

‡ 研究紹介 ‡

東京電力福島第一原発事故由来の 放射性物質により汚染された農地の復興

北海道大学大学院農学研究院 しのの 信濃 たろう 卓郎



1. はじめに

2011 年 3 月 11 日の東日本大震災とそれに引き続く津波によって被災した福島第一原子力発電所はその後ベント、水蒸気爆発を通して大量の放射性物質を大気中に放出しました。その多くは海洋に落下しましたが一部は南東北から北関東を中心とした地域に到達し、降雨・降雪に伴い広大な面積を汚染しました。

この事故においては飛散して問題となった主要な放射性核種は ^{131}I , ^{134}Cs , ^{137}Cs でありましたが、このうち ^{131}I は半減期が約 8 日であり数ヶ月後にはほとんど検出ができなくなったため、農業現場で対策が必要となったのは放射性セシウムになりました（もちろん事故直後においては飲料水の汚染に加えて葉物野菜への付着による汚染が問題とはなりました）。農地を汚染した放射性セシウムは作物を介して食品中に移行をするリスクがあることから、当初は厚生労働省より一般食品に対しては 500Bq/kg 以下という濃度制限が科せられ（2012 年 4 月からは 100Bq/kg）、そのためこの基準値を上回らないための技術開発が求められました。被災した県の多くは農業が主要な産業を構成しており、放射性物質によって汚染された農地においても農業を再開する必要がありました。農林水産省は直ちにこの問題に取り組み様々な手法による農地除染を試みましたが、最終的にはある程度以上の汚染状況では表土はぎとりの有用性が示され、多くの圃場の除染が行われました。本稿では 2013 年 4 月から 2019 年 3 月まで勤務した農研機構東北農研福島拠点にある農業放射線研

究センターにおいて主に実施した農地除染の取り組みを中心に紹介します。

2. ファイトレメディエーションへの期待と実際

当初はファイトレメディエーションによる除染も検討されました。ファイトレメディエーションとは植物（ファイト）を利用して土壌などに含まれる有害物質を除去して回復（レメディエーション）する技術であり、重金属汚染土壌での活用例が多く報告され、水田のカドミウム浄化技術としてもその適用可能性が示されています。一方セシウムに関しては、水溶液からの植物による吸収は迅速に行われることは以前から知られておりますが、放射性セシウムの植物による土壌からの除去（ファイトレメディエーション）の効率は必ずしも高くはないことがチェルノブイリの事故の後の試験からも示されておりました¹⁾。しかしながら、震災直後においてファイトレメディエーションに対しての期待が大きく、農水省も平成 23 年度科学技術戦略推進費「放射性物質による環境影響への対策基盤の確立」においてこの技術の検証を行いました。試験ではヒマワリを栽培して土壌からの除去割合を求めましたが、期待にそうほどの除去効率ではなかったことから除染に有効な技術としての採用は見送られました。しかしながら震災年においては被災地のそこかしこでヒマワリが栽培され、朽ち果てていく姿には心を痛めました。

ファイトレメディエーションは植物を用い

た環境浄化技術であり、そのメカニズムは植物そのものの能力と土壌での対象とする物質の状態で決まります。植物側の要因としては土壌からの吸収と蓄積、分解・無毒化、除去（物質によっては気化など）が挙げられますが、土壌側としては植物の存在による根圏での分解・無毒化（根分泌物、あるいはまたそれによる微生物活性）、土壌への固定促進も考慮に入れる必要があります。そのため対象とする土壌によっても効果は大きく異なります。

例えばチェルノブイリの試験で用いられたアマランサス(*Amaranthus caudatus*)を用いた震災後の福島での試験では、土壌から植物への移行のしやすさは福島で 1/10 程度と大きく異なっていました。この土壌から植物への移行のしやすさは移行係数（植物体の放射性セシウム濃度を土壌の放射性濃度で除した値）で評価されており、移行係数が大きいほどその土壌から植物が対象とする物質（ここでは放射性セシウム）を吸いやすいことを意味します。ただ移行係数が大きければ良いのではなく、植物体のバイオマス（これも単作で考えるのか、年間の作付けで考えるのかで変わります）との掛け合わせで初めて土壌からの除去量が決定されます。震災後に行われたヒマワリの試験に基づく移行係数では 0.20 より小さく、異なる 3ヶ所の福島県内の被災圃場でのヒマワリによる土壌からの放射性セシウムの除去率は 0.37～0.58%と限定的であったことが示されています²⁾。牧草の吸収によるファイトレメディエーションも行ないましたが、その除去率は 0～0.05%と実用には程遠かったです（表 1）。また土壌中の植物に吸収されやすい放射性セシウムとして交換性画分の割合が作物栽培によって低減され、次年度以降のリスクを低減可能との考えもありましたが、栽培後においてもこの画分に変動は認められず、吸収されても非交換性画分から補充が迅速に行われていることが示唆されています³⁾。そのため、土壌からの放射性セシウ

表 1 各種牧草による土壌からの
放射性セシウム除去率(%)

牧草の種類	除去率(%)
シロクロローバー	0.01
アルサイクロローバー	0.02
アカクロローバー	0.02
バヒアグラス	0.02
アルファルファ	0.03
クサヨシ	0.04
オーチャードグラス	0.02
クリムソンクロローバー	0.05
エンバク	0
チモシー品種A	0
チモシー品種B	0.03
チモシー品種C	0.03

試験年：2011-2012, 試験地：飯野町,
試験区：30cm x 30cm, 反復 2

(Shinano et al. unpublished data)

ムの除去が困難であるのみならず、植物に利用しやすい放射性セシウムの除去も困難であることが示されました。

さらに、ファイトレメディエーションで考慮しなければいけない重要な点として、吸収した植物体の処理があります。多くの場合土壌よりも低濃度で集積した場合には除去した後の処理に要する労力、コストも考えなければなりません。このようにファイトレメディエーションの実験現場への応用は複数の要因を総合的に判断する必要があります。福島第一原発の事故のような場合には汚染された面積が広大であり、その対策が迅速に求められていたことから実際には表土除去や反転耕（深耕）を導入する必要がありました。

3. 農地の除染技術（物理的除染）と残存する放射性セシウムの移行抑制対策技術

放射性セシウムは土壌に含まれている粘土

鉱物と強く結合する性質があるため、降雨等によって容易に移動しにくく、震災後に降下した放射性セシウムの多くは表土に残存していることが明らかになったことから表土除去による除染効果が大きいことが期待されました。しかしながら、表土除去によって除染を行なっても完全に放射性物質を農地から除去するのは困難です。そもそも農地は完全に平らではありませんし、そこに重機を入れて作業することを考えれば自明のことです。実際には平均で 5 cm を除去し、その後元の高さにまで客土を行うという作業が多く行われました。そのため、土壌から完全に放射性セシウムは除去されませんでした。実際に営農を再開するには残存する放射性セシウムが植物に移行するのを抑制するための技術が求められました。それには先に示した移行係数を低減することが取り組まれました。植物による放射性セシウムの吸収は化学的挙動が近いと考えられており(同じアルカリ金属元素である)、植物が有しているカリウムの吸収メカニズム(カリウムトランスポーターなど)によってセシウムも吸収されることが知られています。この吸収においてはカリウムとセシウムは拮抗的に作用することから、土壌溶液中のカリウム濃度を高める事が放射性セシウムの吸収を抑制可能なことが震災前から考えられており⁴⁾、実際に被災後の水田においてもこの点は確認されました⁵⁾。

震災当初は移行係数を一定の数値(最大 0.1)と想定し、圃場の放射性セシウム濃度(5,000Bq/kg)で作付け制限を進めました但实际上には 5,000Bq/kg 以下の圃場でも当時の暫定基準値超過を引き起こした事例もあり、より精緻な対策が求められました⁶⁾。汚染水田での試験結果から 2012 年度の作付け前に水稻では生育を通じて土壌の交換性カリ(K_2O)濃度が 25mg K_2O /100g を維持するようにする事で移行係数を 0.01 より小さく維持可能なことが示され、これに基づきカリウム肥料

による移行抑制対策が大々的に 2012 年度から行われることになりました。同様の対策は大豆(25mg K_2O /100g。ただし初作やリスクが高い圃場では 50mg K_2O /100g)、そば(30mg K_2O /100g。ただしリスクが高い圃場では 50mg K_2O /100g)、牧草(30-40mg K_2O /100g)と、その他の作物でも導入されました。カリウム肥料による移行抑制の効果は極めて大きく、2011 年度の福島県産玄米のモニタリング検査では 100Bq/kg(2012 年度からの基準値)超過の玄米の割合が 1 %を超えていましたが、カリウムによる移行抑制対策が導入された 2012 年度産の玄米は全量全袋検査の結果 0.0007%(ふくしまの恵み)と激減したことから明らかです。玄米においては 2015 年度産以降 5 年にわたって基準値超過米が発生しなかったことから 2020 年度においては一部の地域を残して全量全袋検査からモニタリング検査に以降することが決定しています。

4. 今後の課題

このように除染対策によって放射性セシウムによって汚染された農耕地での農業の復興は大きく進展しているものの、全く問題がないわけではありません。その理由は今後の長期的な圃場のカリウムの管理にあります。先に述べたように放射性セシウムの土壌への結合能は高く、作土から系外への移動は極めて緩慢であることが知られています。その一方で放射性セシウムの半減期は ^{134}Cs で約 2 年、 ^{137}Cs で約 30 年であります(事故の際には両者がほぼ 1:1 の割合で放出した)。 ^{134}Cs 濃度は事故から約 10 年が経過して物理的半減期のみでも当初の 30 分の 1 程度まで低減しているのですが、 ^{137}Cs は今後も長期的にゆっくりと減衰しながら存在し続けることを意味しています。現在はこれまでの移行抑制対策によって著しく過剰な量のカリウムが投入されており、結果として効果的に放射性セシウムの吸収を拮抗的に抑制していますが、基準値

超過を複数年にわたって起こさなかったことから、多くの自治体ではカリ肥料による移行抑制対策も中止している現状があります。震災前の福島県の水田においてはわずか 10% 程度の圃場において交換性カリ濃度が低いと指摘されていましたが、その低い圃場の一部が暫定基準値超過を引き起こしました。今後カリウムバランスをきちんと考慮せずに震災前の慣行法に単純に移行した場合には再び圃場の交換性カリ濃度が低減する可能性は否定できず、その際には移行係数が高まるのが危惧されます。これを回避するためには稲藁の還元や定期的な堆肥の投入や追加的なカリウム肥料の投入等の対応が必要なのですが、その基準が明確にはなっていない事が問題点としてあります。今後も長期的に基準値超過を引き起こさないためにも気を引き締めて、さらなる精緻な農業技術の開発と導入が急がれています。付言すれば、今後はただ放射性セシウム対策ということではなく、カリウム（のみならず）の適切な循環、補給を視野に入れた土壌の長期的な保全をベースにした対策として取り組む必要があると考えています。

参考文献

- 1) Dushenkov, S., Vasudev, D., Kapulnik, Y., Gleba, D., Fleisher, D., Ting, K.C. and Ensley, B. 1997. Removal of uranium from water using terrestrial plants. *Environ. Sci. Technol.* 31:3468-3474.
- 2) 佐藤睦人 (2014) ファイトレメディエーションによる放射性セシウム除去効果の検証 土肥誌 85:136-137.
- 3) 鈴木安和, 齋藤隆 2013. 植物を用いた異なる土壌における放射性セシウムの吸収除去効果 福島県放射線関連支援技術情報 <https://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/attachment/307677.pdf>
- 4) Zhu, Y.-G. and Smolders, E. 2000. Plant uptake of radiocaesium: a review of mechanisms, regulation and application. *J. Exp. Bot.* 51:1635-1645.
- 5) Fujimura, S., Yoshioka, K., Saito, T., Sato, M., Sato M., Sakuma, Y. and Muramatsu, Y. 2013. Effects of applying potassium, zeolite and vermiculite on the radiocesium uptake by rice plants grown in paddy fields soils collected from Fukushima prefecture. *Plant Prod. Sci.* 16:166-170.
- 6) Hachinohe, M. and Shinano, T. 2020. Large-scale sampling and radioactivity analysis of agricultural soil and food during nuclear emergencies in Japan: Variations over time in foodstuffs inspection and sampling. *J. Environ. Radioact.* 218:106262.