

超微細気泡による生物接触曝気式 水質浄化法の開発

藤長愛一郎¹・笹本譲²・川西順次³・窪原拓馬⁴・吉田幸司⁵

¹正会員 工修 M.S. 鴻池組 土木本部技術部 (〒541-0057 大阪市中央区北久宝寺町3-6-1)

²正会員 M.S. 鴻池組 土木本部技術部 (〒541-0057 大阪市中央区北久宝寺町3-6-1)

³正会員 鴻池組 土木本部技術部 (〒541-0057 大阪市中央区北久宝寺町3-6-1)

⁴工修 鴻池組 土木本部技術部 (〒541-0057 大阪市中央区北久宝寺町3-6-1)

⁵正会員 工修 鴻池組 土木本部技術部 (〒541-0057 大阪市中央区北久宝寺町3-6-1)

閉鎖性水域の水処理技術として、既存の水処理技術の中からメンテナンスが省力化できる芯材入りひも状微生物接触材と超微細気泡発生装置を組み合わせた水処理システムを開発し、富栄養化した公園内の池で性能確認実験と実証実験を行った。性能確認実験では、2m³のタンクを池の中に設置し、水温や日照時間等、底泥以外の条件を池と同じにした。この実験では、BOD₅や透視度が実験開始直後から改善され、1ヶ月後にはBOD₅は初期値6mg/Lが1mg/Lに、透視度は初期値40cmが100cm以上にまで改善された。そして、最適なモジュールの量と配置を把握するために、池を模擬した水域での実証実験を行い、アオコの発生防止などに効果が認められた。

キーワード：水質浄化、閉鎖性水域、芯材入りひも状接触材、超微細気泡、食物連鎖

1. はじめに

近年、池や湖沼などの閉鎖性水域では、見た目や臭気などの不快感をなくし、親水性を増して、地域の人々が水辺を楽しめるようにすることが望まれている。しかしながら、池や湖沼の水質は一般的に、有機物質、窒素やリンが過剰に含まれているため、汚濁が進み、アオコが発生することにより、臭気や景観上の問題を引き起こしている例が多く見られる。また、底質の酸素欠乏による硫化物などの悪臭物質の発生が見られる場合もある¹⁾。

このような池や湖沼に対する水質浄化技術で、飲料水源として利用されない場合、浄化能力よりも低コストであることが優先される。そのため、大規模なプラントを用いた既存の水処理設備は、技術的に確立されているとしても、コスト面で見合わない場合や、設備を設置する十分なスペースがない場合が多く、湖沼の浄化に向いているとは言えない。このような背景において、水域内の多様な微生物の食物連鎖(図-1)を利用し自然の浄化機能を強化した水質浄化システムを開発した。このシステムは、芯材入りひも状微生物接触材と超微細気泡発生装置を組み合わせたものであり、装置が簡単でメンテナンスが省力化できるという特徴をもっている。本システムを用いて、富栄養化した実際の池で実証実験を行い、その適用性について評価したので報告する。

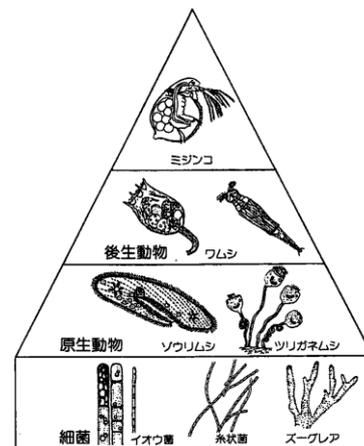


図-1 食物連鎖の概念図

2. システムの原理

閉鎖性水域で飲料水として利用しない場合の水処理技術は、処理能力よりも低コストや設置面積が小さいことが優先される。この目的をに合うものとして、水域に直接設置できる直接浄化型の技術が適切であると考えた。既存の直接浄化型技術の代表的なものには接触材法、レキ間接触酸化法、曝気法、アシ・ヨシなどの水生植物の活用がある(表-1)。開発した水質浄化システム(図-2)は、これらの直接浄化型の中でも、特にコストの低減や

表-1 直接浄化技術

工 法	特 徴	課 題
接触材法	付着微生物による 有機物の分解	・水の流れが 必要 ・目詰まり
レキ間接触 酸化法		
曝気法	浮遊微生物による 有機物の分解	・曝気範囲が 限られる
ア・モシなどの水生 植物の回収	窒素・リンを植物 として蓄積回収	・回収後の 処分

表-2 本水質浄化システムの効果

作 用	効 果
芯材入り ひも状接触 材	<ul style="list-style-type: none"> ・接触材に微生物膜が増殖し、多様な微生物が生息し、食物連鎖が生じる。 ・比表面積が大きく、形状が安定である。 ・余剰汚泥の低減
超微細 気泡	<ul style="list-style-type: none"> ・酸素を効率よく供給して、微生物の活性を図り、汚濁物質の好気分解を促進する。
水流 発生	<ul style="list-style-type: none"> ・アオコの原因となる植物プランクトンを分散できる。 ・水を循環させることにより、浄化できる範囲が広がる。

メンテナンスの省力化にメリットがある付着微生物を利用する接触材法を採用している。使用している芯材入りひも状接触材（商品名：FCR）は、スパイラル状に成形した被覆銅線にひも状の繊維を織り込んだもの（図-3）で、接触材の内でも、比表面積が設置長1 mあたり4.8 m²と大きく、形状が安定なものである。FCR を格子に固定した FCR モジュールは、既に食品工場などの排水処理プラントで使用されており、接触材として優れた能力をもつことが実証されている。

しかしながら、モジュールだけでは、水の流れがない閉鎖性水域において浄化できる範囲が限られるため、微細な気泡と共に水流を発生させる超微細気泡発生装置（図-4）を組み合わせた。この超微細気泡発生装置も、湖沼における曝気と循環流の発生装置として実績をもつ技術の一つである。表-2 に本水質浄化システムの効果をまとめた。

3. 実験方法および調査方法

本水質浄化システム性能そのものを評価するために、流入・流出がない状態での性能確認実験を行った。また、汚濁負荷の主なものとして底泥からの窒素・リンの溶出量を測定するために溶出実験を行った。そして、実証実験として、池の一部分を使用して、池を模擬した水域で実験を行った。

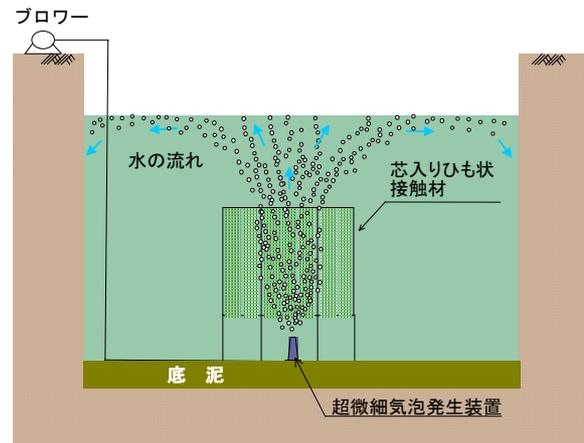


図-2 水質浄化システムの概念図

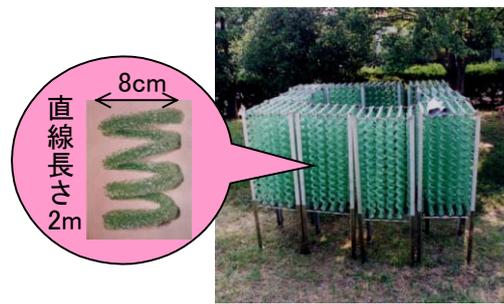


図-3 芯材入りひも状接触材



図-4 超微細気泡発生装置

(1) 性能確認実験

本水質浄化システムの基本性能を確認するため、鋼製の水槽で池の水を使用して、3つのケースで基礎実験を行った。水槽は池の中に設置し、水温、日照量、降雨量などの条件は現地（大阪府岸和田市の公園内にある池）と同じにした。使用した水槽は、鋼製の水槽で内面をタールエポキシ塗装したもので、容量2 m³、1.2 m×1.2 m、深さ1.5mである。

a) 浄化対象水質指標

水質汚濁の浄化対象指標として、有機物質を示す生物化学的酸素要求量（BOD₅）および見た目の清浄度を示す透視度を採用した。これらの指標を採用したのは、本システムによって有機物質を浄化することにより、透視度を向上させて水質を改善させるためである。

b) 性能確認実験ケースの設定

ケースごとの設置条件は以下の通りである（図-5）。

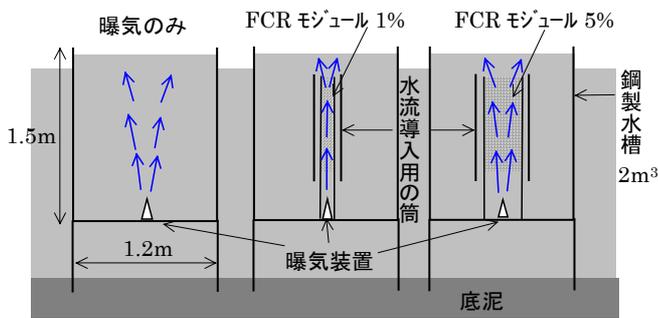


図-5 性能確認実験の設備概略図

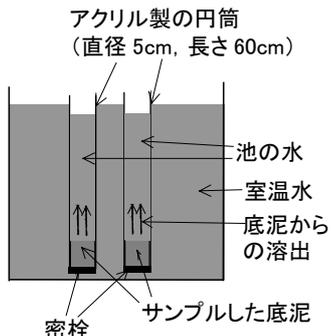


図-6 溶出実験の装置概略図

- ① 曝気のみ
- ② 曝気+FCR モジュールを処理水量 2m^3 に対して 1% (0.02m^3)
- ③ 曝気+FCR モジュールを処理水量 2m^3 に対して 5% (0.1m^3)

なお、水流の循環を効率よくするため、FCR モジュールの周りには水流導入用の角柱筒を設置した。

c) 実験実施時期

春～夏の実験として、H14年5月18日から7月31日まで行い、秋～冬の実験として、H14年10月22日から12月10日まで行った。実験開始時には未処理の池の水を各水槽にポンプで貯留した。

(2) 溶出実験

底泥からの溶出成分を正確に把握するために、現場で底泥を採取して、その底泥から溶出される窒素分、リン分を測定した^{2), 3)}。

溶出実験には、長さ60cm、直径5cmの塩ビ製の円筒に池の底泥を採取して、室内にて図-6のような装置により、現場の溶存酸素に近い状態にて、0, 5, 10, 20, 30日目を目安に水をサンプルして溶存態の窒素とリン濃度を分析した。サンプル時にはカラム内の溶存酸素と水温を測定した。実施時期は、性能確認実験と同時期に行った。

(3) 実証実験

本水質浄化システムの設計因子を把握するための実証実験を平成13年7月から14年7月まで実施した。この実証実験により最適なモジュールの量と配置を把握する

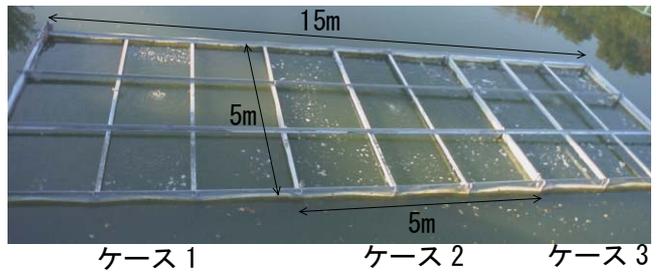


図-7 実証実験水域の写真

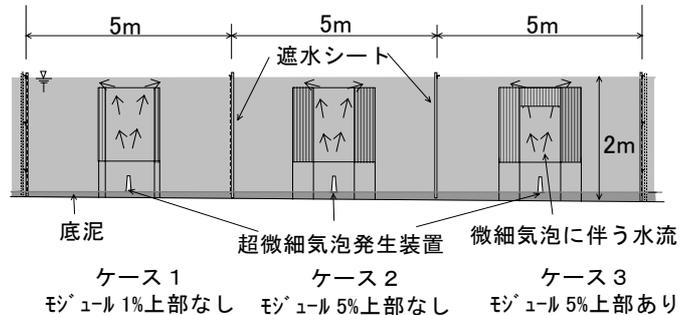


図-8 実証実験の設備概略図

ために、モジュールの量と配置方法を変えた3つのケースを設定した(図-7, 図-8)。

使用した池は、表面積 1000m^2 、水深2m、底泥厚さ0.1m程度で、水中の全窒素は 1mg/L 、全リンは 0.1mg/L 程度であった。実験対象区域は、池内を1ケース $5\text{m} \times 5\text{m}$ で鋼製枠とシートで仕切り、対象区域内外の流入を制限したが、区域内の底泥はそのまま残した。

a) 浄化対象水質指標

水質汚濁の浄化対象水質指標として、主に透視度を対象とする。

b) 分析項目

- ・現場測定(2週間に1回程度)：pH、濁度、水温、伝導度、溶存酸素(DO)、水深、透視度
- ・室内分析(1ヶ月に1回程度)：浮遊物質(SS)、クロロフィル a、全窒素(T-N)、全リン(T-P)の濃度、化学的酸素要求量(COD_{Mn})、生物化学的酸素要求量(BOD₅)
- ・微生物分析(1年に4回)：浮遊微生物(植物性・動物性)と付着微生物(植物性・動物性)の種類と量
- ・底泥(1年に4回)：全窒素(T-N)と全リン(T-P)の濃度、化学的酸素要求量(COD_{Sci})
- ・アオコの発生状況の観察(2週間に1回程度)

c) 実証実験ケースの設定

ケースごとの設定は以下の通りである。

対象処理水量： 50m^3 ($5\text{m} \times 5\text{m} \times$ 水深 2m)

ケース1 モジュール量：1% (0.5m^3)

配置：超微細気泡発生装置の周囲

ケース2 モジュール量：5% (2.5m^3)

配置：超微細気泡発生装置の周囲

ケース3 モジュール量：5% (2.5m^3)

配置：超微細気泡発生装置の周囲および上部

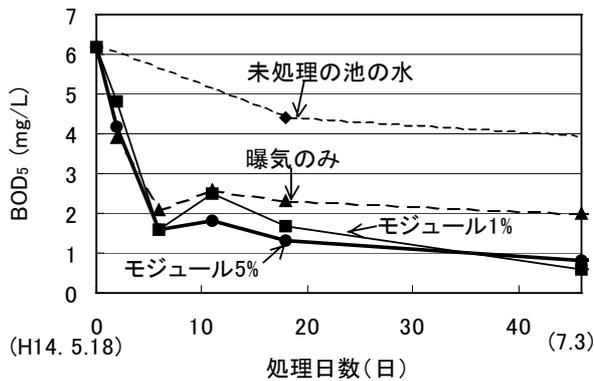


図-9 性能確認実験における BOD₅ の経時変化

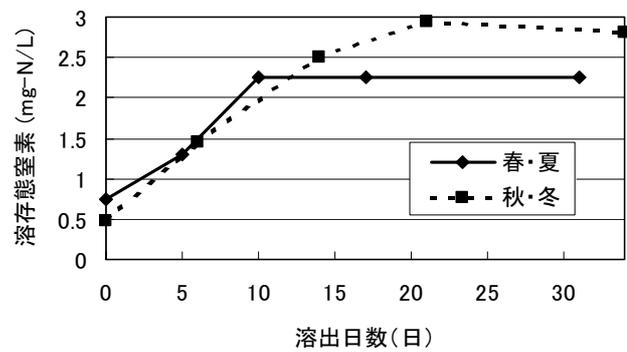


図-11 溶出実験における窒素溶出量の経時変化

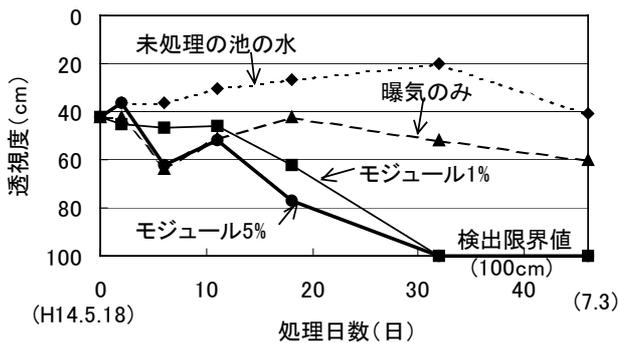


図-10 性能確認実験における透視度の経時変化

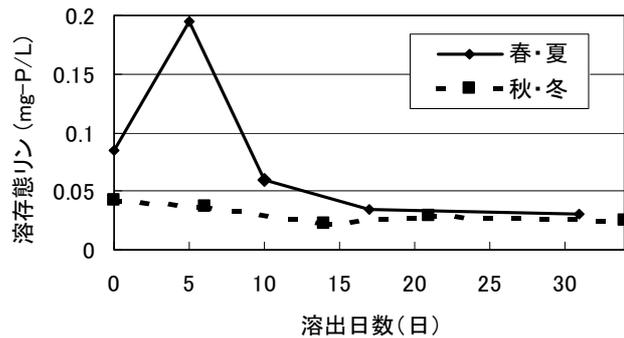


図-12 溶出実験におけるリン溶出量の経時変化

(4) 微生物調査

季節毎の測定を目的に H13 年 7/24, 9/19, 11/22, H14 年 4/10, 7/31, 12/10 にサンプルして、水中の浮遊微生物とモジュール上の付着微生物について、植物性微生物と動物性微生物をそれぞれ分類し計測した。

4. 結果および考察

(1) 性能確認実験結果

3(1) に示した性能確認実験の結果、有機汚濁物質の指標である BOD₅ は、実験開始後から減少し、初期値 6 mg/L が 6 日後には 2 mg/L に下がり、1 ヶ月後には 1 mg/L にまで浄化できた (図-9)。透視度についても BOD₅ と同様に減少し、初期値 40 cm から 1 ヶ月後には 100 cm 以上にまで浄化でき、見た目には水道水と変わらないようになった (図-10)。

(2) 溶出実験結果

3(2) に示した溶出実験の結果、得られた春～夏 (H14/5/24～6/24)、秋～冬 (H14/10/22～11/25) の 2 本の円筒中の溶存態窒素の平均濃度を図-11 に、溶存態リンの平均濃度値を図-12 に示す。

窒素の溶出量については、春～夏、秋～冬ともに同様の傾向を示しており、溶出実験開始後、溶存態窒素濃度

は 10～20 日目ぐらいまでは溶出日数に比例して上昇し、その後は濃度は上昇せず、安定している。溶出開始後の比例関係の傾きより、カラムの断面積 19.6 cm²あたりの溶出量を 1 m²あたりに換算して、溶出速度を計算すると、溶存態窒素の溶出速度は、春～夏で 7.8 mg-N/(m²・日)、秋～冬で 7.3 mg-N/(m²・日)とほぼ同程度の溶出速度が得られた。これらの値は、文献値の 3.4 mg/(m²・日) (溶存酸素が 0.3 mg/L 以上)⁴⁾ や 10～100 mg/(m²・日) (好気条件)⁵⁾ と同程度となっている。溶出が安定化した後の濃度は、春～夏で 2.3 mg-N/L、秋～冬で 2.8 mg-N/L となり、春～夏と秋～冬で同様の結果となった。

リンの溶出については、15 日程度で安定化しており、溶存態リンの濃度は 0.03 mg-P/L と低レベルで安定している。溶存酸素については、溶出期間中、6 mg-O₂/L 程度に維持されていた。

以上の結果により、窒素については、底泥から一定の溶出速度で溶出し、2.5 mg-N/L 程度で安定化し、平衡状態になることが分かる。また、リンについては、一定の溶出は測定されず、0.03 mg-P/L 程度で平衡状態となり、溶存酸素が十分に存在する条件ではリンの溶出速度が非常に小さく、溶出が制限されることが伺える。

(3) 実証実験結果

a) アオコの発生状況

アオコ (水の華) は春から秋にかけて、しばしば発生し、池の表面を覆い、緑色のペンキを水面一体に浮かし



図-13 アオコの発生抑制効果

たような状態になり、景観上の問題になる。しかし、実験開始から現在まで、2回の夏を経過したが、池一面にアオコが発生した時期でも、実験対象である処理水域ではアオコは発生しなかった(図-13)。これは、本システムの機能が発揮されて、アオコの原因となる植物プランクトンの異常発生を防ぐことができたためと考えている。

b) 窒素とリンの物質フロー

実験の結果、全窒素と全リンについては、本システムを用いた効果が明確には得られなかった。この結果を評価するために、窒素(N)とリン(P)の物質フローを計算した。

ケース1つの水量 50 m^3 ($5 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times$ 水深 2 m)、底泥量 2.5 m^3 ($5 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times$ 底泥 0.1 m 、重量を $2,500 \text{ kg}$ とする)、モジュール量 5% (2.5 m^3) の条件下における物質フローは以下の通りである。

①水中：

- ・全窒素： $2 \text{ g/m}^3 \times 50 \text{ m}^3 = 100 \text{ g}$
- ・全リン： $0.1 \text{ g/m}^3 \times 50 \text{ m}^3 = 5 \text{ g}$

②底泥中：

- ・全窒素： $5 \text{ g/kg} \times 2,500 \text{ kg} = 12,500 \text{ g}$
- ・全リン： $1 \text{ g/kg} \times 2,500 \text{ kg} = 2,500 \text{ g}$

③FCRモジュール中：

- ・全窒素： $290 \text{ g/m}^3 \times 2.5 \text{ m}^3 \times 0.063$ (成分比[※]) $= 46 \text{ g}$
または、 $290 \text{ g/m}^3 \times 2.5 \text{ m}^3 \times 5 \text{ g/kg} = 4 \text{ g}$
- ・全リン： $290 \text{ g/m}^3 \times 2.5 \text{ m}^3 \times 0.0087$ (成分比[※]) $= 6 \text{ g}$
または、 $290 \text{ g/m}^3 \times 2.5 \text{ m}^3 \times 1 \text{ g/kg} = 0.7 \text{ g}$

※)：窒素とリンの成分比は、微生物の平均の成分を $(\text{CH}_2\text{O})_{106} (\text{NH}_3)_{16} \cdot \text{H}_3\text{PO}_4$ として算定し、他方は底泥の含有窒素と含有リンの測定値から求めた。

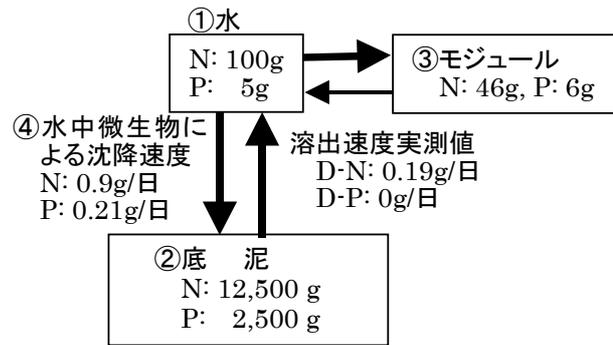


図-14 窒素とリンの物質フロー (FCRモジュール量5%、対象水量 50 m^3 、底面積 25 m^2)

④沈降速度⁵⁾

- ・全窒素： $36 \text{ mg/(m}^2 \cdot \text{日)} \times 25 \text{ m}^2 = 900 \text{ mg/日}$
- ・全リン： $8.4 \text{ mg/(m}^2 \cdot \text{日)} \times 25 \text{ m}^2 = 210 \text{ mg/日}$

なお、FCRモジュール上での付着微生物の増殖速度については、文献値⁶⁾として全窒素： $52.1 \sim 177.4 \text{ mg/(m}^2 \cdot \text{日)}$ 、全リン： $3.8 \sim 23.0 \text{ mg/(m}^2 \cdot \text{日)}$ などが利用可能であるが、モジュールの表面で一定速度で増殖することは考えにくいことから物質フローからは除外することとした。

これらの計算に基づく物質フロー(図-14)より、モジュール上には水中と同程度の窒素とリンが固定化されていることが分かる。底泥中には大量の窒素・リンが含まれており、そこからの溶出を阻止しなければ水中の窒素・リン濃度の減少は見込めないことが明確になった。底泥からの窒素・リンの溶出を防ぐには浚渫・覆砂や底泥への酸素供給などの栄養塩溶出抑制対策と本システムを組み合わせることが有効であり、透視度の改善を含め、高い浄化レベルを達成することが可能となる。

(4) 微生物の分析結果

実験を開始した平成13年7月から14年7月まで季節ごとに測定を行った結果、アオコの原因となる藍藻綱のミクロキスチス属が春から秋にかけて観測された。

浮遊微生物とモジュール上の付着微生物の種類と割合を、処理水域ケース3の平成13年11月22日を例として図-15と図-16にそれぞれ示す。

浮遊微生物には、植物性として緑藻綱、珪藻綱、藍藻綱が、動物性としてワムシ綱、貧毛綱、甲殻綱が観測された。付着微生物には、植物性として緑藻綱、珪藻綱が、動物性としてワムシ綱、貧毛綱、甲殻綱、根足虫綱、絨毛虫綱などが観測された。

未処理の池の水と処理水域の微生物量を図-17に示す。この図は、池とモジュール量5%の処理水域 50 m^3 あたりの浮遊微生物と付着微生物の湿潤体積の季節的な変化を表したものである。

池と処理水域内の微生物量を比べると、浮遊微生物量は同程度であるが、処理水域の方が付着微生物量の分だけ、全体の微生物量が多くなっているのが分かる。

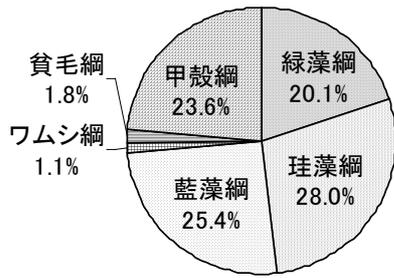


図-15 浮遊微生物の種類と割合

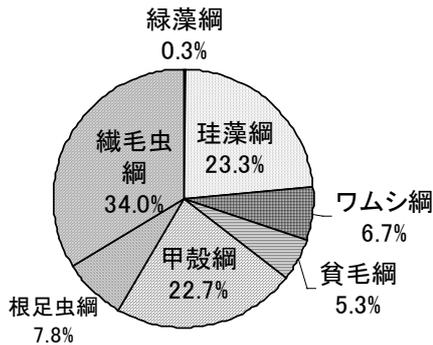


図-16 モジュール上の付着微生物の種類と割合

5. 維持・運転費用

本実験で必要となった維持・運転費用は、月1回の管理人員費とエアレーター運転のための電気料金だけで、定期的な資材の補充や洗浄などの作業は不要であり、省力化ができた。

6. 今後の課題

今後の課題として、浄化対象を池全体の水とする場合は、モジュールの量・配置方法、水循環などを総合的に考えて、本システムの設計を行う必要がある(図-18)。そして、対象水域の水量、水域条件、流入水負荷変動に応じた処理システムを構築することが必要となる。

7. おわりに

本水質浄化システムは、食物連鎖を利用し、自然の浄化能力を強化したものであり、これからの環境保全の技術として必要な低負荷・省エネルギー型の技術の一つと考えられる。このような技術が利用されることにより、親しみのある水環境造りに役立てればと考えている。

本技術は、平成12年度(社)近畿建設協会の技術開発支援制度に採用された技術であり、常磐開発(株)との共同で開発を行った。

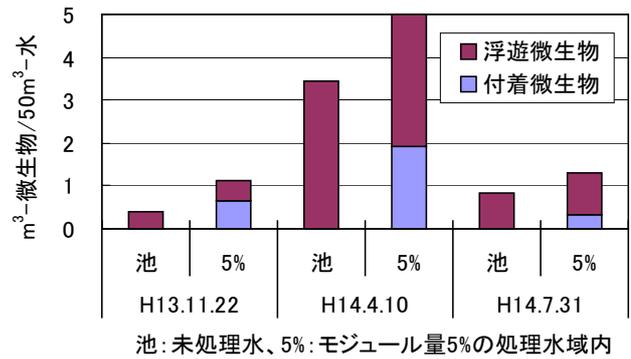


図-17 未処理の池の水と処理水域の浮遊微生物量と付着微生物の加算総量の比較

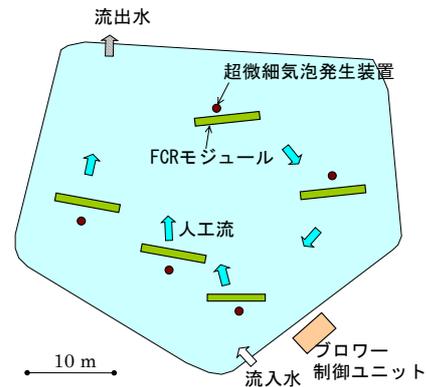


図-18 池全体の浄化例概念図

謝辞

今回の実験は大阪府岸和田市東ヶ丘町の中央公園内の池を使用させて頂き実施することができた。実験に協力頂いた岸和田市都市整備局公園緑地課、岸和田市東ヶ丘町町会、摩湯町町会、摩湯町水利組合、ならびに実験方法についてご指導頂いた京都大学大学院工学研究科 岸本直之先生に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 岩井重久：富栄養化湖沼内湾水の水質浄化対策技術，環境技術，Vol.19, No.2, 1990.
- 2) 岸本直之，各地賢二，宗宮功，中村敏明：流入濁質がダム貯水池水環境に及ぼす影響，環境工学研究論文，Vol.36, pp225-236, 1999.
- 3) 西條八束，三田村緒佐武：新編 湖沼調査法，講談社サイエンティフィク，pp215-216, 1995.
- 4) 津野洋，浦邊真郎，吉川克彦，草野嗣：数理モデルによるエアリフト循環の余呉湖水質改善効果の予知に関する研究，水環境学会，Vol.13, No.3, pp228-235, 1996.
- 5) 宗宮功編：琵琶湖，技報堂出版，p139, p168, 2000.
- 6) 宗宮功編：自然の浄化機構，技報堂出版，p93, 1990.