Bq/m² となった。この小河川源頭部における集水域面積 (0.012 km²) は地図ソフト (Garmin BaseCamp, バージョン 4.7.4) を用い算出した。これらの結果から、集水域に 2022 年時点で沈着している ^{90}Sr 量を 5.4 MBq (0.012 km² × 449 Bq/m²)、1 年に河川を通じてこの集水域から流出する ^{90}Sr 量を 5050 Bq (0.002 Bq/kg × 0.1 L/s × 86400 s × 365 日) と推定した。これらの推定値からこの小集水域に沈着した ^{90}Sr が河川水中の溶存態の ^{90}Sr として域外に流出する割合は 0.1% 程度であると見積もることができた。

2.3 実栽培環境土壌におけるセシウム移行挙動の解明

試験は茨城大学農学部フィールドサイエンス教育センター内の有機ダイズ試験圃場で行った。試験区は 3 つの耕うん方法 (ロータリー耕・プラウ耕・不耕起)、3 種のカバークロップ、(ヘアリーベッチ・ライムギ・雑草)、施肥の有 (20 kg/ha・0 kg/ha) を 4 反復 (72 プロット) で設定した。また、2020 年以降は、バイオ炭の有無 (8 t/ha・0 t/ha) に変更した。土壌は 30 cm のコアサンプラーを用いて 4 層に分けて採取し、カバークロップは 0.25 m² のコドラートを用いてプロットごとに収穫。ダイズはプロットごとに 1 畝 1 m 以内に存在する株を刈り取り後茎と葉に分け、その後放射能分析を行った。

まず、土壌中の放射性セシウムの分布は、2011 年においては、3 種類の耕うん体系で放射性セシウム分布は表層に集中していたが、2012 年からは、ロータリー耕とプラウ耕での ^{137}Cs の土中分布は均一化した。これに対し、不耕起条件であると事故後 10 年を経ても表層に集中したままとなっていた。放射性セシウムのダイズへの移行係数は、土壌中の放射性セシウム分布と関係があることが認められた。これは、耕うんなどの営農活動が放射性セシウムを土中に埋没させることで、ダイズへの移行を抑制したものと考えられる。

ダイズ子実の ^{137}Cs 含有率は 2011 年以降安全基準を大幅に下回っていたが、2011 年に比べて 2021 年には ^{137}Cs 含有率が継続して減少していることが認められた。ダイズ子実の ^{137}Cs 濃度は年ごとに指数関数的に減少し、プラウ耕とロータリー耕では、不耕起に比べてダイズ子実の ^{137}Cs 含有量は著しく低下した。

3. 考察

3.1 帰還困難区域における溪流魚の放射性セシウムの移行メカニズム

2015 年～2022 年の 8 年間にわたる帰還困難区域

[R3-4]

の森林河川（請戸川支流）に生息する溪流魚や環境試料の ^{137}Cs 濃度の各種モニタリングから以下の結論と今後の課題が示された。

3.1.1 帰還困難区域の森林小河川に生息する溪流魚の ^{137}Cs の収束時期や今後の推移について

FDNPP 事故から約 11 年が経過した時点でも溪流魚の ^{137}Cs 濃度は収束することはなく非常に高いレベルで平衡状態に達していると考えられ、地域住民の方々にとっては大変厳しいことに、今後数十年はこのレベルの状態が続くものと推測された。

3.1.2 帰還困難区域の森林小河川に生息する溪流魚に関する今後の研究について

帰還困難区域の森林小河川の空間線量率や環境試料の放射性セシウム濃度が低下傾向にあるにも関わらず、ヤマメやイワナの ^{137}Cs 濃度が低下しないこと、また魚の個体間で ^{137}Cs 濃度に大きな差が見られる理由は依然として不明のままであったが、これは複雑な移行メカニズムの存在が一因であると推測される。今後の展望として、イワナとヤマメの餌生物となる陸生・水生昆虫類の ^{137}Cs の季節変化、並びにそれらの餌となる林床や河床に供給される落葉、河川中の付着藻類・糸状藻類等の一次生産者の ^{137}Cs 濃度の季節変化も追跡していくことで、この複雑な移行メカニズムを解明していきたい。

3.3 放射性ストロンチウムの集水域内における挙動について

今年度は初めて集水域内における放射性ストロンチウムの挙動を定量的に評価した。その結果、地点 D を流れる小河川の源頭部における小集水域ではあるが、集水域に沈着した放射性 Sr の流出量は 1 年間で沈着量のおよそ 0.1% と見積もることができた。過去、森林に沈着した放射性セシウムの流出量は沈着量の 0.02~0.3% であり、沈着した放射性セシウムのほとんどが森林内にとどまることが明らかとなっている^[3]。今年度の研究結果は、事故から 11 年が経過した段階であるが、山林に沈着した放射性ストロンチウムも放射性セシウムと同様に大部分が山林内にとどまる傾向が強いことを示している。この地点 D の小河川においては土壌やイワナの ^{90}Sr 濃度が他の地域よりも高いことが私どもの過去の研究から明らかになっている。このことから、地点 D のような福島第一原子力発電所事故によって放射性ストロンチウムが多く山林に沈着した地域は、土壌から放射性ストロンチウムが少しずつ河川へと移行し、その河川に生息する生物に放射性ストロンチウムが取り込まれる経路が存在し、その影響によりこの地域では土壌だけでなく河川水や魚類の放射性ストロンチウム濃度も他地域に比べて高い状況が続いていることが示唆される。今後はこの小河川集水域全体における沈着、流出量の推定や放射性ストロンチウムの形態別の挙動、山林斜面における放射性ストロンチウムの挙動を明らかにすることで、山林に沈着した放

射性ストロンチウムの挙動の解明を進めていく予定である。

3.4 実栽培環境土壌におけるセシウム移行挙動の解明ニズム

原発事故により東北および関東は広く放射性物質の降下（フォールアウト）を受けたが、農地では土壌の持つ放射性セシウムの吸着・固定能力が発揮され、農作物への移行量はごく少なく、事故初年目からほとんどの農作物の放射能汚染は問題にならなかった。とくに農地では施肥や堆肥投入など土づくりを通じて土壌の放射性セシウムの吸着能力が高くなることで作物への移行を阻止していることが認められた。今までの研究成果では、土壌の粘土鉱物の含有量、カリウム量などの土壌の粒度や化学的成分などの差異が放射性セシウムの作物移行に影響があることが報告されていたが、今回の成果では、ダイズ子実のセシウム吸収量は、同一の汚染レベルにおいて土壌中のセシウムの分布状況および交換性セシウムと交換性カリウムの比率に大きく影響を受けることを明らかとした。これにより、耕うんなどの農家が通常行っている農作業が放射性セシウムの作物移行を抑制することの科学的根拠が明らかになった。

参考文献

- [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(2018), 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 ^{137}Cs 蓄積速度の推定, 第 17 回世界湖沼会議 (いばらき霞ヶ浦 2018) 講演要旨集, pp.603-605.
- [2] H. Tazoe, et. al. (2016): "Determination of strontium-90 from direct separation of yttrium-90 by solid phase extraction using DGA Resin for seawater monitoring", *Talanta* 152, 219-227.
- [3] 環境省 (2022): 放射線による健康影響等に関する統一的な基礎資料東京電力福島第一原発事故とその後の推移 (省庁等の取組), 令和 4 年度版 上巻, <https://www.env.go.jp/content/900410899.pdf>.