

仮置場原状回復の課題解決に向けた基礎調査

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¹⁾。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。

仮置場の原状回復においては跡地利用や原状回復作業に伴う問題を解決する必要がある。フェーズ1において保管場所跡地において土壌汚染等調査や土壌硬度調査等を実施した所、明確な跡地汚染がないことを確認した一方で、保管等の影響による土壌の締固まりが発生していることを確認した。また、仮置場の原状回復においては客土として現地で使用されていた遮へい土等が使用される場合があり、原状回復後の地力低下等の懸念がある。

そこでフェーズ2では、仮置場跡地を農地へと復旧する場合のより効果的な方法を検討するため、原状回復作業を想定したモデル試験を実施した。また、フェーズ1に引き続き、実際の仮置場跡地の土壌硬度を把握するため、土壌硬度調査を実施した。加えて、土壌硬度調査で使用が想定される2つの測定機器について、両者を実施しなくとも、片方の機器の測定結果から判断ができるよう、測定の換算方法の検討を行った。

2. モデル試験

仮置場跡地を農地へ原状回復する場合における、より効果的な原状回復作業方法を検討するため、原状回復作業のモデル試験としてポット栽培試験を実施し、土壌改良方法別の土壌栄養分流出状況及び作物の生育状況確認を行った。

2. 1. 実施方法

試験は図1に示すガラス温室内で行った。栽培には1/5000アールのワグネルポット（以下、ポットという。）を用い、供試する土壌は山砂と黒土とした（図2）。山砂は福島県内を産地とし花崗岩を母材とするマサ土である。一方、黒土は栃木県で産出された関東ローム層の表土であり、市販品を購入して使用した。それぞれの土壌について以下に示す土壌化学性分析項目の分析を行った。

【土壌化学性分析項目】

pH (H₂O)、電気伝導度 (EC)、陽イオン交換容量 (CEC)、石灰 (CaO) 飽和度、苦土 (MgO)

飽和度、カリ (K_2O) 飽和度、塩基飽和度、加給態リン酸 (P_2O_5)、腐植、加給態ホウ素、石灰苦土比、苦土カリ比

この分析結果に基づき、表 1 に示す改良土壌作成の条件で堆肥およびゼオライトを混合した。その後、全ての土壌に対して pH とリン酸量の矯正を炭酸カルシウム及びようりんを用いて行った。混合する堆肥・ゼオライト及びその他の土壌改良資材の量は、福島県施肥基準²⁾における普通畑土壌の改良基準を満たすよう選択した。表 2 に改良後の土壌化学性を示す。



図 1 ガラス温室の様子



図 2 供試試料 (左 : 山砂、右 : 黒土)

表 1 改良土壌作成の条件

土壌種類	土壌改良条件
山砂	そのままの土壌＋土壌改良資材
	堆肥を混合＋土壌改良資材
	ゼオライトを混合＋土壌改良資材
	堆肥及びゼオライトを混合＋土壌改良資材
有機質土（黒土）	そのままの土壌＋土壌改良資材
	山砂を混合＋土壌改良資材

表 2 土壌改良資材混合後の土壌化学性

	pH	EC (mS cm ⁻¹)	CEC (meq 100g ⁻¹)	全窒素 (%)	全炭素 (%)	腐植 (%)
山砂	6.9	0.15	1.4	0.02	0.13	0.22
山砂＋堆肥	7.9	1.00	3.0	0.08	0.86	1.48
山砂＋ゼオライト	7.0	0.02	6.6	0.02	0.00	0.00
山砂＋堆肥＋ゼオライト	7.5	0.88	9.8	0.09	1.09	1.88
黒土	7.0	0.29	26.8	0.48	8.97	15.46
黒土＋山砂	7.0	0.21	6.6	0.14	2.56	4.41

続いて、各条件の土壌をポットに均一に充填した。土壌の充填後、元肥として窒素、リン酸、カリウムをそれぞれ 14、12、12 kg (10a)⁻¹ となるように施肥を行った。施肥には硝酸アンモニウム、リン酸カルシウム、塩化カリウムを用いた。

栽培作物はコマツナとし、1ポットあたり3粒の播種を行った。発芽後、17日目に間引きを行い、発芽生育の均一な個体を選定し2株残した。播種後31日目に追肥として元肥の半量の施肥を水溶液状で与えた。栽培は播種後42日まで継続した。

栽培試験実施中に週に1回、各ポットの土壌間隙体積と等しい量の給水を脱イオン水で行った。給水後は、ポットからの流出水を採取し、その量を記録するとともに、窒素（アンモニア態および硝酸態）及びカリウムの測定を行った。また、栽培試験終了後、栽培した小松菜の草丈、地上部生体重、地上部乾物重の測定を行った。栽培試験後の土壌について、水溶態・交換態のアンモニア態窒素、硝酸態窒素及びカリウムの測定を行った。

2. 2. 実施結果

図3に栽培終了時の植物の成長度合いを示す。山砂に堆肥とゼオライトの両方を入れた区において目視でも確認できるレベルで生育が良かった。表3に示すように、作物の

重量等も山砂に堆肥とゼオライトの両方を加えた区で最も大きかった。一方、堆肥若しくはゼオライトのみを施用した区では育成は改善せず、2元分散分析の結果でも堆肥とゼオライト両方施用（交互作用）のみ有意に生育が良かった（2元分散分析、 $p < 0.05$ ）。

一方、園芸土として用いられている黒土条件は山砂に比べて生育は良くならなかった。黒土区においては多量の給水によって土壤圧縮が生じており、根圏の通気性の不足が生育悪化につながった可能性が考えられた。



図3 栽培終了後の生育状況

表3 栽培終了時の植物生育状況（カッコ内は標準偏差）

	草丈(cm)	新鮮重(g)	乾物重(g)
山砂	23.2 (1.9)	13.3 (3.0)	1.1 (0.3)
山砂+堆肥	24.9 (0.9)	19.1 (1.3)	1.4 (0.1)
山砂+ゼオライト	20.4 (1.1)	9.8 (1.0)	0.7 (0.0)
山砂+堆肥+ゼオライト	30.1 (0.2)	43.7 (4.6)	3.1 (0.4)
黒土	23.0 (4.3)	11.6 (5.5)	0.8 (0.3)
黒土+山砂	24.6 (1.5)	13.8 (2.1)	1.0 (0.1)

下端からの流出量は第2週以降、給水量とほぼ同量となった。山砂区で堆肥を施用しなかった条件では流出水中の窒素濃度は2週目以降検出限界以下となった（図4）。追肥を5～6週の間に行ったが、その影響も観察されなかった。堆肥を加えた条件では継続的に窒素が流出しており、堆肥の分解に伴って供給されたと考えられる。一方、黒土区においても窒素はほとんど流出しなかったが、追肥の影響による窒素流出量の増加は観察された。カリウムについては全区において若干の流出がみられたが、こちらにおいても堆肥を加えた区において流出量が卓越した。栽培期間中に堆肥の分解に伴う、窒素及びカリウムの供給があり、一部が流出したものと考えられる。

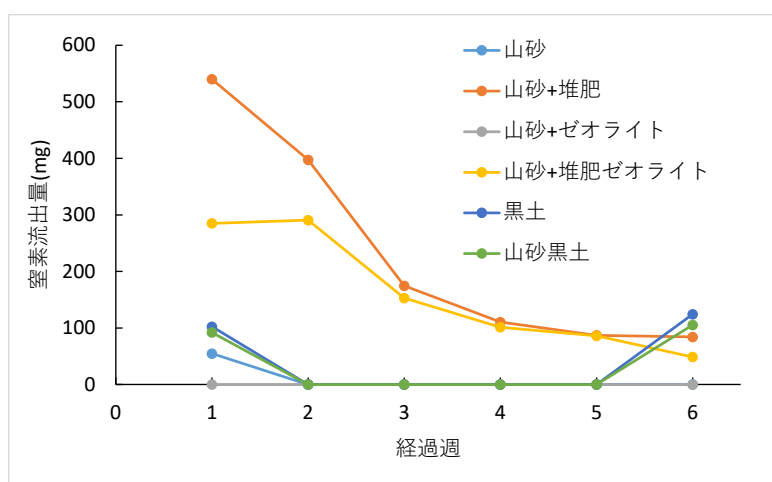


図4 溶脱水中の全窒素

栽培終了後の土壌中の窒素は概ね交換態で、アンモニア窒素の方が多かった（表4）。一般に畑作では好氣的条件によって窒素は硝酸態となるため、これは給水が過剰であり土壌が過湿気味であったことを示唆している。カリウムについてはゼオライトを加えた区で多くなっており、これはゼオライトの多孔質構造内に保持されていたものと考えられる。ただし、多量の給水にも関わらず溶脱はほとんどしていなかったことから、交換態として比較的強固に保持されていた。

栽培期間中の窒素収支は、堆肥区においては支出分が大きいですが、これは堆肥の分解によるものである(図5)。ただし堆肥から生じた窒素の大半は溶脱していた。ゼオライトを加えることで土壌への吸着が多く、結果植物生育も良くなったと考えられる。

一方、堆肥未施用の山砂区および黒土区においては投入した窒素の一部の行先が明らかでないが、アンモニア揮発等の影響が考えられた。ゼオライト区においては窒素の溶脱が少なく大半が土壌に吸着しており、これはゼオライトの作用と考えられる。ゼオライトに強く吸着されたことで植物の利用性が低くなったことが原因と示唆された。

表4 栽培終了後土壌中の窒素及びカリウム(水溶態と交換態合計) 単位: mg kg⁻¹

	アンモニア態窒素	硝酸態窒素	カリウム(K ₂ O)
山砂	1.8 (0.2)	0.8 (0.2)	7.8 (0.4)
山砂+堆肥	1.0 (0.2)	0.6 (0.1)	48.6 (2.4)
山砂+ゼオライト	7.4 (0.3)	0.5 (0.1)	145.3 (9.3)
山砂+堆肥+ゼオライト	3.9 (0.5)	1.0 (0.2)	337.3 (13.5)
黒土	2.0 (1.0)	3.6 (3.1)	26.8 (3.3)
黒土+山砂	0.7 (0.1)	0.6 (0.1)	12.3 (0.5)

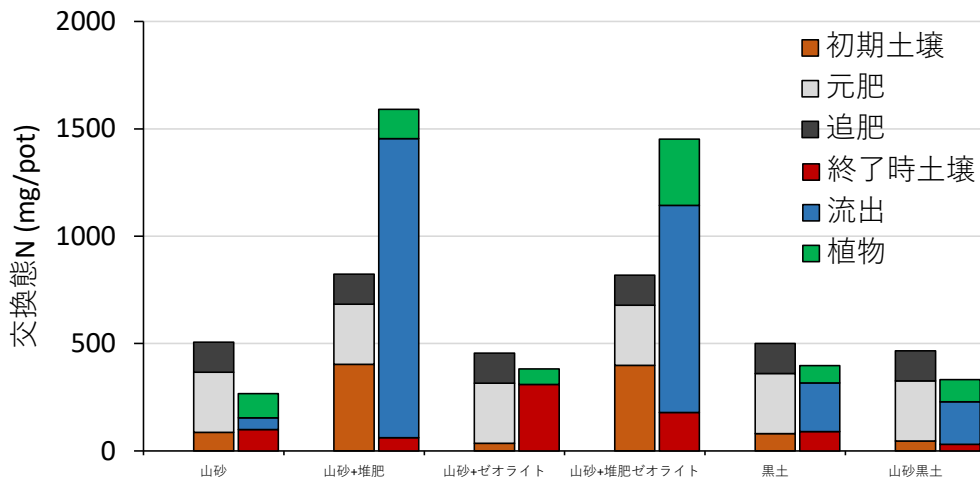


図5 栽培試験前後の窒素収支

3. 跡地の土壌硬度調査

仮置場における、除去土壌等の保管や重機走行による跡地土壌の圧縮の程度を確認するため、コーンペネトロメータ（以下「コンペネ」という。）及び山中式土壌硬度計（以下「硬度計」という。）の2種類の機器を用いて現地の土壌硬度を調査した。一部測定地点においては、土壌をサンプリングし物理性を測定した。

また、硬度計の結果は施肥基準等にも示される農学上有効な指標ではあるものの、測定に際して、後述のように重機を使用する場合がある等、労力を要することから、より簡易なコンペネを使用した調査結果から硬度計の値を推定する方法を検討した。

3. 1. 実施方法

3. 1. 1. 現地調査

福島県内の汚染状況重点調査地域内における仮置場6箇所を実施場所とした。対象とした仮置場は、福島県内県北地域の仮置場A～C、福島県内浜通り地域の仮置場D～Fである。仮置場それぞれの情報を表5-1～5-6に示す。

表 5-1 仮置場 A の情報

元の土地利用	水田
保管物種類	除去土壌等
保管物量	900 m ²
保管期間	5年7ヶ月
仮置場の状況	

表 5-2 仮置場 B の情報

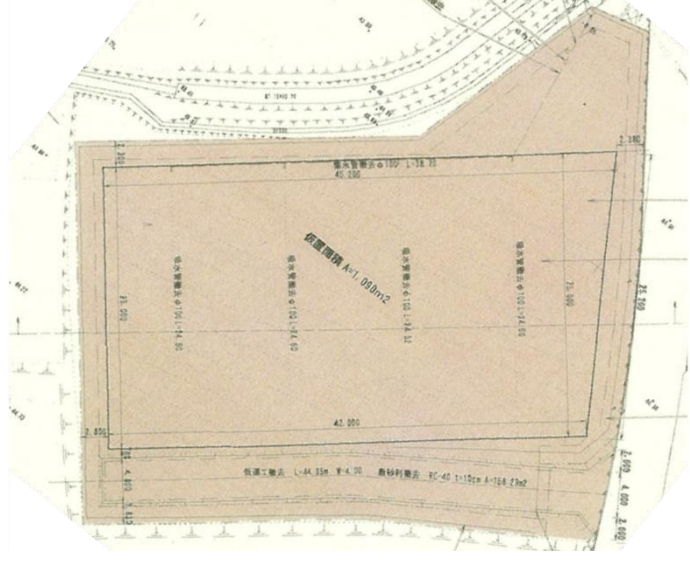
元の土地利用	水田
保管物種類	除去土壌等
保管物量	1000 m ²
保管期間	5 年 4 ヶ月
仮置場の状況	 <p>The site plan for temporary storage B shows a rectangular area with a total area of 1,030 m². The plan includes various dimensions and labels such as '仮置場 B 1,030m²', '最大貯蔵量 100 1.38 11 41.200', and '低圧工機区 1-44.35m 7-4.20 農機列置区 20-40 1-120m 4-124.20m'. The site is surrounded by a fence and has a road to the north.</p>

表 5-3 仮置場 C の情報

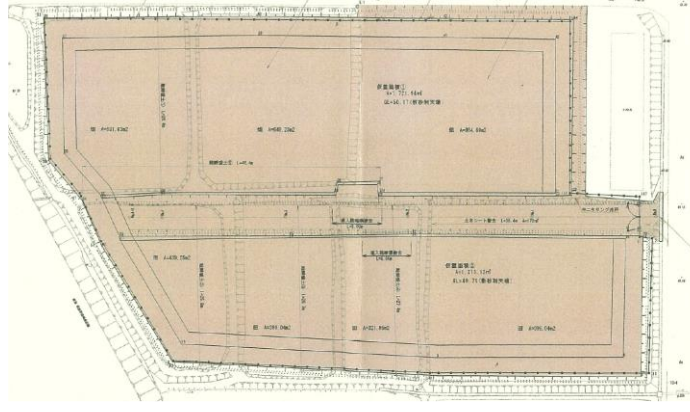
元の土地利用	一部水田、一部畑地
保管物種類	除去土壌等
保管物量	1300 m ²
保管期間	5 年 5 ヶ月
仮置場の状況	 <p>The site plan for temporary storage C shows a rectangular area with a total area of 1,300 m². The plan includes various dimensions and labels such as '仮置場 C 1,300m²', '貯蔵容量 100 1.38 11 41.200', and '低圧工機区 1-44.35m 7-4.20 農機列置区 20-40 1-120m 4-124.20m'. The site is surrounded by a fence and has a road to the north.</p>

表 5-4 仮置場 D の情報

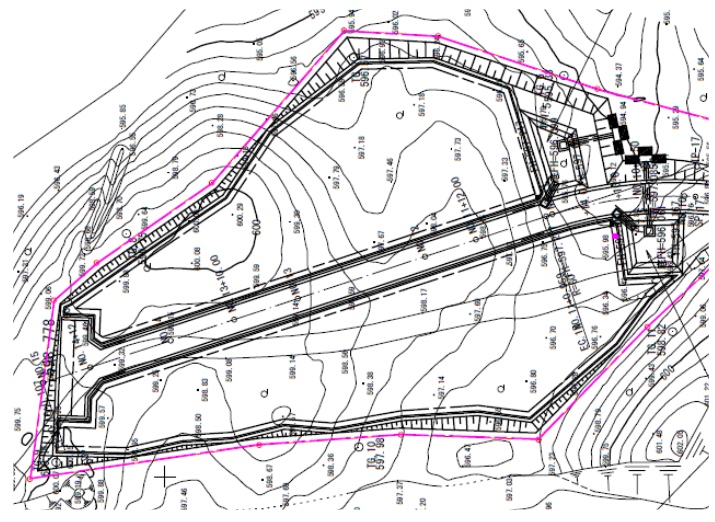
元の土地利用	山林
保管物種類	除去土壌等
保管物量	4100 m ²
保管期間	4 年
仮置場の状況	

表 5-5 仮置場 E の情報



元の土地利用	畑地
保管物種類	除去土壌等
保管物量	2500 m ²
保管期間	5 年 9 ヶ月
仮置場の状況	

表 5-6 仮置場 F の情報

元の土地利用	畑地
保管物種類	除去土壌等
保管物量	5900 m ²
保管期間	5 年 8 ヶ月
仮置場の状況	

各試験場所において、以下に示す関係資料の記載を基本として、除去土壌等が置かれていた場所（以下、「保管区画」という。）や重機走行区画を土壌硬度測定及びサンプリングの対象地点とした。各実施場所における選定地点を図 6 に示す。

【関係資料の詳細】

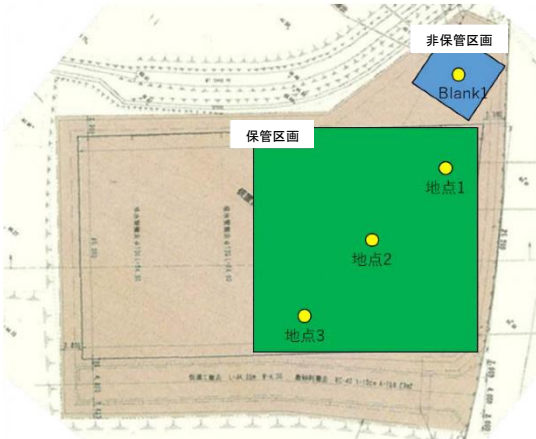
①除染関係ガイドライン（平成 30 年 3 月、環境省、第二版追補）³⁾

“具体的な調査方法は、除去土壌等が置かれていた場所や、重機の作業・運搬車両の通行が行われていた場所を対象に、それらの影響を評価できる調査地点を選定し、コーン貫入試験等を実施します。”

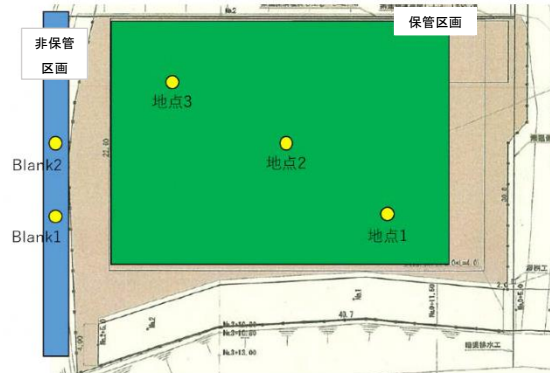
②仮置場等の原状回復に係る現場手順書【水田・未除染・深耕（第 1 編）】（平成 31 年 4 月、福島地方環境事務所）⁴⁾ 及び③仮置場等の原状回復に係る現場手順書【畑・未除染（第 2 編）】（平成 31 年 4 月、福島地方環境事務所）⁵⁾

“原状回復する田の土壌硬度（地耐力調査）は、主にポータブルコーン貫入試験により行う。試験点数は、1 ほ場あたりポータブルコーン 6 箇所以上とする。なお、コーンの貫入ができない場合は、「3.4 耕土深調査」に併せて行う調査坑壁面の土壌硬度計による調査で評価する。試験位置は、保管物設置場所や搬入路等を考慮して選定する。”

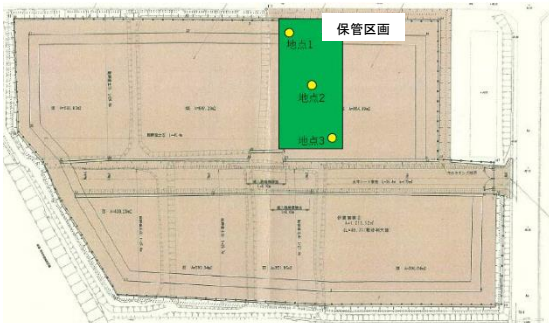
仮置場A



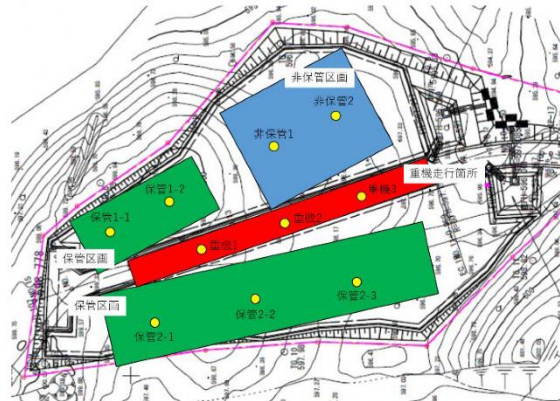
仮置場B



仮置場C



仮置場D



仮置場E



仮置場F

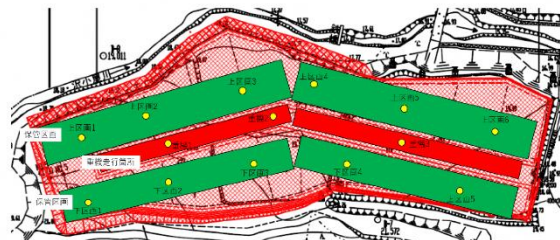


図6 対象の仮置場における測定地点

3. 1. 1. 1. コンペネを利用した土壌硬度測定

コンペネは一般に粘性土、腐葉土などの軟弱地盤に対して用いられる装置であり、コーン貫入抵抗値を求めることで建設機械の走行性や地盤の構造などを知ることができる。本試験においては図7に示すものを用いた。試験は地盤工学会基準 JGS1431 を参照し、貫入速度を 1 cm s^{-1} を目標とし、10 cm 貫入毎に荷重計の読値を記録した。貫入は最大 100 cm に至るまで実施し、各地点で最低 3 回の測定を行い平均値を求めた。ただし、何らかの理由で貫入が停止した場合には反復数を増やす場合もあった。得られた読値を表6に示す較正定数を用いて貫入抵抗とした。



図7 コンペネの様子

表6 調査に使用したコンペネの基本情報

較正定数	3.021 N (0.01mm) ⁻¹
先端コーン断面積	3.23 cm ²
コーン質量	0.1 kg
ロッド質量	0.78 kg
ロッド本数	2本

3. 1. 1. 2. 硬度計を使用した土壌硬度測定

土壌硬度計は土壌断面に対して水平に貫入し、土層の粗密度を測定する装置である。一般に農業分野で用いられており、農地における植物根の伸長の難易や透水性・通気性の程度、農業機械の走行性に影響を及ぼす地耐力（土壌の支持力）の判定などの参考となる。本試験においては図8に示す硬度計を用いた。バックホウ等を用いて図9のような試掘を作成し、測定断面をヘラ等によって成形した上で、断面を測定対象とした。断面の頂上部を0 cmとし、5 cm 深さ毎に硬度計を貫入し、100 cm 深さに至るまで実施した。なお、測定は3~5 反復実施し、その平均を測定値とした。



図8 硬度計の様子

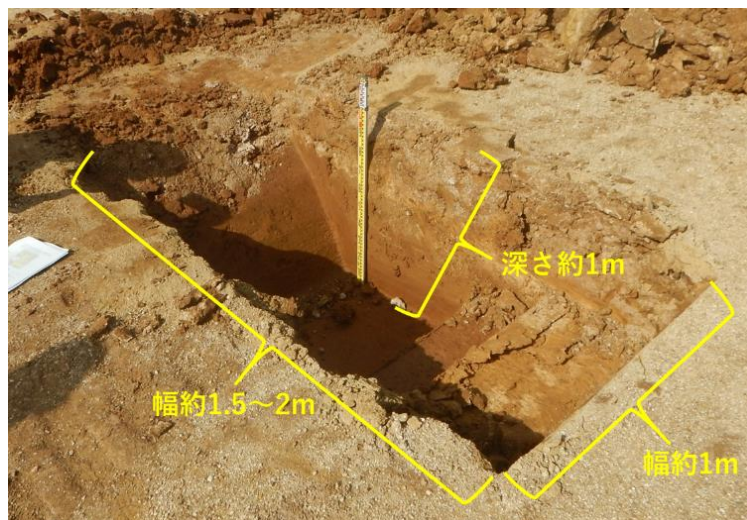


図9 作成する試掘の例

3. 1. 1. 3. 土壌サンプリングと分析

硬度計の測定を行うために作成した試掘の一部において土壌を鉛直方向に容積 100 cm³ のステンレス容器によって採取し、不攪乱のまま持ち帰り、土壌の物理性を測定した。主な項目は飽和透水係数、乾燥密度である。

3. 1. 2. 結果の換算

土壌標準分析・測定法⁶⁾に示されているSR-II型土壌抵抗測定器と山中式土壌硬度計の測定値の相関関係式、及び硬度計の読値の算出式に基づき、コンペネと硬度計の読値へ換算する方法を検討した。具体的な使用した換算式を以下に示す。

[1] コンペネ読値の貫入抵抗への換算式

コンペネの読値は、以下の(1)式によって貫入抵抗 [kg cm⁻²] に換算される。

$$\text{コンペネ貫入抵抗} [\text{kg cm}^{-2}] = \frac{K \times D + (m_c + m_r + n_r) \times 9.8}{A_c \times a} \quad (1)$$

K：較正係数、D：コンペネの読値、 m_c ：コーン質量[kg]、 m_r ：ロッド質量[kg]、 n_r ：ロッド本数、 A_c ：コーン断面積[cm^2]、 a ：単位変換のための係数(=9.8)。

[2] コンペネ貫入抵抗から山中式貫入抵抗への換算式

コンペネと硬度計貫入抵抗の間には、以下の(2)式の関係がある⁶⁾

$$\text{硬度計貫入抵抗} [\text{kg cm}^{-2}] = \text{コンペネ貫入抵抗} [\text{kg cm}^{-2}] \times 0.63 - 0.04 \quad (2)$$

[3] 硬度計貫入抵抗から硬度計読値への換算式

硬度計貫入抵抗[kg cm^{-2}]と硬度計読値[mm]の間には、以下の(3)式の理論式が成り立つ。

$$\text{硬度計貫入抵抗} [\text{kg cm}^{-2}] = \frac{(100 \times h)}{(0.7952 \times (40 - h)^2)} \quad (3)$$

h ：硬度計読値[mm]

[4] コンペネ読値から硬度計読値への換算式

(1)～(3)式を組み合わせると、コンペネ読値と硬度計読値の間に(4)式が成り立つ。

$$\frac{K \times D + (m_c + m_r + n_r) \times 9.8}{A_c \times a} \times 0.63 - 0.04 = \frac{(100 \times h)}{(0.7952 \times (40 - h)^2)} \quad (4)$$

(4)式を h について解くことで、任意のコンペネ読値から硬度計の読値を求めることができる。

3. 2. 結果

3. 2. 1. 跡地の土壤硬度調査

仮置場 A

コンペネの測定について、保管区画の測定は3地点中2地点で表層 20 cm 程度で貫入が停止した。貫入可能であった一地点においては対照地点よりも若干値が大きい傾向を示した(図 10)。ただし、ブランクのばらつきは非常に大きかった。

硬度計の測定結果は、保管区間は3地点ともほぼ同一であり、地表面が高く、深部に向かうにつれて直線的に減少した(図 10)。一方、ブランク地点の土壤硬度は、表層で小さく、20 cm 辺りにピークを持つ分布をしていた。表層の植生、及び元の土地利用が水田であったことによる硬盤形成等が考えられる。

透水性は Blank1 の表層で高いことを除けば両測定地点、およびどの深度においても同程度であった(表 7)。乾燥密度との関連性は小さく、対象地全体で排水性が極端に悪い地点はみつからなかった。

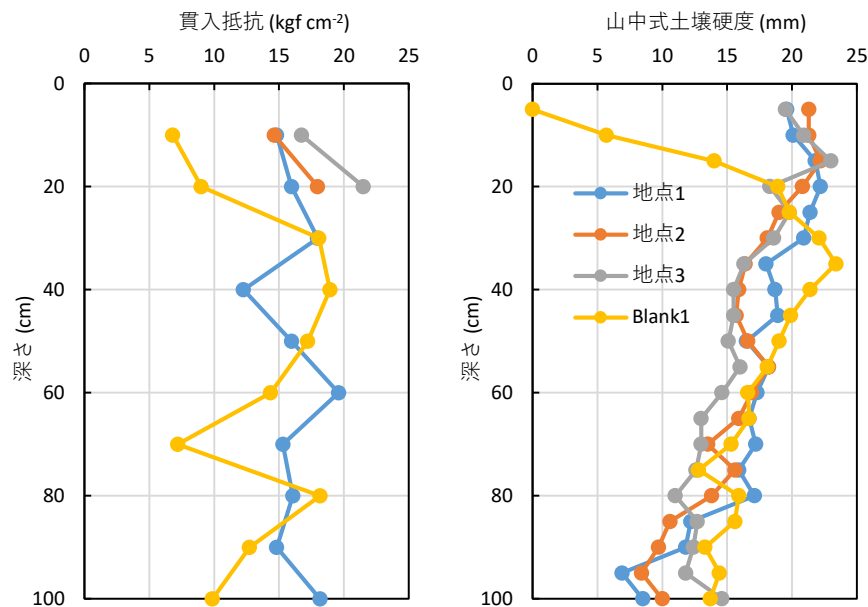


図 10 仮置場 A の土壤硬度調査結果 (左：コンペネ、右：硬度計)

表 7 仮置場 A の土壤物理性 (単位は透水係数が cm s^{-1} , 乾燥密度が g cm^{-3})

採取深	地点 1		Blank1	
	透水係数	乾燥密度	透水係数	乾燥密度
5-17cm ^{**}	3.8×10^{-4}	1.35	29.0×10^{-4}	1.26
32-37cm	5.8×10^{-4}	1.18	7.3×10^{-4}	1.30
50-55cm	-	-	1.9×10^{-4}	1.12

注) 地点 1 は 12-17 cm、Blank1 は 5-10 cm で採取、土壤構造を考慮して決定した。

仮置場 B

保管区間においては客土及び整地がされており、3 地点とも貫入が地表面数 cm で停止した。砂質の客土は変形性が小さくそれが貫入に影響したと考えられる。地点 2 において客土部分より下においては 100 cm までの貫入が可能であった。ブランクと比較して、40 cm までの貫入抵抗は小さく、それ以深ではほぼ同一であった (図 11)。硬度計の結果は保管区間とブランクではほぼ違いがみられなかった。地表面から 10~50 cm 程度までの土壤硬度が高く、以深では徐々に土壤硬度が減少した。

土壤の透水性は保管区間の表層が最も大きくなったが、乾燥密度も最大であった (表 8)。客土の砂質土 (マサ土と思われる) は粒径が大きく粗孔隙が多くなりやすい。そのため、締固めて乾燥密度が大きくとも透水性は維持されたと考えられる。その他の箇所については透水性に差はなかった。

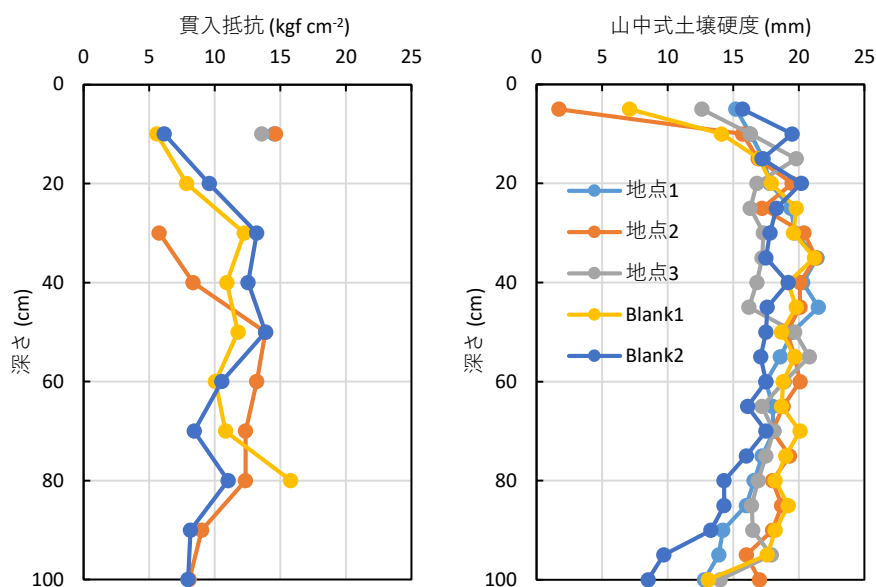


図 11 仮置場 B の土壤硬度調査結果 (左: コンペネ、右: 硬度計)

表 8 仮置場 B の土壤物理性 (単位は透水係数が cm s^{-1} , 乾燥密度が g cm^{-3})

採取深	地点 2		Blank1	
	透水係数	乾燥密度	透水係数	乾燥密度
10-15cm	32.0×10^{-5}	1.63	4.7×10^{-5}	1.28
40-45cm	1.6×10^{-5}	1.42	0.1×10^{-5}	1.17
80-85cm	2.9×10^{-5}	1.28	-	-

仮置場 C

コンペネは地点 1 のやや粘質な部分でのみ 100 cm 貫入が可能であった。その他の地点においては表層すぐに貫入停止し、測定できなかった。

硬度計の結果はばらつきが大きかったが、特に地点 3 の表層から 60 cm 程度まで土壤硬度が高いことが確認された (図 12)。各地点の測定位置はそれほど離れてはいないものの、土質に違いがあり、その影響を受けていたと考えられる。

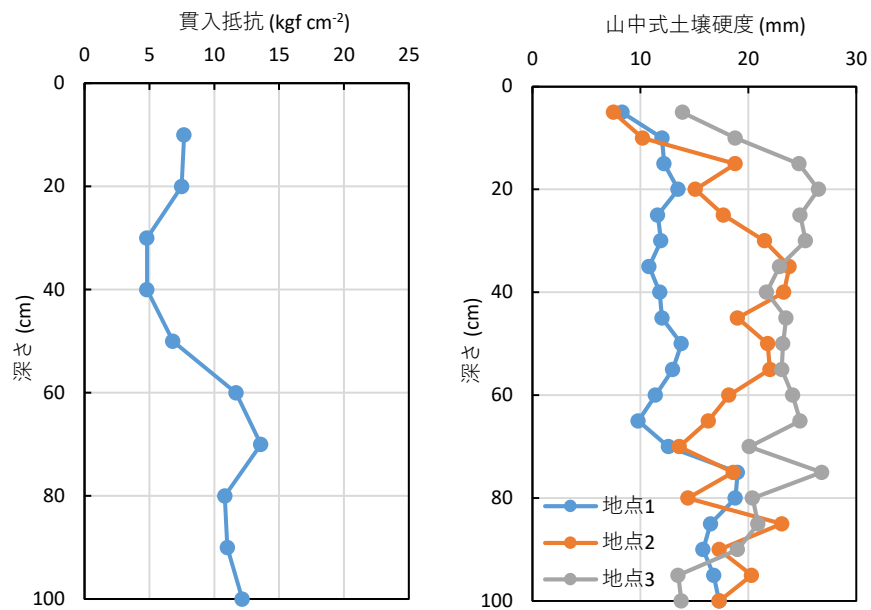


図 12 仮置場 C の土壤硬度調査結果 (左：コンペネ、右：硬度計)

注) コンペネの測定は地点 1 のみ示す

仮置場 D

コンペネの貫入抵抗は測定地点ごとの差が非常に大きく、区画間の差ははっきりしなかった（図 13）。また、100 cm まで概ね同程度の値が維持された。

硬度計の結果については重機走行区画の表層で比較的高い値がみられた。重機の走行に伴う表層の締固めが一因と考えられる。一方、保管 1 と非保管区、保管 2 と重機走行区画のように比較的近い位置の土壤硬度が似通っていたことから、保管等の管理に加えて場所による地質や整地時の切り盛りの違い等が影響している可能性がある。なお、場所ごとの違いは深部ほど小さくなり、40 cm 以降では差はみられなかった。

土壤の透水性は重機走行区画の表層で極端に低く、保管 2-3 区でやや小さかった（表 9）。その他の箇所では大きな違いはなかった。一方、非保管 2 は乾燥密度が極端に小さかったが、これは土壤が黒色の有機質土であったためである。

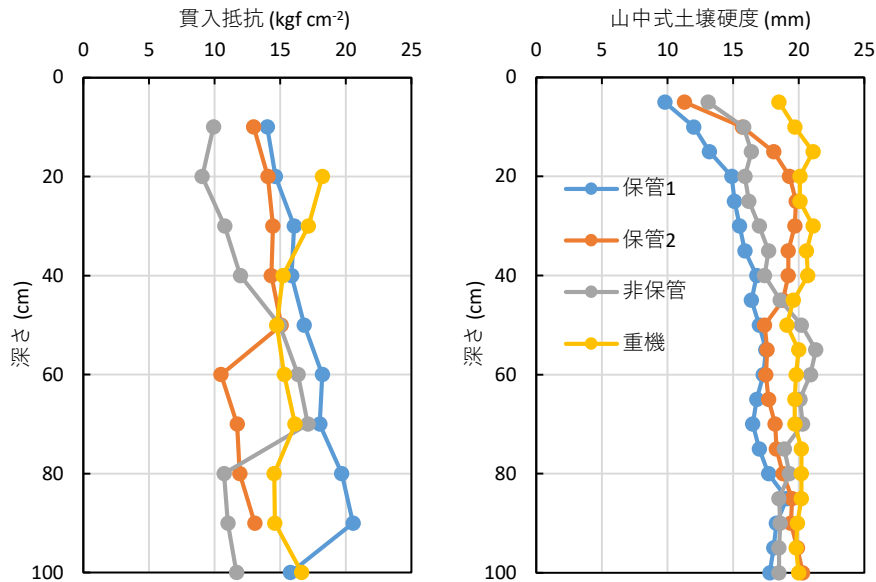


図 13 仮置場 D の土壤硬度調査結果（左：コンペネ、右：硬度計）

表 9 仮置場 D の土壤物理性（単位は透水係数が cm s^{-1} ，乾燥密度が g cm^{-3} ）

採取深	保管 1-2		保管 2-3		非保管 2		重機 3	
	透水係数	乾燥密度	透水係数	乾燥密度	透水係数	乾燥密度	透水係数	乾燥密度
20cm	2.8×10^{-3}	1.25	1.4×10^{-5}	1.11	5.9×10^{-5}	0.99	3.1×10^{-7}	1.15
50cm	4.1×10^{-3}	1.27	3.4×10^{-3}	0.75	6.6×10^{-3}	0.58	1.4×10^{-4}	1.20

仮置場 E

コンペネについては保管区画では全地点で貫入が地表面で停止した。一方、近傍の非保管区画においては、上区画は 100 cm まで、下区画は 40 cm までの貫入が可能であり、仮置場設置による締固まりが示唆された（図 14）。

硬度計の読値は表層でばらつきが大きかったが、10 cm 深さに非常に土壤硬度の高い地点がみられた。また表層の方が高い傾向にあり、深くなるにつれて土壤硬度が減少した。地点間の違いは表層のばらつきを除けば確認されていない。

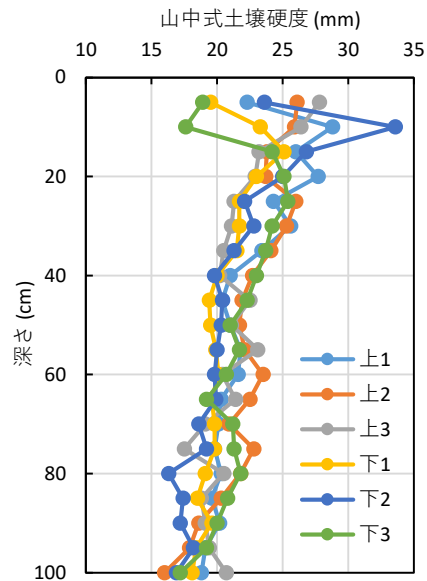


図 14 仮置場 E の土壤硬度調査結果（硬度計の結果のみ）

仮置場 F

コンペネの測定値は重機>北側>南側の順で貫入抵抗が大きく、重機走行区画では最大貫入深度が 60 cm であった (図 15)。ただし、その他の保管区画においても貫入停止するケースが多く、深さ 30 cm において半数以上の測定点で貫入できなかった。この理由としては土壌が硬い場合のほか礫等に当たるケースが多く、仮置場の石礫の状況によっては貫入困難であることが示唆された。

硬度計の値については、北側と重機走行区画がほぼ同程度で、南側は土壌硬度が比較的小さかった。北側と重機走行区画は深さ 20-60 cm にかけて特に土壌硬度が高く、平均で 20 mm を超え、根の伸長や排水性に懸念が生じるレベルであった。

仮置場の土壌物理性は深部の 45-55 cm の方が透水性が大きい傾向にあったが (表 10)、この深度のサンプルからは植物根に由来するマクロポアが観察された (図 15)。このような粗孔隙が残っていると飽和透水係数が大きくなる。一方、表層においては均一に透水性が低く、整地等の影響が大きかったものと考えられた。

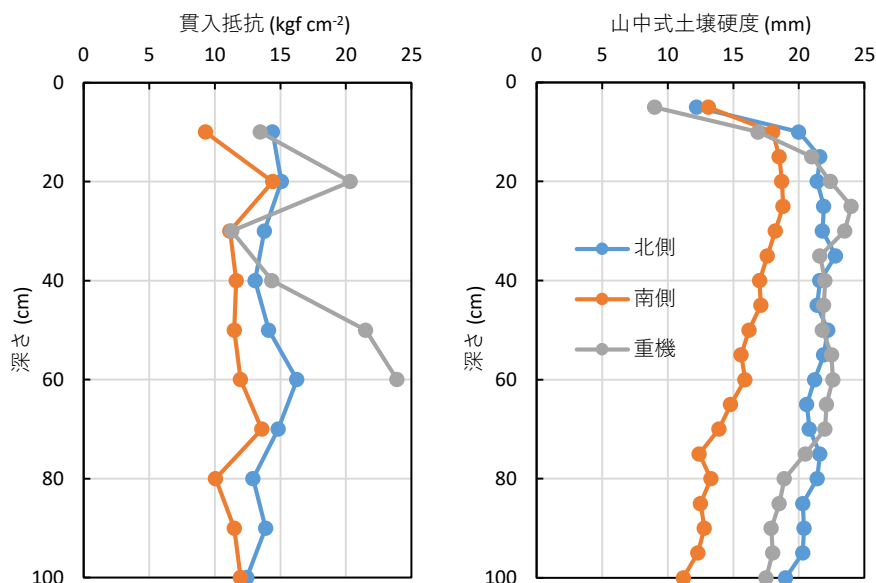


図 15 仮置場 F の土壌硬度調査結果 (左: コンペネ、右: 硬度計)

表 10 仮置場 F の土壌物理性 (単位は透水係数が cm s^{-1} , 乾燥密度が g cm^{-3})

採取深	上 1		上 4		上 6	
	透水係数	乾燥密度	透水係数	乾燥密度	透水係数	乾燥密度
25-30cm	6.1×10^{-5}	1.34	1.8×10^{-5}	1.25	6.1×10^{-5}	1.45
45-55cm	3.4×10^{-3}	1.33	7.6×10^{-7}	1.28	1.7×10^{-3}	1.36

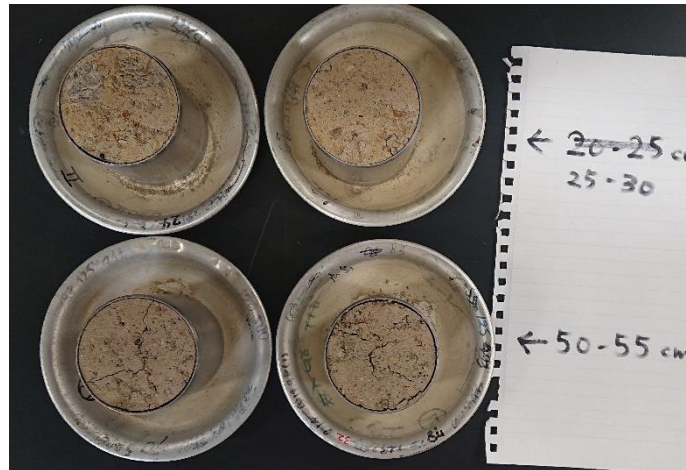


図 15 100 cm³ 容器で採取した土壌（乾燥後）の様子
 注) 50-55 cm サンプルには根由来と思われる穴が確認できる

3. 2. 2. 結果の換算

結果の換算用のエクセルシートについて図 16 に示す。システム上では、コンペネの較正係数やロッド本数などの測定条件を入力すると自動的にコンペネ読値と山中式の土壌硬度の対応が取れるようになっている。また任意の山中式土壌硬度に対応するコンペネ読値を、エクセルマクロを用いて計算できるようにしている。ただし、コンペネと山中式の関係性は土壌や測定条件等の影響が大きく、結果としてばらつきも大きいことに留意する必要がある。

今回作成した換算式及び計算シートは、一部市町村において面積の大きい仮置場の原状回復における硬度調査結果の解析に活用された。

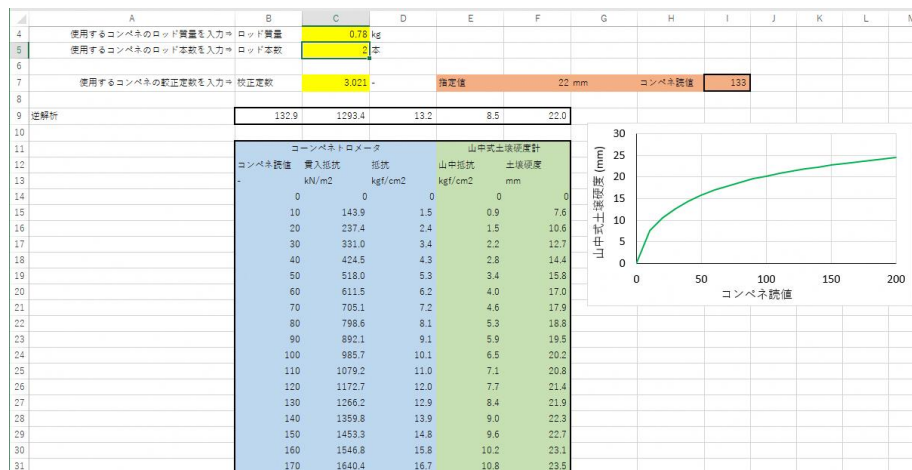


図 16 換算用エクセルシート（一部）

4. まとめ

ポット試験においては山砂には堆肥とゼオライトの両方を加えることで生育改善が期待されることが示唆された。栽培期間中、特に施肥後に降水量が多いなど、多量の給水が見込まれる生育条件においては、堆肥から分解された窒素の溶脱を防ぐためのゼオライトの施用が効果的であると考えられる。

土壌硬度調査においては、特に重機走行区画で土壌硬度が高くなった。保管区画も土壌硬度が高い傾向にはあるものの、必ずしも保管区＞非保管区とはならなかった。また、多くの地点で表層が高くなりやすいものの、場所によっては深部まで締固まっている傾向がみられた。簡易な測定法であるコーンペネトロメータは、一部の仮置場において表土の締固まりにより貫入できない場合が確認された。

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の方々に御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 環境省 中間貯蔵施設情報サイト. <http://josen.env.go.jp/chukanchozou/>
(2024年1月26日最終閲覧)
- 2) 福島県. 福島県施肥基準.
<https://www.pref.fukushima.lg.jp/sec/36021d/kankyounogyousehikijyun.html>
(2024年1月26日最終閲覧)
- 3) 環境省 (2018) 除染関係ガイドライン (平成25年5月第2版 (平成30年3月追補)). <http://josen.env.go.jp/material/> (2024年1月26日最終閲覧)
- 4) 福島地方環境事務所 (2021) 仮置場等の原状回復に係る現場手順書【水田・未除染 (第1編)】. <http://josen.env.go.jp/material/index.html> (2024年1月26日最終閲覧)
- 5) 福島地方環境事務所 (2021) 仮置場等の原状回復に係る現場手順書【畑・未除染 (第2編)】. <http://josen.env.go.jp/material/index.html> (2024年1月26日最終閲覧)
- 6) 土壌標準分析・測定法委員会 (2003) 土壌標準分析・測定法. 博友社