

## 第7章 底質環境に関する調査

環境保全研究所水・土壌環境部

### 7.1. 調査目的

湖沼環境保全の点から底質環境の改善が不可欠であるが、その実態や変化に関する調査例が少ないため、現在の諏訪湖の底質環境の実態を把握する必要がある。湖水の底層溶存酸素量を低下させる大きな要因の一つである底泥による酸素消費速度(SOD)は、新たな環境基準・底層 DO の類型指定及びその後の管理指標として重要であるため、測定データを蓄積し今後の湖内の環境改善対策や底層 DO 類型指定のための基礎資料を得ることを目的とする。なお、本調査は、信州大学との連携により実施している。

### 7.2. 調査内容

#### 7.2.1. 調査内容・地点

貧酸素の発生要因の一つである底質の酸素消費速度の実態を把握するため、R1 年度から湖内の調査を開始し、R3 年度は湖内の底質酸素消費速度(SOD)の実態把握調査として、環境基準点やヒシ帯における季節変動を調査した。R3 調査地点は、環境基準点、溶存酸素濃度(DO)等連続測定地点(第1章参照)、ヒシ繁茂域等とした。調査地点を表1及び図1に示す。(信大③及び上川河口域の地点は R1～R2 に調査実施(参照：令和2年度諏訪湖創生ビジョン推進事業調査結果報告書(2020年11月、長野県))

表1 調査地点一覧

地点	水深	備考	緯度	経度
湖心	5.7	環境基準点	36° 02' 58.01"	138° 04' 55.06"
塚間川沖 200m	2.8	環境基準点	36° 03' 15.01"	138° 03' 41.42"
初島西	2.6	環境基準点	36° 02' 53.90"	138° 06' 18.30"
B 地点	4.7	DO 等連続測定地点	36° 03' 29.72"	138° 05' 52.36"
D 地点	5.9	DO 等連続測定地点	36° 02' 44.66"	138° 04' 28.22"
信大③(南西)	5.7	信州大学 R2, DO 連続測定地	36° 02' 24.53"	138° 04' 48.57"
ヒシ帯(高浜沖)	2.2	ヒシ繁茂(高密度)	36° 03' 57.50"	138° 05' 55.20"
ヒシ帯(高木沖) ※1	1.9	泥質、対照区・地点⑧	36° 03' 57.67"	138° 06' 05.93"
覆砂区(高木沖)	1.9	砂質、覆砂試験区・地点⑦	36° 03' 55.75"	138° 06' 07.85"
上川河口域②※2	2.4	泥質、対照区、地点②	36° 02' 25.95"	138° 05' 37.93"
上川河口域①	1.1	砂質、覆砂試験区、地点①	36° 02' 24.33"	138° 05' 41.66"
上川河口域⑥	1.6	泥質、対照区、地点⑥	36° 02' 41.39"	138° 06' 16.53"
上川河口域③	0.7	砂質、覆砂試験区、地点③	36° 02' 39.71"	138° 06' 20.22"

※1 高木沖の調査地点：第3章覆砂場所モニタリング調査地点(3.2.2.項) 参照

※2 上川河口域の調査地点：R2 年度諏訪湖創生ビジョン推進事業報告書/第3章覆砂場所モニタリング調査地点(3.2.2.項) 参照

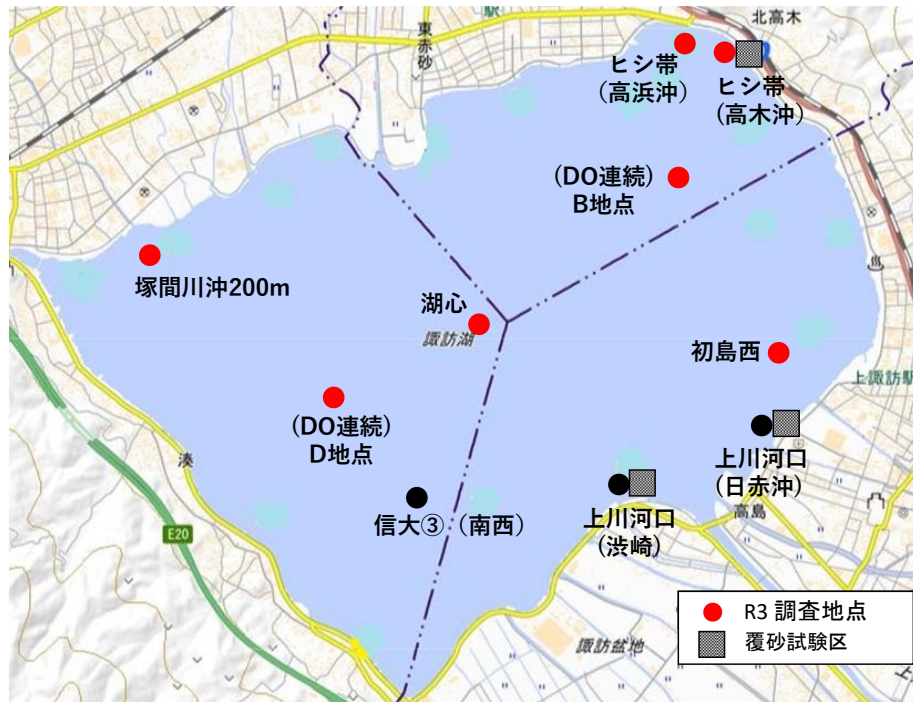


図1 SOD 調査地点図

### 7.2.2. 調査時期

- 環境基準点、沖合、ヒシ繁茂帯等の地点：春期(4～6月)、夏期(8～9月)、秋期(10～11月)
- 高木沖：夏期(7月)、秋期(11月)

### 7.2.3. 採泥方法及び試料調製方法

#### <採泥方法>

鉛直方向の底質性状を調査するため、底質を乱さずに採泥可能な不攪乱柱状採泥器(HR型、離合社)を用いて、採泥用パイプ(アクリル円筒形：内径11cm、長さ50cm)に採泥厚15cm程度以上になるよう底泥を採取し、直上水をカラム上部まで満たし上下をゴム栓で密閉した。各地点において4～6本程度の不攪乱底泥コアを採取して、底質成分分析用、ORP測定用、SOD測定用の試料とした。

底質表層の成分分析用試料は、調査地点毎にエクマンバージ型採泥器で3回採取し、ステンレス製バット中で混合した後、2mmふるいで小石などの異物を除いたものをガラス瓶(1L)に採取した。

#### <成分分析用試料調製方法>

採取した底泥コアサンプルの直上水をサイホンで静かに抜き取った後、表層から深さ方向に1cmを分画し、分画した試料を遠心分離(3000rpm、20分)し、底質を風乾して分析に供した。

## 7.2.4. 測定方法

測定項目及び測定方法を表2に示す。

表2 測定項目及び測定方法

対象	測定項目	測定方法
底質	酸素消費速度(SOD)	環境省底質調査方法 I 9
	強熱減量(IL)	環境省底質調査方法 II 4.2
	全窒素(TN)	環境省底質調査方法 II 4.8.1.1(中和滴定法)
	全りん(TP)	環境省底質調査方法 II 4.9.1

### <SOD 測定方法>

SODの測定方法は、環境省の底質調査方法(I 9)に準じて行い、また入江ら(2007)\*を参考とした。実験装置を図2に示す。採泥した底泥コアサンプルの直上水をアスピレーターでゆっくり排水した後、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た。試験水として、各地点で採水した底層水をガラス繊維濾紙(Whatman GF/B)でろ過し、ばっ気によりDOを概ね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、光学式溶存酸素計(WTW社 Multi 3510 IDS)を用いて試験水のDO経時変化を計測した(10分間隔)。暗条件下で試験温度を20℃一定とするため、実験装置を恒温槽内に設置し、試験水のDO濃度が均一になるよう攪拌器でゆっくり攪拌した。

※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、第54巻

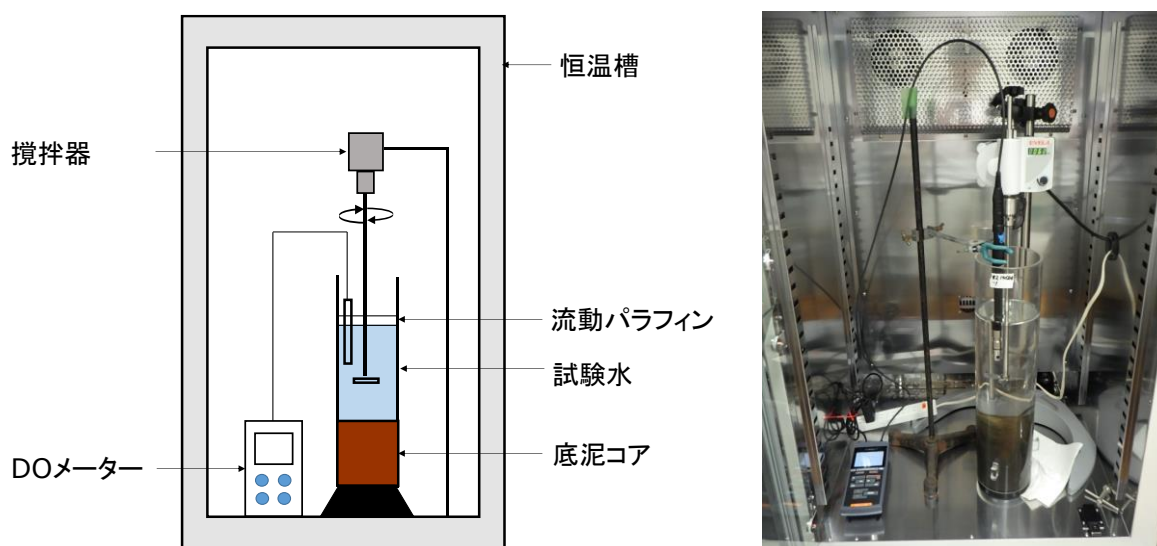


図2 酸素消費速度 実験装置(左：模式図、右：写真)

### 7.3. 調査結果

測定結果を表3、図3(季節別)、図4(地点別)に示す。SOD測定時の直上水のDO経時変化図(酸素消費曲線：図5)の近似曲線の傾きが段階的に変化していたため、底泥酸素消費速度(SOD)は、試験開始から直線的にDOが減少する期間を対象に、DO減少量を底泥の表面積と時間で除して算出した。また、試験水による酸素消費を補正するため、同実験条件下での試験水のみでのDO経時変化を計測して酸素消費速度を算出し、この値を差し引くことで底泥による酸素消費速度とした。

R3年度調査は、季節変動を含めた湖内の実態を把握するため、環境基準点3地点、DO連続測定地点(沖合)2地点、ヒシの繁茂域1地点の計6地点において、春・夏・秋の3期の調査を実施した(+高木沖の覆砂調査区2地点で夏・秋2期：3.2.項参照)。

全般について、地点別に比較すると、3期の平均値は、D地点1.7 g/m<sup>2</sup>/day、ヒシ帯(高浜沖)1.4 g/m<sup>2</sup>/day、塚間川沖1.2 g/m<sup>2</sup>/day、湖心1.1 g/m<sup>2</sup>/day、B地点1.1 g/m<sup>2</sup>/day、初島西0.98 g/m<sup>2</sup>/dayであり、水深が最も深く貧酸素状態の発生頻度が高いD地点や、ヒシが高密度に繁茂するヒシ帯(高浜沖)において、他の地点よりSOD値が高い傾向が見られた。採泥時の現地底層DO濃度について、SODが高い値を示したヒシ帯(高木沖)では春期及び夏期に無酸素状態(DO<1 mg/L)で、D地点では夏期及び秋期に貧酸素状態(DO 2 mg/L程度)であり、底層DOが低い値となっていた。

季節変動は、6地点平均で春期1.7(1.1~2.4)、夏期1.1(0.74~1.4)、秋期0.96(0.62~1.3) g/m<sup>2</sup>/dayであり、夏期、秋期より春期に値が高い傾向が見られた。特に春期のD地点、ヒシ帯(高浜沖)が高い値であり(それぞれ2.4、2.0 g/m<sup>2</sup>/day)、夏期ではヒシ帯(高浜沖)が高く、秋期ではD地点、湖心が高い値であった。春期にSOD値が高い傾向については、春期に観察される湖水中の懸濁物質の増加、懸濁物質(デトリタス)の沈降、堆積、有機物分解などの影響が推察される。

年変動について、2019~2021年の調査結果から、諏訪湖内のSODは、0.62~2.4 g/m<sup>2</sup>/dayの範囲であった(並行試験数：n=3~6、時期：春期~秋期)。最も高い値は2021年6月のD地点で(2.4 g/m<sup>2</sup>/day)、次いで同月のヒシ帯(高浜沖)が高く(2.0 g/m<sup>2</sup>/day)、最も低い値は2021年10月の初島西(0.62 g/m<sup>2</sup>/day)であった。全般には、貧酸素の発生頻度が高いD地点やヒシ帯(高浜沖)でSOD値が高い傾向が見られ、初島西や上川河口域で比較的値が低い傾向が見られた。また、これまでの調査からデータ数の多い湖心については、R1、R2、R3の夏期の値に差が見られた(それぞれ1.7、1.0、0.95 g/m<sup>2</sup>/day)。R1は夏期の気象条件が安定し、湖心の現地底層DOの貧酸素状態が継続的に発生し嫌気的環境下であった状況から、測定時の培養初期の著しいDO減少が還元性物質の酸化による酸素消費に起因している可能性が考えられ<sup>2)</sup>、一方、R2年は梅雨明けが例年より遅く盛夏期の貧酸素の発生期間が短く、R3は8月の降雨量が記録的に多く、このような気象条件や貧酸素の発生状況の違いが要因の一つとして考えられた。

影響要因について、温度依存性を検討するため、湖心(秋期)のサンプルについて、培養温度を20℃、15℃、12℃(現地水温)に変えてSOD測定を実施したところ、培養温度が高い方がSODが高い値であった(図7)。また、SODと底質性状との関係について、SOD調査時の底泥コアサンプルの表層(0-1cm)の有機物量(強熱減量IL)、栄養塩類(N、P)含有量との関係を図6に示す(2019~2021データ)。ILは、ヒシ帯18~21%、沖合12~17%、上川河口域(泥)10~12%、上川河口域(砂)1.9~2.7%であり、SODが高い傾向にあるヒシ帯や沖合の地点の方がILが高く、有機物量の

指標である強熱減量と SOD 値に弱い正の相関が見られた。N 含量は、ヒシ帯 7.1~7.9、D 地点 5.4~7.4、湖心・B 地点 5.3~6.8、塚間川沖・初島西 3.4~4.7 mg/g であり、SOD 値が高いヒシ帯や D 地点で N 含量が高く、N 含量と SOD 値に弱い正の相関が見られた。一方、P 含量は、塚間川沖が他の地点より値が小さい傾向であったが他の地点間に差が見られず、P 含量と SOD 値には相関が見られなかった。

高木沖(覆砂調査区)について、夏期の覆砂区(高木沖)の SOD は平均 0.91 g/m<sup>2</sup>/d、対照地点であるヒシ帯(高木沖)は平均 1.1 g/m<sup>2</sup>/d であり、対照地点の方が値が高く酸素消費速度が大きかった。第 3 章 3.2 項のとおり両地点の底質性状は顕著に異なり、覆砂区は砂泥質で有機物量、栄養塩類等の含有量が少なく(IL 2.2%、TN 0.15 mg/g、TP 0.61 mg/g)、対照地点は泥質で IL 19%、TN 7.9 mg/g、TP 1.7 mg/g であり、底質性状の違いが要因の一つとして考えられる。また、覆砂区では底泥コア表面に付着藻類が見られ、付着藻類が多いサンプルほど SOD 値が高い傾向が見られた。R1 年度(浜崎区)調査でも夏期に付着藻類の影響が見られたことから、覆砂区の底泥コア表面を覆う付着藻類による酸素消費も SOD 値に影響している可能性が考えられる。なお、対照区のサンプル表面はヒシの枯死体等の植物残渣が多く見られた。秋期の覆砂区(高木沖)の SOD は平均 1.5 g/m<sup>2</sup>/d、対照のヒシ帯(高木沖)は平均 1.5 g/m<sup>2</sup>/d であり、調査地点間の差は見られなかった。夏期の調査において覆砂区の方が SOD が小さかったが、同様の傾向は R1(浜崎区)、R2(湖岸通り区)の秋期の調査でも同様に見られている。調査地点ごとのサンプル間のバラつき(n=3)を見ると、覆砂区においてバラつきが大きく(CV% 覆砂区 18%、対照区 6.5%)、試験区の 3 本の底泥コアサンプルのうちクロモの枯死体等の植物残渣が多い 2 サンプルで SOD 値が大きく、バラつきの要因と推察される。

高木沖の 2 期の調査から、両地点において秋期の方が SOD が大きい値であったが、秋期のサンプル表面には覆砂区でクロモ、対照区でヒシ等の枯死体が多く堆積しておりその影響が考えられる。一方、ヒシ帯(高木沖)の近傍にあるヒシ帯(高浜沖)では秋期の方が SOD 値が小さい傾向が見られたが、高浜沖ではヒシの刈取りが 9 月に行われており(高木沖は未実施)、ヒシ刈取りによる枯死体の堆積の減少、貧酸素の解消等が SOD に影響している可能性も考えられる。

SOD による底層水の酸素消費の程度について、SOD 1.0 g/m<sup>2</sup>/day 程度を示したサンプル(湖心・夏期)では、本測定条件下(20℃、酸素供給無し)において、水柱高さ 25 cm の直上水の DO 濃度が飽和状態から約 40 時間程度で貧酸素状態(<3 mg/L)になることが確認された(図 5)。

底泥の不均一性を考慮したサンプル間の測定値のバラつきについて、地点毎に底泥コアサンプル 5 本(又は 3 本)の並行試験により測定値の変動係数を確認した。R3 の変動係数は 3.5~27% であり、基準はないが CV 20%程度を目安とすれば概ね妥当な範囲であった。なお、これまでの調査から CV 30%程度を示したサンプルでは、植物プランクトンの堆積が顕著(R1 塚間川沖 200m・夏)、底泥コア表面に付着藻類が発生(R1 地点①・夏、R2 地点③・秋)といった特徴が見られた。

表3 底泥酸素消費速度 測定結果(g/m<sup>2</sup>/day)

区分	試料名	採泥日	サンプル数	最小値	最大値	平均値	CV%	水温 <sup>※1</sup> (°C)	IL <sup>※2</sup> (%)	TN <sup>※2</sup> (mg/g)	TP <sup>※2</sup> (mg/g)
春期	湖心	4/27	5	0.93	1.24	1.10	12.1%	12.5	15.3	6.30	1.79
	塚間川沖200m	5/11	5	1.46	1.67	1.57	5.0%	14.0	11.9	3.69	1.21
	初島西	5/18	5	1.20	1.42	1.36	6.6%	17.8	15.6	4.62	1.72
	DO連続:B地点	5/25	5	1.32	2.23	1.66	23.0%	15.0	16.4	6.11	1.97
	DO連続:D地点	6/1	5	2.30	2.49	2.39	3.5%	16.2	14.9	6.93	1.91
	ヒシ帯(高浜沖)	6/10	5	1.48	2.48	2.02	20.0%	19.6	18.3	7.33	1.69
夏期 (高木沖)	覆砂区(高木沖)	7/20	5	0.68	1.20	0.91	20.6%	25.1	2.2	0.15	0.61
	ヒシ帯(高木沖) (覆砂対照)	7/29	5	1.03	1.18	1.12	5.7%	25.1	18.6	7.91	1.70
夏期	湖心	8/3	5	0.90	1.07	0.95	6.8%	22.8	15.7	6.84	1.92
	DO連続:D地点	8/11	5	1.09	1.36	1.21	8.1%	25.0	16.2	7.44	2.06
	DO連続:B地点	8/31	3	0.71	0.78	0.74	4.9%	18.4	16.6	5.41	1.84
	初島西	8/31	3	0.86	1.02	0.96	8.7%	25.3	15.6	4.70	1.65
	塚間川沖200m	9/7	5	1.02	1.34	1.20	11.2%	19.6	13.3	3.59	1.11
	ヒシ帯(高浜沖)	9/16	5	1.23	1.60	1.44	9.6%	20.4	20.5	7.13	1.67
秋期	湖心	10/7	5	0.94	1.69	1.28	25.9%	18.7	14.7	5.26	1.90
	DO連続:D地点	10/14	5	0.98	1.78	1.34	27.1%	18.6	13.8	5.37	1.76
	DO連続:B地点	10/19	5	0.68	0.90	0.81	10.1%	16.9	17.0	5.72	1.91
	初島西	10/26	5	0.56	0.71	0.62	11.5%	12.2	15.6	4.67	1.61
	塚間川沖200m	11/1	5	0.66	1.18	0.95	23.9%	12.3	13.5	3.41	1.05
	ヒシ帯(高浜沖)	11/9	5	0.54	1.00	0.73	23.7%	12.4	19.2	7.49	1.65
秋期 (高木沖)	覆砂区(高木沖)	11/24	3	1.23	1.76	1.53	17.5%	8.6	-	-	-
	ヒシ帯(高木沖) (覆砂対照)	11/24	3	1.41	1.60	1.50	6.5%	8.8	19.0	7.82	1.72

\*1 水温：現地の底層水の水温

\*2 強熱減量(IL)：底泥コアの表層0-1cmの測定値

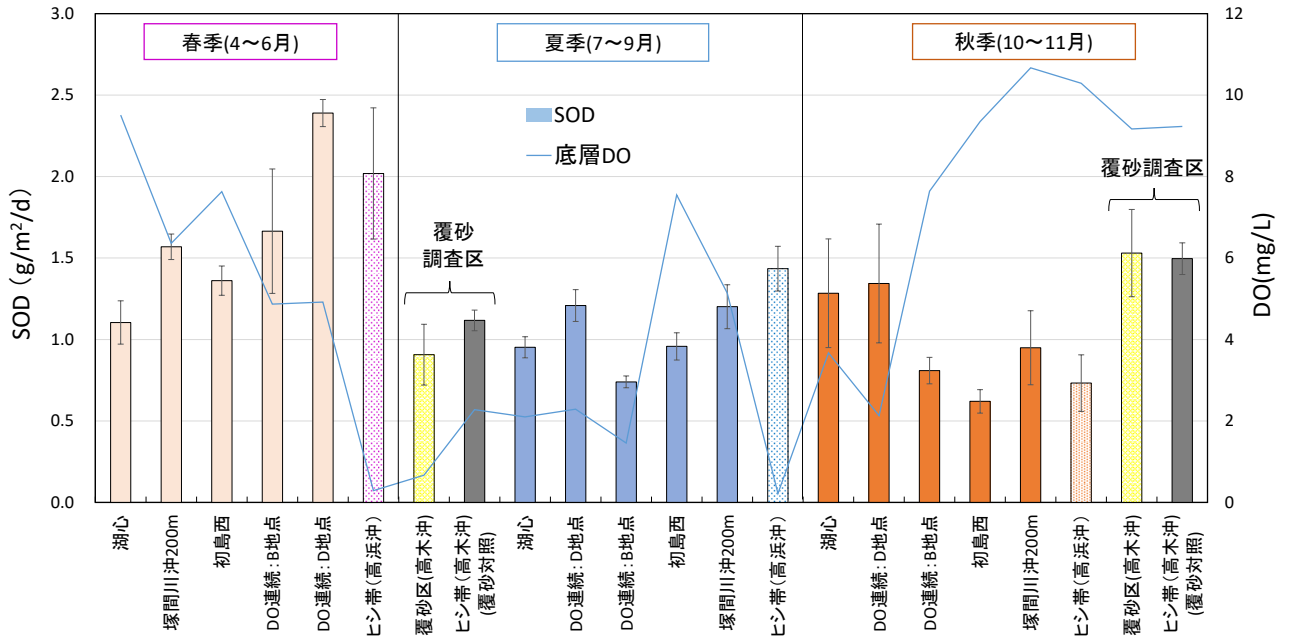


図3 底泥酸素消費速度 測定結果【季節別(採泥日順)】  
 (エラーバーは併行試験(n=3~5)の標準偏差を示す、底層 DO:湖底直上の DO)

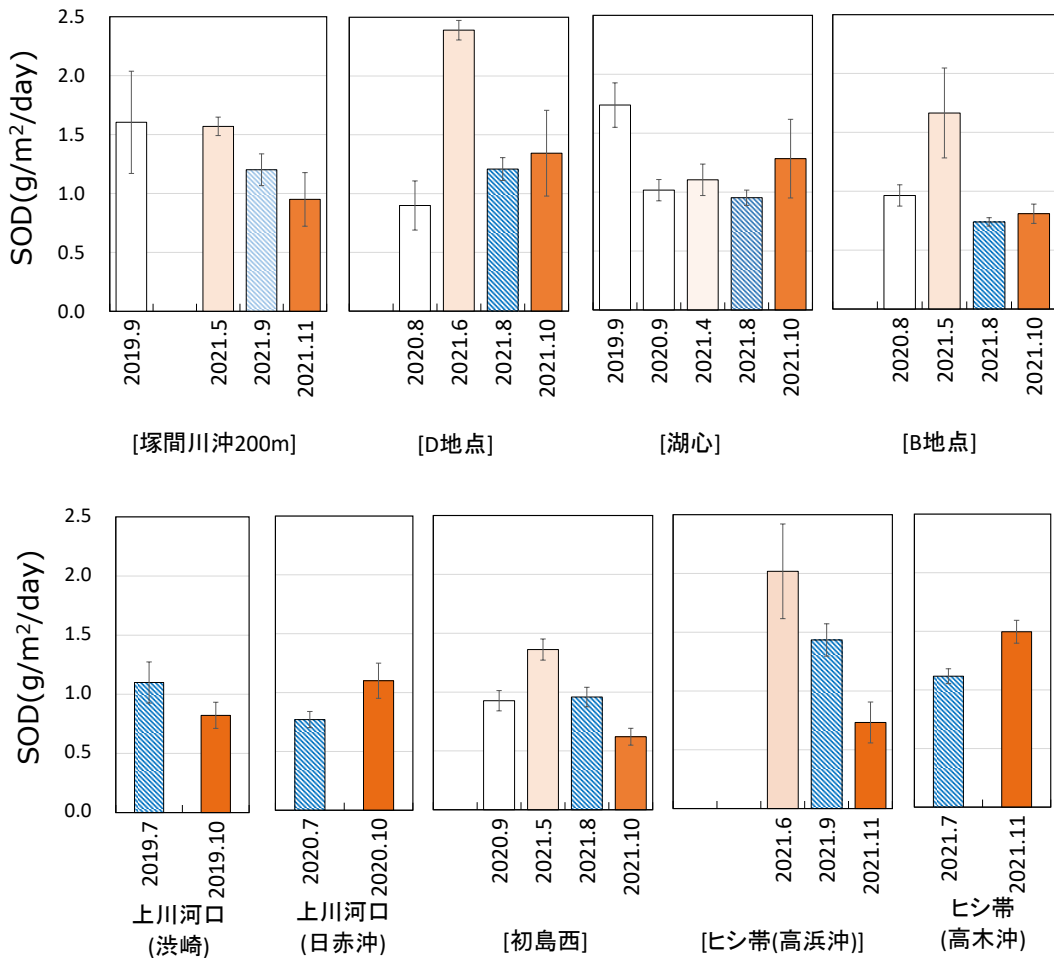


図4 底泥酸素消費速度 測定結果【地点別】  
 (R1-R3 測定結果含む、エラーバーは併行試験(n=3~5)の標準偏差を示す)

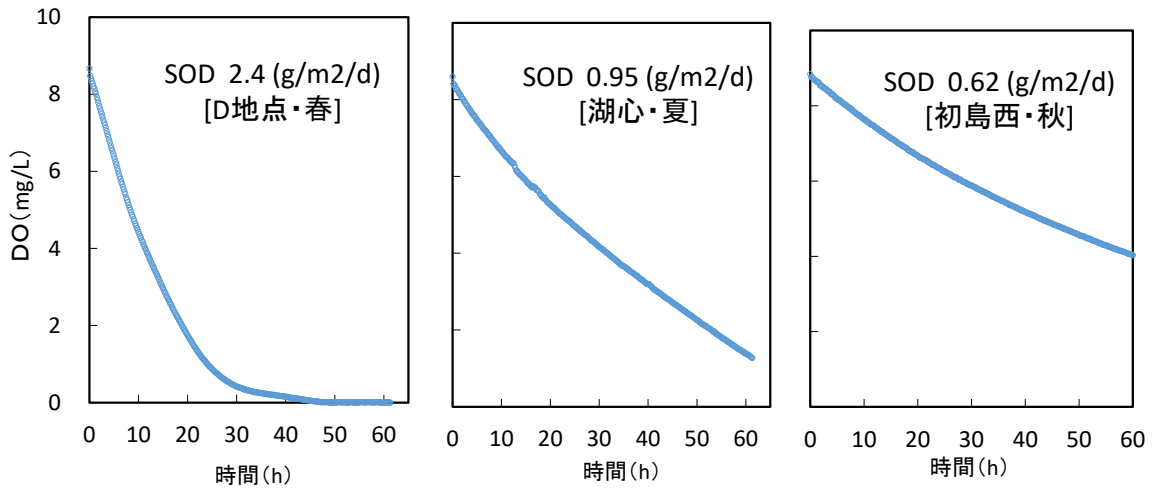


図5 直上水 DO 経時変化(酸素消費曲線)

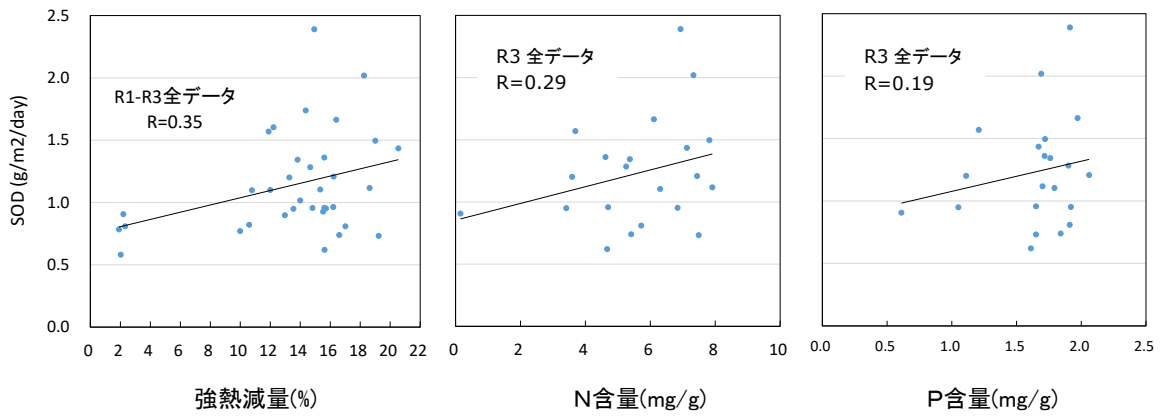


図6 SOD と有機物量、N、P の関係

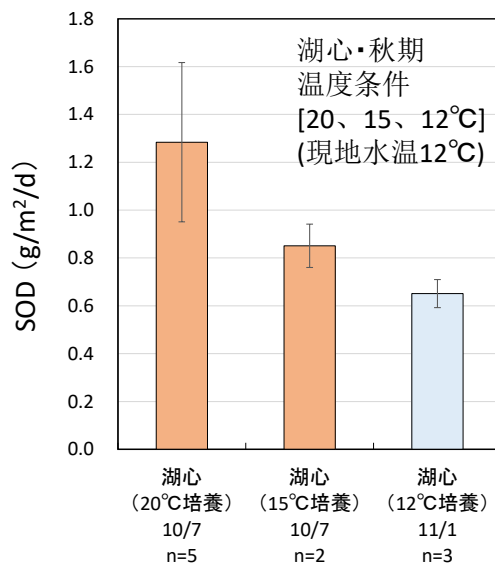


図7 温度影響(湖心・秋期、温度条件：20、15、12°C(現地水温))



また、SOD の影響要因として着目している底泥の酸化還元状態を把握するため、底泥鉛直方向の酸化還元電位(ORP)の測定を試行的に実施した。測定方法について、土壤用 Eh 計(株藤原製作所 PRN-41 型)を用いて、底泥コアの測定深度に電極を挿入して約 5~10 分後に指示値が安定してから値を読み、鉛直深さ方向に測定を実施した。測定結果を図 8 に示す。

全般に底泥表面から深度方向に ORP が低下する傾向が見られ、直上水(深度 0cm)では Eh 400 mv 程度で、表層 0-1cm 付近で深度方向に ORP が大きく低下し(酸化還元境界層)、1cm 以深では Eh 0 ~150 mv 程度で還元的な状態であった。

季節変動について、塚間川沖、D 地点、B 地点、初島西では、夏・秋期より春期の方が値が高い傾向が見られ、夏・秋期は同程度であった。ヒシ帯(高浜沖)では、表層付近で秋期の方が高い傾向であった。

今後、SOD の影響要因の検討のため、測定データのさらなる蓄積や定量的な測定手法の検討等により、底泥の酸化還元状態の把握を進めていく必要があると考える。

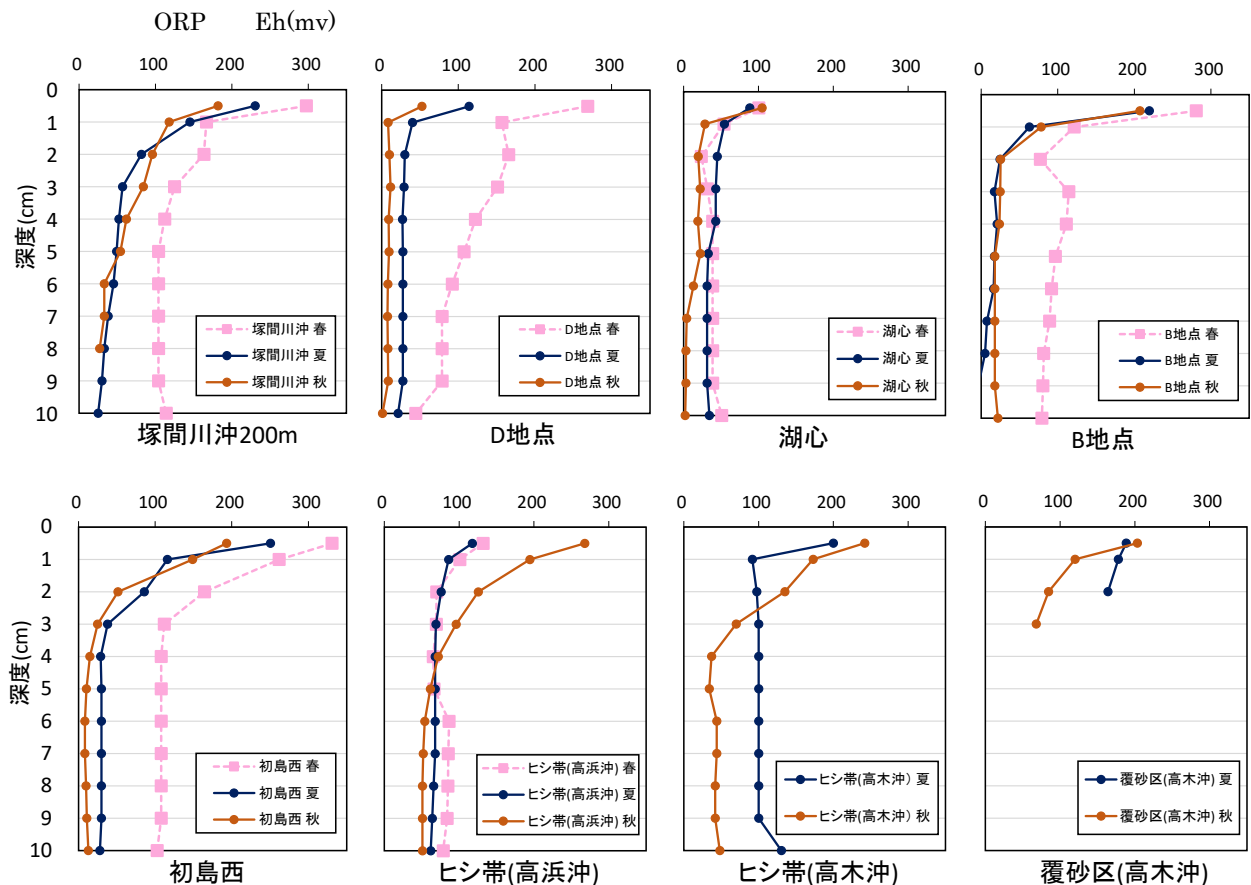


図 8 底泥鉛直方向の酸化還元電位(ORP : Eh 表示、mv)

#### 7.4. まとめ

底泥による湖水底層水の酸素消費は底層溶存酸素量を低下させる要因の一つであり、新たな環境基準・底層 DO の類型指定及びその後の管理指標として重要な底泥酸素消費速度調査(SOD)の測定データの蓄積が不可欠であることから、季節変動を含む SOD の湖内実態を調査した。

近年の課題となっているヒシ繁茂域を含む湖内 6 地点において調査毎 5 試料の並行試験を実施して SOD 測定データを蓄積し、春～秋 3 期の季節変動を把握した(ヒシ繁茂域内の高木沖覆砂調査区でも実施)。R3 年度は、地点全般で夏・秋より春期に値が高い傾向が見られ、地点別では水深が最も深い D 地点やヒシ繁茂帯(東部：高浜沖)において値が高い傾向が見られた。SOD の影響要因について、温度依存性の試験を実施し、湖心(秋期)では 12～20℃の範囲で培養温度が高いほど SOD 値が高い傾向が見られた。また、底泥表層(0-1cm)の有機物量や栄養塩類含有量との関係について、有機物量の指標である強熱減量と N 含量について、SOD 値と弱い正の相関が見られた。

本調査により、諏訪湖内の SOD の広域的な実態を把握し、地点変動、年変動が確認され、3 期の調査から季節変動が把握され、類型指定後の SOD モニタリングを見据えた SOD の初期的な実測データが蓄積された。また、本調査結果から春期に SOD 値が高くなる傾向が確認され、春期に観察される湖水中の内部生産由来の懸濁物質の増加、これによる懸濁物質(デトリタス)の沈降、堆積、有機物分解などの影響などが推察される。春期は貧酸素水塊が発生する夏期に向かって底層 DO が減少していく時期であることから、今後、詳細に季節変動を調査し、SOD に与える影響要因、湖内環境との関係把握をさらに進める必要があると考える。

底質環境に関する調査の今後の方向性について、これまでの調査により把握された現在の底質性状が湖沼環境へ与えている影響の程度を明らかにするため、SOD の詳細な季節変動や水生植物帯の調査、測定省力化に繋がる簡易測定手法の検討等により SOD の詳細な実態把握を進めていくとともに、湖水に栄養塩と有機物を供給する底泥溶出の実態把握に取り組む予定である。