

平成 26 年 4 月 24 日現在

機関番号：24403

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23681004

研究課題名(和文) レーザー分光器を用いた高精度連続観測による森林におけるメタン交換量の評価

研究課題名(英文) High-precision continuous measurements of the methane flux over a forest using a laser spectrometer

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(系)・助教

研究者番号：60508373

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 21,500,000円、(間接経費) 6,450,000円

研究成果の概要(和文)：微気象学的手法とチャンバー法を組み合わせることで森林におけるメタンフラックスの多面的観測を実施し、空間代表性を有するフラックスの定量化、プロセスの解明、測定技法の向上をはかった。観測から森林はメタンの吸収源として作用し、特に夏季に吸収量が大きくなることが分かった。また、観測されたメタン吸収は、土壌において起こっていることが示唆された。森林のメタン吸収量を決定する要因としては、第一に地温、第二に土壌水分量が重要であることが分かった。

研究成果の概要(英文)：Methane flux was measured over a temperate forest using the micrometeorological and chamber methods. The micrometeorological method has an advantage to quantify spatially representative flux, whereas the chamber methods can be used for understanding processes. More than two-year continuous measurements showed that the forest acted as a methane sink, and the sink was greater in summer than winter. The annual methane sink was 868 mg CH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup>. The methane fluxes were controlled by soil water content and soil temperature, where increase in soil water content restricted the methane sink whereas increase in soil temperature enhanced the methane sink.

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：環境学・環境動態解析

キーワード：メタンフラックス 森林 微気象 チャンバー レーザー分光計

## 1. 研究開始当初の背景

地球温暖化が環境問題として取り上げられるようになり、その原因とされる温室効果気体の動態に注目が集まっている。メタンは二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)に次いで温暖化に寄与する気体であり、寄与率は約20%、単位濃度あたりの地球温暖化係数はCO<sub>2</sub>の21倍と非常に強力な温室効果気体である。現在の大気中のメタン濃度は1774ppbであり、工業化以前の値の倍以上にまで上昇している(IPCC, 2007)。大気中のメタン濃度の増加率は、1980年代は10ppb/yr程度であったが、1998年頃より増加が一時的に滞り、その後2006年頃から濃度の上昇が再び始まっている。これらのメタン濃度増加率の変動の原因は明らかとはなっていない。メタンの主要な吸収源は大気中の化学反応(ヒドロキシラジカル(OH)による酸化)であるが、森林などの好気性土壌においても多くのメタンが酸化作用で分解されていると考えられている。一方で集水域などの嫌気的な森林土壌においてはメタンの強い発生がある場合がある。

森林一大気間における微量気体交換量の定量評価には、一般に乱流理論に基づいた微気象学的手法が用いられる(図1)。この手法では、観測用タワーを用いて、森林上空の微量気体の濃度変動を高精度に計測することで森林一大気間での微量気体の正味の交換量を評価できる。社会的な要請からCO<sub>2</sub>に関しては、微気象学的手法を用いた研究が世界各地で実施されており(例えば、Baldochi, 2008; Hirata et al., 2008)、森林におけるCO<sub>2</sub>交換量に関しては一定の理解が得られている。この手法の利点は、生態系への攪乱を最小限にとどめて空間的代表性の高いデータを高時間分解能で連続計測できることである。一方で、この手法はチャンバー法などと比べて高い分析精度を要求するため、これまでメタン交換量の計測に適用可能な分析計が存在しなかった。

これまで、森林におけるメタンの吸収量に関する計測は、チャンバー法や土壌ガス拡散法を用いたプロットスケールでの観測が実施されてきたが(Kim et al., 2007; Morishita et al., 2007)、森林土壌におけるメタンの交換量については、嫌気性土壌における放出と好気性土壌における吸収との微妙なバランスで決定しているため空間的に非常に不均一である事が明らかとなっている。また、近年では植物の葉からもメタンが放出されているとの研究報告もあり(Keppler et al., 2006)、プロットスケールでの計測のみから立体的に複雑な吸収・放出源の空間構造を持つ森林の群落規模でのメタン収支を評価することが難しいことが指摘され始めている。

近年、レーザー分光技術を用いた Tunable Diode Laser Spectroscopy (TDLs)方式のメタン分析計が実用化され、精度1ppbでのメタン濃度の計測が可能となった。この精度は、

従来、微気象学的手法に適用が試みられた分析計の精度を一桁以上向上したものであり、森林における群落スケールでのメタン交換量を高精度に測定できると期待されている。実際に、世界的にもいくつかのグループによって TDLs 分析計を導入した微気象学的手法によるメタン交換量が試験的に実施され(Hendriks et al., 2008; Smeets et al., 2009)、従来の分析計では捉えきれなかったような微細なメタン交換量が評価できるようになりつつある。

申請者は、これまで微気象学的手法を用いたガス交換量観測の高度化に関する研究を行ってきており(Ueyama et al., 2006, 2009)、微量ガスの交換量を高精度に長期連続計測可能な簡易渦集積法(Relaxed Accumulation Method; REA法)の実用化(Ueyama et al., 2009)および傾度法の高精度化(Ueyama et al., 2006)を行ってきた。REA法は使用する分析計に高い時間解像度を必要とせず、大容量のポンプが不要であるため、使用する分析計の選択自由度が高く、設置施設に対する電力要求量が低いという特徴がある。

CO<sub>2</sub>を対象ガスとして行った他の微気象学的手法との比較解析によって REA法による観測システムについては技術的な有効性を確認されている(Ueyama et al., 2009)。申請者は、メタン分析計としてこれまで水素炎イオン検出(FID)方式の分析計を REA法に適用してきたが、FID分析計の精度の問題から森林の微量なメタン交換量の定量化に苦心してきた(Ueyama et al., 2012)。チャンバー法による計測は、定量的な評価が難しい一方で、環境要因との関連など個別のプロセスの解明に優れている。

## 2. 研究の目的

本研究では、これまで申請者らが開発してきた REA法による微気象学的計測システムを高度化させ、TDLs方式のメタン分析計を応用することで、世界でも例の無い森林群落におけるメタン交換量の長期連続計測を高精度に実施する。群落スケールでの弱いシグナルの解析を高度化するために、放出・吸収プロセスを直接観測出来るチャンバー法を併用し、各種環境因子の変動に対する放出・吸収活性の応答を直接的に検出する。また、チャンバー法による連続計測を微気象学的観測と比較することで、両観測による整合性の確認や不確実性を評価する。

## 3. 研究の方法

観測は、山梨県富士吉田市の富士北麓フラックス観測サイトにおいて実施された。観測地では、樹齢約50年のカラマツ人工林が粗粒火山灰土の上に均質に生育していた。双曲線簡易渦集積(Hyperbolic Relaxed Eddy Accumulation; HREA)法を用いて群落スケールでのメタン交換量を2011年8月から連続測定した。HREA法は、従来の REA法によるサ

ンプリング方法を高度化した手法であり (Bowling et al., 1999)、測定精度を 2 倍程度向上させることのできる手法である。分析計への流路をタイムシェアすることで HREA 法によるメタン交換量の測定と同時に、5 高度におけるメタン濃度の鉛直プロファイルを計測した。HREA 法システムの精度は、CO<sub>2</sub> 交換量について渦相関法による観測と比較することで保障された。HREA 法によるメタン交換量はプロファイラーにより観測された貯留項を考慮して補正された。2012 年 10 月からは 6 つの自動閉鎖型閉鎖型チャンバーを森林土壌に設置し、プロットスケールでのメタン交換量を連続測定した。HREA 法、チャンバー法のシステムからの空気はナフィオンドライヤーにより除湿された後、それぞれレーザー分光計 (GGA-24r-EP and FGGA-24r-EP, Los Gatos Research Inc., USA) に通され、メタン、CO<sub>2</sub>、水蒸気の濃度が計測された。分析計は、1 日に 1 回 2 点校正された。

#### 4. 研究成果

TDLs 方式のメタン分析計の精度をアラン分散解析により評価した。分析計の精度は積算時間によってことなり、1、5、10、100 秒の積算時間で、それぞれ、2.27 ppb、1.02ppb、0.72ppb、0.23ppb であった。分析計を HREA 装置に接続した際の精度は、1.26 nmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> となり、実際の森林で生じるメタン吸収量を評価できる精度を有することが明らかとなった (発表論文 1)。

HREA 法による 2 年間の連続測定より、観測を行った森林が季節を通してメタンの吸収源であることが明らかとなった (図 1)。メタンの吸収速度は、冬季に比べて夏季において高くなった。年間のメタン吸収量は、0.9 - 1.0 g CH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> y<sup>-1</sup> であった。これは、日本国内においてチャンバー法を用いて評価されてきた吸収量 (0.2 - 2.4 g CH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> y<sup>-1</sup>; Morishita et al., 2007) の概ね中央値であった。

チャンバー法と HREA 法によるメタン交換量は、一貫性のある季節変化、年間収支を示した (図 1)。チャンバー法と HREA 法の結果が一致したことから、本森林においては、メタン吸収のほとんどは土壌において起こっ

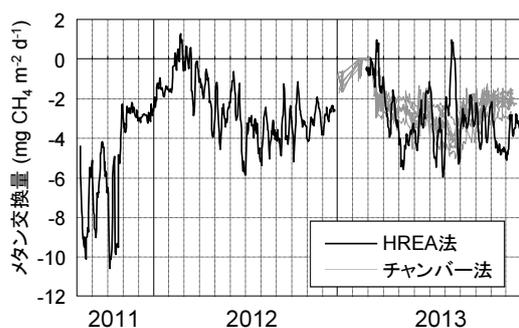


図 1. 観測されたメタン交換量の季節変化。正の値は放出、負の値は吸収を表す。

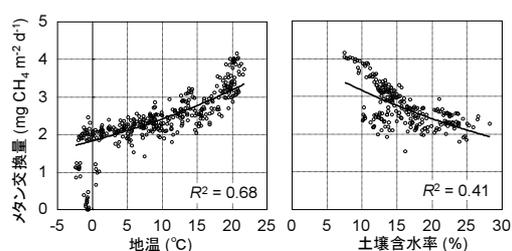


図 2. チャンバー法によるメタン交換量と地温、土壌含水率の関係

ていることが示唆される。これまで生きた植物の葉からメタン放出が起こっていることが指摘されてきた (Keppler et al., 2006) が、本森林においてはそれらの放出が無視できることが示された。

メタン交換量の日々変動、季節変動を駆動する要因は、地温、土壌含水率であった (図 2)。メタンの吸収速度は、地温が増加するにしたがって増加した。これは、メタン酸化菌の活性が温度の上昇によって増加することを表しているものと思われる。一方、土壌含水率が上昇するとメタンの吸収速度は低下した。これは土壌の空隙率低下によって、土壌中のメタン酸化菌に拡散によって供給されるメタンが減少するためだと考えられる。

本研究から、群落スケールでの観測であっても、従来チャンバー法でしか計測できなかった微量な吸収量を精度よく計測することが可能となった。本手法を用いることで空間代表性を有した森林のメタン交換量の定量評価が可能となる。本研究を国内外のさまざまな森林生態系に適用することで、これまで定量化がなされてこなかった森林のメタン吸収量の評価が可能となると思われる。

#### 引用文献

- Baldocchi, D. (2008), 'Breathing' of the terrestrial biosphere: lessons learned from a global network of carbon dioxide flux measurement systems. *Australian Journal of Botany* 56, 1-26.
- Bowling, D. R., A. C. Delany, A. A. Turnipseed, D. D. Baldocchi, and R. L. Monson (1999), Modification of the relaxed eddy accumulation technique to maximize measured scalar mixing ratio differences in updrafts and downdrafts, *J. Geophys. Res.* 104, 9121-9133.
- Hendriks, D. M. D., A. J. Dolman, M. K. van der Molen, and J. van Huissteden (2008), A compact and stable eddy covariance set-up for methane measurements using off-axis integrated cavity output spectroscopy, *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 431-443.
- Hirata, R., N. Saigusa, S. Yamamoto, Y. Ohtani, R. Ide, J. Asanuma, M. Gamo, T. Hirano, H. Kondo, Y. Kosugi, S. G. Li, Y. Nakai, K. Takagi, M. Tani, and H. Wang

- (2008), Spatial distribution of carbon balance in forest ecosystems across East Asia. *Agric. Forest Meteorol.*, 148, 761-775.
- Kepler, F., J. T. G. Hamilton, M. Bras, and T. Rochmann (2006), Methane emissions from terrestrial plants under aerobic conditions, *Nature*, 439, 187-191.
- Kim, Y., M. Ueyama, F. Nakagawa, U. Tsunogai, Y. Harazono, and N. Tanaka (2007), Assessment of winter fluxes of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> in boreal forest soils of central Alaska estimated by the profile method and the chamber method; a diagnosis of methane emission and implications for the regional carbon budget. *Tellus*, 59B, 223-233.
- Morishita, T., T. Sakata, M. Takahashi, S. Ishizuka, T. Mizoguchi, Y. Inagaki, K. Terazawa, S. Sawata, M. Igarashi, H. Yasuda, Y. Koyama, Y. Suzuki, N. Toyota, M. Muro, M. Kinjo, H. Yamamoto, D. Ashiya, Y. Kanazawa, T. Hashimoto, and H. Umata (2007), Methane uptake and nitrous oxide emission in Japanese forest soils and their relationship to soil and vegetation types, *Soil Sci. Plant Nutr.*, 53, 678-691.
- Smeets, C. J. P. P., R. Holzinger, I. Vigano, A. H. Goldstein, and T. Rochmann (2009), Eddy covariance methane measurements at a Ponderosa pine plantation in California, *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 8665-8675.
- Ueyama, M., K. Hamotani, and W. Nishimura (2009), A technique for high-accuracy flux measurement using a relaxed eddy accumulation system with an appropriate averaging strategy, *J. Agric. Meteorol.*, 65, 315-325.
- Ueyama, M., K. Hamotani, W. Nishimura, Y. Takahashi, N. Saigusa, and R. Ide (2012), Continuous measurement of methane flux over a larch forest using a relaxed eddy accumulation method, *Theor. Appl. Climatol.*, 109, 461-472.
- Ueyama, M., Y. Harazono, R. Okada, A. Nojiri, E. Ohtaki, and A. Miyata (2006), Micrometeorological measurements of methane flux at a boreal forest in central Alaska, *Mem. Natl. Inst. Polar Res., Spec. Issue*, 59, 156-167.

#### 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2件)

- ① Ueyama, M., Takai, Y., Takahashi, Y., Ide, R. Hamotani, K., Kosugi, Y., Takahashi, K. and Saigusa, N. 2013. High-precision measurements of the methane flux over a larch forest based on a hyperbolic relaxed eddy accumulation method using a laser spectrometer. *Agricultural and Forest Meteorology*, 178-179, 183-193. (査読有)
- ② Ueyama, M., Hamotani, K., Nishimura, W., Takahashi, Y., Saigusa, N., and Ide, R. 2012. Continuous measurement of methane flux over a larch forest using a relaxed eddy accumulation method. *Theoretical and Applied Climatology*, 109, 461-472. (査読有)
- [学会発表] (計10件)
- ① 植山雅仁・高梨聡・高橋善幸 (2014) 鉛直濃度プロファイルの逆解析による森林メタンフラックスの評価. 農業気象学会全国大会 2014, 札幌, 2014年3月17~21日. (口頭発表)
- ② 岩田拓記・原菌芳信・小杉緑子・植山雅仁・坂部綾香・永野博彦・奥見智佳・間野正美・小野圭介・高橋けんし・宮田明 (2014) 微気象学的手法を中心とした生態系スケールでのメタン交換の解明. 農業気象学会全国大会 2014, 札幌, 2014年3月17~21日. (口頭発表)
- ③ 植山雅仁 (2013) レーザー分光器を用いた森林におけるメタン収支の多面的観測研究. 森林生態系炭素収支・リモセンに係わるモニタリング研究集会. 筑波. 2014年2月19-20日. (口頭発表)
- ④ Ueyama, M., Takai, Y., Takeuchi, R., Takahashi, Y., Ide, R., Ataka, M., Takahashi, K. and Kosugi, Y. (2013) Continuous measurement of Methane flux at a larch forest by micrometeorological and chamber techniques. CH<sub>4</sub> workshop, Fairbanks, USA. 6 September, 2013 (Oral).
- ⑤ Ueyama, M., Takai, Y., Takeuchi, R., Takahashi, Y., Ide, R., Ataka, M., Takahashi, K., and Kosugi, Y. (2013) Continuous measurements of methane flux at a larch forest by micrometeorological and chamber techniques. Joint conference of 11th AsiaFlux international workshop, 3rd HESSS, and 14th annual meeting of Korean society of agricultural and forest meteorology on "Communicating science to society: coping with climate extremes for resilient ecological-societal systems", Seoul, Korea. 21-24 August 2013. (Oral)
- ⑥ 植山雅仁・竹内亮太・高井百合子・高橋

善幸・安宅未央子・高橋けんし・小杉緑子・鯉谷憲 (2013) レーザー分光計を用いた森林におけるメタンフラックスの多面的観測. 日本惑星科学連合 2013 年大会. 幕張. 2013 年 5 月 19-24 日. (口頭発表)

- ⑦ 植山雅仁・竹内亮太・高井百合子・高橋善幸・安宅未央子・高橋けんし・小杉緑子・鯉谷憲 (2013) レーザー分光計を用いた森林におけるメタンフラックスの総合観測. 森林生態系炭素収支・リモセンに係わるモニタリング研究集会. 筑波. 2013 年 2 月 5 日. (口頭発表)
- ⑧ Ueyama, M., Takai, Y., Takahashi, Y., Hamotani, K., Kosugi, Y. and Takahashi, K. (2012) Continuous measurement of methane flux at a larch forest by the relaxed eddy accumulation method with a tunable diode laser spectrometer. The 55th Symposium of the International Association for Vegetation Science, Mokpo, Korea. 23-28 July 2012. (Oral)
- ⑨ 高井百合子・植山雅仁・鯉谷憲・高橋善幸・高橋けんし・小杉緑子, (2012) T D L S と R E A 法を用いた森林におけるメタンフラックスの計測, 農業気象学会全国大会 2012, 大阪, 2012 年 3 月 13~17 日. (口頭発表)
- ⑩ Ueyama, M., Takai, Y., Hamotani, K., Takahashi, Y., Takahashi, K. and Kosugi, Y. 2011. Applying tunable diode laser spectroscopy for continuous measurement of methane flux at a forest canopy with a relaxed eddy accumulation method. AsiaFlux Workshop 2011- Bridging Ecosystem Science to Services and Stewardship, November 9 - 11, 2011, Johor Bahru, Malaysia. (Oral)

[その他]

- ① ホームページ  
微気象学的手法を用いた森林一大気間におけるメタン交換の評価  
([http://www.envi.osakafu-u.ac.jp/atmenv/02\\_Research/FHK/Fuji.html](http://www.envi.osakafu-u.ac.jp/atmenv/02_Research/FHK/Fuji.html))
- ② 学会セッション企画  
日本農業気象学会 2014 年大会  
札幌, 2014 年 3 月 17~21 日  
オーガナイズドセッション「陸域メタンフラックスの評価のための連携研究に向けて一現状の課題共有の先にある飛躍」  
オーガナイザー: JapanFlux [平野高司・植山雅仁・齊藤誠・平田竜一]
- ③ 学会報告  
植山雅仁・平田竜一・齊藤誠 (2014) 日本農業気象学会 2014 年大会オーガナイズド

セッション SA: 「陸域メタンフラックスの評価のための連携研究に向けて一現状の課題共有の先にある飛躍」, 生物と気象, 14 卷 D-3(掲載予定)

## 6. 研究組織

### (1) 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・助教  
研究者番号: 60508373