

平坦河床上の藻類の増殖と剥離に関する研究

STUDY ON PRODUCTION AND DETACHMENT OF PERIPHYTON GROWING ON FLAT CHANNEL BED

戸田祐嗣¹・赤松良久²・池田駿介³

Yuji TODA, Yoshihisa AKAMATSU and Syunsuke IKEDA

¹正会員 学士(工) 東京工業大学大学院助手 理工学研究科土木工学専攻

²学生会員 修士(工) 東京工業大学大学院学生 理工学研究科土木工学専攻

³フェロー会員 工博 東京工業大学大学院教授 理工学研究科土木工学専攻

(〒152-8552 東京都目黒区大岡山2丁目12-1)

Laboratory experiments for the kinetics of periphyton growth were conducted to find out the effect of hydraulic characteristics on the production and the detachment of periphyton, in which the amount of periphyton and the rate of detachment were measured. The results of the experiments show that the growth rate of periphyton becomes large in the case turbulence near the channel bed becomes large. It was also found that the detachment of periphyton mainly depends on the physiological action of periphyton.

A numerical simulation model of the growth of periphyton was presented to describe the production and detachment in details. The result of the calculation shows that the biomass of the filament type periphyton is mainly determined by the balance between production rate and respiration rate.

Key Words: Periphyton, primary production, detachment, numerical simulation

1. はじめに

近年, 河川事業において生物の生息環境に配慮した河道設計が全国的に展開され, 河川工学の分野では河川生物の生育環境に関する研究が盛んに行われるようになった¹⁾. その中で礫床河川中にみられる瀬と淵は河川生物の良好な生活の場を提供することが知られており, 河川環境を構成する中核的な存在として注目を集めている. 瀬と淵における生物環境においては, 河床礫に付着する藻類が一次生産を行い, それらが魚類や昆虫類の餌となることによって食物連鎖を根底から支えている. 従って瀬と淵の生態系を理解するためには付着藻類の一次生産特性を明らかにする必要がある.

これに対して池田ら²⁾は多摩川上流域の瀬と淵を対象として, 付着藻類の一次生産特性に関する現地調査を実施しており, 淵と比較して流速の大きな瀬では付着藻類の一次生産力が大きくなることを示している. また, 赤松ら³⁾は, 水質・日射環境の等しい4本の開水路を用いて付着藻類の生育実験を実施し, 流速の大きな水路で, 糸状型の藻類の優占的繁

茂が生じ, 藻類一次生産力が大きくなることを定量的に示している.

本研究では, 赤松ら³⁾による付着藻類の生育実験結果について, 流れの特性が河床付着性藻類の増殖・剥離に与える影響をより詳細に検討しその特性を把握すること, および実験で得られた知見をもとに平坦河床上の藻類増殖のシミュレーションモデルを作成し, 増殖の特性を検討することを目的とする.

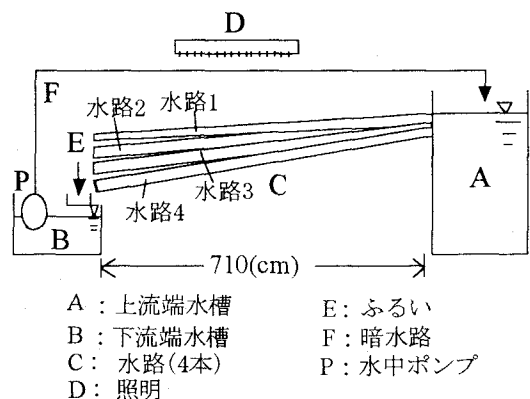


図-1 実験水路

表-1 各水路の水理特性

	水路勾配	平均流速 (cm/s)	平均水深 (cm)	Fr	Re	摩擦速度 (cm/s)
水路1	1/500	9	3.5	0.15	3.9×10^3	2.25
水路2	1/285	13	2.7	0.25	4.3×10^3	2.70
水路3	1/138	51	1.8	1.21	1.1×10^4	3.29
水路4	1/68	71	1.5	1.85	1.3×10^4	4.34

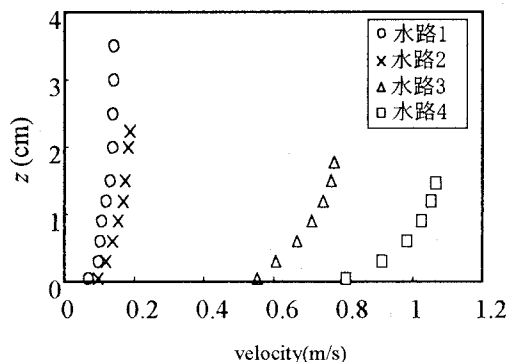


図-2 流下方向流速の鉛直分布

2. 室内実験

(1) 実験方法

a) 実験水路

実験水路の概略図を図-1に示す。実験水路は勾配の異なる四つの水路から構成されている。四つの水路は上流端水槽・下流端水槽を共有しており、同じ水質の水が循環するようになっている。各水路はアクリル製でありその大きさは流下方向710cm, 横断方向20cmである。水路底面には藻類の付着板として塩化ビニルのプレート(200×198mm)を15枚敷きつめた。河床表面は藻類が付着しやすいようにサンドペーパー(40番)で粗さをつけた。藻類の生育は流れが等流になっていると考えられる上流端から300cm～600cmで実施した。また各水路下流端にはふるい(口径150 μ m, 22×18cm)を設け、ここに残留する剥離した藻類量を測定した。

b) 実験条件

実験水には水道水を用い、 KNO_3 を窒素濃度として3.0(mg/l), K_2HPO_4 をリン濃度として0.1(mg/l)になるように添加した。リンや窒素等の栄養塩濃度は付着藻類の増殖に伴い減少するため、一週間間隔でその濃度を測定し、規定の濃度になるように随時添加した。栄養塩濃度(T-P, PO_4 , NH_4 -N, NO_3 -N, NO_2 -N, T-N)の測定は分光光度計(DR-3000, (株) セントラル科学)を用いた。また栄養塩と同時に水温, 溶存酸素濃度についても簡易多項目水質計(U-10, (株) 堀場製作所製)を用いて一週間間隔で測定した。さらに長期間の実験水の循環により藻類の成育に悪影響のある代謝物が蓄積することや窒素・リン以外の微量

栄養元素が成長の制約因子になることを防ぐため、実験中3回水の取り替えを行った。

日射に関しては過去の藻類の生育実験例⁴⁾を参考にし、水路上方に設置した8個の白熱灯により与えた。昼夜の別はタイマーで制御し、昼を16時間, 夜を8時間とした。白熱灯点灯中の水路床における照度は約20kluxであり、これより与えられる光エネルギーは一日あたり約860(J/cm²/day)であり、これは関東圏における夏期の地表が受ける太陽エネルギーの可視, 紫外部に相当するものと考えられる。実験水の水温に関して、実験実施期間が夏期(7月～9月)であったため、藻類生育を阻害するような低水温が生じないものと判断し、特別な制御は行わなかった。その結果、実験水の水温は27～29℃付近で変動しており、22℃前後を好む珪藻綱よりも緑藻・藍藻綱の生育に有利な条件となった。

c) 測定法

付着藻類の現存量と剥離量はクロロフィルa量として測定した。現存量は付着板(200×198mm)上の付着藻類をブラシではぎ取り、水道水中の浮遊させ、ガラスフィルター(口径:1.2 μ m)を用い濾過し、アセトンで抽出した後に吸光度計測を行うことによりクロロフィルa量として定量した。剥離量に関しても水路下流端に設置されたふるいから剥離した藻類をブラシではぎ取り、同様の手順でクロロフィルa量を測定した。実験開始より5日後および34日後には、付着藻類の種分析(種小名まで同定)を実施した。また各水路における流下方向流速成分の鉛直分布をピトー管によって測定した。

(2) 実験結果および考察

a) 水理特性

各水路における水理特性を表-1に示す。水路1, 2は流速が小さく、緩やかな流れであるのに対して、水路3, 4では流速が大きく、射流になっている。摩擦速度は、水路1, 2と比べ水路3, 4では大きな値を示している。各水路の流下方向流速成分の鉛直分布を図-2に示す。流速分布はほぼ対数則に従い、水路3, 4で大きな流速を示している。

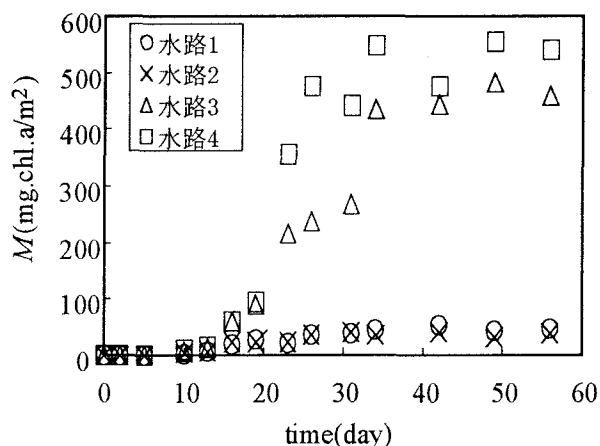


図-3 藻類現存量の時系列変化

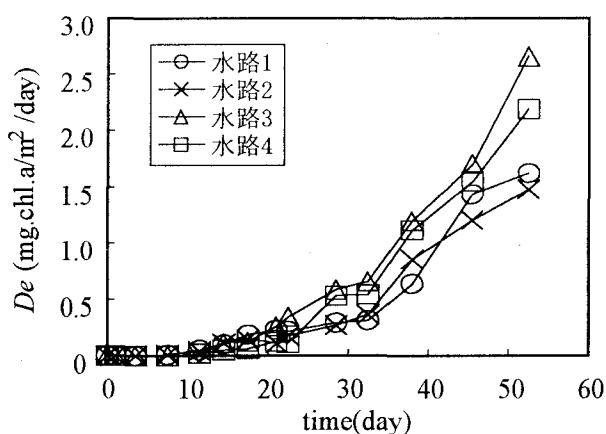


図-4 藻類剥離量の時系列変化

b) 付着藻類の増殖過程

各水路における付着藻類の現存量 M の時系列変化を図-3に示す。一般に生物の増殖は初期段階において指数関数的に増加し、栄養分や環境の制約により増殖が低下するといわれており、本実験においても全ての水路において実験開始後15～20日付近に指数的増殖を示し、40日目以後は現存量変化が小さくなっている。水路間の増殖過程の違いについて、水路1, 2と比較して水路3, 4では実験開始後15日目付近から急激な増殖を示している。

このような増殖過程の違いがみられた原因として次のような二つの要因が考えられる。一つは流れの違いによって付着藻類の生物膜内部への基質（栄養塩、酸素）の供給に違いがあったと考えられる。水路1, 2と比較して、水路3, 4は摩擦速度が大きい。その結果、水路3, 4では付着藻類膜周辺において乱れによる基質の拡散が活発に生じ、生物膜内部まで基質が浸透すると推察される。そのため生物膜深部の付着藻類が増殖に寄与することが可能であったものと考えられる。もう一つの要因として付着藻類の種類の遷移が考えられる。実験開始後5日目と34日目における藻類種の分析結果では、実験開始初期は珪藻綱、緑藻綱の混成群落であったが、実験開始か

表-2 群体型、糸状型の付着藻類の割合 (%)

		群体型	糸状型
実験開始後 5日目	水路1	94	6
	水路2	85	15
	水路3	66	34
	水路4	53	47
実験開始後 34日目	水路1	84	16
	水路2	80	20
	水路3	18	82
	水路4	5	95

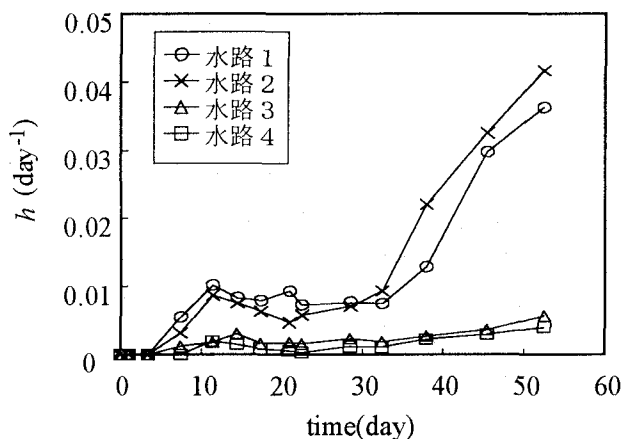


図-5 剥離率の時系列変化

ら34日後では *Homeothrix* spp を中心とした糸状型の藍藻群落へと遷移していた。表-2では藻類の体のつくりによる分類結果を示しており、ここでは糸状の形態で生育しているものを糸状型、単細胞や群体の形態で生育しているものを群体型と分類した。水路1, 2では実験開始後5日目と34日目ともに糸状型の藻類の割合は20%以下であるのに対して、水路3, 4では実験開始後5日目では糸状型の藻類は40%前後であったが、実験開始後34日目には90%前後まで増加している。このように水路3, 4においては顕著な種の遷移が起こり糸状型の藻類が優占しており、その影響で水路1, 2と水路3, 4の現存量に大きな違いが生じたものと考えられる。これらの二つの要因のうちどちらが支配的であったかは、実験からは特定出来ないため、3.で行う数値計算より検討することとする。

c) 付着藻類の剥離過程

図-4に付着藻類の単位時間当たりの剥離量 De を示す。実験開始後からの時間の経過とともに全ての水路で剥離量は増加している。水路間の違いについて、水路1, 2と比較して水路3, 4の剥離量が大きな値を示しているものの、藻類現存量で見られたほどの大きな違いは見られなかった。

付着藻類の現存量に対する剥離量の割合を剥離率 $h (=De/M)$ と定義し、その時系列変化を図-5に示す。付着藻類の剥離は流体せん断力によって生

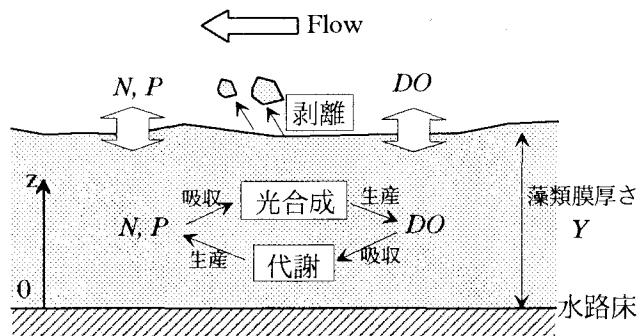


図-6 モデルの概念図

じる機械的な剥離と、藻類の寿命や付着力の低下等によって生じる生理的剥離⁵⁾が考えられる。剥離率は実験開始から時間の経過とともに増加しており、初期に付着した藻類が自らの寿命や、生理活性の低下により剥離していることが推察される。また、水路1,2と比較して水路3,4では流体せん断力が大きいにも関わらず、剥離率が小さくなっており、以上のことから本実験の範囲内においては生理的剥離が支配的であったものと判断される。

水路間の剥離形態の違いに関して、実験時の観察から以下のような特徴が見られた。全ての水路の付着藻類膜内には、光合成や代謝によって気泡が生成されていた。水路3,4では、水路1,2に比べ底面付近の乱れが大きいため、気泡が藻類膜内部から迅速に取り去られていた。また、糸状型藻類が優先的に生育していた水路3,4では、底面から剥がされた糸状型藻類が、他の藻類に絡まり流下せずに生育している様子が観察された。以上の様な、藻類膜内部からの気泡の除去特性や藻類種による剥離形態の違いから、水路3,4では、水路1,2より剥離率が小さくなったものと思われる。

3. 数値計算

実験で見られた藻類の増殖過程を、より詳細に検討するため、藻類増殖に関する数値モデルを構築した。本数値モデルにおいては、乱れによる藻類層内部での基質の拡散効果を取り入れている。図-6にモデルの概念図と座標系を示す。

(1) 藻類増殖の数値モデル

a) 藻類の生理モデル

藻類の組成式には Gloyna⁶⁾により提案されている $C_{106}H_{180}O_{45}N_{16}P$ を用い、藻類の光合成・代謝活動が以下の化学反応式で表されるものとする。

・光合成

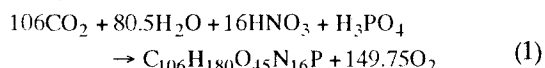
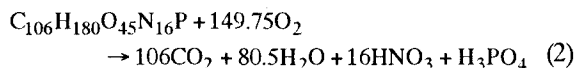


表-3 藻類中の栄養塩含有率および生理活動による酸素使用率

藻類中N含有率	$\alpha_N = \frac{16N}{C_{106}H_{180}O_{45}N_{16}P} = 0.092$
藻類中P含有率	$\alpha_P = \frac{P}{C_{106}H_{180}O_{45}N_{16}P} = 0.013$
光合成・代謝による酸素使用率	$\alpha_{DO} = \frac{149.75O_2}{C_{106}H_{180}O_{45}N_{16}P} = 1.975$

・代謝



式(1), (2)より藻類中の栄養塩含有率および生理活動に伴う酸素使用率が表-3の様に算出される。

付着藻類の増殖は次式に従うものとする。

$$\frac{dM}{dt} = Pr - Re - De \quad (3)$$

ここに、 M : 藻類現存量、 Pr : 光合成による生産量、 Re : 代謝量、 De : 剥離量である。

光合成による生産量は、藻類膜内部での各高さにおける藻類の生産量の積分値として、以下の式で表される。

$$Pr = \mu_{max} \rho_{alg} \times \int_0^Y \frac{N(z)}{N_k + N(z)} \frac{P(z)}{P_k + P(z)} \frac{I_0 \exp\{-\lambda(Y-z)\}}{I_k + I_0 \exp\{-\lambda(Y-z)\}} dz \quad (4)$$

ここに、 Y : 藻類膜の厚さ、 $N(z)$, $P(z)$: 高さ z における無機態窒素、無機態リン濃度、 I_0 : 藻類膜直上における日射量、 N_k , P_k , I_k : 無機態窒素濃度、リン濃度、日射量の半飽和定数、 λ : 藻類膜内の吸光係数、 ρ_{alg} : 藻類の密度、 μ_{max} : 最大光合成速度である。光合成の活性は、栄養塩濃度と日射量に関する Monod 型で表現している。

代謝量に関しても、生産量と同様に、各高さでの代謝量を積分し、以下の式で表すこととする。

$$Re = k_{aemax} \rho_{alg} \int_0^Y \frac{DO(z)}{DO_k + DO(z)} dz \quad (5)$$

ここに、 $DO(z)$: 溶存酸素濃度、 DO_k : 溶存酸素濃度の半飽和定数、 k_{aemax} : 最大代謝速度である。

剥離量に関しては、その特性が藻類膜内からの気泡の除去特性や藻類種に依存し、直接モデル化することが困難であるため、実験により得られた剥離率 h を用いて以下の式で表すこととする。

$$De = h(t)M \quad (6)$$

b) 藻類層内部での物質の拡散

藻類層内部での窒素・リン濃度は、基質の拡散および藻類層内部での生理活動による増減を考慮した次式に従うものとする。

表-4 生物生理に関するパラメータ

項目	値	文献
最大光合成速度 μ_{max}	0.912 (day ⁻¹) : 水路 1,2 0.912 (day ⁻¹) : 水路 3,4	(8)
最大代謝速度 k_{aemax}	0.085 (day ⁻¹) : 水路 1,2 0.085 (day ⁻¹) : 水路 3,4	(8)
半飽和定数 N_k, P_k, DO_k, I_k	0.8, 0.13, 5.0 (mg/l) , 20 (W/m ²)	I_k : (9) 他は仮定
藻類吸光係数 λ	20.0 (cm ⁻¹)	(10)
定数 $\gamma_N, \gamma_P, \gamma_{DO}$	$1.9 \times 10^{-3}, 1.9 \times 10^{-3},$ 2.5×10^{-3}	γ_N, γ_{DO} : (11) γ_P : 仮定

$$\frac{\partial}{\partial z} \left\{ K_N \frac{\partial N}{\partial z} \right\} = \alpha_N \mu_{max} \rho_{alg} \frac{N(z)}{N_k + N(z)} \frac{P(z)}{P_k + P(z)} \times \frac{I_0 \exp\{-\lambda(Y-z)\}}{I_k + I_0 \exp\{-\lambda(Y-z)\}} - \alpha_N k_{aemax} \rho_{alg} \frac{DO}{DO_k + DO} \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left\{ K_P \frac{\partial P}{\partial z} \right\} = \alpha_P \mu_{max} \rho_{alg} \frac{N(z)}{N_k + N(z)} \frac{P(z)}{P_k + P(z)} \times \frac{I_0 \exp\{-\lambda(Y-z)\}}{I_k + I_0 \exp\{-\lambda(Y-z)\}} - \alpha_P k_{aemax} \rho_{alg} \frac{DO}{DO_k + DO} \quad (8)$$

ここに、 K_N, K_P : 窒素・リンの拡散係数である。左辺は拡散項、右辺第1項は光合成による吸収、第2項は代謝による負荷を表している。

溶存酸素濃度に関しても、同様に

$$\frac{\partial}{\partial z} \left\{ K_{DO} \frac{\partial DO}{\partial z} \right\} = -\alpha_{DO} \mu_{max} \rho_{alg} \frac{N(z)}{N_k + N(z)} \frac{P(z)}{P_k + P(z)} \times \frac{I_0 \exp\{-\lambda(Y-z)\}}{I_k + I_0 \exp\{-\lambda(Y-z)\}} + \alpha_{DO} k_{aemax} \rho_{alg} \frac{DO}{DO_k + DO} \quad (9)$$

ここに、 K_{DO} : 溶存酸素の拡散係数である。左辺は拡散項、右辺第1項は光合成による生産、第2項は代謝による負荷を表している。式(7)～(9)の境界条件は、藻類膜頂部で水路内の水質値を取ることであり、および水路床で物質フラックスが0になることより以下で与えられる。

$$N(z) = N; P(z) = P_0; DO(z) = DO_0 \quad \text{at } z = Y \quad (10)$$

$$\frac{\partial N}{\partial z} = \frac{\partial P}{\partial z} = \frac{\partial DO}{\partial z} = 0 \quad \text{at } z = 0 \quad (11)$$

ここに、 N_0, P_0, DO_0 : 水路水中の無機態窒素濃度、無機態リン濃度、溶存酸素濃度である。

拡散係数は以下の様に決定した。水路床を滑面とした場合、河床面近傍の運動量拡散係数 ν_t に関しては、粘性低層内で分子拡散、その外部では乱流拡散を考慮した Rotta の式が提案されている⁷⁾。

$$\nu_t = \nu \quad : z \leq \delta_s Y \quad (12)$$

$$\nu_t = \frac{\nu}{2} \left\{ \sqrt{1 + 4 \left(\frac{U_* \kappa (z - \delta_s)}{\nu} \right)^2} + 1 \right\} \quad : z \geq \delta_s \quad (13)$$

ここに ν : 動粘性係数、 U_* : 摩擦速度、 κ : Karman 定数、 δ_s : 粘性低層厚さである。各物質の拡散係数は運動量の拡散係数に定数を乗じ、以下の式で表すこととした。

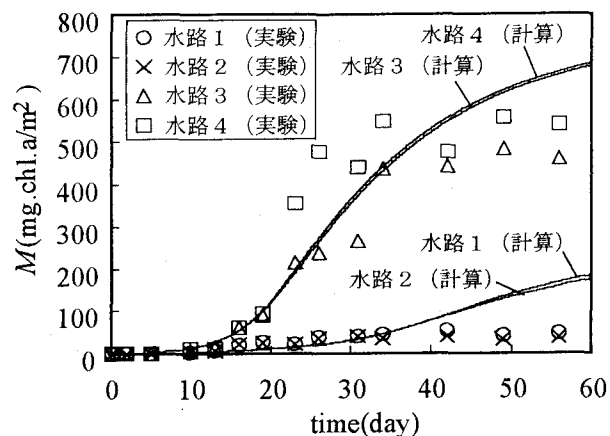


図-7 藻類現存量に関する実験値と計算値の比較

$$K_N = \gamma_N \nu_t; K_P = \gamma_P \nu_t; K_{DO} = \gamma_{DO} \nu_t \quad (14)$$

ここに、 $\gamma_N, \gamma_P, \gamma_{DO}$: 定数である。これらの値については、計算対象領域が分子粘性が卓越する壁面近傍であることを考慮して、各物質の分子拡散係数¹¹⁾と動粘性係数との比より決定している。但し、リンに関しては分子拡散係数の実測値が不明であったため、窒素と同じ値と仮定している。

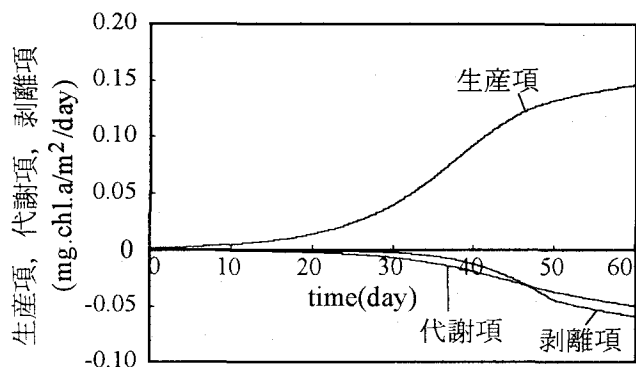
c) 計算条件

計算は実験を行った4つの水路を対象として実施した。全ての計算において、藻類膜上部での日射量 I_0 、水路水中の無機態窒素濃度 N_0 、無機態リン濃度 P_0 、溶存酸素濃度 DO_0 は、 $I_0 = 200$ (W/m²)、 $N_0 = 3.0$ (mg/l)、 $P_0 = 0.1$ (mg/l)、 $DO_0 = 8.0$ (mg/l) とした。各水路の摩擦速度は表-1の通りとした。

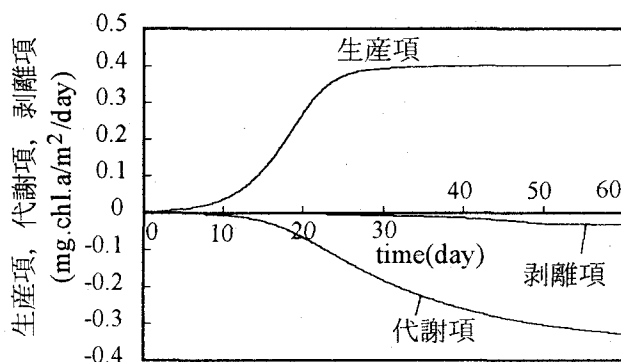
生物生理に関わるパラメータを表-4に示す。最大光合成速度および最大代謝速度に関して、水路1,2では緑藻を中心とした群体状藻類の群落で、水路3,4では糸状型の藍藻が優占種となる群落で実測された値を使っている。藻類の剥離率 h に関しては、実験で得られた各水路の剥離率(図-5)を4次多項式で近似して与えている。計算期間は60日間とし、時間刻みは2.4時間とした。

(2) 計算結果

図-7に実験と数値計算による藻類現存量の比較を示す。計算は実験で得られた藻類の増殖過程を大局的には良く再現しているものの、計算開始より30日以降に関しては、計算値の方が実験値より大きな値を示している。この違いは以下の理由により生じているものと思われる。本モデルでは、藻類量の寿命による減少を考慮せず、代謝・剥離による減少のみを取り扱っている。そのため、寿命により死滅したものの、藻類膜から剥離していない藻類量は考慮されていない。その結果、寿命による死滅量が増加してくるものと思われる計算後



(a) 水路 1



(b) 水路 4

図-8 生産項, 代謝項, 剥離項の時間変化

期において、付着藻類量を大きく見積もってしまったものと思われる。水路間の比較に関して、同じ最大光合成速度を与えた水路1, 2間や水路3, 4間での計算結果の差は小さい。このことから、本実験条件における水路間の付着藻類の現存量の違いは、乱れによる基質の拡散の効果より、藻類種の影響が大きかったものと思われる。

図-8(a), (b)に、水路1および水路4における生産項, 代謝項, 剥離項の大きさの時系列変化を示す。水路1では、水路4と比較して、生産の活性が低く、計算開始から50日付近まで生産量は緩やかに増加している。それに対して、水路4の生産量は、計算開始より30日後付近まで著しく増加し、その後藻類量の増加に伴って、藻類膜深部の藻類への日射の到達や栄養塩の拡散が低下することにより、一定の値へ収束している。計算開始より50日後以降について、水路1では、代謝項と剥離項が同程度の大きさとなり、生産項と釣り合う状態へと推移している。一方、水路4では、代謝項に対して、剥離項が小さく、最終的に、生産量と代謝量がほぼ釣り合う状態へと推移していることが分かる。以上のことから、群体型の藻類の現存量には剥離の影響が大きいが、糸状型藻類は生産と代謝のバランスにより現存量が決定されていると言える。

4. 結論

本研究で得られた主たる知見を以下に示す。

- (1) 底面付近の乱れが大きい場合ほど糸状型の藻類が優占して生育し、一次生産力が大きくなる。
- (2) 付着藻類の剥離は流体のせん断力よりも付着藻類種や光合成によって藻類膜内部に生じる気泡の除去特性の影響を強く受ける。
- (3) 糸状型の藻類が優占する群落では、生育に伴って、光合成による生産量と代謝量が釣り合った平衡状態へと推移して行くが、群体型の藻類が

優占する群落では、生産量に対して代謝量および剥離量が釣り合った状態へと推移していく。

謝辞：本研究は文部省科学研究費補助金基盤研究(A)(2)(課題番号：11305035、研究代表者：池田駿介)の補助を受けている。また、水質分析に関しては東京工业大学大学院総合理工学研究科石川忠晴教授ならびに石川研究室の学生の皆様に機材の使用方法等、多くのご指導を頂いた。さらに藻類の種類分析に関しては東京大学農学部附属緑地植物実験所加藤和弘助教授の援助を受けた。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 例えば、藤田正治、道上正規：千代川における淵の構造と魚類の生息環境、水工学論文集、第40巻、pp181-186、1996。
- 2) 池田駿介、戸田祐嗣、赤松良久：瀬と淵の水質および生物一次生産に関する現地観測、水工学論文集、第43巻、pp1037-1042、1999。
- 3) 赤松良久、戸田祐嗣、池田駿介：河床付着性藻類の増殖と剥離に関する実験的研究、河川技術に関する論文集、第6巻、pp.113-118、2000。
- 4) 川島博之、鈴木基之：河床付着性藻類の増殖と剥離、化学工学論文集、第9巻、第3号、pp.324-329、1983。
- 5) 大橋晶良、原田秀樹、桃井清至：平板上に形成される室処理生物膜の生長過程、衛生工学研究論文集、第27巻、pp.45-54、1991。
- 6) Glyna, E. F.: Basis for waste stabilization pond designs, Advances in water quality improvement, Univ. of Texas, pp.397-408, 1998。
- 7) Rotta, J.: Das in Wandnahe gultige Beschwindigkeitsgesetz turbulenter Stromungen, Ingenieur Arch, 18 Band, 1950。
- 8) 水野信彦、御勢久右衛門：河川の生態学、II-6-4、築地書館、1972。
- 9) 山本譲太郎、伊藤猛夫：水界動物生態学I、共立出版、1973。
- 10) 川島博之、鈴木基之：浅い富栄養化河川水質シミュレーションモデル、化学工学論文集、第10巻、第4号、pp.475-482、1984。
- 11) 日本化学会編：化学便覧、丸善、1995。

(2000.10.2受付)