

講 座



放射性セシウム研究の進展と土壤肥料学の貢献

6. 残された課題

信濃卓郎¹・塙田祥文²¹北海道大学大学院農学研究院, ²福島大学環境放射能研究所

キーワード 植物移行, 変動要因, 存在形態, 水田, 農業環境

1. はじめに

震災から12年経過した2023年2月の段階においても、東京電力福島第一原子力発電所（以降、FDNPS）の事故によって強く汚染の影響を受けた地域である帰還困難区域が設定されている。その面積は福島県全体の2.4%に相当する約337km²である。特定復興再生拠点区域として除染等の空間線量率の低減化が実施された区域では、帰還に向けた整備が進められ令和5年春までに制限の解除がなされている。特定復興再生拠点ではこれまでに培われた除染と移行低減化対策によって、そこで栽培しても作物への放射性セシウムの移行が十分に抑制されることが確認された上で、農業の再開にもつながっている。同時に、表土剥ぎ取り除染によって、農業従事者の外部被ばく線量を顕著に低減した。農業環境における放射性核種の作物への移行経路は、葉面吸収と経根吸収である。事故直後の大気中放射性核種濃度の高い期間は、葉面沈着による直接的な作物汚染が主となる。FDNPS事故時は、まだ多くの作物で播種前であったため大きな被害は免れたが、常緑樹である茶葉、果実の樹皮に沈着し、秋に収穫された果実から放射性核種が検出された。一方、土壤に沈着した放射性核種はやがて経根吸収や再浮遊による葉面沈着によって作物へ移行する。FDNPS事故で放出された主な放射性核種は、¹³¹Iと放射性セシウムであり、¹³¹Iの半減期は8日であったため事故から3ヵ月経過すると1/1000以下に減衰した。一方で、放射性セシウム、特に¹³⁷Csの半減期は30年と長い

Takuro SHINANO and Hirofumi TSUKADA: Progress of radio cesium studies and contributions from soil and plant sciences. 6. Remained issues to be solved

¹060-8589 札幌市北区北9条西9丁目

²960-1296 福島市金谷川1番地

Corresponding Author: 信濃卓郎 shinano@agr.hokudai.ac.jp

2023年2月8日受付・2023年3月9日受理

日本土壤肥料学雑誌 第94巻 第3号 p. 196~202 (2023)

ため、土壤に沈着した後長期間に亘り作物へ移行する。これまでの本講座でも紹介したように、放射性セシウムは土壤と強く吸着し、下方への移行速度が極めて遅いため、表土剥ぎ取り除染がきわめて有効な低減化対策となった。しかしながら、一部の限られた圃場では、対策として施用したカリウムが土壤に維持されずに溶脱し、放射性セシウムの移行係数が比較的高い状態で継続することが明らかとなつたが、その要因はまだ明らかになっていない。また、交換態カリウムのみならず熱硝酸で溶出するような非交換態カリウムの一部も植物が吸収することが示されているが、そのメカニズムは十分には解明されたわけではない。

水田においては、灌水によって還元的な土壤環境となり、発生するアンモニウムによって土壤に吸着していた放射性セシウムと交換され間隙水中に溶出する。また、特に水田においてはアンモニア態窒素の施用によっても田面水中放射性セシウム濃度が一時的に増加するが、灌漑水中放射性セシウムからイネへの移行メカニズムには不明な点が残っている。

除染と移行抑制対策は、除染によって放射性セシウム濃度を低減し、さらに残存する放射性セシウムの植物への移行を土壤中のカリウム濃度（植物が利用可能な交換態カリウム：Ex-K）によって制御する技術である。その手法は水稻（Fujimura *et al.*, 2014; Kato *et al.*, 2015）、大豆（Hiirayama *et al.*, 2018; Hatano *et al.*, 2021; Matsunami *et al.*, 2021）、ソバ（Kubo *et al.*, 2015）といった作物のみならず、牧草（Yamamoto *et al.*, 2014; 農林水産省, 2020）などの広範な植物種においても幅広く利用されている。植物による放射性セシウムの吸収はその化学的性質の類似性から溶液からの吸収ではカリウムイオンの存在によって強く吸収が抑制されることが知られており（White and Broadley, 2000; Zhu and Smolders, 2000），実際の土壤溶液においても同様のメカニズムによって制御されている。特にEx-K濃度が低い時に放射性セシウム濃度が急速に高まることから、この吸収の主体は高親和性のカリウムトランスポーターが担っていると考えられ、実際にこ

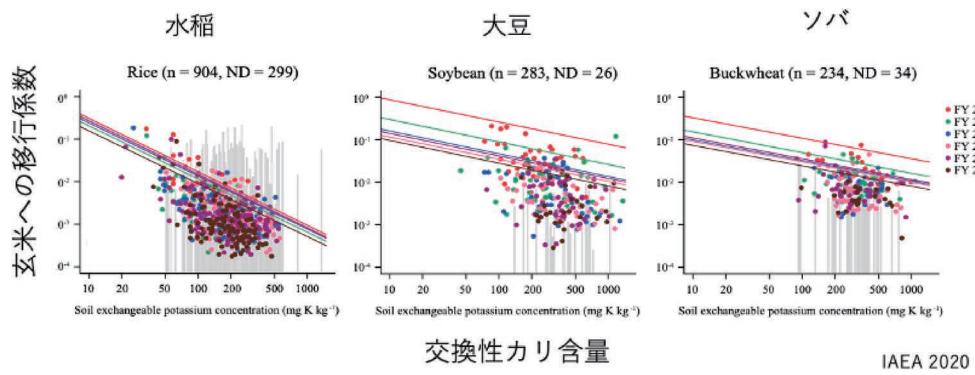


図1 2012–2017年度(Fiscal year (FY))に行われたモニタリング調査結果(IAEA, 2020より作成)
水稻、大豆、そばの年度毎のEx-K土肥TF-¹³⁷Csの比較結果。

のトランスポーターが変異した系統では放射性セシウムの吸収が著しく抑制されることが知られている(Nieves-Cordones *et al.*, 2017, Rai *et al.*, 2017)。さらには、イオンビームによって変異をおこし、放射性セシウム吸収が抑制された系統では根に入ったナトリウムイオンの排除能が抑制された結果、間接的にカリウムトランスポーターの機能が抑制されることが観察されている(Ishikawa *et al.*, 2017)。

放射性セシウムで汚染された農地では土壤のカリウム供給能と植物による放射性セシウムの吸収能に基づく対策が構築されてきたが、土壤による放射性セシウムの固定能とカリウム供給能の違い(中尾・山口, 2022)に加えて、植物種による吸収能の違い(IAEA, 2020)も明らかになっている。また、近年の肥料コストや労賃の急速な上昇は、これまでのように大量のカリウム資材(カリウム肥料、堆肥など)を投入するのではなく、土壤や作物に合わせた精緻な移行抑制対策が求められている。このような対策を行ったうえで、行政機関による定期的な検査体制を整えてモニタリングを実施し、市場に信頼される作物を供給している(福島県, 2023)。作物摂取による内部被ばくの観点から見れば、事故後の作物出荷規制、飲食物の基準値の策定、モニタリング体制の拡充等の対応が比較的速やかに行われたことで、事故直後やその後の内部被ばくは限定的であることが確認されている(塚田, 2019)。そのことは、関係機関の速やかな対応が功を奏し、確実な効果として表れている。また、¹³¹Iと同時に放出された長半減期の¹²⁹Iについての作物由来の内部被ばくについても評価が行われ、放射性セシウムに比べ十分に低い値であることが確かめられた(Tsukada *et al.*, 2022)。しかしながら、被災地への帰還に10年にも及ぶ期間を要したこと、福島では日本の農業が抱える様々な歪が加速的に表面化し、例えば、高齢者の離農が進み、更には震災を機に若い年齢層の農業者の流出を招いたことなどが報告されている(茅野, 2014)。

ここでは、残された課題として植物種間の違い、土壤間の違いを中心に、農業を取り巻く課題として灌漑用ため池、表土剥ぎ取り除染斑、再浮遊、山菜・野生キノコ・野生動物の出荷規制などにも触れ、今後の移行抑制対策、被

災地域の農業のあり方について技術的、学術的な課題について述べてみたい。

2. 植物種間差

農林水産省が2012年度から継続して行っている水稻、大豆、そばのモニタリング調査では、収穫物の放射性セシウム濃度のみならず、栽培された圃場の放射性セシウム濃度、Ex-Kを含む種々の物理化学的項目を測定している。このデータを活用してそれぞれの作物のEx-Kと¹³⁷Csの移行係数(以降、TF-¹³⁷Cs;式1)を比較した(図1)。

$$TF\text{-}^{137}\text{Cs} = \frac{\text{植物体 } ^{137}\text{Cs濃度(Bq kg}^{-1}\text{DW)}}{\text{土壤 } ^{137}\text{Cs濃度(Bq kg}^{-1}\text{DW)}} \quad (1)$$

2012年から6年に亘るデータを総合して解析したところ同じEx-Kに対するTF-¹³⁷Csの関係が作物間で大きく異なることが示された。実際に現場では大豆やそばに対して必要なEx-Kの量が多く設定される場合もあり、その事を支持する内容となっている。このように作物の移行抑制対策を精緻に行う場合には、土壤のEx-Kとの関係性が重要な要因となる一方で、IAEAのTECDOC(IAEA, 2009, 2020)を含めて他の作物に関してのこの関係性の情報は極めて少ない。

図2にFDNPS事故前後の様々な報告に基づくTF-¹³⁷CsのデータをまとめたTF-¹³⁷Csの違いは同じ種の中でも大きい場合には2オーダー(2011前のキャベツでは3オーダー)、つまり100倍の違いがあるとまとめられていた。このような不確かさを持って、実際に事故が起きた場合の対策に用いることとなる。そこで、様々な野菜を異なるカリウムレベルで実際に栽培を行い、Ex-KとTF-¹³⁷Csの関係について調査を行った。その結果、野菜においてもEx-KがTF-¹³⁷Csを制御する重要な要因であるとともに、野菜の種類によって同じEx-KでもTF-¹³⁷Csが異なることが示された(Shinano *et al.*, 2023)。従来野菜は水分含有率が高く(葉菜類では90%以上)、そもそも家の近くで堆肥や灰などをたっぷり含んだ肥沃な土壤で栽培されることが多かったこともあり、かなり初期の段階で福

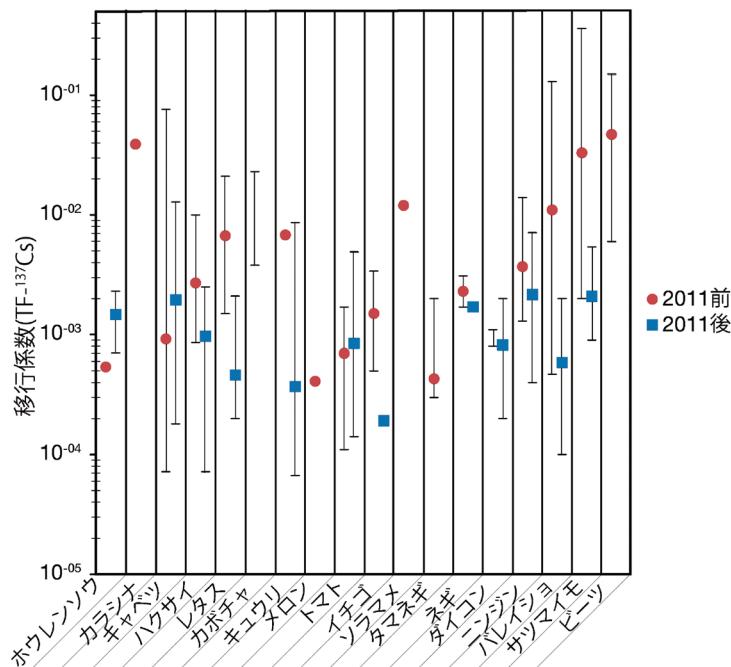


図2 FDNPS 事故前に報告された各種野菜の移行係数 (TF-¹³⁷Cs) のデータ (IAEA, 2020 より作図)

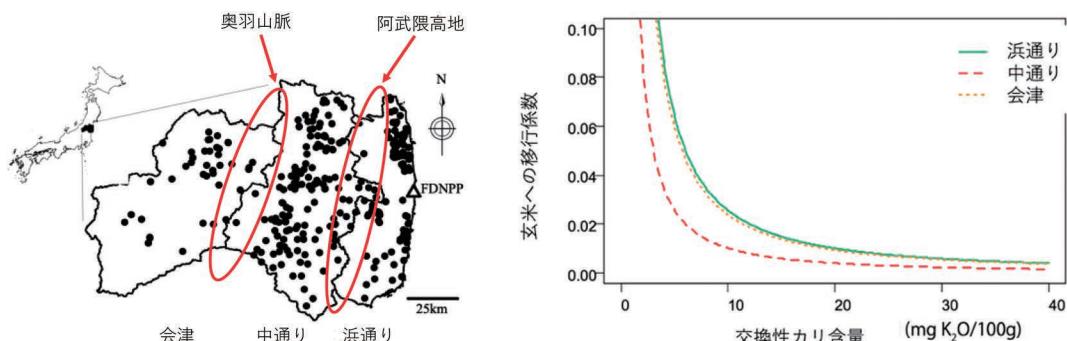


図3 4年間の水稻のモニタリング調査(のべ558筆)に基づく、福島県内3地域におけるEx-KとTF-¹³⁷Csの関係(Yamamura et al., 2018 より作図)

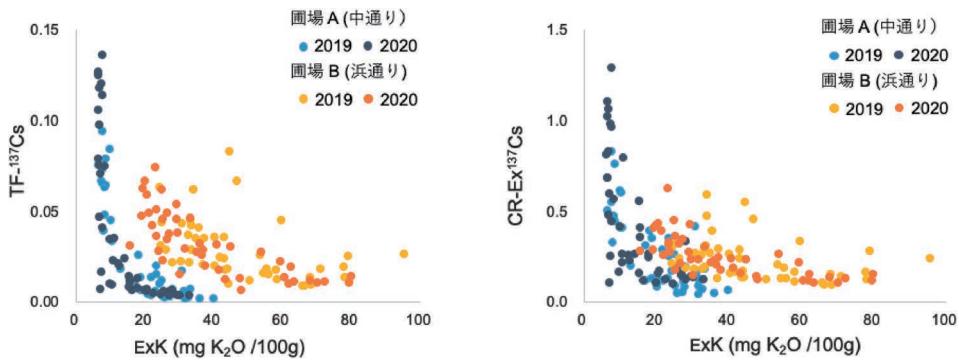
島県の試験対象からも外されていた。ところが、除染後に低肥沃度の客土が行われ、放射性セシウムがある程度残存しているような場合には、その後の利用法も含めて適切な土壤の管理が求められることが明らかになった。このような作物によるEx-KとTF-¹³⁷Csの関係性の違いにはそれぞれの植物が持っているカリウムトランスポーターの性質の違いが重要であると考えられているが、種間の違いに関しての情報はまだ少ない。種によってはカルシウムの存在も関与している可能性もあり(Massas et al., 2010; Nihei et al., 2016, 2020)，詳細な解析が待たれる。ちなみにこれまで解析に供した植物種の中で同じEx-Kに対して最も高いTF-¹³⁷Csを示したのはマメ科の飼料作物であるルーピンであり、圃場栽培においてその地上部へのTF-¹³⁷Csが大豆の約9倍の高さを示している(Kubo et al., 私信)。このルーピンの高い放射性セシウムの移行特性はその独特的の養分吸収戦略にあると考えられており、特定の根の領域での根圈土壤への働きかけの結果と考えられ(Yin et al., 2020; Kan et al., 2022)，今後さらなる研究が求められる。

実際にセシウムイオンの吸収が必ずしも高親和性カリウムトランスポーターだけに依存していないことも指摘されており(Noda et al., 2016; Ashraf et al., 2021)，植物種によって、あるいはまた吸収と体内移行において異なるメカニズムが機能していることが推定される。

3. 玄米移行係数の地域間差

農林水産省のモニタリングデータを用いてYamamura et al. (2018)は玄米のTF-¹³⁷Csが福島県内の会津、中通り、浜通りで異なるEx-Kとの関係性を示すことを明らかにした(図3)。

その結果、同じEx-Kレベルの時にTF-¹³⁷Csが中通りで低く、会津と浜通りで高いことが明らかになった。玄米の放射性セシウム濃度は土壤の放射性セシウム濃度とTF-¹³⁷Csの掛け合いで決まることから、会津では汚染レベルが極めて低く、そのリスクはEx-Kが低下した場合でも小さい。一方、浜通りでは除染後も残存する放射性セシウムがあるため適切なカリウム対策を行わないとリスクが高

図4 Ex-K に対して $\text{TF}^{-137\text{Cs}}$, $\text{CR-Ex}^{137\text{Cs}}$ の関係 (Suzuki *et al.*, 2023 より作図)

左図は $\text{TF}^{-137\text{Cs}}$, 右図は $\text{CR-Ex}^{137\text{Cs}}$ との関係を示す。 $\text{TF}^{-137\text{Cs}}$ では地点間の違いが大きかったが、 $\text{CR-Ex}^{137\text{Cs}}$ では地点間の差が小さいことが示された。

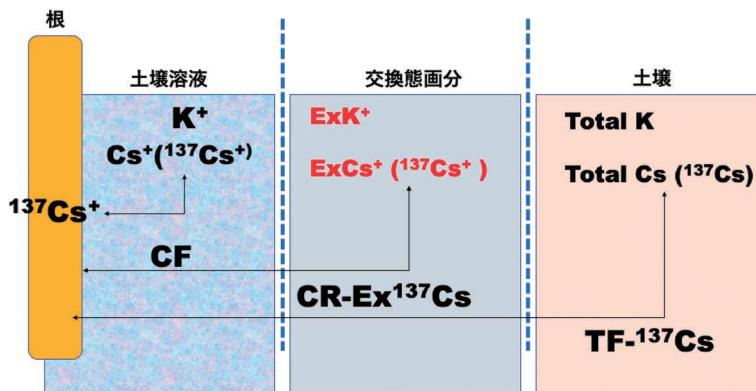


図5 植物根による土壤からのカリウムと放射性セシウム吸収の模式図

植物根による放射性セシウムの吸収における土壤、交換態画分、土壤溶液画分のカリウムと放射性セシウムの役割を示す。植物はイオンとして両元素を吸収するため、土壤溶液における両元素の比率を示すCF (Concentration factor) が植物側から考えたときに最もその生理的応答に対応する。一方、土壤溶液の放射性セシウムの迅速測定は難しい場合が多い。核事故後の迅速な対応として $\text{TF}^{-137\text{Cs}}$ (Transfer factor) が用いられたが $\text{TF}^{-137\text{Cs}}$ はカリウムの存在量によって大きく変動するため、Ex-Kとの関係式に基づいて農地での対策が取られた。Ex- ^{137}Cs は Ex-K 用の抽出液をそのまま利用可能である上に、交換態は K^+ も $^{137}\text{Cs}^+$ も土壤溶液にそれぞれのイオンを供給する画分として評価が可能である。そのため、Ex- ^{137}Cs に対しての植物体の ^{137}Cs の比率で表記される $\text{CR-Ex}^{137\text{Cs}}$ は $\text{TF}^{-137\text{Cs}}$ に比較してより CF に概念的に近いと考えられる。

いことが示された。この地域間の Ex-K と $\text{TF}^{-137\text{Cs}}$ の関係について大豆を用いてさらに検証を行った。大豆においても同様の結果となり、その要因解析を行った結果、土壤中の交換態放射性セシウムの量が重要な因子になっていることが示された (Suzuki *et al.*, 2023)。

これまで交換態放射性セシウムが植物の放射性セシウム濃度を規定する要因になることは指摘されてきた (Li *et al.*, 2022; 矢ヶ崎, 2019a, b)。また、土壤中の放射性セシウムの植物への吸収の容易さが $\text{TF}^{-137\text{Cs}}$ に重要であることは、土壤溶液の分析などからも指摘されている (Flouret *et al.*, 2022)。しかしながら、土壤溶液は特に畑地では採取がしばしば困難であるところから緊急時の迅速な測定を利用することが難しい。その一方で、交換態 ^{137}Cs を活用する利点には Ex-K を測定するために用いる抽出液をそのまま利用可能な点がある。Kondo *et al.* (2015) と Matsunami *et al.* (2021) は Ex-K の Ex- ^{137}Cs 濃度に対する比率が植物体の K の ^{137}Cs の比率と正に相關することを見出している。そこで、 $\text{TF}^{-137\text{Cs}}$ に変わり、土壤の交

換態 ^{137}Cs に対する植物体の ^{137}Cs の比率と Ex-K の関係 (Concentration ration- ^{137}Cs : 以降、 $\text{CR-Ex}^{137\text{Cs}}$ と定義、式2) を調べたところ、図4のように Ex-K と $\text{TF}^{-137\text{Cs}}$ の関係で認められた土壤間の違いが大きく低減することが確認された (Suzuki *et al.* 2023)。

$$\text{CR-Ex}^{137\text{Cs}} = \frac{\text{植物体 } ^{137}\text{Cs 濃度} (\text{Bq kg}^{-1} \text{DW})}{\text{土壤交換態 } ^{137}\text{Cs 濃度} (\text{Bq kg}^{-1} \text{DW})} \quad (2)$$

この交換態放射性セシウムの役割は以下のように解釈することが可能である。植物の養分吸収はカリウムであれ、放射性セシウムであれ土壤溶液中のイオン濃度によって制御され、カリウムの放射性セシウムに対する Concentration factor (CF) として示されるが (Smolders *et al.*, 1996)，カリウムも放射性セシウムも植物が利用可能な画分が交換態であると考えると、土壤溶液の両者の比率は $\text{TF}^{-137\text{Cs}}$ で考えるよりも交換態の放射性セシウムをどの程度吸うのかで評価する方が適切である事を示している (図5)。

今後はこの関係式で他の地域の土壤間の違いを評価できるのか、また植物種間の違いにおいてこの指標を使うことが可能かなどを検証する必要がある。特に植物種間の違いについては、植物によって土壤への働きかけの能力が異なることが予想され、単純に交換態という概念で解析を進めることができると否かは十分に検討の余地がある。さらに、土壤からのカリウムの供給力は非交換態カリウムの重要性が放射性セシウムの吸収において重要であることが水稻で示されていることから (Kurokawa *et al.*, 2020), 土壤からの放射性セシウムの植物への吸収は放射性セシウムとカリウムの土壤での挙動を同時に考慮する必要が想定される。

4. ため池

福島県には3700余りのため池があり、灌漑用水やコイの養殖などに使われる。FDNPS周辺の汚染地域では、農林水産省と福島県によるため池の水質と底質モニタリングが行われ、その結果が公表されている (農林水産省・東北農政局, 2023)。また、底質中放射性セシウム濃度が 8000 Bq kg^{-1} 以上の場合では、これまでに提案された様々な底質除染方法を用いて除染が行われている (農林水産省, 2023)。一方で、ダムなどの大規模な貯水槽では除染が難しいため、定期的にモニタリングを行い、その結果をHPで公開するとともに、関係機関にパンフレット (農林水産省・東北農政局, 2018) も配布している。これまでのところ、試験圃場の結果も含めて灌漑水の寄与による基準値を超える玄米は観測されていない。しかしながら、今後営農再開となるような帰還困難区域やその周辺では比較的高いため池中放射性セシウム濃度も報告されている (Tsukada *et al.*, 2017) ことから、継続的な調査が必要である。

5. 再浮遊

帰還困難区域の周辺地域では、土壤の舞い上がりや森林から飛散する粒子が作物に付着し汚染する可能性がある。作物に沈着した粒子から放射性核種が溶出することがなければ洗浄によって除染することで十分に低減化される。一方、大気圈核実験期間の経験でも示されているように、イネ、麦など開花時に粒子が花の内部に付着し、比較的濃度の高い種子となったことが報告されている (Ichikawa *et al.*, 1962)。よって、比較的高濃度の粒子が飛散する可能性のある FDNPS や帰還困難区域周辺では、定期的なモニタリングや、比較的高濃度の作物が観測された際の要因調査などが必要となると考えられる。そのためにも、降下物や大気中放射性セシウム濃度の継続的な調査研究が必要である。

6. 家庭菜園作物と自生植物

生産・出荷される作物のみならず、家庭菜園での作物や、山菜やキノコなどの自生植物は、避難から解除され帰還した住民にとって生きがいとなる作物である。これまで

の結果では、家庭菜園で作られる作物中放射性セシウム濃度は、カリウム施用の不足など十分な土壤管理が行き届かず、土壤管理された圃場で生産された市場流通している地元産より若干高い傾向にある (菊池ら, 2022)。

自生植物は、除染された圃場周辺や森林など十分な除染が行われていない地域で採取されるため、圃場での作物に比べ放射性セシウム濃度が高く、一部植物は基準値を超える場合がある。特に、天然キノコについては、従来から放射性セシウム濃度の高いことが知られている (杉山ら, 1993; Tsukada *et al.*, 1998)。福島県においても、天然キノコは現在でも高い濃度にあり出荷規制が続いているが、無期限・無制限に規制しておくことはできず、自生植物の解除に向けた検討も課題の一つと言えよう (福島県, 2023)。そのためにも、森林生態系における放射性セシウムの循環に関する研究から得られた知見を活用し、今後に向けた対策を検討することが必要である。

7. その他

圃場の表層土壤剥ぎ取り除染によって、効果的に放射性セシウムの低減化が行われた。一方で、圃場における畝と溝の高低差、周辺環境からの流入などによって除染斑が起こっていることが指摘されており (環境省, 2023)、比較的狭い範囲からサンプリングした結果では同じ圃場であっても作物中放射性セシウム濃度にも斑ができる可能性があり、対策済みであっても局所的なモニタリングで思わぬ結果が出ることも考えられる。

一般に、作物中放射性核種濃度を予測する際、土壤中濃度に対する作物中濃度の比である移行係数が用いられ、IAEA や多くの研究者によって報告がある (IAEA, 2010)。しかしながら、前述の通り、移行係数は様々な要因によって変動し、多くの場合 95% 信頼区間は数桁に及ぶ。そのため、精度の高い予測に向け地域固有の移行係数が整備されている場合がある。今後、福島のみならず作物中放射性核種濃度の高精度な予測に向け検討が必要である。

帰還困難区域では、住民の退去により野生動物の活動範囲が拡大し、気候変動も相まってサル、イノシシ、アライグマ等様々な生息数が急激に増加し (Lyons *et al.*, 2020)、農作物の鳥獣被害が続いている。また、FDNPS 事故前は定期的に捕獲し食料となっていたが、未だに高い濃度が続いている出荷規制が続いている (Saito *et al.*, 2020)。これら野生動物被害の対策は今後も帰還住民の生活環境で継続して対策する必要がある。また、捕獲した野生動物を食料として出荷するために、血抜き等の処理を施すがその際には、筋肉中の放射性セシウムは溶脱されるが、将来に向け食品として事故以前のように食するためにも、検討が必要である。

8. 最後に

今後、帰還困難区域が解除となって、ようやく FDNPS 事故前の福島を取り戻すことが可能となる。これまで挙げてきた課題の他にも、森林で生産されていた原木栽培のキ

ノコ、林業等まだまだ課題が多い。また、残念なことではあるが未だに輸入規制を行っている国々があり、FDNPS事故前に比べ福島県産の作物の価格が十分に回復していないことなどの課題もある(茅野, 2014)。これまでの多くの研究と調査によって、課題の解決が進んでいる。今後更なる課題を解決し、これまでに得られた知見が日本のみならず、世界に向か一層発信できるように心がけていただければ幸いである。

文 献

- Ashraf, M.A., Akihiro, T., Ito, K., Kumagai, S., Sugita, R., Tanoi, K., and Rahman, A. 2021. ATP binding cassette proteins ABCG37 and ABCG33 function as potassium-independent cesium uptake carriers in *Arabidopsis* roots. *Mol. Plant*, **14**, 664–678.
- Flouret, A., Henner, P., Coppin, F., Pierrisnard, S., Carasco, L., and Février, L. 2022. Cesium transfer to millet and mustard as a function of Cs availability in soils. *J. Environ. Radioact.*, **243**, 106800.
- Fujimura, S., Ishikawa, J., Sakuma, Y., Saito, T., Sato, M., and Yoshioka, Y. 2014. Theoretical model of the effect of potassium on the uptake of radio cesium by rice. *J. Environ. Radioact.*, **138**, 122–131.
- 福島県 2023. 農林水産物の緊急時環境放射線モニタリング結果【詳細】. <https://www.pref.fukushima.lg.jp/site/portal/monkekka.html>
- IAEA 2009. Quantification of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments for radiological assessments. IAEA TECDOC-1616, 616. <https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/18093/>
- IAEA 2010. Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments. No. 472. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA 2020. Environmental transfer of radionuclides in Japan following the accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, IAEA-TECDOC-1927. <https://www.iaea.org/publications/14751/environmental-transfer-of-radionuclides-in-japan-following-the-accident-at-the-fukushima-daiichi-nuclear-power-plant>.
- Ichikawa, R., Eto, M., and Abe, M. 1962. Strontium-90 and cesium-137 absorbed by rice plants in Japan, 1960. *Science*, **135**, 1072.
- Ishikawa, S., Hayashi, S., Abe, T., Igura, M., Kuramata, M., Tanikawa, H., Iino, M., Saito, T., Ono, Y., Ishikawa, T., Fujimura, S., Goto, A., and Takagi, H. 2017. Low-cesium rice: Mutation in OsSOS2 reduces radiocesium in rice grains. *Sci. Rep.*, **7**, 2432.
- Kan, A., Maruyama, H., Aoyama, N., Wasaki, J., Tateishi, Y., Watanabe, T., and Shinano, T. 2022. Relationship between soil phosphorus dynamics and low-phosphorus responses at specific root locations of white lupine. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **68**, 526–535.
- 環境省 2023. 除染情報サイト. <http://josen.env.go.jp/>
- Kato, N., Kihou, N., Fujimura, S., Ikeba, M., Miyazaki, N., Saito, Y., Eguchi, T., and Itoh, S. 2015. Potassium fertilizer and other materials as countermeasures to reduce radiocesium levels in rice: Results of urgent experiments in 2011 responding to the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **61**, 179–190.
- 茅野千江子 2014. 福島県における農業の復興をめぐる状況と課題. レファレンス, **767**, 29–53.
- 菊池美保子・西 康一・高村 昇・塚田祥文 2022. 2019年～2020年に採取した福島県浪江町における自家消費作物中放射性Cs濃度と内部被ばく線量. *Radioisotopes*, **71**, 185–193.
- Kondo, M., Maeda, H., Goto, A., Nakano, H., Kihou, N., Makino, T., Sato, M., Fujimura, S., Eguchi, T., Hachiohe, M., Hamamatsu, S., Ihara, H., Takai, T., Arai-Sanoh, Y., and Kimura, T. 2015. Exchangeable Cs/K ratio in soil is an index to estimate accumulation of radioactive and stable Cs in rice plant. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **61**, 133–143.
- Kubo, K., Nemoto, K., Kobayashi, H., Kuriyama, Y., Harada, H., Matsunami, H., Eguchi, T., Kihou, N., Ota, T., Keitoku, S., Kimura, T., and Shinano, T. 2015. Analyses and countermeasures for decreasing radioactive cesium in buckwheat in areas affected by the nuclear accident in 2011. *Field Crops Res.*, **170**, 40–46.
- Kurokawa, K., Nakao, A., Wakabayashi, S., Fujimura, S., Eguchi, T., Matsunami, H., and Yanai, J. 2020. Advanced approach for screening soil with a low radio cesium transfer to brown rice in Fukushima based on exchangeable and non-exchangeable potassium. *Sci. Total Environ.*, **743**, 140458.
- Li, P., Gong, Y., Lu, W., Sakagami, N., Mo, Z., and Komatsu-zaki, M. 2022. Radio cesium distribution caused by tillage inversion affects the soil-to-crop transfer factor and translocation in agroecosystems. *Sci. Total Environ.*, **831**, 154897.
- Lyons, P.C., Okuda, K., Hamilton, M.T., Hinton, T.G., and Beasley, J.C. 2020. Rewilding of Fukushima's human evacuation zone. *Front. Ecol. Environ.*, **18**, 127–134.
- Massas, I., Skarrou, V., Haidouti, C., and Giannakopoulou, F. 2010. ¹³⁴Cs uptake by four plant species and Cs-K relations in the soil-plant system as affected by Ca(OH)₂ application to an acid soil. *J. Environ. Radioact.*, **101**, 250–257.
- Matsunami, H., Uchida, T., Kobayashi, H., Ota, T., and Shinano, T. 2021. Comparative dynamics of potassium and radio cesium in soybean with different potassium application levels. *J. Environ. Radioact.*, **233**, 106609.
- 中尾 淳・山口紀子 2022. 放射性セシウム研究の進展と土壤肥料科学の貢献 1. 土壤中の放射性セシウム動態研究の進展. 土肥誌, **93**, 209–214.
- Nieves-Cordones, M., Hohamed, S., Tanoi, K., Kobayashi, N.I., Takagi, K., Vernet, A., Guiderdoni, E., Périn, C., Sentenac, H., and Véry, A. 2017. Production of low-Cs+ rice plants by inactivation of the K⁺ transporter OsHAK1 with the CRISPR-Cas system. *Plant J.*, **92**, 43–56.
- Noda, Y., Furukawa, J., Aohara, T., Nihei, N., Hirose, A., Tanoi, K., Nakanishi, T.M., and Satoh, S. 2016. Short day length-induced decrease of cesium uptake without altering potassium uptake manner in poplar. *Sci. Rep.*, **6**, 38360.
- 農林水産省 2020. 牧草地における放射性物質移行低減対策の手引き〈東北～北関東地方版〉ver. 2.0. <https://www.maff.go.jp/j/chikusan/sinko/attach/pdf/josentaisaku-4.pdf>
- 農林水産省 2023. ため池の放射性物質対策技術マニュアル. https://www.maff.go.jp/nousin/saigai/tamemanu_zentai.html
- 農林水産省・東北農政局 2018. 大柿ダムの放射性セシウムの実態と対策—請戸川地区の農業復興に向けて—(第2班). https://www.maff.go.jp/tohoku/osirase/higai_taisaku/oogaki_kekka/attach/pdf/index-5.pdf
- 農林水産省・東北農政局 2023. 農業水利施設の放射性物質対策. https://www.maff.go.jp/tohoku/osirase/higai_taisaku/housya

- seibusitu_tyousa.html
- Rai, H., Yokoyama, S., Satoh-Nagasakiwa, N., Furukawa, J., Nomi, T., Ito, Y., Fujimura, S., Takahashi, H., Suzuki, R., Yousra, E.L.M., Goto, A., Fuji, S., Nakamura, S., Shinano, T., Nagasakiwa, N., Wabiko, H., and Hattori, H. 2017. Cesium uptake by rice roots largely depends upon a single gene, HAK1, which encodes a potassium transporter. *Plant Cell Physiol.*, **58**, 1486–1493.
- Saito, R., Nemoto, Y., and Tsukada, H. 2020. Relationship between radiocaesium in muscle and physicochemical fractions of radiocaesium in the stomach of wild boar. *Sci. Rep.*, **10**, 6796.
- Shinano, T., Asaeda, S., Yashiro, S., Saito, T., Maruyama, H., Nemoto, T., and Hachinohe, M. 2023. Radioactive Cs transfer to vegetables after FDNPP accident. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **69**, 54–65.
- Smolders, E., Kiebooms, L., Buysse, J., and Merckx, R. 1996. ^{137}Cs uptake in spring wheat (*Triticum aestivum* L. cv. Tonic) at varying K supply. I. The effect of solution culture. *Plant Soil*, **181**, 205–209.
- 杉山英男・寺田 宙・磯村公郎・塙田祥文・柴田 尚 1993. キノコへの放射性セシウムの移行特性—野性キノコおよび培養キノコ—. *Radioisotopes*, **42**, 683–690.
- Suzuki, M., Eguchi, T., Azuma, K., Nakao, A., Kubo, K., Fujimura, S., Syaifudin, M., Maruyama, H., Watanabe, T., and Shinano, T. 2023. The ratio of plant ^{137}Cs to exchangeable ^{137}Cs in soil is a crucial factor in explaining the variation in ^{137}Cs transferability from to plant. *Sci. Total Environ.*, **857**, 159208.
- 塙田祥文 2019. 福島の農業環境における放射性セシウムと作物摂取による内部被ばく線量. 学術の動向, **24**, 18–25.
- Tsukada, H., Nihira, S., Watanabe, T., and Takeda, S. 2017. The ^{137}Cs activity concentration of suspended and dissolved fractions in irrigation waters collected from the 80 km zone around TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station. *J. Environ. Radioact.*, **178–179**, 354–359.
- Tsukada, H., Shibata, H., and Sugiyama, H. 1998. Transfer of radiocaesium and stable caesium from substrata to mushrooms in a pine forest in Rokkasho-mura, Aomori, Japan. *J. Environ. Radioact.*, **39**, 149–160.
- Tsukada, H., Takahashi, T., and Fukutani, S. 2022. Activity concentrations of radiocaesium, ^{90}Sr and ^{129}I in agricultural crops collected from Fukushima and reference areas, and internal radiation dose. *Radiat. Prot. Dosimetry*, **198**, 1104–1108.
- White, P.J., and Broadley, M.R. 2000. Mechanisms of caesium uptake by plants. *New Phytol.*, **147**, 241–256.
- 矢ヶ崎泰海・齋藤 隆・新妻和敏・佐藤睦人・太田 健 2019a. 水稻への放射性セシウム移行に対する土壤化学性の違いに応じたリスク管理のための統計モデル I. 統計モデルの選択. 土肥誌, **90**, 123–130.
- 矢ヶ崎泰海・齋藤 隆・新妻和敏・佐藤睦人・太田 健 2019b. 水稻への放射性セシウム移行に対する土壤化学性の違いに応じたリスク管理のための統計モデル II. リスク管理のための統計モデルの応用. 土肥誌, **90**, 131–137.
- Yamamoto, Y., Shibuya, T., Hirano, K., Shindo, K., Mashiya-ma, H., Fujisawa, T., Nakamura, M., Tozawa, Y., Miyaji, H., Nakao, S., and Togamura, Y. 2014. Changes in the radioactive cesium concentrations of grasslands during the first year after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident in East Japan. *Grassl. Sci.*, **60**, 69–75.
- Yamamura, K., Fujimura, S., Ota, T., Ishikawa, T., Saito, T., Arai, Y., and Shinano, T. 2018. A statistical model for estimating the radiocesium transfer factor from soil to brown rice using the soil exchangeable potassium content. *J. Environ. Radioact.*, **195**, 114–125.
- Zhu, Y.G., and Smolders, E. 2000. Plant uptake of radiocaesium: A review of mechanisms, regulation and application. *J. Exp. Bot.*, **51**, 1635–1645.