

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 27 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26281012

研究課題名(和文)北極域温暖化解明のためのメタン収支観測とそれに基づく広域的データベースの構築

研究課題名(英文)Observation of methane budget and establish of the regional database for Arctic warming studies

研究代表者

原 園 芳 信 (Harazono, Yoshinobu)

大阪府立大学・生命環境科学研究科(系)・客員研究員

研究者番号：90137240

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,500,000円

研究成果の概要(和文)：北極域では温暖化が顕在化しこれが中緯度の気候変化(夏季の記録的高温や冬季の局所的な多雪と寒波の停滞)の一因になっている。温暖化が進み湿地ツンドラや永久凍土層が融解するとメタン(CH₄)放出が増え、温暖化を加速する。本研究ではAlaska州中央部のクロトウヒ植生を対象にCH₄の放出/吸収を観測し、長期にわたる高品質なデータを確保した。観測からクロトウヒ林のCH₄吸収が大きいことが分かった。海外の研究者と協力してより広範なデータベース化を行った。データに基づいて炭素収支モデルのパラメータが改良され、広域的なCH₄収支を評価できた。これらは気候モデルの予測精度向上に寄与すると期待される。

研究成果の概要(英文)：Arctic warming has been affecting mid-latitude climate. Arctic warming progresses the degradation of tundra and permafrost, that increase methane (CH₄) emission, resulting in accelerating the warming. In this study, we observed CH₄ exchange at poorly drained black spruce forest in Alaska applying micrometeorology techniques and chambers, to reveal the processes of CH₄ exchange. Obtained data have been compiled as long-term high quality dataset and opened for scientific users on global change studies. We also archived referent data from foreign researchers for a global scale database. Based on the data, the parameters of the carbon balance model were improved, and providing better CH₄ budget evaluation globally. Observed results showed that understory of black spruce forest showed large CH₄ absorption during drought, while daily CH₄ budget changed between sink and source according to soil water content. Results may contribute to improving the accuracy of climate model prediction.

研究分野：環境生態学

キーワード：メタン収支 永久凍土 データベース 広域評価 クロトウヒ林 炭素収支 渦相関法 チャンバフラックス

1. 研究開始当初の背景

温暖化抑制のためにCO₂の放出抑制がなされているが、メタン(CH₄)等の他の温室効果ガスへの対応が政策課題となっている。温暖化が進むと、永久凍土層に貯留されたCH₄が放出されるのに加えて、湿地ツンドラでのCH₄の放出が増大し温暖化を加速する。このため、生態系と大気との間のCH₄交換過程の実態把握やそのプロセスの解明、これらに基づいたCH₄収支モデルの改良と温暖化予測の精度向上や影響評価が強く求められている。しかし、観測データが少なく生態系におけるCH₄の吸収と放出のプロセス理解不足が指摘されてきた。

北極域生態系は散在する湖沼や湿潤ツンドラからのCH₄放出が大きい反面、乾燥状態時にはCH₄の吸収源となる。このため、生態系におけるCH₄収支の正確な把握は困難であったが、申請者らはAlaskaのクロトウヒ林などで、チャンバ法と微気象学的手法(渦相関、傾度、REA)によるCH₄フラックスの相互比較を行い、双方で矛盾のない結果を得た。北方林のツンドラなど放出と吸収の入り交じった生態系でも高精度でフラックスを定量的に把握でき、長期連続的なCH₄フラックス観測により、その収支評価は定まってきた。一方、土壌、植生、地下水位等の条件毎にCH₄フラックスレベルの差が大きく、場所毎のCH₄生成/酸化プロセスの影響度に違いがあるため、モデル化や広域評価は未だに不十分である。モデル化やCH₄収支変化予測のためには、さらなる観測継続とその欠測値補完を施した標準的データの整備の必要性が強く指摘され(Japan Flux, FLUXNET等)、放出/吸収プロセスの解明にはチャンバによる同時測定も必要となっている。

2. 研究の目的

観測に基づき、CH₄フラックス観測データの蓄積、観測の欠測を補完した高品質データベース化、それに衛星データを融合した広域化データの整備を行う。最終的には広域データと地上検証データに基づいたプロセスモデルの精緻化により、気候モデルの予測精度向上に寄与する。

(1) CH₄フラックスの比較観測とデータ確保

放出源と吸収源が混在する永久凍土地帯のクロトウヒ林を対象とし、渦相関法、傾度法による連続観測に加えて、REA法、チャンバ法を適用して、植生や土壌条件の局所的な差異を反映したCH₄フラックス観測を行う。これらによりモデル化に不可欠な環境因子を把握すると共に、グランドツルース情報などを現地取得する。

(2) データの欠測補完と広域化データ整備

野外観測では気象条件や電源、測器トラブルなどで欠測が生じる。FLUXNETの標準手法と最

新の統計手法を用いて欠測を補完した連続観測データを整備する他、CH₄フラックスの比較観測による精度検証を行い、モデルの精緻化や広域評価に適用しやすいCH₄フラックスに関するデータベースを構築する。海外の研究者たちの協力を得て、湖沼や他の植生におけるCH₄フラックス観測結果を収集しデータベースに統合する。

(3) CH₄収支モデルの精緻化

伊藤が開発したVISITを凍土地帯のCH₄収支に適用できるよう改良する。観測で得たデータベースを用いて環境変化に対するモデルの応答特性を適合化させる。地上検証データ(植生調査)や総合観測データと機械学習法(SVR)を組み合わせて主要な影響因子を抽出しパラメータを最適化する。

3. 研究の方法

(1) 観測とデータ整備

Alaskaの凍土のクロトウヒ植生での温室効果ガス収支観測を継続する。加えてUASの研究者と連携を図り、彼らが渦相関法やチャンバにより得たCH₄フラックスデータを収集する。申請者らのデータとこれらを統合し、support vector regression (SVR)手法により(CH₄フラックス観測データと衛星データを組み合わせて)広域的データセットを整備する。衛星データはAlaska大学IARCの設備を利用して取得する事で了解が得られており、共同研究者等がIARCに滞在中に集中的に確保する。これらのデータを含めてSVRを適用することによりアラスカ全体のCH₄フラックスの広域評価を試みる。

(2) CH₄収支モデルの改良と精緻化

VISITに含まれるCH₄収支スキームを凍土層の森林に合うように改良し、プロセス解明観測から得られるデータを加味してモデルを精緻化する。追加取得する地上検証データ(植生調査)や総合観測データと機械学習法を組み合わせて影響因子やパラメータを更新し、CH₄収支変化予測と温暖化への影響評価をする。VISITモデルとは別に、観測データを基にCH₄の吸収/放出プロセスを明らかにするモデルの開発も行う。モデルの妥当性が検証できた後、SVRを適用して空間的に補完する。CH₄フラックスの観測場所は局所的に限られるので、広域的データセットが整備され次第、広域的なCH₄収支評価と環境変化との関連を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 連続観測によるCH₄収支の高精度把握

2014年度は科研費でアラスカ大学現地常駐研究員を確保できたが、2015年度途中から予算不足で研究員の常駐が不可能となったため、メタン分析計のトラブルなどに迅速な

対応ができず観測データの欠測が増えた。渦相関法と傾度法の2つの手法により得られたCH₄フラックスは、ノイズ除去と欠測値補完などにより連続データとしてデータベース化ができた。また、測定手法間の相互比較により微弱なメタンフラックスをこれまで以上に高い信頼度で把握でき、高精度のデータベースとしての確保が進んだ。これらのデータを解析することで、メタン放出の環境応答性は土壌水分の異なるエリア間で異なること、湿ったエリアからのメタン放出の季節変化は地温よりも季節的な凍土の融解と関係していることなどを明らかにした (Iwata et al., 2015)。

衛星リモートセンシングとの融合で広域的評価に利用するために、夏季の集中観測に大阪府大の大学院生が参加し、現地調査により質の高いグランドツルースデータを確保できた。

(2) チャンバを用いたプロセス解明観測

UAF サイトの湿潤区と乾燥区において暖候季(5月中旬~9月下旬)に通気開放型チャンバでCH₄フラックスを連続測定した。30分毎のCH₄フラックスは各チャンバ共に、気温(2m)地温(-10cm)および林床表面温度の二次関数で表現でき、最大交換速度となる温度はそれぞれ、7.4~7.5、8.3~8.5、7.9~8.5であった。一般にメタン生成は温度の指数関数として表されるが、チャンバで測定されたCH₄-fluxは吸収/放出ともに最適温度を持つ結果となった。無降雨期間が2週間以上続くと、それまで大きいCH₄放出であったチャンバが大きいCH₄吸収に変わった。比較的湿潤な時期でもCH₄吸収fluxは放出fluxの30-40%に相当し、厚いコケ層のあるクロトウヒ林床はCH₄吸収が大きい(CH₄消化菌の活性が高い)植生であることがわかった。

夜間早朝などにも吸収/放出flux共に大きく低下しなかったことから、生成と消費の双方のメカニズムと輸送過程における動態把握が重要と考えられた。2016年の暖候季は降雨が多く、湿潤区ではCH₄放出が連続的に、乾燥区では小さい吸収fluxが観測され、地表から20cm深さ付近の土壌含水率が影響することがわかった。

凍土のない国内湿原におけるCH₄フラックスの連続観測結果との比較からは、CH₄フラックスの季節変動に最も影響を及ぼす環境要因は地温であり、夏期に気圧が低下するとCH₄の噴出現象が起こることもわかった。

(3) モデルの改良

構築したモデルはCH₄の生成、酸化、貯留と輸送経路(拡散、噴出、植物媒介)のプロセスを含む。各プロセスは、乱数を用いた準ニュートン法によって複数の予備的な最適化モデルパラメータを選抜し、モデルパラメータの

配列をポアソン分布の確率密度関数を基にした尤度関数の入力データにする。第2段階では、尤度関数のパラメータをマルコフ連鎖モンテカルロ法(MCMC)で最適化し、得られたパラメータ分布から真のモデルパラメータとその信頼区間を決定した。

構築したモデルをMCMCで最適化したところ、CH₄の放出プロセスには植物を経由する輸送が重要であることが示された。UAサイトでは、0.2 nmol m⁻² s⁻¹ から 19.4 nmol m⁻² s⁻¹ と低いメタン放出量であった。美唄湿原に比べてUAFサイトのフラックスが小さいのは年平均地温の差と永久凍土の有無によると考えられる。UAFサイトでは、チャンバ内の植生の違いによってCH₄放出量が大幅に異なり、スゲ類が優先しているチャンバのフラックスが最も大きく、地衣類が優先しているチャンバではほぼ放出が無かった。スゲの維管束を通したCH₄輸送と地衣類が優先する乾燥した植生での酸化が重要な機能を果たすことが示唆された。

最適化されたモデルによる推定精度は、美唄湿原において高く(RMSE=; R²=0.65)、UAFサイトでは低かった(RMSE=; R²=0.2)。UAFサイトにおいては、凍土融解深の季節変化を考慮していなかったためR²が低くなったと考えられる。最適化されたモデルは、植物輸送によるCH₄放出に高い感度があった反面、拡散による輸送は表層でほぼ全てが酸化された。

(4) モデルの統合化とdataの相互利用による広域評価

微気象学的手法により永久凍土上のクロトウヒ林(フェアバンクス、湿地林)のほか北極沿岸ツンドラ(パロー、湿性ツンドラ)、美唄湿原(北海道、高層湿原)で得られた観測データをモデルの制約条件とした。3つの陸域生態系モデルの中のCH₄交換量にかかわるサブモデルを抽出し、サイトで観測された環境データを用いてサブモデルを実行できる環境を構築した。解析に使用したモデルは、VISIT (Ito and Inatomi, 2012)、CRM4Me (Riley et al., 2011)、LPJ-WHyMe v1.3.1 (Wania et al., 2010)と、新たに開発したDMM(二口ら, 2017)で、いずれも、CH₄の生成量、酸化量、植物輸送、拡散輸送、噴出輸送の寄与を評価できる。入力する環境データは、気温、地温、水位、土壌含水率、気圧、CH₄濃度、GPP、生態系呼吸量、潜熱フラックス、LAIである。更に、観測されたCH₄フラックスを制約条件としてモデル(VISIT, CRM4M4, LPJ-WHyMe)を大域検索法(SCE-UA法)、DMMをマルコフ連鎖モンテカルロ法で用いて最適化し、最適化によりモデルの精度が向上するかを検討した。

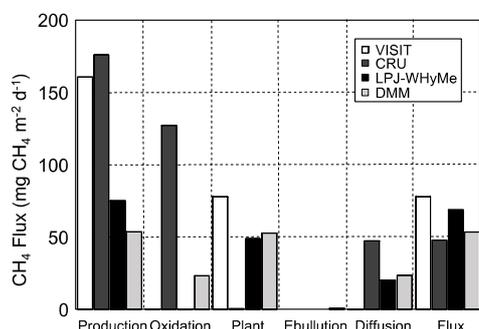


図 1. 最適化されたモデルによる 2015 年 5~10 月の美唄湿原におけるメタン交換量とそのプロセス

最適化したいずれのモデルも観測された CH₄ フラックスの大きさとその季節変化を精度よく再現できるようになった (RMSE=18~25 mg CH₄ m⁻² d⁻¹)。2015 年の 5~10 月に観測された CH₄ 放出量 11.6 g CH₄ m⁻² に対して、モデルによる推定値は 8.8~14.3 g CH₄ m⁻² であった。他方、CH₄ 生成量はモデルにより 2 倍以上の差がみられ、CH₄ 放出のプロセス毎の強弱はモデル間で異なった。CRU4Me は生成された CH₄ の大部分が酸化により消費され、残りが拡散によって大気へ放出されたが、VISIT は生成された CH₄ の殆どが植物経由で大気へと放出すると見積もられた (図 1)。フラックスデータのみでは、それぞれのプロセスの CH₄ 交換への寄与を明確にし難いことが示唆された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 10 件)

- 1) Xiyang Xu, Williams J. Riley, Charles D. Koven, Dave P. Billesbach, Rachel Y. W. Chang, Róisín Commane, Eugénie S. Euskirchen, Sean Hartery, Yoshinobu Harazono, Hiroki Iwata, Anna Karion, Kyle C. McDonald, Charles E. Miller, John B. Miller, Walter C. Oechel, Benjamin Poulter, Colm Sweeney, Naama Raz-Yaseef, Margaret Torn, Steven C. Wofsy, Donatella Zona, 2016, A multi-scale comparison of modeled and observed seasonal methane cycles in northern wetlands. *Biogeosciences*, 査読有, 13, 5043–5056, 2016. www.biogeosciences.net/13/5043/2016/
- 2) Ueyama, M., Tahara, N., Iwata, H., Euskirchen, E. S., Ikawa, H., Kobayashi, H., Nagano, H., Nakai, T., and Harazono, Y. 2016. Optimization of a biochemical model with eddy

covariance measurements in black spruce forests of Alaska for estimating CO₂ fertilization effects. *Agric. Forest Meteorol.* 査読有, 222, 98-111. doi:10.1016/j.agrformet.2016.03.007

- 3) Hideki Kobayashi, Ali P. Yunus, Shin Nagai, Brie Van Dam, Yoshinobu Harazono, Donie Bret-Harte, Kazuhito Ichii, Hiroki Ikawa, Hiroki Iwata, Yongwon Kim, Hirohiko Nagano, Walter C. Oechel, Konosuke Sugiura, Masahito Ueyama, Donatella Zona, and Rikie Suzuki. 2016, Satellite-derived autumn phenology relies more on snowfall than on browning in the Alaskan boreal forest and tundra. *Remote Sensing Environment*, 査読有, 177, 160-170. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.020>.
- 4) Hiroki IWATA, Yoshinobu HARAZONO, Masahito UEYAMA, Ayaka SAKABE, Hirohiko NAGANO, Yoshiko KOSUGI, Kenshi TAKAHASHI, and Yongwon, Kim 2015, Methane exchange in a poorly-drained black spruce forest over permafrost observed using the eddy covariance technique, *Agricultural and Forest Meteorology*, 査読有, 214-215, 157-168. 66-75.
- 5) Derek Starkenburg, Gilberto J. Fochesatto, Jordi Cristóbal, Anupma Prakash, Rudiger Gens, Joseph G. Alfieri, Hirohiko Nagano, Yoshinobu Harazono, Hiroki Iwata, and Douglas L. Kane. 2015, Temperature regimes and turbulent heat fluxes across a heterogeneous canopy in an Alaskan boreal forest, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 査読有, doi: 10.1002/2014JD022338.
- 6) Yoshinobu HARAZONO, Hiroki IWATA, Ayaka SAKABE, Masahito UEYAMA, Kenshi TAKAHASHI, Hirohiko NAGANO, Taro NAKAI and Yoshiko KOSUGI, 2015, Effects of water vapor dilution on trace gas flux, and practical correction methods, *Journal of Agricultural Meteorology*, 査読有, 71 (2): 66-75.
- 7) Ikawa, H., Nakai, T., Busey, R. C., Kim, Y., Kobayashi, H., Nagai, S., Ueyama, M., Saito, K., Nagano H., Suzuki, R., and Hinzman, L. 2015. Understory CO₂, sensible heat, and latent heat fluxes in a black spruce forest in interior Alaska. *Agric. Forest Meteorol.* 査読

有, 214-215, 80-90. doi:
10.1016/j.agrforest.2015.08.247.

- 8) Masahito Ueyama, Kazuhito Ichii, Hiroki Iwata, Eugénie S. Euskirchen, Donatella Zona, Adrian V. Rocha, Yoshinobu Harazono, Chie Iwama, Taro Nakai, and Walter C. Oechel, 2014, Change in surface energy balance in Alaska due to fire and spring warming, based on upscaling eddy covariance measurements, Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 査読有, doi: 10.1002/2014JG002717
- 9) Ueyama, M., Iwata H., Harazono, Y., 2014. Autumn warming reduces the CO₂ sink of a black spruce forest in interior Alaska based on a nine-eddy covariance measurement. *Global Change Bio.*, 査読有, doi: 10.1111/gcb.12434.
- 10) Masahito Ueyama, Shinya Kudo, Chie Iwama, Hirohiko Nagano, Hideki Kobayashi, Yoshinobu Harazono, Kenji Yoshikawa, 2014, Does summer warming reduce black spruce productivity in interior Alaska?, J of Forest Research, 査読有, doi: 10.1007/s10310-014-0448-z.

〔学会発表〕(計 28 件)

- 1) Ueyama, M., Iwata, H., Nagano, H., Ichii, K., and Harazono, Y. Greenhouse gas fluxes at boreal and Arctic wetland in Alaska. 15th International PEAT Congress, Kuching, Sarawak, Malaysia, 15-19 August 2016. (Oral; Invited)
- 2) Iwata, H.: Carbon and water exchange studies of black spruce forests in Interior Alaska. International Russian-Japanese conference of young polar scientists, Moscow Russian Federation, 11-13 October 2016 (Oral)
- 3) 原園芳信・義川滉太・植山雅仁・岩田拓記・永野博彦・坂部綾香・小杉緑子, 凍土上のクロトウヒ植生におけるメタンフラックス, チャンバによる局所的差異. 農業気象学会全国大会 2017, 十和田, 2017 年 3 月 27~30 日. (口頭)
- 4) Ueyama, M., Iwata, H., Ichii, K., Nagano, H., Harazono, Y., Euskirchen, E. S., Zona, D., Rocha, A. V., Nakai, T. and Oechel, W. C. Long-term observations and synthesis for evaluating carbon dioxide fluxes over Alaska. Fourth

International Symposium on the Arctic Research, Toyama Japan, 27-30 April 2015. (Oral)

- 5) Iwata, Hiroki, Y. Harazono, M. Ueyama, A. Sakabe, H. Nagano, Y. Kosugi, K. Takahashi, and Y. Kim, Methane exchange in a poorly-drained black spruce forest over permafrost observed with the eddy covariance technique. Arctic Change 2014 conference, Ottawa, Canada, December 8-12, 2014. (Poster)

〔その他〕

ホームページ等

Real time monitoring view

<http://monitors.iarc.uaf.edu/uaf-north-campus/>

Eddy covariance data in Alaska

http://atmenv.envi.osakafu-u.ac.jp/data/uaf_data/

6 . 研究組織

(1)研究代表者

原園 芳信 (HARAZONO, Yoshinobu)
大阪府立大学・生命環境科学研究科・
客員研究員
研究者番号: 90137240

(2)研究分担者

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

岩田 拓記 (IWATA, Hiroki)
信州大学・理学部・助教
研究者番号: 10466659

(3)連携研究者

伊藤 昭彦 (ITO, Akihiko)
国立環境研究所・地球環境研究センター・
主任研究員
研究者番号: 70344273

市井 和仁 (ICHII, Kazuhito)
千葉大学・環境リモートセンシング
研究センター・教授
研究者番号: 50345865