

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

EVALUATION OF DISTURBANCE ON RIVERBED BY ESTIMATING DETACHMENT OF ATTACHED ALGAE DUE TO BED-LOAD TRANSPORT

田代喬¹・渡邊慎多郎²・辻本哲郎³

Takashi TASHIRO, Shintaro WATANABE and Tetsuro TSUJIMOTO

¹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)

²学生会員 名古屋大学大学院博士(前期)課程学生 工学研究科地圏環境工学専攻

³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

Disturbance on riverbed is one of the key factors for controlling habitat condition in the middle reach of rivers, which depends on the frequency of the disturbance. If it was lower degree owing to some kinds of human impacts (e. g., dam operation, erosion control works and so on), it could cause degradation of habitat quality for many organisms in the river like nuisance growth of attached algae on the riverbed.

Therefore, the role of the disturbance on riverbed should be evaluated efficiently, but the convectional study didn't pay attention to it. In the present study, we discuss about the estimation of the role of the disturbance on riverbed by using the effect of detachment of attached algae. Introducing the mechanics of bed-load transport and the impact of the bed-load against riverbed and the relationship between the impact and detachment of attached algae, we can estimate the effect of detachment of it.

Key Words : *disturbance on riverbed, detachment of attached algae, bed-load transport*

1. はじめに

今日、ダム建設などの人的インパクトが下流河道の物理環境にもたらす影響は、流況の平滑化、供給土砂の減少による河床低下、河床のアーマー化など様々であるが、これらの変化が、周辺の河川生態系へどのような影響を与えるか、という問題は、依然として未解決であると言わざるを得ない。

こうした中、河川の瀬・淵構造や浮き石・沈み石といった底質の構成の差異に着目した様々な研究¹⁾が行われる一方で、著者ら^{2), 3)}は、河床攪乱頻度に着目し、以下に示す研究を進めてきた。矢作川中流域を対象として、既往の資料分析を行うことによって、河床攪乱頻度の経年変化を算出し、生息場の変化と対応することを示した²⁾。さらに、これを指標として採用し、生息場評価を行うことによって、瀬・淵構造の変化に伴う生息場の変化を考察した³⁾。こうした成果から、河川中流部における物理環境変化を、総合的に、かつ、簡易に判断できる指標の一つとして、河床攪乱頻度の有用性は示されたと考

えられる。

しかしながら、河床攪乱頻度は、河床を構成する材料が動く確率を表現したものであるため、細かな砂が動くのと粗い石礫が動くのとを同列に扱っている上に、これらの材料が動いたことによって、生息場にどのようなインパクトが与えられるかについての検討はなされていない。また、低攪乱河床においても、上流から流送される比較的細かな砂の河床に与える攪乱作用が、付着藻類の繁茂を制御しうることから、生息場の維持・復元に寄与する可能性も指摘されている⁴⁾。そこで、河床攪乱作用を、①河床を構成する石礫が動くことによるもの、②河床は動かないが、流送砂礫が河床の石礫に与える衝撃によるものと定義し、検討を行う。

本研究では、河床の石礫に生じる付着藻類の更新は、河川中流域の生息場の形成・維持に重要であり、河床攪乱に依存しているとの認識から、河床攪乱作用を適正に評価することを目的とする。具体的には、まず、対象地点である矢作川中流域における河床攪乱作用の変化を整理し、掃流砂礫の衝撃による付着藻類剥離のメカニズムを記述した上で、現地状況を中心とした種々の条件下に

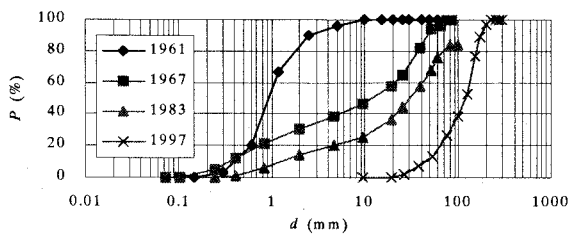


図-1 42km地点における粒度分布

おける付着藻類の剥離効果の変化を推定することによって、河床攪乱作用の評価を試みている。

2. 矢作川中流域における河床攪乱作用の変化

矢作川は、幹線流路延長117km、流域面積1,830km²を有する1級河川で、河口から34km～80km地点の本川区間に7つのダム・低堰堤が建設されており、矢作ダム（80km地点、1971年建設）のみが洪水調節機能を有している。愛知県中部を流れる本川中流域では、近年、アユ漁獲高の減少、糸状藻類の異常繁茂などの問題が顕在化し、矢作ダムを始めとするダム・低堰堤群の影響と憶測されている⁵⁾。本章では、越戸ダム（45.8km地点）の下流に位置する42km地点を対象とし、矢作川中流域における河床攪乱作用の変化に着目する。

(1) 河床構成材料の変化

42km地点の粒度分布（建設省中部地方建設局豊橋工事事務所提供）の経年変化を図-1に示す。1967年以前には河床表層に全く存在しなかった粒径10～30cm程度の「玉石」が、1983年に出現し、1997年には大半を占めており、河床のアーマー化が進行している様子がわかる。

(2) 河床横断形状の変化

42km地点における横断面（建設省中部地方建設局提供）の経年変化に着目する。1960年代以前、低水路内は起伏が乏しく、流路は単一化されていなかったが、1960年代後半から左岸側の河床が低下し、ここに流れが集中した結果、低水路や砂州が単一化し、1990年代からは固定化の傾向が見られる。図-2には、その変遷状況を表す典型的な例を示す。

(3) 河床攪乱頻度の変化

(1)～(2)で把握した河床材料、横断面の情報と流量データをもとに、1年当たり、どの程度河床材料が移動するかについて、1次元等流計算を用いて推測する。流量には日最大流量の時系列（中部電力越戸ダム管理所提供）を、河床材料としては図-1から得られる平均粒径を、断面形状は図-2に示した横断面を想定した。抵抗則にはManning 則を用い、算出した無次元掃流力 τ_c の時系列から、無次元限界掃流力 τ_{c0} を超過する日数を年毎に整理し、

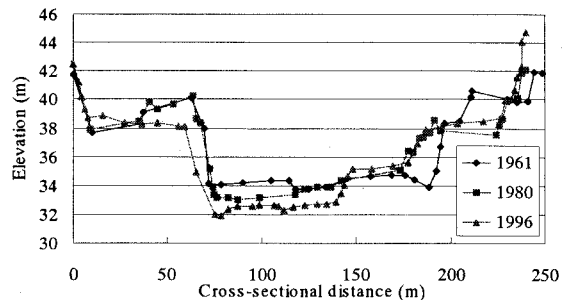


図-2 42km地点における横断面の経年変化

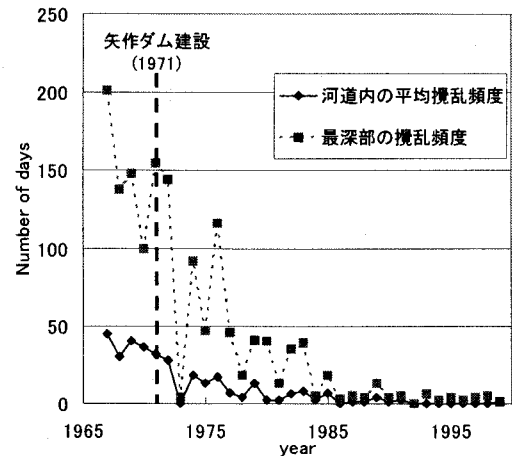


図-3 河床攪乱頻度の経年変化

図-3にまとめた。なお、ここでの τ_{c0} は、混合砂礫の場合に平均粒径に対する τ_{c0} の値が小さくなることを考慮して、0.03とした。矢作ダムが完成した1971年以降、減少し続けてきた河床の攪乱頻度は、1990年以降、特に小さくなり、河床が動きにくくなってきた様子が分かる。こうした変化は、アユ漁獲高の急激な減少、糸状藻類の異常繁茂などの生態系の変質と対応して起こっており²⁾、河床攪乱が生態系に与えるインパクトを適切に捉える必要があると考えられる。

本章では、流量、河床材料、横断地形データから河床攪乱頻度を算出した。以上の検討は、①河床を構成する石礫が動くことによる河床攪乱という前提でのものである。もう一方の、②河床は動かないが、流送砂礫のみの衝撃による河床攪乱については、どんなインパクトをもって攪乱されたと判断するか不明であるため、攪乱頻度の算出は不可能である。しかし、①のような河床攪乱が最早、期待できなくなった河川（例えば、矢作川中流域など）においても、同様の効果が期待される⁴⁾ことから、次章では、このようなアーマー化河床における掃流砂輸送モデルについて記述する。

3. アーマー化河床での掃流砂輸送

アーマー化した路床を図-4のようにモデル化して考える。すなわち、粒径 d_0 の礫床の間隙を粒径 d_s の砂が埋めて

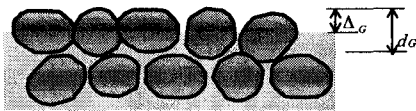


図-4 アーマー化路床のモデル

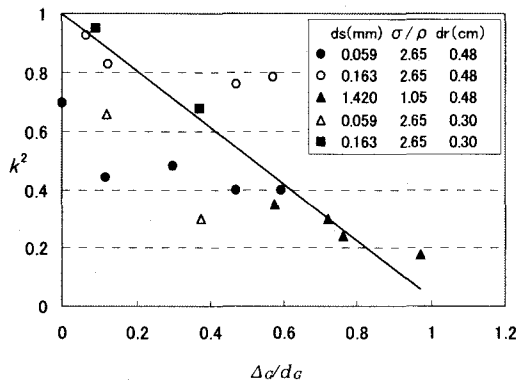


図-5 礫の露出率に対する砂面遮蔽係数の見積もり

おり、礫頂部の高さや砂面の高さの差を Δ_G とする。これは3.での底質構造タイプの議論と対応したもので、「礫の露出率」は Δ_G/d_s 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(1)で求める。

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

ここで、 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⁹⁾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 τ_{*e} は次式のように書ける。

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

芦田・藤田⁹⁾および道上ら⁷⁾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。

$$k^2 = 1 - \frac{\Delta_G}{d_G} \quad (3)$$

このようにして見積もられた有効掃流力を、芦田・道上式⁹⁾に適用して礫間を流送される流砂量を評価する。

以上の水理モデルを踏まえ、次章では、河床攪乱作用を評価する第一段階として、掃流砂礫が、河床にどんなインパクトを与えるかについて記述する。

4. 掃流砂礫による付着藻類剥離のメカニズム

河床の石礫に生じる付着藻類は、他の生物の餌資源と

して、河川中流域の生息場の形成・維持に重要であり、適度な頻度の河床攪乱がその質の維持に役立っている。ここで言う河床攪乱を、前述のように、①河床を構成する石礫が動くことによるもの（以下、移動床と表記）、②河床は動かないが、流送される砂礫が河床の石礫に与える衝撃によるもの（以下、固定（礫）床と表記）と考えると、以下の解析が適用できる。なお、①ではアーマー化路床が出水によって破壊される様子をイメージし、河床からリフトアップされたサルテーション運動する礫による藻類剥離を対象とし、②では礫間隙に存在する砂（図-4参照）のサルテーション運動による藻類剥離を対象としている。

(1) サルテーション砂礫のなす摩擦力による仕事量

石橋⁹⁾は、弾性衝突理論に基づいて、衝突時の砂礫の押し込み深さと砂礫の水平移動速度から、砂礫の衝突時の摩擦力による仕事量を求めている。さらに、滑面開水路において投入された砂礫のサルテーション運動による河床への衝撃力を実測するとともに、粒子運動の解析結果に基づいて、サルテーションの跳躍長さ、高さ、河床への進入角度を逆算して、水理条件による系統的な変化をまとめている。一方、辻本・中川¹⁰⁾は、移動床状態でのサルテーション運動を対象とし、確立過程論的解析を行うことによって、サルテーション特性量を推定している。

まず、石橋⁹⁾の解析結果から、単位時間、単位面積あたりの河床に作用するサルテーション砂礫のなす摩擦力による仕事量 W_x は次のように書ける。

$$W_x = 5.513 \cdot \mu \cdot \frac{1}{\tan \theta} \cdot E_s \cdot \frac{q_B}{L_s A_3 d^3} \quad (4)$$

ここで、 μ ：動摩擦係数、 θ ：砂礫の河床への進入角度（河床に平行な場合ゼロ）、 E_s ：1個の砂礫粒子が河床に衝突するときの運動エネルギー、 q_B ：単位幅あたりの流砂量、 L_s ：サルテーションの跳躍長、 A_3 ：砂礫の3次元形状係数、 d ：砂礫径である。

本研究では、この式(4)を用いて、前述した2種の河床攪乱作用による仕事量を推定できるものとした。式(1)中のパラメータの設定については、移動床条件(①)では、辻本・中川¹⁰⁾の数値模擬の結果、得られたサルテーション特性量を用いた。

なお、固定（礫）床条件(②)については、石橋⁹⁾によると、以下のような関係を導入できる。すなわち、1個の砂礫粒子が河床に衝突するときの運動エネルギーは、石橋の解析においては次のように砂礫の平均衝撃力 F と結び付けられる。

$$E_s = \beta F^{5/3} \quad (5)$$

ここで、 β ：砂礫の弾性体としての性質に依存する係数である。サルテーション特性量に関する石橋⁹⁾の結果を

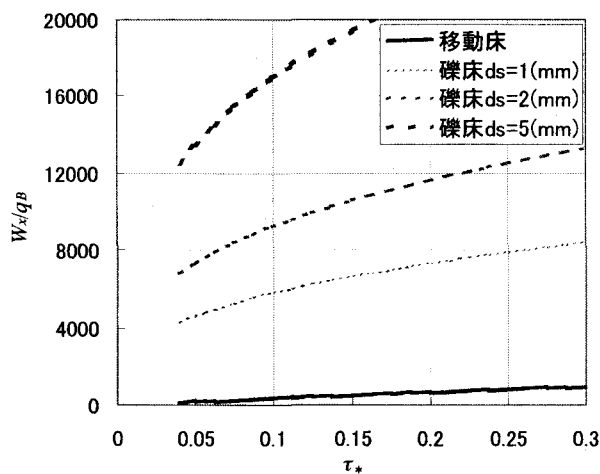


図-6 無次元掃流力と掃流砂礫がなす仕事量との関係

用いると、式(4)は、最終的に以下のように書ける。

$$W_x = \gamma q_B d_s^{1/3} u_*^{2/3} \quad (6)$$

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

図-6には、2種の河床攪乱作用における無次元掃流力と掃流砂礫がなす仕事量との関係を示した。なお、ここでの礫床における礫の粒径は、 $d_G=10\text{cm}$ とした。

(2) サルテーション砂礫による仕事量と付着藻類の剥離特性値との関係

著者ら¹¹⁾は、付着藻類カワシオグサ (*Cladophora glomerata*) を対象として、砂利投入による剥離除去に関する検討を行っている。その結果、藻類の植被面積に着目することによって、掃流砂（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、以下のように扱っている。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。

$$\frac{dA}{dt} = -pA \quad (7)$$

ここで、 p ：剥離率 (s^{-1}) であり、サルテーション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。

$$p = (24 \times 3600) \alpha W_x \quad (\text{day}^{-1}) \quad (8)$$

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。

図-7は、付着藻類の無次元植被面積の時間変化について、剥離率による差異を示したものである。半日程度の時間でも、 p が3.0以上になると、80%以上の藻類の剥離が期待できることが分かる。

ところで、少ない仕事量で効率良く剥離させ、藻類の繁茂を制御するためには、藻類の生長率 ε や繁茂時期なども含めた検討をする必要がある。そこで、攪乱が起こ

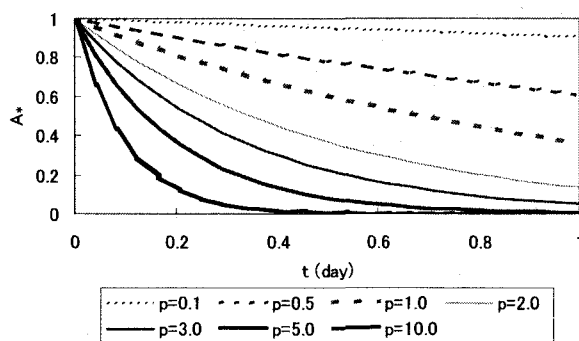


図-7 付着藻類植被面積の時間変化の比較(1)

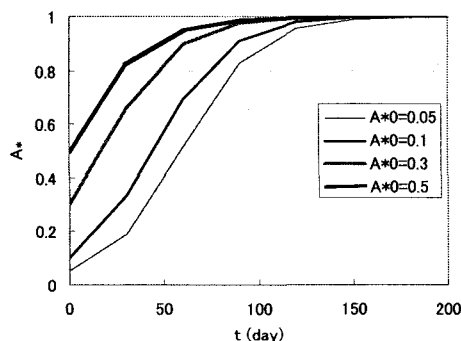


図-8 付着藻類植被面積の時間変化の比較(2)

らない条件下での藻類の生長状況を予測するために、次に示すロジスティック方程式¹²⁾を用いて、検討する。

$$\frac{dA^*}{dt} = \varepsilon (1 - A^*) A^* \quad (9)$$

図-8は、白金¹³⁾の現地モニタリング調査結果を参考に、生長率 ε を0.05とし、植被面積の初期値を変化させた時の計算結果である。これによれば、95%剥離した後の5%の植被面積しか無い状態からでも、約5ヶ月あれば、十分に繁茂可能であることが示されている。ここで検討しているカワシオグサは、夏場の高水温期（25度以上）以外では繁茂しうる¹⁴⁾ので、約9ヶ月間の生長期を有すると考えられる。従って、もし、植被面積を50%以下に制限しようとするならば、95%以上剥離可能な河床攪乱 ($p=3.0$ 程度では、継続時間は約1日) を、最低でも年に4~5回起こす必要があると考えられる。

5. 付着藻類の剥離効果から見た河床攪乱作用

前章では、付着藻類カワシオグサの剥離に必要な河床攪乱のインパクトとそのメカニズムについて示した。本章では、これらを踏まえ、各種水理条件と付着藻類剥離率の関係について整理する。さらに、実際の河川での藻類剥離がどのように起きてきたかについて、2で示した矢作川中流域を実例とした解析を行い、今後の生息場管理に必要な河床攪乱作用について考察を行う。なお、ここでは、前章と同様に2種の河床攪乱作用を対象とした。

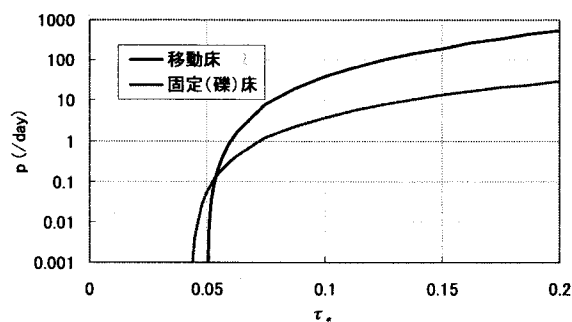


図-9 無次元掃流力 τ_c と藻類剥離率 p の関係

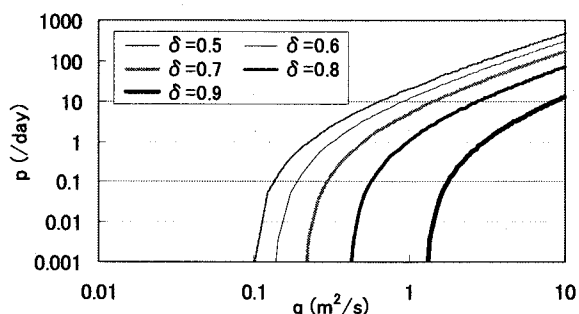


図-10 礫露出率 δ をパラメータとした単位幅流量 q と剥離率 p の関係

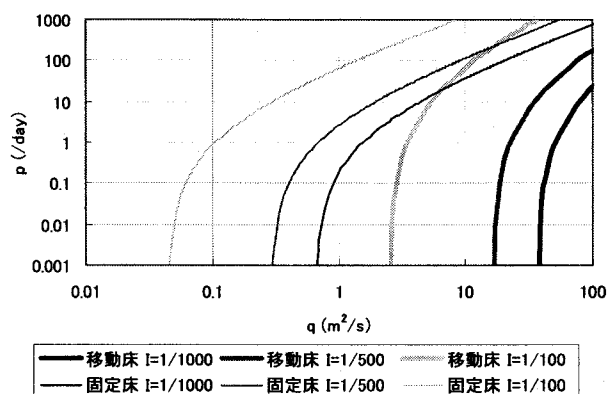


図-11 エネルギー勾配 I_e をパラメータとした単位幅流量 q と剥離率 p の関係

(1) 付着藻類の剥離効果の算定

藻類剥離に必要な水理条件を得るにあたって、1次元水理解析を用いるが、現状の矢作川中流域を意識して条件を設定する。すなわち、礫粒径 $d_c=10\text{cm}$ 、砂粒径 $d_s=1\text{mm}$ とし、移動床条件(①)では河床一面に移動可能な礫が存在し、固定(礫)床条件(②)では移動しない礫床上に砂が存在するものとする。抵抗則には Manning-Strickler の式(式(1)参照)を用い、粗度条件は、移動床条件では礫粒径で与え、固定(礫)床条件では、3に示すように、砂面からの礫露出率 $\delta (=A_c/d_c)$ に応じて変化させるものとする。エネルギー勾配 I_e は通常、 $1/670$ で与えるものとする。こうした解析の結果、得られる無次元限界掃流力 τ_c と剥離率 p の関係を図-9に示す。河床構成材料(①では礫、②では砂)が運動状態にある

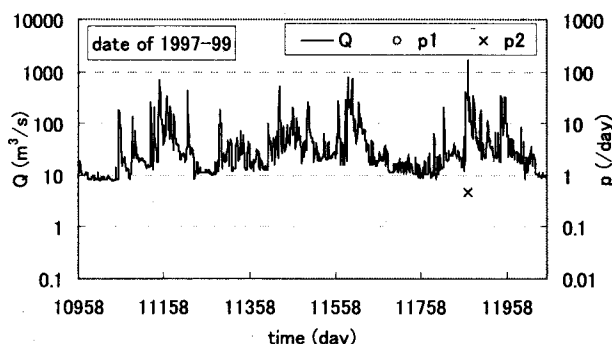
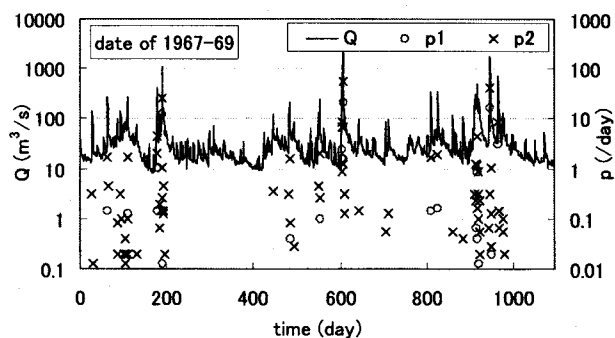


図-12 矢作川42km地点における流量時系列と剥離率 p (p_1 : 河道平均, p_2 : 最深部) の日変化

とき、同一 τ_c の条件下では、移動床条件の方が大きな剥離効果を有することが分かる。また、剥離率 p は無次元限界掃流力 τ_c によって大きく変化することから、 τ_c (この場合、0.05) を越える確率だけで判断してきた河床攪乱作用のこれまでの取り扱いを改善すべきであると考えられる。例えば、1日あたりの剥離率が95%を越えるようなケース(p が3.0以上)を攪乱と判断するならば、移動床条件では $\tau_c=0.065$ が、固定(礫)床条件では $\tau_c=0.095$ が基準値となろう。

図-10には、礫露出率 δ をパラメータとした単位幅流量 $q(\text{m}^2/\text{s})$ と藻類剥離率 $p(\text{day}^{-1})$ の関係を示す。これによると、礫が露出するほど、藻類は剥離しにくくなる。以下の固定(礫)床に関する検討では、一例として、 $\delta=0.8$ の結果を掲載している。

図-11には、エネルギー勾配 I_e をパラメータとした単位幅流量 $q(\text{m}^2/\text{s})$ と藻類剥離率 $p(\text{day}^{-1})$ の関係を示す。同一流量による藻類剥離効果は、固定(礫)床条件の方がはるかに大きいことが分かる。

これらの結果は、礫や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ったり、造網性の底生動物が生息したりするとこれらが固着して無次元限界掃流力が大きくなる^{15), 16)}ことが知られている。今後は、こうした影響も検討していく必要がある。

(2) 矢作川現地条件への適用

矢作川42km地点における実際の流量時系列(日最大

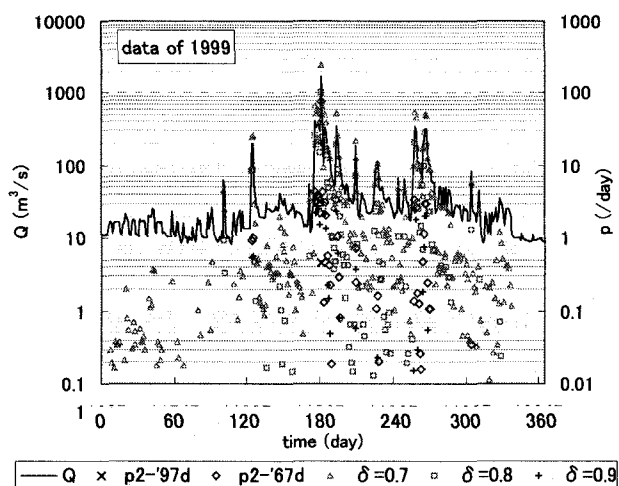


図-13 礫露出率 δ をパラメータとした剥離率 p の日変化

流量), 2で示した横断地形, 河床材料粒径をもとに, 藻類剥離率 p の時間変化を求める。図-12には, 矢作川42km地点における流量時系列と剥離率 p (p_1 : 河道平均, p_2 : 最深部) の日変化を示す。図中, 上段は, 矢作ダム建設前の1967-69年の結果, 下段は, 河床のアーマー化が進行した1997-99年の結果である。図-3に示した河床攪乱頻度の経年変化と同様に, 河床攪乱によるインパクト減少の傾向を呈するが, それだけでなく, 攪乱作用によるインパクトの大きさの日変化も記述し得た。

さらに, 本研究では, 1997年以降のアーマー化した河床を対象として, その生息場変質状況の復元を検討するために, 固定(礫)床条件を仮定した検討を行う。図-13には, 1999年における現地の流量時系列, 横断地形をもとに, 礫露出率 δ をパラメータとして算出した剥離率の日変化を示す。図中には, 図-12でも示した現地条件による結果(p_2 -97d)と1967年当時の粒径(1.9cm)を用いて算定した結果(p_2 -67d)も併載している。これらを見比べると, 固定(礫)床条件における河床攪乱のインパクトは, 僅かな量の砂しか存在しなかったとしても, 移動床条件における河床攪乱のインパクトを大きく上回ることが分かる。ただし, 河床のアーマー化が進行しなかった場合(p_2 -67dを想定)には, 十分な強度とタイミングを有する河床攪乱作用が確保されることも確認された。これらの結果から判断するに, 河床のアーマー化が進行した「低攪乱河床」では, 砂の投入が有効な生息場復元手法になり得ることが分かる。

6. おわりに

本研究では, サルテーション運動する掃流砂礫の衝撃による付着藻類剥離のメカニズムを解析, その効果を算定し, 河床攪乱作用と付着藻類剥離率の関係を記述した。こうした成果は, 低攪乱河床における生息場変質状況の評価やその復元を進めていく上での緒となるものである。

今後は, 河川生態系の工学的評価を目的とした検討を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 例えば, 島谷幸宏, 小栗幸雄, 萱場祐一: 中小河川改修前後の生物生息空間と魚類相の変化, 水工学論文集, 第38巻, pp. 337-344, 1994.
- 2) 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, Vol.7, pp. 297-302, 2001.
- 3) 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.
- 4) 辻本哲郎, 北村忠紀, 加藤万貴, 田代喬: 低攪乱礫床での大型糸状藻類の異常繁茂のシナリオ, 河川技術論文集, Vol. 8, pp. 67-72, 2002.
- 5) 田中蕃: 砂利投入による河床構造回復の試みとその効果, 矢作川研究, No.1, pp. 175-202, 1997.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 中川博次, 辻本哲郎: 移動床流れの水理, 技報堂出版, pp. 86-91, 1986.
- 11) 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.
- 12) 寺本英: 数理生態学, 朝倉書店, 183p, 1997.
- 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—, 河川環境復元総合調査研究事業(矢作川古叢プロジェクト)平成12年度報告書, 豊田市矢作川研究所, pp. 53-60, 2001.
- 14) Witton, B. A.: *Biology of Cladophora in Freshwaters*, Water Research Pergamon Press, Vol. 4, pp. 457-476, 1977.
- 15) 芦田和男, 江頭進治, 加本実: 山地流域における侵食と流路変動に関する研究(1)—粘着性材料を含む砂礫の移動限界と流砂量—, 京都大学防災研究所年報, 第25号, B-2, pp. 1-12, 1982.
- 16) 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.

(2002. 9. 30受付)