<論 文>

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

久 納 誠* 丹 羽 薫**

Dependence of Water Temperature and Dissolved Orthophosphate Concentration on Filamentous Algae's Harvesting Yield

Makoto KUNOH* and Kaoru NIWA**

* Research Institute, Water Resources Development Public Corporation, Jinde-936, Urawa, Saitama 338-0812 Japan

** Japan Water Resources Environment Technology Center (ex-Public Works Research Institute), 2-14-2, Kojimachi, Chiyoda-ku, Tokyo 102-0083 Japan

Abstract

A countermeasure of preventing the eutrophication of lakes and marshes is to use filamentous algae to remove dissolved phosphorus and nitrogen from the waters of rivers flowing into them. In order to establish a procedure for harvesting filamentous algae growing in artificial waterways and a effective use of the harvested algae, it is necessary to clarify the quantity which can be harvested.

In the waterways, the quantity of algae separated from the substratum which are discharged outside the waterway or which accumulate in the interior of the waterways varies for each harvest. Consequently, it is possible to predict the harvesting yield of algae which is separated from the substratum as the function of the phosphorus content, phosphorus absorbing ability, and the constant of non-harvesting algae.

The results of calculations based on field experiments with filamentous algae have confirmed that the harvesting yield is dependent upon the water temperature, concentration of nutrient in the raw water, and the stream regime. Typical harvesting yield values were obtained. When we treated raw water of dissolved orthophosphate concentration of $30\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ at water temperature of 20°C using a gentle-sloped waterway, we found that the harvesting yield was roughly $20\text{g dry weight}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$.

Key words: filamentous algae, harvesting yield, phosphorus content, phosphorus removal, eutrophication

1. はじめに

自然湖沼、遊水池、ダム湖などの富栄養化現象を防止する対策としては、流入河川から溶解性栄養塩を除去する方法が有効である。

著者らは糸状藻類を用いて流入河川から溶解性のリンおよび窒素を除去するシステムを提案しているが¹⁾、人工水路内に増殖した糸状藻類の採取工程を確立し、魚類や家畜の飼料²⁻⁴⁾や有機肥料⁵⁾による有効利用を計画するには、採取量の把握が必要である。なおここでいう採取量とは、人工水路において単位生息面積当たりかつ単位時間当たりに採取できた糸状藻類群集の重量である。

人工水路では、水路内の基層から分離した藻体片が水

流に乗って水路外に移出したり、藻体片が水路内の採取不可能な部分に堆積したり、藻体が昆虫や微生物に捕食されたりするが、水路内に生息する糸状藻類の種類および昆虫や微生物の活動が採取時期の経過につれて刻々と変化するために、採取量の実測値が複雑にかつ大幅に変動する。このため採取量を水温や原水栄養塩濃度等の関数として定式化を試みるのに、採取量の実測値を直接解析することは不確定要因が多いため不適切である。

一方、人工水路でのリンの物質収支を整理すると、採取量の概算値はリン含量、リン吸収能、および非採取定数の関数と考えられるため、その各々の項を定式化することにより、採取量の予測が可能である。ここで非採取定数とは、分離した藻体片が水路外に流出するなど採取

* 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

** ダム水源環境整備センター (前 建設省土木研究所環境計画研究室) 〒102-0083 東京都千代田区麹町2-14-2

不可能となった不確定な藻体量の割合を表す定数とし、本報では設備タイプ毎に異なる数値として整理した。

屋外の人工水路にて現地実験を行い算定した結果、糸状藻類による溶解性栄養塩除去手法における採取量の依存性は水温、原水の溶解性オルトリン酸態リン濃度、および流況（藻類が付着する基層形状、水深、流速等）によることが明らかになってきたため、採取量の予測について報告するものである。

2. 実験方法

2.1 人工水路での物質収支

糸状藻類の採取量の定式化を試みるために、人工水路での物質収支を整理することにより、現地実験における測定項目を検討した。まず収支を検討すべき物質は、①水素、酸素、炭素、および窒素のように大気との移動がある物質は除く、②分析が容易に行えるように藻体内含量が多い物質とする、③糸状藻類の有効利用を検討する際に分析データが役立つ有用物質である、という観点からリンを選定した。次式に人工水路でのリンの物質収支を示す。

$$\begin{aligned} C_{P1} \cdot q - C_{P2} \cdot q \\ = H \cdot A \cdot Q_P + L_1 \cdot A \cdot Q_P \\ + L_2 \cdot A \cdot Q_P + L_3 \cdot A \cdot Q_P \end{aligned} \quad (1)$$

ここに、 C_{P1} ：原水の $D \cdot PO_4\text{-P}$ 濃度 ($\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$)

C_{P2} ：処理水の $D \cdot PO_4\text{-P}$ 濃度 ($\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$)

Q_P ：リン含量 ($\text{mgP} \cdot \text{g}^{-1}$ dry weight)

H ：採取量 ($\text{g dry weight} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)

L_1 ：基層から分離し水路外に流出した藻体量 ($\text{g dry weight} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)

L_2 ：水路の採取不可能な部分に堆積した藻体量 ($\text{g dry weight} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)

L_3 ：昆虫等に捕食され採取不可能となった藻体量 ($\text{g dry weight} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)

q ：処理水量 ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)

A ：水路表面積 (m^2)

式(1)の左辺は、採取までの期間において人工水路に流入および流出した溶解性オルトリン酸態リンの単位時間当たりの量である。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いるが、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。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。

右辺の第1項は、概ね2週間毎の採取作業により人工水路から取り除いた藻体に含まれているリンの単位時間当たりの量である。この項に出てくるリン含量とは藻体の単位乾燥重量当たり含有されるリンの重量である。

右辺の第2～4項は、採取不可能な藻体を対象とする項である。第2項は、採取までの期間において水路の基層から分離し水路外に移出した藻体片に含まれているリンの単位時間当たりの量である。第3項は、水路内の採取不可能な部分に沈降して堆積した藻体片に含まれているリンの単位時間当たりの量である。第4項は、採取までの期間において水路にて昆虫や微生物により捕食され採取不可能となった藻体に含まれているリンの単位時間当たりの量である。

ここで、リン吸収能を式(2)のように、非採取定数を式(3)のように定義する。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る。

$$V_P = (C_{P1} - C_{P2}) \cdot q / A \quad (2)$$

$$n = (L_1 + L_2 + L_3) / (H + L_1 + L_2 + L_3) \quad (3)$$

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

n ：非採取定数

式(2)および式(3)を用いて式(1)を整理することにより式

Fig. 1 Schematic diagram of test waterway

(4)を得るが、これによると非採取定数の概算値は、人工水路での現地実験により得ることのできる3つの測定項目から算定を試みる事が可能である。

$$n = 1 - (H \cdot Q_p) / V_p \quad (4)$$

また式(4)より得られる式(5)によると、採取量の概算値は、リン含量、リン吸収能、および非採取定数の関数と扱うことができる。

$$H = (V_p / Q_p) \cdot (1 - n) \quad (5)$$

現地実験の測定方針としては、まず人工水路の設備毎に測定可能な採取量、リン含量、およびリン吸収能を測定し、測定不可能な非採取定数を式(4)により各々求めて整理する。次に式(5)の定式化を試みるためにはリン含量の定式化が必要となるので、リン含量を測定する実験水路の数を増やし、データ数のある程度の母集団となるように増やしてからデータ整理を行いリン含量の定式化を試みる。

2.2 各項目の測定方法

2.2.1 採取量の測定方法

採取量は、Fig. 1に示す実験水路6カ所にて測定した。実験水路は、屋外に設置した糸状藻類を増殖させる人工水路であり、緩勾配水路2カ所、水平水路2カ所、底網水路2カ所とした。この中に急勾配水路を加えなかった理由としては、急勾配水路¹⁾は藻体が成長すると水流に耐えられなくなり基層である波形人工スレートから藻体片が分離して水路外に容易に流出するというように、もともと採取作業が不要な構造となっているためである。

採取量の測定期間に対応して、リン吸収能およびリン含量を測定した。実験水路での採取作業は、基層から藻体をかき取ったり水中から藻体をすくい上げたりするための採取器を用いて行った。採取後に放置し続けた場合のリン吸収能の経時変化は、水路タイプにより多少異なる

るが採取してから概ね2週間後にピークに達しその後低下してゼロに近づき一定となる。よって採取頻度は効率的なリン除去となるように、週1回水路表面の半面を交互に採取した。採取した糸状藻類の全量に対する乾燥重量を測定し、それを整理して採取量を算出した。採取量の測定期間は、概ね1～2カ月間を一区切りとし、採取量は測定期間の平均値とした。

2.2.2 原水性状およびリン含量の測定方法

リン含量を測定した実験水路は、Fig. 1に示す実験水路6カ所のほかに、緩勾配水路2カ所、水平水路2カ所、底網水路1カ所を加え、合計11カ所とした。実験水路の諸元をTable 1に示す。

リン含量を測定するのに採取した藻類種は、緑藻と珪藻であった。緑藻は、*Hydrodictyon* (11データ)、*Spirogyra* (19データ)、*Mougeotia* (10データ)、*Oedogonium* (4データ)、*Pithophora* (3データ)、*Cladophora* (2データ)、および緑藻混成 (3データ)であり、珪藻は、*Melosira* (12データ)、および珪藻混成 (2データ)であった。

原水は湖沼水、河川水、および地下水であるが、いずれの場合も無機態窒素は、常時余剰に存在しており欠乏することはなかった。原水の性状を調べるために測定した無機態窒素の項目は、アンモニア態窒素、亜硝酸態窒素、硝酸態窒素とした。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 2に示す。

湖沼水は、高濃度の植物プランクトン、特に藍藻を多く含む場合に原水としてそのまま用いると、基層に藍藻が付着するなど糸状藻類の増殖に悪影響が出る。よって現地実験に用いた湖沼水は、平均粒径3mmの軽石を用いた粒状濾過により処理して、クロロフィルaを目標値15 $\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ 以下にしたものを原水として使用した。なお実際に本水質対策手法を施行する際には、流入河川水を原水とするため植物プランクトンの影響はない。

Table 1 Outline and specifications of the test waterway

Test waterway		(a)	(b)	(c)	(d)	State of substratum or bed surface of waterway	(e)	(f)										(p)		
								(g)	(h)	(i)	(j)	(k)	(l)	(m)	(n)	(o)	(q)	(r)	(s)	
Tsuchiura waterway	No. 5	(t)	10	40	(w)	Tightly stretched laces	3~ 7						○	○			3	—	—	
	No. 10		11	50		Plastic rods	15~ 48			○				●	○	○	5	4	28	
	No. 6	(u)	14	40	(x)	Plastic screen	8~ 36		●	○		○		○			7	4	35	
	No. 7		25	77		Polyethylene net	7~ 43		●	●			○			5	7	49		
	No. 9	(v)	30	140			19~ 95		●	●		○				7	8	49		
	No. 12		33	90		Sand bed	30	○	○							2	—	—		
Kanno River waterway	D — I	(u)	16	77		Polyethylene net	274~ 479	○									4	—	—	
	D — II					236~ 258	○			○	○					3	—	—		
	C — 0	(v)	30	1300		Gravel bed	125~ 273	●									3	4	28	
Hebisawa River w.		(t)	15	100	(w)	Plastic rods	6~ 105		●					●			26	22	154	
Bizen River w.			5			Concrete covering stones	58~ 189	○		○	○		○				10	—	—	

(a) Waterway type
 (b) Waterway depth (cm)
 (c) Waterway width (cm)
 (d) Flow velocity category
 (e) Dissolved orthophosphate concentration in raw water ($\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$)
 (f) Species of filamentous algae
 (● : Experimented on Harvesting yield and Phosphorus content)
 (○ : Experimented on Phosphorus content)

(g) *Hydrodictyon*
 (h) *Spirogyra*
 (i) *Mougeotia*
 (j) *Oedogonium*
 (k) *Pithophora*
 (l) *Cladophora*
 (m) *Melosira*
 (n) *Diatoma*
 (o) *Fragilaria*

(p) Number of measured date
 (q) Phosphorus content (the number of dates)
 (r) Phosphorus absorbing ability (the number of dates)
 (s) Harvesting yield (the number of days)
 (t) Gentle-sloped waterway
 (u) Horizontal waterway
 (v) Net-bedded waterway
 (w) Gentle flow ($5\text{cm} \cdot \text{s}^{-1} < V < 20\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
 (x) Slight flow ($V < 0.5\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)

Table 2 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-filtering water from Lake Kasumigaura (near Tsuchiura Harbor)	Maximum 95 $\mu\text{g} \cdot \ell^{-1}$ Minimum 3 $\mu\text{g} \cdot \ell^{-1}$ a)	About 1.1 $\text{mg} \cdot \ell^{-1}$ $\left\{ \begin{array}{l} \text{NO}_3\text{-N} \ 85 \% \\ \text{NO}_2\text{-N} \ 2 \% \\ \text{NH}_4\text{-N} \ 13 \% \end{array} \right.$
Kanno River waterway	Water obtained by gravel-filtering water from Kanno River (river flowing into Lake Imbanuma)	Maximum 479 $\mu\text{g} \cdot \ell^{-1}$ Minimum 125 $\mu\text{g} \cdot \ell^{-1}$	About 4.2 $\text{mg} \cdot \ell^{-1}$ $\left\{ \begin{array}{l} \text{NO}_3\text{-N} \ 40 \% \\ \text{NO}_2\text{-N} \ 4 \% \\ \text{NH}_4\text{-N} \ 56 \% \end{array} \right.$
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 $\text{mg} \cdot \ell^{-1}$ $\left\{ \begin{array}{l} \text{NO}_3\text{-N} \ 92 \% \\ \text{NO}_2\text{-N} \ 2 \% \\ \text{NH}_4\text{-N} \ 6 \% \end{array} \right.$
Bizen River waterway	Water from well dug near estuary of Bizen River (river flowing into Lake Kasumigaura)	Maximum 189 $\mu\text{g} \cdot \ell^{-1}$ Minimum 58 $\mu\text{g} \cdot \ell^{-1}$	About 1.0 $\text{mg} \cdot \ell^{-1}$ $\left\{ \begin{array}{l} \text{NO}_3\text{-N} \ 0 \% \\ \text{NO}_2\text{-N} \ 0 \% \\ \text{NH}_4\text{-N} \ 100 \% \end{array} \right.$

a) K_2HPO_4 was added to elevate the orthophosphate concentration.

リン含量の測定方法は、まず実験水路内の数カ所から糸状藻類群集を採取し、光学顕微鏡を用い淡水藻類の図鑑⁶⁻¹⁰⁾等に基づいて藻類種の同定を行うとともに、以下に示す方法でリン含量を測定した。

なお糸状藻類群集の採取に伴い、実験水路の水温と溶解性オルトリン酸態リン濃度を測定した。

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にて測定した。

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にて測定した。

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

リン含量 (T-P)：沍紙を用いて藻体の水分を除去した後、硝酸-硫酸分解法による分解操作を行い、モリブデン青吸光光度法にて測定した。

溶解性オルトリン酸態リン ($\text{PO}_4\text{-P}$)：検水を実験室に持ち帰ってから $1 \mu\text{m}$ のグラスファイバーフィルターで沍過し、吸光光度法 (アスコルビン酸法) にて測

定した。

2.2.3 リン吸収能の測定方法

Fig. 1 に示す実験水路 6 カ所については、採取量に対応したリン吸収能の値を測定した。

リン吸収能の測定において対象としたリンの形態は、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とした。

リン吸収能を測定するための原水と処理水の採水は、採取量を測定するために行う糸状藻類の採取作業の直前に実施し、リン吸収能は測定期間の平均値とした。

3. 実験結果および考察

3.1 非採取定数の算定結果

Fig. 1 に示す実験水路 6 カ所で測定した採取量、リン含量、リン吸収能、およびそれらの実測値を式(4)に代入して得られた非採取定数を Table 3 に示す。Table 3 によると得られた非採取定数はバラツキがかなり大きいものの、緩勾配水路、水平水路、および底網水路という水

Table 3 Measured values of the harvesting yield based on field experiments

Test waterway	Test period	T	C_{P1}	H	Q_P	V_P	n	
		Measured value					$1 - (H \cdot Q_P) / V_P$	Average value
Tsuchiura waterway No. 10	1995. 1.25 ~ 2.21	7	30	10.2	4.9	82	0.39	Gentle-sloped waterway 0.17 ± 0.09 ($n \approx 0.2$)
Hebisawa River waterway	1994. 4.12 ~ 5.16	16	10	9.2	2.7	26	0.04	
	1994. 5.24 ~ 8. 1	22	66	24.2	6.7	163	0.01	
	1994. 8.23 ~ 10.10	21	59	17.4	5.4	122	0.23	Horizontal waterway 0.41 ± 0.10 ($n \approx 0.4$)
Tsuchiura waterway No. 6	1994.12. 7 ~ 1.10	8	23	5.1	6.3	42	0.24	
Tsuchiura waterway No. 7	1994. 6.17 ~ 7. 7	27	24	10.1	1.2	30	0.60	
	1994.11. 9 ~ 12. 6	12	15	2.6	4.5	19	0.38	Net-bedded waterway 0.57 ± 0.13 ($n \approx 0.6$)
Tsuchiura waterway No. 9	1994. 9. 9 ~ 9.29	23	35	5.0	2.4	46	0.74	
	1995. 1.25 ~ 2.21	7	30	3.5	5.0	48	0.64	
Kanno River waterway C-0	1993. 9.30 ~ 10.27	19	213	11.3	12.2	204	0.32	

T : Water temperature ($^{\circ}\text{C}$)

C_{P1} : Dissolved orthophosphate concentration in raw water ($\mu\text{g P} \cdot \ell^{-1}$)

H : Harvesting yield ($\text{g dry weight} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)

Q_P : Phosphorus content ($\text{mg P} \cdot \text{g}^{-1}$ dry weight)

V_P : Phosphorus absorbing ability ($\text{mg P} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)

n : Constant of non-harvesting algae

路タイプ毎に大小の傾向が見られるため、水路タイプ毎に非採取定数の平均を求め、これを各水路タイプの非採取定数とした。

各水路タイプの非採取定数 n の値は、緩勾配水路では $n \approx 0.2$ 、水平水路では $n \approx 0.4$ 、底網水路では $n \approx 0.6$ となった。なお標準誤差は ± 0.1 程度である。

非採取定数が水路タイプ毎に異なる理由は以下のように考えた。緩勾配水路は、藻体片が切れて基層であるプラスチック棒から分離しても直下流のプラスチック棒にひっかかることにより藻体が排出口からなかなか流出しないため、非採取定数が小さい。水平水路は、活力の失った藻体片の一部が沈降して水路底に堆積するため、非採取定数がやや小さい。底網水路は、活力の失った藻体が底網上あるいは砂利上に堆積したまま残るため、非採取定数がやや大きい。なお底網水路については、底網上に残る藻体を採取できるように採取装置を改良すれば非採取定数を 0.6 より小さくできる。

3.2 リン含量の測定結果と定式化

3.2.1 リン含量の測定結果

Fig. 2 の(a)は横軸に原水の溶解性オルトリン酸態リン濃度を 0.5 乗で、縦軸にリン含量をリニアでとって、リン含量の実測値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る。Fig. 2 の(a)を見ると、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リン含量が増加するという傾向が見られる。Darley (1987)¹¹⁾は、大部分の藻類は余分のリンを細胞質中の直径 30~500nm の粒子にポリリン酸の形で貯蔵すると記述している。この Darley の記述は、Fig. 2 の(a)において、リン濃度が高くなるに従ってリン含量が増加する傾向と一致する。

Fig. 2 の(b)は横軸に原水の水温を縦軸にリン含量の実測値をとって、リン含量が原水の水温に依存しているかどうかを図示したものである。Fig. 2 の(b)を見ると、リン含量が水温に依存しているかどうかは判明できない。しかしリン含量は、Fig. 2 の(a)に見られるように溶解性オルトリン酸態リン濃度に依存しているため、Fig. 2 の(b)のリン含量の実測値を溶解性オルトリン酸態リン濃度で補正してから、再度リン含量の水温依存性を検討する必要がある。

3.2.2 リン含量の定式化

リン含量と原水の溶解性オルトリン酸態リン濃度の 0.5 乗との関係、リン含量と水温との関係を双方とも線形回帰と仮定し、式(6)および式(7)に示すようにリン含量の定式化を試みた。

$$Q_P = (d_1 + d_2 \cdot \sqrt{C_{P1}}) \cdot h_T \quad (6)$$

$$h_T = e_1 + e_2 \cdot T \quad (7)$$

ここに、 d_1 , d_2 , e_1 , e_2 : リン含量の定数

h_T : 水温によるリン含量の補正係数

T : 水温 (°C)

式(7)において水温 T が 20°C の時に補正係数 h_T を 1 に定めると、式(8)を得る。

$$h_{20c} = (e_1 + 20 \cdot e_2) = 1 \quad (8)$$

式(6)、式(7)、および式(8)より、式(9)を得る。

$$Q_P = (d_1 + d_2 \cdot \sqrt{C_{P1}}) \cdot \{1 - e_2 \cdot (20 - T)\} \quad (9)$$

式(9)について重回帰分析を行うことにより、定数 $d_1 = 1.7$, $d_2 = 0.40$, $e_2 = -0.019$ を算定し、さらに式(8)より

$e_1 = 1.38$ を得た。

Fig. 2 の(c)は、Fig. 2 の(a)の縦軸にとったリン含量の実測値を、式(9)および重回帰分析により得られた定数 e_2 を用いて原水の水温が 20°C の場合のリン含量に補正した値と置き替えたものである。同様に Fig. 2 の(d)は、Fig. 2 の(b)の縦軸にとったリン含量の実測値を、式(9)および重回帰分析により得られた定数 d_1 , d_2 を用いて原水の溶解性オルトリン酸態リン濃度が $30 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ の場合のリン含量に補正した値と置き替えたものである。

Fig. 2 の(c)を見ると、リン含量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様子がより明確となった。また Fig. 2 の(d)を見ると、水温が上昇するのに従いリン含量が減少する傾向が見られる。Darley (1987)¹¹⁾は、植物プランクトンの増殖に対する最適温度は一般に 18~25°C の範囲にあるが、それより低い範囲および高い範囲では 1 細胞を作るのにより多くの栄養塩をとりこむと記述している。この Darley の記述は、Fig. 2 の(d)において、水温の上昇に従ってリン含量が減少する傾向と一致する。

3.2.3 リン含量に対する藻類種と流況の影響

リン含量に影響を与える要因としては、①原水の溶解性オルトリン酸態リン濃度、②水温、のほかに、③藻類種の相違、④流況の相違、等が考えられる。

Fig. 2 の(e)と(f)は藻類種の相違による影響を検討するために作図したものである。Fig. 2 の(c)と(d)に対応して、藻類グループ別に 4 種の記号でプロットしたが、現地実験では藻類グループ間で有意な差が見られなかった。

Fig. 2 の(g)と(h)は流況の相違による影響を検討するために作図したものである。Fig. 2 の(c)と(d)に対応して、水路タイプ別に 3 種の記号でプロットしたが、現地実験では水路タイプ間においても有意な差が見られなかった。

3.3 リン吸収能の定式化

久納他 (1997)¹⁾は、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うことにより、原水濃度、水温、および流況の 3 要因を関数もしくは定数とするリン吸収能について式(10)および式(11)のように定式化を試みた。

$$V_P = \{b_1 + b_2 \cdot \ln(C_{P1})\} \cdot k_T \quad (10)$$

ここに、 b_1 , b_2 : 流況によるリン吸収能の定数

k_T : 水温によるリン吸収能の補正係数

D'Elia & DeBoer (1978)¹²⁾は、紅藻による NH_4^+ のとりこみ機構について、低基質濃度でのとりこみには飽和型のとりこみが主に関与し、高基質濃度になると非飽和である拡散型のとりこみが優占すると記述している。

この D'Elia & DeBoer の記述は、久納他 (1997)¹⁾が行った現地実験において、原水の溶解性オルトリン酸態リン濃度が高まるほど糸状藻類のリン吸収能が増加する傾向と一致する。よってこの傾向は、酵素反応の Michaelis-Menten 式による飽和型より式(10)に示す片対数の拡散型の方が適切に表現できると考えた。

式(10)の流況によるリン吸収能の定数 b_1 , b_2 は、水路タイプ毎に異なる値であり、Table 4 に示す¹⁾。

$$k_T = V_{PT} / V_{P20c}$$

Fig. 2 Dependence of dissolved orthophosphate concentration in raw water and water temperature on phosphorus content by field experiments.

∇ : *Hydrodictyon* $\diamond$: *Spirogyra*

$\odot$: *Mougeotia*, *Oedogonium*, *Pithophora*, *Cladophora*

$\times$: *Melosira*, *Diatoma*, *Fragilaria*

$\square$: Gentle-sloped waterway

$\circ$: Horizontal waterway

$*$: Net-bedded waterway

Table 4 Constant of phosphorus absorption by stream regime

Waterway type	$C_{P1} \leq 40 \mu\text{g} \cdot \ell^{-1}$		$C_{P1} > 40 \mu\text{g} \cdot \ell^{-1}$	
Gentle-sloped waterway	$b_1 = -119$	$b_2 = 61.8$	Same as at left	
Horizontal waterway	$b_1 = -200$	$b_2 = 80.2$	$b_1 = -275$	$b_2 = 100.6$
Net-bedded waterway	$b_1 = -160$	$b_2 = 68.1$	Same as at left	

$$= \frac{V_{PTopt}}{V_{P20^{\circ}C}} \cdot \left\{ \frac{T}{T_{opt}} \cdot \exp\left(1 - \frac{T}{T_{opt}}\right) \right\}^{\xi}$$

$$= 1.15 \times \left\{ (T/13) \cdot \exp(1 - T/13) \right\}^{1.3} \quad (11)$$

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

T_{opt} ：リン吸収能の最適水温 ($^{\circ}\text{C}$)

ξ ：リン吸収能の定数

式(11)の最適水温 T_{opt} および定数 ξ については、本来藻類種あるいは流況により異なると考えられるが、久納他 (1997)¹⁾は、4つの水路タイプの現地実験を行ったところ、水温が概ね10～15 $^{\circ}\text{C}$ の範囲でリン吸収能が極大値となり、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として、共通の値として、 $T_{opt} = 13^{\circ}\text{C}$ 、 $\xi = 1.3$ を与えている。

3.4 採取量の予測

採取量の予測は、採取量概算値の式(5)に、リン吸収能の式(10)および式(11)、リン含量の式(9)、非採取定数の Table 3 に示した緩勾配水路 $n=0.2$ 、水平水路 $n=0.4$ 、底網水路 $n=0.6$ の値を合わせて用いることにより試みることができる。

Fig. 3の(a)は、原水の溶解性オルトリン酸態リン濃度が $30 \mu\text{g} \cdot \ell^{-1}$ の場合を想定し、横軸に水温を、縦軸に採取量をとった図である。採取量の予測値を水路タイプ別に3種の線で示し、採取量の測定値を水路タイプ別に3種の記号でプロットした。なお採取量の測定値は Table 3 に示した実測値を式(10)と式(6)を用いて原水の溶解性オルトリン酸態リン濃度が $30 \mu\text{g} \cdot \ell^{-1}$ となるように補正した値とした。測定値を予測値と比較すると、3割程度の差のあるデータもあるが設備設計を行う上では支障のない傾向が得られた。予測値の線は、水温の上昇に伴い採取量が高くなるが、概ね15 $^{\circ}\text{C}$ 以上になると水温の上昇に対して採取量は徐々に低くなる。

Fig. 3の(b)は、水温が20 $^{\circ}\text{C}$ の場合を想定し、横軸に原水の溶解性オルトリン酸態リン濃度を対数で、縦軸に採取量をニアでとった図である。採取量の予測値を水路タイプ別に3種の線で示し、採取量の測定値を水路タイプ別の3種の記号でプロットした。なお採取量の測定値は Table 3 に示した実測値を式(11)と式(7)を用いて水温が20 $^{\circ}\text{C}$ となるように補正した値とした。測定値を予測値と比較すると、3割程度の差のあるデータもあるが設備設計を行う上では支障のない傾向が得られた。予測値の線は、原水濃度の上昇に伴い採取量が高くなるが、概ね $100 \mu\text{g} \cdot \ell^{-1}$ 以上になると採取量は概ね一定となる。

なお、Fig. 3の(a)と(b)において予測値および測定値の

Fig. 3 Dependence of water temperature and dissolved orthophosphate concentration in raw water and stream regime on harvesting yield.

いずれを見ても、採取量が緩勾配水路、水平水路、および底網水路の順で小さくなっている。各水路タイプは、Fig. 1に示すように糸状藻類が付着する基層形状、水深、および流速等が異なり、水路タイプは糸状藻類の生息環境にとって流況を代表している。よって採取量は水路タイプ、つまり流況に依存している。

このように採取量の依存性は、水温、原水の溶解性オルトリン酸態リン濃度、および流況によるという結果が得られた。

Fig. 3より採取量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 $30 \mu\text{g} \cdot \ell^{-1}$ の原水を20 $^{\circ}\text{C}$ の水温で緩勾配水路を用いて処理すると、採取量は約 $20 \text{g dry weight} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ となる。

4. ま と め

1) 糸状藻類による溶解性栄養塩除去手法において、

人工水路でのリンの物質収支を整理すると、採取量の概算値はリン吸収能、リン含量、および非採取定数の関数と考えられるため、その各々の項を定式化することにより、採取量の予測が可能である。現地実験を行い算定した結果、採取量の依存性は、水温、原水の溶解性オルトリン酸態リン濃度、および流況によるという結果が得られた。水温の依存性は、水温の上昇に伴い採取量が高くなるが、概ね15°C以上になると水温の上昇に対して採取量は徐々に低くなる。また原水の溶解性オルトリン酸態リン濃度の依存性は、原水濃度の上昇に伴い採取量が高くなるが、概ね100 $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ 以上になると採取量は概ね一定となる。採取量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30 $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ の原水を20°Cの水温で緩勾配水路を用いて処理すると、採取量は約20g dry weight $\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ となる。

2) 非採取定数は、人工水路の基層より分離した藻体片が水路外に移出したり、藻体片が水路内の採取不可能な部分に堆積したりするなど採取不可能となった不確定な藻体量の割合を表す定数とした。現地実験をもとにして非採取定数を算定した結果、緩勾配水路では概ね0.2、水平水路では概ね0.4、底網水路では概ね0.6となった。

3) 無機態窒素が常に余剰という条件のもとで、糸状藻類のリン含量について現地実験を行った結果、リン含量の依存性は、原水の溶解性オルトリン酸態リン濃度および水温によるという結果が得られた。原水の溶解性オルトリン酸態リン濃度の依存性は、濃度が上昇するのに伴い、リン含量は高くなる。また水温の依存性は、水温が上昇するのに伴い、リン含量は低くなる。なお本現地実験においては、リン含量に対する藻類種による相違あるいは流況による相違の影響について、有意な差が見られなかった。

謝 辞

本研究の遂行にあたり竹内邦良山梨大学教授、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課長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。ここに記して深く感謝いたします。

(原稿受付 1997年3月4日)

(原稿受理 1997年11月16日)

引用文献

- 1) 久納誠, 丹羽薫 (1997) 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, **20**, 269-277.
- 2) 周達生 (1991) 東アジアの食文化探検, 三省堂選書 **162**, pp. 217-230, 三省堂.
- 3) 飯山郁子, 坂井真奈美 (1984) 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**, 71-75.
- 4) 梶田聖孝, 岡本智伸 (1996) 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, **38**, 465-470.
- 5) 小笠原保 (1992) 霞ヶ浦におけるアオコの処理と資源化, 資源環境対策, **358**, 39-45.
- 6) 廣瀬弘幸, 山岸高旺 (1977) 日本淡水藻図鑑, 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) 日本水道生物—写真と解説—, pp. 22-34, pp.72-77.
- 10) 森下雅子 (1991) 川と湖の博物館—1 植物プランクトン, pp. 37-50, pp.131-148, 山海堂.
- 11) Darley, W. M. (1987) 藻類の生理生態学, 基礎微生物学 **9**, 49 pp, pp. 52-56, 培風館.
- 12) D'Elia, C. F. & DeBoer, J. A. (1978) Nutritional studies of two red algae. II. Kinetics of ammonium and nitrate uptake. *F. Phycol.*, **14**, 266-272.