

砂河川における付着藻類の 空間分布に関する研究

SPATIAL DISTRIBUTION OF ATTACHED ALGAE IN A SAND RIVER

戸田祐嗣¹・多田隈由紀²・辻本哲郎³

Yuji TODA, Yuki TADAKUMA and Tetsuro TSUJIMOTO

¹正会員 博(工) 名古屋大学大学院助教授 工学研究科(〒464-8603 名古屋市千種区不老町1)

²名古屋大学大学院 工学研究科(〒464-8603 名古屋市千種区不老町1)

³フェロー 工博 名古屋大学大学院教授 工学研究科(〒464-8603 名古屋市千種区不老町1)

While the growth of attached algae is usually observed on gravel bed river, the large growth of them is sometimes seen even in sand rivers if river discharge is considerably small enough to provide the favorable habitat for attached algae. In the present study, field observations and numerical simulations were performed to know the growth of attached algae in a sand river. In the field observations, the growth of attached algae on fixed sand bed was measured weekly to identify the physiological characteristics of attached algae on sand surface. An integrated numerical simulation model is presented to describe the growth of attached algae on sand river, and the model can roughly predict the spatial distribution of attached algae. A series of numerical tests of growth of attached algae was performed under the various discharge conditions, and the effects of river discharge on growth of attached algae were discussed.

Key Words : attached algae, sand river, growth model, mobility of bed material, river discharge

1. 序論

河川水中において付着藻類は主たる一次生産者であり、光合成活動を通して有機物を生産し、水生生物のエネルギー源として河川生態系を根幹から支えている。このような役割を果たす藻類の動態を明らかにすることは、河川生態系の中での物質・エネルギーの流れを把握することに繋がる。

一般に付着藻類の生育のためには、河床まで日射が到達し、藻類の生息場である河床材料が流れの中で安定している必要がある。そのために、浅い礫河川の河床においては、通常、付着藻類の繁茂が確認され、礫河川の藻類繁茂特性に関する研究が数多く行われてきた。しかし流域に農業地帯を有するなど、利水による取水の大きい砂河川においては、本来付着藻類の発達に適さない砂床上でも付着藻類の繁茂が確認される¹⁾。原因は、取水による河川の流量の減少、水深の低下、河床材料の移動頻度の減少が考えられる。本研究では利水による取水の大きい砂河川である矢作川において、現地観測を行ない付着藻類の分布状況を把握すると共に、流れの影響を考慮した藻類の増殖解析手法を提案し、砂面上の付着藻

類繁茂特性を明らかにすることを目的とする。また、開発した計算手法を用いて河川流量を変化させた場合の計算を行い、人為的な河川流量の操作が砂河川の藻類一次生産に与える影響を明らかにする。

2. 現地調査

(1) 観測地・観測期間概要

本研究の対象地は、愛知県を流れる矢作川の河口

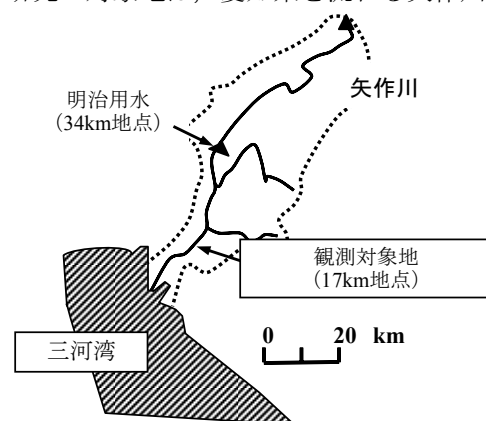


図-1 観測対象地

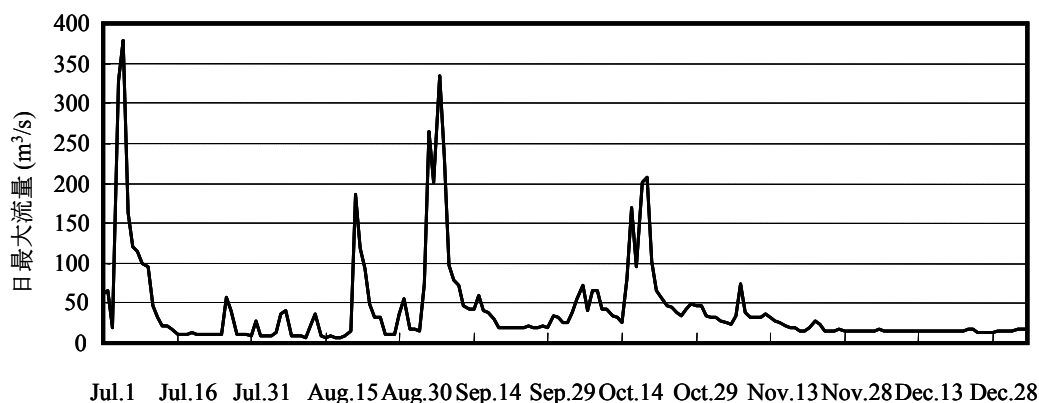


図-2 観測期間の河川流量

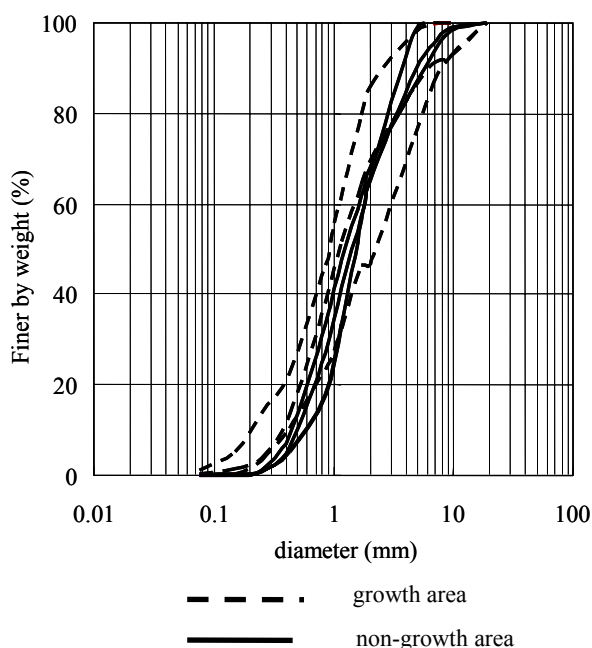


図-3 観測対象域の河床材料

より約17km地点付近である（図-1）。矢作川下流域には多くの農業地域があり、灌漑期にはこれらの農地への水を供給するため、河口より約34.6kmに位置する明治用水から常時30m³/sの河川水を取水している。この取水により、矢作川下流域では平水時の河川流量が低下しており、概ね20～30m³/sの範囲で変動している。図-2に2005年7月から同12月までの6ヶ月間の日最大流量の変化を示す。観測対象域の平水時の流量はおおよそ23m³/sである。観測期前半の夏季から10月後半にかけては台風や秋雨前線の通過により流量が増加しているが、観測期後半の11月以降については、流量の変動が小さく、安定した流況がつづいていたことが分かる。

(2) 観測の概要

観測は2005年7月から同12月の間に月一度の頻度で行なった。現地観測では藻類の空間分布を把握するため、現地踏査時に目視により判断される河床付着藻類の植被エリアの境界線をGPSによって記録し

た。また、上記の期間中の付着藻類群の生理特性を把握するために、河床に藻類付着用プレートを設置し、藻類の増殖実験を行った。まず対象リーチ河道内の河床材料を持ち帰り乾燥させ、ふるい分け試験により粒度分布を求めた。その結果より、試料の大部分を占めるのは粒径が0.425mm～4.75mmのものであった。そこで粒径が0.425mm～4.75mmの混合試料をボンドで貼り付けた藻類付着用プレートを大量に作成した。一つのプレートの大きさは7cm×7cmである。これらのプレートをやぐらに固定し、河川水中に設置し、第1回7/16～9/21、第2回9/15～11/10、第3回10/31～12/12の期間で増殖実験を行った。やぐらの設置高さについては、低流量時に冠出せず、高流量時（増水時）に土砂に埋没しないよう、河床面から10～20cm程度上方に藻類付着用プレートの面が来るように設置した。それぞれの回について、2週間に1度程度の頻度で3枚のプレートを取り出し、プレート表面に付着した藻類を歯ブラシで剥がし取った。SCOR-UNESCO法²⁾にて、採集した試料のクロロフィルa量（Chl.a）を測定した。

(3) 観測結果

a) 付着藻類の繁茂域と非繁茂域の粒度分布

付着藻類の繁茂域および非繁茂域の河床材料を採取しふるい分け試験を行い、それぞれ平均粒径を求めた（図-3）。両者の間には特に系統的な差異は見られなかった。このことから本観測対象地においては、藻類の繁茂域・非繁茂域での粒径は同程度であり、粒径の空間的な変化は小さいものと判断される。

b) Chl.a量の変化

固定砂面上のChl.a量の時間変化を図-4に示す。これらのグラフに、後述する式(1)で示すロジスティック方程式をフィッティングし、藻類生長のパラメータである比増殖速度と環境容量を求めた結果を表-1に示す。本増殖実験では、夏季（第1回目）の実験時に藻類量のばらつきが大きい。また、ロジスティック曲線を用いて藻類の増殖特性を検討した既往の研究³⁾では、8～10回程度以上の藻類量の計測結果からパラメータを同定しているのに対して、本研究では、一つの実験期間中に3～4回ほどしか藻類

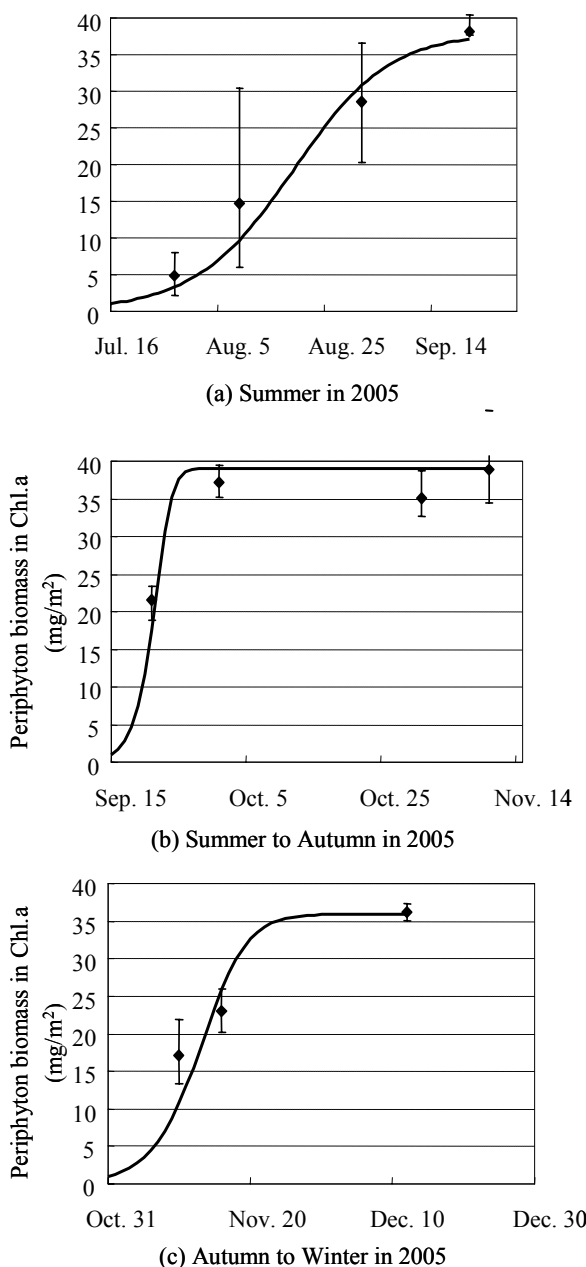


図-4 固定砂面上での藻類の増殖

量の計測を行えなかった。そのため、比増殖速度や環境容量の値そのものを詳細に議論するには、精度面での検証が不十分であり、更なるデータの蓄積が必要であるが、大局的には以下のような特徴が見られた。

砂面上の藻類量については、観測期間によって差は見られるが、3～8週間で35～40mg/m² (chl.a量) まで到達することが観察できる。これらの藻類量は、礫床河川の河床礫表面で観測される生物量（例えば多摩川中流域礫床区間での藻類量で20～50mg/m² (chl.a量)⁴⁾ に匹敵し、砂の移動がなければ砂河床面上においても礫河川と同程度の付着藻類の繁茂が生じることが分る。

増殖速度について、3回の実験結果を比較すると、

表-1 ロジスティック曲線のフィッティングにより得られた藻類増殖に関するパラメータ

	μ (day ⁻¹)	K (mg/m ²)
Jul. to Aug.	0.11	38
Sep. to Nov.	0.70	39
Nov. to Dec.	0.33	36

1回目より2, 3回目の実験で増殖率が大きいことが分かる。特に2回目においては増殖速度が極めて大きい。増殖速度の値そのものについては、前述の通り、データ数やばらつきの問題から現時点では詳細な議論が出来る精度ではないが、少なくとも、第2回目の実験期間にはプレート設置から2週間ほどで37mg/m²程度の藻類量まで増殖が進み、最も増殖活性が高かったものと判断される。

第1回目の実験時期に相当する7, 8月は平均水温がほかの月に比べて高く、日射量も大きい。通常、藻類の生長は日射量の増大とともに大きくなるが、夏季の晴天時のような強い日射の下では光合成速度が低下する（強光阻害）ことが知られている。強光阻害を生じさせる照度は、藻類種、水温、栄養塩濃度に依存するが、200～300W/m²を超える強光下で報告されている事例が多い⁵⁾。観測対象地では平水流量時の水深は1m以下で河川水の濁度も小さい。河川水の吸光係数の計測は行っていないが、仮に水深1mの河川に対して、純水の吸光係数0.28を用いて河床への日射量を算出すると、水中に透過した日射の75%程度は河床へ到達する。夏季の日中平均日射量は300～400W/m²に到達するため⁶⁾、第1回目の実験期間時の日中には、河床へ220～300W/m²程度の日射が到達していたものと推察され、その結果として、第1回目の実験期には強光阻害によって増殖が低下した可能性が示唆される。その後、秋季の第2回目実験期に入り水温・日射が少し低下すると、増殖率が増加しているが、冬季の第3回目実験期になると、光量、水温の低下により活性が小さくなったものと思われる。

なお、藻類の増殖実験期間中には100m³/sを超える出水が3回生じており、流れの掃流力の変化によって付着藻類の剥離が生じた可能性がある。しかし、現地観測では出水の直前・直後の藻類量を計測できなかったため、その効果を抽出するには至っていない。今後の課題である。

3. 数値解析

(1) 数値解析モデルの概要

現地観測の結果、砂河床表面においても、砂の移動が生じなければ藻類が繁茂することが確認された。

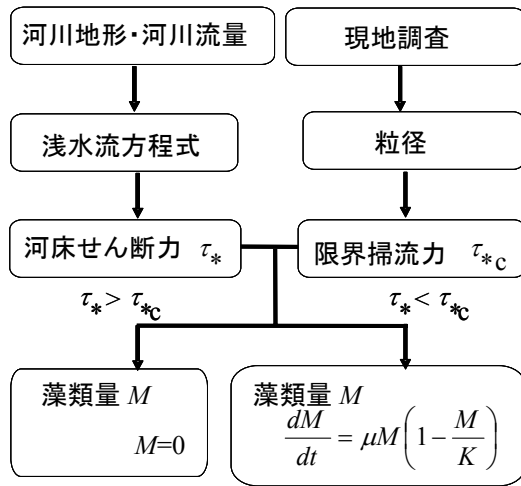


図-5 本解析のフローチャート

このことから、河床の砂が移動しない場所・期間を流れ場の解析から推定し、その期間について藻類の増殖解析を行うことによって、実際の砂河川での藻類繁殖量・藻類分布が予測できることが期待される。本研究では、一般曲線座標系による非定常2次元流れ場の解析⁷⁾に、付着藻類動態を組み込んだモデルを構築した。本解析のフローチャートを図-5に示す。

まず、観測対象河川の流量、地形データを用いた浅水流方程式の数値解析を行い、河床せん断力の平面分布を算出する。一方、現地河川での河床砂に対してから、岩垣式より限界掃流力を求めた。もし、河床のせん断力が限界掃流力より大きい場合は、河床の砂が移動状態と判断されるため、その場所の藻類量を0とし、逆に、河床せん断力が限界掃流力以下の場合は、以下に示すロジスティック方程式により、藻類の増殖解析を行う。

(2) 藻類の増殖解析

藻類の増殖は以下のロジスティック方程式に従うものとする：

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

ここに、 μ ：比増殖速度 (day^{-1})、 K ：環境容量 (mg/m^2)、 M ：付着藻類の現存量 (mg/m^2) である。ここで比増殖速度、環境容量について、藻類増殖に関わる環境因子との相関関係を検討する。まず、比増殖速度は光合成による一次生産力を表すものであり、光合成活性と同様に、水温、日射、栄養塩濃度の影響を受けるものと考えられる。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は以下の関数で表されるものとした。

$$\mu = \mu_{\max} \cdot f_T(T) \cdot f_I(I_b) \cdot f_N(N) \quad (2)$$

$$K = K_{\max} \cdot g_I(I_{b0}) \quad (3)$$

ここに、 f_T 、 f_I 、 f_N ：比増殖速度に関する水温、

河床日射量、栄養塩濃度の影響関数、 g_I ：環境容量に関する晴天時河床面日射量の影響関数、 T ：水温 ($^{\circ}\text{C}$)、 I_b ：日平均河床面日射量 ($\text{MJm}^{-2}\text{day}^{-1}$)、 N ：栄養塩濃度 (mg)、 I_{b0} ：晴天時日平均河床面日射量 ($\text{MJm}^{-2}\text{day}^{-1}$) である。 f 、 g といった影響関数はそれぞれ0～1の値を取るものとする。それぞれの影響関数については、以下の式で与えた。

a) 水温に関する影響関数

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、以下の式で表すこととする。

$$f_T(T) = \exp \left[\alpha_T \frac{(T - T_{\text{opt}})^2}{(T_c - T_{\text{opt}})^2} \right] \quad (4)$$

ここに、 T_{opt} ：光合成の最適水温 ($^{\circ}\text{C}$)、 α_T 、 T_c ：光合成速度の水温依存性に関するパラメータ (α_T ：無次元、 T_c ： $^{\circ}\text{C}$) である。光合成の最適水温に関しては、矢作川中流域における付着藻類の光合成活性に関する野崎ら⁸⁾の研究成果から最適水温を $T_{\text{opt}} = 18(^{\circ}\text{C})$ と設定した。 α_T 、 T_c に関しては池田ら⁹⁾による藻類一次生産速度の解析事例を参考に $\alpha_T = -2.3$ 、 $T_c = 3(^{\circ}\text{C})$ と設定した。

b) 日射量に関する影響関数

最大比増殖速度、最大環境容量に関する影響関数として日射依存関数を以下の式で算定する。

$$f_I(I_b) = \frac{I_b}{I_c + I_b} \quad (5)$$

$$g_I(I_{b0}) = \frac{I_{b0}}{I_c + I_{b0}} \quad (6)$$

ここに、 I_c ：日射に関する半飽和定数で、田代¹⁰⁾に基づいて $I_c = 5(\text{MJm}^{-2}\text{day}^{-1})$ とした。

c) 栄養塩に関する影響関数

ここでの栄養塩はリンを対象とし解析を実施することとし、以下の式(7)で表すことが出来る。また、このときの N_c に関しては野崎ら⁸⁾により $N_c = 0.01 \text{ mg/l}$ とした。

$$f_N(N) = \frac{N}{N_c + N} \quad (7)$$

d) 最大比増殖速度と最大環境容量の推定

式(2)から式(7)を用いて3回の増殖実験時の $\mu_{\max}$ 、 $K_{\max}$ を算出し、その平均値 $\mu_{\max} = 0.99 \text{ day}^{-1}$ 、 $K_{\max} = 48.6 \text{ mg}/\text{m}^2$ を以降の解析に用いる。

(3) 計算条件

計算対象区間は矢作川17km地点のリーチ(16.8km～17.6km)である。初期地形としては、国土交通省が2000年に横断地形測量を200m間隔で行った地形データとそれを補間するように現地測量したデータより作成した。計算格子は流下方向グリッド数が20、横断方向グリッド数は22とした。またManningの粗

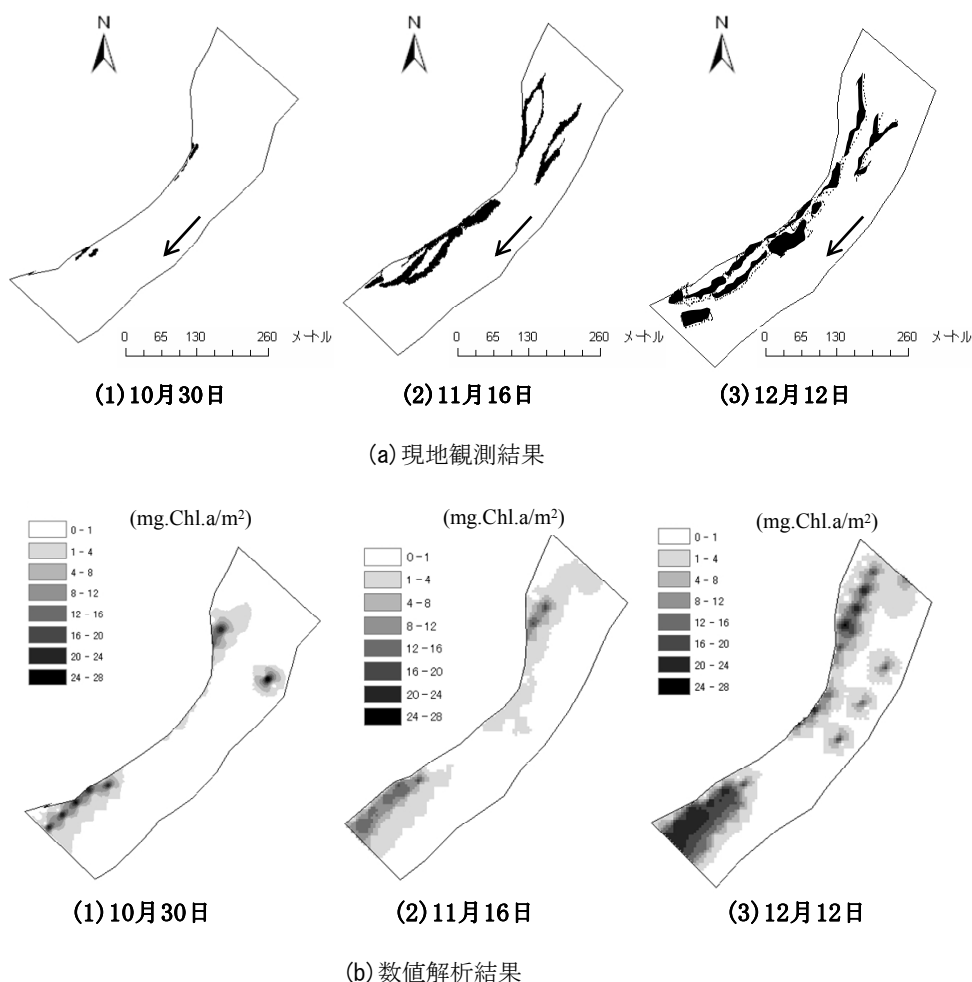


図-6 河床付着藻類の分布

度係数を0.032とした。計算区間平均での河床勾配は約1/1500である。また、河床材料の平均粒径は繁茂域と非繁茂域には差異がないと確認されたので、図-3の粒度分布から対象区間で一様に $d_{50}=1.0\text{mm}$ と与えた。水位に関しては、下流4kmに位置する木戸観測所と上流7.5kmに位置する岡崎観測所における水位データから、計算対象区間の下流端である16.8km地点での水位より算出した。この際、木津観測所から岡崎観測所までの水位が線形的に変化するとして、16.8km地点の水位を算出している。また、流量は $H-Q$ 式($H[\text{m}+\text{T.P.}]$, $Q[\text{m}^3/\text{s}]$)を用いて木戸観測所での流量を算出した。対象区間と木戸観測所の間には支川の流入はなく、観測所の流量はほぼ対象区間の流量と等しいものと判断される。

水温、栄養塩濃度については国土交通省管理の水文水質データベースから計算対象区域(17km地点)に最も近い観測所である米津水質自動観測所(10km地点)のデータを取得し、使用した。また日照時間については気象庁電子閲覧室から、対象地に一番近い岡崎地域気象観測所のデータを取得し、使用した。

前述のとおり矢作川下流域は、明治用水の取水による影響で流量、水深の低下、河床材料の移動頻度の低下が生じているものと考えられる。そこで仮に

取水量を制限したケースを想定して、9～12月の4ヶ月間での付着藻類生産量を計算した。流量以外の条件は一定に保ったままで、現況流量から $5\text{m}^3/\text{s}$ 、 $15\text{m}^3/\text{s}$ 、 $20\text{m}^3/\text{s}$ 、 $30\text{m}^3/\text{s}$ ずつ流量を増加させた4つの場合について計算した。解析方法については前節までで用いた手法と同一のものである。

(4) 現地観測の結果と計算結果の比較

現地観測により得られた付着藻類の繁茂状況と、計算による付着藻類の空間分布の比較を図-6に示す。現地観測結果と計算結果を比較すると、どちらも水深の低い右岸部分に藻類の繁茂域が集中していることがわかる。また三回の現地観測結果から、観測対象地では、10月中旬の出水後から安定した流量の期間が続いたため、藻類繁茂域が拡大していることが分かる。計算結果においてもその拡大の様子は再現されている。しかし、計算で予測される藻類繁茂域は現地観測での繁茂域より広く予測されており、また、現地観測で見られるような繁茂域の複雑な形状を再現出来ていないことが分かる。これは、計算格子や入力地形の解像度の問題等が考えられ、今後の課題ではあるものの、単純なアルゴリズムによる本解析によって砂河川の藻類繁茂の大局的な特徴は再現できるものと判断される。

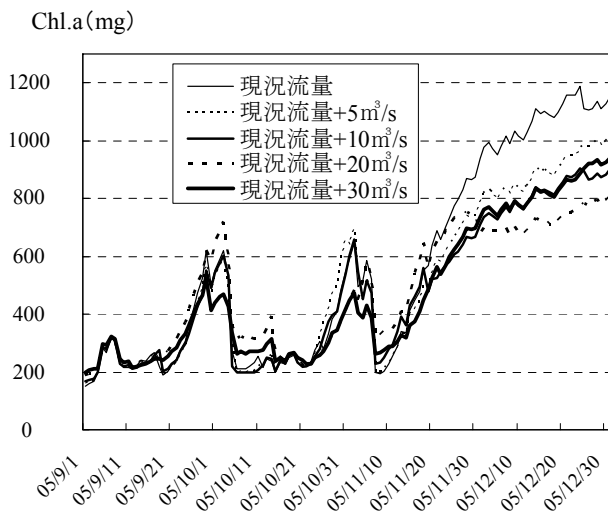


図-7 対象区間全域における付着藻類量の推移

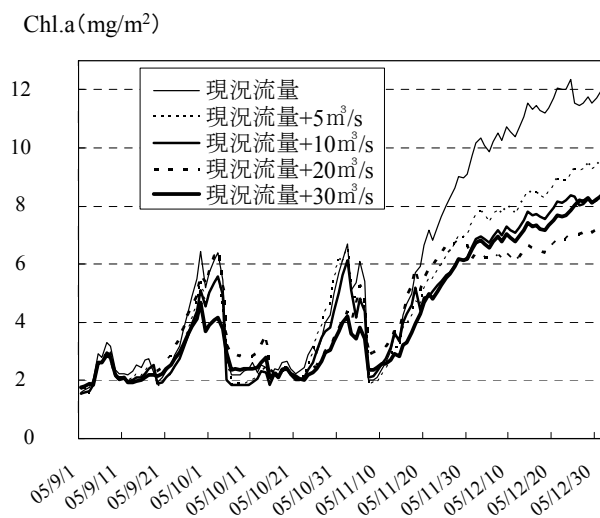


図-8 単位面積当たりの付着藻類量の推移

(5) 流量を変化させた場合の付着藻類量

現況流量から流量を増加させて計算した場合の対象区間全域での藻類の生産量を図-7に示した。また全藻類量を平均流路面積で除した単位面積当たりの藻類量を図-8に示した。この流路面積は、計算した4ヶ月間の各流量での平均流量について、河道内の冠水部分の面積を算出したものである。図-7の全区間での藻類総量については、現況流量から流量を増加させても、単純に藻類量が減る訳ではないものの、11月中旬から始まる流量安定期の大規模な増殖は若干抑制されることが分かる。図-8より、単位面積当たりの藻類量については、現況流量から流量を増加させることによって減少する傾向にあることが分かる。これらのことから、全期間を通じて流量を単純に一定量増加させると、それぞれの平均的な流量に対応して低水深の水際部分が形成され、そこで付着藻類の繁茂が生じるため、河道全体での藻類量は流量の単純増加ではあまり変化しないが、流量が大きい場合には滞筋等の藻類が繁茂していない領域が水域面積の中で相対的に増えるため、それを平均し

た河床単位面積あたりの藻類量は低下することが分かる。逆に河川全域での藻類量を効率的に減らそうとする場合には、一定の期間、安定して低水深であるような場所を作らないよう、流量変動を大きくすることが有効であると思われる。

4. 結論

本研究より得られた主たる結論を以下に述べる。

- 1) 砂河川における付着藻類の繁茂量については、川岸付近や低水深部分で大きくなる傾向があり、水深、掃流力の水理特性と関係している。
- 2) 砂河川における藻類空間分布予測モデルを提案した。本モデルにより付着藻類分布を予測した結果と現地観測により得られた付着藻類の空間分布とを比較したところ、概ね一致した。
- 3) 流量を変化させた場合の計算結果から、効率的に付着藻類を減少させる場合には、出水時に限って現況流量から一定量を増加させると有効であると考えられる。

参考文献

- 1) 戸田祐嗣, 辻本哲郎, 池田拓朗, 多田隈由紀: 砂河川における付着藻類の繁茂とそれによる水質変化, 河川技術論文集, 第12巻, pp.25-30, 2006.
- 2) SCOR/UNESCO: Determination of photosynthetic pigments in sea water, *Monograph of Oceanographic Methodology*, 1, 1-65, 1975.
- 3) 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, pp.1037-1042, 1999.
- 4) 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, Vol.705, pp.161-174, 2002.
- 5) Stevenson, R. J., Bothwell, M. L., and Lowe, R. L.: *Algal ecology* -5. Effects of light -, Academic Press, pp.121-148, 1996.
- 6) 国立天文台編: 理科年表, 丸善, 1997.
- 7) 長田信寿: 一般座標による河川流の計算, 水理公式集例題プログラム集, 例題2-8, 2001.
- 8) 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藻類 *Cladophora glomerata* の光合成活性, 矢作川研究No.7, pp.169-176, 2003.
- 9) 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, Vol.593, pp.93-104, 1998.
- 10) 田代喬: ダム下流河道における河床の低撓乱化に着目した水域生態系評価に関する研究, 名古屋大学学位論文, pp.83-113, 2004.

(2006. 9. 30受付)