

## (61) 糸状藻類を活用した湖沼水質保全システム

### MEASURES FOR LAKE WATER QUALITY CONSERVATION USING FILAMENTOUS ALGAE

丹羽 薫<sup>\*</sup>、久納 誠<sup>\*</sup>、久保 徳彦<sup>\*</sup>、山下 芳浩<sup>\*\*</sup>

Kaoru NIWA<sup>\*</sup>, Makoto KUNOU<sup>\*</sup>, Norihiko KUBO<sup>\*</sup>, Yoshihiro YAMASHITA<sup>\*\*</sup>

**ABSTRACT ;** Abnormal growth of undesirable algae caused by eutrophication has brought water quality problems of algae bloom or musty odor in some lakes. Measures against the phenomenon are to prevent undesirable floating algae from rapid increase. The lake water quality conservation proposed in this paper provides an environment to grow desirable algae, filamentous algae, which works to remove  $PO_4$ -P and T-P from the river pouring into the lake and the lake surface, resulting that increase of undesirable floating algae is to be prevented in the lake. Besides the system works to remove undesirable algae and musty odor from the discharge flow. Explained and reported in this paper are on characteristics of the lake water quality conservation using filamentous algae and field experiments confirming the measure to be effective for lake water purification.

**KEYWORDS ;** water quality, eutrophication, algae-control method, filamentous algae, phosphate phosphorous

#### 1. まえがき

自然湖沼、遊水池、ダム湖など多くの湖沼では、流域から栄養塩類が過剰に流れ込むために、水中の栄養塩類が増加して富栄養化を来している。湖沼の栄養塩類が増える結果、藍藻類等の好ましくない藻類が異常増殖することになり、アオコや淡水赤潮、水道水のカビ臭、湖沼沿岸の異臭、魚類のへき死、親水性活動の阻害などの深刻な問題を引き起こしている。著者らは糸状藻類を活用した湖沼の水質保全手法を紹介してきたが<sup>1)</sup>、本報文はさらに具体的な対策手法を『糸状藻類を活用した湖沼水質保全システム』（以下、『糸状藻類活用システム』と言う）としてまとめ、現地実験結果も含めて報告するものである。

#### 2. 糸状藻類活用システム

##### 2.1 システムの概要

本報文で提案する『糸状藻類活用システム』は、河川や浅い湖沼に一般に生息している糸状藻類が増殖できる環境を人為的に湖沼に与えることにより、流入河川水から $PO_4$ -P及びT-Pを、湖沼表層水から $PO_4$ -P及

\* 建設省土木研究所環境部環境計画研究室

Public Works Research Institute, Ministry of Construction

\*\* (株)建設技術研究所 (前建設省土木研究所部外研究員)

CTI Engineering Co., Ltd.

び浮遊藻類を除去し、藍藻類等の好ましくない藻類の異常増殖を阻止し、さらに放流水から浮遊藻類及びカビ臭物質を除去するシステムである。このように本システムは、自然河川等にて水質浄化に役立っているエコシステムを湖沼において人為的に作り出し、最大限に活用するものである。本システムの模式図を図-1に示す。

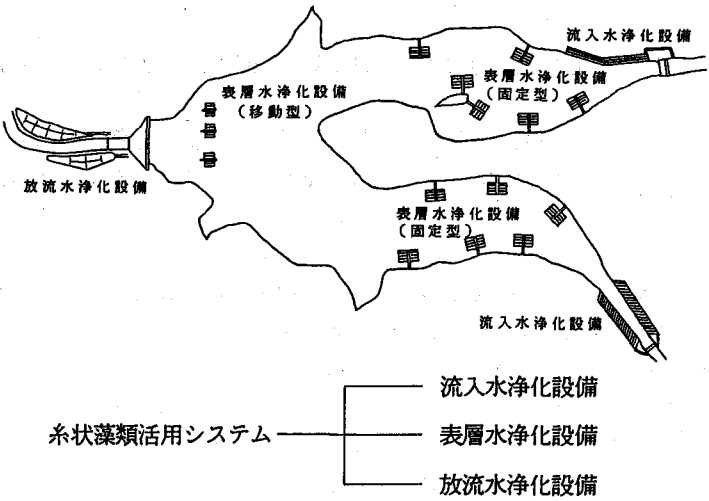


図-1 糸状藻類活用システムの模式図

## 2.2 糸状藻類の種類

糸状藻類とは顕微鏡レベルで細胞が列車のようにつながっている藻類を指す場合と、肉眼レベルで毛糸や木綿糸のように糸状になっている藻類を指す場合があるが、ここでは後者を指す。糸状藻類は意外と我々の生活に関連しており、本システムに関係の深い糸状藻類を表-1に示す。なお糸状藻類は、溪流や水路のように急流に適する種類と、浅い湖沼や水田のように緩流に適する種類とに大きく二分できる。

表-1 本システムに関係の深い糸状藻類

| 適 性 | 名 称                                          | 綱 別 | 特 性                                             |
|-----|----------------------------------------------|-----|-------------------------------------------------|
| 急 流 | シオグサ<br>( <i>Cladophora glomerata</i> )      | 緑藻類 | 丸くならない点を除いてマリモと全く同じ属の藻類である。                     |
|     | ヒビミドロ<br>( <i>Ulothrix</i> sp.)              | 緑藻類 | 山間の溪流の岩石に着生する代表的な藻類である。                         |
|     | サヤミドロ<br>( <i>Oedogonium</i> sp.)            | 緑藻類 | 細胞分裂が特異で、細胞間のサヤや朱色の丸い生卵器など特色が多い。                |
|     | メロシラ<br>( <i>Melosira varians</i> )          | 珪藻類 | 浄水場の緩速砂濾過で重要な役割を果たす藻類である <sup>2)</sup> 。        |
| 緩 流 | アオミドロ<br>( <i>Spirogyra</i> sp.)             | 緑藻類 | 糸状藻類の中でも栄養価が高く有効利用の点で注目すべき藻類である <sup>3)</sup> 。 |
|     | アミミドロ<br>( <i>Hydrodictyon reticulatum</i> ) | 緑藻類 | 肉眼でも一見多角形の模様をしたレース編みを思わせる美しい藻類である。              |

## 2.3 糸状藻類を湖水の水質浄化に用いる利点

糸状藻類は浮遊藻類やホテイアオイ等の高等な水生植物に比べて、湖水を水質浄化するのに適合した多くの利点を有しており、以下に示す。

- ①糸状藻類は富栄養化に起因する現象（アオコ、淡水赤潮、カビ臭等）の原因とならない。
- ②糸状藻類は増殖速度が早く、その分無機態の栄養塩類の吸収能力が高い。例えば、水生植物の代表であるホテイアオイの倍加日数が約2週間であるのに対し、糸状藻類は概ね数日である。
- ③糸状藻類が生息するには付着あるいは上載できる基質が必要であり、この基質を人為的に操作することにより糸状藻類の生息を制御できる。
- ④糸状藻類が生息する適応温度は、低い水温でも可能であるため、冬期も概ね生息が可能である。従ってアオコが発生する季節よりも先に糸状藻類を増殖させて栄養塩類を取り続けることができる。またホテイアオイが西日本の夏期しか増殖に適さないのに対して、糸状藻類は地域性と季節性の点で幅が広く有利である。
- ⑤糸状藻類は浮遊藻類に比べ低い無機態の栄養塩類濃度でも生息が可能である。かなり低い濃度となっても、糸状藻類のまわりの水が次々と入れ替われば栄養塩類を吸収することができる。
- ⑥浮遊藻類と異なり、糸状藻類は水からの分離除去がスクリーン等で容易にできる。
- ⑦糸状藻類は栄養価が高いものが多く、アユやワカサギ等の魚類や鶏等の家畜の良質なエサとなる<sup>31)4)</sup>。

## 2.4 各浄化設備が有する浄化機能

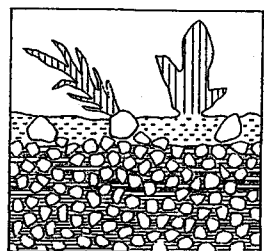
糸状藻類を活用した浄化設備が有する機能を考えてみると、図-2に示すようになる。流入水、表層水、放流水の各浄化設備は、除去すべき物質や生息させたい糸状藻類が急流に適するか緩流に適するかのタイプにより、図-2の①～④に示す浄化機能の組み合わせが異なる。各浄化設備に適用すべき浄化機能の組み合わせを表-2に示す。なお、各浄化設備は前処理と本処理の二段階で処理することを基本とする。ただし、T-Pや浮遊藻類が少ない場合等は前処理を省略し本処理のみとしても十分機能を果たす。

図-2及び表-2の検討により、各浄化設備が保持すべき浄化機能は次のようにまとめられる。

(1) 流入水浄化設備……平常時において、流入河川水が湖沼に入る直前の段階で流入河川水に含まれる $PO_4$ -P及びT-Pを除去し、湖沼に混入するリンを減少させる設備である。流入地点付近に糸状藻類が付着して増殖できる基質を設けることにより、糸状藻類に $PO_4$ -Pを吸収除去させる。T-Pは砂利濾過や砂濾過により除去する。

(2) 表層水浄化設備……湖沼の湖面上に糸状藻類が付着して増殖できる基質を設け、中小洪水等で表層に混入して来た $PO_4$ -Pを藍藻類や鞭毛藻類等の好ましくない浮遊藻類が吸収してしまう前に、糸状藻類に吸収除去させる設備である。同時に好ましくない浮遊藻類そのものを砂利濾過により除去する。

(3) 放流水浄化設備……利水を含む正常流量を補給するため下流に放流した水を、異臭味障害が発生しやすい期間において、藍藻類等の好ましくない浮遊藻類及びカビ臭物質を砂利濾過や砂濾過により除去する設備である。



- ①立体的に生息する糸状藻類 ——  $PO_4$ -Pを吸収除去する
- ②濾過膜となる糸状藻類 ——  $PO_4$ -Pを吸収除去する  
浮遊藻類やSSを捕捉除去する
- ③粒子間の好気性細菌等 —— 加<sup>\*</sup>臭物質を分解除去する
- ④粒子間の物理的濾過 —— 浮遊藻類やSSを捕捉除去する

図-2 糸状藻類等の浄化機能

表-2 各浄化設備における浄化機能の組合せ

| 設備名     | 糸状藻類による判別 | 除去したい物質                    | 浄化機能と除去物質                         |                                                                                  |
|---------|-----------|----------------------------|-----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
|         |           |                            | 前処理                               | 本処理                                                                              |
| 流入水浄化設備 | 緩流タイプ     | PO <sub>4</sub> -P<br>T-P  | ④粒子間の物理的濾過<br>↓<br>T-P除去<br>濁質除去  | ①立体的に生息する糸状藻類<br>②濾過膜となる糸状藻類<br>④粒子間の物理的濾過<br>↓<br>PO <sub>4</sub> -P除去<br>T-P除去 |
|         | 急流タイプ     |                            |                                   | ①立体的に生息する糸状藻類<br>↓<br>PO <sub>4</sub> -P除去                                       |
| 表層水浄化設備 | 緩流タイプ     | PO <sub>4</sub> -P<br>浮遊藻類 | ④粒子間の物理的濾過<br>↓<br>浮遊藻類除去<br>濁質除去 | ①立体的に生息する糸状藻類<br>②濾過膜となる糸状藻類<br>↓<br>PO <sub>4</sub> -P除去                        |
|         | 急流タイプ     |                            |                                   | ①立体的に生息する糸状藻類<br>↓<br>PO <sub>4</sub> -P除去                                       |
| 放流水浄化設備 | 緩流タイプ     | 浮遊藻類<br>カビ臭物質              |                                   | ②濾過膜となる糸状藻類<br>③粒子間の好気性細菌等<br>④粒子間の物理的濾過<br>↓<br>カビ臭物質除去<br>浮遊藻類除去               |

### 3. 前処理設備

#### 3.1 流入水浄化設備での前処理の役割

流入水浄化設備は、流入河川水に含まれるPO<sub>4</sub>-P及びT-Pを除去するのが目的である。前処理でT-Pを除去し、本処理でPO<sub>4</sub>-Pを除去するのを基本とする。流入河川水は洪水後暫くは濁度が高くなるが、本処理で用いられる糸状藻類に濁質が被るのは増殖させる上で望ましくないので、前処理の段階で濁質を除去するのが良い。また流入河川水には本処理で増殖させようとしている糸状藻類の他に様々な糸状藻類及び浮遊藻類が含まれている。そこで特に通水初期の段階において、適切な糸状藻類を安定増殖させるためには供給水に含まれる藻類の種類を制御して適切な糸状藻類を優占種にするのが望ましい。そこで流入水浄化設備では、T-P除去、濁質除去及び藻類種制御を目的とした前処理を行う。

#### 3.2 表層水及び放流水浄化設備での前処理の役割

表層水浄化設備は、湖水に含まれるPO<sub>4</sub>-Pと、アオコ等のもととなる藍藻類等の好ましくない浮遊藻類を除去するのが目的である。放流水浄化設備は湖水に含まれる好ましくない浮遊藻類とカビ臭物質を除去するのが目的である。表層水浄化設備では前処理で浮遊藻類を除去し、本処理でPO<sub>4</sub>-Pを除去するのを基本とし、放流水浄化設備では前処理で浮遊藻類を除去し、本処理でカビ臭物質を除去するのを基本とする。本処理で用いられる糸状藻類が付着性の浮遊藻類や洪水後の濁質に覆われるのは増殖させる上で望ましくないので、前処理の段階でこれらを除去するのが良い。そこで表層水及び放流水浄化設備では浮遊藻類除去及び濁質除去を目的とした前処理を行う。

### 3.3 前処理設備の構造

上向き砂利濾過は、比較的低濃度のT-P除去、短期間の濁質除去、及び藻類種制御が必要な流入河川水の前処理に適している。ここで藻類種制御とは、砂利層で糸状藻類や浮遊藻類を除去し、本処理設備につながる水層部に本処理で増殖させるべき糸状藻類を生息させておくことを示す。つまり糸状藻類の種供給の役割をする。なお維持管理として週に1度程度の頻度で、砂利層底部に堆積した有機物を砂利層底部の散気管による散気と下向流による逆洗排水を行うことによって除去し、水層部に堆積した糸状藻類の死骸は散気管によって攪拌させ排水することにより除去する。なお高濁度の洗浄水を処理する沈澱槽等が必要である。

下向き砂利濾過は、比較的高濃度の浮遊藻類の除去及び長期間の濁質除去が必要な湖水の前処理に適している。湖水に浮遊藻類が過剰に存在する場合は、短期間で砂利粒子間にて濾過閉塞するが、濾過材料を軽石等の比重が軽い材質にすれば、砂利層直下に設置した散気板によって砂利層洗浄ができる。この場合も高濁度の洗浄水を処理する沈澱槽等が必要である。

## 4. 本処理設備

### 4.1 設備タイプの構造上分類

本処理設備の構造上のタイプは、活用する糸状藻類が緩流に適するか急流に適するかによって二分され、またその設備が陸上用なのか湖上用なのかによっても分かれる。これを図にまとめると図-3のようになる。

| 糸状藻類による判別  | 陸 上 用                          | 湖 上 用                     |
|------------|--------------------------------|---------------------------|
| 緩流に適した糸状藻類 | 下向き砂濾過タイプ<br>(流入水・放流水浄化設備)<br> | 網籠タイプ<br>(表層水浄化設備)<br>    |
| 急流に適した糸状藻類 | 緩勾配水路タイプ<br>(流入水浄化設備)<br>      | 緩勾配水路タイプ<br>(表層水浄化設備)<br> |
|            | 急勾配水路タイプ<br>(流入水浄化設備)<br>      |                           |

図-3 構造によって分類した本処理設備

### 4.2 下向き砂濾過タイプ

緩流に適した糸状藻類を用いるタイプであるが、砂層部の上に水層部を持った構造である。図-4に下向き砂濾過タイプの設備例を示す。水層部は水深が30cmと浅く、緩流に適した糸状藻類が生息しやすい環境となっており、糸状藻類が流入河川水の $PO_4-P$ を吸収除去する。砂層部は粒径1~3mm程度の砂となっており、砂粒子間の浄化作用によりT-P除去やカビ臭物質除去を行う。

一般的に粒子間浄化は嫌気性であるとカビ臭物質等の有機化合物の分解能力は小さい。しかし本タイプに

においては、砂層直上の糸状藻類が光合成によって常に酸素を多く含む気泡を付け、昼夜を問わず砂粒子間に酸素を供給するために、砂粒子間には好気性となり、カビ臭物質等の有機化合物の分解を期待できる。砂の粒径は粗くしすぎると、砂粒の表面積が不足して好気性細菌が十分に働けなくなる。よって放流水浄化設備の場合は砂の粒径を1mm程度に細かくする。

流入水浄化設備の場合はT-P除去が目的であるので砂の最小粒径を2mm程度に設定する。なおT-Pの除去率を落としてもかまわない場合は砂利や軽石としても良い。

緩流に適した糸状藻類は成長すると光合成による酸素を多く含む気泡を付着させて浮上するが、その際生物濾過膜ごと浮上するため、濾過閉塞は生じにくい。また浮上した糸状藻類は直径5～50cmの繊維状の塊となるため、スロープ式回収器により容易に回収できる。ただし水槽部に糸状藻類を生息させても1～2ヶ月すれば濾過閉塞してしまうので、その場合は砂層部に埋設してある散気管により濾過膜洗浄を行い濾過閉塞を解消する。なお、通水後暫くは濾過閉塞しつつある期間は、P0<sub>4</sub>-Pの除去量が著しく低下する。

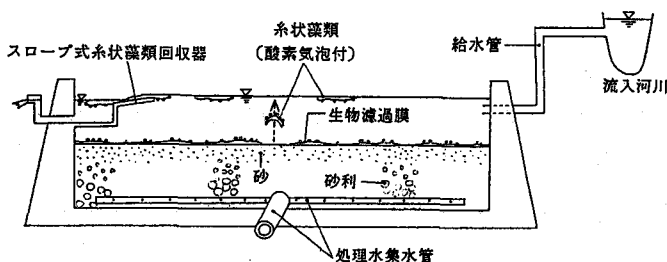


図-4 下向き砂濾過タイプの設備例

#### 4.3 網籠タイプ

緩流に適した糸状藻類を用いるタイプであるが、底板が有孔ボードでできた浮上式の網籠となっている。有孔ボードの上は水深30cmの水層部となっており、緩流に適した糸状藻類が生息しやすい環境となっており、さらに散水によって鉛直流動が得られるような構造となっている。糸状藻類の回収は、糸状藻類が酸素を多く含む気泡を付着して浮上しているところ、または有孔ボード直上に堆積しているところを可動式スクリーンにより除去する。

#### 4.4 緩勾配水路タイプ

急流に適した糸状藻類を用いるタイプであるが、糸状藻類が増殖するのに最も効率的な流速、水深及び基質を与え、糸状藻類を基質より定期的に回収除去して安定増殖させようとするタイプである。

急流に適した糸状藻類は流されないように仮根を持つことによってしっかりと基質に付着している。急流のもとでは糸状藻類の細胞のまわりの水が次々と入れ替わるため、糸状藻類は水中に溶存しているP0<sub>4</sub>-Pを次々と吸収でき、増殖速度は一躍高くなる。しかし流速が高すぎると湖水との接触時間が短くなり結果的にP0<sub>4</sub>-Pの除去量が低下する。最も効率的な流速は15cm/sec、及び水深は20cm程度にあると想定している。水路勾配は0.2%程度である。本タイプの基質は流れを横断する方向に張られたフェンスであり、φ3～5mmの麻ひもや竹材、プラスチック棒等から成る。基質や水路底に付着した糸状藻類は定期的にエッチにより櫛で梳かすようにかき取り、側水路に寄せ集め、水流により水路下流端に流すことにより回収除去する。これらの一連の回収作業は人力ではかなりの手間となるため、回収作業を自動化する必要がある。

#### 4.5 急勾配水路タイプ

急流に適した糸状藻類を用いるタイプであるが、糸状藻類を回収除去する作業を簡略化するために、水路の勾配を大きくして流速を50～100cm/secに高め、水深を数cmの薄層流としたタイプである。水路勾配は5～

15%程度となる。本タイプの基質は薄く敷いた砂利や粗面コンクリートとする。この流速のもとでは、成長した糸状藻類は水流の抵抗に耐えられなくなって途中から切れて流下し、水路下流端の固定スクリーンに自然に集積する。またこの流速のもとでは水路底に糸状藻類の死骸が堆積しにくく維持管理もし易い。ただし、糸状藻類と水との接触時間が短すぎるためP0<sub>4</sub>-Pの除去量は低くなり、さらに糸状藻類の成長に波ができるため除去量が不安定になる。

## 5. 現地実験

### 5.1 前処理設備の処理能力実験

霞ヶ浦湖岸で湖水を原水とした上向式砂利濾過の実験を行った。実験装置を図-5に示す。8~100mmの粗い砂利65cmの上に3~6mmの細かい砂利を35cm載せ、砂利面上は薄層流とした。1m<sup>3</sup>/secの流入河川水を0.5haの設備で前処理することを想定し、上向流の速度として72cm/hourを目標と与え続けた。なお砂利層底部に堆積した有機物は、下向流による逆洗を与えて洗浄した。

数カ月実施した実験の結果を図-6に示す。

砂利層底部の洗浄を月に2度の頻度で行った6月の水質データを見ると、T-Pの除去率は6割程度、濁度の除去率は9割程度、クロロフィルaの除去率は8割程度であった。なお水層部には糸状藻類であるメロシラ (*Melosira varians*; 珪藻類) やサヤミドロ (*Oedogonium* sp.; 緑藻類) が生息し、本処理設備に給水する前処理水の藻類優占種をメロシラやサヤミドロに制御することができた。

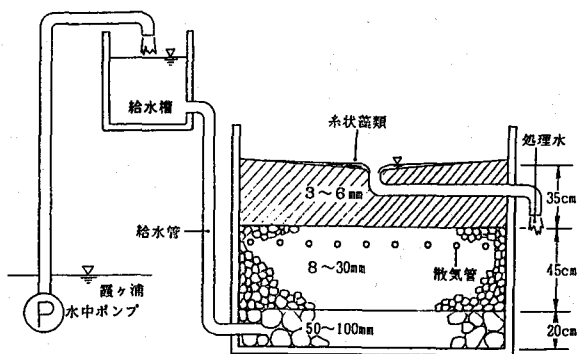


図-5 前処理設備（上向式砂利濾過）の実験装置

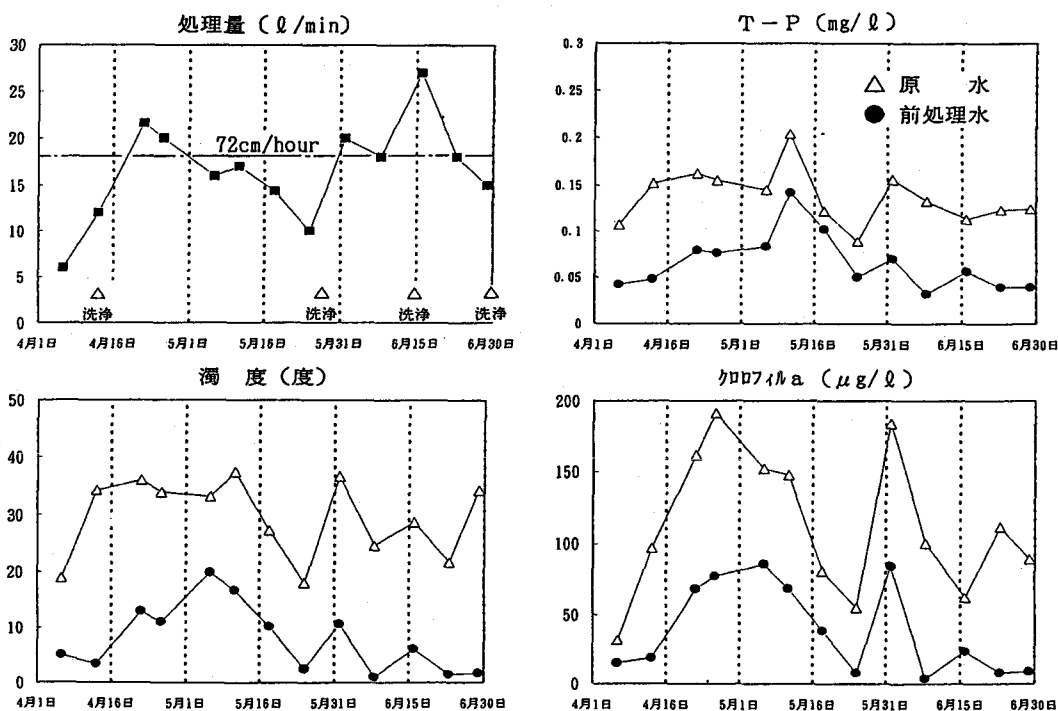


図-6 前処理による水質の測定結果

## 5.2 本処理設備の処理能力実験

霞ヶ浦湖岸で湖水を原水とした緩勾配水路タイプでの実験を行った。実験装置を図-7に示す。水路幅は40cm、水深は8cmであり、ポンプで湖水を供給し、流速は10cm/secが得られるようにした。基質はフェンスとし、 $\phi 3\text{mm}$ の麻ひもを二重にしたものを1段、2段、4段、6段と2カ月おきに増加していった。なお水流方向のフェンス基質の間隔は4cmとした。フェンス基質の上流側にはメロシラ (*Melosira varians* ; 珪藻類) 付の河床礫を置き、糸状藻類供給ゾーンを設けた。

基質にはメロシラが海苔のように付いたが、概ね1週間に1度の頻度で可動式のエッジでかき取り湿潤重量と乾燥重量を測定した。またメロシラに含まれるリンの重

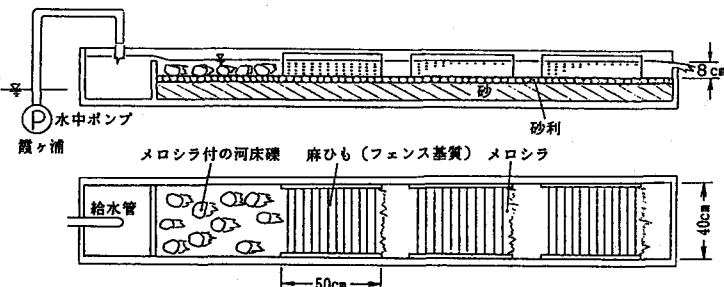


図-7 本処理設備（緩勾配水路タイプ）の実験装置

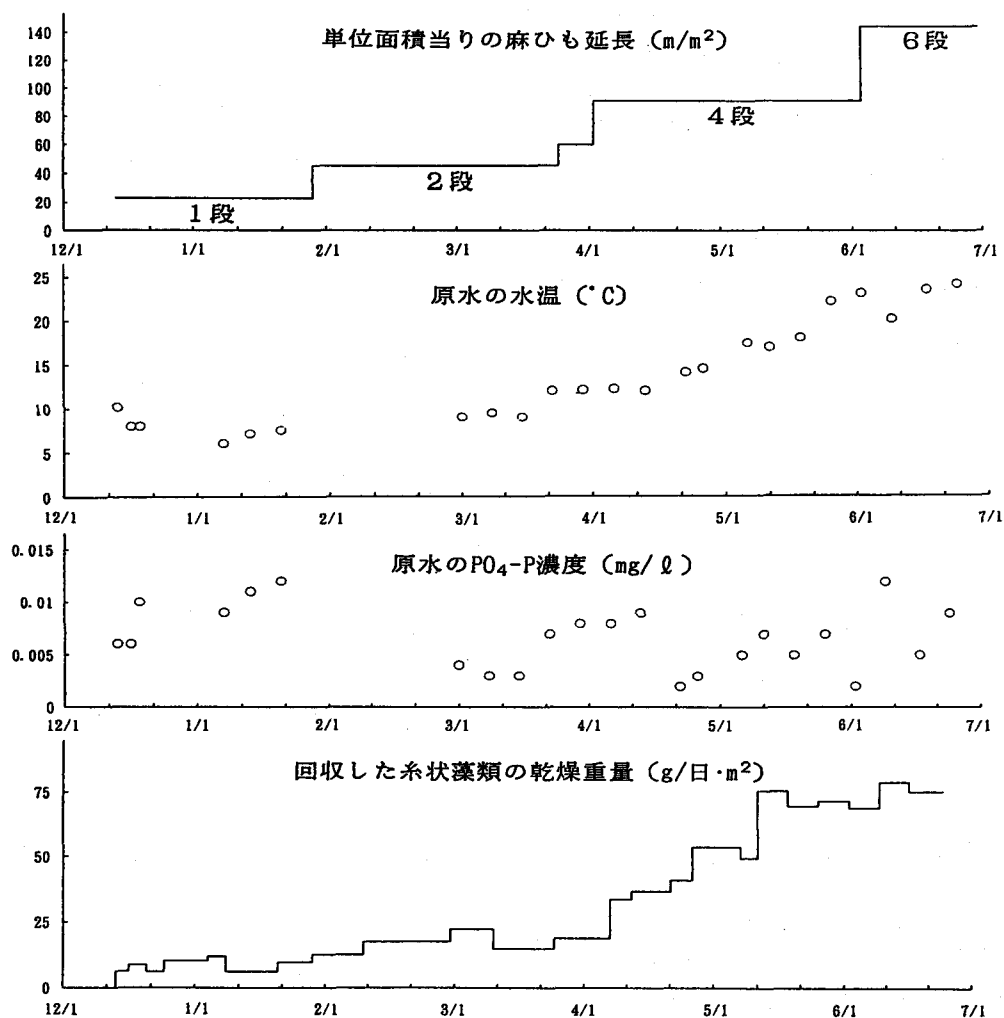


図-8 回収した糸状藻類の乾燥重量等の測定結果

量を測定したが、乾燥重量1g当たり2.6mgであった。図-8に測定結果を示す。回収した糸状藻類の乾燥重量、単位面積当りの麻ひも延長、原水の水温、原水の $PO_4$ -P濃度の経時変化を示す。回収した藻類の乾燥重量は、原水の $PO_4$ -P濃度との関係は見出せず、単位面積当りの麻ひも延長には比例関係が見られる。原水の水温も影響を及ぼしているように見える。

麻ひもが4段になった4～5月の2ヶ月間では、1日1 $m^2$ 当りの回収された糸状藻類の乾燥重量

は概ね50g/日・ $m^2$ であり、リン重量に換算すると130mg/日・ $m^2$ となる。ここで図-9に示すように、1 $m^3$ /secの流入河川水を1haの浄化設備で処理すると仮定すると、次式のように $PO_4$ -P濃度を15 $\mu g/l$ 低下させたという計算になる。なお原水の $PO_4$ -P濃度が数 $\mu g/l$ 程度の低濃度となっても藻類回収量が落ちておらず、このことは本タイプの大きな利点である。

$$130\text{mg/日}\cdot\text{m}^2 (\text{P除去量}) = 15\text{mg/m}^3 (=15\mu\text{g/l}; PO_4\text{-P低下量}) \times 86400\text{m}^3/\text{日} \times \frac{1}{10000\text{m}^2}$$

本実験に対し実際の設備では、①水深を8cmから20cm程度まで上昇させる、②流速を10cm/secから15cm/sec程度まで上昇させる、③糸状藻類が付着する基質に工夫を加えて改良する、等を実施すれば、さらに $PO_4$ -Pの除去効果が向上すると考えられる。

## 6. まとめ

- (1) 湖沼の富栄養化対策として多量水を対象としたリン除去、特に $PO_4$ -Pを除去するには、『糸状藻類活用システム』が有効である。
- (2) 糸状藻類活用システムでは、T-P、浮遊藻類、濁質の除去を目的とした前処理と、 $PO_4$ -P、カビ臭物質の除去を目的とした本処理の2段階に分けて水処理をするのが望ましい。
- (3) 現地実験の結果、前処理設備はT-P、浮遊藻類、濁質をよく除去でき、本処理設備では $PO_4$ -Pをよく除去でき、それをもとに現地における設備規模を算定すると、前処理設備で1 $m^3$ /sec当り0.5ha、本処理設備で1 $m^3$ /sec当り1haとなり、湖沼の富栄養化対策としての実用化の可能性が確認できた。

## 参考文献

- 1) 丹羽薫・久納誠・大西実・山下芳浩；糸状藻類を活用した貯水池水質保全対策、土木学会水理委員会水工学論文集、第37巻、1993
- 2) 中本信忠・坂井正；緩速ろ過池における糸状珪藻とその連続培養の重要性、日本水処理生物学会誌、Vol. 27、No. 1、1991
- 3) 飯山郁子・坂井真奈美；緑藻アオミドロの食品学的評価、山陽女子短期大学研究紀要X、1984
- 4) 坂井正・中本信忠他；緩速ろ過池で繁殖する藻類とその有効利用、環境科学年報（信州大学）、No. 14、1992
- 5) 森下郁子；川の健康診断～清冽な流れを求めて、NHKブックス290、日本放送出版協会、1977

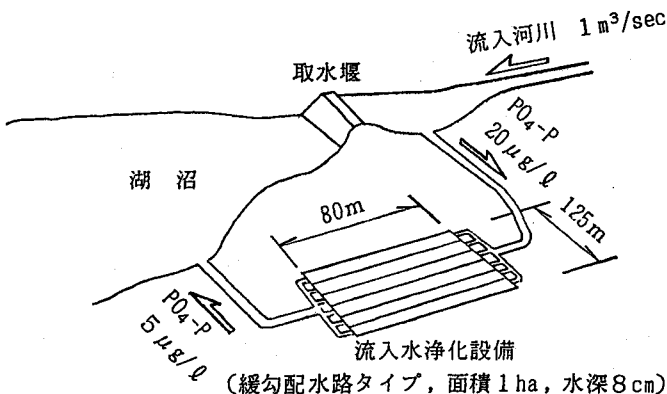


図-9 糸状藻類活用システム（緩勾配水路タイプ）の設備例