

仮置場原状回復の課題解決に向けた現地実証試験

1. 背景・目的

福島県内の除染活動で発生した除去土壌等は、除染を実施した現場や仮置場で一時保管された後、順次中間貯蔵施設への輸送が行われ、福島県外で最終処分するまでの間、安全かつ集約的に管理・保管される。現在、中間貯蔵施設への除去土壌等の輸送は概ね完了している。輸送が完了した仮置場は、従前の土地利用を基本として原状回復が行われる。

福島県環境創造センターでは、仮置場の原状回復について、作業を行う上での技術的課題への対応策等を検討するため、調査研究に取り組んできた。当該調査研究では、前章の基礎調査の土壌硬度調査やモデル試験等の結果から、仮置場跡地を農地に原状回復する際に懸念される問題の解決、及びより効果的な方法の検討のために、実際の仮置場跡地を畑地へと復旧し、復旧後の畑地において営農試験等を行う実証試験を実施した。

2. 実施内容

2. 1. 試験場所

実証試験は福島県内の汚染状況重点調査地域における仮置場跡地一箇所において行った。対象とした仮置場跡地の基本情報を表1に、実証試験前の状況を図1に示す。

表1 試験場所の基本情報

| | | |
|-----------|--------|---------------------|
| 所在地域 | 福島県浜通り | |
| 元の土地利用 | 畑地 | |
| 仮置場設置時の状況 | 保管物種類 | 除去土壌等 |
| | 保管物量 | 5900 m ³ |
| | 保管期間 | 5年8か月 |



図1 実証試験前の現地状況

2. 2. 試験内容

2. 2. 1. 原状回復作業の実施

試験区画のレイアウトを図2のように設計した。現地における事前の土壌硬度調査の結果から、深部までの締固まりが確認されていたため、土壌破碎の程度を変えた深耕区及び対照区を設定し2つの大区画とした。各大区画の大きさは傾斜方向の短辺17 m、長辺32 mである。また、地表面被覆の違いが土壌侵食量へ与える影響を把握すること、および営農試験のために各区画をそれぞれ4つに分割し、裸地区・緑肥区・営農区・堆肥施用区とした(小区画)。なお、深耕は国のガイドラインには示されていない工程である。

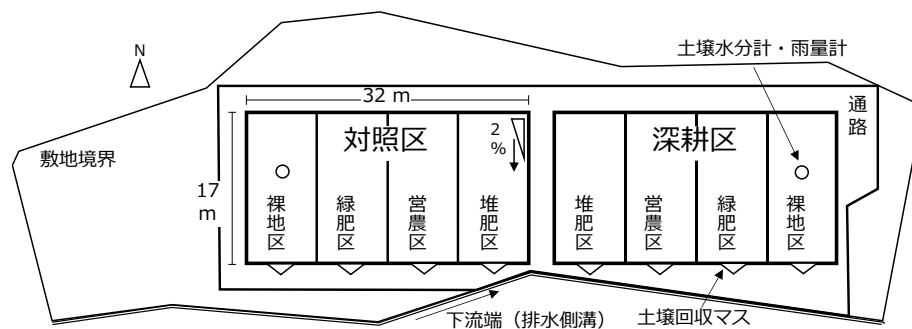


図2 試験区画レイアウト

図3に実施手順の概要を示す。まず、地表面に繁茂していた雑草をすき取ったのち、地表流の方向を統一するために平均2%の傾斜を排水側溝に向けて設定した。続いて、深耕区のみリッパを付けたバックホウを用いて深さ60 cm、縦横間隔1 mの深耕を行った。施工深度は土壌硬度調査で深さ80 cm程度まで土壌硬度が高いこと、および農地の心土破碎に用いられるサブソイラの最大耕作深が60 cm程度であることに基づき決定した。また、施工間隔は既往の文献^{1, 2)}を参考に決定した。続いて、30 cm長さの爪を4本付けたバックホウにより、全区画において30 cm深さの碎土を実施した。

碎土後の圃場を均したのち、実証試験と同じ市町村の別の仮置場で実際に用いられていた遮へい土の山砂を10 cm厚を目標に客土した。客土後に土壌改良資材としてようりんとゼオライト(日東ゼオライト2号)を散布し、トラクターを用いて客土と元の土壌と混合した。土壌改良資材の投入量は元の土壌と客土の土壌化学分析を行い、畑地の作土厚を15 cmとして両土壌を混合した場合の可給態リン酸及び陽イオン交換容量が福島県施肥基準³⁾に達するよう計算して求めた。

大区画を造成した後、プラスチックの波板を用いて4つの小区画に分割した。裸地区は期間中除草のみを行い、耕起等を行わない条件とした。緑肥区は植生被覆による土壌侵食抑制の効果を検討するため、ホワイトクローバーによる被覆を行った。営農区および堆肥施用区は縦畝を立てて作物を栽培し、営農状況の確認と土壌侵食量を測定した。堆肥施用区は特に堆肥を導入した際の作物生育や土壌化学性への影響を検討するため

に、施肥の一部を堆肥によって行った。各種営農条件は後述する。

2. 2. 2. 土壌硬度調査

小区画の整備が終了した段階で、土壌硬度調査を行った。調査は深耕区および対照区それぞれの裸地区と堆肥施用区とした（全4区画）。深さ70 cm程度の試掘を作成し、土壌断面を確認するとともに山中式土壌硬度計を用いて深さ5 cm毎に土壌硬度を測定した。土壌硬度の測定後、容積100 cm³のコアサンプラーを用いて裸地区から土壌をサンプリングした。

2. 2. 3. 土壌水分状況確認

土壌硬度調査の最後にそれぞれの裸地区において土壌水分計(EC-5、Meter社製)を深さ10、30、50 cmに設置した。

対照区・裸地区には雨量計も設置した。それぞれの測定値はデータロガー(ZL6、Meter社製)を用いてロガー内部温度とともに10分間隔で記録した。

2. 2. 4. 土壌侵食状況確認調査

各区画の下流端にステンレス製の土壌回収マス(図4)を取り付け、流出する土壌を捕捉し土壌侵食量を測定した。枠には事前に質量を測定したガーゼを取り付け、ガーゼおよび枠内に捕捉された土壌を回収し、105℃で乾燥し重量を測定した。測定後の試料を混合し、粒度試験を行って粒径組成を測定した。

土壌回収枠の排水口に容量30 Lのタンクを設置して枠を通過した表面流去水を集め、土壌侵食発生時の地表面流の量を測定した。ただし、中程度の降雨によりタンクから溢水することが確認されたため、途中で設置を取りやめ、穴を埋め戻した。



1) 表土すきとり



2) 勾配形成



3) 深耕・砕土



深耕用の爪 砕土用の爪



4) 客土



搬入状況



5) 土壌改良資材散布



6) 耕起

図3 原状回復の手順



図4 土壌回収マスの設置状況

2. 2. 5. 緑肥区の管理

緑肥区は地表面被覆による土壌侵食量抑制の効果を検討するために行った。栽培作物はホワイトクローバーとした。播種はばらまきとし、10 aあたり3 kgを目途に行った。播種後の生育状態が悪い部分については追加播種を行って調整した。なお、ホワイトクローバーの生育に影響する背の高い雑草については刈り取り等を行って管理した。

2. 2. 6. 営農試験

営農試験は営農区および堆肥施用区（計4区画）において行った。各作期において施肥の前に土壌分析を行い、それぞれの作物に適した栄養素（窒素、リン酸、カリウム）となるよう事前に施肥を行った。必要な栄養素の量は福島県施肥基準³⁾を基本とし、調査作物の項目がない場合には種苗会社のサイト等を利用して決定した。営農区においては化学肥料のみを用いて、堆肥施用区においては堆肥を1 t ha⁻¹加え、不足分を化学肥料で補った。従って、営農区と堆肥施用区において主要な栄養素の施肥量は概ね同一である。播種日・収穫日は4区画で同一とした。栽培期間中は必要に応じて給水や除草等の作業を行った。収穫適期に達したタイミングで、収量調査を行った。各区画に1 m四方の枠を3つずつ設定し、内部の作物を全て刈り取った上で新鮮重および75°Cで乾燥させた乾燥重を測定した。なお、各作期の作付け条件は以下のとおりである。

【令和2年1期目】（令和2年11月～令和3年2月）

各区画に畝を5条作成し、コマツナを栽培した。播種を行う前に、福島県施肥基準のコマツナ（ハウス）の目標値N:P:K=15:10:15 kg (10 a)⁻¹に合わせて、緩効性肥料及び堆肥を用いた施肥を行った。播種日は11月17日で手押しの播種機を用いて、株間5 cmで筋蒔きした。この期は生育が悪かったため間引き等は行わず、翌年2月12日に収量調査を行った。

【令和3年1期目】（令和3年5月～7月）

各区画に畝を4条設定し、コマツナ及び小カブを栽培した。土壌分析によりリン酸が不足していたため、ようりんを 0.5 t ha^{-1} 加え、コマツナの目標値に合わせて緩効性肥料及び堆肥による施肥を行った。播種日は5月26日とし、各畝に4条溝を作り、シーダーテープ加工種子を播種した。コマツナの株間は10 cm、小カブは15 cmとした。収穫は7月2日に行った。

【令和3年2期目】（令和3年9月～11月）

畝は4条で設定し、畝全体に黒マルチをかけた。この作期においては一部区画のみを栽培区画とし、ホウレンソウを栽培した。播種日は9月21日、株間は15 cmとした。

2. 2. 7. 放射性物質挙動確認調査

現地における放射性物質の挙動を確認するため、調査地点を設定し定点調査、及び歩行サーベイ調査により空間線量率を測定した。実施頻度は月に1回程度とした。また、適宜現地から土壌を採取して土壌中の放射性セシウム濃度を測定し、原状回復作業による影響や営農作業に伴う変化等を確認した。

2. 2. 7. 1. 定点測定

国や福島県が発行しているガイドライン（後述）に記載された測定方法を基本として測定地点を選定し、選定した地点の空間線量率測定を行った。選定した地点において、シンチレーション式（NaI（Tl））サーベイメータを用いて、地上1 m高さの空間線量率を測定した。

【除染関係ガイドライン（第2版、環境省、平成30年3月追補）】

測定点は、除去土壌等を置いていた範囲の中心及び各四隅1点ずつを選定することを基本とします。

【仮置場等技術指針（第6版、福島県、令和元年12月）】

除去土壌等を運び出した後の汚染状況の確認については、除去土壌等の積み上げ一山毎の中心部1箇所及び四隅4箇所の（ただし、浸出水による周縁部の汚染の恐れがある場合は、周縁部の最大4箇所も含めた）1 mの高さの空間線量率を測定する。

【除染等業務特別教育テキスト（4改訂、厚生労働省）】

除染等作業を行う作業場の区域（当該作業場の面積が 1000 m^2 を超えるときは、当該作業場を 1000 m^2 以下の区域に区分したそれぞれの区域をいう。）の形状が、四角形である場合は、区域の四隅と2つの対角線の交点の計5点の空間線量率を測定し、その平均値を平均空間線量率とします。

2. 2. 7. 2. 歩行サーベイ調査

歩行サーベイ機器としてガンマプロッターH（日本放射線エンジニアリング社製）を用いて歩行調査を行い、実証試験地の空間線量率を面的に測定した。時定数は3秒、測定間隔は5秒とした。

2. 2. 7. 3. 土壌中の放射性セシウム濃度の測定

実証試験開始時の元の土壌、客土、混合後の土壌について各区画の表面から土壌を採取し、Ge半導体検出器を用いて放射性セシウム濃度を測定した。

3. 結果と考察

3. 1. 土壌硬度調査

土壌改良資材を投入して耕起した後に測定した土壌硬度は、地表面から概ね20 cmまで小さかった。これは砂質の客土が行われたこと、及び耕起作業によって土がほぐされたためである。土壌断面観察から客土に由来する砂がこの層の主体であることが確認された。一方、20 cm以深の元の土壌を中心とした部分においては区画間のばらつきが大きく、対照区と深耕区の違いはみられなかった。今回の深耕は間隔が1 mあるため、リッパーの通った部分が断面調査で出なかったことが一因と考えられる。ただし、実証試験前と比べると土壌硬度が全区画で減少していたことから、深耕や砕土作業による影響がみられた。

採取した土壌は表層の透水係数が非常に大きく（表2）、降雨強度が土壌の透水性を超えたときに生じるホートン（Horton）流が発生する可能性は小さいと考えられた。一方、対照区では30 cm深さに、深耕区は50 cm深さにそれぞれ透水性の低い試料がみられた。降水量と降雨の頻度によっては地下に一時的な滞水が生じる可能性がある。乾燥密度には深度毎の違いがみられなかったほか、透水性との相関は確認されなかった。

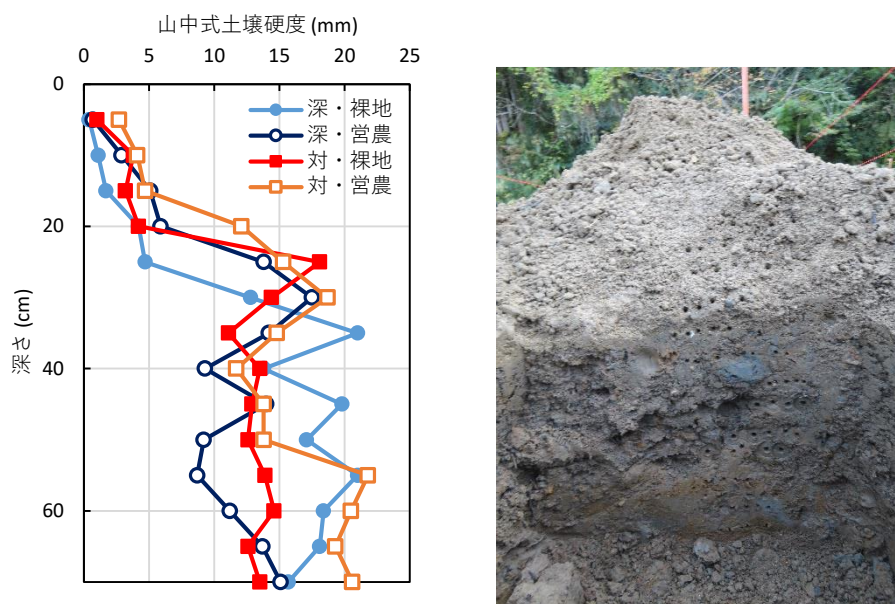


図5 土壌硬度の深度分布（左）及び土壌断面（右）

表2 土壌物理性

| 採取深度 | 対照区 | | 深耕区 | |
|----------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| | 透水係数 (cm s^{-1}) | 乾燥密度 (g cm^{-3}) | 透水係数 (cm s^{-1}) | 乾燥密度 (g cm^{-3}) |
| 10-15 cm | 3.5×10^{-3} | 1.26 | 6.8×10^{-2} | 1.30 |
| 30-35 cm | 1.9×10^{-3} | 1.23 | 8.5×10^{-5} | 1.34 |
| 50-55 cm | 6.8×10^{-6} | 1.29 | 3.3×10^{-3} | 1.27 |

3. 2. 土壌水分等の変化

図6に観測期間中のロガー内温度、気圧、降水量、土壌水分量及びアメダス広野の気温及び降水量を示す。ロガー内温度は冬季には深耕区の方で日中高くなっており、日射の区画間の違いが反映された。夏季には太陽高度の増加により日照の差が小さくなっていることがわかる。降水量については、積算降水量は実証試験地とアメダス広野で概ね同様の変化をしており、現地に設置した雨量計の測定値は実際の降雨量をよく表現しているものと考えられる。

土壌水分量の変化は深度毎に降水に対する応答が異なった。地表面15 cm深の土壌水分はある程度まとまった降水対応して速やかに上昇し、降雨終了後は速やかに土壌水分が低下し、排水が生じていた。また深耕区と対照区を比べると深耕区で土壌水分の変化が大きいが、これは土壌への浸透量が大きかったことを反映しているものと思われる。一方、30 cm深における土壌水分量の変化は変化が少なく、飽和に近い状態で推移していた。50 cm深の土壌水分量も30 cm深さ同様に高いが、降雨後の増加及び排水時の土壌水分低下がみられた。深部で土壌水分が高いことから、大きな降雨後には30 cm深あ

たりにおいて一時的な滞水が発生していた可能性がある。

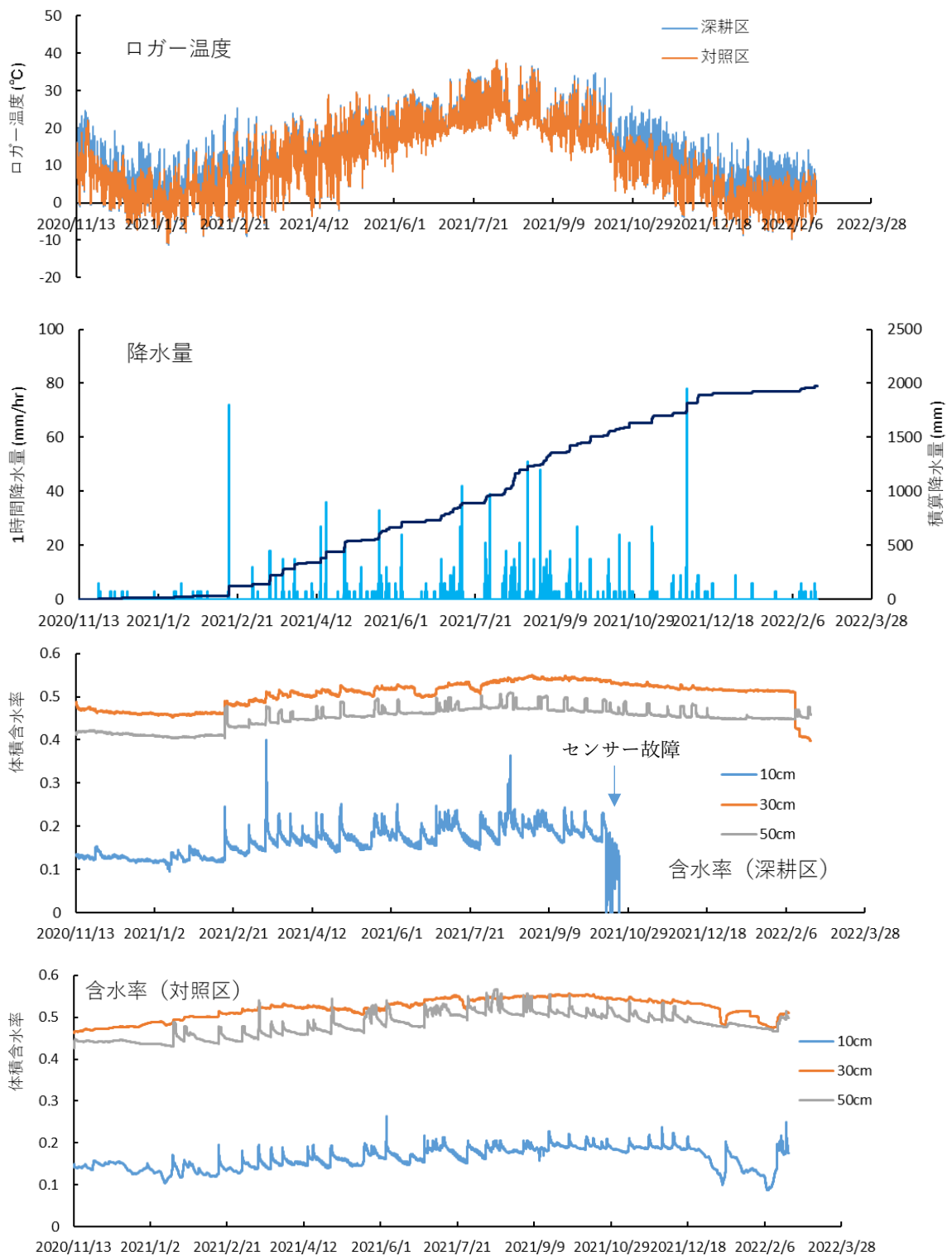


図6 ロガー温度・降水量・土壌水分の経時変化

3. 3. 土壌侵食状況の確認

図7に各区画の積算土砂流出量を示す。小区画の違いをみるとトータルでは緑肥区が最も少なく、裸地区が続き、営農区と堆肥区で大きくなった。緑肥区は2021年5月までは裸地区とほぼ同程度であったが、7月の測定以降土砂の流出が減少した。緑肥区においては5月以降にホワイトクローバーの生育が進み地表面全体が被覆された。緑肥による雨滴衝撃の緩和や根による土壌保持の効果と考えられる。なお、ホワイトクローバーの地上部が枯死した冬季(11~1月)においても緑肥区の侵食量は少ないため、植物の生死よりも被覆されているかが重要である。

一方、営農区と堆肥区は裸地区と比べて大きくなったが、これは畝を立てることによって地表面流が畝間を集中して流れりる侵食が生じたことが原因と考えられる。営農活動によって土壌侵食のリスクが高まるため、対策がより重要となる。なお、対照区において営農区よりも堆肥区の侵食量が大きくなったがこの原因は不明である。

深耕区と対照区を比較すると、全小区画において深耕区で土壌侵食が抑えられ、特に施工直後の効果が高いことがわかる。2021年2月に大きな降水イベントが発生し、土壌侵食が生じた。侵食測定用に設置したガーゼの汚れからマス内部の最大水位がわかるが(図8)、深耕区において水位が低く、表面流が抑制されていた。深耕によって圃場全体としての間隙率や透水性が向上し、地中への浸透量が増えたことが原因と考えられる。

しかしながら、施工後時間がたつと、土砂侵食量の変化が深耕区と対照区で変わらなくなり、深耕の効果が低下した。また、緑肥の方が効果自体は高いため、両者の組み合わせによって長期的な対応をとる等の工夫が重要である。

流出土砂の粒度分析の結果、流出した土砂は概ね砂分であった(図9)。粘土画分は期間・区画の条件を問わず概ね5-8%程度で一定であった。シルト分は、前期(2021年7月まで)の対照区・裸地緑肥区のみやや多いが、後期の結果にはその傾向がみられないことから、サンプリングに由来する誤差と考えられる。砂分については後期に粗砂の割合が全区画で増加していた。

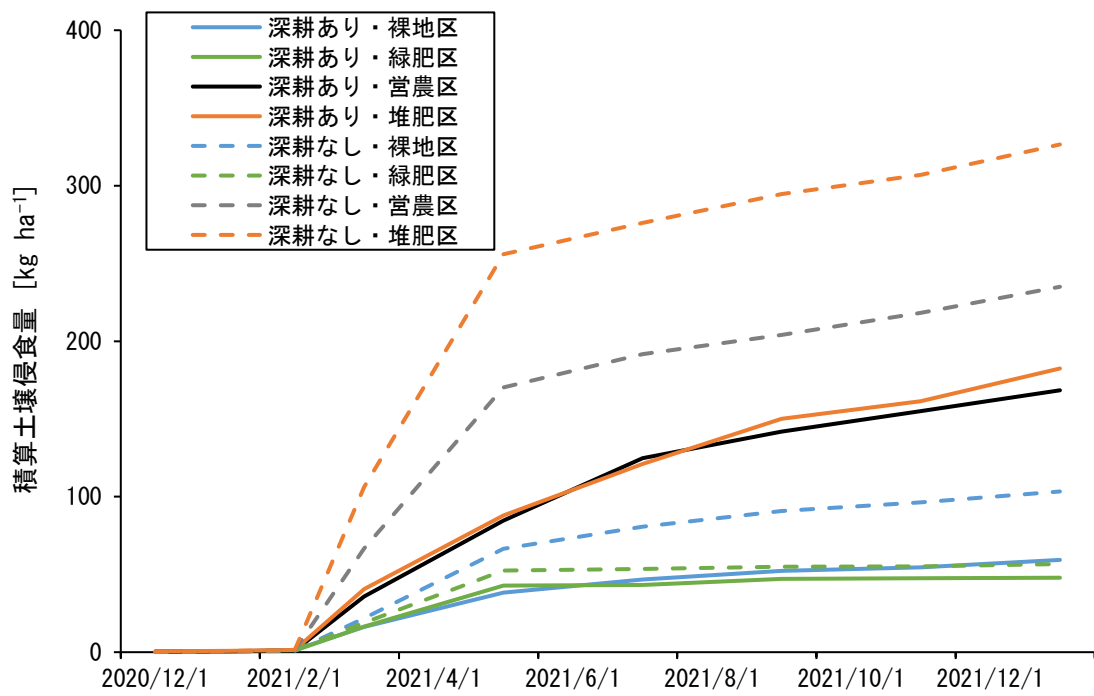


図7 各区画からの積算土砂流出量



図8 土壌侵食マスの状況 (2021年2月15日の豪雨後)

※赤矢印は集水枠の全高 (20 cm)、黄色は豪雨イベント時の最大水位を示す

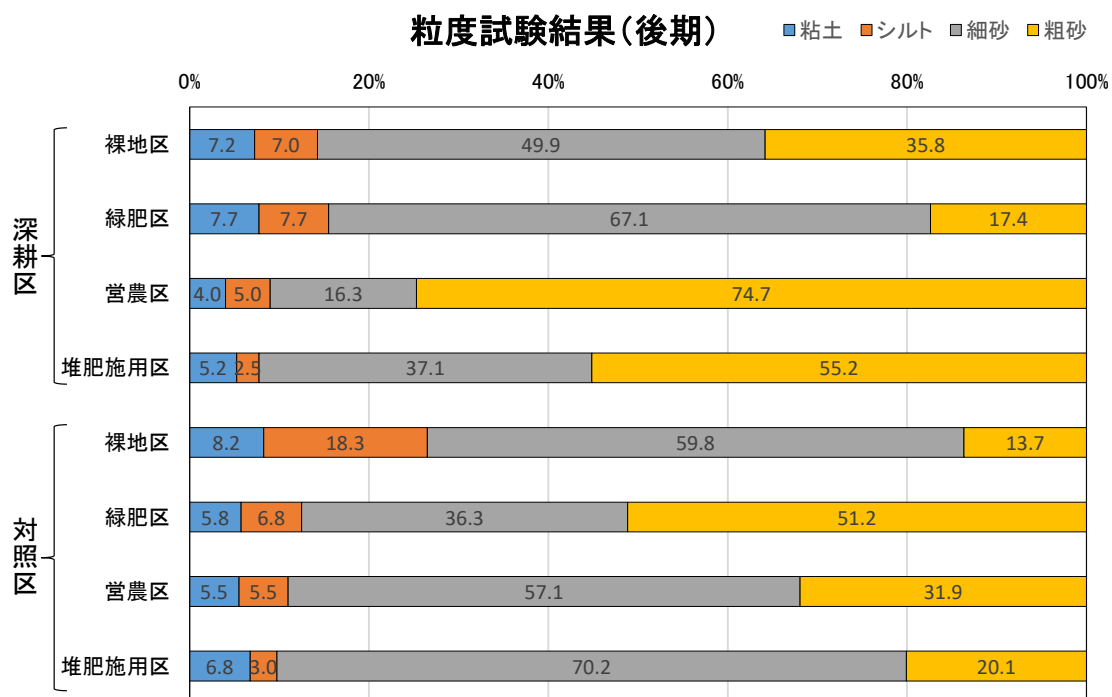
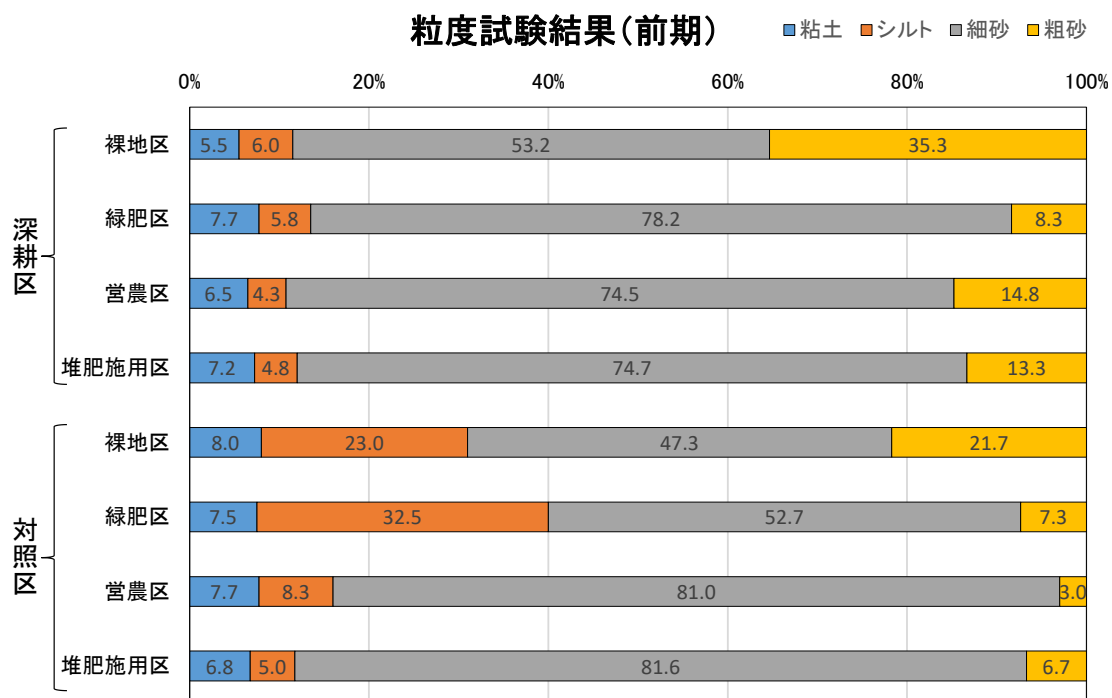


図9 流出土砂の粒径画分

3. 4. 作物生育状況

【令和2年1期目】

実証試験の圃場の南側には森林があり、冬季には圃場の日射が遮られたため、全区画において生育が不十分であった。緑肥区においてはいずれの区においてもホワイトクローバーは生育しなかった。営農区においても冬季の間は双葉以降の生育はほぼ生じなかった。2月12日に収穫した作物の収量は表3のとおりであるが、圃場西側ほど日照が悪かった影響を受けてわずかながら収量に違いが生じた。ただし、収量調査後の3月以降、日照と気温の上昇に伴って全区画においてコマツナの生育は進行し、最終的には食用サイズまで成長した。

収穫したコマツナの放射性セシウム濃度を炉乾燥後の試料において求めたところ、コマツナの¹³⁷Cs濃度は検出下限値(2.5 Bq/kg)未満であり、基準値(100 Bq kg⁻¹)に比べて十分に低く、安全に摂取できることが確かめられた。

表3 令和2年1期作目のコマツナの乾燥収量(単位:g 50株⁻¹)

| | | | |
|------|-------|-------|------|
| 深耕区 | | 対照区 | |
| 営農区 | 堆肥施用区 | 堆肥施用区 | 営農区 |
| 1.68 | 0.80 | 0.34 | 0.26 |

注) 表の左側の区ほど日射の良い東側に位置する

【令和3年1期目】

コマツナは徒長気味であるものの区画全体で生育したが、前作において生育の良かった上流側において葉の黄変等がみられた。これは前作に引き続いて小松菜の生育を行ったことによる連作障害と考えられる。小カブについても概ね区画全体で生育し、収穫適期は逃したものの十分な大きさまで生育することを確認した。なお、区画間の生育差は生じなかった(表4)。

収穫したコマツナおよび小カブの放射性セシウム濃度を炉乾燥後の試料において求めたところ、コマツナの¹³⁷Cs濃度が4.7 Bq kg⁻¹であり、カブは検出下限値(0.7 Bq/kg)未満であった。基準値(100 Bq kg⁻¹)に比べて十分に低く、安全であることが確かめられた。

表4 令和3年1期作目のコマツナの乾燥収量(単位:g 50株⁻¹)

| | | | |
|-----|-------|-------|-----|
| 深耕区 | | 対照区 | |
| 営農区 | 堆肥施用区 | 堆肥施用区 | 営農区 |
| 412 | 367 | 265 | 375 |

【令和3年2期目】

鳥害によるものと推定されるが、ハウレンソウは育成できなかった。

3. 5. 土壤化学性分析結果

表 5 に土壤化学性分析結果を示す。当該圃場の土壤は砂質土であり、CEC は客土・元の土壤ともに低かったが、ゼオライトの施用により全区画で改善した。堆肥の効果として腐植量には大きな差がみられなかったが、有効態リン酸は堆肥施用により増加した。土壤有機物を増やしていくためには緑肥のすきこみや堆肥施用を長期的に行っていく必要があると考えられる。

表5 土壤化学性分析結果

| 時期 | 土壤 | pH | CEC (meq/kg) | 腐植 (%) | 有効態リン (mg/100g) |
|---------|-------|-----|-----------------|-----------|--------------------|
| 工事前 | 元の土壤 | 6.6 | 20.5 | 1.2 | 2 |
| | 客土 | 7.4 | 3.8 | <0.1 | 3 |
| 工事直後 | 深耕・緑肥 | 6.2 | 13.8 | 1.3 | 13 |
| | 深耕・営農 | 6.5 | 13.4 | 1.2 | 11 |
| | 深耕・堆肥 | 6.6 | 14.9 | 0.9 | 21 |
| | 対照・緑肥 | 6.9 | 11.2 | 0.4 | 18 |
| | 対照・営農 | 6.9 | 13.9 | 0.5 | 10 |
| | 対照・堆肥 | 7.2 | 11.9 | 0.5 | 50 |
| R2・1期作後 | 深耕・裸地 | 6.6 | 14.4 | 1.1 | 9 |
| | 深耕・緑肥 | 6.6 | 13.0 | 0.7 | 18 |
| | 深耕・営農 | 6.4 | 15.2 | 1.1 | 4 |
| | 深耕・堆肥 | 6.7 | 13.1 | 0.4 | 6 |
| | 対照・裸地 | 7.1 | 7.5 | 0.3 | 21 |
| | 対照・緑肥 | 6.6 | 12.2 | 0.6 | 8 |
| | 対照・営農 | 6.6 | 11.9 | 0.5 | 14 |
| | 対照・堆肥 | 6.7 | 14.3 | 0.5 | 17 |
| R3・1期作後 | 深耕・裸地 | 7.2 | 14.7 | 0.5 | 11 |
| | 深耕・緑肥 | 7.0 | 19.6 | 0.7 | 12 |
| | 深耕・営農 | 6.9 | 20.1 | 0.6 | 18 |
| | 深耕・堆肥 | 7.2 | 18.7 | 0.7 | 28 |
| | 対照・裸地 | 7.2 | 16.5 | 1.1 | 8 |
| | 対照・緑肥 | 6.9 | 17.2 | 1.3 | 8 |
| | 対照・営農 | 6.9 | 18.6 | 1.0 | 8 |
| | 対照・堆肥 | 6.7 | 17.6 | 1.2 | 19 |
| R3・2期作後 | 深耕・裸地 | 6.7 | 15.4 | 0.6 | 8 |
| | 深耕・緑肥 | 6.6 | 18.0 | 0.7 | 9 |
| | 深耕・営農 | 6.7 | 14.5 | 0.6 | 13 |
| | 深耕・堆肥 | 6.5 | 15.8 | 1.0 | 24 |
| | 対照・裸地 | 6.8 | 14.0 | 0.8 | 4 |
| | 対照・緑肥 | 6.6 | 17.9 | 1.4 | 6 |
| | 対照・営農 | 6.2 | 15.7 | 1.2 | 14 |
| | 対照・堆肥 | 6.3 | 15.7 | 1.3 | 33 |

3. 6. 放射性物質挙動確認調査

図 10 に定点調査の測定結果を示す。空間線量率は概ね放射性セシウムの物理減衰に従って推移しており、原状回復工事や大雨による影響はみられなかった。また、歩行調査についても同様に時間的な変動はなく、局所的に線量が高い地点もなかった(図 11)。

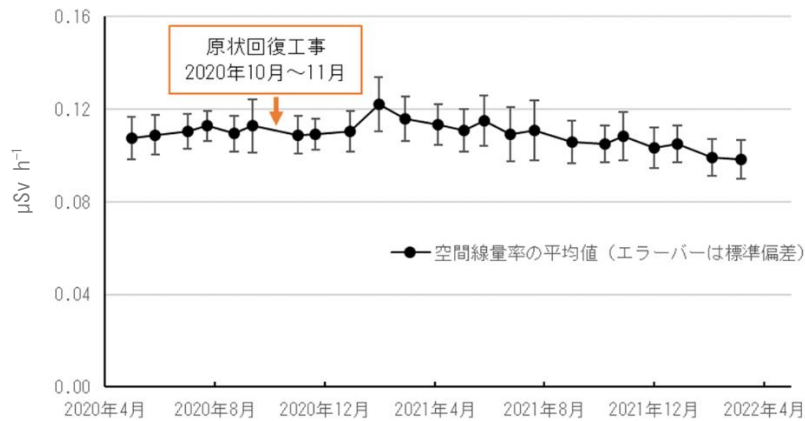


図 10 定点調査による空間線量率の測定結果

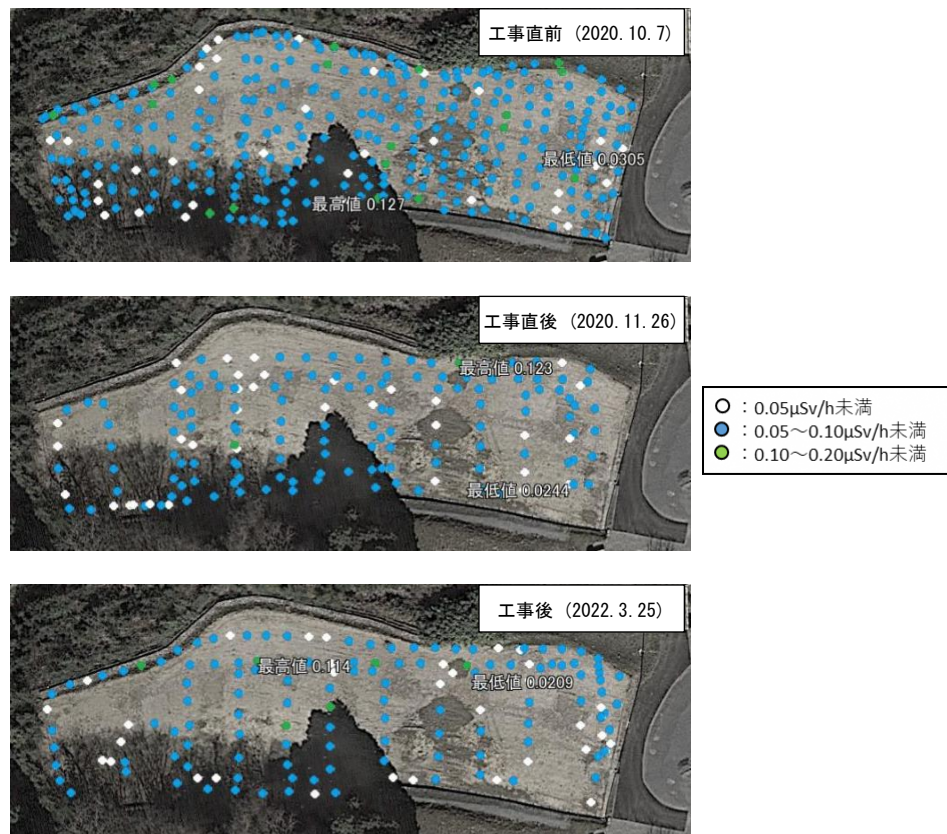


図 11 歩行調査による線量分布図

4. まとめ

仮置場跡地を農地に原状回復する際に懸念される問題の解決、及びより効果的な方法の検討のために、実際の仮置場跡地を畑地へと復旧し、復旧後の畑地において営農試験等を行う実証試験を実施した。今回実施した作業のうち、深耕は特に復旧直後において土壌の浸透能を高め土壌侵食量を低減した。土壌侵食の抑制効果は緑肥栽培の方が高いため、両者の組み合わせによって施工直後から長期的に高い効果を発揮するものと思われる。作物栽培についてはマサ土の客土を土壌改良資材で化学性を補填して栽培を行い、栽培自体は十分可能であること、栽培された作物の放射性セシウム濃度が基準値に対して十分に低いことが示された。ただし、堆肥施用による有機物量の増加は確認されず、地力回復には長期的な取組が必要といえる。また、原状回復作業に伴う空間線量率の増加はないことが確認され、仮置場で用いられた遮へい土の安全性も示された。

謝辞

末筆ながら、お忙しい中調査に御協力いただいた自治体の御担当者に御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 中津智史, 東田修司, 沢崎明弘 (2004) 耕盤層の簡易判定法と広幅型心土破碎による対策. 日本土壌肥料科学雑誌 75(2), 265-268
- 2) 新里良章, 深見公一郎, 山口悟, 上野正実 (2003) 心土破碎と暗渠によるサトウキビほ場の排水性改善効果, 農業機械学会誌 75(6), 426-433
- 3) 福島県 (2019) 福島県施肥基準.

<https://www.pref.fukushima.lg.jp/sec/36021d/kankyounogyousehikijyun.html>
(2022年9月1日最終閲覧)