

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：24506

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H03109

研究課題名（和文）瀬戸内少雨地域のため池が地域的な気象緩和と温室効果ガス放出に及ぼす影響の解明

研究課題名（英文）Effects of small reservoirs in the Setouchi region on regional climate mitigation and greenhouse gas emissions

研究代表者

奥 勇一郎 (Oku, Yuichiro)

兵庫県立大学・環境人間学部・准教授

研究者番号：10456832

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,800,000円

研究成果の概要（和文）：兵庫県瀬戸内地域における堤長およそ数100メートルため池が、その周辺地域の夏の日中の高温化を抑制する気象緩和効果を持つことを、ため池がある場合とない場合の気象シミュレーションにより明らかにした。代表的な農業用ため池内の温室効果ガスの生成・消費について、溶存イオン濃度など水質項目と合わせて時空間的に分析し、その変動の要因解明を進めた。ため池による温室効果ガスの排出量を観測したところ、二酸化炭素については夏の高温暖期を中心に池への吸収が増加、一方メタンについては池からの放出が夏期に増加する傾向が示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の調査から、ため池では夏期の植物プランクトンの増殖が光合成の増加につながり、二酸化炭素が吸収されていること、高温環境下で底泥のメタン生成が活性化しメタン生成の増加につながっていることが示唆された。また、ため池があることで夏の日中における高温化が抑制されていることを気象シミュレーションにより示した。本研究の成果は、農業用ため池が温室効果ガス動態や地域気象に及ぼす影響が大きいという事実が示される学術的な意義とともに、地域のため池の維持管理手法の検討の際の重要な指標となりうるという社会的意義も有するものと言える。

研究成果の概要（英文）：A numerical weather simulation with and without small reservoirs conducted by mesoscale meteorological model has revealed that small reservoirs suppress higher surface air temperature in the surrounding area during daytime in summer. We analyzed dissolved greenhouse gases (carbon dioxide and methane) in agricultural pond water with water chemical components and measured gas exchange between water surface and the atmosphere. Our results suggested that the agricultural ponds can be the sink of carbon dioxide in summer (due to increase of photosynthesis by phytoplankton) and the source of methane (due to increase of methane production in the sediment).

研究分野：気象学

キーワード：ため池 温室効果ガス排出量 気象緩和効果

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

少雨地域の灌漑などに利用される「ため池」は全国で約 21 万個も存在する。これほど多くのため池が日本全国に存在するにも関わらず、これまでその気象緩和効果や温室効果ガス放出量を詳細に検証した例はない。ため池は少雨地域での農業用水の確保のために造成され、洪水の調節機能、生物多様性の維持など多様な機能を有するが、近年、離農や過疎化による維持管理の粗放化、堤体の老朽化が進み、大雨や地震発生時の決壊リスクが指摘されている。2018 年の西日本豪雨でも複数のため池が決壊し、人的被害へのリスクが注目されている。ため池をどう維持・管理していくのか？が改めて問われる中、2015 年の国連サミットで策定された持続可能な開発目標 (SDGs) に掲げられている「安全な水の確保」、「陸域生態環境保全」に寄与する視点からも、ため池のもつ機能についての科学的な観測データの蓄積や将来予測モデルの提示が喫緊の課題となっている。

2. 研究の目的

兵庫県瀬戸内地域におけるため池を対象に、領域気象モデルによる気象場の再現実験とそれらため池の土地利用区分を住宅地に改変した感度実験を行い、双方の気温差をもって気象緩和効果とし、その時空間分布を明らかにする。ため池を対象とした水中温室効果ガス濃度プロファイル、池面からの放出量の観測をため池の立地や形状別に行い、温室効果ガス生成・消費メカニズムや各池からの排出量の制御要因等を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) ため池の気象緩和効果

ため池による気象緩和効果を評価するために兵庫県の瀬戸内地域におけるため池(布池)とその周辺地域を対象とした領域気象モデル WRF による気象の再現実験を実施した(図 1 と図 2)。領域気象モデルにおいてため池を適切に解像するために国土数値情報の 100m メッシュの土地利用データと国土地理院の 50m メッシュの標高データを使用した。次に、気象緩和効果の評価対象とするため池の土地利用区分を水域から住宅地に改変し、土地利用区分の改変を除いた諸条件は再現実験のものと同じとした感度実験を実施した。任意の時刻における再現実験の気温と同じ時刻における感度実験の気温の差をもって気象緩和効果とした。

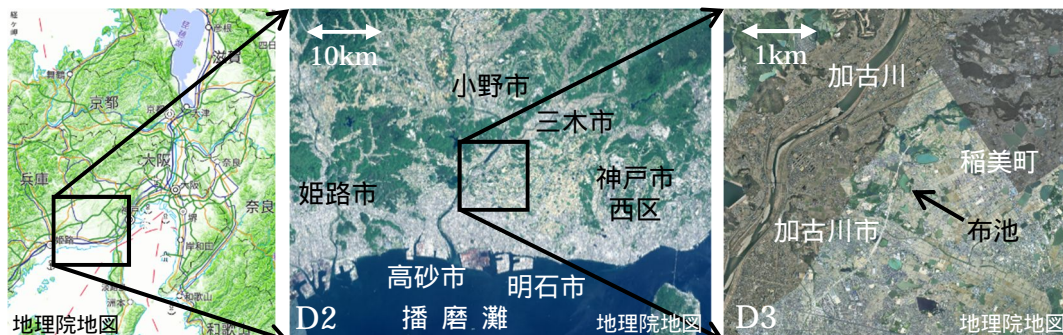


図 1: 研究対象とした布池の位置および空中撮影写真(地理院地図をもとに作成)。D2 と D3 は領域気象モデルの計算対象領域(図 2)に対応する。

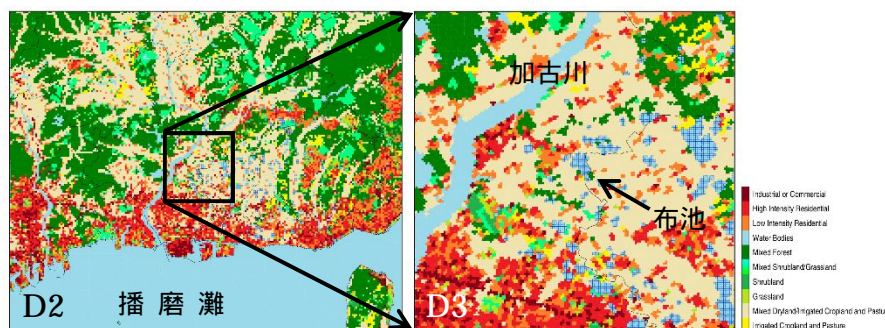


図 2: 領域気象モデルの計算対象領域(D2:第2領域、D3:第3領域)における土地利用。気象緩和効果の評価対象とするため池のメッシュには青色枠線を付している。

(2) ため池における温室効果ガス生成・消費機構の解明と大気水面間のガス交換の評価

ため池を立地と形状によりグループに分け、代表的な池での高温期の観測を行うことで、各タイプの池での温室効果ガス生成・プロファイルを明らかにした。深度ごとに採取した試水の水質やクロロフィル濃度を利用し光合成による二酸化炭素消費やメタン生成・メタン酸化の評価を行った。形状分類した各池で超音波風速計(CSAT3B, Campbell Scientific 社)、オープンパス型メ

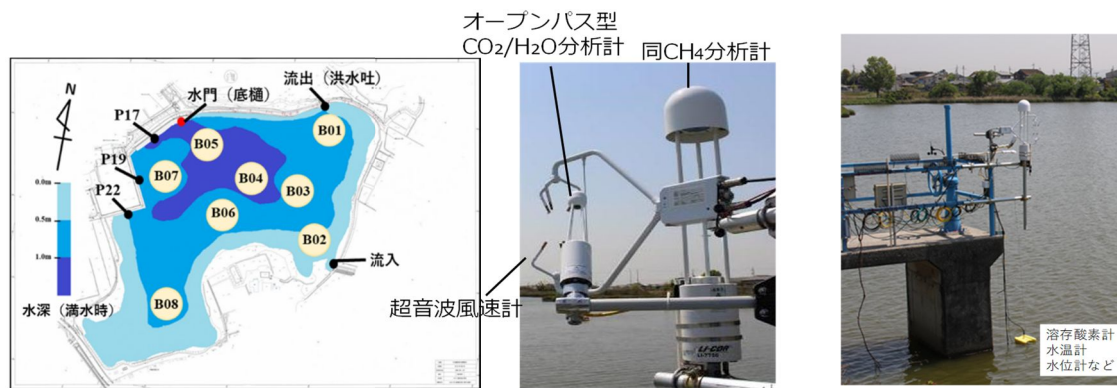


図 3: 観測を行った布池における採水地点 (左) と布池に設置した観測器等。

タン計 (LI-7700, LI-COR 社), $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 計 (LI-7500, LI-COR 社) を活用した微気象学的方法 (渦相関法による連続観測) やフローティングチャンバー法 (LI-7810, LI-COR 社) などを用いてメタン・二酸化炭素の池面と大気間の交換量 (フラックス) の観測を行った。複数サイトでデータ取得することでため池の形状と気象条件・温室効果ガス放出の関連について考察した。主な観測は、農地に囲まれた皿池として一般的なものと考えられる加古川市布池 (図 1、図 3) を対象として行った。

布池の平面図と採水地点を図 3 に示す。IN は布池への流入地点、田 IN は隣接する水田から水が流入する地点、OUT (洪水吐) は隣接する池への流出地点、Gate out は水門 (底樋) からの流出地点である。布池表層水水質の空間的変動の評価のため、毎月 1 回の間隔で、池の表層水をボートにより (B01 ~ B08)、縁辺部の表層水を 3 地点 (P17, P19, P22) で採水した。1 ~ 2 週間の間隔で行った定期観測では、水門 (底樋) 地点において 4 深度から、また IN・OUT 地点から採水を行い、池水の水質の季節変動を評価した。

採水時に溶存酸素濃度 (dissolved oxygen; 以下 DO; HQ30d, Hach)・pH・電気伝導度 (electrical conductivity; 以下 EC) (WM-22EP, 東亜 DKK)・溶存二酸化炭素濃度 (以下溶存 CO_2 , CGP-31, 東亜 DKK) を測定した。冷蔵状態で実験室に持ち帰った水試料は FID 検出器付ガスクロマトグラフ GC-2014 (Shimadzu) を用いてヘッドスペース法により溶存メタン濃度を求めた。ろ過した水試料は、イオンクロマトグラフィーにより各種溶存イオン濃度を分析するとともに、TN ユニット付全有機炭素計 (TOC-L, Shimadzu) を用いて溶存有機炭素や溶存態全窒素量 (Total Dissolved Nitrogen; 以下 TDN) を、ろ紙は蛍光法によりクロロフィル a 濃度 (以下 Chl-a) を測定した。

水面からのメタンフラックスの観測は、フローティングチャンバー法を用いて行った (アクリル製、容積 13.3 L、水面に接する底面積 0.07 m^2)。TDLs 方式温室効果ガスアナライザー (LI-7810, Li-COR) によりチャンバー内のメタン濃度変化の傾きを求め、水面からのメタンフラックスを算出した。布池水門地点においては DO・水温・底からの水位・降水量・光合成有効放射量 (Photosynthetically Active Radiation; 以下 PAR) の連続観測を行った。

布池における二酸化炭素 (CO_2) の水面-大気間の交換について、超音波風速計とオープンパス型 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 濃度計を用いた渦相関法により CO_2 フラックスを算出した。フットプリント解析の結果を基に、布池からの寄与を主とする CO_2 フラックスデータを選別した。関連する環境要因として、風速・光合成有効放射量 (PAR) などを現場で連続測定した。メタンフラックスも同様の解析を行い、気温やバブル放出に寄与する気圧との関係を解析した。また、他の湖や水田とのメタン放出量の比較を行うことで、ため池が地域のメタン放出源として果たす役割の理解を進めた (森口, 2022)。

4. 研究成果

(1) ため池の気象緩和効果

顕著な降水がなく晴天が続いた 2021 年 7 月 20 日から 1 週間を対象に再現実験および感度実験を実施した。再現実験の第 3 領域 (D3、水平解像度 50m) において計算される気温や風速をそれらの観測値と比較して実験の再現性を検証したところ概ね妥当な計算結果が得られていることが確認できた。図 4 に評価対象のため池である布池を含む周辺地域の気象緩和効果を示す。ため池があることでため池周辺地域における夏の日中の高温化が緩和されている様子が見て取れる。ため池があることで池直上における夏の晴天日の日中の気温はその周辺地域の気温と比べて低く、かつ、海から陸に向かって海風が卓越することで、ため池の風下側にはため池直上の相対的に涼しい空気が流入して気温の上昇が抑えられる。その効果の大きさは、ため池の面積が大きいほど、ため池からの距離が近いほど、ため池が密集しているほど、より大きくなることがわかった。このことは、ため

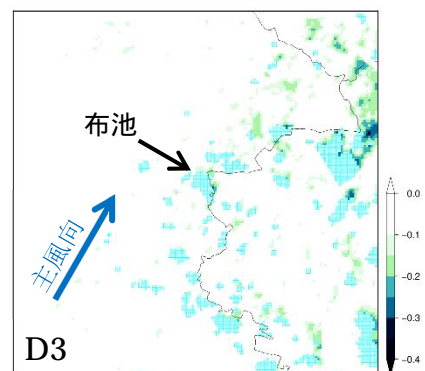


図 4: 図 2 の D3 におけるため池による気象緩和効果。数値 (負の値) は池があることによる気温の変化 (涼しさの程度) を示す。

池が多数存在するこの地域の暑熱環境がそれらため池によって形成されていることを示唆している。

(2)ため池における温室効果ガス生成・消費機構の解明と大気水面間のガス交換の評価

a)皿池（加古川市布池）におけるメタン生成と消費

布池の月平均水温は2022年1月に最小値（4.9℃）同7月に最大値（31.1℃）を示した。月平均水位は2022年5月に最大値（底から1.65m）、2022年11月に最小値（0.70m）を示した。

夏期の日中は日射により表層水温が上昇する一方、底層水温の上昇幅が小さいため、水温成層が形成された。しかし、夜間に表層水温が低下することで、布池の水が鉛直混合することも示された。溶存メタンの空間分布（図5）について、定期的な観測時に採取した計14地点の表層水の溶存メタン・DO等の空間的ばらつきを評価するため、5%有意水準で地点間の有意差検定を行ったところ、溶存メタンでは各地点間に統計的な有意差はみられなかった。DOはIN（流入地点）とS（水門地点表層）間（ $P=0.035$ ）INとOUT（流出地点）間（ $P=0.045$ ）に有意差がみられた。INのTDNはほとんどの布池表層地点と比較して有意に高かった（ $p<0.05$ ）が、布池表層水間では有意な差はなかった。

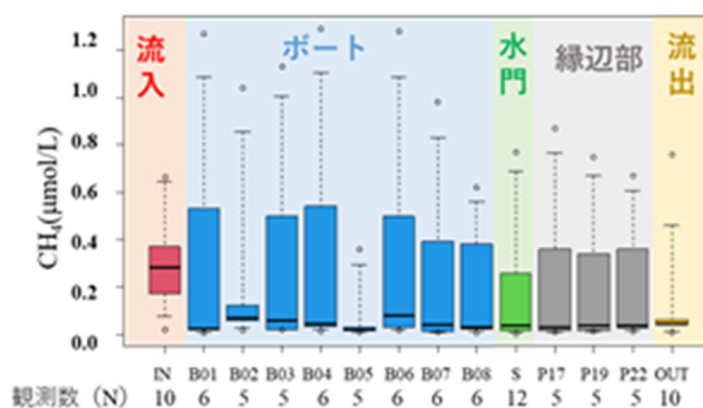


図5. 布池表層水の溶存メタン濃度表層比較

水門地点の深度別プロファイル結果から、溶存メタンは夏期（6月～9月）に4深度とも低濃度を示した（ $\text{CH}_4 < 0.01 \mu\text{mol/L}$ ）。また、4月、5月は底層の溶存メタンが突出して高く（ $\text{CH}_4 > 2.0 \mu\text{mol/L}$ ）それより浅い深度ではほぼ一定の値を示した。11月18日は水位が低く（0.77m）、3深度とも高濃度を示した。

溶存メタンとDO、Chl-aについて、4～9月のボート調査日間の表層水質の有意差を5%有意水準で検定した。溶存メタンは4月が5月以降と比較して有意に高く、5月は6月以降と比較して有意に高かった。6月から9月までは極めて低濃度であった。溶存メタンが低下した6月にDO・Chl-aが最も高くなっており、特にChl-aは6月下旬に最大値を取り9月まで高濃度で推移した。フローティングチャンバー法による水面におけるメタンフラックスの観測について、布池水門地点におけるメタンフラックスは5月に高く、夏期（7月～9月）に低かった。これらのことから、高温期には底層や浅い部分ではメタン生成が活性化しメタンが生成されるが、DOの高い酸化的な水中でメタン酸化菌の活動による酸化も活発に生じていることが示唆された。

b)皿池（加古川市布池）水面からのメタンフラックス

一方、渦相関法による池全体と大気間のメタンフラックスについては、夏に増大する明瞭な季節変化を示した。メタン放出量は気温の上昇に応じて指数関数的に増加した（図6）。また、気圧が低下した場合にメタン放出が増大する傾向が見られ（図7）、バブルによるメタン輸送の寄与が示唆された。通年観測の結果、ため池からのメタン放出量は他の湖や水田からのメタン放出量に匹敵することが明らかになった。フローティングチャンバー法と渦相関法によるメタンフラックスの観測結果から、池表面からのメタン放出量は時間・空間的変動性が大きいことが示唆された。

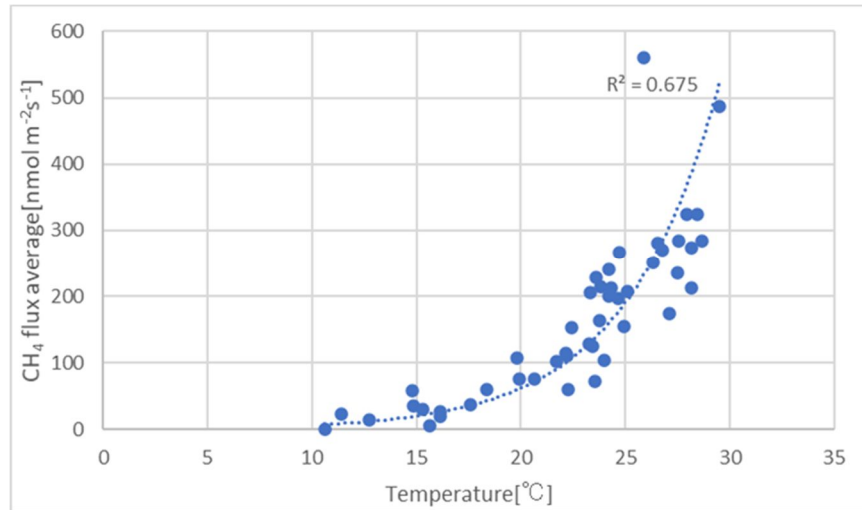


図6 気温とCH₄フラックスの関係

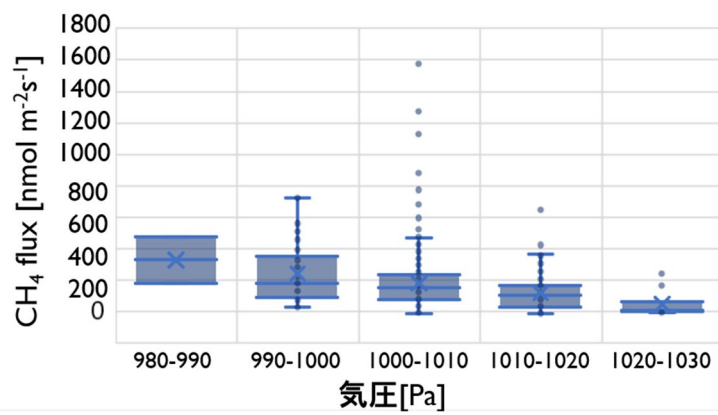


図7 気圧とCH₄フラックスの関係

c) 皿池（加古川市布池）における二酸化炭素動態

図8に棧橋表層水のChl-aの季節変化を示す。8月9日の棧橋表層水のChl-a濃度は390.8 μg/Lと富栄養湖が示すChl-a濃度レベルであった。特に棧橋表層水のChl-a濃度の最大値(968.9 μg/L; 6月28日)は非常に高く、富栄養または過栄養の状態であった。空間的には多地点で採取した表層水のChl-a濃度に地点間の有意差は見られなかったが、“流入”と各地点の表層水のChl-a濃度の間には、有意差が見られた(p<0.005)。池の棧橋表層水に対して行った重回帰分析の結果、Chl-a濃度の変化に水温(p<0.05)とTDN(p<0.005)が有意に影響を及ぼしていたと考えられた(高水位時)。特に表層水のTDNとChl-a濃度の間強い正の相関(p<0.001)が見られた。これらのことから、池水のChl-a濃度は流入水の影響よりも、池内での植物プランクトン等の発生が大きく影響し、その動態はTDNの変動の影響を受けていることが考えられた。

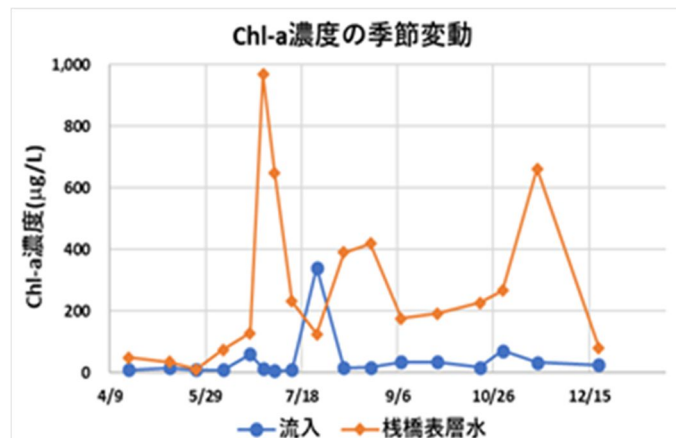


図8 布池におけるChl-a濃度の季節変動

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 1件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Mendoza Pascual Milette U., Itoh Masayuki, Aguilar Jaydan I., Padilla Karol Sophia Agape R., Papa Rey Donne S., Okuda Noboru	4. 巻 126
2. 論文標題 Controlling Factors of Methane in Tropical Lakes of Different Depths	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Biogeosciences	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2020JG005828	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 Iwata Hiroki, Nakazawa Kotomi, Sato Himeka, Itoh Masayuki, Miyabara Yuichi, Hirata Ryuichi, Takahashi Yoshiyuki, Tokida Takeshi, Endo Ryosuke	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 - 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 Taoka T., Iwata H., Hirata R., Takahashi Y., Miyabara Y., Itoh M.	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 -
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 Okuda N, Ikeya T, Fujibayashi M, Itoh M, Osaka K
2. 発表標題 Hypoxia and methanotrophy in a large monomictic Lake Biwa under climate changes
3. 学会等名 JpGU Meeting 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yang CJ, 岩田拓記, 朴虎東, 宮原裕一, 伊藤雅之
2. 発表標題 アオコ添加に対する富栄養湖堆積物中のメタン生成の応答
3. 学会等名 日本農業気象学会2022年全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yang CJ, 岩田拓記, 朴虎東, 宮原裕一, 伊藤雅之, 高野淑識, 浦井暖史
2. 発表標題 植物プランクトン添加に対する湖底堆積物中のメタン生成の応答
3. 学会等名 日本農業気象学会 関東甲信越支部2021年度合同例会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木颯人, 岩田拓記, 宮原裕一, 伊藤雅之, 高橋けんし
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 関東甲信越支部2021年度合同例会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 河内丈太郎, 西藤智哉, 伊藤雅之, 坂部綾香, 尾坂兼一, 中嶋一憲
2. 発表標題 播磨地域のため池における溶存メタン濃度と水面からの放出速度
3. 学会等名 日本陸水学会 第85回大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊藤雅之, 小林由紀, Mendoza MU, 藤林恵, 福井学, 奥田昇, Shiah FK
2. 発表標題 熱帯火山湖と亜熱帯ダム湖の溶存メタン濃度の季節変動と支配要因
3. 学会等名 日本陸水学会第86回大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Okuda N, Okamoto H, Itoh M, Ohtaka A, Fujibayashi M, Kobayashi Y,
2. 発表標題 Climate impacts on benthic biodiversity in a deep ancient Lake Biwa
3. 学会等名 JpGU Meeting 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Fujibayashi M, Okamoto H, Kobayashi Y, Itoh M, Ohtaka A, Okuda N
2. 発表標題 Spatial pattern of methanotrophic food webs in Lake Biwa under changing climates
3. 学会等名 JpGU Meeting 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kobayashi Y, Itoh M, Okamoto H, Fujibayashi M, Okuda N
2. 発表標題 Spatial variation in methane oxidizing bacterial communities in the bottom boundary layer of Lake Biwa under warming
3. 学会等名 JpGU Meeting 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 森口大世, 坂部綾香, 伊藤雅之, 小杉緑子
2. 発表標題 渦相関法を用いたため池からのメタン放出の測定
3. 学会等名 日本陸水学会 第86回大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小林由紀, 伊藤雅之, 藤林恵, 小島久弥, 福井学, 奥田昇
2. 発表標題 亜熱帯地方のダム湖におけるメタン酸化細菌の長期観測
3. 学会等名 日本陸水学会 第86回大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤林恵, 岡本紘奈, 伊藤雅之, 大高明史, 小林由紀, 奥田昇
2. 発表標題 琵琶湖底層におけるメタン栄養食物網の空間パターン
3. 学会等名 日本陸水学会 第86回大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 奥田昇, 岡本紘奈, 伊藤雅之, 大高明史, 藤林恵, 小林由紀
2. 発表標題 古代湖・琵琶湖のベントス多様性に及ぼす温暖化
3. 学会等名 日本陸水学会 第86回大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 宮下直也, 伊藤雅之, 坂部綾香
2. 発表標題 ため池表層水における二酸化炭素濃度の日変動特性
3. 学会等名 日本陸水学会 第86回大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

温帯湖沼との比較として、フィリピンの研究者と共に深度の異なる湖での観測を行ってきたが、その結果を誌上発表した。

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
研究分担者	坂部 綾香 (Sakabe Ayaka) (40757936)	京都大学・白眉センター・特定助教 (14301)	
研究分担者	伊藤 雅之 (Itoh Masayuki) (70456820)	兵庫県立大学・環境人間学部・准教授 (24506)	

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