諏訪湖における底泥酸素消費量 SOD の時空間変動と底泥溶出ポテンシャル

柳町信吾[1]・宮澤正徳[1]・小平由美子[1,2]

2021–2022 年に環境基準点 3 カ所を含む諏訪湖内の 4–6 地点で底泥酸素消費量（SOD）の季節変動を測定した．諏訪湖の SOD は 0.6–2.4 g/m²/day の範囲で変動し，春期では 5–6 月に，夏・秋期では 9–10 月に増加することが確認された．地点別では沖域では湖内西部に位置し貧酸素の発生頻度が多い地点（D 地点），沿岸域ではヒシ帯で高い傾向が見られた．SOD の増加要因のひとつとして内部生産由来の懸濁物質の堆積の影響が考えられた．SOD 測定後に一定期間培養した底泥コア直上水の栄養塩類や金属元素濃度から，沖域の地点での嫌気的条件下での底泥からの栄養塩類等の溶出ポテンシャルは，沿岸域の地点より有意に高く，沖域の底泥からの寄与が大きいと考えられた．

キーワード：底質，酸素消費量，栄養塩，底泥溶出

1　はじめに

底層溶存酸素量（以後，底層 DO と記す）が新たな環境基準として 2016 年に設定され[1)]，水域（海域及び湖沼）ごとに基準値が当てはめられた後には，その達成状況を評価していくことになる．底層 DO の変動には，気候変動を含めた気象条件による湖水の物理的な混合と，底層の酸素を消費する因子による影響が考えられる．このため，湖沼環境の状況の変化を踏まえて対策の効果を評価するためには，底層 DO のモニタリングに加え，底泥による酸素消費量（Sediment Oxygen Demand, SOD）の把握が必要である[2)]．SOD は，主として微生物による有機物分解や無機化過程に伴う酸素消費に起因すると考えられており[3)]，湖沼における底層の溶存酸素量を低下させる主要な要因の一つである[4)]．また，SOD は，底泥からの栄養塩類の嫌気的な溶出にも密接に関連し，富栄養化現象に関与する要因と考えられることから[5)]，湖沼環境の状況や健全性を評価するための指標としての活用も期待されている[2),6)]．霜鳥らは[6)]，霞ヶ浦及び琵琶湖で底泥溶出する鉄・リン量と SOD に有意な相関があり，水質にも影響を与えている可能性を示している．

SOD の測定法としては，現場に設置した密閉容器内（隔離水塊）の DO 減少量を測定する現場法や[7)]，採泥した底泥コアを使用して現場に近い条件で酸素消費を測定する方法が報告されている[8),9)]．後者の室内実験法については，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[10)]．底泥コアを培養して SOD を測定する場合は不撹乱底泥コアの使用が推奨されており[8)]，琵琶湖や霞ヶ浦では室内実験法による SOD 測定が試みられている[4),11),12)]．

諏訪湖では 1960 年代以降，富栄養化による水質汚濁が著しく進み，かつてはアオコが毎年発生するような状況であったが，水質保全対策により近年水質が改善傾向にあり[13),14)]，これに伴い底泥ではりん含有量が減少している[15)]．一方，浮葉植物のヒシの大量繁茂や貧酸素水塊の拡大が新たな課題として生じている[16),17)]．そのため 2023 年 3 月に行われた環境基準・底層 DO の水域類型指定は[18)]，こうした近年の諏訪湖の状況を考慮して，沿岸域及び沖域について基準値が当てはめられた．しかし，今後，環境基準の達成状況を評価していく上で有用な指標となる SOD については，これまで調査が行われていない．

本研究では，諏訪湖において，まず，2021 年は SOD の季節変動を沿岸域と沖域を含む湖内 6 地点で把握するため，春（4–6 月），夏（8–9 月），秋（10–11 月）の 3 期に調査を実施した．さらに，2022 年は 6 地点のうちの 4 地点で 4–10 月にかけて経月変動を調査した．また，諏訪湖における SOD と嫌気的な溶出ポテンシャルとの関係を把握するため，SOD 測定後の直上水中の栄養塩類及び金属元素濃度を分析した．

1　長野県諏訪湖環境研究センター　〒394-0081　長野県岡谷市長地権現町 4-11-51
2　現：長野県企業局松塩水道用水管理事務所　〒399-6461　長野県塩尻市大字宗賀字本山 5225-1

表 1　調査地点の概要

地点	緯度	経度	水深(m)※1	底質	水草の有無	区分	調査日								
							2021			2022					
塚間川沖200m	36° 03′ 15.01″	138° 03′ 41.42″	2.8	砂泥質	-	環境基準点	5/11	9/7	11/1	-	-	-	-	-	-
D地点	36° 02′ 44.66″	138° 04′ 28.22″	5.9	泥質	-	DO等連続観測地点[19]	6/1	8/11	10/14	4/12	5/10	6/7	7/5	8/9	9/26	10/18
湖心	36° 02′ 58.01″	138° 04′ 55.06″	5.8	泥質	-	環境基準点	4/27	8/3	10/7	4/26	5/23	6/21	7/25	8/23	9/21	10/25
B地点	36° 03′ 29.72″	138° 05′ 52.36″	4.6	泥質	-	DO等連続観測地点[19]	5/25	8/31	10/19	-	-	-	-	-	-	-
初島西	36° 02′ 53.90″	138° 06′ 18.30″	2.6	砂泥質	クロモ	環境基準点	5/18	8/31	10/26	4/26	5/23	6/21	7/25	8/23	9/26	10/25
ヒシ帯(高浜)	36° 03′ 57.50″	138° 05′ 55.20″	2.2	泥質	ヒシ	ヒシ繁茂(高密度)	6/10	9/16	11/9	4/12	5/10	6/7	7/5	8/9	9/21	10/18

※1　2021年3期の調査時の平均

2　調査方法

調査地点の地図とその概要はおのおの図 1 と表 1 に示す．2021 年の調査地点は，諏訪湖の 3 つの環境基準点（沖域の湖心，沿岸域の塚間川沖 200 m 及び初島西），沖域で底層 DO の連続観測を実施してきた B 地点及び D 地点[19]，沿岸域でヒシが高密度に繁茂する湖内東部（高浜）のヒシ帯の計 6 地点とした（表 1 及び図 1）．2022 年の調査地点は，6 地点のうち，沖域から 2 地点（貧酸素の発生頻度が多い D 地点，湖内を代表する湖心），沿岸域から 2 地点（環境基準点のうち比較的水質の栄養塩類濃度が高い初島西，ヒシ繁茂帯）の計 4 地点とした．調査地点の水深は，沖域 3 地点（B 地点，湖心，D 地点）が 4.6–5.9 m，沿岸域 3 地点（塚間川沖 200 m，初島西，ヒシ帯）が 2.2–2.8 m である．2021 年の 3 期及び 2022 年の各月の調査日は表 1 に示す．

各地点では，湖底直上の DO 濃度を測定するとともに，SOD 測定に用いる底泥試料を採取した．底泥は，荒居らの方法に従い[20]，船上から不攪乱柱状採泥器（HR 型，離合社）を用いてアクリル製の円筒形パイプ（内径 11 cm，高さ 50 cm）に泥厚 15–20 cm 程度となるよう採取した．各調査地点において 6 本（2021 年）又は 4 本（2022 年）の底泥コアを採取した．なお，同地点で複数本の底泥サンプルを採取する場合は，採泥器の投入ポイントを数 m 離し，繰り返し採取による攪乱の影響を受けることがないように配慮した．採取した円筒形パイプは，上部まで直上水が満たされた状態で上下をゴム栓で密閉し，氷冷下で実験室に搬入した．

実験室では地点毎に 5 本（2021 年）又は 3 本（2022 年）の各底泥コアについて個別に SOD を測定した．測定装置の概要を図 2 に示す．測定方法は，底質調査方法に準じ[10]，また入江らと李らを参考とした[8), 21)]．底泥コアの直上水をアスピレーターで排水した後，あらかじめ条件を整えた試験水を底泥が巻き上がらないようサイホンで静かに加え水柱高 25 cm に調整した．試験水には，各地点で採水した底層水（湖底上 20 cm）をガラス繊維濾紙（Whatman GF/B）でろ過し，ばっ気により DO を飽和状態にさせたものを用いた．試験水の表面からの酸素供給を遮断するために，少量の流動パラフィンで水表面を封じ，水柱の半分の高さに設置した撹拌翼で底泥を巻き上げないよう 50 rpm の回転数で撹拌した．底泥コアは，暗条件，20 ℃の恒温槽内に静置し，光学式溶存酸素計（WTW 社，Multi 3510 IDS）を用いて試験水の DO 経時変化を 10 分間隔で計測した．SOD 値には温度が影響すること

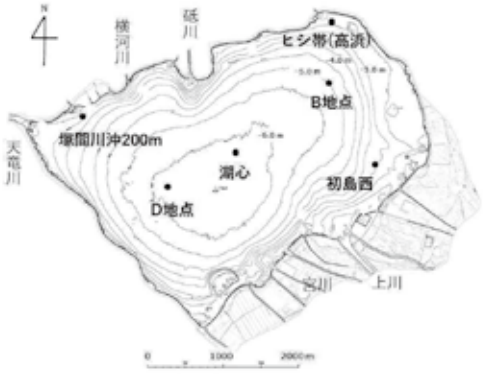
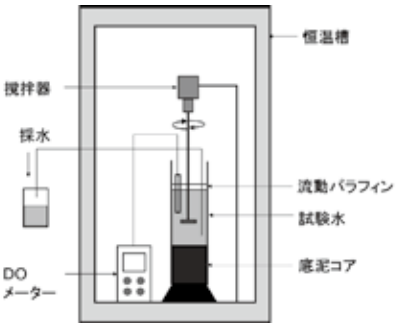


図 1　調査地点図



（水柱高さ 25cm、泥厚 15–20cm、20℃一定）

図 2　実験装置図

が知られている[22),23)]．本調査では，温度影響を除いた底泥の酸素消費ポテンシャルの変動を把握するため，調査時期の現場の底層水の水温の範囲（10–25 ℃程度）にあって標準的な温度である 20 ℃一定とした．また，底泥直上の水の流速が SOD に影響することが報告されているため[24)]，予め底泥が巻き上がらずに試験水が十分混合される条件として，一定の回転数（50 rpm）を定め，その回転数で撹拌した．

SOD は，試験水の DO 濃度が試験開始から直線的に減少する最初の 10 時間程度を対象に[8)]，単位時間・単位表面積当たりの水柱の DO 減少量を算出した．また，同実験条件で試験水のみの DO 経時変化を計測し，その値を差し引いて補正した．

次に，SOD と底泥溶出との関係を解明するため，2022 年の測定では，SOD 算出の 10 時間以降も同条件で DO の計測を継続し，DO<1 mg/L となった時点から嫌気的環境で 6 日経過した後の試験水中の栄養塩類（TP，NH_4-N）及び金属元素（Fe，Mn）の濃度を測定した（参考：霜鳥ら）[6)]．分析方法については，日本工業規格 JIS K0102（2016）に基づき，TP を吸光光度法，NH_4-N をイオンクロマトグラフ法，Fe，Mn を ICP-MS 法で測定した．

各地点で採取した底泥コア 1 本については，直上水を除いて底泥表層 0–2 cm を分画し，遠心分離（3000 rpm, 20 min）した後，上澄水を捨て，残渣を風乾・混合して底泥の TP，TN，強熱減量を測定した．分析については，底質調査方法に基づき[10)]，TP を硝酸硫酸分解―モリブデン青吸光光度法で，TN をケルダール分解―中和滴定法で測定した．

3　結果

2021 年の SOD の測定結果を図 3a に示す．2021 年の各地点，各季節における SOD の値は，0.6–2.4 g/m²/day の範囲で変動した．季節別では春期 1.1–2.4，夏期 0.7–1.4，秋期 0.6–1.3 g/m²/day であり，湖心を除く 5 地点では春期の値が有意に高かった（Welch ANOVA, Holm 補正, $P < 0.05$）．湖心では秋期の値が幾分高い傾向があった．沿岸域の 3 地点，すなわち塚間川沖，初島西，ヒシ帯では春期，夏期，秋期の順に値が低くなったが，沖域の地点では秋期の値が夏期のそれより若干上回る傾向を示した．地点別にみると，沖域 D 地点と沿岸域ヒシ帯の春季が 2.0 g/m²/day 以上の高い値を示した．なお，調査時の現場湖底直上の底層 DO 濃度については，春期及び夏期のヒシ帯で 0 mg/L 付近で無酸素状態であった．

2022 年各月の SOD 測定結果を図 3b に示す．SOD の値は 0.7–1.9 g/m²/day の範囲で変動した．経月変化について，沖域の 2 地点（D 地点，湖心）では春期の 5–6 月に値が高く，その後 7 月に一旦値が低下し，秋期の 9 月又は 10 月に値が高くなった．ただ，D 地点では 8 月にも，一度値が上がった．沿岸域の地点でも，春期の 5 月又は 6 月，秋期の 9 月又は 10 月に値が高かった．現場の底層 DO 濃度は，D 地点と湖心の 7–8 月，ヒシ帯の 8 月に 1 mg/L 以下であった．

春期の 5–6 月に SOD が高くなる傾向は，2021 年と 2022 年の両年に共通して確認された．また，夏期以降 9–10 月に高くなる傾向も，2021 年の沿岸域を除き共通していた．一方，相違点は，沿岸域の初島西で両年 10 月の値に高低差が大きかったことである．なお，ヒシ帯のデータについては，2022 年に値が低くなった 7–8 月に該当するデータが 2021 年にはないため，夏期以降の季節変動についての両年の比較はできなかった．

SOD 測定後の直上水中の栄養塩類及び金属元素濃度を図 4 及び附表 1 に，SOD と直上水濃度の相関を図 5 に示す．TP，NH_4-N，Fe，Mn の濃度は，沖域の地点（D 地点および湖心）の平均値が沿岸域の地点（初島西およびヒシ帯）の平均値より有意に高かった（Welch's t-test, $p < 0.001$）．濃度が高かった沖域の 2 地点では，TP は 5–6 月並びに 10 月に高い傾向を示した．一方，他の 3 成分は TP とは異なる季節パターンを示し，期間を通じて比較的高い値を維持した．NH_4-N は 5–9 月に高い傾向を示し，Fe は 8–9 月，Mn は 7–8 月に高い値を示した．沿岸域の 2 地点では，沖域と概ね同様の季節変動パターンを示したが，TP は初島西，NH_4-N はヒシ帯で異なる傾向を示した．ヒシ帯では TP が 6 月および 10 月にヒシ群落のない初島西より有意に高く（Welch's t-test, $p < 0.05$），逆に NH_4-N が 8–9 月に初島西より低かった（$p < 0.05$）．次に，SOD との相関について（図 5），SOD と培養後の試験水中の Fe 濃度との間には有意な正の相関が見られた（$R = 0.52$, $P < 0.05$）．TP，NH_4-N，Mn 濃度とも正の関係（R=0.33–0.38）が見られた．なお，調

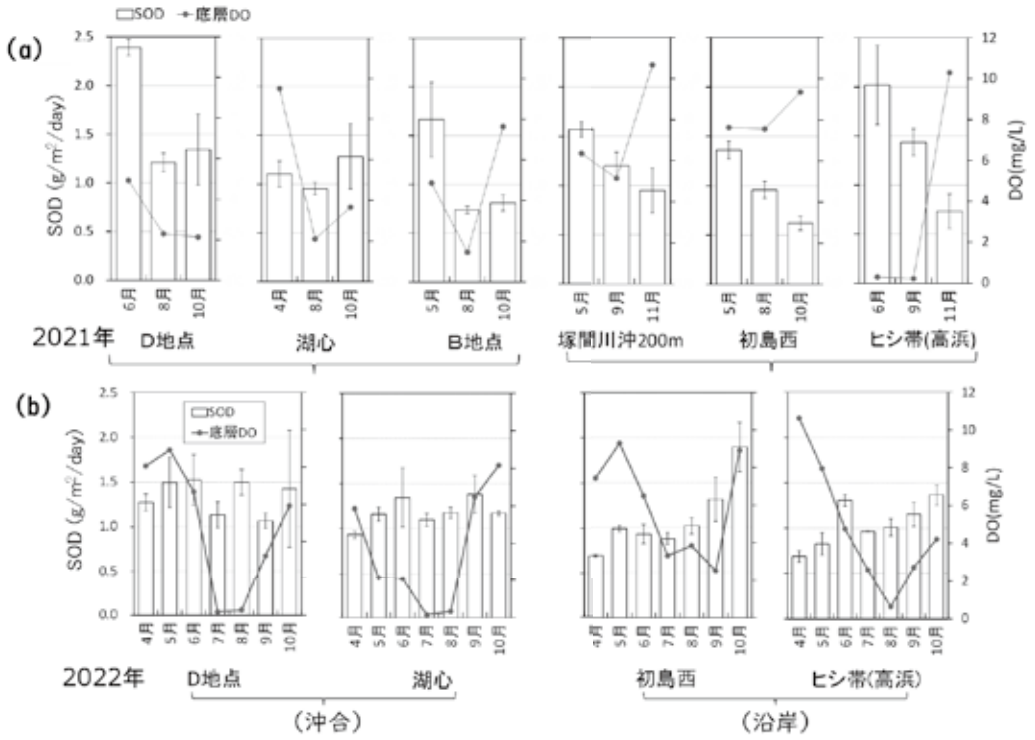


図 3　2021–2022 年 SOD 測定結果(地点別)
(a)上段：2021 年，(b)下段：2022 年．エラーバーは併行試験(n=5 または n=3)の標準偏差を示す．
底層 DO は調査時の湖底直上の値．

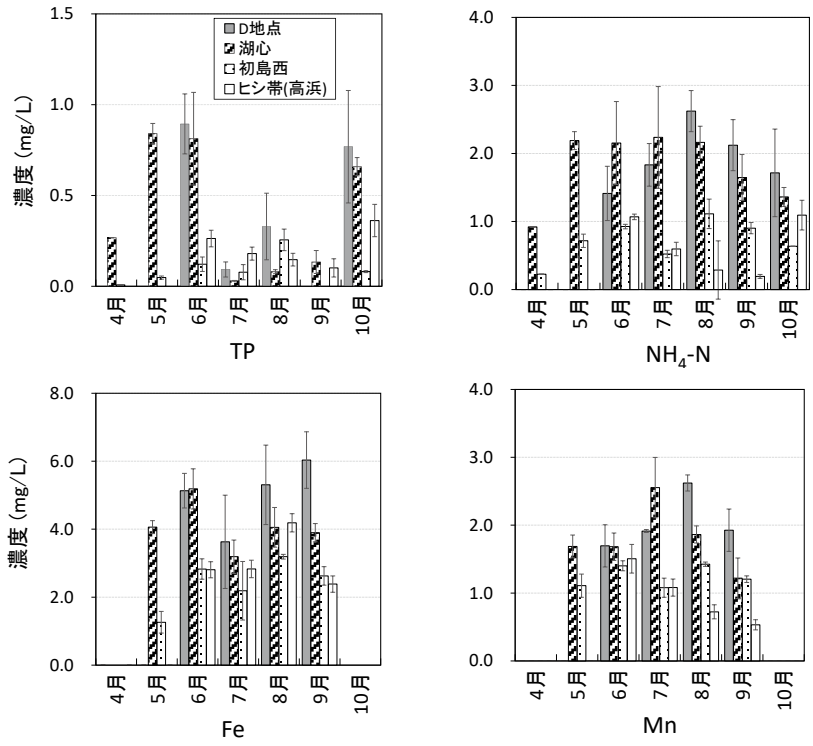


図 4　SOD 測定後の直上水中の栄養塩類等の濃度
エラーバーは併行試験(n=2 または 3)の標準偏差を示す．欠測値は空白で示す．

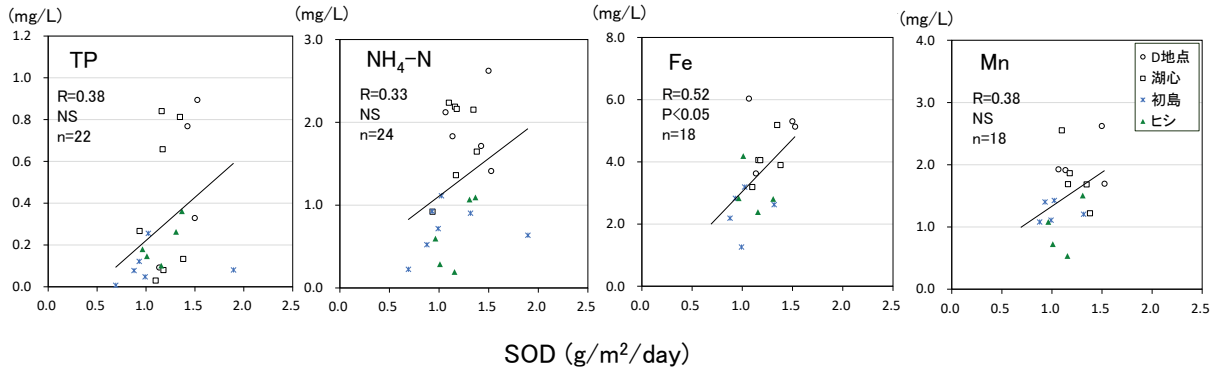


図 5　ＳＯＤと測定後の直上水中の栄養塩類等の濃度との相関
2022 年 4-10 月．各点は併行試験の平均値を示す．

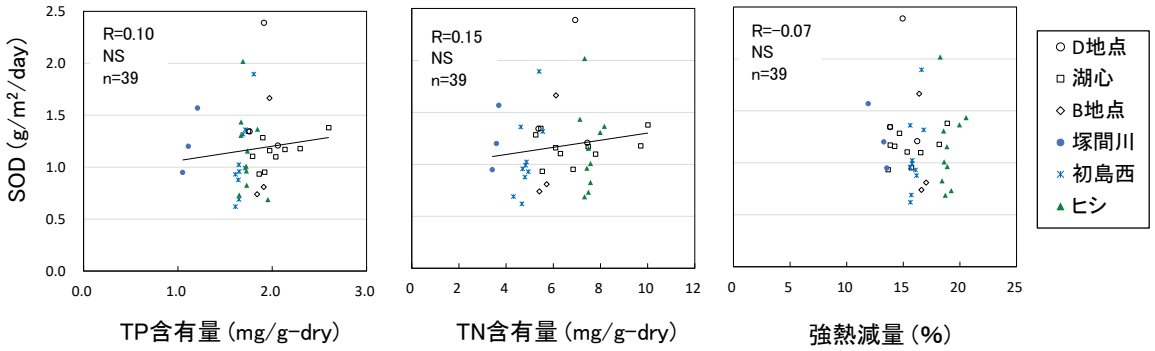


図 6　SOD と底泥性状(表層 0–2 cm)との相関
2021 年春–秋期，2022 年 4–10 月．

査時に採取した底泥コアの直上水の濃度に対して，培養後の試験水中の栄養塩類等の濃度は 10 倍以上高かった．

SOD と底泥の性状との関係について，SOD 調査時に同時に採泥した底泥コアの表層 0–2 cm の TP 含有量，TN 含有量，強熱減量と SOD 値を図 6 及び附表 1 に示す．沖域と沿岸域を比較すると，りん含有量は沖域 3 地点（D 地点，湖心，B 地点）で沿岸域 3 地点（塚間川沖，初島西，ヒシ帯）より有意に高く（Welch's t-test, $p < 0.001$），窒素含有量は沖域及びヒシ帯が他の沿岸域 2 地点より高かった（$p < 0.001$）．強熱減量には明確な傾向が認められなかった．既往研究において底泥の強熱減量と SOD に相関があることが報告されているが [22]，本調査においては SOD と各項目の間に相関は見られなかった．

4　考察

4．1　湖水懸濁物質量と SOD の関係

2021–2022 年の調査結果から，諏訪湖の SOD は，春期の 5–6 月と晩夏から秋期の 9–10 月に値が高く，夏期に低下する傾向が認められた．SOD の季節変動については，既往研究（長崎県大村湾）において夏期に高い傾向が報告されているが [3]，本調査結果では，春期と秋期に SOD が高くなる特徴があった．この結果を，諏訪湖の環境基準点である沖域の湖心と沿岸域の初島西，塚間川沖における湖水のクロロフィル a （Chl.a） 濃度及び懸濁物質量（SS）の月別変動（図 7）と比べると，いずれの年も Chl.a 濃度が大きく増加した月，翌月または翌々月に SOD が高くなる傾向が認められた．この時期の植物プランクトンの優占種は，春期（4–6 月）は両年ともに珪藻類，秋期は 2021 年（10–11 月）が珪藻類，2022 年（9–10 月）が緑藻類であり [25]，春期と秋期に増加したこれら内部生産由来のデトリタスを含む懸濁物質が底泥上に沈降・堆積し SOD を増加させた可能性が示唆された．

環境基準点以外の地点（D 地点，B 地点，ヒシ帯）の内，D 地点と B 地点については，水中の Chl.a 濃度のデータがないが，湖心と初島西の両地点で水中の Chl.a 濃度と SS 濃度に大きな差がないことから

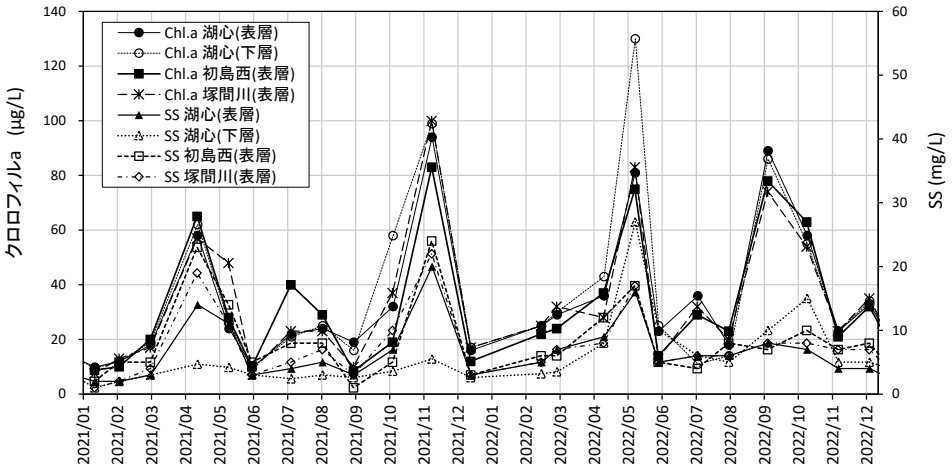


図 7　湖水のクロロフィル a、懸濁物質量(SS)の経月変化
諏訪湖湖心[表層・下層]，初島西[表層]，塚間川沖[表層]，2021-2022 年．
長野県水質常時監視測定結果に基づき作成．

考えて，SOD の変動については同じ要因が当てはまると考えられる．一方，沿岸域のヒシ帯では，水中の懸濁物質の動態が開水面に位置する初島西や塚間川沖とは異なると予想されるので，別の要因を考える必要があろう．

SOD は沿岸域の初島西では 2021 年 10 月は低く 2022 年 10 月は高いと大きな差があった．これは，2021 年の Chl.a 濃度の秋期ピークが 11 月と 2022 年より約 2 ヶ月遅かったことに起因すると考えられた．一方，沖域では 2021 年秋期に Chl.a 濃度が 10 月から上昇したことから，10 月の SOD も夏期より若干増加したと考えられた．

4．2　底泥溶出量と SOD の関係

2022 年のサンプルにおいて SOD 測定後に一定期間培養した底泥コア直上水中の栄養塩類等（TP，NH_4-N，Fe，Mn）の濃度は，調査時に採取した底泥コア直上水の濃度に対して 10 倍以上高く，既往研究（例えば，西尾ら）と同様に [26]，諏訪湖においても嫌気的環境での底泥からの栄養塩溶出ポテンシャルが高いことが示された．

沖域の地点での嫌気的条件下での栄養塩類等の溶出量は，沿岸域の地点より有意に高く，沿岸域の底泥に比べ，沖域の底泥からの寄与が大きいと考えられた．また，TP は 5–6 月および 10 月に，NH_4-N は 5–9 月に溶出量が高いという違いがあった．TP の溶出は底泥の酸化還元状態に強く依存し，底層の貧酸素化に伴う鉄酸化物の還元により間隙水中のりん濃度が上昇する．しかし，成層期（夏期）には底泥から湖水への移行がすでに進んでいたため，採取した底泥コアからの溶出量は低かったと考えられた．一方，成層開始期（春）や解消期（秋）は，酸化還元状態が変化しつつある環境にあり，底泥から湖水への移行が抑制されていた．そのため，貧酸素状態にした際の底泥コアからの溶出量が高くなったと考えられた [27),28)]．NH_4-N は有機物分解により生成され，水温上昇に伴う微生物活性の増加により春–夏期に溶出ポテンシャルが高まると考えられた [29),30)]．Fe，Mn は夏期に高い濃度を示したが，7–8 月の調査時に底層 DO が 1 mg/L 以下であったことから，底泥表層が還元状態となり，間隙水中濃度が上昇し，溶出が促進されたと考えられた．TP とのパターンの違いは，Fe，Mn の拡散速度が遅く，湖水への移行が制限されることに起因すると考えられた [5)]．

沿岸域では，沖域と概ね同様の季節変動パターンを示したが，一部で異なる傾向を示した．ヒシ帯と初島西では，底泥表層のりん含量は同程度（平均 1.7 mg/g）だったが，TP 濃度（溶出量）は 6 月や 10 月にヒシ帯で有意に高かった．両地点では，水生植物の繁茂状態に大きな差異があり [31)]，強熱減量も初島西よりヒシ帯で高かった．繁茂する水生植物の生体や枯死体は底泥中のりんと鉄の共沈物からの嫌気条件下でりんの溶出を促進することが報告されており [32)]，本研究におけるりん溶出量についても，水生植物由来の有機物による影響が考えられる．琵琶湖南湖でもりんの溶出が高かった一因として水生植物による影響が挙げられている [6)]．一方，ヒシ帯では底泥の窒素含有量が高いにもかかわらず，

NH_4-N の溶出ポテンシャルは沖域より低く，8–9 月には初島西よりも低かった．これは，底泥中にヒシ残渣由来の有機態窒素が優占し無機化の進行が緩やかなこと [33), 34)]，さらにヒシによる根からの NH_4-N の吸収といった要因が影響した可能性が考えられる [35)]．

SOD と底泥溶出量との関係について，既往研究では底泥溶出する鉄，りん量と SOD の相関が報告されている [6)]．本研究では SOD と培養後の直上水中の Fe 濃度（溶出量）との間に有意な正の相関が認められたが，TP，NH_4-N，Mn 濃度との相関は弱く有意ではなかった．

4．3　他の湖沼との比較

諏訪湖と他の湖沼を比較するため，諏訪湖，霞ヶ浦，琵琶湖における SOD を表 2 に示す．これらデータは底泥コアを用いた室内実験法による測定値である．本調査における SOD 測定時の培養温度である 20 ℃付近のデータについて比較すると，SOD の値の範囲は，諏訪湖で 0.6–2.4 g/m²/day，霞ヶ浦で 0.7–1.1 g/m²/day，琵琶湖で 0.6–0.7 g/m²/day であり，諏訪湖において他の 2 湖沼より高い値を示した．底泥中の有機物量（強熱減量）や栄養塩類の濃度は，諏訪湖と霞ヶ浦が同程度で，琵琶湖でやや低い [15), 36), 37)]．諏訪湖と霞ヶ浦では，底泥の有機物量（強熱減量）は同程度であるが，SOD には違いが見られる．諏訪湖において SOD が高い要因は今後の検討課題であるが，一つの可能性として，底泥に含まれる内部生産由来の有機物量の違いが挙げられる．既往研究によれば，底泥の C/N 比 7–10 は内部生産された植物プランクトンの堆積を示唆する値とされている [38)]．霞ヶ浦では C/N 比 8–14 が報告されているのに対し [39)]，諏訪湖では沖域で底泥窒素濃度が高く，2018 年の湖心では C/N 比 7（TN 7.5 mg/g，TC 52 mg/g）が観測されている．これらの値から，諏訪湖では堆積する内部生産由来の易分解性有機物の割合が他湖沼より大きい可能性が推察される．

琵琶湖では長期的に SOD が上昇傾向を示し，その要因として底泥中の炭素や窒素含有量の増加，大型種や群体を形成する植物プランクトンの増殖・沈降との関連が指摘されている [4)]．今後，諏訪湖での継続的な調査により長期的な傾向を把握する必要がある．

表 2　ＳＯＤの湖沼間比較

湖沼名	地点	SOD ($g/m^2/day$)	培養温度	測定時期及び地点	出典
諏訪湖	全域	0.62-2.4	20℃	2021.3季 6地点 2022.4-10月 4地点	本研究
霞ヶ浦	西浦	0.76-0.98	25℃	2020.9月 3地点	北村(2023) [12)]
	北浦	0.65-1.1	25℃	2020.7,9月 2021.6,7月 8地点	北村(2023) [12)]
琵琶湖	北湖	0.28-0.40	7℃	2014-2019.4季 今津沖	岡本(2020) [2)]
	南湖	0.56, 0.65	20℃	2018.9月 2019.6月 St.6B	Shimotori(2021) [11)]

謝　辞

本稿の執筆に際し，諏訪湖環境研究センター長高村典子氏には，原稿の添削ならびに内容に関して多大なるご指導を賜りました．また，調査当時には，長野県環境保全研究所水・土壌環境部の研究員の皆様に，サンプリングへのご協力ならびに分析をご担当いただきました．さらに，信州大学工学部 特任教授 小澤秀明氏には，考察に関して有益な議論ならびに貴重なご助言を賜りました．ここに記して，深く感謝申し上げます．

文　献

1）環境省，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 30 日）：https://www.env.go.jp/hourei/add/index.html（2025 年 12 月確認）
2）岡本高弘ほか（2020）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
3）Mori,F.et al.(2021)Potential oxygen consumption and community composition of sediment bacteria in a seasonally hypoxic enclosed bay. PeerJ, 9: e11836.
4）Hanes,B.N., Irvine,R.L.(1968) New technique for measuring oxygen uptake rates of benthal systems. J.Water Pollut. Control Fed., 40(2) :223-232
5）Søndergaard, M.et al. (2003)Role of sediment and internal loading of phosphorus in shallow lakes.Hydrobiologia,506-509:135-145
6）霜鳥孝一ほか（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(1)：21-29

7) 遠藤徹ほか（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
8) 入江政安ほか（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
9) 遠藤雅実ほか（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 B2，66(1)：1036-1040
10) 環境省水・大気環境局，（2012）底質調査方法：37-71
11) Shimotori, K.et al.(2021) Development of a new high-throughput and small-size method for measuring sediment oxygen demand in lakes. J. Soils Sediments, 21:1222–1231
12) 北村立実ほか（2023）北浦の貧酸素水塊形成に係る底層水および底泥の酸素消費の影響評価，水環境学会誌，46(4)：93-101
13) 長野県諏訪地域振興局，（2023）諏訪湖創生ビジョン 2023 年 3 月改定：5-6
14) 宮原裕一(2013)諏訪湖定期調査(2007～2011)の結果，信州大学山地水環境教育研究センター研究報告 9：1-214
15) 長野県，令和元年度諏訪湖創生ビジョン推進事業調査結果報告書：147-157
16) 宮原裕一ほか (2007) 諏訪湖水草帯における水質の不均一性, 信州大学環境科学年報, 29:24-28
17) 木村昌嗣ほか（2015）現地観測に基づく諏訪湖における貧酸素水塊の時空間特性の分析，土木学会論文集 B1，71(4)：I_769-I_774
18) 長野県，諏訪湖における底層溶存酸素量の類型指定について：https://www.pref.nagano. lg.jp/mizutaiki/teisoudoruikeisitei.html（2025 年 12 月確認）
19) 長野県，令和 3 年度諏訪湖創生ビジョン推進事業調査結果報告書：1-13
20) 荒居博之ほか (2017) 湖沼における底質コア採取に係る評価方法：福島原発事故起源の放射性セシウムを指標として,陸水学雑誌,78：67-74
21) 李洪源・松永信博 (2010) 諫早湾底泥の酸素消費速度，土木学会論文集 B，66(4)：335-343
22) 細井由彦ほか (1992) 底泥による酸素消費に関する研究，土木学会論文集，456(Ⅱ-21)：83-92
23) de Klein,J.J.M.et al.(2017)Effect of Temperature on Oxygen Profiles and Denitrification Rates in Freshwater Sediments,Wetlands,37(5):975–983
24) Mackenthun,A.A., Stefan,H.G.(1995)Effect of Flow Velocity on Sediment Oxygen Demand: Experimental Results. St. Anthony Falls Lab Rep. No. 371
25) 長野県諏訪湖環境研究センター，プランクトン調査：https://www.lserc.pref.nagano.lg.jp/watercreature-index/（2025 年 12 月確認）
26) 西尾孝之・新矢将尚（2010）大阪港湾域における底泥からの汚濁発生源除去効果からみた航路浚渫の評価，日本水産学会誌，76(5)：886-893
27) Smith, L.et al.(2011)Relating sediment phosphorus mobility to seasonal and diel redox fluctuations at the sediment–water interface in a eutrophic freshwater lake. Limnology and Oceanography, 56(6):2251–2264.
28) Huang,W.et al.(2018)Seasonal characteristics of phosphorus sorption by sediments from plain lakes with different trophic statuses. R. Soc. Open Sci., 5(8):172237.
29) Shinohara,R.et al.(2021)Warming of water temperature in spring and nutrient release from sediment in a shallow eutrophic lake. J. Water Clim. Change, 12(7):3187–3199.
30) Leoni,B.et al.(2018)Ammonium transformation in 14 lakes along a trophic gradient. Water, 10(3):265.
31) 長野県，令和 4 年度諏訪湖創生ビジョン推進事業調査結果報告書：57-58
32) Lovley, D.R., Phillips, E.J.P. (1986)Organic matter mineralization with reduction of ferric iron in anaerobic sediments. Appl. Environ. Microbiol., 51(4):683-689
33) Zhu,M.et al.(2015)The influence of macrophytes on sediment resuspension and the effect of associated nutrients in a shallow and large lake. PLOS ONE, 10(6):e0127915
34) Han,C.et al.(2023) Differences in carbon and nitrogen migration and transformation driven by cyanobacteria and macrophyte activities in Taihu Lake. Int.J.Environ.Res.Public Health, 20:371

35) Huangfu,S.et al.(2023)Removal of ammonia nitrogen from black and odorous water by macrophytes based on laboratory microcosm experiments. RSC Adv., 13:3173–3180.
36) 国土交通省関東地方整備局，霞ヶ浦の底質調査データ：https://www.ktr.mlit.go.jp/kasumi/kasumi00146.html（2025 年 12 月確認）
37) 滋賀県琵琶湖環境科学研究センター，琵琶湖底質調査報告書(平成 23～平成 25 年度)：3-4
38) Sampei, Y., Matsumoto, E. (2001)C/N ratios in a sediment core from Nakaumi Lagoon, southwest Japan-Usefulness as an organic source indicator-. Geochem.J.,35(3):189–205.
39) 北村立実ほか (2018) 霞ヶ浦底泥における脱窒速度の水平・垂直分布と窒素除去量の推計，水環境学会誌，41(6):213–221

Spatial and Seasonal Variation of Sediment Oxygen Demand (SOD) and Sediment Release Potential in Lake Suwa

Shingo YANAGIMACHI[1], Masanori MIYAZAWA[1], Yumiko KODAIRA[1,2]

1 Nagano Prefecture Lake Suwa Environmental Research Center, 4-11-51, Gongen-Cho, Osachi, Okaya, Nagano 394-0081 Japan
2 Present address: Nagano Prefecture Shoen Water Supply Management Office, 5255-1 Motoyama, Soga, Shiojiri, Nagano 399-6461, Japan

Key words：　sediment, oxygen demand, nutrient, release from sediments

附表 1　SOD 測定後の直上水分析結果，SOD 調査時の底質分析結果

調査年	地点	調査月	SOD※	直上水※				底質		
			($g/m^2/day$)	TP	NH_4-N	Fe	Mn	TP	TN	IL
				(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/g-dry)	(mg/g-dry)	(%)
2021	D地点	6月	2.39±0.08 (5)	-	-	-	-	1.9	6.9	15
		8月	1.21±0.10 (5)	-	-	-	-	2.1	7.4	16
		10月	1.34±0.36 (5)	-	-	-	-	1.8	5.4	14
	湖心	4月	1.10±0.13 (5)	-	-	-	-	1.8	6.3	15
		8月	0.95±0.06 (5)	-	-	-	-	1.9	6.8	16
		10月	1.28±0.33 (5)	-	-	-	-	1.9	5.3	15
	B地点	5月	1.66±0.38 (5)	-	-	-	-	2.0	6.1	16
		8月	0.74±0.04 (3)	-	-	-	-	1.8	5.4	17
		10月	0.81±0.08 (5)	-	-	-	-	1.9	5.7	17
	塚間川沖200m	5月	1.57±0.08 (5)	-	-	-	-	1.2	3.7	12
		9月	1.20±0.13 (5)	-	-	-	-	1.1	3.6	13
		11月	0.95±0.23 (5)	-	-	-	-	1.1	3.4	14
	初島西	5月	1.36±0.09 (5)	-	-	-	-	1.7	4.6	16
		8月	0.96±0.08 (3)	-	-	-	-	1.7	4.7	16
		10月	0.62±0.07 (5)	-	-	-	-	1.6	4.7	16
	ヒシ帯(高浜)	6月	2.02±0.40 (5)	-	-	-	-	1.7	7.3	18
		9月	1.44±0.14 (5)	-	-	-	-	1.7	7.1	21
		11月	0.73±0.17 (5)	-	-	-	-	1.7	7.5	19
2022	D地点	4月	1.27±0.09 (3)	-	-	-	-	-	-	-
		5月	1.52±0.28 (3)	-	-	-	-	-	-	-
		6月	1.55±0.28 (3)	0.89±0.17 (3)	1.41±0.40 (3)	5.13±0.51 (3)	1.70±0.31 (3)	-	-	-
		7月	1.15±0.14 (3)	0.09±0.04 (3)	1.83±0.31 (3)	3.63±1.37 (3)	1.91±0.02 (3)	-	-	-
		8月	1.51±0.14 (3)	0.33±0.18 (3)	2.62±0.30 (3)	5.31±1.17 (3)	2.62±0.12 (3)	-	-	-
		9月	1.08±0.08 (3)	-	2.12±0.38 (3)	6.03±0.83 (3)	1.93±0.31 (3)	-	-	-
		10月	1.44±0.65 (3)	0.77±0.31 (3)	1.71±0.64 (3)	-	-	-	-	-
	湖心	4月	0.93±0.04 (3)	0.27 (1)	0.92 (1)	-	-	1.9	5.5	14
		5月	1.15±0.08 (3)	0.84±0.06 (3)	2.19±0.13 (3)	4.06±0.19 (3)	1.69±0.17 (3)	2.0	6.1	14
		6月	1.34±0.33 (3)	0.81±0.25 (3)	2.15±0.61 (3)	5.19±0.59 (3)	1.68±0.20 (3)	1.7	5.5	14
		7月	1.11±0.07 (3)	0.03±0.00 (2)	2.24±0.75 (2)	3.19±0.49 (2)	2.55±0.45 (2)	2.0	7.8	17
		8月	1.18±0.06 (3)	0.08±0.01 (3)	2.16±0.24 (3)	4.06±0.58 (3)	1.86±0.13 (3)	2.3	9.7	18
		9月	1.38±0.21 (3)	0.13±0.06 (3)	1.65±0.34 (3)	3.90±0.27 (3)	1.22±0.30 (3)	2.6	10.0	19
		10月	1.17±0.03 (3)	0.66±0.05 (3)	1.36±0.14 (3)	-	-	2.1	7.5	14
	初島西	4月	0.69±0.01 (3)	0.01 (1)	0.22 (1)	-	-	1.6	4.3	16
		5月	0.99±0.04 (3)	0.05±0.01 (3)	0.72±0.10 (3)	1.26±0.32 (3)	1.11±0.17 (3)	1.7	4.8	16
		6月	0.95±0.11 (3)	0.12±0.04 (3)	0.93±0.03 (3)	2.83±0.30 (3)	1.40±0.07 (3)	1.6	4.9	16
		7月	0.88±0.07 (3)	0.08±0.04 (2)	0.52±0.05 (2)	2.19±0.86 (2)	1.08±0.14 (2)	1.6	4.8	16
		8月	1.02±0.09 (3)	0.26±0.06 (3)	1.11±0.22 (3)	3.19±0.07 (3)	1.43±0.03 (3)	1.6	4.9	16
		9月	1.32±0.24 (3)	-	0.90±0.08 (3)	2.62±0.27 (3)	1.20±0.05 (3)	1.7	5.5	17
		10月	1.90±0.27 (3)	0.08±0.01 (3)	0.64±0.00 (3)	-	-	1.8	5.4	17
	ヒシ帯(高浜)	4月	0.69±0.06 (3)	-	-	-	-	2.0	7.3	19
		5月	0.84±0.12 (3)	-	-	-	-	1.7	7.6	18
		6月	1.34±0.06 (3)	0.26±0.05 (3)	1.07±0.04 (3)	2.81±0.24 (3)	1.51±0.21 (3)	1.7	8.0	19
		7月	0.97±0.01 (3)	0.18±0.04 (3)	0.60±0.10 (3)	2.83±0.26 (3)	1.08±0.13 (3)	1.7	7.4	19
		8月	1.02±0.09 (3)	0.15±0.03 (3)	0.29±0.43 (3)	4.19±0.27 (3)	0.72±0.10 (3)	1.7	7.6	19
		9月	1.17±0.13 (3)	0.10±0.05 (3)	0.19±0.03 (3)	2.39±0.24 (3)	0.53±0.07 (3)	1.7	7.5	19
		10月	1.38±0.11 (3)	0.36±0.09 (3)	1.09±0.22 (3)	-	-	1.8	8.2	20

※平均値±SD（括弧内はサンプル数）を示す