〈論文〉

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

久 納 誠* 丹 羽 薫**

Dependence of Filamentous Algae's Absorption of Dissolved Orthophosphate on the Concentration and Temperature

Makoto KUNOH* and Kaoru NIWA**

* Research Institute (ex-Kuribaragawa Dam Construction Office), Water Resources Development Public Corporation, Jinde-936, Urawa, Saitama 338 Japan

** Environmental Planning Division, Public Works Research Institute, Ministry of Construction, Asahi-1, Tsukuba, Ibaraki 305 Japan

Abstract

To remove dissolved nutrients from river water flowing into lakes and marshes, water purification by using water hyacinth, reed and other higher aquatic plants has been promoted.

Generally, however, there are many problems associated with higher aquatic plants such as low absorption of dissolved nutrients, no absorption of nutrients when nutrient concentration is low, and little adaptation when the water temperature is low. We therefore designed and tested a filamentous algae system instead of using higher aquatic plants. The system can continuously cultivate filamentous algae, has a high growth ability and can be adapted to a wide range of water temperatures, throughout the year.

We conducted in field experiments on the ability of filamentous algae of the system to absorb dissolved orthophosphate. The results showed that filamentous algae's absorption ability depends on the stream regime, the concentration of nutrient in raw water, and the temperature, except the radiation. We therefore formulated the ability of filamentous algae to absorb phosphorus using three factors as functions. Representative values obtained were as follows. When we treated raw water of dissolved orthophosphate concentration of $30 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ at a water temperature of 20°C , we found that the dissolved orthophosphate absorbing ability was $70 \sim 90 \text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$.

Key words: filamentous algae, dissolved orthophosphate, phosphorus removal, phosphorus absorption, eutrophication

1. はじめに

自然湖沼、遊水池、ダム湖などの湖沼は、流域からの栄養物質が流入河川を通じて過剰に搬入され続けると、流水が湖沼に入るために滞ることと、溶解している栄養物質の過剰な存在とが相まって、水界における生態環境は一変する。その結果、生態系のバランスが崩れて、藍藻や鞭毛藻等が優占して異常増殖するようになり、富栄養化現象が顕著に生じる湖沼もある。

湖沼に流入する河川水から溶解性栄養塩を除去するのに、ホテイアオイやヨシ等の高等水生植物による水質浄化が進められてきている¹⁻⁴⁾。しかし高等水生植物は一

般に、溶解性栄養塩の吸収能が低い、栄養塩の濃度が低いと吸収できない、水温が低いと適応しにくい等、多くの問題点を有している。よって高等水生植物に代わり、河川水より溶解性栄養塩を除去するのに、増殖能力が高く水温の適応範囲が広い糸状藻類群集を周年連続培養できる糸状藻類活用システムを検討した。

日本の湖沼では、そのほとんどがリン制限となっているため、本研究では着目すべき栄養塩をリンに限定した。さらにリンの形態としては、藻類にとって最も利用しやすい形態である溶解性オルトリン酸態リン ($\text{D} \cdot \text{PO}_4\text{-P}$) に研究の対象を絞った。糸状藻類の溶解性オルトリン酸態リンの吸収能について現地実験を行った結果、リン吸

* 水資源開発公団試験研究所 (前 栗原川ダム調査所) 〒338 埼玉県浦和市大字神田936番地

** 建設省土木研究所環境計画研究室 〒305 茨城県つくば市大字旭一番地

収能の依存性は、日照を除くと、原水のリン濃度、水温、さらに流速、糸状藻類が付着する基層形状⁵⁾、水深よりなる流況によることが明らかになってきたため、糸状藻類のリン吸収能の定式化および本システムにおけるリン除去率の程度について報告するものである。

2. 糸状藻類の生息特性

2.1 糸状藻類の自然界での生息環境

糸状藻類は、河川上流の溪流のように急流に適する種類と、河川中流の浅瀬や水路のように緩流に適する種類と、浅い湖沼、水田や浄水場のように流れのほとんどない微流に適する種類とがある。Table 1 は著者が野外観察あるいは現地実験により得た糸状藻類の生息環境である⁶⁻¹⁰⁾。 *Stigeoclonium*, *Cloniophora*, *Diatoma* は急流のみに適し、*Cladophora*, *Ulothrix* は急流および緩流に適する。*Melosira*, *Oedogonium*, *Spirogyra* は急流から微流に至る広い生息環境に適する。*Fragilaria*, *Mougeotia* は緩流および微流に適する。*Hydrodictyon*, *Pithophora* は微流のみに適する。

糸状藻類は光合成を行い、溶解性のリン、窒素、および珪素等の栄養塩を吸収して生息している。このため昼間の水中光強度および日周期性や、溶解性の栄養塩濃度は生息環境に大きく影響する。

生息に適する季節も糸状藻類の種類により異なる。*Stigeoclonium*, *Cloniophora*, *Cladophora*, *Oedogonium*, *Mougeotia*, *Hydrodictyon*, *Pithophora* は緑藻であり、水温の上昇する春季から秋季にかけて活性が高く、水温の低下する冬季は活性を失う。同じ緑藻であっても、*Spirogyra* は通年活性が高く、*Ulothrix* は冬季から春季にかけて活性が高いが夏季から秋季にかけては活性を失う。*Diatoma*, *Melosira*, *Fragilaria* は珪藻であり、水温の低

下する秋季から春季にかけて活性が高く、水温の上昇する夏季は活性を失う。

2.2 他の植物に比べての糸状藻類の利点

糸状藻類はホテイアオイやヨシ等の高等水生植物や植物プランクトンに比べて、河川水から溶解性栄養塩を除去するのに適した多くの利点を有している¹¹⁾。

1) 糸状藻類はホテイアオイ等の高等水生植物と比べると体制が原始的であり、増殖速度が速く、その分、溶解性栄養塩の吸収能が高いことを期待できる。

2) 糸状藻類は高等水生植物に比べ、低い溶解性栄養塩濃度でも生息が可能である。かなり低い濃度となっても、糸状藻類の藻体に接する水塊が次々と入れ替わるような流況環境であれば栄養塩を吸収することができる。

3) 糸状藻類は一般に、水温および季節の適性が異なる多種類から成る群集として生息し、その中から最も適した種類が自然と選択されて優占種となる性質を有しており、かなりの低い水温から高い水温に至る範囲に適応できる。一方、高等水生植物はホテイアオイ¹²⁾のように西日本の春季から夏季、ヨシのように全国の夏季から秋季というように、植生種が単一であるため適応できる水温および季節の範囲が限られる欠点がある。

4) 微粒状となっている植物プランクトンと異なり、毛糸や頭髮のように糸状となっている糸状藻類は河川水からの分離除去がスクリーン等で容易にできる。

2.3 糸状藻類を利用する際の注意点

糸状藻類を利用して、河川水から溶解性栄養塩を連続的に除去し続けるには、次に示す点を十分に配慮する必要がある。

1) 糸状藻類を活性が高い状態で連続培養させるには、特定された流速および水深、付着あるいは上載できる基層が必要であり、それを配慮した人工水路が必要と

Table 1 Habitat and season of filamentous algae

Stream regime	Filamentous algae		Habitat					Season			
	Scientific name	Class	(a)	(b)	(c-1)	(c-2)	(c-3)	Spring	Summer	Autumn	Winter
(a) Rapids	<i>Stigeoclonium</i> sp.	green algae	○	△	—	—	—	○	○	△	△
	<i>Cloniophora plumosa</i>	green algae	○	△	—	—	—	△	○	△	—
	<i>Diatoma vulgare</i>	diatoms	○	△	—	—	—	○	△	—	○
	<i>Cladophora glomerata</i>	green algae	○	○	△	—	—	○	○	○	△
	<i>Ulothrix zonata</i>	green algae	○	○	—	—	—	○	—	—	○
(b) Gentle streams	<i>Melosira varians</i>	diatoms	○	○	—	○	—	○	△	○	○
	<i>Oedogonium</i> sp.	green algae	○	○	○	—	○	○	○	△	△
	<i>Spirogyra</i> sp.	green algae	○	○	○	—	○	○	○	○	○
	<i>Fragilaria construens</i>	diatoms	—	○	—	○	—	○	△	○	△
	<i>Mougeotia</i> sp.	green algae	—	○	○	—	○	○	○	○	△
(c) Slack water	<i>Hydrodictyon reticulatum</i>	green algae	—	△	—	—	○	○	○	○	△
	<i>Pithophora kewensis</i>	green algae	—	—	○	—	○	○	○	○	—

(a): Attached to substratum in rapids

(b): Attached to substratum in gentle streams

(c-1): Attached to substratum in slack water

(c-2): Forming membranes at the bottom in slack water

(c-3): Floating underwater in slack water

○: Habitat in active condition was confirmed

△: Habitat in inactive condition was confirmed

なる。

2) 人工水路内に増殖した糸状藻類は、そのまま放置すると、順次死骸が分解されて溶解性栄養塩に戻るため、定期的な採取作業が必要となる。

3. 実験装置および実験方法

3.1 糸状藻類を生息させる実験装置の作成

糸状藻類のリン吸収能は、①日照、②原水のリン濃度、③水温、④流速・基層形状・水深よりなる流況、が大きな要因になると考えられる⁵⁾。本研究では②～④を考慮した現地実験を行った。

河川や浅い湖沼等の自然界で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近傍に与えることにより、流入河川水から溶解性栄養塩を除去し、湖沼での藍藻や鞭毛藻の異常増殖を抑制するシステムを作りたい。糸状藻類は Fig. 1 に示すような河川、水路、湖沼、水田、および浄水場等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して生息するには、それらの中でさらに特定な流況環境の場所だけに限られる。しかしながら、その流況環境の条件については必ずしも明らかにされていないので、本研究ではまず溪流、浅瀬、水田、および汙過池で糸状藻類が生息している流況環境をシミュレーションできる実験装置を作成し、この装置

内に流速、基層形状、水深を再現する現地実験を行い、糸状藻類が溶解性栄養塩を吸収する条件を実験的に把握することとした。実験装置としての人工水路は、Fig. 1 に示すように4タイプに大別でき、以下にその概要を示す。

1) 急勾配水路タイプ：河川上流の溪流で糸状藻類が岩石に付着している状況を再現したタイプである。設備は勾配を急にした水路に原水を流速 $30\sim60\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 程度の薄層流で流下させ、波長6cm程度の波形をした人工スレートに糸状藻類を付着させる。

2) 緩勾配水路タイプ：河川中流の浅瀬で糸状藻類が河床礫に付着したり、水路の側壁に付着したりしている状況を再現したタイプである。設備は勾配を緩くした水深10cm程度の水路に、原水を流速 $10\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 程度で流下させ、鉛直に立てた直径5～7mmのプラスチック棒に糸状藻類を付着させる。

3) 水平水路タイプ：浅い湖沼や水田で糸状藻類が水生植物に付着したり、水中に浮漂したりしている状況を再現したタイプである。設備は勾配のほとんどない水深20cm程度の水路に、原水を流速 $12\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$ 程度の微流で流下させ、間仕切のように40cm程度間隔に張ったプラスチックのスクリーンに糸状藻類を付着させるか、あるいはスクリーン間に浮漂させる。

4) 底網水路タイプ：浄水場の緩速汙過池で糸状藻類

Natural Habitat of filamentous algae	Suitable filamentous algae	Schematic diagram of facility of filamentous algae system	Stream regime
1) Torrents in upper reaches of river	<i>Melosira varians</i> <i>Cloniophora plumosa</i> <i>Stigeoclonium</i> sp. <i>Diatoma vulgare</i> <i>Cladophora glomerata</i> <i>Oedogonium</i> sp. <i>Spirogyra</i> sp. <i>Ulothrix zonata</i>	1) Steep-sloped waterway type	Flow velocity $30\sim60\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ Waterway depth Less than 1cm Inclination of waterway 20~40%
2) Shallows in middle reaches of river and channels	<i>Oedogonium</i> sp. <i>Spirogyra</i> sp. <i>Mougeotia</i> sp. <i>Melosira varians</i> <i>Fragilaria construens</i> <i>Ulothrix zonata</i> <i>Cladophora glomerata</i>	2) Gentle-sloped waterway type	Flow velocity $10\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ Waterway depth 10cm Inclination of waterway 0.5~1%
3) Marshes and paddy fields	<i>Oedogonium</i> sp. <i>Mougeotia</i> sp. <i>Spirogyra</i> sp. <i>Pithophora kewensis</i> <i>Hydrodictyon reticulatum</i>	3) Horizontal waterway type	Flow velocity $12\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$ Waterway depth 20cm Inclination of waterway None
4) Slow sand filter ponds of purification plants	<i>Melosira varians</i> <i>Fragilaria construens</i> <i>Spirogyra</i> sp. <i>Hydrodictyon reticulatum</i> <i>Mougeotia</i> sp. <i>Oedogonium</i> sp. <i>Pithophora kewensis</i>	4) Net-bedded waterway type	Flow velocity $18\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$ Waterway depth 30~40cm Inclination of waterway None

Fig. 1 Natural habitat of filamentous algae and facility of the system

が砂面に上載したり、水中に浮漂したりしている状況を再現したタイプである。設備は水深を30~40cmとした水路の底面に有孔床板と網目2.5mmのポリエチレンネットを敷き、原水を透過速度 $18\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$ 程度の微流で鉛直方向に流下させ、細目のポリエチレンネット上に糸状藻類を膜状に上載させるか、水層部分に浮漂させる。

3.2 実験方法

実験水路は、急勾配水路タイプ、緩勾配水路タイプ、水平水路タイプ、底網水路タイプの4タイプとし、各タ

イプ2~3カ所ずつの合計9種類の実験水路を用いた。各タイプ2~3カ所ずつとしたのは実験に用いる原水の溶解性オルトリン酸態リン濃度の範囲を広くするためである。実験水路の諸元をTable 2に示す。実験水路の概略図をFig. 2に示すが、いずれの実験水路も屋外であるため、日照、気温、および降水等は外界と同様の気象条件が得られる。

原水は河川水、湖沼水、および地下水を用いたが、いずれの現地実験の場合も無機態窒素は、常時余剰に存在

Table 2 Outline and specifications of the test waterway

Items	Steep-sloped waterway type		Gentle-sloped waterway type		
	Tsuchiura waterway No.8	Kanno River waterway	Tsuchiura waterway No.10	Hebisawa River waterway	Bizen River waterway
Test Period	94.8 ~ 95.1	94.8 ~ 94.10	94.11 ~ 95.1	94.4 ~ 94.10	94.4 ~ 94.5
Waterway depth (cm)	Thin-layer flow	Thin-layer flow	11	15	5
Waterway length (m)	2.5	3.9	5.4	120	51
Waterway width (m)	0.30	0.82	0.50	1.0	1.0
Waterway area (m^2)	0.75	3.2	2.7	120	51
Waterway gradient (%)	25	25	0.5	1 (terraced)	0.5
Amount of raw water ($\ell\cdot\text{min}^{-1}$)	2.5 ~ 5	12 ~ 20	12	360 ~ 720	340
Amount circulated ($\ell\cdot\text{min}^{-1}$)	24 ~ 40	108 ~ 180	280	140	—
Overflow discharge ($\ell\cdot\text{min}^{-1}$)	—	—	—	—	—
Amount of raw water per area ($\ell\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$)	3.3 ~ 6.7	3.8 ~ 6.3	4.4	3.0 ~ 6.0	6.7
Type of substratum	Corrugated artificial slate	Corrugated artificial slate	Plastic rods	Plastic rods	Uneven surface concrete
Substratum specifications	Wave length 6cm	Wave length 6cm	Diameter 5-6mm One for each 10cm^2	Diameter 4mm One for each 6cm^2	Size of gravel 5cm
Filamentous algae that lived	Primary <i>Melosira</i> Rare <i>Cloniophora</i> <i>Cladophora</i>	Primary <i>Melosira</i> <i>Stigeoclonium</i>	Primary <i>Melosira</i>	Primary <i>Melosira</i> <i>Spirogyra</i> Rare <i>Cloniophora</i>	Primary <i>Oedogonium</i> <i>Hydrodictyon</i> Secondary <i>Mougeotia</i>

Items	Horizontal waterway type		Net-bedded waterway type	
	Tsuchiura waterway No. 7	Kanno River waterway	Tsuchiura waterway No.9	Kanno River waterway
Test Period	94.7 ~ 95.1	94.7 ~ 94.9	94.1~94.6 , 95.1~95.2	93.6 ~ 93.11
Waterway depth (cm)	25	16	30	30
Waterway length (m)	1.7	5.5	3.0	Round water tank 3.0 (Internal diameter)
Waterway width (m)	0.77	0.77	1.4	
Waterway area (m^2)	1.3	4.2	4.2	7.1
Waterway gradient (%)	None	None	None	None
Amount of raw water ($\ell\cdot\text{min}^{-1}$)	3.5 ~ 5	25	12 ~ 25	24 ~ 60
Amount circulated ($\ell\cdot\text{min}^{-1}$)	—	—	—	—
Overflow discharge ($\ell\cdot\text{min}^{-1}$)	—	—	5	4 ~ 10
Amount of raw water per area ($\ell\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$)	2.7 ~ 3.8	6.0	2.9 ~ 6.0	3.4 ~ 8.5
Type of substratum	Polyethylene net	Polyethylene net	Polyethylene net	Gravel
Substratum specifications	Mesh 13mm Interval 44cm	Mesh 13mm Interval 50cm	Mesh 2.5mm Fastened on perforated vinyl chloride board	Grain size 4mm
Filamentous algae that lived	Primary <i>Mougeotia</i> <i>Spirogyra</i> <i>Melosira</i> Secondary <i>Oedogonium</i> <i>Pithophora</i>	Primary <i>Hydrodictyon</i> Secondary <i>Spirogyra</i> Rare <i>Oedogonium</i>	Primary <i>Melosira</i> <i>Spirogyra</i> Rare <i>Oedogonium</i> <i>Pithophora</i>	Primary <i>Hydrodictyon</i>

しており欠乏することはなかった。各実験水路における原水の供給法および栄養塩の性状を Table 3 に示す。

実験水路の原水と処理水を採水し、実験室に持ち帰ってからあるいは採水現場にて検水を $1 \mu\text{M}$ のグラスファイバーフィルターで濾過し、以下に示す水質分析項目について測定を行った。ただし無機態窒素の各項目については原水の性状を調べる際のみに測定を行った。

溶解性オルトリン酸態リン ($\text{D}\cdot\text{PO}_4\text{-P}$)：吸光光度法(アスコルビン酸法)で測定した。

アンモニア態窒素 ($\text{NH}_4\text{-N}$)：インドフェノール青吸光光度法で測定した。

亜硝酸態窒素 ($\text{NO}_2\text{-N}$)：ナフチルエチレンジアミン吸光光度法で測定した。

硝酸態窒素 ($\text{NO}_3\text{-N}$)：カドニウム銅カラム還元法もしくはイオンクロマトグラフ法で測定した。

実験水路に供給する原水負荷量については、原水量 $1 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ を処理するのに必要な水路表面積の目標値を 2 ha としたため、原水負荷量は $3 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ 程度となるように設定した。

通水開始時には、糸状藻類の混成群集を $2\sim 3 \text{ cm}$ に裁断して実験水路の上流端に投入した。通水開始より数週間すると基層に糸状藻類が付着し、安定した連続培養状態となった。増殖した糸状藻類の藻体採取は、概ね 2 週間に 1 回の頻度で行った。

4. 実験結果および考察

4.1 リン吸収能の測定結果

リン吸収能とは、糸状藻類群集が単位生息面積当たりかつ単位時間当たりに利用可能な形態のリンを吸収する量であり、次式により評価できる。

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

ここに、 V_P ：リン吸収能 ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)

C_{P1} ：原水の $\text{D}\cdot\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度 ($\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$)

C_{P2} ：処理水の $\text{D}\cdot\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度 ($\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$)

Q ：処理量 ($\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$)

A ：水路表面積 (m^2)

流入河川から湖沼に流入するリンのうち、溶解性オルトリン酸態リンは藻類にとって最も利用しやすい形態であることが知られており、一部の藻類については溶解性有機態リンの利用も可能なことが知られている⁵⁾。本実験では、溶解性有機態リンについては、①藻類にとって利用可能かどうかは藻類種の選択性による、②水路内での減少もしくは増加が藻類の利用によるものなのか生分解に伴い有機物からオルトリン酸態リンへ向かう形態変化によるものなのかを明確にしにくい、という理由により除外し、藻類にとって最も利用しやすい形態である溶解性オルトリン酸態リンに着目した。

Fig. 3 はリン吸収能が原水の溶解性オルトリン酸態リン濃度に依存しているかどうかを図示したものであ

Fig. 2 Schematic diagram of test waterway

Table 3 Supply method and properties of raw water

Test waterway	Method of supplying raw water	Properties of raw water	
		Dissolved orthophosphate	Inorganic nitrogen
Tsuchiura waterway	Water obtained by pumice-filtered water from Lake Kasumigaura(near Tsuchiura Harbor)	Maximum 119 $\mu\text{g} \cdot \ell^{-1}$ Minimum 10 $\mu\text{g} \cdot \ell^{-1}$ a)	About 1.1 $\text{mg} \cdot \ell^{-1}$ { $\text{NH}_4\text{-N}$ 13 % $\text{NO}_2\text{-N}$ 2 % $\text{NO}_3\text{-N}$ 85 %
Kanno River waterway	Water obtained by gravel-filtered water from Kanno River(river flowing into Lake Imbanuma)	Maximum 479 $\mu\text{g} \cdot \ell^{-1}$ Minimum 55 $\mu\text{g} \cdot \ell^{-1}$	About 4.2 $\text{mg} \cdot \ell^{-1}$ { $\text{NH}_4\text{-N}$ 56 % $\text{NO}_2\text{-N}$ 4 % $\text{NO}_3\text{-N}$ 40 %
Hebisawa River waterway	Water stored by damming Hebisawa River (tributary of Abukuma River)	Maximum 105 $\mu\text{g} \cdot \ell^{-1}$ Minimum 6 $\mu\text{g} \cdot \ell^{-1}$ a)	About 1.1 $\text{mg} \cdot \ell^{-1}$ { $\text{NH}_4\text{-N}$ 6 % $\text{NO}_2\text{-N}$ 2 % $\text{NO}_3\text{-N}$ 92 %
Bizen River waterway	Water from well dug near estuary of Bizen River(river flowing into Lake Kasumigaura)	Maximum 161 $\mu\text{g} \cdot \ell^{-1}$ Minimum 140 $\mu\text{g} \cdot \ell^{-1}$	About 1.0 $\text{mg} \cdot \ell^{-1}$ { $\text{NH}_4\text{-N}$ 100 % $\text{NO}_2\text{-N}$ 0 % $\text{NO}_3\text{-N}$ 0 %

a) Because the original concentration was too low, we added $\text{D}\cdot\text{P}\text{O}_4\text{-P}$ as needed.

り、設備タイプ毎に整理した。Fig. 3は、個々の測定値をプロットすると同時に、概ね1カ月間という期間平均値も記号を換えて図示した。なお、Fig. 3に用いた測定値は後述の式(4)により、水温を20°Cに補正した値とした。

Fig. 3の4つの図を見ると、リン吸収能は原水の溶解性オルトリン酸態リン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¹³⁾。また原水の溶解性オルトリン酸態リン濃度が10~50 $\mu\text{g} \cdot \ell^{-1}$ の範囲では、急勾配水路タイプおよび緩勾配水路タイプは、水平水路タイプおよび底網水路タイプに比べ、リン吸収能が数割程高いという傾向が見られる。

Fig. 4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、これも設備タイプ毎に整理した。Fig. 4についても、個々の測定値をプロットすると同時に、概ね1カ月間という期間平均値を記号を換えて図示した。なお、Fig. 4に用いた測定値は後述の式(5)により、原水の溶解性オルトリン酸態リン濃度を30 $\mu\text{g} \cdot \ell^{-1}$ に補正した値とした。

Fig. 4の4つの図を見ると、リン吸収能は水温が概ね10~15°Cの範囲で極大値となり、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。水温依存性の要因をさらに細分すると、①温度に依存する増殖速度、②糸状藻類に対する捕食圧、に分けられる。藻類の増殖に対する最適温度は一般に18~25°Cであるが、動物プランクトンやユスリカ等の捕食圧もその温度の範囲で大きくなるため、両者が相殺し合った結果、極大値が10~15°Cになったと考えられる。

Fig. 4に示す4つの設備タイプのうち緩勾配水路タイプはバラツキが大きいが、その原因としては次のように考えられる。図中に(■)印で示した2つのデータは、原水の溶解性オルトリン酸態リン濃度が急激に低下または上昇した直後に一定期間のあいだ測定したデータであり、リン吸収能が著しく低い値または高い値を示しており、この2つのデータが緩勾配水路タイプのバラツキを大きくしていると考えられる。

4.2 糸状藻類と高等水生植物との比較

Fig. 5は糸状藻類と高等水生植物とが原水リン濃度に対してどれほどのリン吸収能を有するかを比較するた

めに示した図である。各設備タイプのリン吸収能の概ね1カ月間という期間平均値をプロットし、合わせて文献¹⁾による高等水生植物のリン吸収能のデータもプロットした。

Fig. 5によると、糸状藻類のリン吸収能は高等水生植物より高く、従来より試みられている高等水生植物による浄化に比べ、より効果的な溶解性のリン除去を期待できることがわかる。

4.3 リン吸収能の水温依然性の定式化

植物プランクトンの比増殖速度は水温により影響を受けるが、その影響関数のうち最適水温で極大となる近似式が多く用いられる¹⁴⁾。Fig. 4は、横軸に水温を縦軸にリン吸収能をとって、期間平均値をプロットしたものである。この点群に対し、(2)式の Λ 型関数を当てはめた。また水温 $T^\circ\text{C}$ の場合の、20°Cの場合に対するリン吸収能の比を水温補正係数 k_T と定義した。

$$V_{PT} = V_{PT_{opt}} \cdot \left\{ \frac{T}{T_{opt}} \cdot \exp \left(1 - \frac{T}{T_{opt}} \right) \right\}^{\xi} \quad (2)$$

$$k_T = V_{PT} / V_{P20^\circ\text{C}} \quad (3)$$

ここに、 V_{PT} : 水温 $T^\circ\text{C}$ の場合のリン吸収能 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)

k_T : 水温によるリン吸収能の補正係数

T : 水温 ($^\circ\text{C}$)

T_{opt} : 流況環境による最適水温 ($^\circ\text{C}$)

ξ : 流況環境による係数

式(2)の最適水温 T_{opt} および係数 ξ については、本来、生息する糸状藻類の種類により、つまりは流況環境により異なると考えられ、それぞれ最小自乗法で求めるべきものである。しかし今回の現地実験では4つの設備タイプにおいて、水温が概ね10~15°Cの範囲で極大値となり、その低温および高温域では減少するというほぼ同様な傾向が見られたため、共通の値として $T_{opt}=13^\circ\text{C}$ 、 $\xi=1.3$ を与えた。よって k_T は式(4)のように整理できる。

$$\begin{aligned} k_T &= V_{PT} / V_{P20^\circ\text{C}} \\ &= \frac{V_{P13^\circ\text{C}}}{V_{P20^\circ\text{C}}} \cdot \left\{ (T/13) \cdot \exp(1 - T/13) \right\}^{1.3} \\ &= 1.15 \times \left\{ (T/13) \cdot \exp(1 - T/13) \right\}^{1.3} \end{aligned} \quad (4)$$

4.4 リン吸収能の濃度依存性の定式化

Fig. 3は、横軸に原水の溶解性オルトリン酸態リン濃

Fig. 3 Relation between phosphorus absorbing ability and dissolved orthophosphate concentration in raw water by field experiments.
 $\triangle \square \circ *$: Individual measured value
 $\blacktriangle \blacksquare \bullet *$: Average value for a month

Fig. 4 Relation between phosphorus absorbing ability and water temperature by field experiments.
 $\triangle \square \circ *$: Individual measured value
 $\blacktriangle \blacksquare \bullet *$: Average value for a month

Fig. 5 Comparison of filamentous algae and higher aquatic plants for phosphorus absorbing ability (After Ryo Mishima, 1985, Bio filter system, *Hedoro*, 33, 44pp).

度を対数で、縦軸にリン吸収能をリニアでとって、期間平均値をプロットした。これらの期間平均値を最小自乗法で処理することにより、式(5)に示すようにリン吸収能の定式化を行った。

$$V_P = \{b_1 + b_2 \cdot \ln(C_{P1})\} \cdot k_T \quad (5)$$

ここに、 V_P ：リン吸収能 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)

C_{P1} ：原水の $\text{D} \cdot \text{PO}_4\text{-P}$ 濃度 ($\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$)

b_1, b_2 ：流況環境による係数

k_T ：水温によるリン吸収能の補正係数

流況環境による係数 b_1, b_2 は、設備タイプ毎に異なる値であり、Table 4 に示す。

式(5)、式(4)および Table 4 より溶解性オルトリン酸態リンの吸収能の代表的な値を求めると、溶解性オルトリン酸態リン濃度が $30 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ の原水を 20°C の水温で処理すると、急勾配水路タイプおよび緩勾配水路タイプでは約 $90 \text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ となり、水平水路タイプおよび底網水路タイプでは約 $70 \text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ となる。

式(6)で定義されるリン除去率は、式(1)、式(5)とともに、 V_P と C_{P2} を消去すると、式(7)のように表される。

$$R_P = (C_{P1} - C_{P2}) / C_{P1} \quad (6)$$

$$R_P = \frac{A}{Q} \cdot \frac{b_1 + b_2 \cdot \ln(C_{P1})}{C_{P1}} \cdot k_T \quad (7)$$

ここに、 R_P ：リン除去率

Fig. 6 は式(7)、式(4)、および Table 1 を用いて、原水 $1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ を 2 ha、 20°C で処理する際の溶解性オルトリン酸態リンの除去率を図に示したものである。Fig. 6 によると、リン除去率は、原水の溶解性オルトリン酸態リン濃度と設備タイプとで大きく異なる。原水 $1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ を 2 ha、 20°C で処理する場合、急勾配水路タイプでは原水の溶解性オルトリン酸態リン濃度が約 $30 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ のところに溶解性オルトリン酸態リンの除去率の極大値が現われ、その値は70%である。同様に緩勾配水路タイプでは約 $20 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ のところで75%、水平水路タイプでは約 $40 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ のところで55%、底網水路タイプでは約 $30 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$

Table 4 Coefficient of phosphorus absorption by stream regime

Facility type	$C_{P1} \leq 40 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$		$C_{P1} > 40 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$	
Steep-sloped waterway type	$b1 = -189$	$b2 = 82.6$	Same as at left	
Gentle-sloped waterway type	$b1 = -119$	$b2 = 61.8$	Same as at left	
Horizontal waterway type	$b1 = -200$	$b2 = 80.2$	$b1 = -275$	$b2 = 100.6$
Net-bedded waterway type	$b1 = -160$	$b2 = 68.1$	Same as at left	

のところで55%である。富栄養化が懸念されるダム湖の流入河川水の溶解性オルトリン酸態リン濃度の代表的な値は、概ね $15 \sim 50 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ であり¹⁵⁾、溶解性オルトリン酸態リンの除去率の極大値が現れる原水の溶解性オルトリン酸態リン濃度の範囲と概ね一致し、糸状藻類が流入河川水の溶解性のリン除去に適することがわかる。

5. ま と め

1) 糸状藻類を連続培養させて湖沼の流入河川水より溶解性のリンを除去する設備の構造は、まず糸状藻類が高密度で群集を形成して増殖できる流況環境を自然界から抽出し、次に人工水路内に流速、糸状藻類が付着する基層の形状、水深を再現させる必要がある。検討の結果、設備構造は、流れが急・緩流である設備タイプとして急勾配水路タイプおよび緩勾配水路タイプ、流れが微流である設備タイプとして水平水路タイプおよび底網水路タイプの合計4タイプに大別できることがわかった。

2) 無機態窒素が常に余剰という条件のもとで、糸状藻類の溶解性オルトリン酸態リン吸収能について現地実験を行った結果、リン吸収能の依存性は、日照を除くと、

Fig. 6 Phosphorus removal ratio when treating $1\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ by 2ha and 20°C

原水の溶解性オルトリン酸態リン濃度、水温、さらに流速、基層形状、水深よりなる流況によることを確認した。各依存性の特徴は以下のとおりであった。原水の溶解性オルトリン酸態リン濃度については、これが大きくなるに従いリン吸収能が増加する。水温については、概ね $10\sim 15^\circ\text{C}$ の範囲で極大値となり、その低温および高温域では減少する。流況については、原水の溶解性オルトリン酸態リン濃度が $10\sim 50\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ の範囲では、急・緩流の設備タイプは微流の設備タイプに比べて、リン吸収能が数割程高い。

3) 原水の溶解性オルトリン酸態リン濃度、水温、流況の3要因を関数とするリン吸収能について定式化を行い、式(5)、式(3)、式(2)が得られた。溶解性オルトリン酸態リンの吸収能の代表的な値を示すと、原水の溶解性オルトリン酸態リン濃度が $30\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ で 20°C の際に、急・緩流の設備タイプでは約 $90\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ となり、微流の設備タイプでは約 $70\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ となった。

4) 糸状藻類によるリン除去率は、原水の溶解性オルトリン酸態リン濃度が概ね $20\sim 40\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ の範囲で極大値が現われるが、この範囲は富栄養化が懸念されるダム湖の流入河川水の溶解性オルトリン酸態リン濃度の範囲と概ね一致し、糸状藻類が流入河川水の溶解性のリン除去に適することがわかった。溶解性オルトリン酸態リンの除去率の代表的な値を示すと、溶解性オルトリン酸態リン濃度が $20\sim 40\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ の原水 $1\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ を 2 ha の設備、 20°C の水温で処理する場合、急・緩流の設備タイプでは約 7 割、微流の設備タイプでは約 5 割であることがわかった。

謝 辞

本研究の遂行にあたり中本信忠信州大学教授、ならびに竹内邦良山梨大学教授に有益な助言とご指導をいただいた。実験に際しては建設省土木研究所環境計画研究室の諸氏には心からの協力をいただいた。ここに記して謝

意を表します。

(原稿受付 1996年8月7日)

(原稿受理 1997年1月31日)

引用文献

- 1) 三島亨(1985)水生植物による水域浄化システム, ヘドロ, 33, 43-50.
- 2) 大槻忠(1993)水生生物を用いた環境改善・創造—I—水生植物—, ヘドロ, 58, 25-29.
- 3) 田畑真佐子, 加藤聡子, 川村晶, 鈴木潤三, 鈴木静夫(1996)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, 19, 331-338.
- 4) 本部広哲, 新納正也, 上田耕三郎(1990)ブラックマップを用いた植物フィルターによる水中の窒素・リンの除去, 用水と廃水, 32, 486-490.
- 5) グーリー, W.M.(1987)藻類の生理生態学, 基礎微生物学 9, pp.37-56, pp.62-68, pp.90-95, 培風館.
- 6) 廣瀬弘幸, 山岸高旺(1977)日本淡水藻類図鑑, pp. 831-835, 内田老鶴園.
- 7) 水野壽彦(1977)日本淡水プランクトン図鑑, pp. 125-264, 保育社.
- 8) 堀輝三(1994)藻類の生活史集成—緑色藻類, pp. 148-327, 内田老鶴園.
- 9) 日本水道協会(1993)日本の水道生物—写真と解説—, pp. 22-34, pp.72-77.
- 10) 中本信忠, 坂井正(1994)生物浄化法の緩速ろ過処理の見直し, 環境科学年報—信州大学, 16, 23-25.
- 11) 丹羽薫, 久納誠, 久保徳彦, 山下芳浩(1993)糸状藻類を活用した湖沼水質保全システム, 土木学会環境システム委員会環境システム研究, 21, 419-427.
- 12) 角野康郎(1994)日本水草図鑑, 57pp, 文一総合出版.
- 13) 村田吉男, 玖村敦彦, 石井龍一(1976)作物の光合成と生態, pp.109-112, 農山漁村文化協会.
- 14) 岩佐義郎(1990)湖沼工学, pp. 305-324, 山海堂.
- 15) 丹羽薫, 天野邦彦, 太西実(1992)富栄養化の観点から見た全国多目的ダム貯水池の水質特性に関する研究, 土木研究所資料, No. 3116, 37pp.