

土壌から作物へ，セシウムの移行とその要因

古川 純

福島第一原発事故から約3年が経過した現在，森林土壌や河川堆積物に含まれている放射性物質，特に放射性セシウム (^{137}Cs : 半減期約30.1年) が環境中をどのように移行していくのか，その過程を明らかにすることが復興支援研究の一つの焦点となりつつある．環境中における放射性物質の動態研究においては，放射性物質の付着した土壌そのものの浸食・運搬・堆積といった直接的な移動に加えて，植物などによる土壌中の放射性物質の吸収の後，植物体内を移動・蓄積され，落ち葉などのような有機物の形態で再び環境中を移動するような現象についても明らかにしていく必要がある．このような土壌から植物への放射性物質の移行については未解明な部分が多く，具体的な抑制方法を提示する上で十分な知見が蓄積されているとは言い難い状況にある．また，植物による放射性物質の吸収は土壌から生態系への主要な入り口の一つであり，食物連鎖を介したヒトを含めた生態系への放射性物質拡散の観点からも土壌-植物系を中心とした放射性物質の動態について理解を深めていくことが求められている．本稿では土壌から植物への放射性物質の移行について，主に作物に着目して概説あるいは紹介したい．まず我々の食生活に大きく関わってくるイネにおける放射性セシウムの蓄積について，多くの研究グループにより精力的に実施された現地調査から得られた結果を中心に解説する．またセシウムの吸収にはアナログであるカリウムとの関係性が多く指摘されていることから，カリウムを比較的多く可食部に蓄積するマメ科植物による吸収についての室内実験的な検証について触れる．

イネによる放射性セシウムの吸収

放射性セシウムのイネへの移行については，食品として我々の生活に直結することから，2011年の事故後から非常に強い興味を持って多くの研究がなされてきた．特に我々が口にする米に含まれる放射性セシウムに対する関心が高く，実際の調査ではその大多数で玄米が測定対象となっている．現在多くの調査結果が公表データとしてまとめられていることから，関係機関のHPなどから入手して一読された方も多いと思われる．土壌からの放射性セシウムの移行を調査するにあたって最初に検証

されたのは，栽培された地域の土壌と玄米中の放射性物質濃度に相関があるかどうかであったが，それらには明らかな関連性が認められなかった．これはイネにおけるセシウムの吸収・蓄積は単純な土壌中セシウム濃度に依存するのではなく，土質や施肥状況，さらには灌漑用水といった水田ごとに異なる栽培環境によって大きく影響されることを示していた．玄米中の放射性セシウム濃度が暫定規制値 (500 kBq/kg, 2012年3月31日まで) に比べて十分に低い濃度に収まっているイネでは，下位葉に放射性セシウムが比較的多く，上位葉になるにつれセシウム濃度が減少するというものであった．これに対し，暫定規制値を超えたイネでは反対に上位葉において高濃度のセシウムを含むことが明らかにされた¹⁾．これは上位葉が成長する夏季に多量のセシウムがイネによって吸収されたことを示唆するものであり，夏季におけるなんらかの栽培環境変化がセシウム吸収を促進したものと考えられた．

根本らは2012年も現地での調査を継続し，その結果を報告している²⁾．それによると，玄米や上位葉で高いセシウム濃度を示したイネでは，茎葉部において7月から8月にかけてセシウムの濃度が上昇することが示されている．これは同時期にセシウム濃度が減少する大多数のイネとは異なる傾向である．夏季に見られる茎葉でのセシウム濃度の減少は，イネの成長がピークを迎えてバイオマスが増加することによって考えられており，このバイオマス増加には非常に多くの水を必要とすることが知られている．現地で実際に利用されていた灌漑用水の影響をイネのセシウム濃度と対応させて検証するために，それぞれの試験田に流入している用水の放射性セシウム濃度を，溶存態 [GF/Fフィルタ (平均孔径約0.9マイクロメータ)ろ過後] と，溶存態+懸濁態 (GF/Fフィルタ未ろ過) に分けて測定すると，夏季にイネ茎葉部中の放射性セシウム濃度が上昇した水田では用水中に含まれる懸濁態セシウム量が他に比べ数倍程度高いことが示された．実験室における懸濁態セシウム濃度が高い用水を用いた水耕吸収試験からも，懸濁態セシウムを含まない用水での栽培に比べて多量の放射性セシウムがイネへと移行することが示されており，イネは懸濁態として用水とともに移動しているセシウムを容易に吸収するこ

と、また水田の土壤環境だけでなく、流入する用水中に含まれるセシウム量の変化といった放射性セシウムの環境中での動態と併せて検証すべきであることが明らかとなっている。一般に粘土粒子のフレイドエッジサイトに結合した放射性セシウムは、植物への移行が困難であるとされていることから³⁾、懸濁態のセシウムがどのような状態で存在しているのかを明らかにする必要があるとともに、河川などを介した懸濁態セシウムの動態を明らかにすることも食品中の放射性セシウム量を低く維持する上できわめて重要になるものと考えられる。

以上から明らかになりつつある環境中のセシウム動態の変化がイネのセシウム含量に影響するような現象に加えて、イネそのものの性質に着目した研究も進められている。セシウムが植物体へ吸収される際の経路としては、植物にとっての必須元素であるカリウムの輸送系が候補となっている。カリウムチャンネルによるカリウムの輸送がセシウムの共存下で阻害されること、またカリウム欠乏の植物体ではセシウム吸収が促進されることなどから有力視されているものの、いまだ解明されていない部分が多く残されている。カリウムとセシウムの拮抗的な作用から予測されるように、一般に土壤中の置換性カリウム濃度が高いほど玄米への放射性セシウムの蓄積は妨げられている。これは被災地で実際に試験栽培されたイネと、そのイネを栽培した水田の環境を調査した福島県と農林水産省による報告結果からも同様の結果が得られている⁴⁾。また、先の玄米中に高濃度のセシウムを含むイネが栽培された水田の土を用いたポット試験においても、カリウム施肥によりセシウム吸収量が低減されており、土壤環境の改変が有効な手段であることが示されている¹⁾。しかしながら、上記の福島県と農林水産省による報告においても、同程度の置換性カリウム濃度を示す他の水田に比べて玄米中のセシウム濃度が高く、置換性カリウム濃度との間に関連性が認められない事例が複数存在していた⁴⁾。これは土壤環境の違いによる交換性カリウム濃度の差だけで玄米への放射性セシウムの蓄積を完全に説明できるわけではないことを示唆するものとして注目されている。そのため、カリウム以外の土壤成分による影響についても多くの研究が進行中であるが、その中から窒素施肥に着目した報告について紹介する。藤原らは、福島県内の水田を用いてカリウムと窒素の施肥が玄米中の放射性セシウム量にどのように影響するか調査している。その結果、カリウム施肥をせず窒素を過剰気味に与えた試験区でもっとも高いセシウムの蓄積が認められたことが報告されている⁵⁾。2010年までは通常の水田としてカリウムなどの施肥も行われていたため土壤

中に十分なカリウムが存在していたと考えられ、カリウム無施肥処理と対象の通常施肥区との間に明確なセシウム蓄積量の差は認められなかったものの、施肥法によってはイネへのセシウム移行が増加するというを示しており、今後の更なる研究が期待される。

また藤原らのグループは、セシウム吸収がイネの品種間でどのように異なっているかについても同様に福島県内の水田を用いて調査した結果を報告している⁶⁾。85系統のイネを用いた解析の結果から、玄米中の放射性セシウム量には10倍程度の幅を持った系統間差があることが明らかとなり、玄米へのセシウム蓄積にはゲノム上に原因となる遺伝子が存在し、遺伝的に支配される多様性があることが示されている。一方、イネがセシウムを取り込む機構を、輸送体の機能から直接解明しようというアプローチでの研究も進められている。秋廣らはイネのゲノム上に存在する約1200個の輸送体について組換え酵母を用いたセシウムの輸送活性調査を行い、17個のセシウム輸送体候補を得ている⁷⁾。今後これらの輸送体の機能が欠損したイネの作出による植物体レベルでのセシウム蓄積量の低下が期待される。これらの研究はセシウムをあまり蓄積しないイネの開発が将来的に可能であることを示しており、被災地での稲作を継続する上でその果たす役割は非常に大きいものと考えられる。

マメ科作物のセシウム蓄積機構の解明に向けて

これまでに述べたイネばかりでなく、さまざまな栽培作物について放射線量の検査が行われており、その結果はWebサイトなどを通じて広く公開されている。上記のようなカリウム施肥の管理により基準値を超える農作物は減少しているが、原発事故から2年以上が経過した2013年12月であっても放射線量が高い値を示す場合のある作物がある。その一つの例がダイズであり、福島県の農林水産物モニタリング情報提供ホームページである「ふくしま新発売」でも基準値を超過したダイズが報告されている⁸⁾。ダイズをはじめとするマメ科の作物は可食部である子実のカリウム含有量が比較的多いことが知られている⁹⁾。子実の集積量が高いということから、放射性セシウムの土壤からの取込みを抑えるだけでなく、植物体内におけるセシウム輸送についての知見を蓄積することにより可食部の放射性セシウム含量を低減させることが必要である。我々の研究室では水耕実験を用いた植物生理学的アプローチでこれらの問題解決に取り組んでいる。

イネの研究でも示されているカリウムイオンがセシウム吸収を抑制するような拮抗作用がダイズでも共通して

認められるかを明らかにするため、水耕栽培でのセシウム取込み試験を行った。その結果、ダイズにおいても水耕液にカリウムが共存していると放射性セシウムの吸収は大きく阻害されることが示されたため、植物体内における輸送を中心的に解析することとした。水耕液からカリウムを除き、カリウム欠乏としたダイズにおけるセシウム輸送活性の変化について検証したところ、カリウム欠乏3日間の処理によりセシウムの吸収量・地上部への輸送量がともに増加していた。これはカリウム欠乏により活性化されるカリウムの吸収機構を介して放射性セシウムが植物体中に取り込まれていることを示唆するものである。これまでの知見から、カリウムの吸収にはカリウムに対する親和性の異なる二種類のシステムが働いており、カリウム欠乏時に活性化されるのはそのうちの高親和性側の輸送システムであることが知られている^{10,11)}。したがって、ダイズの放射性セシウムの取込みにもカリウムに対して高親和性を示す輸送体が関与しているものと考えられる。一方でダイズ地上部へ輸送される放射性セシウムは、その濃度は増加していたものの、根に取り込まれているセシウム濃度と比較するとカリウム欠乏処理による増加は認められなかった。このことは、根における根圏からのカリウム吸収機構の活性化が根中の放射性セシウム濃度の増加をもたらす、その増加に起因した地上部への輸送量の上昇は起こっているが、根から地上部への輸送活性そのものに着目するとカリウム欠乏処理による活性化は誘導されていないということを示唆している。より詳細な検証が必要であるものの、カリウム欠乏時のダイズにおいては根における高親和性カリウム取込み機構の活性化が比較的初期に誘導されることで放射性セシウムの植物体全体への蓄積量増加が生じていると考えられる。また子実形成期における解析も重要であることから、生育段階ごとの放射性セシウムの吸収・輸送活性を現在検証中である。

また先に述べたイネ同様にマメ科植物においてもセシウム吸収に関する品種間差、種間差が存在しているものと考えられる。これまでにダイズ3系統、飼料用マメ1系統、ツルマメ1系統について、カリウム十分条件と欠乏処理3日間でのセシウム取込み実験を行った。カリウム十分条件では飼料用マメ系統とツルマメ系統において、ダイズ3系統よりも高いセシウムの根への取込みとそれに応じた地上部への蓄積が認められた。特にツルマ

メ系統で顕著に放射性セシウムが取り込まれており、またダイズの品種間では差が認められなかった。これらについてカリウム欠乏3日間という処理を施すと、ダイズ3系統、飼料用マメ系統では根・地上部の双方においてセシウム濃度が上昇したが、ツルマメ系統では根での濃度に変化が見られないにも関わらず、地上部での蓄積濃度の増加が認められた。以上からツルマメはセシウムを輸送する特徴的なカリウム吸収・輸送機構を有していることが示唆され、今後より詳細な検証を通してその原因遺伝子を特定し、セシウム吸収が抑制された品種の作出に寄与することを期待している。

おわりに

植物による土壌からの放射性セシウムの吸収機構の解明は安心・安全な作物の供給に大きく貢献すると考えられ、植物の研究に携わる者として精力的に取り組まなければならない課題である。またこれまでに進められた研究では、施肥の方法によっては予想されていなかったようなセシウムの移行が示されることもあり、更なる検証も必要である。また、被災地においては栽培環境の変化が可食部のセシウム蓄積に密接に関わることから、森林や河川を軸とした環境中の放射性物質の動態を理解することで、生態系への放射性物質の拡散を低減することが重要である。そのためにもさまざまな背景を持つ研究者・協力者の連携をより一層深めていくことが必要である。

文 献

- 1) Nemoto, K. and Abe, J.: *Agricultural Implications of the Fukushima Nuclear Accident*, p. 19, Springer (2013).
- 2) <http://www.a.u-tokyo.ac.jp/rpjt/event/20121208.html>
- 3) Delvaux, B. et al.: *Trace elements in the rhizosphere*, p. 61, CRC (2001).
- 4) 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) ; 福島県, 農林水産省.
- 5) Ohmori, Y. et al.: *J. Plant Res.*, **127**, 67 (2014).
- 6) Ohmori, Y. et al.: *J. Plant Res.*, **127**, 57 (2014).
- 7) http://jstore.jst.go.jp/nationalPatentDetail.html?pat_id=31464
- 8) <http://www.new-fukushima.jp/>
- 9) 尾和尚人: わが国の農作物の養分収支, (独) 農業環境技術研究所 (1996).
- 10) White, P. J. and Broadley, M. R.: *New Phytol.*, **147**, 241 (2000).
- 11) Smolders, E. and Tsukada, H.: *Integr. Environ. Assses. Manage.*, **7**, 379 (2011).