

事業の名称

地域連携による千波湖のアオコ抑制プロジェクト

〔事業責任者〕

（自治体等側）

水戸市公園緑地課・課長 市村 正一

（大学側）

工学部都市システム工学科・准教授 藤田 昌史

事業テーマ：地域環境の形成
自治体との連携
その他

連携先

水戸市、水戸商工会議所

プロジェクト参加者

市村 正一（水戸市公園緑地課 課長）

千波湖のアオコ集積防止対策

藤田 昌史（茨城大学工学部 准教授）

炭酸カルシウム系廃棄物を利用した

リン除去技術の開発

比佐 美南（茨城大学工学部 4 年）

リン除去実験とシミュレーション

和田祐之介（水戸商工会議所 会頭）

地域住民からの貝殻廃棄物の回収の

方法

プロジェクトの実施概要

①プロジェクトの目的

【背景】水戸市の貴重な水辺環境である千波湖（淡水湖、湖面積 332,131m²、平均水深 1.0m）は、近年、アオコの問題が深刻化している。水面景観

の悪化や悪臭が発生するなど親水性が損なわれており、地域住民から水環境の改善が強く望まれている。水戸市では、H26 年度からアオコ集積防止業務委託を行い、民間から募集したアオコ集積防止装置を設置し、発生したアオコを消滅させる運転を行っている。

【目的】千波湖のアオコ対策は短期的と長期的の両面の視点が必要となる。流域対策（生活排水対策、農地対策）がなされることにより、アオコ発生の原因となるリンの流入を抑えることが根治的な解決となるが、これには年月を要する。現在、水戸市では地域住民からの水環境改善の強い要望もあり、発生したアオコの集積を防止する装置を導入している。対症療法的な手段であり即効性はあるが、長期的な視野に立つと根治的な解決には至らない（図-1）。

本事業では、対症療法と根治療法の間位置付けられる対策として、リン吸着能に優れる炭酸カルシウム系廃棄物（卵殻、貝殻）を地域住民や企業から回収し、それをもとに安価なリン吸着剤

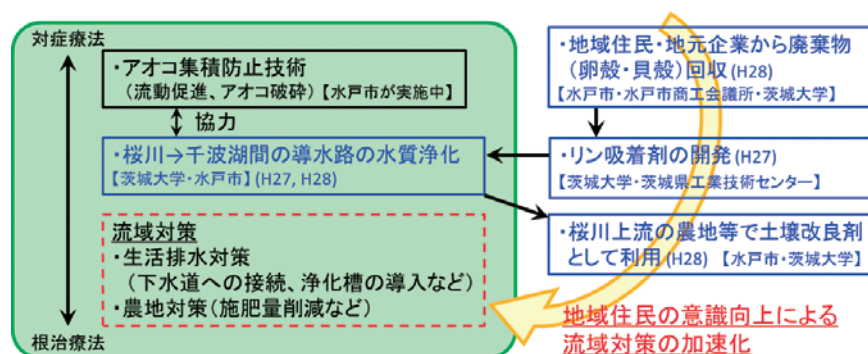


図-1 本事業の概念図

を開発して（協力：茨城県工業技術センター）、桜川から千波湖に流入する唯一の導水路に設置して、リン吸着を図ることで千波湖のアオコ発生を抑制することを目指す。卵殻や貝殻はスーパーでのペットボトル、牛乳パック等の回収と同様に、回収コーナーを設けて地域住民の手で運んでいただく。茨城県は鶏卵生産量が日本一であり、大洗町では貝殻廃棄物の処理に困っていることから、地元企業からの廃棄物回収も視野に入れる（協力：水戸商工会議所）。卵殻や貝殻は、土壤改良剤として利用できるが、リンが吸着することにより肥料の効果も期待される。そのため、桜川上流の農地を中心に農地還元する。桜川上流は下水道未接続、浄化槽未導入の地域が多いため、この地域の住民の流域対策の意識を向上してもらえようようなネットワークを組むことにより、根治的な解決の加速化を狙う。

②連携の方法及び具体的な活動計画

【自治体等の活動】

- ・桜川や湖内の水質データ、桜川からの導水量データ、H28年度も実施するアオコ集積防止装置の稼働データ等を提供していただく。特に、アオコ集積防止装置の稼働においては、本事業の提案技術と連携することにより相乗的なアオコ抑制効果を狙う。
- ・地域住民や関連企業からの廃棄物（卵殻、貝殻）の回収、桜川→千波湖の導水路で使用後のリン吸着廃棄物の農地還元のフロー開拓を茨城大学と連携して進める。

【大学の活動】

- ・現地（桜川→千波湖の導水路）で実証実験を実施する。
- ・プロジェクトの総括を行う。

当初計画では以上を予定していたが、今年度は導水路の流量が不安定だったため、現地では実証実験を行わず、室内の装置で模擬実験を実施した。また、現地でのリン除去の方法と効果をシミュレーションする検討も追加した。

③期待される成果

- ・水戸市が実施しているアオコ集積防止技術と連携することにより、千波湖のアオコ抑制の相乗効果が期待される。
- ・水戸市、水戸市商工会議所、茨城大学が連携することにより、地域住民を巻き込んで千波湖のアオコ対策に取り組むネットワークを創る。地域住民の意識向上を図り、流域対策を加速化させることにつながる。

プロジェクトの実施成果

①活動実績

【千波湖のアオコ集積防止】

水戸市が千波湖アオコ集積防止業務委託を実施した。湖南側にアオコ集積防止装置を設置し稼働させた。その結果、南西側の湖岸 200m の範囲において、アオコ集積防止の効果が得られた。詳細については、水戸市の報告書を参照されたい。

【千波湖の導水路でのリン除去方法の検討】

1. 方法

1.1 連続式 Ca^{2+} 溶出実験

連続式 Ca^{2+} 溶出実験では $32\mu\text{m}$ 以下のシジミ貝殻を使用した。シジミ貝殻粉末は、貝殻をハンマーと乳鉢で粉碎し、 $32\mu\text{m}$ 以下のふるいにかけて作成した。

本実験で使用した貝殻は粒径が細かく、連続式実験では水に流されてしまうため、開き目 $25\mu\text{m}$ のメッシュを用いて貝殻を包んだ。使用する貝殻量は、事前に実施した Ca^{2+} 溶出バッチ試験から溶出率を仮定し、35g とした。貝殻がメッシュの中で堆積する恐れがあるため、図-2 のようにメッシュを一定間隔で区切り堆積を防いだ。

貝殻を入れたメッシュをアクリル箱に挿入し、図-2 の実験装置を作成した。タンクに水を溜め、ヒーターを用いて水温を 25°C とした。そこからポンプで水を引き、アクリル箱の中を通過させることで Ca^{2+} を溶出させた。t=10s, 30s, 1min, 2min, ..., 7min の時間でサンプリングを行い、すぐに濾過をした。その後高速液体クロマトグラフィー（Shimadzu 社）で Ca^{2+} を分析した。

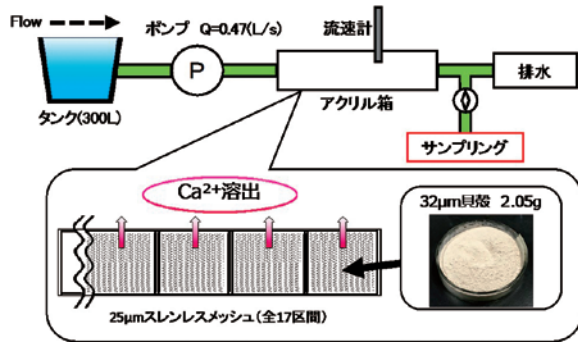


図-2 連続式 Ca^{2+} 溶出実験装置図

1.2 貝殻の Ca^{2+} 溶出時間特性把握試験

貝殻は 1.1 と同様の方法で作成し、 $106\mu\text{m}$ 以下のものを用いた。 $106\mu\text{m}$ 以下の貝殻 0.1g を $25\mu\text{m}$ のメッシュで包み、精製水中に入れ攪拌することで Ca^{2+} を溶出させた。一定時間でサンプリングを行い、その都度精製水の交換も行うことで長時間実験を続けた。その後高速液体クロマトグラフィーで Ca^{2+} を分析した。

1.3 千波湖における藻類・リン濃度変化のシミュレーション

千波湖における藻類、リン濃度変化のモデルを作成し、Peterson Matrix を図-3 に示した。藻類が増殖すると藻類濃度（以下、 X_{ALG} とする。）は上昇するが、藻類はリンを摂取して成長するため湖内のリン濃度は減少する。藻類が死滅すれば、 X_{ALG} は減少するが、死骸からリンが溶出するためリン濃度は上昇する。 r_1 は藻類の増殖速度式で、 r_2 は藻類の死滅速度式である。

	X_{ALG}	$\text{PO}_4\text{-P}$	
Growth of X_{ALG} with $\text{PO}_4\text{-P}$	1	$-\gamma_P$	r_1
Death of X_{ALG}	-1	γ_P	r_2

図-3 Peterson Matrix

また、使用した式を以下に示し、各パラメーターは表-1 に示した。

$$r_1 = K_{g\text{PO}_4\text{ALG},T_0} e^{\beta_{\text{ALG}}(T-T_0)} \frac{S_{\text{HPO}_4} + S_{\text{H}_2\text{PO}_4}}{K_{\text{HPO}_4\text{ALG}} + S_{\text{HPO}_4} + S_{\text{H}_2\text{PO}_4}} \frac{I}{K_I} \exp\left(1 - \frac{I}{K_I}\right) X_{\text{ALG}} \quad (\text{式 } 1)$$

$$r_2 = K_{\text{death,ALG},T_0} e^{\beta_{\text{ALG}}(T-T_0)} X_{\text{ALG}} \quad (\text{式 } 2)$$

$$V_P = \text{藻類のリン含有率}$$

$$V \frac{dX_{\text{ALG}}}{dt} = Q^{\text{in}} X^{\text{in}} - Q^{\text{out}} X^{\text{out}} + (r_1 - r_2) V \quad (\text{式 } 3)$$

$$V \frac{dX_{\text{ALG}}}{dt} = Q^{\text{in}} X^{\text{in}} - Q^{\text{out}} X^{\text{out}} + (\gamma_P r_2 - \gamma_P r_1) V \quad (\text{式 } 4)$$

表-1 藻類の成長式におけるパラメーター

$K_{g\text{PO}_4\text{ALG},20}(\text{1/min})$	藍藻飽和係数	0.00139
$K_I(\text{J/m}^2/\text{min})$	藍藻の照度飽和係数	10208.3
$K_{\text{HPO}_4\text{ALG}}(\text{gP/m}^3)$	藍藻のリン酸飽和係数	0.005
$K_{\text{death,ALG},20}(\text{1/min})$	藍藻の死滅飽和係数	0.00003
$\beta_{\text{ALG}}(\text{1/}^\circ\text{C})$	藍藻成長の温度補正係数	0.046
$X_{\text{ALG}}(\text{gCOD/m}^3)$	藍藻密度	計算値
$I(\text{J/m}^2/\text{min})$	照度	気象庁データ参照
$T(^\circ\text{C})$	導水路温度	25
$T_0(^\circ\text{C})$	標準状態温度	20

式 3 より X_{ALG} は藻類の流入と流出、増殖、死滅の量を考慮した。式 4 より $\text{PO}_4\text{-P}$ は DTP の流入と流出、藻類の DTP 摂取、藻類の死骸から溶出する DTP の量を考慮した。 r_1 式では本来窒素による制限も考慮されるが、千波湖における藻類増殖の制限因子はリンであるため¹⁾、窒素による影響はないと仮定した。また、湖内の水は完全混合とし、流入量と流出量は同量とした。

貝殻を利用したリン除去を行う場合、流量は貝殻の投入量を決定する重要な要素である。よって、現在の千波湖の状態におけるシミュレーションに加え、流量を制限し貝殻量を減少させた場合の藻類、リン濃度変化のシミュレーションを行った。流量最低値は、千波湖の蒸発量、滞留時間から算出した。蒸発量は、湖面の年蒸発量緯度分布と千波湖の面積を用いて算出した^{2) 3)}。導水路の流量を制限する場合、湖内の滞留時間が 200 日程度となるようにした⁴⁾。

水温、藻類濃度は季節によって変化するため、流量制限のシミュレーションは夏期と冬期に分けて行った。夏期の水温、藻類濃度をそれぞれ 25°C 、 200g/m^3 とし、冬期は 8°C 、 10g/m^3 と設定した。また、夏期はつくば（館野）の 8 月 7 日、冬期は 2 月 26 日の照度を用いた⁵⁾。晴天率を 100%、80%、40% とし、各々シミュレーション

ンを行った。

千波湖の導水量, DTP 濃度はそれぞれ $0.29\text{m}^3/\text{s}$, 0.104g/L である¹⁾。これを基に1日の貝殻からの Ca^{2+} 溶出率を仮定することで, リン除去に使用する貝殻量試算を行った。

2. 結果と考察

2.1 貝殻の連続式 Ca^{2+} 溶出能力評価実験

連続式 Ca^{2+} 溶出能力評価実験の結果を図-3に示した。 Ca^{2+} 濃度は平均で $21.72\text{mgCa}^{2+}/\text{L}$ であり, 現地 DTP 濃度の 0.104mgP/L と比較して200倍以上の Ca^{2+} 濃度を得ることができた。したがって, シジミ貝殻粉末を用いることで, $\text{Ca}^{2+} : \text{PO}_4^{3-} = 100 : 1$ の関係を実現できることが明らかとなった。

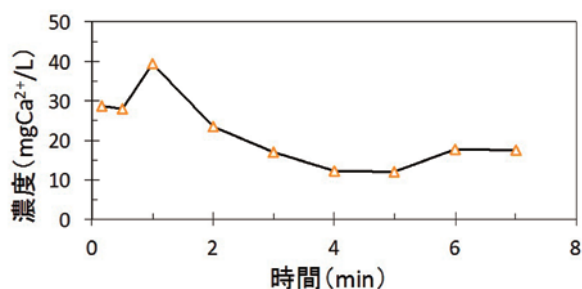


図-3 連続式 Ca^{2+} 溶出実験結果

2.2 Ca^{2+} 溶出の持続性及び時間特性

貝殻の Ca^{2+} 溶出時間特性把握試験の結果を図-4に示した。 Ca^{2+} は144時間溶出し続けたが, 12時間から傾きが非常になだらかになり, 溶出量が少なくなった。このことから, 数日間にわたり高い溶出能力を維持することはできないことがわかった。溶出量を日単位で表した図-5をみると1日目は高い値を示したが, 2日目以降は溶出量が大幅に減少した。このことから, 現地で貝殻を使ったリン除去を行う場合, 貝殻の交換は24時間で行うべきである。

2.3 千波湖におけるリン除去のシミュレーションと貝殻量の試算

2.3.1 シナリオ1 (現地条件)

前述のモデルを用いて, 千波湖における貝殻

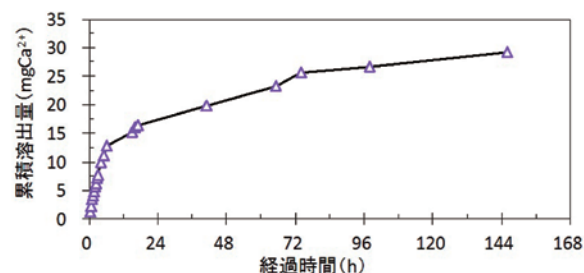


図-4 Ca^{2+} 累積溶出量の推移

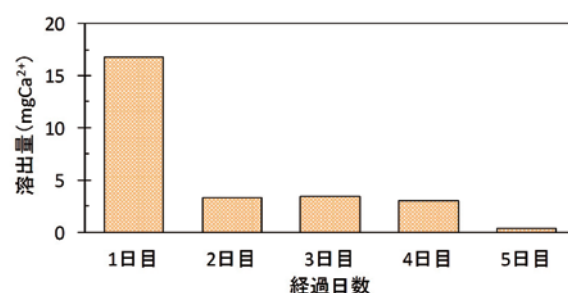


図-5 日ごとの Ca^{2+} 溶出量

を利用したリン除去のシミュレーションを行った。その結果, 藻類濃度は $500\text{g}/\text{m}^3$ から $150\text{g}/\text{m}^3$ に減少し, 定常値をとった。また, DTP 濃度も 0.1mg/L から 0.02mg/L に減少し, 除去日数は46日であった。

現地で使用する貝殻の量の試算を行った結果, 1日で使用する貝殻の量は 1530kg となった。よって, 今回のシミュレーションで使用する貝殻量は1年間でおよそ 548t となることから, 実現は難しい。

2.3.2 シナリオ2 (流量制限)

2.3.1の結果を受け, 導水路の流量を制限し, 使用する貝殻量を減少させた。流量最低値の計算結果が $0.02\text{m}^3/\text{s}$ であり, 蒸発量を上回ったため, $0.02\text{m}^3/\text{s}$ を流量最低値とした。流量を $0.29\text{m}^3/\text{s}$ から $0.02\text{m}^3/\text{s}$ に変更し, 夏期と冬期に分けてシミュレーションを行った。夏期の藻類濃度は, $500\text{g}/\text{m}^3$ から $33\text{g}/\text{m}^3$ に減少した。また, DTP 濃度も 0.1mg/L から 0.003mg/L に減少したが, 除去日数は144日であった。冬期の藻類濃度は $10\text{g}/\text{m}^3$ から $21\text{g}/\text{m}^3$ に増加したが, 定常値をとった。また, DTP 濃度は 0.1mg/L から 0.001mg/L に大

きく減少し、除去日数は9日であった。

シミュレーションの結果、冬期のリン除去の方が藻類、リン濃度の除去率が高く除去日数が短い。また湖内の藻類濃度が低いため、天候の影響を受けにくい。よって、千波湖の導水路における貝殻を利用したリン除去は冬期が適している。貝殻の量を試算すると1日に必要な貝殻の量は106kgであった。年間の貝殻使用量はおよそ39tとなるため、実現は十分可能である。

貝殻を利用したリン除去後の夏期における藻類増殖を確認するシミュレーションを行った。冬期のリン除去を行い湖内のDTP濃度を減少させたまま、夏期においてもリン除去を継続した。その結果、藻類濃度は $21\text{g}/\text{m}^3$ から $22\text{g}/\text{m}^3$ 、DTP濃度は $0.001\text{mg}/\text{L}$ から $0.002\text{mg}/\text{L}$ に1日で定常値をとった。したがって、藻類の増殖はないと判断した。

2.3.3 貝殻廃棄物を利用したリン除去による千波湖のアオコ対策

貝殻廃棄物を利用したリン除去による千波湖アオコ対策の方法を図-6に示す。導水路からDTPが豊富に流入するため湖内のDTP濃度は高く、水温が高い夏期はアオコが大発生する。11月になると水温が下がることにより藻類が減少し、冬期になると藻類が非常に少なくなる。藻類が少なくなる冬期において、導水路の流量を制限し貝殻を利用したリン除去を行う。すると、DTP濃度が非常に低い水が流入する一方で、湖内のDTP濃度が高い水は流出していく。この状態が続くと4月には湖内のDTP濃度が非常に低くなる。以降は常にDTP濃度が低い状態を保つことができるため、夏期も藻類は増殖しない。以上で貝殻廃棄物を利用したリン除去による千波湖のアオコ対策は完了となる。

②プロジェクトの達成状況

流水条件で貝殻から導水路リン濃度の100倍の Ca^{2+} を溶出し、貝殻が流水中でも十分な Ca^{2+} 溶

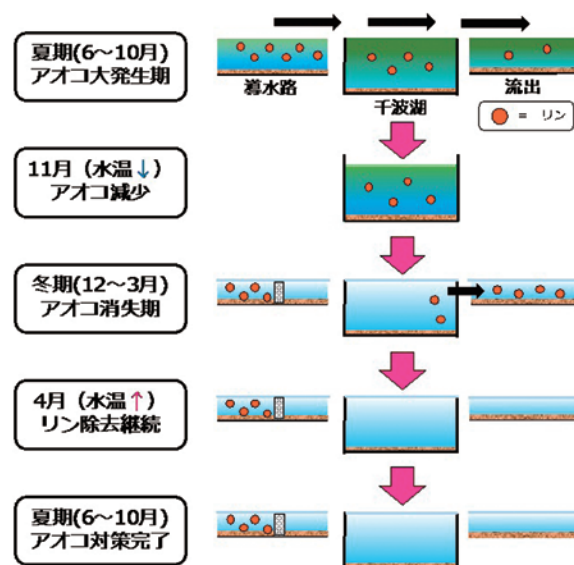


図-6 貝殻を利用した千波湖アオコ対策の概念図

出能力を持つことを明らかにした。貝殻廃棄物を利用したリン除去を千波湖に適用したシミュレーションを行い、貝殻廃棄物を利用したリン除去の効果を明らかにした。また、現地で使用する貝殻の量を試算し、貝殻を使ったリン除去が実現可能であることを明らかにした。貝殻廃棄物を利用した千波湖のアオコ対策を考案し、低コストで千波湖のアオコを除去できることを示した。

③今後の計画と課題

導水路でリン除去実証試験を実施し、回収したリンの利用方法を確立することで、地域連携による千波湖のアオコ対策が実現する。

参考文献

- 鈴木（2014）千波湖の富栄養化の変遷と雨天時流入負荷の影響評価，茨城大学工学部卒業論文。
- 環境省（2001）富栄養化対策マニュアル。
- 近藤純正（編著）（1994）水環境の気象学，朝倉書店，350pp。
- 水戸市，SENBA LAKE OFFICIAL WEB SITE。
- 気象庁，日射・赤外放射に関するデータ集。