

# 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

## MODELING OF GROWTH-DETACHMENT DYNAMICS OF ATTACHED ALGAE ON RIVERBED AND ITS APPLICATION TO REAL RIVER

田代 喬<sup>1</sup>・加賀真介<sup>2</sup>・辻本哲郎<sup>3</sup>

Takashi TASHIRO, Shinsuke KAGA and Tetsuro TSUJIMOTO

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

<sup>2</sup>正会員 工修 扶桑建設工業株式会社 大阪支店  
(〒550-0005 大阪市西区西本町1丁目3番10号(第五富士ビル6F))

<sup>3</sup>正会員 工博 名古屋大学工学研究科 地圏環境工学専攻 教授

It is important to grasp dynamic condition of growing attached algae adequately because it can feed the other species in river, from the viewpoint of river ecosystem conservation.

In the present study, we have discussed on the application of logistic equation to evaluate the change of algae habitat. Firstly, field-data investigation has been conducted in the middle reach of the Yahagi River to estimate the growth rate and the environmental capacity of algae ash-free weight. And then, by using the field-data, the growth-detachment dynamics model for algae has been carried out. The simulation has demonstrated that the nuisance growth of algae is caused by restricted sediment transport.

**Key Words:** Attached algae, riffle-pool structure, sediment transport, ash-free weight, logistic equation

### 1. まえがき

河床に生育する付着性藻類は、魚類・底生動物の餌資源として重要であるが、近年では、人的インパクトを始めとする様々な要因から起こる河川水の富栄養化や攪乱頻度の減少などの環境変化をきっかけとして、時に異常繁茂の傾向を示す例が見られる。この異常繁茂は、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 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り、こうした状況の早期改善が求められる。

藻類の異常繁茂を制御していくためには、その原因解明はもとより、繁茂動態を評価・予測する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<sup>2)</sup>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>3)</sup>を援用した例<sup>4)~6)</sup>が多い。これらは、室内水路における定常な流れの中での藻類の繁茂状況を再現したものがほとんどで、生長・増殖・枯死に関する記述が詳細であるのに対し、物理的剥

離に関する記述は不十分であったため、実河道への適用性も不十分であった。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ことが分かってきた<sup>7)~9)</sup>。こうした流れを受け、著者ら<sup>10), 11)</sup>は、藻類の植被(面積)率を対象として、掃流砂礫による剥離効果を考慮したロジスティック方程式<sup>2)</sup>を用い、付着性藻類の繁茂動態モデルの構築を試みてきた。その結果、増殖率・剥離率を水量と関連付けることにより、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。

本研究では、藻類群の現存量を表す指標として、現地観測では判別し難い植被率に代えて、比較的計量が容易な強熱減量を採用する。そして、瀬・淵構造内の物理環境特性の違いに着目した、矢作川中流域における継続的な現地観測の結果から、付着性藻類群の増殖過程に関するモデル化を行い、さらに、掃流砂礫による剥離効果を考慮することが可能な繁茂動態モデルを提案し、本手法の実河道への適用について検討する。

## 2. 矢作川における付着性藻類群の生育状況

矢作川は長野県大川入山(標高1,980m)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117km、流域面積は1,830km<sup>2</sup>の1級河川である。中～下流域部には、一大農業・工業地帯が広がっており、治水、農工業用水、発電利用のために、河口から34km～80km地点の本川区間に7つのダム・堰が建設されている。

矢作川は、かつて典型的な砂河川であったが、近年、砂利採取や、砂防整備、ダムによる土砂の堰止により、中流部では河床低下を伴ったアーマー化が進み<sup>12)</sup>、特に、越戸ダム(45.8km地点)下流では、10～30cm程度の玉石層が露出したアーマー路床状態を呈している<sup>12)</sup>。また、矢作ダム(80.0km地点)の洪水調節によって、平均年最大流量はダム建設前後で、1500m<sup>3</sup>/s程度から800m<sup>3</sup>/sへと大幅に減少する<sup>12)</sup>など、出水の規模・頻度が減少してきた。こうした様々な要因のために、河床攪乱頻度は急激に減少してきており<sup>12)</sup>、これと対応するようにカワシオグサ(*Cladophora glomerata*)を始めとする付着性藻類群の異常繁茂が顕著になってきている。

### (1) 現地観測対象区間

調査対象区間は、42km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。この付近の河道は複断面形状を示し、河幅が約250mあるのに対し、低水路幅は約100m、高水敷は河畔林や竹林が密生しているなど矢作川中流域の特徴を呈している区間である。

まず、GPSとレベル測量を併用して縦断方向に約20m間隔、横断方向に約5m間隔で測量を実施し、作成した河床高コンター図を図-1に示す。

河床材料(底質)については、主として1cm以下の砂集団

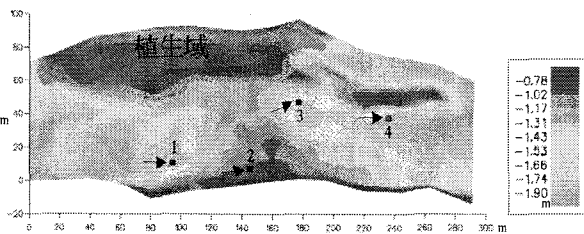


図-1 対象区間における河床高コンター図(矢印は流向)

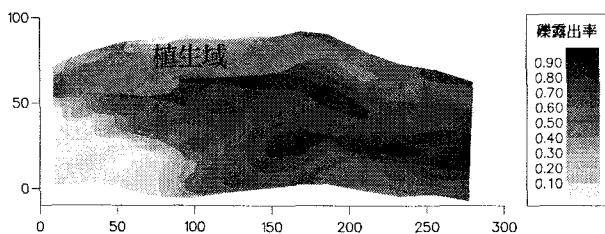


図-2 対象区間における礫露出率コンター図

表-1 各調査時点における水質測定結果

調査日	水温(°C)	濁度(度)	栄養塩		
			Cl(mg/l)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (.g/l)
02/7/23	24.6	37	0.0	1.3	21.2
02/8/9	26.8	13	0.8	2.3	2.0
02/8/30	27.4	3	1.2	1.7	11.6
02/9/13	25.1	4	2.4	2.5	11.2
02/9/26	21.3	5	3.0	7.1	1.4
02/10/16	20.0	13	3.0	7.1	3.1
02/10/30	15.1	5	2.0	7.4	6.2
02/11/13	13.1	4	2.2	7.4	0.7
02/11/28	11.6	37	5.4	9.5	1.7
02/12/18	6.7	32	2.9	8.8	4.1
02/12/30	6.1	42	2.0	8.3	5.6
03/1/15	4.8	17	5.0	14.6	1.7

と礫層を構成する粒径5cm～20cm集団の組み合わせで河床が構成されている<sup>10),11)</sup>ことから、礫径を $d_G$ とし、礫頂部の高さ $h_G$ と砂面の高さ $h_S$ の差を $\Delta_G$ として定義される礫の露出率( $\Delta_G/d_G=0.0\sim1.0$ )を調査した。なお、この礫露出率は、浮き石・沈み石などの底質構造類型<sup>13)</sup>との良好な相関関係にある<sup>10)</sup>。図-2には礫露出率コンター図を示す。

### (2) 付着性藻類群の増殖過程

対象区間における付着性藻類群の増殖過程について、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の大きさを有し、瀬・淵構造に伴う物理環境の違いに着目して設定されており、コドラート1:淵、コドラート2:平瀬、コドラート3:平瀬～早瀬、コドラート4:早瀬となっている。調査は2002年7月23日から2003年1月15日まで、月2回の頻度で実施した。各調査時点における水質(水温、濁度、栄養塩濃度)を“HORIBAマルチプローブW-23(堀場製作所製)”により測定し、各コドラートにおける流速(6割水深)、水深を測定した。表-1には、各調査時点における水質測定結果を示す。

付着性藻類群サンプルは、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10cm×10cm領域内を全量採取することにより得た。採集試料は、同定及び細胞数計数用、強熱減量測定用、クロロフィルa量測定用にそれぞれ3等分するが、本研究では、強熱減量とクロロフィルa量の結果について考察する。強熱減量の測定は下水試験法<sup>14)</sup>に、クロロフィルa量の測定はLorenzen法<sup>15)</sup>に従って行った。採集したサンプルの強熱減量およびクロロフィルa量について、各コドラート(No.1～4)における平均値の時間変化を図-3,4に示す。

両図から、秋口(9月下旬)より増殖傾向が始まること、11月中旬～12月中旬と1月上旬の2回のピークを有することが確認できる。この結果を同じ中流域における複数の調査結果<sup>16), 17)</sup>と比較した結果、2002年の本調査結果(42.0km地点)は、1995年の阿摺ダム直下流(53.0km地点)のものと同様な傾向であった。日流量時系列(越戸ダム)を参照すると、この両年は、増殖期間(9月下旬～1月上旬の約3ヶ月間)中に出水が無いことから、図-3,4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。

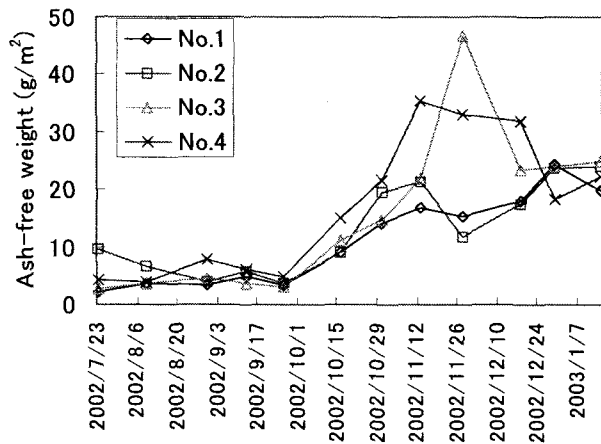


図-3 各コドラートにおける強熱減量の時間変化

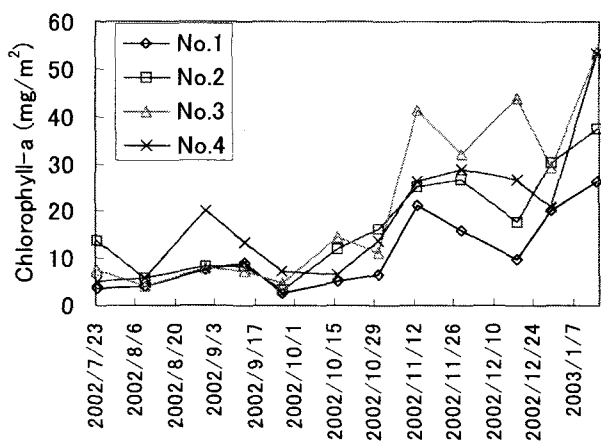


図-4 各コドラートにおけるクロロフィルa量の時間変化

### (3) 付着性藻類群の消長に関わる要因

一般的に、河床付着性藻類群の現存量は、光・水温など気象条件による影響、水質・栄養塩など流入条件に起因する影響、流速・底質・攪乱(流砂)などの物理条件による影響、捕食などの生物的作用による影響によって制限される<sup>18)~20)</sup>。

矢作川中流域における付着性藻類群の増殖期間を対象として、上記の消長要因について考えるに、本研究では、次のような想定によって、藻類の繁茂動態を流速、水深、攪乱、底質、濁度を用いて記述できるものとする。すなわち、捕食の効果は藻類の増殖に比して小さく<sup>6)</sup>、現地では、水質・水温変化の影響も小さい(表-1参照)。さらに、栄養塩は瞬間的な濃度でなく供給量で捉え直すべきであるとの指摘<sup>21)</sup>に従い、流速によって見積もるものとした。また、水中に浸透する射光量は、濁度と水深に依存するとの知見<sup>22)</sup>を重視し、光条件として採用する。

### 3. 付着性藻類群の繁茂動態のモデル化

付着性藻類群の繁茂動態をロジスティック方程式<sup>2)</sup>を用いて予測するに当たり、藻類の増殖率、環境容量、剥離率といったパラメータを評価する必要がある。本章では、まず、基礎式について記述した上で、前章で示した現地観測結果から、各コドラートにおける増殖率、環境容量を見積もり、これらを物理量と結び付けて評価することにより、付着藻類の繁茂動態をモデル化する。なお、剥離率の評価には後述する著者らの手法<sup>7)</sup>を用いる。

#### (1) ロジスティック方程式の適用

本研究では、掃流砂礫による藻類剥離効果を組み込んだ、以下に示すロジスティック方程式を用いる。

$$\frac{d}{dt} N(t) = \varepsilon \left( 1 - \frac{N(t)}{K} \right) N(t) - pN(t) \quad (1)$$

ここに、 $N(t)$ : 付着性藻類群の強熱減量( $\text{g/m}^2$ )、 $\varepsilon$ ,  $p$ : 増殖率及び剥離率(/day)、 $K$ : 環境容量( $\text{g/m}^2$ )である。上式の解は、 $t=0$ における $N$ を $N_0$ として次のように書ける。

$$N(t) = \frac{N_0 K (\varepsilon - p)}{\varepsilon N_0 + \{K(\varepsilon - p) - \varepsilon N_0\} \exp\{- (\varepsilon - p)t\}} \quad (2)$$

さらに、実際の繁茂動態の解析に当たっては、物理環境の変動を有限の時間ステップ( $\Delta t$ )ごとに与えることから、式(2)を次式のように変形し、用いる。

$$N_{j+1} = \frac{N_j K (\varepsilon - p)}{\varepsilon N_j + \{K(\varepsilon - p) - \varepsilon N_j\} \exp\{- (\varepsilon - p)\Delta t\}} \quad (3)$$

ここに、添え字 $j$ : 時間ステップ $j$ における量を示す。

以上を踏まえ、図-3に示す強熱減量の時間変化を参照すると、次のように見なせる。すなわち、①増殖傾向の始まる2002年9月26日を $t=0$ とすれば、②初期値 $N_0$ は調査地点の違いによらず、ほぼ等しく、③各コドラートにおける強熱減量の最大値は異なる。また、図は平常流量時における増殖過程を示すことから、④剥離率は増殖率に比して小さく、無視出来る。

①~④の想定に従い、各コドラートにおける諸パラメータを見積もる。初期値 $N_0$ については、 $t=0$ 時点での全強熱減量の平均値( $3.62\text{g/m}^2$ )を一様に与える、環境容量 $K$ については、各コドラートにおける強熱減量の最大値を採用する。増殖率については、各コドラートにおける $t=0$ 時点から最初のピークに至るまでの強熱減量の増殖過程を対象とし、これに適合するロジスティック曲線を最小二乗法により決定することで増殖率を得る。結果として得られたロジスティック曲線を各コドラートにおける増殖過程とともに図-5に示す。

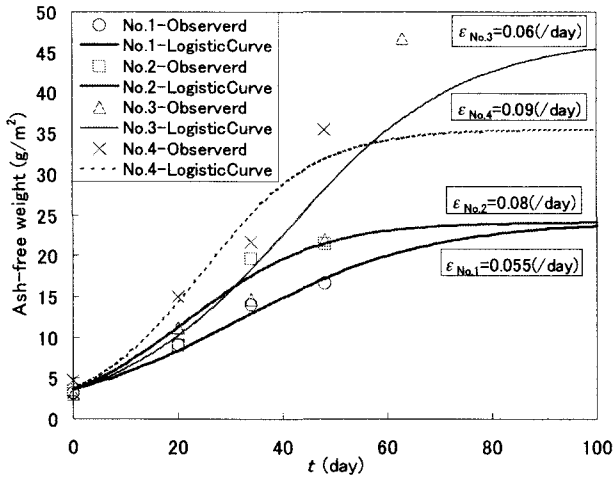


図-5 強熱減量の増殖過程とロジスティック曲線

### (2) 増殖率, 環境容量の評価

著者ら<sup>11)</sup>は既に、藻類の増殖率を流速, 水深と結び付けて評価する手法を提案しているが, ここでは, 環境容量も対象に加え, 観測結果に基づいた評価を行う。

まずは増殖率について, 次式を用いて評価する。

$$\varepsilon = \varepsilon_0 (I_h / I_0) \quad (4)$$

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_{\max} \sqrt{f_\varepsilon(U) \times g_\varepsilon(h)} \quad (5)$$

ここに,  $\varepsilon_0$ : 清水での増殖率,  $\varepsilon_{\max}$ : 最大増殖率(ここでは,  $0.1 \text{ day}^{-1}$ ),  $f_\varepsilon, g_\varepsilon$ : 流速( $U$ ), 水深( $h$ )についての影響関数,  $I_h/I_0$ : 水深 $h$ における(無次元)光量である。

図-6には, 流速, 水深と $\varepsilon_0/\varepsilon_{\max}$ の関係を示し, 図中の曲線により,  $f_\varepsilon(U), g_\varepsilon(h)$ が与えられるものとした。また,  $I_h/I_0$ の算出には, 次式<sup>22)</sup>を用いた。

$$I_h / I_0 = \exp(-\omega h) \quad (6)$$

ここに,  $\omega$ : 単色光吸収係数( $\text{m}^{-1}$ )であり, 濁度 $T(\text{kg}/\text{m}^3)$ と単位補正係数 $n(\text{kg}^{-1}\text{m}^2)$ (ここでは,  $n=20\text{kg}^{-1}\text{m}^2$ )との積で表される<sup>22)</sup>。なお, 濁度時系列は, 濁度の観測データ(表-1参照)の不足分を透視度データ<sup>23)</sup>(48km地点)から見積もる。

環境容量についても同様に, 次式によって評価する。

$$K = K_{\max} \sqrt{f_K(U) \times g_K(h)} \quad (7)$$

ここに,  $K_{\max}$ : 最大環境容量(ここでは,  $46.8\text{g}/\text{m}^2$ ),  $f_K, g_K$ : 流速( $U$ ), 水深( $h$ )についての影響関数である。図-7には, 流速, 水深と $K/K_{\max}$ の関係を示し, 増殖率と同様に,  $f_K(U), g_K(h)$ は, 図中の曲線により与えられるものとする。

### (3) 剥離率の評価

剥離率は攪乱に支配されるため, 掃流砂の衝撃による藻類剥離モデル<sup>7)</sup>を援用する。ここでの掃流砂輸送は, 河床のアーマー化が進行した矢作川の現状に鑑み, 基盤となる礫は移動しないが, 砂の移動によって礫表面が受

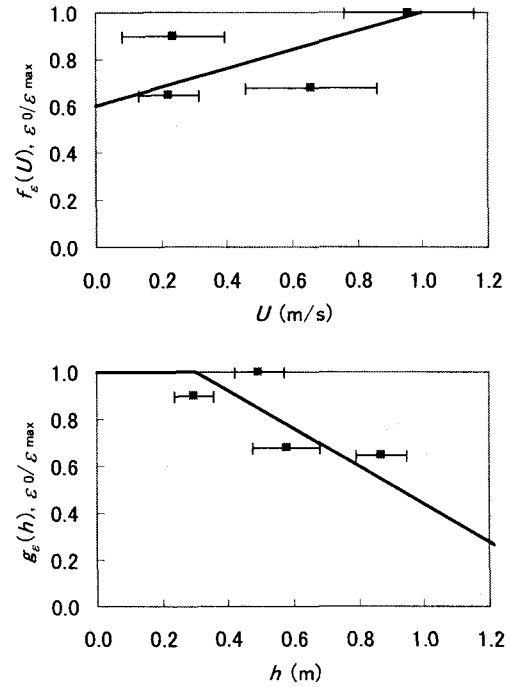


図-6 流速(上), 水深(下)に対する $\varepsilon_0/\varepsilon_{\max}$ の変化と増殖率に関するそれぞれの影響関数

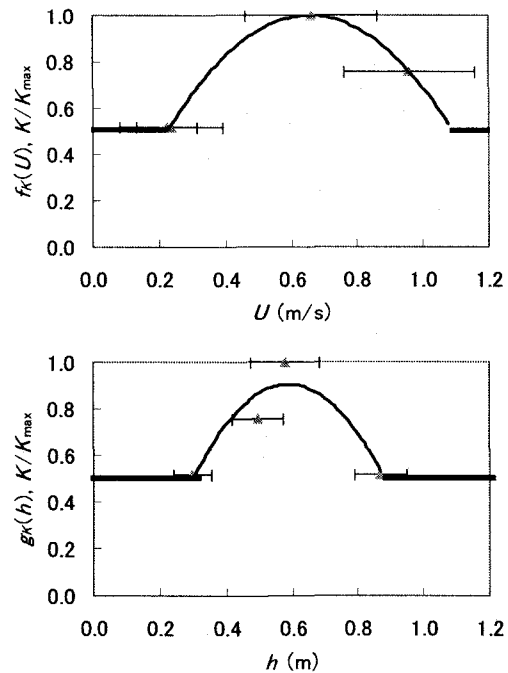


図-7 流速(上), 水深(下)に対する $K/K_{\max}$ の変化と環境容量に関するそれぞれの影響関数

ける衝撃を見積もる<sup>10), 11)</sup>。砂面は突出した礫の生む流れで遮蔽されるため, 砂面上の有効摩擦速度を見積もるのに芦田・藤田<sup>24)</sup>に倣って遮蔽係数 $k$ を導入する。なお, ここでは, 彼らの実験結果<sup>24)</sup>を参考に, 礫の露出率 $\Delta_G/d_G$ を用いて,  $k^2=1-\Delta_G/d_G$ として与える。これらより, 砂面上の有効無次元掃流力 $\tau_{*c}$ は次式のように書ける。

$$\tau_{*e} = k^2 \tau_* = \frac{k^2 u_*^2}{(\sigma/\rho - 1) g d_s} \quad (8)$$

ここに、 $\tau_*$ ：無次元掃流力、 $u_*$ ：摩擦速度、 $\sigma$ ：砂粒密度、 $\rho$ ：水密度、 $g$ ：重力加速度である。上式で得られる $\tau_{*e}$ を芦田・道上式<sup>25)</sup>に適用することで礫間を流送される流砂量を算定する。

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を $W_x$ は、石橋<sup>26)</sup>による滑面上でのサルテーション運動解析をもとに、次のように書ける。

$$W_x = \gamma q_B d_s^{1/3} u_*^{2/3} \quad (9)$$

ここで、 $\gamma$ ：礫の材料特性に関わる係数( $4.94 \times 10^5 \text{Nm}^{-4}\text{s}^{2/3}$ )であり、 $u_*$ ：砂面上の有効摩擦速度である。以上を踏まえ、剥離率 $p$ は最終的に次のように書ける。

$$p = (24 \times 3600) \alpha W_x \quad (\text{day}^{-1}) \quad (10)$$

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、 $1.23 \times 10^{-4} \text{N}^{-1}\text{m}$ とすることが適当であった<sup>7)</sup>。

#### 4. 矢作川における付着性藻類群の繁茂動態解析

前章で行ったモデル化に基づき、2で示した矢作川現地河道における付着性藻類の繁茂動態解析を行う。ここで、対象河道における流れ場の再現には、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>11)</sup>を用い、日平均流量(図-8参照、越戸ダム)を流入条件とする解析を行う。なお、図中の時間スケールは、図-5と同様に、藻類群の

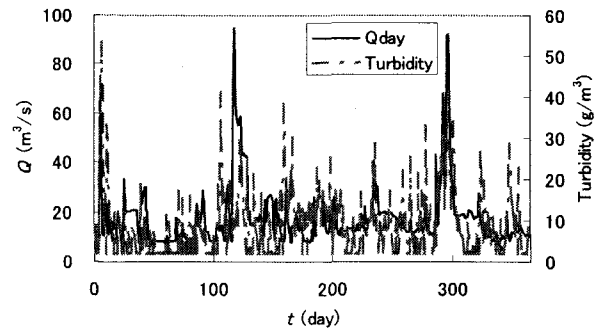


図-8 解析対象流況と濁度の日変化

増殖が始まった2002年9月26日を $t=0(\text{day})$ としており、翌年も同様の流況を示すと仮定し、1年間の流況変化を示す。また、図中には、増殖率を評価するために必要な(あらかじめ見積もられた)濁度時系列も併せて示す。

藻類の繁茂動態解析を進めるに当たり、次のような条件設定を行う。すなわち、初期条件となる $N_0$ 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、 $t=0$ 時点での全強熱減量の平均値( $3.62 \text{g/m}^2$ )を一様に与えるものとする。解析の過程で、水域が陸化した場合には、水面上への露出頻度が藻類群の繁茂状態へ与える影響を調べたBurns & Walkerの成果<sup>27)</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、基礎方程式(式(1))の特性上、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になってしまうため、こうした場合に限り、初期値 $N_0$ の1%( $0.036 \text{g/m}^2$ )の藻類が新たに移入されるものとしている。

図-9に、各コドラートに着目した繁茂動態解析の結果を示す。図中の解析値は、流砂量をパラメータとして算定された曲線であり、各コドラートにおける平衡状態の

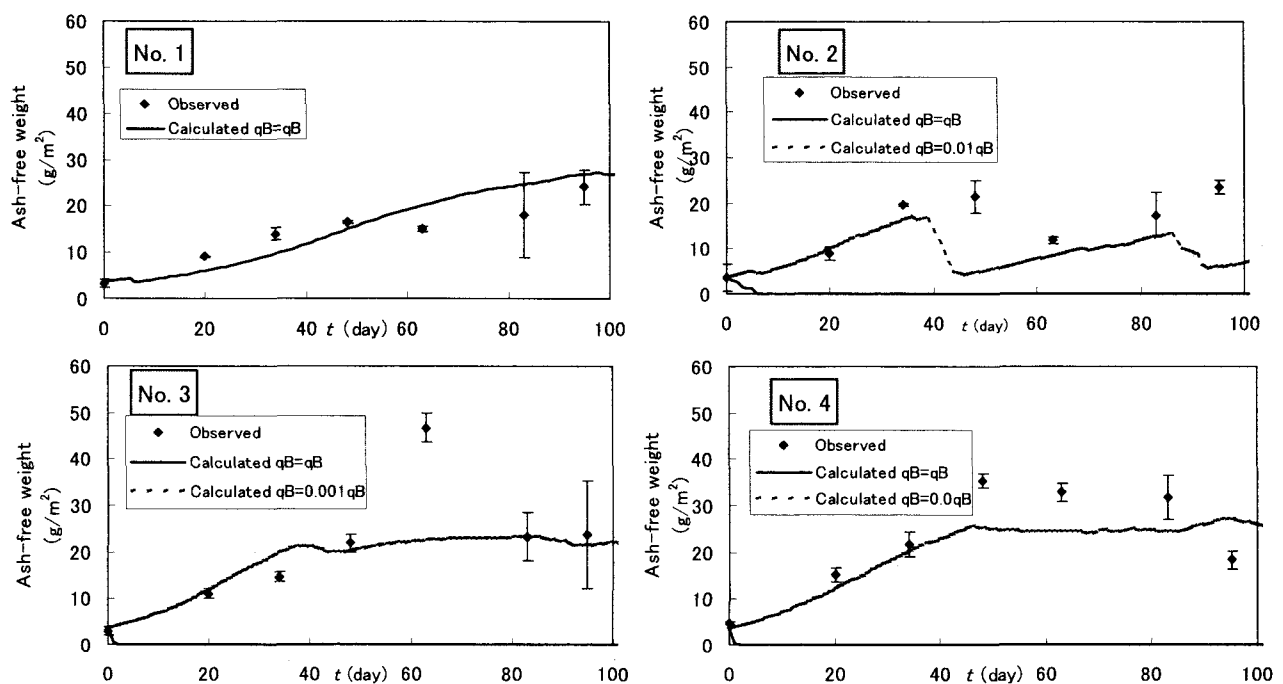


図-9 付着性藻類群の繁茂動態解析の結果

流砂量による結果と実測値に適合する結果が併記してある。図より、No.1(淵)では両者が一致したものの、No.2(平瀬)及び3(平瀬～早瀬)では、それぞれ平衡状態の1%、0.1%の流砂量から算出した結果が実測値と適合し、No.4(早瀬)については、流砂量0として算出した結果が実測値と適合していることから、瀬における流砂量が過大評価されているものと考えられる。

対象区間内の瀬の河床は、礫間に網を張り、礫の下面に砂礫を固めて営巣する造網型水生昆虫の高密度な分布が観察されている<sup>28)</sup>。Statzner *et al.*<sup>29)</sup>は、造網型昆虫の高密度な生息により、砂礫の限界掃流力が増加することを確認していることから、対象区間内の瀬において、生物的作用による河床の固結化により、流砂量が減少したものと推察される。言い換えれば、こうした結果から、矢作川中流域における藻類の異常繁茂は、流砂量の大幅な減少に起因している可能性を見出すことも出来よう。

## 5. あとがき

本研究では、矢作川中流域における付着性藻類群の増殖と剥離について、強熱減量をパラメータとするロジスティック方程式による記述を試みた。その結果、藻類群の繁茂動態をある程度表現できたが、現地観測の結果を再現するまでには至らなかった。解析精度の向上のためには、実河道における局所流砂量の評価が重要であり、これには、従来の土砂水理学的な知見に加え、生物による河床の固結化の影響も考慮する必要がある。今後、更なる検討を重ね、問題の解決に努めていきたい。

謝辞：付着藻類の採取・分析に当たり、内田朝子氏（豊田市矢作川研究所）、野崎健太郎氏（椋山女学園大学）から助言を頂いた。ここに記して御礼申し上げる。

## 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) 寺本英：数理生態学，朝倉書店，1997.
- 3) 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.
- 4) 浅枝隆，ズン・ソンホン，藤野毅：河床ベリファイトンの遷移過程の解析，河川技術に関する論文集，第6巻，pp.119-124，2000.
- 5) 戸田祐嗣，赤松良久，池田駿介：平坦河床上の藻類の増殖と剥離に関する研究，水工学論文集，第45巻，pp.1111-1116，2001.
- 6) 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.
- 7) 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，Vo.6，pp.125-130，2001.
- 8) 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.
- 9) 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.
  - 10) 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.
  - 11) 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.
  - 12) 北村忠紀，田代喬，辻本哲郎：生息場評価指標としての河床攪乱頻度について，河川技術論文集，第7巻，pp.297-302，2001.
  - 13) 竹門康弘，谷田一三，玉置昭夫，向井宏，川端善一郎：棲み場所の生態学，平凡社，1995.
  - 14) 佐藤敦久：水環境工学 浮遊物質からみた環境保全，枝報堂出版，1987.
  - 15) 西条八束，三田村緒佐武：新編 湖沼調査法，講談社，1995.
  - 16) 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.
  - 17) 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.
  - 18) Borhardt, M. A.: Nutrients, *Algal Ecology*, edited by R.J. Stevenson *et al.*, Chapt.6, Academic Press, pp.375-402, 1996.
  - 19) Stevensen, R. J.: The stimulation and drag of current, *Algal Ecology*, edited by R. J. Stevenson *et al.*, Chapt.11, Academic Press, pp.321-336, 1996.
  - 20) Peterson, C. G.: Response of benthic algal communities to natural physical disturbance, *Algal Ecology*, edited by R. J. Stevenson *et al.*, Chapt.13, Academic Press, pp.375-398, 1996.
  - 21) 野崎健太郎，内田朝子：河川における糸状藻類の大発生，矢作川研究，No. 4，pp.159-168，2000.
  - 22) Reynolds, C. S.: Algae, Chap.9, *The Rivers Handbook*, edited by Peter Calow and Geoffrey E. Petts, Blackwell Scientific Publications, pp.195-215, 1994.
  - 23) 西広瀬小学校：平成14年(2002年)矢作川透視度結果，<http://www.hm2.aitai.ne.jp/r45toyot/newpage5.htm>.
  - 24) 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.
  - 25) 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.
  - 26) 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.
  - 27) Burns, A. and K. Walker: Effects of water level regulation on algal biofilms in the River Murray, South Australia, *Regulated Rivers: Research & Management*, 16, pp.434-444, 2000.
  - 28) 田代喬，渡邊慎多郎，辻本哲郎：底質の構成・構造から見た河床近傍の微小生息場，応用生態工学研究会第6回研究発表会講演集，pp.133-136，2002.
  - 29) Statzner, B., Arens, M. F., Champagne, J. Y., Morel, R. and Herouin, E.: Silk-producing stream insects and gravel erosion: Significant biological effects shear stress, *Water Resources Research*, Vol. 35, pp. 3495-3506, 1999.

(2003. 4. 11受付)