



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Investigation on soil carbon loss mitigation through organic fertilizer application and enhanced rock weathering
Author(s)	YANG, Yilin; 楊, 倚麟
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(農学)
Dissertation Number	甲第16686号
Issue Date	2025-12-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k16686
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/98660
Type	doctoral thesis
File Information	YANG_Yilin_abstract.pdf, 論文内容の要旨 https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称： 博 士（農学）

氏名 楊 倚麟

学 位 論 文 題 名

Investigation on soil carbon loss mitigation

through organic fertilizer application and enhanced rock weathering

（有機肥料投入と風化促進技術による土壌炭素損失緩和策に関する研究）

1. 背景

21 世紀中に世界の平均気温が 1.5～2.0℃上昇すると予測される中、温室効果ガス（特に CO₂）削減が急務となっている（IPCC 2023）。土壌は重要な炭素プールであり、陸地と大気間の CO₂ 交換量の 25%を占め（Schlesinger and Andrews 2000）、土壌炭素損失の緩和が重要な二酸化炭素除去戦略（CDR）として注目されている。土壌での炭素損失緩和策は主に二つに分類される。第一は、有機炭素の施用による土壌炭素貯留の向上であるが、土壌からの CO₂ 排出を増加させる可能性がある上、異なる有機資材の効率に関する研究は依然として少ない。第二は、風化促進技術（ERW）などの土壌から発生する CO₂ の再固定・安定化であるが、具体的な炭素損失緩和量の算出については、現時点では研究が十分とは言えない。本研究では、2 種類の土壌管理方法（有機質肥料の施用と ERW）による炭素損失緩和量を定量化・比較し、実用化技術の科学的根拠を提供することを目的とする。具体的には、（Ⅰ）資材の相違が土壌炭素プールと炭素収支に及ぼす影響とその効率の比較、（Ⅱ）ERW による緩和量の算定と適用環境の検討、を行った。

2. 研究方法

（1）異なる有機質肥料の施用（培養）：

北海道大学静内研究牧場のリードカナリー採草地で採取した多湿黒ボク土を用い、無施肥（NF）、化学肥料（IF）、堆肥（M）、スラリー（S）と消化液（D）区を 3 反復で、25℃の好気条件下で 91 日間培養した。圃場実用量に基づき、M、S、D はそれぞれ 14.4、56.3、55.2 g（炭素投入量は 5.63、5.53、3.50 mg g⁻¹）を 300 g 風乾土壌に混和した。培養期間を初期（1-7 日）、中期（8-35 日）、後期（36-91 日）に区分し、CO₂、N₂O、NO、CH₄ 排出量を測定した。土壌有機態炭素（SOC）、易酸化有機態炭素（LOC）、バイオマス炭素（MBC）、水溶性有機態炭素（WSOC）はそれぞれ燃焼法、過マンガン酸酸化法、クロロホルム燻蒸法、水抽出により求め、難分解性有機炭素（ROC）は SOC と LOC の差として算出した。投入炭素量（C_{input}）に対する分解炭素（ΔSOC+ΔCO₂）の割合を炭素分解進行度（CDP, (ΔSOC+ΔCO₂)/C_{input}）、純炭素蓄積（ΔSOC-ΔCO₂）の割合を炭素収支効率（CBE, (ΔSOC-ΔCO₂)/C_{input}）として算出し、炭素動態を評価した。ΔSOC と ΔCO₂ はいずれも NF 補正值（施用区-NF 区）として定義した。

（2）風化促進技術（圃場）：

2023 年 5 月から 9 月にかけて北海道大学 FSC 研究農場の圃場にて玄武岩粉施用区（B）（150 t ha⁻¹）と無施用区（NB）をそれぞれ 3 反復で設けてダイズを栽培し、各プロットの中に植栽区と裸地区を設けた。栽培期間中、2 処理の裸地区の CO₂ フラックス（F_{CO2}）と植栽区で大豆の光合成を含めた CO₂ 交換量（NEE）、15 cm 深土壌の pH、EC、WSOC、WSIC、NH₄⁺-N・NO₃⁻-N 濃度、5 cm 深地温、体積含水率（VWC）、光量子強度を測

定した。 F_{CO_2} とNEEは地温、VWCと光量子強度でフィッティングしモデルを作製した。作物純一次生産(NPP)と収穫搬出量(E)は収穫時の作物から、溶脱量(L)は土壤溶液の炭素濃度と浸透水量から求めた。ERWsはBとNBの裸地区の CO_2 排出量の差、ERWpはBとNB区の植生区のNEEの差からERWsを引いて求めた。炭素収支(NBP)は炭素輸入(NPP、ERWs、ERWp)から炭素輸出(F_{CO_2} 、L、E)の差で求めた。栽培期をS0(播種前)、S1(成長期)、S2(開花期)、S3(子実肥大期)とS4(成熟期)に分けて解析した。

3. 結果と考察

(1) 異なる有機質肥料の施用

培養終了時、全有機肥料区でSOCはNF区より有意に増加したが、 CO_2 排出量は炭素投入量に単純比例せず、 $S > D > M$ の順で有意に小さかった。M区の炭素投入量は最も高かったにも関わらずSOC増加量が最低だった。CDPは、M区では投入炭素の51.6%が CO_2 またはSOCとして変換され、S区(81.12%)とD区(97.98%)より有意に低かった。相関ネットワーク解析では、M区で CO_2 フラックスと土壤特性間の相関がS区やD区より弱く、特に CO_2 フラックスとpHとの正相関またはECとの負相関が低下しており、堆肥粒子による嫌氣的微環境の形成が示唆された。CBEはS区(47.16%)よりD区(74.24%)が有意に高く、嫌気発酵による易分解性炭素の事前分解が土壤施用後の急激な炭素分解を抑制し、持続的な炭素貯留に寄与することを示唆した。RDA分析により、 NO_3^- -N濃度変化と累積 N_2O 排出量がCDP・CBEに正の寄与を示し、SOC画分変化より予測力が高かった。消化液は炭素投入量が少ないものの、高い変換効率により最低の CO_2 排出と最高のCBEを示し、炭素損失緩和に最適と考えられる。

(2) 風化促進技術

調査期間中、B区のpHはNB区より有意に高く、VWCは有意に低く、玄武岩施用による土壤pHの改善と乾燥化傾向が示された。ERWsとERWpは正の値を示し、ERWの CO_2 削減効果が示唆されたが、ERWsの累積量($0.11 \pm 0.43 \text{ Mg C ha}^{-1}$)は時期で変動し特に降水の多いS4では負の値となった。ERWsの日累積量とpH・VWCとの負の相関関係から、風化による CO_2 吸収をpH増加と降水に伴う微生物呼吸の促進が相殺した可能性がある。ERWpの累積量($0.69 \pm 0.43 \text{ Mg C ha}^{-1}$)は有意な正の値を示し、特に作物根分泌物の多いS3と落葉の多いS4で期間中の平均累積量が他の時期より高かった。風化過程で生成された金属イオンによる作物生育の促進、さらに根分泌物と金属イオンの結合による岩石溶解促進との相互促進効果はERWpが有意な正の値であった要因と考えられた。調査期間中、B区とNB区のNBPに有意差はないがB区では CO_2 排出が減少傾向であり $0.79 \text{ Mg C ha}^{-1}$ の炭素損失緩和効果が示唆された。ERWの CO_2 削減効果の86.4%は植栽区由来であり、発達した根系を持つ作物圃場へERWの応用が期待される。

4. 結論

本研究は、有機質肥料施用とERWを共通の評価枠組みで比較し、いずれも土壤炭素損失の緩和に寄与することを示した。CDR効果は「資材×環境×時期」で決定される。有機質肥料は炭素投入による即効的な貯留増加が見込まれ、特に消化液は急激な分解を回避し好氣的な圃場での短期的なCDRに適していると考えられる。一方、ERWは根系活動との相互作用により植栽圃場の生育期で削減効果を示し、長期的な炭素安定化が期待される。統合評価により、短期的な固定には消化液、植栽圃場の継続削減はERWが最適である。技術選択には、窒素動態(NO_3^- -N濃度・ N_2O 排出など)評価、および各生育段階の根系生物量の把握が重要である。