

光合成細菌による放射能汚染土壌の実用的除染と 農業への還元利用

佐々木 健*・竹野 健次

福島原子力発電所の事故以来3年以上経過したが、水、汚泥、土壌などの放射能除染は順調に進んでいるとはいえない。特に土壌の除染は農業復活に重要である。現在の農業用土壌の除染は表層土壌をはぎとり、地下の土壌と反転させる反転耕法か、表層をはぎ取ってフレコンバッグに入れ中間保管場所や仮置き場に保管する方法が多い。特に後者がよく行われているが、中間保管場所や仮置き場の確保が難しくなっており、除染が進まない所も多く見受けられる。できる限り減容化が可能な技術開発が望まれている。

我々は、光合成細菌を用いて環境汚染された地区での、実用的な放射性物質除去ができないかと研究を進めてきた。そして、福島市の公立学校での、光合成細菌によるプールの水およびヘドロの約90%の実用的な除染¹⁾、および、南相馬市での腐養質土壌の除染(約60–70%)について成功例も報告した^{2,3)}。本稿では、浪江町で農業用土壌の、現場での放射能の除染を行った結果と、さらに野菜を栽培して、除染した土壌の農業へ還元利用が可能かを検討した結果を述べる。

汚染土壌からの放射能の除染

福島に広く分布する汚染土壌、特に里山の森林土壌(南相馬市畑町地区)の除染を行った^{2,3)}。汚染土壌5 kgに水10 L(水道水、0.4 $\mu\text{Sv/h}$ 以下)を懸濁しよく攪拌して、栄養源(グルコース4 g、ポリペプトン0.15 g、ビタミ

ン類(B1, ニコチン酸, ビオチン混合^{1,2)})を添加し、光合成細菌固定化ビーズ(*Rhodobacter sphaeroides* SSI)(SSIビーズ)を入れたメッシュバッグを1–3袋浸漬して通気を行った。このベンチスケール実験の様子を図1に示す。その結果、土壌懸濁液の放射能はヘドロ除染のように良好に除去されず、最大で31%の除去率であった²⁾。土壌の放射性セシウムについて、藤川⁴⁾は放射性セシウムはシルトや粘土質土壌と強く結合していることを報告している。また、橋本は⁵⁾、放射性セシウムは腐葉土についてはフルボ酸やフミン質に強く結合していることを報告している。ヘドロに比較して、土壌ではこれらとセシウムとの結合が強いようで、光合成細菌の放射性セシウムの吸着とカリウムポンプによる吸収能力のみでは、汚染土壌の実用的除染は厳しい状態であった。そこで乳酸菌を用いる前処理について検討した。

乳酸菌との組合せによる土壌の除染

前処理として乳酸発酵と嫌気消化を行い、有機物が分解され溶出してきた細かい粒子、低分子の有機物に含まれる放射性セシウムをSSIビーズで除去する実験を行った。我々は長く乳酸菌と光合成細菌を組み合わせた広島湾のヘドロの浄化の研究を行ってきた^{6,7)}。この中で、ある乳酸菌はヘドロや干潟の土壌の有機物を分解して、CODを低下させ浄化しうることを明らかにしている⁶⁾。嫌気消化菌や乳酸菌で有機物を分解し生成した低分子有機物、酢酸、プロピオン酸および乳酸を、光合成細菌で分解浄化するシステムである。そこで、この考え方を放射能汚染土壌の除染に応用した。

有機物分解力に優れた乳酸菌(*Lactobacillus casei*)の培養液³⁾を図1に示す土壌懸濁液に添加し、最初35°Cで4日間嫌気消化と乳酸発酵を行い、その後メッシュバッグに入れたSSIビーズを浸漬し、栄養源添加と通気を行いつつ、好気処理を行った²⁾。その結果を図2に示すが、メッシュバッグ2袋と3袋の場合それほど除染効果には大差はなかったが、24日後に7.33 $\mu\text{Sv/h}$ あった土壌懸濁液の放射能は3袋投入で3.02まで低減した。これは最大で59%の除染であった。乳酸菌を使わないSSIビーズのみの除染率、31%と比較して大きく改善した。これは、乳酸菌や嫌気発酵により、高分子有機物に含まれている放射性セシウムが細かい粒子となり、懸濁液画



図1. 光合成細菌(BBIビーズ)による、放射能汚染土壌のベンチスケール除染。

*著者紹介 広島国際学院大学(学長)、工学部食農バイオ・リサイクル学科(教授) E-mail: sasaki@hkg.ac.jp

特 集

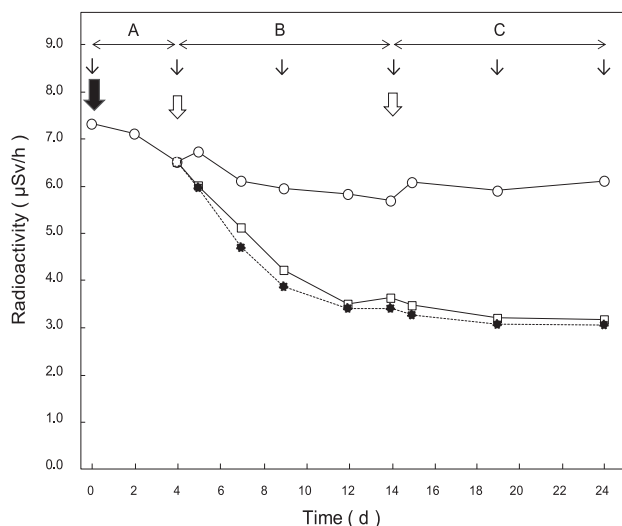


図2. 光合成細菌 (*Rhodobacter sphaeroides* SSI) ビーズによる、南相馬市の放射能汚染土壌のベンチスケールでの除染。汚染土壌5 kgに水10 Lを入れ懸濁。A期で乳酸菌培養液1 Lを入れ(黒太矢印)嫌気消化および乳酸発酵。B期でSSIビーズを2-3袋(メッシュバッグ, 1袋約200個ビーズ)を入れ(白抜き矢印), 栄養源(グルコース4 g, ポリペプトン0.15 g, ビタミン類), を添加して(黒矢印), 通気(0.2-0.3 vvm)を行いつつ好気条件で除染。C期でSSIビーズを新しいものに入れ替えさらに栄養源を添加しつつ(黒矢印), 好氣的除染を継続。温度はA期では35°C, B, C期は30°Cに維持した。pHは毎日6.0-7.5にアンモニアで調整した。

分に懸濁し, SSIビーズによる取込みがより容易になったためと思われる^{2,3)}。乳酸菌を改良し土壌中の有機物分解がより進行すれば, 70-90%以上の除染も可能性は十分考えられる。

浪江町での土壌の実用的除染と野菜栽培

ベンチスケール規模での除染の成功をもとに, 浪江町の農場(希望の牧場)の土壌(黒ボク土)除染を行った。60 Lコンテナに汚染土壌30 kgと水道水50 Lを入れ, ベンチスケール実験と同じように乳酸菌培養液(5 L)を添加し, 4日間嫌気消化および乳酸発酵を行い, その後SSIビーズを入れたメッシュバッグ9袋を入れ, 栄養源(グルコース, ペプトン, ビタミン類)を添加し, 通気を行いつつ土壌除染を行った。図3に今回の実用的除染の様子を示す。浪江町での除染結果を図4に結果を示すが, 現場なので温度管理はできず, 18-28°Cの屋外温度で行った実証試験であったが, ベンチスケール規模実験とはほぼ同じく, 最初6.18 μSv/hの土壌懸濁液の放射能は, 14日後に2.91 μSv/hにまで低減した。放射性セシウムがSSIビーズに吸着, 吸収されたものと推定された。この方法が現場での実用的な除染技術であることが確認された。

この時の土壌の除染状態をベクレル単位で示すと, 除染前199,248 Bq/kg乾燥土壌が, 72,225 Bq/kg乾燥土壌に



図3. 光合成細菌(BBIビーズ)による, 放射能汚染土壌の実用的除染。

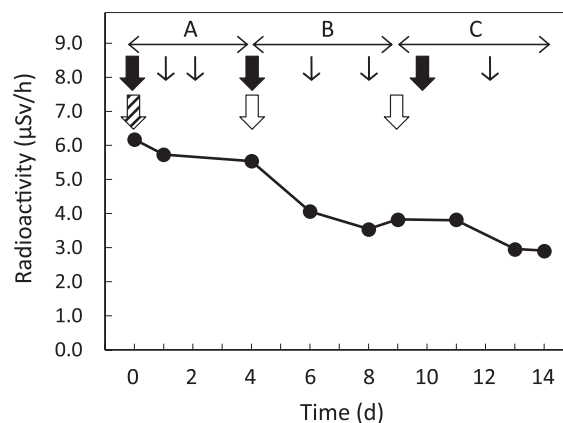


図4. 光合成細菌 (*Rhodobacter sphaeroides* SSI) ビーズによる, 浪江町汚染土壌の実用的除染。60 Lコンテナに汚染土壌30 kg, 水50 Lを入れ懸濁。A期で, 乳酸菌培養液(5 L)を入れ(波線矢印)4日間嫌気消化および乳酸発酵。B期で光合成細菌ビーズ9袋(約1800個ビーズ)を投入し(白抜き矢印), 栄養源(グルコース200 g, ポリペプトン7 g, ビタミン類, 各少量)を添加(太字の黒矢印), 通気(約0.2-0.3 vvm)を行いつつ, 好気条件で除染。細字矢印はグルコース(200 g)のみ添加。C期で, 9日後にSSIビーズを入れ替え, 栄養源, グルコースをそれぞれ矢印のごとく添加して除染を継続。温度は18°Cから28°C, pHは6.0-7.5にアンモニアで調整した。

まで低下しており, 約64%の除染達成であった。この除染効果はゼオライトの1回処理とほぼ同等のものであった。ゼオライトは放射能吸着後, 減容化が難しいが, SSIビーズは600°C以下で焼却すれば, 放射能の飛散なしに97%以上の容量, 重量の減容化が可能であることがわかっており^{1,2)}。小型容器で敷地内に容易に保管でき, 中間保管場確保の必要がなく, 本技術はゼオライト処理に比べより減容化が可能な実用的技術である。

また, この除染した土を, 非常に汚染度の高い土壌(表面で23 μSv/h)の上に10 cmの厚さで覆うと, 遮蔽効果で表面が約10 μSv/h以下に低下することを確認している。除染した土壌を遮蔽土壌として利用し, 汚染度の

表1. 放射能汚染度の高い土壌（浪江町，黒ボク土）の除染と野菜（小松菜）栽培における約2か月後の放射能の移行

	土壌 (Bq/kgDW)	土壌除染率 (%)	野菜 (Bq/kgfw)	移行係数 (TF)
除染前	199,248	—	11,698	0.0587
除染後	72,225	63.8	1,682	0.0232

DW：乾燥重量，fw：新鮮重量，TF：野菜すべてのBq/kgfw/土壌のBq/kgDW

高い場所の空間線量を低下させる目的に使用できる。仮置き場の大量の土壌のリサイクル利用の一つとして可能性はある。

除染した土壌による野菜栽培

光合成細菌を用いて除染した土壌がそのまま農業へ還元利用できるかどうかを検討するために，小松菜のポット栽培試験を行った。図5に示すように約2か月の栽培後，一番手前の対照実験（除染前の土壌を用いた場合）と比較して除染した土壌（手前から二つ目のポット）ではやや生育が遅いものの，ほとんど同じような小松菜の生育が認められた。その時の小松菜に移行した放射能は，表1に示すように，除染後土壌では大きく低減していた，同じ市販肥料と水を同じ量施用しており，この違いは土壌の違いである。元々の土壌汚染濃度が高いために，100 Bq以下という食用基準は満たしていなかった。移行係数は除染前では0.0587と非常に高い値であった。

しかし注目すべきは，除染後は移行係数が0.0024と半分以下に低減していたことである。この低い移行係数は低濃度に汚染された土壌（約3000 Bq/kgDW）を用いた小松菜栽培試験の値（0.0022）とほぼ同じ結果であった。小松菜，ホウレンソウは放射能の移行係数が高い作物といわれている（福島県農業総合センター）⁸⁾。この移行係数が除染処理で低減できるということは農業への還元利用に際し重要な知見である。今回の結果は，光合成細菌で除染を行うと，植物に移行しやすい形の放射性セシウムは光合成細菌の吸着およびカリウムポンプの取込み作用で大きく除去されており，植物に移行しにくいセシウムのみが土壌に残存しているという我々の仮説³⁾を支持するものである。移行係数は土壌や肥料の種類によってもかなり異なるといわれている。また，除染後土壌での約1か月後の若い小松菜の葉での試験的計測では，156 Bq/kgfwと，食用基準内に近い放射能の検出が認められた。したがって，栽培期間によっても放射能の移行は異なるとも考えられ，今回の除染後土壌でも，肥料や栽培期間をよく考慮し栽培すれば，食用基準内に抑えられた栽培も可能と考えられる。

今後いろいろな土壌の除染を行い，どの程度の放射能



図5. 除染前，除染後の土壌による小松菜の栽培，一番前ポットが汚染前土壌，2番目ポットが除染後土壌。その他は別の汚染土壌の栽培実験。

汚染であれば，またどのような肥料や栽培条件で栽培すれば，我々の光合成細菌による除染技術で安定した農業への還元利用が可能であるか，さらなるデータの蓄積が必要である。

光合成細菌による土壌の除染は，①減容化が可能，②簡便容易，大きな設備は不要，③作物への放射能移行が低減，④光合成細菌はもともと農業資材であり農業に対して安全（ゼオライトなど吸着材は産地，製造法により安全性が確認されていない）など，農業への還元利用に対し多くの利点を有している。したがって，現在放置されている農業用地や，フレコンバッグで仮置き場や中間保管場所に保管されている土壌の農業への還元利用も可能性がある。除染方法も簡便で，現在主流の酸抽出，ゼオライト処理法より実用性が高いと思われる。

謝 辞

本実験にご協力いただいた福島希望の牧場，吉沢正巳代表とスタッフの方々および広島国際学院大学の岡川真和，石井貴浩氏に深謝いたします。

文 献

- 1) Sasaki, K. et al.: *Biosci. Biotechnol. Biochem.*, **76**, 859 (2012).
- 2) Sasaki, K. et al.: *Biosci. Biotechnol. Biochem.*, **76**, 1809 (2012).
- 3) 佐々木健ら：生物工学，**91**, 432 (2013).
- 4) 藤川陽子：東日本大震災後の放射性物質汚染対策，p. 106, NTS出版 (2012).
- 5) 橋本洋平：東日本大震災後の放射性物質汚染対策，p. 137, NTS出版 (2012).
- 6) Okuhata, H. et al.: *Jpn. J. Wat. Treat. Biol.*, **48**, 73 (2012).
- 7) 奥畑博史ら：環境技術，**40**, 7373 (2011).
- 8) 福島県農業総合センター作物園芸部野菜科，小林智之：放射線関連支援技術情報H24 (2012).