

論文 底泥を使用したポーラスコンクリートの閉鎖性環境下における水質への影響に関する研究

下原 怜也*1・川崎 佑磨*2・佐藤 圭輔*3・山田 悠二*4

要旨：近年、琵琶湖では、底泥による植生の生育不良や悪臭が発生しており、除去された底泥の廃棄も問題となっている。加えて細骨材の採取場所や量も規制されている。そこで本研究では、底泥を骨材代替資源として有効利用するため、底泥ポーラスコンクリートの作製を考えた。実験では、琵琶湖水を使用して閉鎖性環境下における水質について380日目まで測定した。その結果、実験開始直後のpHは、溶脱したカルシウムの影響により増加したが、時間経過に伴い低下し収束することが確認された。さらに、底泥を混入することで、赤潮の要因となるケイ素濃度の低下を抑えることが確認された。

キーワード：水質、底泥、琵琶湖、ポーラスコンクリート、ICP 発光分析

1. はじめに

琵琶湖は、我が国で最大の面積と貯水量を持つ湖であり、その湖水は京阪神で利用されている。その一方で、1972年から始まった琵琶湖総合開発事業¹⁾の影響により、琵琶湖沿岸の地形、居住環境などの変化から底泥（粒径0.5mm以下の底質）が増加している²⁾。琵琶湖沿岸周辺では、底泥が植生の生育不良や悪臭、景観阻害の要因となっている。このような状況を鑑みて、環境省は2015年に「琵琶湖の保全及び再生に関する法律」³⁾を施行し、水質汚濁の防止および改善に関する施策を掲げている。

一方で、土木・建築資材として重要な役割を担うセメント系材料では、自然環境への配慮などから骨材の採取場所や量が規制されている⁴⁾。その中では、骨材代替資源の普及促進に関する事項もあり、地産地消、環境保全の下、様々な取り組みを実施している。

底泥は、湖沼だけではなく海域でも多く発生しており、例えば、湖沼から採取した底泥を地盤改良材として有効利用した研究⁵⁾などがある。しかし、底泥を細骨材として利用する検討は少ない。底泥が、細骨材として利用可能になれば、上述の通り、多量の底泥廃棄、骨材枯渇化の課題に対して有効な解決策になると考えられる。

これらから、琵琶湖の内湖の中で最大の面積を持ち、底泥の浚渫が積極的に行われている西ノ湖⁶⁾から採取される底泥に着目して、骨材代替資源としての適用可能性を検討した。本研究では底泥を混入したコンクリートの漁礁の製造を考えており、琵琶湖に悪影響をもたらしていた底泥を漁礁としてリサイクル活用することで、生物や植物を定着させ、湖沼などの環境改善に寄与することを期待している。

そこで、エコマテリアルの一つとされているポーラスコンクリートに底泥を混入することを考えた。ポーラスコンクリートは、通常のコンクリートに比べて、独立・連続した空隙が多く、保水力を有しているため、植物の生育や微生物の棲息が可能である。本研究では、底泥を細骨材置換したポーラスコンクリートの作製を行った。また、比較対象として底泥を細骨材に置換したモルタルと、底泥を置換させていないポーラスコンクリートも作製した。これら供試体が水質に直接影響を与える事項を確認するため、閉鎖性環境下とし、供試体を琵琶湖水で満たしたコンテナに入れて、水質変化について確認を行った。

2. 本研究で使用した底泥の概要

2.1 採取した底泥

本研究で使用した底泥は、西ノ湖（滋賀県近江八幡市）から、2016年11月12日に採取した。主成分は、砂分25.0%、シルト分36.9%、粘土分38.1%である。底泥の採取時には、ネットで木くずなどのゴミと底泥を分類し、その後、約1年間天日干しした。天日干しした底泥は大きな塊として凝固しており、骨材としての利用は困難で



(a) 粉碎前

(b) 粉碎後

写真-1 使用した底泥

*1 立命館大学大学院 理工学研究科環境都市専攻 (学生会員)

*2 立命館大学 理工学部環境都市工学科准教授 博(工) (正会員)

*3 立命館大学 理工学部環境都市工学科准教授 博(工) (非会員)

*4 立命館大学 理工学部環境都市工学科特任助教 博(工) (正会員)

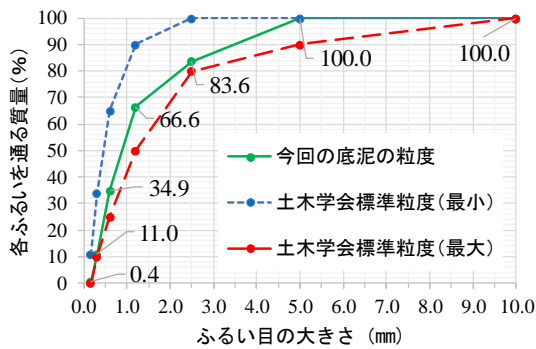


図-1 底泥の粒度分布

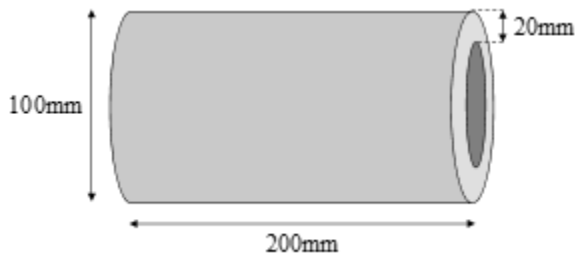


図-2 供試体概要図

あることから、ジョークラッシャーを用いて細かく粉砕し、貝殻や小枝などの細かい不純物を取り除いた。粉砕前の底泥を写真-1 に示す。ジョークラッシャーにより一次破碎を行った場合、同一粒径の底泥が多くなったため、適宜粉砕を繰り返し、ふるいをを用いて JIS A 5005 に記載されている粒度に調整した。

2.2 骨材試験および含有成分

調整後の底泥の骨材特性を確認するために、土木学会標準示方書に準拠した方法¹⁰⁾で各種骨材試験を実施した。ふるい分け試験は JIS A 1102 を、密度及び吸水率試験は JIS A 1109 を、単位容積質量及び実積率試験は JIS A 1104 を引用規格として実施した。上記の骨材試験を実施した結果、粗粒率は 3.82、表乾密度は 1.63 g/cm³、吸水率は 29.8 %、絶乾密度は 1.38 g/cm³、単位容積質量は 1.03 g/cm³、実積率は 74.8 %となった。一般的に使用される細骨材と異なり、密度が軽く、吸水率が非常に高い結果が得られた。底泥の粒度分布結果を図-1 に示す。

底泥は、採取箇所により含有成分が異なり、場合によっては、人体あるいは環境に悪影響を与える成分（例えば、有機リン化合物、六価クロムなど）を含有する場合もある^{例えは 11), 12)}。そのため、採取した底泥の含有成分の化学分析を実施した。その結果、有機リン化合物は不検出、六価クロムは 0.01mg/L 未満などから本研究で利用した底泥には、人体および環境に悪影響を与える成分を含有していないことが確認された。

3. 実験概要

3.1 供試体

空隙率 20%・底泥置換率 0%のポーラスコンクリート



(a)普通ポーラス コンクリート (b)底泥ポーラス コンクリート (c) 底泥 モルタル

写真-2 作製した供試体

表-1 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント 密度：3.16g/cm ³
骨材	砕砂 粒径：0.15～5.0mm、表乾密度：2.68g/cm ³ 、実積率：57.6%
	7号砕石 粒径：5～13mm、表乾密度：2.69g/cm ³ 、実積率：55.0%
	底泥 粒径：0.15～5.0mm、表乾密度：1.63g/cm ³ 、実積率：74.8%
混和剤	高性能AE減水剤（ポリカルボン酸エーテル系） 密度：1.065g/cm ³
	AE助剤（アルキルエーテル系） 密度：1.03g/cm ³ ～1.12g/cm ³
	水

（以下、普通ポーラスコンクリートと表記）、空隙率 20%・底泥置換率 50%のポーラスコンクリート（以下、底泥ポーラスコンクリートと表記）、底泥置換率 50%のモルタル（以下、底泥モルタルと表記）の 3 種類の供試体をそれぞれ 4 体ずつ作製した。また、水と接する表面積を増やすために、中空状に作製した。中空供試体の概要を図-2 に示す。なお、事前の試験練りの結果、各供試体での底泥混入量の違い、底泥の高吸水率が影響して、水セメント比 (W/C) を統一することが出来なかったため、ポーラスコンクリートは W/C を 30%、モルタルは W/C を 50%とした。これは、ポーラスコンクリート作製時に、底部にペースト垂れをしないように考慮した結果である。打設後の各供試体を写真-2 に示す。また、使用材料は表-1 に、全ての供試体の配合は表-2 に示す。混和剤の使用量は、試験練りの結果から選定した。

3.2 実験方法

上述した 3 種類の供試体を、それぞれ 1 体、3 体ずつ入れたコンテナと何も入れていないコンテナの計 7 ケースを用意した。全コンテナ内に約 30L の水を注水し、簡易屋根付きの外部環境下で暴露して、水質の経時変化および観察を行った。実験で使用したコンテナ内の水は、琵琶湖から採取してきた湖水を使用した。実験風景を写真-3、写真-4 に示す。

水質の計測は、測定開始から 0、1、2、3、6、10、20、35、50、80、110、140、170、200、230、280、330、380 日目に実施した。また測定後には、コンテナ内の水深を一定に保つために、蒸発や採取したことによって減少し

表一2 供試体の配合

供試体種類	底泥置換率 (%)	水セメント比 (%)	単位量 (kg/m ³)						
			水	セメント	底泥	細骨材	粗骨材	AE助剤	高性能AE減水剤
ポーラスコンクリート	0	30	100	333	0	118	1480	2.67	1.33
	50				37	59			
モルタル			50	338	676	328	528	0	5.41

た水量分を適宜加えた。

測定した項目は、水質調査として基礎的な項目とされている水温、pH、溶存酸素、電気伝導度に加えて、セメントや骨材から溶脱すると考えられるカルシウム、マグネシウム、リン、ケイ素の8項目の測定を行った。また測定日の気温も記録した。pHおよび溶存酸素は、実験供試体が水質にどのような影響をもたらすか把握しておくべき項目であり、電気伝導度は水質の変化を示す指標である。また、カルシウム、マグネシウム、リン、ケイ素に関しては実験供試体から溶脱すると考えられ、それらが水質に影響を与えているかを把握するために測定した。

pHは、各コンテナ内の湖水上層部からスポイトを用いて適量採取し、校正を行ったコンパクト pHメータ内に湖水を垂らし、測定した。溶存酸素は、溶存酸素測定器の校正を大気中で行った後にコンテナ内に直接入れ、コンテナ内の湖水を攪拌させながら測定した。また、水温、電気伝導度も、電気伝導度測定器の校正を行った後にコンテナ内に直接入れて測定した。カルシウム、マグネシウム、リン、ケイ素の4項目は、測定日に試料を採取し、水質が変化しないように4℃で冷蔵庫に保管した後、ICP発光分析を行った。なお、湖水を濾過した際に、ろ紙に白色物が存在した。濾過前後の湖水をICP発光分析した結果、カルシウム濃度差が確認されたことから、炭酸カルシウムCaCO₃であると推察した。採取量の関係上、定量分析は実施できていない。また、カルシウムとマグネシウムの結果より、式(1)を用いて総硬度を算出して生物への影響を確認した¹³⁾。

$$\text{総硬度} = (\text{カルシウム}[mg/L] \times 2.5 + \text{マグネシウム}[mg/L] \times 4.0) \quad (1)$$

4. 実験結果

4.1 水質

グラフの凡例を表一3にまとめて示す。何も入っていないコンテナをBL(ブランク)、普通ポーラスコンクリートを1体、3体入れたコンテナをそれぞれP1S0、P3S0、底泥ポーラスコンクリートを1体、3体入れたコンテナをそれぞれP1S50、P3S50、底泥モルタルを1体、3体入れたコンテナをそれぞれM1S50、M3S50と表記した。2017年12月6日から測定を開始し、この日を0日目とした。また、全ケースの0日目の結果は、BLの結果と同



写真一3 実験風景 (全景) 写真一4 実験開始直後

表一3 凡例

.....●.....	気温	—□—	P1S0
—○—	BL	—□—	P3S0
—◇—	P1S50	—△—	M1S50
—◇—	P3S50	—△—	M3S50

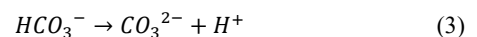
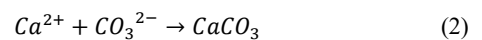
様である。測定時間による気温差を無くすために、測定日の14時~16時に測定を行った。

(1) 水温・気温

気温と水温の計測をまとめた結果を図一3に示す。気温と水温は同様に変化しており、全ケースで水温の変化はほとんどないことから、同一の外部環境下で実験できていることが確認された。

(2) pH

pHの測定結果を図一4に示す。測定初期では、供試体の種類に関係なく、供試体の数に影響を受けている傾向が確認された。供試体を3体入れたケースではpH10~11、供試体を1体入れたケースではpH9~10、BLではpH7~8を示した。しかし、測定開始から150日目以降からは、全てのケースでpH9前後に収束した。供試体を入れたケースでpHが低下した要因としては、セメント成分から溶脱したカルシウムイオンCa²⁺の濃度が増加すると式(2)の反応により炭酸イオンCO₃²⁻が消費されるため、炭酸水素イオンHCO₃⁻から炭酸イオンCO₃²⁻を補充する。そのため水素イオンH⁺が増加し、pHが低下したと考えられる。その反応を式(3)に示す。



さらに本研究では、閉鎖性環境下での実験であるため、炭酸水素イオンHCO₃⁻が不足した状態(海水中で豊富に存在する)となっており、それを補うために大気中の炭酸ガスを吸収し、式(4)、式(5)、式(6)の反応を起こし、水

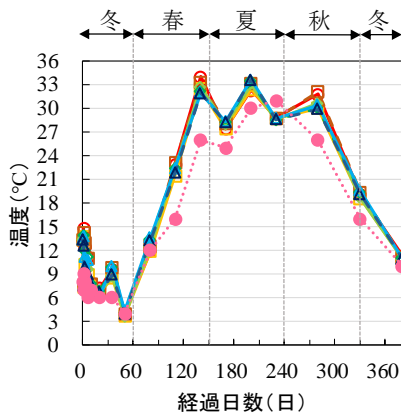


図-3 気温・水温

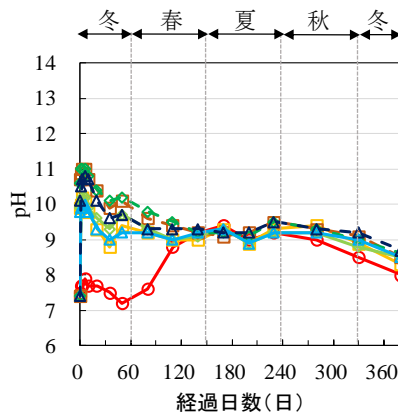


図-4 pH

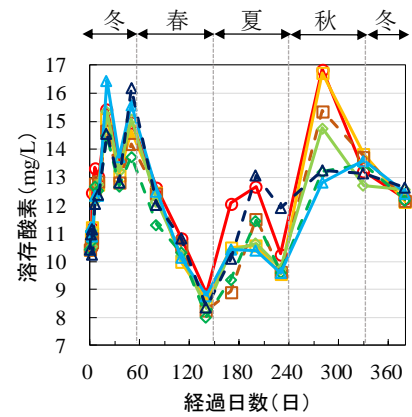


図-5 溶存酸素

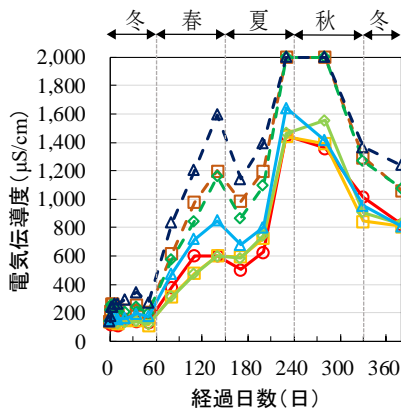


図-6 電気伝導度

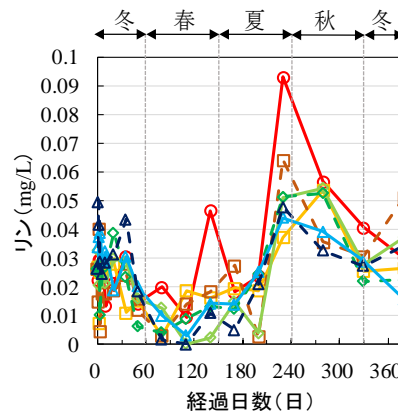


図-7 リン

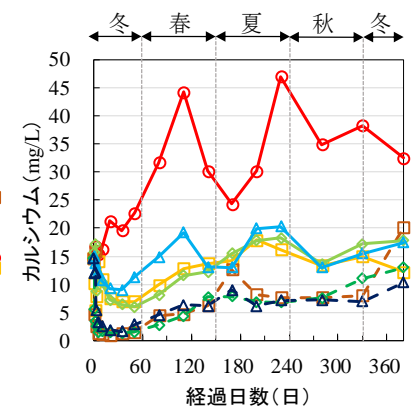
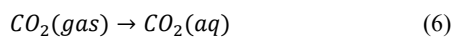
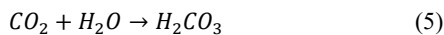
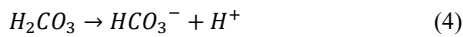
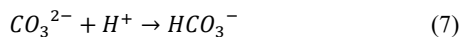


図-8 カルシウム

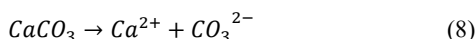
素イオンは $2H^+$ と増加するため、pH は低下傾向を示す。



一方で、BL の pH が増加した要因としては、供試体を入れていないため、大気中の二酸化炭素 CO_2 のみを吸収し、式(6)、式(5)の順で反応が起こり、炭酸水素イオン HCO_3^- と水素イオン H^+ が生成される。水素イオン H^+ が生成されることで pH は低下するが、この水素イオン H^+ を相殺するために炭酸イオン CO_3^{2-} が消費され、炭酸カルシウム $CaCO_3$ から炭酸イオン CO_3^{2-} の供給を行う。その反応を式(7)に示す。



炭酸カルシウム $CaCO_3$ は式(8)のように炭酸イオン CO_3^{2-} とカルシウムイオン Ca^{2+} に分解するため、カルシウムの増加と pH の増加に繋がったと考えられる¹⁴⁾。



270 日目以降、全ケースでさらに pH が低下した要因として、気温が低下することで微生物の活性も下がったことが影響したと考えられる。嫌気分解の活性が下がれば、有機酸の生成が抑えられ、pH も下がると推察される。

(3) 溶存酸素

溶存酸素の測定結果を図-5 に示す。溶存酸素は、気



写真-5 藻類繁殖

写真-6 藻類沈殿

温の低下に伴い高くなり、気温の上昇に伴い小さくなる傾向にある。図-3 の水温・気温の経時変化と比較すると、気温に影響を受けていることが確認できる。しかし、180 日目以降は気温が上昇しているにも関わらず、溶存酸素値も増加している。これは夏場に気温が上昇したことで繁殖した藻類が光合成を行ったためであると推測される。藻類が繁殖したコンテナの様子を写真-5 に示す。

(4) 電気伝導度

電気伝導度の測定結果を図-6 に示す。電気伝導度は、水中に溶解もしくは浮遊している電解物質に反応する。図-6 から経過日数に伴い、電気伝導度は増加していることが確認できる。測定 230、280 日目では供試体を 3 体入れたケースでは、今回使用した測定器の最大値である $2000\mu S/cm$ に達した。しかし、測定 330、380 日目には気温も低下し、写真-6 に示すように、繁殖・浮遊していた藻類もコンテナの底に沈んだため、測定箇所である試料の上層では、測定値が下がったと考えられる。また、

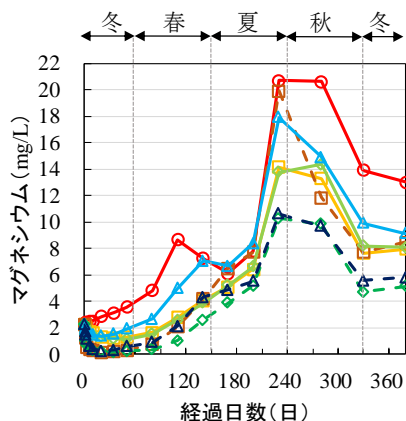


図-9 マグネシウム

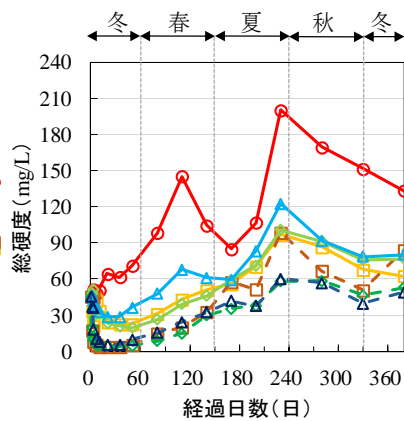


図-10 総硬度

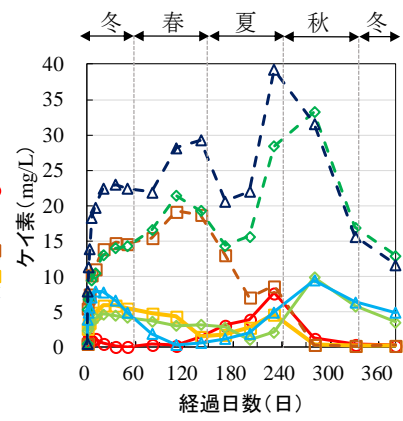


図-11 ケイ素

水道水の電気伝導度は $100\mu\text{S}/\text{cm}$ 、雨水の電気伝導度は $80\sim 300\mu\text{S}/\text{cm}$ 程度であることから藻類が繁殖した影響が顕著に出ていると考えられる。

供試体を3体入れているケースの方が、供試体を1体入れているケースよりも電気伝導度が高くなっていることから、供試体の数が多い方が、電気伝導度に影響を与えていることが分かる。さらに、底泥の混入の有無に関係なく、ポーラスコンクリートよりもモルタルの方が、電気伝導度が高くなることが確認された。これは供試体を作製する際に使用したセメント量の違いによるものと考えられる。

(5) リン

リンの測定結果を図-7に示す。リンは特徴的な傾向は確認されなかった。ただし、いずれのケースも、きれいな水と評される $0.065\text{mg}/\text{L}$ を下回っており、水質汚染への影響はないと考えられる。

(6) カルシウム

カルシウムの測定結果を図-8に示す。BLのケースが最もカルシウム濃度が高く、供試体数が少ないほど、カルシウム濃度が高くなることが確認された。供試体数が多いほど、カルシウム成分の溶脱量が多くなりカルシウム濃度が高くなると予想していたが、逆の結果が確認された。これは、上述したように式(8)の反応によるものだと考えられる。また、供試体数が多いケースほど、多くのカルシウムイオンが溶脱したため、そのカルシウムイオンが水中の浮遊物質（今回では藻類）と吸着し、カルシウム濃度が低下したことも推測される。

また、測定50日目までカルシウム濃度が低下している。これは図-7から、リン濃度も同様に50日目まで減少していることからカルシウムがリンと反応し、リン酸カルシウムが生成されたことが推測される¹⁵⁾。

(7) マグネシウム

マグネシウムの測定結果を図-9に示す。どの実験ケースにおいても、マグネシウム濃度は測定230日目まで増加していたが、気温の低下に伴い、230日目以降は低

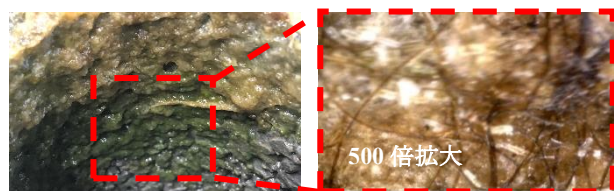


写真-7 植生状況

写真-8 拡大した藻類

下した。

また、カルシウム濃度と同様に供試体の数が少ないほど、マグネシウム濃度が高くなる傾向が見られた。要因としても後者のカルシウムの要因と同様だと考えられる。

(8) 総硬度

総硬度の測定結果を図-10に示す。カルシウム濃度やマグネシウム濃度のみでは、生物への影響が比較しにくいいため、カルシウム濃度とマグネシウム濃度の両者から算出される総硬度を求めた。

総硬度は魚の生存に直接影響するわけではないが、総硬度が $285\text{mg}/\text{L}$ 以上になるとストレスを感じる魚の種類が増える。本研究では、漁礁としてリサイクル活用することを目指しているため、 $285\text{mg}/\text{L}$ 以下が望ましい。今回の閉鎖性水域を模擬した実験では、一番高い値でも $210\text{mg}/\text{L}$ 以下である。一番高い値は、BLの結果であるため、底泥を混入した供試体を入れたケースに絞ると $120\text{mg}/\text{L}$ 以下であるため、魚へのストレスの影響は比較的少ないと推測される。

(9) ケイ素

ケイ素の測定結果を図-11に示す。測定170日目までは、電気伝導度と同じく供試体数が多いほど、ケイ素濃度が高くなることが確認された。170日目以降は、BL、P1S0、P3S0の3ケースでケイ素濃度の低下傾向が確認された。ケイ素濃度の低下傾向が確認されたBL、P1S0、P3S0の3ケースと他の4ケースの相違点は、底泥の混入有無である。すなわち、底泥を混入するとセメント成分から溶脱するケイ素濃度の低下を抑える可能性があると考えられる。環境分野では、ケイ素はダムの増加等で世

界的に低下傾向にある。そのため、ケイ素を必要とするケイ藻も減少している。ケイ藻は光合成を行うことで、善玉プランクトンとなり、生態系の基盤を形成するのにとても重要である。これに対し、ケイ素を必要とせず、赤潮を引き起こす要因となる渦鞭毛藻などの悪玉プランクトンが増加している。したがって、ケイ素の低下は、善玉プランクトンを減退させ、その分悪玉プランクトンを助長する可能性がある。つまり、底泥を混入したポーラスコンクリートを水中に入れることで赤潮の要因となる悪玉プランクトンの増殖を抑えることにも繋がる¹⁶⁾。

4.2 植生

本研究は、380日間実施しており、四季の影響も受けているため、供試体側面やコンテナ内の植生状況を確認した。夏場に増殖した藻類が、3種類全ての供試体表面に付着しており、水中で揺り動かしても藻類が剥がれ落ちることなくびいたことから、藻類が根付いていることが確認できた。さらに、底泥ポーラスコンクリートの方が多くの藻類が根付いていることが確認された。これはポーラスコンクリートの空隙部分に藻類が根付きやすいことや底泥に含まれている有機物量の違い、もしくは、細骨材化した底泥の低密度で高吸水率という性質が影響していると推測される¹⁷⁾。底泥ポーラスコンクリートに植生している様子を写真-7に、その藻類を顕微鏡で500倍に拡大したものを写真-8に示す。また、生物に関しては、P1S50のケースにおいてコンテナ内でヤゴが生息していることが確認でき、閉鎖性環境下でも生物が生息できる可能性が示された。

5. まとめ

本研究で得られた結果を以下に示す。

- (1) 多くの測定項目において気温に影響を受けている傾向が見られた。pH、カルシウム、マグネシウムは供試体の種類には影響を受けず、供試体の個数に影響を受けた。さらに電気伝導度では、供試体の個数による影響に加えて、ポーラスコンクリートよりもモルタルの方が、値が大きくなる傾向も見られた。
- (2) 底泥の混入の有無による水質の相違は確認されなかった。ただし、底泥を混入させることでセメント成分から溶脱するケイ素濃度の減少を抑えることができ、赤潮の発生を抑制できる可能性が示された。
- (3) モルタルよりポーラスコンクリートに底泥を混入した方が、植物の根付き量が多く、生物の生息も確認できた。また、底泥を利用したポーラスコンクリートを入水させても水質への悪影響は確認されなかった。

謝辞

本研究は、琵琶湖水質改善研究会の中川隆一様、協

和株式会社奥弘海様、鎌田技術士事務所の鎌田忠則様、滋賀県環境保全協会の北村佐津木様から多くのご助言を頂きました。ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 琵琶湖総合開発協議会：琵琶湖総合開発事業25年のあゆみ、pp.74-75、1997
- 2) 滋賀県：琵琶湖沿岸帯調査報告書昭和44年度、滋賀県水産試験場、1972
- 3) 滋賀県：琵琶湖沿岸帯調査報告書平成7年度、滋賀県水産試験場、1998
- 4) 環境省：琵琶湖の保全及び再生に関する法律、2015
- 5) 滋賀県：滋賀県骨材供給基本計画、pp.8-36、2002
- 6) 日高厚、吉田幸司、川西順次、小山孝、永塚典幸：脱水・固化処理技術による湖沼浚渫土の地盤材料への有効利用、土木建設技術シンポジウム、2007
- 7) 梅崎健夫、河村隆：諏訪湖底泥の脱水・浄化対策の検討、信州大学環境科学年報、29号、pp.29-38、2007
- 8) 滋賀県：西ノ湖河川浄化（総流防）調査委託報告書平成27年度、2015
- 9) 滋賀県：西ノ湖 残したい水郷景観・守りたい人のいとなみ、2009
- 10) (社)土木学会：土木学会コンクリート標準示方書基準編、p5、2010
- 11) 前田高広、鈴木正彦、大井節男、佐々木洋二：底泥が水質に与える影響、農土誌 小特集・環境水質改善への試み-6、Vol. 64, No. 4, pp.351-356、1996
- 12) 奥村浩気、岸本直之、一瀬論、馬場大哉、田中仁志：琵琶湖北湖東岸における湖岸形状と泥質化の関係、Journal of Japan Society on Water Environment、Vol. 37, No. 2, pp.45-53、2014
- 13) 金田高之、高野敏：水のカルシウム硬度及び総硬度の簡易測定法、分析化学、36巻、2号、pp.103-108、1987
- 14) 神谷寛一、東本守、矢田誠、那須弘行：コンクリート廃材の炭酸化反応によるカルシウム源のリサイクルと二酸化炭素の固定、日本セラミック協会学術論文誌、106巻、1235号、pp.719-723、1998
- 15) 佐藤周之、野中資博、佐藤利夫、桑原智之：リン吸着コンクリートのリン酸イオン除去性能に関する基礎的研究、コンクリート工学、Vol.26, No.1、2004
- 16) 国立環境研究所：「シリカ欠損仮説」と海域生態系の変質 - フェリーを利用してそれらの因果関係を探る、No39、2011
- 17) 山本武志、井野場誠治、宮永洋一、下垣久：手賀沼底泥を利用したポーラスコンクリートの植栽・水質浄化効果、コンクリート工学、pp.114-118、2007