

令和 7 年 6 月 23 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2024

課題番号：21H01435・23K20969

研究課題名（和文）気象と物質循環構造が近年変化する湖沼・沿岸域の貧酸素化機構の解像

研究課題名（英文）Understanding the mechanism of hypoxia in lakes and coastal areas under recent changes in meteorology and material cycle structure

研究代表者

入江 政安（Irie, Masayasu）

大阪大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：00379116

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、近年気象や物質循環が変化している湖沼および沿岸域において大きな環境問題となっている貧酸素水塊について、観測値を用いて数値計算結果の精度を向上させるデータ同化手法を用いて、流動水質モデルのモデルパラメータを計算中に推定しつつ再現結果も向上させる方法を採用することで、再現性向上だけでなく、再現・予測するモデルの係数の推定やモデルの改良案を提案する技術を開発した。また湖沼を対象に、大気モデルとの連携により、流動水質シミュレーションの高精度化を行った。現地調査と合わせて本研究を進めることにより、将来の気候変動下における貧酸素水塊の消長を予測した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

下水道整備が進むなど、水域外からの栄養塩流入が減少し、水質全体としては改善が進む一方で、生物の生息域を物理的に奪う貧酸素水塊は2000年以降も大きく改善されていない。本研究は貧酸素水塊に対し、必要な現地調査を実施しつつ、一方で数値モデルによる高度な解析を実施したことで、その形成や消滅過程についてより高精度に解析した点で新しい。また、純粋に学術面としても、台風の予測など、予測精度の向上に使われることの多いデータ同化を、水質モデルの改良に貢献する技術として構築した点が非常に有用である。

研究成果の概要（英文）：This research developed a method for estimating model parameters of a hydrodynamic-water quality model while improving the model performance of hypoxia, which is a major environmental problem in lakes and coastal seas where weather and material cycles have been changing in recent years, using a latest data assimilation that improves numerical calculation results using observed data. This method improves not only the model performance but also the model itself. For lakes, simulation of flow and water quality was improved together with an atmospheric model. By conducting field surveys in parallel, prediction of the hypoxia dynamics in the future under climate change was conducted.

研究分野：環境水理学

キーワード：気候変動 貧酸素水塊 流動水質モデル 大気モデル 湖沼 大阪湾

1. 研究開始当初の背景

近年、気候変動の影響が、大規模な出水や苛烈な台風の一方、無降雨で安定した気象の初夏、夏季の猛暑が発生している。例えば、無酸素底層水の湧昇現象である青潮は、発生手前までの日射と高温、安定した風向により酸素消費が進み硫化水素が蓄積すること、ならびに台風による強風と風向変化により発生する。気象変動は青潮発生にとって負の要因と予想できるが、近年(2000年以降)の東京湾や大阪湾では青潮の規模や発生回数は大きく変化していない。これは近年の気象変動の面での影響は増大(悪化方向)、栄養塩などの水質環境の面での影響は減少(改善方向)に進んでいるからとも見られるし、一方で、内湾奥部の酸素環境は今世紀に入ってから目立って改善していないことを示している。

琵琶湖北湖では、夏季に発生する貧酸素水塊を解消する冬季の全循環が完結しないことが大きなニュースとなった。南湖では、高度経済成長期にあった汚濁負荷の削減により水質が著しく改善した。しかし、その後しばらくは低水準であった水草の繁茂は1994年の濁水を機に増加し始め、現在では南湖の殆どをカバーしている。現在、BOD(生物化学的酸素要求量)の減少とCOD(化学的酸素要求量)の増加が継続する乖離現象が起きており、難分解性有機物が原因ではないかと予想されている。下流域の水道水源であるからには、このような水質や物質循環構造の変化を常に監視する必要がある。

貧酸素化を含む溶存酸素濃度(DO)の低下は世界中で拡大しており(Schmidt et al. Nature, 2017)、特に沿岸河口域や湖沼での拡大が指摘されている。気候変動によってその状況が悪化、拡大するとの予測がある(環境省水・大気環境局(2012)他)ものの、予測が大きな不確実性を含んでいることも指摘されている(Stramma et al., Biogeosciences, 2012; Löptien & Dietze, Biogeosciences, 2019)。原因は現在までの水温上昇と人間活動による負荷増加が同時に起きてきたことにより、貧酸素化要因が未解明であること、また、DOの観測値が表底2点のみに限られることが多く、酸素の鉛直循環構造が十分にモデル化されていないこと、結果として将来予測に耐える3次元流動水質モデルが未完成であることにある。

2. 研究の目的

そこで、本研究は、これまで申請者らが実施してきたデータ同化またその新技術、微地形を表現できる高精細モデルによる解析、非接触型DOセンサーや少量サンプルで分析可能な新たな観測技術を用いて、沿岸域、湖沼域の酸素生産消費機構を明らかにし、気象や物質循環構造の変化にตอบสนองする貧酸素水塊の変化を再現でき、将来予測に資する3次元流動水質貧酸素化モデルを構築することを目的とする。そこで以下のような技術開発や解析を目的とし、研究を実施した。

データ同化による原因の切り分け技術：

貧酸素水塊のモデル解析における再現性低下要因は物理場の問題と水質・生態系モデルの問題が複合して発生しているが、水温、塩分分布を同化することにより、成層構造の再現性不足が水質の再現に及ぼす影響を排除でき、水質モデル内の再現性低下要因に絞ることが可能である。

水質生態系モデルを自在に改造できるデータ同化新技術：

研究代表者らは「二重数」による自動微分を用いた4次元変分データ同化法を構築した。本研究で用いる非逐次型データ同化手法である4次元変分法は、1つの同化期間に複数の時系列観測値を織り込むことが可能であり、一定期間の変動を考慮したパラメータ修正やモデルの改良が可能である。その一方で、元の非線形モデルに加えて、水質モデルの変更のたびにデータ同化に使用するタンジェントモデルとアジョイントモデルの再構築が必要であった。この再構築の手間を無くす自動微分の導入により、水質モデルの自在な変更が可能となった。この技術は水工学に限らず他分野にも応用可能で、これ自体が新技術として発展性の高いものである。

非構造格子によるモデル高解像化：

近年、利用が多くなっている非構造格子有限体積法モデルの適用により、貧酸素化に寄与する物理現象の再現性が高くなるか検討する。

非接触型DOセンサーによる高精度酸素濃度測定技術：

近年非接触型の蛍光式センサーが開発され、DOについてもこのセンサーの使用が可能である。これにより実験時の酸素の混入やセンサーによる酸素消費もない完全に密閉した実験系での高精度な酸素消費速度を測定できるようになり、酸素消費速度についてより高精度な調査を実施する。

植生の影響の把握とモデル化：

現地調査では、植生内および周辺の酸素生産消費機構を調査する。これにより、酸素生産消費機構について精細なモデル化が可能である。

沿岸域と湖沼の同時解析による相補性：

大阪湾は潮汐や淡水流入による強固な密度成層などの物理的な力や外因の強さがあり、水質など水環境の変化が貧酸素水塊の分布に及ぼす影響が見えにくい。一方、湖沼では、水温差による密度成層は小さく、水質は外力の影響を大きく受ける可能性がある。貧酸素化機構の解明や貧酸素化モデルの性能低下要因の究明は、貧酸素化に及ぼす物理的、水環境学的要因が輻輳して困難にさせているため、沿岸域、湖沼のそれぞれが得意とする分野で原因究明を行い、お互いのモデル解析に知見を交換しあう相補効果により、両水域の貧酸素化機構の解明を一度に実現する。

3. 研究の方法

(1) 現地調査

大阪湾の西宮市鳴尾浜地先において、密閉瓶内に封入した海水を現場水深で培養することで、移流・拡散・曝気の影響を除いた DO の連続データを取得した。ガラス瓶に DO ロガーのセンサー一部を挿入した培養系を作成し、水面下 1 m の海水を瓶に封入し、光量子計とともに係留した。培養系内の窒素・酸素循環を再現するため、1 ボックスの低次生態系モデルを構築した。21 個の未知モデルパラメータは、明・暗条件の時々刻々の DO および実験終了時の NH_4 、 NO_3 、DON についての測定値と計算値を比較した評価関数を定め、境界制約付き記憶制限 BFGS 法による最適化を、初期値を変えながら複数回実施して求めた。

また、琵琶湖では南湖において夏季に月 1 回程度の調査船による巡回観測により、水草帯の繁茂状況の調査を実施し、カメラ撮影および水温、DO、クロロフィルの測定を実施するとともに、サンプリングにより水中栄養塩濃度および水中および底泥の有機物量の計測を行った。また、霞ヶ浦では夏季の酸素消費速度を把握するため、HR 式コアサンプラーによるコア採泥を 4 地点で実施し、実験室に持ち帰り、酸素消費速度および無機態窒素・リンの溶出速度の測定を実施した。直上水は 0.2 μm フィルターで濾過した湖水で置換した。DO 計測時には密閉した上で、コア外部からスターラーにより攪拌し、底泥直上において直上水流速が 2-3 cm/s となるよう維持して計測した。また栄養塩溶出速度の測定においては採水後改めて濾過湖水をつぎ足し、密閉状態を維持した。

(2) 数値解析

データ同化による状態推定およびパラメータ推定、モデルの改良について、2 つのアプローチを採用した。1 つは二重数による自動微分を用いた 4 次元変分法 (DN-4DVar) の活用である。二重数による自動微分により、4 次元変分データ同化に必要な非線形モデルに対する Adjoint モデルを作成する必要がなくなる。これにより水質モデルの変更、改良した場合でも比較的容易に 4 次元変分データ同化が可能となる。このモデルを用いて、データ同化を行い、水質モデル内のモデルパラメータ最適化を行った上で、将来気候における貧酸素水塊の消長を予測した。また、貧酸素水塊の再現性を低下させるモデル構造内の課題について、データ同化によりモデル構造の改良を提案する手法を構築した。もう 1 つは二重数による場合では積分時間が長いと一時保存データ量が爆発的に増えてしまう点を回避すべく、Adjoint モデルをアンサンブル近似で代替する手法であり、4 次元アンサンブル変分法 (4DEnVar) と呼ばれる手法の採用である。東京湾の流動・水質場を対象とした領域海洋モデル ROMS に 4DEnVar を実装し、気象観測衛星やモニタリングポストによる観測値の同化実験を行うことで、本手法の有用性を評価した。さらに、非構造格子モデル SCHISM を採用し、波浪モデルを最適化した上で、貧酸素水塊の消長への地形改変による波浪場の変化がもたらす影響を明らかにした。

また、水草の繁茂が水質に及ぼす影響を評価するため、既存観測データの多い諏訪湖において、水草の物理的障害が貧酸素水塊に及ぼす影響を流動水質モデル AEM3D を用いて数値実験により評価した。さらに低温河川水の流入が密度成層および貧酸素水塊に及ぼす影響を評価した。また、湖沼水質には風による入力条件が重要であることから、大気モデル SCALE を採用し、湖上風の再現を実施した。また、大気モデルおよび流動水質モデルを用いて、日成層の継続により貧酸素化が生じる霞ヶ浦において、現在の貧酸素状態を再現し、加えて、将来気候データを用いて、将来の気象の変化によりどのように貧酸素水塊が応答するかを検討した。

4. 研究成果

主な結果を以下に示す。

(1) 植物プランクトンに比増殖速度および有機物の比分解速度

大阪湾で得た連続観測結果により、明条件では DO が日中に上昇し、夜間に減少する明瞭な日周変化を示したが、計測開始 3 日後以降は NH_4 および NO_3 が枯渇し、栄養塩制限が生じた。20°C のときの最大比増殖速度は 2.78 d^{-1} と高い値が推定された。暗条件では DO が継続的に減少し、20°C のときの SDet、LDet、DON の比分解速度はそれぞれ 0.084、0.058、0.061 d^{-1} と推定された。ただし、本推定値は局所的最適値であり、初期値を変えた複数回の実行では異なる値が推定される。一方で、複数回の実施においても炭素窒素比は 18 程度と推定され、レッドフィールド比より高いことが示唆された。

(2) 水草が酸素環境および有機物生成に及ぼす影響

ササバモ、クロモ、コカナダ等の直立型の沈水植物が繁茂する地点では、夏季に DO の日変動が大きくなるものの、大気や光合成による DO 供給により、水柱中で継続的な DO 低下は生じ

くいことが示された。一方、浮葉植物が繁茂する場所では DO 飽和度が表層で 79~101%、底層で 35~67% となった。これは、水面が覆われることにより大気からの DO 供給の低下、水中の光環境の悪化による光合成低下に起因していると考えられる。以上のことから、琵琶湖湖南湖の水柱中で継続的な DO 低下は浮葉植物が繁茂する水域でより懸念される。沈水植物繁茂地点と比較対象地点の平均流速はそれぞれ、3.7 と 8.5 cm/s で両者には有意な差が見られた。DOM 濃度は、沈水植物繁茂地点の平均が 2.06 mgC/L、比較対象地点の平均が 1.36 mgC/L であった。DOM 濃度については生物利用性の高い分子量 10 万以上の高分子画分の割合も沈水植物繁茂地点で有意に高かった。沈水植物は DOM の供給源となりうることが知られており、沈水植物繁茂地点での DOM 濃度上昇に寄与していると考えられ、沈水植物由来の DOM が湖沼の炭素循環の駆動に対し大きな役割を担っている可能性が示唆された。

(3) 霞ヶ浦の酸素消費速度および栄養塩溶出速度

霞ヶ浦での夏季の底泥による酸素消費速度 (SOD) は、流入河川河口に近い 3 地点および湖心において流速有り条件で 0.76-1.44 mg/m²/d、流速なし条件で 0.96-1.19 g/m²/d であった。これらの値は湖沼の値として高く、容易に貧酸素化しやすい環境であることが裏付けられた。また、実験中に底泥の相が変化した後、SOD はさらに高くなる。また、アンモニア態窒素の溶出速度は湖心において、34 (嫌気条件下) ~ 54 (好気条件下) mg/m²/d、リン酸態リンの溶出速度が 30 (好気条件下) ~ 35 (嫌気条件下) mg/m²/d となり、これらも高い値を示し、依然として富栄養状態にある霞ヶ浦の状況を反映した結果となった。

(4) 4次元変分データ同化による DO の再現性向上およびパラメータ推定、モデル改良の提案

東京湾での青潮の発生 (2015 年 8 月 9 日) を、4 次元アンサンブル変分法 4DVar を用いてパラメータ修正を行いながら再現を試みた。8 月 6 日まで連吹していた南東寄りの風が転向し、北西寄りの風が変わった 8 日ごろから底層 DO が急に無酸素となるが、データ同化によって、計算値は DO 低下のタイミングに加えてほぼ無酸素な状態が継続される様子が再現できた。この湧昇イベントにおいて無酸素水塊の消長は計算条件のばらつきに大きく影響されうること、影響を及ぼす原因は複数のパラメータに依存した複合的な結果であることが示唆された。

また、貧酸素水塊に対するモデル性能を向上させ、水質モデルにおけるモデルパラメータを最適化するために、大阪湾において DN-4DVar データ同化を実施した。酸素生産・消費、水温、塩分、生化学的状態に関するパラメータを 24 時間ごとに調整したところ、貧酸素水塊の厚さの水平分布は観測結果と最もよく一致した。特にデータ同化によって、一次生産と有機物の無機化に関連するパラメータが大幅に変更された。植物プランクトンの成長および分解過程にかなりの不確実性があることを浮き彫りにし、これらのパラメータの慎重な設定とキャリブレーションの必要性が示された。

さらに、DN-4DVar によって時空間的に観測値に整合する初期場を推定した結果、現行の水質モデルでは植物プランクトンの一次生産と酸素生成を関連付けるパラメータに空間分布が現れること、また、その空間分布と一次生産を律速する栄養塩濃度との間には相関関係が認められた。言い換えれば、酸素生成に栄養制限を考慮しているモデルに矛盾があることを示しており、植物プランクトンによる酸素生成 (光合成) 過程における栄養塩制限を削除することにより、DO の再現性改善効果が期待されることが示唆された。また、細胞内栄養貯蔵モデル理論の有効性を支持する結果である。このように、データ同化手法を用い、実観測値を用いた再現性低下要因解析を行うことによって、モデル改良の方向性までも提案することが可能であることを示した。

(5) 河川流入および藻類の繁茂が湖の貧酸素水塊に及ぼす影響

出水による河川からの流量および負荷量の増加が諏訪湖の貧酸素水塊の体積に及ぼす影響を解析した。その結果、2008 年は出水によって湖沼水塊の 13% に相当する貧酸素水塊が減少したと見積もられた。これは、河川水温が湖沼の表層水温より低く、酸素を多く含む多量の河川水が中層以深に流入したことで、貧酸素水塊の減少を助けたことによると考えられる。また、出水後、流入負荷の増加により、植物プランクトン量および植物プランクトンの呼吸による酸素消費量が増加していた。特に、中層以深での植物プランクトンの呼吸による酸素消費が貧酸素水塊の拡大に影響を及ぼしていることが示唆された。

さらに、水草の存在が諏訪湖内の流動と貧酸素水塊に与える物理的影響を評価した。2008 年の再現計算である水草ありのケースで貧酸素水塊が最も拡大したとき、湖沼水塊の 34% が貧酸素化し、これは水草なしの計算ケースと比較して約 1.2 倍増加していた。貧酸素水塊が最も拡大していた 8 月上旬、水草の存在によ

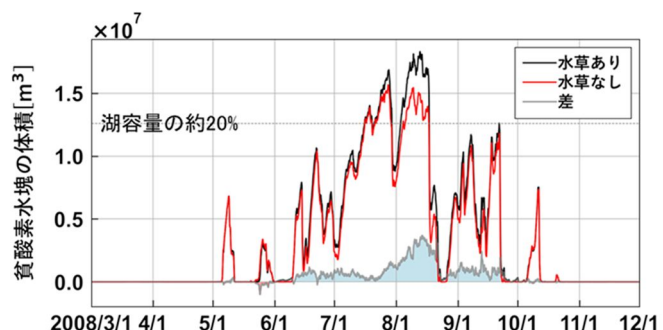


図-1 水草ありと水草なしの貧酸素水塊の体積の比較

る貧酸素水塊の影響範囲は水草帯とその周辺部に限られていたが、貧酸素水塊が縮小中の 8 月下旬、水草の存在による貧酸素水塊の影響範囲は湖心に及んだ。水草の繁茂により風の吹送距離が短くなり、表層流速が低下し、混合が弱化したためと考えられた。

(6) 大気モデルの活用による湖沼における貧酸素水塊の再現

霞ヶ浦において、空間解像度 5 km、時間解像度 6 時間の再解析データ GPV-MSM を適用した場合と比べ、大気モデルを用いて作成した 1 km、1 時間解像度の風況を与えて水質シミュレーションをした場合、表底層共に水温の再現性の向上が見られた。その要因としては 5 km 以下の規模で発生している海陸風や湖陸風の分布が表現できるようになったことが考えられた。また、SCALE で得られた風場を用いて水質計算を実施した結果、DO 濃度の概ねの季節変動、夏季の底層の貧酸素化を再現することができた。しかし、連続観測値と比較を行うと、貧酸素水塊が発生するタイミングは概ね捉えているものの、貧酸素状態にある時間が計算値では短い傾向にあった。

諏訪湖においても大気モデルを利用して、流動水質シミュレーションを実施した。大気モデルの活用により、諏訪湖特有の湖上風の空間非一様性を表現することができた。観測風を一樣に与えるケースと比べ、非一樣風を与えた場合、表層に時計回りの水平循環流が生じやすい傾向を示した。表底層の水温差は非一樣風条件の方が大きい傾向にあり、これは非一樣風の入力に伴い、水温躍層が安定して表現されたためだと考えられる。また、貧酸素水塊の発生期間に大きな違いは見られなかったものの、水温成層の強化に伴い、底層における貧酸素水塊は広くかつ長く存在していた。

(7) 大阪湾の将来水温における貧酸素水塊の予測

将来においては、現在に比べると、早期の 6 月から貧酸素水塊体積が大きくなると予測された。特に、湾奥部の DO が $1 \text{ mgO}_2/\text{L}$ 以下となる面積の拡大が認められた。また、将来ケースの流動構造の変化は小さく、湾西部の飽和状態となっている海水が湾東部の成層海域下層に水平移流によって DO が供給される循環構造は現在ケースと同様であった。将来は現況と比べて鉛直方向への貧酸素水塊発達ペースが速く、その要因は一次生産の増加、および水温上昇に伴う無機化による DO 消費量の増加、また、溶存可能酸素量の低下であると考えられた。将来気候では湾奥中層における貧酸素水塊の急激な拡大や盛夏の体積の縮小が起き、指標として、貧酸素水塊の面積より、体積を重視すべきことが示唆された。

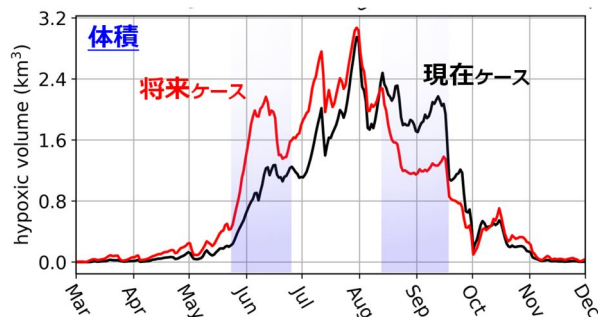


図-2 現在ケースおよび将来ケースにおける貧酸素水塊体積の季節変化

(8) 霞ヶ浦における将来気候における貧酸素状態の変化

将来気候の作成には、過去期間と将来期間を連続的に計算している 150 年連続実験データセット（気象庁気象研究所）を使用した。現在気候を 10 年分の観測値との比較を通じてバイアス補正を行い、この補正を援用して、将来気候を作成した。2090 年の風速は 2010~2020 年の平均風速に対して約 0.08 m/s の減少であり、特につくばでは 5 月や 8 月の減少量が大きく、夏季の水温成層に対して影響を与えることが伺える。また将来においては、現在環境に比べ 2 m/s 前後風の発生回数は増加し、一方で 2.5 m/s 以上の回数が全て減少している。特に、混合に寄与する 5 m/s 前後の風速の発生回数が減少しており、混合頻度に影響を与えることが予想される。また、この他、流入河川水温については観測結果から気温 1°C の上昇に対し、河川水温が 0.97°C 上昇する関係を得るなどして、将来気候における気象および境界条件を与え、将来気候における貧酸素水塊および水質の推定を行った。気温や流入河川水温の上昇によって湖内の水温は全域で上昇、特に夏季は全層で 30°C を上回る時間が大幅に増加することが示唆された。また、底層の DO 濃度は減少傾向を示し、貧酸素水塊の発生時間の大幅な増加が見られた。貧酸素水塊の発生時間、体積が増加した要因の最たるものは気温、水温の上昇に伴う植物プランクトンの増加であった。光合成により表層の DO 濃度は 2019 年に比べて上昇したものの、透明度低下による成層の強化や、有機物量増加に伴う酸素消費量の増加で底層の DO 濃度が低下したと考えられる。風の将来変化は貧酸素水塊を深刻化させる方向に作用することが示唆され、現在環境よりも成層の解消に長い時間を要するようになる可能性がある。透明度低下による成層強化と風速低下によって水温が全層で一樣になる時間が短くなり、底層の DO 濃度が回復しきる前に翌日の成層が発生し貧酸素状態となることが何度か確認され、貧酸素水塊の拡大に無視できない影響を与えていると考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 永野隆紀, 入江政安	4. 巻 80(17)
2. 論文標題 4次元変分データ同化法を用いた植物プランクトン増殖モデル改良方針の検討	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 土木学会論文集	6. 最初と最後の頁 24-17230
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscej.24-17230	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 Takanori Nagano ; Masayasu Irie	4. 巻 -
2. 論文標題 Exploring the effects of modifying stratification reality and biogeochemical model parameters on hypoxia using DN-4DVar	5. 発行年 2025年
3. 雑誌名 Proceedings of IAHR-APD 2024 (in press)	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) 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 -

1. 著者名 Takanori Nagano, Masayasu Irie and John Wells	4. 巻 -
2. 論文標題 Development of a reliability evaluation system for dissolved oxygen monitoring data using machine learning	5. 発行年 2025年
3. 雑誌名 Hydrological Research Letters (Accepted)	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) なし	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 出口博之, 鹿島千尋, 中谷祐介	4. 巻 80
2. 論文標題 地形改変による波浪場の変化が閉鎖性内湾の流動・水質に及ぼす影響	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 土木学会論文集	6. 最初と最後の頁 24-17233
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscej.24-17233	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 長谷川 菜月, 入江 政安, 永野 隆紀, 大江 里奈, 永井 椋, 宮原 裕一, 豊田 政史, 矢島 啓	4. 巻 81
2. 論文標題 風の非一様性が諏訪湖の流動・水質に及ぼす影響に関する数値解析	5. 発行年 2025年
3. 雑誌名 土木学会論文集	6. 最初と最後の頁 24-16024
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscej.24-16024	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 永野 隆紀, 入江 政安, 東 博紀	4. 巻 78
2. 論文標題 気候変動に伴う水温上昇が大阪湾の貧酸素水塊と酸素循環におよぼす影響評価	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 土木学会論文集B2(海岸工学)	6. 最初と最後の頁 I_841 ~ I_846
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/kaigan.78.2_I_841	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 大江 里奈, 永野 隆紀, 入江 政安, 霜島 孝一	4. 巻 78
2. 論文標題 植物プランクトンの酸素消費に関する実験と表層DOの日変動の再現計算	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 土木学会論文集B2(海岸工学)	6. 最初と最後の頁 I_787 ~ I_792
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/kaigan.78.2_I_787	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 Yueyi Wang, Masayasu Irie, Yusuke Nakatani, Ayato Kohzu, Takao Ouchi, Miyuki Yuzawa	4. 巻 Online
2. 論文標題 Numerical Simulation To Analyze The Effect Of Diurnal Stratification On Bottom Hypoxia Development And Recovery In Lake Kasumigaura, Japan	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 39th IAHR World Congress (Granada, 2022)	6. 最初と最後の頁 ID 20889
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3850/IAHR-39WC2521711920221012	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 Masayasu Irie, Masaki Okuda, Yuichi Miyabara, Yusuke Nakatani, Masashi Toyota	4. 巻 Online
2. 論文標題 Influence of boundary conditions on modeling water temperature and quality in a shallow stratified lake (Lake Suwa, Japan)	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 39th IAHR World Congress (Granada, 2022)	6. 最初と最後の頁 ID 20903
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3850/IAHR-39WC2521711920221509	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 入江政安, 永野隆紀, 霜鳥孝一	4. 巻 77
2. 論文標題 密閉系での酸素消費実験とデータ同化を用いた大阪湾の貧酸素水塊規模の推計	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 土木学会論文集 B2 (海岸工学)	6. 最初と最後の頁 I_853-I_858
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/kaigan.77.2_I_853	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 奥田雅貴, 入江政安, 中谷祐介, 宮原裕一, 豊田政史	4. 巻 77
2. 論文標題 底面熱輸送を考慮した諏訪湖の弱い水温成層形成に関するモデル解析	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 土木学会論文集B1 (水工学)	6. 最初と最後の頁 I_1081-I_1086
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejhe.77.2_I_1081	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19件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 Koichi Shimotori, Masayasu Irie
2. 発表標題 Dynamics of dissolved oxygen and dissolved organic matter in the submerged aquatic vegetation zone in Lake Biwa, Japan
3. 学会等名 20th World Lake Conference (国際学会)
4. 発表年 2025年

1. 発表者名 Masayasu Irie, Ryo Nagai, Ayato Kohzu, Hironori Higashi
2. 発表標題 Application of atmospheric, hydrodynamic, and biogeochemical models to enhance simulation accuracy of water temperature and hypoxia in a shallow lake (Kasumigaura, Japan)
3. 学会等名 IAHR-APD 2024 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 入江政安, 大江里奈, 宮原裕一, 豊田政史
2. 発表標題 諏訪湖におけるヒシ除去の水質への物理的影響評価
3. 学会等名 第27回日本水環境学会シンポジウム
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 長谷川菜月, 大江里奈, 永井椋, 永野隆紀, 豊田政史, 入江政安
2. 発表標題 風の非一様性が諏訪湖の流動に及ぼす影響の解析
3. 学会等名 2024年度関西土木工学交流発表会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 長谷川菜月, 入江政安
2. 発表標題 大気モデルおよび3次元流動水質モデルを用いた諏訪湖の貧酸素水塊シミュレーション
3. 学会等名 諏訪湖研究連絡会
4. 発表年 2025年

1. 発表者名 岡田輝久, 野田晃平, 宮崎奈穂, 比嘉紘士, 今村正裕
2. 発表標題 水中カメラによる東京湾の中層白濁層の実態調査
3. 学会等名 第59回日本水環境学会年会
4. 発表年 2025年

1. 発表者名 野田晃平, 岡田輝久, 宮崎奈穂, 比嘉紘士, 今村正裕
2. 発表標題 東京湾の貧酸素水塊と水質特性に関する通年調査 (2023-2024)
3. 学会等名 第59回日本水環境学会年会
4. 発表年 2025年

1. 発表者名 岡田輝久
2. 発表標題 4次元アンサンブル変分法による内湾の非定常境界条件の推定ー水質4次元再解析に向けてー
3. 学会等名 第72回海岸工学講演会
4. 発表年 2025年

1. 発表者名 Takanori Nagano, Masayasu Irie
2. 発表標題 Exploring the effects of modifying stratification reality and biogeochemical model parameters on hypoxia using DN-4DVar
3. 学会等名 IAHR-APD 2024 (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Masayasu Irie, Ryo Nagai, Ayato Kohzu, Hironori Higashi
2. 発表標題 Application of atmospheric, hydrodynamic, and biogeochemical models to enhance simulation accuracy of water temperature and hypoxia in a shallow lake (Kasumigaura, Japan)
3. 学会等名 IAHR-APD 2024 (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 永野隆紀, 入江政安
2. 発表標題 4次元変分データ同化法を用いた植物プランクトン増殖モデル改良方針の検討
3. 学会等名 土木学会海岸工学講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 霜鳥孝一, 入江政安, 和田佳大, 永井椋
2. 発表標題 琵琶湖南湖の沈水植物帯における溶存酸素と溶存有機物の動態
3. 学会等名 日本水環境学会年会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 和田佳大, 永井椋, 永野隆紀, 入江政安, 中谷祐介, 霜鳥孝一
2. 発表標題 琵琶湖南湖のD0分布に水草が及ぼす影響に関する2022年調査
3. 学会等名 土木学会関西支部2023年度関西土木工学交流発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yueyi Wang, Masayasu Irie, Yusuke Nakatani, Ayato Kohzu, Takao Ouchi, Miyuki Yuzawa
2. 発表標題 Numerical Simulation To Analyze The Effect Of Diurnal Stratification On Bottom Hypoxia Development And Recovery In Lake Kasumigaura, Japan
3. 学会等名 The 39th IAHR World Congress (Granada, 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masayasu Irie, Masaki Okuda, Yuichi Miyabara, Yusuke Nakatani, Masashi Toyota
2. 発表標題 Influence of boundary conditions on modeling water temperature and quality in a shallow stratified lake (Lake Suwa, Japan)
3. 学会等名 The 39th IAHR World Congress (Granada, 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takanori Nagano, Masayasu Irie
2. 発表標題 Biogeochemical state estimation by four-dimensional variational data assimilation using dual numbers in Osaka Bay
3. 学会等名 Coastal and Estuarine Research Federation the 26th Annual Conference (CERF2021), Estuarine Coastal Modeling 16 (ECM16) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 永野隆紀, 入江政安
2. 発表標題 4次元変分法による密度修正が水質予測精度に及ぼす影響
3. 学会等名 令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 永井 椋, Yueyi Wang, 奥田雅貴, 入江政安
2. 発表標題 霞ヶ浦における水温成層の形成が溶存酸素濃度低下に及ぼす影響に関する基礎検討
3. 学会等名 2022年度土木学会関西支部年次学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大江里奈, 永野隆紀, 霜鳥孝一, 入江政安
2. 発表標題 植物プランクトンによる酸素消費に関する室内実験と数値解析
3. 学会等名 2022年度土木学会関西支部年次学術講演会
4. 発表年 2022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	中谷 祐介 (Nakatani Yusuke) (20635164)	大阪大学・大学院工学研究科・准教授 (14401)	
研究分担者	岡田 輝久 (Okada Teruhisa) (40817962)	一般財団法人電力中央研究所・サステナブルシステム研究本部・主任研究員 (82641)	
研究分担者	霜鳥 孝一 (Shimotori Kouichi) (50593688)	国立研究開発法人国立環境研究所・地域環境保全領域・主任研究員 (82101)	

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