

第8章 底質環境に関する調査

環境保全研究所水・土壌環境部

8.1. 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。

8.2. 調査内容

8.2.1. 沿岸域等底質把握調査

8.2.1.1. 調査概要

本調査では、諏訪湖沿岸域の底質性状の過去からの変化や水生植物繁茂帯における底質性状の実態について、調査を実施した。それぞれの調査概要を以下に記載する。

- 沿岸域の実態把握*

過去の調査(1978-1980)から選定した沿岸域 10 調査地点において、鉛直方向の底質性状を調査し、過去からの変化を把握した。〔調査時期：2期（春・秋）、2018年〕

※ 調査結果の掲載先：「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」

- 水生植物帯の実態把握

水生植物繁茂帯内外（7調査区 14 地点）の底質性状(鉛直方向)の実態を調査し、繁茂域内と域外を比較した。〔調査時期：2期（春・秋）、2019～2020年〕

- 過去のシジミの生息域の実態把握

かつてシジミが採れたエリアから選定した沿岸域 3 調査地点において、底質表層の底質性状の現状、実態を調査した。〔調査時期：2期（春・秋）、2018～2019年〕

8.2.1.2. 調査地点

水生植物帯の実態把握については、ヒシ、クロモ等の水生植物繁茂帯から7調査区を選定し（ヒシ帯：4調査区、クロモ帯：2調査区、他[ヒロハノエビモ、ササバモ、セキシウモ等]：1調査区）、それぞれ水生植物繁茂域内の調査地点及び対照地点として繁茂域外の調査地点を選定した（表1、2及び図1）。

過去のシジミの生息域の実態把握については、かつてシジミが採れた浜に関する資料（県諏訪建設事務所提供）から調査エリアを選定し、調査エリア周辺の現地調査、水深調査から水深 2m 程度の3調査地点を選定した（表3及び図2）。

表1 調査地点一覧（水生植物帯の実態把握）

調査区	地点名	水深(m) ^{※1}	繁茂する水生植物 ^{※2}
① (諏訪市大和沖)	ヒシ①	2.0、1.9	ヒシ
	ヒシ①対照	2.7、2.8	-
② (下諏訪町高浜沖)	ヒシ②	2.2、2.2	ヒシ
	ヒシ②対照	3.3、3.1	-
③ (岡谷市湊沖)	ヒシ③	2.3、2.2	ヒシ
	ヒシ③対照	3.9、3.9	-
④ (岡谷市長地沖)	ヒシ④	2.3、2.3	ヒシ
	ヒシ④対照	3.2、3.0	-
⑤ (諏訪市日赤沖)	クロモ⑤	1.7、1.7	クロモ
	クロモ⑤対照	2.8、2.8	-
⑥ (岡谷市湖畔沖)	クロモ⑥	2.3、2.7	クロモ
	クロモ⑥対照	3.7、3.7	-
⑦ (諏訪市豊田沖)	自然植生区⑦	0.8、0.9	クロモ、ヒロハノエビモ、 ササバモ、セキシヨウモ
	自然植生区⑦対照	4.7、4.9	-

※1 採泥時(春期、秋期)の水深 ※2 採泥時に確認された水生植物

表2 調査地点の位置情報（水生植物帯の実態把握）

調査地点	位置	緯度	経度
ヒシ①	北澤美術館沖 約 150 m	36° 03' 18.40"	138° 06' 35.30"
ヒシ①対照	(調査地点間の距離 約 520 m)	36° 03' 20.50"	138° 06' 15.00"
ヒシ②	高浜信号沖 約 130 m	36° 03' 57.50"	138° 05' 55.20"
ヒシ②対照	(調査地点間の距離 約 260 m)	36° 03' 50.10"	138° 05' 50.90"
ヒシ③	湊湖畔公園沖 約 70 m	36° 02' 00.88"	138° 04' 21.91"
ヒシ③対照	(調査地点間の距離 約 180 m)	36° 02' 04.88"	138° 04' 27.50"
ヒシ④	諏訪湖ハイツ沖 約 50 m	36° 03' 35.20"	138° 04' 12.30"
ヒシ④対照	(調査地点間の距離 約 170 m)	36° 03' 33.00"	138° 04' 18.70"
クロモ⑤	諏訪赤十字病院沖 約 130 m	36° 02' 41.49"	138° 06' 16.74"
クロモ⑤対照	(調査地点間の距離 約 200 m)	36° 02' 44.86"	138° 06' 09.70"
クロモ⑥	塚間川沖 約 240 m	36° 03' 12.49"	138° 03' 37.48"
クロモ⑥対照	(調査地点間の距離 約 220 m)	36° 03' 08.18"	138° 03' 44.62"
自然植生区⑦	豊田終末処理場とガラスの里美術館の中間沖 約 230 m	36° 02' 03.40"	138° 04' 55.10"
自然植生区⑦対照	(調査地点間の距離 約 270 m)	36° 02' 08.70"	138° 04' 45.30"

表3 調査地点一覧（過去のシジミの生息域の実態把握）

地点名	位置	水深(m)	緯度	経度
湊	岸から 20 m	2.0	36° 01' 53.69"	138° 04' 33.41"
十四瀬川 (河口)	十四瀬川河口から約 200 m 沖、 赤砂崎公園西側	2.1	36° 03' 36.37"	138° 04' 24.41"
砥川東	赤砂崎公園東側、岸から 10 m	2.2	36° 03' 37.04"	138° 04' 50.23"



図1 調査地点図 (水生植物帯の実態把握)



図2 調査地点図 (過去のシジミの生息域の実態把握)

8.2.1.3. 調査時期

- 水生植物帯の実態把握
春期（4～6月）及び秋期（10～11月）、2019～2020年に採泥を実施した。
- 過去のシジミの生息域の実態把握
春期（3～5月）及び秋期（12月）、2018～2019年に採泥を実施した。

8.2.1.4. 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。また、全硫化物及び粒度分布測定用試料は、エクマンバージ型採泥器でポリエチレン製容器(12L)に各地点3回採取したものを混合し、試料とした。

<鉛直方向の成分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。

8.2.1.5. 測定項目及び分析方法

測定項目及び分析方法を表4に示す。

表4 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(IL)	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

8.2.2. 底質酸素消費速度調査

8.2.2.1. 調査地点

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～R2年度の2カ年で湖内の調査を実施した。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)及び上川河口域とした。調査地点を表5及び図3に示す。

表5 調査地点一覧

地点	水深(m)	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連続測定地点	36° 02' 24.53"	138° 04' 48.57"
上川河口域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"

※上川河口域の調査地点：第3章覆砂場所モニタリング調査地点(3.2.2.項)参照



図3 調査地点図

8.2.2.2. 調査時期

- 環境基準点等沖合の地点：夏期(8～9月)
- 上川河口域：夏期(7～8月)、秋期(10～11月)

8.2.2.3. 採泥方法

不攪乱柱状採泥器による柱状採泥(8.2.1.4. 参照)

8.2.2.4. 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4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

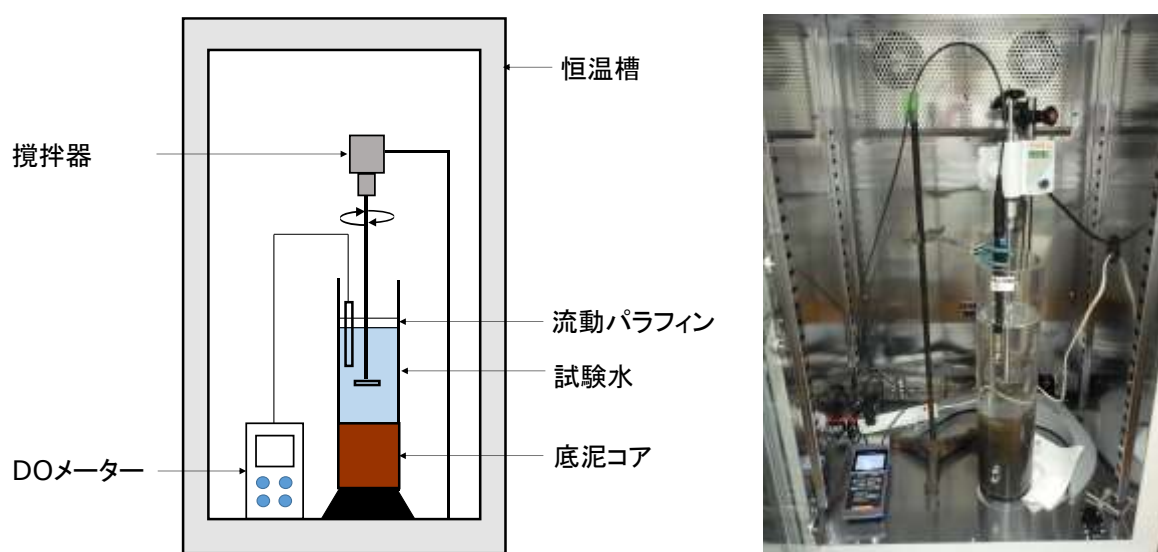


図4 酸素消費速度 実験装置 (左：模式図、右：写真)

8.3. 調査結果

8.3.1. 沿岸域底質把握調査

8.3.1.1. 水生植物帯の実態把握

調査地点の概況について、水生植物繁茂域内の調査地点では6月～9月頃に表1に示す水生植物が繁茂し、対照地点では水生植物の繁茂は確認されなかった。

以下、測定項目ごとに調査結果を示す。なお、測定データの詳細は資料編に示す。

<窒素>

底質表層(0-2 cm)の全窒素含有量の測定結果(2019～2020年)を図5に示す。また、調査区①、②、④及び⑦については、同地点における2013年の調査結果^りを図中に併記した(強熱減量、りんの調査結果について同様)。

水生植物繁茂域内の地点と域外の対照地点を比較すると、ヒシ帯について、湖内東部及び北部のヒシ繁茂域内の地点ヒシ①、ヒシ②、ヒシ④の濃度(平均値)は、それぞれ5.7、7.5、4.7 mg/gでヒシ②が最も高く、対照比はそれぞれ110%、132%、134%で対照地点と比較して高い傾向が見られた(2013年の調査区①、②についても同傾向)。湖内西部の地点ヒシ③の濃度(平均値)は、5.8

mg/g で対照地点と同程度であった。また、本調査結果と 2013 年の調査結果を比較すると、対照地点では変化が見られないが、ヒシ②、ヒシ④では 2013 年比で濃度の増加傾向が見られた(2013 年比 ヒシ②111%、ヒシ④138%)。また、ヒシ②付近で信州大学が実施した調査(2019 年)においても同様の増加傾向が確認されている(2012 年比 1.5 倍)。なお、ヒシ①、ヒシ②付近のヒシ繁茂域内の地点 13、地点 10(沿岸域実態把握)の 2018 年の濃度は、それぞれ 5.6、7.5 mg/g であり本調査結果と同程度の値であった。

一方、クロモ帯等について、クロモ繁茂域内の地点クロモ⑤、クロモ⑥の濃度(平均値)は、それぞれ 2.8、3.9 mg/g、対照比 63%、65%であり、対照地点と比較して低い傾向が見られた。また、クロモ⑤の経年変化について、同一地点である覆砂場所モニタリング調査・地点⑥の調査結果(3.2.3.2.項 参照)から、2016 年から 2020 年まで 2.6~3.4 mg/g の範囲で推移し、やや減少傾向が見られている。また、クロモ、ヒロハノエビモ、ササバモ、セキシウモ等が繁茂する自然植生区⑦の濃度(平均値)は 0.34 mg/g であり、対照地点より顕著に低い値であった(対照比 5%)。

水生植物帯別に底質濃度の範囲を見ると、ヒシ帯 4.7~7.5 mg/g、クロモ帯 2.8~3.9 mg/g、自然植生区 0.34 mg/g であり、クロモ帯よりヒシ帯の方が濃度が高い傾向であった。

季節変動について、ヒシ繁茂域内の地点(ヒシ①、ヒシ②、ヒシ④、地点 10、13)においては、春期より秋期の方が濃度が高く、2013 年も同様の傾向が見られており、ヒシの枯死・堆積による影響が考えられる。また、春期より秋期の方が濃度が高い傾向は、クロモ⑤、ヒシ③対照、ヒシ⑦対照、地点 19(沿岸域実態把握)においても見られた。

底質の鉛直方向(0-10 cm)の全窒素含有量の測定結果を図 6 に示す。

全般的に底泥の表層付近で季節変動が見られ、ヒシ帯(ヒシ①、ヒシ②、ヒシ④)では春期に鉛直方向の変化が小さく、秋期に表層 0-2cm で濃度が高くなる傾向が見られたが、対照地点では季節変動が見られず鉛直方向に概ね一定値であった。上述したヒシの枯死・堆積の影響が底泥表層 0-2cm に現れていると考えられる。なお、ヒシ③では傾向が異なり、深さ方向に 4cm 以深で低下する変化が見られ、春期より秋期の方が濃度が低かった。

クロモ帯等について、クロモ⑤では秋期の方が、クロモ⑥では春期の方が表層付近の濃度が高く、季節変動に一定の傾向は確認されなかった。自然植生区⑦では、鉛直方向に低濃度で概ね一定値であった。その他変化があった地点は、ヒシ③対照、自然植生区⑦対照で、表層付近(0-2 cm 又は 0-4 cm)で春期より秋期の方が濃度が高い傾向が見られた。

間隙水の全窒素及び各態窒素の測定結果を図 7 に示す。各態窒素について、NO₃-N 濃度は直上水で 0.05 未満~0.58 mg/L、底泥間隙水で概ね 0.05 mg/L 未満、NO₂-N 濃度は全試料で 0.03 mg/L 以下であり、間隙水の無機態窒素の形態は NH₄-N が主であったため NH₄-N の値のみ図中に示す。自然植生区⑦は、底泥を深度別に分画する過程で砂質のため間隙水が底泥コアから抜けてしまい採取できなかったため欠測とした(りんについても同様に欠測)。

間隙水中の窒素成分の構成について、全窒素に占める無機態窒素の比率は全サンプル平均で 55%、このうち概ね 95%以上がアンモニア性窒素の形態であり、また有機態窒素の比率は 45%であった。間隙水の窒素濃度の鉛直分布は、アンモニア性窒素と全窒素は概ね類似の深度パターンを示し、季節変動が顕著に見られ、全般に底泥深さ方向に濃度が高くなる傾向が見られた(地点別の最大濃度：NH₄-N 0.54~4.6 mg/L、T-N 1.8~6.3 mg/L)。一部の地点(ヒシ③、クロモ⑥、⑥対照)では、春期に表層下 4-6cm で濃度のピーク形成が見られた。

季節変動について、春期の方が濃度が高い地点はヒシ②、②対照、④対照、クロモ⑤、⑤対照、

クロモ⑥、⑥対照で、秋季の方が濃度が高い地点はヒシ①、③対照であり、他の地点では顕著な変化は見られなかった。対照地点と比較して、水生植物繁茂域内の方が濃度が高い傾向が見られた地点は、ヒシ①秋期、ヒシ③春期、ヒシ④秋期、クロモ⑤秋期であった。他の地点では同程度、ヒシ③秋期のみ対照の方が高い傾向であった。このような間隙水濃度の傾向と後述する酸化還元電位(図 16)との関係について、全般的には間隙水濃度が高いサンプルで比較的 ORP 値が低い傾向が見られた。

また、底泥間隙水濃度と底泥から湖水への底泥溶出量の関係について、底泥表面付近の間隙水 $\text{NH}_4\text{-N}$ の鉛直濃度勾配から Fick の拡散方程式を用いて今井ら(H27)³⁾の算出方法により $\text{NH}_4\text{-N}$ の底泥溶出フラックスを試算した(図 8)。試算した溶出フラックス値から、春期は多くの地点で 1~2 $\mu\text{gN}/\text{cm}^2/\text{day}$ 程度でヒシ④が最大の値 3.1 $\mu\text{gN}/\text{cm}^2/\text{day}$ であり、秋期は 0.5 程度以下の地点が多く 1.5~4 程度の地点がヒシ①、ヒシ④、ヒシ③対照(最大 3.9 $\mu\text{gN}/\text{cm}^2/\text{day}$)であった。対照と比較して、ヒシ帯ではヒシ④の春期及び秋期、ヒシ①の秋期で対照よりヒシ繁茂域内の方が溶出フラックスが高い傾向が見られた。季節変動は、多くの地点で春期の方が高い傾向が見られ、ヒシ①、ヒシ③対照では秋期の方が高い値であった。なお、当所実施の過去の調査研究(1980)⁴⁾による測定値(溶出試験)では、湖心で 1.5~3.6 $\mu\text{gN}/\text{cm}^2/\text{day}$ であった。今後、底泥溶出量の夏期を含む季節変動や湖内広域の実態について、定量的な把握が課題と考えられる。

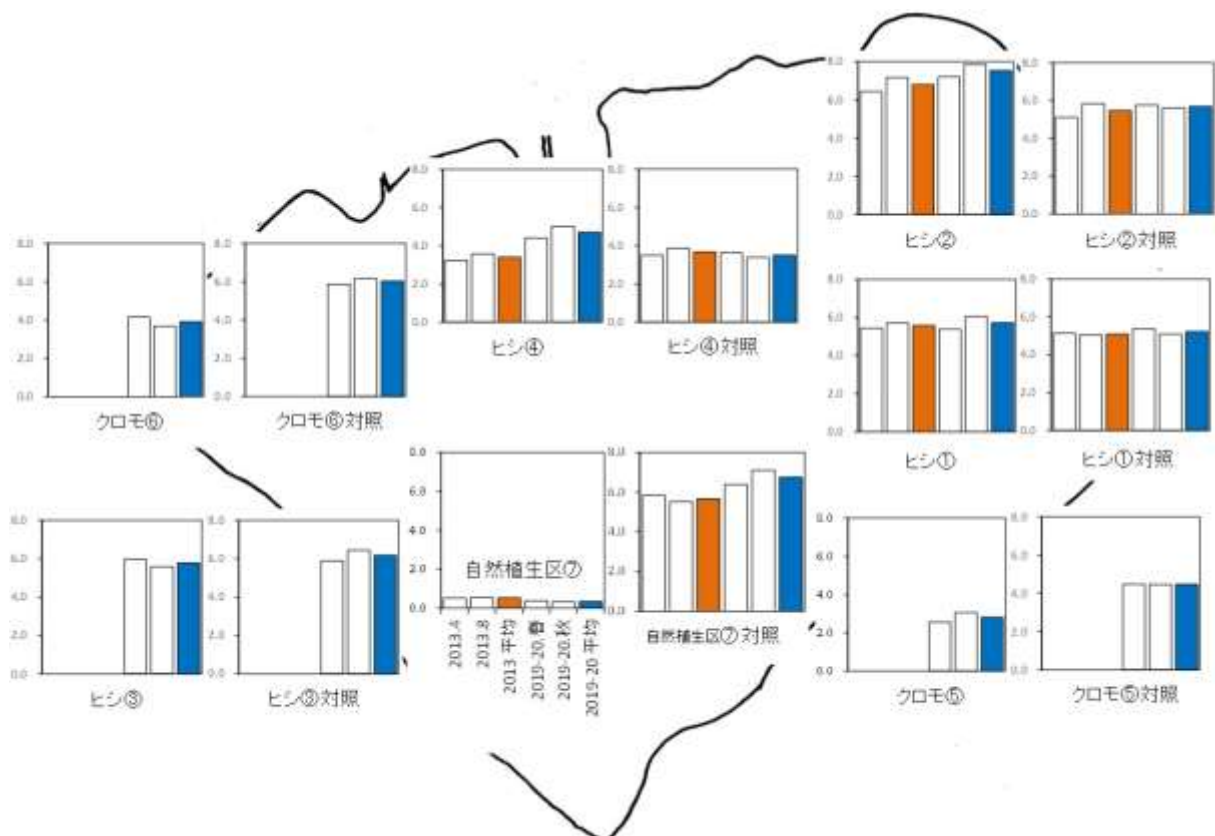


図 5 底質表層の全窒素【水生植物帯内外】

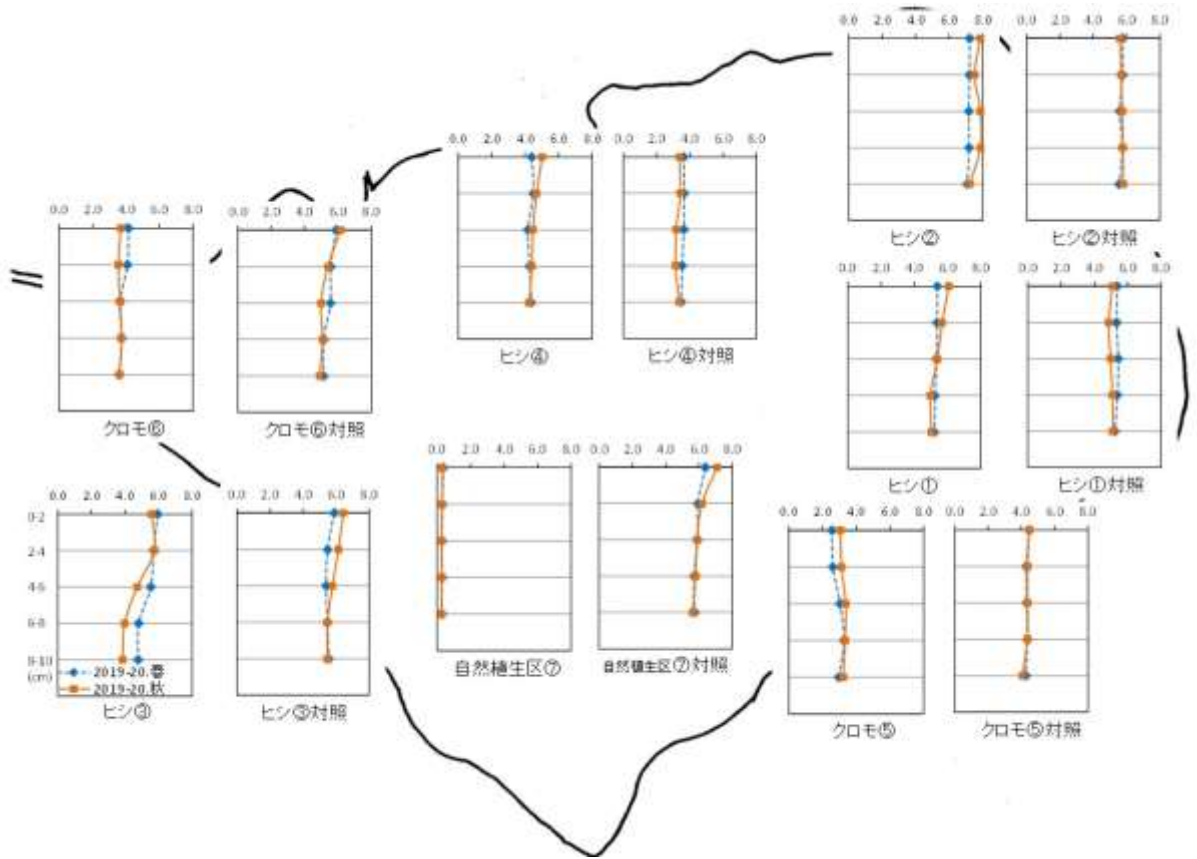


図6 底質の全窒素の鉛直分布【水生植物帯内外】

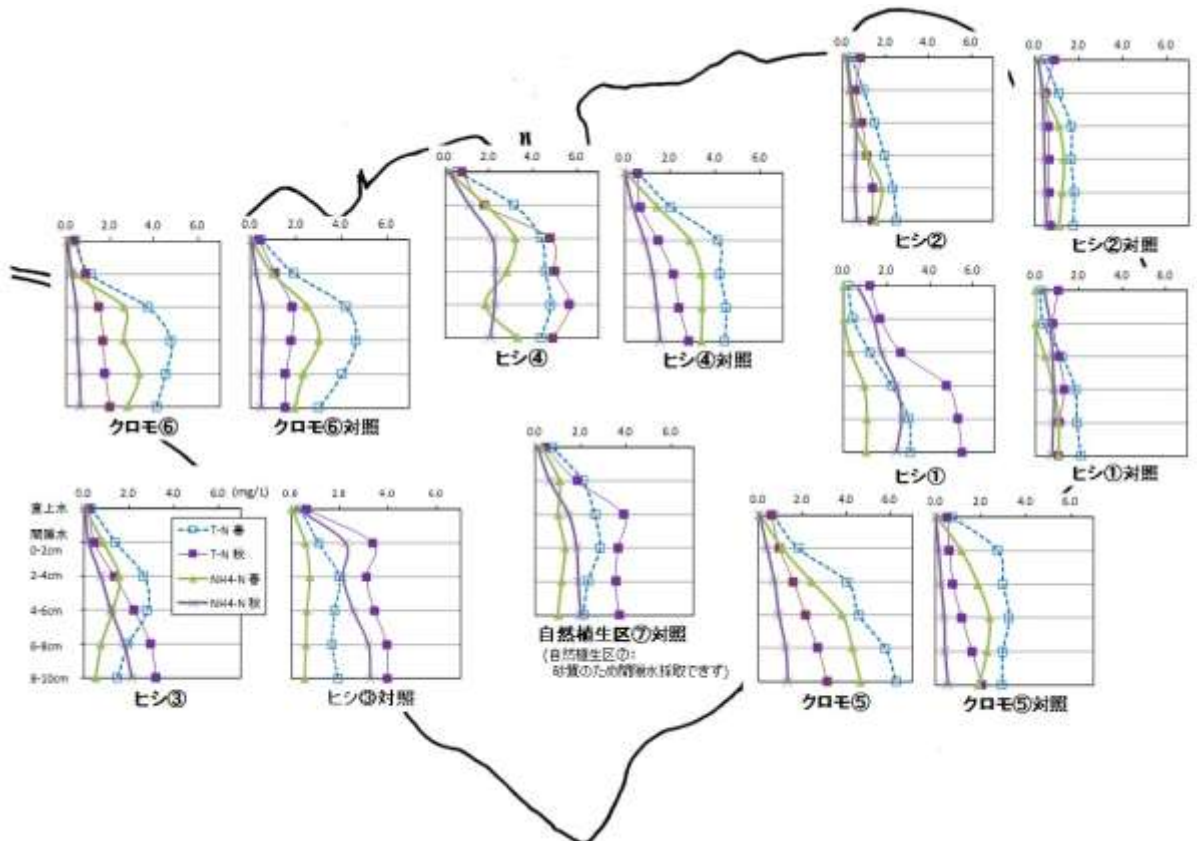


図7 間隙水の窒素の鉛直分布【水生植物帯の内外】

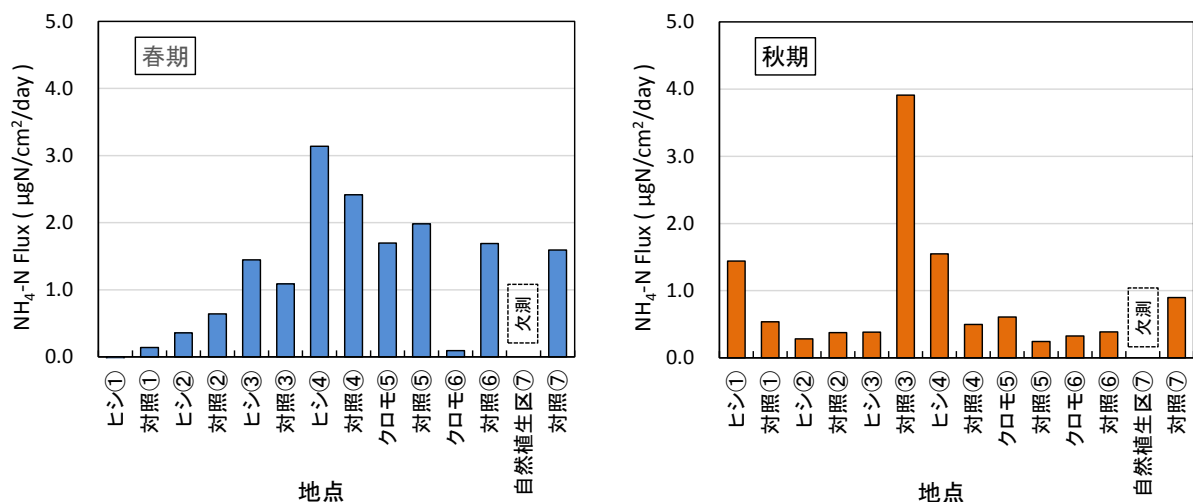


図8 NH₄-Nの溶出フラックスの試算(左図：春期、右図：秋期)

< 強熱減量 >

底質表層(0-2 cm)の強熱減量の測定結果を図9に示す。

水生植物繁茂域内の地点と域外の対照地点を比較すると、ヒシ帯について、繁茂域内の地点ヒシ①、ヒシ②、ヒシ④の値(平均値)は、それぞれ対照比112%、116%、119%であり、対照地点より高い傾向が見られた(2013年の調査区①、②で同傾向)。ヒシ③の値は、対照地点と同程度であった。また、本調査結果と2013年の調査結果とを比較すると、対照地点では変化が見られないが、ヒシ①、ヒシ②で1割程度の微増、ヒシ④で3割程度の増加傾向が見られた。

一方、クロモ帯において、クロモ⑤、クロモ⑥の値(平均値)は、それぞれ対照比74%、85%であり、対照地点と比較して低い傾向が見られた。また、過去の調査結果と比較すると、クロモ⑤と同一地点である覆砂場所モニタリング調査・地点⑥の値(平均値)は、2016年から2020年までやや減少傾向が見られている(3.2.3.2.項 参照)。なお、自然植生区⑦(クロモ、ヒロハノエビモ、ササバモ、セキショウモ等)では、対照地点より顕著に低い値であった(対照比15%)。

水生植物帯別に値(平均値)を比較すると、ヒシ帯14~18%、クロモ帯11~13%、自然植生区2.4%であり、クロモ帯よりヒシ帯の方が値が高い傾向であった。季節変動については、ヒシ①、ヒシ④、地点10(2018)、クロモ⑤で春期より秋期の方が値が高い傾向が見られた。

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。

一般的に深度パターンは、概ね全窒素に類似した傾向が見られた。ヒシ帯(ヒシ①、ヒシ②、ヒシ④)では、鉛直方向に変化が小さく、季節変動は見られなかった(対照地点も同様)。ヒシ③では深さ方向に変化が見られ(4cm以深で減少)、春期より秋期の方が値が低かった。

クロモ帯等について、クロモ⑤では表層付近で春期より秋期の方が値が高く、クロモ⑥では鉛直方向に変化が小さかった。自然植生区⑦では、鉛直方向に概ね一定値であった。その他変化があった地点は、ヒシ③対照、クロモ⑥対照、自然植生区⑦対照で、表層付近(0-2 cm)で春期より秋期の方が値が高い傾向が見られた。

以上の調査結果から、強熱減量は全窒素と類似した傾向を全般に示していた(対照比、2013年比等の変化率は全窒素より小さい)。

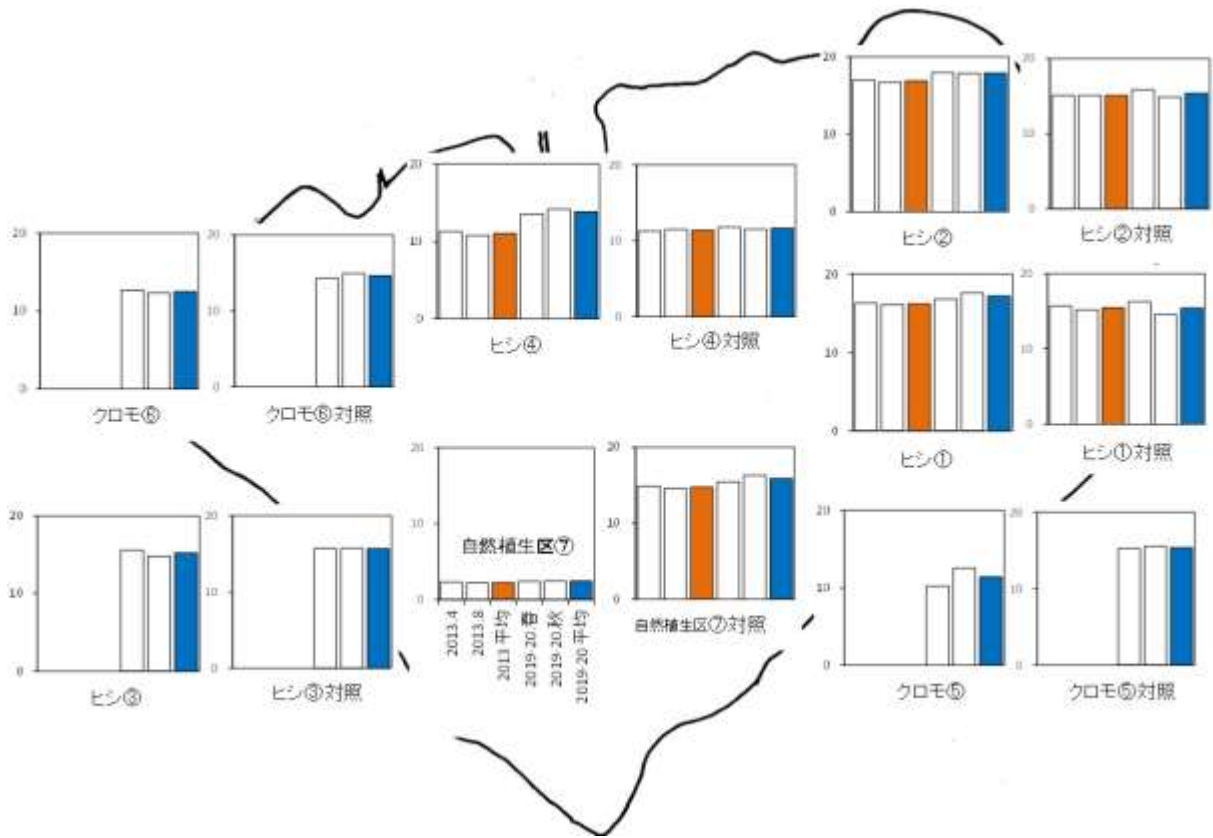


図9 底質表層の強熱減量【水生植物帯内外】

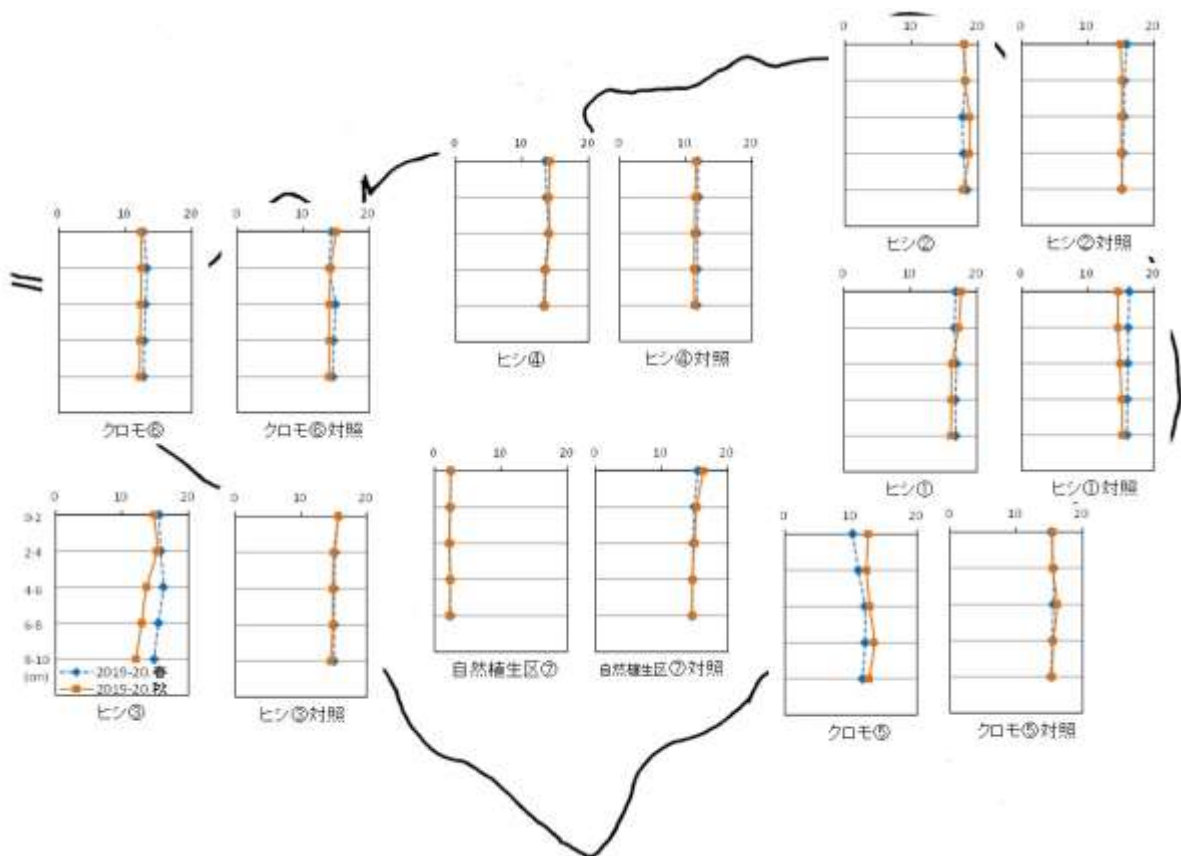


図10 底質の強熱減量の鉛直分布【水生植物帯内外】

<りん>

底質表層(0-2 cm)の全りん含有量の測定結果を図 11 に示す。

水生植物繁茂域内の地点と域外の対照地点を比較すると、ヒシ帯について、ヒシ①、ヒシ④の濃度(平均値)は、対照比でそれぞれ 108%、109%であり、対照地点と同程度又はやや高い傾向であった。ヒシ②の濃度は対照地点より低い値であったが(対照比 69%)、対照とした②対照の濃度は、同じ東部の①対照より顕著に高く、また②対照に近接する地点 22 の濃度(2.2-2.4 mg/g、沿岸域実態把握調査で最も濃度が高い)と同程度であり、調査地点由来の濃度差が現れている可能性が考えられる(2013 年も同様の傾向が見られている)。また、ヒシ③においては、対照比 71%であり、後述する粒度分布の測定結果から調査地点間の粒径の違い(ヒシ③の方が粒径が大きい)が影響していると考えられる。本調査結果と 2013 年の調査結果とを比較すると、繁茂域内、対照地点ともに同程度であり、変化は見られなかった。

クロモ帯について、クロモ⑤、クロモ⑥の濃度(平均値)は、それぞれ対照比 74%、71%であり、対照地点と比較して低い傾向が見られた。また、過去の調査結果と比較すると、クロモ⑤と同一地点である覆砂場所モニタリング調査・地点⑥の濃度(平均値)は、2016 年から 2020 年までやや減少傾向が見られている(3.2.3.2.項 参照)。なお、自然植生区⑦(クロモ、ヒロハノエビモ、ササバモ、セキショウモ等)では、対照地点より低い濃度であり(対照比 61%)、2013 年比では 2 倍程度の値であった。

水生植物帯別に底質濃度(平均値)を比較すると、ヒシ帯 1.2~1.9 mg/g、クロモ帯 1.0~1.2 mg/g、自然植生区 1.1 mg/g であり、クロモ帯よりヒシ帯の方が濃度が高い傾向であった(クロモ帯と自然植生区は同程度)。季節変動について、ヒシ繁茂域内では変動は見られず、ヒシ②対照、クロモ⑤で春期より秋期の方が濃度が高い傾向が見られた。

底質の鉛直方向(0-10 cm)の全りん含有量の測定結果を図 12 に示す。

調査地点全般について、鉛直方向に変化が小さく、概ね一定値であった。ヒシ帯では鉛直方向の変化や季節変動は見られず、ヒシ②対照で春<秋の季節変動が見られた(間隙水濃度 春>秋)。また、クロモ⑤では表層付近で春期より秋期の方が濃度が高かった。

間隙水の全りん及びりん酸態りんの測定結果を図 13 に示す(自然植生区⑦欠測)。

間隙水中のりん成分の構成について、全りに占めるりん酸態りんの比率は全サンプル平均で 52%であり、表層 0-2cm 付近(深い層より酸化還元電位が高い)では低い比率であった(平均 26%)。間隙水のりん濃度の鉛直分布は、水草帯と対照の深度パターンは類似傾向で、りん酸態りんと全りんは概ね深度パターンが一致しており、季節変動が顕著に見られた(地点別の最大濃度：PO₄-P 0.014~0.25 mg/L、T-P 0.043~0.31 mg/L)。

季節変動について、春期は調査区②、④、⑥、⑦では表層下 2-6cm で濃度のピーク形成が見られ、調査区①、③、⑤では鉛直方向に変化が小さかった。秋季は深度方向に概ね濃度が増加傾向であった。春期の方が濃度が高い地点はヒシ②、②対照、ヒシ④で、秋季の方が濃度が高い地点はヒシ①、①対照、ヒシ③、③対照、クロモ⑤、⑤対照であり、他の地点では季節変動は見られなかった。

また、水生植物繁茂域内のヒシ④の春期では、表層 0-2cm のりん濃度が対照や他の地点と比較して高く、りん酸態りんの底泥表層付近での鉛直濃度勾配から窒素項目と同様に PO₄-P の溶出フラックスを試算すると 0.04 µgP/cm²/day であり、他のサンプルは 0.01 µgP/cm²/day 程度以下であった(窒素についても春期はヒシ④が最大値)。

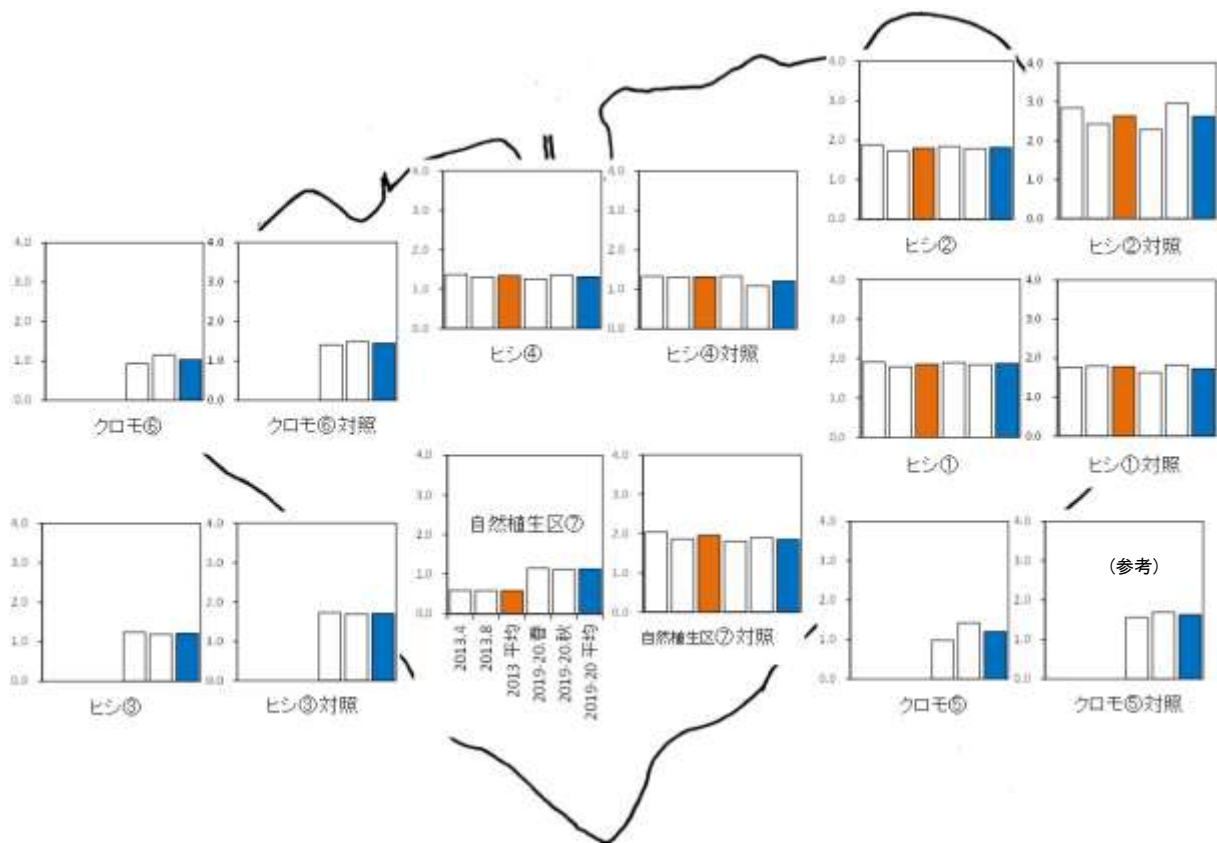


図 11 底質表層の全リン【水生植物帯内外】

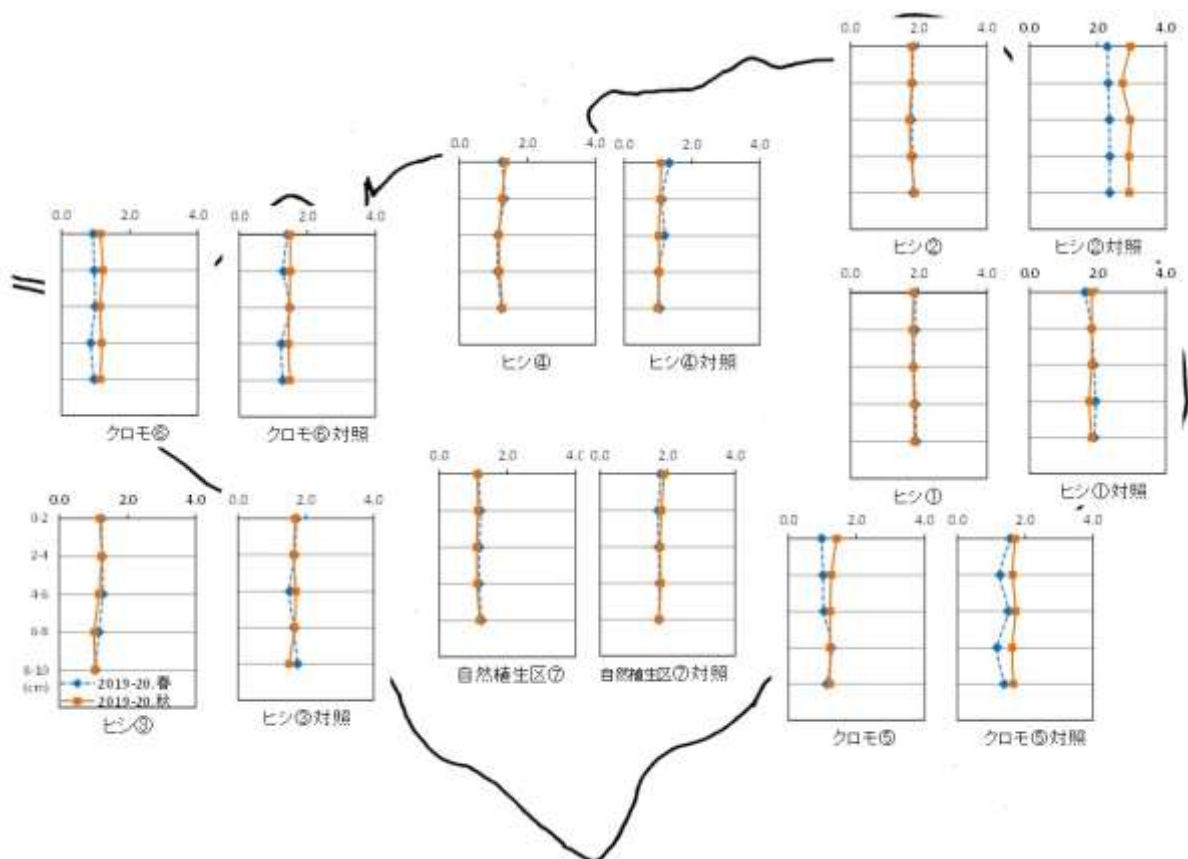


図 12 底質の全リンの鉛直分布【水生植物帯内外】

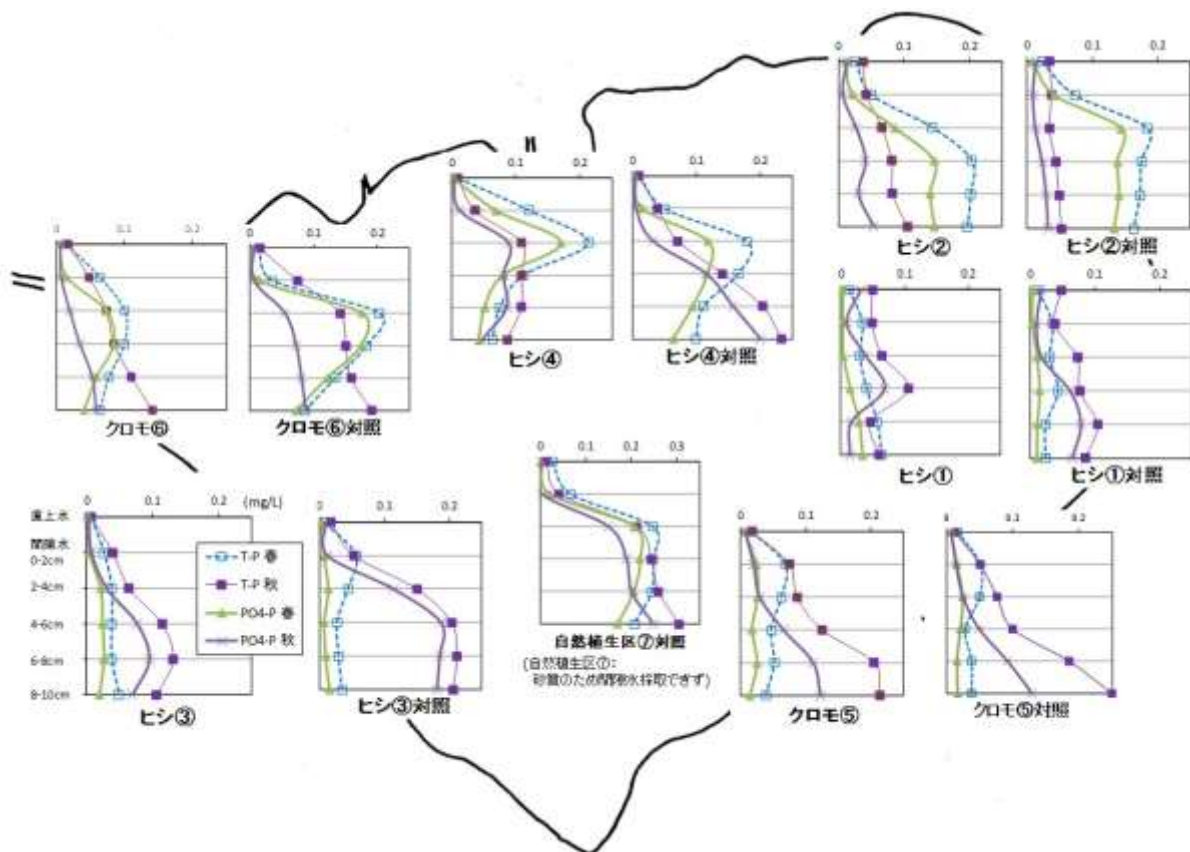


図 13 間隙水のりんの鉛直分布【水生植物帯内外】

< 粒度分布 >

底質の粒度分布の測定結果を図 14 に示す。

粒度分布の地点ごとの特徴について、ヒシ①及びヒシ②(東部ヒシ繁茂域)では泥分率※が高く(84～94%)、ヒシ④、クロモ⑤、クロモ⑥(北西部、上川河口域)では泥分率がやや高く(66～74%)、ヒシ③(西部、沿岸に近接)では泥分率が 34%(砂分 62%)、自然植生区⑦では泥分率が 1%(砂分 92%)であった。また、水生植物帯別に見ると、泥分率の範囲はヒシ帯で 35～95%程度、クロモ帯で 65～75%程度、自然植生区(クロモ、ヒロハノエビモ、ササバモ、セキシウモ等)で 1%程度であった。なお、対照地点ではいずれも泥分率が 80%以上であった。

水生植物繁茂域内の地点と域外の対照地点を比較すると(図 15)、クロモ⑤、クロモ⑥では対照地点より泥分率が低い傾向が見られた(それぞれ対照比 15%低下、20%低下)。ヒシ帯(ヒシ③除く)では概ね同程度であった。自然植生区⑦は対照地点より顕著に砂分が多かった。なお、ヒシ③では、対照地点と粒径分布の傾向が顕著に異なっており、地点由来の差と推察される。

粒径と水生植物体との関係は、全般的な傾向として、ヒシ繁茂域は泥分率が比較的高い傾向(35-95%)にあり、クロモ繁茂域(自然植生区含む)は比較的低い傾向(1-75%)であった。

※泥分率：シルト・粘土分(粒子径 <75 μ m)の割合

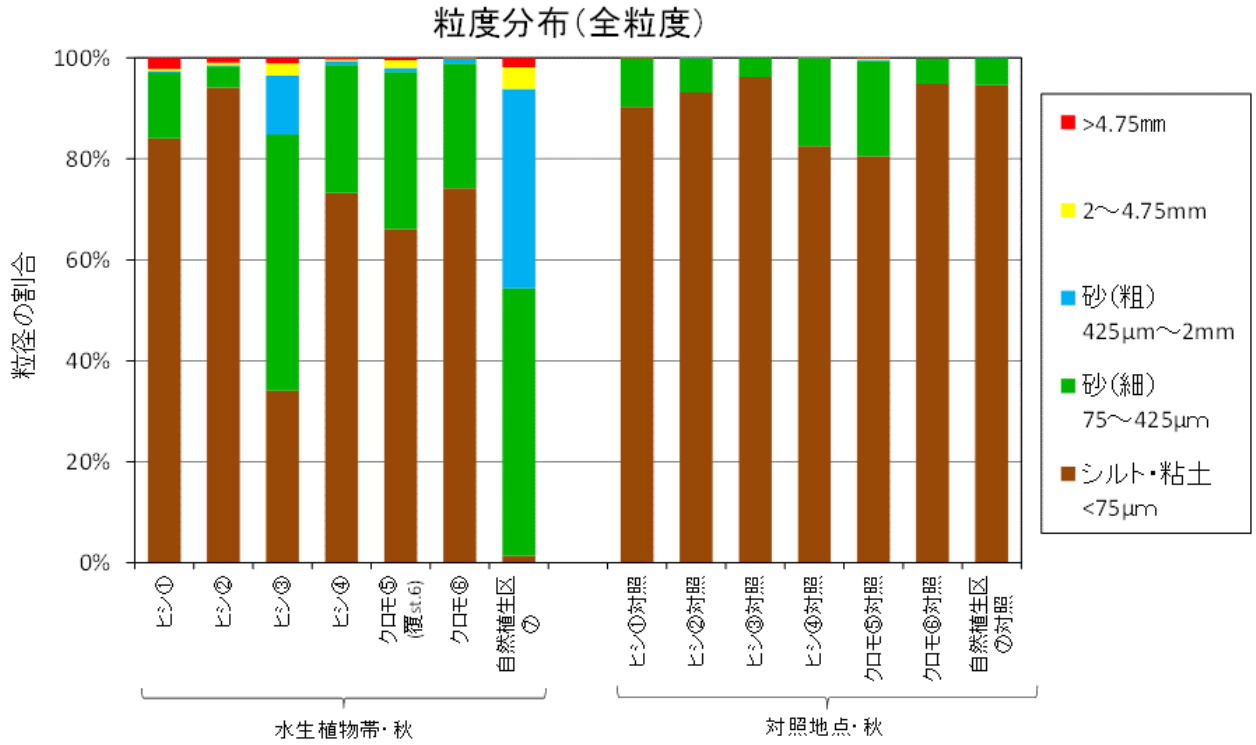


図 14 底質の粒度分布の測定結果【水生植物帯内外の比較】

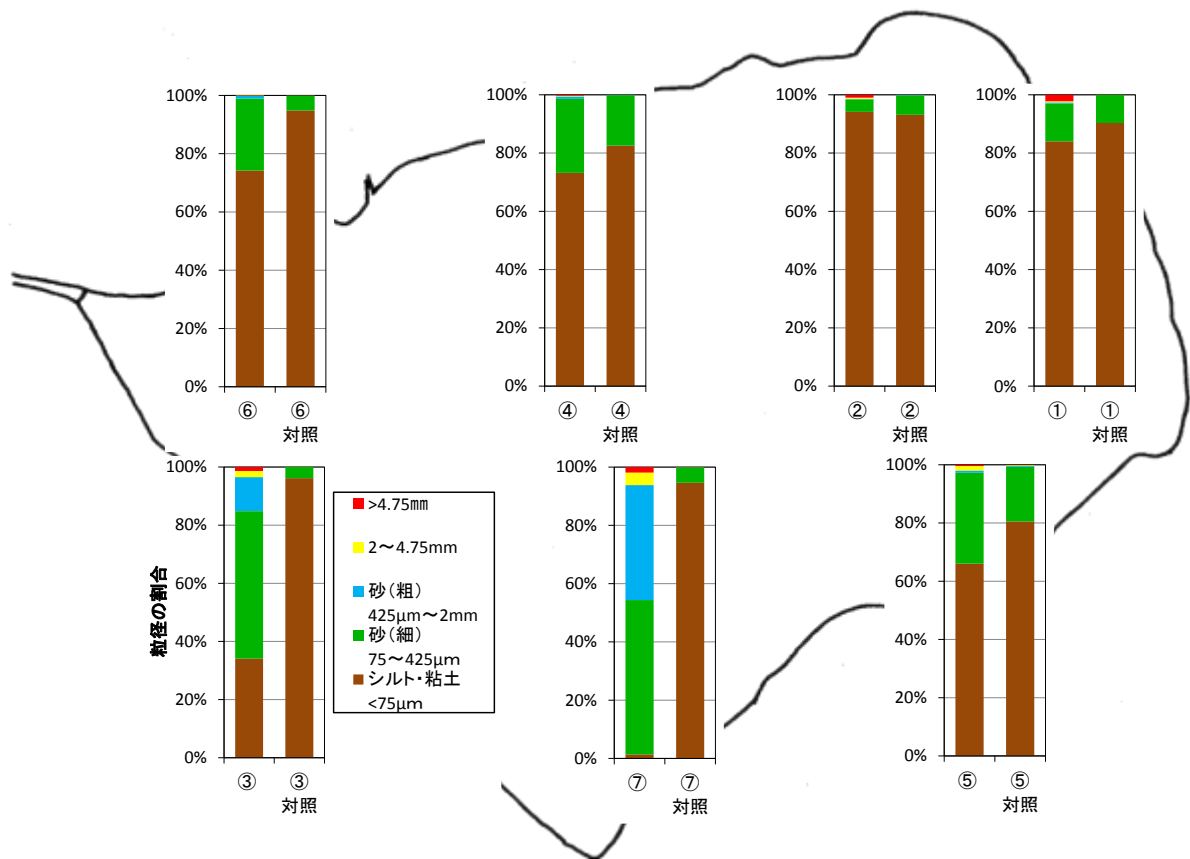


図 15 調査区別の粒度分布比較【水生植物帯内外の比較】

<酸化還元電位(ORP)>

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2020年の調査時に試行的に実施した。測定方法について、土壌用 Eh 計(榊藤原製作所 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 16 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 0~100 mv 程度で還元的な状態であった。

季節変動について、ヒシ③、ヒシ④対照では春期の方が低い傾向が見られ、自然植生区⑦では秋期の方が低い値であった。また、春期はヒシ③、ヒシ④の方がクロモ⑤、クロモ⑥より低い傾向で、秋期はヒシ④で対照より低い傾向が見られた。自然植生区⑦は全般に Eh 200~400 mv 程度であり、対照や他の地点より酸化的な状態であったと考えられる。

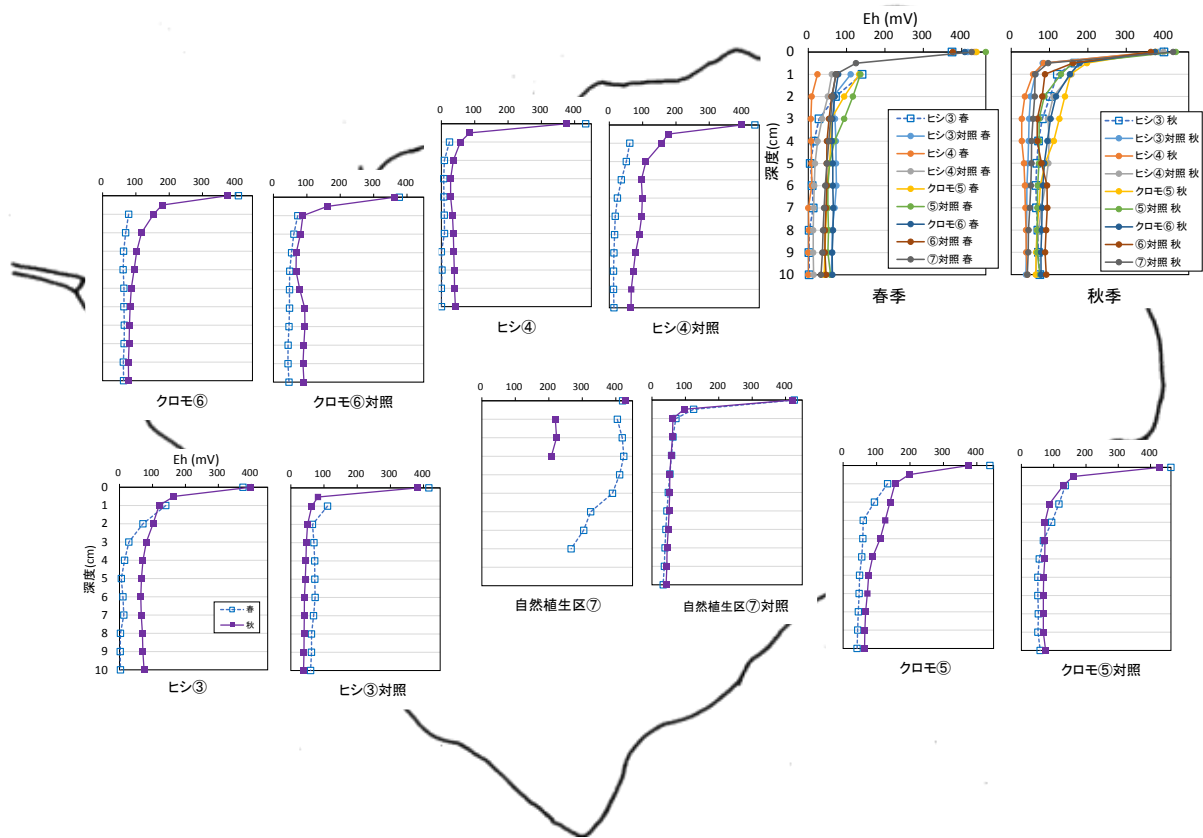


図 16 底泥鉛直方向の酸化還元電位(Eh 表示, mv) 【水生植物帯内外】

<考察>

水生植物繁茂域内外の鉛直方向の底質含有量等を把握・比較し、水生植物と底質性状との関係を検討した。

【ヒシ帯】では、湖内東部及び北部のヒシ帯(ヒシ①、ヒシ②、ヒシ④)において、全窒素含有量は対照地点と比較して高い傾向(対照比1~3割増加)が見られ、またヒシ繁茂域内では2013年比で1~4割増加していた。季節変動は、底質表層(0-2cm)で春期より秋期の方が濃度が高い傾向が見られた。(ヒシ③:対照比同程度)また、有機物量の目安となる強熱減量(IL)は全窒素と類似の傾向を示していた。さらに、沿岸域の底質把握調査地点10、13(ヒシ繁茂域内)において1980年比で増加している傾向²⁾を踏まえ、これらの調査結果から、ヒシ繁茂域内では全窒素含有量が過去比(1980、2013)及び対照比で増加している傾向が把握された。この要因として、栄養塩類を固定化したヒシの枯死、底泥表層への堆積による影響(栄養塩類、有機物含有量の増加)が考えられた。

全りん含有量については、ヒシ①、ヒシ④では対照比、2013年比で同程度であり、ヒシ②、ヒシ③では傾向が異なり対照地点より低い傾向であった。ヒシ②と対照は地点由来の底質濃度の差が影響していると推測され、ヒシ③(西部)と対照は粒度分布の顕著な違い(対照より粒径が大きい)が影響している可能性が考えられた。

【クロモ帯】では、全窒素含有量が対照比4割低く(IL2割低く)、全りん含有量が対照比3割低く、クロモ繁茂域内の方が栄養塩類濃度が低い傾向が確認・把握された。また、自然植生区内では全窒素、強熱減量、全りんが顕著に濃度が低く、対照比で全窒素が9割低く(IL8割低く)、全りんが4割低かった。また、クロモ繁茂域内の地点における直近5年間の経年変化では、栄養塩類含有量等がやや減少している傾向が見られた。このようにクロモ繁茂域内の調査地点において、栄養塩類含有量等が対照地点やヒシ帯より低い傾向が見られたが、クロモ帯の底質粒度分布から泥分率が比較的小さい傾向にあること、ヒシが繁茂していない場所(比較的含有量が低い)に分布していることなどが要因の一つとして考えられた。なお、クロモの繁茂面積はH28年頃から急激に増加しR2年に最大となっている(H27 4ha→R2 68ha、第7章参照)。今後も継続的に調査を実施し、クロモ繁茂域での底質性状の推移・変化を把握していきたい。

粒度分布と水生植物帯の関係については、一般的な特徴として、ヒシ繁茂域では泥分率が比較的高い傾向(35-95%)にあり、クロモ繁茂域(自然植生区含む)では比較的低い傾向(1-75%)であることが把握された。

また、底泥ORP測定により底泥鉛直方向の酸化還元状態の傾向が把握され、間隙水濃度、溶出フラックスとの関係について参考となるデータが得られたが、酸化還元状態と間隙水濃度パターン等との関係を把握するためには、これらの測定データの蓄積と酸化還元電位の定量的な測定が今後の課題と考えられる。

2018年の沿岸域実態把握調査の成果を踏まえ、本調査において重点的に実施した水生植物帯の調査結果から底質性状(栄養塩類含有量、粒度分布の特徴等)の実態が明らかになり、水生植物と底質性状との関係が把握された。湖内水質の全窒素はこれまでの水質浄化対策により長期的には改善傾向、近年横ばいで推移しているが、本調査結果から、ヒシ帯(東部及び北部)の底質全窒素濃度は上昇傾向にあることから、今後の湖沼環境改善対策を検討する上では、底質環境の観点から、ヒシ帯における底質改善対策が必要と考えられる。

8.3.1.2. 過去のシジミの生息域の実態把握

過去にシジミの生息域であった3調査地点（湊、十四瀬川河口、砥川東：各水深2m程度）について、現在の底質表層の実態を調査した。調査結果を表6、図17に示す。

栄養塩類、有機物及び硫黄含有量について、各調査地点[湊、十四瀬川河口、砥川東]の2期(春期、秋期)の平均値は、全窒素5.6、4.2、0.68 mg/g、全りん1.6、1.5、0.67mg/g、強熱減量16%、15%、3.8、全硫化物0.89、0.79、0.20 mg/gであり、砥川東の濃度が他の2地点より顕著に低かった。粒度分布について、砥川東の泥分率(75 μ m以下のシルト・粘土分の割合)は10%程度であり、他の2地点の泥分率：60～70%程度より顕著に低かった。また、砥川東では採泥時にシジミ、カラス貝、タニシが確認された。

また、他の調査(沿岸域底質把握、水生植物帯等)における地点と比較しても砥川東の底質は低濃度であり、自然植生区⑦(8.3.1.1.項参照)や覆砂試験区(洪崎区、湖岸通り区：第3章覆砂場所モニタリング調査3.2.3.項参照)と同程度の濃度レベルであった(全硫化物除く)。

表6 底質表層の全窒素、全りん、強熱減量及び全硫化物の測定結果

地点名	採泥日	全窒素 (mg/g)	全りん (mg/g)	強熱減量 (%)	全硫化物 (mg/g)
湊	2018年12月	5.7	1.6	17	0.93
	2019年5月	5.4	1.6	15	0.84
十四瀬川 (河口)	2018年12月	4.4	1.5	15	0.63
	2019年5月	4.0	1.5	15	0.95
砥川東	2019年12月	0.65	0.62	3.8	0.13
	2019年3月	0.70	0.71	3.9	0.28

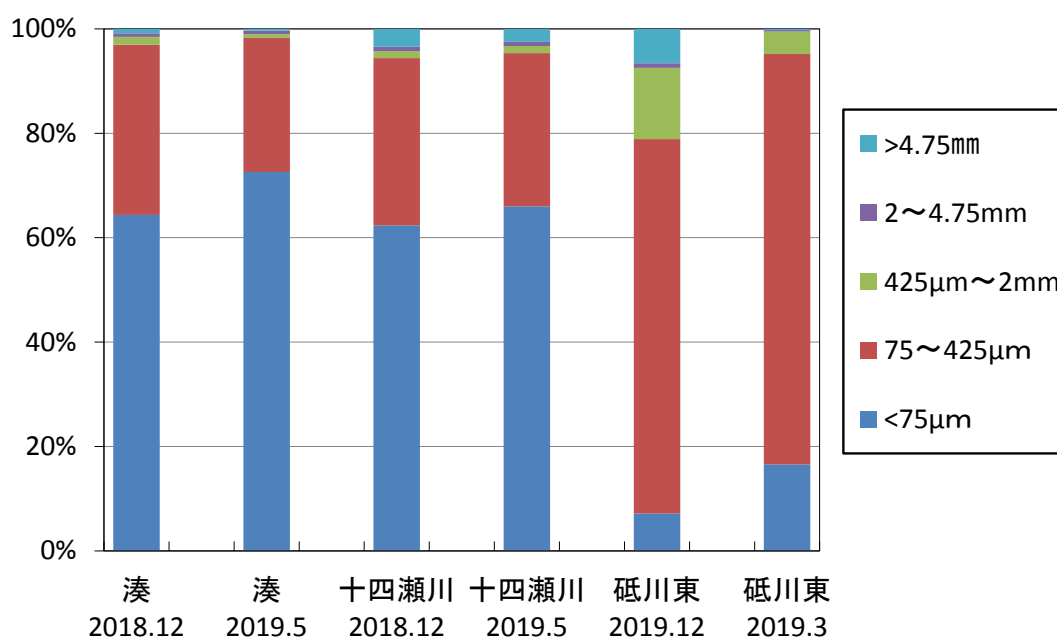


図17 底質の粒度分布の測定結果

8.3.2. 底質酸素消費速度調査

測定結果を表7、図18に示す。測定時のDO経時変化図(図19)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。

R2年度調査は、沖合等の湖内実態を把握するため、沖合5地点、上川河口域2地点で調査を実施した。夏期の調査結果について、沖合5地点(D地点、B地点、信大③南西、湖心、初島西)のSODは各地点毎の平均値で0.90~1.02 g/m²/d、5地点平均0.95 g/m²/dであり、地点間の差は小さかった。上川河口域2地点は0.77~0.78 g/m²/d(2地点平均0.78 g/m²/d)であり、沖合の方がSODがやや高い傾向が見られ、R1年度調査においても同様の傾向が確認されている。また、SOD 1.0 g/m²/dを示したR2湖心・夏期の底泥コアサンプルによる底層水の酸素消費の程度について、本測定条件下(20℃、酸素供給無し)では、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19)。

年変動について、湖心・夏期のR1とR2の値に差が見られた(2019.9.3 : 1.7 g/m²/d、2020.9.1 : 1.0 g/m²/d)。R1は現地(湖心)において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²⁾、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、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。

強熱減量(IL)(底泥表層0-1cm)とSODの関係を図20に示す。ILは、沖合12~16%、上川河口域(泥)10~12%、上川河口域(砂)1.9~2.7%であり、SODがやや高い傾向であった沖合の地点の方がILが高く、データ数が十分ではないがIL(底泥表層に含まれる有機物含量)とSOD値に正の相関が見られた(付着藻類(R1上川河口域①・夏)を除外して評価)。

上川河口域の調査について、夏期の地点③(覆砂試験区)のSODは平均0.78 g/m²/d、地点⑥(覆砂対照区)は平均0.77 g/m²/dであり、調査地点間の差は見られなかった。一方で、第3章覆砂場所モニタリング調査(底質調査)のとおり両地点の底質性状は顕著に異なり、試験区③が砂質で有機物量が少なく(IL 1.9%)、対照区⑥が砂泥質でIL 10%であり、また試験区③では全サンプルの底泥コア表面が付着藻類に覆われていた。R1調査では夏期に試験区で付着藻類の影響が大きかったことから、R2年度の両調査地点のSOD値は同程度であったが、底質性状の違いや試験区の底泥コア表面を覆う付着藻類による酸素消費も影響している可能性が考えられる。また、秋期について、試験区③のSODは平均0.81 g/m²/dであり、対照区⑥の平均値1.1 g/m²/dより小さい値となった(③IL 2.3%、⑥IL 12%)。覆砂した試験区のSODの方が小さい傾向は、R1年度の秋期の調査においても同様に見られている。なお、③は並行試験のバラつきが大きく(CV 35%, n=5)、付着藻類に覆われていた2サンプルを除外して評価した。2期の調査からSODの季節変動が見られ、全般にはR1夏>秋、R2夏<秋で一定の傾向は見られなかった(R1 浜崎区、R2 湖岸通り区)。なお、本測定(室内培養試験)は暗条件下で行っているが、現場環境を評価する場合には、付着藻類の日中の光合成による酸素供給の側面も考慮する必要があると思われる。

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、全地点で底泥コア5本の並行試験により測定値の変動係数を確認した。R2の変動係数は8.9~29%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 7 底泥酸素消費速度測定結果 (並行試験数: n=5)

(g/m²/day)

試料名	採泥日	最小値	最大値	平均値	CV(%)	水温 ^{※1} (°C)	強熱 ^{※2} 減量(%)
D地点・夏期	2020/8/4	0.71	1.25	0.90	23%	16.2	13
B地点・夏期	2020/8/12	0.89	1.11	0.96	9.4%	16.9	16
信大③(南西)・夏期	2020/8/18	0.89	1.10	0.96	9.1%	17.4	15
湖心・夏期	2020/9/1	0.94	1.16	1.02	8.9%	18.8	14
初島西・夏期	2020/9/8	0.83	1.02	0.93	9.3%	24.0	16
上川河口域(泥)⑥・夏期	2020/7/15	0.68	0.86	0.77	8.9%	17.0	10
上川河口域(砂)③・夏期	2020/7/29	0.68	0.92	0.78	12%	23.2	1.9
上川河口域(泥)⑥・秋期	2020/10/27	0.89	1.24	1.10	14%	13.4	12
上川河口域(砂)③・秋期	2020/10/14	0.66	1.08	0.81	29%	17.2	2.3

*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 0-1 cm の測定値

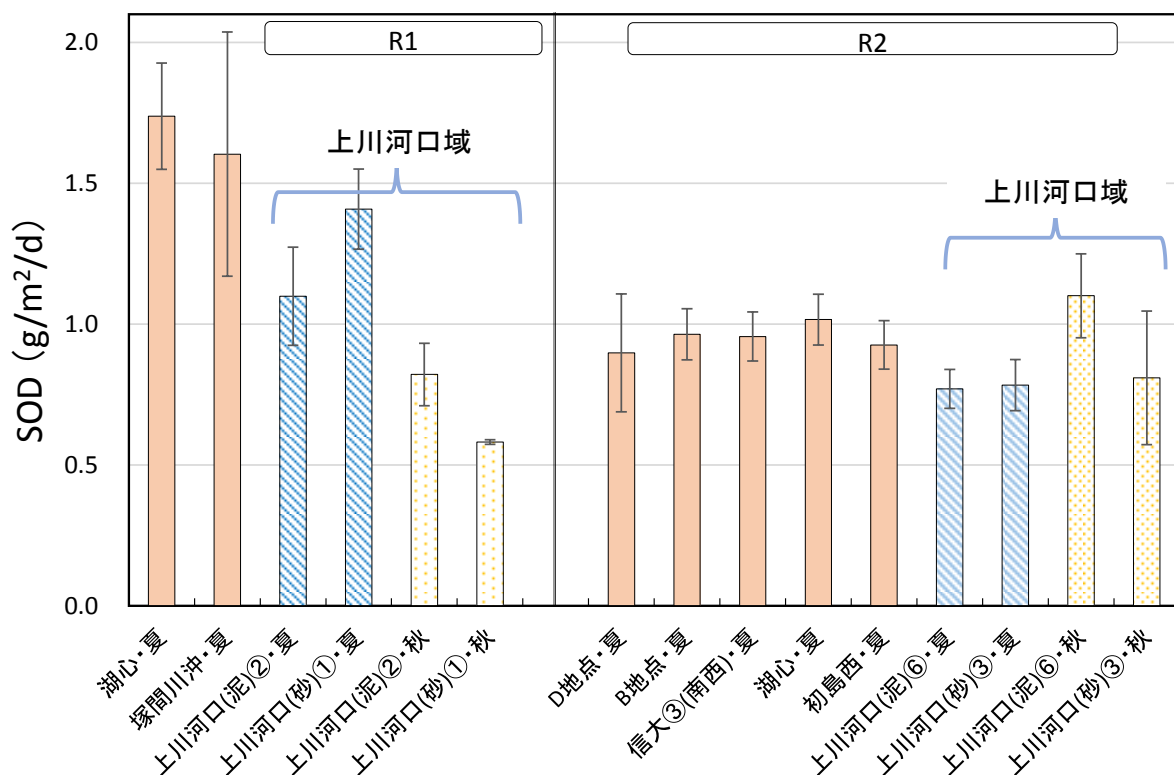


図 18 底泥酸素消費速度 測定結果
(R1 測定結果含む、エラーバーは標準偏差を示す)

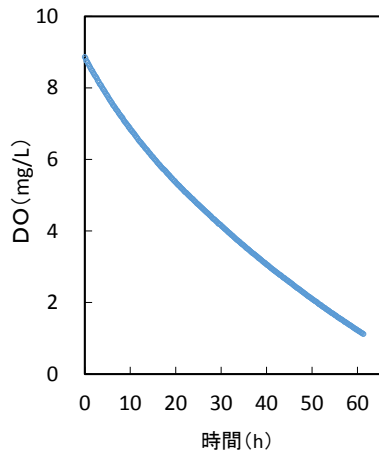


図 19 直上水 DO 経時変化(酸素消費曲線)
(R2 湖心・夏期、SOD 1.0 g/m²/d)

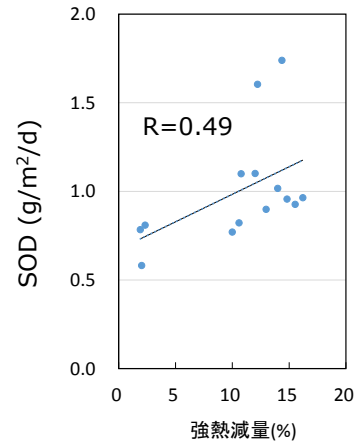


図 20 SOD と強熱減量の関係

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：8.3.1.1.項 参照)

R2 の測定結果(図 21)から、沖合や地点⑥の底泥表層 0~1cm 程度において、表層から深度方向に ORP が大きく低下していた(酸化還元境界層)。R2 の夏期・沖合の地点では深度方向全般に Eh 0~100 mv 程度で還元的な状態であり、一方、上川河口域(砂)③では表層付近で Eh 300~400 mv であり、沖合や st.⑥より酸化的な状態であったと考えられる。

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。

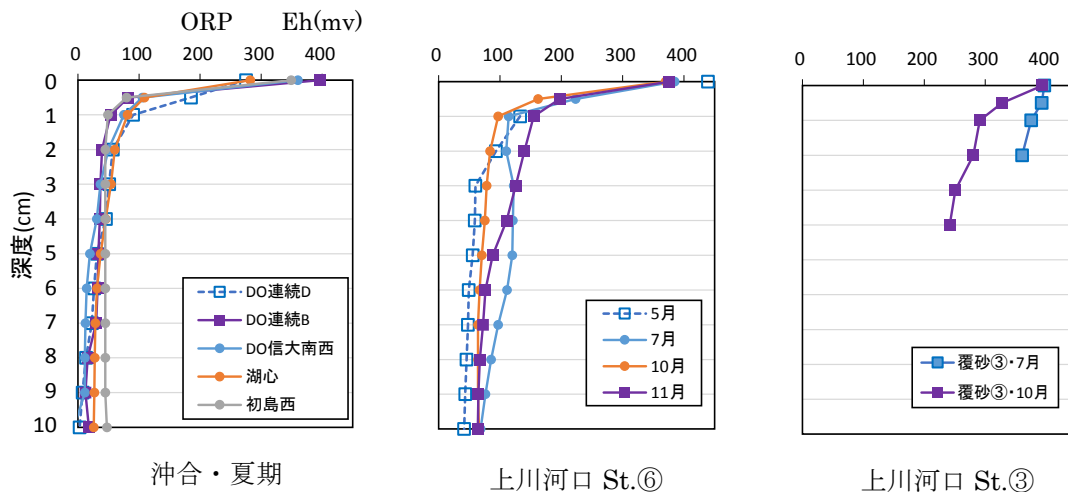


図 21 底泥の酸化還元電位(ORP)

8.4. まとめ

不攪乱柱状採泥による底質調査手法により、沿岸域等底質把握調査において、諏訪湖沿岸域を中心に鉛直方向の底質性状の実態を把握、広域的な底質環境の変化を把握・評価した。

2018年の沿岸域実態把握調査の成果²⁾からは、諏訪湖における水質浄化対策の効果として、底質の全りん含有量は、40年前と比較して湖内全般に一定程度の改善傾向が現れていることが明らかとなった(1980年比約4割減少、鉛直方向一定)。一方、全窒素含有量は、多くの地点で同程度又は増加傾向にあることが確認され、東部では水生植物帯による影響が推察された。また水平分布の特徴として、北西部で濃度が低い傾向(P、N、IL、S)が把握された。

これを踏まえ、本調査において重点的に実施した水生植物帯の調査結果から、全窒素含有量は湖内東部及び北部のヒシ繁茂域内で増加傾向にある(対照比1~3割増、2013年比1~4割増、1980年比5~6割増)ことが明らかになり、この要因として栄養塩類を固定化したヒシの枯死・堆積による影響が考えられた。また、クロモ繁茂域内では対照と比較して栄養塩類濃度が低い傾向(全窒素4割、全りん3割低い)が見られ、自然植生区(クロモ、ヒロハノエビモ、ササバモ、セキショウモ等)ではさらに顕著に濃度が低い等、底質性状(栄養塩類含有量、粒度分布の特徴等)の実態が明らかになり、水生植物と底質性状との関係が把握された。

これらの調査結果から、これまでの水質浄化対策により湖内水質の全窒素が長期的には改善傾向(近年横ばい傾向)にあるが、ヒシ帯の全窒素含有量は上昇傾向にあることから、今後の湖内環境改善対策を検討する上で、ヒシ帯における底質改善対策の必要性が挙げられる。

また、過去のシジミの生息域における現在の底質性状の実態把握調査では、湊や十四瀬川河口の地点で現在泥質化(泥分率60~70%)している現状が把握されたが、砥川東では栄養塩類、有機物等の濃度が他の地点より顕著に低く(自然植生区や覆砂試験区と同程度の濃度レベル)、砂泥質(泥分率10%程度)で採泥時にシジミ等が確認された。本調査結果は、覆砂場所の適地選定等における基礎資料としての活用が見込まれる(底質改善効果、覆砂効果の持続性等の観点)。

底泥酸素消費速度調査(SOD)について、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SODの測定データの蓄積が不可欠であることから、本調査により、諏訪湖内のSODの広域的な実態を初めて把握し、地点変動、季節変動、年変動が確認され、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。

底質環境に関する調査の今後の方向性について、本成果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、湖水に栄養塩と有機物を供給する底泥溶出の実態を定量的に把握するとともに、SODの季節変動や水生植物帯の実態調査、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予定である。

(引用文献)

- 1) 平成25年度湖沼自然浄化活用事業(長野県諏訪湖)委託業務報告書(2013年11月、長野県)
- 2) 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(2020年11月、長野県)
- 3) 湖沼のブラックボックス負荷「底泥溶出」の定量評価に関する研究,国環研 今井章雄ら,H27年度環境研究総合推進費終了成果報告書(5-1304)
- 4) 諏訪湖の富栄養化に関する研究(1982年3月、長野県衛生公害研究所)