福島原発事故後の陸域での放射性物質の環境動態

古川 純

**The Terrestrial Environmental Dynamics of Radioactive Nuclides Released
by the Fukushima Nuclear Accident**

Jun Furukawa

*Center for Research in Isotopes and Environmental Dynamics (CRiED), University of Tsukuba;
1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8577, Japan.*

(Received August 27, 2013)

Research into environmental dynamics of radioactive nuclides released by the Fukushima nuclear accident, especially radiocesium ^{137}Cs (half-life, 30.1 years), is highly focused especially on diffusion processes of radiocesium into ecosystems, which is high-priority knowledge. Because of relatively sparse knowledge about the reallocation of radiocesium contained in organic matter in terrestrial ecosystems, the effects of diffused radiocesium into ecosystem cannot be accurately estimated. In this article, the terrestrial environmental dynamics of radiocesium mainly in the processes of plant uptake and the possibility of release from plants will be discussed. Plants uptake minerals from soil and these minerals are likewise ingested by animals that feed on plants, including humans. Therefore one of the main gateways of radiocesium into ecosystem is *via* plants. From the viewpoint of human dietary consumption, rice contamination with radiocesium has been energetically investigated and useful data are accumulating. Processes of radiocesium uptake mechanisms by plants are being researched using legumes, *e.g.* soybean. Speculation on the possibility of radiocesium release into forest atmosphere *via* plant activity will be introduced.

Key words—radioactive nuclide; environmental dynamics; terrestrial; reallocation; ecosystem; plant

1. はじめに

福島第一原発事故による放射性物質の環境への放出は、東日本を中心とした広い地域に放射線被害をもたらしている。事故直後から多数の機関の協力の下に進められた調査によって、詳細な汚染状況が把握・公開されてきた。蓄積されたこれらのデータは、自治体の放射線対策の策定や健康被害を調査する上での基礎的なデータとなっており、また事故直後にどのような事態が生じていたのかを明らかにする上でも極めて貴重な資料である。一方で、事故から約2年が経過した現在では、汚染地域の大部分を占めている森林や、周辺環境からの流入が継続していると考えられる河川の堆積物など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、今後環境中をどのように移行していくのかという放射性物質の環境動態の解明が復興支援研究の1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、土壌から放射性物質が植物などに取り込まれた後、その植物に由来する落ち葉などのような有機物の形態で放射性物質が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。また、食物連鎖を介した生態系への放射性物質拡散の観点からも、土壌から生態系への主要な入り口となる植物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。

本稿では陸域における放射性物質の動態について、主に植物に着目して概説あるいは紹介したい。まずわれわれの食生活に大きく係わってくるコメにおける放射性セシウムの蓄積について現地調査を中心に解説し、またセシウムのアナログであるカリウ

The author declares no conflict of interest.

筑波大学アイソトープ環境動態研究センター (〒305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1)

e-mail: junfurukawa@sa.uno.ne.jp

本総説は、日本薬学会第133年会シンポジウム S30-301 で発表した内容を中心に記述したものである。

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と輸送についての室内実験的な検証について、最後に森林における大気中への放射性物質の再拡散の可能性について触れる。

2. 玄米における放射性セシウムの検出

コメへの放射性物質の移行については、食品としてわれわれの生活に深く係わることから、2011年から非常に強い興味を持って多くの研究がなされている。それらの多くは福島県及び農林水産省の公表データとしてまとめられており、調査された大多数の試料では基準値を超えるような放射性セシウム濃度は検出されなかった。しかしながら、文部科学省と福島県による報告書である「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)」にあるように、一部で玄米中の濃度が暫定規制値(500 kBq/kg, 2012年3月31日まで)を超える事例が報告されたことから、¹⁾栽培環境などがどのようにイネのセシウム吸収に影響するかを詳細に検証する必要性が生じた[Fig. 1(A)]。玄米中の放射性セシウム濃度が暫定規制値に比べて十分に低い濃度に収まっているイネでみられた放射性セシウムの分布は、下位葉に比較的多く、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のに対し、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なった。²⁾これは上位葉が成長する夏期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った。

セシウムが植物体へ吸収される際の経路として候補となっているカリウムに着目すると、一般に土壌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結果からも同様の結果が得られている。¹⁾また、先の上位葉において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、土壌環境の改変が有効な手段であることが示されている。²⁾しかしながら、上記の中間報告においても、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関連性が認められないイネが複数存在しており、土壌環境の違いによる

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が示唆されていた。

東京大学の根本らは2012年も現地での調査を継続し、その結果を報告している。³⁾それによると、置換性カリウム濃度と出穂期の茎葉中セシウム濃度に関連性が認められなかったイネの地上部では、7月から8月にかけてセシウム濃度が上昇することを明らかにしている[Fig. 1(B)]。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反対の傾向である。夏期にみ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 μm)濾過後]と、溶存態+懸濁態(GF/Fフィルタ未濾過)で測定したところ、夏期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の水田に比べ2-10倍程度高いことが示された。このような懸濁態セシウム濃度が高い用水を用いてイネによる水耕吸収試験を行ったところ、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植物へ移行することが示された。これらの試験から、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、また水田の土壌環境だけでなく、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動態と併せて検証すべきであることが明らかとなった。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、⁴⁾懸濁態のセシウムがどのような状態

古川 純

筑波大学アイソトープ環境動態研究センター並びに生命環境系所属、助教(放射線取扱主任者)。陸上植物の金属集積について、多様な集積機構が持っている特異性と共通性に着目して研究を行っている。福島第一原子力発電所事故以降は、樹木を含めた植物による放射性セシウムの吸収・輸送機構の解明に取り組む。

Fig. 1. Schematic Illustrations of the Relationship between Soil Exchangeable K₂O Concentration and Radiocesium Concentration in Brown Rice (A) and the Tendency of Radiocesium Concentration Change in Ordinary and Abnormal Paddy Fields (B)

(A) was modified from the report of Ref. 1) and (B) was also modified from the report of Ref. 3).

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解明が環境中での放射性物質の拡散を理解する上で極めて重要になるものと考えられる。

また東京大学の藤原らは、安定セシウム (¹³³Cs) の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調査した結果を報告している。⁵⁾ 100 系統以上のイネを用いた解析の結果から、玄米中の安定セシウム量には 20 倍以上の幅を持った系統間差があることが明らかとなり、イネ玄米へのセシウム蓄積には遺伝的に支配される多様性があることが示された。これは玄米中にセシウムをあまり蓄積しないイネの開発が可能であることを示唆しており、またセシウムを輸送する具体的な輸送体タンパク質などの同定に向けて非常に有益な情報となるものと期待される。

以上のように栽培作物の代表であるイネにおける放射性セシウムの取り込み機構は現地試験を中心に様々な結果が得られており、セシウム移行の低減に関する有効な手段も確立されつつある。今後は放射性セシウムの環境動態と併せた施肥管理などにより、一層の玄米中セシウム濃度の低減を目指しつつ、より詳細なセシウムの吸収・輸送機構の解明に向けた解析が進むものと考えられる。

3. マメ科植物を用いたセシウム吸収特性の実験室的アプローチ

これまでに述べたイネばかりでなく、現在多数の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公開されている。上記のようにカリウムなどの施肥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 年が経過した 2013 年であっても放射線量が高い値を示す作物がある。その 1 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」でもいくつか基準値を超過したダイズが報告されている。⁶⁾

ダイズを始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報告されており、インゲン、アズキ、落花生なども多くのカリウムを含んでいる。⁷⁾ これらマメ科作物では放射性セシウムの土壌からの取り込みを抑えるだけでなく、植物体内における輸送についての知見を蓄積して、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ため、われわれは実験室での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。未発表データが中心となるが、これまでに得られた結果について紹介する。

われわれはまずカリウムイオンの共存がセシウム吸収を抑制するような、既知取り込み経路がマメ科植物にも共通しているのかどうかを明らかにするため、栽培作物であるダイズと、マメ科のモデル植物であるミヤコグサを用いて取り込み実験を行った。その結果、マメ科植物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、次にカリウム欠乏による輸送活性の変化について検証した。こちらの実験でも同様にダイズとミヤコグサを用いたが、双方ともカリウム欠乏 3 日の処理により、放射性セシウムの吸収量・地上部への輸送量ともに増加していた (Fig. 2)。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

Lotus japonicus

Fig. 2. Radiocesium Imaging Obtained by BAS System

The plant used was *Lotus japonicus* and -K (3 days) indicates a potassium (K) starvation treatment for 3 days grown with the hydroponic solution without K.

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。カリウムの輸送系についての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2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カリウム輸送システムであることが知られている。^{8,9)}したがって、放射性セシウムの取り込みには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。

一方で地上部組織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の比を求めてみると、カリウム欠乏処理の有無によらずほぼ一定であった。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組織中の放射性セシウム濃度の増加をもたらした、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。欠乏処理の期間を延長するなど、より詳細な検証が必要であるものの、マメ科植物においては根におけ

Fig. 3. Radiocesium Concentrations Absorbed by the Legumes

-K (3 days) indicates a K starvation treatment for 3 days grown with the hydroponic solution without K.

る高親和性カリウム取り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に関与していることが考えられる。また子実形成期における解析も重要であることから、生育段階に対応した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と同様にマメ科植物においてもセシウム吸収について品種間差が存在しているものと考えられ、その原因遺伝子の特定により、セシウムを吸収し難い品種の作出、あるいはその遺伝子をマーカーとした育種過程の効率化が期待される。これまでにそれぞれ交配が可能なダイズ2系統 (Soybean-A, -B), 飼料用マメ1系統 (Feeding), ツルマメ1系統 (Soja) について、カリウム十分条件と欠乏処理3日でのセシウム取り込み実験を行った。カリウム十分条件ではツルマメ系統と飼料用マメ系統において、ダイズ2系統よりも高いセシウムの根への取り込みとそれに応じた地上部への蓄積が示された (Fig. 3)。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いることが示唆され、またダイズ2系統間に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2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蓄積に変化がみられないにもかかわらず、地上部での濃度増加が認められた。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ることから、今後より詳細な検証を行う予定である。

4. 森林からの再拡散

事故発生直後から放射性物質の飛散・沈着状況の把握のため、広範囲を対象とした核種の同定・定量作業が進められてきた。その結果は文部科学省により公表され、多くの自治体、あるいは研究者により活用されている。現在では沈着した放射性物質が再び大気中に巻き上げられる再飛散と呼ばれる現象が、より広範囲な地域に影響を及ぼすと考えられることから注目されている。土壌粒子の地表面からの飛散は風速や土壌中の水分量に影響されることがこれまでに知られているが、川俣町山木屋地区での調査結果からは、土壌粒子の巻き上げに依存しないと考えられる空間線量の上昇など、どのような状態で放射性物質が大気中を移動しているのかが明らかでないような事例も報告されている。¹⁰⁾

また、同調査では土地利用の違いにより放射性セシウムの飛散状況がどのように異なるかについても述べられている。裸地と草地での大気中放射能濃度をサンプリング毎にプロットすると、それぞれの土地における土壌沈着量の比に近い値で正の相関を示すものの、林地における大気中放射能濃度は、裸地と相関しないプロットが多いなど異なった傾向を示している。特に調査されたスギ若齢林では地表放射性セシウム沈着量が裸地の約0.7倍であるにもかかわらず、両地点の大気中放射能濃度がほぼ等しいなど、なんらかの機構により放射性セシウムの放出割合が大きくなっている可能性が示された。また、広葉樹混合林及びスギ若齢林において、林床部と樹冠部での大気中放射能濃度を比較すると、林床部での濃度が樹冠部よりも約2倍程度高くなることが示されている。これは、林内で飛散した放射性セシウムがなかなか拡散しないために留まっている可能性もあるものの、林内の地表あるいは植物体表面からの放射性セシウム放出が周囲より活発に生じているためではないかと考えられている。

森林の樹木が土壌などから放射性物質を取り込み、それを再放出しているとすれば、今後汚染の更なる拡大につながる恐れがある。これに対処するためには、実際に再飛散している放射性物質の形態を明らかにし、それが植物に由来するものであるかを検証することが重要となる。

5. おわりに

陸域における放射性物質の移動が今後どのような影響を及ぼすのかについて明らかにされた部分はまだまだ少ないと言わざるを得ない。しかしながら、森林や河川を軸とした放射性物質の環境動態研究が、汚染状況の変化を明らかにするのみならず生態系への放射性物質拡散の低減においても極めて重要になると考えられることから、水文地形学・森林科学・植物栄養学といった多様な背景を持つ研究者の連携をより一層深めていくことが必要である。

REFERENCES

- 1) Fukushima Prefecture, Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries, “Zanteikiseichi wo chouka sita houshasei sesium wo fukumu kome ga seisan saretai youin no kaiseki (chukan houkoku),” 2011.
- 2) Nemoto K., Abe J., “Agricultural Implications of the Fukushima Nuclear Accident, Radiocesium Absorption by Rice in Paddy Field Ecosystem,” ed. by Nakanishi T. M., Tanoi K., Springer, Tokyo, 2013, pp. 19–27.
- 3) Nemoto K., “Houshasei sesium no ine eno ikou (dai san hou).”: <http://www.a.u-tokyo.ac.jp/rpjt/event/20121208.html>, cited 25 August, 2013.
- 4) Delvaux B., Kruyts N., Maes E., Smolders E., “Trace Elements in the Rhizosphere, Fate of Radiocesium in soil and rhizosphere,” ed. by Gobran G. R., Wenzel W. W., Lombi E., CRC Press, Boca Raton, 2001, pp. 61–91.
- 5) Fujiwara T., “Agricultural Implications of the Fukushima Nuclear Accident, Cesium uptake in rice: Possible transporter, distribution, and variation,” ed. by Nakanishi T. M., Tanoi K., Springer, Tokyo, 2013, pp. 29–35.
- 6) Toward a new future of Fukushima: <http://www.new-fukushima.jp/>, cited 25 August, 2013.
- 7) Owa N., “Wagakuni no nousanbutsu no yobun shushi,” Kankyou hozengata nougyou kenkyu renraku kai News, No. 33, 428–445, 1996.
- 8) White P. J., Broadley M. R., *New Phytol.*, **147**, 241–256 (2000).
- 9) Smolders E., Tsukada H., *Integr. Environ. Assess. Manag.*, **7**, 379–381 (2011).

- 10) Japan Atomic Energy Agency, Heisei 24
nendo houshanou sokutei chousa itaku jigyou,
“Fukushima daiichi genshiryokuhatsudensho-

jiko ni tomonau houshasei busshitsu no chou-
kiteki eikyou haaku shuhou no kakuritsu,
seika houkokusho,” 2013.