

# 放射性物質に汚染された農地における土壌固化剤を用いた表土剥ぎ取り技術の開発

若杉晃介<sup>1</sup>・原口暢朗<sup>1</sup>

Development of surface soil peeling technology using a soil solidification agent on farmland contaminated by radioactive substances

Kousuke WAKASUGI<sup>1</sup> and Noburou HARAGUCHI<sup>1</sup>

## 1. はじめに

東日本大震災を起因とする東京電力福島第一原子力発電所の事故により、広範囲にわたる地域が放射性物質により汚染された。政府の原子力対策本部は平成23年4月8日時点の暫定基準値として、土壌中の放射性物質濃度が $5,000 \text{ Bq kg}^{-1}$ 以上（地表から地下15 cmの平均値）の約8,300 haの農地では稲の作付けを制限した。しかし、被災地のほとんどの地域が農林水産業を基幹産業としており、作付け制限による影響は大きく、予測される風評被害も合わせると甚大な被害となる。そこで、営農再開と安全な生活空間の確保に向け、早期の除染が求められているが、農地の除染方法についてはこれまでに前例のないことであり、過去のありとあらゆる知見の活用と他分野同士の協力による技術開発が求められている。

農林水産省は、内閣府総合科学技術会議、文部科学省、経済産業省と連携して、平成23年度科学技術戦略推進費「放射性物質による環境影響への対策基盤の確立」により、農地土壌等における放射性物質除去技術の開発に取り組んだ。作付けが制限された農地では耕起・作付けが行われていないことから、放射性物質は土壌のごく表層に蓄積しており、この部分の選択的な剥ぎ取りは、早期かつ確実な除染対策と考えられている。本研究では、戦略推進費の助成をうけて、土壌固化剤を用いた表土剥ぎ取り技術の開発、及び福島県飯館村における実証試験を実施しており、ここではその成果を中心に解説をする（農林水産省、2011）。

## 2. 除染技術について

放射性物質の除染の方法は、大別すると生物学的手法と化学的手法、物理的手法があり、以下にその特徴を記

した。

### 2.1 生物学的手法

生物学的手法は植物による汚染物質の吸収を利用したファイトレメディエーションがあり、代表的な植物としてヒマワリが用いられているが、汚染物質を吸収するまでに数年から数十年と運用期間が長く、その間も管理し続けなくてはならないことや、汚染物を収集した植物体の処理の手間などの問題がある。また、根域の汚染物質しか吸収しないため、ごく表層に蓄積した放射性物質は吸収しにくい。福島県飯館村での栽培試験の結果、ヒマワリに吸収された放射性セシウム濃度は $50 \text{ Bq kg}^{-1}$ で土壌中の濃度の1/2000しか吸収しなかった（農水省、2011）。今後も複数の作物で試験を行うこととなっているが、早期の除染を目的とした場合は適していないと思われる。

### 2.2 化学的手法

化学的手法はカリウムなどを散布し、農作物のセシウム吸収を抑制する手法がある。これは、農作物の安全性を高める効果はあるが、地域の放射線量を下げる効果はない。また、パーミキュライトやゼオライト等の鉱物を用いてセシウムを吸着させる手法があるが、これは水溶性セシウム（イオン体セシウム）の場合のみに機能するため、既に土壌にセシウムが吸着している農地の除染には効果が低いと考えられる。一方で、下記に示す物理的手法で剥ぎ取った土壌の減量化技術として期待されており、今後のさらなる技術開発が必要となる。

### 2.3 物理的手法

耕起していない農地では表面から2.5 cmの深さに放射性セシウムの約95%が存在していることが報告されている（農水省、2011）。これまでの研究等からもセシウムは、土壌の粘土分と強く結びつき、降雨などによって深部に移行しないとされている。物理的手法は表層に蓄積したセシウムを土壌ごと処理する手法で、客土や天地返し（反転耕）、表土の剥ぎ取りといった工法がある。これらの手法は生物学的手法や化学的手法と異なり、迅速かつ確実な放射線量の低下や土壌中のセシウム濃度を低下させることができる。

<sup>1</sup>Institute for Rural Engineering, National Agriculture and Food Research Organization (NARO),  
2-1-6 Kannondai, Tsukuba, Ibaraki 305-8609, Japan.  
Corresponding author: 若杉晃介, (独) 農業・食品産業技術総合研究機構農村工学研究所  
2012年3月15日受稿, 2012年5月16日受理  
土壌の物理性 121号, 35-42 (2012)



Photo. 1 プラウによる反転試験。  
A turnover test using a plow.

### 3. 物理的除去の手法

#### 3.1 客土工法

過去にカドミウムやヒ素などに汚染された農地の対策として客土が行われてきた実績がある。放射性物質に対しても客土材の遮蔽効果による空間線量の減少が期待される。しかし、客土を行うには放射性物質に汚染されていない客土材が大量に必要となり、その客土材の確保が困難になっている。また、50 cm 程度客土した場合、従前の用水路や農道などが使用できなくなる場合が多く、それらの整備も一体とした事業となることからコストが非常に高くなる。さらに、施工後も下層土に放射性物質が存在することから、植物による吸収のリスク、及び風評被害リスクは解消しない。

#### 3.2 反転耕

反転耕はプラウによって表層土壌を下層に反転させる技術である。これは廃棄土壌が発生せず、客土材も不要であることから経済性では優れた手法である。しかし、客土と同様に下層に放射性物質が存在することから同様のリスクが顕在することが懸念される。また、土壌によっては反転率が低下し、汚染物の一部が表層に残る可能性が高い。農村工学研究所内でプラウの反転率の試験を行ったところ、関東ローム土壌では約60%の反転率に止まり、表層にマーカーとして散布した石灰が残留した (Photo. 1)。また、通常のプラウでは地表から深さ30 cmの反転が限界であるが、深さ60 cmまで反転可能な二段耕プラウが開発されている。これは、土層を上下の2層に分けて階段状に反転することで可能となる技術で、上層を地表～深さ20 cmとした場合、深さ40～60 cmの下層に反転して入れ込むことが可能である。しかし、この場合でも反転率は土壌の性質に左右され、施工は大型の重機を用いるの必要があり施工条件に限られる (Photo. 2)。

#### 3.3 表土剥ぎ取り工法

表層土の除去は客土や反転耕と異なり、放射性物質を農地から搬出するため、確実に除去ができ、風評被害も起きにくい。特に農地は空間線量を下げただけでなく、農作物に放射性物質が吸収されないようにして、安全・



Photo. 2 二段耕プラウ。  
Two-stage plow.

安心な農作物を生産することが求められている。

一方で、表土除去は大量の汚染土壌が発生してしまうことが懸念される。特に、一般的な建設機械を使用した場合、剥ぎ取り厚さの制御が困難で、安全側に厚く剥ぎ取ると処理する土量や施工費が増加し、薄く剥ぎ取ろうとすると取り残しが発生する。そこで、厚さを2～3 cm程度に制御し、かつ確実に剥ぎ取る工法が不可欠である。

### 4. 表層固化による剥ぎ取り

#### 4.1 土壌固化剤の散布

固化剤を散布することで地表から2～3 cm程度の汚染土壌を固化し、確実性、施工性、安全性を向上させながら除染する工法を開発した (特許出願 2011-178236)。固化剤を土壌と攪拌・混合するにはロータリー状の攪拌作業機が必要となるが、5～10 cm程度攪拌してしまうため、汚染土壌層を深くしてしまい処理土も増加する。そこで、固化剤を添加したスラリーを散布し、表層のみに浸透させることで汚染土壌を固化させた (Photo. 3)。固化剤はマグネシア系及びカルシウム系固化剤、または石灰やリグニン系の固化剤などがあるが、特に農地での施工は地表面の亀裂に固化剤が流れ込み、汚染土壌を剥ぎ取った後には場内に残る可能性があるため、環境に負荷を与えない資材の使用が望ましい。マグネシア系固化

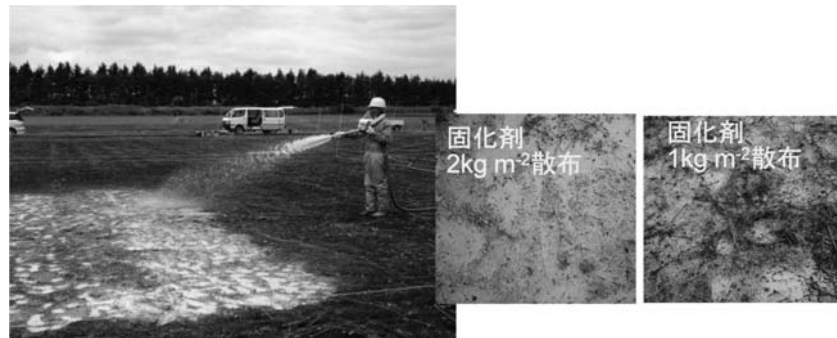


Photo. 3 固化剤の散布。  
Spraying solidification agent.



Photo. 4 吹き付け機。  
Sprayer.

剤は酸化マグネシウムを主成分とし、マグネシアを固化させる反応性物質としてケイ酸カルシウム、塩基性炭酸カルシウム、炭酸マグネシウムなどを配合したもので、pH9~11 の中性域から弱アルカリ性域で固化し、六価クロムなど環境に負荷を与えるものを含まない資材である(藤森・小堀, 2000)。なお、スラリーの散布は吹き付け機や動力噴霧器などによって行う(Photo. 4)。また、固化剤の配合量は $1\text{m}^2$ あたり $1\text{kg}$ では部分的に行き渡らないことがあったが、 $2\text{kg}$ では十分に散布されていた(Photo. 3)。

#### 4.2 固化剤の浸透・固化

スラリーが浸透する深さは現地の透水係数や粒径、土質などによって異なるが、固化剤の粒径やスラリーの粘性によって調整することが可能である。砂質土が多く含まれて透水性が高い土壌は増粘剤を用いて浸透層を調節する。また、粘土が多く含まれて透水性が低い土壌では、粒径の小さい固化剤を使用し、状況に応じて分散剤を用いる。なお、マグネシア系固化剤の粒径はブレン比で $3000\sim 8000\text{cm}^2\text{g}^{-1}$ の資材がある。固化までの日数は使用する固化剤や天候などによって異なるが、マグネシア系固化剤では散布から6時間後には固化が開始し、十分な強度が発現するまで約1週間の養生期間を要する。また、以下に本工法のメリットを挙げる。

i) 表層が固化しているため、降雨による流出や風に



Photo. 5 固化された剥ぎ取り土壌。  
Solidified peeled soil.

よる飛散が起こらないことから拡散防止になる。

ii) 固化した汚染土壌は、固化していない土壌と異なる塑性をしているため容易に剥ぎ取りができ、取りこぼしが発生しにくい(Photo. 5)。

iii) 固化剤によって汚染土壌が白色化しているため、目視で汚染土壌が分かり、施工管理がしやすい。

iv) 汚染土壌の粉塵巻き上げが起こりにくいことから、施工時の安全性が向上する。

## 5. 剥ぎ取り工法の開発

表層土壌を剥ぎ取るにはブルドーザーやローダー、グレーダーなどの建設機械が用いられる。また、剥ぎ取った土壌はローダーや油圧ショベルなどを用いて集積・搬出するのが一般的である。しかし、水田の多くはグラウンドなどと異なり、地面が軟弱で田面に稲株や轍などの小さな凸凹が存在するため、放射性物質が蓄積する表層 $2\sim 3\text{cm}$ のみを剥ぎ取るのは困難である。そこで、建設機械を用いた効率的な剥ぎ取り工法の開発を行った。

### 5.1 一般的な表土剥ぎにおける問題点

ブルドーザーなどを使用した表土剥ぎの場合、 $10\text{cm}$ 程度の作業誤差があり、近年はレーザー光線やGPSによって制御された作業機も存在するが、精度は $\pm 2\sim 3\text{cm}$ である(Photo. 6)。次に、表層を剥ぎ取る際の建設機械の問題点を挙げる。

i) ブルドーザーやグレーダーは土を押し運ぶ機械であり、容量を超えた土は横からこぼれ落ちるため取り残しが出やすい。

ii) 作業機のバケットやブレードが邪魔をして、地面との接地点が死角になっているため、どれくらいの深さ



Photo. 6 レーザーブルドーザーによる運土。  
Hauling soil with a laser-controlled bulldozer.



Photo. 7 油圧ショベルの掘削。  
Excavation by hydraulic shovel.



Photo. 8 ワイパー工法による剥ぎ取り状況。  
View of peeling by the wiper method.

で剥ぎ取っているかオペレーターが目視で確認できない。

iii) 集めた土が抵抗や重みとなってバケットの先端部分が徐々に深く入ってしまう。

iv) 水田などの農地の場合、地面は平らではなく小さな凸凹があり、車体の揺れに連動して掘削部分も上下左右に揺れるため、剥ぎ取り厚さが安定しない。

これらの理由から、安全側に厚く剥ぎ取ると処理する土量や施工費の増加となり、薄く剥ぎ取ろうとすると取り残しが発生する。

## 5.2 新たな剥ぎ取り工法 (ワイパー工法)

一般的な油圧ショベルの作業では作業機の先端部分のバケットを掘削面に押し込み、機体側に引き寄せながら、縦方向に掘削していくため、地表面に対して平行、かつ深さを一定に剥ぎ取るのは困難である (Photo. 7)。そこで、新たに開発した工法では油圧ショベルのバケットを掘削面に押し当て、旋回機能を使って左右にスイングし、横方向に剥ぎ取っていく方法で行う (特許出願 2011-184127) (Photo. 8)。

走行しながら剥ぎ取るブルドーザーやローダーでは、地面の凹凸により剥ぎ取り厚さの管理が難しいが、油圧ショベルの本体は動かずにアーム部分のみ動くため剥ぎ取り厚さが安定しやすい。また、油圧ショベルは複数関節のアームを持つことから、地面に凹凸があってもそれに合わせて高さの調節が容易にできる。特に、オペレー

ターは目視で剥ぎ取り厚さを確認しながら操作できるため、施工管理がしやすい。

## 5.3 収集方法

剥ぎ取った汚染土壌の集積・搬出は通常、油圧ショベルやローダーによって行うが、土を動かすと取り残しの原因となる。そこで、放射性物質などに汚染された危険性の高い土壌を扱う場合はバキュームカー (吸上車) などを用いて、汚染土壌を剥ぎ取りながら吸引して収集する方法を用いた。タンク後部が大きく開き、タンク全体がダンプする構造のバキュームダンパーを用いることで、剥ぎ取った土壌を処分方法に応じて移動・排出し、容易にかつ安全に処分することができる。また使用する機械は、真空ポンプを用いた吸引力によって剥ぎ取った表層土壌を吸引することができる理論風量  $12 \sim 100 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$  程度の能力を持つもので、面積や立地などを考慮して選択する。

## 6. 表土剥ぎ取り予備試験

### 6.1 予備試験の方法

農村工学研究所内において、本工法の効果を検証する予備試験をした。固化剤の吹き付けは平成 23 年 7 月 21 日～22 日、表土の剥ぎ取りは 7 月 28 日～29 日に行い、剥ぎ取りと収集方法を変えた試験区を設けた (Table 1)。

試験区①はホイールローダーと油圧ショベルの排土板によって剥ぎ取り、油圧ショベルによって集積・搬出を行っ

Table 1 試験区及び剥ぎ取り試験結果.  
Peeling method and peeling test results.

	剥ぎ取り方法	集積・搬出方法	剥ぎ取り前の 空間線量率 ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	剥ぎ取り後の 空間線量率 ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	剥ぎ取り 土量 ( $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ )	剥ぎ取り 厚さ(cm)	重量比
①	ローダー+排土板	油圧ショベル	0.36	0.11	529	5.3	1
②	ワイパー工法+排土板	油圧ショベル	0.35	0.09	427	4.2	0.8
③	ワイパー工法	バキュームカー	0.27	0.10	271	2.8	0.5

備考：固化剤はマグネシア系固化剤「マグホワイト」を使用  
固液比は 300 % (マグホワイト重量 100 に対し、水 300 を配合)  
固化剤の配合量は  $2 \text{ kg m}^{-2}$

た (Photo. 9). 試験区②は油圧ショベルによるワイパー工法を用いて剥ぎ取り, 部分的に排土板を用いた. また, 集積・搬出方法は油圧ショベルを用いて行った (Photo. 10). 試験区③はワイパー工法による剥ぎ取りとバキュームカーによる収集を行った. なお, 剥ぎ取り前後の大気中の放射線量は, 地表面から 5 cm の高さで 5 m メッシュの区間ごとに TCS-161 (日立アロカメディカル社製) を用いて測定した.

### 6. 2 試験結果

試験区①では, 剥ぎ取り前の線量が  $0.36 \mu\text{Sv h}^{-1}$  であったが, 剥ぎ取り後は  $0.11 \mu\text{Sv h}^{-1}$  まで低下した (Table 1). また, 剥ぎ取り土量は  $529 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$  で, 土量と含水比, 及び剥ぎ取り前の表層の仮比重から算出した剥ぎ取り厚さは 5.3 cm であった. 試験区②では, ワイパー工法によって効果的に剥ぎ取りを行ったが, 集積・搬出時に計画よりも多くの土壌を搬出していた. その結果, 土量は試験区①に比べて 21 % 減量して  $427 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$  で, 剥ぎ取り厚さは 4.2 cm であった. 試験区③では, ワイパー工法による剥ぎ取りに加え, バキュームによる収集を行うことで収集・搬出時のロスがない. そのため, 剥ぎ取り土量は 47 % 減量化して  $271 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$  で, 剥ぎ

取り厚さは 2.8 cm となり, かつ放射線量も他の試験区と同等であったことから, 効果的な剥ぎ取りと収集が実現できたと考えられる. なお, 各試験区とも全ての地点でつくば市の日常的な線量まで低下していたことから部分的な取り残しはないと思われる.

### 7. 福島県飯館村現地ほ場における実証試験

平成 23 年 4 月 22 日から計画的避難地域に指定されている福島県飯館村の伊丹沢地区の水田 (0.1 ha) において, 本工法の除染効果を検証した.

#### 7. 1 配合試験

資材の配合は土壌状態によって検討する必要があるため, 配合試験を平成 23 年 7 月 6 日 (固化剤散布), 7 月 15 日 (剥ぎ取り) に実施した (Photo. 11). その結果, 固化剤と水の重量比が 1 : 6 の場合は, 水量が多く, 地表面が飽和状態となって資材が区画から流れ出てしまった. また, 1 : 2 の配合では資材が地表面で膜を作ってしまう, 資材が浸透していかない状況が確認され, 1 : 4 の配合では問題なく資材が浸透していたことから, 配合は 1 : 4 程度が適当であると判断した. また, 剥ぎ取り前後の放射線量は固化剤によって白くマーキングされた



Photo 9. 油圧ショベルの排土板による集積.  
Accumulation by the blade of the hydraulic shovel.



Photo 10. 油圧ショベルによる搬出.  
Removal from the site by the hydraulic shovel.

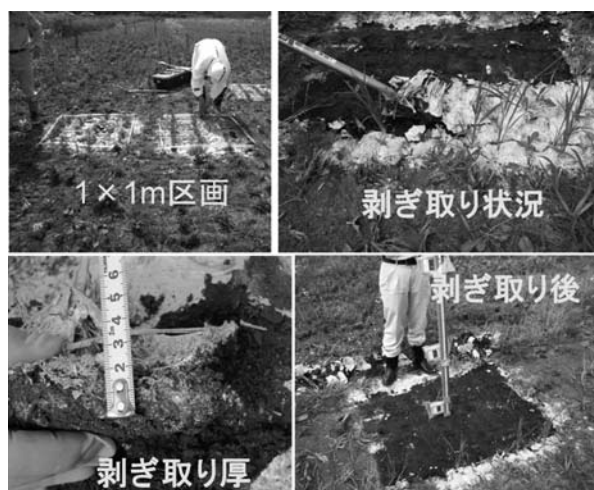


Photo. 11 現地ほ場における配合試験の状況。  
View of mixing test at a field on site.

箇所をスコップで取り残しのないように剥ぎ取れば、低減率は同等であった (Table 2)。

### 7.2 油圧ショベルのアタッチメントの改良

実証試験を行うにあたり、予備試験において高い成果を挙げたワイパー工法とバキュームの組み合わせ (ワイパー・バキューム工法) を効率良く行うため、油圧ショベルのアタッチメントの改良を行った。

油圧ショベルの特徴として、アームの先端に各種のアタッチメントを付け替えることが可能である。土を掘る通常のバケットから法面やほ場面の成形を行う法面バケット、草刈りを行うモアなど利用用途は多岐にわたる。ワイパー工法では一般的なバケットや法面バケットなどの底面が平らなものを用いる。しかし、バケットの側面を用いることから1回のスイングで剥ぎ取れる面積が限られる。そこで、バケットの開口部に剥ぎ取り土が入るように90度回転させ、バケット内にバキュームのホースを取り付けられる吸引ダクトを設けることで、表土を剥ぎ取りながらバキュームで吸い出す連続的な作業を可能にした (Photo. 12)。バケット内は油圧モーターでロータリー状、または螺旋状やハンマーナイフカッター状の装置などによって砕土及び稲株などの植物残渣を粉碎し、吸引ダクトに誘導する機能も併せを持つ構造となっ



Photo. 12 改良バケット。  
Improved bucket.

ている。この手法を用いることで、剥ぎ取りと収集が同時に行うことができ、施工の効率性や安全性が向上する (Photo. 13)。さらに、地面が平らでない法面や急な傾斜地においても安全に土を剥ぎ取ることができる。

### 7.3 実証試験

実証試験は8月19~20日 (吹き付け)、8月29~31日 (剥ぎ取り) に行った。吹き付けは前日の降雨により土壤水分状態が高かったことから固化剤と水の比率を1:3とし、固化剤 (マグホホワイト) の散布量は  $2 \text{ kg m}^{-2}$  とした (Photo. 14)。なお、吹き付けには0.1 haあたり約3時間を要した。

剥ぎ取りはワイパー工法とワイパー・バキューム工法を併用し、剥ぎ取りと収集・搬出には0.1 haあたり約7時間を要した (Photo. 13, 15)。なお、剥ぎ取った土壌は耐候性のフレコンパックに入れて、所定の仮置き場にて保管した。

除染試験の結果、剥ぎ取り土量は  $320 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ 、剥ぎ取り厚さは約3.0 cmであった。また、大気中の放射線量をNaI検出器によって計測した結果、除染前の  $7.76 \mu \text{ Sv h}^{-1}$  から  $3.57 \mu \text{ Sv h}^{-1}$  に減少した。線量はその場の放射性物質を除去しても周囲からの影響を受けるため、除染の目標とされる線量までは低下しなかったが、深さ15 cmの土壌中の放射性物質量は除染前が平均

Table 2 剥ぎ取り前後の放射線量。  
Radiation dosage before and after peeling.

配合比 (マグホホワイト:水)	剥ぎ取り前	剥ぎ取り後	排出土
1:6	7.6	4.7	10.1
1:4	7.6	4.3	11.1
1:2	7.5	4.6	10.9

地表面から +5 cm 地点の線量 ( $\mu \text{ Sv h}^{-1}$ )



Photo. 13 ワイパー・バキューム工法.  
Decontamination by the wiper vacuum method.



Photo. 14 吹き付け状況.  
View of spraying.



Photo. 15 剥ぎ取り状況.  
View of peeling.

9,616Bq kg<sup>-1</sup> (乾土中)で、除染後が平均 1,721 Bq kg<sup>-1</sup> (乾土中)まで低下し、低減率は82%で、作付の暫定基準値である 5,000 Bq kg<sup>-1</sup>を大きく下回る結果となり、高い除染効果が確認された (Fig. 1).

## 8. おわりに

土壌固化剤を散布し、油圧ショベルの旋回機能を使って剥ぎ取るワイパー工法の開発によって、放射性物質に汚染された表層2~3cmの土壌を安全性や確実性、施工性を高めながら除去することが可能となった。

除染作業の課題としては、地域によってはもちろんであるが、一筆のほ場内においても放射性物質量にバラツキが相当あり、一般的な土木工事とは異なった施工管理が必要である。特に、放射性物質は表層の非常に細かい土粒子に吸着されているため、運土作業をすると必ず取りこぼしが発生してしまう。また、取りこぼしが発生する方法で剥ぎ取ると、多くの土を剥ぎ取っても除染効果が高まらないこともある。そのため、なるべく土を動かさないで表土を剥ぎ取る工法や放射線量をモニタリングしながら緻密に施工を管理する技術などの確立が重要である。さらに、場所によっては田面の亀裂などを伝って表層よりも下層に放射性物質が存在する場合があり、表土の剥ぎ取りだけでは完全な除去は難しい場合がある。それらは、反転耕や深耕などの技術を組み合わせて活用

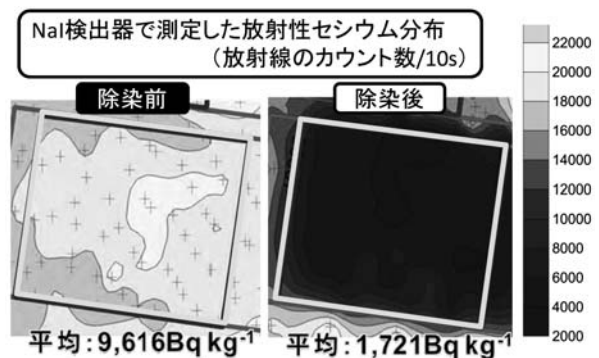


Fig. 1 除染前後の放射線量.  
Radiation dosage before and after decontamination.

することも検討する必要がある。

## 引用文献

- 藤森新作, 小堀茂次 (2000): 自然環境にやさしい土壌硬化剤 マグホワイトの開発. 農業土木学会誌, 68 (12): 53-56.  
農林水産省 (2011): 農地土壌の放射性物質除去技術 (除染技術) について,  
<http://www.s.affrc.go.jp/docs/press/110914.htm>

## 要 旨

東京電力福島第 1 原発の事故に伴い、広範囲にわたる地域が放射性物質により汚染され、土壌中の放射性物質濃度が高い農地では栽培が制限されている。これらの農地において放射性物質は、表層 2~3 cm に集積していることから、この土壌層の選択的な除去は、確実な除染効果が期待できる。一方、一般的な建設機械による従前の操作では、剥ぎ取り厚さの制御が困難であり、処理土量の増加や施工費の増大、取り残しの発生など、多くの問題が懸念されている。そこで、土壌固化剤を用いて汚染土壌層を固化し、油圧ショベルの操作方法やバケットを改良することで、剥ぎ取り厚さを表層から 2~3 cm に制御でき、かつ安全・確実に剥ぎ取る工法を開発した。

キーワード: 東日本大震災, 放射性物質汚染, 農地の除染, 物理的除去, 土壌固化剤