

8. 調査解析 1 (5-IA1)

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

環境監視部門 公用用水域係、生物圈係、化学環境係

(執筆担当: 山本春樹¹⁾・藤原直樹・山田健太・七里将一・中村光穂・尾原禎幸²⁾・石崎陽平・岡本高弘)

要約

2017年度から2019年度までの水深別の琵琶湖水質は、植物プランクトンの消長、豪雨や強風による影響、高い気温による全層循環の未完了、底層DO(底層溶存酸素量)の低下の影響等によって大きく変動し、その状況と要因のために、水深別調査の結果は大いに活用された。気候変動が水質へ与える影響も考慮しながら、琵琶湖水質の変動メカニズム解明のために、調査を継続する必要がある。

北湖深水層の底層DOについては、2017年度から2019年度まで、水深別調査に加えて、地点や頻度を増やし、北湖深水層底層DO調査を実施した。その結果、2018年度に、北湖第一湖盆の水深約90mの調査地点で1979年のモニタリング開始以降初めて、全層循環しなかったことを確認した。その後、2019年度は、当該水域で最も長い期間にわたり貧酸素状態が継続し、水深80mの4地点を追加して貧酸素水塊の拡がりについても把握に努めた。

北湖の底層DOとその主な消費因子である底泥酸素要求量(SOD)と底層DOの関係性を解析した結果、SODが例年よりも高ければ、底層DOがより早く減少することが示唆された。SODと底泥の表層(深度0-5mm)に含有されるTC・TNとの間には正の相関が認められた。水中の全窒素は減少している一方で、北湖深層部の底泥におけるSODは上昇しており、SODの上昇に底泥表層における有機物量の増加が寄与していることが示唆された。

1. はじめに

琵琶湖北湖のように温帯に位置する水深の比較的大きい湖では、例年、春から秋あるいは初冬にかけて水温躍層が形成され、冬季に全層循環により表層から底層までの水質が均一となる周期が毎年繰り返される。水温躍層の形成と全層循環が琵琶湖の水質形成に大きく関わっていることから、滋賀県では、水深別の水質調査を水質汚濁防止法の規定による公用用水域水質測定計画に位置付け、表層だけではなく鉛直方向の水質についても把握に努めている。

また、湖沼における底層の溶存酸素量(底層DO)が、2016年3月に環境基準に追加され(環境省, 2016)、2019年度末現在、琵琶湖における底層DOの環境基準について、国で基準値の設定(類型指定)が進められている。これまでの表層の水質に対する基準とは異なり、深さ方向の水質について評価を求める基準であり、水深別水質調査の重要性が高まっている。

琵琶湖の深層部での貧酸素化の現象は1960年代頃に観測され、その要因は富栄養化に伴う表水層での有機物生産の増大とそれらの深層への沈降と分解による酸素消費

であることが古くから指摘されてきた(中, 1973)。このように、琵琶湖における底層DOで課題となるのは、平均水深が40mを超える深い北湖の中でも、水深90mを超える今津沖第一湖盆であり、その中の定点である今津沖中央において貧酸素状態の目安である2mg/Lを下回る年が2000年頃から増加していることである(岡本, 2016)。こうしたことから、琵琶湖水環境の保全の面からも、底層DOのモニタリングの重要性は高まっている。底層DOが減少するのは、北湖では主に底泥における有機物の分解により酸素が消費されるためであると考えられている。この指標としては底泥酸素要求量(sediment oxygen demand, SOD)があり、SODを把握することは底層DOの低下要因や対応策を検討していくために必要である。これまで観測してきたSODは2016年度に高い値となっており、その変動要因を把握するためにも、SODと底泥の性状との関係性、水質と底泥との関係性を評価することは琵琶湖深層部の低酸素化への対応策を検討する上で極めて重要である(焦ら, 2018)。

本報告では、平成29年度(2017年度)から令和元年度

1) 現・滋賀県環境事業公社、2) 現・滋賀県湖北環境事務所

(2019年度)に実施した調査研究について取りまとめた。

2. 琵琶湖水深別調査

2.1. はじめに

琵琶湖北湖では、例年、春から夏にかけて表層水温が上昇し、水深10mから30mにかけて水温が急激に低下する水温躍層が形成される。水温躍層が形成されると、これよりも下層の水は上層の水と鉛直混合しにくくなる。その後、冬季の水温低下や季節風の影響による水温躍層のかく乱衰退沈降に伴い、水の鉛直混合が進んでいき、翌年1月から2月頃には全層循環により表層から底層までの水質は均一となる。

そこで、水質汚濁防止法の規定による公共用水域水質測定計画に基づき、水深別の水質を調査し琵琶湖水質の鉛直分布の監視を継続して行い、琵琶湖水質の長期変動や水環境の変化に対する水質面からの関連性を把握している。

ここでは平成29年度(2017年度)から令和元年度(2019年度)までの琵琶湖水深別調査の結果と確認された水質の特徴について報告する。

2.2. 方法

調査地点は、琵琶湖北湖では第一湖盆の水深約90mの今津沖中央定点(C点)と第2湖盆の南比良沖中央である(図2.1)。両地点は、水質汚濁防止法第16条の規定に基づく琵琶湖水質の常時監視地点の一つであり、このうち、C点は昭和54年(1979年)から鉛直方向の水質調査を継続して実施している。C点では、0.5、5、10、15、20、30、40、60、80、85mおよび湖底直上1mの11水深について測定した。水温とDOは、多項目水質計DataSonde5(hydrolabo社製)を使用した。その他の項目については、バンドーン採水器で採取した水を実験室に持ち帰り、JIS K 0102に準拠した方法等で分析した。



図2.1 水深別調査地点

2.3. 結果

平成29年度(2017年度)における今津沖中央定点(C点)の水深別の特徴的な水質は、図2.2に示すように6月から7月にかけてPOC(粒子態全有機炭素)が表層から深度20mにかけて増加したことである。また、11月は図2.3に示すようにSS(浮遊物質量)が表層から深度30mにかけて顕著に増加した。

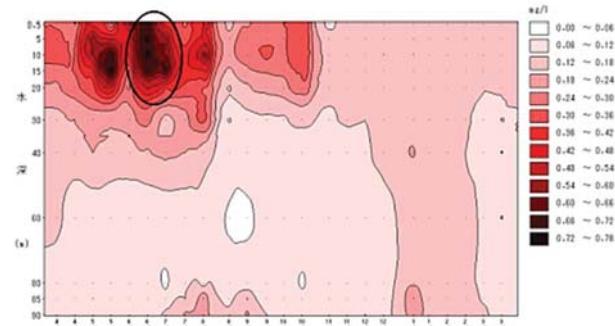


図2.2 C点におけるPOCの鉛直分布の経時変化
(平成29年度(2017年度))

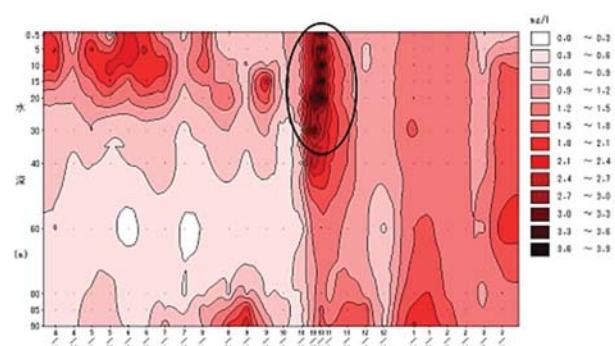


図2.3 C点におけるSSの鉛直分布の経時変化
(平成29年度(2017年度))

平成 30 年度（2018 年度）については、図 2.4 に北湖 28 地点における硝酸態窒素の表層平均値の経月変化を示したとおり、表層の硝酸態窒素の低下が確認された。6 月～7 月にかけて過年度平均値より低下し、特に 11 月以降は過年度最低値を更新するような濃度の低下が確認された。さらに、例年全層循環が起こる 1 ～ 2 月の本調査の結果において、表層の濃度が低く底層の濃度が高いといった濃度分布が残ったままであった。

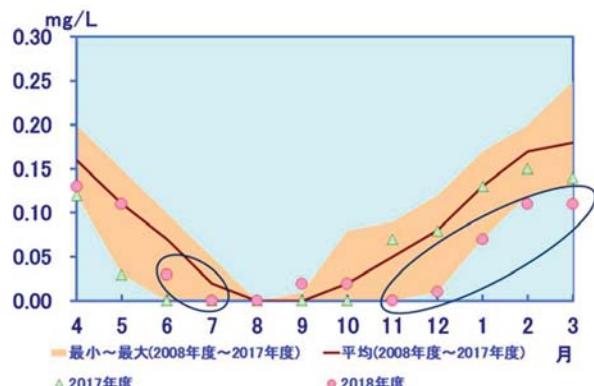


図 2.4 北湖硝酸態窒素の経月変化（表層平均値）

令和元年度（2019 年度）については、3 節において詳述する第一湖盆で全層循環が未完了であったこと、C 点の底層 DO が 8 月下旬から 1 月下旬までの間、強風による一時的な回復を除いて 2 mg/L 前後で推移したことから、底層における栄養塩類やマンガンなどの濃度上昇が懸念された。底層の全窒素は図 2.5 に示すように過年度最低値付近で推移しており、底層の全りんは図 2.6 に示すように過年度最低値付近で推移していた。一方、底層の全マンガンは図 2.7 に示すように 10 月以降過年度平均を上回る濃度で推移し、12 月中旬から 2 月中旬まで過年度最高値を超える濃度が確認されたが、これまでに観測された最高値よりは低い値であった。

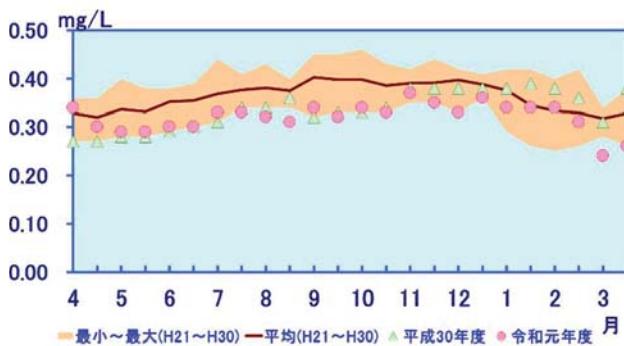


図 2.5 C 点における全窒素の経月変化（湖底から 1m 層）

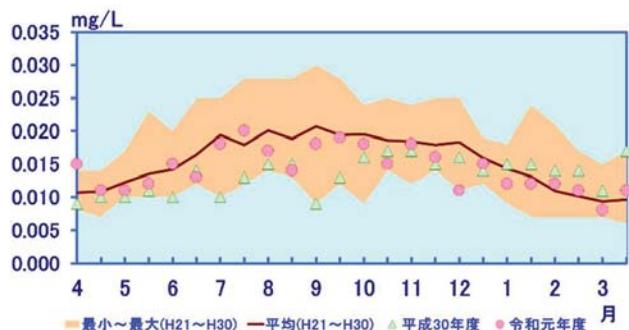


図 2.6 C 点における全りんの経月変化（湖底から 1m 層）

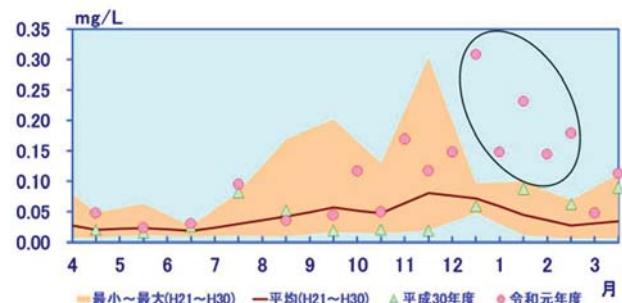


図 2.7 C 点における全マンガンの経月変化（湖底から 1m 層）

2.4. 考察

平成 29 年度（2017 年度）については、6～7 月に POC が表層から水深 15m の範囲で顕著に増加した原因是、大型緑藻のスタウラストルムの大増加によるものと考えられた。11 月の SS の上昇は大型の台風 21 号の襲来による豪雨の影響によるものと考えられた。また、1～3 月の SS の上昇は植物プランクトンの珪藻が増加したことが要因と考えられた。

さらに、水深別調査の結果に表れたこれらの事象は、同じ 6～7 月、11 月、1～3 月の透明度の月平均値（図 2.8 に示す北湖 28 地点における月平均値）の低下に大きく影響したものと考えられた。

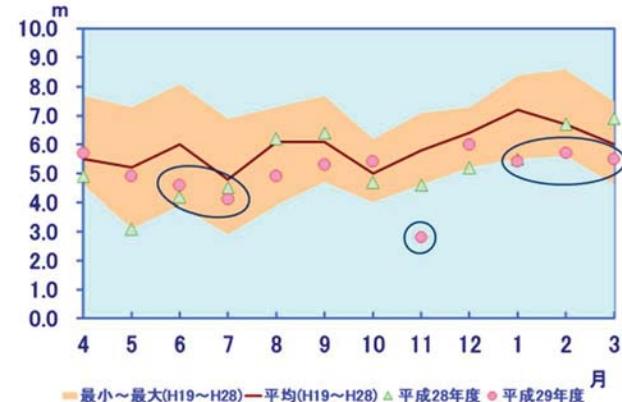


図 2.8 透明度の経月変化（表層平均値）

平成 30 年度（2018 年度）については、北湖表層の全窒素の年間平均値が 0.20 mg/L と過去最低となり、令和元年度（2019 年度）においても平成 30 年度（2018 年度）と同値である 0.20 mg/L となつたが、その内訳として硝酸態窒素の低下が寄与していた。そこで、水深別調査で得られた C 点における硝酸態窒素の鉛直分布の経時変化（図 2.9）を見ると、11 月以降、例年見られる深水層から表層への回帰が大幅に遅れ、少なかつことが分かった。この要因として、秋季から冬季における高温により水温躍層の沈み込みと衰退が遅れ、底層の濃度の高い水が表層の水と混合せず、表層で濃度が低い状態が続いたためと考えられた。さらに、6 月と 10 月には前年度に続き、大型藻類が大増殖し、表層において硝酸態窒素を吸収し、沈降したため、表層の濃度が低下・枯渇したものと考えられた。

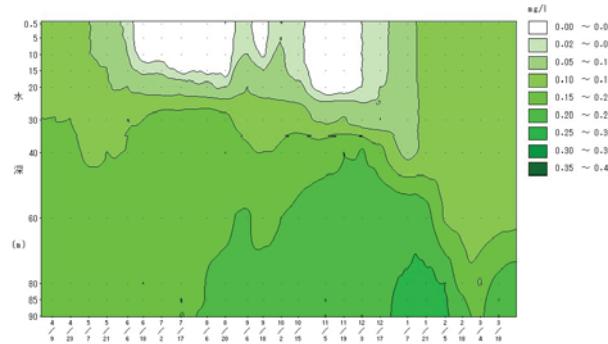


図 2.9 C 点における硝酸態窒素の鉛直分布の経時変化
(平成 30 年度 (2018 年度))

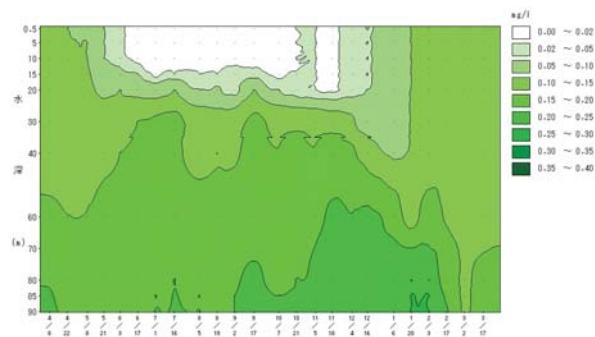


図 2.10 C 点における硝酸態窒素の鉛直分布の経時変化
(令和元年度 (2019 年度))

令和元年度（2019 年度）については、C 点の底層 D0 が 8 月下旬から 1 月下旬までの間、強風による一時的な回復を除いて 2 mg/L 前後で推移したことにより、底層における栄養塩類やマンガンなどの濃度が上昇する可能性が考えられた。

しかし、底層の全窒素は図 2.5 に示すように過年度最低値付近で推移し、底層の全りんは図 2.6 に示すように過年

度平均値付近で推移しており、濃度の上昇は見られなかつた。これは底層 D0 が 2 mg/L 前後の貧酸素状態で推移した時期があったものの、その時期も一定量の底層 D0 が存在し無酸素状態に至らなかつたことで窒素とりんの溶出が起らなかつたと推定される。

底層の全マンガンについては、図 2.7 に示すように 10 月以降過年度平均を上回る濃度で推移し、12 月中旬から 2 月中旬まで過年度最高値を超過する濃度が確認された。また、図 2.10 に示すように 12 月から 2 月にかけて底層で硝酸態窒素の濃度が上昇していた時期はマンガン濃度の上昇が水深 60m まで及んでいた（図 2.11）。これについては、底層 D0 が 2 mg/L 前後の貧酸素状態となったことにより底泥表面の還元状態が進行し、湖底表層のマンガンが溶出したためと考えられ、貧酸素状態におけるマンガンの挙動の特徴が顕在化していたものと見られる。

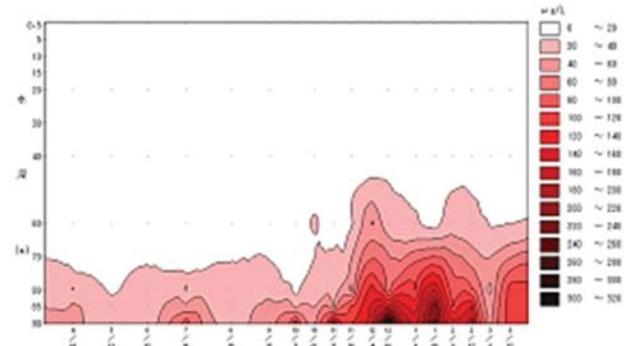


図 2.11 C 点における全マンガンの鉛直分布の経時変化
(令和元年度 (2019 年度))

2.5. まとめ

平成 29 年度（2017 年度）から令和元年度（2019 年度）にかけて水深別水質調査等を実施した結果、平成 29 年度（2017 年度）については、植物プランクトンの増加と 10 月に襲来した台風 21 号の影響により、透明度の顕著な低下が生じた。平成 30 年度（2018 年度）については、表層水での硝酸態窒素の低下が確認され、通常回復する冬季においても表層の濃度が低く底層の濃度が高いままであつた。このことが、北湖表層の全窒素が過去最低となつた直接の原因であったが、その要因として、前年度に続く春と秋の大型緑藻の増殖沈降に加え、秋季から冬季の高温により水温躍層の衰退が例年よりも遅かつたため、深水層からの硝酸態窒素の表層への回帰が大幅に遅れたことが考えられた。令和元年度（2019 年度）については、全層循環の未完了後 C 点の底層 D0 低下の影響による底層における窒素・りんなどの濃度上昇が懸念されたが、一定量の底層 D0 が存在していたことにより、全窒素は過年度最低値、全りんは過年度平均値付近で推移した。一方で底層の全マンガ

ンは貧酸素状態の継続により底泥表面の還元状態が進行し、湖底表層のマンガンが溶出したことにより、10月以降に顕著な濃度の上昇がみられた。

3. 北湖深水層底層DO調査

3.1. はじめに

湖沼における底層の溶存酸素量が、平成28年(2016年)3月に環境基準に追加された(環境省, 2016)。2019年度末現在、琵琶湖における底層DOの環境基準について、国で基準値の設定(類型指定)が進められている。これまでの表層の水質に対する基準とは異なり、深さ方向の水質について評価を求める基準であり、水深別水質調査の重要性が高まっている。

春から北湖の深水層においてDOが減少していくのは、上層と下層で水温の急勾配(水温躍層)が生じ、水温躍層より下へのDOの供給がほとんどなくなり有機物の分解等によるDOの消費が上回ることによる。特に底層DOは、底泥においてDOの消費が多く低下が進みやすい。一方、非常に強い風が吹くと、底層付近よりもDOが高い上層水と混ざり合うことで、一時的に底層DOの上昇が観測される。気温が低い季節になると、水温躍層が弱まり沈降し、最終的には表層から底層まで循環(全層循環)し、底層DOは表層と同程度の値まで上昇する。

水深約90mの底層DO低下状況については年によって大きく異なる。2002年は春の気温上昇が早く全層循環の終了時期が早かったため底層DOの低下期間が長期に及んだこと、2007年や2008年は秋の高温による水温躍層の衰退の遅れに加え、強風イベントの影響も弱く、底層DOの低い状態が長く続いたことなどが考えられる(岡本ら、2008、焦ら、2012)。

3.2. 方法

北湖深水層底層DO調査の地点は、今津沖中央定点を含む水深約90mの7地点(A~F・L:図3.1)で実施した。多項目水質計 DataSonde5(hydrolabo社製)を使用し、水深0.5、5、10、15、20、30、40、60、70、80、85mおよび湖底直上1mの水温・DOを測定した。

なお、水深別水質調査と併せて実施する場合は、原則、C,L点を測定することとした。また、当日の天候によっては、予定していた調査地点・水深について、地点数・水深数を減らすことや調査自体を中止・延期するなど、現場で優先順位をつけて調査を行った。

また、2019年度には貧酸素状態の拡がりが予想され、その状況を把握するため、水深80m地点(H~K:図3.1)を追加して、前述の方法により、湖底直上1mまでの水温・DOを測定した。これらの地点は、2002年に水深90m地

点で貧酸素状態を確認した時に、その影響を把握するために実施した地点(藤原ら、2003)である。

また、2017年度に、底層DO調査の効率化の検討を行った。2008年度以降、北湖第一湖盆の底層DO調査は月に3~4回実施してきたが、このうち、第一湖盆7地点調査は、全層循環確認後から底層DOが徐々に低下する8月までの間は月に1回、9月から全層循環確認までの間は月に2回、新たな調査を追加するに及んでいる。そこで、地点や頻度の重点化と効率化を目的として過去5年間の測定データをもとに第一湖盆のB点とE点を残りの5地点からスプライン補間法で推計値として求め実測値と比較し、底層DO濃度減少速度の算出を行い、年間の測定地点・回数の削減が可能である条件を導くこととした。

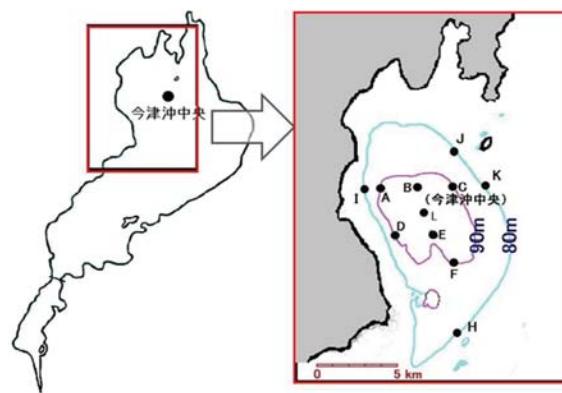


図3.1 北湖深水層底層DO調査地点

3.3. 結果

3.3.1. 底層DOモニタリング方法効率化の検討

底層DOの実測値とスプライン補間による推計値をプロットしたものが図3.2である。欠測点を除き、実測値と推計値との関係は、 $y=0.944x+0.429$ 、 $R^2=0.923$ と良い直線性を示した。しかし、実測値 $\leq 8 \text{ mg-O/L}$ 付近よりばらつく傾向が観察され、数値の安定性は8mg-O/L以上において有効であることが考えられる。

この結果をふまえて実測値の底層DO濃度において、DO濃度 $> 8 \text{ mg-O/L}$ 、 $5 \leq \text{DO濃度} < 8 \text{ mg-O/L}$ 、DO濃度 $< 5 \text{ mg-O/L}$ で場合分けを行った(図3.3)。DO濃度 $> 8 \text{ mg-O/L}$ における実測値と推計値の関係は、 $y=1.026x+0.307$ 、 $R^2=0.896$ と良い直線性が得られた。 $5 \leq \text{DO濃度} < 8 \text{ mg-O/L}$ では、 $y=0.791x+1.22$ 、 $R^2=0.374$ 、DO濃度 $< 5 \text{ mg-O/L}$ では、 $y=0.881x+0.731$ 、 $R^2=0.547$ と、DO濃度8mg-O/L未満ではばらつきが大きくなっていた。

また、表3.1に誤差10%以下の出現率を示す。これよ

り、実測値 8 mg-O/L 以上における誤差 10%以下のデータの出現率は 90%を超えていた。底層 DO 濃度が低下すると、誤差 10%以下出現率は $5 \leq \text{DO} < 8 \text{ mg-O/L}$ では 72%、 $\text{DO} < 5 \text{ mg-O/L}$ では 45%となり信頼性が低下してくる。この場合、推計値と実測値に大きな差が生まれる可能性があり、実際には底層 DO が貧酸素状態になっているにもかかわらず推計値が高く算出されて貧酸素状態を見逃してしまうことが考えられ、一定の数値の目安を設定して、5 地点から 7 地点調査に戻す必要がある。

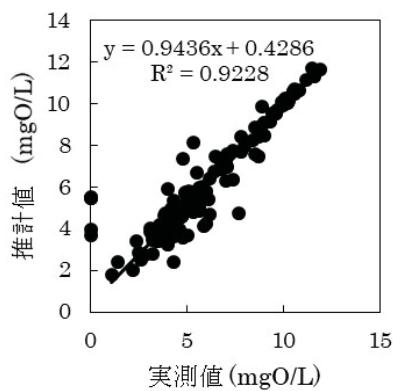


図 3.2 実測値と推計値の関係

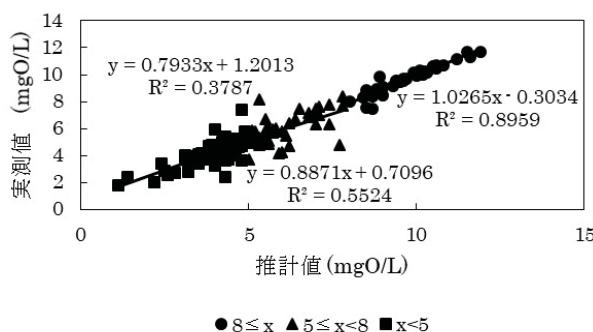


図 3.3 場合分けでの実測値と推計値の関係

表 3.1 場合分けでの誤差出現率

場合分け	データ数	誤差 10%以下	
		データ数	出現率 (%)
$8 \leq x$	38	35	92.1
$5 \leq x < 8$	50	36	72.0
$x < 5$	53	24	45.3
有効データ数	141		

次に、底層 DO 濃度の減少速度を図 3.4 に示す。減少傾向が著しく早かった平成 29 年度（2017 年度）と平成 25～27 年度（2013 年度～2015 年度、通年）を分けて実施し、

平成 25～27 年度（2013 年度～2015 年度）については測定各点の平均値を、平成 29 年度（2017 年度）については測定結果の最低点を用い、4 月 1 日を 0 日目として計算した。

DO 濃度の減少速度は、通年については -0.0353 mg/L/day 、平成 29 年度（2017 年度）については -0.0657 mg/L/day と算出された。一月当たりの日数を 30 日とすると、一月当たりの DO 濃度の減少速度はそれぞれ 1.059 mg/L/month 、 1.971 mg/L/month として表され、DO 濃度が 2 mg/L を下回る場合の一月前（30 日）の DO 濃度について計算すると、通年の減少速度に基づくと 3.06 mg/L 、昨年度の速度では、 3.97 mg/L と算出された。

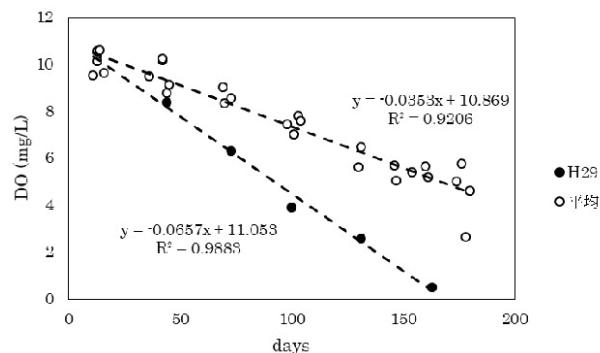


図 3.4 琵琶湖第一湖盆における DO 濃度の減少速度

3.3.2. 底層 DO のモニタリング結果

平成 29 年度（2017 年度）から令和元年度（2018 年度）までの北湖今津沖中央 C 点における底層 DO（湖底直上 1 m）の経月変化が図 3.5 である。年度によって経月変化の傾向が大きく異なっていることがわかる。各年度の詳細について説明する。

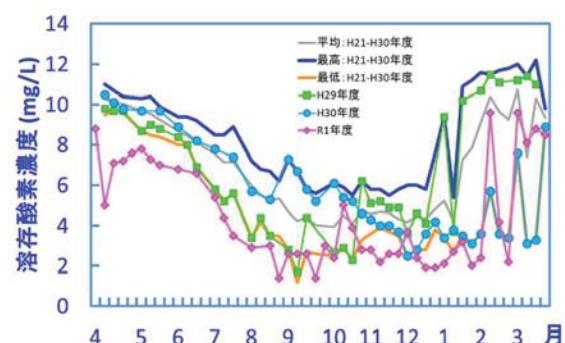


図 3.5 C 点における底層 DO の経月変化 (H29-R1 年度 (2017 年度～2019 年度))

平成 29 年度（2017 年度）は、6 月以降水深 90m 地点の底層 DO は大きく低下し、8 月に台風 5 号が通過後、一時的に回復したが、再び低下し、9 月 11 日には 1.7 mg/L

まで低下し、貧酸素状態となった。しかし、その直後、台風 18 号が通過し、一時的に回復し、10 月下旬には大型の台風 21 号が通過し、C 点を含む第一湖盆の水深 90m 全域で大幅な回復が見られた（図 3.6、カラー図表参照）。その後、平成 30 年（2018 年）1 月 22 日の調査時に過去 10 年では最も早い時期に全層循環を確認した。

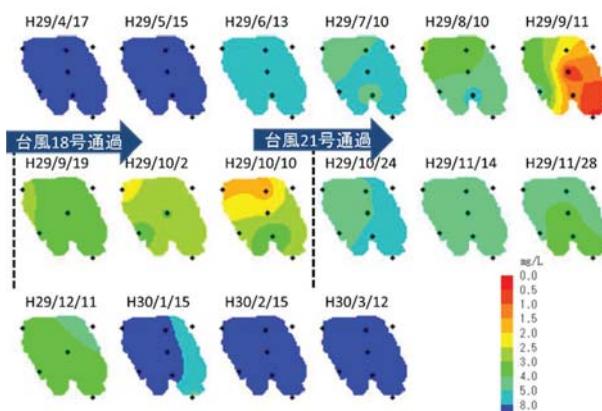


図 3.6 水深 90m 地点の底層 DO 変動 (H29 年度 (2017 年度)、
カラー図表参照)

2018 年度（平成 30 年度）においては水深 90m 地点の底層 DO が貧酸素状態とはならなかった。しかし、C 点における DO 鉛直分布の経月変動（図 3.7）から、冬季において深水層の DO は徐々に回復したもの、例年のように表層から底層まで一様になっていなかったことがわかる。

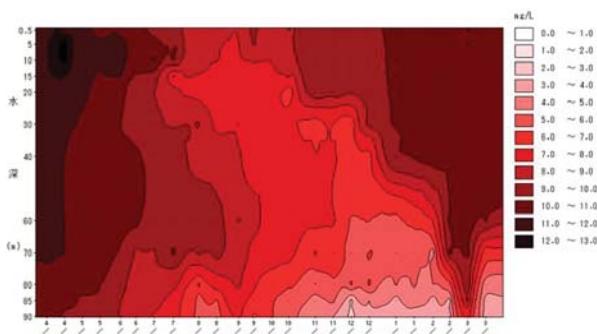


図 3.7 C 点における DO 鉛直分布の経月変動 (H30 年度
(2018 年度))

また、水深 90m の 7 地点における底層 DO の平面分布も図 3.8（カラー図表参照）に示したとおり一様ではなく、値が低い地点が観測され、DO が十分に回復していない水塊が残存していた。

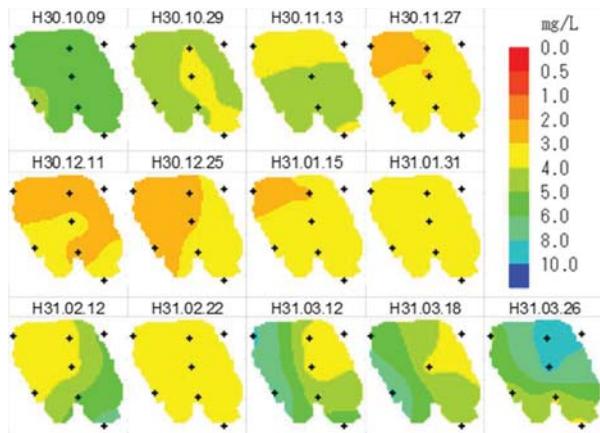


図 3.8 水深 90m 地点の底層 DO 変動 (H30 年度 (2018 年度)、
カラー図表参照)

全層循環が 3 月まで遅れた 2015 年度（平成 27 年度）では、3 月中旬まで値が大きく変動しており、2018 年度（平成 30 年度）も、同様に大きな変動が見られ 3 月から 2019 年度（令和元年度）当初 4 月にかけて引き続き値の変動が見られたが、5 月には例年より 1 ~ 2 mg/L 低い 7 mg/L 程度となった（図 3.9）。

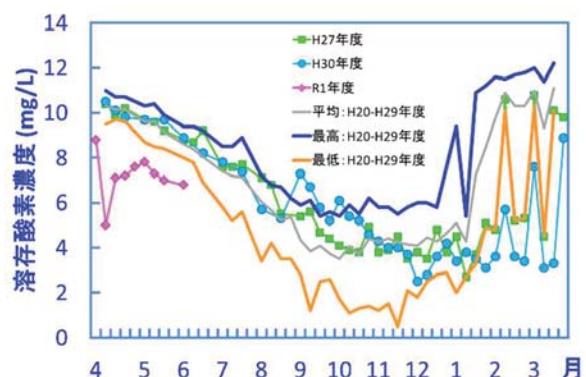


図 3.9 C 点における底層 DO の経月変化 (R1 年度 (2019 年度) 当初まで)

令和元年度（2019 年度）の水深 90m 7 地点における底層 DO は、8 月下旬に 2 mg/L を下回る貧酸素状態を確認した。その後、台風 19 号の強風によって 10 月中旬に全ての地点で 2 mg/L 以上となったことを観測したものの、2 mg/L を下回った期間は、その一時的に回復した期間を除き、約半年間に達した（表 3.2）。

貧酸素状態の継続により貧酸素水塊の拡がりも懸念されたことから、水深 80m の 4 地点（H/I/J/K）を追加して調査した結果、貧酸素水塊は水深 90m の水域から広がっていたが、水深 80m の水域全域までは広がっていなかった（図 3.10、カラー図表参照）。

表 3.2 第一湖盆（水深約 90m）における底層 DO（令和元年（2019 年）8月 27 日～令和 2 年（2020 年）2 月 10 日）

調査日	8月		9月				10月				11月	
	8/27	9/2	9/9	9/17	9/24	9/30	10/7	10/16	10/21	10/30	11/5	11/13
A	1.7	1.9	1.0	3.0	1.3	1.2	1.3	3.1	2.1	1.6	中止	1.1
B	1.2	2.0	0.8	中止	1.4	0.8	0.7	2.5	2.7	1.8	中止	1.7
C(今津沖中央)	1.4	2.6	2.6	2.6	1.4	3.0	2.4	5.0	3.9	2.8	2.8	2.2
D	2.6	3.4	1.3	2.3	1.0	0.9	1.9	2.1	1.8	4.0	1.8	1.6
E	2.5	1.8	1.6	中止	2.7	2.2	<0.5	2.5	3.1	2.6	2.0	2.7
F	2.1	2.3	3.0	2.2	2.3	1.8	1.0	2.8	2.7	2.1	2.1	2.1
L(第1湖盆中央)	1.6	1.0	1.2	0.8	0.9	1.6	<0.5	2.3	2.8	2.6	2.6	1.3

調査日	11月		12月				1月				2月	
	11/18	11/26	12/4	12/9	12/16	12/23	1/6	1/14	1/20	1/29	2/3	2/10
A	1.7	2.0	1.9	1.9	1.3	1.8	2.5	2.1	1.8	中止	2.7	1.6
B	2.1	1.5	3.5	2.5	1.8	1.4	2.1	2.7	2.3	中止	1.5	1.6
C(今津沖中央)	2.6	2.6	3.7	2.4	1.9	1.9	2.1	2.7	3.2	2.0	2.4	9.6
D	1.8	1.6	2.8	1.9	1.6	3.1	2.2	2.1	1.8	中止	3.0	1.6
E	1.7	1.2	2.0	2.7	1.8	2.1	2.7	2.3	1.9	中止	1.5	9.6
F	2.0	1.9	1.5	1.7	1.8	2.2	3.0	2.7	2.5	中止	1.4	7.1
L(第1湖盆中央)	1.7	1.1	2.7	2.7	2.7	1.3	2.0	2.4	1.8	1.5	1.7	2.5

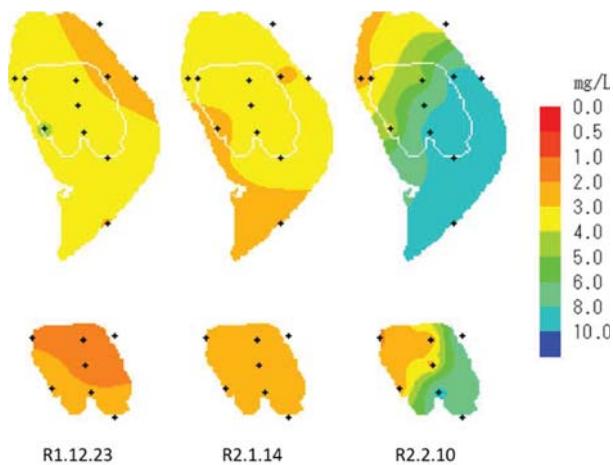


図 3.10 水深 80m 地点の底層 DO 変動（令和元年（2019 年）12 月 23 日～令和 2 年（2020 年）2 月 10 日、カラー図表参照）

令和 2 年（2020 年）2 月以降は、DO が大きく変動し、前年度（平成 30 年度（2018 年度））の同時期と比較して高く推移したものとの、3 月 23 日の調査時においても、例年のような回復は見られず、この水域では 2 年連続で全層循環しなかった（図 3.11、カラー図表参照）。

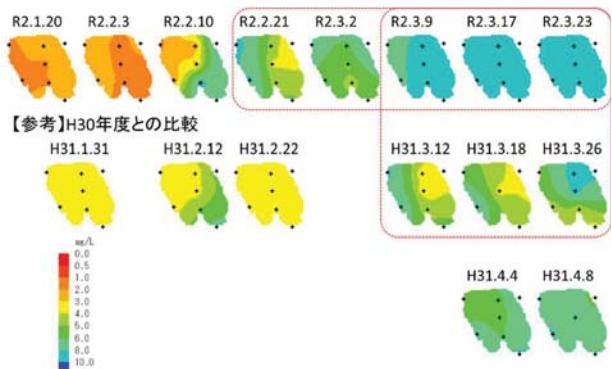


図 3.11 水深 90m 地点の底層 DO 変動(R1 年度末(2019 年度末)、カラー図表参照)

3.4. 考察

3.4.1. 底層 DO モニタリング方法の効率化

底層 DO 調査効率化検討結果から導いた底層 DO 濃度による調査地点数の考え方を図 3.12 に示す。

5 地点の底層 DO 濃度が 8 mg-O/L 以上の場合においては 90%を超える可能性で実測値と比べて誤差 10%以下の値が推計値として算出されていると見られる。よって第一湖盆の全層循環が確認された調査以降は、底層 DO 濃度が 8 mg-O/L 以上であれば 5 地点で調査を実施することが可能であると考えられる。（図 3.12①）

次に、過年度 5 年間の最大 DO 減少速度は 1.971 mg-O/L/month であったので、5 地点の値の中で最低値が 4 mg-O/L を下回れば翌月には貧酸素状態（2 mg-O/L 未満）が観測される可能性がある。したがって 5 地点の値の中で最低値が 4 mg-O/L を下回る点が確認された場合は、次の調査（モニタリングの 2 週間のサイクルを想定）から 7 地点で行う必要があると考えられた。（図 3.12③）

DO 濃度が 4 mg-O/L 以上 8 mg-O/L 未満の場合は推計値の信頼性は低下するが、前述の理由により 4 mg-O/L を下回らなければ貧酸素状態を見逃す可能性は非常に低く、5 地点調査で底層 DO の監視は実施できると考えられる。ただし、算出された底層 DO 減少予想速度が過年度最大値を超える場合や地点間の底層水温に大きな差が見られ異なる水塊の流入が疑われる場合等の特異な現象が確認された時には、適宜地点数の追加を行い 7 地点での詳細な底層 DO 調査を実施することを検討する必要がある。（図 3.12②）

その後、第一湖盆の底層 DO が 8 mg-O/L 以上に回復するか、全層循環が確認されたら、再び 5 地点の調査に戻すことが可能であると考えられる。（図 3.12④）

以上の考え方を、第一湖盆の底層 DO 調査に反映し、貧酸素状態になる可能性が低い 5 月から 8 月までの期間、か

つ、 4 mg/L を下回ったことを観測するまでの期間に、水深別調査時に 5 地点調査を併せて行い、これまでの 7 地点調査を削減することとし、2018 年度(平成 30 年度)の調査から試行を開始した。その結果、底層 DO 低下の傾向や貧酸素状態に達した時期や範囲の精度を失すことなく、4 回の調査を削減することができた。

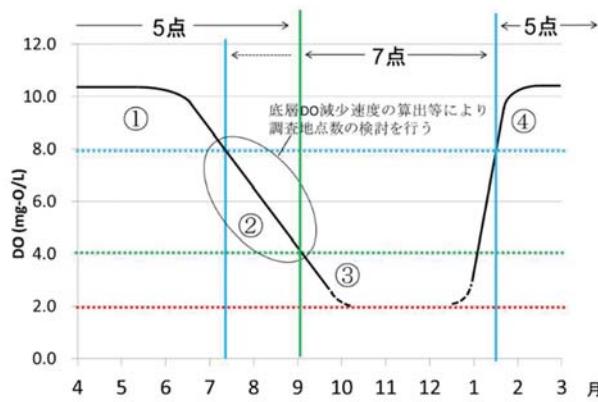


図 3.12 底層 DO 濃度による調査地点数の考え方

3.4.2. 底層 DO の特異的な変動について

平成 29 年(2017 年)10 月 20 日から 23 日にかけて襲来した台風 21 号は県全域に記録的な降水量と暴風をもたらした。台風通過後の 24 日に実施した C 点における調査では、台風前と比較して表層から水深 15m までの水温の約 3°C の低下と、水深 40m から 60m までの水温の約 1°C の上昇を確認し、水温の鉛直分布が顕著に変化したことを把握した(図 3.13)。

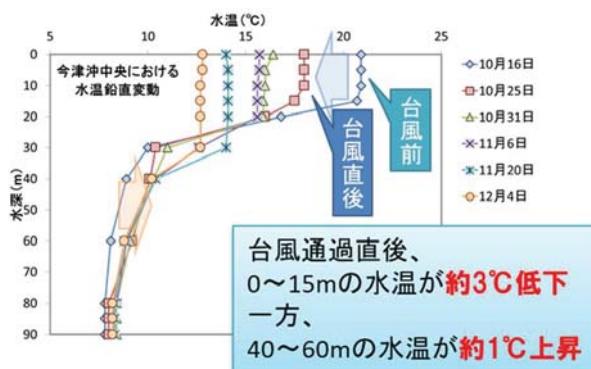


図 3.13 台風 21 号襲来前後の C 点における水温変化(H29 年(2017 年))

地点別にみると、東岸(C 点)では水温躍層が残存しているが、中央部(L 点)から西岸(D 点)にかけては表層水温が大きく下がっており、水温躍層が大きく崩れていた(図 3.14)。このことから、台風 21 号の暴風により湖水

が攪乱されて中層、底層部の湖水も振り動かされたことが推察された。さらに、平成 30 年(2018 年)1 月 22 日の調査時に過去 10 年では最も早い時期に全層循環が確認されたのは、厳冬で例年より表層水からの冷却が進んだことに加えて、前述の台風の影響により底層水温が上昇していたことも循環を促す効果があったものと考えられた。

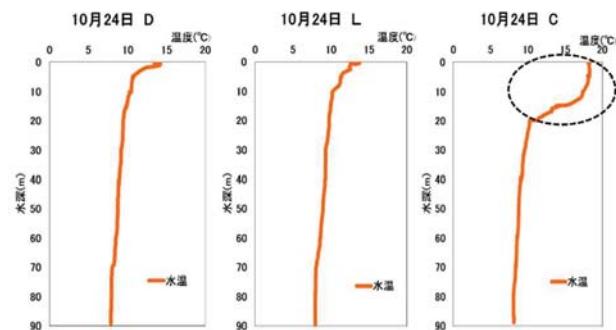


図 3.14 第一湖盆調査地点における水温の鉛直分布(H29 年(2017 年)10 月 24 日)

平成 30 年度(2018 年度)は、水深 90m 地点の底層 DO は貧酸素状態とはならなかったが、3 月から 2019 年度の 4 月にかけても、水深 90m の水域における水温と DO の鉛直分布は一様になることはなく、昭和 54 年(1979 年)の調査開始以降、全層循環しなかったと判断した。

令和元年度(2019 年度)は、水深 90m の水域の底層 DO が 2 mg/L を下回った期間が、一時回復した期間を除き、過去最長の約半年間に達した。ただし、10 月中旬以降は、 2 mg/L を下回るものの 1 mg/L までは下回らない値で推移した。昭和 54 年(1979 年)から調査を継続している今津沖中央における水深 60m 以深の DO の年度最低値の推移(図 3.15)を見ると、令和元年度(2019 年度)の底層 DO 最低値は 1.4 mg/L と過去に観測された低い年の値と変わらなかった。一方で、深度 60m の DO 最低値は 4.0 mg/L と過去最低を下回った。これらの現象は、秋から冬の強風により、深水層において混合が起こり、DO が底層に供給されて回復した分、その上の層では減少したことにより生じたものと考えられる。

その後も、暖冬が続き、当水域における表層から底層までの水温分布は 0.1°C にまで縮小したが、DO は 1 mg/L の差を残したまま、表層から水温躍層が形成され始めたことから、2 年連続で全層循環しなかったものと考えられた。



図 3.15 今津沖中央における水深 60m 以深の DO の年度最低値の推移

この 2 年の今津沖中央における水温分布を見ると、過去 10 年と比べ、全層で高いことがわかる（図 3.16）。特に、底層の水温については、令和元年度（2019 年度）における平均水温が 8.6°C、最低水温が 8.0°C と、それぞれ観測開始以来最高値となった。今後は、循環しなかった水域の底層 DO とともに、その水域における水温の変動についても、より注視する必要があると考えられる。

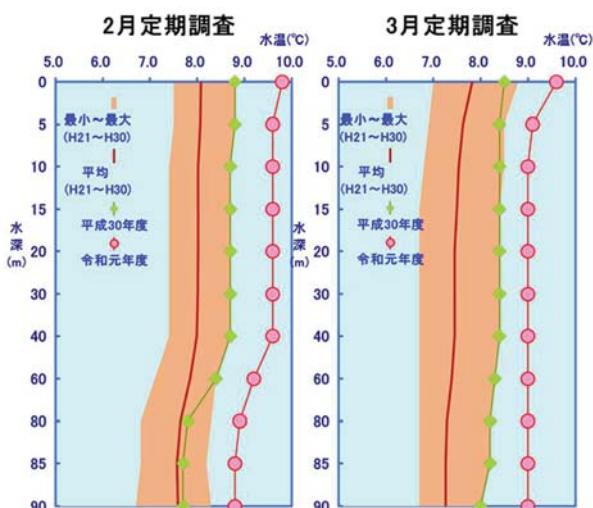


図 3.16 平成 30 年度（2018 年度）～令和元年度（2019 年度）2-3 月の今津沖中央における水温の鉛直分布の過年度比較

3.5. まとめ

・平成 30 年度（2018 年度）において、昭和 54 年（1979 年）に琵琶湖の今津沖中央における水深別の水質モニタリングを開始して以降初めて、北湖第一湖盆の水深約 90m の水域で全層循環しなかったことを確認した。また、平成 29 年度（2017 年度）および令和元年度（2019 年度）においては、底層 DO が 2 mg/L を下回る貧酸素状態を観測

した。

・平成 29 年度（2017 年度）に北湖深水層底層 DO 調査の効率化を検討し、平成 30 年度（2018 年度）に施行した結果、貧酸素状態を見逃すことなく、底層 DO の変動を把握した。

・令和元年度（2019 年度）は、8 月下旬に第一湖盆で貧酸素状態を観測して以降、強風により一時的に DO が回復したものの、2 月上旬までこれまで最も長い期間にわたり貧酸素状態が継続した。貧酸素水塊の拡がりが懸念されたことから、水深 80m の 4 地点を追加して状況を把握した結果、貧酸素水塊は、水深 90m の水域から広がっていたが、水深 80m の水域全域までは広がっていなかった。

・今後は、令和元年度（2019 年度）に観測された状況等をふまえ、底層 DO の変動を適切に把握するために必要な調査地点・調査頻度をさらに検討していく必要がある。

3.6. 結論

平成 28 年（2016 年）に環境基準に設定された底層 DO については、類型指定が行われることとなっており、底層 DO を適切に評価できる調査地点・頻度など解析と組み合わせたモニタリング方法の検討を進める必要がある。

北湖深水層における DO の課題は、全層循環しないという事態が、シミュレーションで近未来に起こるとの予測より早く現実になり、それが一因となって貧酸素状態が生じるといった新たなステージに入ったと考えられる。底層 DO 低下の頻度増加などの当初の課題に加え、全層循環しなかったことや気候変動による影響把握も含め、当該水域で継続して底層 DO の状況と変動要因を調査していく必要がある。

4. 底泥酸素消費量 (SOD) 等の詳細把握調査

4.1. はじめに

底層水における酸素消費因子としては、底層水そのものの酸素消費と底泥の酸素消費がある。これらの指標として、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, SOD）を利用することができる。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。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3.1)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2.0mg/Lを度々下回っていることである。そこで、琵琶湖北湖のSODと底泥中の元素成分を把握し、それぞれの関係性、底層DOの低下に対するSODの寄与について考察した。

4.2. 方法

4.2.1. 採泥

琵琶湖北湖の底泥における酸素消費の実態を把握するため、第一湖盆東側に位置し、毎月表層から湖底直上1mまで水深別に調査を実施している今津沖中央の定点(C点)、第一湖盆の中央に位置する地点(L点)および第二湖盆に位置する南比良沖中央地点(12B点)(図4.1)において、四季ごとにC点では2017年5月から2020年2月まで、L点では2017年5月から2018年2月まで、12B点では2017年11月および2018年5月から2020年2月まで採泥を行った。

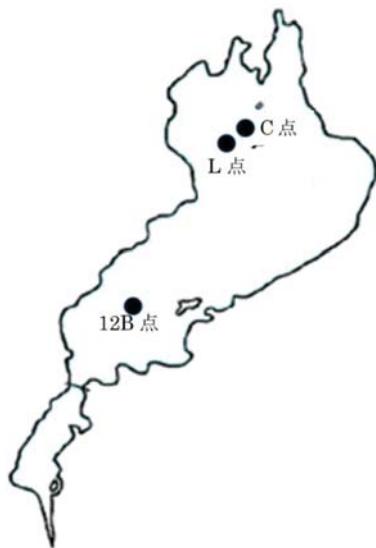


図4.1 底泥酸素消費量(SOD)調査地点

各地点の底泥は不搅乱柱状採泥器((株)離合社製、HR型、写真4.1(左))を用いて、内径110mm、長さ500mmのアクリル製カラムに、高さが250mmとなるよう直上の湖水とともに採取して実験室に持ち帰った。同時にバンドーン採水器を用いて各地点の深層部の湖水を採取した。

底泥酸素消費量(SOD)は、底質調査方法(環境省水・大気環境局, 2012)に準じて以下のとおり測定を行った。

持ち帰ったアクリル製カラムから底泥上の湖水を取り除いた後、底泥と同じ地点で採取した深層水から調製したカラム充填水を充填し、空気が残らないよう攪拌子付き天

然ゴム栓で密栓してSOD測定用カラムを作成した。カラム充填水は、C点、L点で水深85m、12B点で水深55mの湖水を採取し、GF/Bガラス繊維ろ紙(Whatman社製、Φ47mm、粒子保持能:1.0μm)でろ過した後、十分にばつ氣して調製した。SOD測定用カラム(写真4.1(右))は、窒素ガスを充填したガスバリア袋(三菱ガス化学(株)製エスカル・ネオHT160100M)の中に密封し、アクロバットスター(株)関東理化製、ASH-1240で底泥を巻き上げないよう攪拌しながら湖底水温と同程度である7°Cの恒温槽で暗条件下3日間培養した。培養開始時に、カラム内の充填水のDOをDO計(HACH社製ポータブルマルチメータHQ40d)で測定し、培養開始後はガスバリア袋から毎日カラムを取り出してDOを測定した後、再び窒素ガスを充填したガスバリア袋内に密封し、培養を続けた。

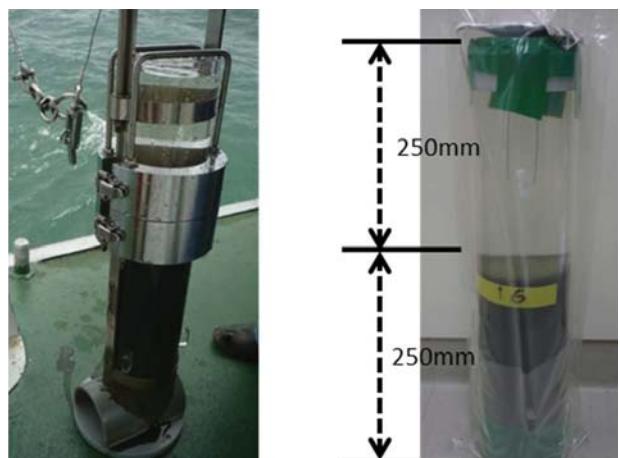


写真4.1 不搅乱柱状採泥器(左)、SOD測定用カラム(右)

各地点のカラムを3日間培養したSOD(SOD-3d)は、次式(1)により求めた。

$$SOD = \frac{(開始DO - 終了DO)}{\text{測定時間(day)}} \times \frac{\text{充填水体積(m}^3\text{)}}{\text{底泥接触面積(m}^2\text{)}} \quad \dots \dots \quad (1)$$

また、底泥成分とSODとの関係を調べるために底泥中に含まれる成分の分析を行った。底泥は表面から0-5mm(表層)、5-10mm(中層)、10-20mm(深層)に切り分け、試料の調整は底質調査方法に準じて行った。分析項目は全炭素(TC)、全窒素(TN)、全りん(TP)、鉄(Fe)、マンガン(Mn)、ひ素(As)の6項目で、全炭素(TC)と全窒素(TN)は風乾試料を全窒素・全炭素分析装置(住友化学(株)製、SUMIGRAPH M-TR22)で、全りん(TP)は湿試料を硝酸-過塩素酸分解後JIS K 0102 46に準拠した方法(ビーエルテック社製、SWATT)で、Mn, Fe, Asは湿試料を硝酸-過塩素酸分解後、ICP-MS(ThermoFisher製、iCAP-Qc)で分析した。

4.3. 結果

C点（2014～2019年度）、L点（2015～2017年度）および12B点（2017～2019年度（2017年度は秋季のみ））におけるSOD-3dの季節変化を図4.2に示す。

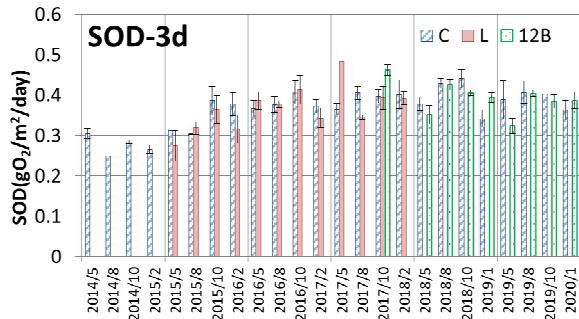


図4.2 SOD-3dの経時変化（エラーバーはn=3の標準偏差を示す。）

C点におけるSOD-3dの年間平均値は、 $0.39 \pm 0.03 \text{ g-O}_2/\text{m}^2/\text{day}$ （2017年度）、 $0.40 \pm 0.04 \text{ g-O}_2/\text{m}^2/\text{day}$ （2018年度）および $0.39 \pm 0.03 \text{ g-O}_2/\text{m}^2/\text{day}$ （2019年度）、L点におけるSOD-3dの年間平均値は $0.40 \pm 0.05 \text{ g-O}_2/\text{m}^2/\text{day}$ （2017年度）、12BにおけるSOD-3dの年間平均値は、 $0.39 \pm 0.03 \text{ g-O}_2/\text{m}^2/\text{day}$ （2018年度）および $0.38 \pm 0.03 \text{ g-O}_2/\text{m}^2/\text{day}$ （2019年度）となった。

C点および12B点においては、夏季および秋季にやや高く、春季および冬季にやや低い値であった。

C点（2014～2019年度）および12B点（2017～2019年度（2017年度は秋季のみ）における底泥中の成分分析結果を図4.3および図4.4に示す。

0-5 mm（表層）、5-10 mm（中層）、10-20 mm（深層）の各成分の含有量（単位：mg/g dry）の2017-2019年度の平均は、TCが、C点でそれぞれ50、45、42 mg/g dry、12B点で48、45、39 mg/g dry、TNが、C点で5.7、4.9、4.7 mg/g dry、12B点で5.7、5.2、4.7 mg/g dry、TPが、C点で2.8、3.0、2.8 mg/g dry、12B点で3.9、3.8、3.5 mg/g dryとなった。また、Feが、C点でそれぞれ54、55、53 mg/g dry、12B点で76、66、58 mg/g dry、Mnが、C点で27、12、8.5 mg/g dry、12B点で3.8、2.2、2.0 mg/g dry、Asが、C点で0.45、0.30、0.12 mg/g dry、12B点で0.47、0.21、0.098 mg/g dryとなつた。

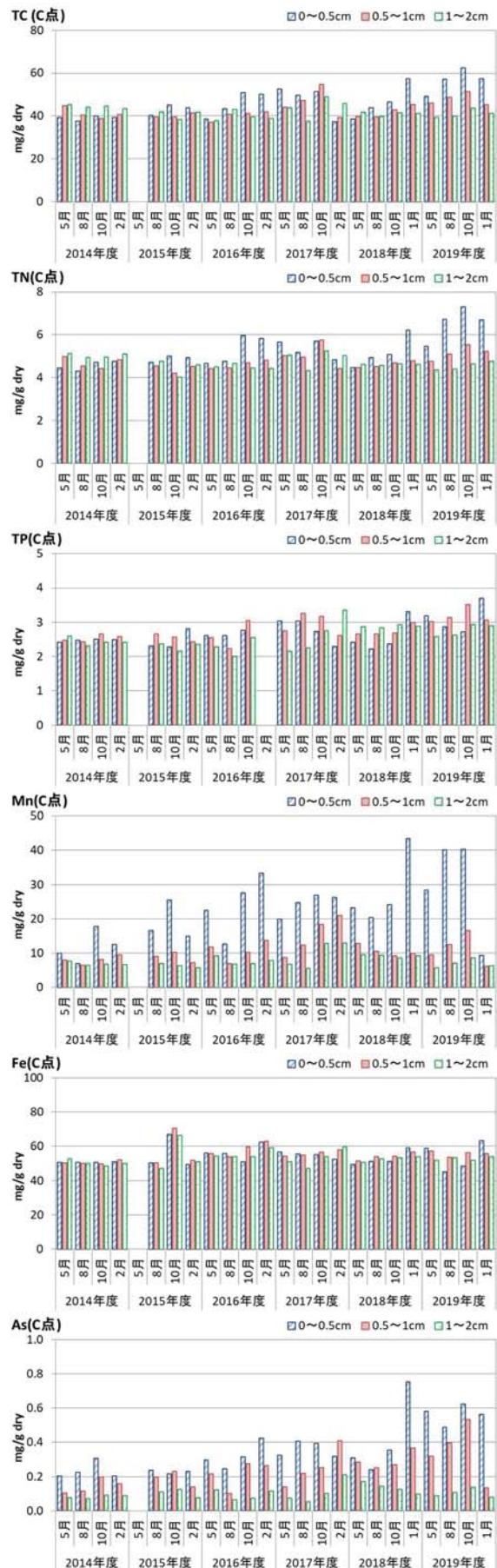


図4.3 底泥成分含有量の経時変化（C点）

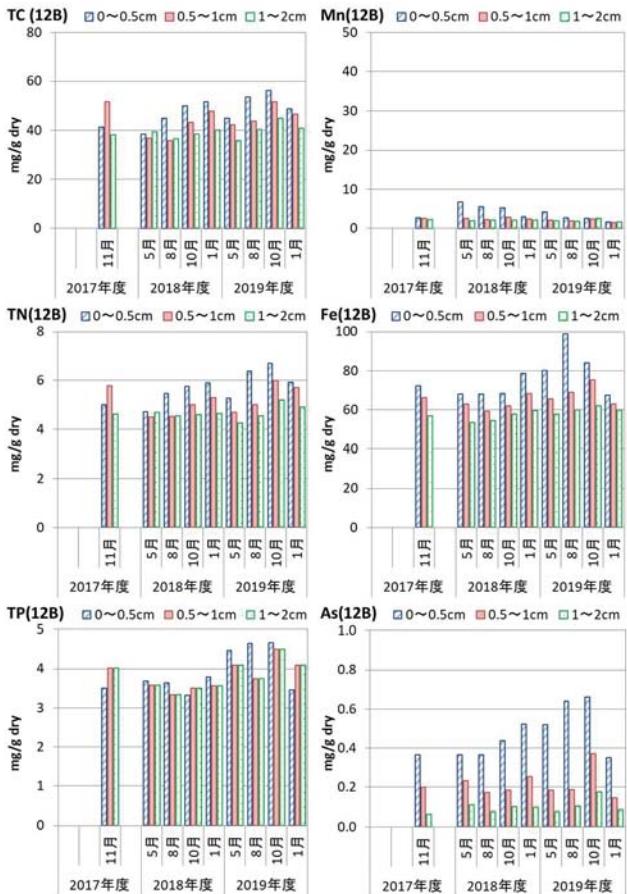


図 4.4 底泥成分含有量の経時変化（12B 点）

各成分の含有量を両地点で比較すると、MnはC点が12B点の数倍高く、TPおよびFeは12B点がC点よりも数割高かった。また、TCはC点が12B点より数%高く、TNは同程度、Asは中層でC点が12B点より数割高く、他の2層では同程度であった。

各層の含有量を比較すると、MnおよびAsでは表層が高く、TCおよびTNでは、表層が1割程度高かった。TPおよびC点のFeは各層で明確な差がなく、12B点のFeは表層が15%程度高かった。

4.4. 考察

C点におけるSOD-3dは、2014年5月から2015年8月まで0.25-0.31 g-O₂/m²/day（平均0.29）であったが、2015年10月に0.39 g-O₂/m²/dayに上昇した後、0.34-0.44（平均0.39）と高い値で推移している。L点においても同じ時期に上昇しており、2015年10月以降のSOD-3dは、0.31-0.48（平均0.38）である（図4.2）。

北湖第一湖盆において底層DOの減少期である春季と夏季について、底層DO減少速度とSOD-3dとの関係を見るために、C点（2014～2019年度）とL点（2015～2017年度）において春季・夏季に調査したSOD-3dと、SOD調査前後約1か月程度の間に実施した各時期の底層

DO調査結果から算出した底層DOの減少速度との相関関係を検証した（図4.5）。その結果、春季においては、SOD-3dと底層DO減少速度との間に1%水準で有意な正の相関が認められた。このことから、春季においてはSODが高ければ底層DOがより早く減少することが示唆された。一方、夏季については5%水準で有意な相関は見られなかった。図4.6にC点における2014-2019年度春季・夏季の底層DOの経時変動を示した。春季には底層DOが直線的に低下するのに対し、夏季には直線的に低下する年（2014、2015、2016年）と直線的な低下を示さない年（2017、2018、2019年）があった。2017年と2018年の夏季には台風の影響（彦根地方気象台、2017、2018）で底層DOが一時的に回復したために増減が見られ、2019年には早期に底層DOが低下したためにその後の低下幅が小さくなつたと考えられる。

C点（2014-2019年度）およびL点（2015-2017年度）におけるSOD-3dと底泥中の各成分含有量との間で無相関検定を行ったところ、底泥表層（0-5mm）におけるTC、TNおよび表層、中層（5-10mm）におけるMnについて5%水準で有意な正の相関が認められた（図4.7）。Mnについては、底層DOの低下によって底泥中の含有量が高まると考えられる。すなわち、底層DOの低下に伴って底泥から溶出したMnを酸化する細菌によってメタロゲニウム粒子が生成され（焦ら、2018）、底泥表層に堆積すると考えられる。一方、底泥中のTC、TNの多くを光合成によって湖水中で生産された植物プランクトンの堆積物が占めていると考えられる。このことから、SOD-3dの変動に湖水中で生産される有機物の量が影響を与えていると考えられる。

C点における表層から底層までの水深別の全窒素濃度から算出した水柱全窒素量を水量で除して求めた平均濃度の変動を図4.8に示した。2015年度後半から2016年度にかけて濃度が低下し、2018年度に少し上昇したものの低下傾向が続いている。大型緑藻である *Saurastrum dordidentferum* var. *orunatum*や *Micrasterias hardyi*が増加した際に窒素濃度が低下していくことから、これらの植物プランクトンの増加が表層だけでなく、北湖全体の全窒素濃度の低下に寄与していると考えられる（環境監視部門 公共用水域係・生物園係・化学環境係、2021）。すなわち、生産層における利用可能な窒素が増加した大型緑藻に取り込まれた後、大型藻類が沈降し、湖底に堆積することによって湖水中の窒素が底泥に移行したと考えられる。

今後、調査結果から想定された底層DO変動要因について、因果関係を検討していく必要がある。

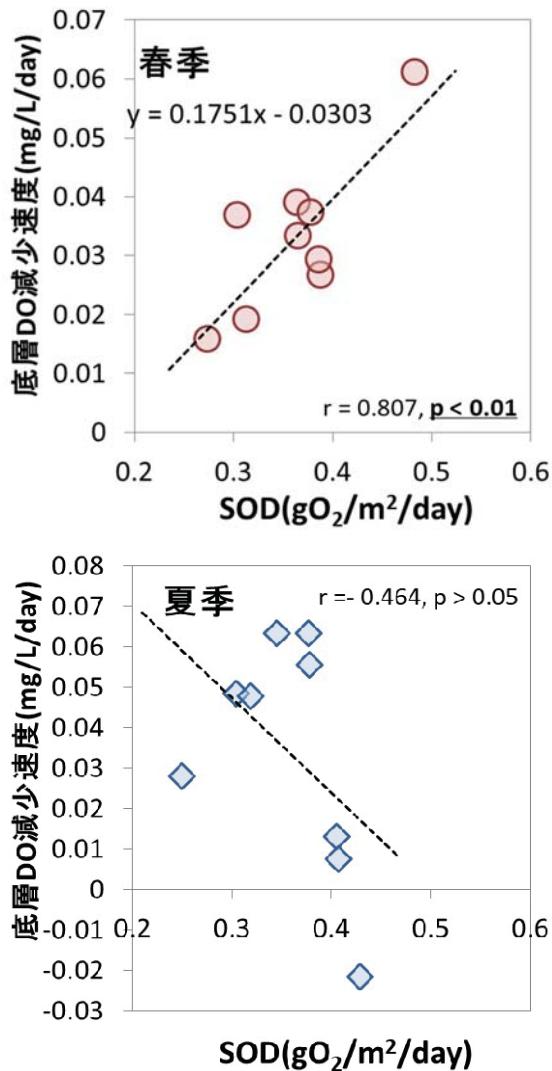


図 4.5 春季および夏季における SOD-3d と底泥 DO 減少速度との関係 C 点 (2014~2019 年度) と L 点 (2015~2017 年度)

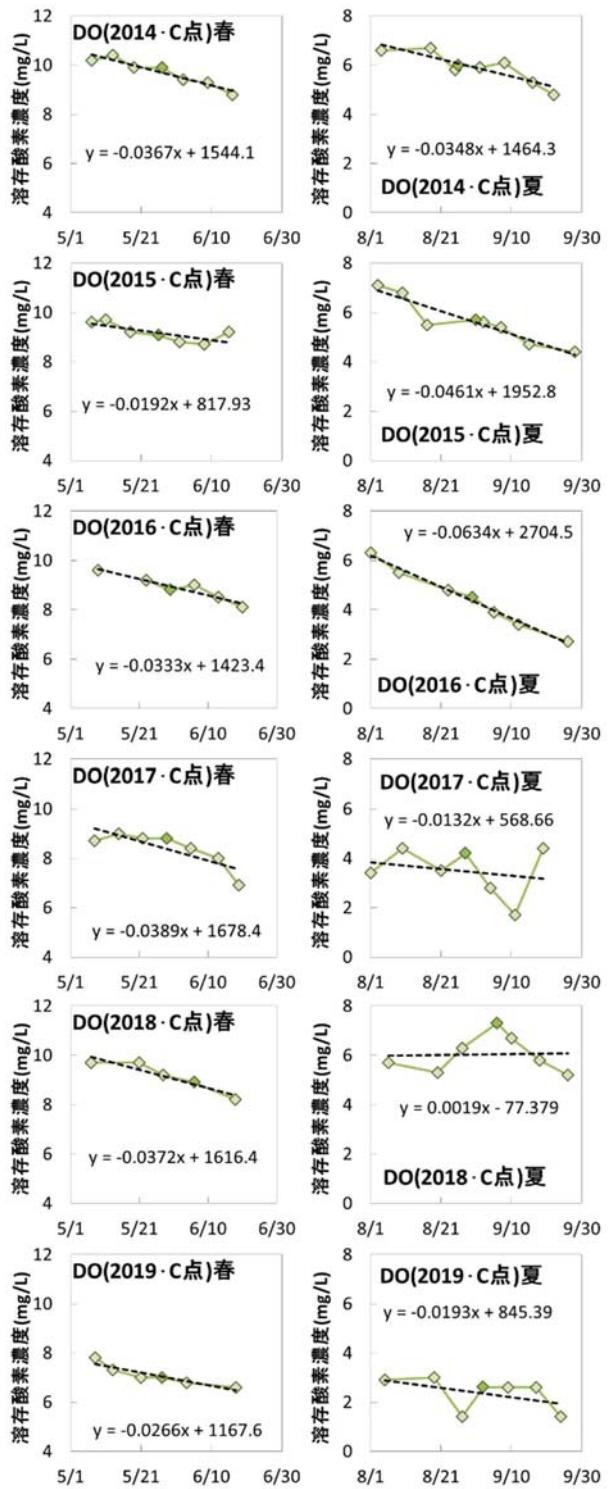


図 4.6 C 点における底層 DO の経時変動 (2014~2019 年度、春季・夏季)

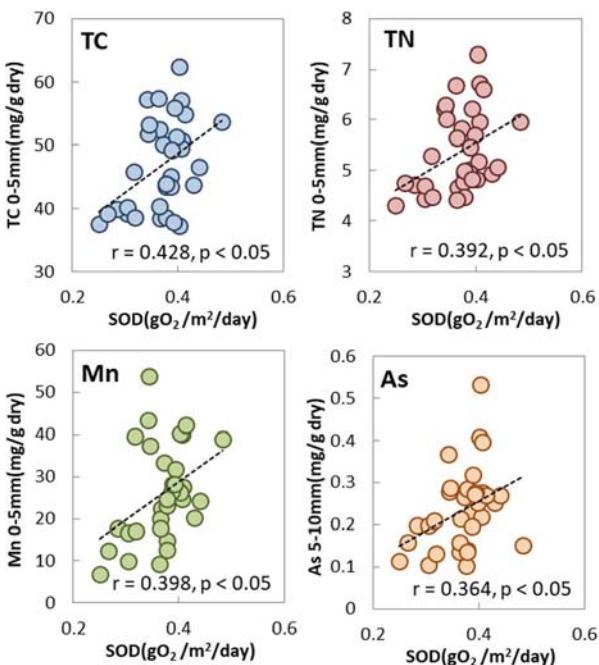


図 4.7 SOD-3d と底泥における各成分含有量との関係



図 4.8 C 点における湖水柱の平均全窒素濃度の変動
(2014 - 2019 年度)

4.5. まとめ

- ・C 点における SOD (底泥酸素消費量) 年間平均値は、平成 26 年度 (2014 年度) の $0.28 \text{ g-O}_2/\text{m}^2/\text{day}$ から上昇傾向を示し、平成 28 年度 (2016 年度) からは $0.40 \text{ g-O}_2/\text{m}^2/\text{day}$ 程度と高い値で推移していることが分かった。
- ・春季においては、SOD から底層 DO の減少度合いが推測できることが示唆された。春季の SOD と底層 DO の減少速度との間には正の相関が認められ、SOD が例年よりも高ければ底層 DO がより早く減少することが示唆された。底層 DO の変動状況を把握するうえで、その消費因子となる SOD が底層 DO の変動にどの程度寄与しているか、引き続き解析を進める必要がある。
- ・SOD と底泥の表層 (深度 0-5 mm) に含有される TC、TN との間には正の相関が認められた。

4.6. 結論

湖水中の全窒素は減少している一方で、北湖深層部の底泥における SOD は上昇しており、SOD の上昇に底泥表面における有機物量の増加が寄与していることが示唆された。引き続き、SOD の変動因子について調査・解析を進める必要がある。

環境基準に設定された底層 DO について、今後の類型指定作業に引き続き協力し、SOD の面的な把握に取り組む必要がある。その際、国立環境研究所が開発した SOD 簡易測定法 (霜鳥ら, 2017) の導入が必要である。

5. 謝辞

北湖深水層底層 DO 調査については、京都大学生態学研究センター中野伸一教授に、ご意見およびご助言をいただいた。心より感謝申し上げる。

6. 引用文献等

- 遠藤雅実・鯉渕幸生・藤田昌史・鈴木準平・小倉久子・飯村晃・大畑聰・磯部雅彦 (2010) : 東京湾における底泥酸素消費と微生物群集構造の関係. 土木学会論文集, 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
- 藤原直樹・岡本高弘・井上健・一瀬諭・内藤幹滋・原良平・加賀爪敏明(2003) : 琵琶湖深水層における溶存酸素の変動(2002 年). 滋賀県立衛生環境センター所報, 38, 89-94.
- 彦根地方気象台 (2017~2020) : 滋賀県気象月報 4(2017) ~3(2020).
- 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
- 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(2012) : 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. 琵琶湖環境科学的研究センター研究報告書 (平成 20~22 年度), 7, 150-181
- 焦春萌・早川和秀・石川可奈子・古田世子・桐山徳也・奥居紳也・井上栄壮・永田貴丸・廣瀬佳則・七里将一・岡本高弘・田中 稔・山本春樹(2018) : 北湖深水層と湖底環境の総合評価. 琵琶湖環境科学的研究センター研究報告書, 13, 94-102
- 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

環境監視部門 公共用水域係・生物圏係・化学環境係
(2021)：琵琶湖等水環境のモニタリング. 琵琶湖環境科学研究センター研究報告書, 16, 189-200

桑江朝比呂・中川康之・三好英一 (2008) : 海底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

中賢治(1973) : びわ湖深層の全循環期前の溶存酸素量の永年変化について. 陸水学雑誌, 34, 41-43.

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

岡本高弘・奥田一臣・小林博美・矢田稔・原良平・石川俊之・中村豊久 (2007) : 暖冬に伴う北湖深水層における溶存酸素濃度等の変動. 琵琶湖環境科学研究センター研究報告書 (平成 18 年度), 3, 125-129

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