

[H23-5]

農作物のセシウム量低減と土壌改良-農・畜産業の永続的發展に向けて 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)}, 荻部甚一^{B)}, 上田仁^{B)}, Mohammad Ismail Moqbal^{A)}
Masakazu Komatsuzaki^{#A)}, Ryoji Nakazato^{B)}, Hitoshi Ueda^{B)}, Zinichi Karube^{B)}, Mohammad Ismail
Moqbal^{A)}

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

^{B)} Center for Water Environment Studies, Ibaraki 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. Now, most of agricultural products in Ibaraki prefecture were rear contamination of radio cesium, because soil can strongly fix it and make cesium and clay binding form resulting reduction of radio cesium contamination to the crop although soil has contaminated it. The present paper indicates that radiocesium contamination agricultural products by uptake through plant roots from soil is sufficiently low. The paper described reasons why radioactive cesium does not transfer easily from soil to crops, and methods how to inhibit the transfer of radioactive cesium from soil to crops. Also, the authors revealed that the contamination of fresh water fishes significantly reduced due to appropriate management.

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の研究者、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 (Hishino et al.2015;Jayasanka et al. 2016)。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・畜産業の永続的發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 水試料中の放射性セシウムの簡略化

2011 年 3 月の福島第一原子力発電所事故により、環境中には放射性セシウムが放出され、現在も日本各地の陸域環境中にはこの放射性物質が残存している。そして、この放射性セシウムは土壌等に沈着し

[H23-5]

た後、降雨等により陸水環境およびその生態系へと移行する。従って、放射性セシウムによる陸水環境における汚染実態の解明を進めるとともにその長期的な変動を把握していくことが必要である。これらの調査研究を行う上で重要となるのが分析法である。特に、従来の分析法（文科省 2002）では試料が 20～100L と大量であり、その処理には時間と手間がかかる。従って、水試料の放射性セシウム分析法の簡略化は今後の長期的な調査研究を効率的に進める上での重要な検討課題である。そこで我々の研究グループでは、放射性セシウム濃縮装置（迅速くん、Yasutaka et al.2015、Tsuji et al.2014、Yasutaka et al.2013）を用いた分析法の簡略化を試みた。

1.2.2 溪流生態系における放射性セシウムの移行メカニズムに関する研究

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 6 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や、より下流側でのアユ釣りなどの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、避難指示地域において遊漁対象となる魚種については、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、また、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が未解明である。さらに、今後の放射性セシウムの推移や収束時期の予測など多くの課題についても手つかずのままである。被災地での遊漁活動を復興・復活させるためには上記のことを十分に理解・把握しながら、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 年度と 28 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に、遊漁対象魚種の子アユとイワナ、大型無脊椎動物（主として水生昆虫）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を実施した。また溪流魚の主要な餌資源を明らかにするために、捕獲した魚類の胃内容物分析をした。

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に、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」を実施し、定期的に再捕獲することで放射性セシウムの取り込み速度（見かけの増加量）を測定した。

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に、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）を実施した。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。これらの結果を総合して、避難指示区域内の山地溪流生態系における放射性セシウム移行メカニズムについて考察した。

1.2.3 落ち葉堆肥の放射性セシウムに関する調査

近年、里山保全活動の一環として落ち葉かきの実施と堆肥づくりが再び行われはじめている。とくに里山資源と連携した有機農業生産は、資源循環の点で極めて有効であり、茨城県の有機農産物の多くが、豊富な森林資源を活用した落ち葉堆肥に依存していた。しかし、福島第一原子力発電所事故以降、県内の森林の多くで放射性物質による汚染が危惧され、これらは堆肥化資材としては利用が憚れている実態がある。植物質の堆肥として落ち葉堆肥は有機農業では重要であるが、落ち葉のセシウム汚染状況は深刻で、現在でも 1 都 17 県において販売・流通が禁止されている。

本調査では、放射性物質汚染の少ない落葉堆肥の作成技術の開発および作物への移行抑制技術を開発することを目的として実施する。昨年度は、副資材の組み合わせによってこれら落ち葉堆肥のセシウムの希釈効果について調査した。本年度はこれらの堆肥を用いて実際に作物への移行率を測定することで、移行率を低減化するための落ち葉堆肥の利用方法を明らかにする。

2. 研究の概要

2.1 水試料中の放射性セシウム分析法の簡略化

迅速くんの活用により、短時間での大量の試料処理（20L で 8 分程度）が可能となった。また、放射能測定に関して従来の Ge 半導体検出器ではなく NaI(Tl)シンチレーション検出器を使うことにより、モニタリング機材の整備にかかる費用の抑制（Ge 半導体検出器の 1 割程度の費用）が可能となった。この分析法では、Ge 半導体検出器と同等の定量下限値を確保するために Ge 半導体検出器による分析法よりも試料量や測定時間を増やす必要がある。例えば、Ge 半導体検出器を用いる系（Yasutaka et al. 2013）では 20L の水試料を約 10 分で濃縮し、4000 秒の計測時間で定量下限値はおおよそ 0.03Bq/L、NaI(Tl)シンチレーション検出器の場合は 40L を約 20 分で濃縮、計測時間はおおよそ 50000 秒で 0.02Bq/L 程度である。また、迅速くんによる放射性セシウムの濃縮と Ge 半導体検出器および NaI(Tl)シンチレーション検出器による放射性セシウム分析結果（n=17）を比較すると、

[H23-5]

溶存態及び懸濁態の放射性セシウム (^{137}Cs と ^{134}Cs) のどちらも 10%以内のばらつきで一致する結果となった。各試料の測定結果における RSD は Ge 半導体検出器では 10%以下、NaI(Tl)シンチレーション検出器は平均すると 15%程度あるため、上記の結果は両者の分析結果に整合性があることを示している。以上のことから、迅速くんおよび NaI(Tl)シンチレーション検出器を用いることで従来の分析法の簡略化ができたといえる。

2.2 溪流生態系における放射性セシウムの移行メカニズムに関する研究

2.2.1 溪流魚、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 50 mm)、河床堆積物 (川砂)、水底落葉および河川水を、また生物試料として溪流魚のヤマメ、イワナの採捕および河川内に生息する大型無脊椎動物を採取した。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。大型無脊椎動物試料は凍結乾燥後に粉碎し、6 ml シンチレーションバイアルに充填した。河川水は、カートリッジ型フィルタ装置 (Yasutaka et al. 2014) 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。大型無脊椎動物の測定には、ウェル型 3×3 インチ NaI(Tl)検出器 (FUIJapan 社製) を用いた。

これらの調査は地点 A では 2015 年 5 月～2016 年 11 月に、地点 B と C では 2015 年 5 月～11 月と 2016 年 11 月に、また地点 D では 2016 年 4 月～11 月に実施した。

空間線量率は、地点 C と D で最も高い値を示し、続いて B、A の順に高い値を示した (地点 A<B<C=D)。河川環境試料の放射性セシウム濃度を地点別に比較すると、空間線量率と同様の傾向が見られ、河川周辺環境の放射能強度の違いが空間線量率の差異に影響を及ぼしていると考えられた。

ヤマメおよびイワナの放射性セシウム濃度と体重の関係には有意な正の相関が見られた。地点別に比較すると、空間線量率および河川環境試料中の放射性セシウム濃度が高い地点ほど、ヤマメおよびイワナの放射性セシウム濃度がそれぞれ有意に高くなっていた。また、2015 年と 2016 年に地点 A で採捕された各魚種の放射性セシウム濃度を比較すると、ヤマメの場合は有意に低下していた (ANCOVA, $p<0.05$)。一方、イワナの放射性セシウム濃度には有意な差はなかった (ANCOVA, $p=0.596$)。

大型無脊椎動物は、主としてカクツツトビケラ科、ヒラタカゲロウ科、ガガンボ科、ヘビトンボ科などの水生昆虫の幼虫が多く採集され、それらの放射性セシウム濃度は 214 Bq/kg-dry～36,505 Bq/kg-dry の

範囲にあった (平均 3,846 Bq/kg-dry)。地点別に比較すると魚類と同様の傾向が見られた。しかしながら幼虫個体ごとのばらつきが多く、河川内での放射性セシウムの多寡などにより個体差が生じていると考えられた。

2.2.2 魚類の胃内容物分析

採捕した魚の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 (Nakai et al. 2001) を求めることによって推定した。

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帯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帯巣のみであり、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路からであると推察された。

2.2.3.溪流魚の標識放流実験無給餌と飼育実験(インサイト実験)

標識放流実験およびインサイト実験ともに、地点 A と地点 D を実験フィールドとした。

溪流魚の標識放流実験では、2016 年 5 月、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 480 尾ずつ放流した。これらの魚は放流 14 日後、28 日後、58 日後および 76 日後に釣りによって再捕獲した。

インサイト実験では、餌経路以外での放射性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 0.5 mm メッシュのナイロン布地を張った網籠(25 cm x 25 cm x 40 cm)を用意した。1 つの籠に入れる魚は 1 尾のみとし、合計 36 基の籠 (2 魚種 x 9 基 x 2 地点)を設置した。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。

2 つの実験ともに採捕・回収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。また各魚種について胃内容物の顕微鏡観察も行った。

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

[H23-5]

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 0.5mm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。

2.3 落ち葉堆肥の放射性セシウムに関する調査

落ち葉堆肥の設置直後の放射性 Cs 値 (Cs134 + Cs137) は米ぬかの添加によって大きく放射性 Cs が減少した。阿見の落ち葉では、12 月で 62Bq/kg が、米ぬかの混和によって 45Bq/kg に減少した。笠間の落ち葉では、57Bq/kg が、同じく米ぬかの添加によって 42Bq/kg に減少した。

また、2016 年 9 月における放射性 Cs の値は、阿見の落ち葉では、160q/kg が、米ぬかの混和によって 66Bq/kg に減少した。笠間の落ち葉では、58Bq/kg が、同じく米ぬかの添加によって 22Bq/kg に減少した。

米ぬか添加によって、放射性 Cs が著しく減少したことは、主として米ぬか添加による希釈効果と、米ぬかを添加することで水分保持量が異なることから、現地水分での落ち葉堆肥の放射性 Cs 値が減少することが認められた。また、堆肥化期間中において、落ち葉の分解による減量化することで、放射性 Cs の値は落葉堆肥中に濃縮される傾向が認められたが、笠間の落葉堆肥、同米ぬか添加堆肥、阿見の米ぬか添加堆肥については、堆肥の利用基準である 400Bq/kg を下回っており、現状でも利用可能な落葉堆肥の製造が可能となった。

落葉堆肥をポットに施用したあとの栽培土壌の放射性 Cs 濃度をみると、落葉堆肥の投入量が多くなるほど、土壌の放射性 Cs 濃度は増加する傾向が認められた。阿見の落葉堆肥では、落葉のみであると、1~12Bq/kg であったのに対し、米ぬか処理では、1 から 4Bq/kg にとどまった。また、笠間の落葉堆肥では、落葉のみであると、1~6Bq/kg であったのに対し、米ぬか処理では、1 から 2Bq/kg に阿見の落葉と比べて小さい値を示した。

コマツナの収量は、落葉堆肥の投入量が増加するにつれて、コマツナの収量が増加する傾向が認められた。また、落ち葉堆肥のみで堆肥化したものよりも、米ぬかを処理した落ち葉堆肥のほうがコマツナの収量が高い傾向が認められた。

コマツナの放射性セシウム濃度は、阿見の落ち葉を 50 g 施用で 5.8Bq/kg に対し、米ぬか処理で 4.0 Bq/kg に低下した。100 g 施用で、落ち葉で 8.0Bq/kg 対

し、米ぬか処理で 6.5 Bq/kg に低下した。これに対し、笠間の落ち葉を 50 g 施用で 2.4Bq/kg に対し、米ぬか処理で 1.3 Bq/kg に低下した。100 g 施用で、落ち葉で 3.1Bq/kg に対し、米ぬか処理で 2.5 Bq/kg に低下した。

2.4 考察

本研究では、福島第一原子力発電所事故により、環境中へ放出された放射性物質の動態について、水環境、水域生態系および森林-農地連鎖における循環について検討した。

山地溪流における一般的な食物連鎖(食物網)は、付着藻類などの一次生産者や水底落葉を起点として、川石についた付着藻類などを齧りとり剥ぎ取り摂食者 (scraper)、造網性のトビケラ類に代表される藻類やデトリタスなどの懸濁物を利用するろ過摂食者 (collector-filterer)、水底落葉を直接的に餌として利用する採集摂食者 (collector-gatherer) 等の一次消費者(二次生産者)、そしてこれらを捕食するヘビトンボなどの肉食性昆虫やイワナ・ヤマメ類の溪流魚やカジカ類へとつながる。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經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、水生昆虫經由であっても水底落葉で構成される携帯巣を持つカク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、魚の胃中での巣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。

また、農耕地など流域に残存する放射性セシウムは、適正な農業生産手法によって土壌に吸着され、作物への移行する量はごく少ないことが普遍的に認められつつある。この点で、今後の流域管理においては、流域の土壌・環境保全の視点がますます重要となるものと考えられる。環境中での放射性セシウムの動態には長期的な影響を十分に考慮する必要がある。この点で、流域全体に降下した放射性セシウムの動態については継続的にかつ網羅的に調査を継続していくことが重要であると考えられる。

2.5 まとめ

本研究は、福島原発事故による放射性セシウムの、様々な農水産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、土壌改良や養魚管理などにより軽減する方法を探る事を目的として実施した。まず、NaI 検出器を使用した淡水魚類体内の放射性 Cs を適宜モニタリング可能なシステム構築を確立した。次に、環境水の放射性 Cs 分析法として、迅速くんを活用により、処理時間の大幅な短縮 (最大 72 時間程度から 1 時間未満への短縮) が可能となった。さらに、米ぬか混和による落ち葉堆肥の放射性物質の抑制およびコマツナへの放射性 Cs 低減効果が確認された。これらの環境水、土壌、作物およ

[H23-5]

び淡水魚の放射性 Cs モニタリングを継続することで、農水産物への原発事故の影響の軽減に貢献することが期待される。

参考文献

- [1] Y.Hoshino, Higashi, T., Ito, T., and Komatuzaki, M. "Tillage can reduce the radiocesium contamination of soybean after the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident". *Soil & Tillage Research* 153, 76-85. (2015)
- [2] Jayasanka, D., Komatsuzaki, M., Hoshino, Y., Seki, H., Moqbal, M., Nutrient Status in Composts and Changes in Radioactive Cesium Following the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident. *Sustainability* 8, 1332. (2016)
- [3] 文部科学省 “放射性セシウム分析法”. 日本分析センター. (2002)
- [4] T. Yasutaka, Kondo, Y., Suzuki, Y., Takahashi, A., and Kawamoto, T. “Rapid quantification of radiocesium dissolved in water by using nonwoven fabric cartridge filters impregnated with potassium zinc ferrocyanide”. *Journal of Nuclear Science and Technology* 50, 792-800. (2015)
- [5] H. Tsuji, Kondo, Y., Suzuki, Y., and Yasutaka, T. “Development of a method for rapid and simultaneous monitoring of particulate and dissolved radiocesium in water with nonwoven fabric cartridge filters”. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 299, 139-147. (2014)
- [6] T. Yasutaka, Tsuji, H., Kondo, Y., and Suzuki, Y. “Development of Rapid Monitoring for Dissolved Radioactive Cesium with a Cartridge Type of Prussian blue-impregnated Nonwoven Fabric”. *BUNSEKI KAGAKU* 62, 499-506. (2013) [2] T. Yasutaka, Kondo, Y., Suzuki, Y., Takahashi, A., and Kawamoto, T. “Rapid quantification of radiocesium dissolved in water by using nonwoven fabric cartridge filters impregnated with potassium zinc ferrocyanide”. *Journal of Nuclear Science and Technology* 50, 792-800. (2015)