

[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^{B), C*)}

Masakazu Komatsuzaki ^{#,A)}, Ryoji Nakazato^{B)}, Zinichi Karube^{B), 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, * present address

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 7 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～29 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、遊漁対象魚種の子アサギとイワナ、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」の実施と定期的に再捕獲による放射性セシウムの取り込み速度(見かけの増加量)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、餌経路と水経路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、2017 年度実施分について試料分析が終了している①と④についての研究成果を報告する。特に①に関しては 2015 年から 2017 年度までの 3 年間のデータ解析から、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) ^{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。

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。そこで本研究では、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、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。

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～2017 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 濃度の推移

帰還困難区域内の空間線量率の異なる二級河川請戸川と高瀬川のそれぞれの支流となる 4 か所の山地溪流(地点 A,B,C,D)を調査フィールドとした。地点 A,B,C では 2015 年の 3～5 月から、地点 D では 2016 年 3 月から調査を開始し、いずれの地点も 2018 年 4 月現在まで調査を継続している。各地点における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。またこれらの釣獲調査とほぼ同日に各地点で河川の水温、溶存酸素、pH などの環境要因の測定と周辺の山土、水底落葉、川砂、河川水など各種の環境試料も採取した。これらの試料に含まれる Cs は Ge 半導体検出器(GC4020, キャンベラジャパン)を用いて測定した。

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(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

[23-5]

囲にあった。また 3 年間に採捕されたヤマメ・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見られなかった。

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。

2.1.2 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

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(キャンベラジャパン株式会社)で、 ^{137}Cs 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、 ^{137}Cs 濃度の相対値から補正係数を導出した。

Cs 取り込み実験: Cs 非汚染の養殖ヤマメ・イワナ各 6 尾を水温 16°C の環境下で 1~2 ヶ月間、給餌飼育した。餌には Cs 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(^{137}Cs 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 ^{137}Cs 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 ^{137}Cs 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 ^{137}Cs 総量の推移をモニタリングした。

Cs 取り込み実験の結果、全ての供試魚で ^{137}Cs 総量が増加し、餌に含まれていた ^{137}Cs が魚体内に移行、蓄積されたことが確認された。投与した ^{137}Cs 総量と実験後の魚体内の ^{137}Cs 総量から計算した ^{137}Cs 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 ^{137}Cs 総量の減少が見られ、代謝活動によって ^{137}Cs 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 ^{137}Cs 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 ^{137}Cs 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 ^{137}Cs 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 ^{137}Cs の低減化に効果的であることが示唆された。用紙の大きさは A4、本文は 2 段組 (2 カラム) とします。

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

調査は福島県浪江町を流れる請戸川の支流および周辺において、2015、2016、2017 年 4~11 月に実施した。また、放射性 Sr 汚染レベルの相対的評価のため、原発事故の影響がない青森県および北海道の溪流流域でも同じ調査(2015 年 10 月、2016 年 6 月)を行った。採取した魚類は骨を灰化後に酸分解、土壌は灰化後に酸抽出、河川水(30~40L)はキレートファイバー(MetaSEP CH-1、GL Sciences)による濃縮を行い、その後は各試料とも固相抽出法による Sr 分離(Karube et al. 2016)もしくは Y 分離(Tazoe et al. 2016)を行い、最終的に Y-90 のベータ線を低バックグラウンド 2π ガスフローカウンター(LBC、日立アロカメディカル)で測定し、Sr-90 の放射能を算出した。

土壌中の Sr-90 濃度分布については、請戸川上流の一部地域で特異的に高くなり(51~182 Bq/kg dry、青森・北海道を含む他地域: 2~14 Bq/kg dry)、この地域では原発事故に由来する放射性 Sr の存在割合が高いと考えることができる。河川水中の Sr-90 濃度は、土壌中の Sr-90 濃度が高い地域において高い傾向があり、土壌中に沈着した原発事故に由来する Sr-90 の一部が河川水中に移行している可能性がある。このような環境に生息する魚類(イワナ)の骨に含まれる Sr-90 濃度についても、土壌および河川水中の Sr-90 濃度が高い地点において高い傾向があり、その値は 113~754 Bq/kg ash (n=10)、請戸川の他の地点では定量下限値以下(39~60 Bq/kg ash)~63 Bq/kg ash (n=7)、青森県内の河川では定量下限値以下(31~82 Bq/kg ash、n=3)、北海道の河川では 48~75 Bq/kg ash (n=3) となった。これらの結果は、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を示唆している。また、請戸川上流の一部地域において土壌、河川水、魚骨中の Sr-90 濃度が特異的に高いという結果は、原発事故から 4~6 年経過した状況(本

[23-5]

研究の現在までの期間が 2015~2017 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 6 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:Hoshino et al. 2017)

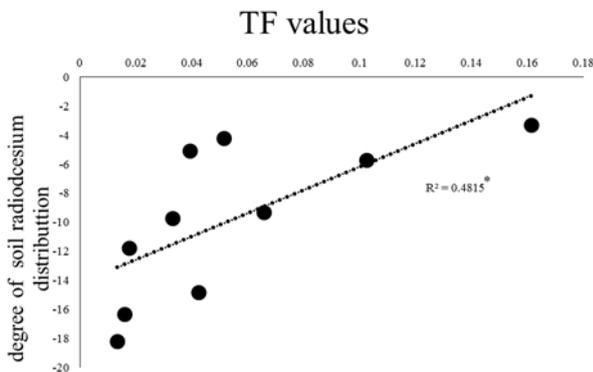


Fig.1 Relationship between TF values of soybean grain and depth of soil radiocesium distribution (*P<0.05).

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~2017 年の 3 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 7 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と魚体内のセシウム低減化法について

本研究において、酸素要求性の極めて高い溪流魚であるヤマメやイワナを活魚状態のままゲルマニウム半導体検出器を用いて 137Cs を測定する方法が開発された。この方法により魚を様々な条件下で飼育しながら同一個体の魚に含まれる 137Cs 濃度の推移をモニタリングすることが可能となった。これは一般的に行われていた測定法である対象魚を殺処理後に破壊して測定するよりも、実験に用いる飼育検体を大幅に節約できるとことや、より正確な追跡データを取得できるなど多くのメリットがある。

上記の同一個体による活魚測定による 137Cs のモニタリング技術の活用によって、ヤマメとイワナ魚体内の 137Cs 濃度や総量を低減させるには、ゼオライトを混ぜた飼料で一定期間飼育することが有効であることが示された。将来的には、自然環境下に生息する溪流魚を対象にしたゼオライトによる 137Cs 低減化方法の開発を実施していきたい。

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環境試料や、魚骨中の Sr-90 濃度が特異的に高いという結果から、原発事故から 4~6 年経過した状況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、土壌の粘土量や有機物含有量に影響されるが、本研究では、土壌中の分布によってもおおきく影響を受けることを明らかとした。このことは、放射性物質の作物への移行抑制の技術を考えていく上で示唆が多いものとする。

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)
- [4] Hoshino, Y., Komatsuzaki, M., 2018. Vertical distribution of radiocesium affects soil-to-crop transfer coefficient in various tillage systems after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. Soil and Tillage Research 178, 179-188.