

農地土壌の放射性物質除去技術
(除染技術) 作業の手引き 第1版

平成24年3月

農林水産省

目 次

I	はじめに	1
II	基本的な表土削り取り	5
III	固化剤を用いた削り取り	17
IV	牧草地等での表土剥ぎ取り	27
V	水による土壌攪拌・除去	39
VI	反転耕	53
参考資料 1	反転耕に関する技術の詳細	63
参考資料 2	土壌の放射性セシウム濃度と空間線量率の 関係	73

I はじめに

I はじめに

この度の東京電力福島第一原子力発電所の事故に伴い、福島県を中心に広範囲の農地が放射性物質に汚染された。我が国の農地が放射性物質に高濃度で汚染される事態は初めてのことであり、面積が大きく、食料生産の基盤である農地土壌を除染する技術を開発するため、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できたところである。

試験研究機関での予備試験を踏まえ、地目（水田、畑）や汚染程度等を考慮した上で、福島県の現地圃場等において、表土の削り取り、水による土壌攪拌・除去、反転耕による汚染土壌の埋め込み、及び高吸収植物による除染等の実証試験を行った。さらに、除染に伴って生じる汚染土壌や植物体の処理・保管技術についても研究を行った。これら各技術の詳細、得られた知見より整理された農地土壌除染技術の適用の考え方について、平成 23 年 9 月 14 日に公表を行ったところである¹⁾。

ここでは、開発された技術のうち、表土の削り取りとして「基本的な表土削り取り」、「固化剤を用いた削り取り」、「牧草地等での表土剥ぎ取り」について、さらに「水による土壌攪拌・除去」、「反転耕」について、それぞれの作業の手順や準備する用具や機器、留意事項等について示している。それぞれの除染技術の適用の考え方は、表 1 に示す。

除染関係ガイドライン²⁾（環境省、平成 23 年 12 月 14 日）では、土壌の除染等の措置として、農用地の除染方法について示されている。本手引きは、農用地の除染の具体的な作業内容等を示したものである。ただし、本手引きの内容は農林水産省がこれまでに実施した現地試験の結果に基づいて記載しており、ここで示す手順や使用する用具が必須ではなく、また国による除染に係る財政措置等の適用範囲を示すものではないことに留意されたい。なお、今後の実証試験等のデータの蓄積に伴い、内容は随時改訂していく予定であることを付記する。

また、除染作業におけるその他の留意点等については、関係法令を遵守するとともに、除染関係ガイドライン²⁾（環境省、平成 23 年 12 月 14 日）、除染等業務に従事する労働者の放射線障害防止のためのガイドライン³⁾（厚生労働省、平成 23 年 12 月 22 日）を参照し、作業者の安全には十分配慮されたい。

○関係する研究機関

独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構（農研機構）、独立行政法人農業環境技術研究所（農環研）、独立行政法人産業技術総合研究所（産総研）、独立行政法人日本原子力研究開発機構（原子力機構）、福島県農業総合センター

参考文献

- 1) 農林水産省：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>
- 2) 環境省：除染関係ガイドライン、<http://www.env.go.jp/jishin/rmp.html>
- 3) 厚生労働省：除染等業務に従事する労働者の放射線障害防止のための省令の公布及びガイドライン制定、<http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r9852000001yy2z.html>

表 1：農地土壌除染技術適用の考え方（2011 年 9 月 14 日公表資料¹⁾ に加筆修正）

土壌の放射性セシウム濃度	畑		水田	
～5,000 Bq/kg	耕起されていないところでは、●表土削り取りを選択することが可能。農作物への移行を可能な限り低減する観点、また、空間線量率を下げる観点から、必要に応じて○反転耕、○移行低減栽培技術、●水による土壌攪拌・除去の手法を適用。			
5,000～10,000 Bq/kg	地下水位		土壌診断・地下水位	
	低い場合（数値は検討）	高い場合（数値は検討）	低地土	低地土以外
	●表土削り取り ○反転耕	●表土削り取り	●表土削り取り ●水による土壌攪拌・除去 ○反転耕（耕盤が壊れる）	●表土削り取り ●水による土壌攪拌・除去 （低地土より効果低） ○反転耕（耕盤が壊れる） （地下水位が低い場合のみ適用）
10,000～25,000 Bq/kg	●表土削り取り		●表土削り取り	
25,000 Bq/kg～	●表土削り取り。ただし、高線量下での作業技術の検討が必要。 （例えば土ぼこりの飛散防止のための固化剤の使用）		●表土削り取り。ただし、高線量下での作業技術の検討が必要。 （例えば土ぼこりの飛散防止のための固化剤の使用）	

注）●は廃棄土壌が出る手法、○は出ない手法。

Ⅱ 基本的な表土削り取り

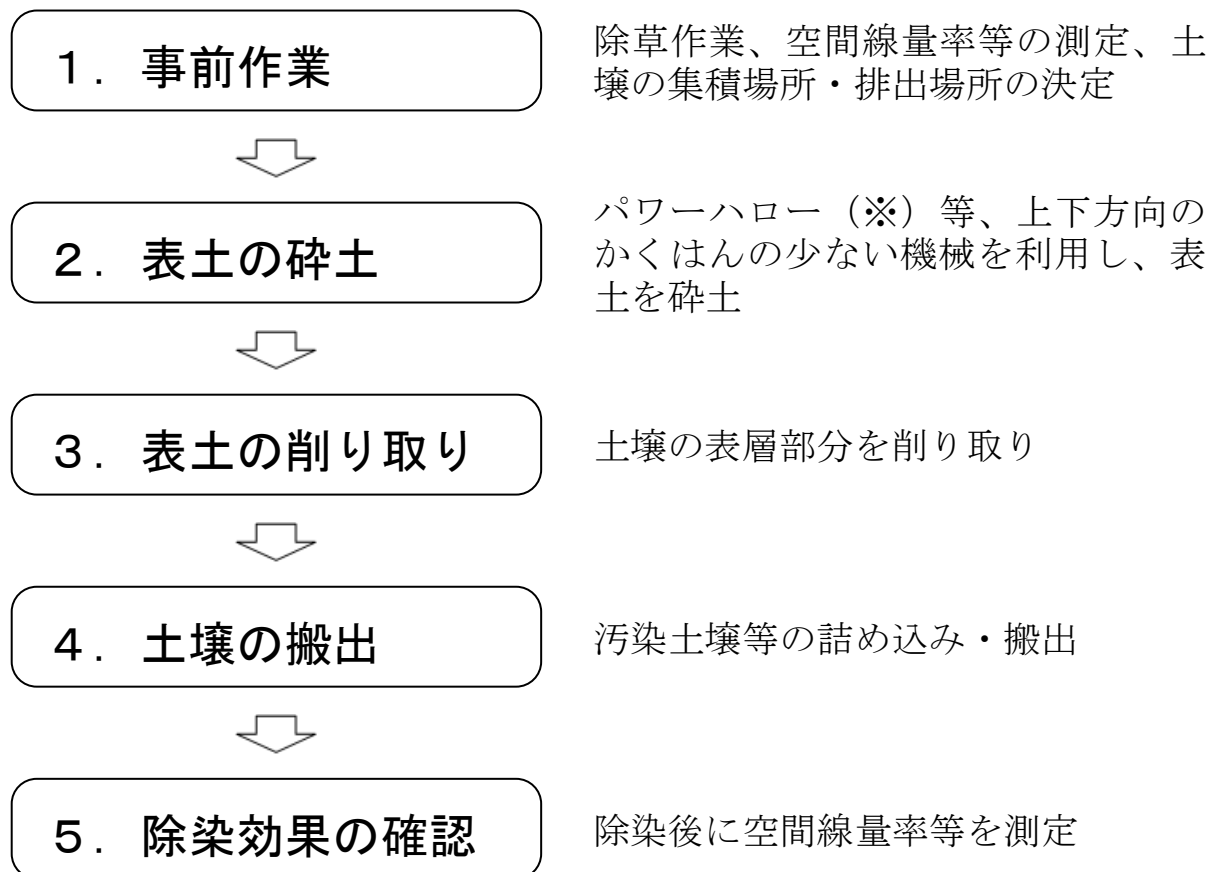
Ⅱ 基本的な表土削り取り

○概要

放射性セシウムが吸着された表土を削り取りにより除去する手法。放射性物質降下後に耕起されていないほ場であれば適用可能。

表土削り取りは、耕起されていない農地の地表面付近の放射性物質を除去する技術であり、大きな効果が期待できるのは最初の1回である。ただし、削り残しや汚染土の取りこぼし等がある場合は、再度の実施による効果が期待できる。

○作業の流れ



※パワーハロー：国内ではバーチカルハローとして販売されている

○詳細

1. 事前作業

(1) 準備するもの

- ・刈払い機
- ・フレキシブルコンテナ
- ・シンチレーション式サーベイメータ等
- ・コンベックス巻尺・標尺等
- ・採土器
- ・土壌サンプル保管用の容器

※フレキシブルコンテナについては一定期間の保管を考慮し、耐候性のものを選択する。

(2) 除草

- ・農地が雑草で覆われている場合は、除草を行う。雑草の処理の参考とするため、刈り取った雑草の空間線量率を計測しておく。
- ・処理した雑草は定められた場所に仮置きし、フレキシブルコンテナ等に入れる、シートをかぶせる等飛散しないようにする。また、搬出する場合はフレキシブルコンテナ等の容器ごと搬出するなどし、周囲に飛散しないよう注意する。
- ・再度雑草が繁茂しないように、除草後は表土除去作業をすみやかに行うことが望ましい。
- ・除草剤を使用した場合、除染実施時には地表面に残った雑草残渣を除去する。
- ・除草時に発生するほこりを吸い込まないように注意する。

(3) 土壌の放射性物質の濃度及び空間線量率の測定

- ・除染実施前に空間線量率及び必要に応じて土壌の放射性セシウム濃度の測定を行い、除染後の比較対象とする。なお、サーベイメータ（CsI 線量計など）を用いた市販の簡易測定キット等を利用し、あらかじめ空間線量率と放射性セシウム濃度の相関関係を整理しておくことで、その場で比較的容易に空間線量率から濃度の推計が可能である。また、巻末に参考資料として、空間線量率から土壌の放射性セシウム濃度の推計のための回帰式を掲載したので、参考にすることが可能である。
- ・土壌の放射性セシウム濃度の測定は、ほ場内の複数点（例：一筆で 5 点）で、耕起による土壌のかくはんや作物の根がはる深さを考慮し、水田は約 15 cm、畑地は最大 30 cm の深さまでの土壌を採取して行う。空間線量率の測定は、ほ場内を格子状（例：10 m あるいはそれ以上のメッシュ）に区切り、ほ場表面から 1 cm、1 m の高さの位置で実施する。
- ・事前の調査により、ほ場内で局所的に空間線量率の高い地点がある場合は、その箇所の除染が確実にできるよう、特に除染実施者に確実に同情報が引き継がれる

よう注意する。

(4) ほ場内の土壌の集積場所等の決定

- ・作業を開始する前に、ほ場内でどのように土を運び、どの位置に集積してほ場外に運び出すかをあらかじめ決めておく。
- ・平らな場所でダンプトラック等が進入可能で、フレキシブルコンテナ等の容器に詰める作業を実施することが可能な場所を確保する。

2. 表土の砕土

(1) 準備するもの

- ・パワーハロー等、土壌の上下方向のかくはんの少ない砕土機（図 1）
- ・トラクター（パワーハロー等作業機の作業幅に応じた出力のものを用いる。キャビン付き。）

(2) 砕土作業

- ・土壌を膨軟にするために、削り取り厚に相当する深度で砕土を実施する（飯舘村での現地試験では約 5 cm）。砕土作業は、土壌が乾燥している場合は、ほこりが発生しやすい。このため、土質にもよるが、砕土が可能であり、かつ土が塊状となりバラバラにならない程度のほこりが発生しにくい土壌水分の状態のときに作業を行うことが望ましい。
- ・作業時のオペレータのほこりによる被曝を防ぐため、キャビン付きトラクターを使用する。ほ場全面の砕土を行い、砕土していない部分が残っていないことを確認して作業を終了する。
- ・飯舘村での現地試験の場合、作業能率は 10 a あたり 15～20 分程度であった。トラクターのオペレータによる一人作業が可能であるが、砕土深さの調節など補助者が必要である。



図 1 パワーハローを装着したキャビン付きトラクター

3. 表土の削り取り

(1) 表土の削り取り

ここでは、3つの手法について述べる。ケース1は、農機（トラクター）を利用した削り取り、ケース2は建設機械を利用した削り取りの手法である。ケース3については、ケース2の手法を特注品のバケットを用いて実施した事例である。

<ケース1：農家が保有する農機を利用した削り取り>

a. 準備するもの

- ・リアブレード（図2）
- ・フロントローダ（図3）
- ・トラクター（リアブレードの作業幅、フロントローダの能力に応じた出力のものを用いる。キャビン付き。）

b. 削り取り

- ・削り取り作業は、砕土終了後ただちに実施する。あらかじめ決定したほ場内の集積場所に表土を集めるため、まずリアブレードで土を削り取る。走行距離を長くして一度にたくさんの土を削ると、ブレード部分に溜まった土でブレードが浮き上がったりするなどして、汚染土壌を十分に取りきれない場合がある。このため、ブレードで運べる土の量を考慮し、1回の走行距離を短くし複数回走行することにより土を削り取る（図4）。
- ・リアブレードでの作業ができる範囲が終了したところで、フロントローダを使用してリアブレードから横にこぼれた土や、畦畔際の土を削り取り、集積する。
- ・作業後に作業前と同じ方法で空間線量率の測定を行い、空間線量率が十分低くない場合は、再び砕土し、表土を削り取るといった手順で作業を行う。その際には空間線量率が高い部分のみを再度除染するなど、削り取り厚の増加による作土層の減少に留意する。
- ・飯舘村での現地試験の場合、表土削り取りの作業能率は、リアブレードでの削り取りが10 aあたり40～50分程度、フロントローダでの集積が10 aあたり20～25分程度であった。作業としてはトラクターのオペレータによる一人作業が可能であるが、削り取り後の空間線量率の計測など、補助者が必要である。



図2 リアブレードを装着したキャビン付きトラクター



図3 フロントローダを装着したキャビン付きトラクター

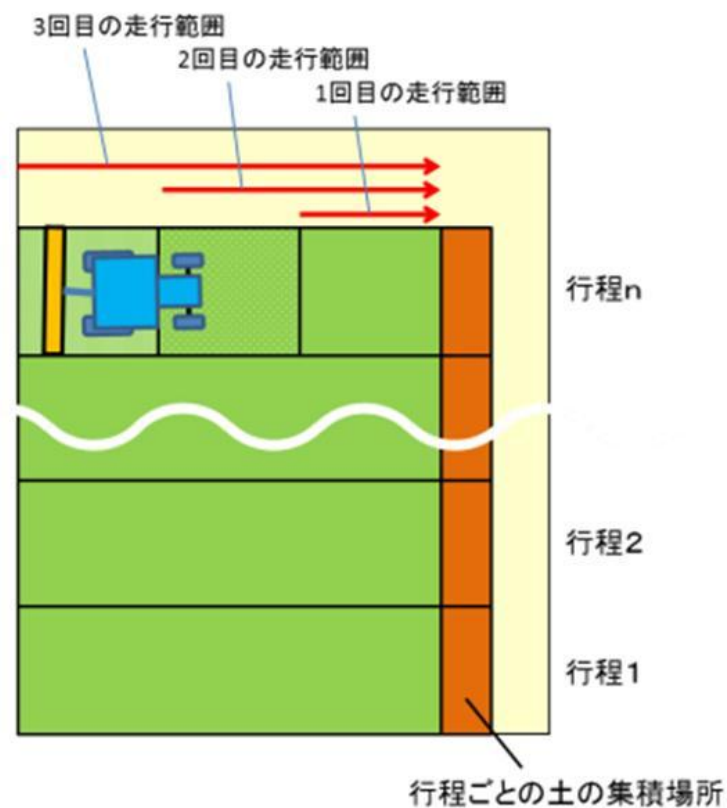


図4 リアブレードによる表土の削り取り方法

＜ケース2：建設機械を利用した削り取り＞

機械前部での作業（フロント作業）が可能な建設機械を用いることで、土壌表面を効率的に削り取ることが可能である。ただし、作業方法により、削り取り厚が必要以上に大きくなるので、後述するバックホーのバケット部分を左右にスイングする方法を採用するなど十分な注意が必要である。なお、農地特に水田の地盤は軟弱であり、進入路が狭いため、建設機械のサイズが限定される。

a. 準備するもの

- ・バックホー（0.28 m³） 2 台（キャビン付き）

b. 削り取り

バックホーのバケット部分のスイング運動で表層土を削り取り、もう 1 台のバックホーで削り取った土を収集（集積）する。

- ・バックホーのバケット部分を地表面に押し付け、左右にスイングすることによりバケット底部で削り取りを行う（特許出願中）（図 5）。削り取った土壌がショベルのキャタピラに踏まれないようにショベル幅以上はスイングさせない。この削り取り作業では、機械本体が停止しているため動作が安定し、かつオペレータが作業を目視で確認しやすい。
- ・さらに、バケット部分に削り取り深さを示すガイドを付属させることにより、目標とする厚さ（現地試験では約 3 cm）に制御しやすくなる。
- ・農地特に水田では、ウネとウネ間や収穫機の旋回部などに凹凸がある。上記による削り取り作業は、農地の凹凸にあわせてできる限り薄く丁寧に削り取る。
- ・固化剤を使用して白色に着色されている場合（例：飯舘村の現地試験で用いたマグネシウム系固化剤）、削り残しは目視で判別可能であり、それらの除去を行う。
- ・マグネシウム系固化剤を用いた飯舘村における現地試験において、10 a あたりの排土量は約 40 m³であり、推定された削り取り厚さは約 4 cm であった。
- ・削り取った土をもう 1 台のバックホーで収集・集積し、集積した土をフレキシブルコンテナに詰めて搬出する。
- ・飯舘村での現地試験より、1 日 6 時間作業した場合、削り取り及び収集（集積）対象の農地面積は 1 日あたり約 1,200 m²と推計された（マグネシウム系固化剤を用いた場合）。



図 5：バックホーによる削り取り（左）と集積及び搬出（右）
（固化剤を散布したほ場での試験）

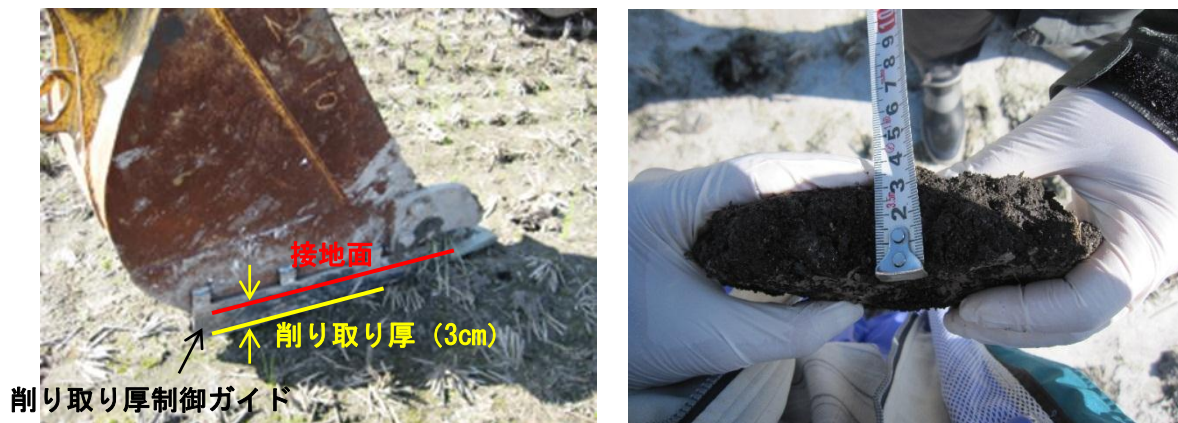


図6：バケット部分へのガイドの取り付け（左）と削り取られた土壌（右）
（固化剤を散布したほ場での試験）

<ケース3：建設機械を利用した削り取り（吸引による収集）>

※本手法は、<ケース2>の手法を特注品のバケットを用いて実施した事例

a. 準備するもの

- ・バックホー（0.28 m³）2台
- ・吸引装置が接続可能なバケット
- ・バキューム車1台（容量 6.9 m³）

b. 削り取り

バックホーのバケットをバキューム車に接続し、スイング運動による削り取り・吸引による収集（集積）を同時に行う。もう1台のバックホーは削り取りないしバキューム車に集積した土のフレキシブルコンテナへ詰め込み作業などを行う。なお、飯舘村の現地試験で使用したバケットは特注品である。

- ・バックホーのバケット部分を地表面に押し付け、左右にスイングすることで削り取りを行うとともに、この土をバケット内に誘導し、バキューム車により吸引・収集する。削り取った土壌がショベルのキャタピラに踏まれないようにショベル幅以上はスイングさせない。
- ・また、もう1台のバックホーにより削り取られた土を、上記により吸引・収集することもできる。
- ・バケット（特許出願中）は、バキューム車の吸引ホースを接続するジョイント部が付属するとともに、バケット内にハンマーナイフ式カッターを内蔵し、砕土及び稲株などを粉碎し、吸引ダクトへ誘導する構造。これにより、削り取り・集積・搬出の3行程を1行程で行うことが可能であり、かつ取りこぼしが発生しにくい。固化剤を使用して白色に着色されている場合（例：飯舘村の現地試験で用いたマグネシウム系固化剤）、削り残し部は目視で判別可能。
- ・マグネシウム系固化剤を用いた飯舘村における現地試験において、10 aあたりの排土量は約 30 m³であり、推定された削り取り厚さは約 3 cmであった。削り取り・収集（集積）が同一工程になるため、厚さはケース2より小さかった。

- ・飯舘村での現地試験より、1日6時間作業した場合、削り取り対象の農地面積は、1日あたり約1,000 m²、バキューム車タンクに集積した土を別の運搬車等への積み込み作業の対象となる農地面積は1日あたり約1,000 m²と推計された（マグネシウム系固化剤を用いた場合）。



図7：バケット部分の改良（左）と表土の削り取り（右）

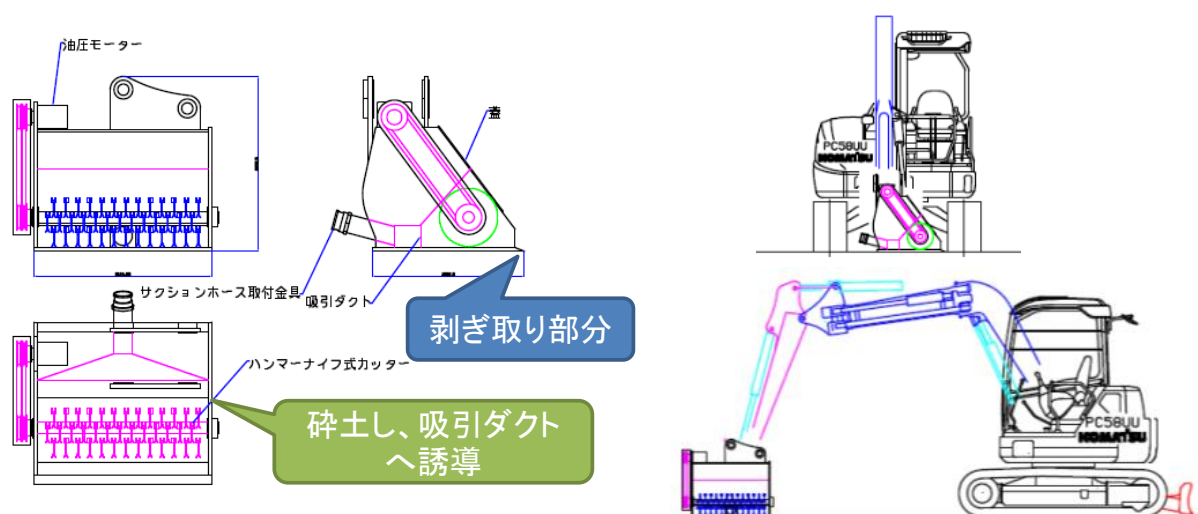


図8：バケット部分の構造

※ケース1～3についての留意事項

- ・集積の過程で、削り取った土が削り取っていないエリアに集積されると、（目印でもない限り）削り取りを実施していないエリアの元の地表面がわからなくなる。このため、あらかじめ決めておいた場所に排土を集積するなどして、除染を実施した場所とそうでない場所の区別を明確にする。
- ・排土板等による集積作業では、運搬しきれない土の発生による取りこぼしが発生した場合、同じ場所を複数回走行することにより地表面を削り取る可能性がある。このた

め、集積作業における削り取り厚さの増大に十分な注意が必要である。

4. 土壌の搬出

(1) 準備するもの

- ・バックホー（キャビン付き）
- ・フレキシブルコンテナ
- ・フレキシブルコンテナ固定機器

※フレキシブルコンテナについては一定期間の保管を考慮し、耐候性のものを選択する。

(2) 詰め込み・搬出

- ・削り取った土壌を、バックホー等を用いてフレキシブルコンテナに詰め込み、搬出する。
- ・削り取った土を収集する際の取りこぼしを防ぐためには、例えば、固化剤等を使用した目視による確認や<ケース 3>で示した吸引機能を持ったバケットの使用などの工夫が考えられる。
- ・管理のために、除去土壌等を入れた容器の表面（1 cm 離れた位置）の空間線量率を測定する。

5. 除染効果の確認

- ・作業後に空間線量率及び必要に応じて土壌の放射性セシウム濃度の測定を行い、除染前の結果と比較する。
- ・空間線量率、土壌の放射性セシウム濃度の測定は、作業前と同じ方法、同じ測定器で行う。

※飯舘村における現地試験により、以下の除染効果が確認されている。

<ケース 1>

- ・土壌の放射性セシウム濃度（15 cm 深さ）は、10,400 Bq/kg から 2,600 Bq/kg へ低減した。
- ・ほ場の地表面の空間線量率は、7.14 $\mu\text{Sv/h}$ から 3.39 $\mu\text{Sv/h}$ へ低減した。

6. その他留意点等

(1) 作業

- ・トラクターによる作業（特に傾斜地）は、転倒事故を引き起こす可能性があるため安全フレーム付き（原則としてキャビン付き）のトラクターを用いるなど作業者の安全に十分配慮すること。
- ・作業後に、機械に付着した土はできるだけ作業現場で落とし、洗浄する場合は汚

染された土が周囲に流れ出ないように対策を施す。

（２）地力回復対策

- ・表層数センチを削り取るため、地力が低下する場合がある。削り取りを実施した後には土壌診断を実施して、堆肥、肥料及び土壌改良資材の施用量を決定することが望ましい。土壌診断の項目としては、pH、EC、陽イオン交換容量、全炭素、窒素、カリウム等が考えられる。下層土の地力が低い場合には、堆肥を施用する。下層土の pH が低い場合には、石灰などを施用する。また、必要に応じて客土を実施する。
- ・根群域の拡大のために深耕を実施する。なお、水田ではできるだけ耕盤を破壊しないよう、耕耘をやや深く行う程度とする。

（３）廃棄土壌の仮置き

- ・発生した廃棄土壌をフレキシブルコンテナに詰める場合は、紫外線等への耐久性が高い製品を使用する。また、「市町村による除染実施ガイドライン」（2011 年 8 月 26 日原子力災害対策本部）において、廃棄土壌等の仮置きについては、耐久性材料などで梱包し、遮水シートなどの上に山積みにする方法、遮水した上でまとめて地下に置き、覆土する方法が記載されている。

Ⅲ 固化剤を用いた表土削り取り

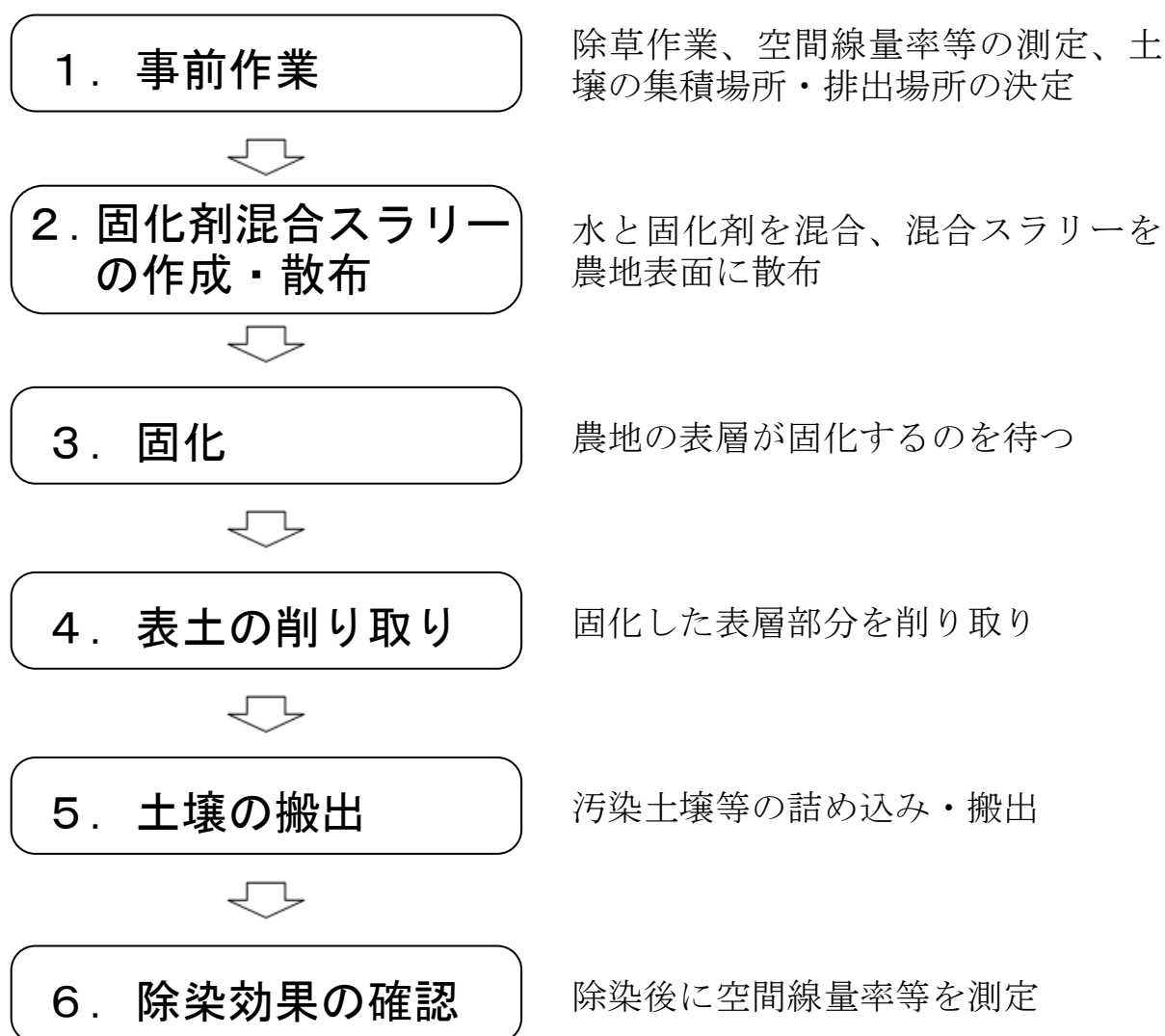
Ⅲ 固化剤を用いた表土削り取り

○概要

土を固める薬剤（土壌固化剤）を表面散布し、土壌表層を固化させてから表土を削り取る手法（特許出願中）。放射性物質降下後に耕起されていないほ場であれば適用可能。ここでは、飯舘村での現地試験で使用したマグネシウム系固化剤を用いた表土の削り取り（農村工学研究所）について記載する。その他、固化剤としてポリイオンや分子性ポリマー（日本原子力開発研究機構）もあるが、ほ場レベルでの実証は行っていない。

固化剤を用いた表土削り取りは、耕起されていない農地の地表面付近の放射性物質を除去する技術であり、大きな効果が期待できるのは最初の1回である。

○作業の流れ



○詳細

1. 事前作業

(1) 準備するもの

- ・刈払い機
- ・フレキシブルコンテナ
- ・シンチレーション式サーベイメータ等
- ・コンベックス巻尺・標尺等
- ・採土器
- ・土壌サンプル保管用の容器

※フレキシブルコンテナについては一定期間の保管を考慮し、耐候性のものを選択することが望ましい。

(2) 除草

- ・農地が雑草で覆われている場合は、除草を行う。雑草の処理の参考とするため、必要に応じて刈り取った雑草の空間線量率を計測しておく。
- ・処理した雑草は定められた場所に仮置きし、フレキシブルコンテナ等に入れる、シートをかぶせる等飛散しないようにする。また、搬出する場合はフレキシブルコンテナ等の容器ごと搬出するなどし、周囲に飛散しないよう注意する。
- ・再度雑草が繁茂しないように、除草後は表土除去作業をすみやかに行うことが望ましい。
- ・除草剤を使用した場合、除染実施時には地表面に残った雑草残渣を除去する。
- ・除草時に発生するほこりを吸い込まないように注意する。

(3) 土壌中の放射性セシウム濃度あるいは空間線量率の測定

- ・除染実施前に空間線量率及び必要に応じて土壌の放射性セシウム濃度の測定を行い、除染後の比較対象とする。なお、サーベイメータ（CsI 線量計など）を用いた市販の簡易測定キット等を利用し、あらかじめ空間線量率と放射性セシウム濃度の相関関係を整理しておくことで、その場で比較的容易に空間線量率から濃度の推計が可能である。また、巻末に参考資料として、空間線量率から土壌の放射性セシウム濃度の推計のための回帰式を掲載したので、参考にすることが可能である。
- ・土壌の放射性セシウム濃度の測定は、ほ場内の複数点（例：一筆で 5 点）で、耕起による土壌のかくはんや作物の根がはる深さを考慮し、水田は約 15 cm、畑地は最大 30 cm の深さまでの土壌を採取して行う。空間線量率の測定は、ほ場内を格子状（例：10 m あるいはそれ以上のメッシュ）に区切り、ほ場表面から 1 cm、1 m の高さの位置で実施する。
- ・事前の調査により、ほ場内で局所的に空間線量率の高い地点がある場合は、その箇所の除染が確実にできるよう、特に除染実施者に確実に同情報が引き継がれる

よう注意する。

（４）ほ場内の土壌の集積場所等の決定

- ・作業を開始する前に、ほ場内でどのように土を運び、どの位置に集積してほ場外に運び出すかをあらかじめ決めておく。
- ・平らな場所でダンプトラック等が進入可能で、フレキシブルコンテナ等の容器に詰める作業を実施することが可能な場所を確保する。

2. 固化剤混合スラリーの作成・散布

（１）準備するもの

農地における固化剤混合スラリーの表面散布は、緑化工における吹付作業とほぼ同じ工程であり、同等の機械装備で行うことが現実的と考えられる。以下、飯舘村での現地試験に基づき記載する。

- ・攪拌機および吹付ノズル（容量 2 m³、吹付専用）
- ・発電機（45 KVA）
- ・固化剤（※）
- ・水中ポンプおよびポンプ用発電機（現地で攪拌機に水を投入するため）

※以下、飯舘村の現地試験で使用したマグネシウム系固化剤の場合について記載する。



図 1：発電機（左）と攪拌機（容量 2m³）（右）

（２）固化剤混合スラリーの作成

攪拌機に水、固化剤の順に投入・混合し、固化剤混合スラリーを作成する。

- ・固化剤と水の混合比は、土壌へのスラリーの浸透の点から、重量ベースで 1 : 4 程度が望ましい。なお、土壌水分が高い場合には、配合比によるスラリーの浸透状況を確認し、必要に応じて水の添加割合を 1 : 3 まで減らす（この比率以下では、スラリーの粘性が高まり、散布作業や土壌への浸透に影響を及ぼす）。
- ・農地へ散布する固化剤の量は、混合比によらず、1 平方メートルあたり 1.5～2 kg 程度が望ましい（1 平方メートルあたり 1 kg の散布量では、スラリーが十分行き渡らず、固化が不十分となるおそれがある）。

- ・固化剤散布に至る一連の作業は、土壌が乾燥している条件が好ましい。湿潤側では、土壌表面に湛水のないことが作業の可能性を判断する目安である。



図 2：配合比の事前確認



図 3：固化剤の投入

(3) 固化剤混合スラリーの散布

固化剤混合スラリー作成後、速やかにノズルで農地へ表面散布する。

- ・攪拌機の容量等により一度に散布できる面積が決まるので、その面積に応じて予めほ場を（ロープなどで）区割りしておくとう便利である。
- ・図 1 の機械を用いて 1 日 6 時間作業した場合、1 日の散布面積は約 2,000 m²（現地試験での実績）。



図 4：固化剤混合スラリーの散布

3. 固化

散布された固化剤混合スラリーが浸透し、土壌表層が固化するまで待つ。固化に要する期間は、気温や降雨などにより変わる。以下を目安に確認することが望ましい

- ・夏期に乾燥が続けば 7 日程度で十分に固化する。春期または秋期では、固化時間は夏期より長くなる。
- ・夏期でもスラリー散布後に降雨が続くと、固化が遅れる。現地試験では、散布後に降雨が続き（9 日中 7 日降雨）、9 日後であっても固化が不完全な部分がみられた（削り取りは可能であった）。

- ・ 冬期に土が凍る（凍上する）地域では、土壌表面の固化層が圧力（凍上圧）により寸断される。この条件では、表土削り取りの際に“かさぶたを剥ぐ”ような現象が生じにくいと予想される。現象の確認が望ましい。



図 5：9 日後の固化状況（現地試験）

右上 十分に固化、右下 固化不完全（指で跡が付く）

4. 表土の削り取り

土壌表層の固化を確認後、表層を削り取る。

- ・ 削り取りの詳細については、「基本的な表土削り取り」を参照。
- ・ マグネシウム系固化剤を利用する場合、固化部分が白色に着色される。白色部分が残らないよう削り取ることで、削り残しを防止することが可能。
- ・ 固化剤の作用により、土は飛散することなくかさぶた状に剥がれ、その後の収集作業も容易になる。

5. 土壌の搬出

（1）準備するもの

- ・ バックホー（キャビン付き）
- ・ フレキシブルコンテナ
- ・ フレキシブルコンテナ固定機器

※フレキシブルコンテナについては一定期間の保管を考慮し、耐候性のものを選択する。

（2）詰め込み・搬出

- ・ 削り取った土壌を、バックホー等を用いてフレキシブルコンテナに詰め込み、搬出する。
- ・ 固化剤により土壌が着色されている場合、収集する際の取りこぼしを防ぐための

目安とすることが可能である。

- ・管理のために、除去土壌等を入れた容器の表面（1 cm 離れた位置）の空間線量率を測定する。

6. 除染効果の確認

- ・作業後に空間線量率及び必要に応じて土壌の放射性セシウム濃度の測定を行い、除染前の結果と比較する。
- ・空間線量率、土壌の放射性セシウム濃度の測定は、作業前と同じ方法、同じ測定器で行う。

※マグネシウム系固化剤を用いた飯舘村における現地試験により、以下の除染効果が確認されている。

- ・土壌の放射性セシウム濃度（15 cm 深さ）は、9,090 Bq/kg から 1,670 Bq/kg へ低減した。
- ・ほ場の地表面の空間線量率は、7.76 μ Sv/h から 3.57 μ Sv/h へ低減した。

7. その他留意点等

（１）作業

- ・トラクターによる作業（特に傾斜地）は、転倒事故を引き起こす可能性があるため安全フレーム付き（原則としてキャビン付き）のトラクターを用いるなど作業者の安全に十分配慮すること。
- ・作業後に、機械に付着した土はできるだけ作業現場で落とし、洗浄する場合は汚染された土が周囲に流れ出ないように対策を施す。

（２）固化剤の環境への影響

- ・マグネシウム系固化剤の主成分であるマグネシウムは、作物の必須元素であるとともに、カルシウムとともに農地の酸性矯正のために農地に投入される一般的な成分である（例えば、“苦土石灰”）。
- ・マグネシウム系固化剤は、セメントに比べ、固化物の pH が低い傾向にある。さらに、今回のように投入後に除去するのであれば、土壌中に残る量は微量であり、pH の上昇による作物への影響はほとんどないと考えられる。
- ・畦畔の造成や簡易舗装にマグネシウム系固化剤を用いる際は、固化剤と土を混合・転圧して用いる。しかし、ここで示したように混合スラリーを散布して土壌表層を固化する場合、処理部分の土が堅固に固化されることはなく容易に砕けるため、建設機械による固化部分の削り取りが可能である。
- ・セメントに微量の六価クロムが含まれるように、マグネシウム系固化剤の種類によっては、微量の重金属が含まれる可能性がある。事前の確認が望ましい（飯舘村で使用したマグネシウム系固化剤は、成分検査によって土壌汚染対策法上の特

定有害物質を含まないことが確認されている)。

(3) 地力回復対策

- ・表層数センチを削り取るため、地力が低下する場合がある。削り取りを実施した後には土壌診断を実施して、堆肥、肥料及び土壌改良資材の施用量を決定することが望ましい。土壌診断の項目としては、pH、EC、陽イオン交換容量、全炭素、窒素、カリウム等が考えられる。下層土の地力が低い場合には、堆肥を施用する。下層土の pH が低い場合には、石灰などを施用する。また、必要に応じて客土を実施する。
- ・根群域の拡大のために深耕を実施する。なお、水田では耕盤を破壊しないよう、耕耘をやや深く行う程度とする。

(4) 廃棄土壌の仮置き

- ・発生した廃棄土壌をフレキシブルコンテナに詰める場合は、紫外線等への耐久性が高い製品を使用する。また、「市町村による除染実施ガイドライン」(2011 年 8 月 26 日原子力災害対策本部)において、廃棄土壌等の仮置きについては、耐久性材料などで梱包し、遮水シートなどの上に山積みにする方法、遮水した上でまとめて地下に置き、覆土する方法が記載されている。

Ⅳ 牧草地等での表土剥ぎ取り

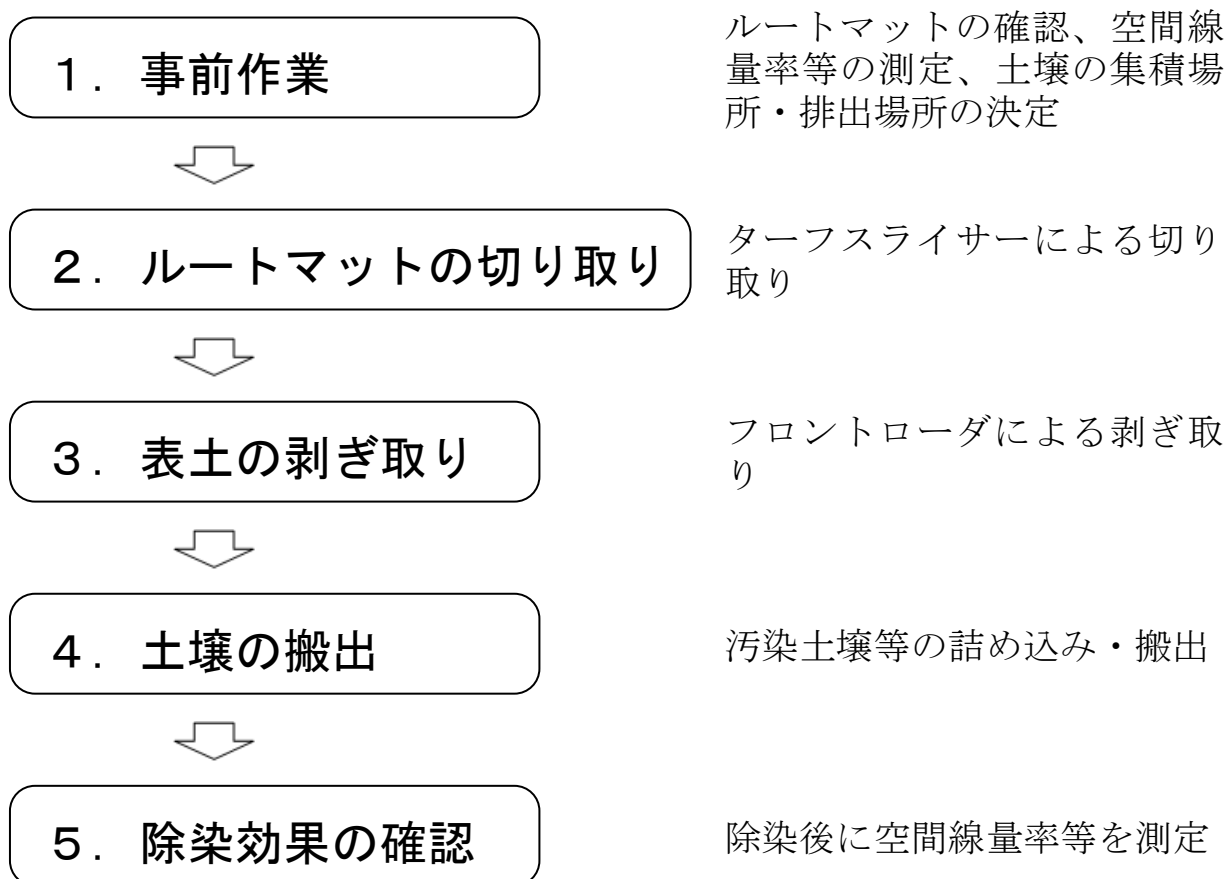
Ⅳ 牧草地等での表土剥ぎ取り

○概要

牧草が栽培されているほ場やルートマット※¹を形成する草種が優占している農用地において、ターフスライサー※²とトラクターのフロントローダを利用して、ルートマットごと表土を剥ぎ取る手法。

ルートマットの剥ぎ取りは、放射性物質降下後の農地の地表面付近の放射性物質を除去する技術であり、大きな効果が期待できるのは最初の1回である。

○作業の流れ



※¹ ルートマット：地表近くに根が密集する層。

※² ターフスライサー：芝の剥ぎ取り機。芝地や草地の草と表土とを同時に切り取る。

○詳細

1. 事前作業

(1) 準備するもの

- ・刈払い機
- ・フレキシブルコンテナ
- ・シンチレーション式サーベイメータ等
- ・コンベックス巻尺・標尺等
- ・採土器
- ・土壌サンプル保管用の容器

※フレキシブルコンテナについては一定期間の保管を考慮し、耐候性のものを選択することが望ましい。

(2) ルートマットの確認

- ・作業は、ほ場に水たまりやぬかるみがない状況で行う。
- ・ルートマットが地中 3 cm 以上に発達しており、牧草等の地上部を持ち上げた際にその面積分の土壌がこぼれ落ちずに剥ぎ取れる状態にほ場になっていることを確認する。
- ・ほ場内にこぶし大以上の石やごみなどがいないか確認し、ある場合は除去または作業場所から除外する。



図1 ルートマットの様子（左：根の張り具合、右：ターフスライサー切り取り後）

(3) 土壌濃度あるいは空間線量率の測定

- ・除染実施前に空間線量率及び必要に応じて土壌の放射性セシウム濃度の測定を行い、除染後の比較対象とする。なお、サーベイメータ（CsI 線量計など）を用いた市販の簡易測定キット等を利用し、あらかじめ空間線量率と放射性セシウム濃度の相関関係を整理しておくことで、その場で比較的容易に空間線量率から濃度の推計が可能である。また、巻末に参考資料として、空間線量率から土壌の放射性セシウム濃度の推計のための回帰式を掲載したので、参考にすることが可能である。

- ・ 土壌の放射性セシウム濃度の測定は、ほ場内の複数点（例：一筆で 5 点）で、耕起による土壌のかくはんや作物の根がはる深さを考慮し、水田は約 15 cm、畑地は最大 30 cm の深さまでの土壌を採取して行う。空間線量率の測定は、ほ場内を格子状（例：10 m あるいはそれ以上のメッシュ）に区切り、ほ場表面から 1 cm、1 m の高さの位置で実施する。
- ・ 事前の調査により、ほ場内で局所的に空間線量率の高い地点がある場合は、その箇所の除染が確実にできるよう、特に除染実施者に確実に同情報が引き継がれるよう注意する。

（４）ほ場内の土壌の集積場所等の決定

- ・ 作業を開始する前に、ほ場内でどのように土を運び、どの位置に集積してほ場外に運び出すかをあらかじめ決めておく。
- ・ 平らな場所でダンプトラック等が進入可能で、フレキシブルコンテナ等の容器に詰める作業を実施することが可能な場所を確保する。

2. ルートマットの切り取り

（１）準備するもの

- ・ トラクター（出力 40 kw～50 kw 程度のもの）
- ・ ターフスライサー（現地試験ではスガノ農機社製を使用、同型機は特注により入手可能）、PTO シャフト
- ・ ものさしまたはコンベックス巻尺（切り取り厚確認用）



図2 トラクターに装着した状態（左）と切り取り厚の調整風景（右）

（２）ターフスライサーをトラクターに装着する

- ・ ターフスライサーは、オートヒッチフレームを利用せずにトップリンクとロアリンクに直接装着する（図2）。
- ・ 図3の部分为目的の切り取り厚になっているかどうか確認する。調整が必要な場合はレバーを回して目的の厚さに調整する。なお、調整箇所は、左右2カ所にあるので注意すること（図4）。
- ・ 切り取り厚については、移動する土量を考慮して調整する。飯舘村での現地試験

では 3 cm、5 cm のはぎ取り厚で試験を実施した。より確実にセシウムを減少させたい場合ははぎ取り厚を大きくする。



図3 厚さ調整確認部分

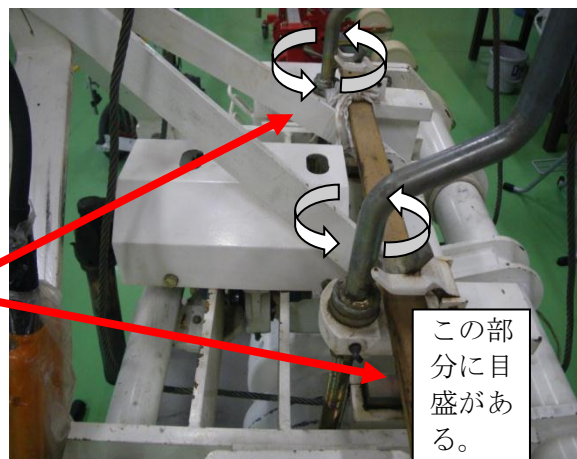


図4 高さ調整レバー



図5 刃の角度の調整

(3) 表層土壌を切り取る調整を行う

- PTO 回転数は 560 rpm(正転)とし、ターフスライサーの刃を地面に平行になるよう赤線（図4）の部分を目安に、地面と平行となるようにトップリンクで調整する。
- 変速ギヤは、走行速度が 0.5 km/h 程度となるよう調整しておく。
- 水平制御等の電子制御は使用しない。
- 切りはじめは、エンジン回転数をゆっくり上げていき、表層土壌が切り取られているのを確認してから走行速度を上げ、ターフスライサーから「カンカンと高い音が大きく聞こえた場合」や「激しい振動に戻った場合」は速度の出しすぎなので速度を落とす。また、異音が出た場合は、直ちに停止して状況を確認する。
- 5 m 位走行したら、切り取られた表層土壌が目的とする厚さになっているかを確認し、そうでない場合は切り取り厚を再度調整する。

(4) ルートマットの切り取り手法について。

- ・トラクターの運行方法は、図6のように片道耕を基本としてルートマットを切り取っていく。
- ・走行時には、ターフスライサーの表層土壌の切り取り具合を時々確認し、切れ味が悪い場合はまず速度を落とし、それでも回復しない場合は、ターフスライサーの角度や刃の状態の確認を行い、必要に応じて調整する。
- ・1列の刈り取り幅は90 cm。
- ・次列は、前回切り取った部分を10 cm 程度重ねて切り取るように走行する。
トラクターの前輪内側を前回切り取った端に合わせて走行することを目安とする（図7：白線が前回の切り取り部分、黄色点線が2回目切り取り部分となる）。ただし、使用するトラクターによるので実際に走行して確認する。
- ・3回走行すると約2 m50 cm の切り取り幅となる（図7、白線から青点線の幅）。

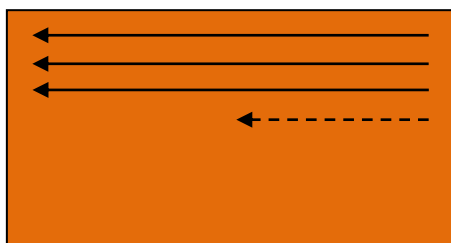


図6 片道耕

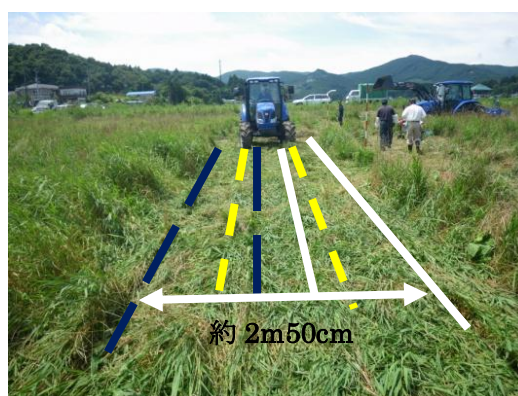


図7 次列の切り取り

3. 表土の剥ぎ取り

（1）準備するもの

- ・トラクター
- ・フロントローダ（爪なしのフロントバケット付）
- ・鎌

（2）剥ぎ取り手法

剥ぎ取り手法には2種類あり、状況に合わせて選択していく。

① 押し剥ぎ法

フロントローダのバケットを地面すれすれに維持して、切り取った表層土壌をバケットに押し込む手法（図8）。

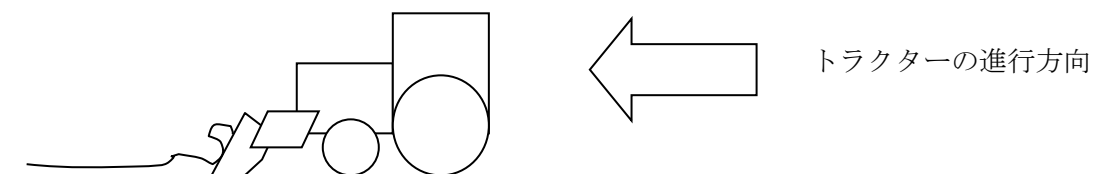


図8 押し剥ぎ法の模式図

② 引き剥ぎ法

フロントローダのバケットの先端底面で切り取った表層土壌引っかけて、手前に引き込む手法（図9）。切り取った表土はバケットとトラクター前輪の間にたまっていく。

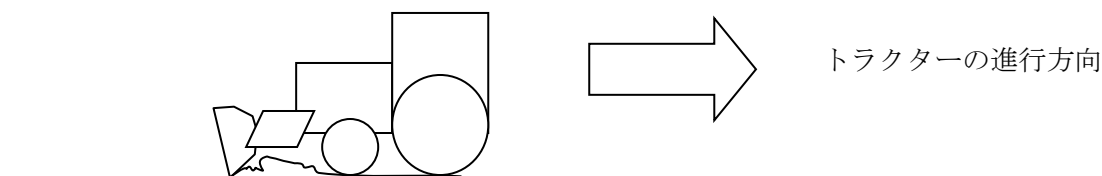


図9 引き剥ぎ法

（3）剥ぎ取り手法の決定

剥ぎ取り手法は、押し剥ぎ法を基本とするが、ルートマットの状況や土壌の状況などにより押し剥ぎ法が利用できない場合があるので、以下を参考に剥ぎ取り手法を決定する。

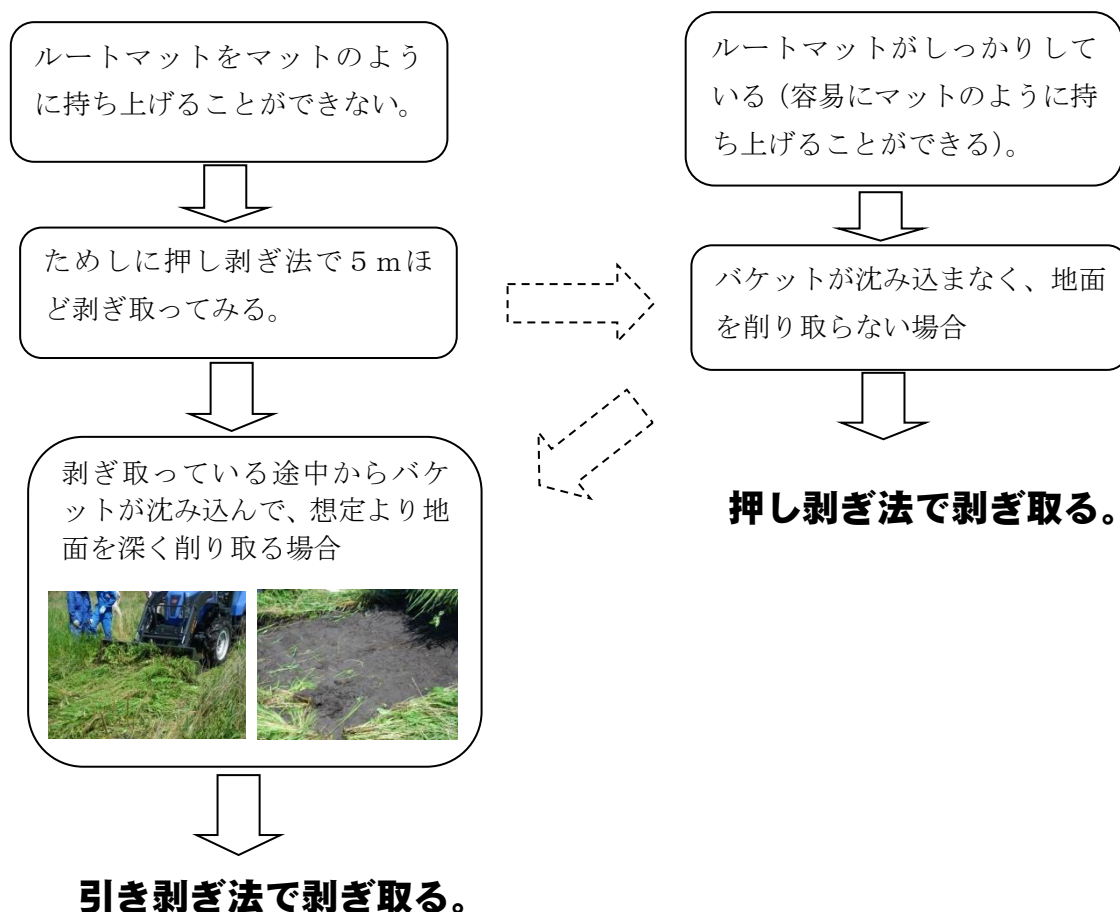


図10 剥ぎ取り手法の検討

(4) 押し剥ぎ法について

- ・バケットは、バケット底面が全体的に付く角度とする（図1 1）。
- ・バケットは地面に触れるか触れないかの状態にして押していく。切り取った表層土壌だけを押していく感覚。
- ・バケットが一杯になったらすくい上げて搬出する。その際、ルートマットがしっかりしている場合は、うまくすくい上げることができずに引きずる場合があるので、鎌などで表層土壌を切り取って対応する。
- ・飯舘村での現地試験では、バケットのサイズ 1.365 m のものを利用した。その際の 10 a 当たりの大まかな作業時間は 105 分（3 cm 厚）であった。



図1 1 剥ぎ取り状況

(5) 引き剥ぎ法について

- ・バケットはダンプ状態で地面に鋭角にあたるように調整する。
- ・地面にバケットが当たったら、少しバケットを押し付け気味にして 5 m 程度バックする（図1 2）。
- ・バケットの後ろ側に剥いだ表層土壌が溜まる。
- ・地面にまだ表層土壌が残っている場合は、もう一度同様の作業を行う。
表層土壌の切り取りを行っているので、牧草や土塊が残っているのを目視で確認可能である。
- ・ある程度表層土壌が溜まったら、バケットですくい取り、搬出する。
- ・飯舘村での現地試験では、バケットのサイズ 1.85 m のものを利用した。その際の 10 a 当たりの大まかな作業時間は 113 分（3cm 厚）であった。



図1 2 引き剥ぎ法

4. 土壌の搬出

(1) 準備するもの

- ・バックホー（キャビン付き）
- ・フレキシブルコンテナ
- ・フレキシブルコンテナ固定機器

※フレキシブルコンテナについては一定期間の保管を考慮し、耐候性のものを選択

する。

(2) 詰め込み・搬出

- ・剥ぎ取った表土を、バックホー等を用いてフレキシブルコンテナに詰め込み、搬出する。
- ・作業時に、剥ぎ取った表土から土壌がこぼれ落ちないように注意する必要がある。
- ・管理のために、除去土壌等を入れた容器の表面（1 cm 離れた位置）の空間線量率を測定する。

5. 除染効果の確認

- ・作業後に空間線量率及び必要に応じて土壌の放射性セシウム濃度の測定を行い、除染前の結果と比較する。
- ・空間線量率、土壌の放射性セシウム濃度の測定は、作業前と同じ方法、同じ測定器で行う。
- ・当手法による飯舘村における現地試験において、土壌の放射性セシウム濃度（15 cm 深さ）は、3 cm 厚の剥ぎ取りにより 13,600 Bq/kg から 327 Bq/kg、ほ場の地表面の空間線量率は、3,280 cps から 1,410 cps へそれぞれ低減した。

6. その他留意点等

(1) 作業

- ・トラクターによる作業（特に傾斜地）は、転倒事故を引き起こす可能性があるため安全フレーム付き（原則としてキャビン付き）のトラクターを用いるなど作業者の安全に十分配慮すること。
- ・作業後に、機械に付着した土はできるだけ作業現場で落とし、洗浄する場合は汚染された土が周囲に流れ出ないよう対策を施す。

(2) ターフスライサーについて

- ・石があるとターフスライサーの刃が欠けることがあるので、ほ場の石の状況により使用できないことがある。
- ・牧草に雑草が多いほ場や、ほ場面が平らでない場合は作業精度などに問題が生じることがある。
- ・「傾斜がある」または「傾斜をつけている」ほ場の場合は、地形勾配に合わせて（縦断勾配）切り取ること。

(3) 地力回復対策

- ・表層を数センチ剥ぎ取るため、地力が低下する場合がある。ルートマットの剥ぎ取りを実施した後には土壌診断を実施して、堆肥、肥料及び土壌改良資材の施用量を決定することが望ましい。土壌診断の項目としては、pH、EC、陽イオン交換

容量、全炭素、窒素、カリウム等が考えられる。下層土の地力が低い場合には、堆肥を施用する。下層土の pH が低い場合には、石灰などを施用する。また、必要に応じて客土を実施する。

(4) 廃棄土壌等の仮置き

- ・発生した廃棄土壌をフレキシブルコンテナに詰める場合は、紫外線等への耐久性が高い製品を使用する。また、「市町村による除染実施ガイドライン」（2011 年 8 月 26 日原子力災害対策本部）において、廃棄土壌等の仮置きについては、耐久性材料などで梱包し、遮水シートなどの上に山積みにする方法、遮水した上でまとめて地下に置き、覆土する方法が記載されている。

V 水による土壌攪拌・除去

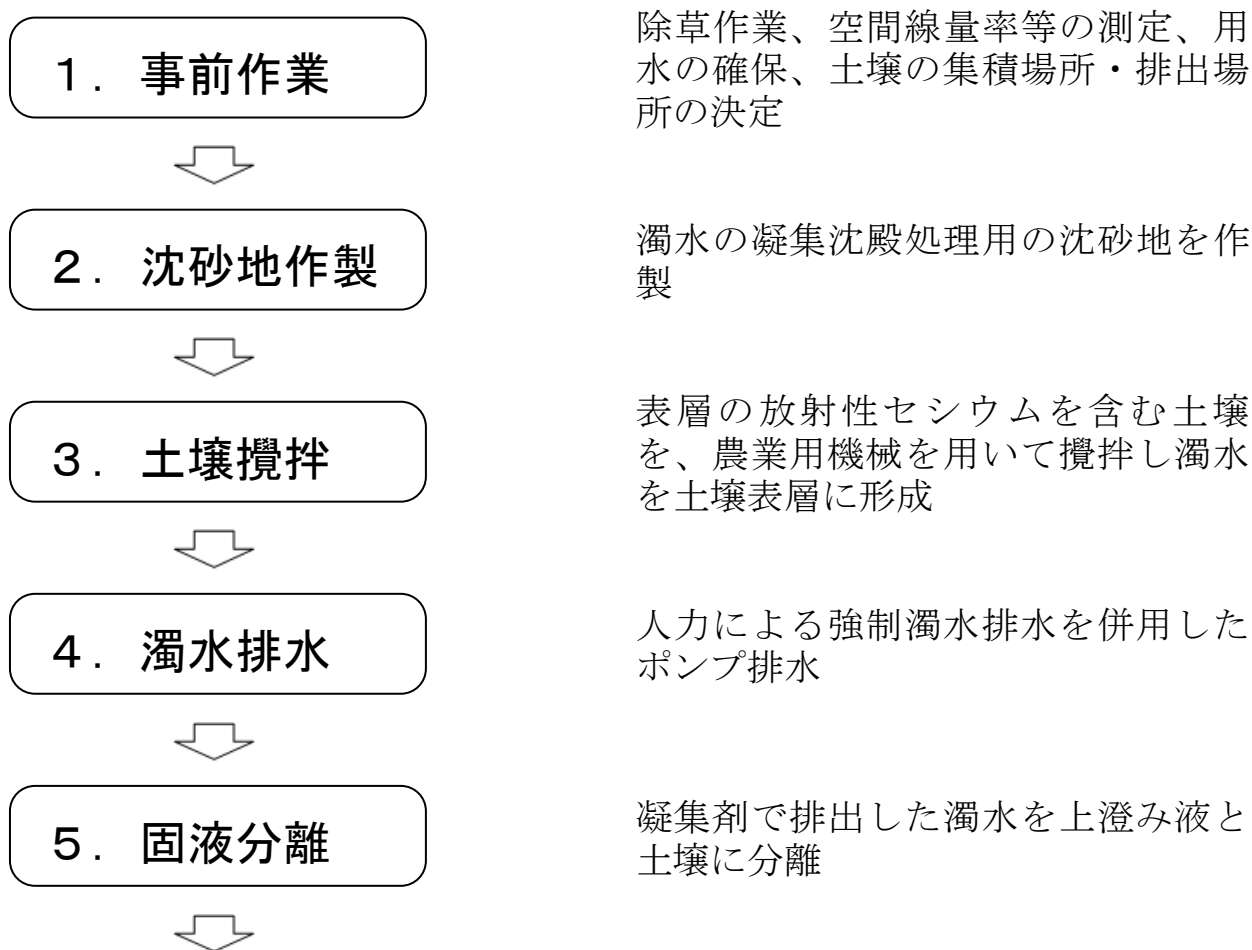
V 水による土壌攪拌・除去

○概要

水田の表層土壌を水により攪拌（浅代かき）した後、放射性セシウム含有量の高い土壌表層の粘土を主体とする細粒子を排出し、濁水を沈砂地で固液分離して放射性セシウムを多量に含有する土壌のみを排出する手法。ただし、本作業では放射性セシウムが水田から流出する可能性もあることに留意し、後述する固液分離を適切に行い、下流側に十分配慮を行った上で排水を行う必要がある。

本手法は、表層にとどまっている放射性セシウムを除去する方法と異なり、土壌を攪拌し粘土を主体とする細粒子を排出することによる除染技術である。この技術を2回適用した試験では、2回とも土壌中の放射性セシウムの低減効果が認められていることから、繰返しの実施が可能。

○作業の流れ



6. 沈殿土壌の自然乾燥

分離した沈殿土壌を乾燥



7. 土壌の搬出

汚染土壌の詰め込み・搬出



8. 除染効果の確認

除染後に空間線量率等を測定

○詳細

1. 事前作業

(1) 準備するもの

- ・刈払い機
- ・フレキシブルコンテナ
- ・シンチレーション式サーベイメータ等
- ・コンベックス巻尺・標尺等
- ・採土器
- ・土壌サンプル保管用の容器

※フレキシブルコンテナについては一定期間の保管を考慮し、耐候性のものを選択することが望ましい。

(2) 除草

- ・農地が雑草で覆われている場合は、除草を行う。雑草の処理の参考とするため、刈り取った雑草の空間線量率を計測しておく。
- ・処理した雑草は定められた場所に仮置きし、フレキシブルコンテナ等に入れる、シートをかぶせる等飛散しないようにする。また、搬出する場合はフレキシブルコンテナ等の容器ごと搬出するなどし、周囲に飛散しないよう注意する。
- ・再度雑草が繁茂しないように、除草後は浅代かき作業をすみやかに行うことが望ましい。
- ・除草剤を使用した場合、除染実施時には地表面に残った雑草残渣を除去する。
- ・除草時に発生するほこりを吸い込まないように注意する。

(3) 土壌濃度あるいは空間線量率の測定

- ・除染実施前に空間線量率及び必要に応じて土壌の放射性セシウム濃度の測定を行

い、除染効果の比較対象とする。なお、サーベイメータ（CsI 線量計など）を用いた市販の簡易測定キット等を利用し、あらかじめ空間線量率と放射性セシウム濃度の相関関係を整理しておくことで、その場で比較的容易に空間線量率から濃度の推計が可能である。また、巻末に参考資料として、空間線量率から土壌の放射性セシウム濃度の推計のための回帰式を掲載したので、参考にすることが可能である。

- ・土壌の放射性セシウム濃度の測定は、ほ場内の複数点（例：一筆で 5 点）で、耕起による土壌のかくはんや作物の根がはる深さを考慮し、水田は約 15 cm までの深さの土壌を採取して行う。空間線量率の測定は、ほ場内を格子状（例：10 m あるいはそれ以上のメッシュ）に区切り、ほ場表面から 1 cm、1 m の高さの位置で実施する。
- ・事前の調査により、ほ場内で局所的に空間線量率の高い地点がある場合は、その箇所の除染が確実にできるよう、特に除染実施者に確実に同情報が引き継がれるよう注意する。

（４）ほ場内の土壌の集積場所等の決定

- ・作業を開始する前に、ほ場内でどのように土を運び、どの位置に集積してほ場外に運び出すかをあらかじめ決めておく。
- ・平らな場所でダンプトラック等が進入可能で、フレキシブルコンテナ等の容器に詰める作業を実施することが可能な場所を確保する。

（５）本手法の適用適否の考え方

- ・本手法は土壌中の粘土を主体とする細粒子に吸着した放射性セシウムを取り除く手法であるため、施工するほ場の粘土含量によって効果に大きな差（除染率で 30 ～70%）を生じる（（独）農業環境技術研究所実施の試験より）。
- ・したがって、本手法は粘土含量の高い水田で効果的である。

（６）浅代かき用水の確保

- ・浅代かき用水は、河川もしくはため池の水を使用するが、ため池の利用に際しては、途中の水路が暫く使用されていないこともあり通水直後は水路内の濁水や底泥が流下する可能性があるので注意を要する。
- ・飯舘村で実施した現地試験で使用した河川からの用水の放射性セシウム濃度は、測定検出限界以下であった。

2. 沈砂地の作製

排水した濁水を沈砂地等で固液分離する。沈砂地では、土粒子を凝集させて沈殿させ濁水の固液分離、沈殿土壌の自然乾燥を行う。水田で攪拌された濁水を受け入れる容量と簡易に設置出来ることが要求される。ここでは、飯舘村の現地試験で用いた沈砂地の例について記載する。

水田群の末端に沈砂地を設置する場合には、水田から排水路に濁水を流すのではなく、漏水の恐れのない専用水路やパイプライン等で送水することが望ましい。

(1) 準備するもの

- ・ 工事用シート、柵作製の資材

(2) 沈砂地作製

- ・ 水田内に設置する場合には、ほ場面を極力乱さないこと、仮設物であることから、工事用シートによる貯水槽を作製する。
- ・ 水田に柵を設置し、そこに工事用シートを被せる構造とし、稲株、雑草茎等による穴あきによる漏水を避けるため厚手のものを使用。
- ・ ほ場において 10 cm の深さの湛水を行い、土壌攪拌後に完全に濁水を排出した場合には、10 a あたりの沈砂地への濁水量は 100 m³ となり、沈砂地の水深を 50 cm とすれば、沈砂地面積は 200 m² 必要となる。実際には、田面から完全に排水されることはなく、飯舘村での現地試験では 10 cm の湛水深で、42 m³/10 a の濁水排出量に留まっている。
- ・ 沈砂地は、水深（目安 10～20 cm 以上）があることが、風等による影響がなく凝集沈殿を行う上で有利である。また、沈殿土壌の回収が容易となる。同一排水濁水容積に対して、沈砂地の敷地面積を小さくすることも検討する。
- ・ 濁水の排出先としての沈砂地に必要な機能は、外部（地表、地下）に漏水しない構造であることが重要である。
- ・ 沈砂地として、養殖池等で用いられる簡易プールや農業用の貯水ポリタンク等を利用することも可能である。容量は、水田から排出される濁水量に規定される。なお、既存施設を利用する場合には、排水先や漏水の有無を十分確認する必要がある。



図1 水槽壁として柵を設置



図2 工事用シートで作製した沈砂地

3. 土壌攪拌

(1) 準備するもの

- ・トラクター
- ・パワーハロー
- ・ドライブハロー

(2) 表層攪拌

浅代かきにより土壌を攪拌させ、放射性セシウムが多量に吸着している粘土、シルト等を濁水として浮遊させる。

- ・稲株等の除去およびドライブハロー時の耕深を制御しやすいように、代かき用水を入水する前にパワーハローで表層 2 cm を目安に碎土する。



図3 パワーハローによる表層の碎土（入水前）

- ・水田に入水後、ドライブハローによる土壌攪拌を行う。
- ・耕深は表層 5 cm を目標として行い、深い層への汚染土壌の拡散を予防するため 1 回掛けとする。
- ・作業時間は、およそ 40 分/10 a である。



図4 ドライブハローによる浅代かき状況（入水後）

4. 濁水排水

(1) 準備するもの

- ・水中サンドポンプ及び配管用塩ビパイプ
- ・塩ビ管、ロープ（人力による強制濁水排水作業用）

- ・除塵用の網
- ・凝集剤および投入装置
- ・発電機

(2) ポンプ排水・凝集剤の添加

- ・ドライブハローによる攪拌作業を終え次第、水中ポンプにより濁水を隣接する沈砂地に送水する。
- ・排水時間は、浮遊した土砂の沈降を考慮し 20 分を目途とした（飯舘村の現地試験は場 4.2 a の場合）。
- ・飯舘村で実施した現地試験では、毎秒 4 リットルの吐き出し能力を持つポンプを 4.2 a あたり 4 台使用した。
- ・ポンプの吸い込み側には、水田内の植物残渣等による詰まりを防ぐためゴミ防止網を設置する。
- ・飯舘村で実施した現地試験では、凝集剤として PAC（ポリ塩化アルミニウム）を使用。上水道用水や一般工業用水の水処理として使用されている凝集材であり、添加・攪拌によりフロックの生成→吸着、架橋→粗大フロック→沈降となる。
- ・水中ポンプの吸入側に凝集剤を投入、ポンプ内で濁水に急速攪拌させる。一定流量が流せるマリオットタンクを製作し 5 %濃度の PAC を 48 リットル/10 a を使用。



図 5 排水ポンプ設置状況

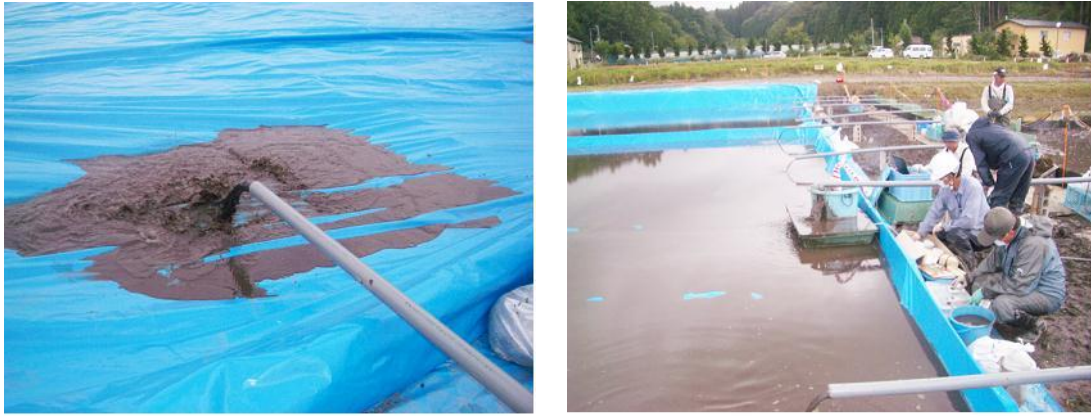


図6 濁水排水状況

(3) 人力による強制濁水排水

- ・ポンプによる強制排水だけでは、濁水によって排出される土壌が少なく除染効果が低い。
- ・濁水排出の効率を高めるため、飯舘村での試験では、口径 50 mm、長さ 8 m の塩ビパイプ（水による重量調整が必要）の両端にロープをくくり付け、2名の作業員により引っ張り、ポンプ方向に移動させ濁水をポンプ吸い込み口に押し出す作業を実施した。4.2 a のほ場で、2名1組として計6名で作業を実施。
- ・浮上防止のため塩ビ管に水を半分程度注入し両端に蓋をする。



図7 人力による強制濁水排水作業状況

5. 固液分離

(1) 準備するもの

- ・沈砂地

- ・水中ポンプ
- ・発電機

（２）上澄み液の排水

固液分離された上澄み液はほ場外に排水

- ・濁水が分離していることを確認し、水中ポンプにより凝集している土壌をかき乱さないようにして上澄み液のみを排出。
- ・固液分離した上澄み液は、空間線量率を測定し放射性物質が含まれないことを確認してから排出を行う。なお、サーベイメータ（CsI 線量計など）を用いた市販の簡易測定キット等を利用し、あらかじめ空間線量率と放射性セシウム濃度の相関関係を整理しておくことで、その場で比較的容易に空間線量率から濃度の推計が可能である。
- ・飯舘村の現地試験においては、固液分離した上澄み液の放射性セシウム濃度は、検出下限値以下であり、環境中への排出が可能であった。
- ・上澄み液に放射性物質が溶出した場合は、プルシアンブルー不織布をフィルターとした水路（（独）産業技術総合研究所）や天然鉱物等による吸着・除去が可能である。



図8 凝集剤による固液分離状況（右下は上澄み液）

6. 沈殿土壌の自然乾燥

（１）準備するもの

- ・沈砂地

（２）天日乾燥

- ・上澄み液を排出した残りの土壌は、水分が多いため脱水処理が必要。

- ・機械脱水、フィルターによる脱水等の方法があるが、飯舘村での現地試験においては天日による乾燥を行った。
- ・上澄み液排出後は、必要に応じ沈砂地面積を縮小し脱水作業を行う。降雨の流入による脱水作業の遅れを防止するため、沈砂地にはビニールシートでの覆いや仮設の屋根等を設置することが望ましい。



図9 天日乾燥状況

7. 土壌の搬出

(1) 準備するもの

- ・バックホー（キャビン付き）
- ・フレキシブルコンテナ
- ・フレキシブルコンテナ固定機器

※フレキシブルコンテナについては一定期間の保管を考慮し、耐候性のものを選択する。

(2) 詰め込み・搬出

- ・乾燥させた土壌を、バックホー等を用いてフレキシブルコンテナに詰め込み、搬出する。
- ・管理のために、除去土壌等を入れた容器の表面（1 cm 離れた位置）の空間線量率を測定する。
- ・本手法では、放射性セシウムを多く吸着する粘土・シルト等の微細粒子を選択的に回収するため、飯舘村での現地試験での沈殿土壌の放射性セシウム濃度は、**50,000 Bq/kg（乾土）**を超えていた。高濃度汚染土壌の飛散を防ぐために、完全に乾く前にフレキシブルコンテナに詰める必要がある。
- ・飯舘村で実施された現地試験での排土量は、ほ場 4.2 a あたり **1.73 m³**（含水比 178 %、放射性濃度 **61,800 Bq/kg（乾土）**）であった。

8. 除染効果の確認

- ・作業後に空間線量率及び必要に応じて土壌の放射性セシウム濃度の測定を行い、除染前の結果と比較する。
- ・空間線量率、土壌の放射性セシウム濃度の測定は、作業前と同じ方法、同じ測定器で行う。
- ・飯舘村での現地試験では、土壌の放射性セシウム濃度(15 cm 深さ)は、15,300 Bq/kg から 9,690 Bq/kg に低減した。またほ場の地表面の空間線量率は、7.55 μ Sv/h から 6.48 μ Sv/h に低減した。

9. その他留意点等

(1) 作業

- ・トラクターによる作業（特に傾斜地）は、転倒事故を引き起こす可能性があるため安全フレーム付き（原則としてキャビン付き）のトラクターを用いるなど作業者の安全に十分配慮すること。
- ・作業後に、機械に付着した土はできるだけ作業現場で落とし、洗浄する場合は汚染された土が周囲に流れ出ないように対策を施す。

(2) 土壌攪拌による除染実施について

- ・水を扱う本手法では、放射性セシウムを含むほ場からの濁水の管理が重要となる。固液分離後の上澄み液は、十分分離させることで環境中への排出が可能となる。濁水は、外部に漏れないよう十分な配慮が必要である。
- ・濁水のポンプ排水において、濁水中の粒子が沈降する前に速やかに排水するためには、水田の端からポンプまでの距離が短いほど有利である。小規模な区画での実施や排水用のポンプを水尻以外にも配置するなどして、粒子の沈降前に濁水を排出することが効果的である。
- ・代かき・強制落水方式は、放射性セシウムが含まれる濁水を排水路に流さないために、沈砂地等を築造し、代かき濁水から、放射性セシウムを回収する必要があるため、専門家の指導の下、農家、個人が実施するための安全対策の検討が別途必要と考えられる。
- ・既に耕耘した水田における本手法による除染効果については、実証試験により確認しているところ（2012年3月）。

(3) 地力回復対策

- ・飯舘村で実施した現地試験では、水田外に搬出された土壌は、1.6 t/10 a（乾土）であり、おおよそ表層 0.2 cm が失われたことになる。本手法では微細粒子を濁水として排出するため、必要に応じてベントナイト等の汚染されていない粘土の補給を行う。
- ・土壌攪拌による除染を実施した後には土壌診断を実施して、堆肥、肥料及び土壌

改良資材の施用量を決定することが望ましい。土壌診断の項目としては、pH、EC、陽イオン交換容量、全炭素、窒素、カリウム等が考えられる。下層土の地力が低い場合には、堆肥を施用する。下層土の pH が低い場合には、石灰などを施用する。

（４）廃棄土壌の仮置き

- ・発生した廃棄土壌をフレキシブルコンテナに詰める場合は、紫外線等への耐久性が高い製品を使用する。また、「市町村による除染実施ガイドライン」（2011 年 8 月 26 日原子力災害対策本部）において、廃棄土壌等の仮置きについては、耐久性材料などで梱包し、遮水シートなどの上に山積みにする方法、遮水した上でまとめて地下に置き、覆土する方法が記載されている。

VI 反転耕

VI 反転耕

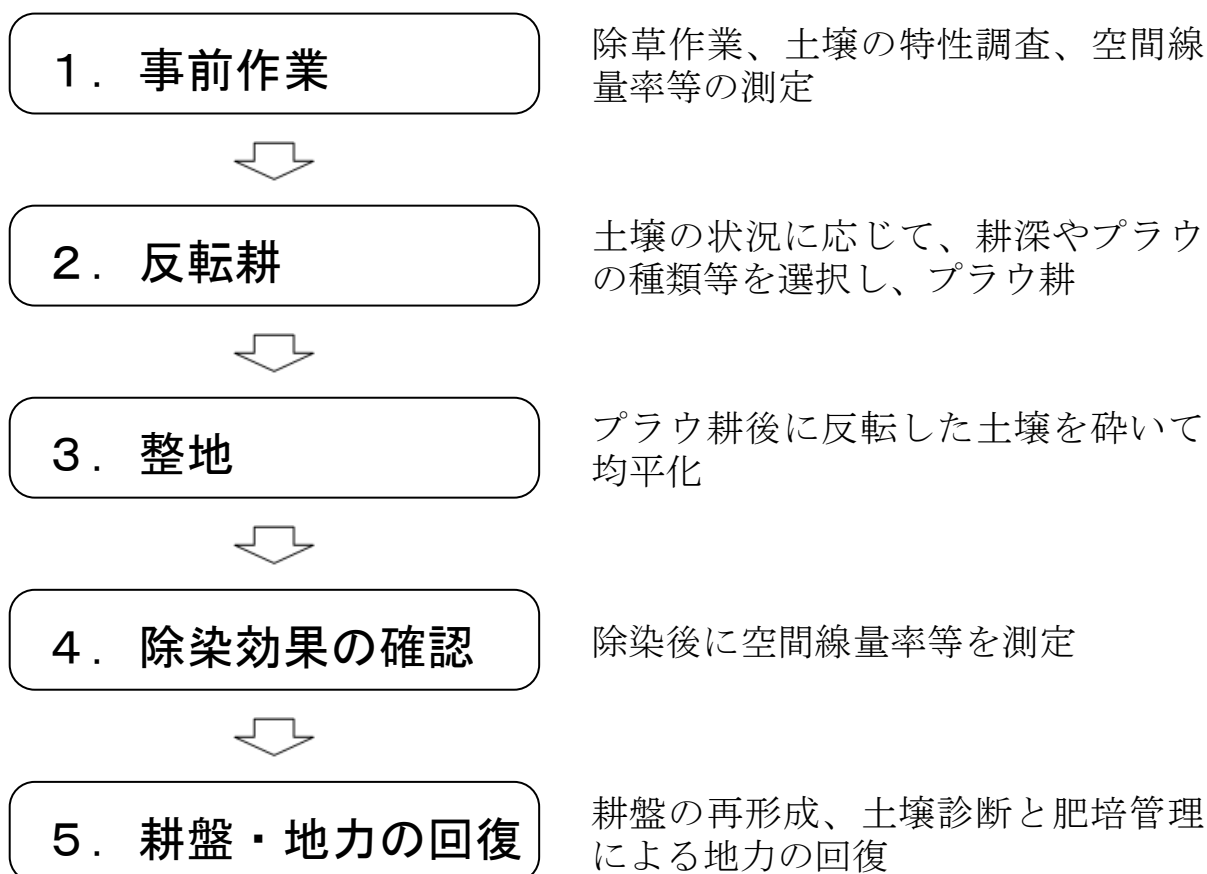
○概要

プラウ耕により、放射性セシウムで汚染された表層土と下層土を反転させる手法。

反転耕は、表土除去の様に放射性物質を取り去る方法ではないので、将来にわたって管理が必要である。反転耕後に掘り起こすと再度放射性物質が表面に露出する可能性がある。また、作物が下層の放射性物質を吸収する可能性があることを念頭におく。

一旦反転耕を行うとそれに続き適用できる除染技術がほとんどないため、当面は、作土の放射性セシウム濃度が 5,000 Bq/kg 以下の圃場での適用を行い、知見が得られるに従って、実施対象圃場を拡大する。

○作業の流れ



○詳細

1. 事前作業

(1) 準備するもの

- ・刈払い機
- ・フレキシブルコンテナ
- ・ハンドオーガー（ボーリング用）
- ・検土杖
- ・シンチレーション式サーベイメータ等
- ・コンベックス巻尺・標尺等
- ・採土器
- ・土壌サンプル保管用の容器

※フレキシブルコンテナについては一定期間の保管を考慮し、耐候性のものを選択する。

(2) 土壌調査

- ・プラウ耕を実施する前に、土壌の状況等を把握する。

耕作者や土地の所有者、土地改良区など、対象は場についての情報を有する人に、土地、土壌の性質に関する情報として、土地の整備状況（整備前の地形、切り土か盛り土かなど）、土性、土層の深さ、礫層の位置、地下水位、客土の有無、暗きよの施工状況、圃場の排水状況、地耐力、対象圃場及び周囲の収量水準、施肥量、堆肥施用量、土壌改良資材の施用量、水田であれば減水深などを聞き取る。

その上で、検土杖により土性を把握する。さらに、プラウ耕の予定の耕深まで掘り、土壌の断面を調査する。プラウ耕により表層に上がって作土層になる土壌に礫が含まれていないか等、作土層とするには不適切な土壌でないかを確認する。礫が含まれる層、作土層とするには不適切な土壌がある場合には、プラウ耕の耕深を浅く設定する。

K、 NH_4 等の陽イオンと置き換わることができるイオン交換態（置換態）の放射性セシウムが高い値を示す砂質土壌や有機質土壌の場合、ハンドオーガーボーリング等により 2～3 m の深さを調査し、地下水位を把握する。5,000 Bq/kg 以下の農地においては、耕深+50 cm 以下に地下水位があれば、最大で見積っても地下水の放射性セシウム濃度は、一般廃棄物最終処分場からの排水処理の目安の濃度限度（三ヶ月の平均濃度が ^{134}Cs で 60 Bq/l、 ^{137}Cs で 90 Bq/l）（参考：環境省、放射能濃度等測定方法ガイドライン）や新しい飲料水の基準値 10 Bq/kg 以下となると予測される。

(3) 除草

- ・農地が雑草で覆われている場合は、除草を行う。雑草の処理の参考とするため、刈り取った雑草の空間線量率を計測しておく。
- ・刈り取った雑草は定められた場所に仮置きし、フレキシブルコンテナ等に入れる、

シートをかぶせる等飛散しないようにする。また、搬出する場合はフレキシブルコンテナ等の容器ごと搬出するなどし、周囲に飛散しないよう注意する。

- ・再度雑草が繁茂しないように、除草後は反転耕作業をすみやかに行うことが望ましい。
- ・除草剤を使用した場合、除染実施時には地表面に残った雑草残渣を除去する。
- ・除草時に発生するほこりを吸い込まないように注意する。

(4) 土壌の放射性物質の濃度及び空間線量率の測定

- ・除染実施前に空間線量率及び必要に応じて土壌の放射性セシウム濃度の測定を行い、除染後の比較対象とする。なお、サーベイメータ（CsI 線量計など）を用いた市販の簡易測定キット等を利用し、あらかじめ空間線量率と放射性セシウム濃度の相関関係を整理しておくことで、その場で比較的容易に空間線量率から濃度の推計が可能である。また、巻末に参考資料として、空間線量率から土壌の放射性セシウム濃度の推計のための回帰式を掲載したので、参考にすることが可能である。
- ・土壌の放射性セシウム濃度の測定は、ほ場内の複数点（例：一筆で 5 点）で、耕起による土壌のかくはんや作物の根がはる深さを考慮し、水田は約 15 cm、畑地は最大 30 cm の深さまでの土壌を採取して行う。空間線量率の測定は、ほ場内を格子状（例：10 m あるいはそれ以上のメッシュ）に区切り、ほ場表面から 1 cm、1 m の高さの位置で実施する。
- ・事前の調査により、ほ場内で局所的に空間線量率の高い地点がある場合は、その箇所の除染が確実にできるよう、特に除染実施者に確実に同情報が引き継がれるよう注意する。

2. 反転耕

下層土に問題のないほ場の場合、水田では農家が所有する 60～80 馬力の中型トラクターのけん引力や土壌の比重の大きさを考慮すれば、プラウの耕深は 30 cm 程度である。水田において、プラウ耕によって表土が下層に入ることによって排水性が低下した場合には、弾丸暗渠と額縁明渠を組み合わせれば排水性が向上する。一方、土壌の比重が軽い畑では、深耕ができる二段耕プラウなどを用い、耕深は 45 cm 程度とする。

耕起していない圃場では、反転耕の前にロータリー耕を行って表層の土壌を混和してしまうと、放射性物質の土中分布範囲が深くなる。そのため、反転耕後の放射性物質の埋没深が浅くなるので、反転耕の前にはロータリー耕を行わないようにする。

作業時の土壌が乾燥しているとほこりが舞い上がり、放射性物質の漂流飛散や作業者の被曝につながる。そのため、乾燥した土壌条件でプラウ耕を行うことは避け、土を練り付けぬ程度のやや湿った土壌条件の時に作業を行う。

(1) 準備するもの

- ・はつ土板プラウ（他種類もあるが本機種種の反転性能が高い）

作業機の種類やはつ土板の材質については、参考1 参照。

- ・トラクター

プラウ耕を行う場合、けん引抵抗（トラクターを後方へ引く力）がトラクターに作用するため、一定以上の機体質量（車輪荷重）を持つトラクターで作業する必要がある。供試するプラウに適したトラクターは、販売会社のカタログやウェブサイトに記載されているので、それらを参考にして選択する。

また、トラクターの種類、選択の考え方の詳細は、巻末の参考資料を参照。

- ・吸着資材

現在バーミキュライトやゼオライト等について、土壌から作物体へのセシウムの移行低減に係る効果の検証を行っている。吸着資材の選択の参考となるよう結果が取りまとまった段階で公表していく予定である。

（2）反転耕

- ・圃場からの放射性セシウムの移動や作物への移行を抑制するために、反転耕の前に必要に応じて圃場表面にバーミキュライトやゼオライト等のセシウム吸着資材を散布する。吸着剤の散布量と効果については、今後実証試験等で明らかにしていく必要がある。
- ・土壌の重い水田では、可能であればジョインタ付きプラウを用い、ジョインタで表層の一部を削り落として、放射能の高い表層土を下層に埋設する。
- ・土壌の軽い畑では、可能であれば二段耕プラウを用い、耕深は 45 cm 程度とする。前方に設置されている二段目のプラウが耕起した部分に、後方の 1 段目のプラウが表層を削り落とし、次の行程で、削り落とした表層の上に 2 段目のプラウが土を盛り上げることで、放射能を含む土壌を下層に埋設する。
- ・作業手順の詳細や作業能率については、巻末の参考資料を参照。



図1 はつ土板プラウによる反転耕

3. 整地

プラウ耕を行った後には、反転した土壌を砕いて均平にする整地作業を行う必要が

ある。

(1) 準備するもの

- ・パワーハローないしロータリー
- ・トラクター

ロータリーやパワーハローで整地を行う場合には、PTO の所要動力と走行時や旋回時の前後バランスを考慮してトラクターを選択する。

(2) 整地作業

- ・ 耕深の調整

表層土（地表から約 3 cm）の大部分は、プラウの耕深の約 1/2 より下に埋没されるので、整地時の耕深はプラウ耕の耕深の 4 割程度以下（プラウ耕の耕深が 30 cm の時は 12 cm 程度以下）とし、放射性物質の露出を防ぐ。ロータリーの耕深は、定規輪の高さを調節（耕深制御機能のある機種ではトラクターの耕深調節ダイヤルを調節）して、パワーハローの耕深は、鎮圧ローラの高さを調節して設定する。

- ・ PTO 回転速度と作業速度の選択

ロータリー及びパワーハローの作業では、PTO 回転速度が高いほど、また作業速度が低いほど砕土性能が高くなる。土壌条件、ほ場の大きさなどから、目標とする砕土状態が得られる PTO 回転速度と作業速度を選択する。

- ・ 作業経路の選択

ロータリー及びパワーハローの作業では、ほ場の中央部を往復耕で、ほ場の周辺部を回り耕法で作業するのが一般的である。



図2 パワーハローによる整地作業

4. 除染効果の確認

- ・ 作業後に空間線量率及び必要に応じて土壌の放射性セシウム濃度の測定を行い、除染前の結果と比較する。
- ・ 空間線量率、土壌の放射性セシウム濃度の測定は、作業前と同じ方法、同じ測定器で行う。

※現地試験により、以下の除染効果が確認されている。

- ・ 耕深 30 cm の反転耕により、福島市の畑圃場の地表面の空間線量率は、耕起前の 0.66 $\mu\text{Sv/h}$ から 0.30 $\mu\text{Sv/h}$ に低減した。
- ・ 飯舘村の水田ほ場の地表面の空間線量率は、1.63 $\mu\text{Sv/h}$ から 0.52 $\mu\text{Sv/h}$ に低減した（速報値）。
- ・ 本宮市の現地試験での、施工前の土壌濃度に対する玄米への放射性セシウムの移行率をロータリー耕と反転耕で比較した場合、ロータリー耕で 0.183 %であったのに対して、反転耕では 0.084 %であった。

5. 耕盤・地力の回復

（１）２作目以降の耕起

表層土（地表から約 3 cm）の大部分は、プラウ耕の耕深の約 1/2 より下に埋没されるため、２作目以降の耕起の耕深は、プラウ耕の耕深の 4 割程度以下（プラウ耕の耕深が 30 cm の時は 12 cm 程度以下）とし、放射性物質の露出を防ぐ。

（２）耕盤破壊への対応

水田では、耕盤が漏水を防止し、トラクター（代かき時）や田植機の走行を支持する役割を果たしている。水田でのプラウ耕は耕盤を破壊することになるため、ほ場条件によっては漏水や農業機械の走行ができなくなる問題が発生する。耕盤層は、水稻栽培を行うことで形成されるが、初年度はローラーによる鎮圧やベントナイト等の資材の施用により、農業機械が落輪しない程度の支持層を形成する必要がある。

漏水が増加する場合には、代かきを丁寧に行って（特に畦畔際）、漏水を減らす。また、必要に応じて表土を剥いて行う心土転圧により耕盤の修復を行うほか、ベントナイトの投入が考えられる。耕盤の硬度が不十分な間は接地圧の小さいクローラー型やセミクローラー型のトラクターを利用するなどの対応を行う。また、可能であれば、何度か畑作物を栽培した後に水稻の作付けを行う対応もあり得る。

（３）地力回復対策

プラウ耕により地力が低下する場合がある。下層土の地力が低い場合には、プラウ耕のあとに堆肥を施用する。下層土の pH が低い場合には、石灰などを施用する。プラウ耕を実施した後には土壌診断を実施して、堆肥、肥料及び土壌改良資材の施用量を決定することが望ましい。土壌診断の項目としては、pH、EC、陽イオン交換容量、全炭素、窒素、カリウム等が考えられる。特にカリウムは、植物体への放射性セシウムの吸収抑制効果が期待できるため、作物の作付けを行う際には、土壌診断結果に基づきカリウムの施用を行う。

（４）水田の暗きょ排水

プラウ耕により暗きょの疎水材の上部が取り除かれる。本暗きょが施工されてい

るほ場では、耕深 30 cm のプラウ耕によって、モミガラ等の疎水材（暗きょ施工時は田面から 20 cm 以深に投入されている）の上部が損失することになる。元の位置に疎水材を継ぎ足すことは不可能であり、田面下 30 cm の位置に弾丸暗きょを本暗きょと直交して施工することで、暗きょ機能を維持することが可能である。この際の弾丸暗きょの間隔は 5 m より狭くすることが望ましく、狭いほど効果的である。

6. その他留意点等

（１）作業

- ・トラクターによる作業（特に傾斜地）は、転倒事故を引き起こす可能性があるため安全フレーム付き（原則としてキャビン付き）のトラクターを用いるなど作業者の安全に十分配慮すること。
- ・作業後に、機械に付着した土はできるだけ作業現場で落とし、洗浄する場合は、汚染された土が周囲に流れ出ないよう対策を施す。

参考資料 1 反転耕に関する技術の詳細

参考資料 1 反転耕に関する技術の詳細

(1) 機械の選択

1) 反転耕用の作業機

反転耕を行うプラウにはいくつかの種類があるが、土壌の反転性能（表層土壌の埋没性能）が高く、一般的に使われているのは、はつ土板プラウ（ボトムプラウ）である。

a) はつ土板プラウ（ボトムプラウ）

刃板で土を切断し、はつ土板で土を反転して耕起を行うプラウである（図 1）。国産のプラウでは、り体の大きさ（り体当たりの標準耕幅をインチで表す。）は 12 インチから 24 インチまで、り体の数は、標準プラウでは 1 連から 6 連まで、深耕プラウでは 2 連、水田プラウでは 3 連から 8 連までである。以下に、はつ土板プラウの種類と選択方法について述べる。

(a) 作業経路別の種類

進行方向の右側にのみ土を反転させて作業するワンウェイプラウ（図 1）と、機体を進行方向の軸回りに回転させることにより、右側と左側の両方に土を反転させることができ、隣接往復作業（順次耕）が可能なリバーシブルプラウ（図 2）がある。小区画ほ場や傾斜地での作業があり、ほ場表面の均平が要求される場合にはリバーシブルプラウを選択する。小型のトラクターを使う場合は、重量が軽いワンウェイプラウが適する。

(b) けん引方式別の種類

プラウのり体（図 1）が通過してできる溝にトラクターの片側の車輪を落として作業する溝曳きプラウ（図 3）と、トラクターの車輪またはクローラーを溝に落とさず、地表を走行しながら作業する丘曳きプラウ（図 4）がある。溝曳きと丘曳きを兼用できるプラウもある。使用するトラクターが小さい時や深耕を行いたい時には、作業幅が狭い溝曳きプラウを選択し、大きなトラクターで作業でき

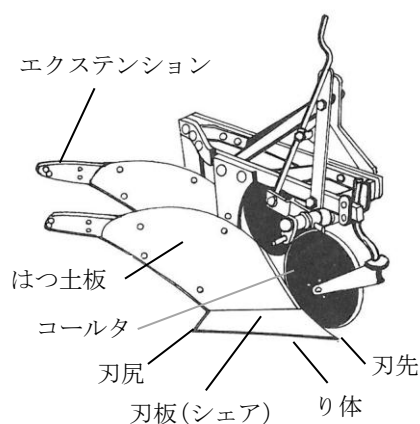


図 1 ワンウェイはつ土板プラウ¹⁾

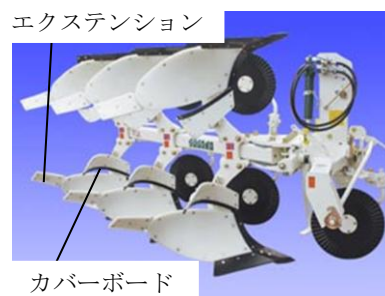


図 2 リバーシブルはつ土板プラウ²⁾



図 3 溝曳きプラウ耕²⁾



図 4 丘曳きプラウ耕³⁾

る時や比較的耕深が浅い時には、作業幅が広い丘曳きプラウを選ぶ。なお、クローラートラクターは同クラスの車輪トラクターよりけん引性能が高く、プラウ耕に適しているが、溝曳きを行うと車体が左右方向に斜めになるので、クローラーの荷重が不均一となりクローラーの耐久性に悪影響を及ぼすことがある。そのため、同トラクターを利用する時には、丘曳きプラウを使用するのが望ましい。

(c) はつ土板の材質別の種類

はつ土板に土が付着すると、反転性能が低下し、けん引抵抗も大きくなる。はつ土板には、砂壤土や粘土などの重く、付着しづらい土に適する鋼鉄製の「スチール」、比較的軽い土や付着しやすい土に適する樹脂を表面に貼った「スリック」、粘土、火山灰土、比較的軽く付着しやすい土に適する鋼鉄製の格子で構成される「格子」があり（図 5）、作業する土壌の種類に応じて選択する⁴⁾。



図 5 はつ土板の種類²⁾

(d) 耕深別の種類と性能

はつ土板プラウを耕深で分類すると、以下のとおりである。耕深は、り体の大きさや型式により異なる。表 1 に、種類別の標準耕深を示す。

① 標準プラウ

一般的に使われているプラウであり、国産機では 14 インチから 22 インチまでである。標準耕深は 14～36 cm（表 1）、耕幅は 30 cm（12 インチ 1 連）～280 cm（22 インチ 5 連）であり、目標耕深と利用可能なトラクターの大きさ等から機種を選定を行う。

② 深耕プラウ

標準耕深 25～45 cm のプラウであり、耕深 40 cm 以上で作業したい場合にはこれらの機械を利用する。けん引抵抗が高いため、国産品では 2 連のみ（1 連の製造も可能）である。受注生産品である。

③ 2 段耕プラウ（地下休閒耕プラウ）

表 1 はつ土板プラウの種類と標準耕深

種類	り体の大きさ	り体数	標準耕深 (cm)
標準プラウ	14 インチ	1-5	14～26 16～27 15～28 18～28 16～32
			14～26 16～27 16～32 20～32
			16～27 16～32 20～32 20～36
			20～32 20～36
			20～32 20～36
深耕プラウ (受注生産)	20-22 インチ	2	25～40 30～45
	24 インチ	2	25～40
2 段耕プラウ (受注生産)	18/20 インチ	1 対	35～70
水田用プラウ	12 インチ	3-8	10～18 12～18

前方のり体で下層土を表層に反転するとともに、後方のり体で表層の土を、前方のり体が通過してできた溝中に落とすプラウ（図 6）である。下層土に良質な土がある場合は使用し、表層土を深く埋没できる特徴がある。受注生産品である。

③ 水田プラウ

10～18 cm 程度の耕深で作業する水田用のプラウである。耕深が浅いため表層土の埋没深も浅くなり、除染作業には適さない。



図 6 2 段耕プラウ²⁾

(e) 犁体の大きさと数

はつ土板プラウは、り体の大きさ（1 り体当たりの標準耕幅）が 12～24 インチの範囲で、2 インチごとに機種設定されている（表 1）。耕深は、り体当たり耕幅の 2/3 が限界と言われており⁴⁾、耕深 30 cm で作業するには、18 インチ以上のプラウの選択が望ましい。また、犁体の数は 1 連から 8 連程度まであり、目標の作業能率と使えるトラクターの大きさにより選択する。

(f) ジョインタ

ジョインタ（図 7）は耕起の前に地表の残さを横に移動させて深く埋没させる機能を持つ。オプションでジョインタが準備されている機種では、ジョインタを取付けることにより埋没性能が向上することがある。

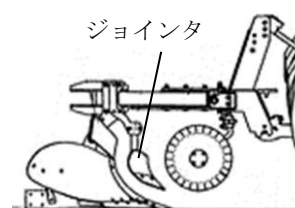


図 7 ジョインタの装着状態

(g) 作業能率

① 標準プラウ

標準的な作業速度は 4～8 km/h で、作業能率は、ワンウェイプラウで 750 分/ha（14 インチ 1 連）～70 分/ha（20 インチ 3 連）、リバーシブルプラウで 650 分/ha（16 インチ 1 連）～30 分/ha（22 インチ 5 連、20 インチ 6 連）程度である。

② 深耕プラウ

標準的な作業速度は 4～8 km/h で、作業能率は 160 分/ha～70 分/ha 程度である。

③ 2 段耕プラウ（地下休閒耕プラウ）

標準的な作業速度は 3～6 km/h、作業能率は 460～190 分/ha 程度である。

2) 反転耕後の整地用作業機

プラウ耕を行った後には、反転した土壌を砕いて均平にする整地作業を行う必要がある。現在、わが国で使われている主な整地用機械は以下のとおりである。

a) ロータリー



図 8 砕土用ロータリー⁵⁾



図 9 バーチカルハロー⁶⁾

トラクターのPTOで駆動されて横軸回転するつめで土を混和し、砕土均平を行う機械である。水田の耕うん用に使われている通常のロータリーも利用できるが、砕土性に優れたつめと広い作業幅を持つ砕土用ロータリー(図8)を利用すると高精度で高能率な作業ができる。砕土用ロータリーの耕深は12~18 cm程度、作業幅は200~350 cm、標準的な作業速度は2~5 km/h、作業能率は200~50分/ha程度である。オプションで、鎮圧用のローラーを後方に取付けることができる。

b) パワーハロー

トラクターのPTOで駆動されて縦軸回転するつめで土を混和し、砕土均平を行う機械(図9)で、鎮圧用のローラーが後方に取付けられている。つめによる土壌の練り付けが少なく、土中にすき込んだ残さを地表に出すことが少ない利点があるが、地表に出ている残さの埋没性能が低い問題点もある。パワーハローの耕深は8~18 cm程度、作業幅は190~500 cm、標準的な作業速度は4~8 km/h程度、作業能率は120分/ha~25分/ha程度である。作業幅が3 mを越える機種では、路上走行時に折畳みが可能である。

c) その他の整地用機械

上記のPTO駆動式機械のほか、ディスクで整地を行うディスクハロー、バネ歯杆で整地するスプリングハロー、これらを組み合わせたコンビネーションハローなどのけん引式作業機が使われることもある。これらの機械は、ロータリーやパワーハローに比べ高速で作業できるが、砕土性能は劣る。

ロータリーやパワーハローなどで整地を行っても土壌が膨軟な場合には、別行程で鎮圧用のローラーをかけることがある。これらのローラーは、それらの形状により、ケンブリッジローラー、カルチパッカ(K型ローラー)等と呼ばれており、前者では作業幅が3~7 m、標準的な作業速度は8~12 km/h、作業能率は30~10分/ha程度、後者では作業幅が2~3 m、作業速度が4~5 km/h、作業能率が100~50分/ha程度である。

表2 はつ土板プラウの比抵抗⁷⁾

土質	プラウの比抵抗 (N/cm ²)
砂土	2.1~2.5
砂質壤土	2.5~4.2
壤土	3.5~4.9
粘質壤土	4.9~7.0
重粘土	7.0~7.7

3) トラクター

a) トラクターのキャビン

作業者の放射線被曝をできるだけ減らすため、キャビン付きのトラクターを使用し、作業時には窓を閉めて運転する。

b) プラウ耕時のトラクター

プラウ耕を行う場合、けん引抵抗(トラクターを後方へ引く力)がトラクターに作用するため、一定以上の機体質量(車輪荷重)を持つトラクターで作業する必要がある。また、多連のリバーシブルプラウは全長が長く重量が重いので、路上走行時や旋回時のトラクターの前後バランスも考慮してトラクターを選択する必要がある。基本的には、製品のカatalogやウェブサイトで機種ごとに適応トラクターが記載されているので、その範囲内のトラクターを選定する。粘質な土壌や硬い土壌のほ場で作

表3 車輪トラクターのけん引係数⁷⁾

土質	けん引係数
乾燥砂土	0.30
砂壤土	0.40
壤土	0.50
埴土	0.65

業する場合や、耕深を深くしたい場合は、記載範囲の上限付近のトラクターを選択するとよい。また、耕幅の広い丘曳きプラウには、車輪トラクターよりもけん引力（作業機を引く力）が大きいクローラートラクターが適している。以下に、詳しいトラクターの選択方法を示す。

プラウのけん引抵抗は、耕起断面積と土壌条件により違って来る。表 2 に、土壌の種類と耕起断面積当たりのけん引抵抗である「比抵抗」の関係を示す。「けん引抵抗」は、「比抵抗」に「耕起断面積（耕幅×耕深）」をかけて求める。傾斜地や波状地では、比抵抗を 20～30 % 大きく見積る必要がある。

一方、トラクターのけん引力は、トラクターの車輪荷重と土壌条件によって違って来る。表 3 に、土壌の種類と車輪トラクターの車輪荷重当たりのけん引力を表す「けん引係数」の関係を示す。トラクターの「けん引力」は、「車輪荷重」に「けん引係数」をかけて求める。円滑にプラウ耕を行うには、プラウの「けん引抵抗」よりも大きな「けん引力」が出せる機体質量（車輪荷重）を持つトラクターを選択する必要がある。

例えば、20 インチ 2 連のプラウを用いて壤土ほ場を耕深 30 cm で作業する場合のけん引抵抗は、比抵抗 $3.5 \sim 4.9 \text{ (N/cm}^2\text{)} \times \text{耕起断面積 } 3,060 \text{ (cm}^2\text{)} \text{ (耕幅 } 102 \text{ cm} \times \text{耕深 } 30 \text{ cm)} = 11 \sim 15 \text{ (kN)} \text{ (1,100} \sim 1,500 \text{ kgf)}$ となり、必要な最大けん引力は 15 (kN) となる。この結果から、必要なトラクターの車輪荷重は、最大けん引力 (15 kN) ÷ けん引係数 0.50 = 40 kN (3,000 kgf) となり、3,000 kg 以上の機体質量を持つトラクター（フロントウェイトを取り付けた場合 50～60 kW (70～80 PS) 級）が必要となる。

c) 整地用作業時のトラクター

ロータリーやパワーハローで整地を行う場合には、PTO の所要動力と走行時や旋回時の前後バランスを考慮してトラクターを選択する。製品のカatalogやウェブサイトにも機種ごとに適応トラクターが記載されているので、その範囲内のトラクターを選定する。

（２）作業の手順と作業時の留意点

１）反転耕の手順と留意点

a) トラクターへの装着

取扱い説明書や作業マニュアル⁴⁾に従い、トラクターロアリンクの高さ、トップリンクの姿勢、チェックチェーンの調節等を行い、プラウの横や前後の水平の調整、プラウの横位置の調整（溝曳き耕の場合には、後方視で最も右側のり体刃尻位置をトラクターの右後輪の内側位置に合わせる。）などを行う。

b) プラウの調整

プラウの調整が不十分だと、反転性能が低下することがあるので、以下のとおりに調整を行う。

(a) 耕深の調整

耕深が浅くなると表層土の埋没深が浅くなるので、30 cm 程度以上の耕深を維持できるように調節する。深耕する場合は、供試トラクターでけん引できるかどうか、後作業等への影響（特に水田の場合）などを考慮して耕深を決定する。除染の効果だけを考えると耕深は深いほど良いが、作業の能率やコストを考慮すると、水田では 30 cm 程度、畑では 45 cm 程度の耕深とするのが現実的と思われる。耕深は、トラクターのトップリンクを短くす

ると、また、プラウのゲージホイールを上げると深くなる⁴⁾。

(b) カバーボードの調整

カバーボード（図 2）は雑草や残さの飛散を防ぎ、それらを埋没させる機能を持つ。雑草や残さの埋没が悪い場合は、カバーボードの高さを調節する⁴⁾。

(c) エクステンションの調整

エクステンション（図 1、図 2）は、耕深が深い場合に土を押さえて反転を補助する機能を持つ。れき条が立って反転が悪い場合は、エクステンションの高さを調節する⁴⁾。

(d) コールタの調整

コールタ（図 1）は地表の残さ等を切断し、反転やすき込み性能を向上させるとともにけん引抵抗を少なくする機能を持つ。コールタの取付け位置は作業精度に影響を及ぼす。左右位置はプラウの刃先から 1.5～3 cm 丘側（未耕起側）となるように（図 12 の a）、上下位置は直径の約 1/3 が土中に貫入するように（図 10 の b）、前後位置はプラウの刃先とコールタの前方外周を結ぶ線が約 45° になるように（図 10 の c）それぞれ調節する⁴⁾。崩れやすい土壌では、コールタの左右位置を刃先から 2～4 cm 丘側にすると、れき溝壁の崩れが少なくなり、表層土の埋没深が浅くなるのを防ぐことができる。

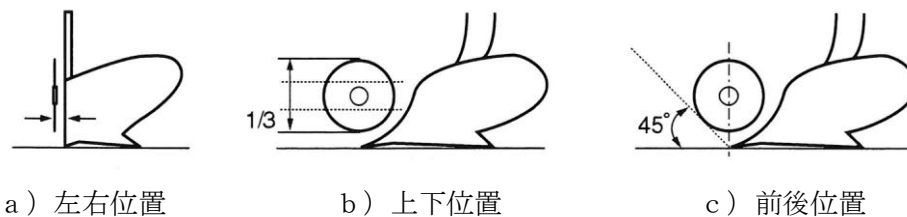


図 10 コールタの調整位置⁴⁾

(f) ジョイントの調整

耕深に合わせ、刃板が土中に隠れる位置になるようにジョイントの取付け高さを調節する⁴⁾。

c) 作業の方法

(a) トラクター油圧制御装置の選択

トラクターの油圧制御の方式には、けん引抵抗が大きくなるとプラウを上昇させるドラフトコントロール、油圧レバーの位置に比例してプラウを上下させるポジションコントロール、ポジションコントロールとドラフトコントロールの中間的なミックスコントロール（けん引抵抗が大きくなった時だけプラウを上昇させる）などがある⁴⁾。一般に、浅く耕起したい口開け時にはポジションコントロールを使用し、それ以外の作業では、トラクターのスリップを少なくできるポジションコントロールまたはミックスコントロールが利用される。ポジションコントロールよりもミックスコントロールの方が、土の抵抗が大きいところ以外での耕深を一定にできる。

(b) 作業速度の選択

作業速度が異なると土の飛び方が変化し、反転性能が変わってくる。はつ土板プラウの標準的な作業速度は 3～8 km/h であるが、土壌条件やほ場の大きさに合わせ、反転性能が

最も良くなる作業速度を選択する。

(c) 作業経路の選択

プラウの作業経路による作業法としては、往復耕法（内返し耕、外返し耕）、回り耕法（外巻き耕、内巻き耕）、片道耕法（バック耕）、順次耕法（リバーシブルプラウでのみ可能）などがある（図 11）⁴⁾。これらの耕法を組み合わせる作業を行うのが一般的であり、ほ場の形状や大きさに合わせて最適な方法を選択する。また、口開け行程の耕深は、均平度を低下させないように目標耕深の 1/3 程度に設定する。

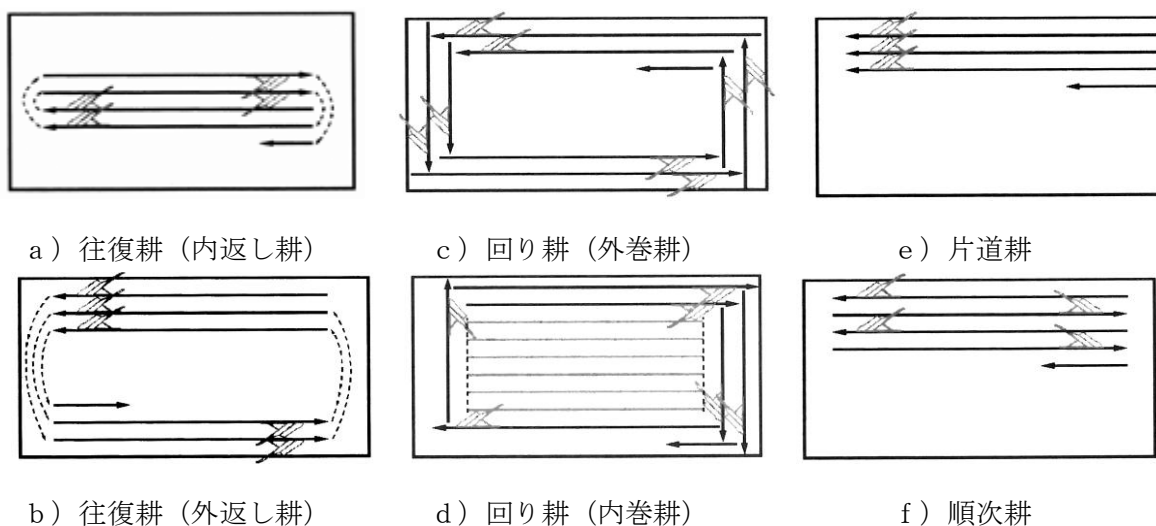


図 11 プラウの耕起方法（作業経路）⁴⁾

引用文献

- 1) 田代敏治（1970）：プラウ，農業機械化の実技 2 「耕うん整地」，農業技術研修会，16-54
- 2) スガノ農機(株)ウェブサイト：
<http://www.sugano-net.co.jp/products/plow/revers/vr163c.html>
- 3) (有)イワセアグリセンターウェブサイト：
[http:// http://www.iwase-agri.com/pc/equipment.html](http://http://www.iwase-agri.com/pc/equipment.html)
- 4) スガノ農機(株)ウェブサイト、教本シリーズ 1 「ボトムプラウ」：1-93、
http://www.sugano-net.co.jp/products/plow/plow_text/plow_text.html
- 5) 小橋工業(株)ウェブサイト：
<http://www.kobashikogyo.com/product/operation/rotary/hyper/krl.html>
- 6) Eooo!ウェブサイト：
http://www.eooo.jp/ctr.php/m/ShowCategoryList/a/Detail/goods_id/6469/c1/1/c2/6/c3/1
- 7) 田辺一（1984）：機関出力とけん引力・走行抵抗，新版農業機械ハンドブック，コロナ社，332-335

参考資料 2 土壌の放射性セシウム濃度と空間線量率の 関係

参考資料 2 土壌の放射性セシウム濃度と空間線量率の関係

農林水産省は、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、福島県及びその周辺の地域を対象に、農地土壌の放射性物質濃度分布図を作成し、「農地土壌の放射性物質濃度分布図の作成について」（農林水産省、平成 23 年 8 月 30 日）として公表を行った。

その中で、農地土壌の放射性セシウム濃度と農地上の空間線量率との間には一定の相関関係が見出されたため、これに着目して、福島県を対象に、空間線量率から農地土壌の放射性セシウム濃度を推計する回帰式を作成し、この回帰式を使って調査地点以外の農地土壌の放射性セシウム濃度の推計を行った。

推計では、田・普通畑を対象に、耕起・未耕起、黒ボク土であるかそうでないかによって場合分けを行い、放射性セシウム濃度と空間線量率の関係を求めた（独立行政法人農業環境技術研究所）。それぞれの回帰式は以下の通りである。なお、ここでは y ：放射性セシウム濃度（Bq/kg、乾土）、 x ：空間線量率（ $\mu\text{Sv/h}$ ）である。

地目	耕起有無	土の種類	測定高さ	回帰式
田・普通畑	耕起	黒ボク土	1 m	$y = 3450 x$ ($R^2=0.89$)
			1 cm	$y = 3370 x$ ($R^2=0.91$)
		非黒ボク土	1 m	$y = 2660 x$ ($R^2=0.92$)
			1 cm	$y = 2610 x$ ($R^2=0.93$)
	不耕起	黒ボク土	1 m	$y = 3080 x$ ($R^2=0.97$)
			1 cm	$y = 2700 x$ ($R^2=0.96$)
樹園地			1 m	$y = 1500 x$ ($R^2=0.92$)
			1 cm	$y = 1280 x$ ($R^2=0.90$)
全体			1 m	$y = 2290 x$ ($R^2=0.86$)
			1 cm	$y = 2020 x$ ($R^2=0.84$)

回帰式のあてはまりの良さの尺度である決定計数（ R^2 ）は 0.84～0.97 と比較的高い値を示す。ただし、回帰式により推計した放射性セシウム濃度の値と実測値との間には、相当の誤差が生ずる場合があることから、推計値は参考情報として取り扱う必要がある。

**農林水産省 農林水産技術会議事務局
研究開発官（食料戦略）室**

〒100-8950 東京都千代田区霞が関 1-2-1
TEL. 03-3502-2549
