

講演要旨

東京電力・福島第一原発事故による放射性物質の農地汚染とその対策

信濃 卓郎

1. はじめに

2011年3月11日の昼過ぎは当時の勤務先の北海道農業研究センター内の研究室におり、突然のゆっくりとした長い揺れに離れた場所で大きな地震が発生したことを認識した。その後次々と入ってくるニュースなどにその惨状の大きさに驚くと同時に当該地域の知り合いなどから被災地の状況の把握に努めた。その後予想を超える津波とそれによって引き起こされた東京電力福島第一原子力発電所の被災、電源喪失に基づくベント及び水素爆発による周辺環境への放射性物質の飛散が起これ、被災地は混乱に陥り連絡も途絶えた。震災後初めて福島に足を踏み入れたのは5月の連休であり、直ちに福島市内の生産者圃場を複数確保して研究グループで栽培試験を開始した。

事故で広範囲に飛散した放射性物質の主体が放射性ヨウ素とセシウムであり、さらにその半減期から放射性セシウムを中心とした研究が求められた。4月には土壌の汚染程度に基づき営農が再開可能な地域が示されたが、多くの地域では震災前とは異なる状況の中で適切な栽培を模索しながらの取り組みになっていた。そのため、土壤肥料学会では学会として土壌や作物での放射性物質の挙動に関して3月には土壤・農作物等への原発事故ワーキンググループを立ち上げて、いち早く数多くのレビューを取りまとめ公表を行い¹⁾、自分のような、にわかに放射能対策に取り組む研究者にとって重要なランドマークとなった。

2. ファイトレメディエーション

土壌表面に降下した放射性セシウムを植物によって除去をしようという取り組みが広く行われたことは当時の報道資料を紐解けば明らかである。実際に福島県内では多くの場所でヒマワリの種子が撒かれ、当時の農水大臣による播種風景も報道された。しかしながら、土壌の粘土鉱物に強く吸着する放射性セシウムが簡単に植物によって除去できるとの科学的な知見はなく、むしろその吸収能が植物種内で特にヒマワリで高いという事実も無いことが指摘されていた (Watanabe, in preparation)。それでも植物によって有害な物質を除去するというアイデアは放射性物質によって汚染されている農地をあえて一般農作物の栽培では無く、ヒマワリを栽培して農地を除染可能できるのであればという希望は強かった。しかしながら、福島県や農研機構においてその検証が行われたが、実際の除去率はわずかであったことからファイトレメディエーションによる除染は現実的では無いと判断された²⁾。自分たちも牧草類を使った除染に取り組んだが、その効果は小さかった³⁾。当時は全く可能性が無いとは考え

てはおらず、特に植物が利用可能な放射性セシウムを吸収されることによりその後作ではその割合が低下するのでは無いかという考えもあったが、必ずしもそのような結果にはならなかった。

3. 表土はぎとり、反転耕（+深耕）

放射性セシウムの降雨等による鉛直方向の下方浸透は極めて遅いことがチェルノブイリの事故でも報告されており、これは粘土鉱物の風化した層に強く固定される事に基づくと考えられている⁴⁾。被災地でもこの調査が行われ実際に半年後でもその95%が表層2.5cmに残存していることが明らかになった⁵⁾。そのため、ある程度の汚染がある場合には（水稻の場合に作付け可能な圃場は暫定基準値(500Bq/kg)を超過しないために作土で5,000Bq/kg以下とされ⁶⁾、これが指標となって、表土はぎとりが行われた（実際にはそれ以下ではぎとりを行った地域もあればそれ以上でもはぎとりを行わなかった地域もある）。もちろん、この手法は大量の土壤廃棄物を発生させることになるため、草地などでは反転耕が幅広く用いられた。ただし、反転耕では一部の草地で反転させたルートマットの層（放射性セシウムを多く吸着している）に根が到達してそこから放射性セシウムを吸収している事が指摘された⁷⁾。そのため、単純に反転耕を行うのではなく、堆肥やカリ資材と良く表土を混合してから反転耕を行う手法が現在は取られている。深耕は通常の作土層である15cmよりも深く耕作することにより作土の放射性セシウム濃度を下げる手法である。実際の生産地ではこれらの手法を適宜組み合わせることで除染、あるいは低減化を進めて営農に取り組んだ。

4. カリウムによる移行抑制対策

表土はぎとりの基準は、大気圏核実験に由来した放射性セシウムによる日本全国の水田、畑の長期にわたるモニタリング結果に基づいた。2011年当時の一般食品の暫定基準値である500Bq/kgを超過しないように主要作物である玄米を栽培するための指標となった。大気圏核実験が地球規模で行われている時には最大で日本の平均的な土壤の放射性セシウム濃度は約40Bq/kgに達しており、玄米では4をやや超える程度であった。このことから、大気からの降下物がややある状況においても移行係数（収穫物の放射性セシウム濃度/土壤の放射性セシウム濃度）が0.1を最大と考える事が妥当とされた（図1）。

2011年の収穫時期を迎えて、残念ながら一部の地域で暫定基準値を超過した事例が認められ、その要因解析を行った結果から土壤の交換性カリ(K₂O)濃度が極めて低い圃場において超過事例が認められる事が報告された⁸⁾。このことから2012年度の作付けに向けて新たな対策として、土壤の交換性カリ濃度を一定以上に高める手法が確立された⁹⁾。カリ肥料のみならず堆肥やその他のカリを含む資材によっても同様

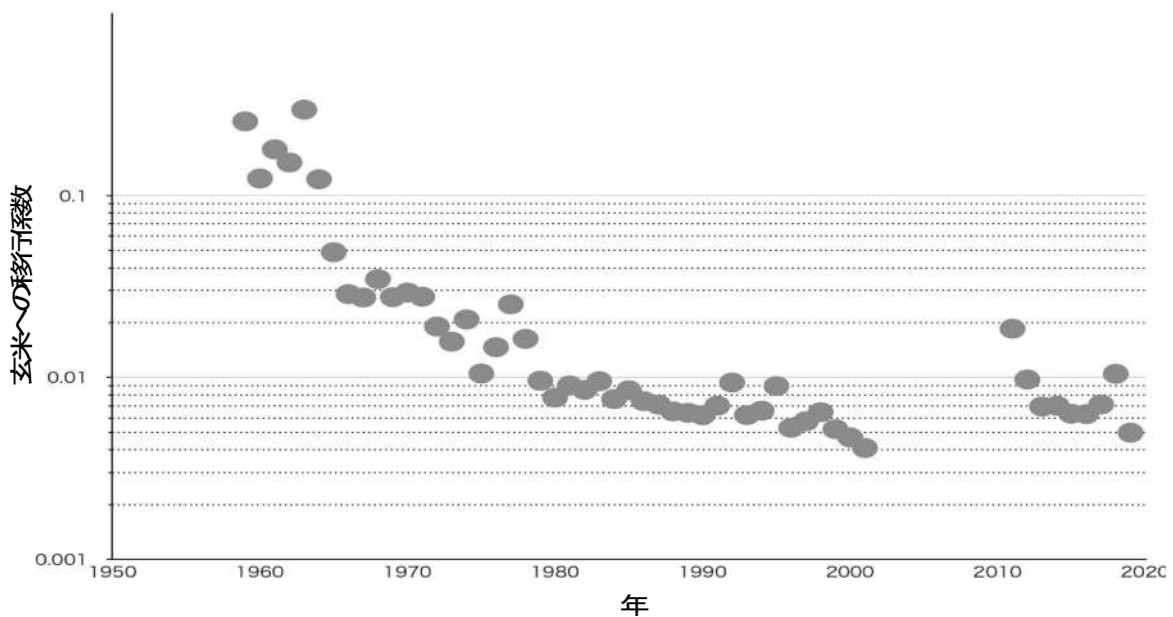


図1 日本全国の代表的な水田におけるグローバルフォールアウトおよび以降の¹³⁷Csの水稻玄米への移行係数（平均値，n=6-15）。データは農研機構が提供している主要穀類および農耕地土壌の⁹⁰Srと¹³⁷Cs分析データ一般公開システムより取得。

(<https://vgai.rad.naro.go.jp/>)

の効果が認められ、カリによる対策は水稻のみならず、大豆、そば、牧草といった様々な作物において広く用いられている。さらには表土はぎとり除染を行った圃場においても放射性セシウムを完全に除去することは困難であり（実際の圃場での作業を想定して欲しい）、残存している放射性物質の移行を抑制するためにもカリ肥料の投入は極めて効果的である。

ただし、牧草ではカリ対策が実施される以前では牛の病気抑制のためにカリ濃度を一定以下に低減する事が求められており、単純に放射性セシウム濃度を抑制することを目的とするためだけに圃場にカリウムを投入するのではなく、より精緻なカリ濃度の管理に基づいた施肥管理が必要となっている¹⁰⁾。

5. 土壌におけるカリウムの挙動

移行抑制にカリウムが効果的である事が示されたが、詳細に解析すると土壌による効果が異なっている。その原因究明が必要であるが、単純にその地域の土性のみでは決まらないことは、黄砂に由来する粘土鉱物が放射性セシウムの吸着に参与している事が明らかになった事や、土壌を構成している粘土鉱物の種類や量によっても放射性セシウムの動態のみならずカリウムの動態が大きく変動している事が示されている。カリウムは従来交換性カリ（1M酢酸アンモニウムで抽出されるカリウムで、植物が利用可能なカリウムとされる）が指標として活用されているが、それのみでは無

く非交換態カリウムとされる1 M 酢酸アンモニウムでは抽出されず一定レベルのTPB や熱硝酸によって抽出されるようなより強固に存在している層間などのカリウムの一部も植物が利用している事が明らかになっており、これが移行係数にも重要な因子である事が示されてきた^{11,12)}。

一方、植物種によっても移行係数には違いが存在している。移行係数は原発事故を含む核事故が発生した場合の食糧生産を維持するかどうかを決定するために重要な指標となるため、チェルノブイリの事故後に集積した情報をもとにしたIAEA（国際原子力機関）からの情報が震災時にも参考とされた¹³⁾。ただし、その値はバラツキが大きく、様々な要因によって変動をするためそのまま用いるには困難があった。その後福島での事故後の調査に基づいて2020年に新たなTECDOC（Technical Document）が完成した¹⁴⁾。様々な作物種の移行係数の違いを示した他、移行係数が圃場レベルにおいて交換性カリによって強く制御されていることが明示された。イネとダイズ およびソバは被災地において主要な作物であったことから、様々な圃場での広範な交換性カリ濃度での経年的な調査が行われ、それに基づくと同じ交換性カリ濃度であってもこれらの作物間では移行係数が異なる事が示された。概してイネに比較してダイズ、ソバで移行係数が高い。水田と畑土壌という違いも大きいと考えられる他、大豆では子実に多くのカリウムを集積することもその原因になっていると考えられている¹⁵⁾。

6. 今後の課題

体内に取り込まれた放射性セシウムの体内での分配自体のカリ栄養によって制御される事が示されているがその詳細なメカニズムは不明な点が多い¹⁶⁾。吸収場面においては、その主体を構成すると考えられている高親和性カリウムトランスポーターを変異により発現を抑制する事で圃場レベルでも著しく放射性セシウム吸収を抑制可能である事が示された¹⁷⁾。その一方でナトリウムの排除に関わる転写因子が変異する事で間接的に放射性セシウムの吸収が抑制された品種の開発に成功したこと¹⁸⁾からも、植物にとって不要な元素であるセシウムは必須性が無いことから副次的な作用で吸収・除去が行われていることを示している。そのため幅広の視野からの研究がさらに求められる。放射性セシウムに限っても現在の基準値に準拠するために、品種の選択により吸収が半減できるだけでもその栽培現場でのコスト削減効果は極めて大きいことから今後の進展に大いに期待している。

農作物への放射性セシウムの移行抑制には実際の圃場や作目に基づくさらなる調査が求められるのは当然であるが¹⁹⁾、実際に植物が放射性セシウムを吸収するのは土壌溶液からである。より正確に土壌溶液中のセシウムとカリウムの濃度変化を予測可能とする手法の開発、また放射性セシウムの土壌溶液中における濃度上昇のリスク評価が必要となる。そのためには土壌における放射性セシウムの固液分配係数の精緻化やRIP（放射性セシウム固定能）に代表される放射性セシウムに関連した土壌の物理化

学性の解析の重要性が指摘されており²⁰⁾、移行係数を固液分配係数と溶液の濃度比に分けて詳細に解析する事で土壤間の移行係数の違いの説明がより正確に行える事が示された²¹⁾。また、植物側からは吸収において同じ圃場での同時期の栽培でルーピンという飼料作物（マメ科）において大豆に比較して著しく高い放射性セシウムの吸収能が観測されている（表1）。そのメカニズム解明を進めることで、植物種間のセシウム吸収能の違いを明らかにできる可能性がある。

表1 圃場試験におけるダイズとルーピンの放射性セシウムの蓄積性 数値は平均値±標準誤差(n=3) **、*、+はそれぞれ1%、5%、10%水準で有意であることを示す（Kubo et al. unpublished data）

| | 2016 | | | | 2017 | |
|------|-----------------------------------|-------------|--|---|-----------------------------------|----|
| | 茎葉 ¹³⁷ Cs濃度 (Bq/kg) | | 単位根量あたり茎 葉 ¹³⁷ Cs量(Bq/g) | | 茎葉 ¹³⁷ Cs濃度 (Bq/kg) | |
| ダイズ | 243.1 ± 14.6 | 1.66 ± 0.21 | 126.6 ± 21.4 | | | |
| ルーピン | 555.8 ± 114.7 | 6.98 ± 1.38 | 1165 ± 72.8 | | | |
| | | | | * | | ** |

このような植物による積極的な放射性セシウムの吸収には、植物と土壤の接点の領域が極めて重要な意味を持つてくると想定される。ルーピンを用いた研究から根からごく特定の根圏領域に対して集中的に地上部で同化された炭素が分泌されている事が明らかになっており²²⁾、植物から土壤への直接的な作用が土壤中の放射性セシウムの動態に影響を与えている可能性が示唆されている。このような植物と土壤の接点を最新の研究手法などを導入して解析することにより、土壤肥料学の分野に新たな研究領域を創出する機運が高まっていると期待している。

震災から5年目に日本土壤肥料学会ではシンポジウムを開催し、それまでの対策の紹介と今後復興を進めるための技術についての議論を行った²³⁾。10年目を迎えるにあたって、今更のように土壤の肥沃度、カリの地域循環を機軸にした供給などの重要性が指摘されている。被災地の状態を震災前に戻すだけではなく、肥沃度や環境までを視野に入れたより進んだ農業が栄える地域を目指すためには、より幅広いネットワークと知識による取り組みの重要性がますます増してくる、なお、日本土壤肥料学会では10年目の節目におけるシンポジウムを11月5日に開催する予定である。

参考文献

- 1) <http://jssspn.jp/info/nuclear/index.html>
- 2) 佐藤睦人(2014)土肥誌 85:136-137.
- 3) 信濃卓郎(2020)グリーンテクノ情報, 16(3), 2-5.

- 4) 中尾淳(2012)学術の動向, 10, 40-45.
- 5) 農林水産技術会議 <http://www.s.affrc.go.jp/docs/press/110914.htm>
- 6) 原子力災害対策本部(2011.4.8)
https://www.maff.go.jp/j/kanbo/joho/saigai/pdf/ine_sakutuke.pdf
- 7) <https://www.maff.go.jp/j/chikusan/sinko/attach/pdf/josentaisaku-5.pdf>
- 8) 福島県・農林水産省(2011) <https://dl.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/6017943/1>
- 9) Kato, N. et al. (2015) *Soil Sci. Plant Nutr.* 61:170-190.
- 10) 農研機構(2019) https://www.naro.affrc.go.jp/publicity_report/publication/files/einosaikai-karisehi.pdf
- 11) Eguchi, T. et al. (2015) *J. Environ. Radioact.* 147:33-42.
- 12) Ogasawara, S. et al. (2020) *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 323:633-640.
- 13) International Atomic Energy Agency (2010) Technical Reports, Series No, 472.
- 14) International Atomic Energy Agency (2020) IAEA TECDOC series, No. 1927.
- 15) Nihei, N. et al. (2017) *Radioisotopes* 66:235-242.
- 16) Ishikawa, J. et al. (2018) *Plant Soil.* 429:503-518.
- 17) Rai, H. et al. (2017) *Plant Cell Physiol.* 58:1486-1493.
- 18) Ishikawa, S. et al. (2017) *Sci. Rep.* 7:2432.
- 19) Yamaguchi, N. et al. (2016) *Soil Sci. Plant Nutr.* 62:303-314.
- 20) 江口定夫(2017)土壌の物理性 135:9-23.
- 21) Yoshikawa, S. et al. (2020) *Soil Sci. Plant Nutr.* 66:541-552.
- 22) Yin, Y-G. et al. (2020) *Sci. Rep.* 10:8446,
- 23) 塚田祥文, 他 (2017)土肥誌 88:352-260.