

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 4 月 25 日現在

機関番号：82124

研究種目：基盤研究(B) (海外学術調査)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H04475

研究課題名(和文) 熱帯メロミクティックな湖沼における無酸素層の上昇に関する研究

研究課題名(英文) Study on shoaling of hypolimnetic oxygen-deficient water in tropical meromictic lakes

研究代表者

福島 武彦 (Fukushima, Takehiko)

茨城県霞ヶ浦環境科学センター (湖沼環境研究室、大気・化学物質研究室)・湖沼環境研究室・センター長

研究者番号：90124354

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)：熱帯湖沼の中には深く鉛直混合がほとんど生じないメロミクティックな湖沼が存在する。そうした湖沼では、下層の貧酸素化が進み、その深さが年々浅くなるとともに、上層の生物に悪影響をもたらす場合もあり、インドネシア等で研究を行った。スマトラ島の3湖等を対象に水質鉛直分布の測定を実施し、貧酸素となる水深の変化を解析し、低気温による対流の頻度とその水質鉛直混合への影響を明らかにした。また、湖内でのその分布の地点差から、水流動を推測した。さらに、衛星画像データを解析することから、透明度空間分布の長期変化や表面水温変動を推定し、その要因を議論した。また、霞ヶ浦を対象に手法の開発、検証を実施した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

熱帯湖沼はその周辺住民の水、生態系利用にとって極めて重要な存在である。水深の深い熱帯湖沼では、鉛直循環が乏しいことから下層水塊の溶存酸素が枯渇し、そうした貧酸素水塊が表層の水利用、生態系に悪影響を与えることが頻発している。本研究では、貧酸素水塊の上昇の様子をインドネシアの湖沼で明らかにするとともに、対流現象の存在と原因を示した。また、高頻度の現地観測が難しい湖沼にも適用可能な衛星画像解析による水質推定技術を開発し、それをインドネシアやアフリカの湖沼に適用した。これらの手法は簡易であることから、様々な湖沼での水環境管理への利用も期待される。

研究成果の概要(英文)：There are many meromictic lakes in tropical zone, e.g., Indonesia. This kind of lakes, where a vertical mixing to the bottom rarely happens, face shoaling of hypolimnetic dissolved oxygen(DO)-deficient waters and outbreaks of water problems. Thus, we measured the vertical distributions of water quality (water temperature, DO, electric conductivity, etc.) and investigated the change in zero-DO depths in Lakes Maninjau, Singkara, Toba, etc. While the event of large convection due to the drop of air temperature resulted in mixing of water to the bottom in these lakes, hypolimnetic DO recovery did not happen. Long-term changes in Secchi depth and surface water temperature were estimated using the satellite images, which would be useful to understand the influences of natural and anthropogenic factors on lake environment. Development and validation of the analyzing and modeling methods have been attempted in Lake Kasumigaura.

研究分野：水環境学

キーワード：湖沼 インドネシア 無酸素層 水質鉛直分布 リモートセンシング

1. 研究開始当初の背景

熱帯湖沼の中には、浅くて頻度高く鉛直混合が生じているポリミクティックな湖沼と、深く鉛直混合がほとんど生じない下層(Hypolimnion)を有するメロミクティックな湖沼が存在する。後者においては、下層が貧酸素化し、その深さが年々浅くなるとともに、上層(Epilimnion)の生物に悪影響をもたらす事件を生じる場合もある。

2. 研究の目的

インドネシアの数湖沼を対象に、水質鉛直分布を測定し、既往の報告と比較することから無酸素層の経年変化を明らかにする。また、透明度、クロロフィル a、表層水温等を衛星画像から推測するリモートセンシングの手法を開発し、Landsat や MERIS 画像等に適用して、これら水質の長期変化を調べ、無酸素層の経年変化との関係を解析する。インドネシア以外の湖沼に対してもリモートセンシング手法の適用を試みる。

3. 研究の方法

インドネシアの数湖沼で深度計付き水質センサーを下降させることから水質鉛直分布(水温、電気伝導度、濁度、クロロフィル a、溶存酸素等)を測定し、特に無酸素層の水深の経年変化を観測し、2011-2016年における測定結果等と比較して無酸素層上昇速度を定量化する。あわせて、反射スペクトル、表層水質測定を行い、反射スペクトルをもとに水質推定を行うアルゴリズムを開発するとともに、過去の衛星画像データを解析して、透明度、クロロフィル a、表面水温等の長期変動特性を明らかにし、無酸素層の経年変化との関係を調べる。

4. 研究成果

(1) Maninjau 湖と Singkarak 湖での水質鉛直分布の変化

両湖はスマトラ島中央部に位置する熱帯湖沼である。Maninjau 湖は湖面積 94 km²、最大水深 165 m、滞留時間 25.1 y の火山性断層湖であり、中栄養湖に分類される。Singkarak 湖は湖面積 108 km²、最大水深 268 m、滞留時間 20.4 y の断層湖であり、貧栄養と中栄養の中間程度となっている。両湖での溶存酸素(DO)の鉛直分布から、無酸素層の水深は長期的には上昇傾向にあるものの、2014~2018年では微妙に上下していることがわかった(図1と図2)。2015年と2017年の間に、下層の電気伝導度(EC25)が均一化しており、水の混合が生じたことがわかり、大規模な対流の発生が確認された(図3と図4)。同様に、小規模な対流が2017年の5月と7月の間にも確認された。大規模対流発生時には、近接気象観測地点での気温データは5℃程度の低下を示しており、このような低温減少により熱帯湖沼でも対流が発生することを明確にとらえることができた。また、MODIS 衛星画像から表層水温の変化を推定した結果(図5)、この時期にその低下が確認された。こうした冷温は数年から十数年に1度程度しか生じない気象イベントであることがわかった。また、こうした大規模対流発生時でも、下層の貧酸素状態はわずかに改善されるだけであり、無酸素層の上昇は自然現象では止めることができず、何らかの人為的な対策が必要であることがわかった。

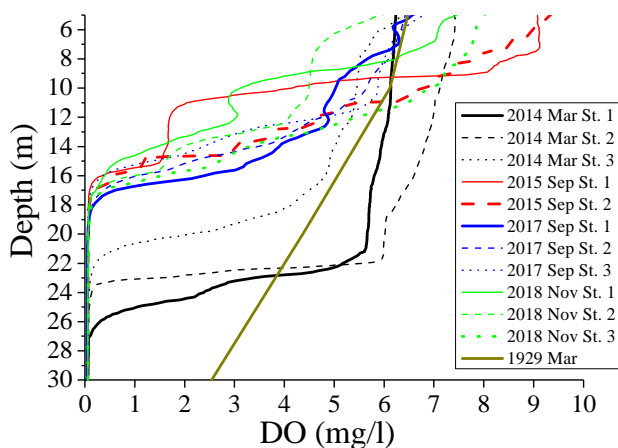


図1 Maninjau 湖での DO 鉛直分布の変化

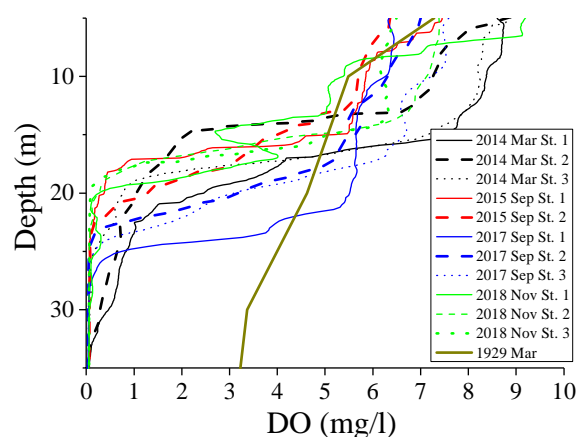


図2 Singkarak 湖での DO 鉛直分布の変化

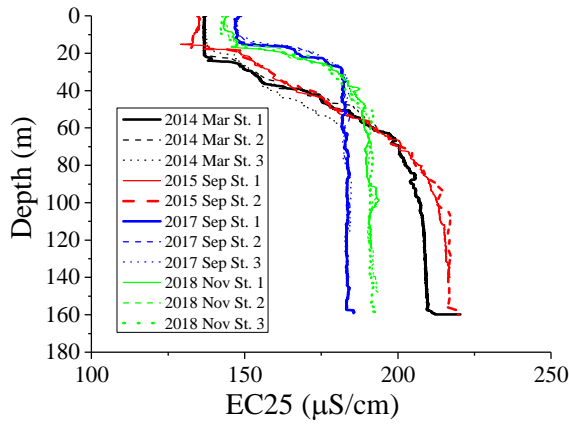


図3 Maninjau 湖での EC25 鉛直分布の変化

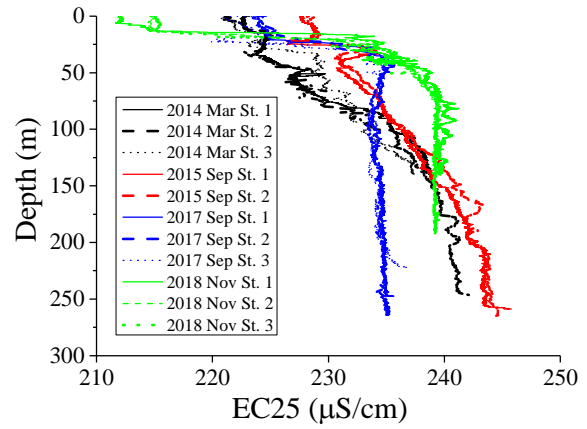


図4 Singkarak 湖での EC25 鉛直分布の変化

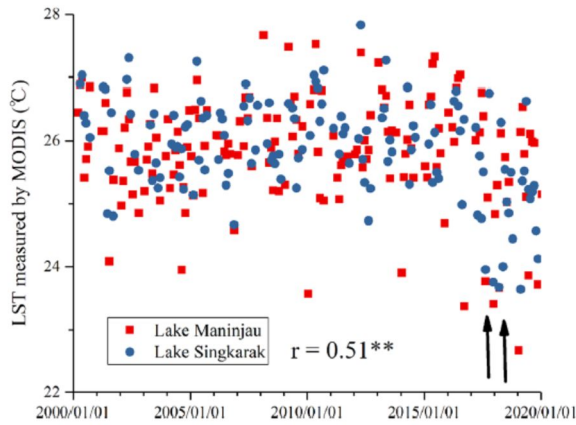


図5 MODIS 画像による Maninjau 湖の表層水温の推定結果

(2) Toba 湖での水質鉛直分布

Toba 湖はスマトラ島北部に位置し、湖面積 1120 km²を有する熱帯湖沼である。水深 100-200m、幅数 km、長さ 30 km の狭窄部を境に、北部水域 (NB) と南部水域 (SB) に分けられている。NB の最大水深 505 m、SB のそれは 433 m であり、世界でも有数のカルデラ湖である。滞留時間 79 y であり、栄養状態は貧栄養と中栄養の中間に分類される。NB、SB とともに底層 DO が低下傾向にあることが明白である (図 6, 7)。EC25 は湖底からのイオンの溶出の影響を受け下層が高いが、EC25 と DO は、各水域、年代ごとに直線関係を示すことがわかった (図 8)。また、NB から SB に向けての流下方向にみると水深 100 m、200 m で EC25 は増加傾向にあることがわかった (図 9)。これらの変化は湖内での流動、酸素消費動態などの状況を表現していると考えられた。

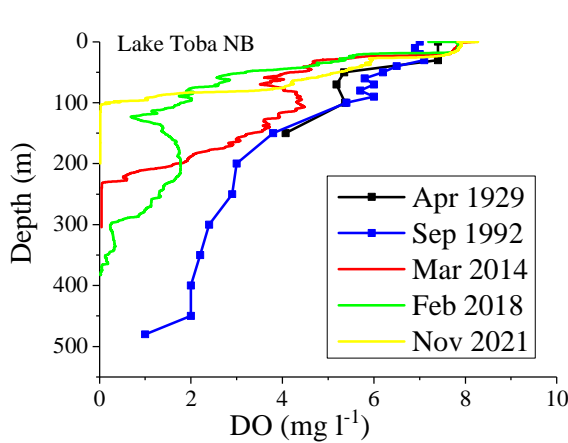


図6 Toba 湖 NB での DO 鉛直分布の変化

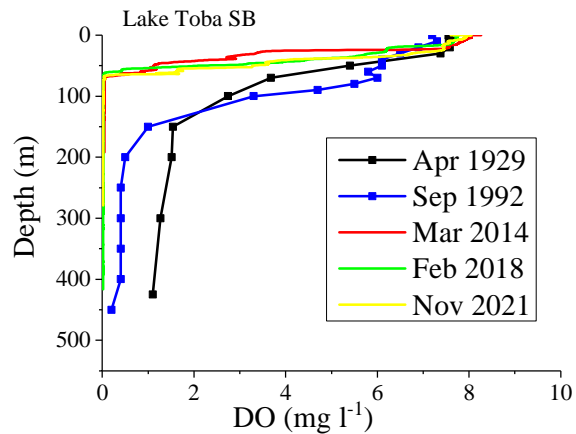


図7 Toba 湖 SB での DO 鉛直分布の変化

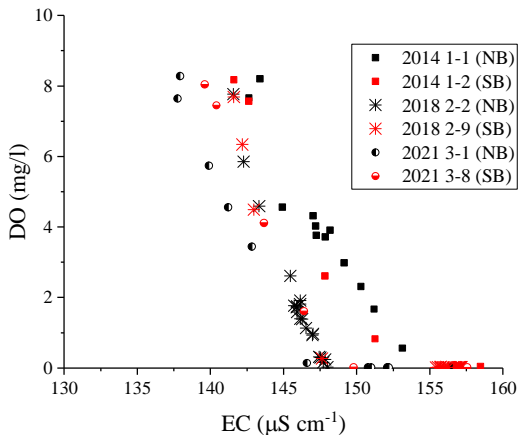


図 8 Toba 湖での DO と EC25 の関係

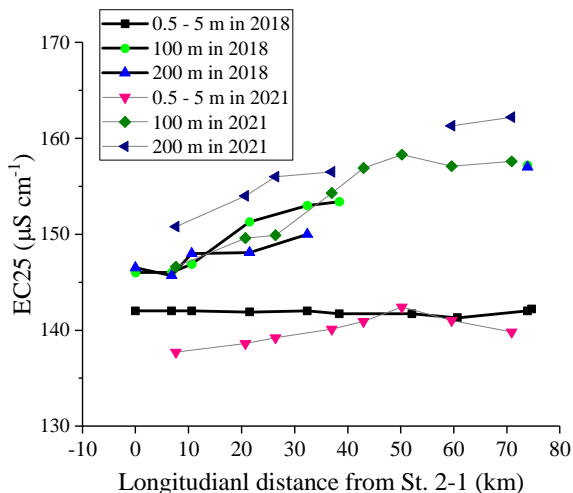


図 9 Toba 湖での EC25 の流下方向変化 (St. 2-1 は NB 水域の北部中央)

(3) バリ島湖沼での水質鉛直分布

バリ島の Batur 湖 (面積 15.9 km²、最大水深 88 m) と Buyan 湖 (面積 3.7 km²、最大水深 70 m) で水質鉛直分布の測定を行い、過去の分布と比較した。両湖とも近年、水温 (WT) は上昇、DO は低下傾向にあるが、気象の影響で WT 低下、DO 上昇が生じる期間も存在することがわかった (図 10-13)。以上の湖沼以外にも、バリ島では Bratan 湖、Tramblingan 湖、スマトラ島では Diatsu 湖、ジャワ島では Gajah_Mungkur 湖、Kedung_Ombo 湖で水質鉛直分布と反射スペクトル等の測定を行った。

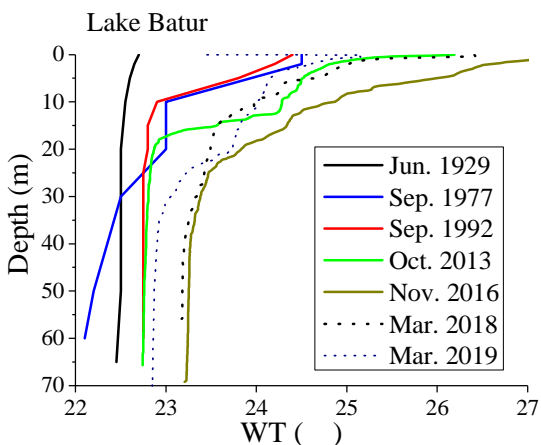


図 10 Batur 湖での WT 鉛直分布の変化

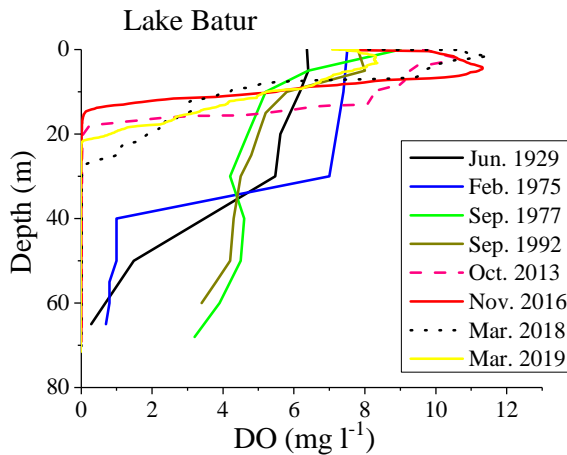


図 11 Batur 湖での DO 鉛直分布の変化

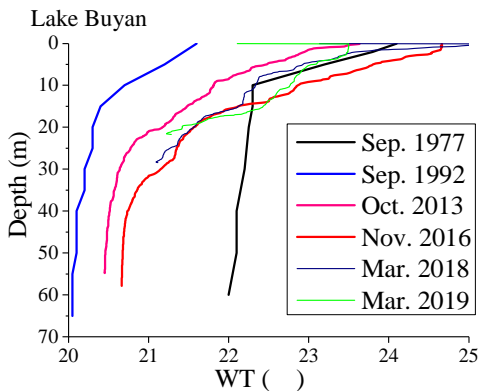


図 12 Buyan 湖での WT 鉛直分布の変化

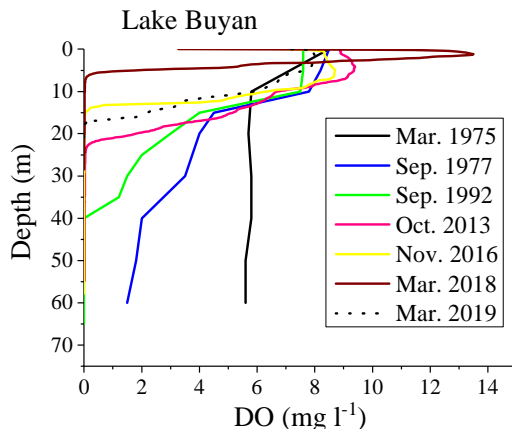


図 13 Buyan 湖での DO 鉛直分布の変化

(4) 衛星画像を用いての Maninjau 湖の透明度長期変化

Landsat TM/ETM+データを用いて、湖沼の透明度（SD）を推定する方式を開発した。まず、インドネシアの9湖沼での実測透明度と反射スペクトルデータを用いて Landsat TM/ETM+データから透明度を推定する統計モデルを構築した。その際、データの前処理（水以外の要素を含むデータの削除、大気補正等）従来とは異なるバンド比（青/緑、赤/緑比）の利用を行った。図14には Maninjau 湖における 1987-2018 年間の透明度の変化（赤点：衛星画像による推定、青点：実測、線は内挿曲線）を示すが、推定値は実測値の変化傾向をよく再現している。藻類の大発生、下流ゲートの開閉、網いけすの設置数といった情報とも齟齬がない傾向を再現していることがわかった。

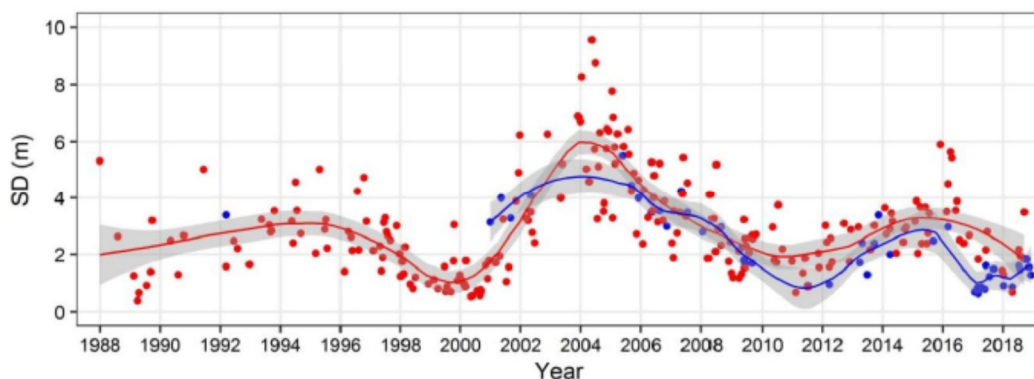


図 14 Maninjau 湖での衛星画像による透明度変化の推定

(5) Malawi 湖での透明度分布

アフリカで3番目に大きな Malawi 湖（湖面積 29,252 km²）を対象に MERIS 画像データを用いて透明度を推定した。まず、Doron11 と Lee15 という2つのアルゴリズムを比較したところ、後者の方が精度がよいことがわかり、この方式で 2003-2011 年の9年間にわたる透明度の湖内分布を推定した（図15）。この結果、南岸、南西岸あたりで透明度は低く、汚濁が進んでいることがわかるとともに、透明度が 6-12m と 12m 以上の水域は年々、季節的にその範囲を変化させていることがわかった。

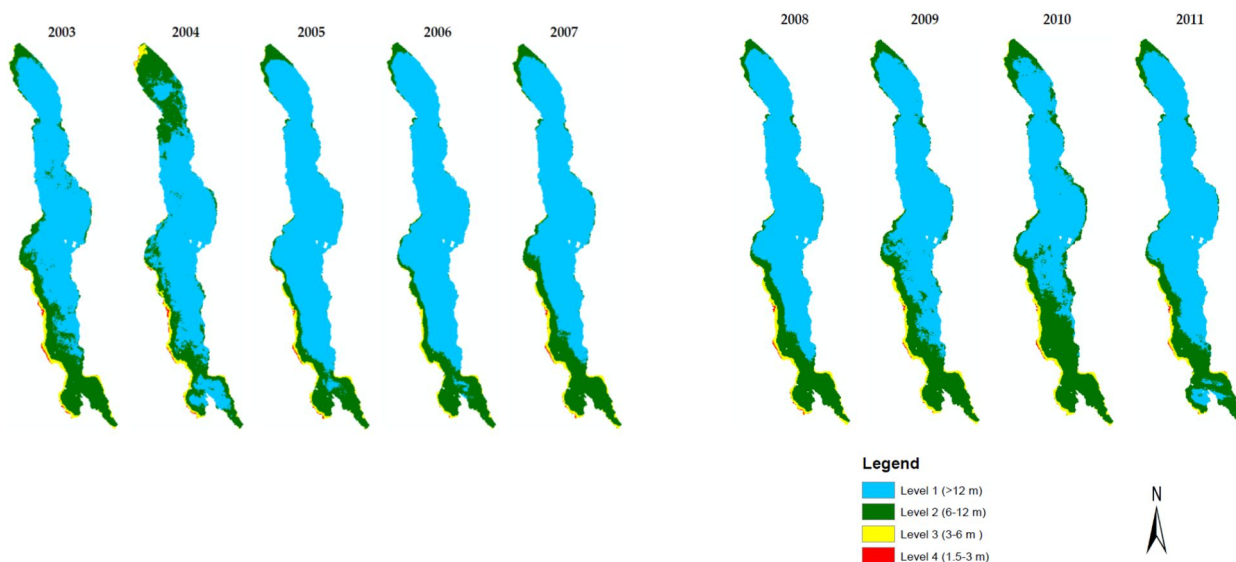


図 15 Malawi 湖での衛星画像による透明度水平分布変化の推定

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計16件（うち査読付論文 16件 / うち国際共著 8件 / うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Luki Subehi, Iwan Ridwansyah, Takehiko Fukushima	4. 巻 1
2. 論文標題 Dissolved oxygen profiles and its problems in Lake Maninjau, West Sumatra-Indonesia.	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Indonesian J. Limnol	6. 最初と最後の頁 7-11
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 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 Fukushima Takehiko, Matsushita Bunkei	4. 巻 848
2. 論文標題 Limiting nutrient and its use efficiency of phytoplankton in a shallow eutrophic lake, Lake Kasumigaura	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Hydrobiologia	6. 最初と最後の頁 3469-3487
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10750-021-04593-y	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 Fukushima Takehiko, Setiawan Fajar, Subehi Luki, Fakhrudin Muh, Triwisesa Endra, Dianto Aan, Matsushita Bunkei	4. 巻 23
2. 論文標題 Convection of waters in Lakes Maninjau and Singkarak, tropical oligomictic lakes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Limnology	6. 最初と最後の頁 375 ~ 383
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10201-021-00686-8	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 Jiang Dalin, Matsushita Bunkei, Pahlevan Nima, Gurlin Daniela, Lehmann Moritz K., Fichot C?dric G., Schalles John, Loisel Hubert, Binding Caren, Zhang Yunlin, Alikas Krista, Kangro Kersti, Uus?ue Mirjam, Ondrusek Michael, Greb Steven, Moses Wesley J., Lohrenz Steven, O'Donnell David	4. 巻 258
2. 論文標題 Remotely estimating total suspended solids concentration in clear to extremely turbid waters using a novel semi-analytical method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Remote Sensing of Environment	6. 最初と最後の頁 112386 ~ 112386
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/J.RSE.2021.112386	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 Msusa Anastazia Daniel, Jiang Dalin, Matsushita Bunkei	4. 巻 14
2. 論文標題 A Semianalytical Algorithm for Estimating Water Transparency in Different Optical Water Types from MERIS Data	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Remote Sensing	6. 最初と最後の頁 868 ~ 868
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/rs14040868	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 KOMURO Shunsuke, KITAMURA Tatsumi, OOUCHI Takao, MASUNAGA Eiji, ASAOKA Daiki, AYUKAWA Kazuhiro, MIKAMI Yasuhide, SEIKE Yasushi, YUZAWA Miyuki, FUKUSHIMA Takehiko	4. 巻 44
2. 論文標題 Distribution of Oxygen-Deficient Water and Estimation of Its Area in Lake Kitaura	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society on Water Environment	6. 最初と最後の頁 157 ~ 164
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2965/jswe.44.157	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 Fukushima Takehiko, Kitamura Tatsumi, Matsushita Bunkei	4. 巻 3
2. 論文標題 Lake water quality observed after extreme rainfall events: implications for water quality affected by stormy runoff	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 SN Applied Sciences	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) 10.1007/s42452-021-04823-x	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 -

1. 著者名 Setiawan Fajar, Matsushita Bunkei, Hamzah Rossi, Jiang Dalin, Fukushima Takehiko	4. 巻 11
2. 論文標題 Long-Term Change of the Secchi Disk Depth in Lake Maninjau, Indonesia Shown by Landsat TM and ETM+ Data	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Remote Sensing	6. 最初と最後の頁 2875 ~ 2875
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/rs11232875	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 Fukushima Takehiko, Kitamura Tatsumi, Komuro Syunsuke, Nakagawa Keita, Nagahama Yumi, Matsumoto Syunichi, Matsushita Bunkei	4. 巻 24
2. 論文標題 Characteristics of declining dissolved oxygen concentrations in Lakes Kasumigaura and Kitaura, two shallow polymictic eutrophic lakes in Japan	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Lakes & Reservoirs: Science, Policy and Management for Sustainable Use	6. 最初と最後の頁 314 ~ 323
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/lre.12294	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 Fukushima Takehiko, Komuro Shunsuke, Kitamura Tatsumi, Nagahama Yumi, Matsushita Bunkei	4. 巻 1
2. 論文標題 Decadal change in tripton concentration in a shallow lake	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 SN Applied Sciences	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) 10.1007/s42452-019-1668-9	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 -

1. 著者名 Fukushima Takehiko, Komuro Shunsuke, Kitamura Tatsumi, Nagahama Yumi, Matsushita Bunkei	4. 巻 2
2. 論文標題 Long-term changes in water mineral concentrations and their influence on sediment water content in a shallow lake	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 SN Applied Sciences	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) 10.1007/s42452-020-3119-z	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 -

1. 著者名 Jiang Dalin, Matsushita Bunkei, Yang Wei	4. 巻 165
2. 論文標題 A simple and effective method for removing residual reflected skylight in above-water remote sensing reflectance measurements	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing	6. 最初と最後の頁 16 ~ 27
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.isprsjprs.2020.05.003	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 T. Fukushima, T. Inomata, E. Komatsu and B. Matsushita	4. 巻 9: 298
2. 論文標題 Factors explaining the yearly changes in minimum bottom dissolved oxygen concentrations in Lake Biwa, a warm monomictic lake.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-018-36533-7	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 -

1. 著者名 A. Vundo, B. Matsushita, D. Jiang, M. Gondwe, R. Hamzah, F. Setiawan and T. Fukushima	4. 巻 11: 279
2. 論文標題 An Overall Evaluation of Water Transparency in Lake Malawi from MERIS Data	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Remote Sensing	6. 最初と最後の頁 1-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/rs11030279, 2019	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 Fukushima Takehiko, Komatsu Eiji, Arai Hiroyuki, Kamiya Koichi, Onda Yuichi	4. 巻 615
2. 論文標題 Shifts of radiocesium vertical profiles in sediments and their modelling in Japanese lakes	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Science of The Total Environment	6. 最初と最後の頁 741 ~ 750
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.scitotenv.2017.09.286	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 T. Fukushima., B. Matsushita, W. Yang and L. M. Jaelani,	4. 巻 19
2. 論文標題 Semi-analytical prediction of Secchi depth transparency in Lake Kasumigaura using MERIS data,	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Limnology	6. 最初と最後の頁 89-100
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10201-017-0521-3	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

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 3. 北村立実, 福島武彦他
2. 発表標題 北浦における現場観測データを用いた底泥からの P04-P 溶出量算出の試み.
3. 学会等名 第56回日本水環境学会年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 E. Komatsu, T. Fukushima, Y. Sato
2. 発表標題 Integrated modeling and long-term predictability of lakes and watersheds.
3. 学会等名 ISEM Global Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Fukushima, S. Komuro, T. Kitamura, Y. Nagahama, B. Matsushita
2. 発表標題 A conceptual model for explaining the decadal change in tripton and its influences on limnological processes in a shallow lake.
3. 学会等名 ISEM Global Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 北村立実、大内孝雄、湯沢美由紀、福島武彦、佐藤礼二、浅岡大輝、増永英治、鮎川和泰、清家泰
2. 発表標題 霞ヶ浦における貧酸素水塊の分布と酸素消費速度について
3. 学会等名 第55回日本水環境学会年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小室俊輔, 中川圭太、北村立実、松本俊一、福島武彦、増永英治、浅岡大輝、小野正人、番場泰彰
2. 発表標題 北浦における貧酸素水塊と水質の変動について
3. 学会等名 第53回日本水環境学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小室俊輔、松本俊一、福島武彦
2. 発表標題 気候変動による霞ヶ浦水質への影響について
3. 学会等名 17th World Lake Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Iuki subehi, I. Ridwansyah, T. Fukushima
2. 発表標題 Dissolved oxygen profiles and its problems at Lake Maninjau, West Sumatera-Indonesia.
3. 学会等名 17th World Lake Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 F. Setiawan, B. Matsushita, T. Fukushima, Iuki subehi
2. 発表標題 Development a model for estimating Secchi disk depth using Landsat TM and ETM+ in Indonesian lakes.
3. 学会等名 17th World Lake Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 ANB. Vundo, B. Matsushita, T. Fukushima
2. 発表標題 Spatio-temporal variability of chlorophyll-a concentration in Lake Malawi using MERIS data.
3. 学会等名 17th World Lake Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小室俊輔, 松本俊一, 福島武彦
2. 発表標題 気候変動による霞ヶ浦の水質への影響解析について
3. 学会等名 第52回日本水環境学会年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松本俊一, 中川圭太, 福島武彦
2. 発表標題 汽水湖溷沼の長期水質変動について
3. 学会等名 第52回日本水環境学会年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中川圭太, 松本俊一, 福島武彦
2. 発表標題 外浪逆浦の浚渫窪地における水温成層の形成と水質への影響
3. 学会等名 第52回日本水環境学会年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 福島武彦
2. 発表標題 湖沼水環境の将来：レジームシフト、気候変動、新環境基準
3. 学会等名 水環境学会「将来の水環境変化に適応した水供給システム委員会キックオフワークショップ」（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 福島武彦
2. 発表標題 湖沼水環境の将来を考える
3. 学会等名 第11回つくば3Eフォーラム会議（招待講演）
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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	松下 文経 (Matsushita Bunkei) (80361319)	筑波大学・生命環境系・准教授 (12102)	

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