

13. スチューデントセッション

■ 2026年8月26日(水) 11:00 ~ 12:40 | 会場 第10会場(518教室)

[S-4] スチューデントセッション④：土壌物理

座長:加藤 千尋(弘前大学農学生命科学部)

11:00 ~ 11:10

[S-27] 地下水流条件下におけるバイオクロッキングの持続性評価

*吉田 綾¹、小島 悠揮²、神谷 浩二²、大石 雅人³ (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. 株式会社精研)

11:10 ~ 11:20

[S-28] 水田の湛水深の違いが地温に及ぼす影響

*柴田 航汰¹、今井 咲菜¹、ディクソン 千尋¹、関谷 信人¹、渡辺 晋生¹ (1. 三重大学生物資源学部)

11:20 ~ 11:30

[S-29] X線CTを用いた水田土壌中のメタンバブルの3次元解析

*高橋 諒太郎¹、常田 岳志²、大竹 豊³、辰野 宇大⁴、柏木 淳一⁵、濱本 昌一郎⁴ (1. 北海道大学大学院農学院、2. 国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構 農業環境研究部門、3. 東京大学大学院工学系研究科、4. 北海道大学大学院農学研究院、5. 北海道大学大学院国際食資源学院)

11:30 ~ 11:40

[S-30] 土中反応移動モデルを用いた間断灌漑が水田土中の酸化還元状態に与える影響の評価

*岩崎 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農学府、2. 鹿児島大学大学院連合農学研究科、3. 三重大学)

11:40 ~ 11:50

[S-31] 水稻の生育段階における通気組織発達と土壌CH₄動態の関係*宮内 藍子¹、安達 俊輔²、西脇 淳子² (1. 東京農工大学、2. 東京農工大学大学院農学研究院)

11:50 ~ 12:00

[S-32] 修正版HYDRUSによる太陽光パネルが土中水分・熱動態に及ぼす影響評価

*種田 悠杜¹、斎藤 広隆¹、伴 琢也² (1. 東京農工大学大学院、2. 東京農工大学大学院フィールドサイエンスセンター)

12:00 ~ 12:10

[S-33] Direct observation on deposition and clogging of Leonardite humic acid using porous microfluidics

*WANG Sitong¹, SUGIMOTO Takuya², KOBAYASHI Motoyoshi² (1. Graduate School of Science and Technology, University of Tsukuba, 2. Institute of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba)

12:10 ~ 12:20

[S-34] メタン発酵消化液とバイオ炭の併用施用が草地土壌のN₂Oガス放出に及ぼす影響*佐々木 創太¹、澁谷 怜恩²、柳田 圭介²、高松 利恵子¹、落合 博之¹、藤川 智紀³ (1. 北里大学、2. 元北里大学、3. 東京農業大学)

12:20 ~ 12:30

[S-35] Global Detection and Characterization of Flash Droughts Using the Standardized Soil Moisture Index (SSI) in ISIMIP3b Daily Simulations

*Sampa Islam¹, Julien Boulange¹, Fang Zhao² (1. Tokyo University of Agriculture and Technology, 2. East China Normal University)

セッション

2026年度（第75回）農業農村工学会大会講演会

12:30～12:40

セッション総括

地下水流条件下におけるバイオクロッキングの持続性評価 Assessment of the durability of bioclogging under groundwater flow conditions

○吉田 綾¹, 小島悠揮², 神谷浩二², 大石雅人³
Aya Yoshida¹, Yuki Kojima², Kohji Kamiya², Masato Ohishi³

1) はじめに

地盤凍結工法は、人工的な地盤凍結により地下水を止水する優れた工法だが、地下水流速が速い場所では凍結が阻害される弱点を持つ。その場合、凍結前に薬液注入により地盤の透水性を下げるが、薬液の流出や地中残存が環境面から好ましくない。そこで、微生物の繁殖による透水性低下（バイオクロッキング）を薬液注入の代替として、高地下水流速下の凍結工法に応用することを提案する。これまで吉田ら（2025）により地下水流条件下におけるバイオクロッキングの発生とそれによる十分な透水性低下が確認されたが、実用化にはその持続性が重要となる。よって本研究では長時間の通水実験によるバイオクロッキングの持続性評価を目的とした。

2) 実験方法

本研究では、鉛直一次元の飽和透水試験を行った（図1）。内径 52 mm、高さ 220 mm の透水カラムに圧力計を高さ $z = 25, 75, 125, 175$ mm に設置した。また、TDR センサ、酸化還元電位計を高さ $z = 50, 100, 150$ mm に設置した。カラムを給水タンクと排水タンクに接続し、試験時の排水を容器により集水した。カラム内に水中落下で真砂土（砂分 97%）を充填し、24 時間静置後、透水を開始した。栄養剤（飽和スクロース溶液）は通水開始 24

時間経過後から 1 日 1 回 10 時間かけて 50 mL を $z = 25$ mm の高さに注入し、これを 7 日間くり返した。その後 22 日間は無注入で通水続けた。試験終了後は透水を停止し、カラム内の土壌試料を炉乾燥後、強熱減量試験を行った。なお、本実験は表 1 に示す 4 条件で行った。動水勾配はそれぞれ 2 から 4 とし、動水勾配 2 に関しては、栄養剤を注入するケースと注入しないケースを用意した（Case 1 と Case 2）。なお動水勾配は、排水タンクと給水タンクの水位差を調整し、設定した。測定項目は間隙水圧、透水流量、排水濁度、酸化還元電位、体積含水率、透水係数、強熱減量である。透水係数は動水勾配および排水量より Darcy 則で決定した。体積含水率は TDR の波形解析により決定した。強熱減量は炉乾燥した試料を 550°C で 4.5 時間以上加熱し、質量の減少量から求めた。

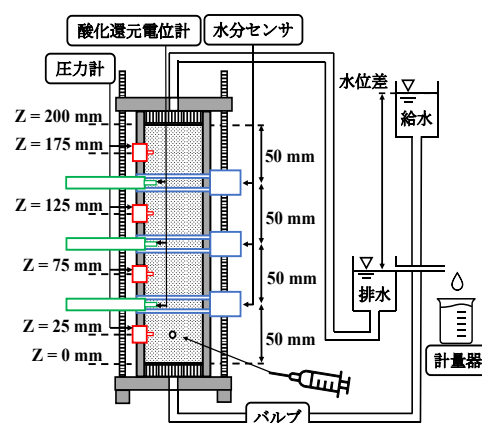


図1 透水試験装置の概要
Fig. 1 Overview of permeability testing equipment

- 1) 岐阜大学大学院自然科学技術研究科 Graduate School of Natural Science and Technology, Gifu University
- 2) 岐阜大学工学部 Faculty of Engineering, Gifu University
- 3) 株式会社精研 Seiken Co., Ltd.

キーワード：バイオクロッキング、透水性、持続性、凍結工法

3) 結果と考察

図2には各ケースの透水係数の時間変化を示した。図2から栄養剤を注入した全てのケースで透水性が低下し、その効果は4週間以上持続することがわかった。しかしながら、バイオクロッキングによる透水性低下作用と動水勾配の間には、明確な関係性を見つけていくことができなかった。これは、注入した高粘性の栄養剤が部分的に間隙を閉鎖し、水の流路に著しい不均一性をもたらしたためと考えられる。

図3には各ケースの体積含水率の時間変化を示した。栄養剤を注入すると、注入直後に一時的な低下が生じ、その後しばらくして回復した。この低下は栄養剤の比誘電率が水より低いことによる見かけの水分量の変化であり、低下後の回復は通水により栄養剤が次第に排出されたためと考えられる。この見かけの低下期間は栄養剤残留を示す有効な指標となり、動水勾配2, 4, 3の順で低下期間が長かったことから、同順で栄養剤の残留期間が長かったことがわかった。また、栄養剤の排出後、体積含水率は急激に低下した。これは、栄養剤排出完了後に微生物活動によるメタン等の微細気泡が生成され、それが土壌間隙を閉塞したためと考えられる。このことから、微細気泡は透水性低下の一因であると推察されるが、微細気泡の発生時期は栄養剤の残存期間が長いほど遅れた。本研究で観測された透水係数および体積含水率の変化は、動水勾配よりも栄養剤の影響を大きく受けた結果となった。

微生物量の指標となる強熱減量は動水勾配が大きいほどその増加量は小さくなった。一方で、同一の動水勾配では栄養剤の有無による強熱減量の変化が見られなかった。これは栄養剤の注入有無により繁殖しやすい微生物種が異なっていたためと考えられる。

表1 透水試験の実験条件

Table. 1 Experimental conditions

Case	動水勾配	スクロース溶液の注入
1	2	×
2	2	○
3	3	○
4	4	○

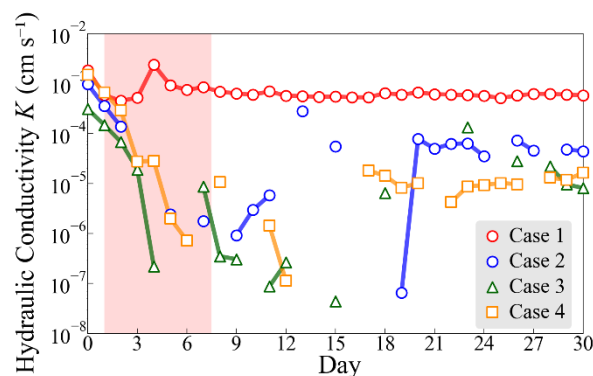


図2 透水係数の時間変化

Fig. 2 Hydraulic conductivity

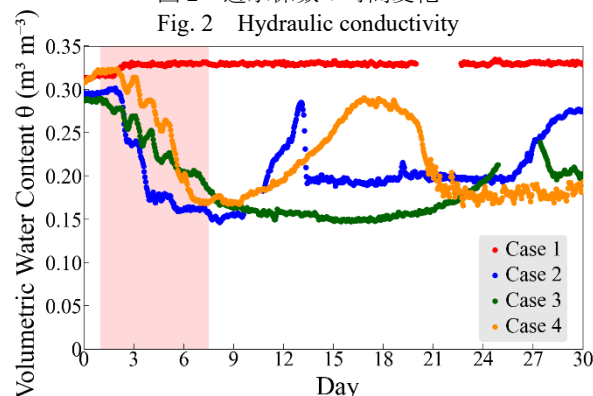


図3 体積含水率の時間変化

Fig. 3 Volumetric water content

4) おわりに

本研究では、地盤凍結工法へのバイオクロッキングの応用を目標とし、地下水流条件下におけるバイオクロッキングの持続性評価を行った。バイオクロッキングは透水性を低下させ、その効果を4週間程度持続させたことから、地下水流抑制手法として有効であることがわかった。しかし、バイオクロッキング発生過程において、動水勾配よりも栄養剤の粘性およびその浸透挙動、排出の不均一性が大きく影響した。実地盤への適用に向けて、今後は栄養剤の粘性や濃度条件の最適化について検討を進める必要がある。

【引用文献】吉田ら. 2025. 農業農村工学会 2025 年度大会講演会要旨集 S-10.

水田の湛水深の違いが地温に及ぼす影響

Effect of ponding water level on soil temperature in paddy fields

○柴田 航汰*, 今井 咲菜*, ディクソン 千尋*, 関谷 信人*, 渡辺 晋生*

SHIBATA Kota, IMAI Sakina, DIXON Chihiro, SEKIYA Nobuhito, WATANABE Kunio

はじめに 水田では土壌有機物や堆肥等の有機態窒素が微生物により無機態窒素に分解され、イネに供給される。有機態窒素の分解速度は地温により変化する。地温は熱移動式で表すことができる。また、水田の地温は湛水の影響を受ける。ここで、湛水の熱容量により田面水の水位が高いほど登熟期の根圏地温は低くなると考えたが、2025年の観測では田面水の水位が高いほど地温が高くなる傾向がみられた。そこで本研究では、2025と2026年の現場観測と数値解析に基づき、田面水の水位と地温推移の関係を明らかにすることを目的とする。

方法 調査地は三重県伊賀市の4地区(大野木, 猪田, 勝地, 下柘植)の有機質堆肥連用水田とした。2025年のイネ作期に、気温と5cm地温, 水位, 窒素動態を観測した。これらに加え、2026年は田面水の水温, 地表面の照度, 群落温度を測定する。数値計算では、湛水層と土層の2層に対し、水分・熱移動式に基づきイネの移植から収穫までの1次元の地温分布を計算した。土層の厚さは制動深さを考慮して1500cmとし、湛水の厚さは0, 3, 8cmのいずれかとした。初期条件は2025年の観測値を与えた。上下端の水フラックスはなしとし、上端の熱フラックスは気象観測値に基づき、Penman-Montheith式で与えた。計算にはHYDRUS 1Dを用いた。

結果と考察 Fig. 1aに2025年に観測した日平均気温と5cm深の日平均地温を示す。5月から6月までは地温が気温よりも高く、7月以降は地温が気温よりも低くなった。5月から6月までは、勝地と大野木の地温が高く、下柘植の地温は他2圃場より低かった。7月以降の地温は大野木, 勝地, 下柘植の順に地温が高かった。また、この期間の田面水の水位は大野木, 勝地, 下柘植の順で高かった。Fig. 1bにFig. 1aと同期間について、湛水層の厚さを3種類に変えて計算した5cm深の日平均地温を示す。5月から6月の地温は気温に近かったが、7月以降の地温は気温よりも低くなった。7月以降の地温は水位が0, 3, 8cmと低いほど高くなった。ここで、水の熱伝導率を2倍にすることで対流による熱伝達を仮定して、計算を行った。その結果、熱伝導率が高いほど日平均地温は高くなったが、水位が低いほど地温は高くなる傾向は変わらなかった。観測値は、湛水深以外の要因が強く影響していると示唆される。要因として灌漑水の温度や、イネの生育にともなう照度や、群落温度の違いなどが考えられる。2026年ではこのような要因を明らかにするため現地調査を継続2025年の観測や数値解析と比較する。

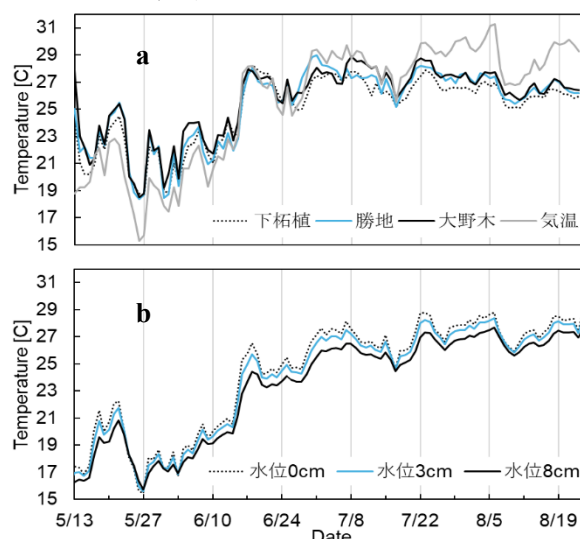


Fig1 5 cm 深地温 a)3 圃場の観測値,b)計算値
Soil temperature at 5cm depth in three fields
a) observed. b) calculated.

*三重大学生物資源学部 (Faculty of Bioresources, Mie University) 土壌の熱的性質, 熱移動式, 熱容量, 日射

X線 CT を用いた水田土壌中のメタンバブルの 3 次元解析

Three-dimensional Analysis of Methane Bubbles in Paddy Field Using X-ray CT

○高橋 諒太郎	常田 岳志**	大竹 豊***	辰野 宇大****	柏木 淳一*****	濱本 昌一郎****
*					
TAKAHASHI	TOKIDA	OHTAKE	TATSUNO	KASHIWAGI	HAMAMOTO
Ryotaro	Takeshi	Yutaka	Takahiro	Junichi	Shoichiro

1. はじめに

水田は湛水条件下でメタン生成菌が活性化し、有機物の最終分解生成物としてメタン (CH_4) が生成される。生成された CH_4 は主に水稻を介した輸送、バブルとしての噴出、水面からの分子拡散によって大気に放出される。その中でもバブル態 CH_4 の放出が総 CH_4 フラックスに大きく寄与している (Kajiura and Tokida, 2021)。しかし、土壌中におけるメタンバブルの生成過程やバブルの放出過程、さらにバブルと水稻根の空間的關係など未解明な点が多い。X線 CT は物質の X 線透過度の違いを利用し、物体の内部構造を可視化できる手法であり、近年では土壌中の植物根や間隙構造の解析にも応用されている。そこで本研究では、X線 CT を用いて、水田土壌中における CH_4 バブルの存在形態を明らかにすることを目的とした。

2. 方法

茨城県つくば市の農研機構所有の水田圃場表層から土壌サンプルを採取した。2 mm 篩を通した後、乾土重 1070g 分を 1/10000 ワグネルポット (直径 : 11.5 cm、高さ : 13.5 cm) に水中充填した。これを水稻の有無に対して 2 条件用意し、人工気象機内で 60 日間培養した。培養開始後、水稻有り条件 (p) は 10、20、30、50、60 日目に、水稻無し条件 (np) は 0、7、10、14、20、30、45、50 日目に X 線 CT 装置 (CT Lab HX130, Rigaku) で CT 画像を撮影した (電圧 130 kV、管電流 300 μA 、0.2mm 銅フィルター使用、分解能は 37 μm)。CT 画像は画像解析ソフト (Dragonfly) を使ってセグメンテーションし、水稻根とバブルをそれぞれ抽出した。抽出したバブルはノイズ処理をしたあとラベル付けをし、各バブルの重心位置と体積を出力した。X 線 CT 撮影に使用したポットは撮影後に水中で攪拌し、浮上したバブルを水で満たした漏斗で捕集することで、土壌中のバブルの体積を定量した。また、ガスクロマトグラフィーでバブルの CH_4 濃度を測定した。

* 北海道大学大学院農学院 (Graduate school of Agriculture, Hokkaido University)

** 国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構 農業環境研究部門 (National Agriculture and Food Research Organization)

*** 東京大学大学院工学系研究科 (Graduate school of Engineering, The University of Tokyo)

**** 北海道大学大学院農学研究院 (Research Faculty of Agriculture, Hokkaido University)

***** 北海道大学大学院国際食資源学院 (Graduate School of Global Food Resources, Hokkaido University) キーワード : 土壌環境と植物根系、土壌、物質循環

3. 結果と考察

水稲無し条件のバブル体積の深度分布を図1に示す。14日目まではバブルは表層10 mm以内に多く存在していたものの、20日目以降に減少した。この結果は表層付近においては、バブルが比較的に速やかに放出されたことを示唆している(Liu *et al.*, 2018)。一方、表層20 mm以深のバブル体積は培養期間に伴い増加した。図2に、水稲根近傍740 μm 以内の領域に存在するバブル体積を計測し、領域体積で除した気相率(根近傍気相率)と、ポット全体の気相率(全気相率)との比較を示す。30日目まで根近傍気相率は全気相率の約半分であった。水稲根の通気組織は根圏に酸素を供給することが知られており(Colmer and Voesenek, 2009)、その結果30日目までは根近傍でのメタン生成が抑制されていたことが考えられる。一方50日目以降では、全気相率に対する根近傍気相率の割合が上昇したものの依然として根近傍気相率の方が低くなった。水稲根からの有機物供給によって CH_4 バブルが生成が促進された一方で、水稲体を介したメタン輸送も活発となり、バブルの蓄積が抑制されたことが示唆された。

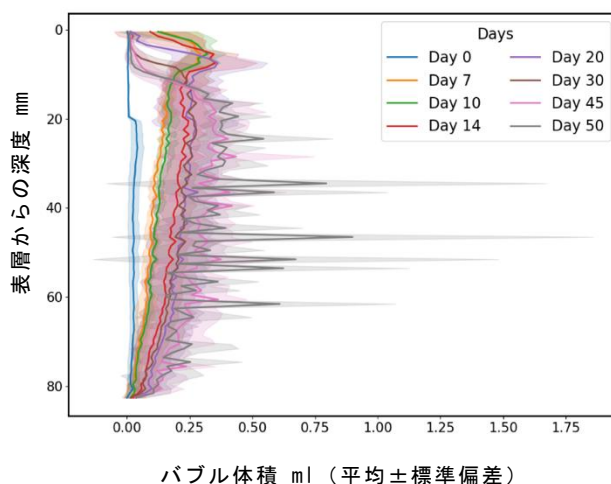


図1 バブル体積深度分布の時系列変化 (np)
Fig.1 Time series of bubble volume depth distribution

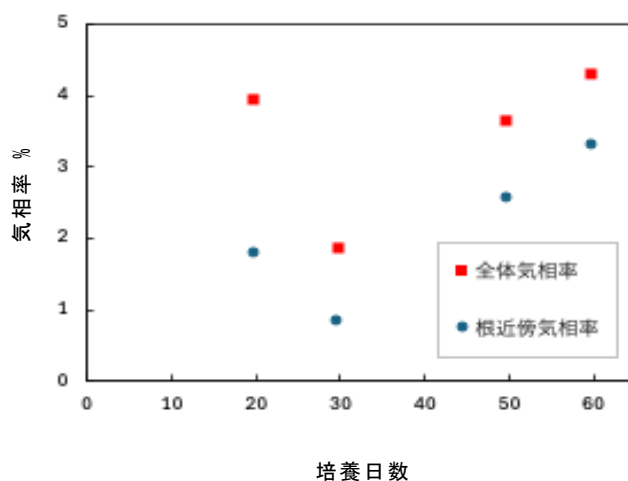


図2 根近傍とポット全体の気相率
Fig.2 Gas phase fraction in the root zone and inside the pot

4. まとめ

本実験の結果から、湛水初期に表層10mm以内に多く存在するバブルは2-3週間で減少し、その後表層から20mm以深の深い場所にバブルが蓄積することが明らかになった。さらに水稲根が存在する場合、根近傍域では土壌全体の中で相対的にバブルが少なく、根近傍域でのバブル存在割合は培養期間とともに変化することがわかった。

参考文献

- 1) Colmer, T.D. and Voesenek, L.A.C.J. (2009) Functional Plant Biology, 36(8), pp. 665-681.
- 2) Kajiura, M. and Tokida, T. (2021) 農業気象, 77(4), pp. 245-252.
- 3) Liu, L. et al. (2018) Environmental Science & Technology, 52(4), pp. 2007-2015.

土中反応移動モデルを用いた間断灌漑が水田土中の酸化還元状態に与える影響の評価 Evaluation of the impacts of alternate wetting and drying on redox states in paddy soil using a soil reactive transport model

○岩崎桃子*
○Momoko Iwasaki*

田崎小春**
Koharu Tasaki**

斎藤広隆*
Hiroataka Saito*

取出伸夫***
Nobuo Toride***

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、間断灌漑が水収支、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。

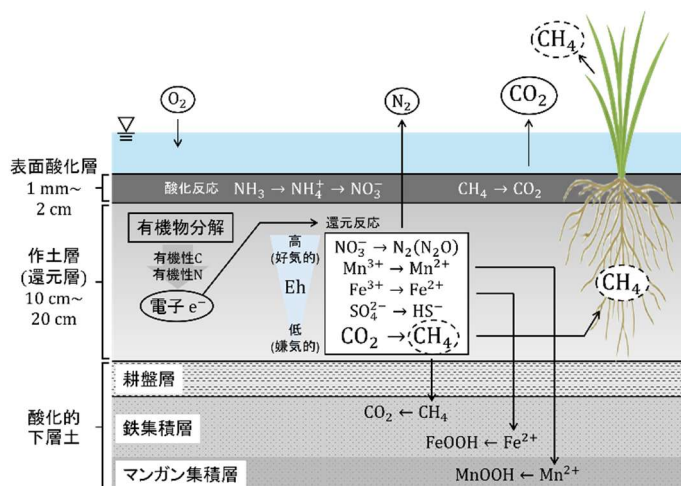


図1 水田土壌の物質動態について
Fig1 Biogeochemical dynamics in paddy soils

2. 有機物分解を伴う物質の土中反応移動モデル

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。HYDRUS-1D 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。HYDRUS-1D 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、マンガニウム、鉄、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

*東京農工大学大学院農学府(Graduate School of Agriculture, Tokyo University of Agriculture & Technology)

**鹿児島大学大学院連合農学研究科(The United Graduate School of Agricultural Sciences, Kagoshima University)

***三重大学(Mie University)

水分移動, 溶質移動

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 ($K_s=15 \text{ cm d}^{-1}$)、22–27 cm を耕盤層 ($K_s=0.05 \text{ cm d}^{-1}$)、27–70 cm を下層土 ($K_s=1 \text{ cm d}^{-1}$) 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 $h=0 \text{ cm}$ 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、水収支においては常時湛水と比較して間断灌漑により約 9.3% の節水効果が得られた。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 (図 2)。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、 O_2 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。

引用文献

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.

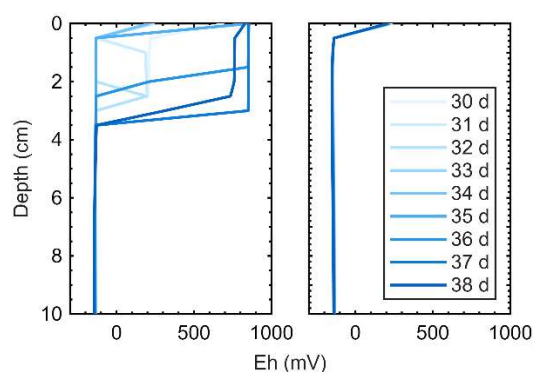


図 2 (左)AWD(右)CF の Eh 変化

Fig2 Eh changes in AWD (left) and CF (right)

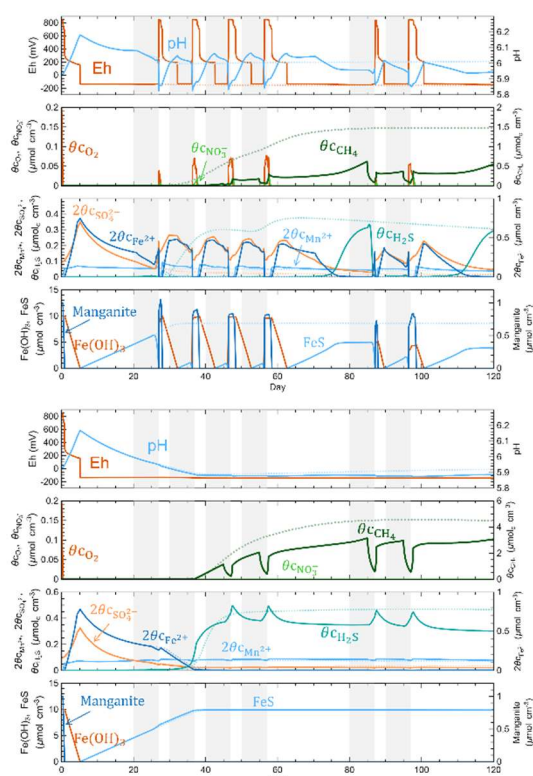


図 3 (上)深さ 2.5 cm(下)深さ 10 cm の各主成分の経時変化(実線:AWD、点線:CF)

Fig3 Temporal changes in principal components at 2.5 cm(top)and 10 cm (bottom) depths

水稲の生育段階における通気組織発達と土壌 CH₄動態の関係

Relationship between Aerenchyma Development at Methane Dynamics under Paddy Conditions in Rice Cultivars

○宮内 藍子*

安達 俊輔**

西脇 淳子**

MIYAUCHI Aiko

ADACHI Shunsuke

NISHIWAKI Junko

1. はじめに

近年地球温暖化が進行しており、農業・林業・その他の土地利用からの温室効果ガス排出は、2019年の世界温室効果ガス排出量の22%を占める(IPCC, 2023)。さらに、日本では、CH₄放出量全体の43.8%が稲作由来である(国立環境研究所, 2023)。そのため、水田におけるCH₄排出抑制が重要である。

湛水状態の土壌で成長する稲は、根に酸素を供給するために発達した通気組織(以下、RAと称す)を形成する(Justin & Armstrong, 1987)。RAは根の皮層に形成される空隙で、ガスの通り道として機能する。土中で生成されたCH₄ガスは根から植物体に入り、RAを通して上方へ輸送された後、葉鞘から大気に放出される(Klaus et al., 2000)。RAを通したCH₄排出は、土壌からのCH₄排出量の最大9割を占める(Holzapfel-Pschorn & Seiler, 1986)。

本研究では、食用水稲品種の成長段階における通気組織発達と土壌CH₄動態の関係を明らかにすることを目的とした。これにより、土壌中でのCH₄生成から大気への放出に至る一連の過程を総合的に評価する。

2. 方法

東京農工大学農学附属FM本町(北緯35.67, 東経139.47)の水田で実験を行った。イネ(イクヒカリ)は条間30cm、株間30cm、1株3本で移植し、水田は常時湛水とした。試験期間は2025年6月6日～9月5日である。圃場には、水稻区を3反復設けた。

地表面CH₄ガスフラックスは、水稻経路に対して、1時間ごとにクロズドチャンバ一法で測定した。RA割合はイネの成長段階(分けつ初期、最高分けつ期、幼穂形成期、出穂期、成熟期)において計5回、各成長段階で3株のイネを採取して測定した。イネの根の先端から1、2、3、4cmの断面を光学顕微鏡(OLYMPUS upright microscope, BX43)で観察し、顕微鏡上のカメラで画像を撮影した。Image-Jを用いて、根の断面積に対するRAの割合を算出した。土中ガスは週に1回、各区画の5、10、20、30cmから採取し、ガスクロマトグラフ(GC-2010, 島津製作所, BID)を用いて分析した。また、その他環境要因を測定した。さらに、地表面CH₄ガスフラックス、RA割合、および土中CH₄濃度について、各測定項目を2項目ずつ組み合わせた相関解析を行った。

3. 結果・考察

図1に、RA割合と土中CH₄ガス濃度の結果を示す。深さ5、10cmの土中ガスとRAの相関係数はそれぞれ $r=0.911$, 0.944 であり、強い正の相関が認められた。また、土中

*東京農工大学(Tokyo University of agriculture and Technology)、**東京農工大学大学院農学研究
院(Institute of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology)

根の通気組織、水田、メタンガス

ガス、および RA はいずれも、出穂期(移植から約 65 日)に最大値を示した(図 1)。

図 2 に地表面 CH_4 ガスフラックスと RA 割合を示す。チャンバーを改良したため、移植 47 日目以降は CH_4 ガスフラックスのグラフの色を変えた。地表面 CH_4 ガスフラックスのピークは分げつ初期～最高分げつ期(移植から 30 日周辺)と、幼穂形成期～出穂期(移植から 50 日周辺)の 2 回観測された(図 2)。これは、Li et al. (2025)、Iqbal et

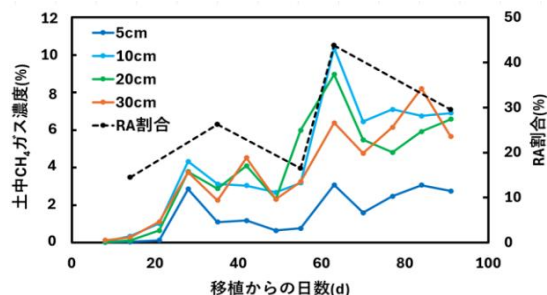


図 1 RA 割合と土中 CH_4 ガス濃度

Fig.1 RA Proportion and Soil CH_4 Concentration

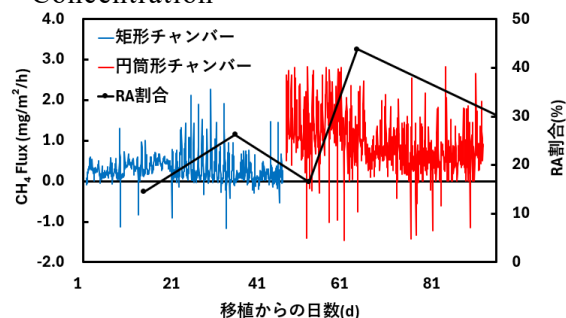


図 2 地表面 CH_4 ガスフラックスと RA 割合

Fig.2 CH_4 Flux and RA Proportion

al. (2021)の報告と一致する。また、出穂期以降のフラックスの減少(図 2)は、根や分げつの枯死による通気経路の閉鎖が原因と考えられる(Aulakh et al., 2000)。さらに、地表面 CH_4 ガスフラックスのピーク直後に RA 割合が高い値を示した(図 2)。これは、RA の発達に伴う根からの酸素供給増加によって土壌の嫌気状態が緩和されたためと考えられる。その結果、 CH_4 酸化菌の活性が高まり、土中での CH_4 ガス酸化が促進されたと推察される。

土中 CH_4 ガス濃度と RA 割合が最大値を示した出穂期(移植から 64 日)には、地表面 CH_4 フラックスは低下した(図 2)。土中での CH_4 生成が活発で、かつ RA も発達した条件下で地表面 CH_4 フラックスが低下したことから、出穂期の RA の主な役割が、土壌からの CH_4 放出経路ではなく、土壌への酸素供給であった可能性が高いと考えられる。

4. まとめ

常時湛水条件下では、通気組織は出穂期に最も発達する傾向を示した。これに伴い土中での CH_4 酸化が進行し、地表面 CH_4 ガスフラックスはピーク後に低下した。一方で、同時期に通気組織面積割合と土中 CH_4 ガス濃度がともに高い値を示した。以上より、一定以上発達した通気組織は、 CH_4 ガスの輸送経路としてよりも、土壌への酸素供給としての役割が相対的に大きくなる可能性が示唆された。

参考文献

IPCC(2023) AR6 Synthesis Report Climate Change 2023; 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 2025 年; Justin, S. H. F. W. & Armstrong, W. (1987) New Phytol. 106(3), 465-495; Klaus, B., Hans P., Heinz, R. (2000) Phytol. 40, 43-55; Holzappel-Pschorn, A., Conrad, R., Seiler, W. (1986) Plant Soil. 92, 223-233; Li, S., Zhang, Y., Zhao, J., Groenigen, K., Shen, X., Zhang, H., Gu, J., Zhang, W., Hui, D., Chen, Y., Liu, L. (2025) Agric. Ecosyst. Environ. 378, 109309; Iqbal, M., Liu, S., Zhu, J., Zhao, L., Qia, T., Liang, J., Luo, J., Xiao, X. and Fan, X. (2021) Environ. Manage. 279, 111583; Aulakh, M. S., Bodenbender, J., Wassmann, R., Rennenberg, H. (2000) Nutr. Cycl. Agroecosyst. 58, 367-375

修正版 HYDRUS による太陽光パネルが土中水分・熱動態に及ぼす影響評価

Evaluation of the Effects of PV Panels on Soil Water and Thermal Dynamics Using the Revised HYDRUS Model

○種田 悠杜*

斎藤 広隆*

伴 琢也**

TANEDA Haruto

SAITO Hiroataka

Ban Takuya

1. はじめに

近年、再生可能エネルギーの需要増加や儲かる農業の実現、土地の有効利用といった点から営農型太陽光発電が注目されている。営農型太陽光発電は農地の上に太陽光パネルを設置し、営農と太陽光発電を同時に行うシステムである。一方で、太陽光パネルを設置することから、太陽光が遮られ土中水分・熱環境が変化し、作物生育にも影響を及ぼすことが問題とされている。現在では、作物の光飽和点を基準とした作物収量予測が行われているが、瞬間的な光応答しか表せず、生育段階や気象条件による影響を反映できないため不十分である(Thum et al., 2025)。そこで本研究では、太陽光パネルの設置による土中水分や熱動態に対する影響を評価するため、土中水分・熱移動解析プログラム HYDRUS に太陽光パネルの影による影響を考慮できるよう修正した。

2. 方法

(1) 観測

東京農工大学農学部フィールドサイエンスセンターが管理する FM 府中において、太陽光パネルが設置された地点(H)と設置されていない地点(C)の2地点にて、任意の深度において土中体積含水率、土中水ポテンシャル、地温を観測した(図1)。

(2) 解析

解析には液状水・水蒸気・熱移動解析が可能な HYDRUS-2D(Šimůnek et al., 2018)を用いた。太陽光パネルによる影を境界条件に導入するため、太陽光パ

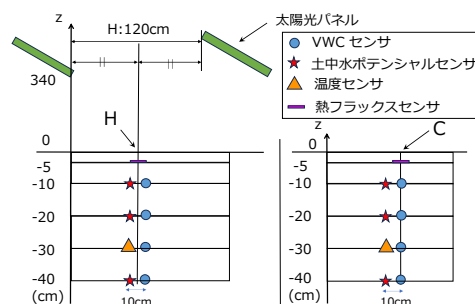


図1 センサ設置地点断面図

Fig.1 Cross-sectional view of sensors installation

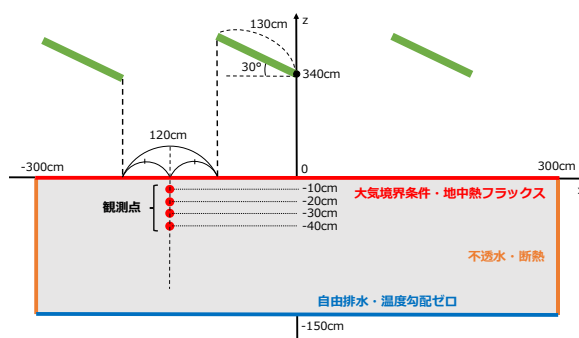


図2 解析で用いた計算条件

Fig.2 Computational conditions used in the analysis

*東京農工大学大学院(Graduate School of Tokyo University of Agriculture and Technology)

**東京農工大学大学院フィールドサイエンスセンター (Field Science Center, Tokyo University of Agriculture and Technology)

営農型太陽光発電, 土壌水分熱動態, HYDRUS-2D

ネルによる影の変化を定式化し組み込んだ修正版 HYDRUS-2D を用いた。計算条件を図 2 に示す。任意の時間に任意の節点が太陽光パネルの影に含まれる場合は、短波放射量を 0 とし、熱移動における上端境界条件の地中熱フラックスを求めた。水分移動および熱移動パラメータは、太陽光パネルの影響のない地点 (C 地点) で取得した観測データを用いて、逆解析により最適化した値を用いた。

3. 結果・考察

図 3 は土中水ポテンシャルについて C 地点と H 地点における解析値を示したものである。解析期間全体を通して、C 地点における値は H 地点における値よりも小さい。これは太陽光パネルにより放射が遮られ、土の乾燥が抑制されたためである。図 4 は、H 地点における体積含水率の観測値と解析値を示したものである。降雨および乾燥に対する応答は解析の方が実測よりも大きくなっているが、全体的な傾向は観測結果と同様である。一方で、土中温度は DOY225 以降で大幅に解析値が過小評価した(図 5)。この結果は、地表面からの蒸発が過大評価されたことに起因すると考えられる。今後は放射データを取得することで、影の影響を再度検証し、影領域における散乱放射を定量化し、モデルに組み込む必要がある。

4. 結論

観測と修正版 HYDRUS を用いた解析から太陽光パネルの土中水分動態への影響を評価した。今後は、熱動態の影響評価や冬季における影響評価に取り組み、営農型太陽光発電における太陽光パネルが土中水分・熱動態へ及ぼす影響を評価していく。

参考文献

- 1) Thum, C.H., et al., 2025. Field Crops Research, 326 109877.
- 2) Šimůnek, J. et al., 2018. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 66(2), 133-142

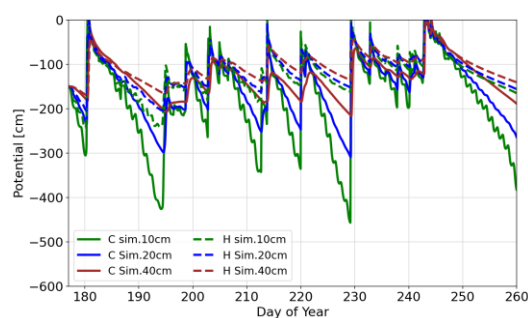


図 3 C 地点と H 地点における土中水ポテンシャルの解析値
Fig.3 Simulated soil water potential at site C and H

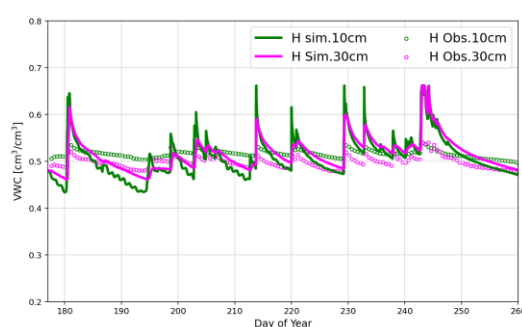


図 4 H 地点における体積含水率の実測値と解析値

Fig.4 Observed and simulated volumetric water content at site H

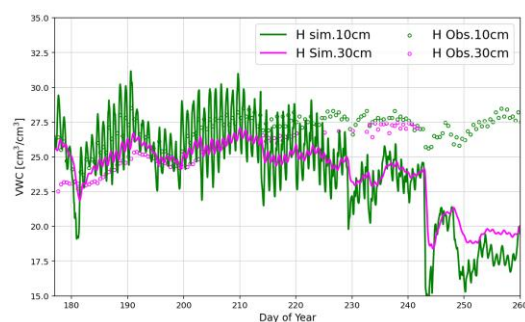


図 5 H 地点における土中温度の実測値と解析値

Fig.5 Observed and simulated soil temperature at site H

多孔質マイクロ流体デバイスを用いたレオナルダイトフミン酸の
沈着・目詰まりの直接観察
Direct observation on deposition and clogging of Leonardite humic acid using porous
microfluidics

○王 思童*
WANG Sitong

杉本 卓也**
SUGIMOTO Takuya

小林幹佳**
KOBAYASHI Motoyoshi

1. Introduction

Humic acid, a major component of natural organic matter, is widely present in natural water and groundwater systems. Its accumulation within porous media can cause severe clogging, reducing hydraulic conductivity and threatening long-term system performance. In this study, porous microfluidic devices were used to investigate the deposition and clogging behavior of Leonardite humic acid (LHA) under varying pH and ionic conditions. Deposition on pore walls and progressive clogging development were directly observed through transparent microfluidic channels, while pressure drop across the porous network was continuously monitored to quantify clogging extent. We show how deposit development is linked to pressure drop increase and hydraulic conductivity reduction.

2. Materials and Methods

Materials. Leonardite humic acid (LHA) was used as the model natural organic matter in all experiments. Stock solutions were prepared by dissolving LHA powder in deionized water to a concentration of 10 mg/L. The solution pH was adjusted to desired values using KOH and HCl solution. Calcium chloride dihydrate ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) was added at a concentration of 60 mM to control the ionic concentration and provide divalent cation conditions representative of natural groundwater chemistry.

Microfluidic Device. Porous microfluidic devices were fabricated to mimic the pore structure of natural porous media. The height is $\sim 100 \mu\text{m}$ the width is 0.5 cm, the length is 5 cm. Cylindrical grains are randomly distributed within a rectangular region and have a size distribution the mean grain diameter of $120 \mu\text{m}$ in a power law.

Experimental Procedure. LHA solution was injected into the microfluidic device at $30 \mu\text{L}/\text{min}$ using a syringe pump. Experiments were

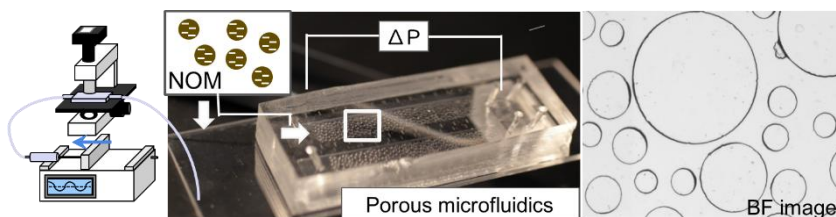


Figure 1. Schematic of experimental setup for visualizing deposition in a microchannel

performed under varying pH, ionic strength, and ionic species conditions to assess their effects on LHA deposition behavior, with each condition maintained until observable clogging developed.

Measurements and Analysis. Deposition on pore walls was observed at regular time intervals using an optical microscope. Pressure drop across the porous network was monitored in real time via differential pressure sensors at the device inlet and outlet. Hydraulic conductivity k was derived from the measured pressure drop using Darcy's law:

$$k = \frac{Q \cdot L}{A \cdot \Delta P / (\rho g)}$$

*筑波大学大学院理工情報生命学術院 (Graduate School of Science and Technology, University of Tsukuba)

**筑波大学生命環境系 (Institute of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba)

コロイド・粘土, 沈着, フミン酸, 多孔質マイクロ流路, 目詰まり

where Q is the volumetric flow rate, L is the length of the porous medium, A is the cross-sectional area, and ΔP is the measured differential pressure. Changes in k over time were used to quantify the degree of clogging and its temporal development.

3. Results and discussions

Microscopic Observation of Humic Acid Deposition. Microscopic imaging revealed progressive LHA deposition within the porous network. Fig. 1 shows the initial state, with clean pillar boundaries and fully open pore spaces. After sustained LHA flow (Fig. 2), dark deposits accumulated heterogeneously, with preferential deposition at pore throats and grain contact zones. The presence of 60 mM CaCl_2 likely promoted deposition, as divalent Ca^{2+} ions compress the electrical double layer of

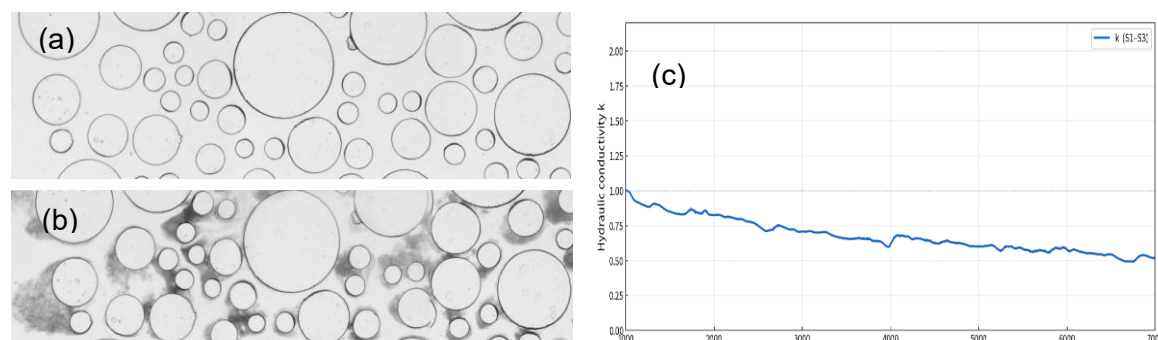


Figure 2. Microscopic observations of the porous medium (a) before and (b) after LHA injection. (c) The progressive decrease of hydraulic conductivity due to LHA deposition.

LHA and form Ca^{2+} -bridging complexes with negatively charged grain surfaces, lowering the attachment energy barrier and facilitating irreversible deposition.

Evolution of Hydraulic Conductivity. The temporal evolution of hydraulic conductivity k , normalized to its initial value $k_0 = 1$, is presented in Fig. 2. (c) continuous and monotonic decline in (k) is observed over the entire experimental duration from 1000 s to 7000 s. As the experiment progresses, the rate of decrease slows, suggesting that accessible deposition sites become progressively saturated and that the remaining open pore throats offer greater hydraulic resistance to further clogging.

4. Conclusions and Future works

We found the points below:

1. Divalent Ca^{2+} ions played a critical role in promoting LHA deposition by compressing the electrical double layer and forming Ca^{2+} complexes between humic acid macromolecules and negatively charged grain surfaces, thereby facilitating irreversible attachment.
2. Hydraulic conductivity declined monotonically over the entire experimental duration, a rapid initial decrease driven by the occupation of primary flow pathways, followed by a progressively slowing rate as accessible deposition sites became saturated.

Future works. Systematic investigation of solution chemistry effects. Future experiments with image analysis should explore a wider range of pH values and ionic strengths to establish a comprehensive understanding of how solution chemistry governs LHA deposition kinetics and clogging severity.

5. Reference

- 1) Hakim, A.; Suzuki, T.; Kobayashi, M. Strength of Humic Acid Aggregates: Effects of Divalent Cations and Solution pH. *ACS Omega*, **2019**, 4(5), 8559–8567.
- 2) Okaybi, W.; Roman, S.; Soullaine, C. Progressive Colloidal Clogging Mechanism by Dendritic Build-Up in Porous Media. *Soft Matter*, **2025**, 21(28), 5687–5698.

メタン発酵消化液とバイオ炭の併用施用が草地土壌の N₂O ガス放出に及ぼす影響

Effects of combined application of methane fermentation digestate and biochar on emission from grassland soil

○佐々木創太*, 澁谷怜恩**, 柳田圭介**, 高松利恵子*, 落合博之*, 藤川智紀***

Sota Sasaki, Reo Shibuya, Keisuke Yanagida, Rieko Takamatsu, Hiroyuki Ochiai, Tomonori Fujikawa

1. はじめに

「みどりの食料システム戦略」では 2050 年までの目標として、資源の循環利用、化石燃料を原料とした化学肥料の使用抑制等を掲げている。化学肥料の代替としてメタン発酵消化液(以下、消化液)の液肥利用が注目されている。消化液の液肥利用が化成肥料よりも N₂O 放出量が多くなったとの報告が見られるが、消化液は乳牛糞尿だけでなく、食品廃棄物や汚泥など多様な原料から生成されるため、その評価は不十分である。青森県十和田市で生成されている食品廃棄物由来のメタン発酵消化液も水田や草地での利活用が期待されているが、その効果が十分に明らかになっておらず、実用化まではされていない。

消化液を施用した際に生じる農地からの N₂O ガス放出による環境負荷の対策として、土壌へのバイオ炭の施用が挙げられる。バイオ炭は従来から土壌改良で用いられているが、N₂O 抑制効果も報告されている。一方で、バイオ炭による抑制効果がみられない、あるいは N₂O 発生量が増加した例 (Wells & Baggs, 2014) もあり、土壌条件やバイオ炭の種類によって異なった。青森県上北地域の造成後、長期間未更新の牧草地ではコストの低減や地域の資源有効活用等の点から更新時に消化液の利用が検討されているが、消化液による土壌の物理性や温室効果ガス放出への影響については明らかにされていない。本研究では青森県十和田市草地土壌において、メタン発酵消化液とバイオ炭の併用施用が草地更新時の N₂O ガス放出に及ぼす影響を明らかにする。窒素動態を検討するため、N₂O フラックスとともに土壌 EC の変動にも着目した。

2. 実験方法

青森県十和田市の北里大学獣医学部附属 FSC 十和田農場を試験地とし、2025 年 7 月に黒ボク土草地にバイオ炭と肥料(消化液, 化成肥料, 堆肥)を組み合わせた区を 8 区設定し、施用後にチモシー (*Phleum pratense*) を播種した。バイオ炭を 20 t/ha 施用し、施肥量はチモシーの N 基準とした。測定項目は N₂O フラックスと土壌水分, 土壌 EC・pH (1:5 水抽出法), 乾燥密度, 飽和透水係数とした。N₂O フラックスはバイオ炭+消化液区(BM), バイオ炭+化成肥料区(BK), 消化液区(NM), 化成肥料区(NK), 無施用区(NN)の 5 区においてクロードチャンバー法で求め、ガスは BID 検出器付きガスクロマトグラフ (GC-2010 plus Tracera (検出器 BID)) により分析した。

*北里大学 Kitasato University, **元北里大学 Former Kitasato University,

***東京農業大学 Tokyo University of Agriculture,

キーワード: 土壌の物理化学的性質, 土壌空気, 地球環境

3. 結果・考察

十和田市の日降水量と N_2O フラックスの推移を Fig. 1 に示す. 7月29日の基肥施用直後, N_2O フラックスは低い値であったが, 75mmの降雨後に急激なガスの放出が見られた. 中村らの室内実験(2006)では消化液施用後2~4日ほどでガスの放出が確認された. 施肥前から7日ほど無降雨だったことで土壌の乾燥化が進み, 施肥直後では硝化反応が進行しなかったと考えられる. 10月22日の追肥後は急激なガス放出が見られなかった. 追肥は表面施肥により, 基肥に対して1/3の施用量だったことや地温が低下し, 硝化反応が進行しなかったと考えられた.

Fig. 2 より消化液を施用した際の土壌表層の窒素動態とガスフラックス放出に及ぼすバイオ炭の影響を検討する. 施肥と降雨後に, NM区とBM区両区の土壌ECが上昇し, その後ECの低下とともに N_2O ガスフラックスが上昇した. 土壌ECの上昇・下降には水分量増加による硝化反応の進行とその後の溶脱が考えられた. さらにECの上昇から N_2O フラックスの増加が遅れたのはガス移動が制限されたことによるものと推察した. BM区の土壌ECはNM区よりも高い値であったが逆に N_2O フラックスは少なく, バイオ炭の施用により N_2O ガスフラックスを抑制する可能性が示された. これらはバイオ炭の水分保持力や吸着能が影響していると考えられるが, その効果は明確でない. 最後に更新後の土壌の物理性にメタン発酵消化液とバイオ炭の併用施用が及ぼす影響を把握するため, 表層土壌を採取し, 乾燥密度や透水係数を試験区で比較したが, 短期的な結果に違いは見られなかった. 牧草の刈り取りなどの管理のもと長期的な土壌の物理性の評価が必要である.

4. おわりに

今後は, 消化液を施用した際の窒素動態や土壌条件などの特性に着目し, バイオ炭との相互作用による硝化・脱窒過程への影響を詳細に解明することで, N_2O ガスの発生抑制条件の最適化を目指す.

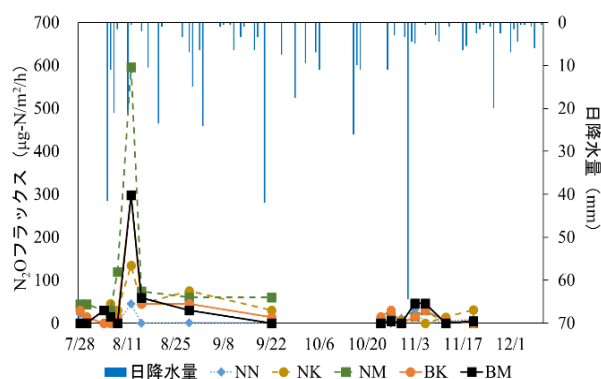


Fig. 1 十和田市の日降水量と N_2O フラックスの推移
Change in dairy precipitation and N_2O flux in Towada City

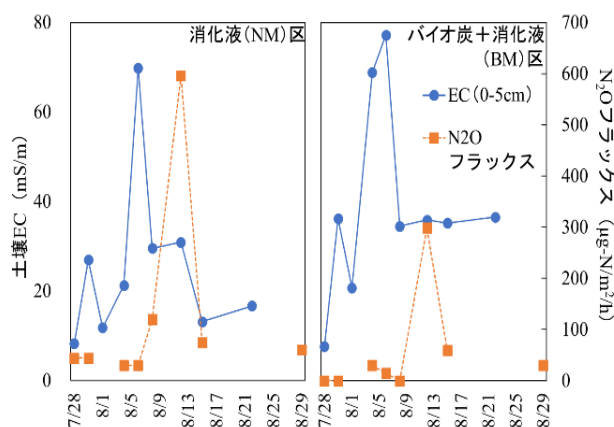


Fig. 1 NM区とBM区の土壌ECと N_2O フラックスの変動
Soil EC and N_2O flux in the MN and BM plots

「農業農村工学会大会講演会」

ISIMIP3b 日次シミュレーションにおける標準化土壌水分指数 (SSI) を用いた突発性
干ばつのグローバルな検出と特性評価Global Detection and Characterization of Flash Droughts Using the
Standardized Soil Moisture Index (SSI) in ISIMIP3b Daily Simulations

○サンパ イスラム*

ジュリアン ブランジェ*

ファン ザオ**

Sampa Islam

Julien Boulange

Fang Zhao

1. Introduction

Well into the 21st century, drought remains one of the costliest disasters, causing significant economic, environmental, and social impacts all over the world [5]. Recent studies have flagged flash droughts, a fast-developing drought subtype, occurring in a matter of days to weeks, hence leaving little time for response or mitigation [4], as a research priority [2]. While flash droughts are gradually getting more scientific attention, they remain underrepresented in global-scale analysis.

We address this research gap by leveraging daily simulations of soil moisture from multiple hydrological models operated under a common ISMIP3b protocol. After harmonizing soil moisture to a 1 m across all models, we derive Standardized Soil Moisture Index (SSI) and analyze the occurrences and characteristics of global drought and flash drought events across multiple future climate scenarios.

2. Materials and Methods

In this preliminary analysis, we use outputs from the H08 global hydrological model [3]. Following the ISIMIP3b protocol, simulated daily soil moisture are available at 0.5° spatial resolution (approximately 55 km) for five independent bias-adjusted climate models: GFDL-ESM4, IPSL-CM6A-LR, MPI-ESM1-2-HR, MRI-ESM2-0, and UKESM1-0-LL. Two simulation periods are considered: a historical baseline (1951-2014) and a future period (2015-2100). For future projections, we analyze two emissions pathways: the medium-high forcing scenario SSP3-7.0 and the high forcing scenario SSP5-8.5. Drought characteristics are evaluated for two future windows: mid-century (2041-2070) and late-century (2071-2100).

To enable consistent comparison of SSI characteristics across regions and among hydrological models, soil moisture was normalized to an effective 1 m. The Standardized Soil Moisture Index (SSI) was then calculated from daily normalized soil moisture. For each calendar month, values were pooled across years, and a non-parametric cumulative distribution was estimated using the Gringorten plotting position: $p(x_i) = \frac{i-0.44}{n+0.12}$, where i is the rank and n is the sample size. SSI values were subsequently obtained by transforming these probabilities to the standard normal space: $SSI = \Phi^{-1}(p)$.

Flash droughts were identified using a daily detection algorithm. Drought onset was defined when SSI fell below -1.0, while flash drought onset occurred when SSI declined to -1.5 within 30 days. Recovery was defined when SSI subsequently exceeded -0.5. For each detected event, six characteristics were extracted: onset speed, intensification rate, peak intensity, severity, duration, and antecedent moisture. Across 67,420 land grid cells, the primary diagnostic metric was the flash ratio, defined as the proportion of flash drought events relative to all drought events:

$$FlashRatio = \frac{n_{flash}}{n_{total}}$$

* 東京農工大学 Tokyo University of Agriculture and Technology ** 華東師範大学 East China Normal University. Keywords: drought, soil moisture, ISIMIP3

3. Results and Discussion

The global flash drought ratio increased consistently in all five H08 models from the reference period (~ 0.49) to mid-century (0.54-0.62) and late-century (0.58-0.70) under both scenarios. In comparison to SSP3-7.0, SSP5-8.5 consistently showed larger ratios; with the divergence becoming more pronounced by late-century, reflecting the stronger warming intensity driving faster soil moisture depletion. To the best of our knowledge, no previous global demonstration of robust inter-model consistency in flash drought intensification has been conducted based on daily SSI from multi-model hydrological simulations, but all five GCMs agreed on the directional upward trend despite differences in climate sensitivity.

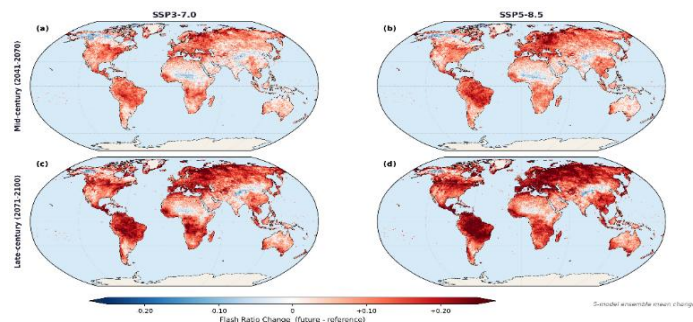


Fig 1: Ensemble mean change in flash drought ratio under SSP3-7.0 and SSP5-8.5 scenarios for mid- and late-century

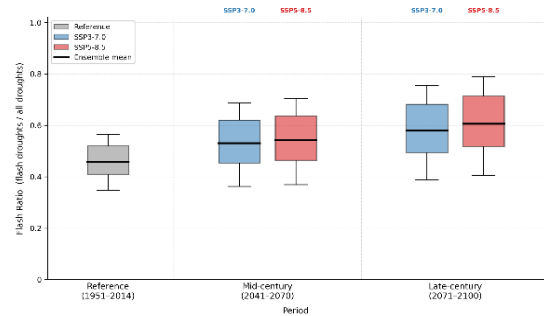


Fig 2: Ensemble distribution of flash drought ratio under reference period (1951-2014), mid-century (2041-2070), and late-century (2071-2100) for SSP3-7.0 and SSP5-8.5 scenarios

Under both scenarios, the propensity for flash droughts rose spatially in all eight locations that were analyzed. All five GCMs agreed on positive changes in the mid- and late-century periods, with largest increases in flash ratio observed in Europe, Central America, and South America. Additionally, North America demonstrated a progressive increase, particularly under SSP5-8.5 in the late century. Africa and South Asia showed smaller but consistently positive changes. The spatial pattern of increases was more pronounced under SSP5-8.5 late-century than under SSP3-7.0, highlighting the regional flash drought risk's scenario dependency.

All five models confirm a progressive shift in flash drought characteristics at the event level under future warming, with statistically significant differences confirmed at each period transition. In both cases, intensification rates rise, which is in line with previous studies finding that faster evapotranspiration under warming causes faster soil moisture depletion^[1,4] suggesting that future flash droughts will reach severe anomaly thresholds more rapidly.

4. Future Work

Future studies will focus on combining agricultural impact models with the detected flash drought events to evaluate the implications of food security and crop yield sensitivity. Regional vulnerability and the potential of early warning indicators will also be explored in more detail.

5. References

1. Ford, T.W. and Labosier, C.F. (2017) Meteorological conditions associated with the onset of flash drought in the eastern United States. *Agricultural and Forest Meteorology*, 247, pp. 414-423. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.08.031>
2. Gu L., Schumacher D. L., Fischer E. M., Slater L. J., Yin J., Sippel S., Chen J., Liu P. & Knutti R. (2025) Flash drought impacts on global ecosystems amplified by extreme heat. *Nature Geoscience* 18 709-715
3. Hanasaki, N., Kanae, S., Oki, T., Masuda, K., Motoya, K., Shirakawa, N., Shen, Y., Tanaka, K., 2008. An integrated model for the assessment of global water resources - Part 2: Applications and assessments. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 12, 1027-1037.
4. Otkin, J.A., Svoboda, M., Hunt, E.D., Ford, T.W., Anderson, M.C., Hain, C. and Basara, J.B. (2018) Flash droughts: A review and assessment of the challenges imposed by rapid-onset droughts in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 99(5), pp. 911-919. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0149.1>
5. Wilhite, D.A. (2000) Drought as a natural hazard: Concepts and definitions. In: D.A. Wilhite, ed., *Drought: A Global Assessment*. Routledge, pp. 3-18.