

平成 29 年 6 月 2 日現在

機関番号：24403

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2014～2016

課題番号：26701002

研究課題名(和文)高精度観測ネットワークに基づく森林のメタン交換量とその時空間変動の解明

研究課題名(英文) Understanding spatio-temporal methane exchange between forests and the atmosphere based on high precision measurements

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)・准教授

研究者番号：60508373

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 19,100,000円

研究成果の概要(和文)：双曲線簡易渦集積法と閉鎖型自動開閉式チャンバー法を併用して、3つの温帯林と1つの亜寒帯林において生態系スケールのCH₄交換量を複数年にわたって連続観測した。従来、森林はCH₄の吸収源と考えられてきたが、微気象学的手法を用いて生態系スケールの収支を計測したところ4つの森林のうち3つがCH₄の放出源である事が分かった。この原因として、森林に点在するCH₄のホットスポット的な放出源が寄与している可能性が示唆された。以上のことから、既往の研究による森林のCH₄吸収量は過大評価されている可能性がある。今後、生態系スケールのCH₄収支を微気象学的手法で計測し、値を見直すことが必要である。

研究成果の概要(英文)：Ecosystem-scale CH₄ exchange between forest and the atmosphere was measured using the hyperbolic relaxed eddy accumulation method with the automated closed chamber measurement. The measurements were conducted at three temperate forests and one sub-arctic forest. We found that three of the four forests acted as net CH₄ source at the annual timescale. The sources could be contributed by sporadically located hotspot emissions within the flux footprint. Our findings suggest that previous CH₄ sink at global upland forests are overestimated; thus, revisiting CH₄ budget at forest ecosystems are required. Our system combining the micrometeorological and chamber methods are useful for understanding CH₄ budget at the point to ecosystem scales.

研究分野：微気象学

キーワード：メタン収支 森林 微気象学的手法 チャンバー法 レーザー分光計

1. 研究開始当初の背景

メタン(CH₄)は二酸化炭素(CO₂)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CO₂の34倍と非常に強力な温室効果気体である。現在(2015年)の大気中のCH₄濃度は約1845ppbであり、工業化以前の値の2.5倍以上にまで上昇している(IPCC, 2013)。

森林は、好気性土壤中の細菌による酸化作用により、大気中の化学反応に次いで大きなCH₄の吸収源と考えられている(IPCC, 2013)。一方で、嫌気性土壌ではCH₄生成菌によりCH₄が発生するため、森林全体としてのCH₄交換量は時間・空間的な変動性が高く、チャンバー法に代表されるプロットスケールでの観測からは空間代表性を有したCH₄交換量を評価することは容易でない(Itoh et al., 2009)。すなわち、全ての森林がCH₄の吸収源として作用していない可能性があり(Werner et al., 2003; Itoh et al., 2009)。全球規模でのCH₄濃度の推移を予測する上でも森林における吸収・放出のメカニズムの解明が必要とされている。

森林 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。しかし、CH₄に関しては、これまで計測に適用可能な分析計が存在しなかったため、いくつかの湿原での観測を除いては長期的なモニタリングが殆どなされてこなかった。

2. 研究の目的

生態系スケールでの森林のCH₄収支とその交換プロセスの解明を目的とする。そのために、本研究では4つの森林サイトと比較のために1つの湿原サイトにおいてCH₄交換量の長期モニタリング拠点を設立し、CH₄交換量の季節変化、年次変化を明らかにした。各森林・湿原のCH₄交換量と環境要素をサイト間で比較しCH₄収支に影響を与える重要なプロセスを明らかにした。

3. 研究の方法

計測装置は、微気象観測システムとチャンバー法システムからなり、群落スケールでのCH₄収支とCH₄交換に係るプロセスを同時に評価した。微気象観測システムには、申請者らが開発・実用化した双曲線簡易渦集積法(HREA法; Ueyama et al., 2013)を利用した。これまでのシステムで問題となっていたCH₄ガス分析計の精度を克服するために、最新のレーザー分析技術であるTDLS方式のCH₄分析計を導入した。

計測システムを、国内の壮齢カラマツ林(FHK; Takahashi et al., 2015)、幼齢カラマツ林(TSE; Takagi et al., 2009)、落葉広葉樹二次林(YMS; Kominami et al., 2008)、アラスカの湿性(UAF; Iwata et al., 2015)の4つの拠点サイトに設置した。これらのサイトは、気候帯(冷帯・冷温帯・温帯)、林

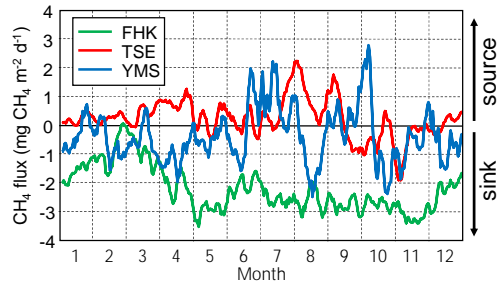


図1. 森林3サイトにおける生態系スケールのCH₄交換量の平均季節変化パターン

齢(若齢・壮齢) 土壌(火山灰土・永久凍土上の湿地・飽和 不飽和土壌の混在する山岳土壌) 植生(落葉針葉・常緑針葉・落葉広葉樹)などの環境要因が異なる。更に、CH₄放出が盛んであると考えられる高層湿原(BBY; 北海道・美唄湿原)においても生態系スケールのCH₄交換量を渦相関法により連続測定し、森林との比較を行った。

4. 研究成果

4-1. 温帯森林のCH₄交換量

火山灰土上のFHKでは積雪期間を除いては一年を通してCH₄が吸収されていたのに対し、鉬質土壌上にあるYMS、TSEでは季節によって吸収、放出が変化した(図1)。FHKでは、生態系スケールでのCH₄吸収量とチャンバーで計測された吸収量とが概ね一致したことから、土壌微生物の酸化作用による吸収が森林全体のCH₄交換量を決定する主要因であることが示唆された(Ueyama et al., 2014)。一方、YMSでは盛夏期に、TSEでは盛夏期と融雪期に生態系スケールでCH₄の放出源となった。チャンバーの計測からは、TSEサイトの1つのチャンバーが弱い放出を示したことを除くと、2サイトのチャンバーはCH₄吸収を示した。このことから、TSE、YMSにおけるCH₄放出には、土壌微生物の酸化以外のプロセスが生態系スケールでの放出に寄与していることが示唆された。

森林内におけるCH₄放出点を明らかにするために、TSE内を調査して見つけた湿潤地においてチャンバーを用いた多点観測を行った(図2)。多点観測の結果、林内の湿地から森林土壌の吸収と比べて10~100倍程度大きなホットスポット的なCH₄放出があることが分かった。このホットスポットでCH₄放出を連続観測したところ、水温や湿原植生のフェノロジーによってCH₄放出量が変化し、その変動傾向が生態系スケールでのCH₄交換量と同様の傾向を示すことがわかった。以上のことから、CH₄放出を示す森林については、ホットスポット的な放出が生態系スケールのCH₄収支に寄与していることが示唆された。

森林土壌のメタン吸収速度の時空間変動は土壌中の空隙率と地温によって説明可能であることが分かった(図3)。空隙率が上がるにつれてCH₄吸収が増加することは、土壌

中のメタン酸化菌への拡散による基質供給速度が吸収の決定要因となっていることを示唆する。地温の上昇に伴い CH_4 吸収が増加するのは酸化菌の活性が高まることが原因だと考えられる (Ueyama et al., 2015)。これらの土壌チャンバーから得られた結果は、既往の知見 (Morishita et al., 2007; Ishizuka et al., 2009) と矛盾がなく、研究対象とした森林土壌が一般的な森林土壌であることを表す。

生態系スケールの CH_4 交換量を支配する要因は3つの森林で異なった。FHK では CH_4 吸収速度の季節変化が、土壌空隙率 (含水率) と地温で説明することができ、土壌中のメタン酸化菌が森林全体の CH_4 収支を支配していると示唆された (Ueyama et al., 2014, 2015)。一方、TSE や YMS では生態系スケールの CH_4 交換量とチャンバーで計測された吸収速度とは明確な関係がなく、地温、積算温度、降水量が CH_4 交換量の変動を説明することが分かった。温度の上昇や降水の増加によって CH_4 放出が高くなる傾向は、先に述べたホットスポットからの放出と類似する点があり、ホットスポットからの放出強度やホットスポットの増減が生態系スケールの CH_4 収支に影響を与えている可能性が示唆された。

計測を行った3つの温帯森林のうち、2つが生態系スケールで年間の CH_4 放出を示した (図4)。一般に、森林は CH_4 の吸収源だと考えられているため (Hashimoto et al., 2011)、森林が生態系スケールで年間 CH_4 放出源として作用していた観測事実は本研究の成果として特筆すべき点である。チャンバー法で計測した森林土壌の CH_4 収支は吸収であり、既往の研究と矛盾しない。このことは、既往のチャンバー法による計測では CH_4 交換の空間不均一性を十分に評価できないため森林の CH_4 吸収量を過大評価している可能性を示唆する。この点は、森林内の100プロット以上に設置した多点のチャンバー観測からも指摘されている (Sakabe et al., 2016)。本研究で採用した HREA 法は広い空間代表性を有した交換量を計測できるため、空間的不均一性が高い森林の CH_4 収支を評価する上で有効であると考えられる。

4-2. 湿性林・湿原の CH_4 交換量

アラスカの永久凍土上の湿性林において無積雪季節期間について渦相関法 (Iwata et al., 2015)、および閉鎖型チャンバー法で3地点の CH_4 交換量を計測した。3地点全て無積雪期間を通して弱い CH_4 放出が観測された (図5)。 CH_4 放出量の空間変動性は非常に高く、スゲ科草本がチャンバー内に多く混在するプロットでは $1.64 \text{ g CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ season}^{-1}$ 、ミズゴケが優先するプロットでは $0.30 \text{ g CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ season}^{-1}$ 、地衣類が優先するプロットでは $0.03 \text{ g CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ season}^{-1}$ の放出が無積雪期間について観測された。スゲ科草本のプロットで放出が高くなったことは、根圏での CH_4 生

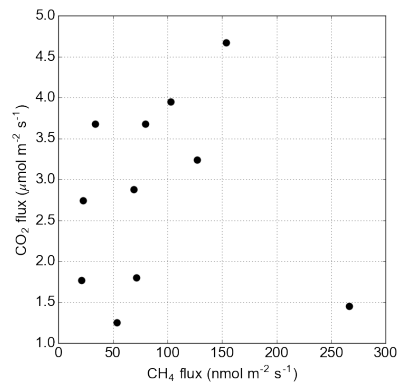


図2. TSE サイト内のホットスポット的放出源における CH_4 放出量と CO_2 放出量の関係

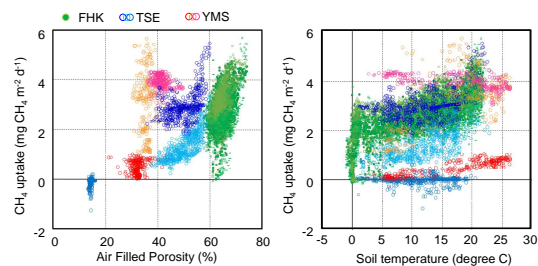


図3. 森林3サイトにおいてチャンバー法で計測された CH_4 吸収量と土壌空隙率、地温の関係

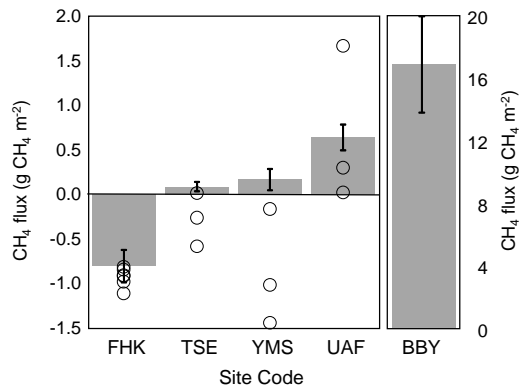


図4. 森林4サイトと湿原で計測された年間 CH_4 収支。ただし、UAF, BBY については無積雪期間の積算値を示した。棒グラフは微気象学的手法による計測値、鉛直バーは年次間差、点はチャンバー法による計測値を表す。

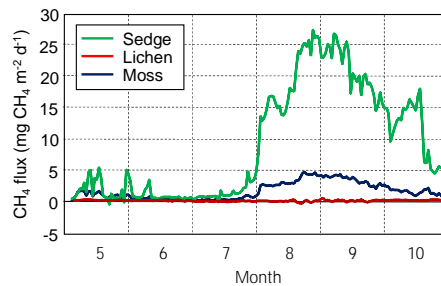


図5. UAF サイト (湿性林) で2016年にチャンバー法により観測された3地点の CH_4 交換量

成や維管束を通した CH_4 輸送が重要なプロセスであることを示唆している。渦相関法によ

る群落スケールでの観測では、生育期間を通してこの森林は CH_4 の放出源であり、生育期後半に放出傾向が高まることが明らかとなった (Iwata et al., 2015)。

放出に明確な季節変化を示したスゲ科草本とミズゴケの両プロットでは、7月下旬になるまで高い放出を示さなかった。アラスカの湿性林には永久凍土が存在するため、永久凍土の融解によって土壌深度が変化する。7月下旬までメタン放出が高くならなかったことは、 CH_4 生成が土壌の深い深度で起こっていることを示しているのかもしれない。

美唄湿原からの生態系スケールの CH_4 放出 (図 6) はアラスカの湿性林の全てのチャンパーと比べて高かった。 CH_4 放出の季節変化は地温によって概ね説明でき、地温の上昇に伴い放出が高くなる変動を示した。盛夏期については気圧の低下に伴う CH_4 放出がたびたび観測され、水中に溶存する CH_4 が気圧の低下に伴い泡となって放出されている (Tokida et al., 2007) ことが示唆された。2016~2017年にかけては積雪期についても連続観測を行い、雪面から CH_4 放出がある事を明らかにした。

湿原と湿性林との比較から、樹木が存在するような比較的乾燥した湿性林では、湿原と比べて CH_4 放出が非常に小さくなることが分かった。このことは温暖化等による植生遷移が進めば高緯度地域の CH_4 収支が劇的に変化する可能性がある事を示唆する。

4-3. 結論

従来、森林は CH_4 の吸収源と考えられてきたが、微気象学的手法を用いて生態系スケールの収支を計測したところ4つの森林のうち3つが CH_4 の放出源である事が分かった。この原因として、森林に点在する CH_4 のホットスポット的な放出源が寄与している可能性が示唆された。以上のことから、既往の研究による森林の CH_4 吸収量は過大評価されている可能性がある。今後、生態系スケールの CH_4 収支を微気象学的手法で計測し、値を見直すことが必要である。また、森林間の CH_4 収支が林内に点在する放出源と関連がある事が示唆されたことから、 CH_4 吸収・放出源の空間不均一性を定量化できるモデルの開発が急がれる。

引用文献

- Hashimoto et al., 2011. *Sci. Reports* 1, 116, doi:10.1038/srep00116.
IPCC, 2013. doi:10.1017/CB09781107415324.
Ishizuka et al., 2009. *Biogeochemistry* 92, 281-295.
Itoh et al., 2009. *Soil Biol. Biochem.* 41, 388-395.
Iwata et al., 2015. *Agric. For. Meteorol.* 214-215, 157-168.
Kominami et al., 2008. *Agric. For. Meteorol.* 148, 723-737.

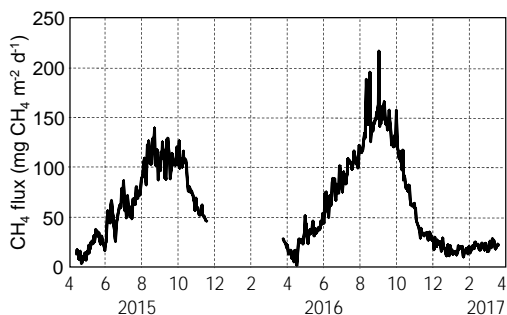


図 6. 美唄湿原において渦相関法により観測された生態系スケールの CH_4 交換量

- Takagi et al., 2009. *Glob. Change Biol.* 15, 1275-1288.
Takahashi et al., 2015. *J. Agric. Meteorol.*, 71, 302-317.
Morishita et al., 2007. *Soil Sci. Plant Nutri.* 53, 678-691.
Sakabe et al., 2016. *J. Geophys. Res. Biogeosci.* doi: 121, 1717-1732.
Tokida et al., 2007. *Glob. Biogeochem. Cycles*, 21, doi:10.1029/2006GB002790.
Ueyama et al., 2013. *Agric. For. Meteorol.* 178-179, 183-193.
Ueyama et al., 2014. *J. Geophys. Res. Biogeosci.* doi: 10.1002/2014JG002716.
Ueyama et al., 2015. *Agric. For. Meteorol.* 213, 1-9.
Werner et al., 2003. *Glob. Change Biol.*, 9, 1251-1261.

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 4 件)

- Iwata, H., Harazono, Y., Ueyama, M., Sakabe, A., Nagano H., Kosugi, Y., Takahashi, K., and Kim, Y. 2015. Methane exchange in a poorly-drained black spruce forest over permafrost observed using the eddy covariance technique. *Agric. Forest Meteorol.*, 査読有, 214-215, 157-168.
DOI: 10.1016/j.agrformet.2015.08.252
Ueyama, M., Takeuchi, R., Takahashi, Y., Ide, R., Ataka, M., Kosugi, Y., Takahashi, K., and Saigusa, N. 2015. Methane uptake in a temperate forest soil using continuous closed-chamber measurements. *Agric. Forest Meteorol.*, 査読有, 213, 1-9.
DOI: 10.1002/2014JG002716
Harazono, Y., Iwata, H., Sakabe, A., Ueyama, M., Takahashi, K., Nagano, H., Nakai, T., and Kosugi, Y. 2015. Effects of water vapor dilution on trace gas flux, and practical correction methods. *J. Agric. Meteorol.*, 査読有, 71, 65-76.

DOI: 10.2480/agrmet.D-14-00003
Ueyama, M., Takanashi, S., and Takahashi, Y., 2014. Inferring methane fluxes at a larch forest using Lagrangian, Eulerian, and hybrid inverse models, *J. Geophys. Res. Biogeosciences*, 査読有, 119, 2018-2031.
DOI: 10.1016/j.agrformet.2015.05.004

[学会発表](計24件)

二口雄介・植山雅仁・矢崎友嗣・平野高司・小南靖弘・原園芳信・五十嵐康則・岩田拓記 (2017) 北方湿原におけるメタンフラックスの連続観測とモデリング. 農業気象学会全国大会 2017, 北里大学, 青森県十和田市, 2017年3月27~30日. (口頭)

植山雅仁・二口雄介・矢崎友嗣・平野高司・岩田拓記・原園芳信 (2017) 湿原メタンフラックスの観測データを用いた陸域生態系モデルの最適化. 農業気象学会全国大会 2017, 北里大学, 青森県十和田市, 2017年3月27~30日. (口頭)

植山雅仁 (2017) 森林メタンフラックスの連続測定とモデリングへの展開. 陸域生態系モニタリング研究集会. 国立環境研究所, 茨城県つくば市, 2017年2月20~21日. (口頭)

Futakuchi, Y., Ueyama, M., Matsumoto, Y., Yazaki, T., Hirano, T., Kominami, Y., Harazono, Y., Igarashi, Y. (2016) Observations and modeling of methane flux in northern wetlands. AGU Fall meeting, San Francisco USA, 12-16 December 2016. (Poster)

Ueyama, M., Yoshikawa, K., Takahashi, Y., Takagi, K., Kominami, Y. (2016) Methane fluxes at upland forests in Japan based on the micrometeorological and chamber methods. AGU Fall meeting, San Francisco USA, 12-16 December 2016. (Poster)

義川滉太・植山雅仁・高木健郎・小南裕志 (2016) 北海道部のカラマツ林とカラマツ林と京都南部の落葉広樹林におけるメタンフラックスの季節変化. 農業気象学会近畿支部大会. 大阪工業大学うめきたナレッジセンター, 大阪府大阪市. 2016年11月26日. (口頭)

松本有貴・植山雅仁・義川滉太・小南裕志 (2016) 山城地域の森林における傾度法を用いたメタン交換量連続測定. 農業気象学会近畿支部大会. 大阪工業大学うめきたナレッジセンター, 大阪府大阪市. 2016年11月26日. (口頭)

二口雄介・植山雅仁・矢崎友嗣・平野高司・小南靖弘 (2016) 温帯高層湿原におけるメタンフラックスの連続観測とモデ

リング. iLEAPS-Japan 研究集会 2016, 名古屋大学, 愛知県名古屋市, 2016年9月9~10日. (口頭)

植山雅仁・義川滉太・二口雄介・高橋善幸・高木健太郎・小南裕志・平野高司・矢崎友嗣・岩田拓記・原園芳信 (2016) レーザー分光計を用いた陸域生態系におけるメタンフラックスの連続測定. 2016年度 日本地球化学会年会, 大阪市立大学, 大阪府大阪市, 2016年9月13~16日. (口頭; 招待講演)

Ueyama, M., Iwata, H., Nagano, H., Ichii, K., and Harazono, Y. (2016) Greenhouse gas fluxes at boreal and Arctic wetland in Alaska. 15th International PEAT Congress 2016, Kuching, Sarawak, Malaysia, 15-19 August 2016. (Oral; Invited)

植山雅仁 (2016) 生態系スケールの連続観測からみた森林と湿原のメタン収支. 信州大学テニユアトラック教員研究成果発表会 陸域生態系 大気間のメタン交換研究の最新動向, 信州大学, 長野県松本市, 2016年3月26日. (招待講演)

義川滉太・植山雅仁・高木健太郎・小南裕志 (2016) 微気象学的手法とチャンパー法による森林におけるメタンフラックスの連続観測. 農業気象学会全国大会 2016, 岡山大学, 岡山県岡山市, 2016年3月14~17日. (口頭)

植山雅仁 (2016) レーザー分光計を用いた森林と湿原のメタンフラックスの連続測定. 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. 国立環境研究所, 茨城県つくば市, 2016年3月8~9日. (口頭)

Yoshikawa, K., Ueyama, M., Takagi, K., and Kominami, Y. (2015) Continuous measurements of methane flux in two Japanese temperate forests based on the micrometeorological and chamber methods. AGU Fall meeting, San Francisco USA, 14-18 December 2015. (Poster)

二口雄介・植山雅仁・矢崎友嗣・平野高司・小南靖弘・山田浩之 (2015) 美唄湿原における渦相関法によるメタンフラックスの連続観測. 農業気象学会近畿支部大会. 大阪工業大学うめきたナレッジセンター, 大阪府大阪市. 2015年12月5日. (口頭)

坂部綾香・小杉緑子・高橋けんし・伊藤雅之・植山雅仁・岩田拓記・安宅未央子 (2015) プロットスケールと生態系スケールのフラックス測定によって明らかになった温帯林におけるメタン動態. 日本惑星科学連合 2015年大会. 幕張メッセ, 千葉県幕張市. 2015年5月24-28日. (ポスター)

Iwata, H., Harazono, Y., Ueyama, M.,

- Sakabe, A., Nagano, H., Kosugi, Y., Takahashi, K., and Kim, Y. (2015) Methane exchange in a poorly-drained black spruce forest over permafrost observed with the eddy covariance technique. Fourth International Symposium on the Arctic Research, Toyama Japan, 27-30 April 2015. (Poster)
- 義川滉太・植山雅仁 (2015) 複数の森林におけるメタン収支の総合的観測. 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. 国立環境研究所, 茨城県つくば市. 2014年2月19-20日. (口頭)
- Iwata, H., Harazono, Y., Ueyama, M., Sakabe, A., Nagano, H., Kosugi, Y., Takahashi, K., and Kim, Y. (2014) Methane exchange in a poorly-drained black spruce forest over permafrost observed with the eddy covariance technique. Arctic Change 2014, Ottawa, Canada, 8-12 December, 2014. (Poster)
- 植山雅仁 (2014) 気流と光で探る陸域生態系の温室効果気体の収支. 第13回光科学若手研究会, 大阪府立大学 iSite なんば, 大阪府大阪市, 2014年11月29日. (口頭)
- 21 植山雅仁・高梨聡・高橋善幸 (2014) 多層モデルの逆解析による森林のメタン吸収量の評価. 第4回生物起源微量ガスワークショップ, つくば市文部科学省研究交流センター, 茨城県つくば市, 2014年11月20日. (口頭)
- 22 植山雅仁 (2014) 生態系スケールでのメタンの吸収. 第28回気象環境研究会 - 生態系の微量ガス交換と大気浄化機能-, つくば国際会議場, 茨城県つくば市, 2014年11月19日. (口頭)
- 23 高橋善幸・三枝信子・植山雅仁・谷晃・望月智貴 (2014) 大気・陸域生態系間の物質交換に関する総合的観測研究プラットフォームの構築と整備. 2014年度日本地球化学会第61回年会, 富山大学, 富山県富山市, 2014年9月16~18日. (ポスター)
- 24 Ueyama, M., Takahashi, Y., Takagi, K., and Ide, R. (2014) Micrometeorological and chamber measurements of methane flux over two forests in Japan. 12th AsiaFlux Workshop, Los Banos, Philippines, 18-23 August 2014. (Oral)
- 25 Ueyama, M., Takahashi, Y., Takagi, K., and Ide, R. (2014) Micrometeorological and chamber measurements of methane flux over two forests in Japan. 12th AsiaFlux Workshop, Los Banos, Philippines, 18-23 August 2014. (Oral)

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕

ホームページ

http://atmenv.envi.osakafu-u.ac.jp/research/research_ch4_flux/

6. 研究組織

(1) 研究代表者

植山 雅仁 (UEYAMA, Masahito)

大阪府立大学・大学院生命環境科学研究科・准教授

研究者番号: 60508373