

セシウム集積性の木本植物「コシアブラ」の研究

(一財)九州環境管理協会環境部生態工学室 大井 和之

要 旨

ウコギ科の「コシアブラ」は若芽を山菜として利用する樹木である。コシアブラは若芽に東京電力福島第一原子力発電所事故に由来するセシウムを集積することが知られており、事故時に放射性プルームにさらされた枝葉や樹幹からの転流による蓄積を示す樹種とは異なる特徴を有する。セシウムがコシアブラに対して生理的に特別な活性があって選択的に蓄積されているわけではなく、他のイオンの吸収や輸送の機構に便乗して植物体内を移動しているものと考えられたため、類似の陽イオンの動態と比較検討した。コシアブラ体内のセシウム動態には、根圏の共生微生物である菌根菌や放線菌が関与する複数の陽イオンの吸収・輸送機構が複雑に影響していることが示唆された。

1. はじめに

東京電力福島第一原子力発電所の事故で環境中に放出された放射性物質のうち、 ^{137}Cs は半減期 30 年と比較的長く、 ^{90}Sr などと比べて放出量も非常に多かったため、外部被曝及び内部被曝の主要因となる同位体と考えられている。セシウムの環境中での挙動については数多くの知見が蓄積されている¹⁾が、特に食品として摂取することが内部被曝につながる農作物²⁾に比べて、森林の樹木についての樹種別の研究例³⁾は多くなく、土壌から植物への移行については不明な点も多い。その中で、ウコギ科のコシアブラは若芽を山菜として利用する樹木であり、食品の基準値である 100 Bq/kg を超過する例が同じウコギ科のタラの芽などに比べても多く⁴⁾、セシウム高集積性植物として注目されている。

本研究では、コシアブラがセシウム高集積性を示す機構を明らかにするため、植物体内での各種イオンの動態や微生物との共生関係をふまえて、福島県内に自生するコシアブラ及び同所に生育していた種類が異なる数種の樹木の放射性セシウムの分布及び共生微生物の解析を実施した。

2. 植物体内における各種陽イオンの動態

2. 1 カリウム

カリウムはセシウムと同じアルカリ金属であり、化学的性質は類似している点が多い。

植物は根から水分・窒素・リン・ミネラルを吸収するが、土壌溶液中の養分やミネラルが勝手に染み込んでくるわけではなくて、根の表面の細胞膜にある輸送タンパク質が積極的に取り込んでいる。例えばカリウムは、細胞膜にあるプロトンポンプという膜タンパク質が ATP をエネルギー源として細胞内の水素イオン（プロトン）を細胞外に出す代わりに、細胞外のカリウムイオンをカリウムイオンチャンネルを通して細胞内に取り込む⁵⁾ (図 1①)。この働きにより、土壌水の pH がおよそ 5~6 であるのに対し、細胞内の pH は約 8 に保たれている。さらに細胞内に取り込まれた物質は、原形質連絡を通じて維管束の周囲の細胞まで到達し (図 1④)、そこから導管を通して葉で蒸散した水分を補う水の流れ (蒸散流) により上部の枝や葉まで届けられる⁶⁾ (図 1⑤)。

土壌水のカリウムイオンが十分ある場合、カリウムイオンチャンネルはほぼカリウムイオンだけを取り込む。しかし、カリウムイオンが不足している場合は選択性が低く、Cs、Rb、Na などの他の 1 価の陽イオンを取り込むことが知られている。このため、水田での稲作ではカリウム施肥によるセシウム吸収抑制が有効であった^{7),8),9)}。

2. 2 窒素（アンモニウムイオン）

アンモニウムイオン (NH_4^+) は1価の陽イオンで、細胞内でアミノ酸を合成する材料として用いられる。硝酸イオンとともに植物の窒素源として重要である。セシウムイオンはイオンの大きさがアンモニウムイオンと類似しており、細胞膜のアンモニウムイオン輸送体が同時にセシウムイオンを通してしまふと考えられている¹⁰⁾。

土壌中で水に溶けやすい硝酸イオンと異なり、アンモニウムイオンは電荷を帯びた粘土粒子や腐植質に結合して固定されている。好気的な環境ではアンモニウムイオンは微生物の作用で亜硝酸・硝酸に酸化される。多くの植物では窒素源としてアンモニア態窒素よりも硝酸態窒素をよく利用する^{5),6)}。

アンモニウムイオンは植物にとって毒になるため、高濃度のアンモニウムイオンを吸収しないように細胞膜のイオンチャンネルで制御されている。根で吸収されたアンモニウムイオンは細胞質のグルタミン合成酵素の働きにより速やかにアミノ酸に変換される¹¹⁾。導管で輸送され

る窒素分は、主にアミノ酸または硝酸イオンの状態であると考えられている。

キノコなどの菌類では放射性セシウムの吸収が植物に比べて高いことが知られている¹²⁾。特に林床の落葉や土壌表層の腐植質に菌糸を張り巡らせる菌類では、粘土鉱物に強く吸着される前のイオン交換態のセシウムを多く取り込む。菌類のセシウム吸収能力（移行係数）はばらつきが大きく、その吸収機構も詳しく解明されていないが、アンモニウムイオンと同時に吸収している可能性がある¹³⁾。

菌類では菌糸の周囲に酸を分泌して pH を下げイオン交換性のアンモニアを効率よく吸収する仕組みを持っている。また、菌糸が根の維管束にまで入り込んで共生する VA 菌根菌だけでなく、外生菌根とも窒素やリンの養分を通じた共生関係にある。菌類が吸収したアンモニア態窒素の一部は、アンモニウムイオンのまま植物へ渡される¹⁴⁾ (図1②)。

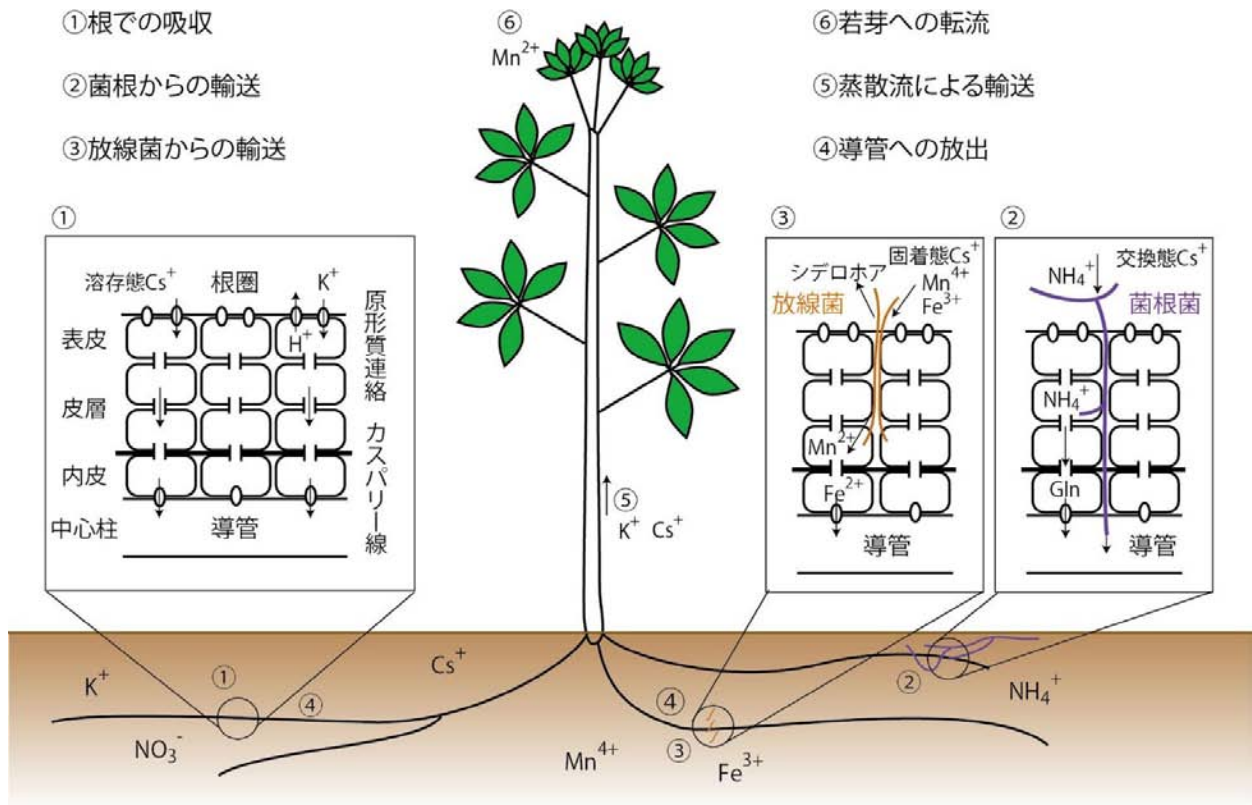


図1 コシアブラ植物体内でのイオンの動態に関する機構のイメージ

2. 3 鉄・マンガン

鉄やマンガンは植物の微量必要元素であり、葉緑素の形成や酸化還元反応、光合成に関与する。通常、植物は土壤中に含まれる水溶性の Fe^{2+} 、 Mn^{2+} を根から吸収し、導管を通じて葉に輸送する。土壤中の酸化還元電位に応じて、鉄は Fe^{3+} 、マンガンは Mn^{4+} に酸化されるが、これらのイオンは水酸化鉄(III)、二酸化マンガンを形成して沈殿し水にほとんど溶解しない。

クエン酸誘導体やヒドロキサム酸など、 Fe^{3+} をキレートして溶解する物質をシデロホアとよぶ¹⁵⁾。放線菌は、土壌バクテリアの一種で菌糸を形成する。放線菌の一種 *Streptomyces* 属は抗生物質を産生することでも知られているが、シデロホアを産生し Fe^{3+} や Mn^{4+} を可溶化して取り込む性質を持つことが知られている¹⁶⁾ (図1③)。

コシアブラは乾燥重量の2%にも及ぶマンガンを葉に蓄積することができるマンガン超集積性植物である。水野(2008)¹⁷⁾によると、本種は土壌条件にかかわらずマンガン超集積性を示し、土壌中のマンガンの溶解・吸収と根圏のpH低下の関係を示唆している。しかし、根圏のpH低下はコシアブラ特異的なものではなく、コシアブラ

が特異的なマンガン集積能を示す機構は明らかにはなっていない。

Yamaji et al (2016)¹⁸⁾によると、コシアブラの根に共生している放線菌のうち、シデロホアを産生しマンガンを溶脱する菌株の中に、土壌に固着したセシウムの溶脱を促進しコシアブラのセシウム及びマンガンの吸収促進に寄与する株がある。

シデロホアはマンガンと鉄の両方を溶解すると考えられているが、コシアブラの葉ではマンガンのみが集積している。これは共生微生物の影響ではなく、葉緑体で必要となるマンガンを葉の細胞に取り込む輸送タンパクをコシアブラ自身が形成しているものと想定される(図1⑥)。コシアブラの若芽で高濃度の放射性セシウムが検出されるのは、このマンガン輸送体が葉の細胞内にセシウムも取り込むためと考えられる。

3. 植物体内における放射性物質の分布

2016年6月と10月に福島県川内村、川俣町、広野町で採取したコシアブラ、タカノツメ、コナラ、アカマツ、クロモジのさく葉標本を、イメージングプレートに密着

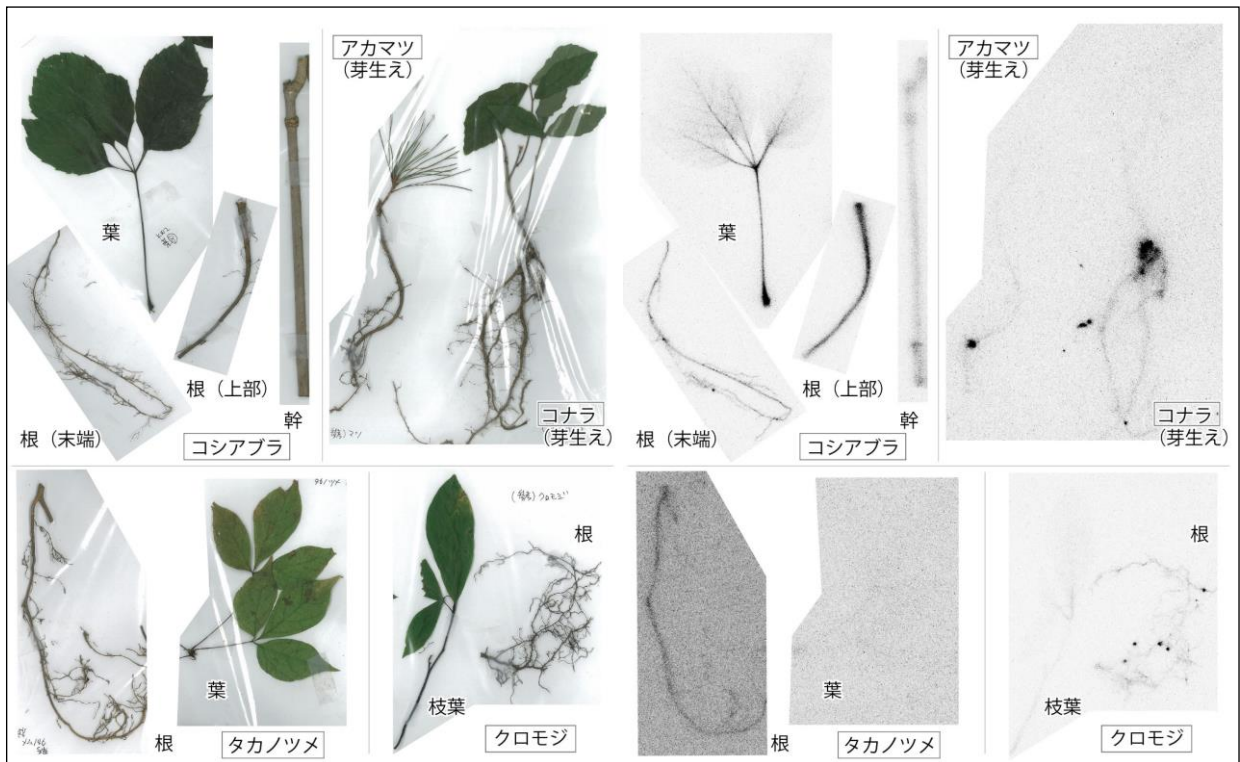


図2 植物標本(左)とイメージングプレート像(右)

表1 DNA分析で使用したプライマー

プライマー名称	塩基配列	出典
ITS1-F	CTTGGTCATTTAGAGGAAGTAA	Gardes & Bruns (1993) ¹⁹⁾
ITS4-B	CAGGAGACTTGTACACGGTCCAG	Gardes & Bruns (1993) ¹⁹⁾
16S_243F	GGATGAGCCCCGCGCCTA	Monciardini et al (2002) ²⁰⁾
16S_A3R	GGYTACCTTGTTACGACTT	Monciardini et al (2002) ²⁰⁾

表2 コシアブラの根から確認された微生物 DNA の例

分析領域	BLAST 検索最上位種
真菌類 ITS 領域	<i>Russula heterophylla</i> (ウグイスハツ・ベニタケ科)
放線菌 16S 領域	<i>Streptomyces</i> sp. (cf. <i>Kitasatospora kifunensis</i>)

させて 90~140 時間暴露し、イメージリーダーで放射性物質の分布を可視化した (図 2)。

コシアブラは根、幹、葉のいずれも黒く感光し、特に根と葉柄部分に放射性セシウムが多く分布している様子が確認できた。葉は葉柄と葉脈が浮き出ているが、これは乾重量に応じたものと思われる。幹部分は、その乾重量に対して色が薄く、根や葉に比べると濃度が低かった。

コシアブラと同じウコギ科のタカノツメは、根はコシアブラと同じように黒くなっているが、葉や葉柄はほとんど黒くなっておらず、コシアブラと異なり葉への放射性セシウムの輸送がされていないことがうかがえた。図には示していないが、同じウコギ科のハリギリ、ウコギでも根ではコシアブラと同程度に黒くなっていた。

コナラとアカマツの芽生え、クスノキ科のクロモジは、根に付着した土壌由来と思われる黒いスポットを除いて、全体的に薄い色で、放射性セシウムは根でもあまり取り込まれていない。コナラ、アカマツはコシアブラと同じように外生菌根を形成するとされているが、今回分析した株は若齢で菌根が形成されていなかった可能性がある。

以上から、コシアブラ以外の樹木では葉に放射性セシウムを蓄積する働きはないが、菌根菌の働きにより根圏のセシウムを根に取り込んでいる様子が明らかになった。

4. 共生微生物の分析

コシアブラの根の外皮を削るように切り出したブロックを液体窒素で凍結して乳鉢で粉碎した後、植物用の DNA 抽出キット ISOPLANT II (ニッポンジーン) を使用

して DNA を抽出した。

得られたコシアブラ根 DNA を鋳型として、表 1 のプライマーセットを用いて、真菌類のリボゾーム RNA 遺伝子 ITS 領域および放線菌類の 16S リボゾーム RNA 遺伝子を増幅する PCR を行った。増幅産物は複数の塩基配列が混合しており分析は継続中であるが、一部の PCR 産物は DNA シーケンサーで塩基配列を決定することができた。

真菌類の ITS 領域で得られた塩基配列は、DNA データバンクの BLAST 検索 (類似度の高い塩基配列の検索) ではベニタケ科のウグイスハツに最近縁であった。また、放線菌類の 16S 領域で得られた塩基配列は、*Streptomyces* 属の一種と判定された (表 2)。DNA 分析により、これらの微生物の菌糸がコシアブラの根に侵入・共生していることが確認できた。

今回コシアブラの根に共生していることが確認できた菌根菌が属するベニタケ科は、多くの樹木に外生菌根を形成することが知られており²¹⁾、特にコシアブラと 1 対 1 の共生関係があるわけではない。コシアブラ以外の樹木でも根の Cs 濃度が高い場合は菌根菌と共生しているものと考えられる。今後、コナラやクロモジの根に共生している菌根菌の種類と生態を調査し、コシアブラとの比較を進めていく予定である。また、コシアブラの根から検出された細菌である放線菌は土壌微生物としては普遍的であるが、今回確認できた *Streptomyces* 属はシデロホア産生能を持つという報告¹⁸⁾があり、マンガンやセシウムを可溶化している可能性がある。

5. おわりに

植物が放射性セシウムを取り込む機構は、①カリウムと同時に溶存態 Cs を取り込む、②アンモニア態窒素と同時に交換態 Cs を取り込む、③鉄・マンガンと同時に固着態 Cs を取り込むという 3 つが考えられる。また、②は菌根菌が、③は放線菌が関与するものと思われる。菌根菌や放線菌はコシアブラに特異的なものではないが、コシアブラは新しく展葉する葉に放射性セシウムをマンガンとともに高濃度で集積する特異な性質を持つ。今後は、それぞれの機構のセシウムの移行への寄与について、他の樹木との比較調査をさらに進めて、明らかにしていきたい。

謝辞：イメージングプレートについては九州大学アイソトープ統合安全管理センターの杉原先生、春口さんのご協力により測定していただいた。心より感謝いたします。

参考文献

- 1) 鶴飼保雄: 植物が語る放射線の表と裏, 第 16 章 農牧地に降ったフォールアウトの行き着く先. 培風館, 東京 (2007).
- 2) 福島県農業総合センター研究報告 放射性物質対策特集号 (平成 25 年度). http://www4.pref.fukushima.jp/nougyou-centre/kenkyu_houkoku/kenkyu_houkoku_top.htm
- 3) 梶本卓也ら: 東京電力福島第一原子力発電所事故で影響を受けた森林の放射性セシウムの挙動 一事故後 2 年間の林冠から地表への移行過程から見た樹種特性一. 日本森林学会誌, 97, 33-43 (2015).
- 4) 新潟県 山菜の放射性物質の検査結果について (平成 29 年 2 月から) <http://www.pref.niigata.lg.jp/syokuhin/1356862648009.html>
- 5) 山口紀子ら: 土壌-植物系における放射性セシウムの挙動とその変動要因. 農業環境技術研究所報告, 31, 75-129 (2012).
- 6) 日本樹木医会: 樹木医必携 基礎編. 日本樹木医会, 東京 (2010)
- 7) T. Nobori, et al.: Effects of potassium in reducing the radiocesium translocation to grain in rice. *Soil Science and Plant Nutrition*, 60, 772-781 (2014).
- 8) 太田 健: 水稻の放射性セシウム吸収抑制対策. 日本土壤肥料学雑誌, 85, 90-93 (2014).
- 9) 中西友子: 土壌汚染 フクシマの放射性物質のゆくえ. NHK ブックス 1208, NHK 出版, 東京 (2013).
- 10) 塚田祥文: 土壌から作物へ放射性セシウムの移行と分布. 化学, 67, 20-23 (2012).
- 11) 鈴木健夫: 森林樹木の生理と生態. 化学と生物, 31, 621-626 (1993).
- 12) 食用キノコの代表であるシイタケについては以下の漫画に詳しい描写がある。端野洋子: はじまりのはる②チェーンソー・ラブソディー. 講談社, 東京 (2013).
- 13) Y. Sugiura, et al.: Radiocesium accumulation properties of *Chengiopanax sciadophylloides*. *J. Environ. Radioactivity*, 151, 250-257 (2016).
- 14) 矢野勝也: 植物と VA 菌根菌の窒素をめぐる駆け引き. 根の研究, 15, 11-17 (2006).
- 15) J.B. Neilands: Siderophores: Structure and function of microbial iron transport compounds. *J. Biol. Chem.*, 270, 26723-26726 (1995).
- 16) 池田治生ら: 放線菌の全ゲノム配列決定とその意義. 蛋白質 核酸 酵素, 47, 1845-1850 (2002).
- 17) 水野隆文: 日本の重金属超集積植物の研究と植物栄養学への応用. 三重大学大学院生物資源学研究科紀要, 35, 15-25 (2008).
- 18) K. Yamaji, et al.: Root endophytic bacteria of a ¹³⁷Cs and Mn accumulator plant, *Eleutherococcus sciadophylloides*, increase ¹³⁷Cs and Mn desorption in the soil. *J. Environ. Radioactivity*, 153, 112-119 (2016).
- 19) M. Gardes & T.D. Bruns: ITS primers with enhanced specificity for basidiomycetes – application to the identification of mycorrhizae and rusts. *Molecular Ecology*, 2, 113-118 (1993).
- 20) P. Monciardini et al.: New PCR primers for the selective amplification of 16S rDNA from different groups of actinomycetes. *FEMS Microbiol. Ecol.* 56, 482-493 (2002).
- 21) 谷亀高広: 菌従属栄養植物の菌根共生系の多様性. 植物科学最前線, 5, 110-119 (2014).