

気候変動緩和策における土壌炭素貯留：歴史的軽視の背景、科学的論争、および政策的展開の包括的分析

1. 序論：気候変動における土壌の二面性と炭素貯留の巨大な潜在力

気候変動対策において、森林や海洋と並ぶ地球規模の炭素シンク(吸収源)として「土壌」が果たす役割は極めて甚大である。陸上生態系において、土壌は地球の大気中の約3倍に相当する有機炭素を保持しており、気候変動を緩和するための戦略的な土壌管理は決定的な意味を持つ¹。しかしながら、人類の農業の歴史は、この巨大な炭素貯留庫の継続的な破壊の歴史でもあった。過去12,000年間にわたる農地の拡大と森林や草原などの自然生態系の転換により、土壌の表層から約1,100億メートルトンもの炭素が失われたと推定されている。これは現在の米国の温室効果ガス(GHG)排出量の約80年分に相当する莫大な規模である²。

現代の工業化された農業システムにおいても、この流出は加速している。除草剤や合成化学肥料の過剰使用、大規模な単作(モノクロッピング)、そして頻繁な耕起(ティレージ)といった慣行農業は、大気中の二酸化炭素(CO₂)濃度を上昇させるだけでなく、栄養塩汚染による水資源の枯渇や、生態系全体にわたる著しい生物多様性の喪失を引き起こしている³。過去10年間の土地利用変化、とりわけ熱帯および亜熱帯地域における大規模な森林から農地への転換により、毎年

1.9 ~ 2.4 Pg の土壌有機炭素(SOC)、CO₂換算で年間 7.9 Pg が失われ続けている⁴。さらに、気候変動による地球の温暖化自体が土壌微生物の有機物分解速度を加速させ、北極圏の永久凍土の融解に見られるように、広範な土壌からの炭素放出スパイラルを引き起こしている⁵。

工業型農業システムがもたらす弊害は環境面にとどまらず、人類の健康にも波及している。過去数十年にわたる食事の質の低下と、工業型農業複合体によって支えられた超加工食品の世界的普及は、微量栄養素の欠乏や栄養不良を招き、糖尿病や肥満をはじめとする非感染性疾患(NCDs)の世界的蔓延の一因となっている³。このように、土壌は「巨大な炭素の貯蔵庫」であると同時に、不適切な管理下においては「最大の環境・健康リスクの源」へと転換する脆弱性を抱えている。本報告書は、気候変動に関する国際的な政策議論において、土壌の健康状態や炭素貯留能が長らく軽視されてきた歴史的背景を解き明かし、その後を生じた過剰な期待(ハイプ)と激しい科学的論争、大豆生産等に見られるグローバルな土地利用のジレンマ、そして最新の測定・報告・検証(MRV)の枠組みや、日本特有の火山灰土壌(黒ボク土)およびバイオ炭を活用した政策的展開に至るまでを網羅的に分析する。

2. 初期気候変動枠組みにおける土壌炭素の周縁化と歴史的軽視

気候変動対策の国際的な初期の議論において、土壌炭素が軽視された背景には、科学的・政策的・

技術的な複合的要因が強固に絡み合っていた。特に、IPCC(気候変動に関する政府間パネル)の初期評価報告書や、京都議定書における温室効果ガスインベントリの算定規則が、土壤炭素の政策的優先順位を著しく下げる結果となった。

2.1 IPCC報告書における「土地劣化」と土壤炭素の分断的評価

IPCCの第5次評価報告書(AR5)や、それ以前の報告書において、土壤炭素は炭素循環の文脈で網羅的に議論されていたものの、「土地劣化(Land Degradation)」という根本的な問題とは制度的に切り離されて扱われていた⁶。AR5の第1作業部会(WGI)では、森林劣化や永久凍土の融解に伴う炭素動態には言及されたが、農業や不適切な土地管理による土壤炭素の枯渇については焦点が当てられなかった⁶。

2000年に発行された「土地利用、土地利用変化及び林業に関する特別報告書(SR-LULUCF)」は、主に京都議定書下での陸上炭素の吸収・排出の「算定(アカウンティング)方法」に特化していた。この報告書では、土壤浸食によって炭素が失われ土地の生産性が低下するプロセスへの言及や、浸食された炭素が海洋堆積物に永久隔離される可能性に局所的に触れられていたものの、気候変動が土地の生産性や劣化に与える影響についての包括的な議論は欠如していた⁶。また、極端現象に関する特別報告書(SREX)に至っては、土地劣化の明確な定義すら提供されておらず、沿岸域や山岳地帯における気象災害との関連でのみ局所的に扱われるにとどまった⁶。

2.2 京都議定書におけるMRVの壁と「Not-Source原則」の濫用

京都議定書下において、各国は国連気候変動枠組条約(UNFCCC)に対し、5つの炭素プール(地上部バイオマス、地下部バイオマス、枯死木、リター、土壤)の炭素蓄積量の「変化」を年次報告する義務を負った⁷。ここで土壤炭素が直面した最大の障壁は、測定可能性とデータの圧倒的な欠如である。

地上部のバイオマス(森林など)は衛星画像や毎木調査によって比較的容易に測定可能であるのに対し、広大な農地や森林の土壤炭素蓄積量変化を統計的に信頼に足る精度で定期的に測定することは、コストと技術の面で極めて困難であった⁷。この困難さを象徴するのが、2006年の段階で、欧州連合(EU-15)の中で「森林のままの森林」カテゴリにおける土壤炭素蓄積量変化についてゼロ以外の有効な数値を報告できた国が、ベルギー、フィンランド、イタリア、ルクセンブルク、ポルトガル、スウェーデンのわずか6カ国に過ぎなかったという事実である⁷。

さらに、京都議定書の算定ルールには「Not-Source(排出源ではない)原則」が存在した。これは、特定の炭素プールが温室効果ガスの「排出源」ではないことを透明かつ検証可能な情報で証明できれば、そのプールの算定を除外できるというルールである⁷。多くの国(例えば英国の1920年以前に植林された森林は炭素平衡にあるとする仮定など)は、正確な測定が「実行可能(practicable)」ではないという理由から、この原則を利用して土壤炭素の変動を「ゼロ」と見なす仮定を多用した⁷。このような政策的な実用主義と、フェルミ推定的な大まかな仮説への依存が、結果として土壤炭素貯留の潜在的な緩和効果を長期間にわたり政策的アジェンダから除外する決定的な要因となったのである⁷。

3. 土地利用変化の現実:大豆生産に見るリーケージリスクと

炭素会計のジレンマ

土壌炭素の蓄積に関する議論が机上の空論に陥りやすい最大の理由は、グローバルな農業サプライチェーンにおける「リーケージ(漏出)」の問題を無視することにある。特定の農場内で土壌炭素を蓄積する試みが、地球の裏側での致命的な森林破壊を誘発するリスクが存在する。その典型例が、ブラジルのセラード(Cerrado)やアマゾンにおける大豆生産の急拡大である。

3.1 セラードの開墾とバイオディーゼルのカーボンフットプリント

ブラジルのセラード地域は南米最大のサバンナであり、地球上の生物多様性の約5%を擁し、他では見られない4,800種以上の植物や脊椎動物が生息している⁸。しかし、ここは世界で最も重要な農業拡大のフロンティアでもあり、大規模な大豆生産(Soy Pro)のために急速に開墾が進んでいる⁸。

科学的な分析によれば、過去20年間の大半において、ブラジルの温室効果ガス排出の最大の発生源は土地転換に伴うCO₂排出であった⁹。アマゾンやセラードに大豆を植えた場合、1ヘクタールあたり年間わずか **0.9 Mg** のCO₂しか土壌に戻らない⁹。自然の森林やサバンナを直接転換して栽培された大豆からバイオディーゼルを製造した場合、本来その土地が保持していた莫大な炭素ストックが一気に大気中に放出されるため、化石燃料由来のディーゼルよりもかえってカーボンフットプリントが大きくなるという致命的な矛盾が生じる⁹。

3.2 グローバルな認証スキームの動向と市場の乖離

こうした森林破壊や土地転換を伴わない「森林破壊・転換ゼロ(Deforestation and conversion-free)」の大豆調達を目指し、欧州を中心とする国際市場では認証スキームの導入が進められている。IDH Soy Monitorのデータによれば、欧州の飼料工業連盟(FEFAC)の持続可能性調達ガイドライン(SSG)に準拠した大豆の利用が推進されており、特にProTerra認証や米国のSSAP認証を受けた大豆が市場に流通している¹⁰。

しかし、市場の動向は一筋縄ではいかない。2020年から2022年にかけて、欧州(EU27+)におけるFEFAC SSG準拠大豆の消費量は7%減少した一方で、通常の大豆ミールの消費は2%増加し、持続可能な大豆と市場全体の需要との間に大きな乖離が生じた¹⁰。これは、ProTerra認証大豆の流通量が35%も激減したことなどが要因である¹⁰。その後、2022年から2023年にかけて米国SSAP認証大豆の利用が91%急増したことで再び準拠大豆のシェアは回復したものの、持続可能性認証と実際のサプライチェーンの安定供給を両立させることの困難さが浮き彫りとなっている¹⁰。

Forest Trendsの分析が示すように、ブラジルにおける森林伐採を回避することで得られる炭素削減効果は、1ヘクタールあたり **367 tCO₂e** に達する。62万ヘクタールの森林保全是 **2.275 億 tCO₂e** の削減に相当し、炭素価格を1トンあたり5ドルと仮定した場合、約11億3,700万ドル(1ヘクタールあたり1,835ドル)の価値を生み出す¹¹。大豆バイヤーが農地の10%相当の環境準備割当(CRA)を購入することでこの保全コストを負担するメカニズムも提案されているが、土壌炭素の議論を特定の農場のミクロな視点から切り離し、こうしたマクロな土地利用変化のコストとして炭素会計(カーボンアカウンティング)に厳密に組み込まない限り、世界資源研究所(WRI)が警告する「不完全な炭素会計(Faulty Carbon Accounting)」によるグリーンウォッシュの罠から抜け出すことはで

きない¹²。

4. パラダイムの転換:「4パーミル・イニシアチブ」と自然基盤解決策(NbS)の台頭

長らく政策の死角にあった土壌炭素は、2015年の気候変動枠組条約第21回締約国会議(COP21・パリ協定)を契機に突如としてスポットライトを浴びることとなった。その牽引役となったのが、フランス政府が主導した「4パーミル・イニシアチブ(4 per 1000 Initiative)」である。

4.1 4パーミル・イニシアチブの理念と世界的な波及

このイニシアチブは、「世界の土壌有機炭素(SOC)のストックを毎年0.4%(1000分の4)ずつ増加させることができれば、人類の経済活動による大気中への人為的CO₂排出量の増加分を相殺できる」という極めて野心的な概念を提唱した¹³。アグロエコロジー、アグロフォレストリー、保全農業、景観管理など、地域条件に適応した農業手法を推進することで、土壌の健全性を高め、気候変動緩和と食料安全保障の「ダブルウィン(二重の利益)」を達成することを目指したのである¹³。

この運動は、土壌を静的なシステムとしてではなく、炭素を動的に隔離し生態系サービスを提供する生きた基盤として再定義した点で画期的であった。トップダウンでの農家への助言だけでなく、農民主体で優良事例を共有するボトムアップのアプローチを内包しており、女性の参加推進や先住民の権利保護といった社会的セーフガードも組み込まれていた¹⁴。この包括的かつ革新的な設計により、2017年にはFuture Policy Vision Awardを受賞し、2020年には2050年までの長期戦略計画を採択するなど、土壌の役割に関する政策的言説を根本から変革することに成功した¹⁴。

4.2 Crowther Labの「1兆本の木」論争と熱狂の代償

4パーミル・イニシアチブの台頭と並行して、生態系を活用した気候変動緩和策(自然基盤解決策: Nature-based Solutions, NbS)に対する過度な期待、いわゆる「ハイプ(Hype)」が科学界とメディアを席卷した。その頂点に位置するのが、スイス連邦工科大学チューリッヒ校(ETH Zurich)のCrowther Labが2019年にScience誌に発表した研究である。Jean-François BastinとThomas Crowtherらが主導したこの研究は、「地球上の都市や農地を除外した上で、新たに1兆本の木を植える余地(約9億ヘクタール)があり、これにより人類が産業革命以降に排出した炭素の3分の2に相当する約2,050億トンの炭素を吸収できる」と結論づけた¹⁷。

この発表は世界経済フォーラムの「1T.org」創設の契機となるなど熱狂的に迎えられたが、直後に気候学者や土壌科学者から激しい反発と科学的検証の波にさらされることとなった。「気候変動対策の特効薬」としての過大評価は、エネルギーシステムの脱炭素化や強力な温室効果ガス(メタンやHFCs等のスーパー汚染物質)の削減という真の課題から目を背けさせる免罪符として利用されるリスクがあるためである¹⁷。

結果として、Crowtherらは2020年にScience誌上で訂正を発表し、「樹木の再生が気候変動に対する『最も効果的』な解決策であると述べたのは誤りであった」と認め、新たな森林が吸収できる炭素量の見積もりも初期の印象の半分程度に引き下げざるを得なかった²⁰。Crowtherはこのコミュニケーションの失敗に強い責任を感じ、その後、生物多様性と保全プロジェクトを統合するプラットフォーム「Restor」を立ち上げるなど再起を図っているが、一連の騒動の背後では研究室内部での給

与や科学的見解の相違に端を発するハラスメント告発や大学側の外部調査が巻き起こるなど、NbSを取り巻く巨額の資金と社会的プレッシャーがいかに科学界を揺るがしているかを浮き彫りにした²⁰。

5. 科学界からの懐疑論と土壌炭素隔離の生物物理学的限界

4パーミル・イニシアチブが提示した「毎年0.4%の土壌炭素増加」という目標に対しても、土壌科学の第一線から厳しい批判と現実的な制約が突きつけられた。Baveye、Powlson、de Vries、Whiteらをはじめとする多くの土壌科学者は、この目標が生物物理学的に非現実的であり、気候変動緩和効果を過大に見積もっていると警鐘を鳴らしている²²。

科学的批判の主要な論点	メカニズムと制約の具体的内容	影響と結果
化学量論的制約(窒素・リン)	炭素を安定した土壌有機物として固定するには、炭素と窒素等の一定の比率が必要。WRIの試算では12トンの炭素隔離に約1トンの窒素が不可欠 ¹² 。	化学肥料の大量投入は強力なGHGである一酸化二窒素(N ₂ O)の排出を誘発し、水質汚染を招く。総合的なGHG会計では相殺効果が消失する ¹² 。
バイオマスの絶対的不足	マメ科植物や堆肥で窒素を補うにしても、地球上で利用可能なバイオマスの総量には物理的限界がある ²² 。	ある農地にバイオマスを集中させることは、他の農地から有機物を奪う「ゼロサム・ゲーム」に過ぎない ¹² 。
飽和限界(Saturation)	炭素蓄積を開始すると初期は急速に固定されるが、土壌が新たな平衡状態に近づくにつれて蓄積速度は低下し、最終的にゼロになる ²² 。	飽和を無視すると2100年までの隔離ポテンシャルを53%～も過大評価する。実際の貢献は世界排出量の4%から1%未満に留まる ²⁵ 。
非永続性(Impermaence)	土壌有機物は動的であり、環境変化や管理手法の変更によって容易に分解される ²² 。	不耕起栽培で表層に炭素を蓄積しても、数年に一度耕起すれば蓄積された炭素は急速に酸化され、CO ₂ として大気中に放出される ¹² 。

加えて、WRIの分析によれば、2050年までに農業セクターが埋め合わせるべき温室効果ガスのギャップは約110億トン(11 Gt)に達するが、土壌炭素隔離単独でこの大規模な削減を達成することは不可能に近い¹²。例えば、米国の全農地の85%に被覆作物(カバークロープ)を導入したとしても、

オフセットできるのは米国の総排出量のわずか1.5%に過ぎず、現状ではコストや越冬前の播種期間の制約から、被覆作物の導入率は4%未満に留まっている¹²。

6. 環境再生型農業の実践的課題とIPCCによる再構築

現在、多国籍食品企業や政策立案者の中で「環境再生型農業(リジェネラティブ農業: Regenerative Agriculture)」が急速な広がりを見せている。この手法は、先住民が何千年も培ってきた生態学的哲学を再定義したものであり、土壌を常時被覆し、不耕起・省耕起を徹底し、生きた根を維持し、生物多様性を高め、家畜を統合的に放牧し、合成化学物質を極力排除することを原則としている³。

2023年の世界の環境再生型農業の市場規模は103億ドルに達し、2031年までに318億ドルへと急成長すると予測されている²⁸。しかしながら、世界の農地面積のわずか1%にしか普及していない現状が示す通り、現場での実装には甚大な壁が存在する。

慣行農業から環境再生型農業への移行期において、土壌の生態系プロセスがバランスを取り戻すまでの数年間、農家は深刻な「収量変動(Yield variability)」のリスクに直面する²⁸。また、この農法は自然の動態を利用する生態学の深い理解に基づく適応型の管理技術を要求するため、高度な教育訓練と知識の習得が不可欠である²⁸。さらに、運用上の明確な定義の未解決や、標準化された認証制度の欠如が、大規模な移行を阻害している³。前述の通り、収量の低下を補うために他地域での開墾が誘発されれば、リーケージ(漏出)によるネットの炭素排出量増加を招く危険性がある¹²。

こうした過度な期待と悲観論が交錯する中、IPCCが2019年に発表した「気候変動と土地に関する特別報告書(SRCCL)」は、土壌炭素と土地管理に関する最も客観的でバランスの取れた科学的コンセンサスを提示した²⁹。この報告書では、長らく分断されていた「気候変動」「土地劣化」「砂漠化」「食料安全保障」が初めて統合的なフレームワークのもとで評価された³⁰。

IPCCは、砂漠化防止対策や劣化した土地への自然植生の回復・植林が、長期的に表土および下層土の炭素を濃縮し、土壌炭素隔離を促進することに「高い確信度(High confidence)」を与えた³¹。また、乾燥地における保全農業の導入による炭素隔離速度については、局所的な条件に依存するとして「中程度の確信度(Medium confidence)」と評価した³¹。さらに、各国が提出した国別温室効果ガス削減目標(NDCs)が完全実施された場合、農業管理や土壌炭素隔離等により、2030年時点で $0.4 \sim 1.3 \text{ GtCO}_2/\text{yr}$ の純吸収がもたらされると推定している³²。これは「大気中のCO₂をすべて相殺する」といったハイプとは一線を画す、現実的かつ控えめな数値であるが、同時に気候変動緩和における「欠かすことのできない重要な一部」としての土壌の地位を公式に確立するものであった。

7. 炭素市場とMRV(測定・報告・検証)の高度化

土壌炭素貯留の実践を拡大するための強力な経済的インセンティブとして期待されているのが、カーボンクレジット市場への農家の参加(カーボンファーム)である。しかし、ここでも「MRV(測定・報告・検証)」の技術的・経済的な壁が立ちはだかっている。

土壌中の有機炭素の変動は、単位面積あたりの変化量が微小であり、その変化が安定して定着するまでに長い年月を要する³³。さらに、同じ農場内であっても地形や水分の違いにより炭素量は空間

的に激しくばらつく。厳密なベースラインを設定し、追加的(Additional)な炭素量を正確に測定するための伝統的な土壌サンプリングはコストが極めて高く、カーボンのクレジットの販売収益をMRVコストが上回ってしまうという経済的ジレンマが存在する³³。

この分野の制度設計で世界をリードしているのがオーストラリアである。同国は2014年という早い段階で土壌炭素測定のコアを構築し、国家規模の温室効果ガスインベントリシステムである「FullCAM(Full Carbon Accounting Model)」を開発した。これを遵守市場(CCM)における「オーストラリア炭素クレジットユニット(ACCUs)」の生成に直結させることで、2023年2月時点で400件を超える土壌炭素プロジェクトが登録されるまでに成長している³⁶。

一方、米国のコロラド州等の多くの地域では政府主導の遵守市場が存在せず、農家は民間主導のボランタリー市場(VCM)に依存せざるを得ない³⁵。VCMではプロジェクト開発企業ごとに採用する基準やプロトコルが異なり、第三者検証機関、技術支援プロバイダー、弁護士などを交えた複雑な手続きが農家の参加障壁となっている³⁵。近年では、高コストな現地サンプリングを最小限に抑え、衛星データ、AI、生地球化学的モデリングを組み合わせた「ハイブリッドMRV」手法が主流になりつつあるが、モデル自体の不確実性の検証が新たな課題となっている³⁵。

8. バイオ炭(Biochar)による持続性の担保と新たなプロトコル

前述の通り、通常の土壌有機炭素は「飽和限界」や耕起による「非持続性(大気への再放出)」という致命的な弱点を抱えている。この限界を突破する技術的切り札として国際的に期待を集めているのが「バイオ炭(Biochar)」である。

バイオ炭は、農業残渣や未利用バイオマスが酸素が制限された環境下で350℃以上で熱分解(Pyrolysis)して生成される多孔質の炭化物である³⁷。この熱分解プロセスにより、バイオマス中の不安定な炭素は極めて安定した芳香族構造(Aromatic structures)に変換される。結果として、微生物による分解に対する強力な耐性(難分解性:Recalcitrance)を獲得し、土壌中で数百年から数千年にわたって炭素を固定し続けることが可能となる³⁸。

バイオ炭の優位性は持続性だけではない。MRVの観点からも、不確実性の高いモデリングに依存する必要がない。製造段階において投入重量、熱分解温度、炭素含有量を計測し、地球化学的トレーサーや官能基(ヒドロキシル基、カルボキシル基等)の分析を統合することで、より確実かつ低コストに炭素隔離量を算定・検証することが可能である³⁸。現在、Verra(VM0044)、Climate Action Reserve、Puro.earth、Isometric、そして欧州のGlobal Biochar C-Sink Standard(EBC)など、世界の主要なカーボンのクレジット認証機関がバイオ炭の厳密な方法論を相次いで確立している³⁹。

さらにバイオ炭は、多孔質な物理特性により保水性と保肥力を飛躍的に高めるため、劣化した土壌の修復策としても極めて有効である。タジキスタンやベトナムのメコンデルタ、モルディブ、米国南東部など、世界で10億ヘクタール以上に及ぶ塩類集積土壌において、火山灰や岩石粉(Rock dust)と並び、農業生産を回復させる気候適応策としての応用研究が急速に進んでいる⁴¹。

9. 日本における政策展開と特有の土壌ポテンシャル

土壌炭素貯留に向けた国際的な潮流を受け、日本政府(農林水産省)も農業の脱炭素化と環境負荷低減に向けた大規模な政策転換に踏み切った。その中核となるのが、2021年5月に策定された

「みどりの食料システム戦略(MeaDRI)」であり、併せて日本特有の火山灰土壌(黒ボク土)の研究とJ-クレジット制度の拡充が進められている。

9.1 みどりの食料システム戦略の野心的目標

この戦略は、イノベーションを通じて生産力の向上と持続可能性を両立させることを目指しており、2050年までに達成すべき極めて野心的なKPIを設定している。

政策分野	2050年(または2030年/2040年)までの主要な達成目標	技術・イノベーションの具体例
脱炭素化	農林水産業における化石燃料由来のCO2排出量ゼロ ⁴²	温室の完全脱化石燃料化(ヒートポンプ、バイオマス、太陽熱利用) ⁴⁴ 。林業機械・漁船の電動化・水素化 ⁴⁴ 。
化学農薬・肥料	化学農薬の使用量(リスク換算)50%削減。化学肥料の使用量30%削減 ⁴³ 。	総合的病害虫・雑草管理(IPM)の普及、ドローンによるピンポイント散布、AIによる病害虫早期発見 ⁴³ 。
有機農業	有機農業の取組面積を耕地面積の25%(100万ヘクタール)に拡大 ⁴³ 。	2040年までに主要作物の有機農業技術を確立。光や音を利用した害虫防除システム ⁴⁴ 。
炭素吸収	エリートツリー等の苗木を林業用苗木全体の9割以上(2030年で3割)に拡大 ⁴³ 。	高層木造建築技術の確立。CO2吸収能力の高い「スーパー植物」の安定生産技術開発 ⁴⁴ 。

9.2 J-クレジット制度の改定とバイオ炭の市場化

日本において土壌炭素を経済的価値に変換する実務的な枠組みが「J-クレジット制度」である。経済産業省、環境省、農林水産省が共同で運営するこの制度において、近年「水田におけるメタン排出削減」と「バイオ炭の農地施用による土壌炭素貯留」の方法論が追加・改定された⁴⁷。

水田は強力なGHGであるメタンの主要な発生源であるが、中干し期間の延長などの水管理によってメタン排出を抑制しクレジット化する取り組みが進展している。例えば株式会社Green Carbonは「水田コンソーシアム」を設立し、日本最大級の水田由来J-クレジットの認証を取得した⁴⁹。また、バイオ炭の分野では、丸紅株式会社がESG投資の一環としてバイオ炭由来のクレジットを購入し、自社のアップサイクル食器(edish)の製造プロセスにおけるCO2排出をオフセットするカーボンネガティブ製

品の開発を進めている³⁷。未利用の竹林や食品残渣といった地域の廃棄バイオマスをバイオ炭に変換し、農家に還元するサーキュラーエコノミーの構築が期待されている³⁷。

9.3 黒ボク土 (Andosols) の驚異的な炭素貯留ポテンシャル

日本の土壌炭素貯留を語る上で欠かせないのが、日本列島に広く分布する火山灰土壌「黒ボク土 (Andosols)」の存在である。火山活動に起因するこの土壌は、多量の水と有機炭素・窒素を蓄積する特異な機能を有しており、日本の高付加価値な園芸作物の栽培基盤となっている⁵⁰。また、九州地方に分布する「アカホヤ (Akahoya)」と呼ばれるアルミナを豊富に含む火山灰土壌は、細菌の吸着能力に優れ、放牧地の水質浄化等の環境修復にも応用可能であることが示されている⁵¹。

黒ボク土は、風化の進行度合いによって主に非アロフェン質 (Vitric Andosols: 風化が弱く新しい火山灰) とアロフェン質 (Silandic Andosols: 風化により短範囲秩序鉱物が形成されたもの) に大別される⁵²。北海道の洞爺湖周辺を対象とした実証研究によれば、土壌深さ 0 - 0.30 m 層における土壌有機炭素 (SOC) ストックは、砂質が多い非アロフェン質で $71.5 \pm 15.3 \text{ Mg C ha}^{-1}$ 、多孔質でかさ密度が低いアロフェン質においては $86.4 \pm 12.7 \text{ Mg C ha}^{-1}$ に達し、世界的に見ても極めて高い炭素保持能力を示した⁵²。

アロフェン質の黒ボク土は、アルミニウムや鉄が腐植と強固な複合体を形成するため、微生物による分解を受けにくく有機物の長期保存に非常に適している⁵¹。研究結果は、非アロフェン質の土壌では有機物 (堆肥等) の投入量に比例して SOC ストックが有意に増加する一方、アロフェン質の土壌はすでに多量の炭素を保持しているため、追加投入による表層での増加効果は限定的であることを示唆している⁵²。したがって、根張りを促進するための深耕 (Deep cultivation) や、被覆肥料 (Controlled-release fertilizers) を用いた局所的なプログラム施肥を組み合わせることで、この特異な土壌の炭素貯留能と長期的な生産性を最大化する緻密な管理が求められる⁵⁰。

10. 結論: 過信を超えた統合的土壌管理の未来

気候変動対策において「健康な土壌が CO₂ の吸収源である」という事実は、歴史的に見れば長らく政策の死角に置かれ、京都議定書時代には MRV の困難さから実質的に無視されてきた。その後、パリ協定を契機とする「4パーミル・イニシアチブ」や「1兆本の木」といった自然基盤解決策の台頭により、一転して「人類の排出量を完全に相殺できる魔法の杖」として過度な期待 (ハイプ) の対象となった。

本報告書の包括的分析が示すように、大気中の過剰な CO₂ を土壌のみで相殺しようとする極端なシナリオは、窒素・リンの化学量論的制約、土壌炭素の飽和限界、非永続性、そして地球規模の土地利用変化に伴うリーケージリスクを無視した非現実的な主張である。大豆生産の事例が示す通り、農地レベルの局所的な炭素蓄積が他地域での森林破壊を誘発するような不完全な炭素会計のもとでは、土壌炭素オフセットは化石燃料削減を遅らせるグリーンウォッシュの罠へと転落する危険性ははらんでいる。

しかしながら、科学的限界に対する健全な懐疑論は、土壌管理の無用論を意味するものではない。IPCC が統合的に評価したように、現実的な枠組みの中での土壌炭素隔離 (2030 年時点で

0.4 ~ 1.3 GtCO₂/yr)は、地球規模の気候変動緩和において不可欠なピースである。

今後の政策および市場メカニズムの構築において重視すべきは、土壌炭素の増加を単なる「トン当たりのCO₂削減量」としてのみ評価するのではなく、保水性の向上、生物多様性の回復、人類の健康(NCDsリスク低減)、そして異常気象に対する農業システムのレジリエンス強化という「適応策」としての総合的価値の観点から再評価することである。

同時に、土壌炭素市場の信頼性を担保するためには、厳密なベースライン設定とリーケージ評価を含んだ包括的なハイブリッドMRVフレームワークの構築が急務である。その際、土壌有機炭素の不安定性を補完し長期的かつ確実な炭素隔離を可能にする「バイオ炭」の活用や、日本特有の黒ボク土壌の炭素保持能力を最大化する精密農業技術を戦略的に実装していくことが、世界的にも極めて有効なアプローチとなる。科学的限界を冷静に直視した上で、自然のプロセスに寄り添う適応的な土壌管理を社会実装していくことこそが、真の意味での持続可能な気候変動政策の核心である。

引用文献

1. Scientists map soils' potential to combat climate change - Cornell CALS, 5月 9, 2026にアクセス、
<https://cals.cornell.edu/news/2020/12/scientists-map-soils-potential-combat-climate-change>
2. Soil-Based Carbon Sequestration | MIT Climate Portal, 5月 9, 2026にアクセス、
<https://climate.mit.edu/explainers/soil-based-carbon-sequestration>
3. From soil to health: advancing regenerative agriculture for improved food quality and nutrition security - PMC, 5月 9, 2026にアクセス、
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12576041/>
4. Soil Carbon Sequestration: Much More Than a Climate Solution | Environmental Science & Technology - ACS Publications, 5月 9, 2026にアクセス、
<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.3c07312>
5. 5月 9, 2026にアクセス、
<https://climate.mit.edu/explainers/soil-based-carbon-sequestration#:~:text=Climate%20change%20is%20also%20making,or%20permanently%20frozen%20soil%2C%20thaws.>
6. Chapter 4 : Land Degradation — Special Report on Climate Change ..., 5月 9, 2026にアクセス、
<https://www.ipcc.ch/srccl/chapter/chapter-4/>
7. Reporting soil carbon stock change information under the ... - BFW, 5月 9, 2026にアクセス、
https://bfw.ac.at/010/pdf/Act_639/Z-SOMOGYI.pdf
8. Linking global drivers of agricultural trade to on-the-ground impacts on biodiversity - PNAS, 5月 9, 2026にアクセス、
<https://www.pnas.org/doi/pdf/10.1073/pnas.1905618116>
9. Green for gold: social and ecological tradeoffs influencing the sustainability of the Brazilian soy industry - Boston University, 5月 9, 2026にアクセス、
https://www.bu.edu/gdp/files/2018/02/Garrett-and-Rausch_2015_JPS_Green-for-Gold.pdf
10. Trends and developments in sustainable soy production and consumption between 2019 and 2023 - IUCN NL, 5月 9, 2026にアクセス、

- <https://www.iucn.nl/app/uploads/2025/07/250626-IDH-Soy-Monitor.pdf>
11. Toward a Financial Architecture to Protect Tropical Forests: The Case of Brazil, 5月 9, 2026にアクセス、
https://www.forest-trends.org/wp-content/uploads/2018/02/doc_5728.pdf
 12. Regenerative Agriculture Practices | World Resources Institute, 5月 9, 2026にアクセス、
<https://www.wri.org/insights/regenerative-agriculture-good-soil-health-limited-potential-mitigate-climate-change>
 13. The international "4 per 1000" Initiative Soils for food security and climate, 5月 9, 2026にアクセス、<https://4p1000.org/>
 14. The 4 per 1000 Initiative - futurepolicy.org, 5月 9, 2026にアクセス、
<https://www.futurepolicy.org/healthy-ecosystems/the-4-per-1000-initiative-soils-for-food-security-and-climate/>
 15. The International "4 per 1000" Initiative - CoAct - Global Data Lab, 5月 9, 2026にアクセス、
<https://globaldatalab.org/coact/initiative/1/the-international-4-per-1000-initiative/>
 16. The "4 per 1000" Initiative and its implementation | Department of Economic and Social Affairs, 5月 9, 2026にアクセス、
<https://sdgs.un.org/partnerships/4-1000-initiative-and-its-implementation>
 17. What's the potential of a trillion trees? - Crowther Lab, 5月 9, 2026にアクセス、
<https://crowtherlab.com/whats-the-potential-of-a-trillion-trees/>
 18. How trees could help to save the climate* | ETH Zurich, 5月 9, 2026にアクセス、
<https://ethz.ch/en/news-and-events/eth-news/news/2019/07/how-trees-could-save-the-climate.html>
 19. The Need for Fast Near-Term Climate Mitigation to Slow Feedbacks and Avoid Tipping Points - Institute For Governance & Sustainable Development, 5月 9, 2026にアクセス、
<https://www.igsd.org/wp-content/uploads/2024/01/IGSD-Background-Note.pdf>
 20. 'I've never said we should plant a trillion trees': what ecopreneur Thomas Crowther did next, 5月 9, 2026にアクセス、
<https://www.theguardian.com/environment/2021/sep/01/ive-never-said-we-should-plant-a-trillion-trees-what-ecopreneur-thomas-crowther-did-next-aoe>
 21. What really happened at the Crowther Lab: A personal reflection on a failed process | by Constantin Zohner | Medium, 5月 9, 2026にアクセス、
https://medium.com/@constantin.zohner_15670/what-really-happened-at-the-crowther-lab-a-personal-reflection-on-a-failed-process-1d932ec0e2dd
 22. The 4p1000 initiative: Opportunities, limitations and challenges for implementing soil organic carbon sequestration as a sustainable development strategy - PMC, 5月 9, 2026にアクセス、<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6889108/>
 23. Written evidence submitted by Dr Helen Millman (MSI0002) My Science Inquiry: Carbon Farming The 4 per 1000 initiative was launch, 5月 9, 2026にアクセス、
<https://committees.parliament.uk/writtenevidence/110080/pdf/>
 24. UK Research Flags Practical Problems with 4 Per 1000 Soil Carbon Initiative, 5月 9, 2026にアクセス、
<https://www.theenergymix.com/uk-research-flags-practical-problems-with-4-pe>

- [r-1000-soil-carbon-initiative/](#)
25. Challenging claimed benefits of soil carbon sequestration for mitigating climate change and increasing crop yields: Heresy or sober realism? - PMC, 5月 9, 2026にアクセス、<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10946913/>
 26. Soil Carbon Sequestration: Myths, Realities, and the Biden ... - CSIS, 5月 9, 2026にアクセス、
<https://www.csis.org/analysis/soil-carbon-sequestration-myths-realities-and-biden-administrations-proposals>
 27. Regenerative Agriculture—A Literature Review on the Practices and Mechanisms Used to Improve Soil Health - MDPI, 5月 9, 2026にアクセス、
<https://www.mdpi.com/2071-1050/15/3/2338>
 28. Challenges and opportunities of regenerative agriculture | Experts' Opinions, 5月 9, 2026にアクセス、
<https://www.developmentaid.org/news-stream/post/183168/challenges-and-opportunities-of-regenerative-agriculture>
 29. Foreword and Preface Technical Summary - Intergovernmental Panel on Climate Change, 5月 9, 2026にアクセス、
https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2022/11/SRCCL_Technical-Summary.pdf
 30. Summary report 2–7 August 2019 - Earth Negotiations Bulletin, 5月 9, 2026にアクセス、
<https://enb.iisd.org/events/50th-session-intergovernmental-panel-climate-change-ipcc-50/summary-report>
 31. Summary for Policymakers - Intergovernmental Panel on Climate ..., 5月 9, 2026にアクセス、
https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2022/11/SRCCL_SPM.pdf
 32. Special Report on Climate Change and Land — IPCC site, 5月 9, 2026にアクセス、
<https://www.ipcc.ch/srccl/>
 33. Publication: Soil Organic Carbon MRV Sourcebook for Agricultural Landscapes - Open Knowledge Repository, 5月 9, 2026にアクセス、
<https://openknowledge.worldbank.org/entities/publication/1424d8b2-97e7-570b-812b-91585520c0a8>
 34. Soil Organic Carbon MRV Sourcebook for Agricultural Landscapes | PMI, 5月 9, 2026にアクセス、
<https://www.pmiclimate.org/publication/soil-organic-carbon-mrv-sourcebook-agricultural-landscapes>
 35. Carbon Market Intro, 5月 9, 2026にアクセス、
<https://www.soilcarbolutionscenter.com/resources-guide-carbon-market-intro>
 36. Should We Wait for a Global Soil Carbon Regulatory Policy? | Cleantech Group, 5月 9, 2026にアクセス、
<https://cleantech.com/should-we-wait-for-a-global-soil-carbon-regulatory-policy/>
 37. Introducing J-Credit Sales for the Agricultural Use of Biochar, Including its Application in the Production of “edish” Upcycling Tableware - Marubeni Corporation, 5月 9, 2026にアクセス、

- <https://www.marubeni.com/en/news/2022/release/00056.html>
38. Rethinking Biochar's MRV Systems: A Perspective on Incorporating Agronomic and Organic Chemistry Indicators - MDPI, 5月 9, 2026にアクセス、
<https://www.mdpi.com/2673-4079/5/4/20>
 39. Digital MRV for distributed Biochar production and Carbon Dioxide removal (CDR) system - I-TRACK Foundation, 5月 9, 2026にアクセス、
https://www.trackingstandard.org/wp-content/uploads/Distributed_Biochar_Methodology_Foundation_v1.0.pdf
 40. COMPARISON OF BIOCHAR CARBON MARKET PROTOCOLS | Environmental Defense Fund, 5月 9, 2026にアクセス、
<https://www.edf.org/comparison-biochar-carbon-market-protocols>
 41. Volcanic Ash: A Unique Carbon Capture and Land Degradation Solution, 5月 9, 2026にアクセス、
<https://remineralize.org/2026/02/volcanic-ash-a-unique-carbon-capture-and-land-degradation-solution/>
 42. MAFF endeavors to accomplish the triple win of; MeaDRI's Conceptual Approach, 5月 9, 2026にアクセス、
https://www.maff.go.jp/e/policies/env/env_policy/attach/pdf/index-19.pdf
 43. MIDORI Strategy for Sustainable Food Systems : MAFF, 5月 9, 2026にアクセス、
https://www.maff.go.jp/e/policies/env/env_policy/midori.html
 44. Report Name:MAFF Finalizes Green Food System Strategy Report - USDA/FAS, 5月 9, 2026にアクセス、
https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=MAFF%20Finalizes%20Green%20Food%20System%20Strategy%20Report_Tokyo_Japan_05-20-2021.pdf
 45. Japan's Sustainable Food Systems Strategy (MeaDRI) | English - クロップライフジャパン, 5月 9, 2026にアクセス、
<https://www.croplifejapan.org/english/meadri.html>
 46. Report Name:MAFF Releases Interim Report on Green Food System Strategy - USDA/FAS, 5月 9, 2026にアクセス、
https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=MAFF%20Releases%20Interim%20Report%20on%20Green%20Food%20System%20Strategy_Tokyo_Japan_04-02-2021
 47. Japan revises five methodologies under J-Credit scheme - Carbon Pulse, 5月 9, 2026にアクセス、
<https://carbon-pulse.com/490737/>
 48. J-Credit Scheme, 5月 9, 2026にアクセス、
https://japancredit.go.jp/english/pdf/credit_english_001_41.pdf
 49. Green Carbon,Inc. begins pilot testing for J-Credit new methodology development with Snow Brand Seed Co., Ltd., 5月 9, 2026にアクセス、
<https://green-carbon.co.jp/en/gcmeg-eng/>
 50. Environmental and Agricultural Significance of Volcanic Ash Soils, 5月 9, 2026にアクセス、
https://www.airies.or.jp/attach.php/6a6f75726e616c5f30362d32656e67/save/0/0/06_2-12.pdf
 51. Discovery of a new volcanic soil material, “Akhoya,” as an adsorbent for bacterial and viral pathogens and its application to environmental purification - PMC, 5月 9,

2026にアクセス、<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11409706/>
52. Factors impacting soil organic carbon pool in different types of Andosols in Toya, Hokkaido, Japan | Request PDF - ResearchGate, 5月 9, 2026にアクセス、
https://www.researchgate.net/publication/363291590_Factors_impacting_soil_organic_carbon_pool_in_different_types_of_Andosols_in_Toya_Hokkaido_Japan