J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 126, p.23 ～ 30 (2014)

放射性物質汚染農地の効率的な表土剥ぎ取り工法の開発

若杉晃介[1]・原口暢朗[1]

Efficient radioactive decontamination methods for removal of surface soils in farmlands

Kousuke WAKASUGI[1] and Noburo HARAGUCHI[1]

1. はじめに

東京電力福島第 1 原発の事故にともない，広範囲にわたる地域が放射性物質により汚染されたため，土壌中の放射性物質濃度の高い農地では作付け制限がされた．それらの農地では放射性物質は表層 2 ～ 3 cm に集積しており，この土壌層の選択的な除去（剥ぎ取り）は確実な除染効果が得られる（農林水産省, 2013）．一方で建設機械による従前の操作，及び一般的な施工管理の下では，剥ぎ取り厚さの制御は困難であり，排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，高い精度での除染を可能とする施工管理技術や剥ぎ取り厚さを放射性物質の集積している表層 2 ～ 3 cm 程度に制御し，かつ安全・確実に剥ぎ取る工法，及び剥ぎ取った土壌を効率的に回収する装置を開発した（農研機構農村工学研究所, 2013）．さらに，福島県飯舘村や川俣町などの山間部の多くは冬期（12 月下旬 ～ 3 月まで）の気温が氷点下になるため，厚い凍土層が形成される．そのため，この期間の表土剥ぎ取りが困難になることから，冬期における表土剥ぎ取り工法を開発した．本稿では，平成 25 年から環境省や福島県内の地方自治体により本格的に実施されている農地の除染事業の現状を踏まえながら，新工法の概要と効果について解説する．

2. 固化剤散布による施工管理技術

表土の剥ぎ取りによる除染の対象となる農地は高い濃度の放射性物質を含んでいるため，取り残しや取りこぼしが起こると，農作物への吸収リスクを残したまま営農を行うこととなる．そのため，施工管理を厳密に行いながら除染する必要がある．そこで，本技術では白色系の固化剤を除草後に散布して，最も高い濃度で放射性物質が存在する表層土を固化し，剥ぎ取り対象土壌を可視化することで，面的な施工管理を可能とし，高精度の除染効果があることに大きな特徴がある（若杉ら, 2013a）．

2.1 一般的な施工管理方法

国や市町村が行う農地の除染事業では，高濃度に汚染された地表から概ね 5 cm の表層土を剥ぎ取ることとし，施工精度は ± 10 mm を基準としている．施工管理方法は 10 a に 1 地点（1,000 m^2 で 1 地点）に基準点となる観測杭を設け，施工前後の基準点と地表面の高さ計測によって剥ぎ取り厚さを確認している（環境省福島再生事務所, 2013）．一方で，ほ場整備事業などによる一般的な整地工では施工精度 ± 35 mm が基準として用いられており，ほ場内を 10 m メッシュ（100 m^2 で 1 地点）で測量を行う施工管理方法が用いられている．また，空間線量については，施工前後の測定を 10 ～ 30 m メッシュで地表からの高さ 1 cm と 1 m で測定することになっており，除染事業では 30 m メッシュで実施されている（環境省, 2013）．水田は軟弱な地盤が多く，轍などによる不陸が発生しやすいため，数カ所の測量による施工管理ではほ場全面において，剥ぎ取りが目標の厚さで実施されたのか確認することができない．さらに，取り残しや取りこぼしが発生した場合，空間線量の測定ではそれを確認することができない．

2.2 固化剤の散布方法

一般的に土壌を固化するには固化剤と土壌と攪拌して転圧するが，汚染された最表層の土壌は 5 ～ 10 cm の攪



Photo 1　固化剤の散布．
Spraying solidification agent.

[1]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
2014 年 1 月 12 日受稿　2014 年 3 月 5 日受理

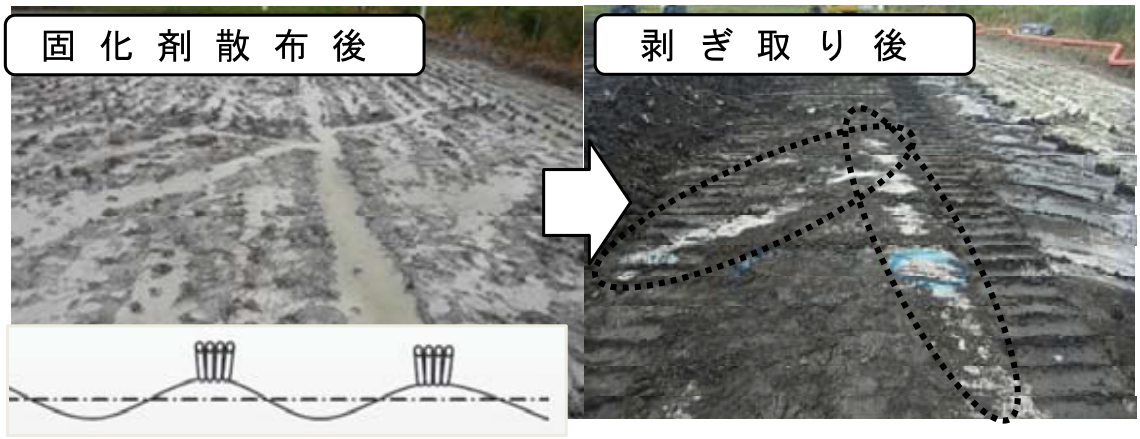


Photo 2 剥ぎ取り前後の状況.
Soil surfaces before and after the surface layer stripping with a solidification agent for decontamination.

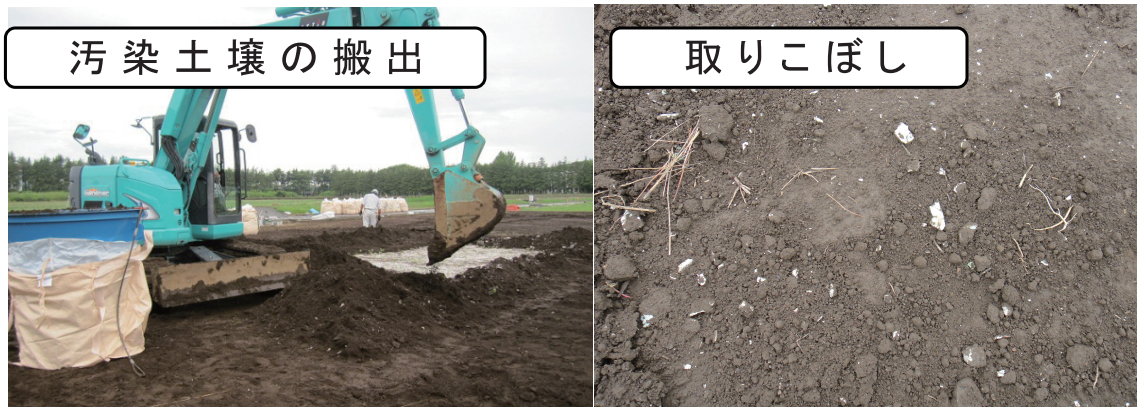


Photo 3 搬出時の取りこぼし.
Remaining radioactive contaminated soils after the surface layer stripping for decontamination.

拌層内に広がり，汚染土壌層を深くしてしまう．そこで，固化剤と水を混合したスラリーを散布して表層の 2 ～ 3 cm のみに浸透させることで，汚染土壌を剥ぎ取りやフレキシブルコンテナーバック（フレコンバック）への詰め込み作業の支障がでない強度で固化させる（Photo 1）．固化剤の配合量と固液比（水の割合）は資材の種類や土壌状態によって変化するため，地表面全体にムラなく吹き付けられること．また，過剰な水分によって資材が浸透しないことがないように，予め最適な配合を調整する必要がある．なお，スラリーの散布は 30 a の標準区画に整備された水田や 1 a 区画程度で大型車両が進入できない水田が存在するため，区画に応じて吹き付け機や動力噴霧器など，使用する機械を選択する必要がある．

2.3 固化剤散布による施工管理の効果

水田の地表面は凸凹が多く，剥ぎ取り厚さを制御しても取り残しが発生しやすい．本技術は白色の固化剤を散布することによって，剥ぎ取り後の取り残しが目視で容易に確認することができるマーカー機能を有する（Photo 2）．また，汚染土壌の搬出時に起こりやすい取りこぼしも確認できるトレーサー機能を有し，高い精度の除染が可能となる（Photo 3）．さらに，表層土壌が乾燥した畑地では汚染土壌の粉塵巻き上げも起こりにくいことから，施工時の安全性が向上する．

2.4 固化剤の種類

散布する固化剤は最終的には剥ぎ取られるが，農地に散布するため農作物や周辺環境への影響が極力少ない資材が好ましい．以下に代表的な資材を示す．また，資材は農地の状況やコストなどに応じて選択する．

2.4.1 マグネシア系固化剤

マグネシア系固化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



Photo 4 急結固化剤の固化状況.
Quick hardening of the drying soil surface.



Photo 5　水溜まりでの固化状況.
Quick hardening of the soil surface with pounded water.

どを配合した資材である. セメント系固化剤とは異なり pH 9 ～ 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成分を含まない．また，散布から固化の開始まで 6 時間程度あるため，簡易プラントによる資材の練り込みが可能となるが，剥ぎ取りができる十分な強度の発現まで 1 週間程度要する.

2.4.2 セメント系固化剤

酸化カルシウムを主成分とし，水を加えることで水和反応によって固化する．固化物は pH 13 程度の高アルカリ性となり，六価クロムの溶出といった問題があることから，農地への散布は注意を要する．また，固化の反応時間は概ねマグネシア系固化剤と同様である.

2.4.3 石膏系固化剤

半石膏または無水石膏は水と反応して二水石膏になり，その結晶がからみ合うことで凝固する．pH は中性域から弱アルカリ性域で，凝固に要する時間も他の資材より早いが，上記の資材における固化反応とは異なり，水に浸かると溶出する欠点がある．そのため，湿潤な状態の農地や散布後に降雨があった場合は凝固しない．また，資材に硫酸塩を含むため，嫌気性の環境下で硫化水素を発生する恐れがあり，剥ぎ取った土壌の保管状態に細心の注意を払う必要がある（農林水産省, 2013）.

2.5 急結固化剤の開発

上記の固化剤は降雨や湿潤なほ場では固化反応が遅れ，除染工事の進捗に影響を与える場合がある．そこで，これらの問題に対処するため，急結固化剤を開発した（若杉ら, 2013b）.

本資材は水硬性物質（高炉スラグ粉末やセメント）に反応促進剤（カルシウムアルミネート），及び凝集調整剤を配合した資材である．pH は 11 程度と弱アルカリ性で，10 秒程度で固化が開始し，養生期間は 1 日程度と短いのが特徴である（Photo 4）．そのため，凸凹のある地表面や傾斜地においても均一に固化する．さらに，本資材は水を取り込みながら固化する特徴があり，降雨や湿潤なほ場条件が固化反応に及ぼす影響は小さく，計画的な事業の推進が可能になる（Photo 5）.

3. 油圧ショベルを用いた剥ぎ取り工法発

広域に汚染された農地を迅速に除染するには，油圧ショベル等の建設機械の使用が不可欠となる．一方で国や市町村が行う除染事業では，表土の剥ぎ取り厚さの施工管理基準は ±10 mm を規格値としており，一般的な建設機械の操作ではその精度で作業することは極めて難しい．そのため，固化剤散布による施工管理技術に加えて，厚さを高い精度で制御しながら剥ぎ取る工法を導入することで，より除染事業の信頼性は高まると考えられる.

3.1 一般的な剥ぎ取り工法

除染事業では，油圧ショベルを用いて剥ぎ取り作業が行われている．一般的な油圧ショベルの操作方法は，アームの関節を支点に振り子のような動き方で掘削する．この操作では，地面に対して水平にバケットを動かすことが難しく，施工精度 ±10 mm での剥ぎ取りは非常に困難である（Photo 6）.

3.2 ワイパー工法の開発

3.2.1 操作方法

新たに，油圧ショベルのバケット底面を掘削面に押し当て，旋回機能によって左右にスイングし，バケットの側面を使って横方向に剥ぎ取っていく工法（ワイパー工法）を開発した（Photo 7）（若杉ら, 2013c）．なお，剥ぎ取りは油圧ショベルの車両幅分行い，徐々に前方へ移動しながら，汚染土壌を筋状に集める．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．さらに，オ

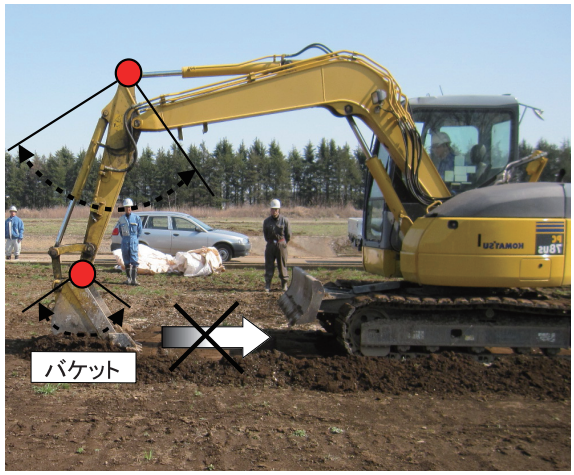


Photo 6　一般的な油圧ショベルの操作.
Standard bucket operation of a hydraulic excavator.



Photo 7 ワイパー工法.
Lateral swinging bucket operation of a hydraulic excavator for the surface layer stripping.



Photo 8 バケットのエッジ板.
An attachment board of a hydraulic excavator bucket to strip uniformly the surface layer.

ペレーターは目視で剥ぎ取り厚さを確認しながら旋回操作のみをすればよく，迅速かつ容易に剥ぎ取りが可能になる．なお，表層固化することによって，剥ぎ取り時に汚染土壌が細分化して下層土に混ざるのを防ぐ効果もある（Photo 7）．

3.2.2 バケットの改良

剥ぎ取り厚さをより確実に制御するため，バケット側面にエッジ板を取り付ける改良を行った（Photo 8）．エッジ板の高さを剥ぎ取り厚さと同一に調整することで，バケットを地面に置くと設定した深さに板が入り込む．この状態でワイパー工法による旋回操作を行えば目標とする厚さで確実に剥ぎ取りが行える．

4. 土壌回収機の開発

4.1 一般的な剥ぎ取り土の回収方法

剥ぎ取られた汚染土壌は，1 m^3 の耐候性フレキシブルコンテナーバック（フレコンバック）に油圧ショベルによって詰め込まれ，所定の場所で保管される．油圧ショベルのバケットで土を回収する場合，少量の土壌ではバケットに入らないため，ある程度の体積の土壌を集積してから回収してフレコンバックに入れる．農工研内の試験ほ場において，3 cm の厚さで剥ぎ取った土壌をフレコンバックに入れて搬出した結果，回収した土量は 1.6 倍になり，5 cm の剥ぎ取り厚さと同等の容積になっていた（若杉・原口, 2012）．このように，剥ぎ取った土壌を集めながらフレコンバックに入れる作業を繰り返すと，回収対象以外の土壌も回収してしまい排土量の増加を招きやすい．さらに，頻繁な運土は汚染されていない土壌との混和を招き除染率を低下させる要因となる．

4.2 土壌回収機

汚染土壌を最小限の運土でフレコンバックに回収するため，土壌回収機を開発した．これにより，剥ぎ取った土壌の取りこぼしや回収時の土量の増加が大幅に減少する．

4.2.1 スクリューコンベア式土壌回収機（若杉ら，2011）

本機体は油圧ショベルをベースに，土壌を回収しながら破砕して集めるバケット部と後背部に土壌を送り込む輸送部，及びフレコンバック用アタッチメントが装備されている（Fig. 1）．バケットは前面に大きな土塊，雑草の株や根を破砕するためのハンマーナイフとバケットの内部に入った土壌を輸送部に送り出す横軸のスクリューコンベアが備わっている．輸送部は縦スクリューコンベ

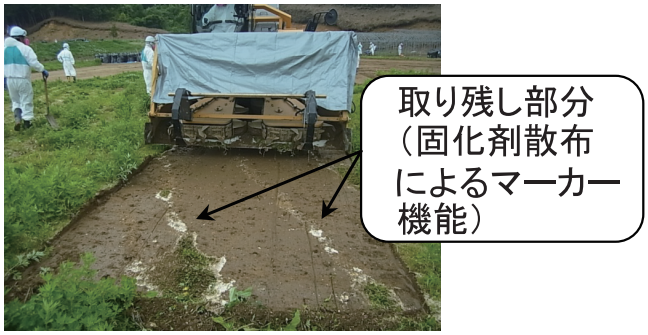


Photo 9 スキマー工法による剥ぎ取り.
Stripping the surface layer using the “Skimmer” method.

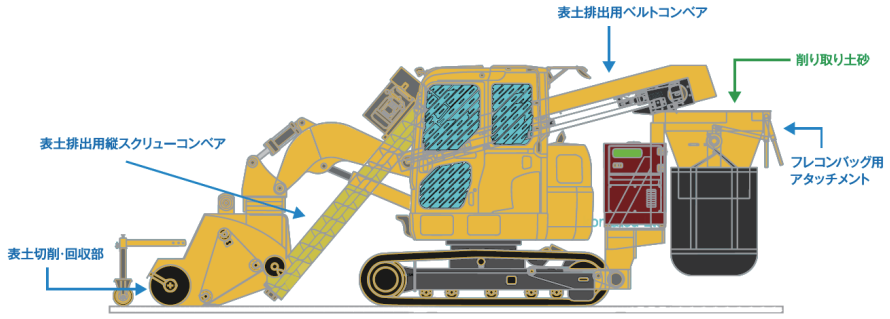


Fig. 1　スクリューコンベア式土壌回収機.
A hydraulic excavator equipped with screw and belt conveyors to store the stripped soil.

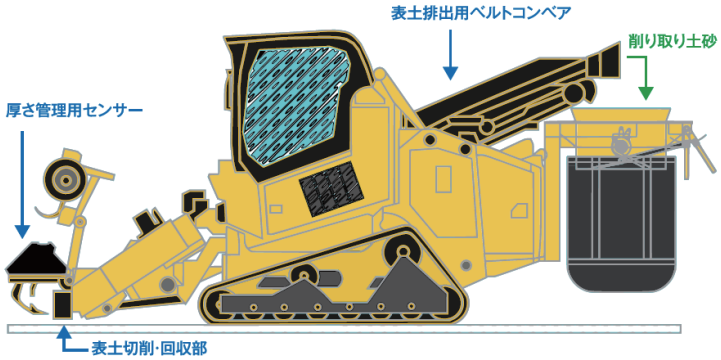


Fig. 2　スキマー工法.
A hydraulic excavator specially designed for stripping and storing the surface layer soil called “Skimmer”.

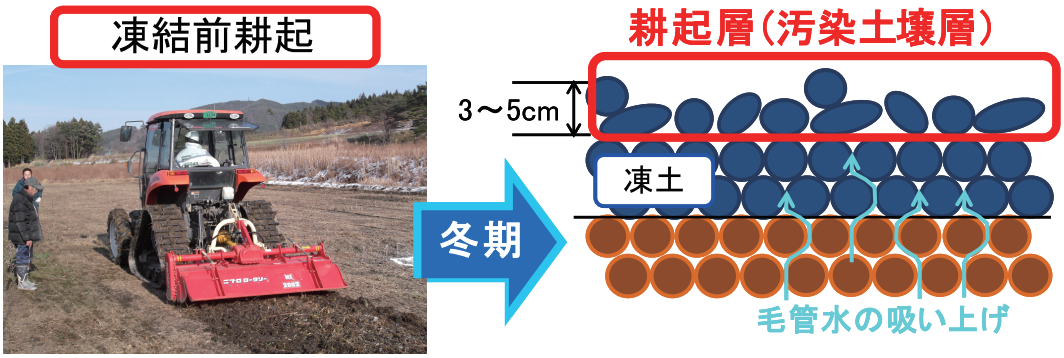


Fig. 3　冬期剥ぎ取り工法の概要.
A schematic procedure of stripping the frozen surface layer for decontamination in winter.

アとベルトコンベアによって構成されており，粉塵が発生しないように閉鎖され，フレコンバックに土壌が回収される仕様になっている．

4.2.2 剥ぎ取り及び土壌回収専用機（スキマー工法）

本機は表層土壌 5 ～ 100 mm の厚さを効率的に剥ぎ取ることを目的に開発された専用機（ドップシュタット社製）である（Fig. 2）．これは欧州等での浄水場の緩速砂濾過池の堆積砂を回収するために使用されてきた実績があり，作業部先端に剥ぎ取り厚さ管理センサーが 2 カ所に装備され，高い精度で均一に剥ぎ取ることができる．剥ぎ取られた土壌はベルトコンベアによってフレコンバックに回収される．本機は剥ぎ取り厚さの精度が高く，剥ぎ取りと回収作業を同時に行うことも可能で作業の迅速化と効率化が図れる（Photo 9）．一方で，センサーによる管理を行っても全ての凸凹には対応できないことから，前述の固化剤散布による施工管理を組み合わせることで，より精度の高い除染が可能となる．なお，取り残し部分は小面積であるため，人力で確認しながら回収する．

5. 冬期における剥ぎ取り工法の開発

放射線量が高い福島県飯舘村や川俣町などの山間部の多くは冬期（12 月下旬 ～ 3 月まで）の最低気温が概ね −5°C 以下になり，表層から徐々に凍土が形成される．含水率の高い凍土は強度が高く，油圧ショベルを用いて数センチの表層土を削り取るのは困難なため，この期間に除染事業が滞る可能性が高い．そこで，凍土が形成される冬期の表土剥ぎ取り工法を開発した（若杉ら, 2012）．

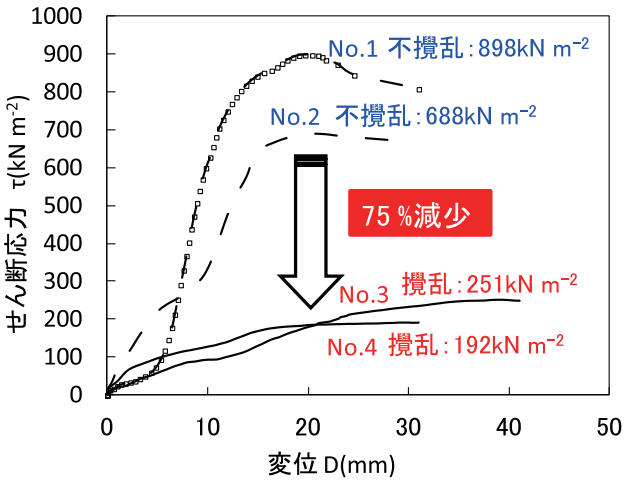


Fig. 4　凍土の一面剪断応力.
Shearing stress vs. displacement for non-destructive and destructive (rotary-tilled) soils.

Table 1　現地実証試験結果.
Stripping experiments of the frozen surface layer for non-tilled and rotary-tilled soils.

	無対策区		耕耘区（新工法）		
	①	②	①	②	③
施工日	2/8	2/19	2/8	2/19	2/19
区　画	2×2 m	2×2 m	2×2 m	2×2 m	2×8 m
作業時間	7 分	7 分	2.5 分	2.8 分	8.7 分
作業効率 (h 10 a^{-1})	29	29	10	12	9
土壌硬度 (kgf cm^{-2})	63	43	29	41	35

土壌硬度は剥ぎ取り前の地表を山中式硬度計によって計測

5.1 冬期剥ぎ取り工法の概要

本工法は土壌水分の毛管上昇によって強固な凍土形成が促されることに着目し，剥ぎ取る対象の土壌表層を凍結前に耕起し，多くの空隙を持つ土塊状態を作り出す．それによって，毛管による水分上昇を抑制し，強固な凍土の形成を制御することで，凍結したほ場において汚染された表層土壌を容易に剥ぎ取ることをねらいとしたものである（Fig. 3）．また，剥ぎ取り作業は一般的な工法の場合，10 a あたり 5.6 ～ 22.3 h（農林水産省, 2013）と多くの時間を要するが，耕起は 10 a あたり 1 h 程度で実施できるため，凍結前に耕起することで土壌凍結によって剥ぎ取りが困難であった地域においても事業の推進が可能となる．以下にその工程を記する．

5.1.1 耕起（土壌凍結前）

作業はロータリーハローやバーチカルハローなどを用いて，剥ぎ取り対象とされる深さ 3 ～ 5 cm 程度で実施する．その際，細かく砕土しないように刃の回転数などを調整する．なお，3 cm 程度の浅い耕起はバーチカルハローが適している．また，耕起から剥ぎ取りまでの期間中に，降雨や積雪などで耕起層の構造が徐々に失われる可能性がある．そこで，耕起の際にほ場内に繁茂する雑草の裁断，鋤込みなどによって土塊構造の維持を図る．

5.1.2 剥ぎ取り（土壌凍結後）

土壌凍結後，建設機械等を用いて事前に耕起した層を剥ぎ取る．耕起層以下は板状の強固な凍土層になっており，剥ぎ取る機械のバケットやブレードが深く入り込むことがないため，ワイパー工法のような特殊な操作を必要としない．

5.2 予備試験

後述の福島県飯舘村の現地ほ場において，木枠（縦 25 × 横 25 × 高さ 20 cm）を用いて不撹乱土壌を採取すると共に，同じ木枠に耕起後の土壌を詰め，凍結融解試験機を用いて槽内を −20°C の恒温管理をして凍結させた．凍結した試料は，特殊な剪断試験器で各 2 試料の一面剪断応力を測定した．その結果，不撹乱土壌の一面剪断応力は 700 ～ 900 kN m^{-2}，耕耘土壌は 200 ～ 250 kN m^{-2} で，耕耘土壌は不撹乱土壌の 1/4 程度の力で剪断が可能であることが確認された（Fig. 4）．

5.3 現地実証試験

5.3.1 試験ほ場の概要と方法

福島県飯舘村飯樋八和木地区の現地ほ場において，本工法の実証試験を実施した．耕起作業は平成 24 年 12 月 14 日，剥ぎ取り作業は平成 25 年 2 月 8 日，19 日に実施した．

耕起作業はトラクタ（76 PS）とロータリーハローを用いて約 80 m^2 を深さ 5 cm で実施し，剥ぎ取り作業はバケット容量（0.28 m^3），56.4 PS，最大掘削力 54.8 kN の油圧ショベルを用いて行った．

5.3.2 試験結果

事前耕起区の耕起作業は 10 a あたり 1.0 h であった．また，事前耕起区では，約 5 cm の耕起層は通常のバケット操作で容易に剥ぎ取られ，凍結を要因とする取り残しはなかった（Photo 10）．作業効率は 10 a あたり約 10 h で，剥ぎ取られた土塊のフレコンバックへの回収も問題はなかった（Table 1）．なお，剥ぎ取り前の地表面の空間線量は 2.8 μSv h^{-1} であったが，剥ぎ取り後は 0.5 μSv h^{-1} に低下した．

一方，無対策区では凍土をたたき割って剥ぎ取ったため，作業効率は 10 a あたり約 30 h で，事前耕起区の 3 倍の時間を要した（Photo 11）．また，一部では凍土の強度が高く，たたき割ることが困難な箇所も存在した．さらに，剥ぎ取り厚は凍土厚と同じ 10 cm であり，剥ぎ取られた土塊は大きさが 50 cm 程度でフレコンバックの回収に支障をきたした．

これらのことから，凍結前耕起による部分的な土壌凍結制御に基づく新たな冬期剥ぎ取り工法は，凍土が形成される冬期に有効な除染工法として活用できることが実証された．また，新工法は剥ぎ取られた土塊のフレコンバックへの詰め込みもスムーズに行え，さらに特殊機械を用いないことから，低コストかつ汎用性が高く，除染を必要としながら，凍土によって除染作業が停滞する地



Photo 10　新工法の剥ぎ取り状況.
Stripping the frozen rotary-tilled surface layer in winter.

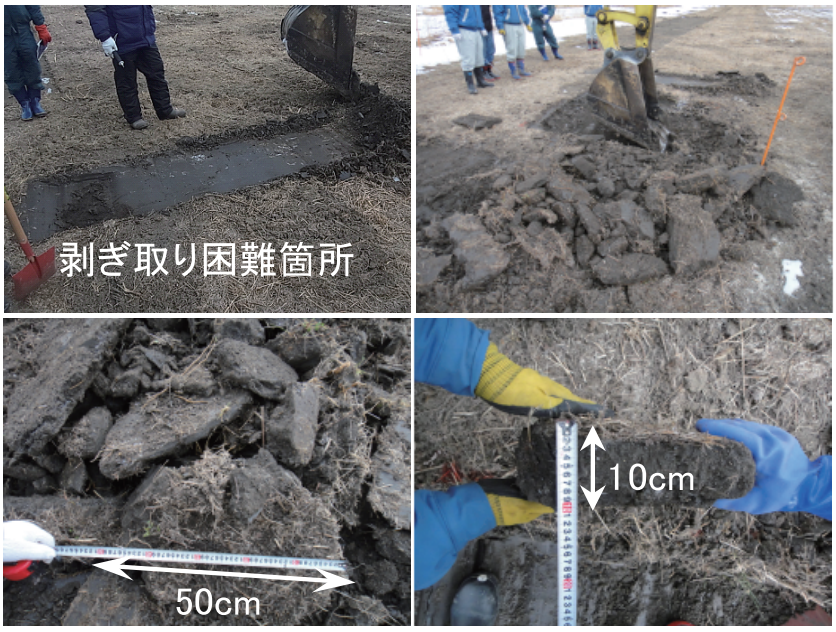


Photo 11　無対策の剥ぎ取り状況.
Stripping the frozen non-tilled surface layer in winter..

域に広く適用することが期待できる.

6. おわりに

表土剥ぎ取りによる除染工事の対象になる農地の表面は凸凹が多くあり，空間的な放射性物質濃度のバラツキも多く，施工精度の確保や営農再開の判断をする除染効果の測定は難しい．また，地域やほ場ごとに汚染深度が異なるため，現行事業のように，一律 5 cm の厚さで剥ぎ取りが行われると，必要以上に剥ぎ取りが行われる場合がある．これは農家が長年に渡って培ってきた肥沃な表土を必要以上に剥ぎ取ることになり，さらに汚染土壌の運搬や処理施設，貯蔵施設の容量に係わるコスト増も懸念される．これらの懸念は適切な施工管理技術とほ場の汚染状況に応じた適切な厚さを確実に剥ぎ取れる工法を採用することで解消できる．本稿で解説した固化剤散布による施工管理技術，油圧ショベルの旋回機能を用いて剥ぎ取るワイパー工法や土壌回収機は，精度の高い除染や剥ぎ取り厚さの制御，作業効率の向上が可能であり，上記の懸念を解消する技術であると考える．農地の除染は空間線量を下げるだけではなく，生産の場である農地から確実に放射性物質を取り除くことが重要であり，帰村した農家が除染後の農地で安心して農作物を生産し，消費者も納得できる除染が行われることを期待したい.

引用文献

環境省福島再生事務所 (2013): 平成 25 年除染等工事共通仕様書（第 6 版），http://tohoku.env.go.jp/fukushima/to_2013/data/1115ab.pdf (2014.2.5)

環境省 (2013): 除染関係ガイドライン, http://josen.env.go.jp/material/ (2014.2.5)

農研機構農村工学研究所 (2013): 放射性物質により汚染された農地等の除染に関する固化剤散布による表土削り取り工法に関する施工の手引き（案），農研機構農村工学研究所.

農林水産省 (2013): 農地除染対策の技術書，http://www.maff.go.jp/j/nousin/seko/josen/index.html (2014.2.5)

若杉晃介，原口暢朗，大内公安，阿部正直，一色　弘（2011): 特願 2011-263277 表層土壌の剥ぎ取り収集車両及びバケット.

若杉晃介，原口暢朗（2012): 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, 土壌の物理性, 121: 35–42.

若杉晃介，原口暢朗，大内公安，岡本　元 (2012): 特願 2012-2668793，冬期の汚染土壌表層の除去工法.

若杉晃介，原口暢朗，大内公安，阿部正直，一色　弘 (2013a): 特許第 5321992 号，汚染土壌表層の除去工法.

若杉晃介，原口暢朗，奥山康二，伊藤和幸，寺島　勲，渡邉　晃 (2013b): 特願 2013-210737，地盤固化方法.

若杉晃介，原口暢朗，大内公安，阿部正直，一色　弘 (2013c): 特許第 5181110 号，表層土壌の剥ぎ取り収集工法及びバケット.

要　　旨

原子力発電所の事故にともない放出された放射性物質は未耕耘の場合，農地土壌のごく表層に留まる．そのため，地表から 2，3 cm の土壌の剥ぎ取りは迅速かつ効果的な除染方法である．一方で建設機械の従前の操作，及び一般的な施工管理の下では，剥ぎ取り厚さの制御は困難であり，排土量や施工費の増大，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，白色の固化剤を事前に散布することで確実な施工管理を行い，かつ油圧ショベルの旋回機能を利用することで剥ぎ取り厚さを制御する一連の技術を開発した．さらに，福島県の山間部は冬期の気温が氷点下になるため，厚い凍土層が形成され，表土の剥ぎ取りが困難になる．そこで，事前に耕耘を行い表土を大きな土塊状態にすることで，冬期でも剥ぎ取りができる工法を開発した．

キーワード：農地除染，油圧ショベル，土壌固化剤，凍土