

# 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

## EVALUATION OF DETACHMENT EFFECT OF ATTACHED ALGAE IN GRAVEL BED RIVER WITH LESS DISTURBANCE AND ITS APPLICATION TO THE ALGAL GROWTH-DETACHMENT DYNAMICS MODELING

田代 喬<sup>1</sup>・辻本哲郎<sup>2</sup>

Takashi TASHIRO, Tetsuro TSUJIMOTO

<sup>1</sup> 学生会員 工修 名古屋大学大学院博士(後期)課程学生 工学研究科地圏環境工学専攻  
(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

<sup>2</sup> 正会員 工博 名古屋大学大学院教授 工学研究科地圏環境工学専攻

It is important to grasp dynamic process of growing attached algae because it provides food resources to the other aquatic organisms, from the viewpoint of river ecosystem conservation.

In this paper, we discuss on the application of logistic equation to evaluate the change of algal biomass. Firstly, the vertical distribution of saltating sand particles around cobbles is considered to estimate the effective detachment rate of algae in a river of which bed is composed of sands and cobbles, adequately. And then, by making use of the algal physiological data in the previous studies and the climate data at the research site, the growth-detachment dynamics model of algae is properly adjusted. The simulation is applied to the prediction of the algal biomass fluctuation in the middle reach of Yahagi River that is a typical gravel river with less disturbance.

**Key Words :** Attached algae, less disturbance, bed-load transport, growth-detachment dynamics

### 1. はじめに

河床に生育する付着藻類は、魚類・底生動物の餌資源として重要であるが、近年、ダム下流などの攪乱機会の減少した河道(低攪乱礫床)において、時に異常繁茂の傾向を示す例が見られる。この異常繁茂を構成するのは、主にカワシオグサ(*Cladophora glomerata*)などの大型糸状藻類であり、河川空間における景観面の悪化だけでなく、餌資源の質的变化を伴うことによってアユ(*Plecoglossus altivelis*)の成長を阻害する<sup>1)</sup>など、生態系へ及ぼす影響も甚大であるため、こうした状況の早急な改善が求められている。このような付着藻類の異常繁茂を制御していくためには、生育状況を左右する様々な物理・化学・生物的要因を整理した上で、これらによる影響を考慮できる繁茂動態の評価・予測手法の構築が必要である。

既往の研究では、個体群動態モデルなどの数理モデルを用いた検討がなされており、主に物質収支に着目した水域生態系モデル<sup>2)</sup>を援用した例<sup>3)~5)</sup>が多い。これらは、藻類の生育形態に着目することによって種間競争を議論できる<sup>6)~9)</sup>レベルにまで発展させられてきた。しかしながら、室内水路における定常な流れの下での藻類の繁茂

状況の再現に留まっているために、増殖・代謝に関する記述に汎用性が見られる一方で、実河道への適用を考えた場合には、物理的剥離に関する記述は不十分であったことは否めない。

一方、この付着藻類の物理的剥離について、最近では、実験水路における検討とその理論的解析から、掃流砂礫の運動と関連付けられる<sup>9)~9)</sup>。著者らは、この掃流砂礫による剥離効果を組み込んだロジスティック方程式を用いて、まずは、藻類の植被(面積)率を対象として<sup>9)~10)</sup>、次いで、単位面積当たりの強熱減量を対象として<sup>11)</sup>、付着藻類の繁茂動態モデルの構築を試みてきた。これらによって、あるリーチ内において時間的・場所的に変動する物理環境条件に応じた繁茂動態を議論できる素地は整ってきた。しかし、平坦河床において理論展開されてきた剥離モデル<sup>9)~9)</sup>を実際の河床に適用すると、剥離効果が過大に評価される<sup>9)~11)</sup>ために、再現性の定量的な議論のレベルまでには至っていない<sup>11)</sup>。また、増殖に関する記述についても、実際の観測結果と物理量との関係に基づいており、汎用性という点でも不十分であった。

本研究では、時に異常繁茂の状態を呈する、低攪乱な状況下における付着藻類の繁茂動態の解明を目的に、特に剥離効果の適正な評価について検討した上で、付着藻類の増殖・剥離過程に関するモデル化を行い、矢作川中

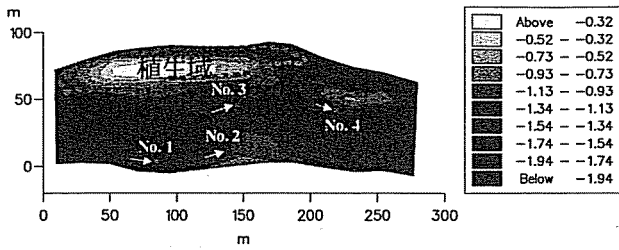


図-1 対象区間における河床高コンター図(矢印は流向)

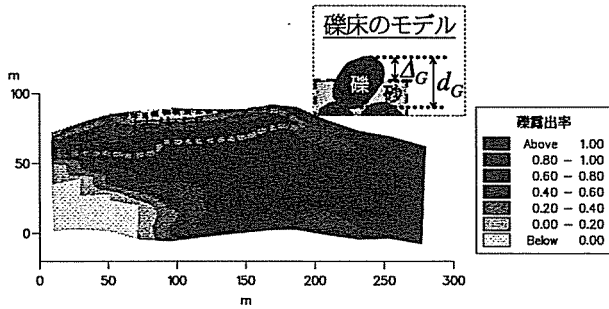


図-2 対象区間における礫露出率コンター図

流を対象として本手法の適用性について検討する。

## 2. 矢作川中流における付着藻類の繁茂動態<sup>12)</sup>

矢作川は長野県大川入山(標高 1,980 m)を水源に発し、長野、岐阜、愛知の3県を流れ三河湾にそそぐ、幹線流路延長 117 km、流域面積は 1,830 km<sup>2</sup>の1級河川である。かつては典型的な砂河川であったが、砂利採取、砂防整備、ダム建設などの人的インパクトにより、中流部では近年、河床低下を伴ったアーマー化が進み、河床攪乱頻度も急激に減少してきた<sup>7)</sup>。現在の低攪乱な状況下では、しばしば、カワシオグサを始めとする付着藻類の異常繁茂が問題になっている。

調査対象区間は、42 km地点付近のリーチで、砂州と瀬・淵構造によって特徴付けられる矢作川中流域の典型的な区間である。河床材料(底質)は、主として1 cm以下の砂集団と礫層を構成する粒径5~20 cm集団により構成されている<sup>11)</sup>ことから、礫径を $d_G$ とし、礫頂部の高さ $\Delta_G$ として定義される礫の露出率( $\Delta_G/d_G=0.0\sim 1.0$ )に着目した。図-1には河床高コンター図を、図-2には礫露出率コンター図を示す。

付着藻類の増殖過程については、図-1中のコドラートを対象として調査した。各コドラートは1m×1mの大きさで、瀬・淵構造の変化に伴う物理環境の違いを代表するように、それぞれ、No.1:淵、No.2:平瀬、No.3:平瀬~早瀬、No.4:早瀬に設定した。調査は2002年7月23日( $t=0$  d)から2003年1月15日( $t=176$  d)まで、月2回の頻度で実施した。付着藻類サンプルは、コドラート内の繁茂を代表する礫を2個選択し、各礫面上の10 cm×10 cm領域内を全量採取することにより得た。ここでは、強熱減量結果について、各コドラート(No.1~4)における平均値の時間変化を図-3に示す。強熱減量の測定

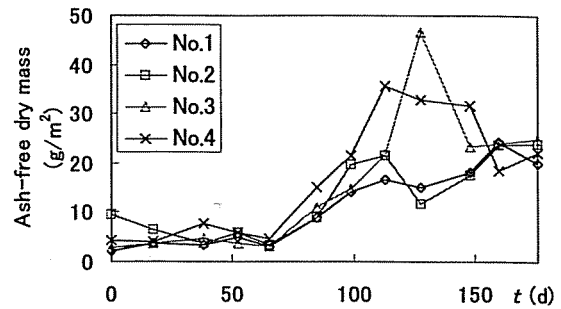


図-3 各コドラートにおける強熱減量の時間変化

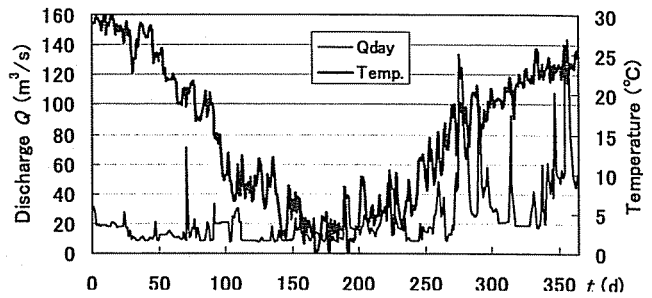


図-4 調査期間中の日平均流量と日平均気温の変化

は下水試験法<sup>12)</sup>に従って行った。既往の調査<sup>13),14)</sup>との比較から、本調査結果は、平常流量時における典型的な増殖過程を示していると推測される<sup>11)</sup>。なお、図-4には、調査期間を含む1年間の日平均流量と日平均気温の変化<sup>15)</sup>を示す。

## 3. 低攪乱礫床における付着藻類の剥離効果

著者ら<sup>7)</sup>は、河床攪乱作用を、①河床を構成する礫が動くことによるもの、②河床は動かないが、比較的細かい粒径の掃流砂が河床の礫に与える衝撃によるものと区別しているが、低攪乱礫床において期待される攪乱は、②のタイプとなる。露出した礫間を砂が移動する場合、掃流砂が礫に生じた藻類を剥離させるには、その生育基盤たる礫に達するほどに跳躍する必要がある。つまり、剥離に貢献する掃流砂量は実際の掃流砂量の一部に過ぎない。そこで、本章ではサルテーション粒子の鉛直方向分布を考慮して、礫床条件下における藻類剥離率を評価することとした。

### (1) 藻類剥離に寄与する掃流砂量

藻類剥離に寄与する有効掃流砂量 $q_{Be}$ について、ここではサルテーション粒子の鉛直方向 $y$ の存在確率密度分布 $f(y)$ を用いて、以下のように見積もることとした。

$$q_{Be} = P \cdot q_B, \quad P = \int_{\alpha \Delta_G}^h f(y) dy \quad (1)$$

ここに、 $P$ :剥離に寄与できる高さ( $\alpha \Delta_G$ )以上に跳躍する砂礫の存在確率、 $\alpha$ :定数(ここでは1.0と仮定)、 $\Delta_G$ :礫露出高、 $q_B$ :掃流砂量である。 $f(y)$ の算定には、辻本・

中川の手法<sup>16)</sup>を援用し、吉川・山田のモデル<sup>17)</sup>を変形、標準化して得られる次式を用いた。

$$f_*(\xi) = K_0(\xi) / \int_0^{\infty} K_0(\xi) d\xi$$

$$K_0(\xi) = \exp\left\{-\frac{(\xi-1)^2}{2\alpha_y^2}\right\} + \exp\left\{-\frac{(\xi+1)^2}{2\alpha_y^2}\right\} \quad (2)$$

ここに、 $f_*(\xi)$ : 標準化された確率密度関数 (図-5 参照),  $\xi \equiv y/E[y]$ ,  $\alpha_y \equiv \sqrt{\text{Var}[y]}/E[y]$ ,  $E[y]$ : サルテーション粒子の平均存在高さ,  $\text{Var}[y]$ : 存在高さの分散である。 $E[y]$ ,  $\text{Var}[y]$ は辻本・中川の数值模擬の結果<sup>16)</sup>より、次式で与えた。

$$E[y] = \{A_3(\sigma/\rho + C_M)/(A_2 C_D) \cdot \tau_{*e}^{0.7} + 0.5\} d_s \quad (3)$$

$$\sqrt{\text{Var}[y]}/E[y] = 0.65$$

ここに、 $A_2$ : 2次元形状係数 ( $\pi/4$ ),  $A_3$ : 3次元形状係数 ( $\pi/6$ ),  $\rho$ : 水の密度,  $\sigma$ : 砂の密度,  $C_M$ : 付加質量係数 (0.5),  $C_D$ : 抗力係数 (0.4),  $\tau_{*e}$ : 砂面上の無次元有効掃流力である。図-5に、標準化されたサルテーション粒子の鉛直方向確率密度分布<sup>16)</sup>を示す。

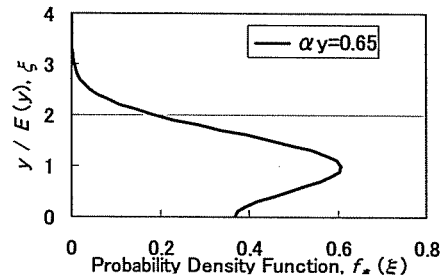


図-5 Saltation 粒子の鉛直方向分布

### (2) 礫床上の掃流砂量の見積もり<sup>7,9,10)</sup>

礫床は、図-2のように、粒径 $d_G$ の礫の間隙を粒径 $d_s$ の砂が埋めて構成されていると考える。河床の等価砂粒度 $k_s$ を $\Delta_G$ と $d_s$ との和で表されるものとする、単位幅流量 $q$ とエネルギー勾配 $I_e$ が与えられれば、水深 $h$ (等流水深)は、重力加速度 $g$ を用いて次式で求められる。

$$h = \left\{ (\Delta_G + d_s)^{1/3} q^2 / (7.66^2 g I_e) \right\}^{3/10} \quad (4)$$

また、砂面は突出した礫により遮蔽されるため、芦田・藤田<sup>18)</sup>に倣った遮蔽係数 $\kappa$ (式(5)参照)を導入すれば、砂面上の有効無次元掃流力 $\tau_{*e}$ は次のように書ける。

$$\tau_{*e} = \kappa^2 h I_e / \{(\sigma/\rho - 1) d_s\}$$

$$\kappa^2 = 1 - \Delta_G / d_G \quad (5)$$

このようにして見積もられた $\tau_{*e}$ を、芦田・道上式<sup>19)</sup>に適用し、礫床における流砂量を評価する。

### (3) 礫床における付着藻類剥離率の評価

掃流砂の衝撃による藻類剥離モデルに関しては、サルテーション粒子の衝撃力でカワシオグサが剥離する過程を扱った著者ら<sup>9)</sup>の实验結果およびモデルを採用した。すなわち、サルテーション運動する砂が礫に衝突する際、礫面になす単位面積・単位時間あたりの仕事量を $W_x$ とすれば、次のように書ける。

$$p = (24 \times 3600) \alpha W_x \quad (d^{-1}) \quad (6)$$

ここで、 $\alpha$ : カワシオグサの剥離抵抗を表す係数であり、長さ3cm程度のカワシオグサについては、 $\alpha = 1.23 \times 10^4 N^1 m$ が適当であった<sup>9)</sup>。なお、 $W_x$ については、石橋

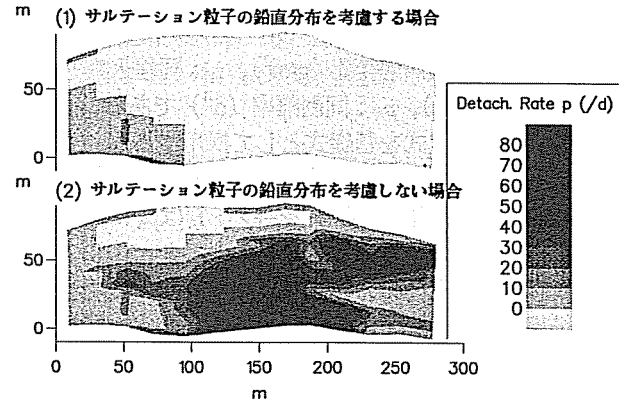


図-6 対象区間における新・旧剥離率分布の比較

<sup>20)</sup>による滑面上でのサルテーション運動解析をもとに、藻類剥離に寄与する有効掃流砂量 $q_{Be}$ 、礫間砂面上の摩擦速度 $u_{*e}$ を用いて次のように書ける。

$$W_x = \gamma q_{Be} d_s^{1/3} u_{*e}^{2/3} \quad (7)$$

ここで、 $\gamma$ : 礫の材料特性に関わる係数であり、 $4.94 \times 10^5 Nm^4 s^{2/3}$ が適当とされた<sup>20)</sup>。

対象区間における剥離率の空間分布を図-6に示した。ここでは、対象期間中の出水規模(図-4参照)に当たる $150 m^3/s$ を流入条件とする算定結果を示す。図より、サルテーション粒子の鉛直分布を考慮しない従来の推定剥離率は、極端に過大評価されていた様子が分かる。

図中の剥離率算定に必要な、対象河道における流れ場の把握は、既に適用性が確認されている平面2次元水理解析モデル<sup>10)</sup>を用いて行った。

## 4. 付着藻類の繁茂動態のモデル化

付着藻類の繁茂動態のモデル化に当たり、増殖要因として光合成、移入による効果を、減少要因として剥離、代謝による効果を考慮、また、剥離に関する項に密度依存(density-dependent)の効果<sup>21)</sup>を加味すれば、付着藻類の繁茂動態は次のように記述できる。

$$\frac{dX_A}{dt} = \mu_A X_A \left(1 - \frac{X_A}{K_A}\right) + i_A X_A - r_A X_A - p_A X_A \frac{X_A}{K_A} \quad (8)$$

ここに、 $X_A$ : 付着性藻類群の現存量 ( $g/m^2$ ),  $\mu_A$ : 同増殖

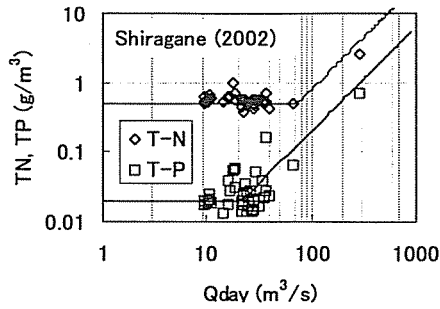


図-7 矢作川中流 (古岸地区, 44.0 km 地点) における日平均流量  $Q_{day}$  と全窒素濃度  $TN$ , 全リン濃度  $TP$  の関係

率 ( $d^{-1}$ ),  $K_A$ : 同環境容量 ( $g/m^2$ ),  $i_A$ : 同移入率 ( $d^{-1}$ ),  $r_A$ : 同代謝率 ( $d^{-1}$ ),  $p_A$ : 同剥離率 ( $d^{-1}$ ) である。

本論文では, 上式を基礎式として採用するが, 上記のパラメータのうち,  $K_A$  は調査期間中の最大現存量 (ここでは  $46.8 g/m^2$ , 図-3 参照) を与え,  $i_A$  は  $\mu_A$  に比して十分に小さいことから考慮しないものとした。式(8)のようなロジスティック型の方程式を採用する際, 環境容量は解析結果に大きく影響する問題である。本来, 環境容量は局所的, かつ, 瞬間的な環境条件に応じて変化すると考えられるが, 河道内の非定常な環境下にあるそれを評価できるほどの知見は存在しないため, 上記のように設定している。以下,  $\mu_A$ ,  $r_A$  の定式化について記す。

#### (1) 光合成による増殖

植物が光合成を行うためには, 光, 水, 二酸化炭素が必須であるが, 河川水中に生育する藻類にとっては, 特に光環境が重要である。また, 栄養塩, 中でもリンと窒素はそれぞれ制限要素になるなど藻類自身の形成に必要であり, 河川水中における栄養塩の摂取は増殖率を大きく左右する<sup>22)</sup>。従来のモデルの多くは, 湖沼における植物プランクトンモデル<sup>23)</sup>を参考に行っているためか, 栄養塩摂取速度は水中の栄養塩濃度のみによって記述されてきた。しかし, 流水中に生じる付着藻類の栄養塩摂取速度は, 流速によっても変化することが知られており<sup>23)</sup>, 栄養塩の濃度ではなく供給量そのものによって記述されるものとするのが望ましい<sup>22)</sup>。ここでは, 流水中の栄養塩摂取は栄養塩フラックスに依存するものと考えた。

以上から, 光合成による付着性藻類群の増殖率  $\mu_A$  は, 次のように与えられる。

$$\mu_A = \mu_{Amax} \cdot f_{I_w} \cdot f_F \cdot f_{I_w} \quad (9)$$

$$f_{I_w} = I_w / (K_{I_w} + I_w) \quad (10)$$

ここに,  $\mu_{Amax}$ : 最大比増殖速度 (ここでは既往の知見<sup>22)</sup>, <sup>24)</sup>から,  $1.0 d^{-1}$ ),  $f_{I_w}$ : 光合成活性に対する水温  $T_w$  の効果,  $f_F$ : 栄養塩摂取に関するフラックス  $F_P$  の効果,  $f_{I_w}$ : 水中日射量  $I_w$  による効果,  $K_{I_w}$ : 日射に関する半飽和定数である。

白金の測定結果<sup>25)</sup>によれば平水時の矢作川中流の河川水はリン制限であると判断できるので, ここでの栄養塩は

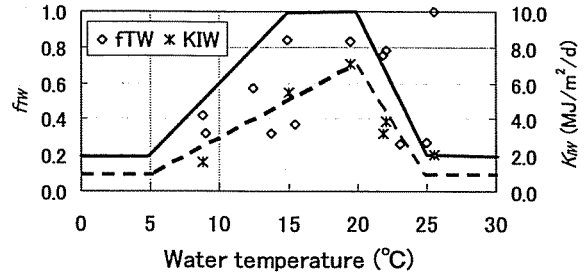


図-8 水温と光合成活性の関係

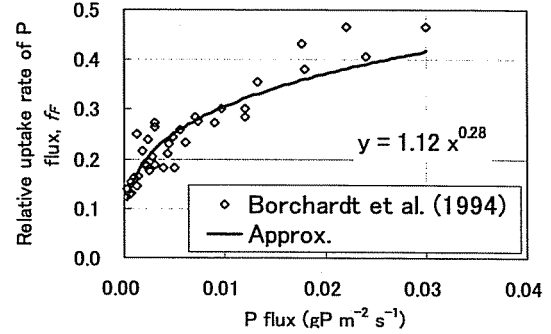


図-9 全リンフラックスと栄養塩 (リン) 摂取速度の関係

リンを対象とし, そのフラックス  $F_P$  を次式で与えるものとする。

$$F_P = TP \cdot U \quad (11)$$

ここに,  $TP$ : 全リン濃度 ( $g/m^3$ ),  $U$ : 水深方向平均流速 ( $m/s$ ) であり,  $TP$  は図-7 に示す関係から, 次式で示すような日平均流量  $Q_{day}$  の関数で与える。

$$TP = 0.02 \quad (Q_{day} \leq 21.5 m^3/s) \\ TP = \alpha \cdot Q_{day}^\beta \quad (Q_{day} > 21.5 m^3/s) \quad (12)$$

ここに,  $\alpha = 2.0 \times 10^{-4} (g m^{-15} s^{15})$ ,  $\beta = 1.5$  である。

$f_{I_w}$ ,  $K_{I_w}$  については, 矢作川中流における付着藻類の光合成活性に関する野崎らの研究成果<sup>26)</sup>から,  $T_w$  の関数として図-8 のように与えられる。ここでは図中の実線により  $f_{I_w}$  を, 破線により  $K_{I_w}$  を表すものとした。

$f_F$  については, 糸状藻類 *Spirogyra fluviatilis* のリン摂取速度に及ぼす流速の影響を調べた Borchardt et al.<sup>23)</sup> の成果から,  $F_P$  とリンの相対摂取速度 ( $f_F$ ) の関係を調べ, 図-9 のように作成し直した。この際, Borchardt<sup>23)</sup> に従い, リンの最大摂取速度を  $1875 \times 10^{-6} g P (g \text{ dry wt})^{-1} h^{-1}$  として縦軸を規準化した。図中の実線は,  $f_F$  を表すものである。

水温  $T_w$  については, 調査時点に計測した水温と先に図-4 に示す日平均気温  $T_A^{15}$  との関係から推定した。

水中の日平均日射量  $I_w (MJ m^{-2} d^{-1})$  の推定は, 井上<sup>3)</sup> の手順に従った。すなわち, 水面での日平均日射量  $I_s (MJ m^{-2} d^{-1})$ , 懸濁物質濃度  $SS (g/m^3)$ , 水深  $h (m)$  を用いて, 次のように書ける。

$$I_w = (1 - \delta) I_s \cdot \exp\{-(\lambda + \varepsilon \cdot SS) h\} \quad (13)$$

ここに,  $\delta$ : 水面での反射率 (0.70),  $\lambda$ : 水の吸光係数 ( $0.18 m^{-1}$ ),  $\varepsilon$ : 懸濁物質による吸光係数 ( $0.11 m^{-1}$ ) である。

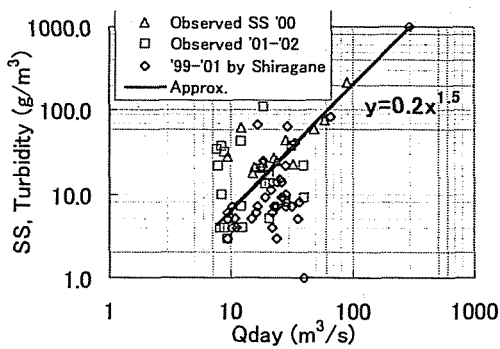


図-10 日平均流量と濁度、懸濁物質濃度の関係

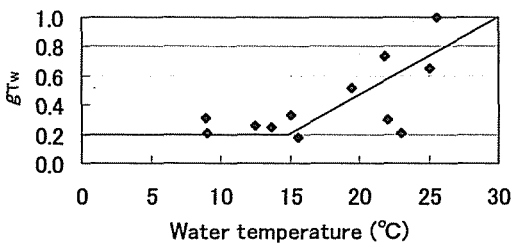


図-11 水温と付着藻類の相対代謝率の関係

ある<sup>3)</sup>。

SSについては、TPと同様、日平均流量との関係(図-10参照)から、次式で得られるものとした。

$$SS = 0.2 \cdot Q_{day}^{1.5} \quad (14)$$

なお、図中には、直接法の「濾別」<sup>12)</sup>によって分析したSS(Observed SS '00)、前章の調査時にHORIBA W-23(堀場製作所)で実測した濁度を単位変換したデータ(Observed '01-'02)、白金<sup>25)</sup>による濁度を単位変換したデータ('99-'01 by Shiragane)を併示している。

$I_s$ については、日照率 $S/S_m$ を用いて、以下に示すAngstromの式<sup>27)</sup>で与える。

$$I_s = I_m \cdot (0.25 + 0.75S/S_m) \quad (15)$$

ここに、 $I_m$ :日平均最大日射量 ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ )、 $S$ :日照時間、 $S_m$ :可照時間である。 $I_m$ はBudykoの資料<sup>27)</sup>から、 $S_m$ は豊田市における暦情報<sup>28)</sup>から得られる。

## (2) 代謝による減少

付着藻類の代謝率 ( $\text{d}^{-1}$ ) は、水温に依存するものと考え、次式でその効果を見積もる。

$$r_A = r_{Amax} \cdot g_{TW} \quad (16)$$

ここに、 $r_{Amax}$ :最大比代謝率(文献<sup>30)</sup>を参考に、 $0.075 \text{d}^{-1}$ 、 $g_{TW}$ :水温による影響(図-11参照)である。なお、ここで代謝は呼吸・枯死の影響を含めて考えるものとする。

## 5. 付着藻類繁茂動態シミュレーション

2で示した対象河道における流れ場の把握には、3と同様、平面2次元浅水流モデル<sup>10)</sup>を用い、日平均流量(図-4参照)を流入条件とする計算結果を採用する。本解析では、式(8)の任意の時点( $t = t + \Delta t$ )での解を与える次式を用い、調査開始日である2002年7月23日を $t=0(\text{d})$ として、1年間の変動を追跡する。

$$X_A(t + \Delta t) = \frac{X_A(t) \cdot \exp \alpha \Delta t}{\beta X_A(t) \cdot (\exp \alpha \Delta t - 1) + 1} \quad (17)$$

ここに、 $\alpha = \mu_A + i_A - r_A$ 、 $\beta = (\mu_A + p_A) / \alpha K_A$ である。

初期条件となる $X_A(0)$ については、対象区間内の(植生域を除く)裸地領域(図-1,2参照)に、一様に与える(ここでは、 $3.62 \text{g/m}^2$ )。解析の過程で、水域が陸化した場合には、Burns & Walkerの成果<sup>32)</sup>を参考に、陸化状態が1日継続する毎に、現存量は半減させられるものとする。また、ある場所での強熱減量がある時点において0となった場合には、その後の現存量も0となってしまうため、こうした場合に限り、初期値の1% ( $0.036 \text{g/m}^2$ )

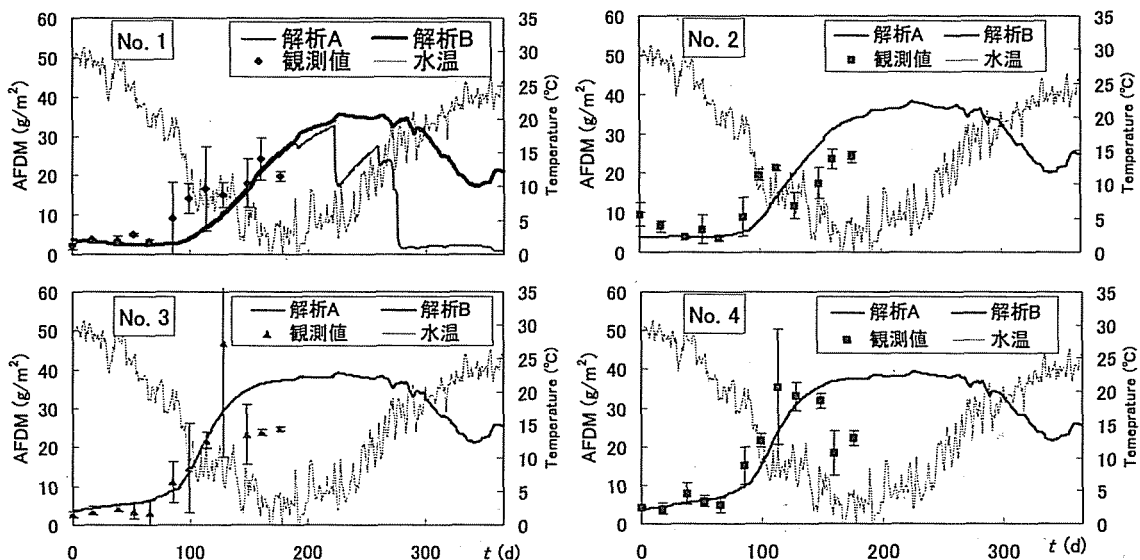


図-12 付着藻類の繁茂動態シミュレーションと観測結果の比較

の藻類が新たに移入されるものとした。

図-12 に、各コドラートにおける繁茂動態解析の結果を示す。ここでの各解析値は、コドラートを含むセルにおける結果を表示している。図中の解析値2種(A, B)の違いは、剥離率を組み込んだ(A)か否(B)かを表している。No.1(淵)を除き、剥離効果は解析結果に表れていないにもかかわらず、前半の観測結果を再現できたのは、カワシオグサに代表される付着藻類の繁茂が、光合成及び代謝効果の評価によって記述できたことによる。特に、代謝効果は、初期の高水温期における増殖抑制、最大値の低減に作用していると考えられる。また、前述のように、礫露出高の小さいNo.1でしか剥離効果が表れなかったことは、藻類剥離効果に対する露出高の影響の大きさ(図-6参照)を改めて示していると思われる。モデルにおける「礫露出高一定」との前提条件は、今後見直す必要がある。

## 6. おわりに

本研究では、低攪乱礫床における付着藻類の剥離効果について、サルテーション粒子の鉛直分布の考慮によって、従来、過大評価になりがちであった掃流砂礫による藻類剥離率の評価手法を改善した。また、藻類の増殖、代謝について、生理学的知見や日射時間、気温などの気象情報をもとに各種影響要因を組み込んだ定式化を行った。これらをもとに構築した付着藻類の増殖・剥離モデルは、観測資料不足のため、定量的検証が不十分ではあるが、矢作川中流における藻類繁茂の特徴を記述することができ、インパクト・レスポンスの考案などに十分応用できる枠組みが出来た。今後、更なる検討を重ね、問題の解決に努めていきたい。

## 参考文献

- 1) 内田朝子：矢作川中流域におけるアユの消化管内容物，矢作川研究，No.6，pp.5-20，2002。
- 2) 楠田哲也：水域生態系モデルの進歩と課題，第36回水工学に関する夏季研修会講義集Aコース，pp.A-3-1-23，2000。
- 3) 井上隆信：河床付着生物膜による河川流下過程の水質変化に関する研究，北海道大学学位論文，1996。
- 4) Duong, H. S., 浅枝隆, 田中規夫, 谷本勝利：種間の競争を考慮した付着性藻類群集の変動解析，土木学会論文集，No.677/II-55，pp.151-161，2001。
- 5) 戸田祐嗣, 赤松良久, 池田駿介：単細胞・群体型付着藻類と糸状型付着藻類の増殖競争モデルの開発，河川技術論文集，第9巻，pp.481-486，2003。
- 6) 北村忠紀, 加藤万貴, 田代喬, 辻本哲郎：砂利投入による付着藻類カワシオグサの剥離除去に関する実験的研究，河川技術に関する論文集，No.6，pp.125-130，2001。
- 7) 田代喬, 渡邊慎多郎, 辻本哲郎：掃流砂礫による付着藻類の剥離効果算定に基づいた河床攪乱作用の評価について，水工学論文集，第47巻，pp.1063-1068，2003。
- 8) 山本亮介, 松梨史郎, 下垣久：移動粒子を伴う流れの付着藻類剥離効果，水工学論文集，第47巻，pp.1069-1074，2003。
- 9) 辻本哲郎, 北村忠紀, 加藤万貴, 田代喬：低攪乱礫床における大型糸状藻類繁茂のシナリオ，河川技術論文集，第8巻，pp.67-72，2002。
- 10) 田代喬, 加賀真介, 辻本哲郎：個体群動態モデルの生息場評価手法への導入に関する基礎的研究，水工学論文集，第47巻，pp.1105-1110，2003。
- 11) 田代喬, 加賀真介, 辻本哲郎：河床付着性藻類群の繁茂動態のモデル化とその実河道への適用，河川技術論文集，第9巻，pp.91-96，2003。
- 12) 佐藤敦久：水環境工学 浮遊物質からみた環境保全，技報堂出版，1987。
- 13) 内田朝子：矢作川における付着藻類と底生動物の基礎調査報告，矢作川研究，No.1，pp.59-80，1997。
- 14) 内田朝子, 藤居勇, 山戸孝浩：矢作川における大型糸状緑藻の時空間変動，矢作川研究，No.6，pp.113-124，2002。
- 15) 気象庁電子閲覧室：豊田地域気象観測所(東経137度10.6分，北緯35度7.9分)における気象観測資料，<http://www.data.kishou.go.jp/>，2002-2003。
- 16) 辻本哲郎, 中川博次：掃流粒子のSaltationの確率過程論的解析，土木学会論文集，No.345/II-1，pp.83-90，1984。
- 17) Kikkawa, H. and T. Yamada: Transport rate of bed load based on "the existence probability" of a sand particle, *Proc. 3<sup>rd</sup> Int'l Symp. on Stochastic Hydraulics*, Tokyo, Japan, pp.337-346, 1980。
- 18) 芦田和男, 藤田正治：河床粒子の浮遊機構とそのモデル化，土木学会論文集，第375号，pp.79-88，1986。
- 19) 芦田和男, 道上正規：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究，土木学会論文集，第206号，pp.59-69，1972。
- 20) 石橋毅：ダム排砂設備の流下砂礫による磨耗・損傷に関する水理学的研究，土木学会論文集，第334号，pp.103-112，1983。
- 21) 例えば，Shenk, T. M. and A. B. Franklin: Models in natural resource management: an introduction, *Modeling in Natural Resource Management*, edited by Shenk, T. M., and A. B. Franklin, Chapt. 1, Island Press, pp.1-8, 2001。
- 22) Borchardt, M. A.: Nutrients, *Algal Ecology*, edited by R.J. Stevenson *et al.*, Chapt.6, Academic Press, pp.375-402, 1996。
- 23) Borchardt, M. A., J. P. Hoffmann and P. W. Cook: Phosphorus uptake kinetics of *Spirogyra fluviatilis* (Charophyceae) in flowing water, *J. Phycol.*, Vol. 30, pp.403-417, 1994。
- 24) Canale, R. P., M. T. Auer, Y. Matsuoka, T. M. Heidtke and S. J. Wright: Optimal cost control strategies for attached algae, *J. Env. Eng.*, Vol. 109, pp.1225-1241, 1983。
- 25) 白金晶子：矢作川中流域の水質—古岸水辺公園を中心に—，矢作川研究，No.6，pp.99-112，2002。
- 26) 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，No.7，pp.169-173，2003。
- 27) 安芸皎一, 多田文男：2.1.5 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。
- 28) 例えば，国立天文台天文情報公開センター暦計算室：<http://www.nao.ac.jp/koyomi/hinode.html>，2002-2003。
- 29) 国立天文台編：気象部日射量，理科年表，丸善，pp.260-263，1997。
- 30) ダーリー，W. M. (手塚泰彦, 渡辺泰徳, 渡辺真利代共訳)：藻類の生理生態学，基礎微生物学9，培風館，199p，1987。
- 31) Burns, A. and K. Walker: Effects of water level regulation on algal biofilms in the River Murray, South Australia, *Regul. Rivers: Res. Mgmt.*, 16, pp.434-444，2000。

(2003.9.30受付)