

課題名	D-0804 温暖化が大型淡水湖の循環と生態系に及ぼす影響評価に関する研究
課題代表者名	永田 俊（東京大学大気海洋研究所 海洋化学部門 生元素動態分野）
研究実施期間	平成20～22年度
累計予算額	116,870千円（うち22年度 36,270千円） 予算額は、間接経費を含む。
研究体制	<p>（1）琵琶湖の全循環と生態系モデリングに関する研究 東京大学生産技術研究所</p> <p>（2）乱流・混合過程に伴う酸素フラックス量の定量化に関する研究 東京海洋大学海洋科学部</p> <p>（3）温暖化が物質循環と水質に及ぼす影響評価に関する研究 東京大学大気海洋研究所</p> <p>（4）温暖化が底生動物と魚類に及ぼす影響評価に関する研究 滋賀県琵琶湖環境科学研究センター 研究協力機関 滋賀大学教育学部、滋賀県立大学環境科学部、お茶の水女子大学人間文化創成科学研究科</p> <p>（5）温暖化が浮遊性生物相互作用に及ぼす影響評価に関する研究 滋賀県立大学環境科学部</p> <p>（6）安定同位体比を用いた生態系変動評価と予測に関する研究 京都大学生態学研究センター</p>
研究概要	<p>1. はじめに</p> <p>我が国最大の淡水湖である琵琶湖は、世界有数の古代型湖沼であり、その形成時期は約400万年前と推定されている。大きく発達した沖合や深底部（最大水深104 m）と、それを取り囲む複雑な湖岸は、広大で豊かな生息環境を提供し、多様な生物の共存を可能にしている。58種の固有種を含め、1200種もの動植物種が記載されている湖は、我が国はいうにおよばず世界的にも貴重であり、まさに、淡水生物多様性のホットスポットとすることができる。近年、この多様な生物群集にとっての「生命維持装置」ともいうべき、冬季「全循環」が、温暖化の影響によって不活性化し始めている可能性が指摘されている。全循環とは、冬季に湖面や湖岸の冷却によって冷やされた高密度の表層水が沈み込むことで湖水の上下混合（対流）が起こり、それによって湖の全深度に溶存酸素が供給される物理現象である。温暖化（冷却不足）による全循環の欠損や不全は、深底部の低酸素化や無酸素化をひきおこし、そこに生息する生物の絶滅につながる危険がある。また、還元化した湖底堆積物からの栄養塩類の溶出を介して急激な水質悪化や有毒藻類の発生の引き金となる可能性もある。1400万人の飲料水を供給し、わが国の全淡水資源の34%もの水量を湛える巨大な水がめである琵琶湖の将来を、科学的な根拠に基づいて予測することは喫緊の課題である。</p> <p>温暖化が生態系や水質に与える悪影響は、世界の湖において顕在化している（IPCC第四次報告書）。中央ヨーロッパの大型湖沼では、気候変動と関連した水温上昇や、全循環パターンの変動が観測されている。また、2003年の熱波襲来に際して湖の循環が停滞し、低酸素化が引き起こされたという報告がある。中国の雲南省にある深湖フーシェン湖では、近年になって底層の無酸素化が進んでいることが懸念されている。また、アフリカのタンガニーカ湖では、温暖化による水温成層の強化が、鉛直混合による深層から表層への栄養塩の供給を低下させ、それが、一次生産と魚類の生産の著しい低下につながっていると報告されている。つまり、異常気象や温暖化が大型湖の生態系に深刻な打撃を与え、水質悪化がおこる可能性は、世界的に大きな懸念事項になりはじめており、これは深刻な地球規模の環境問題としてとらえる必要がある。琵琶湖に出現する問題群と適応策の可能性を整理・一般化し、その成果を発信することは、水資源管理に係る政策実現のうえで重要な意義を有する。</p>

2. 研究目的

本研究では、6研究機関に所属する物理、化学、生物の専門家が学際的な連携体制を組むことで、以下の3つの全体目標を達成することを目的とした。

目標1：琵琶湖における総合的な観測や実験的な解析を実施することで、温暖化が、生態系や水質に及ぼす影響を評価するのに必要な新たな科学的知見を得る。具体的には、琵琶湖の流動場や乱流の詳細な把握と酸素の鉛直混合フラックスの評価（サブテーマ2）、琵琶湖堆積物からの栄養塩フラックスと深水層における溶存酸素消費過程の解明（サブテーマ3）、琵琶湖底生動物群集の生息環境の把握と低酸素耐性の実験的検証（サブテーマ4）、沖合一次生産速度と琵琶湖深層への粒子状物質の沈降フラックスの季節変動の詳細な解析（サブテーマ5）、各種安定同位体を用いた酸素と窒素の動態解析及びイサザ個体群の経年変動の要因解析と温暖化影響評価（サブテーマ6）を行う。

目標2：目標1で得られた知見を統合化することで、高精度な3次元流れ場－生態系結合数値モデルを構築する（サブテーマ1）。数値実験を行い、モデルの再現性を検証するとともに、琵琶湖の生態系と水質が今後100年間にどのような変化をするのかについての評価を行う。

目標3：以上の知見に基づき、予想される被害の緩和策や適応策の構築に資する基盤情報を整備する。

3. 研究の方法

（1）琵琶湖の全循環と生態系モデリングに関する研究

深水湖を対象とした3次元流れ場－生態系結合数値モデルを開発した。流れ場サブモデルは、静水圧近似とブジネスク近似を仮定し、デカルト座標系の3軸方向の運動方程式、連続の式、水温の移流・拡散方程式、状態方程式から構成され、3方向の流速、圧力、水温、密度の時空間変化を解いた。生態系サブモデルでは、植物プランクトン、リン、窒素のセルクオタ、動物プランクトン、懸濁態有機物、溶存態有機物、無機態リン、無機態窒素、溶存酸素を状態変数とし、状態変数間のフラックスをいくつかの数式とパラメータを用いて定式化した。これらの物質の時空間変化は、化学・生物学的な変化を組み込んだ後、流れ場サブモデルにより得られる物理パラメータによる移流・拡散方程式を用いて解いた。数値モデルを琵琶湖に適用し、過去の観測結果や他のサブテーマで実施された観測の結果を用いて、数値モデルの校正と検証を行った。また、比較研究として、1980年代に全循環が停止した池田湖を取り上げ、数値モデルを池田湖に適用した数値シミュレーションも実施した。さらに、今後100年間のIPCCの気候変動シナリオに基づき、琵琶湖の将来の水質、生態系を予測した。また、気候変動が琵琶湖の水質、生態系に及ぼす影響を緩和するための方策を提示し、その効果を数値シミュレーションによって予測した。

（2）乱流・混合過程に伴う酸素フラックス量の定量化に関する研究

琵琶湖北湖を対象とし、夏季の成層状態において、微細構造観測プロファイラー、多周波音響測定装置、レーザー式粒径計測装置、及びホログラフィックイメージカメラなどを用いた24時間観測を実施し、表層及び亜表層における水塊構造及び混合状態と生物指標（溶存酸素、蛍光強度及び音響の体積散乱強度）などを測定した。また、冬季においては、係留系観測を実施し、水温、溶存酸素、流速の時系列データを得た。湖底の低酸素状態の解消策として、冷水を80 m深層から注入する方法の有効性を、数値モデルを用いて検討した。

（3）温暖化が物質循環と水質に及ぼす影響評価に関する研究

琵琶湖堆積物コアを用いた培養実験を行い、堆積物から直上水へのリン及びその他の各種栄養塩類の溶出フラックスを測定した。実験は、直上水が有酸素の条件下（現在の琵琶湖の状態を模す）と無酸素の条件下（温暖化が進行した状態を模す）で行った。有酸素条件の実験で得られた結果を、成層期の琵琶湖深水層におけるリン蓄積速度と比較し、現場でのリンの溶出が実験的に再現されているかどうかの検証を行った。無酸素条件下におけるリン溶出フラックスのデータを用い、琵琶湖が無酸素化した場合に、内部負荷が外部負荷と比較してどの程度の規模になるのかを定量的に評価した。また、深水層における溶存酸素の消費過程に関する鉛直1次元モデルであるリビングストーン・インボデン・モデルを温暖化影響評価の汎用ツールとして用いる方法論を検討した。具体的には、木崎湖の長期データを用いて、深水層水温、平均クロロフィルa量、水塊の安定性の指標であるシュミット指数と、水中および湖底酸素消費との関連を調べ、温暖化と富栄養化が深水層での酸素消費に与える影響を評価した。得られた関係式から、深水層における溶存酸素動態に関する汎用モデルの構築を行った。

(4) 温暖化が底生動物と魚類に及ぼす影響評価に関する研究

自律型潜水ロボット「淡探」を用いて、琵琶湖深底部に生息する生物の分布状況と水温および溶存酸素(DO)濃度との関連を調べた。主な調査対象は、琵琶湖固有種であるイサザとした。イサザはハゼ科の魚で、絶滅危惧IA類に指定されており、近年急激に漁獲量が減少している。自律型潜水ロボット「淡探」に内蔵したデジタルカメラで浅い水域から90 mを超える水域の湖底の写真を撮り、得られた画像からイサザの生死の判別を行った。また、同時に計測した水温およびDO濃度との比較を行った。また、湖底に生息する底生生物(イサザおよびアナンデルヨコエビ)を採取し、低溶存酸素濃度に対する応答を実験的に調べた。具体的には、底生生物の活動に影響を及ぼす溶存酸素濃度の閾値(P_c値)を求めた。

(5) 温暖化が浮遊性生物相互作用に及ぼす影響評価に関する研究

琵琶湖における沈降フラックスと植物プランクトン一次生産が湖水の流動および気象の変化にどのように応答しているのかを明らかにするために、2008年6月から2009年11月までのおよそ18ヶ月間に渡って、琵琶湖北湖第1湖盆に係留系を設置し、有機物の沈降フラックスと光環境および植物プランクトン生物量の変動について詳細に調査した。これと平行して、月に一度、光合成-光曲線を求めることにより、植物プランクトンの一次生産量を見積もった。またセストン(懸濁物質)の生元素比および炭素同位体比の鉛直構造を調べた。更に、湖底へ沈降する有機物の水平分布を詳細に把握するために、湖底表層堆積物(0~1 cm)中の有機物含有量について調べた。

(6) 安定同位体比を用いた生態系変動評価と予測に関する研究

安定同位体比を用い、琵琶湖における溶存酸素の消費過程を推定するための新たな方法を検討した。具体的には、琵琶湖湖水および湖底堆積物を培養することにより、水柱の酸素消費における同位体分別係数と堆積物の酸素消費における同位体分別係数を実測した。得られたパラメータを用いて、琵琶湖における溶存酸素の消失機構について検討した。また、堆積物コアを用いた実験的解析と安定同位体比の測定を組み合わせることで、琵琶湖の堆積物-湖水境界層における窒素動態とその支配要因を詳細に解析した。さらに、底層の貧酸素化が深刻化しつつある琵琶湖沖合生態系のキーストン種であるイサザの長期個体群変動メカニズムの解明を進め、気候変動による固有種イサザの個体群絶滅リスクの評価を行った。

4. 結果及び考察

(1) 琵琶湖の全循環と生態系モデリングに関する研究

全循環の発生に関わる表層と底層の水温変動の再現性向上に焦点を当て、境界条件の精緻化等を進めた結果、温暖化シナリオのもとで、1)琵琶湖では成層期の底層の水温上昇率が表層の水温上昇率を上回り、全循環が継続して発生すること、2)池田湖では表層の水温上昇率が底層の水温上昇率を上回り、全循環が停止することを示した。琵琶湖と池田湖の予測結果の比較から以下の考察がなされた。琵琶湖では、今後の気温上昇により表層平均水温が底層平均水温より上昇しても、成層期に底層水温が上昇し、循環期に下降する季節変動を示すため、全循環が継続して発生する。一方、湖底の勾配が大きい池田湖では、吹送流、密度流、内部波などの3次元物理現象が発達しにくく、底層への熱伝達率が減少し、底層の水温上昇率が抑制される。次に、生態系サブモデルでは、無機態リン濃度が著しく低いにもかかわらず植物プランクトンのブルームが発生する琵琶湖の特性を考慮し、栄養塩のセルクオタをモデルに組み込んだ。また、他のサブテーマによる観測結果を用いて、有機物の沈降速度、栄養塩の溶出速度、酸素消費速度などの主要な速度変数を直接的に定式化し、観測、実験で得られたパラメータを与えた。その結果、深水湖の季節変動および経年変動を想定した予測精度の範囲内で再現できた。今後100年間で気温が上昇すると仮定した場合は、水温の上昇により酸素の溶解度が減少し、年最低溶存酸素濃度が低下した。また、底層での溶存酸素濃度の低下により栄養塩が溶出し、富栄養化によって湖底の溶存酸素濃度がさらに低下した。溶存酸素濃度の低下を緩和する有効な手法として、汚濁物質負荷量の削減による酸素消費の低減、や酸素供給を取り上げ、その効果を数値シミュレーションによって評価した。その結果、汚濁物質負荷量の削減により溶存酸素濃度の低下を緩和できること、酸素を供給する場合は成層期に集中して行うのが効果的であることが示された。

(2) 乱流・混合過程に伴う酸素フラックス量の定量化に関する研究

琵琶湖の夏季の成層期には、表層及び亜表層に強い乱流層があることが確認できた。また、これらの層の間には乱流混合がほとんど発生しない成層の強い層が存在することが示された。この乱流の弱い層は鉛直フラックスを伴っておらず、観測期間中の気象条件のもとでは表層を通して中・底層への酸素の供給はないことが明らかとなった。この混合が弱い層の中には、酸素の局所極大層と

局所極小層が存在していた。また、クロロフィルの極大層は水温勾配が急激に変化する躍層内に存在することが観測により確認された。更に、同一層において等価球半径 0.31 mmの動物プランクトンや粒径0.3 mmの粒子が大量に存在することが明らかとなった。冬季の係留系データを基に、湖が冷却していく状態を解析した結果、表面冷却による対流現象と湖底面に沿って流下する密度流を捉えることができた。湖は全体が一挙に冷やされるのではなくて、対流と密度流が間欠的に発生することを繰り返しながら冷却していくことが明らかになった。さらに、北湖東岸の緩斜面から得られたデータによれば、冷却の過程で冷水・低酸素・低クロロフィルの層が波動の状態が存在することも確認できた。温暖化によって引き起こされる可能性がある湖底の低酸素状態の解消策として、冷水を注入する方法を数値モデルにより検討した。その結果、 $10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ の河川水を水深80 mで放流することが有効な手段のひとつになりうると結論付けた。

(3) 温暖化が物質循環と水質に及ぼす影響評価に関する研究

堆積物直上水が有酸素の条件のもとでは、可溶性反応リン (SRP) の溶出フラックスが $40.5 \mu\text{mole m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ と見積もられた。この値は、琵琶湖の深水層におけるSRP濃度の季節変動から推定されるSRPの溶出フラックスと整合的であった。一方、堆積物直上水を無酸素条件にした場合は、約7日間の培養で堆積物上部の酸化還元電位が大きく減少し、それに伴い、SRPや二価鉄の溶出が顕著にみられた。この条件下でのSRPの溶出フラックスは $79 \mu\text{mole m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ と推定され、有酸素条件で得られた値の約2倍であった。深水層の無酸素化に伴うリンの内部負荷が生態系に及ぼす影響を評価するために、50~90 m以深の水層が無酸素化した場合に、リンの溶出フラックスがどの程度上昇するかを試算した。その結果、深水層が1カ月間にわたって無酸素化した場合のリンの溶出量は1.1~10.9トン、一方、12カ月間にわたって無酸素化した場合には、この値は3.1~29 トンと見積もられた。無酸素化が12カ月間続いた場合に増加するリンの内部負荷量は、外部負荷量の3~29%に相当した。このことから、温暖化に伴う深水層の無酸素化が、リンの内部負荷の増大を通して、富栄養化を促進する可能性が示唆された。一方、リビングストン・インボデン・モデルを用いて、琵琶湖と木崎湖における深水層の溶存酸素データを解析した結果、水中と湖底における酸素消費が、それぞれ異なる要因に支配されていることが示された。木崎湖データの解析結果では、水中における酸素消費は当年の深水層の水温と湖の生産性と強く関連した。汎用モデルによる予測の結果、琵琶湖において深水層の水温が上昇すると、貧酸素水塊の占める割合が大きく増加するという結果が得られた。この予測結果は、サブテーマ1による3次元数値モデルの予測結果と整合的であり、本研究で検討を進めた汎用モデルが温暖化影響評価において有用であることが示された。

(4) 温暖化が底生動物と魚類に及ぼす影響評価に関する研究

2008年12月、2009年12月、2010年4月の水中ロボットによる湖底調査に2002年12月以降の調査の結果を加えて、イサザの生存条件を制限する水温と溶存酸素濃度を調べた。その結果、生きているイサザが確認されるのは溶存酸素濃度が 3 mg L^{-1} 以上で、 $2\sim 3 \text{ mg L}^{-1}$ の濃度では生きたイサザと死んだイサザが混在し、 2 mg L^{-1} 以下では、死んだイサザしか確認できないことが明らかになった。琵琶湖で採集されたイサザを用いた飼育実験の結果、活動に影響を及ぼす溶存酸素濃度の閾値 (Pc値) は、最低で 1.06 mg L^{-1} 、最高で 2.66 mg L^{-1} であり、平均値は 1.72 mg L^{-1} 、その分散は0.49であった。一方、アナンデルヨコエビについては、Pc値は 1.03 mg L^{-1} と推定された。以上から、イサザはアナンデルヨコエビに比べてより低酸素化の影響を受けやすいものと推察された。また、湖底の中程度の低酸素化は、イサザの減少とアナンデルヨコエビの増加を引き起こす要因のひとつとなることが示唆された。

(5) 温暖化が浮遊性生物相互作用に及ぼす影響評価に関する研究

乾燥重量で表した全沈降フラックスは、実験期間を通して大きく変動し、30 mで $0.1\sim 5 \text{ g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 、85 mで $0.1\sim 4 \text{ g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ だった。多くの場合、85 mでの値が30 mの値を2~3倍上回り、湖底において水平方向の物質供給過程が存在する可能性が示唆された。これに対して炭素フラックスは、30 mでも85 mでも全フラックスの3.8~10%程度であり、実験期間を通して $10\sim 400 \text{ mg C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ で変動した。一次生産は、 $25\sim 930 \text{ mg C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ であり、4月以降、急激に上昇した後、8月までは何度か増減を繰り返すが、以後は減少傾向を示した。30 mでの炭素フラックスは11月まで一次生産の4~30%程度だったが、12月以降は100%を上回った。これは、湖水の鉛直混合が30 m以深に達したためと考えられた。観測期間の8割以上の日において西北西から北北西の風が卓越しており、これらの風速と全沈降フラックスの関係を見ると、大きなピークは強風の後に認められ、30 mにおけるフラックスで特に顕著だった。年間純一次生産量は、 $96 \text{ g C m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ であり、これまでに得られた値に比べると3~7割程度低かった。一方、30 mで計算した年間炭素フラックスは、 $30 \text{ g m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ であり、これは一次生産のおよそ3割であった。沈降粒子の炭素同位体比は、30 mで

も 85 m でも 6 月下旬から 7 月上旬にかけて最も高くなり、-20%を上回った。しかし以後は減少し、10 月から翌年 3 月までの期間は-27~-25%で安定した。4 月から 5 月にかけて-30%以下に減少するものの以後は-20%まで急激に増加した。また、30 m でも 85 m でもほぼ同じ値であり、両深度へ沈降した有機炭素の起源がほぼ同じであることを示唆した。これが 7.5 m でのセストンの炭素同位体比にほぼ等しいことから考えて、湖底への有機物の沈降フラックスのほとんどが自生性有機炭素と考えられた。

(6) 安定同位体比を用いた生態系変動評価と予測に関する研究

実験の結果、水中および堆積物中での呼吸による酸素の同位体分別係数として、それぞれ、0.982、および0.997という値が得られた。この値を用いて琵琶湖深水層の酸素消費過程を解析したところ、全体の酸素消費に対して、水柱における酸素消費が約40%、湖底堆積物による酸素消費が約60%寄与しているものと計算された。つまり、琵琶湖において湖底堆積物の酸素消費が、琵琶湖全体の溶存酸素消費の大きな部分を占めると推察された。堆積物コアを用いた窒素動態の解析の結果、無酸素環境下では実験開始7日間で硝酸イオンはほぼ枯渇したが、アンモニウムイオンは培養35日間の平均で $354\sim 448\ \mu\text{mole m}^{-2}\ \text{day}^{-1}$ の溶出が認められた。湖底が無酸素になると、アンモニウムの活発な溶出が起こる一方で、硝化-脱窒系が機能しにくくなるため、堆積物による窒素除去能が低下し、窒素の内部負荷が加速することが示唆された。また、イサザ個体群および環境変数についての長期データを統計解析した結果、湖底酸素濃度の低下、卵成熟開始タイミングのシグナルとなる秋季の沖帯表層水温の低下時期の遅延、繁殖資源をめぐる水温特異的な競争による近縁種からの繁殖干渉などの生理・生態的影響により、イサザの個体群減少が引き起こされることが示唆された。各種温暖化シナリオの下でイサザ個体群の絶滅リスクの予備的な評価を行った結果、温暖化がイサザ個体群に悪影響を及ぼす可能性が高いことが示された。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

1) 湖の温暖化影響評価に関しては、これまで主に1次元モデルによる数値計算が手法として用いられてきたのに対し、本研究では、観測研究との連携のもとに高精度な3次元流れ場・生態系結合数値モデルを開発し、底層の溶存酸素濃度など、生物の生息にとって重要な環境変数の空間分布や季節変動を、想定した予測精度の範囲内で再現することに成功した。このような研究は国際的にもほとんど例が無く、科学的な意義は高い。

2) 今後100年間で気温が上昇すると仮定した場合、水温の上昇は酸素の溶解度を減少させるため、湖内の溶存酸素濃度が全体的に低くなり、年最低溶存酸素濃度も低下すること、さらに、底層での溶存酸素濃度の低下により栄養塩が溶出し、冬季の全循環とともに溶出した栄養塩が表層に運ばれ、一次生産量が増大することなど、水質と生態系間のフィードバックを明らかにした点は、本研究の独創的な点である。このような成果は、物理モデルと生態系モデルを複数の分野の専門家の密接な協力のもとに検討・開発したことにより初めて得られたものである。

3) 従来の研究では観測が困難であった、成層期の水温躍層の微細物理構造と生態系環境の空間異質性を、新たに開発した乱流プロファイラー、高解像度蛍光光度計、ホログラフなどを駆使することで追及し、表層から深層への酸素フラックスの評価と生物過程の関与についての新たな知見を得ることに成功した。

4) これまで知見が極めて乏しい、大型湖沼における堆積物と湖水の境界層における栄養物質の動態について、堆積物コアを用いた培養実験と精密安定同位体測定を総合的に実施することで、詳細に明らかにすることに成功した。

5) 水中ロボットを用いた先端的な湖底観測と、室内実験の結果から、琵琶湖の固有種であるイサザの低酸素耐性についての新たな知見を得た。またこの情報をもとにして、イサザへの温暖化影響の評価を行った。

6) 従来の観測では解析が困難であった、大型湖沼における気象条件と一次生産・有機物鉛直フラックスの関係について、高時間分解能の係留系観測の実施により、解析することが可能となった。

(2) 環境政策への貢献

1) 本研究の代表者は、滋賀県総合保全学術委員会の委員として、滋賀県の「新マザーレーク 21 計画」の策定のための議論において、温暖化影響の可能性を踏まえた琵琶湖の水質・生態系監視の強化の必要性を提言し、計画の作成に貢献した。

2) 全サブテーマの協力のもとに、本研究の成果を統合化し、①世界および我が国の湖沼における温暖化影響の現状、②湖沼物理過程の変動メカニズム、③湖沼生態系と物質循環システムの変動メカニズム、④数値モデルによる将来予測と湖沼管理、という4つのテーマに即して、研究の現状、課題、将来展望をまとめた（京都大学学術出版会より平成24年2月に出版予定）。本書は、湖沼に対する温暖化影響の可能性を物理的、化学的、生物学的な根拠に基づいて総合的に議論した初めての成書であり、今後の、環境政策の検討や研究の推進のための基礎的な資料として広く活用されることが期待される。

3) 日本陸水学会や日本魚類学会の公開シンポジウムにおいて本研究の成果を発表し、一般国民への普及に努めた。

4) 本研究では、温暖化影響のうち、特に、底層における溶存酸素濃度の低下を緩和する手法として、①汚濁物質負荷量の削減による酸素消費の低減（サブテーマ1）、②酸素供給（サブテーマ1）、③冷水の注入（サブテーマ2）を取り上げ、その効果を数値シミュレーションによって調査した。これらの結果は、緩和策の検討における基礎資料としての活用が期待される。

6. 研究者略歴

課題代表者：永田 俊

1958年生まれ、京都大学大学院理学研究科博士課程修了、理学博士、現在、東京大学大気海洋研究所教授

研究参画者

(1) : 北澤大輔

1974年生まれ、東京大学大学院工学系研究科博士課程修了、博士（工学）
現在、東京大学生産技術研究所准教授

(2) : 山崎秀勝

1955年生まれ、テキサスA & M大学大学院工学専攻博士課程修了、Ph D.
現在、東京海洋大学海洋環境学科教授

(3) : 永田 俊（同上）

(4) : 熊谷道夫

1951年生まれ、京都大学大学院理学研究科博士後期課程修了、理学博士
現在、琵琶湖環境科学研究センター環境情報統括員

(5) : 伴修平

1959年生まれ、北海道大学水産学研究科博士後期課程単位取得退学、博士（水産学）
現在、滋賀県立大学環境生態学科教授

(6) : 陀安一郎

1969年生まれ、京都大学大学院理学研究科博士課程修了、博士（理学）
現在、京都市立大学環境学センター准教授

7. 成果発表状況（本研究課題に係る論文発表状況。）

(1) 査読付き論文

1) 熊谷道夫・石川俊之・田中リジア（2009）自律型潜水ロボット淡探（たんたん）による湖底調査．日本ロボット学会誌．27: 278-28.

2) K. Maki, C. Kim, C. Yoshimizu, I. Tayasu, T. Miyajima and T. Nagata (2009) Autochthonous origin of semi-labile dissolved organic carbon in a large monomictic lake (Lake Biwa):

carbon stable isotopic evidence. *Limnology*. 11: 143-153.

- 3) K. Yoshiyama, J.P. Mellard, E. Litchman and C.A. Klausmeier (2009) Phytoplankton competition for nutrients and light in a stratified water column. *American Naturalist*. 174: 190-203.
- 4) N. Itoh, S. Tamamura, T. Sato and M. Kumagai (2010) Elucidation of polycyclic aromatic hydrocarbon sources in the suspended matter in Lake Biwa, Japan. *Limnology*. DOI:10.1007/s10201-009-0309-1
- 5) C.H. Hsieh, K. Ishikawa, Y. Sakai, T. Ishikawa, S. Ichise, Y. Yamamoto, T.C. Kuo, H.D. Park, N. Yamamura and M. Kumagai (2010) Phytoplankton community reorganization driven by eutrophication and warming in Lake Biwa. *Aquatic Sciences*. 72: 467-483.
- 6) D. Kitazawa, M. Kumagai and N. Hasegawa (2010) Effects of internal waves on dynamics of hypoxic waters in Lake Biwa. *Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering*. 13: 30-42.
- 7) A.S. Pradeep Ram, Y. Nishimura, Y. Tomaru, K. Nagasaki and T. Nagata (2010) Seasonal variation in viral-induced mortality of bacterioplankton in the water column of a large mesotrophic lake (Lake Biwa, Japan). *Aquatic Microbial Ecology*. 58: 249-259.
- 8) H. Yamazaki, H. Honma, T. Nagai, M.J. Doubell, K. Amakasu and M. Kumagai (2010) Multilayer biological structure and mixing in the upper water column of Lake Biwa during summer 2008. *Limnology*. 11: 63-70.
- 9) C. Yoshimizu, K. Yoshiyama, I. Tayasu, T. Koitabashi and T. Nagata (2010) Vulnerability of a large monomictic lake (Lake Biwa) to warm winter event. *Limnology*. 11: 233-239.
- 10) J.P. Mellard, K. Yoshiyama, C.A. Klausmeier, and E. Litchman (2011) The vertical distribution of phytoplankton in stratified water columns. *Journal of Theoretical Biology*. 269: 6-30.

(2) 査読付論文に準ずる成果発表（「持続可能な社会・政策研究分野」の課題のみ記載可）
該当せず