



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Enhanced Rock Weathering in Acid Mine Drainage and Sandy Soil Systems : Assessments of CO ₂ Removal Potential and Co-benefits
Author(s)	San, Hkaung Htut
Description	この博士論文の全文は利用可能日以降に公開されます。利用可能日以前の閲覧方法は https://www.lib.hokudai.ac.jp/dissertations/copy-guides/ をご参照ください。
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第16627号
Issue Date	2025-09-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k16627
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/98237
Type	doctoral thesis
File Information	Hkaung_Htut_San_review.pdf, 審査の要旨 https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/



学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士 (工学) 氏名 Hkaung Htut San

審査担当者 主 査 教 授 佐藤 努
 副 査 教 授 大竹 翼
 副 査 准教授 胡桃澤 清文
 副 査 准教授 大友 陽子

学位論文題名

Enhanced Rock Weathering in Acid Mine Drainage and Sandy Soil Systems: Assessments of CO₂ Removal Potential and Co-benefits
(酸性鉱山廃水および砂質土壌における岩石風化促進: CO₂ 除去ポテンシャルとコベネフィットの評価)

岩石風化促進 (ERW) は、土壌肥沃度の回復や海洋酸性化の回避など、重要なコベネフィットをもたらす二酸化炭素除去 (CDR) 技術として、その認知度や期待感が高まっている。この学位論文では、今まで ERW の対象として検討されて来なかった酸性鉱山廃水 (AMD) と砂質土壌という 2 つの地球化学的環境の異なる場における ERW のポテンシャルを地球化学反応輸送モデリングにより検証するとともに、現場試験や試料の詳細な分析、および精緻なモニタリング結果の解析により、農地での応用に限定されてきた ERW の拡張性・実現性とコベネフィットと評価した。

第 1 章では、ERW を岩石の風化促進による自然ベースのネガティブ・エミッション技術 (NET) と定義し、地化学的に反応性が高く、ERW の展開に十分に利用されて来なかった環境である AMD と砂質土壌に焦点を当てた研究の目的と方法について示した。

第 2 章では先行研究の包括的なレビューを行い、pH、鉱物組成、粒子径、水文環境など、ERW の有効性に影響を及ぼす主な因子を抽出した。また、AMD システムのような強酸性環境下や、砂質土壌のような未調査の環境における ERW の展開に関する知識のギャップを明らかにし、本論文で明らかにすべき内容やその新規性に関して言及した。

第 3 章では、多様な環境条件における ERW のメカニズムと炭素貯留の可能性を確実に評価するため、現場試験や試料の詳細な分析、および精緻なモニタリング結果の解析、および地球化学モデリングを組み合わせた、本研究の基盤となる研究手法と枠組みを示した。

第 4 章では、様々な条件での AMD や砂質土壌における ERW のポテンシャルを示すために、地球化学反応輸送モデリングによるパラメータスタディを実施した。AMD の場合は反応する溶液の pH や流速により、砂質土壌の場合は反応する溶液や間隙率により 1 年間で溶解可能な玄武岩量が異なるため、それぞれの条件で得られる年間 CDR 量にも大きな違いが認められた。

第 5 章では、実在する休廃止鉱山に存在する 2 つの AMD に、貫入タイプの結晶の多い玄武岩質安山岩と、噴出タイプのガラスマトリックスの多い玄武岩を 1t 投入した現場試験の詳細と結果および考察を示した。その結果、岩石に含まれる鉱物の溶解により、pH や Ca や Mg 等の陽イオン濃度が上昇するとともに、ヒ素濃度が減少していることが明らかとなった。これらの知見は、AMD における ERW は、CDR のためだけでなく、同時にパッシブトリートメントとしてのコベネフィッ

トも期待できることを明らかにしたものとなった。また、玄武岩の投入から経過時間の異なる時点でサンプリングした玄武岩試料の詳細な分析から、どちらの岩石においても、構成鉱物は調和溶解し、鉱物反応時間が経過するとともに、構成鉱物が分離して粒径が小さくなっていた。この傾向は、ガラスマトリックスの多い玄武岩で顕著であった。鉱物の調和溶解は、4章で実施したモデリングにおける鉱物の溶解速度を決定する際に想定した溶解メカニズムなので、4章で示した結果を支持するものとなっている。

第6章では、ミャンマー中央部の砂質土壤に異なる量の玄武岩を混合させたフィールド試験とその結果を示した。土壌 pH が弱酸性のため玄武岩の風化速度は遅かったが、玄武岩の施用によって土壌 pH は 1.5~2 単位上昇し、植物が利用可能なカルシウムとマグネシウムイオン量も増加して、茄子の成長に大きな影響を与えることを明らかにした。ただし、玄武岩の含有量が多すぎると成長障害も認められたため、玄武岩の投入量には注意が必要であることも示された。

第7章は、すべての結果を総合した上で、AMD や砂質土壤での ERW の実現可能性について議論した。その結果、存在する多くの AMD で、迅速な鉱物溶解とそれにともなう高い CDR が期待できるため、ERW のサイトとして十分なポテンシャルを有することが明らかにされた。一方、砂質土壤は、玄武岩の投入により植物の生育環境が改善し、比較的高い CDR も期待できるため、農地としての利用が広がる可能性が示された。砂質土壤における ERW は、土壌における CDR 計算のプロトコルが多数存在するため、それらに従ってプロジェクトを実施することが可能である。一方、AMD における ERW は、本研究で初めてその可能性が示されたものなので CDR 計算のプロトコルが存在しないが、河川や海洋アルカリ強化等の類似環境のプロトコルを改良することで実施可能であることを示した。

第8章では、本研究の総括と結論を述べ、得られた知見を強調するとともに、今後の研究の方向性を示唆した。

これを要するに、著者は農地に限定されていた風化促進による二酸化炭素除去が、鉱山活動の負の遺産である酸性鉱山廃水や農地として利用されてこなかった砂質土壤でも有効に実施可能であることを明らかにした。このことは、風化促進による二酸化炭素除去量の拡大につながるだけでなく、その技術開発の背景となる環境資源工学の発展に寄与するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格があるものと認める。