

# 糸状藻類を用いた貯水池富栄養化対策の 設備設計に関する研究

久納 誠<sup>1</sup>・竹内邦良<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 水資源開発公団 試験研究所 (〒338-0812 埼玉県浦和市大字神田936)

<sup>2</sup>正会員 工博 山梨大学教授 工学部土木環境工学科 (〒400-8511 山梨県甲府市武田4-3-11)

貯水池の富栄養化対策は、流域における排水規制などの発生源対策と、選択取水や流動制御など湖内における対策が中心に進められているが、本研究では、貯水池に流れ込む流入河川水より、溶解性のリンおよび窒素を除去する対策手法を扱った。その代表的な手法に植生浄化があるが、広い栽培面積を必要とすることが欠点である。本研究は、淡水植物の中でも増殖速度が高く、四季を通して適用可能な糸状藻類群集を用い、それを栽培する人工水路を、貯水池周辺の利用価値の低い水位変動域や、副ダムの水面などに設置することにより、この難点の解決を図ったものである。これを前提として、具体的な設備構造案、および貯水池での設備設置場所の検討例を示すとともに、実施に当たって予想される問題点を明らかにした。

**Key Words :** filamentous algae, phosphorus removal, aquatic treatment, reservoirs, eutrophication

## 1. はじめに

貯水池の富栄養化は、集水域での開発に伴う、生活排水や畜産排水などが、完全に処理されないまま多量に流入河川へ流れ込み、それにより湖水中の栄養塩が増加して生じるものである。栄養塩が増えると、藍藻や鞭毛藻などが増殖し易くなり、アオコや淡水赤潮、水道水のカビ臭、貯水池沿岸の異臭、魚類のへい死、および親水活動の阻害な

どの問題を引き起こす。

このような貯水池の富栄養化の対策には、図-1に示すように数多くの手法がある。貯水池の富栄養化対策の基本は、溶解性栄養塩のもととなる汚濁物質を集水域において発生させないことであり、この発生源対策を第一段階とする。しかし、早急なる実現が困難であるため、河川の中で汚濁物質が分解して高濃度となった溶解性栄養塩を、貯水池へ入り込む前に河川水から除去することが望ましい。これが第

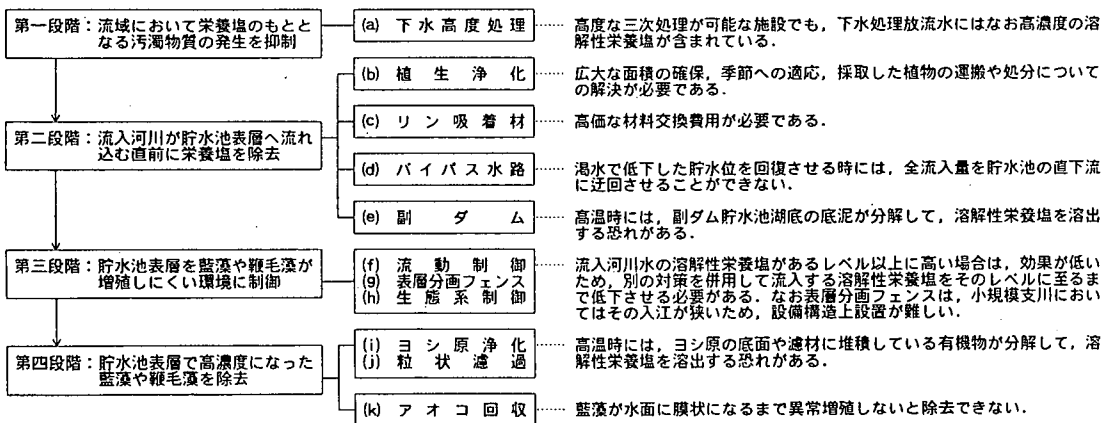


図-1 貯水池における既往の富栄養化対策の手法構成と問題点

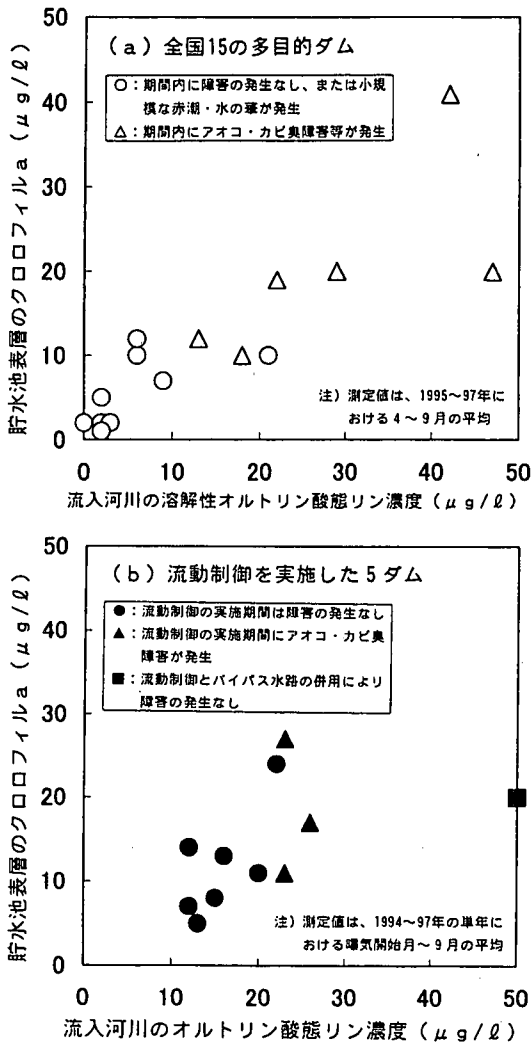


図-2 実貯水池における流入河川の溶解性リン濃度と富栄養化障害の程度との関係

二段階であり、本研究は、そのうちの一对策手法を扱ったものである。

なお高濃度の溶解性栄養塩が河川水とともに貯水池に流入した後の対策として、貯水池表層にて藍藻や鞭毛藻が異常増殖しないように、貯水池表層の環境を水理的に、あるいは生態系として制御する方法が続く。これを第三段階とする。さらに貯水池表層で藍藻や鞭毛藻が異常増殖してしまっからの対策として、アオコ回収やヨシ原浄化などがある。これが第四段階である。

ここで図-2に実際の貯水池における流入河川の溶解性リン濃度と貯水池表層のクロロフィル a の関係を示す。図-2(a)によると流入河川の溶解性リン濃度が大きくなるに従い貯水池表層のクロロフィル a

も大きくなる傾向が読み取れ、また溶解性リン濃度が $10 \mu\text{g}/\ell$ を超えるとアオコ・カビ臭障害が発生し易くなるのがわかる。図-2(b)によると第三段階に当たる曝気循環による流動制御を実施しても、流入河川の溶解性リン濃度が $20 \mu\text{g}/\ell$ 程度より悪化している場合は、流動制御だけでは確実な効果を期待できないことを示している。このため第一段階や第二段階の対策を併用して、流入濃度を $20 \mu\text{g}/\ell$ 以下に低下させたい。第一、第二段階の対策としては、下水高度処理<sup>1)</sup>、植生浄化<sup>1)~5)</sup>、リン吸着材<sup>6)</sup>、および流入河川水のバイパス水路<sup>7)</sup>などがある。本研究は、このうち植生浄化を扱った。

植生浄化に用いる淡水植物は、ホテイアオイなどの高等水生植物のほかに、浮遊藻類や糸状藻類が考えられる。糸状藻類群集は、高等水生植物に比べ増殖速度が高いことと、冬季の低い水温でも増殖可能であるために四季を通じて適応できることなどの点で、他の淡水植物に比べ有利である。久納他(1997)<sup>8)</sup>は、この糸状藻類群集を連続的に培養することにより、河川水中の溶解性リンおよび窒素を効率的に除去できる糸状藻類栽培処理を提案している。

しかし、糸状藻類群集の増殖速度が高等水生植物に比べ高いとはいえ、貯水池の富栄養化に対処するには、糸状藻類群集を栽培する水路設備を設置する広大な場所が必要である。また、生産した藻体の採取や処分の方法も、明らかにしなければならない。

本研究では、水路設備を設置する場所として、貯水池の水位変動域、副ダムの水面、土捨場跡地、および流入小支川や水路などの貯水池周辺の利用価値の低い場所を利用することとした。それらの場所にて機能する水路設備を設計した。水路設備の維持管理は、藻体の定期的あるいは連続的な採取と、水路底に堆積した有機物の除去が、人手が掛からず簡易な構造の装置で行えるようにした。また採取した藻体の有効利用の可能性も示した。

これらの総合的検討例として、具体的な水路構造案にもとづく貯水池での設備設置場所および規模の検討例を示し、実施に当って予想される問題点についても検討した。

## 2. 富栄養化対策における糸状藻類栽培処理の適性

### (1) 貯水池の富栄養化対策の問題点

貯水池の富栄養化対策は図-1に示すように数多くの手法がある。これらの富栄養化対策はいずれ

生育形 進化の系統樹	浮漂形	固着形	沈水形	抽水・浮葉形	
被子植物 シダ植物 コケ植物 車軸藻 緑藻 珪藻 黄緑藻 黄金色藻 紅藻 藍藻	アオウキクサ属 ウキクサ属	カワゴケウ属 カワゴモ属	カワフカモ属 ヒメシロモ属 クロモ属 コナガモ属 オナガモ属 ハジロモ属 フサモ属 シツクモ属	ヨシ属 荻属 ハリイ属 ハス属 コウネ属 ホテイアオイ属 オランダガラシ属 トチカズミ属 ヒシ属 シュンギイ属	
	クサシロモ属 アカウキクサ属		ミズユリ属	トクワ属 ミズカサモ属	
	イチョウカキクサ属 ウキクサ属	ヒシヤクゴケ属	カワゴケ属 ヤナギゴケ属		
			シツクモ属 フサコモ属		
	クサミドリモ属 オキネモ属 クロレウ属 ハナハナモ属 セキネモ属 シツクモ属 アシハラモ属	セキネモ属 アンキストロモ属	ヒメシロモ属 スズメアカモ属 カニコサモ属 シツクモ属 オオシロモ属 フサモ属 オナガモ属 ヒシヤクモ属 アオシロモ属	糸状藻類群集	
	ホシバクイソウ属 ハリケイソウ属 ホシバクイソウ属 ヒメバクイソウ属 ヨロシ属	クサバクイソウ属 ハリケイソウ属 フナバクイソウ属 アカハネモ属 ニッチャ属	ヨシ属 ヒメシロモ属		
	トリホネモ属	フナシロモ属			
	クワレナモ属 シノブリオン属		ミズイ属		
		ベニマダモ属	カモモク属 オイソクモ属		
	ミコカキモ属 アナバクモ属 コレモ属 フナシロモ属	ユレモ属 リンゴモ属 フナシロモ属 ネツモ属			
	生育形の模式図				
	採取作業の難易性	小形のため採取が困難	基層からのかき取りが困難	レーキスクリーン等で採取が容易	茎や葉が堅固なため高張る

図-3 淡水植物の分類における糸状藻類の位置

も一長一短があり、万全ではない。

(a) 下水高度処理<sup>1)</sup>は、高度な三次処理が可能な施設でも、下水処理放流水にはなお高濃度の溶解性栄養塩が含まれている。(b) 植生浄化は、流入河川水を被子植物の根のある水域に通水し、河川水から溶解性のリンおよび窒素を吸収除去する手法であるが、広大な栽培面積を必要とする。(c) リン吸着材<sup>6)</sup>は、高価な材料交換費用を必要とする。(d) バイパス水路<sup>7)</sup>は、高濃度の溶解性リンおよび窒素を含む流入河川水を、貯水池を迂回して直接下流へ流す方法であるが、渇水等で低下した貯水位を回復させる時には、全流入量を貯水池直下流に迂回させることはできない。(f) 流動制御<sup>9)</sup>、(g) 表層分画フェンス、(h) 生態系制御<sup>10)</sup>は、流入河川水の溶解性栄養塩があるレベル以上に高い場合は、単独では対応できず、別の対策により、そのレベルに低下するまで流入する溶解性栄養塩を除去しなければならない。(e) 副ダム<sup>11)</sup>、(i) ヨシ原浄化<sup>12)</sup>、(j) 粒状濾過<sup>13)</sup>は、高温時には、副ダムの湖底、ヨシ原の底面、および濾材に堆積している有機物が分解して、処理水に溶解性栄養塩を溶出する恐れがある。

これらの問題点に対し、何らかの改善方法が望まれている。

## (2) 植生浄化の問題点

現状の植生浄化には以下に示す問題点がある。

① リン吸収能と必要面積：被子植物における溶解性リンおよび窒素の吸収は、光合成に起因する作用のため、広い栽培面積が必要である。比較的増殖速度の大きいホテイアオイでも、溶解性リン濃度が  $40 \mu\text{g}/\ell$  の  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  の流入河川水を  $20 \mu\text{g}/\ell$  にするのに、約 8 ha の面積が必要となる<sup>3)</sup>。

② 季節性：ヨシやホテイアオイ等の被子植物は、増殖するのに、水温や季節変化の影響を大きく受けるため、北日本あるいは秋季や冬季には機能できない。

③ 採取方法：ホテイアオイやオランダガラシなどの被子植物は、採取した植物体の運搬や処分について、根本的な解決策が見出されていない。

## (3) 糸状藻類の生態学的特性と植生浄化への適性

淡水植物は増殖速度 (1/d) で見ると、河床付着性藻類が 2.5 程度<sup>14)</sup>、植物プランクトンが 1.0 程度<sup>15)</sup>、ホテイアオイが 0.1 程度<sup>3)・4)</sup>、オオフサモが 0.03 程度<sup>5)</sup>、およびオランダガラシが 0.03 程度<sup>3)</sup> というように、一般に進化段階が進んでいる方が増殖速度が小さい。また生育形が単純なほど採取作業が困難である。そこで淡水植物の代表的な種を進化段階毎に抽出し、さらに各進化段階の種を生育形に分類した。図-3はこれらの淡水植物における進化段階と生育形との関係を図化したものである<sup>16)~21)</sup>。糸状藻類

表-1 糸状藻類栽培設備の設計条件

設備の設計方針	具体的な設計条件
① 糸状藻類を栽培することが可能である。	(a) 自然等の流況を観察することにより糸状藻類が増殖する5タイプの生息場所を選出し、設備に再現させる。具体的には、藻体が増殖するのに適切な、基層形状・密度、水深、および接触流速を有する水路構造とする。
② 溶解性の栄養塩を連続的に除去することが可能である。	(b) 藻体を定期的あるいは連続的に採取する仕組みを持つ水路構造とする。 (c) 水路底に堆積した藻体死骸等の有機物が、分解により栄養塩を発生させて処理水に溶出しないように、有機物を除去する仕組みを持つ水路構造とする。 (d) 他の水生生物の悪影響を受けにくい設備とする。具体的には、ユスリカの産卵やウキクサの滞留が生じにくい基層形状を有する水路構造とする。
③ 設備を容易に維持管理することが可能である。	(e) 藻体を採取するのと有機物を除去するのに必要な維持管理が、簡単に省力的な水路構造とする。 (f) 災害に強い設備とする。具体的には、陸上に設けた場合は濁水や土砂の流入に、また湖上に設けた場合は波浪に対応できる水路構造とする。
④ 広い設備面積を貯水池の周辺に確保することが可能である。	(g) 設備から採取した糸状藻類は処分することなく、有機肥料や家畜および魚類の飼料に加工して有効利用する。 (h) 貯水池周辺の利用価値の低い場所である水位変動域、副ダムの水面、水路上部空間などに設置する。 (i) 本設備単独で富栄養化対策に当たるのではなく、既往の貯水池対策と組合せて対策機能を補完する。

群集は緑藻および珪藻からなるため、淡水植物の中では、進化段階は原始的な位置にあり、また生育形は沈水形の位置にあることがわかる。糸状藻類を植生浄化に用いる上での利点は、以下のようにまとめられる。

① リン吸収能と必要面積：緑藻および珪藻からなる糸状藻類群集は、図-3に示すように現状の植生浄化に用いられているホテイアオイなどの被子植物に比べると進化段階が原始的であるため、増殖速度が速く、溶解性栄養塩の吸収能が高い。溶解性リン濃度が $50 \mu\text{g}/\text{l}$ 以下である低濃度領域における糸状藻類のリン吸収能は、ホテイアオイ、ウキクサおよびヨシ等に比べると5倍以上高く<sup>3)~5), 8), 12), 22)</sup>、この分、栽培面積を大幅に縮小できる。また糸状藻類によるリン除去率は、原水の溶解性リン濃度が概ね $20\sim 40 \mu\text{g}/\text{l}$ の範囲で最大値が現われるが、この範囲は富栄養化が懸念されるダム貯水池の流入河川水の溶解性リン濃度の範囲と概ね一致し、糸状藻類は流入河川水からの溶解性リンの除去に適する<sup>8)</sup>。なお同じく藻類である黄金色藻や紅藻にも沈水形の種類が存在するが、それらは生息条件が著しく限定されるため、自然界においてはまれにしか発生しない。

② 季節性：糸状藻類群集は、増殖に適する水温が異なるか、あるいは増殖のピークとなる季節が異なる、十数種類の緑藻あるいは珪藻から成る群集として生息する。その中から状況に最も適した種類が、自然と選択されて群集の優占種となる性質を有している。つまり糸状藻類群集は、被子植物と違ってかなりの低温から常温に至る範囲の水温と、水温の四季変化とに適応できる。

③ 採取方法：淡水植物における生育形による分類を図-3に示す。糸状藻類群集は沈水形に属し、水中にて柔軟な葉状体を成すため、スクリーンなどに

より採取が容易であり、またホテイアオイやオランダガラシなどの被子植物は抽水・浮葉形に属し、水上あるいは水面にて堅固な茎葉体を成すため、採取は可能である。しかし現地実験によると「運搬時の湿潤状態での体積」を「乾燥重量」で割った値( $\text{cm}^3/\text{g dry weight}$ )は、ホテイアオイが180程度、オランダガラシが60程度と嵩張って、運搬に手間が掛かるのに対し、糸状藻類は30程度であり、あまり嵩張らない。なお他の生育形として、浮漂形と固着形がある。前者は、水中あるいは水面を微細な植物体として浮漂しているため、水からの分離が困難である。後者は、岩盤等の基層に被膜状に固着しているため、基層からのかき取りが困難である。

### 3. 糸状藻類栽培設備の設計方針

#### (1) 設備の設計方針

糸状藻類栽培設備を設計するのに、基本となる設計方針は以下に示す4つに大別できる。

- ① 糸状藻類を栽培することが可能である。
- ② 溶解性の栄養塩を連続的に除去することが可能である。
- ③ 設備を容易に維持管理することが可能である。
- ④ 広い設備面積を貯水池の周辺に確保することが可能である。

これらの設計方針①~④に対する具体的な設計条件を表-1の(a)~(i)に示す。

#### (2) 生息場所と設備の設置場所

糸状藻類は河川、池沼、水田、および浄水場などにおいて生息しているが、それらの場所ならどこにでも生息しているかと言えば、そうではない。糸状藻類が高密度の群集を形成するには、それらの

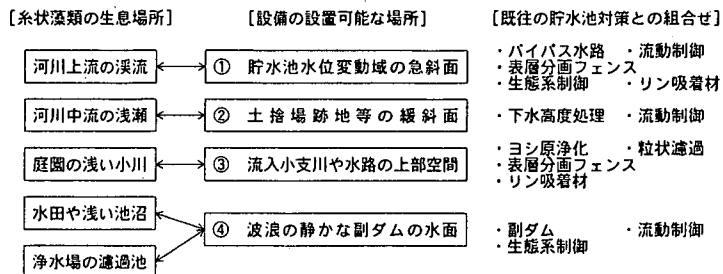


図-4 糸状藻類の生息場所と設備の設置場所と既往対策の組合せ

中でさらに特定の流れの条件を持つ場所だけに限られる。よって自然などの流況を十分に観察することにより、糸状藻類群集が増殖可能な5タイプの生息場所を図-4に示すように選出した。

一方、糸状藻類栽培設備は、貯水池に流入する河川の近傍に広い設備面積を確保する必要がある。貯水池周辺で広い面積が確保できるのは、利用価値の低い場所に限られ、具体的には、①水位の下がる夏期における貯水池の水位変動域の急な斜面、②流入河川近傍の土捨場や土取場跡地の緩い斜面や下水処理施設の屋上スペース、③貯水池に流入する小規模支川や農業排水路の上部空間、④副ダム等で堰止められた波浪の少ない水面が挙げられる。

これらの①～④の設置場所に、糸状藻類群集の生息場所を再現させるには、設置場所と生息場所との関係を、斜面勾配および流況をもとにして、以下のように考えた。

① 貯水池水位変動域の急斜面：急な勾配であるから、接触時間が極力長くなるように、階段状の水路床を持つやや短い流れを造り、「河川上流の溪流」における糸状藻類群集の生息場所を再現する。

② 土捨場跡地等の緩斜面：緩い勾配であるから、乱れが極力多く生じる水路床を持つかなり長い流れを造り、「河川中流の浅瀬」における生息場所を再現する。

③ 流入小支川や水路の上部空間：かなり緩い勾配であるから、流下方向の接触面積を大きくした水路床を持つかなり長い流れを造り、「庭園の浅い小川」における生息場所を再現する。

④ 波浪の静かな副ダムの水面：得られる水面勾配がほとんど水平であるから、乱れが全くない水平方向もしくは鉛直方向の短い流れを造り、前者は「水田や浅い池沼」、後者は「浄水場の濾過池」における生息場所を再現する。

糸状藻類栽培処理は、ホテイアオイなどの被子植物による植生浄化に比べれば、必要面積はかなり縮小でき、また前述のように貯水池周辺の利用

価値の低い場所に設置できるため、かなり有利となる。しかし貯水池の富栄養化対策として単独で対処するには、なお必要面積が大きくて不利である。

そこで、既往の貯水池対策と糸状藻類栽培処理とを組合せることを考える。既往の貯水池対策は、図-1に示すような問題点を持っているが、糸状藻類栽培処理は、溶解性栄養塩を連続的に除去できるため、組合せによっては対策機能を互いに補完でき、効率的となる。組合せ例を図-4に示す。

#### 4. 水路構造の設計

##### (1) 水路構造上の外因項目と設計項目

糸状藻類群集が増殖し溶解性栄養塩の除去に影響を与える要因には、大別すると光、栄養塩、温度、流況、および藻体除去の5つがあり、水路構造の設計を行う際に、これら5つの要因に関与する項目は、制御不可能な外因項目と、制御可能な設計項目に分けられる。

外因項目としては、(a)水面照度、(b)照度の日周期性<sup>23)</sup>、(c)原水の栄養塩濃度<sup>2)</sup>、(d)水温<sup>2)</sup>の4項目が挙げられる。

設計項目については、水路構造を決定する基本設計項目、水路構造の細部を決定する細部設計項目、の2段階に区分される。基本設計項目は、(e)基層形状、(f)藻体採取の仕組み、(g)有機物除去の仕組みの3項目が、細部設計項目は、(h)基層密度、(i)水深、(j)水路幅当り流量、(k)藻体採取頻度の4項目が挙げられる。

糸状藻類栽培設備を設計した手順を以下に示す。本設備は糸状藻類群集の生息場所をその水路に再現できなければならない。まずそれが可能な構造となるように設計項目の組合せを仮定し、実験水路を作成した。次にそれらを用いて現地実験を行ったが、現地実験は溶解性栄養塩を除去するのにより適した構造となるように、設計項目を順次置

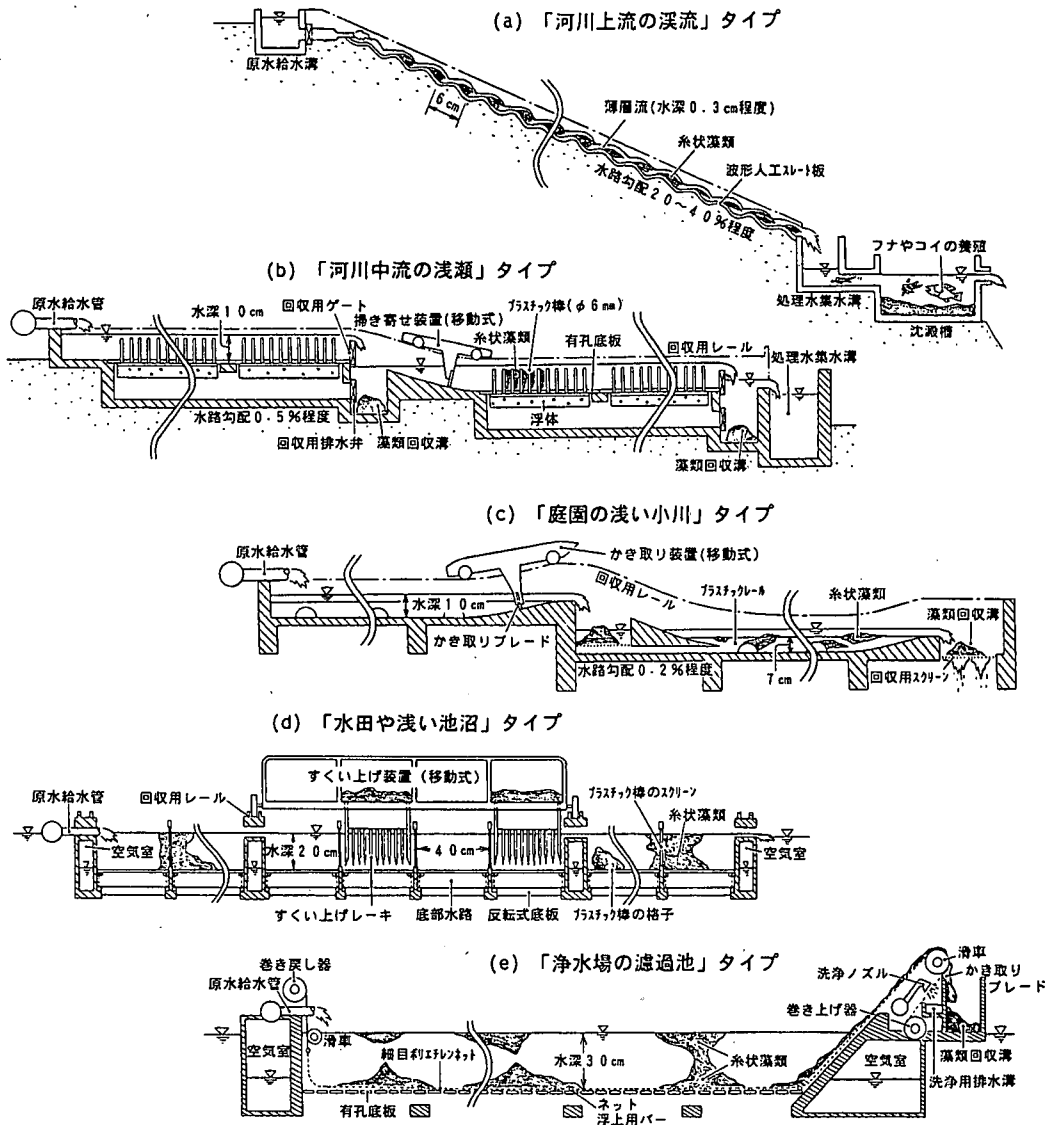


図-5 糸状藻類栽培設備の水路構造

換しながら行った。それらを繰り返すことにより、最終的に最も適した設計項目の組合せを見つけ出した。なお基本設計項目の置換実験において、得られる水路構造が、施工性あるいは維持管理の点で不利になることが判明した場合は、その基本設計項目は採用しないこととした。

## (2) 基本設計項目の実験結果

糸状藻類群集の生息場所を5タイプ選出したが、各タイプ毎に水路構造を現地実験により設計した。得られた水路構造を図-5に示す。

### a) 「河川上流の溪流」タイプ

河川上流の溪流で、糸状藻類が岩石に付着して

いる生息場所を、再現したタイプである。

基層形状は、①粒径3cmの中礫層を傾斜させた水路、②粒径3cmの中礫を埋め込んだコンクリート板を傾斜させた水路、③波長6cmの波形をした人工スレート板を傾斜させた水路の3ケースと比較した結果、短い水路長で対応できる、基層の施工性が容易、リン吸収能が高いという理由により③が選択された。

本タイプでは基層に付着した糸状藻類は、成長すると水流に抵抗できず自然に切れて流下するため、かき取りの必要はない。なお流下した糸状藻類を回収するために、糸状藻類を餌とする魚類養殖を兼ねた沈殿槽を水路下流端に設けた。

水路底に堆積した有機物は、順次自然流下するため、かき取りの必要はない。

#### b) 「河川中流の浅瀬」タイプ

河川中流の浅瀬で、糸状藻類が河床礫に付着している生息場所を、再現したタイプである。

基層形状は、①直径3mmのひもを水路横断方向に5cm間隔で張った水路、②上端を連結させた直径3mmのプラスチック棒より成るスクリーンを水路横断方向に6cm間隔で設けた水路、③直径6mmのプラスチック棒を剣山状に林立させた水路の3ケースで比較した結果、採取量が高い、水中での光強度が得やすい、基層の維持管理が容易、ユスリカが産卵しにくいという理由により③が選択された。

採取方法は、プラスチック棒を底板の真下の浮体と一体化しておき、水位を下げることによりプラスチック棒を底板より降下させ、プラスチック棒に付着している糸状藻類を、底板の穴のところでそぎ取ることにより、底板上に一旦堆積させ、掃き寄せ装置により水路下流端に集め、回収するものとした。

水路底に堆積した有機物は、採取の際に掃き寄せ装置の作動と同時に除去できる。

#### c) 「庭園の浅い小川」タイプ

庭園に造られた浅めの流れのある小川で、糸状藻類が小川の両岸や、埋め込みの小石に付着している生息場所を、再現したタイプである。

基層形状は、①直径2cm高さ10cmのプラスチック円柱の突起を底面より林立させた水路、②厚さ1cm長さ5cm高さ10cmのプラスチック板の突起を底面より林立させた水路、③厚さ1cm高さ7cmのプラスチックレールを流下方向に多列に布設した水路の3ケースで比較した結果、水路断面全体が均一流となる、夏季の採取量が高いという理由により③が選択された。

採取方法は、水流を保ったままで、レールに沿ってかき取り装置を走行させて、糸状藻類を基層から分離させ、流下する糸状藻類を水路下流端に設けたスクリーンにて回収するものとした。

水路底に堆積した有機物は、採取の際にかき取り装置の作動と同時に除去できる。

#### d) 「水田や浅い池沼」タイプ

水田や浅い池沼で、糸状藻類が高等水生植物に付着したり、水中を浮漂したりしている生息場所を、再現したタイプである。

基層形状は、①水路横断方向に網目13mmの荒目ネットより成るスクリーンを50cm間隔で設けた水路、②水路横断方向に直径8mmのプラスチック棒

より成るスクリーンを40cm間隔で設けた水路の2ケースで比較した結果、糸状藻類の仮根部が残り易い、ウキクサを排除できるという理由により②が選択された。

採取方法は、水位を保ったままで、スクリーン間にすくい上げ装置を走行させて、糸状藻類を水中よりすくい上げるものとした。

水路底に堆積した有機物の除去は、①水位が無くなるまで設備を浮上させ、水路左右端から水流を与えて水洗する、②水路底部に水平なプラスチック棒の格子で仕切られた、水路横断方向に連続する底部空間を設けておき、採取の直後に底部空間の底板を裏表に反転させて、底板上に堆積した有機物を湖中に沈降させるという2ケースで比較した結果、設備を浮上させる作業が不要である、二重底にすれば夏季に栄養塩を溶出しないという理由により②が選択された。

#### e) 「浄水場の濾過池」タイプ

浄水場の緩速濾過池で、糸状藻類が砂面上載したり、水中に浮漂したり<sup>24)</sup>している生息場所を、再現したタイプである。

基層形状は、①水路底面に有孔底板を設け、その上に粒径7mmで層厚5cmの軽石層を載せた水路、②水路底面に有孔底板を設け、その上に網目2.5mmのポリエチレンネットを敷いた水路という2ケースで比較した結果、基層より栄養塩を溶出しないという理由により②が選択された。

採取方法は、①浮上して来た糸状藻類を水路下流端に設けた越流スロープで常時回収する、②ポリエチレンネットを水面近くまで浮上させ、水路下流端でネットを巻き上げて、ネットとともに引き寄せて来た糸状藻類をかき取りブレードでかき落とすという2ケースで比較した結果、ほぼ全量回収できるという理由により②が選択された。

水路底に堆積した有機物は、採取の際に水路下流端でのネット巻き上げと同時に、ネットに付着している有機物を洗浄ノズルにより除去できる。

### (3) 細部設計項目の実験結果

水路設備が、溶解性栄養塩を除去するのに、より効率的となるように、細部設計項目の比較実験を行った。細部設計項目の標準値を表-2に示す。

#### a) 「河川上流の溪流」タイプ

水路勾配は、15%以下になると有機物が自然流下しないため、それより大きくする必要がある。25~35%の範囲におけるリン吸収能は、概ね同値である。

水路幅当りの流量は、30ℓ/min/m以下になると

表-2 水路構造の細部設計項目の標準値

設備タイプ	基 層 密 度	水路勾配	水 深	水路幅当りの流量	藻体採取頻度
「河川上流の溪流」	人工スレート板の波長 …… 6 cm	20%以上	0.3cm程度	50 ℓ/min/m以上	不 要
「河川中流の浅瀬」	プラスチック棒(φ6mm)の設置間隔 …… 水路横断方向2.5cm×流下方向6 cm	0.5%程度	10 cm	600 ℓ/min/m	1～2週間に1回
「庭園の浅い小川」	レール(B1cm×H7cm)の設置間隔 …… 6 cm	0.2%程度	10 cm	600 ℓ/min/m	1～2週間に1回
「水田や浅い池沼」	スクリーン(φ8mm)の設置間隔 …… 40cm	勾配なし	20 cm	30 ℓ/min/m以上	2週間に1回
「浄水場の濾過池」	ポリエチレンネットの網目 …… 2.5mm	勾配なし	30 cm	2.5～5.0 mm/min (濾過速度)	3～4週間に1回

水路底全体の均一流が得られにくくなるため、それより大きくする必要がある。38～92 ℓ/min/mの範囲におけるリン吸収能は、概ね同値である。

b) 「河川中流の浅瀬」「庭園の浅い小川」タイプ

水深については、15cm以上になると水深の深い層が照度不足となって藻類が増殖できなくなり、原水が通過するだけの水みちとなる。よって10cmが適切である。

水路幅当りの流量は、400 ℓ/min/m以下になると、本設備タイプに生息する糸状藻類にとって不可欠な条件である藻体の接触流速10cm/sを確保できなくなるため、それより大きくする必要がある。560～1120 ℓ/min/mの範囲における採取量 (g dry weight/m<sup>2</sup>/d)は、概ね同値である。

藻体採取頻度は、3週間に1回以下になると水面を藻類がマット状に増殖するようになるため、それより大きくする必要がある。1～2週間に1回の範囲における採取量は、概ね同値である。

c) 「水田や浅い池沼」タイプ

水深については、30cm以上になると水深の深い層が照度不足となって藻類が増殖できなくなり、原水が通過するだけの水みちとなる。よって20cmが適切である。

水路幅当りの流量については、10 ℓ/min/m以下になると水路断面全体の均一流が得られにくくなり、採取量が大幅に低下する。よって30 ℓ/min/m以上が適切である。

藻体採取頻度については、3週間に1回以下になると、水路断面全体の均一流が得られにくくなり、採取量が大幅に低下する。よって2週間に1回が適切である。

d) 「浄水場の濾過池」タイプ

水深については、浅すぎると給水管から離れた水路底に原水を運ぶための通路となる水深の浅い層がなくなり、深すぎると水路底に光が届かなくなる。よって30cmが適切である。

濾過速度については、このタイプにおける藻体の接触流速はかなり小さいため、濾過速度の大小

がリン吸収能へ与える影響はかなり小さい。2.3～4.7mm/minの範囲におけるリン吸収能は、概ね同値である。

藻体採取頻度については、採取後に長期間採取を行わない場合のリン吸収能 (mg/m<sup>2</sup>/d)の経時変化は、7日後に60、14日後に78、21日後に102、28日後に71、35日後に62となった。よって3～4週間に1回が適切である。

(4) 設備規模の算定方法

前述の4.(2) 4.(3) で水路構造を検討したが、貯水池や湖沼にて実用化する際の設備規模の算定方法を述べる。

設備規模を算定するのに最も重要なのは水路表面積であるが、これを求めるには次式に示すように糸状藻類のリン吸収能を把握しなければならない。

$$A = \frac{(C_{P1} - C_{P2}) \cdot q}{V_P} \quad (1)$$

ここに、A：水路表面積 (m<sup>2</sup>)

C<sub>P1</sub>：原水のD・PO<sub>4</sub>-P濃度 (μg/ℓ)

C<sub>P2</sub>：処理水のD・PO<sub>4</sub>-P濃度 (μg/ℓ)

q：設計流量 (m<sup>3</sup>/d)

V<sub>P</sub>：リン吸収能 (mg/m<sup>2</sup>/d)

流入河川から貯水池に流入するリンのうち、藻類にとって最も利用しやすい形は溶解性オルトリン酸態リン (以下、D・PO<sub>4</sub>-Pという) である。よってリン吸収能を把握するために、D・PO<sub>4</sub>-Pに着目して現地実験を行った。

図-6は、リン吸収能が原水のD・PO<sub>4</sub>-P濃度に依存しているかどうかを図示したものであり、5つの設備タイプに分けて整理した。横軸は原水のD・PO<sub>4</sub>-P濃度の対数、縦軸はD・PO<sub>4</sub>-Pの吸収能とした。まず個々の測定値を後述の式(3)により水温20℃の値となるように補正し、次に1ヶ月間の平均測定値をプロットした。図-6を見ると、リン吸収能は原水のD・PO<sub>4</sub>-P濃度が大きくなるに従い増加するという傾向が見られる。よって平均測定値を最小



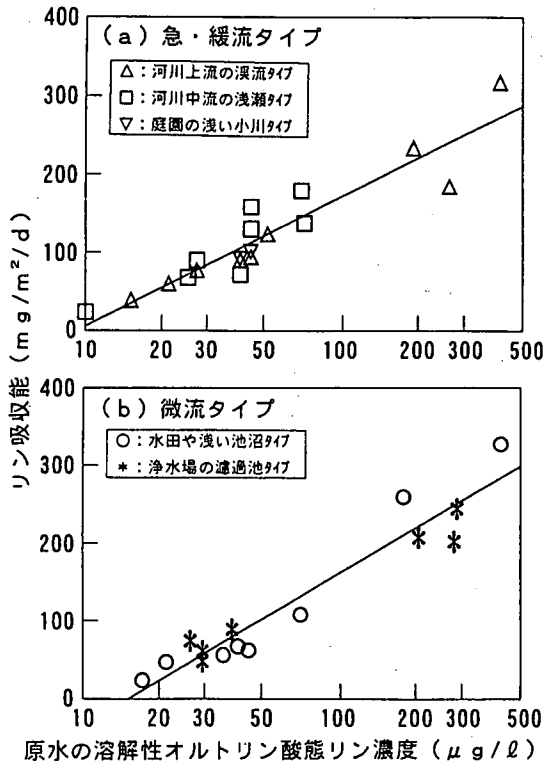


図-6 現地実験による溶解性オルトリン酸態リンの吸収能における濃度依存性

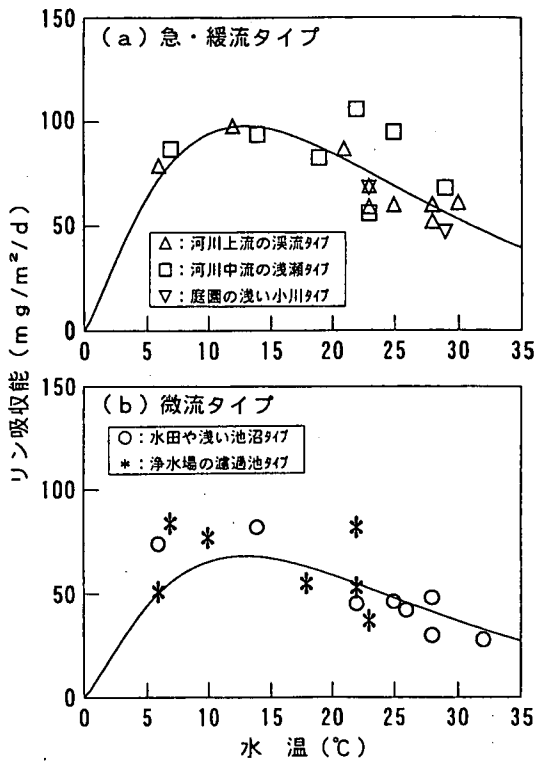


図-7 現地実験による溶解性オルトリン酸態リンの吸収能における水温依存性

自乗法で処理することにより、式(2)に示すようにリン吸収能の定式化を行った。

$$V_P = \{ b_1 + b_2 \cdot \ln(C_{P1}) \} \cdot k_T \quad (2)$$

ここに、 $b_1, b_2$ : 流況条件ごとのリン吸収能の定数(表-3参照)

$k_T$ : 水温によるリン吸収能の補正係数  
(20°Cの場合に  $k_T = 1$ )

流況条件ごとのリン吸収能の定数  $b_1, b_2$  は、リン吸収能が流況つまり藻体の接触流速に依存しているかどうかを示すものである。なお藻体の接触流速は、基層形状、基層密度、水深、水路幅当りの流量の4つの設計項目が関与しており、設備タイプにより異なる。

図-6の2つの図を見ると、原水の  $D \cdot PO_4-P$  濃度が  $10 \sim 50 \mu g/l$  の範囲では、藻体の接触流速の大小がリン吸収能に影響を及ぼすため、5つの設備タイプはその大小により急・緩流タイプと微流タイプという2つの流況タイプに分かれる。前者は後者に比べ、リン吸収能が  $20 \sim 30 mg/m^2/d$  高いという傾向が見られる。

図-7は、リン吸収能が水温に依存しているかどうかを図示したものであり、図-6と同様に、5つの設備タイプに分けて整理した。まず個々の測定

表-3 流況条件ごとのリン吸収能の定数

設備タイプ	流況タイプ	$b_1$	$b_2$
「河川上流の溪流」タイプ	急・緩流タイプ	-160	72
「河川中流の浅瀬」タイプ			
「庭園の浅い小川」タイプ			
「水田や浅い池沼」タイプ	微流タイプ	-230	85
「浄水場の濾過池」タイプ			

値を前述の式(2)により原水の  $D \cdot PO_4-P$  濃度  $30 \mu g/l$  の値となるように補正し、次に1ヶ月の平均測定値を図示した。図-7を見ると、リン吸収能は水温が概ね  $10 \sim 15^\circ C$  の範囲で最大値となり、その低温および高温域では減少するという傾向が見られる。この傾向は式(3)により表わすことが可能であり、図-7に実線により示した。

$$k_T = 1.15 \times \{ (T/13) \cdot \exp(1 - T/13) \}^{1.3} \quad (3)$$

原水と処理水の  $D \cdot PO_4-P$  濃度、水温、および設計流量が既知の場合に、必要な水路表面積は、式(1)、および式(2)を用いて得られる式(4)により、流況タイプに応じて算定できる。

$$A = \frac{q \cdot (C_{P1} - C_{P2})}{\{ b_1 + b_2 \cdot \ln(C_{P1}) \} \cdot k_T} \quad (4)$$

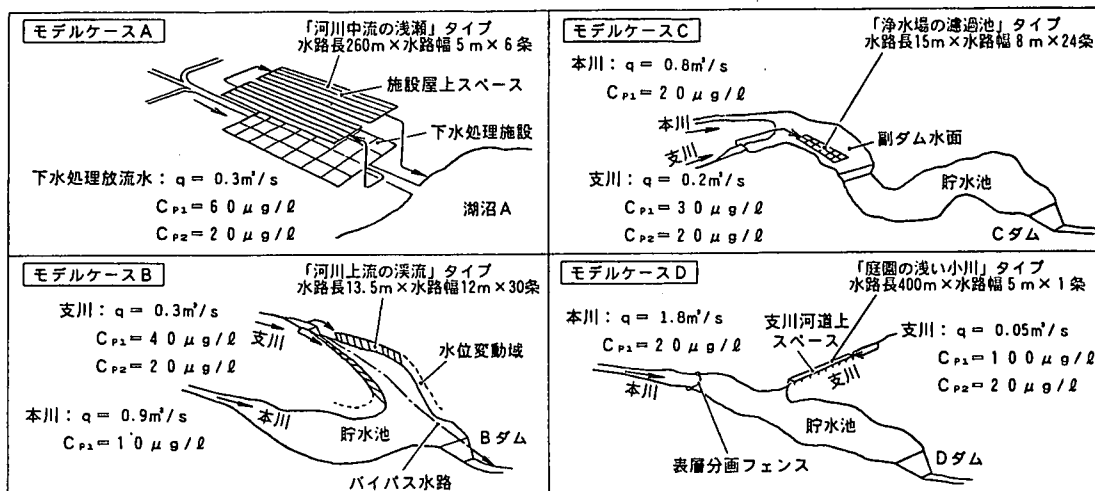


図-8 モデルケースにおける設備規模の算定

設備規模を算定するのに次に重要なのは、栽培した糸状藻類を採取する装置の設計と糸状藻類の有効利用計画であるが、これらを行うには採取量 (g dry weight/m<sup>2</sup>/d) を把握しなければならない。久納他 (1998)<sup>25)</sup> は、採取量についても現地実験をもとに定式化している。

## 5. 場所・規模の検討例と実施への問題点

### (1) 設備の設置場所および規模の検討例

ここでは、実在する湖沼と貯水池を立地条件とするモデルケースとして、具体的な設備の設置場所および規模の検討例を示す。図-8に示すモデルケースA～Dは、いずれも現地にて水路設備を設置できる場所を確認した。

#### a) モデルケースA

本ケースは、湖沼Aに流入する下水処理場の放流水0.3 m<sup>3</sup>/sが対象である。下水処理放流水は溶解性リン濃度が60 μg/lと高い。「河川中流の浅瀬」タイプの設備により20 μg/lまで低下させるには、必要な水路表面積が7800m<sup>2</sup>となる。

設備は、下水処理施設の屋上スペースに水路長260m、水路幅5mの水路6条を折り返して設け、下水処理放流水を屋上にポンプアップして設備に導水する。設備から採取した糸状藻類は、光合成細菌、および放線菌などで構成される拮抗微生物を添加する腐敗防止処理を行ったうえで<sup>26)</sup>、有機肥料や、家畜、および魚類の飼料に加工して有効利用を計る<sup>27)</sup>。

#### b) モデルケースB

本ケースは、Bダム貯水池の流入支川0.3m<sup>3</sup>/sが

対象である。流入本川は溶解性リン濃度が10 μg/lと低く、対策は必要としない。流入支川は溶解性リン濃度が40 μg/lと高い。バイパス水路はあるが、貯水位回復時には全流入量を迂回することができないため、対策が必要である。「河川上流の溪流」タイプの設備により20 μg/lまで低下させるには、必要な水路表面積が4860m<sup>2</sup>となる。

設備は、水位変動域に水路長13.5m、水路幅12mの水路30条を設け、水面上に現れる5月から10月の期間において、支川の取水堰より導水する。このタイプの設備は糸状藻類の採取の必要がなく、維持管理としては、水路下流端に設けた沈殿槽に溜まった糸状藻類の死骸を数ヶ月に1回吸引除去する。

#### c) モデルケースC

本ケースは、Cダム貯水池の流入支川0.2m<sup>3</sup>/sが対象である。流入本川は溶解性リン濃度が20 μg/lと低く、対策は必要としない。流入支川は溶解性リン濃度が30 μg/lと高い。副ダムはあるが、この対策では溶解性栄養塩を除去できないため、対策が必要である。「浄水場の濾過池」タイプの設備により20 μg/lまで低下させるには、必要な水路表面積が2880m<sup>2</sup>となる。

設備は、副ダム水面に水路長15m、水路幅8mの水路24条を棧橋状に設け、支川の取水堰より導水する。本設備は台風時などの波浪による損壊を回避するため、短時間で水没ならびに浮上可能な構造となっている。

#### d) モデルケースD

本ケースは、Dダム貯水池の流入支川0.05m<sup>3</sup>/sが対象である。流入本川は溶解性リン濃度が20 μg

/ℓと低く、対策は必要としない。流入支川は溶解性リン濃度が100 μg/ℓとかなり高い。流入本川の河口には表層分画フェンスがあるが、支川の河口には構造上設置が困難なため、対策が必要である。「庭園の浅い小川」タイプの設備により20 μg/ℓまで低下させるには、必要な水路表面積が2000m<sup>2</sup>となる。

対象とする流入支川はBODが高いため、支川上流より導水して砂利濾過で前処理を行う。次に幅5mの流入支川の河道上スペースに、水路長400m、水路幅5mの水路1条の設備を設けて処理する。

## (2) 実用化に向けて予想される問題点

設備の具体的な設計条件を表-1の(a)~(i)に示した。このうち(a)~(e), (h), および(i)については、前述の3.と4.で解決したことを説明した。残る(f), (g)については前述の5.(1)のモデルケースのなかで説明したが、(f), (g)の設計条件には未解決の部分があり、実用化へ向けて予想される問題点として以下の点が挙げられる。

(f)の湖上に設ける水路設備を波浪に対応できる構造とする点については、机上での設計は検討済であるが、水理模型実験に未着手である。

(g)の採取した糸状藻類を有機資材として有効利用する点については、肥料・飼料の製造方法は開発済であるが、市場の確保に未着手である。なおこの問題点については、多くの知見が得られており<sup>26)~29)</sup>、解決の道はあると考えられる。

## 6. まとめ

① 糸状藻類が増殖可能な生息場所を、水路設備に再現することを現地実験により検討し、河川上流の溪流、河川中流の浅瀬、庭園の浅い小川、水田や浅い池沼、および浄水場の濾過池の5タイプの生息場所を選出した。

② 各々のタイプに対し、溶解性栄養塩を連続的に除去し、容易な維持管理が可能な糸状藻類栽培設備を図-5に示すように設計した。

③ 設備が設置可能と考えられる場所として具体例を選び、下水処理施設の屋上、貯水池の水位変動域の急斜面、副ダムの水面、および流入小支川の上部空間の各々をモデルケースとして設備について検討した。その結果、水路表面積1haで流入河川の溶解性リン濃度を20 μg/ℓに低下可能な流量は、処理対象水の濃度や流況タイプによっても異なるが、0.3~0.7m<sup>3</sup>/sとなった。

糸状藻類栽培設備は、既往の富栄養化対策との

組合せによる効率の点からも、利用価値の低い場所に設置可能な点からも、容易な維持管理の点からも実用に供すると結論できる。

謝辞：本研究は、平成4~7年度に建設省土木研究所環境部環境計画研究室における湖沼環境保全に関する研究の一部として実施したものである。研究の実施に際しては、竹林征三環境部長（現土木研究センター）、丹羽薫環境計画研究室長（現ダム新技術研究官）をはじめ研究室の諸氏には心からの協力をいただいた。また研究の遂行にあたり中本信忠信州大学教授、ならびに雨宮由美子山梨県薬剤師会環境衛生検査センター部長に有益な助言とご指導をいただいた。記して深甚なる謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 相崎守弘, 中里広幸, 皆川忠三郎, 朴濟哲, 大橋広明 : 水耕生物ろ過法と酸化池の組合せによる下水処理水の高度処理, 用水と廃水, Vol. 37, pp. 892-899, 1995.
- 2) 椛田聖孝, 岡本智伸 : 水生植物および微細藻類による水質浄化とそのバイオマス利用, 用水と廃水, Vol. 38, pp. 465-470, 1996.
- 3) 三島亨 : 水生植物による水域浄化システム, ヘド口, Vol. 33, pp. 43-50, 1985.
- 4) 今岡務, 寺西靖治 : ホテイアオイの栄養塩吸収能を利用した水質浄化に関する研究, 水質汚濁研究, Vol. 8, pp. 314-322, 1985.
- 5) 村越勇, 副田行夫, 松本誠, 樋口義洋, 池上文雄, 斉藤和季, 立本英機 : 水生植物オオフサモによる水質浄化に関する研究, 千葉大学環境科学研究報告, Vol. 13, pp. 35-42, 1988.
- 6) 寺菌勝二, 上條勝彦 : リン吸着材を用いたリンの削減について, 大ダム, No. 148, pp. 1-11, 1994.
- 7) 清水俊昭, 矢沢賢一, 丹羽薫 : 三春ダムさくら湖の水質保全対策, ダム技術, No. 143, pp. 71-81, 1998.
- 8) 久納誠, 丹羽薫 : 糸状藻類の溶解性オルトリン酸態リンの吸収能における濃度および水温依存性, 水環境学会誌, Vol. 20, pp. 269-277, 1997.
- 9) 横浜市水道局水質試験所 : 水質試験年報~平成7年度, Vol. 46, pp. ii, pp. 18, pp. 27-28, 1996.
- 10) 佐野和生 : 魚類による富栄養化進行の抑制, 水環境学会誌, Vol. 18, pp. 207-214, 1995.
- 11) 松井正樹, 本多吉美, 矢野善博, 工藤守, 一柳淳一 : ダム前貯水池の水質挙動と浄化能, 用水と廃水, Vol. 38, pp. 903-910, 1996.
- 12) 田畑真佐子, 加藤聡子, 川村晶, 鈴木潤三, 鈴木静

- 夫：ヨシ植栽水路における河川水中の窒素・リンの除去効果，水環境学会誌，Vol. 19, pp. 331-338, 1996.
- 13) 丹羽薫，久納誠：軽石濾過システムの原理と設備例，ダム技術，No. 104, pp. 42-49, 1995.
- 14) 川島博之，鈴木基之：負荷解析のための河川水質シミュレーションモデル，水質汚濁研究，Vol. 9, pp. 707-715, 1986.
- 15) 岩佐義朗：湖沼工学，山海堂，pp. 307-309, 1990.
- 16) Linda E. Graham：陸上植物の起源－緑藻から緑色植物へー，内田老鶴圃，pp. 38-73, 1996.
- 17) 角野康郎：日本水草図鑑，文一総合出版社，pp. 2-136, 1994.
- 18) 倉沢秀夫，青山莞爾：湖沼の生物観察ハンドブック，～湖沼の生態学入門，東洋館出版社，pp. 156-175, 1984.
- 19) 岩月善之助，伊沢正名：山溪フィールドブックスしだ・こけ，山と溪谷社，pp. 175-233, 1996.
- 20) 千原光雄：藻類多様性の生物学，内田老鶴圃，pp. 2-26, 1997.
- 21) 廣瀬弘幸，山岸高旺：日本淡水藻図鑑，内田老鶴圃，pp. 831-835, 1977.
- 22) 中里広幸，猪狩敏将：生態系を活用した（水耕栽培）低コスト水浄化法，工業用水，No. 428, pp. 30-44, 1994.
- 23) 久納誠，丹羽薫，中本信忠，福渡隆：糸状藻類のリンおよび窒素吸収能の日周期性に関する実験的研究，水環境学会誌，Vol. 20, pp. 338-346, 1997.
- 24) 中本信忠，池田大介，田口香代，山本満寿夫，野崎健太郎：河川を水源とする緩速ろ過池と貯水池を水源とする緩速ろ過池の藻類被膜の発達の違い，日本水処理生物学会誌，Vol. 33, pp. 81-90, 1997.
- 25) 久納誠，丹羽薫：糸状藻類の採取量における水温および溶解性オルトリン酸態リン濃度依存性，水環境学会誌，Vol. 21, pp. 104-111, 1998.
- 26) 久納誠，竹林征三：水質浄化回収物より有機資材を製造する方法，特許庁，特願平7-68993, 1995.
- 27) 真田誠至，久納誠，丹羽薫，高橋健夫：湖沼水質浄化に伴い発生する糸状藻類の有効利用，土木学会年次学術講演会第2部，Vol. 50, pp. 1132-1133, 1995.
- 28) 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，Vol. X, pp. 71-75, 1984.
- 29) 周達生：東アジアの食文化探検，三省堂選書，pp. 217-230, 1991.

(1998. 9. 29 受付)

## STUDY ON FACILITY DESIGN FOR CONTROLLING EUTROPHICATION IN RESERVOIRS USING FILAMENTOUS ALGAE

Makoto KUNOH and Kuniyoshi TAKEUCHI

This study focusses on a measure to remove dissolved phosphorus and nitrogen from river water flowing into reservoirs. Aquatic treatment is a typical such method, but has the shortcoming that the facilities covering a large area are required. In this paper, we use filamentous algae communities, which have a high multiplication rate compared with other freshwater plants and which can be applied throughout the entire year. We aim to resolve the problem by installing artificial beds for cultivating such filamentous algae communities at places around reservoirs that have little value in terms of other uses. We present specific propositions for facility structure and site selection and clarify the problems expected in putting these proposition into practice.