

HP1 を用いた CO₂ 生成および鉱物風化を伴う土壌内物質動態に関する数値計算 Numerical simulations of soil mass transport with CO₂ production and rock weathering using HP1

濱本昌一郎¹・朱顔¹・辰野宇大¹・柏木淳一¹・山崎琢平²・西村拓²

¹北海道大学 大学院農学研究院・²東京大学 大学院農学生命科学研究科

要旨(Abstract)

本研究では、PhreeqC による鉱物風化および土壌内 CO₂ 生成モデルと HYDRUS-1D を HP1 により連結させ、圃場条件における鉱物風化を伴う土壌内水・熱・ガス・溶質動態を数値計算した。数値シミュレーションは実測の土壌水分・地温・土中 CO₂ 濃度をよく再現した。降雨イベント時に土中 CO₂ 濃度は増加し、土壌内の岩石（橄欖石）風化は促進した。また、深度が深い程岩石風化量は増加し、土中 CO₂ の時空間変動が岩石風化量に大きく影響を与えることが確認された。

キーワード：鉱物風化、土壌呼吸、HP1、数値解析、モニタリング

Key words: Rock weathering, Soil respiration, HP1, Numerical simulation, Monitoring

1. はじめに

地球温暖化対策として鉱物風化促進 (ERW) による炭素貯留が注目されている。玄武岩などを粉砕・土壌に散布し、風化を人工的に促進する技術である。風化過程では、岩石中のケイ酸塩鉱物が CO₂ と反応して重炭酸として溶脱する。鉱物風化量は、鉱物の溶解速度によって決まり、土壌水のイオン組成、pH、土壌 CO₂ 濃度等に影響を受ける。一方土壌水分や地温は、土壌呼吸（土壌 CO₂ 濃度）を規定する。このように、ERW による炭素貯留能を正しく評価するためには、土壌内の水、熱、溶質、ガス挙動と鉱物溶解反応の連成場での物質輸送現象を理解する必要がある。これまで、ERW による炭素固定能に関する数値計算については地球科学計算コードの PhreeqC などを用いて検討された事例はみられるものの、鉱物風化に関連する土壌内の物質移動、特に土壌 CO₂ 濃度変化による影響を検討した事例はみられない。

本研究では、PhreeqC と HYDRUS-1D を連成した HP1 を用いて、粉砕玄武岩存在下における土壌内物質動態を数値解析し、土壌呼吸が鉱物風化に与える影響について評価した。

2. 実験方法

粉砕玄武岩の散布実験を実施している北海道大学内畑地土壌（灰色低地土）を数値計算の対象サイトとした。数値計算は鉛直 1 次元で行い、深さは 1 m とした。土壌断面調査に従い、表層 (0~30 cm) と下層 (30~ cm) の 2 層を仮定した。水移動の境界条件は、地表面に日降水量(北海道札幌市)および Penman-Montieth 式によって計算した FAO 基準蒸発散位、下端境界は地下水位を仮定した。溶質移動の上部境界として、大気中 CO₂/O₂ と平衡した溶液を降雨に伴い与えた。熱移動の境界条件は、地表面に日平均気温、下端はゼロフラックスとした。ガス移動の境界条件は、地表面に大気中 CO₂/O₂、下端にゼロフラックスを設定した。土壌呼吸 (CO₂ 生成) については、Simunek and Suarez (1993) に基き、最大 CO₂ 生成速度 (γ_0 , 20°C) に、制限要因として土中水圧および地温による応答を考慮した。なお、 γ_0 は 0~30 cm 深度間で均一と仮定した。また、玄武岩の成分として橄欖石を仮定し、表層 15 cm までに均一に混和することとした (0.01 mmol cm⁻³)。鉱物溶解の平衡定数と速度定数は文献値を用

いた。対象サイト（非栽培区）で得られた 2023 年度の観測データを対象にフィッティングすることで、土壌水分・熱移動に関するモデルパラメータおよび γ_0 を得た。

3. 結果および考察

土壌水分は、特に 10 cm 深度で 9 月上旬まで大きな変動を示し、その後比較的湿潤状態が継続した（図 1a）。土中 CO_2 濃度は、深度が深い程高く、特に降雨イベント時に高くなった（図 1b）。土壌水分の増加による土壌呼吸の増加と、気相率の減少による大気とのガス交換の阻害が考えられる。HP1 による土中 CO_2 濃度の予測は、概ね実測値のトレンドを再現することができたものの、再現性を高めるためには土壌呼吸の深度依存性やガス拡散係数など CO_2 生成や移動に関わる各種パラメーターのファインチューニングが必要と思われる。図 2 に土壌内橄欖石の深度分布を示す。深度が深い程橄欖石の風化量が大きい結果が得られた。これは地表面が大気 CO_2 濃度一定に対し、深度方向で CO_2 濃度が増加し pH が低下したためと考えられる。また、シミュレーション期間が経つにつれて風化速度は低下した。これは、10 月以降地温が低下したことと、鉍物存在量の減少に伴い溶解速度が低下したためと考えられる。図 3 に示すように、土中 CO_2 濃度の増加時に pH は低下し、橄欖石の風化は促進した。 γ_0 を倍にした場合、土壌内 pH はさらに低下し、橄欖石の風化速度も増加した。

4. 結論

鉍物風化を考慮した土壌内物質挙動を HP1 により解析した。岩石風化量は土壌内 CO_2 濃度に連動して変化し、土中 CO_2 増加時に風化量は増加した。今後、有機物分解モデルに加え、実際の鉍物・土壌溶液組成やイオン交換反応等を反映させ、より現実的な条件での解析を行い、実測の鉍物風化量との相違について調べる。

謝辞：本研究はムーンショット型研究開発事業の助成を受けて行われた。

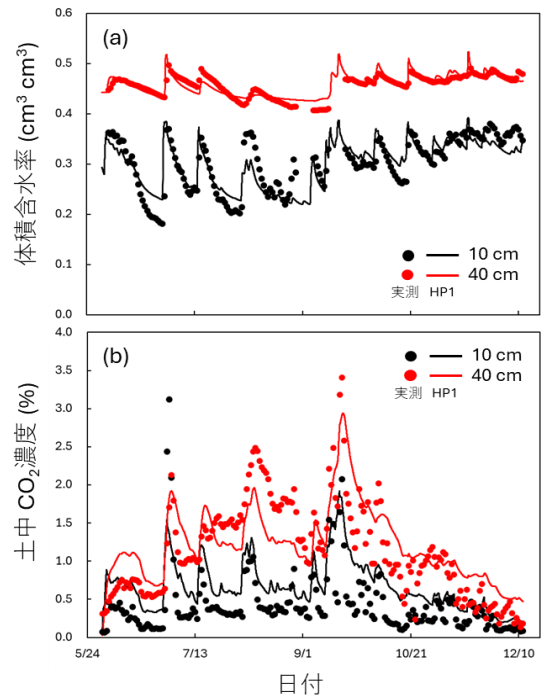


図 1(a)体積含水率および(b)土中 CO_2 濃度の時系列変動

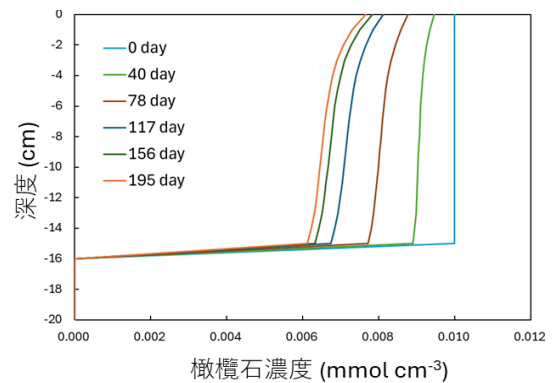


図 2 橄欖石濃度分布変化

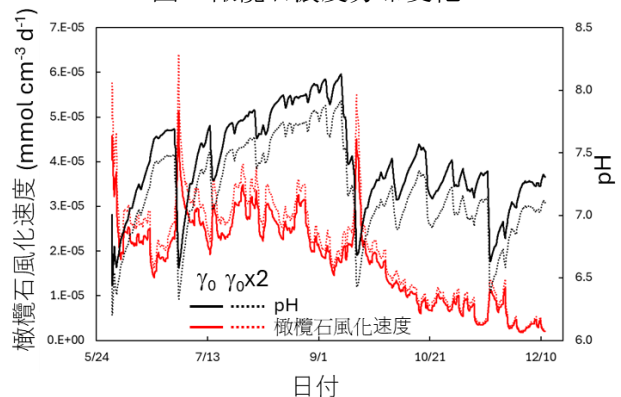


図 3 深度 10 cm における pH および橄欖石風化量の時系列変動

参考文献：Simunek and Suarez, WRR, 29, 487-497, 1993