

千葉工業大学大学院	学員	○天野佳正
千葉工業大学	正員	村上和仁、石井俊夫
日本大学理工学部	正員	松島 暉
哈爾濱工業大学		胡 翔

1. はじめに

閉鎖性水域における富栄養化の進行は、水資源・水産資源・観光資源としての価値の低下をもたらし、特に藍藻類をはじめとする有毒物質産生能を有する植物プランクトンの異常増殖は大きな問題となっている。

本研究では、湖沼生態系の秩序だった修復に配慮した水底質改善手法の確立を目的とし、栄養塩類の供給源となっている底泥の浄化に着目して検討を行った。具体的には、DAF 処理（Dissolved Air Flotation：加圧浮上分離処理法）、CRM 処理（Chemical Remediation Materials：底質改善材散布法）、さらに、両者を組み合わせたハイブリッド処理（DAF+CRM）を施し、各処理法における底泥からの栄養塩類溶出抑制効果の比較および各処理法が湖水中の N/P 比、植物プランクトン相に与える影響について実験的検討を行った。

2. 実験条件および方法

2.1 供試湖水および底泥

本研究では、湖沼水質保全特別措置法における指定湖沼であり最も汚濁が進行している手賀沼（千葉県我孫子市）を対象として検討した。本実験では、底泥は手賀沼上流部（ポート桟橋付近）、湖水はプランクトン密度の比較的高い手賀沼下流部（曙橋付近）の表層水を用いた。

2.2 各種処理方法の概要

(1) DAF 処理法

リアクター（円筒形部高：100cm、三角錐部高：30cm、リアクター径：30cm）に水道水を充填し、図1に示す微細気泡発生装置（加圧量：7 気圧、気泡発生方式：連続式、発生気泡径：約 $3\mu\text{m}$ 、容量：50L）で気泡をリアクター下方から噴出させ、気泡層を形成させた。次に、リアクター内に手賀沼底泥（7kg）を投入し、凝集剤（ポリ硫化第2酸化鉄）を数回に分けてリアクターに注入した。底泥投入から40分後にDAF操作を終了し、リアクター上層に浮上堆積した浮泥をフロスとして、リアクター底部に残った残泥を処理後底泥として回収した。

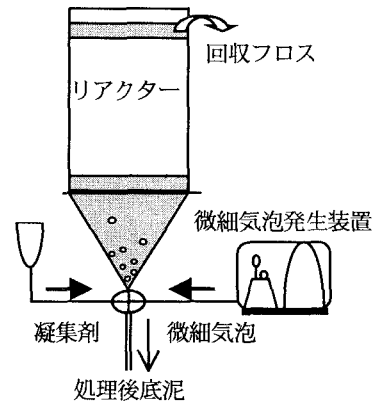
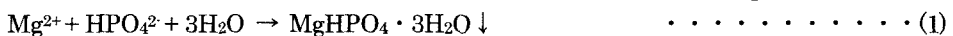


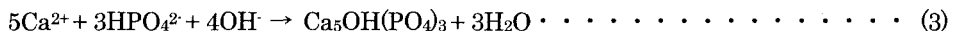
図1 加圧浮上分離装置

(2) CRM 処理法

底質改善材として用いた MgO は、水中の $\text{PO}_4\text{-P}$ または $\text{NH}_4\text{-N} \cdot \text{PO}_4\text{-P}$ と化学反応することにより、(1)式、(2)式に示したようにリン酸マグネシウム、リン酸マグネシウムアンモニウムとして栄養塩類を除去するものである。この反応は、それぞれ pH11、pH7 以上の条件下で進行するため、pH が重要因子となる。



また、 CaO も MgO と同様に、(3)式に示したような $\text{PO}_4\text{-P}$ との化学反応によりリン酸カルシウムとして栄養塩類を除去するものである。この反応も pH に依存しており、pH9.3 付近で反応が進行する。



2.3 水・泥質系マイクロコズム試験による評価

マイクロコズム試験における水量は300~1,000mLが一般的な規模であることから、本実験での評価系としては透明ガラス容器（高さ：14cm、直径：7.2cm、容量：470mL）を使用することとした。また、マイクロコズムにおける培養実験では、泥を充填した方が速やかに安定した系となりやすいことから、培養容器は各処理を施した湿泥 100g を容器の底に平坦になるように注入した上で湖水 380mL を静かに底層を乱すことなく充填し、マイクロコズムとして定温インキュベータ（20℃）にて培養を行った。培養試験条件は、明条件（20,000Lux）または暗条件とし、静置培養を行った。

培養系は、表1に示すように、未処理系（Run1）、DAF 処理系（Run2）、MgO 散布系（Run3）、CaO 散布系（Run4）、MgO ハイブリッド系（Run5）、CaO ハイブリッド系（Run6）の6系とした。培養期間は約1ヶ月間とし、分析項目はT-N、T-P、NH₄-N、PO₄-P、Chl-a およびプランクトン相の6項目とした。なお、CaO ハイブリッド系（Run6）における分析項目はT-N、NH₄-N および Chl-a の3項目である。

3. 結果および考察

3.1 各処理系における栄養塩類抑制効果

未処理系（Run1）におけるNH₄-NおよびPO₄-P現存量をそれぞれ100とした時の各処理法の抑制効果および栄養段階を図2に示した。また、栄養段階は、文献値からT-N、T-Pについてそれぞれ貧栄養状態（0.02~0.2mg/L、0.002~0.02mg/L）、中栄養状態（0.1~0.7mg/L、0.01~0.03mg/L）、富栄養状態（0.5~1.3mg/L、0.01~0.09mg/L）とし、マイクロコズム培養期間中、それらの濃度が維持されたものと仮定して決定した。

未処理系（Run1）は、T-Nは中栄養、T-Pは富栄養状態を示しており、富栄養化が進行した状態であることが読み取れる。また、未処理系（Run1）をDAF 処理（Run2）することにより、T-Nの栄養段階は貧栄養、T-Pは中栄養または貧栄養状態への抑制が観察された。このことから、DAF 処理ではリンよりも窒素の抑制効果の高いことが明らかとなった。

CRM 処理であるMgO 散布系（Run3）およびCaO 散布系（Run4）はいずれもT-Pの抑制率が高く、T-Pにおける栄養段階も貧栄養状態となった。また、MgO 散布系（Run3）とは対照的にCaO 散布系（Run4）ではT-Nが多量に溶出し、栄養段階は中栄養から富栄養状態へと富栄養化が進行した。

DAF 処理とMgO 散布のハイブリッド処理（Run5）では、T-NおよびT-Pが抑制されたため、栄養段階はいずれも貧栄養状態となった。DAF 処理とCaO 散布のハイブリッド処理（Run6）では、CaO 散布系（Run4）と同様にT-Nの溶出が認められ、T-Nは未処理系（Run1）よりも高い中栄養状態となった。

以上より、DAF 処理では窒素の抑制効果が高く、CRM 処理ではリンの抑制効果が高いこと、また、ハイブリッド処理することにより、栄養塩類を富栄養状態の湖沼から貧栄養状態まで改善できることが明らかとなった。特にDAFとCRM（MgO）のハイブリッド処理は湖沼の生態系の秩序だった環境再生という観点

表1 培養系および底質改善材散布量

培養系	Run	散布量 (g/m ²)
未処理系	Run1	-
DAF 処理系	Run2	-
MgO 散布系	Run3	400
CaO 散布系	Run4	200
DAF+MgO 散布系	Run5	400
DAF+CaO 散布系	Run6	100

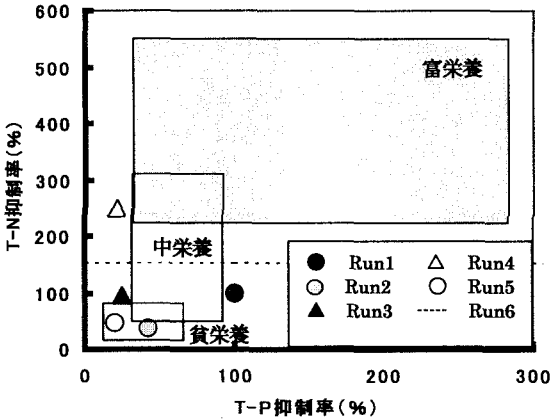


図2 各処理系における栄養段階

からして適切なものと考えられた。

3.2 各培養系における N/P 比制御効果

図3に各処理系における N/P 比を植物プランクトンの体組成比、すなわち植物プランクトン体内に取り込む N/P 比である 7.2 (レッドフィールド比) で割ったものを縦軸に、培養期間中の Chl-a の最大値を横軸に、また、そのときの植物プランクトンの優占種についての関係を示した。また、栄養段階は前述と同様の方法で決定した。

未処理系 (Run1) では、N/P 比および Chl-a が増加し、このときの N/P 比は中栄養から富栄養段階と高いことを意味している。また、植物プランクトン優占種はアオコ形成藻類である藍藻類 *Microcystis aeruginosa* および *Anabaena spiroides* の出現が認められた。

DAF 処理系 (Run2) では、N/P 比、Chl-a の減少に伴い優占種は未処理系 (Run1) の藍藻類から珪藻類 *Melosira varians*, *Cyclotella* sp. へ変遷し、栄養段階は貧栄養状態を下回った。DAF 処理系 (Run2) では、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 抑制効果よりも $\text{NH}_4\text{-N}$ 抑制効果の方が高く、この $\text{NH}_4\text{-N}$ の抑制による N/P 比の低下が藍藻類の優占化を妨げたものと考えられた。

MgO 散布系 (Run3) および CaO 散布系 (Run4) では、N/P 比および Chl-a は減少傾向にあったが、優占種は藍藻類となった。ここで、MgO 散布系 (Run3) では N/P 比が低い値を示していることが確認できるが、Chl-a が最大値を示した数日前には N/P 比の上昇が確認されており、この時点では藍藻類の優占化が生じたものと考えられた。また、CaO 散布系 (Run4) における栄養段階は富栄養状態となっており、N/P 比の上昇により藍藻類の優占化が生じたものと考えられた。

DAF 処理と MgO 散布のハイブリッド処理 (Run5) では、N/P 比および Chl-a は急激に減少する傾向を示し、優占種も藍藻類から鞭毛藻類 *Chlamydomonas* sp. へと変化した。また、N/P 比の栄養段階は、貧栄養段階より低い値を示している。

以上のことより、植物プランクトン相を決定する上で、N/P 比は重要な意味を持つが、N/P 比が上昇することにより有毒アオコ形成藻類である藍藻類の優占化を招き易く、逆に、N/P 比を減少させることができれば藍藻類から珪藻類や鞭毛藻類へ優占種を人為的にコントロールできる可能性が示唆された。

4. まとめ

本研究は、各種底泥処理法における栄養塩類溶出抑制効果の比較および湖水中の N/P 比、植物プランクトン相に与える影響について検討を加え、湖沼生態系に配慮した水・底質改善手法の確立を試みたものである。

- ① DAF 処理ではリンの除去効果と比べ、窒素の除去効果が高く、CRM 処理ではリンの除去効果が高いことが明らかとなった。
- ② ハイブリッド処理を施すことにより栄養塩類を富栄養状態の湖沼から貧栄養状態まで改善できることが明らかとなり、特に DAF と CRM (MgO) のハイブリッド処理は湖沼の生態系の秩序だった環境再生という観点からして適切なものと考えられた。
- ③ 水域の植物プランクトン相を決定する上で、N/P 比は重要な意味を持つが、N/P 比が上昇することにより有毒アオコ形成藻類である藍藻類の優占化を招き易く、逆に、N/P 比を減少させることができれば藍藻類から珪藻類や鞭毛藻類へ優占種を人為的にコントロールできる可能性が示唆された。

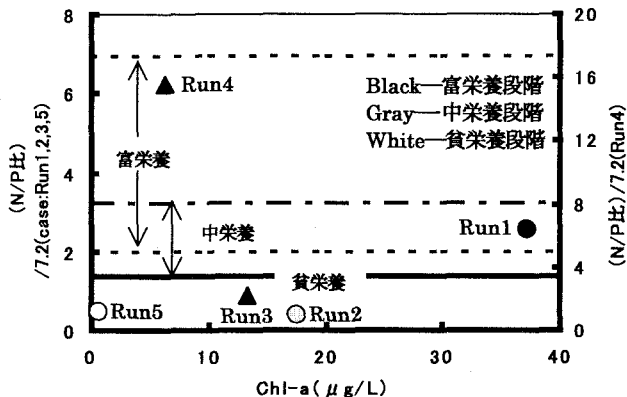


図3 N/P 比、Chl-a および植物プランクトン優占種の関係