

セシウムとストロンチウムの植物における動態と農地の放射能汚染の除去

原田 英美子
生物資源管理学科

2011年3月11日に発生した東日本大震災、およびそれに伴う津波により、福島第一原子力発電所では深刻な事故が発生し、放射性核種が大量に環境中に放出される事態となった。植物は生命活動に必要な水分や無機元素類などの物質を主に根を介して土壤中から吸収している。ファイトレメディエーション (phytoremediation) は、このような能力を利用して環境中の汚染物質を植物に集積させ、分解、除去する手法である。これまで対象としてきた有害物質は主に、窒素酸化物、硫黄酸化物などの大気汚染物質、農薬、環境ホルモンおよび有害金属類であるが、今回の事態を受け、ファイトレメディエーションによる放射性核種の除染の可能性が注目を集めている。また、食品の放射能汚染を議論する上でも、植物における元素の挙動に関する情報は非常に重要である。本稿では、セシウムとストロンチウムの環境中および植物体内での動態と、および福島における農地の汚染除去の概要について紹介する。

土壌中の無機元素は土壌から土壌水中に溶け出して植物が利用できる形 (可給態) となり、根を介して植物に吸収される。土壌粒子の表面は、有機物や粘土鉱物に由来する負電荷を帯びている。セシウムはアルカリ金属、ストロンチウムはアルカリ土類金属であり、ともに陽イオンとなることから土壌粒子に電氣的に保持されるが、その挙動は異なっている。セシウムは土壌に強く吸着される性質があり、土壌の表面に留まる傾向がある。実際に、福島原発事故後に水田土壌の放射性セシウム (^{134}Cs 、 ^{137}Cs の合計) の分布を調べた結果、耕起していない農地土壌の表面から 2.5cm の深さに 95% が存在していることが判明している。¹⁾ 逆に放射性ストロンチウム (^{90}Sr) は土壌の下層まで浸透し、環境中で移動しやすい。²⁾ さらに、これらの元素の人体での生物学的半減期 (生体に取り込まれた物質の半量が代謝・排泄されて体から出て行くまでの時間) は、 ^{137}Cs では平均およそ 90 日³⁾ であるが、骨に親和性の高い ^{90}Sr では 49.3 年⁴⁾ となり著しい差がみられる。このことは、セシウムとストロンチウムの性質の差異をよく考慮した除染活動が必要であることを示している。

セシウム、ストロンチウムとも、周期表で縦に並んでいる同族元素に基本的には類似した性質を持つ。いずれも植物の必須元素ではなく、類似の性質を持つ必須元素の取り込み、輸送系が植物体内での

移行メカニズムに関与している。⁵⁾ 非放射性セシウムの土壌中での濃度は極めて低いが、非放射性ストロンチウム量は比較的多く、クラーク数 0.02、第 22 位である。ストロンチウムはカルシウムと類似の経路で植物に取り込まれていると考えられている。

Dushenkov らは、水耕栽培の実験系で、ヒマワリの根が培地中からウランやストロンチウム、セシウムを効果的に除去することを示していた。⁶⁾ しかし、農地土壌除染技術開発の実証試験⁷⁾ によると、ヒマワリによる農地土壌の放射性セシウム除染の試みは 0.70% という低い除去率に終わった。⁸⁾ ヒマワリが期待されたような成果を挙げなかったのは、一つには植物の形状から、根を土壌から回収するというのが現実的ではなかったためか、土壌から植物体地上部 (茎葉) への移行を測定しているのがその理由であると考えられる。また、土壌から植物への元素の移行に影響を与える要因は、土壌種、土壌中の鉱物組成、土壌水中の各種のイオンなどであるが、水耕栽培は、土壌粒子からの元素の溶出の影響を除外した人工的な系である。一方、表土の削り取りでは 75%、土壌の表面に固化材を散布し、固化部分を排土する方法では 82% の放射性セシウムが除去された。最も効果的であったのは芝地や草地の草を表土と同時に剥ぎ取る方法で、97% の除去率であった。表土のみを削り取るよりも、草丈の低い植物を地上部・地下部とも土壌を同時に除く手法が有効であったことから、現状ではこの手法が植物の根系に

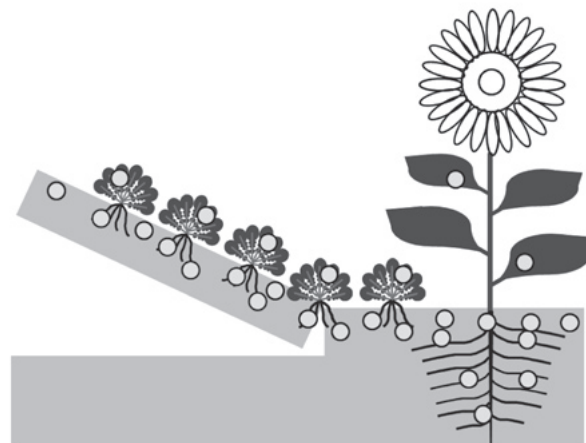


図1 放射性セシウム (○で示す) は表土に吸着し、植物の地上部と地下部にも吸収される。植物体全体を表土とともに剥ぎ取ることにより、効率的に除染することができた。土壌からヒマワリ地上部へのセシウムの移行はごくわずかであった。

重金属集積植物 (metal hyperaccumulator) は、植物体の地上部に有害重金属を高濃度で蓄積する性質を持つ。カドミウム、亜鉛、ヒ素などの元素を集積する植物については、その性質や集積性に関与する遺伝子についても研究されており、実際に重金属集積植物を用いた汚染土壌の浄化は実用化フェーズに近いところまで到達している。^{9,10} 重金属集積植物は、根で特定の元素を積極的に取り込み、さらに根から地上部に効率的に元素を移行させる機構と、地上部における有害元素の解毒機構を併せ持った植物だと考えられる。セシウムもしくはストロンチウムの高集積植物がもし存在すれば、ファイトレメディエーションへの利用が期待されるが、報告はごく限られている。国立環境研究所の高田らによる、日本の各地で採取された陸上植物の元素濃度の測定結果によると、セシウムではオオバヤシャブシの 21.5 ppm が最大であり、概して極めて低濃度である。11)ウラジロガシが 1590 ppm のストロンチウムを集積していたが、元素濃度などの土壌の情報がないため、これが土壌の性質もしくは高濃度の環境中ストロンチウムに由来するのか、あるいは植物の特性なのか現段階では不明である。日本における重金属集積植物に関する研究は、欧米と比べると歴史が浅いことに加えて、セシウムとストロンチウムはこれまであまり着目されてこなかった元素であることから、基礎的なデータの蓄積が未だ不十分である。

一方、放射性セシウムが降下した森林では、樹木の葉、下草とともに、落葉枝層やそれが腐植化する土壌表層、いわゆるリター層に放射性セシウムが高濃度で存在する。¹²⁾ このことから、森林におけるリターの除去による除染が試みられ、有効性が示されている。¹³⁾ また、樹木の幹においては木材として利用される中心部分に放射性セシウムはほとんど含まれておらず、樹皮での濃度が高い。放射性ストロンチウムについての樹木での挙動に関するデータはこれまでに示されていないが、ヤナギにおける非放射性ストロンチウムの分布を測定した筆者らの報告が参考になるかもしれない。筆者らは、樹木におけるカドミウムの挙動を調べる目的で、野外のヤナギの枝を採取、水耕栽培の系でカドミウム処理を行った後、枝の切片を作製し、放射光施設 SPring-8 で蛍光 X 線分析を行い、元素の分布を可視化した。その結果、カドミウムと同じ測定条件で、ストロンチウムも検出され、いずれの元素濃度もやはり木部より樹皮で高いという結果が得られた。¹⁴⁾

このように樹皮に放射性元素濃度が高いことから、果樹園の除染においては、果実へのセシウム・ストロンチウム移行を抑えるために、樹皮を可能な

限り除くという手法が考えられる。この方法では、樹皮の表面に付着した放射性核種も同時に除くことができる。実際、ブドウおよびナシでは、樹皮の剥ぎ取りによる除染が効果的で、樹木の汚染程度を 80-90%減少させた。モモでは樹皮を除くと植物体に著しくダメージを与えることから、樹皮の表面を高圧洗浄するという手法がとられ、付着した放射性核種を 55%除去することができた。¹⁵⁾

放射性元素の農作物における可食部への移行に関しても、植物生理学的な考察が必要である。事故直後は、放射性核種の飛散による農作物の汚染、つまり大気中から直接植物の表面にセシウム・ストロンチウムを含んだ粉塵が付着し、さらに葉面から植物体内に取り込まれる経路 (葉面吸収) が重要である。したがって、葉面積が大きい葉菜類が一番汚染される可能性があった。今後、中・長期にわたる主な移行経路は、放射性核種が土壌から根を介して植物体内に取り込まれる経路 (経根吸収) と考えられる。農作物中 (可食部) の放射線核種濃度 (Bq/kg 生鮮) を土壌の放射線核種濃度 (Bq/kg 乾土) で割ると、それぞれの作物について移行係数を算出することができる。¹⁶⁾ 移行係数と農地の放射線濃度を利用し、作付けの可否の予測が行われた。それにもかかわらず、玄米から暫定基準値を超える放射性セシウムが検出された。¹⁷⁾ 玄米が規制値を超えた水田では、土壌中のカリウム濃度が通常より低いことが後に判明した。¹⁸⁾ このように、土壌の条件などにより予測通りにならない例が少なくないことから、今後大学研究機関で活動する植物研究者には、放射性核種が農作物に吸収・移行するメカニズムや栽培条件の影響、吸収抑制技術などの科学的な解明に関する研究を行なうことで、除染や農作物の安全性確保へ寄与することが期待されている。¹⁹⁾

汚染農地の徹底的な浄化以外の東北地方の農業復興策として、植物工場による大規模な野菜生産を開始する案が検討されている。植物工場は、建屋内で人工光、水耕栽培により農作物を生産する手法である。植物工場は生産性が高く、場所を選ばず作物を栽培できる手法であり、塩害、放射能汚染などの被害を受けた地域でも農業生産を再開することができる。植物工場はこれまで、光源として主に蛍光灯が用いられていたため、ランニングコストが作物の価格に上乘せられてしまい、採算がとれない事例もあったが、太陽光を最大限に利用することにより経費の削減を図ることができる。食の安全が何よりも求められている今日の状況を考えると、今後この分野の技術開発は不可欠である。

最後になるが、私見を述べさせていただく。内閣府

原子力安全委員会の委員が審査対象となる原子力関連の企業団体から寄付を受けていたことが報道され、安全審査の中立性が問題視された(2012年1月1日、朝日新聞報道)。さらに、産官学の癒着による組織的なデータの改ざんおよび不正隠蔽が次々と報道されている。このような体質が福島原発事故の遠因になったのではないか、また、科学者がどのような姿勢で科学と向き合うべきか、この機に自らに問い直す必要があるのではないか、と思えてならない。

引用文献

- 1) 農林水産省、農林水産技術会議、「農地土壌の放射性物質除去技術(除染技術)について、別添4、各技術についての解説」< <http://www.s.affrc.go.jp/docs/press/pdf/110914-10.pdf> >、2011-09-14.
- 2) 塚田祥文、山口紀子、高橋知之(2011) 土壌-作物系における放射性セシウムおよび放射性ストロンチウムの動態、化学と生物、49: 834-842.
- 3) (財)高度情報科学技術研究機構、フォールアウトからの人体内セシウム(40年の歴史) < <http://www.rist.or.jp/atomica/index.html> >、2006年12月.
- 4) Rodríguez M, Suárez JA, Espartero AG. (1996) Separation of radioactive strontium by extraction using chromatographic resin. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A 369: 348-352.
- 5) 長谷川博、セシウムと高等植物、作物研究、印刷中.
- 6) Dushenkov S, Vasudev D, Kapulnik Y, Gleba D, Fleisher D, Ting KC, Ensley B. (1997). Removal of uranium from water using terrestrial plants. Environ. Sci. Technol. 31: 3468-3474.
- 7) 農林水産省、農林水産技術会議、「農地土壌の放射性物質除去技術(除染技術)について、別添2、実証した除染技術の成果の概要」< <http://www.s.affrc.go.jp/docs/press/pdf/110914-06.pdf> >、2011-09-14.
- 8) 日本農学会、東日本大震災からの農林水産業の復興に向けて-被害の認識と理解、復興へのテクニカル リコメンデーション- < <http://www.ajass.jp/image/recomfinal.pdf> >、2011-11-17.
- 9) 北島信行(2009) モエジマシダによるヒ素浄化、メタルバイオテクノロジーによる環境保全と資源回収-新元素戦略の新しいキーテクノロジー- 監修: 吉田和哉、植田充美、池道彦、(株)シーエムシー出版、東京、p84-90.
- 10) 久保田洋、菅原玲子、北島信行、矢島聡、谷茂(2010) ハクサンハタザオによるカドミウムのファイトレメディエーション、日本土壤肥科学雑誌、81: 118-124.
- 11) 高田実弥、高松武次郎、佐竹研一、佐瀬裕之(1994) 陸上植物葉の元素濃度-中性子放射化分析データ集(I) - 環境庁国立環境研究所、つくば.
- 12) 文部科学省報道発表、文部科学省による放射性物質の分布状況等に関する調査研究(森林内における放射性物質の移行調査)の結果について< http://radioactivity.mext.go.jp/ja/distribution_map_around_FukushimaNPP/0002/5600_091412.pdf >、2011-09-14.
- 13) 林野庁報道発表資料、森林の除染実証試験結果について(第二報)、別添、森林の除染実証試験(下草・落葉の除去)結果について< http://www.rinya.maff.go.jp/j/press/hozen/pdf/111227_1-01.pdf >、2011-12-27.
- 14) Harada E, Hokura A, Takada S, Baba K, Terada Y, Nakai I, Yazaki K. (2010) Characterization of cadmium accumulation in willow as a woody metal accumulator using synchrotron radiation-based X-ray microanalyses. Plant Cell Physiol. 51: 848-853.
- 15) 福島県農業振興課、がんばろう ふくしま! 農業技術情報、福島県農林地等除染基本方針(農用地編)の概要と除染方法< http://www.pref.fukushima.jp/keieishien/kenkyuukaihatu/gijyutsufukyuu/06ganba_joho/ganbajosenH231228kou.pdf >、2011-12-28.
- 16) 農林水産省報道発表資料、農地土壌中の放射性セシウムの野菜類及び果実類への移行の程度< <http://www.maff.go.jp/j/press/syouan/nouan/pdf/110527-01.pdf> >、2011-6-7.
- 17) 福島県農林水産部、暫定規制値を超えた放射性セシウムが検出された玄米について< http://www.cms.pref.fukushima.jp/download/1/suiden_sibukawamura_1207.pdf >、2011-12-7.
- 18) 福島県農業振興課、暫定規制値を超過した放射性セシウムを含む米が生産された要因の解析(中間報告)(案) < http://www.pref.fukushima.jp/keieishien/kenkyuukaihatu/gijyutsufukyuu/05gensiryoku/231225_tyukan.pdf >、2011-12-25.
- 19) 荒川市郎、二瓶直登、農作物に関する緊急時モニタリングの概要、第191回生存圏シンポジウム 東日本大震災以後の福島県の状況及び支援の取り組みについて 講演予稿集 p1-2、2012年1月6日(宇治)。