

第 11 章 底質環境に関する調査

環境保全研究所水・土壌環境部

11.1. 調査目的

湖沼環境保全の点から不可欠な底質環境の改善については、変化の実態についての調査例が少なく、特に沿岸域では不明な点が多い。このため、現在の諏訪湖の底質環境の実態把握を行うとともに過去の底質の状況と比較するほか、底質の酸素消費速度などを測定し、今後の湖内の環境改善対策や新規の環境基準として設けられた底層溶存酸素量の類型指定を行う上で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。

11.2. 調査内容

11.2.1. 沿岸域の底質把握調査

11.2.1.1. 調査地点

調査地点を表 1 及び図 1 に示す。調査地点は、1978 年～1980 年に当所が実施した調査(諏訪湖の富栄養化に関する研究、1982 年 3 月)から沿岸域の地点を選定した。

表 1 調査地点一覧

地点番号	位置	水深(m)	備考
1	釜口水門から 250m 沖 (湖心線)	2.4	砂質
5	塚間川河口から 200m 沖 (湖心線)	2.9	
6	横河川河口から 200m 沖 (湖心線)	3.5	
8	古川河口から 200m 沖 (湖心線)	2.9	
10	大沢川河口から 200m 沖 (湖心線)	2.5	
13	柳並川河口から 300m 沖 (湖心線)	2.2	
16	上川河口から 700m 沖 (湖心線)	2.7	砂質
19	武井田川河口から 800m 沖 (湖心線)	5.6	
20	北村沢川河口から 200m 沖 (湖心線)	4.5	
22	鰻沢川河口から 350m 沖	3.9	
(参考)9	古川河口から 800m 沖 (湖心線)	-	過去調査データ

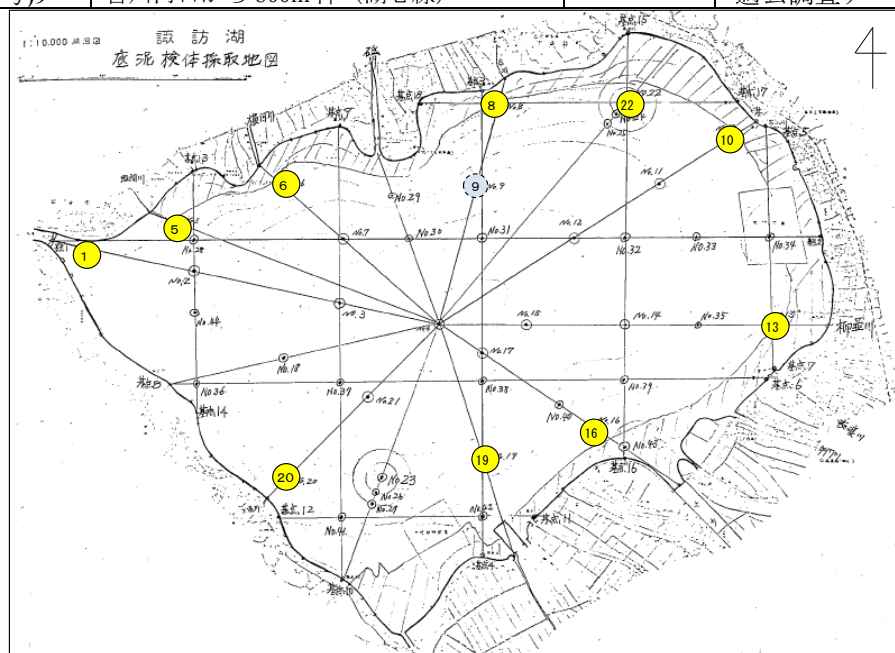


図 1 調査地点図

11.2.1.2. 調査時期

春期(4~6月)及び秋期(10月)、採泥は2018年に実施した。

11.2.1.3. 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把握するため、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3本の不攪乱底泥コアを採取した。

また、エクマンバージ型採泥器でポリエチレン製容器(12L)に地点毎3回採泥し、全硫化物及び粒度分布測定用試料とした。

<分析用試料調製方法>

採取した底泥コアサンプルについては、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2cm毎に10cmまで分画し、地点毎3本分を合わせた。分画した底質試料を遠心分離(3000rpm、20分)し、上澄水をガラス繊維濾紙(Whatman GF/B)でろ過し、ろ液を間隙水の試料とした。底質試料は、風乾し分析に供した。

11.2.1.4. 測定項目及び分析方法

測定項目及び分析方法を表2に示す。

表2 測定項目及び分析方法

対象	測定項目	分析方法
水質 ・直上水 ・間隙水	全窒素(T-N)	紫外線吸光光度法(JIS K0102 45.2)
	アンモニア性窒素(NH ₄ -N)	インドフェノール青吸光光度法(JIS K0102 42.2)
	亜硝酸性窒素(NO ₂ -N)	ナフチルエチレンジアミン吸光光度法(JIS K0102 43.1.1)
	硝酸性窒素(NO ₃ -N)	サリチル酸ナトリウム吸光光度法(上水試験方法 10.3)
	全りん(T-P)	ペルオキシ二硫酸カリウム分解法(JIS K0102 46.3.1)
	りん酸態りん(PO ₄ -P)	モリブデン青吸光光度法(JIS K0102 46.1.1)
底質	強熱減量	底質調査方法 II 4.2
	全窒素	底質調査方法 II 4.8.1.1(中和滴定法)
	全りん	底質調査方法 II 4.9.1
	全硫化物	検知管法(全国漁業協同組合連合会(社)全国かん水養魚協会 硫化物の簡易測定法マニュアル)
	粒度分布	4.75mm、2mm、425μm、75μmの試験ふるいによる分別

11.2.2. 底質酸素消費速度調査

11.2.2.1. 調査地点

貧酸素の発生原因となる底質の酸素消費速度の実態を把握するため、R1～R2年度の2ヵ年で湖内の調査を実施する。R1年度は環境基準点2地点(湖心、塚間川沖 200m)及び上川河口付近で調査を実施した。調査地点を表3に示す。

表3 調査地点一覧

地点	水深(m)	備考
湖心	5.8	環境基準点
塚間川沖 200m	2.8	環境基準点
上川河口付近	2.4	覆砂場所モニタリング調査対照区② (4.2.2.1. 参照)

11.2.2.2. 調査時期

夏季(7～9月)

11.2.2.3. 採泥方法

不攪乱柱状採泥器による柱状採泥(4.2.2.3. 参照)

11.2.2.4. 測定方法

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

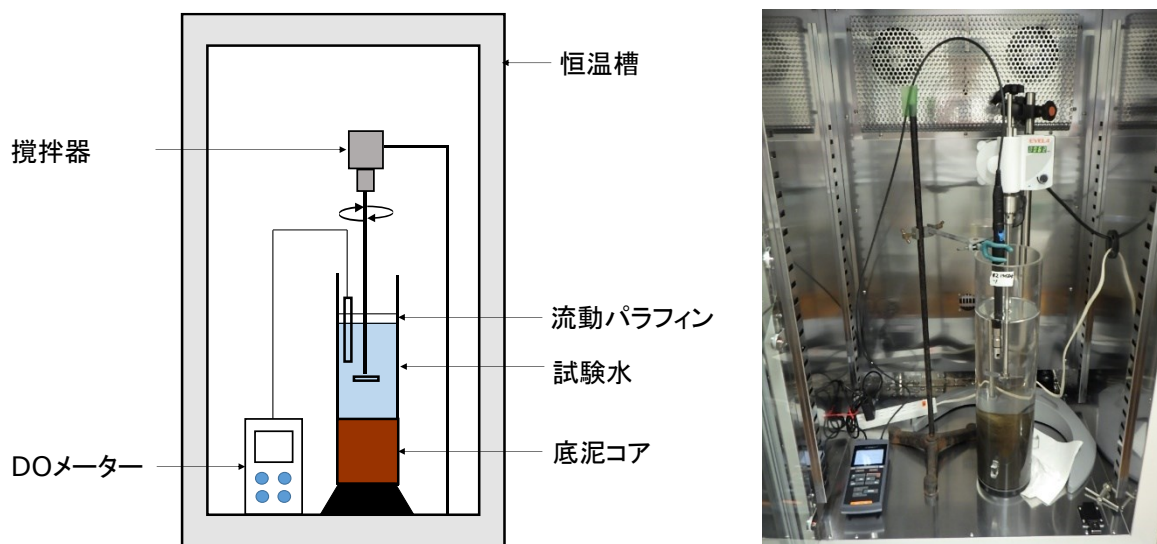


図2 酸素消費速度 実験装置 (左：模式図、右：写真)

11.3. 調査結果

11.3.1. 沿岸域底質把握調査

<りん>

底質表層(0-2 cm)の全リン含有量の測定結果及び過去の調査結果(1978-1980)との比較を図 3 に示す。なお、地点 16 は砂質で不攪乱柱状採泥器による採泥が不能であったため欠測とした(以降の調査結果について同様)。

底質表層の全リン含有量の 2018 年平均値は、1978-80 年平均値に対し 39%~93%(全地点平均 66%)であり、過去の調査結果と比較して沿岸域全域で低い傾向が見られた。また、釜口水門~古川河口沖までの沿岸域北西部(地点 1~8)の 2018 年平均値は、他の地点に比べて低い値であった(地点 1~8 : 1.2~1.5 mg/g、地点 10~22 : 1.9~2.3 mg/g)。季節変動(春期、秋期)は、過去調査で大きい傾向が見られたが、本調査の季節変動は小さかった。

底質の鉛直方向(0-10 cm)の全リン含有量の測定結果を図 4 に示す。鉛直方向の全リン含有量は、地点毎に 0-10cm まで概ね一定値であった。一方、過去調査の地点 9(地点 8 より 600m 沖)では、深さ方向に 12cm 前後まで減少傾向であり、12cm 以深は概ね一定値で本調査の 0-10cm と同程度の濃度レベルであった。また、季節変動は、過去調査では見られたが、本調査では見られなかった。

底質の間隙水のりん酸態りんの測定結果を図 5 に示す。間隙水のりん酸態りん濃度の鉛直分布は、季節変動が顕著に見られた。春期について、地点 1~13 及び 22 では鉛直分布の変化が小さく(<0.1 mg/L)、水深が比較的深い地点 19 及び 20 では他の地点より濃度が高く、鉛直分布の変化が大きかった(0.1~0.4 mg/L 程度)。秋期について、深さ方向に濃度が増加する傾向が見られ(地点 13 除く)、概ね 4cm 以深で春期より秋期の方が濃度が高くなっていた(地点 13、20 除く)。なお、間隙水の全リンについてもりん酸態りんと同様の挙動を示していた。

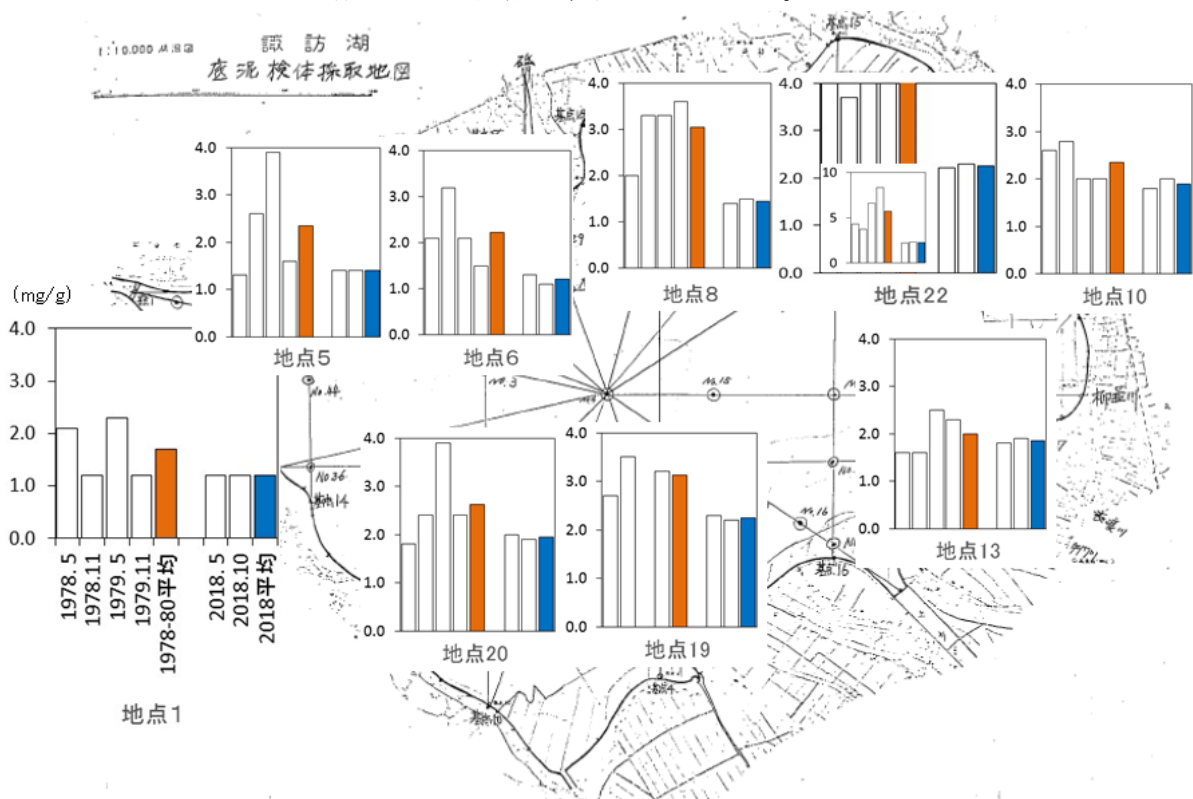


図 3 底質表層の全リンの湖内(沿岸域)分布及び過去調査との比較

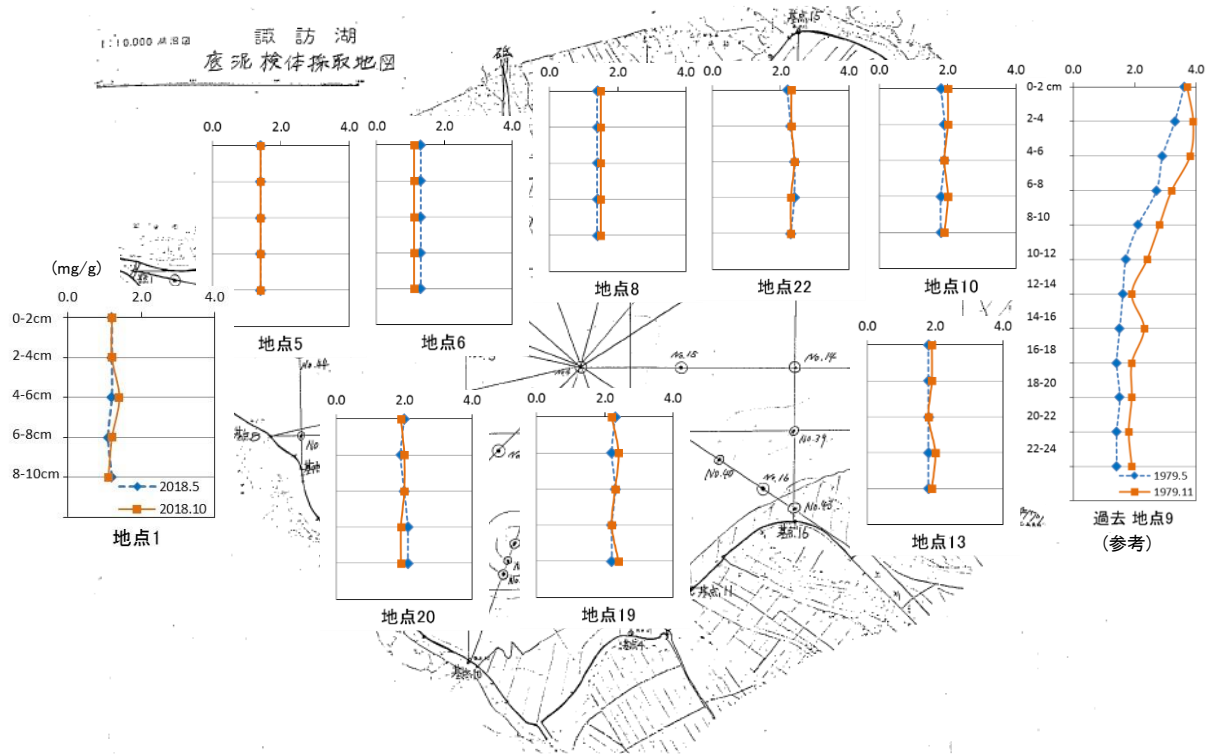


図4 底質の全鉛の鉛直分布

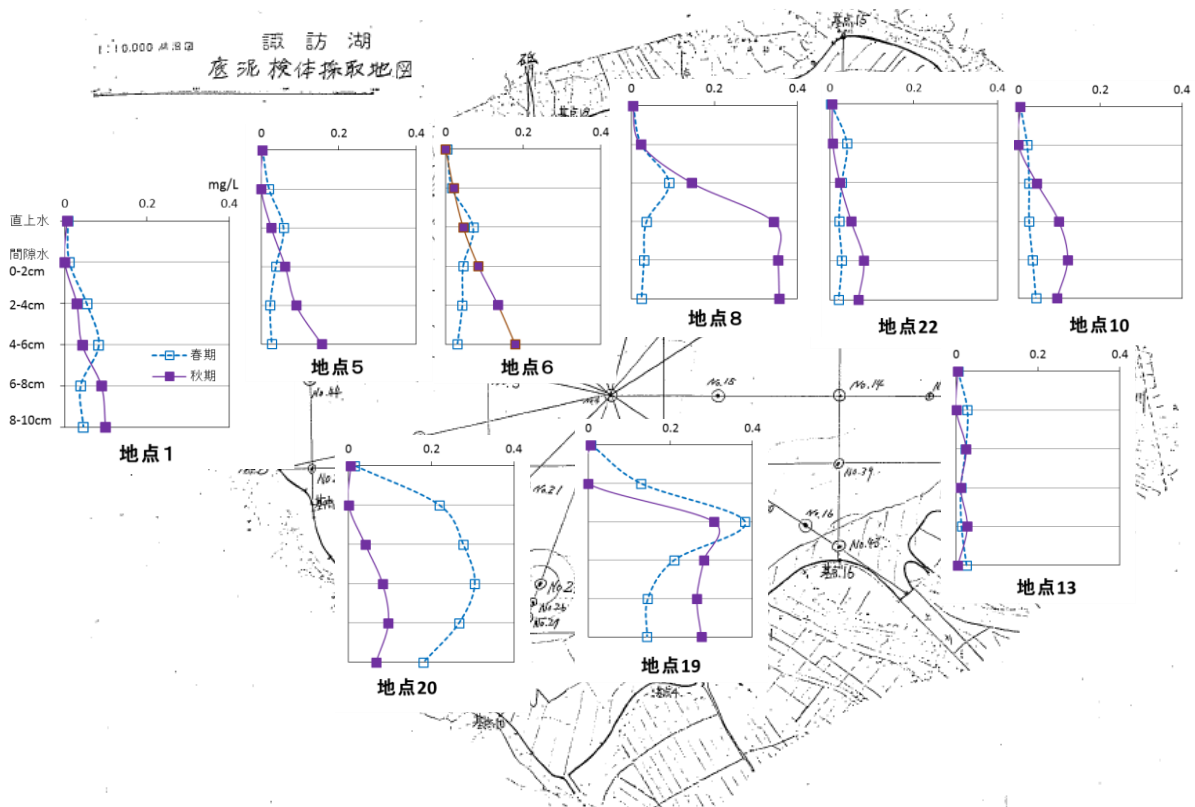


図5 間隙水のりん酸態鉛の鉛直分布

<窒素>

底質表層(0-2 cm)の全窒素含有量の測定結果及び過去の調査結果(1978-1980)との比較を図 6 に示す。

底質表層の全窒素含有量の 2018 年平均値は、1978-80 年平均値に対し 79%~164%(全地点平均 117%)であり、過去の調査結果と比較して同程度又は高い傾向が多く見られた(高い傾向: 地点 10~20、1978-80 年比 127~164%)。また、釜口水門~古川河口沖までの沿岸域北西部(地点 1~8)の 2018 年平均値は、他の地点に比べて低い値であった(地点 1~8 : 3.3~4.0 mg/g、地点 10~22 : 5.6~7.5 mg/g)。季節変動は、過去調査で大きい傾向が見られたが、本調査の季節変動は小さかった。

底質の鉛直方向(0-10 cm)の全窒素含有量の測定結果を図 7 に示す。鉛直方向の全窒素含有量は、地点 1~8、20 及び 22 で地点毎に 0-10cm まで概ね一定値であった。地点 10、13 及び 19 の秋期は、深さ方向に変化(減少傾向)が見られた。一方、過去調査の地点 9 では、深さ方向に 10cm 前後まで減少傾向であり、10cm 以深で概ね一定値であった。また季節変動は、過去調査、本調査ともに小さかった。

底質の間隙水の全窒素及び各態窒素の測定結果を図 8 に示す。なお、各態窒素については、NH₄-N 及び NO₃-N の秋期が欠測、NO₃-N の春期は直上水又は 0-2cm で 0.1~0.3 mg/L 程度、NO₂-N は全試料で<0.02 mg/L であったため、NH₄-N の春期の値のみ図中に示す。間隙水の全窒素濃度の鉛直分布は、季節変動が顕著に見られた。春期について、沿岸域全域で鉛直分布の変化が小さかった(< 3 mg/L、地点 19 除く)。秋期について、深さ方向に濃度が増加する傾向が見られ、特に地点 10、13 及び 19 では増加傾向が顕著で、値も高かった(最大 3.9~6.1 mg/L)。また、春期の窒素形態はアンモニア性窒素が主であった。

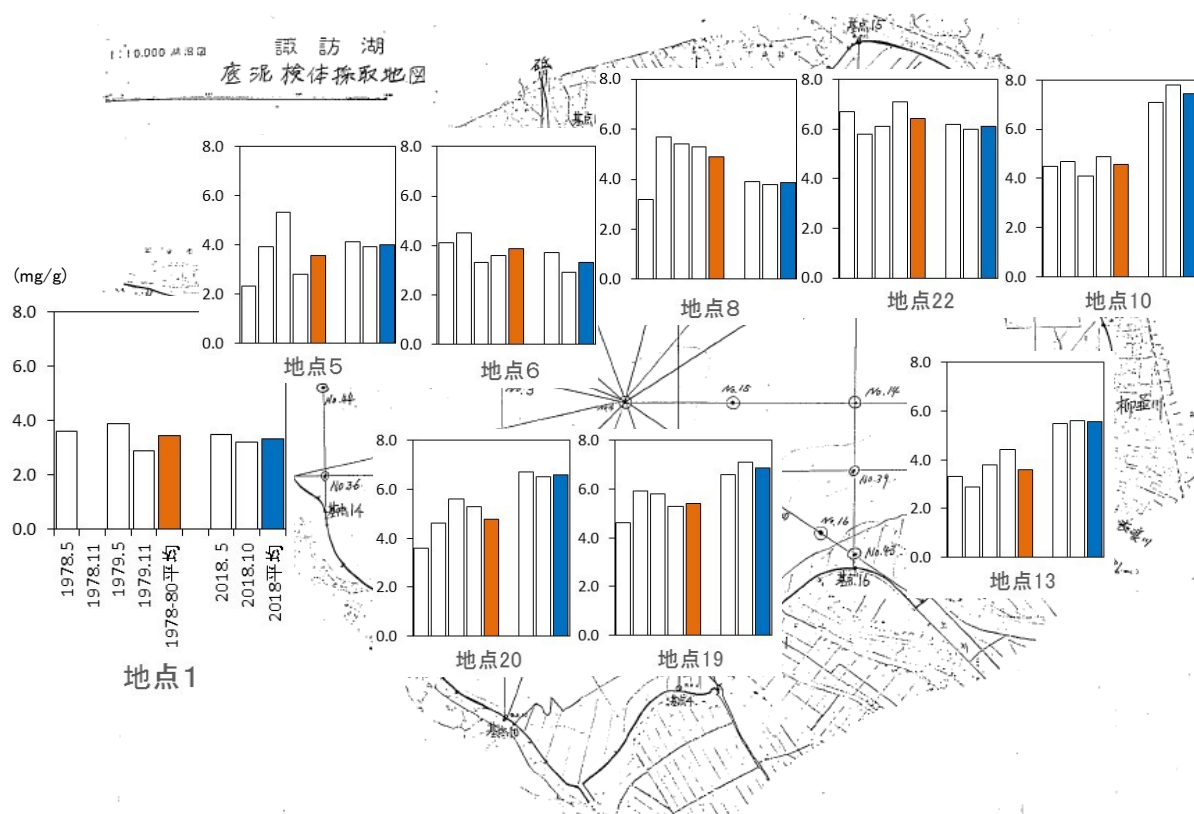


図 6 底質表層の全窒素の湖内(沿岸域)分布及び過去調査との比較

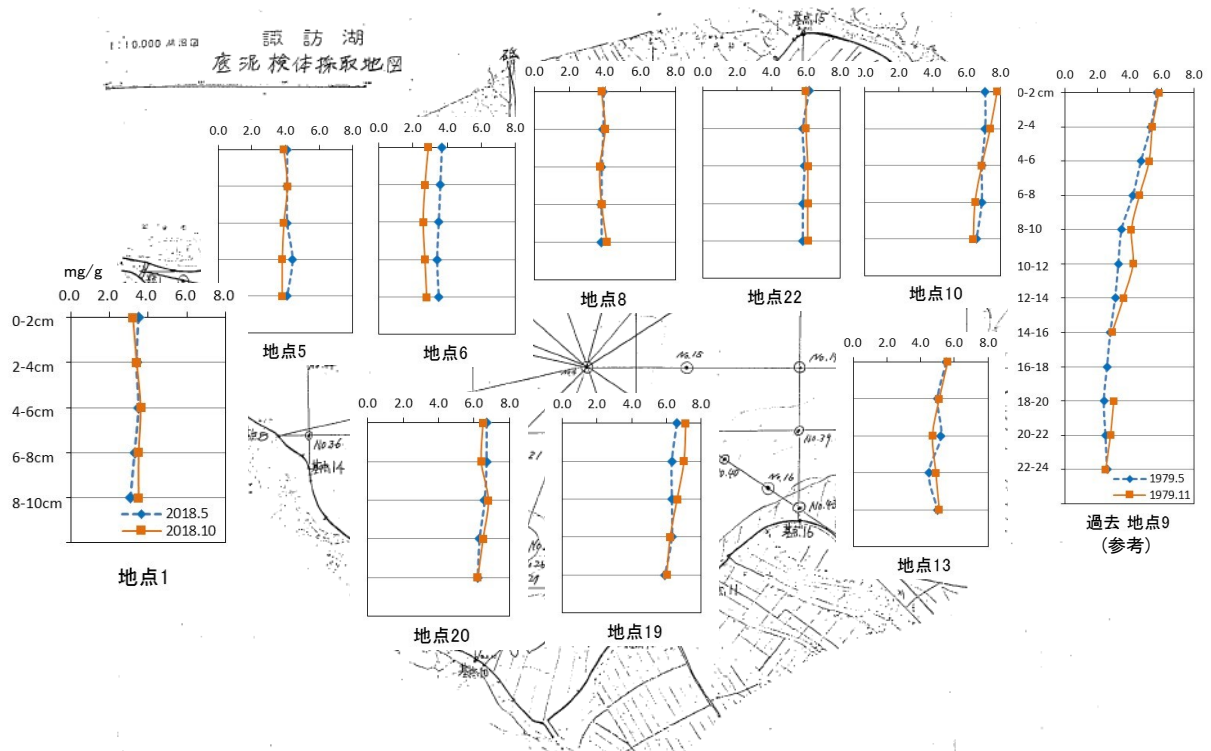


図7 底質の全鉛素の鉛直分布

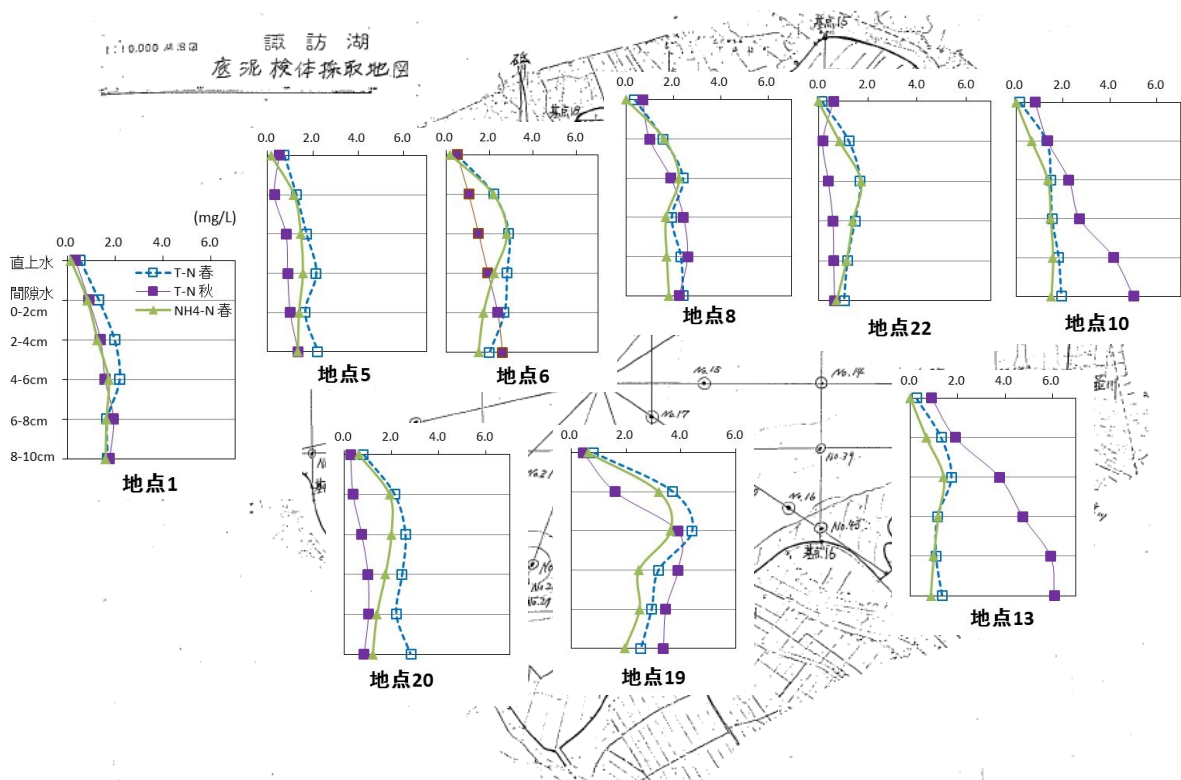


図8 間隙水の窒素の鉛直分布

<強熱減量>

底質表層(0-2 cm)の強熱減量の測定結果及び過去の調査結果(1978-1980)との比較を図9に示す。底質表層の強熱減量の2018年平均値は、1978-80年平均値に対し80%~117%(全地点平均98%)で、過去の調査結果と比較して全地点平均は同程度であるが地点毎に傾向は異なっていた(低い傾向：地点6、8及び22、同程度：地点1、5、19及び20、高い傾向：地点10及び13)。また、釜口水門~古川河口沖までの沿岸域北西部(地点1~8)の2018年平均値は、他の地点に比べて低い値であった(地点1~8：11~13%、地点10~22：15~19%)。季節変動について、過去調査では大きかったが、本調査では小さかった

底質の鉛直方向(0-10 cm)の強熱減量の測定結果を図10に示す。鉛直方向の強熱減量は、地点毎に0-10cmまで概ね一定値であった。一方、過去調査の地点9では深さ方向に減少傾向であった。季節変動について、過去調査では大きかったが、本調査では小さかった。

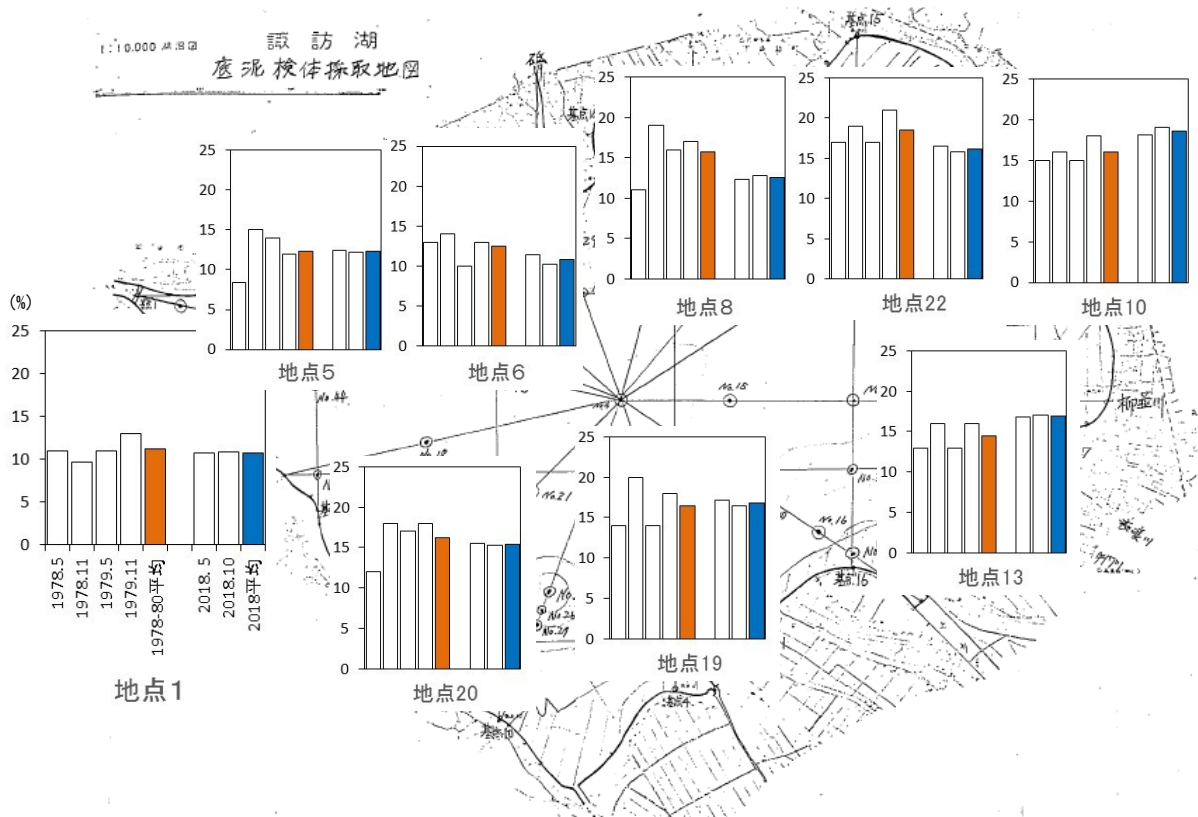


図9 底質表層の強熱減量の湖内(沿岸域)分布及び過去調査との比較

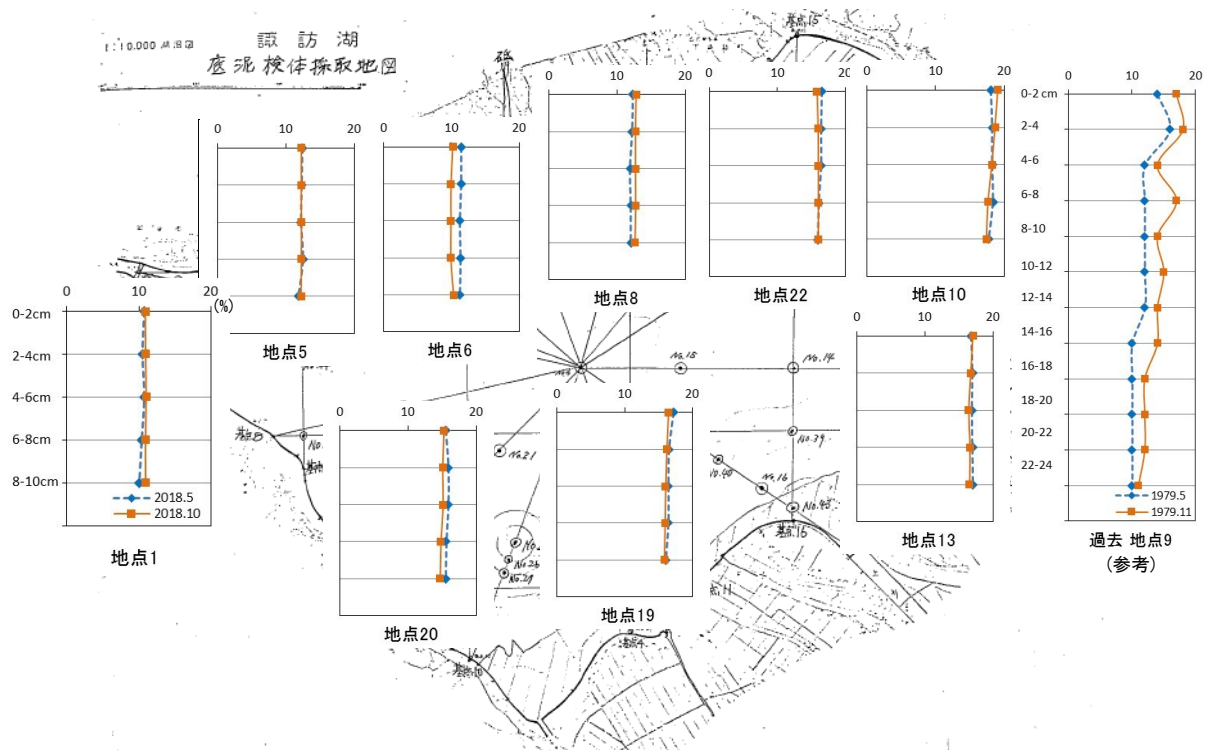


図 10 底質の強熱減量の鉛直分布

<全硫化物>

有機物の分解環境によっては、硫化水素による底生生物への影響が懸念されるため、そのポテンシャルとして全硫化物を調査した。測定結果を図 11 に示す。沿岸域全域的に秋期の方が濃度が高く(対春期比 140~420%、地点 6 を除く)、季節変動が顕著に見られた。特に、秋期の地点 10、19~22 で高い濃度であった(0.70~0.93 mg/g-dry)。この季節変動は、上川河口付近で継続して実施している覆砂場所モニタリング調査(2017~)においても同様に確認されている。

[参考] 水産用水基準値：海域では 0.2 mg/g-dry 以下

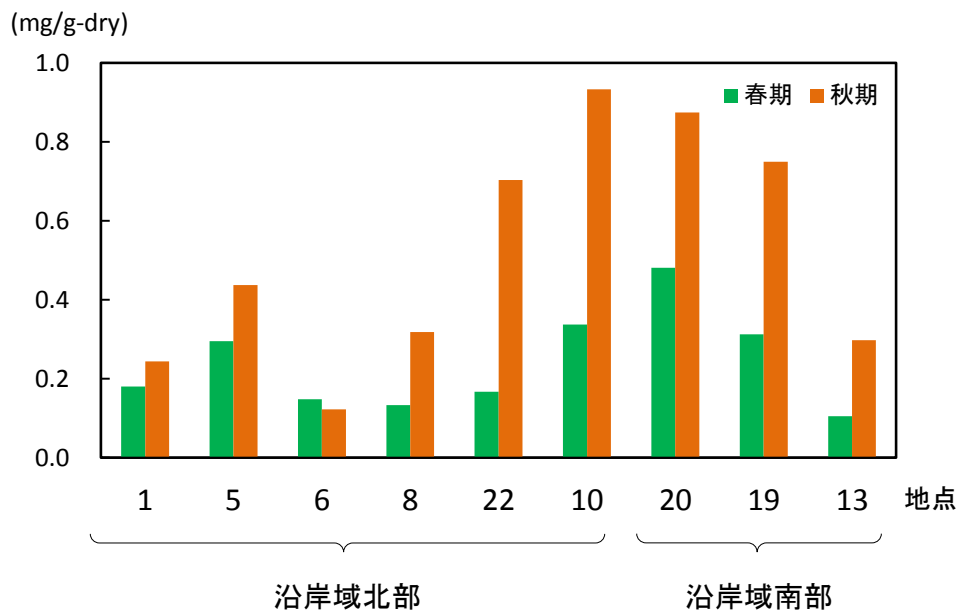


図 11 底質の全硫化物の測定結果

11.3.2. 底質酸素消費速度調査

測定結果を表 4、図 12 に示す。酸素消費速度は、DO 経時変化図の近似曲線の傾きが段階的に変化していたため、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、直上水に用いた試験水についても同条件で 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。

夏期の調査では、湖心の酸素消費速度は平均で 1.74 g/m²/d、塚間川沖 200m は平均 1.60 g/m²/d、上川河口付近は平均 1.10 g/m²/d(4.2.3.3. 参照)であった。表 4 に示す底泥表層(0-1cm)の強熱減量との関係について、強熱減量の値が高い湖心、塚間川沖 200m で酸素消費速度が大きく、底泥に含まれる有機物量が多いと高い酸素消費速度となる傾向が見られた。また、塚間川沖 200m については、底泥コア表面に堆積していた植物プランクトンが酸素消費を促進したと考えられる。

DO 連続測定結果(2.3. 参照)より、湖心では 8 月下旬～採泥日(9/3)まで底層が貧酸素状態(<3 mg/L)にあり底泥表面が嫌気的環境下であったことから、湖心の酸素消費速度試験において培養初期(概ね 10 時間以内)に観測された著しい DO の減少(図 13)は、還元性物質による酸素消費に起因している可能性がある。また、図 13 に示す湖心の底泥コアサンプルの酸素消費速度について、本測定条件下(水柱高さ 25 cm、酸素供給無し)では、DO 飽和状態から約 30 時間程度で貧酸素状態(<3 mg/L)になることが確認された。

また、底泥の不均一性を考慮して測定値のバラつきを確認したところ、湖心、上川河口付近の変動係数は 11～16%であり、基準はないが変動係数 20%程度を目安とすれば妥当な範囲であった。なお、変動係数が 20%以上であった塚間川沖 200m については、底泥コア表面に堆積した植物プランクトンの影響でバラつきが大きくなったと考えられる。

表 4 酸素消費速度測定結果 (g/m²/day)

試料名	サンプル数	最小値	最大値	平均値	CV %	採泥日	水温 (°C)	強熱減量 (%)
湖心・夏期	5	1.56	2.00	1.74	11	9/3	20.9	14.4
塚間川沖200m・夏期	4	1.11	2.09	1.60	27	9/17	23.2	12.2
上川河口付近・夏期	4	0.89	1.31	1.10	16	7/24	23.6	10.8
上川河口付近・秋期	6	0.72	1.01	0.82	13	10/24	14.5	10.6

※水温：現地の底層水水温、強熱減量：底泥コアの表層 0-1 cm の測定値

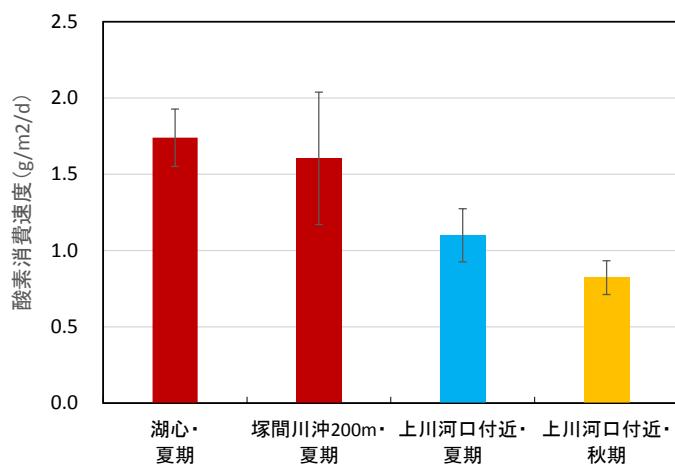


図 12 酸素消費速度(エラーバーは測定値の標準偏差を示す)

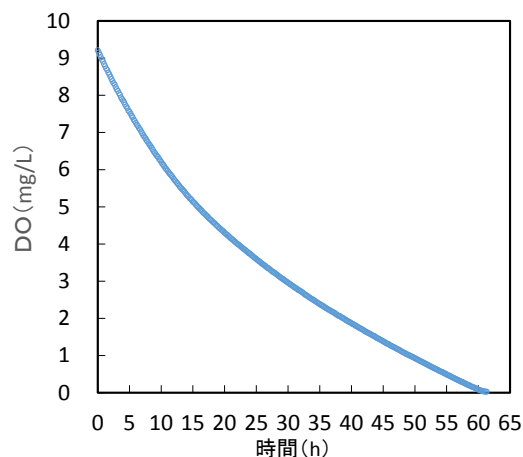


図 13 DO 経時変化(湖心)

11.4. 考察・まとめ

湖内沿岸域において不攪乱柱状採泥コアを採取し、鉛直方向の底質性状の実態及び過去からの変化を把握した。

底質表層の全りん含有量は、過去調査と比較して沿岸域全般で低い傾向であった。また、過去調査では季節変動が顕著に見られたが本調査では小さかった。鉛直分布について、過去調査が深さ方向に減少傾向であるのに対し、本調査では地点毎に 0-10 cm まで概ね一定値であった。このような底質の変化は、1979 年の諏訪湖流域下水道の供用開始により湖内へのりん流入負荷量が大幅に減少したこと(2018 年 3 月末下水道普及率 99%)、湖水中のりん濃度の減少・水質改善による植物プランクトンの増殖抑制(死滅により湖底へ沈降・堆積)などが要因の一つと考えられる。

また、全りん含有量の 2018 年の水平分布から、湖内北西部の地点の値が他の地点に比べて低い傾向が見られた。この水平分布の特徴について、信州大学が調査した底質表層の粒度分布測定データ(2016 年秋)※1によると湖内北西部の地点の平均粒径は平均 98 μm で他の地点(平均 28 μm 、地点 13 除く)より大きく、底質粒子の表面積が小さいこと、また主要流入河川について、湖内南部に流入する上川、宮川と比較して北部に流入する横河川、砥川の汚濁負荷が小さいことなどが影響している可能性が考えられる。なお、全窒素含有量、強熱減量及び全硫化物の値についても全りんと同様の水平分布の特徴が見られた。

一方、底質表層の窒素含有量は、過去と比較して同程度又は高い傾向が多く地点で見られた。特に増加傾向が大きい地点 10 及び 13 (強熱減量も同様)について、1980 年頃水生植物の分布域は観察されなかったが 2000 年頃からヒシが大量に繁茂し、現在、同地点ではヒシやクロモが繁茂しており、栄養塩類を固定化したヒシ等の堆積が一つの要因として考えられる。今後、水生植物帯における調査を重点的に実施し底質性状との関係を評価したい。

酸素消費速度調査については、R1 年度に初めて調査を実施し、湖心及び沿岸域の測定データが得られ、またデータ数は少ないが底泥コア表面の強熱減量と一定程度の正の相関が見られた。R2 年度も継続して調査を実施し湖内の実態把握を進める予定である。

(参考文献)

※1 吉原茜(2018)：諏訪湖底質における形態別リンの分布，信州大学理学部物質循環学科平成 30 年度卒業論文