

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 3 日現在

機関番号：24403

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2021

課題番号：20K21849

研究課題名（和文）地球観測ビッグデータに基づく新しい陸域生態系のメタン収支の推定

研究課題名（英文）estimating terrestrial methane flux based on global earth observation big data

研究代表者

植山 雅仁（Ueyama, Masahito）

大阪府立大学・生命環境科学研究科・准教授

研究者番号：60508373

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：渦相関法により観測されたメタン（CH₄）フラックスを、CH₄生成、酸化、輸送（植物輸送・拡散・バブル輸送）に分離するための手法を開発し、陸域生態系の全球CH₄収支のデータベース（FLUXNET-CH₄）を利用して、湿原のCH₄放出量を説明するプロセスを推定した。開発した手法を、FLUXNET-CH₄のデータベースに適用することで、手法が様々な湿原や水田のCH₄放出量を説明できることを明らかにした。CH₄放出に関わるプロセスを分離したところ、湿原間のCH₄放出量の大きさの差には、CH₄生成量の違いが主要因で、次に、生成されたCH₄が酸化される割合が重要であることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

陸域のCH₄収支やその変動要因を定量評価することは、全球の温室効果気体収支や温暖化予測を向上させる上で喫緊の課題である。これまで陸域CH₄収支の評価法は、個別の地点で観測されたCH₄収支と環境要因とを統計解析するか、検証が不十分なモデルによる広域推定にとどまっていた。多地点の地球観測データを用いて数理モデルのパラメータを直接的に決定し、データ駆動による陸域CH₄収支を決定する要因や気候応答を評価できたことは、プロセスモデルの高度化に貢献できる。数理モデルを使ったデータフュージョンを行うことで、得られたCH₄収支の変動を粗過程に遡って評価できるホワイトボックス型の推定が可能となった。

研究成果の概要（英文）：This study has developed a method (CH₄) for partitioning methane flux observed by the eddy covariance method into CH₄ production, oxidation, and transportation (plant-mediated transportation, diffusion, ebullition). The method constrains parameters for a newly-developed process model with the observed data based on a Bayesian method. The developed method was tested for a temperate bog in Hokkaido, Japan. The method was then applied for a database of global terrestrial CH₄ fluxes (FLUXNET-CH₄) for estimating CH₄-related processes for wetlands (bog, fen, and marsh), tundra, and rice paddies. The estimated processes suggest that spatial variations in CH₄ emissions are mostly explained by those by CH₄ production across the sites, and then CH₄ oxidation is the important factor for CH₄ emissions. The model estimated that plant-mediated transport was the most important transport process in fen and rice paddies, but ebullition was the important process in bog and tundra.

研究分野：環境動態解析

キーワード：メタンフラックス 温室効果気体収支 陸域生態系 モデリング ビッグデータ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

二酸化炭素(CO₂)の32倍の温室効果を持つCH₄は、産業革命以前の722 ppbから2019年の1862.8 ppbにまで濃度が上昇している。CH₄は、湿地や水田などの嫌気条件でCH₄生成古細菌によって生成される。CO₂に比べて連続観測が困難であったため、陸域生態系のCH₄収支や変動要因については、多くの不確実性が残されている。将来の地球温暖化を正確に予測するためには、湿原や水田などの陸域生態系のCH₄動態を正確に評価する必要がある。

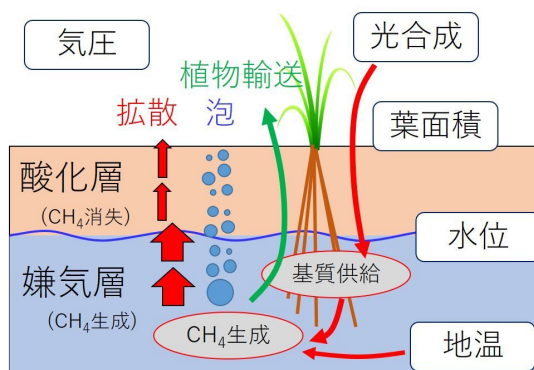
2019年に欧米主導のFLUXNET-CH₄プロジェクトで陸域生態系の全球CH₄収支のデータベースが整備された(Knox et al., 2019)。このデータベースには、北極から熱帯の湿原、水田、森林など60サイトのデータが登録されており、2019年当時、米国アメリカ地質調査所(USGS)・Powell Centerの作業グループにのみ公開されていた。2021年に、79地点のデータに拡充されたデータベースがオープンデータとしてCC BY 4.0のライセンスで公開された(Delwiche et al., 2021)。FLUXNET-CH₄は、陸域CH₄収支の高度な理解のために有益なデータである。

2. 研究の目的

本研究の目的は、陸域生態系のメタン(CH₄)収支を決定する環境要因と粗過程をグローバル観測網で蓄積されたFLUXNET-CH₄データを用いて逆推定するための解析手法を開発し、グローバルの湿原・水田のCH₄放出機構を解明することである。

3. 研究の方法

生態系におけるCH₄生成から大気への輸送、消失の粗過程までを構造的に表現できる数値モデルを開発し、モデルを駆動させるために必要なパラメータを観測データベースにより決定する。データフュージョンにより観測データを、科学法則に矛盾がない形でモデルに同化する。例えば、CH₄は地下水位より下の嫌気層で光合成産物を基質として生成され、生成されたCH₄は、拡散、泡、植物維管束を通して大気に輸送される。これらの粗過程を数理的に表現することで、生態系間のCH₄収支が異なる理由や環境変数(地温、水位など)に対する生態系CH₄収支の応答を粗過程に遡って評価できる。モデルは、観測データから制約できる程度にシンプルであり、生物・物理法則によるCH₄生成、輸送、消失の粗過程を十分に説明できる構造をもつ(図1)。同様に、森林生態系のCH₄吸収に対しても適用できる手法を開発した(Ueyama et al., 2021)。



$$\text{CH}_4\text{放出量} = \text{生成量} - \text{消失量} \\ = \text{拡散輸送量} + \text{泡輸送量} + \text{植物輸送量}$$

図1. データ駆動型CH₄放出量推定モデルは入力変数を表す。

モデルの開発、改良、観測データの整備を、FLUXNET-CH₄データに含まれる国内の高層湿原を対象に実施した(Ueyama et al., 2022)。開発したモデルを、FLUXNET-CH₄データベース内の入力条件がすべて観測されている22地点を対象に、適用して湿原・水田のCH₄放出機構のグローバルな特徴を評価した。

4. 研究成果

4 - 1. 美唄湿原におけるモデル検証

モデルの開発と検証は、北海道の美唄湿原のデータを用いて実施した(Ueyama et al., 2022)。観測データにより制約されたモデルは、CH₄放出量の変動の87%を説明することができた(図2)。

CH₄放出経路として植物輸送とバブルによる輸送が重要であることが分かった(図3)。観測期間に占めるCH₄放出量に対して、バブル輸送の寄与は64%で、植物輸送の寄与は34%であると推定された。この高層湿原では、泥炭の深い層からのバブルによる輸送が重要であることが示されており(Tokida et al., 2005)。モデルによる推定値はこの結果と矛盾しない結果であった。気圧の低下に伴い観測される

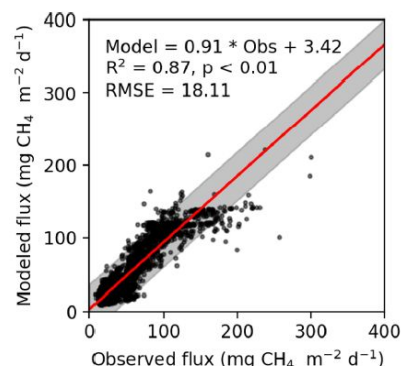


図2. モデル推定値と観測値によるCH₄放出量の比較(Ueyama et al., 2022)

CH₄ 放出イベントが、バブル輸送であるとモデルにより推定されている。

モデルの制約に利用する観測データの年数が少ないと、推定されるプロセスに不確実性が大きくなることが分かった。このことは、正確なプロセスの推定のためには、長期の観測データが必要であることを示唆するものである。

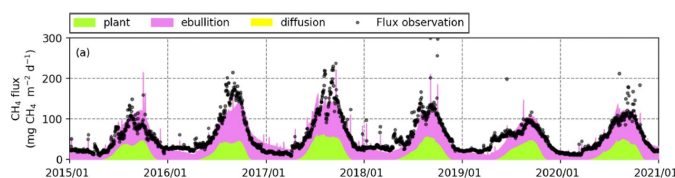


図 3. 美唄湿原における CH₄ 放出量の観測値と推定された輸送経路 (Ueyama et al., 2022)

4 - 2. FLUXNET-CH₄ データベースへの適用

開発した手法を、FLUXNET-CH₄ のデータベースに適用することで、手法が様々な湿原や水田の CH₄ 放出量を説明できることが分かった。CH₄ 放出に関わるプロセスを分離したところ、湿原間の CH₄ 放出量の大きさの差には、CH₄ 生成量の違いが主要因で (図 4) 次に、生成された CH₄ が酸化される割合が重要であることが分かった。輸送プロセスは、湿原間の CH₄ 放出量の違いには大きく効かないと推定されたが、CH₄ 放出量の季節変化に影響している可能性が示された。また、低層湿原や水田では、植物体の維管束を通った CH₄ 放出が多い一方、ツンドラや高層湿原では、バブル輸送による寄与が大きい可能性が示された。

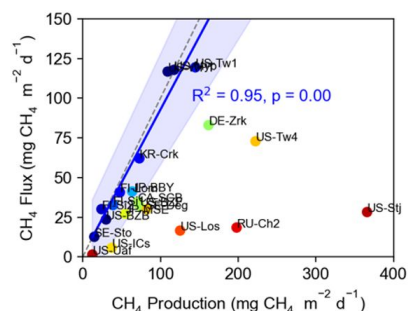


図 4. CH₄ 生成量と放出量の関係 (Ueyama et al., in prep.)

4 - 3. 森林 CH₄ 吸収量への手法の適用

森林の CH₄ 吸収量のメカニズム解明に向けて、森林の CH₄ 酸化に適用できるような手法を開発し、山梨県のカラマツ人工林で観測された 7 年分の CH₄ 吸収量のデータに適用した (Ueyama et al., 2021)。この実験では、4 種のプロセスモデルのパラメータを観測データにより決定した。いずれのモデルも観測による CH₄ 吸収量の季節変化、年次変化を精度よく再現できる事が確認できた (図 5)。

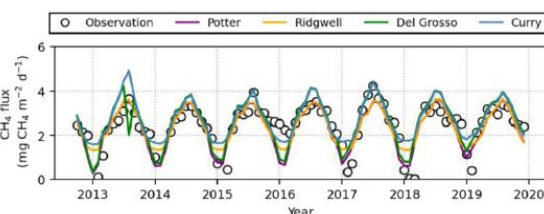


図 5. 制約された 4 種のプロセスモデルと観測に基づくカラマツ林の CH₄ 吸収量 (Ueyama et al., 2021)

制約されたモデルを用いて、RCP2.6 と RCP8.5 の気候シナリオを用いて 2100 年までの森林の CH₄ 吸収量を将来予測した。その結果、4 種のモデルともに、将来の CH₄ 吸収量は増加すると予測したが、その増加量には大きな不確実性があることが分かった。これは、各モデルにおける CH₄ 酸化と CH₄ 濃度の関係が現状の観測から十分に制約できていない事が原因である。すなわち、CH₄ 濃度に対する環境応答を十分に制約できるようなデータを観測によって蓄積させることが必要だと分かった。

< 引用文献 >

- Delwiche, K. B., Knox, S. H., Malhotra, A., Fluet-Chouinard, E., McNicol, G., Feron, S., Ouyang, Z., Papale, D., Trotta, C., Canfora, E., Cheah, Y.-W., Christianson, D., Alberto, M. C. R., Alekseychik, P., Aurela, M., Baldocchi, D., Bansal, S., Billesbach, D. P., Bohrer, G., ... Jackson, R. B. (2021). FLUXNET-CH₄: A global, multi-ecosystem dataset and analysis of methane seasonality from freshwater wetlands. *Earth System Science Data*, 13, 3607-3689.
- Knox, S. H., Jackson, R. B., Poulter, B., McNicol, G., Fluet-Chouinard, E., Zhang, Z., Hugelius, G., Bousquet, P., Canadell, J. G., Saunio, M., Papale, D., Chu, H., Keenan, T. F., Baldocchi, D., Torn, M. S., Mammarella, I., Trotta, C., Aurela, M., Bohrer, G., ... Zona, D. (2019). FLUXNET-CH₄ synthesis activity: objective, observations, and future directions. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 100, 2607-2632.
- Tokida, T., Miyazaki, T., Mizoguchi, M., 2005. Ebullition of methane from peat with falling atmospheric pressure. *Geophysical Research Letters* 32, L13823, doi:10.1029/2005GL022949.
- Ueyama, M., Fujimoto, A., Ito, A., Takahashi, Y., Ide, R. (2021) Constraining models for methane oxidation based on long-term continuous chamber measurements in a temperate forest soil. *Agricultural and Forest Meteorology*, 310, 108654.
- Ueyama, M., Yazaki, T., Hirano, T., Endo, R. (2022). Partitioning methane flux by the eddy covariance method in a cool temperate bog based on a Bayesian framework. *Agricultural and Forest Meteorology*, 316, 108852.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Chang, K.-Y., et al (Ueyama, M.)	4. 巻 12
2. 論文標題 Substantial hysteresis in emergent temperature sensitivity of global wetland CH4 emissions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 2266
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-021-22452-1	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 Knox, S. H., et al (Ueyama, M.)	4. 巻 27
2. 論文標題 Identifying dominant environmental predictors of freshwater wetland methane fluxes across diurnal to seasonal time scales	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Global Change Biology	6. 最初と最後の頁 3582-3604
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/gcb.15661	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 Delwiche, K. B., et al (Ueyama, M.)	4. 巻 13
2. 論文標題 FLUXNET-CH4: A global, multi-ecosystem dataset and analysis of methane seasonality from freshwater wetlands	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Earth System Science Data	6. 最初と最後の頁 3607-3689
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5194/essd-13-3607-2021	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 Ueyama, M., Fujimoto, A., Ito, A., Takahashi, Y., Ide, R.	4. 巻 310
2. 論文標題 Constraining models for methane oxidation based on long-term continuous chamber measurements in a temperate forest soil.	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Agricultural and Forest Meteorology	6. 最初と最後の頁 108654
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.agrformet.2021.108654	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 Ueyama, M., Yazaki, T., Hirano, T., Endo, R.	4. 巻 316
2. 論文標題 Partitioning methane flux by the eddy covariance method in a cool temperate bog based on a Bayesian framework	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Agricultural and Forest Meteorology	6. 最初と最後の頁 108852
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.agrformet.2022.108852	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 Irvin, J., et al. (Ueyama, M.)	4. 巻 308-309
2. 論文標題 Gap-filling eddy covariance methane fluxes: Comparison of machine learning model predictions and uncertainties at FLUXNET-CH4 wetlands	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Agricultural and Forest Meteorology	6. 最初と最後の頁 108528
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.agrformet.2021.108528	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

〔学会発表〕 計6件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 植山雅仁・藤本梓
2. 発表標題 生態系モデルを用いた森林におけるメタン酸化速度の評価
3. 学会等名 陸域生態系モニタリング研究集会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 植山雅仁・藤本梓
2. 発表標題 生態系モデルを用いた森林におけるメタン酸化速度の評価
3. 学会等名 日本農業気象学会全国大会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤岡詩乃・矢崎友嗣・植山雅仁・平野高司
2. 発表標題 北海道美唄湿原における5年間のCO2収支の年次変動と気象環境の関係
3. 学会等名 日本湿地学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masahito UYAMA
2. 発表標題 Expanding research interests with collaborations through surviving young days.
3. 学会等名 FLUXNET Early Career Network Summer series (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ueyama, M., Iwata, H., Endo, R., Harazono, Y.
2. 発表標題 Methane emissions from the forest floor of a black spruce forest on permafrost in interior Alaska.
3. 学会等名 International Symposium Pan-Arctic Water-Carbon Cycles and Terrestrial Changes in the Arctic: For Resilient Arctic Communities (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 植山雅仁
2. 発表標題 北方湿原で観測されたメタン交換量のプロセスへの分離
3. 学会等名 陸域生態系モニタリング研究集会 (国際学会)
4. 発表年 2022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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------