

# 論文 球形ポーラスコンクリートとゼオライトを併用した水質浄化材のリン・窒素の低減効果に関する基礎研究

谷貝 有紀<sup>\*1</sup>・内田 慎哉<sup>\*2</sup>・中 新弥<sup>\*3</sup>・岡本 享久<sup>\*4</sup>

**要旨:** 本研究では、ポーラスコンクリートとゼオライトを併用した水質浄化材を提案し、琵琶湖南湖の水を対象とした水質実験により、富栄養化原因物質である全リン・全窒素の低減効果の把握を試みた。その結果、約7日間で全リン・全窒素の数値が琵琶湖の環境基準値を下回ることが明らかとなった。また、画像解析により水質浄化材の空隙構造を把握し、水質浄化材がもつ吸着効果を定量的に示した。さらに、対象湖沼の水容積、湖沼の全リン・全窒素の初期値を予め調査することにより、湖沼の水質改善を実施する前の段階で、水質浄化材の必要個数を試算する方法の提案も併せて行った。

**キーワード:** 水質浄化、ポーラスコンクリート、ゼオライト、全リン、全窒素、画像解析、空隙構造

## 1. はじめに

湖沼や池などの閉鎖水域においては、工業排水や農業排水による重金属の流入や、家庭からの生活排水によるリンや窒素の流入より、富栄養化状態となってアオコが発生するなどの環境問題が近年顕在化している。アオコは景観の悪化だけでなく、腐敗するとカビ臭などの悪臭を生じ、かつ腐敗したアオコが水中で分解されると酸素が消費されるため、水中が酸欠状態になり魚の大量死を招くこともある。一方、藍藻類の中には、毒性を持つものも一部存在し、生物の生態系や人の健康に深刻な影響を及ぼす可能性も懸念されている。

このような背景を受け、ポーラスコンクリート（以降、PoC）の利用が検討されてきた。PoCは連続もしくは独立した空隙を多く含む。また、その空隙の多さから、透水性に優れており、日本においては植生基盤や生物の生息空間に用いられることもしばしばあり、近年の環境問題に対する関心の高まりと共に注目を集めているエコマテリアルの一つである。日本ではPoCを利用した水質浄化に関する研究も多くなされており、PoCに加えて、主に吸着材として用いられているゼオライトあるいは木炭をPoCに混入させた各種水質浄化材の開発もこ

れまでに進められている<sup>1), 2)</sup>。しかしながら、例えばゼオライトをPoCに混入（ゼオライト、セメント、粗骨材などを練り混ぜる）させると、セメントペーストがゼオライトの表面を覆い、その細孔を塞ぐことにより、ゼオライトが持つ浄化機能を十分に発揮しない場合がある。

そこで本研究では、まず、PoCの内部にゼオライトを設置した水質浄化材を作製し、琵琶湖南湖の水を対象として、富栄養化原因物質（リン・窒素）の浄化性能を把握した。続いて、画像解析を用いて浄化材の空隙構造把握を試みた。最後に、リンや窒素を低減するために必要な浄化材の個数を算定する方法についての検討を行った。

## 2. 球形 PoC による浄化材の作製

### 2.1 使用材料

セメントは密度: 3.16g/cm<sup>3</sup>の普通ポルトランドセメントを用い、粗骨材には表乾密度: 2.68g/cm<sup>3</sup>、粒径: 5~13mmの大府高槻市産の硬質砂岩砕石を、混和剤には密度 1.065g/cm<sup>3</sup>の高性能 AE 減水剤を使用した。ゼオライトは、粒径 3~7mmの秋田県二ツ井町で採掘されたクリノプチロル系天然ゼオライトを用いている。表-1にPoCの配合を示す。なお、ゼオライトはコンクリートに練り混ぜずに使用しているため、表中には記載していない。

### 2.2 作製方法

表-1 配合

水セメント比 W/C (%)	骨材粒径 (mm)	水 W (kg/m <sup>3</sup> )	セメント C (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 G (kg/m <sup>3</sup> )	高性能 AE 減水剤 AD (kg/m <sup>3</sup> )
21	5~13	72	343	1526	3.65

\*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 理工学部環境システム工学科講師 博士(工学) (正会員)

\*3 立命館大学 理工学部環境システム工学科

\*4 立命館大学 理工学部環境システム工学科教授 工博 (正会員)

球形 PoC は以下の手順により作製した。すなわち、まず、強制二軸練混ぜ式ミキサに、セメントと粗骨材を投入し、60 秒間練混ぜた。その後、高性能 AE 減水剤と水を注入し、90 秒間の練り混ぜを行った。練りあがったフレッシュな PoC を、直径 200mm の半球型の鋼製型枠 2 つにそれぞれ打設し、それぞれの中心部分に直径 70mm のくぼみを作り、そのくぼみに粒状のゼオライトを 700g 設置した（写真-1 参照）。設置面のゼオライトを覆うように PoC を敷き、バイブレーターで表面を締め固めた後、両型枠を突き合わせて、球形の PoC とした。球形 PoC を気中養生し、材齢 1 日で鋼製型枠を脱型し、写真-2 に示す浄化材を作製した。

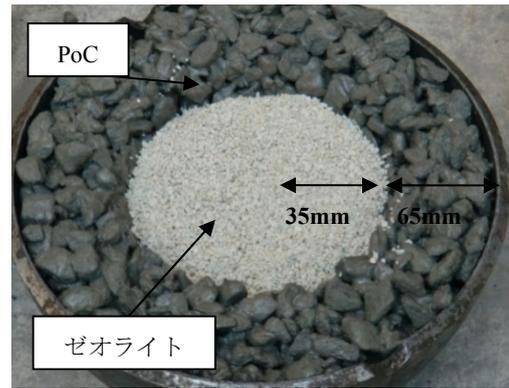


写真-1 供試体断面写真

### 3. 作製した浄化材の水質浄化作用の把握

#### 3.1 実験概要

縦 560cm、横 375cm、高さ 80cm の水槽を作製し、内部に浄化材 30 個を単管パイプで吊るすことにより等間隔で設置した（写真-3 参照）。琵琶湖南湖より約 16800L の水を取水し、同日に水槽内に入れた。水槽内の水は滞留状態である。実験は 6 月 27 日（取水日）から実施し、期間は 49 日間とした。1 週間ごとに水槽内から 2000ml の水を採取し、全リンおよび全窒素のそれぞれの濃度を分析した。



写真-2 水質浄化材

#### 3.2 実験結果および考察

##### (1) 全リン

図-1 に全リン濃度の測定結果を示す。図中に示す経過日数 0 日は、初期値であり、浄化材を設置する前の値である。49 日間の実験を行った結果、図より、早期で全リンの低減効果があることが確認できる。経過日数 0 日では 0.1mg/L であった全リンが、実験開始 7 日目で 0.023mg/L まで減少した。琵琶湖における全リンの環境基準値は 0.02mg/L であり、その基準値を概ね満たしている。その後も徐々に全リン濃度は減少し、最終日の経過日数 49 日目には 0.008mg/L となった。ただし、7 日目以降の全リン濃度の減少幅は小さいことから、球形 PoC とゼオライトを併用した浄化材の浄化効果は、約 7 日間で飽和状態になったと言える。



写真-3 水質浄化の設置状況

##### (2) 全窒素

図-2 に全窒素濃度の測定結果を示す。全リンの測定結果（図-1 参照）と同様、7 日目で急激な減少が見られた。経過日数 0 日では 0.74mg/L であった全窒素が、実験開始 7 日目で 0.25mg/L まで減少している。28、35 および 42 日目では若干大きい数値になっているものの、7 日目以降は概ね 0.2mg/L 前後付近で停滞した。琵琶湖における全窒素の環境基準値は 0.2mg/L である。本研究では、その値を下回る結果は得られなかったものの、実験

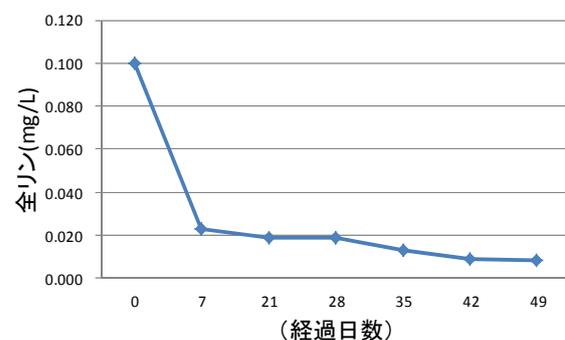


図-1 全リン分析結果

開始7日目で窒素化合物の低減効果が得られ、その後も概ね継続して効果を発揮することが明らかとなった。

#### 4. 画像解析による浄化材の空隙構造の把握

ここでは、既往の研究<sup>3)</sup>を参考に、水質浄化材の空隙構造の把握を試みた。具体的な手順としては、まず、水質浄化材と同じPoCで円柱PoC供試体を製作した。これを輪切りにして画像解析を行うことにより、各断面における空隙数、空隙面積、空隙周長および空隙表面積を算出するとともに、供試体単位体積当たりの全空隙表面積（空隙比表面積）を推定した。最後に、円柱PoC供試体の空隙比表面積から水質浄化材のPoC部分の全空隙表面積を推定し、浄化材の空隙構造を把握した。以下にその詳細を示す。

##### 4.1 円柱PoC供試体の概要

直径100mm、高さ200mmの円柱PoCを作製し、空隙部分にフレッシュなホワイトセメントペースト（W/C：30%）を充填した（写真-4参照）。使用材料および配合は、水質浄化材のものと全て同じである（2章参照）。

##### 4.2 画像解析による円柱PoC供試体の空隙数、空隙面積、空隙周長および空隙（比）表面積の算出

画像解析を行うにあたり、作製した円柱PoCを打設面から50mm間隔にコンクリートカッターで切断した。その後、4分割に輪切りされた各切断面を撮影し、画像解析ソフトにより二値化処理を行った。供試体切断面の一例を写真-5に示す。空隙部分にホワイトセメントペーストが充填されていることが確認できる。写真-5に示す切断面の画像解析結果を図-3に示す。図中の白色が粗骨材および骨材バイнда部分を示し、黒色が空隙（ホワイトセメントペースト）部分になっている。各切断面で得られた二値化画像を表-2に示す。表に示す二値化画像から、「空隙数」、「空隙面積」、「空隙周長」および「空隙表面積」を算出した。それぞれの用語の定義を概説するため、図-4に切断面を二値化した際に得られる画像の模式図を示す。「空隙数」は、図中の閉鎖している黒色部分の総数であり、空隙1個の面積を「空隙面積（図中の網掛け部分）」とした。また、「空隙周長」は、空隙1個の周囲の長さ（図中の赤色部分の長さ）と定義した。空隙が輪切り区間（50mm）において均一であると仮定し、「空隙周長」に「輪切り区間（50mm）」を乗じて、これを「空隙表面積」とした。得られた結果を表-3に示す。なお、表中の「空隙面積」および「空隙周長」は、平均値を示している。いずれの切断面においても、「空隙数」、「平均空隙面積」、「平均空隙周長」および「空隙表面積」ともに、それぞれの指標内で概ね同程度の値を示していることがわかる。したがって、高さ方向における空隙分布の変化は、ほとんど生じていないことが確認で

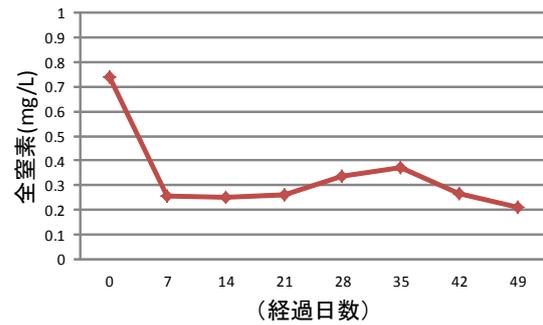


図-2 全窒素分析結果



写真-4 円柱PoC供試体



写真-5 円柱PoC供試体の切断面



図-3 円柱PoC供試体の切断面の二値化画像

きた。表-4に、「全空隙表面積」および「空隙比表面積」をそれぞれ示す。「全空隙表面積」とは、表-3に示す空隙表面積の総和である。一方、「空隙比表面積」とは、供試体単位体積当たりの全空隙表面積であり、「全空隙表面積」を直径100mm、高さ200mmの円柱供試体の体積で除したものである。

#### 4.3 浄化材の空隙構造の把握

表-4に示す「空隙比表面積」に、水質浄化材のPoC部分の体積を乗じることにより、水質浄化材の「全空隙表面積」を推定した。浄化材のPoC部分の体積は、次式により算出した。

$$V_{PoC} = \frac{4\pi r^3}{3} - \frac{4\pi a^3}{3} \quad (1)$$

ここで、 $V_{PoC}$ ：浄化材のPoCの体積、 $r$ ：水質浄化材（球形PoC）の半径（0.1cm）、 $a$ ：ゼオライト部分の半径（0.07cm）である。式(1)より、 $V_{PoC}$ は $0.004\text{m}^3$ となる。したがって、水質浄化材の「全空隙表面積」は $0.26\text{m}^2$ を得る。なお、この値は、空隙を円柱と見立てて算出したものであり、およその値である。

#### 5. 水質浄化材の全リンおよび全窒素の吸着効果および湖沼適用へ向けての水質浄化材必要個数の算出方法

3章では、球形ポーラスコンクリートとゼオライトを併用した水質浄化材を30個使用して、水量16800Lの試験水に対して、全リンおよび全窒素が7日間で環境基準値まで低減することが明らかとなった。一方、4章では、画像解析により、水質浄化材のPoC部分の空隙構造（全空隙表面積）を把握した。そこで本章では、両者の結果を踏まえて、水質浄化材1個当たりのゼオライトの量（700g）が全て一定であるため、浄化材が有する全リンおよび全窒素の吸着効果をPoCの空隙構造で定量化し、実際の閉鎖水域と考えられる湖沼へ適用する場合の浄化材必要個数の算出方法についての検討を行った。

表-5に、全リンおよび全窒素の吸着濃度と吸着量をそれぞれ示す。表中に示す濃度は、3章に示す水質分析結果（図-1および図-2における経過日数0および7日目のそれぞれの値）である。吸着濃度は、経過日数7日目の値から0日目の値を差し引くことで求めている。吸着量は、吸着濃度に水量16800Lを乗じて算出した。以上より、この表に示す吸着濃度および吸着量は、全リン・全窒素ともに、水質浄化材30個あたりの結果である。

続いて、全リンおよび全窒素の各吸着量を浄化材個数（30個）で除すことにより、「浄化材1個当たりの吸着量」を求めた。さらにこの値を全空隙表面積で除すことにより、「単位面積当たりの吸着量」も算出した。得られた結果を表-6に示す。

表-2 各断面における二値化画像

打設面からの距離	解析ソフトによる二値化画像 (黒色部が空隙部分)
50mm	
100mm	
150mm	
200mm	

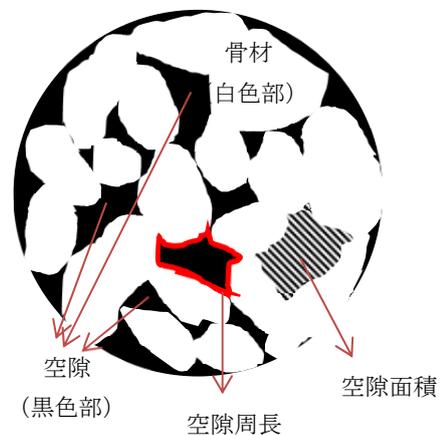


図-4 二値化画像の模式図

以上のことから、本研究で提案した水質浄化材を用いて実際の湖沼における全リンおよび全窒素を低減させる際は、対象湖沼の水容積、湖沼の全リンおよび全窒素の初期値をあらかじめ調査することにより、湖沼の水質浄化を実施する前の段階で、水質浄化材の必要個数を事前に試算することが可能である。

## 6. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) 琵琶湖南湖より取水した水を対象に、球形ポーラスコンクリートとゼオライトを併用した水質浄化材により水質浄化実験を行った結果、約7日間で全リンおよび全窒素の数値が琵琶湖における環境基準値を下回ることが明らかとなった。
- (2) 画像解析により、水質浄化材の空隙構造（空隙表面積）を明らかにした。空隙構造と水質浄化実験により得られた結果から、水質浄化材がもつ吸着効果を定量的に示した。
- (3) 対象湖沼の水容積、湖沼の全リンおよび全窒素の初期値をあらかじめ調査することにより、湖沼の水質浄化を実施する前の段階で、水質浄化材の必要個数を試算する方法を提案した。

本研究で作製した球形ポーラスコンクリートとゼオライトを併用した水質浄化材の水質浄化効果、ならびに浄化材必要個数の試算方法の有効性を検証するため、現在、東寺の池を利用して実験を行っている。そこでの結果が得られ次第、改めて報告する予定である。

## 謝辞

本研究で使用した鋼製型枠、琵琶湖南湖からの取水および水質分析においては、株式会社星山建設 星山達雄氏、杵本克二氏に援助して頂いた。また、実験の実施にあたり、立命館大学 市丸園子君、中川隆一氏にご協力を頂いた。ここに記して謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 坂井 忍, 水口裕之, 上月康則, 村上仁士: ポーラスコンクリートの水質浄化機能に及ぼす空隙特性, 高炉スラグおよびゼオライトの影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1, pp.164-174, 2001
- 2) 遠藤典男, 井上健典, 松岡保正: 木炭を混入したポーラスコンクリートの諸特性, Vol.30, No.2, pp.319-324, 2008
- 3) 梶尾 聡: ポーラスコンクリートの配合設計法と空隙性能に関する研究, 首都大学東京大学博士論文, pp.126-132, 2008
- 4) 坂井 忍, 水口裕之, 細谷 誠, 白井 朗: ポーラスコンクリートの水質浄化機能に及ぼす混和材および環境条件の影響, 土木学会第57回年次学術講演会, V-366, pp.731-732, 2002.9
- 5) 新西成男, 中澤隆雄, 張 日紅, 今井富士夫: ポーラスコンクリートの水質浄化特性に関する実験的研究, コンクリート工学次論文報告集, Vol.21, No.1, pp.247-252, 1999

表-3 各断面における空隙数, 空隙面積, 空隙周長および空隙表面積

打設面からの高さ (mm)	空隙数 (個)	平均空隙面積 (mm <sup>2</sup> )	平均空隙周長 (mm)	空隙表面積 (mm <sup>2</sup> )
50	56	43.7	8.2	23086
100	62	37.3	8.6	26677
150	58	37.3	9.0	26239
200	56	40.8	9.1	25615

表-4 全空隙表面積および空隙比表面積

全空隙表面積 (m <sup>2</sup> )	0.102
空隙比表面積 (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )	64.7

表-5 全リンおよび全窒素の吸着量計算結果

経過日数	濃度 (mg/L)	吸着濃度 (mg/L)	吸着量 (mg)
全リン			
0日	0.100	0.077	1294
7日	0.023		
全窒素			
0日	0.740	0.485	8153
7日	0.255		

表-6 浄化材 1 個当たりの吸着量および単位面積当たりの吸着量

	浄化材 1 個当たりの吸着量 (mg)	単位面積当たりの吸着量 (mg/m <sup>2</sup> )
全リン	43	166
全窒素	272	1048

