

## 農林水産分野の先端技術展開事業 令和5年度終了課題 報告書

事業名	農林水産分野の先端技術展開事業(研究開発/現地実証研究委託事業)
研究課題名	見える化技術を活用した土壌肥沃度のばらつき改善技術の開発
研究代表機関	福島県農業総合センター浜地域農業再生研究センター
研究実施期間	令和3年度～令和5年度 (2021-2023年度 3カ年)

### (1) 事業目標の達成結果

福島県の旧避難指示区域等では、数万筆のほ場において「表土剥ぎ+客土」による農地除染が行われたため、土壌肥沃度の低下とほ場内のばらつきが顕著なほ場が多い。このため、「土壌肥沃度の面的分布の見える化」技術と「高機能堆肥の可変散布」技術との連携により、ほ場内の土壌肥沃度のばらつきを効果的に改善するシステムを開発した。

### (2) 活動実績の概要

#### 【推進会議・現地検討会】

- ・ R3 推進会議 (2021/07/12)、オンライン開催、非公開
- ・ R3 現地検討会 (2021/11/08)、福島県富岡町、非公開
- ・ R4 第1回統合試験 (2022/08/24-25)、福島県富岡町、非公開
- ・ R4 第2回統合試験・推進会議 (2023/03/16)、福島県富岡町、非公開
- ・ R5 第1回現地検討会・推進会議 (2023/10/07)、福島県富岡町、限定公開
- ・ R5 第2回現地検討会 (2024/02/21)、福島県富岡町、一般公開  
(福島県農業総合センター技術移転セミナーとして開催)

#### 【現地試験】

- ・ 高機能堆肥の可変散布試験 (2022/08/08-09)、福島市
- ・ 土壌センシング試験、可変散布試験 (2023/03/15-16)、福島県富岡町
- ・ 麦類栽培試験 (2023/05/18-08/18)、福島県富岡町
- ・ 高機能堆肥の可変散布試験 (2023/07/25-26)、福島市
- ・ 土壌センシング試験 (2023/10/24, 11/01)、福島県大熊町、浪江町、双葉町
- ・ 高機能堆肥の可変散布試験 (2023/11/28-29)、青森県十和田市
- ・ 高機能堆肥の可変散布試験 (2024/02/21)、福島県富岡町

#### 【コンソーシアムの打合せ】

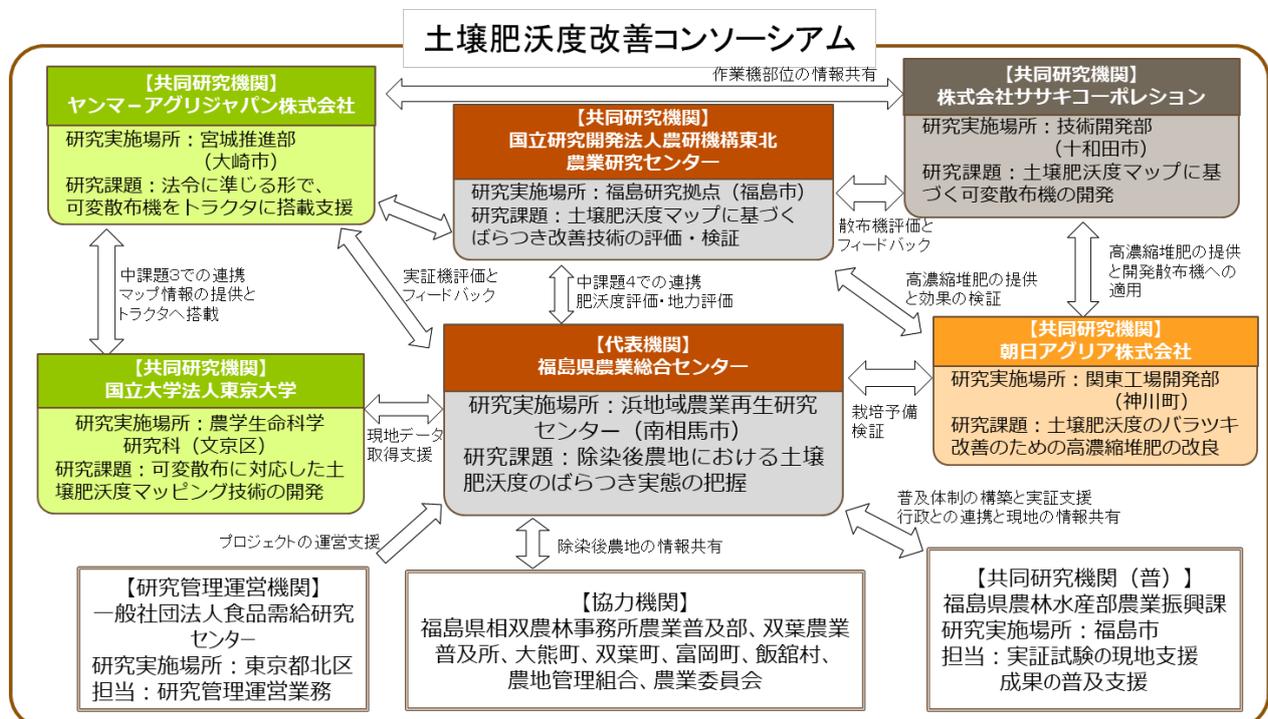
- ・ 朝日アグリア(株)訪問、打合せ (2021/09/17)、埼玉県神川町
- ・ R3 第1回技術検討会 (2021/10/15)、オンライン開催
- ・ R3 第2回技術検討会 (2022/02/10)、オンライン開催
- ・ (株)ササキコーポレーション訪問、打合せ (2022/06/08)、青森県十和田市
- ・ (株)ヤンマーアグリジャパン訪問、打合せ (2022/06/14)、宮城県大崎市
- ・ R4 第1回技術検討会 (2022/06/23)、オンライン開催

- ・ R4 第 2 回技術検討会（2023/12/02）、オンライン開催
- ・ 朝日アグリア（株）訪問、打合せ（2023/02/21）、埼玉県神川町
- ・ R5 第 1 回技術検討会（2023/11/30）、オンライン開催
- ・ R5 第 2 回技術検討会（2024/02/01）、オンライン開催

【運営委員会】

- ・ R3「農林水産分野の先端技術展開事業」運営委員会（中間検討会）（2022/12/09）、オンライン対応
- ・ R4「農林水産分野の先端技術展開事業」運営委員会・評価委員会（2023/02/27）、オンライン対応
- ・ R4「農林水産分野の先端技術展開事業」に係る運営委員会（中間検討会）（2022/10/18）、オンライン対応
- ・ R4「農林水産分野の先端技術展開事業」運営委員会・評価委員会（2023/02/27）、オンライン対応
- ・ R5「農林水産分野の先端技術展開事業」研究成果等に関する報告会（2023/08/02）、福島県浪江町
- ・ R5「農林水産分野の先端技術展開事業」運営委員会（2023/02/28）、福島県浪江町

(3) 事業実施体制



#### (4) 事業成果

##### ① 総括

##### 1) 達成目標

土壤炭素含有率を土壤肥沃度の指標として、その圃場内の面的分布を非接触で計測・可視化し、診断マップおよび改善のため処方せんマップを作成する技術を開発する。生成されたデジタル処方せんマップに基づいて高機能堆肥を可変散布するシステムを開発する。両者の連携により耕作に適したレベルの土壤条件を確保するための改善技術を構築する。

##### 2) 実施内容と目標達成度

中課題1～3で①可変散布機の開発、②高機能堆肥の改良、③土壤肥沃度のセンシング/マッピング技術の開発を行い、現地試験等により各システムの動作や精度、操作性等の改良を重ねた。各課題の開発成果の連携性や全体としてのワークフローを検証するため、福島県富岡町の除染後農地で統合試験を実施（2022年10月、2023年3月）し、技術システムとしての課題抽出と改良を進めた。併せて、統合技術の現地運用に関する検討や高機能堆肥の評価等の中課題4で行い、目標としていた技術システムの構築を概ね達成した（図1-1）。

##### 3) 波及効果等

最終年度には、開発した新規技術システムを一般向けに紹介する技術パンフレットを作成・公表するとともに、現地検討会（福島県富岡町の除染後農地）を通して開発システムを一般公開した。土壤肥沃度の効率的な改善システムは、福島県の被災地域のみならず全国で利活用できる技術であり、引き続き、現地でのニーズを把握し、実利用を進める予定である。



図1-1 開発した土壤肥沃度改善システム

## ② 課題毎の実施内容と結果概要

### 【中課題1：土壤肥沃度マップに対応した可変散布機の開発】

(担当機関：(株) ササキコーポレーション)

#### 1) 達成目標

シャッター開度量を制御する機構を備えた可変散布機の開発

#### 2) 実施内容

<2021 年度> (達成度 40%)

- (1) ブロードキャスターの肥料出口形状でのペレット状堆肥の吐出状況の検証
- (2) ライムソワーをベースとした施肥機体の検討
- (3) 散布作業の測位への GNSS 機材の適用決定と、処方マップの GNSS 機材への入力プロトコルの協議

<2022 年度> (達成度 80%)

- (1) ライムソワーをベースにしたシャッター連結部の部品製作と吐出量計測
- (2) 疑似的マップによるシャッター開閉の可変施肥制御の作動確認
- (3) 路上試験による実走行時の動作確認
- (4) 統合試験におけるマッピングデータ受取から可変散布までの一連の動作確認
- (5) 可変散布開始時の通信確立改良

<2023 年度> (達成度 100%)

- (1) シャッター吐出開口部の改良
- (2) 異なる種類のペレット堆肥が散布可能であることの確認
- (3) 路上試験による実走行時の肥料吐出量と車速との相関性の確認
- (4) ホッパー内の肥料残量を検知する残量センサーの設置
- (5) コンソール表示画面上における施肥経路の基準線の表示改良
- (6) ホッパー容量アップのための改良設計、製作、組立
- (7) ホッパー容量アップに伴う吐出量測定と確認

#### 3) 結果概要

<2021 年度>

肥料散布機ブロードキャスター（散布幅 10m）、ライムソワー（散布幅 2.4 m）の 2 機種を用いて高機能堆肥（ペレット堆肥）のシャッター吐出確認、および、最大吐出量を比較し実施し、処方せんマップの細分化に対応できる自然落下方式のライムソワーをベースとし、通信手段は国際標準規格 ISOBUS に準拠した可変散布機とすることを決定した（表 2-1）。

表 2-1 肥料散布機の違いによる高機能堆肥の 1 分間あたりの吐出量

○高機能堆肥(ペレット) の 1 分間あたりの吐出量		(PTO回転数 540rpm) 吐出量(kg/min)									
シャッター開度		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
機種											
ブロードキャスター		-	4.2	9.8	20.0	33.3	41.4	54.5	60.0	66.7	75.0
ライムソワー		-	1.2	3.5	6.6	11.3	20.4	43.1	81.3	97.0	97.6

ISOBUS に準拠した位置情報取得機器の選定（図 2-1）と、位置情報取得機器からの位置情報と処方せんマップを取得する通信ソフトと、処方せんマップに基づいて可変散布を実行する可変散布プログラムを備えた可変散布システムの開発、および可変散布機を制御する電子制御ユニット（ECU）の開発を行った（図 2-2）。



図 2-1 位置情報取得機器の選定



図 2-2 電子制御ユニット（ECU）

### <2022 年度>

ライムソワーをベースにした可変散布機のシャッター連結機構部の設計、部品製作を行い、シャッター開度と高機能堆肥（ペレット）の吐出量の関係を計測した（表 2-2）。

表 2-2 ライムソワーでの高機能堆肥の 1 分間あたりの吐出量

○高機能堆肥(ペレット)の1分間あたりの吐出量		(PTO回転数 540rpm) 吐出量(kg/min)																			
機種	シャッター開度	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
ライムソワー		0.0	0.0	0.0	0.2	1.3	2.4	3.6	5.1	7.2	8.7	11.0	13.6	19.0	24.8	34.7	47.9	63.8	83.0	98.0	99.1

この計測結果を基に、可変散布システムへ組み込む高機能堆肥の散布テーブルを作成した。

疑似処方せんマップを用いてシャッター開閉の可変散布制御の作動確認を実施し、処方せんマップの各メッシュの境界で、シャッター開度が制御され、シャッターが変動していることが確認できたが、散布軌跡の色分け表示にズレが発生し、可変散布プログラムの改良を実施した（図 2-3）。



図 2-3 可変施肥の表示部色分け状態と散布軌跡のズレ

路上試験による実走行時の動作確認では、3, 4, 5km/h の各トラクタ車速において、設定散布量に対する実際の散布量を測定した結果、300kg/10a の設定で、目標施肥量に対し実散布量の不足であった。補正係数 1.3 倍で、誤差なしの測定結果であった。また、500kg/10a、200kg/10a 設定では誤差±10%の範囲で散布可能であった（表 2-3）。

表 2-3 肥料吐出量測定結果

作業速度 (km/h)	設定施肥量 (kg/10a)	実施施肥量 (kg/2.4m*5m)	目標施肥量 (kg/2.4m*5m)	備考
3	300	2.6	3.6	
4	300	2.6	3.6	
5	300	2.6	3.6	
3	300	3.6	3.6	補正係数*1.3
4	300	3.6	3.6	補正係数*1.3
5	300	3.6	3.6	補正係数*1.3
3	500	6.2	6.0	補正係数*1.3
4	500	6.4	6.0	補正係数*1.3
3	200	2.2	2.4	補正係数*1.3
4	200	2.2	2.4	補正係数*1.3
5	200	2.2	2.4	補正係数*1.3

第 1 回統合試験では、センシングにより計測された計測マップから 2.4 m メッシュで生成された処方せんマップ（中課題 3）のデータを USB メモリで受取り、可変散布機側の ECU に取り込み、可変散布機側の ECU にてマップ変換され、表示装置（コンソール）へ表示することができた。

このマップにて可変散布作業を行い、メッシュ位置に到達した時シャッター開度が制御され、シャッターが変動し可変散布されていることが確認できた。また、散布軌跡の色分け表示のズレを解消したことを確認した（図 2-4）。

散布量については、設定散布量と実散布量の差を測定し、設定施肥量 78.96kg に対し、実施施肥量 82.5kg で+5%の結果であった。

この試験時に、可変散布機側 ECU とトラクタ側 ECU 間での通信確立に時間を要したことにより、通信ソフトの改良を実施し、第 2 回統合試験での通信確立はスムーズに接続された。



図 2-4 実散布時の表示部と散布軌跡のズレ解消

<2023 年度>

シャッター吐出開口部の改良型を製作し、朝日アグリア(株)から高機能堆肥の提供を受け、改良型シャッター吐出開口形状での高機能堆肥の吐出状況を測定した。その結果、1 分間あたり 227 kg の吐出量を得ることができた。改良前に対し 2.3 倍の吐出量となった(図 2-5)。この計測結果を基に、可変散布システムの高機能堆肥散布テーブルの改良を行った。

シャッター開度	吐出量(kg/min)	
	改良後(四角)	改良前(三角)
0	0	0
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	1
6	9	3
8	43	7
10	85	11
12	109	20
14	134	43
16	166	81
18	208	97
20	227	98

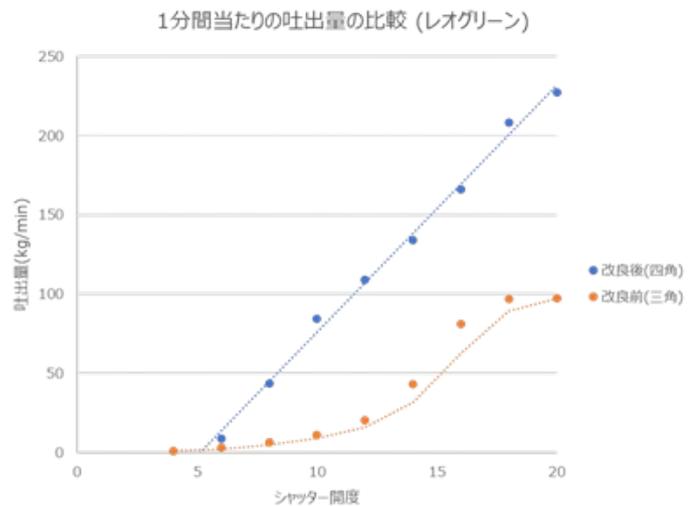


図 2-5 シャッター開度と吐出量関係

また、異なる種類の堆肥入銘柄の吐出状況の測定を実施した結果、比重、形状の違いによって吐出できないことはなかった(図 2-6)。

シャッター 開度	吐出量(kg/min)		
	レオグリーン	稲サボ	エコレット
0	0	0	0
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0	0	0
4	0	0	1
5	1	8	17
6	9	17	33
7	26	42	56
8	43	66	78
9	64	93	106
10	85	119	132
11	96	138	151
12	109	158	169
13	121	176	193
14	134	194	215
15	150	216	239
16	166	238	262
17	186	263	289
18	208	290	319
19	217	298	328
20	227	307	338

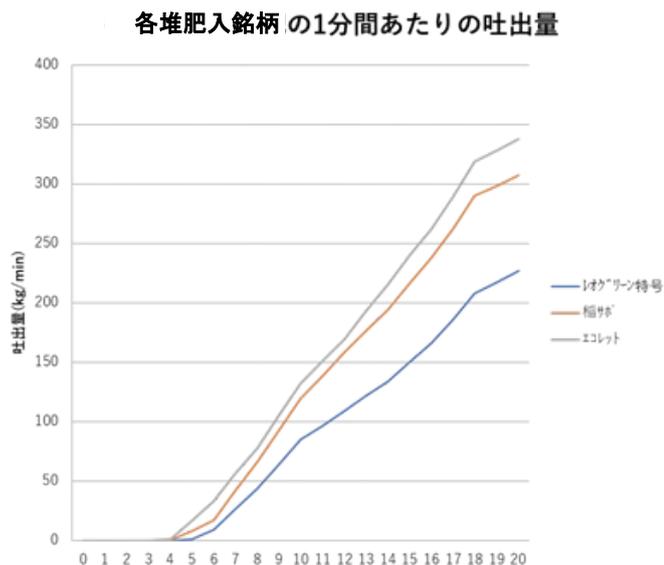


図 2-6 異なる堆肥入銘柄の吐出量

事前確認試験では、各トラクタ車速の違いに対する肥料吐出量を測定した。まず、散布量 500kg/10a の設定で、作業速度 3km, 5km/h では、目標散布量に対し約 3%の誤差であった。車速が上がると相対的に散布量が減少する傾向となり、誤差が大きくなった。

プログラム補正を実施し、散布量 150kg/10a、作業速度 3km/h では、ほぼ 100%となり、5km/h で 10%程度落ちた。また、300kg/10a の設定では、3km/h でプラス 12% になっているため、さらにプログラム補正を加え、誤差をおおむね 10% の範囲に収まるよう改善した (表 2-4)。

表 2-4 肥料吐出量測定と目標と実散布量の比較 (レオグリーン特号)

肥料：レオグリーン特号

目標散布量 (kg/10a)	車速 (km/h)	5m区間目標散布量 (kg)	5m区間実散布量 (kg)	全体散布距離(m)		全体散布量(kg)		実散布量/目標散布量	
				目標値	実測値	目標値	実測値	5m区間	全体
500	3	6	6.33	21.55	-	25.86	26.77	106%	104%
500	5	6	5.65	15.15	-	18.18	16.3	94%	90%
700	3	8.4	8.33	11.77	-	19.77	19.01	99%	96%
700	5	8.4	7.15	19.5	19.7	32.83	27.48	85%	84%
700	7	8.4	6.87	17.64	17.65	29.64	23.05	82%	78%
700	4	8.4	7.5	16	-	26.89	23.65	89%	88%
プログラム補正①									
150	3	1.8	2.36	11.98	12.1	4.31	5.63	131%	131%
150	5	1.8	2.24	18.19	19.2	6.55	7.71	124%	118%
300	3	3.6	4.21	18.19	18.4	13.09	14.94	117%	114%
300	5	3.6	3.92	17.68	17.6	12.73	13.5	109%	106%
500	5	6	5.76	18.3	18.15	21.96	20.65	96%	94%
700	7	8.4	7.94	19.6	20	32.93	30.66	95%	93%
700	5	8.4	7.77	18.45	18.5	31	28.2	93%	91%
プログラム補正②									
150	3	1.8	1.81	15.09	15.3	5.43	5.25	101%	97%
150	5	1.8	1.7	15.63	15.7	5.63	5.03	94%	89%
300	3	3.6	4.03	14.39	14.5	10.26	11.5	112%	112%
300	5	3.6	3.79	16.51	16.2	11.89	12.3	105%	103%
500	3	6	5.77	13.4	14.1	16.68	16.13	96%	97%
500	5	6	5.82	17.98	16	21.57	20.88	97%	97%

ホッパー内の肥料残量が少なくなったことを検知する残量センサーからの信号をコンソール表示画面に出力させ、満載時は点灯、残量が少なくなると点滅表示するよう改良を行った。点滅表示することで、空での散布作業を未然に防ぐことができた（図 2-7）。



図 2-7 肥料残量表示追加

コンソール表示画面上に表示される施肥計画マップに、施肥経路の基準線を散布幅の中心に表示するよう改良を行った。基準線があることにより、施肥計画マップに対するトラクタの位置合わせおよび可変散布作業を容易に行うことができた（図 2-8）。

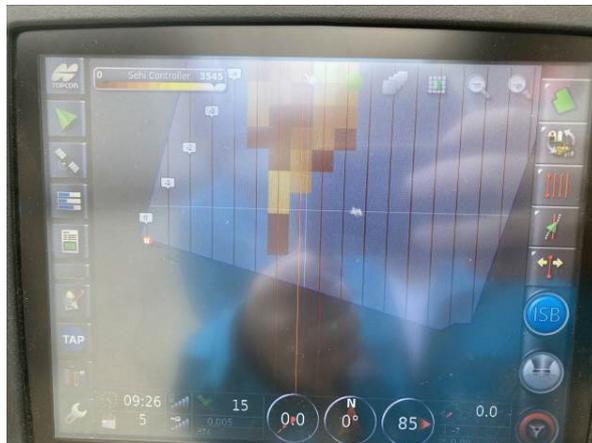


図 2-8 施肥経路基準線表示追加

高機能堆肥（ペレット堆肥）の施肥設定量増大を考慮し、補給回数を削減するためホッパー容量仕様検討を行い、容量アップの改良部品の設計、製作、組立を実施、ホッパー容量を 385 リットルから 615 リットルへ改良し高機能堆肥 400kg を積載可能とした（図 2-9）。



図 2-9 ホッパー容量アップの機体

ホッパー容量アップに伴う吐出量の測定を実施し、最大吐出量1分間あたり 227 kg の結果を得ることができた（図 2-10）。この計測結果を基に、可変散布システムの高機能堆肥散布テーブルの改良を行った。

シャッター開度	吐出量(kg/min)
0	0
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	18
7	36
8	55
9	77
10	98
11	118
12	133
13	149
14	163
15	185
16	205
17	229
18	250
19	268
20	271

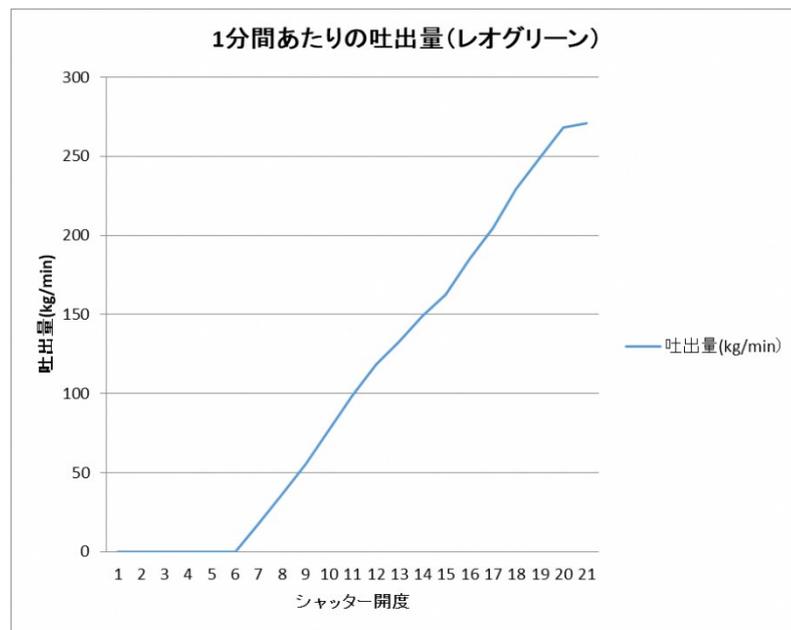


図 2-10 ホッパー容量アップ後のシャッター開度と吐出量の関係

以上より、概ね予定どおり目標を達成した。

**【中課題 2： 土壌肥沃度のばらつき解消のための高機能堆肥の改良】**

（担当機関：朝日アグリア（株））

1) 達成目標

可変散布機に適応する高機能堆肥の改良品開発

2) 実施内容と達成状況

<2021 年度>（達成度 40%）

- (1)「高機能堆肥の改良版」の開発に際し、畜ふん堆肥、腐植酸、ひまし油粕等の組合せや配合量を検討し、成形が可能な設計を行った。

#### <2022 年度> (達成度 80%)

- (1)肥効性および炭素貯留効果を高められる原料の検討のため、現採用牛ふん堆肥等について CN 比を中心とした原料性質についてデータ解析を実施した。
- (2)既存品「レオグリーン特号」を構成する原料について、肥効性を確認するため、無機化率についてシミュレーション解析を実施した。
- (3)路上試験と統合試験で既存品「レオグリーン特号」を散布し、資材の施肥むらや粉発生有無について確認した。
- (4)既存品「レオグリーン特号」の着色試験を開始し、着色剤の新規検討、転換版資材の振動試験を実施した。

#### <2023 年度> (達成度 100%)

- (1)継続的に使用している「レオグリーン特号」に加え、比重・粒形の異なる 2 種類の高機能堆肥を使用し、散布機適合性を検討した。
- (2)資材の散布確認のため、資材の着色方法を検討した。

### 3) 研究の実施状況

#### <2021 年度>

- (1) 畜ふん堆肥、腐植酸、ひまし油粕等の組み合わせや配合量を検討し、成型が可能な設計について検討した。使用する原料は、土壌への炭素貯留性等が高いと想定される原料を選抜した。その中で、有機原料である牛糞堆肥及び腐植酸については配合量によって、成型する形状（円柱状のペレット）や、生産性に影響しやすいことが明らかとなった。

#### <2022 年度>

- (1) 各種原料および試作品、既存品「レオグリーン特号」において、CN 比を中心に成分分析を東北農研にて実施した（表 2-1）。炭素の含有量に関して、レオグリーン特号は試作品と同程度であることがわかり、炭素貯留効果があると考えられた。
- (2) JA 施肥改善支援システム「施肥名人」を使用し、原料別の無機化シミュレーションを作成した（図 2-1）。レオグリーン特号は、施肥窒素の約半分が無機化されることが確認された。
- (3) 事前施肥試験において、吐出量別における散布ムラは軽微であることが確認された（表 2-2）。ただし、500 kg/10a 相当の施肥の場合、吐出量が多くなる影響で、本資材の推奨施用量である 100-200 kg/10a に比べ、粉立ちがやや生じることが確認された。資材施用後のペレット規格である 2 mm オーバーの粒度品は 95% 以上あり、圃場レベルでの散布ムラへの影響は少ないことが確認された。
- (4) 食紅を中心とした着色剤を数種類選定し、レオグリーン特号への粉末添加を試みた。添加割合を 0.5~2.0% とした際、添加割合が増える程資材の着色性は良化することが明らかになった。

#### <2023 年度>

- (1)「レオグリーン特号（ペレット品）」に加え、比重および形状の異なる堆肥入

銘柄「稲サポ（ペレット品）」と「エコレット 553（アグレット品）」の散布機適合試験を東北農研福島拠点において実施した。3種類の比重および形状は表 2-3、写真 2-1 のとおり。散布機の設定量および速度を変更し、散布量と設定量を比較検討した結果、93～117%の差であった。比重および形状による差はなかった。

(2)資材の散布後、散布状況を確認するため、着色材と添加量を検討した。着色材は写真 2-2 のとおり。目視での色の変化を確認しやすいのは、肥料の固結防止材として使用できるシリカフュームであった（写真 2-3）。しかし、表面の着色のみのため、散布後の風雨等により表面が洗い流される等によって、目視で経時的变化を確認することは難しいと考えられた。

表 2-1 試作品および原料の成分分析

堆肥サンプル	水分 [%]	C/N [-]	全炭素 (%w.b.)	全窒素 (%w.b.)	P2O5 (%w.b.)	K2O (%w.b.)	灰分 %
レオグリーン特号	11.5	9.0	31.9	3.6	3.8	1.4	28.7
試作品①	6.6	20.4	31.4	1.5	1.8	1.7	38.6
試作品②	3.2	6.1	24.3	4.0	5.1	4.9	46.7
鶏糞堆肥	20.0	7.7	21.7	2.8	3.8	3.1	38.3
バーク堆肥	39.6	14.7	29.7	2.0	0.3	0.5	11.5
乾燥菌体	11.1	6.2	33.0	5.3	4.6	0.4	26.7
米ぬか	11.3	21.2	43.3	2.0	4.7	1.9	8.1
魚かす	9.5	4.5	35.0	7.7	11.8	0.4	27.6

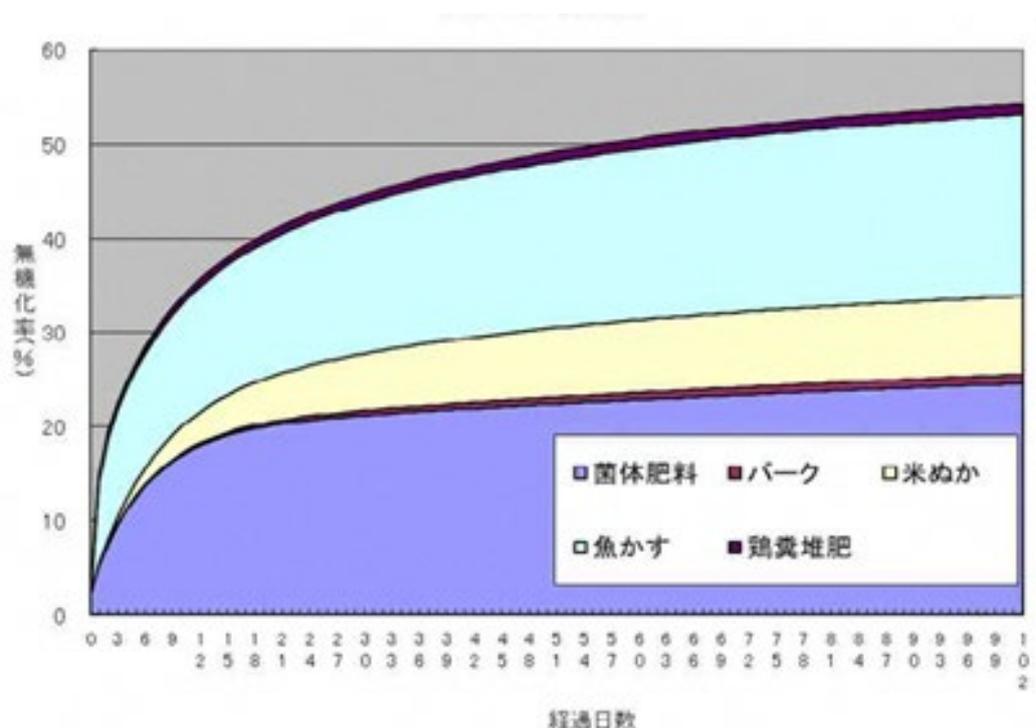


図 2-1 レオグリーン特号の無機化シミュレーション (25°C)

表 2-2 事前試験結果一覧

No	車速 km/h	設定施肥量 kg/10a	実施肥量 kg/10a	実施肥量 kg/12㎡	目標値 kg/12㎡
1	3	300	208	2.6	3.6
2	3	300	304	3.8	3.6
3	3	300	288	3.6	3.6
4	4	300	288	3.6	3.6
5	5	300	288	3.6	3.6
6	3	500	496	6.2	6.0
7	4	500	512	6.4	6.0
8	3	200	176	2.2	2.4
9	4	200	176	2.2	2.4
10	5	200	176	2.2	2.4

表 2-3 試験肥料の形状および比重

No.	銘柄	形状	比重	主な原料
1	レオグリーン特号	ペレット	0.63	バーク堆肥、鶏ふん堆肥
2	稲サポ	ペレット	0.89	牛ふん堆肥
3	エコレット553	アグレット	0.79	豚ふん堆肥



ペレット

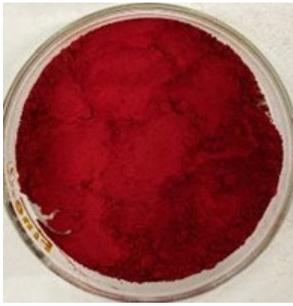


アグレット

写真 2-1 形状

表 2-4 着色材

No.	銘柄	備考
1	食用赤色色素102号	
2	シリカフォーム	固結防止材（肥料使用）



食用赤色色素

シリカフューム

写真 2-2 着色剤



添加なし



食用赤色色素(0.5%添加)



シリカフューム(0.5%添加)

写真 2-3 着色材添加後

### 【中課題3：可変散布に対応した土壤肥沃度マッピング技術の開発】

(担当機関：東京大学、(株) ヤンマーアグリジャパン)

#### 1) 達成目標

トラクタ搭載型の土壤肥沃度のセンシング／マッピングシステムの開発

#### 2) 実施内容と達成状況

＜2021 年度＞ (達成度 40%)

- (1) 数種土壤タイプに対応できる土壤肥沃度評価アルゴリズムの策定のため、福島県浜通りの多地点で採取された土壤のハイパースペクトルデータを計測し、一般化分光指数法 (NDSI 等)、多変数回帰法 (iPLSR 等) および機械学習法 (ANN, SVM 等) によるアルゴリズムに基づいた予測モデル群を試作した。
- (2) 異種トラクタへの搭載性の向上に向けて、簡易で柔軟性のある構造の搭載システムの検討を進めている。具体的には主要メーカーのトラクタ機種を想定して簡易設計を行いつつ、搭載位置や動作範囲、振動の影響等に関する比較検討を進め、トラクタ安全フレームに装着する方式を策定した。

＜2022 年度＞ (達成度 80%)

- (1) 圃場走行試験により土壤肥沃度計測／マッピングシステムが計画どおりに動作し、再現性・精度がおおむね確保できることを検証した。機器精度の向上や、より安定した動作や環境耐性向上のためのハード・ソフトの改良を進めた。

- (2) 分光計測による肥沃度指標計量のための新規アルゴリズムの考案ならびにシステムへの実装が実現した。さらに異種土壌への適用性や計測環境条件に対するロバスト性の改善・拡充のため、新規データの収集・解析等を進めた。
- (3) メーカー・形状の異なるトラクタへの計測システムを可能とする艀装フレームを試作し、走行試験により適切に実装可能なことを検証した。計測データの品質確保、走行中の計測動作の安定性、搭載の簡易性等の面での改良を進めた。
- (4) 処方マップデータの散布機サイドへの受け渡しに関する基本形式・手順を確定し、実データにより有効性を検証した。データ受け渡しの安定性・円滑性を改善した。

**<2023 年度> (達成度 100%)**

**(1) 土壌肥沃度計測システムのハードとデータ処理システムの動作検証と改良**

土壌の炭素含有率は最も有用かつ簡易な土壌肥沃度指標であるため、圃場の耕起作業と同時に土壌炭素含有率を非接触で走行計測できるトラクタ搭載型の分光センシングシステムを開発した。第一号機の基本システムは完成した。また、同計測システム一式をトラクタ側の改造なしにメーカーの異なる異種トラクタに搭載可能なフレームを開発し、実用性を確認した。

**(2) 炭素含有率（肥沃度指標）推定アルゴリズムと計量モデルの開発・検証**

ハイパースペクトルデータから土壌の炭素含有率を算出する新規アルゴリズムを考案し、複数の土壌型について 80%程度以上の精度で圃場内の炭素含有率変動を評価可能な計量モデルを開発し実装した。

**(3) 「計測」・「診断」・「処方せん」マッピングシステムの機能・操作性の検証と改良、ならびにバラつき改善シナリオ策定と処方ロジックの実装**

① 走行計測の直後に、分光計測データから推計した炭素含有率を任意のサイズ（通常 2～3m 程度）のメッシュ単位でマップ化し、ヒストグラムおよび変動係数とともに GoogleEarth 上に可視化する技術を開発した。

② メッシュ単位の「肥沃度不足レベル」診断マップ、ならびに「堆肥散布量」の処方せんマップを生成するマッピングシステムを開発した。

③ ペレット堆肥の可変散布によって効果的にバラつきを解消するためのメッシュごとの散布量を算出する処方せんロジックを数式としてマッピングシステムに実装することを可能にした。

④ なお、生成した処方せんマップは国際標準 ISOBUS 準拠のデータフォーマット（ISO-XML）で可変散布機に伝達・利用できることは実証済みである。

**(4) 炭素動態モデルによる可変散布の効果予測と改善シナリオの策定法構築**

計測マップデータを用いた土壌炭素動態のシミュレーションにより、堆肥の投入量や散布方法の違いによる肥沃度のバラつきや炭素貯留量の変動をメッシュ単位で長期にわたって予測することを可能にした。これにより、圃場ごとの実態に応じたバラつき改善シナリオを策定することが可能である。

**(5) 浜通り除染圃場での実証とワークフローの確立、運用ノウハウの拡充**

開発したセンシング/マッピングシステムの性能を浜通り地域 4 サイトの除

染後農地で実証し、システムの有効性とワークフローを検証するとともにシステム運用上のノウハウを蓄積した。

### 3) 研究の実施状況

#### (1) 土壌肥沃度計測システムのハードとデータ処理システムの動作検証と改良

土壌肥沃度計測システムのハードウェア（ハイパースペクトル分光器・超小型ネットワーク RTK 型 GNSS 等）の改造ならびに構成機器の制御およびデータ処理・演算ソフトの改良を重ね、第 1 号機が完成した。また、同計測システム一式を機種・形状の異なるトラクタ（ヤンマー社・クボタ社）に、トラクタ側の改造等なしに実装するための艀装フレームを製作し、有効に動作することを検証した。

現地圃場試験により、複数分光器からのハイパースペクトル信号の高速記録（30 a 圃場 1 走行で約 5 万本）や位置精度（10 Hz；数 cm 以下）が、実用に耐えることを検証した。暑熱環境を含む圃場条件での安定動作を確認した。

#### (2) 炭素含有率（肥沃度指標）推定アルゴリズムと計量モデルの開発・検証

ハイパースペクトルデータから炭素含有率を算出する新規アルゴリズム「ハイブリッド分光アルゴリズム」を考案し、浜通り各地の土壌について、圃場内の炭素含有率変動を 80% 程度以上の精度で評価可能な計量モデルを開発し、計測システムに実装した。

#### (3) 「計測」・「診断」・「処方せん」デジタルマップ作成システムの開発

計測データ（ハイパースペクトルデータ・位置データ）を、高速でデータ処理し、炭素含有率を算定し、メッシュマップをヒストグラム・変動係数とともに生成する。また、それに基づいて、指定した処方せんロジックにより「肥沃度不足レベル」診断マップおよび「堆肥散布量」処方せんマップを生成する。これら 3 つのデジタルマップは走行計測直後に作成され、GoogleEarth 上に可視化される。処方せんマップのファイルは可変散布農機（課題 1）の制御システムに伝達・使用される。マップのデータ形式は国際標準 ISOBUS に準拠したフォーマット（ISO-XML）である。

#### (4) 浜通り地域除染圃場での性能実証および運用ワークフローとノウハウの確立

開発したセンシング/マッピングシステムの性能を浜通り地域 4 サイトの除染農地で実証した。現地除染圃場での走行試験を通して、「計測走行」→「データ記録/処理/演算」→「肥沃度マップ/診断マップ/処方せんマップ作成」→「散布農機への処方せんデータ受渡し」までの一連のワークフローが全体として適切かつ円滑に遂行可能なことを検証した。

その結果、搭載機種や計測環境条件（日射条件等）、地表面状態（残査等）、走行条件（速度等）が異なる状態で、反復計測した結果、圃場内分布を

高い再現性( $r^2 = 0.9$ 程度)でマッピングできることを確認した。試験対象にした4サイトの圃場の計測結果からも、サイズ2~3mのメッシュ単位ですらばらつきの変動係数が20%を超える圃場が非常に多いと推察された。

#### (5) 炭素動態モデルによる可変散布の効果予測と改善シナリオの策定法構築

堆肥等の有機物投入は土壌肥沃度の改善(土づくり)の主要な技術的対策であるが、その改善には長年月を要することが知られている。そこで、堆肥の可変散布による圃場内のバラつき低減化や肥沃度改善、さらに近年関心が高まっている土壌の炭素貯留量増強に対する効果を推定するため、プロセスベースの土壌炭素動態モデル(RothC)を用いてシミュレーションを行った。同モデルは、堆肥や作物残査等の投入炭素量、土層中の5種類の炭素貯留量、土層から大気へのCO<sub>2</sub>フラックスの全体的な収支を月単位で時系列的に算出する機能を有する。堆肥の散布方法(均一散布、可変散布、散布量)に対応するメッシュの炭素含有率、圃場内の変動係数、炭素貯留量の長期変動の予測結果の要点は以下のようにまとめられる。

- 1) 均一散布法では長年月継続してもバラつきはほとんど解消されない。圃場平均値には一定の改善効果が認められるものの、初期に22%あった圃場内のバラつきを示す変動係数CVは20年後にも約15%と依然として大きい。
- 2) メッシュ単位の炭素含有率に対応した処方せんに基づいて可変散布した場合(同図bとc)では、バラつきは効果的に低下させることができる。bの場合CVは約8年程度で10%、約13年で5%へと減少し、散布量をbの倍量散布するcのシナリオでは約4年程度で10%、約6年で約5%まで減少することが分かる。
- 3) 圃場全体の炭素貯留量は、ケースa, bでは10年後に5.3tC/ha、ケースcでは10年後に9.3tC/ha程度増加すると推定された。

以上のように、本研究で開発した計測システムにより得られる炭素分布データを炭素動態シミュレーションモデルとリンクすることにより、長期変動の面的シミュレーションが可能となった。これにより、可変散布の効果を長期的な視点で定量評価することができる。本手法は、長期見通しに基づいて営農事情や行政の支援策に対応した土壌肥沃度の改善シナリオを策定し、改善に向けた効果的な処方せんロジックを選定する上で有用と考えられた。

本マッピングシステムでは各メッシュへの可変散布量の重みづけを適切な数式で表現する多様な重みづけ関数を実装することが可能である。

#### (6) 考察

近年、我が国においても化学肥料使用量の低減化と有機農業拡大への要請が急速に高まっており、土壌肥沃度(土づくり)の重要性が再認識されている。さらに、温暖化緩和策のひとつとして土壌への炭素固定が重視されてお

り、それは肥沃度改善の方向性とも一致している。これらのニーズのいずれにおいても、土壌炭素含有率の面的な定量評価の重要性は高く、本研究で開発したセンシング/マッピングシステムは除染農地のバラつき改善にとどまらず、広範な応用が期待される。

#### ■ 引用文献

井上吉雄ら 2023. ハイパースペクトル計測による土壌肥沃度の計量と改善—圃場内変異解消と炭素貯留量の増強. 日本作物学会第 256 回講演会要旨集, p. 47.

Inoue, Y. *et al.* 2023. Hyperspectral sensing and mapping of soil fertility for amending within-field heterogeneity. Proc. 14th European Conference on Precision Agriculture (ECPA2023); Precision Agriculture '23, p. 925-932.

### 【中課題 4 : 「見える化」技術を活用した土壌肥沃度のばらつき改善技術の評価・検証】 (担当機関 : 農研機構東北農業研究センター、福島県農業総合センター)

#### 1) 達成目標

高機能堆肥の評価と開発システムの「ばらつき」の評価方法の確定

#### 2) 実施内容と達成状況

##### <2021 年度> (達成度 20%)

(1) 理論上対象とするほ場の土壌肥沃度を目標値まで高めるために必要な施用量を算出した。

##### <2022 年度> (達成度 60%)

(1) 高機能堆肥の作物による検証として、ワグネルポット (1/5000a) を用いた小麦栽培試験を開始した。

(2) 高機能堆肥の可変散布を行ったほ場において、土壌炭素含有率の経時変化を確認するため、散布量の異なる 16 プロットの土壌を経時的に採取した。

(3) 高機能堆肥及び堆肥原料について、基礎成分分析を実施した。また、散布後の評価のために、土壌への定着・順化などの時間的な物理的・科学的な変化の検証に着手した。

(4) 高機能堆肥の散布後の可視画像から散布量・散布密度を推定する手法の検討を行った。

##### <2023 年度> (達成度 100%)

(1) 高機能堆肥の作物による検証となる小麦のポット試験を終了した。

(2) 高機能堆肥の可変散布を行ったほ場において、えん麦栽培試験を実施した。

(3) 高機能堆肥の可変散布を行ったほ場において、散布量の異なる 16 プロットの土壌炭素含有率を経時的に計測した。

(4) 可変散布機の精度検証として、高機能堆肥の設定量に対する実散布量を路上・ほ場試験で確認した。

(5) 4 地点 / 5 ほ場の除染後農地で土壌センシングを実施するにあたり、各土壌の炭素含有率のばらつき状況を把握した。

- (6) 課題 2 で用意された高機能堆肥及び堆肥原料について、基礎成分分析を実施し、高機能堆肥の散布後の評価のために、土壌への定着・順化などの時間的な物理的・化学的な変化の検証を行った。

### 3) 研究の実施状況

- (1) 6 地点の除染後農地から土壌を採取して、県指標の炭素含有率目標値 (1.2%) に達する量の高機能堆肥を添加し、ワグネルポット (1/5000a) に充填して 2022~23 年に小麦 (品種: きぬあずま) を無肥料で播種したところ、添加しなかった土壌に比べて越冬後の生育は明らかに良くなった (図 4-1)。高機能堆肥が含む有用な成分が効果を示したものと考えられた。
- (2) 富岡町の現地ほ場にて 2023 年 3 月に高機能堆肥の可変散布試験を実施した後、散布・無散布エリアにまたがるように試験区を設け、5 月にえん麦 (品種: 前進) を播種した (化成肥料は慣行量を施用)。7 月の成熟期に採取したところ、高機能堆肥の施用効果は判然とせず、単純に土壌炭素含有率が高くなるほどえん麦の生育が良くなる傾向が見られた (図 4-2)。土壌炭素含有率は全窒素含有率との相関が高いことが知られており、作物によっては土壌酸素含有率が生育に影響することが示された。なお、堆肥散布区のほうが低いのは、土壌肥沃度の低いエリアで堆肥散布を行ったためである。
- (3) 高機能堆肥の可変散布後の土壌で炭素含有率の経時推移を確認したが、向上効果は限定的であった (図 4-3)。これは、ほ場で一度に散布できる量がポット試験の投入量にはるかに及ばないためであり、土壌肥沃度の低いほ場で目に見える改善効果を得るためには、長期間の継続使用が必要であることが示された。
- (4) 高機能堆肥の可変散布精度評価をほ場試験 (2023 年 3 月 16 日、富岡町) で実施した。土壌条件や天候 (強風) の影響でややばらつきが見られたものの、概ね想定量の可変散布ができていることを確認した (図 4-4)。
- (5) 旧避難指示区域の 5 ほ場 / 4 地点の除染後農地において任意の 20~50 点の土壌を採取した結果、土壌肥沃度の指標となる土壌の炭素含有率のむらは一様ではなく、いずれのほ場でも県の土壌改良目標値 (1.2%) に満たない土壌が混在していることを確認した (図 4-5)。
- (6) 除染後農地に可変散布する高機能堆肥 (レオグリーン特号) について、肥料成分の分析を行った (表 4-1)。レオグリーン特号について、原料中に約 32% (乾物中には約 36%) の炭素が含まれていることを確認した。
- (7) 福島県の土地改良基準における土壌炭素量は 1.2% である。この 1.2% を一つの目安として堆肥を複数回散布するが、高機能堆肥中の炭素がどれだけ残存するか明らかにする必要がある。高機能堆肥とその原料を対象に、堆肥等の有機質資材中の難分解性有機物 (散布後 3 年間残存する) を粗繊維分析 (図 4-6) と呼ばれる有機物の分析手法にて解析を行った。粗繊維分析にてリグニンを主成分とする ADL と呼ばれる難分解性有機物の量を測定した (表 4-2)。
- (8) 粗繊維分析により、高機能堆肥を散布した際に残存すると考えられる有機物量と炭素量について試算を行った。そこで、実際に土壌中にこれらの高機能

堆肥を埋設することで、実際の炭素量変化について検討を行った。土壌と高機能堆肥またはその原料の混合物をガラス繊維ろ紙に入れ圃場に埋設し、1, 3, 6, 9, 12 ヶ月後に取り出した（図 4-7）。これらの炭素量、ADF・ADL の分析を行った。

- (9) 除染特別地域（国が除染事業を進める地域として、法律に基づき指定されている地域）を主な対象としてきたが、当該地域の状況やニーズの変化を勘案した運用方法の検証を行った。本取組みによる一定の効果は期待できるものの、機器の低廉化と運用組織（技術の担い手）は、さらに検討が必要である。

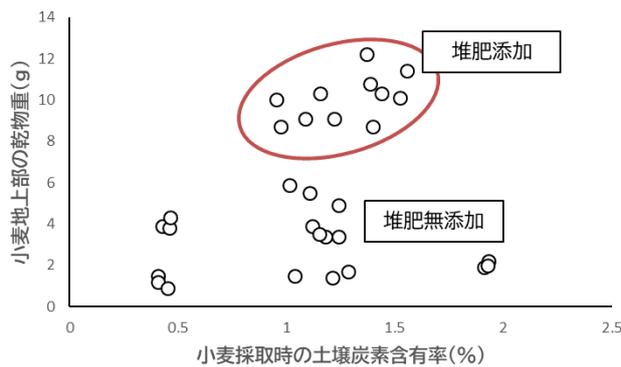


図 4-1 高機能堆肥の施用と小麦の生育量（ポット試験）

注：採取日 2023 年 4 月 10 日

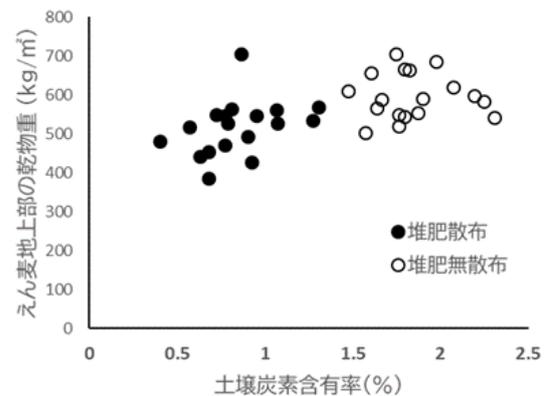


図 4-2 可変散布ほ場における土壌炭素含有率とえん麦生育量の関係

注：採取日 2023 年 7 月 18 日

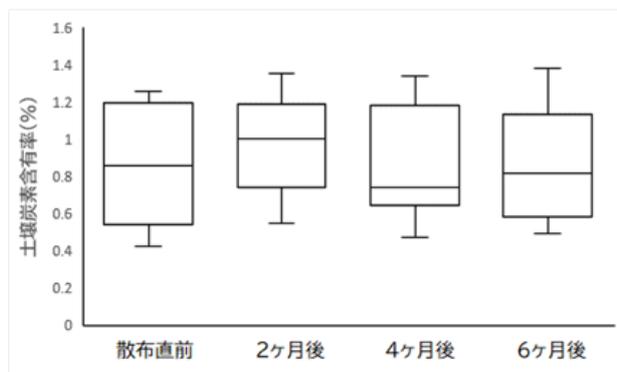


図 4-3 高機能堆肥可変散布後の土壌炭素含有率の経時推移

注：3 月 16 日は堆肥散布前に採土

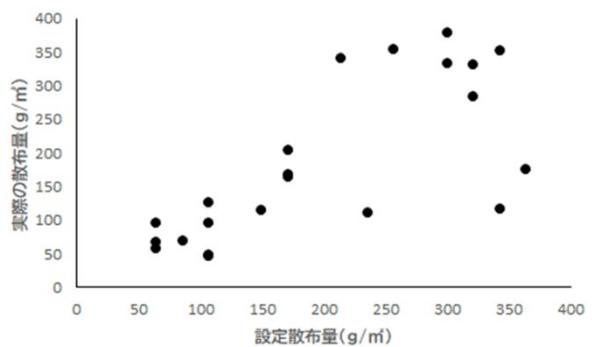


図 4-4 高機能堆肥設定散布量に対する圃場における散布精度

注：高機能堆肥はレオグリーン特号を供試

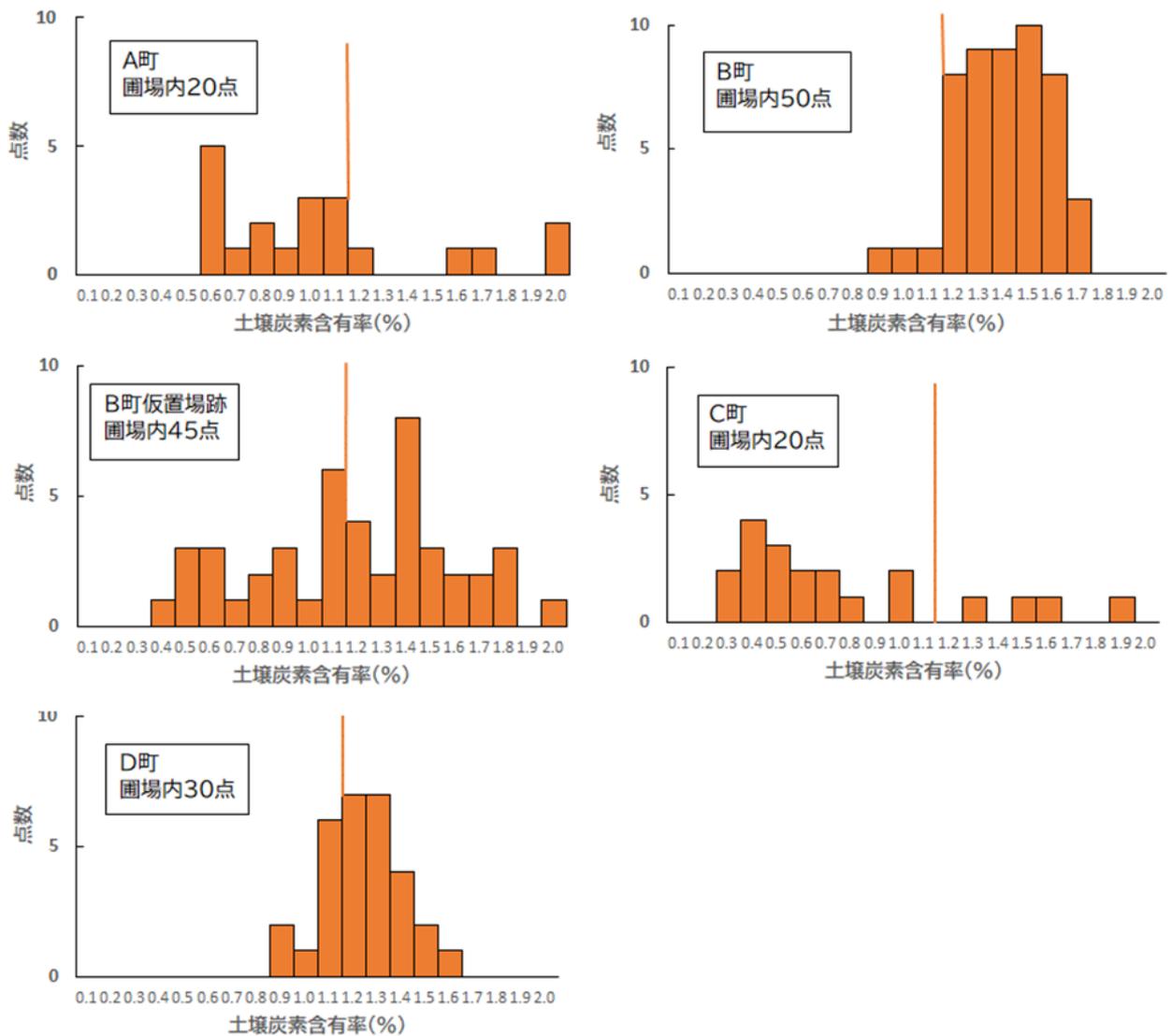


図 4-5 除染後農地における地点ごとの土壤肥沃度（土壤炭素含有率）のばらつき  
 注 圃場内の任意の 20～50 点の土壤を採取したもの。赤線は福島県における土壤改良目標値

表 4-1 高機能堆肥の分析値の例

堆肥サンプル	水分 [%w.b.]	C/N [-]	全炭素 [%d.b.]	全窒素 [%d.b.]	P2O5 [%d.b.]	K2O [%d.b.]	灰分 [%d.b.]
レオグリーン特号	11.5	9.0	36.1	4.0	4.3	1.5	32.4

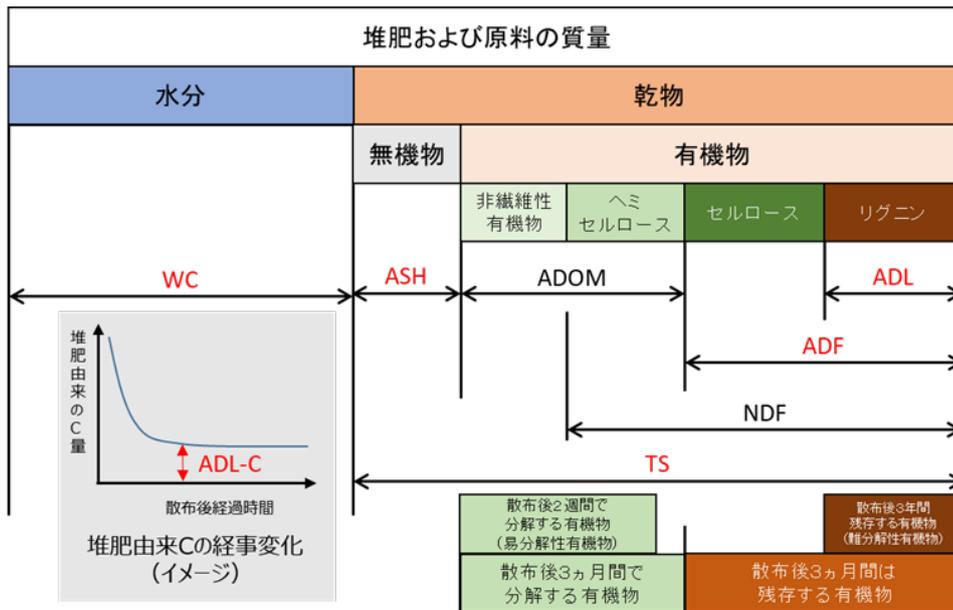


図 4-6 堆肥中有機物の分類

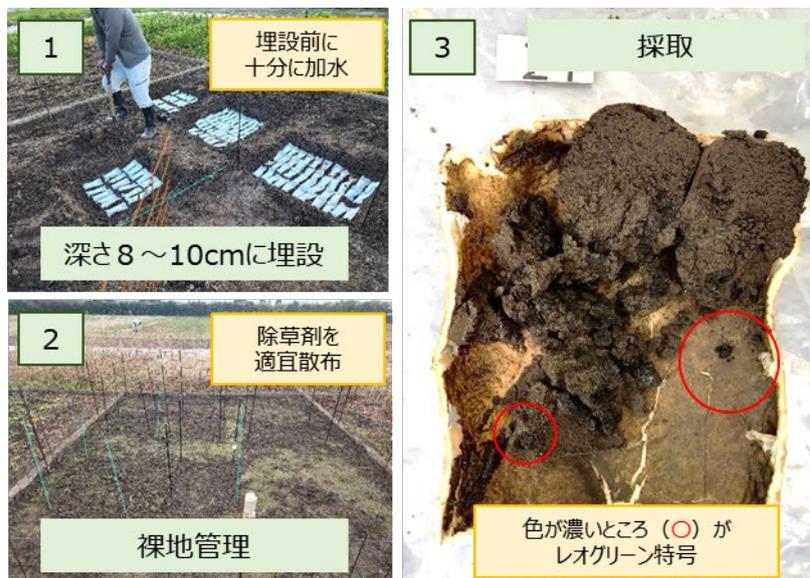


図 4-7 高機能堆肥の土壤埋設への様子

表 4-2 高機能堆肥の粗繊維分析値の例

Sample	粉碎後水分 (%)	ADF (%DM)	ADL (%DM)	ASH (%DM)
レオグリーン特号	12.1	16.1	9.6	7.4

(5) 産業化に向けた取組

① 論文、特許化、イベントでの公表等の普及活動

【論文】

- 1) Tanigaki M., Inoue Y., Momota S., Saito T., et al., 2022, Development of a robot for the measurement of radioactive contamination and fertility of the soil in farmland, Radiation Protection Dosimetry 19, 13-15
- 2) 井上吉雄, 2023, 作物生産研究におけるセンシング, データ処理解析技術の利活用と留意点ーリモートセンシングおよび「AI」, 「ビッグデータ」, 「フェノタイピング」を中心にー, 日本作物学会紀事 92 (2) 91-103
- 3) 井上吉雄, 吉野邦彦, 細井文樹, 平山孝, 齋藤隆, Hyperspectral sensing and mapping of soil carbon content for amending within-field heterogeneity of soil fertility and enhancing soil carbon stock, Precision Agriculture (投稿中)

#### 【学会発表】

- 1) 井上吉雄, 齋藤隆, 吉野邦彦, 根本知明, 小野司, 2022, ハイパースペクトル計測による土壌肥沃度評価法ー福島除染農地の生産性回復に向けてー, 日本作物学会第 253 回講演会要旨集, p. 65.
- 2) 井上吉雄, 2022, 農業生産のスマート化とリモートセンシング, 日本学術振興会「光電相互変換第 125 委員会」第 261 回研究会
- 3) 井上吉雄, 吉野邦彦, 2022, 土壌肥沃度マッピングのための地上走行型ハイパースペクトル計測システムー福島県除染農地の生産基盤回復に向けてー, 日本リモートセンシング学会第 73 回学術講演会
- 4) Inoue Y., Yoshino K., 2023, Hyperspectral sensing and mapping of soil fertility for amending within-field heterogeneity, 欧州精密農業会議 (The 14th European Conference on Precision Agriculture)
- 5) 井上吉雄, 吉野邦彦, 古舘正行, 丹優太郎, 平山孝, 2023, ハイパースペクトル計測による土壌肥沃度の計量と改善ー圃場内変異解消と炭素貯留量の増強, 日本作物学会第 256 回講演会
- 6) 井上吉雄, 吉野邦彦, 細井文樹, 2023, ハイパースペクトル計測による土壌炭素マッピングと肥沃度のバラつき解消・炭素貯留量増強への利用, 日本リモートセンシング学会 2023 年秋季学術講演会

#### 【シンポジウム】

- 1) 齋藤隆, 2021, 除染後農地の本田移転と農業復興に向けた取り組み, 2021 年度土壌肥料学会主催シンポジウム「原発事故から 10 年ーこれまで・今・これからの農業現場を考える」
- 2) 平山孝, 2023, 除染後農地の保安全管理技術, 福島県営農再開支援事業「除染後農地の保安全管理に関する放射性物質対策」講座 (浪江町)
- 3) 平山孝, 2023, 「見える化」技術を活用した土壌肥沃度のばらつき改善技術の開発, 令和 4 年度福島県農業総合センター研究成果発表会
- 4) 平山孝, 2023, 福島県の除染後農地における営農再開上の課題と対策, 福島国際研究教育機構 (F-REI) リサーチビジョンセッション (RVS) 農林水産分野土壌領域勉強会

- 5) 平山孝, 2024, 「見える化」技術を活用した土壌肥沃度のばらつき改善技術の開発(仮), 令和5年度福島県農業総合センター研究成果発表会(予定)

【その他】

- 1) アグリビジネス創出フェア 2021 (ポスター展示), 東京ビッグサイト
- 2) アグリビジネス創出フェア 2022 (ポスター展示), 東京ビッグサイト
- 3) アグリビジネス創出フェア 2023 (ポスター展示), 東京ビッグサイト
- 4) 平山孝, 除染後農地における土壌肥沃度のばらつきの現状(仮), 2024, 令和5年度福島県農業総合センター営農再開技術情報 (Web 公開予定)

② 研究成果の普及に向けたロードマップ

本事業では、圃場内の土壌肥沃度ばらつきを改善するためのセンシング／マッピング技術と高機能堆肥の可変散布技術を連携させたシステムを考案した。3年間で試作機やモデルの研究開発を進め、最終年度に旧避難地域の圃場で現地検討会を実施して一般公開した。現時点では、計測業者等が専門的にセンシング業務を担い、各地域の大規模生産法人等がこのデータを活用して可変散布機を稼働させる運用形態を想定しているが、今後も引き続き、現地のニーズを踏まえ、実用化に向けた検討と提案を行っていく予定である。