

令和 3 年 4 月 30 日現在

機関番号：13601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H05039

研究課題名（和文）渦相関法と溶存メタン濃度測定を統合した浅い中緯度湖からのメタン放出の評価

研究課題名（英文）Evaluation of methane emission from a mid-latitude shallow lake using eddy covariance observations and dissolved methane concentration measurements

研究代表者

岩田 拓記 (Iwata, Hiroki)

信州大学・学術研究院理学系・准教授

研究者番号：10466659

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 19,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、渦相関法と呼ばれる手法によるメタン放出の連続測定から、湖からのメタン放出の制御機構の詳細を明らかにした。それを達成するために、渦相関法で測定したメタン放出量を拡散とバブルによる放出に分離する新たな手法を開発した。この手法を用いることで、特にメタン放出の日内変動の評価を進めた。また、培養実験から得られたメタン生成速度と酸化速度データを用いて、湖モデル中のメタンに関するサブモデルのパラメータを決定することで、メタン放出量の季節変化の再現が可能であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

メタンは重要な温室効果ガスであり、本研究はその主要な放出源である湖からのメタン放出の制御機構の解明を進めたものである。

世界的に用いられている渦相関法の改良を行うことで、湖からのメタン放出を拡散とバブルによる放出に分離する方法を開発した。この手法は他の観測サイトで測定されたデータにも容易に適用可能であり、今後、この手法を広く適用することでメタン放出の制御機構の詳細な理解が進むと期待される。この手法を適用することで、浅い中緯度湖においては湖水中や堆積物中のメタン蓄積がメタン放出の日内変動を説明する上で重要であるということを新たに示した。

研究成果の概要（英文）：We clarified the detailed control mechanisms of methane emission from a lake by conducting a continuous observation of emission with the eddy covariance technique. To achieve this goal, we developed a new technique to separate the total methane emission observed with the eddy covariance technique into diffusive and bubble emissions. By applying this technique, we evaluated especially the diurnal variability of methane emission. In addition, we showed that the seasonal variation of methane emission can be simulated by using determined parameters related to methane dynamics in a lake model based on methane production/oxidation incubation experiments.

研究分野：微気象学

キーワード：メタン 渦相関法 湖 溶存メタン濃度 培養実験 シミュレーション

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

メタンは重要な温室効果ガスであり、地球温暖化とメタン放出の間の正のフィードバックによる温暖化の促進が危惧されている。メタンは嫌気条件下で生成されるため、湖沼は主要な放出源のひとつとなっており、その放出は自然放出源からの全放出の 6-16% に寄与していると推定されている。しかしながら、湖沼におけるメタン放出量の評価は、これまでフローティングチャンバー法のような時間的にも空間的にも不連続な測定を基にしたものがほとんどで、観測データの量と質の制限により湖沼からのメタン放出の定量化には大きな不確定性が残されている。

湖から大気へのメタン放出は、嫌気環境である湖底堆積層中で生成されたメタンが水中を拡散、あるいはバブルによって輸送されることにより起こる。バブルによる放出は全放出量の 80% まで寄与していると考えられているが、時間的にも空間的にも局所的な放出であるため、前述したフローティングチャンバー法ではバブル放出を取り逃がしている可能性がある。バブル放出量を正確に評価するためには、風上の  $10^4 \text{ m}^2$  程度のエリアをカバーできる渦相関法が有効である。しかしながら、湖における渦相関法を用いたメタン放出の研究は数例に限られており、湖からのメタン放出の環境応答性を明らかにするためには更なる研究が必要である。

### 2. 研究の目的

#### (A) メタン放出の定量化とその環境応答性の把握

メタン放出は拡散とバブルによるものがあるが、それぞれは異なる環境応答性をもっている。そこで、渦相関法で測定されるメタン放出量を拡散とバブルによる放出に分離する解析手法を開発する。分離した拡散とバブルによる放出のそれぞれと気象・湖内環境データ、溶存メタン濃度との関係を調べることにより、メタン放出量の環境応答性を詳細に明らかにする。また、複数年の観測により、メタン放出の季節変化や経年変化を明らかにする。

#### (B) 数理モデルを用いたメタン放出のシミュレーション

湖の流体力学モデルに湖内でのメタン・酸素動態過程を加えた LAKE2.0 モデルを用いて、モデルの改良およびメタン生成・酸化過程のパラメータ決定をおこない、湖内環境とメタン放出の観測結果を再現する。

### 3. 研究の方法

#### (A) メタン放出量の定量化とその環境応答性の把握

本研究は、中緯度に位置する浅い湖である長野県の諏訪湖を対象として実施した。諏訪湖の棧橋にオープンパス型メタン計を設置し、メタン放出量の連続測定を実施した。測定されたデータをもとに、渦相関法で測定されるメタン放出量を拡散とバブルによる放出に分離する解析手法を開発した。バブルによる放出が生じている時には水蒸気濃度と大気メタン濃度の乱流変動の相関を低くする変動成分があり、ウェーブレット解析を用いてそのバブル放出による変動を分離する手法を開発した。分離した拡散とバブルによる放出のそれぞれと気象・湖内環境データ、溶存メタン濃度との関係を調べることにより、メタン放出量の環境応答性を明らかにした。

湖水中の溶存メタン濃度は、棧橋において複数深度の湖水のサンプリングをおこない、気液平衡法にて測定した。メタン濃度の分析には水素炎イオン化検出器を実装したガスクロマトグラフを用いた。湖水のサンプリングは、月に一度の頻度でおこなった。また、渦相関法のメタン放出データとの時間的な対応を考慮し、湖表層の溶存メタン濃度の日変化を明らかにするために、溶存ガス抽出装置と温室効果ガス分析器を用いた溶存ガス濃度の自動観測を実施した。

メタン生成量と酸化量を明らかにするために、湖底堆積物と湖水の培養実験を行った。メタン生成量はバイアル中に入れた堆積物を異なる温度で培養し、バイアルのヘッドスペース中のメタン濃度の増加速度から得た。メタン酸化量は湖水を同様に培養し、その溶存メタン濃度の減少速度から得た。

#### (B) 数理モデルを用いたメタン放出量のシミュレーション

本研究では、湖の流体力学モデルに湖内でのメタン・酸素動態過程を加えた LAKE2.0 モデルを用いた。LAKE2.0 モデルを用いて水温プロファイルと湖上の顕熱・潜熱フラックスの再現性の検証と、メタン・酸素動態過程のパラメータ決定をおこなった。そして、湖内環境とメタン放出のシミュレーション結果と観測結果を比較した。

### 4. 研究成果

渦相関法によるメタン放出の連続測定から、諏訪湖には連続的なメタンバブルの放出エリアが存在し、局所的に大きなメタン放出が存在することが分かった(図 1b)。その他のエリアでは、メタンは拡散と時折起こるバブルにより放出されていた(図 1a)。後者のエリアからのメタン放出は水温変動に伴う明らかな季節変化を示し、夏の月平均放出量は  $0.39 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  に達した。夏の高いメタン放出は堆積物中の高いメタン生成速度とその結果の表層水中の高い溶存メタン濃度のためである。連続的なバブルによるメタン放出は季節的には湖底の全静圧によって制御

されており、夏の低圧時に放出量が大きくなっていた(図1b)。これは圧力が抵抗として湖底からのバブル放出量を制御していることを示している。年間のこのバブル放出は1.9 Mg CH<sub>4</sub>であると推定された。他の陸水における渦相関法を用いた研究と比較すると、諏訪湖からのメタン放出はその温度のわりには高く、これには富栄養状態によるメタン生成の促進が影響しているかもしれない。

メタン放出の制御の詳細を明らかにするために、渦相関法で測定したメタン放出量を拡散とバブルによる放出に分離する手法を開発した(Iwata et al., 2018)。拡散によるメタン放出は比較的空間的に一様に起こっていることから、その場合、大気メタン濃度の乱流変動は同じく一様に放出されている水蒸気濃度の変動と同様となった。しかし、バブルによるメタン放出は大気メタン濃度の急上昇につながり、それにより水蒸気変動と異なる変動を示した。この分離手法はウェーブレット解析をベースにしており、この局所的に水蒸気濃度と異なる大気メタン濃度変動を分離することで、放出プロセスの分離をおこなった。この手法を諏訪湖で測定されたデータに適用した結果、分離した拡散放出は風速の上昇とともに増加を示した。この応答は物理的に理にかなっていることから、手法の妥当性を示している。バブルによるメタン放出は、平均して全放出量の57%を占めていた。また、この手法は水田からのメタン放出プロセスの分離にも使用された(Hwang et al., 2020)。現在、スウェーデンの研究グループとの共同研究により、寒帯湖におけるこの手法の適用性の評価を進めている。

分離手法を諏訪湖での一年間の測定データに適用し、理解の進んでいないメタン放出の日内変動を評価した。連続測定データを用いることで、湖水中と堆積物中でのメタンの蓄積がメタン放出とその制御機構に及ぼす影響を明らかにすることを試みた。拡散によるメタン放出は風速依存に加えて、夏季の安定成層時の湖水深層で蓄積する溶存メタンの表層への輸送がその変化を説明する上で重要であることを示した。夏には、高いバブル放出は全静圧の低下時に起こっている傾向があった(図2b)。これは先行研究の結果に一致する。一方、冬には全静圧の低下の影響は小さく(図2a)、高いバブル放出は午前中に起こる傾向があった。この結果は、冬には低温のため堆積物中でのメタン生成速度が小さく、バブルの形成が遅くなっていることが全静圧の影響を小さくしているということを提案している。

溶存ガス濃度の連続測定は湖内のガス動態や生成・消費プロセスを明らかにするうえで重要であるが、手法の制限からほとんど実施されていない。本研究ではその連続測定を実施し、二酸化炭素とメタンの溶存濃度の日内変動を異なる季節で明らかにした。現在、その結果をもとに論文を執筆中である。

LAKE2.0 モデルの検証においては、水温プロファイルや大気への顕熱・潜熱フラックスの時間変化がよく再現されることを明らかとした。過去20年の水温データを使用し、長期的な水温変動も再現できることを確認した。また、培養データを用いて、メタン生成と酸化に関するパラメータを決定した。メタン放出量の季節変化の再現性も良好であるが、更なる改良が必要かもしれない。これらの結果は、国際学会で発表をおこなった。

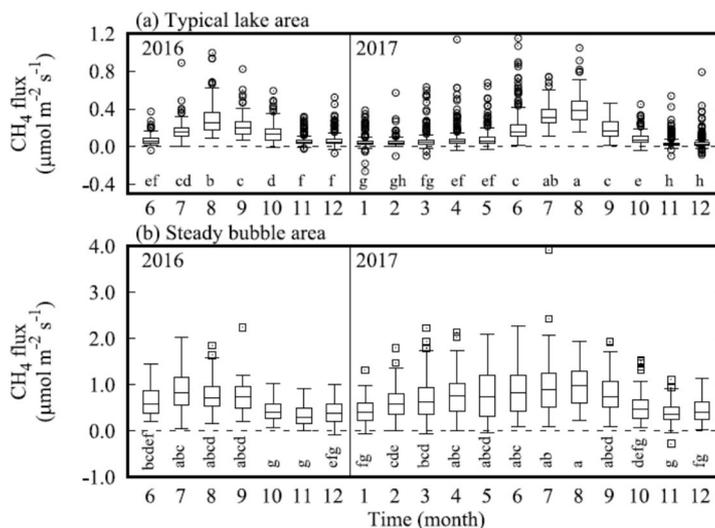


図1 メタン放出の季節変化。(a) 典型的な湖のエリアと(b) 連続的なバブル放出エリア。Iwata et al. (2020)より。

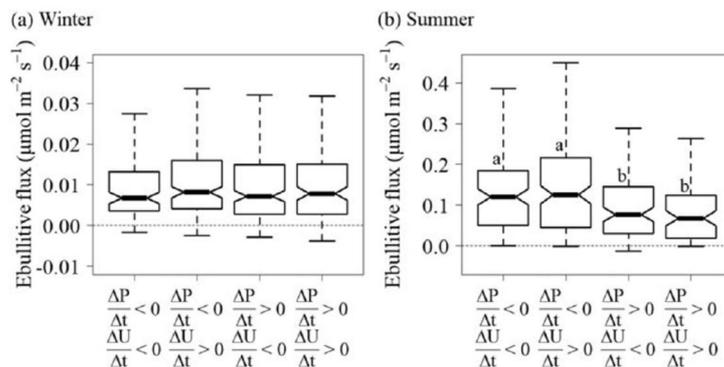


図2 (a) 冬と(b) 夏におけるバブルによるメタン放出の全静圧と風速変化への応答化。Taoka et al. (2020)より。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 T. Taoka, H. Iwata, R. Hirata, Y. Takahashi, Y. Miyabara, and M. Itoh	4. 巻 125
2. 論文標題 Environmental Controls of Diffusive and Ebullitive Methane Emissions at a Subdaily Time Scale in the Littoral Zone of a Midlatitude Shallow Lake	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research Biogeosciences	6. 最初と最後の頁 e2020JG005753
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2020JG005753	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 Hiroki Iwata, Kotomi Nakazawa, Himeka Sato, Masayuki Itoh, Yuichi Miyabara, Ryuichi Hirata, Yoshiyuki Takahashi, Takeshi Tokida, Ryosuke Endo	4. 巻 295
2. 論文標題 Temporal and spatial variations in methane emissions from the littoral zone of a shallow mid-latitude lake with steady methane bubble emission areas	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Agricultural and Forest Meteorology	6. 最初と最後の頁 108184
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.agrformet.2020.108184	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 Knox Sara H., Jackson Robert B., Poulter Benjamin, McNicol Gavin, Fluet-Chouinard Etienne, Zhang Zhen, Hugelius Gustaf、他、Iwata Hiroki他	4. 巻 100
2. 論文標題 FLUXNET-CH4 Synthesis Activity: Objectives, Observations, and Future Directions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Bulletin of the American Meteorological Society	6. 最初と最後の頁 2607 ~ 2632
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1175/BAMS-D-18-0268.1	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 該当する
1. 著者名 Hwang Yorum, Ryu Youngryel, Huang Yan, Kim Jongho, Iwata Hiroki, Kang Minseok	4. 巻 285-286
2. 論文標題 Comprehensive assessments of carbon dynamics in an intermittently-irrigated rice paddy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Agricultural and Forest Meteorology	6. 最初と最後の頁 107933 ~ 107933
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.agrformet.2020.107933	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 該当する

1. 著者名 Iwata Hiroki, Hirata Ryuichi, Takahashi Yoshiyuki, Miyabara Yuichi, Itoh Masayuki, Iizuka Kotaro	4. 巻 169
2. 論文標題 Partitioning Eddy-Covariance Methane Fluxes from a Shallow Lake into Diffusive and Ebullitive Fluxes	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Boundary-Layer Meteorology	6. 最初と最後の頁 413 ~ 428
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10546-018-0383-1	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 岩田拓記、平田竜一、高橋善幸、伊藤雅之、宮原裕一、飯塚浩太郎、小林大曙、佐藤媛香、中澤琴美、常田岳志	4. 巻 43
2. 論文標題 微気象学的手法と生物地球化学的手法を統合した浅い中緯度湖からのメタン放出の評価	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 関東の農業気象	6. 最初と最後の頁 9-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 -

[学会発表] 計26件(うち招待講演 1件/うち国際学会 7件)

1. 発表者名 落合悠介, 岩田拓記, 田岡 作, 宮原裕一, 朴 虎東
2. 発表標題 浅い富栄養湖-大気間の二酸化炭素交換の日内変動と生物プロセスの影響
3. 学会等名 日本農業気象学会2021年全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田岡作, 岩田拓記, 宮原裕一, 平田竜一, 高橋善幸, 伊藤雅之
2. 発表標題 湖からの拡散による温室効果ガスの放出のモデル検証
3. 学会等名 日本農業気象学会2020年全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田岡 作, 岩田拓記, 宮原裕一, 平田竜一, 高橋善幸
2. 発表標題 諏訪湖における温室効果ガスの拡散放出モデルの検証
3. 学会等名 日本農業気象学会関東甲信越支部2019 年度例会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 笠原佑香, 岩田拓記
2. 発表標題 諏訪湖の混合に対する運動量輸送と水温成層の影響
3. 学会等名 日本農業気象学会関東甲信越支部2019 年度例会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Taoka, T., Iwata, H., Miyabara, Y., Hirata, R., Takahashi, Y.
2. 発表標題 The controlling factors of diffusive and ebullitive methane emission on sub-daily time scale at a mid-latitude shallow lake
3. 学会等名 AsiaFlux Workshop 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Iwata, H., Nakano, S., Stepanenko, V., Kobayashi, D., Taoka, T., Itoh, M., Miyabara, Y., Hirata, R., and Takahashi, Y.
2. 発表標題 Simulation of methane dynamics in a mid-latitude eutrophic lake with constraints using incubation data
3. 学会等名 AsiaFlux Workshop 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 浦井 暖史, 高野 淑識, 松下 慎, 井町 寛之, 岩田 拓記, 朴 虎東, 大河内 直彦
2. 発表標題 表層水圏と深部地下圏のメタンサイクル：有機地球化学的・微生物生態学的手法による断層湖の研究（予察）
3. 学会等名 地球化学会2019年度年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Matsushita, M., Takano, Y., Imachi, H., Urai, A., Park, H.-D., Iwata, H., Ohkouchi, N.
2. 発表標題 Search for microbial CH <sub>4</sub> production processes in lake sediments and surface water associated with cyanobacterial bloom
3. 学会等名 JpGU-AGU joint meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田岡作, 岩田拓記, 宮原裕一, 平田竜一, 高橋善幸
2. 発表標題 諏訪湖における拡散およびバブルによるメタン放出の制御要因
3. 学会等名 日本農業気象学会2019年全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岩田拓記
2. 発表標題 渦相観測と生物地球化学的観測を用いた諏訪湖におけるメタン動態の解明
3. 学会等名 日本気象学会関西支部第2回例会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kobayashi, D., Iwata, H., Stepanenko, V., and Miyabara, Y.
2. 発表標題 Response of thermal regime of a shallow mid-latitude lake to climate change
3. 学会等名 2018 AGU Fall meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 西村若菜, 岩田拓記, 伊藤雅之, 宮原裕一
2. 発表標題 諏訪湖における溶存メタン濃度の変動要因
3. 学会等名 日本農業気象学会北陸支部・関東支部2018年度合同例会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田岡 作, 岩田拓記, 宮原裕一, 平田竜一, 高橋善幸
2. 発表標題 諏訪湖における拡散およびバブルによるメタン放出の時空間変動
3. 学会等名 日本農業気象学会北陸支部・関東支部2018年度合同例会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中野 航, 岩田拓記, 小林大曙, 宮原裕一, Victor Stepanenko, 伊藤雅之
2. 発表標題 諏訪湖におけるメタン動態のシミュレーション
3. 学会等名 日本農業気象学会北陸支部・関東支部2018年度合同例会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 新井沙友里, 岩田拓記
2. 発表標題 時間スケールごとにみた諏訪湖における熱収支
3. 学会等名 日本農業気象学会北陸支部・関東支部2018年度合同例会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小林大曙, 岩田拓記, Victor Stepanenko, 宮原裕一
2. 発表標題 湖モデルを用いた諏訪湖における過去 30 年間の熱環境の再現
3. 学会等名 日本農業気象学会北陸支部・関東支部2018年度合同例会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Iwata, H., Hirata, R., Takahashi, Y., Itoh, M., Miyabara, Y., and Kobayashi, D.
2. 発表標題 Eddy covariance and biogeochemical observations of methane dynamics in a shallow mid-latitude lake in Japan
3. 学会等名 OzFlux-AsiaFlux Joint Conference 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岩田拓記, 平田竜一, 高橋善幸, 宮原裕一, 伊藤雅之, 飯塚浩太郎
2. 発表標題 渦相関法により測定された浅い湖からのメタン放出の拡散とバブル放出への分離
3. 学会等名 日本農業気象学会2018年全国大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小林大曙, 岩田拓記, Victor Stepanenko, 宮原裕一
2. 発表標題 LAKE2.0を用いた諏訪湖の熱収支の再現
3. 学会等名 日本農業気象学会2018年全国大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中澤琴美, 岩田拓記, 平田竜一, 高橋善幸, 宮原裕一
2. 発表標題 諏訪湖におけるメタンフラックスの時空間変動と制御要因
3. 学会等名 日本農業気象学会2018年全国大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐藤媛香, 岩田拓記, 伊藤雅之, 宮原裕一, 中澤琴美
2. 発表標題 諏訪湖における湖水中のメタン動態
3. 学会等名 日本農業気象学会2018年全国大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小林大曙, 岩田拓記, 宮原裕一, Victor Stepanenko
2. 発表標題 LAKE2.0モデルによる諏訪湖の水溫プロファイルの再現性
3. 学会等名 日本農業気象学会関東支部2017年度例会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中澤琴美, 岩田拓記, 平田竜一, 高橋善幸, 宮原裕一
2. 発表標題 諏訪湖におけるメタンフラックスの時空間変動と制御要因
3. 学会等名 日本農業気象学会関東支部2017年度例会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 佐藤媛香, 岩田拓記, 伊藤雅之, 宮原裕一, 中澤琴美
2. 発表標題 諏訪湖における湖水中のメタン動態
3. 学会等名 日本農業気象学会関東支部2017年度例会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Iwata, H., Hirata, R., Takahashi, Y., Itoh, M., Iizuka, K., Miyabara, Y., Kobayashi, D., and Tokida, T.
2. 発表標題 Evaluation of methane emission from a mid-latitude lake with the eddy covariance technique
3. 学会等名 Physical Processes in Natural Waters 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Iwata, H., Hirata, R., Takahashi, Y., Itoh, M., Iizuka, K., Miyabara, Y., Nakazawa, K., Satoh, H., Kobayashi, D., and Tokida, T.
2. 発表標題 Evaluation of methane emission from a mid-latitude lake with the eddy covariance technique
3. 学会等名 AsiaFlux Workshop 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

信州大学理学部物質循環学コース 微気象学研究室 公開プログラム  
<http://science.shinshu-u.ac.jp/~hiwata/program.html>

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
研究協力者	平田 竜一  (Hirata Ryuichi)		
研究協力者	高橋 善幸  (Takahashi Yoshiyuki)		
研究協力者	伊藤 雅之  (Itoh Masayuki)		
研究協力者	常田 岳志  (Tokida Takeshi)		

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			
ロシア連邦	Moscow State University			
スウェーデン	Uppsala University			
スウェーデン	Stockholm University			