

[23-5]

農作物のセシウム量低減と土壌改良-農・畜産業の永続的発展に向けて Reduction of Radio Cesium Contamination to Agricultural Products and Soil Improvement for Sustainable Agriculture

小松崎将一^{#A)}, 中里亮治^{B)}, 荏部甚一^{C)}

Masakazu Komatsuzaki^{#A)}, Ryoji Nakazato^{B)}, Zinichi Karube^{C)}

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

^{B)} Center for Water Environment Studies, Ibaraki University

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

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 reduced during recent 3 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: Radio cesium, soybean, freshwater fish

1. はじめに

1.1 研究の背景

本研究は、福島原発事故による放射性セシウムの、様々な農作物への影響を詳細に調べ、今後長く続くと予想されるその影響を、土壌改良などにより軽減する方法を探る事を目的とする。そのため、現に農業に取り組んでいる農家の方、農学・環境研究を長年行っている大学の農学部研究者、そして大学及び法人研究機関の原子核物理研究者から成るメンバーが、連携して本研究を推進する。

東京電力福島第一原子力発電所より放出された放射性物質が農作物へ与える影響を評価し、その影響を農業現場で最低限に抑える事が急務となっている。この問題に関連して、農水省は、農地土壌中の放射性セシウムの野菜類と果実類への移行について、平成 23 年 5 月 27 日にプレス発表を行った。ここで利用された、科学的資料は、主には、海外の数編の論文である。科学的資料の数が少ない事は、大きな問題であるが、想定される事故では無かったことから致し方ない面がある。一方、別の問題として、日本と海外の土壌や農作物、環境の違いにより海外のデータが我が国の状況に適用できるか否かがある。そこで、今回の原発事故の影響を受けた福島県、茨城県等の農地で栽培された色々な農作物を採取し、その中の放射性セシウム量を精度よく測定・解析し、実情がどうなっているかを先ずは明らかにする。そ

の結果、様々な農作物についての、放射性セシウムの移行係数の知見が得られる。

ところで、セシウムの移行については酸性度やカリウム濃度が影響をすることはわかっているが、移行係数の測定に加えて土壌分析を同時に実施することで移行係数を左右する他の条件の知見が合わせて得られる。その結果を踏まえ、セシウムを低減化するための土壌の改良を試み、その効果を検証する。また、土壌から植物や餌資源などを介し、畜産や水産物に対する影響を検討する。

本研究の遂行により、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・畜産業の永続的発展に資するのが最終的な目的である。

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、環境中へ多量の放射性物質が放出された。事故から約 8 年が経過した現在でも、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。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

[23-5]

しながら、これまで、避難指示地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思われる。

そこで私どもの研究グループでは、平成 27 年(2015 年)～30 年(2018 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河川を研究フィールドとして以下に述べる①～④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。

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実験

今回の報告書では、①と②について報告するが、①では 2015 年から 2018 年度までの 4 年間の調査結果についてデータを整理し、帰還困難区域の森林河川に生息する溪流魚(イワナ・ヤマメ)の ^{137}Cs 濃度の推移と今後の収束時期についても考察を加えた。また②では、放流時の個体サイズや魚種の差異による ^{137}Cs 蓄積速度の多寡について明らかにするために、放流した魚すべてについて個体の区別が可能となる「個体識別標識放流実験」を 2018 年度に実施したので、それらの結果についても報告する。

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(Cs)などとともに放射性ストロンチウム(Sr)が大気中に放出され、原発から北西地域の地表に放射性 Sr が多く沈着した(福島県

2012)。しかし、この地域の河川やそこに生息する生物の放射性 Sr 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(Cs)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 Sr 分析法(Karube et al. 2016, Tazoe et al. 2016)を用い、2015 年から、放射性 Sr 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 Sr 濃度から原発事故に由来する放射性 Sr 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いる。2018 年度は湧水と土壌の放射性 Sr について、空間線量率の高い地点 D(後述)の小河川を対象に複数の調査点を設けた詳細な調査を実施した。

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

茨城大学 FSC のダイズ圃場(3 つの耕うん、カバー・クロップ処理)において、土壌中、カバー・クロップ中、ダイズ中の放射性セシウムを 2011 年～2018 年まで測定し、①耕うんの方法②カバー・クロップの種類から、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

2.1.1 避難指示区域内の森林河川に生息する溪流魚の ^{137}Cs 濃度のモニタリング

帰還困難区域内にある山地溪流の空間線量率の異なる 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。なお、地点 A は高瀬川支流、地点 B, C, D は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 50 mm)、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 ^{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。これらの調査は地点 A では 2015 年 5 月から 2017 年 11 月まで実施した。また地点 B と C では 2015 年 3 月から、地点 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。

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、 $3.1 \mu\text{Sv/h}$ 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

[23-5]

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～2018 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傾向は見られなかった。

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。特に空間線量率の最も高い地点 D で 2018 年度に捕獲されたヤマメとイワナのすべての個体の ^{137}Cs 濃度が 1,000 Bq/kg wt を超えており、10,000 Bq/kg wt 以上の値を示す個体も散見された。

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 8 年が経過した現在では 2 魚種の ^{137}Cs 濃度はほぼ平衡状態に達しているものと推測された。

2.1.2 個体識別放流実験による ^{137}Cs 蓄積速度の推定

本実験は、4 地点の中で空間線量率の最も高い地点 D の溪流で、2018 年 5 月から実施した。 ^{137}Cs をほぼ含まない養殖のイワナとヤマメは、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) と個体識別が可能のようにアルファベット 1 文字と二ケタの数字が記載された VI タグ (NMT 社製) で標識し、放流前の体長と体重を記録した。これらの供試魚を、溪流の 550 m の範囲にある 7 か所で、それぞれ約 20～50 尾程度放流した。合計放流尾数はヤマメとイワナで、それぞれ 139 尾および 192 尾であった。これらの放流場所は GPS で座標を記録した。放流魚は釣りによって月 1 回程度の頻度で定期的に再捕獲した。再捕獲した際には、魚の口から鰓に数字の記入された結束バンドを通し、採捕場所の座標を GPS に登録し、GPS のメモリー番号と結束バンドの数字を野帳に記録した。採捕した魚は速やかに冷蔵保温して、調査地から約 15 km 離れた浪江町の市街地にある屋外作業場に持ち帰り、VI タグの有無や番号の確認後に GPS との関連付けをした。これらの魚は一尾毎にビニール袋に詰めた後に、現場で冷凍し、実験室に持ち帰った。これらの試料は Ge 半導体検出器による ^{137}Cs 分析を行うまで冷凍保存した。

VI タグにより標識した個体について、放流場所と再捕獲場所の位置情報を解析したところ、ヤマメは放流地点からほぼ移動しないのに対して、イワナは個体によっては長距離を移動していた。再捕獲した体重は放流前と比較して減少した。特にヤマメの場合は個体ごとの減少率の差が大きかった。また、魚の ^{137}Cs 濃度と放流日数から計算した一日あたりの見かけの ^{137}Cs 蓄積速度は、ヤマメとイワナでそれぞれ 19.9 Bq/kg day および 5.3 Bq/kg day となり、イワナよりもヤマメの方が速かった。2 魚種において、これらの蓄積速度は放流時の体重とは明瞭な関係は示されなかったが、ヤマメの場合はイワナと比較して個体差が極めて大きいことが分かった。蓄積速度の

個体差が生じる理由については、現在のところ明確な証拠はないが、溪流魚の ^{137}Cs は利用可能な食物資源から主に移行することから、 ^{137}Cs 蓄積速度が高かった個体は、より多くの餌を獲得できた個体なのかもしれない。これらのことを明らかにするため、今後は魚サンプルの胃内容物量と餌となる食物源の ^{137}Cs 濃度との関係を調べる予定である。

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

2018 年 8 月に請戸川上流域 (空間線量率の高い地点 D) の小河川にて調査を行った。調査は小河川源流域 (NP4) 及び下流域 (NP2) では小河川に流入する湧水 (20L) および近傍の土壌 (表層 5cm)、中流域 (NP3、NP5) では河川水 (10L)、今回の調査地点の中で最も下流に位置する地点 (最下流、P1) では河川水 (10L) と河川近傍の土壌 (表層 5cm) を採取した。また、魚類の捕獲は中流域 (NP3) ～源流域 (NP4) までの範囲で行った。採取した魚類 (イワナ) は骨を灰化後に酸分解、土壌は灰化後に酸抽出、河川水はキレート樹脂による Sr の濃縮を行った。その後は各試料ともに Sr Resin (Eichrom) (骨、土壌、河川水) もしくは DGA Resin (Eichrom) (骨、土壌) を用いた固相抽出処理 (Karube et al. 2016、Tazoe et al. 2016) を行い、最終的に放射性イットリウム (^{90}Y) のベータ線を低バックグラウンド 2 π ガスフローカウンター (日立アロカメディカル) で測定し、放射性 Sr (^{90}Sr) の放射能を算出した。

P1、NP2、NP4 における表層土壌の Sr-90 濃度は、P1 : 72 ± 2 Bq/kg dry、NP2 : 57 ± 2 Bq/kg dry、NP4 : 21 ± 1 Bq/kg dry となった。今回の調査では河川水中の Sr-90 濃度 (P1) は測定することはできなかったが 2016 年では 0.005 Bq/kg の値が得られており、今回はこの値を P1 の河川水の濃度とした。P1 よりも上流域で小河川に流入する湧水については、P1 よりも近い NP2 が 0.007 ± 0.001 Bq/kg、NP2 よりも上流に位置する NP4 は 0.003 ± 0.001 Bq/kg となった。NP2 の湧水の Sr-90 濃度が源流部の NP4 の湧水よりも高い理由の一つとして、これらの地点の土壌中 Sr-90 濃度の違いが考えられえらる。これは、NP2 は NP4 よりも土壌中 Sr-90 濃度が高いため、そこから溶出する Sr-90 の量が NP2 で多いことによると思われる。また、P1 と NP4 の中間に位置するこの NP2 のような場所からの高 Sr-90 濃度の湧水の流入があることにより、P1 の河川水が源流部の NP4 の湧水よりも高くなっている可能性がある。今回の調査で採取したイワナの分析を行い、 $45 \sim 79$ Bq/kg wet (n=3) の値を示した。2016 年に同じ河川 (P1 よりも上流側) で採取したイワナの値は $27 \sim 144$ Bq/kg wet (n=11) であり、2016 年から 2018 年にかけてイワナの Sr-90 濃度の低下傾向は見られなかった。このことは、2018 年の時点でも魚類には原発事故由来の放射性 Sr が多く蓄積していることを示している。

2.3 実栽培環境土壌におけるセシウム移行挙動の

[23-5]

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(20kg/ha・0kg/ha)を 4 反復(72 プロット)で設定した。土壌は 30cm 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 0.25m² 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 1m 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。

調査の結果から、ダイズの放射性セシウム濃度は、2011 年からの年次的変化をみても 7 年間耕うんを行ったプラウ区、ロータリー区のほうが不耕起区に比べ放射性セシウム濃度は優位に低い値を示した。とくに、ダイズの放射性セシウムの移行係数は、土壌中の放射性セシウムの分布に大きく影響を受けることが明らかとなった (Fig.1)

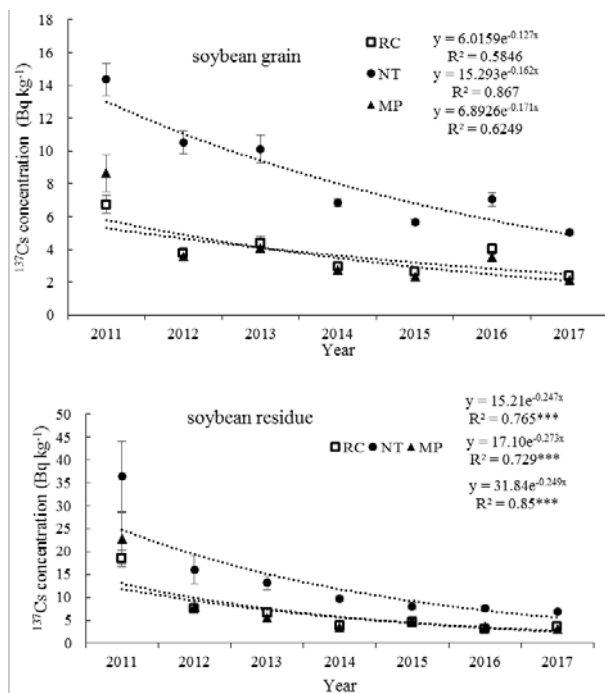


Fig. 1 Dynamics of ¹³⁷Cs concentration (Bq kg⁻¹) in soybean grain and residue (averaged for three cover crops species and fertilizer levels). Vertical line represent the standard error. *, *** and R² represent significant at the 0.05, 0.001 confidence levels and determination coefficient, respectively.

3. 考察

3.1 帰還困難区域の森林河川に生息する溪流魚体内に含まれる ¹³⁷Cs の収束時期や今後の推移について

2015 年～2018 年の 4 年間にわたる帰還困難区域の森林河川 (請戸川支流・高瀬川支流) に生息する

溪流魚や環境試料の ¹³⁷Cs 濃度の各種モニタリングデータの解析から、震災後 8 年が経過した現在でも河川およびその周辺環境試料や溪流魚体内に含まれる ¹³⁷Cs 濃度は収束することで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。

3.2 溪流魚の活魚状態での放射性セシウムのモニタリング方法の開発に関する今後の方向性

これまでは、活魚状態での放射性セシウムのモニタリング方法の一つとして、野外から採取した魚を実験室に持ち帰り、様々な餌条件で天然魚を飼育して、その個体を用いて実験室内に設置した測定器を使用して活魚状態で ¹³⁷Cs 濃度を測定する方法を用いていた。しかし、これまで簡便に現場で溪流魚の ¹³⁷Cs 濃度が測定できる技術や方法はなかった。簡便な測定システムが確立できれば、魚の Cs モニタリングや溪流魚の Cs 低減化実験にも有効活用できると思われる。そのため 2018 年の後半からは簡易測定器の制作とそれを用いた現場での溪流魚の ¹³⁷Cs 濃度測定システムの開発を進めている。

3.3 請戸川上流域における放射性ストロンチウムの動態

本研究により、土壌から河川水を経由して最終的に魚類の骨に原発事故由来の放射性 Sr が移行していることが示唆された。また、請戸川上流の一部地域において魚骨中の Sr-90 濃度が 2016 年から 2018 年にかけて低下傾向が見られないという結果は、原発事故から 7 年経過した 2018 年においても未だに原発事故由来の放射性 Sr がこれらの地域に多く残存していることを示唆するものである。

3.4 実栽培環境土壌におけるセシウム移行挙動の解明

作物への放射性セシウムの移行係数は、各種耕うん条件下において経年的に減少するが、震災後 7 年を経ても一定の放射性セシウムが作物吸収されることが明らかとなった。

参考文献

- [1] 福島県 “福島県における土壌の放射線モニタリング調査結果”. (2012)
- [2] Z. Karube, Inuzuka, Y., Tanaka, A., Kurishima, K., Kihou, N., and Shibata, Y. Radiostromium monitoring of bivalves from the Pacific coast of eastern Japan”. “Environmental Science and Pollution Research 23, 17095–17104. (2016)
- [3] H. Tazoe, Obata, H., Yamagata, T., Karube, Z., Nagai, H., and Yamada, M. “Determination of strontium-90 from direct separation of yttrium-90 by solid phase extraction using DGA Resin for seawater monitoring”. Talanta 152, 219–227. (2016)