

●総説

地球環境変動緩和策としての土壌炭素貯留 —4パーミルイニシアティブ@まつどの実現に向けた展望—

八島未和*

千葉大学大学院園芸学研究院

Soil carbon sequestration as a fight against climate change: Prospects for 4 per 1000 Initiative@Matsudo

YASHIMA, Miwa*

Graduate School of Horticulture, Chiba University

Abstract

Atmospheric carbon dioxide (CO₂) concentrations have increased by about 50% compared to before industrialization, causing serious effects such as global warming and climate change. In Japan, the target is to reduce CO₂ emissions by 46% by 2030 and to achieve “carbon neutrality” by 2050. Not only reducing CO₂ emissions but also expanding CO₂ sequestration are important to fulfil carbon neutrality. Soil is a huge carbon storage and stores nearly three times as much carbon as terrestrial vegetation and more than twice as much as the atmosphere. Increasing the amount of carbon stored, “carbon sequestration” is a key to mitigate global warming and climate change. In this paper, we will introduce in detail the protection of soil surfaces and incorporation of carbon-containing substances into soils as technologies for carbon sequestration. In addition, focusing on urban green spaces, green infrastructure, management practices of green spaces may also be able to contribute to mitigation of global warming and climate change. As a practical research project, “4 per mille initiative @ Matsudo” will be suggested.

Key words : Soil, Carbon dioxide, Climate change, Carbon sequestration, Urban green space

キーワード : 土壌, 二酸化炭素, 気候変動, 炭素貯留, 都市緑地

世界と日本における地球温暖化と対応策の現状

気候変動に関する政府間パネル（以下IPCC）の最新の報告によると、人為的な温室効果ガス（以下GHGs）の排出量は1850年以降2019年まで一貫して増加し続けている（IPCC 2022a）。GHGsの総排出量のうち化石燃料および産業由来の二酸化炭素（以下CO₂）が64%をしめており、依然としてCO₂排出量の制御が温暖化のゆくえを握る鍵となっている。日本国内では、気象庁が大気中のCO₂濃度を継続観測している（図1）。各地における濃度増加率には増減があるものの、2～3ppm/年ずつ増加の状況となっている。2021年の平均CO₂濃度は418ppmとなっており、工業化（1750年）以前の平均的な値とされる278ppmと比較すると、実に約50%増の状況となっている。

世界平均気温は工業化以前と比較すると、2017年の時点で1.0℃以上上昇している（IPCC 2018）。今後、短期間の間に気温上昇が1.5℃を超える確率は高く、その結果として陸域や

海洋の極端な高温、強い降水や干ばつ、火災を誘発する気象条件が発生しやすくなり、暑熱による人間の死亡、暖水性サンゴの白化と死滅、干ばつによる樹木の枯死、林野火災による焼失面積の増加、熱帯低気圧による影響の甚大化、海水面の上昇など、生態系や人間の居住地やインフラに与える被害増加が懸念されている（IPCC 2022b）。2019年から2020年にかけてオーストラリア南東部の森林火災により10¹¹m²以上の面積が類焼したこと、2022年にパキスタンで発生した大洪水で国土の3分の1が水没したとされたことなどは、映像を通して鮮明に報道され、我々に衝撃を与えている。温暖化や付随する地球環境変動に対する対応が喫緊に迫っており、すでに背水の陣にいることを如実にあらわしている。

このような状況に対し、2015年フランス・パリで開催された第21回国連気候変動枠組条約締結国会議（COP21）において、パリ協定が採択、2016年に発効された（Paris Agreement 2015）。パリ協定は、京都議定書に代わる、2020年以降のGHGs排出削減等のための新たな枠組みであり、世界共通の長期目標として世界平均気温の上昇を工業化以前の2℃以

代表著者：八島未和

千葉大学大学院園芸学研究院, matsushima@faculty.chiba-u.jp

doi : 10.20776/S18808824-77-P31

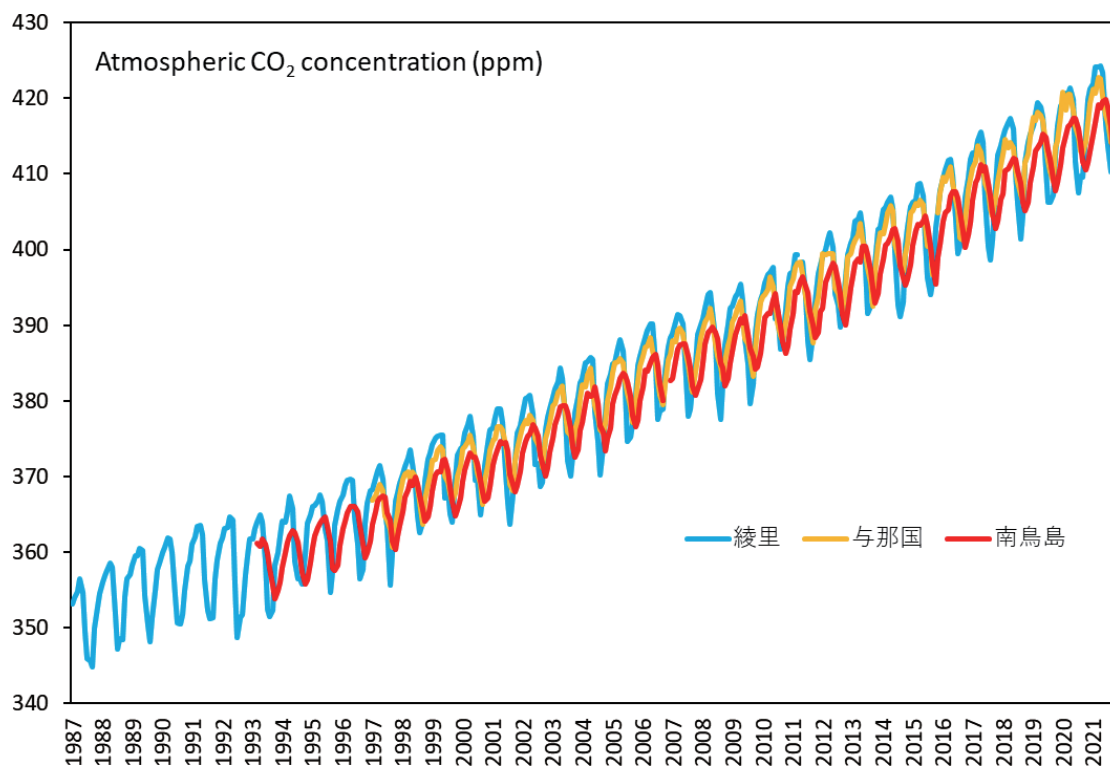


図1 日本国内で測定された大気中の二酸化炭素濃度の推移. 各値は気象庁ホームページに掲載されている定点観測値より入手した (<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/info/coment.html>).

内とすることを目標とし、さらに1.5℃に抑える努力を追求することが合意された。また、今世紀後半までにCO₂の実質排出量をゼロとする目標も設置された。日本国内では、2021年地球温暖化対策計画の改訂が閣議決定し、GHGsの排出を2030年度に46%削減（2013年度比）、さらに2050年度にGHGsの排出を全体としてゼロとする『2050年カーボンニュートラル』の実現を目指すことが明文化された（環境省 2022）。カーボンニュートラルの実現には、CO₂排出削減だけでなく、CO₂吸収拡大も重要で、全体として排出量をゼロとすることで実現する。現在まで、再生エネルギー・省エネルギーの取り組み、産業・運輸の分野におけるイノベーション支援、分野横断的脱炭素の取り組みが進められている。CO₂排出削減に関する技術革新は着々と進んでいるものの、CO₂吸収拡大に関しては今後さらなる知見の蓄積と新たな技術の開発が必要な状況である。

土壌の炭素貯留機能の重要性

ここでいったん土壌に目を向けたい。『土壌とは、地球の陸地表層または浅い水の下にあり、岩石の風化や、水、風による堆積作用と生物の活動によりできた有機物と無機物からなる粒状物質であり、植物をはじめとする生物を養い、物質の保持や循環などの機能を持つ。』と定義されている（日本土壌肥料学会2022）。土壌が持つ機能を表1に示した。土

壌には有機物が貯蔵されており、無数の微生物がこれを餌として生息する。微生物は地上より供給された植物や動物遺体などの有機物を分解し、植物根が吸収できる形に変換する。また、イオンの形で存在する養分をイオン交換能により交換吸着し、保持している。さらに、毛管により水を保持し、植物に供給する。土壌は植物が成長するための物理的・化学的・生物学的な生物生産基盤を提供しており、人類誕生から現在まで、食料を生産する基地としての働きを担ってきた。赤道面における地球の直径が約12,700kmであるのに対し、多くの農耕地において土壌の厚さは1 m程度であり、さらに生物生産能力を持つのは表層20cm程度に限られている。

このように物質循環と食料生産の要である土壌は、現在かつてないレベルの土壌劣化の危機に瀕している（Montanarella et al. 2016）。一般に土壌劣化とは、人口増加による土地利用の変化、それに伴う森林破壊、都市面積の拡大、有害物質による汚染、気候変動、不適切な土壌管理に起因する土壌侵食（表層土壌の損失を指す）、土壌有機物の損失、土壌酸性化、土壌汚染、土壌の物理的変化（圧縮や封入）、土壌中養分のバランス喪失、土壌塩類化、土壌中の生物多様性の損失を指し、実際に土壌劣化による被害は甚大となっている。世界連合食糧農業機関（以下FAO）によると、地球上の全土壌面積のうち33%においてなんらかの土壌劣化の影響がみられ、52%の農業土壌において生物生産能力に対する影響があるとされている（FAO and ITPS 2015, ELD 2015）。

大気中のGHGs濃度上昇とそれに伴う気候変動が顕著になるにつれ、土壌の有機物貯留の機能—特に炭素貯留（Soil Carbon sequestration）—が注目され始めた。図2に2008年から2017年の間の全球レベルの炭素循環を示した（それぞれの値はLe Quere et al. 2018およびLal 2018に基づいている）。大気・植生・海洋・土壌を示す箱の中にある値はそれぞれが貯留している炭素の総量を示している。土壌に貯留されている炭素の総量は1500GtCほどであり、陸域植生の3倍近く、大気の2倍から3倍ほどである。我々の足元、地球上に広く薄く存在している土壌は、実は巨大な収容量を持つ炭素の貯蔵庫であると言え、地球温暖化や気候変動の緩和において大きな働きをすることが期待される（Lal 2004）。日本の地球温暖化対

策計画（環境省 2021）においては、2030年度にGHGs発生46%減の目標達成のうち、吸収源対策で3.4%貢献できると試算されており、農地土壌吸収で0.6%が計上されている。

土壌に炭素を貯める！国際的枠組み4パーミルイニシアティブ

COP21において、フランス政府が国際的枠組み4パーミルイニシアティブ（以下4 per 1000）を提案した（図3, <https://4p1000.org/>, King et al. 2018, Soussana et al. 2019）。4 per 1000は農林業土壌が食料安全保障と気候変動の問題解決において決定的な働きをすることを期待したものである。上述のように、土壌は巨

表1 生命を支える土壌の機能（松中 2018より改変）

1 生産機能	陸上の植物を育てる。土壌で生産された植物は様々な生き物に炭水化物を提供する。
2 保水機能	水を保持する。雨水は土壌に浸透することで一旦涵養されるため、洪水防止に働く。 農地では土壌が保水することで植物に水を供給することができる。
3 分解浄化機能	動植物の遺体や動物の排泄物などの有機物を分解する。 分解に伴い有機物が無機物に変化し（無機化）、植物が吸収利用できるようになる。 一部の有害物質を分解し、浄化する微生物も生息する。
4 大気組成維持	大気圏とのガス交換を行い、酸素、二酸化炭素をはじめとした大気組成を維持する。
5 動物の生息環境	微生物、土壌動物、昆虫など、様々な生き物の生息環境を提供し、生物多様性を維持する。
6 人間の生活基盤	道路、鉄道、建物などの基盤となる。
7 各種建材資材の窯業の原料となる。	
8 景観の構成要素となる。	

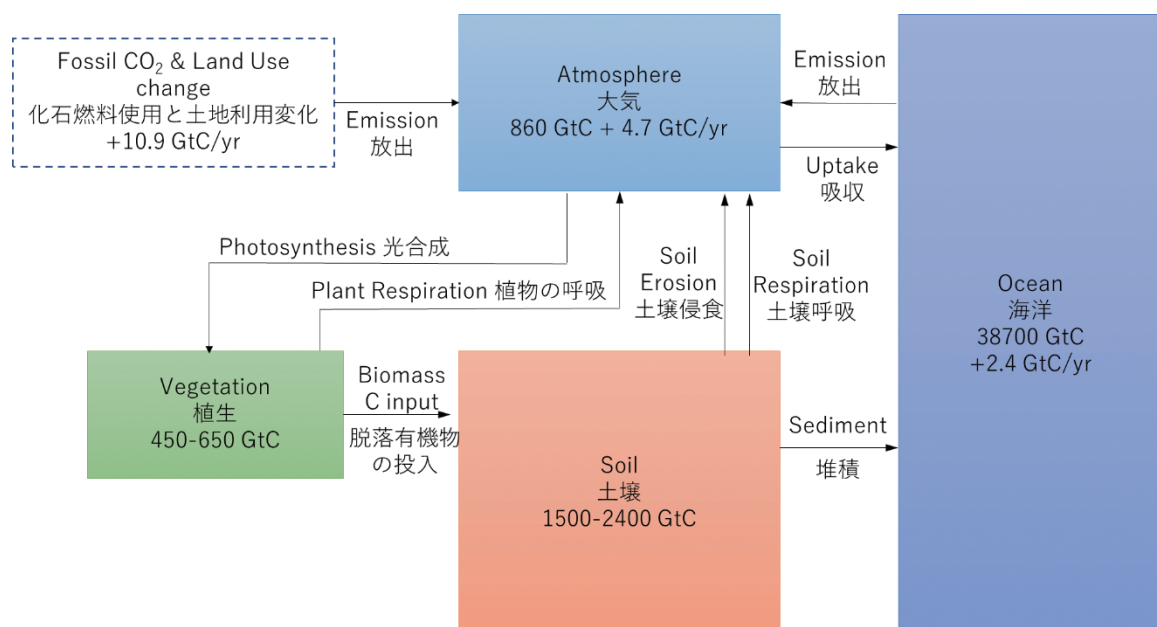


図2 2008年から2017年の間の全球レベルの炭素循環。矢印は炭素の移動を表している。それぞれの値はLe Quere et al. 2018 および Lal 2018に基づいている。



図3 フランス政府が提唱した国際的枠組み4パーミルイニシアティブ（4 per 1000）のホームページで紹介されている全体像（<https://4p1000.org/>）。ホームページからは動画や資料など、多くのリソースにアクセスできる。

大な炭素の貯蔵庫であり、世界中の土壌の表層40cmにおいて炭素含有量を年間4%（すなわち0.4%）ずつ増加できれば、大気CO₂濃度の年間増加分を相殺できるという試算に基づいている。4%という数値自体は各国が達成しなければならない数値、というのではなく、あくまでも『土壌に炭素を貯める』方向性を共有するためのネーミングであると認識されている。土壌炭素貯留を促進すると、大気中のCO₂濃度の低下と気候変動緩和に貢献できるだけでなく、適切な方法を使用すれば“土壌の健康”を高め、土壌劣化を抑制でき、食料生産基盤の安定化につながると考えられており、まさに一石二鳥のコンセプトである。

ここで“土壌の健康（Soil health）”という用語について議論しておきたい。2000年代までは食料生産や気候の調節、生物多様性の保全といった機能が注目され、どちらかといえば人間中心的な観点から“土壌の健康”が定義され、“土壌の質（Soil quality）”と同義的に扱われてきた（Kibblewhite et al. 2008）。しかし、Lal（2016）は土壌の“質”と“健康”は異なるものであると指摘した。“質”は土壌の機能や土壌が提供するパフォーマンスについて評価されるのに対し、“健康”は土壌が有限で動的な生きる資源である事柄に注目して評価される。これに基づき、FAOは“土壌の健康”を次のように明確に定義した。“土壌の健康”とは『生産性、多様性、陸上生態系の環境サービスを維持する土壌の能力』である（FAO and ITPS 2020）。この“土壌の健康”の定義は、自然生態系や農耕地などの管理された土壌に適用され、土壌がもともと持つ生物多様性の維持機能、水や物質循環そして気候の調整といった機能を維持する、また、現在進行している環境変動や土地利用変化に直面する中でも高いレジリエンス（適応する能力）を発揮する土壌が“健康な土壌”であると

いえる（FAO and ITPS 2020）。

4 per 1000の実現に向け、特に農耕地を中心とした『土壌に炭素を貯める』ための方策として次の5つが挙げられている（<https://www.4p1000.org/>）。

1. 土壌表面の保護（カバークロップと不耕起栽培）
2. 炭素に富む資材の土壌投入（堆肥・コンポスト・バイオチャー）
3. 栽培する作物や植物の種の多様化
4. 荒廃した農耕地土壌の再生や森林伐採面積の削減
5. アグロフォレストリーの拡大

とくに研究例が蓄積されている1および2については後述する。これらの具体的方策はFAOが提案している保全型農業（Conservation agriculture, FAO 2022）、近年定義づけが明確となってきた再生型農業（Regenerative agriculture, 4per1000 and STC 2021）においても推奨されており、共通点や類似点が多い。必ずしも除草剤、殺虫剤、殺菌剤、化学肥料を使用しない“有機農業”ではないが、慣行農業で使用されてきたこれらの資材使用量を最小限にとどめることがそれぞれ推奨されている。これらの方策を用いて長期的に土地管理を実施することにより、土壌の生物多様性の改善、地上部地下部を含めた生態系の生物活性拡大、水や各栄養分の利用効率向上を期待でき、結果として作物生産が改善する、または作物生産を維持することができるとされている（Wiesmeier et al. 2020）。

一方、これらの『土壌に炭素を貯める』方策を実施していく際、土壌はCO₂のシンクにもなりうるが、CO₂のソースになることを明確に勘案しておく必要がある（Bispo et al. 2017,

Baveye et al. 2018). 土壤中に存在する微生物は、有機物を分解しエネルギーを得ている。一般的に、有機物分解の最終産物は好気的環境であればCO₂、水田のような嫌気的環境であればCH₄である。2019年度における日本のGHGs総排出量に占める農林水産分野のGHGs排出量が占める割合は3.9%に上っており、とくに稲作体系から放出されるCH₄が大きな割合を占めている（農林水産省 2021）。土壤微生物の活動が旺盛な土壤中、分解しやすい有機物が大量に投入され、分解微生物にとって快適な環境であれば、当然土壤からの炭素排出は多くなり、土壤はCO₂やCH₄のソースとなる。数年の期間で投入した量と排出した量を比較し、投入量が多い場合のみに炭素貯留が実現できたといえる（Bispo et al. 2017, Baveye et al. 2018）。

土壤表面の保護による土壤の炭素貯留促進

土壤劣化（とくに土壤侵食）などによる炭素の損失を最小にするため、土壤を裸地のまま放置しないことが推奨されている（Lal 2004, FAO 2022）。そのためにカバークロップや作物残渣を敷き詰める。カバークロップには広く緑肥種が用いられている。農研機構が2020年にまとめた『緑肥利用マニュアル』において、緑肥の効果のひとつとして土壤侵食の防止が挙げられており、土壤表面を保護することにより強度の強い雨や風などから土壤を物理的に保護するとされている（農研機構 2020）。さらに土壤表面を覆うことは、雑草の生長を抑制し（Isik et al. 2009, Saudy et al. 2021）、過度な水分の蒸発を防ぎ（Schappert et al. 2019, Hunter et al. 2021）、場合によっては転圧によるダメージを軽減することができる（Chen and Weil 2010）。

また、慣行農業において、耕起は柔らかに均一な土壤表面を作るためや、競合雑草の繁茂防止のため、播種や定植の前に広く実施されている。しかし、過度な耕起は土壤の団粒構造や微細な毛細管の破壊を招く恐れがあり（Six et al. 1998）、さらに土壤有機物が突然酸素にさらされるため、急激な土壤有機物分解とそれに伴う炭素損失を引き起こす原因となる場合もある（West and Post 2002）。よって、炭素貯留のためには、耕起は最小限にとどめるか、不耕起とすることにより、土壤の攪乱を防ぐことが重要であるとされ（Six et al. 1998, Six et al. 2002, Lal 2004）、4 per 1000のホームページにおいてもカバークロップと不耕起が最も重要な炭素貯留の方法であると紹介されている（<https://4p1000.org/>）。

土壤表面の保護や不耕起による農耕地土壌での4%レベルの炭素貯留の実現可能性について、現在活発に議論がなされている。多くの事例では、カバークロップ、輪作体制の見直し、有機物の投入、アグロフォレストリーなどから、複数の方法を用いて土壤炭素貯留量の拡大を目指している。カザ

フスタン、イタリア、フィンランドの農耕地土壌を対象にしたモデル研究は、カバークロップと不耕起を用いた保全的農法の実践により年間4%の炭素貯留量拡大が可能であると報告した（Valkama et al. 2020）。ドイツのバイエルン地方の農耕地を対象にした研究例では、年間1%の土壤炭素増加にとどまったが、GHGsの増加分の1.5%を相殺すると試算された（Wiesmeier et al. 2020）。アフリカのサブサハラの報告では、アグロフォレストリーや保全型農業の方法を導入すると、一部の土壌では炭素貯留が増加するが、効果は土壌のタイプ、サンプリングの方法、作物体系の種類、管理方法、実験の期間により結果が大きく異なると報告した（Corbeels et al. 2019）。一般的に、土壤炭素が増加すると、土壤の団粒化が促進し、黒色が濃くなる。一部の報告では上記の炭素貯留の方法を用いても土壤炭素貯留は拡大しない、または投入された土壤有機物のプライミング効果により逆に損失が起こるとしている報告もある（Keel et al. 2019, Issoufou et al. 2022）。今後、土壌タイプ、土性、土地利用形態、実施する炭素貯留の方法のそれぞれの組み合わせにおいて、実際の炭素貯留が年間4%のレベルで達成可能か、丁寧なケーススタディの積み上げが必要であり、さらに包括的な予測モデルの開発が期待される。

炭素に富む資材の投入による炭素貯留

炭素を多く含む堆肥やコンポストを施用することは、基本的に土壤炭素貯留量の増加につながる。日本においては、耕種農家において『土づくり』という言葉が古くから使われ、堆肥を中心とした有機物の施用は土壤の物理性・化学性・生物性を改善するために重要であると認識されている。英国ロザムステッド研究所において、堆肥の投入をはじめとした114の試験区を3種類の土壌タイプにおいて7年から157年の間長期連用試験を実施した結果について、Poultou et al. (2018)は4 per 1000の目標の観点からその達成度を検討した。その結果、65%のケースにおいて0-23cmの表層では年間7%以上の炭素貯留が拡大していた（4 per 1000では表層40cm程度をターゲットにしている）。また、最も長期間連用されている（150年以上年間35t ha⁻¹）堆肥の投入の試験区において、試験開始当初の20年間で年間の炭素貯留拡大は18~43%に及んでいた。これは4 per 1000の目標を十分に達成する結果であった。一方、実際にこのような方法を農家で運用していくのは大変難しいことであると指摘し、その理由として、地域における堆肥の入手可能性に制限があること、農家にとって不経済な方法であること、法整備等インセンティブが必要であることなどが挙げられている。同時に、大幅な土壤炭素貯留の拡大でなくとも、少しの土壤炭素量増加によって得られる利益（土壌の質や健康が向上すること）は大変大きいこと

も指摘されている。

また、生物資源を炭化した炭化物であるバイオチャーの利用により、土壌の質や健康を促進させ、土壌炭素貯留を拡大する研究は、4 per 1000以前から多く実施されてきた。バイオチャーの施用は、酸性土壌pHの補正 (Van Zwieten et al. 2010)、仮密度の低下と排水性の向上、陽イオン交換容量の増加に伴う養分保持力の向上 (Liang et al. 2006)、微生物バイオマスの増加 (ただし菌根菌に対する効果は不明点が多い)

(Lehmann et al. 2011) などの具体的な土壌改良につながるものが報告されており、目立った植物生育への悪影響はあまりないとされている。農耕地面積当たりのバイオチャー投入割合は現在までのところ多様で、体積比で1%から10t ha⁻¹というような例もある (Lu et al. 2020)。今後の課題としては、継続したバイオチャーの施用や長期連用が土壌の質や健康に与える影響の解明、バイオチャー施用がもともと土壌に存在している有機物に与えるブライミング効果など、実用にあたって発生する課題の抽出と解決法の提案、バイオチャー施用が菌根菌など共生菌の動態に与える影響の解明などが挙げられる。

4 per 1000提唱後の世界と日本国内の動き

以上のように、農地などの土壌中にバイオマス炭素や有機態炭素を貯留し、大気に戻らないようにした上で行う生物生産方式を、近年『カーボンファーマーミング (Carbon farming)』と呼ぶようになり (Lal 2020, 日経新聞 2022)、4 per 1000提唱以降、土壌の炭素貯留の重要性が広く知られるようになった。実際の動きが盛んなのは欧州連合 (EU) で、カーボンファーマーミングが法制化される予定である (日経新聞 2022)。土壌炭素貯留が認証されるシステムが構築されれば、カーボンファーマーミングで生産される農産物に対して付加価値が与えられる可能性がある。

日本国内では、山梨県が他に先駆けて『やまなし4パーミル・イニシアチブ農産物等認証制度』を策定している (山梨県 2022)。果樹王国である同県の果樹園圃場では、剪定枝廃棄物が多く発生する。剪定枝に含まれる多くの炭素を炭化物にすることで分解しにくい炭素とし、圃場に戻す。また、草生栽培や剪定枝チップの敷き均し、堆肥の施用を実施する。このような土壌炭素貯留につながる取り組みを実施して栽培していることを認証された圃場では、生産された果物に認証マークを付けて販売することが可能になる。消費者にとってはカーボンファーマーミングの付加価値を持った農産物を選ぶという選択肢が増え、生産者にとっては生産物の競争力強化につながる仕組みである。このような実践的取り組みを全国的に広げるために、日本国内で実践可能なカーボンファーマーミングの方法や効果に関する知見の蓄積が急務である。

都市緑地における炭素貯留拡大の意義とその方法

保全型農業、再生型農業、カーボンファーマーミング、これらの土壌炭素貯留の主戦場は前述の通り農地である。一方、現在地球人口の50%が都市域に居住しており、この割合は2030年には60%、2050年には70%になると予想されている (Lal 2013)。現在、日本では国土に占める都市面積の割合は約9%を占め、農地面積 (12%) と比較可能なほど広大である (国土交通省 2022a)。都市部地表面の多くはアスファルトに覆われ、植物の培地や水の涵養といった土壌の基本的機能が失われている (FAO and ITPS 2022)。都市域内外に残された都市緑地や都市農地はグリーンインフラと呼ばれ、多様な生物が生息する場を提供し、雨水を貯留し防災や減災に役立ち、河川の水質維持に貢献するなど、景観を含む生活環境の改善や生物多様性の維持に必要不可欠である (Tzoulas et al. 2007)。2017年に閣議決定された国土形成計画、第4次社会資本整備重点計画では、「国土の適切な管理」「安全・安心で持続可能な国土」「人口減少・高齢化等に対応した持続可能な地域社会の形成」といった課題への対応の一つとして、グリーンインフラの取組を推進することが盛り込まれている (国土交通省 2022b)。また、2024年からは森林環境税が国税として1人年間1,000円が賦課徴収されることが盛り込まれており、グリーンインフラと合わせ、都市域では里山等残る緑の管理が促進すると期待される。

このような都市周辺の緑地管理で問題となるのが、管理で発生した廃棄物の処分である。高頻度の剪定では剪定枝が大量に排出する。また、近年台風や強風などによる倒木落枝の発生量は増加傾向である。堆肥化の設備がない場合は、これらの木質廃棄物は焼却処分されることになり、含有する多量の炭素はCO₂となり大気に放出し、温暖化の原因となる。農地を中心に実践されつつあるカーボンファーマーミングの概念を、都市緑地にもあてはめ、温暖化や気候変動の緩和に役立てることができれば、都市緑地の機能をより生かすことにつながり、その価値を最大限にすることができると考えられる。例えば、都市緑地の管理で発生した木質廃棄物を焼却処分せず、チップ化、炭化、または堆肥化を実施し、気候変動に関与しない (しにくい) 炭素として土壌に炭素貯留を進めることは様々な意味で重要である。1つ目に、都市周辺の植物に取り込まれた量に相当するCO₂を大気から削減することにつながる。先行研究において、チップ化した剪定枝を敷き均すことにより、剪定枝に含まれていた20%の炭素は分解されて大気に戻っていくものの、30%は腐植物質として長い期間土壌に貯留されると試算されている (高橋ら 2014)。2つ目に、炭素貯留増加に伴い、土壌肥沃度が改善し、緑地の生産力が向上する可能性がある。3つ目にグリーンインフラを

含む都市緑地の管理を、市民団体やNGOが中心となって実施しているケースがあり、取り組む人々が地域の緑の管理を通し、自分事として温暖化および気候変動緩和の意識を共有する機会となる。たとえ規模が小さくても市民が管理する緑地や農地においてカーボンファームが草の根的に拡大することが期待される。このような考え方が広く共有されるようになれば、都市域に住む人々が、消費者として農産物を購入する際、カーボンファームで生産された農産物を選ぶ動機となる等、ポジティブなループ形成につながるかもしれない。

4 パーミルイニシアティブ@まつどの実現に向けた展望

都市緑地における土壌炭素貯留の取り組みは、貴重な都市域のグリーンインフラ管理や維持活動を促進するだけでなく、実際の気候変動緩和の効果、さらに人々の意識の変化やそれに伴う次世代を担う子供たちへの環境教育の効果が大きい期待できるという点で、農地を中心としたカーボンファームにはない魅力がある。

このような考え方にに基づき、園芸学研究院園芸環境科学講座では、2021年に『4 パーミルイニシアティブ@まつど』の構想に至った。これは都市緑地や都市農地を対象とした炭素貯留技術の最先端を目指す研究プロジェクトであり、研究で得られた成果を市民と共有し、実際に地域社会と協働することで、地球温暖化対策活動を目指す多面的プロジェクトである。現在までのところ、農地以外の都市域において炭素貯留を念頭とした研究例は少なく、園芸環境科学講座のような多様な研究背景を持つ研究者群が取り組んだ報告例も見当たらないため、大変ユニークな取り組みとなる。本プロジェクトで設定した目標は次の4点である。

1. 土壌への炭素貯留方法の確立：剪定枝などの木質バイオマスの堆肥やバイオ炭を土壌に施用して炭素の動態（分解・無機化特性）を調査して炭素貯留の効果を評価し、有効な施用方法を明らかにする。
2. 炭素貯留の土壌および植物への影響解明：炭素貯留による土壌の理化学性・生物性の変化、土壌肥沃土への影響を調査し、施用土壌における植物の生育への影響や雑草抑制効果を明らかにする。同時に、窒素飢餓（炭素含量の高い資材の土壌施用により生じる一時的な窒素欠乏）を回避する方法を確立する。
3. 付加価値としての植物病害防除技術の確立：木質バイオマスの堆肥やバイオ炭を土壌に施用した場合の、土壌伝染性病害の抑制効果を明らかにする。また、バイオ炭に有用微生物を定着させ、土壌還元消毒の促進資材や、養液栽培の水媒性病害を予防する栽培基質として活用す

る方法を確立する。

4. 市民参加活動の展開：市民や緑地管理団体などを対象にワークショップやセミナーを開催して炭素貯留に関する知識や技術、研究成果を共有し、地球温暖化抑制を協働的に推進する基盤を整備する。

本プロジェクトでは、松戸キャンパスを対象の中心として展開するため、『@まつど』とネーミングしている。松戸市で策定された『みどりの基本計画』（松戸市 2022）の方針ともよく一致しており、松戸市や市民と協働して展開することが期待される。松戸キャンパスは、明治42年（1909年）に千葉県立園芸専門学校として創立されて以降、110年以上にわたって緑を豊かに蓄え、グリーンインフラの機能を提供してきた。その価値は研究成果を生み出すことによりさらに増している。本プロジェクトを通して、土壌炭素貯留研究を促進し、実践的に取り組み、カーボンニュートラルに貢献できるはずである。また、プロジェクト活動を通して、とくに若い世代の市民と研究成果の共有を進め、次世代の環境教育を実施し、先人が築き上げてきた松戸キャンパスのレガシーをさらに高めることが期待される。

和文抄録

大気二酸化炭素（CO₂）濃度は工業化以前と比較すると約50%増加しており、温暖化や気候変動など深刻な影響をもたらしている。日本国内では、CO₂の排出を2030年度に46%削減、さらに『2050年カーボンニュートラル』を目指している。カーボンニュートラルには、CO₂排出削減だけでなく、CO₂吸収拡大も重要で、全体として排出量をゼロとすることで実現する。土壌には、陸域植生の3倍近く、大気の2倍以上の炭素が貯留されており、その貯留量を増加させることにより、温暖化・気候変動の緩和を目指す『炭素貯留』の技術が注目されている。本稿では、土壌炭素貯留の技術として、土壌表面の保護や炭素を含む物質の土壌還元について詳しく紹介する。また、とくに都市緑地に着目し、緑地の管理においてグリーンインフラの機能を維持するだけでなく、排出される木質廃棄物を炭素貯留に利用することで、温暖化や気候変動の緩和に貢献する可能性について言及する。実践的研究プロジェクトとして『4 パーミルイニシアティブ@まつど』を提案する。

謝 辞

『4 パーミルイニシアティブ@まつど』は、2022年度園芸フロンティア研究プロジェクトとして採択され、研究費助成を受けています。また、本プロジェクトの全体構想は、園芸

環境科学講座の教員ディスカッションの中で誕生し、成長したものです。心より感謝申し上げます。

参考文献

- Baveye, P. C., Berthelin, J., Tessier, D. and Lemaire, G. (2018) The “4 per 1000” initiative: A credibility issue for the soil science community? *Geoderma* 309: 118–123. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.05.005>
- Bispo, A., Andersen, L., Angers, D. A., Bernoux, M., Brossard, M., Cecillon, L., . . . Eglin, T. K. (2017) Accounting for carbon stocks in soils and measuring GHGs emission fluxes from soils: Do we have the necessary standards? *Frontiers in Environmental Science* 5 : Article 41. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2017.00041>
- Chen, G. H. and Weil, R. R. (2010) Penetration of cover crop roots through compacted soils. *Plant and Soil* 331 (1–2): 31–43. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0223-7>
- Corbeels, M., Cardinael, R., Naudin, K., Guibert, H. and Torquebiau, E. (2019) The 4 per 1000 goal and soil carbon storage under agroforestry and conservation agriculture systems in sub-Saharan Africa. *Soil and Tillage Research* 188: 16–26. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.02.015>
- ELD Initiative (2015) Report for policy and decision makers: Reaping economic and environmental benefits from sustainable land management. Available online: https://www.eld-initiative.org/fileadmin/pdf/ELD-pm-report_05_web_300dpi.pdf
- FAO (2022) Conservation agriculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy. <https://www.fao.org/conservation-agriculture/overview/what-is-conservation-agriculture/en/> (cited on 2022-10-01)
- FAO and ITPS (2015) Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Main Report. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, Rome, Italy. Available online: <https://www.fao.org/3/i5199e/i5199e.pdf>
- FAO and ITPS (2020) Towards a definition of soil health, ITPS Soil Letters #1. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, Rome, Italy. Available online: <https://www.fao.org/global-soil-partnership/itps/itps-soils-letter/en/>
- 4 per 1000 and STC (2021) Towards a definition of regenerative agriculture. *Soil Carbon Notes* #1. 4 Per mille Initiative and the Scientific and Technical Committee. Available online: https://4p1000.org/wp-content/uploads/2021/12/4p1000-STC_Soil-Carbon-Notes_Definition-of-Regenerative-agriculture_2021_EN.pdf
- Hunter, M. C., Kemanian, A. R. and Mortensen, D. A. (2021) Cover crop effects on maize drought stress and yield. *Agriculture Ecosystems and Environment* 311: Article 107294. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107294>
- IPCC, 2018: Summary for Policymakers. In: *Global Warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 32 pp.
- IPCC (2022a) Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. <https://doi.org/10.1017/9781009157926.001>
- IPCC (2022b) Summary for Policymakers [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem (eds.)]. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 3–33, <https://doi.org/10.1017/9781009325844.001>.
- Isik, D., Kaya, E., Ngouajio, M. and Mennan, H. (2009) Weed suppression in organic pepper (*Capsicum annuum* L.) with winter cover crops. *Crop Protection* 28 (4) : 356–363. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2008.12.002>
- Issoufou, A. A., Younoussa, B. H., Soumana, I. and Mahamane, A. (2022) Soil Restoration Practices on Priming Effect Intensity and Carbon Fluxes. *Applied and Environmental Soil Science*, 2022, Article 1038514. <https://doi.org/10.1155/2022/1038514>
- 環境省 (2022) 脱炭素ポータル, https://ondankataisaku.env.go.jp/carbon_neutral/index.html (cited 2022-10-01)
- 環境省 (2021) 地球温暖化対策推進法, <https://www.env.go.jp/earth/ondanka/domestic.html> (cited on 2022-10-01)
- Keel, S. G., Anken, T., Buchi, L., Chervet, A., Fließbach, A., Flisch, R., . . . Leifeld, J. (2019) Loss of soil organic carbon in Swiss long-term agricultural experiments over a wide range of management practices. *Agriculture Ecosystems and Environment* 286: Article 106654. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106654>
- Kibblewhite, M. G., Ritz, K. and Swift, M. J. (2008) Soil health in agricultural systems. *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences* 363 (1492): 685–701. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2178>
- King, J. K. K., Granjou, C., Fournil, J. and Cecillon, L. (2018) Soil sciences and the French 4 per 1000 Initiative-The promises of underground carbon. *Energy Research & Social Science* 45: 144–152. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2018.06.024>
- 国土交通省 (2022a) 国土の利用区分面積. <https://www.mlit.go.jp/>

- kokudoseisaku/kokudoseisaku_fr3_000033.html (cited 2022-10-01)
- 国土交通省 (2022b) グリーンインフラ. https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_mn_000034.html (cited 2022-10-01)
- Lal, R. (2004) Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science* 304(5677): 1623–1627. <https://doi.org/10.1126/science.1097396>
- Lal, R. (2013) Food security in a changing climate. *Ecology & Hydrobiology* 13: 8–21. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2013.03.006>
- Lal, R. (2016) Soil health and carbon management. *Food and Energy Security* 5 (4): 212–222. <https://doi.org/10.1002/fes.3.96>
- Lal, R. (2018) Digging deeper: A holistic perspective of factors affecting soil organic carbon sequestration in agroecosystems. *Global Change Biology* 24(8): 3285–3301. <https://doi.org/10.1111/gcb.14054>
- Lal, R. (2020) The role of industry and the private sector in promoting the “4 per 1000” initiative and other negative emission technologies. *Geoderma* 378: Article 114613. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114613>
- Le Quere, C., Andrew, R. M., Friedlingstein, P., Sitch, S., Hauck, J., Pongratz, J., . . . Zheng, B. (2018) Global Carbon Budget 2018. *Earth System Science Data* 10(4): 2141–2194. <https://doi.org/10.5194/essd-10-2141-2018>
- Lehmann, J., Rillig, M. C., Thies, J., Masiello, C. A., Hockaday, W. C. and Crowley, D. (2011) Biochar effects on soil biota-A review. *Soil Biology and Biochemistry* 43(9): 1812–1836. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.04.022>
- Liang, B., Lehmann, J., Solomon, D., Kinyangi, J., Grossman, J., O'Neill, B., . . . Neves, E. G. (2006) Black Carbon increases cation exchange capacity in soils. *Soil Science Society of America Journal* 70(5): 1719–1730. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0383>
- Lu, H. F., Bian, R. J., Xia, X., Cheng, K., Liu, X. Y., Liu, Y. L., . . . Pan, G. X. (2020) Legacy of soil health improvement with carbon increase following one time amendment of biochar in a paddy soil - A rice farm trial. *Geoderma* 376: Article 114567. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114567>
- 松戸市 (2022) 松戸市みどりの基本計画—緑と暮らす。松戸に暮らす。豊かに暮らす。 Available online: <https://www.city.matsudo.chiba.jp/shisei/keikaku-kousou/midorinokihon.files/midoriikeikaku.pdf>
- Montanarella, L., Pennock, D. J., McKenzie, N., Badraoui, M., Chude, V., Baptista, I., . . . Vargas, R. (2016) World's soils are under threat. *Soil* 2 (1): 79–82. <https://doi.org/10.5194/soil-2-79-2016>
- 日本土壌肥料学会 (2022) 私たちの研究対象とする土壌と土 (中間まとめ). <http://jssspn.jp/file/tuchinoteigiv2.pdf> (cited 2022-10-01)
- 日本経済新聞 (2022) 脱炭素、主戦場は「農業」にEUは炭素貯留を法制化へ (2022-0909). <https://www.nikkei.com/article/DGXZQOCD267QJ0W2A820C2000000/> (cited 2022-10-01)
- 農研機構 (2020) 緑肥利用マニュアル—土づくりと減肥を目指して—。国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構 中央農業研究センター。 Available online: https://www.naro.go.jp/publicity_report/publication/files/ryokuhi_manual11_carc20200420.pdf
- 農林水産省 (2021) 農業分野における気候変動・地球温暖化対策について。農林水産省農産局農業環境対策課。 Available online: <https://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/ondanka/attach/pdf/index-72.pdf>
- Paris Agreement (2015) <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>
- Poulton, P., Johnston, J., Macdonald, A., White, R. and Powlson, D. (2018) Major limitations to achieving “4 per 1000” increases in soil organic carbon stock in temperate regions: Evidence from long-term experiments at Rothamsted Research, United Kingdom. *Global Change Biology* 24(6): 2563–2584. <https://doi.org/10.1111/gcb.14066>
- Saudy, H. S., El-Bially, M., Ramadan, K. A., El-Nasr, E. K. A. and Abd El-Samad, G. A. (2021) Potentiality of Soil Mulch and Sorghum Extract to Reduce the Biotic Stress of Weeds with Enhancing Yield and Nutrient Uptake of Maize Crop. *Gesunde Pflanzen* 73(4): 555–564. <https://doi.org/10.1007/s10343-021-00577-z>
- Schappert, A., Linn, A. I., Sturm, D. J. and Gerhards, R. (2019) Weed suppressive ability of cover crops under water-limited conditions. *Plant Soil and Environment* 65(11): 541–548. <https://doi.org/10.17221/516/2019-pse>
- Soussana, J. F., Lutfalla, S., Ehrhardt, F., Rosenstock, T., Lamanna, C., Havlik, P., . . . Lal, R. (2019) Matching policy and science: Rationale for the ‘4 per 1000-soils for food security and climate’ initiative. *Soil & Tillage Research* 188: 3–15. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.12.002>
- Six, J., Elliott, E. T., Paustian, K. and Doran, J. W. (1998) Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils. *Soil Science Society of America Journal* 62(5): 1367–1377. <https://doi.org/10.2136/sssaj1998.03615995006200050032x>
- Six, J., Feller, C., Denef, K., Ogle, S. M., Sa, J. C. D. and Albrecht, A. (2002) Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils - Effects of no-tillage. *Agronomie* 22(7–8): 755–775. <https://doi.org/10.1051/agro:2002043>
- 高橋輝昌, 神原大地, 石井匡志, 荻野淳司, 原田秀樹, 八色宏昌, 山田拓広, 鳥越昭彦 (2014) 剪定枝の分解に伴う炭素動態の推定。 *ランドスケープ研究* 7: 17–19. <https://doi.org/10.5632/jilaonline.7.17>
- Tzoulas, K., Korpela, K., Venn, S., Yli-Pelkonen, V., Kazmierczak, A., Niemela, J. and James, P. (2007) Promoting ecosystem and human health in urban areas using Green Infrastructure: A literature review. *Landscape and Urban Planning* 81(3): 167–178. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2007.02.001>
- Valkama, E., Kunyipyayeva, G., Zhapayev, R., Karabayev, M., Zhusupbekov, E., Perego, A., . . . Acutis, M. (2020) Can conservation agriculture increase soil carbon sequestration? A modelling approach. *Geoderma* 369: Article 114298. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114298>
- Van Zwieten, L., Kimber, S., Morris, S., Chan, K. Y., Downie, A., Rust, J., . . . Cowie, A. (2010) Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant and Soil* 327 (1–2): 235–246. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0050-x>
- West, T. O. and Post, W. M. (2002) Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: A global data analysis. *Soil Science Society of*

-
- America Journal 66(6): 1930–1946. <https://doi.org/10.2136/sssaj2002.1930>
- Wiesmeier, M., Mayer, S., Burmeister, J., Hubner, R. and Kogel-Knabner, I. (2020) Feasibility of the 4 per 1000 initiative in Bavaria: A reality check of agricultural soil management and carbon sequestration scenarios. *Geoderma* 369: Article 114333. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114333>
- 山梨県 (2022) 4 パーミル・イニシアチブについて—果樹王国やまなしが取り組む, 地球温暖化対策. <https://www.pref.yamanashi.jp/oishii-mirai/contents/4pa-mirunituite2.html> (cited on 2022-10-01)