

水田からの経路別メタン排出量定量法

梶浦 雅子

(国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構基盤技術研究本部農業情報研究センター)

1. はじめに

このたび, Masako Kajiura and Takeshi Tokida, 2021: Quantifying bubbling emission (ebullition) of methane from a rice paddy using high-time-resolution concentration data obtained during a closed-chamber measurement. *Journal of Agricultural Meteorology* 77(4), 245-252 に対して日本農業気象学会論文賞を受賞しましたこと, 大変光栄に感じております。

2 論文概要

2.1 水田からの経路別メタン排出量定量法を開発した

水田からは強力な温室効果ガスであるメタンが排出されており, 主にイネの通気組織を経由するか, 土壌から泡の上昇(バブリング)によって排出されています。この研究では, これら主要経路別に排出量を定量する方法を開発しました。

2.2 どうやって定量するのか?

まず水田でイネにチャンパーをかぶせて, チャンパー内空気中のメタンガスの濃度変化を, 携帯型メタン計で, 約 1 秒間隔でリアルタイム観測します。経路別の排出量は, このときの濃度上昇の仕方の違い, すなわち, イネ経路は一定速度の濃度上昇を示すが, バブリングは濃度の急増として現れることを用いて分離定量します。このような最先端のメタン計を用いた同様の研究は湿地などでも行われており, 水面からの拡散(イネ経路と同様一定濃度上昇を示す)とバブリング(濃度の急増)を分けて定量する方法がすでに提唱されていました。この方法では, バブリングしていない時間帯に線形回帰(時間vs濃度)することで, 拡散による排出量を求めます。しかし水田では, 非常に高頻度でバブリングを起こすこともあるため, 線形回帰できる時間帯が見つからないことが多々ありました。そこで, 秒単位のフラックスの密度分布から推定する方法を編み出しました。これによって高頻度でバブリングを起こしても, 一定時間以上観測すれば, イネ経路とバブリングを区別することが可能となりました。測定時間がどの程度必要になってくるかは, バブリングの頻度によって変わってきますが, これについては, 2 年間異なる圃場で集めた 3255 個のデータセットを総括した Kajiura and Tokida (2022)で示しているので参照してください。

2.3 何がわかったか?

バブリング由来の排出量は, 今まで土壌(イネの生えていないところ)にチャンパーをかぶせて測る, といった手法で測定されてきましたが, バブリングはイネの株元でより頻発に生じている可能性もあり, この方法ではバブリング由来の排出量を過小評価してしまう懸念があります。それが原因だったのか, 現在までバブリング由来の排出は大きくなく, イネ経路の排出がほとんどであるとされてきました。しかし, 著者らの開発した方法を用いると, バブリングが一日の排出量の半分以上にも及ぶ時期があることが明らかになり, 今までの知見を覆す成果が得られました。

他にも, イネ経路もバブリングも, 気温が高いほど多くなるが, バブリングの気温に対する感受性は, イネ経路の数倍にも及ぶこと, すき込んだイネ残渣がある程度分解した圃場(秋鋤きなど)だと, 穂ばらみ期はほとんどバブリングがなく, 出穂期, 登熟期になるに従ってバブリングが増えること, などが明らかとなりました。

2.4 その後の研究で

この論文で開発した方法を使って, さらに以下のようなことが分かってきているので, 紹介しておきます: (1) メタン排出量は朝夕に小さく昼に多いといった日中変動を示すが, その傾向を主に決めているのがバブリングであること(Kajiura and Tokida, 2023), (2) イネ経路, バブリングいずれも温度依存性にはヒステリシスがあること, すなわち気温が上昇する午前は温度が高まるほど排出量が増えるが, 気温が下降に転じて以降は高温でも排出量が大きくばらつき, 夕方には午前と同じ温度帯でも排出量が小さくなること(Kajiura and Tokida, 2023), (3) バブリングによる排出量や, その全排出量に対する寄与率は, 品種によって大きくことなること(Tokida *et al.*, 2022), (4) イネ経路の排出量は根の形態によって異なること(Ma *et al.*, 2023)などです。(3)や(4)の知見は非常に興味深く, この点を追究していけばメタン低減に有効なイネ品種の選択・育成に有益な情報が得られるかもしれません。

3. 研究秘話

3.1 高価なメタン計

メタン濃度の測定は, チャンパー上部に接続したチューブでチャンパー内のガスを吸引して装置に送り込み, レーザーによる分光学的な手法でリアルタイムに行います。この研究で用いた機器は Picarro 社の G4301 でしたが, 現在廃盤となってしまいました。同様の装置としては Licor の LI-7810 があり, この装置は非常に安定してお薦めです(特に利益相反はございません)。しかしいずれにせよ, とても高価です。二度ほど, チューブが外れて田面水を吸っていて, 装置に水が入る直前

に電源を切った、という冷や汗をかくなような事態がありました。使用の際は、このようなことが起こらないよう、チューブの接続部分はチェックしたほうがよいと思います。測定方法の詳細や様子(写真)は、Tokida (2021)に載っているのので、参照してください。

3.2 チューブの接続がゆるい？

チューブの接続が緩むなどして、外気が混入することがあります。本研究で使ったメタン計は、二酸化炭素や水蒸気も同時に測ることができます。通常は、吸入したチャンパー内の空気を水蒸気透過性チューブ(Nafion)+シリカゲル(通称-弁当箱)で乾燥させてからガス濃度を測っているのので(Tokida, 2021)、水蒸気濃度はかなり低いです。しかし、接続部がゆるんで外気が混入すると、水田なので水蒸気濃度は高まります。ですから、外気でコンタミしていないか、ときどきは水蒸気濃度も確認するとよいと思います。

3.3 イネって背が高い

夏の暑さがますます厳しくなっています。水田圃場におけるガス測定は、炎天下の中で行うのでとても大変です。今では空調服が通常仕様となりました。著者にとってさらに大変だったのが、成長したイネにチャンパーをかぶせることです。チャンパーの大きさは 30(縦)×60(横)×60(高さ) cm ですが、イネの成長に伴って、このチャンパーの下段にさらにチャンパー台を挿入します。この論文ではコシヒカリのデータのみ載せていますが、世界のイネコレクション等さまざまな品種を対象に測定を行っていて、著者の伸長を超える品種もたくさんあり、下段の高さは120 cm 以上になることもありました。すなわちトータルで180 cm ということです。もう少し背が高かったら、もう少し楽なのにな、と思った瞬間です。

3.4 チャンパーにはファンをダブルで

良質なデータをとるには、内部空気を攪拌させるファンが大事です。チャンパー上部にファンをつけることは多いと思いますが、(チャンパーの大きさにもよるかと思いますが)側面にも、さらには下段にチャンパー台を挿入する場合はそれにもつけることをお勧めします。なぜなら、チャンパー内部の攪拌がうまく行かないと、ときどき内部のメタンガス濃度が瞬間的に上下することがあるからです。メタンは軽いので、おそらくバブリングで出た高濃度のメタンガスが速やかにチャンパー上部のチューブ口に到達し、結果このようなデータになってしまうのだと思います。濃度が下がるということは、フラックスが負となります。解析では移動平均によるスムージングを行うのですが、負のフラックスが移動平均に影響してしまうため、データクリーニングで除去する必要があります。よってその分データが無駄になってしまうわけです。このようなことが無いよう、十分攪拌されるよう手を加えるとよいと思います。

3.5 「最初から高濃度」にはご注意

測定を始めようとチャンパーをかぶせた瞬間、その衝撃でバブリングしてしまうことがあります。このとき、内部のメタンガス濃度は測定開始時から数 10 ppm を超えてしまうことがあります。この研究で用いたメタン計は、高濃度になるとノイズが大きくなる

ため、一律の解析ステップではうまく計算できなくなったりします。そのため著者らは、測定を継続してもよい開始時濃度の閾値を 10 ppm として、それ以下なら継続可能、それ以上なら再度換気してチャンパーを設置し直すようにしています。

3.6 バブりまくる圃場

バブリングの多い登熟期などではまれに、測定中ずっとほぼ一定間隔で「ぼこっ、ぼこっ、ぼこっ」とバブリングが起き続けることがあります。そのような場合、排出量は通常の何倍、何十倍にもなり、結果このデータは外れ値として除外されます。原因は不明ですが、動物の通り道か、大きな残渣があるかなどとして、泡の抜け道ができていないのかもしれない。ただ、品種間比較をしたいときに、このようなデータは困りものです。各品種で代表性のあるデータを圃場で得るには、反復数 6 は最低必要だと実感しています。すごく大変ですが。

3.7 R 言語

解析には R 言語を使いました。使い始めて数年の著者にとっては、「もう少しきれいなスクリプトが書けるのかもしれない」、という疑惑がぬぐえず、未だ公開には至ってはいません。しかしいずれは、公開はする予定です。当時はなかった Chat GPT を活用するとよいかもしれません。自分でバグ探しをするのはとても大変ですが、Chat GPT に聞くと瞬時に直してくれたりします。便利な世の中です。

3.8 JAM に投稿しよう

さまざまな学術雑誌でオープンアクセス化が進む中、Journal of Agricultural Meteorology (JAM) はオープンアクセス費がとても良心的です。他の国際誌だと 30-50 万が相場といったところででしょうか。誰にでも読まれることはいいことですが、成果公表する機会が不平等になるのもどうかと思います。インパクトファクターの高い商業誌はオープンアクセス費も高かかりますが、だからと言ってエディターやレビューアーの質が高いとは限りません。この研究の後継論文を、他の商業誌に投稿したところ、有名どころでさえ、エディター、レビューアーともに粗末で非常に残念に思ったことがあります。学会誌は真面目なので、良いエディター、レビューアーにあたる可能性は高いと感じています。

3.9 ガンバレ！ につぼん！

水田や水稻に関して、もう十分研究してきたから、これ以上研究は必要ない、という意見を聞いたりします。しかし農業を取り巻く問題は、気候変動や世界情勢に伴って日々刻々と変わっており、そういったものにも対応した最新の研究がなされていくべきです。また水田からのメタン排出メカニズムに関して、まだまだわかっていないと言っても過言ではないでしょう。実際、想定以上バブリングで排出していることを、この研究で発見したわけです。イネ経路もバブリングも、どこにあるメタンがどういった経路をたどってどこから出ているのか、それを何が規定しているのか、など詳細は分かっています。古くからコメを主食としてきた日本人が、水田、水稻の研究を先導しなくてどうする？ と思ったりします。過去を振り返れば、先輩方がとても質の高い研究をされてきています。しかし残念ながら昨今、斬新で面白い発見を

報告しているのは、中国など日本以外の国々が目立ちます。最新研究をレビューしていて悲しくなるような実状。ガンバレ！
につぼん！

4. これからのメタン削減

水田からのメタン排出を削減するなら、中干し延長すればいい、それは分かり切っていることだ、という意見もあるでしょう。しかし昨今、特に九州地方などでは中干期に集中豪雨が多発していますし、必ずしも予定通りの水管理ができるとは限らないのではないのでしょうか。日本以外の国々でみると、灌漑/排水設備が十分でなく、そもそも水管理ができないところも多々あります。

ではどうやってメタン削減していくか？一つはメタン排出が少ない品種選択や育種だと思います。水管理に比べれば、農家さんへの負担も少ないでしょう。実際、本研究で開発した方法によって、品種によってイネ経路やバブリングによる排出量が異なることが分かりました。イネ経路が多い/少ない品種ほどバブリングが多い/少ないかといったらそのようなことはなく、イネ経路が多くバブリングが少ないもの、その反対のものなど様々なパターンがあります (Tokida *et al.*, 2022)。これは、イネの何かしらの形質によってメタン排出量が増減することを意味していると思うのです。これに関しては、共著者の常田岳志氏が研究を推進しているもので、今後の成果が楽しみです。

最後になりましたが、この場を借りて、共著者の常田岳志氏 (農研機構・農業環境研究部門)、圃場におけるメタン観測を共に行った齊藤彪流氏 (茨城大学(当時))と Ma Xuping 氏 (農研機構・農業環境研究部門) に改めて感謝申し上げます。

引用文献

- Kajiura M, Tokida T, 2022: Appropriate chamber deployment time for separate quantification of CH₄ emissions via plant and ebullition from rice paddies using a modified closed-chamber method. *Journal of Agricultural Meteorology* **78(1)**, 41–45.
- Kajiura M, Tokida T, 2023: Diurnal variation in methane emission from a rice paddy due to ebullition. *Research Square* <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1683513/v2>.
- Tokida T, 2021: Increasing measurement throughput of methane emission from rice paddies with a modified closed-chamber method. *Journal of Agricultural Meteorology* **77(2)**, 160–165.
- Tokida T, Kajiura M, Saito T, Nishiwaki J, 2022: Varietal differences in methane emissions through rice plants and via ebullition. *Proceedings of International Symposium on Agricultural Meteorology 2022*, p154. (日本農業気象学会 2022 年全国大会講演要旨)
- Ma X, Kawai T, Fukushima D, Kimani SM, Hmwe K, Kajiura M, Sakai Y, Uga Y, Tokida Y, 2023: The influence of root system architecture on methane emissions: insights from *in situ* root distribution of rice genotypes having different root angles. 日本土壌肥料学会講演要旨集, 第 69 集, p151.