

# 報 告

「Soil Health（土壌の健康）：国民的理解と  
持続可能な管理のイノベーションの推進」



令和8年（2026年）6月29日

日本学術会議

農学委員会土壌科学分科会

農学委員会・食料科学委員会合同 IUSS 分科会

農学委員会植物保護科学分科会

この報告は、日本学術会議農学委員会土壌科学分科会 Soil Health 小委員会での審議結果を踏まえ、農学委員会土壌科学分科会、農学委員会・食料科学委員会合同 IUSS 分科会、農学委員会植物保護科学分科会においてとりまとめ公表するものである。

#### 農学委員会土壌科学分科会

委員長	波多野 隆介	(連携会員)	北海道大学名誉教授
副委員長	渡辺 京子	(第二部会員)	玉川大学農学部教授
幹事	川東 正幸	(連携会員)	東京都立大学大学院都市環境科学研究科地理環境学域教授
幹事	山口 紀子	(連携会員)	国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構農業環境研究部門化学物質リスク研究領域グループ長
	竹山 春子	(第二部会員)	早稲田大学理工学術院教授
	中嶋 康博	(第二部会員)	日本栄養大学栄養学部教授
	犬伏 和之	(連携会員)	千葉大学名誉教授
	木村 園子 ドロテア	(連携会員)	ライプニッツ農業景観研究センター土地利用およびガバナンス領域領域長／フンボルト大学ベルリン生命科学学部農学園芸科教授
	小崎 隆	(連携会員)	愛知大学国際問題研究所名誉教授
	信濃 卓郎	(連携会員)	北海道大学大学院農学研究院特任教授
	清水 真理子	(連携会員)	国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所寒地農業基盤研究グループ資源保全チーム主任研究員
	丹下 健	(連携会員)	東京大学名誉教授
	中西 友子	(連携会員)	福島国際研究教育機構 (F-REI) 監事／星薬科大学名誉教授／東京大学名誉教授・特任教授
	南條 正巳	(連携会員)	東北大学名誉教授
	藤井 一至	(連携会員)	福島国際研究教育機構土壌ホメオスタシス研究ユニットユニットリーダー
	藤原 徹	(連携会員)	東京大学大学院農学生命科学研究科教授
	矢内 純太	(連携会員 (特任))	京都府立大学大学院生命環境科学研究科教授

#### 農学委員会・食料科学委員会合同 IUSS 分科会

委員長	犬伏 和之	(連携会員)	千葉大学名誉教授
副委員長	信濃 卓郎	(連携会員)	北海道大学大学院農学研究院特任教授

幹事	藤井 一至	(連携会員)	福島国際研究教育機構土壌ホメオスタシス研究ユニットユニットリーダー
	中嶋 康博	(第二部会員)	日本栄養大学栄養学部教授
	渡辺 京子	(第二部会員)	玉川大学農学部教授
	川東 正幸	(連携会員)	東京都立大学大学院都市環境科学研究科地理環境学域教授
	木村 園子 ドロテア	(連携会員)	ライプニッツ農業景観研究センター土地利用およびガバナンス領域・領域長／フンボルト大学ベルリン生命科学学部農学園芸科教授
	小崎 隆	(連携会員)	愛知大学国際問題研究所名誉教授
	清水 真理子	(連携会員)	国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所寒地農業基盤研究グループ資源保全チーム主任研究員
	丹下 健	(連携会員)	東京大学名誉教授
	中西 友子	(連携会員)	福島国際研究教育機構 (F-REI) 監事／星薬科大学名誉教授／東京大学名誉教授・特任教授
	南條 正巳	(連携会員)	東北大学名誉教授
	波多野 隆介	(連携会員)	北海道大学名誉教授
	藤原 徹	(連携会員)	東京大学大学院農学生命科学研究科教授
	山口 紀子	(連携会員)	国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構農業環境研究部門化学物質リスク研究領域グループ長
	当真 要	(連携会員 (特任))	北海道大学大学院農学研究院教授
	前田 守弘	(連携会員 (特任))	岡山大学学術研究院環境生命自然科学学域教授

#### 農学委員会植物保護科学分科会

委員長	渡辺 京子	(第二部会員)	玉川大学農学部教授
副委員長	松本 宏	(連携会員)	筑波大学名誉教授
幹事	林 謙一郎	(連携会員)	岡山理科大学生命科学部生物科学科教授
幹事	松田 一彦	(連携会員)	近畿大学農学部応用生命化学科教授
	中嶋 康博	(第二部会員)	日本栄養大学栄養学部教授
	阿部 芳久	(連携会員)	九州大学大学院比較社会文化研究院教授
	大黒 俊哉	(連携会員)	東京大学大学院農学生命科学研究科教授
	小野 正人	(連携会員)	玉川大学名誉教授
	西田 智子	(連携会員)	国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構理事 (人事・人材育成担当)

藤井 一至	(連携会員)	福島国際研究教育機構土壌ホメオスタシス研究ユニットユニットリーダー
吉田 重信	(連携会員 (特任))	国立研究開発法人農研機構植物防疫研究部門病害虫防除研究領域長

#### 農学委員会土壌科学分科会 Soil Health 小委員会

委員長	矢内 純太	(連携会員 (特任))	京都府立大学大学院生命環境科学研究科教授
副委員長	金子 信博		島根大学生物資源科学部客員教授
幹事	当真 要		北海道大学大学院農学研究院教授
	川嶋 四郎	(第一部会員)	同志社大学法学部法律学科教授
	西岡 加名恵	(第一部会員)	京都大学大学院教育学研究科教授
	竹山 春子	(第二部会員)	早稲田大学理工学術院教授
	渡辺 京子	(第二部会員)	玉川大学農学部教授
	犬伏 和之	(連携会員)	千葉大学名誉教授
	川東 正幸	(連携会員)	東京都立大学大学院都市環境科学研究科地理環境学域教授
	小崎 隆	(連携会員)	愛知大学国際問題研究所名誉教授
	信濃 卓郎	(連携会員)	北海道大学大学院農学研究院特任教授
	波多野 隆介	(連携会員)	北海道大学名誉教授
	藤井 一至	(連携会員)	福島国際研究教育機構土壌ホメオスタシス研究ユニットユニットリーダー
	山口 紀子	(連携会員)	国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構農業環境研究部門化学物質リスク研究領域グループ長
	小松崎 将一		茨城大学農学部附属国際フィールド農学センター教授
	水田 勝利		ケンタッキー大学土壌植物学科助教授
	森 圭子		埼玉県立川の博物館学芸グループリーダー
	若林 正吉		国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構農業環境研究部門土壌環境管理研究領域主任研究員

本報告の作成に当たり、以下の方々に御協力いただいた。

三枝 信子	(第三部会員)	国立研究開発法人国立環境研究所理事
森口 祐一	(第三部会員)	東京大学名誉教授／国立環境研究所名誉研究員

高田 裕介

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究  
機構企画戦略本部セグメント IV 理事室上級研  
究員

本報告の作成に当たり、以下の職員が事務を担当した。

郷家 康德	参事官（審議第一担当）
加瀬 博一	参事官（審議第一担当）付参事官補佐
増田 能伸	参事官（審議第一担当）付審議専門職

# 要 旨

## 1 作成の背景

地球の陸域では約 23%の土地が劣化しているとされ、気候変動に伴う作物収量の低下が新たな農地開発を促し自然生態系の喪失を招く悪循環が進行している。土壌は食料生産のみならず大気ガス組成の維持、水質浄化、生物多様性保全といった多様な生態系サービスを提供し、これらは持続可能な開発目標 (SDGs) と直結するため、その健全性は国際的にも重要視される。国連食糧農業機関 (FAO) は土壌の健康を「陸上生態系の生産性、多様性、環境サービスを維持する土壌の能力」と定義している。しかし 2024 年時点でプラネタリーバウンダリーの 9 指標のうち 7 指標が閾値を超過したと報告され、土壌劣化は地球規模のリスクを高めている。本報告は日本における土壌の健康の現状と課題を整理し、保全と強化に向けた具体的方策を検討するものである。

## 2 土壌の健康の現状と課題

土壌健康評価は、化学性・物理性・生物性を統合する点が基本であり、特に土壌有機物や微生物バイオマスといった生物性指標が中核である。これに加え化学性の代表的項目としては酸性度 (pH)、可給態養分量 (窒素、リン、カリウム等)、陽イオン交換容量 (CEC) や塩基飽和度、電気伝導度 (EC) や残留農薬・重金属類濃度が挙げられる。物理性の代表項目としては粒径分布 (土性)、団粒構造の安定性、透水性 (浸透速度)、保水性 (水分保持曲線)、通気性、容積重、有効土層深、土壌硬度 (貫入抵抗) などが重要であり、これらは団粒形成や水分・養分動態、根の発育や浸透性と直結するため、生物性指標と併せて土壌機能の健全性を総合的に評価する必要がある。

土壌劣化の要因は大別して自然由来と人為由来で整理できる。自然由来は津波・噴火などの突発災害や、気候変動に伴う集中豪雨、洪水、干ばつ、熱波の激甚化による表土流出・侵食・水文変化で、表層有機物喪失や団粒崩壊を通じ肥沃度を急速に低下させる。人為由来は都市化に伴う被覆 (アスファルト・コンクリート) や歴史的汚染、過剰施肥による窒素・リン流出と一酸化二窒素 ( $N_2O$ ) 排出の増加、過剰耕うんや大型機械による踏圧 (コンパクション) と団粒破壊、作物残渣除去や堆肥不足など有機物管理の欠如、泥炭地の過剰排水による地盤沈下と二酸化炭素 ( $CO_2$ ) 及び  $N_2O$  排出増加、耕地拡大・森林伐採による生態系喪失、重金属類・放射性物質・マイクロプラスチック等の混入、さらに家畜飼料由来の抗菌剤に伴う薬剤耐性遺伝子の拡散等が含まれる。これらは浸透性低下、養分循環の破綻、温室効果ガス排出増加、生物多様性喪失といった複合的影響を引き起こすため、予防・診断・現地修復を組み合わせた対策が必要である。

## 3 土壌の健康の社会実装の現状と課題

土壌教育は、土壌の健康を維持・向上させる知識と技術を得るために不可欠である。日本の土壌学者は日本土壌肥料学会に「土壌教育委員会」を設置し教育コンテンツを検討し、国際土壌科学連合での「土壌教育の国際ガイドライン」を主導してきた。しかし、日本の

土壌教育の現状には改善すべき点が多い。土壌に関する情報を科学的知見に基づいて活用するために、高等教育では、専門分野ごとの教育研究を超えて土壌の健康を対象とした教育が必要である。初等・中等教育では、学習指導要領における土壌の扱いが減少しており、土壌の健康について考える土台を失っている。この改善のために教師と研究者をつなぐネットワークにより、土壌に関するより深い内容を各教科に位置付けることや、「総合的な学習（探究）の時間」などで土壌の探究機会を提供することなど、質の高い実践を草の根的に普及させることが大事である。

米国では、5～18歳を対象とした「4H (Head, Heart, Hands, Healthを育てる)」で土壌と生態系の関係性調査の教育が行われ、さらに大学では土壌の健康を維持・管理・活用する（保全）とかばい守る（保護）の実践的な方法を学ぶ。国際土壌科学連合(IUSS)によると、世界の多くの国々では「土壌の健康」を自然資本と位置付け、経済、政策その他の地域文化・社会的側面を包摂した「土壌の安全保障」に関する教育が行われている。

日本の農業環境政策は2021年策定の「みどりの食料システム戦略」により大きく転換した。2050年目標としてCO<sub>2</sub>ゼロエミッション化、化学肥料使用量の30%低減、化学農薬使用量（リスク換算）の50%低減、有機農業の取組面積25%（100万ha）に拡大を掲げている。2022年制定の「みどりの食料システム法」に基づき、環境負荷低減に取り組む農業者の「みどり認定」制度、オーガニックビレッジの指定、カーボン・クレジット制度推進などが進められている。

米国では、農務省(USDA)が1990年代以降「土壌の健康」の維持向上の推奨管理手法として(1)生きた根の存在の最大化、(2)攪乱の最小化、(3)植生による土壌被覆の最大化、(4)生物多様性の最大化を挙げ、「Healthy Soils Healthy Climate Act」が提案され、土壌の健康の改善と炭素固定モニタリングの支払制度の恒久化を目指している。

欧州連合(EU)では、土壌の60%以上が不健康な状態にあるとされ、越境大気汚染や汚染された地下水の越境流出などに関わる国境を越えた土壌劣化に対応するため、2025年10月に「EU土壌モニタリング法」が採択された。この法律は、土地劣化に関する理解を深め、土地管理者・所有者・社会が土壌の健康を向上させることを支援するためのデータを収集するモニタリングシステムの構築を定めている。

#### 4 土壌の健康の評価と改善

日本独自の地域レベルでの土壌の健康の理解促進を担う人材育成と指標開発を強化する必要がある。農薬使用量の削減の達成には圃場単位での病害予察と土壌管理の統合を視野に入れた研究が必要である。水田での生物多様性保全には有機栽培、冬期湛水が有効とされているが、メタン(CH<sub>4</sub>)排出の懸念がある。その抑制のためには稲わらをよく分解することや、中干しの延長などCH<sub>4</sub>排出抑制技術の導入も必要である。畑では、日本の湿潤温暖条件では土壌有機物の分解が速いため、有機物の分解抑制と有機物を補給する有機肥料の施与、カバー作物、不耕起・省耕起が効果的である。それらの複合的技術として開発された不耕起草生栽培は土壌侵食防止、雑草の発芽抑制、土壌生物の多様性増加に効果がある。

## 5 報告の内容

### (1) 地域レベルの土地利用の最適化

「測れないものは管理できない」の原則に基づき、土壌が提供する生態系サービスを定量的に把握し、土地利用の最適化を進める。地目連鎖系による環境負荷低減と生物多様性向上を評価する。国際的に土壌有機炭素が中核指標であるが、これは畑地を対象に策定されてきたことから、水田での基準の策定が必要である。

### (2) 土壌の健康をチェックする技術開発

土壌炭素貯留、環境負荷、土壌微生物の健全性の監視が重要である。土壌炭素貯留では、土壌分析とリモートセンシング、数値モデルを組み合わせ、広域の監視を可能にする。環境負荷の監視として水質、温室効果ガス、重金属類、放射性物質を測定する。土壌微生物の健全性は、微生物叢の網羅的解析と微生物活性とバイオマスを合わせた総合評価手法を開発する。

### (3) 環境再生型農業技術のイノベーション

農薬と化学肥料の最小限の使用を達成するための精密農業を実践する。炭素隔離と土壌肥沃度の向上を両立するバイオ炭施与、岩石風化促進の積極的な導入、さらに耕畜連携による地域レベルの有機物循環の構築を目指す。

### (4) 教育研究と社会システム

教育研究機関における発信力の向上を図る必要がある。初等・中等教育に「土壌の視点」を加え、「農業」、「生態系」、「栽培」の内容を扱う単元間の学習を深めること、高等教育では実習による土壌の健康を回復させる実践的カリキュラムを導入し、社会還元に挑む人材の育成が必要である。教材開発、国内外連携、社会への発信を担う拠点（土壌の健康教育・研究センター（仮称））の構築が望まれる。

### (5) リビングラボのネットワーク

土壌は多くの生態系サービスを提供するがゆえに土壌の健康に対するステークホルダー間の見解に相違を生じさせる。地域における持続可能な農業への転換を促進するには、研究者、農家、政策立案者が参加し課題解決の対話と実践を図るリビングラボの推進が効果的である。様々な状況でのリビングラボによる課題解決策を共有するネットワークにより、地域における土壌の健康の維持向上の取り組みを支援する。

### (6) 日本における土壌の健康基本法（仮称）の制定

EU の土壌モニタリング法等を参考に、日本独自の「土壌の健康基本法」（仮称）の制定を検討すべきである。その目的は、土壌の健康を確保するために基本理念を定め、国等における土壌の健康確保に関する施策の基本を定めることにより、その施策を総合的かつ計画的に推進することにある。これにより、定期的に「土壌の健康基本計画」（仮称）が策定され、それに基づき収量維持や気候変動対応等を実践し、国土の強靱化が図られることが望ましい。また、リビングラボにおいて土壌の健康の指標項目が測定され、ニーズに合わせた形で情報が提示できるようにすることが期待される。

## 目 次

1	はじめに	1
2	土壌の健康の現状と課題	3
(1)	自然資本としての土壌	3
①	土壌の質と機能	3
②	土壌肥沃度	3
(2)	土壌微生物の役割（生物多様性）	4
(3)	土壌を不健康にする要因とその影響	5
①	自然災害	5
ア	津波	5
イ	噴火	5
②	都市化	6
③	過剰施肥	6
④	不適切な耕うん	7
⑤	有機物管理の欠如	7
⑥	有機質土壌における過剰な排水	8
⑦	傾斜地の裸地化（不適切な森林管理）	9
⑧	ハザード物質の混入	9
ア	重金属類	9
イ	放射性物質	10
ウ	マイクロプラスチック	10
エ	動物用医薬品由来の薬剤耐性菌（遺伝子）	11
3	土壌の健康の社会実装の現状と課題	12
(1)	土壌教育	12
①	学界での取り組み	12
②	高等教育(大学)での取り組み	12
③	初等・中等教育での取り組み	13
④	米国での取り組み	15
⑤	各国の土壌教育	15
⑥	土壌教育のネットワーク	16
(2)	土壌の健康を増進させるインセンティブに関わる社会制度	16
①	日本の「みどりの食料システム戦略」	16
②	米国の「Healthy Soils Healthy Climate Act」と「土壌健康指標」	18
③	欧州連合の「New soil monitoring law」	19
4	土壌の健康の評価と改善	21
(1)	土壌診断	21
①	土壌の健康の指標	21
②	土壌資源管理	22
③	土壌病害管理	22

(2) 土壌の健康に配慮した農業技術 .....	23
① 水田 .....	23
② 畑 .....	24
③ 不耕起草生栽培 .....	25
④ アグロフォレストリー .....	25
5 日本における土壌の健康を回復させるために .....	27
(1) 地域レベルの土地利用の最適化 .....	27
(2) 土壌の健康をチェックする技術開発 .....	28
(3) 環境再生型農業技術のイノベーションの推進 .....	29
(4) 教育研究機関における発信力の向上 .....	31
(5) リビングラボのネットワークの構築 .....	32
(6) 日本における土壌の健康基本法（仮称）の制定 .....	33
<用語の説明> .....	36
<引用文献> .....	38
<参考資料1> 審議経過 .....	52
<参考資料2> 公開シンポジウム開催（1） .....	55
<参考資料3> 公開シンポジウム開催（2） .....	56

## 1 はじめに

世界の陸域約 150 億ヘクタールの 30%が農業に関わる土地利用であり、10%が耕作地として利用されてきた。しかし、国連環境計画（UNEP）の報告では不適切な土壌管理により土壌全体の 23%は劣化していると見積もられている[1]。国連は 2015 年を国際土壌年と定め、毎年 12 月 5 日を世界土壌デーとして、この問題に警鐘を鳴らし、土壌保全の機運を高めようとしてきた[2]。

土壌劣化の主要因は農業である。収穫により土壌表面から植物被覆が無くなると、雨滴や風の影響を直接受け、団粒構造が破壊され、土壌は著しく侵食（水食、風食）されやすくなる。不適切な灌漑や排水は塩類化、アルカリ化、酸性化といった化学的劣化を誘引する。化石エネルギー燃焼により排出された窒素酸化物（NO<sub>x</sub>）やイオウ酸化物（SO<sub>x</sub>）は酸性雨となり、また農地から揮散したアンモニアも地表に降下した後に硝化されて土壌を酸性化する。大型機械の走行は踏圧（コンパクション）や練り返しなどの物理的劣化を起こす。さらに、最近の気候変動の影響により、南米、アフリカ、アジアでは、干ばつによる作物収量低下により新たな農地開発が進み、自然生態系が失われ、土壌劣化を誘引していると指摘されている[3][4][5]。流域の農地率と河川への栄養塩流出には高い正の相関関係があり、また、窒素化学肥料の過剰な施肥は一酸化二窒素（N<sub>2</sub>O）排出を増加させる。特に泥炭農地における排水は二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）と N<sub>2</sub>O 排出を著しく増加させる。すなわち、農地の拡大は栄養塩の水圏への負荷や温室効果ガスの大気圏への排出を増加させる[6]。

土壌は陸域で生成する自然物である。土壌は、大気圏、岩石圏、水圏、生物圏の要の位置にあり、土壌は食料生産への貢献のみならず、大気ガス組成の維持、水質浄化、生物多様性の維持といった生態系サービスの提供に貢献している[7]。土壌が劣化し生態系サービスが失われると、農地では健全な作物が生産されなくなり、飢餓が生じる。自然生態系においても植物生育が悪化すると土壌は侵食されやすくなる。栄養塩の流出が増加し、地下水と河川水の汚染が進む。土壌の炭素供給が少なくなるため炭素隔離量が減少し、土壌有機物が減少し土壌肥沃度が低下し、更なる植物生育の悪化が起こる。食物連鎖が悪化し、生物多様性が低下する。すなわち、土壌は直接的に持続可能な開発目標（SDGs）の「飢餓をゼロに」SDG2；「すべての人に健康と福祉を」SDG3；「安全な水とトイレを世界中に」SDG6；「気候変動に具体的な対策を」SDG13；「陸の豊かさを守ろう」SDG15、に関わっている[8]。ゆえに、土壌が健康であるかどうかとは、土壌が置かれた環境下で劣化に対してレジリエンス（回復力）を発揮でき、生態系サービスの提供が持続可能であるかどうかであり、土壌の健康は「陸上生態系の生産性、多様性、環境サービスを維持する土壌の能力」と定義されている[9]。

SDGs が目指す「持続可能な社会」は、プラネタリーバウンダリーが示す「地球の限界」の中で達成されなければならない。しかし、直近の評価では、その 9 つの指標のうち 7 つ（気候変動（CO<sub>2</sub>排出）、生物圏の健全性の変化（生物多様性喪失）、淡水の変化（河川・土壌水分）、陸域システムの変化（森林被覆）、生物地球化学的フローの改変（窒素とリンの負荷）、新規化学物質汚染（マイクロプラスチックや放射性廃棄物などの人為的な汚染）、

海洋酸性化までが閾値を超過し、安全領域内に残っているのは大気汚染とオゾン層の破壊の2つだけであると報告されている[10]。

2015年に採択されたパリ協定に基づき、世界の平均気温上昇を1.5℃に抑えることが目標となっており、日本政府は2050年までの炭素中立を宣言し、2040年度の排出量73%削減を目指している。この目標達成のための土壌保全と食料生産における緩和策と適応策[11][12]、エネルギー需要に関わる技術革新[13]、その社会実装による炭素中立社会の構築[14]に関して重要な提案がなされてきている。しかしながら、2024年時点で平均気温は1.55℃の上昇を記録しており、対策が履行されるまでの間も温暖化は進行するため、現状の土壌管理を続けていけば、土壌は激甚的な劣化に見舞われると懸念される。気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の土地と気候変動のレポートでは、土壌劣化への対応は早ければ早いほど効果があると述べている[15]。

陸上のすべての生物が土壌に関わっている。植物生産を決める土壌肥沃度は農家や土地所有者の土壌の扱いに影響され、大気ガス組成、水質、生物多様性を決める土壌の質はその地域の住民の環境への意識に影響される[16]。すなわち、農家や住民の活動や意識の向上が土壌の健康への公衆の関心を高め、土壌の安全を保障すると考えられている。国民的理解こそが大切である。

以上の観点から、本報告は、日本において土壌の健康を強化するにはどのような取り組みが必要かを明らかにすることを目的に、土壌科学分科会、Soil Health小委員会、IUSS分科会、植物保護科学分科会において議論を重ねるとともに、環境学、教育学、法学の専門家、行政の関係者と意見交換をして作成した。

まず、土壌の健康の現状と課題について、自然資本としての土壌が果たす役割と、土壌の健康が損なわれる要因とその影響について述べる。そして日本の土壌の健康に対する社会実装について、教育と農業政策における土壌の取り扱いの実情を海外の事例も含めて紹介する。さらに、農業現場における土壌の健康の評価と維持及び改善技術の現状を紹介する。最後に土壌の健康の持続可能性を向上させるための今後の検討課題として、1) 地域レベルの土地利用の最適化、2) 土壌の健康をチェックする技術開発、3) 環境再生型農業技術のイノベーションの推進、4) 教育研究機関における発信力の向上、5) リビングラボネットワークの構築、6) 土壌の健康基本法（仮称）（土壌の健康モニタリング）について述べる。

## 2 土壌の健康の現状と課題

### (1) 自然資本としての土壌

#### ① 土壌の質と機能

土壌の質は、水質や大気の水質とともに私たちの生活環境と関わる重要な指標である。水質や大気の水質が主に汚染程度を指すのに対して、土壌の質は「環境の水質を維持し、人間を含む動植物の健康を促進する能力」として定義される[17]。狭義には、後述する土壌肥沃度と同様に収穫量、生産性の維持に関わる諸性質を指し、広義には地域・流域全体の環境負荷（土壌・地下水汚染、悪臭）低減や地球規模の生物多様性や気候の恒常性維持機能に関わる諸性質も加わる。これは、土が固体だけでなく気体、液体を含むことで大気や水と接続していること、土壌が多様な目的で使われ、多様な機能を期待され、多様な生態系サービスを提供していることと関わっている。

土壌の健康との違いは、土壌の質は測定項目と結び付いている点にある。土壌の質を物理性、化学性、生物性に分けて考えると、土壌物理性としては、三相分布（固相、液相、気相比率）、容積重（体積当たりの土壌重量）、粒径分布又は土性（砂・シルト・粘土の割合）、団粒構造（団粒タイプ）、根張りのしやすい土壌深（有効土層深）、透水性（浸透速度）、保水性（水分保持曲線）、通気性（ガス拡散係数）、土壌硬度（貫入抵抗）、受食性（侵食速度）などがある。化学性としては、酸性度（pH）、養分保持機能（陽イオン交換容量 CEC や陰イオン交換容量 AEC）、可給態養分量（窒素やリン濃度）、塩分濃度（電気伝導度や塩類飽和度）、粘土鉱物種、その他にも残留農薬、放射性物質、重金属類、マイクロプラスチック、有機フッ素化合物（PFAS、特に発がん性の指摘されるペルフルオロオクタンスルホン酸（PFOS）やペルフルオロオクタン酸（PFOA））などの濃度がある。生物性としては、土壌有機物とその組成（炭素・窒素含量、有機物の官能基）、土壌動物（多様性や個体数）、微生物（群集の組成、微生物バイオマス量）、酵素活性などが挙げられる。

定量可能な指標値（土壌の物理化学特性値など）の多くは、土壌の機能・生態系サービスと関わっている[18]。特に土壌有機物（あるいは土壌炭素）含量は炭素貯留機能を通して気候変動の緩和に貢献し、微生物定着・養分循環機能を通して物質（特に食料）生産に貢献し、保水機能を通して洪水抑制機能に貢献し、養分保持機能を通して水質形成に貢献し、土壌構造安定化を通して侵食抑制に貢献するため、重要な指標となる。土壌 pH もまた、作物根の生育を妨げる酸性害（アルミニウムイオンの毒性）、養分の溶解度、微生物の分解活性の指標として重要である。

#### ② 土壌肥沃度

土壌は、森林や草地などの自然生態系であれ水田や畑などの農業生態系であれ、植物に生育の場を提供している。そこでは、土壌は植物に対して、水分の保持と供給、養分の保持と供給、物理的基盤（根の生育環境）の提供、という3つの機能を有している[19]。ここで、「土壌肥沃度」は、植物の生育に必要な養分を過不足なく供給し、物理・化学・生物学的に良好な生育環境を提供することで、植物の生育を持続させる

土壌の能力と定義される[20]。土壌肥沃度は土壌生産力や地力とほぼ同義で使われることが多いが、気象条件（光や温度）や栽培法なども含めた土地生産力の一部をなすものである。

植物は、生育に不可欠な元素である必須元素を 17 種類持つが、窒素・リン・カリウムを含む 14 種類の必須元素を土壌から吸収するため、土壌肥沃度は植物の生育や農作物の収量を強く規定している。したがって、食料生産を高めるために土壌肥沃度に注目しそれを維持向上させることは、非常に合理的なことである。また、農業とは収穫物（可食部）を持ち出す活動なので、土壌から養分を持ち出すプロセスとも捉えることができ、農地では堆肥や化学肥料などを通じて減少した養分を補う必要がある[21][22]。そのため、土壌肥沃度の評価として、土壌中の植物に利用可能な（可給態の）窒素・リン・カリウムの濃度などを含む土壌診断が行われている[22]。

「土壌の健康」は、陸域生態系の生産性、多様性、環境サービスを維持する土壌の能力と定義されているので、「土壌の健康」のためにも、土壌肥沃度を適切に維持向上させることは非常に重要である。

## (2) 土壌微生物の役割（生物多様性）

土壌には 1 グラム当たり数億から数十億の多様な土壌微生物が住んでおり、食料生産や有機物分解など様々な生態系サービスを提供する上で重要な役割を果たしている[23]。マメ科植物などに共生している根粒菌は空気中の窒素ガスを固定化して、窒素肥料の代わりに植物へ窒素養分を供給している。またカビ（糸状菌）の一種である菌根菌も植物に共生して、土壌から難溶性のリン酸などを溶解・吸収して宿主植物に養分を供給している。化学肥料や有機質肥料の一部は微生物菌体（バイオマス）に取り込まれ、代謝回転しながら次第に植物養分として供給されていく。代謝には菌体内の酵素が作用するほか、微生物が菌体外に分泌する菌体外酵素も働き、植物組織など高分子有機物の分解には菌体外酵素が重要である[24]。

森林の落葉や堆肥は、土壌微生物によって分解され、CO<sub>2</sub>や無機物に分解される一方、その一部は腐植物質など難分解性の有機物に変換され、土壌炭素として貯留される。水田では稲わらなど有機物が酸素のない土壌環境でも生きられる嫌気性微生物によって分解され、メタン（CH<sub>4</sub>）が生成される。CO<sub>2</sub>やCH<sub>4</sub>は温室効果ガスであるが、窒素肥料の一部から土壌微生物の働きによってガス化され生ずる N<sub>2</sub>O も強力な温室効果ガスであり成層圏オゾン層の破壊や窒素肥料の損失にもなってしまう。その反面、森林土壌中には CH<sub>4</sub>を酸化するメタン酸化菌が大気中の CH<sub>4</sub>を吸収している。また N<sub>2</sub>O を無害な窒素ガス（N<sub>2</sub>）にまで代謝する微生物も生息しており[26]、それらを土壌に接種し N<sub>2</sub>O の削減機能を強化できると期待される[27]。

植物に病気を引き起こす病害虫の中には土壌伝染性の微生物も存在し、同一作物を作り続けると激化する連作障害は全国で問題となっている。その対策として作付け体系を変化させたり土壌を消毒したり、各種の資材や農薬などが施用・散布されている。農薬の中には残留性や有毒なものもあり注意が必要であるが、農薬分解能のある微生物も見

つかっている。植物根の周辺（根圏）や内部には植物の生育を促進し、あるいは病害抵抗性を誘導する微生物も見つかっている。

土壌の健康を理解する上で、土壌微生物の働き、例えば土壌呼吸や微生物バイオマスなどに注目した論文も多く見られる[25][29]。

### (3) 土壌を不健康にする要因とその影響

#### ① 自然災害

健康な土壌はその機能（2(1)①参照）を十分に果たせる状態にある。土壌が健康を損ない、その機能が低下する要因には下記（2(3)①～⑦）のように各種あり、自然災害はその要因の一つである。自然災害は大きく6種類（地震、火山、風水害、斜面災害、雪氷災害、その他の気象災害）に区分され[30]、それらは更に合計32項目に細分されている。これらの多くは直接的又は間接的に土壌の健康に関係しうると思われる。しかし今のところ、実測により自然災害を「土壌の健康」と部分的にでも関係付けられそうな事柄は土壌の物理性・化学性の変化による植物の生産性低下とその回復かと考える。ここでは「地震」災害の中の「津波」、「火山」災害の中の「噴火」に着目した。これらは過去にも各地で繰り返し発生し、土壌は大きな影響を受けてきた。そして、その発生は今後も続く。

#### ア 津波

津波は主として地震に伴う海底の上下運動が海水に伝わって引き起こされる。その海水の振動は海岸の浅海に達すると高い波となる。陸地に上がると、建物を押し流す等の大きな災害をもたらすとともに土壌にも大きな悪影響を与え、土壌の植物生産性を損なう。

仙台湾岸に上陸した東日本大震災時における事例[31]では、津波は主に砂質物を含みながら陸上を進み、津波が道路や水田の畦を超えて流れる時に土壌が侵食され、内陸側に流された。津波の流速が弱まるにつれて、あるいは、津波が引いた後に水田の区画内に残った海水から懸濁物が土壌の上に堆積（表層に泥質物、その下に砂質物）し、砂質物は海岸側に多く、泥質物はやや内陸側に分布した。

津波の土壌に対する化学的影響は塩類の集積と交換性ナトリウムの増加であった。その塩類の主なものは硫酸カルシウムと塩化ナトリウムであった。

農地復興の際には津波堆積物は除去され、灌漑水を使って除塩された。津波の影響を土壌から早く取り除くためには排水の強化が重要で、排水路と排水機場の整備などが望まれる。農地でも明渠及び必要に応じて暗渠などの排水設備が効果的と考えられる。

#### イ 噴火

国内には活火山が111あり、それらはおおむね過去1万年以内に噴火している[32]。噴火活動の様式や噴出物の性質は多様である。火山の噴出物は爆発的な噴火により空中から飛来するものや火口から流出した溶岩や火砕流が斜面を流下するもの、一旦火山の斜面に堆積した火山灰が雨水に懸濁して流下する火山泥流などが

ある。巨大噴火により噴出した火山灰は中緯度地帯では上空の偏西風に乗ると広範な地域に降下し、各種の社会設備、普段の生活や農作物、そして土壤に大きな影響を与える。噴出物が硫化物を多量に含む場合は酸化されて強酸性化する問題[33]、イオウが硫酸カルシウムとして含まれる場合は水田で硫化水素の害につながる可能性がある。

台地、丘陵地に堆積した火山灰は湿潤気候の排水良好な条件下で土壤化すると独特な性質を持つ黒ボク土となる[34]。この土壤は自然植生下では森林、草地などの植生を育み、生物生産機能も十分な土壤となるが、作物多収のためには作目に応じた改良が必要である。

## ② 都市化

1950年から現在まで、5倍以上に増加した世界の都市人口[35]に対して、対応する都市面積は110%に拡大した[36]。この人口集中による都市化は構造物による土地被覆面積を拡大させている。中でも都市間をつなぐ道路網の拡大は2050年までに60%増しになることが予測されており、増加分の90%は途上国に集中する[37]。構造物は強固な地盤を必要とすることから、都市化に供された土地の土壤は、転圧されて生物生産の要である保水性と通気性に貢献する土壤構造を失う。多くの場合、締め固められた土壤には碎石が敷かれ、さらにアスファルトやコンクリートが被覆する。このような都市土壤は土壤として生物を養う能力を失った状態と言えるかもしれない。

一方で、拡大する都市面積と相まって、都市緑地の面積も拡大傾向にある。しかし、植物生育に良好な土壤は表土のみであり、下層には道路と同様に土壤を圧密化して造成した堅硬な地盤が敷き均されている。植物生育による一次生産はあるものの、土壤の発達は表土でのみ認められる。このような緑地も含めて、現在、都市にある土壤の健康を取り戻す取り組みがなされており、被覆地面積の削減や有機物蓄積が目標に挙げられている[38]。欧米で進められている被覆を除去して土壤を再生する取り組みは始まったばかりであり、その土壤特性についてデータ集積が急がれている[39]。土壤の再生には植物の力が必須である。現在、被覆構造物を破碎・埋設した土壤への植栽が試みられている。

## ③ 過剰施肥

農地における過剰施肥は、余剰栄養分の土壤中への蓄積だけでなく、農地外への流出を生じ、作物生産性のみならず地球規模で環境に影響を及ぼす。特に肥料として重要な窒素の過剰施用は、作物が必要とする量以上の吸収による軟弱・徒長化や病害虫に対する抵抗力の低下等、生産性や品質に大きく影響する。加えて、土壤中で形態変化が著しく移動性の高い窒素は、土壤中で生成された硝酸性窒素の流出による飲用水の汚染や河川の富栄養化の原因となるだけでなく、同じく生成された $N_2O$ や一酸化窒素( $NO$ )の大気中への放出は、それぞれ地球温暖化や光化学スモッグの原因物質として広域的に影響を及ぼす[40]。さらに、硝酸が生成される際には土壤の酸性化が進行

する。このような酸の供給は土壌 pH の低下による作物生育への影響だけでなく、土壌に保持されている陽イオン類を追い出すとともに、変異荷電部位の正荷電の減少で陽イオン交換容量を低下させることで土壌の酸緩衝能の弱体化が生じ、総体的に土壌肥沃度の低下を招く。窒素以外にも、近年特に黒ボク土農地への蓄積が報告されているリン酸は[41]、土壌流亡に伴う環境への流出が河川の富栄養化の原因ともなり、カルシウム等の過剰な蓄積は塩基バランスが崩れ、特定元素との吸収の拮抗作用による欠乏症（例えばマグネシウム欠乏）を引き起こす[42]。土壌の健康を司る持続的な生産性と低環境負荷の維持には、適切な土壌診断に基づいた施肥管理が必要である。

#### ④ 不適切な耕うん

農地を耕すことは、人類が農業を始めた当初から行われてきた基本的な農作業である[43]。耕うんの目的は、土壌表面の残渣や雑草を取り除き、播種した種子がうまく発芽するように土壌表面を整えることである。また、肥料を土壌に混和したり畝を整地したりするためにも行われる[44]。

トラクタの開発によって耕うん作業は楽になったが、耕うんの強度や回数の増加は土壌劣化を引き起こす[45]。また、トラクタの大型化は時間当たりの整地面積の増加をもたらすが、同時に土壌の圧密の程度も増加し、世界の農地の 20%が機械の大型化による圧密により農業生産が低下している[46]。

耕うんによる土壌劣化は土壌団粒の物理的な破壊、土壌有機物の分解促進、土壌生物の減少をもたらす。これらは互いに関連しており、物理的攪乱により相対的に細菌のような単細胞で小型の生物よりも糸状菌やミミズなどの長い、あるいは大型の生物が負の影響を強く受け、それまで団粒で保護されていた易分解性の有機物が分解され、土壌有機物含有率の低下を招く。そのため団粒形成を行う生物活動が低下し、そのことが、土壌生物の生息場所の単純化を引き起こすという悪循環につながる。そこで、全面的に画一的に耕うんするのでなく、不耕起や省耕起、部分耕起や浅耕など栽培に合わせた耕うん方法が開発され、有機物による被覆やカバークロープによる土壌の保護と合わせ保全農業と呼ばれるようになった[47]。

#### ⑤ 有機物管理の欠如

土壌の健康の維持において、土壌有機物はその骨格を成す基本的要素である。土壌有機物の喪失は、農業史の初期から続く普遍的課題であり、土地劣化・生産性低下・気候変動を連鎖的に引き起こしてきた。一旦、土壌が開墾されると、土壌有機物の維持対策がとられないかぎり、耕起以前の土壌有機物含有率は減少し始める。そのため、人類は長い間、農耕地の肥沃度管理において、緑肥（カバークロープ）、作物残渣の供給、有機質肥料の供給、たい肥の施用など綿々としてきた。

しかしながら、現在の農業体系の中で、土壌は主に植物を栽培する培地であるかのように取り扱われ、生産性の追求の中で土壌有機物の管理は軽視されてきた。短期的な視点では、栄養塩などの外部投入を通じて土壌栄養は確保し高い収量を確保したも

の、長期的な視点では、土壌の健康を支える土壌有機物は減少し続けている。残念なことに、農業生産活動そのものが土壌劣化の原因となっている[48]。国連食糧農業機関（FAO）は世界の土地の25%が「著しく劣化」していて、「軽微に、あるいは中程度に劣化した」土地は44%、「改良途上にある」土地は10%に過ぎないことを報告している[49]。

土壌有機物を維持管理するには土壌への有機物の投入を増やすことに加えて、耕起の強度（頻度や耕うん深さなど）を下げることで農業生産を通じて土壌有機物の減少を緩和し、過去に土壌が確保していたであろう土壌有機物を復元することにつながる。しかし、一度低下した土壌有機炭素ストックを元のレベルまで回復させるには長い年月と継続的な対策が必要であることから、土壌有機物の維持・増加を長期的視野で捉え、継続的に農業者を支援する枠組みが重要となる。

## ⑥ 有機質土壌における過剰な排水

有機質土壌の母材は湿地植物の遺体から成る泥炭であり、枯死した植物体が分解されずに堆積したものである。泥炭土は主に北海道と東北地方に分布し、その面積は国土の約1%を占める[50]。泥炭土は容積重が小さく、孔隙量が多く、有機物含量と水分飽和度が高く、pHが低いことが特徴である。また、農作業に不可欠な地耐力も弱い。しかし、戦後の食料増産のため、泥炭地でも農地開発が進められてきた。

泥炭土の農地利用のためには、排水と鉱質土客土が必要不可欠である。しかし、泥炭土では排水に伴う泥炭の乾燥収縮、圧密、分解により地盤沈下が生じる。宮地らは、北海道美唄で、農地開発に伴い、約40年間で3m以上の地盤沈下が生じ、泥炭分解の寄与は約30%であると報告している[51]。さらに、水田としての利用が転換畑としての利用よりも地盤沈下と泥炭分解の抑制に効果的であるとしている。

泥炭土は、植物の光合成で固定された炭素を多く含み、その分解は温室効果ガスであるCO<sub>2</sub>やCH<sub>4</sub>の排出をもたらす。永田は、美唄湿原とその周辺農地において、本来の湿原植生においてもCH<sub>4</sub>の排出により地球温暖化を促進するが、小麦及び大豆圃場ではCO<sub>2</sub>とN<sub>2</sub>O排出の増大により湿原の3倍、水田ではCO<sub>2</sub>とCH<sub>4</sub>排出の増大により湿原の6倍も地球温暖化を促進するとしている[52]。

泥炭地の農業利用には、排水だけでなく、適切な地下水位管理を行う必要がある。CO<sub>2</sub>とN<sub>2</sub>O排出は地下水位を下げると増加し、CH<sub>4</sub>排出は地下水位を上げると増加する。メタ解析の結果、地下水位を-20 cm~-40 cmに保つとCO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O、CH<sub>4</sub>の合計排出量が最低となることが認められ、特にN<sub>2</sub>O排出の抑制には適正な窒素施肥と毛管上昇による土壌水分の維持が重要であることが示されている[53]。泥炭土の有機物は失われたら元には戻らない。持続的な泥炭農地の実現のためには、作物生産性だけでなく地球環境に配慮した管理が必要である。

## ⑦ 傾斜地の裸地化（不適切な森林管理）

日本の国土の67%を占める森林の多くは、傾斜地に分布している。森林土壌を不健康にする主な要因は、養分に富む表層土壌を失うことになる土壌侵食である。土壌侵食は、雨滴侵食による表層土壌の物理性劣化とそれに伴う表面流発生によって生じる。森林では、林床植生や落葉・落枝などのリターの被覆が失われて地表が露出すると土壌侵食が急激に進み[54]、傾斜が急なほど著しい。森林の約40%を占めるスギやヒノキ等の針葉樹人工林では、間伐遅れによって林内が暗くなると林床植生が乏しくなり、リターが主要な地表被覆となる。ヒノキの落葉は細かくなりやすく被覆効果が小さいため、間伐遅れに伴う土壌侵食が他の針葉樹人工林より生じやすい[55]。特に急傾斜地では、根系が露出するほどの土壌侵食が生じる場合がある。人工林では、皆伐とその後に植栽のために伐採残渣を除去する地ごしらえによって地表が露出するが、植栽木の成長や林床植生の繁茂によって徐々に覆われていき、土壌侵食も低減していく。しかし近年、植栽木への食害が人工林経営の問題となっているニホンジカの個体数増加は、雑草木による植生被覆の回復を遅らせ、土壌侵食が継続する要因となる。天然林においても同様に、林床植生へのニホンジカの食害が土壌侵食の原因となっており[56]、ニホンジカの個体数管理が、森林土壌の健康を保つ上で重要となっている。

## ⑧ ハザード物質の混入

### ア 重金属類

生物にとって有害な重金属類は、土壌の健康を脅かす一因となる。ほとんどの重金属類は土壌中に普遍的に存在しているが、生物に利用されにくい。土壌中の鉱物や有機物の持つ吸着能によって溶出が抑制され、生態系における物質循環から隔離されているためである。しかし、地質的に濃度が高い地域の土壌、大気降下物や灌漑水等を介して土壌に混入した重金属類の健康影響は無視できない[57][58]。工場跡地等では汚染した土壌からの溶出・流出を防ぐ処理を施して、地下水を含む周辺環境から重金属類を隔離することが義務付けられている。農地では、作物の根の生育範囲にある土壌の重金属類濃度が基準値を超過する場合は、非汚染土の客土等の対策が施されてきた。このように法整備や対策が進んだことにより、生態系や作物、ヒトに対して短期間で影響が現れるような深刻な土壌汚染は、国内では稀なケースとなっている。普遍的に存在する重金属類の混入をどこまで許容できるかは、土地利用により大きく異なる。農地土壌への混入は可能な限り回避すべきであり、汚泥肥料や堆肥等の重金属類濃度は継続的な監視が必要である。また、微量であっても慢性的な摂取が健康被害を引き起こすおそれがあるヒ素やカドミウムのような物質については、作物吸収を最小限に抑えなくてはならない。作物吸収量は、重金属類の土壌中濃度だけでは一概に決まらず、吸着能をはじめとする土壌特性や、栽培管理条件の影響が大きい[59]。

## イ 放射性物質

日本の国土において放射性物質による農地の汚染が広く問題視されたのは、1960年代の大気圏内核実験である。主に北半球を中心に各国の実験が行われた結果、全球的に人工放射性核種（放射性セシウム、放射性ストロンチウム）による汚染が広がった。日本においては国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構（農研機構）による全国の圃場を対象とした、土壌と収穫物の人工放射性核種のモニタリングが1960年頃から行われている[60]。放射性セシウムによる土壌の最大の汚染は1965年頃の平均約43Bq/kgであった。2011年の東京電力福島第一原発での事故は福島県の他、宮城県、栃木県、群馬県、千葉県、茨城県の周辺県の一部の地域にも影響が及んだ。降下した放射性物質は $^{131}\text{I}$ 、 $^{134}\text{Cs}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ が主体であったが、半減期が順に約8日、2年、30年であったことから、長期間にわたって問題となっているのは $^{137}\text{Cs}$ である。食品由来の内部被ばくを低減するために、土壌中放射性セシウムの作物への移行抑制には土壌中の交換性カリウムの濃度を一定以上に維持するためにカリウム肥料を施用する対策[61]が極めて効果的であった。また、セシウムには土壌中の粘土に強く固定され、表層に残留する特性があることから、汚染レベルの高いところでは表土除去が有効であった。約5cmの表土をはぎ取り、近隣の非汚染土壌（表土をはいだ山土）を加え、肥沃度向上のために肥料、堆肥等を添加して耕起することで汚染レベルを大幅に削減した。ただし、今後も除去した土壌の取り扱いの問題が残されている。いずれにしても、これらの対策の効果は大きく2012年以降の基準値超過事例は極めて少ない[62]。

## ウ マイクロプラスチック

石油などから作られるプラスチック（合成樹脂）は生活日用品から工業製品、医療器具まで現代人に不可欠であるが、石油資源を使わずサトウキビやトウモロコシ残渣などを原料としたバイオプラスチックも注目されている。一般に疎水性であるが、高吸水性のポリマーも開発されて紙おむつなどに利用され、砂漠の緑化への活用も試みられている。農業資材としてハウス温室やトンネル掛けに用いられる他、土壌表面を被覆し地温上昇や雑草防除用マルチフィルムも普及しており、省力化には使用後に土壌中で分解する生分解性プラスチック製マルチフィルムも期待されている。

プラスチックが物理的に破碎されたり、日光や微生物により分解された破片（マイクロプラスチック；MP）が海洋汚染につながるものが問題となっており、さらに陸域には海洋の約10倍量のMPが存在するとの推定もあるので、プラスチックの行方が注目されている。最終的には $\text{CO}_2$ と水にまで分解するとされる生分解性プラスチックも、分解に長時間を要するものや、分解中間産物が土壌有機物の分解を促進し、添加プラスチック中の炭素より多くの $\text{CO}_2$ を発生させるもの、 $\text{CO}_2$ 以外の $\text{N}_2\text{O}$ や $\text{CH}_4$ などの温室効果ガスを発生させるもの、さらには生態系や植物生育に悪影響を及ぼす可能性のあるものも指摘されている[63][64][65][66]。

MP がヒトの健康に影響を及ぼすとの報告もあり [67]、土壌の健康を維持する上でもプラスチック問題は避けられない課題である。

## エ 動物用医薬品由来の薬剤耐性菌（遺伝子）

動物用医薬品としての抗菌剤が効かない耐性菌の出現は世界的に大きな脅威であり、このまま何も対策を講じないと 2050 年には 1000 万人の死亡原因となると推定されている [68]。2015 年に世界保健機関が薬剤耐性に関するグローバルアクションプランを採択したことを受け、厚生労働省は 2016 年と 2023 年に薬剤耐性 (AMR) 対策アクションプランを決定した。また、農林水産省は 1999 年より動物由来薬剤耐性菌モニタリングを実施している。家畜にはヒトよりも多くの抗菌剤が利用されているが [69]、下水のような集中処理施設がないだけでなく、抗菌剤が飼料添加物としても使用されているため、広範な環境影響が懸念される。堆肥化によって抗菌剤や ARB (Antibiotic Resistant Bacteria) の減少は期待できるが、ARGs (Antibiotic Resistance Genes) は一定量残存し、別の微生物に水平伝播する可能性が指摘されている。

堆肥化を行っても一定量の ARB や ARGs は残存し、細胞外遺伝子であるプラスミドを通して別の微生物に ARGs が水平伝播する可能性が指摘されている [70]。一方、Katada らは家畜ふんの嫌気性消化処理において ARGs の分解が効率的に進むことを報告した [71]。また、有機物施用を伴う土壌還元消毒過程においては嫌気条件で好気性土壌病害菌が効率的に死滅した [72]。さらに、Chen らは、堆肥化過程においては温度よりも、pH、EC、窒素循環に関わる微生物が ARGs の増殖を抑制することを明らかにした [73]。これらのことは畜種や堆肥化方法が抗菌剤・ARB・ARGs の動態に大きく影響することを示唆している。

DNA の土壌中での移動性は一般に小さいといわれているが [74]、堆肥施用農地において ARGs の検出が報告されており [75]、堆肥施用に着目した研究の実施が求められる。Li らは ARGs 下方移動の可能性を示し、土壌 pH や有機物含量の関与を示唆したが、詳細なメカニズムは分かっていない [76]。ワンヘルスの観点からも、土壌中での抗菌剤・ARB・ARGs の動態を総合的に理解し、環境中での拡散リスク低減対策を早急に講じる必要がある。

### 3 土壌の健康の社会実装の現状と課題

#### (1) 土壌教育

##### ① 学界での取り組み

私たちの衣食住の供給をはじめとして地球上のすべての生命を支え育む土壌の健康を担保することの重要性を就学前児童から一般市民に至るすべての地球社会の構成員に周知すべく、国内にあっては日本土壌肥料学会や日本ペドロロジー学会他の関連学会がその活動をリードしてきた。とりわけ日本土壌肥料学会は 1982 年に土壌教育委員会を組織し、これまでに 1) 初等・中等教育現場での土壌教育の実態調査及びそれに基づく土壌関連教科(理科・社会科・技術家庭科・農業科・総合的な学習(探求))の教科書・教材記載内容の検討、2) 関連教科授業での使用効果が期待される教育手引書の作成、3) 自然科学系博物館等における土壌標本の展示促進、4) 学会の年次大会における高校生の研究発表実施、5) 一般市民を対象とした公開シンポジウムの開催、6) 文部科学省・教科書出版社などへの土壌教育教科内容の改訂と新規導入についての意見申入れなどを行ってきた。2017 年の学習指導要領小学校理科の単元に「土の粒」が取り上げられたことは上記活動の大きな成果の一つである[77]。また、近年、土壌が持続可能な開発目標(SDGs)達成の要であることが関連学会でも議論されるようになり、農学や生物・生態学のみならず工学さらには社会科学系諸学会との連携の下、日本学術会議環境学委員会環境科学分科会[78]及び同委員会環境思想・環境教育分科会[79]から土壌並びに土壌教育の役割と重要性を広く世に発信するに至っている。

国際的には世界 90 余か国の当該分野関連学会の連合体である国際土壌科学連合(IUSS)に、会長をはじめとして 8 名(2018-22 年、参加国最多)の役員を送り込むことにより土壌教育の啓発・普及手法の開発を主導し、「土壌教育の国際ガイドライン」を提示した[80]。今後は上記ガイドラインに沿って、「土壌の健康」教育の充実・整備並びに社会実装を推進していくことが日本並びに世界の持続的発展を具現化するために必要不可欠であると考えられる。

##### ② 高等教育(大学)での取り組み

高等教育機関における高度に専門化された先端的研究の成果により、土壌の生成から生命の起源、植物や動物の連鎖を通じたナノスケールからグローバルスケールでの相互関係を解明し、土壌—生態系—植物—動物—人間活動への連鎖と綿密なコミュニケーションについて科学的知見を有している。しかしこのような広範にわたる科学的知見とその農業生産現場での活用について、いまだ十分な技術展開がなされていない[81]。その結果、人類はかつてないほどの農産物を生産することに成功した一方で、地球上のあらゆるところで深刻な土壌劣化を引き起こしている。とりわけ気候変動に直面している人類にとって、農業のレジリエンス(被害を受けても速やかに回復し安定生産を続ける力)が注目されるが、ここでは、耐干ばつ性品種の導入ばかりでなく、作物多様化(輪作・混作)、有機物による土壌改良、灌漑や排水の強化など栽培と土壌

管理の両面からのアプローチが有効となる。これらの対策は、各地域で土壌の健康を高める方策と一致する。従来の大学などの高等教育の場面では個々の専門分野における個別の現象について、原理・原則を明らかとする教育研究を実施してきた。しかし、人類の持続的な生存を支える基盤として、土壌の健康の維持を改めて対象としたときに、今までの土壌に関する知識の深化を図る必要がある。同時に、どのような土壌管理が持続的な社会で求められるのかを、地域特性や農業特性、コミュニティの意思を踏まえ、科学的データを用いた定量的かつ包括的な検証に基づいて意思決定することが不可欠であり、それを担う人材と実施機関の育成・整備が求められる。こうした人材を育成するためには、高等教育における土壌教育において、講義・実験による土壌に関する知識修得に加え、野外フィールド実習を中核に据え、土壌断面観察、土壌サンプリング、土地利用・作物生育・農作業管理と土壌の関係の把握を通じて、土壌の物理性・化学性・生物性を総合的に理解させることが重要である。特に大学附属農場、演習林、野外実験施設を活用し、地域の自然や農業現場と実験室を往還しながら学ぶ実践的教育は、土壌の健康の維持・改善に関する科学的知見を社会実装へつなぐ人材育成の基盤となる。

### ③ 初等・中等教育での取り組み

文部科学省は、全国どこの学校でも一定の水準が保てるよう、教育課程の基準として学習指導要領を定めている。1947年に試案が作成され、1958年に学習指導要領が改訂されて以来、約10年に一度の頻度で改訂されている。児童が使う教科書は、学習指導要領に基づいて作成される。

土に関わる直接的な記述を見ると、1958年の改訂版には、土や砂への水のしみ込み方、土は岩石から変わったものであることを知る、という土壌の無機的な性質、また植物の成長には養分・温度が関係すること、イネの栽培において、除草・施肥などが生育に関係すること、という有機的な内容が含まれていた。しかし平井氏らが指摘するように、学習指導要領における土の有機的・無機的な取り扱いは1968年から2008年の中で減少してきた[82]。全体を通して土は岩石などが風化した無機物と生き物に由来する有機物から成る、という土の本質が示されたことはなく、土について直接的に学ぶ記述は減少傾向にあり、土壌の健康について考える土台がないのが現状である。

現行の学習指導要領[83][84]における土に関連する学習内容とその課題（問題点）を挙げる。小学校1・2年生の生活科と、3年生から始まる理科の生命・地球と物質・エネルギーの4つの領域から、生命・地球分野（中学校では第2分野という）で土に関連する部分について記す。

1・2年では身近な自然を観察する内容が含まれ、具体的な活動や体験が重視されている。理科の生命分野において、3年の「身の回りの生物」では観察の目標の一つが“生物は、色、形、大きさなど、姿に違いがあること。また周辺の環境と関わって生きていること”である。様々な種類の動植物を観察すること、生息している多様な環境に着目することが求められている。

5年生の「植物の発芽、成長、結実」の単元では、“植物は、種子の中の養分を基にして発芽すること”、“発芽には、水、空気及び温度が関係していること”、加えて“成長には、日光や肥料などが関係していること”を学ぶ。しかし、肥料が土壌中で無機養分として存在し根から吸収されることについては触れられていない。教科書ではバーミキュライト等を用いて肥料の有無で栽培する実験が紹介されており、植物の成長には肥料が必要であると理解させる内容になっている。

6年生の「植物の養分と水の通り道」（この養分はでんぷんを指す）の単元では植物の根から水が吸い上げられることを学ぶが、(無機)養分の吸収については記述がない。また「生物と環境」の単元において、“生物は、水及び空気を通して周囲の環境と関わって生きていること”の学習では、地球上の水の循環（川・海→水蒸気や雲→雨）に触れることになっている。しかし通り道である土には言及がない。また“生物の間には、食う食われるという関係があること”の学習では、食べ物に着目して生物同士の関わりについて学ぶとされるが、落ち葉や死骸を食べる生き物には言及がない。

中学校では、2年生の「植物の体のつくりと働き」を学ぶところで、植物が根から水とともに溶けた養分を吸収することが説明されているが、それらが土壌から供給されることには触れられていない。3年生で学習する「自然と人間の中の生物と環境」において自然界の釣り合いや、自然環境の調査と環境保全について学習する。自然界の釣り合いでは、“分解者の働きについても扱うこと。その際、土壌動物にも触れること”と記載されている。

地球分野において、小学校4年生では、「雨水の行方と地面の様子」の単元で“水のみみ込み方は、土の粒の大きさによって違いがあること”を学習する。“土の粒”という土が直接言及される記述があるものの、扱う土については、校庭や教材園、砂場などから土を採取することが例示され、教科書で取り上げられる材料としては、砂利・砂・校庭の土が多く、教材として販売されている粒径の異なる人工物が紹介されるなど、自然の土を扱う例は少ない。

5年生では、流れる水の働きと土地の変化の学習で、“流れる水には、土地を侵食したり、石や土などを運搬したり堆積させたりする働きがある”ことを学ぶ。

6年生では土地のつくりと変化の学習として、“土地は、礫、砂、泥、火山灰などからできており、層をつくって広がっているものがあること。また、層には化石が含まれているものがある”を学ぶ。5年生では現在も生じる事象として石と土が運搬され堆積することを学ぶが、6年生では土という記述はなく、学習の内容は地学・地質学的である。これは中学1年生の地層に関する単元でも同様である。

このように、土に関連する学習項目があるものの、土の本質に直接的に言及する記述は少ない。しかし、土の観点を取り入れて学ぶことで単元間のつながりが強化されると考えられ、これは、「主体的・対話的で深い学び」の実現を掲げる現在の学習指導要領の理念に合致するものである。そのためには教師が土壌について学ぶ機会と利用可能な資料を提供することが必要であろう（5(4)参照）。

#### ④ 米国での取り組み

米国では、5～18歳を対象とした「4H (Head, Heart, Hands, Healthを育てる)」教育プログラムがあり、農業、STEM(Science, Technology, Engineering, Mathematics)、芸術といった文系及び理系の分野に関する課外活動が、大学などを通じて実施されている。これは1900年代初期から続く伝統であり、ハイキングやキャンプを通じて土壌と生態系の関係性を調査したり、土壌の健康に関する活動が各州で行われたりしている。中でも「Land Judging Contest」は、全米未来農業者協会(FFA)が4Hプログラムとともに主催する全国規模の大会であり、中学生や高校生が土壌を観察・分析し、その土地に適した土地利用を判断する競技というのものもある。大学に進学すると、「Soil Judging Contest」として、さらに高度な内容となり、土壌の健康や状態を時間制限内に調査・評価する大会が全国規模で行われている。大学の授業では、各州が協力してカバークロップを実際に植えて育て、その生育量を競うことで、その土地に適した土壌の健康を維持・管理・活用する(保全)とかばい守る(保護)の実践的な方法を学ぶ取り組みもある[85]。また、米国土壌学会は4Hで使用される教材の作成に貢献しており、農務省(USDA)やFFA(Future Farmers of America)は学生に向けて金銭的な支援を提供している。

#### ⑤ 各国の土壌教育

国際土壌科学連合(IUSS)による取りまとめ[80]に基づくと、世界の多くの国々では「土壌の健康(Soil Health)」を自然資本として捉え、さらに経済、政策、その他の地域文化・社会的側面をも包摂した「土壌の安全保障(Soil Security)」[86]の概念に基づいた土壌教育を、SDGsの実現を目標にして、取り組んでいる。具体的な教育手法やテーマについては、当該国・地域により多様であることを認めつつも、基本となる教育プロセスとして、学習者の1) 感知・感作、2) 知識の習得・展開、3) 問題解決、を段階的に実施することが必要であると考えられている。これら一連の教育プロセスは(前) 初等→中等→高等・市民教育の場で、ある程度の重複を許容しつつ展開することが一般的であり、中でも全プロセスの基礎となる1) 及び2) の教育プログラムは地域を問わず実施されており、特に中南米の小学校では活発である。3) については高等(大学・大学院)教育の歴史の長い欧州、北米、オセアニア地域での高度かつ多様なプログラムが整備・実施されているが、アフリカ地域でも成人(特に農業従事者)向けの実践的技術研修が国際協力の一環として活発に実施されている例をみることができる。比較して我が国を顧みるに、特に都市化の著しい地域では上記の教育プロセスの基礎である1) を経験する機会が乏しく、また、2) についても習得すべき内容が複数の教科に断片化されていることから、それらを「土壌の知識」として展開・利用、さらにはSDGsなどの問題解決のための行動へとつなげる能力開発に大きな障害となっている。

## ⑥ 土壌教育のネットワーク

土壌の重要性をかんがみると、学校のカリキュラムに土壌教育を位置付ける可能性を追求することが求められる。しかしながら、現在はカリキュラム・オーバーロードが問題になっており、また実践事例も限られていることから、即座に学習指導要領に組み込むことは困難であろう。将来的に学校のカリキュラムに位置付けるためには、まず質の高い土壌教育の実践を生み出し、草の根的に実践を普及していくことが重要だと考えられる。

具体的には、次のような実践づくりが考えられる。第1に、各教科において土壌に関連する内容を扱う単元に注目し、そこに土壌に関する理解を位置付けるものである。例えば、「農業」（社会科）、「生態系」（理科）、「栽培」（技術・家庭科）といった内容を扱う単元において、土壌に関するより深い内容を位置付ける可能性を追求することが考えられる[86]。

第2に、「総合的な学習（探究）の時間」などで、土壌について児童・生徒が探究する機会を提供することが考えられる。児童・生徒の発達段階に応じて、どのような探究を進めることができるのかについて検討することが重要である[88]。

今後は、各学校で既に生み出されている実践事例を収集するとともに、新たな実践を生み出したい学校の教師と研究者をつなぎ、質の高い実践事例を生み出すようなネットワークを構築していくことが重要であろう。

## (2) 土壌の健康を増進させるインセンティブに関わる社会制度

### ① 日本の「みどりの食料システム戦略」

日本の農業環境政策は2021年5月に策定された「みどりの食料システム戦略」（以下、「戦略」）によって再定義されることとなった。「戦略」は2050年までに、農林水産業のCO<sub>2</sub>ゼロエミッション化の実現、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、化学農薬使用量（リスク換算）の50%低減、有機農業の取組面積の割合を25%（100万ha）に拡大などの目標を掲げている。2022年に制定された「みどりの食料システム法」に基づいて、環境負荷低減に取り組む農林漁業者の計画認定（みどり認定）、地域ぐるみで取り組む特定区域の設定・特定計画の認定、有機農業の拡大を実践するオーガニックビレッジの指定、農林水産分野におけるカーボン・クレジット制度の推進、環境負荷低減の取り組みの見える化が進められている。また「戦略」の目標を達成する生産性向上と持続性を両立させるための現在利用可能な技術や近い将来利用可能な技術等を示した「みどりの食料システム戦略技術カタログ(Ver. 5.0)」が公表されている[89]。

日本の環境保全型農業に関する政策は、1992年に策定された「新たな食料・農業・農村政策の方向」で初めて示された。その後、1999年に「食料・農業・農村基本法」（以下、「基本法」）が制定されたことにあわせて、環境三法と呼ばれる、「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）」、「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）」、「肥料取締法の一部を改正する

法律」が制定された。この持続農業法において、土づくり、化学肥料の使用低減、化学合成農薬の使用低減の3つの技術に取り組む計画を作成した農業者を都道府県知事によってエコファーマーに認定する制度が発足した（現在はみどり認定へ継承）。2003年には「農林水産環境政策の基本方針—環境保全を重視する農林水産業への移行」が公表されて、環境負荷の低減を図るために、農業環境規範とクロスコンプライアンス制度が導入された。2006年には、「有機農業の推進に関する法律（有機農業法）」が制定された。2007年から農地・水・環境保全向上対策が開始され、そのうちの農業環境支払メニュー部分は、2011年に環境保全型農業直接支援対策へと分離され、2014年には環境保全型農業直接支払交付金となった。

また国としての地球温暖化対策計画、気候変動適応計画、生物多様性国家戦略に基づき、農林水産分野では、農林水産省地球温暖化対策計画（2017年制定、2021/25年改定）、農林水産省気候変動適応計画（2015年制定、2017/18/21/23年改定）、農林水産省生物多様性戦略（2007年制定、2012/23年改定）が策定された。

これらの政策導入を背景として、「地力増進法」に基づく「地力増進基本指針」では、環境保全型農業の推進に関する環境負荷の軽減事項として「土壌診断に基づく土づくりや適正施肥」の次に、「農地土壌への炭素貯留」「水田からのCH<sub>4</sub>排出削減」「温室効果ガス排出状況・削減効果の評価手法の高度化」が取り上げられている。

改正前「基本法」の旧第32条では、「国は、農業の自然循環機能の維持増進を図るため、農薬及び肥料の適正な使用の確保、家畜排せつ物等の有効利用による地力の増進その他必要な施策を講ずるものとする。」と定めていた（自然循環機能とは、旧第5条で「農業生産活動が自然界における生物を介在する物質の循環に依存し、かつ、これを促進する機能」と定義している）。「基本法」に基づいて策定される「食料・農業・農村基本計画」（以下、「基本計画」）では、「基本計画、2005年閣議決定」において地球温暖化対策への言及はありつつも、主に省エネルギー化・新エネルギー利用及び自然循環機能の維持増進を図る観点からの環境保全に係る施策を講じていたが、「基本計画、2010年」では「地球環境問題への貢献」として農地土壌の炭素貯留も含めた地球温暖化対策や生物多様性保全策の導入も明記され、その後の「基本計画、2015年」及び「基本計画、2020年」においても「気候変動への対応等環境政策の推進」でそれらに言及していた。

みどりの食料システム戦略を推進していることを踏まえて、2024年に改正された「基本法」では、新たな基本理念として新第3条「環境と調和のとれた食料システムの確立」が定められた。また新第32条で「国は、農業生産活動における環境への負荷の低減を図るため、農業の自然循環機能の維持増進に配慮しつつ、農薬及び肥料の適正な使用の確保、家畜排せつ物等の有効利用による地力の増進、環境への負荷の低減に資する技術を活用した生産方式の導入の促進その他必要な施策を講ずるものとする。」とした。そして「基本計画、2025年」では、「農業生産活動における環境負荷の低減」において、農地土壌への炭素貯留や生物多様性にも配慮した水稻栽培における

中干し期間の延長などを含めた、様々な気候変動緩和策、生物多様性保全策が明記された[90]。

## ② 米国の「Healthy Soils Healthy Climate Act」と「土壌健康指標」

米国における土壌保全・保護の歴史は、1930年代のダストボウルを契機に始まり、土壌侵食や劣化が国家的課題として認識されるようになった[91]。以降、政策と科学技術の両面で土壌管理の進展が図られ、今日に至るまで複数の概念が提案・定義されてきた。例えば、農業収量の向上を目的とした「Soil Fertility」、土壌を有限な資源と捉える「Soil Sustainability」、気候変動などの人為的影響に対する回復力を示す「Soil Resilience」、Water QualityやAir Qualityから派生した「Soil Quality」などがある。1990年代以降、土壌生物の機能や生態系サービスに焦点を当てる「Soil Health (SH)」という概念が注目されるようになった[91]。SHの定義や評価指標は多様化・精緻化が進んでおり、USDAはSHを「食料生産、水質・大気質の調整、生物多様性の維持などの生態系サービスを支える土壌の能力」と定義している[92]。一方で、評価の標準化や簡略化に対しては批判的な意見もあり、測定の妥当性・再現性・実装可能性をめぐる議論が続いている。こうした背景のもと、産官学民金の五者連携による体制整備が志向され、科学的根拠に基づく土壌管理を支援する制度・政策・市場の構築が進められている。

主要なアクターには、米国農務省自然資源保全局 (USDA NRCS) などの政府機関、Soil Health Institute (SHI) などの非営利団体、Cornell Soil Health Labなどの大学・研究機関、そしてSH診断サービスや被覆作物の種子を販売する民間企業やスタートアップが含まれる。USDAは、再生型農業の実践やAI・データ駆動型の土壌管理の普及を積極的に支援しており、Conservation Innovation Grants (CIG) などの助成制度を通じてSH関連研究への安定的な予算確保が図られている。米国農務省国立食品農業研究所 (USDA NIFA) の主要公募でもSHは常設領域として扱われており、Environmental Quality Incentives Program (EQIP:最大75%の実装費用補助)、Conservation Stewardship Program (CSP:5年間の保全活動への支払い)、Conservation Reserve Program (CRP:農地・湿地・森林の保全支援)などのプログラムを組み合わせたボトムアップ型の実証・展開が各地で定着している。2025年時点で、米国農地の約27%が国の支援を受けてSHに取り組んでおり、補助なしで自主的に実践する農家も存在する[93]。インセンティブ設計は、収益性・リスク低減・環境便益を統合する成果指標に基づいて行われている。2021年度第118議会では、Healthy Soils Healthy Climate Act (上院法案S.2588/下院法案H.R.5043)が提案された。この法案は、EQIP内でのSH及び炭素固定モニタリングの支払制度を恒久化し、年次予算編成に依存せずにSHの改善と炭素固定、作物の回復力向上、大気中の炭素削減を目指すものである。大学や研究機関への支援も検討されているが、現時点では法案は未だ可決されていない。

SH の評価方法については、アクター間で標準化や最小データセット (MDS) の議論が進められている。USDA は化学・物理・生物の三側面から 32 項目の指標を提案しており [94] [95]、SHI は SOC (土壌有機炭素)、団粒安定性、炭素無機化ポテンシャルを中核指標としている。指標の構成や「Indicator」と「Index」の違いについては、5 (1) で詳述する。SH はカーボン・クレジット市場とも連動しているため、評価方法の透明性が強く求められている。

USDA は SH 実装において、以下の 4 つの管理手法を推奨している：(1) 生きた根の存在を最大化する、(2) 攪乱を最小化する、(3) 土壌被覆を最大化する、そして (4) 生物多様性を最大化することを必須な管理手法であると提言している。現場では、被覆作物、不耕起・減耕起、輪作、踏圧管理、有機資材投入、アグロフォレストリーなどが導入され、土壌攪乱の低減、被覆確保、多様性付与、生物活性促進の実現を目指している [93]。以上を踏まえて、今後日本独自の SH における定義とガバナンスを形成し、産官学民金の協働で社会実装することが急務である。

### ③ 欧州連合の「New soil monitoring law」

欧州連合 (EU) 土壌劣化ダッシュボードに示された指標では、欧州の土壌の 60% 以上が不健康な状態にあるとされる [96]。土壌劣化が広範かつ国境を越えて進行していること、また環境・経済・社会に重大なリスクをもたらすことから、土壌モニタリング法により、その推移を観測し、対策を取ることが求められている。EU において共通する土壌モニタリングシステムの確立は、土地所有者、農家、土壌管理者、政策決定者への情報提供と支援において極めて重要である。実際、健全な土壌を促進するための適切かつ効果的な措置の実施には、特に土壌タイプ、気候条件、土地利用の著しい多様性に対応するため、データ、情報、知識が必要不可欠である。現場での持続可能な土壌管理実践から得られる知見は、モニタリングとガバナンスメカニズムの精緻化に情報を提供し支援する [97]。

土壌モニタリング法は 2025 年 10 月に採択された [98]。この法律は、土地劣化に関する理解を深め、土地管理者・所有者・社会が土壌の健康を向上させることを支援するため、データを収集する調和された EU 土壌モニタリングシステムを構築することを定めている。データ収集は各国で行われているモニタリングに合わせ、それぞれの責任と負担によって行われる。その目標は、EU のゼロ汚染構想に沿って、2050 年までに全ての土壌を健全な状態にすることである。EU 土壌モニタリング法は、農家が作物の選択、施肥、灌漑、水管理に関するより良い意思決定を行う上で大きな利益となる。定期的なモニタリングは、栄養素欠乏の特定にも役立てることができる [99]。

EU における法律は、各国の法律において更に具体的に地理環境・社会状況に合わせて運用される。モニタリングそのものは各国で行われる。指標、またその測定方法は統一され、結果は簡素化された形でダッシュボードに提示される。指標はまだ発展段階であり、物理性、化学性及び生物性の指標についてテーマごとにまとめられている：

土壌水収支、土壌熱収支、土壌物質収支、土壌構造、土壌種の多様性、土地利用[100]。  
特に生物的な指標についてはまだ合意形成が途上で、今後増えると予想される。

## 4 土壌の健康の評価と改善

### (1) 土壌診断

#### ① 土壌の健康の指標

土壌の持続可能性を確保するためには土壌の健康の評価が不可欠である。EU 及び米国では深刻な土壌劣化を受け、科学的指標に基づく土壌の健康の指標化が始まっている。土壌の健康は生きた生態系としての機能を維持・向上し、人・作物・動物・環境を支える能力を指す概念であり、これまで複数の土壌の健康指標が提案されている。

土壌の健康の指標化には、土壌の持つ化学性 (pH、栄養塩、塩基飽和度など)、生物性 (土壌微生物バイオマス、多様性、酵素活性など)、物理性 (土壌構造、水分保持力、通気性など) の観点から個々に評価し、これらのデータを総合的に評価する取り組みが進んでいる。

従来の土壌診断は主に化学分析に偏りがちであり、土壌に不足する栄養塩の供給が主目的として行われてきた。しかし、土壌の健康の視点からは、生物的・物理的指標を統合的に評価するアプローチが重視されている。例えば米国農務省農業研究局 (USDA-ARS) の Haney 土壌健全性テストは、従来の無機養分中心の分析に代わり、土壌呼吸量 (CO<sub>2</sub>発生による微生物活性指標) や水抽出及び有機酸抽出による植物利用可能態養分の測定を組み合わせる土壌の総合的な健康度を評価する手法である。一方、コーネル大学の包括的な土壌健康評価 (CASH: Comprehensive Assessment of Soil Health) は、農家や研究者向けに 2006 年から提供されている総合診断サービスで、土壌養分分析に加えて土壌の生物的・物理的制約要因に関する標準化指標を報告する土壌の健康検査とされている。CASH では土壌有機物含有率、Active Carbon (過マンガン酸カリウムによる酸化可能炭素)、微生物由来の土壌窒素、窒素無機化量 (潜在的無機化窒素; PMN: Potentially Mineralized Nitrogen)、土壌呼吸量、団粒安定性、浸透速度、土壌硬度 (貫入抵抗) など、多面的な指標を測定し、0~100 のスコアで土壌の健康度を評価する。このような統合的評価は、どの土壌機能が不十分かを特定し、適切な土壌管理改善策につなげることを目標としている。

しかし、既往研究では、特定の土壌環境を対象とするものがほとんどであり、日本に広く分布する黒ボク土を対象とした研究は少ない。CASH に準じる手法を日本の黒ボク土に当てはめてみた結果、一部の黒ボク土では農業管理の手法 (耕うんやカバークロップ利用) は土壌の化学性への差異は少ないが、土壌の物理性や生物性に関する影響が大きい傾向が見られたが [101]、その他の地域での詳細な追試が必要である。

そのため、日本の土壌特性と農地利用を踏まえた日本型の土壌健康指標を開発することは、土壌の本質的な機能を広く理解し、土壌管理における意思決定を支援するために重要である。ここでいう日本型とは、黒ボク土などの土壌の違いだけでなく、畑地と水田の違いを含む農地条件を考慮した評価体系を意味する。また、こうした指標の整備は、次世代に健康な土壌を継承するために現世代が担うべき課題である。さらに、その指標は現場で実際に土壌管理を行う農家にとって理解しやすく、活用しやす

いものでなければならない。単なる土壤分析データを羅列するのではなく、農家が自ら測定・理解・行動できる指標が求められる。

## ② 土壤資源管理

食料安全保障及び環境保全の両立のため、農耕地土壤の実態と経時的変化を総合的に把握し、適切な土壤資源管理に役立てることは極めて重要である。日本においても農林水産省の各種土壤調査事業において、土壤資源の分布状況の把握（土壤図等の作成）、農地管理に伴う土壤の質的变化のモニタリングが行われてきた。全国的な土壤モニタリングについては、都道府県公設試験場の試験圃場において精緻な農地管理の下に実施されている基準点調査、及び全国約3千6百地点（2025年時点）の生産者圃場において実施されている定点調査がある。なお、定点調査は1979年から開始され、当初は全国約2万地点の生産者圃場において5年一巡で土壤理化学性モニタリングが実施され、農地管理情報と合わせてデータベース化されている。この定点調査により、樹園地や施設圃場における化学肥料の多施用に伴い、土壤中にリン酸が過剰に蓄積している実態などが報告された[102]。これら土壤調査から得られた膨大な土壤データは、地方公共団体が作成する施肥基準や土づくり指針等の作成・更新に活用されている。さらに土壤データは土壤有機物をはじめとする様々な物質に関する動態モデル開発にも用いられ、それらモデル活用による地力変動の把握や農地からの環境負荷物質の排出量算定等に幅広く活用されてきた。

日本の各種土壤調査事業で得られた土壤データは体系化され、農研機構の日本土壤インベントリーでデジタル土壤図、土壤断面データベース、土壤物理特性データベース、土壤炭素・窒素マップ等として公開されている。更にデジタル土壤図及び土壤物理特性データベース等は、土壤環境API（アプリケーション・プログラミング・インターフェース）としてデータ配信されており[103]、民間企業が上市する営農管理支援システム上でも土壤データの商業利用が可能となっている。また、土壤データを活用した土壤資源管理に資するアプリケーション開発・公開もされており、堆肥等の有機質資材の肥効を可視化して化学肥料削減可能量を算定できる日本土壤インベントリー「有機質資材の肥効見える化アプリ」、有機質資材の施用に伴う土壤炭素貯留量の変動を可視化する農研機構「土壤のCO<sub>2</sub>吸収「見える化」サイト」等として生産現場で広く利用されている。

## ③ 土壤病害管理

農作物に発生する病害の中には、土壤中に長く生息する病原体が原因となるものがあり、土壤病害と呼ばれる。病原体には真菌・卵菌類、細菌、センチュウ、さらにこれら真菌、センチュウにより媒介されるウイルスが含まれ、萎凋や萎縮などの症状を引き起こす。一般に発病が確認された時点で防除が難しく、特に同じ作物を繰り返し栽培する圃場では病原体の蓄積が進みやすく、発生リスクが常に懸念される。

こうした病害を避けるためには、土壌の肥料成分を適切に維持し、都道府県が公表する病原体系統に対応した抵抗性品種を導入すること、さらに国や都道府県の防除暦や発生予察に基づいた管理を行うことが重要である。ただし、土壌の種類や成分、気象条件、さらには病原体密度が発病閾値に達しているか否かは圃場ごとに異なる。そのため播種や定植前に土壌を事前検査し、圃場単位で管理計画を立てることが望まれる。

この事前検査は土壌分析と生物分析から構成される。生物分析では、病原体を分離して同定する方法や、特異的 qPCR プライマーを用いて遺伝子解析から推定する方法が利用される。しかし前者は培養可能な病原体に限定され、後者はプライマーの有無に依存するため、全てを網羅できるわけではない。こうした制約を受けずに、これまで蓄積された研究成果や発生解析を基に、予防と防除の概念を持つ Health checkup based Soil-borne Disease Management (HeSoDiM) の土壌病害管理法に基づき、圃場の発病ポテンシャルを評価し必要な対策を提示する AI アプリ「Heso+」が農研機構を代表機関として、13 の公設試験研究機関、1 大学、そして民間企業が参画して開発された[104]。現在 10 種類の作物の主要土壌病害に対応し実用化されている。

検査の結果、病原体密度を低下させる必要があった場合、連作回避が最も有効とされるが、実際の農業生産現場では困難な場合が多い。このため、農薬取締法に基づき使用が認められた薬剤や、太陽熱消毒・土壌還元消毒といった物理的防除法が利用されてきた。1990 年代以降に技術開発が進み、2005 年には臭化メチルがオゾン層保護の観点から全廃され、その代替技術として改めて土壌還元法が注目された。さらに 2010 年代には有機資材を利用した方法が実証され、近年では低濃度エタノールを用いる実用化技術も開発されている[105]。

また、2021 年に公表された「みどりの食料システム戦略」では農薬使用削減が政策目標に掲げられ、新たな病害管理技術の導入が求められている。同時にソイルヘルス (Soil Health) の概念が浸透し、土壌病害の発生と土壌成分や微生物多様性との関係解明が進展している。近年は、これまでの拮抗微生物を利用した病害抑制効果に加え、微生物多様性が病害発生に関連する知見や[106]、拮抗細菌と特定資材の施用により苗立枯病の発生が軽減される事例[107]も報告されている。従来の防除技術にとどまらず、病害予察と土壌管理を統合的に視野に入れた研究の必要性が高まっている。

## (2) 土壌の健康に配慮した農業技術

### ① 水田

水田の生物多様性、特に無脊椎動物は、有機栽培や特別栽培の導入、畦畔の粗放的管理、ビオトープの設置、冬期湛水や中干し延長により改善する[108]。有機栽培等では雑草対策が大きな課題だが、湛水期間中に水田の土壌表面を軽く攪拌する中耕除草は、5 回程度の実施で雑草の抑制とある程度の収量が確保できる[109][110]。水田では有機物や水管理が稲の生育や CH<sub>4</sub> 排出に影響する。堆肥や稲わらの施用は肥沃度の維持に重要だが、移植直後の急激な分解や CH<sub>4</sub> 排出量が増加する。これらへの対策と

して、例えば稲わらの秋のすき込みは冬期間のワラの腐熟化が進み翌年春の栽培初期の急速な土壌の還元化を抑制することに加え、CH<sub>4</sub>排出も抑制する[111]。さらに、収量の多少の低下傾向はあるが、特に残渣等をすき込んでいる水田で中干しを慣行よりも延長することで、3割程度のCH<sub>4</sub>排出を削減できる[112]。また、特に東南アジアでは節水かつ約50%のCH<sub>4</sub>排出を抑制できる間断灌漑技術(AWD: Alternate Wetting and Drying)が普及してきているが、この効果は土壌有機物が少ないあるいは降水量が多いほど低下するため[113]、土壌の健康の悪化や気候変動による効果の低下が懸念される。

## ② 畑

日本の湿潤温暖条件では、地温と水分により土壌有機物の分解が速く進む[114]。したがって、土壌生物群の栄養基盤である有機物を積極的に補給・循環させる管理が、畑地生態系の健康を保つ鍵となる。

まずは、家畜糞や農業副産物、食品廃棄物、落ち葉などの地域有機資源を堆肥化し、有機肥料として活用する方法である。これらを作付けの数週間～数か月前に施し、すき込んで微生物分解を促進させる。これらの即効性は弱い但し効果が長続きし、施肥と土壌改良を同時に進められる。現在農耕地へ供給する栄養塩の多くを海外からの輸入に依存しているが、この堆肥化技術を通じて、国内にある未利用の有機資源の有効活用、土壌の健康の維持及び地域における栄養塩の循環の改善など複数の効果がある。

主作物の休閑期にマメ科やイネ科の作物(カバークロープ、緑肥)を栽培し、土壌を覆って保護・改良する手法も有効である。これらの生育後はすき込むか地表を覆わせ、窒素肥料の節減や土壌改良、病虫害抑制に活用する。種類や播種・処理の時期を圃場条件に合わせて選ぶことが重要となる。この方法の大きなメリットは、植物により土壌を被覆することで、土壌侵食(水食や風食)を抑制できる。また休閑期での養分溶脱を抑制できる点[115]や植物の生きた根と土壌生物相との協働で土壌の健康に大きく貢献する[116]。

輪作は、作物ごとの根系や吸収特性の違いを利用して土壌物理性を改善し、養分バランスの偏りを是正する。とりわけマメ科植物の導入は生物的窒素固定を通じて窒素を補給し、肥料窒素の削減につながる。さらに連作障害の要因となる病虫害のサイクルを断ち切り、土壌微生物相の多様性を維持する。特に、作物残渣の量の多い作物や、根域の異なる作物を交互に栽培することで各層の土壌を耕す効果が生まれ、土壌の通気性・透水性が改善し、硬化防止・団粒構造の発達が促進される[117]。

不耕起・省耕起は、機械的攪乱を抑えることで団粒構造の維持・侵食抑制・土壌有機炭素蓄積に寄与する[114][118]。耕さないことで団粒構造が維持され、侵食や表土流亡を防止する。ここでは、枯死した根やミミズ孔が通気性・透水性を高める天然の空隙を形成する。耕起を控えることで有機物分解が抑制され、有機炭素が蓄積する[118]。これにより腐植量・保肥力・緩衝能が向上し、養分流出が減少する。結果とし

て、土壌肥沃度と炭素貯留機能が強化される。このほか、バイオ炭などの有機物供給も有効な手法である。

各技術は単独でも有効だが、有機物投入（堆肥・残渣・カバークロープ）×土壌攪乱の最小化（不耕起/省耕起）×生物多様性の確保（輪作）の組み合わせにより、土壌の物理性・化学性・生物性の三側面で相乗的な改善が得られる[119]。

### ③ 不耕起草生栽培

耕うんによる土壌劣化を回避するために、農地を耕さない不耕起栽培や耕す面積割合を限定する省耕起、深度を浅くする浅耕などが取り入れられている。さらに作付け期間以外にも裸地状態を避けるためにカバークロープを栽培し、不耕起で作付けする方法が開発された[120]。この方法は除草剤を散布しても枯れない除草剤耐性を遺伝子組換え技術によって付与した種子の開発によって、急速に拡大したが、除草剤に依存することで除草剤耐性雑草の出現をもたらすことが懸念されている[121]。

有機栽培において除草剤を使用しないで作物を栽培するには不耕起栽培とカバークロープの組み合わせが有効である[122]。自然土壌は耕されることなく、様々な植物が生息している。耕地と違って耕うんや施肥、防除を行わなくても一次生産が安定的に高く維持されている。この自然の仕組みを農業に活用する試みは様々に行われてきたが、機械化大型農業に応用できる技術としてカバークロープを押し倒しそのまま不耕起で栽培するという技術が開発された[123]。この栽培は、不耕起栽培でかつ一年を通して植物の根があるので、「不耕起草生栽培」と呼ぶことができる[124]。

この栽培によりカバークロープと作物の根の脱落と滲出物の形で土壌に新鮮な有機物（炭素源）が供給され、土壌生物にエネルギーを供給する。一方、カバークロープが吸収した窒素やその他の必須元素はその場に還元され、その後栽培する作物に利用可能となる。作物の残渣も農地に残され、今度は次のカバークロープの利用可能資源となる。カバークロープはバイオマスが多くなるイネ科のライムギなどと、窒素固定をするマメ科植物が混植されることもあり、それぞれ土壌に炭素と窒素を外部から取り込み供給する。また、有機物のマルチとして土壌表面を保護し、土壌侵食を防ぐとともに畑地雑草の発芽、生育を抑制する。一連の管理により土壌生物の数量と多様性が増加するので、土壌食物網の機能が最大限に発揮され、有機物の分解、土壌団粒やマクロポアの形成が促進され、栄養塩類循環、排水性や保水性が良くなり、天敵相の維持が可能である。そして、耕うんに起因する土壌劣化が生じない。

### ④ アグロフォレストリー

アグロフォレストリーは生活型の違う植物を混作して利用する農業であり、同時に樹木を利用する林業でもある。一般に農地では日照や作業の効率を確保するために樹木と作物は共存していない。しかし、種類の異なる植物を混作すると相乗効果により全体の一次生産が増すことがある[125]。そのため、作物のために樹木の密度を下げ栽培している。

作物と樹木の混作の場合、樹木による強い日射の緩和や樹木の落葉による土壌有機物の増加、土壌侵食抑制の効果が期待できる[126]。

熱帯ではコーヒー、コショウ、カカオなどの樹陰を好む樹木性の作物を、より高い樹木下で栽培することが可能である。大規模なプランテーションでは樹木を伐採してこれら作物だけを栽培することが多いが、そのような栽培では土壌劣化を促進する。

温帯では樹下では日照が不足することが制限要因となるため、上下の関係ではなく防風林の機能を持たせた樹林列と作物の組み合わせが多い。今後、作物に有害なレベルの夏季の気温上昇を緩和するために温帯でも樹木と作物の組み合わせの研究が必要である。

## 5 日本における土壌の健康を回復させるために

### (1) 地域レベルの土地利用の最適化

生産性だけではなく土壌の健康として生物多様性や生産の持続性への配慮を求める視点から、ネイチャー・ポジティブ（生態系の回復）あるいはリジェネラティブ（環境再生型）農業が期待されている。ただし、その評価手法は確立されていない。「測れないものは管理できない」という原則は、土壌の健康管理にも当てはまる。土壌の健康の向上を目指すには、まずその地域の土壌が提供する生態系サービスを定量的に把握し、それに基づいた土地利用の最適化を進める必要がある。特に、土壌炭素貯留量の増加、生物多様性の保全、環境負荷の低減を同時に達成するには、科学的根拠に基づいた測定・評価・管理の枠組みが不可欠である。一般的に、土壌の生態系サービスは「供給サービス」「調整サービス」「文化的サービス」「基盤サービス」の四つに分類される。これらの機能に関連する土壌特性は、化学的・物理的・生物的側面から測定される。現地で採取・測定されたデータは整理・品質管理を経て一次データとなり、そこから機能に対応した「指標（Indicator）」が構築される。さらに、複数の指標を統合し、一般の意思決定者にも理解可能な形で提示するために「インデックス（Index）」が設計される。インデックスは、pH や土壌有機炭素（SOC）濃度のような Indicator ではなく、複数要因を集約した合成値であるため、地域参照値（レファレンス）や機能別閾値の設定、スコアリング関数の透明性が問われる [127]。

森林生態系を水田の上流域に配置することで水源を確保できる。畑地からの硝酸溶脱が予測される茶園等の下流に水田を配置し、脱窒やイネへの肥料とすることで下流域の水質汚染を防ぐ地目連鎖系もある。茶園だけでなく茶草場（チャノキの根元に敷く草を生産するための茶園周辺の採草地）を配置することで、土壌へ施用する有機資材を確保でき、化学肥料を削減できるだけでなく、カヤネズミなどの生物の住処を確保することができ、生物多様性向上が可能になる。

USDA をはじめとする国際的な合意では、土壌有機炭素含有率が土壌の健康の中核指標として推奨されている。土壌有機炭素含有率は、土壌微生物の多様性、団粒構造の安定性、栄養素の供給能力などと密接に関連し、4パーミル・イニシアティブに代表されるように、土壌炭素隔離を通して気候変動緩和と生産性の向上の両立を達成する手段として提案されている。

しかし、これらの議論は主に畑地を対象としており、日本に広く分布する水田土壌の特性には十分に対応していない。水田土壌では土壌有機炭素含量が高くても収量に直結しない場合があり、土壌の健康の評価には地域特性を踏まえた多基準評価が必要である [128]。SOC は気温や粘土含量にも依存し、生態系や土壌タイプによって一律に評価できるわけではない。単一指標による評価では限界がある。

地域レベル（流域レベル）での土地利用の最適化を行う基盤技術として土壌特性値を簡易に測定・推定する手法として可視-近中赤外分光法や  $\gamma$  線等のセンサーを用いた研究が多く行われている。測定しやすい土壌特性値から測定しにくい土壌特性値を推定する Pedotransfer function、限られた地理的サンプルデータから空間的な相関を利用し

て未観測地域の特性を推定・予測する Digital Soil Mapping、AI を駆使した Soil science-informed machine learning アルゴリズム、精密農業やスマート農業でみられるドローンや衛星データ等を使用して各土地固有の状態に合わせた肥料処方ツールの開発などが現在研究されている[129]。これらの技術を用いて土壤炭素マップの生成と整備、そして地域ごとの土壤の健康の指標値を開発することは、土地利用の時空間的変化を科学的に調査するための基盤となる。また、地方公共団体や農業者が意思決定を行う際に、こうした指標値を活用することで、持続可能な農業と環境保全の両立が現実的なものとなる。

## (2) 土壤の健康をチェックする技術開発

土壤の健康を評価するには、土壤の物理性・化学性・生物性を調べるのが一般的であり、様々な項目について評価法が確立しているが（4 (1) ①）、土壤の様々な機能についてモニタリングすることもあわせて重要である。

土壤炭素貯留のモニタリングとしては、大きく分けて直接測定、センシング技術（リモートセンシング及びプロキシマルセンシング）、モデル推定（プロセスモデルとデータモデル）の3つの方法がある。直接測定法は、土壤の全炭素含有率（gC/kg）と土壤の単位体積当たりの固相重量を示す容積重（g/cm<sup>3</sup>）に基づいて、一定の深さまでの単位面積当たりの貯留量（tonC/ha）を求めるもので、最も正確に現場の土壤炭素貯留量を定量できる。一方、リモートセンシング及びプロキシマルセンシング法は、人工衛星などに搭載したハイパースペクトルセンサーなどを用いて土壤表面や植生から反射・放射される可視光や近赤外線を分光観測し、土壤の色や水分含量、植生指標などの特性を評価した上で、地上の土壤炭素データとの関係解析に基づいて炭素貯留量を推定するものである。この方法は迅速かつ安価に広域の土地の炭素貯留量を推定するのに適しているが、実測より精度は低いため、実測データによる検証が不可欠である。さらにモデル推定としては、英国のローザムステッド試験場の化学肥料と有機資材を様々に長期間連用した農地（畑地）における炭素貯留量のデータを元に確立された、土壤炭素動態モデル（ローザムステッド炭素モデル、略してRothCモデル）が世界的に広く活用されている[130]。水田が多く、火山灰土壤の多い日本の農耕地に適用するため、RothCモデルの改良も行われている[131]。

環境負荷モニタリングとしては、地下水汚染、河川水汚濁、温室効果ガス排出、重金属類汚染、放射能汚染、土壤微生物叢などが挙げられる。まず、地下水汚染については、窒素肥料に由来する硝酸汚染があり、基準値を超えた地下水を飲料に用いると、メトヘモグロビン症と呼ばれる血液で酸素を十分運べなくなる症状を呈する。そのため、硝酸性窒素と亜硝酸性窒素の合計で10mg/Lという基準があり、主に都道府県が「水質汚濁防止法」に基づき、定期的を実施する「地下水質常時監視」としてモニタリングが行われている。河川水汚濁については、水質汚濁防止法に基づき、国民の健康や生態系の保全のため、国や地方公共団体によって継続的にモニタリングが行われており、河川の生物化学的酸素要求量（BOD）、湖沼や海域の化学的酸素要求量（COD）をはじめ、溶存酸素量、

全有機炭素、水素イオン濃度 (pH)、大腸菌群数、窒素及びリンなどが測定されている。温室効果ガス排出のモニタリングについては、地上での計測に基づく「ボトムアップ手法」と人工衛星による観測などに基づく「トップダウン手法」があるが、日本では、環境省や国立環境研究所などが中心となりこれらの手法を組み合わせる排出量を監視している。これらは、土壌の健康を直接チェックするというより、土壌の健康が損なわれるとこれら環境負荷量の増大が懸念されるという、間接的な関係となっている。

一方で、土壌の重金属類汚染モニタリングは、人の健康被害の防止等を目的として、主に土壌汚染対策法に基づき定期的な調査や継続的な監視として行われている。基準値としては、土壌に直接含まれる重金属類の濃度を規制する土壌含有量基準と、重金属類が地下水に溶出する量を規制する土壌溶出量基準がある。土壌の放射能汚染については、環境放射能モニタリングの一環として、土壌中の放射性物質の濃度を定期的又は連続的に測定・監視している。特に、2011年の福島第一原子力発電所事故以降は、主に放射性セシウムなどの放射性物質の土壌中濃度を環境省などが測定しており、それに基づいた対策も取られている[132]。これらは、土壌の健康が損なわれていないかどうかを直接的に測定するものとなっている。

土壌の評価では、化学的・物理的な指標に加え、生物性、特に土壌微生物の健全性に注目が集まっている。土壌微生物解析においては、難培養微生物が多いという特性を考慮し、培養を介さないゲノム解析手法が用いられている。これは、土壌中の全微生物のDNAを分析し、微生物種の多様性や存在量、さらに窒素やリンなどの物質循環や病原性などに関わる機能遺伝子も評価することで土壌微生物群集を把握し、土壌の評価につなげる手法である[133]。農業土壌では、作物の生育に欠かせない多様な植物生育促進微生物の存在や、作物の栄養吸収を助けるアーバスキュラー菌根菌の存在量を評価することを通じ、土壌の健康を評価することも可能である。このようなゲノム解析手法では、特定の遺伝子マーカー（細菌では16S rRNA遺伝子、カビなどの真核微生物では18S rRNA遺伝子やITS配列）を対象としたアンプリコンシーケンスによる微生物叢の網羅的解析、及び全DNAをランダムにシーケンスするショットガンメタゲノム解析による機能遺伝子群の解析が行われている。次世代シーケンサーの進化により、ゲノム解析はより高速かつコスト効率が向上したことから、現場への導入が進んでおり、より詳細な微生物叢の情報が把握できるようになってきた。一方、迅速かつ簡易的な診断技術として、土壌の微生物バイオマス量や活性を測定する指標であるATP測定なども導入されている。ただし、これらは上記のゲノム解析手法とは異なり、微生物種の多様性、あるいは特定の種類の検出はできないため、土壌の総合的な評価には、複数の評価軸を組み合わせる必要がある。

### (3) 環境再生型農業技術のイノベーションの推進

近年の技術革新により、衛星やドローン (UAV) とマルチスペクトルカメラの組合せによる高解像度空撮画像を用いたセンシング技術が発達し、さらに機械学習モデル (Random Forest や畳み込みニューラルネットワーク等) を用いたデータの解析と診断

から、比較的小規模な農地でも作物の生育状態、土壌水分や土壌炭素の偏り、病害等の情報を得ることができる[134]。これらの情報は効率的で省エネルギーかつ必要最小限の農薬等の利用につながり、さらに土壌の肥沃度向上のための戦略策定へ重要な情報を提供する。

土壌の真の健康度は、その機能が微生物群集に大きく依存するため、生物性評価が決定的な指標となる。難培養微生物が多い土壌に対し、次世代シーケンサーを用いたゲノム解析（アンプリコン、ショットガンメタゲノム）が標準化し、さらにシングルセルゲノム解析[135]などの先端技術が稀少な機能微生物の情報提供を可能にしている。これらの高解像度データは、世界的な研究コミュニティによってデータベース化（例：MGnify、JGI IMG/M）が進んでおり、AIによる横断的なビッグデータ解析を可能にすることで、未知の機能を持つ微生物の発見や、複雑な生態系の動態理解に貢献している。国内でも、国レベルのプロジェクトにおいて農業土壌微生物の解析機能を有するゲノムデータベース（AgriSoil Microbe Atlas）などの構築が進んでいる。これらの生物性データは、前述のリモートセンシングデータや化学的診断データと統合され、AIを用いた高度な解析を通じて精密農業の基盤となる。この統合データは、デジタルツインの構築に活用され、管理シナリオの予測シミュレーションを可能にする。この解析結果から、農地ごとの微生物生態系に基づき、後続で議論されるバイオ炭や岩石風化促進（Enhanced Rock Weathering, ERW）といった資材投入戦略を策定する「微生物生態系に基づく処方箋」が導き出され、化学資材依存度を低減し、環境再生型農業の実現を強力に支援する。

このような土壌診断技術に基づき、従来の農法の見直しや新たな適応が試みられている。4(2)①や4(2)②で示される農法に加え、近年ではバイオ炭の農地施用に注目が集まる。農地の土壌改良としての炭の利用はこれまでも行われてきたが、近年は「バイオ炭」として土壌改良だけでなく環境保全の視点からも注目されている。バイオ炭は「燃焼しない水準に管理された酸素濃度の下、350°C超の温度でバイオマスを加熱して作られる固形物」と定義され、作物収量や土壌生物性、保水性の向上により、総体としての土壌の健康の向上が期待される[136]。加えて、窒素溶脱低減や土壌への炭素隔離、N<sub>2</sub>O排出の削減等、水質や地球温暖化に対する効果も期待され[137]、近年では日本でも農地へのバイオ炭施用によるJ-クレジット認定の方法論が確立された。ただし、バイオ炭によるJ-クレジットへの適用へは、対象とする農地の種類、原料が国内産であること、バイオ炭の種類や質が客観的に確認できるなどの他、認定される炭素量は製造や運搬にかかるCO<sub>2</sub>排出量を加味した正味の炭素貯留量で算定されることについて留意する必要がある[138]。さらに、玄武岩等の塩基性岩のERW技術による農地土壌の肥沃度改善（pH矯正、Ca・Mg・Si等のミネラル供給）や炭素吸収に関する研究が世界的に注目されている[139]。ERWは風化が早い岩石（かつ低重金属類含量）を細かく粉砕し土壌に混和することで、風化を促進しその際にCO<sub>2</sub>を固定し土壌中でCaCO<sub>3</sub>あるいは重炭酸が地下水として流れ河川や海洋で固定されることを想定している。日本でも150t/haの玄武岩粉施用量で年間約800kgC/haの炭素固定が報告されるなど[140]、研究が進められている。その他、従来からのシステムチックな有機物の利用の促進も重要である。耕畜連携による有

機物の循環は、例えば水田において畜産堆肥由来のNやPを農地に還元することにより、化学肥料の使用量の削減や肥沃度維持が期待できる[141][142]。

#### (4) 教育研究機関における発信力の向上

土壌の健康 (Soil Health) への理解を深めるためには、まず「土を感じる」体験から始め、それを「知る・理解する」段階へとつなげ、なぜ土が大切なのかを自ら考えられる人を育てることが、持続可能な社会を形成する上で重要である。

そのためには学習指導要領[143][144]の理念に沿いつつ土壌の視点を入れた学習が必要である。以下に具体的な内容と効果を挙げる。

児童の土に対する親しみや興味は高学年になるほど薄れるという報告もあるように[145][146]、土壌について理解を深めるためには、幼少期の体験が重要である。小学校1・2年生の自然観察や3年生の「身の回りの生物」で、土を触ったり、土壌動物を観察したりすることで、土に親しむとともに多様な生物との関係性やその生息環境を体験的に学ぶことができる。

生命領域において、5年生では植物に必要なものを考える際に周囲の樹木や雑草に注目することで、土の中には養分(無機)が含まれることを予想し、それを確かめる実験が可能である。これは6年生の植物の養水分の吸収、中学生における土壌の養分供給の学習へとつながる。また6年生の、「食う・食われる関係」の学習では生き物の排泄物や死骸が土の中で食べられる(分解される)ことを学ぶことで、植物が吸収する養分の素が土にあることが理解でき、物質循環の概念の基礎を築くことができる。これにより中学生で学ぶ分解者の役割も明確になる。

地球領域において、4年生では土の粒の大きさとの水のしみ込み方の違いについて自然に近い土を用いて実験し、土と砂の違いを比べることで、自然の土の水はけや水持ちについて学べる。土は水の通り道になっていることを理解すると、6年生の生命分野や社会で学習する水の循環の学習につながる。さらに土は岩石が風化して細かくなっただけではなく、有機物が含まれることを学習すると生命領域の学習につながる。

5年生では、「流れる水の働き」を6年生の「土地のつくりと変化」に土壌の視点でつなげると、地表面に堆積した土砂から土ができることが理解できる。そのようにしてできた土や火山灰の堆積がもとになってできた土があり、土地に応じた農業が営まれることを理解することは中学校の社会や高校の地理の学習にもつながる。

つまり、現行の学習に「土壌の視点」を入れることで「土とは何か」「土の中の生き物」「土は水の通り道」「土は養分を供給する」「土は有機物分解の場である」といった土の成り立ちとその基本的な役割について学ぶことができ、岩石、植物、動物、人の暮らしなどが相互につながる。中学校、高等学校(普通科)においては、生態系における土壌の理解を深め、温暖化などの環境問題や農業の課題解決の糸口として捉えていくことができる。これらの学びが、更なる土壌の理解を深め土壌の健康について自分事として考えるための土台となる。

これらを実施していくためには、学校教員と連携した実践、教材開発、普及が欠かせない。

農業高校や大学農学部の中・初学年段階では、作物や土壌に触れる実習教育が非常に重視される。現状において、その実習内容の多くは、農業管理及び作物の生産性に関する調査・実習が中心となっている。しかしながら、作物が土壌を介して生産されるプロセスを捉えるには、土壌が自然生態系の一部であることを認識し、過去の自然条件と人為的管理が形成してきた「土壌そのもの」が持つ健康性を深く理解することが必要である。そのためには、学生が手に取って土壌の物理性、生物性、化学性を評価するという実践的取り組みが必要である。

今後、若者の自然体験・農業体験が希薄化する傾向にあることを踏まえると、こうした実習教育を位置付けることは、極めて重要な機会となる。特に、複数農法比較の圃場を設けて管理方法を変えつつ、土壌の健康評価を学生自らが実践し、指標間の関連性を探り、さらには失われた土壌機能をどのように回復するかを議論・検証する実習カリキュラムを導入することで、学生が土壌の健康を実質的に理解することに役立つ。

このような実習は、最新のバイオセンサー技術、ドローンや衛星写真、さらには AI モデルによるデータサイエンス的解析といった先進技術と密接に連携させて構築すべきである。なぜなら、農耕によって土壌がどう変化し、その変化がいかに関与する作物の生育・生態系・化学反応・物理特性に与える影響を総合的に理解することができるからである。学生は「土壌の健康」を維持・向上させるために必要な研究や、その成果の社会還元について自ら問いを立てることができるようになる。これは将来的に科学研究や社会実装に挑む原動力となるだけでなく、教育研究機関として土壌の健康に特化した専門部署の設置や教育カリキュラムの充実を通じて、学内外への貢献を可能にする。

初等・中等教育における土への親しみと理解の醸成、高等教育における土壌の健康の理解、社会への還元を実現するには、包括的に土壌教育・土壌の健康を推進する拠点の設置が必要であろう。その拠点として「土壌の健康教育・研究センター（仮称）」の設置を検討すべきである。当センターは、土壌学並びに土壌の健康について、初等～高等教育のための教員と連携した教材開発、国内外の大学・農業高校との教育連携、社会への発信を担う拠点として機能し、教育研究機関としての発信力を飛躍的に高める役割を果たす。また、各地域や大学において地域拠点を設置することで、地域に特有のプログラム作成や、大学においては現場に対応した土壌の健康を理解するための実習モデル圃場の運営が可能となり、情報交換の促進となる。さらに、一般社団法人日本土壌協会などのステークホルダーと連携することで、教育・研究・社会実装の各側面において、より実効性の高い土壌の健康促進活動を展開することが期待される。

## (5) リビングラボのネットワークの構築

持続可能な開発目標（SDGs）は、競合しうる複数の目標を同時に達成しなければならない「厄介な問題（Wicked Problems）」である[147]。土壌は、食料・繊維の供給、生物多様性の維持、水や栄養素の循環、気候変動の緩和など、多様な役割を果たすことで SDGs

達成の基盤を担っている。しかし、その多機能性ゆえに、「健康な土壌とは何か」という問いに対するステークホルダー間の見解は、立場や価値観の違いから常に相違を生じさせる[148]。

価値観・目的の違いを超えて協働を可能にする「バウンダリー・オブジェクト」として「土壌の健康」という概念を機能させるためには、科学的な信頼性の担保に加え、意思決定者のニーズに応じ、多様なステークホルダーの価値観を包摂した知識の創出が必要となる[149]。このため、土地管理者、市民、政策関係者との継続的な対話を通じて、研究の役割について開かれた議論を展開し、環境規則の構築などの基盤となる交流モデルを整備しなければならない[147]。

リビングラボは、共創型 (Co-Development) イノベーションを促進する有望な枠組みとして台頭している。ここではリビングラボを「多様な主体が実生活環境で、現在進行形の問題を共有し、実験するアプローチあるいは場所」と定義する[150]。農業分野におけるリビングラボは、持続可能な農業への転換に焦点を当てた研究・開発・イノベーションの拠点となりうる。重要なのは、リビングラボが地域レベル（市町村などで規定されるコミュニティ）での現場と研究の対話の場であり、研究者は地域の一員として貢献するものの、活動の主導者ではないという点である。したがって、研究者、農家、政策立案者、産業界代表者、市民社会を含んだ対話の場を構築するためには、リビングラボのガバナンス構造（運営委員会など）と関係者ネットワークの構築が不可欠である[151]。

コミュニティーレベルでそれぞれの状況に応じた活動が求められる一方、異なる状況間でも共通の手法や知見が活かされる側面がある。例えば、ワークショップの手法や情報の共有方法、共創型研究の方針などは、他のリビングラボと連携して発展させるべきである。そのため、EU の Agroecology Living Lab[152]のように、隣接地域、共通課題、テーマ、国際的な枠組みなどに基づいたネットワークの構築が求められている。

土壌の健康をどのように価値付け、改善・維持していくかは、その土地の土壌タイプ、地理環境、社会経済的な枠組みを含んだ文脈によって異なる。リビングラボでは、地域に合わせた評価・指標・管理の枠組みを作成するとともに、対話を通じて「土壌の健康」についての地域的な合意形成を図ることが期待される。

一方で、革新的な環境規則の基盤となるような共通認識へと知見を統合するためには、土壌の健康に関するより一般化された指標が求められ、農業分野の枠を超えた学際的な取り組みも必要となる。これら課題に対応し、土壌保全の価値意識を醸成し、土壌の健康を維持するための対策を創出・遂行するためには、リビングラボ間のネットワークの構築が不可欠となる。

## (6) 日本における土壌の健康基本法（仮称）の制定

欧州では土壌モニタリング法 (Soil Monitoring Law) が採択され、EU 各国の土壌の状況がダッシュボードで簡単に把握できるようになった[153]。EU では農業の肥培管理はGAP (Good Agricultural Practice) によって管理され、農家への支払いとも直結している。そのため、規制への反発も強いが、公共財産としての自然保護の理解も存在す

る[154]。よって日本で土壌の健康基本法（仮称）を作成する場合、何を目的として作成し、その目的をどう達成するかという戦略が必要となってくる。みどりの食料システム戦略など、存在する政策、あるいは社会の動向として炭素市場でのカーボン・クレジットに類似した支払い方法を目指すのか、などいろいろ方向性は考えられる。今後、議論を進め、政策面に貢献していくことが求められる。特に、土壌の健康を向上させる・維持する目標が、罰則を伴う達成義務や規制となるのではなく、収量が持続的に保持できること、気候変動へ対応しやすくなることなどのインセンティブとなることが望ましい。日本の農家は土壌診断をすることが多く、土壌の健康の目標を受け入れる素地がある。現行の土壌診断とも合わせて構築していくのが良いと考えられる。

研究者としての役割は、いかにして、土壌の健康を測定し、そのデータを共有し、情報を公開していくかを研究していくことにある。ある意味、土壌学研究そのものであるが、リビングラボの中で、社会で求められている形に合わせて研究結果を提示していくことが求められる。また生データとしての共有の他（FAIR原則[155]）、データを基にした情報を積極的に発信していくことが必要である。これは個々の研究者にはできないため、学会や学術団体などが主体となって進めていく必要がある。国際的には、研究分野で様々な取り組みがある：例 Gaia X[156]、FAIR Agro [157]。まずは研究データからはじめ、今後、様々なデータ解析により、より良い判断基準となることが期待される。

現場レベルでは、集めたデータを基に判断基準となる情報を提供することが不可欠である。意志決定支援システム（Decision Support System）は、デジタル化とAIの発達により、急速に発達している。例えばドイツ・バイエルン地方だけでも、使える圃場（farm management information systems, FMIS）は52存在する[158]。しかし、まだ収量や効率化が中心となったものが市場の中心であり、土壌の健康の多面的な指標を含み、持続的な栽培体系をサポートするものはまだ研究途上である。様々なシステムが開発される中、個々のサポートシステム・ツールが孤立せず、API（application programming interface）を通して相互に利用できるように開発を進めることが求められる。研究面では、プログラミングをオープンソースで行い、GitHubなどのシステムを使い公開していくことが必要である。

このように、近時におけるEUの土壌モニタリング法の制定や、先に見た米国における展開等は、日本独自の土壌の健康の確保に関する法律の制定に際しても参考になる。現在、日本には土地や土壌に関する個別法規が数多く存在し、それぞれが、各主務官庁の下で個別の目的から様々な法規制を行っている。しかし、日本には土壌の健康確保を目的とした基本法は存在しない。このような状況で、先に述べたような土壌の持つ様々な機能の健全な発揮に向けて、地球規模で持続可能な開発目標（SDGs）の諸目標を実現するための基盤づくりの一端として、土地や土壌に関する個別法規にいわば横串を刺す形で、日本においても土壌の健康の確保に関する基本法（「土壌の健康基本法」（仮称））を制定することは不可欠である。

その目的は、土壌の健康を確保するために、基本理念を定め、国、地方公共団体、土地の所有者・占有者及び国民の責務を明らかにするとともに、土壌の健康確保に関する

施策の基本となる事項を定めることにより、土壌の健康に関する施策を総合的かつ計画的に推進し、もって現在及び将来の国民の健康で文化的な生活の確保に寄与するとともに、人類の福祉に貢献することである。この基本法を基に、例えば5年に一度「土壌の健康基本計画」（仮称）を定め、収量維持や気候変動対応等を具体的に実践し、国土の豊穡化や強靱化が図られるとともに、各種の施策が実現されることが望ましい。また、具体的な法整備を通じて、リビングラボを創設し、そのネットワークを構築することにより、土壌の健康の指標項目が測定され、ニーズに合わせた形で情報が提示されることも、保障されるべきである。さらに、国等は、土壌の教育を充実させ、かつ、土壌の健康の意義や価値に関する広報活動を行うことを通じて、土壌の健康確保が、現在及び将来の国民的な課題であり地球規模の難題の一つであることの認識を深めていくべきであろう。

## <用語の説明>

### **岩石風化促進 (ERW)**

Ca や Mg に富むケイ酸塩岩石を細かく粉砕して地表に散布することで、岩石の風化を促進する技術のこと。促進された岩石の風化により、CO<sub>2</sub>を炭酸塩として土壤中に貯留、又は土壤水に溶けた重炭酸が Ca や Mg に随伴して土壤圏から水圏へ移動し海洋で炭酸塩等の形で沈殿することにより、自然な風化より迅速に大気中の CO<sub>2</sub> を削減することが期待されている。

### **地目連鎖**

上流に畑地、下流に水田というように、異なる地目が一つの水系でつながっている状態。上流部の環境汚染物質を下流部で除去する際に使われる地形・地目の概念。

### **都市土壤の緑化 (土地被覆の除去)**

欧米では、都市縮退に伴って利用されなくなった都市域においてアスファルトやコンクリートの被覆を除去し、その土地での植生回復が試みられている。都市域における生物生産と生物多様性の確保、及び雨水浸透による洪水防止が期待されている。そのためには被覆除去後、基盤土壤の掻き起こしやコンポストの混ぜ込みによる一次生産力の向上に加えて、廃棄物処理を兼ねたアスファルトやコンクリート片の植栽基盤への混和の影響評価も進められている。

### **土壤が提供する生態系サービス**

土壤は、大気圏、岩石圏、水圏、生物圏の要であり、食料生産を含む以下のような多くの生態系サービスを提供する。供給サービスとして、濾過機能により淡水を生成し、農産物、繊維材、燃料材を生産し、建材などの材料となる。調整サービスとしては、大気成分の恒常性を保ち、侵食、洪水、水利用を調整し、水を浄化し、生物多様性を維持する。文化的サービスとしては、地域固有の景観の基盤となり審美を提供して、余暇やツーリズムに寄与する。基盤サービスとしては、土壤生成を通して水・エネルギー・物質の循環を作り出し、生物生息場を提供する。

### **土壤の健康**

土壤は負荷がかかるとその固有の物理的、生物学的、化学的特性を相互に作用させておかれた生態系において土壤ごとに独自の特性を作り出し、フィードバックする。この機能により、食料生産、大気ガス組成の維持、水質の浄化、生物多様性の保全といった生態系独自のサービスが提供される。土壤の健康は、これらの機能を維持する能力であり、劣化から回復する能力（レジリエンス）である。国連食糧農業機関（FAO）は「陸上生態系の生産性、多様性、環境サービスを維持する土壤の能力」と定義している。

### **4パーミル・イニシアティブ**

世界の土壤の表層の炭素量を年間 0.4%（4パーミル）増加させることで、人間の経済活動によって発生する大気中の二酸化炭素を実質ゼロにすることができるという考え方に基づく国際的な取り組み。2015年にパリで行われた COP21 にてフランス政府主導で始まった。

## ダストボウル

1930年代に米国中部で発生した大規模な土壌劣化と砂じん被害の総称である。長期にわたる干ばつに加え、草原を広く耕作地に転換したことで地表が露出し、土壌の「健康」が低下した。その結果、強風が土壌粒子を巻き上げ、広域で砂じん嵐が頻発した。農業生産の低下だけでなく、交通や地域経済にも影響が及び、健康被害や失業率の増加といった深刻な社会問題へとつながった。

## ハザード物質

農薬や化学肥料のように適切な使用方法が定められ、有用性を前提として管理される一般的な農業資材とは異なり、人の健康や生態系に対して本質的に有害な性質（ハザード）を発揮する物質を指す。本稿では、ハザード物質の例として「重金属類」「放射性物質」「マイクロプラスチック」「動物用医薬品由来の薬剤耐性菌（遺伝子）」について説明した。

## プラネタリーバウンダリー（地球の限界）

持続可能な開発目標（SDGs）のための条件であり、「人類のための安全動作領域」を定義するフレームワークとして、政府、国際機関、市民社会、科学界及び民間部門を含む国際社会に向けた提案。2009年にスウェーデンのヨハン・ロックストローム（Johan Rockström）博士によって提唱された。気候変動、生物圏の健全性、淡水の変化、陸域システムの変化、生物地球化学的フローの改変、新規化学物質汚染、海洋酸性化、大気汚染、オゾン層の破壊の9つの指標が定められている。

## リビングラボ

生活の場（リビング）を実験場（ラボ）と見立て、様々な主体が参加し、ユーザー視点を取り入れながら、製品やサービス等を開発・共創していくオープンイノベーションの手法である。本報告では土壌の健康の維持向上を図るには、地域レベルで農家、研究者、行政、市民が参加するリビングラボの仕組みが必要であることを述べた。

## <引用文献>

- [1] UNEP 2014. Assessing Global Land Use: Balancing Consumption with Sustainable Supply. A Report of the Working Group on Land and Soils of the International Resource Panel. <https://www.unep.org/resources/report/assessing-global-land-use-balancing-consumption-sustainable-supply-0>
- [2] 国際連合広報センター 2015. 2015年は「国際土壌年」～人類の“寡黙な同志”である土壌に目を向けよう～. [https://www.unic.or.jp/news\\_press/features\\_backgrouunders/14198/](https://www.unic.or.jp/news_press/features_backgrouunders/14198/)
- [3] Liu, Z., Liu, Y., and Wang, J. 2021. A global analysis of agricultural productivity and water resource consumption changes over cropland expansion regions. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 321, 107630. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.1076>
- [4] Tan, M. and Li, Y. 2019. Spatial and temporal variation of cropland at the global level from 1992 to 2015. *J. Resour. Ecol.*, 10, 235-245. <https://doi.org/10.5814/j.issn.1674-764x.2019.03.001>
- [5] Zaveri, E., Russ, J. and Damania, R. 2020. Rainfall anomalies are a significant driver of cropland expansion. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 117, 10225-10233. <https://doi.org/10.1073/pnas.1910719117>
- [6] Hatano, R. 2025. Study on the occurrence, impact, and mitigation of soil-derived environmental loads in agricultural ecosystems. *Soil Science and Plant Nutrition*, 71, 371-384. <https://doi.org/10.1080/00380768.2025.2482940>
- [7] Adhikari, K. and Hartemink, A.E. 2016. Linking soils to ecosystem services – A global review. *Geoderma*, 262, 101-111. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.009>
- [8] Lal, R., Bouma, J., Brevik, E., Dawson, L., Field, D., Glaser, B., Hatano, R., Hartemink, A., Kosaki, T., Lascelles, B., Monger, C., Muggler, C., Ndzana, G., Norra, S., Pan, X., Paradelo, R., Reyes-Sánchez, L., Sandén, T., Singh, B., Spiegel, H., Yanai, J. and Zhang, J. 2021. Soils and sustainable development goals of the United Nations: An International Union of Soil Sciences. *Geoderma Regional*, 25, e00398. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00398>
- [9] FAO-ITPS 2020. Towards a Definition of Soil Health. *ITPS Soil Letters* #1. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cb1110en>
- [10] EAT-Lancet 2025. Global Food Transformation Needed to Ease Pressure on the Planet and Save Millions of Lives. [https://www.planetaryhealthcheck.org/wp-content/uploads/PlanetaryHealthCheck2025\\_ExecutiveSummary.pdf](https://www.planetaryhealthcheck.org/wp-content/uploads/PlanetaryHealthCheck2025_ExecutiveSummary.pdf)

- [11] 日本学術会議 2016. 提言「緩・急環境変動下における土壌科学の基盤整備と研究強化の必要性」 <https://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-23-t223-1.pdf>
- [12] 日本学術会議 2023. 見解「気候変動に対する国内農業の適応策と食料安定供給へ果たす農業生産環境工学の役割」 <https://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-25-k230926-15.pdf>
- [13] 日本学術会議 2020. 提言「長期の温室効果ガス大幅排出削減に向けたイノベーションの加速」 <https://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-24-t289-1.pdf>
- [14] 日本学術会議 2025. 提言「気候危機に対処するための産官学民の総力の結集－循環経済を活かし自然再興と調和する 炭素中立社会への転換－」 <https://www.scj.go.jp/ja/member/iinkai/kanji/pdf26/siryo393-s-3-2.pdf>
- [15] IPCC 2019. Summary for Policymakers. In: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2019/12/02\\_Summary-for-Policymakers\\_SPM.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2019/12/02_Summary-for-Policymakers_SPM.pdf)
- [16] Lehmann, J., Bossio, D. A., Kögel-Knabner, I. and Rillig, M. C. 2020. The concept and future prospects of soil health. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(10), 544-553. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0080-8>
- [17] Doran, J.W. and Parkin, T.B. (1994) Defining and Assessing Soil Quality. In: Doran, J.W., et al., Eds., *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*, SSSA Special Publication No. 35, SSSA, ASA, Madison, 3-21.
- [18] Bünemann E. K., Bongiorno G., Bai Z., Creamer R. E., De Deyn G., de Goede R., Fleskens L., Geissen V., Kuyper T. W., Mäder P., Pulleman M., Sukkel W., van Groenigen J. W., Brussaard L. (2018) Soil quality-A critical review. *Soil biology and biochemistry*, 120, 105-125.
- [19] Weil, R.R. and Brady, N.C. 2016. *The nature and properties of soils* (15th ed.), Pearson Prentice Hall. pp1086.
- [20] 岡島秀夫 1976. 土壌肥沃度論, 農文協, pp235.
- [21] 日本土壌肥料学会編 2008. 土壌肥沃度の評価と管理－食料生産と環境保全の両立に向けて－, 博友社, pp146.
- [22] 森塚直樹 2024. 農地生態系における土壌肥沃度管理. 朝倉農学体系 9 土壌学, 朝倉書店, p300-323.
- [23] 土壌環境分析法編集委員会編 1997. 土壌環境分析法, 博友社, pp427.
- [24] 豊田剛己 (編) 2018. 土壌微生物学, 朝倉書店, 東京.
- [25] 犬伏和之 (編) 2019. 土壌生化学, 朝倉書店, 東京.
- [26] Itakura, M., Uchida, Y., Akiyama, H., Hoshino, Y. T., Shimomura, Y., Morimoto, S., Tago, K., Wang, Y., Hayakawa, C., Uetake, Y., Sánchez, C.,

- Eda, S., Hayatsu, M. and Minamisawa, K. 2013. Mitigation of nitrous oxide emissions from soils by *Bradyrhizobium japonicum* inoculation. *Nature Climate Change*, 3, 208–212. <https://doi.org/10.1038/nclimate1734>
- [27] 原 沙和・板倉 学 2024. 根粒菌による温室効果ガス(N<sub>2</sub>O)の削減技術の現在—N<sub>2</sub>O還元根粒菌の新たな可能性を探る—. *土と微生物*, 78, 46–54.
- [28] Arias, M.E., González-Pérez, J.A., González-Vila, F.J., and Ball, A.S. 2005. Soil health—a new challenge for microbiologists and chemists. *Int. Microbiol.*, 8, 13–21.
- [29] Singh, J.S., and Gupta, V.K. 2018. Soil microbial biomass: A key soil driver in management of ecosystem functioning. *Science of the Total Environment*, 634, 497–500. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.373>
- [30] 国立研究開発法人防災科学技術研究所. 災害事例データベース. <https://dstr.mhr.bosai.go.jp/dedb/table3.html>
- [31] 南條正巳 2013. 農地における塩害の概況とその修復. 日本農学会編, シリーズ 21 世紀の農学, 東日本大震災からの農林水産業と地域社会の復興, p. 1–19. 養賢堂. 東京.
- [32] 気象庁. 日本の活火山分布図. [https://www.data.jma.go.jp/vois/data/filing/bulletin/catalog/appendix/v\\_active.html](https://www.data.jma.go.jp/vois/data/filing/bulletin/catalog/appendix/v_active.html)
- [33] 水野直治・丸岡孔一・後藤英次・稲津 脩 2016. 十勝岳火山泥流(1926)による酸性硫酸塩土壌の問題と対策. *農業および園芸*, 91, 325–336.
- [34] Shoji, S. Nanzyo M. and R.A. Dahlgren 1993. Volcanic ash soils - genesis, properties and utilization, *Develop in Soil Science*, 21, p1–288. Elsevier, Amsterdam.
- [35] United Nations 2014. World urbanization prospects: The 2014 revision [Highlights]. New York: United Nations.
- [36] United Nations 2016. Department of Economic and Social Affairs, Population division 2014 World urbanization prospects the 2014 revision. New York: United Nations.
- [37] Laurance W. F., Clements G. R., Sloan S., O’Connell C. S., Mueller N. D., Goosem M., Venter O., Edwards D. P., Phalan B., Balmford A., Van Der Ree R., Arrea I. B. 2014. Global strategy for road building. *Nature*, 513, 229–232.
- [38] European Commission (EC). 2011. Communication from the Commission to the Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Roadmap to a Resource Efficient Europe. COM(2011) 571 final. Brussel.
- [39] European Environmental Agency (EEA). 2016. Soil Resource Efficiency in

- Urbanised Areas. Analytical Framework and Implications for Governance; EEA Report No 7/2016; Office of the European Union: Luxembourg.
- [40] 鶴田治雄 2000. 地球温暖化ガスの土壌生態系との関わり 3. 人間活動による窒素化合物の排出と亜酸化窒素の発生. 日本土壌肥科学雑誌, 71, 554-564.
- [41] 谷 昌幸・木下林太郎 2020. 十勝地域の普通畑黒ボク土における元素の蓄積量と消耗量の評価. 日本土壌肥科学雑誌, 91, 137-146.
- [42] 関本 均 2013. 1.2 植物の栄養特性と栄養診断. 米山忠克・長谷川功・関本均・牧野周・間藤徹・河合成直・森田明雄 著 新植物栄養・肥料学, p25-32. 朝倉書店, 東京.
- [43] Lal, R., Reicosky, D.C., Hanson, J.D. 2007. Evolution of the plow over 10,000 years and the rationale for no-till farming. *Soil Tillage Res.*, 93, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.still.2006.11.004>
- [44] Triplett, G. B., Dick, W. A. 2008. No-Tillage Crop Production: A Revolution in Agriculture! *Agron J.*, 100, S153-S165. <https://doi.org/10.2134/agronj2007.0005c>
- [45] Or, D., Keller, T., Schlesinger, W.H. 2021. Natural and managed soil structure: On the fragile scaffolding for soil functioning. *Soil Tillage Res.*, 208, 104912. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104912>
- [46] Keller, T., Or, D. 2022. Farm vehicles approaching weights of sauropods exceed safe mechanical limits for soil functioning. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 119, 1-6. <https://doi.org/10.1073/pnas.2117699119>
- [47] Hobbs, P.R., Sayre, K., Gupta, R. 2008. The role of conservation agriculture in sustainable agriculture. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.*, 363, 543-55. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2169>
- [48] Amundson, R., Berhe, A. A., Hopmans, J. W., Olson, C., Sztein, A. E. and Sparks, D. L. 2015. Soil and human security in the 21st century. *Science*, 348(6235), 1261071.
- [49] 国連食糧農業機関 (FAO) 2015. Status of the - World's Soil Resources, [https://www.fao.org/fileadmin/user\\_upload/newsroom/docs/FAO-world-soils-report-SUMMARY.pdf](https://www.fao.org/fileadmin/user_upload/newsroom/docs/FAO-world-soils-report-SUMMARY.pdf)
- [50] 小原洋・高田裕介・神山和則・大倉利明・前島勇治・若林正吉・神田隆志 2016. 包括的土壌分類第1次試案に基づいた1/20万日本土壌図. 農環研報, 37, 133-148.
- [51] 宮地直道・神山和則・大塚紘雄・粕渕辰昭 1995. 美唄泥炭地における地盤沈下: 湿原と泥炭農用地の管理 (第2報). 日本土壌肥科学雑誌, 66 (5), 465-473.
- [52] 永田修 2006. 泥炭地・湿原における温室効果ガス. 土壌の物理性, 104, 85-95.
- [53] Hatano, R. 2025. Impacts of changes in peat soils due to agricultural activities on greenhouse gas (especially N<sub>2</sub>O) emissions and their mitigations. *Pedosphere*. 35(1): 8-11.

<https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2023.12.010>

- [54] 三浦覚 2000. 表層土壌における雨滴侵食保護の視点からみた林床被覆の定義とこれに基づく林床被覆率の実態評価. 日本森林学会誌, 82, 132-140.
- [55] Miura, S., Yoshinaga, S., and Yamada, T. 2003. Protective effect of floor cover against soil erosion on steep slopes forested with *Chamaecyparis obtusa* (hinoki) and other species. *Journal of Forest Research*, 8, 27-35.  
<https://doi.org/10.1007/s103100300003>
- [56] Abe, H., Kume, T., Hyodo, F., Oyamada, M., and Katayama, A. 2024. Soil erosion under forest hampers beech growth: Impacts of understory vegetation degradation by sika deer. *CATENA*, 234, 107559.  
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107559>
- [57] 浅見輝男 2010. データで示す日本土壌の有害金属汚染, アグネ技術センター, 東京.
- [58] Hou D, Jia X, Wang L, McGrath SP, Zhu Y-G, Hu Q, Zhao F-J, Bank MS, O' Connor D and Nriagu J. 2025. Global soil pollution by toxic metals threatens agriculture and human health. *Science*. 388, 316-321.  
<https://doi.org/10.1126/science.adr5214>
- [59] Rashid, A., Schutte, B. J., Ulery, A., Deyholos, M. K., Sanogo, S., Lehnhoff, E. A., Beck, L. 2023. Heavy Metal Contamination in Agricultural Soil: Environmental Pollutants Affecting Crop Health. *Agronomy*, 13, 1521.  
<https://doi.org/10.3390/agronomy13061521>
- [60] 江口定夫 2017 農業環境中における放射性セシウムの挙動. 土壌の物理性, 135, 9-23. [https://doi.org/10.34467/jssoilphysics.135.0\\_9](https://doi.org/10.34467/jssoilphysics.135.0_9)
- [61] Kato, N., Kihou, N., Fujimura, S., Ikeba, M., Miyazaki, N., Saito, Y., Eguchi, T. and Itoh, S. 2015. Potassium fertilizer and other materials as countermeasures to reduce radiocesium levels in rice: Results of urgent experiments in 2011 responding to the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. *Soil Science and Plant Nutrition*, 61(2): 179-190.  
<https://doi.org/10.1080/00380768.2014.995584>
- [62] ふくしまの恵み <https://fukumegu.org/ok/contentsV2/> (2025/9/10 アクセス)
- [63] Inubushi, K., Kakiuchi, Y., Suzuki, C., Sato, M., Ushiwata, S.Y., and Matsushima, M.Y. 2022. Effects of biodegradable plastics on soil properties and greenhouse gas production, *Soil Science and Plant Nutrition*, 68, 183-188. <https://doi.org/10.1080/00380768.2021.2022437>
- [64] Inubushi, K., Sahara, I., Kato, T., and Oshima, H. 2024. Effect of biodegradable plastics on greenhouse gas emission and paddy rice growth under flooding conditions, *Biol. Fertil. Soils*, 60, 875-882.  
<https://doi.org/10.1007/s00374-024-01838-5>

- [65] Inubushi, K., Satomi, R., Ohsaka, M., Sahara, I., Kato, T., Oshima, H., and Matsushima, M. 2025. Effect of biodegradable mulching plastics on soil chemical properties, greenhouse gas emission, and plant growth under aerobic and flooding conditions, *Soil Science and Plant Nutrition*, 71, 333-340. <https://doi.org/10.1080/00380768.2025.2465316>
- [66] Zhang, T., Somura, H., Akao, S., Nakahara, N., Perera, G.L.E.P., Nakano, C, and Maeda, M. 2024. Effects of aged microplastics on paddy soil properties and greenhouse gas emissions under laboratory aerobic conditions, *Soil Science and Plant Nutrition*, 70, 215-224. <https://doi.org/10.1080/00380768.2024.2439393>
- [67] Blackburn, K. and Green, D. 2022. The potential effects of microplastics on human health: What is known and what is unknown, *Ambio*, 51, 518-530. <https://doi.org/10.1007/s13280-021-01589-9>
- [68] O' Neill, J. 2016. Tackling Drug-Resistant Infections Globally: Final Report and Recommendations. Review on Antimicrobial Resistance. [https://amr-review.org/sites/default/files/160518\\_Final%20paper\\_with%20cover.pdf](https://amr-review.org/sites/default/files/160518_Final%20paper_with%20cover.pdf)
- [69] Van Boeckel, T.P., Glennon, E.E., Chen, D., Gilbert, M., Robinson, T.P., Grenfell, B.T., Levin, S.A., Bonhoeffer, S., Laxminarayan, R. 2017. DOI: 10.1126/science.aao1495
- [70] Zhang, L., Gu, J., Wang, X., Sun, W., Yin, Y., Sun, Y., Guo, A., Tuo, X. 2017. Behavior of antibiotic resistance genes during co-composting of swine manure with Chinese medicinal herbal residues. *Bioresour. Technol.*, 244, 252-260. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.035>
- [71] Katada, S., Fukuda, A., Nakajima, C., Suzuki, Y., Azuma, T., Takei, A., Takada, H., Okamoto, E., Kato, T., Tamura, Y., Usui, M. 2021. Aerobic Composting and Anaerobic Digestion Decrease the Copy Numbers of Antibiotic-Resistant Genes and the Levels of Lactose-Degrading Enterobacteriaceae in Dairy Farms in Hokkaido, Japan. *Front. Microbiol.*, 12. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.737420>
- [72] Ueki, A., Kaku, N., Ueki, K. 2018. Role of anaerobic bacteria in biological soil disinfestation for elimination of soil-borne plant pathogens in agriculture. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 102, 6309-6318. <https://doi.org/10.1007/s00253-018-9119-x>
- [73] Chen, Z., Fu, Q., Wen, Q., Wu, Y., Bao, H., Guo, J. 2022. Microbial community competition rather than high-temperature predominates ARGs elimination in swine manure composting. *J. Hazard. Mater.*, 423, 127149. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127149>
- [74] 佐伯和利・境雅夫・國頭恭 2010. 土壤生態系における細胞外 DNA 分子の挙動 :

- 第1部: 土壌および土壌構成物質へのDNA分子の吸着. 土と微生物, 64, 113-122.
- [75] Zhang, Y.-J., Hu, H.-W., Chen, Q.-L., Singh, B.K., Yan, H., Chen, D., He, J.-Z. 2019. Transfer of antibiotic resistance from manure-amended soils to vegetable microbiomes. *Environ. Int.*, 130, 104912.  
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.104912>
- [76] Li, H., Wang, X., Tan, L., Li, Q., Zhang, C., Wei, X., Wang, Q., Zheng, X., Xu, Y. 2022. Coconut shell and its biochar as fertilizer amendment applied with organic fertilizer: Efficacy and course of actions on eliminating antibiotic resistance genes in agricultural soil. *J. Hazard. Mater.*, 437, 129322. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129322>
- [77] 平井英明・赤羽幾子・森 圭子・藤間 充・浅野眞希・浅野陽樹・若林正吉 2022. 土壌教育の国際ガイドラインの理念と内容はこれだ! -持続可能な社会の創り手の育成に向けて-, 日本土壌肥料学雑誌, 93(5), 321-331.  
[https://doi.org/10.20710/dojo.94.5\\_419](https://doi.org/10.20710/dojo.94.5_419)
- [78] 大政謙次・阿尻雅文・北川尚美・青野光子編 2020. 持続可能な社会への道, p. 263. 日本学術協力財団, 東京. ISBN 9784990997236
- [79] 関礼子・井上真理子・太田和彦編 2025. 〈驚き (ワンダー)〉を呼び込む自然体験学習, p. 224. 昭和堂, 京都. ISBN 9784812224236
- [80] Kosaki, T., Lal, R. and Reyes Sanchez, L.B. (Eds.) 2020. *Soil Sciences Education - Global concepts and teaching*, p.198. Schweizerbart Publ. Co. Ltd., Stuttgart. ISBN 978-3-510-65523-6
- [81] Bouma, J. 2010. Implications of the knowledge paradox for soil science. *Advances in agronomy*, 106, 143-171.
- [82] 平井英明・篠崎亮介・星野幸一 2011. 小学校理科, 社会科および生活科の学習指導要領における土の取り扱い方の変遷と小学校理科における土の学習内容の提案. 日本土壌肥料学雑誌, 82. 52-57.
- [83] 文部科学省 2017a. 小学校学習指導要領 (平成 29 年告示).
- [84] 文部科学省 2017b. 中学校学習指導要領 (平成 29 年告示).
- [85] Menalled, U.D., Djuric, N., Smith, R.G., Baas, D.G., Basche, A., Haramoto, E.R., Park, D., Renner, K.A., Tully, K.L., Wortman, S.E. and Ryan, M.R. 2024. The Cover Crop Challenge: An experiential learning activity for teaching students about cover crop mixtures. *Natural Sciences Education*, 53(2), p. e70002. <https://doi.org/10.1002/nse2.70002>
- [86] McBratney, A.B., Field, D.J. & Koch, A. 2014. The dimensions of soil security. *Geoderma* 211, 203-213.  
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.08.013>
- [87] 日本土壌肥料学会土壌教育委員会編 2009. 『土をどう教えるか——現場で役立つ環境教育教材 (上・下巻)』 古今書院.

- [88] 福田直 2019. 『土壌リテラシーを育成育成する土壌教育の開発——幼少期から成人に至る生涯学習を視点として』 風間書房.
- [89] 農林水産省 2025. 「みどりの食料システム戦略」技術カタログ～現在普及可能な新技術 (Ver. 6.0) .  
<https://www.maff.go.jp/j/kanbo/kankyo/seisaku/midori/attach/pdf/catalog-78.pdf>
- [90] 農林水産省 2025. 「食料・農業・農村基本計画」(2025年4月11日閣議決定) .  
[https://www.maff.go.jp/j/keikaku/k\\_aratana/attach/pdf/index-61.pdf](https://www.maff.go.jp/j/keikaku/k_aratana/attach/pdf/index-61.pdf)
- [91] Mizuta, K., Grunwald, S., Phillips, M. A., Bacon, A. R., Cropper Jr, W. P., and Moss, C. B. 2021. Emergence of the Pedo-Econometric Approach. *Frontiers in Soil Science*, 1, 656591.  
<https://doi.org/10.3389/fsoil.2021.656591>
- [92] USDA NRCS 2025. Soil Health. <https://www.nrcs.usda.gov/conservation-basics/natural-resource-concerns/soil/soil-health>
- [93] USDA NASS 2025. Quick Stats. <https://quickstats.nass.usda.gov/>
- [94] USDA NRCS 2019a. Recommended Soil Health Indicators and Associated Laboratory Procedures. Soil Health Technical Note. 450-03.  
<https://www.naptprogram.org/files/naptpublications/method-papers/2019-nrcs-technote-450-03.pdf>
- [95] USDA NRCS 2019b. Applying Soil Health Management Systems to Reduce Climate and Weather Risks in the Northwest.  
<https://www.climatehubs.usda.gov/sites/default/files/Mngmt%20Systems%20Reduce%20Risks%20in%20the%20NW.pdf>
- [96] European Commission 2025. EUSO Dashboard.  
<https://esdac.jrc.ec.europa.eu/esdacviewer/euso-dashboard/>
- [97] Panagos, P., Jones, A., Lugato, E., Ballabio, C. 2025. A Soil Monitoring Law for Europe. *Global Changes.*, 9 (3) 2400336,  
<https://doi.org/10.1002/gch2.202400336>
- [98] European Soil Partnership 2025. European Parliament adopts first-ever Soil Monitoring Law. <https://www.europeansoilpartnership.org/container-fuer-news-auf-startseite/european-parliament-adopts-first-ever-soil-monitoring-law>
- [99] Council of the European Union 2024. General approach on the soil monitoring law. <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-11299-2024-INIT/en/pdf>
- [100] Wolf M., Schönthaler K., Ölmez C., Bosch & Partner GmbH, München 2024. Übersicht über Indikatoren in der bodenbezogenen Berichterstattung Deutschlands und der EU, TEXTE 23/2024, Umweltbundesamtes.

[https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/23\\_2024\\_texte\\_uebersicht\\_ueber\\_indikatoren.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/23_2024_texte_uebersicht_ueber_indikatoren.pdf)

- [101] Dewi, R. K., Huang, Q., Hashimi, R., Komatsuzaki, M. 2025. Enhancing agroecosystem sustainability: Integrative soil health strategies in regenerative organic soybean production on Andosol in Japan. *Geoderma Regional*, 40, e00910. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2024.e00910>
- [102] 小原洋・中井信 2004. 農耕地土壌の可給態リン酸の全国的変動. *日本土壌肥料学雑誌*, 75, 59-67.
- [103] 高田裕介・早野 美智子・森下 瑞貴・滝本 貴弘・小林 創平・望月 賢太・古賀 伸久・原 嘉隆 2025. 圃場一筆毎の肥効を見える化 - AI-土壌図と土壌環境APIの開発 -. *農研機構研究報告*, 2025 巻 20 号, 37-42.
- [104] 吉田重信 2025. 健康診断の発想に基づく土壌病害管理法「ヘソディム」農研機構研究報告, 20, 69-76. [https://doi.org/10.34503/naroj.2025.20\\_69](https://doi.org/10.34503/naroj.2025.20_69)
- [105] 門馬 法明 2017. 土壌還元消毒の普及の現状と今後の展望 *土と微生物*, 71(1): 24-28.
- [106] Wang, Y., Zou Q. 2024. Deep learning meta-analysis for predicting plant soil-borne fungal disease occurrence from soil microbiome data. *Applied Soil Ecology*, 202, 105532. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105532>
- [107] Takeuchi K., Ogiso, M., Morohoshi, T., Seo, S. 2023. Glutamate positively regulates chitinase activity and the biocontrol efficacy of *Pseudomonas protegens*. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 36(6), 323-333. <https://doi.org/10.1094/MPMI-09-22-0178-R>
- [108] 片山直樹・馬場友希・大久保悟 2020. 水田の生物多様性に配慮した農法の保全効果: これまでの成果と将来の課題. *日本生態学会誌*, 70, 201-215.
- [109] 粕渕辰昭・荒生秀紀・安田弘法 2019. 肥料や農薬に依存した現代農業への警鐘 - 江戸時代に開発された水田の多数回中耕除草法が意味するもの-. *土壌の物理性*, 141, 65-69. [https://doi.org/10.34467/jssoilphysics.141.0\\_65](https://doi.org/10.34467/jssoilphysics.141.0_65)
- [110] Namie, H., Shimada, K., Zhao, S., Sakaguchi, K., Toma, Y., Ishiguro, M., Hatano, R. 2025. Five-year assessment of multiple inter-tillage weeding on greenhouse gas emissions, rice yield, and carbon balance in organic rice farming in Hokkaido, Japan. *Agri. Ecosyst. Environ.*, 389, 109718. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2025.109718>
- [111] Takakai, F., Goto, M., Watanabe, H., Hatakeyama, K., Yasuda, K., Sato, T., Kaneta, Y. 2021. Application of lime nitrogen on methane and nitrous oxide emissions and rice growth of a high-yielding paddy field in a cool-temperate region in Japan. *Agriculture*, 11, 1298. <https://doi.org/10.3390/agriculture11121298s>

- [112] Itoh, M., Sudo, S., Mori, S., Saito, H., Yoshida, T., Shiratori, Y., Suga, S., Yoshikawa, N., Suzue, Y., Mizukami, H., Mochida, T., Yagi, K. 2011. Mitigation of methane emissions from paddy fields by prolonging midseason drainage. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 141, 359–372. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.03.019>
- [113] Zhao, C., Qiu, R., Zhang, T., Luo, Y., Agathokleous, E. 2020. Effects of alternate wetting and drying irrigation on methane and nitrous oxide emissions from rice fields: A meta-analysis. *Glob. Change. Biol.*, 30, e17581. <https://doi.org/10.1111/gcb.17581>
- [114] Gong, Y., Li, P., Lu, W., Nishiwaki, J., Komatsuzaki, M. 2021. Response of soil carbon dioxide emissions to no-tillage and moldboard plow systems on Andosols in a humid, subtropical climate, Japan. *Geoderma*, 386, 114920. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114920>
- [115] Abdalla, M., Hastings, A., Cheng, K., Yue, Q., Chadwick, D., Espenberg, M., ... and Smith, P. 2019. A critical review of the impacts of cover crops on nitrogen leaching, net greenhouse gas balance and crop productivity. *Global Change Biology*, 25(8), 2530–2543. <https://doi.org/10.1111/gcb.14644>
- [116] Wood, S. A., and Bowman, M. 2021. Large-scale farmer-led experiment demonstrates positive impact of cover crops on multiple soil health indicators. *Nature Food*, 2(2), 97–103. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00222-y>
- [117] Iheshiulo, E. M. A., Larney, F. J., Hernandez-Ramirez, G., Luce, M. S., Liu, K., & Chau, H. W. 2023. Do diversified crop rotations influence soil physical health? A meta-analysis. *Soil and Tillage research*, 233, 105781. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105781>
- [118] Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304(5677), 1623–1627. DOI: 10.1126/science.1097396
- [119] Bai, X., Huang, Y., Ren, W., Coyne, M., Jacinthe, P. A., Tao, B., Hui, D., Yang, J., Matocha, C. 2019. Responses of soil carbon sequestration to climate - smart agriculture practices: A meta - analysis. *Global Change Biology*, 25(8), 2591–2606. <https://doi.org/10.1111/gcb.14658>
- [120] Triplett, G.B., and Dick, W.A. 2008. No-Tillage Crop Production: A Revolution in Agriculture! *Agron J.*, 100, S153-S165. <https://doi.org/10.2134/agronj2007.0005c>
- [121] Lu, C., Yu, Z., Hennessy, D.A. Feng, H. Tian, H. Hui, D. 2022. Emerging weed resistance increases tillage intensity and greenhouse gas emissions in

- the US corn-soybean cropping system. *Nature Food*, 3, 266-274.  
<https://doi.org/10.1038/s43016-022-00488-w>
- [122] Vincent-Caboud, L., Casagrande, M., David, C., Ryan, M.R., Silva, E.M., and Peigne, J. 2019. Using mulch from cover crops to facilitate organic no-till soybean and maize production. A review. *Agron Sustain Dev.*, 39, 45.  
<https://doi.org/10.1007/s13593-019-0590-2>
- [123] Mirsky, S.B., Ryan, M.R., Curran, W.S., Teasdale, J.R., Maul, J., Spargo, J.T., Moyer, J., Grantham, A.M., Weber, D., Way, T.R., and Camargo, G.G. 2012. Conservation tillage issues: Cover crop-based organic rotational no-till grain production in the mid-Atlantic region, USA. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 27, 31-40.  
<https://doi.org/10.1017/S1742170511000457>
- [124] 金子信博 2023. ミミズの農業改革, みすず書房, pp203.
- [125] Vandermeer J. Van Noordwijk, M. Anderson, J. Ong, C. Perfecto, I. 1998. Global change and multi-species agroecosystems: Concepts and issues. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 67, 1-22.  
[https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(97\)00150-3](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(97)00150-3)
- [126] Dollinger, J., and Jose, S. 2018. Agroforestry for soil health. *Agroforestry Systems*, 92, 213-219. <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0223-9>
- [127] Mizuta, K., Grunwald, S., Phillips, M.A. 2018. New Soil Index Development and Integration with Econometric Theory. *Soil Science Society of America Journal*, 82(5), 1017-1032. <https://doi.org/10.2136/sssaj2017.11.0378>
- [128] Mizuta, K., and Grunwald, S. 2022. Reshaping How We Think about Soil Security. *Soil Systems*, 6(4), 74. <https://doi.org/10.3390/soilsystems6040074>
- [129] Minasny, B., Bandai, T., Ghezzehei, T.A., Huang, Y.C., Ma, Y., McBratney, A.B., Ng, W., Norouzi, S., Padarian, J., Sharififar, A. and Styc, Q. 2024. Soil science-informed machine learning. *Geoderma*, 452, 117094.  
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.117094>
- [130] Jenkinson, D.S. and Rayner, J.H. 1977. The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments. *Soil Science*, 123, 298-305. <https://doi.org/10.1097/00010694-197705000-00005>
- [131] 白戸康人 2018. 土壌炭素動態モデルを活用した農地土壌への炭素貯留の評価, 日本土壌肥科学雑誌, 89, 357-360.
- [132] 塚田祥文・鳥山和伸・山口紀子・武田 晃・中尾 淳・原田久富美・高橋知之・山上 睦・小林大輔・吉田 聡・杉山英男・柴田 尚 2011. 土壌-作物系における放射性核種の挙動. 日本土壌肥科学雑誌, 82, 408-418.
- [133] Manuel Delgado-Baquerizo, Angela M Oliverio, Tess E Brewer et al. 2018. A global atlas of the dominant bacteria found in soil, *Science* (2018)

- 19;359(6373):320–325. <https://doi.org/10.1126/science.aap9516>
- [134] Inoue, Y. 2020. Satellite- and drone-based remote sensing of crops and soils for smart farming - a review. *Soil Science and Plant Nutrition*, 66, 798–810. <https://doi.org/10.1080/00380768.2020.1738899>
- [135] Christian Rinke and Mária Džunková, Eds., 2025. *Single-Cell Omics in Microbiome Research*, Springer-Nature
- [136] Blanco-Canqui, H. 2021. Does biochar improve all soil ecosystem services?. *GCB Bioenergy*, 13, 291–304. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12783>
- [137] Lyu, H., Zhang, H., Chu, M., Zhang, C., Tang, J., Chang, S.X., Mašek, O., O, Y.S. 2022, Biochar affects greenhouse gas emissions in various environments: A critical review. *Land Degradation & Development*, 33, 3327–3342. <https://doi.org/10.1002/ldr.4405>
- [138] J-クレジット制度 2026. 方法論.  
<https://japancredit.go.jp/about/methodology/>
- [139] Swoboda, P., Döring, T.F., Hamer, M. 2022 Remineralizing soils? The agricultural usage of silicate rock powders: A review. *Science of the Total Environment*, 807, 150976. DOI:  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150976>
- [140] Yang, Y., Kosaka, G., Uchibayashi, H., Zhu, Y., Kuramochi, K., Shinano, T., Watanabe, T., Maruyama, H., Hamamoto, S., Nakao, A., Toma, Y. 2025. Enhanced CO<sub>2</sub> removal and improved carbon budget by enhanced rock weathering: a field experiment in Hokkaido, Japan. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 131, 47–64. <https://doi.org/10.1007/s10705-025-10414-8>
- [141] Nguyen, T.T., Sasaki, Y., Kakuda, K., Fujii, H. 2020a. Comparison of paddy soil fertility under conventional rice straw application versus cow dung compost application in mixed crop-livestock systems in a cold temperate region of Japan. *Soil Science and Plant Nutrition*, 66, 106–115. DOI:  
<https://doi.org/10.1080/00380768.2019.1677445>
- [142] Nguyen, T.T., Sasaki, Y., Kakuda, K., Fujii, H. 2020b. Comparison of the nitrogen balance in paddy fields under conventional rice straw application versus cow dung compost application in mixed crop-livestock systems. *Soil Science and Plant Nutrition*, 66, 116–124.  
<https://doi.org/10.1080/00380768.2019.1697856>
- [143] 文部科学省 2017a. 小学校学習指導要領 (平成 29 年告示).
- [144] 文部科学省 2017b. 中学校学習指導要領 (平成 29 年告示).
- [145] 平井英明・赤羽幾子・平井雅世 2017. 児童を対象とした土に関するアンケート調査の解析からみえた土壌教育の重要性-東京都 (板橋区、府中市) と栃木県 (大田原市, 市貝町) の調査データより-. *日本土壌肥料学雑誌*, 88. 205–212.

- [146] 藤間 充・種市 豊・長友義彦 2017. 土壌教育を考えるための土壌アンケート調査 - 山口市内の周辺環境の異なる3地区の小・中学校における事例 - . 日本土壌肥料学雑誌, 88. 527-537.
- [147] Bouma, J. 2022. Transforming living labs into lighthouses: a promising policy to achieve land-related sustainable development. *Soil*, 8, 751-759. <https://doi.org/10.5194/soil-8-751-2022>
- [148] Fausak, L. K. et al. 2024. Soil health - a perspective. *Frontiers in Soil Science*, 4, 1462428. <https://doi.org/10.3389/fsoil.2024.1462428>
- [149] Wood, S. A., & Blankinship, J. C. Making soil health science practical: guiding research for agronomic and environmental benefits. *Soil Biology and Biochemistry*, 172, 108776. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108776>
- [150] Gamache, G. et al. 2020. Can living labs offer a pathway to support local agri-food sustainability transitions?. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 37, 93-107. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2020.08.002>
- [151] Ewert, F., Baatz, R. & Finger, R. 2023. Agroecology for a sustainable agriculture and food system: from local solutions to large-scale adoption. *Annual Review Resource Economics*, 15, 351-381. <https://doi.org/10.1146/annurev-resource-102422-090105>
- [152] Agroecology Partnership 2025. Network of Living Labs and Research Infrastructures -<https://www.agroecologypartnership.eu/networkofllsandris>
- [153] European Commission 2025. EUSO Dashboard. <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/esdacviewer/euso-dashboard/>
- [154] Alexoaei, P. A., Robu, R. G., Cojanu, V., Miron, D. and Holobiuc, A. -M. 2022. Good practices in reforming the common agricultural policy to support the European Green Deal: A perspective on the consumption of pesticides and fertilizers, *Amfiteatru Economic Journal*, ISSN 2247-9104, The Bucharest University of Economic Studies, Vol. 24, Iss. 60, pp. 525-545, <https://doi.org/10.24818/EA/2022/60/525>
- [155] Umbach, G. 2024. Open Science and the impact of Open Access, Open Data, and FAIR publishing principles on data-driven academic research: Towards ever more transparent, accessible, and reproducible academic output? *Statistical Journal of the IAOS*, 40, 59-70. <https://doi.org/10.3233/SJI-240021>
- [156] Tardieu, H. 2024. Chapter 4 Role of Gaia-X in the European Data Space Ecosystem, in *Designing Data Spaces The Ecosystem Approach to Competitive Advantage*, Ed. Otto B., ten Hempel M., Worbel. 41-58, [https://doi.org/10.1007/978-3-030-93975-5\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-93975-5_4)
- [157] Brizuela, J. G., Scharfenberg, C., Scheuner, C., Hoedt, F., König, P.,

Kranz, A., Leidel, A., Martini, D., Schneider, G., Schneider, J., Singson, L. S., von Waldow, H., Wehrmeyer, N., Usadel, B., Lesch, S., Specka, X., Lange M. and Arend D. 2024. A roadmap for a middleware as a federation service for integrative data retrieval of agricultural data. Journal of Integrative Bioinformatics, 21(3): 20240027. <https://doi.org/10.1515/jib-2024-0027>

[158] Melzer, M., Bellingrath-Kimura, S.D. and Gandorfer, M. 2023. Commercial farm management information systems - A demand-oriented analysis of functions in practical use. Smart Agricultural Technology, 4, 100203. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100203>

## <参考資料 1> 審議経過

令和6年

3月4日 農学委員会土壌科学分科会（第26期・第1回）

- ・今期の課題を「Soil Health」とし、「意思の表出」を行うことを確認した。
- ・「Soil Health」について各委員が話題提供し意見交換する懇談会を開催することとした。
- ・議論を深めるために、Soil Health小委員会を設置することとした。
- ・植物科学分科会など他分科会との連携も検討することとした。

5月13日から隔週月曜日にオンラインで8回、Soil Health懇談会（各委員による土壌の健康に関する話題提供と意見交換）を開催した。

9月5日 農学委員会土壌科学分科会（第26期・第2回）

- ・Soil Health懇談会のまとめを行った。
- ・Soil Health小委員会の設置について、土壌科学分科会とIUSS分科会の役員に加えて外部委員数名を推薦することとした。
- ・次年度公開シンポジウムを開催し、その後26期末までに意思の表出を行うこととした。

11月4日、7日、19日、27日 Soil Health小委員会に招聘した5名の外部委員（金子信博氏、小松崎将一氏、水田勝利氏、森圭子氏、若林正吉氏）による土壌の健康に関する話題提供と意見交換を行い、「意思の表出」案の検討を行った。

令和7年

1月7日 農学委員会土壌科学分科会 Soil Health小委員会（第26期・第1回）

- ・「意思の表出」の検討を行い、原案を作成し分科会へ報告することとした。
- ・次年度公開シンポジウムについて検討した。

3月6日（午前） 農学委員会土壌科学分科会（第26期・第3回）

- ・意思の表出についてSoil Health小委員会での検討を経て作成された原案の検討を行った。
- ・タイトルを「Soil Health（土壌の健康）：国民的理解と持続可能な管理のイノベーションの推進」とした。
- ・土壌科学分科会、IUSS分科会及び植物保護分科会の3分科会から合同で提出することとした。

3月6日（午後） 農学委員会・食料科学委員会合同IUSS分科会（第26期・第4回）

- ・次年度公開シンポジウムのテーマを「Soil Healthとは？：土壌の健康の理解・維持向上・共有」とし、7月26日に学術会議講堂において土壌科学分科会、日本土壌肥料学会と共同で開催することとした。
- ・意思の表出「Soil Health（土壌の健康）：国民的理解と持続可能な管理のイノベーションの推進」を審議し了承した。

3月25日 日本学術会議事務局へ「意思の表出」の「骨子」を提出。

- 3月26日 農学委員会土壌科学分科会委員長の波多野が農学委員会農学分科会において「土壌学の視点から－Soil Health－」と題して、意思の表出の背景を説明。
- 4月14日 科学的助言等対応委員会より、意思の表出のカテゴリー（提言、見解、報告）のうち「報告」が妥当であるとの回答があった。理由として、テーマの重要性は認めるものの専門家間の連携にとどまっており、「提言」とするにはさらなる幅広い分野との情報交換を行い意見を集約することが望まれるとのことであり、この助言に基づいて「報告」を執筆することにするとともに、第一部の教育学及び法学並びに第三部の環境学の専門家に意見を求めることにした。
- 5月9日 農学委員会土壌科学分科会委員長の波多野が農学委員会植物保護科学分科会において「土壌学の視点から－Soil Health－」と題して、意思の表出の背景を説明。
- 7月23日 農学委員会土壌科学分科会 Soil Health 小委員会（第26期・第2回）
- ・第三部会員三枝信子日本学術会議副会長から「学術の社会還元」の講演をいただき、「土壌の健康」の社会還元について意見交換を行った。
  - ・「Soil Health（土壌の健康）：国民的理解と持続可能な管理のイノベーションの推進」目次案と執筆者を検討した。
  - ・公開シンポジウム「土の教育はじめませんか？」を企画することとした。
- 7月25日 農学委員会土壌科学分科会（第26期・第4回）；農学委員会・食料科学委員会合同 IUSS 分科会（第26期・第5回）合同会議
- ・公開シンポジウム「Soil Health とは？：土壌の健康の理解・維持向上・共有」の会場設営の状況、発表者ファイル収集状況を含めた準備状況を確認した。
  - ・Soil Health（土壌の健康）：国民的理解と持続可能な管理のイノベーションの推進」の目次案と執筆者を検討した。
- 7月26日 公開シンポジウム「Soil Health とは？：土壌の健康の理解・維持向上・共有」を学術会議講堂において開催した。
- 9月18日 農学委員会土壌科学分科会（第26期・第5回）
- ・公開シンポジウム「Soil Health とは？ 土壌の健康の理解・維持向上・共有」の開催報告があった。
  - ・意思の表出の目次案について項目、執筆者、執筆分量を決定した。
  - ・公開シンポジウム「土の教育はじめませんか」を11月29日（午前）にハイブリッド開催することとした。
- 10月10日 農学委員会土壌科学分科会 Soil Health 小委員会（第26期・第3回）
- ・第一部会員西岡加名恵委員から「学校における「土の教育」の可能性」の講演をいただき、意見交換を行い、意思の表出に提案を盛り込むこととした。
- 11月20日 農学委員会土壌科学分科会 Soil Health 小委員会（第26期・第4回）
- ・第一部会員川嶋四郎委員から「「土と法」の世界について 一法は「土壌の健康」に寄与できるか？」の講演をいただき意見交換を行い、意思の表出に提案を盛り込むこととした。

11月29日 公開シンポジウム「土の教育」はじめませんか？」をオンラインにより開催した。

12月2日 農学委員会土壌科学分科会 Soil Health 小委員会（第26期・第4回）

- ・第三部会員森口祐一氏から「環境学からみた土壌－原発事故、気候変動との関わり－」の講演をいただき、土壌の健康に関する意見交換を行った。

## <参考資料2> 公開シンポジウム開催（1）

- 1 名称：Soil Health とは？ 土壌の健康の理解・維持向上・共有
- 2 日本学術会議側の主催者：農学委員会土壌科学分科会、農学委員会土壌科学分科会 Soil Health 小委員会、農学委員会・食料科学委員会合同 IUSS 分科会
- 3 その他の主催団体等：
  - ・主催：（一社）日本土壌肥料学会
  - ・後援：日本土壌微生物学会，日本ペドロロジー学会，他 16 学会・団体
- 4 開催日時：令和 7 年 7 月 26 日（土）10:00～17:00
- 5 開催場所：日本学術会議講堂

### 6 開催趣旨：

土壌は陸域のすべての生態系を支える基盤である。すなわち、食料生産の場であるとともに、土地利用を支える植物栄養の供給と循環、生物多様性、水の浄化、気候制御など環境を調整し、地域の景観の基盤として文化を支えるサービスを提供している。人類は良質な作物を多量に安定的に収穫するための農業生産技術を開発し、土壌が提供するサービスを過剰に搾取し続けてきた。しかし、食料安定供給の代償として、生物多様性の喪失、土壌有機物の消耗、水質汚濁や富栄養化、温室効果ガスの排出、アンモニア揮散、NO<sub>x</sub> や SO<sub>x</sub> の排出、土壌侵食や土壌圧縮、塩類化等の土壌劣化が世界中で顕在化している。すなわち、日本を含む世界中のさまざまな地域で土壌の健康が損なわれている。本シンポジウムでは、この事実を認識し、将来の土壌の健康の維持向上のための道筋を次のテーマにおいて議論する。

1. 土壌の健康とは？
  2. 土壌の健康を向上させるイノベーション
  3. 土壌の健康を共有するために
- ### 7 参加人数：
- 講演者等：25 名（講演者 13 名、司会・座長等 6 名、会場スタッフ 6 名）  
その他の参加者：現地参加者 95 名、オンライン同時参加者数 383 名

### ＜参考資料3＞ 公開シンポジウム開催（2）

- 1 名称：「土の教育」始めませんか？
- 2 日本学術会議側の主催者：
  - ・農学委員会土壌科学分科会
  - ・共催：農学委員会土壌科学分科会 Soil Health 小委員会
- 3 その他の主催団体等：
  - ・共催：京都大学大学院教育学研究科教育実践コラボレーション・センターE. FORUM
  - ・後援：（一社）日本土壌肥料学会
- 4 開催日時：令和7年11月29日（土）10:00～12:00
- 5 開催場所：オンライン
- 6 開催趣旨：

皆様は4パーミル・イニシアティブをご存知でしょうか？4パーミル・イニシアティブとは、「世界の土壌の表層の炭素量を年間0.4%（4パーミル）増加させることで、人間の経済活動によって発生する大気中の二酸化炭素を実質ゼロにすることができるという考え方に基づく国際的な取り組み」（農林水産省HP）です。また、「植生を中心とし土壌を環境要素の一つとして、それらの相互作用系を考える生態系の概念」に対し、「土壌を中心に置き、植生をも含めた環境要素の間の相互作用が土壌を生成するという現代の土壌観」が提唱されています（久馬一剛「土壌とは何か」同編『最新土壌学』。朝倉書店、1997年、p.8）。このように、「土壌」には、私たちの世界の見え方を転換させてくれる面白さがあります。しかし、学習指導要領で、「土」が扱われる場面は極めて限られています。そこで、この度、「土の教育」に関心をもつ先生方と、土壌学の専門家の先生方との間で、「土」をどのように教材化していくことができるのかに関して、共同研究する会を立ち上げることにいたしました。本公開シンポジウムは、広く一般の方々参加の下、第1回研究会を兼ねた形式で「土の教育」を議論することにしております。

- 7 参加人数：
  - 講演者等：5名（講演者4名、司会1名）
  - その他の参加者：オンライン参加者 118名