

低攪乱礫床での大型糸状藻類の異常繁茂のシナリオ

UNFAVORABLE GROWTH OF GREEN FILAMENTOUS ALGAE IN GRAVEL-BED RIVER WITH LESS DISTURBANCE

辻本哲郎¹・北村忠紀²・加藤万貴³・田代喬⁴

Tetsuro TSUJIMOTO, Tadanori KITAMURA, Maki KATOH and Takashi TASHIRO

¹ 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 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

² 正会員 博(工) パシフィックコンサルタンツインターナショナル(株)コンサルティング事業部水環境部

³ 正会員 工修 名古屋市上下水道局下水道本部下水道建設部建設工事事務所

⁴ 学生会員 工修 名古屋大学大学院工学研究科学生 地圏環境工学専攻博士課程後期課程

In downstream of dams, we often observe unfavorable growth of green filamentous algae and they suppress the attached algae fed for Ayu fish. In order to restore Ayu-fishing activity, several attempts have been tested such as flushing and introducing sand and gravel in a river bed. In this paper, the system how the discharge control by dam changes the bed composition or constitution as growing condition of attached algae is studied. According to the field test, the growth rate can be estimated, while we previously conducted a fundamental research to estimate the detachment rate of algae by impacts caused by colliding sand. In this paper, by coupling these information, we propose a logistic equation model and conduct a simulation algae dynamism responding to flow dynamism. We chose the research field from the Yahagi river for this study, where flow dynamism is strongly controlled by dams and the extraordinary growth of green filamentous algae bother Ayu-fishing activity. This study may provide good information to keep the river-bed condition favorably from the ecological view point.

Key Words : Attached algae, disturbance, active bed, gravel-bed river, armoring, logistic equation

1. まえがき

ダム下流などアーマー化した礫床でしばしば大型糸状藻類が異常繁茂しアユの餌資源である新鮮な珪藻の生育を阻害するなどの例がしばしば見られる。本研究では、矢作川をフィールドとし、現地データを背景とした推論に基づいて、糸状藻類の異常繁茂のシナリオを構成し、河道及び水理特性と関連付けた数理モデルで表現し、異常繁茂を制御する手段を検討する。

矢作川では、ダム建設後、上流からの土砂供給が減少するとともに出水規模・頻度も減少した。とくに河床低下に伴う粗粒化によって、礫のみが露出した状況が顕在化した¹⁾。一方、大型糸状藻類であるカワシオグサの繁茂、アユの釣果の減少など生物相への変化も伴っている。

現在の矢作川河道では、礫表面にカワシオグサが半年程度かけて最大植被率に達する成長をみせる。ところが、かつては出水の規模、頻度が高く、また河床粒径が小さく、河床が動いて藻類繁茂が阻害されていた。現在の出水規模で、礫を移動させて剥離させるようなフラッシュ洪水は期待できず、せいぜい砂を投入して砂の衝突によって藻類剥離を促すことが考えられるだけである。矢作川では、矢作川研究所が中心になって砂利投入実験を実

施してきた²⁾が現地実験から効果は明らかになっていない。一方、著者ら³⁾は、礫面に付着して成育したカワシオグサが掃流砂によって剥離される状況を水路実験で確認するとともに、流砂モデルを介在させて掃流砂の衝撃による剥離率の評価を試みている。

本研究では、これらをもとにカワシオグサの成長率、掃流砂による剥離率を考慮して、礫面藻類の植被率の動態を流況に対応させてシミュレーションすることを考えた。また、掃流砂密度が、アーミングの進行によって減少することについてもその機構をモデル化し、実際に矢作川のあるリーチにおけるカワシオグサの異常繁茂の状況を説明すると共に、その制御の考え方を示す。

2. 矢作川の河相変化と付着藻類の生育状況

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、三重の3県を流れ三河湾にそそぐ幹線流路延長117km、流域面積は1,830km²の1級河川で、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、典型的な砂河川であるが、近年、砂利採取

や、砂防、ダムによる土砂の堰止により、河床低下に伴って中流部でアーマー化が進んだ。矢作川越戸ダム(45.8km 地点)下流の古巣地区では、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(図-1 参照)³⁾。

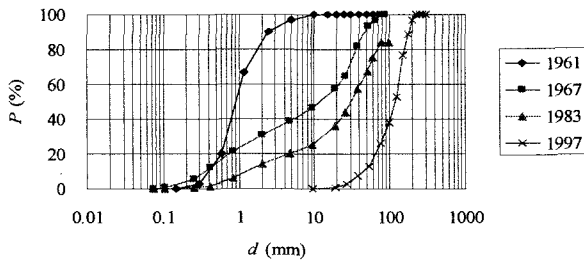


図-1 矢作川 42 km における河床粒度分布の変化

矢作ダムの洪水調節によって平均年最大流量はダム建設前後で、1500m³/s 程度から 800m³/s へと大幅に減少し³⁾、出水の規模・頻度の減少が著しい。これにも起因して河床低下は濘筋に集中し低水路が固定化する傾向にある³⁾。

矢作川において、糸状藻類の異常繁茂が見られるようになったのは、1990 年代からである。内田の調査⁴⁾によると、糸状緑藻カワシオグサ *Cladophora glomerata* は、1995 年春から、1998 年の冬の期間に春及び秋に拡大し、夏及び冬に縮小する傾向性があったが、1998 年夏以降は顕著な消長はなく、広域に継続して発生している。水質との関係では、野崎・内田⁴⁾によると、34.6 km での愛知県環境部の調査(1990-1998)で溶存窒素が 0.01-0.3mg/l、リン濃度が 0.1-5mg/l で、どちらかといえばリン制限河川で、その状況の経年変化は顕著でなく、水質的に(栄養補給の観点から)大型付着藻類である糸状緑藻が繁茂できる環境であるとしている。

3. 矢作川における河床環境の変質に関する調査

矢作川中流域においてアーマー化の実態とそれがどのように大型糸状藻類繁茂と関わっているか、現地調査を行った。対象区間は、42km 地点付近のリーチで、砂州と瀬・淵構造が特徴である。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 20m 間隔、横断方向 5m 間隔で測量を実施、河床高コンターを作製した。次に、水深・流速(電磁流速計によって 6 割水深で計測)の平面分布を作製した(図-2,3 : 水深は cm、流速は cm/s 表示、また空間座標は m、また、このとき(2001 年 8 月 17 日)の流量は 14.9m³/s)。さらに河床材料(底質)について粒度と構造を調査した。粒度は、粒径が(0)50cm 以上、

(1)20 ~ 50cm,(2)5 ~ 20cm,(3)1 ~ 5cm,(4)0.1 ~ 1cm,(5)0.1cm 以下の 6 クラスに、底質構造(類型)はまず竹門ら⁶⁾方法を参考に、(1)浮石 2 層,(2)浮石 1 層,(3)載り石,(4)浅い沈み石,(5)深い沈み石,(6)石無しに分類した。こうした調査結果をこのリーチに平面分布として表したのが図-4,5 である。

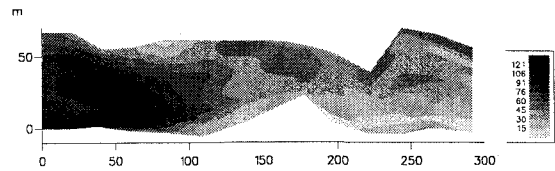


図-2 矢作川対象リーチでの水深 (cm) の空間分布

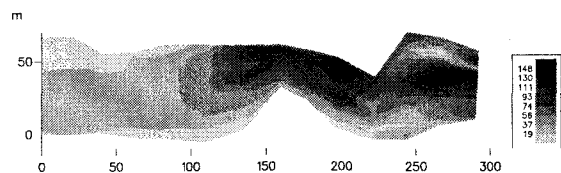


図-3 矢作川対象リーチでの流速 (cm/s) の平面分布

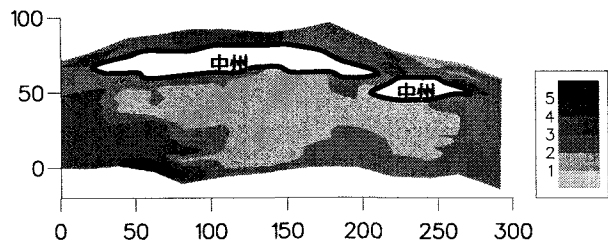


図-4 矢作川対象リーチでの底質粒径分布

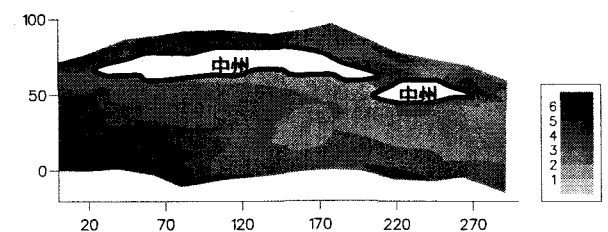


図-5 矢作川対象リーチでの底質構造タイプの分布

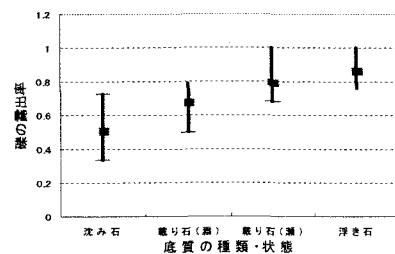


図-6 底質構造類型と砂礫の露出度

次に、矢作川のこのセグメントでは、主として 1cm 以下の砂集団と玉石層を構成する粒径 20cm~50cm 集団の組み合わせで河床が構成されていることから、砂面と礫面の相対位置で先に定義した(浮石,沈み石といった)定性

的な底質構造類型を定量評価できると考え、その関係を図-6で調べた。図には類型ごとの平均露出率とその標準偏差を示したが、その相関は良好で、底質構造類型を以下のように礫露出率で区分することを提案する。(1)1.0以上,(2)0.8~1.0,(3)0.6~0.8,(4)0.3~0.6,(5)0~0.3,(6)0.

4. 矢作川におけるカワシオグサの繁茂状況調査

付着藻類の群集の中でも、糸状藻類の卓越するものは、攪乱の少ない状態が一定期間続いたあとに生じる極相状態であると考えられる。矢作川中流域では、近年、河川環境の変化に伴い、糸状藻類カワシオグサの異常繁茂が顕在化している。糸状藻類は、他の藻類と比較すると、肉眼で確認できるほど大型であり、礫面における繁茂状態を比較的容易に調査可能であることから、対象区間全域で目測によって植被率の平面分布を調べた。

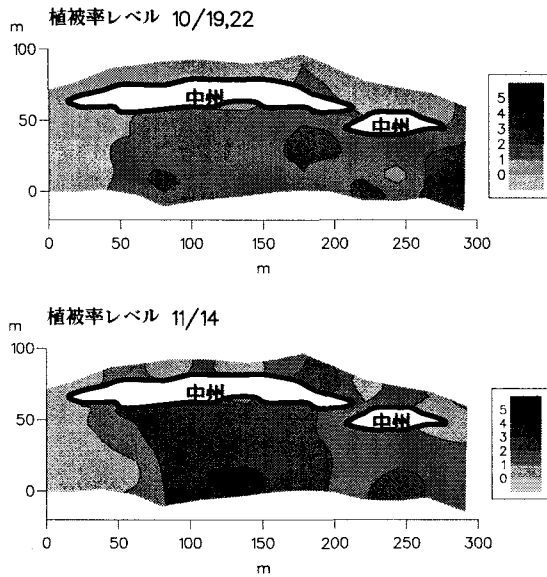


図-7 糸状藻類植被率の空間分布

植被率レベルの判別に当たって、次のような5段階のクラス分けを利用した。(1)植被率が0~5%,(2)5~25%,(3)25~50%,(4)50~75%,(5)75~100%。図-7には、10月19日及び22日、11月14日の調査結果から、糸状藻類の植被率レベルの平面分布を表示する。図より植被率レベルは、比較的高いレベルを持つ区間が10月と11月で異なった傾向が見られる。すなわち、10月の時点では150mより下流の早瀬の区間で繁茂しているのに対し、11月の時点では、それより上流の平瀬区間で繁茂している様子が見てとれる。流速、水深といった物理量そのものを生育環境適性指標に直接選択できないことが示唆される。もっとも敏感に変化した指標は図-8に示すように底質構造であるが、2度の調査で相反する結果となっている。これは植被率がそれまでの生育適性の累積の結果

であるため、生育環境としては流況を媒介とした履歴性の考慮が重要となる。

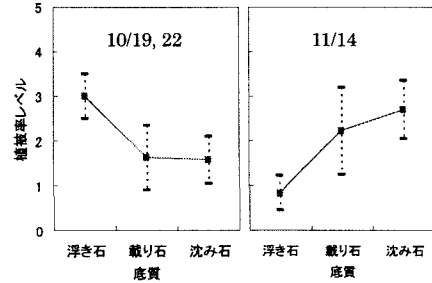


図-8 糸状藻類植被率と底質構造類型の関係

5. カワシオグサの異常繁茂抑止策

矢作川中流域のような砂を輸送する礫床河川においては、河床が流水の作用によって攪乱される度合いを河床に繁茂する糸状緑藻に対するインパクトという観点から次の3段階のレベルに分けることができる。(1)付着藻類の基盤である河床構成礫が移動し、礫表面が大きな攪乱を受ける。(2)基盤の礫は移動しないが、砂が礫間あるいは礫上を移動することによって礫表面が攪乱を受ける。(3)河床を構成する砂礫はともに移動しないが、大きな流速の作用が礫表面に攪乱を与える。

(1)では礫自体が移動して周辺の礫と衝突、摩擦を繰り返して、糸状緑藻の繁茂基盤が破壊される。この攪乱レベルでは、糸状緑藻のほとんどが消滅してしまう。適度な頻度で攪乱レベル(1)が生起すれば、糸状緑藻の異常繁茂は生じないものと期待される。

しかしながら、現在の矢作川中流域では、河床のアーマー化が顕著であり、平均年最大流量程度の洪水によってすら河床礫はほとんど移動せず、このことが、近年のカワシオグサの異常繁茂の大きな要因となっているものと考えられる。この程度の洪水規模でも攪乱レベル(2)が作用すれば、礫表面は砂粒子の衝突や摩擦でそれなりの糸状緑藻の剥離が期待される。著者ら³⁾は、こうした掃流砂輸送によるカワシオグサ剥離効果について、長さ3cm程度のカワシオグサを基盤の礫ごと矢作川中流域から採取して室内実験を行い、砂の輸送によってカワシオグサが剥離されることを確認するとともに、その剥離速度は砂が礫面に衝突する際礫面に与える仕事量に比例することを確認した。この仕事量は、流砂量、砂の粒径の1/3乗、摩擦速度の2/3乗に比例する。このことから、適度な頻度、大きさを攪乱レベル(2)が生じることにより、糸状緑藻の生育を遅らせて、異常繁茂を抑止することができることが期待される。

現在の矢作川中流域では、図-1に示したように河床礫の間隙を埋める砂の量がかつてより少なく攪乱レベル(2)が生起しがたい。さらに、悪いことに、多くのアーマー化した河床礫間隙には、粘着性を有するシルトや粘土

が入り込んで固着していたり、造網型底生動物の棲家に使われ固着している状況がしばしば観察される。

このような攪乱レベル(2)の発生頻度、規模の減少が、上述の攪乱レベル(1)の頻度の減少とともに、近年のカワシオグサの異常繁茂の要因の一つとなっていると考えられる。

なお、攪乱レベル(3)では大型糸状緑藻の繁茂を抑制することは難しい。十分な流体力が期待できないし(3cm程度のカワシオグサは 2m/s 程度の流速の作用では剥離しない³⁾), 大きな流速は糸状緑藻の剥離を促進する一方で、糸状緑藻のマット内の不要物を洗い流したり、栄養塩をマットのより深部にまで行き渡らせて生育を促進する効果があるからである^{7,9)}。

以上から、矢作川中流のようにアーマー化し、またその底質移動が期待できない河道では、掃流砂運動の活発化にカワシオグサ異常繁茂抑止策を期待することになる。

6. カワシオグサ繁茂動態シミュレーション手法

一般に、生物の生長過程はロジスティック曲線に従う場合が多い¹⁰⁾。本章では、河床攪乱による剥離がない場合の糸状緑藻カワシオグサの生長過程がロジスティック曲線で近似できるものとし、これに、掃流砂による剥離を考慮したカワシオグサ消長のシミュレーションを行なう。ここでは、カワシオグサの植被率を対象とし A^* で表す。飽和植被率 A_{max} は、栄養塩、光の供給状況、流速によって変化するが、ここでは、飽和植被率で「異常繁茂状態」であるとみなしうるレベルの植被率となることを前提とし、飽和植比率に対して、植被率がどの程度で推移するかを調べることにより、異常繁茂が生じるかどうかを議論することとする。よって、以下では相対植被率 A^*/A_{max} を取り扱うものとする。

相対植被率 A^* について、ロジスティック生長は次の微分方程式で記述される¹⁰⁾。

$$\frac{dA^*}{dt} = \varepsilon(1 - A^*)A^* \quad (1)$$

ここで、 ε : 生長率である。上式の解は、 $t=0$ で $A^*=A_0^*$ として、次のように書ける。

$$A^* = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{A_0^*} - 1\right) \exp(-\varepsilon t)} \quad (2)$$

ところで、河床礫間や礫上を砂が輸送されることによって、カワシオグサの剥離が生じる。剥離を考慮すれば、無次元植被率 A^* の消長は次式で記述される。

$$\frac{dA^*}{dt} = (\varepsilon - p)A^* - \varepsilon A^{*2} \quad (3)$$

ここで、 p : 剥離率であり、河床の状態、流量によって変化する量である。上式の解は、 $t=0$ で $A^*=A_0^*$ として、次

のように書ける。

$$A^* = \frac{1}{\frac{\varepsilon}{\varepsilon - p} + \left(\frac{1}{A_0^*} - \frac{\varepsilon}{\varepsilon - p}\right) \exp\{-(\varepsilon - p)t\}} \quad (4)$$

また、平衡状態での相対植被率 A_e^* は、式(3)で $dA^*/dt=0$ として、次のようになる。

$$A_e^* = \frac{\varepsilon - p}{\varepsilon} \quad (5)$$

掃流砂移動が完全にとまってしまったときの A_e^* の値は 0 なので、以下では、掃流砂移動の回復で大型藻類の繁茂が相対的にどの程度抑止できるかの割合を A_e^* の値で示すことができる。

ところで、流況が確率的であるため、攪乱に支配される剥離率 p は確率的に与えられることになる。一方、生長率は、栄養塩の補給、光エネルギー供給、藻類の遷移に関係する(河川工学の分野でも、最近赤松ら¹¹⁾や浅枝ら¹²⁾の研究がある)が、ここでは、時間によらず一定であるとして、現地観測データから次のように与えることとした。白金¹³⁾は、矢作川中流域において、タイル状の基盤を河道内に設置して、そこに繁茂するカワシオグサの植被率、藻長等を調べている。タイル設置後約 3~5 ヶ月程度で、いったん植被率が最大値となるが、この間の流量履歴には大きな出水は含まれておらず、ほぼ攪乱が作用しない状態での生長である($p=0$)と考えてよい。なお、モニタリングは、比較的流速の速い領域 (0.5~0.8m/s) と遅い領域 (0.2~0.4m/s) で行なわれてた。タイル設置後約 3~5 カ月後にいったんほぼ平衡状態に至った状態での植被率を飽和植被率とみなし、流速の速い領域、遅い領域でそれぞれ $A_{max}=40\%$, 90% とした。このモニタリングでの相対植被率 A^* の時間的変化は図-9 に示すとおりで、式(2)が最も実測値と適合するように成長率 ε の値を求めた。ここで、 $t=0$ はタイル設置後はじめて有意な植被率の観測が可能となった日とし、このときの植被率を A_0^* とした。生長率は、流速の遅い領域で $\varepsilon=0.06/\text{day}$ 、速い領域で $\varepsilon=0.04/\text{day}$ であり、以後の解析ではこれらの中間をとって、 $\varepsilon=0.05/\text{day}$ を標準値とする。

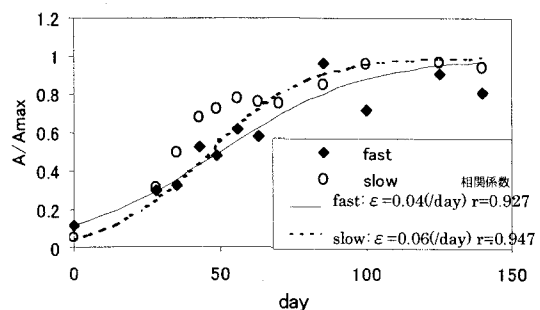


図-9 攪乱の無い状況でのカワシオグサ相対植被率の時間変化

さて、流量の変動を有限の時間ステップごとに与え、式(4)をそれぞれの時間ステップごとに適用して、カワシ

オグサの消長を解析する。このとき、時間ステップを Δt とすれば、時間ステップごとのカワシオグサの無次元植被率 A_c^* についての漸化式は次のようである。

$$A_{c,i+1}^* = \frac{1}{\frac{\varepsilon}{\varepsilon - p_i} + \left(\frac{1}{A_c^*} - \frac{\varepsilon}{\varepsilon - p_i} \right) \exp\{-(\varepsilon - p_i)\Delta t\}} \quad (6)$$

添字 i ：時間ステップ i における量であることを示す。

7. アーマー化河床での掃流砂による剥離率

アーマー化した路床を図-10のようにモデル化して考える。すなわち、粒径 d_G の礫床の間隙を粒径 d_s の砂が埋めており、礫頂部の高さ Δ_G と砂面の高さの差を Δ_G とする。これは3.での底質構造類型の議論と対応したもので、「礫の露出率」は Δ_G/d_G で定義される。このとき、河床の等価砂粗度 k_s は、 Δ_G と d_s との和で与えられるものとし、単位幅流量 q とエネルギー勾配 I_e が与えられたときの水深を式(8)で求める。

$$h = \left\{ \frac{(\Delta_G + d_s)^{1/3} q^2}{7.66^2 g I_e} \right\}^{3/10} \quad (7)$$

ここに、 g は重力加速度である。

ところで、砂面は突出した礫の生む流れで遮蔽されるため、有効摩擦速度を見積もるのに芦田・藤田¹⁴⁾に倣って遮蔽係数 k を導入する。遮蔽係数を用いて、砂面有効無次元掃流力 $\tau_{e,c}$ は次式のように書ける。

$$\tau_{e,c} = \frac{k^2 h I_e}{(\sigma/\rho - 1)gd} \quad (8)$$

芦田・藤田¹⁴⁾および道上ら¹⁵⁾の実験結果を元に、遮蔽係数をさしあたって次式で見積もることとする。

$$k^2 = 1 - \frac{\Delta_G}{d_G} \quad (9)$$

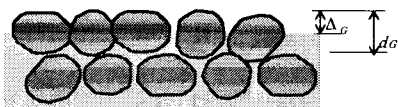


図-10 アーマー化路床のモデル

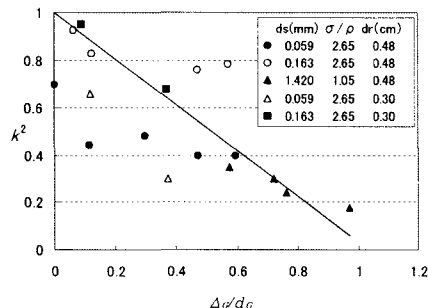


図-11 礫の露出率に対する砂面遮蔽係数の見積もり

このようにして見積もられた有効掃流力を、芦田・道上式¹⁶⁾に適用して礫間を流送される流砂量を評価する。

さて、著者ら³⁾は掃流砂(saltation 粒子)の衝撃力でカワシオグサが剥離する過程を以下のように扱った。すなわちカワシオグサの剥離速度 dA/dt は、次のように書ける。

$$\frac{dA}{dt} = -pA \quad (10)$$

ここで、 p ：剥離率であり、saltation 運動する砂が礫に衝突する際に礫面になす単位面積・単位時間あたりの仕事量を W_x として、次のように書ける。

$$p = (24 \times 3600) \alpha W_x \quad (\text{day}^{-1}) \quad (11)$$

ここで、 α ：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、 $1.23 \times 10^4 \text{N}^1 \text{m}$ が適当であった。

Saltation 運動する砂がレキ面に衝突する際に礫面になす単位面積・単位時間あたりの仕事量については、石橋¹⁷⁾による滑面上での saltation 運動解析をもとに、次のように書けることがわかった。

$$W_x = \gamma q_a d_s^{1/3} u_{*c}^{2/3} \quad (12)$$

ここで、 γ ：礫の材料特性に関わる係数であり、 $2.02 \times 10^5 \text{Nm}^4 \text{s}^{2/3}$ が適当とされた。

以上により、 d_G ：礫の粒径、 d_s ：砂の粒径、 I_e ：エネルギー勾配および Δ_G ：砂面からの礫の突出高から、単位幅流量 q に対する剥離特性の変化を見積もることができる。矢作川中流域の現状代表値($d_G=0.1\text{m}$, $d_s=0.002\text{m}$, $I_e=1/670$)に対して試算したものを図-12に示す。礫の露出度が大きいほど砂面有効掃流力が減じ、剥離率は小さくなっている。なお、図中、線が描かれていない流量 q の範囲では、砂が移動動しないため p 値はゼロである。

これらの結果は、砂が粘着性を持たないものと仮定して計算したものであるが、礫間隙にシルトや粘土が詰まりだすと、これらが固着して砂の無次元限界掃流力が大きくなることが考えられる。

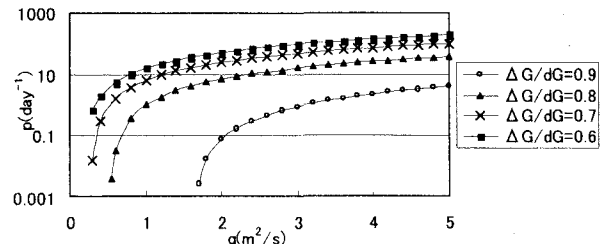


図-12 単位幅流量とカワシオグサ剥離率の関係

8. カワシオグサ繁茂動態シミュレーションの例

矢作川42km地点の上流には、中部電力越戸ダムが存在しその放流量を42km地点の河道流量とみなした。

1970 年以降(矢作ダム完成後)の日平均流量の出現頻度を調べこれに従うように乱数発生にもとづくシミュレーションを行った。

図-13 は、砂面からの礫頂部の突出度とレキの粒径の比 Δ_c/d_G が、0.84, 0.9 の場合における無次元植被率の時間変化のシミュレーション結果($t=4000\sim 6000$ 日, 植被率についての初期条件の影響が無くなった状況)を示したものである。図には、流量時系列も併示した。

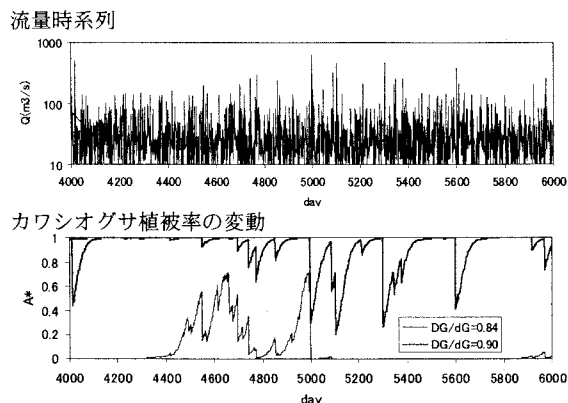


図-13 カワシオグサ繁茂動態のシミュレーション例

$\Delta_c/d_G=0.90$ の場合、ほとんどの時期で植被率は飽和状態に近い値を示す。これは、稀に生起する大きな流量が作用したときのみ破壊が生じるが、すぐに大きな植被率へと移行するためである。一方、 $\Delta_c/d_G=0.84$ の場合には、ちょっとした出水ですぐに剥離が生じるために、多くの時期で植被率がゼロに近い状態となる。出水がない期間が続いたときのみ、植被率は大きくなる。

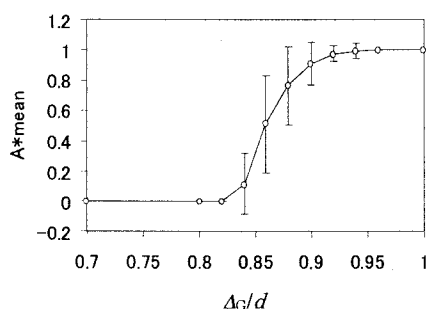


図-14 露出率による平均相対植被率の変化

図-14 はこうした変動する無次元植被率の平均値と標準偏差を Δ_c/d_G に対して示したもので、 $\Delta_c/d_G > 0.90$ では大きな流量での剥離も生じにくくなり、 $\Delta_c/d_G < 0.80$ では逆に植被率は常にゼロに近い値となる。ここでの計算条件では、 Δ_c/d_G が 0.80 から 0.90 へ移行する間に平均無次元植被率は急増する。また、この急増する間では変動も大きい。この結果から、 Δ_c/d_G がある閾値を越えるとき異常繁茂が生じるといえ、この計算条件では、その閾値は $\Delta_c/d_G=0.80$ 程度である。逆に、カワシオグサの異常繁茂を抑制するには、 $\Delta_c/d_G < 0.80$ 程度である必要がある。

9. あとがき

矢作川中流部のカワシオグサ異常繁茂を題材に、大出水がもはや期待し難いアーサー化路床での大型付着藻類の異常繁茂の動態をさぐるとともに、礫間掃流砂の藻類繁茂抑止効果を検討するシミュレーションモデルを提案した。今後、矢作川での実践を踏まえて実用性を確保するとともに、藻類動態記述のための基礎的研究もあわせて進めたい。本研究の遂行にあたっては、豊田市矢作川研究所の協力を得た。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 田代喬, 辻本哲郎: 河床攪乱頻度を指標とした生息場評価による瀬・淵構造の変質に関する考察, 水工学論文集, 第 46 巻, pp.1151-1156, 2002.
- 2) 田中蕃: 砂利投入による河床構造回復の試みとその効果 IV, 矢作川研究, No.4, pp.135-141, 2000.
- 3) 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.
- 4) 内田朝子: 矢作川における付着藻類と底生動物その 4, 矢作川研究, Vol.4, pp.5-18, 2000.
- 5) 野崎健太郎, 内田朝子: 河川に置ける糸状藻類の大発生, 矢作川研究, No.4, pp.159-168, 2000.
- 6) 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, 279p., 1995.
- 7) Borhardt, M.A.: Nutrients, *Algae Ecology*, edited by R.J. Stevenson et al., Chapt.6, Academic Press, pp.375-402, 1996.
- 8) Stevensen, R.J.: The stimulation and drag of current, *Algae Ecology*, edited by R. J. Stevenson et al., Chapt.11, Academic Press, pp.321-336, 1996.
- 9) Peterson, C. G.: Response of benthic algal communities to natural physical disturbance, *Algae Ecology*, edited by R. J. Stevenson et al., Chapt.13, Academic Press, pp.375-398.
- 10) 寺本英: 数理生態学, 朝倉書店, 183p., 1997.
- 11) 赤松良久, 戸田祐嗣, 池田駿介: 河床付着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.
- 12) 浅枝隆, ズン・ソンホン, 藤野毅: 河床ペ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.
- 13) 白金晶子: 矢作川中流域における糸状緑藻 *Cladophora glomerata* のモニタリング調査-生物班報告一, 河川環境復元総合調査研究事業(矢作川古鼠プロジェクト)平成12年度報告書, 豊田市矢作川研究所, pp.53-60, 2001.
- 14) 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.
- 15) 道上正規, 藤田正治, 三村光太郎: 粗面河床上の平衡浮遊砂濃度分布に関する研究, 平成 4 年度土木学会中国四国支部研究発表会, II-87, pp.264-265, 1992.
- 16) 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.
- 17) 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.

(2002. 4. 15 受付)