

# 健全な水環境保全のための水質・湖底環境に関する調査研究

## 1. 目的

琵琶湖においては、工場等に対する排水規制や流域下水道、農業における施肥指導等、県民も含めた種々の水質改善努力により、富栄養化は抑制されつつある。しかし、琵琶湖の水環境は必ずしも健全な状態にあるとは言えない。異臭味の発生による利水障害、内部生産による水質への影響、水草異常繁茂による湖内部や沿岸域での環境悪化、二枚貝等の著しい減少をはじめとした生態系の脆弱化を招いている。

これらの諸課題に対応し、健全な琵琶湖の水環境を保全・管理・再生していくためには、水質汚濁メカニズムを明らかにし、さらに水質、水生生物、水辺地を含む水環境を総合的に把握するための新たな水質評価手法や生物資源・生態系保全の評価手法を構築し、改善手法を見出してゆく必要がある。

本研究では、琵琶湖における水質と生態系に関連性がとても深い有機物収支を把握・解析するために、定量的な評価指標として全有機炭素 (Total organic carbon, TOC) を組み込み、未解明領域である食物連鎖・微生物食物網と溶存有機物の特性解析に係るテーマを中心に研究を実施することを目標とした。加えて、湖沼水質や生態系に多大な影響を及ぼすことが懸念される底泥環境に関する研究の進展を目指した。

## 2. 研究内容と結果

本研究は二つのサブテーマから構成されている：サブテーマ 1. 有機物収支に関する研究、サブテーマ 2. 底泥環境の評価と底泥溶出に関する研究。以下に、二つのサブテーマ研究において得られた代表的な研究成果を報告する。

### 【サブテーマ 1. 有機物収支に関する研究】

#### (1) 琵琶湖南湖における溶存有機物 (Dissolved organic matter, DOM) の分子サイズ分布

DOM の分子サイズは DOM の特性や反応性 (生物利用性、分解、収着、凝集沈殿、錯化等) と密接に関係すると報告されている (Benner & Amon 2015)。そこで、国立環境研究所と島津製作所により開発された DOM の分子サイズ測定装置 (サイズ排除クロマトグラフィー) を用いて、琵琶湖南湖において、湖水の DOM の分子サイズ測定を行った (図 1(a), 1(b))。琵琶湖南湖全域の 18 地点において (図 2(a))、2018 年度毎月採水を行った。DOM は、季節によって多少の変動はあるものの、南湖全域で分子量約 10~11 万ダルトン (Da) の高分子画分 (植物プランクトンの光合成産物等、微生物が利用しやすい成分) と分子量 1500~2000Da 程度の低分子画分 (細菌の代謝産物等、微生物が利用しにくい成分) から成ることが明らかとなった (図 2(b))。各 DOM 画分に含まれる溶存有機炭素 (Dissolved organic carbon, DOC) 濃度を測定したところ、高分子 DOM は夏季に増加傾向を示し、7 月に最大となった。この理由としては、夏季に植物プランクトン由来の光合成産物が増加したことが挙げられる。本研究結果から、琵琶湖南湖では、夏季に高分子 DOM の割合が高まり水中の微生物活動が活性化していると推察された。

(a)



(b)

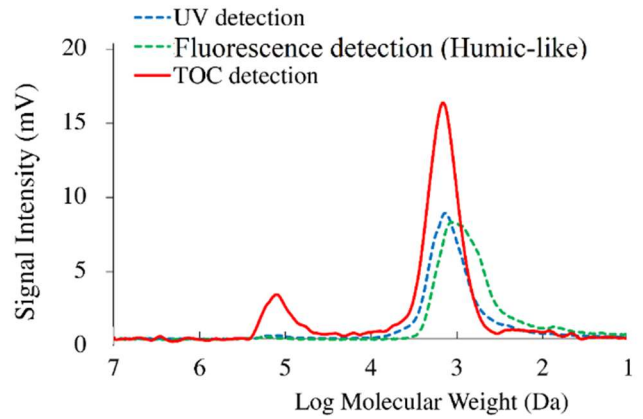


図 1. 全有機炭素検出サイズ排除クロマトグラフィーによる DOM の分子サイズ分布 : (a) 装置概要、(b) 典型的なクロマトグラム (UV: 254nm, Fluorescence: Ex/Em=310nm/410nm, TOC: 全有機炭素).

(a)



(b)

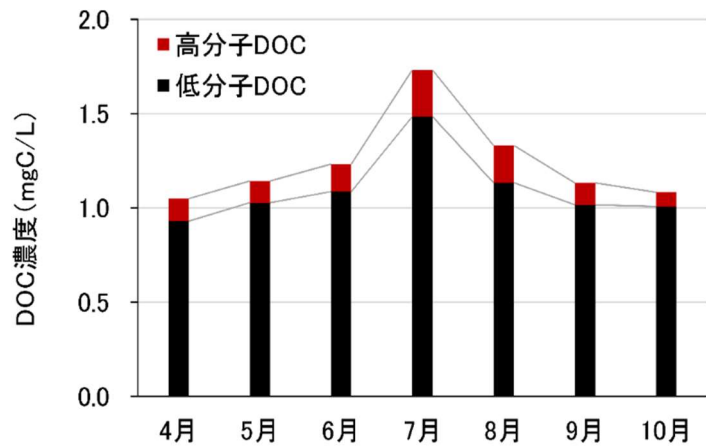


図 2. 琵琶湖南湖採水地点と DOM の分子サイズ : (a) 琵琶湖南湖の採水地点. 写真は欧州宇宙機関 (European Space Agency) のリモートセンシングデータを使用した, (b) 琵琶湖南湖における DOM の分子サイズの季節変動 (DOC 濃度は 18 調査地点の平均値).

## (2) 細菌二次生産速度の測定と季節・地点別変化

湖水中において細菌は食物連鎖（微生物ループ）で重要な役割を果たすとともに、DOMの難分解性化に大きく関与していると報告されている。

琵琶湖における細菌生産性の現状を把握するために、安定同位体（ $^{15}\text{N}$ ）で標識したデオキシアデノシンを細菌に取り込ませる $^{15}\text{N}$ -デオキシアデノシン法（ $^{15}\text{N}$ -dA法）を用い、琵琶湖における細菌生産速度の定量評価について検討した。琵琶湖に適用するに当たり、琵琶湖における最適な培養時間、細菌の細胞当たりの炭素量、細菌の16S rDNA含量の測定を行い、当該測定法を琵琶湖に最適化した。

2016年7月から2018年11月まで毎月、琵琶湖北湖第二湖盆中央（12B）において、7深度で細菌生産を測定した（図3）。また、2018年に3月、5月、7月、11月の4回にわたり、北湖の多地点で細菌生産の同時測定を行い、季節及び地点別の変化を評価した。

細菌生産速度は $0.07 \sim 15.9 \mu\text{gC L}^{-1} \text{d}^{-1}$ の範囲で変動していた。夏季の表層で高く、冬季の深水層では概ね $1 \mu\text{gC L}^{-1} \text{d}^{-1}$ と低い値を呈した。細菌の呼吸速度は夏季に高く、冬季に低下する傾向を示した。呼吸速度と生産速度には、 $\text{Log}[\text{呼吸速度}] = 0.76 [\text{生産速度}] + 0.77$ の関係があることが分かった。生産速度と呼吸速度の和である細菌の炭素要求量は $1.7 \sim 118 \mu\text{gC L}^{-1} \text{d}^{-1}$ の範囲内で変動していた（表層では平均 $60 \mu\text{gC L}^{-1} \text{d}^{-1}$ ）。この値は湖水中の全有機炭素の分解速度 $59 (\text{max } 86) \mu\text{gC L}^{-1} \text{d}^{-1}$ と概ね整合していた。

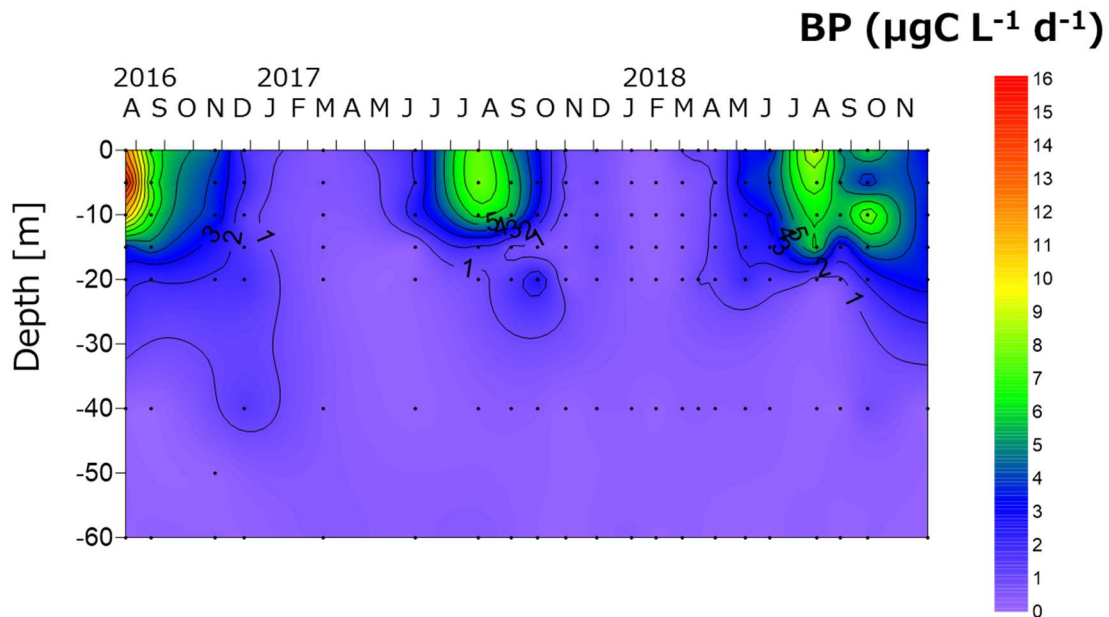


図3. 琵琶湖北湖第二湖盆中央（12B）におけるバクテリア生産量の時空間変動。

細菌生産速度の変動要因を検討したところ、細菌生産速度と水温に有意な正の相関関係があることが明らかとなった（図4）。20m以深の生産速度はどの季節においても概ね一定であった（ $< 1 \mu\text{gC L}^{-1} \text{d}^{-1}$ ）。表層においては比較的に大きな変動を示した。

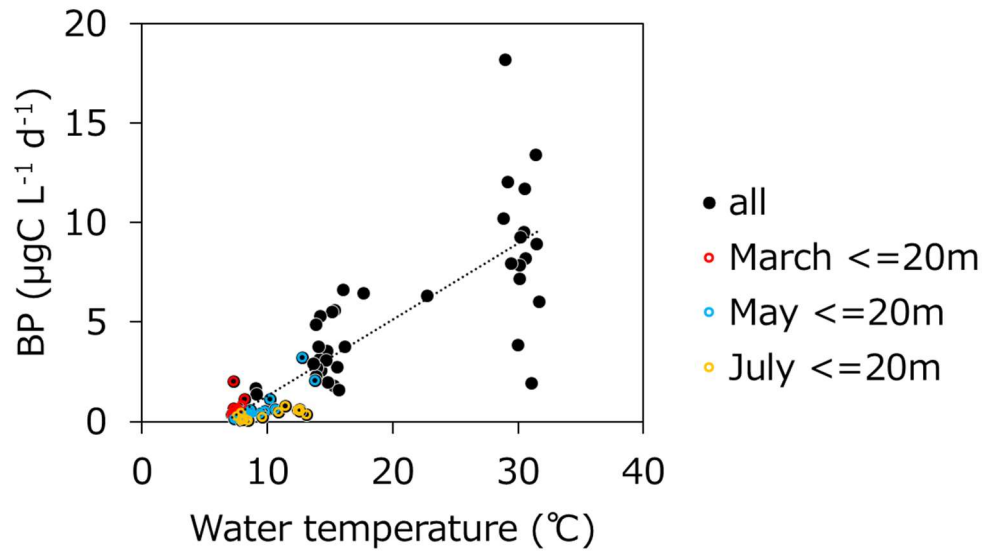


図4. 琵琶湖における細菌生産速度（BP）と水温の関係.

2018年7月に採取したサンプルを対象として、細菌の生産速度とリンの形態別濃度の関係性を評価した（図5）。結果として、細菌生産速度は粒子態リン濃度と高い相関を示した。一方、溶存態リン（≒溶存有機態リン）との相関は低い値に止まった。従って、細菌のリン供給源は主に粒状態リンであると示唆された。加えて、沖帯において細菌生産速度と溶存態リン濃度の相関が顕著に低かったため、沖帯では生物利用可能な溶存態リン濃度が低くなっていると推察された。

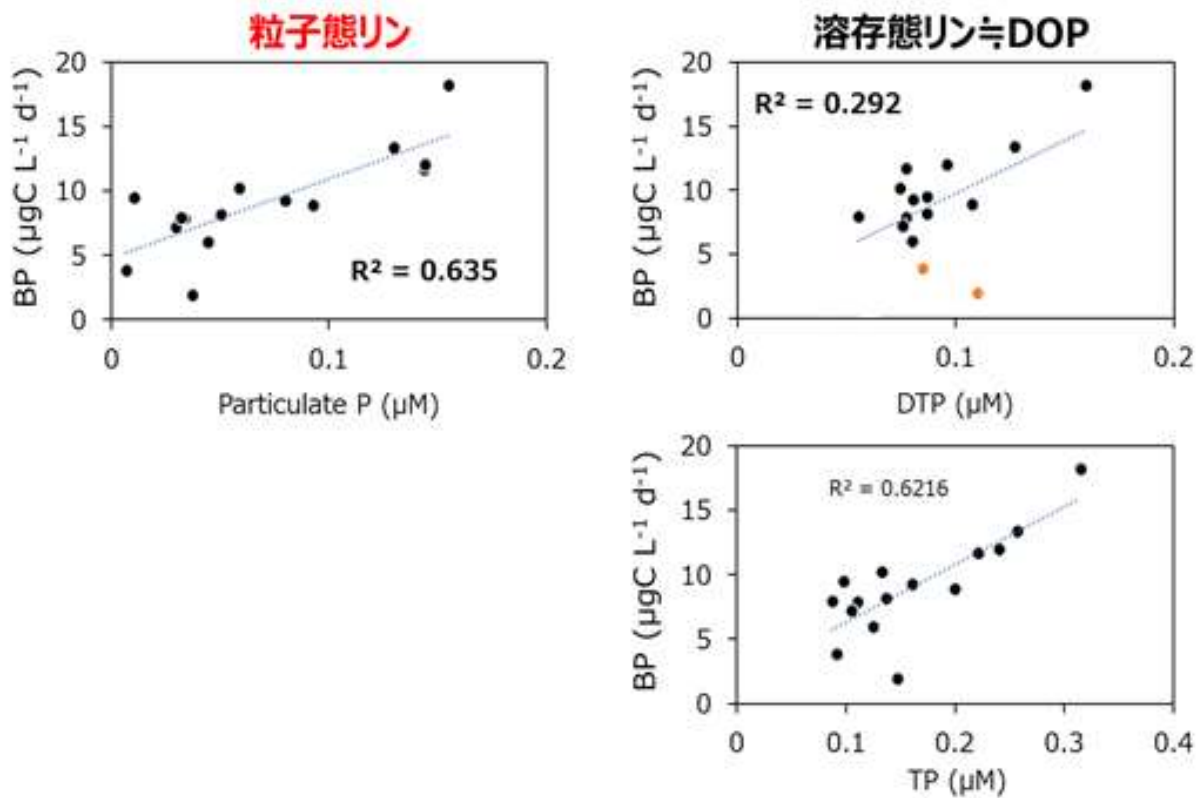


図 5. 細菌生産速度 (BP) とリンの形態別の相関分析 (2018 年 7 月).

### (3) 細菌二次生産速度の 30 年間における変化

琵琶湖では高度成長に伴い富栄養化が進行し、淡水赤潮が頻発したが、負荷削減努力により 1980 年代以降栄養塩濃度は減少した。その結果、クロロフィル濃度は低下し、植物プランクトン種組成の遷移が見られた(Kishimoto et al. 2013)。系外からの栄養塩・有機物負荷量や水質、植物プランクトンなどに関する長期変動はこれまでよく記述されてきたが、細菌生産量(BP)の長期変動は明らかとなっていない。そこで本研究では琵琶湖北湖で過去に実測されてきた BP (1986 年 4 月～10 月 (Nagata 1987)、1997 年 6 月～1998 年 6 月 (Gurung et al. 2000) と 2016～17 年に我々が実測した BP を比較し、30 年間での BP の変化を明らかにすることを目的とした。

本研究の調査は 2016 年 7 月から 2017 年 12 月に琵琶湖北湖の南比良沖中央(12B、水深約 60 m)において実施し、水温、溶存酸素量(Dissolved oxygen, DO)、クロロフィル *a*、懸濁態・溶存態有機炭素、栄養塩等を測定した。BP は採水直後に  $^{15}\text{N-dA}$  を湖水試料に添加し(最終濃度 50 nM)、暗所下、現場水温で培養後、 $^{15}\text{N-dA}$  取り込み速度を測定した(Tsuchiya et al. 2015)。1986 年の BP は  $^3\text{H-TdR}$  法 (Fuhrman and Azam 1982) によって測定されているため、 $^{15}\text{N-dA}$  法と  $^3\text{H-TdR}$  法の比較実験を 2018 年 8 月に実施した。ここで得られた変換係数( $[^3\text{H-TdR}] / [^{15}\text{N-dA}] = 1.64$ ; 図 6)から  $^{15}\text{N-dA}$  取り込み速度を  $^3\text{H-TdR}$  取り込み速度に変換し、1986 年の BP と比較した。尚、1986 年の BP 測定時の  $^3\text{H-TdR}$  添加濃度(5~6 nM)では取り込み速度は未飽和のため(Nagata 1987)、50 nM 付近の取り込み速度を飽和速度と仮定し、1986 年の値に各月の補正

係数を乗じ(1.56~2.00)、2016~17年のBPと比較した。1997~98年のBPは培養による細菌現存量の変化から求めているため、2016~17年のBPとは比増殖速度 $\mu$ による比較を行った。2016年7、8、10月に $^{15}\text{N}$ -dA取り込み量と細胞増殖数への変換係数を求め( $1.83 \times 10^6$  cells  $\text{pmol}^{-1}$ ; 図7)、 $^{15}\text{N}$ -dA取り込み速度から $\mu$ を算出した。

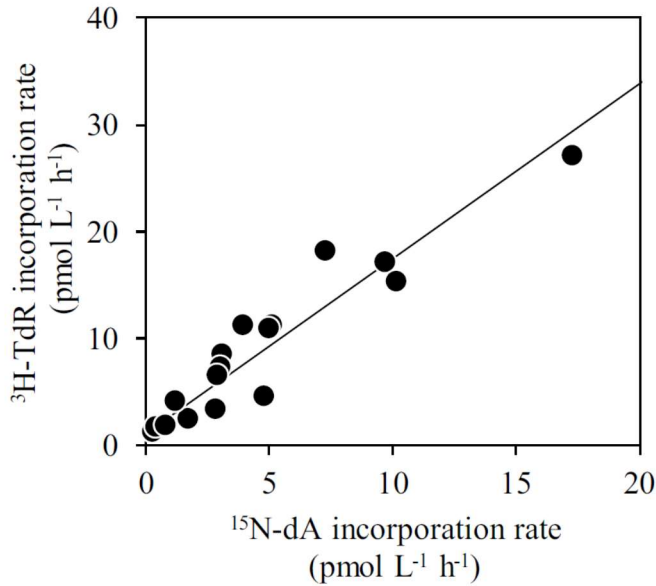


図6. 琵琶湖北湖 12B における $^3\text{H}$ -チミジン ( $^3\text{H}$ -TdR)と $^{15}\text{N}$ -デオキシアデノシン ( $^{15}\text{N}$ -dA)の取込速度の相関 ( $n=17$ ,  $r^2=0.892$ ,  $P < 0.001$ ). 図中の回帰線形直線:  $[^3\text{H}\text{-TdR}] = 1.64 \times [^{15}\text{N}\text{-dA}] + 1.05$ .

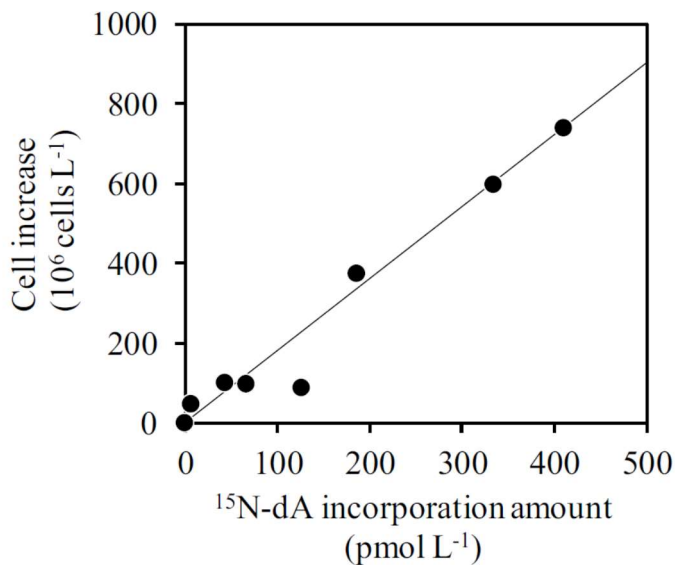


図7. 琵琶湖北湖 12B における細菌細胞増大量と $^{15}\text{N}$ -デオキシアデノシン ( $^{15}\text{N}$ -dA)の取込量との関係 ( $n=8$ ,  $r^2=0.952$ ,  $P < 0.001$ ). 図中の回帰線形直線:  $[\text{細胞増大量}] = 1.83 \times [^{15}\text{N}\text{-dA}] - 12$ .



$^{15}\text{N}$ -dA 取り込み速度は、2016年8月40mの  $0.13 \text{ pmol L}^{-1} \text{ h}^{-1}$  から2016年7月5mの  $30.7 \text{ pmol L}^{-1} \text{ h}^{-1}$  の範囲で変動し、夏季の表層で比較的高い値を示した。1986年4月~10月、水深0~10mの補正済み  $^3\text{H}$ -TdR 取り込み速度は  $14.8 \sim 178.8 \text{ pmol L}^{-1} \text{ h}^{-1}$  を示した。2016~17年の同季節・同深度の  $^{15}\text{N}$ -dA から変換した  $^3\text{H}$ -TdR 取り込み速度は  $6.1 \sim 50.2 \text{ pmol L}^{-1} \text{ h}^{-1}$  を示し、1986年と比較して有意に低かった(*Student's t-test*;  $P < 0.001$ )。1986年の平均値は  $87.2 \text{ pmol L}^{-1} \text{ h}^{-1}$ 、2016~17年は  $18.9 \text{ pmol L}^{-1} \text{ h}^{-1}$  となり、1986年比で2016~17年のBPは0.217倍であったことが示唆された。

$\mu$  は2016~17年では  $0.0086 \sim 0.70 \text{ d}^{-1}$  を示し、水温と有意な正の相関を示した ( $[\mu] = 0.017 \times [\text{水温}] + 0.093$  ( $n = 56$ ,  $r^2 = 0.59$ ,  $P < 0.001$ ; 図8)。一方、1997~98年の  $\mu$  は  $0.07 \sim 1.02 \text{ d}^{-1}$  を示し、水温との回帰式は  $[\mu] = 0.035 \times [\text{水温}] - 0.044$  ( $n = 17$ ,  $r^2 = 0.677$ ,  $P < 0.001$ ; 図8)であった。2016~17年の  $\mu$  は1997~98年と比較して有意に低かった(*Student's t-test*;  $P < 0.001$ )。これらの直線回帰式の傾きに注目すると、1997-98年比で2016年の傾きは0.49倍であり、およそ20年間でBPが半減したことが示唆された。

以上のことから、1986年からの30年間でBPはおおよそ5分の1程度にまで低下したことが示唆された。

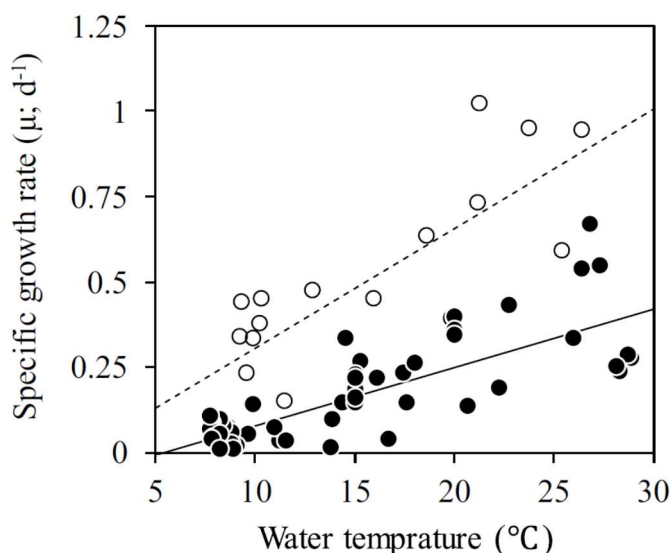


図8. 琵琶湖北湖における水温と細菌比増殖速度との関係。白丸は文献値(1997-1998年)、黒丸は本研究の値を示す。破線の式は  $[\mu] = 0.035 \times [\text{WT}] - 0.044$  ( $n = 17$ ,  $r^2 = 0.68$ ,  $P < 0.001$ ); 実線の式は  $[\mu] = 0.017 \times [\text{WT}] - 0.092$  ( $n = 56$ ,  $r^2 = 0.59$ ,  $P < 0.001$ )。

#### (4) 細菌生産速度測定における放射性同位体を用いないロイシン法の開発

細菌(バクテリア)生産は、通常放射性同位体で標識されたチミジン(DNA合成; Fuhrman & Azam 1980, 1982)やロイシン(タンパク質合成; Kirchman et al. 1985)の取り込み速度を測定し求められる。細菌(バクテリア)は物質循環に大きく寄与し(Azam 1998)、細菌生産速度(BP)の定量は微生物食物網を介した物質循環の見積りに重要である。しかし、放射性同位体は管理区域内での使用が義務付けされており、任意の場所でのBP測定は実施できないため、細菌生産動態理解の障壁となっていた。そこで放射性同位体を用いないチミジン法の代替法として、プロモデオキシウリジン法(Steward and Azam 1999)や  $^{15}\text{N}$ -デオキシアデノシン法(Tsuchiya et al. 2015)などが開発され、現場でのBP測定に用いられてきた(e.g. Tsuchiya et al. 2019)。しかし、放射性同位体を用いないロイシン法の代替法は開発されておらず、現状で

は放射性同位体を使用せざるを得ない。そこで本研究は安定同位体・重水素(D)で標識したロイシン((CD<sub>3</sub>)<sub>2</sub>CD<sub>2</sub>CD(NH<sub>2</sub>)COOH; D<sub>10</sub>-Leu, Cambridge Isotope Laboratories, Inc.)を細菌に取り込ませ、液体クロマトグラフィー質量分析計(LC-MS/MS)によって定量する BP 測定法の開発を目的とした。また、従来法である放射性同位体標識ロイシン(<sup>3</sup>H-Leu)法と比較実験を行い、本測定法の妥当性を確認した。

D<sub>10</sub>-Leu 取り込み速度は、以下の①～⑤の手順で定量した：①細菌に D<sub>10</sub>-Leu を取り込ませ、トリクロロ酢酸(TCA)を添加し培養終了。②孔径 0.2- $\mu$ m メンブレンフィルター(Millipore)に濾過後、5% TCA、80%エタノールで洗い、分析まで-20°Cで冷凍保存。③6 mol L<sup>-1</sup>塩酸を用いて試料中のタンパク質をアミノ酸に分解(110°C、20 時間)。④試料を乾燥後、サロゲートとして <sup>13</sup>C<sub>6</sub>-Leu を加えた 0.3 mol L<sup>-1</sup>塩酸に溶解。⑤孔径 0.45- $\mu$ m フィルターバイアル(Thomson Instrument Company)で濾過後、LC-MS/MS(Shimadzu)で D<sub>10</sub>-Leu ( $m/z = 142.10$ )を定量。

従来法(<sup>3</sup>H-Leu)と D<sub>10</sub>-Leu 法を比較するため、2018 年 7 月に琵琶湖 Sta. 12B (南比良沖中央) の 7 深度より、2020 年 5 月に霞ヶ浦 5 地点 (Sta. 1, 3, 7, 9, 12) より採水した。琵琶湖水は孔径 1- $\mu$ m メンブレンフィルター(Millipore)、霞ヶ浦湖水は GF/F フィルター(Whatman)で濾過後、D<sub>10</sub>-Leu、<sup>3</sup>H-Leu (Perkin Elmer)をそれぞれ添加し、8~26°Cで数時間、暗所下で培養した。<sup>3</sup>H-Leu 取り込み速度は Smith and Azam (1992)に従って定量し、D<sub>10</sub>-Leu 取り込み速度は上述した手順で定量した。

琵琶湖および霞ヶ浦両方の試料において、D<sub>10</sub>-Leu ( $m/z = 142.10$ )の他に、D<sub>9</sub>-Leu ( $m/z = 141.10$ )と D<sub>8</sub>-Leu ( $m/z = 140.10$ )が検出され (図 9)、D<sub>9</sub>-Leu と D<sub>8</sub>-Leu の合計値は D<sub>10</sub>-Leu より高い値を示した(Student's t-test、 $n = 36$ 、 $p < 0.001$ )。このことから、細胞内に取り込まれた D<sub>10</sub>-Leu は直接タンパク質合成に使用されるものは少なく、多くの D<sub>10</sub>-Leu (87 $\pm$ 6%)はアミノ基転移反応によって 4-methyl-2-oxopentanoate に変化したのち、D<sub>9</sub>-Leu や D<sub>8</sub>-Leu としてタンパク質に取り込まれていたことが示唆された。D<sub>10</sub>-Leu、D<sub>9</sub>-Leu、D<sub>8</sub>-Leu を合計した取り込み速度(D<sub>10</sub>+D<sub>9</sub>+D<sub>8</sub>-Leu)は、<sup>3</sup>H-Leu 取り込み速度と有意な正の相関を示すとともに([D<sub>10</sub>+D<sub>9</sub>+D<sub>8</sub>-Leu] = 0.95  $\times$  [<sup>3</sup>H-Leu] - 20、 $n = 36$ 、 $r^2 = 0.87$ 、 $p < 0.001$ 、図 10)、<sup>3</sup>H-Leu 取り込み速度と同等の値を示したことから、本手法の妥当性が確認された。



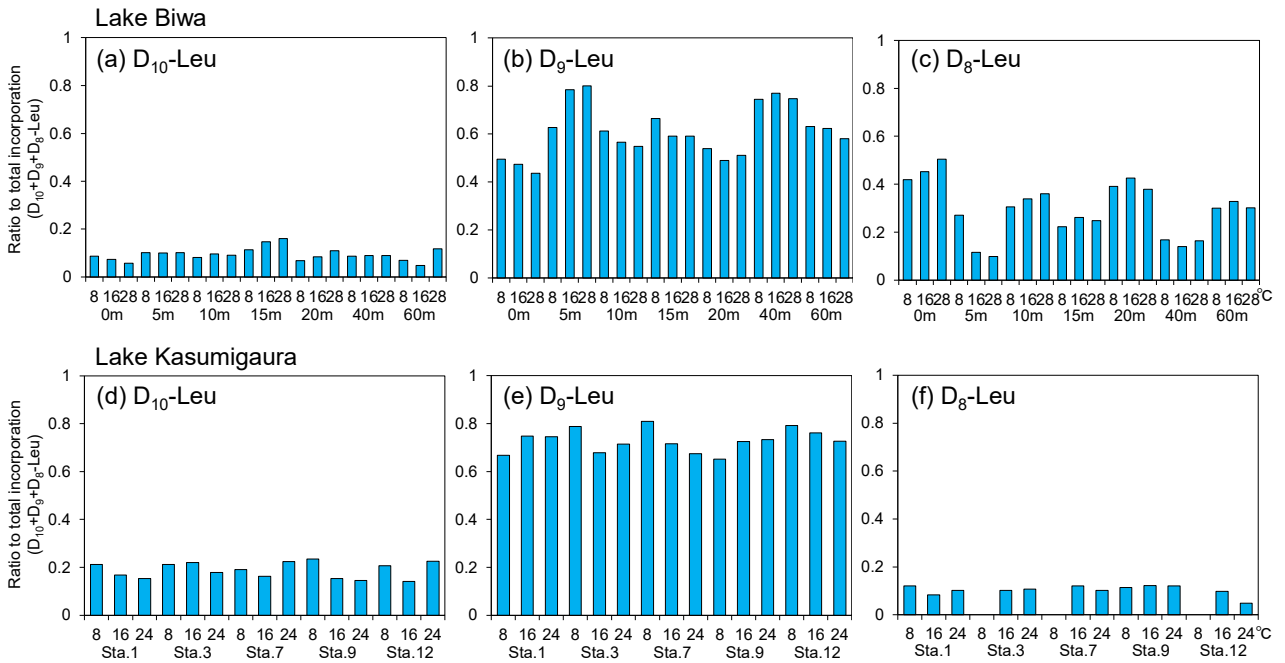


図 9. 琵琶湖および霞ヶ浦における  $D_{10}$ -Leu,  $D_9$ -Leu,  $D_8$ -Leu の取り込み割合.

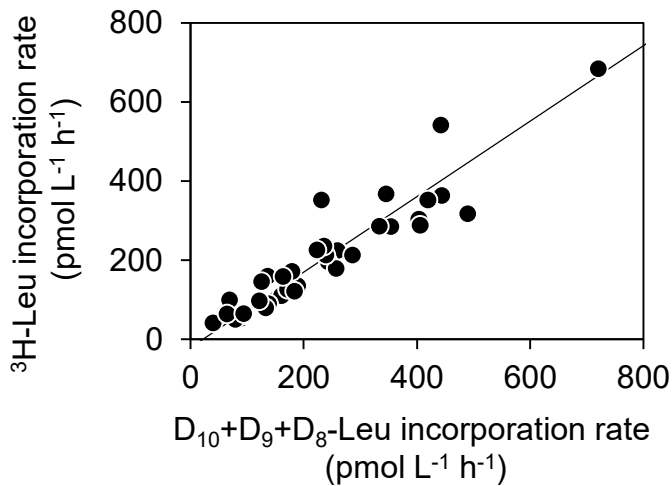


図 10. 琵琶湖および霞ヶ浦における  $^3\text{H}$ -Leu と  $D_{10}+D_9+D_8$ -Leu の取り込み速度の関係.

(5) 高速フラッシュ蛍光光度計を用いた一次生産速度の推定

植物プランクトンの光合成活性を測定する高速フラッシュ蛍光光度法 (Fast Repetition Rate fluorometry, FRRf) を用い、湖沼の総一次生産量 (Gross primary production, GPP) を即時に得るためのモデル開発を行った。FastOcean (CTG Ltd., 図 11) は、国内で運用される数少ない多波長 FRR 蛍光光度計であり、アオコ発生時にも光合成特性のパラメータ群を正しく測定できる。また、光合成特性パラメータと光量か

ら、プランクトン群集の電子伝達速度を測定することが出来る。そこで、2018年7月~2019年5月の琵琶湖北湖および南湖の計4観測点において、FRRfによる電子伝達速度の測定を行った。同時に、従来法である炭素安定同位体 ( $^{13}\text{C}$ ) を用いた生産量の測定を行い、電子伝達速度からC固定速度に換算する統計モデルを作成した。モデルはC固定速度を目的変数とし、現場環境(光、水温、栄養塩、プランクトン群集組成、光合成特性)を説明変数、電子伝達速度を固定係数とした。



図 11. 高速フラッシュ蛍光光度計, FastOcean.

最終的に、様々な要因をすべて含めた Best model、栄養塩を省いた model2、水温と光合成特性のみを含めた model3 の3つを作成し、 $^{13}\text{C}$ 法による結果と比較した。その結果、Best modelは北湖および南湖のGPPをよく再現した(図 12)。特に南湖については、より節約的な model2、model3でも、季節変動のパターンの再現性が高かった。

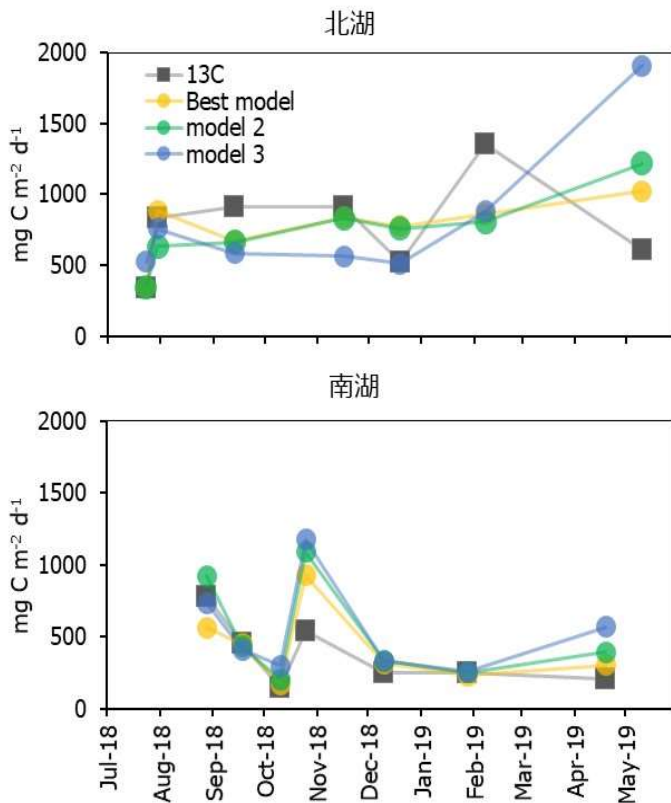


図 12.  $^{13}\text{C}$  法と FRRf を用いた GPP 推定結果の比較. 上段: 北湖, 下段: 南湖.

#### (6) 植物プランクトンのサイズ別光合成特性

*Staurastrum* (1980年代~) や *Micrasterias hardyi* (2016年~) といった大型緑藻の増加は、琵琶湖における転送効率低下の原因と考えられている。その増殖メカニズムはよく分かっていないが、先行研究では、大型藻類は小型藻類より光ストレスを受けにくいことが示唆されている。そこで、琵琶湖の植物プランクトン群集の光化学系 II (PSII) の活性特性と、サイズとの関係について明らかにするため、野外調査および栄養塩添加実験を行った。2019年6~11月に毎月1回、南比良沖 12B および長命寺沖 12C において、藻類群集を採集した。試料から大型捕食者を除いた後、フィルターで小型藻類 (S, <30  $\mu\text{m}$ ) と大型藻類 (L,  $\geq 30 \mu\text{m}$ ) に分画し、クロロフィル a (Chl.a) 濃度、細胞体積、および生物量を測定した。PSII 活性を示す指標として、最大量子収率 ( $F_v/F_m$ )、実行量子収率 ( $F_q'/F_m'$ ) および熱放散係数 ( $NPQ_{NSV}$ ) を、多波長励起蛍光光度計 (FRRf) を用いてサイズ別に測定した。さらに、捕食者を除いた各地点の試料を 500 mL 容のボトル 6 本に満たし、うち 3 本に  $\text{NO}_3$  と  $\text{PO}_4$  を添加し、残り 3 本を対照区として、現場水温、500  $\mu\text{mol photon m}^{-2} \text{s}^{-1}$  で 2 日間培養した後、FRRf 測定を行った。

野外植物プランクトン群集のサイズ別現存量は、12B・12C とともに 6~9 月は  $S > L$ 、10、11 月は  $S < L$  となった。PSII 活性については、12B・12C とともに、L は S よりも  $F_v/F_m$  が高く、 $NPQ_{NSV}$  が低かった (図 13)。背景光の強さを様々に変えた場合、同じ群集内ならば、L の方が高い  $F_q'/F_m'$  を示した (図 14)。これらの結果は、同じ環境下ならば、L のほうが高活性・低ストレス状態であることを示している。 $F_v/F_m$  や  $NPQ_{NSV}$  と細胞体積との間に有意な相関は見られなかったが、細胞体積あたりの Chl.a 量 ( $\text{pg } \mu\text{m}^{-3}$ ) と

の間に有意な相関関係が見られた(図 15)。すなわち、細胞内の光合成色素密度が活性やストレスの違いに影響を与えていることが示唆された。栄養塩添加実験の結果、12B・12C とともに7~9月の間は、S・Lの光合成活性が栄養塩制限であることが示唆された。さらに12BのSは、10、11月も引き続き光合成活性の栄養塩制限が見られたが、12Cでは見られなかった。鉛直混合が盛んになると、沖合の植物プランクトン群集が受ける光強度の変化が大きくなる。そのため光ストレスを受けやすい沖合の小型植物プランクトンは、大型植物プランクトンよりもPSII 防御・修復にかかるコストが高く、栄養塩不足になりやすい可能性がある。

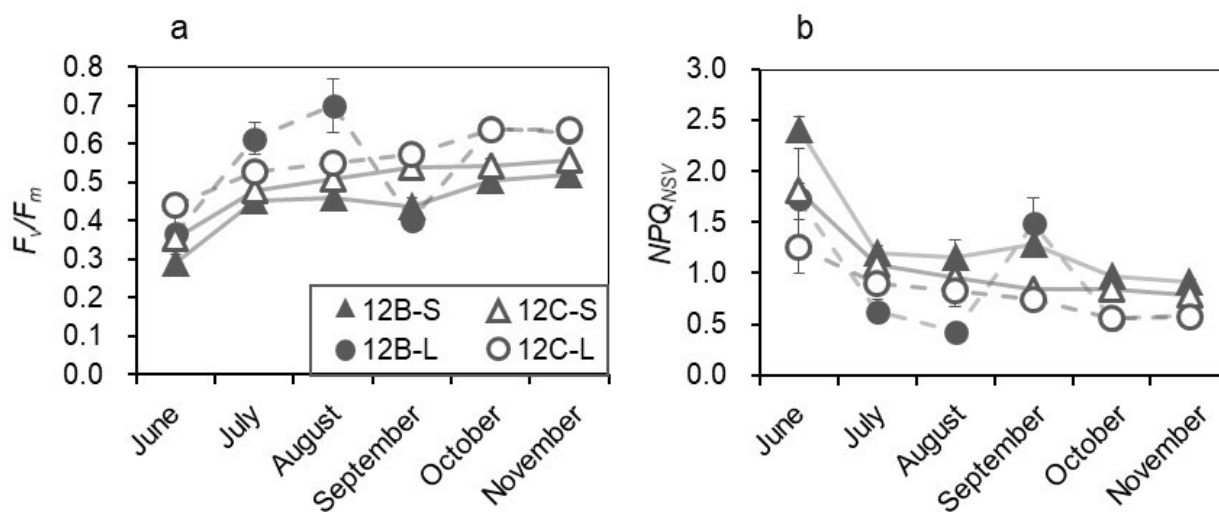


図 13. 南比良中央 (12B) と長命寺沖 (12C) から採集した小型 (S)・大型 (L) 藻類の暗所適応時における最大量子収率 ( $F_v/F_m$ ) (a)、および熱放散係数 ( $NPQ_{NSV}$ ) (b).

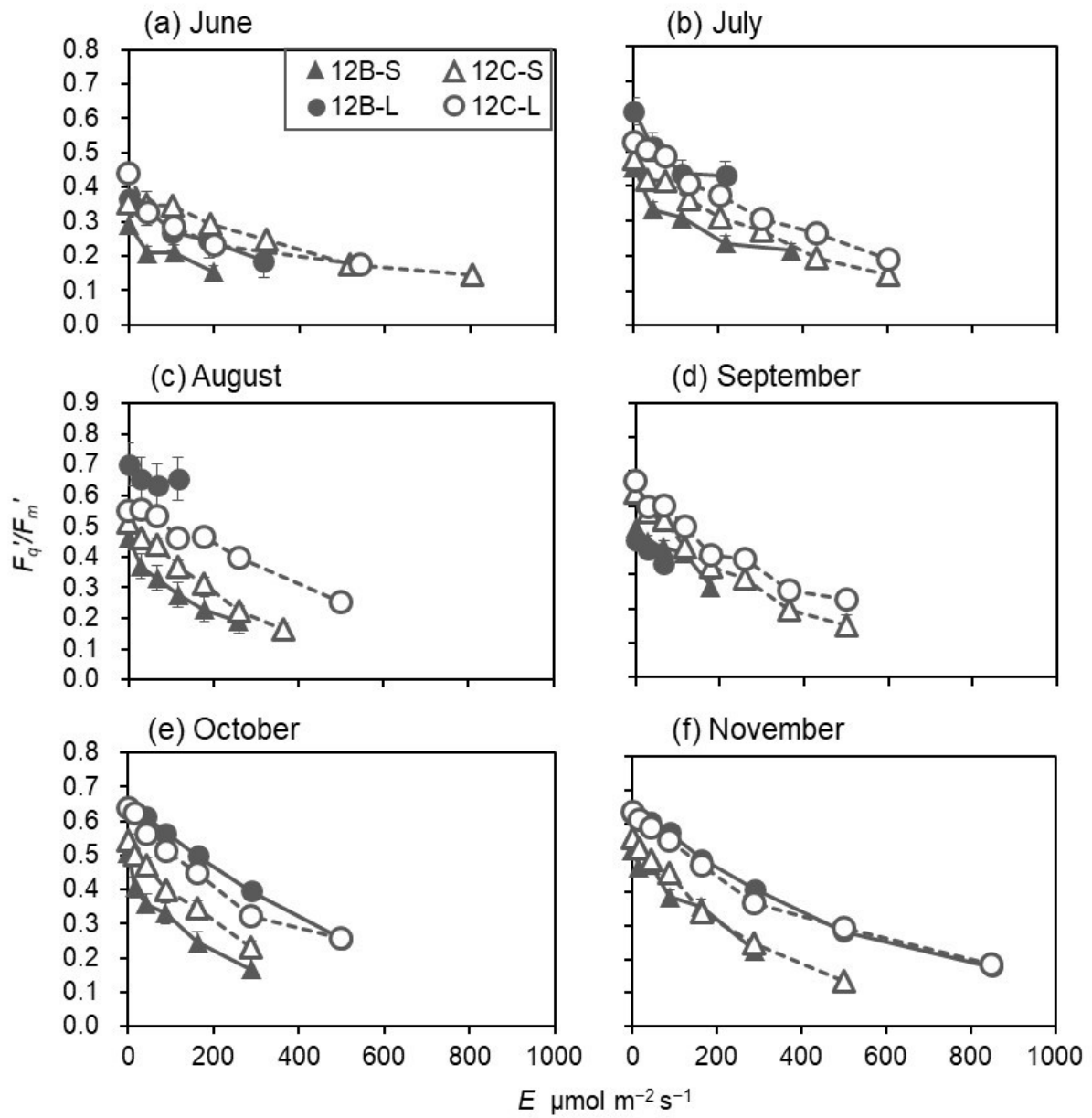


図 14. 背景光を変化させた場合の小型 (S)・大型 (L) 藻類の実行量子収率

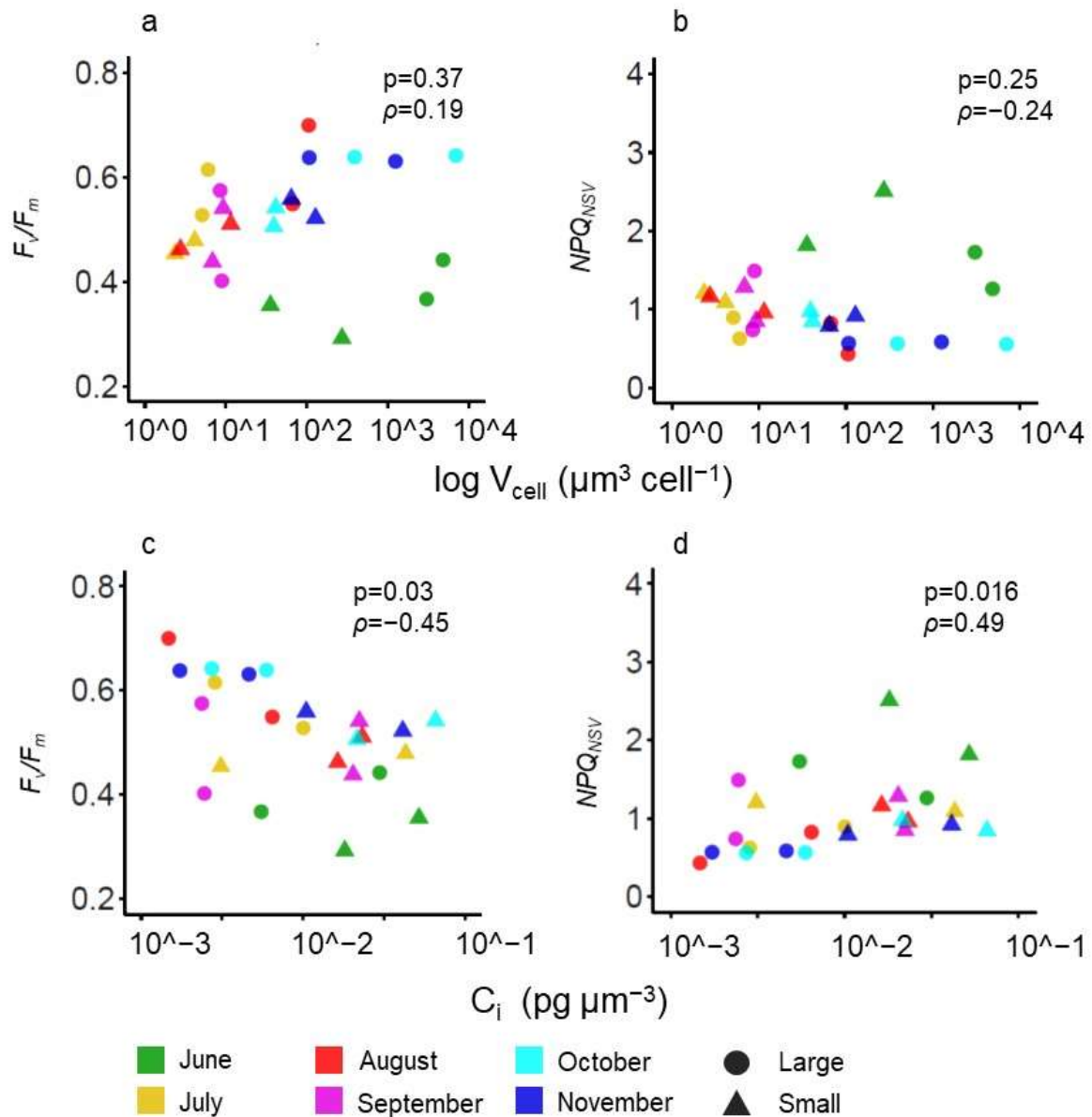


図 15.  $F_v/F_m$  および  $NPQ_{\text{NSV}}$  と細胞体積 ( $V_{\text{cell}}$ ) との相関関係 (a, b)、および細胞内 Chl.a 濃度 ( $C_i$ ) との相関関係 (c, d) .

### (7) 琵琶湖における一次生産の分布と季節変動

陸水における一次生産 (Primary production, PP) は、植物プランクトンの光合成作用により生成される有機物量を指し、湖沼における生態系サービスや有機物循環を捉える際の、基礎的かつ重要なパラメータと言える。しかし、既存の PP 測定手法は培養を伴うものであるため、時間がかかる上、現場での測定が困難だった。そこで本研究では、近年手法開発が進められている Fast Repetition Rate fluorometry (FRRf)



法を琵琶湖北湖に適用してPPを測定し、その変動を評価した。この方法は新規性が高く、原位置で瞬時に（数 $\mu$ 秒で）PPを測定できる。

測定機器としてFRR式蛍光光度計（FastOcean、Chelsea社、[図11](#)参照）を用いた。FRR式蛍光光度計は微弱なクロロフィル蛍光を計測することから、光合成有効照射（PAR: Photosynthetic active radiation）が高い表層では測定は困難となる。本研究では、バンドパスフィルターの装着によりその問題点を克服した。深度別に得られたデータは積算し湖水柱における生産として算出した。調査地点は[図16](#)に示す琵琶湖北湖の11地点で、2018年3月、5月、7月、11月に調査が行われた。なお12Bのみ2016～2017年にかけても調査が行われた。

琵琶湖北湖においてPPの深度プロファイルを作成したところ、表層である1～5 mにピークがあり、全層生産の大半を表層が占めていた。北湖の南比良沖中央（12B）における時系列観測の結果は、5月に最大、11月に最小を持つPPの年周期を示していた。ただ、5月であっても積算PPは約1 gC m<sup>2</sup> d<sup>-1</sup>であり、過去の報告値と比べて低いものであった。

5月の北湖全域調査の結果では、PPは岸から離れた中央部で高く、北部よりも南部で高かった（[図17\(a\)](#)）。Chl.a濃度も同様の分布を示しているため、5月におけるPPの分布は植物プランクトンの存在量に左右されていると示唆された。7月の北湖全域調査の結果でも、5月と同様、PPは岸から離れた中央部で高かった（[図17\(b\)](#)）。しかし5月とは異なり南部よりも北部で高かった。7月におけるChl.a濃度の分布は西部で高い傾向が見られ、PPのそれと一致していなかった。また植物プランクトンの活性を示すPP/Chl.aは東部で高かった。

PP/Chl.aは光合成有効放射(PAR)の影響を強く受けるため、PP/Chl.a/PAR (PPCP)で水質項目との関係性を評価とした。結果、PPCPは冬季においても夏季においても各種窒素濃度やリン濃度の影響を受けておらず、それらの濃度と連動していないことが分かった。一方、有機物濃度との連動は見られた。次に、DOC濃度とPPCPに関して夏季と冬季に分けてプロットしたところ、夏季にDOC濃度と有意な逆相関を示した。一方、冬季においては明確な関係は見られなかった。夏季はラン藻類が優占することから、それらによる生産が湖内のDOMによって阻害された可能性がある。過去の知見でも報告されている通り、DOMは錯体形成を通じてラン藻類の鉄取り込みを妨害する。そうした作用が働いた結果なのかもしれない。

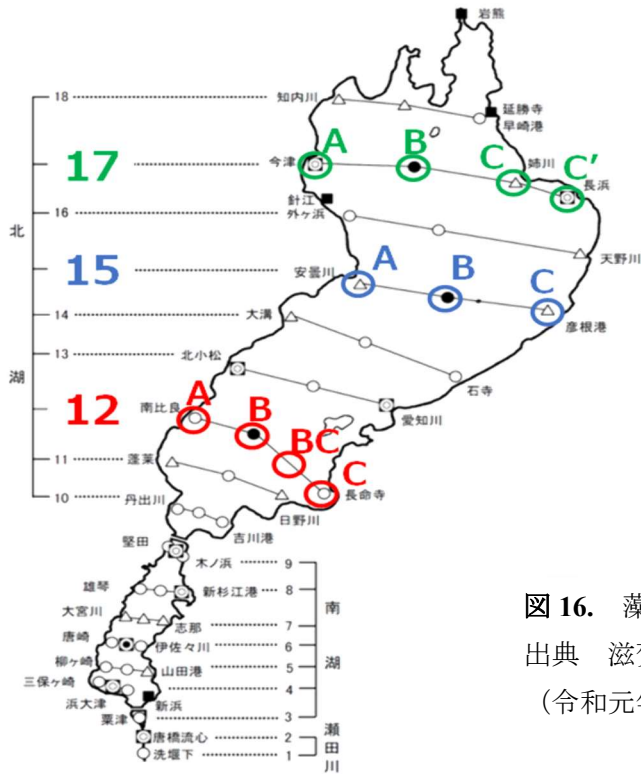


図 16. 藻類一次生産速度の調査地点.  
 出典 滋賀県 (2019): 滋賀の環境 2019  
 (令和元年版環境白書) 資料編.

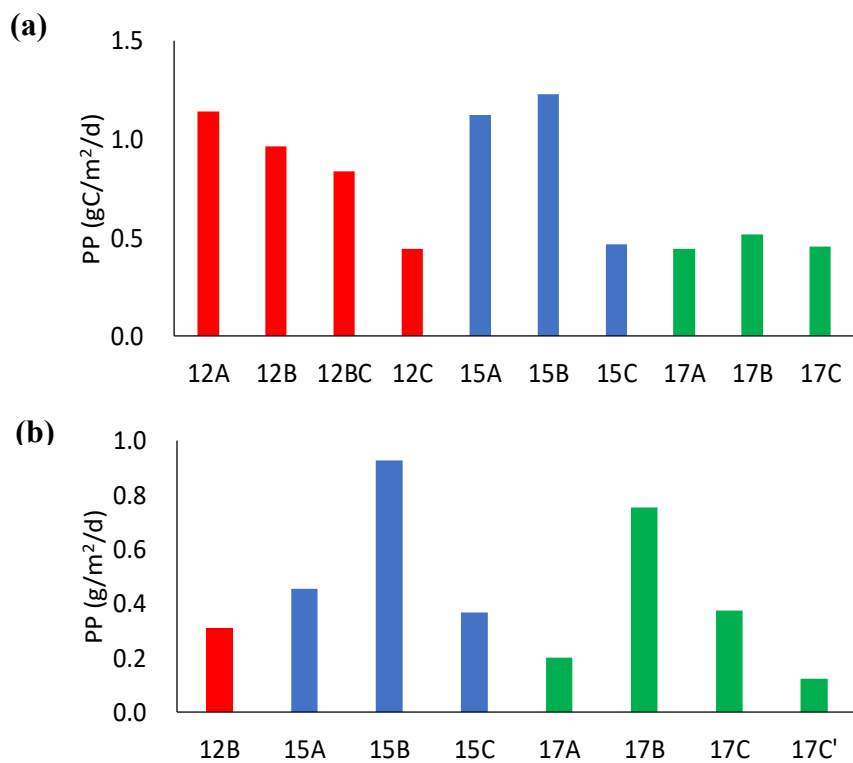


図 17. 琵琶湖北湖における各地点の一次生産速度：(a) 5 月、(b) 7 月.

## (8) 琵琶湖南湖における溶存態リンの分布とその変動要因

栄養塩類の中でも、リンは植物プランクトンを中心とした微生物活動に最も大きな影響を与えるためその動態把握が必要である。とりわけ、微生物が利用しやすい形態である溶存態リン（DTP）の動態は、微生物活動への直結性から重要である。しかし、琵琶湖は北湖、南湖とも DTP の濃度が極めて低く、モリブデンブルー法では定量下限となることもしばしばあり、DTP の詳細な動態把握が課題であった。本研究では、トリプル四重極型誘導結合プラズマ質量分析計（ICP-MS/MS）を用いて  $\mu\text{g/L}$  オーダーの琵琶湖南湖の DTP の分布を明らかにすることを主目的とした。また、リンの底泥溶出と関連性の高い金属元素の動態や微生物活動を反映すると考えられる溶存有機物の腐植様蛍光特性のデータを組み合わせ、琵琶湖南湖の溶存態リンの変動要因に関する考察を行った。

2019 年 1 月～12 月にかけて、瀬田川 1 地点（図 18：2）、琵琶湖南湖 17 地点（図 18：3、4A、4A'、4B、5A、5B、6A、6B、6C、8A、8B、8C、168、9A、9B、9C、新浜地先）の溶存態リン（DTP）、溶存態鉄（DTFe）、溶存態マンガン（DTMn）、腐植様蛍光（励起/蛍光波長 = 315/408 nm）を調査した。

本研究では、溶存態リンの分析に ICP-MS/MS を用いることで、モリブデンブルー法では定量下限となる  $\mu\text{g/L}$  オーダーの DTP の動態を把握することに成功した。DTP は閉鎖性の高いエリア（168、8C、新浜地先）で夏から秋にかけて値が高くなる傾向が見られた。その一例として 2019 年 8 月の各調査項目の分布を図 19 に示す。全調査地点の中でも、168、8C の DTP は高い値が確認され、底泥溶出に付随して溶出するマンガンや鉄、微生物活動を反映すると考えられる溶存有機物の腐植様蛍光も同様に高い値が観測された。そのため、このエリアでは活発な微生物活動から DO の低下が起こり、底泥溶出が促進されるという水質にとっての負の連鎖が生じていると推察される。さらに、赤野井湾以南の東岸の DTP は西岸に比べて高くなっていることから、赤野井湾が琵琶湖南湖における夏季の水質形成に大きな影響を持つ可能性が示された。新浜地先も矢橋帰帆島を取り巻く水路では水の停滞が生じるため、底泥溶出による DTP の増加が予測されたが、8 月についてはその傾向は見られなかった。DTFe が高濃度で見られた原因に関しては、この付近の地下水には数  $\text{mg/L}$  の DTFe が含まれ、その DTFe/DTMn 比が約 10 と調査時の新浜地先の DTFe/DTMn 比と類似していたことから、地下水の影響を受けていた可能性が示唆される。

気候変動に伴い琵琶湖南湖のような浅い湖沼では、夏季の水温上昇に伴い栄養塩類の底泥溶出のリスクも高まっていくと推察される。そのような状況を把握する上で、本研究で用いた ICP-MS/MS と腐植様蛍光によるリンの動態評価はリンの底泥溶出リスクを評価する有効な手段となりうると考えられる。

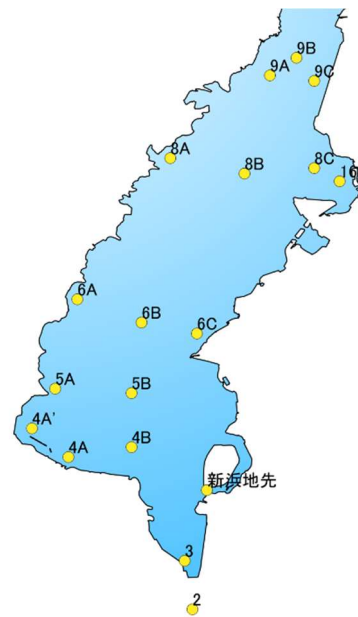


図 18. 琵琶湖南湖の調査地点.

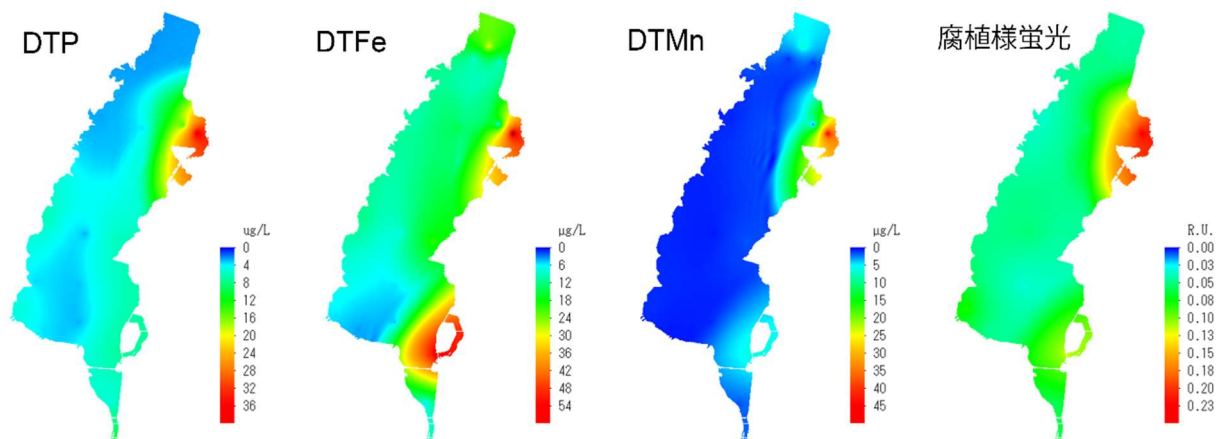


図 19. 2019 年 8 月の琵琶湖南湖の DIP, DTFe, DTMn および腐植様蛍光の濃度分布.

#### (9) 琵琶湖北湖全層循環に関するシミュレーション解析：モデル開発、再現性、熱収支解析

琵琶湖は、年一回全層循環が起きる一回循環湖であり、湖面冷却による鉛直混合によって DO と溶存物質が琵琶湖内部に供給され、底層に生息するベントスや水生植物に影響をあたえる。将来気候においては、世界規模で多くの一回循環湖（一年に一度の全層循環が起きる湖沼）の割合が減少し、全層循環の頻度が減るか、ないしは永年成層湖に変化すると報告がある。琵琶湖における 2018 年度の全層循環は、北湖の一部において 2019 年 3 月の時点で未確認であったことが報告された。一方、2017 年度の全層循環は 2018 年 1 月下旬に確認されている。そこで、全層循環が一部未完であった原因を調べるため、全層循環の再現シミュレーション結果に基づいた琵琶湖全体の熱収支解析を実施し、2017 年度と 2018 年度の湖面冷却の違いを比較した。

本シミュレーションは、琵琶湖における代表的な物理現象をうまく再現していた。例えば、琵琶湖北湖において夏季にたびたび観測されている反時計回り（低気圧性）の第一環流（例えば、Endoh et al. 1987; Endoh and Okumura 1993）が、計算結果においても再現されており（図 20）、シミュレーションの定性的な再現性を確認した。また、滋賀県琵琶湖環境科学研究センターが収集した現場水温観測データを解析すると、冷却期間における鉛直混合によって季節水温躍層が破壊されていく様子が両年度において捉えられており、そのような水温の時空間変動がシミュレーション結果においても再現されていた（図 21）。図の白点は混合層の底部の深度を示しており、白点が存在しない期間が全層循環（すなわち混合層の底部が湖底に到達）に至っていることを示す。シミュレーションにおいては、2017 年度の全層循環は 1 月上旬からほぼ毎日継続されているが、2018 年度の全層循環は 3 月下旬においてもほとんど継続している様子がみられない。このように、シミュレーションは未完の全層循環を再現していることがわかる。水温の再現性は、決定係数  $R^2=0.95$  ( $p<0.001$ )、モデルのスキルスコア (Murphy & Epstein 1989)  $SS=0.97$  であり  $SS>0.6$  で有効なモデルとされる指標 (Smedstad et al. 2003) を優に超えていることから、熱収支解析を実施するための十分な精度を持つ定量的な計算結果が得られたと判断した。

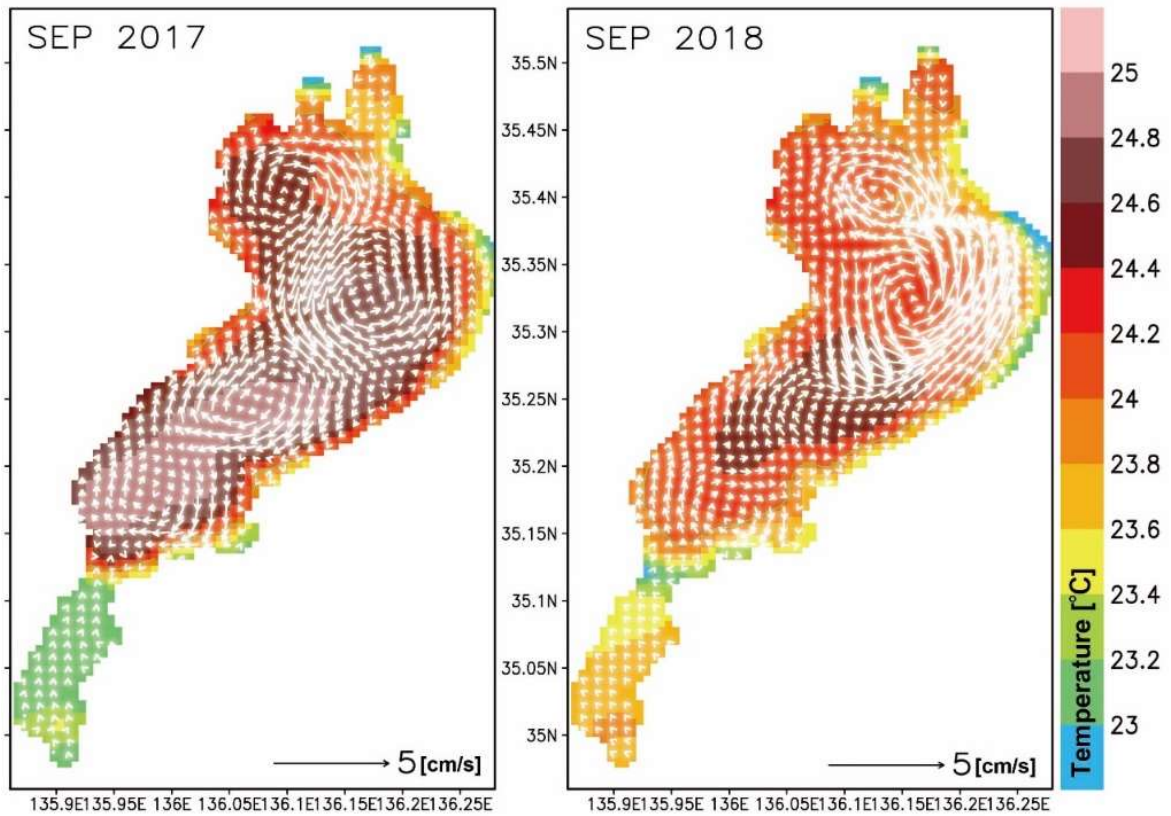


図 20. 再現シミュレーションによる表層(深度 1m)における 2017 年と 2018 年 9 月の月平均水温および流速場.



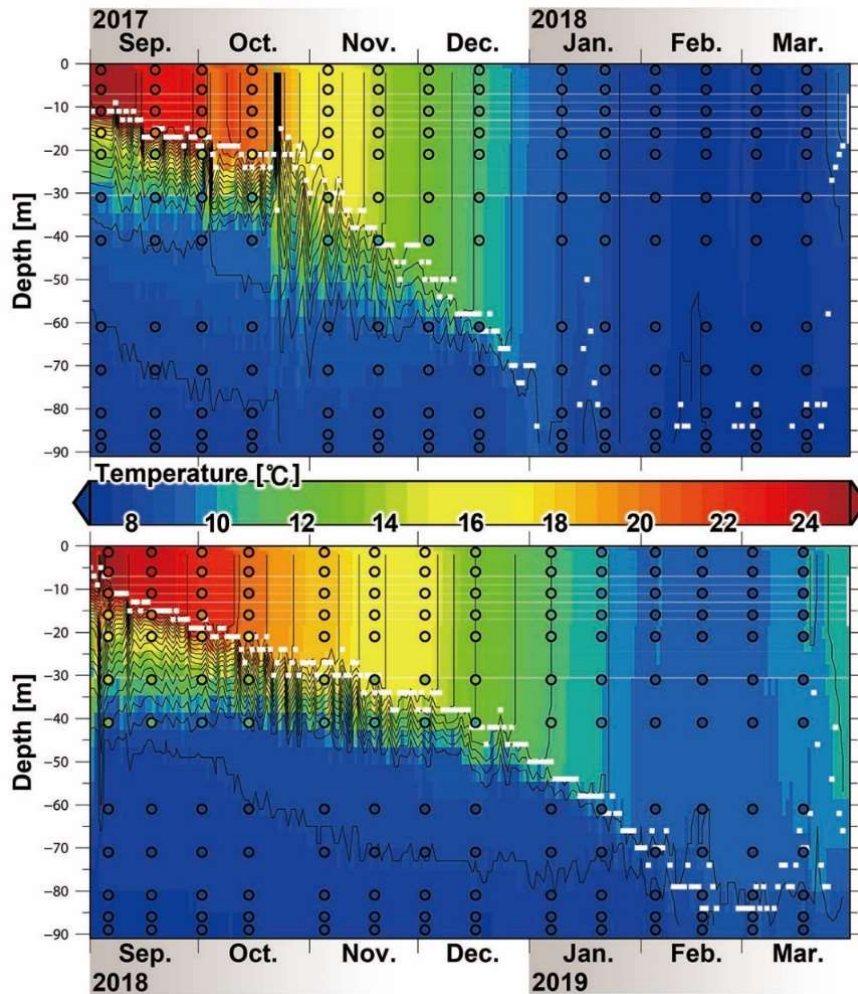


図 21. 今津沖中央(17B)における 2017 年度と 2018 年度の、シミュレーションによる再現計算水温の TD(時間-深度)ダイアグラム (カラーコンター)と現場水温観測値 (色点). 白点は混合層の底部を示す (表面水温との水温差が  $0.5^{\circ}\text{C}$  以上となる水温の深度).

次に、両年度において全層循環の強さを決定する冬季湖面冷却と琵琶湖全体の貯熱量に注目した。熱収支解析の結果、2018 年度の貯熱量は  $1000 \text{ P}$  (ペタ: $\times 10^{15}$ )  $\text{J}$  を一度も下回らなかった (図 22)。一方、2017 年度の貯熱量は 2018 年 1 月 22 日(琵琶湖環境科学センターにより全層循環が確認された日)から 3 月下旬までの期間において  $1000 \text{ PJ}$  を下回っていた。そして、2018 年度の湖面冷却は 2017 年度よりも弱かった。これは、湖面冷却期における 2018 年度の平均気温が 2017 年度よりも約  $1^{\circ}\text{C}$  高く、平均風速が  $2 \text{ m/s}$  程度小さかったため、2018 年度の潜熱と顕熱フラックスが弱かったからである。これらの要因が、全層循環が未完であった原因である。貯熱量の閾値(約  $1000 \text{ PJ}$ )は、琵琶湖における全層循環を完了できるかどうかの指標になるだろうと考えられる。本研究結果は、現在は一回循環湖である琵琶湖が、将来の気候変動によって部分循環湖または数年ごとに全層循環がおきる湖に変化するかどうかを指標化できる可能性を示唆している。



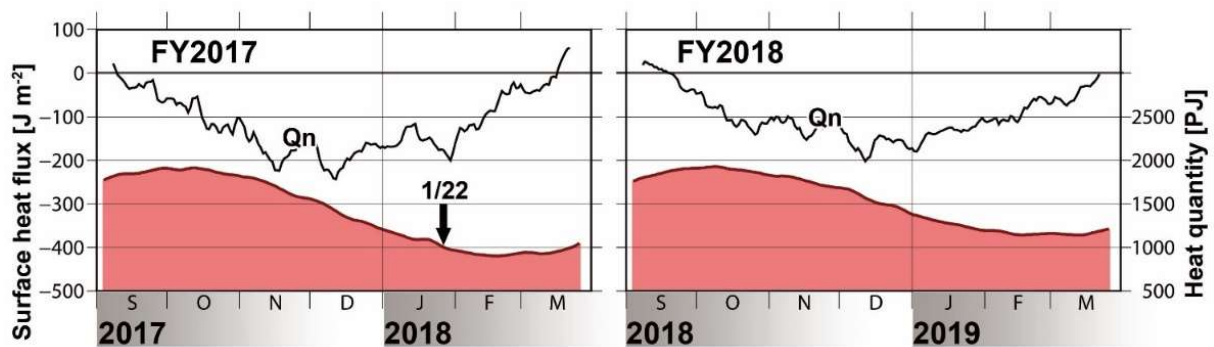


図 22. シミュレーションによる 2017 年度と 2018 年度の湖面冷却期における琵琶湖全体の正味の湖面熱フラックス (Qn) および貯熱量 (HQ) の時間変化.

#### (10) 琵琶湖北湖全層循環に関するシミュレーション解析：全層循環未完了の要因解析

琵琶湖は、年一回の全層循環が起きることで、DO と溶存物質が琵琶湖内部に供給され、底層に生息するベントスや水生植物に影響をあたえる。近年の問題となった全層循環が未完了だった要因について、それらの再現シミュレーションと気象条件を変化させた感度数値実験結果に基づいて検証した。

琵琶湖における全層循環の達成時期の遅延、継続期間の短期化、あるいは中断などの支配要因についての知見は不十分であり、気候変動による鉛直循環のレジームシフトに焦点を絞った研究は皆無である。今年度は、“強い全層循環”が形成された(琵琶湖全域が全層循環に達した時期が近年最も早かった)2017 年度と、“全層循環が未完了”であった(部分的に全層循環に至らなかった)2018 年度に注目して、これらの年における水温の時空間変動を数値シミュレーションによって再現した。また、モデル入力条件である気温と風速を仮想的に様々に変化させた感度数値実験を実施した。実験結果をもとに、全層循環が卓越した 2017 年度と、逆に未完であった 2018 年度の再現シミュレーションとその直接要因となる気象条件を精査し、湖面風の観測と評価の重要性を議論した。

前年度報告書に記載した通り、琵琶湖における代表的な物理現象について本シミュレーションの再現性が妥当であったことから、全層循環の再現性についてもある程度信頼性が担保できると判断した。その前提の下で、琵琶湖全水面積  $A$  において全層循環に達した場所の面積  $A_{FO}$  と混合層 (MLD) が形成された体積  $V_{ML}$  を下記の計算式により算出した。

$$A_{FO} = \iint_A \delta dx dy \quad (1),$$

$$\text{where } \delta = \begin{cases} 1 & MLD = h(x,y) \\ 0 & MLD < h(x,y) \end{cases} \quad (2),$$

$$V_{ML} = \iint_A MLD(x, y) dx dy \quad (3)$$

ここで、 $x$ および $y$ はそれぞれ東方と北方を正とした座標系で表現された各計算格子の位置を示し、 $h(x, y)$ は琵琶湖の湖底水深(m)である。 $MLD(x, y)$ は混合層の底部深度を表し、表面水温 $T_s$ から鉛直方向に任意の深さでとった水温 $T_w$ の水温差 $\Delta T(=T_s - T_w)$ が $0.5\text{ }^\circ\text{C}$ になった深度と混合層を定義した。(2)式に従い、計算格子において混合層 $MLD(x, y)$ が湖底 $h(x, y)$ に達した場合( $MLD = h(x, y)$ )に全層循環に達したと判断した。そして、全層循環に至った(鉛直混合が湖底に到達した)延べ日数を $D_{FO}$ として計算格子毎にカウントした。

図 23 に 2017 年度と 2018 年度において全層循環に至った延べ日数 $D_{FO}$ のマップを示す。左図が 2017 年度、中央図が 2018 年度における  $D_{FO}$  のマップであり、2017 年度では琵琶湖全域にわたって全層循環が少なくとも 1 ヶ月以上形成されていたことがわかる。一方、2018 年度は全層循環が起きていない( $D_{FO}$  が 0 日)となっている場所が第一・第二湖盆周辺において部分的に出現しており、また $D_{FO}$ が 1 ヶ月に満たない短い期間が占める面積が大きい。このように、2018 年度では琵琶湖全域を占める全層循環が一度も形成されていなかったことが再現されている。ただし、全層循環の再現性には湖面風をどのように推定するかが課題である。例えば、図 23 の右図はモデルに入力した 2017 年度の湖面風速を校正せずに用いた計算結果であるが、全層循環の延べ日数 $D_{FO}$ が激減し、特に水深の深い湖盆においては $D_{FO}$ が 0 日となったエリアが 2018 年度よりも顕著に広がっている。本再現シミュレーションでは、モデルに与えた風速は GPV-MSM 気象予測値から推定された湖面風速であり、推測風速と観測風速(雄琴沖及び安曇川沖総合自動観測所)の比較結果から、現場観測水温データに合うようにモデルへの入力風速を 1.5~2 倍にして入力させている。水温場の再現性と同様に、全層循環の形成やその延べ日数には、推定風速の影響が大きいことが示唆された。現段階では、風速データをモデルに入力する際には、現場水温観測データ等を使用して計算水温の再現性がある程度担保されるように風速を校正する必要がある。

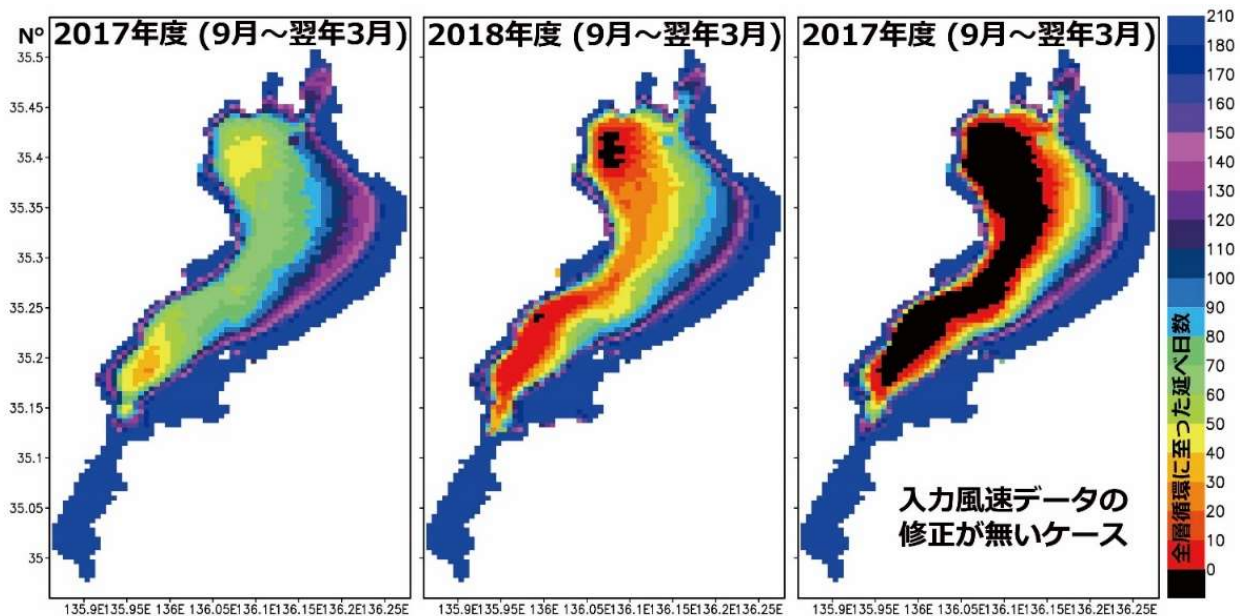


図 23. 2017 年度(左)と 2018 年度(中央)における全層循環が形成された延べ日数  $D_{F0}$  のマップ。2017 年度において風速校正をしなかった数値実験による  $D_{F0}$  のマップ(右).

次に、風速を増減させた数値実験結果について、形成された全層循環の面積と混合層体積の時間変化に注目して、両年度における違いをみた(図 24)。2017 年度では、全層循環の面積  $A_{F0}$  が 100% に達する時期は CR(コントロールラン)において 1 月下旬、2 月中旬、3 月中旬であり、全層循環が琵琶湖全域に形成される期間は断続的であった。CR では 1 月下旬に  $A_{F0}$  が例年より早期に 100% に達したことは、滋賀県琵琶湖環境科学センターが報告した観測報告(早期の全層循環達成)と一致する。図 24 下段に示した混合層の体積  $V_{ML}$  の時系列をみると、1 月下旬から 3 月中旬までは湖水の 90% 以上が混合層に占められており、琵琶湖全容積にほぼ近い体積が 1 月下旬以降ずっと鉛直混合していたことを示唆する。風速を減少させた 2017 年度の実験結果では、風速の減少率に応じて  $A_{F0}$  と  $V_{ML}$  も減少した。一方、風速を増加させた 2018 年度の実験結果では、その逆の結果となった。これらの結果は定性的には予想通りであった。興味深いことに、2017 年度に注目すると、風速の減少率 1 割(W-10)のケースは  $A_{F0}$  が 100% になる時期が 1 月下旬に存在していたが、風速の減少率が 2 割以下のケース(W-20~W-50)では  $A_{F0}$  は 100% にまで達した時期がなかった。このことは、 $A_{F0}$  を指標として全層循環の達成を判断した場合、風速が約 2 割弱になると、琵琶湖全域が同時に全層循環に達しないことを意味する。 $V_{ML}$  をみてみると、風速 3~4 割弱させたケース(W-30~W-40)では、1 月下旬から 3 月下旬までは  $V_{ML}$  がほぼ 90% 以上であった。これは、風速が約 4 割減少しても湖面冷却によって琵琶湖の大部分は依然として鉛直循環していることを意味する。しかし、風速 5 割弱ケース(W-50)については  $V_{ML}$  が 90% 以下になり全ケースの中で  $A_{F0}$  と  $V_{ML}$  とともに最も小さいケースであった。

2018年度において風速を強化した実験結果をみると、いずれのケースも2月中以降は $V_{ML}$ はほぼ90%以上となり、琵琶湖全域がほぼ混合層に占められた。風速増加率3割以上のケース(W+30~W+50)においては、 $A_{FO}$ が100%になる時期が2月中旬に存在し、W+50のケースでは1月下旬には $A_{FO}$ が100%に至った。このことから、2018年度の風速が、約3割強化されれば全層循環は例年並みに達成されたと推察され、約5割強化されれば2017年度並みに1月下旬に(早期に)琵琶湖全域で同時に全層循環が形成されたと考えられる。

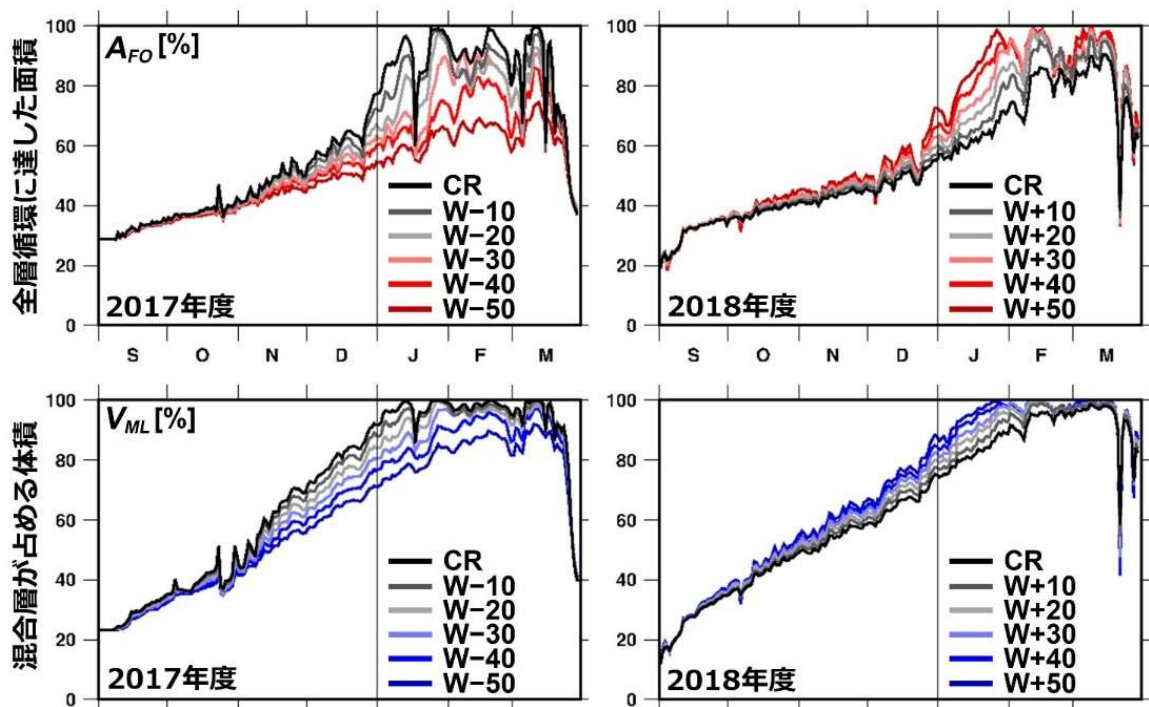


図 24. 2017年度(左図)と2018年度(右図)における、風速を変化させた実験結果から得られた全層循環が形成された面積 $A_{FO}$ (上段)と琵琶湖全容積に対して混合層が占める体積 $V_{ML}$ (下段)の時系列。

これまで多くの研究は、気候変動による気温上昇が湖沼に及ぼす影響に注目してきたが、今後は風速変化についても調査する必要がある。琵琶湖においては、2017年度の“強い全層循環”と、2018年度の“未完の全層循環”が発生し、鉛直循環のレジームシフトの兆候が示唆された。本報告では、両年における鉛直混合を再現したシミュレーション結果と、気候変動を模した仮想的な感度実験結果を紹介し、風速変化が全層循環へ与える影響について考察した。風速が約2割減少すると2017年度の全層循環は未完となった。2018年度は風速の強化が約3割で全層循環が達成された。このように全層循環の達成時期の遅延や延べ日数の短期化には気温上昇に加えて風速弱も大きな支配要因であることがわかった。ただし、全層循環の形成やその延べ日数には、風速の影響が大きいので、湖面風をどのように推定するかが今後の課題として挙げられた。

## 【サブテーマ2. 底泥環境の評価と底泥溶出に関する研究】

### （1）簡易な底泥酸素消費量測定法の開発

底泥表面では有機物分解や溶出した還元性物質の酸化等に伴い DO が消費される。この DO 消費は、底泥酸素消費量（Sediment oxygen demand, SOD）とされ、環境基準である底層 DO の主な変動要因の一つである。それゆえ、底層 DO の動態解明のためには、DO に加えて SOD についてもモニタリングする必要がある。SOD の測定は、測定用機器を現場に設置し測定する方法と底泥コアを実験室で培養し測定する方法に大別される。しかし、前者は機器の設置技術や費用、後者は実験手法の多様性や大きな底泥コアの取り扱いの問題が存在する。これらは SOD 測定を行う上での課題となっている。以上の経緯から、本研究では既存の底泥コアを用いた SOD 測定法よりも短時間で簡単に実施できる新しい SOD 測定法の開発を行った。

滋賀県の琵琶湖において、不攪乱柱状採泥器（離合社）を用いて底泥コア（内径 11cm、長さ 50cm）を採取した。底泥コアは層構造を乱さぬように、予め DO 測定用センサーチップ（PreSens）を張り付けたガラスの円筒容器（内径 12.8 mm、長さ 125 mm）に 8mL 採取した（図 25）。ここに孔径 0.2 $\mu$ m のメンブレンフィルターでろ過した底泥直上水を加え密閉し、現場水温で培養した（バイアル法）。直上水の攪拌には自作した小型の攪拌子を使用した（図 26）。直上水の攪拌による底泥表面の水流速度は粒子画像流速測定法により測定した。DO 濃度の時間変化は蛍光式酸素センサー Fibox4（PreSens）を用いて測定した。新手法との比較のため、底質調査法（環境省水・大気環境局 2012）に準じた底泥コアを用いた既存手法（コア法）との比較検討も行った。SOD の算出は以下の式に従った。

$$\text{SOD (g}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}) = \Delta[\text{DO}]/\text{dt} \times (\text{直上水量}/\text{底泥表面積}) \times 24/1000$$

$\Delta[\text{DO}]/\text{dt}$  : 培養時間 t (h) における DO 濃度 ( $\text{mg L}^{-1}$ ) 変化から求めた近似曲線の傾き ( $\text{mg L}^{-1} \text{ h}^{-1}$ )、  
24/1000 : 単位換算係数

バイアル法とコア法による SOD を比較した結果、図 27 の様に両者には有意な正の相関が見られた。これはバイアル法が既存の SOD 測定手法の代替手法となり得ることを示唆している。新手法は小型で前処理も容易なことから、SOD 測定における作業負担を低減し、モニタリングデータの取得促進につながる。新手法では既存手法に比べて SOD が僅かに低くなる傾向が見られた。バイアル法とコア法で用いる容器の直径は大きく異なるため、壁効果によって水流速度低下し SOD が減少する可能性が考えられた。そのため、バイアル法とコア法の水流速度を調べた結果、底泥表面流速はコア法では 0.2–2  $\text{cm s}^{-1}$  であったのに対し、バイアル法では 6  $\text{mm s}^{-1}$  未満と大きな差が見られた。そこで、バイアル法の流速を 0.2–2  $\text{cm s}^{-1}$  に調整し SOD 測定を行い水流流速の影響を検証したが SOD の上昇は見られなかった。SOD 上昇に寄与するその他の要因としては、底生生物による呼吸、巣穴構造による移流増加が想定され、更なる精度向上に向けては、それら要因の検証が求められる。

本研究では、SOD 測定における前処理時間を短縮し測定時の操作性も大きく向上させることができた。この新しい手法が確立することによって、SOD モニタリングデータの蓄積に貢献し、湖の DO 動態の解明に大きな進歩をもたらすことが期待される。

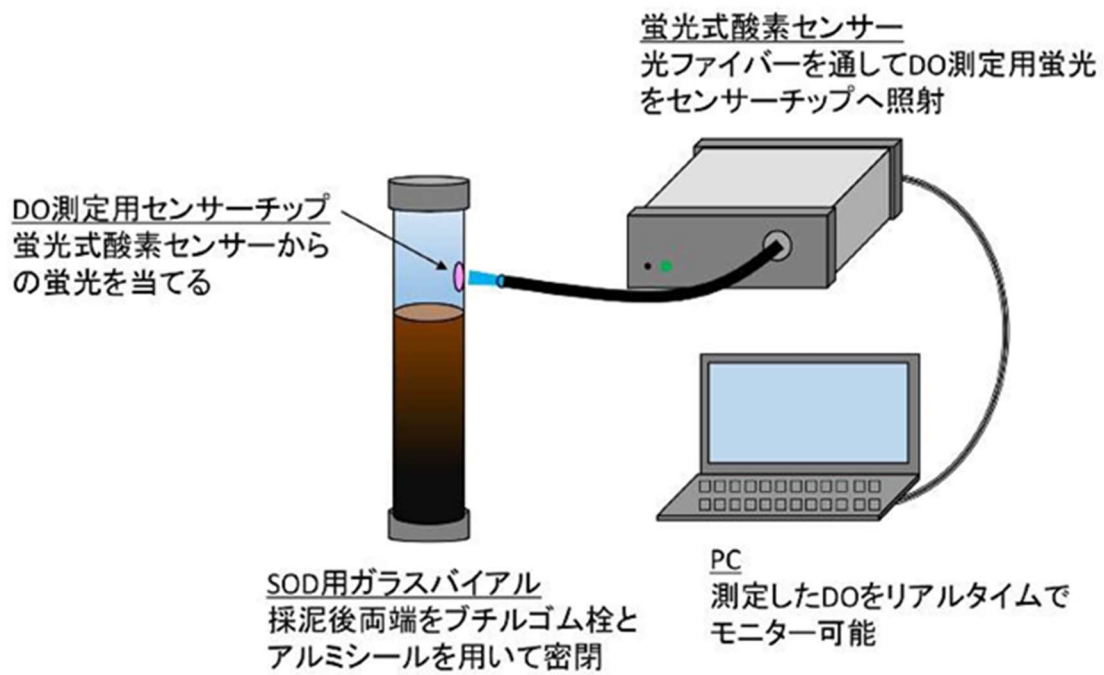


図 25. バイアル法による底泥酸素消費量 (SOD) の測定概要.



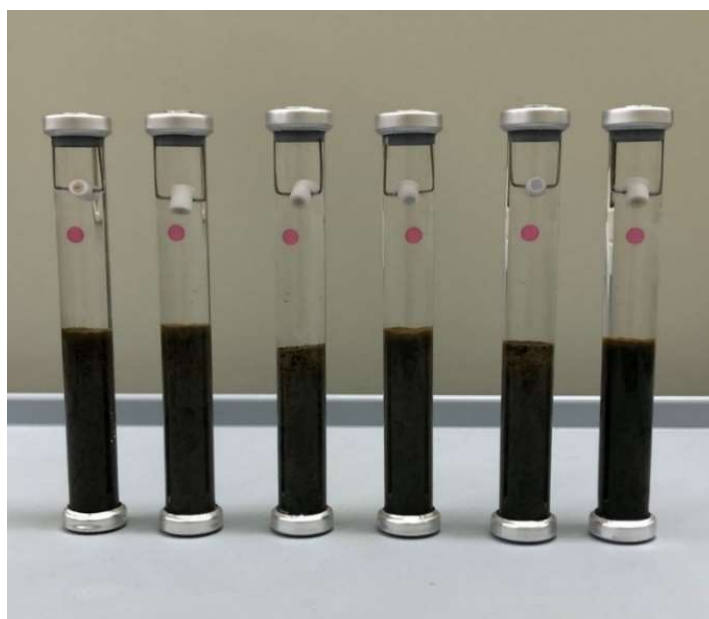


図26. バイアル法でSOD測定に使用するサンプル. バイアル内上部に取り付けた攪拌子を外部磁石により回転させることで試水を攪拌することができる.

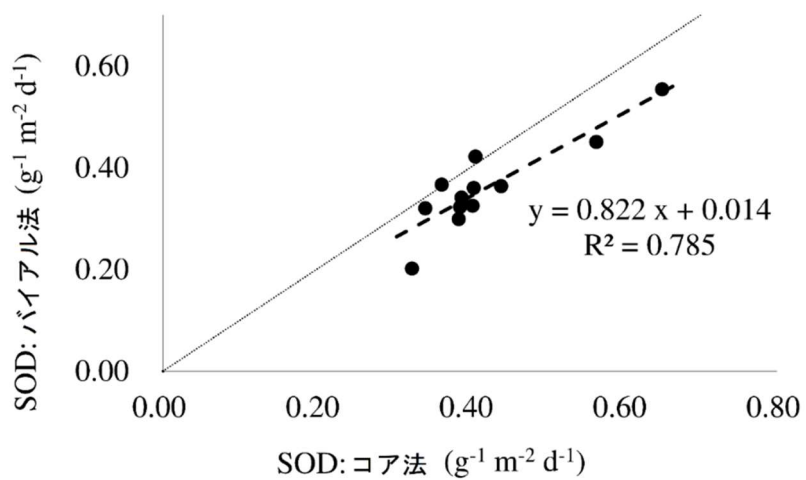


図 27. バイアル法とコア法による SOD 測定値の関係.

## (2) 琵琶湖南湖環境基準点における底層 DO の連続観測

琵琶湖南湖の中心部に位置する唐崎沖中央（図 28）において新たな環境基準である底層 DO の日変動を明らかにすべく唐崎沖中央で底層 DO の連続観測を行った。湖底直上 30cm に底層 DO の連続観測用 DO ロガー（図 28 左下；PME 社製、miniDOT ワイパー付き）を設置し、水温と DO の連続データを取得した。得られたデータを解析し底層 DO の変動に対する水温や気象データとの関連性を議論した。

2018 年 7 月上旬に底層 DO と水温の急激な低下が見られた（図 29a, b, e 下向き青色矢印）。これは 7 月 5 日の豪雨によって南湖に河川水または地下水といった、低温、低 DO の異なる水塊が多量に流入し底層 DO が低下したものと推察される。季節変化については、夏季に日変動が大きくなり底層 DO が低下する現象が観測された（図 29a）。この現象には、夏季に水温上昇に伴う BOD や底泥酸素消費量の増加や糸状藻類や底生生物の呼吸量の増加等が関与しているものと考えられる。底層 DO が特に低くなる期間を 3 期間に分け詳しく解析を行った（図 29a の赤色データ期間）。その結果、いずれも水温が 25.5℃以上の高水温期であった（図 29b、横赤色破線が 25.5℃）。高水温期でも低気温、強風、低日射量のような荒天時は底層 DO が比較的高くなる時期が観察された（図 29 の縦の青色破線時）が、風速  $3\text{ m s}^{-1}$  以下となる期間にも底層 DO が低くなる傾向が見られた。以上のことから、本調査地では 2018 年夏季には高水温、低風速の気象条件の際に貧酸素化のリスクが高まると推測できた。

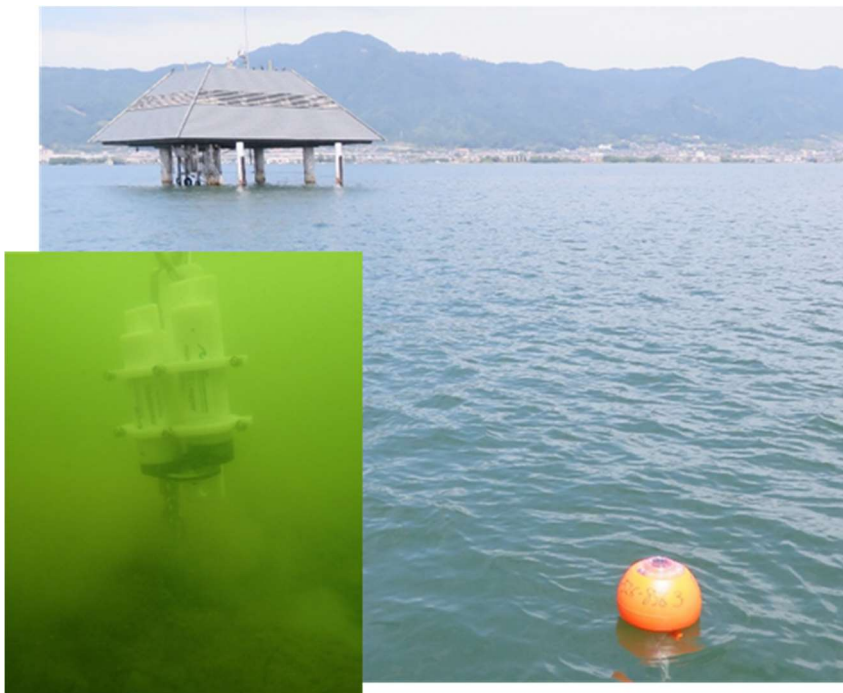


図 28. 南湖唐崎沖中央に設置した DO ロガー（写真左下：湖底に設置した DO ロガー、写真右：設置地点の様子）。

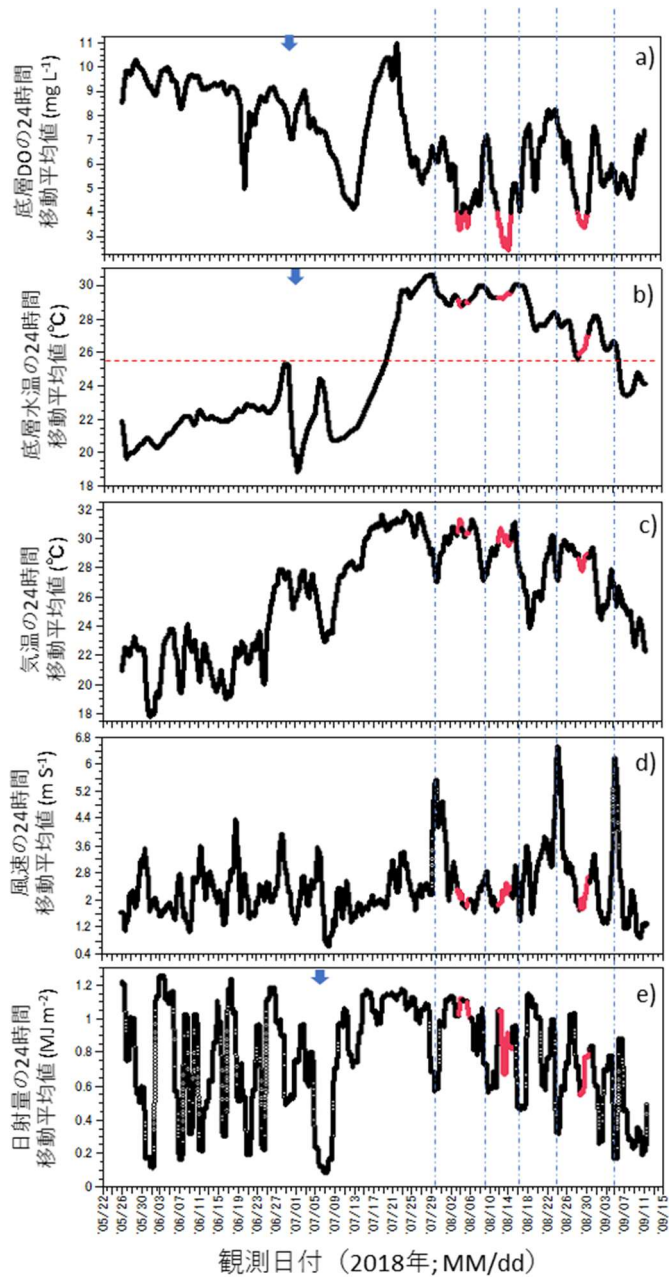


図 29. 平成 30 年度(2018 年度)南湖唐崎沖中央の底層 DO と水温および気象パラメータの変動 (24 時間移動平均) : a) 底層 DO、b) 底層水温、c) 気温、d) 風速、e) 日射量.

### (3) 琵琶湖南湖環境基準点における底層DOの時系列変動要因

2018年から琵琶湖南湖の中心部に位置する唐崎沖中央において新たな環境基準である底層DOの日変動を明らかにすべく底層DOの連続観測を開始した。湖底直上30cmと表層50cmにDO連続観測用のDOロガー（PME社製、miniDOTワイパー付き）を設置し、5/25から9/11までの3か月半余りの水温とDOの連続データ（ただし、底層DO異常に高い値を示した7/13-7/28の2週間を除いてある）を取得した。また、降水量および風向・風速といった気象データに関しては、滋賀県琵琶湖環境科学研究センター（大津市柳が崎）の建屋屋上の気象ステーションからデータ供与を受けたものを底層DOの変動解析に供した。

DOロガーから得られる表層、底層の水温とDOに加えて、上記気象データの元は10分間隔で得られたデータであるが、ばらつきが大きいため、1時間平均値として解析に供した。また、一つ前の1時間平均値とのDO差から求められる単位時間あたりのDO変化量（ $\Delta DO / \Delta t$ ）の日中の平均値から純生産速度（NEP）を、夜間の平均値から生態系呼吸速度（R）を算出し、NEP+Rより総生産速度（GPP）を求めた（Staehr et al. 2010）。

昨年度に引き続き、底層DOの変動に対する水温や気象データとの関連性を解析した。6月末に表層水温が26℃以上になってからは、底層DOが大きくなり低下するときは必ず表層と底層の水温差が大きくなった（図30）。このことから、表層と底層の水温差が湖水柱の鉛直混合を阻害し、底層へのDOの輸送が滞った際に底層の貧酸素化が進行する可能性の高いことが分かった。モニタリング地点の水深は4m余りしかないが、表層と底層の水温差が1℃以上あれば、上記のプロセスが働き底層の貧酸素化リスクの高まっていることが推察された。また、7/1から9/11の73日間でこの表層と底層の水温差が解消されたのは、8回確認され、うち7回では降雨が確認されていることから（図30）、降雨に伴う北湖の水の南湖への流入や周辺からの河川水等の流入が水温差解消に関連していると推察された。

一方、DOの時間変化量から算出したRとGPPについては、両者の間に強い相関があり、GPPで生産された酸素の47%がRにより消費されていることが分かった（図31右図）。R、GPPともに高水温で増加する明らかな水温依存性が認められた（図31左図）。Rの場合、夜間の底層水温が10℃上昇した場合、平均で $0.078 \text{ gO}_2 \text{ m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ 増加し、水温20℃の時のR（ $0.036 \text{ gO}_2 \text{ m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ ）が30℃で倍増以上に増加することが分かった。このことは、夏季に貧酸素リスクが高まる一因となっていると考えられた。

今後はRやGPPといった酸素代謝パラメータの時系列変化に関する情報を蓄積すると同時に、貧酸素化を引き起こす、気象条件や水質についての解析を進め、琵琶湖南湖におけるDOのモニタリングとその要因解析を進める。

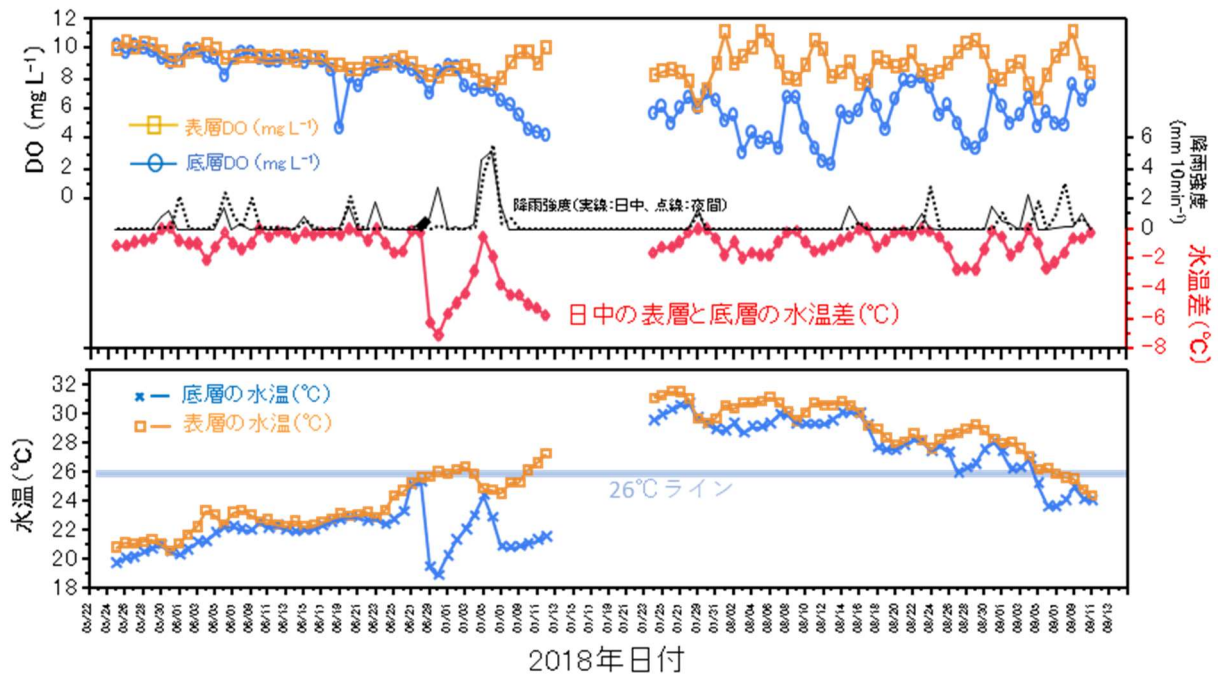


図 30. 2018 年夏季の唐崎沖中央における表層と底層の水温と DO.

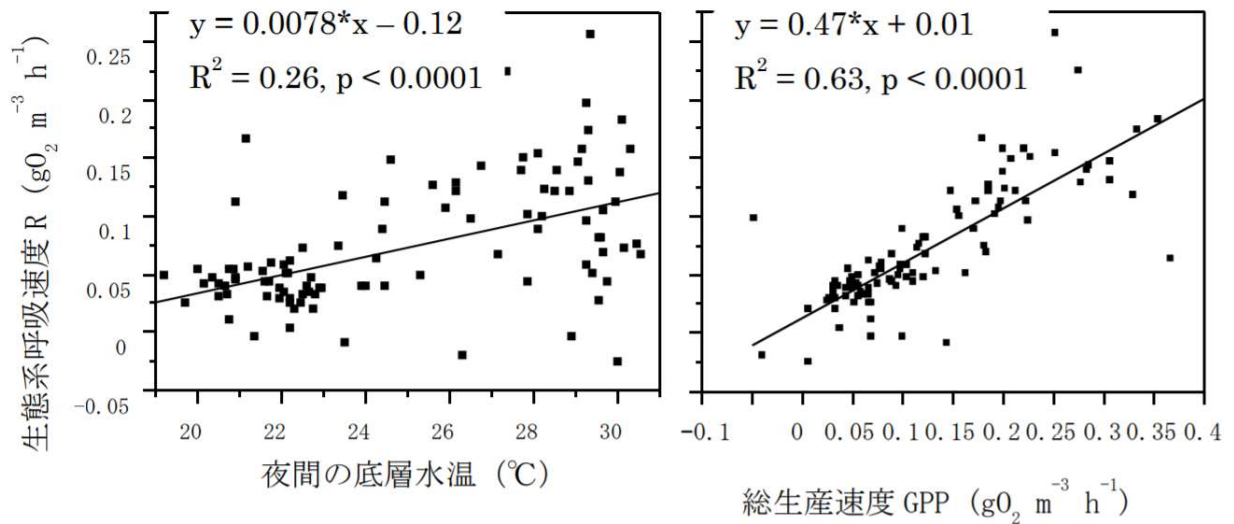


図 31. 2018 年夏季の唐崎沖中央における R の水温依存性と GPP との関係.

#### (4) 琵琶湖南湖環境基準点における貧酸素化の要因解析

2016年より導入された環境基準である底層 DO の日変動を明らかにすべく、2018年6月から2020年7月にかけて、琵琶湖南湖の中心（唐崎沖中央）と赤野井湾湾口（新杉江港沖）の2地点において、夏季を中心に底層 DO の連続観測を実施した。湖底から30 cm に DO 連続観測用のロガー（2019年以前はPME社製、miniDOTワイパー付き、2020年以降はJFE社製、Rinko W）を設置し、水温とDOの連続データを取得した。また、降水量および風向・風速といった気象データに関しては、アメダスの大津気象ステーションの特別データを解析に供した。さらに貧酸素化の要因をさぐるため、琵琶湖南湖西岸の三保ヶ崎の自動測定装置により取得された pH と濁度の特別データを用いた。これらバックグラウンドデータの取得日時と DO・水温の測定日時は、完全に一致しているわけではないため、バックグラウンドデータについては JMP (ver.7.0.1, SAS)上で内挿補完した予測値（ $\lambda=1$  のスプライン平滑化処理）を用いて評価した。また、10分間あたりの日照時間データについては日照率 = 日照時間(分) / 10分に変換し、日周期をスプライン平滑化処理（ $\lambda=10^{16}$ ）により除去した値を用いて評価した。また、南湖の流動に大きな影響を及ぼす人為要因として琵琶湖河川事務所から提供された特別の瀬田川洗堰放流量データを考察に用いた。

DO ロガーから得られる水温と DO のデータは10分間隔で得られたデータであるが、ばらつきが大きいため、1時間平均値として解析に供した。貧酸素化の基準の一つとして考えられている底層 DO が  $4.0 \text{ mgL}^{-1}$  を頻繁に下回る期間およびその期間直前の DO 低下傾向の顕著な期間を合わせて「DO 低下期間」とし抽出することで、貧酸素化の直接要因とその背後にある要因の解析を行った。

その結果、唐崎沖中央では2018年に4回、新杉江港沖では2018年に2回、2019年に5回の、のべ11回の DO 低下期間を確認することができた。そのうち1回は両地点で同じ期間であったため、南湖2地点で観察された DO 低下期間は計10回であった。各 DO 低下期間について、水質（濁度と pH）との同調性を確認したところ、10回中9回で濁度の上昇と pH の低下が同調もしくは DO 低下期間直前に顕著であった。図 32、図 33 および図 34 で両者の対応関係を点線矢印で示した。個々の DO 低下期間に関しては、数日から一週間であり、水域および発生時期に応じてばらついてはいたが、ほとんどの DO 低下期間が濁度の上昇と pH の低下の時期と同調していたことから、DO 低下の原因は濁度上昇により湖水柱の光環境が悪化し、結果として光合成活性が低下したことに起因すると考えられた。一方、気象要因や該当時期の天気図を参考にして、そうした光環境の悪化を引き起こした原因を解析した結果、表 1 に示すように、前線停滞による日照不足、もしくは台風によるものと考えられた。前線停滞時はまとまった降雨を伴うことが多く、日照不足に加えて出水による流域からの濁水流入による光環境の悪化が生じた可能性が高い。台風時はそれらに加えて、強風による底泥の巻き上げ等による光環境の悪化も加わった可能性がある。

一方、水質との上記のような同調性が見られない DO 低下期間は1回だけあった。その理由は不明であるが、南湖の流動を大きく変える瀬田川洗堰の放流量の大きな変化やバックグラウンド水質と DO の取得水域が異なることなどが考えられた。

以上、3年間2地点の底層 DO 高頻度モニタリングの結果から、琵琶湖南湖における DO 低下の主要因は気象イベントによるところが大きく、今後その影響の緩和につながる技術開発や知見の集積が必要となると考えられた。



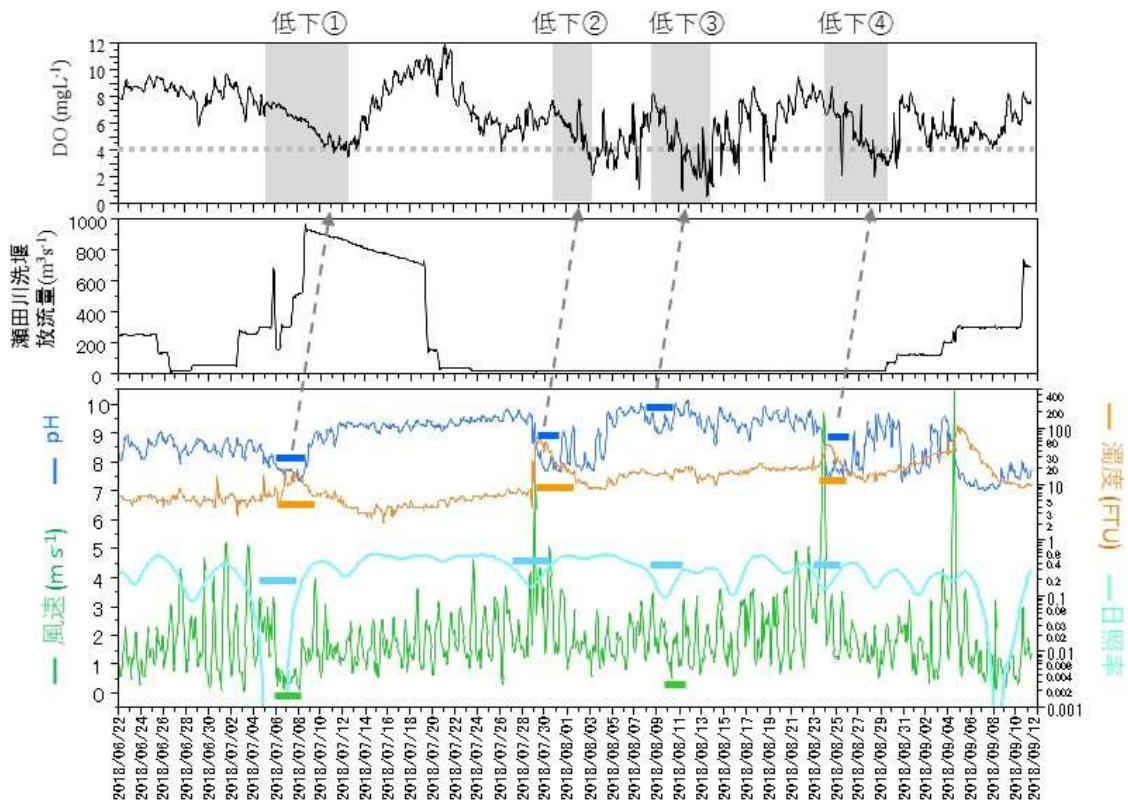


図 32. 2018 年の唐崎沖中央の底層 DO と関連水質・気象因子.

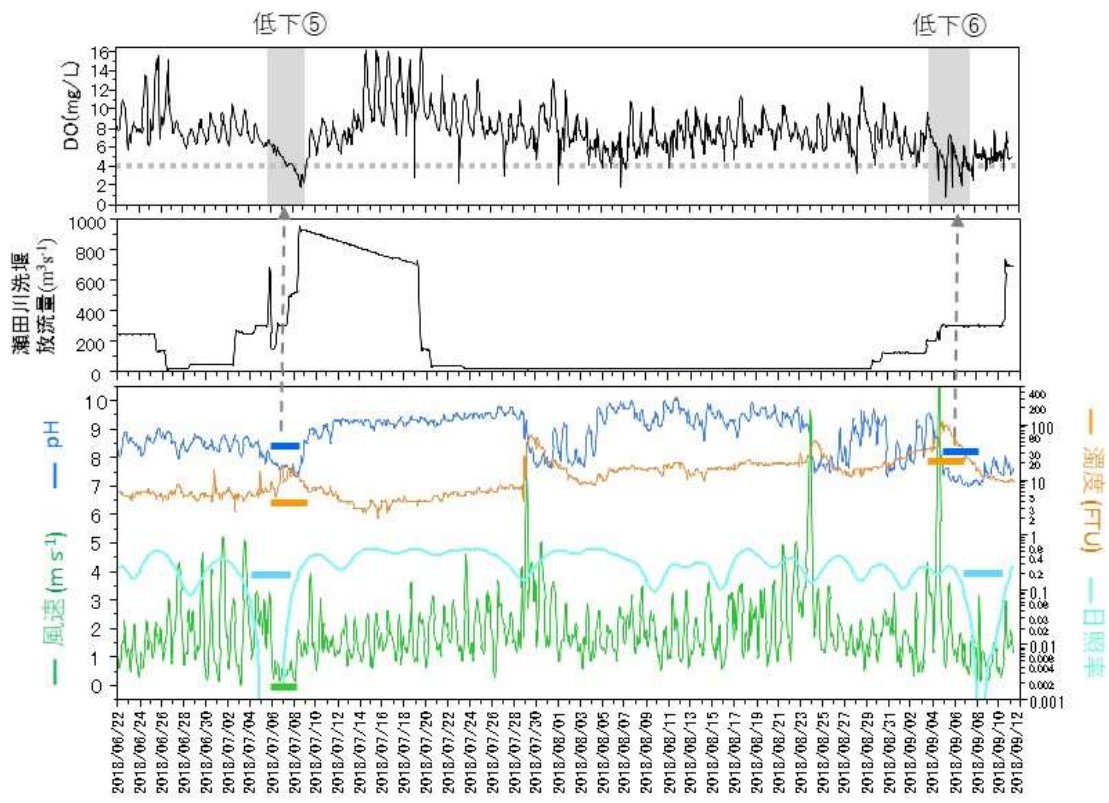


図 33. 2018 年の新杉江港沖の底層 DO と関連水質・気象因子.

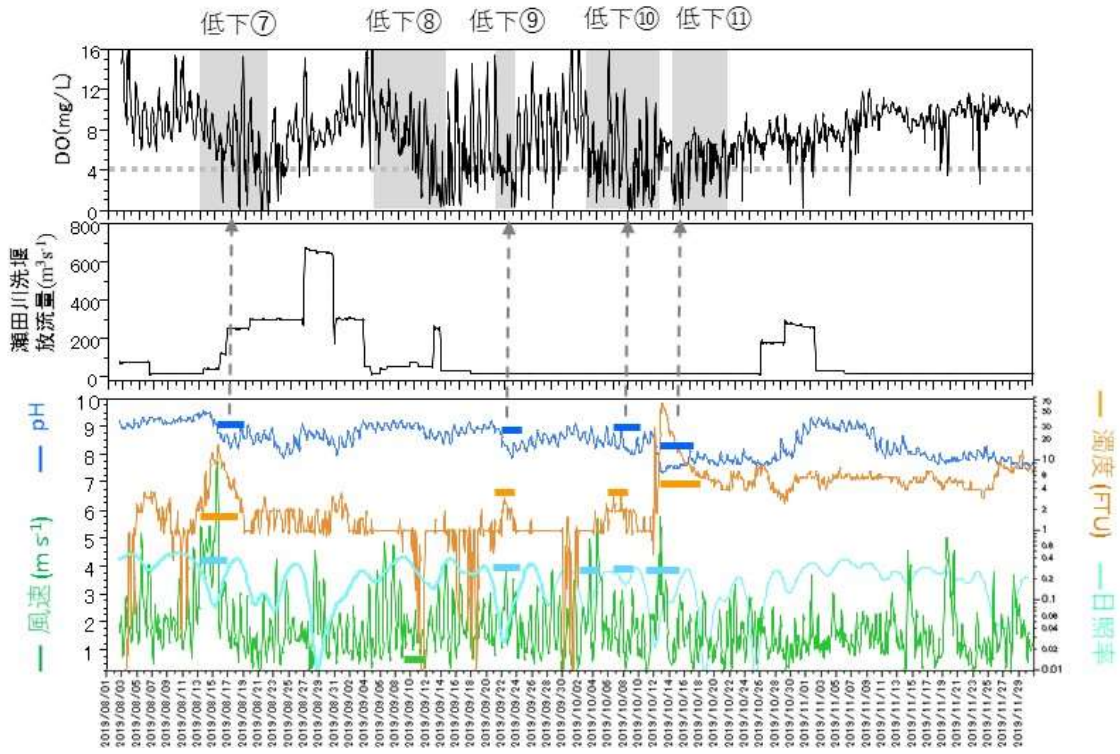


図 34. 2019 年の新杉江港沖の底層 DO と関連水質・気象因子.

表 1. 2018 年 6 月～2020 年 7 月の夏季を中心に 2 水域で発生した底層 DO < 4 mg L<sup>-1</sup> の貧酸素化現象の期間とその要因.

DO 低下期間 (図の低下 No.)	関連水質からの説明可能性*	気象イベントとの関連性	貧酸素水域の広域性**
2018. 7. 5-12 (①、⑤)	可能	前線停滞による日照不足	広域的
2018. 7. 31-8. 3 (②)	可能	台風 12 号による濁り	局所的
2018. 8. 8-13 (③)	可能	台風 13, 14 号と前線停滞における濁りと日照不足	局所的
2018. 8. 24-29 (④)	可能	前線停滞による日照不足	局所的
2018. 9. 3-7 (⑥)	可能	台風 21 号による濁り	局所的
2019. 8. 13-21 (⑦)	可能	台風 10 号による濁り	局所的
2019. 9. 5-14 (⑧)	不可能	不明	局所的
2019. 9. 21-23 (⑨)	可能	前線停滞による日照不足	局所的
2019. 10. 3-12 (⑩)	可能	前線停滞による日照不足	不明
2019. 10. 14-21 (⑪)	可能	台風 19 号による濁り	不明

\*湖水柱の光環境の指標として濁度、光合成活性の指標として pH からの説明が可能かとの観点で判断した。

\*\* 2 水域の両方で底層 DO < 4 mg L<sup>-1</sup> の貧酸素化現象を確認した場合には「広域的」とし、どちらか一方のみの時には「局所的」とした。またいずれかの水域のデータの欠けている期間に関しては「不明」とした。

### 3. まとめ

本研究において得られた主な結果を以下に記述する。

#### 「溶存有機物 (DOM) の分子サイズ」

- 琵琶湖南湖 (18地点) における DOM の分子サイズを TOC として詳細に検討した。結果、南湖 DOM は分子量約 10~11 万ダルトン (Da) の高分子画分と分子量 1,500~2,000Da の低分子画分から成ることが明らかになった。
- 溶存有機物 (DOM) の特性・起源評価のテーマについては、自ら開発した TOC 検出器を搭載したサイズ排除クロマトグラフィー装置 (SEC) を用いて、琵琶湖南湖 DOM の分子サイズ分布を測定・評価した。その DOM の分子サイズは約 12 万ダルトン (Da) の高分子画分と約 2,000Da の低分子画分で構成されていることが分かった。

#### 「細菌生産 (二次生産) 速度」

- 琵琶湖北湖において細菌二次生産速度の深度、季節、地点別の変動を評価した。細菌生産速度は夏季の表層で高く冬季の深水層で低い値を示した。20m 以深の生産速度は季節変動が無く概ね一定であった。細菌生産と環境因子との関係を検討したところ、細菌生産速度は水温と有意な正の相関を示した。加えて、粒状態リン濃度と高い相関が認められた。
- 琵琶湖北湖において測定した細菌生産速度 (BP) と過去に実測された BP の値を比較検討して、30 年間での BP の変化を明らかにした。結果、琵琶湖北湖では 1986 年からの 30 年間で BP はおよそ 5 分の 1 程度まで低下したことが示唆された。
- タンパク質合成に基づくバクテリアの生産速度を、世界で初めて、放射性同位体 (標識されたロイシン) を使用せずに定量測定する方法を開発した。安定同位体・重水素 (D) で標識したロイシンを用いて液体クロマトグラフィー質量分析計により測定する。以上により、従来の放射性同位体を使用する二通りのバクテリア生産速度測定法 (DNA 合成とタンパク質合成に基づく方法) の放射性同位体フリー化が達成された。

#### 「藻類一次生産速度」

- 藻類の一次生産速度を測定する新たな手法として、高速フラッシュ蛍光光度計を用いた方法が開発され、ラン藻を含む植物プランクトン群集を対象として FRRf 測定を行う場合、励起波長 450 nm と 624 nm の組み合わせが有効であることが示唆された。
- 同方法を用いて琵琶湖北湖と南湖における藻類一次生産速度を測定したところ、表層 1-5m にピーク値があり、全層生産の大半は表層での生産が占めていた。北湖と南湖ともに、一次生産は沖帯で高く沿岸部で低い値を示した。一次生産速度と環境因子の関係を検討したところ、窒素やリン濃度とは連動しておらず、有機物濃度と逆相関の関係が夏季に認められた。
- 植物プランクトンの光合成活性を測定する高速フラッシュ蛍光光度法 (FRRf 法) を用い、湖沼の総一次生産量 (GPP) を即時に得るためのモデル開発を行った。最終的に、様々な要因を全て考慮したモデルを開発した。当該モデルは琵琶湖北湖および南湖の GPP を良好に再現することができた。
- 琵琶湖では *Staurastrum* (1980 年代~) や *Micrasterias hardyi* (2016 年~) といった大型緑藻の増加が観察されたが、その増殖メカニズムはよく分かっていない。そこで、琵琶湖の植物プランクトン群集のサイズ別の光合成特性を FRRf 法により把握・評価した。結果、沿岸および沖合ともに、大型藻

類は小型藻類よりも光感受性が低い、強光ストレスも低いために光合成活性が高いことが明らかとなった。

- 琵琶湖における植物プランクトン群集の光化学系 II (PSII) の活性特性とプランクトンサイズの関係、野外調査と栄養塩添加実験により検討した。PSII 活性を示す指標として最大量子収率、実行量子収率および熱放散係数を、プランクトンサイズ別に測定した。結果、細胞内の光合成色素密度が活性やストレスの違いに影響を与えていることが示唆された。光ストレスを受けやすい沖合の小型植物プランクトンは、大型植物プランクトンよりも PSII 防御・修復にかかるコストが高く、栄養塩不足に陥りやすい可能性が示された。

#### 「底泥酸素消費速度」

- バイアルを用いた底泥酸素消費量 (SOD) 測定法において試料の攪拌の影響を検討した。結果、試水を攪拌することで SOD が顕著に増大することが明らかとなった。
- 底泥の酸素消費量 (sediment oxygen demand, SOD) を、従来法 (底泥コア法、内径 11cm×長さ 50cm) に比較して、短時間で簡便に実施できる新しい SOD 測定法 (バイアル法、内径 12.8mm×長さ 125mm) を開発した。SOD 測定における前処理時間の大幅な短縮と操作性の大きな向上を達成した。今後の SOD モニタリングデータの収集・蓄積が大いに期待される。

#### 「DO の連続モニタリング」

- 琵琶湖南湖において DO の日変動を、連続観測用 DO ロガーを用いて、連続データとして取得した。得られたデータを解析し底層 DO の変動に対する水温や気象データとの関連性を検討した。結果として、生態系呼吸速度 (R) と総生産速度 (GPP) は強い相関があり、GPP で生産された酸素の 47% が R により消費されていることがわかった。R および GPP ともに高水温で増加するため、夏季に貧酸素リスクが高まる一因と考えられた。
- 環境基準項目である底層 DO の日変動を明らかにすべく、2018 年 6 月から 2020 年 7 月にかけて、琵琶湖南湖の中心 (唐崎沖中央) と赤野井湾湾口 (新杉江港沖) の 2 地点において、夏季を中心に底層 DO の連続観測を実施した。観測結果から、琵琶湖南湖における DO 低下の主要因は気象イベントによるところが大きいと示唆された。

#### 「リン酸態リン濃度の測定」

- 溶存態リン (DTP) の分析にトリプル四重極型誘導結合プラズマ質量分析計 (ICP-MS/MS) を用いることで、モリブデンブルー法の定量下限となる  $\mu\text{g/L}$  オーダーの琵琶湖南湖における DTP の動態を明らかにすることができた。DTP は閉鎖性の高いエリアで夏から秋にかけて濃度が高くなる傾向を示した。

#### 「全層循環再現シミュレーション解析」

- 全層循環の再現シミュレーション結果に基づいた琵琶湖全体の熱収支解析を実施した。当該シミュレーションは琵琶湖における代表的な物理現象をうまく再現していた。全層循環の強さを決定する冬季湖面冷却と琵琶湖全体の貯熱量に注目した熱収支解析により、熱貯熱量の閾値 (約 1000 PJ [P:ペタ=10<sup>15</sup>]) は、琵琶湖における全層循環を完了できるかどうかの指標になると示唆された。
- 琵琶湖で「強い全層循環」が形成された 2017 年度と「全層循環が未完了」であった 2018 年度に注目して、水温の時空間変動を数値シミュレーションによって再現した。さらに気温と風速を仮想的に変化させた感度数値実験を実施した。結果として、風速が約 2 割減少すると 2017 年度の全層循環



は未完となり、2018年度は風速が約3割増大で全層循環が達成された。全層循環の達成時期の遅延や延べ日数の短期化には気温上昇に加えて風速弱化も大きな支配要因であることがわかった。

#### 4. 引用文献

- Azam F. (1998): Microbial Control of Oceanic Carbon Flux: The Plot Thickens. *Science* 280, 694-696.
- Benner R., Amon R.M.W. (2015): The Size-reactivity continuum of major bioelements in the Ocean. *Annual Review of Marine Science*, 7, 185-205.
- Endoh S., Okamoto I., Okumura Y., Tamura T., Takano K., Hamai Y., Kodani T., Hayami T., Asada H., Kawamura H., Iwane K. (1987): Measurements of lake current by using a radar. *Mem. Fac. Educ., Shiga Univ.* 37, 27-38 (in Japanese).
- Endoh, S., Okumura, Y. (1993): Gyre system in Lake Biwa derived from recent current measurements. *Japanese Journal of Limnology*, 54(3), 191-197.
- Fuhrman J.A., Azam F. (1980): Bacterioplankton secondary production estimates for coastal waters of british columbia, antarctica, and california. *Applied and Environmental Microbiology* 39, 1085-1095.
- Fuhrman J.A., Azam F. (1982): Thymidine Incorporation as a Measure of Heterotrophic Bacterioplankton Production in Marine Surface Waters - Evaluation and Field Results. *Marine Biology* 66, 109-120.
- Gurung T.B., Nakanishi M., Urabe J. (2000): Seasonal and vertical difference in negative and positive effects of grazers on heterotrophic bacteria in Lake Biwa. *Limnology and Oceanography* 45, 1689-1696.
- 環境省水・大気環境局 (2012): 底質調査方法(平成24年8月). URL. [http://www.env.go.jp/water/teishitsuchousa/00\\_full.pdf](http://www.env.go.jp/water/teishitsuchousa/00_full.pdf)
- Kirchman D., Knees E., Hodson R. (1985): Leucine Incorporation and Its Potential as a Measure of Protein-Synthesis by Bacteria in Natural Aquatic Systems. *Applied and Environmental Microbiology* 49, 599-607.
- Kishimoto N., Ichise S., Suzuki K., Yamamoto C. (2013): Analysis of long-term variation in phytoplankton biovolume in the northern basin of Lake Biwa. *Limnology* 14, 117-128.
- Murphy, A.H., Epstein, E.S., 1989. Skill scores and correlation coefficients in model verification. *Monthly weather review*, 117(3), 572-582.
- Nagata T. (1987): Production rate of planktonic bacteria in the north basin of lake biwa, Japan. *Applied and Environmental Microbiology* 53, 2872-2882.
- 滋賀県 (2019): 滋賀の環境2019 (令和元年版環境白書) 資料編.
- Smedstad, O.M., Hurlburt, H.E., Metzger, E.J., Rhodes, R.C., Shriver, J.F., Wallcraft, A.J., Kara, A.B. (2003): An operational eddy resolving 1/16 global ocean nowcast/forecast system. *Journal of Marine Systems*, 40, 341-361.
- Smith D.C., Azam F. (1992): A simple, economical method for measuring bacterial protein synthesis rates in seawater using 3H-leucine. *Marine Microbial Food Webs* 6, 107-114.



- Staehr P.A., Bade D., Van de Bogert M.C., Koch G.R., Williamson C., Hanson P., Cole J.J., Kratz T. (2010): Lake metabolism and the diel oxygen technique: State of the science. *L&O Methods* 8, 628-644. DOI 10.4319/lom.2010.8.628
- Steward G.F., Azam F. (1999): Bromodeoxyuridine as an alternative to 3H-thymidine for measuring bacterial productivity in aquatic samples. *Aquatic Microbial Ecology* 19, 57-66.
- Tsuchiya K., Sano T., Kawasaki N., Fukuda H., Tomioka N., Hamasaki K., Tada Y., Shimode S., Toda T., Imai A. (2015): New radioisotope-free method for measuring bacterial production using [15N5]-2' -deoxyadenosine and liquid chromatography mass spectrometry (LC-MS) in aquatic environments. *Journal of Oceanography* 71, 675-683.
- Tsuchiya K., Sano T., Tomioka N., Kohzu A., Komatsu K., Shinohara R., Takamura N., Nakagawa M., Sugai Y., Kuwahara V.S., Toda T., Fukuda H., Imai A. (2019): Seasonal variability and regulation of bacterial production in a shallow eutrophic lake. *Limnology and Oceanography* 64, 2441-2454.

## 5. 研究発表

### 【誌上发表】

1. **今井章雄** (2017): 国立環境研究所琵琶湖分室、開所しました. *用水と廃水* 59(7), 1.
2. **Shinohara R.**, Hiroki M., **Kohzu A.**, **Imai A.**, Inoue T., Furussato F., **Komatsu K.**, Sato T., **Tomika N.**, **Shimotori K.**, Miura S. (2017): Role of organic phosphorus in sediment in a shallow eutrophic lake. *Water Resources Research* 53, 7175-7189.
3. Fukushima M., **Tomioka N.**, Jutagate T., Hiroki M., Murata T., Preecha C. Avakul P., Phomikong P., **Imai A.** (2017): The dynamics of pico-sized and bloom-forming cyanobacteria in large water bodies in the Mekong River Basin. *PLoS ONE* 12(12) e0189609.
4. **今井章雄** (2018). 湖沼の水質と生態系機能—湖内の生態系のはたらきに注目！—. *月刊下水道* 第17回世界湖沼会議開催記念「湖沼と下水道の交差点」、41(13), 24-26.
5. **Komatsu K.**, **Imai A.**, Kawasaki N. (2019): Comparison between "humic-like" peaks in excitation emission matrix spectra and resin-fractionated humic substance in aquatic environments. *Limnology* 20(1), 109-120.
6. **今井章雄** (2019): IWA-NOM7セッション座長コメント. *日本水道新聞* 2019年10月31日付け3面.
7. **Shimotori K.**, **Imai A.**, **Kohzu A.**, **Komatsu K.**, Koshikawa-K.M., Hayashi S, Watanabe Mirai. (2019): Long-term observations of the vertical distributions of mineral elements and phosphorus dynamics in sediments in a shallow eutrophic lake in Japan. *Journal of Soils and Sediments* 19(3), 1566-1575.
8. **Tsuchiya K.**, Sano T. **Tomioka N.**, **Kohzu A.**, **Komatsu K.**, **Shinohara R.**, **Takamura N.**, Nakagawa M., Sugai Y., Kuwahara V.S., Toda T., Fukuda H., **Imai A.** (2019): Seasonal variability and regulation of bacterial production in a shallow eutrophic lake. *Limnology and Oceanography* 64(6), 2441-2454.
9. **小松一弘**, 尾内秀美, **今井章雄**, 川崎伸之, Emi Fazlina Hashim, Mohd Kushairi Mohd Rajuddin (2019): 土壌抽出物中溶存有機物 (DOM) の微細藻類増殖に及ぼす影響. *水環境学会誌* 42(6), 239-246.
10. **Komatsu K.**, Onodera T., **Kohzu A.**, Syutsubo K., **Imai A.** (2020): Characterization of dissolved organic matter in wastewater during aerobic, anaerobic, and anoxic treatment processes by molecular size and fluorescence analyses. *Water Research* 171, 15 March 2020, 115459.
11. Hiroki M., Fukushima M., **Tomioka N.**, Murata T., **Imai A.**, Jutagate T., Preecha C., Avakul P., Phonikong P. (2020): Primary production estimated for large lakes and reservoirs in the Mekong River Basin. *Science of the Total Environment*, 747, 141133, DOI: 10.1016/j.citotenv.2020.141133.
12. **Kazama T.**, **Hayakawa K.**, Kuwahara V.S., **Shimotori K.**, **Imai A.**, **Komatsu K.** (2020). Development of photosynthetic carbon fixation model using multi-excitation wavelength fast repetition rate fluorometry in Lake Biwa. *bioRxiv*, <https://www.biorxiv.org/content/10.1101/2020.08.10.244012v1> (preprint)
13. **Kazama T.**, Urabe J., Yamamichi M., Tokita K., Yin X., Katano I., et al. (2020). A unified framework for understanding biomass ratio of herbivores to producers with a field test of plankton. *Authorea*. <https://doi.org/10.22541/au.159121368.85843146> (preprint)
14. **Kohzu A.**, Watanabe H., **Imai A.**, Takaya N., Miura S., **Shimotori K.**, **Komatsu K.** (2020): Magnetic resonance imaging as a novel method for elucidating sediment burrow structures and functions. *ACS Omega*, 5(25), 14933-14941.

15. Miura S., **Kohzu A.** (2020): Effects of downwash during unmanned aircraft system-assisted water sampling on water sampling on water mass structure directly below the UAS. *Limnology and Oceanography: Methods*, 18(8), 391-397.
16. 二瓶泰範, 鶴見悠太郎, 増田憲和, 原田浩太郎, 奥野充一, 原尚之, **中田聡史** (2020): 四胴型自動航行船による高密度・高頻度な自動水質環境計測. *土木学会論文集 B1*(水工学), (76)2, I\_1039-I\_1044.
17. **中田聡史** (2020): SOCIETY5.0 の実現に向けた養殖環境情報の新技術. *CMD ニュースレター*, (64): pp.3. (査読無し)
18. **Tsuchiya K.**, Sano T., **Tomioka N.**, **Komatsu K.**, **Imai A.**, **Hayakawa K.**, **Nagata T.**, **Okamoto, T.**, Kuwahara V.S., **Kohzu A.** (2020): Novel method for measuring aquatic bacterial productivity using D10-leucine based on protein synthesis rate. *Aquatic Microbial Ecology*, 85, 121-129.
19. **Tsuchiya K.**, **Komatsu K.**, **Shinohara R.**, **Imai A.**, **Matsuzaki S.S.**, Ueno R., Kuwahara V.S., **Kohzu A.** (2020): Variability of benthic methane-derived carbon along seasonal, biological, and sedimentary gradients in a polymictic lake. *Limnology & Oceanography*, 65(12), 3017-3031.
20. **Tsuchiya K.**, Sano T., **Tomioka N.**, **Kohzu A.**, **Komatsu K.**, **Shinohara R.**, Shimode S., Toda T., **Imai A.** (2020): Incorporation characteristics of exogenous <sup>15</sup>N-labeled thymidine, deoxyadenosine, deoxyguanosine and deoxycytidine into bacterial DNA. *PLOS ONE*, 15(2), e0229740.
21. 吉成浩志, 東博紀, **中田聡史** (2020): 陸域-海域統合モデルを用いた瀬戸内海の流動場・通過流への気候変動影響予測. *土木学会論文集 B2* (海岸工学), 76(2), I\_1105-I\_1110.
22. **今井章雄** (2021): 「国立環境研究所・琵琶湖分室ーガンバッてますー」 *地球環境研究センターニュース* 2021年1月号, vol.31, No.10. (査読無し)
23. **今井章雄 (責任編集者)** (2021): 湖沼環境研究の新たな動き: 概念、現象、アプローチ・手法・装置、モデル解析. *地球環境* Vol.25 (1&2).
24. **中田聡史** (2021): 深水湖において気候変動がもたらす全層循環への影響. *地球環境* 25(1&2), 3-14.
25. **霜鳥孝一**, **今井章雄** (2021): 水中の溶存有機物の分子サイズ分布評価. *地球環境* 25(1&2), 23-30.
26. **風間健宏**, **早川和秀**, **霜鳥孝一**, **今井章雄**, **小松一弘** (2021): 高速フラッシュ蛍光光度法を用いた光合成活性と基礎生産のリアルタイム計測. *地球環境* 25(1&2), 31-42.
27. **土屋健司** (2021): 放射性同位体を用いないバクテリア生産速度測定法の開発と応用. *地球環境* 25(1&2), 43-52.
28. **岡本高弘**, **山本春樹**, **山田健太**, **七里将一**, **藤原直樹**, **霜鳥孝一** (2021): 底層 DO の環境基準設定とその評価に向けた底泥酸素要求量 (SOD) の測定～琵琶湖北湖における事例～. *地球環境* 25(1&2), 87-94.
29. 三浦真吾, **高津文人** (2021): ドローンが変える湖沼環境研究. *地球環境* 25(1&2), 95-100.
30. **Tsuchiya K.**, **Kohzu A.**, Kuwahara V. S., **Matsuzaki S.S.**, Masatoshi D., Hirabayashi K. (2021): Differences in regulation of planktonic and epilithic biofilm bacterial production in the middle reaches of a temperate river. *Aquatic Microbial Ecology*, 87, 47-60.
31. **Kazama T.**, **Hayakawa K.**, Kuwahara V.S., **Shiomotori K.**, **Imai A.**, **Komatsu K.** (2021): Development of photosynthetic carbon fixation model using multi-excitation wavelength fast repetition rate fluorometry in Lake Biwa. *PLOS ONE* 16(2), e0238013.

32. **Shimotori K., Yamamoto H., Imai A., Kohzu A., Okamoto T.** (2021): Development of a new high-throughput and small-size method for measuring sediment oxygen demand in lakes. *Journal of Soils and Sediments*, 21, 1222-1231.
33. **Tsuchiya, K., Tomioka N., Komatsu K., Sano T., Kohzu A., Imai A., Hayakawa K., Nagata T., Okamoto T., Ohara T.** (2021): Horizontal variability and regulation of bacterial production in Lake Biwa, Japan. *Limnology* (accepted).
34. **Kazama T., Hayakawa K., Nagata T., Shimotori K., Imai A., Komatsu K.** (2021): Size-dependent susceptibility to light stress in lake phytoplankton community: an implication for succession of large green algae in a deep oligotrophic lake. *Hydrobiologia* (accepted).
35. **Kazama T., Hayakawa K., Shimotori K., Imai A.** (2021): Measuring photophysiology of attached stage of *Colacium* sp. By a cuvette-type fast repetition rate fluorometer. *Journal of Visualized Experiments* (accepted).

#### 【図書】

1. **今井他 (2017):** F.R. Spellman & N.E. Whiting 著／住明正 監修／原澤英夫 監訳「環境のための数学・統計学ハンドブック」**今井章雄** 章監訳，朝倉書店，2017年，840頁。
2. **高津文人, 土屋健司 (2021):** 河川における環境問題の変遷. *日本水環境学会 (編) 水環境の辞典*. 朝倉書店，東京，pp.82-83.

#### 【口頭発表】(招待講演を含む)

1. **今井章雄 (2017) [招待講演]:** 国立環境研究所 29 年間、何とかなりました！ 堀場雅夫賞審査委員講演会，2017.5.12，株式会社 堀場アドバンスドテクノ（京都市）。
2. **馬淵浩司, 霜鳥孝一, 今井章雄, 高村健二, 高村典子 (2017):** 琵琶湖の水環境と生物・生態系の保全・再生を目指してー琵琶湖分室の設置と今後の展望ー. *国立環境研究所 公開シンポジウム 2017 「私たちの安心・安全な環境づくりとはー持続可能性とその課題ー」*，2017.6.16、びわこホール、滋賀県大津市、2017.6.23、メルパルクホール、東京都。
3. **今井章雄 (2017):** 国立環境研究所の概要と琵琶湖分室の今後の研究について. *滋賀県琵琶湖環境対策特別委員会*，2017.7.18，滋賀県琵琶湖環境科学研究センター，大津市。
4. **今井章雄 (2017) [招待講演]:** 国立環境研究所・琵琶湖分室について. *滋賀県経済同友会 環境・エネルギー・イノベーション研究会*，2017.7.20，コラボしが 21，大津市。
5. **今井章雄 (2017):** 国立環境研究所・琵琶湖分室の紹介. *琵琶湖保全再生推進協議会幹事会*，2017.7.24，滋賀県琵琶湖環境科学研究センター，大津市。
6. **今井章雄 (2017):** 国立環境研究所・琵琶湖分室の研究活動について. *関西広域連合会*，2017.8.25，滋賀県琵琶湖博物館，草津市。
7. **Shimotori K., Kohzu A., Imai A.** (2017): Biodegradation and size-distribution of dissolved organic matter derived from aquatic macrophytes in Lake Biwa. *NIES International Advisory Board 2017*, August 31th 2017, Tsukuba, Ibaraki, Japan.
8. **今井章雄 (2017) [招待講演]:** 琵琶湖分室の研究活動について. *滋賀県化学・行政職同友会研究会*，2017.9.13，滋賀県庁，大津市。

9. 霜鳥孝一, 高津文人, 今井章雄 (2017): 琵琶湖における水草由来の溶存有機物の特性評価. *日本地球化学会第64回年会*, 2017.9.15, 東京大学 (東京都目黒区).
10. 篠原隆一郎, 広木幹也, 高津文人, 今井章雄, 井上徹教, 古里栄一, 小松一弘, 佐藤貴之, 富岡典子, 霜鳥孝二, 三浦真吾 (2017): 浅い湖沼における底泥有機態リンの動態について. *ELR2017 Nagoya/ 8th ICLEE*, 2017.9.22~9.25, 名古屋大学 (名古屋市).
11. 富岡典子, 土屋健司, 小松一弘, 高津文人, 今井章雄, 早川和秀, 廣瀬住則, 岡本高弘, 永田貴丸 (2017): 琵琶湖北湖における微生物群集の季節変化. *日本陸水学会第82回大会*, 2017.9.28~10.1, 田沢湖高原温泉郷 駒ヶ岳グランドホテル (仙北市).
12. 早川和秀, 廣瀬住則, 岡本高弘, 佐藤祐一, 永田貴丸, 後藤直成, 中野伸一, 富岡典子, 今井章雄 (2017): 琵琶湖水における有機物の生分解性について. *日本陸水学会第82回大会*, 2017.9.28~10.1, 田沢湖高原温泉郷 駒ヶ岳グランドホテル (仙北市).
13. 土屋健司, 佐野友春, 富岡典子, 高村典子, 中川恵, 高津文人, 小松一弘, 今井章雄 (2017): 細菌生産速度から見る霞ヶ浦湖心物質収支. *日本陸水学会第82回大会*, 2017.9.28~10.1, 田沢湖高原温泉郷 駒ヶ岳グランドホテル (仙北市).
14. 今井章雄 (2017) [招待講演]: 湖沼における溶存有機物の研究—国環研20年の歩み—. *第20回日本水環境学会シンポジウム*, 2017年9月26日, 和歌山大学 (和歌山市).
15. Komatsu K., Onodera T., Kohzu A., Syutsubo K., Imai A., Kawasaki K. (2017): Characterization of dissolved organic matter (DOM) during the processes of advanced wastewater treatment plant and evaluation of its effect on river water quality. *7<sup>th</sup> IWA-ASPIRE Conference 2017*, Kuala Lumpur Convention Center, Kuala Lumpur, Malaysia.
16. Matsuzaki SS., Komatsu K., Kohzu A., Tomioka N., Shinohara R., Shimotori K., Ueno R., Kondo N., Yamaguchi H., Kadoya T., Ando H., Nakagawa M., Totsu K., Imai A., Takamura N. (2017): Long-term monitoring of Lake Kasumigaura, Japan: a 40 year legacy and looking to the future. *Global Lake Ecological Observatory Network (GLEON) 19*, November 29<sup>th</sup>, 2017, New Paltz, New York, USA.
17. 今井章雄 (2018) [招待講演]: 水環境における有機物環境基準について. *しが水環境ビジネス推進フォーラム研究・技術分科会*, 2018.1.24, ピアザ淡海, 大津市.
18. 今井章雄 (2018) [招待講演]: 国立環境研究所の概要と琵琶湖分室の研究活動について. *滋賀大学フラスコ会 (教育学部化学教室理科教育研究会)*, 2018.2.26, 滋賀大学大津サテライトプラザ, 大津市.
19. 今井章雄 (2018) [基調講演]: 水に溶けている有機物、溶存有機物の世界—特性・起源・機能—. 平成30年度びわ湖セミナー, 2018.3.1, ピアザ淡海, 大津市.
20. 今井章雄 (2018) [招待講演]: 国立環境研究所の概要と琵琶湖分室の研究について. *滋賀バイオ産業推進機構第2回バイオ技術研究セミナー*, 2018.3.26, ホテルボストンプラザ草津びわ湖, 草津市.
21. 土屋健司, 佐野友春, 富岡典子, 小松一弘, 高津文人, 今井章雄, 早川和秀, 岡本高弘, 廣瀬佳則 (2018): 琵琶湖北湖の細菌生産動態. *第52回日本水環境学会年会*, 2018.3.15~17, 北海道大学工学部 (札幌市).
22. 今井章雄, 小松一弘, 佐藤貴之, 川崎伸之 (2018): 生活排水中の溶存有機物 (DOM) の特性評価. *第52回日本水環境学会年会*, 2018.3.15~17, 北海道大学工学部 (札幌市).

23. 篠原隆一郎, 広木幹也, 高津文人, 今井章雄, 井上徹教, 古里栄一, 小松一弘, 佐藤貴之, 富岡典子, 霜鳥孝一, 三浦真吾 (2018): 霞ヶ浦底泥中における有機態リンの動態. 第52回日本水環境学会年会, 2018.3.15~17, 北海道大学工学部 (札幌市).
24. 高津文人, 渡邊未来, 小松一弘, 松崎慎一郎, 角谷拓, 今藤夏子, 山口晴代, 安藤温子, 中川恵, 霜鳥孝一, 今井章雄 (2018): 台地浸透水起源の湧水で涵養されたため池での栄養塩類濃度の低減効果について. 第52回日本水環境学会年会, 2018.3.15~17, 北海道大学工学部 (札幌市).
25. 小松一弘, 小野寺崇, 高津文人, 珠坪一晃, 今井章雄 (2018): 下水処理プロセス中溶存有機物の蛍光特性および分子サイズ分布の変化. 第52回日本水環境学会年会, 2018.3.15~17, 北海道大学工学部 (札幌市).
26. 山本春樹, 岡本高弘, 七里将一, 廣瀬佳則, 桐山徳也, 奥居紳也, 高津文人, 霜鳥孝一, 小松一弘, 富岡典子, 今井章雄 (2018): 琵琶湖北湖第一湖盆における底泥酸素消費量の変動と底層 DO・底泥成分との関係について. 第52回日本水環境学会年会, 2018.3.15~17, 北海道大学工学部 (札幌市).
27. Komatsu K., Tomioka N., Imai A., Kohzu A., Matsuzaki S., Nakagawa M., Hayakawa K. (2019): In situ and instantaneous determination of primary production in representative lakes in Japan by using a new method. 4<sup>th</sup> NIES International Forum, 2019.1.23 – 1.24, Hanoi, Vietnam.
28. 今井章雄 (2019): 国立環境研究所琵琶湖分室の紹介：琵琶湖分室の設置について. 参議院環境委員会視察, 2019.2.18., 琵琶湖環境科学研究センター.
29. Tsuchiya K., Komatsu K., Shinohara R., Imai A., Matsuzaki S., Kohzu A. (2019): Spatial variations in contributions of methane-derived carbon to chironomid larvae and oligochaeta in a shallow, eutrophic Lake Kasumigaura, Japan. ASLO 2019 Aquatic Sciences Meeting, 2019.2., San Juan, Puerto Rico.
30. 風間健宏, 霜鳥孝一, 早川和秀, 今井章雄, 小松一弘 (2019): 淡水植物プランクトン群集における光化学系 II の活性と炭素固定速度の関係に関わる要因. 日本生態学会第66回全国大会, 2019.3., 神戸市.
31. 土屋 健司, 富岡典子, 小松一弘, 高津文人, 今井章雄, 佐野友春, 早川和秀, 永田貴丸, 岡本高弘, 廣瀬佳則 (2019): 琵琶湖北湖における細菌生産の30年間の変化. 第53回日本水環境学会年会, 2019.3., 甲府市.
32. 今井章雄 (2019) [招待講演]: 水に溶けている有機物、溶存有機物の研究—とても地味だが面白い—. 京都工芸繊維大学環境科学センター第25回公開講演会, 2019.6., 京都市.
33. 霜鳥孝一 (2019) [講義]: 健全な水環境保全のための水質・湖底環境に関する研究, 2019.6.26, 京都繊維工芸大学, 京都府.
34. 今井章雄 (2019): 健全な水環境保全のための水質・底質環境に関する研究. 琵琶湖分室研究説明会, 2019.7.1, 琵琶湖環境科学研究センター.
35. 今井章雄 (2019) [招待講演]: 水環境における溶存有機物 (DOM) の研究—樹脂分画からサイズ分析までの20年—. 第34回環境計量技術事例発表会, 一般社団法人兵庫県計量協会環境計量証明部会, 2019.7., 神戸市.
36. Onouchi H., Komatsu K., Imai A., Hashim E. F., Kawasaki N., Toda T. (2019): Evaluation of the growth promoting effect of dissolved organic matter extracted from soils on microalgae. IWA Conference on Algal Technologies and Stabilization Ponds for Wastewater Treatment and Resource Recovery IWAAlgae 2019, 2019.7., Valladolid, Spain.



37. 今井章雄 (2019): 健全な水環境保全のための水質・底質環境に関する研究. 滋賀県琵琶湖環境科学研究センター令和元年度評議委員会, 2019.7.22, 琵琶湖環境科学研究センター.
38. 土屋健司, 高津文人, 平林公男 (2019): 河川のバクテリア生産: 水とバイオフィーム. 応用生態工学会第18回北信越現地ワークショップ in 長野(信州大学), 2019年9月, 講演要旨集: 26.
39. 土屋健司, 富岡典子, 小松一弘, 高津文人, 今井章雄, 佐野友春, 早川和秀, 永田貴丸, 岡本高弘, 尾原禎幸 (2019): 琵琶湖北湖におけるバクテリア生産の空間異質性. 日本陸水学会第84回大会, 2019.9., 金沢市.
40. 土屋健司, 小松一弘, 篠原隆一郎, 今井章雄, 松崎慎一郎, 上野隆平, 高津文人 (2019): メタン由来炭素の大型底生無脊椎動物への寄与. 日本ベントス学会・日本プランクトン学会合同大会, 2019.9., 静岡市.
41. 風間健宏, 早川和秀, 霜鳥孝一, 今井章雄, 小松一弘 (2019): 基礎生産速度をリアルタイムで知る: 高速フラッシュ蛍光光度計 (FRRf) によるアプローチ. 2019年日本ベントス学会・日本プランクトン学会合同大会, 2019.9, 静岡市.
42. 土屋健司, 富岡典子, 小松一弘, 高津文人, 今井章雄, 佐野友春, 早川和秀, 永田貴丸, 岡本高弘, 尾原禎幸 (2019): 琵琶湖北湖におけるバクテリア生産の空間異質性. 日本陸水学会第84回大会, 2019.9., 金沢市.
43. 土屋健司, 小松一弘, 篠原隆一郎, 今井章雄, 松崎慎一郎, 上野隆平, 高津文人 (2019): メタン由来炭素の大型底生無脊椎動物への寄与. 日本ベントス学会・日本プランクトン学会合同大会, 2019.9., 静岡市.
44. 風間健宏, 早川和秀, 霜鳥孝一, 今井章雄, 小松一弘 (2019): 基礎生産速度をリアルタイムで知る: 高速フラッシュ蛍光光度計 (FRRf) によるアプローチ. 日本ベントス学会・日本プランクトン学会合同大会, 2019.9, 静岡市.
45. 佐々木貞幸, 齋藤由実子, 高津文人, 平山大輔, 齋藤康司, 飯島麻依子(2019): 新環境基準項目 (底層 DO) のモニタリング手法および評価手法の構築に関する研究 (第2報). 第57回栃木県公衆衛生学会, 2019.9, 宇都宮市.
46. Imai A., Satou T., Komatsu K., Kawasaki N., Shimotori K. (2019): Characterization of dissolved organic matter (DOM) in domestic wastewaters: DOM-fraction distribution, biodegradability and molecular size distribution. *IWA Specialist Conference on Natural Organic Matter in Water 2019 (NOM7)*, 2019.10.7 – 10.9, Tokyo, Japan.
47. Shimotori K., Imai A., Satou T., Komatsu K., Kohzu A., Kawasaki N. (2019): Quantification and characterization of dissolved organic matter in natural environments by size exclusion chromatography with total organic carbon detector. *IWA Specialist Conference on Natural Organic Matter in Water 2019 (NOM7)*, 2019.10.7 – 10.9, Tokyo, Japan.
48. Komatsu K., Onodera T., Kohzu A., Syutsubo K., Imai A. (2019): Changes in Characteristics of NOM During Wastewater Treatment Processes. *IWA Specialist Conference on Natural Organic Matter in Water 2019 (NOM7)*, 2019.10.7 – 10.9, Tokyo, Japan.
49. 中田聡史, 二瓶泰範, 原尚之, 増田憲和, 原田浩太郎, 奥野充一 (2020): 四胴ロボット船が収集したビッグデータを活用する海洋予測技術開発, SATテクノロジー・ショーケース, 2020.1, つくば市.
50. 霜鳥孝一 (2020): 琵琶湖南湖における溶存態リンの動態とその変動要因について. 第35回全国環境研究所交流シンポジウム, 2020.2.14, つくば市.
51. 土屋健司, 富岡典子, 小松一弘, 高津文人, 今井章雄, 佐野友春, 早川和秀, 永田貴丸, 岡本高弘, 尾原禎

- 幸 (2020): 琵琶湖北湖におけるバクテリア生産量の空間変動. *海洋生物シンポジウム 2020* (東京海洋大学), 2020年3月.
52. 霜鳥孝一 (2020) [招待講演]: 湖沼における底泥酸素消費量測定法の開発と湖沼環境評価への応用. *しが水環境ビジネス推進フォーラム研究・技術分科会*. 2020.3.2, 大津市.
53. Emi F.H., Komatsu K., Imai A., Onouchi H., Ikuram W.M.W.M.Z., Toda T. (2020): Effectiveness of soil extract and its fractions in enhancing the growth of marine microalgae. *第54回日本水環境学会*, 同予稿集 309, 2020.3, 盛岡市.
54. 尾内秀美, 小松一弘, 今井章雄, Emi F.H., 川崎伸之, 高津文人, 戸田龍樹 (2020): 土壌抽出液中有機物が微細藻類の成長に及ぼす影響. *第54回日本水環境学会*, 同予稿集 308, 2020.3, 盛岡市.
55. 風間健宏, 早川和秀, 霜鳥孝一, 永田貴丸, 今井章雄, 小松一弘 (2020): 大型藻類と小型藻類の光合成活性および生産量に対する栄養塩負荷の影響. *第54回日本水環境学会年会*, 2020.3, 盛岡市.
56. 高津文人, 小松一弘, 渡邊英宏, 高屋展宏, 今井章雄, 霜鳥孝一 (2020): 霞ヶ浦底泥を用いたユスリカ幼虫培養系における巣穴密度と底泥間隙水水質との関係. *第54回日本水環境学会*, 同予稿集 239, 2020.3, 盛岡市.
57. 小松一弘, 小野寺崇, 高津文人, 珠坪一晃, 富岡典子, 水落元之, 今井章雄 (2020): 三次元励起蛍光スペクトル法で検出される下水特有ピークの特性評価. *第54回日本水環境学会*, 同予稿集 290, 2020.3, 盛岡市.
58. 三浦真吾, 高津文人, 今井章雄 (2020): ドローンはフィールドサイエンスに何をもたらすのか～琵琶湖の内湖調査の事例～. *第54回日本水環境学会*, 同予稿集 318, 2020.3, 盛岡市.
59. 霜鳥孝一, 今井章雄, 早川和秀 (2020): 琵琶湖南湖の溶存有機物の蛍光特性と動態について. *第54回日本水環境学会年会*. 2020.3. \*新型コロナウイルスのため学会開催中止. 要旨をもって発表扱い.
60. 竹村泰幸, 珠坪一晃, 高津文一, 霜鳥孝一, 今井章雄, 宮永俊明, 山田勝弘 (2020): パイロトスケール堆積物微生物燃料電池 (SMFC) による底質改善効果の検証. *第54回日本水環境学会*, 同予稿集 10, 2020.3, 盛岡市.
61. 土屋健司, 佐野友春, 富岡典子, 小松一弘, 今井章雄, 早川和秀, 永田貴丸, 岡本高弘, 桑原ビクター伸一, 高津文人 (2020): 重水素標識ロイシンを用いたバクテリア生産速度測定法の開発. 2020年度日本プランクトン学会・日本ベントス学会合同大会, 講演要旨集 17, オンライン.
62. 風間健宏, 早川和秀, 霜鳥孝一, 永田貴丸, 今井章雄, 小松一弘 (2020): 琵琶湖の大型藻類はなぜ増えたのか?-光合成特性の違いから探る-. *第67回日本生態学会大会*, 2020.3, 名古屋市.
63. 土屋健司, 富岡典子, 小松一弘, 高津文人, 今井章雄, 佐野友春, 早川和秀, 永田貴丸, 岡本高弘, 尾原禎幸 (2020): 琵琶湖北湖におけるバクテリア生産量の空間変動. *海洋生物シンポジウム 2020*, 同予稿集 12, 東京都.
64. 中田聡史, 今井章雄, 霜鳥孝一, 山田健太, 山本春樹, 岡本高弘 (2020): なぜ琵琶湖の全層循環は2019年春季に不完だったのか?: 数値実験検証. *JpGU - AGU Joint Meeting 2020: Virtual*, 2020.7., オンライン.
65. 沈尚, 富永賢人, 土屋健司, 松田知成, 吉田天士, 清水芳久 (2020): 琵琶湖ウイルスの多様性と季節変動. 2020年度日本地球化学会第67回オンライン年会, 講演番号: PR0081, オンライン.
66. 霜鳥孝一 (2020) [招待講演]: 湖沼における底泥酸素消費量測定法の開発と湖沼環境評価への応用.

しが水環境ビジネス推進フォーラム研究・技術分科会. 2020.8.21.

67. 中田聡史(2020) **[招待講演]**: SOCIETY5.0 の実現に向けた海洋観測・予測の取り組み. 機械学会 2020 年次大会・先端技術フォーラム, 2020.9., オンライン.
68. 高津文人, 松崎慎一郎, 小松一弘, 高村典子, 中川恵, 今井章雄, 小室俊輔, 松本俊一, 湯澤美由紀, 福島武彦(2021): 西浦および北浦のプランクトン群集の変化時期と気象・流域・湖内物理・水質環境における変化時期との関係性解析ー長期モニタリングデータのレジームシフト解析事例ー. 第 55 回日本水環境学会, 2021.3, 京都市 (オンライン).
69. 風間健宏, 早川和秀, 永田貴丸, 霜鳥孝一, 今井章雄, 小松一弘 (2021): 琵琶湖北湖における小型・大型藻類の動態, 光合成活性, および栄養塩添加に対する応答. 第 55 回日本水環境学会, 2021.3, 京都市 (オンライン).
70. 霜鳥孝一, 山本春樹, 今井章雄, 岡本高弘 (2021): 湖沼におけるハイスループットで小さな底泥酸素消費量測定システム. 第 55 回日本水環境学会, 2021.3, 京都市 (オンライン).
71. 小松一弘, 土屋健司, 富岡典子, 今井章雄, 早川和秀, 永田貴丸 (2021): 琵琶湖北湖の一次生産に影響を及ぼす環境因子の解析. 第 55 回日本水環境学会, 2021.3, 京都市 (オンライン).

#### **[受賞・特許等]**

1. 岡本高弘, 今井章雄ら (2017): 平成 29 年度日本水環境学会技術奨励賞 (公益社団法人) 日本水環境学会 「湖沼・河川および発生源における難分解性有機物の標準的分析手法の確立」
2. 伴修正 (滋賀県立大学). 伴修平・戸田龍樹・小山光彦・石川可奈子・高津文人・今井章雄 (2018): Best Presentation Award 第 17 回世界湖沼会議. 水草の持続的利活用を通じた湖沼生態系の保全. [共同研究者の受賞]
3. 菅井洋太 (創価大学) (2018): 2018 年度日本海洋学会奨励論文賞. Sugai Y., Tsuchiya K., Kuwahara V.S., Shimode S., Komatsu K., Imai A., Toda T.: Bacterial growth rate and the relative abundance of bacteria of heterotrophic nanoflagellates in the euphotic and disphotic layers in temperate coastal waters of Sagami Bay, Japan. [共同研究者の受賞]
4. 篠原隆一郎 (2018): 日本陸水学会吉村賞受賞 「湖沼河川におけるリンの動態に関する研究について」
5. 小松一弘, 今井章雄 (2019): The Best 25 papers of the Conference. Onouchi H., Komatsu K., Imai A., Hashim E. F, Kawasaki N., Toda T. (2019): Evaluation of the growth promoting effect of dissolved organic matter extracted from soils on microalgae. IWA Conference on Algal Technologies and Stabilization Ponds for Wastewater Treatment and Resource Recovery IWAAlgae 2019, 2019.7., Valladolid, Spain.
6. 土屋健司 (2020): 日本プランクトン学会奨励賞. 日本プランクトン学会, 水圏生態系における細菌生産生態に関する研究. 2020.3.22.
7. 小松一弘, 今井章雄 (2017): 職務発明、「フミン物質の回収方法及び回収装置」
8. 今井章雄, 霜鳥孝一 (2019): 島津製作所と共同開発した「全有機炭素検出サイズ排除クロマトグラフ装置」の受注市販化決定 (2019.11) .
9. 今井章雄, 霜鳥孝一 (2020): 「全有機炭素検出サイズ排除クロマトグラフィー装置」に係る特許 3 件を出願 (1 件単独、2 件は島津製作所と共同出願). 特願 2020-122724 (今井章雄, 霜鳥孝一、他 2 名)、122725 (今井章雄, 霜鳥孝一、他 2 名)、122726 (今井章雄、他 1 名) .

10. 今井章雄, 霜鳥孝一 (2020): 島津製作所と共同開発した「全有機炭素サイズ排除クロマトグラフ装置」の一般市販化が実現.
11. 今井章雄 (2020): 優秀査読者賞 : Certificate of Excellence in Reviewing, Chemosphere (2016) (2020年にメールが届いた)。
12. 土屋健司ら (2021): 2021 年度日本陸水学会論文賞受賞. Tsuchiya K., Tomioka N., Sano S., Kohzu A., Komatsu K., Imai A., Hayakawa K., Nagata T., Okamoto T., Hirose Y. (2020) Decrease in bacterial production over the past three decades in the north basin of Lake Biwa, Japan. *Limnology* 21 (1): 87-96.