

植物による放射性セシウムの吸収と動態



小林奈通子*¹
Kobayashi. I. Natsuko



高田 大輔*²
Takata Daisuke

1 はじめに

東京電力福島第一原子力発電所事故(以下「事故」)後に発生した農環境の放射能汚染は幅広い研究分野の総力を挙げた対策が求められる問題であり、農業関係者及び研究者間の連携、知の共有が極めて重要である。更に農業というマクロな視点で見れば、自然科学の領域を超える社会的な問題も含まれるが、これらすべての対策において起点となるのは、環境中での放射性物質の分布や移動を把握するための測定や試験調査である。本稿では、その一例として、モモを対象とした栽培試験について紹介すると共に、植物の持つ放射性セシウム吸収のメカニズムに関する基礎研究について解説する。

2 モモの栽培試験

2-1. 事故当年のモモをめぐる状況

モモは、福島県の農業産出額に占める割合が高い農産物トップ10の常連である。農家数も多く、事故後の夏に収穫されるモモからどれだけ放射性セシウムが検出されるのか、懸念が高まっていた。この点、事故が起きた3月時点ではモモは開花前の“裸”の状態である(図1A左)ことが幸いする可能性が考えられていた。というのも、果実に至る放射性セシウムの経路を調査した過去の研究によれば、事故時に葉や果実の無い裸の樹の場合は根による吸収が唯一の経路であり(図1A右)、しかも、放射性セ

シウムの吸収量を示す“移行係数”も、果樹の場合は非常に低いことが知られていたのである¹⁾。加えて、放射性セシウムは土壌表面に留まりやすく、土壌の深い位置に存在するモモの根には実際にはほとんど到達しないと考えられたため、モモ果実から放射性セシウムは検出されないと期待された。ところが、2011年夏の出荷前の調査の結果、検出限界未満となったモモは3割に過ぎず、100 Bq/kgを超過するモモも見つかったのである。

2-2. 栽培試験で明らかになった放射性セシウム動態

予想外に高い放射性セシウム濃度の検出は、モモ果実に至る想定外の経路の存在を示唆していた。そこで、樹体内における放射性セシウム動態を理解するためにいくつかの栽培試験を行ったところ、1. 樹皮を介して樹体に吸収されること²⁾、2. 樹体内では成長中の若い器官に転流すること^{3,4)}、3. 根からの吸収量は小さいこと^{5,6)}、という性質が明らかとなった。

1つ目の性質は、事故時に偶然、株元を鉢カバーで覆っていた鉢植えのモモの樹によって示された。この樹は、鉢カバーによって土壌へのフォールアウトが防がれ(図1B)、結果として、放射性セシウム汚染が樹皮表面のみに限定されていたが、夏に収穫した果実を調べたところ、根元を覆っていなかった樹に生った果実と同レベルの放射性セシウムが検出されたのである²⁾。2つ目については、事故時に福島県内の果樹園で生育中であった樹を、フォールアウトのない土壌に移植する試験で示された(図1C)。

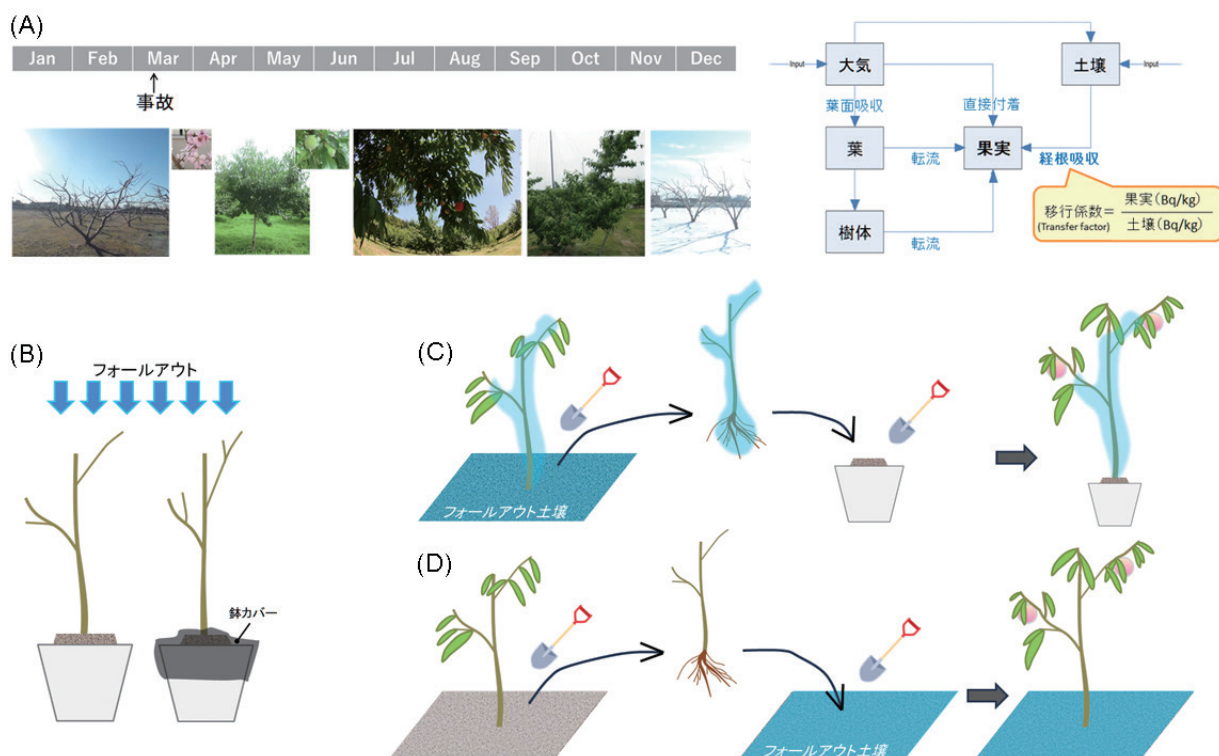


図1 モモの栽培試験

(A) 左：福島県での代表的なモモの栽培スケジュール，右：2011年時点で想定されていたモモ果実の汚染経路と移行係数，(B) 鉛カバーによる土壌へのフォールアウトの遮断，(C) 移植試験による樹体内の放射性セシウム動態の解析，(D) 移植試験による移行係数の算出

2012年に樹体を解体して各器官の放射性セシウムを測定した結果，移植後に成長した葉や新梢，果実，細根にも放射性セシウムが検出された⁴⁾。つまり，樹体の中でも，放射性セシウムは古い器官から新生器官へと移動するのである。そしてこの試験とは反対に，フォールアウトによる汚染のない樹を，福島県内の果樹園に移植することで（図1D），根からの放射性セシウムの吸収量は小さいという3つ目の性質が示された⁶⁾。移植した翌年に収穫された果実と土壌の放射性セシウム含量の比率から算出された移行係数は $3.6 \sim 5.4 \times 10^{-4}$ であった。

3 カリウム輸送体によるセシウム吸収

3-1. カリウムの持つ汚染低減効果

移行係数は，植物の根による放射性セシウムの吸収のしやすさの指標であるが，植物種に応じた固有の値というわけではなく，栽培条件等によって左右される。特に，カリウム栄養は移行係数に大きな影響を与える要素として知られており，セシウム吸収との量的な関係が多様な生理学的実験によって調

べられてきた。そして今を遡ること24年，培地中のカリウム濃度を 0.02 mM から 1 mM に上昇させると，麦や豆，ホウレン草等多くの植物においてセシウムの吸収量を10分の1から100分の1程度に抑制できるという結論を得るに至ったのである⁷⁾。前述のとおり，モモでは非常に低い移行係数が示されたが，その理由の1つには，果樹園の土壌の可給態カリウム濃度が高いことが挙げられるだろう。実は，1970年頃まで行われていた必要量以上の施肥により，国内の果樹園の土壌カリウム濃度平均値は今でも 50 mg/kg^{-1} を超えている⁸⁾。これは，事故後に水田でのカリウム施肥の目標値として掲げられた 25 mg/kg^{-1} の2倍以上に相当し，果樹栽培の適正域の上限値をも上回る水準である。1990年代からは減肥栽培が促進されているのだが，事故による農作物の放射性セシウム汚染を最小限に抑えたという点では，この過剰なカリウム蓄積が幸いした面もあったのかもしれない。

3-2. カリウム輸送体の機能と役割

植物にカリウムを十分に与えることでなぜ放射性セシウム含量が低下するのか。同族元素であるカリ

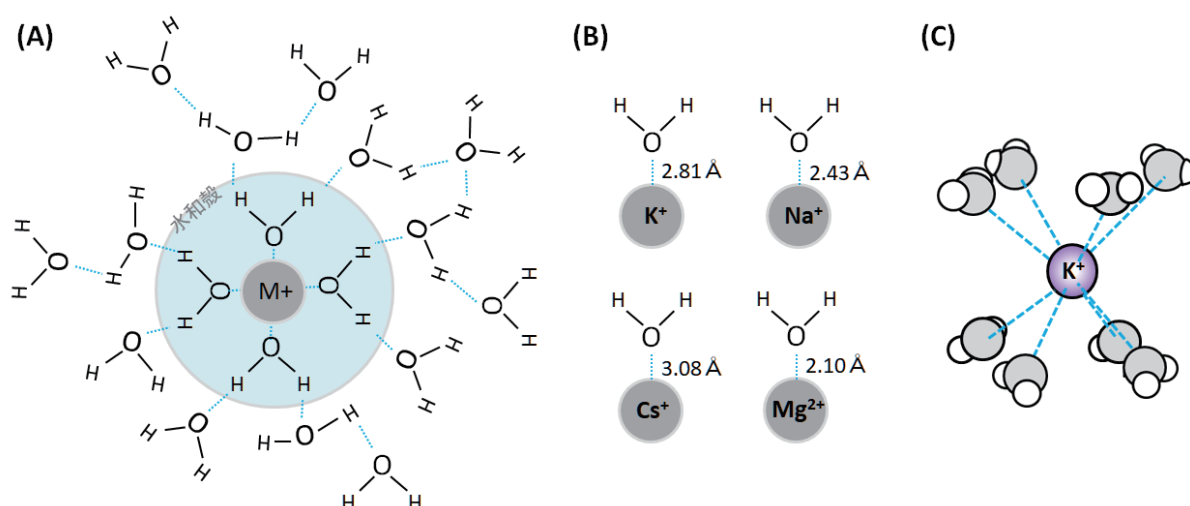
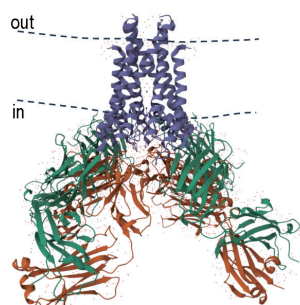


図2 水溶液中の金属イオン

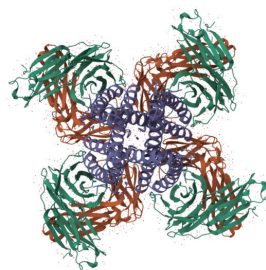
(A) 複数の水分子が金属イオン (M^{+}) の周囲に配位して水和殻を形成する, (B) 水和殻内の水分子酸素と金属イオンの原子間距離, (C) カリウムイオンに8個の水分子が配位した水和殻の立体構造

KcsA (SKT transporter family)

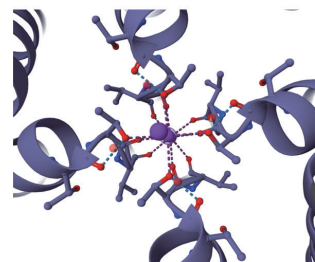
Side view



Top view

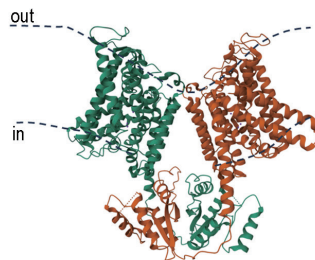


K⁺ ion in the pore

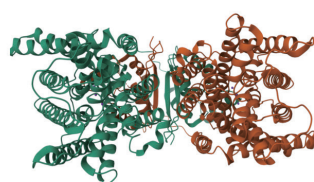


KimA (HAK/KUP/KT transporter family)

Side view



Top view



K⁺ ion in the pore

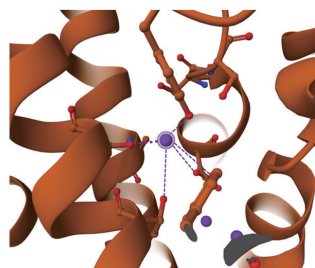


図3 カリウム輸送体の構造と透過孔内のカリウムイオン

上段: SKT ファミリー輸送体 KcsA (PDB:1K4C), 下段: HAK/KUP/KT ファミリー輸送体 KimA (PDB:6S3K) 透過孔内のカリウムイオンを紫, カルボニル基酸素を赤で示した

ウムとセシウムは化学的な性質が似ており, 根による吸収の過程で競合するから, というのが最大の理由であるが, このメカニズムをもう少し考えてみたい。そこで重要なのは, 根によるカリウムの吸収はカリウム選択的な輸送体タンパク質によって担われているという事実であり, 問題は, それが「選択的」

である仕組みである。そもそも水の中に存在する陽イオンは, 水分子の酸素原子を電気的に引きつけることで周囲に水和殻を形成して安定な状態となっている (図 2A)。このとき, カリウムと酸素原子の距離は $2.81 \text{ \AA}$ である。一方, セシウムと酸素原子の距離は $3.08 \text{ \AA}$ とやや長く, ナトリウムでは $2.43 \text{ \AA}$, 二

価陽イオンであるマグネシウムでは $2.10\text{\AA}$ となって酸素原子をより強く引き付けることで安定する (図 2B)。また、水和殻内の水分子の配置も重要である。カリウムは多くの場合 7 個の水分子を配位しているが、8 個を配位することも可能である。8 個の水分子はカリウムの上下に 4 個ずつ、正反四角柱の形に並ぶ (図 2C)。水分子はカリウム輸送体の透過孔を通る際に脱水され、その「代わり」に、イオン透過孔内に整列するアミノ酸のカルボニル酸素が、水分子の酸素に酷似した位置関係でカリウムイオンに配位してこれを安定化させるのである (図 3 上段)。この、カルボニル基酸素による水和水酸素の代替が、イオン選択性の鍵と考えられる。セシウムの水和水は 8 個かそれ以上とされており⁹⁾、酸素との原子間距離がやや長いいため、カリウム輸送体の透過孔内で安定せず、輸送されにくい。ナトリウムの水和水は 6 個とされている。しかし、この選択性の仕組みを持たないカリウム輸送体ファミリーもある。HAK/KUP/KT ファミリー輸送体 KimA の立体構造は 2020 年に明らかにされたが¹⁰⁾、それによると、カリウムは透過孔内でカルボニル基酸素に囲まれるものの、原子間距離は $2.4\text{\AA} \sim 3.9\text{\AA}$ とまちまちである (図 3 下段)。カルボニル基酸素の位置も、正反四角柱の頂点とは一致しない。この「曖昧」な透過孔の構造により、HAK/KUP/KT ファミリー輸送体はカリウムを優先的に透過しつつも、酸素との原子間距離がカリウムに近いセシウムも透過してしまっていると考えられる。そして、シロイヌナズナやイネにおいてセシウムの吸収の大部分を担う輸送体として同定された AtHAK5 や OsHAK1 は、まさにこの輸送体ファミリーに属する^{11,12)}。環境中にカリウムが多ければ、セシウムがこれらの輸送体を通って根に侵入するチャンスは下がる、というのが、カリウムとセシウムの競合の基本的なメカニズムだと理解できる。

4 今後の展望

根におけるセシウム吸収に対するカリウムの輸送体の役割は分子生理学的な研究によって認識されていたが、近年のタンパク質解析技術、特にクライオ電子顕微鏡を用いた単粒子再構成法の急速な発達によって、そのメカニズムにまで理解が及ぶように

なった。一方で、モモ樹体中の古い器官から新しい器官へのセシウムの移行のような、植物に侵入した後の植物体内でのセシウムの動きについては、それに関わる分子の同定を含め、多くが課題として残っている。これを理解することは、多年生植物の体内に侵入した放射性セシウムの経年的な動態を予測、制御する農業技術にもつながるのみならず、環境中の物質循環という視点からも重要な課題と思われる。また、根でのセシウム吸収についても、カリウム輸送体以外の分子の関与を無視してはいけなだろう。実際、AtHAK5 や OsHAK1 が機能しない条件においても、セシウム吸収はゼロにはならない。更に環境中では、根に共生する土壤微生物を介した元素吸収の割合も大きく、この仕組みが放射性セシウム吸収に及ぼす影響の定性的、定量的な評価はまだまだこれからの課題である。モデル生物から得られる最新の知見を踏まえながら、農地や森林環境で観察される事象を紐解く包括的な研究活動が今後も求められる。

参考文献

- 1) Brown, J., *et al.*, HPA-CRCE-039 (2012)
- 2) 高田大輔, 他, *RADIOISOTOPES*, **61** (10), 517-521 (2012)
- 3) 高田大輔, 他, *RADIOISOTOPES*, **62** (7), 455-459 (2013)
- 4) 高田大輔, 他, *RADIOISOTOPES*, **61** (12), 607-612 (2012)
- 5) 高田大輔, 他, *RADIOISOTOPES*, **62** (8), 533-538 (2013)
- 6) Takata, D., *Agricultural implications of the Fukushima nuclear accident: The First Three Years.*, 119-144 (2016)
- 7) Zhu, Y-G. *et al.*, *J. Exp. Bot.*, **51**, 1635-1645 (2000)
- 8) 農林水産省, 果樹生産における施肥の現状と課題, https://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/nenryu_koutou/n_kento/pdf/3siryo3.pdf
- 9) Mähler, *et al.*, *Inorg. Chem.*, **51**, 425-438 (2012)
- 10) Tascón, I., *et al.*, *Nat. Commun.*, **11**, 626 (2020)
- 11) Qi, Z., *et al.*, *J. Exp. Bot.*, **59**, 595-607 (2008)
- 12) Nieves-Cordones, M., *et al.*, *Plant. J.*, **92**, 43-56 (2017)

(^{*1} 東京大学大学院農学生命科学研究科, ^{*2} 福島大学農学群食農学類)