

微生物と植物を用いた農耕地からの放射性セシウムの レメデーシヨンの試み

横山 正*・Djedidi Salem・小島 克洋・山谷 紘子
木村園子ドロテア・渡邊 泉・大津 直子

はじめに

2011年3月11日の東日本大震災により福島第一原子力発電所の1号機は3月12日に、3号機は3月14日に水素爆発を起こした。その爆発・破損などやその後の原子炉のベントで、3月15日や3月21日には各地に大規模な放射性物質の降下が生じた¹⁾。福島県は、農地面積全国6位、森林面積全国4位、米生産量全国6位など、日本でも有数の農林産業振興県であり、この広大な農地と山林が放射性セシウムにより汚染された。放射能物質のうち、¹³⁷Csは半減期が30.2年と非常に長く、これらの物質で汚染された農耕地の修復は、福島県だけではなく日本の農業にとっても非常に重要である。

東日本大震災は、東京農工大農学部が位置する東京都府中市も大きく揺らした。また、震災の被害状況がわかっていくにつれて、全国の人たちや世界中から支援の手が伸び出した。私たちは震災被災地域に何ができるかと考え続けた。筆者のうち、横山、木村らは土壤肥料学を研究領域としており、放射性セシウムで汚染された農耕地をどのように修復するかを研究することが震災被災地域にもっとも貢献できることであろうと考えた。

植物を用いた放射性セシウムの土壌からの除去

2011年当時、横山の研究室では、植物生育促進微生物(Plant Growth Promoting Rhizobacteria, 以後PGPRと呼ぶ)をバイオ肥料として、水稻の増収減肥栽培技術の開発研究を行っていた。たとえば、図1のように、水稻にPGPRを接種すると発根が促進され土壌中の肥料成分を効率的に吸収することができる。また、ポット試験や圃場試験により*Bacillus*属細菌を水稻に接種することで、表1に示したように、水稻の乾物重やN, P, Kの肥料成分吸収量も増加する結果を得ていた(投稿準備中)。また、セシウムは元素周期律表では、ナトリウム(Na)やカリウム(K)と同じアルカリ金属に分類され、元素としての挙動に類似性がある。そこで、セシウム集積植物とPGPRを組み合わせると、相乗的な汚染土壌からの放射性セシウムの除去ができるのではと期待した。

2011年の震災直後から農林水産省は、「ふるさとへの帰還に向けた取組み」²⁾の一環として、放射性セシウム除去実証試験を開始した。その結果、水田表土の削り取りで土壌の放射性セシウム濃度は75%減少し、反転耕で表層に局在していた放射性セシウムは15–20 cmの深さを中心に0–30 cmの土壌に拡散(放射性濃度は50%前後に均一化)した。一方、ヒマワリによる土壌中からの放射性物質の除去に関しては、当初大いに期待された。農林水産大臣が、飯舘村でヒマワリの苗を移植している



図1. *Bacillus*属細菌TUAT1株を接種したひとめぼれの根の状況。TUAT1株の接種で発根が促進されていることがわかる。

表1. PGPR接種が水稻の乾物重、各肥料成分の吸収に与える効果(農工大府中水田圃場における水稻品種リーフスター1株当たり換算)

	無接種区	接種区
水稻乾物重 (g)	87.0 ± 2.9**	114.3 ± 10.1**
窒素集積量 (mgN)	767.5 ± 35.4**	1095.1 ± 64.3**
リン集積量 (mgP)	177.2 ± 18.6**	228.5 ± 20.2**
カリ集積量 (mgK)	1067.1 ± 61.4**	1375.5 ± 177.1**

**は危険率1%で接種区と無接種区の間有意差があることを示す。

*著者紹介 東京農工大学大学院農学研究院(教授) E-mail: tadashiy@cc.tuat.ac.jp

映像などがテレビで流されたが、ヒマワリを利用した放射性セシウム除去試験では、深根性のヒマワリの放射性セシウム吸収量は、作付け時土壌中含量の2千分の1と低かった。この結果から、農林水産省は、ヒマワリなどの植物を用いた放射性セシウムの除去に関しては否定的な見解³⁾を持った。

微生物-植物作用による土壌からのセシウムの除去試験

私たちは、上記の農林水産省が行った福島県飯舘村などでの現地試験を考察し、表層削土などを行うことで放射性セシウムを75%くらいは取り除け、これが可能な地域は、この手法が最適であると考えた。しかし依然として、相当量の放射性セシウムが土壌に残る。すでに耕耘して、作物を栽培している立ち入り制限区域の周辺地域の農耕地からの放射性セシウムの除去はどうするのか。また、植物を用いて土壌表層に局在する放射性セシウムを除去する場合は、放射性セシウムが局在する部分に大量の根を発達させる植物の選抜が必要ではなかったかなどを考えた。

2011年は、私たちは現地に行く研究予算を獲得しておらず、2012年度に現地での研究が展開できるめどが立ってきた。そこで、農工大府中キャンパスで、私たちが考えている放射性セシウムで汚染された土壌からの放射性セシウムのレメディエーションに関するモデル試験を行うことにした(投稿中)。農工大農学部は武蔵野の黒ボク土の上に立っており、黒ボク土を用いた実験を組み立てた。図2に実験概要を示した。植物の根張りりとセシウム吸収の関係を見るため、セシウムの施用位置を変えた。(i) 放射性セシウムが降下したままになっている耕地のモデルとして表層5 cmにセシウムを混合した区、(ii)すでに農家などで畑などを耕耘している状況のモデルとして全層にセシウムを混合した区、(iii) 表層に放射性セシウムが蓄積したものを反転耕して下層に埋めたモデルとして下層5 cmにセシウムを混合した区を設けた。図2に示した基本組合せに、植物種として表層に細根を密生させるコマツナ、放射性セシウム集積植物の

アマランサス⁴⁾、深根性のソルガム、日本固有のソバを試験植物にした。また、PGPRとしては、*Bacillus*属のTUAT1株、および以前特性評価し、現在タイでイネ用のPGPRとして用いられている*Azospirillum* TS13株⁵⁾を用いた(図3)。安定同位体¹³³Csは、各層に60 mg添加した。

30日間栽培し、収穫後、根と地上部の乾物重量を測定後、植物試料はICP-MSによりセシウム存在量を測定した。

表2に微生物-植物相互作用による¹³³Csの移行係数の変化を示した。土壌から農作物へのセシウムの移行係数(TF値)は、「単位重量当たりの土壌中セシウム濃度」と「単位重量当たりの農作物中セシウム濃度」との比で表し、具体的には下記の式で計算する。

$$\text{移行係数 (TF 値)} = \frac{\text{【農作物中のセシウム濃度 (新鮮重または乾物重当たり ppm/kg)】}}{\text{【栽培前の土壌中のセシウム濃度 (乾土当たり ppm/kg)】}}$$

¹³³Csを用いた実験で算出したセシウムの植物体への移行係数(TF値)は、接種・無接種とも、福島のコマツナで算出された放射性セシウムの移行係数(TF値: 0.0005)より高かった。また、微生物と植物の相互作用により移行係数(TF値)が上昇する場合は多数出現した。さらに、1を越す場合も現れ、PGPRの植物への接種は、地上部へセシウムを濃縮する場合もあることがわかった。

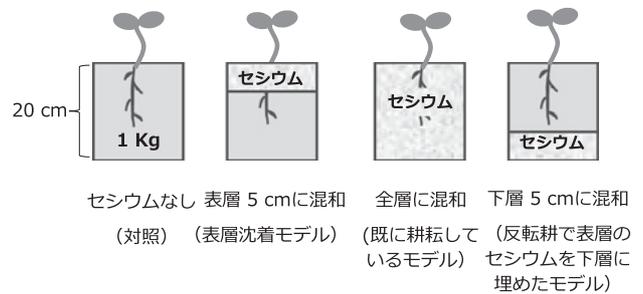


図2. セシウムの存在部位の違いが植物のセシウム吸収に与える効果を調べる実験。

表2. セシウムの存在位置とPGPRの接種が各植物種のTF値に与える影響

	セシウム表層			セシウム全層			セシウム下層		
	無接種	<i>Bacillus</i>	<i>Azospirillum</i>	無接種	<i>Bacillus</i>	<i>Azospirillum</i>	無接種	<i>Bacillus</i>	<i>Azospirillum</i>
コマツナ	4.1	6.6	6.7	1.7	2.4	3.5	2.5	1.9	3.4
アマランサス	4.2	4.8	4.0	2.0	1.5	1.1	1.9	1.7	2.4
ソルガム	2.3	2.3	1.7	0.7	2.8	1.6	1.9	2.2	2.2
ソバ	3.5	2.3	4.7	0.8	1.2	1.2	1.1	1.1	1.5



図3. 試験の状況



図4. 二本松市戸沢地区試験圃場全景 (2012年6月22日)

福島県二本松市東和地区の放射性セシウムで汚染された農地からの微生物と植物によるレメディエーション試験

農工大でモデル試験を行っている時点で、木村らは、福島県二本松市東和地区の農業者が設立していたNPO法人「ゆうきの里東和ふるさとづくり協議会」⁶⁾からの協力招請を受けて、新潟大学の野中昌法教授とともに、東和地区の農耕地や山林の放射性セシウムのモニタリングを開始した。当時は、放射性セシウムの放射線量を計測できる測定機は、小金井の工学部キャンパスの仁藤修教授の研究室が保有しているNAI計測機のみであったが、その後徐々に、ゲルマニウム半導体測定装置を含む各種計測装置が整備されていった。そして、2012年4月から福島県の農耕地や山林の放射能汚染のモニタリング、どのように汚染地から放射性セシウムを取り除くか、および農作物に放射性セシウムを移行させない農業技術開発などを目的としたプロジェクト（東京農工大福島農業復興支援プロジェクト：<http://www.tuat.ac.jp/~biof-pro/index.html>）が開始されることが決定し、2012年3月に木村らの紹介で、私たちはNPO法人「ゆうきの里東和ふるさとづくり協議会」に研究概要を説明し、圃場設営などの協力を依頼し、共同研究を開始した。

放射性セシウムで汚染された農地からの微生物と植物によるレメディエーション試験は、図4に示した二本松市東和支所戸沢地区の大槻千春さんの圃場を借りて行う事になった。借り受けた圃場は、福島第一原子力発電所の事故前までは、たばこ栽培が行われていた。しかし、事故後は、日本たばこ産業が、たばこ栽培契約の継続を中止したため、農工大が使用するまで放置されていた。2012年4月時点で、表層に約5000 Bqの放射性セシウムの蓄積があった。

実験の考え方は、次のようにした：(i) 種子が容易に手に入るもの、(ii) 栽培がしやすいもの、(iii) 各層位

から効率的にセシウムを吸収するもの、(iv) 栽培期間が短く、1年間に複数回栽培が可能なもの（放射性セシウムの積算除去量を増やすため）、(v) バイオ肥料の接種効果が高いもの。農工大で行ったモデル試験から、コマツナは栽培期間が短く、品種も沢山有り、種子供給も問題がなく、1年間に5～6回は福島で栽培可能であり、PGPRの接種効果も高いので、試験作物に選んだ。

圃場試験の段取りは図5に記載した。2012年5月17日にNPO法人「ゆうきの里東和ふるさとづくり協議会」の大野達弘理事長のご自宅の作業スペースをお借りして播種作業を行った。圃場には第1回栽培試験として、移植時には、各1 m²の栽培区には15 cm間隔で25個体の各処理作物を移植した。コマツナ4品種（河北、清澄、照彩、日光）、カラシ菜、およびソバは1植物種あたり3反復3処理（それぞれの作物種に、*Bacillus TUAT1*株、*Azospirillum TS13*株の接種区と無接種区を設けた）で225個体移植するため、全部で1350個体の準備を行った。PGPRの接種は、播種時から、1週間おきに3回、上記菌液をカン注した。菌液の接種は大野理事長に依頼して行った。6月初旬に戸沢の圃場に移植したが、移植前に基肥として、硫安11 kg/160 m²、過リン酸石灰14 kg/160 m²を耕耘時に施用した。カリウム施肥は行わなかった。

2012年6月～7月半ば（小松菜（河北、日光、きよすみ、照彩）、カラシ菜、ソバ）、7月半ば～8月（小松菜（河北、日光、きよすみ、照彩）、カラシ菜、ソバ）、9月～10月（ソバ、ソルガム（D66、D93、D100、D1）、アマランサス）、11月～2013年3月まで（菜花、稲こき菜、野沢菜、松本冬菜、信夫冬菜）の4期に分けて、栽培を行った。収穫後、植物体は、大槻さんのたばこ乾燥室を借りて、ひもにつるし自然乾燥させた。この乾燥は初めての経験で、ひもにくっついたサンプルが乾燥過程で落ちたり、虫



図5. 圃場試験の手順

に食われたり思いもよらない問題が多発した。乾燥植物は、個体ごとに粉砕機で粉砕し、PerkinElmer社のガンマカウンター（WIZARD2 2480）を用いて、放射線量を測定した（投稿中）。第1回の栽培は、順調に推移したが、第2回目、および第3回目は農薬散布の回数が少なく、虫害にあった。また、4回目は降雪で、作物の生育に大きなばらつきが出た。私たちは、府中市の多摩川沿いにある農工大の水田での圃場試験や、農学部隣接している畑での麦作の圃場試験の経験はあったが、遠距離での漬け菜類の圃場試験は初めてで、かつ、試験区を細かく区切ったため除草などの作業も難航し、暑いさなか、学生さん達も含めよくやったなど、現在でも感じている。

2012年度の試験に関しては、PGPRと作物の組合せで土壌からの放射性セシウムのレメデーションが促進されることの検証と周年的な栽培体系に適し、放射性セシウム除去を加速化するPGPR - 作物種の最適組合せの探索に焦点を当てていた。特に、福島県二本松周辺で作られている小松菜などに絞って、栽培試験を組み立てた。

図6に、小松菜2種（河北・日光）とカラシ菜、ソバの総放射性セシウム吸収量と乾物重との関係を示した。

小松菜（日光）- *Bacillus* PGPR (NI.BC) の組合せは、植物体への吸収濃度を高めて総放射性セシウム吸収量を高め、カラシ菜 - *Azospirillum* PGPR (BJ.Az) の組合せは、植物体を大きくすることで、総放射性セシウム吸収量を高めた。さらなる検証が必要であるが、PGPRと

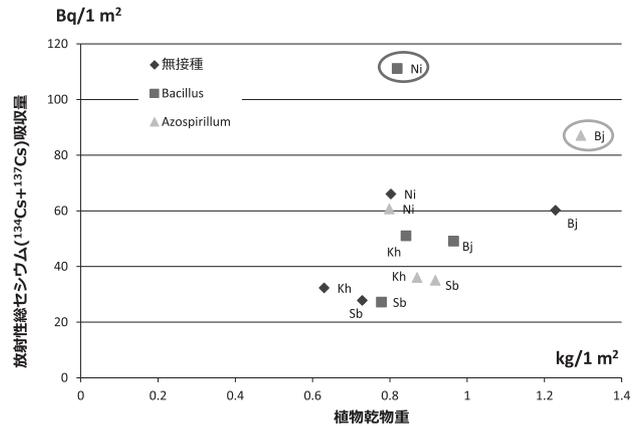


図6. 総放射性セシウム ($^{134}\text{Cs} + ^{137}\text{Cs}$) 吸収量と乾物重との関係（総放射性セシウム量は2012年の7月サンプリング時に補正している）

植物種の組合せにより土壌からの放射性セシウムの吸収機構が異なる可能性も考えられた。

図7に、二本松戸沢で行った微生物 - 植物相互作用で、総放射性セシウム ($^{134}\text{Cs} + ^{137}\text{Cs}$) の移行係数 (TF値) に変化が生じるか否かに関する実証試験結果の一部を示した。

すべてではないが、一部の植物 - 微生物の組合せは、総放射性セシウムの移行係数 (TF値) を高くすることがわかった。コマツナ類では、*Bacillus* PGPRの接種がTF値を上昇させる傾向が示された。また、二本松で行っ

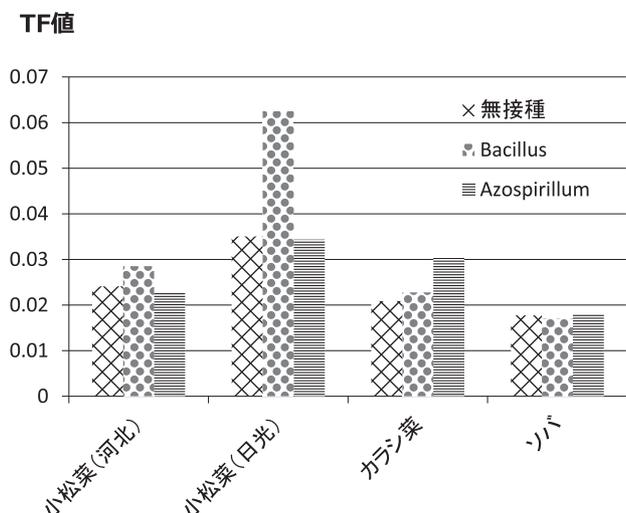


図7. 二本松戸沢で行った微生物-植物相互作用で、総放射性セシウム ($^{134}\text{Cs} + ^{137}\text{Cs}$) の移行係数 (TF 値) に変化が生じるか否かに関する実証試験

た試験での総放射性セシウムのTF値は、最大で0.06前後で、府中の黒ボク土を用いたモデル試験の10分の1以下であった。この原因に関しては、土壌要因に絞ると、戸沢の試験圃場の土壌は、粘土鉱物としてパーミキュライト（雲母類）を含有しており、事故から1年以上経過し、放射性セシウムがそのパーミキュライトに強く固定されていること、また試験圃場の土壌には長石の風化物が大量に存在しておりそれらによるカリウム供給力が強くそれが放射性セシウムの吸収を阻害⁷⁾していることなどが考えられた。

終わりに

現在、二本松市東和地区で「放射性セシウムを農耕地からどのように除くか」や「可食部に放射性セシウムを移行させない栽培技術」に関する圃場試験を開始して2年が経過した。東和地区には戸沢のような雲母が多い土壌の他に、府中と同様に黒ボク土も存在している。そ

こで、黒ボク土ではモデル試験と同じように、高いTF値を示すことができるか、2014年から試験を始める。しかし、戸沢の試験圃場のような土壌は、存在している粘土画分に放射性セシウムが年々強く固定されている。微生物-植物系に吸収させるためには、これを可動化させる必要があり、粘土鉱物のフレイドエッジなどに強く固定されている放射性セシウムを放出させる必要がある⁸⁾。そのため、酸を産生し粘土鉱物の構造を破壊し放射性セシウムを可動化するカリウム溶解菌⁹⁾と呼ばれる微生物を単離して、それらがどのくらい放射性セシウムを可動化するか検証を始めている。すべての放射性セシウム汚染土壌には適応はできないと思うが、特定の土壌において、微生物-植物の相互作用で、放射性セシウムを効率的に除去できる技術に仕上げたいと学生さんと悪戦苦闘しながら頑張っていこうと考えている。どうぞ、福島県の農業復興や私たちの福島農業復興支援プロジェクトにご支援を頂ければ有り難いと思う。

本研究は文部科学省特別経費「大学固有の生物資源を用いた放射性元素除去技術、バイオ肥料・植物保護技術開発（福島農業復興支援プロジェクト）」(H24～H28年)の援助で行われている。

文 献

- 1) <http://nsed.jaea.go.jp/fukushima/data/20110906.pdf>
- 2) <http://www.s.affrc.go.jp/docs/press/110524.htm>
- 3) 平山 孝：農業分野における放射性物質試験研究課題成果説明会（第5回），p. 6, 福島総合農業センター（2011）。
- 4) Broadley, M. R. *et al.*: *Environ. Pollut.*, **106**, 341 (1999).
- 5) Meunchang, S. *et al.*: *Soil Sci. Plant Nutr.*, **50**, 413 (2004).
- 6) <http://www.touwanosato.net/kyougikai.html>
- 7) 吉岡邦雄：水稲の放射性セシウム吸収抑制対策について，福島県農業総合センター（2013）。
- 8) 山口紀子ら：農環研報，**31**, 75 (2012)。
- 9) Han, H. S. *et al.*: *Res. J. Agric. Biol. Sci.*, **1**, 176 (2005).