2026年度

土壌物理学会大会　講演要旨集

Proceedings of the 2026 Annual Meeting, Japanese Society of Soil Physics

第 68 回シンポジウム

「農地土壌における窒素・炭素動態に着目して」

一般発表

（ポスターセッション）

2026年11月28日（土）

東京大学

主催：土壌物理学会

第 68 回土壌物理学会大会について

土壌物理学会長　西村拓

2026 年度の土壌物理学会大会は、東京大学農学部において、農業農村工学会土壌物理研究部会との共催で開催いたします。今年度のテーマは「農地土壌における窒素・炭素動態について」です。

初期の土壌物理学は、「土壌中で何が起こっているのか、そして、その現象を支配する物理法則は何か、予測できないか、モデル化できないか」といったことを課題としていました。現在でも、「複雑な土壌をどうモデル化するか」といったスケールや土壌の不均一性の把握に関する問題や、通常使っている法則・仮定の見直し、試験方法や実験方法、モニタリング手法の改良といった古くからある重要なテーマにやるべき課題が残っています。たとえば、溶存化学物質の移動に関して、土壌物理に疎い方は遅延係数そのものすら知らずに事業を行う一方で、土壌物理学に関わる者として、イオン交換をイオンの吸着とみなした遅延係数のようなモデルの限界の切り分けと限界を超えた部分をどう扱っていくかといったことは重要な課題です。

「土壌で何が起こっているのか？」に着目すると、いわゆる物理現象だけではなく、無機化学的プロセスや微生物が関与するような生化学的プロセス、たとえば温室効果ガス発生の抑制や吸収、土壌中の反応性汚染物質の移動の予測など、今まで扱ってこなかったプロセスを理解し、モデルとして構成することが求められます。また、是非はさておき、現在の風潮のように、研究に役に立つことを求められる様になると、知や技術を作るだけではなく、使うことも必要になります。

土壌中では多量の炭素・窒素が絶えず循環しています。農地においては作物生産や土壌肥沃度、環境への影響など様々な面から研究が進められてきました。近年、農地からの二酸化炭素やメタン、亜酸化窒素の放出抑制が社会的に求められており、排出抑制の為の様々な研究・提案が積極的に行われてきています。

今回のシンポジウムでは、水田における鉄還元菌が持つ窒素固定能に関する発表、メタン還元菌とメタン酸化細菌の動態に関する話題提供を頂きます。また、別の観点として農地から放出される温室効果ガスを減らす取り組みとして、岩石粉末を用いた無機炭素の固定に関して話題提供を頂き、その後総合討論を行います。これらの議論を通して得た最新の知見が、土壌物理学会がこれまで取り組んできた研究と組み合わさって、研究の飛躍に繋がることを期待します。

学会大会ならびにポスターセッションは講義でも動画でもありません。発表者、聴衆を含めた参加者のリアルな双方向のコミュニケーションが、個々人にとっての新しい知や新しいプロジェクトの種となります。その意味で、研究者のみならず、学生、院生の皆さんからの質問・コメントを歓迎・奨励します。講演要旨などが事前に公開される予定です。学生諸氏（もしかすると研究者の方も）においては、もし普段なじみのないテーマであるなら、予習をして、どんな話が出てくるかを予想した上で参加し、発言していただけると大変幸甚に思います。是非、勇気を奮って声を上げて下さい。同じ趣旨で、大会後に行われる情報交換会は、講演会会場やポスター会場ではできなかった研究議論をする絶好の場です。皆様の積極的な参加をお願いしたいと思います。

土壌物理学会大会・第 68 回シンポジウム　プログラム

日時：2026 年 11 月 28 日（土）
場所：東京大学大学院農学生命科学研究科
　　総会・シンポジウム・企業展示：弥生講堂（一条ホール）
　　ポスター会場：弥生講堂（一条ホール・アネックス）

9:00～　受付開始
9:30～ 9:40　開会・事務連絡
　開会の挨拶　西村拓学会長（東京大学大学院農学生命科学研究科）
9:40～10:00　企業展示紹介

10:00～11:30　ポスターセッション
　前半 45 分：奇数番号，後半 45 分：偶数番号のポスターコアタイム

11:40～12:20　総会および学会賞授賞式

13:00～16:30　第 68 回シンポジウム
　「農地土壌における窒素・炭素動態について」

13:10～13:55　水田土壌の窒素肥沃度を支える鉄還元菌窒素固定の発見と持続的農業への応用
　妹尾啓史
　　東京大学大学院農学生命科学研究科
　　東京大学微生物科学イノベーション連携研究機構
14:05～14:50　水田土壌におけるメタン生成古細菌とメタン酸化細菌の動態
　浅川晋
　　名古屋大学大学院生命農学研究科
15:00～15:45　農地は CO_2除去の「反応場」になり得るか？
　：Enhanced Rock Weathering の可能性と課題
　中尾淳
　　京都府立大学
16:00～16:45　総合討論

16:45～17:00　閉会式

会場案内図



最寄り駅　東京メトロ南北線　東大前駅（１番出口）
　　東京メトロ千代田線　根津駅（１番出口）

クリマテック株式会社

True TDR 土壌水分センサ

CACC-TDR315シリーズ　¥68,000(税抜)





製品Webページ

ブレークスルーテクノロジーにより、従来大型のシステムでしか可能ではなかった真のTDR測定方式を小型なセンサーの中に凝縮しました。生の波形データを取得(*)も可能です。

計測項目
体積含水率(0-100%)
土壌バルクEC(0-5dS/m)
地温(-20～50℃)
比誘電率

出力
デジタル(SDI-12)

サイズ・重量
本体200L x 553W x 19Hmm
150/100/50mmロッド
440g(9.5m cable)

Handy 土壌水分モニター/ロガー

C-M1001　¥95,000(税抜)

C-M1001土壌水分モニターは、TDRセンサー(別売)を接続して、土壌水分を測定し、モニター/記録します。
3つの操作ボタンにより、簡単に設定やモニターが可能です。
省電力データロガーとしての機能もあるので、拡張ターミナルに接続して、10本までの長期間の計測も可能です。
*TDR-315センサに対応します。



本体・センサ

電源
アルカリ単3電池x4本

電池寿命
1ch　85日(10分インターバル)
4ch　35日(10分インターバル)

記録メディア
マイクロSDカード
(<16GB)

測定インターバル
2分、5分、10分、30分、60分、ワンショット記録



10ch拡張ターミナル

本社:東京都豊島区池袋4-2-11 CTビル6F
TEL 03-3988-6616　FAX 03-3988-6613
札幌営業所:札幌市東区北22条東8丁目4－5
TEL 011-711-9921　FAX 011-711-9922

DynaxT-Measure

データが語る現場の予見。「予測と予防」を実現する

リアルタイム測定IoT ソリューション

製品の特長



高性能センサーを搭載し独自に最適化

一流メーカー製の
MEMS センサーを採用し、
当社独自の読み取り制御と
省電力マネジメントを実現。

全送信器ワイヤレスで設置場所を選ばない

送信器は電池駆動による
省エネ型のデータ送信に対
応。

収集したデータをニーズに合わせて利用可能

測定、蓄積したデータは、
過去データとの比較や、
異常値警報への利用など、
ニーズに合わせた利用が可能。

精密ディジタル測定、全てワイヤレス

pF計



植物の生育改善や
土砂崩れ予測に有用な
土壌水分吸引圧(pF)を測定

地下水位計



軽量で設置がしやすく、
吊り下げも不要
地上測定部から7m下(最大9m)
の水位まで測定可能

精密傾斜計



センサ部の縦置きにより、
雨などによるノイズを防止
0.0005° の分解能で計測

照度計



広いダイナミックレンジ
により、直射日光から、
月明かりまで測定

気象計



気温・湿度・気圧の測定を、
自然通気による
超小型センサ部で実現

地中温度計



植物の生育に影響する
地中温度を
5cm、10cm、20cm、40cm
の4点を同時測定

株式会社DynaxT

〒761-0301 香川県高松市林町2217-6
TEL: 087-887-8881 / FAX: 087-887-8889
MAIL: embedded@dynaxt.co.jp

株式会社 DynaxT HP

目　次

シンポジウム「農地土壌における窒素・炭素動態に着目して」

水田土壌の窒素肥沃度を支える鉄還元菌窒素固定の発見と持続的農業への応用　18

妹尾啓史

東京大学大学院農学生命科学研究科

東京大学微生物科学イノベーション連携研究機構

水田土壌におけるメタン生成古細菌とメタン酸化細菌の動態　19

浅川晋

名古屋大学大学院生命農学研究科

農地は CO_2除去の「反応場」になり得るか？　20

：Enhanced Rock Weathering の可能性と課題

中尾淳

京都府立大学

ポスター発表　　※発表者は第一著者のみ表示

P01　石井史花（東京農工大学）　21
鉄置換型アロフェンのリン酸吸着反応速度
Adsorption kinetics of phosphate on iron substituted allophane

P02　佐野佳祐（東京農工大学）　23
アロフェンの PFOA 吸着機構の解明
Mechanism of PFOA adsorption on allophane

P03　宮城彩夏（東京農工大学）　25
アロフェン質黒ボク土における肥料圏でのリン蓄積機構の解明
Elucidation of phosphorus accumulation mechanism in fertosphere of allophanic Andisols

P04　大槻優華（公益財団法人東京都農林水産振興財団 東京都農林総合研究センター）　27
土壌水分センサを利用した循環型自動底面給水システムによる花壇苗の栽培
Cultivation of Potted Plants Using a Water-Recycling Automatic Bottom-Watering System Equipped with Soil Moisture Sensors

P05　坂口敦（茨城大学農学部）　29
ドローンを用いた圃場の水分状態観測活動の進捗報告
Progress Report on UAV-Based Monitoring of Field Water Status

P06　釣田竜也（森林研究整備機構 森林総合研究所）　31
飽水から風乾状態までの広範囲な保水曲線の測定　－森林土壌タイプによる違い－
Measurement of wide range of water retention curves from saturated to air-dried conditions: Differences by forest soil type

P07　垣内悠太郎（農研機構 中農研・東京農工大）　33
表層施用したもみ殻炭が黒ボク土畑の深度別土壌水分動態に及ぼす影響
Effects of surface-applied rice husk biochar on soil moisture dynamics at different depths in an andosol field

P08　犬持　智（国立研究開発法人国際農林水産業研究センター　農村開発領域）　35
灌漑・排水両立システムの構築による乾燥・半乾燥地域における節水と土壌塩類化抑制を目指して
Development of an Integrated Irrigation and Drainage System for Water Saving and Soil Salinity Mitigation in Arid and Semi-arid regions

P09　佐藤　駿介（筑波大学理工情報生命学術院）　37
モンモリロナイト懸濁液の液性限界と動的粘弾性
Liquid Limit and Viscoelastic Properties of Montmorillonite Suspensions

P10　井上　光弘（鳥取大学乾燥地研究センター）　39
変水位試験の異なるデータ解析による現場飽和透水係数(Kfs)値の比較
Comparison of the Kfs values using different data analyses of falling-head tests

P11　関口　覧人（森林研究・整備機構　森林総合研究所　森林研究部門　立地環境研究領域）　41
冬の森でも TEROS 10 は使えるか ―森林土壌での較正に向けた個体差・温度・凍結融解の確認―
Can TEROS 10 be used in winter forests? Sensor-to-sensor variability, temperature, and freeze-thaw response examined toward calibration for forest soils

P12　登尾　浩助（明治大学　研究・知財戦略機構（生田））　43
分散ボーエン比(VBR)法による LE と H に対するサンプリングレートの影響
Sampling Rate Effect on LE and H by Variance Bowen Ratio (VBR) Method

P13　徳田　修吾（九州大学農学部）　45
園芸培養土と EF ポリマーを混合した試料の飽和透水係数の変化
Effects of Superabsorbent Polymer Application Rate on the Saturated Hydraulic Conductivity of Horticultural Growing Media

P14　田崎　小春（鹿児島大学大学院連合農学研究科）　47
不飽和黒ボク土中のイオン交換を伴う窒素成分の反応移動解析
Reactive Transport Analysis of Nitrogen species with ion exchange in Unsaturated Andisol

P15　田中　長月（岡山大学大学院環境生命自然科学研究科）　49
人工マクロポアによる水田土壌の物質移動経路と酸化還元環境の変化

Effects of artificial macropores on mass transport pathways and redox conditions in paddy soil

P16　吉岡　尚寛（香川大学大学院農学研究科）　51
木質燃焼物の配置が土壌温度分布に及ぼす影響
Effects of Woody Fuel Arrangement on Soil Temperature Distribution

P17　佐竹　晋太朗（岐阜大学工学部社会基盤学科）　53
地盤凍結工法へのバイオクロッギング適用に向けた土中の栄養剤移動の数値解析
Numerical analysis of nutrient solution transport in soil for the application of bioclogging to artificial ground freezing

P18　有村　穂高（岐阜大学大学院自然科学技術研究科）　55
地表面被覆によるアルベド制御が地温・水分量および CO_2 フラックスに及ぼす影響
Effects of surface cover–induced albedo control on ground temperature, soil moisture, and CO_2 flux

P19　定住　颯太（岡山大学大学院）　57
3 軸クリノスタットによる重力変化が土壌微生物群集とササゲの生長に及ぼす影響
Effects of Gravitational Changes Using a 3D Clinostat on Soil Microbial Communities and Cowpea Growth

P20　山崎　琢平（東京大学大学院農学生命科学研究科）　59
岩石風化促進法による CO_2 固定のモデル化に向けた玄武岩溶解カラム実験
Basalt Dissolution column experiment for modeling Carbon fixation by enhanced rock weathering

P21　今井　咲菜（三重大学生物資源研究科）　61
有機質堆肥施用水田における灌漑方法と地温や土中の窒素収支の年次比較（2025/26）
Interannual comparison of water management, soil temperature, and nitrogen balance in paddy fields amended with organic compost (2025/26)

P22　藪内　友佑（三重大学大学院生物資源学研究科）　63
異なる風速条件における埋設有孔管への送風による土の温度低下効果の検証

Effect of Airflow Velocity Inside a Buried Perforated Pipe on Soil Cooling by Evaporation

P23　安達　侑里（国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構 農村工学研究部門 農地基盤研究領域 農地整備グループ）　65
排水不良な粘土質圃場における N2O フラックス測定
N_2O Flux Measurements in a Clayey Field with Poor Drainage

P24　臼木　美紅（香川大学）　67
養液水位条件に対するサニーレタスの生育応答および根系の発達と分布
Growth Responses and Root Development and Distribution of Lettuce under Different Nutrient Solution Levels

P25　堀之内　江凪（香川大学農学部）　69
ハス栽培地における CO2 および CH4 フラックスの経時変動
Temporal variations of CO2 and CH4 Emissions in a Lotus Cultivation Field

P26　福田　日毬（三重大学大学院生物資源学研究科）　71
異なる照度条件下のイネ生育に伴う土中の DO，Eh 分布と窒素動態の関係
DO and Eh profiles and nitrogen dynamics in flooded soil during rice growth under different light conditions

P27　清水　皓平（鳥取大学大学院連合農学研究科）　73
水ストレス負荷時における幹・葉での水分動態に着目した水利用特性の評価
Evaluation of water use characteristics focusing on water dynamics in stems and leaves under water stress

P28　齊藤　忠臣（鳥取大学 農学部）　75
安価な GNSS 信号受信システムを用いた作物の植生情報の面的推定
Spatial estimation of crop vegetation characteristics using a low-cost GNSS signal receiving system

P29　秋山　大綺（香川大学農学部）　77
TDR 波形を用いたソープティビティ推定手法の検討
Evaluation of a Method for Estimating Sorptivity Using TDR Waveforms

P30　久保田　滋裕（九州大学）　79
耕盤層を有する転換畑においてダイズの吸水深はどこか？

Where Do Soybean Plants Take Up Water in Rotational Paddy Fields?

P31　加藤　千尋（弘前大学 農学生命科学部）　81
積雪地域における緑肥圃場の土中 CO2 濃度の連続観測
Continuous Monitoring of Soil CO2 Concentration in Green Manure Fields in a Snow-Covered Region

P32　中山　伶音（佐賀大学農学部）　83
2026 年熊本地震に着目した沿岸干拓地の土壌水分・塩分環境の連続観測と作物吸水リスクの検討
Monitoring of Soil Water and Salinity Conditions in a Reclaimed Land Toward Assessing Crop Water-Uptake Risks Following the 2026 Kumamoto Earthquake

P33　柳井　洋介（農研機構　野菜花き研究部門）　85
高地下水位条件のアスパラガス圃場における畝内土壌水分動態
Soil water dynamics in raised beds for asparagus in a field with a high groundwater table

P34　古川　陽渡（佐賀大学農学部）　87
Ca^{2+} - Na^{+}イオン交換を伴う砂中の溶質移動：飽和浸透実験による HP1 の基礎的検証
Solute transport with Ca^{2+} - Na^{+} exchange in sand: A column-based evaluation of HP1

P35　瑞慶村　知佳（農研機構・農村工学研究部門・農地基盤情報研究領域・空間情報グループ）　89
排水性評価のための逓減曲線の不飽和土壌水分移動モデルによる再現
Simulation of depression curves for drainage evaluation using an unsaturated soil water flow model

P36　渕山　律子（農研機構　九州沖縄農業研究センター）　91
振動ローラ式乾田直播圃場におけるメタン放出量低減機構の解明に向けた土壌構造および間隙径分布の評価
Assessment of Soil Structure and Pore Size Distribution toward Understanding Methane Emission Reduction in Vibration-Roller Dry Direct-Seeded Paddy Fields

P37　及川　航貴（東京農工大学大学院農学府・農学部）　93
数値計算に基づくタイムラプス GPR データの速度解析による浸潤領域内の反射深さの推定
Estimation of Reflection Depth Within the Infiltration Zone via Velocity Analysis of Time-Lapse Ground-Penetrating Radar Data Based on Numerical Analysis

P38　胡 天宸（筑波大学）　95
凝集した希薄なモンモリロナイト懸濁液の流動特性の塩濃度依存性
Effect of NaCl Concentration on the Flowing Characteristics of Dilute Suspension of Coagulated Montmorillonite

P39　大久保　直紀（東京農工大学）　97
DNDC-Rice モデルの検証に向けた間断灌漑水田における土壌水分動態とメタンフラックスの観測
Observation of soil moisture dynamics and methane flux in intermittently irrigated paddy fields for validation of the DNDC-Rice model

P40　楊　宇軒（東京農工大学連合農学研究科）　99
同程度の炭素投入条件下における原料の異なる バイオ炭の水田土壌改良特性の比較
Comparison of soil amendment responses to different feedstock biochars under comparable carbon inputs in a paddy field

P41　河村　賢吾（東京農工大学大学院農学府）　101
異なるカバークロップを導入した畑地における N_2O フラックスの変動
Variations in N_2O fluxes in fields with different cover crops

P42　川口　麻衣子（香川大学大学院農学研究科）　103
L バンド帯における土壌比誘電率の実測値と校正式・モデルの比較
Comparison of Measured Soil Dielectric Permittivity with Calibration Equations and Models in the L-Band

P43　吉田　綾（岐阜大学大学院自然科学技術研究科）　105
栄養剤としてのスクロース溶液の濃度が土壌中の微生物活動および気泡生成に及ぼす影響
The effect of the concentration of sucrose solution as a nutrient source on microbial activity and bubble formation in soil

P44　山中　志音（東京農工大学食農情報工学コース）　107
間断灌漑水田における稲わらバイオ炭施用が土中 CH_4・CO_2 濃度と地表面放出に及ぼす影響
Effects of rice straw biochar application on CH_4 and CO_2 concentrations in soil and surface emissions in a paddy field under alternate wetting and drying water management

P45　井林　凉哉（香川大学農学部）　109
灌水量がヤシガラ培地内の水分動態に及ぼす影響
Effects of Irrigation Amount on Water Dynamics in Coconut Coir Substrate

P46　Laymar Pudao UMHAO（三重大学）　111
シールディング・マルチ栽培を適用したカンキツ園地における土壌水分・気象データの観測―2025 年と 2026 年の比較―
Interannual Soil Moisture Dynamics and Atmospheric Conditions in a Citrus Orchard under Shielding Mulch Cultivation

P47　宮本　恵理（東京農工大学）　113
AWD 条件下の水田における水位変動に伴う酸化還元電位と土中メタン濃度の変化
Changes in redox potential and soil methane concentration in response to water level fluctuations in a paddy field under alternate wetting and drying (AWD)

P48　鈴置　桃果（岐阜大学工学部）　115
不均質土壌のバルク熱特性を決定可能なサーモ TDR センサのデザイン検討
Design considerations of a thermo-TDR sensor for estimating bulk thermal properties in heterogeneous soils

P49　落合　美月（東京農工大学農学部）　117
水田土壌における 2 種類のバイオ炭施用が温室効果ガス動態に及ぼす影響
Effects of two types of biochar on greenhouse gas dynamics in paddy soil

P50　中川　智賀（東京農工大学大学院農学府）　119
黒ボク土壌における異なるカバークロップによる土壌侵食抑制効果
Effects of different cover crops on soil erosion control in andosols

P51　岩﨑　桃子（東京農工大学大学院）　121
反応移動モデルによる間断灌漑下の水田土壌における有機物分解と酸化還元状態の評価
Evaluation of Organic Matter Decomposition and Redox Status in Paddy Soil Under Alternate Wetting and Drying (AWD) Using a Reactive Transport Model

P52　永田　祐麻（東京大学）　123
灌漑に伴う水田内のイオン濃度の水平分布形成
Formation of horizontal distribution of ion concentrations in paddy fields due to irrigation

P53　尾崎　友哉（三重大学大学院生物資源学研究科）　125
黒ボク土の浸潤実験における浸潤フラックスと水分上昇の関係
Relationship between Infiltration Rates and Water Content Rises of Andosol

P54　本間　雄亮（農業・食品産業技術総合研究機構　農村工学研究部門）　127
観測孔水位から補間した圧力水頭分布と深層学習による堤体内高透水性箇所の検出
Deep Learning-Based Detection of High Hydraulic Conductivity Zones in Embankments Using Pressure Head Distributions

P55　宮内　藍子（東京農工大学大学院農学府）　129
水稲の生育段階に伴う放出メタンの炭素安定同位体と土壌中メタン濃度の変化
Changes in carbon stable isotope ratios of emitted methane and soil methane concentrations during rice growth

P56　福桝　純平（農研機構農業環境研究部門）　131
長期連用土壌管理がアロフェン質黒ボク土の土壌有機炭素と土壌物理特性の圃場内不均一性に及ぼす影響
Within-field variations in soil physical properties and soil organic carbon in an allophanic Andosol as affected by long-term soil management practices

P57　升田　直希（鹿児島大学大学院連合農学研究科）　133
OER センサによる 1.5 GHz 以下の粘土の誘電特性
Dielectric properties of clay below 1.5 GHz measured using an OER sensor

P58　清水　朝陽（筑波大学生命地球科学研究群）　135
多孔質マイクロ流路内における活性炭ナノ粒子の沈着・閉塞挙動への価数の影響
Effects of Ionic Valence on Deposition and Clogging of Activated Carbon Nanoparticles in Porous Microchannels

P59　菊地　駿（元東京農工大学大学院）　137
不飽和土壌凍結解析における混合有限要素法の有効性
Effectiveness of the Mixed Finite Element Method in Simulating Unsaturated Soil

P60　佐藤　直人（北海学園大学工学部）　139
DEM-CFD 解析による三次元間隙構造の飽和透水係数評価
Evaluation of Saturated Hydraulic Conductivity of Three-Dimensional Pore Structures by DEM–CFD Analysis

P61　青木　伸輔（香川大学農学部）　141
加熱条件が土壌撥水性に及ぼす影響
Effects of Heating Conditions on Soil Water Repellency

P62　各務　希海（北海道大学大学院 農学院）　143
紫外線劣化したナノプラスチックの多孔質内動態に関する研究
Transport Behavior of UV-Aged Nanoplastics in Porous Media

P63　山下　祐司（東京大学・大学院農学生命科学研究科）　145
吸水性ポリマーの繰り返し膨潤に及ぼす塩の種類・濃度と浸漬履歴の影響
Effects of Salt Type, Concentration, and Immersion History on the Repeated Swelling of a Water-Absorbing Polymer

P64　藤巻　晴行（鳥取大学 乾燥地研究センター）　147
固定隔畝畝間灌漑の効果および動的根群成長モデルによる根群分布の予測
Effect of Fixed Skip Furrow Irrigation and the Prediction of Root Distribution with a Dynamic Root Growth Model

P65　山本　日和里（石川県立大学）　149
川岸にすむハンミョウ幼虫たちは激流時にどのように命を守るのか
Survival Techniques of Riverine Tiger Beetle Larvae Against Flood Disturbance

P66　伊藤　健二（東京大学大学院農学生命科学研究科）　151
近年の高温・渇水の発生に伴う米の外観品質悪化
Deterioration of Rice Appearance Quality Associated with Recent High Temperatures and Water Shortage

P67　ABEYKOON JAYASUNDARA MUDIYANSELAGE CHATHURA MADUSHANKA SIRIWARDANA （United Graduate School of Agricultural Sciences, Kagoshima University）　153
湛水水田における植物媒介酸素輸送がメタン発生に及ぼす影響－ガス透過性シリコンチューブを用いた土壌カラム実験－
Effects of Simulated Plant-Mediated Oxygen Transport on Methane Emissions in Flooded Paddy Soil: A Soil Column Experiment Using Gas-Permeable Silicone Tubes

P68　金澤　寛志（東京農業大学地域環境科学研究科）　155
軽埴土における短時間強雨による湛水の観測と評価手法の検討
Study on observation and evaluation of surface water ponding o f Light Clay soil

P69　UKWATHTHAGE THILAKSHA SEWWANDI（United Graduate School of Agricultural Sciences, Kagoshima University）　157

GIS に基づく都市屋上農業適地評価における水利用可能性の重要度：スリランカ・コロンボの事例
Water Availability as a Decision Criterion in GIS-Based Rooftop Agriculture Suitability Assessment: Evidence from Colombo, Sri Lanka

P70　石原　直史（筑波大学大学院生命地球科学研究群）　159
多孔質マイクロ流路におけるマイクロプラスチック粒子の沈着と閉塞挙動の KCl 濃度依存性
Effects of KCl Concentration on Microplastic Particle Deposition and Hydraulic Clogging in a Porous Microchannel

P71　林　祐妃（京都大学大学院農学研究科）　161
画像解析による土壌水分特性曲線の測定のための色空間 HSV の適応手法
Methodology of Measurement of Soil Water Retention Curve Using Image Analysis, Color Space, HS

水田土壌の窒素肥沃度を支える鉄還元菌窒素固定の発見と持続的農業への応用

Nitrogen fixation by iron-reducing bacteria in rice paddy soil: discovery and application to sustainable agriculture

妹尾啓史

東京大学大学院農学生命科学研究科，東京大学微生物科学イノベーション連携研究機構

水稲の生育は水田土壌の窒素肥沃度（地力窒素）に大きく支えられている。水田土壌への窒素供給経路として、土壌微生物による窒素固定反応が重要である。私達が行った新潟水田土壌を対象としたメタトランスクリプトーム解析において、水田土壌の優占種である鉄還元菌（アネロミキソバクター属、ジオバクター属細菌）由来の窒素固定遺伝子（nif）転写産物が最も高頻度に検出された。これら鉄還元菌は窒素固定への関与がこれまで全く注目されていなかったが、本解析から水田土壌で窒素固定を行う主要な微生物である可能性が示された。

これら鉄還元菌は水田土壌からの単離例が全く無く、水田土壌由来の鉄還元菌の性状や窒素固定能については不明であったことから、まず単離を試みた。その結果、得られた鉄還元菌のほとんど全てが新種もしくは新属に分類され、窒素固定活性を示した。中でもアネロミキソバクター属細菌が土壌において窒素固定能を発揮することを初めて証明した。

これら鉄還元菌は、Fe(Ⅲ)を電子受容体、稲わら等の分解から生じる有機酸等を電子供与体として生育する。そこで稲わらを加えた室内系水田土壌ミクロコズムに Fe(Ⅲ)化合物（フェリハイドライト、Fe2O3）を添加することによって土壌の窒素固定活性が高まるかどうか検証した。その結果、Fe(Ⅲ)化合物添加区において、対照区よりも有意に高い窒素固定活性が検出され、同時に鉄還元菌由来の窒素固定遺伝子転写産物が検出された。次に、水田に農業用純鉄粉を施用し、土壌の窒素固定活性および水稲収量への影響を調査した。その結果、窒素固定活性は鉄粉施用区において対照区よりも有意に高まった。安定同位体窒素を用いた解析により、鉄還元菌が窒素固定を行う主要な微生物であり、鉄粉の施用によって窒素固定が増強されることを直接的に明らかにした。窒素固定増強には鉄粉が酸化して生成した酸化鉄鉱物のフェリハイドライトとレピドクロサイトが重要であることも明らかにした。さらに、鉄粉を施用することにより、窒素施肥量を減らした際の水稲収量の減少を緩和できることが示された。一方、水田土壌へのフェリハイドライトの添加により、鉄還元菌窒素固定の増強と温室効果ガスであるメタン生成の抑制が同時に起こることを確認し、鉄還元菌の活性化によりメタン生成の材料となる有機酸等が消費されたことが示唆された。

以上の結果から次のことが結論付けられた。(1) 鉄還元菌窒素固定は水田土壌の窒素肥沃度維持に重要な役割を果たしており、鉄によって増強できる。(2) 鉄還元菌窒素固定は、窒素施肥量を低減し、環境への窒素負荷を軽減する水稲生産技術への応用が可能である。(3) 鉄還元菌の鉄による活性化は、水田からのメタン排出の削減にもつながり、地球温暖化抑止への貢献が期待できる。

水田土壌におけるメタン生成古細菌とメタン酸化細菌の動態

Dynamics of methanogenic archaeal and methane-oxidizing bacterial communities in paddy field soil

浅川　晋
名古屋大学大学院生命農学研究科

メタンは温暖化への寄与が大きい温室効果ガスであり、水田はメタンの主要な発生源の一つである。メタン生成古細菌による生成量とメタン酸化細菌による酸化量の差が正味のメタンの放出量となるため、両微生物群は水田からのメタン発生に重要な役割を果たしている。メタン生成古細菌は絶対嫌気性であり、湛水した作土など還元的な部位でメタンを生成する。一方、好気性のメタン酸化細菌は表面水、土壌表層、水稲根圏など酸化的な部位でメタンを酸化し消去する。通常、水田が湛水されるのは 1 年のうちで水稲が栽培される 100 日間程度であり、それ以外の時期には落水されるため、水田では土壌の酸化還元状態が 1 年の中でも大きく変動する。このような特徴を持つ水田土壌におけるメタン生成古細菌とメタン酸化細菌の動態について、主に圃場レベルで解析した結果を紹介したい。

メタン生成古細菌は絶対嫌気性であるが、毎年水稲が作付けされる通常の水田では湛水・落水条件に関わらずその群集構造は極めて頑健な安定性を示す。水稲の裏作として冬期に小麦が畑状態で作付けされる二毛作水田における調査では、培養法、DNA・RNA を対象とした解析のいずれでも、メタン生成古細菌の存在量や群集組成は湛水と落水状態の間で大きな違いは認められなかった。一方、ダイズが畑状態で作付けされ、夏期も土壌の落水状態が維持される田畑輪換圃場の輪換区では連年水田区と比べ、DNA の解析により存在量は約 1/10 に低下し、畑転換期間が 1 年を超えると RNA の解析により群集の活性は 1/100～1/1,000 程度に低下することが示された。このように、通常の水田の土壌中で維持されているメタン生成古細菌群集の頑健な安定性は畑転換後には失われると考えられた。

通常の水田における好気性のメタン酸化細菌の存在量や群集組成は、メタン生成古細菌と同様に湛水・落水条件に関わらず大きな変動を示さない。一方、田畑輪換圃場の輪換区では連年水田区と比べ、好気性にも関わらずメタン酸化細菌の存在量は約 1/10 に低下することが示された。これは、メタン酸化酵素と構造・機能的に類似したアンモニア酸化酵素を有し、同様に好気性であるアンモニア酸化細菌の存在量が輪換区では連年水田区と比べ約 10 倍高い値を示すことと対照的であった。メタン酸化細菌の存在量には、土壌の酸化還元条件よりも、生育基質であるメタンの供給が大きな影響を及ぼすと考えられた。

水田からの発生抑制などメタンの動態を考える際には、水田土壌に生息するメタン生成古細菌とメタン酸化細菌のこのような生態的特性を理解することが必要であろう。

農地は CO_2除去の「反応場」になり得るか？
：Enhanced Rock Weathering の可能性と課題

中尾淳
京都府立大学

2050 年カーボンニュートラルの実現に向け、大気中の CO_2を積極的に除去する Carbon Dioxide Removal（CDR）技術の開発が求められている。その一つとして近年注目されているのが、Enhanced Rock Weathering（ERW；岩石風化促進）である。ERW は、天然ケイ酸塩鉱物の風化反応を人為的に促進し、その過程で CO_2を消費する技術であり、特に農地への岩石粉末施用が有望視されている。

土壌中では、植物根や微生物の呼吸によって CO_2が供給される。そこに反応性の高いケイ酸塩鉱物を含む岩石粉末を施用すると、風化反応による CO_2の消費と HCO_3^-、Ca^{2+}、Mg^{2+}、ケイ酸などの溶出が促進されると見込まれる。さらに、Ca^{2+}、Mg^{2+}、HCO_3^-が河川を介して海洋へ輸送されることで、長期的な炭素除去につながると考えられている。農地への施用材料としては、重金属含有量などの安全性も考慮する必要があり、現在は玄武岩が主要な候補となっている。また、風化速度は粒径に依存する一方、微粉砕にはエネルギーを要するため、両者のトレードオフを考慮する必要がある。さらに数十 $t\ ha^{-1}$規模の施用が想定されることから、輸送・散布方法や既存の営農体系との統合も実用化上の課題となる。

一方、ERW は単なる炭素除去技術ではなく、土壌改良技術としての側面を持つ。玄武岩の風化に伴って土壌 pH が上昇し、Mg やケイ酸などが供給されるため、酸性・貧栄養土壌では作物生育を改善する可能性がある。実際、玄武岩を施用した栽培試験では、土壌条件によって作物生育に顕著な違いが認められている。

しかし、土壌物理学的には別の側面にも注意が必要である。大量の岩石粉末を施用すれば土壌の粒度組成が変化し、特に細粒質土壌では孔隙構造や透水性を悪化させる可能性がある。一方、砂質土壌では細粒画分の付加が物理性の改善につながる可能性もある。したがって、ERW の適地を評価するには、鉱物の反応性だけでなく、土性、孔隙構造、水移動特性などを含む土壌物理環境との相互作用を考慮する必要がある。

さらに、ERW を炭素クレジットとして社会実装するには、実際の CO_2除去量を定量する Monitoring, Reporting and Verification（MRV）が不可欠である。現状では、玄武岩由来 Ca^{2+}や Mg^{2+}の作土層からの移動量に基づいて風化量を推定する方法など、複数の手法が検討されているが、実測量や不確実性が手法間で大きく異なることが課題である。また、生成した HCO_3^-が土壌－河川－海洋系を移動する過程での炭素損失についても不確実性が残る。

ERW の実用化には、岩石種、粒径、施用量と対象土壌の組合せを最適化し、水・溶質移動を含む炭素除去プロセスを圃場スケールで定量する必要がある。農地を炭素除去の「反応場」として捉えたとき、岩石の風化反応と土壌中の水・物質移動を結びつけて理解することが重要となる。ERW は、炭素循環という地球規模の課題と圃場スケールの土壌物理・化学現象が交差する研究対象であり、複数の土壌研究領域の融合が不可欠である。

鉄置換型アロフェンのリン酸吸着反応速度

Adsorption kinetics of phosphate on iron substituted allophane

石井史花 1・橋本洋平 1

1 東京農工大学

要旨(Abstract)

アロフェン質黒ボク土の主要鉱物であるアロフェンは，構造内のアルミニウムの一部が鉄と同型置換して存在している。本研究では，アロフェンの鉄置換がリン酸の吸着速度に及ぼす影響を解明することを目的とした。吸着反応速度実験より，鉄を 5%含むアロフェンは鉄を含まないアロフェンと比べ，リン酸の吸着量，反応速度ともに大きくなった。

キーワード：アロフェン，同型置換，吸着反応速度論

Key words: allophane, isomorphic substitution, adsorption kinetics

1. はじめに

アロフェンはアロフェン質黒ボク土に典型的な鉱物である。単位粒子は小孔を持つ 3〜5 nm の中空球状で，表面電荷によりリン酸や水蒸気を多量に吸着する。土壌中のアロフェンは，構造内のアルミニウムの一部が鉄と同型置換しており，リン酸の吸着に影響を与えると考えられるが，詳細は解明されていない。天然のアロフェンは 5%程度の鉄を含有(置換)していることが知られており(Kawano et al.(2024))，鉄置換がアロフェンのリン酸吸着に及ぼす影響を解明することは，農地のリン酸蓄積の機構を詳細に明らかにする点において意義がある。

本研究の目的は，鉄置換型アロフェンのリン酸の吸着反応速度実験を pH4 と 6 の条件で行い，反応溶液の pH の違いやアロフェンの鉄置換によって生じるリン酸の吸着量と反応速度の違いを明らかにすることである。

2. 方法

(1) アロフェンの合成

Ohashi et al.(2002)を参考に，オルトけい酸ナトリウム水溶液と塩化アルミニウム水溶液を用いて鉄を含まないアロフェン Fe0% (Si:Al:Fe= 1：1：0) を合成した。また，塩化アルミニウム･塩化鉄混合水溶液を用いて 2 種類の鉄置換型アロフェン Fe 5% (1：0.95：0.05) と Fe 10% (1：0.9：0.1) を合成した。

(2) リン酸の吸着反応速度実験

反応槽にアロフェンを評量し 0.3 mol/L リン酸二水素カリウム水溶液を固液比 1:2000 の条件で添加した。pH4 または 6 の条件で撹拌し，1 分〜3 日後の溶液を採取した(n=1)。ろ液中のリン酸濃度をモリブデンブルー法で定量した。

吸着量の経時変化を擬二次反応速度式(式 1)に回帰し，初期反応速度 (式 2)を導出した。

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \quad (1)$$

$$h = k_2 q_e^2 \quad (2)$$

q_e： 平衡時の吸着量， q_t：t 秒後の吸着量，

k2： 速度定数, h： 初期反応速度

(3) X 線分光分析(P K-edge XANES)

リン酸がアルミニウムおよび鉄に結合しているのかを判断するため，あいちシンクロトロン光センターBL6NI において，リン酸吸着後の Fe0%, Fe5%, Fe10%, Fe100% (1：0：1) アロフェンの P の K 吸収端 XANES スペクトルを蛍光法で測定した。

3. 結果

(1) リン酸の吸着反応速度実験

図 1 に各アロフェンのリン酸吸着量の経時変化を示す。全ての条件において，リン酸吸着量の経時変化は擬二次反応速度式で回帰できた(R^2>0.99，表 1)。

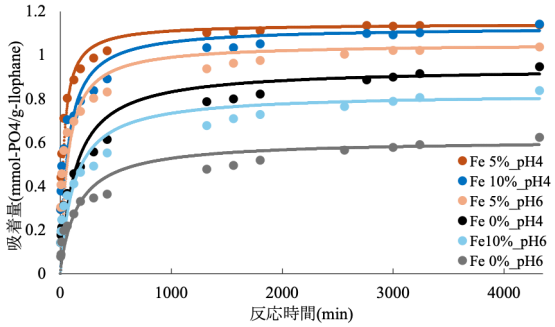


図 1． 各アロフェンへのリン酸の吸着量の経時的変化と擬二次反応速度式への回帰

表 1．擬二次反応速度式の定数と初期反応速度

pH	Fe (%)	k_2 (g/(mmol·min))	h (mmol/(g ·min))	R^2
4	0	0.008	0.007	0.995
	5	0.029	0.038	1.000
	10	0.014	0.017	0.999
6	0	0.010	0.004	0.991
	5	0.015	0.017	0.997
	10	0.010	0.007	0.995

また，全ての条件において，リン酸は反応開始後 3 時間にかけて急速に吸着し，その後一定に推移する現象が確認された。同一の鉄置換率で比較すると，pH4 の方がリン酸の吸着量が多く，初期反応速度が大きいことがわかった。いずれの pH においても鉄置換型アロフェンの方がリン酸の吸着量が多く，初期反応速度は Fe5%が最大であった。

(2) X 線分光分析(P K-edge XANES)

pH4 の条件でリン酸を吸着させた各アロフェン(Fe0%，Fe5%，Fe10%，Fe100%)の P K-edge XANES スペクトルを図 2 に示す。

全てのスペクトルにおいて 2153 eV 付近の鋭いピークが確認された。Fe100%では 2149 eV 付近にピークが観察されたが，他のアロフェンでは見られなかった。

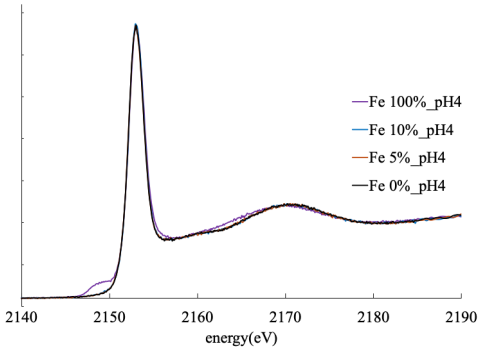


図 2． アロフェン・鉄置換型アロフェン(Fe0%，Fe5%，Fe10%，Fe100%)の P K-edge XANES スペクトル(pH4)

4. 考察

リン酸の吸着量が pH4 でより多くなった要因として，アロフェンの変異電荷が正に帯電したことが考えられる。XANES スペクトルにおいて，2149 eV 付近のピークはリンと鉄の結合を示すと考えられるが，Fe5%，Fe10%ではこのピークを確認できず，鉄置換型アロフェンにおける鉄とリンの結合は確認できなかった。また，アロフェン合成時に鉄を添加すると，構造内のアルミニウムとの同型置換だけでなく，表面への付着も発生する(Du et al. (2020))。よって，表面に鉄が付着したことによる吸着サイトの増加が，鉄置換型アロフェンがリン酸を多量に吸着した要因として考えられる。

5. おわりに

アロフェンのリン酸の吸着量や反応速度は，鉄の存在によって増大することが明らかになった。X 線分光分析ではその直接的な要因を解明することができず，今後更なる研究が必要である。

参考文献等 （明朝体 8P 程度）

Du, P. et al. (2020), Journal of Geophysical Research: Planets, 125(12), e2020JE006590.

Kawano et al.(2024), Journal of Mineralogical and Petrogical Sciences, 119(1), 240729.

Nakajima et al. (2025), Geoderma, 461, 117488.

Uchida et al. (2022), Soil Science Society of America Journal, 86(6), 1571-1581.

アロフェンの PFOA 吸着機構の解明

Mechanism of PFOA adsorption on allophane

佐野 佳祐[1]・橋本 洋平[2]・水川薫子[2]

[1]東京農工大学大学院先進学際科学府・[2]東京農工大学農学研究院

要旨(Abstract)

異なる pH 環境下で PFOA のアロフェンへの吸着機構を検討した。PFOA の吸着量は，溶液の pH が 4.5 から 3 に低下すると増加した。固体 ^{19}F NMR では CF_2 由来ピークの分裂が反応時間の経過で不明瞭となり（pH 4.5），ペルフルオロ鎖周辺の化学環境の変化が示唆された。

キーワード：PFOA，アロフェン，吸着機構，核磁気共鳴法，減衰全反射フーリエ変換赤外分光法

Key words: PFOA, Allophane, Adsorption mechanism, NMR, ATR-FTIR

1. はじめに

環境中で分解されにくいペルおよびポリフルオロアルキル化合物（PFAS）の土壌中での移動性や滞留性を理解するには，土壌固相への吸着反応の解明が重要である。例えば，ペルフルオロオクタン酸（PFOA）の鉱物表面への吸着は酸性側の pH 領域で増大し，表面電荷の影響を受ける 1)。黒ボク土に典型的に含まれるアロフェンは、pH に応じて表面電荷が変化するため，PFOA の吸着挙動は pH に依存すると考えられる。本研究では，pH 3 および 4.5 における PFOA のアロフェンへの吸着量や，吸着態 PFOA の分子状態の経時変化を検討した。

2. 方法

Si/Al＝1 のアロフェン 0.1 g に対し，0.01 mol L^{-1} $NaNO_3$を電解質として，PFOA を 1 mmol L^{-1}となるよう添加した吸着実験を実施した。この溶液の pH を 3 または 4.5 に調整し，1, 24，168, 672 および 4320 h 反応させた。PFOA 吸着量は液体クロマトグラフィー/質量分析法（LC-MS/MS）により測定した。固相は凍結乾燥後，固体 ^{19}F 核磁気共鳴法(NMR）および減衰全反射フーリエ変換赤外分光法(ATR-FTIR）に供した。^{19}F NMR では主に CF_2領域のスペクトルを比較し，FTIR では PFOA 未吸着アロフェンとの差スペクトルから COO^-由来ピークを評価した。これらの分光分析によって、PFOA とアロフェンの結合様式を明らかにすることを試みた。

3. 結果

(1) 反応速度実験

図 1 に，pH 3 および 4.5 における PFOA 吸着量の経時変化と，1～672 h のデータに対する Elovich 式によるフィッティングを示す。pH 3 における吸着量は 1 h から 672 h にかけて増加し，247.6 μmol g^{-1} に達した後，4320 h では 197.0 μmol g^{-1}に低下した。一方，pH 4.5 では 1 h 以降経時的に増加し，4320 h で 229.8 μmol g^{-1} に達した。以上より，PFOA の吸着量の経時変化は pH によって異なった。

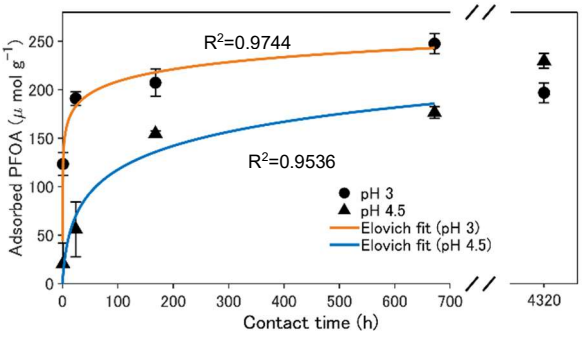


図 1. pH3, 4.5 における PFOA のアロフェンへの吸着量の経時変化（n=3）

(2) 固体 ^{19}F NMR

図 2 に，各 pH において PFOA を 168 および 672 h 吸着させたアロフェンの固体 ^{19}F NMR 結果を示す。化学シフト（δ F）−83 ppm 付近の CF_3由来ピークが，pH 3 および 4.5 の両方で 168 h から 672 h にかけて広がる様子が観察された。δ F = −123 ppm 付近の CF_2領域では pH 3 で顕著な変化が見られなかったのに対し，pH 4.5 では 168 h でみられたピークの分裂が 672 h で不明瞭となった。これらの変化は，時間経過に伴ってペルフルオロ鎖の運動性や周囲の化学環境が変化した可能性を示している。

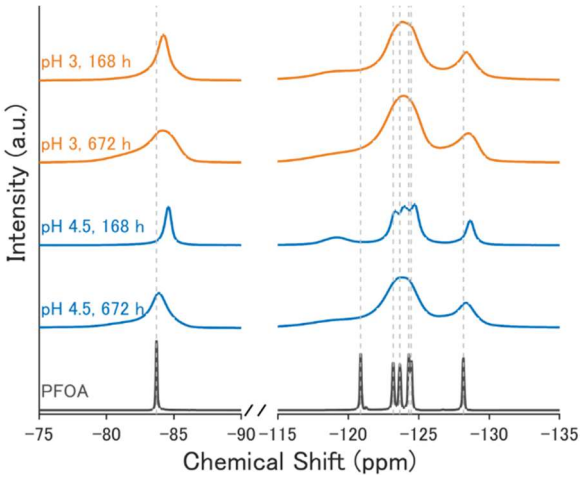


図 2. 各 pH における PFOA を吸着させたアロフェンおよび PFOA の固体 ^{19}F NMR スペクトル

(3)ATR-FTIR

表 1. PFOA-Na およびアロフェン吸着態 PFOA における COO^-伸縮振動のピーク位置と Δ ν

試料	$\nu_{as}(COO^-)$	$\nu_{s}(COO^-)$	Δ ν
PFOA-Na	1660	1421	239
pH 3, 168 h	1676	1400	276
pH 3, 672 h	1676	1402	274
pH 4.5, 168 h	1678	1400	278
pH 4.5, 672 h	1676	1402	274

（ν_{as}：逆対称伸縮振動，ν_{s}：対称伸縮振動，$\Delta\nu = \nu_{as} - \nu_{s}$，単位は cm^{-1}。）

表 1 に，ATR-FTIR で得られた COO^-伸縮振動のピーク位置と，逆対称および対称伸縮振動の波数差 $\Delta\nu$（$\nu_{as} - \nu_{s}$)を示す。PFOA がアロフェンに吸着すると、$\Delta\nu$ 値が増加していることから、アロフェンと PFOA が何らかの構造の変化を伴って吸着していると考えられるが、詳細は今後の検討課題とする。また、NMR で認められた明確な経時変化は、FTIR 分析の結果から確認されなかった。

4. 考察とまとめ

吸着反応の開始から 672 h までは、溶液の pH が低いほどアロフェンへの PFOA 吸着量が大きく，アロフェン表面で増加した正電荷が吸着の増加に寄与したと考えられる。一方，反応時間 4320 h ではこの傾向が逆転したことから，長期間の反応では、アロフェンの部分的な溶解などが関与して PFOA が脱着する可能性が考えられる。固体 ^{19}F NMR では，時間経過に伴い pH 3，pH 4.5 の両方で δ F = −83 ppm 付近の CF_3 由来ピークの広幅化が見られたことに加え，pH 4.5 では δ F = −123 ppm 付近の CF_2 由来ピークの不明瞭化も観察されたことから，吸着した PFOA のペルフルオロ鎖周辺の化学環境が変化する可能性が示唆された。一方, ATR-FTIR では COO^-伸縮振動の $\Delta\nu$ に顕著な経時変化は見られなかった。このことから，アロフェンとの反応時間によらず、PFAS の COO^-基を介した吸着機構が重要であることが示唆された。

参考文献

(1) Wang, F. (2011): *Water Research*, 45(9), 2925–2930.

(2) Gao, X. (2012): *Environmental Chemistry*, 9(2), 148–157.

アロフェン質黒ボク土における肥料圏でのリン蓄積機構の解明

Elucidation of phosphorus accumulation mechanism in fertosphere of allophanic Andisols

宮城彩夏[1]・橋本洋平[1]

[1]東京農工大学大学院 先進学際科学府先進学際科学専攻

要旨(Abstract)：

リン酸の移動性が低いアロフェン質黒ボク土では，添加された肥料の近傍に高濃度リン酸領域（肥料圏）が形成していると考えられる。本研究では，肥料圏におけるリン酸の化学形態とその経時変化の解明を目的とした。固体 ^{31}P 核磁気共鳴（NMR）法による分析の結果，肥料圏においてリン酸の大部分が 24 時間以内に土壌中のアルミニウムと結合して存在することが示唆された。

キーワード：肥料圏，アロフェン質黒ボク土，ＭＣＰ，ＭＡＰ

Key words: fertosphere, allophanic Andisols, MCP, MAP

1. はじめに

アロフェン質黒ボク土は, アロフェンをはじめとした活性アルミニウム・鉄を豊富に含むためリンの収着能力が高く, 土壌中のリン酸の移動が制限されるという特徴を持つ。そのため, アロフェン質黒ボク土の農地に施用された固形リン酸肥料の周囲には高濃度リン酸領域（以下，肥料圏）が形成されていると考えられる。例えば, 同じくリンの収着能力が高いオーストラリアの耕作土壌において, 肥料として添加したリンの多くが肥料の周囲 13.5 mm 以内に留まることが報告されている(Lombi et al., 2005)。肥料圏におけるリン酸の化学形態が明らかになれば, 日本の畑土壌におけるリン酸利用のより正確な評価に繋がることが期待できる。

そこで, 本研究では肥料圏におけるリン濃度を再現した土壌の作成・培養を実施し，培養土壌内のリン酸の化学形態とそれの経時変化に着目し分析を行った。

2. 方法

(1) 培養実験

アロフェン質黒ボク土（東京都府中市）にリン酸二水素カルシウム（$Ca(H_2PO_4)_2・H_2O$, MCP）もしくはリン酸二水素アンモニウム（$NH_4H_2PO_4$，MAP）を 31.73 mg-PO_4/g-soil 添加した。また同時にリン酸試薬を添加しない区も作成した。水分量を一定に保ち 25℃で 1 日～1 年間各土壌を培養した。培養終了後の土壌は凍結乾燥を行い以下(2)，(3)の測定に使用した。

(2) 水溶性リンの測定

凍結乾燥後の土壌 0.4±0.02 g（n=2）にイオン交換水を 4 mL 添加し 10 分間振とうを行った。振とう後遠心分離を行い，得られた上澄みをろ過した。ろ過後の上澄みにモリブデンブルー法を適用しリン酸濃度を定量した。

(3) 固体 ^{31}P 核磁気共鳴（NMR）法

400 MHz 核磁気共鳴装置（ECX400，日本電子）を使用し固体 NMR 法測定を実施した。測定の条件は以下の通りとした：Single Pulse 法, 回転数 15 kHz, スキャン回数 4423~7616。また，添加したリン酸試薬（MCP，MAP）も同様の条件で測定を実施した。

3. 結果

(1) 水溶性リンの測定

培養期間の増加に伴う水溶性リン量の変化を図 1 に示す。MCP 区，MAP 区の両区において，培養 1 日以内で今回の方法で抽出できるリン量（以下，水溶性リン量）が添加リン量の 2 割以下まで減少した。また，一日あたりの水溶性リンの減少量は培養期間の増加に伴い減少した。

(2) 固体 ^{31}P NMR スペクトル

各培養期間・リン酸試薬とアロフェンにリン酸を吸着させた試料の固体 ^{31}P NMR スペクトルを図 2 に示す。培養 1 日以降の全ての土壌試料において，−10 ppm 付近を中心としたなだらかなピークが現れた。また，MCP 区では培養 1 日以降の全てのスペクトルで−2 ppm 付近に肩ピークが現れた。−10 ppm 付近のピークの強度に対する肩ピークの強度は培養期間の増加に伴い減少した。

4. 考察

培養 1 日以降の全ての土壌試料で出現した−10 ppm 付近のなだらかなピークは，アロフェンにリン酸を吸着させたスペクトルと形状・位置が近似していた。よって，添加したリン酸の大半は培養 1 日以内に土壌中のアルミニウムと結合することが示唆された。

また，MCP 区のスペクトルに現れた−2 ppm 付近の肩ピークはリン酸カルシウムに由来する化学シフト領域に位置していた。このことから，MCP 区にはリン酸カルシウムも存在していると考えられる。このリン酸カルシウムの具体的な化学形態は今後の検討事項とする。

5. おわりに

既往の研究で報告されている，農地土壌全体におけるリン酸の化学形態と同様に，MCP 及び MAP によって形成された肥料圏においても添加したリン酸の大部分は土壌中のアルミニウムと結合して存在することが示唆された。

加えて，添加したリン酸の大部分が培養 1 日以内に土壌と反応していることが明らかとなった。

参考文献

Lombi, E. et al. (2005). *Plant and Soil*, *269*(1), 25–34.

Nakajima, T. et al. (2025). *Geoderma*, *461*, 117488.

Uchida, S. et al. (2022). *Soil Science Society of America Journal*, *86*(6), 1571–1581.

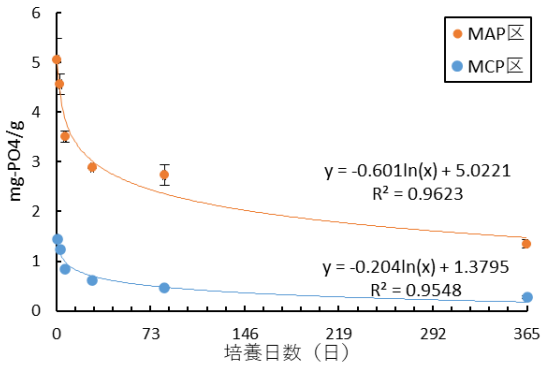


図 1：培養期間の増加に伴う水溶性リン量の変動。エラーバーは標準偏差(n=2)を示す。曲線は対数関数に回帰した結果であり，回帰した曲線の式と R2 乗値は図内に示している。

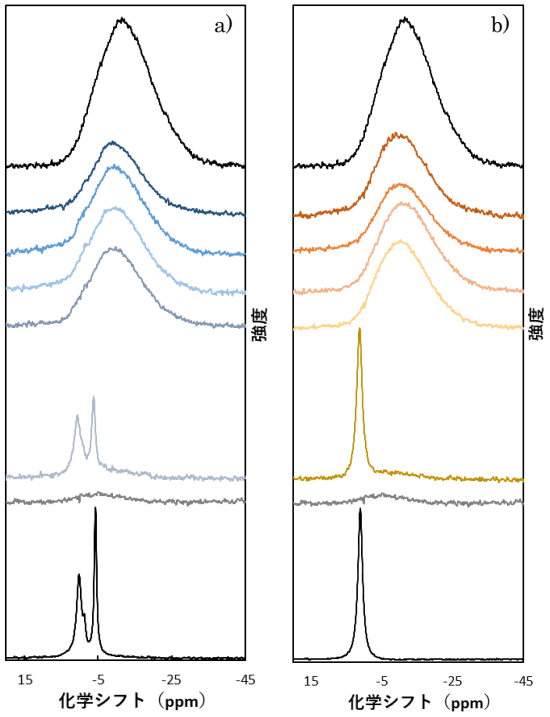


図 2：a) MCP 添加区，b) MAP 添加区の固体 ^{31}P NMR スペクトル。スペクトルはそれぞれ下から；培養開始時土壌に添加したリン酸試薬，試薬無添加区(培養 1 週間)，培養 0 日，1 日，1 週間，3 ヵ月，1 年試料，リン酸が吸着したアロフェン。

土壌水分センサを利用した循環型自動底面給水システムによる花壇苗の栽培

Cultivation of Potted Plants Using a Water-Recycling Automatic Bottom-Watering System Equipped with Soil Moisture Sensors

大槻優華[1]・藤川（石塚）真記子[2]・曽我京佑[2]

[1]公益財団法人東京都農林水産振興財団　東京都農林総合研究センター　園芸技術科

[2]公益財団法人東京都農林水産振興財団　東京都農林総合研究センター　スマート農業推進室

要旨(Abstract)：

花壇向けのポット苗の栽培を対象とした循環型自動底面給水システムを普及に向けて既存の環境制御システムへ移植し，ペチュニアおよびガーデンシクラメンの栽培を行った．潅水を再利用した循環区，潅水を廃棄するかけ流し区，対照区である手潅水区を設けた．自動潅水は正常に動作し，生育は概ね良好であったが，一部栽培条件で草姿がやや徒長する傾向がみられた．

キーワード：循環型自動底面給水システム，土壌水分センサ，花壇用ポット苗

Key words: Automatic BottomWatering System, Soil moisture sensor, Potted Plants

1. はじめに

花壇苗は東京都の主要な花き生産品目であるが，その生産においては潅水作業が大きな労力で生産者の負担となっている．また花壇苗に求められる徒長していない締まった草姿を実現するためには，高度な潅水制御が必要である．そこで東京都農林総合研究センターは土壌水分センサを用いた花壇苗の自動底面給水装置の開発に取り組んだ[1)]．本報では，循環型自動底面給水システムの普及に向けて，制御の仕組みを民間事業者が提供する環境制御装置に移植した上で実施した 2025 年度の栽培について報告する．

2. 方法

自動底面給水システムの普及を目的とした環境制御システムへの統合：試作機で検証した循環型自動底面給水システムの制御の仕組み[1)]を（株)オネスト社の提供するハウス栽培向け環境制御システム「スマートガーデナー®」に移植した．潅水に関するセンサやデバイスの動作について，チャンネル表とタイムチャートを事業者に示して移植を行った．

栽培と潅水試験区：供試作物は花壇苗２品目，ペチュニア（「バカラホワイト」株式会社 サカタのタネ）とガーデンシクラメン（「F1 スーパーベラノ　フジワインレッド」未来アグリス株式会社）である．

鉢上げには 10.5cm の黒ポリポットを用い，１試験区あたり 10 株，各潅水試験区あたり３反復を設けた．

潅水試験区は，潅水を再利用する循環区，潅水を都度廃棄するかけ流し区，潅水のタイミングを栽培スタッフが任意に判断して株の上部から手作業で潅水する手潅水区（対照区），の３種類とした．2025 年５月下旬から 11 月上旬にかけて，ペチュニアは４回，ガーデンシクラメンは１回の栽培を行った．

なお，試験はすべて同一ハウス内（間口 5.4ｍ，奥行 18ｍ）で実施した．

3. 結果と考察

普及向け循環型自動底面給水システム：土壌水分センサの測定値より，潅水が概ね設定どおり体積含水率 30%で実施されていることを確認した．

栽培：ペチュニアについて，いずれの区も欠株はなく，生育は良好であった．**表１**に出荷時調査の結果を示す．ここで，調査日の基準は調査対象９試験区について，少なくとも５個以上の開花が確認された日とした．

株張は，８月作および９月作の循環区とかけ流し区について手潅水区よりも有意に大きくなった．その傾向は８～９月の高温期に特に顕著であった．これは，循環区とかけ流し区で潅水が過剰となり株が徒長したものと推測された．

ガーデンシクラメンについて,**表２**に出荷時調査の結果を示す.一部で枯死株が見られたが株数に区間差はなく,暑熱などの環境要因と考えられた.生育は概ね良好で,手潅水区よりも循環区で株高,株張が大きかった.開花数も手潅水区より循環区で有意に多かったが,花蕾数は同程度であったことから,循環区は株の生育が旺盛で開花が早まったと考えられる.

4.おわりに

土壌水分センサを用いた循環型自動底面給水システムは,既存の環境制御システムへ制御を移植して利用できること,花壇苗を栽培可能であることが確認された.このシステムを普及することよって花壇苗生産における潅水労力の軽減を実現したい.ペチュニア,ガーデンシクラメンの栽培では,株がやや徒長する傾向がみられたが,過剰な潅水が原因と考えられる.そのため,今後は潅水条件のより詳細な潅水条件(潅水時の浸漬水位および浸漬時間の調整,植物の生育ステージごとの潅水頻度の変更など)も検討したい.

参考文献:

1) 藤川ら(2026)「循環型自動底面給水システムを利用した花きポット苗栽培に適用可能な土壌水分センサの検討」,農地保全の研究、第44号、(公社)農業農村工学会農地保全研究部会、pp.20-21

表１　ペチュニアの出荷時調査

作型	試験区	株高(cm)	株張(cm)	花冠径(cm)	花蕾数(個)	SPAD値	新鮮重(g)		乾燥重(g)	
							地上部	地下部	地上部	地下部
	循環	13.7	27.1	5.8 a	12.5 b	38.1	32.66	3.87	2.33 b	0.17
６月作	かけ流し	13.0 ns	24.7 ns	5.4 b	10.5 b	39.5 ns	31.86 ns	3.91 ns	2.31 b	0.19 ns
	手灌水	12.7	26.0	5.8 a	17.1 a	40.6	34.69	4.37	2.63 a	0.24
	循環	14.3	24.1	5.3 a	7.3	38.6 b	29.20 a	2.63	1.60	0.12 ab
７月作	かけ流し	13.0 ns	19.8 ns	4.9 b	7.0 ns	41.9 a	16.51 b	2.20 ns	1.16 ns	0.11 b
	手灌水	13.8	23.3	5.3 a	8.3	38.0 b	29.09 a	2.77	1.59	0.15 a
	循環	16.1 a	29.4 a	5.5	17.5 ab	36.6 b	40.67 a	5.61 a	2.59 a	0.26 a
８月作	かけ流し	15.7 a	24.9 b	5.2 ns	18.5 a	39.7 a	28.23 b	3.09 b	2.02 b	0.17 b
	手灌水	13.2 b	21.7 b	5.3	12.5 b	39.4 a	23.12 b	3.17 b	1.66 b	0.18 b
	循環	12.6 a	30.4 a	6.0	7.1 a	36.5	33.48	3.73	2.48	0.25
９月作	かけ流し	12.3 ab	23.6 b	5.7 ns	3.5 b	34.8 ns	27.78 ns	3.20 ns	1.89 ns	0.18 ns
	手灌水	11.3 b	25.2 ab	6.2	5.9 ab	35.2	27.26	4.03	2.13	0.25

脚注）288穴セルトレーに１穴１粒で播種し，10.5号ポリポットに鉢上げした。作型ごとの作業日は次の通り（いずれも2025年），６月作：４月15日播種，５月29日鉢上げ，７月１日調査，７月作：６月26日播種，７月18日鉢上げ，８月13日調査，８月作：７月８日播種，７月28日鉢上げ，８月28日調査，９月作：８月12日播種，９月３日鉢上，９月30日調査。表中の異なる英文字間はTukey法により５％水準で有意差あり。

ペチュニアの鉢上げ用土は，赤土：腐葉土：牛糞堆肥＝５：４：１（体積比）の混合用土で，基肥は用土100L当たり、被覆複合肥料12-10-11（マイクロロングトータル　100タイプ）＝300g、化成肥料6-40-6（マグアンプＫ中粒）＝200g、過リン酸石灰0-17-0＝250g（用土100L当たり成分量でN＝48g、Ｐ２０５＝152g、Ｋ２０＝45g）。

表２　ガーデンシクラメンの出荷時調査

試験区	株高(cm)	株張(cm)	葉数(枚)	SPAD値	新鮮重(g)		乾燥重(g)		芽点数(個)	花蕾数(個)	開花数(個)
					地上部	地下部	地上部	地下部			
循環	17.4 a	27.2 a	63.3	64.3	95.5 a	15.8	9.4 a	1.9	3.1 a	48.7	7.5 a
かけ流し	15.2 b	24.1 b	63.3 ns	57.5 ns	63.7 b	13.9 ns	7.0 b	2.0 ns	5.5 b	47.1 ns	4.3 ab
手灌水	12.1 c	23.0 b	78.9	62.1	61.9 b	14.5	6.8 b	1.9	6.4 b	58.8	2.1 b

脚注）品種は未来アグリス「F1スーパーベラノ　フジワインレッド」（以下，ワインレッド）を供試した。購入した288穴プラグ苗を2025年５月９日に10.5号ポリポットに鉢上げした。鉢上げ用土は，赤土：腐葉土：牛糞堆肥＝５：４：１（体積比）を標準用土として，標準用土：ヤシガラ培土（ベラボン）：腐葉土：パーライト＝５：３：１：１。基肥は用土100ℓ当たり，リン酸肥料（ようりん）500g，被覆複合肥料（オスモコート）300g，化成肥料（マグアンプK）200g（用土100ℓ当たり成分量でN＝48g、P205＝152g、K2O＝45g）とした。設定した灌水の適用期間は５月29日～11月10日。表中の異なる英文字間はTukey法により５％水準で有意差あり（n=15），SD＝標準偏差

ドローンを用いた圃場の水分状態観測活動の進捗報告

Progress Report on UAV-Based Monitoring of Field Water Status

坂口敦[1]

[1]茨城大学農学部

要旨(Abstract)：

地区内の各圃場の水分状態を把握し適切に管理する事を目的として，ドローンで圃場の水分状態を観測する技術の開発を試みている。当初は葉温を水分状態の指標としていたが，葉温と土壌水分の関係は観測時刻により変化し，また土壌の乾燥と共に圃場内での葉温分布が面的に不均一になる事が分かった。その後は水分状態の指標を日蒸発散量に変更し，高度間の温湿度差および風速プロファイルから蒸発散速度を求め，日蒸発散量を近似している。進捗状況を報告する。

キーワード： UAV，土壌水分，葉温，蒸発散量

Key words: UAV, Soil moisture, Leaf temperature, Evapotranspiration rate

1. はじめに

ドローンで圃場の水分状態を評価する試みでは、葉温から求められる CWSI を評価指標としたアプローチが多い。同手法の模倣から始まった観測活動の推移を説明したい。

2. 方法および結果

試験１（2020 年）

方法： ダイズ圃場に灌漑区と無灌漑区を設け気孔コンダクタンスを測定し、各区の平均値を時刻別に求めた。CWSI は葉温から算出する指標であるが、両区の気孔コンダクタンスの比は CWSI と同義である。

結果： 図 1 に 13 時台における灌漑区と無灌漑区の気孔コンダクタンスの比（≒CWSI）と根域土壌の吸引圧の関係を示す。両者の関係をフィットしたところ、決定係数は 10 時台 0、11 時台 0.43、13 時台 0.77、14 時台 0.62 となり、CWSI を指標としてドローンで圃場の水分状態を評価するためには最適な時刻に飛行する必要がある事が分かった。

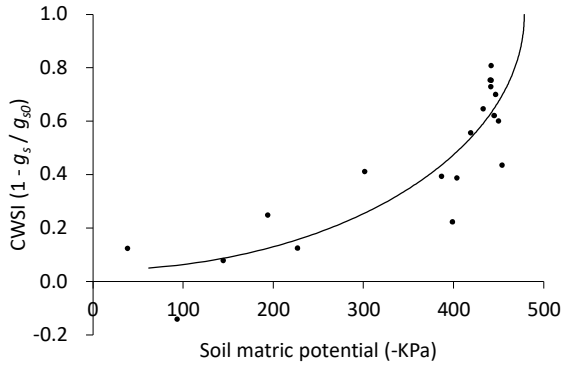


図 1　CWSI と吸引圧の関係

試験２（2022 年）

方法： ドローンの最適な飛行時刻を決定するために、トウモロコシ圃場でのドローンによる熱画像の空撮を実施した。

結果： 目的とは異なり、図 2 に示す通り根域土壌の吸引圧の増加と共に熱画像内の温度分布の不均一性が増大するという傾向が見受けられた。

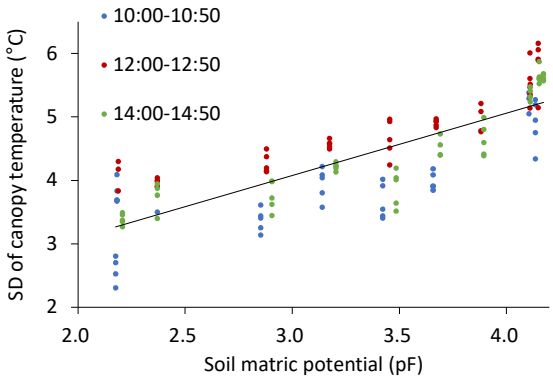


図 2　温度分布の不均一性と吸引圧の関係

試験３（2023 年）

方法： 根域土壌の吸引圧の増加が圃場内の葉温分布の不均一性を増大させる原因を解明するために、ゴマ圃場において気孔コンダクタン

スを測定し、その圃場内での不均一性を求めた。また、株内の葉温分布の不均一性と株間の平均葉温の不均一性を測定した。

結果： 図 3 に示す通り、根域土壌の吸引圧の増加と共に、圃場の気孔コンダクタンスの不均一性は増大した。よって、ドローンによる圃場の熱画像の空撮時に見受けられた傾向は、蒸散速度の差異の結果であった。また、吸引圧の増加と株内の葉温分布の不均一性は無関係であったが、株間の平均葉温の不均一性は吸引圧の増加と共に増大した。よって、本傾向は株単位で生じていた。本傾向が生じるメカニズムは、Feddes モデルと土壌水分分布の不均一性により説明する事が可能と考えられる。

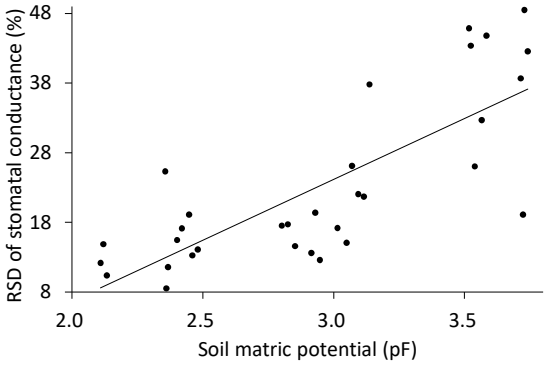


図 3　気孔コンダクタンスの不均一性と吸引圧の関係

試験 4（2025 年）

方法： 以上から、CWSI と土壌の吸引圧の関係は時刻および面的な均一性の変化に伴い一定に保たれないと判断し、圃場の水分状態の指標を日蒸発散量へ変更した。ドローンでサツマイモ圃場の地表面温度を測定し、バルク式で得た 9 時、11 時、13 時、15 時の顕熱フラックスから潜熱フラックスを求め、日蒸発散量を近似した。

結果： 図 4 に示す通り、どの日でも午前はドローンが蒸発散速度を過大評価し、午後は過小評価した。原因は地表面温度と気温の温度差が拡大し始める時刻と、高度間の気温差が拡大し始める時刻の時差であった。

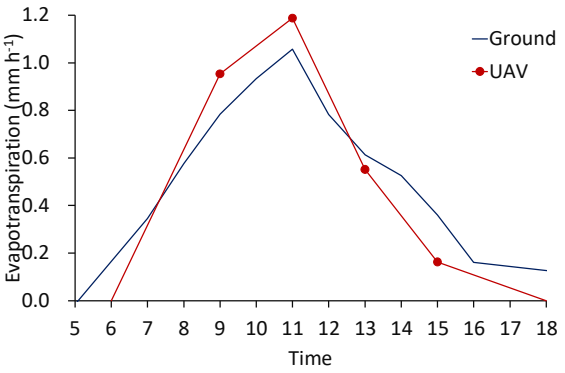


図 4　日蒸発散量の近似

試験 5（2026 年）

方法： 時差への対策として、ドローンで高度間の温湿度差を測定する方針へと変更した。また、温湿度は 1 時間内での変動は小さいが風速の変動は大きいため、ドローンで測定可能な風速の瞬時値から 1 時間の平均風速を推定すべく、図 5 に示す方法を考案した。ある程度高い高度では地区の風速は同等と考え（$U_h' = U_h$）、風速を 3 高度で定点観測し、U_h'（$= U_h$）を推定する。次に、対象圃場の上空でドローンが風速の高度間差の瞬時値を測定して粗度長を求め、4 時刻×7 日間の粗度長の平均値を用いて時間平均 U_h から時間平均 U_3 を推定する。

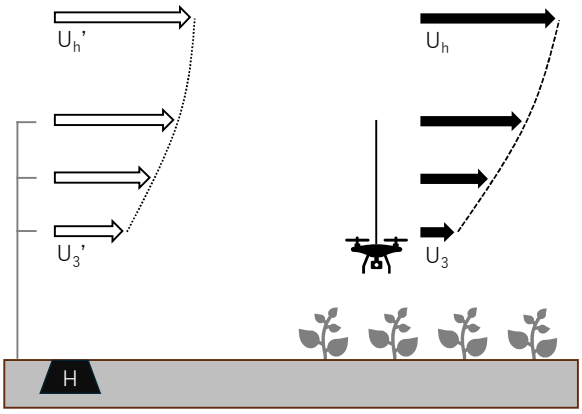


図 5　時間平均風速の推定方法

結果： 高度間の風速差および温湿度差を測定する事はできたものの、2m の炭素繊維製パイプを付けたドローンのバランスを保つ事ができず、試行錯誤を続けている。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 21K14941 および 26K09011 の助成を受けたものです。

飽水から風乾状態までの広範囲な保水曲線の測定 ー森林土壌タイプによる違いー

Measurement of wide range of water retention curves from saturated to air-dried conditions: Differences by forest soil type

釣田竜也[1]・阪田匡司[1]・小林政広[1]

[1]森林総合研究所

要旨(Abstract)：

日本の森林土壌の永久しおれ点までの保水性情報の整備を目的として，様々な土壌タイプについて加圧板法と鏡面冷却露点計を併用して飽水時から風乾状態までの保水性を測定した。-150kPa から-1500ｋPa の水分ポテンシャルの範囲では，火山灰の影響が強い褐色森林土や黒色土，粘土質な赤黄色土で含水率の変化が大きかった。一方，火山灰の影響が弱い褐色森林土や，砂質な赤黄色土や未熟土では同ポテンシャル範囲の含水率変化が小さかった。得られた保水曲線に保水性モデルのあてはめを行った結果，非常に砂質な土壌タイプでは変曲点が 1 つのモデルでも適合したが，他のほとんどの土壌タイプでは変曲点が 2 つのタイプでないと実測値にうまく適合しなかった。

キーワード： 森林土壌，保水曲線，飽水から風乾状態まで，保水性モデル，適合度

Key words: forest soil, water retention curve, from saturated to air dried, water retention models, fitness

1. はじめに

気候変動が懸念されるなか、長期無降雨等が樹木の生育に及ぼす影響の評価を高度化するためには、樹木が利用できる水の限界とされる永久しおれ点（水分ポテンシャル=-1500kPa）までの土壌の保水性情報が必要である。しかし日本の森林土壌では-150kPa までの測定が一般的で，永久しおれ点までの保水性情報が整備されていない。そこで様々な土壌タイプについて，加圧板法と鏡面冷却露点計を併用して飽水時から風乾状態（約-100000kPa）までの保水性を測定し，-150kPa から-1500kPa の水分ポテンシャル範囲の含水率変化の森林土壌タイプによる違いについて検討した。

2. 方法

(1) 土壌試料の採取

東北地方から九州沖縄地方までの 11 府県の森林土壌から計 24 断面，110 層位の不かく乱土壌試料を採取した(400ml 円筒使用)。採取土壌には褐色森林土，黒色土，赤・黄色土，未熟土の土壌群が含まれた。

(2) 土壌の保水曲線の測定

採取した不かく乱土壌試料を飽水した後，加圧板法により飽水から−150kPa までの保水曲線を得た。続いて加圧板法終了後の風乾細土 2g に蒸留水を加えて-300kPa 程度に調整し，段階的に乾燥させながら鏡面冷却露点計（WP4T または WP4C）で水ポテンシャルとその時の試料重から含水比を測定した。含水比と試料乾燥密度から体積含水率を計算し，-500kPa 程度から風乾状態までの保水曲線を得た。加圧板と鏡面冷却露点計の保水曲線をつないで飽水から風乾状態までの保水曲線を作成した。

(3) 保水性モデルのあてはめ

森林土壌の飽水から風乾状態までの保水曲線に適合する保水性モデルを検討するため，変曲点が 1 つの van Genuchten (1980) のモデル（VG モデル）とこれを組み合わせて変曲点を 2 つとした Durner (1994) のモデル（BM モデル）を各保水曲線にあてはめ，適合度を検討し

た。保水性モデルパラメータの最適化には Microsoft® Excel® のソルバーを用いた。

3. 結果と考察

(1) 森林土壌タイプによる保水曲線の違い

森林土壌ではほとんど測定事例のなかった -150kPa 以下の含水率変化に注目すると，火山灰の影響が強い褐色森林土や黒色土，粘土質な赤黄色土では，-150kPa 時点の含水率が高く，-150kPa から-1500kPa の含水率変化が大きかった。一方、火山灰の影響が弱い褐色森林土や，砂質な赤黄色土や未熟土では，-150kPa 時点の含水率が低く，同ポテンシャル範囲の含水率変化が小さかった。このことから，-150kPa から -1500kPa の含水率変化の大小には土性の影響が大きいと考えられた。

(2) 飽水から風乾状態までの保水曲線への保水性モデルのあてはめ

今回のあてはめでは，変曲点が 1 つの VG モデルとこれを 2 つ組合せた変曲点が 2 つの BM モデルのあてはめを試みたが，実測データに対して異なるモデルの適合度が同等であれば，よりパラメータの少ない保水性モデル（今回の VG と BM モデルの場合では VG モデル）を選ぶのが合理的である。今回収集した土壌タイプの中では，非常に砂質な未熟土（マサ土）の 1 断面では変曲点が 1 つの VG モデルと 2 つの BM モデルの適合度はほぼ同じだったが（図 1），これ以外の他の土壌タイプでは変曲点が 2 つの BM モデルで適合度が高かった。特に火山灰の影響を受けた褐色森林土や粘土質の赤・黄色土の土壌断面の試料では，-200～-500kPa 付近で体積含水率が大きく変化する階段状の形状が顕著なため，BM モデルの適合度は高かったが VG モデルの適合度は極めて低かった（図 2）。このことから，森林土壌の飽水から風乾状態までの保水曲線のモデルパラメータの整備を今後進めていく上では，パラメータ数は多くなるが BM モデルのように階段状の保水曲線に対応したモデルが適切であると考えられた。

謝辞　本研究は、農林水産省委託プロジェクト研究「気候変動に対応するための農林水産業の温暖化適応技術の開発～農林業における気候変動適応技術～」JPJ01313 の補助を受けて行った。

参考文献等

van Genuchten, M. Th. (1980): Soil Sci. Soc. Am. J., **44**: 892-898.

Durner, W. (1994): Water Resour. Res., **30**: 211-223.

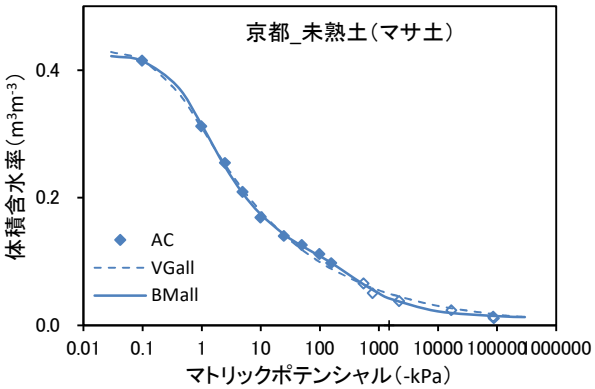


図 1　砂質の未熟土（マサ土）への VG と BM モデルのあてはめ結果

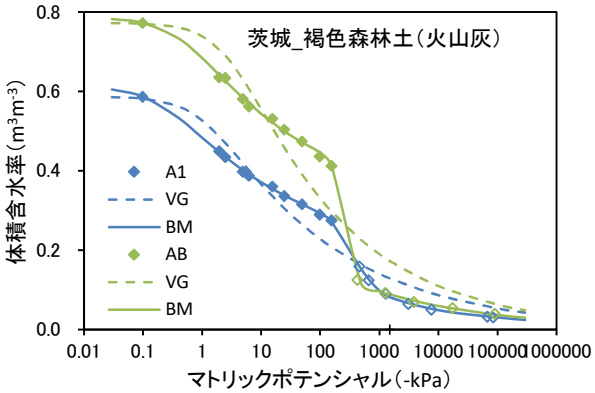


図 2　火山灰の影響を受けた褐色森林土への VG と BM モデルのあてはめ結果

表層施用したもみ殻炭が黒ボク土畑の深度別土壌水分動態に及ぼす影響

Effects of surface-applied rice husk biochar on soil moisture dynamics at different depths in an andosol field

垣内悠太郎[1,2]・塔野岡（寺門）純子[1]・徳田進一[1]・斎藤広隆[2]

[1]農研機構中日本農業研究センター・[2]東京農工大学大学院連合農学研究科

要旨

土壌表層 10cm へのもみ殻炭施用により，施用深度だけでなく，バイオ炭を直接施用していない 15 および 30 cm においても土壌水分動態が変化する可能性が示された．特に裸地条件では，いずれの深度でももみ殻炭施用区が無施用区より乾燥過程で高い体積含水率を維持する傾向が認められた．一方，その傾向はダイコン栽培条件では一様ではなく，根吸水を含む植生条件との相互作用が示唆された．

キーワード：バイオ炭，下層土，土壌水分，

Key words: biochar, subsoil, soil moisture

1. はじめに

バイオ炭を土壌表層に施用すると，土壌断面はバイオ炭を含む表層と，バイオ炭を含まない下層に分けられる．バイオ炭施用による表層土壌の保水性改善については多くの報告がある一方，表層施用が下層土の水分動態に及ぼす影響については知見が限られている．下層土の水分状態は，作物根の伸長と吸水や降雨後の鉛直水分移動，養分および溶質の移動等に関わるため，土壌全体の水分動態を把握するうえで重要である．そこで本研究では，バイオ炭の一種であるもみ殻炭の表層施用が，黒ボク土野菜畑における作土および下層土の水分動態に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした．

2. 方法

調査は 2025 年 10 月から，農研機構内の黒ボク土野菜畑において実施した．試験区は，①ダイコン栽培・もみ殻炭無施用区（NR），②ダイコン栽培・もみ殻炭施用区（BR），③裸地・もみ殻炭無施用区（NN），④裸地・もみ殻炭施用区（BN）の 4 処理 3 反復とした．NR および BR ではダイコン品種「耐病総太り」を 2025 年 9 月 25 日から 12 月 17 日まで栽培し，収穫後は裸地とした．BR および BN では，地表面に幅 5 cm，深さ 10 cm の溝を設け，約 6 t ha^{-1} 相当のもみ殻炭を作条施用した後，溝内の土壌ともみ殻炭が均一になるよう手作業で混和した．深度 7.5，15 および 30 cm にセンサー（TEROS 21，TEROS 12）を設置し，水ポテンシャル，体積含水率，地温，EC を 1 時間間隔で測定した．2025 年 10 月 26 日～2026 年 8 月 17 日の約 10 か月間の観測データについて，湿潤イベント後の排水・乾燥過程を抽出し，水ポテンシャルと体積含水率の関係に van Genuchten 式を適用した．得られた現場水分保持曲線を用いて，もみ殻炭施用の有無および植生条件による深度別の違いを比較した．さらに，得られたパラメータを HYDRUS-1D に入力し，0–10 cm，10–20 cm，20–50 cm の 3 層からなる土壌プロファイルを構築した．降雨を上端境界条件，自由排水を下端境界条件として土壌水分動態をシミュレーションし，観測値との比較を行った．また，深度別パラメータおよび蒸発量を変更した感度解析により，もみ殻炭が下層土壌水分に及ぼす影響要因を評価した．

3. 結果と考察

図 2 の水分保持曲線より，裸地条件の NN と BN を比較すると，深さ 7.5cm では BN の現場水分保持曲線が NN より高含水率側に位置した．15 および 30cm においても，湿潤側では両区の差が比較的小さかったが，水ポテンシャルの低下に伴って曲線が分離し，BN で高い体積含水率が維持される傾向にあった．一方，ダイコン栽培条件の NR と BR では，もみ殻炭施用による変化は裸地条件ほど一貫しなかった．7.5cm では BR が NR より低含水率側に位置し，15cm では両区の差が小さく，乾燥イベント間のばらつきも大きかった．また，30cm の BR では単一の van Genuchten 式による適合度が低く，現場水分保持曲線としての解釈は困難であった．

もみ殻炭は深さ 10cm までに施用されているため，15 および 30cm で認められた NN と BN の差は，表層のもみ殻炭による保水性や透水性の変化に起因する降雨後の下向きの水分移動，乾燥時の上向きの水分移動，土壌表面からの蒸発などの変化により，その影響が下層まで波及した可能性が考えられる．ただし，本研究で得た曲線は，圃場における非定常な水分移動を含む水ポテンシャルと体積含水率の関係であり，下層土固有の水分特性が変化したことを直接示すものではないと考えられる．

また，現場水分保曲線を用いた HYDRUS-1D 解析では，表層（0-10 cm）のパラメータ変化のみでは下層の含水率差を十分に再現できなかった．一方，蒸発量の変化は深度 30cm の土壌水分動態に影響を及ぼした．このことから，観測された下層の含水率差には，表層の保水特性変化に加え，土壌面蒸発を介した水収支の変化が関与している可能性が示唆された．

この成果は，NEDO（国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）の委託業務（JPNP21032）の結果得られたものです．

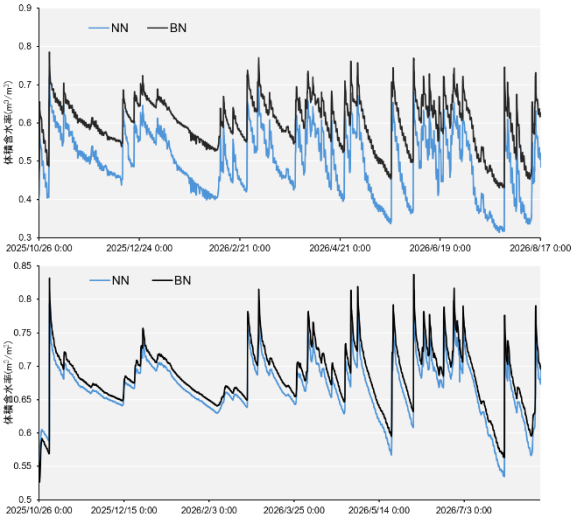


図 1 センサーから得た圃場の土壌の含水率の推移
(上)深度 7.5cm (下)深度 30cm

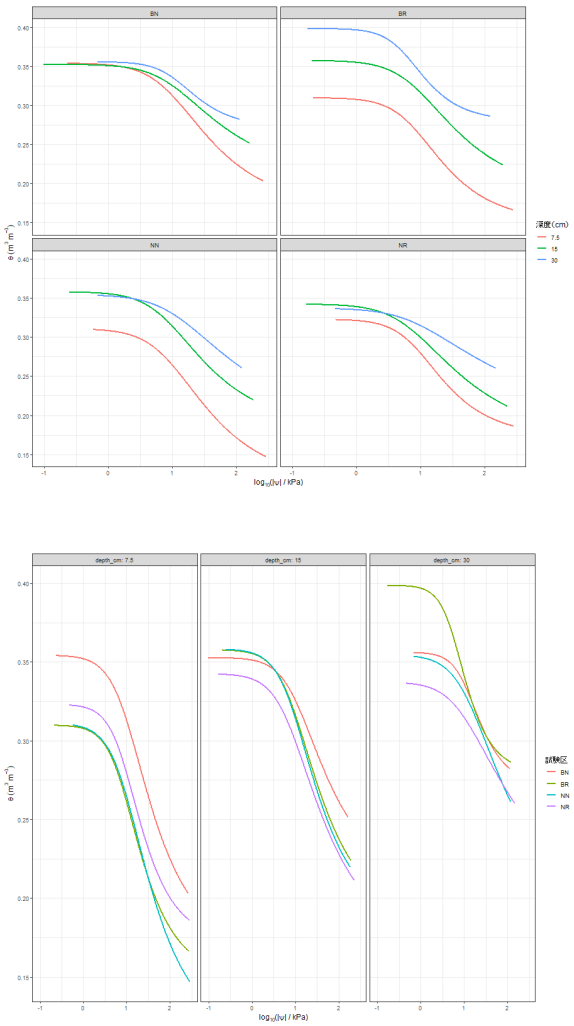


図 2　センサーデータから作成した現場水分保持曲線

灌漑・排水両立システムの構築による乾燥・半乾燥地域における節水と土壌塩類化抑制を目指して

Development of an Integrated Irrigation and Drainage System for Water Saving and Soil Salinity Mitigation in Arid and Semi-arid regions

犬持智[1]・大西純也[1]・岡本健[1]

[1]国立研究開発法人国際農林水産業研究センター

要旨(Abstract)

乾燥・半乾燥地域では，灌漑農業に伴う土壌塩類化が深刻化しており，節水と塩類化抑制を両立する灌漑・排水技術が求められている。本研究では，灌漑と排水の両機能を有する可能性がある節水型地下灌漑システム OPSIS に着目した。インド・ハリヤナ州カルナールの CSSRI の野外ライシメータを用い，地表灌漑，点滴灌漑，OPSIS および Simplified-OPSIS 適用下の土壌水分・塩分から，各灌漑方法の節水・塩類排出効果を評価する。

キーワード：OPSIS，地下灌漑，節水，土壌塩類化

Key words: OPSIS，Subsurface irrigation，Water saving，Soil salinity

1.はじめに

気候変動に伴う水資源の不安定化や食料需要の増加に伴い，灌漑農地が果たす役割はより一層高まっている。特に乾燥・半乾燥地域では，蒸発散量に対して降水量が非常に少ないため，安定した農業生産には灌漑が必要不可欠である。一方で，これらの地域では不適切な灌漑・排水管理に伴う土壌の塩類化が深刻な問題となっている。このような背景から国際農研では灌漑と排水を適切に管理することで，節水と土壌塩類化の抑制を両立できる技術の確立を目指して，インドの中央塩類土壌研究所（CSSRI）との共同研究を進めている。

本研究の対象地域であるインド北部のヒンドゥスターン平野は灌漑農業に伴う土壌の塩類化が顕著な地域の一つである。本地域では，伝統的なイネ―コムギ連作体系が広く行われており，モンスーン期には多量の降雨がある一方，乾季には降雨量が非常に少ない。このため，雨期には降雨や水田による湛水によって一定量の塩分がリーチングされるものの，乾季には灌漑への依存度が高くなり，地下水や灌漑水に含まれる塩が土壌中に蓄積することが懸念される。土壌塩類化を抑制し，持続的に農業生産を行うためには，作物に必要な水を適切に供給するだけでなく，土壌中に蓄積した塩類を排水によって系外へ排出することが重要である。

インドでは，これまで暗渠を用いた排水改良や点滴灌漑などの節水灌漑技術の導入が進められてきた。しかし，農地への導入には施工性，維持管理，コストなどのハードルがあり，両技術の普及率は依然として低い。さらに，排水と節水灌漑をそれぞれ別の設備によって導入する場合，複数の設備の施工・維持管理が必要となる。そのため，排水機能を確保しながら節水灌漑を可能とするシステムの構築によって，施工の簡素化，容易な維持管理，コスト削減を図り，現地での導入・普及を促進することで，土壌塩類化の抑制と限られた水資源の有効利用につながる可能性がある。

そこで本研究では，日本国内で開発された節水型地下灌漑システムである OPSIS（Optimum Subsurface Irrigation System）に着目した。OPSIS は，地中に有孔管と遮水シートを埋設すること

で浅い位置に地下水位を形成し，毛管上昇を利用して作物根域へ水を供給するシステムである。本システムは高い給水圧を必要とせず，土壌水と灌漑水との圧両区勾配に従って水を供給することに加え，雨期には有孔管を暗渠として利用することで灌漑と排水の両方の機能を担える可能性がある。

以上から，本研究では OPSIS の構造を対象に，節水灌漑を行いながら土壌中の塩分を排出できるのかを明らかにする。さらに，従来の灌漑方法との比較を通じて，OPSIS による水利用効率および土壌塩類化抑制効果を評価し，途上国の塩害農地における灌漑・排水技術としての適用可能性を検討する。

2.試験方法

本試験はインド・ハリヤナ州カルナールに所在する中央塩類土壌研究所（CSSRI）内の野外ライシメータにおいて実施している。本試験場に Control 区（地表灌漑），Drip 区，OPSIS 区，さらに，遮水シートを省略し，より簡易的な構造とした Simplified-OPSIS 区の 4 つの灌漑手法を導入し比較試験を行う（**Fig.1**）。供試土壌には，砂質壌土（Saline soil）と重埴土（Sodic soil）を用いた。各試験区では灌漑水の電気伝導度を可能な限り統一することで，灌漑方法の違いが土壌水分および塩分分布に及ぼす影響を評価する。また，ライシメータ内の土壌水分，土壌 EC および排水量を測定し，各灌漑方法における水分・塩分移動を比較する。これらの結果から，OPSIS 適用下での節水効果と土壌中の塩分排出効果を評価し，塩類化農地における灌漑・排水技術としての適用可能性を検討する。

3.今後の課題と展望

OPSIS は地中に有孔管と遮水シートを埋設する必要があるため，広域圃場への適用では，施工性や導入コストが課題となる。特に，埋設間隔によっては設置本数が増加することや遮水シートの施工や破損など，施工・維持管理の負担が大きくなる可能性がある。そのため，有孔管をより簡易かつ低コストに設置できる方法についても検討している。これにより，必要な資材や施工工程を削減し，広域圃場への適用可能性を高めることを目指す。

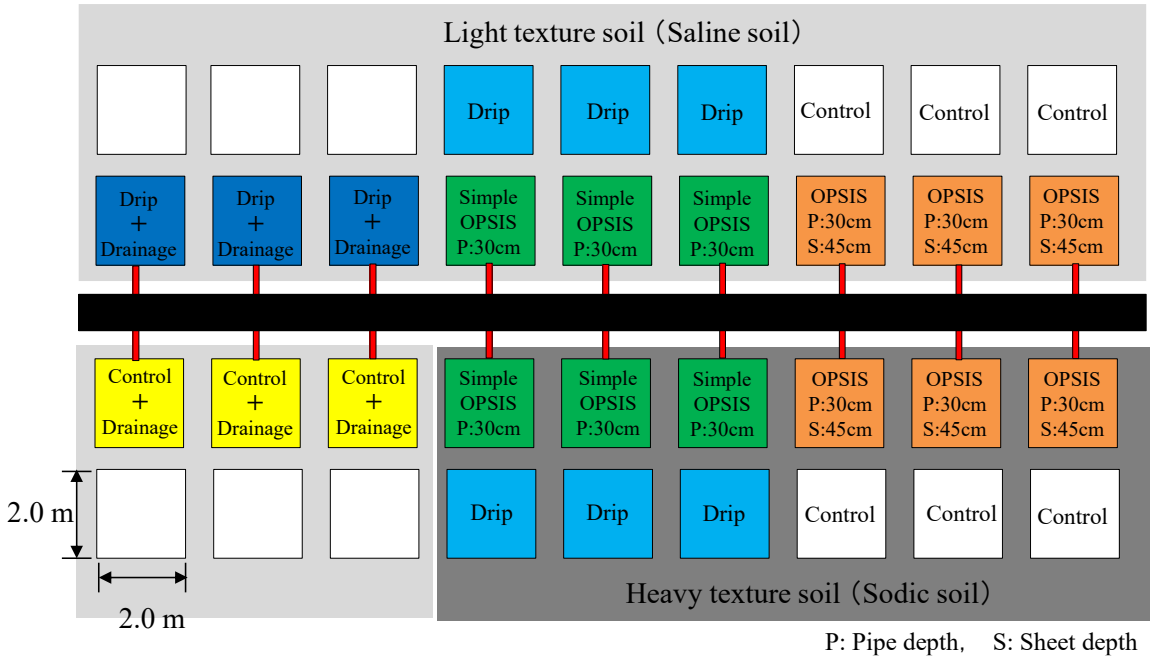


Fig. 1　ライシメータ概要

モンモリロナイト懸濁液の液性限界と動的粘弾性

Liquid Limit and Viscoelastic Properties of Montmorillonite Suspensions

佐藤 駿介・Zheng Haotian・小林 幹佳

筑波大学

要旨(Abstract)

モンモリロナイト懸濁液の液性限界と動的粘弾性を調査した。未精製試料では高い液性限界が確認され，その近傍の含水比では微小変形下で弾性が，大変形下で粘性が優勢となった。また，精製試料では未精製試料より低い粒子濃度から顕著な弾性応答が現れた。以上より，懸濁液の力学特性の評価には，含水状態に加えて変形条件と精製状態を考慮する必要があることが示唆される。

キーワード： コロイド，粘土，レオロジー

Key words: Colloid, Clay, Rheology

1. はじめに

モンモリロナイトは，膨潤性，増粘性，チキソトロピー性などを有する層状粘土鉱物であり，地盤掘削材や土壌改良資材などに広く利用されている。その懸濁液の流動性や力学特性は，含水状態や粒子間相互作用に大きく依存する。液性限界は細粒土のコンシステンシーを表す重要な工学的指標であるが，力学応答の詳細を示すものではない。そこで，試料の変形条件に応じた弾性・粘性応答を定量的に評価できる動的粘弾性測定を併用すれば，液性限界付近の力学特性をより詳細に把握できると考えられる。

一方，市販のモンモリロナイトには，精製品であっても他種の鉱物，可溶性塩，有機物などの夾雑物が残存する［1］。既往研究では追加の精製によって pH や電気伝導度（EC）が低下し，懸濁液の粘度が上昇することが報告されている［2］。したがって，懸濁液の力学特性を理解するためには，含水状態に加えて精製の影響も考慮する必要がある。

本研究では，未精製モンモリロナイトの液性限界を測定し，その近傍における粘弾性特性を調べた。さらに，精製前後の懸濁液のレオロジー特性を比較し，精製の影響を検討した。

2. 方法

市販の粉末状モンモリロナイト（Kunipia-F，クニミネ工業（株））を用いた。鈴木ら［2］の方法を参考に，遠心分離による粗大粒子の除去，化学的処理と洗浄による炭酸塩鉱物，可溶性塩，有機物の除去を行い，透析および凍結乾燥により精製試料を得た。1 wt.%懸濁液の pH と EC は，未精製試料で 10.2，376 μS/cm，精製試料で 6.7，47 μS/cm であった。

未精製試料の液性限界をカサグランデ法により測定した。試料に脱イオン水を添加し，密封状態で 24 時間以上静置した後，異なる含水比で落下試験を行った。各含水比において，黄銅皿内の試料に設けた溝が規定の長さにわたって閉じるまでの落下回数を測定し，含水比と落下回数の関係から，落下回数 25 回に相当する含水比を液性限界とした。

精製前後の試料をそれぞれ脱イオン水に分散させ，動的粘弾性（貯蔵弾性率 G'，損失弾性率 G''）のひずみ，周波数依存性を測定した。

3. 結果

含水比の増加に伴い，カサグランデ試験における落下回数は減少した（**Fig. 1**）。流動曲線から，液性限界は 1.15×10^{3}%（粒子重量分率 7.97 wt.%）と求められた。

この液性限界に近い含水比 1.22×10³%（質量分率 7.55 wt.%）の未精製モンモリロナイト懸濁液では，微小ひずみ領域では貯蔵弾性率 G' が損失弾性率 G'' を上回り，弾性優勢の応答を示した（**Fig. 2**）。一方，ひずみの増加に伴って G' は低下し，大ひずみ領域では G'' が G' を上回る粘性優勢の応答を示した。

精製前後のいずれの試料も，粒子濃度の増加に伴い G' が増大する傾向を示した（**Fig. 3**）。一方で，精製試料では未精製試料よりも低い粒子濃度から顕著な弾性応答が観測された。

4. 考察

モンモリロナイトの高い液性限界は，その高い保水性や膨潤性を反映していると考えられる。ただし，液性限界は所定の試験条件で定められる操作的な指標であり，微小変形時の弾性応答の有無を直接示すものではない。液性限界付近で力学応答がひずみの増加にともない弾性優勢から粘性優勢へと移行したことは，懸濁液の非線形力学応答を考慮する重要性を示している。

また，精製に伴う pH や EC の低下は，懸濁液の溶液環境が変化したことを示している。これに伴う粒子間相互作用の変化が，精製前後の弾性応答の違いに寄与した可能性がある。

5. おわりに

液性限界付近のモンモリロナイト懸濁液は変形条件に依存する粘弾性応答を示した。また，精製によってより低粒子濃度から顕著な弾性応答が発現した。今後は含水比やイオン組成とレオロジー特性および内部構造の関係を系統的に検討し，粘土材料の力学特性の理解と制御につなげることが期待される。

参考文献等

[1] 鈴木ら，山形産モンモリロナイトの交換性陽イオン組成，粘土科学 (2005).

[2] 鈴木ら，高精製モンモリロナイトの調製とキャラクタリゼーション，粘土科学 (2007).

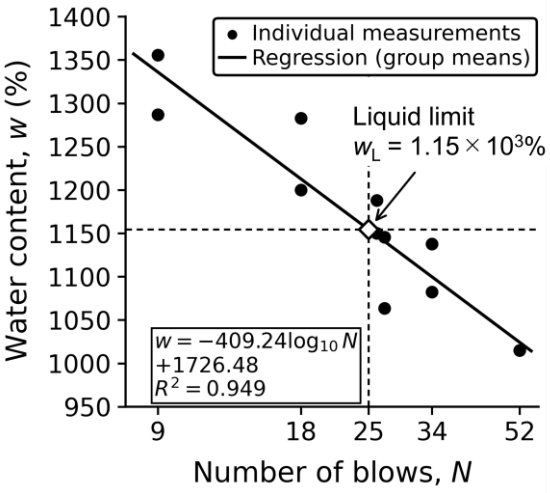


Fig.1. Flow curve of unpurified montmorillonite obtained by the Casagrande method. The liquid limit was determined as the water content corresponding to 25 blows.

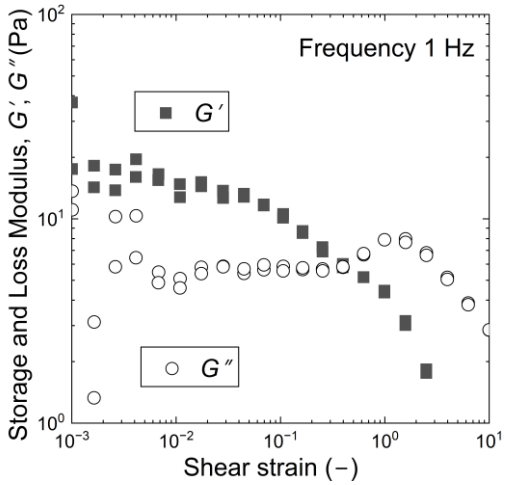


Fig. 2. Strain dependence of storage modulus (G') and loss modulus (G'') of an unpurified montmorillonite suspension at a water content of 1.22×10³%.

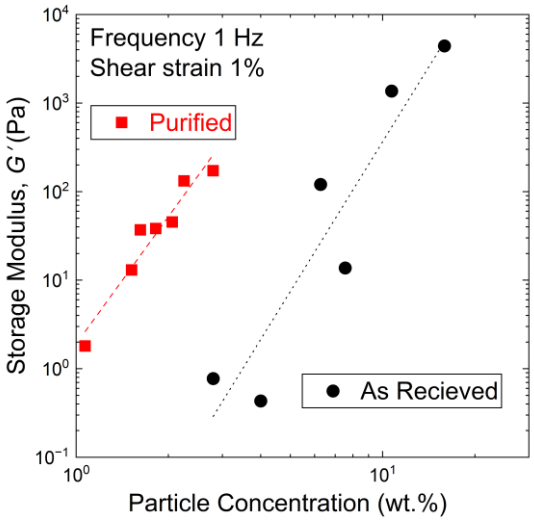


Fig. 3. Particle concentration dependence of storage modulus (G') for purified and unpurified montmorillonite suspensions measured at 1 Hz and 1% strain amplitude.

変水位試験の異なるデータ解析による現場飽和透水係数（K_{fs}）値の比較

Comparison of the K_{fs} values using different data analyses of falling-head tests

井上光弘[1]・登尾浩助[2]・斎藤広隆[3]・藤巻晴行[1]・猪迫耕二[1]

[1]鳥取大学・[2]明治大学・[3]東京農工大学

要旨(Abstract)

現場飽和透水係数（K_{fs}）を簡単な $K_{fs} = \alpha t_r^{\beta}$ のべき関数近似(PFA)を提案した。ここで，係数 α，βは，6 種類の土壌，6 つの円筒直径と 4 つの土壌侵入深度の 144 組のシナリオに対して，HYDRUS reservoir boundary condition の数値実験で求めた。異なるデータ解析法として，反復変水位法(RFH)，非線形指数回帰解析(NER)，ボトムレスバケット法(BBM)，Bagarello らの簡略変水位法(SFH)と比較し，また，ALRC の砂地圃場実験で求めた K_{fs} と乾燥密度との関係を検討した。

キーワード：変水位試験，現場飽和透水係数，乾燥密度

Keywords: falling-head test, field-saturated hydraulic conductivity, dry bulk density

1. はじめに

最近では高価な SATURO とよばれる K_{fs} 自動測定機器が採用されている(Autovino et al, 2025)。しかし，安価な装置（円筒とジョロ）で，多地点で変水位実験が可能で，簡単にデータ解析できる方法が必要である。内径 D（半径 r）の円筒を深さ d (cm)まで挿入し，初期水位が H_{ini} = 20 cm になるまで給水し，水位 H が 10 cm から 5 cm まで低下する時間（t_r）を測定して，べき関数近似による簡単な **K_{fs} 値の算定法(PFA)**を提案した。ここでは，異なるデータ解析法と比較し，それらの特徴を明らかにする。

2. 異なるデータ解析法

(1)反復変水位法(RFH)[1]：2 回目変水位試験の水位変化 $H(t)$を[1]式の指数関数で近似する，

$$H(t) = (H_0 + L_{ge} + \lambda) \exp[-(K_{fs}/L_{ge})\, t] - L_{ge} - \lambda \quad [1]$$

L_{ge} = 0.926 d + 0.427 r + 0.446，適用範囲は $15<H<25$, $2<r<14$, $3<d<7$ cm

(2)非線形指数回帰分析(NER)[2]：1 回変水位試験で H_{ini} =20cm まで給水し，水位範囲 $5<H<10$ の変化 $H(t)$を[2]式の線形指数関数で近似する，

$$Y = (H(t)+b) = (H_0+b) \exp(-a\, t) \quad [2]$$

H_0=10，b = 9 cm として，[3]式の非線形指数関数の初期値 a を求める。

$$H(t) = (H_0+b) \exp(-a\, t) - b \quad [3]$$

[3]式の非線形指数関数の係数 a が求まると

$$K_{fs} = a\, L_{ge} = a\,(0.844\, d + 0.346\, r + 0.734) \quad [4]$$

適用範囲は $5<H<10$, $3<r<10$, $2<d<5$, H_{ini} =20 cm

(3)BB 法[3]：ボトムレスバケット法

$$K_{fs} = L_{gs} \ln[(L_{gs} + \lambda + H_0)/(L_{gs} + \lambda + H(t))] / t \quad [5]$$

適用範囲は $5<H<20$, $4<r<10$, $3<d<5$, λ = 8 cm

(4)簡略変水位法(SFH)[4]：

$$K_{fs} = \frac{\Delta\theta}{(1-\Delta\theta)t}\left[\frac{H_0}{\Delta\theta} - \frac{\left(H_0+\frac{1}{\alpha^*}\right)}{(1-\Delta\theta)} \ln\left(1 + \frac{(1-\Delta\theta)H_0}{\Delta\theta\left(H_0+\frac{1}{\alpha^*}\right)}\right)\right] \quad [6]$$

ここで$\Delta\theta$は飽和水分量と実験前の初期水分量の差，　α^* は土性と土壌構造に依存する係数。

3. 結果と考察

RFH 法は基本的に数値実験で直接出力される水位 H と浸潤フラックス q_s との時間変化（**Fig.1** 参照）から，同時刻の H と q_s の関係に着目した（**Fig.2** 参照）。

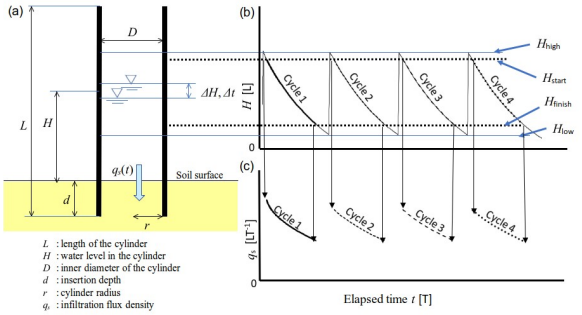


Fig.1 (a) A schematic diagram, (b) H function of t, (c) q_s function of t in RFH.

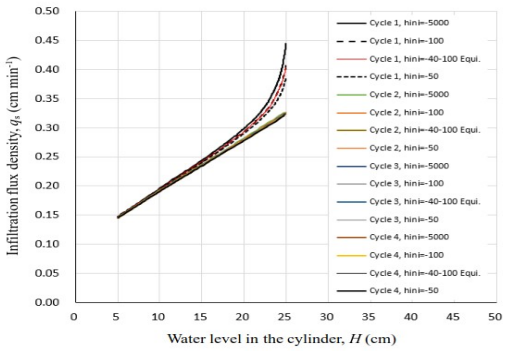


Fig.2 Relation between q_s and H (SD10d5)

反復変水位（RFH 法）の回数が Cycle 2 以降で $5<H<25$ の範囲が H と q_s の関係に直線性($q_s=AH+B$)が認められ，実験前の土壌の初期条件(h_{ini}=-50, -5000 cm など)に影響されないことがわかる。NER 法の[3]式を t で微分すると q_s が求まり，さらに，q_s を H で微分すると

$$\frac{dq_s}{dH} = a \qquad [7]$$

となる。すなわち水位の時間変化を[3]式の指数関数で近似することは，q_s と H の関係が線形になることを意味する。**Fig.2** に示すように Cycle1 の $5<H<10$ に注目すると，勾配 A の直線性が認められた。また，[1]式の指数関数を自然対数式に変形すると[5]式になる。

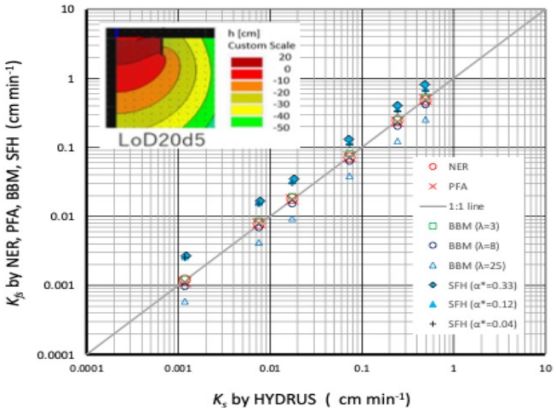


Fig.3 Comparison of K_{fs} (NER, PFA, BBM, and SFH) with input (K_s) by HYDRUS for D10d5 and D20d5 (six soils).
(他の論文に投稿中)

$$E_{rr} = 100\left|1 - \frac{K_{fs}}{K_s}\right| \qquad [8]$$

は絶対相対誤差で，NER と PFA に対して，平均 E_{rr} は，それぞれ 3.1%と 2.9%であった。BBM と SFH による K_{fs} の推定値は λ と α^*に依存し，BBM の平均 E_{rr} は，9.2%, 14%, 48%，SFH では 98%, 79%, 70%と大きな差になった。

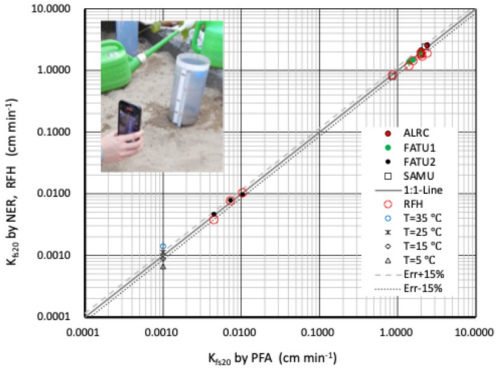


Fig.4 Temperature-corrected NER and RFH conductivity estimates plotted against PFA field estimates. (他の論文に投稿中)

ALRC,鳥大農学部(FATU1,2),明大(SAMU)の実験データに対して異なるデータ解析法による K_{fs} 値の比較では，E_{rr} は 15%以内にあり，温度による影響の方が大きいことが示された。

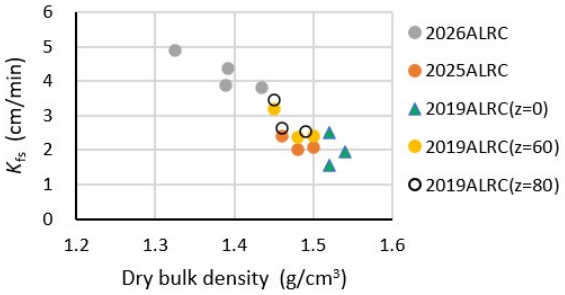


Fig.5 Relationship between K_{fs} and dry bulk density in Arid Land Research Center field.

いずれも乾燥地研究センターの圃場実験データで 2019 年 12 月 7 日は階段状に深さ 1m まで測定した。2026 年 7 月 28 日にトラクターで耕耘した砂丘圃場で K_{fs} を測定した。K_{fs} と乾燥密度との関係は負の相関が示された。

参考文献

1) Inoue et al.: Geoderma, 435, 116511 (2023), 2) 井上ら：土壌物理学会大会要旨，23-24 (2025), 3) Nimmo et al.: Vadose Zone J. 8, 142-149 (2009), 4) Bagarello et al.: Soil Sci. Soc. Am. J. 68:66-73 (2004)

冬の森でも TEROS 10 は使えるか ―森林土壌での較正に向けた個体差・温度・凍結融解の確認―

Can TEROS 10 be used in winter forests? Sensor-to-sensor variability, temperature, and freeze-thaw response examined toward calibration for forest soils

関口覧人[1]・岩﨑健太[1]・釣田竜也[1]

[1]森林研究・整備機構　森林総合研究所

要旨(Abstract)

非火山性森林土壌を対象とした TEROS 10 の土壌別較正の過程で，個体差と温度・凍結融解の影響を確認した。27 台の出力の変動係数は，空気中で 1.25%，感度で 3.06%であった。0°C 以上の温度依存性は体積含水率換算で 20°C あたり 0.02 $m^3 m^{-3}$程度であり，既往研究と同程度であった。0°C 以下でも凍結しない限り出力はほぼ変化せず，凍結時の出力の低下は含水率に依存する可能性が示された。

キーワード：誘電率式土壌水分センサー，個体差，温度依存性，凍結融解，森林土壌

Key words: dielectric soil moisture sensor, sensor-to-sensor variability, temperature dependence, freeze-thaw, forest soil

1. はじめに

誘電率式土壌水分センサーは，水文観測に広く用いられている。高い精度を得るには，土壌ごとの較正が推奨される。筆者らは，非火山性の森林土壌を対象に TEROS 10 の較正を進めている。較正は少数のセンサーで行われ，得られた較正式は他の個体にも適用される。Nasta et al.（2024）は温度補正を組み込んだ較正式を提案したが，センサー間の差は検討の対象外としている。個体差が較正の精度にどの程度効くかは，十分に確かめられていない。TEROS 10 の温度依存性は，2～40°C の範囲で小さいと報告されている（Cominelli et al., 2024）。山地の森林では，冬季に土壌の凍結と融解が生じうる。凍結土の誘電率は，未凍結水分量だけでなく全含水量にも依存する（Watanabe and Wake, 2009）。市販センサーの凍結土での応答は，センサーの種類によって異なる（Yoshikawa and Overduin, 2005）。低価格の静電容量式センサーが森林土壌の凍結融解時にどう応答するかを調べた例は少ない。低価格の静電容量式センサーが森林土壌の凍結融解時にどう応答するかは，ほとんど調べられていない。そこで，TEROS 10 を冬の森林で使えるかを確かめるため，較正の過程で個体差，温度依存性および凍結融解に対する応答を調べた。

2. 方法

(1) 個体差

27 台の TEROS 10 を，室温（約 25°C）の空気中および蒸留水中に静置し，1 時間間隔でセンサー出力値（RAW）を記録した。

(2) 温度依存性

土壌は，岐阜県七宗国有林（母材はチャート）の深さ 10，30，60 cm から供試した。風乾土に加水し，体積含水率 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 $m^3 m^{-3}$ と飽和の試料を各深度 1 点ずつ作製した。温度は−5，0，20，40°C に設定した。加えて水分センサーを空気中と蒸留水中でも，−5～40°C の範囲で昇温と降温を行った。土壌温度はおんどとりで測定した。温度変化が安定したことを確認した後，センサー出力値を計測した。

(3) 凍結融解

表層（10 cm）の土壌試料を，飽和と乾燥の 2 条件で，3°C から−9°C まで 3°C 刻みで冷却し，同様に 3°C まで昇温させた。各温度は 12 時間間隔で変化させた。

3. 結果

(1) 個体差

27 台の出力の変動係数は，空気中で 1.25%，蒸留水中で 1.84%，感度（蒸留水−空気）で 3.06%であった。

(2) 温度依存性

空気中の出力は，−5〜40°C で温度にほぼ比例して増加した。含水試料の出力は 20°C から 40°C への昇温による出力の変化は，空気中で +33〜+35 RAW，風乾土で+30〜+36 RAW であり，ほぼ等しかった。湿潤な試料（0.4 $m^3\ m^{-3}$ の 30・60 cm と飽和）では，出力は 55〜79 RAW 減少した。これらの変化は，体積含水率に換算して 0.02 $m^3\ m^{-3}$程度であった。

(3) 凍結融解

凍結していない間は，0°C 以下でも出力はほぼ変化しなかった。乾燥させた表層土は −3.1°C まで過冷却した後に凍結した。凍結による出力の低下は，飽和試料で約 40%，乾燥させた表層土で約 14%であった。出力は冷却時と昇温時で明瞭なヒステリシスを示し，融解後は凍結前の値に戻った（図 1）。

4. 考察

感度のばらつきは，ゼロ点のばらつきより大きかった。較正式を他の個体に適用する際には，ゼロ点だけでなく感度も補正する必要があり，空気と蒸留水の 2 点による個体補正が有効と考えられる。0°C 以上での温度の影響は，Cominelli et al.（2024）の報告と同程度であり，実用上の影響は小さいと考えられる。風乾土と空気中で昇温による出力の変化がほぼ等しかったことは，乾燥側の温度の影響がセンサー回路に起因することを示唆する。出力を大きく変えたのは，低温そのものではなく凍結であった。凍結による出力の低下は，含水率の高い試料ほど大きかった。この結果は，凍結土の誘電率が全含水量に依存するとした Watanabe and Wake（2009）の報告と整合する。このことから，冬季の観測値は，土壌温度と併せて解釈する必要がある。

5. おわりに

TEROS 10 は，0°C 以下でも凍結しない限り，温度の影響の小さい測定が期待できる。凍結期を区別して扱い，個体補正を行えば，冬の森林でも利用できると考えられる。今後は，各含水率の試料で凍結融解に対する応答を調べ，冬季観測への適用を検討する。

謝辞

本研究は，農林水産省委託プロジェクト研究「気候変動に対応するための農林水産業の温暖化適応技術の開発〜農林業における気候変動適応技術〜」（JPJ01313）の助成を受けた。

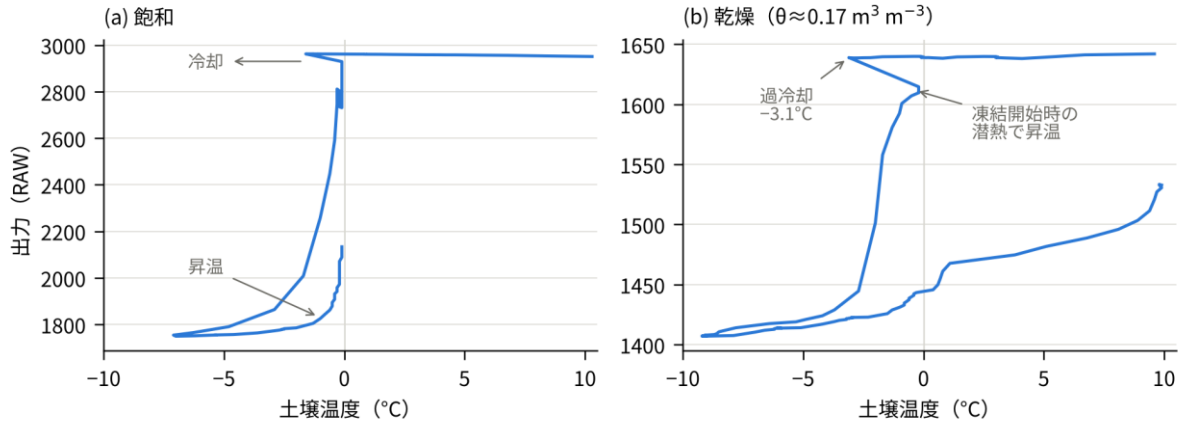


図 1　表層土の凍結融解時における土壌温度と出力の関係。(a) 飽和，(b) 乾燥。

分散ボーエン比(VBR)法による *LE* と *H* に対するサンプリングレートの影響

Sampling Rate Effect on *LE* and *H* by Variance Bowen Ratio (VBR) Method

登尾浩助[1]・佐藤太郎[2]・佐藤直人[3]・千葉克己[4]・吉田修一郎[5]

[1]明治大学研究・知財戦略機構（生田）・[2]新潟県上越地域振興局農林振興部・[3]北海学園大学工学部・[4]宮城大学事業構想学群・[5]東京大学大学院農学生命科学研究科

要旨

オクラを栽培している水田転換畑において分散ボーエン比（VBR）法を用いた際に、温湿度測定頻度が潜熱（*LE*）および顕熱（*H*）輸送量に与える影響を調査した。その結果、測定間隔が短いほど、基準となる渦相関法による *LE* および *H* との相関が高く、RMSE が小さくなった。測定頻度の減少は、VBR 法による *LE* よりも *H* に大きく影響した。実用的な測定間隔は、*H* では 1 分以下、*LE* では 2 分以下であると考えられる。

キーワード：蒸発散、潜熱輸送量、顕熱輸送量、熱収支、オクラ畑

Keywords: evapotranspiration, latent heat flux, sensible heat flux, energy balance, okra field

1. はじめに

水田転換畑における作物栽培において、適切な灌漑時期を知ることは極めて重要である。登尾ら（2025a）は、オクラ畑において Penman-Monteith（P-M）法による可能潜熱輸送量（$LE_{P\text{-}M}$）に対する実潜熱輸送量（*LE*）の比（$LE/LE_{P\text{-}M}$）が 1 未満になった際に、耕作者が灌漑を概ね開始していたことを明らかにした。登尾ら（2025a）は *LE* を 0.1 秒間に 1 回測定（10 Hz）の渦相関（eddy covariance, EC）法によって測定したが、Wang ら（2023）は、10 秒間に 1 回（0.1 Hz）の温湿度測定でも分散ボーエン比（variance Bowen ratio, VBR）法を使うと、20 Hz で風速・温湿度を測定する EC 法による潜熱輸送量（*LE*）と顕熱輸送量（*H*）と同程度の精度を維持できることを報告している。さらに、登尾ら（2025b）は、水田において 5 分間に 1 回（0.0033 Hz）の温湿度測定でも従来の Bowen 比法と同程度の精度で *LE* と *H* を測定できたと報告している。

本研究では、オクラ栽培の転換畑を対象として、VBR 法における温湿度測定間隔が *LE* と *H* の推定にどの程度影響を及ぼすかを調査した。

2. 方法

新潟県五泉市でオクラを栽培している転換畑に測定機器を設置した（Fig. 1）。3 次元超音波風速計（YG-81000、RM Young 社）を用いて 10 Hz で鉛直風速(w) (m/s)と音仮温度(T_s) (K)を測定し、基準となる EC 法により H_{EC} (W/m^2) = $c_p\overline{w'T_s'}$を算出した。VBR 法では、30 分間の温湿度測定間隔（1 秒間、1 分間、2 分間、5 分間にそれぞれ 1 回測定）を変えてボー

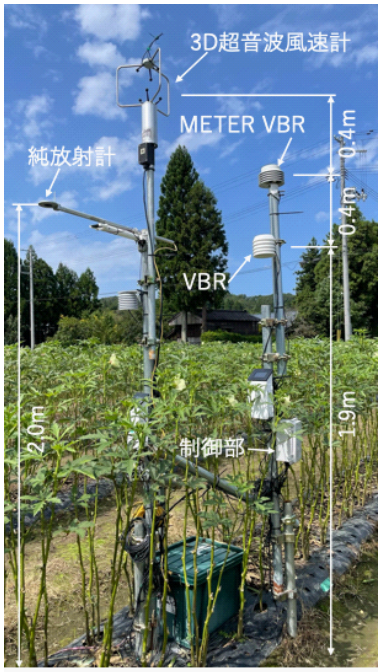


Fig. 1. オクラ畑に設置した EC 法と VBR 法による測定機器の状況

エン比 β を次式で計算した（Wang et al., 2023）：

$$\beta = \frac{H}{LE} = \frac{c_p \sigma_T}{L \sigma_{\rho a}} \quad (1)$$

ここで，σ_T は気温 T の 30 分間（n 回測定）の標準偏差（K），$\sigma_{\rho a}$ は水蒸気濃度 ρ_a の 30 分間（n 回測定）の標準偏差（kg/m^3）である。

VBR 法による H_{VBR} (W/m^2)は以下の式で算出した：

$$H_{VBR} = -\frac{(R_n - G)}{\frac{1}{\beta}+1} \quad (2)$$

ここに、R_n は純放射量（W/m^2）、G は地中熱流量（W/m^2）である。一方、LE (W/m^2)はそれぞれ次式で計算した：

EC 法　$LE_{EC} = (R_n - G) - H_{EC}$　(3)

VBR 法　$LE_{VBR} = (R_n - G) - H_{VBR}$　(4)

3. 結果

Fig. 2 に H と LE に対する測定間隔の影響を示した。また、Table 1 には基準となる LE_{EC}, H_{EC} と VBR によるそれらの相関係数 r を示した。

(1) 顕熱輸送量（H）

測定間隔が長くなるにつれて r が小さくなり、RMSE が大きくなった（Table 1）。特に 100 W/m^2 以下の小さい H のとき、過小評価の数が多くなったため、r が小さくなった（Fig. 2a-d）。

(2) 潜熱輸送量（LE）

H と同様に、測定間隔が長くなるにつれて r が小さくなり、RMSE が大きくなった（Table 1）。どの測定間隔も H に比較して r 値が大きい傾向が見られた。LE >100 W/m^2 において、ばらつきが大きくなる傾向があった（Fig. 2e-h）。

4. おわりに

実用的な測定間隔は、H では 1 分以下、LE では 2 分以下であると考えられる。

Table 1. H_{EC} と LE_{EC} に対する 1, 2, 5 分と 1 秒間隔測定の H_{VBR} および LE_{EC} の相関係数 r と括弧内は RSME を示す.

熱輸送量	1分間隔	2分間隔	5分間隔	1秒間隔
H	0.656 (49.04)	0.374 (69.54)	0.288 (165.7)	0.771 (29.85)
LE	0.889 (49.04)	0.825 (68.69)	0.445 (161.4)	0.990 (29.85)

参考文献

Wang, T., Verfaillie, J., Szutu, D., and Baldocchi, D. (2023): Handily measuring sensible and latent heat exchanges at a bargain: A test of the variance-Bowen ratio approach. Agricultural and Forest Meteorology, 333: 109399. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109399.

登尾浩助，佐藤太郎，千葉克己，吉田修一郎（2025a）:オクラ栽培転換畑における灌漑時期推定法の検討. 2025 年度（第 74 回）農業農村工学会大会講演会，宇都宮大学陽東キャンパス, 2025 年 9 月 2-4 日.

登尾浩助，佐藤直人，土井俊弘，佐藤太郎，関川力（2025b）: 潜熱フラックス（LE）を測定する分散ボーエン比法の評価. 2025 年度土壌物理学会大会，三重大学，2025 年 10 月 25 日.

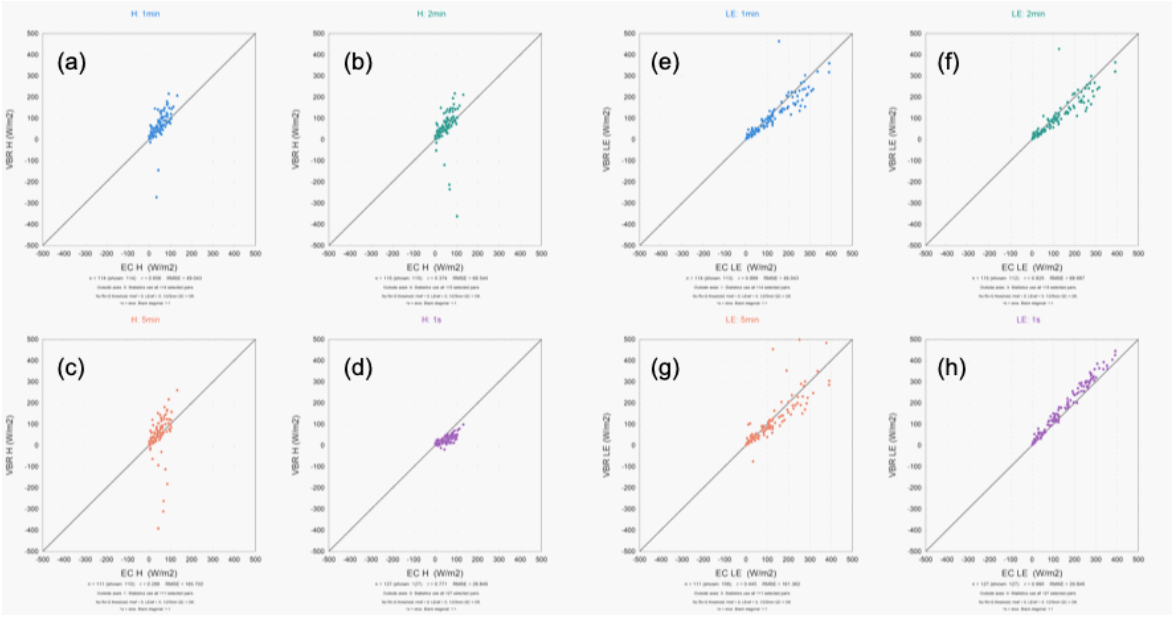


Fig. 2. H_{EC} に対する 1, 2, 5 分と 1 秒間隔測定の H_{VBR}（それぞれ a, b, c, d）および LE_{EC} に対する 1, 2, 5 分と 1 秒間隔測定の LE_{VBR}（それぞれ e, f, g, h）.

園芸培養土と EF ポリマーを混合した試料の飽和透水係数の変化

Effects of Superabsorbent Polymer Application Rate on the Saturated Hydraulic Conductivity of Horticultural Growing Media

徳田修吾[1)]・岩田幸良[2)]・柳井洋介[3)]・谷口智之[2)]
1)九州大学農学部，2)九州大学農学研究院，3)農研機構野菜花き研究部門

要旨(Abstract):
生分解性ポリマーの EF ポリマーと 4 種類の園芸培養土について，EF ポリマーの混合割合と飽和透水係数の関係を調査した。いずれの園芸培養土でも，SAP をある程度入れても飽和透水係数はほぼ変化しないが，ある程度混合割合が増加すると直線的に飽和透水係数の減少が確認された。ただし，メーカー推奨値の上限まで入れた場合でもオーダーレベルでの飽和透水係数の低下は認められず，育苗に支障が出ることはないと考えられた。

キーワード： 高吸水性ポリマー，土壌保水性改良，透水性，気候変動対策

Key words: Superabsorbent polymer, Improving soil water retention, Soil permeability, Climate change mitigation measures

1. はじめに

高吸水性ポリマー（以下，SAP）を土壌に施用することで保水性が向上することが知られており，これまで砂漠の緑化を目的とした施用が検討されてきた（高橋ら，2018)。しかし，既往の研究では，砂質土，黒ボク土などの土壌試料に SAP を施用したときの土壌物理性の変化を調査した事例がほとんどであり，園芸培養土に SAP を施用した報告事例は少ない。

また，これまではポリアクリル酸ナトリウムやビニルアルコールを主成分とした石油由来の SAP が使われてきた。マイクロプラスチックの問題により，石油由来の SAP の使用が難しくなったが，近年，食物残渣を材料とする EF ポリマー（以下，EFP）などの生分解性の SAP が開発され，保水性の向上効果による干ばつ対策が再び注目を集めている。しかし，生分解性の SAP を多孔質体に施用した際の土壌物理性の変化に関する知見は少ない。

SAP を土壌に施用した場合，土壌の主要なパラメータである飽和透水係数（以下，k_s）が低下することが知られている（矢橋ら，1990)。一方，野菜の育苗で一般的に用いられる園芸培養土に SAP を施用した場合の k_s の変化を詳細に調査した事例はほとんどない。そこで本研究では，園芸培養土に EFP を施用した場合の k_s の変化を室内試験により調査した。

2. 供試試料と方法

(1) 供試試料

園芸培養土として「げんきくんネギ培養土」（以下，A)，「与作 N8」（以下，B)，「タキイ培養土 TypeZN-120」（以下，C)，「セルミックス」（以下，D）の 4 種を用い，それぞれの園芸培養土に EFP を施用した。

(2)供試体の作成と飽和透水試験

多くの既往の研究では，単位乾土重量に対する SAP の混合重量（重量比）を指標にして，SAP の混合試料を作成していた。しかし，育苗やポット栽培時では，単位体積に対する SAP の重量を指標として土壌や園芸培養土に混合する場合が多い。そこで本試験では，メーカーが推奨する EFP の混合割合の下限値である 2.0 kg m^{-3} とメーカー推奨の上限値である 10 kg m^{-3}，これらの間の混合割合である 5 kg m^{-3} になるように 100 cm^3 円筒カラムに試料を詰めて供試土を作成し，園芸培養土単体を同じく 100 cm^3 円筒カラムに充填した試料の k_s と比較した。

SAP は吸水による膨張率が高いため，カラムに試料充填して毛管飽和させると試料の容量がカラムの容量を超過する場合が多い。そこで，以下の手順により単位体積あたりの SAP の混合割合が一定の試料を作成した。

1) 100 cm^3 円筒カラムの約半分まで，100 cm^3 に相当する重量の SAP と園芸培養土を混合した試料を入れ，毛管飽和させる。

2) 毛管飽和後の試料について，カラムの空きスペースに園芸培養土を詰め，全容積を 100 cm^3 にする。試料を容器から出して

よく混ぜた後で再充填する。試料は，充填条件を同じになるように上端に 3.6 kPa の圧力をかけながら，2〜3 回に分けて充填する。

3）毛管飽和後も試料が 100 cm^3 に満たない場合は，試料が 100 cm^3 になるまで上記 2）の作業を繰り返す。

4）このようにして求めた重量比をもとに，風乾状態の園芸培養土と SAP をよく混ぜた後に 100 cm^3 円筒に充填し，毛管飽和する。

これら一連の作業により飽和時に容器内で吸水により試料が自然に膨張して 100 cm^3 の容量の試料を作成できたことから，鎮圧等の作業による人為的なサンプル間のバラツキを回避することができた。

毛管飽和した各試料について，定水位法で k_s を測定した。

3. 結果と考察

飽和透水試験によって求めた k_s を **Fig. 1** に示す。

A は EFP の混合割合 5.0 kg m^{-3} まで k_s に変化が見られず，混合割合 10 kg m^{-3} で k_s が低下した。B と D の k_s の変化傾向は同様であり，EFP の混合割合が 2.0 kg m^{-3} では k_s が低下しなかったが，5.0 kg m^{-3} から直線的に低下した。C は EFP の混合割合が 2.0 kg m^{-3} から直線的に k_s が低下した。

A は園芸培養土のみの k_s が他の試料よりも大きいことから，粗間隙が多いと考えられる。そのため， EFP を入れても間隙の連続性が確保され，EFP の混合割合が 5.0 kg m^{-3} まで k_s が低下しなかったと考えられる。

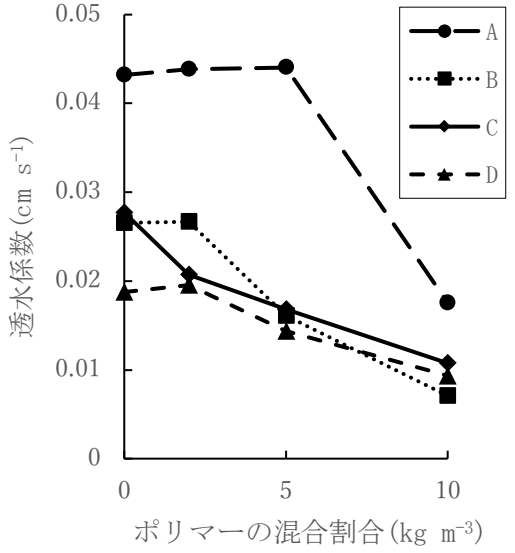


Fig. 1 SAP の混合割合に対する飽和透水係数の変化

一方，B と C は園芸培養土のみの k_s がほぼ同じ値であるにもかかわらず，C の方が低い混合割合で k_s が低下した。この理由として，C の試料のほうが間隙の連続性が低く，EFP の膨潤によって間隙が詰まりやすかったことが考えられる。これについては土壌構造と k_s の関係を今後詳細に検討する必要がある。

EFP と粘性土を混合した既往の研究では，本実験と同じく EFP の施用により k_s が低下した（Ruwanpathirana ら，2024）。この研究における土壌試料の k_s は 3.27×10^{-3} cm s^{-1} であり，EFP の施用量は 0.102〜0.306 kg m^{-3} と推定され，いずれも本実験に比べて 1/10 程度である。園芸培養土は k_s が高いため，土壌に比べ多量の EFP を入れても k_s が下がりにくいことが示唆された。

4. おわりに

本実験では園芸培養土と EFP を混合した際の試料の k_s を測定した。一定の容積に対し所定の重量の SAP を混合する実験系を確立し，EFP の混合割合と試料の k_s の関係を調べたところ，k_s が大きい試料は混合割合が大きくなっても k_s が低下しにくいことが明らかになった。

今後，これらの試料について水分特性曲線を作成することで EFP の施用が園芸培養土の保水性に与える影響を評価し，水分特性曲線から推定される間隙構造と k_s の関係を調査する予定である。

本研究の一部は，農林水産省委託プロジェクト研究「気候変動に対応するための農林水産業の温暖化適応技術の開発〜農林業における気候変動適応技術〜」の支援を受けて実施した。

参考文献等

Ruwanpathirana, PP, K Sakai, T Nakandakari, K Yuge (2024): Evaluating the Effectiveness of the Biodegradable Superabsorbent Polymer (Fasal Amrit) on Soil Hydrological Properties, Agronomy 14.

高橋正通， 柴崎一樹， 仲摩栄一郎， 石塚森吉，太田誠一(2018)： 林業・緑化分野における高吸水性高分子樹脂の利用，日本林学会誌 100.

矢橋 晨吾，金 敏洙，金光 達太郎，高橋 悟，田中 弥寿男(1990)： 保水材の添加による土壌物理性の変化，千葉大学園芸学部学術報告 43.

不飽和黒ボク土中のイオン交換を伴う窒素成分の反応移動解析

Reactive Transport Analysis of Nitrogen species with ion exchange in Unsaturated Andisol

田崎小春[1]・徳本家康[2]・取出伸夫[3]

[1]鹿児島大学大学院連合農学研究科・[2]佐賀大学農学部・[3]三重大学大学院生物資源科学研究科

要旨(Abstract)：

不飽和黒ボク土中における硝化に伴う各種イオン濃度変化を実測し，永久負荷電のみを考慮した反応移動と変異荷電モデルによる陽イオン・陰イオンを考慮した反応移動と永久負荷電のみを考慮した反応移動を比較検討した．永久負荷電のみでは硝化に伴い pH は大きく低下したが，変異荷電モデルでは，pH 緩衝作用，CEC と AEC の変化と陽イオン・陰イオン交換を表現でき，pH および各種イオン濃度の予測が改善された．

キーワード：硝化，変異荷電，pH 緩衝作用，イオン交換

Key words: Nitrification, Variable charge, pH buffering, Ion exchange

1. はじめに

土中の窒素成分動態の把握は，環境への影響を評価する上で重要である．不飽和土中では，NH_4^+の硝化によりNO_3^-が生成され，NH_4^+およびNO_3^-はそれぞれ陽イオン交換および陰イオン交換しながら移動する．また，硝化に伴う土中水の pH 変化は，変異荷電における荷電量を変化させ，窒素成分の移動に影響する．しかし，土中の窒素成分の移動に関して，反応移動モデルによる解析事例は少ない．そこで本研究では，不飽和黒ボク土中の硝化を伴う窒素成分の移動実験を行い，変異荷電モデルを用いた反応移動モデルを用いた解析を行い，変異荷電の影響を検討した．

2. 不飽和溶質移動実験

供試土には，熊本県の九州沖縄農業研究センターの圃場から採取した黒ボク土を用いた．供試土を風乾後，2mm 篩を通過させ，直径 7.7 cm，高さ 23 cm のアクリル円筒カラムに乾燥密度ρ_b=0.75 となるように均一に充填した．飽和条件で 1M の KCl で平衡後，0.005M KCl を 3PV 以上流し，その後上端フラックス 4.5 cm d^{-1} で 0.005M KCl を供給した．テンシオメータにより土中水圧力を観察しながら下端排水位置を調整することで不飽和定常流れを作成した．0.005M の KCl を 9 日間供給後，上端供給溶液を 0.005M のNH_4Clに切り替え，30 日間供給した．土中水中および排液中のイオン濃度をイオンクロマトグラフを用いて分析した．

3. 反応移動モデル

反応移動モデルは HP1 を用いて構築した．土中のNH_4^+の硝化反応を次式で与えた．

$$NH_4^+ + 2O_2 \rightarrow NO_3^- + 2H^+ + H_2O \quad (1)$$

変異荷電モデルでは，脱プロトン化に伴う負電荷の発生と陽イオン交換，およびプロトン化に伴う正電荷の発生と陰イオン交換を以下の反応式で与えた．

$$S_iOH + K^+ \rightleftarrows S_iO^-K^+ + H^+ \quad (2)$$

$$S_iO^-K^+ + NH_4^+ \rightleftarrows S_iO^-NH_4^+ + K^+ \quad (3)$$

$$R_jOH + H^+ + Cl^- \rightleftarrows R_jOH_2^+Cl^- \quad (4)$$

$$R_jOH_2^+Cl^- + NO_3^- \rightleftarrows R_jOH_2^+NO_3^- + Cl^- \quad (5)$$

永久荷電と変異荷電を考慮したモデル（VC）では，実測した黒ボク土の pH 緩衝曲線にパラメータを適合した．また比較のため，永久負荷電のみを考慮し CEC を 200 μmol cm^{-3}_{soil} で一定としたモデル（PC）でも計算を行った．硝化速度定数は，溶存態NH_4^+に 0.22 d^{-1}，交換性NH_4^+に 0.18 d^{-1} を与えた．

4. 結果および考察

実験期間中の pH および各種イオン濃度の経時変化について，実測値と計算値を Fig. 1 に示す．なお，上端供給溶液をNH_4Clに切り替えた時点を

0 d とした．pH の実測値は，6.17～6.49 の範囲で変動し，実験後期にかけて低下した（Fig. 1a）．VC ではこの変化を再現したが，PC では pH 緩衝作用が働かないため，2.14 まで急激に低下した．

実測したK^+濃度は 20 日まで上昇し，その後低下する傾向を示した（Fig. 1b）．一方，15 日頃からのNH_4^+濃度増加に伴って，K^+濃度が低下し，両イオン間の交換が示唆された．VC では，K^+濃度の一時的な増加と減少およびNH_4^+の変動を再現した．実測したNO_3^-濃度は 5 日頃から増加した一方，Cl^-濃度は低下した．NO_3^-濃度が増加し始める時期は両モデルとも一致したが，その後の変化は最終的に過小評価した．

Fig. 2 に VC モデルによる数値計算における交換性イオンの積み上げ鉛直分布を示す．交換性陽イオン濃度の合計は CEC，交換性陰イオン濃度の合計は AEC を示す．25 日にかけて交換性陽イオン濃度が低下し，交換性陰イオン濃度が増加したのは，硝化に伴う pH の低下により変異荷電の CEC が低下，AEC が増加したためである．したがって，Fig. 1b でみられた実測値のNH_4^+の上昇およびCl^-濃度の低下を VC において再現できたのは，pH 低下に伴い変異荷電量が変化したためと考えられた．

各種イオンの鉛直分布の実測値では，上端からのNH_4^+濃度の増加に伴い，NO_3^-濃度が増加し，硝化の進行が確認された（Fig. 3c, d）．計算値との比較では，両モデルともK^+の濃度低下，NH_4^+およびNO_3^-の濃度上昇を再現した．特に VC では，K^+濃度の濃度前線の位置がおおよそ一致した．一方，実測値のNH_4^+はどちらも過大評価，NO_3^-は過小評価する傾向があり，これらの鉛直分布は十分に再現されなかった．

変異荷電を考慮することで，硝化に伴う pH 変化に対する緩衝作用と，それに伴うイオン交換を表現でき，pH および各種イオンの排液中濃度の予測が改善された．しかし，さらに NH_4^+ および NO_3^-濃度の実測値に適合させるには，供試土の変異荷電特性の再検討が必要である．

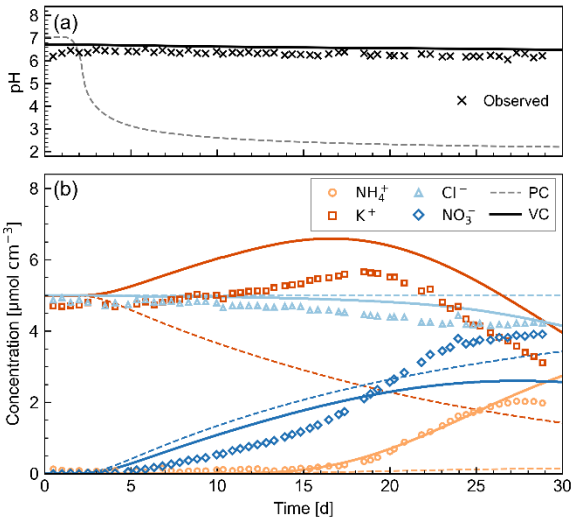


Fig. 1 下端排液の pH およびK^+, NH_4^+, Cl^-, NO_3^-濃度の経時変化．破線は PC，実線は VC による計算結果．

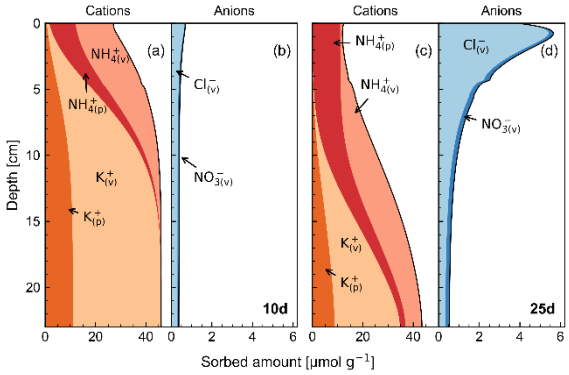


Fig. 2 VC モデルによる 10 日(a, b)および 25 日(c, d)の交換性イオンの積み上げ図．添え字(P)，(V)はそれぞれ永久荷電と変異荷電．

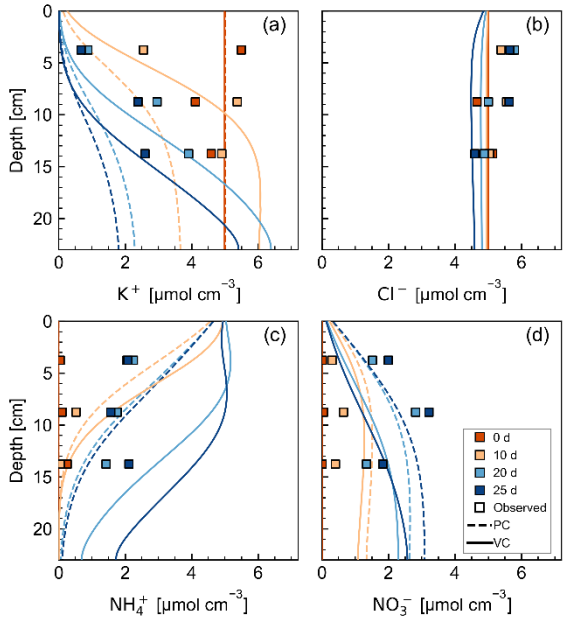


Fig. 3 K^+, NH_4^+, Cl^-, NO_3^-濃度の鉛直分布．破線は PC，実線は VC による計算結果．

謝辞：本研究は，農業農村工学会「農業農村整備技術に関する博士課程学生による調査研究活動への支援事業」の助成を受けて実施した．ここに謝意を表する．

人工マクロポアによる水田土壌の物質移動経路と酸化還元環境の変化

Effects of artificial macropores on mass transport pathways and redox conditions in paddy soil

田中長月[1]・森也寸志[1]

[1]岡山大学大学院環境生命自然科学研究科

要旨(Abstract)：

人工マクロポアは，水田土壌中の水・溶質・ガスの移動経路を変化させ，酸化還元環境を制御する手法となる可能性がある。本研究では，人工マクロポアの効果が確認された先行カラム実験と，再現されなかった実験を比較し，HYDRUS による数値解析を併用してその機構を再検討した。その結果，排水様式は溶質の物理的輸送効率に影響する一方，酸化還元応答は物理輸送のみでは説明できず，酸化剤の供給・消費やその空間分布を含む生物地球化学的過程を考慮する必要性が示された。

キーワード：人工マクロポア，水田土壌，酸化還元環境，物質移動，HYDRUS

Key words: artificial macropore, paddy soil, redox environment, mass transport, HYDRUS

1. はじめに

水田土壌の酸化還元状態は空間的に不均一であり，水・溶質・ガスの移動経路と密接に関係する。人工マクロポアは，ガラス繊維等の支持材を土壌中に鉛直に導入して粗大間隙を模擬し，下方への水移動を促進する技術である。先行研究では，人工マクロポアと排水を組み合わせることで，下層への酸素輸送が促進され，還元化が緩和されることでメタン排出量が減少すると考えられてきた。一方，著者らのカラム実験では，同様に人工マクロポアと排水を組み合わせても還元化が十分に緩和されない条件が確認された。

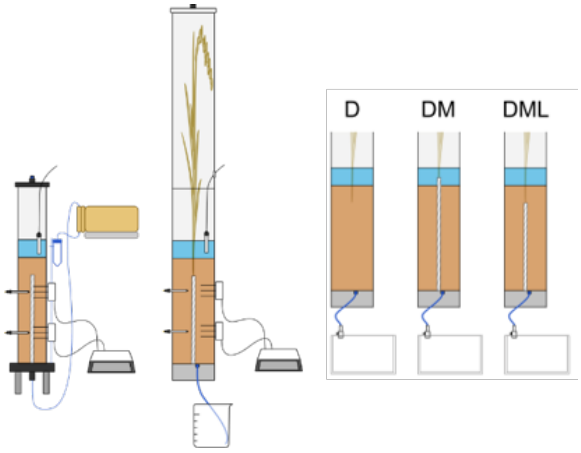


Fig. 1　メソスケール土壌カラム実験．左から，カラム概要（先行研究），同（本研究），処理 3 種（人工マクロポア形態の違い．いずれも排水適用）．

このことから，人工マクロポアの効果を単純な「酸素の下方バイパス」として説明するだけでは不十分である可能性がある。本研究では，人工マクロポアが水田土壌中の物質移動経路と酸化還元環境にどのような影響を与えるかを，カラム実験の比較と数値解析から再検討した。

2. 方法

解析では，先行研究と本研究で実施したメソスケール土壌カラム実験を比較した（Fig. 1）。実験条件の違いを Table 1 に示す．また，HYDRUS を用いて人工マクロポアおよび排水条件が水・溶質移動に与える影響を検討した。保存性溶質を用いて物理的輸送特性を評価するとともに，酸化還元反応に関与する物質の輸送・消費を考慮した解析を行った。

Table 1　実験条件の違い（カラム実験）

項目	先行研究	本研究
カラム実験	対照，中長期モニタリング	対照，中長期モニタリング
排水方式	連続排水（定量ポンプ制御）	間欠排水（手動の重力排水）
排水速度	常時 9 mm d^{-1}	2 日毎に 20 mm
イネ	なし	あり
想定される物質移動条件	水・溶質の連続的な供給	間欠的な輸送 ＋ 根からの O_2供給

3. 結果

カラム実験では，人工マクロポアの形態に応じて，酸化還元状態とその関連指標に異なる応答が認められた。数値解析では，人工マクロポアおよび排水条件が溶質の移動経路と輸送効率に影響することが示された。

保存性溶質の解析では，人工マクロポアの存在によって溶質フロントはマクロポアに沿ってより深部まで到達した。一方，周囲のバルク土壌への側方拡散は限定的であった．また，先行研究の連続排水条件と本研究の間欠排水条件を比較すると，総排水量が概ね同程度であっても，連続排水条件の方が溶質の下方輸送効率は高かった（Fig. 2）。

酸素消費を一次反応として導入した解析では，高い流入酸素濃度を与えた場合でも，既報の消費速度（Reim et al., 2012）に相当する条件で酸素は表層付近で急速に消費され，下層への浸透は強く制限された。

4. 考察

人工マクロポアの効果について，数値解析の結果は，排水様式の違いが物理的な溶質輸送効率を変化させる可能性を示しており，これはカラム実験結果に対する解釈にも整合する。溶質輸送効率の違いは，実験間で観察された酸化還元応答の違いを生じ得る一因子であると考えられる。併せて，水田土壌では，酸化剤の供給と微生物・化学反応による消費が同時に生じ，これらの生物地球化学的プロセスが酸化還元環境に影響し得る。酸化剤となる電子受容体の供給・消費バランスや，それらの空間分布等を

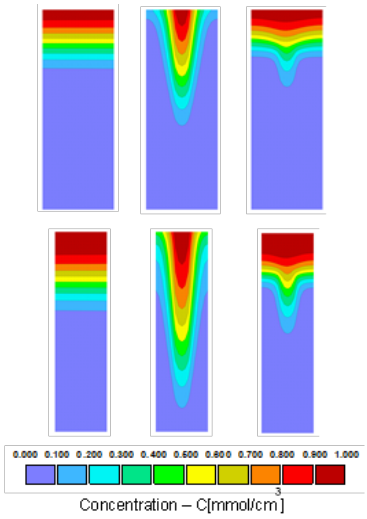


Fig. 2 保存性溶質の物理輸送（HYDRUS）．
上（本研究），下（先行研究）再現．
左から処理 D, DM, DML.

考慮する必要がある。

また，人工マクロポアは単に物質移動量を増加させるのではなく，移流が卓越する領域と移流が制限される領域を空間的に再配置し，ガス輸送や酸化還元反応が生じる位置そのものを変化させる可能性があった。人工マクロポアは単なるバイパスではなく，土壌中の物質移動経路と酸化還元関連領域を再構成する手法として捉えられる。

5. おわりに

人工マクロポアによる水田土壌の酸化還元制御機構を，カラム実験と数値解析の統合的解釈から再検討した。今後は，排水部や人工マクロポアの配置が物質移動経路に与える影響を検討するとともに，酸化還元反応に関与する環境の空間分布を考慮し，物理輸送と生物地球化学反応を統合した機構仮説の構築を進める。

参考文献等

Reim, A., Lüke, C., Krause, S., Pratscher, J., & Frenzel, P. (2012): One millimetre makes the difference: High-resolution analysis of methane-oxidizing bacteria and their specific activity at the oxic–anoxic interface in a flooded paddy soil. The ISME Journal, 6(11), 2128–2139, doi:10.1038/ismej.2012.57.

木質燃焼物の配置が土壌温度分布に及ぼす影響

Effects of Woody Fuel Arrangement on Soil Temperature Distribution

吉岡尚寛[1]・青木伸輔[2]

[1]香川大学大学院農学研究科・[2]香川大学農学部

要旨(Abstract)：

山火事では，地表面からの加熱に加え，倒木や根系などの木質燃焼物が土壌内部の熱伝達に影響する可能性がある．本研究では，木質燃焼物の配置が土壌内部への温度変化に及ぼす影響を評価した．地中方向に薪を配置した条件では，薪近傍の浅層で地表面薪のみの条件より著しい温度上昇が認められた一方，深部では両条件に明瞭な差はみられなかった．

キーワード：熱伝達，木質燃焼物，山火事

Keywords: Heat transfer, Woody fuel, Wildfire

1.はじめに

山火事は，植生を消失させるだけでなく，土壌撥水性の発現や団粒構造の変化など，土壌の物理・水理特性にも影響を及ぼす（Vahedifard et al., 2024）．小渕ら（2009）は，地表面燃焼実験により，土壌温度の深度分布と撥水性の発現深度との関係を検討している．このように，山火事による土壌への影響を理解するうえで，土壌内部の温度分布を把握することは重要である．

山火事による土壌加熱は主に表層に集中する一方，木質燃料の燃焼条件によっては深部まで加熱される場合がある（Doerr et al., 2025）．実際の森林では，地表面の落葉や倒木に加え，地上部の樹幹から地下部の根系へと連続する木質部も存在する．このような木質部が地表面で加熱されると，木質部を介した地中への熱移動が生じ，周辺土壌の温度分布に影響する可能性がある．そのため，木質物が地表面のみに存在する場合と地中にも存在する場合とでは，土壌内温度分布が異なると予想される．

本研究では，木質物の地中配置が土壌内温度分布に及ぼす影響を評価するため，模擬火災実験を行った．地表面のみに薪を配置した条件と地中にも薪を配置した条件について，複数の深度および水平位置における地温の時間変化を比較した．

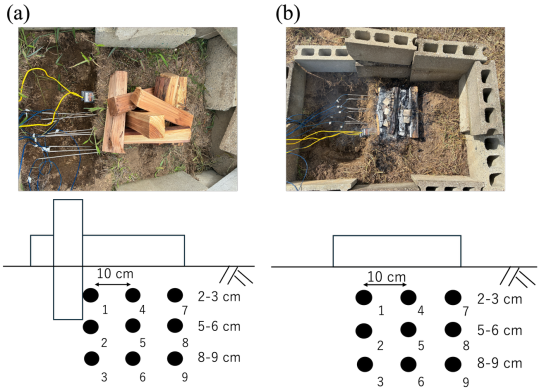


Fig. 1 模擬火災実験の様子（a）地中薪ありおよびセンサー配置図（b）地中薪なしおよびセンサー配置図．数字はセンサーの番号．

2.方法

実験は香川大学農学部キャンパス内の圃場で実施した．40 cm 四方の実験区画を設け，木質燃焼物として薪を用いた．実験区は，薪を地中約 5 cm まで挿入し，その周囲の地表面を薪で覆った区画（地中薪あり）と，薪を地中に挿入せず地表面のみに配置した区画（地中薪なし）の 2 条件とした．燃焼前に深さ 0-5 および 5-10 cm の土壌試料を 100 cc サンプラーを用いて採取し，初期体積含水率を求めた．初期体積含水率は，地中薪あり条件でそれぞれ 0.26 および 0.19 $m^3\ m^{-3}$，地中薪なし条件で 0.17 および 0.18

$m^3\ m^{-3}$ であった.

地温測定には, K 型熱電対（アズワン, 東京, 日本）を使用した. 熱電対は, 地表面から深さ 2-3, 5-6, 8-9 cm の 3 深度と, 地中薪の設置位置を基準とした水平方向 0, 10, 20 cm の 3 地点を組み合わせた計 9 地点に設置した. このうち, 深さ 2-3 cm, 水平 0 cm の熱電対は地中薪に接するように設置した（Fig. 1）. 燃焼時間は 3 時間とし, 燃焼開始から終了まで 10 秒間隔で地温を記録した. 実験中は火を絶やさないよう, 適宜薪を追加した.

3.結果と考察

Fig. 2 に, 地中薪ありおよび地中薪なし条件における地温の時間変化を示す. 地中薪あり条件では, 水平 0 cm, 深さ 2-3 cm における最高温度は 403.7 ℃に達し, 地中薪なし条件の 167.9 ℃を大きく上回った. 一方, 水平 0 cm の深さ 5-6 および 8-9 cm における最高温度は, 地中薪あり条件でそれぞれ 89.0 および 67.9 ℃, 地中薪なし条件で 90.4 および 68.0 ℃であり, 両条件間で明瞭な差は認められなかった. また, 深さ 2-3 cm の水平 10 cm 地点では, 地中薪あり条件で 110.5 ℃, 地中薪なし条件で 160.5 ℃となり, 接触位置とは反対に地中薪なし条件の方が高かった. さらに, 地中薪あり条件の深さ 2-3 cm では, 初期温度から 5 ℃上昇するまでの時間が, 水平 0 cm 地点と比較して水平 10 cm 地点で約 11 分, 20 cm 地点で約 35 分と, 薪から離れるほど温度上昇が遅れた.

これらの結果から, 地中に配置された木質燃焼物は局所的な熱源となり, 土壌内温度分布に影響を及ぼす可能性が示唆された. 特に, 地中薪との接触位置では顕著な高温が観測された一方, その下方では両条件の最高温度に明瞭な差は認められなかった. このことは, 地中薪が高温となっても, その熱が周辺土壌を一様に加熱するわけではないことを示している. また, 深さ 0-5 cm の初期体積含水率は, 両条件で異なっていた. 土壌水分は熱容量や熱伝導率, 水分蒸発に伴う潜熱消費に影響するため, 観測された温度分布の違いには, 木質物の配置に加えて初期含水率も関与した可能性がある. 今後は, 本実験を実施した土壌の粒度分布, 土粒子密度および有機物量などを把握するとともに, 高温曝露前後の水理特性を評価し, 土壌内温度分布との関係を検討する.

謝辞

本研究は, 日本科学協会の笹川科学研究助成による助成を受けたものである.

参考文献

小渕敦子, 溝口勝, 西村拓, 井本博美, 宮崎毅（2009）: 地表面燃焼下の黒ボク土壌における撥水性発現機構. 農業農村工学会論文集, 263 : 73–79.

Vahedifard, F., Abdollahi, M., Leshchinsky, B. A., Stark, T. D., Sadegh, M., and AghaKouchak, A. (2024): Interdependencies Between Wildfire-Induced Alterations in Soil Properties, Near-Surface Processes, and Geohazards. Earth and Space Science, 11: e2023EA003498.

Doerr, S. H., Girona-Garcia, A., Sanchez-Garcia, C., Badia-Villas, D., Bryant, R., Dickison, M. B., Hsieh, R., Mataix-Solera, J., Miesel, J. R., Robichaud, P. R., Stoof, C. R., and Santin, C. (2025): Soil heating during wildfires and prescribed burns: a global evalution. International Journal of Wildland Fire, 34: WF25103.

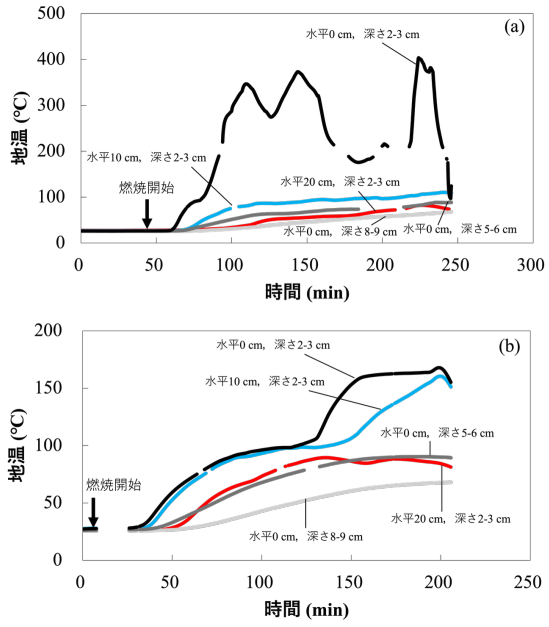


Fig. 2 模擬火災実験中のセンサー1, 2, 3, 4, 7 における地温の時間変化
（a）地中薪あり（b）地中薪なし

地盤凍結工法へのバイオクロッギング適用に向けた土中の栄養剤移動の数値解析

Numerical analysis of nutrient solution transport in soil for the application of bioclogging to artificial ground freezing

佐竹晋太朗[1]・吉田綾[2]・小島悠揮[1]・神谷浩二[1]・大石雅人[3]

[1]岐阜大学工学部・[2]岐阜大学大学院自然科学技術研究科・[3]株式会社精研

要旨(Abstract)

地盤凍結工法における透水性制御へのバイオクロッギングの適用を目指し，スクロース溶液の濃度および注入量が土中での移動性に及ぼす影響を数値解析により評価した．その結果，注入領域の半径が大きいほど，溶液の移動が遅延する傾向が示された．また，初期濃度による移動速度の差は，注入領域の半径が大きい場合に顕著となった．以上より，栄養剤の移動性を適切に制御するには，初期濃度と注入量の両方を考慮した注入条件の検討が重要である．

キーワード：地盤凍結工法，バイオクロッギング，栄養剤，数値解析

Key words: artificial ground freezing, bioclogging, nutrient solution, numerical analysis

1. はじめに

地盤の強度増加に用いられる地盤凍結工法では，地盤の透水性が高い場合，地下水流によって熱が運び込まれ地盤の凍結が阻害される．そのため，凍結前に地盤の透水性を下げる必要があるが，代表的な工法である薬液注入は環境負荷が高い．一方，バイオクロッギングは微生物の活動によって地盤の透水性が低下する現象であり，その利用が検討されている．吉田ら（2026）は栄養剤に飽和スクロース溶液を用い，水流条件下での透水性の低下を試みた．その結果，高濃度の栄養剤による微生物の不活化と，栄養剤の高い粘性に起因する土中での長期残存が課題として挙げられた．したがって，微生物の不活化を回避しつつ，長期間残存せず，且つ短期間で流亡しない栄養剤の注入条件を検討する必要がある．そこで本研究では，スクロース溶液の濃度および注入量が土中での栄養剤移動に及ぼす影響を数値解析で評価することを目的とした．

2. 方法

数値解析には偏微分方程式ソルバ FlexPDE を用いた．水流条件下での土壌中の栄養剤の移動は，次の二次元移流分散方程式によって計算した．

$$\theta\frac{\partial C}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left\{\left(D_{\mathrm{dif}}+D_{\mathrm{dispx}}\right)\frac{\partial C}{\partial x}-q_{\mathrm{wx}}C\right\}+\frac{\partial}{\partial y}\left\{\left(D_{\mathrm{dif}}+D_{\mathrm{dispy}}\right)\frac{\partial C}{\partial y}-q_{\mathrm{wy}}C\right\} \quad (1)$$

ここで，θ は飽和体積含水率（$\mathrm{cm^3\,cm^{-3}}$），C はスクロース濃度（$\mathrm{mol\,cm^{-3}}$），t は時間（h），x と y は距離（cm），D_{dif} はスクロース溶液の土中での拡散係数（$\mathrm{cm^2\,h^{-1}}$），D_{dispx} と D_{dispy} はそれぞれ x 軸と y 軸方向の分散係数（$\mathrm{cm^2\ h^{-1}}$），q_{wx} と q_{wy} は x 軸と y 軸方向のダルシー流速（$\mathrm{cm\ h^{-1}}$）である．D_{dif} の計算に必要な水中での拡散係数は文献値（山本, 2010）を使用し，屈曲度は Millington and Quirk (1961)モデルで求めた．D_{dispx} と D_{dispy} の計算に必要な横分散長は 3.1 cm，縦分散長は 0.6 cm を用いた（小林ら，2004）．ダルシー流速は，飽和浸透流解析を連成させて求めた．その際，飽和透水係数 K_s（$\mathrm{cm\ h^{-1}}$）はスクロース溶液の粘性比（η_0/η）に応じて次式で変化するようにした．

$$K_s=K_{s0}\times\frac{\eta_0}{\eta} \quad (2)$$

K_{s0} は濃度 0 $\mathrm{mol\ cm^{-3}}$ における透水係数で 3.5

cm h^{-1} とした．η_0/η は Swindells et al. (1958) の測定値に基づき次式で表現した．

$$\frac{\eta}{\eta_0} = e^{(546088.58\times C^2+590.71\times C)} \quad (3)$$

解析領域は縦 10 cm，横 150 cm の領域を設定した（図 1）．水移動の境界条件として，左端の水頭を 10 cm，右端の水頭を 0 cm ，それ以外はゼロフラックスとした．溶質移動の境界条件は，左端・右端共に $C = 0$ mol cm^{-3}，それ以外はゼロフラックスとした．

スクロース溶液の初期条件として，解析領域の左端から 7.5cm，下端から 5cm を中心に，半径 d=2.5，5，7.5 cm の円形領域を注入場所として設定した．t = 0 h における円形領域内の濃度は，低濃度 (1.0×10^{-4} mol cm^{-3})，中濃度 (3.0×10^{-4} mol cm^{-3})，不活化濃度 (6.0×10^{-4} mol cm^{-3})，高濃度 (1.4×10^{-3} mol cm^{-3})，飽和濃度 (2.6×10^{-3} mol cm^{-3}) を設定した．解析領域内に x 軸方向に 20 cm 間隔（y=5 cm）で 8 点の濃度観測点を設置した．

3. 結果

3.1 注入量の違いによる濃度変化

図 2 に各観測点のスクロース溶液濃度の時間変化を示した．左端から 1 m 地点におけるピーク到達時間を飽和濃度の d=2.5 cm（図 2(a)）と d=7.5 cm（図 2(b)）で比較すると，103 時間の差が生じた．他の濃度でも注入領域の半径に比例して，1 m 地点のピーク到達時間の差が増大する傾向が示された．

3.2 初期濃度の違いによる濃度変化

1 m 地点のピーク到達時間を飽和濃度（図 2(b)）と低濃度（図 2(c)）とで比較すると，低濃度では 105 時間早かった．その一方で，d=2.5 cm の場合は，その差は 3 時間と小さかった．

4. 考察

注入領域の半径は，栄養剤の移動速度に大きな影響を与えることが分かった．特に，栄養剤

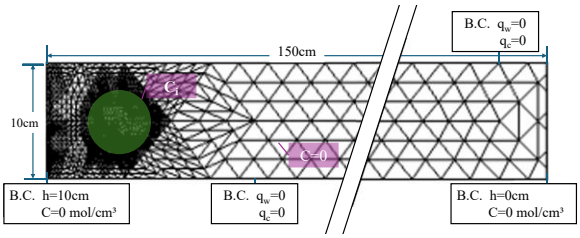


図 1　FlexPDE の解析領域

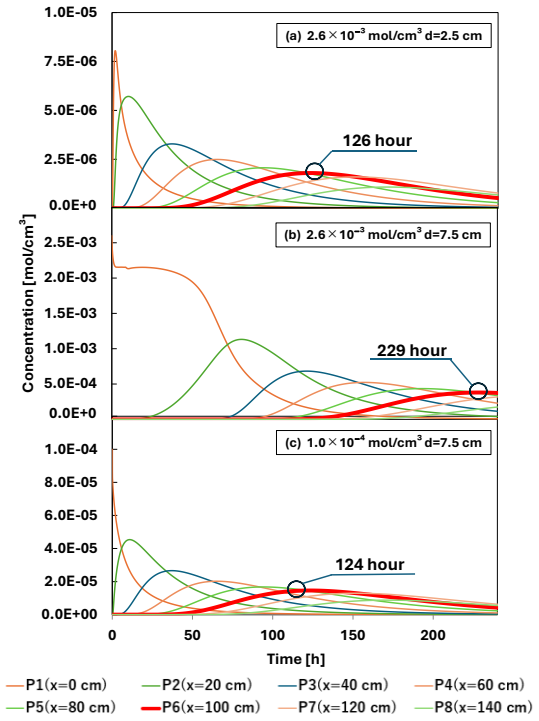


図 2　各観測点のスクロース濃度変化

の注入によって水の流路が制限される場合，栄養剤の移動は顕著に遅延すると考えられる．このことから，栄養剤の移動性を適切に制御するためには，水の流路を過度に制限しない注入量を検討することが重要である．また，注入領域の半径が大きい場合には，初期濃度も栄養剤の移動速度に大きく影響した．これは，初期濃度による粘性の違いが，制限された水の流路の回復に影響したためと考えられる．

5. おわりに

本研究により，栄養剤の移動性には初期濃度だけでなく注入量も影響することが示された．今後は，栄養剤の残存性を考慮した最適な注入条件を検討する．

【参考文献】吉田ら（2026）農業農村工学会大会講演要旨集 S-27; 山本（2010）日本食品工学誌 11:73-83; Millington and Quirk (1961) Trans. Faraday Soc.57:1200-1207; 小林ら（2004）土木工学会論文集 764:53-67; Swindells et al. (1958) Suppl. Natl. Bur. Stds. Circ. 440.

地表面被覆によるアルベド制御が地温・水分量および CO_2 フラックスに及ぼす影響

Effects of surface cover–induced albedo control on ground temperature, soil moisture, and CO_2 flux

有村穂高[1]・小島悠揮[2]・青木伸輔[3]・吉岡有美[4]・加藤千尋[5]・神谷浩二[2]

[1]岐阜大学大学院自然科学技術研究科・[2]岐阜大学工学部・[3]香川大学農学部・

[4]岐阜大学応用生命科学部・[5]弘前大学農学生命科学部

要旨(Abstract)

地表面アルベドの制御が土壌からの CO_2 放出に及ぼす影響を数値解析的に評価した．岐阜大学実験圃場を対象とし，HYDRUS-1D を用いて，アルベドの値を 0.1 から 0.7 まで変化させながら，地温，土壌水分量および CO_2 の生成・移動を計算した．計算の結果，アルベドの増加に伴い土中 CO_2 濃度は上昇する一方，地表面 CO_2 フラックスは低下した．地温低下による CO_2 生成の抑制に加え，土壌の湿潤化に伴う気相率および拡散係数の低下によって CO_2 の拡散が抑制されたためと考えられる．以上より，地表面アルベドの増加は，土壌からの CO_2 放出を抑制することが示された．

キーワード：気候変動，アルベド，地温，体積含水率，地表面 CO_2 フラックス

Key words: Climate change, albedo, soil temperature, volumetric water content, surface CO_2 flux

1.はじめに

気候変動による将来的な地温の上昇が問題視されており，岐阜県では約 3℃ の上昇が見込まれている（Asano et al., 2023）．これにより，土壌劣化，土壌生物の生態変化，農作物の生育不良などが懸念されている．したがって将来的な地温上昇を抑制することは重要な課題である．さらに地温上昇を抑制することで，土壌からの CO_2 放出を抑制できる可能性がある．

地温上昇を抑制する手法として，近年，地表面のアルベド制御の検討が進められている．アルベドとは地表に入射する太陽放射の反射率である．アルベドの増加により地中に流入する熱量が減少し，地温上昇が抑制できると考えられる．鈴木ら（2023）は数値解析によって，アルベドを 0.5 程度に維持すれば現在の地温を将来も維持できることを示した．また，蒸発量の減少で土壌の湿潤化が生じる可能性を明らかにした．しかし，鈴木ら（2023）は，アルベド制御が土壌からの CO_2 放出量に及ぼす影響は検討していない．よって本研究では，アルベド制御が土壌からの CO_2 放出に及ぼす影響を数値解析的手法に基づき評価することを目的とした．

2.実験方法

対象地には，岐阜大学実験圃場を選定した．アルベド制御の有効性評価には土壌中の熱・物質移動計算ソフトウェア HYDRUS-1D を修正し，地表面アルベドを任意の値に固定する機能を追加したものを使用した．HYDRUS-1D の水・熱・CO_2 同時移動解析では，気象データから地表面境界条件を設定することができない．そのため，まず水・熱同時移動解析を実施し，得られた地表面の水フラックスと温度を地表面境界条件として用いて，水・熱・CO_2 同時移動解析を実施した．

農研機構メッシュ農業気象データ（GCM：MIROC5）から 2091 年から 2100 年の気象データ（最高・最低気温，日降水量，日射量，風速，湿度）を取得した．また，大気中 CO_2 濃度には，2024 年の世界平均濃度 423.9 ppm を用いた．

土中の液状水移動は修正された Richards 式で，熱移動は熱伝導方程式で計算される．アルベドを従来の土壌水分量の関数とした条件と，0.1，0.3，0.5，0.7 に固定した条件について，将来の地温および土壌水分量を算出した．さらに，各条件について CO_2 の生成および移動を解析し，アルベド制御の影響を評価した．

土壌中の CO_2生成量は，土壌微生物および植物根による CO_2生成量の和として表される．本研究では裸地を対象としたため，土壌微生物による CO_2生成のみを考慮した．CO_2生成速度は，深さ，温度，土壌水分状態，CO_2濃度などの影響を受ける．このうち温度および土壌水分量の補正関数をそれぞれ以下の式(1)，(2)で表す．

$$f(T) = exp\left[\frac{E(T - T_{20})}{RTT_{20}}\right] \quad (1)$$

$$f(h) = \frac{\log|h| - \log|h_3|}{\log|h_2| - \log|h_3|} \quad h \in (h_3, h_2) \quad (2)$$

ここで，T は絶対温度[K]，T_{20}は 20℃における絶対温度，R は気体定数，E は活性化エネルギー，h_2は CO_2 生成に最適な水分状態の下限値，h_3は CO_2 生成がなくなる水分状態である．

3.結果と考察

図 1（a）（b）に 10cm 深度の最高地温および体積含水率の月平均を示した．アルベドの増加に伴い地温が低下する一方で，地表面蒸発量の減少に起因して体積含水率が増加した．

10 cm 深度の土中 CO_2濃度の月平均を図 1(c)に示した．土中 CO_2濃度は，アルベドの増加に伴って上昇した．一方で図 1（d）より，地表面 CO_2フラックスの月平均値は，アルベドが 0.2 増加するごとに 0.04～0.06 $cm^3\ cm^{-2}\ day^{-1}$低下した．このように，土中 CO_2濃度と地表面 CO_2フラックスは反対の傾向を示した．この要因として，地温低下による CO_2生成の抑制と，土壌の湿潤化による CO_2拡散の抑制が考えられる．土壌の湿潤化に伴う気相率の低下は，土壌中の CO_2の拡散係数を低下させる．その結果，地表面への CO_2輸送量が減少し，土中 CO_2濃度が上昇したと考えられる．

また 7 月から 9 月の期間と 10 月から 12 月の期間を比較すると，地温が高い時期ほどアルベド増加によって CO_2放出が大きく抑制された．夏季は土壌微生物による CO_2生成が活発であり，地温低下による生成抑制の影響が大きく現れたと考えられる．

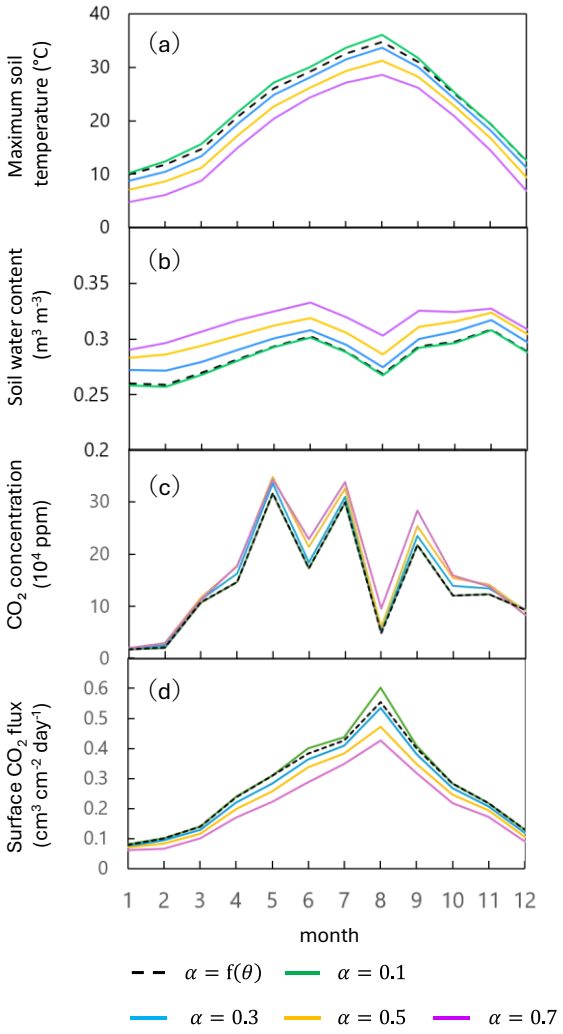


図 1 （a）最高地温，（b）体積含水率，（c）土中 CO_2濃度，（d）地表面 CO_2フラックスの月平均値

4.おわりに

アルベド制御が土壌からの CO_2放出に及ぼす影響を数値解析により評価した．アルベドの増加に伴い土中 CO_2濃度は上昇する一方，地表面 CO_2フラックスは低下した．これは，地温低下による CO_2生成の抑制に加え，土壌の湿潤化に伴う気相率および拡散係数の低下によって CO_2の拡散が抑制されたためと考えられる．以上より，地表面アルベドの増加は，土壌からの CO_2放出を抑制することが示された．

【引用文献】
Asano et al. 2023. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 1165, 012045; 鈴木ら.2023.土壌物理学会要旨．2023 年度土壌物理学会大会講演要旨集 p20.

3軸クリノスタットによる重力変化が土壌微生物群集とササゲの生長に及ぼす影響
Effects of Gravitational Changes Using a 3D Clinostat on Soil Microbial Communities and Cowpea Growth

定住颯太[1]・森也寸志[1]
[1]岡山大学大学院環境生命自然科学研究科

要旨(Abstract)

本研究では，3軸クリノスタットを用いて疑似微小・低重力環境が土壌微生物群集とササゲに及ぼす影響を調べた。その結果，粘土質土壌で微生物群集の構成変化がみられ，ササゲでは胚軸の屈曲が観察された。これらの結果から，重力環境の変化が土壌微生物群集や植物の成長に影響する可能性が示唆された。

キーワード：3軸クリノスタット，微小重力，土壌微生物群集，ササゲの初期成長
Key words: 3D Clinostat, Low/Microgravity, Soil Microbial Community, Cowpea Early Growth

1. はじめに

近年，宇宙開発が進展し，月や火星での長期滞在や食料生産の実現が期待されている。しかし，宇宙空間で持続的に食料を生産するためには，地球とは異なる重力環境が植物や土壌に及ぼす影響を明らかにする必要がある。特に，重力環境の変化は，土壌中の水分移動や蒸発，植物の発芽・初期成長，土壌微生物群集に影響を及ぼすと考えられる。そこで本研究では，3軸クリノスタットを用いて疑似微小・低重力環境を作り出し，土壌微生物群集の変化，ササゲの発芽・初期成長，および土壌微生物群集への影響を明らかにすることを目的とした。

2. 方法

(1) ササゲの発芽実験

マメ科の植物は窒素固定が行えるため，人間が活動できる，地球に近い大気が保証された環境では育成実験をしやすい。このため粘土質土壌を用いてササゲの栽培実験を行い，0G, 1/6G, 1/3G，1G（クリノスタット），1G（静置）の5条件で発芽および初期成長を評価した。15 mL遠沈管の底部中央に直径 1 mm の穴を設け，コットンを充填した後，乾燥密度 1.03 g/cm^{3}となるよう土壌を 10 mL 充填した。毛管飽和後，24 時間の重力排水を行った。ササゲを土壌表面から 1.5 cm の深さに1粒ずつ播種し，栽培した。各条件 12 反復とし，25℃, 相対湿度 55%の環境下で 7 日間，播種後の灌水を行わず栽培した。24 時間ごとに回転を停止し，発芽の有無および胚軸高を測定した。胚軸が屈曲した個体では，土壌表面から最も離れた位置までの高さを胚軸高とした。

(2) 微生物群集解析

15 mL 遠心分離管に 4 種類の土壌（粘土質土壌，まさ土，黒ボク土，森林土壌）を 10 mL 充填した。底部からイオン交換水で毛管飽和させた後，飽和度 70%となるよう遠心機で排水し，体積含水率を調整した。その後，0G では 3D クリノスタット，1G では静置条件に設置し，25℃，相対湿度 55%で 7 日間培養した。試料名は土壌種（C : 粘土質土壌, M : まさ土, A : 黒ボク土, F : 森林土壌）と重力条件を組み合わせて表記し，0 G を CC1，CM1，CA1，CF1，1 G を C1，M1，A1，F1 とした。

3. 結果

(1) ササゲの発芽実験の結果

発芽実験では，0G において発芽が早く，1/6G～1G では明確な傾向はみられなかった。

一方，初期成長は 0G で最も大きくなった。また，クリノスタット条件ではすべての条件で胚軸の屈曲が観察された。なお，胚軸高は土壌表面から最も離れた位置までの高さとして測定したため，屈曲の影響を含む値であることに留意する必要がある（Fig. 1, 2)。

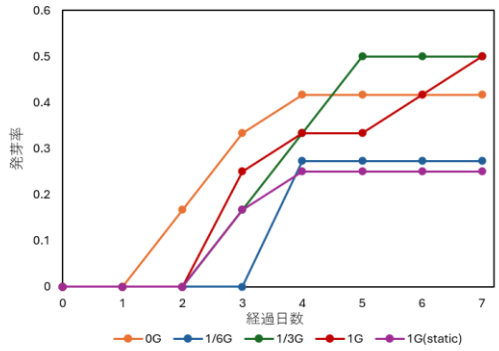


Fig. 1 重力ごとの発芽日と発芽率

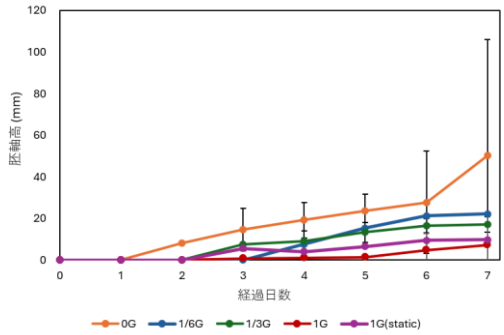


Fig. 2 重力ごとの胚軸高

(2) 微生物群集の変化（Fig. 3）

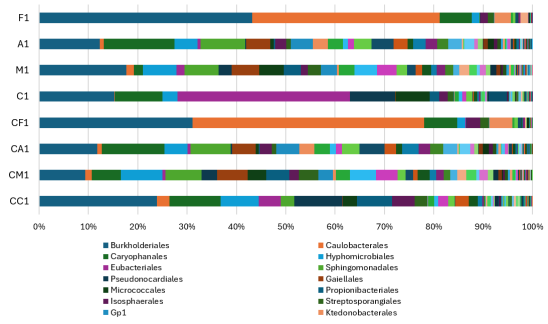


Fig. 3 微生物群集構造

Order レベルの相対優占率を比較した結果，粘土質土壌では，1G と比較して 0G では Eubacteriales の相対量が減少し，Burkholdeniales，Hyphomicrobiales，Isosphaerales などの相対量が高くなった。一方，まさ土，黒ボク土，森林土壌では明瞭な変化はみられなかった。

4. 考察

(1) ササゲの屈曲に関する考察

先行研究では，微小重力環境やクリノスタット環境において植物の自発的屈曲が生じ，重力による成長方向の制御が弱まることがその一因とされている。本実験では，遠心力によって疑似重力を与えた条件でもササゲの屈曲が観察された。このことから，クリノスタットの回転に伴う重力方向の連続的な変化が，屈曲に影響した可能性が考えられる。

(2) 微生物群集の変化に関する考察

Eubacteriales には嫌気性細菌が多く含まれる一方，Burkholderiales, Hyphomicrobiales, Sphingomonadales, Caulobacterales には好気性細菌が多く含まれる。これらの分類群の変化の要因として，粘土質土壌ではクリノスタットによる重力環境の変化が土壌中の水分や物質の移動状態に影響し，酸素や栄養条件などの土壌微小環境を変化させた可能性が考えられる。また，その他の土壌で大きな違いが見られないため，粒径が大きくなるとこの影響は小さくなると考察された。

5. おわりに

本研究では，3 軸クリノスタットを用いて疑似微小・低重力環境が土壌微生物群集とササゲの初期成長に及ぼす影響を調べた。その結果，粘土質土壌では微生物群集の構成に変化がみられた。ササゲでは 0G 条件で発芽が早くなる傾向がみられた。また，クリノスタット条件では胚軸の屈曲が観察された。クリノスタットは実際の微小重力環境を完全に再現するものではなく，回転や遠心力の影響も考慮する必要がある。今後は，これらの影響を区別し，現象の要因を明らかにする必要がある。

岩石風化促進法による CO2 固定のモデル化に向けた玄武岩溶解カラム実験

Basalt Dissolution column experiment for modeling Carbon fixation by enhanced rock weathering

山崎琢平・境田義晃・西村拓

東京大学大学院農学生命科学研究科

要旨(Abstract)：

大気 CO_2 を除去する技術である岩石風化促進法による炭素固定量を農地土壌一般において予測するためにはモデルの利用が望ましい．しかし，pH 変動に多くの機序が関与している土壌を用いた実験では鉱物風化モデルの検証・校正が難しい．そこで，本研究では反応性の低い豊浦砂に玄武岩を混合したカラムを用い，溶解速度を変えるために異なる pH の溶液を通水する溶脱実験を行った．鉱物溶解量を排水中のイオンと粉末 X 線回折による鉱物組成から評価した．

キーワード：岩石風化促進法，カラム実験，地球化学モデリング

Key words: Enhanced Rock Weathering, Column experiment, Geochemical modeling

1. はじめに

大気中の CO_2 を除去する技術として岩石風化促進法が注目されている．これは，アルカリ金属を含むケイ酸塩鉱物の含有率の高い岩石（玄武岩等）を粉砕して農地に散布し，CO_2 との溶解反応によって大気 CO_2 を地下水・海洋に貯留する技術である．

玄武岩に含まれる 1 次鉱物の溶解は単純なバッチ溶解実験によって速度式のパラメータが既に求められている．しかし，土壌に散布した際の溶解を予測するとなると難しい．鉱物溶解速度は反応 pH に影響されるが，土壌では生化学反応や変異荷電等によって H^+が生成・消費され，鉱物溶解による pH 上昇は緩衝される．このような土壌 pH の変動を陽的にモデルに組み込むことは現時点ではできない．また，2 次鉱物の沈殿によって，1 次鉱物の溶解速度が変化するため適切な沈殿過程を組み込む必要があるが，土壌には元から 2 次鉱物が多く含まれるため，玄武岩由来の沈殿の特定が困難である．そのため，鉱物溶解反応をモデル化してもその検証データがない状況にある．

そこで，本研究は反応性の低い豊浦砂に玄武岩を混合したカラム実験を行い，モデル検証データを取得した．

2. 実験方法

土壌は豊浦標準砂を，純水を用いて洗浄液が 10 μS/cm 以下になるまで洗浄してから実験に供試した．玄武岩粉末はソブエクレー社製の粉砕玄武岩を使用した．D_{50} は 66 μm である．玄武岩に含まれる主な易風化鉱物は溶解速度が大きい順に橄欖石(質量割合で 5%)，輝石(9.3%)，斜長石(56%)である．豊浦砂と玄武岩は質量比 9:1 で混合して実験に使用した．

カラムは内径 8.5 cm，高さ 10 cm で試料を乾燥密度 1.5 g cm^{-3} で充填した．その後，溶液 pH の影響をみるために，地表面に純水，または pH 約 6.2 の 10 mM クエン酸緩衝液（クエン酸とクエン酸 3Na の混合液）をそれぞれ 1 日 5 mm (30 mL)供給した．カラム下端は滲出境界とした．

下端からの排水を 1 日おきに採取し，pH，EC，主要陽イオンを測定した．実験終了後のカラムを解体し，土壌を 2 cm 毎に分けて採取し，炉乾して含水比を測定した．その後，各深さの試料と内部標準のコランダムを既知の割合で混合・粉砕して X 線回折装置で分析し，回折パターンを既知鉱物のライブラリーを用いて逆解析して鉱物組成を求めた．手法は Kurokawa et al., (2024)に準拠した．

3. 結果と考察

排水の pH は供給水の種類によらず 8 程度になり，時間と共に緩やかに低下した（図 1）．クエン酸緩衝液の緩衝作用を超えて鉱物が溶解して pH が上昇し，それに伴って玄武岩の溶解速度は低下していたと考えられる．

主要陽イオンをみると，どの陽イオンについてもクエン酸カラムで濃度が高かった（図 2・3）．クエン酸由来の H^+により鉱物の溶解が促進されていたといえる．

純水カラムでは Na イオンが最も高く，Ca・Mg イオンはほとんど流出しなかった．また，流出濃度は時間と共に徐々に低下した．

クエン酸カラムでは供給水に 26 mM 程度の Na が含まれる．最終的に 30 mM 程度で安定しており，土壌由来成分が数 mM 程度含まれていると考えられる．Ca・Mg イオンは共に実験 12 日目あたりで最大値を迎える山型の濃度変化をした．試料充填時の水分調整を純水で行ったため，クエン酸の浸透に伴って溶解速度が増え，濃度が時間と共に上昇したと考えられる．

カラム解体後の粉末 X 線回折結果をみると，橄欖石は初期量 0.5%から未検出となり，輝石は 0.9%から若干減少した．これらは鉱物の溶解を示すものと解釈できるが，陽イオンの流出量に比べて鉱物の減少量が大きいので，再検討が必要である．存在量の多い斜長石は X 線回折では実験前後で鉱物量の減少が認められなかった．

ポスター発表では本実験結果を，HYDRUS の HP1 を用いて再現した結果についても併せて報告する予定である．

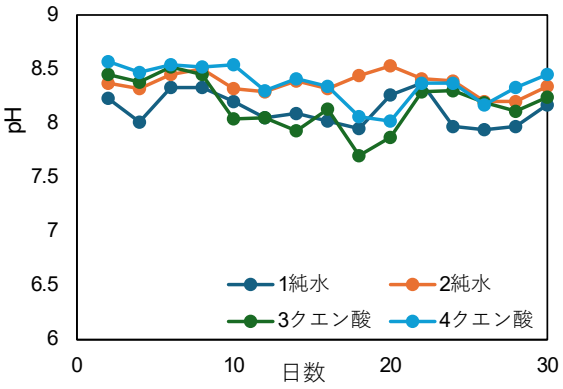


図 1 カラム流出液の pH 変化

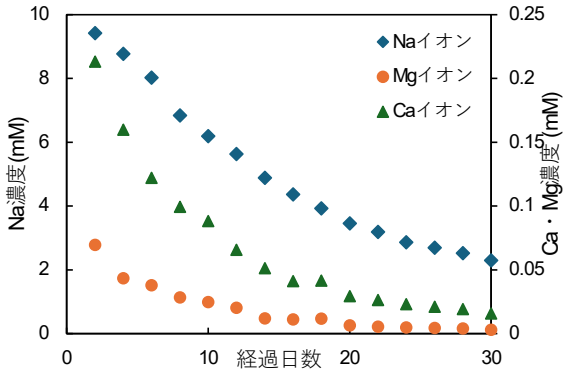


図 2 純水カラムの流出水陽イオン濃度

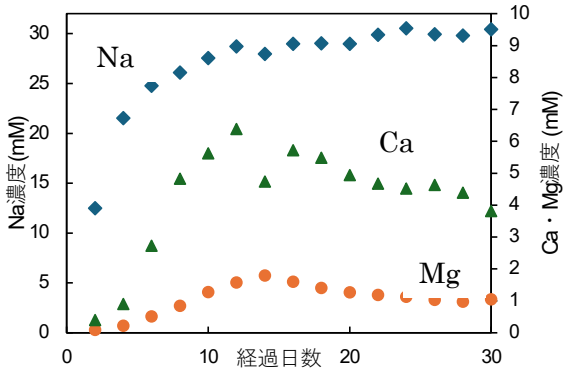


図 3 クエン酸カラムの流出水陽イオン濃度

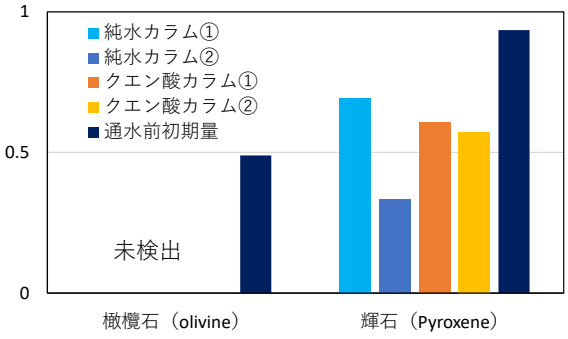


図 4 実験前後の易風化鉱物量

参考論文
Kurokawa et al. (2024) *SSSAJ* 90(4) e70283
https://doi.org/10.1002/saj2.70283

謝辞：本研究はムーンショット型研究開発事業「岩石と場の特性を活用した風化促進技術“A-ERW”の開発」の助成を受けて行った．

有機質堆肥施用水田における灌漑方法と地温や土中の窒素収支の年次比較（2025/26）

Interannual comparison of water management, soil temperature, and nitrogen balance in paddy fields amended with organic compost (2025/26)

今井咲菜[1]・柴田航汰[1]・ディクソン千尋[1,2]・関谷信人[1]・渡辺晋生[1]

[1]三重大学生物資源学部・[2]三重大学地域共創展開リンク

要旨(Abstract)

2025 年，2026 年に伊賀市内 4 地区（下柘植，大野木，猪田，勝地）の有機質堆肥を推奨量施用した水田において，地温と無機態窒素の変化を田面水の水位とともにモニターした。水管理は，勝地では年次により異なった。地温は，いずれの年も 6 月頃に上昇したが，2025 年の方が急激で 2 週間ほど早かった。窒素量は，地温の上昇に伴い増加した。

キーワード：水田土壌，田面水位，有機物分解

Key words Paddy soil, Water level, Decomposition of soil organic matter

1. はじめに

三重県伊賀市では, 地域内の家畜糞を発酵させた有機質堆肥の活用が進められている。この堆肥の水田への施用量は地域内で一律に設定されているが, 圃場や年次で水管理や地温は異なる。作付け期間中の水管理の違いは地温や土中の酸素状態に影響を与え，その結果，各生育ステージの窒素動態にも影響を与えると考えられる。そこで，本研究では有機質堆肥を推奨量施用した水田において, 地温と窒素収支の変化を田面の水位とともにモニターした。2 年間の結果を整理し, 各圃場の水管理と地温や窒素収支の特徴を明らかにすることを目的とした。

2. 方法

伊賀地域内 4 地区（下柘植，大野木，猪田，勝地）においてそれぞれ有機質堆肥連用区と慣行区の水田 2 圃場，計 8 圃場を選定し，2025 年と 2026 年に調査を行った。いずれの年についても，堆肥連用区では，10 月から 12 月に堆肥（大山田コンポ）を施用し，1 週間以内に荒起こしをした。各圃場において 5 月 10 日前後にコシヒカリを移植し，8 月末に収穫した。

3 月に土壌を採取し，強熱減量，アンモニア態窒素 NH_4-N，硝酸態窒素 NO_3-N，可給態窒素，粒径組成とその他の化学性を測定した。田植え後，各圃場に水位計（U20L, HOBO）と温度・日射計（Mx2202, HOBO）を 5 cm 深に設置し, 収穫直前までの期間, 1 時間間隔で水位, 地温，照度を測定した。2026 年は、温度・日射計を地上 0 cm と 13 cm にも設置し，水温と群落温度，照度も測定した。月 1 回程度，各圃場内 4 地点で草丈と分げつ数を調べた。この際, 作土層の厚さを測り, 地表から硬盤層までの土壌と代表的な植物体を採取した。採取した土壌に KCl 溶液あるいは純水を加え，抽出液の吸光度（DR6000, HACH）から，NH_4-N と NO_3-N の濃度を測定した。植物体はそれぞれ部位に分け，元素分析（vario EL cube, Elementar）により含有窒素量を測定し, 単位面積当たりのイネが吸収した窒素量を算出した。

3. 結果と考察

Fig. 1 に下柘植，大野木，勝地の堆肥連用区の田面水の水位を示す。2025 年の中干し前の水位は下柘植，大野木，勝地でそれぞれ平均, 3.9，2.3，2.8 cm であった。2026 年はそれぞれ 6.3，4.7，4.4 cm でいずれの地区も 2026 年の中干し前の水位が 2025 年より高かった。

下柘植：2025 年は 7 月 5 日の中干し後は間

断灌漑が実施された。2026 年は 7 月 11 日の中干し後，間断灌漑に加え，漏水の可能性が示唆された。大野木：2025 年は 7 月 4 日の中干し後は飽水灌漑が実施された。2026 年は 7 月 1 日の中干し後は，2025 年同様に飽水灌漑が実施された。勝地：2025 年は 6 月 26 日の中干し後，2.7 cm に維持された。2026 年は 6 月 25 日の中干し後，掛け流し灌漑が実施された。勝地は灌漑方法が年次で異なった。

Fig. 2 に下柘植，大野木，勝地の堆肥連用区の 5 cm 深の日平均地温を示す。2025 年の地温は 6 月 16 日まではそれぞれ，平均 21.6, 21.9, 21.6℃で，以降は平均 26.5，27.2，27. 0℃まで急激に上昇した。この急激な上昇傾向は日平均気温でも同様だった。2026 年の地温は 6 月 29 日まではそれぞれ，22.7，23.3，22.4℃で，以降は，25.7，25.8，25.7℃となった。2025 年の 6 月の地温上昇は 2026 年より 2 週間ほど早く，急激で上昇幅も大きかった。

Fig. 3 に各圃場の土中の無機態窒素と植物体が吸収した窒素の合計値を示す。いずれの年も下柘植と大野木では田植え後 6 月初旬（分げつ期）まで緩やかに増加した。その後減少し，植物体各部位の窒素量が増加した。窒素の総量については，2025 年は 6 月初旬（分げつ期）に大きく増加したが，2026 年は 8 月初旬（登熟期）頃に増加した。これは地温の上昇時期の違いに起因すると考えられる。

上昇後の平均地温はいずれの年も大野木，勝地，下柘植の順で高かった。中干し後の水位は 2025 年では大野木，勝地，下柘植の順で高かったが，2026 年は大野木と勝地の順が入れ替わり，日平均気温と水位に一貫した関係は見られなかった。作付け期間を通しての窒素量はいずれの年も下柘植，大野木，勝地の順で高く，地温の低い下柘植の窒素量が高かった。今後，実際の施肥管理や稲の生育ステージの日付を調査し，水管理と地温，窒素収支の関係について検討する予定である。

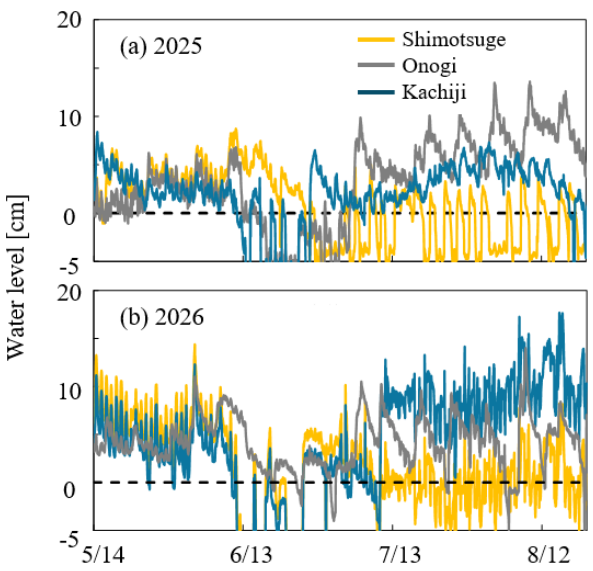


Fig.1 Water level

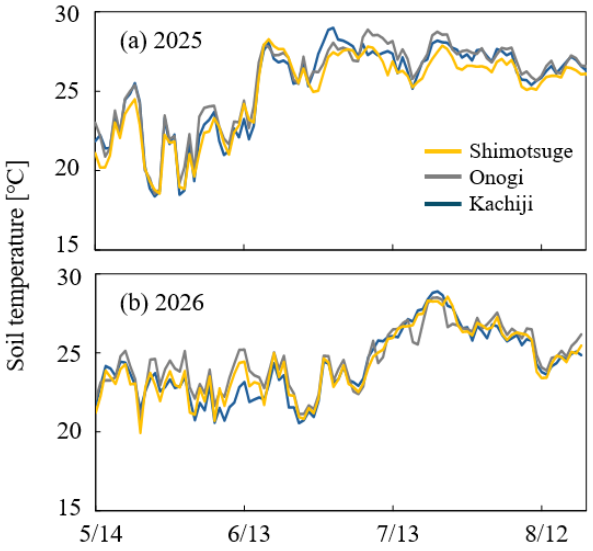


Fig.2 Soil temperature

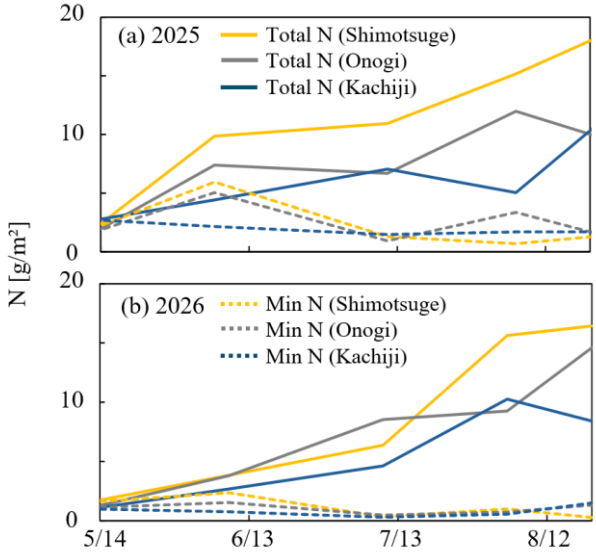


Fig.3 Total amount of Nitrogen

異なる風速条件における埋設有孔管への送風による土の温度低下効果の検証
Effect of Airflow Velocity Inside a Buried Perforated Pipe on Soil Cooling by Evaporation

藪内友佑[1]・渡辺晋生[1]
[1] 三重大学大学院生物資源学研究科

要旨(Abstract)：
作物の高温障害対応策の一つに地中に埋設した有孔管への送風による根圏冷却法がある。本研究では，送風風速が冷却効果に与える影響を検討した。ワグネルポットに設置した有孔管に 0.7～1.8 m/s で送風したところ，風速が大きくなるほど蒸発速度が増大し，平均温度低下幅も 1.4℃から 2.5℃に拡大した。また，高風速下では乾燥に伴い，有孔管を中心とした圧力勾配が大きくなった。

キーワード：根圏冷却，蒸発潜熱，土中の水分・熱移動
Key words: Root-zone cooling, Latent heat of vaporization, Heat and water transport in soil

1. はじめに

近年の気候変動に伴い，作物の高温障害が農業生産に対する大きな問題となっている。これに対する有効な対策の一つに根圏冷却があり，作物の根圏温度を適切に保つことで高温障害を軽減できると報告されている。根圏冷却には様々な方法があるが，本研究では，地中に埋設した有孔管内に送風することで，土中水の蒸発を促進し，その際の蒸発潜熱を利用して冷却する方法に着目した。この方法では，送風風速が地中の温度低下に対して影響を与えると考えられるが，その影響の程度は明らかになっていない。そこで，本研究では，地中に埋設した有孔管内に異なる風速で送風し，その際の蒸発速度および温度低下の違いを検討した。

2. 方法

三重大学学内圃場の表土を採土し，2 mm ふるい通過分を試料とした。1/5000 a ワグネルポットに乾燥密度 1.2～1.5 g/cm^3 程度（体積含水率 θ_i：0.16～0.32）で試料を充填した。ポット下端から 9.5 cm の高さに，3D プリンタで作製した内径 1.5 cm，肉厚 0.2 cm の有孔管を貫通させた。同管にはスリット状の通気孔を円周上に 10 個，軸方向に 0.7 cm 間隔で配置し，管の外周にはガーゼを巻いた。ポット内には，温度測定用に熱電対を下端から 3，6，9，12，15 cm の 5 つの高さに各 4 本ずつ設置した。また，圧力水頭測定用にテンシオメータをポット中央に下端から 5，7.5，12.5，15 cm の 4 つの高さにそれぞれ設置した（Fig. 1）。ポット外周は断熱材で被覆し，上面は蒸発を防ぐためポリエチレンフィルムで密閉した。装置を 25℃の恒温室（湿度 40～50%）内の電子天秤上に設置し，試料温度を室温になじませるため 24 時間以上静置した。その後，空気ポンプにより 0.7, 1.1, 1.8 m/s で有孔管に室温の空気を送風し，試料の冷却を開始した。有孔管と空気ポンプの間には流量計を設置して，試料温度，圧力水頭，およびポット全重量を 1 分間隔で測定した。

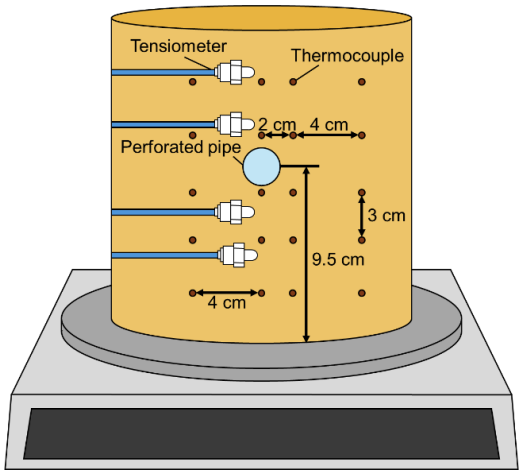


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

3. 結果

有孔管への送風開始により土中水の蒸発が促進され，試料温度が低下した。Fig. 2 に風速ごとの送風開始時からの試料の重量減少量を示す。いずれの風速においても送風開始後から試料の重量はほぼ線形に減少した。重量減少速度（蒸発速度）は，風速 0.7，1.1，1.8 m/s でそれぞれ 0.9，1.4，1.6 g/h となり，風速が大きいほど蒸発速度が増大した。Fig. 3 に風速ごとの有孔管へ流入する空気の温度（≒室温）と試料全体の平均温度との差を示す。なお，図縦軸の負の値は，試料温度が室温より低いことを表す。いずれの風速においても，送風開始後 24 時間程度までは試料温度が室温から次第に低下し，風速が大きいほど温度の低下速度も大きかった。その後はおよそ一定の温度を維持した。24 時間から 120 時間における平均温度低下量は，風速 0.7，1.1，1.8 m/s でそれぞれ約 1.4，2.0，2.5℃であり，風速が大きいほど温度低下幅も大きくなった。有孔管を通過する空気の顕熱移動を評価するため，Fig. 4 に有孔管に流入する空気と流出する空気の温度差を示す。期間中の平均温度差は，風速 0.7，1.1，1.8 m/s でそれぞれ約 0.9，1.2，0.7℃であった。これらの値から各条件で持ち出された顕熱量を試算すると，それぞれ約 0.13，0.30，0.28 W となり，明確な風速依存性はみられなかった。Fig. 5 に風速 0.7 m/s および 1.8 m/s における有孔管（9.5 cm 高：図中灰色帯）上下の圧力水頭の分布を示す。いずれの風速条件でも 5 cm および 15 cm 高の圧力水頭が有孔管に近い 7.5 cm および 12.5 cm の圧力水頭より大きかった。初期の圧力水頭は風速 1.8 m/s の方が大きかったが，乾燥の進行に伴い，67 時間後には，風速 0.7 m/s と同程度となった。また，時間経過に伴い風速 1.8 m/s の 5 cm と 7.5 cm 高の圧力水頭差は拡大し，67 時間時点において風速 0.7 m/s が約 22 cm であったのに対し，風速 1.8 m/s は約 65 cm と約 3 倍の圧力水頭差に達した。

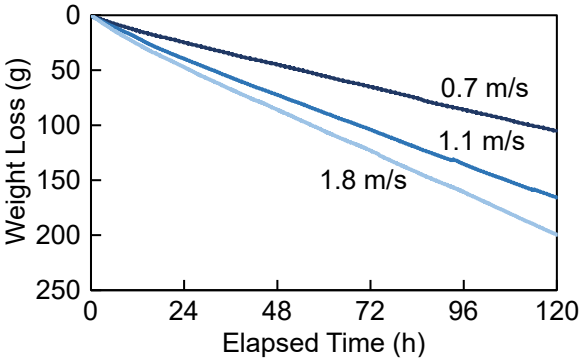


Fig. 2 Weight loss of the samples

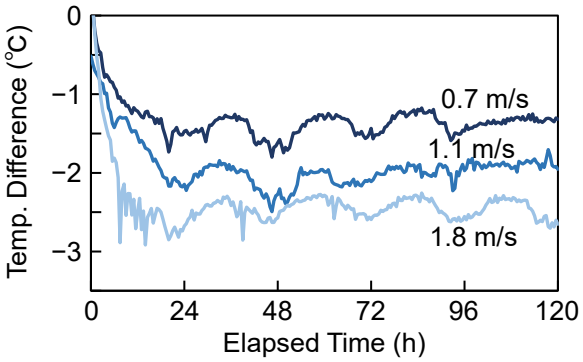


Fig. 3 Sample- ambient temperatures difference

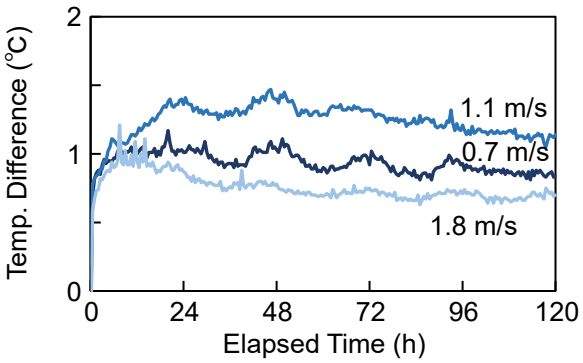


Fig. 4 Inlet-outlet air temperature difference

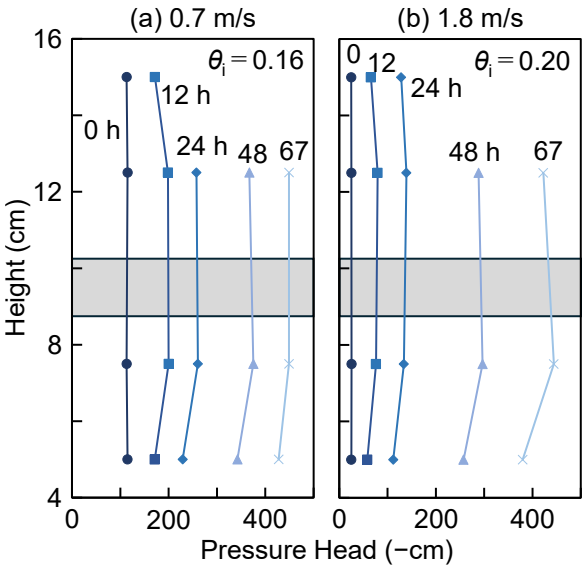


Fig. 5 Profiles of pressure head

排水不良な粘土質圃場における N_2O フラックス測定

N_2O Flux Measurements in a Clayey Field with Poor Drainage

安達侑里・松本宜大・宮本輝仁・瑞慶村知佳・久保田幸

農研機構農村工学研究部門

要旨(Abstract)

排水不良で嫌気的になりがちな粘土質圃場のダイズ作付期間に，N_2O フラックス，体積含水率，酸素濃度および無機態窒素濃度の測定を行った。その結果，施肥から約 1 か月後の降雨の際に，土壌中の酸素濃度が低下し，顕著な N_2O フラックスのピークが観測された。これは脱窒によるものと考えられる一方で，酸素濃度の低下だけでは説明できない可能性も示唆された。

キーワード： 一酸化二窒素，粘土質圃場，脱窒，土壌水分，土壌酸素濃度

Key words: N_2O, Clayey Field, Denitrification, Soil Moisture, Soil Oxygen Concentration

1. はじめに

一酸化二窒素（N_2O）は温室効果ガス排出量の 5％（CO_2 換算）を占め[1]，その人為起源の排出のうち 59%が農業分野由来，特に畑地が 26%を占めると推定されている[2]。農地からの N_2O 排出は，好気条件では主に硝化によって，嫌気条件では主に脱窒によって生じる。日本は降水量が多く，ダイズやムギといったコメ以外の穀物は，排水不良な水田転換畑で作付けされることが多い。このような条件では，降雨後に土壌が嫌気的になり，脱窒によって N_2O が多く放出されると考えられる。Hasukawa et al. (2022) は，ダイズを作付けした転換畑（灰色低地土）において，施肥から約 1 か月後の降雨後に，脱窒によると思われる N_2O フラックスの著しい増加を観測している。一方で，その要因については十分に明らかにされていない。本研究では，粘土質圃場において，施肥後の降雨後に N_2O フラックスが著しく増加するかを確認するとともに，その要因を検討した。

2. 方法

農研機構農村工学研究部門（茨城県つくば市）内の排水不良な粘土質圃場で，ダイズ栽培期間（2025 年：6 月 23 日～11 月 6 日，2026 年：7 月 15 日～現在）に N_2O フラックスを測定した。粘土含有量は 48%であり，飽和透水係数は作土層で 2×10^{-2}～6×10^{-1} cm s^{-1}，下層土で 4×10^{-7}～2×10^{-5} cm s^{-1} であった。施肥は，播種前に，窒素成分について，硫安を 3 kg N 10 a^{-1} 散布した。両年ともダイズを播種したが，2026 年は発芽不良により裸地条件となった。

N_2O フラックスは，クローズドチャンバー法により圃場の 3 地点で測定した。チャンバー設置後，20 mL シリンジを用いて 0，10，20 分後に試料ガスを採取した。N_2O ガス濃度をガスクロマトグラフィーにより分析し，濃度変化からフラックスを算出した。2025 年は 1～2 週間に 1 回程度，2026 年は 8 月中旬までは週 5 日程度，以降，週 2～3 回測定した。

N_2O フラックスに影響を与えうる要因として，体積含水率（Meter 社 EC-5）を圃場内の 1 地点の深さ 10, 20, 30 cm で，酸素濃度（Apogee 社 SO-120）を圃場内の 3 地点の深さ 10, 20, 30 cm で，地下水位（ウイジン社 UIZ-WL100-LR）を圃場内の 1 地点で，それぞれ 10 分間隔で測定した。また，1～2 週間間隔で深さ 0～10 cm および 20～30 cm の土壌を圃場内の 3 地点から採取し，インドフェノール青吸光光度法でアンモニア態窒素濃度を，イオンクロマトグラフィーで硝酸態窒素濃度を測定した。

3. 結果

図 1 に，2025 年および 2026 年の N_2O フラックス，深さ 10 cm の体積含水率と酸素濃度の経時変化を示す。N_2O フラックスは両年ともほとんどの期間で 400 μg N_2O-N m^{-2} h^{-1} 以下であった。一方で，施肥から約 1 か月後の降雨時に 2025 年には 1 地点，2026 年には 3 地点で 1400～6000 μg N_2O-N m^{-2} h^{-1} の顕著なピークが観測された。このとき，体積含水率は降雨直後のため飽和近傍の値を示した。また，土壌酸素濃度は 16～18 %で，21 %より低下していた。

図 2 に，2025 年および 2026 年の深さ 0～10 cm のアンモニア態および硝酸態窒素濃度の経時変化を示す。アンモニア態窒素濃度は，両年ともに，N_2O フラックスのピーク前後であまり変わらなかった。硝酸態窒素濃度は，2025 年は N_2O フラックスのピーク後に減少した一方で，2026 年は増加し，一貫した傾向は見られなかった。

4. 考察

観測対象とした粘土質圃場では，施肥から約 1 か月後の降雨後に N_2O フラックスのピークが観測された。この結果は Hasukawa et al. (2022) と一致する。このピーク時には，降雨に伴う土壌水分の増加と酸素濃度の低下が見られたことから，脱窒が N_2O の著しい放出に寄与したと考えられる。一方，ピーク後においても降雨に伴う酸素濃度の低下が観測されたが，その際には顕著な N_2O フラックスの増加は認められなかった。そのため，N_2O の著しい放出には，酸素濃度の低下以外の要因も影響していると考えられる。今後は，易分解性炭素の測定も追加して行い，硝酸態窒素と合わせて脱窒による N_2O 放出に及ぼす影響をより詳細に検討する。

参考文献等

[1] IPCC (2022). IPCC Sixth Assessment Report. (https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/)

[2] 西村拓 編 (2019). 土壌物理学. 朝倉書店.

[3] Hasukawa et al. (2021). *Soil Sci. Plant Nutr.* 67, 716–726.

謝辞：本研究は JSPS 科研費 JP24H00535 の支援を受けて実施した。

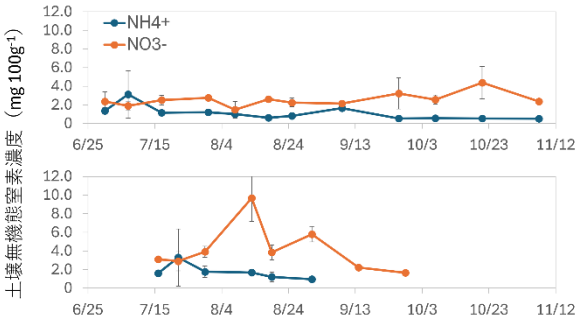


図 2　深さ 0～10 cm の土壌無機態窒素濃度（上：2025 年，下：2026 年）

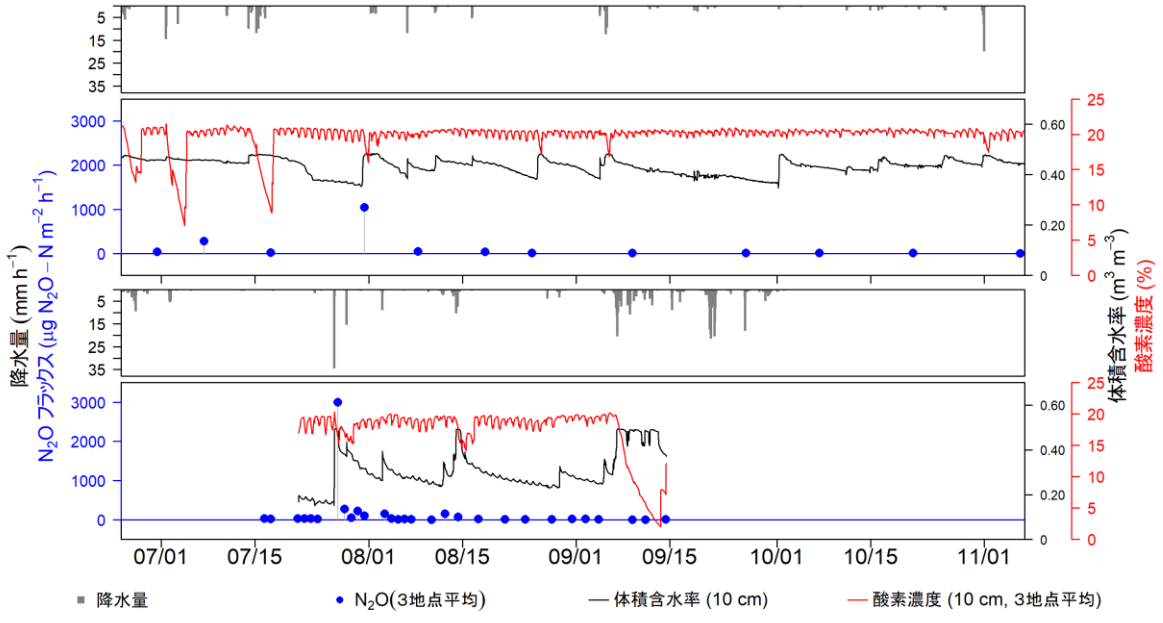


図 1　深さ 10 cm の体積含水率・酸素濃度と N_2O フラックス（上：2025 年，下：2026 年）

養液水位条件に対するサニーレタスの生育応答および根系の発達と分布

Growth Responses and Root Development and Distribution of Lettuce under Different Nutrient Solution Levels

臼木美紅[1]・冨吉啓太[1]・吉岡尚寛[2]・青木伸輔[1]

[1]香川大学農学部・[2]香川大学大学院農学研究科

要旨(Abstract)：

水耕栽培では，根系の浸水状態が植物の生育や根系の発達に影響を及ぼすと考えられる。本研究ではサニーレタスを対象に，根系の浸水条件を変えた栽培試験を行い，地上部生育および根系構造への影響を評価した。その結果，低水位条件では最も長い根長を形成するが，地上部生体重および根乾物重は小さく，Kratky 法区では地上部生育が最も良好であった。これらの結果から，根系の浸水条件の違いが地上部生育および根系構造に影響を及ぼす可能性が示唆された。

キーワード：サニーレタス，水耕栽培，浸水条件，根系構造

Key words: Lettuce, Hydroponics, Immersion conditions, Root system architecture

1. はじめに

水耕栽培では根が養液と直接接するため，根圏の酸素環境が植物の生育を左右する重要な要因となる（Chun and Takakura，1994）。これまで，養液中の溶存酸素濃度や酸素供給条件が植物の生育に及ぼす影響について研究されてきた。しかし，根系の浸水程度の違いが植物の生育および根系構造に及ぼす影響については，十分に明らかにされていない。そこで本研究では，サニーレタスを対象に，根系の浸水条件が異なる区を設定し，根系の浸水条件の違いが地上部の生育および根系構造に及ぼす影響を評価した。

2. 方法

本実験は，2026 年 8 月 4 日から 9 月 9 日まで，香川大学農学部キャンパスで 25℃に設定したインキュベーター内で実施した。供試作物には，株式会社アタリヤ農園のサニーレタスを用い，8 月 4 日に播種し，8 月 19 日に各処理区に 5 株ずつ定植した。容器底面からの養液面高さを 15 cm，10 cm，6 cm に固定した処理区をそれぞれ完全浸水区（H 区），部分浸水区（M 区），低浸水区（L 区）とした。また，養液を補給せず，植物の吸水に伴って養液面が経時的に低下する Kratky 法（Kratky，2009）に基づく K 区を設けた（Fig. 1）。各処理区の養液は 7 日ごとに全量交換した。H 区，M 区および L 区では，交換後の養液面高さをそれぞれの設定値に維持した。K 区では交換直前の養液面高さに合わせて養液を交換し，その後は

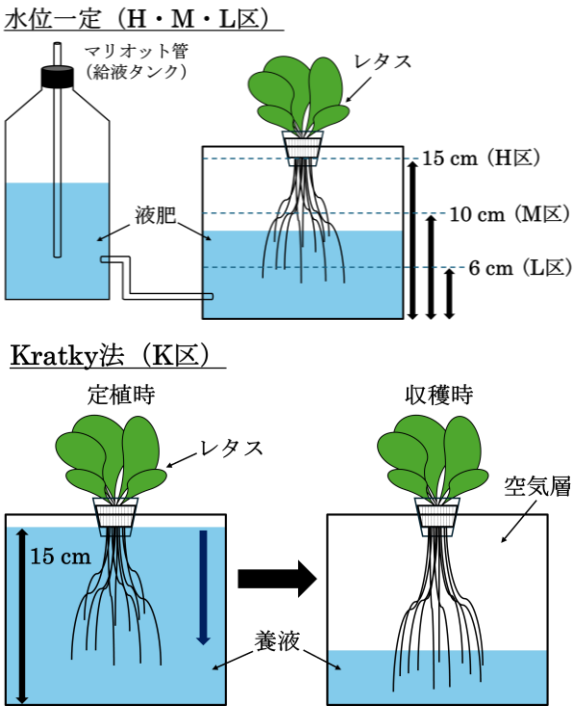


Fig. 1 栽培装置の概略図

補給せず，養液面を経時的に低下させた。

栽培期間中は，7 日間隔で各個体の葉数，最大葉長，最大葉幅，SPAD 値および根長を測定した。収穫時には地上部および根系の生育調査を実施した。根系は各処理区の養液水位を基準として上層・中層・下層の 3 層に区分し（Fig. 2），RhizoVision Explorer（Seethepalli et al., 2021）を用いて根長，根径，根表面積および根体積を解析した。

3. 結果と考察

Table 1 に各処理区における地上部生体重，地上部乾物重，根長および総根乾物重を示す。収穫時の地上部生体重は K 区で 33.2 g と最も大きく，L 区では 10.3 g と最も小さかった。また，地上部乾物重についても同様の傾向が認められ，K 区で 2.4 g と最も大きく，L 区では 0.7 g と最も小さかった。これらの結果から，L 区では地上部の生育が抑制された一方，K 区では良好な生育が認められた。根長は L 区で 33.3 cm と最も長く，次いで K 区（29.0 cm），M 区（24.9 cm），H 区（17.9 cm）の順であった。根乾物重は K 区で 0.21 g と最も大きく，L 区では 0.08 g と小さかった。このことから，L 区では根系全体の乾物重が小さいものの，養液を求めて根が伸長した可能性が考えられる。

Fig. 3 に各処理区における根体積の層別分布および各層の割合を示す。H 区では上層部の根体積が全根体積の 58.2%を占めたのに対し，L 区では下層部が 57.7%を占めた。また，M 区および K 区では根体積が大きく，特に K 区では各層に比較的均等に分布していた。これらの結果から，浸水条件の違いによって根系の分布が変化し，H 区では上層部に，L 区では下層部に根が集中する傾向が認められた。一方，K 区では根が上層から下層に広く分布しており，地上部生育も最も良好であったことから，このような根系形成が生育に有利に働いた可能性が示唆された。

4. おわりに

本研究より，根系の浸水条件の違いが地上部の生育や根系の発達，分布に影響を及ぼすことが示された。今後は根圏環境の経時変化と根系の発達との関係を明らかにし，水耕栽培における適切な根系の浸水条件について検討する。

参考文献

Chun, C., Takakura, T. (1994): Rate of root respiration of lettuce under various dissolved oxygen concentrations in hydroponics. *Environment Control in Biology*, 32(2), 125-135.

Kratky, B. A. (2009): Three non-circulating hydroponic methods for growing lettuce. *Acta Horticulturae*, 843, 65-72.

Seethepalli, A., Dhakal, K., Griffiths, M., Guo, H., Freschet, G. T., York, L. M. (2021): RhizoVision Explorer: open-source software for root image analysis and measurement standardization. *AoB PLANTS*, 13(6)

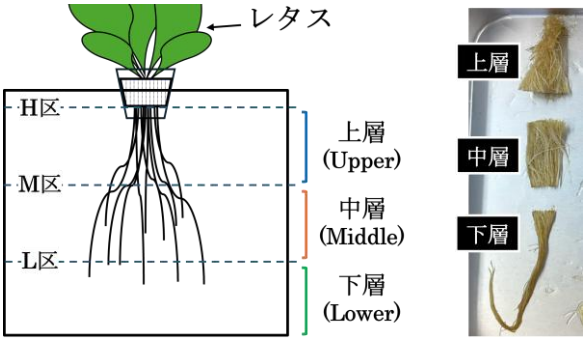


Fig. 2 各層に分割した根

Table 1 各浸水条件におけるサニーレタスの地上部および根系の生育

区画	地上部生体重(g)	地上部乾物重(g)	根長(cm)	根乾物重(g)
H	28.6 ± 5.8 a	1.5 ± 0.2 bc	17.9 ± 1.3 b	0.09 ± 0.02 b
M	26.1 ± 6.9 a	1.8 ± 0.4 ab	24.9 ± 4.2 ab	0.16 ± 0.02 a
L	10.3 ± 4.5 b	0.7 ± 0.3 c	33.3 ± 4.1 a	0.08 ± 0.03 b
K	33.2 ± 8.1 a	2.4 ± 0.6 a	29.0 ± 6.2 a	0.21 ± 0.05 a

値は平均値 ± 標準偏差（n = 5）を示す。同一列内の異なるアルファベットは，TukeyのHSD検定により処理区間に有意差があることを示す（$p < 0.05$）。

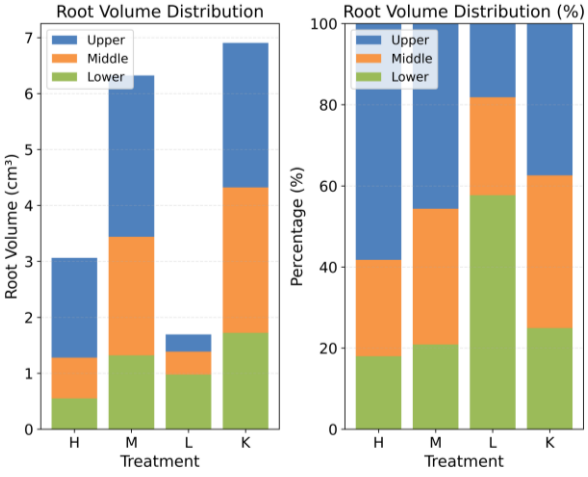


Fig. 3 各浸水条件における根の体積分布（右）と層別割合（左）

ハス栽培地における CO_2 および CH_4 フラックスの経時変動

Temporal variations of CO_2 and CH_4 Emissions in a Lotus Cultivation Field

堀之内江凪[1]・宇田萌[1]・冨吉啓太[1]・青木伸輔[1]

[1]香川大学農学部

要旨(Abstract)：

水田はメタン（CH_4）の主要な発生源であり，ガス放出には土壌からの拡散に加え，水稲等の植物体の通気組織を介した輸送が大きく関与している。本研究ではハス栽培地における植物体の有無が二酸化炭素（CO_2）および CH_4 フラックスに及ぼす影響と外部環境との関係を評価した。その結果，ハスあり区における CH_4 フラックスは日中の昇温に伴って増加する傾向を示した。

キーワード：ハス，温室効果ガス，オートチャンバー

Keywords: lotus, greenhouse gases, automated chamber

1. はじめに

地球温暖化対策として温室効果ガスの削減が国際的に急務とされる中，日本は 2030 年度までに 2013 年度比で 46%削減する目標を掲げている（環境省，2021）。農業分野において，水田は主要なメタン（CH_4）の発生源として知られている。水田土壌で生成された CH_4 は，土壌中の拡散や気泡による放出に加え，イネの通気組織を介した輸送が主要な放出経路の一つとされている（八木，2003）。ハス（*Nelumbo nucifera*）もイネと同様に湛水条件下で栽培され，発達した通気組織を有する。このため，土壌中で生成された CH_4 の一部がハスの通気組織を介して大気中へ輸送される可能性がある。しかし，ハス栽培において植物体を介した輸送が CH_4 放出にどの程度寄与しているかは十分に明らかではない。 そこで本研究では，ハス栽培地において植物体の有無による CO_2 および CH_4 のフラックスの違いを評価することを目的とした。

2. 方法

本研究は香川大学農学部附属農場（2025 年）と香川大学農学部キャンパス内の圃場（2026 年）で実施した。それぞれの圃場にハスの植物体がある区および植物体がない区を設け，オートチャンバー（佐藤ら，2025）を用いて CO_2 および CH_4 濃度，気温，地温を連続的に測定した（Fig. 1）。

ガスフラックス F（mg m^{-2} h^{-1}）はチャンバーの蓋が閉じている間の CO_2 および CH_4 濃度の変化から (1) 式より求めた (de Mello and Hines, 1994)。

$$F = H[dC/dt]_{t=0} \quad (1)$$

ここで，H はチャンバー高さ（m），dC/dt はチャンバー内の濃度変化の傾き（mg m^{-3} h^{-1}），t=0 はチャンバーの蓋が閉じた瞬間である。

3. 結果・考察

Fig. 2 および Fig. 3 に，2025 年の雨天（10 月 22 日）および 2026 年の晴天（8 月 23 日）における，ハスあり区とハスなし区の CO_2 および

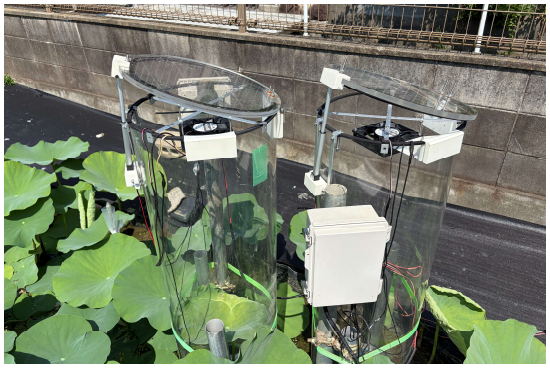


Fig. 1 設置したオートチャンバー

CH_4 の濃度，ガスフラックス，気温，地温の経時変化を示す（2026 年 CO_2 濃度は除く）。

ハスあり区の CO_2 および CH_4 濃度はチャンバー解放時（毎時 00 分から 30 分まで）に低下し，チャンバー閉鎖時（毎時 30 分から 00 分まで）には上昇するという周期的な変動を示したことから，オートチャンバーの動作を確認できた。一方，ハスなし区では濃度変化が比較的平坦であった。この結果から，ハスの存在がガスの放出に影響を与えていると考えられる。

ハスあり区の CH_4 フラックスは，気温の上昇に伴って増加していることが確認された（Fig. 3）。水田における CH_4 フラックスと地温との間に正の相関があることが報告されており（Schütz et al., 1990），本研究で観察された変動にも温度条件が関与している可能性が考えられる。

ハスあり区の CO_2 フラックスは，日中に減少する傾向が見られた（Fig. 3）。植物の光合成による CO_2 吸収と，植物および土壌からの CO_2 放出がフラックスの変動に関与した可能性が考えられる。

4. おわりに

今後はさらにフラックス算出を進め，気温や日照，気圧などの環境条件と各ガスフラックスとの関係を明らかにしていく予定である。

謝辞：本研究は高橋産業経済研究財団の助成を受けて実施した。ここに記して謝意を表す。

参考文献等

環境省（2021）:地球温暖化対策計画（令和３年 10 月 22 日 閣議決定）

八木一行（2003）:土壌生態系からの微量ガス発生と大気環境. 土壌の物理性, No.94, 21-31.

佐藤直人，吉岡尚寛，磯貝好輝，土井俊弘，登尾浩助（2025）: 温室効果ガス放出測定用オートチャンバーの開発．農業農村工学会要旨集，281–282.

Schütz, H., W. Seiler and R. Conrad（1990）:Influence of soil temperature on methane emission from rice paddy fields. Biogeochemistry, Vol.11, 77-95

de Mello, W.Z., Hines, M.E.（1994）:Application of static and dynamic enclosures for determining dimethyl sulfide and carbonyl sulfide exchange in Sphagnum peatlands: Implications for the magnitude and direction of flux. Journal of Geophysical Research, Vol.99(14), 601-607

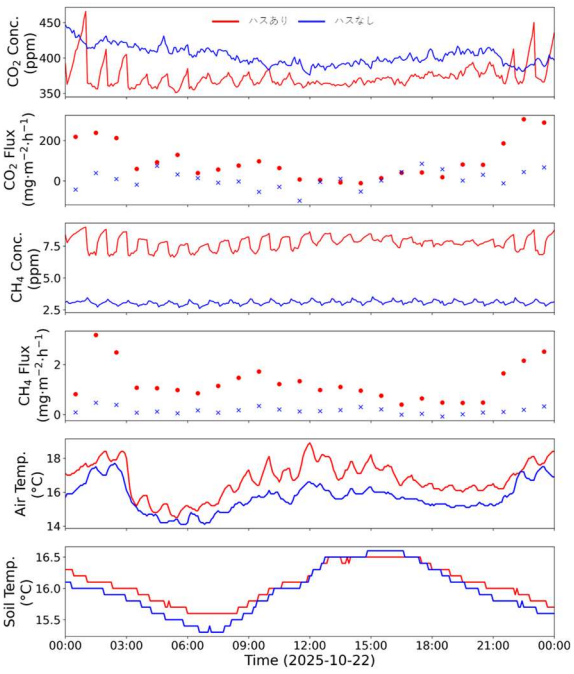


Fig. 2　2025 年 10 月 22 日（雨天）における CO_2 および CH_4 の濃度とフラックス，気温，地温の経時変化

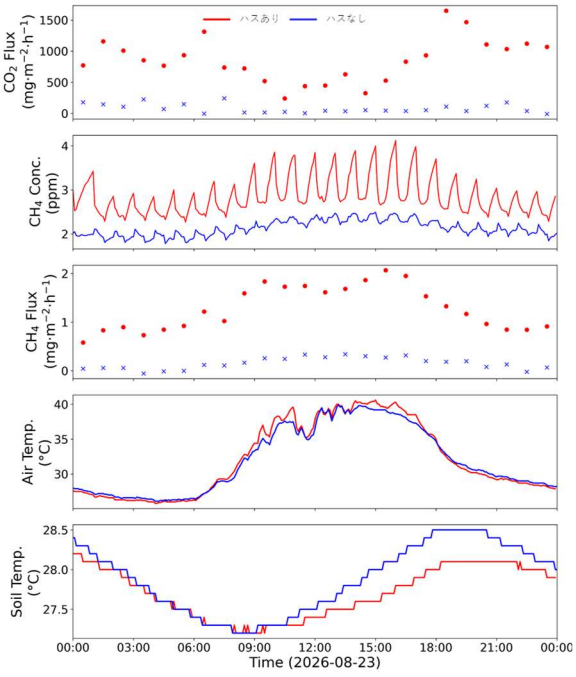


Fig. 3　2026 年 8 月 23 日（晴天）における CO_2 および CH_4 のフラックス，CH_4 の濃度，気温，地温の経時変化

異なる照度条件下のイネ生育に伴う土中の DO，Eh 分布と窒素動態の関係

DO and Eh profiles and nitrogen dynamics in flooded soil during rice growth under different light conditions

福田日毬・渡辺晋生

三重大学大学院生物資源学研究科

要旨(Abstract)

異なる照度下でのイネの生長に伴う土中の DO と Eh の深さ分布と窒素動態の関係を調べることを目的とした．人工気象器内に設置した湛水土中の DO と Eh を探針するとともに，土中の無機態窒素の深さ分布およびイネの含有窒素量を測定した．結果として，照度の違いがイネの生長を介して土壌中の酸素環境に影響を与え，土中の窒素分布にも影響を与えたことが示唆された．

キーワード：溶存酸素濃度，酸化還元電位，酸素供給、通気組織

Key words: Dissolved oxygen，Redox potential，Oxygen supply，Aerenchyma

1. はじめに

水田では，微生物や藻類の光合成，田面水からの浸透により表層に酸化層が形成され，イネの通気組織を介した酸素供給により，根圏にも酸化的領域が形成される．水田土中のアンモニア態窒素（NH_4^+-N）はイネに吸収されるほか，この酸化的環境で硝酸態窒素（NO_3^--N）に変換され，その一部は脱窒などにより系外へ損失する．そのため，イネの生長や植物の生理応答に影響する照度は，通気組織を介した土壌への酸素供給量を変化させ，土中の DO 分布や無機態窒素の分布，形態変化にも影響すると考えられる．しかし，根の伸張に伴う微細な DO・Eh 分布と土中の窒素分布，イネの窒素吸収量との関係は明らかでない．そこで本研究では，異なる照度下でのイネの生長に伴う湛水土中の DO 分布の変化が Eh 分布や窒素動態に与える影響を調べることを目的とする．

2. 試料と方法

三重大学学内農場の休耕畑の表土を採取し，2 mm 篩通過分を試料とした．試料には，14-14-14 の化成肥料を窒素換算で 23.8 g/m³ 施肥した．試料を 1/10000a のワグネルポットに，乾燥密度 1.22 Mg/m³ で 10 cm 高まで均一に充填し，24 ℃の人工気象器内に設置した（図 1）．試料の上端は，3 cm の湛水深を保った．試料を 1 週間湛水した後，イネ（コシヒカリ）を中央部に一株移植した「イネあり」と土試料のみの「イネなし」の 2 条件とした．ここで，空間分解能 5 µm の DO と Eh，pH のニードルセンサを，図 1 のように中央部から 2 cm の位置に設置した．測定期間は移植後 20 日間とした．照度は，PPFD で 950，100 µmol/m²/s の 2 条件とし，10 時間日照とした．任意の時間に，センサを湛水中から土中 40 mm 深まで 23 µm/s で鉛直に挿入し，DO と Eh，pH の深さ分布を測定した．移植後 0，10，20 日に，試料表面から 100 mm 深までの土壌を 10 mm 深間隔で採取し，NH_4^+-N と NO_3^--N 濃度を測定した．また，低照度条件下では移植後 10，20 日のイネの含有窒素量も測定した．

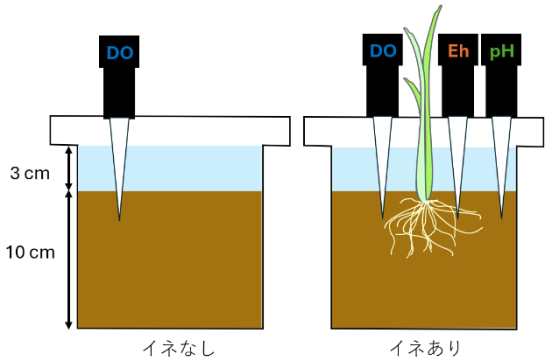


図1　装置概略図

Fig.1　Experimental apparatus

3. 結果と考察

図 2 に，移植後 20 日（DAT）の DO 分布を示す．高照度では，暗条件開始時（0:00）の DO は湛水部で 7 mg/L だったが，地表から土中 5 mm 深までで 0 mg/L まで減少し，以深では 0 mg/L となった．点灯直後（8:00）には，湛水部の DO は変化しなかったが，DO の増加域が下方へ広がり，土中 8 mm 深で急な増減がみられた．その後日射を与えると（18:00），湛水部から土中 8 mm 深までの DO が 13 mg/L まで増加した．消灯後 4 時間（22:00）では，湛水部および土中部の DO が暗条件開始時の値に近づいた．一方低照度では，湛水部および土中部で DO の日変動はほとんど見られず，表層から土中 5 mm 深までに DO は 0 mg/L まで減少した．

図 3 に，移植後 20 日の Eh 分布を示す．Eh は DO ほど日変化を示さなかった．高照度の Eh は，表層から土中 20 mm 深までは概ね 400 mV で推移したが，DO が増加した 15，30 mm 深付近において酸化側（600 mV）へ増加した．一方低照度では，全層で概ね 400 mV で推移した．

図 4 に，高照度での移植後 10，20 日の窒素分布を示す．NH_4^+-N は両日ともに，表層（0~40 mm 深）より下層（40~100 mm 深）で多く，移植日数の経過とともに全層で減少した．一方 NO_3^--N は，移植後 10 日には 0~20 mm 深のみで検出されたが，移植後 20 日では，60 mm 以深でも表層と同程度の量（0.2 mg-N/100g-soil）が各深さで検出された．

図 5 に，低照度での移植後 10，20 日の窒素分布を示す．NH_4^+-N は、高照度同様，日数の経過とともに全層で減少した．一方 NO_3^--N は，両日ともに表層（0~10 mm 深）のみで検出された．土中の無機態窒素量とイネの含有窒素量の総量は，初期施肥窒素量と比較して，移植後 10 日には約 10%，20 日には約 30%減少した．移植日数の経過とともに系内の窒素が減少しており，イネによる吸収に加え，脱窒による損失が生じたと考えられる．

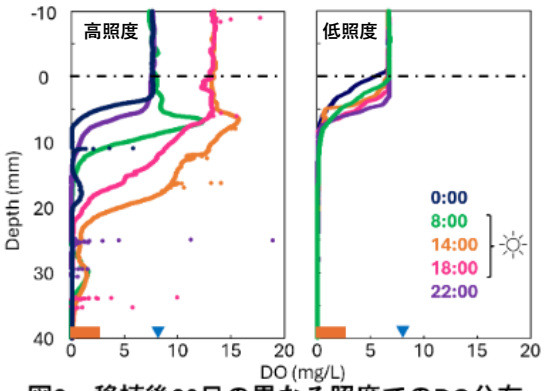


図2　移植後20日の異なる照度でのDO分布
Fig.2　DO profiles at 20 DAT

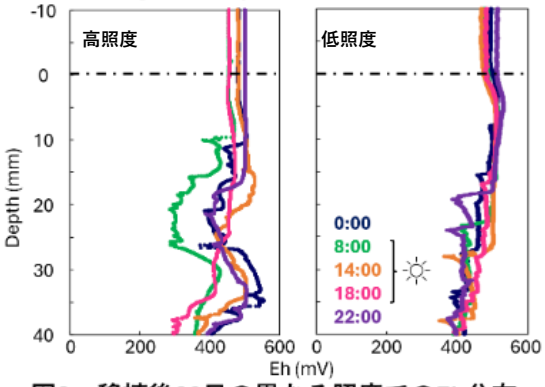


図3　移植後20日の異なる照度でのEh分布
Fig.3　Eh profiles at 20 DAT

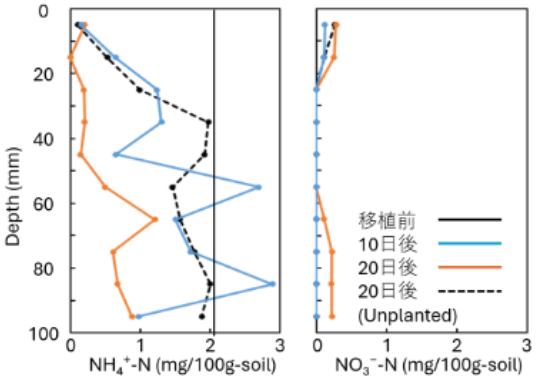


図4　移植後10，20日の高照度の窒素分布
Fig.4　Nitrogen Distribution at 10 and 20 DAT under high PPFD

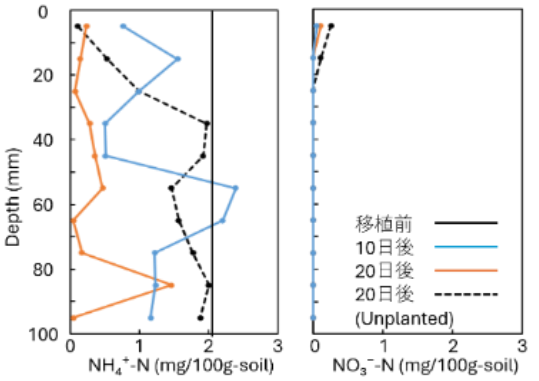


図5　移植後10，20日の低照度の窒素分布
Fig.5　Nitrogen Distribution at 10 and 20 DAT under low PPFD

水ストレス負荷時における幹・葉での水分動態に着目した水利用特性の評価

Evaluation of water use characteristics focusing on water dynamics in stems and leaves under water stress

清水皓平[1]・齊藤忠臣[2]・猪迫耕二[2]・藤巻晴行[3]

[1]鳥取大学大学院連合農学研究科・[2]鳥取大学農学部・[3]鳥取大学乾燥地研究センター

要旨(Abstract)

本研究では，常緑広葉樹であるシラカシを対象に，乾燥による水ストレス負荷および灌水に対する，幹での貯留水・葉の膨圧の関係性を評価した．結果より，水ストレス負荷時には，貯留水の減少後に葉の膨圧が，灌水後には葉の膨圧の回復後に貯留水が回復することがわかった．

キーワード：樹体水分，樹液流速，葉の膨圧，水ストレス，水利用特性

Key words: Tree water, Sap flow, Leaf turgor, Water stress, Water use characteristics

1. はじめに

高品質な果実の生産や水源涵養機能の評価を行う上で，樹木の水利用特性の把握は有用な手法である．清水ら（2022）では樹体水分，樹液流速，幹の水ポテンシャル，および葉の水分状態指標の連続測定により，乾燥による水ストレスに対する水分状態の応答が評価されている．一方で，水ストレスや灌水による応答を葉や幹での挙動の違いに着目し，貯留メカニズムを解明した事例はほとんどない．そこで本研究では，樹木の水分貯留に着目した水利用特性の解明を目的とした．

2. 実験方法

(1) 測定項目・対象樹木

対象樹木は，鳥取大学農学部 5 号館横のポットに植栽された，ブナ科コナラ属シラカシ（*Quercus myrsinifolia*, 常緑広葉樹）とした．測定項目として，樹木は，樹体水分（θ_{stem}），樹液流速（SF），および葉の膨圧とした．θ_{stem} は体積含水率を，SF は比例関係にあるヒートパルス速度を指標とした．ここで樹体水分は，温度依存補正を実施している．また葉の膨圧は，逆相関の関係にある減衰出力圧（P_p）を指標とした．土壌は，水ポテンシャル（ϕ_{soil}）を，大気は，飽差（VPD）を指標とした．センサの詳細を Table 1 に，設置位置を Fig. 1 に示す．

Table 1　Measured variables and sensors

		Sensor	Manufacturer
θ_{stem}	(m^3 m^{-3})	GS3 soil moisture, temperature, and EC sensor	METER Group, Inc.
SF	(cm/h)	SFM-1	ICT International Inc.
ψ_{stem}	(MPa)	PSY-1	ICT International Inc.
Pp	(kPa)	Yara Water Sensor	Yara ZIM Plant Technology GmbH
ψ_{soil}	(MPa)	TEROS 21 Soil Water Potential Sensor	METER Group, Inc.
VPD	(hPa)	（Tottori Local Meteorological Office, JMA）	
Precipitation	(mm)		

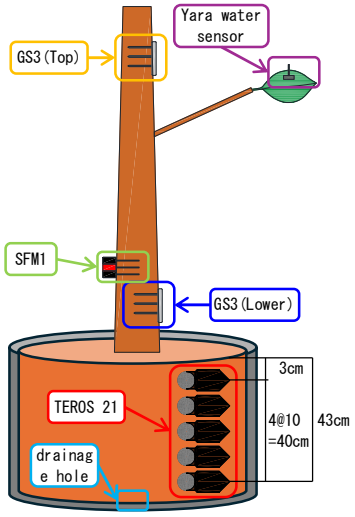


Fig.1　Locations of the sensors

(2) 灌水制限による水ストレス負荷

シラカシが植栽されたポットは，表面に防水処理が施されており，灌水でのみ土壌水分が回復する．本研究では，通常 ϕ_{soil} が-600 kPa に到達した時点で実施していた灌水を一時的に停止することで，乾燥による水ストレスを，その後は ϕ_{soil} が飽和状態になるまで灌水を実施した．観測期間は 2021/7/1～12/10 とした．

3. 結果と考察

(1) 樹体水分・P_pの基本的な指標の変動

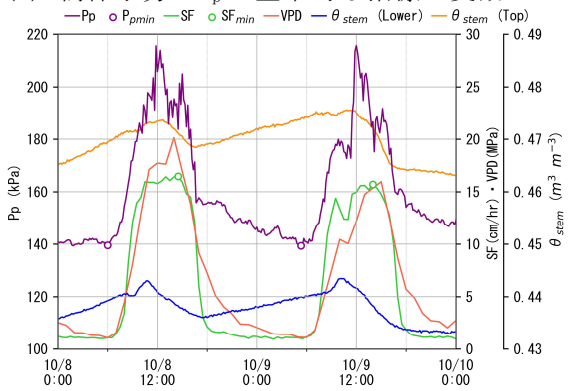


Fig.2 Variations in θ_{stem}, SF, P_p,and VPD

Fig. 2 に，灌水直後の 2021/10/8～10 の樹木・大気の各指標の変動を示す．結果より，既報と同様に，樹体水分（θ_{stem}）は，日中は蒸散による貯留水の消費により減少し，夜間は水分回復により増加した．また樹液流速（SF）は，飽差（VPD）と類似した挙動を示し，P_p は，夜間には SF とは異なり漸減した一方，早朝以降は SF と同じく上昇に転じた．以上より，夜間には θ_{stem} が増加し，かつ P_p も低下したことから，蒸散が不活発な夜間には，幹に加えて葉でも経時的に水分が回復することがわかった．

(2) 水ストレスによる幹・葉の指標の変動

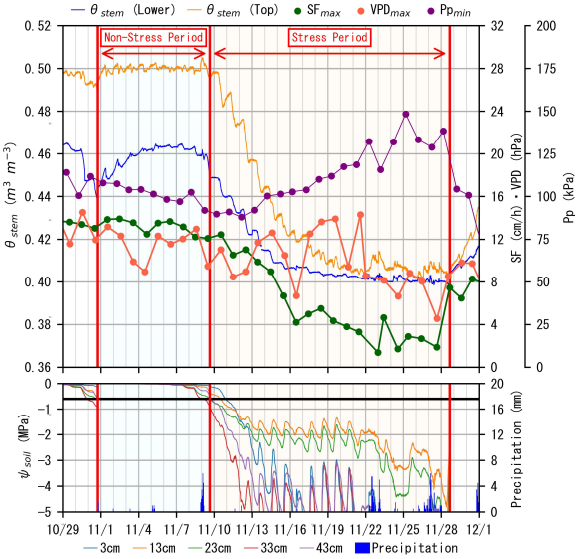


Fig.3 Variations in θ_{stem}, SF, P_p, VPD, and Precipitation during Stress and Non-Stress Period

Fig. 3 に，2021/11/1～28 の樹木・土壌・大気の各指標の変動を示す．結果より，既報で示した他期間と同様，ストレス期間では，初期より θ_{stem} が減少した一方で，日中の SF の最大値（SF_{max}）および P_p の最小値（P_{pmin}）は，θ_{stem} と時間差をもって前者は低下し，後者は上昇した．また，θ_{stem} の変動が低い値で推移した期間も，P_{pmin} は継続的に上昇した．このことから，水利用特性の一つとして，水ストレスにより幹での貯水が制限された条件では，貯留水が葉への水分供給に使われていると推察される．また，ストレス期間中の P_{pmin} の上昇は，夜間に葉での水分回復が不十分であったためと考えられる．

(3) 水ストレス後の灌水に対する指標の推移

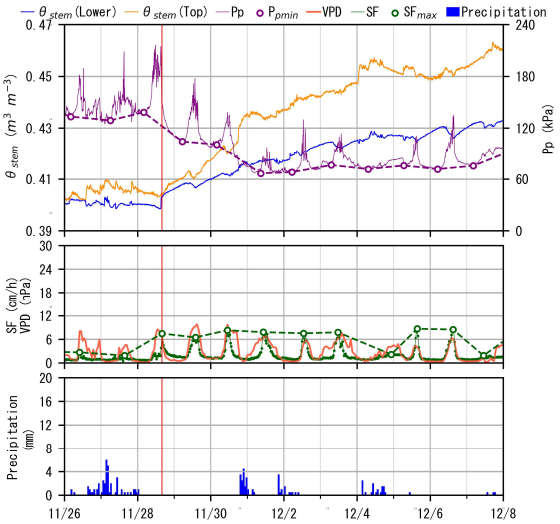


Fig.4 Variations in θ_{stem}, SF, P_p, VPD, and Precipitation after irrigation

Fig. 4 に，樹木の各指標の変動を示す．結果より，θ_{stem} は，灌水直後より明瞭な上昇が生じた．SF は，VPD と連動した挙動を示し，SF_{max} の上昇は確認されなかったものの，P_p は，灌水直後より夜間に低下した結果，P_{pmin} が漸減に転じた．指標ごとに回復度合い・期間が異なることから，複数指標の同時モニタリングが，水ストレスからの回復の評価に有用であると考えられる．また，θ_{stem} および P_{pmin} より，ストレス期間では，θ_{stem} の減少後に P_{pmin} が上昇した一方で，灌水後の水分回復の過程では，P_{pmin} の低下後に θ_{stem} が増加した．このことから，蒸散が行われる葉への水分供給が先行するという水利用特性の存在が示唆された．

参考文献
清水ら（2022）：水ストレスに伴う樹木の水分状態指標および幹直径・葉の膨圧の変動，2022 年度　農業農村工学会大会講演会

安価な GNSS 信号受信システムを用いた作物の植生情報の面的推定

Spatial estimation of crop vegetation characteristics using a low-cost GNSS signal receiving system

齊藤忠臣[1]・加藤栄嗣[1]・大丸弘明[2]・門田直哉[3]・猪迫耕二[1]

[1]鳥取大学農学部・[2]鳥取大学大学院・[3]ゲルフ大学大学院

要旨(Abstract)

ダイズ，ソバ，ヒマワリの 3 圃場で GNSS-IR と安価な GNSS 信号受信システムを用いて作物の植生情報の面的推定を行った．ダイズ・ヒマワリでは反射体高さから草高が推定され，ソバでは新鮮重量と位相の間には高い相関があった，振幅は多くの植生パラメータと反応した．

キーワード：GNSS-IR，GPS 衛星，マルチパス，リモートセンシング

Key words: GNSS-IR, GPS satellites, multipath, remote sensing

1. はじめに

近年, スマート農業の普及に伴い圃場スケールでの面的な植生モニタリングのニーズが高まっており，GNSS アンテナに到達する衛星からのマルチパス信号を用いて環境要素を推定する GNSS-IR（GNSS-Interferometric Reflectometry）が注目されている．GNSS 信号は地表面等で反射する際に反射面の影響を受け，その影響が SNR（信号対雑音比）に干渉反射波形として現れる. このデータを解析することで環境要素を推定するのが GNSS-IR である．本研究では，自作の安価な GNSS 信号受信システムを異なる作物が播種された圃場に設置し, 植生情報が干渉反射波形に与える影響を考察した.

2. 方法

2.1 実験方法 : 本研究では鳥取大学 FSC 内のダイズ，ソバ，ヒマワリの 3 圃場で実験を行った（Fig. 1）. 各圃場に GNSS 信号受信システムとして, 安価なアンテナ・受信機（ANN-MB-00-00, u-blox 社）とマイクロコンピュータ（Raspberry Pi 3 Model A+，ラズベリーパイ財団）を組み合わせたものを設置し, アンテナ高さは植物の草高に合わせて Fig. 1 の通り 1.5m，1.6m，2.0m に設定した．植生調査を週 4 日程度の頻度で実施し，ダイズ圃場では 7/24~8/28，ソバ圃場では 9/12~10/24，ヒマワリ圃場では 9/22~10/29 の期間に行った．植生調査では NDVI，新鮮重量（FW），乾物重量（DW），草高（C_h）を測定し, これらを各圃場における日毎の植生パラメータの代表値とした．なお，実験期間中ソバ圃場では作物が比較的均一に生育したものの, ダイズ圃場とヒマワリ圃場では作物の生育が不均一であり一部雑草の繁茂がみられた.

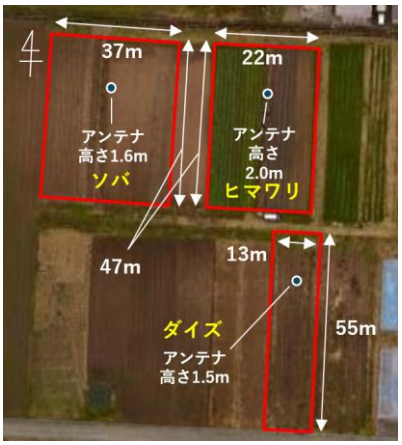


Fig. 1 Field map

2.2 解析方法 : 本研究では取得した GNSS データのうち GPS 衛星の 31 機の L1 信号および 25 機の L2 信号を用いて解析を行った．解析にはオープンソフトウェアである gnssrefl を使用した. まず取得した衛星データからマルチパスの影響が強い低仰角（5°-30°，7°-30°）の SNR や衛星仰角・方位角等のデータを抽出した．次に SNR 値を線形スケールに変換，トレンド除去し，除去後の SNR（SNR_r）と仰角の

波形関係に対し，周期性の解析手法である LSP を適用して卓越周波数（f_m）を導出した．導出した f_m と GNSS 信号の波長 λ から解析期間中の有効反射体高さ H_r を算出した上で，式（1）に代入し，線形最小二乗法を用いて SNR_r と衛星仰角 E の関係をフィッティングした．

$$SNR_r = A\cos\left(\frac{4\pi H_r}{\lambda}\sin E + \varphi\right) \quad (1)$$

式（1）において，A，φ がフィッティングパラメータであり，A が振幅，φ が位相のずれを表している．A，φ それぞれについて，解析期間中の値を用いて基準化した上で日平均化した．φ については 0°/360°境界で見かけ上の不連続（ラッピング）を生じ得る可能性があるため，本研究では独自の補正（アンラッピング）を行い，補正の有無による結果を比較した．加えて，解析期間中の H_r を固定せずにフィッティングパラメータとして式（1）に当てはめた際に得られる値を反射体高さ H とし，日平均化した．以上の解析から得られた A，φ，H の日平均データを植生パラメータと比較した．また，解析に利用する衛星のデータを，南方位（90°-270°）および各圃場サイズ（150°-200°前後）とした条件でも解析を行った．

3. 結果

解析結果の一例として，各圃場での L2 信号における H と C_h の結果について述べる．全ての圃場において H と C_h の間に強い相関がみられたものの，ソバ圃場を対象とした場合のみ正の相関を示した．H はアンテナから反射点までの高さを表し，理論上は植物の草高とは負の相関を示す．したがって，ソバの結果は擬似相関と考えられる．ダイズ・ヒマワリでは植物体表面での反射が卓越することにより草高が推定できた一方，葉や茎が細く地表面を完全に被覆しないソバでは H による草高の推定ができなかったと考えられる．続いて，各圃場における φ と FW の関係を Table 1 に示す．表において，

Table 1 R between φ and FW by field (L2)

方位角	unwrapping	ソバ FW	ダイズ FW	ヒマワリ FW
0-360	無	-0.61	-0.37	-0.52
	有	0.76	0.50	0.15
90-270	無	-0.52	-0.18	-0.54
	有	0.75	0.69	0.19
150-220	無	-0.60	-0.73	-0.01
	有	0.74	-0.73	0.25

Table 2 R between A and vegetation parameters by field (L2)

方位角	圃場	$NDVI$	FW	DW	C_h
0-360	ソバ	-0.02	-0.25	-0.16	0.44
	ダイズ	-0.92	-0.72	-0.78	-0.94
	ヒマワリ	-0.38	-0.55	-0.57	-0.68

Table 3 Comparison of R between A and vegetation parameters by buckwheat field

	方位角	$NDVI$	FW	DW	C_h	データ数
L1	0-360	0.48	-0.48	-0.35	-0.08	2163
	90-270	0.46	-0.51	-0.35	-0.16	1553
	150-220	0.60	-0.61	-0.57	-0.39	910
L2	0-360	-0.020	-0.25	-0.16	0.44	1766
	90-270	0.12	-0.25	-0.25	0.22	1203
	150-220	0.09	-0.20	-0.21	0.22	725

赤は正の相関，青は負の相関を示し，色の濃淡は相関の強弱を表している．位相アンラッピングを実施した φ はソバの FW と最も強い相関を示したが，生育が不良であったダイズはソバより相関が低下し，同様に生育不良であったヒマワリでは無相関となった．φ は土壌水分と相関を示すパラメータとされるが，本研究では植物の水分量にも反応したことが示唆される一方，植生の生育が不均一である場合には φ と FW との相関が低下する可能性が示された． Table 2 に示す通り，L2 信号におけるダイズ・ヒマワリ圃場の振幅 A と植生パラメータとの間に広く相関がみられた．また，ソバにおいて L2 信号の A は無相関であったが，L1 信号では中程度の相関がみられた（Table 3）．このことから，周波数の高い L1 信号は L2 信号よりも植生の影響に対して敏感であり，特に A においては L2 信号だけでは捉えきれない植生情報を推定できる可能性がある．解析に用いる方位角の絞り込みは相関の上昇に寄与する一方で，通過する衛星の減少に伴うデータ数の減少を引き起こした．特に，圃場サイズの条件ではデータ数が半分以下にまで減少するケースが多く，精度の安定性が低下する可能性が示唆された．

TDR 波形を用いたソープティビティ推定手法の検討

Evaluation of a Method for Estimating Sorptivity Using TDR Waveforms

秋山大綺[1]・吉岡尚寛[2]・登尾浩助[3]・青木伸輔[1]

[1]香川大学農学部・[2]香川大学大学院農学研究科・[3]明治大学研究・知財戦略機構

要旨(Abstract)：

水平浸潤実験では，浸潤前線位置の時間変化からソープティビティ (S_p)を推定できる。本研究では，TDR 波形より導出した見かけの距離 L_a から S_p を簡易的に推定する方法を検討した。L_a を用いて S_p を算出した結果，画像解析による値を上回った。一方，実際の浸潤前線距離と L_a に正の相関が見られたため，適切な補正を行うことで S_p を推定できる可能性が示唆された。

キーワード： ソープティビティ，水平浸潤，TDR，豊浦砂

Key-words: sorptivity, horizontal infiltration, TDR, Toyoura sand

1.はじめに

土壌中の水分移動特性を把握することは，作物への適切な水分供給や灌水管理を行う上で重要である。ソープティビティ (S_p)は，土壌が毛管力により水を吸い込む能力を表す重要な指標であり，水平浸潤実験から求めることができる。

TDR（time domain reflectometry）法は，土壌の誘電特性を利用した水分測定手法であり，水平浸潤実験への応用も検討されている。吉岡ら(2023)は，TDR 波形から得られる見かけの距離 L_a と実際の浸潤前線距離 L との間に高い相関があることを報告した。このことから，L_a の時間変化を利用することで S_p を推定できる可能性がある。そこで本研究では，L_a の時間変化から S_p を算出し，画像解析による値と比較することで，本手法の適用可能性を検討した。

2.方法

実験は室温を 25℃に設定した実験室内で行った。実験カラムには長さ 20.7 cm，内径 2.4 cm のアクリルパイプを用いた。TDR センサーのプローブ部分となる長さ 15 cm の銅箔テープをアクリルパイプの内壁に 2 箇所貼り付けた(Fig. 1)。TDR 装置 (TDR100, Campbell Scientific Inc., UT, USA)に接続する 50 Ω 同軸ケーブルを，はんだを用いて銅箔テープと接合し，2 線式 TDR プローブとした。なお，銅箔テープの給水端側は，めくれ防止のためカラムに開けた穴を通して外側に固定した。

実験には風乾した豊浦砂を使用し，乾燥密度が 1.6±0.01 g cm^{-3} となるようにカラムに充填し，水平に設置した。浸潤溶液には水道水を使用し，マリオット管を用いて給水した。水源と試料の間に接続したシリンジで空気を抜き，浸潤を開始した。

浸潤過程を動画で撮影し，画像解析ソフトウェア (ImageJ, National Institutes of Health, MD,

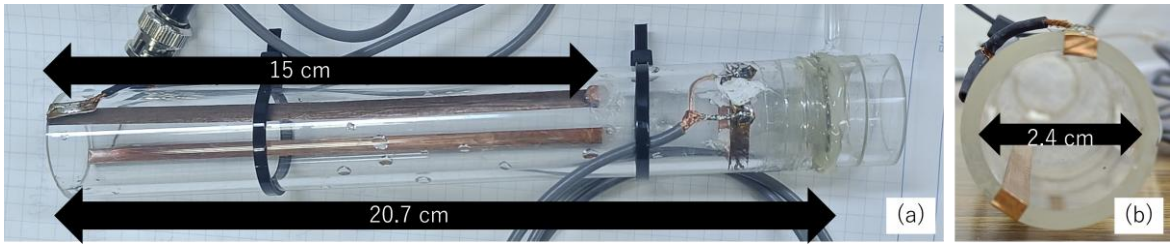


Fig. 1 実験用カラム（a: 横面，b: 正面）

USA)を用いて L を決定した。また TDR 波形を TDR 装置で測定し，データロガー (CR1000, Campbell Scientific Inc., UT, USA)を用いて 2 秒間隔で記録した。

(1)式から積算浸潤量 I を求めた。

$$I(t) = L(t) \cdot n \qquad (1)$$

ここで n は間隙率であり, 乾燥密度と土粒子密度 (2.65 g cm^{-3})から 0.396 とした。さらに, I と経過時間の平方根との関係から S_p を求めた。

$$I = S_p t^{0.5} \qquad (2)$$

一方，TDR 波形におけるプローブ始点および終点から L_a を算出し，(1)式を用いて見かけの積算浸潤量 I_a とした。その後，(2)式を用いて見かけのソープティビティ S_{pa} を算出し，S_p と比較した。

3.結果

Fig. 2 に I および I_a と，経過時間の平方根との関係を示す。いずれも経過時間の平方根に対してほぼ直線的に増加した。この時，S_p は 4.85 cm min$^{-0.5}$，S_{pa} は 10.9 cm min$^{-0.5}$ となり，S_{pa} は S_p の約 2.2 倍であった。

Fig. 3 に，画像解析による L と TDR 波形から求めた L_a との関係を示す。両者には正の相関がみられ，回帰直線の傾きは 2.00，切片は 3.85，決定係数 R^2 は 0.996 であった。

4.考察

波形から求めた S_{pa} は, S_p を大きく上回った。TDR 法では含水率の増加に伴い見かけの比誘電率が大きくなり, 電磁波の伝播速度が低下するため, L_a の変化量が実際の浸潤前線の移動距離を上回った可能性がある。

また，L_a と $t^{0.5}$ との関係は L と $t^{0.5}$ との関係とは異なり，$t^{0.5} = 0$ のとき $L_a = 0$ とはならない。これは，L_a が給水端からの距離ではなく，乾燥状態のプローブの見かけの長さを含む値であるためと考えられる。(2)式のように原点を通る直線を当てはめると，この分も S_{pa} に含

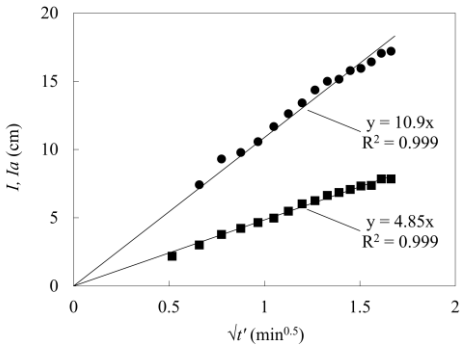


Fig. 2 経過時間の平方根 $t^{0.5}$ と積算浸潤量 I, 見かけの積算浸潤量 I_a の関係。実線は近似直線を示す。

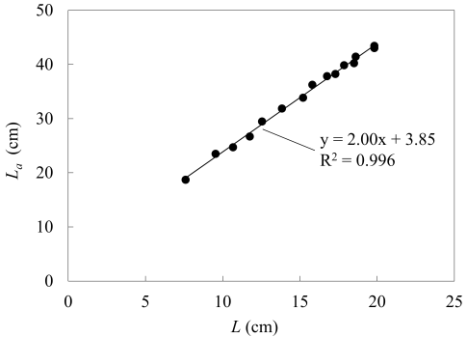


Fig. 3 浸潤前線距離 L と見かけの距離 L_a

まれ，過大評価した可能性がある。

一方，L と L_a の間には高い線形関係が認められた。この関係を利用して L_a を校正することで，S_{pa} の推定精度を改善できる可能性がある。今後，同条件での反復実験により回帰式の再現性を確認するとともに, 校正後の推定値を画像解析による値と比較し, 本手法の有効性を検証する必要がある。

参考文献

吉岡尚寛・佐藤直人・土井俊弘・登尾浩助 (2023): TDR を用いた水平浸潤実験手法の開発. 土壌物理学会大会講演要旨集, SP65: 72-73.

耕盤層を有する転換畑においてダイズの吸水深はどこか？

Where Do Soybean Plants Take Up Water in Rotational Paddy Fields?

久保田滋裕[1]・橋本英里香[1]・片嶋理奈子[1]・岩井雅裕[1]・鈴木崇之[2]・吉田修一郎[3]・島武男[2]・原貴洋[2]・岩田幸良[1]

[1]九州大学・[2]農研機構・[3]東京大学

要旨(Abstract)：

耕盤層を有する転換畑では、畑作物栽培時に浅い根系が形成され、表土の乾燥に対して植物が脆弱に応答する可能性が指摘されてきた。本研究では、土壌－植物間の水ポテンシャル勾配、土壌植物間の通水抵抗の分布、蒸発散と土壌水分量の変動パターンをもとに、土壌の乾燥に対する根の吸水パターンを解析した。作土乾燥時も、夜明け前の葉の水ポテンシャルは–0.01 MPa 程度を維持し、植物は耕盤層から吸水することで活発な蒸散を維持している可能性が示唆された。

キーワード：葉の水ポテンシャル、蒸発散、根系、ダイズ

Key words: Leaf water potential, Evapotranspiration, Root system, Soybean

1. はじめに

水稲と畑作物を輪作する転換畑では、水稲栽培時に湛水を維持するために形成される耕盤層が畑作物時にも残存する。その結果、先行研究では、畑作物栽培時に浅い根系が形成されることが報告されている（Shinoto et al., 2020; Zhou et al., 2014）。根の吸水速度は、土壌と根の水ポテンシャル勾配と輸送経路の通水抵抗で決まる。そのため、多くの研究で、吸水深度は根の深さを超えないことが示されている（Bachofen et al., 2024）。このことは、転換畑で栽培される畑作物は浅い土壌層からしか吸水できず、乾燥ストレスに対して脆弱である可能性を示唆している。

本研究では、転換畑におけるダイズの根の水分吸収パターンを評価することを目的とした。そのために、作土層と耕盤層の水分状態、根長プロファイル、葉の水ポテンシャル、および群落の蒸発散速度を測定し、水ポテンシャル勾配、通水抵抗、水フラックスの乾燥応答について解析した。

2.方法

福岡県久留米市および筑後市の農家の管理するダイズ（*Glycine max* L. cv. Fukuyokamaru）転換畑を対象に、2025 年および 2026 年に調査を実施した。2 高度の温湿度、日射量、純放射量、風速、降水量、土壌の体積含水率（深さ 5, 10, 20, 30, 40 cm）、マトリックポテンシャル（深さ 10 cm）、地温（5, 10, 15, 20 cm）、地中熱フラックス（耕盤表面）、群落および地表面温度を連続観測した。また、夜明け前の葉の水ポテンシャル ψ_{pd}、日中の茎および葉の水ポテンシャル（それぞれ ψ_{st} と ψ_{le}）、草丈、LAI を 2 週間に 1 回程度の頻度で計測した。開花期および収穫期には 100 cc コアサンプラーを用いて 5 cm 間隔で土壌をサンプリングし、根長プロファイルを調査した。得られた結果を用いて、実蒸発散量 E_a を熱収支・ボーエン比法をもちいて，基準蒸発散量 E_0 を FAO Penman-Monteith 式をもちいて計算した。Katul et al. (2003) に従い、根長密度および土壌の不飽和透水係数から土壌の通水抵抗を計算した。また、根および葉の通水抵抗（それぞれ R_{ro} と R_{le}）は、以下の水フラックス式を解くことで計算した。

$$E_a = \frac{\psi_{pd} - \psi_{st}}{R_{ro}} = \frac{\psi_{st} - \psi_{le}}{R_{le}}$$

3. 結果および考察

本要旨では、2025 年の筑後市圃場で観測したデータについて報告する。調査期間中の総降水量は 378 mm で、8/11～24 まで 2 週間程度無降雨だった。その結果、表層のマトリックポテンシャルは–1.0 MPa 付近まで低下した（Fig. 1）。しかし、作土乾燥時（例 8/16~25）も実蒸発散速度は基準蒸発散速度と同様の推移を示し、十分な吸水を維持していたことが示唆された（Fig. 2）。

夜明け前の葉の水ポテンシャルは吸水に寄与する土壌領域の水ポテンシャルと平衡することが知られている（Bachofen et al., 2024）。作土乾燥時に計測した夜明け前の水ポテンシャルは、–0.01 MPa 程度であり、30~40 cm 深土壌のマトリックポテンシャルと平衡していた。対照的に、断続的な降雨の観測された 9 月には、作土層（0~15 cm）のマトリックポテンシャルと夜明け前の水ポテンシャルが平衡していた。実際、開花期（8/20）には、深さ 25~30 cm まで根が分布しており（Fig. 3）、耕盤以深での吸水が可能であったと考えられる。また、作土乾燥時の作土層の通水抵抗は、植物体の通水抵抗の 2.6 倍であり（Fig. 4）、このことも耕盤以深からの吸水を示唆している。

謝辞

本研究は生研支援センター・「スマート農業技術の開発・供給に関する事業（大豆干ばつ予測システムの開発（SA2-621F3）」の支援を受けた。

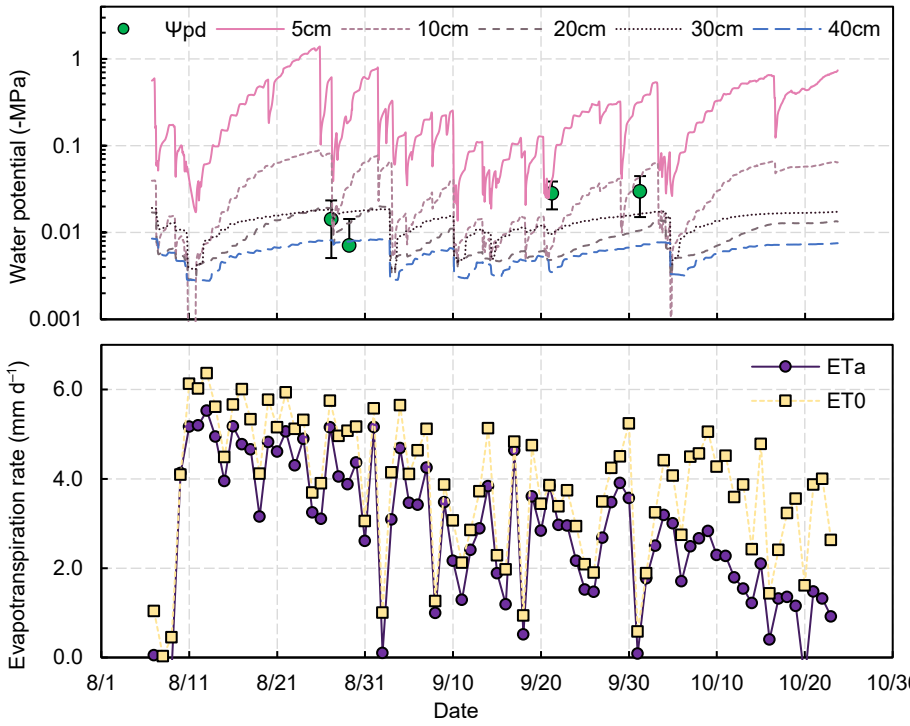


Fig. 1 Time-courses of soil matric potential and predawn leaf water potential. The matric potential of each soil depth was calculated from observed volumetric soil water content using van-Genuchiten Mualem model.

Fig. 2 Time-courses of daily actual evapotranspiration rate ET_a and reference evapotranspiration rate ET_0.

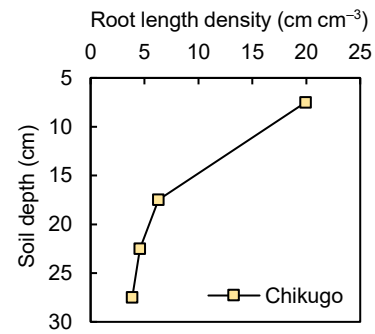


Fig. 3 The profile of root length density in Chikugo field at flowering (R1) stage.

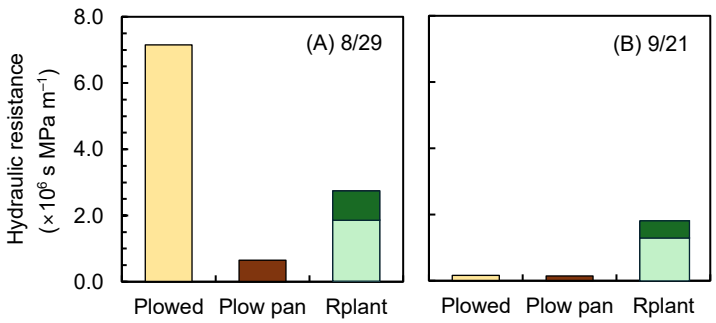


Fig. 4 The comparison of hydraulic resistance of soil and plant on 8/29 (dry topsoil; A) and 9/21 (moist topsoil; B). Light and dark green represent the hydraulic resistance of root-stem and stem-leaf, respectively (n=5~7).

積雪地域における緑肥圃場の土中 CO_2 濃度の連続観測

Continuous Monitoring of Soil CO_2 Concentration in Green Manure Fields in a Snow-Covered Region

加藤千尋[1]・佐藤直人[2]・小島悠揮[3]

[1]弘前大学農学生命科学部・[2]北海学園大学工学部・[3]岐阜大学工学部

要旨(Abstract)

積雪地域を対象に，緑肥管理が行われている圃場において土中 CO_2 濃度の連続観測を行った．緑肥区では，緑肥のすき込み後に土中 CO_2 濃度および地表面から放出される CO_2 フラックスの増加が確認された．また，土中 CO_2 濃度は非積雪期において地温と高い正の相関を示し，緑肥区のすき込み後の回帰直線の傾きは雑草区と比較して大きかった．また，冬季の積雪期には緑肥すき込みの有無に関わらず土中 CO_2 濃度の上昇傾向が認められ，消雪後に一時低下した後，地温の上昇に伴って再び増加した．

キーワード： 積雪地域　土中 CO_2 濃度　緑肥

Key words: Snow-Covered Region, Soil CO_2 concentration, Green Manure

1. はじめに

緑肥作物の作付け・すき込みは，休耕地の地力維持や有機物供給を通じた土壌機能の向上また，農地土壌への炭素貯留に寄与すると考えられる．一方，積雪地域における土中 CO_2 濃度連続観測の事例は限られており，特に積雪期を含めた土壌 CO_2 動態には未解明な点が多い．そこで本研究では，緑肥管理が行われる農地を対象に，積雪期を含む土中 CO_2 濃度の季節変動の連続観測を実施した．

2. 方法

本研究は，積雪地域である青森県黒石市沖浦に位置する集落内（標高約 400m）の 3 つの圃場において，2024 年 6 月から 2026 年 5 月にかけて土壌観測を行った．「雑草区」では 2024 年および 2025 年の 5 月中旬にプラウによる雑草すきこみを行い，その後は無作付けとして越冬させた．「緑肥区 A」は，2024 年 5 月下旬にプラウによるすき込み後，緑肥（エンバク）を作付けし，そのまますき込まずに越冬させた．「緑肥区 B」は，2025 年 5 月下旬にエンバクを播種，出穂後の 7 月中旬にプラウすき込みを行い，作付けせずに越冬させた．なお，緑肥区，雑草区 A，雑草区 B ともに圃場土壌の土性は埴壌土（Clay Loam）であった．

2024 年度（2024 年 7 月から翌 5 月初旬）は雑草区と緑肥区 A，2025 年度（2025 年 6 月から翌 5 月初旬）は雑草区と緑肥区 B において地表面深さ 30cm に 5TE センサ (METER 社) および，加藤ら (2013) と同様にシリコンチューブに封入した GMP251 CO_2 プローブ（Vaisala 社）を埋設し，土中の体積含水率，地温，土中 CO_2 濃度を連続観測した． ただし，緑肥区 B は，緑肥すき込み後の 2026 年 8 月 5 日に土中 CO_2 濃度測定を開始した．また，非積雪期にクローズドチャンバー法によって地表面から放出される CO_2 フラックスを測定した．本研究ではティンフリースチール製のペール缶で作成したチャンバーに，Trace Gas Analyzer LI7810 (LO-COR Bioscience 社) を接続してチャンバー内 CO_2 濃度の変化を測定した．

3. 結果と考察

(1) 土壌水分および地温

図 1，2 にそれぞれ 2024 年度，2025 年の深さ 30 cm における日毎の土壌水分飽和度，地温および土中 CO_2 濃度の推移を示す．飽和度は融

雪期に記録した観測期間の最大値を水分飽和状態と仮定して計算した.

地温について，2024 年度は緑肥区 A と雑草区は観測期間を通して差が 1℃未満であった. 一方，2025 年度は 8 月から 9 月にかけて緑肥区 B の地温は雑草区と比較して 2℃程度高かった. これは雑草区や緑肥区 A は夏期も草本類が繁茂していたのに対し 2025 年度の緑肥区 B は 7 月中旬に雑草すき込みを行った後，8 月中は地表面が裸地に近かったためと考えられる. 対象地は例年 11 月中下旬から降雪があり，12 月以降 4 月中旬まで根雪となる. 本対象地では表土も含めて土壌凍結は観測されず, 根雪の期間は地温は約 4℃~0.3℃程度で推移したのち消雪後に地温が上昇する. 圃場内あるいは圃場間において消雪時期にバラつきがあり, 春季の地温上昇のタイミングが試験区によって 4～6 日異なっていたと考えられる(図 1，図 2).

(2)土中 CO_2 濃度

両年の雑草区・緑肥区ともに，非積雪期の土中 CO_2 濃度は地温変動とほぼ同じ推移を示し(加藤ら，2013 ほか)，8 月中に最大値を記録したのち 12 月初旬まで低下し続けた(図 1，2). 2025 年度の雑草区および緑肥区 B について, 8 月から 11 月までの土中 CO_2 濃度と地温の関係は相関係数が 0.89 および 0.88 と高い相関を示した. また，緑肥区 B では回帰直線の傾きが同年の雑草区や 2024 年度と比較して大きく（図非掲載），地温に対する土中 CO_2 濃度の応答性が高い傾向にあった. また，緑肥すき込み前の 7 月 10 日（平均気温 22.8℃）と比較してすき込み後の 8 月 24 日（同 25.7℃），9 月 12 日（同 21.6℃）は緑肥区における地表面 CO_2 フラックスが増加しており (図 3)，7 月下旬の緑肥すき込みによる有機物供給が微生物による CO_2 生成を促進した可能性がある.

他方, 特に 2024 年 12 月から翌 4 月の積雪期間の土中 CO_2 濃度は微増傾向を示した. 消雪直前から CO_2 濃度は低下し，消雪後地温上昇

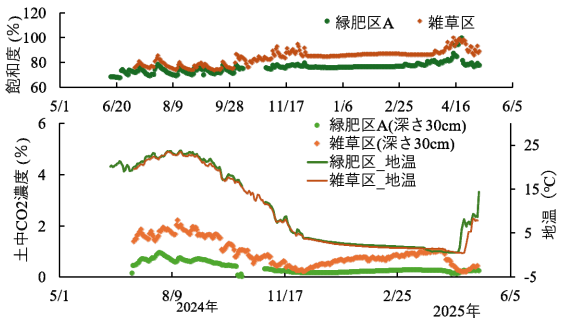


図 1　緑肥区 A および雑草区の深さ 30cm における水分飽和度，地温および土中 CO_2 濃度 (2024 年度)

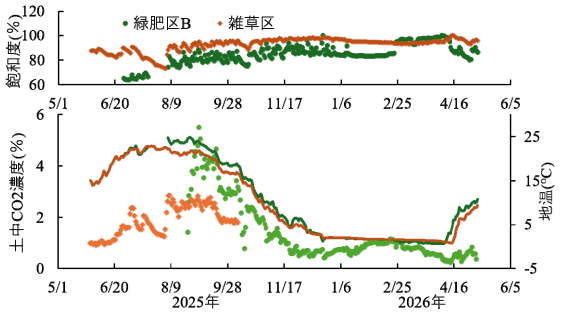


図 2　緑肥区 B および雑草区の深さ 30cm における水分飽和度，地温および土中 CO_2 濃度 (2025 年度)

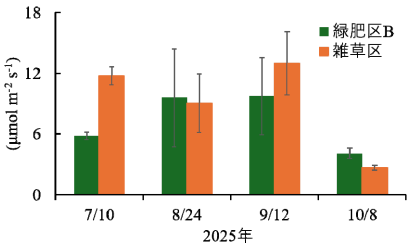


図 3　地表面から放出される CO_2 フラックスの比較 (2025 年度). エラーバーは標準誤差 (n=3).

とともに土中 CO_2 濃度も再び増加傾向を示した. Ohkubo et al. (2011) は札幌の農耕地において凍土と積雪がある条件下で土中 CO_2 濃度の上昇を観測した. 本研究対象地では土壌凍結は確認されなかったが, 厚い積雪層によって地上への拡散が抑制されていた可能性がある.

参考文献

加藤ら (2013), 土壌の物理性，124，25-33

Ookubo et al. (2011), J. Agric. Meteorol., 67(3), 151-162.

謝辞 : 本研究は科研費 (基盤(C)24K09121) の支援を受けて実施した. 黒石市および現地試験圃場の土地所有者・関係者の皆様には，圃場の利用や栽培管理にご協力いただいた. また，弘前大学農地工学研究室の卒業生に圃場観測にご協力いただいた. ここに記し謝意を表します.

2026 年熊本地震に着目した沿岸干拓地の土壌水分・塩分環境の連続観測と作物吸水リスクの検討

Monitoring of Soil Water and Salinity Conditions in a Reclaimed Land Toward Assessing Crop Water-Uptake Risks Following the 2026 Kumamoto Earthquake

中山伶音[1]・Fadhil Noor[2]・徳本家康[3]

[1]佐賀大学大学院農学研究科・[2]鹿児島大学大学院連合農学研究・[3]佐賀大学農学部

要旨(Abstract)：

本研究では，熊本県横島干拓地の施設栽培圃場に設置した IoT 観測システムを用い，土壌水分・塩分動態と根域水分環境を評価した。2026 年の地震前観測では，深さ 40 cm におけるマトリックと浸透ポテンシャルの和は約−1500 cm と推定され，地震後観測による吸水制限の影響評価の重要性を示唆した。

キーワード： 沿岸干拓地，IoT モニタリング，地震

Key words: Coastal reclaimed land, IoT monitoring, Earthquake

1. はじめに

熊本県沿岸の干拓地では，浅い塩水地下水と灌漑・排水管理によって根域の水分・塩分環境が変化する。塩分を含む土壌水では，土壌が湿潤であっても浸透ポテンシャルの低下により作物の吸水が制限され得る。

2016 年熊本地震では干拓地の施設栽培圃場において液状化や塩類障害が報告されている（Tokumoto et al., 2023)。2026 年 7 月 28 日には熊本県熊本地方で M7.1，最大震度 7 の地震が発生した。対象圃場の地下水環境が変化した可能性も検討する必要がある。本研究では既報の IoT 観測システム(Nakayama and Tokumoto, 2026）を用いて，まず地震前の水分・塩分動態と作物の吸水条件を評価することを目的とした。

2. 方法

対象圃場は，熊本県横島干拓地内にある園芸施設である。2025 年 10 月下旬からミニトマトが栽培され，畝をマルチ被覆して灌漑・施肥管理が行われた。水分･塩分計測のため，M5Stamp Pico を用いた IoT 土壌水分・塩分モニタリングシステムを導入し，干拓地における土壌水分・塩分環境を連続観測した (Fig.1)。各深さにおいて，比誘電率(ε)とバルク電気伝導度(EC_b)を 30 分間隔で測定した。体積含水率 θ は現地土壌の校正式から，土壌水の電気伝導度(EC_w)は Hilhorst 式から推定した。

$$EC_w = \frac{\varepsilon_w EC_b}{\varepsilon_b - \varepsilon_0} \quad (1)$$

ここで，ε_w は水の比誘電率（25℃のとき 78.5），ε_b は計測した比誘電率，ε_0 は $EC_b = 0$ のときに推定される ε_b である（本研究では $\varepsilon_0 = 3.46$）。

換算した θ と土壌水分特性曲線を用いて，マトリックポテンシャル(ψ_m)を推定し，換算した EC_w を用いて浸透ポテンシャル(ψ_o)を算出した。これらの和を全土壌水分ポテンシャル($\psi_t =$

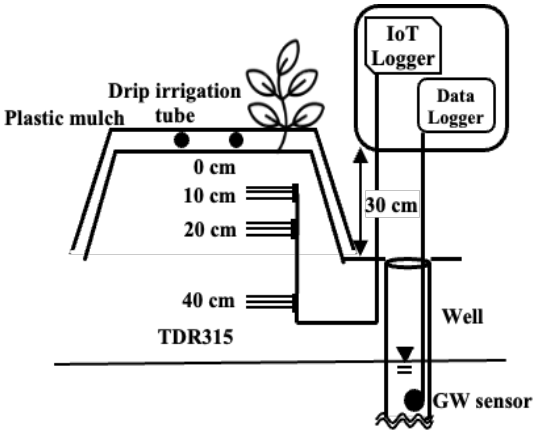


Fig. 1 計測システムの概略図

$\psi_m + \psi_o$)とし，土壌水分･塩分環境を検討した。

3. 結果・考察

2026 年 5 月 18 日～6 月 2 日の体積含水率（θ），地下水位および EC_b の経時変化を Fig. 2 に示す。深さ 10，20 cm の θ は急増後に緩やかに低下する変動を繰り返し，灌漑による湿潤化とその後の水分減少を反映したと考えられた（Fig. 2a）。一方，40 cm の θ は約 0.43 $cm^3\ cm^{-3}$ で安定し，地下水位は約 90 cm 付近で推移した。EC_b は 10，20 cm で約 0.2～0.3 dS m^{-1} と θ の増加時に上昇したのに対し，40 cm では約 0.4～0.5 dS m^{-1} と高く，変動は小さかった（Fig. 2b）。

Fig. 3 に，θ から推定した ψ_m（a），EC_w（b）および ψ_t（c）を示す。10 cm の ψ_m は主として −1000～−2000 cm 付近で変動した。20 cm では湿潤化に伴って 0 cm 付近まで上昇した後，大きく低下した。一方，40 cm では約−900 cm で比較的安定した（Fig. 3a）。EC_w は 10 cm で変動が大きく，20，40 cm では比較的安定して推移した（Fig. 3b）。

10 cm の ψ_t は一時的に約−3000 cm まで低下した。一方，40 cm では ψ_m が約−900 cm であったのに対し，ψ_t は約−1500 cm となり，浸透ポテンシャルによって約 600 cm 低下した（Fig. 3c）。すなわち，浅層では水分状態の短期変動が大きく，深層では θ が安定していても浸透ポテンシャルによる水分ポテンシャルの低下が認められた。

今後は地震後の観測値を取得し，地震前の変動範囲と比較することで，水分・塩分動態および根域の吸水条件への影響を検討する。

[謝辞]

本研究は，JSPS（課題番号: 26K09017）の助成を受けたものである。また圃場のメンテナンスにご協力いただいた上村農園の皆様にも深く感謝いたします。

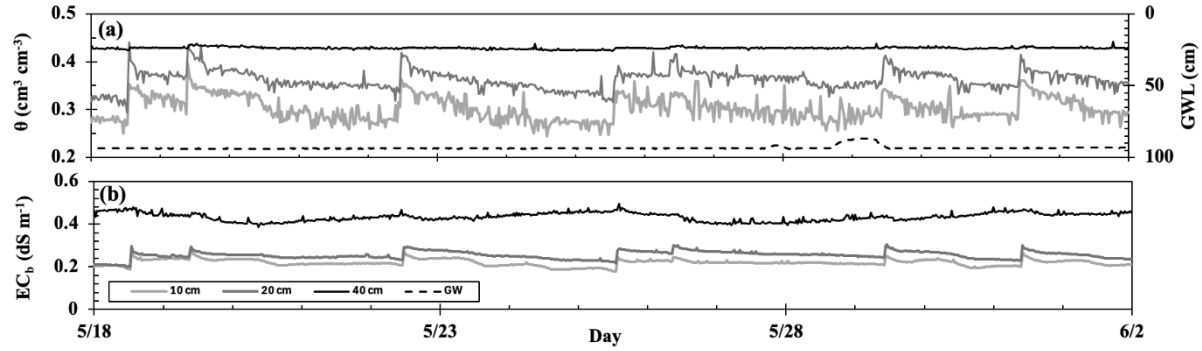


Fig. 2 2026 年 5 月 18 日から 6 月 2 日までの体積含水率と地下水位(a)，EC_b(b)の経時変化

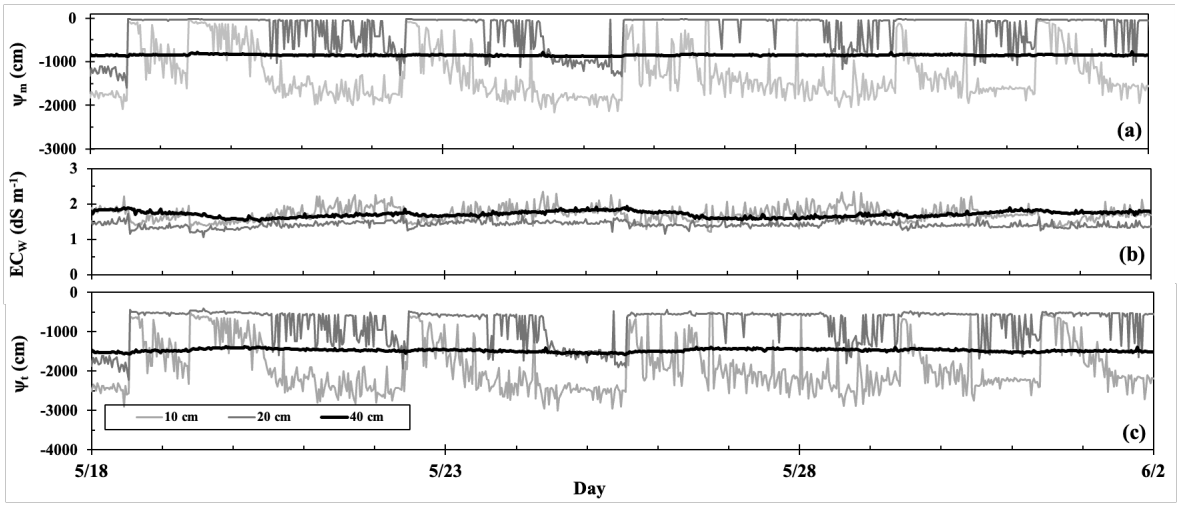


Fig. 3 2026 年 5 月 18 日から 6 月 2 日までのマトリックポテンシャル，EC_w および全土壌水分ポテンシャルの経時変化

高地下水位条件のアスパラガス圃場における畝内土壌水分動態

Soil water dynamics in raised beds for asparagus in a field with a high groundwater table

柳井洋介[1]・岩田幸良[2]・宮本輝仁[3]

[1]農研機構野花研・[2]農研機構農工研（現：九大院農）・[3]農研機構農工研

要旨(Abstract)：

2019 年に枠板式高畝栽培を開始した秋田県の地下水位が高い圃場における畝内土壌水分動態を観測した．土壌水分の変動は主として 5～25 cm 深で大きく，25 cm 以深では比較的小さかった．一方，複数の時期に 45～55 cm 深の土壌水分の増加が認められ，地下水位の上昇による下層からの水分供給や灌漑水が高畝の下端まで浸透することで，根域は概ね湿潤に維持されていた．

キーワード：枠板式高畝栽培，水田転換畑，点滴灌水，地下水位

Key words: raised-bed culture, converted paddy field, drip irrigation, groundwater table

1. はじめに

アスパラガスの枠板式高畝栽培は香川県で広く普及している技術で，作土が浅い圃場や地下水位が高い圃場での安定生産に有効とされている．枠板式高畝栽培では雨よけハウスの中央に 2 m ほどの通路の両側に部分客土を行い，高さ 60 cm ほどの畝を得ることで作土層を確保する（長野県，2025）．そのため，灌水により植物体が必要とする水分を供給することが，多収を得るために重要となる．自動灌水装置を導入した養液土耕により定植翌年から 3 t/10a を超える収量が得られることもあるが，タイマーを用いた低コストな自動灌漑を行うのが一般的であり，高畝内の土壌水分が不足して多収にならない場合があることが考えられる（農研機構，2026）．

新規にアスパラガス栽培を導入する際には水田転換畑が利用されることが多いことから，地下水位が高い条件で枠板式高畝栽培を導入する事例が増えることが想定される．そこで本研究では，秋田県の水田転換畑に枠板式高畝栽培を導入した圃場において，タイマーによる灌水管理下で高畝内の土壌水分動態を調査した結果を報告する．

2. 方法

秋田県の仙北地域に位置する間口 6.3 m，奥行き 50 m，棟高 3.6 m の雨よけハウス内に設置された上底幅 50 cm，下底幅 100 cm，高さ 60 cm の片流れ畝（農研機構，2026）で試験を実施した．2019 年に畝立てと定植をし，2020 年から収穫が開始された．2022 年 6 月 27 日に畝の上底から 10，20，30，40，50 cm 深に Teros 12（Meter 社）を設置し，ZL-6 Basic（Meter 社）を用いて体積含水率の 1 時間値を取得した．Teros 12 の出力値を現場から採取した土壌試料を用いて校正し（池添ら，2026），1 時間値を平均して日値とした．各設置深度のセンサーが 5～15, 15～25, 25～35, 35～45，45～55 cm 深を代表すると仮定して各層の土壌水分貯留量（mm）を計算した．灌水の影響を強く受ける 5～25 cm 深，地下水位変動の影響を強く受ける 45～55 cm 深，その間の 25～45 cm 深の 3 層に分け，各層の土壌水分貯留量の日変化量（mm d^{-1}）を算出した．欠測がなく連続したデータが得られた 2022 年 6 月 28 日～12 月 31 日，2024 年 1 月 1 日～12 月 31 日，2025 年 3 月 13 日～12 月 31 日の 3 期間について解析を実施した．

3. 結果および考察

(1) 体積含水率

深さ別の体積含水率はそれぞれ異なる変動を示した（図 1）．10 cm 深と 20 cm 深は概ね 0.4～0.5 m^3 m^{-3} 付近で推移し，乾燥と灌水により周期的な変動が認められた．30 cm 深，40 cm 深と深くなるほど水分量が低下し，0.15～0.35 m^3 m^{-3} の範囲で変動した．これに対し，50 cm 深の水分量は 0.3～0.45 m^3 m^{-3} と 30・40 cm 深よりも高水分で推移した．

(2) 土壌水分貯留量の変化

2022 年は観測開始直後に 25～45 cm 深と 45～55 cm 深で貯留量の変化が大きかった(図 2)．雨よけハウス内であるため降雨に伴う畝上底面からの水供給はほとんどないことから，この貯留量の変化は地下水位上昇の影響を受けた可能性が考えられる。これ以後の貯留量は全層で概ね±1 mm d^{-1} 程度に収まっていた．2024 年は 3 月の収穫開始時の萌芽促進と，9 月の多量灌水により，畝内全層で貯留量の大きな変化が見られたが，それ以外は 5～25 cm 深で±2～4 mm d^{-1} 程度の変化が観測された．2025 年は春から夏にかけて 5～25 cm 深の変動が大きく，特に 8 月には灌水量の操作により貯留量の大きな変化が確認された．9 月後半から 10 月には高畝内全層で負の貯留量変化が継続した期間があり，根による水分利用量が灌水量を上回ったことが示唆された．

(3) アスパラガスの可販収量

2020 年の収穫初年は 1.7 t/10a に留まったが，それ以後は 2.3～2.7 t/10a が得られた．

4. おわりに

地下水位の上昇が想定される水田転換畑において，60 cm の畝高を設けることで地下水位変動の影響は主として畝下端に認められ，地下茎が発達する表層 30 cm 深までにはその影響は限定的であった．一方，表層の土壌水分は概ね湿潤に維持されており，高地下水位条件における枠板式高畝栽培の有効性が示された．

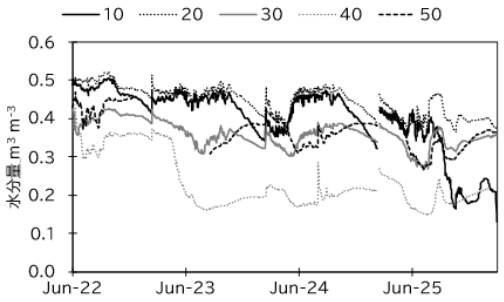


図 1　高畝内の土壌水分量の季節変化

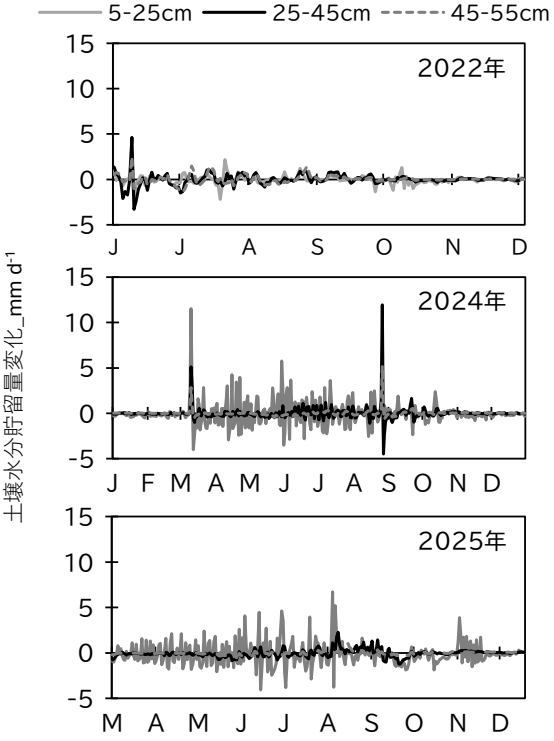


図 2　高畝内深さ別の土壌水分貯留量変化量の季節変化

謝辞

本研究は生研支援センター「イノベーション創出強化研究推進事業」（JPJ007097）および JSPS 科研費 JP24H00535 の支援を受けて実施した．灌水管理や収量の情報は田口誠毅氏（秋田県）よりご提供いただいた．

参考文献等

池添ら（2026）土壌の物理性 163，3-14

長野県（2025）アスパラガス枠板式高畝栽培マニュアル（長野県版）Ver. 1.0.

農研機構（2026）アスパラガスの枠板式高畝栽培標準作業手順書 公開版

Ca^{2+}-Na^{+}イオン交換を伴う砂中の溶質移動：飽和浸透実験による HP1 の基礎的検証

Solute transport with Ca^{2+}-Na^{+} exchange in sand: A column-based evaluation of HP1

古川陽渡[1]・田崎小春[2]・徳本家康[1]

[1]佐賀大学農学部・[2]鹿児島大学大学院連合農学研究科

要旨(Abstract)：

鳥取砂丘砂を $NaNO_3$溶液で初期飽和し，$CaCl_2$溶液を飽和浸透させて，Ca^{2+}–Na^{+}交換に伴う溶質移動を HP1 の計算と比較した。計算では，Ca^{2+}の交換吸着による移動遅延と Na^{+}の交換脱着による濃度ピークが現れた。実測でも Na^{+}濃度の上昇が見られたものの，そのピークは計算値より小さかった。

キーワード：イオン交換，鳥取砂丘砂，溶質移動

Key words: Ion exchange，Tottori dune sand，Solute transport

1. はじめに

土中の Ca^{2+}–Na^{+}イオン交換は, 陽イオン交換容量（CEC），交換選択性に加え，溶液の全電荷濃度と組成に依存する。取出ら（2024）は HP1 によって完全交換と混合溶液における部分交換の溶質移動を解析したが, 濃度分布の実測値に対する予測精度の確認が必要である。鳥取砂丘砂は CEC が小さく，交換の影響は限定的と予想される一方, 溶液の成分と初期交換状態を制御することで単純化したイオン交換を検討しやすい。本研究では，$NaNO_3$溶液を初期溶液とした砂カラムへの $CaCl_2$溶液の飽和浸透実験を行い, 非交換性陰イオンと交換性陽イオンの濃度分布を HP1 の計算結果と比較した。

2. 計算・実験方法

2.1 カラム実験

Fig.1 は実験の概略図である。供試土には，鳥取砂丘砂を用いた。2 mm ふるいを通過した試料を直径 7.7 cm，高さ 25 cm のカラムに ρ_b=1.55 g cm^{-3} で充填した。0.03 mol L^{-1}の $NaNO_3$溶液を下端から毛管飽和させ, 初期溶液とした。その後，0.05 mol L^{-1}の $CaCl_2$溶液を上端から浸透させ, 下端のポンプで水分フラックス J_w＝16 cm d^{-1}に制御した。カラム上端から 3.75，6.25，10，15，20 cm の深さで 0.05 d 間隔に土中水を採取し, イオンクロマトグラフィーにより Na^{+}, Ca^{2+}, Cl^{-}, NO_3^{-}濃度を測定した。

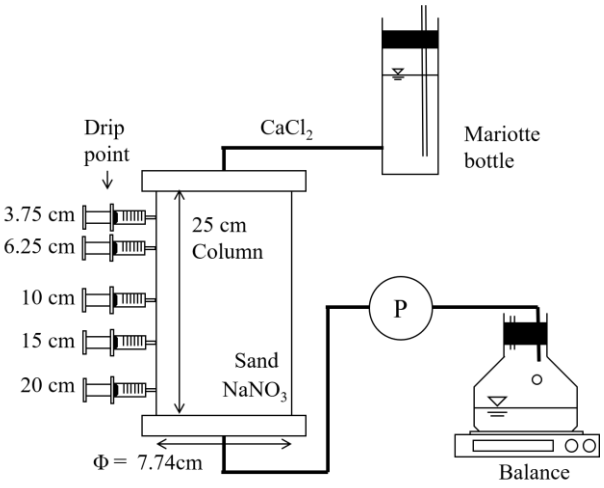


Fig.1 実験の概略図

2.2 HP1 の計算条件

HP1 を用いて，Na 飽和土に対して $CaCl_2$ 溶液が飽和浸透する条件を計算した。実験と同じカラム長，初期・浸透液の組成，水分フラックスおよび乾燥密度を与えた。実測値に基づき，体積含水率 θ＝0.341 cm^3 cm^{-3}, 分散長 λ＝0.2 cm, CEC＝0.02 mmolc g^{-1}，乾燥密度 ρ_b =1.55 g cm^{-3} とし，平均間隙流速は v＝Jw/θ＝46.92 cm d^{-1}とした。計算例は，初期溶液電荷濃度 c_i=0.03 $mmol_c$ cm^{-3} の土カラムに初期濃度より高い溶液電荷濃度 c_0=0.1 $mmol_c$ cm^{-3} の浸透溶液を与

える条件であり，$NaNO_3$ 溶液で Na 飽和した土への $CaCl_2$ 溶液の浸透である。浸透溶液の陰イオンは Cl^-，初期溶液では NO_3^- とした。

3. 結果と考察

Fig.2 は HP1 による計算結果を実線で，実験による計測結果をプロットし破線で結んだ Na^+，Ca^{2+}，Cl^-，NO_3^- の溶液電荷濃度分布である。（a）Ca^{2+}，（b）Na^+は陽イオン，（c）Cl^-，（d）NO_3^-は陰イオンにおける鉛直分布を示した。

Fig. 2(a)，(b)の HP1 計算では，浸透した Ca^{2+} の濃度前線は非吸着性 Cl^- より遅れて進行し（Fig. 2(c)），その前方に初期濃度を上回る Na^+ 濃度のピークが形成された。これは，Ca^{2+} の交換吸着に伴い Na^+ が脱着する現象に対応する。すなわち，Ca^{2+} の移動遅延と Na^+ の放出は，同じ Ca^{2+}–Na^+ 交換反応の両側面である。

実測値でも，Ca^{2+} の浸透に伴って Na^+ 濃度が上昇し，Na^+ の交換脱着が示唆された。一方，Fig. 2(a)の Ca^{2+} 濃度前線は計算より下方へ進行し，Fig. 2(b)の Na^+ 濃度ピークは計算より小さかった。したがって，HP1 は交換に伴う濃度変化を定性的に表現したが，Ca^{2+} の遅延と Na^+ の放出の定量的な予測には差が残った。

Fig. 2(c)，(d)では，Cl^- と NO_3^- の濃度前線の進行傾向は実測値と計算値でおおむね一致した。一方，Cl^- の実測濃度には計算値を上回る点も見られた。したがって，陽イオンの計算値と実測値の差については，イオン交換特性に加えて，移流分散の影響も検討する必要がある。

まず，陰イオンの濃度分布を用いて移流分散条件を確認する。その上で，Ca^{2+} の移動遅延と Na^+ の濃度ピークに見られた計算値と実測値の差について，CEC，交換選択係数および初期交換性陽イオン組成の影響を検討する必要がある。また，実測分散長 $\lambda = 0.2$ cm を用いた HP1 の計算では，空間・時間刻みに対する数値解の収束性も確認する。今後は，混合溶液を用いた部分的なイオン交換についても実験による検証を進める。

《謝辞》本研究は，JSPS(課題番号: 26K09017)の助成を受けたものである。ここに深謝します。

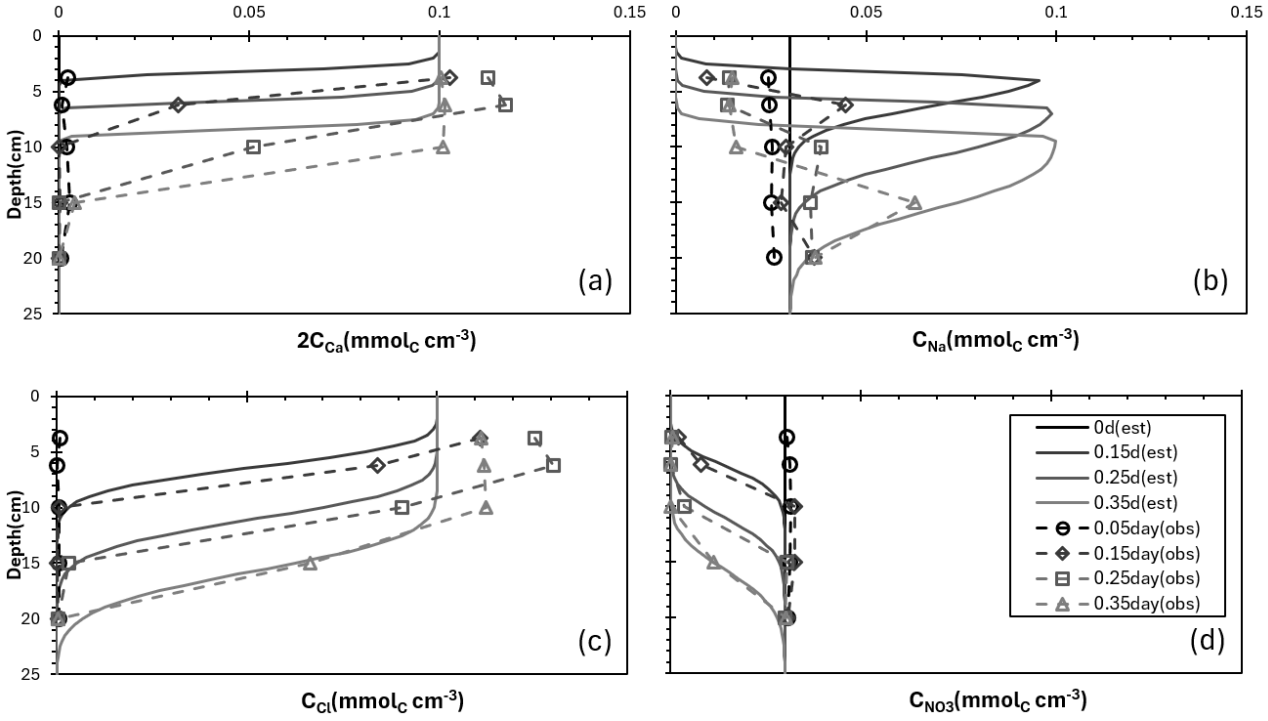


Fig.2　Na^+、Ca^{2+}、Cl^-、NO_3^- の溶液電荷濃度分布の計算値・実測値

排水性評価のための逓減曲線の不飽和土壌水分移動モデルによる再現

Simulation of depression curves for drainage evaluation using an unsaturated soil water flow model

瑞慶村 知佳[1]・宮本 輝仁[1]

[1]農研機構農村工学研究部門

要旨(Abstract)：

転換畑における排水性評価を目的として提案した逓減曲線について，取得方法の改良および不飽和土壌水分移動モデルによる再現を検討した。自動化によって波形マッチングと変曲点探索を適用した結果，後半部のフィッティングが改善された。また，逓減曲線は下端境界を圧力一定条件とした二層土壌の排水過程として概ね表現できることが確認された。

キーワード：転換畑，排水性評価，HYDRUS-1D，不飽和土壌水分移動

Key words: Converted paddy field, Drainage evaluation, HYDRUS-1D, Unsaturated soil water flow

1. はじめに

水田で畑作物を作付けする転換畑では排水対策は不可欠である。排水性を定量的に評価し，排水対策技術の導入効果を事前に予測できれば，営農計画を立てる上で有用である。そこで瑞慶村ら（2025）は，転換畑の観測データを用いて，短い逓減イベントを多数重ね合わせて逓減曲線を導出し，これを用いて排水性を定量的に評価する手法を提案した。

転換畑では，大きな降雨後に作土層の体積含水率が飽和付近まで上昇した後，徐々に減少する。また，地下水位が比較的浅い圃場が多いことから，観測される逓減曲線は，下端境界を圧力一定条件とした作土層と下層からなる二層の成層の飽和状態からの排水過程と等価と考えられる。

そこで本研究では，実質的に手作業で行っていた逓減曲線の取得方法を改良するとともに，逓減曲線が，下端境界を圧力一定条件とした二層の成層の排水過程として表現可能か，不飽和土壌水分移動モデルを用いて検討した。

2. 逓減曲線の取得方法の改良

これまで実質的に手動で行っていた逓減曲線導出に係る処理を，Python を用いて自動化できるようアルゴリズムを整理した。

大豆栽培期間中に耕盤上へ設置した土壌水分センサで観測した 1 時間間隔の体積含水率（θ）データから，6 時間以上連続して θ が減少する区間を逓減イベントとして抽出した。各イベントを始点 θ の大きい順に並べ，最も高い θ から開始するイベントを基準曲線とした。残りのイベントは，各イベント全体の波形と基準曲線との重複区間における二乗平均平方根誤差（RMSE）が最小となる位置へ接続させた。また，観測値のみでは接続位置が定まらない場合には，基準曲線に指数関数を当てはめ，近似曲線上の対応位置へ接続した。これを全イベントに対して繰り返し，逓減曲線を導出した。

逓減曲線は，重力排水が卓越する初期過程と，その後の緩やかな排水過程から構成されると考えられる。瑞慶村ら（2025）では，導出した逓減曲線に対し，0-24 時間および 36 時間以降の区間に回帰直線を当てはめ，その交点を変曲点とした。本研究では，候補となる分割点を移動させながら前後の区間に直線回帰を適用し，2 本の回帰直線による残差平方和（SSE）が最小となる位置として変曲点を求めた。また，各

機密・配付先限り

区間の回帰直線の傾きを排水速度の指標として評価した。

3. 不飽和土壌水分移動モデルでの逓減曲線の再現方法

作土層および下層からなる二層土壌を対象とし，Richards 式に基づく鉛直一次元の不飽和土壌水分移動モデルにより逓減曲線の再現を試みた。大きな降雨後に作土層が飽和状態近くまで湿潤した後の排水過程を想定し，上端境界は，無降雨かつ蒸発量 5 mm day^{-1} とした。下端境界には地下水面を想定した圧力一定条件を与え，初期条件は土層全体が飽和状態に近い条件とした。土壌水分特性には van Genuchten-Mualem モデルを用いた。パラメータは実測データおよび都道府県別土壌物理環境データベース（滝本ら，2017）を用い，α および n は逆解析によって推定した。観測から得られた逓減曲線と計算結果との適合性は RMSE によって評価した。

4. 結果と考察

滋賀県の大豆を作付けする転換畑の耕盤上（センサ設置深さ約 15 cm）で観測した θ のデータを対象に，逓減曲線の取得方法の改良と不飽和土壌水分移動モデルによる再現を試みた。

(1) 逓減曲線の取得方法の改良

波形マッチングおよび変曲点探索を適用した結果，前半および後半の回帰直線の傾きは，それぞれ−0.0033 および−0.0006 m^3 m^{-3} h^{-1} であった。また，変曲点は 30.5 h，そのときの θ は 0.37 であった。従来法と比較すると，変曲点の時間および θ，前半区間の回帰直線の傾きに大きな差はなかった。一方，後半区間の回帰直線の傾きはより緩やかとなった。

(2) 不飽和土壌水分移動モデルによる再現

手動および自動化により取得した逓減曲線をそれぞれ逆解析の対象としてフィッティングを行った（**Fig. 1**）。その結果，どちらの逓減曲線も不飽和土壌水分移動モデルの水分特性パラメータを最適化することで再現できること，自動化した逓減曲線では，後半部のフィッティングが改善され，実測値と計算値との RMSE は手動の 0.014 から自動化の 0.007 へ低下したことがわかった。

また，変曲点が現れた 30.5 h 付近では，作土のマトリックポテンシャルは概ね−30 kPa 以下，下向きフラックスも 1 mm day^{-1} 以下であった。従来法で求めた変曲点は pF1.5 との相関が高いことが確認されており，本研究の結果も，変曲点が重力排水からその後の排水過程への移行点を表すことを支持するものであった。以上より，逓減曲線は下端境界を圧力一定条件とした二層土壌の排水過程として概ね表現できることが確認された。

謝辞：本研究は JSPS 科研費 JP24H00535 の支援を受けて実施した。

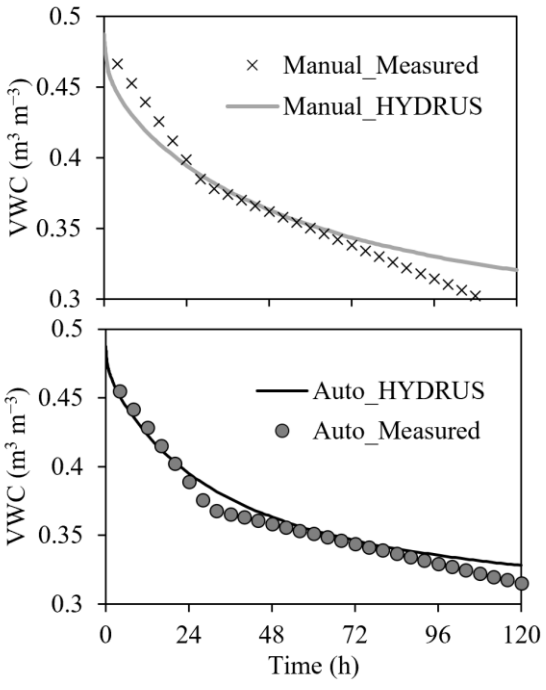


Fig. 1　手動および自動化によって構築した逓減曲線と HYDRUS による再現結果の比較

参考文献等

瑞慶村ら（2025）：農業農村工学会論文集，320，p. I_29–I_43

滝本ら（2017）：日本土壌肥料学雑誌，88(4)，p. 309–317

機密・配付先限り

振動ローラ式乾田直播圃場におけるメタン放出量低減機構の解明に向けた土壌構造および間隙径分布の評価

Assessment of Soil Structure and Pore Size Distribution toward Understanding Methane Emission Reduction in Vibration-Roller Dry Direct-Seeded Paddy Fields

渕山律子[1]・渡邊修一[1]・中嶋美幸[2]・宇賀優作[3]

[1]農研機構九沖研・[2]農研機構東北研・[3]農研機構作物研

要旨(Abstract)

振動ローラ式乾田直播圃場におけるメタン放出量低減要因を明らかにするため、移植圃場と土壌構造および間隙径分布を比較した。作土の断面観察およびX線CT画像から、乾田直播では粗大間隙が発達し、移植とは異なる土壌構造が確認された。また、ミクロポア率は乾田直播で有意に低かった。これらの結果から、乾田直播に特徴的な土壌構造および間隙径分布が示された。

キーワード：乾田直播，メタン放出，間隙径分布，土壌構造，X線CT

Key words: dry direct-seeded rice cultivation, methane emission, pore size distribution, soil structure, X-ray computed tomography

1. はじめに

近年,農業分野における温室効果ガス排出削減が求められており,水田から発生するメタンは重要な削減対象となっている。振動ローラ式乾田直播栽培は,振動ローラによる地表面鎮圧を特徴とする乾田直播技術であり,移植栽培に比べてメタン放出量が低下することが報告されているが,要因は十分明らかにされていない。

土壌中のメタン生成は還元状態の形成と密接に関係しており,土壌構造や間隙の特性がガス拡散や酸素供給を通じて影響を及ぼす可能性がある。代かきを行う移植栽培と乾田直播栽培では土壌構造が異なると考えられることから,本研究では振動ローラ式乾田直播圃場と移植圃場の土壌構造および間隙径分布を比較し,メタン放出量低減機構の解明に資する基礎的知見を得ることを目的とした。

2. 方法

(1) 調査圃場および栽培概要

農研機構九州沖縄農業研究センター(福岡県筑後市）内の、隣接する2筆で、2023年より水稲単作で乾田直播（乾直）栽培と移植栽培を行うコンクリート枠圃場(表1)を対象とした。

栽培品種はヒノヒカリで、乾直圃場は 5 月 29 日播種、移植圃場は6月23日に移植を行い、両圃場ともに6月25日からポンプでの定期的な入水を開始し、落水まで同じ水管理を行った。

(2)土壌採取

水稲収穫期に乾直、移植各圃場3地点で、1) X線CT画像用試料：直径15 ㎝のステンレス円筒を用い、稲株を中心として表面～耕盤までを各地点1連で採取、2）間隙径分布測定用試

表1　対象圃場の理化学性（2023年度水稲作付前）

圃場	土壌*	粒径組成*（各%）			仮比重	固相率	作土	TC	TN	C/N	pH(H_2O)	Fe2O3
		砂	シルト	粘土	gcm^{-3}	%	cm	%	%			%
乾直	灰色低地土	45	27	28	1.07	41	17.4	1.9	0.2	10.3	6.1	1.3
移植					1.07	41	16.5	1.8	0.2	10.1	6.1	1.4

*既存報告より

料：直径 5 ㎝、100 ㎖のステンレス円筒を用い、1）の試料を採取した近傍で 0 - 5、5-10、10-15 ㎝深さを各地点 2 連で採取した。

(3) 測定方法

1）X 線 CT 画像用試料は、ステンレス円筒から取り出した後、ビニール袋に封入し、X 線 CT 装置（inspeXio SMX-225CT FPD HR Plus, 株式会社島津製作所）を用いて撮影した。

2）間隙径分布測定用試料は、実容積計を用いて三相分布を測定後、吸引法および加圧板法で体積含水率を測定した。なお、間隙径分布は飽和～pF1.5 をマクロポア、pF1.5～2.7 をメソポア、pF2.7 以上をミクロポアとして区分した。

3. 結果

(1) 土壌断面および CT 画像（図 1）

断面調査では、移植区で鉛直方向に発達した亀裂が観察された。一方、乾田直播区では試料全体に粗大な間隙が分布していた。これらの特徴は X 線 CT 画像でより明瞭に確認され、移植区では亀裂が卓越し、乾田直播区では粗大間隙が土壌全体に分布する構造が認められた。

(2) 間隙径分布（図 2）

移植区ではミクロポア率が高く、乾田直播区では低かった。特に 0-5 cm および 5-10 cm 層でその傾向が顕著であり、ミクロポア率には有意差が認められた。一方、乾田直播区ではマクロポア率が高い傾向を示したが、地点間差が大きく有意差は認められなかった。メソポア率に有意差は認められなかった。

4. 考察

乾田直播区では移植区に比べてミクロポア率が低く、マクロポア率が高い傾向を示したことから、両栽培法で間隙構造が異なることが示された。また、X 線 CT 画像では、移植区が亀裂主体の構造を示したのに対し、乾田直播区では粗大間隙が土壌全体に分布していた。これらの結果から、乾田直播区では土壌中の空気およびガスの移動経路が移植区と異なる可能性が示唆された。

5. おわりに

振動ローラ式乾田直播圃場では、移植圃場とは異なる土壌構造および間隙径分布が認められた。特に、ミクロポア率の有意な低下が確認され、乾田直播による土壌物理性の変化が示された。これらの構造的特徴は、メタン放出量低減機構を解明する上で重要な知見になると考えられた。なお、乾田直播による土壌構造の変化は栽培方式や土壌条件によって異なる可能性があり、今後はそれらの影響も考慮しながら、土壌の酸化還元状態、ガス拡散特性およびメタン放出量との関係について検討を進める必要がある。

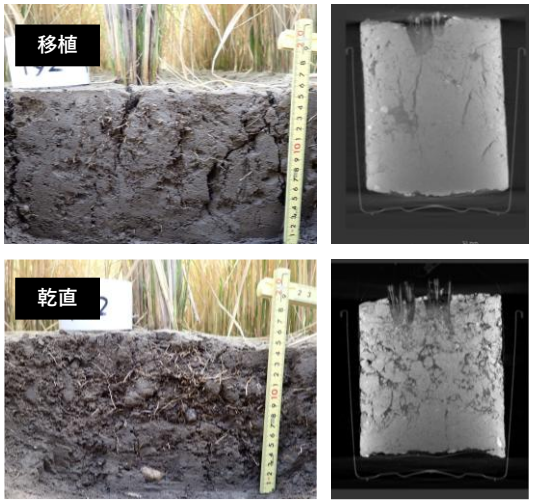


図 1 移植と乾直における作土の土壌構造

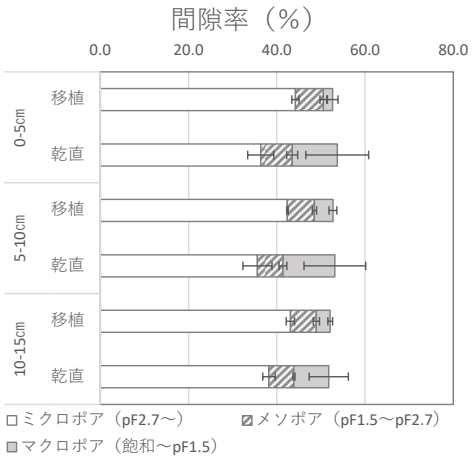


図 2 移植と乾直における間隙径分布の比較

謝辞：本研究は本発表の一部は農林水産省「自然系クレジット創出推進事業」により実施した。

数値計算に基づくタイムラプス GPR データの速度解析による浸潤領域内の反射深さの推定

Estimation of Reflection Depth Within the Infiltration Zone via Velocity Analysis of Time-Lapse Ground-Penetrating Radar Data Based on Numerical Analysis

及川航貴[1]・斎藤広隆[1]

[1]東京農工大学大学院　農学府

要旨(Abstract)

土壌水分移動と電磁波伝播シミュレーションを組み合わせることで，浸潤過程のタイムラプス GPR データを速度解析して得られる浸潤領域内での反射深さを明らかにすることを目的とした。その結果，複数の土性において反射深さは浸潤前線の先端付近であることが示唆された。

キーワード：地中レーダ，浸潤，体積含水率

Key words: Ground-penetrating radar, Infiltration, Volumetric water content

1. はじめに

地表型地中レーダ（以下，GPR）は土壌の体積含水率（以下，VWC）と比誘電率が高い相関を持つことを利用して，非破壊で浸潤過程のタイムラプスデータを計測することができる。また，送受信アンテナの複数の間隔（マルチオフセット，以下 MO）データでの反射波の走時の違いから，反射波の速度を推定できる。Oikawa et al. (2022)では，砂丘砂の浸潤過程のアレイアンテナ GPR のタイムラプス MO データから反射波を速度解析することで，反射深さおよび反射深さまでの見かけの体積含水率の経時変化を推定した。しかし，VWC が滑らかに変化する浸潤領域内での反射の場合，どの部分で反射しているのかは十分に検討されていない。そこで，土壌水分移動と電磁波伝播シミュレーションを組み合わせることで，複数の土性において浸潤過程のタイムラプス GPR データの反射波の浸潤領域内での反射深さを明らかにすることを目的とした。

2. 方法

土中の一次元浸潤現象を HYDRUS で，浸潤過程の GPR による電磁波伝播を gprMax で解析した。土壌は，HYDRUS のソイルカタログの中から SL，SCL，CL の 3 種類を対象とした。深さは 100 cm として，初期条件はマトリックポテンシャル（以下，MP）-500 cm および-100 cm，上端は 2 cm/d の一定フラックス境界条件，下端は自由排水条件とした。また，比較として HYDRUS と同じ積算浸潤量になるような浸潤領域と乾燥領域に分けた二層浸潤の VWC 分布を求めた。

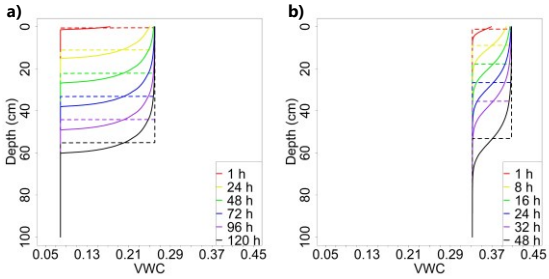


図 1. 浸潤過程の VWC 分布の経時変化。(a) SL・初期 MP-500 cm, (b) CL・初期 MP-100 cm。実線は HYDRUS，破線は二層浸潤を示す。

これらの浸潤過程の VWC 分布に基づくタイムラプス GPR データを計算するために，電磁波伝播の数値解析プログラムである gprMax のインプットデータとして，VWC 分布から比誘電率分布を求めた。送信アンテナは，

1000MHz のリッカー波形を地表面の点源から放射する。計算領域は 200 cm×200 cm×0.2 cm として，境界は PML 吸収境界条件とした。土中は浸潤前線の連続的な変化を再現するために 0.2 cm ごとに媒質定数を与えた。オフセットは 40 cm から 80 cm までの等間隔の 41 トレースのタイムラプス MO データを求めた。

トレースごとのタイムラプス GPR データにおける反射波のピークを連続的に選択した。各時間の 41 トレースの MO データの反射波のピークを双曲線フィッティングして，反射波の速度および往復反射走時を推定した。推定された速度と往復反射走時から，反射深さの経時変化を求めた。

3. 結果と考察

HYDRUS の結果から浸潤が進むほど浸潤領域が二層浸潤に近づいていく一方で，土性や初期 MP によって浸潤前線の形状に大きな違いがみられた（図 1）。タイムラプス GPR データにおける反射波の走時の経時変化では，SL の場合は二層浸潤と HYDRUS ともに同様に遅くなるが，CL の場合は二層浸潤と比べて HYDRUS は著しく反射波の強度が小さく検出できなかった（図 2）。したがって，浸潤前線からの反射波の強度において，上層と下層の比誘電率の差だけではなく，前線の形状が大きな影響を与えることが示唆された。また，初期 MP-100 cm の CL を除いた反射波の解析が可能だった場合は，いずれも反射波の深さは比誘電率の変化が最も大きい浸潤前線の先端付近であった（図 3）。

4. おわりに

本研究では，土中水分移動および電磁波シミュレーションを組み合わせることで，浸潤過程の反射波の反射深さが浸潤前線の先端付近であることが示された。また，浸潤領域と乾燥領域に比誘電率差があっても，CL のように浸潤前線が緩やかに変化する場合は，反射波が検出できない場合があった。このように浸潤前線からの反射波は浸潤前線の形状に大きな影響を受けるため，反射波の走時や振幅情報を土性の逆推定に利用できる可能性がある。

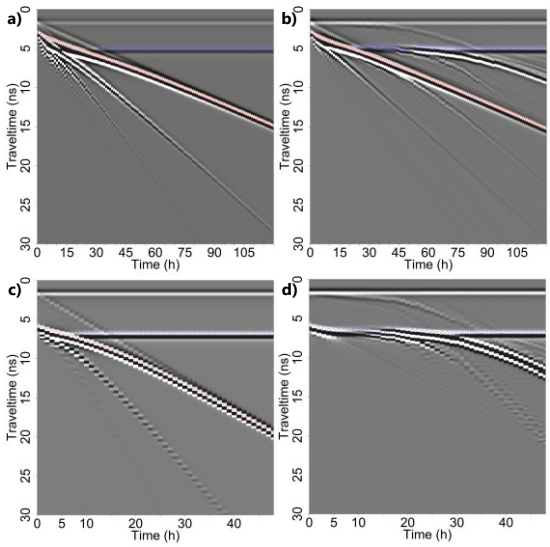


図 2. オフセット 40 cm でのタイムラプス GPR データ。（a-b）SL・初期 MP-500 cm，（c-d）CL・初期 MP-100 cm。（a,c）二層浸潤，（b,d） HYDRUS。赤点は反射波，青点は地表面直達波の選択されたピークを示す。

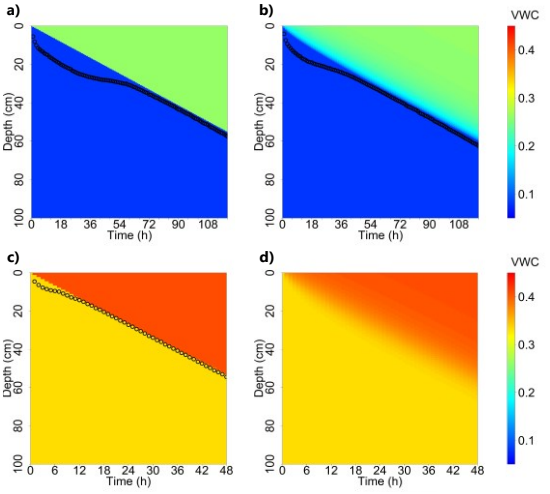


図 3. 浸潤過程の反射深さと VWC 分布の比較。（a-b）SL・初期 MP-500 cm，（c-d）CL・初期 MP-100 cm。(a,c) 二層浸潤，(b,d) HYDRUS。黒点は反射深さを示す。

参考文献等

Oikawa, K. et al., 2022, *JEEG*, **27(4)**, 219-231.

凝集した希薄なモンモリロナイト懸濁液の流動特性の塩濃度依存性

Effect of NaCl Concentration on the Flowing Characteristics of Dilute Suspension of Coagulated Montmorillonite

Hu Tianchen [1]・Santanu Saha[2]・Yasuhisa Adachi [2]

[1]Graduate School of Science and Technology, University of Tsukuba

[2] Faculty of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba

Abstract

Flowing characteristics montmorillonite suspension with solid volume fraction of 0.0016 coagulated in NaCl solution was analyzed using a circular pipeline system as a function of NaCl concentration. From the measurement of pressure drop against flow rate, the relationship between shear stress and shear rate at the pipe wall (consistency curve) was determined. Experiments were carried out across laminar flow to turbulent flow. Experimental results are summarized as follows. At NaCl concentration 0.7 M or higher, the consistency curve can be practically approximated by the Bingham model. However, at salt concentrations below this threshold, the Bingham model becomes no longer applicable. In this lower salt concentration regime, the changing behavior of the consistency curve against salt concentration is not monotonic demonstrating the maximum deviation occurring around 0.5 M NaCl. At this specific concentration, the transition from laminar to turbulent flow was found to be remarkably suppressed.

Key words: Flocculated Montmorillonite slurry, Laminar to turbulent transition, Bingham model

1. Introduction

The flow of solid-liquid systems containing colloidal particles, such as sludge and soil, is closely linked to various environmental issues. To control these flows effectively, a comprehensive understanding of the flow characteristics of the suspensions is essential. Because colloidal particles easily aggregate to form flocs under natural environmental conditions, flow analysis must be conducted with this behavior considered.

In our previous report[1], we demonstrated that the flow characteristics of a dilute montmorillonite suspension flocculated with 1.0 M NaCl can be closely approximated by the Bingham model under laminar flow conditions. In the present study, we conducted an analysis focusing on how the findings reported in our previous work vary in response to changes in NaCl concentration.

2. Theory

For non-Newtonian fluid, there are several different models to explain the flow characteristics. In the case of clay suspension. Three parameter Herschel-Bulkley model (H-B model) is the most comprehensive model for clay suspension [2]. The constitutive equation for the relation between $\dot{\gamma}$ (shear rete) and τ (shear stress) of an H-B fluid is defined as:

$$\tau = \tau_y + K \cdot \dot{\gamma}^n \qquad (1)$$

where, τ_y, K and n is yield stress, consistency index (plastic viscosity), and flow behavior index, respectively. If n=1, this model reduces to Bingham model,

$$\tau = \tau_y + K\dot{\gamma} \qquad (2)$$

which was useful in the analysis of dilute flocculated suspension [3]. In this case, the following linearized approximate solution enabled

the practical analysis:

$$\frac{8V}{D} = \frac{\tau_w}{K} - \frac{4}{3} \cdot \frac{\tau_y}{K} \quad (3)$$

here V, D and τ_w is the mean velocity of the fluid, diameter of the pipe and wall stress respectively. The value of $\frac{8V}{D}$ is the shear rate at the wall of pipe and τ_w can be obtained from the force balance between pressure drop and wall shear stress:

$$\tau_w = \frac{\Delta P}{4} \cdot \frac{D}{L} \quad (4)$$

here ΔP is the pressure drop and L is the distance between the two detecting points.

3. Materials and Method

As for experiment setup, a closed-loop circular piping system equipped with dual pressure sensors and a flow meter is shown in Fig 1. Experiment was carried out by the measurement of pressure drop changing the flow rate.

In this study, the experiments were carried out through changing NaCl concentration while keeping the same solid volume fraction of MMT. The solid volume fraction of MMT is fixed to 0.16%, with the NaCl concentration vary from 0.1M to1.2M.

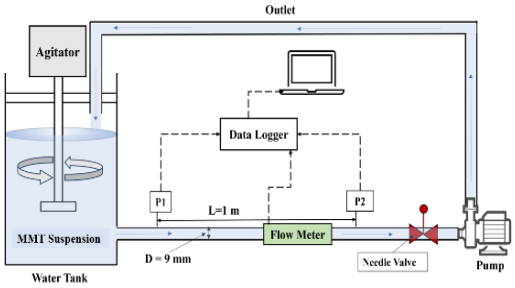


Fig 1. Experiment apparatus

4. Results and Discussion

As indicated in the Fig 2, when NaCl concentration larger than 0.5M, the flow curves in laminar region can be treated as Bingham model. However, at lower NaCl concentration, especially in the case of 0.5M, the flow curves show the tendency of downward bending. In Table 1, values of n (flow behavior index of H-B model) calculated by non-linear regression are summarized.

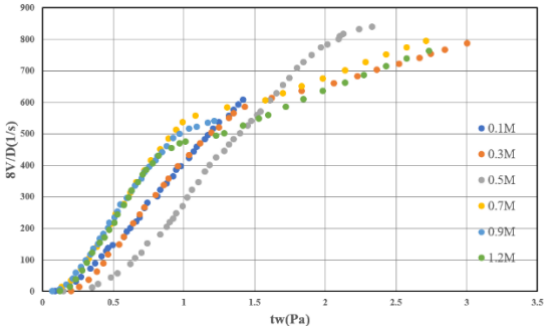


Fig 2. Flow curve of 0.16% MMT with different NaCl concentration from 0.1M-1.2M

NaCl	0.1M	0.3M	0.5M	0.7M	0.9M	1.2M
n value	0.86	0.91	0.54	0.97	0.92	1.07

Table 1. n value of different NaCl concentration applying H-B model

5. Conclusion

By studying the effect of NaCl concentration on the flowing properties of flocculated montmorillonite at 0.16% volume fraction, we found a significant deviation from the prediction from Bingham model at 0.5M where the transition from laminar flow to turbulent flow is strongly suppressed.

Acknowledgement

Financial support from Kakenhi 22H0038 is acknowledged.

References

[1] Hu, T.; Saha, S.; Asada, Y.; Adachi, Y. Purification 2026, 2, 7.

[2] Fur, B.L.; Martin, M. Laminar and transitional flow of drilling muds and various suspensions in circular tubes. J. Fluid Mech. 1967, 30, 449–464.

[3] Ohgaki S. Matsuo T. Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers, 02/1973, Vol. 1973, Issue 210, P 21-32

DNDC-Rice モデルの検証に向けた間断灌漑水田における土壌水分動態とメタンフラックスの観測

Observation of soil moisture dynamics and methane flux in intermittently irrigated paddy fields for validation of the DNDC-Rice model

大久保直紀[1]・片柳薫子[2]・麓多門[2]・西脇淳子[3]

[1]東京農工大学・[2]農業・食品産業技術総合研究機構・

[3]東京農工大学大学院農学研究院

要旨(Abstract)：本研究では，連続湛水（CF）と間断灌漑（AWD）条件下の水田において，地表面 CH_4フラックスと土壌の体積含水率を観測した。観測期間中，AWD 区では CF 区と比較して CH_4フラックスが小さい傾向が見られ，AWD 区では落水直後に土壌体積含水率が低下した。これらの観測結果を踏まえ，今後 DNDC-Rice モデルによる水分移動と CH_4排出の再現性を検証し，必要な改良を検討する。

キーワード： メタン，水田，間断灌漑，土壌水分

Key words: methane，paddy fields，alternate wetting and drying，soil moisture

1. はじめに

我が国では，水田からの CH_4 排出が人為起源 CH_4 排出量の大きな割合を占めており，水田における CH_4 排出量の定量化と削減技術の評価が求められている。

水田からの CH_4 排出量は，気候，土壌，水管理，作物生育などの条件によって変動する。そのため，広域的な排出量推定や緩和策の評価には，観測データを用いたプロセスベースモデルによる推定が有効である（Fumoto et al., 2008）。DNDC-Rice モデルは，水田における炭素・窒素循環および CH_4 排出を推定するモデルであり，間断灌漑（Alternate Wetting and Drying: AWD）条件下での適用性も検証されている（Katayanagi et al., 2012; Oo et al., 2020）。

一方で，DNDC-Rice モデルでは，土壌水分量の推定精度に関する課題が指摘されている（徳本ら，2008）。土壌水分量は土壌の酸化還元状態や CH_4 生成・酸化過程に影響するため，特に AWD のように湛水と落水を繰り返す水管理条件では，水分移動の再現性が CH_4 排出量推定に重要である。

そこで本研究では，連続湛水（CF）および間断灌漑（AWD）条件下の水田において地表面 CH_4 フラックスおよび土壌体積含水率を観測し，水管理に伴う変化を比較した。 得られた観測データは，今後の DNDC-Rice モデルの水分移動計算および CH_4 排出量推定の検証に用いる。

2. 方法

試験は，東京農工大学農学部附属広域都市圏フィールドサイエンス教育研究センターの水田圃場で実施した。試験区として，連続湛水（CF）区および間断灌漑（AWD）区を各 3 反復設け，チャンバー内にはイネを 1 株ずつ移植した。観測期間は，イネ移植 14 日後の 6 月 15 日から収穫前の 9 月 22 日までである。地表面 CH_4 フラックスは，クローズドチャンバー法によるガスサンプリングとガスクロマトグラフ分析で測定した （Minamikawa et al., 2015）。また，土壌水分センサーを用い，AWD 区では深さ 5，10，20 cm，CF 区では深さ 5，10 cm において体積含水率と土壌温度を測定した。

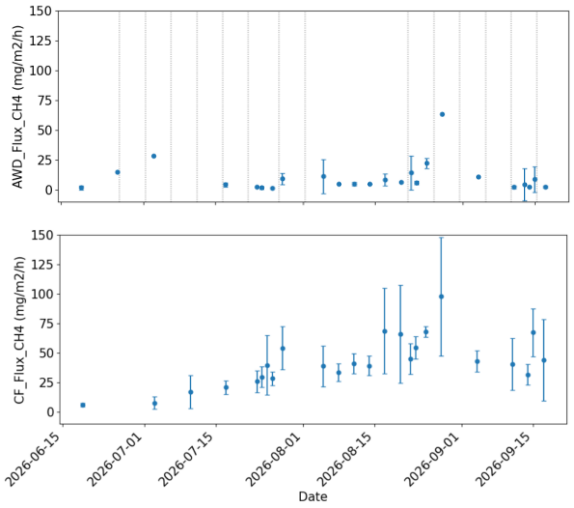


図 1　AWD 区（上），CF 区（下）の地表面 CH_4 フラックス

3. 結果・考察

図 1 に，AWD 区および CF 区の地表面 CH_4 フラックスを示す。プロットは平均値，エラーバーは標準偏差である。また，グレーの縦線は AWD 区における落水日である。両区とも，7 月中旬から下旬にかけてと，8 月中旬から下旬にかけてフラックスが増加した。ピーク値は AWD 区で 11.3 （8 月 5 日）および 63.7（8 月 28 日），CF 区で 54.2（7 月 28 日）および 97.9（8 月 28 日）mgC m^{-2} h^{-1} であった。観測されたピーク値は CF 区で大きかった。これは AWD 区での定期的な落水により土壌の還元状態が緩和され，CH_4 生成量の抑制や酸化促進が生じた可能性がある。

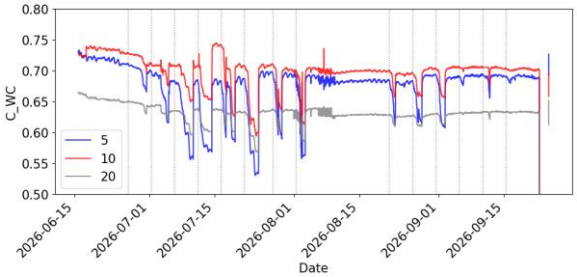


図 2　AWD 区 の体積含水率 (-) の変化
青：5cm，　赤：10cm，　灰：20cm

また，図 2 に，AWD 区の深さ別体積含水率の変化を示す。落水後には各深度で体積含水率の低下が見られ，その低下幅や応答時期には深度による違いが見られた。今後，落水・再湛水時の水分移動の再現性を検討する。

4. おわりに

圃場観測では，AWD 区で CF 区より CH_4 フラックスが小さい傾向が見られ，AWD 区の落水時には体積含水率の低下が確認された。今後は DNDC-Rice モデルの再現性を検証し，水分移動計算の改良が土壌水分量と CH_4 排出量の推定精度に与える影響を評価する。

謝辞

本研究は，JST SICORP e-ASIA プログラム（JPMJSC23E3）および JSPS 科研費・基盤研究（B）（26K01840）の助成を受けて実施しました。また，圃場利用に際し，本学の本林隆教授ならびに技術職員の松川孝治様にご協力いただきました。ここに記して深く感謝申し上げます。

参考文献

Fumoto, T. et al. (2008): Revising a process-based biogeochemistry model (DNDC) to simulate methane emission from rice paddy fields under various residue management and fertilizer regimes. Global Change Biology, 14(2): 382-402.

Katayanagi, N. et al. (2012): Validation of the DNDC-Rice model by using CH_4 and N_2O flux data from rice cultivated in pots under alternate wetting and drying irrigation management. Soil Science and Plant Nutrition., 58(3): 360-372.

Minamikawa, K. et al. (2015): Guidelines for Measuring CH_4 and N_2O Emissions from Rice Paddies by a Manually Operated Closed Chamber Method. National Institute for Agro-Environmental Sciences, Tsukuba, Japan.

Oo, A. Z. et al. (2020): Field Validation of the DNDC-Rice Model for Methane and Nitrous Oxide Emissions from Double-Cropping Paddy Rice under Different Irrigation Practices in Tamil Nadu, India. Agriculture, 10(8): 355.

徳本家康ら．(2008): 水田からの温室効果ガス発生量推定への DNDC モデル適応可能性の検討．明治大学農学部研究報告, 58(2): 37-46.

同程度の炭素投入条件下における原料の異なるバイオ炭の水田土壌改良特性の比較

Comparison of soil amendment responses to different feedstock biochars under comparable carbon inputs in a paddy field

楊 宇軒[1]・西脇 淳子[2]

[1]東京農工大学連合農学研究科　[2]東京農工大学大学院農学研究院

要旨(Abstract)

炭素投入量を揃えた 3 種類のバイオ炭について，水田土壌の団粒安定性，化学性および水稲生産性を比較した。MWD・GMD の応答は時期・深度によって異なり，TC・TN の変化と必ずしも一致しなかった。竹・稲わら区では TC と一部の団粒指標が高く，鶏糞区では TN，K・EC および収量が高かった。等炭素投入条件下でも，バイオ炭の原料によって土壌特性および水稲生産性への応答が異なり，窒素投入量などの違いが関与した可能性がある。

キーワード：バイオ炭，水田土壌，団粒安定性，深度別応答

Key words: Biochar, Paddy soil, Aggregate stability, Depth-dependent responses

1. はじめに

バイオ炭の土壌改良効果は，原料特性や施用条件によって異なる（Ghorbani and Amirahmadi, 2024）。原料の違いによる土壌改良効果を比較するには，炭素投入量を揃え，団粒安定性や土壌化学性への影響を評価することが重要である。また，水田土壌では湛水や水稲生育に伴って土壌環境が変化するため，団粒安定性を時間および深度の両面から把握する必要がある。本研究では，同程度の炭素投入条件で稲わら，竹および鶏糞由来バイオ炭を施用し，MWD・GMD の時間・深度別応答を比較した。さらに，TC・TN，K・EC および水稲生産性との対応を検討し，各資材の土壌改良特性を考察することを目的とした。

2 材料と方法

東京農工大学の水田圃場に，対照区，稲わら由来バイオ炭区，竹由来バイオ炭区および鶏糞由来バイオ炭区を設けた。各処理区は 3 反復とし，1 区画の大きさは 60 × 90 cm とした。各資材の炭素含量を CN コーダーで測定し，炭素投入量が約 9.72 t C/ha となるよう投入量を調整した（表 1）。各資材の総窒素投入量は，全窒素含量と施用量から算出した。

表 1 資材含量および投入条件

資材	C (%)	N (%)	施用量 (t/ha)	C 投入量 (tC/ha)	N 投入量 (t N/ha)
稲わら	43.60	0.38	22.30	9.723	0.0847
竹	75.51	0.39	12.88	9.726	0.0502
鶏糞	19.57	1.64	49.68	9.722	0.815

深さ 0〜20 cm の土壌に各バイオ炭を混和し，水稲「イクヒカリ」を栽培した。約 2 週間間隔で 0〜5，5〜10，10〜15，15〜20 cm の各層から土壌試料を採取した。風乾試料を用いた湿式ふるい分けにより，平均重量直径（MWD）および幾何平均直径（GMD）を求めた。土壌の全炭素（TC）および全窒素（TN）は CN コーダーで測定した。pH・EC は土水比 1:5 の上澄み液で測定し，交換性 K 等および収量構成要素も評価した。MWD および GMD は，同一時点・深度の対照平均値との差（ΔMWD，ΔGMD）を算出して比較した。

3 結果と考察

(1) 団粒安定性の時間および深度別応答

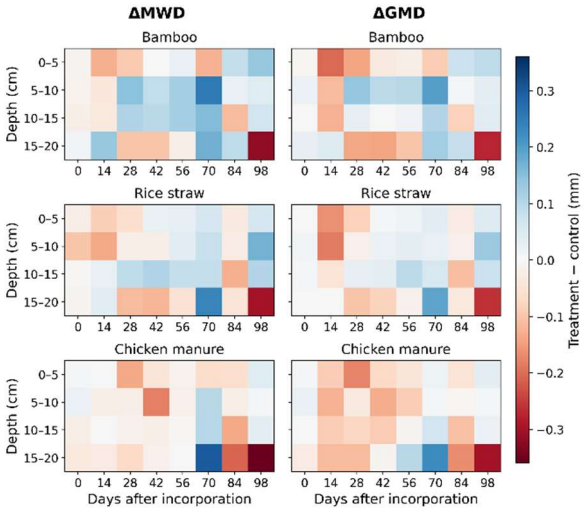


図 1 バイオ炭施用後の経過日数および土壌深度別の団粒安定性指標の変化（施用区平均値－対照区平均値，mm）。左列は ΔMWD，右列は ΔGMD を示す。

竹区では，5～10 cm 層の施用後 28～70 日に MWD および GMD が対照区を上回り，竹・稲わら区では，10～15 cm 層の施用後 28～56 日に MWD が対照区を上回った。一方，施用後 84 日の 10～15 cm 層では，全施用区で両指標が対照区を下回るなど団粒安定性の応答は時期・深度によって異なった。また，MWD と GMD で応答が一致しない場合も認められた（図 1）。

(2) 土壌化学性と団粒応答との対応

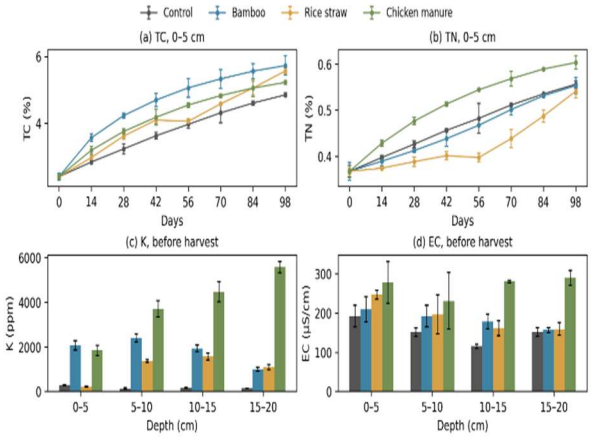


図 2 土壌化学性の処理別応答。（a，b）0–5 cm 層の TC・TN の経時変化，（c，d）収穫前の深度別 K・EC

表層の全炭素（TC）含有率は竹・稲わら区，全窒素（TN）含有率は鶏糞区で高い傾向を示した（図 2）。同一深度・時点でみると，10～15 cm 層 56 日の竹・稲わら区では TC と MWD・GMD が対照区を上回った。一方，施用後 84 日には，竹区および稲わら区の TC が対照区より高かったものの，両区の MWD および GMD は対照区を下回った。鶏糞区も同層の施用後 84 日に TN 含有率が 0.552%と対照区の 0.506%を上回った一方，両団粒指標は低かった。15～20 cm 層 98 日も全施用区の TC が対照より高い一方，両団粒指標は低かった。したがって，TC や TN の増加が必ずしも団粒安定性指標の上昇に対応するわけではなかった。

(3) 水稲生産性と養分投入条件との関係

平均収量は鶏糞区，竹区，稲わら区，対照区の順であった（図 3）。鶏糞区では総 N 投入量が約 815 kg N/ha と他の施用区より多く，土壌 TN，K および EC も高かった（図 2）。これらの養分条件の違いが収量に関与した可能性があるが，窒素の可給性については今後の検討が必要である。

一方，鶏糞区の MWD・GMD はすべての時期・深度で最も高かったわけではなく，収量の高低と団粒安定性指標の大小は必ずしも一致しなかった。このことから，水稲生産性には団粒安定性だけでなく，養分供給条件なども関与した可能性が考えられる。

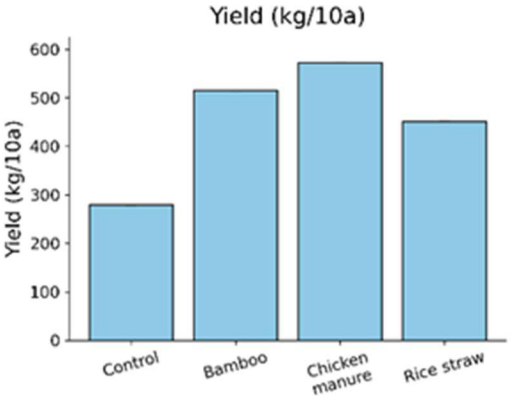


図 3 収量（kg/10a）

4 おわりに

同程度の炭素投入条件下でも，バイオ炭の原料によって土壌物理性，土壌化学性および水稲生産性への影響が異なった。竹・稲わら由来バイオ炭区では，一部の時期・深度で団粒安定性指標が対照区を上回ったが，TC の増加と必ずしも一致しなかった。一方，鶏糞由来バイオ炭区では TN，K および EC が高く，収量も最大であった。今後は，資材由来の炭素・窒素の特性や有機物画分などを解析し，これらの応答の要因を検討する。

謝辞

本研究は，JST SICORP e-ASIA プログラム（JPMJSC23E3）および JSPS 科研費・基盤研究（B）（26K01840）の助成を受けて実施しました。また，圃場利用に際し，本学の本林隆教授ならびに技術職員の松川孝治様にご協力いただきました。ここに記して深く感謝申し上げます。

参考文献

Ghorbani, M. and Amirahmadi, E.（2024）：Insights into soil and biochar variations and their contribution to soil aggregate status – A meta-analysis. Soil and Tillage Research, 244, 106282.

異なるカバークロップを導入した畑地におけるN_2Oフラックスの変動

Variations in N_2O fluxes in fields with different cover crops

河村賢吾[1]・西脇淳子[2]

[1]東京農工大学大学院農学府　[2]東京農工大学大学院農学研究院

要旨(Abstract)

本研究では，マリーゴールドおよびムギをカバークロップとして栽培した畑地において,各処理区におけるN_2O排出の時間変化の違いと環境条件との関係を検討した。7月下旬～10月に地表面N_2Oフラックスを測定した結果，降雨後や高温期にN_2Oフラックスが増加する傾向がみられたが処理区によってピークの時期が異なり，降水量や気温のみではN_2Oフラックスの変動を十分に説明できなかった。今後は，土壌水分，硝酸態窒素濃度，炭素量等を考慮する必要がある。

キーワード：N_2O、カバークロップ、脱窒、温室効果ガス

Key words: N_2O、Cover crops、Denitrification、Greenhouse gases

1. はじめに

N_2O は温室効果ガスの一種であり，成層圏オゾンを破壊する物質でもある（Machefert et al., 2002）。畑地土壌において，マリーゴールドは主にセンチュウ抑制を目的としたカバークロップとして利用されているが，N_2O 発生に関する研究は少ない。一方，ムギは生育中に N_2O 排出を抑制するものの，分解期には排出量が増加することが報告されている（Lussich et al., 2024）。また，N_2O 排出量は土壌条件や気象条件に左右され, その影響には未解明な部分が多い。

本研究では, マリーゴールドおよびムギをカバークロップとして栽培した畑地において, 地表面 N_2O フラックスの時間変化と気象条件との関係を検討した。

2. 方法

調査地は東京農工大学 FM 府中の畑地圃場である。調査は 7 月下旬から 10 月に実施した。90 cm × 230 cm の区画を裸地区，マリーゴールド区およびムギ区としてそれぞれ 1 区画ずつ設けた。各区画内に 3 つの測定プロットを設定し，それぞれのプロットで地表面 N_2O 排出フラックスを 3 回測定した。ガスフラックスの測定にはガス分析計（LI-7820）およびスマートチャンバー（8200-01S, LI-COR Biosciences）を使用した。また，各処理区内にガス採取チューブ（Yanai and Tokida, 2009）を 3 セット設置し, 深さ 10, 20, 30 cm における土壌中 N_2O 濃度を測定した。これらの調査は週に 1 回行った。調査の最初と最後には土壌コアのサンプルを採取し，ガス拡散係数を測定した後，深度別濃度勾配を用いて土壌中のガスフラックスを計算した。土壌環境の測定には，各処理区に 130 cm × 230 cm の区画を設け，地温および土壌水分を測定した。また，2 週間に 1 回土壌試料を採取し, 深度別の硝酸態窒素濃度および C/N 比を測定した。

3. 結果

(1)地表面 N_2O フラックスと降水量の関係

9 月上旬の大きな降水後,マリーゴールド区ではN_2Oフラックスが約0.7 nmol m^{-2} s^{-1} まで上昇した（図 1）。一方，ムギ区および裸地区では，9 月上旬の降雨後の観測では明瞭なピー

クはみられず，その後の継続的な降雨を経て 0.8~0.9 nmol m^{-2} s^{-1} のピークが観測された。このように，降雨後の N_2O フラックスのピークの出現時期は，処理区によって異なった。

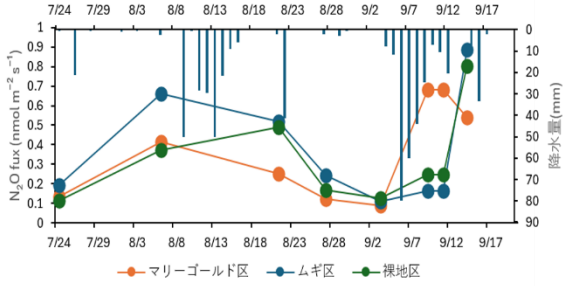


図 1　地表面 N_2O フラックスと降水量の関係

(2) 地表面フラックスと気温の関係

8 月上旬には 31～36℃の高温の日が続き，同時期に全処理区で N_2O フラックスの増加がみられた（図 2）。特にムギ区では，約 0.7 nmol m^{-2} s^{-1} のフラックスが観測された。一方，8 月中旬から下旬には全処理区でフラックスが減少した。9 月上旬には気温が 8 月より低かったものの（22～31℃），各処理区で N_2O フラックスのピークが観測された。

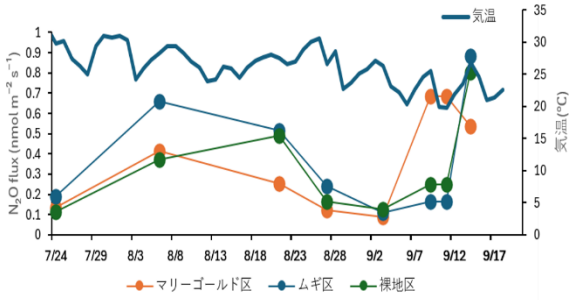


図 2　地表面 N_2O フラックスと気温の関係

4. 考察

降雨後の N_2O フラックスの増加には，土壌水分の増加に伴う酸素供給の低下や，脱窒過程の活発化が関与した可能性がある。一方，9 月上旬の降雨後には，マリーゴールド区で N_2O フラックスの増加が観測されたのに対し，ムギ区および裸地区では，その後の測定時に高い値が観測された。このことから，処理区間の N_2O 発生特性の違いを明らかにするためには，土壌水分状態や硝酸態窒素濃度，炭素量などを併せて考慮する必要がある。

8 月上旬には高温期と N_2O フラックスの増加が重なっており，温度が N_2O 生成に影響した可能性がある。しかし，8 月後半には高温下でもフラックスが減少し，9 月には比較的低温でもピークが観測されたことから，気温のみではフラックスの変動を説明できない。今後は，地温や土壌水分，硝酸態窒素濃度などとの関係を検討する必要がある。

5. おわりに

本研究では，降雨後および高温期に N_2O フラックスが増加する傾向が認められ，降雨後のピーク出現時期には処理区間で違いがみられた。今後は，深度別の体積含水率，硝酸態窒素濃度および土壌中 N_2O 濃度などの結果を組み合わせ，カバークロップの種類による N_2O フラックスの変動要因を検討する。また，根系の発達状況と N_2O フラックスとの関係についても検討する。

参考文献等

Lussich, F., Dhaliwal, J. K., Faiia, A. M., Jagadamma, S., Schaeffer, S. M., and Saha, D.（2024）Cover crop residue decomposition triggered soil oxygen depletion and promoted nitrous oxide emissions. Scientific Reports, 14, 8437, https://doi.org/10.1038/s41598-024-58942-7

Machefert, S. E., Dise, N. B., Goulding, K. W. T., and Whitehead, P. G. 2002. Nitrous oxide emission from a range of land uses across Europe. Hydrology and Earth System Sciences, 6(3): 325–338, https://doi.org/10.5194/hess-6-325-2002

Yanai, Y., & Tokida, T. (2009). Applicability of the gas-permeable membrane to in situ soil gas sampling for the measurement of microbial activity in soil. *Soil Microorganisms*, 63(1), 26–31,

https://doi.org/10.18946/jssm.63.1_26

Lバンド帯における土壌比誘電率の実測値と校正式・モデルの比較

Comparison of Measured Soil Dielectric Permittivity with Calibration Equations and Models in the L-Band

川口麻衣子[1]・小林大樹[2]・登尾浩助[3]・青木伸輔[4]

[1]香川大学大学院農学研究科・[2]NTT アクセスサービスシステム研究所・

[3]明治大学研究・知財戦略機構（生田）・[4]香川大学農学部

要旨(Abstract)：

Lバンド SAR による土壌水分推定では，対象周波数帯における土壌の誘電特性を適切に評価する必要がある。本研究では，豊浦砂および関東ロームを対象として，Lバンド帯の実測値を，既往の TDR 測定に基づく算出値および誘電率モデルによる推定値と比較した。その結果，各値の対応関係は土壌によって異なり，特に関東ロームでモデル推定値と実測値との差が大きかった。

キーワード：Lバンド，土壌水分，誘電率，FDR，誘電混合モデル

Keywords: L-band, soil moisture, dielectric permittivity, FDR, dielectric mixing model

1. はじめに

Lバンド SAR（synthetic aperture radar）による土壌水分推定では，対象周波数帯における土壌の誘電特性を適切に評価することが重要である。土壌誘電率の測定に用いられる TDR（time domain reflectometry）法と FDR（frequency domain reflectometry）法は，測定原理や対象周波数が異なる。

豊浦砂では，複素誘電スペクトルの実測値とモデルとの比較が行われ，高含水条件では試料充填の影響が報告されている（上村ら，2020）。また，モデル推定値には土性や自由水・吸着水が影響することが指摘されている（辻本ら，2022）。一方，性質の異なる土壌について，Lバンド帯の実測値と既往の TDR 測定に基づく算出値，誘電率モデルによる推定値との対応関係は十分に整理されていない。

そこで本研究では，豊浦砂および関東ロームを対象として，導波管法および同軸プローブ法によるLバンド帯の実測値を，既往の TDR 測定に基づく算出値および誘電率モデルによる推定値と比較し，土壌による各値の対応関係を検討した。

2. 方法

対象土壌には豊浦砂および茨城県つくば市で採取した関東ロームを用い，各土壌について 4 段階の体積含水率条件を設定した。試料は所定量の水を添加して十分に混合した後，水分を均一化するため 24 時間静置した。また，各土壌内では乾燥密度ができるだけ一定となるように試料を充填した。

FDR 法による誘電率測定には，Vector Network Analyzer (VNA)を用いて導波管および同軸プローブで土壌中を透過・反射する電磁波に関する周波数領域のインピーダンスを計測した。導波管は Nicholson-Ross-Weir 法，同軸プローブ法では Blackham and Pollard（1997）を用い VNA で得られたインピーダンスを比誘電率に換算した。土壌は重量法により含水条件を調整して VNA により計測をした 960 MHz～1.4 GHz の範囲で得られた比誘電率実部を平均し，各含水条件の代表値とした。比較の参考値として，既往研究の TDR 測定に基づく校正式から比誘電率を算出した。豊浦砂には Miyamoto and Chikushi（2006），関東ロームには Kobayashi et al.（2024）の校正式を用いた。また，Topp 式による算出値を求め

た。さらに，誘電混合モデルとして Mironov モデル（Mironov et al., 2009）を用いた。Mironov モデルについても 960 MHz～1.4 GHz の範囲で比誘電率を算出し，その平均値を用いた。モデル計算に必要な粘土含量には，既往研究で報告された値を用いた（Miyamoto and Chikushi, 2006；Kobayashi et al., 2024）。

3. 結果

各手法およびモデルから得られた体積含水率と比誘電率の関係を Fig. 1 に示す。豊浦砂では，低含水域では各値の差は小さかったが，体積含水率の増加に伴って差が拡大し，高含水域では同軸プローブ法による実測値が最も高く，導波管法による実測値が最も低かった。TDR 測定に基づく校正式から算出した値と，Topp 式および Mironov モデルによる推定値は概ね近い値を示した。関東ロームでは，豊浦砂より各値の差が大きく，Topp 式および Mironov モデルによる推定値は両実測値を上回り，特に導波管法との差が大きかった。同軸プローブ法による実測値は，体積含水率の増加に伴い TDR 測定に基づく算出値に近づいた。

4. 考察

誘電率モデルと実測値の対応が土壌によって異なった要因として，土性や自由水・吸着水の状態の違いが考えられる（辻本ら，2022）。一方，本研究では測定体積や試料の充填状態なども手法間で異なるため，関東ロームで認められた差が土壌特性によるものか，測定条件によるものかは本結果のみでは明確にできない。

また，両手法では測定体積や試料との接触状態が異なり，導波管用サンプルホルダー内の水分再分布や充填状態の不均一性が測定値の差に影響した可能性がある。さらに，誘電率には周波数依存性があるため，今後は対象 SAR の観測周波数，乾燥密度，測定体積および水分分布を考慮し，測定条件による影響と誘電率モデルの適用性を切り分けて検証する必要がある。

5. おわりに

L バンド帯の実測値，TDR 校正式に基づく算出値および誘電率モデルによる推定値の対応関係は，土壌によって異なった。

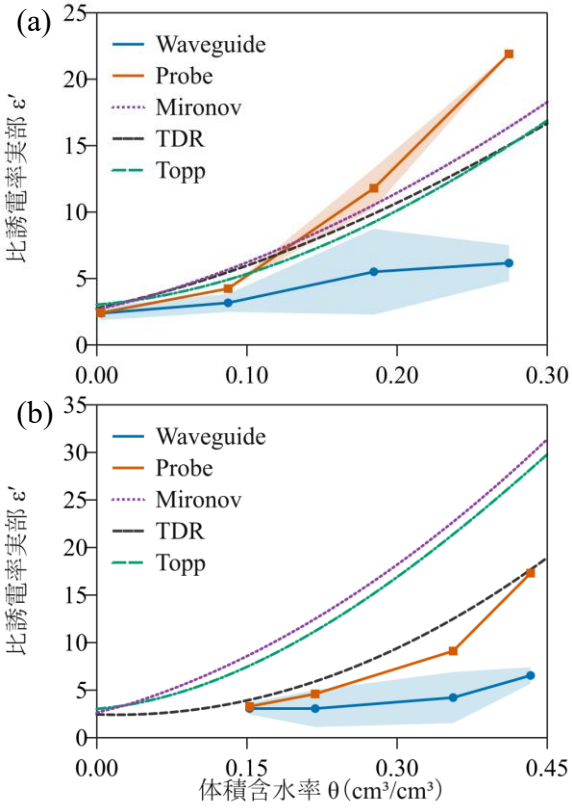


Fig. 1　体積含水率と比誘電率の関係：(a) 豊浦砂，(b) 関東ローム。網掛けは FDR 測定値の周波数間平均±標準偏差を示す。

参考文献

上村将彰・中川啓・宮本英揮（2020）：水分量の異なる不飽和土壌の複素誘電スペクトルの評価．植物環境工学，32(4)，201–207.

辻本久美子・太田哲・藤井秀幸・小松満（2022）：1～36 GHz 帯のマイクロ波に対する湿潤土壌の誘電特性：モデルとその検証．土壌の物理性，151，3–24.

Blackham, D. V. and Pollard, R. D. (1997): An improved technique for permittivity measurements using a coaxial probe. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 46(5), 1093–1099.

Miyamoto, T. and Chikushi, J. (2006): Time Domain Reflectometry Calibration for Typical Upland Soils in Kyushu, Japan. *Japan Agricultural Research Quarterly*, 40(3), 225–231.

Kobayashi, D., Aoki, S., Sato, N., Maruo, Y., Kodaira, S. and Noborio, K. (2024): Estimation of relative permittivity for measuring soil texture-dependent water content by GNSS-IR. *GPS Solutions*, 28, 210.

Mironov, V. L., Kosolapova, L. G. and Fomin, S. V. (2009): Physically and Mineralogically Based Spectroscopic Dielectric Model for Moist Soils. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(7), 2059–2070.

栄養剤としてのスクロース溶液の濃度が土壌中の微生物活動および気泡生成に及ぼす影響

The effect of the concentration of sucrose solution as a nutrient source on microbial activity and bubble formation in soil

吉田　綾[1]・小島悠揮[2]・水津光昭[3]・神谷浩二[2]・大石雅人[4]

[1]岐阜大学大学院自然科学技術研究科・[2]岐阜大学工学部・[3]山梨大学生命環境学部・[4]精研

要旨(Abstract)

バイオクロッギング誘発のための栄養剤として，スクロース溶液を選定し，その濃度が土壌中の微生物活動に与える影響を評価した．異なる濃度のスクロース溶液を用いて作成した飽和土壌試料に対し，X 線 CT による土壌内部観察と TDR による含水状態の経時測定を行った．濃度 0.15 と 0.30 mol L^{-1} で早期に大量の気泡が生成された一方，0.99 mol L^{-1} 以上の濃度では気泡が生成されなかった．以上から，比較的低濃度で微生物活動が急速に活発になること，また 0.99 mol L^{-1} は不活化濃度であることが明らかになった．

キーワード：バイオクロッギング，スクロース溶液濃度，微生物活動

Key words: bioclogging, concentration of sucrose solution, microbial activity

1. はじめに

凍結工法は人工的な地盤凍結で地下水を止水する工法だが，地下水流速が速いと凍結が阻害される．この場合，凍結前に薬液注入で地盤透水性を下げるが，薬液の流出や残存が環境面から好ましくない．一方で，土中に微生物が繁殖すると透水性が低下するバイオクロッギングが知られている．これを人為的に発生させられれば，低環境負荷の透水性低下が実現できる．

吉田ら（2026）は水流下の土壌にスクロース溶液を注入し，バイオクロッギングによる透水性低下を確認した．しかし，その過程においてスクロース溶液が微生物に高い浸透圧を与え，不活化状態に陥る期間が生じた．そこで本研究では，スクロース溶液の濃度が土中の微生物活動に及ぼす影響を評価し，微生物を活発化する濃度範囲と不活化に至る濃度を明らかにすることを目的とした．

2. 実験材料と方法

本研究では，微生物活動を土壌内部に生成される気泡量を基に評価した．土壌は真砂土（砂分 97%）を，スクロース溶液は 0.00, 0.15, 0.30, 0.63，0.99，1.37，2.66 mol L^{-1} に調整したものを用意した．これらを用いて 7 種類の飽和土壌試料を作製し，X 線 CT による土壌内部観察と TDR による含水率の経時測定を行った．試料の作製では，X 線 CT と TDR でそれぞれ異なる寸法のカラムを用いた．真砂土とスクロース溶液を混合し，X 線 CT 用は内径 10 mm，高さ 20 mm のカラムに充填した．TDR 測定用は内径 54 mm，高さ 150 mm のカラムに高さ 60 mm まで試料を充填した後，さらにスクロース溶液を 60 mm 湛水させた．これらのカラムを 25℃の恒温室で 1 週間養生した．

X 線 CT は X4 POSEIDON で，養生 0，1，3，7 日目に撮影した．撮影条件は，管電圧 100 kV，管電流 200 μA，ボクセルサイズ 7.21 μm とした．撮影画像は ImageJ を用いて前処理をした．円形 ROI により解析範囲を設定し，メディアンフィルタ（10 pixel）をかけた．その後，輝度値のヒストグラムから気泡と判断される輝度範囲を決定し，Python で自作したプログラムで分節化した（図 1）．最後に気泡のボクセル数と

ROI 内の全ボクセル数との比率を気泡率として算出した.

TDR による測定は，プローブをカラム底部から挿入した. スクロース溶液の比誘電率は濃度依存するため，それを考慮した mixing モデル（Kojima et al., 2020）で含水率を決定し，実験開始時の含水率からの減少量を算出した.

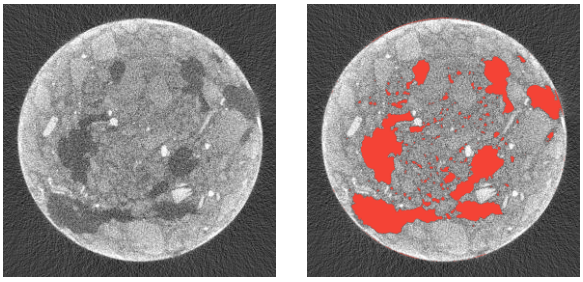


図 1　X 線 CT 撮影で得られた画像（左）と画像処理後の画像（右）

3. 結果と考察

図 2 に X 線 CT 画像から計算した気泡率を示した.　Day 1 は気泡率の増加は見られなかったが，濃度 0.15 と 0.30 mol L^{-1} では Day 3 に 0.15 と 0.09 cm^3 cm^{-3} まで, 0.63 mol L^{-1} では Day 7 に 0.13 cm^3 cm^{-3} まで増加した. また Day 7 では濃度 0.15，0.30 および 0.63 mol L^{-1} でそれぞれ 0.16，0.14 および 0.13 cm^3 cm^{-3} であった. 微生物により微細気泡が生成されたためと考えられる. これらのカラムでは，目視でも気泡の発生が確認された. 濃度 0.00，0.99，1.37，2.66 mol L^{-1} では，期間中変化は見られなかった. 0 mol L^{-1} では栄養剤不在のため微生物活動が促進されなかった，0.99，1.37，2.66 mol L^{-1} では, 微生物が不活化状態に陥ったと考えられる. 以上より，微生物活動の活発化には高濃度ほど有効とは限らず, 0.15～0.30 mol L^{-1} 程度の比較的低濃度の条件で, より早く活発な活動が生じることがわかった. Luciana et al.（2006）は培地を用いた実験でも比較的低濃度で微生物活動が活発となることを報告しており, 土壌中でも同様であることがわかった.

気泡生成は，TDR による含水率変化からも確認された（図 3）. 濃度 0.15 と 0.30 mol L^{-1} では Day 2 から含水率が急激に減少し，それぞれ −0.09 および−0.07 cm^3 cm^{-3} となった. また，0.63 mol L^{-1} では Day 3 から減少し，−0.06 cm^3 cm^{-3} となった. X 線 CT では 0.15 mol L^{-1} で気泡率が最大となったのに対し，TDR では 0.30 mol L^{-1} で減少量が最大となった. この違いは，気泡の一部が土壌外へ放出されたためと考えられる. 以上より，0.15～0.30 mol L^{-1} 程度の濃度範囲が有効である可能性が示された.

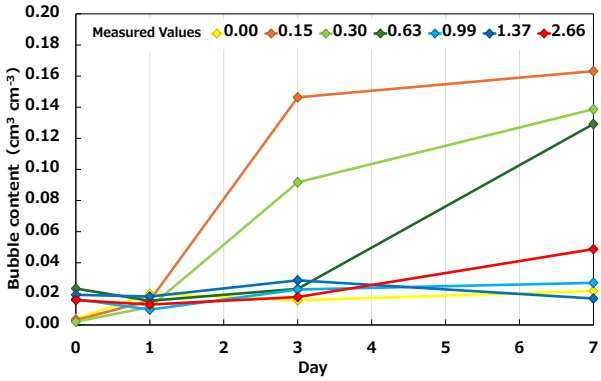


図 2　X 線 CT による各カラムの気泡率

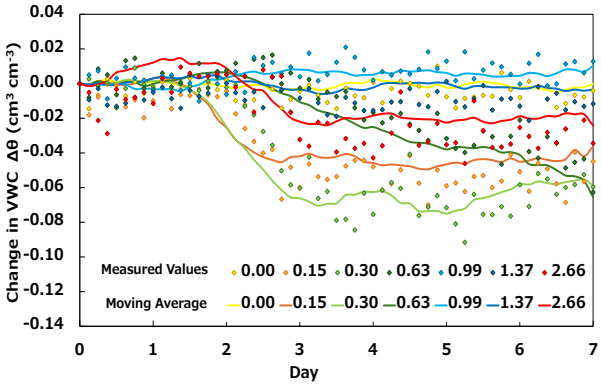


図 3　TDR による含水率の減少量

4. おわりに

微生物活動が活発となるスクロース溶液の濃度範囲および不活化に至る濃度を明らかにした. その結果，比較的低濃度の範囲で微生物活動が促進された.　一方で，0.99 mol L^{-1} 以上は不活化濃度であることがわかった. バイオクロッギングには気泡生成に加えバイオフィルムの形成も寄与するため, 今後は溶液濃度がバイオフィルム形成に与える影響を明らかにする.

【参考文献】吉田ら. 2026. 農業農村工学会 2026 年度大会講演会要旨集 S-27; Kojima et al., 2020. Cold Reg. Sci. Technol. 174:103060; Luciana et al. 2006. Res. Microbiol. 157:867-875.

間断灌漑水田における稲わらバイオ炭施用が土中 CH_4・CO_2 濃度と地表面放出に及ぼす影響

Effects of rice straw biochar application on CH_4 and CO_2 concentrations in soil and surface emissions in a paddy field under alternate wetting and drying water management

山中志音[1]・登尾浩助[2]・西脇淳子[3]

[1] 東京農工大学大学院農学府　[2] 明治大学研究・知財戦略機構（生田）　[3] 東京農工大学大学院農学研究院

要旨(Abstract)：

間断灌漑（AWD）水田における CH_4・CO_2 動態へのバイオ炭施用の影響を評価するには，土中 CH_4・CO_2 濃度と地表面放出の双方を把握する必要がある。本研究では，施用の有無による両者の違いを明らかにすることを目的とした。深度別のガス濃度とフラックスを測定した結果，施用区で CH_4 濃度が高い時期がみられた一方，フラックスの処理間差は濃度ほど明瞭ではなかった。

キーワード：間断灌漑，稲わらバイオ炭，水田土壌，CH_4，CO_2

Key words: AWD, rice straw biochar, paddy soil, CH_4, CO_2

1. はじめに

水田では，落水によって CH_4 放出が抑制される一方，N_2O 放出が増加する場合があり，間断灌漑（AWD）では両ガスの放出にトレードオフが生じ得る（Zou et al., 2005）。また，稲わらバイオ炭施用による CH_4 放出への影響は施用後の年次によって異なる（Liu et al., 2025）。土中ガス濃度は土壌内での生成, 消費および移動を反映する一方, 地表面フラックスは大気との正味のガス交換を示す。したがって，施用による土中濃度の変化が放出に及ぼす影響を評価するには，両者を併せて検討する必要がある。

本研究では，AWD 水田における稲わらバイオ炭施用の有無による土中 CH_4・CO_2 濃度と地表面フラックスの違いを評価し，水位と Eh の推移を踏まえて考察した。

2. 方法

実験は東京農工大学 FM 本町水田（礫質普通灰色低地土）で実施し，「イクヒカリ」を供試品種とした。観測期間は 2026 年 6 月 5 日（移植後 4 日，DAT 4）～9 月 22 日（DAT 113）とし, 本要旨では 8 月 7 日（DAT 67）までの AWD 条件下の結果を示した。常時湛水（CF）と間断灌漑（AWD）水田に稲わらバイオ炭施用の有無を組み合わせた 4 処理区を各 3 反復で設け, バイオ炭は 1 区画（50 cm×50 cm）当たり 400 g（16 t/ ha）施用した。AWD 区では，ほ場水管理システム WATARAS（クボタ）を用い，5 日を基本周期として給水の停止と再開を繰り返した。水位は連続観測値を用い，観測地点と実験区画の地表面の高さの違いを考慮し, 実測水位に基づいて補正した。

土中ガスは埋設型採取管（柳井・常田, 2009）により株間・株直下の 5，10，20 cm 深さから採取した。土中ガスおよび手動クローズドチャンバーで採取したガスの CH_4・CO_2 濃度は, FID および TCD を備えたガスクロマトグラフ（6890N, Agilent Technologies）で分析した。フラックスは, チャンバー内のガス濃度の経時変化から求めた勾配と有効チャンバー高さを用いて算出した。勾配の算出には，オートチャンバーでは指数関数の初期勾配を, 手動チャンバーでは直線回帰の勾配を用いた。土中濃度は株間の有効値が 2 反復以上ある場合に処理別平均を算出した。

酸化還元電位（ORP）は株間の 5，10，20 cm

深さにおいて白金電極を使って測定し，同一深さで測定した地温を用いて標準水素電極基準の Eh に換算した。また，白金電極を刺した地点において，亀裂が比較的少ない地点の 5，10，20 cm 深さで測定した値を使用した。地温・体積含水率は土壌水分センサー（TEROS 12 および 5TE, METER Group）で測定した。

3. 結果と考察

AWD 区では，水位変動に対応する Eh の上昇・低下が複数回認められた（Fig. 1）。このことから，水管理に伴う酸化還元状態の変化が示唆された。ただし，Eh は各深度 1 地点の測定値である。

DAT 32 の 20 cm における土中 CH_4 濃度は，バイオ炭施用区で約 6.8×10^4 ppm，無施用区で約 1.7×10^4 ppm であった（Fig. 2）。一方，地表面放出フラックスでは，土中濃度ほど明瞭な処理間差はみられなかった（データ未掲載）。Liu et al.（2025）も，AWD 下ではバイオ炭施用区と無施用区の積算 CH_4 放出量に有意差を認めていない。ただし，本研究の結果のみからバイオ炭による放出抑制効果を判断するのは早計である。

土中 CO_2 濃度は，両区とも 20 cm で 5 cm より高い傾向を示した（Fig. 3）。バイオ炭施用区の DAT 39 では，5 cm の CH_4 濃度が低下した一方（Fig. 2），同日の土中 CO_2 濃度は 10，20 cm でそれぞれ約 6.0×10^4，7.1×10^4 ppm を示した（Fig. 3）。今後は，Xu et al.（2016）を参考に，同一区画・同時期の濃度と地表面放出フラックスを対応づけ，地温や体積含水率との関係を解析する。さらに，酸化還元状態に伴う窒素変換との関連を検討するため，N_2O 動態と土壌無機態窒素を併せて解析する。

謝辞
本研究は，JST SICORP e-ASIA プログラム（JPMJSC23E3）および JSPS 科研費・基盤研究（B）（26K01840）の助成を受けて実施しました。また，圃場利用に際し，本学の本林隆教授ならびに技術職員の松川孝治様にご協力いただきました。ここに記して深く感謝申し上げます。

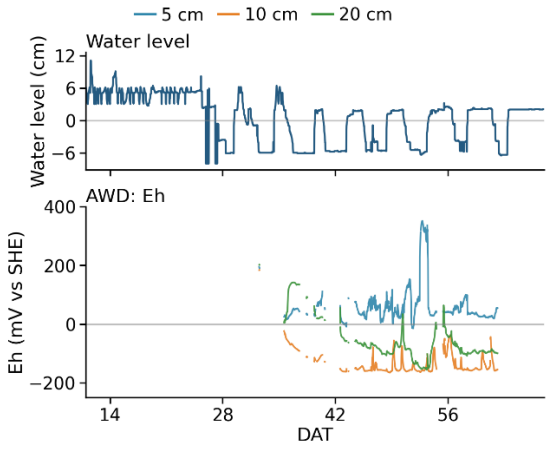


Fig. 1　AWD 区における水位と土壌 Eh の経時変

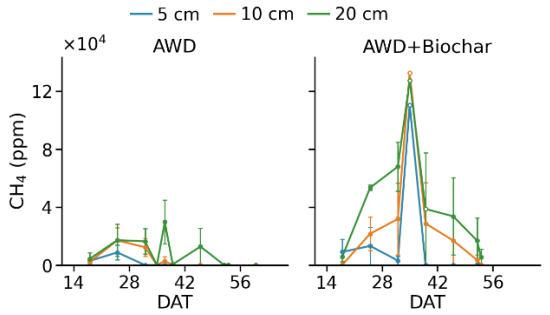


Fig. 2　AWD 区および AWD＋Biochar 区における土中 CH_4 濃度の経時変化

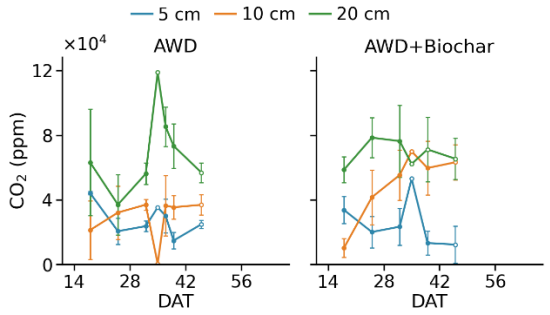


Fig. 3　AWD 区および AWD＋Biochar 区における土中 CO_2 濃度の経時変化

参考文献
Xu, X., Wu, Z., Dong, Y., Zhou, Z., and Xiong, Z.（2016），Effects of nitrogen and biochar amendment on soil methane concentration profiles and diffusion in a rice-wheat annual rotation system，Scientific Reports，6，38688.
Zou, J., Huang, Y., Jiang, J., Zheng, X. and Sass, R. L.（2005），A 3-year field measurement of methane and nitrous oxide emissions from rice paddies in China: Effects of water regime, crop residue, and fertilizer application，Global Biogeochemical Cycles，19（2），GB2021.
柳井洋介・常田岳志（2009），ガス透過性膜を用いた土壌ガス採取による土壌微生物活性の原位置計測の可能性，土と微生物，63（1），26–31.
Liu, C., Chen, T., Zhang, F., Han, H., Yi, B., Meng, J., Chi, D. and Ok, Y. S.（2025），Engineered biochar effects on methane emissions and rice yield under alternate wetting and drying in paddy soils，Environmental Technology & Innovation，38，104133.

灌水量がヤシガラ培地内の水分動態に及ぼす影響

Effects of Irrigation Amount on Water Dynamics in Coconut Coir Substrate

井林凉哉[1]・臼木美紅[1]・吉岡尚寛[2]・伊東雄樹[3]・青木伸輔[1]

[1]香川大学農学部・[2]香川大学大学院農学研究科・[3]株式会社大林組技術研究所

要旨(Abstract)：

本研究では，点滴灌水におけるヤシガラ培地内部の体積含水率を 9 地点で測定し，水分分布および経時変化を評価した。その結果，下層ほど体積含水率が高く保持され，灌水量が多い条件では局所的な含水率の増加も認められた。これらの結果から，ヤシガラ培地内の水分動態には，水分の下方移動や排水条件，灌水量が影響することが示唆された。

キーワード：ヤシガラ培地，水分分布，点滴灌漑

Keywords: Coco coir substrate，Water distribution，Drip irrigation

1. はじめに

根域内の水分状態を把握することは，作物への水分供給および効率的な灌水管理を行う上で重要である。土壌の保水性や水分移動特性は，根域内の水分状態を左右する重要な要因である。近年，土壌に代わる栽培培地として，保水性と排水性を併せ持つヤシガラ培地の利用が広がっている。しかし，ヤシガラ培地内部における灌水後の水分分布や経時変化については，限定的にしか明らかにされていない。そこで本研究では，ヤシガラ培地内部の水分分布および時間経過に伴う水分量の変化を測定し，培地内の水分動態を明らかにすることを目的とした。

2. 方法

実験は香川大学農学部キャンパスのハウス内で行った。横幅 34.0 cm，高さ 13.0 cm，奥行き 15.0 cm のプランターを使用し，湿潤なヤシガラ培地を 3 kg 充填した。プランター内の培地を 2 分割し，一方にセンサーを設置した。培地表面から 3.25 cm 地点を上層，6.50 cm 地点を中層，9.75 cm 地点を下層とし，各層に 4.25 cm 間隔で 3 本ずつ，合計 9 本の土壌水分センサー（EC-5, Meter Group Inc, WA, USA）を設置した（図 1）。灌水は，流量による培地内の水分分布の変化を見るため，1 回の灌水量が，0.55 L，0.27 L，0.05 L の 3 条件でそれぞれ 3 日間測定した。測定前の条件を統一するため，測定前日は 1 回あたり 0.27 L の灌水を 1 日 5 回行った。灌水は点滴灌漑をドリッパーに接続したスパイクで固定して地表面上から行った。スパイ



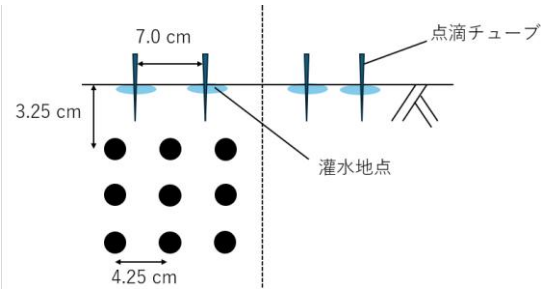


図 1: 実験の様子とセンサーの配置図（黒点がセンサーの位置）

クは地表面に対して垂直になるように 7.0 cm 間隔で培地に 4 本挿入した。データはデータロガー（CR1000X, Campbell Scientific Inc., UT, USA）を用いて 5 分間隔で測定および記録した。灌水は 8 時，10 時，12 時，14 時，16 時の 5 回行った。

EC-5 センサーは電圧値 V（mV）を出力するため，体積含水率 θ（$m^3\ m^{-3}$）を 0.08～0.71 の 9 段階に調製したヤシガラ培地を用いて校正を行った。得られた校正式は以下である。

$$\theta = (-4 \times 10^{-7})V^2 + 0.002V - 0.6291 \quad (1)$$

3. 結果

図 2 に各灌水時の 9 地点における θ の経時変化を示す。横軸は経過時間，縦軸は θ である。中層では 3 地点とも 0.36～0.37 $m^3\ m^{-3}$ で推移した一方，上層は 0.24～0.26 $m^3\ m^{-3}$，下層は 0.45～0.64 $m^3\ m^{-3}$ となり，深度が大きいほど θ が高くなった。灌水前から全灌水後を比較すると，0.05 L が全体的に減少した。また，12 時の灌水時の体積含水率の変化を比較すると，上層は灌水量 0.55 L が 0.27 L のおよそ 4 倍であり，0.05 L は 0.27 L の半分であった。下層の含水率に大きな差はなかったが，0.55 L では下層左側の θ が約 0.45～0.55 $m^3\ m^{-3}$ 高くなった。

4. 考察

各灌水条件において，下層の θ が最も高く，次いで中層，上層の順となった。点滴灌漑では，培地全体に均一に水が供給されるのではなく，点滴位置を中心として局所的に水分が供給される。この時，水分は灌水地点から水平方向よりも垂直方向に速く移動する（Skaggs ら, 2004）ため，下層の θ が他の層に比べて大きくなり，上層の θ は小さくなったと考えられる。中層は水平方向と垂直方向への移動速度が同じため，センサー位置による差がほとんど生じなかったと考えられる。

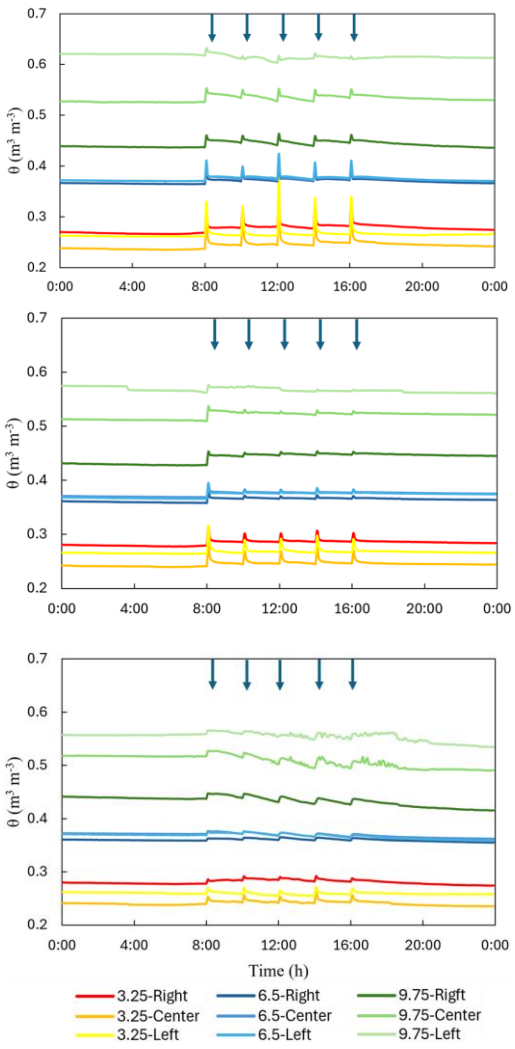


図 2：体積含水率の経時変化（上から灌水一回につき 0.55 L，0.27 L，0.05 L。↓は灌水を指す）

また，下層において地点間の θ にばらつきが認められた。下層では，上層および中層から下方へ移動した水が供給される一方，プランター底部からの排水も同時に生じる。そのため，排水口との位置関係や培地の充填状態の不均一性により，地点間の θ にばらつきが生じた可能性がある。

参考文献等

T. H. Skaggs, T. J. Trout, J. Simunek, and P. J. Shouse (2004): Comparison of HYDRUS-2D Simulations of Drip Irrigation with Experimental Observation.

Interannual Soil Moisture Dynamics and Atmospheric Conditions in a Citrus Orchard under Shielding Mulch Cultivation

Laymar Pudao UMHAO[1]・Masaru SAKAI[1]

[1]Mie University

要旨**(Abstract)**：

Field observed data in a citrus orchard were compared between 2025 and 2026. In 2026, the S.Mulch plot soil water pressure head at 25 cm was below −1,000 cm for 80 % of the time, compared with 40 % in 2025, and the resulting canopy warming (+1.5 °C vs +0.5 °C) was not due to atmospheric demand, since reference evapotranspiration was lower.

キーワード： 土壌水分変化，シールディング・マルチ栽培，カンキツ園地

Key words: soil moisture dynamics, shielding mulch cultivation, citrus orchard

1. Introduction

Shielding mulch (S.Mulch) cultivation improves citrus fruit sugar content through controlled root-zone drying that induces tree water stress. In 2025, canopy temperatures of S.Mulch and surface mulch + drip (SMD) differed slightly, which simulation attributed to compensatory root water uptake (RWU) in the deeper root zone. If the root zone dried more in 2026, this compensation may differ. This study compares S.Mulch drying periods in 2026 with 2025, using canopy temperature T_c relative to SMD as tree response and reference evapotranspiration (ET_o) to separate soil water supply from atmospheric demand, providing soil water conditions for the second-year RWU simulation.

2. Methods

A gravelly soil citrus orchard in Mihama Town, Mie prefecture, has S.Mulch and conventional surface mulch + drip (SMD) plots. Soil water content θ (10, 25, 45 cm), soil pressure head h (10, 25 cm), T_c, and meteorological variables were measured. Surface mulch was applied on June 24, 2025 and June 30, 2026 and kept until harvest on September 16, 2025 and September 14, 2026. Drying periods were June 24 – July 22, 2025 and June 30 – July 19, August 4 – 9 and August 12 – 23 for 2026. Soil water deficit was judged by $h < -1{,}000$ cm. ΔT_c was S.Mulch minus SMD T_c (10:00 – 15:00), and ET_o followed FAO-56 Penman-Monteith.

3. Results and Discussion

3.1 Interannual Soil Moisture Dynamics

Field observed θ and h are shown in Fig. 1. From mulching to harvest, mean θ was lower in 2026 than in 2025 at all depths (0.151 – 0.175 against 0.182 – 0.203 $m^3\ m^{-3}$; Table 1; Fig. 1a). Likewise, h was below −1,000 cm for 85 % of the time in 2026 against 75 % in 2025 at 10 cm, and 80 % against 40 % at 25 cm (Fig. 1b). The driest day of the drying periods was also drier in 2026 (−17,651 and −9,883 cm at 10 and 25 cm; 08/22) than in 2025 (−13,613 and −3,855 cm; 07/20; Fig. 1b), indicating stronger soil water stress.

3.2 Interannual Atmospheric Demand

From mulching to harvest, the atmosphere was less water demanding in 2026: daily ET_o was mostly lower (Fig. 2a), as were cumulative precipitation, ET_o, solar radiation and mean VPD (Table 1).

Despite this, ΔT_c averaged +1.48 °C in 2026 against +0.47 °C in 2025 (Table 1) and was positive on all 77 days of 2026 (up to +3.42 °C) against 78 % of 85 days in 2025 (up to +1.7 °C; Fig. 2b, suggesting that soil water limitation, not atmospheric demand, caused the stronger canopy warming.

Table 1. Mean soil water, atmospheric variables, and ΔT_c from mulching to harvest.

Variables	2025	2026
θ at 10 cm ($m^3\ m^{-3}$)	0.182	0.173
θ at 25 cm ($m^3\ m^{-3}$)	0.203	0.175
θ at 45 cm ($m^3\ m^{-3}$)	0.190	0.151
h at 10 cm (cm)	−7,402	−10,642
h at 25 cm (cm)	−3,207	−4,835
Cum. solar rad. ($MJ\ m^{-2}$)	1,690	1,321
VPD (kPa)	0.89	0.47
Cum. ET_o (mm)	376	294
Cum. precipitation (mm)	664	527
ΔT_c (°C)	+0.47	+1.48

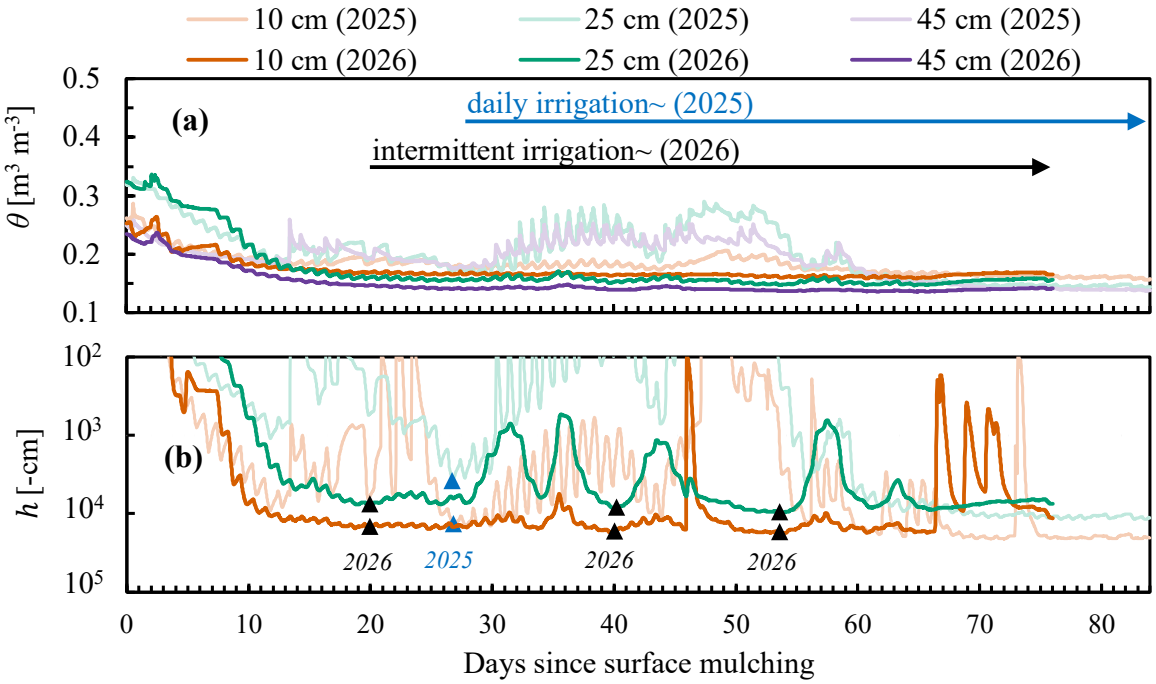


Fig. 1. Soil water content, θ, (a) with irrigation and pressure head, h (b). Arrows: irrigation; triangles: driest day of each drying period.

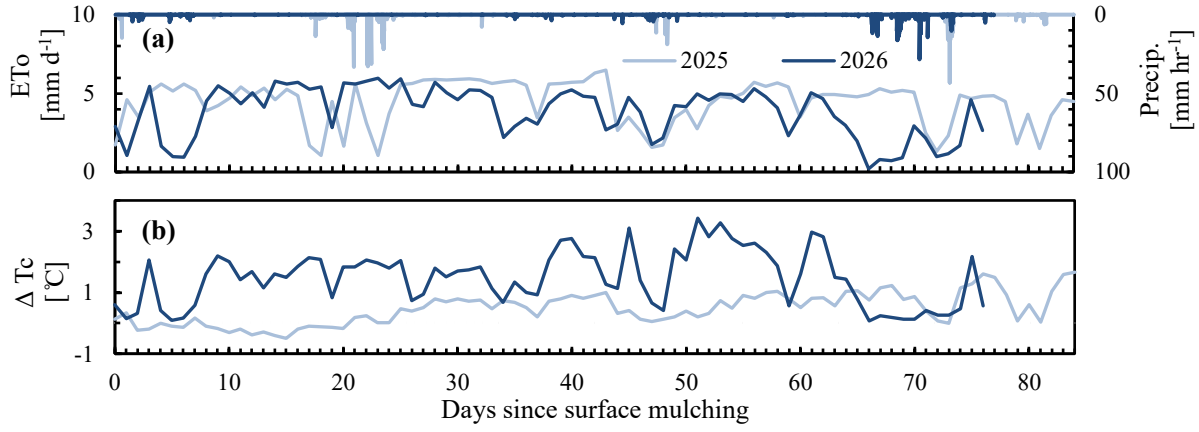


Fig. 2. Daily ET_o with hourly precipitation (a) and ΔT_c (b).

AWD 条件下の水田における水位変動に伴う酸化還元電位と土中メタン濃度の変化

Changes in redox potential and soil methane concentration in response to water level fluctuations in a paddy field under alternate wetting and drying (AWD)

宮本恵理[1]・山中志音[2]・西脇淳子[3]

[1]東京農工大学農学部・[2]東京農工大学大学院農学府・[3]東京農工大学大学院農学研究院

要旨(Abstract)：

間断灌漑（AWD）による水田土壌の酸化還元状態と CH_4動態の変化を検討するため，土壌 Eh の連続観測と深度別土中 CH_4濃度の測定を行った。水位低下に伴う Eh の応答には深度差が認められた。また，AWD 区では常時湛水区に比べ土中 CH_4濃度が低く，特に浅層ほど早期に低濃度化する傾向を示した。

キーワード： AWD，メタンガス，酸化還元電位，水田

Key words: AWD, CH_4 gas, redox potential, paddy field

1. はじめに

2024 年度の日本の CH_4排出量のうち，稲作からの排出が 42.0%と最も多く（温室効果ガスインベントリオフィス，2026），その削減が課題となっている。間断灌漑を実施した場合，常時湛水に比べCH_4排出量を 42～45 %削減できることが報告されている（Yagi et al., 1996）。また，CH_4 生成の開始に対応する土壌の酸化還元電位（Eh）として−150～−160 mV が報告されており（Wang et al., 1993），水管理に伴う Eh の変動は CH_4動態を理解する上で重要である。

しかし，間断灌漑（AWD, Alternate Wetting and Drying）に伴う水位変動に対する土壌中の酸化還元環境の応答や土中 CH_4濃度の時間変化については，十分には明らかになっていない。そこで本研究では，AWD 条件下の水田における水稲生育期前期を対象に，高時間分解能で測定した土壌 Eh の水位変動に対する応答と，土中 CH_4濃度の変化を明らかにすることを目的とした。

2. 方法

試験は 2026 年 6 月 1 日から 9 月 22 日にかけて東京農工大学農学部附属フィールドミュージアム本町水田（北緯 35.67°，東経 139.47°）で実施した。水管理条件として間断灌漑（AWD）区と常時湛水（CF）区を設けた。AWD 区では，給水の停止と再開を約 5 日周期で繰り返し，土壌の乾燥状況に応じてほ場水管理システム（WATARAS，クボタ）で給水と給水停止の日数を調整した。ただし，移植直後と出穂前後には 2 週間以上の長期湛水期間を設けた。栽培品種はイクヒカリで，6 月 1 日に移植した。

土中ガスは田面下 5，10，20 cm に埋設した土中ガス採取管から原則週に 1 回採取し，CH_4濃度をガスクロマトグラフ（6890N, Agilent および GC-2010, 島津製作所）で分析した。

酸化還元電位は田面下 5，10，20，30 cm に埋設した白金電極と参照電極間の電位差を測定してデータロガー（CR-3000，Campbell Scientific）に記録し，地温を用いた補正式から 10 分平均で Eh に換算した。地温は田面下 5，10，20 cm に埋設した土壌水分センサ（TEROS 12, METER Group）で 10 分おきに計測し，データロガー（ZL6, METER Group）に記録した。水位は AWD 区設置のオートチャンバーのうち 1 基に付属の水位計の出力電圧を 10 分間隔で記録し，水位に換算した。

3. 結果

6 月下旬から 8 月上旬までの水稲生育前期における AWD 区の水位および深度別土壌 Eh の

経時変化を図 1 に示す。給水停止後の水位低下に伴い，土壌 Eh は深度によって異なる応答を示した。5 cm 深ではおおむね 0 mV 以上で推移し，7 月下旬には顕著な上昇が認められた。10 cm および 30 cm 深では低い電位で推移する期間が長かったが，水位低下時に一過性の Eh 上昇が観測された。一方，20 cm 深では約 −150 mV から 600 mV 程度までの急激な上昇が繰り返し観測された。

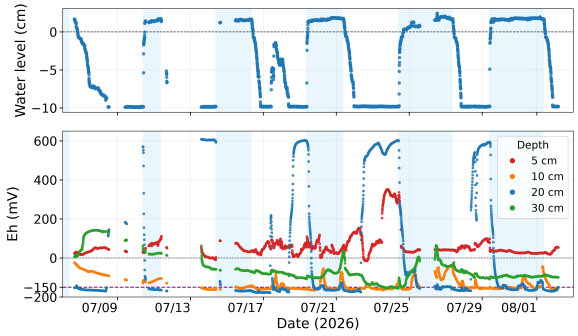


図 1　AWD 区の水位と Eh 変化

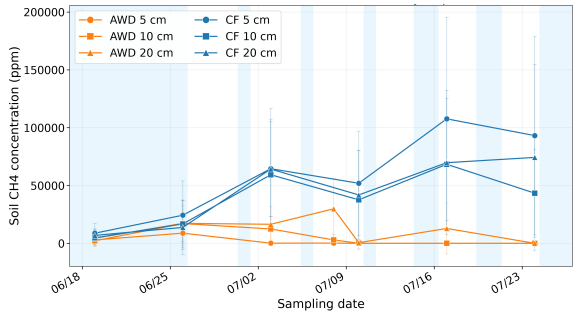


図 2　AWD 区および CF 区の深度別土中 CH_4 濃度

AWD 区および CF 区の深度別土中 CH_4 濃度の経時変化を図 2 に示す。CF 区では 7 月以降，いずれの深度でも高い CH_4 濃度を示したのに対し，AWD 区では低濃度で推移する傾向が認められた。特に AWD 区の 5 cm 深では 7 月上旬から CH_4 濃度が大きく低下し，10 cm 深でも 7 月中旬には低濃度となった。一方，20 cm 深では 7 月中旬以降も一時的に濃度が上昇するなど，浅層とは異なる変動を示した。

4. 考察

土壌 Eh は，5 cm 深ではおおむね 0 mV 以上で推移したことから，浅層で比較的酸化的な環境が維持されていた可能性がある。一方，10, 20 cm 深では約−150 mV まで低下した Eh が給水停止後に一時上昇する様子が観測された。これは，AWD による水位低下が土壌の酸化還元状態を一時的に変化させ，CH_4 生成に適した還元的環境の持続を妨げた可能性を示唆する。ただし，給水停止時の 20 cm 深での Eh の大幅な上昇については，電極周辺の土壌の亀裂を介した酸素供給や測定系などの影響も考えられるため，慎重に検討する必要がある。

土中 CH_4 濃度は，CF 区ではいずれの深度でも増加傾向を示し，連続湛水に伴う還元的な環境の維持が関与した可能性が考えられる。一方，AWD 区では CF 区に比べて低濃度で推移し，特に浅層ほど早期に濃度が低下した。このことから，AWD に伴う土壌への酸素供給によって還元状態が緩和され CH_4 生成が抑制された可能性がある。ただし，CH_4 濃度には生成だけでなく移動や消失も関与しているため，生成抑制以外のプロセスも寄与している可能性がある。

5. おわりに

水稲生育前期の AWD では，水位低下に対する土壌 Eh の応答に深度差が認められ，土中 CH_4 濃度は CF 区より低く推移した。今後は，土壌の酸化還元状態と CH_4 の生成・酸化・輸送過程の関係を検討する必要がある。

謝辞

測定にご協力いただいた研究室の皆様，圃場管理にご尽力いただいた本学の本林隆教授，技術職員の松川孝治様に深く感謝申し上げます。本研究は JST SICORP e-ASIA プログラム（JPMJSC23E3）および JSPS 科研費・基盤研究（B）（26K01840）の助成を受けました。

引用文献

温室効果ガスインベントリオフィス（2026）：日本国温室効果ガスインベントリ報告書 2026 年．国立研究開発法人国立環境研究所

Wang et al. (1993) Soil Sci. Soc. Am. J., 57(2): 382-385.

Yagi et al. (1996) Global Biogeochem. Cycles, 10(2): 255-267.

不均質土壌のバルク熱特性を決定可能なサーモ TDR センサのデザイン検討

Design considerations of a thermo-TDR sensor for estimating bulk thermal properties in heterogeneous soils

鈴置 桃果[1]・小島 悠揮[1]・神谷 浩二[1]

[1]岐阜大学工学部

要旨(Abstract)

本研究では，不均質土壌のバルク熱特性の推定精度向上を目的に大型サーモ TDR センサへの多点温度測定の導入について数値解析で評価した．多点化によって 1 回の測定で礫との位置関係が異なる複数の温度測定点から熱応答を取得でき，各測定点の熱伝導率および体積熱容量の推定値には顕著な違いが生じた．一方，これらの推定値を平均することで，バルク熱特性の真値に近づくことが確認された. また, 本解析ケースでは 3 点以上で測定点数による大きな差は見られず, 3 点または 5 点の採用が有効である可能性が示された.

キーワード：サーモ TDR センサ，体積熱容量，熱伝導率，不均質土壌

Key words: thermo-TDR sensor, volumetric heat capacity, thermal conductivity, heterogeneous soils

1. はじめに

近年, リモートセンシングによる土壌特性の広域推定が進められている. その推定精度を検証する地上計測法の一つとしてサーモ TDR センサが用いられる. 従来のセンサは小型で測定範囲が限られるため, 礫などを含む不均質土壌ではバルク熱特性を正確に推定できない. この問題に対し，鈴木（2025）はサーモ TDR センサの大型化により複数回の測定値の平均がバルク熱特性に近づくことを示した．一方で，個々の測定値は礫位置に影響を受け, ばらつきが生じた．そこで，ロッド内に複数の温度測定点を設けることで, 礫との位置関係が異なる地点の熱応答を一度に取得し, 測定ごとの変動を抑えられると考えた.

よって本研究の目的は, 不均質土壌のバルク熱特性の推定に多点温度測定を取り入れ, 数値解析により推定精度向上が可能かつ最適な温度測定点の数を検討することである.

2. 実験方法

偏微分方程式ソルバ FlexPDE を用いた 3 次元熱伝導解析から，多点温度測定における測定点の最適な数および配置を検討した. モデルの土壌領域は 100 mm×100 mm×100 mm とし，中心に大型サーモ TDR（ロッド長 100 mm，間隔 15 mm，直径 3 mm）（**図 1**）を配置した．中央のロッドを 240 W m^{-1} で 20 秒間発熱させ，両側のロッド内に 10 mm 間隔で 9 点の温度測定点を設けて熱応答を測定した. 今回は作成したモデル内に直径 30mm, 20mm, 10mm の礫をそれぞれ 1, 2, 5 個ずつランダムに配置したケースで検討を行った. 解析の熱特性として，熱伝導率は土壌 0.54 W m^{-1} K^{-1}, 礫 5.24 W m^{-1} K^{-1}, 体積熱容量は土壌 2.27 MJ m^{-3} K^{-1}，礫 1.93 MJ m^{-3} K^{-1} に設定し，熱応答結果から線熱源理論により熱特性を求めた. 別途，フーリエ則を用いて得たバルク熱特性の真値と比較して最適な測定点の数および配置を評価した.

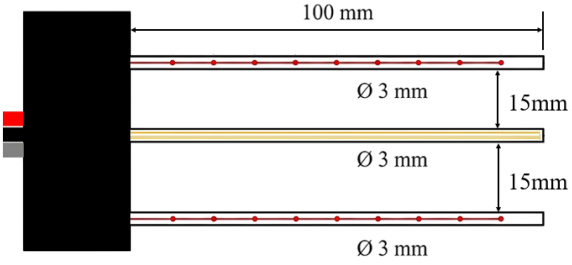


図 1 大型多点熱応答サーモ TDR センサの例

3. 結果

本研究では数値解析ケースのうち，**図 2** の礫配置を対象に熱特性を算出した．

3.1 測定位置と熱特性の関係

ロッド内の各測定点の熱応答から求めた熱伝導率 λ を**図 3**，体積熱容量 *C* を**図 4** に示した．バルク熱特性の真値は黒破線で示した．λ は左ロッドでは全ての測定点で真値を下回り，右ロッドでは深度と共に増加した．*C* は上端側では真値近傍の値を示したが，下端側では値が著しく低下または増加した．

3.2 測定点数とバルク熱特性の関係

図 5 に測定点数ごとの熱特性の平均値を示した．λ は，1 点測定で真値からの誤差が 0.07 W m^{-1} K^{-1} であったのに対し，3 点以上の推定結果は約 0.73 W m^{-1} K^{-1} と概ね真値に近い値となった．*C* は測定点数の増加に伴って真値に近づき、真値からの誤差は 1 点の約 0.09 MJ m^{-3} K^{-1} から，9 点で約 0.02 MJ m^{-3} K^{-1} となった．

4. 考察

熱特性の推定値が大きく変動した要因は，礫がロッド周辺の熱移動に影響したためである．左ロッドでは，ロッド間の礫を介した熱移動の促進により温度上昇が大きくなり，*C* が小さく推定された．その一方で，右ロッド付近の大きな礫は熱を吸収するように作用し，*C* の過大評価につながった．**図 5** では，測定点数を増やすことで推定精度が向上したが，3 点，5 点，9 点の結果に大きな差はなかった．このため，測定精度とセンサ作製コストを考慮すると，3 点または 5 点の採用が妥当と考えられる．

5. おわりに

本研究では不均質地盤を対象に，多点温度測定によるバルク熱特性の推定精度を，1 ケースを用いて評価した．これらの結果から，多点温度測定が不均質地盤のバルク熱特性の推定精度向上に有効である可能性が示された．

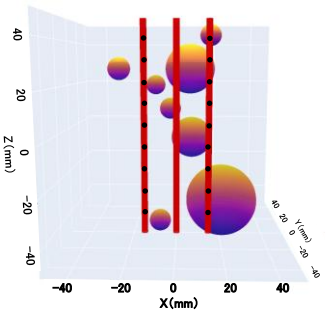


図 2 解析モデル領域

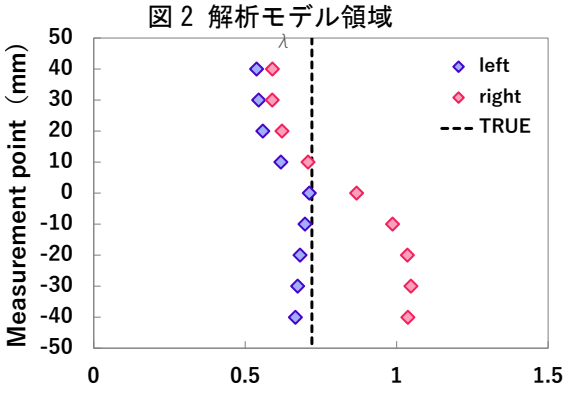


図 3 各測定点の熱伝導率 λ

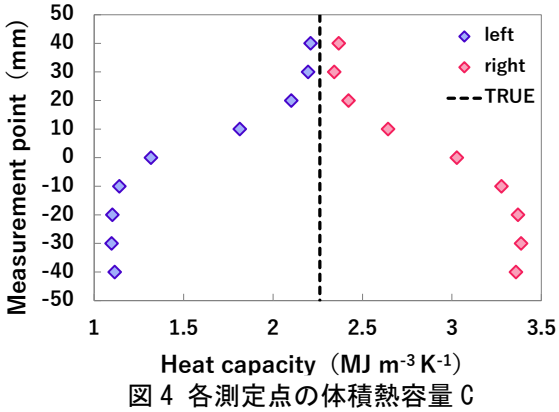


図 4 各測定点の体積熱容量 C

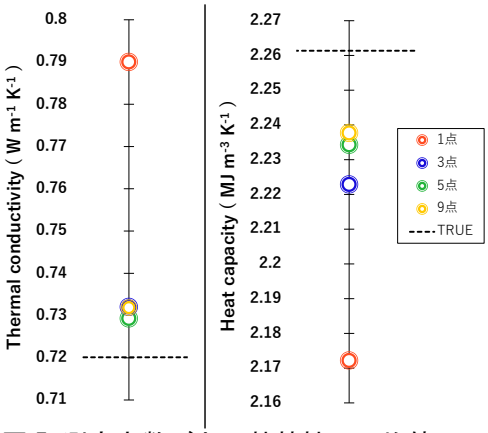


図 5 測定点数ごとの熱特性の平均値

今後は解析ケースを増やし，測定点数と精度の関係についてさらに評価を行う必要がある．

【引用文献】鈴木拓実．2025．岐阜大学大学院自然科学技術研究科 2025 年度修士論文．

水田土壌における 2 種類のバイオ炭施用温室効果ガス動態に及ぼす影響

Effects of two types of biochar on greenhouse gas dynamics in paddy soil

落合美月[1]・宮内藍子[2]・大久保直紀[2]・登尾浩助[3]・西脇淳子[4]

[1]東京農工大学農学部 [2]東京農工大学大学院農学府 [3]明治大学 [4]東京農工大学大学院農学研究院

要旨(Abstract)

本研究では，常時湛水管理下の水田において，稲わらバイオ炭（RSB）および籾殻バイオ炭（RHB）を施用し，土中ガス濃度および地表面ガスフラックスへの影響を比較した。深さ 30 cm の土中 CH_4 濃度は，対照区で 7 月下旬に急増したのに対し，両バイオ炭施用区では低く推移した。一方，CO_2 濃度は RSB 区で高く，対照区で低い傾向を示した。地表面からの CH_4 および CO_2 放出フラックスは，いずれもバイオ炭施用区で対照区を上回った。以上より，バイオ炭施用による土中ガス濃度の低下が，必ずしも地表面からの温室効果ガス放出の抑制につながらないことが示された。

キーワード:バイオ炭 ，水田 ，温室効果ガス

Key words: Biochar , Rice paddy, Greenhouse gases

1.はじめに

世界の温室効果ガス排出量は，過去最高水準にあり，早急な対策が求められている（IPCC, 2022）。日本の農業分野におけるメタン排出量のうち，水田由来のメタン排出は 43.8%を占める（NIES, 2025）。

バイオ炭は，土壌への炭素貯留や土壌肥沃度の改善に寄与することが知られている（IPCC, 2014）。一方，温室効果ガスの排出に及ぼす影響は，バイオ炭の種類や土壌・環境条件によって異なるとされるが，その比較事例は限られている。本研究では，稲わらおよびもみ殻由来のバイオ炭を水田に施用し，土壌ガス濃度と地表面ガスフラックスの経時変化を比較することを目的とする。

2.方法

(1)試験地概要

実験は東京農工大学農学部本町農場の水田圃場（礫質灰色低地土，常時湛水管理）で実施した。供試品種は「イクヒカリ」とした。試験区として，稲わらバイオ炭施用区（RSB），籾殻バイオ炭施用区（RHB），および未施用の対照区（control）の 3 処理を設定した。バイオ炭は 400 g 施用し，深さ 20 cm までの土壌に混和した。各区画は 50 cm × 50 cm とし，3 反復の乱塊法で計 9 区画を配置した。水稲は 2026 年 6 月 1 日に移植した。バイオ炭は RSB 区で 6 月 4 日，RHB 区で 6 月 18 日に混和した。センサー，およびチャンバーの設置後，6 月 5 日より測定を開始した。ただし，RHB 区のチャンバー測定は 6 月 23 日から開始した。観測期間は 2026 年 6 月 5 日から 9 月 22 日までとした。

(2)測定

地表面ガスフラックス（CH_4, CO_2）は自動開閉式クローズドチャンバー法により測定し，1 時間ごとのフラックスから処理別の日平均値を算出した。土中ガス濃度（CH_4, CO_2）は，深さ 5，10，20，30 cm に設置したガス採取管から，毎週金曜日の 9:00～11:00 にシリンジで 10 mL 採取し，バイアルに封入後，ガスクロマトグラフ（GC-2010 Plus, 島津製作所製, BID 検出器）で分析した。土壌酸化還元電位（Eh）および土壌温度は同深度で連続自動測定し，深さ 30 cm の Eh はポータブル Eh 計で週 1 回手動測定した。また，バイオ炭施用前および収穫前に土壌コアサンプルを採取し，CN コーダー（MT-700,ヤナコテクニカルサイエンス）で C/N 比，および 1:5 法で電気伝導度（EC）を測定

した。収穫時には株ごとの収量を調査した。

3.結果と考察

(1)土中ガス(CH_4)

6 月 19 日～7 月 31 日における深層土壌(30 cm)の土中ガス(CH_4)濃度の経時変化を図 1 に示す。

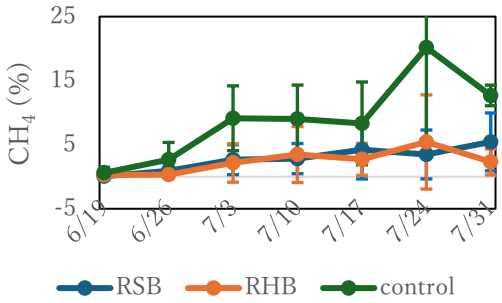


図 1 深度 30cm における CH_4 濃度の経時変化

control 区では，深さ 30 cm および 5 cm(データ未掲載)で濃度が高く，特に 30 cm では 7 月下旬に急増した。一方，RSB 区では全深度で急激な濃度変化は見られず，RHB 区は 7 月中旬まで全深度で最も低い濃度を示した。深さ 30 cm の CH_4 濃度は両バイオ炭施用区で対照区より低く推移したが，地表面CH_4フラックスは施用区で高く，土中濃度の低下は必ずしも CH_4 放出量の減少に対応しなかった。

(2) 土中ガス(CO_2)

6 月 19 日～7 月 31 日の深さ 30 cm における土中 CO_2 ガス濃度の経時変化を図 2 に示す。

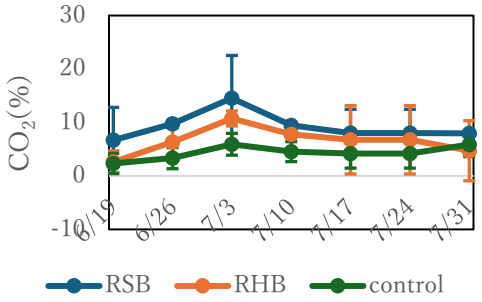


図 2 深度 30cm における CO_2 濃度の経時変化

RSB 区では全深度で CO_2濃度が高く，特に深さ 30 cm で高い値を示した。RHB 区では浅層で control 区と同程度の低い濃度で推移したが，深さ 20 cm，30 cm では高く，7 月中旬以降は 20 cm で RSB 区を上回った。一方，control 区では全深度で最も低い濃度を示した。RSB 区で土中 CO_2濃度が高かったことには，バイオ炭施用に伴う有機物分解や微生物活動の変化が関与した可能性があるが，その要因については今後の検討が必要である。

(3) 地表面ガスフラックス(CH_4, CO_2)

CH_4 フラックスは RSB 区で最も高く，次いで RHB 区，control 区の順であった。また，CO_2 フラックスは，RHB 区，RSB 区，control 区の順に低くなった。両ガスともバイオ炭施用区で control 区を上回り，土中 CH_4 濃度が低かった施用区でも，地表面からの CH_4 放出量は多い傾向にあった。

4.おわりに

本研究では，常時湛水管理下の水田において，バイオ炭施用区は対照区に比べて土中 CH_4濃度が低い一方，地表面フラックスは高い傾向を示した。このことから，バイオ炭施用による温室効果ガス排出への影響を評価するには，土中ガス濃度だけでなく，地表面からの放出量も併せて検討する必要がある。

謝辞:本研究は，JST SICORP e-ASIA プログラム(JPMJSC23E3)および JSPS 科研費・基盤研究(B)(26K01840)の助成を受けて実施しました。また，圃場利用に際し，本学の本林隆教授ならびに技術職員の松川孝治様にご協力いただきました。さらに，実験および測定にご協力いただいた研究室の学生の皆様に感謝申し上げます。

参考文献

IPCC (2014): *AR5 WGIII Report: Mitigation of Climate Change*, Cambridge University Press.

IPCC (2022): *AR6 WGIII Report: Mitigation of Climate Change*, Cambridge University Press.

NIES (2025): *National Greenhouse Gas Inventory Report of Japan*, NIES.

黒ボク土壌における異なるカバークロップによる土壌侵食抑制効果

Effects of different cover crops on soil erosion control in andosols

中川智賀[1]・渡邊裕純[2]・西脇淳子[2]

[1]東京農工大学大学院農学府　[2]東京農工大学大学院農学研究院

要旨(Abstract)

営農的な土壌侵食対策として，2 種のカバークロップ（ムギ・マリーゴールド）をそれぞれ畑地に導入し，人工降雨装置を用いた土壌侵食実験を行った。カバークロップ播種から約 45 日後，65 日後，100 日後に，平均 69.4 mm/h で 60 分の人工降雨実験を行った。マリーゴールド区では全時期を通じて土壌流出量が少なく，表面流出もほとんど認められなかった。一方，ムギ区では，時期によっては裸地区を上回る土壌流出および表面流出が確認された。

キーワード：土壌侵食，カバークロップ，人工降雨実験

Key words: Soil erosion，Cover crops，Rainfall simulation

1. はじめに

近年, 気候変動にともなう集中豪雨の頻発により, 畑作地帯では土壌流亡の被害が顕在化している（農研機構，2020)。土壌侵食は表土の流亡だけでなく, 土壌の有機物や栄養塩類の流出を引き起こし, 地力低下や土壌劣化につながることから，農地保全上の重要な課題である。こうした課題に対する営農的手法の一つとしてカバークロップの利用が挙げられる。地表面の被覆や根系の発達を通じて, 表面流出および土壌流出を抑制する。

実圃場の土壌構造を保持した条件下で, カバークロップによる侵食抑制効果と土壌物理性および植生特性との関係を人工降雨実験によって検討した例は限られている。本研究では黒ボク土畑に 2 種のカバークロップをそれぞれ導入し, 人工降雨実験により高強度降雨下における表面流出および土壌流出の抑制効果を検討した。また，現場透水試験を行い，表面流出と土壌の透水性との関係を検討した。

2. 方法

試験地は東京農工大学 FM 府中の畑地圃場である。裸地区，ムギ区，マリーゴールド区の 3 処理区を設定し，各処理区に複数の実験区画を設けた。各区画には 5%の傾斜を設けた。ムギ区では，リビングマルチ用オオムギ「てまいらず E」（カネコ種苗株式会社）を 15 cm × 25 cm 間隔，7.0 kg/10 a で播種した。マリーゴールド区ではフレンチマリーゴールド「マーチ」（株式会社サカタのタネ）を 15 cm × 15 cm 間隔，0.5 kg/10 a で播種した。いずれも 2026 年 6 月 17 日に播種した。

(1) 人工降雨実験

人工降雨実験は，7 月 21 日～27 日，8 月 18 日～20 日および 9 月 24 日～30 日の各期間に，各処理区で毎月異なる 1 区画を用いて実施した。実験は強風時および自然降雨時を避けた。実験には小型移動式圧力水頭型降雨装置（Jiraratchwaro et al.，2019）を使用した。圃場にステンレス製の枠（33 cm × 48 cm） を打ち込み，斜面下端で流出水を収集した。降雨強度は 70 mm/h に設定し，60 分間の実験で 10 分ごとに流出水を集水した。流出水を炉乾燥（105℃, 24 時間）させ，乾燥後の残留物の質量を土壌流出量とした。実験前には Jiraratchwaro ら（2019）の方法に従い，降雨強度のキャリブレーションおよび降雨分布の均一性評価を行った。

(2) 現場透水試験

現場透水試験は，Mini-Disk Infiltrometer（METER Group，Inc.）を用い，各処理区において圧力水頭−6，−3，−0.5 cm の条件で，それぞれ 3 反復実施した。

3. 結果

(1) 土壌流出量・表面流出量

降雨実験の平均降雨強度は 69.4 mm/h，降雨均一性は 79.4%であった。図 1 に各処理区における総土壌流出量を示す。7 月および 8 月には裸地区で最も土壌流出が多かったが，9 月にはムギ区で最も多くなった。マリーゴールド区では全時期を通して土壌流出量が少なかった。総流出水量（図 2）は，7 月に裸地区とムギ区で同程度であったが，8 月には裸地区，9 月にはムギ区で最も多かった。マリーゴールド区ではいずれの時期においても，ほとんど流出水が認められなかった。

(2) 透水係数

圧力水頭−0.5 cm における透水係数を図 3 に示す。7 月ではマリーゴールド区で最も高く，裸地区，ムギ区の順であった。8 月および 9 月には裸地区で低い傾向を示した。

4. 考察

マリーゴールド区では全時期を通し土壌流出量が少なく，表面流出もほとんど認められなかった。マリーゴールドの導入が土壌侵食の抑制に寄与した可能性が示された。植物体による地表面被覆が雨滴衝撃を緩和したことが一因として考えられるが，被覆率などとの関係については今後の検討が必要である。

一方，ムギ区では 7 月・8 月に土壌流出量が裸地区を下回ったものの，9 月には裸地区を上回った。ムギは 9 月初旬までに枯死しており，生育状態や地表面被覆の変化が関与した可能性がある。ただし，裸地区でも時期によって土壌流出量が大きく変化しており，ムギの枯死だけでこの違いを説明することはできない。

また，表面流出量の大小は，圧力水頭−0.5 cm で測定した透水係数の大小と必ずしも一致しなかった。今後は，降雨前の土壌水分状態や地表面被覆などを確認し，流出特性との関係を検討する必要がある。

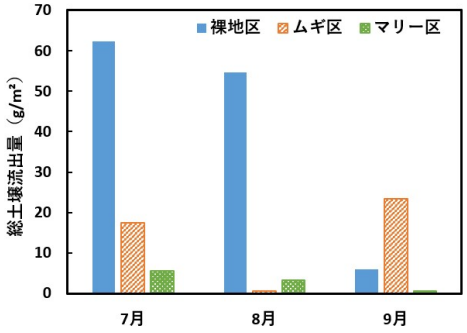


図 1　総土壌流出量

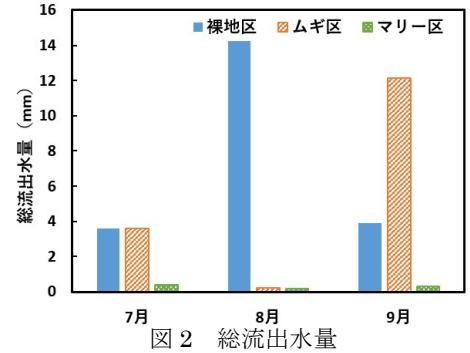


図 2　総流出水量

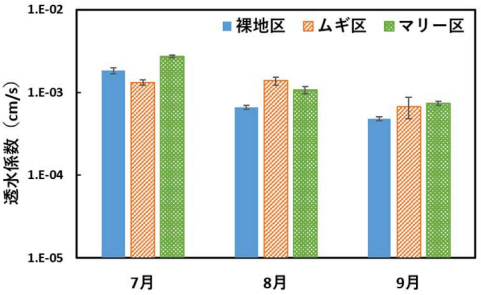


図 3　−0.5 cm における透水係数

5. おわりに

本研究では，黒ボク土畑におけるカバークロップの種類によって，人工降雨時の土壌流出および表面流出の傾向が異なった。特にマリーゴールド区では，全時期を通じて土壌流出量が少なかった。一方，ムギ区では時期による違いが大きく，今後は地表面被覆や降雨前の土壌水分状態などを考慮した検討が必要である。

引用文献

農研機構，2020，土層改良と部分不耕起帯「ドットボーダー・プロテクト」による土壌流亡対策

農研機構，　2006，　最新農業技術事典，　農山漁村文化協会

Jiraratchwaro et al.，　2019，　IDRE journal，　309，　297-302

反応移動モデルによる間断灌漑下の水田土壌における有機物分解と酸化還元状態の評価

Evaluation of Organic Matter Decomposition and Redox Status in Paddy Soil Under Alternate Wetting and Drying (AWD) Using a Reactive Transport Model

岩﨑桃子[1]・田崎小春[2]・斎藤広隆[1]・取出伸夫[3]

[1]東京農工大学大学院・[2]鹿児島大学大学院連合農学研究科・[3]三重大学

要旨(Abstract)：

本研究は，反応移動モデルを用いて，間断灌漑が水田土壌の水分動態や酸化還元状態に与える影響を評価した．常時湛水との比較解析より，落水期における浅層での酸素供給に伴うメタンおよび硫化水素の生成抑制を示し，深部でのメタン生成量の減少を明らかにした．以上より，本モデルが間断灌漑の節水効果や土中の酸化還元変化の評価に有用であることを示した．

キーワード：反応移動モデル，間断灌漑

Key words: Reactive transport model，Alternate wetting and drying (AWD)

1. はじめに

水田では有機物を含む土壌が湛水され，土壌中の酸素が不足することで還元状態となる(図 1)。還元状態では土中で還元反応が生じ，温室効果ガスであるメタンが発生する。水田のメタン発生抑制を目的とした灌漑手法として，間断灌漑(Alternate wetting and drying or AWD)がある。間断灌漑は湛水と落水を繰り返し，定期的に土中に酸素を供給する。そのため，水田土中の還元状態を緩和でき，灌漑水の投入量を減らすことで節水効果も期待できる。

間断灌漑に対しては，現場実験や数値シミュレーションが実施されている。現場実験では間断灌漑の導入により，常時湛水(Continuous flooding or CF)と比較し，収量の減少がない中でメタン排出量が削減する結果を得た（Chidthaisong et al., 2018）。しかし，既往研究では，特定の土壌条件に限定され，数値実験では土中の化学反応まで考慮されていない。様々な土壌条件における間断灌漑の効果を評価するためには数値シミュレーションが有効であり，土中の水分・溶質移動と化学反応を同時に計算できるモデルが重要となる。そこで本研究では，田崎ら(2025)が構築した有機物分解

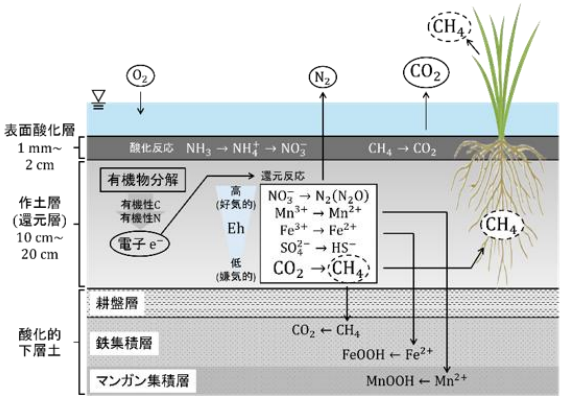


図 1 水田土壌の物質動態について

を伴う物質の土中反応移動モデルを用いて，間断灌漑と常時湛水を比較し，間断灌漑が土中の水分動態，酸化還元状態に与える影響を評価することを目的とした。

2. 反応移動モデル

田崎ら(2025)は，HYDRUS1D-PHREEQC (HP1)を用いて水田土壌の酸化還元反応に適用可能な土中反応移動モデルを構築した。HYDRUS1D で土中の水分・溶質・ガス移動，PHREEQC で有機物の好気・嫌気分解、酸化還元反応，イオン交換，鉱物の溶解・析出などの土中の化学反応を逐次的に計算する。HYDRUS1D において，1 次元土中の水分移動はリチャーズ式、溶質移動は移流分散式，ガス

は拡散式に基づく。また，イネの根の生長・吸水モデルを加えた。水田土中で有機炭素・窒素が好気・嫌気分解し，それぞれ形態変化する。炭素成分については，有機炭素が一次分解反応として微生物バイオマス中の炭素，腐植炭素，炭素元素に分解されると仮定する。炭素元素は直ちに二酸化炭素へ酸化され，その酸化反応で電子が放出され，土中の還元反応に使われる。還元反応は，土中において酸素，硝酸イオン，マンガン鉱物，鉄鉱物，硫酸イオン，二酸化炭素が酸化還元電位(Eh)に従い，順に還元される。窒素成分については，有機窒素が一次分解反応として微生物バイオマス中の窒素，腐植窒素に分解し，アンモニアに無機化されると仮定する。生成されたアンモニアはアンモニウムイオンに電離し，好気条件で硝酸イオンへ変化する。

3. 計算条件

対象とした土壌は一次元鉛直の黒ボク土である。全層を 70 cm とし，0-22 cm を作土層，22-27 cm を耕盤層，27-70 cm を下層土とした。初期条件として作土層に有機炭素・窒素を与えた。境界条件は，上端が最大湛水深 5 cm とした大気境界条件，下端が地下水位と仮定し一定圧力 h=0 cm とした。計算期間は 120 日間とした。常時湛水は全期間を通じて最大湛水深 5 cm を維持し，間断灌漑は計 6 回(20, 30, 40, 50, 80, 90 日目から各 7 日間)の落水期を設定した。

4. 結果・考察

土中反応移動モデルを用いた解析の結果，落水期では上層から酸素が供給され，酸化還元電位の変化があった。酸化還元電位の変化が大きい深さ 2.5 cm と、変化が小さい深さ 10 cm の各種成分の経時変化を示す(図 3)。深さ 2.5 cm では酸素供給から硝化反応が起き，溶解していた鉱物の再析出，硫化水素やメタンの生成が抑制された。深さ 10 cm では酸素供給が十分でなく，常時湛水と変わらない変化をする成分が多い。だが，メタンの生成量は減少することが確認できた。深さ 10 cm においては落水期で

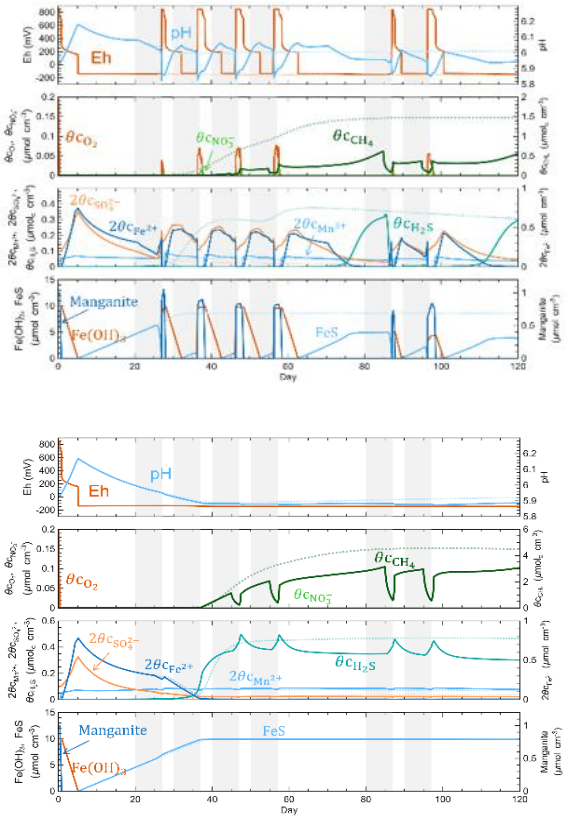


図 2　(上)深さ 2.5 cm(下)深さ 10 cm の各主成分の経時変化(実線:AWD、点線:CF)

水が下方浸透するが，上端から酸素が到達せず，変化が限定的になった。

5. おわりに

以上より，土中反応移動モデルを用いることで間断灌漑の実施による節水効果，O2 供給による土中の酸化還元状態の変化を評価できた。今後は実測データを用いたモデル結果の検証や，速度論的反応を考慮したモデルへの拡張が課題となる。

参考文献等　（明朝体 8P 程度）

田崎小春・取出伸夫・小泉匠平・徳本家康.水田土中の有機物の好気・嫌気分解に伴う物質の形態変化と反応移動のモデル化.土壌の物理性.2025,No.159,p.33-57.

Chidthaisong, A., Cha-Un, N., Rossopa, B., Buddaboon, C., Kunuthai, C., Sriphirom, P., ... & Minamikawa, K. (2018). Evaluating the effects of alternate wetting and drying (AWD) on methane and nitrous oxide emissions from a paddy field in Thailand. Soil Science and Plant Nutrition, 64(1), 31-38.

灌漑に伴う水田内のイオン濃度の水平分布形成
Formation of horizontal distribution of ion concentrations in paddy fields due to irrigation

永田祐麻[1]・西田和弘[1]・吉田修一郎[1]
[1]東京大学大学院農学生命科学研究科

要旨(Abstract)：

灌漑水の流入に伴う田面水の各種イオン濃度の水平分布形成とその時間変化の把握を目的に，水田内の複数地点において，田面水の NO_3^-，Cl^-，K^+濃度を測定した。その結果， 水口からの距離増加に伴い，NO_3^-は濃度低下，Cl^-はわずかに上昇または一定，K^+は上昇・低下の双方が観測された．このように，イオン種によって異なる水平分布が形成されることが明らかになった．

キーワード：灌漑，イオン濃度，空間分布，時間変化

Key words: irrigation, ion concentration, distribution, temporal change

1. はじめに

水田への灌漑水の流入は，水田内に温度や物質濃度の空間分布を形成し，水稲の生育や水田内外の物質動態に影響する．そのため，灌漑に伴う分布形成を理解することは，米の収量・品質向上や環境負荷を軽減する水管理法の確立に極めて重要である．

灌漑に伴う物質濃度の空間分布は，田面水の水平移動と，田面水―土壌水間（および田面水―大気間）における物質の移動（主に濃度差に伴う拡散）によって生じる．一方，土壌水中の濃度は，水稲による吸収，土壌中での形態変化（無機化・有機化，硝化・脱窒等），土壌への吸着の有無により，イオン種によって大きく異なる．そのため，イオン種の違いに応じて田面水には異なる分布が形成されると予測される．

そこで，本研究では，水田内の複数地点において，田面水の各種イオン濃度（NO_3^-，Cl^-，K^+）を測定し，灌漑に伴う水平分布形成とその時間変化を調べた．

2. 方法

調査は，2026 年に東京大学生態調和農学機構の試験水田 1 枚（43 m × 19 m，土壌：黒ボク土，品種：コシヒカリ）を用いて実施した。本圃場は浸透量（と灌漑水量）が約 70 mm d^{-1} 以上と多いため，灌漑に伴う温度や濃度の変化が顕著である．灌漑は水位制御型の自動給水栓により行われた（1 日複数回）．排水口は設けられておらず表面排水は生じない．

圃場内 8 地点（灌漑水含む）で田面水を採水し，各種イオン濃度を測定した。採水は，7/1 から 9/2 にかけて計 8 日実施し，各回とも灌漑終了直後と終了から時間経過時点で採水した．各種イオン濃度はイオンクロマトグラフィーによって測定し，本研究では NO_3^-，Cl^-，K^+を分析対象とした．また，比較・解析用に採水地点の田面水温および水位を連続測定（10 分間隔）した．

3. 結果と考察

田面水温およびイオン濃度の空間分布と時間変化の測定例（7/9 と 8/4）を図 1, 2 に示す．

本圃場の灌漑水温は低いため，水口から離れるほど水温が上昇する分布が形成された．

NO_3^-濃度は，水口から離れるほど低下する空間分布となった．また，時間経過によって全地点で濃度が低下した．これは，①脱窒や水稲の吸収に伴う土壌水中の NO_3^-濃度の低下，②これによる田面水から土壌への下方向の拡散によって生じたと考える．Cl^-濃度は，水口から離れるほどわずかに上昇（7/9）あるいはほぼ

一定（8/4）の分布となった．Cl^-は吸収や形態変化が生じにくいため，主に田面水の蒸発による濃縮によって濃度変化が生じたと考える．K^+の濃度は，水口から離れるほど上昇（7/9）および低下（8/4）の両方の結果が得られた．施肥や吸収，吸着の影響が考えらえるが，支配要因については現在検討中である．

4．おわりに

以上のように，灌漑に伴いイオン種によって異なる水平分布が形成されることが明らかになった．今後，他の各種イオンを含めた解析を行い，これらの形成メカニズムについて詳細に調べる予定である．

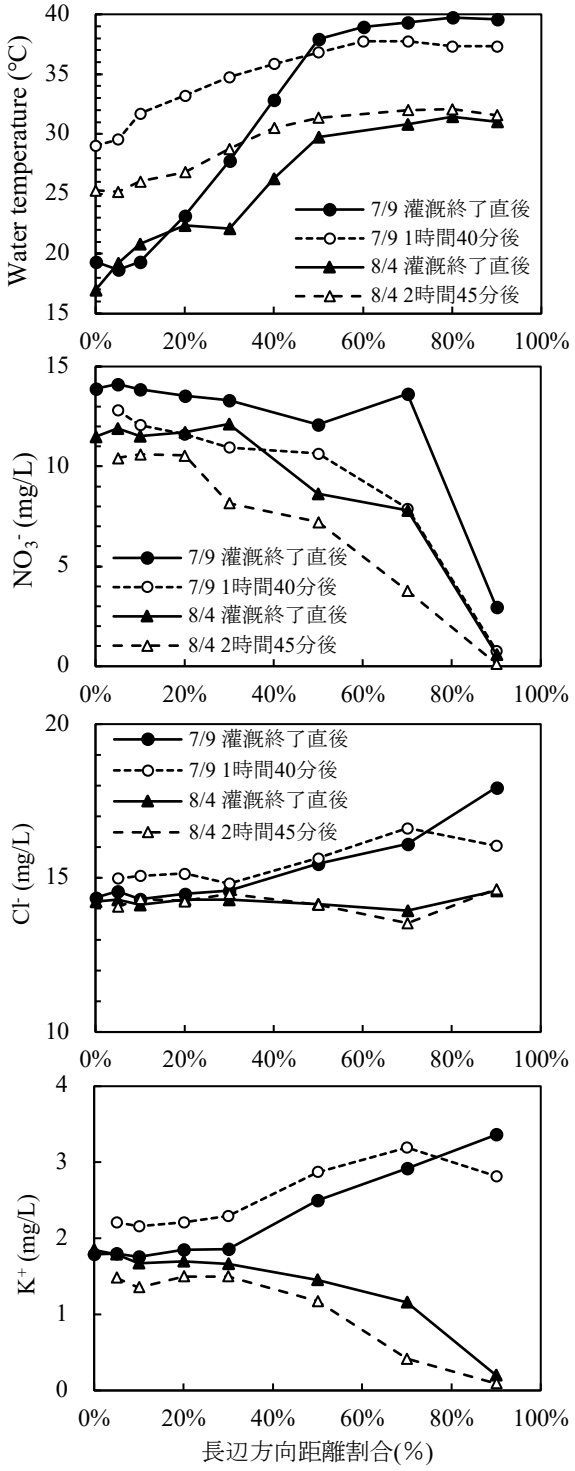


図１　水温・イオン濃度の水平分布

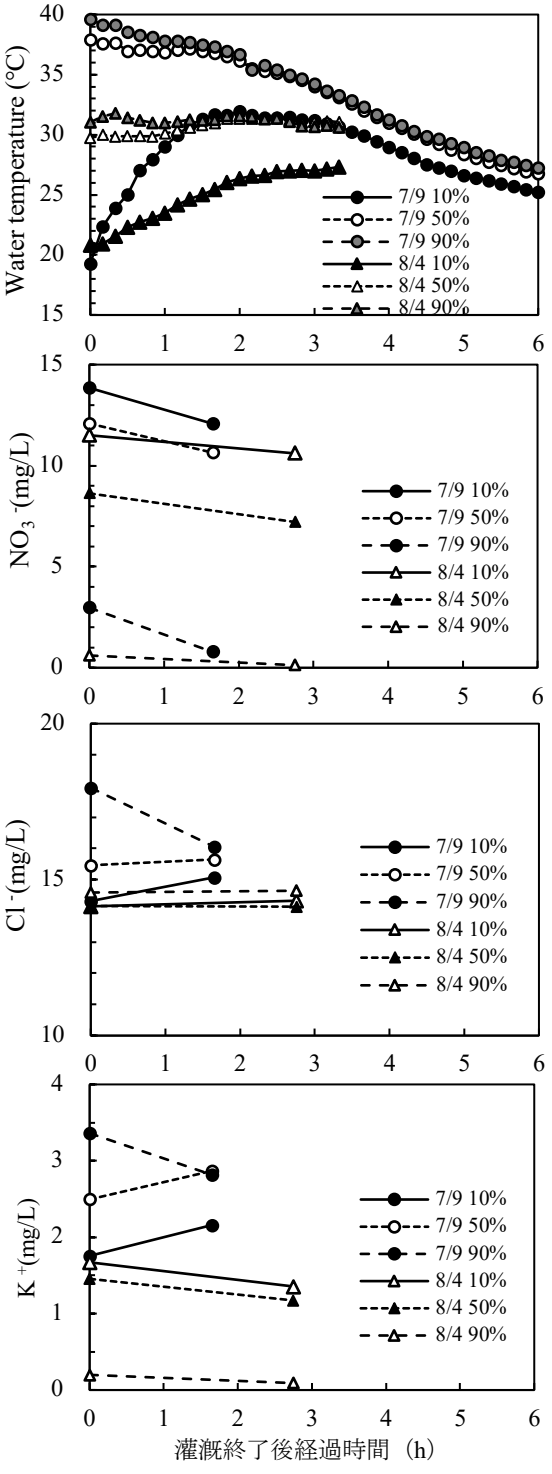


図２　水温・イオン濃度の時間変化

黒ボク土の浸潤実験における浸潤フラックスと水分上昇の関係

Relationship between Infiltration Rates and Water Content Rises of Andosol

尾崎友哉[1]・坂井　勝[1]

[1]三重大学大学院生物資源学研究科

要旨(Abstract)：

本研究では，長野黒ボク土を対象に浸潤実験を行い，異なる浸潤フラックス条件下における水分上昇の特徴を明らかにすることを目的とした。その結果，浸潤フラックスが大きい条件では水分上昇速度のピークが明瞭に 2 つ現れ，小さい条件ではピークが近づき不明瞭になる傾向を示した。この傾向は，団粒間と団粒内の浸潤速度および領域間の水分交換のバランスが変化し，領域間で浸潤の進行にずれが生じたことを表していると考えられる。

キーワード：団粒，黒ボク土，水分移動，浸潤実験，水分上昇

Key words: Aggregates, Andosol, Water movement, Infiltration experiment, water content rises

1. はじめに

団粒土では，団粒内外で水分交換しながら，団粒内では遅い流れ，団粒間では速い流れが発生し，それらによる不均一な流れが様々な物質循環に影響を与えている。尾崎ら（2026）は，団粒が発達した熊本黒ボク土を用いて浸潤実験を行い，浸潤フラックスの増加により水分上昇速度のピークが 1 つから 2 つに変化することを示した。そして，土壌を流速の異なる二領域に分け，領域間の水分交換を考慮した Dual Permeability（DP）モデルを団粒内外の水分移動に適用し数値計算を行うことで，この浸潤実験の結果が，団粒内外の交換を含む団粒間，団粒内の異なる浸潤速度を反映している可能性を示した。団粒の発達度合いが異なる黒ボク土では団粒内外の水分交換速度が異なり，同様な浸潤実験でも異なる水分上昇の特徴を示すことが考えられる。そこで本研究では，長野黒ボク土を対象に浸潤実験を行い，異なる浸潤フラックス条件下における水分上昇の特徴を明らかにすることを目的とした。

2. 試料と方法

試料には長野の牧草地で採土した黒ボク土（2 mm 篩通過分，乾燥密度 ρ_b：0.69 g･cm^{-3}，飽和透水係数 K_s：0.21 cm･min^{-1}）を用いた。長野，熊本黒ボク土（畑土，ρ_b：0.51 g･cm^{-3}，K_s：0.14 cm･min^{-1}）の水分特性曲線を図 1 に示す。両試料とも団粒土の特徴である階段状の水分特性曲線を示した。

内径 7.8 cm，高さ 5 cm のアクリルリングを鉛直方向に 6 個重ね，高さ 30 cm のカラムを作成し，風乾試料（体積含水率θ= 0.25）を乾燥密度 0.69 g･cm^{-3} で充填した。カラム上部に降雨装置を設置し，一定の浸潤フラックス i（0.019, 0.041，0.12 cm･min^{-1}）でカラム中心から半径 2 cm の円周上に滴下した（図 2）。2～5 層目の各リングに 2 本ずつ 2.5 cm 間隔で計 8 本の水分センサ（EC-5）を設置し，浸潤過程の体積含水率を 5 秒間隔で測定した。浸潤前線がカラム下端に達した後，炉乾燥より層ごとの体積含水率を測定し，実験初期と終了時の体積含水率の値

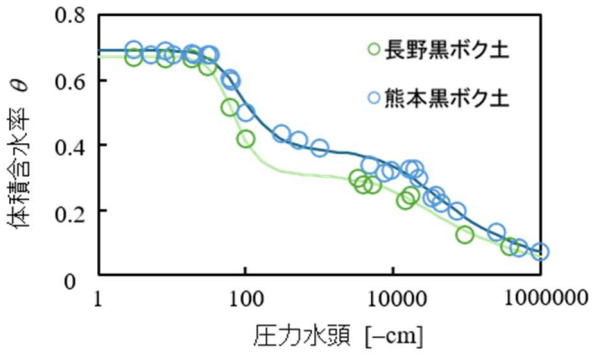


図 1　長野黒ボク土の水分特性曲線

を用いて水分センサ出力値の補正を行った。表 1 に長野および熊本黒ボク土の浸潤実験の条件を示す。

3. 結果と考察

各深度のセンサは同様な傾向を示したが，上部のセンサは上端の滴下のばらつき，下部のセンサは下端の滞留の影響を受けた可能性があるため中央部のセンサの値に注目する。図 3 に各浸潤フラックス i 条件で得られた 11.25 cm 深における体積含水率 θ と 1 分間の水分上昇速度 $d\theta/dt$ の時間変化を示す。θ は，$i = 0.12$ cm·min^{-1} のとき 10 分間で 0.23 から 0.50 へ，$i = 0.041$ cm·min^{-1} のとき 30 分間で 0.25 から 0.48 へ，$i = 0.019$ cm·min^{-1} のとき 60 分間で 0.27 から 0.46 へと変化した。$d\theta/dt$ に着目すると，$i = 0.12$ cm·min^{-1} のとき 27 分で 1 つ目，30 分で 2 つ目の水分上昇速度のピークを示した。また，$i = 0.041$，0.019 cm·min^{-1} と i が小さくなるにつれて，明瞭に見られた水分上昇速度の 2 つのピークが近づき，不明瞭になった。

長野，熊本どちらの黒ボク土においても，浸潤フラックスの大きい $i = 0.12$，0.11 cm·min^{-1} では明瞭な 2 つの水分上昇速度のピークを示した一方で，浸潤フラックスの小さい $i = 0.019$，0.034 cm·min^{-1} では水分上昇速度のピークが 1 つに近づき不明瞭になる同様な傾向を示した。この傾向は，異なる黒ボク土においても，浸潤フラックスの増加に伴い，団粒間と団粒内の浸潤速度および領域間の水分交換のバランスが変化し，領域間で浸潤の進行にずれが生じたことを表していると考えられる。今後は，実験データに DP モデルを用いた数値計算を適用し，浸潤フラックスと $d\theta/dt$ のピークの挙動を再現することで，団粒土毎の特徴として団粒内外の水分交換速度を評価できる可能性がある。

参考文献：尾崎友哉・坂井 勝（2026）団粒土中の水分移動に対する Dual Permeability モデルの適用，（第 75 回）農業農村工学会大会講演会講演要旨集，2－13

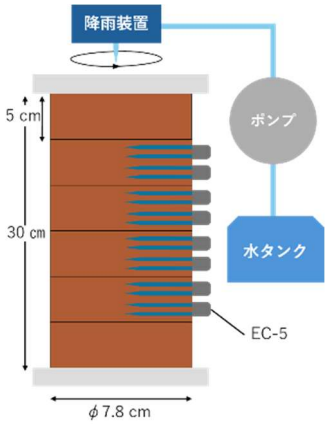


図 2　実験装置の概略図

表 1　長野，熊本黒ボク土の浸潤実験条件

	K_s [cm·min^{-1}]	i 条件 [cm·min^{-1}]
長野	0.21	0.019, 0.041, 0.12
熊本	0.14	0.034, 0.065, 0.11

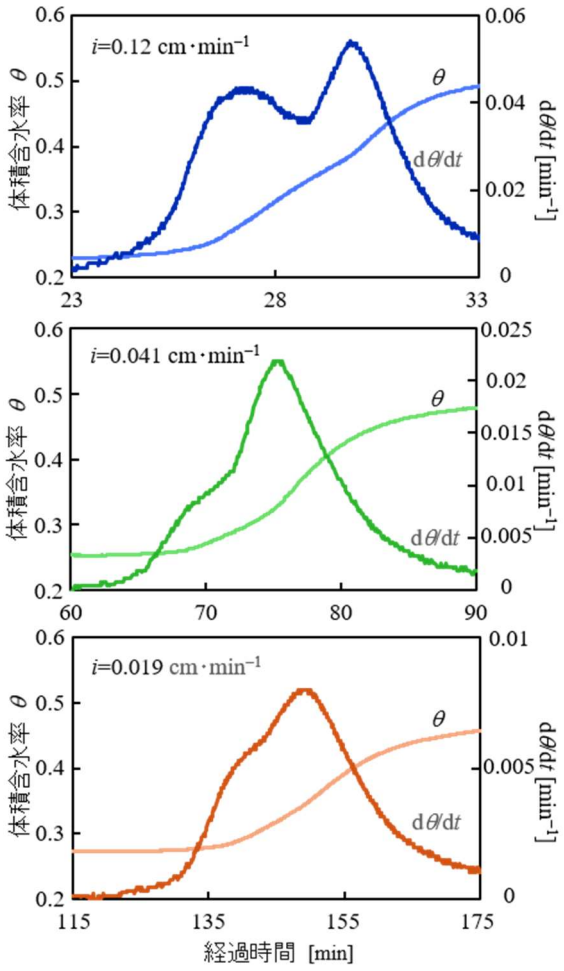


図 3　11.25 cm 深の水分測定結

観測孔水位から補間した圧力水頭分布と深層学習による堤体内高透水性箇所の検出
Deep Learning-Based Detection of High Hydraulic Conductivity Zones in Embankments Using Pressure Head Distributions

本間雄亮[1]・黒田清一郎[1]
[1]農研機構農村工学研究部門

要旨(Abstract)：
ため池堤体内部に高透水箇所である水みちが形成されると堤体の安定性に影響を及ぼす可能性がある。本研究では，HYDRUS による数値解析結果を用いて，堤体内部の圧力水頭分布と高透水箇所の関係を深層学習モデルに学習させた。さらに，学習済みモデルに実規模試験ため池で得られた観測データを入力し，高透水箇所の検出可能性を検証した。

キーワード： ため池堤体，深層学習，異常検知
Key words: Irrigation pond embankments, Deep learning, Anomaly detection

1. はじめに

ため池堤体に形成される水みち（局所的な高透水箇所）は，貯水機能の低下や堤体の安定性に影響を及ぼす可能性があり，早期検出は維持管理上重要である。現状の点検では漏水箇所を目視等からの把握が中心で，堤体内部の水みちの位置や形状を直接把握することは難しい。

農業用フィルダムでは，堤体内部の浸透状態を把握するため水位観測孔が設置されている。一方，農業用ため池では観測孔の設置例は多くないが，フィルダムと同様に水位観測孔を設置すれば，観測水位から堤体内部の浸透状況を把握可能となる。さらに，複数の観測孔で得られる水位分布から水みちに起因する局所的な異常を抽出できれば，堤体内部の状態把握の高度化につながる。

本研究では，HYDRUS-3D による数値解析結果から学習データセットを構築し，U-Net[1)]ベースの深層学習モデルへ入力して水みちを検出する方法を検討した。さらに，農研機構内の実規模試験ため池で実証実験を行い，数値解析で学習したモデルを実験データへ適用した。

2. 方法

(1) 数値解析モデルおよび水みち条件

試験ため池を対象とした HYDRUS-3D モデルを用い，堤体内に観測孔に相当する 25 点（5 測線×5 点）を設定した。堤体土の飽和透水係数は 2.89×10^{-3} cm/s とし，水みちは局所的な高透水領域として表現した。水分特性曲線には堤体土の保水試験から得られた値を使用した。実証実験で得られた圧力水頭の変動幅を概ね再現する条件として，水みち部の飽和透水係数を 2.89 cm/s（堤体土の 1000 倍）とした。水みちは z=20 cm，半径 2.5 cm とし，直線，斜め直線，緩やかな曲線，緩やかな S 字の 4 形状を各 75 ケース，計 300 ケース設定した。解析終了時（120 h）の 25 観測点の圧力水頭を取得した。

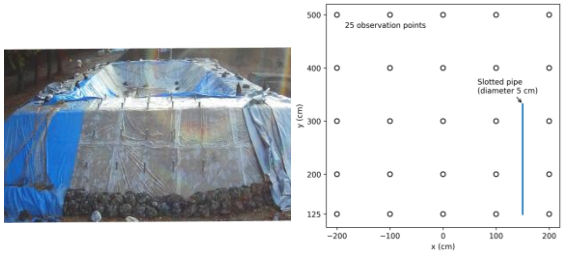


図 1　試験ため池の外観，観測点配置および模擬水みち用パイプの配置

(2)深層学習用データと U-Net

25 観測点の圧力水頭を貯水位で無次元化して H^*とし，観測範囲（x=−200～200 cm，y=125～500 cm）で補間して 256×256 の二次元分布

配付先限り

を作成した。さらに，各 y 行について x 方向平均値を差し引き，$A(y,x) = H^*(y,x) - \overline{H^*(y)}$ を横方向偏差として入力した。教師データは，水みちを 1，それ以外の堤体土を 0 とした二値マスクとした。

300 ケースを学習データ 210，検証データ 45，テストデータ 45 に分割した。学習データのみ x 方向に左右反転し，入力と教師データを反転することで 420 ケースに拡張した。U-Net ベースの 1 チャネル入出力モデルを用いて 200 エポック学習した。テストデータおよび実験データについて水みち箇所の推定および評価を行った。

(3) 実規模試験ため池での湛水実験

農研機構内の堤高 1.9 m の試験ため池を対象に湛水実験を行った。観測孔は数値解析と同じ 25 点配置とし，堤体内に直径 5 cm のスリット付きパイプを設置して水みちを模擬した。観測孔水位から数値解析と同じ手順でデータの前処理を行い，学習済みモデルへ入力した。

3. 結果

(1) テストデータへの適用

テストデータに対する IoU（水みちとして検出された予測領域と真値領域の重なりを表す指標）は 0.331 であった。予測領域のうち最大の連続領域を代表的な水みちとして位置評価したところ，真値との共通 y 範囲における x 方向位置の平均絶対誤差は 3.27 cm であった。領域の完全な一致には至らなかったものの，水みちのおおよその横方向位置と進展範囲を推定できた。

（2）試験ため池データ

試験ため池のケースでは，予測は複数成分に分断されたものの（図 2），予測領域のうち最大の連続領域は，模擬水みちの中間部付近に形成された。真値との共通 y 範囲における x 方向位置の平均絶対誤差は 11.29 cm であった。

4. 考察

数値解析では水みちの位置を比較的良好に

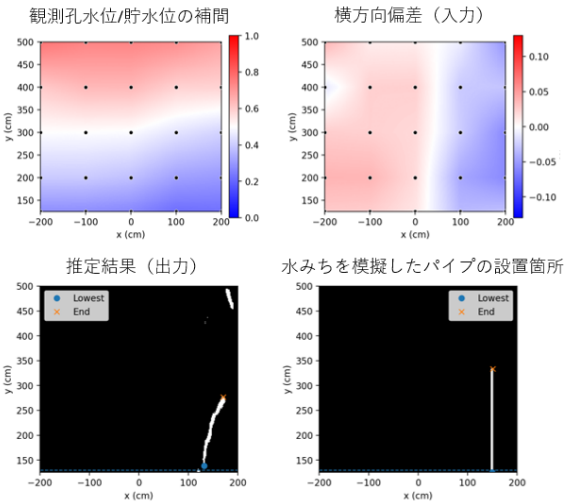


図 2　試験ため池データへの適用例

捉えたことから，局所的な高透水性箇所が水頭分布に与える変化を U-Net が学習できる可能性が示された。一方，試験ため池では主要成分の位置は概ね模擬水みち近傍に現れたものの，重なり指標は低く，水みち端部の再現も不十分であった。実験データには数値解析で十分表現されていない横断方向の大域的な水頭勾配，材料の不均質性，観測誤差等が含まれる可能性がある。今後は水位条件，高透水性箇所の透水性の表現，観測誤差等を変化させた学習データを導入し，数値解析から実験への適用性を高める必要がある。

5. おわりに

HYDRUS-3D で作成した 300 ケースを用い，25 観測点から補間および前処理を行った水頭分布を U-Net へ入力して水みちを検出する手法を構築した。実規模試験ため池への適用では模擬水みちを部分的に捉えたが，連続性と端部位置に課題が残った。今後は，実測でみられた水頭分布の特徴を数値解析に反映し，数値計算と実測の差異を低減することで，学習モデルの実測データへの適用性向上を目指す。

参考文献等

1) Ronneberger, O., Fischer, P., & Brox, T. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. In Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI, 2015.

配付先限り

水稲の生育段階に伴う放出メタンの炭素安定同位体と土壌中メタン濃度の変化

Changes in carbon stable isotope ratios of emitted methane and soil methane concentrations during rice growth

宮内藍子[1]・西脇淳子[2]

[1]東京農工大学大学院農学府・[2]東京農工大学大学院農学研究院

要旨(Abstract)：

本研究では，常時湛水条件下の水田において，水稲の生育段階に伴う放出 CH_4 の炭素安定同位体比（$\delta^{13}CH_4$）と土中 CH_4 濃度の変化を調べた。気泡による放出を抑制する目的で水面に緩衝材を設置し，無設置区と比較した。その結果，移植後 94 日の $\delta^{13}CH_4$ に両区間で有意差が認められた。また，土中 CH_4 濃度は生育初期から中期にかけて上昇する傾向を示した。以上より，水稲の生育段階に伴って CH_4 の放出特性が変化する可能性が示された。

キーワード：炭素安定同位体，水田，メタンガス

Key words: Stable carbon isotope，Paddy field，CH_4 gases

1. はじめに

水稲は日本の主要な食用作物である一方，水田は温室効果ガスである CH_4 の主要な排出源の一つでもある。日本の農業分野における CH_4 放出量の 43.8%を水田が占めており(国立環境研究所, 2025)，CH_4 は CO_2 と比較して，地球温暖化係数が 28 倍であるため(IPCC, 2021)，水田における CH_4 排出抑制が重要である。

水田からの CH_4 放出経路には，拡散，気泡，植物体経由の 3 つがある。拡散による放出の寄与は小さく(Kajiura & Tokida., 2024)，植物体経由の放出は全体の最大 9 割を占めると報告されている(Holzapfel-Pschorn et al., 1986)。一方，生育後期には気泡による放出が 43～70%を占めた報告もあり(Kajiura & Tokida., 2024)，放出経路の寄与は生育段階によって異なる可能性がある。しかし，こうした放出経路の変化と土中 CH_4 濃度や放出 CH_4 の同位体組成との関係は十分に明らかになっていない。そこで本研究では，常時湛水条件下の水田において，水稲の生育段階に伴う放出 CH_4 の炭素安定同位体比（$\delta^{13}CH_4$）と土中 CH_4 濃度の変化を明らかにすることを目的とした。

2. 方法

実験は東京農工大学附属広域都市圏フィールドサイエンス教育研究センターフィールドミュージアム本町(北緯 35.67, 東経 139.47）の水田で行った。水稲品種「イクヒカリ」を 30 cm 間隔, 1 株 3 本で 2026 年 6 月 1 日に移植，10 月 3 日に収穫した。水管理は常時湛水とした。

放出経路による CH_4 の炭素安定同位体比の違いを検討するため，Komiya et al.（2020）を参考に，気泡による CH_4 放出を抑制する目的で水面に気泡緩衝材を設置した区（via plant 区）と無設置区（control 区）を設けた。各区から採取した放出 CH_4 の $\delta^{13}CH_4$ は，同位体比分析計(G2201-i，Picarro）で測定した。

地表面フラックスはクローズドチャンバー法で測定し，1 時間ごとの値を算出した。土中 CH_4 濃度は週 1 回，各区画の深さ 5，10，20，30 cm で採取したガスを，ガスクロマトグラフ（GC-2010，島津製作所, BID)で分析した。

3. 結果と考察

放出 CH_4 の $\delta^{13}CH_4$ の経時変化を図 1 に示

す。via plant 区の $\delta^{13}CH_4$ は－80.6～－63.6‰, control 区では－75.0～－63.8‰であり，Komiya et al. (2020)が報告した植物体経由の値(－60～－55‰) より低い傾向を示した。移植後 94 日には両区間で有意差が認められた ($p < 0.05$)。このことから，緩衝材によって気泡放出が防がれていたことがわかる。また，移植後 64 日の穂ばらみ期以前は，両区の $\delta^{13}CH_4$ が同程度であったが，成熟期に差が認められた。この違いには，生育段階に伴う CH_4 放出経路の寄与の変化が関与した可能性がある。

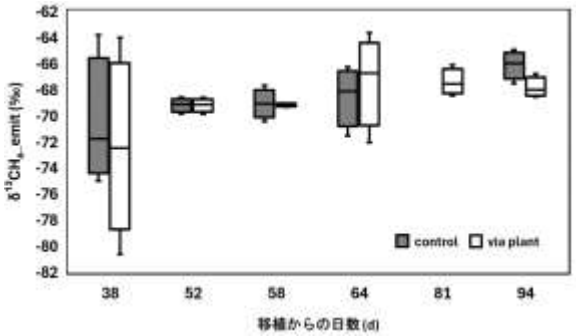


図 1　放出 CH_4 の $\delta^{13}CH_4$ の経時変化
箱は第 1～第 3 四分位数，箱内の線は中央値を示す。ひげは第 1・第 3 四分位数から四分位範囲の 1.5 倍以内にある最小値・最大値を示す。

土中 CH_4 濃度の経過時間を図 2 に示す。土中 CH_4 濃度は移植後 53 日に最大値 30.72%を示し，その他の測定時点では 15%未満であった(図２)。生育初期から中期にかけて濃度が上昇する傾向が見られたが，移植後 67 日以前では土中 CH_4 濃度と放出 $\delta^{13}CH_4$ との間に明瞭な関係は認められなかった。

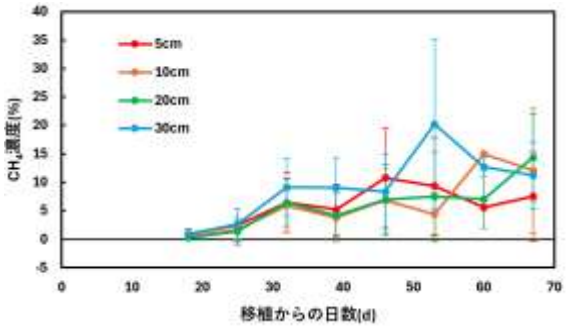


図 2　土中 CH_4 ガス濃度
エラーバーは±1 標準偏差を示す

4. おわりに

本研究では，水稲の生育段階に伴って放出 CH_4 の $\delta^{13}CH_4$ が変動し，土中 CH_4 濃度も時間的・深度別に変化することが確認された。今後は，地表面 CH_4 ガスフラックスとの関係を解析し，同位体比の変動要因と CH_4 放出過程について検討する。

謝辞

炭素安定同位体比計測やバイアルの脱気作業にご協力いただいた明治大学の登尾浩助教授，土井俊弘様，測定にご協力をいただいた研究室の皆様，圃場管理にご尽力いただいた本学の本林隆教授，技術職員の松川孝治様に深く感謝申し上げます。本研究は JST SICORP e-ASIA program (JPMJSC23E3) および JSPS 科研費・基盤研究（B）(26K01840）の助成を受けました。ここに記して謝意を表します。

参考文献等

国立環境研究所　地球環境研究センター (2025) 日本国温室効果ガスインベントリ報告書

IPCC (2021) Climate Change 2021 The Physical Science Basis.

Holzapfel-Pschorn, A., R. Conrad, W. Seiler (1986) Plant and Soil. Vol. 92, pp. 223-233.

Kajiura, M., Tokida, T. (2024) Journal of Environmental Quality. Vol. 53, pp. 265-273.

Komiya, S., Yazaki, F. Kondo, K. Katano, J. V. Lavric, T. I. McTaggart, T. Pakoktom, M. Siangliw, T. Toojinda, K. Noborio (2020) Journal of Geophysical Research: Biogeosciences. Vol.125, Issue9.

長期連用土壌管理がアロフェン質黒ボク土の土壌有機炭素と土壌物理特性の圃場内不均一性に及ぼす影響

Within-field variations in soil physical properties and soil organic carbon in an allophanic Andosol as affected by long-term soil management practices

福枡純平[1]

[1]農研機構　農業環境研究部門

要旨(Abstract)

持続可能な作物生産を目指した環境保全型農業に注目が集まっている。本研究では，1981 年より継続している保全・慣行栽培圃場内において，土壌物理性と土壌炭素量の空間的不均一性の把握および土壌物理性の規定要因の評価を目的とした。保全管理（不耕起+有機物施用）区内では土壌炭素量のばらつきが大きかった。一方，仮比重，水分特性と飽和透水係数は両処理区内で大きな空間変動を示し，その要因として土壌炭素量や農業機械の走行に伴う圧密の影響が示唆された。

キーワード：保全管理，黒ボク土，土壌物理性，長期連用，土壌有機炭素

Key words: Conservation agriculture, Andosol, Soil physical properties, Soil organic carbon

1. はじめに

近年，作物生産性と環境負荷低減の両立を目指した環境保全型農業への注目が高まっている。特に，地球温暖化および気候変動の緩和に向けて，農地土壌への炭素貯留の促進とそれに伴う土壌肥沃度の改善に対して期待が高まっている。

農研機構農業環境研究部門では，1981 年に開始した長期連用試験圃場がある[1]。ここでは，アロフェン質黒ボク土圃場内に慣行管理区と保全管理区の２処理が設けられており，保全管理区では不耕起・有機物施用・有機栽培を基本とした管理を継続している。Wagai et al., (2018)[2] は，慣行区と比較して，保全管理によって土壌表層の炭素貯留量が増加したことを報告している。土壌有機炭素は黒ボク土壌に多く含まれる非晶質鉱物と結合することで，団粒構造を形成し，特徴的な二重間隙構造を有する。土壌構造特性は保全管理によっても変化することが予想されるが，対照的な長期土壌管理が黒ボク土圃場内の土壌炭素量・形態および土壌構造・物理特性の空間的不均一性に及ぼす影響に関する知見は限られている。

本研究では（i）長期連用圃場内における土壌炭素量・形態，有機無機複合体・非晶質鉱物および土壌物理性の空間的なばらつきの把握，（ii）土壌物理特性の空間的不均一性の規定要因を評価することを目的とした。

2. 方法

農環研・長期連用圃場の２つの処理区（保全・慣行）にて供試土壌を採取した。慣行区では耕起管理，化学肥料施用および殺虫剤・除草剤散布が行われている。一方，保全区では不耕起管理，落葉堆肥施用と作物残渣還元および化学由来資材を使用しない栽培管理を行っている。1994 年以降，大豆－大麦の二毛作栽培を継続している。対象圃場は各処理区に反復がない。そのため，各処理区の縦幅 22.5 m を５分割し，疑似反復としてかく乱・不かく乱土壌を 0-5 cm および 10-15 cm から採取した（各処理区内で 5 地点，n = 20）。採取時は大豆収穫直後であり，耕耘前であった（2024 年 10 月下旬）。加えて，慣行区において，収穫作業時の農業機械の走行に伴う圧密が観察された。そのため，慣行区内の圧密箇所にて表層 0-5 cm のかく乱・不かく乱土壌も採取した（n = 5）。

不かく乱土壌（100 cm^3）を用いて，飽和透水係数（変水位法）および土壌水分特性（砂柱法および加圧板法）を測定した。かく乱土壌は，風乾および 2 mm 篩後に土壌炭素・窒素量（乾式燃焼法），土壌有機物化学構造（^{13}C-NMR）および有機無機複合体および非晶質鉱物画分中の活性メタル量（ピロリン酸抽出，シュウ酸抽出）を測定した。また，2 mm 篩を通過した土壌団粒をデジタル顕微鏡で観察した。

3. 結果と考察

デジタル顕微鏡画像からは土壌管理間での明瞭な形態の違いは観察されなかった。（図 1，団粒形状のばらつきにも留意する必要がある。）この土壌粒子と作物残渣の凝集態である団粒が“Pseudo-sand”として土壌間隙構造の発達に寄与している可能性が考えられた。

土壌炭素量の圃場内ばらつきは不耕起処理区内で大きく，50 g kg^{-1} から 170 g kg^{-1} のレンジを示した。また深さ方向で明瞭な土壌炭素量の違いがあった。一方で，慣行区においては土壌炭素量の空間変動が小さく，深さ方向の違いも確認できなかった。^{13}C-NMR の結果より，土壌炭素量の低下に伴いカルボニル炭素画分割合が増加する傾向が認められた。活性メタル量の分析結果より，シュウ酸抽出シリカ（非晶質鉱物量の指標）と土壌炭素量で負の相関がみられた。これは，土壌有機物量の増加に伴い，非晶質鉱物を含む土壌鉱物量の割合が相対的に減少したことが要因であると考えられた。

仮比重および飽和透水係数は圃場内で大きなばらつきを示した（図 2A）。仮比重と土壌炭素量には強い負の相関が確認された。また，土壌炭素量の増加は 6-100 µm サイズの間隙量の増加をもたらすことが示唆された。保全管理表層では飽和透水係数は高く，一方で慣行区の圧密箇所では約 3 オーダー低い値を示した（図 2B）。土壌水分特性の結果より，圧密によって >300 µm サイズのマクロ間隙量が減少したことで透水性が低下したことが示唆された。加えて，飽和透水係数と仮比重の関係より，同一土壌タイプ内において，飽和透水係数が急激に低下する仮比重の閾値が存在しうることが示唆された。これは他の土壌タイプにおける既往の研究 [3,4] とも整合的であった。

4. おわりに

同一土壌・気候条件下においても，異なる長期土壌管理や圧密作用によって，土壌物理性と土壌炭素量の大きな空間的不均一性が存在した。特に，物理性が良好な黒ボク土壌でも，農業機械の走行による圧密によって土壌構造の劣化が認められた。一方，不耕起管理や土壌炭素量の増加に伴う仮比重の低下と非常に高い飽和透水係数が作物生育にとって最適なのかは検討の余地があると考えられる。

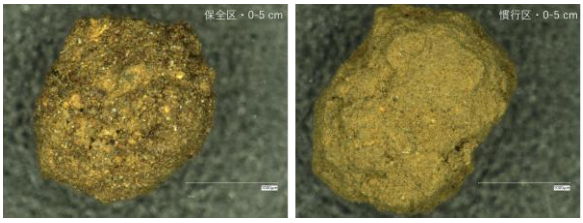


図 1 風乾・2 mm 篩後の表層土壌団粒の様子

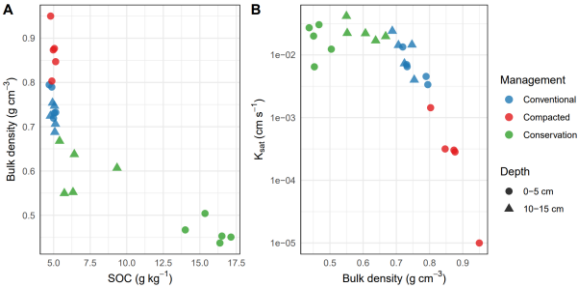


図 2 仮比重と土壌炭素量および仮比重と飽和透水係数の関係

謝辞　実験や圃場・設備利用に際して，河上智也さん，和穎朗太さん，渡邊瑛勇さん，八重垣康子さん，安永はる奈さん，寺坂みどりさん，小林耕野さん，農研機構つくば第 4 業務科の皆様よりご支援いただきました。また，科研費（23K14042・26K18161）による助成を受けました。

参考文献等

[1]Nakamura, Y. (1988). Soil Tillage Res., 12(2), 177-186.

[2]Wagai, et al. (2018). Soil Systems, 2(2), 29.

[3]Nakano and Miyazaki (2005).Soil Tillage Res. 84 145–153

[4]Kool et al. (2019). Soil Tillage Res. 193, 95–100

OER センサによる 1.5 GHz 以下の粘土の誘電特性

Dielectric properties of clay below 1.5 GHz measured using an OER sensor

升田直希[1]・楕野航士[2]・堂崎誠一郎[2]・宮本英揮[2]

[1]鹿児島大学大学院連合農学研究科・[2]佐賀大学農学部

要旨(Abstract)：

解放端型反射法(OER)センサ(DIK-L001)を用いて，θの異なるカオリナイトおよびベントナイトの 1.5 GHz 以下の複素誘電スペクトルを計測した。L001 によるスペクトルには，1.3 GHz ~ 1.5 GHz に不規則な増減が認められたものの，それを除けば既存の OER センサ(G300)の計測範囲を超える周波数帯においても，VNA と共通するε'の周波数依存性およびθに対する応答を捉えられることが示された。

キーワード：複素誘電率，粘土，体積含水率

Key words: Complex permittivity, Clay, Volumetric water content

1. はじめに

土壌水分の計測には，静電容量法や時間領域透過法（TDR）が多用されてきた。これらが通用しない土壌への対応や，GPR や合成開口レーダーとの連携運用を模索される中，近年，解放端型反射法(OER)を利用した周波数可変式センサの開発と応用が試みられている [1)]。本研究では，1.5 GHz 以下の帯域における周波数可変機能を実装した新型 OER センサを用いて，商用流通するセンサが通用しない二種類の粘土の複素誘電スペクトルを計測し，体積含水率(θ) に対するスペクトルの応答と，θ計測に対する同センサの有効性を検討した。

2. 方法

風乾のカオリナイトおよびベントナイトに蒸留水を加え，その混合比を変えることにより，θが異なる試料を作製した。各試料をアクリル板上で直方体(7.0 cm×7.0 cm×7.0 cm)上に成形し，中央に OER センサ(DIK-L001，大起理化工業)(以後，L001と略す)を水平に埋設した(Fig.1)。センサをコンピュータに接続し，スペクトル計算用ソフトウェアを利用して各試料における0.01 ~ 1.5 GHzの複素誘電率の実数部(ε')および虚数部(ε'')を 5 MHz 間隔で計測した(Fig.1)。計測終了後，各試料の一部を採取して炉乾し，θを決定した。一連の計測結果を，ベクトルネットワークアナライザ(VNA)および 500 MHz 以下用 OER センサ(DIK-G300，大起理化工業)(以後，G300 と略す)による計測計測結果 [1, 2)]と比較した。

3. 結果と考察

500 MHz を計測上限とした G300 と違い，L001 により 1.5 GHz 以下の両粘土のε'スペクトルを計測できた。L001 によるスペクトルには，1.3 GHz ~ 1.5 GHz に不規則な増減が認められたものの，それを除けば，G300 や VNA による既往の計測結果 [1, 2)]と同様に，高θほど両粘土のε'値が高くなった(Fig.2, Fig.3)。OER を採用した G300 と同様，ベントナイトのような強い誘電分散と高導電性を示す供試土壌においても，L バンド以下のε'値を得

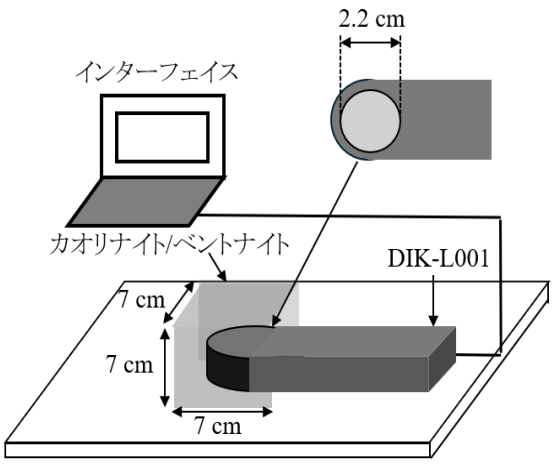


Fig.1 実験の模式図

られた点が，既存の他のセンサと一線を画す。

センサによるε'スペクトルの差異が認められた。L001 と VNA では，0.3 GHz 以上の周波数帯と比較して，0.01 ~ 0.3 GHz における周波数の増加に伴うε'の低下が顕著であり，それ以上の周波数帯ではほぼ横ばいに推移した(Fig.2，Fig.3)。一方，G300 では，0.01 GHz から計測上限の 0.5 GHz まで周波数の増加とともにε'が低下し続けた（Fig.2，Fig.3）。これは，同じ OER 方式のセンサであっても，両センサのプローブ形状や電極配置の違いが影響した可能性がある。L001 のε'スペクトルが VNA のそれと類似したことは，G300 の計測上限を超える GHz 帯においても，VNA と同様に土壌の誘電特性を把握できることを示唆している。

L001 を利用することにより，VNA と遜色のない精度のθ計測が可能であった。カオリナイトでは，いずれのセンサにおいても計測周波数によらずε'とθの正の相関が認められた (図は割愛)。一方，ベントナイトでは，L001，G300 および VNA のいずれにおいても，0.1 GHz と比較して 0.5 GHz の方がθに対するε'の差異は大きかった。(Fig.4)。また，L001 のε'-θ関係は，0.1 GHz および 0.5 GHz に加え，G300 の計測上限を超える 1.2 GHz においても， VNA のそれと類似した(Fig.4)。VNA は高価であり，野外での利用には制約があるが，L001 は比較的安価であり，土壌中に埋設して連続計測が可能である。これらの結果は，L001 によって計測したε'値が，GPR や SAR によるマイクロ波計測のグランドトゥルースデータとして活用できることを意味する。

4. おわりに

L001 は G300 の計測範囲を超える GHz 帯において，VNA と類似したε'スペクトルの変化やθの変化に対するのε'応答を捉えることができた。今後は GPR や SAR の観測周波数帯を考慮した原位置計測への応用を検討するとともに，計測対象や使用環境に応じたセンサ形状の改良を進める予定である。

謝辞: 大起理化工業株式会社および東京都立産業技術研究センター・佐野宏靖氏の支援を受けて本研究を実施した。ここに記して謝意を表す。

参考文献: 1)升田ら(2025)：土壌物理学会大会講演会要旨集，95-96 , 2)宮本ら(2008): 土壌の物理性, 110, 13-23.

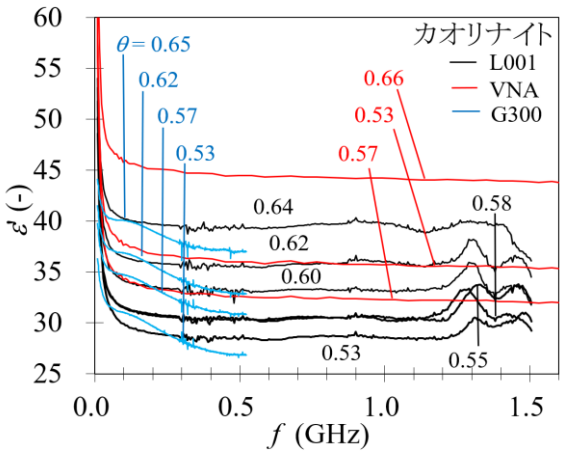


Fig.2 体積含水率(θ)が異なるカオリナイトの複素誘電率の実数部(ε')のスペクトル

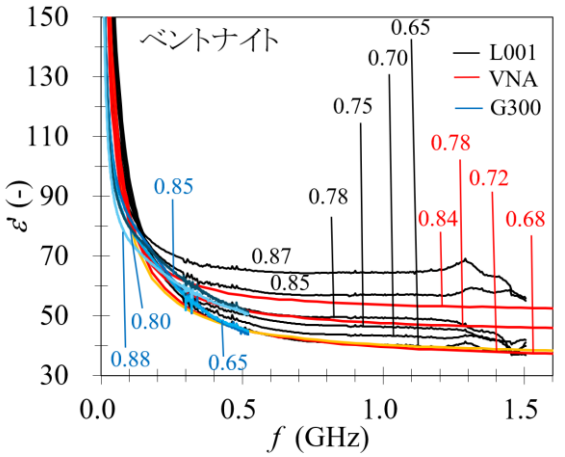


Fig.3 体積含水率(θ)が異なるベントナイトの複素誘電率の実数部(ε')のスペクトル

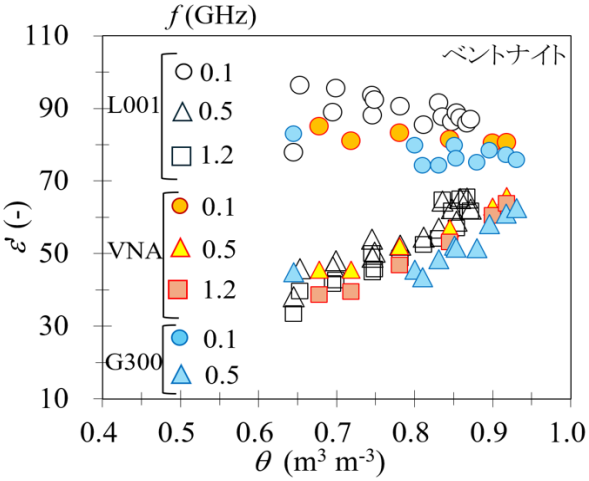


Fig.4 カオリナイトおよびベントナイトにおけるε'とθの関係

多孔質マイクロ流路内における活性炭ナノ粒子の沈着・閉塞挙動への価数の影響

Effects of Ionic Valence on Deposition and Clogging of Activated Carbon Nanoparticles in Porous Microchannels

○清水朝陽[1]，小林幹佳[2]，杉本卓也[2]

○Asahi SHIMIZU[1], Motoyoshi KOBAYASHI[2], Takuya SUGIMOTO[2]

[1]筑波大学大学院環境科学学位プログラム、[2]筑波大学生命環境系

要旨(Abstract)

多孔質構造を持つマイクロ流路を用い、価数および濃度が活性炭ナノ粒子の沈着・間隙閉塞挙動に与える影響を顕微鏡観察と圧力損失の測定から評価した。2 価の Ca^{2+} は 1 価の K^{+} よりも顕著に低濃度から閉塞を誘発し、透水性と画像解析の比較から平面沈着から立体的な多層沈着への移行が示唆された。本知見の汚染物質吸着を伴う浄化設計への応用が期待される。

キーワード：多孔質マイクロ流路、活性炭ナノ粒子、透水性、沈着

Key words: Porous microfluidic channel, Activated carbon nanoparticles, Permeability, Deposition

1. はじめに

高い比表面積と吸着能を有する活性炭ナノ粒子は、土壌の原位置環境浄化への適用が期待されている[1,2]。実環境への適用には土壌間隙内での粒子移行挙動の解明が不可欠である。そこで本研究では、土壌を模擬した多孔質マイクロ流路を用いて粒子の沈着・輸送挙動を評価した。特に、電気的相互作用を支配する間隙水中の塩濃度と価数を変化させ、流路内の透水性低下および沈着挙動に与える影響を検討した。

2. 方法

試料として活性炭ナノ粒子(上田環境ソリューション社製、平均粒径 300 nm) を用い、粒子濃度を 5 mg/L に調製した。土壌多孔質構造を模擬したマイクロ流路は、ソフトリソグラフィー法を用いてポリジメチルシロキサン (PDMS) で作製した。流路寸法は長さ 41 mm、幅 5 mm、深さ 100 μm とし、内部には土壌粒子を模したべき乗分布に従う平均径約 120 μm の円柱構造をランダムに配置した(図 1)。電解質として KCl および $CaCl_2$ を用い、電解質濃度を系統的に変えて実験を行った。調製した活性炭ナノ粒子懸濁液を、シリンジポンプにより一定流量で流路内に注入した。マイクロ流路内の間隙の目詰まりによる透水性低下を定量的に評価するため、流路内の多孔質構造の流入口および流出口に設置した圧力センサーにより圧力差を連続測定し、Darcy 則に基づいて透水係数を算出してその経時変化を評価した。得られた透水係数の経時変化から、通液初期 (1～5 min) の圧力差 ΔP_0 に対する相対透水係数 $k/k_0(t) = \Delta P_0/\Delta P(t)$ を求め、閉塞が進行する線形減少領域 (5～30 min) における負の傾きの絶対値を閉塞速度と定義した。さらに、通液実験中(15～90 min、15 分間隔の計 6 時点) に撮影した顕微鏡画像の二値化処理により、初期間隙面積に対する付着物面積の割合として空隙内沈着率 R(t)を算出した。得られた R(t)の経時変化に対して線形回帰を行い、その傾きから 1 時間あたりの沈着速度 (%/hour) を算出した。上記の閉塞速度と沈着速度の測定に基づいて、異なる価数を持つ電解質条件下における閉塞挙動および沈着特性の濃度依存性を比較検討した。

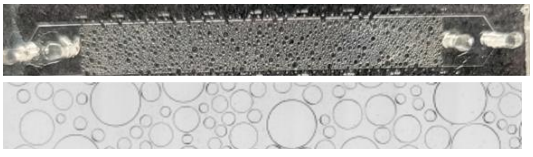


図 1.マイクロ流路の写真(上)と拡大図(下)

3. 結果と考察

図 2(a)に閉塞速度と電解質濃度の関係を示す。閉塞速度は、各電解質濃度（N≧2）の平均値を最大値で除して規格化した。両塩種ともに濃度上昇に伴い閉塞速度は増大したが、KCl が 3 mM 付近で一定値に漸近したのに対し、$CaCl_2$ では明確な一定値は見られなかった。また、2 価の Ca^{2+}イオン存在下では 1 価の K^+イオンに比べて、より低濃度で閉塞速度が増大した。

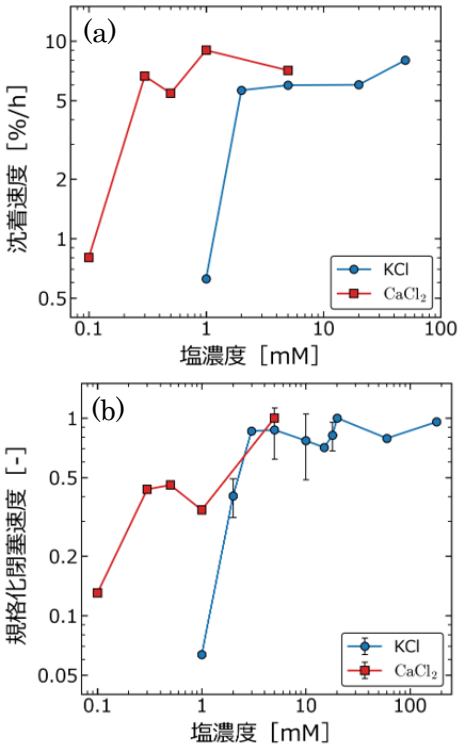
これは、塩濃度上昇に伴う粒子表面電荷の遮蔽によって電気的反発力が低下し、せん断流下の粒子衝突に伴う狭窄部での架橋や凝集閉塞が促進されたためと考えられる。特に 2 価の Ca^{2+}は 1 価の K^+に比べて電気二重層の圧縮や特異吸着が起こりやすいため、微量の添加でも強い凝集・架橋が誘発され、低濃度からの急速な粒子沈着および閉塞の進行に繋がったと考えられる。

図 2(b)に沈着速度と電解質濃度の関係を示す。同一濃度条件における平均値をプロットした。画像解析から求めた沈着速度は、KCl では約 2 mM、$CaCl_2$では約 0.5 mM 付近でそれぞれ一定値に漸近した。これは、電解質濃度の増加に伴う静電反発障壁の低下によって付着効率が増大し、高電解質濃度で輸送律速へと移行したためだと考えられる。

画像解析と透水係数に基づく評価を比較すると、KCl では両手法による濃度依存性が比較的よく一致した。一方、$CaCl_2$では、圧力をもとに算出した閉塞速度では明確な一定値は見られなかったのに対して、画像解析から求めた沈着速度は一定値に達する傾向が認められた。この違いは、両手法が反映する沈着構造の違いに起因する可能性がある。画像解析では二次元的な沈着面積の変化を捉えるため、深さ方向への粒子の重なりや多層沈着を十分に反映できない。これに対して、透水係数は三次元的な間隙縮小に伴う流動抵抗の増加に敏感である。そのため、$CaCl_2$条件では、画像上の沈着面積の増加が頭打ちになった後も、流入口付近などで粒子の多層沈着や流路狭窄が進行し、透水係数に基づく閉塞速度が高電解質濃度まで増加した可能性がある。

4. おわりに

以上より、活性炭ナノ粒子の間隙閉塞・沈着挙動は電解質の価数に強く依存し、2 価の Ca^{2+}は、1 価の K^+と比較して、より低い濃度から目詰まりを誘発することが明らかとなった。また、透水性評価と画像解析の併用により、平面沈着から局所的な立体堆積へと移行する空間的な閉塞プロセスを捉えることができた。今後は、本評価系を展開し、粒子による汚染物質の吸着特性に着目した実験を行う予定である。流路内における粒子の輸送・沈着挙動と汚染物質の吸着除去性能の相互関係を明らかにすることで、効果的な土壌浄化プロセスの設計指針を得ることを目指す。



参考文献等

1． L. Li et al. Water Res, 266, 122399 (2024).

2． Eric F. Zama et al. J. Clean. Prod, 148, 127–136 (2017).

不飽和土壌凍結解析における混合有限要素法の有効性
Effectiveness of the Mixed Finite Element Method in Simulating Unsaturated Soil Freezing

菊地駿[1]・斎藤広隆[2]
[1]元東京農工大学大学院・[2]東京農工大学農学研究院

要旨 (Abstract)：
不飽和土壌の凍結に伴う熱・水移動解析に Mixed FEM を適用し，CG FEM と比較した．両手法とも凍結前線の進行と水分再分配を概ね再現した．一方，Mixed FEM は局所質量保存性に優れ，時間刻みの増大やメッシュ細分化に対しても高い非線形計算の頑健性を示した．

キーワード： 混合有限要素法，不飽和土壌凍結，局所質量保存
Key words: Mixed finite element method, Unsaturated soil freezing, Local mass conservation

1. はじめに

不飽和土壌の凍結過程では，間隙水の相変化に伴って不飽和透水係数が著しく低下し，間隙氷の形成によって液状水の移動が制約される．このような条件下では，水分移動の支配方程式が退化的な性質を示し，凍結前線近傍における水分移動を保存則と整合的に評価することが重要となる．一般的な連続 Galerkin 有限要素法（CG FEM）では，要素境界における法線流束の連続性が保証されず，局所的な水収支に誤差が生じ得る．一方，混合有限要素法（Mixed FEM）は，間隙水圧と液状水流束を独立した未知量として扱い，適切な離散化によって要素単位の質量保存を実現できる手法である [1]．本研究では，Mixed FEM を不飽和土壌の凍結に伴う熱・水移動解析に適用し，既往の一次元凍結実験との比較により温度・水分量分布の再現性を評価する．さらに，CG FEM との比較を通じて，局所保存性および非線形計算の頑健性を検討する．

2. 手法

土壌中の間隙水の凍結を考慮した熱移動の支配方程式は，次式で表される．

$$\partial_t \mathcal{H}(T, p_\mathrm{w}) - \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + C_\mathrm{w} \nabla \cdot (\boldsymbol{q}_\mathrm{w} T) = 0 \quad (1)$$

ここで，$\mathcal{H}$ は土壌全体のエンタルピー $[\mathrm{J\,m^{-3}}]$，λ は有効熱伝導率 $[\mathrm{W\,m^{-1}\,K^{-1}}]$，$C_\mathrm{w}$ は水の体積熱容量 $[\mathrm{J\,m^{-3}\,K^{-1}}]$，$\boldsymbol{q}_\mathrm{w}$ は液状水流束 $[\mathrm{m\,s^{-1}}]$，T は温度 [°C]，p_w は間隙水圧 [Pa] である．

また，間隙中を移動する水分を液状水のみと仮定すると，水分の質量保存則は次式となる．

$$\partial_t \Theta(T, p_\mathrm{w}) + \nabla \cdot \boldsymbol{q}_\mathrm{w} = 0 \quad (2)$$

ここで，Θ は液状水と氷の総質量を液状水の体積に換算した等価体積含水率 [–] である．液状水流束は，Darcy 則を変形した (3) 式に従うものとする．

$$\rho_\mathrm{w} g \mathbf{K}^{-1} \boldsymbol{q}_\mathrm{w} + \nabla p_\mathrm{w} - \rho_\mathrm{w} \boldsymbol{g} = 0 \quad (3)$$

ここで，$\mathbf{K}$ は透水係数テンソル $[\mathrm{m\,s^{-1}}]$，ρ_w は水の密度 $[\mathrm{kg\,m^{-3}}]$，g および $\boldsymbol{g}$ は重力加速度の大きさとベクトルである．

本研究では，凍結に伴い透水係数が 10 桁以上変化し，水分移動が凍結前線近傍に集中することから，水分のみ p_w と $\boldsymbol{q}_\mathrm{w}$ を独立な未知数とする混合形式，熱は T を未知数とし，Newton 法で強連成して解く．離散化には，$\boldsymbol{q}_\mathrm{w}$ に $H(\mathrm{div})$ 適合の Raviart–Thomas 要素，p_w に要素内定数近似，T に CG FEM を用いる．これにより，要素境界で法線流束が連続となり，要素単位で水の質量保存則を満たす．また，間隙水の相変化は一般化 Clausius–Clapeyron 式と水分保持曲線を組み合わせてモデル化する [2]．

解析対象には，溝口による一次元土壌凍結実験 [3] を用いる．高さ 0.20 m の土壌カラムを上端から冷却する実験条件に対し，既往研究 [4] に基づく物性値，初期条件および境界条件を設定する．Mixed FEM と CG FEM による温度・水分量分布を実験結果と比較し，凍結前線の進行および水分再分配の再現性を評価する．さらに，両手法の水収支誤差を比較し，局所保存性を検証する．

3. 結果・考察

図 1 に Mixed FEM および CG FEM による解析結果を示す．実験と同様に，液状水と氷を液状水換算含水率として評価した．両手法とも凍結前線の下降

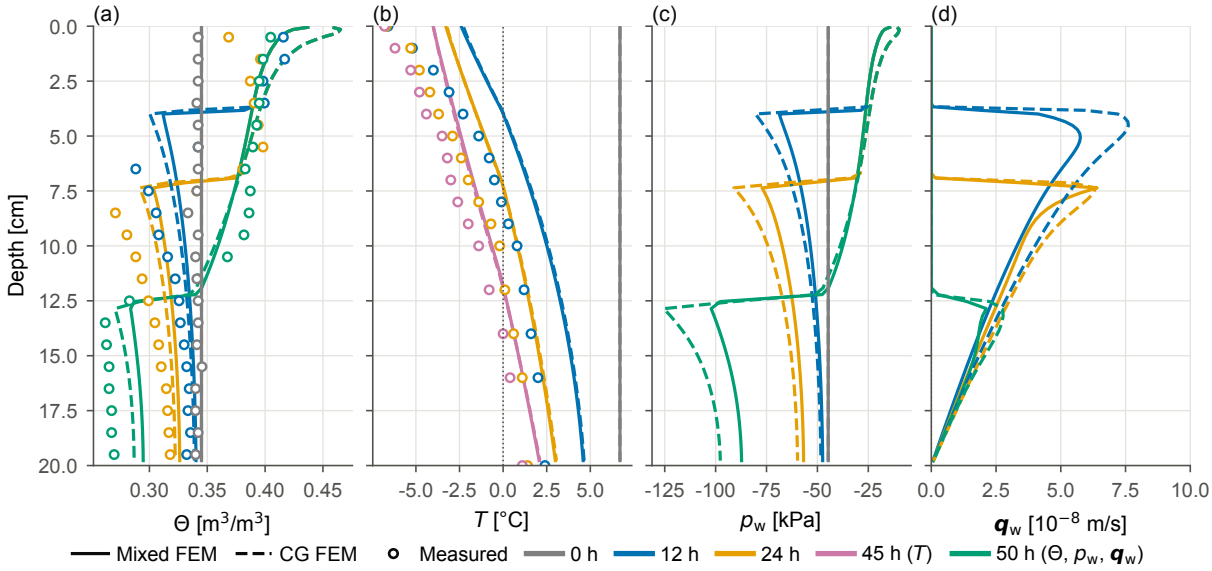


図 1 鉛直プロファイル：(a) 液状水換算含水率，(b) 温度，(c) 間隙水圧，(d) 上向き液状水流束

に伴う水分再分配を概ね再現し，温度および水分量分布に大きな差は見られなかった．一方，12 h では凍結前線位置にずれが見られた．また，上端付近では氷の過剰集積が示唆された．この要因の一つとして，上端の熱的境界条件が考えられる．別途実施した境界条件の比較では，上端を実測温度を与えると凍結前線の進行が速まる一方，水分再分配が抑制された．したがって，凍結前線の進行と水分再分配を同時に再現することが課題となる．また，間隙水圧および液状水流束には手法間の差が見られ，特に 12 h では CG FEM が Mixed FEM より大きな上向き流束を示した．次に，図 2 に系全体および要素単位の水収支誤差を示す．両手法とも系全体の誤差は十分小さいものの，要素単位では顕著な差が見られた．Mixed FEM では要素単位の誤差が概ね 10^{-12} 以下であったのに対し，CG FEM では 10^{-2}〜10^{-1} 程度の誤差が残存した．Mixed FEM では要素境界の法線流束が連続し，各要素の水分蓄積量と流出入量の収支が成立する．一方，CG FEM では圧力勾配から求めた法線流束の連続性が保証されず，局所的な水収支誤差が生じる．このことから，Mixed FEM では凍結前線への水分供給と局所的な蓄積を，保存則と整合した流束に基づいて評価できる．

さらに，同一の Newton 法を用いた比較では，60〜300 秒の固定時間刻みで CG FEM が凍結開始時に収束しなかったのに対し，Mixed FEM は 12 h まで計算できた．また，上端要素の厚さが 0.047 mm での可変刻み解析では，0〜6 h の時間刻みの再試行が Mixed FEM で 3 回，CG FEM で 392 回となった．

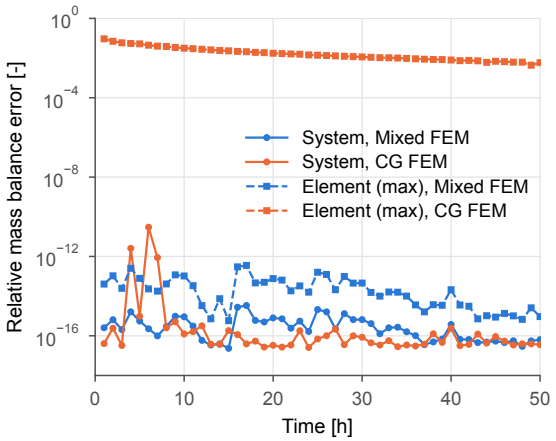


図 2 系全体および要素単位の水収支誤差

これらの結果から，メッシュ細分化時の非線形計算においても Mixed FEM の高い頑健性が確認された．

4. おわりに

本研究では，Mixed FEM が CG FEM と同程度の実験再現性を示しつつ，局所保存性に優れ，大きな時間刻みや細分化したメッシュでも安定して計算を進められることを確認した．これにより，Mixed FEM は不飽和土壌の凍結に伴う水分移動を保存則と整合的に評価する上で有効な手法であることが示された．一方，両手法に共通して実験結果との不一致が残されており，さらなる精度向上には，土壌変形や構成則，境界条件を含む数理モデルの検討が必要である．

引用文献

[1] Arbogast T. and Wheeler M. F. (1996) *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 33(4), 1669–1687.
[2] 菊地ら (2025)，土壌の物理性，159, 13–24.
[3] 溝口 (1990)，三重大学博士論文.
[4] Hansson K. et al. (2004)，*Vadose Zone J.*，**3**(2), 693–704.

DEM-CFD 解析による三次元間隙構造の飽和透水係数評価

Evaluation of Saturated Hydraulic Conductivity of Three-Dimensional Pore Structures by DEM-CFD Analysis

佐藤直人[1]・西崎友乃[1]

[1]北海学園大学工学部

要旨(Abstract)：

本研究では，個別要素法（DEM）により三次元粒子充填構造を作成し，数値流体解析（CFD）によって飽和透水係数を評価した．OpenFOAM を用いて計算格子の細分化レベルおよび粒子表面への適合処理が間隙率の再現性に及ぼす影響を検討した．その結果，格子の細分化により間隙率の再現性が向上した．算出された飽和透水係数は 0.0632 m/s となった．この値は粗粒材料の一般的な透水係数の範囲内であり，本手法による透水性評価の可能性が示された．

キーワード： 飽和透水係数，間隙構造，個別要素法（DEM），数値流体解析（CFD）

Key words: Saturated hydraulic conductivity, Pore structure, Discrete Element Method (DEM), Computational Fluid Dynamics (CFD)

1. はじめに

飽和透水係数は，多孔質体中における水分移動特性を表す重要な物理量である．飽和透水係数は粒径分布や乾燥密度，間隙率などの影響を受けるほか，間隙の形状，連結性，屈曲度といった間隙構造にも大きく依存する．しかし，実試料を用いた透水試験では，試料内部の間隙構造や各間隙内の流れを直接把握することは容易ではなく，間隙構造と巨視的な透水性との関係を詳細に評価することには限界がある．

近年，個別要素法（Discrete Element Method: DEM）と呼ばれる個々の粒子の運動および粒子間の接触を逐次計算することで，粒状体の挙動を表現する手法を用いて粒子充填構造を再現し，その間隙空間を用いて数値流体解析（Computational Fluid Dynamics: CFD）を行うことで，多孔質体内部の流れを直接解析する手法が利用されている（Mohanty et al., 2016）．このような手法を用いることで，間隙構造と流速分布や圧力損失との関係を三次元的に評価することが可能となる．

そこで本研究では，DEM により作成した粒子充填モデルから間隙構造を構築し，オープンソースの数値流体解析ソフトウェア OpenFOAM を用いて飽和状態における水の流れを解析した．得られた流量および圧力勾配から飽和透水係数を算出し，透水性の評価を試みた．

2. 方法

本研究では，Python の物理シミュレーションライブラリ PyBullet を用いて DEM による粒子充填計算を行った．粒子は球形とし，直径 1～6 mm の範囲からランダムに粒径を与えた．粒子密度は 1.8 g cm^{-3}，粒子間の摩擦係数は 0.8，反発係数は 0.2，重力加速度は 9.81 m s^{-2}とした．幅 40 mm，奥行 40 mm，高さ 40 mm の容器を設け，粒子を容器上方から投入し，重力によって沈降させた．この操作を粒子数が 1000 個になるまで繰り返し，全粒子投入後，粒子の運動が十分に収束するまで計算を行ったのち，各粒子の座標および半径を記録した．

得られた粒子配置から，容器中央の 25 × 25 × 25 mm の領域を抽出し，ボクセルサイズ 0.200 mm，125 × 125 × 125 voxel の三次元データに変換した．さらに，間隙領域の表面形状を抽出し，数値流体解析に用いる STL 形式の間隙モデルを作成した（図 1）．

作成したモデルを用い，OpenFOAM v2306 による三次元数値流体解析を行った．解析には DEXCS2023 を導入した VirtualBox 上の仮想環境を使用した．まず，blockMesh という機能を用いて間隙モデルの周囲に 25 × 25 25 mm の直方体の外壁を生成した．次に，snappyHexMesh を用いて粒子表面近傍の計算格子を細分化し，粒子形状に適合させた．この際，メッシュの生成条件が間隙率に及ぼす影響を検討するため，粒子表面の細分化レベル（refinement level: RL）および表面形状への適合処理（snap）の条件を変更して計算格子を生成し，各条件における流体領域の体積から間隙率を算出した．

流体には水を用い，動粘性係数を 1.004 × 10^{-6} m^2 s^{-1}，密度を 998 kg/m^3 とした．流れは定常・非圧縮・層流を仮定し，simpleFoam を用いて計算した．流れ方向を x 方向とし，入口と出口に 1 Pa の圧力差を与えた（図 2）．また，粒子表面および流れ方向に平行な解析領域の側面には，滑りなし（no-slip）条件を設定した．定常状態における入口および出口の体積流量は各境界面の体積流束を積分することで求めた．得られた体積流量と入口・出口間の圧力差から，ダルシー則に基づいて飽和透水係数を算出した．

3. 結果と考察

ボクセル化した粒子モデルの全間隙体積は 4,722.5 mm^3 で，間隙率は 30.2%となった．RL を level 2（セル幅 0.250 mm）および level 3（セル幅 0.125 mm）とし，snap の有無を組み合わせた 4 条件で生成した各計算格子の間隙率を表 1 に示す．RL = 2 では，snap の有無にかかわらず，ボクセルモデルの間隙体積を下回った．一方，RL = 3 では，snap なしで 4,764.2 mm^3，snap ありで 4,604.0 mm^3 となり，ボクセルモデルの間隙体積に近づいた．計算格子の細分化によって粒子表面や粒子間の狭い間隙をより詳細に表現できるようになったためであると考えられる．

定常状態における流量は 1.615 ×10^{-7} m^3 s^{-1} であり，ダルシー則に基づいて算出した飽和透水係数は 0.0632 m s^{-1} であった．この値は，既往研究で報告されている砂礫などの粗粒材料の飽和透水係数と同程度のオーダーにあり，概ね妥当な値であると考えられる．ただし，間隙構造の再現性や計算格子の生成条件が飽和透水係数に及ぼす影響については，今後さらに検討する必要がある．

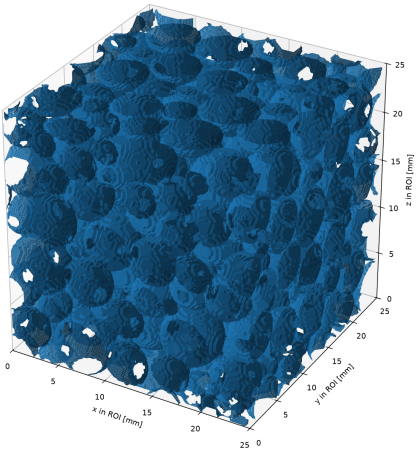


図 1 DEM により作成した 3 次元間隙構造

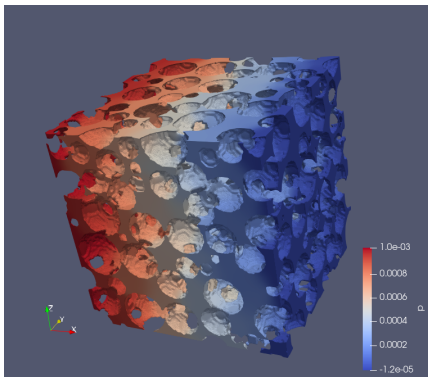


図 2 粒子表面モデル内の動圧力分布

表 1 メッシュの生成条件と間隙体積

条件	表面付近のセル幅	間隙体積 (mm^3)	ボクセルモデルとの差
ボクセルモデル	−	4722.5	−
level 2, snap=false	0.250 mm	4235.0	−10.17%
level 2, snap=true	0.250 mm	4090.1	−13.24%
level 3, snap=false	0.125 mm	4764.2	1.060%
level 3, snap=true	0.125 mm	4604.0	−2.34%

参考文献：Mohanty et al. (2016). *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, 63, 71-80.

謝辞：本研究は JSSP 科研費（若手 26K18157）の助成を受けて実施した．

加熱条件が土壌撥水性に及ぼす影響

Effects of Heating Conditions on Soil Water Repellency

佐野くらら[1]・小島悠揮[2]・青木伸輔[3]

[1]元香川大学農学部・[2]岐阜大学工学部・[3]香川大学農学部

要旨(Abstract)：

森林火災による土壌の加熱は，撥水性を発現させることがある。本研究では，加熱温度，加熱時間，初期含水状態および加熱時の蓋の有無が土壌撥水性に及ぼす影響を検討した。400°C の加熱では，蓋なし条件および 90 分加熱条件で撥水性は認められなかった。一方，蓋あり・60 分条件では，一部の測定で顕著な撥水性が認められた。以上より，加熱後の土壌撥水性は加熱条件によって異なることが示された。

キーワード：土壌撥水性，森林火災，加熱条件，WDPT

Keywords: Soil water repellency, Wildfire, Heating conditions, WDPT

1. はじめに

気候変動に伴う高温・乾燥化の進行により，世界各地で森林火災のリスクが高まっている。日本国内でも近年，大規模な森林火災が相次いで発生しており，森林火災が森林生態系や環境に及ぼす影響の解明が重要となっている。森林火災による加熱は土壌の物理特性を変化させ，表層下に撥水性を有する層を形成することがある。土壌撥水性は降雨の浸透を妨げ，火災跡地における土壌の表面流出や土砂災害を促進する要因となりうる。

小渕ら（2009）は，土壌撥水性の発現には，加熱によって揮発した有機成分の下方移動に加え，酸素供給条件が関与することを報告している。そこで本研究では，加熱温度，加熱時間，初期含水状態および加熱時のサンプラーの蓋の有無を組み合わせた加熱試験を行い，これらの条件による土壌撥水性の違いを評価することを目的とした。

2. 方法

香川大学農学部キャンパス内の圃場において表層土（深さ 5〜10 cm）を 100 cm^3 の金属製サンプラーを用いて 48 試料採取した。採取した試料について，加熱温度（100, 200, 400°C），加熱時間（60 と 90 分），初期含水状態（採取時の含水状態・24 時間炉乾燥した状態），およびサンプラーの蓋の有無（酸素供給）を組み合わせた 24 条件を設定し，マッフル炉を用いた加熱試験を行った。各条件について 2 反復で試験を実施した。加熱後の土壌表面における撥水性を Water Drop Penetration Time（WDPT）法により評価した。各試料の表面 5 地点に水滴を滴下し，水滴が浸透するまでの時間を測定して，撥水性を 5 段階に分類し，数字が小さいと撥水性が弱く（あるいはなし），数字が大きいと撥水性が強い。

3. 結果・考察

マッフル炉による加熱処理後の土壌試料の表面写真を，400°C での加熱を例として Fig. 1 に示した。加熱時間による色の違いは顕著ではなかったが，サンプラーの蓋の有無によって試料表面の色が異なった。400°C 加熱ではサンプラーの蓋をした場合の試料表面は黒色を呈した。一方，蓋をしなかった試料では 100°C や 200°C で加熱した試料と類似した色を示した。

400°C で加熱した試料の WDPT 測定結果を，採取時の含水状態で加熱した試料（Fig. 2）と，事前に炉乾燥した試料（Fig. 3）に分けて示した。乾燥時に蓋をしなかった試料では，初期含水状態および加熱時間にかかわらず，撥水性は

認められなかった。

採取時の土壌水分状態で蓋をしてマッフル炉で加熱した試料では，加熱時間によって撥水性の発現状況が異なった（Fig. 2）。90 分加熱した試料では撥水性は認められなかったが，60 分加熱した試料では撥水性の有無および程度に試料間のばらつきが認められた。

事前に炉乾燥させた試料を 400ºC で加熱した場合，蓋あり・90 分条件では撥水性は認められなかった。一方，蓋あり・60 分条件では極めて強い撥水性を示す測定地点と，撥水性を示さない測定地点が混在した（Fig. 3）。このような違いは同一試料内で認められ，数 cm 離れた測定地点間で撥水性が大きく異なることが確認された。

初期水分量が高い土壌では，加熱時に水分の蒸発に熱が消費されるため，土壌温度の上昇が遅れ，有機物の熱的変化が生じるまでに時間を要する可能性がある。このような加熱過程の違いが，同一の加熱条件下でも撥水性に差が生じた一因と考えられる。一方，加熱時間の延長に伴って撥水性が低下する可能性も示された。土壌撥水性は加熱温度のみに依存するのではなく，加熱時間，酸素供給条件，初期含水状態といった複数の要因が組み合わさることで発現することが示唆された。なお，100ºC および 200ºC の加熱試験結果については，大会当日に報告する。

4. おわりに

本研究ではマッフル炉による加熱試験を通じて，加熱条件の違いが土壌撥水性に及ぼす影響を検討した。実験結果から加熱後の土壌撥水性は加熱時間や蓋の有無によって異なることが示された。今後は試料内のばらつきを含めて撥水性の発現条件を検討する予定である。

参考文献等
小渕敦子，溝口　勝，西村　拓，井本博美，宮崎　毅（2009）：地表面燃焼下の黒ボク土壌における撥水性発現機構，農業農村工学会論文集，77(5):541–47. https://doi.org/10.11408/jsidre.77.541.

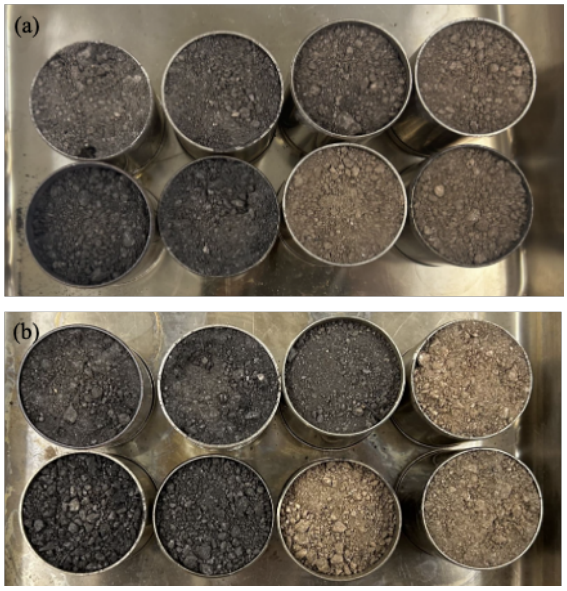


Fig. 1　マッフル炉で 400ºC の加熱を経験した土壌試料の外観。（a）採取時の含水状態で加熱した試料，（b）事前に炉乾燥した試料。各写真の左 2 列は蓋あり，右 2 列は蓋なし。各写真の上段は 60 分，下段は 90 分加熱。

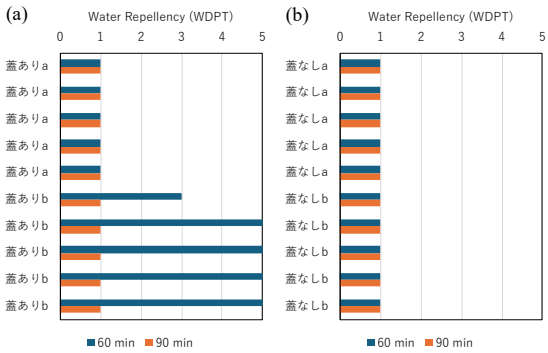


Fig. 2　採取時の含水状態で 400ºC に加熱した試料の WDPT 測定結果。（a）蓋あり，（b）蓋なし。加熱時間は 60 分および 90 分。

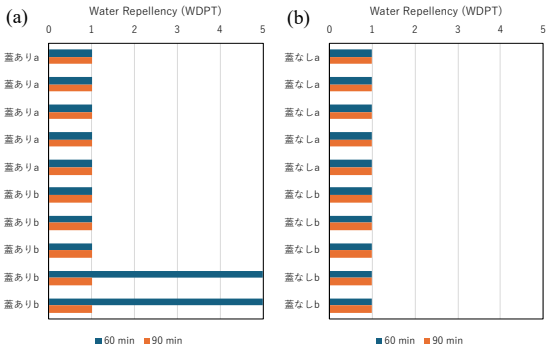


Fig. 3　事前に炉乾燥した後，400ºC で加熱した試料の WDPT 測定結果。（a）蓋あり，（b）蓋なし。加熱時間は 60 分および 90 分。

紫外線劣化したナノプラスチックの多孔質内動態に関する研究

Transport Behavior of UV-Aged Nanoplastics in Porous Media

各務希海[1]・Azizul Hakim[1,2]・辰野宇大[1]・柏木淳一[1]・斎藤健志[3]・竹村貴人[4]・濱本昌一郎[1]

[1]北海道大学・[2]University of Chittagong・[3]産業技術総合研究所・[4]日本大学

要旨(Abstract)

紫外線照射により劣化程度を制御したナノプラスチック（NPs）を用いて表面電位などの粒子状態変化の測定と飽和カラム通水実験を行った。劣化前後でゼータ電位と粒径の変化はほとんど見られなかったものの，形状の不規則化と親水性の酸素含有官能基の増加が確認された。また，カラム実験においては、劣化処理によって NPs の移動がわずかに制限された。今後、pH や塩濃度が NPs 移動性に与える影響について更なる検討が必要である。

キーワード：ナノプラスチック，紫外線劣化，コロイド輸送

Key words: Nanoplastics, UV-aging, Colloid transport

1. はじめに

農地で用いられるプラスチック資材が物理・化学・生物的な作用により劣化し生成するナノプラスチック（NPs：粒径 1 μm 以下のプラスチック粒子）は高い反応性を持つ難分解性コロイドとして土壌中で蓄積・移動することから，その環境動態の解明が急務となっている（Wang et al., 2022, Zhang et al., 2022）。屋外環境で劣化した NPs は劣化の程度（紫外線の照射量など）によって表面電荷の低下や粒径の縮小，親水性官能基の増加など粒子特性が変化し，その移動性にも影響を与えることが予想される。しかし，劣化 NPs の土壌内挙動に関する研究は限られており，劣化に伴う親水性増加により移動性が増加するという報告（Liu et al., 2019）がある一方，劣化により表面化学性は変化するものの移動には影響を及ぼさないという報告（Yu et al., 2024）があり，NPs の劣化が土壌内動態に与える影響は未だ明らかでない。本研究では，紫外線照射により劣化 NPs を作成し，劣化による粒子特性変化が多孔質体内の NPs 移動性に与える影響を検討した。

2. 方法

(1) 紫外線照射による NPs 劣化実験

粒径 101 – 140 nm の表面修飾の無いポリスチレン NPs 懸濁液（Merck，KSF-010）200 ppm に対し，紫外線ランプ（セン特殊光源，HLR100T-2）を用いて 1.7 kW/m^2 の照度で紫外線を照射し，20℃で 6，24，72 時間劣化させた。各劣化状態の NPs について，走査型電子顕微鏡（日本電子，JSM-IT710HR/LA，SEM）による形態観察，動的光散乱法（Malvern，Zetasizer Nano ZS，DLS）による粒径とゼータ電位の測定，減衰全反射法を用いたフーリエ変換赤外分光法（島津製作所，IRXross + QATR 10，ATR-FTIR）による表面官能基の分析を行った。

(2)飽和多孔質体カラム通水実験

白鳥ら（2008）を参考に洗浄した豊浦砂を内径 3 cm，長さ 5 cm のカラムに水中充填し NPs 飽和移動実験に用いた。NPs は未処理のものと 72 時間劣化させたものをそれぞれ 20 ppm に調整して用いた。

流速 5 mL/min で純水を 1 PV 流したのち，NPs 懸濁液を 3 PV，続けて純水を 3 PV 流した。0.33 PV ごとに流出液を採取した。紫外可視分光光度計（島津製作所，UV-1280）を用いて流出液中の NPs 濃度を測定し、流出濃度曲線を作成した。

3. 結果と考察

(1)劣化による粒子状態変化

SEM で得られた画像から，劣化 24 時間までは形態的な変化がなく，72 時間で粒子形状の変化が観察された(図 1)。さらに，ATR-FTIR で得られたスペルトルにおいても 72 時間の劣化後に酸素含有官能基に由来する 1710 cm^{-1} 付近のピークの増加（図 2）がみられた。劣化によるゼータ電位の変化は見られなかったが，粒径はわずかに縮小傾向を示した（図 3)。

(2)劣化による移動性変化

カラム実験において，未処理 NPs の相対濃度が最大で 1.00~1.02 に達した一方，劣化 NPs の最大相対濃度は 0.93~0.97 であった。また，回収率は未処理 NPs で 104.6~107.1%，劣化 NPs で 95.8~103.1%であった（図 4)。いずれの NPs も砂への保持は限定的であったが，劣化 NPs は未処理 NPs と比較して保持されやすい傾向があった。この結果は Liu et al. (2019) などの既報と相反する。劣化により増加した解離基は pH に応じて荷電状態が変化し，また塩濃度も静電相互作用を変化させるため，これらの条件を変えた更なる検討が必要である。

謝辞 本研究は科研費（24H00529）の助成を受けて行った。ここに記して感謝する。

参考文献 Wang et al., 2022. J. Hazard. Mater. 424, 127531. Zhang et al., 2022. J. Hazard. Mater. 424, 127750. Liu et al., 2019. Environ. Sci. Technol. 53, 5805 – 5815. Yu et al., 2024. Environ. Sci. Nano. 白鳥ら, 2008. 農業農村工学会論文集, 255, 9-14

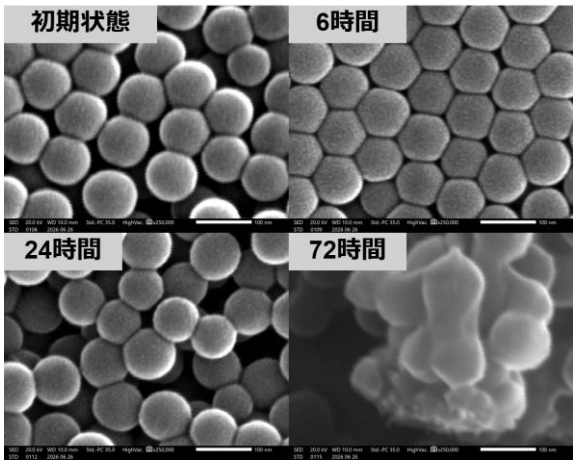


図 1 SEM 画像

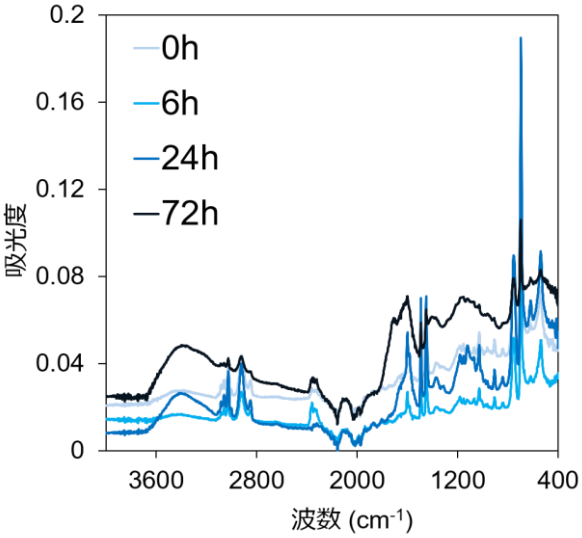


図 2 ATR-FTIR スペクトル

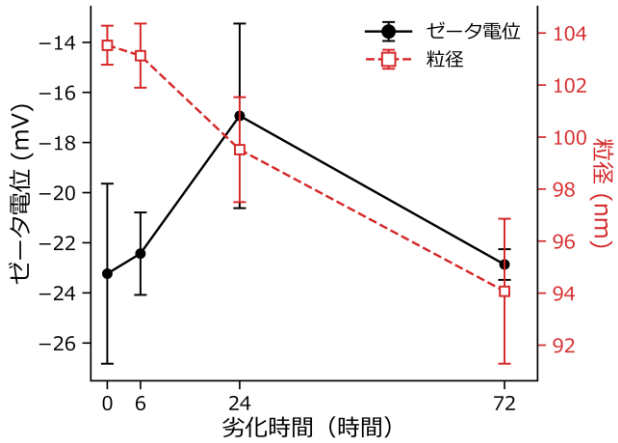


図 3 ゼータ電位と粒径

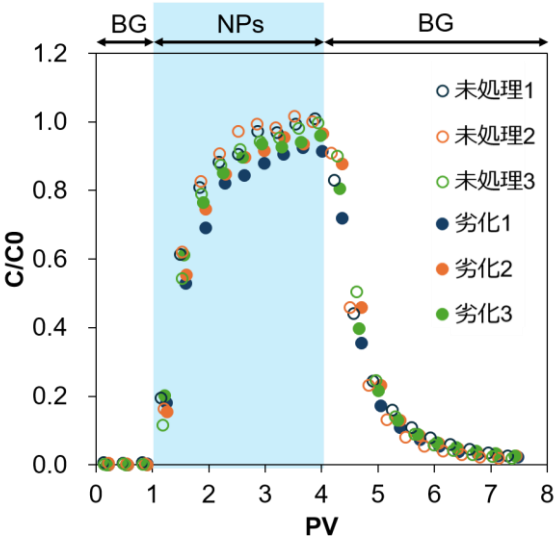


図 4 流出濃度曲線

吸水性ポリマーの繰り返し膨潤に及ぼす塩の種類・濃度と浸漬履歴の影響

Effects of Salt Type, Concentration, and Immersion History on the Repeated Swelling of a Water-Absorbing Polymer

山下祐司・西村　拓

[1] 東京大学大学院農学生命科学研究科

要旨(Abstract)

吸水性ポリマーを塩溶液と脱イオン水に交互に浸漬し,膨潤した高分子ゲルの重量および外液 EC を測定した。NaCl・KCl では 0.1 M の再膨潤時の重量が 0.01 M より小さく，$CaCl_2$では水に戻した後の重量が一価塩の場合より小さかった。KCl では初回の水浸漬より塩浸漬を経たあとの水浸漬による再膨潤時の重量が大きかった。吸水性ポリマーの繰り返しの膨潤は塩濃度と浸漬履歴を併せた評価が必要である。

キーワード：吸水性ポリマー，高分子ゲル，膨潤，塩濃度，浸漬履歴

Key words: water-absorbing polymer, polymer gel, swelling, salinity, immersion history

1. はじめに

吸水性ポリマーの吸水量は,外液の塩濃度上昇に伴って低下する。Bowman ら（1990）は，肥料塩によるポリアクリルアミドゲルの吸水抑制と,その後の脱イオン水洗浄による回復が陽イオンの価数で異なることを示した。また，塩を含む水での反復吸水に伴う吸水量の低下も報告されている（Banedjschafie and Durner，2015）。したがって，土壌利用時の吸水能を評価するには，初回の吸水量に加え，塩濃度変化後の再膨潤と浸漬履歴の影響を把握する必要がある。本研究では，作物残渣由来の吸水性ポリマーである EF ポリマー（EF ポリマー株式会社) を用いて脱イオン水と塩溶液への交互浸漬を行い，塩の種類，濃度および初期浸漬液が繰り返し吸排水応答に及ぼす影響を調べた。さらに，外液の電気伝導度（EC）と重量に基づく塩収支を試算し,ゲル内残存塩量の推定可能性を検討した。

2. 方法

EF ポリマー粒状タイプ 1.0 g を 255 メッシュのナイロン網（株式会社 NBC メッシュテック）で作成した 6 cm × 9 cm の袋に封入した。塩溶液として,NaCl および KCl の 0.01, 0.1 M, ならびに $CaCl_2$の 0.01 M を用いた。

ポリマーの繰り返し浸漬実験では、塩溶液→水→塩溶液→水の 4 ステージとした。浸漬順の影響を確かめるため， KCl の 0.01 M について,水→塩溶液→水→塩溶液のパターンもおこなった。ステージの切り替えは 48 時間以上経過後とした。初期外液量は塩溶液 300 mL，脱イオン水 500 mL とし,切り替えのたびに外液を新しい液に全量交換した。

浸漬中にポリマーの封入された袋の重量と外液の EC を経時測定した。EC から塩濃度への換算には,塩浸漬時は 0.005～0.1 M の 5 点，水浸漬時は 0.00001～0.005 M の 7 点に対する切片付き一次回帰式を検量線とした。

ゲル内の残存塩量は以下の手順で推定した。溶液密度を 1 g/mL とし，外液の重量増減をポリマーの保持液量の重量増減として,外液量 V を求めた。EC への寄与をすべて投入塩に由来すると仮定し,外液塩量を濃度と体積の積として，ゲル内塩量を逐次更新した。新規投入塩量は水浸漬時には 0 とし，1 つのステージ区間末のゲル内塩量を次ステージへ引き継いだ。初期のゲル内塩量は 0 とした。負の推定値はゼロに置き換えず，収支の不整合として扱った。

3. 結果

塩溶液から開始した系では，水への浸漬でポリマー重量が増加（吸水）し，２度目の塩溶液への浸漬で減少（排水），２度目の水への浸漬で再び増加した（図 1）。２度目の水浸漬の 180 分後のポリマー重量は，NaCl の 0.01，0.1 M でそれぞれ 74.2，56.5 g，KCl で 73.1，57.8 g であり，外液の塩濃度が高いとき，より小さかった。$CaCl_2$ 0.01 M 系は 34.6 g であった。

水から開始した系では，初回水浸漬と塩浸漬後の水への再浸漬の 180 分重量を比較すると，0.01 M で 39.1→60.1 g, 0.1 M で 39.5→50.1 g へ増加した（図 2）。ステージ区間末での重量でも同じ傾向の変化を示した。したがって，この増加は浸漬時間の違いだけでは説明されなかった。水浸漬中の外液 EC は上昇し，水から開始した初回にも EC が認められた。塩収支の試算では一部条件で負値が生じた（図 3）。

4. 考察

推定されたゲル内塩量は，添加塩以外の導電性成分や検量線の適用性に影響される。とくに塩投入前から EC が生じる結果は，全 EC が投入塩に由来するとの仮定だけでは説明できない。推定残存量をイオンの結合量とは解釈せず，外液組成の直接分析による収支確認が今後求められる。

5. おわりに

EF ポリマーの繰り返し吸水応答には，塩の種類・濃度と浸漬履歴による違いが認められた。吸水能の評価には，再膨潤と外液組成の変化を併せて扱うことが重要である。

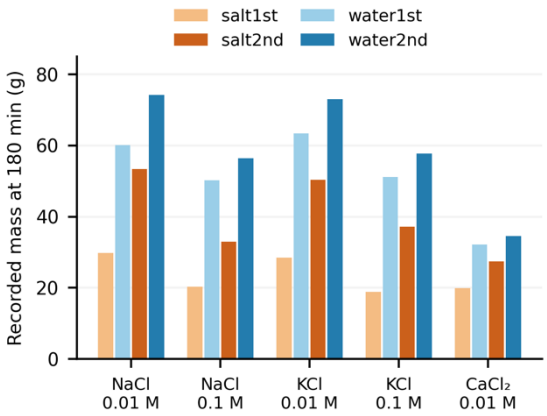


図 1　塩溶液から浸漬を開始した 180 分後のポリマー重量

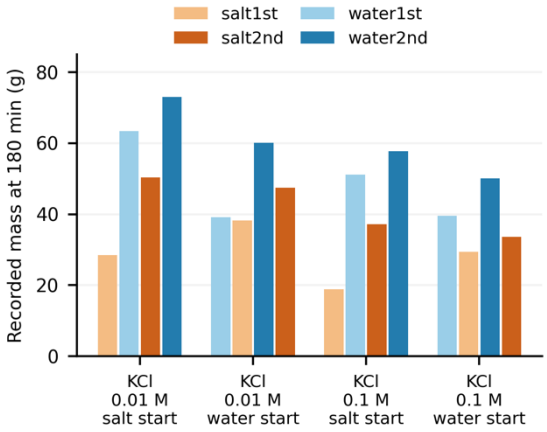


図 2　塩溶液あるいは水から浸漬を開始した 180 分後のポリマー重量

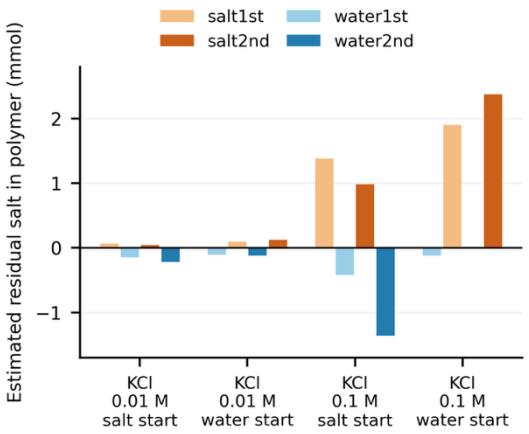


図 3　推定されたゲル内塩量

引用文献

Bowman, D. C., Evans, R. Y. and Paul, J. L. (1990) *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 115, 382–386.

Banedjschafie, S. and Durner, W. (2015) *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 178, 798–806.

謝辞　この成果は、NEDO(国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構)の補助事業(JPNP23019)の結果得られたものです。

固定隔畝畝間灌漑の効果および動的根群成長モデルによる根群分布の予測

Effect of Fixed Skip Furrow Irrigation and the Prediction of Root Distribution with a Dynamic Root Growth Model

藤巻晴行[1]・Erkinbay TLEUBERGENOV[2]・Ismail ASANOV[3]・斎藤広隆[4]

[1]鳥取大学・[2]カラカルパクスタン農業大学・[3]アラル海流域イノベーションセンター・[4]東京農工大学

要旨(Abstract)

費用を抑えつつ灌水量を節減する手法として、従来のように全ての畝間に灌水するのではなく一つ飛ばしに灌水する隔畝畝間灌漑(SF)が考案されてきたが、通水畝間を固定することでさらに節水を図る固定隔畝畝間灌漑(FSF)の効果を調べるため、ウズベキスタンでトウモロコシを用いた比較実験を行った結果、その効果が確認された。動的根群成長モデルは通水側に偏った根群分布を概ね再現できた。

キーワード：蒸散、吸水、塩ストレス

Key words: transpiration, root water uptake, salinity stress

1. Introduction

Skip furrow irrigation would be a cost-effective water saving method by reducing the amount of water supplied and evaporation losses. Conventional skip furrow switches watered furrow at each irrigation. But if the watered furrow is fixed on one side, we may further save water and plants may extend root preferentially and more effectively. It is called Fixed Skip Furrow (FSF) Irrigation. To evaluate the effectiveness of FSF for maize on a sandy loam soil, and to investigate the validity of a dynamic root development model, we carried out a field experiment in Nukus, Uzbekistan.

2. Materials and Methods

The field area was 40.5 m wide and 10 m long, with 54 ridges with a spacing of 0.75 m. We set up three treatments: conventional every furrow irrigation(F), alternating skip furrow irrigation (SF), and FSF. Each treatment had three replicates consisting of six furrows. Maize was sown on 2 June at 20 cm plant spacing at the top of each bed. To monitor soil moisture and salinity, four WD5-WET-SDI probes were installed to each treatment as illustrated in Fig.1. Irrigation was carried out six times, 80, 68, and 60 mm at each time for F, SF and FSF, respectively, using pipelines with flowmeters. Only 13 mm of rain occurred during the growing period. Yield survey was conducted on 2 October. Root and soil samples were also collected at the same time.

3. Dynamic root growth model

In the macroscopic root water uptake model, the water uptake rate, S (cm s^{-1}) is given as the product of reduction coefficient, α, and potential root water uptake rate, S_p, which is given as the product of potential transpiration rate, T_p(cm s^{-1}), and root activity, β(cm^{-2}).

$$S=S_p\alpha=T_p\beta\alpha \tag{1}$$

The root activity, β, is a value obtained by normalizing root length density such that integration of the across the root zone gives unity:

$$\int_0^{drt}\int_{-grt}^{grt}\beta\,dxdz=1 \tag{2}$$

where x is horizontal coordinate (cm), z is depth (cm), d_{rt} is lower boundary of the root zone (cm) and g_{rt} is rightward limit of the root zone. In a numerical model WASH_2D which we use, d_{rt} is

given as a function of cumulative transpiration, τ:

$$d_{rt}=a_{drt}[1-\exp(b_{drt}\,\tau)]+c_{drt} \quad (3)$$

where a_{drt}, b_{drt}, and c_{drt} are empirical parameters. Various functions for expressing β have been presented and following one is used in WASH_2D.

$$\beta_p=0.75(b+1)d_{rt}^{(-b-1)}(d_{rt}-z+z_{r0})^b g_{rt}(1-x^2 g_{rt}^{(-2)}) \quad (4)$$

where β_p is potential β without any stresses or if the plant is completely insensitive to stress, b is empirical shape factor and and z_{r0} is the depth below which roots exist. Then β is given by multiplying average α from germination to the time, $\bar{\alpha}$, to β_p, and normalized as:

$$\beta=\frac{\beta_p\bar{\alpha}^\gamma}{\int\int\beta_p\bar{\alpha}^\gamma dxdz} \quad (5)$$

where γ is adaptivity. If γ = 1, roots escape difficult zone and preferably extend to easy zone. If γ = 0, roots grow as described with eq.(4) regardless of dry or saline zone. This model requires to store cumulative potential and actual water uptake rate for each element as:

$$\bar{\alpha}=\frac{\int_0^t S\,dt}{\int_0^t S_p\,dt} \quad (6)$$

4. Results and Discussion

There was no significant difference in yield. Figure 1 compares biological water productivity, WP (= biomass / mass of water applied). WP of SF was 1.27 times larger than F and that of FSF was even higher, 1.51 times, indicating the effectiveness of FSF. In FSF, roots avoided the dry and saline zone and preferentially extended to surface layer of watered furrow (right side), as shown in Fig.2 and 3. The effectiveness of FSF may owe to such a adaptivity of maize.

Simulated salt content distribution are also drawn in Fig.2. The numerical solution slightly underestimated the width and overestimated the depth of accumulated zone.

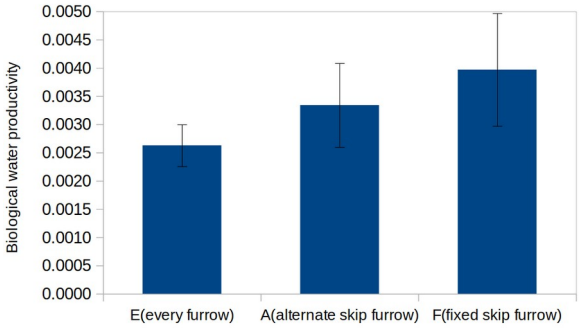


Figure 1 Comparison of biological water productivity

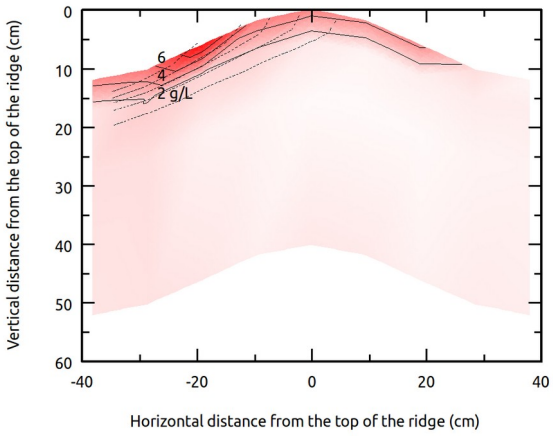


Figure 2 Profile of the mass of salt per volume under FSF at the end.

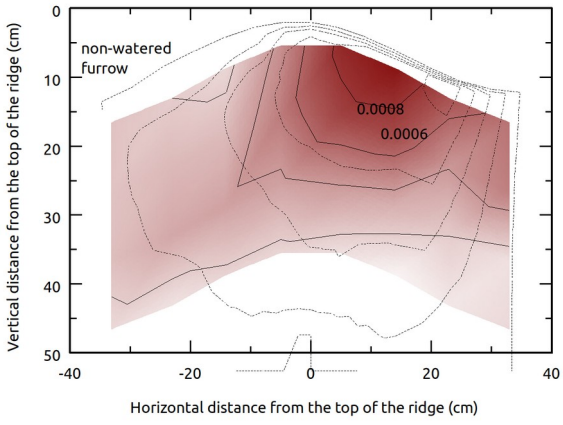


Figure 3 Profile of root length density under FSF

The simulated root activity distribution somewhat skewed to watered side but less skewed than measured one. Also, simulated root activity distribution were horizontally narrower, implying that given original distribution might have been too narrow.

1

川岸にすむハンミョウ幼虫たちは激流時にどのように命を守るのか

Survival Techniques of Riverine Tiger Beetle Larvae Against Flood Disturbance

山本日和里[1]・水田陽斗[2]・百瀬年彦[3]

[1,3]石川県立大学大学院 生物資源環境学研究科 環境科学専攻

[2]株式会社東洋設計

要旨(Abstract)：

河川性ハンミョウの幼虫は川岸や中州など、河川増水によって冠水やかく乱が生じる場に営巣する。先行研究で、幼虫は増水時には巣穴入口を砂で塞いで水没を回避し、冠水中は隔壁直下で静止することが知られている。しかし、増水時のかく乱に対してこの隔壁が防御機能を持つとは考えにくく、幼虫は別の対応策を備えている可能性がある。本研究では、石川県の手取川に生息する河川性ハンミョウ幼虫を用いて、室内で増水によるかく乱を再現し、幼虫の行動を調べた。

キーワード： 河川性ハンミョウ幼虫、かく乱深、冠水、隔壁

Key words: tiger beetle larvae, depth of disturbance, flooding, plug

1. はじめに

ハンミョウは、コウチュウ目オサムシ科に属する肉食性昆虫である。幼虫が川岸や中州を生息場所とする種は河川性ハンミョウと呼ばれ、コニワハンミョウ、エリザハンミョウ、アイヌハンミョウの3種が知られている。川岸や中州は餌生物が豊富な一方、増水時には冠水や土砂移動によるかく乱を受ける環境でもある。

河川性ハンミョウの幼虫は、地下水位の上昇時に巣穴入口に砂で隔壁を形成し、水没を回避することが知られている。また、冠水時には隔壁直下でほとんど動かないことが確認されている。しかし、この行動は水没への適応を示すものであり、増水に伴う表層かく乱への応答は明らかになっていない。さらに、砂で作られる隔壁が増水時の表層かく乱に対して防御機能を持つとは考えにくく、幼虫は隔壁形成以外の対応策を備えている可能性がある。そこで本研究では、石川県の手取川に生息する河川性ハンミョウの幼虫2種(コニワ・エリザ)を対象に、野外調査を実施するとともに、室内で河川増水による表層かく乱を再現し、そのときの幼虫の行動を観察することを目的とした。

2. 方法

(1) 野外調査

2026年7月から9月にかけて、石川県手取川流域の藤蔵地区で幼虫の生息状況の把握とかく乱深の測定を行った。

幼虫が確認された場所に50 cm四方のコドラートを設置し、コドラート内の巣穴数および巣穴深を調査することで、幼虫の生息状況を把握した。かく乱深は、ロッド・ワッシャー法により測定した。また、河川の流況および増水状況を把握するため、定点カメラでインターバル撮影を行った。

(2) 室内実験

2026年8月にコニワハンミョウおよびエリザハンミョウの幼虫を採取し、実験に使用した。室内実験には、藤蔵地区の砂を用いた。

アクリル板で薄型の容器を作成し、砂を充填・飽和させ、各幼虫に巣穴を掘らせた。その後、地下水位を上昇させて冠水状態とし、さらに洗浄瓶を使って表層かく乱を再現した。なお、地下水位の上昇速度は、飽和透水係数(0.6 cm/分)とした。

3. 結果

(1) 野外調査

両種の幼虫の巣穴深は、いずれも約 10 ㎝であった。調査期間中、コドラートは複数回冠水したが、表層かく乱が確認されたのは 1 回のみであった。このときのかく乱深は 5 ㎝であった。かく乱が生じた後も、コドラート内には両種の巣穴を確認できた。両種とも表層かく乱に対して何らかの対応手段を有している可能性が示唆された。

(2) 室内実験

両種の幼虫は、飼育容器に放すと直ちに掘削を開始し、約 10 ㎝の巣穴を作成した。その後、地下水位を上昇させると、両種とも巣穴入口付近に隔壁を 1 つ作成し、水没を回避した（図 3 左）。

冠水状態で表層をかく乱し、隔壁を破壊しても、巣穴内の空気は維持され、かく乱によって巣穴上部は破壊されたものの下部構造は維持された。かく乱深を徐々に増加させると、幼虫は頭部で崩壊部を塞ぐようにしながら、巣穴下方へ移動した。(図 3 右)。最終的にかく乱深が巣穴深に近づくと、幼虫は水流に飲み込まれ、巣穴外へ流出した。

4. 考察

室内実験では、幼虫はかく乱深に応じて巣穴の下方へ移動したが、かく乱深が巣穴深に近づくと水流に飲み込まれ、巣穴外へ流出した。このことから、幼虫は巣穴深よりも浅いかく乱には対応できると考えられ、かく乱深と巣穴深の大小関係が幼虫の対応可否に重要であることが示唆された。実際に、野外調査で確認されたかく乱深は約 5cm であり、幼虫の巣穴深である 10 ㎝より浅かった。これらの結果から、今回確認されたかく乱は、巣穴全体を破壊するものではなく、幼虫は巣穴下部へ退避することで、巣穴外に流出するのを回避していたと考えられる。

参考文献

水田陽斗，百瀬年彦，上田哲行：手取川の水辺にすむハンミョウ幼虫たちのサバイバルテクニック, 2019 年度土壌物理学会大会講演要旨集



図 1：生息地の平常時の様子



図 2：生息地の増水時の様子

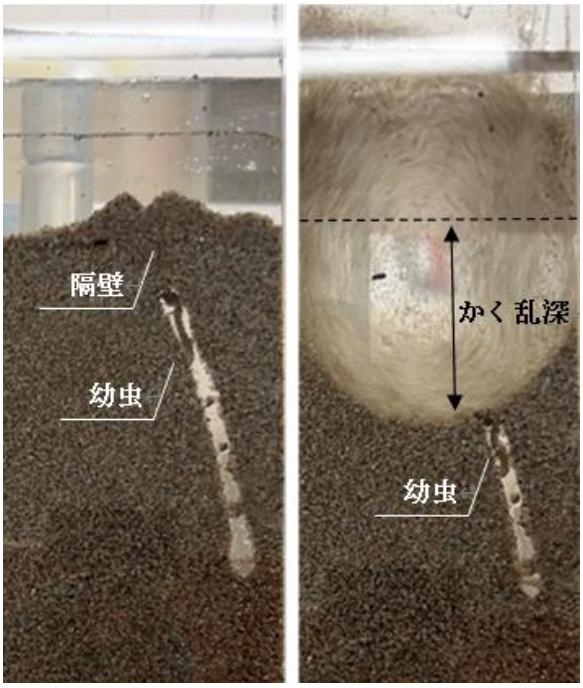


図 3：冠水時の幼虫の様子（左図）とかく乱時の幼虫の様子（右図）

近年の高温・渇水の発生に伴う米の外観品質悪化

Deterioration of Rice Appearance Quality Associated with Recent High Temperatures and Water Shortage

○伊藤健二[1]，西田和弘[1]，磯田創佑[1]，中西正洋[2]，北秋広徳[2]，吉田修一郎[1]

1 東京大学大学院農学生命科学研究科，2 株式会社クボタ

要旨(Abstract)：

近年の登熟期の高温と渇水の発生が米の外観品質に及ぼす影響の実態把握を目的として，複数の現場水田を対象に，米の外観品質と出穂後の平均気温および水田の湛水状況との関係を調査した。その結果，出穂後 20 日間の平均気温が 28℃を超える高温により白未熟粒率が著しく増加したこと，渇水に伴う長期間の非湛水が品質被害を増加させたことが確認された。

キーワード：白未熟粒，米の外観品質，高温障害，渇水

Key words: Chalky grains, grain appearance quality, heat damage of rice, water shortage

1. はじめに

近年の気候変動に伴う極端高温の頻発や局所的な渇水（水不足）は，夏季の高気温に伴う高温障害や水ストレスによる，米の収量・外観品質悪化（白未熟粒率の増加）の被害を深刻化させている. このような被害の実態把握を目的に，本研究では，出穂後の平均気温および水田の湛水状況が，米の外観品質に与える影響を調べた。

2. 方法

調査は 2024 年と 2025 年に，三重県内の同一大規模農業法人が管理する複数水田（38 枚）を対象に実施した。対象水田の水源のほとんどは小規模なため池であり，用水路末端の水田ではたびたび用水不足が問題となっている. 栽培品種は「あいちのかおり」「コシヒカリ」「みのりの郷」の 3 品種である。出穂後 20 日間の平均気温は，2024 年が，26.5～27.3 ℃，2025 年が 27.5～28.5 ℃であり，2025 年の方が高温であった．夏季の降雨量は両年共に少なく（図 1），2025 年の 7 月と 8 月の合計降水量（128 mm：平年値の約 4 割）は過去 10 年で最少であった.

各圃場の玄米のサンプルを取得し，米の外観品質（白未熟粒率等）を穀粒判別機で測定した。また，各圃場の水位を，超音波式水位センサー（farmo）を用いて計測した。出穂後 20 日間の平均気温は，営農支援システム（KSAS）の記録（移植日等）と機能を用いて算出した.

3. 結果と考察

出穂後 20 日間の平均気温と白未熟粒率の関係を図 2 に示す。白未熟粒率は，平均気温が高いほど増加し，平均気温が 27.5℃以上となった 2025 年には，著しく高い値を示した。一方で，同一気温条件下であっても白未熟粒率には大きな違いが見られた。

2025 年のサンプル平均および図 2 の①・②の外観品質の内訳を比較した結果を図 3 に示す．白未熟粒率が高かった水田（②）では，特に乳白粒率が顕著に高かった.

このような白未熟粒多発水田では，3 品種ともに，出穂前後に長期間の非湛水状態が生じており，そのほとんどは用水路末端に位置していた．一例として，「あいちのかおり」における水田水位（②）を図 4 に示す。②の水田では，出穂期（8 月 20 日頃）を含む 8 月以降の長期間にわたり非湛水であった。

以上の結果から，夏季の高温条件に加え，長期間の無降雨と用水不足に伴う非湛水化が，米の外観品質悪化（白未熟粒率の増加）を助長したと考えられた。

4. おわりに

以上より，登熟期の高温に伴う白未熟粒率の増加に加え，長期間の非湛水（用水不足）が被害をさらに悪化させたことが確認された。

謝辞

本研究は，「クボタ―東京大学産学協創事業」の一環として実施した。

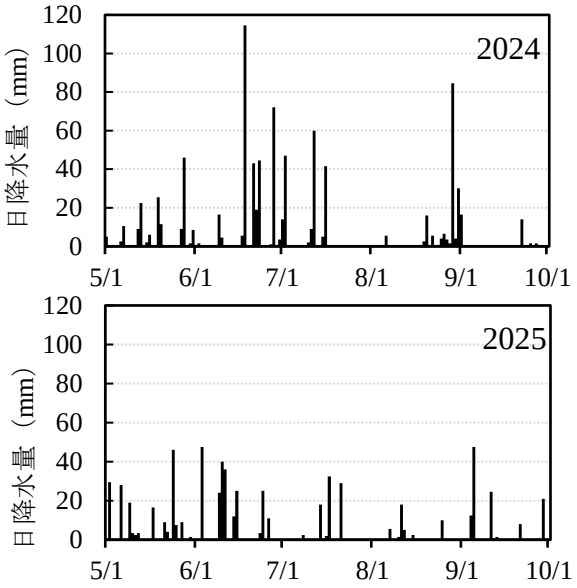


図 1　5 月から 9 月の日降水量

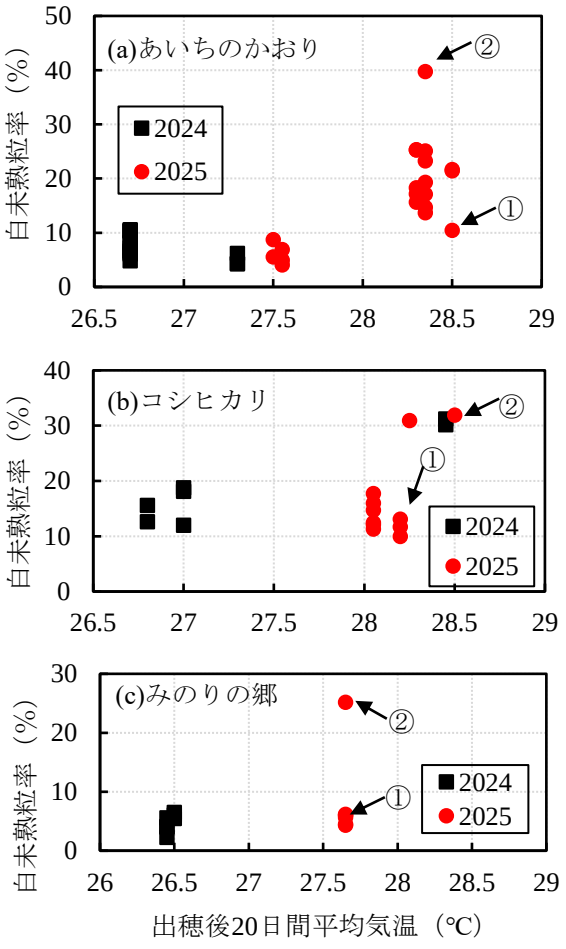


図 2　出穂後 20 日間平均気温と白未熟粒率の関係

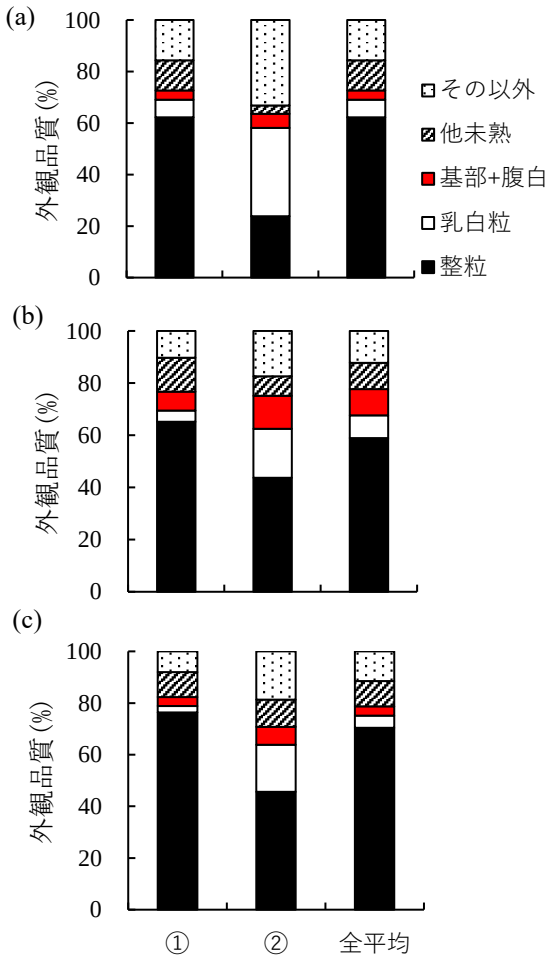


図 3　玄米の外観品質の構成要素（2025）
(a)あいちのかおり（n=20），(b)コシヒカリ（n=11），(c)みのりの郷（n=7），①②は図 2 の①②．白未熟粒は基部＋腹白＋乳白粒

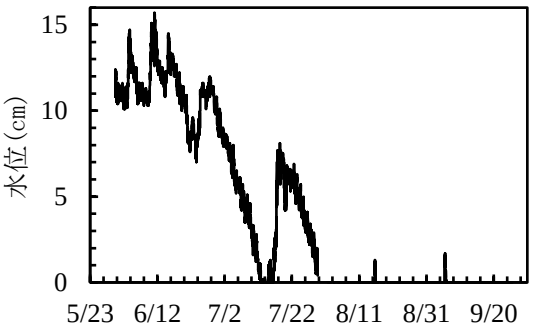


図 4　湛水水田の水位変化
（2025 年：あいちのかおり（図 2 の②）

Effects of Simulated Plant-Mediated Oxygen Transport on Methane Emissions in Flooded Paddy Soil: A Soil Column Experiment Using Gas-Permeable Silicone Tubes

AJMCM Siriwardana[1]*, SAKAI Kazuhito[1,2], Tamotsu Nakandakari[1,2], Kozue Yuge[1,3]

[1]United Graduate School of Agricultural Sciences, Kagoshima University, Kagoshima, Japan.

[2]Faculty of Agriculture, University of the Ryukyus, Okinawa, Japan.

[3]Faculty of Agriculture, Saga University, Saga, Japan.

Abstract

The effects of oxygen availability on CH_4 emissions from flooded paddy soil were evaluated using gas-permeable silicone tubes under alternating atmospheric air and N_2 ventilation. CH_4 fluxes were reduced by about 80–94% in all treatments under atmospheric air, whereas silicone tube treatments exhibited higher CH_4 fluxes than the no tube control under N_2 ventilation. Oxygen availability strongly influenced CH_4 emission, while silicone tubes can transport oxygen into the soil and CH_4 to the atmosphere.

Key words: Methane emission, Oxygen availability, Paddy soil, Silicone tubes

1. Introduction

Rice cultivation is one of the major sources of anthropogenic methane (CH_4) emissions, with plant-mediated CH_4 transport representing a major emission pathway (Wei et al., 2021). This study evaluated gas-permeable silicone tubes as pseudo-plants to simulate plant-mediated CH_4 transport, examining the effects of oxygen availability and tube insertion depth on CH_4 emissions from flooded paddy soil.

2. Materials and Methods

A laboratory experiment was conducted at the University of the Ryukyus, Okinawa, Japan, using an automated closed-chamber system with four chambers (500 mL headspace; 69.5 cm^2 base area). The chambers were installed in an 8.15 L plastic container filled with 6.5 kg of moist paddy soil. Three chambers were equipped with ten bottom-closed silicone tubes (inner diameter 1 mm; outer diameter 1.5 mm) inserted at 5, 7.5 or 10 cm depth to simulate plant-mediated gas transport, and control without tubes (NT).

Oxygen availability was manipulated by ventilating the chambers with high-purity N_2 or atmospheric air for 10 min before each measurement. Initially, chambers were sealed with N_2 for 3 days to create oxygen limited condition, then ventilated alternately with N_2 and air every 5 days for 20 days. CH_4 concentrations were measured every 2 min for 30 min using an FTIR spectrometer, and emission rates and total emission per closure were calculated as described by Hoffmann et al. (2017).

3. Results

CH_4 flux was consistently lower during atmospheric-air ventilation than during N_2 ventilation in all treatments and both cycles approximately 80.39-93.67% (Figure 01). During the N_2 cycles, the silicone tube treatments had higher median fluxes than the control (NT). In the 1st cycle, flux increased with insertion depth (10 cm > 7.5 cm > 5 cm > NT; 0.337, 0.297, 0.258 and

0.130 mg CH_4 m^{-2} min^{-1}). In the 2nd cycle, fluxes in the tube treatments were lower than in the 1st, with no depth-related trend (5 cm 0.238, 10 cm 0.224, 7.5 cm 0.219 and NT 0.154 mg CH_4 m^{-2} min^{-1}). During the atmospheric-air ventilation, fluxes were low (about 0.02-0.03 mg CH_4 m^{-2} min^{-1}) and differed little among treatments.

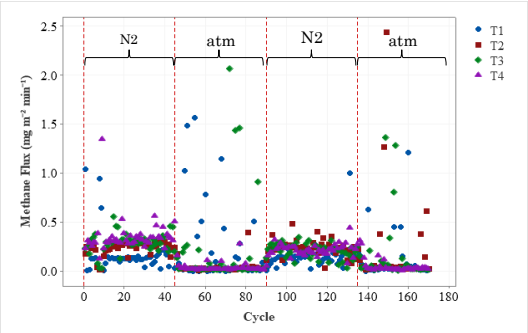


Figure 1. Effect of oxygen availability on CH_4 flux under different silicone tube insertion depths. T1 is the control without tubes (NT); T2, T3 and T4 are tube insertion depths of 5, 7.5 and 10 cm, respectively.

Cumulative CH_4 emission, estimated during the chamber-closure periods, was highest in the 7.5 cm treatment (10.43 mg CH_4), followed by NT (9.42 mg) and 5 cm (9.30 mg), and lowest in the 10 cm treatment (7.97 mg). During the 1st N_2 ventilation cycle, cumulative CH_4 emission increased faster in the 7.5 and 10 cm treatments than in the other treatments, and the 7.5 cm treatment remained the highest for the rest of the experiment. However, the CH_4 accumulation rate in the 10 cm treatment declined after the first atmospheric-air ventilation cycle.

4. Discussion

CH_4 flux declined by approximately 80-94% under atmospheric air ventilation across all treatments. This is consistent with King et al. (1998), who found that CH_4 oxidation controls emission where plant transport is absent and that plots without sedges had deeper oxic zones. They further suggested that oxygen entry through silicone tubes may enhance CH_4 oxidation, whereas Turner et al. (2020) reported that simulated aerenchyma did not change the fraction of CH_4 oxidised in peat. The absence of a tube insertion depth-related effect on CH_4 emission may be due to CH_4 oxidation by oxygen supplied during atmospheric air ventilation, or to depletion of stored CH_4 (King et al., 1998; Turner et al., 2020).

5. Conclusions

Oxygen availability strongly influenced CH_4 emissions from flooded paddy soil, with atmospheric air reducing fluxes by 80–94% compared with N_2 ventilation, possibly through enhanced CH_4 oxidation. Silicone tubes increased CH_4 release under N_2 ventilation, but insertion depth had no consistent effect on cumulative emissions.

References

Wei, X., Fan, L., Li, Y., Wang, W., Zhu, Z., Zhran, M., Shen, J., Kim, P.J., Wu, J., Ge, T. and Dorodnikov, M., 2021. Subsurface methane dynamics of a paddy field under long-term fertilization: 13C-evidence from in-situ belowground labeling. Journal of Cleaner Production, 325, p.129285.

Turner, J.C., Moorberg, C.J., Wong, A., Shea, K., Waldrop, M.P., Turetsky, M.R., Neumann, R.B., 2020. Getting to the root of plant-mediated methane emissions and oxidation in a thermokarst bog. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences 125 (11), e2020JG005825.

Hoffmann, M., Schulz-Hanke, M., Garcia Alba, J., Jurisch, N., Hagemann, U., Sachs, T., Sommer, M., Augustin, J., 2017. A simple calculation algorithm to separate high-resolution CH4 flux measurements into ebullition-and diffusion-derived components. Atmospheric Measurement Techniques 10 (1), 109–118.

King, J.Y., Reeburgh, W.S., Regli, S.K., 1998. Methane emission and transport by arctic sedges in Alaska: results of a vegetation removal experiment. Journal of Geophysical Research: Atmospheres 103 (D22), 29083–29092.

軽埴土における短時間強雨による湛水の観測と評価手法の検討

Study on observation and evaluation of surface water ponding of Light Clay soil

金澤寛志[1]・鈴木伸治[2]・渡邉文雄[2]

[1]東京農業大学院地域環境科学研究科農業工学専攻・[2]東京農業大学地域環境科学部

要旨(Abstract)

近年増加している短時間強雨による裸地での湛水現象のメカニズムを解明するため、土壌水分センサを用いた軽埴土における湛水現象の観測と、土壌の吸水度から湛水の発生する降雨強度を評価することを試みた。土壌水分センサでは湛水が明確に観測でき、湛水発生評価では吸水度だけでなく、飽和透水係数も考慮する必要があると示唆された。

キーワード：湛水　浸潤特性　気候変動　土壌侵食

Key words: Surface water ponding, Infiltration, Climate change, Soil erosion

1. 背景

近年、短時間強雨の増加が報告されている（気象庁,2026)。土壌の浸入能を超える短時間強雨は、湛水とそれに続く表面流去や土壌侵食の引き金となる。Perroux(1981)は、降雨強度と初期湛水開始時間の関係を以下とした(式 1)。

$$t_p = \frac{S^2}{2v_0^2} \quad (式\ 1)$$

ここに、t_p : 初期湛水開始時間(hour) , S : 吸水度 (mm hour$^{-0.5}$) , v_0 : 降雨強度(mm hour^{-1})である。

この式では、吸水度が土壌の浸潤能を表す要素となっており、短時間強雨における浸潤現象を考察する手掛かりになると考えられる。

また、湛水の発生を直接観測できればより詳細に湛水の発生条件をあきらかにすることができる。

そこで本研究は、以下の 2 つを目的とした。

(1)　湛水の発生を観測する手法を確立する。

(2)　式 1 を用いた湛水発生予測式の精度を検証する。

2. 方法

2-1 土壌面湛水の直接観測

東京農業大学世田谷キャンパス生産環境工学科試験圃場(N35°　38'33", E139°　38'4", 標高 47m)に褐色低地土区画(1.0 m×　1.0　m) を設置した。観測区の土壌の物理性を表 1 に示す(表 1)。観測は 2026 年 7 月 31 日から 9 月 30 日の間で行った。

表 1　観測区の土壌の物理性

粒径区分(%)				間隙率	飽和透水係数
砂	シルト	粘土	土性	(m^3 m^{-3})	(cm s^{-1})
36.4	34.6	29.0	軽埴土	0.565	3.50 ×10^{-4}

観測区には、土壌水分センサ(CS616)を地表面に接するように設置し(以下水平設置センサ)、センサのロッドの断面の半分が地中に埋まった状態にした。この時、センサの測定値から地中の水分の影響を除くため、もう 1 つのセンサ(TEROS11)(以下鉛直設置センサ)を地表面に対して垂直に設置した(図 1)。湛水が生じれば、水平設置センサの値が鉛直設置センサに比べ大きくなることを利用し、湛水発生の観測を試みた。降雨量を転倒升式雨量計(TR525-M,Texas Electronics)で観測した。

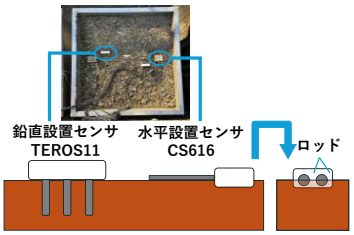


図 1 観測区とセンサの設置位置の様子と水平設置センサの断面図

上記の測定を区画内で 2 反復行った。また、観測区を定点カメラ（富士倉トレイルカメラ FTC-003mini) によって定点撮影し、目視でも湛水の有無を確認した。

2-2 土壌面湛水の予測

式 1 を降雨強度(v_0)について解き、湛水が発生する降雨強度を求めた。パラメータである吸水度は体積含水率と負の相関関係があるため、観測区から採取した不攪乱土で、負圧浸潤計(METER Group)によって体積含水率と吸水度の関係を求め、鉛直設置センサで観測した体積含水率から 10 分ごとの吸水度を求め、予測式のパラメータとした。

3. 結果

3-1 センサによる土壌面湛水の観測結果

図 2 に 2026 年 8 月 22 日の降雨における水平設置センサと鉛直設置センサの体積含水率と降雨量の関係を示す。また、同時刻の観測区の様子を写真 1 に示す。

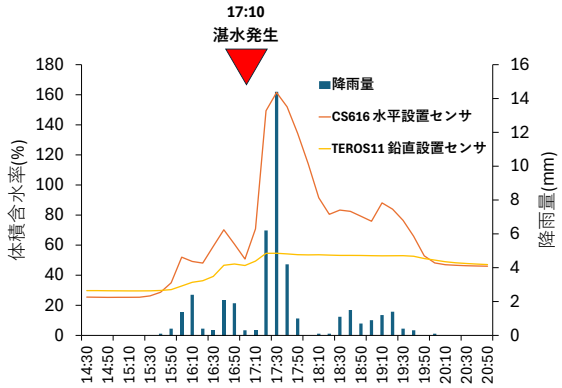


図2　8月22日の降雨時の各水分センサの体積含水率



写真 1　8 月 22 日 17:10 の観測区(左), 8 月 22 日 17:30 の観測区(右)

図 2 より降雨のない時はセンサ同士の値はよく一致し($p>0.05$)、湛水が生じているとき、水平設置センサは鉛直設置センサを大きく上回っていた($p<0.05$)。

また、2026 年 9月6 日のような 0.9 mm/10 分以下の降雨強度の降雨(図 3)でも湛水が生じ(写真 2)、その際も各水分センサには有意な差があった($p < 0.05$)。

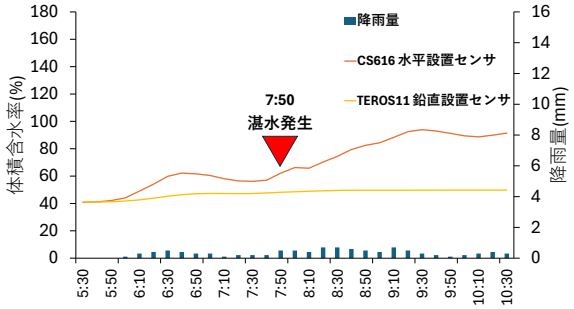


図 3　9 月 6 日の降雨時の各水分センサの体積含水率

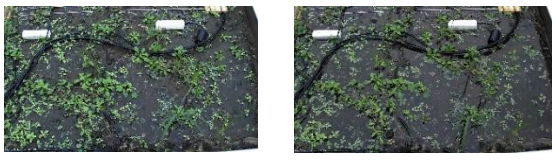


写真 2　9 月 6 日 7:50 の観測区(左), 9 月 6 日 9:30 の観測区(右)

3-3 予測式の精度検証結果

吸水度と体積含水率の関係は図4のようになり、指数関数 (式2) で近似することができた。

$$s = 0.931e^{-5.34\theta} \quad (式\ 2)$$

ここに、θ：体積含水率($m^3\ m^{-3}$)である。

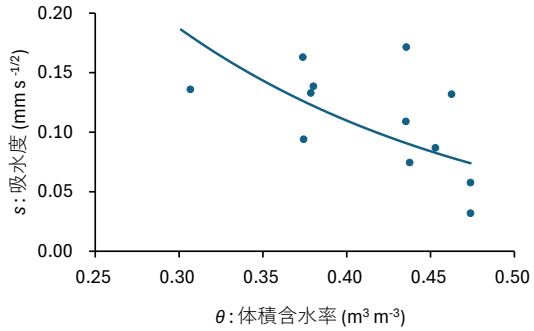


図4　体積含水率と吸水度の関係

式 2 から各時刻の吸水度を求め、降雨強度(v_0)について解いた式 1 から湛水が生じる降雨強度を求めた。観測期間中に湛水発生を 11 回記録したが、湛水発生の予測と目視による結果が一致したのは 1 回、最大で 40 分の遅れで予測できたのが5回、予測できなかったのが 5回だった。予測ができない、あるいは遅れたときの実際の降雨強度は、湛水が生じると予測された降雨強度(0.9 mm / 10 分)を下回っていた。

4. 考察・まとめ

土壌水分センサを水平と鉛直に設置することで、湛水時に水平設置センサの値が、鉛直設置センサの値を大きく上回ることが明らかになった。さらに、この傾向は 10 分間の降雨強度に関わらずみられた。このことにより、水分センサによる湛水の観測は可能であると示せた。

一方で、式 1 を用いた湛水の発生予測は、予測に遅れが生じることや、予測ができなくなることが分かった。鈴木ら(2018)の結果によると、黒ボク土(砂質壌土)では目視による結果と、(1)式の予測はよく一致していた。このことから、軽埴土の浸潤現象においては、吸水度だけでなく飽和透水係数も影響している可能性が示された。

参考文献

Perroux, K. M., et al. (1981):Water Movement in Uniform Soils During Constant-flux Infiltration, Soil Sci. Soc. Am. J. 45:237-240

鈴木伸治，青木将人，渡邉文雄 (2018)：湛水の直接観測手法の開発と湛水を生じさせ得る降雨の長期変動傾向の検討：2018 年度土壌物理学会大会講演要旨集 106-107

気象庁(2026)：気候変動レポート

GISに基づく都市屋上農業適地評価における水利用可能性の重要度：スリランカ・コロンボの事例

Water Availability as a Decision Criterion in GIS-Based Rooftop Agriculture Suitability Assessment: Evidence from Colombo, Sri Lanka

T. S. Ukwaththa[1]*, Kazuhito Sakai[1,2], Shinya Nakamura[1,2], Mitsumasa Anan[1,3], G. Y. Jayasinghe[4], H. T. Rupasinghe[5]

[1] United Graduate School of Agricultural Sciences, Kagoshima University, Japan; [2] Faculty of Agriculture, University of the Ryukyus, Japan; [3] Faculty of Agriculture, Saga University, Japan; [4] Department of Agricultural Engineering, University of Ruhuna, Sri Lanka; [5] Department of Architecture, General Sir John Kotelawala Defense University, Sri Lanka

Abstract

Rooftop farming can be a component of urban food supply, and its feasibility will depend on the availability of water amongst other factors. The present study examined in depth the importance given to water availability during the GIS suitability assessment for rooftop agriculture in Colombo, Sri Lanka. The variation in individual Best-Worst Method (BWM) weights from 14 experts and the differences among the clusters of preferences were analyzed. Water availability had a mean weight of 0.2203 and ranged from 0.1359 to 0.4372. The results reinforce the need to take into account the variability in the preferences of experts when considering the priorities of rooftop agriculture planning.

Keywords: Best-Worst Method; GIS; Expert preferences; Rooftop agriculture; Water availability

1. Introduction

Urban rooftop agriculture (RTA) is a solution that can be developed to boost urban food production with available building space. The suitability of rooftops for rooftop farming relies on the physical, environmental, and functional aspects of rooftop farming, such as water availability, which is an important aspect of crop production but may be limited in rooftop farming. These criteria can be integrated for spatial suitability assessment using GIS-based multi-criteria decision analysis (MCDA) (Sultana et al., 2024). But the 'weight' of experts is an average and can mask variance in judgment. Water-availability weights were assigned by experts and this study aims to evaluate these weights against six other suitability criteria, rather than measuring water availability or soil-water processes, with regard to the variation in preferences.

2. Materials and Methods

Seven suitability criteria were evaluated by fourteen experts from the four fields of Agriculture, Architecture, Environment, and Urban Planning: Rooftop Area, Building Age, Sunlight Availability, Building Use, Water Availability, Building Height, and Property Value.

The weights were derived by applying the Best-Worst Method (BWM) (Rezaei, 2015, 2016) to get the relative preferences through comparing the most and least important criteria.

The weights for each individual were analyzed descriptively and clustered into three preference clusters using the k-means method.

Similarities among weighting patterns were displayed using multidimensional scaling (MDS). The mean weights were computed at the cluster level and compared to evaluate the differential emphasis on water availability. Cluster patterns are considered "exploratory" because of the small panel and the two-member size of the smallest cluster.

3. Results

The 14 experts felt that Water Availability had the highest mean BWM weight (0.2203) followed by Rooftop Area (0.1997) and Sunlight Availability (0.1838) (Table 1).

There was, however, a wide range in expert preferences for Water Availability weights from .1359 to .4372. The standard deviation for Building Use was highest (0.1197), and this also indicated significant differences in the importance perceptions.

Criterion	Mean	Minimum	Maximum
Water availability	0.2203	0.1359	0.4372
Rooftop area	0.1997	0.0498	0.4113
Sunlight availability	0.1838	0.0887	0.3095
Building use	0.1009	0.0252	0.3813

Table 1. Selected descriptive statistics for individual BWM weights (n = 14).

The three preference groups, containing 6, 6 and 2 experts, respectively, were identified by applying K-means clustering to the experts. The top three priorities (highest scores) in Cluster 1 were Water Availability (0.2473), Building Age (0.2256), and Sunlight Availability (0.1683). Cluster2 identified Rooftop Area (0.3042), Water Availability (0.2030) and Sunlight Availability (0.1970). The values for Building Use (0.3784) were also high for Cluster 3, compared to the others, whereas the weights for Rooftop Area (0.0784) and Building Age (0.0453) were not that high. The separation of Cluster 3 was more prominent in the MDS plot, while the separation of Clusters 1 and 2 was more overlapping.

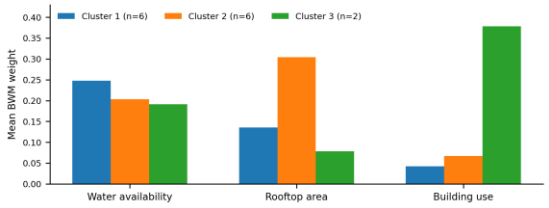


Figure 1. Mean BWM weights for selected criteria across preference clusters.

4. Discussion

These findings indicate that aggregated weights may conceal differences in expert judgments, which can influence GIS-based suitability assessments. Water Availability should therefore be considered alongside other criteria rather than treated as the sole determinant of rooftop suitability. Future sensitivity analysis could compare suitability maps generated using alternative weighting schemes to assess potential changes in spatial classifications (Zhao et al., 2024). However, this study examined expert preferences rather than physical water availability or resulting spatial changes. The small expert panel (n = 14), particularly the two-member Cluster 3, limits generalization. Thus, cluster patterns should be interpreted as exploratory and require further validation.

5. Conclusion

The weights of the seven criteria in this Expert Panel were highly variable, with Water Availability having the highest mean BWM weight (0.2203). The cluster-level results also showed that water availability, rooftop area, and building use were significant. The reporting of this variability together with the aggregate weights can serve as a more informative basis for the interpretation of the water-related priorities in the assessment of urban rooftop-agriculture suitability.

References

Rezaei, J. (2015). Best-worst multi-criteria decision-making method. Omega, 53, 49-57. https://doi.org/10.1016/j.omega.2014.11.009

Rezaei, J. (2016). Best-worst multi-criteria decision-making method: Some properties and a linear model. Omega, 64, 126-130. https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.12.001

Sultana, N., Sharifi, A., Haque, M. N., & Aghaloo, K. (2024). Urban greening in Dhaka: Assessing rooftop agriculture suitability using GIS and MCDM techniques. Journal of Environmental Management, 368, 122146. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122146

Zhao, L. Q., van Duynhoven, A., & Dragićević, S. (2024). Machine learning for criteria weighting in GIS-based multi-criteria evaluation: A case study of urban suitability analysis. Land, 13(8), 1288. https://doi.org/10.3390/land13081288

多孔質マイクロ流路におけるマイクロプラスチック粒子の沈着と閉塞挙動の KCl 濃度依存性

Effects of KCl Concentration on Microplastic Particle Deposition and Hydraulic Clogging in a Porous Microchannel

○石原 直史[1]，小林 幹佳[2]，杉本 卓也[2]

○Naofumi ISHIHARA[1], Motoyoshi KOBAYASHI[2], Takuya SUGIMOTO[2]

[1]筑波大学大学院 環境科学学位プログラム,[2]筑波大学生命環境系

要旨(Abstract)

円柱から構成される多孔質マイクロ流路で，マイクロプラスチックモデル粒子の沈着・閉塞に KCl 濃度が及ぼす影響を画像解析と差圧測定から評価した。沈着面積率の増加速度と閉塞速度は KCl 濃度とともに増加し，200 mM 付近で最大となった。一方，沈着面積率の増加速度は 100～150 mM で急増したのに対し，閉塞速度は 200 mM 付近まで段階的に増加することを示した。この結果は，両指標が間隙内の沈着量増加に対して異なる応答を示すことを示唆している。

キーワード： マイクロプラスチック，多孔質媒体，粒子沈着，閉塞，透水性

Key words: Microplastic, Porous media, Particle deposition, Clogging, Permeability

1. はじめに

土壌などの多孔質媒体では，コロイド粒子の輸送・沈着が間隙内の流動や透水性に影響を及ぼす。粒子の沈着には，溶液のイオン強度や粒子－固体表面間の相互作用が関与し，電解質濃度の上昇による電気二重層の圧縮は電気的な反発力を弱める[1]。近年，微細流路を用いた研究では，間隙スケールにおける粒子の保持・閉塞挙動が可視化されている[2]。一方，粒子の沈着領域の拡大が水理的閉塞の進行にどのように対応するかを明らかにするには，両者の塩濃度依存性を同時に測定する必要がある。本研究では，円柱から成る多孔質マイクロ流路を用い，画像の輝度低下領域の割合を沈着面積率，差圧から求めた相対透水係数の低下速度を閉塞速度として評価し，両指標の KCl 濃度依存性を比較した。

2. 方法

各実験には，作製後 1 週間経過した PDMS 製マイクロ流路（長さ 41 mm，幅 5 mm，深さ 100 μm，ランダムに円柱ピラーを配置）を用いた（図 1）。直径 1 μm のポリスチレンラテックス粒子を使用し，pH 4 に調整した KCl 溶液で流路を満たした後，同じ KCl 濃度となるように混合した粒子懸濁液を流量 0.052 mL/min で 90 分間送液した。このとき，流入時の粒子数濃度を 9.5×10^7 個/mL，pH を約 4，KCl 濃度を 50～250 mM に設定した。

差圧は静水時の値を用いてゼロ点補正し，補正後の差圧を $\Delta P(t)$，送液開始後 1～5 分の平均値を ΔP_0 とした。流量・粘度一定の条件下で，相対透水係数を次式から求めた。

$$k(t)/k_0 = \Delta P_0/\Delta P(t)$$

1～30 分の k/k_0 を直線近似し，負の傾きの絶

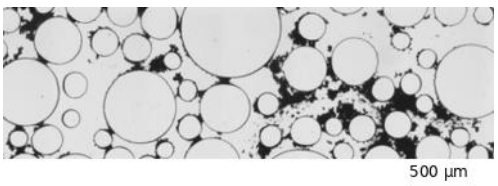


図 1 多孔質流路の顕微鏡画像の一部.

対値を閉塞速度（min^{-1}）とした。画像解析では粒子導入前の画像を基準とし，ピラーを除く全空隙において輝度が低下した領域を沈着領域として評価した。空隙領域に対する沈着領域の割合を沈着面積率とし，0，15，30 分の沈着面積率の時間変化を直線近似し，その増加速度（%/min）を求めた。反復数は差圧解析で n＝1～3，画像解析で n＝1～2 とした。画像と差圧は原則として同一流路で取得し，一部ではどちらか一方の測定のみの実験データも用いた。

3. 結果

KCl 濃度に対する差圧測定による閉塞速度と画像解析による沈着面積率の増加速度を,それぞれの図 2(a,b)に示す。

(1) 差圧測定に基づく閉塞速度

閉塞速度はKCl濃度の上昇に伴って増加し，200 mM で最大値を示した。その後，225 および 250 mM ではやや低下した(図 2(a))。

(2) 画像解析による沈着面積率の増加速度

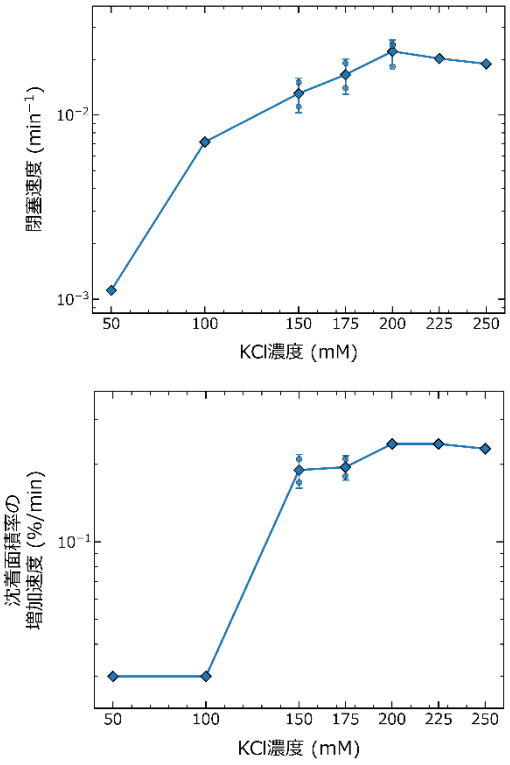


図 2(a) KCl 濃度と差圧由来の閉塞速度
(b) KCl 濃度と沈着面積率の増加速度.

閉塞速度は 200 mM 付近まで段階的に増加したのに対し，沈着面積率の増加速度は 100～150 mM で急増し，200 mM 付近からほぼ一定となる傾向を示した（図 2(a)，(b)）。

4. 考察

KCl 濃度の上昇に伴い，閉塞速度と沈着面積率の増加速度はともに増加し，200 mM 付近で一定となる傾向を示した。これは，電気二重層の圧縮による静電反発の減少が粒子の沈着を促進したことと整合的である[1]。

一方，閉塞速度と沈着面積率の増加速度では，KCl 濃度に対する応答が異なった。この違いは，沈着領域の広がりだけでなく，粒子の集積位置や局所的な間隙狭窄が水理抵抗に影響する可能性を示唆している[2]。

なお，沈着領域は画像の輝度低下に基づく指標であり，反復数も限られるため，これらの機構については今後の検証が必要である。

5. おわりに

本研究では，マイクロプラスチック粒子の閉塞速度と沈着面積率の増加速度が，KCl 濃度の上昇に伴って増加し、200mM 付近で最大値を示すことを確認した。また，両指標の増加傾向には沈着量と沈着の透水性への寄与に起因すると考えられる差異が認められた。今後は反復測定と沈着の空間分布解析を進め，粒子の集積状態と水理的閉塞の関係を明らかにする。

参考文献

1. S. A. Bradford and S. Torkzaban, Vadose Zone J., 7, 667–681 (2008).
2. M. Auset and A. A. Keller, Water Resour. Res., 42, W12S02 (2006).

画像解析による土壌水分特性曲線の測定のための色空間 HSV の適応手法

Methodology of Measurement of Soil Water Retention Curve Using Image Analysis, Color Space, HSV

林祐妃[1]　高橋涼太[2]

[1]京都大学大学院 農学研究科 森林科学専攻、 [2]パシフィックコンサルタンツ株式会社

要旨(Abstract)

水分特性曲線（WRC）が土壌孔隙構造によって決まる性質に基づき、WRC を土壌の画像解析から簡易に測定する手法を開発する。画像解析には色空間 HSV を用いた。土壌構造の画像は、照明が当たっている明るい土粒子の部分と暗い孔隙の部分で成り立っている。S は土粒子の部分を取り除いた範囲を孔隙とし、V は孔隙の部分を抽出する。結果、S の方が精度高く有効孔隙率を測定できた。さらに、大体、画像 12 枚で高精度に推定することが分かった。

キーワード：画像解析、有効孔隙率、HSV、最適しきい値（a_best）

Key words: Image based method, Effective porosity, HSV, Best threshold value (a_best)

1. はじめに

近年、気候変動により土砂災害が増加しており、予知のために浸透計算が有効な手段となる。この数値計算には、莫大な時間と手間と費用がかかる水分特性曲線（WRC）のデータが必要となる。

土壌孔隙構造を捉えた顕微鏡画像を用いて色指標のしきい値を設定することにより、WRC が簡便に取得可能である。しきい値の手法の中で、光による明暗を数値化する色空間として HSV がある。この色空間は明暗によってしきい値を設定できる。しかし、しきい値が変わると WRC パラメータが大きく変わるため、最適なしきい値（a_best）を決定する必要がある。本研究では a_best を決定するためには S と V のどちらが有効であるか、さらに精度高く推定するために必要な画像の枚数について解析する。

2. 方法

(1) 土壌採取　顕微鏡画像から解析するために、立命館大学の自然緑地内（BKC）と六甲（Rokko）にて、森林土壌を採取した。BKC は広葉樹林であり、土粒子はシルトであった。Rokko は崩壊跡地の広葉樹林であり、土粒子は砂質であった。両試験地で、深度 5～15 cm の不撹乱土壌を、100 cc コアサンプラーで採った。不撹乱土壌サンプルは表面の画像を取得するため、さらに加圧板法を実施するため採取した。

(2) 画像取得　顕微鏡画像を撮影する前処理として、不撹乱土壌サンプルの表面をカッターナイフで水平に削った。サンプルからデジタル顕微鏡（キーエンス社製 VHX-5000）により、カラー2D 画像を倍率 100 倍で各サンプルにおいて 64 枚を取得した。

(3) 画像解析　顕微鏡画像の土壌孔隙径分布の測定を実施するために、画像解析プログラミング言語、MATLAB（MathWorks 社製）のを用いて解析を行った。色空間は HSV を用いた。この色空間は、色相を表す H、明るい色を取り除いて孔隙を抽出する S、暗い色を孔隙として抽出する V で構成される。抽出した孔隙の総和の面積率を有効孔隙率, θ_e,とした。室内試験を実施し求めておいたθ_eと比較した。誤差が十分に小さかったと時のしきい値を a_best とした。この解析をすべての画像に対して実施した。

(4) データ処理　a_best の平均値を用いて、θ_e

を計算した、モンテカルロシミュレーションを実施して何枚画像があれば十分な精度でθ_eを導くことができるかを検討した。そのθ_eの再現精度はEOIとして求めた。EOIは加圧板法から求めたθ_eからの誤差が最小の場合1、最低の場合0となる。

3. 結果と考察

(1) 画像ごとのa_bestの分布状況

図-1にS,Vの64枚のそれぞれの画像から求めたa_bestのヒストグラムを示している。

BKCにおけるSとVのa_bestを比較する。同じコアサンプルからの画像であるのに、Sは Vより a_bestは画像によるばらつきが小さいことが分かる。サンプラー内で土壌構造が均質であると仮定した場合、Vのa_bestよりSのa_bestの方が画像中のθ_eを精度よく推定できる可能性がある。

Rokkoにおける SとVのa_best を比較すると、ばらつきが似ている。SとVの両方からθ_eの推定精度の差が変わらないかどうかははっきりとは分からない。

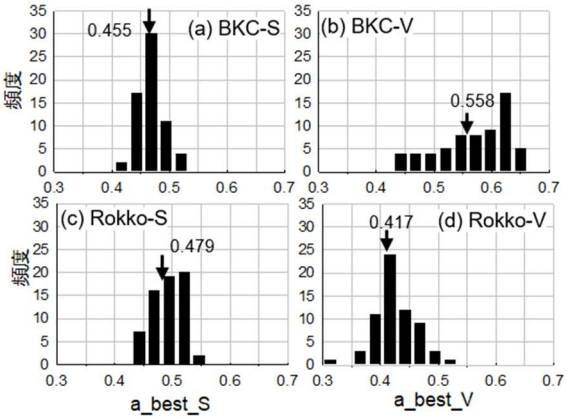
BKCとRokkoはSのa_bestは平均値とばらつき具合が似ている。共通のSのa_bestを使って孔隙をとらえることができることを示唆している。

(2) θ_eの再現精度の枚数よる違い

図-2に枚数の違いによるθ_eの再現精度であるEOIの累積確率密度分布を示す。図では画像の枚数よる違いも示している。

BKCのSにおいて、4枚から枚数が増えるとさらに精度が高くなる。しかしEOIの増加率は枚数が大きい範囲では小さくなる。12枚のときは90%の確率で約0.9ものEOIを実現できる。すなわちSでは12枚あれば高確率でθ_eを精度高く推定できることが分かった。BKCのSとVのEOIを比較すると、Vは同じ0.9のEOIを実現するためには、20枚でもおよそ60%の確率でしか実現できない。

Rokkoの Sにおいて、12枚では、EOIは



図中の矢印と数値はそれぞれのヒストグラムの平均値を示す。

図-1. BKCとRokko の64枚の土壌画像から得た，a_best_Sとa_best_Vのヒストグラム

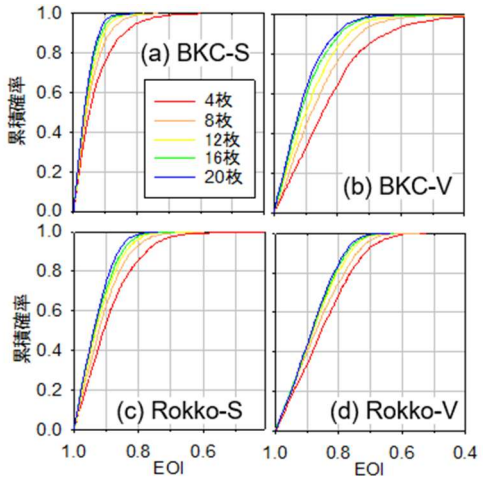


図-2. BKCとRokkoにおけるq_eの再現精度，EOIの累積確率密度分布の、a_best_S，Vを推定するための枚数による違い

90%確率では、EOIは0.85であり BKCのSの12枚よりわずか0.05程度低い。Rokkoの Vにおいては枚数が大きくてもEOIは低い。

4. おわりに

土壌構造の画像は、照明が当たっている土粒子の部分と暗い孔隙の部分で成り立っている。Sは土粒子、Vは孔隙の部分を抽出する。Sの方が、精度が高いということは、Sの土粒子ではない部分を取り除いて孔隙と認識することの方が、有効であることを示している。さらに、大体どの条件でも12枚で高精度に推定することが分かった。

（問い合わせ先、hayashi.yuki.2n@kyoto-u.ac.jp）

2026 年度土壌物理学会大会講演概要集　2026 年 11月28日発行
Proceedings of the 2026 Annual Meeting, Japanese Society of Soil Physics

2026 年度土壌物理学会大会
日時：2026 年 11月25日（土）
会場：東京大学
第 68 回シンポジウム
「農地土壌における炭素・窒素動態について」
ポスターセッション
発行：土壌物理学会大会事務局
〒113-8657 東京都文京区弥生1-1-1
東京大学大学院農学生命科学研究科内　　環境地水学研究室気付
土壌物理学会事務局

著作権について：概要集の著作権は土壌物理学会に帰属します。