

# 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

Setting environmental standards for bottom layer dissolved oxygen (DO) and  
measurement of sediment oxygen demand (SOD) for the evaluation of the values:

A case study of lake biwa in northern basin

岡本 高弘<sup>1\*</sup>・山本 春樹<sup>1</sup>・山田 健太<sup>1</sup>・七里 将一<sup>1</sup>・藤原 直樹<sup>1</sup>・霜鳥 孝一<sup>2</sup>  
Takahiro OKAMOTO<sup>1\*</sup>, Haruki YAMAMOTO<sup>1</sup>, Kenta YAMADA<sup>1</sup>, Shoichi HICHIRI<sup>1</sup>,  
Naoki FUJIWARA<sup>1</sup> and Koichi SHIMOTORI<sup>2</sup>

<sup>1</sup>滋賀県琵琶湖環境科学研究センター

<sup>2</sup>国立環境研究所 琵琶湖分室

<sup>1</sup>Lake Biwa Environmental Research Institute

<sup>2</sup>Lake Biwa Branch Office, National Institute for Environmental Studies

## 摘 要

湖沼における底層水の溶存酸素は底層を利用する生物の個体群維持に重要であることから、2016年に底層溶存酸素量(底層 DO)が環境基準に設定された。基準値を達成しない場合、対策の検討をするために、底層 DO の値だけでなく消費因子や物理的な混合状況の把握が必要となる。琵琶湖では、水深 90 m の水域において最も低い基準値である 2 mg/L を 2000 年頃から度々下回るといった課題があり、この水域の底層 DO の変動を把握するとともに、低下要因をも検討する必要が生じてきた。そのため、酸素消費因子の 1 つである底泥の酸素要求量 (SOD) の測定を行い、底層 DO の消費には SOD の寄与が大きいこと、その SOD に上昇が見られること等を見出し、琵琶湖では底層 DO 低下への対応や評価には SOD の把握が必要であると考えられた。一方、水深 90 m の SOD 測定は容易でないことから、国立環境研究所で開発された新たな SOD 測定法を活用し、この手法の導入を進めている。

キーワード：気候変動，底層 DO，底泥酸素消費量，琵琶湖

Key words：climate change, bottom dissolve oxygen, sediment oxygen demand,  
Lake Biwa

## 1. はじめに

国民の実感にあった分かりやすい指標として、湖沼の環境基準に底層溶存酸素量(bottom-layer dissolved oxygen, 底層 DO)が設定されたのは、2016年3月である(環境省, 2016)。これを受けて、底層を利用する生物の個体群維持の場を保全・再生するために、保全対象種を選定し、その保全に必要な水域を定め、底層 DO の基準値が当てはめられる(中央環境審議会, 2015)。底層 DO が基準値を達成しない場合、対策の検討が求められることになる。これまでの表層で設定された環境基準と大きく異なるのは、発生源から対象水域への負荷量を算定し、発生源からの負荷削減対策によって流入負荷量を減らすという手法では、底層 DO の改善が見込めるレ

バルやケースが限定されることである。底層 DO の改善対策を検討するにあたっては、上述の他、物理的な混合による酸素供給の状況と底層の酸素を消費する要因の把握が必要となる。その情報に基づき、底層への酸素供給や上層水との混合、覆砂・浚渫といった物理的手法と、酸素消費因子である有機物の底層への沈降量を減じる手法等の中から、水域に応じた効果的な底層 DO の保全策を選定していくことになる(環境省, 2006)。酸素消費因子としては、底層水そのものの酸素消費と底質の酸素消費がある。これらの指標としては、底層水の酸素消費量(水柱の酸素要求量：water-column oxygen demand, WOD)は底層水の生物化学的酸素要求量(biochemical oxygen demand, BOD)を用い、底泥の酸素消費量には底泥酸素要求量(sediment oxygen demand,

受付：2020年9月4日，受理：2020年10月29日

\* 〒520-0022 滋賀県大津市柳ヶ崎 5-34, E-mail：okamoto-takahiro@pref.shiga.lg.jp

SOD)を利用することが可能である。SODの測定法としては、直接現場に隔離水塊を設営し酸素の減少量を測定する方法(遠藤ら, 2008)や現場のDOと流速の連続データから酸素フラックスを計測する方法(渦相関法)(桑江ら, 2008), 採泥したコアを持ち帰って現場に近い条件で酸素消費を測定する方法等が活用・評価され(入江ら, 2007; 遠藤ら, 2010), 環境省水・大気環境局が2012年に改定した底質調査方法にも記載された。今回、底層DOの環境基準を設定する琵琶湖において、課題となるのは、平均水深が40mを超える深い北湖のうち、水深90mの水域(図1)で、これまでの貧酸素状態の目安であり、環境基準の類型として最も低い値である2.0 mg/Lを度々下回っていることである。そこで、本論文では、琵琶湖北湖の当水域を中心に、1979年度からモニタリングしている底層DOの結果と2014年度以降測定したSODの結果をもとに、底層DOの低下に対するSODの寄与や、SODの測定方法と課題について述べるとともに、新たな技術開発と今後の活用についても触れる。

## 2. 琵琶湖における底層DO低下の特徴

### 2.1 底層DOの長期モニタリングの方法と改良

我々は、1979年度から月2回の頻度で、図1左に示す今津沖中央(水深約90m, 北緯35°23'41", 東経136°07'57")において水深別水質調査を行い、その中で底層DO(湖定直上1m)を測定している。

測定方法は、2015年度までは隔膜式溶存酸素計を使用していた。水深の測定は、2001年度まではセンサーケーブルの目印をもとに、調査船のソナーで計測した全水深から必要に応じて補正を行っていたが、2002年度以降は圧力式水深計と濁度センサーを付帯した多項目水質計(Quanta(Hydrolab社))の導入によって、濁度計でセンサーの着底を確認して全水深を測定し、水深計を見ながら底から1m引き上げたところで底層DOを測定することが可能とな

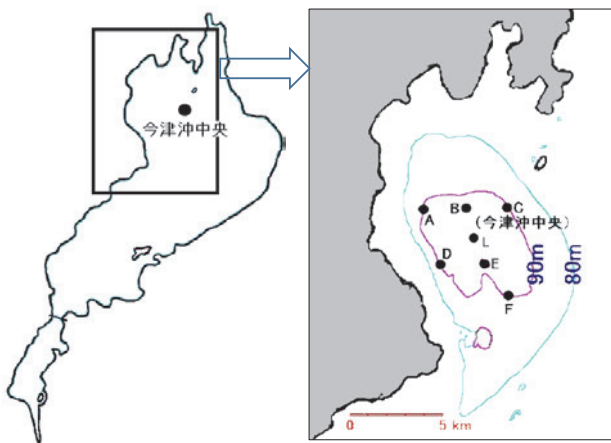


図1 琵琶湖北湖深水層における底層DOの調査地点。

り、精度と作業性が向上した。さらに、2016年度には溶存酸素計測センサーが隔膜式から蛍光式になった多項目水質計(DataSonde5(Hydrolab社))の導入によって、DOセンサーの応答速度が格段に高まり、1秒ごとにデータが取得・記録(ロギング)できることで、強風や荒波で船舶が不安定な時も表示画面を書き写すことが不要となりデータの精査が容易になった。

### 2.2 北湖における底層DOの年変動の特徴

これらの方法により測定してきた今津沖中央水深約90mにおける底層DOの長期変動を図2に示す。例年、琵琶湖北湖では1~3月の期間の中で全層循環し、底層DOもほぼ飽和に近づき10 mg/Lを超える。春の気温上昇とともに表層が暖まり、水温躍層が形成され、表層から深水層への直接の酸素供給は次の冬まで無くなる。その間、底層DOは、主にバクテリア等の底層に生息する生物による有機物の分解呼吸により消費され、徐々に低下していく。台風等による強風が吹くと、底層水がその上の溶存酸素濃度が高い水と一時的に混合し、見かけ上、底層DOの低下が止まるか、やや上昇する。秋以降、冷え込みとともに、水温躍層の水温差が小さくなり躍層も沈んでいくと、浅い水域から全層循環が進み、酸素濃度が低い水塊も小さくなる。強い寒波の到来により、全層循環が90m湖盆の湖底に到達するという一年のサイクルがこれまで繰り返されてきた。

底層DOの変動で課題となるのは、水深90mの水域で貧酸素状態の目安とされる2 mg/L前後に低下することである。水深約90mの底層DO(図2)を見ると、1980年代後半から年度最低値が一旦上昇したものの、2000年頃から再び2 mg/L前後に低下する年が増える傾向がうかがえる。

琵琶湖北湖の水質は、流入負荷削減対策により、全りんについては1980年代には環境基準を達成しており、全窒素も2005年以降低下し2019年度には初めて環境基準を達成するなど水質改善が進んできた。それにもかかわらず、この水域の底層DOが2 mg/L前後にまで低下する年が生じることから、それぞれの年の底層DOの低下要因を調べたところ、2002年のように春の気温上昇が早く全層循環終了時期も早いため底層DOの低下期間が長期に及ぶケース、2007年や2008年のように秋の高温により水温躍層の弱体化が遅れ底層DOの回復が遅れるケースや強風イベントの影響が弱いケースがあった(岡本, 2016)。

さらに、2019年冬(1~3月)には、水深90mの深水層に全層循環が到達せず、未完了という初めての事象が生じた。その結果、この水域の底層DOが、図3に示すように2019年春には過年度平均より1~2 mg/L低い値から低下が始まった。その後8月末には2 mg/Lを下回り、10月初めに台風の強風の影

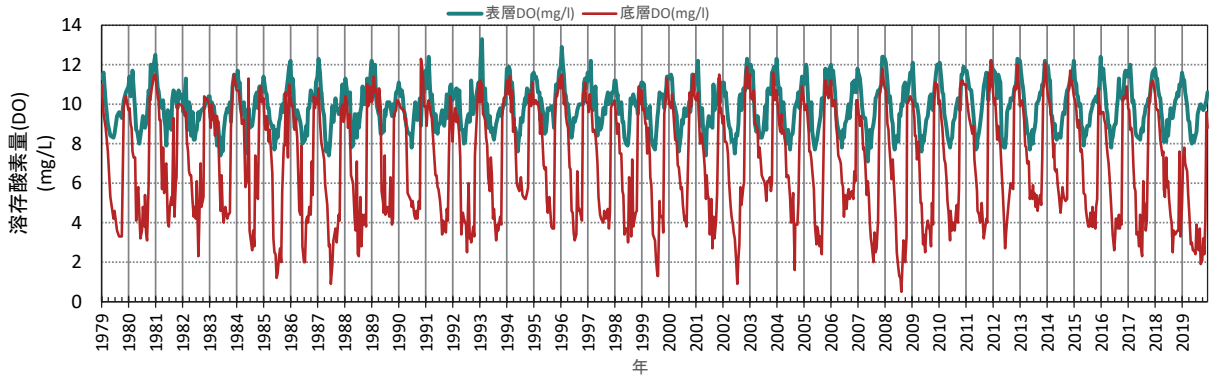


図2 北湖今津沖中央(C点)における溶存酸素量(DO)の長期変動(表層と底層の比較)。

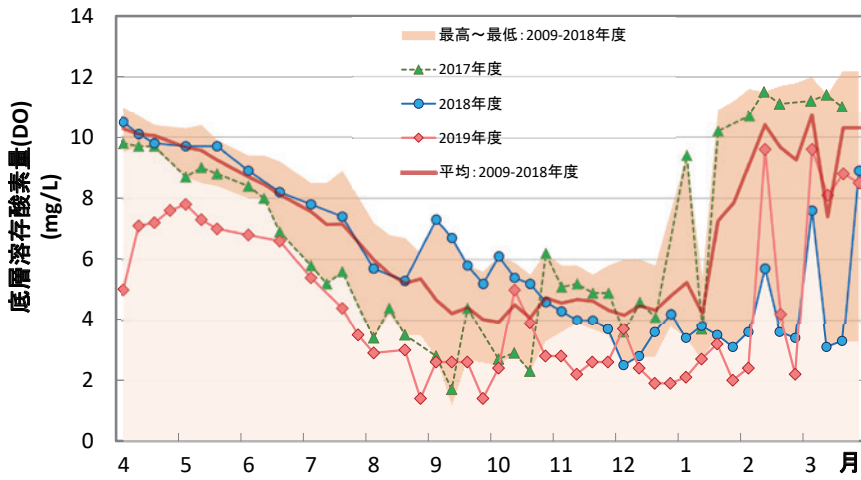


図3 北湖今津沖中央(C点)における底層溶存酸素量(DO)の年間変動の傾向。(2017~2019年度を2009~2018年度の10年間と比較)

響により一旦4 mg/Lを超えるまで上昇したものの、その後、2月まで約半年間の長期にわたり、2 mg/L前後で推移した。それぞれの要因は、異常気象の発生との関連が示唆された(滋賀県琵琶湖環境科学研究センター, 2020; 滋賀県, 2020)。

また、2012年や2017年、2019年には、6~8月の底層DOの低下速度が過年度より速くなったことが底層DOの年度最低値を押し下げた一因と考えられた。

### 2.3 環境基準の設定と底層湖水の貧酸素化

琵琶湖においても、環境基準の設定に際して、まず保全対象とする生物種を選定し、その保全に必要な水域を定め、底層DOの基準値が当てはめられることになる。北湖の今津沖水深90m湖盆の底層を利用する生物の代表種(熊谷ら, 2011)としては、琵琶湖の固有種であり絶滅危惧IA類に指定されているイサザが取り上げられるが、この種の貧酸素耐性(底生生物の活動に影響を及ぼす溶存酸素濃度の閾値)が1.76(±0.49)mg/L(熊谷・石川, 2010)とされている。このことから、環境基準値としては最も低いタイプの2 mg/Lは確保する必要があると考えられるが、これまでのモニタリング結果から上述のとお

り、基準値を達成できない年が生じることが想定される。実際に、これまでも底層DOが2 mg/L程度にまで低下するとイサザとスジエビのへい死が観察されている(石川ら, 2009)。一方で、底層DOの低下範囲が水深90mの水域内に収まっており、底層DOが回復するとイサザの個体群が回復してきたことから、この水域で2 mg/Lを下回った場合には、監視態勢を強化することとし、それによって、低下範囲の拡大や貧酸素状態の期間、低下濃度レベル等、貧酸素状態の把握に注力してきた。

しかし、前述のとおり2019年冬(1~3月)に生じた初めての全層循環の未完了という事象は、モデルによる将来予測のシミュレーションでは、ほとんど起こりえないとされていたこと(山田ら, 2018)が現実となった。さらに2020年冬も未完了となったことから、対応を検討する必要が一気に高まった。このことについては、2018年に国において、深い成層湖沼で水温変化による冬季の全循環不全が予測される場合には、底層DOの改善のための適切な対策を検討することが閣議決定されており、北湖の深い水深や水域の広さ、風波を想定し、新たな技術やコスト、維持管理に関する知見を組み合わせ手法等に

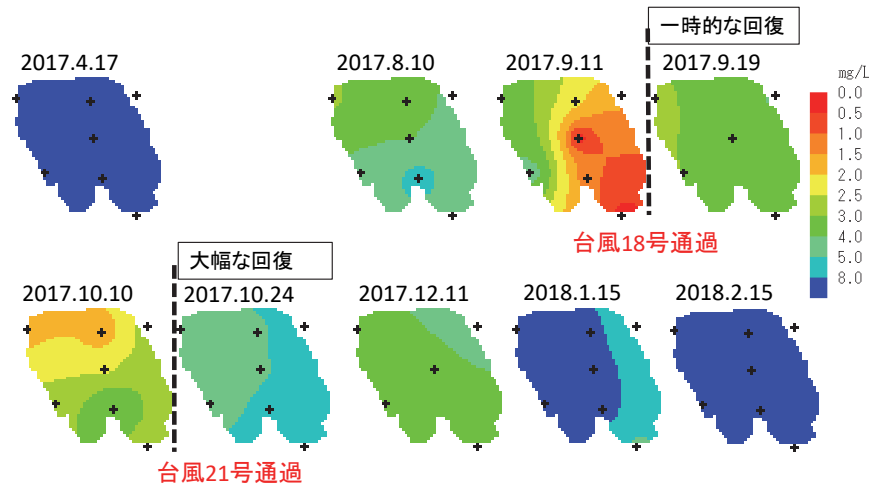


図4 北湖今津沖水深90 mにおける底層溶存酸素量(DO)分布(2017年度)。  
DO分布は図1(右)拡大図のA~F, Lのうち5~7地点のデータをスプライン補間により作成。

について検討されるものと考えられる。

なお、参考までに平均水深が4 mと浅い南湖でも、芳賀ら(2006)によって2002年9月に行われた84の格子点調査において、湖底直上10 cmのDOが35地点でこの水域で想定される基準値の4.0 mg/L未満であり、底層DO低下の要因として、水深、観測時刻、沈水植物の種別の現存量、底質の強熱減量を説明変数として重回帰分析を行った結果、特にオオカナダモの現存量が湖底直上の溶存酸素濃度の変動に大きな影響を与えることが示された。この対策について、石川と芳賀(2015)は、溶存酸素濃度が2 mg/L未満の貧酸素水塊は、3.1 cm/sec以上の湖流がある地点では形成されていないことから、貧酸素水塊の解消には下層の流速が目安になることを指摘している。底層DO低下の状況や要因を詳細に把握するため、蛍光式溶存酸素計により連続測定データが蓄積できる溶存酸素ロガーによる調査が行われており、気象や流量、水草異常繁茂との関係解析が進められている(国立環境研究所, 2020)。対策としては、水草の異常繁茂解消のための刈り取りが流速の確保や底質の泥化改善によるSODの上昇抑制にもつながることから、底層DOの改善対策としても有効であると考えられる(川崎, 2015)。

#### 2.4 淡水湖沼における底層DO低下の要因の検討

淡水湖沼においては、生物の呼吸や化学物質の還元等による消費(霜鳥・高津, 2016)と物理混合による供給のバランスで底層DO濃度の分布、経時変化といった底層DO変動の様態が決まる。

このうち、底層DOの消費因子に着目すると、WODとSODがあり、琵琶湖では、浅い南湖のような沿岸帯では、SODとWODの両者を考慮する必要がある。一方、北湖の深い沖帯では、底層のBODは0.1 mg/L前後と低く変動もほとんどないことから、SODが底層DOの消費速度を左右している。

それに加えて湖水の鉛直方向からのDO供給の程

度によって、数日~数週間で濃度レベルが変動する。その結果の一例を図4に示すが、底層DOが低下し、DOが低い水塊の形成や移動、強風や寒波によって回復する状況が見られる。24時間5%致死量(LC5-24hr)で貧酸素耐性を評価する底層DOの環境基準の達成状況については、厳密には24時間連続で基準値を満足しているかどうか把握する必要がある。こうしたことから、国においては連続測定することが望ましいとされている(環境省水・大気環境局長, 2016)が、北湖深水層のモニタリングに導入するにはコストや維持管理面の課題が多い。

### 3. 琵琶湖北湖におけるSOD

#### 3.1 SODの測定と課題

底泥のSODの測定は、直接現場において酸素の減少量を測定する方法については、琵琶湖でも水深の浅い南湖では、これまでも隔離水塊実験(密閉チャンバー型)が行われたが、琵琶湖北湖の深水層では設営が難しく、実測された事例は見当たらない。

不攪乱コアを用いた実験室法については、2010~2011年に、後藤ら(2017)が、北湖第一湖盆水深90 m以深2地点を含む水深40 mまでの5地点の底泥を採取しSODを測定した結果、時季による変動はあるが、水深による変動が少ないことから、底層DOの低下を顕在化させる貧酸素水塊の形成には、水柱の酸素消費が寄与している可能性を指摘している。我々も、底層DO低下の経時変動との関係を把握するため、今津沖中央において、2014年度から底質調査方法(環境省水・大気環境局, 2012)に基づき、現場に近い条件での底泥の酸素消費ポテンシャルの変動を把握する目的で、SODを測定している。具体的には、図5左に示す不攪乱採泥器により底泥を採取した。採泥時期は5月、7~8月、10月、2月の年4回とした。採泥には内径110 mm、長さ500 mmの

アクリルパイプを用い、船上で図5右のように底泥と湖水を50%ずつに調整し、実験室に持ち帰った。採泥時に直上水(深度85mの湖水)を採取し、ガラス繊維ろ紙GF/Bを用いてろ過し、ろ過湖水を現場水温の7℃で溶存酸素を飽和後、カラム直上水を置き換えた。

アクリルパイプを天然ゴム栓で密閉後ガスバリア袋(図5右)に入れ、現場の平均的な水温であった7℃で、暗所にて、直上水をスターラーで底泥が巻き上がらないよう攪拌しながら培養し、定期的に直上水のDOを測定した。DOが直線で減少した期間の減少速度から、SODを算出した。

これまでの結果は、図6に示すとおり、測定開始当初の2014年は0.3 gO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/day前後であったが、2015年秋に上昇して以降、季節による変動はあるが、0.4 gO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/day前後で低下しない状況が続いている。一方、5月から6月の底層DOの低下速度と

SODが良い相関を示した(図7)。この時期は風が弱く、物理的要因よりもSODの影響を受けやすいことが考えられる。このことが、近年、5~8月の底層DOの低下速度が速くなっている要因の一つと考えられる。他の時期のSODは底層DOとの相関はなかったが、今後、底層水と堆積物の酸素消費寄与率について水柱を考慮して算定している研究(徳永ら、2016)等を参考にSODと水柱のDOの変動の関係についてアプローチしていくことを考えている。

環境基準の類型が指定されると、底層DOの環境基準点を設定して、モニタリングし、測定データを評価していくことになる。環境基準を達成しない場合は、その要因や影響の説明と対応が求められる。その際、検討する要因として、物理的な混合条件は気象観測データを用いてモデルシミュレーション等により把握することとなる。また、酸素消費因子については、北湖では主にSODの把握が必要となるが、琵琶湖全域が類型指定され、基準点が設定されると、各基準点のSODを把握する必要が生じる。

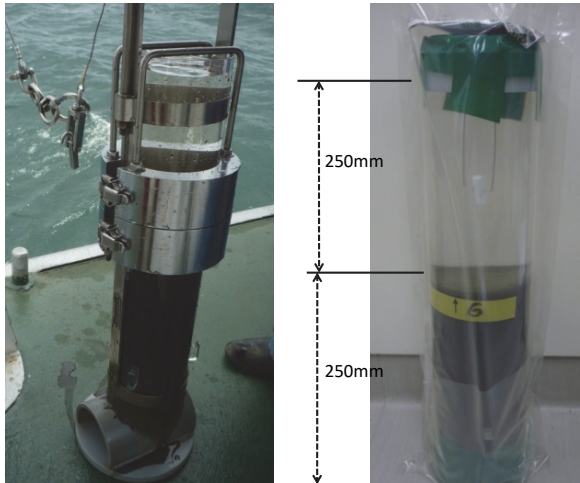


図5 不攪乱採泥器(左)と底泥酸素要求量(SOD)測定用試料(右).  
(右の上部のゴム栓にはスターラーバーが装着されている.)

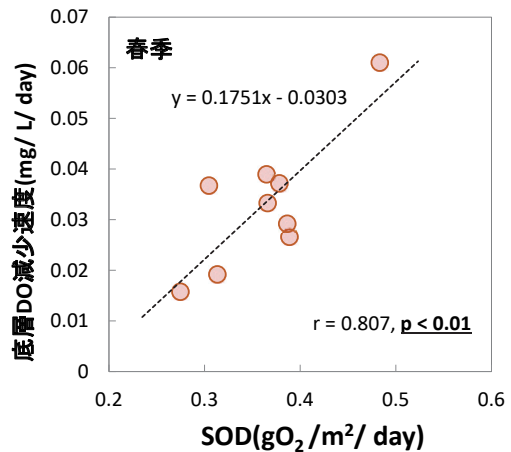


図7 春季(5~6月)の底泥酸素要求量(SOD)と底層DOの減少速度の関係。

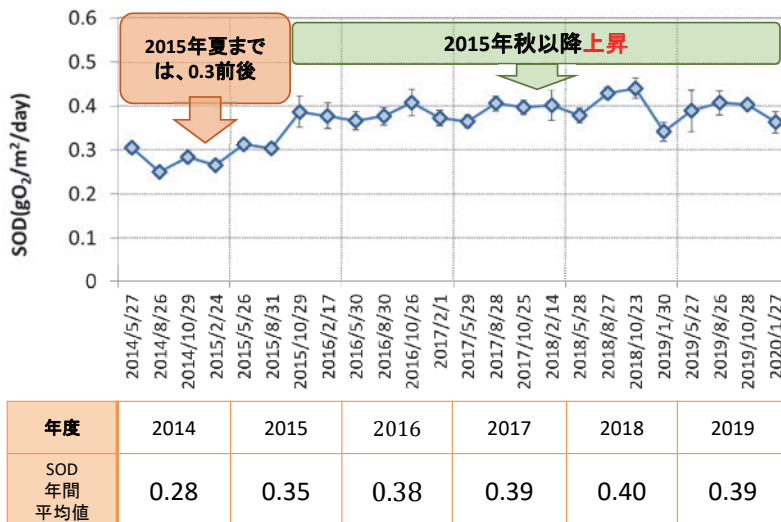


図6 琵琶湖北湖今津沖中央(C点)における底泥酸素要求量(SOD)の経時変化。

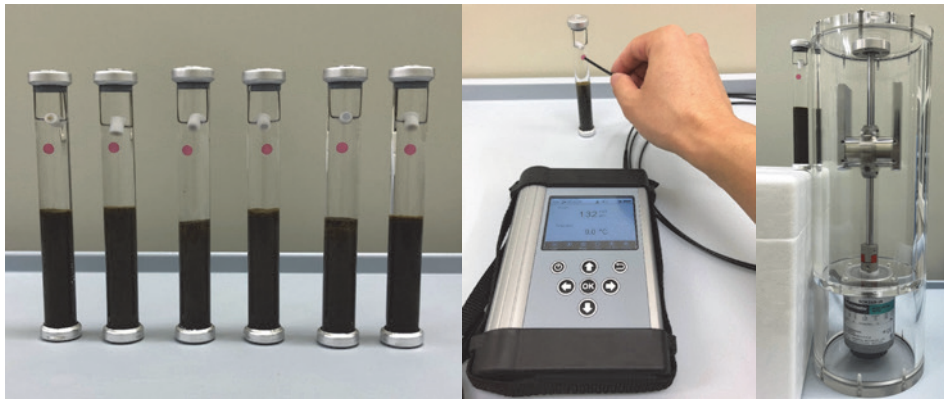


図8 開発されたSOD測定用採取試料(左)と測定(中)、攪拌方法(右)。

その際、持ち帰って測定する既存の方法では1地点当たり測定用のコアを3~4本要し、1回の調査で2~3地点、季節や年変動があることから対照地点の設定も求められ、既存の方法だけでは全基準点でのSODの把握は相当難しいことから、測定方法の効率化が急務となっている。

### 3.2 SODの効率的な測定手法の開発

霜鳥ら(2017)は、小型バイアルを用いて、前処理時間を短縮し高効率にSODを測定する手法を開発した。内径12.8mm、長さ125mmの両端がフランジ構造となっているバイアルをマクロピペット(エッペンドルフ)に接続し、不攪乱コアで採取した底質からサンプルを採取する。その上にSOD測定用の直上ろ過湖水を静置し、バイアルの両端にPTFE(ポリテトラフルオロエチレン)コートしたブチルゴムセプタム(La-Pha-Pack)を取り付け、クリンパック(La-Pha-Pack)とマニュアルクリンパー(大阪ケミカル)を用いて、図8(左)のように密封する。ろ過湖水の部分の内側に予め、非接触・非破壊蛍光式酸素センサーFibox4(PreSens)用のDO測定用センサーチップ(PreSens)を張り付け、チップにセンサーをバイアルのガラス壁面越しに近接させ、非接触でDOを測定する。この方法は、従来の不攪乱コア法と良い相関を示すことから、従来法を置き換えることが可能となっている。特に、同日多地点のSODを測定することができるとともに、経時変化や対策効果を把握するために水質モニタリングと同時採取・測定することも可能となる。

この手法を導入して、高頻度でSODを測定することにより、これまで困難であった面的なSODの分布や水域ごとにSODを支配する要因の把握を進めることを考えている。

また、先述の渦相関法を用いた酸素消費フラックスの測定は深海における実施例も増えており、我が国の大型湖沼への導入も期待される(桑江, 2016)。

### 3.3 環境基準底層DO評価におけるSODの利用

これまでの長期モニタリングでは、水深方向の水質の状況把握を目的として底層DOを測定してきた

が、環境基準の設定を受けて、今後は基準値を達成できなかった場合の要因の把握と対策の要否・方法の選択、対策実施効果の評価が求められるようになる。しかしながら、底層DOの測定結果だけでは、これらに対応していくことは難しい。

特に、気候変動による影響が大きくなると、年による物理的要因の変動も大きくなり、対策を講じなくても底層DOが改善する年や、逆に対策を講じて悪化する年が生じ、底層DOの値だけでは対策効果の評価が困難になることが想定される。

琵琶湖北湖においても、底層DOの年度最低値はこれまで10~11月になる年が大半であったが、2000年以降、2.2で述べた2mg/L前後に低下する特徴的な気象条件によって、早い年では8月に、遅い年では1月にずれ込むことがあり、その期間が広がっている。地球温暖化に伴う気候変動の影響を受けた底層DOの低下圧が高まる結果が出てきている。

物理的要因は気象条件によって大きく変動し、年による差が大きい。これらに対する底層DOの改善策は、気候変動の緩和策とともに、直接的な酸素の供給や物理的混合を促す方策があるが、北湖では莫大なコストとエネルギーが必要となり、今後の気候変動を考慮すると持続的な対策とは言えない。底質改善として覆砂や浚渫が行われてきたが、堆積粒子の質や量が変わらなければ時間の経過とともに、再び底質改善対策が必要になる。富栄養化対策の一つとされる沈降粒子の質や量の改善を目指す流入負荷削減対策は、持続的にSODを抑制することができ適応策としては有効である。一方、琵琶湖北湖では、前述のとおり、水質は改善してきたにもかかわらず、底層DOの状況は、これまで想定していた富栄養化の抑制によって、期待されていた底層DOが改善するどころか2mg/Lに低下する頻度が増え、SODも上昇するといった様相も呈している。SODの上昇と関連が見られるのが、底泥の炭素や窒素の含有量の上昇であり、同時にモニタリングしている植物プランクトンの種組成から、動物プランクトン

が捕食できない大型種や群体を形成する植物プランクトンの増殖が顕在化し、これらが底層まで沈降したことが影響していることが示唆される。さらに、2020年の成層開始時期の湖底水温が9℃にまで上昇しており、現場のSODも実測よりも高くなっているものと想定される。今後は、新たな技術を用いた高頻度のSOD調査に、セディメントトラップや沈降粒子の種組成の検鏡や分析等も加えて、上述との関連を把握していくことにより、底層DOの改善策が見いだされることに期待を寄せている。

底層DOの環境基準値が水域ごとに設定された後には、水域ごとの底層DOの測定とあわせて、基準値が達成できなかった場合には、気象条件を踏まえた物理的な混合状況と、酸素消費因子であるWODとSODを把握し、モデルシミュレーションも活用しながら、基準値を達成できない要因の解明と対応を検討していくことになる。気象条件に大きく左右され、WODが低い琵琶湖北湖では、酸素消費因子のSODを基本として、気象による変動の振れ幅を把握し、底層環境を評価していく手法の構築が望まれる。

#### 4. まとめ

琵琶湖北湖深水層における底層DOの変動は、地球環境の変動を敏感に察知するセンサーに例えることができる。

琵琶湖では、全層循環未完了というこれまで将来予測のシミュレーションでは、現状起こりえないとの結果(山田ら, 2018)であったことが現実に起こり、さらに2年連続で生じたことから、対応を検討するステージに入ったと考えるべきである。幸いにも、2019年は気象条件にも救われ、長期の無酸素状態には至らず、湖水への栄養塩の溶出も認められなかった。しかし、台風や季節風の影響が弱ければ、無酸素になる水塊が生じ、それも長期に及ぶことが想像に難くなかった。無酸素水塊の存在が長期に及んだりその範囲が広がったりすると、湖底に生息する固有種を含む在来種の個体群維持への影響や栄養塩の溶出にともなう富栄養化の進行といった、今の琵琶湖の状態ではなくなるレジームに移行する可能性があることを念頭に置き、調査研究と適応策の検討を進めることが必要である。琵琶湖の深湖底で生じている貧酸素水塊の発生をこれ以上拡大させないことが、深水層の生物の生息環境を保全するための砦となる。

気候変動の緩和が見えない中、これまでの琵琶湖の懐の深さと気象が与えてくれた猶予も使い果たしつつあるとの認識に立って、今後も、琵琶湖の水環境の変動を把握するとともに、結果の発信に努めていきたい。

#### 謝 辞

滋賀県琵琶湖環境科学研究センター第5期中期計画の調査解析『水深別水質調査と新指標(底層DO)のモニタリング・評価手法の構築』の研究の推進に対し、ご意見、ご助言をいただいた次の方々(敬称略順不同)に深く感謝します。今井章雄、清水芳久、中野伸一、田中宏明、山室真澄、内藤正明、三和伸彦、海東聡、明石達郎、川崎竹志、浅見正人、奥田一臣、田中輝子、藤原務の各氏、滋賀県琵琶湖環境部及び琵琶湖環境科学研究センターの皆様。

#### 引用文献

- 中央環境審議会(2015)平成27年12月7日水質汚濁に係る生活環境の保全に関する環境基準の見直しについて(答申).
- 遠藤雅実・鯉渕幸生・藤田昌史・鈴木準平・小倉久子・飯村 晃・大畑 聡・磯部雅彦(2010)東京湾における底泥酸素消費と微生物群衆構造の関係. 土木学会論文集 B2(海岸工学), 66, 1036-1040.
- 遠藤 徹・水田圭亮・重松孝昌(2008)貧酸素化した港湾海域における底質の酸素消費特性に関する研究. 海岸工学論文集, 55, 1066-1070.
- 後藤直成・小村沙織・福田 紀・吉村 葵・伴 修平(2017)琵琶湖北湖第一湖盆における底質環境と表層堆積物による溶存酸素消費. 陸水学雑誌, 78, 169-178.
- 芳賀裕樹・芦谷美奈子・大塚泰介・松田征也・辻 彰洋・馬場浩一・沼畑里美・山根 猛(2006)琵琶湖南湖における湖底直上の溶存酸素濃度と沈水植物群落現存量の関係について. 陸水学雑誌, 67, 23-27.
- 入江政安・窪田勇輝・中辻啓二・西田修三(2007)都市海浜における底質の非一様性を考慮した酸素消費量の推定. 海岸工学論文集, 54, 1026-1030.
- 石川可奈子・芳賀裕樹(2015)水草の大量繁茂による水の停滞と湖底の貧酸素水塊、そして水草除去による回復. 南湖生態系の順応的管理に関するサイエンスレポート, 第3章 水草をめぐる南湖生態系の現況と課題, 56-63.
- 石川俊之・中島久男・北澤大輔・石川可奈子・熊谷道夫(2009)琵琶湖における生態系レジームシフトに関する先導的研究. 滋賀県琵琶湖環境科学研究センター研究報告書, 5, 86-93.
- 焦 春萌・青木真一・奥村陽子・南 真紀・矢田 稔・石川可奈子・中島拓男・石川俊之・辻村茂男(2011)琵琶湖の低酸素化の実態把握および北湖生態系に与える影響の把握に関する解析モニタリング. 滋賀県琵琶湖環境科学研究センター研究報告書, 7, 175-180.
- 閣議決定(2018)気候変動適応計画. 39-41.
- 環境省(2006)湖沼水質保全基本方針. 平成18年1月

26日環境省告示29号。  
環境省(2016)平成28年3月30日環境省告示37号。  
環境省水・大気環境局(2012)底質調査方法。  
環境省水・大気環境局長(2016)水質汚濁に係る環境基準についての一部を改正する件の施行について。平成28年3月28日付け環水大水発第1603303号。  
川崎竹志(2015)琵琶湖の水草の順応的管理と有効利用への挑戦。環境技術, 44, 500-505。  
国立環境研究所 琵琶湖分室(2020)底層溶存酸素量の連続観察。http://www.nies.go.jp/biwakobranch/projects/do.html。(2020年12月6日確認)  
熊谷道夫・石川俊之(2010)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。(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D-0804, 代表:永田俊), 平成22年度環境研究総合推進費終了成果報告集。  
桑江朝比呂(2016)渦相関法を用いた堆積物:海水境界面における酸素フラックスの直接測定。海洋理工学会誌, 22, 47-56。  
桑江朝比呂・中川康之・三好英一(2008)海底境界面における酸素消費速度:渦相関法による現地連続観測。海岸工学論文集, 55, 1001-1005。  
岡本高弘(2016)琵琶湖における底層DOと沿岸透明度の長期変動傾向と評価について。水環境学会誌, 39, 164-168。  
滋賀県(2020)琵琶湖北湖第一湖盆における底層溶存酸素量(底層DO)の回復状況について。滋賀県2020年4月1日広報資料。https://www.pref.shiga.lg.jp/kensei/koho/e-shinbun/oshirase/311042.html(2020年12月6日確認)  
滋賀県琵琶湖環境科学研究センター(2020)令和元年度琵琶湖水質変動の特徴。滋賀県環境審議会水・土壌・大気部会, 令和2年度第1回滋賀県環境審議会・水・土壌・大気部会資料5。https://www.pref.shiga.lg.jp/file/attachment/5187608.pdf(2020年12月6日確認)  
霜鳥孝一・今井章雄・高津文人・小松一弘・佐藤貴之・富岡典子・篠原隆一郎・三浦真吾・奥居紳也・桐山徳也・岡本高弘(2017)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。水環境学会誌, 40, 21-29。  
霜鳥孝一・高津文人(2016)底泥表層の酸素消費速度と物理構造の解析。国立環境研究所シンポジウム 新たな水環境基準(透明度, 底層DO等)の導入に向けた動きとそれに対応したモニタリング・研究のあり方要旨集。  
徳永貴久・木戸克典(2016)底層水と堆積物による酸素消費寄与率:実験結果を用いた理論的考察。土木工学論文集B2(海岸工学), 72, 22-26。  
山田匡・林誠・渡辺康生・上原浩・松田尚郎・佐竹康孝(2018)気候変動による我が国の湖沼にお

ける水質・生態系の影響評価と適応策の検討に向けた将来水質予測の課題について。17th World Lake Conference, 1023-1025。



岡本 高弘/Takahiro OKAMOTO

滋賀県琵琶湖環境科学研究センター・環境監視部門・主任専門員。

琵琶湖水質調査(測定, 分析, 解析)に従事。北湖深水層におけるマンガン濃度の上昇や貧酸素化, 全層循環未完了等の特異変動の観測を主導し, 要因の把握にも関心を持つ。ここに生息する固有種でもあるイサザを好む。



山本 春樹/Haruki YAMAMOTO

滋賀県琵琶湖環境科学研究センター・環境監視部門・主査。

本テーマの研究のコーディネータを務めSODの測定方法の精度を向上させるとともに, 国立環境研究所のII型研究に応募, 採択され, 地方環境研究所の代表として研究の進捗に尽力し貢献したが, 2020年4月に異動。SODの制御因子の把握に強い興味を持っている。



山田 健太/Kenta YAMADA

滋賀県琵琶湖環境科学研究センター・環境監視部門・主任技師。

大学では, 分光法を用いた生体高分子の構造ダイナミクス観測・解析を研究。民間企業の勤務を経て, 滋賀県入庁, 2018年から現職。現在, 琵琶湖における底層DOモニタリングの調査・解析を担当。



七里 将一/Shoichi HICHIRI

滋賀県琵琶湖環境科学研究センター・環境監視部門・主査。

琵琶湖水質調査結果の解析評価を担当している。長期測定データと気象データや植物プランクトン計数結果等から, 毎年の琵琶湖水質変動の特徴と要因について解析, 研究している。



藤原 直樹/Naoki FUJIWARA

滋賀県琵琶湖環境科学研究センター・環境監視部門・専門員。

当センターにおいて2020年度からこの研究テーマのコーディネータを務めるとともに, 国立環境研究所との共同研究に参画している。前任時は琵琶湖のプランクトンの変遷に関する調査解析を担当。底層DO低下とプランクトンの種組成との関係に強い関心を持つ。プランクトンの学名の由来にも造詣が深く, 好きな種はミジンコワムシ。



霜鳥 孝一/Koichi SHIMOTORI

国立研究開発法人・国立環境研究所・琵琶湖分室・研究員。

2013年 国立環境研究所・地域環境研究センター・特別研究員, 2017年から現職。琵琶湖分室の研究テーマ「健全な水環境保全のための水質・湖底環境に関する研究」において有機物収支, 底泥環境の評価と底泥溶出に関する研究を担当。