

〔報文〕

植物プランクトンを活用した水質浄化技術の検討(第3報)

石川県保健環境センター 環境科学部

秋澤 久美子・前田 空人・原田 由美子

川畑 陵介・吉田 秀一・安田 能生弘

健康・食品安全科学部

清水 隆二

石川県危機対策課

古澤 佑一

〔和文要旨〕

石川県の河北潟では化学的酸素要求量(COD)の環境基準を未だに達成していない。河北潟におけるCODの負荷割合については、4~10月の平均で内部生産が約6割を占めていることがこれまでの県の調査で明らかになっている。内部生産の低減には潟に流入する栄養塩類の低減が課題である。そこで、本研究では、新たな水質浄化技術として考案した、河北潟に在来する植物プランクトンを用いて水中の栄養塩類を低減する実験装置による浄化実験を行い、水理的滞留時間(HRT)0.18日の場合、装置の水容量1Lあたり1日に硝酸態窒素($\text{NO}_3\text{-N}$)1.7mg、リン酸態リン($\text{PO}_4\text{-P}$)0.11mgを除去できることを確認した。

キーワード：河北潟，湖沼，植物プランクトン，水質浄化，除去速度

本報及びそれに先行する既報の内容については以下の学会等で発表した。

第30回全国環境研協議会東海・近畿・北陸支部研究会，2016/1/14~15，滋賀県大津市

第50回日本水環境学会年会，2016/1/16~18，徳島県徳島市，以上第1報

第31回全国環境研協議会東海・近畿・北陸支部研究会，2017/1/26~27，福井県福井市

第51回日本水環境学会年会，2017/3/15~17，熊本県熊本市，以上第2報

第52回日本水環境学会年会，2018/3/15~17，北海道札幌市 第3報

1 はじめに

石川県の河北潟，木場潟及び柴山潟の3湖沼においては，昭和49年及び52年に環境基準を当てはめてから未だに化学的酸素要求量(COD)の環境基準を達成していない¹⁾。県の調査では，河北潟のCOD汚濁負荷の内訳は，4~10月の暖候期には内部生産が約6割になると報告している²⁾。

当センターがこれまでに実施した「浮葉植物による水質浄化と植栽・利用に関する研究」では，浮葉植物(ヒシ)を植えていない対照区であっても，植物プランクトンの増殖により，模擬湖沼水中の $\text{NO}_3\text{-N}$ 及び $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度が減少したと報告した³⁾。また，「河北潟における難分解性有機物に関する実態調査」では，春夏は易分解性の懸濁態有機物が多く，この成分と植物プランクトンの指標であるChl aとの相関が高いことから，内部生産を

Examinations of the Water Quality Improvement Technology with Utilizing an Intake of Nutrient Salts by Phytoplanktons (3rd Report). by AKIZAWA Kumiko, MAEDA Sorato, HARADA Yumiko, KAWABATA Ryosuke, YOSHIDA Syuichi and YASUDA Nobuhiro (Environmental Science Department, Ishikawa Prefectural Institute of Public Health and Environmental Science), SHIMIZU Ryuji (Health and Food Department, Ishikawa Prefectural Institute of Public Health and Environmental Science), FURUSAWA Yuichi (Ishikawa Prefectural Crisis Management Division)

Key words : Kahokugata Lagoon, Lakes, Phytoplankton, Water Quality Improvement, Removal Speed

低減させることが水質浄化に重要であることを報告した⁴⁾。

内部生産は渦内部での植物プランクトンの増殖に起因し、その増殖は流入河川水中の窒素・リン等の栄養塩類に依存する。従って、内部生産の低減には流入河川水中の窒素・リンの低減が課題である。

そこで、前報（第1報及び2報）では、新たな水質浄化技術として、河北渦に在来する植物プランクトンを用いて、水中の栄養塩類を低減する実験装置を考案し、その性能を検討した⁵⁾⁶⁾。第1報⁵⁾では、栄養塩類を低減するために必要な培養槽の容量について検討し、容量10Lの培養槽を用いて、河北渦への流入河川の一つである森下川河川水中のNO₃-N約0.3mg/Lを検出下限値（濃度0.01mg/L）未満まで低減できることを確認した。また、植物プランクトンがCOD濃度で75mg/LであればNO₃-Nを低減することができた。第2報⁶⁾では、CODとChl a濃度を測定し、正の相関が認められたことから、植物プランクトンの量の目安としてChl aを用いることとした。第1報と同条件で実験を行った結果、Chl a 100μg/Lあたり0.04~0.09mg/LのNO₃-Nを除去できることを確認した。また、Chl a 100μg/Lあたり約0.02mg/Lもしくはそれ以上のPO₄-Pを除去できると考えられた。

本報では、本装置の性能を評価するため、第2報の栄養塩を添加した河川水の水質浄化実験の追加試験を行った（栄養塩添加試験）。次いで、分離膜からペリスタルティックポンプで吸引する速度（処理速度）を上げることにより水学的滞留時間（HRT）の短縮を検討した（HRT短縮試験）。また、これらの結果について除去速度を算出したので報告する。

2 実験装置と方法

2.1 実験装置

実験装置の概要を図1に示した。ペリスタルティックポンプは前報より流量の大きなものと交換し、その他は、第2報と同じ装置を使用した。装置の稼働条件（稼働時間、原水及び培養水に用いた水等）及び測定項目は、第

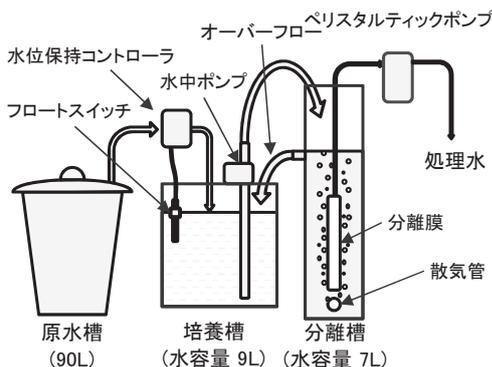


図1 実験装置の概略図

2報と同条件とした。処理速度は、栄養塩添加試験では第2報と同じ、HRT短縮試験では変化させて実験を行った。

2.2 浄化実験

(1) 栄養塩添加試験

第2報及び本報の栄養塩添加試験の実験条件を表1に示した。第2報の栄養塩添加試験（原水にNO₃-N約3.0mg/L、PO₄-P約0.1mg/L相当の硝酸及びリン酸を添加した森下川河川水を使用（表1の添加①））では、NO₃-Nが約3割、PO₄-Pが全量除去された。この時、NO₃-Nの除去率が約3割にとどまった要因が、PO₄-Pが全量除去されたことによりChl aの増殖が阻害されたためと考え、本試験ではリン酸の添加量を前報の10倍（PO₄-P約1.0mg/L相当（表1の添加②））とした。

表1 実験条件（栄養塩添加試験）

条件項目	期 間	栄 養 塩 濃 度
添加なし	H28.4/7 ~4/27	森下川河川水 NO ₃ -N濃度 0.3~0.5 mg/L PO ₄ -P濃度 0.01~0.03 mg/L
添 加 ①	H28.5/16 ~5/24	森下川河川水に硝酸、リン酸を添加 NO ₃ -N濃度 3.0 mg/L PO ₄ -P濃度 0.1 mg/L
添 加 ②	H28.5/25 ~6/24	森下川河川水に硝酸、リン酸を添加 NO ₃ -N濃度 3.0 mg/L PO ₄ -P濃度 1.0 mg/L

(2) HRT短縮試験（1回目）

処理速度を変化させ、HRT短縮試験を行った。原水には森下川河川水を使用し、処理速度を2, 3, 5, 8L/hと変化させた。この場合のHRTは、それぞれ1, 0.6, 0.4, 0.25日となった。なお、処理速度を変更して3HRT経過後に採水した。

(3) HRT短縮試験（2回目）

(2)の再現性確認のため、処理速度以外を同条件で再試験を行った。(2)ではChl a濃度が十分でなかったと考え、Chl a濃度が500μg/L程になってから、試験を開始した。処理速度を2, 4, 8, 11L/hとし、この場合のHRTは1, 0.5, 0.25, 0.18日となった。11L/hは、本装置処理速度の最大値であった。なお、HRT 0.18日の条件においては、多量の原水が必要であったため、1日に2回（10時、16時）採水を行った。

2.3 除去速度

第1報の培養槽容量検討試験、第2報と本報の栄養塩添加試験及び本報のHRT短縮試験の結果について、装置の水容量（培養槽+分離槽の水容量）あたりの除去速度及びChl a重量あたりの除去速度を算出した。

装置の水容量あたりの除去速度は、装置の性能を評価する目的で、NO₃-N又はPO₄-Pの除去速度（mg/day）を装置の水容量で除して算出した。これは、除去濃度を

HRTで除したものと同一である。

装置の水容量当たりの除去速度 (mg/(L・day))

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\text{除去速度 (mg/day)}}{\text{装置の水容量 (L)}} \\
 &= \frac{\text{除去濃度 (mg/L)} \times \text{処理速度 (L/h)} \times \text{稼働時間 (h/day)}}{\text{装置の水容量 (L)}} \\
 &= \frac{\text{除去濃度 (mg/L)}}{\text{HRT (day)}}
 \end{aligned}$$

また、Chl a濃度とNO₃-N又はPO₄-P除去濃度との関係を検討する目的で、第2報ではChl a 100μg/LあたりのNO₃-N又はPO₄-P除去濃度を求めたが、本報ではChl a重量あたりの除去速度として検討した。Chl a重量あたりの除去速度は、装置の水容量当たりの除去速度(除去速度)をChl a濃度で除して、単位をμgに揃えて算出した。

Chl a重量あたりの除去速度 (μg/(μg-Chl a・day))

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\text{除去速度 (mg/day)} \times 1000}{\text{装置の水容量 (L)}} \times \frac{1}{\text{Chl a (}\mu\text{g/L)}} \\
 &= \frac{\text{除去濃度 (mg/L)} \times 1000}{\text{HRT (day)} \times \text{Chl a 濃度 (}\mu\text{g/L)}} \\
 &= \frac{\text{装置の水容量あたり除去速度 (mg/(L・day))} \times 1000}{\text{Chl a 濃度 (}\mu\text{g/L)}}
 \end{aligned}$$

なお、HRT短縮試験(1回目)については、Chl aの増殖が十分でなかったため、Chl a重量あたりの除去速度については検討していない。

3 結果と考察

3・1 浄化実験

(1) 栄養塩添加試験(追加試験)

NO₃-N又はPO₄-Pの原水中濃度及び処理水中濃度並びにChl aの培養水濃度の推移を図2、3に示した。添加なし及び添加①の結果については、第2報で述べたとおりである。添加②では、NO₃-N約3割(除去濃度1.2mg/L)が、PO₄-P約2割(除去濃度約0.15mg/L)が除去された。PO₄-Pの添加量を上げてNO₃-Nの除去濃度がほぼ変わらなかった要因として、栄養塩の添加量が過剰であったことが考えられた。このことから、本装置の適用

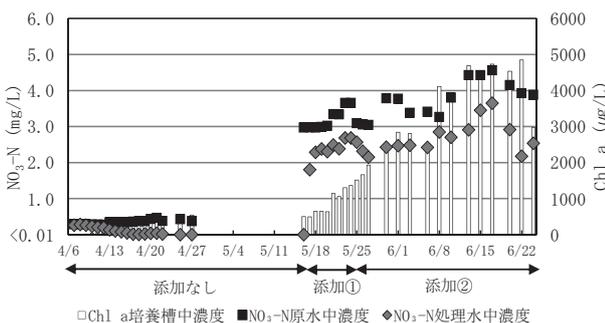


図2 NO₃-N及びChl aの濃度推移(栄養塩添加試験)

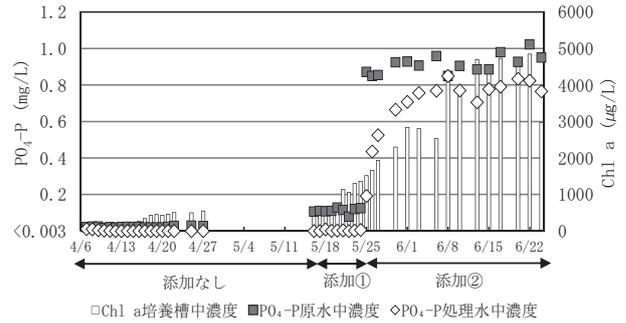


図3 PO₄-P及びChl aの濃度推移(栄養塩添加試験)

範囲について、原水中濃度がNO₃-N約1.2mg/L、PO₄-P約0.15mg/Lが上限であることが示された。

(2) HRT短縮試験(1回目)

NO₃-N又はPO₄-Pの原水中濃度及び処理水中濃度並びにChl aの培養槽中濃度の推移を図4、5に示した。処理速度を3L/h(HRT 0.6日)とした場合、NO₃-Nは約8割、PO₄-Pは全量除去された。この時、NO₃-Nを完全に除去するにはChl aの濃度が十分ではなかったと考え、その後4日間培養させた後に、処理速度を8、5L/hと変化させた。その結果、NO₃-N及びPO₄-Pはほぼ全量除去できた。

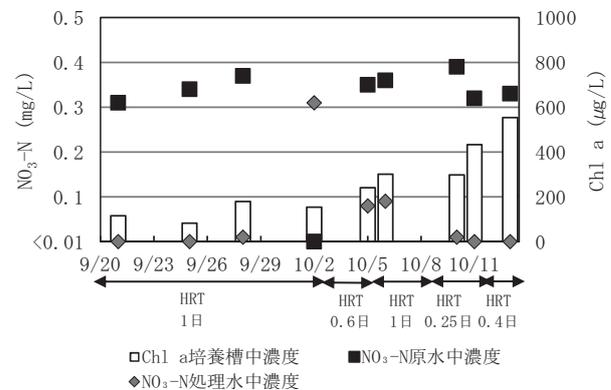


図4 NO₃-N及びChl aの濃度推移(HRT短縮試験(1回目))

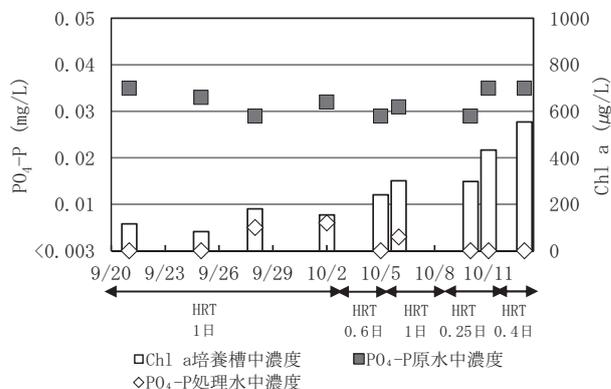


図5 PO₄-PとChl aの濃度推移(HRT短縮試験(1回目))

(3) HRT短縮試験(2回目)

NO₃-N又はPO₄-Pの原水中濃度及び処理中濃度並びに

Chl aの培養槽中濃度の推移を図6, 7に示した。処理速度を11L/h (HRT 0.18日)とした場合であっても, NO₃-N及びPO₄-Pは全量除去できた。

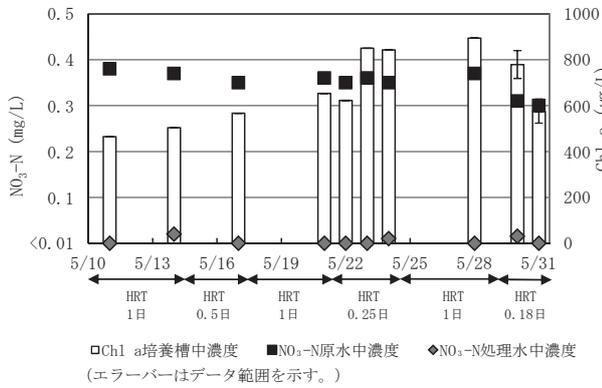


図6 NO₃-N及びChl aの濃度推移 (HRT短縮試験 (2回目))

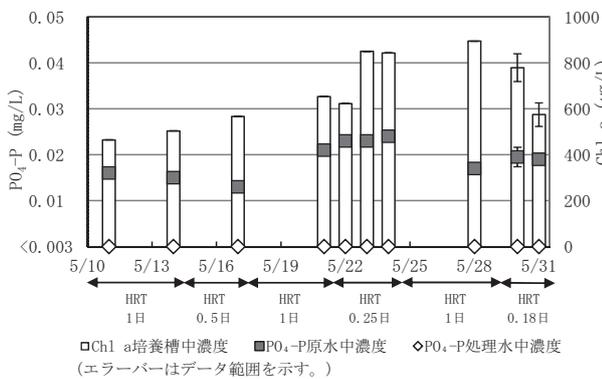


図7 PO₄-PとChl aの濃度推移 (HRT短縮試験 (2回目))

3・2 除去速度

装置の水容量あたりの除去速度を図8に, Chl a重量あたりの除去速度を図9に示した。

装置の水容量あたりの除去速度について, 培養槽容量検討試験では, 容量を小さくするほど除去速度は大きくなり, 10LでNO₃-N 0.3mg/(L・day), PO₄-P 0.01mg/(L・day)となった。栄養塩添加試験では, 添加により除去速度は

大きくなり, 添加②でNO₃-N 1.2mg/(L・day), PO₄-P 0.15mg/(L・day)となった。HRT短縮試験では, HRTを短縮するほど除去速度は大きくなり, 1回目ではHRT 0.25日でNO₃-N 1.4mg/(L・day), PO₄-P 0.09mg/(L・day)となり, 2回目ではHRT 0.18日でNO₃-N 1.7mg/(L・day), PO₄-P 0.11mg/(L・day)となった。PO₄-Pの除去速度が2回目に比べ, 1回目で大きくなったのは, 原水中PO₄-P濃度が1回目の方が高かったためである。栄養塩添加試験及びHRT短縮試験において, 除去速度の最大値は同程度となった。

Chl a重量あたりの除去速度について, 培養槽容量検討試験では, 容量を小さくするほど除去速度は大きくなり, 10LでNO₃-N 0.3µg/(µg-Chl a・day), PO₄-P 0.01µg/(µg-Chl a・day)となった。栄養塩添加試験では, NO₃-Nは添加なしと添加①で除去速度は同程度 (0.8µg/(µg-Chl a・day)), PO₄-Pは添加①で除去速度は最大 (0.09µg/(µg-Chl a・day))となった。しかし, 添加②ではNO₃-N及びPO₄-Pともに除去速度は小さくなった。これは, Chl a濃度は栄養塩を添加するほどに増加した一方で, NO₃-N及びPO₄-Pの除去濃度は一定量以上にはならなかったため, 本装置条件下では, Chl aの増殖とNO₃-N又はPO₄-Pの除去濃度との間に, 単純な比例関係が成り立つわけではないことが示された。この要因として, 窒素及びリン以外の植物プランクトンの増殖に必要な鉄分やケイ素などの栄養成分が不足していたこと, 培養槽の容量に対して植物プランクトン量が過剰となったために水が濁り, 光が奥まで届かないために光合成の効率が悪くなったこと等が考えられたが, 詳細は不明である。HRT短縮試験 (2回目) では, HRTを短縮するほど除去速度は大きくなり, HRT 0.18日でNO₃-N 2.5µg/(µg-Chl a・day), PO₄-P 0.1µg/(µg-Chl a・day)となった。

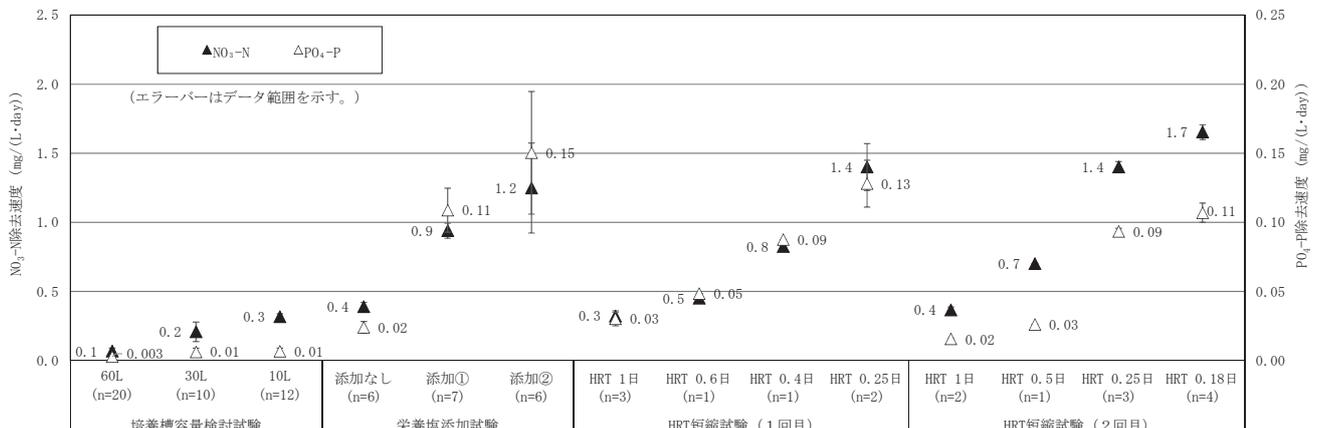


図8 装置の水容量あたりの除去速度

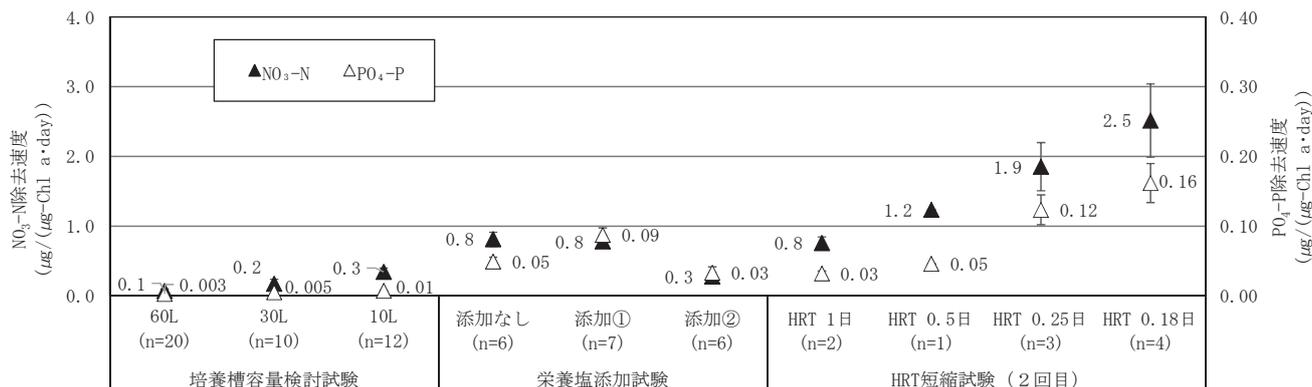


図 9 Chl a重量あたりの除去速度

4 まとめ

- (1) 栄養塩添加試験の結果、本装置では装置の水容量 1Lあたり 1日にNO₃-N約1.2mg、PO₄-P約0.15mg除去できた。
- (2) HRT短縮試験の結果、処理速度を11L/h (HRT 0.18日)とした場合でも、森下川河川水中のNO₃-N及びPO₄-Pは全量除去できた。
- (3) HRT 0.18日とした場合、装置の水容量 1Lあたり 1日にNO₃-N 1.7mg、PO₄-P 0.11mg除去できた。
- (4) HRT 0.18日とした場合、Chl a重量 1μgあたり 1日にNO₃-N 2.5μg、PO₄-P 0.1μg除去できた。

文 献

- 1) 石川県：平成28年度公共用水域及び地下水の水質測定の結果報告書 (2017)
- 2) 石川県環境安全部：河北潟水質保全対策検討調査報

告書 (2006)

- 3) 柿澤隆一, 小西秀則, 玉井徹, 亀井とし, 本田和子：浮葉植物による水質浄化と植栽・利用に関する研究 (中間報告) —模擬水路を用いた水質浄化の検討—, 石川県保健環境センター研究報告書, **47**, 1-6 (2010)
- 4) 安田能生弘, 古澤佑一, 川畑陵介, 牧野雅英, 谷村睦美, 亀井とし：河北潟における難分解性有機物に関する実態調査 (最終報), 石川県保健環境センター研究報告書, **52**, 1-6 (2015)
- 5) 古澤佑一, 川畑陵介, 安田能生弘, 清水隆二：植物プランクトンを活用した水質浄化技術の検討 (第1報), 石川県保健環境センター研究報告書, **53**, 14-17 (2016)
- 6) 原田由美子, 古澤佑一, 吉田秀一, 安田能生弘, 清水隆二：植物プランクトンを活用した水質浄化技術の検討 (第2報), 石川県保健環境センター研究報告書, **54**, 52-55 (2017)