

コロナ禍で見たホリスティックで学際的な土壌科学

波多野隆介*

〔キーワード〕：土壌科学，土壌の健康，飢餓，炭素隔離，循環経済

1. はじめに

COVID-19 パンデミックによる食料サプライチェーンの分断による飢餓の増加，教育機会の低下は，社会システムの見直しとSDGs達成の重要性を改めて気づかせた．生命を支える要である土壌を考えると，健康な食料を高度な方法で生産するだけでなく，水質，エネルギー利用，温室効果ガス排出，炭素隔離，生物多様性保全など環境への配慮の重要性にも気付かされる．パンデミックの克服は土壌科学の最重要課題であり，持続可能な地域社会形成のために必要な取り組みとその実行方針の提示に貢献しなければならない．

本稿は，国際土壌科学連合(IUSS)の理事メンバーが取りまとめた総説^[1]を中心に，必要に応じて関連するトピックスを補足したものである．

2. COVID-19 パンデミックと土壌科学

COVID-19 パンデミックのために食料価格は2019

年3月と比較して，1年後には小麦の価格が8%上昇し，米の価格が25%上昇し，貧困層に大きな影響を与えた．世界の飢餓人口は2005年の8億1070万人(全体の12.4%)から漸減し2019年には6億5000万人(8.4%)となっていたが，2020年は7億6800万人(9.9%)に一気に増加した．これらはアジア(4億1800万人)とアフリカ(2億8200万人)で90%以上を占める^[2]．また，COVID-19 パンデミックによる学校閉鎖により，ピーク時には16億人が教育機会を失い，この世代には将来最大10兆ドルの収益損失があると見積もられている^[3]．

人の健康は片方でCOVID-19 パンデミックに接し，もう一方では土壌の健康と機能に接している(図1)．パンデミックにより人の生活が脅かされると，適切な土壌管理ができなくなり，土壌の健康と機能が劣化する．そして，環境負荷が増加し，気候変動の影響を回避できないという危険性が高まる．COVID-19 パンデミックは，飢餓を助長し，生態系サービスを損ない持続可能性を脅かす．その意味でコロナ禍は土壌科学が配慮すべき最大の懸念である．

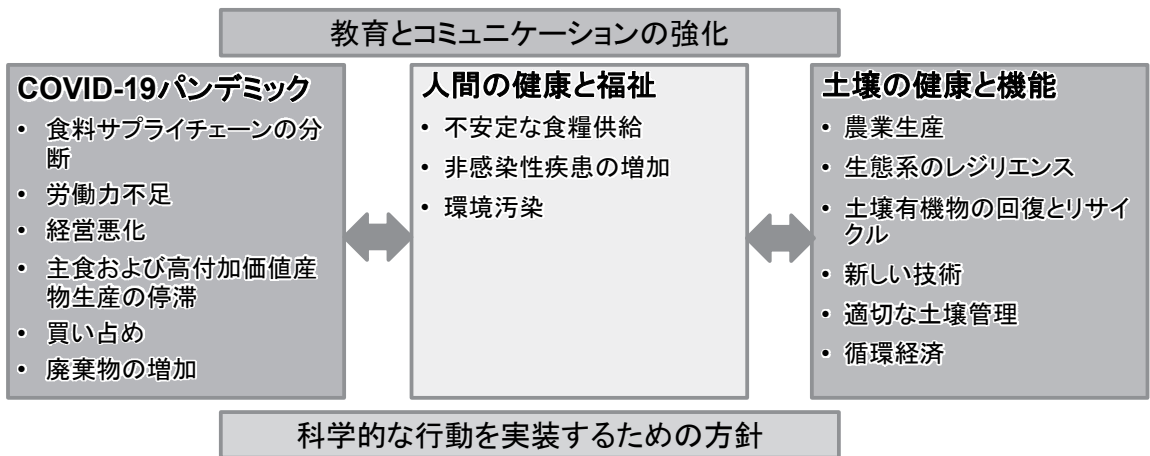


図1 人の健康は片方でCOVID-19のパンデミックに接し，もう一方では土壌の健康と機能に接している Lalら^[1]から作成．

COVID-19 パンデミックからの回復を確かなものにするには、地域の食料システムのストレスからの回復力—すなわちレジリエンス—の強化が不可欠である。新しい農業技術の開発により適切な土壌管理と循環経済の確立を進めていくことが肝要である。土壌科学は教育とコミュニケーションを通して科学的な行動を社会実装する方針を確立している。本稿では土壌の健康、土壌ウイルスと人間の健康、食料安全保障、循環経済、COVID-19 パンデミックを超えた土壌管理と土壌科学、および土壌科学の社会実装について述べる。

3. 土壌の健康

FAO は「土壌の健康とは、生態系や土地利用の区切りにおいて、植物と動物の生産性を維持し、水と空気の質を維持または向上させ、植物と動物の健康を促進する、生きたシステムとして機能する土壌の能力」と定義している^[4]。土壌の健康は人間活動に強く影響を受ける一方、人間活動は COVID-19 パンデミックに大きな影響を受けた(図2)。そのためにパニック買いや市場閉鎖などサプライチェーンの混乱が生じたのである。そして、食料生産活動と消費活動の両者を低下させた。農地管理がおろそかに

なり、土壌の健康と生態系サービスが劣化し、食料生産量を低下させ消費活動を衰退させ、水質汚濁を引き起こし漁業、生活用水、飲用水を悪化させ、人間活動に悪影響を及ぼす。このように COVID-19 パンデミックは人間活動に負のフィードバックを及ぼしている。

健康な土壌は、高いレジリエンスを持つ。土壌のレジリエンスが、持続可能な土地利用を可能にし、食料供給とその他の生態系サービスを可能にし、高い人口扶養力を発揮する。土壌は、生物生産を維持し、環境の質を維持し、植物、動物、人間の健康を促進するシステムである。その土壌の能力を持続するには、土壌が健康でなければならない。

土壌の健康の科学はまだ開発途上であるが、土壌特性のうち生物性と生態性を中心に評価することが提案されている(図3)^[5]。土壌の質は土壌の物理性、化学性、生物性および生態性により特徴づけられ、土壌の機能と生態系サービスを決定づけている。土壌の機能が相互作用する因子には、1) 土壌固有の内因的特性、2) 気候、景観、その他生物的・非生物的要因に関連する外因的要因(外因性)、3) 干ばつ洪水に関わる土壌の水関連の問題、4) 社会、経済、環境および利用可能性に関わる人間的な側面

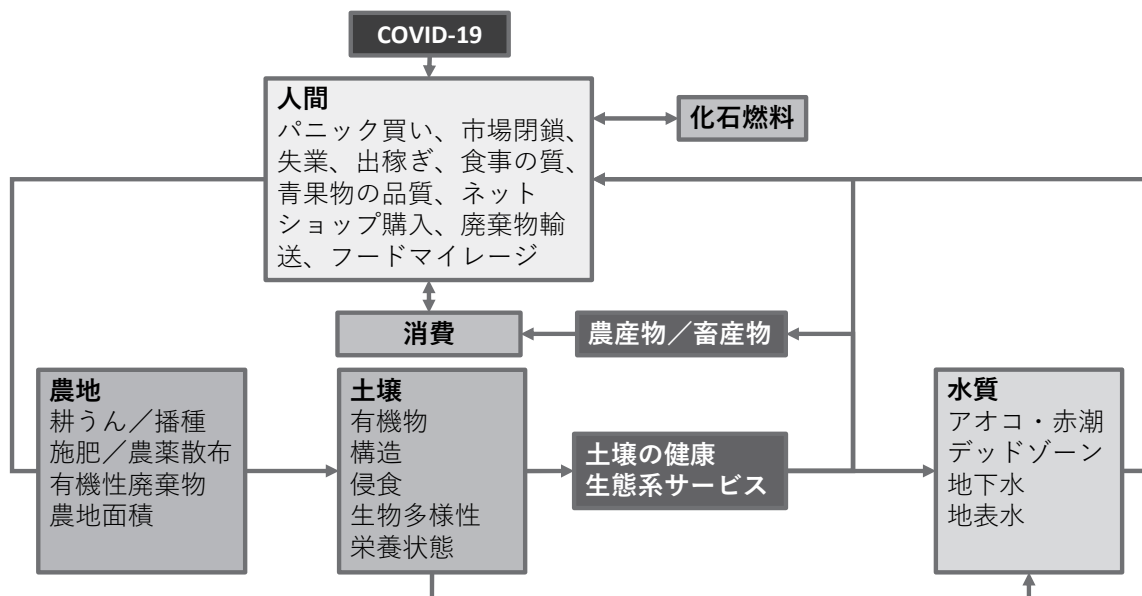


図2 COVID-19 パンデミックの人間活動への影響は、土壌の健康、生態系サービス、水質へ影響し人間活動へフィードバックする Lal ら^[1] から作成。

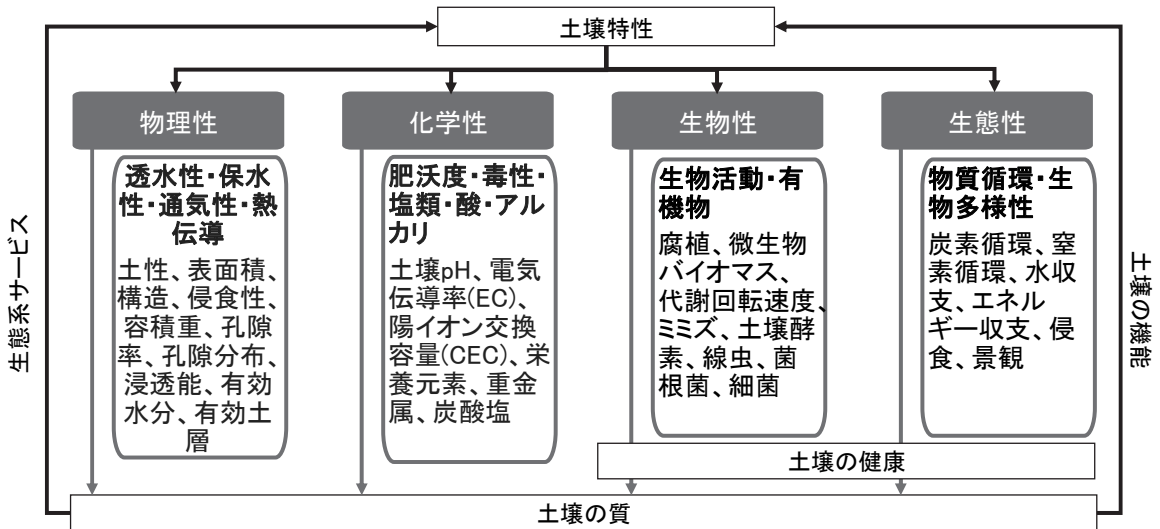


図3 土壌の健康は生物性と生態性に特徴づけられ、生態系サービスと土壌の機能へ影響する Lal ら^[5]から作成。

がある。これらの因子のいずれかが引き金となって、土壌の機能に影響すると、すべての因子にその影響が及ぶ。とくに土壌有機物は保水性、透水性を高め、化学性を安定にし、大気から炭素を隔離し、植物栄養を貯蔵し供給するなど土壌の機能の重要な要となっている。

土壌有機物は、植物の光合成と微生物の分解による炭素収支の結果として生じる。すなわち土壌有機物の消耗を回復し増加させるためには、土壌への有機物投入量を増加させることと過度の有機物分解を抑制することが必要である。このためには、不耕起やマルチなどの保全農法の適用、有機質肥料やバイオチャーの施与、荒地の修復、作物栽培と家畜飼養、樹木生産、都市生態系保全、バイオ燃料生産の複合システムなどの構築が有効である。これらの実践のために有機農業、アグロフォレストリー、生態系修復、基盤整備などの技術が開発されてきた。

土壌有機物の消耗を修復することで、土壌の健康を増進しレジリエンスを高めようとしているのである。COVID-19 パンデミックによる不適切な人間活動が土壌の健康を阻害し土壌のレジリエンスを劣化させる。そのことが人間の健康と福祉を劣化させることを認識しなければならない。

4. 土壌ウイルスと人間の健康

Robert Koch (1870) が、土壌に生息する炭疽菌が

炭疽症の原因であることを示し、Luis Pasteur (1880) が、ミミズが炭疽菌胞子を土壌表面に運ぶことを示したことが、土壌が人間の健康を害することがあることを示した最初の発見であったとされる。肝炎、胃腸炎、呼吸器疾患、ポリオ、髄膜炎、天然痘などのさまざまな病気を引き起こすウイルスはすべて生物性廃棄物を介して土壌から発見されている。土壌におけるウイルスの生存は、土壌温度、含水量、土壌粒子へのウイルス吸着、水溶性リン、交換性アルミニウム、土壌 pH に影響を受けことが知られている。一般に土壌ウイルスは乾燥に強く、ほこりに吸着し呼吸器疾患を増加させる。モンモリロナイトはプリオンの伝染性を高めることなども知られている。

土壌とそれに接する環境媒体における COVID-19 ウイルスの潜在的な生存性と伝染性、および土壌の特性や環境条件との関係評価は、人間の健康と土壌の健康の連関について認識を高め、土壌を管理する方法を構築するために重要であり、今後の課題である。

5. 食料安全保障

FAO は「食料安全保障とはすべての人々が常に、活動的で健康的な生活をするために必要な食事を、十分に嗜好を満たし安全で栄養価の高い食品に物理的、社会的、経済的にアクセスできる状況を保障

すること」と定義している^[6]。

COVID-19 パンデミックは、移動制限や国境閉鎖のために地域の食料の生産と消費を著しく制限し食料安全保障を損なわせた。さらに土壌の健康と生態系サービスに影響を及ぼし、人間の健康に影響を及ぼしている。工業先進化による都市化はパンデミック以前から農地を減少させ人口を増加させることによる飢餓の大きな原因であり、サプライチェーン由来の温室効果ガス排出が増加し、気候変動にも大きな影響を及ぼすまでになっている^[7]。COVID-19 パンデミックはあらためて地域の食料安全保障の構築の重要性を気付かせている。

作物生産には栄養元素の確保が必須である。COVID-19 パンデミックによる国境閉鎖は肥料の輸入を制限するため、その利用効率の向上が不可欠である。このことは、地域における利用可能なすべての有機肥料の持続的な利用が環境保全とともに食料安全保障の達成に重要であることを示している。高度に品質管理された有機肥料は、広範な循環経済に貢献する。リン肥料の輸入を削減することは、土壌への有害重金属汚染防止にも役立つ。過剰な窒素化学肥料施与を削減することは、硝酸塩の溶脱による飲用水汚染や水圏の富栄養化、大気圏へのアンモニア揮散とその降下物による土壌の酸性化、窒素酸化物排出による光化学スモッグや、亜酸化窒素排出による温暖化や成層圏オゾン層の破壊を抑制する。地域における肥料の利用効率の向上は環境負荷の低減に寄与する。

現在の食料システムは温室効果ガス排出、土地利用、水利用、窒素施肥、リン施肥を通して地球環境に大きなインパクトを与えている。とくに温室効果ガス排出、窒素施肥、リン施肥はすでに地球の環境容量 (Planetary Boundary) を超えており、なにも対策を行わなければ、そのインパクトは 2050 年までに現在の 150-190% に増加する。その改善には食品ロスと廃棄物の削減、食料生産技術の向上、食餌改善が有効であり、それらを同時に行った場合には現在の 50-90% にまでインパクトを軽減できると予想されている^[8]。

地域の食料安全保障を確固たるものにするには、地域の循環経済の確立に知恵を絞る必要があることは明らかである。

6. 循環経済

循環経済は、資源の減価償却を最小限に抑え、資源の回収、再利用、または転用を通じて環境への排出を減らすことにより、資源の利用を最大化するものである^[9]。

COVID-19 パンデミックによるパニック買いや流通制限は、生産物の品不足と廃棄物の潜在的増加を引き起こしており、循環経済の強化が必要である。すなわち、地域の食料生産システムのレジリエンスをどのように向上させるか？食料および生産資源の外部依存を減らし自給率をどのように上げるか？食品ロスによる廃棄物をどのように減らすか？に答える必要がある。

有機性廃棄物、作物残渣を栄養元素の資源として有機肥料にして地域農業に適用し循環経済を確立する。これにより化学肥料の施与量を削減し、有機性廃棄物を減らして環境負荷を抑制する。循環経済により肥料の外部依存度を下げ、サプライチェーンの混乱や価格変動に対する養分供給に関する脆弱性を軽減する戦略である。

生態系サービスの維持の観点からは、多様性の無い工業型農業からより多様な自然生態系を重視する農業へのパラダイムシフトが必要である。持続可能性における経済的、環境的、社会的側面を調和させる農業が望まれる。その例として「テラプレタ」(人為的黒土)がある。テラプレタは熱帯雨林における風化が進んだフェラルソル地帯に点在する黒色土壌である。その成因は、無機物(灰、骨)および有機物(有機性廃棄物、堆肥、バイオ炭など)の施与によるフェラルソルの改良であり、厚いA層が形成されている。テラプレタは陸域生態系の長期的な炭素隔離の例として、その管理は持続可能な農業のモデルとして参考になる^[10]。

土壌は物質循環過程において腐植と粘土鉱物が自生することで生成される。腐植と粘土鉱物は塩基置換容量(CEC)を持ち、塩基性陽イオンを吸着し、粒団を安定にする。すなわち土壌の養分供給、保水と透水、通気を良好にし、土壌微生物活動と植物生育を良好にする。とくに腐植のCECは酸を緩衝し、土壌の酸性化を防ぐ。土壌の酸性化は、植物栄養供給のアンバランス、有害物質の溶出がよく知られている。化学肥料のみで栽培すると、経年的に土壌 pH

の低下が起こるが、堆肥を施与した土壌では pH 低下は見られない^[11]。窒素施肥した土壌は pH が 5.5 以下になると亜酸化窒素排出量が増加することも認められている^[12]。堆肥のペレット化によりハンドリングを向上させることができるが、ペレット化は亜酸化窒素排出量を増加させることがジレンマであった。窒素付加した堆肥ペレットは亜酸化窒素排出をペレット化していないレベルまで軽減できることも報告されている^[13]。

7. COVID-19 パンデミックを超えた土壌管理

人類は気候変動、環境汚染による複合的な問題により生態系サービスが劣化あるいは消失するという世界的危機に直面している。それに加えて COVID-19 パンデミックが問題を拡大させた。これらの危機は (i) 土地利用方針の断片化、(ii) 環境問題と農業問題への対応の連携不足 (iii) 土壌特性とプロセスに関する地理空間的知識不足により助長されてきた。地域の生態系サービスを維持するには、環境保全すべき土地と持続可能な生物生産を行う土地の利用計画と管理を一元的に行う必要がある。EU では、そのことを可能にする Web ベースの地理空間意思決定支援システム (S-DSS) の開発を進めている。我が国でもデジタル土壌図が整備され、スマートフォンを利用して、地域の土壌と作物に適量な施肥管理を地図上で検索できるなどの技術開発が進められている。さらに有機物管理のアプリも開発されてきている^[14]。地域の循環経済を進めるための技術開発が進んでいる。

8. COVID-19 パンデミックを超えた土壌科学

COVID-19 パンデミックは地域を分断するため、小規模な家族経営の農村への影響が大きく、脆弱地帯での気候変動や環境負荷の抑制や、生態系サービスや土壌機能の修復に関する対策と支援強化が必要である。

その適切な対策のためには、地球レベルでの地理空間意思決定システムを自由に利用できるように必要がある。地理情報およびモデルパラメータのデータベースの構築や、土壌の物理性、化学性、生物性、生態性の特性を高精度で迅速に分析するための手法開発も必要である。COVID-19 ウイルスの伝播予測や、影響を与える土壌特性についても整備

していく必要がある。科学者のグローバルな協力関係が必要である。

パンデミック下の学校教育のために、オンライン教育教材を充実することも大事である。土壌調査、土壌分析実習のエキスパート養成のための実践的な訓練と経験をより効率的に向上させるプログラムの開発を進めていく必要がある。

9. 土壌科学の社会実装

COVID-19 パンデミックは土壌の重要性を改めて気付かせた。気候変動の影響が拡大するなか、世界的に土壌の劣化を食い止め土壌のレジリエンスを向上させるための国連の取り組みが進められている。すなわち、i) パリ COP21 における地球温暖化を緩和のための土壌炭素隔離「4 パーミル」グローバルイニシアチブ、ii) マラケシュ COP22 におけるイニシアチブ「アフリカ農業の環境変動への適応」、iii) マドリッド/チリ COP25 における農業における気候変動取り組みプラットフォーム (PLACA)、iv) グラスゴー COP26 における家庭菜園と都市農業に基づく食料生産システムの強化である。これらに呼応して、合衆国では“reThink Soil”：米国の土壌の健康のためのロードマップ、イングランドでは土壌の健康行動計画 (SHAPE)、欧州ではグリーン・ディールの成果として EU 行動計画「大気・水・土壌の汚染ゼロに向けて」を採択した。日本ではみどりの食料システム戦略が計画されてきている。

土壌炭素隔離「4 パーミル」は、世界中で土壌炭素を深さ 30cm まで年間 4 パーミル (0.4%) 増加させると、年間大気中で増加する 4GtC の炭素をすべて吸収できることに基づいた世界規模のプロジェクトである。深さ 2m までの土壌炭素を年間 4 パーミル増加させることができれば、人為起源の年間炭素排出量 8.9GtC がすべて吸収できる。土壌炭素隔離「4 パーミル」は、不耕起、残渣マルチ、統合栄養管理、カバークロップなどの保全農法を適用すると、保全農法の実施開始から 20 年間は 4 パーミル以上の土壌炭素含有率の増加が認められたことに基づいて計画されている^[15]。世界各地が土壌炭素の隔離技術を実践することを目指している。

地域では、農家への COVID-19 パンデミックの影響についての注意喚起が大事である。パンデミックは、食料サプライチェーンを分断するため、不規則

な食料生産、農産物の廃棄、日和見的な土壌管理が誘発され、土壌の健康を阻害する可能性が高く、とくに特産物に生計を頼るような小規模な農村ほど影響を受けやすいと考えられる。地域の循環経済の構築を早急に進めることが大事である。一般市民は食料の消費者であり、生態系サービスの受益者である。したがって、一般市民への土壌管理への理解を深め、パニック買いを控えて循環経済の構築に協力してもらえ情報発信を強化する必要がある。

有機肥料の利用は循環経済の構築のポイントであり、その効果がどのようなものであるかを明らかにし、社会全体の理解を得るようにしていく必要がある。有機肥料には堆肥、スラリー、消化液の3種があるが、いずれも温室効果ガス排出を抑制し、炭素貯留を促進し、収量を低下させることなしに化学肥料を削減できることが認められる^[16]。とくに消化液はスラリーを嫌氣的発酵させバイオガスを得た後の液体であり、悪臭がなく散布できる優れた有機肥料である。北海道施肥ガイド^[17]には有機肥料別、作物別の施与量と施与方法が提示されている。さらなる普及が期待される。

10. おわりに

COVID-19 パンデミックは人間活動を攪乱し、飢餓を増加させ、子供の教育機会を低下させた。飢餓の増加は、土壌の管理の不適切さによる、作物生産と生態系サービスの低下によるものであり、気候変動や水質汚濁などによる問題を増長させることが懸念される。適切な土壌管理と循環経済を土壌科学に基づいて社会実装することが大事である。その強化はSDGs2（飢餓をゼロに）、3（すべての人に健康と福祉を）、6（安全な水とトイレを世界中に）、13（気候変動に具体的な対策を）、15（陸の豊ゆたかさを守ろう）、17（パートナーシップで目標を達成しよう）に直接貢献すると考えられる^[18]。

引用文献

- [1] Lal, R. et al. Managing soils for recovering from the COVID-19 pandemic. *Soil Syst.*, 2020, 4(3), 46.
- [2] FAO, IFAD, UNICEF, WFP, WHO. The state of food security and nutrition in the world 2021. Rome, FAO.
- [3] World Bank. COVID-19 could lead to permanent loss in learning and trillions of dollars in lost earnings. PRESS RELEASE, NO: 2020/228/EDU.
- [4] FAO. An international technical workshop Investing in sustainable crop intensification The case for improving soil health. *Integrated Crop Management Vol.6*, 2008. FAO, Rome
- [5] Lal, R. Soil health and carbon management. *Food Energy Secur.* 2016, 5, 212-222.
- [6] FAO. Declaration on world food security. World Food Summit 1996, Rome
- [7] Crippa, M. et al. Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions. *Nature Food* 2021, 2, 198-209.
- [8] Springmann, M. et al. Options for keeping the food system within environmental limits. *Nature* 2018, 562, 519-525.
- [9] Geissdoerfer, M. et al. The circular economy - A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production* 2017, 143, 757-768.
- [10] Glaser, B. and Birk, J.J. State of the scientific knowledge on properties and genesis of Anthropogenic Dark Earths in Central Amazonia (terra preta de índio). *Geochim. Cosmochim. Acta* 2012, 82, 39-51.
- [11] Jin, T. et al. Effect of chemical fertilizer and manure application on N₂O emission from reed canary grassland in Hokkaido, Japan. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2010, 56, 53-65.
- [12] Mukumbuta et al. Nitrous and nitric oxide emissions from a cornfield and managed grassland: 11 years of continuous measurement with manure and fertilizer applications, and land-use change. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2017, 63, 185-199.
- [13] 山根剛 他. 牛ふん堆肥ペレットへの尿素および微量の石灰窒素添加が土壌からの一酸化二窒素発生に及ぼす影響. *土肥誌*, 2017, 88, 5, 413-419.
- [14] 農研機構農業環境変動研究センター. 日本土壌インベントリー. 土壌管理アプリ集. 2019. <https://soil-inventory.dc.affrc.go.jp/main/menu/static/>
- [15] Minasny B. et al. Soil carbon 4 per mille. *Geoderma* 2017, 292, 59-86.
- [16] Kitamura, R. et al. Effects of three types of organic fertilizers on greenhouse gas emissions in a grassland on Andosol in southern Hokkaido, Japan. *Front. Sustain. Food Syst.*, 2021, 5:649613.
- [17] 北海道農政部. 北海道施肥ガイド2015. <https://www.pref.hokkaido.lg.jp/ns/shs/clean/sehiguide2015.html>
- [18] Lal, R. et al. Soils and sustainable development goals of the United Nations: An International Union of Soil Sciences. *Geoderma Regional* 25 (2021) e00398.