

令和 6 年 5 月 28 日現在

機関番号：10101

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K22921

研究課題名（和文）バブル態メタンの土壌内挙動の解明とメタンガス運命予測モデルの構築

研究課題名（英文）Methane bubble behaviors in soils and predictive models of methane transport in soils

研究代表者

濱本 昌一郎（Hamamoto, Shoichiro）

北海道大学・農学研究院・教授

研究者番号：30581946

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、バブル態を含むメタンガスの水田からの放出特性を解明することを目的とした。圃場モニタリングの結果、バブル態メタンフラックスが水田の通気組織が未熟または劣化が考えられる生育初期や後期で高く、総メタンフラックスに対して無視できない割合で放出されていることがわかった。また、稲わらの初期施用が生育初期のバブル態メタン放出を増加させることがわかった。土壌内のバブル存在量と形態別メタンフラックスの関係から、バブル存在量を関数とする形態別メタンフラックスを推定する予測式を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果から、水田からのバブル態メタン放出の季節変動を明らかにした。従来、水田からのメタン放出は水田経路が主であると考えられており、本研究成果は水田からのメタン放出機構におけるバブル態メタン放出の重要性を示したもので学術的意義は高い。また、土壌内のバブル存在量を関数とする形態別メタンフラックス予測式を提案した。比較的測定が容易な土壌気相率の連続モニタリングデータから水田におけるメタン放出フラックス予測の可能性を示し、温室効果ガス放出源としての水田の正確な評価に繋がる成果が得られた。

研究成果の概要（英文）：The objective of this study was to elucidate the characteristics of methane gas emissions from paddy fields, including bubble-form methane fluxes. Field monitoring conducted in FY2021 and FY2022 showed that bubble-form methane fluxes were higher in the early and late growth stages when the aeration tissue of rice plants was immature or possibly degraded, and that a non-negligible proportion of bubble-form methane against the total methane fluxes. The initial application of rice straw was also found to increase the release of bubble-form methane in the early growth stages. Based on the relationship between the amount of bubbles in the soil and the methane fluxes, we proposed a predictive model to estimate the methane flux at different pathways.

研究分野：土壌物理学

キーワード：メタン バブル態メタン 水田 溶存メタン濃度

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

水田は、メタンや二酸化炭素などの温室効果ガスの主要な自然放出源として知られている。メタンは、水稲の通気組織を介する経路、土壌から水面を介してバブル態として大気に放出される経路、水に溶解したメタンが大気に拡散する経路の三種類の経路で放出される。これまで、水田からのメタン放出の大部分は主として水稲を通して生じると考えられてきた。しかし、メタンは溶解度が低いことから、地下水下では主にバブル態として存在する。バブル態メタンは気圧や地下水位変動によって突発的かつ大量に放出することが知られており、バブル態メタンの動態はメタン放出量の時空間的変動に大きく影響を与える。バブル態メタンを考慮しない場合、メタン放出量の予測を大きく見誤る。しかし、バブル態メタンはバブル同士の合泡、外的環境変化(地下水位や気圧変動)に伴う径の変化、土壌間隙への物理的捕捉など、土壌内で極めて複雑な現象を有し、その動態を把握・予測することは極めて困難である。また、水田からのメタン放出量を正確に予測するためには、地下水位上部(不飽和)・下部(飽和)領域で多様な形態(溶存態、ガス態、バブル態)でのメタンガス移動を定量的に表すことが必要不可欠である。これまで、水田や湿地環境でのメタンガス挙動に関する研究の大半は、溶存態とガス態のみを取り扱っており、バブル態メタンの動態を定量的に評価可能なメタン挙動モデルは存在しない。既存のメタン放出予測モデルでは、バブル態としての地下メタンの蓄積量や環境変化による各形態メタンの放出量変動を正確に評価できない。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、バブル態を含むメタンガスの水田からの放出特性を解明することである。圃場実験から水田からの形態別メタンフラックスの季節変動を測定した。加えて、形態別メタンフラックスと環境条件、生育ステージとの関係や、形態別メタンフラックスの予測モデルを検討する。本研究では、高時間分解能なポータブルメタン分析計を用いて、突発的なバブル態メタン放出を捉え、形態別のメタンフラックスの季節変動を定量する。加えて、土壌水分センサーによる連続観測や原位置ポット実験を行い、土壌内メタンバブル存在量の経時変化に加え、実測のメタンバブル存在量およびその濃度測定を行った。

### 3. 研究の方法

茨城県つくば市谷和原に位置する農研機構 農環研所有の水田圃場を対象とした。合計 12 プロット(4 処理×3 反復)の測定プロットを設けた。各プロットサイズは縦 30cm 横 50cm である。水稲作付の有無と稲藁施用の有無を組み合わせ、計 4 処理区を設けた(稲有藁有、稲有藁無、稲無藁有、稲無藁無)。

測定期間は、2021 年 6 月 8 日から 2021 年 9 月 24 日までで、圃場は継続して湛水を行った。測定は午前中に行い、6 月 8 日から 7 月 5 日までの栄養成長期(VS)に 4 回、7 月 6 日から 8 月 4 日の生殖成長期(ReS)に 4 回、8 月 5 日から 9 月 24 日までの登熟期(RiS)に 7 回、の計 15 回行った。また、8 月 4 日～8 月 5 日にかけて、連続測定として計 8 回の測定を行った。栽培期間中、土壌内バブル存在量測定のため、各処理区につき深度 5cm と、10cm に土壌水分センサー(TEROS-12, Meter group)を設置し、データロガー(ZL6 Basic, Meter group)により 1 時間間隔で計測した。メタンフラックス測定は、閉鎖式チャンバー法を採用し、0.9 秒間隔でメタン濃度を ppb-ppm レベルで測定できる高精度ガス分析機(G4301, Picarro Inc., Santa Clara, CA, USA)を用いた。形態別メタンフラックスは、Kajiura and Tokida (2021) によって提案された方法を用いて算出した。

2022 年度も 2021 年度と同様な処理区を設定し、土壌水分センサーによる土壌内バブル存在量の計測に加え、形態別メタンフラックスの測定を実施した。土壌水分センサーと同一深度に採水管を設置し、メタンフラックス測定時に土壌溶液を回収し、ヘッドスペース法により溶存メタン濃度を測定した。測定期間は、2022 年 5 月 22 日から 8 月 27 日までで、栽培期間中計 13 回の測定を行った。圃場は常時湛水下にあった。また、同一圃場内で原位置ポット実験を行った。容積 3L のポットに、代掻き状態で現場土壌を充填し、各ポットに土壌水分センサーと採水管を 1 本ずつ埋設した。フラックス測定区と同様の 4 処理条件で計 15 個のポットを作成し、現場圃場に設置した。生育ステージ毎にポットを回収し、Tokida et al. (2013)の手法でポッ

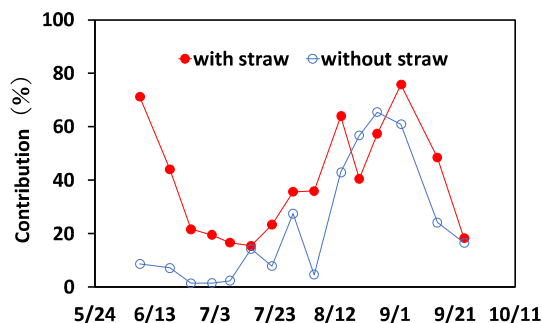


図 1 総メタンフラックスに対するバブル態メタンフラックスの割合

ト内のバブル量およびメタンバブル濃度、溶存メタン濃度を測定した。

#### 4. 研究成果

2021年度のメタンフラックス測定の結果、総メタンフラックスは、稲藁施用区で栄養成長期に増加し、稲作付け区では登熟期に増加が見られた。稲藁施用区の栄養成長期のメタンフラックスの増加は、稲藁を起因とした有機物供与によりメタン生成が活発に生じたためと考えられる。また、登熟期の稲作付け区の総メタンフラックス増加は、水稻の根から供給される有機物や、枯死根に由来するメタン生成が考えられた。

図1に総メタンフラックスに対するバブル態メタンフラックスの寄与率を示す。稲わら施用区では、栄養成長期で60%以上の寄与率を示し、稲藁未施用区、稲藁施用区どちらも、登熟期では、50%を超える寄与率を示していた。これは、登熟期後期で水稻は通気組織が低下し、通気能力を上回った量のメタンがバブル態として放出されたからだと考えられる。

稲有区では、栄養成長期から生殖成長期にかけて、水稻体メタンフラックスと土壌内のバブル存在量（気相率）に正の相関があり、土壌の気相率が増加すると、水稻体メタンフラックスも増大することがわかった。一方、登熟期になると稲有区について、相関が見られなかった。これは、登熟期以降土壌の気相率はほぼ一定の値をとっていたのに対して、登熟期後期では登熟期前期と比較して、水稻体の通気能力や根からの有機物供給が低下したためと考えられた。

土壌気相率と形態別フラックスの関係を整理し、気相率を関数とする形態別フラックス予測式を提案した。稲わら投与によりメタン生成が活発になる栄養成長期初期を除いて、提案したモデルは実測値をよく再現した。

2022年度モニタリングから図2に示すように、溶存メタン濃度は栄養成長期でピークを示し、登熟期にかけて再度増加した。稲藁投与区では、特に栄養成長期で高い値を示した。このことから、2021年度同様に有機物投与によってメタン生成が栽培初期に盛んに行われたことが示唆された。

水稻経由のメタンフラックスは生殖成長期でピーク値を示した（図3）。気相率は栄養成長期で急増し、その後の変化は小さかったことから、生育に伴い水稻内の通気組織が発達し、水稻経由のメタン放出が生殖成長期で最も盛んに行われたことが考えられた。一方、登熟期では通気組織の劣化に伴い水稻経由のメタン放出が減少したと考えられる。バブル態のメタンフラックスは、栄養成長期に最も高く、生殖成長期で低い値で推移した後に、登熟期にかけて僅かに増加した。2021年度モニタリングでは顕著にみられなかったものの、水稻の通気組織が未熟である栄養成長期では、生成されたメタンがバブル態として放出されることが考えられた。

図4に示すように、溶存メタン濃度とバブル態メタン濃度には正の相関がみられた。原位置ポット実験からも溶存メタン濃度とバブル態メタン濃度の間の正の相関が確認できたことから、栄養成長期のメタン生成増加に伴い高濃度のメタンバブルが大気へと放出されたと考えられる。また、気相率とバブル態メタンフラックスの関係から、気相率9%を超えるとバブル態メタンフラックスが増加することがわかった。

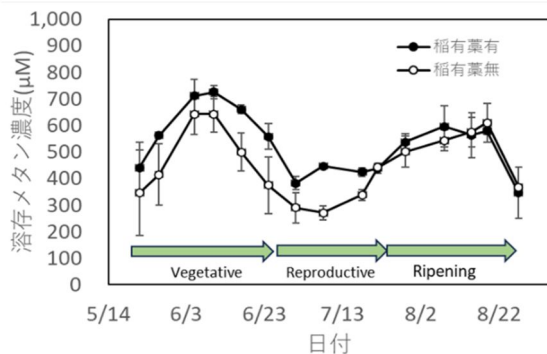


図2 溶存態メタン濃度の時系列変化

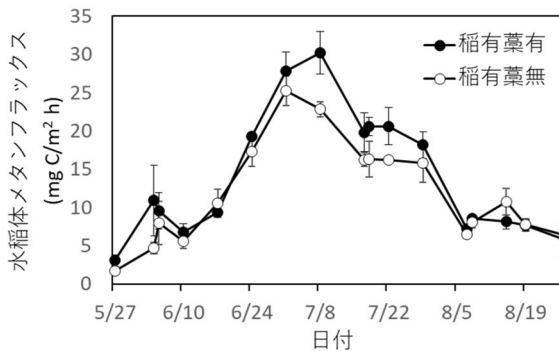


図3 水稻経由のメタンフラックス

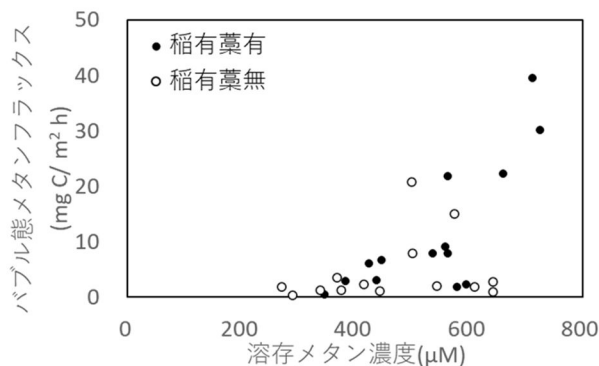


図4 バブル態メタンフラックスと溶存メタン濃度の関係

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Lakshani M. M. Tharindi, Deepagoda T. K. K. Chamindu, Li Yuan, Hansen H. F. E., Elberling Bo, Nissanka Sarath P., Senanayake Dassanayake M. J. B., Hamamoto Shoichiro, Babu G. L. Sivakumar, Chanakya Hoysala N., G. Parameswaran T., Arunkumar Pandit G., Sander Bjoern Ole, Clough Timothy J., Smits Kathleen	4. 巻 15
2. 論文標題 Impact of Water Management on Methane Emission Dynamics in Sri Lankan Paddy Ecosystems	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Water	6. 最初と最後の頁 3715 ~ 3715
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/w15213715	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kajiura Masako, Tokida Takeshi	4. 巻 53
2. 論文標題 Diurnal variation in methane emission from a rice paddy due to ebullition	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Environmental Quality	6. 最初と最後の頁 265 ~ 273
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/jeq2.20553	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 M. M. T. Lakshani, T. K. K. Chamindu Deepagoda, Shoichiro Hamamoto, Bo Elberling, Wei Fu, Ting Yang, Jun Fan, Xiaoyi Ma, Timothy Clough, Kathleen M. Smits, T. G. Parameswaran, G. L. Sivakumar Babu, H. Chanakya	4. 巻 23
2. 論文標題 A new exponential model for predicting soil gas diffusivity with varying degree of saturation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Vadose Zone Journal	6. 最初と最後の頁 1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/vzj2.20236	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 鈴木 健策, 柏木 純一, 中島 大賢, 長菅 輝義, 望月 俊宏, 安彦 友美, 古畑 昌巳, 大平 陽一, 千葉 雅大, 木村 利行, 矢野 真二, 阿部 光希, 松田 晃, 齋藤 寛, 笹川 正樹, 高橋 元紀, 西村 拓, 濱本 昌一郎, 常田 岳志, 西 政佳, 由比 進, 下野 裕之	4. 巻 91
2. 論文標題 水稻の初冬直播き栽培における播種時期と種子コーティングが出芽率に及ぼす影響の広域評価	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本作物学会紀事	6. 最初と最後の頁 291-302
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1626/jcs.91.291	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takeshi Tokida	4. 巻 77
2. 論文標題 Increasing measurement throughput of methane emission from rice paddies with a modified closed-chamber method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Agricultural Meteorology	6. 最初と最後の頁 160-165
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 谷川原 龍之介、小島 悠揮、濱本 昌一郎、神谷 浩二	4. 巻 149
2. 論文標題 TDRを用いた水中ファインバブル濃度推定手法の検討	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 土壌の物理性	6. 最初と最後の頁 47～53
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.34467/jssoilphysics.149.0_47	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計16件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 濱本昌一郎
2. 発表標題 農地における温室効果ガス動態と土壌ガスの予測モデル検証
3. 学会等名 土壌肥料学会北海道支部大会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 濱本昌一郎・鶴海遥嘉・小早川竜也・梶浦雅子・常田岳志・山崎琢平・西村拓
2. 発表標題 水田における経路別メタン放出と溶存メタン濃度の経時変化に関する研究
3. 学会等名 土壌物理学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小早川竜也、小野圭介、常田岳志、濱本昌一郎、山崎琢平、西村拓
2. 発表標題 インパース法を用いた、水田から放出される形態別メタンフラックスに関する研究
3. 学会等名 農業気象学会関東支部大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tatsuya Kobayakawa, Soichiro Hamamoto, Dingwen Cui, Ma Xuping, Masako Kajiura, Takeshi Tokida, Taku Nishimura
2. 発表標題 Seasonal and diurnal variations in methane emissions via plant and ebullition from rice paddies
3. 学会等名 PAWEES International Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tatsuya Kobayakawa, Soichiro Hamamoto, Dingwen Cui, Ma Xuping, Masako Kajiura, Takeshi Tokida, Taku Nishimura
2. 発表標題 Seasonal variations in methane emissions via plant and ebullition from rice paddies
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小早川竜也、濱本昌一郎、崔丁文、Ma Xuping、梶浦雅子、常田岳志、西村拓
2. 発表標題 水田からの形態別メタン放出の季節変動に関する研究
3. 学会等名 農業農村工学会2022年度大会講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tatsuya Kobayakawa
2. 発表標題 Seasonal variations in methane emissions via plant and ebullition from rice paddies
3. 学会等名 Tsukuba Global Science Conference
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小早川竜也、濱本昌一郎、崔丁文、Ma Xuping、梶浦雅子、常田岳志、西村拓
2. 発表標題 水田からの形態別メタン放出の季節変動に関する研究
3. 学会等名 2022年度（第71回）農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tatsuya Kobayakawa, Soichiro Hamamoto, Dingwen Cui, Ma Xuping, Masako Kajiura, Takeshi Tokida, Taku Nishimura
2. 発表標題 Seasonal variations in methane emissions via plant and ebullition from rice paddies
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takuya Sugimoto, Shoichiro Hamamoto, Taku Nishimura
2. 発表標題 Interaction between Nano-Bubbles and Colloid Particles in Saturated Porous Media under Flowing Condition
3. 学会等名 JpGU 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 濱本昌一郎・荻田翔・二瓶直登・竹村貴人・西村拓
2. 発表標題 飽和多孔質体におけるナノバブル挙動：ナノバブル水の化学的特性および共存コロイド粒子の影響
3. 学会等名 第68回コロイドおよび界面化学討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 谷川原龍之介・小島悠揮・関戸遼加・濱本昌一郎・神谷浩二
2. 発表標題 サーモ TDR を用いた水中および飽和土壌中におけるファインバブル濃度測定法の検討
3. 学会等名 2020年度土壌物理学学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大古湧之，濱本昌一郎，杉本卓也，西村拓
2. 発表標題 封入不飽和状態における多孔質体中のコロイド移動に関する研究
3. 学会等名 第54回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 濱本昌一郎，大古湧之，西村拓
2. 発表標題 土壌の間隙構造と物質移動特性
3. 学会等名 東京大学アイソトープ総合センターイメージングセミナー（招待講演）
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 大古湧之, 濱本昌一郎, 杉本格也, 西村拓
2. 発表標題 封入不飽和状態の多孔質体中におけるコロイド移動に関する研究
3. 学会等名 2019年度農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小島悠輝
2. 発表標題 熱特性測定を応用した地盤環境の可視化技術の開発
3. 学会等名 第35回岐阜地下水環境研究会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	常田 岳志  (Tokida Takeshi)  (20585856)	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・上級研究員   (82111)	
研究分担者	小島 悠輝  (Kojima Yuki)  (70767475)	岐阜大学・工学部・准教授   (13701)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	西村 拓  (Nishimura Taku)  (40237730)	東京大学・農学生命科学研究科・教授   (12601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------