

取水量の大きな砂河川における 河床付着藻類の繁茂について

GROWTH OF PERIPHYTON IN SAND RIVER WITH LARGE WATER INTAKE

戸田祐嗣¹・辻本哲郎²・藤森憲臣³

Yuji TODA, Tetsuro TSUJIMOTO and Noriomi FUJIMORI

¹正会員 博士(工) 名古屋大学講師 大学院工学研究科(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

²正会員 工博 名古屋大学教授 大学院工学研究科(同上)

³正会員 修士(工) 名古屋大学 大学院工学研究科(同上)

Field observations and numerical simulations were performed to know the growth of periphyton in sand river. In the field observation, the growth of periphyton on fixed sand bed was measured weekly. The results of the field observations show that the large growth of periphyton occurs in sand river until the bed material sands have not moved. An integrated numerical simulation model is presented to describe the growth of periphyton at the observed river reach, and the series of numerical simulations were performed to know the effect of river discharge on growth of periphyton in the sand river. The results of the numerical simulations show that the net primary production of periphyton decrease with the river discharge. These results suggest that the excess intake of river water may induce the increase of primary production of periphyton in sand river.

Key Words: *Periphyton, sand river, large water intake, mobility of bed materials, primary production*

1. はじめに

河川生態系を保全していくためには、生態系を構成する各生物種に対して、生息に必要な場と餌(エネルギー)が自律的に確保される必要がある。その中で水域の一次生産者である植物は、光合成活動を通して有機物を生産し、餌の供給源として河川生態系を根幹から支えている。従って、河川生態系の中でのエネルギーの流れを把握するためには、水域の一次生産特性を解明する必要がある。

水域の一次生産者の一つである藻類は、その生息形態によって、固体表面に付着して生息する付着藻類と水中に浮遊して生息する植物プランクトンに大別される。一般に、河床に付着藻類が生育するためには、河床まで日射が到達し、かつ藻類の付着基盤が流れの中で安定して存在する必要があるため、中流域の浅い礫床河川では付着藻類が繁茂する¹⁾。下流域の水深が比較的大きな砂河川では、河床に到達する日射量が少なく、河床材料の砂が藻類の付着基盤としては不安定であるため、植物プランクトンによる一次生産が盛んになると言われている¹⁾。

一方で、流域に農業地帯などを有する河川では、灌漑などの目的で河川水の取水が行われている。取水量の大きな砂河川では平水時の河川流量が取水により減少し、その結果として水深と河床材料の移動性が低下するため、本来では付着藻類が生息しないような砂床区間においても付着藻類が繁茂することが予測される。そこで、本研究では、利水による取水量の大きな砂河川を対象として、付着藻類の繁茂に関する現地観測を実施し、砂河川における付着藻類一次生産の特性を実証的に明らかにすることを第一の目的とする。また、砂河川の付着藻類動態予測モデルを構築し、取水による河川流量の変化が付着藻類繁茂動態に与える影響について検討することとする。

2. 現地観測

(1) 観測対象地および観測方法

a) 観測対象地の概要

現地観測は、愛知県を流れる矢作川の河口より17km地点付近で実施した。矢作川は流路延長117km、流域面

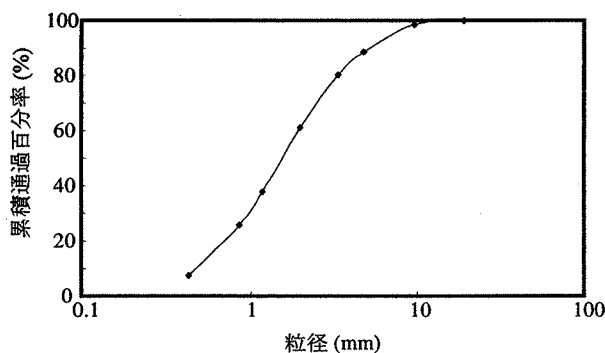


図-1 観測対象地の河床材料の粒度分布

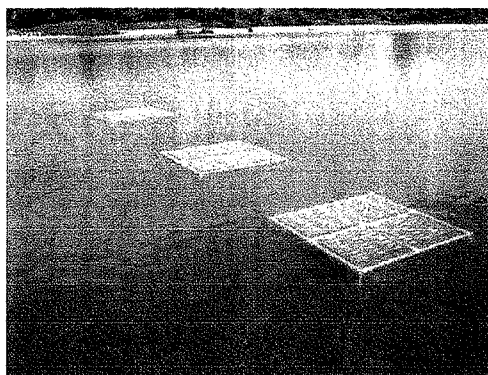
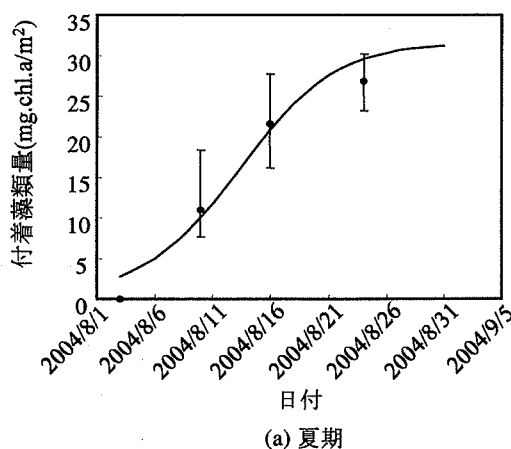
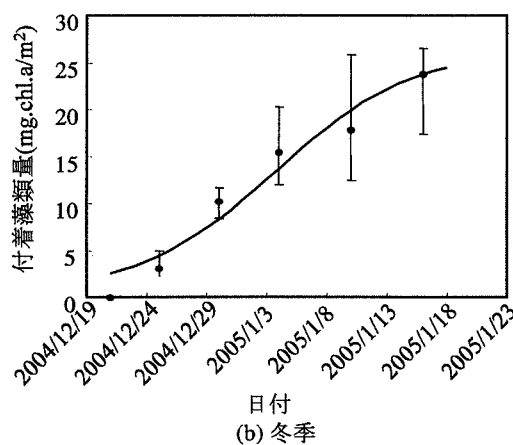


図-2 藻類付着板の河床への設置状況



(a) 夏季



(b) 冬季

図-3 固定砂面上での藻類繁茂状況

積 1,830km² の一級河川であり、その中・下流部の流域に位置する豊田市、岡崎市には農業・工業地域が広がっている。これらの地域の治水安全度向上と利水のため、矢作川本川の河口から 34.6km 地点から 80.0km 地点の区間には 7 つのダムが建設されている。その中で最下流に位置する明治用水（河口より 34.6km 地点）では、灌漑期に 30m³/s の河川水の取水が行われており、それより下流側の河川流量を半減近くまで低下させている。この影響で、矢作川の下流域では平水時の河川流量が小さく、平水時水域の減少、水深の低下、河床材料の移動頻度の低下などが生じているものと判断される。

b) 観測方法

河床材料の移動が生じなかった場合の砂面上での付着藻類の繁茂特性を把握するため、2004 年 8 月～同年 9 月および 2004 年 12 月～2005 年 1 月の期間に以下のような現地観測を実施した。

観測対象地の河床材料を採取し、乾燥後に篩い分け試験を実施した（図-1）。各粒径に篩い分けされた土砂をそれぞれ D1（0.085mm 以下）、D2（0.085～1.18mm）、D3（1.18～2.00mm）、D4（2.00mm 以上）の 4 粒径グループに分類し、それぞれの砂を貼り付けた多数の藻類付着用アクリル板プレートを作成した。藻類付着用プレートは 8×8cm である。これらの藻類付着板をフレームに固定し、河川水中に設置した（図-2）。観測開始から概ね 1

週間に 1 度の頻度で、付着用プレートを取り出し、その表面に繁茂した藻類を歯ブラシで剥がし取って回収した。回収された藻類のサンプルについて、藻類量の計測を分光光度計（UVmini-1240、島津製作所製）を用いて行った。藻類量はクロロフィル a 量（以下 Chl.a と記す）として定量し、UNESCO 法²⁾に従って分析を行った。

(2) 観測結果

図-3 に現地観測より得られた藻類付着プレート上での付着藻類の増殖を示す。図中の●は各観測時の藻類量の平均値であり、プレート間でのデータのばらつきの範囲を縦向きのバーで示している。夏季、冬季ともに、プレート設置から徐々に藻類量が増加していく様子が見られる。夏季と冬季を比較すると、夏季のほうが藻類量が大きくなる傾向が見られ、光合成活動が活発であることが分かる。

一般に生物の増殖は、増殖の初期に指数的に増加し、その後、資源の制約などにより増殖が低下することが知られている。そのような生物量の増殖過程の大局的特徴を表現するモデルとして、以下で表されるロジスティック方程式が知られている³⁾。

$$\frac{dM}{dt} = \mu M \left(1 - \frac{M}{K} \right) \quad (1)$$

表-1 夏季・冬季における比増殖速度と環境容量

	夏季	冬季
比増殖速度 μ (day ⁻¹)	0.24	0.17
環境容量 K (mg.chl.a/m ²)	31.5	26.3

ここに、 M : 生物量 (本研究の場合、単位面積当たりの付着藻類量)、 t : 時間、 μ : 比増殖速度、 K : 環境容量である。ロジスティック方程式では、生物量 M が環境容量 K に対して十分小さな増殖の初期過程では

$$\frac{dM}{dt} \cong \mu M \quad : M/K \rightarrow 0 \quad (2)$$

となり、指数増殖となる。その後、生物量の増加とともに、増殖が低下し、最終的には生物量は環境容量に漸近する。ロジスティック方程式を $t=0$ の時の生物量を M_0 として積分すると以下の解 (ロジスティック曲線) が得られる。

$$M = \frac{M_0 K}{M_0 + (K - M_0) \exp(-\mu t)} \quad (3)$$

ロジスティック曲線は、3つのパラメータ (比増殖速度 μ 、環境容量 K 、初期値 M_0) の値を定めることにより確定することが出来る。図-3 中には、観測された藻類量にロジスティック曲線を最小自乗法によりフィッティングした結果を実線で示している。このようにして得られたロジスティック曲線のパラメータを表-1 に示す。表より、生物増殖の活性を示す比増殖速度 μ 、最終的な生物量を示す環境容量 K とともに、冬季より夏季のほうが大きな値を示すことがわかる。

図-4 に異なる粒径のプレート上での付着藻類の増殖過程を示す。図より、藻類量および藻類の増殖過程については、粒径による系統的な違いは観察されなかった。このことから、砂河川における付着藻類の繁茂について、砂の移動が生じない場合には、河床粒径の違いによる増殖過程の違いは無いことが分かる。

3. 数値解析

本章では、実河床面上での付着藻類の増殖過程を明らかにするために、藻類増殖に関する数値解析モデルを構築し、観測対象域における一次生産量を推定するとともに、河川流量の変化が砂河川の付着藻類による一次生産量に与える影響を明らかにする。

(1) 数値計算モデル

a) モデルの概要

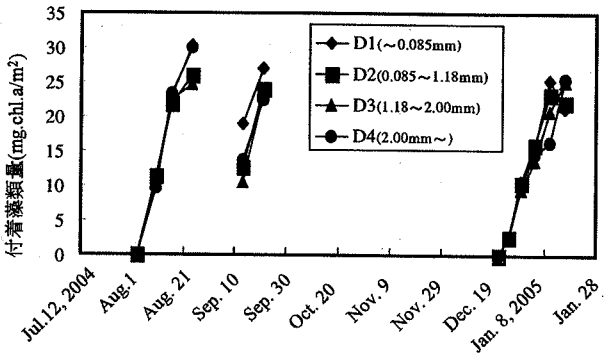


図-4 異なる粒径の砂面上での藻類の繁茂

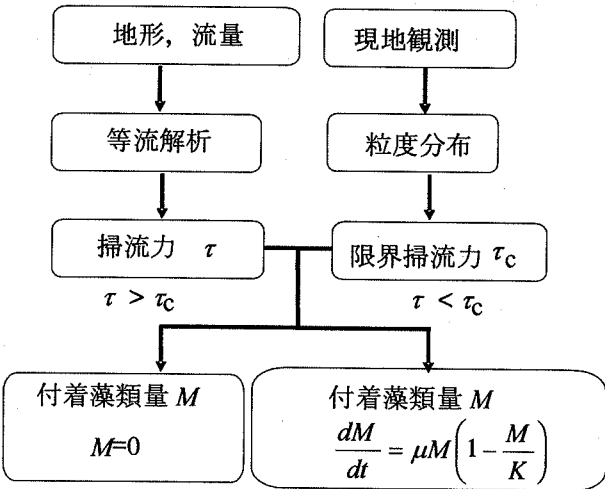


図-5 本数値解析のフローチャート

本数値計算のフローチャートを図-5 に示す。本数値解析では、まず河床材料の砂の移動頻度解析を行い、河床材料の砂が停止している期間を推定する。砂が停止している期間については、ロジスティック方程式 (式(1)) を用いて藻類の増殖解析を行い、砂が移動している期間については、藻類量を零とする。

b) 河床砂の移動頻度解析

河床砂の移動頻度解析は以下の手順で行った。まず、観測対象域の流量データ、横断地形に基づいて等流計算を行い、エネルギー勾配より解析対象断面の平均的なせん断力 (掃流力) τ を算定した。等流計算においては、Manning の粗度係数を $n=0.03$ と仮定した。一方、河床の表面の被覆状態に関して、現地河川の粒度分布 (図-1) を参考にして、 $d_{10}=0.45\text{mm}$ 、 $d_{30}=1.0\text{mm}$ 、 $d_{50}=1.5\text{mm}$ 、 $d_{70}=2.5\text{mm}$ 、 $d_{90}=4.5\text{mm}$ の5つの異なった粒径成分の砂がそれぞれ20%ずつ表面を被覆しているものと仮定し、それぞれの粒径の限界掃流力 τ_c を岩垣式⁴⁾より算定した。掃流力 τ と限界掃流力 τ_c を比較し、掃流力が大きい場合には、その粒径成分の砂は移動するものと判断して藻類量を零とし、掃流力が小さい場合には、以下の節で示す藻類の増殖解析を行い、各粒径成分河床上の藻類量を足し合わせて河床付着藻類量を算出した。

c) 藻類増殖過程の解析

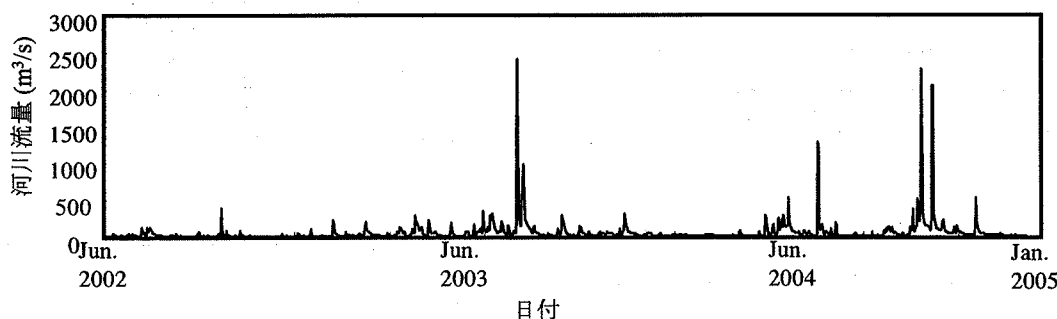


図-6 解析期間の河川流量

藻類増殖過程の解析の基礎式には式(1)で示されるロジスティック方程式を用いた。ロジスティック方程式のパラメータの中で、比増殖速度 μ と環境容量 K については、生息域の水温、水質等の環境条件によって変化することが予測される。比増殖速度は光合成による増殖の活性を表すものであることから⁵⁾、光合成活動に影響を及ぼす、水温、日射量、栄養塩濃度の影響を受けるものと考えられる。また、環境容量については、付着藻類の増殖可能な最大量を示すものであり、基本的には河床に供給される日射量に依存しているものと判断される。以上の考察に基づいて、比増殖速度と環境容量について以下の関数で表現できるものと仮定する。

$$\mu = \mu_{\max} f_T(T) f_I(I_b) f_N(N) \quad (4)$$

$$K = K_{\max} g_I(I_{b0}) \quad (5)$$

ここに、 $\mu_{\max}$ ：最大比増殖速度、 $K_{\max}$ ：最大環境容量、 f_T 、 f_I 、 f_N ：比増殖速度に対する水温、河床日射量、栄養塩濃度の影響関数、 g_I ：環境容量に対する晴天時河床面日射量の影響関数、 T ：水温、 I_b ：日平均河床面日射量、 N ：栄養塩濃度、 I_{b0} ：晴天時日平均河床面日射量である。

水温に関する影響関数については、付着藻類の光合成に対する最適水温を中心とした正規分布型の関数で表されるものとして⁶⁾、以下の式を用いることとする。

$$f_T(T) = \exp \left[\alpha_T \frac{(T - T_{opt})^2}{(T_C - T_{opt})^2} \right] \quad (6)$$

ここに T_{opt} ：光合成の最適水温、 α_T 、 T_C ：光合成速度の水温依存性に関するパラメータである。

日射に関する影響関数については以下のように設定した。まず河床面における日平均日射量は、水中へ投下した日射が Lambert-Beer の法則⁷⁾で減衰するものとして以下の式で与える。

$$I_b = (1 - \delta) I_s \exp(-\lambda h) \quad (7)$$

ここに、 I_s ：水面での日平均日射量、 δ ：水面での反射率（アルベド）、 λ ：水の吸光係数、 h ：水深である。水面での日平均日射量 I_s については、日照率 S/S_m をもちいて Angstrom の式⁸⁾より与える。

表-2 計算に用いたパラメータ

項目	値	文献
$\mu_{\max}$	1.1 (day ⁻¹)	実測データより算出
$K_{\max}$	38.4(mg.chl.a/m ²)	実測データより算出
T_{opt}	18 (°C)	野崎ら ¹¹⁾
α_T	-2.3	池田ら ⁶⁾
T_C	3(°C)	池田ら ⁶⁾
δ	0.05	仮定
λ	0.18(m ⁻¹)	仮定
I_c	5(MJm ⁻² day ⁻¹)	野崎ら ¹¹⁾
N_c	0.01(mg.N/l)	野崎ら ¹¹⁾

$$I_s = I_m \left(0.25 + 0.75 \frac{S}{S_m} \right) \quad (8)$$

ここに I_m ：日平均最大日射量、 S ：日照時間、 S_m ：可照時間であり、ブディコの資料⁹⁾をもとに次のように与える。

$$I_m = 9.7 \cdot \sin \left(2\pi \cdot \frac{t - t_0}{T_Y} \right) + 23.1 \quad (9)$$

ここに、 T_Y ：周期（ここでは365days）、 t_0 ：春分の日（day）を表す。可照時間の算定については以下の式で与える¹⁰⁾。

$$S_m = 2.37 \cdot \sin \left(2\pi \cdot \frac{t - t_0}{T_Y} \right) + 12.17 \quad (10)$$

晴天時の日平均河床面日射量については、式(8)中の S を S_m と等しいものとして I_s を算出し、それを式(7)に代入することにより求めた。日照時間 S については実測値を与えた。

これらの式より求められた日平均河床面日射量と晴天時日平均河床面日射量を用いて、比増殖速度および環境容量に対する日射の影響関数を Monod 型式で与えた。

$$f_I(I_b) = \frac{I_b}{I_c + I_b} \quad (11)$$

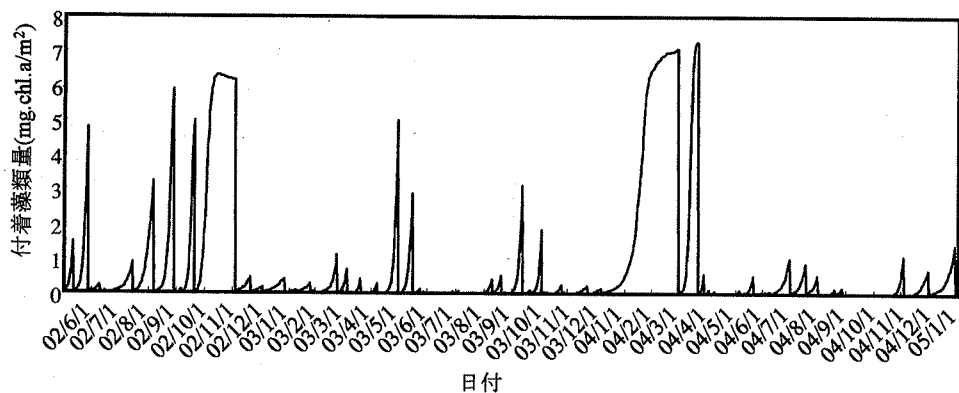


図-7 現況河川流量下での付着藻類の増殖

$$g_I(I_{b0}) = \frac{I_{b0}}{I_c + I_{b0}} \quad (12)$$

ここに I_c : 日射に関する半飽和定数である。

栄養塩に関する影響関数については、Monod 型関数の以下の式で与えることとした。

$$f_N(N) = \frac{N}{N_c + N} \quad (13)$$

ここに、 N_c : 栄養塩濃度に関する半飽和定数である。

d) 最大比増殖速度および最大環境容量の推定

現地観測を行った夏季と冬季の比増殖速度と環境容量(表-1)とそれぞれの観測期間での日射、水温、栄養塩濃度の値および既往の藻類生理に関するパラメータ値(表-2)を用いて、式(4)、(5)を用いて最大比増殖速度、最大環境容量を算出した結果、 $\mu_{\max}=1.05$ (day^{-1}) (夏季)、 $\mu_{\max}=1.19$ (day^{-1}) (冬季)、 $K_{\max}=38.2$ (mg.chl.a/m^2) (夏季)、 $K_{\max}=38.5$ (mg.chl.a/m^2) (冬季) となった。最大比増殖速度、最大環境容量ともに、両期間で大きく異なることから、本数値解析では、両者の値に夏季、冬季を平均した値として、 $\mu_{\max}=1.12$ (day^{-1})、 $K_{\max}=38.4$ (mg.chl.a/m^2) を用いることとする。

(2) 解析条件

本解析では年間スケールでの藻類繁茂状況と一次生産量を把握するために、2002年6月～2005年1月の2年半の期間の数値計算をおこなった。解析対象期間における河川流量の時系列変化を図-6に示す。藻類の増殖解析においては、藻類生理に関連するパラメータの値が必要となるが、それらについては既往の研究から表-2に示す値を与えた。

また、明治用水での取水量が付着藻類の繁茂に与える影響を明らかにするために、現況流量(明治用水で $30\text{m}^3/\text{s}$ の取水を行った後の流量)から $2.5\text{m}^3/\text{s}$ ずつ流量を増加させ、取水が行われなかった場合の流量(現況流量 + $30\text{m}^3/\text{s}$)までの数値実験を実施した。なお、取水量が変化した場合には、流量、水深の変化により、水温や水質

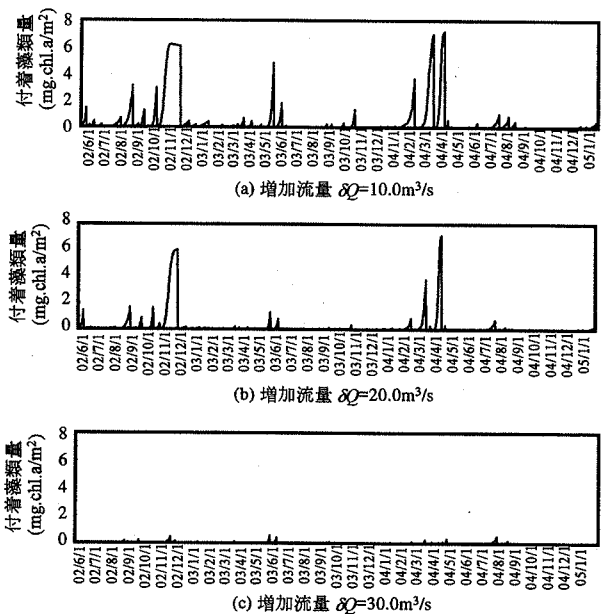


図-8 河川流量の変化に伴う付着藻類繁茂動態の変化

が変化することが予測されるが、本解析ではそれらは考慮されておらず、水温、水質については、現況流量下での計測値を用いている。

(3) 解析結果

a) 現況流量における付着藻類の増殖

図-7に現況の河川流量時の付着藻類の増殖解析結果を示す。解析対象とした2.5年間の期間で付着藻類量が 4.0mg.chl.a/m^2 を上回るような繁茂が7回程生じており、平均して年に2～3回程程度は藻類の大規模繁茂が生じることが予想される。一般に礫床河川に繁茂する付着藻類は、その現存量で数十 mg.chl.a/m^2 程度まで増加することが知られているが¹²⁾、それらの値と比べると砂河川での藻類現存量は小さいといえる。しかし、砂河川の場合は、河床材料の移動に伴ってそれらが容易に下流に流されるため、生産された生物量はそのまま河口域、海域といったつながる水域への有機物負荷となる。今後、これらの有機物負荷が河口域、海域の水域環境に与える影響を把握する必要がある、今後の課題である。

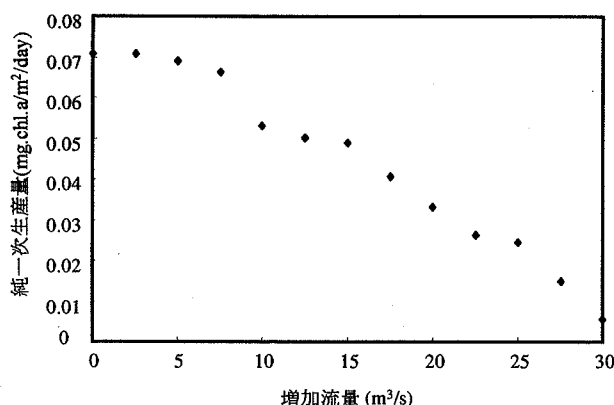


図-9 河川流量の変化に伴う藻類一次生産量の変化

b) 明治用水での取水量を制限した場合の藻類繁茂動態

明治用水での取水量を制限した場合を想定し、現況流量から流量を増加させた場合の付着藻類量の時系列変化を図-8に示す。現況流量より10.0m³/s 流量回復した場合においては、現況流量で2004年3月付近に見られた一連の藻類の増殖が、一度破壊され再生産されている。それよりも取水制限量が大きくなってくると、次第に藻類の大量繁茂が生じにくくなり、河床藻類の生産量が低下していくことが分かる。明治用水の取水を全く行わなかった場合には、解析期間のほぼ全域にわたり河床材料の移動が生じ、藻類一次生産は殆ど行われなくなる。

図-9に、現況流量からの増加流量に対する付着藻類の純生産量の変化を示す。図より付着藻類の一次生産量は流量の増加とともに減少するものの、増加流量が10m³/s 程度までは一次生産量はあまり低下せず、10m³/s 以上の流量増加だと生産量を効率的に低下させることが出来ることがわかる。これは、一定量以下の流量増加だと、2004年3月に見られたように、比較的発達した段階での藻類群落を破壊する頻度が上昇するため、効率的に生産量を下げることが出来ないことを示している。

4. 結論

本研究では、矢作川下流域を対象として、取水による平水時の流量低下に起因する砂河床上の付着藻類の繁茂動態について、現地観測と数値解析によって検討を行った。本研究より得られた主たる結論を以下に示す。

- 1) 浅い砂河川において、河床材料の移動が生じない場合には河床付着藻類の繁茂が生じる。
- 2) 砂床における付着藻類の増殖は、河床材料の移動が生じない場合においては、藻類付着基盤の粒径の影響を受けない。
- 3) 夏季の方が冬季と比較して、比増殖速度、環境容量ともに大きな値をとる。
- 4) 河床材料の移動頻度解析と藻類増殖解析を組み合わせた、砂河川における藻類一次生産予測モデルを構築

した。開発されたモデルを用いて、矢作川下流域での純一次生産量を推定した。

- 5) 明治用水の取水量を制限して河川流量を増加させた場合の藻類増殖に関する数値実験を実施し、一定量以上の流量増加を行わないと効率的に藻類一次生産量を低下させることが出来ないことが示された。

謝辞：本研究の実施に際して、国土交通省中部地方整備局豊橋河川事務所より、流量、地形のデータの提供を頂いた。また、本研究は日本学術振興会科学研究費補助金若手研究(B) (課題番号：15760376, 代表：戸田祐嗣) および河川環境管理財団河川整備基金 (助成番号：16-1-④-10, 代表：戸田祐嗣) の補助を受けたものである。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Vannote, R. L., Minshall, G. M., Cummins, K. W., Sidel, J. R. and Cushing, C. E.: The river continuum concept, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 37, pp.130-137, 1980.
- 2) SCOR/UNESCO: Determination of photosynthetic pigments in sea water, *Monograph of Oceanographic Methodology*, 1, pp.1-65, 1975.
- 3) 例えば、寺本英：数理生態学，朝倉書店，1997.
- 4) 岩垣雄一：限界掃流力に関する基礎的研修(I)限界掃流力の流体力学的研究，土木学会論文集，41，pp.1-21，1956.
- 5) 池田駿介，戸田祐嗣，赤松良久：瀬と淵の水質及び生物一次生産に関する現地観測，水工学論文集，43，pp.1037-1042，1999.
- 6) 池田駿介，戸田祐嗣，佐野貴之：現地観測に基づく瀬の水理と生物一次生産に関する研究，土木学会論文集，593，pp.93-104，1998.
- 7) 土木学会編：水理公式集(第1編-11章)，土木学会，1987.
- 8) 古藤田一雄：地表水－湖沼および人造湖－，水資源ハンドブック，朝倉書店，pp.92-123，1967.
- 9) ディブコ，M. I. (内島善兵衛訳)：地表面の熱収支，河川水温調査会，p.181，1959.
- 10) 田代喬，辻本哲郎：低攪乱礫床における付着藻類剥離効果の評価とそれに基づく繁茂動態モデルの構築，水工学論文集，48，pp.1537-1542，2004.
- 11) 野崎健太郎，神松幸弘，山本敏哉，後藤直成，三田村緒佐武：矢作川中流域における糸状緑藻 *Cladophora glomerata* の光合成活性，矢作川研究，7，pp.169-173，2003.
- 12) 戸田祐嗣，赤松良久，池田駿介：水理特性が付着藻類の一次生産特性に与える影響に関する研究，土木学会論文集，705，pp.161-174，2002.

(2005. 4. 7 受付)