

第38回 土・水研究会資料

みどりの食料システム戦略を見据えた 持続的土壌管理のための有機物活用

令和4年3月17日

農研機構 農業環境研究部門

本資料の取扱いについて

本資料に掲載の研究成果などについては、未発表のものもありますので、転載及び引用に当たっては、必ず原著者の了承を得た上でご利用下さい。

「みどりの食料システム戦略を見据えた持続的土壌管理のための有機物活用」

土・水研究会は農研機構農業環境研究部門の前身の農業環境技術研究所発足時より、「環境資源としての土・水の持つ保全・浄化機能について、生態系調和型農業の視点から幅広く問題点を取り上げて討議し、情報交換を行う」との趣旨で始まった研究会です。以来今回で38回を数え、これまでに土壌・水系における炭素、栄養塩、有害化学物質等の適正な管理に向けた研究をテーマとして取り上げてまいりました。

今回は、「みどりの食料システム戦略を見据えた持続的土壌管理のための有機物活用」をテーマとしました。

令和3年5月に公表された「みどりの食料システム戦略」は、持続可能な食料システムの構築に向け、中長期的な観点から環境負荷削減のイノベーション推進を旗印とし、2050年までに輸入原料や化石燃料を原料とする化学肥料を30%削減、有機農業面積を25%に拡大するといった挑戦的な目標を掲げています。その実現に向けた個別の技術革新要素として、耕畜連携、ペレット等有機質資材の開発と普及、緑肥等による土づくりなど有機物資材の活用に関する多くの開発事項が示されています。

農研機構や公設試において、従来から堆肥、緑肥、家畜ふん尿といった有機物資材の活用による化学肥料削減や収益性向上の取組みが行われてきました。その研究は当然ながら生産性に加えて環境保全も見据えたものです。近年の成果としては農林水産省委託プロジェクト研究「有機質資材」（2015～2019）によって混合堆肥複合肥料の製造と利用、また緑肥の利用に関する技術マニュアルがまとめられました。これらの研究蓄積に加えて、近年、土壌情報や環境情報の高度化とアクセシビリティが急速に進んでおり、それに基づく新たな有機物施用技術の実現が可能になりつつあります。その一例として令和3年に日本土壌インベントリに追加された有機質資材の肥効見える化アプリがあります。

以上のような現状をふまえ、今年度の土・水研究会では関連する行政部局、研究者から情報提供をいただき、みどりの食料システム戦略の目標達成に向けた有機物活用技術の現状を共有するとともに、今後の展開方向を考える端緒とします。

令和4年3月17日

農研機構 農業環境研究部門

第38回土・水研究会資料

「みどりの食料システム戦略を見据えた 持続的土壌管理のための有機物活用」

目次

1. みどり戦略を背景とする政策情勢等	・ ・ ・ ・ ・ 1
井原 啓貴（農林水産省農林水産技術会議事務局）	
2. 適正な有機物管理の基礎となる土壌情報	・ ・ ・ ・ ・ 13
高田 祐介（農研機構農業環境研究部門）	
3. 有機質資材窒素肥効見える化の取り組み	・ ・ ・ ・ ・ 19
古賀 伸久（農研機構九州沖縄農業研究センター）	
4. 家畜ふん尿由来有機質資材の野菜栽培への利用	・ ・ ・ ・ ・ 25
徳田 進一（農研機構中日本農業研究センター）	
5. 土づくり・減肥に役立つ緑肥の効果とその特徴	・ ・ ・ ・ ・ 29
唐澤 敏彦（農研機構中日本農業研究センター）	
6. 食の窒素循環と次世代型の有機農業	・ ・ ・ ・ ・ 35
江口 定夫（農研機構農業環境研究部門）	

みどり戦略を背景とする政策情勢等

農林水産省 農林水産技術会議事務局 研究専門官 井原啓貴

2021年5月に、農林水産省はみどりの食料システム戦略を策定しました。この戦略では、「食料・農林水産業の生産力向上と持続性の両立をイノベーションで実現」として、持続性の観点から、2050年までに我が国の農林水産業が目指す姿を示しています。

戦略の策定から半年以上が経過し、次年度の予算概算決定したことで、戦略の目指す姿を実現するための取組みが形になってきました。本日の話題提供では、次年度概算決定について、土・水研究会にご参加の皆様に関係が深い、土壌肥料、環境保全型農業に関わる事業を紹介します。また、研究成果の普及のために集約された2件の資料「より持続性の高い農法への転換」および「技術カタログ」について紹介させていただきます。

持続的な農業生産が注目を受けている今、世に広げられる技術の開発や、革新的な研究開発に、今後ともよろしくお願いいたします。

グリーンな栽培体系への転換サポート

【令和3年度補正予算額 2,518 (一) 百万円の内訳】

<対策のポイント>

みどりの食料システム戦略の実現に向けて、それぞれの産地に適した「環境にやさしい栽培技術」を「省力化に資する先端技術等」を取り入れた「グリーンな栽培体系」への転換を推進するため、産地に適した技術の転換を支援します。

<事業の内容>

- 化学農業・化学肥料の使用量低減、有機農業面積の拡大、農薬における温室効果ガスの排出削減を推進するため、農業者、農薬、肥料メーカー、ICTベンダー、農機メーカー、農業協同組合、畜産組織等の地域の関係者が参画する協議会を組織し、グリーンな栽培体系への転換に向けた以下の取組の検討を支援します。

- ① 総合的病害虫管理や生分解性リミタの利用、フラスチャールによる環境影響の低減など、環境にやさしい栽培技術及び省力化に資する先端技術等について、産地に適した技術の検証

- ② グリーンな栽培体系の実現に向けた栽培マニュアルの検討や、産地内への普及に向けた5年後の産地戦略（ロードマップ）の策定

- ③ 産地に策定した栽培マニュアルや産地戦略について、都道府県と農業協同組合、地方銀行などの関係機関に広く情報発信（パンフレット・動画の作成、セミナー開催等）

<事業の流れ>



・成果の普及



【お問い合わせ先】 農産局技術普及課 (03-6744-2218)

<事業イメージ>

- 産地内の農業者や実需者等の関係者が参画する協議会を組織



- 産地に適した「環境にやさしい栽培技術」、「省力化に資する先端技術」等の検証



環境保全型農業直接支払交付金

【令和4年度予算概算決定額 2,650 (2,450) 百万円】

<対策のポイント>

農業の持続的な発展・農業の有する多面的機能の発揮を促すために、農業生産に由来する環境負荷を軽減するとともに、地球温暖化防止や生物多様性保全等に効果の高い農業生産活動を支援します。

<事業目標>

温室効果ガス排出削減への貢献、生物多様性保全の推進

<事業の内容>

1. 環境保全型農業直接支払交付金 2,537 (2,360) 百万円

【交付対象取組・交付事項】
化学肥料、化学農薬の使用量を原則5割以上低減する取組に合致して行われる取組

▶ 全国共通取組 国が定めた全国共通取組に対する取組

① 対象者：農業者の組織する団体、一定の条件を満たす農業者等

② 対象となる農業者の要件
ア 生産物について販売することを目的に生産を行っていること
イ 持続可能な農業生産に向けた研修の受講と自己点検に取り組むこと
ロ 環境保全型農業の取組を拡げる活動（技術向上や情報促進に係る活動等）に取り組むこと

③ 活動対象活動
化学肥料、化学農薬の使用量を原則5割以上低減する取組に合致して行う地球温暖化防止や生物多様性保全等に効果の高い営農活動

④ 取組拡大加算（令和4年度から実施）
有機農業の新規取組の導入、定農に向けた活動への支援を拡充

2. 環境保全型農業直接支払交付金 113 (90) 百万円

① 環境保全型農業直接支払交付金 104 (81) 百万円

都道府県、市町村等による環境保全型農業直接支払交付金事業の推進を支援します。

② 環境保全型農業直接支払交付金 9 (9) 百万円

本交付金の効果の検証に必要な調査・分析を実施します。

<事業の進め方>

【取組拡大加算】（令和4年度から実施）
有機農業に新たに取組む農業者の受け入れ、定農に向けて、栽培技術の指導等の活動を実施する農業者団体に対し、国による追加した新規取組に合致して行われる取組

※交付件数は、都道府県が決定します。

※交付件数は、都道府県が決定します。

※交付件数は、都道府県が決定します。

※交付件数は、都道府県が決定します。

※交付件数は、都道府県が決定します。

※交付件数は、都道府県が決定します。

※交付件数は、都道府県が決定します。

※交付件数は、都道府県が決定します。

※交付件数は、都道府県が決定します。

※交付件数は、都道府県が決定します。

※交付件数は、都道府県が決定します。

有機農業推進総合対策緊急事業

【令和3年度補正予算額 2,518 (一) 百万円の内訳】

<対策のポイント>

みどりの食料システム戦略に基づき、有機農産物の販路拡大、新規需要開拓を促進します。

<事業の内容>

1. 有機農産物の取組促進事業

有機農産物の販路拡大を支援し、有機農産物の販路拡大と新規需要開拓を促進。

① 有機農産物の販路拡大支援
消費者への訴求（消費者セミナーの開催、広報、素材の作成・提供・周知等）
事業者向けの商談会の開催

② 生産者支援
有機農産物の取組促進に資する取組の支援
新規に有機農産物の取組を希望する事業者へのマッチング支援

③ 生産者支援
有機農産物の取組促進に資する取組の支援
新規に有機農産物の取組を希望する事業者へのマッチング支援

④ 生産者支援
有機農産物の取組促進に資する取組の支援
新規に有機農産物の取組を希望する事業者へのマッチング支援

⑤ 生産者支援
有機農産物の取組促進に資する取組の支援
新規に有機農産物の取組を希望する事業者へのマッチング支援

⑥ 生産者支援
有機農産物の取組促進に資する取組の支援
新規に有機農産物の取組を希望する事業者へのマッチング支援

⑦ 生産者支援
有機農産物の取組促進に資する取組の支援
新規に有機農産物の取組を希望する事業者へのマッチング支援

⑧ 生産者支援
有機農産物の取組促進に資する取組の支援
新規に有機農産物の取組を希望する事業者へのマッチング支援

⑨ 生産者支援
有機農産物の取組促進に資する取組の支援
新規に有機農産物の取組を希望する事業者へのマッチング支援

⑩ 生産者支援
有機農産物の取組促進に資する取組の支援
新規に有機農産物の取組を希望する事業者へのマッチング支援

⑪ 生産者支援
有機農産物の取組促進に資する取組の支援
新規に有機農産物の取組を希望する事業者へのマッチング支援

⑫ 生産者支援
有機農産物の取組促進に資する取組の支援
新規に有機農産物の取組を希望する事業者へのマッチング支援

⑬ 生産者支援
有機農産物の取組促進に資する取組の支援
新規に有機農産物の取組を希望する事業者へのマッチング支援

⑭ 生産者支援
有機農産物の取組促進に資する取組の支援
新規に有機農産物の取組を希望する事業者へのマッチング支援

⑮ 生産者支援
有機農産物の取組促進に資する取組の支援
新規に有機農産物の取組を希望する事業者へのマッチング支援

⑯ 生産者支援
有機農産物の取組促進に資する取組の支援
新規に有機農産物の取組を希望する事業者へのマッチング支援

⑰ 生産者支援
有機農産物の取組促進に資する取組の支援
新規に有機農産物の取組を希望する事業者へのマッチング支援

⑱ 生産者支援
有機農産物の取組促進に資する取組の支援
新規に有機農産物の取組を希望する事業者へのマッチング支援

⑲ 生産者支援
有機農産物の取組促進に資する取組の支援
新規に有機農産物の取組を希望する事業者へのマッチング支援

⑳ 生産者支援
有機農産物の取組促進に資する取組の支援
新規に有機農産物の取組を希望する事業者へのマッチング支援

㉑ 生産者支援
有機農産物の取組促進に資する取組の支援
新規に有機農産物の取組を希望する事業者へのマッチング支援

㉒ 生産者支援
有機農産物の取組促進に資する取組の支援
新規に有機農産物の取組を希望する事業者へのマッチング支援

㉓ 生産者支援
有機農産物の取組促進に資する取組の支援
新規に有機農産物の取組を希望する事業者へのマッチング支援

㉔ 生産者支援
有機農産物の取組促進に資する取組の支援
新規に有機農産物の取組を希望する事業者へのマッチング支援

㉕ 生産者支援
有機農産物の取組促進に資する取組の支援
新規に有機農産物の取組を希望する事業者へのマッチング支援

㉖ 生産者支援
有機農産物の取組促進に資する取組の支援
新規に有機農産物の取組を希望する事業者へのマッチング支援

㉗ 生産者支援
有機農産物の取組促進に資する取組の支援
新規に有機農産物の取組を希望する事業者へのマッチング支援

㉘ 生産者支援
有機農産物の取組促進に資する取組の支援
新規に有機農産物の取組を希望する事業者へのマッチング支援

㉙ 生産者支援
有機農産物の取組促進に資する取組の支援
新規に有機農産物の取組を希望する事業者へのマッチング支援

㉚ 生産者支援
有機農産物の取組促進に資する取組の支援
新規に有機農産物の取組を希望する事業者へのマッチング支援

㉛ 生産者支援
有機農産物の取組促進に資する取組の支援
新規に有機農産物の取組を希望する事業者へのマッチング支援

㉜ 生産者支援
有機農産物の取組促進に資する取組の支援
新規に有機農産物の取組を希望する事業者へのマッチング支援

㉝ 生産者支援
有機農産物の取組促進に資する取組の支援
新規に有機農産物の取組を希望する事業者へのマッチング支援

㉞ 生産者支援
有機農産物の取組促進に資する取組の支援
新規に有機農産物の取組を希望する事業者へのマッチング支援

㉟ 生産者支援
有機農産物の取組促進に資する取組の支援
新規に有機農産物の取組を希望する事業者へのマッチング支援

㊱ 生産者支援
有機農産物の取組促進に資する取組の支援
新規に有機農産物の取組を希望する事業者へのマッチング支援

㊲ 生産者支援
有機農産物の取組促進に資する取組の支援
新規に有機農産物の取組を希望する事業者へのマッチング支援

㊳ 生産者支援
有機農産物の取組促進に資する取組の支援
新規に有機農産物の取組を希望する事業者へのマッチング支援

㊴ 生産者支援
有機農産物の取組促進に資する取組の支援
新規に有機農産物の取組を希望する事業者へのマッチング支援

㊵ 生産者支援
有機農産物の取組促進に資する取組の支援
新規に有機農産物の取組を希望する事業者へのマッチング支援

㊶ 生産者支援
有機農産物の取組促進に資する取組の支援
新規に有機農産物の取組を希望する事業者へのマッチング支援

㊷ 生産者支援
有機農産物の取組促進に資する取組の支援
新規に有機農産物の取組を希望する事業者へのマッチング支援

㊸ 生産者支援
有機農産物の取組促進に資する取組の支援
新規に有機農産物の取組を希望する事業者へのマッチング支援

㊹ 生産者支援
有機農産物の取組促進に資する取組の支援
新規に有機農産物の取組を希望する事業者へのマッチング支援

㊺ 生産者支援
有機農産物の取組促進に資する取組の支援
新規に有機農産物の取組を希望する事業者へのマッチング支援

㊻ 生産者支援
有機農産物の取組促進に資する取組の支援
新規に有機農産物の取組を希望する事業者へのマッチング支援

㊼ 生産者支援
有機農産物の取組促進に資する取組の支援
新規に有機農産物の取組を希望する事業者へのマッチング支援

㊽ 生産者支援
有機農産物の取組促進に資する取組の支援
新規に有機農産物の取組を希望する事業者へのマッチング支援

㊾ 生産者支援
有機農産物の取組促進に資する取組の支援
新規に有機農産物の取組を希望する事業者へのマッチング支援

㊿ 生産者支援
有機農産物の取組促進に資する取組の支援
新規に有機農産物の取組を希望する事業者へのマッチング支援

㊿ 生産者支援
有機農産物の取組促進に資する取組の支援
新規に有機農産物の取組を希望する事業者へのマッチング支援

㊿ 生産者支援
有機農産物の取組促進に資する取組の支援
新規に有機農産物の取組を希望する事業者へのマッチング支援

㊿ 生産者支援
有機農産物の取組促進に資する取組の支援
新規に有機農産物の取組を希望する事業者へのマッチング支援

㊿ 生産者支援
有機農産物の取組促進に資する取組の支援
新規に有機農産物の取組を希望する事業者へのマッチング支援

㊿ 生産者支援
有機農産物の取組促進に資する取組の支援
新規に有機農産物の取組を希望する事業者へのマッチング支援

㊿ 生産者支援
有機農産物の取組促進に資する取組の支援
新規に有機農産物の取組を希望する事業者へのマッチング支援

グローバル産地づくり緊急対策のうち
有機JAS認証、GAP認証取得等支援事業等

【令和3年度補正予算額 87百万円】

<対策のポイント>

国際的に市場規模・取引額が拡大している中、輸出の機会を逸さないよう有機JAS認証及びGAP認証の取得や商談の実施等を支援します。

<事業目標>

農林水産物・食品の輸出額の拡大（2兆円 [2025年まで]、5兆円 [2030年まで]）

<事業の内容>

1. 有機JAS認証、GAP認証取得等支援事業 77百万円

① 有機JAS認証取得等支援
有機農産物、加工品等の輸出拡大に向け、農業者等による有機JAS認証の取得や、輸出向け商談、商品開発、有機以外の農産物等の混入防止に必要な農機具・容器等の取組を支援します。

② GAP認証取得等支援
農産物の輸出拡大に向け、農業者等によるGAP認証（GLOBAL G.A.P.、ASC、BAP）の取得や、輸出向け商談、認証取得に必要な農機具・容器等の取組を支援します。

③ 情報発信による一問一答支援
有機JAS認証やGAP認証取得による輸出事例等を発信するセミナー開催を支援します。

④ 輸出促進支援
有機JAS認証取得等支援事業

⑤ 輸出促進支援
有機JAS認証取得等支援事業

⑥ 輸出促進支援
有機JAS認証取得等支援事業

⑦ 輸出促進支援
有機JAS認証取得等支援事業

⑧ 輸出促進支援
有機JAS認証取得等支援事業

⑨ 輸出促進支援
有機JAS認証取得等支援事業

⑩ 輸出促進支援
有機JAS認証取得等支援事業

⑪ 輸出促進支援
有機JAS認証取得等支援事業

⑫ 輸出促進支援
有機JAS認証取得等支援事業

⑬ 輸出促進支援
有機JAS認証取得等支援事業

⑭ 輸出促進支援
有機JAS認証取得等支援事業

⑮ 輸出促進支援
有機JAS認証取得等支援事業

⑯ 輸出促進支援
有機JAS認証取得等支援事業

⑰ 輸出促進支援
有機JAS認証取得等支援事業

⑱ 輸出促進支援
有機JAS認証取得等支援事業

⑲ 輸出促進支援
有機JAS認証取得等支援事業

⑳ 輸出促進支援
有機JAS認証取得等支援事業

㉑ 輸出促進支援
有機JAS認証取得等支援事業

㉒ 輸出促進支援
有機JAS認証取得等支援事業

㉓ 輸出促進支援
有機JAS認証取得等支援事業

㉔ 輸出促進支援
有機JAS認証取得等支援事業

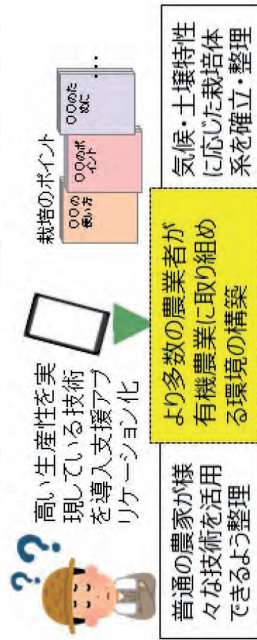
㉕ 輸出促進支援
有機JAS認証取得等支援事業

- 研究予算でも、みどり戦略に資するものがありまので紹介します。

みどり戦略関連のR4開始のプロジェクト研究（例）

・地域に応じた有機農業技術の体系化

高収量・高品質な生産を可能とする有機農業栽培技術の科学的評価を進めて栽培体系として確立し、さらに、その技術の導入を支援するアプリケーション化を推進



40 「知」の集積と活用によるイノベーションの創出

【令和4年度予算総額決定額 3,968 (4,151) 百万円】

<知の集積と活用によるイノベーションの創出>

農林水産・食品分野におけるイノベーションを促進するため、農林水産省が開設した「知」の集積と活用において、様々な分野の多様な知識・技術等の連携を図ります。

<事業目標>

- 基礎研究・応用研究・実証研究の70%以上において、革新的な技術成果や実用化につながる技術成果を創出
- 関係研究・実証研究・実証研究（海外）で成果を創出する（海外）で成果を創出する（海外）で成果を創出する
- 関係研究・実証研究・実証研究（海外）で成果を創出する（海外）で成果を創出する（海外）で成果を創出する

<事業の内容>

1. 「知」の集積による産学連携推進事業
「知」の集積と活用による産学連携推進事業、研究開発プラットフォームから生み出された研究成果を海外へ展開するためのセミナー等の開催、バイオコンミの推進に資する70ユーザー人材への支援等、イノベーションの創出に向けた取組を支援します。

2. イノベーション創出強化研究推進事業（産学公参型研究事業）
「知」の集積と活用による産学連携推進事業、産学公参型研究事業を農林水産・食品分野に導入し、革新的な技術・商品・サービスを生み出す研究を支援します。さらに、研究成果の迅速な実用化・事業化を図る実証研究を支援します。

※ 「知」の集積と活用による産学連携推進事業（産学公参型研究事業）
3. スタートアップへの総合的支援
日本版SBI R制度を活用し、サービス事業体の創出、新たな技術開発・事業化を図るスタートアップを切り目めい支援します。特に、若手研究者等による「知」の集積と活用による産学連携推進事業の取組を支援します。

<事業の流れ>



加算の視点

- ・みどりの食料システム戦略（～食料・農林水産業の生産力向上と持続性の両立をイノベーションで実現～（令和3年5月12日））
みどりの食料システム戦略本部決定。）の推進に資する研究課題

※ 「みどりの食料システム戦略」及び「具体的な取組」については、以下のURLを参照

基準

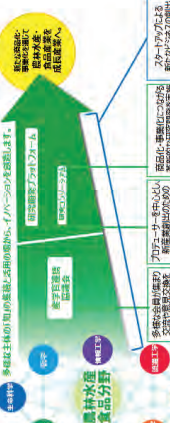
該当する場合は、以下の通り加算する。

- ① 「みどりの食料システム戦略」のうち「具体的な取組」に該当する課題：10点

<事業イメージ>

【知】の集積と活用によるイノベーションの創出

（農林水産・食品分野に様々な分野の「知」を集積し、産学連携研究を促進するオープンイノベーションの場）



プロジェクト研究の例

① 有機農業推進のための深層水管理による省力的な雑草抑制技術の開発

令和4年度予算総額決定額：70（～）百万円

「みどりの食料システム戦略」では、2050年までに化学農薬使用量の50%低減及び耕地面積に占める有機農業の取組面積の割合を25%（100万ha）に拡大することを目標としており、具体的な取組として、水田の水管理による雑草の抑制があげられている。水田の雑草対策については、除草機などの耕種的な除去法を組み合わせることも重要とされている。雑草抑制のための水管理技術、畦畔等の省力的な除去法を組み合わせることも重要な取組として、化学農薬使用量の削減、有機農業の拡大を目指す。



みどりの食料システム戦略

- <https://www.maff.go.jp/j/kanbo/kankyo/seisaku/midori/index.html>

ホームページの主な項目
(2022/2/16時点) ↓

- ・「みどりの食料システム戦略」本体及び参考資料

- ・説明資料

- ・パンフレット

- ・**技術カタログ**

- ・関連講演資料

- ・予算説明資料

- ・令和3年度補正予算・令和4年度当初予算案の概要
- ・みどりの食料システム戦略緊急対策交付金の交付要綱等

- ・参考資料

- ・より持続性の高い農法への転換について

みどりの食料システム戦略トップページ



農林水産省

ホーム > 政策推進 > 農林水産省のホームページ > 農林水産省のホームページ

農業技術総合ポータルサイト

本ポータルサイトは、農林水産省のホームページにある様々な農林水産に関する情報を集約しています。農林水産省のホームページから検索された最新の技術情報、さらに研究機関や関係機関に関する情報を提供しています。



https://www.maff.go.jp/j/kanbo/kihyo03/gityo/gijutsu_portal/top.html

より持続性の高い農法への転換 (技術カタログ)

「みどりの食料システム戦略」技術カタログ

はじめに

近年（直近10年程度）開発された技術で、みどりの食料システム戦略で掲げた各目標の達成に貢献しうる、現場への普及が期待される技術をまとめました。

広く関係者の皆様に有用な新技術を知っていただくとともに、栽培者の見直し等に際してご活用ください。

*掲載内容の詳細につきましては、各カタログの間合せ先までご連絡ください。

コンテンツ

【全体版】「みどりの食料システム戦略」技術カタログ～現在普及可能な技術～（ver1.0）(PDF: 13,643KB)

- https://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/nouhou_tenkan.html

より持続性の高い農法への転換 (技術カタログ)

全167項目。目次の一部↓

項目	技術名	技術概要	技術の持続性	技術の普及性	技術の利便性	技術の経済性	技術の環境性	技術の社会性	技術の国際性	技術の未来性
1	米	米の生産技術	高	高	高	高	高	高	高	高
2	小麦	小麦の生産技術	高	高	高	高	高	高	高	高
3	大豆	大豆の生産技術	高	高	高	高	高	高	高	高
4	野菜	野菜の生産技術	高	高	高	高	高	高	高	高
5	果物	果物の生産技術	高	高	高	高	高	高	高	高
6	畜産	畜産の生産技術	高	高	高	高	高	高	高	高
7	水産	水産の生産技術	高	高	高	高	高	高	高	高
8	森林	森林の生産技術	高	高	高	高	高	高	高	高
9	環境	環境の生産技術	高	高	高	高	高	高	高	高
10	エネルギー	エネルギーの生産技術	高	高	高	高	高	高	高	高
11	情報	情報の生産技術	高	高	高	高	高	高	高	高
12	人材	人材の生産技術	高	高	高	高	高	高	高	高
13	政策	政策の生産技術	高	高	高	高	高	高	高	高
14	国際	国際の生産技術	高	高	高	高	高	高	高	高
15	未来	未来の生産技術	高	高	高	高	高	高	高	高
16	その他	その他の生産技術	高	高	高	高	高	高	高	高

適正な有機物管理の基礎となる土壌情報

農研機構農業環境研究部門

土壌環境管理研究領域

高田裕介

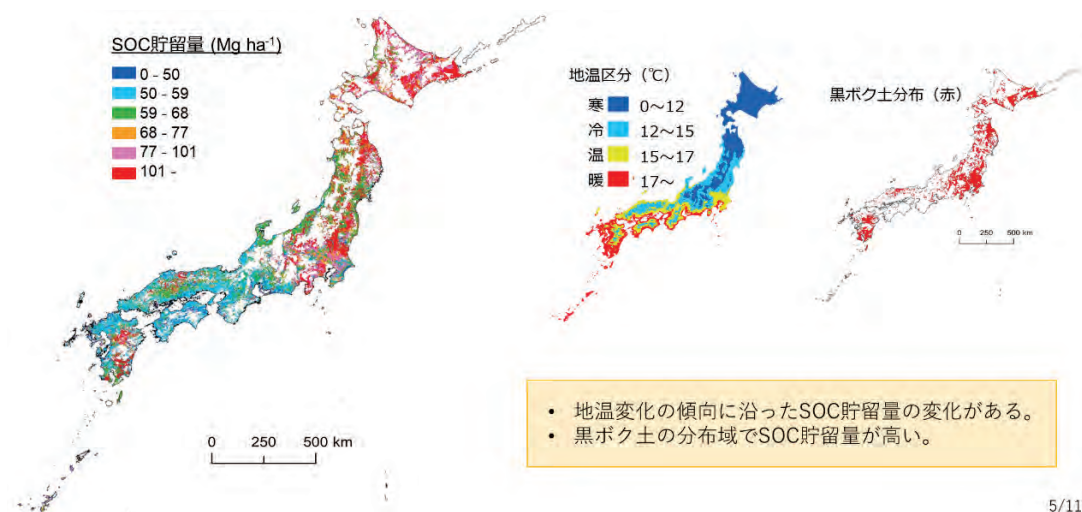
はじめに

みどりの食料システム戦略（以下、みどり戦略）の背景として、食料・農林水産業が利活用してきた土地や水、生物資源等の「自然資本」の持続性に大きな危機が迫っており、早急な取組を行うことが重要であると明記されている。そして、みどり戦略が 2050 年までに目指す姿と取組方向として、CO₂ ゼロエミッション化の実現、化学農薬使用量（リスク換算）の 50% 低減、輸入原料や化石燃料を原料とした化学肥料の使用量の 30% 低減、それら取組を推し進めた有機農業の面積拡大（100 万 ha）等の目標が掲げられている。本発表では、特に CO₂ ゼロエミッション化の実現にむけた適正な有機物管理による土壌炭素貯留というテーマに絞って、その基礎となる土壌情報について紹介する。

土壌炭素貯留「4 パーミル」

パーミル（‰）とは 1/1000 を示す単語であり、土壌炭素貯留に関わるこの「4 パーミル（4/1000）」という極めて小さな数値こそが、CO₂ ゼロエミッション化の実現に向けた重要な目安となる。世界中の土壌に含まれている炭素の量は約 1500 億トン（t）と見積もられ、「もしも毎年その炭素量の 4/1000（6 億 t）ずつ増やすことができれば、大気 CO₂ の増加量をゼロに抑えることができる」という試算である（4 パーミル・イニシアチブ；<https://www.4p1000.org/>）。

実際に、わが国農耕地にたい肥や緑肥等の有機物を施用して土壌炭素貯留量を毎年 4‰ ずつ増加することを考えると、現在、農耕地土壌に含まれる炭素量は 0.379 億 t（表層下 30 cm）であるため（図 1：Matsui et al., 2021a）、ターゲットとする年間での炭素貯留増加量は約 0.0015 億 t（150 万 t）となる。また、農耕地面積が 437 万 ha であることから、面積当たりでは 0.3～0.4 t/ha の炭素を 1 年間に貯留することができれば CO₂ ゼロエミッション化の実現に貢献できるだろう。なお、地目別での面積当たりの平均土壌炭素貯留量は、水田、普通畑、牧草地および樹園地でそれぞれ、73.2 ± 5.3 t/ha、92.1 ± 7.9 t/ha、128 ± 14.6 t/ha および 79.2 ± 5.5 t/ha と試算されている（Matsui et al., 2021a）。



5/11

図 1 わが国農耕地の土壌有機炭素（SOC）貯留マップと土壌温度、黒ボク土の分布状況

土壌炭素貯留量とその地域性

土壌中の炭素貯留量には地域性が認められ、土壌温度（表層下 30～50 cm の年平均土壌温度）や土壌の種類によっても炭素貯留量は大きく異なることが報告されている（図 2：Matsui et al., 2021a）。例えば、わが国の畑に広く分布する黒ボク土（主に火山灰から生成した土壌）は、水田に特徴的な低地土よりもはるかに多くの炭素を貯留していることが認められる。また、低地土などでは、土壌温度が低くなると、土壌炭素貯留量は大きくなる。概して、これらの地域性は、土壌中での有機物の分解特性と関連付けて理解することが出来る。例えば、土壌温度が高くなるほど、土壌中の微生物の働きが活性化され、微生物による土壌中の有機物分解量は多くなり、炭素貯留量は低くなる傾向にある。土壌中での微生物の働きは、水田のように湛水（還元）状態でも低下し、炭素貯留量は高い傾向を示す（Shirato et al., 2005; Matsui et al., 2021b）。また、有機物と錯体を形成するアルミニウムや鉄を主体とした非晶質粘土鉱物が土壌中に多く含まれると、微生物による有機物の分解が遅延され、土壌中の炭素貯留量は大きくなる。黒ボク土は、火山灰から生成され、その生成過程で非晶質粘土鉱物を多く含むことが知られており、世界的にも特異な炭素貯留量を示すことが知られている。そのため、図 2 にあるように、九州地方のように土壌温度が高い地域においても、黒ボク土の炭素貯留量は他の地域の黒ボク土に比べても高くなり、土壌温度よりも Al 等の非晶質粘土鉱物の存在の方が、炭素貯留量に大きく影響を及ぼすことが示唆される。これら地域性に加えて、有機物施用等の土壌管理の違いもまた、炭素貯留量に影響を及ぼすことが報告されている（Shirato et al., 2003）。

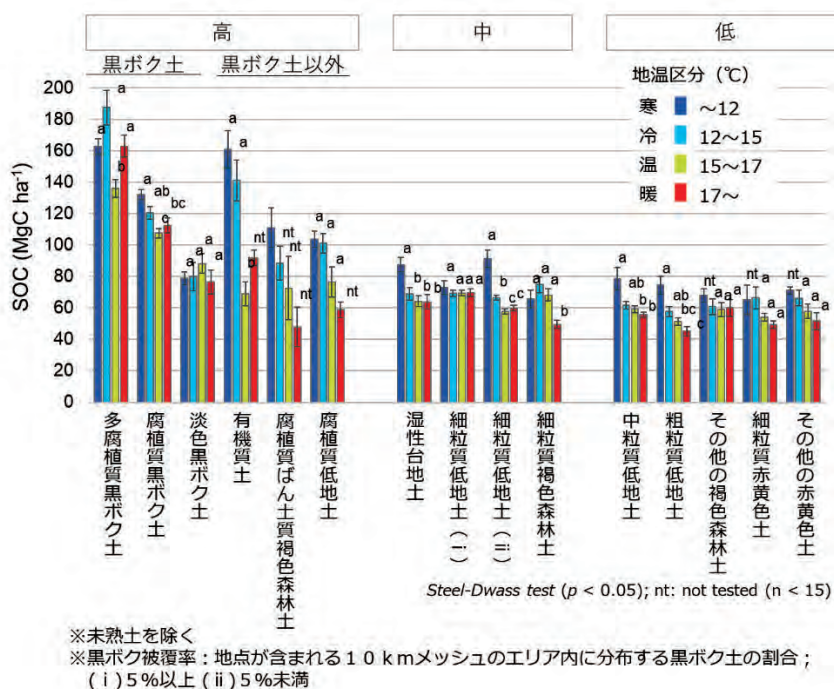


図 2 わが国農耕地の土壌有機炭素（SOC）貯留量、土壌の種類、土壌温度との関係性

土壌炭素貯留ポテンシャル

仮に、たい肥や緑肥等の有機物を投入し続けた場合、どれぐらいの炭素を土壌中に貯留できるのか、そのポテンシャルを評価しようという取組が世界各地で行われている。例えば、全球的に農業活動に伴う

土壌有機炭素の減少量は 130～135 億 t と推定されており（Lal 2018）、その減少分は炭素貯留できるのではないかという考え方がある。また、4 パーミル・イニシアチブの提言国でもあるフランスには、気象、植生、土壌の性質から国内をいくつかの炭素-景観区に分け、その区分ごとに炭素貯留量の上位 5～15%をその区分の炭素貯留ポテンシャルとする考え方もある（Chen et al., 2019）。わが国でもフランスと同様の考え方で炭素貯留ポテンシャル評価が行われており、土壌の種類と土壌温度区分毎にリン酸吸収係数と土壌有機炭素含有量（%）との関係性に着目している（図 3：Matsui et al., 2021b）。リン酸吸収係数は土壌診断でも測定されてきた特性値の一つであるが、炭素貯留ポテンシャルを評価する上でも有用な指標であると考えている。例えば図 3 より、土壌温度が寒（年平均土壌温度が 12 度未満）の地域（北海道、東北、関東の高冷地）における低地土のリン酸吸収係数が 500～1000 であった時、炭素含量上位 10%ラインの土壌有機炭素含有量は 5%程度である。この含有量を炭素貯留ポテンシャルとして考え、適切な土壌管理（有機物施用や作物残渣のすき込み等）を行うことで達成・維持可能な炭素目標量として位置付けるという考え方だ。

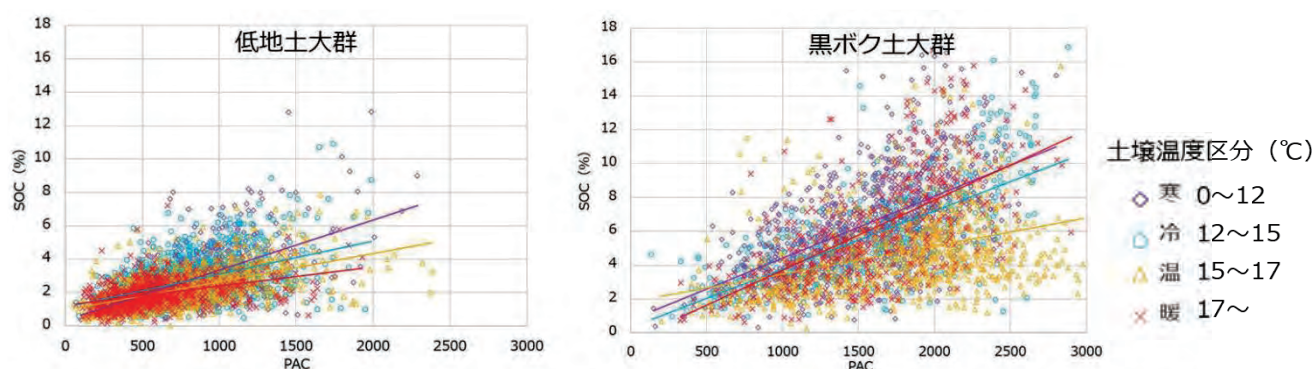


図 3 土壌温度区分、土壌の種類ごとの土壌有機炭素含量とリン酸吸収係数との関係性

土壌中に施用された堆肥などの有機物の一部は、微生物によって分解され CO₂ として大気中に放出されるが、ある一定程度の有機物は土壌中に貯留される。有機物の分解と貯留の配分は、先に述べたように土壌温度、土壌水分、リン酸吸収係数（非晶質アルミニウム・鉄含量の指標）等によって決まってくる。これら有機物の動態を予測することに用いられるのが土壌炭素動態モデルである。これまで数多くの土壌炭素動態モデルが開発されてきており、わが国においては農耕地ではローザムステッド・カーボンモデル、林野ではセンチリーモデルがよく用いられている。なお、黒ボク土大群におけるリン酸吸収係数と土壌有機炭素含量との関係性は、既に黒ボク土を対象としたローザムステッド・カーボンモデルの改良にも用いられており（Takata et al., 2011）、後述する土壌の CO₂ 吸収量「見える化」サイト（<https://soilco2.rad.naro.go.jp/>）、日本土壌インベントリーの土壌有機物管理アプリ（<https://soil-inventory.rad.naro.go.jp/main/organic/calc>）、日本国温室効果ガスインベントリ報告書等でも活用されている。

土壌有機物管理ツール「日本土壌インベントリー」と「土壌の CO₂ 吸収量見える化サイト」の紹介

前述したとおり、わが国農耕地において 4%の炭素蓄積を達成するため、その目標となる炭素増加量は年間で 0.3～0.4t/ha である。これを実現するためには、どの程度の量の堆肥を施用する必要があるのかを簡単に計算できるのが「日本土壌インベントリー」の有機物管理アプリや土壌の CO₂ 吸収量見える

化サイト（以下、土壌 CO₂ サイト）である。有機物管理アプリでは、土づくりの指標である土壌中の有機物含量がたい肥施用などによってどの程度増減するのか計算できるアプリである。土壌 CO₂ サイトは、土壌中の炭素貯留量の算定や、農地管理によるメタンや一酸化二窒素（N₂O）の発生量の算定も可能である。有機物管理アプリおよび土壌 CO₂ サイトのどちらも、同じ土壌情報を用いており、その内の土壌図や土壌炭素含量マップは、「日本土壌インベントリー」で閲覧できる。

ここでは、有機物管理ツールを用いて、目標となる炭素増加量を達成するためのたい肥施用量をいくつかの事例を基に算定していくことにする。



図4. 日本土壌インベントリーの土壌有機物管理アプリ画面

事例1：茨城県つくば市の腐植質普通アロフェン質黒ボク土の圃場

栽培作物はコムギ、たい肥を 1.6t/10a 施用、作物残渣すき込みの場合、1.19t/ha の炭素貯留が可能

事例2：茨城県つくば市の腐植質普通アロフェン質黒ボク土の圃場

栽培作物はハクサイ、たい肥を 1.6t/10a 施用、作物残渣すき込みの場合、0.03t/ha の炭素貯留が可能

事例3：茨城県つくば市の細粒質普通褐色低地土の圃場

栽培作物はコムギ、たい肥を 1.6t/10a 施用、作物残渣すき込みの場合、0.68t/ha の炭素貯留が可能

事例4：茨城県つくば市の細粒質普通褐色低地土の圃場

栽培作物はハクサイ、たい肥を 1.6t/10a 施用、作物残渣すき込みの場合、0.97t/ha の炭素が放出

上記の事例は、同一市内の黒ボク土と褐色低地土という畑作物を作付けるのに適した圃場を選定し、たい肥を同量施用して作物残渣の多いコムギと少ないハクサイを作付けた場合である。事例1および3のコムギ作付け圃場において炭素貯留は可能であるが、事例4のハクサイを作付けた場合には逆にCO₂が大気中に放出されると試算された。また、黒ボク土の方が褐色低地土よりも炭素貯留効果が高いことが示されている。今回の試行では、たい肥を 10a 当たり 1.6t 施用することになっているが、この数値は現在堆肥等として利用されている家畜排せつ物 7,030 万 t（農林水産省 2016）を全国の耕地面積で除

した値である。このため、炭素貯留効果が低い地域（暖かい地域で、かつ、黒ボク土以外の土壌）において、作物残渣の少ない作物を作付けする際には、より多量のたい肥施用もしくは緑肥の導入がCO₂ゼロエミッションへの貢献には必要だろう。

参考文献

- Chen S., Arrouays D., Angers D.A., et al., 2019. National estimation of soil organic carbon storage potential for arable soils: A data-driven approach coupled with carbon-landscape zones, *Science of the Total Environment*, 666, 355-367.
- Lal R., Smith P., Hermann F., et al., 2018. The carbon sequestration potential of terrestrial ecosystems.
- Matsui K., Takata Y., Maejima Y., Kubotera H., Obara H., Shirato Y., 2021a. Soil carbon and nitrogen stock of the Japanese agricultural land estimated by the national soil monitoring database (2015–2018), *Soil Science and Plant Nutrition*, 10.1080/00380768.2021.1902750
- Matsui K., Takata Y., Matsuura S., Wagai R., 2021b. Soil organic carbon was more strongly linked with soil phosphate fixing capacity than with clay content across 20,000 agricultural soils in Japan: a potential role of reactive aluminum revealed by soil database approach, *Soil Science and Plant Nutrition*, 10.1080/00380768.2021.1902750
- Shirato, Y. and Taniyama, I., 2003. Testing the suitability of the Rothamsted carbon model for long-term experiments on Japanese non-volcanic upland soils, *Soil Science and Plant Nutrition*, 49: 921-925.
- Shirato, Y. and Yokozawa, M., 2005. Applying the Rothamsted Carbon Model for long-term experiments on Japanese paddy soils and modifying it by simple tuning of the decomposition rate, *Soil Science and Plant Nutrition*, 49: 921-925.
- Takata, Y., Ito, T., Ohkura, T., Obara, H., Kohyama, K., Shirato, Y., 2011. Phosphate adsorption coefficient can improve the validity of RothC model for Andosols, *Soil Science and Plant Nutrition*, 57: 421-428
- 農林水産省 2016 バイオマスの活用をめぐる状況、
https://www.maff.go.jp/j/shokusan/biomass/b_suisin/attach/pdf/160908-9.pdf

有機質資材窒素肥効 見える化の取り組み

農研機構 九州沖縄農業センター
暖地畜産研究領域 飼料生産グループ
古賀伸久

有機物施用拡大のポイント

1. 品質（**窒素肥効**、ミネラルバランス）の把握と品質に応じた施用（施用量の決定）
2. 施肥コスト（肥料費、輸送費、加工費など）の低減
3. 連用効果の解明と利用（総合的な土壌改善、地力窒素など）

2

みどりの食料システム戦略と有機物施用

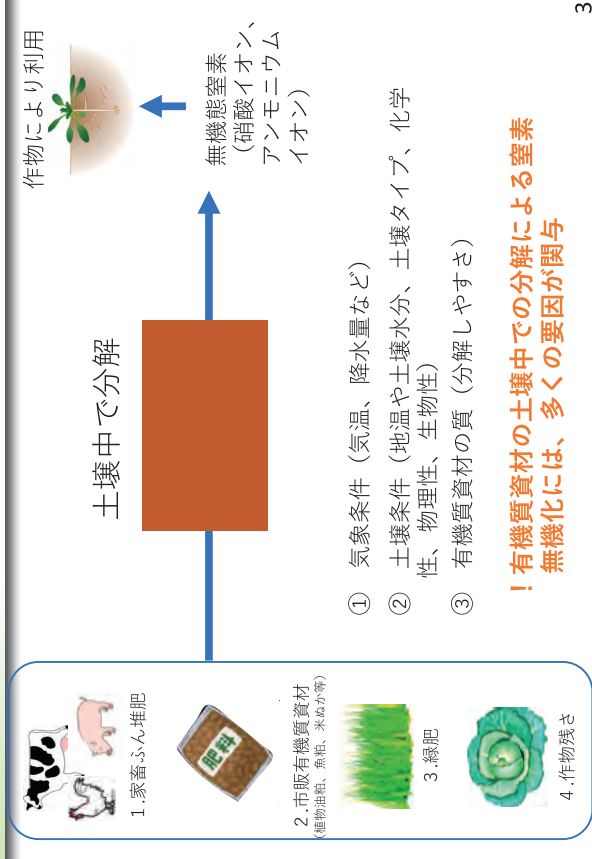
4つの柱（2050年までに目指す姿）

目標	KPI（重要業績評価指数）
1. 温室効果ガス削減	2050年までに、CO2ゼロエミッション化
2. 化学農薬の使用量低減（リスク換算）	2050年までに、50%低減
3. 化学肥料の使用量低減	2050年までに、30%低減
4. 有機農業の取組面積拡大	2050年までに、耕地面積に占める有機農業の取組面積の割合25%（100万ha）

温室効果ガス削減での**農地炭素貯留**や、**化学肥料使用量低減**、**有機農業取組面積拡大**での**化学肥料の代替肥料**として、**みどりの戦略では有機物施用は重要な役割**。

1

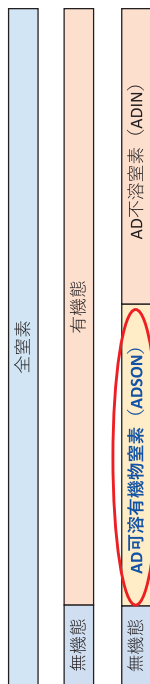
有機質資材と窒素無機化



3

ADSON (酸性デタージェント可溶性有機態窒素) とは

ADSON (酸性デタージェント可溶性有機態窒素) とは、有機質資材中の有機態窒素のうち、AD溶液 (0.5 mol L⁻¹の硫酸 1 Lに対して20gの臭化セチルトリメチルアンモニウムを溶解させた溶液) に可溶性窒素成分



有機態だが、AD溶液に溶ける窒素 (これに注目)

➤ 有機質資材のADSON含量は、土壌中での分解によって生成する窒素無機化量と高い正の相関 (小柳ら、2016 ; 小柳、2017)

➤ ADSONが10 mg/g 乾物以下の資材 (C/N比では20以上の資材) は、無機化しないといわれている。

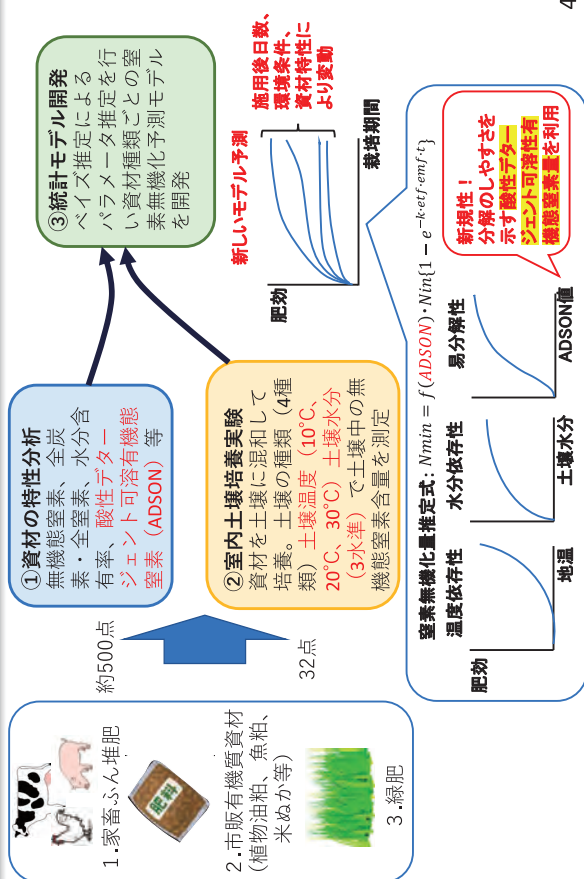
5

有機質資材ごとのADSON値

ADSON(mg N g ⁻¹ 乾物)	
60以上	植物油かす、魚かす
40〜60	骨粉、多原料混合肥料
30〜40	作物残さ (茎葉菜類)、生豚、ぶん
20〜30	鶏ふん堆肥、緑肥 (マメ科、アブラナ科、ハゼリソウ科)、米ぬか、下水汚泥肥料、乳牛生ふん、肥育牛生ふん、フィルダーケーキ
15〜20	豚ふん堆肥、緑肥 (イネ科)、作物残さ (果菜類、根菜類)、生ごみ堆肥
10〜15	牛ふん堆肥、畜産混合堆肥、緑肥 (キク科)、飼料作物刈り株、カニガラ、稲わら堆肥、繁殖牛生ふん、コーヒーカす
10以下	作物残さ (穀類)、もみがら、ハカマ、バガス、せん定枝

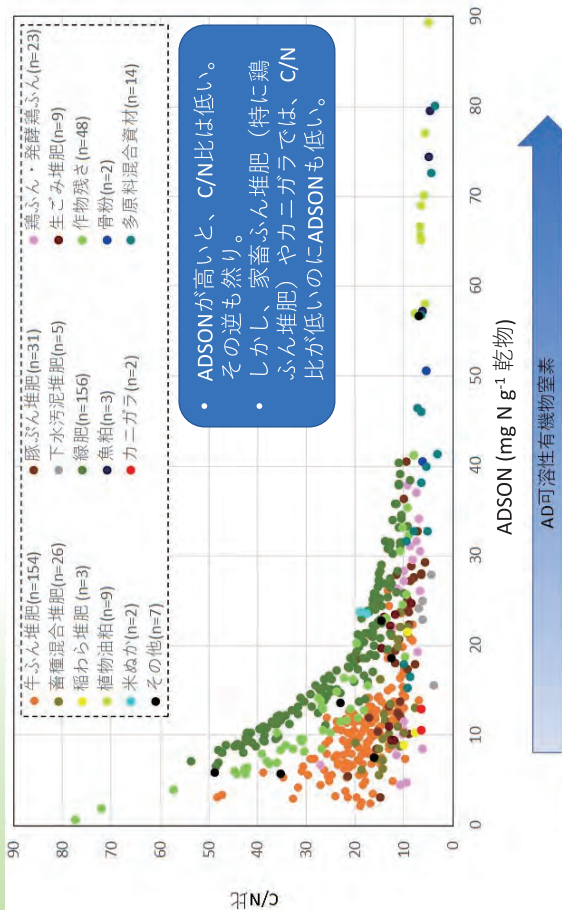
7

窒素無機化予測のモデル化

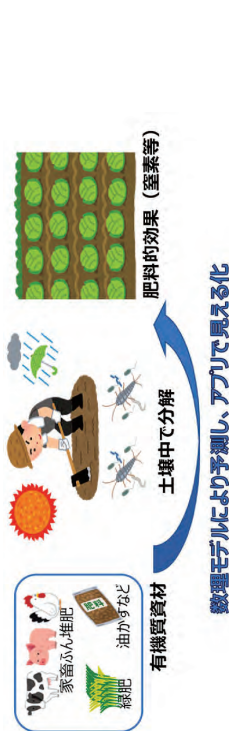


4

ADSON値とC/N比との関係



この数値が大きいほど、土壌中での分解 (無機態窒素の放出) が速いと考えられる 古賀ら (2019)土肥誌



有機質資材の肥効見える化アプリ、API

8

有機質資材窒素無機化予測モデル

基本式： $Nmin = f(ADSON)Nin\{1 - e^{-k \cdot etf \cdot emf \cdot t}\}$

補助式（温度依存性）： $etf = Q_{10}^{\frac{T-30}{10}}$

補助式（水分依存性）： $emf = \frac{1}{1 + b \cdot \exp(-\frac{8.5Vw}{100})}$

赤字：入力値

青字：推定されたパラメータ

国立環境研究所と共同で特許出願中

出力値：Nmin (窒素無機化量；g/m²)

入力値：ADSON (mg N/g)、Nin (有機態窒素投入量；g/m²)、t (期間；日)、T (地温；℃)、Vw (体積含水率；%)、k (分解速度定数)、Q10、b

実際の計算上は日々変化する環境条件に対応するため、基本式を差分法にて変形することで各日毎の無機化量を計算して指定期間の無機化量を積算する。

10

土壌培養実験による窒素無機化データ収集

有機質資材
32種
(+有機物
資材なし)

×

土壌4種類
・都城0t区
(黒ボク土)
・都城12t区
(黒ボク土)
・筑後
(灰色低地土)
・長崎
(赤黄色土)

×

土壌温度
3水準
(10, 20,
30℃)

×

土壌水分
3水準
(最大容
水量の
45, 60, 75
%)

×

培養期間
3水準
(1, 4, 12
週間)

= 3456点

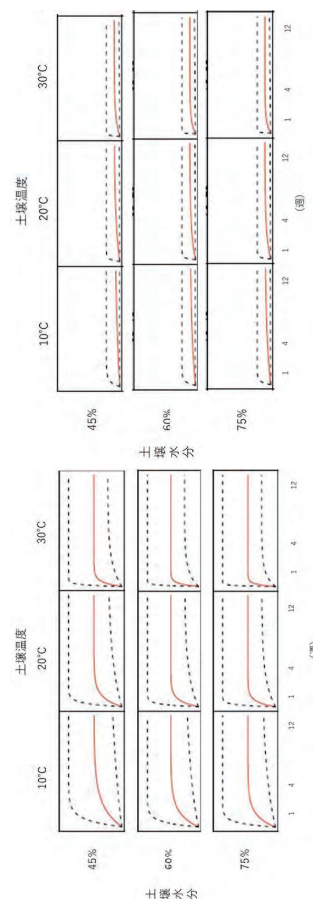


9

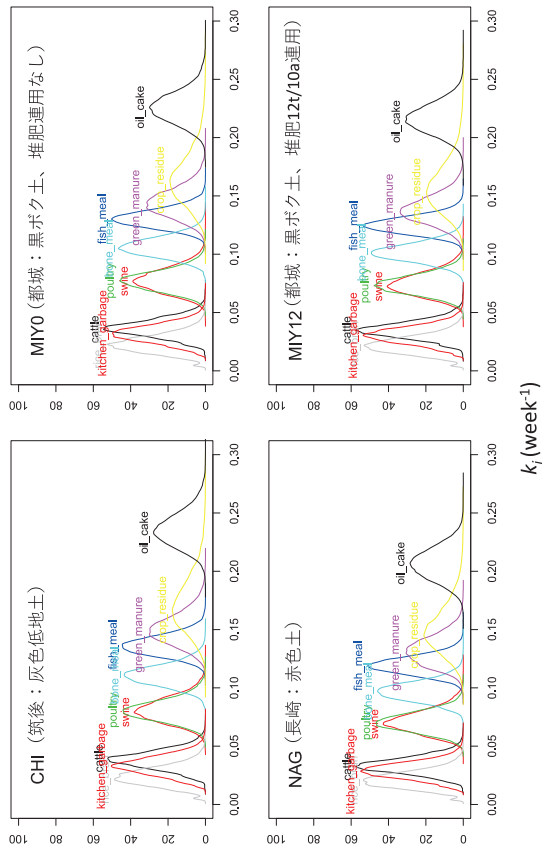
窒素無機化の推定

植物油かす

牛ふん堆肥

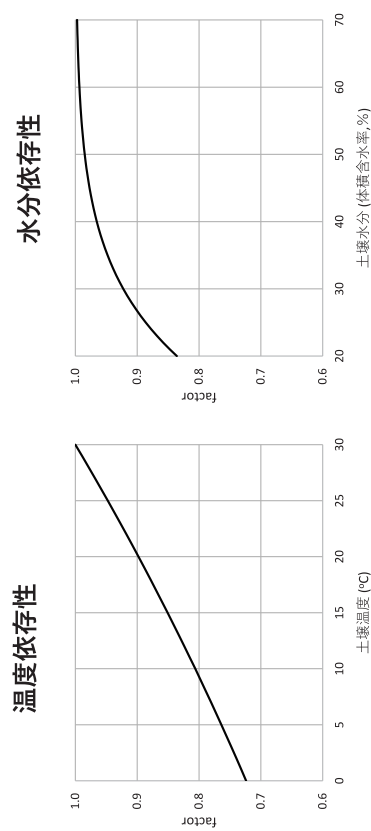


11

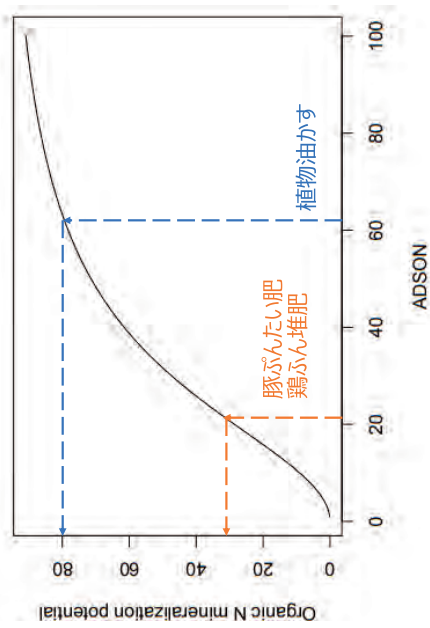


12

温度・水分依存性の推定結果



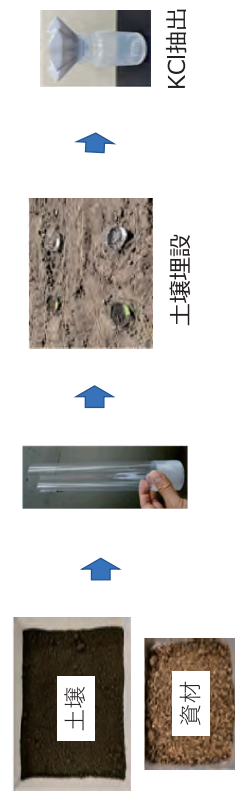
14



13

【ほ場実証】

現在、イノベ事業 (R2~R4年度) 予算により、「有機質資材窒素肥効予測モデル」の全国検証を実施中。



【改善点】ほ場実証値とモデル予測値の現状

- ADSONの高い資材 (植物油かすなど) で、予測では無機化の立ち上がりが遅い。
- 最大窒素無機化量の予測がまったく合わない資材が一部ある (鶏ふん堆肥の一部)。

15

公開された見える化アプリ①



アクセス方法

検索 日本土壌インベントリー から「土壌管理アプリ集」へ

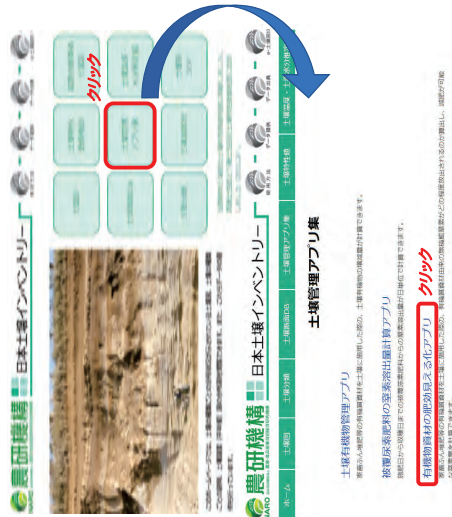


図 日本土壌インベントリーと土壌管理アプリ集の画面

16

見える化アプリのデータフロー

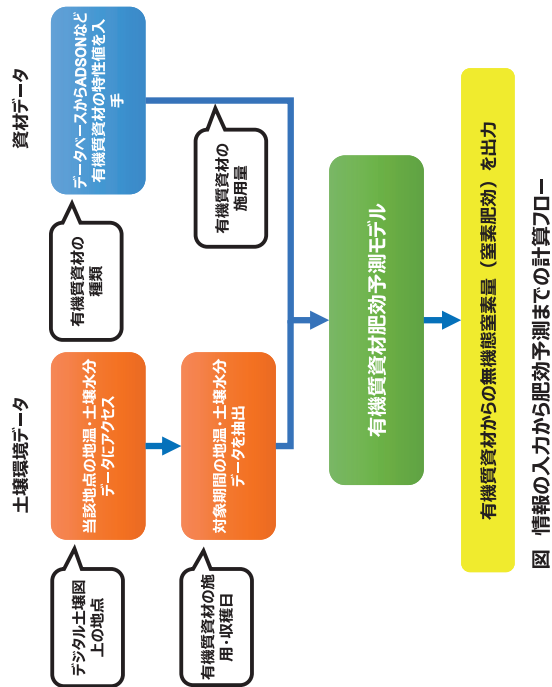


図 情報の入力から肥効予測までの計算フロー

18

公開された見える化アプリ②



図1.1 有機質資材の肥効見える化サイトの画面

17

謝辞



本研究で分析に使用した有機質資材を提供していただいた九州沖縄各県の農業試験場、農業団体、民間企業、農家の皆様、東京農業大学 後藤逸男名誉教授に厚くお礼申し上げます。

連絡先

nkoga@affrc.go.jp



家畜ふん尿由来有機質資材の野菜栽培への利用

農研機構 中日本農業研究センター
徳田 進一

1. はじめに

「みどりの食料システム戦略」では 2050 年までに、①輸入原料や化石燃料を原料とした化学肥料使用量の 30%低減、②耕地面積に占める有機農業の取組面積の割合を 25%(100 万 ha)に拡大、③農林水産業の CO₂ ゼロエミッション化の実現、を達成することが目標に掲げられている。野菜類は水稻・麦類・大豆などに比べて一般的に年間施肥量が多いことから、目標達成に向けて①や③に取り組む必要性は高い。また、国内において購入経験がある有機食材では野菜が最も多いとの報告があり、有機野菜への消費者の関心が高いことがうかがわれ、野菜栽培において②に取り組むことへの社会からの要望も大きいと思われる。筆者らは以前に家畜ふん尿由来有機質資材を活用した野菜栽培における化学肥料全量代替技術の開発を目指して、堆肥連用圃場での野菜栽培試験を実施した。この試験で得られた知見は上記①～③の目標達成のための技術開発の一助になると考え、その一部を紹介する。

2. 堆肥連用試験に取り組んだ背景

今回紹介する堆肥連用試験は 2002 年に開始したものであった。当時の耕種農家が抱える問題として、品質の不安定さや高齢化による労働力不足などの理由から堆肥の農地への投入量が漸減する傾向があり、土壤環境基礎調査等の定点調査の結果からは、有機質資材投入量減少にともなって露地野菜畑土壌の肥沃度が低下傾向にあることが指摘されていた。一方で、国内では年間約 9,000 万トンの家畜排せつ物が発生しており、堆肥化・焼却などの処理が行われていたものの、処理しきれない家畜排せつ物や堆肥が野積みされることも多く、十分には有効利用されていなかった。これら問題の顕在化を受けて、1999 年に「食料・農業・農村基本法」が制定され、さらに、「環境三法」とも呼ばれた「家畜排せつ物の管理の適正化及び利用の促進に関する法律」（家畜排せつ物法）、「持続性の高い農業生産方式の導入の促進に関する法律（持続農業法）」、「肥料の品質の確保等に関する法律（肥料取締法、現在の肥料品質確保法）」が制定・改正された。これらの法律は、「耕」側の堆肥施用量減少による地力低下、「畜」側の家畜排せつ物の適正処理、と言う両方の問題の解決を図るため、家畜排せつ物由来有機質資材を作物生産に積極的に利用することによって「耕畜連携」を強化することを目標としたものであった。

3. 家畜ふん堆肥による化成肥料全量代替が露地野菜の生産性と土壤環境へ及ぼす影響の解明

1) 堆肥連用試験の概要

このような社会背景を受けて 2002 年より、当時の(独)野菜茶業研究所（現農研機構野菜花き研究部門）では、露地野菜の生産性向上と適正な土壤環境の維持の両立を目標とする家畜ふん由来有機質資材の利用技術の開発を目指して、家畜ふん堆肥の連用試験を開始した。対象作物は、栽

培面積、収穫量ともダイコンに次いで国内 2 位（2002 年当時、2021 年は 1 位）のキャベツとした。表 1 に示す 6 つの処理区を含む全 18 処理区を 3 反復で設定し、1 年に 2 回（4 月定植・6 月収穫の夏作と、9 月定植・12 月収穫の冬作）、合計 16 回の堆肥施用・キャベツ栽培を行った。堆肥のみを施用する 3 つの処理区では化成肥料を施用せず、堆肥由来全窒素のみで化成肥料由来窒素と同量もしくは 2 倍量、3 倍量を施用した。堆肥は定植 1 ヶ月前、化成肥料は定植前日に全面全層施用し、いずれの処理区も追肥は行わず、また苦土石灰などの pH 矯正資材は施用しなかった。

2) キャベツ生産性の推移

堆肥連用 4 回目まではキャベツ収量が低下したが、5 回目以降は堆肥投入量に応じた収量となり、堆肥 3 倍区では 9 回目以降に化成肥料区と同等の収量となった（図 1）。化成肥料と同等の収量を得るためには全窒素換算で 3 倍量の牛ふん堆肥の施用が必要であった本研究の結果は、牛ふん堆肥の窒素肥効率は一般に 30%程度とされる既往の知見を支持するものであったと言える。

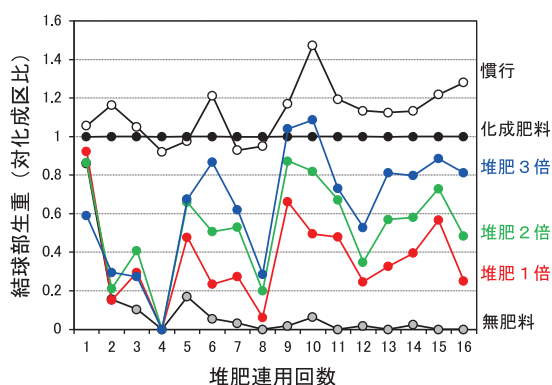


図 1 堆肥連用にもなうキャベツ収量の推移

表 1 堆肥連用試験の施肥設計(10a あたり)

処理区	有機物*1	化成肥料*2
1. 慣行	堆肥現物 2 t 収穫残さ	2.5 kgN
2. 無肥料	なし	なし
3. 化成肥料	なし	2.5 kgN
4. 堆肥 1 倍	2.5 kgN	なし
6. 堆肥 2 倍	5.0 kgN	なし
8. 堆肥 3 倍	7.5 kgN	なし

*1: 堆肥はおがくず牛ふん堆肥(水分含量:68%、TN:2.2%、CN比:20)を使用

*2: 化成肥料は化成8号(N, P₂O₅, K₂Oいずれも8%)を使用

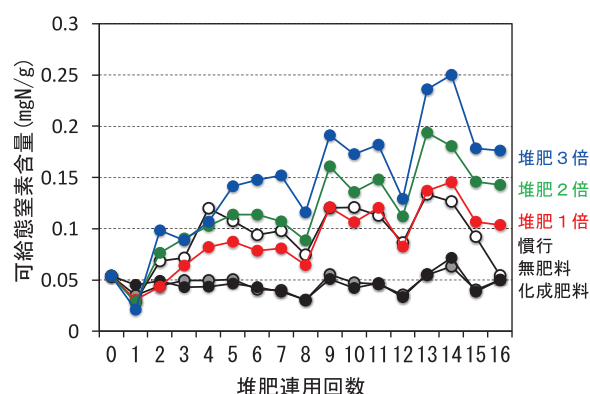


図 2 堆肥連用にもなう可給態窒素含量の推移

3) 栽培跡地土壌の化学性の推移

栽培跡地土壌の全炭素含量と全窒素含量は化成肥料の連用では変化がなかったが、堆肥を連用すると施用量に応じて増加した。可給態窒素含量は同様に推移したが、連用 9 回目以降にほぼ一定の値を示したことから（図 2）、土壌中での可給態窒素画分の有機化と無機化が平衡状態に達したと考えられた。

可給態リン酸（トルオーグリン酸）含量は慣行区が最も高く推移し、連用 16 回目でも一定値に達することはなかった。一方、土壌中に存在するリン酸のうち植物が直接吸収する画分と考えられる水溶性リン酸含量は堆肥 3 倍区が最も高く推移し、トルオーグリン酸含量が高かった慣行区では非常に低く推移した。

土壌 pH(H₂O)は堆肥を施用した 3 つの処理区では試験開始時の pH から大きく変化することはないが、慣行区と化成区では徐々に低下し、連用 16 回目には化成区で 4.7 にまで低下した。

4) 一酸化二窒素 (N₂O) 発生量の比較

表 1 で紹介した 6 つの処理区において、堆肥連用 15 回目と 16 回目のキャベツ栽培期間中の N₂O 発生量をクロードチャンバー法で評価した（図 3）。チャンバーは PVC 製で、幅 60 cm・奥行 40

cm・高さ 40 cm とし、条間 60 cm・株間 40 cm で栽培するキャベツ 1 個体を覆うように圃場に設置した。堆肥連用 15 回目の冬作においては、化成肥料を施用する慣行区と化成肥料区において化成肥料施用直後に N_2O 発生量が増加した。しかし冬作においては、これ以外の N_2O 発生量の増加はほとんど観察されなかった。一方、堆肥連用 16 回目の夏作においては、化成肥料施用直後に N_2O 生成量の増加が観察され、さらに、無肥料区と堆肥 1 倍区以外の処理区において、収穫前後、特に収穫直前に発生量が増加した。また、収穫残さをすき込む慣行区においては、残さすき込み後の発生量も依然として高かった。測定期間中の総 N_2O 発生量は堆肥と化成肥料を併用する慣行区が最も多く、堆肥施用区においては施用量が多いほど N_2O 発生量も多くなった（図 4）。



図 3 クローズドチャンバー法によるキャベツ圃場からの N_2O 発生量の測定の様子

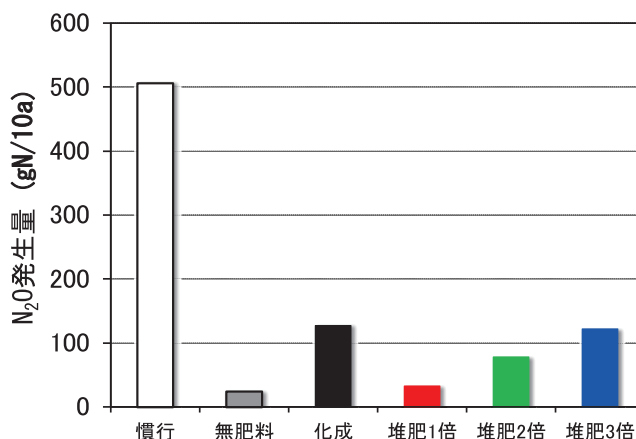


図 4 堆肥連用圃場の 15～16 作目キャベツの栽培期間における N_2O 発生量の比較

5) 連用中止後の生産性と可給態窒素含量の推移

堆肥連用によって蓄積した可給態窒素の生産性への寄与を検討するため、16 回の堆肥連用・キャベツ栽培の終了後、化成区と堆肥 1 倍・2 倍・3 倍区の 4 つの処理区をそれぞれ四等分し、それぞれ①無肥料、および②化成肥料を 20 kgN/10a、③1/2 の 10 kgN、④1/4 の 5 kgN、を施用してキャベツを 7 回栽培した。可給態窒素の蓄積が少ない化成区では減肥により収量が低下したが、堆肥を連用してきた 3 つの処理区では 10 kgN でも化成肥料 20 kgN と同等の収量が得られた（図 5）。しかし、この時に土壌の可給態窒素含量は徐々に減少したことから（図 6）、生産性を維持しながら化成肥料を減肥するには堆肥を連用して窒素肥沃度を維持する必要があると考えられた。

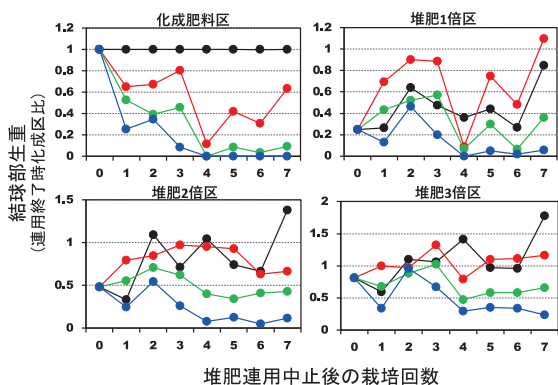


図 5 堆肥連用中止後のキャベツ収量の推移
凡例：●化成 20kgN/10a、●化成 1/2、●化成 1/4、●無肥料

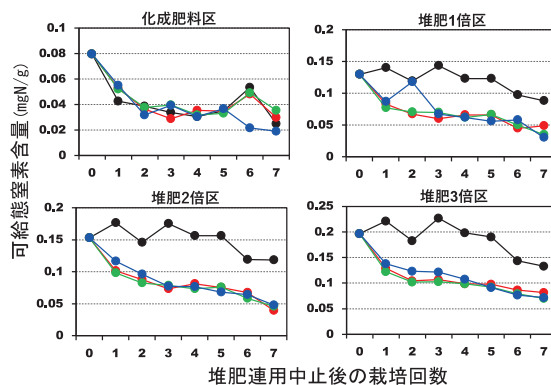


図 6 堆肥連用中止後の可給態窒素含量の推移
凡例は図 5 に同じ

6) 堆肥の窒素肥効発現促進

牛ふん堆肥に含まれる有機態窒素の土壌中での無機化は、温度（積算温度）に依存することが知られている。そこで、有機態窒素の無機化を促進して堆肥の窒素肥効発現を高めるために、通常は苗定植の1ヶ月前に施用される堆肥を2ヶ月前に施肥し、さらに地温を高めるために堆肥施用後の圃場表面を透明ビニールマルチで被覆する、と言う2つの方法によって積算地温を確保することを試みた。その結果、堆肥施用から定植までの期間が盛夏期にあたる冬作においては、2ヶ月間のマルチ被覆によって有機態窒素の無機化が促進されるとともに、生成した無機態窒素の降雨による溶脱が抑制されることから、定植時には化成肥料施用直後と同程度の土壌無機態窒素濃度が確保され、キャベツ収量も化成肥料と同程度かそれ以上となった。

4. おわりに

本試験の結果から、家畜ふん堆肥を利用して土壌の窒素肥沃度を適正に維持することによって、化成肥料の施用量を大幅に削減することが可能であると考えられた。しかし、家畜ふん堆肥は肥料成分の含有量や肥効のばらつきが大きいことが指摘されており、耕種農家が使用をためらう理由の1つになっている。そのため、堆肥等の有機質資材について肥料成分の含有量や肥効を簡易・迅速に評価する方法の開発が必要である。また、施用量を計算するには堆肥の品質評価だけでなく、施用する圃場の肥沃度やそのムラを正確に評価する必要があり、そのための土壌診断技術やそれに基づく施肥技術の開発も必要となる。これらの課題については農研機構ですでに取り組まれており、今後の成果に期待したい。

土づくり・減肥に役立つ 緑肥の効果とその特徴

農研機構 中日本農業研究センター
唐澤敏彦

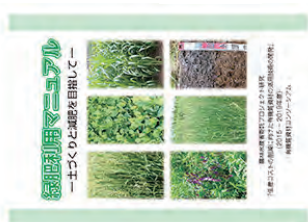
※ 農研機構（のうけんきこう）は、国立研究開発法人 農林・食品産業技術総合研究機構のコミュニケーションネーム（通称）です。

NARO

緑肥の効果



緑肥：栽培している植物を、
収穫せず田畑にすきこみ、
次の作物の肥料にすること、
またはそのための植物



- ・ 肥料効果
- ・ 土づくり

他の有機物
と比較した
緑肥の特徴

農水省委託プロ「生産コストの削減に向けた有機質資材の活用技術の開発（2015～2019）」

- 自給肥料として広く栽培→化学肥料の普及とともに減少
- 肥料価格が高騰 = 肥料効果に再注目
- 堆肥投入量の減少 = 堆肥に代わる土づくり資材として期待

緑肥による窒素の供給（マメ科）

マメ科緑肥：

青刈ダイズ、レンゲ、ベッチ、
クロタラリアなど

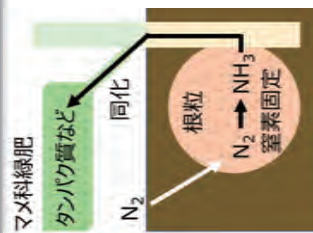


ヘアリーベッチ
N 3-5%, C/N 8-15



クロタラリア
N 2-3%, C/N 17-20

ベッチ根の根粒



窒素固定により、窒素を多く含む

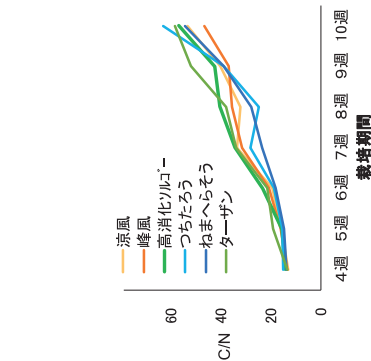
すぎ込むと次作物の窒素肥料に

窒素固定：堆肥など他の有機物と異なる機能の利用
窒素濃度（乾物あたり）：有機質肥料よりも低く、
豚ふん堆肥/鶏ふん堆肥と同等以上
C/N：比較的变化しにくく、ベッチなどは、大きくしてすぎ込んだ方が窒素肥効は高い

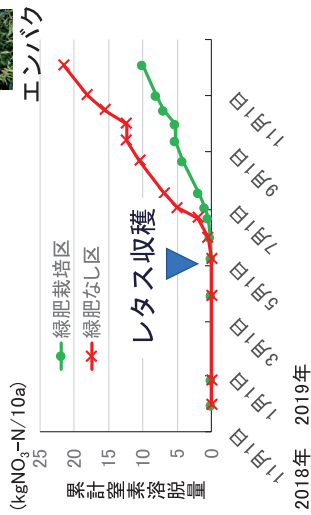
緑肥導入がもたらす肥料効果

緑肥による窒素の供給（イネ科）

野菜などが吸い残した窒素
＝野菜収穫後に地下に流れ、
吸収不能（溶脱）



レタス収穫後にエンバクを
導入し、溶脱窒素を回収→
次作物の養分に



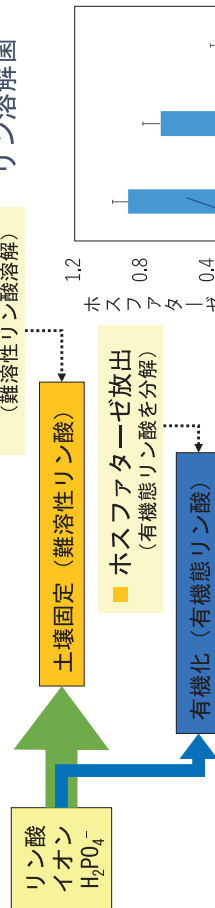
栃木県、ライシメータ試験

溶脱低減：堆肥など他の有機物にはない機能の利用
C/N比：栽培期間、栽培条件で変化しやすい
大きくしてすき込むと窒素肥効が低い

ソルガムなどのC/N比の
経時変化（長野県）

リン酸吸収を促進する微生物

リン酸は、施肥後、植物が
利用しにくい形態に変化



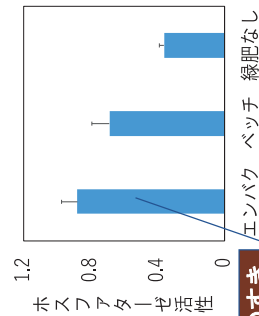
緑肥がエサとなることで、
様々な土壌微生物が増殖

微生物機能：堆肥より微生物の作用を受け
ていない緑肥（新鮮有機物）の効果が大きい
緑肥のリン濃度：家畜ふん堆肥の1/10前後

緑肥すき込み
でリン溶解菌
が増殖

有機酸を放出
(難溶性リン酸溶解)

リン溶解菌

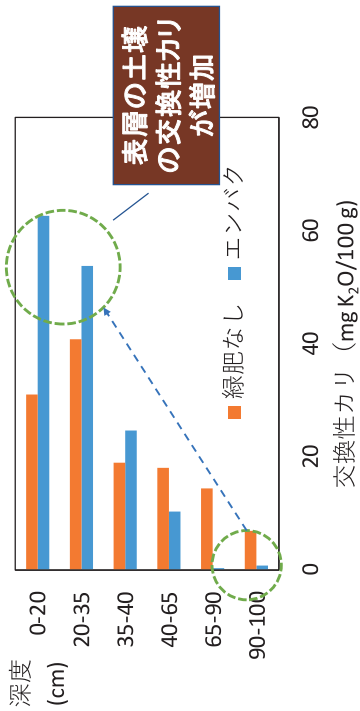


緑肥のすき
込みでホス
ファターゼ
活性は上昇

ホスファターゼ

緑肥によるカリ供給（イネ科など）

緑肥導入：カリの溶脱を減らし、作土の交換性カリを増やす
→カリ施肥を減らせる可能性



表層の土壌
の交換性カリ
が増加

深さごとに
交換性カリ
を測定

エンバクの導入が深さ別の交換性カリ含量に及ぼす効果

下層への移動を小さく：堆肥など他の有機物にはない機能の利用
緑肥のカリ濃度：ソルガム、エンバク、ライムギ（イネ科）4-6%、
ベッチ、クロタリリア（マメ科）2-5%

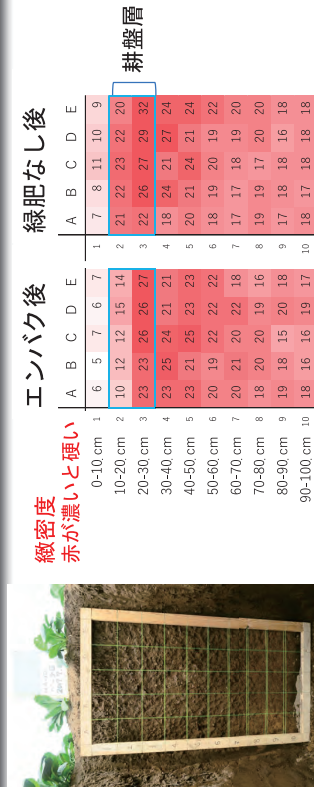
緑肥導入がもたらす土づくり効果

有機物を蓄積する効果 一 堆肥との比較一



- 緑肥ごとの土づくり効果を比較可能に
例) ソルガムは牛ふん堆肥1.4t/10a ⇔ ベッチは牛ふん堆肥0.3t/10a
- 土づくりにかかるコストや労力を緑肥と堆肥で比較可能に
例) 牛ふん堆肥は1.4 tの運搬・散布⇔ソルガムは種子5 kgの持ち込み・播種

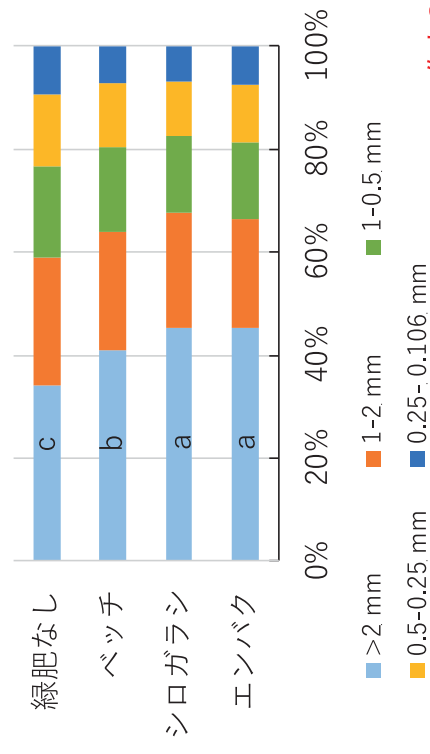
下層土の硬さと後作コマツナの根の分布への効果



深さ (cm)	エンバク後					緑肥なし後				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
0-10 cm	1	6	5	7	6	7	1	7	8	11
10-20 cm	2	10	12	12	15	14	2	21	22	23
20-30 cm	3	23	23	26	26	27	3	22	26	27
30-40 cm	4	23	25	24	21	21	4	18	24	21
40-50 cm	5	23	21	25	23	23	5	20	21	24
50-60 cm	6	20	19	22	22	22	6	18	19	20
60-70 cm	7	20	21	20	22	18	7	17	17	19
70-80 cm	8	18	20	20	19	16	8	19	19	17
80-90 cm	9	19	18	15	20	18	9	17	18	16
90-100 cm	10	18	16	16	19	17	10	18	17	18

下層土の改良：堆肥は耕起する作土まで有機物を補給するのにに対し、緑肥は下層土にも根が伸びる

作土の団粒の大きさに与える効果



緑肥が土壌団粒の大きさに与える効果

作土の団粒化：有機物の蓄積などにより、緑肥、堆肥とも進む

土壌の透水性（水はけ）に与える効果



緑肥なし後 ヘアリーベッチ後

■緑肥なし後（左）とベッチ後（右）のネギ圃場の降雨後の様子（秋田県立大）

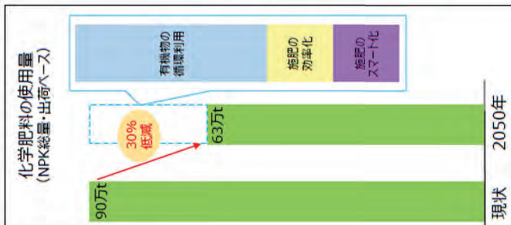
透水性の改善：根が伸びることで、下層土に亀裂ができたり、下層土にも土壌構造が発達したりするため、緑肥後では透水性が改善

みどりの食料システム戦略

化学肥料の低減に向けた取組

目標

- ・2050年までに、輸入原料や化石燃料を原料とした化学肥料の使用量を30%低減。



1 有機物の循環利用

たい肥の投入による生産性の向上を重視し、農業のたい肥利用を促進するとともに、たい肥の品質向上・ペレット化技術等の開発や流通などを通じて、耕種農家が使いやすいたい肥等からでも手に入る環境を整備することによって、たい肥による化学肥料の削減を進める。

目標達成に向けた技術開発

- ・たい肥の製造コスト低減、品質安定化技術や低コストなペレット化技術
- ・劣化等からの肥料成分（リン）の低コスト回収技術

目標達成に向けた環境・体制整備

- ・たい肥による生産性向上効果を現場で検証しつつ取組を拡大（持続可能な生産技術への転換を促す仕組みや支援を検討）
- ・地域の有機性資源の循環利用システムの構築（たい肥の品質向上・ペレット化、たい肥を原料とした新たな肥料の生産、広域流通体制等）

2 施肥の効率化・スマート化

土壌や作物の生育に応じた施肥や作物が吸収できる範囲への局所施肥等で施肥の無駄を省き効率化するとともに、データの蓄積・活用により最適な施肥を可能にする「スマート施肥」を導入する。

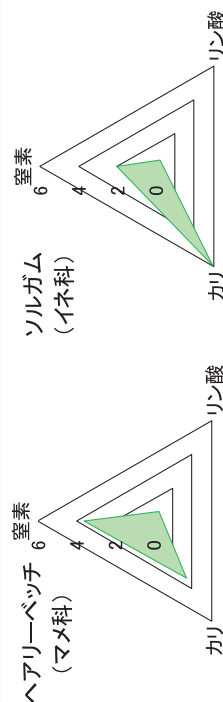
目標達成に向けた技術開発

- ・ドローンや衛星画像等を用いて、土壌や作物の生育状況に応じて精密施肥を行う技術
- ・土壌や作物などのデータを活用した「スマート施肥システム」
- ・有機物なども活用した新たな肥効調節型肥料、土壌微生物機能の解明と活用技術

目標達成に向けた環境・体制整備

- ・土壌分析に基づく施肥の実証、ドローン等を用いた精密施肥技術の現場実証と農業者への普及導入
- ・土壌や作物などのデータを地域や各システムを越えてビッグデータ化
- ・スマート施肥システムによるデータに基づく最適な施肥の実現

たい肥等による化学肥料の置換え



家畜ふん堆肥：リン酸、あるいは、リン酸・カリが高い傾向
→混合堆肥複合肥料などで成分を調整する方法も

緑肥：窒素・カリ（マメ科）、カリ（イネ科）が高い傾向
→養分バランスという意味でも、たい肥と緑肥を組み合わせた化学肥料代替

養分のバランス：堆肥と緑肥では異なる、化学肥料代替には、両者の組合せが有効か

土壌や作物の生育状況に応じた精密施肥



主作物ではなく、緑肥の生育をセンシング

主作物を植える前に圃場の状況を把握可能

選ぶ緑肥の種類によっては、主作物よりも、土壌の条件がわかりやすい可能性も

みどりの食料システム戦略

有機農業の取組面積拡大に向けた取組

耕地面積に占める
有機農業の取組面積の割合
25% (100万ha)

有機農業の取組面積拡大に向けた技術革新



28

有機農業の取組面積拡大に向けて

緑肥等の有機物施用による土づくり

有機農業の取組面積拡大に向けた技術開発・普及（現在から2030年頃まで）



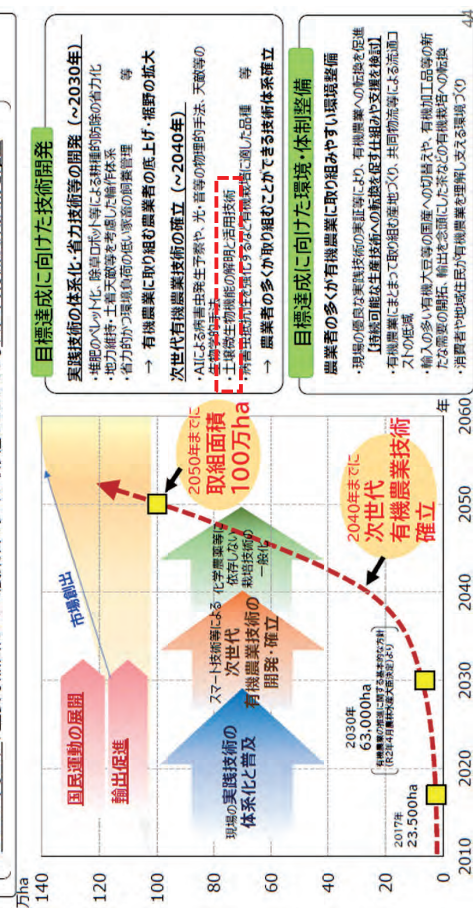
プロジェクトの成果として 紹介した内容の延長

みどりの食料システム戦略

有機農業の取組の拡大

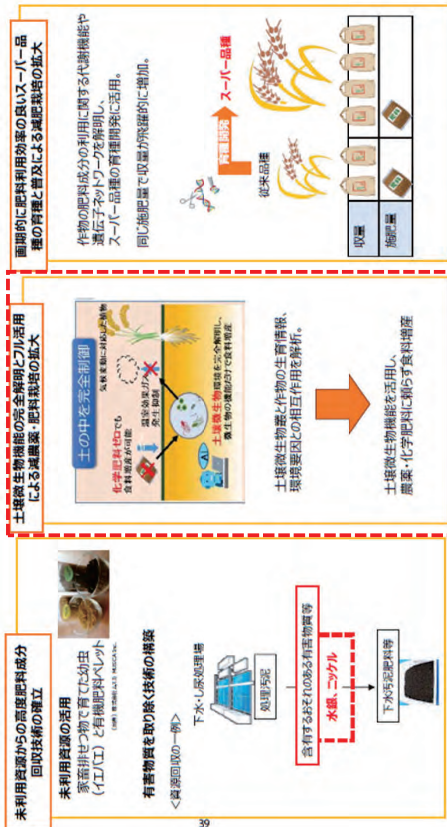
目標

- ・2050年までに、オーガニック市場を拡大しつつ、耕地面積に占める有機農業の取組面積の割合を25%（100万ha）に拡大（※国際的に行われている持続農業）



土壌微生物機能の完全解明とフル活用

化学肥料の使用量低減に向けた技術開発・普及（2040年頃から）



有機農業の取組の拡大だけでなく、化学肥料の使用量低減、化学農薬の使用量低減にも、土壌微生物機能の活用への期待

まとめ

- 肥料効果 ○○肥料＝〇kg相当（緑肥ごと）
 - 窒素：窒素固定、溶脱低減
 - カリ：溶脱低減
 - リン酸：有用な微生物機能（窒素固定・溶脱低減・リン関連微生物は緑肥特有）
 - 土づくり効果 有機物の蓄積＝牛ふん堆肥〇t相当（緑肥ごと）
 - 作土：団粒化
 - 下層土：緻密度、水はけの改善（下層土の改善は緑肥特有）
 - 施肥削減
 - 養分バランスを考慮した堆肥との組合せ
 - 緑肥のセンシングによる精密施肥
 - 有機農業
 - 土づくり、肥料効果、病虫害抑制効果
 - 土壌微生物機能の制御
- これらを利用し、効果的な施肥削減、有機農業の取組面積拡大へ

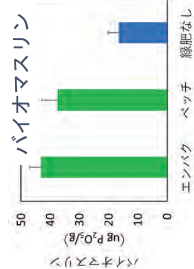
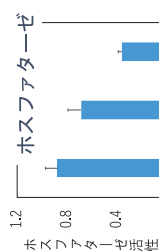
緑肥の土壌微生物への効果

緑肥は、新鮮有機物（微生物の作用を受けていない有機物）であるため、土壌微生物へのインパクトが大きい

- 緑肥がエサとなることで、様々な土壌微生物が増殖
 - リン酸循環に関わる機能：リン溶解（リン溶解菌）、無機化（ホスファターゼ）、リン酸のプール（バイオマスリン）、吸収域の拡大（菌根菌）
 - 窒素：無機化（プロテアーゼ）・・・
 - 炭素：有機物分解（グルコシダーゼ）・・・
- 土壌微生物の機能を引き出すために使えるかもしれない
- 雑草、線虫、土壌病害の抑制への効果も知られている



リン溶解菌



食の窒素循環と次世代型の有機農業

農研機構農業環境研究部門土壌環境管理研究領域土壌資源・管理グループ 江口 定夫

1. 反応性窒素の増大と食の窒素循環

タンパク質は、全ての生命体にとって必要不可欠な構成物質であり、私達は毎日の食事ですべてを摂取する必要がある。タンパク質の約 16%は窒素 (N) であり、それは全て、大気中の窒素分子 (N_2) が元となっている。反応性窒素 (reactive nitrogen, Nr) (Galloway et al 2003) は、生物が利用可能な N_2 以外の全ての N 化合物中の N を表す。微生物のごく一部は、生物学的窒素固定 (biological N_2 -fixation, BNF) により、 N_2 からアンモニア (NH_3) を生合成できるが、それ以外の生物は、Nr を摂取せずに生きることが出来ない。20 世紀初め、 N_2 から NH_3 を化学合成する Haber-Bosch 法が開発された。化学肥料と化学農薬の使用は、食料生産を増大させ、世界人口は急増した。一方、人為プロセスにより生成される「新しい」Nr (210 Tg N/年) は、自然プロセスによる Nr 生成 (203 Tg N/年) を上回り (Fowler et al 2013)、N 循環の人為的攪乱は、人間が制御可能な範囲 (地球の限界: planetary boundary) を超えたと報告されている (Rockström et al 2009)。現在、食料生産を目的とした「新しい」Nr 生成は、人為プロセスの 75%以上を占め (Fowler et al 2013)、食料生産～消費システム (フードシステム) における Nr 負荷削減は、地球規模での喫緊の課題となっている。

2. 有機農業による窒素負荷削減の可能性

これ以上、地球上の Nr プールを増大させないため、 N_2 から化学合成される「新しい」Nr (窒素肥料等) の生成を極力抑え、既に地球上に大量に存在する「古い」Nr (堆肥等) を如何に効率良く循環利用するか? が強く問われている (江口ら 2018)。即ち、有機物主体の肥培管理や育種を大前提として、耕畜連携を強化し、国全体が資源循環型の環境保全型農業へ大きく転換する必要がある。なお、堆肥等の過剰施用は窒素溶脱等を助長することから、総窒素施用量に上限値を設ける取組 (農林水産省 2008; 北海道農政部生産振興局技術普及課 2019) が必要である。更に、Nr 負荷削減だけでなく、化学農薬による生態系への負の影響削減も含めると、化学物質を原則使用しない有機農業になる。但し、それはごく一部の生産者 (日本では農地面積の 0.5%) が取り組む有機農業ではなく、多くの生産者がマニュアル通りに実施可能な (慣行農業と同様に広く普及可能な) 次世代型の有機農業でなくてはならない。また、単収は慣行農業に匹敵し、安定した収量を確保できるものが求められる。既存の有機農業は、一般に単収が慣行農業に劣るため、同じ人口を養うためにはより多くの農地造成 (森林破壊) を必要とするという点で、環境保全的とはいえない面がある (e.g., Clark & Tilman 2017)。必要最低限の化学物質に頼る減肥減農薬農業 (特別栽培農産物など) と有機農業を比較したとき、どちらがより環境保全的であるかについては、様々な実証データの蓄積・解析が必要である。

みどりの食料システム戦略は「2050 年までに有機農業面積 25%」という高い数値目標を掲げるが、有機農業が拡大する程、食料供給源としても環境保全的観点からも、高く安定した収量が要求される。日本の新規就農者 (H22~H28) の 1/4 以上は、有機農業を実践しており (農林水産省生産局農業環境対策課 2020)、「有機農業面積 25%」という数値目標は、非現実的ではないかもし

れない。しかし、それが本当に環境負荷削減につながるかどうかについては、その多くは、次世代型の有機農業を实践できる革新的な土壌・作物管理技術の開発の如何に掛かっている。

3. 有機農業と土壌の健康

有機農業とは、公的には、「生物の多様性、生物の循環及び土壌の生物活性等、農業生態系の健全性を促進し強化する全体的な生産管理システム」（農水省 HP）のことであり、有機農業推進法（H18 策定）では、「化学的に合成された肥料及び農薬を使用しないこと並びに遺伝子組換え技術を利用しないことを基本として、農業生産に由来する環境への負荷をできる限り低減した農業生産の方法を用いて行われる農業」と定義される。公的ルール（認証制度）としては、Codex の有機食品ガイドラインに準拠した有機 JAS 規格があり、一部の化学物質の使用は許容されている。有機農業の定義は、国・団体等により異なるが、FAO は、「外部からの投入ではなく生態系管理（ecosystem management）に依存するシステム」という点に収束する、と総括している。USDA は、生態学的バランス（ecological balance）の促進を明記し、有機農業の具体的な方策として、カバー作物、緑肥、家畜糞尿堆肥、輪作の活用により、土壌の健康（soil health）を長期的に維持すること等を挙げている。有機農業では、化学農薬を原則使用できないため、病虫害予防のために出来るだけ健康的に作物・土壌を管理することが最も重要である。

健康な土壌（healthy soil）を実現する上で、作土層の化学性や生物性だけでなく、耕盤層～下層土の物理性の重要性、特に根などの生物活動が作り出す孔隙（biopore）による土壌構造等の改善効果（Cresswell & Kirkegaard 1995）が、近年あらためて大きな注目を集めている。日本の農地土壌の物理性データを根の伸長（貫入抵抗、硬度）・呼吸（通気性）・吸水（有効保水量）の観点から総合的に解析したところ（江口 2021）、特に耕盤層～下層土における通気性（気相率）が低く、大きな根生育阻害要因となっており、直根性・深根性のマメ科緑肥作物等を利用して耕盤層～下層土を貫通する粗大間隙を作り出すことが、単収増加や病虫害予防等に有効と考えられた。単収増加は、日本の農地の窒素収支（OECD 農業環境指標の一つ）を改善する上で、大きな鍵の一つである（江口ら 2021a）。国際的にも、bio-subsoiler（Pulido-Moncada et al 2020; 2021）、bio-tillage（Zhang & Peng 2021）といった新語が生み出され、農業機械では成し得ない様々な緑肥作物等の導入効果を評価する研究が増えている。また、単収の高い有機栽培における土壌の化学性（中川ら 2019）、緑肥作物や有機栽培における土壌の生物性（唐澤 2020）の特徴等が明らかにされている。これら土壌の物理・化学・生物性に係る様々な情報・知見を最大限に駆使して、農業生態系（農地系外を含む）全体の物質循環と生態学的バランスを設計・制御できるような革新的な土壌・作物管理技術が必要である（江口ら 2021b）。

4. 持続可能かつ健康的な食生活と有機農業

日本や欧米諸国を含む多くの国々は、今の食生活ではとても持続可能とは言えず、食肉（畜産物）を大幅に削減し、植物性タンパク質を中心とした食事に移行すること、タンパク質の摂り過ぎや食品ロスを削減することが、窒素負荷や地球温暖化等の環境問題を緩和する上で、また、人間にとって健康的な食生活を実現する上で、大きな効果を有する（e.g., 江口・平野 2019; Willett et al 2019）。これは、程度の差はあれ今すぐ各個人が実施できるという点で、食料生産側の技術開発とは異なっており、また、食料生産側のどのような削減策よりも、削減効果が大きく（5~6 割以

上)、不確実性が小さい。仮に、慣行農業よりも単収が 2~3 割低い有機農業が主体のフードシステムに移行したとしても、全人類がこれを実施すれば、食料不足を補って余りある。但し、これを実施するかどうかは、消費者一人一人の判断に委ねられる。したがって、まずは食生活と環境負荷の関係や有機農産物の機能性成分（抗酸化物質等）（西尾 2019）など健康に関わる情報を知ってもらうことが、最も重要である。

有機農業は、環境保全だけでなく、動物福祉（animal welfare）を重視する。生産効率や消費者嗜好（市場ニーズ）を重視した食料生産システムは、生態学的農業（ecological agriculture）の反対側にある工業型農業（industrial agriculture）を生み出し、耕種農業でも畜産業でも、単一種をできるだけ高密度・大規模に栽培・飼養する単一栽培/飼養（monoculture）が主体となっている。Monoculture は、作物体/家畜体を一斉管理し易い反面、病害は感染拡大し易く、農薬/抗生物質への依存度が高まり易い。これは水産養殖業や昆虫飼養でも同じだろう。大きな国家予算・時間・労力を投入して新たな技術開発をするならば、もう高密度・大規模の monoculture を繰り返してはならない。

次世代型の有機農業では、混作・間作・輪作を基本とした複雑な農業生態系の中で、慣行農業に匹敵する高い生産性の実現が求められる。更に、それを放牧（飼料作物）と同じ圃場内で組合せるような耕畜連携システムも検討すべきだろう。短期的ではなく長期的な視点で、最も持続可能な食料生産システムとは何か、消費者を巻き込んで、構築していく必要がある。筆者を含む多くの消費者は、農作物の生産以上に、家畜生産の実態（畜舎内の飼養密度、運動環境、給餌状況、と殺年齢、と畜体の疾病状況・全廃棄率・部分廃棄率、等々）を殆ど知らない。土壌・作物管理も地球環境問題も、結局は、物質フローの最大の駆動力かつ受益者である消費者一人一人の決断が、全てを決定する。食料生産～消費過程の詳細についてまず知ること（情報共有すること）、その上で、より持続可能なフードシステム構築の将来設計に、出来るだけ多くの消費者が積極的に関わることが必要である。

5. 引用文献

- Clark M, Tilman D (2017) Comparative analysis of environmental impacts of agricultural production systems, agricultural input efficiency, and food choice. *Environmental Research Letters* 12: 064016
- Cresswell HP, Kirkegaard JA (1995) Subsoil amelioration by plant roots—the process and the evidence. *Australian Journal of Soil Research* 33: 221–239
- 江口定夫 (2021) 耕地における土壌の物理性評価のための貫入抵抗及び他の物理的性質の活用方法. *土壌の物理性* 148: 17–30
- 江口定夫, 浅井真康, 寶示戸雅之, 堤道生, 菅野勉, 赤松佑紀, 郷内武, 朝田景, 糟谷真宏, 森昭憲, 澤本卓治 (2021a) 日本の OECD 農地の窒素収支の改善方策と耕畜連携の推進方向. *日本土壌肥科学雑誌* 92(3): 280–288
- 江口定夫, 朝田景, 平野七恵, 箭田佐衣子, 森昭憲, 廣野祐平, 濱田耕佑, 安西俊彦, 松本成夫 (2021b) 窒素循環に関する課題と解決策—農業研究の立場から. 産総研シンポジウム「窒素循環における課題とその解決に向けて」<https://www.n-cycle.jp/wp-content/uploads/2021/11/6c38901ff9999218e1203f39842ccc7f.pdf>
- 江口定夫, 平野七恵 (2019) 日本の消費者の食生活改善による反応性窒素排出削減ポテンシャルと国連 SDGs シナリオに沿った将来予測. *日本土壌肥科学雑誌* 90(1): 32–46
- 江口定夫, 柴田英昭, 種田あずさ, 新藤純子, 松本成夫, 森昭憲, 中島泰弘, 朝田景, 志村もと子, 林健太郎, 中辻敏朗 (2018) 食料生産～消費過程における窒素利用効率と環境への窒素負荷—消費者影響の重要性と活用方向—. *日本土壌肥科学雑誌* 89(3): 249–259
- Fowler D, Coyle M, Skiba U, Sutton MA, Cape JN, Reis S, Sheppard LJ, Jenkins A, Grizzetti B, Galloway JN, Vitousek P, Leach A, Bouwman AF, Butterbach-Bahl K, Dentener F, Stevenson D, Amann M, Voss M (2013) The global nitrogen cycle in the twenty-first century. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 368 (1621): 20130164

- Galloway JN, Aber JD, Erisman JW, Seitzinger SP, Howarth RW, Cowling EB, Cosby BJ (2003) The nitrogen cascade. *BioScience* 53: 341–356
- 北海道農政生産振興局技術普及課 (2019) 北海道における施肥合理化の取組.
https://www.maff.go.jp/j/syouan/nouan/kome/k_hiryo/attach/pdf/shiryou2-6.pdf
- 唐澤敏彦 (2020) 緑肥の導入や有機栽培が土壌の有用微生物に与える影響とその利用の可能性. *土と微生物* 74(1): 8–12
- 中川祥治, 井川幸一, 阿部真久, 清水幸一 (2019) 北海道の有機栽培露地畑における収量水準と土壌化学性との関係: 土壌診断のための基準値の試案. *有機農業研究* 11(2): 20–28
- 西尾道徳 (2019) 検証有機農業: グローバル基準で読みとく理念と課題. p.1–388. 農山漁村文化協会 (農文協), 東京
- 農林水産省 (2008) 「土壌管理のあり方に関する意見交換会」報告書.
https://www.maff.go.jp/j/study/dozyo_kanri/attach/pdf/index-4.pdf
- 農林水産省生産局農業環境対策課 (2020) 有機農業をめぐる事情.
<https://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/youki/attach/pdf/meguji-full.pdf>
- Pulido-Moncada M, Katuwal S, Ren L, Cornelis W, Munkholm L (2020) Impact of potential bio-subsoilers on pore network of a severely compacted subsoil. *Geoderma* 363: 114154
- Pulido-Moncada M, Monnereau C, Munkholm LJ (2021) Root-dependent recovery of pore system functionality of compacted subsoil: A field case study with bio-subsoilers in Denmark. *Soil Science Society of America* 85: 1566–1577
- Rockström J, Steffen W, Noone K, Persson Å, Chapin FS III, Lambin E, Lenton TM, Scheffer M, Folke C, Schellnhuber HJ, Nykvist B, De Wit CA, Hughes T, Van der Leeuw S, Rodhe H, Sörlin S, Snyder PK, Costanza R, Svedin U, Falkenmark M, Karlberg L, Corell RW, Fabry VJ, Hansen J, Walker B, Liverman D, Richardson K, Crutzen P, Foley J (2009) Planetary Boundaries: Exploring the safe operating space for humanity. *Ecology and Society* 14: 32
- Willett W, Rockström J, Loken B, Springmann M, Lang T, Vermeulen S, Garnett T, Tilman D, DeClerck F, Wood A, Jonell M, Clark M, Gordon LJ, Fanzo J, Hawkes C, Zurayk R, Rivera JA, De Vries W, Sibanda LM, Afshin A, Chaudhary A, Herrero M, Agustina R, Branca F, Lartey A, Fan S, Crona B, Fox E, Bignet V, Troell M, Lindahl T, Singh S, Cornell SE, Reddy KS, Narain S, Nishtar S, Murray CJL (2019) Food in the Anthropocene: the EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. *Lancet* 393: 447–492. doi.org/10.1016/S0140-6736(18)31788-4
- Zhang Z, Peng X (2021) Bio-tillage: A new perspective for sustainable agriculture. *Soil and Tillage Research* 206: 104844