

特集：古川プロジェクト

原 著

# 河床状態の変化に着目した矢作川中流域における河道動態とそれに伴う生息場の変質

——底生魚・底生動物の分布と大型糸状藻類の繁茂に関する分析——

Study on Dynamics of Geomorphology and Habitat in the Middle Reach of the Yahagi River

—— Analysis on Distribution of Benthic Species and Growth of Macro Filamentous Algae ——

田代 喬・辻本 哲郎

Takashi TASHIRO and Tetsuro TSUJIMOTO

## 要 約

- 1) 矢作川中流域における既往の資料の整理・分析から、近年の河床攪乱頻度の減少が生物相の変化と対応することを示した。
- 2) 現地調査から、矢作川中流域の生息場の現状把握とその評価を行い、特に、底生魚ヨシノボリと造網型トビケラの生息場の関係について考察した。
- 3) 室内水路において、砂利投入によるカワシオグサ剥離実験を行い、サルテーション運動する掃流砂のインパクトによる剥離効果を表現した。
- 4) 低攪乱のためにカワシオグサ繁茂制御が困難な現状河床の自然復元手法について、ロジスティック方程式を援用した藻類の繁茂動態モデルを構築し、矢作川中流域に適用した。この結果、底質状況が藻類の繁茂動態を大きく左右することが示された。

キーワード：生息場、攪乱、底質、底生、大型糸状藻類

## はじめに

近年、我が国の多くの河川では、ダム建設を始めとする各種の人為的インパクトが加えられており、それに伴って生ずる生態系への様々な影響が問題視されてきている。矢作川も例に漏れず、上流でのダム建設、水源地での砂防事業、河原での砂利採取など、多様なインパクトが加えられ、アユ (*Plecoglossus altivelis altivelis*) 漁獲高の減少などの諸問題が顕在化してきた。

従来、河川整備は治水、利水機能の向上を目的としたものであったが、こうした状況を受けて、1997年に河川法が改正され、さらに、1999年には環境影響評価法が制定されるなど、生態系の保全機能にも重点が置かれるようになってきた。河川水理学の分野においても、こうした問題に対処すべく、生息場の評価といった観点から、数多くの研究がなされてきたが、未解決な点も多い。特に、中流河川では、その地質的要因から特徴的な河床構成材料を有することが多く、流れの状況に応じて様々な河床状態を呈し、その多様性が種々の生息場を提供して

いるにもかかわらず、これまでの取り扱いは不十分であった。

本論文は、河床状態の変化に着目し、人的インパクトによって変質させられた生息場の把握及びその自然復元手法を提案することを目的としたもので、古川プロジェクト（研究代表：古川彰教授、関西学院大学）の枠組みの中での河川工学班の研究成果をまとめたものである。本論文の構成を、以下に示す。

①まず、既往の文献・資料の分析から、古川地区（河口から約44km地点）を始めとする矢作川中流域における河道動態を整理し、生息場の変質状況を捉えた。②続いて、現地調査を行い、魚類・底生動物・付着藻類の生息状況を把握、その現状を評価した。③さらに、糸状緑藻カワシオグサ (*Cladophora glomerata*) を対象として、その生態を把握するとともに、室内水路における砂利投入による藻類剥離実験を行い、その剥離特性を調べた。④最終的には、カワシオグサの繁茂動態モデルを構築し、現地条件に基づいたシミュレーションを行い、その繁茂制御に関する検討を行った。

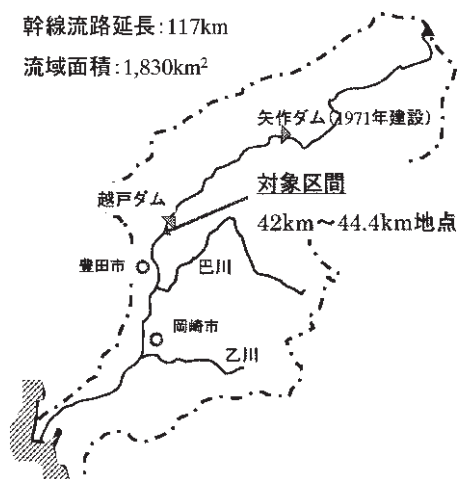


図1 矢作川流域概要図。

### 矢作川中流域の河道動態と生息場の変質

矢作川は、幹線流路延長 117 km、流域面積 1,830 km<sup>2</sup> を有し、中下流域で巴川、乙川などの支川を合わせ、三河湾に注ぐ 1 級河川である (図 1 参照)。流域は長野、岐阜、愛知の 3 県に及び、河口から 34 km～80 km 地点の本川区間に 7 つのダム・低堰堤 (上から矢作、矢作第二、笹戸、百月、阿摺、越戸、明治用水) が建設されているが、洪水調節機能を有しているのは、1971 年に建設された矢作ダム (80 km 地点) だけである。

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・低堰堤群の影響によるところが大きいと憶測されている (田中, 1997)。本章では、越戸ダム (発電用に 1929 年建設, 45.8 km 地点) の直下流に位置する 42 km～44.4 km 区間を対象とし、矢作川中流域における河床のアーマー化 (粗粒化) がもたらす河床攪乱頻度の低下に着目して、議論を進める。

#### (1) 流量特性の変化

中部電力越戸ダム管理所のゲート操作記録 (1943～1999) より、発電使用水量、ゲート放流量を調べ、それらの合計をもって対象区間の流量とした。こうして得られた日平均流量、年最大流量 (時間平均流量) を用いて、矢作ダム建設前後を比較する。矢作ダム完成は 1971 年 3 月であるが、その後の湛水期間を考慮して、ダム運用前 (1970 年以前) と運用後 (1973 年以後) に分けてデータ整理を行うこととした。図 2 に年最大流量の経年変化、図 3 に日平均流量の平均値 (Ave)、標準偏差

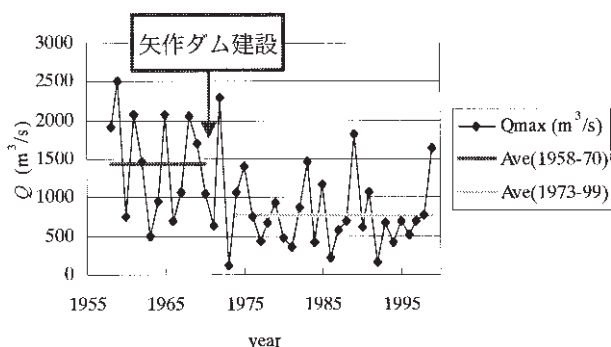


図2 年最大流量の経年変化。

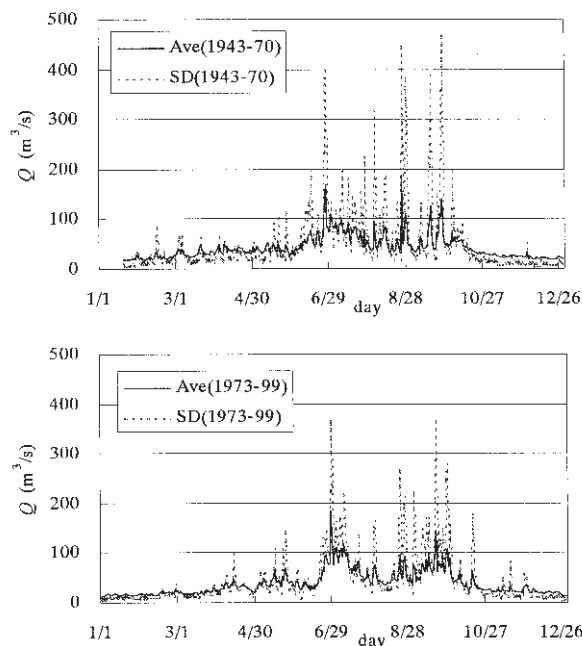


図3 日平均流量の年間変動。  
(上: 1943-70 年, 下: 1973-99 年)

表1 矢作ダム運用前後の流況変化。

| 年       | (m <sup>3</sup> /s) |    |    |    |
|---------|---------------------|----|----|----|
|         | 豊水                  | 平水 | 低水 | 渇水 |
| 1943-70 | 40                  | 25 | 20 | 10 |
| 1973-99 | 35                  | 20 | 15 | 10 |

(SD) の年間変動を示す。

年最大流量の平均値は、矢作ダム運用前後で 1,500 m<sup>3</sup>/s 程度から 800 m<sup>3</sup>/s 程度にまで落ち込んでいる。また、ダム運用前後における日平均流量は、平均値の有意な差は無いものの、標準偏差については顕著な違いが認められ (図 3 参照)、豊・平・低水流量 (表 1 参照) についても低減されている。こうした流況特性の変化をダム運用の影響と結び付けて議論するには、流域内降水量の変化についても言及する必要があると考えられるが、近

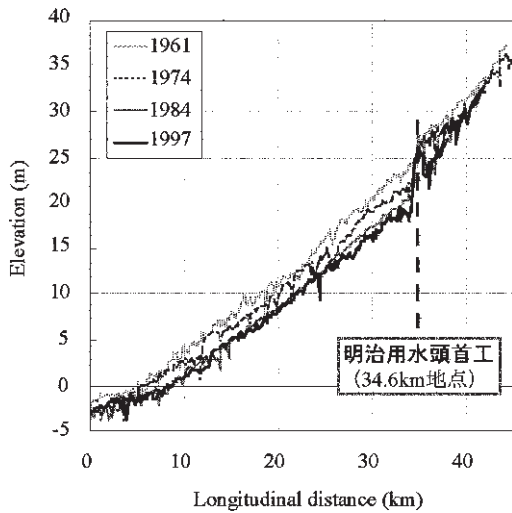


図4 最深河床の縦断変化。

年、矢作川中流域における流況は平滑化の傾向にあることが分かる。

### (2) 河床縦断形状の変化

最深河床の縦断変化について、河口から42 km地点までを図4に示す。

最深河床の低下が年々下流へ伝播しており、明治用水頭首工(1959年建設, 34.6 km地点)より下流では、最高で5~6 m程度の河床低下が起こっている一方、その上流における河床低下は2~3 m程度の範囲にある。

### (3) 河床構成材料の変化

平均粒径の縦断変化及び42 km地点の粒度分布の経年変化をそれぞれ図5, 図6に示す。これらから、河床の粗粒化が年々進行している様子が分かる。平均粒径の縦断変化を見ると、明治用水頭首工(34.6 km地点)、越戸ダム(45.8 km地点)などのダム直下流における変化が特に顕著であり、上流から河床の粗粒化が伝播している。河床の粗粒化は、上流からの供給土砂の不足に起因しており、上流域での砂利採取、砂防整備、ダムによる土砂の堰き止めなどの影響が考えられる。また、42 km地点の粒度分布を見ると、1967年以前には河床表層に全く存在しなかった粒径10~30 cm程度の「玉石」が、1983年に出現し、1997年には大半を占めている。このことと(2)で示した河床縦断形状の変化と併せて考えると、砂で覆われていた河床から、砂が輸送されて河床低下が起こり、2~3 mm程度の砂からなる層を洗掘し尽くした後に、礫(玉石)層が露出してきたと考えることが出来る。

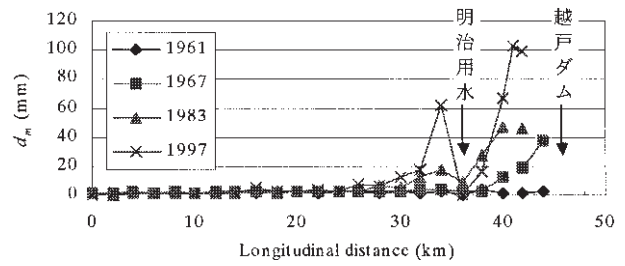


図5 平均粒径の縦断変化。

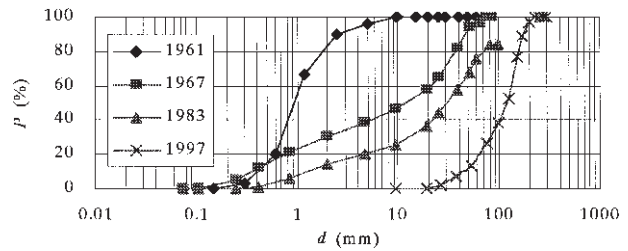


図6 42 km地点における粒度分布。

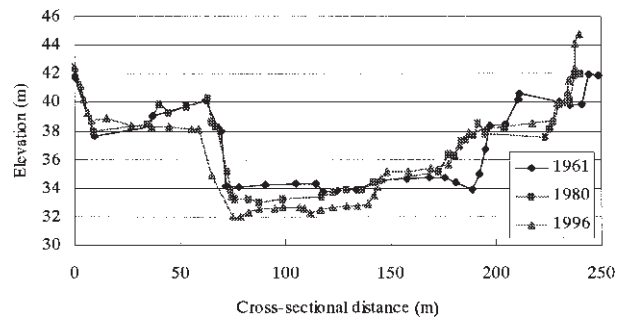


図7 42 km地点における横断面の経年変化。

### (4) 河床横断形状の変化

42 km地点における横断面の経年変化(図7参照)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、滞筋や砂州が単一化し、1990年代には固定化した。この当時の低水路には、波高が小さいながらも砂州が発達している様子が伺えるが、1967~83年当時の対象区間は、年最大流量の水利条件下で、黒木・岸(1994)の中規模河床形態の領域区分に照合すると、交互砂州の領域に属している。

### (5) 河床攪乱頻度の変化

(1)~(4)で把握した流量、河床材料、横断面の経年変化をもとに、42 km地点に着目して、1年当たり、どの程度河床材料が移動するかについて、1次元等流計算を行って推測する。流量には日最大流量の時系列を、河床

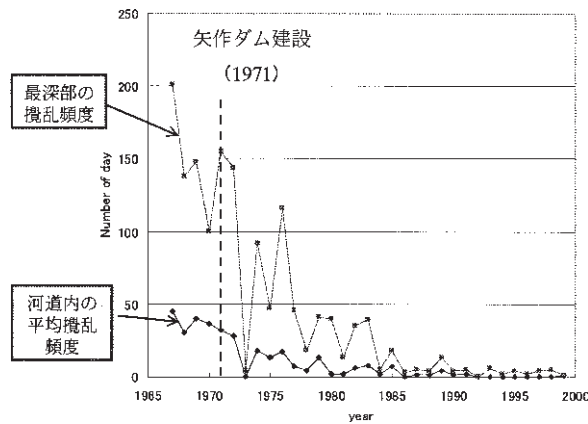


図8 河床攪乱頻度の経年変化。

材料としては図5に示した平均粒径を、断面形状は図7に示した横断面を想定した。抵抗則にはManning則を用い、Stricklerの式によって粗度係数 $n_T$ を得るものとした。ここでの等価粗度 $k_s$ は、 $k_s=2.5d_m$  ( $d_m$ :平均粒径)で与えた。

混合砂礫床の場合、砂粒レイノルズ数の十分大きい条件下では、平均粒径に対する無次元限界掃流力 $\tau_{*mc}$ の値は、均一粒径の場合のそれ( $\tau_{*c}=0.05$ )よりも小さくなる(山本, 1994)。ここでは、 $\tau_{*c}=0.03$ とし、算出した無次元掃流力 $\tau_*$ の時系列から、その超過日数を年毎に整理し、図8にまとめた。

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。

#### (6) 生育・生息場の変質

矢作川中流域における生物相について、既往の研究から魚類相、付着藻類相の変遷をまとめる。

山本(2000)は、アユを指標とし、その釣果の記録から魚類相の変遷を考察する中で、古岸地区(44 km地点付近)における1980年代と90年代の釣果に有意な差があることを見出し、アユの生息場の悪化との関連性を指摘している。このような変化は(5)で示した河床攪乱頻度の変化と一致している。

古岸地区において、糸状藻類カワシオグサは1990年代から繁茂している。内田(1997, 2000)は、矢作川中流の広域にわたって、1995年4月から1999年2月に行った付着藻類調査の結果をまとめており、その中で、1995年春から1998年冬の期間、カワシオグサの分布は春及び秋に拡大し、夏及び冬に縮小する傾向にあったが、1998年夏以降は顕著な消長はなく、広域に継続して発生した

と報告している。Petts(1984)によれば、カワシオグサを始めとする付着性緑藻の異常繁茂は、水質が悪化し(有機汚濁が進行し)、さらに河床の攪乱が減少した河川に於ける一般的な傾向であるとされており、アユ釣果の減少と併せて鑑みるに、河床攪乱頻度の変化は生物相の変化とよく対応している。

### 矢作川中流域の生息場の現状とその評価

続いて、矢作川中流域におけるアーマー化の実態と生息場の現状を把握するために、現地調査を行った。対象区間は、42 km地点付近のリーチ(約300 m)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250 mあるのに対し、低水路幅は約100 m、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に共通の特徴を呈している区間である。

#### (1) 物理量調査

まず、GPSとレベル測量を併用して縦断方向約20 m間隔、横断方向約5 m間隔で測量を実施、河床高コンター(図9参照)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、図10, 11に示す。図中、水深はcm、流速はcm/s表示、また空間座標はmであり、このとき(2001年8月17日)の流量は14.9 m<sup>3</sup>/sであった。さらに河床構成材料(底質)について粒度と構造を調査した。粒度は、粒径が(0)50 cm以上、(1)20~50 cm、(2)5~20 cm、(3)1~5 cm、(4)0.1~1 cm、(5)0.1 cm以下の6クラスに、底質構造(類型)は、竹門ほか(1995)の方法を参考に、(1)浮き石2層、(2)浮き石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平面分布として表したのが図12, 13である。

また、矢作川のこのセグメントでは、主として1 cm以下の砂集団と玉石層を構成する粒径20 cm~50 cm集団の組み合わせで河床が構成されている。そこで、砂面と礫(玉石)面の相対位置で先に定義した、浮き石、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、図9で示したコドラートにおいて、その関係を調べた(図14参照)。図には類型ごとの礫の露出率について、その平均値と最大・最小値を示した。底質構造類型と礫露出率の対応関係を見るに、今後のデータ補充によって、おおよそ以下のように区分することが予想出来る。(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。

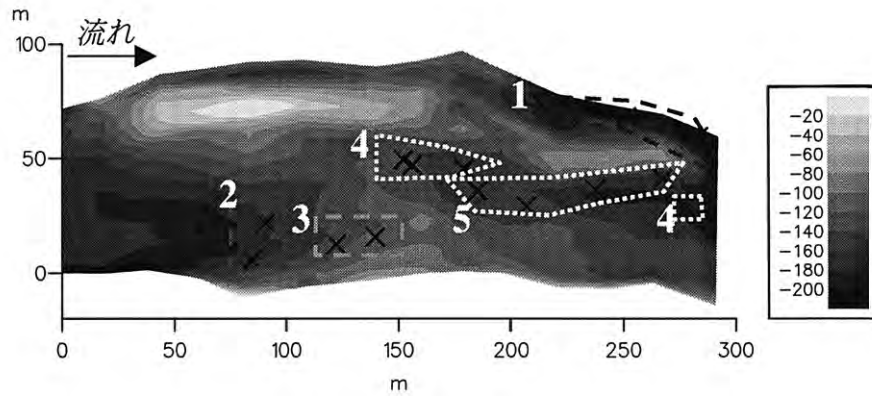


図9 矢作川対象リーチでの河床高コンター（基準杭からの相対高さ(cm)）とコドラート設置点。

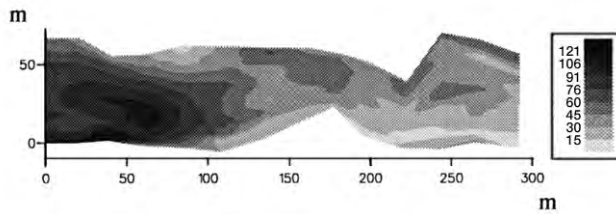


図10 矢作川対象リーチでの水深 (cm) の空間分布。

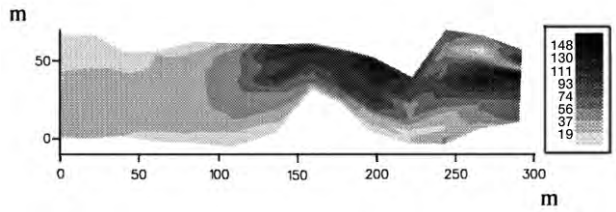


図11 矢作川対象リーチでの流速 (cm/s) の平面分布。

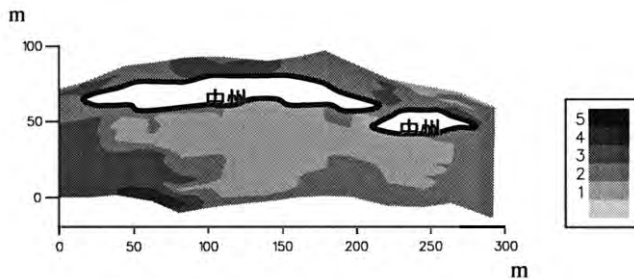


図12 矢作川対象リーチでの底質粒径分布。

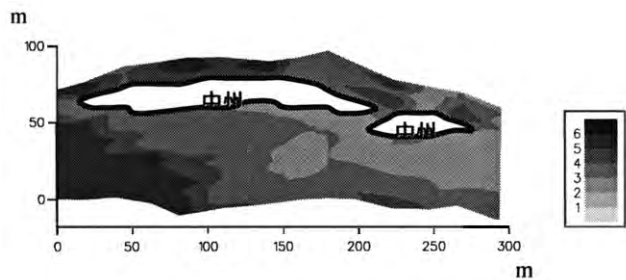


図13 矢作川対象リーチでの底質構造タイプの分布。

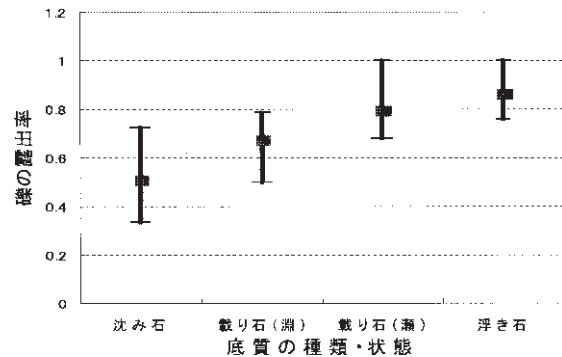


図14 底質構造類型と砂礫の露出度。

## (2) 付着藻類繁茂状況調査

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。カワシオグサは、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出来ることから、対象区間全域で目測によって（面積）植被率の平面分布を調べた。

植被率レベルの判別に当たって、繁茂している様子がほとんど確認できない状態(1)から、ほぼ全面を覆うほどに繁茂している状態(5)までを対象として、次のような5段階のクラス分けを利用した。すなわち、(1)植被率が0～5%、(2)5～25%、(3)25～50%、(4)50～75%、(5)75～100%である。図15には、2001年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、

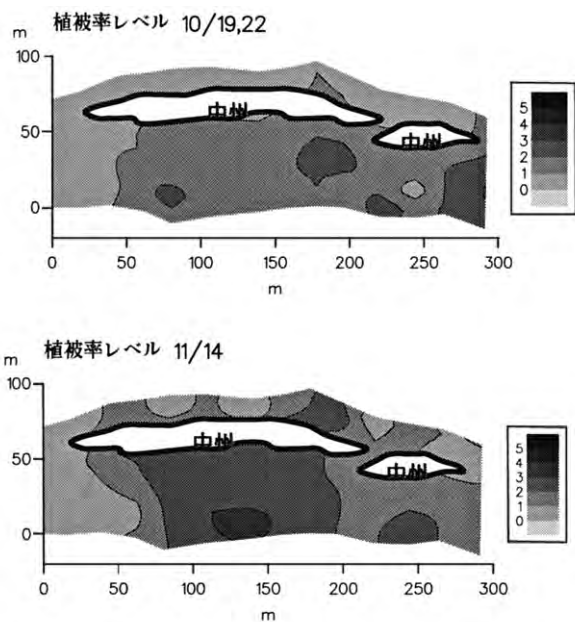


図 15 糸状藻類植被率の空間分布。

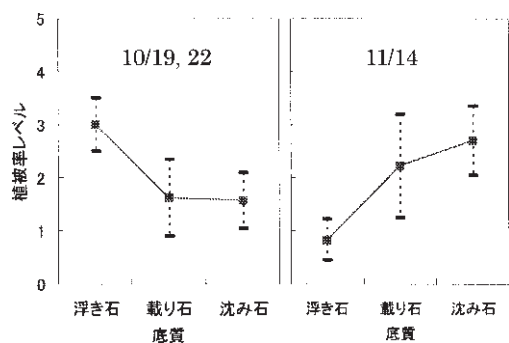


図 16 糸状藻類植被率と底質構造類型の関係。

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ている。もっとも敏感に変化した指標は図 16 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と考えられ、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。

### (3) コドラート内生息状況調査

生息場調査のためのコドラートについては、瀬・淵構造と底質構造類型の組み合わせから、次の 5 つの領域に分け、それぞれ 2～4 ヶ所のコドラート (1×1m) を設置して調査を行った(図 9 参照)。すなわち、1：淵で石無し、2：淵で沈み石、3：淵で載り石、4：瀬で載り

表 2 各領域の水理量平均値。

| 領域 | 流速 (cm/s) | 水深 (cm) | Fr   |
|----|-----------|---------|------|
| 1  | 34.4      | 43.8    | 0.17 |
| 2  | 22.8      | 80.0    | 0.01 |
| 3  | 13.4      | 32.5    | 0.08 |
| 4  | 49.9      | 45.0    | 0.24 |
| 5  | 102.5     | 50.0    | 0.46 |

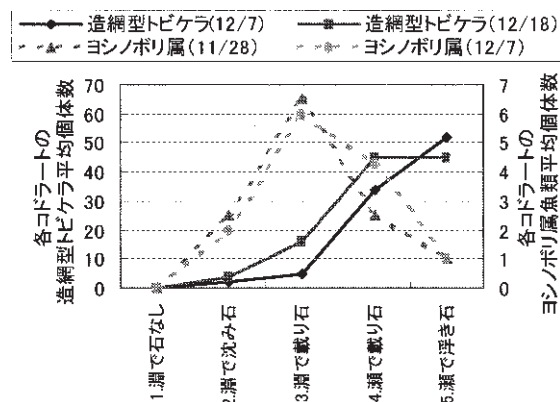


図 17 各領域ごとのヨシノボリ属、造網型トビケラの平均個体数。

石、5：瀬で浮き石である。調査は潜水目視により行い、コドラート内に生息する底生魚および底生生物の種類・個体数を記録した。また、調査時の流速・水深も記録した。表 2 に、各領域における流速、水深の平均値をまとめた。

図 17 には、2001 年 11 月 28 日及び 12 月 7 日に調査したときのヨシノボリ属 (*Rhinogobius* sp.) の領域区分別個体数を示した。これらを比較すると、日付が異なるにもかかわらず、ほぼ同様の傾向を示しており、本研究の対象区間においては、ヨシノボリ属は載り石で流れの緩い場所を好み、石の無い場所にはいないことが分かる。また、図には、造網型トビケラ ((*Stenopsychidae*, *Hydropsychidae*) 12 月 7 日、18 日に調査実施) の領域区分別個体数も併記しているが、領域 3～5 においては、造網型トビケラとヨシノボリ属の個体数の関係から、造網型トビケラが底質の構成・構造を変質させ、ヨシノボリ属の生息場に何らかの影響を及ぼしていると予測される。造網型トビケラは、石と石の間に網を張り、上流から流れ込んでくる有機物を餌にし、網のそばに小石を糸でつなげた巣を作りその中で生息しているため、石間の空隙が減少するばかりか、造網型トビケラの多い河床は動きにくくなり安定する(森下, 1996) ので、前述した底質の変化と密接に関連して生息場の変質が起きている

と考えられる。

#### (4) 生息場の評価

現地調査区間を対象として、生息場評価を行う。生息場の評価には、PHABSIM (Physical Habitat Simulation) 手法を用いるが、その適用については、以下の手順(辻本, 2000)に従う。

##### (4.1) PHABSIM の適用

まず、流速、水深、底質などの物理環境指標  $\xi_i$  を選び、それぞれの指標について、生息場適性を 0~1 の間の数値で評価した選好曲線  $f_j(\xi_i)$  を作成する。各指標への選好性は独立ではないが、個別に考慮し、様々に組み合わせることによって、生息場適性を合理的に評価できる。選好曲線の作成方法については、(I)図鑑的知見から、簡単な関数形を想定する方法の他、(II)観測データからの出現頻度分布に基づいて決める方法がある。一方、水理モデルによって流速、水深、底質粒径などの指標  $\xi_{ik}$  の空間分布 ( $k$ : 位置を表す添え字) を推定できる。これらと選好曲線群から、生息場適性評価値  $\Xi_k$  が求められる。ここでの評価値の算出には、辻本ほか (2000) によって提案された次式を用いる。

$$\Xi_k^{(m)} = p \sqrt{\prod_{j=1}^p \eta_j^{(m)}} = p \sqrt{\prod_{j=1}^p f_j^{(m)}(\xi_{jk})} \quad (1)$$

ここに、 $\eta_j$ : 各指標に対する適性値、 $p$ : 指標の個数、 $m$ : (採餌、産卵などの) 各生活場に応じて設定するモードであるが、ここでは、生活場の違いを考慮しないこととした。

##### (4.2) 選好曲線の作成と生息場評価

各指標に対する適性値を求める選好曲線について、観測データから作成する方法(II)の一例を示す。

- ① 魚種別、サイズ別に選好曲線に取り入れる指標 (流速、水深など) を階級に分ける。
  - ② 階級別に指標自体の頻度のヒストグラム及び出現個体数のヒストグラムをつくる。
  - ③ 出現個体数を指標自体の頻度で除すことにより、各指標と個体数密度の関係を得る。
  - ④ 各指標ごとに、個体数密度を 0~1 に規格化したヒストグラムをつくる。
  - ⑤ ④のヒストグラムをもとに選好曲線を設定する。
- ここでは、ヨシノボリ属魚類を対象に、流速、水深、底質について評価関数を作成する。出現個体数分布と各指標の分布についての調査結果から規格化し、作成した個

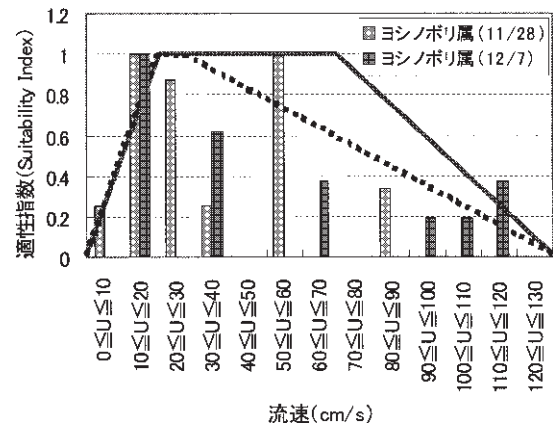


図 18 流速と 0~1 に規格化された個体数密度の関係。

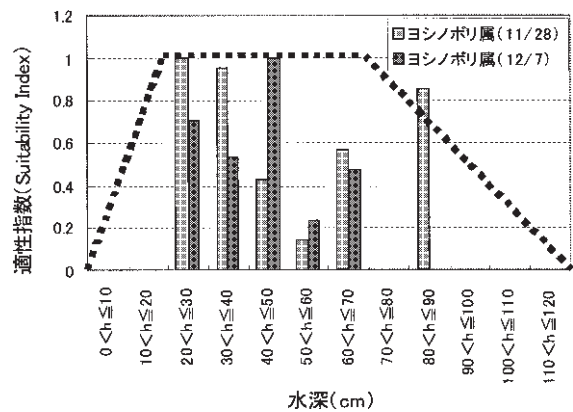


図 19 水深と 0~1 に規格化された個体数密度の関係。

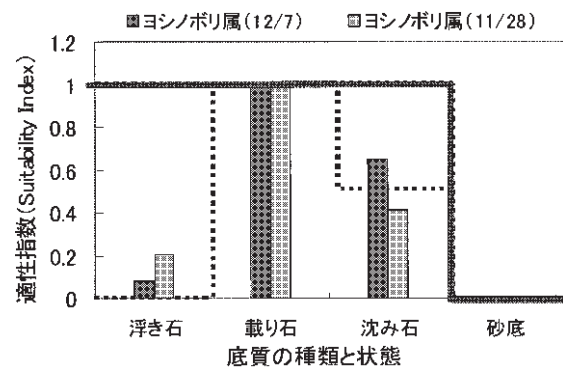


図 20 底質と 0~1 に規格化された個体数密度の関係。

体数密度を表すヒストグラムを図 18, 19, 20 に示す。また、図中には、ここで用いた 2 種の選好曲線を併記した。実線が中村・小出水 (1999) が提案したシマヨシノボリ (*Rhinogobius* sp.) の選好曲線、破線が上記手順により作成した選好曲線であり、水深については共通のものを採用した。

これらの選好曲線群を用いて、調査区間全域の平均流速、水深、底質のデータから、それぞれの指標に対する

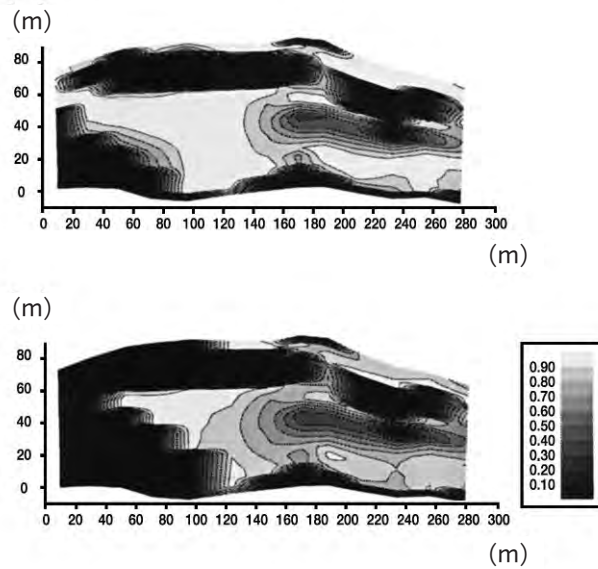


図 21 生息場適性評価値コンター。  
 (上：中村ほかの選好曲線による、  
 下：現地モデルの選好曲線による)

適性値を得て、式(1)に代入することにより、評価値  $E_k$  を求めた。なお、現地調査から得られた実測の流速、水深は、必ずしも調査区間全域で計測されていないため、ここでは、適合性の確認されている平面2次元水理解析モデル(田代・辻本, 2002)により得られた流速、水深の分布を用いて評価を行った。図21は、中村ほか(1999)の提案した選好曲線に基づく評価値のコンター(上図)、今回の現地調査の結果に基づく評価値のコンター(下図)である。

図21の両図を比較すると、様々な相違点が見受けられる。当然のことながら、現地調査から作成した選好曲線を用いた評価の方が、現地の生息場適性の状況を適切に表していると考えられる。しかし、一般的には妥当だと考えられる上図の結果から考えるに、下図の結果は、前述したように、造網型トビケラによってヨシノボリ属の生息場が阻害された結果であると考えられることもできよう。本対象区間におけるヨシノボリ属の生息場は、ここでの解析結果から原因を特定するまでには至らないが、何らかの形で変質させられていることが確認できる。

### 大型糸状藻類カワシオグサの生育場

前述のように、糸状緑藻は、富栄養化し、かつ、低攪乱状態の河床を有する河川において繁茂するとされる(例えば、Petts, 1984)。ここでは、対象をカワシオグサに絞って、その生態的特徴を改めて整理するとともに、

既に繁茂してしまった河川における制御手法を検討するため、室内水路において行った砂利投入による剥離実験をもとに、カワシオグサの剥離特性に関する考察を行った。この実験は、阿摺、越戸ダム下流部において、1995年度より豊田市矢作川研究所を中心として試みられた砂利投入実験(田中, 1997, 1998, 1999)に鑑み、行ったものである。

#### (1) カワシオグサの生態的特徴

カワシオグサを含む *Cladophora* 属は、世界各地に生息し、様々な研究が行われている。Whitton(1970)によれば、水温  $6^{\circ}\text{C}\sim 30^{\circ}\text{C}$  が生育範囲であり、 $15^{\circ}\text{C}\sim 20^{\circ}\text{C}$  では最も早く成長し、春の終わりと秋の2回に生長ピークがあるとされる。一方、カワシオグサの大繁茂は、富栄養化された汚水中で確認されており、藻長20mにまで生長した例が報告されている(Joska et al., 1994)。汚水濃度・流速から、藻類の生育を調べた研究では、カワシオグサはより速い流速を好み、その原因は、栄養塩を有効に取り入れるためである(Whitford and Schumacher, 1961)と言われている。さらに、洪水のような大きな流速に対しても、Brock et al. (1999)によれば、衰弱したもののみ剥離・除去されるというように、流速のみのインパクトには非常な耐性を持つ。また、比較的堅固で、枝状に広がる形態から、他の生物の餌としては適さないが、多くの無脊椎動物にとっての生息場を提供している(Power, 1991, 1992)。

#### (2) 掃流砂によるカワシオグサの剥離実験

実験は図22に示すような長さ8m、幅0.3mの矩形断面を有する可変勾配直線水路で行った。この水路に、高さ0.1mの木製固定床を取り付けて、その固定床の途中区間に0.4mだけカワシオグサの生えた巨礫を設置するための凹部を設けた。固定床表面は塗装して滑面とした。

実験で使用したカワシオグサの生えた巨礫は、矢作川越戸ダム下流部の古岸地区において、1999年11月24日から2000年1月11日にかけて採取されたものである。採取地点は、平水状態で水深約0.5m、流速約0.5m/sである瀬の流心付近であり、河床はアーマー化されて巨礫が露出している。採取期間においては、河床の大部分の巨礫上面においてカーペット状に3cm程度の長さのカワシオグサが繁茂していた。こうした巨礫のうち、比較的平らな面をもち、そこにほぼ均質に被覆度90%以上でカワシオグサが繁茂しているものを採取した。実験ケー



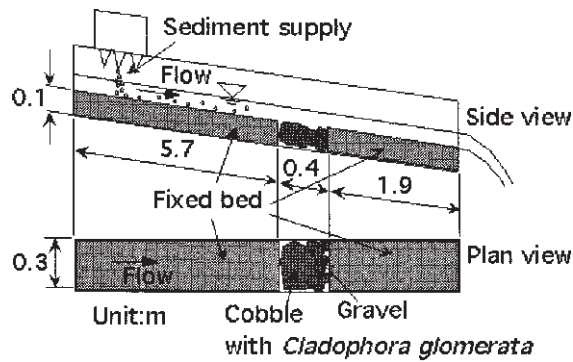


図 22 実験装置の概要.

表 3 実験条件表.

| Case                                      | 1            | 2           | 3           | 4            | 5            |
|---|--------------|-------------|-------------|--------------|--------------|
| Date of Collecting Cobble                 | Nov.24, 1999 | Dec.1, 1999 | Dec.7, 1999 | Dec.14, 1999 | Jan.11, 2000 |
| Date of Experiment                        | Nov.29, 1999 | Dec.3, 1999 | Dec.8, 1999 | Dec.17, 1999 | Jan.12, 2000 |
| $S$                                       | 1/100        | 1/25        | 1/25        | 1/25         | 1/25         |
| $Q$<br>( $10^{-2}\text{m}^3/\text{s}$ )   | 1.8          | 2.8         | 2.8         | 2.8          | 1.3          |
| $U$ (m/s)                                 | 1.0          | 1.9         | 1.9         | 1.9          | 1.4          |
| $h$ (m)                                   | 0.06         | 0.05        | 0.05        | 0.05         | 0.03         |
| $d$ (mm)                                  | 1.6          | 3.5         | 3.5         | 1.6          | 3.5          |
| $q_b$<br>( $10^{-4}\text{m}^2/\text{s}$ ) | 1.17         | 4.71        | 2.30        | 2.60         | 2.43         |
| $p$ ( $10^{-4}/\text{s}$ )                | 0.20         | 4.83        | 2.15        | 1.08         | 1.60         |

スゴとの採取日と実験日は表 3 に示すとおりであり、採取後実験日まで、エアポンプを装着した水槽において保存した。実験直前に、観察のための矩形区間だけが残るようにブラシでカワシオグサをはぎ取り、このカワシオグサの生えた平らな部分が固定床表面とほぼ同じ高さになるように巨礫を上述した固定床間のスペースに設置した。さらに、この巨礫と固定床のすき間は直径約 3 cm の礫で埋めた。

水路上流端には投入する砂礫の速度と総量を調整するための砂礫投入機を製作、設置し、砂礫がほぼ一定の割合で供給されるようにした。実験では、平均粒径 ( $d$ ) 3.5 mm の礫と 1.6 mm の砂を使用して、粒径の違いによる剥離状況の違いを検討することとした。粒径のほか、流量 ( $Q$ )、河床勾配 ( $S$ )、砂礫投入速度 ( $q_b$ : 単位幅流砂量) を変化させた合計 5 ケースの実験を行い、それぞれのケースについて、砂礫の移動状態とカワシオグサの剥

離の様子を観察するとともに、一定量の砂礫投入ごとに通水を止めて、写真撮影とスケッチによりカワシオグサの剥離状況の時間的変化を記録した。実験条件を表 3 に示す。表中、 $U$ : 断面平均流速、 $h$ : 水深、 $p$ : 剥離特性値 (単位時間あたりのカワシオグサの面積剥離率) である。なお、今回の実験では、最も掃流力が大きいケースでも、砂礫の投入を行わずに流れだけを作用させた場合には、カワシオグサの剥離は全く生じなかった。これは、前述したカワシオグサの生態の記述に反せず、流速に対して強い耐性を持つことを示している。

### (2.1) 砂礫の移動状態とカワシオグサ剥離

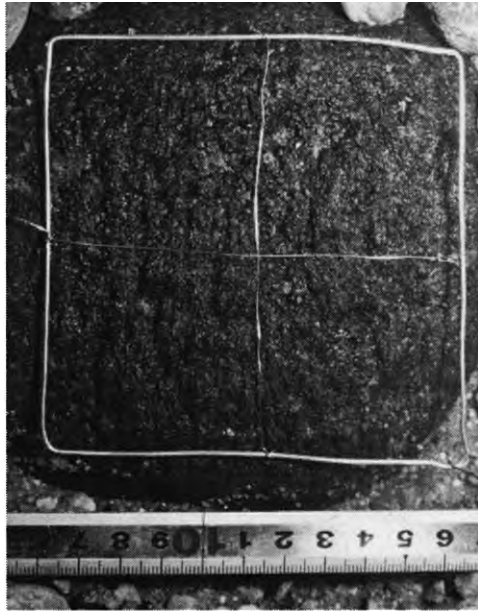
水路上流端から投入された砂礫は、滑面水路床をサルテーション運動しながら流下し、カワシオグサの生えた巨礫の表面に衝突して、下流方向に再びサルテーション運動しながら流れ去った。砂礫の巨礫表面への衝突によって、カワシオグサは基質から剥離した。カワシオグサの繁茂は、被度が 90% といえども、巨礫に接する基質部分はある間隔で分布したものとなっている。砂礫がこの基質の部分に何度か衝突するうちに、基質ごとカワシオグサの剥離が生じる様子が見て取れた。なお、カワシオグサ剥離後の巨礫の表面は、カワシオグサだけでなくほとんどすべての付着物が剥がされていた。写真 1 に、Case 2 における、礫投入前と 3180 s (53 分) かけて 0.449  $\text{m}^3$  の礫を投入した後のカワシオグサの状態を示す。

礫を用いたケースでは、礫が巨礫表面にほぼ均質に衝突する様子が観察され、カワシオグサの剥離速度は比較的大きかった。

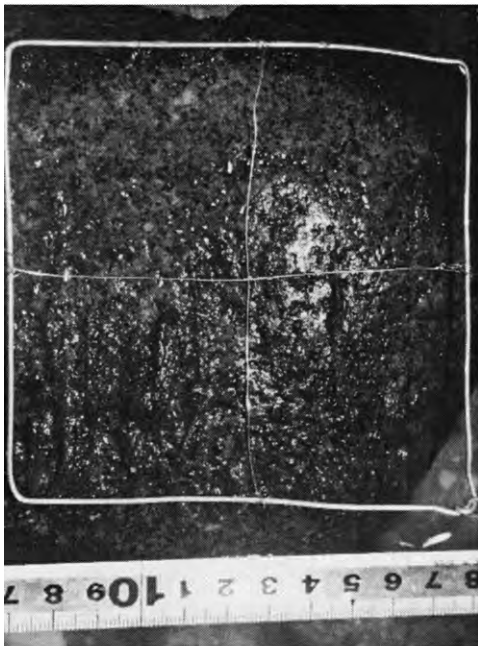
Case 1 (最も掃流力が小さく、砂を投入したケース) では、砂を供給し始めた初期には、砂の巨礫表面への衝突によってカワシオグサの剥離が生じるものの、ある程度剥離が進むとそれ以降は剥離された部分を砂が通過して繁茂領域への砂の衝突が少なくなって、全体的な剥離の進行速度は著しく低下した。また、このケースでは、部分的にカワシオグサのすき間への砂の堆積もみられ、砂の移動はカワシオグサの存在によって変化した流れ場の影響を受けているようである。

同じ粒径でも掃流力の大きい Case 4 では、砂はほぼ均質に巨礫の表面全体に衝突する様子が観察され、砂移動に対するカワシオグサの存在の影響はそれほど顕著でない。掃流力が大きくなると局所的な流れの変化はそれほど重要でなくなるものと考えられる。

砂礫の移動がカワシオグサの存在によって顕著に影響を受けるかどうかは、砂礫径あるいはサルテーションの



Before sediment supply: Case 2



After sediment supply (t=3180s): Case 2

写真1 カワシオグサ剥離の様子。

跳躍高さとカワシオグサの繁茂状態の相対的な関係であると予想される。今回実験に用いたカワシオグサは流水中では流下方向にたなびいて河床からの高さが約2mm程度となるが、カワシオグサがより大きく成長した場合には、直径3mm程度の礫であっても、カワシオグサの存在によって変化させられた流れ場の影響を受けることは十分にありうると考えられる。

## (2.2) カワシオグサの剥離速度

カワシオグサの現存量を代表する量として、存在面積に着目する。各実験ケースについて、カワシオグサの繁茂状態を撮影した写真とスケッチから、カワシオグサの存在面積の変化を求めた。

今、単位時間あたりのカワシオグサの剥離率を  $p(s^{-1})$  とする。このとき、存在面積  $A$  のカワシオグサが  $dt$  時間に剥離される面積  $dA$  は、砂礫がランダムに当たるとして、

$$dA = -pAdt \quad (2)$$

とかける。  $t=0$  で  $A=A_0$  として、式 (2) を解くと、

$$\frac{A}{A_0} = \exp(-pt) \quad (3)$$

が得られる。

図23は、各実験ケースにおけるカワシオグサ存在面積 ( $A$ ) をその初期値 (砂礫投入前の値:  $A_0$ ) で基準化して、時間的変化を示したものである。図中の直線は、各実験ケースごとに、実験値が式 (2) に最も適合するように  $p$  値を与えたときの式 (2) を表している。図より、剥離量の時間変化は概ね式 (2) で表現可能である。したがって、剥離特性値として  $p$  値を知れば、剥離過程が記述できる。各実験ケースごとの  $p$  値を表3に示す。 $p$  値は掃流力、砂礫径、砂礫投入速度が大きいほど大きくなる傾向にある。

## (2.3) 剥離要因に関する考察

### (a) カワシオグサ剥離のイメージ

実験時の観察によれば、カワシオグサの剥離要因は、カワシオグサの生えた基質部分へのサルテーション砂礫の衝突にある。そこで、サルテーション運動する砂礫が巨礫表面に衝突する際、河床に対して鉛直方向に働く力に比例した摩擦力が河床に作用し、カワシオグサの基質部はこの摩擦力によって剥離するというイメージを描く。このとき、剥離率  $p$  は河床に作用する摩擦力による仕事量に比例するものとする。サルテーション運動する砂礫によって河床に作用する摩擦力は、鉄やコンクリートでできた水路の摩耗の要因となることが指摘されており(石橋, 1983)、本研究ではこうした摩耗とほぼ同様の機構でカワシオグサの剥離が生じるものとする。

### (b) サルテーション砂礫のなす摩擦力による仕事量の解析

石橋 (1983) は、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

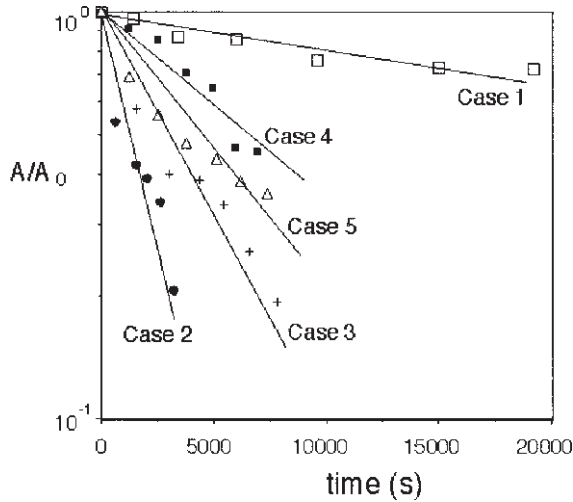


図 23 カワシオグサ繁茂面積の時間変化。

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。さらに、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。

石橋 (1983) による解析結果をもとに、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。

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

ここで、 $\mu$ ：動摩擦係数、 $\theta$ ：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。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、 $\beta$ ：砂礫の弾性体としての性質に依存する係数である。

サルテーション砂礫の衝撃力、跳躍長、河床への進入角度に関して石橋 (1983) の結果を用い、掃流力が限界掃流力に比べて十分に大きいとすると、最終的に、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が次のように得られる。

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

ここで、 $\gamma$ ：係数であり、礫では  $2.02 \times 10^5 (\text{Nm}^{-4} \text{s}^{2/3})$  程度となり (ただし、礫の比重を 2.65、動摩擦係数を 0.4

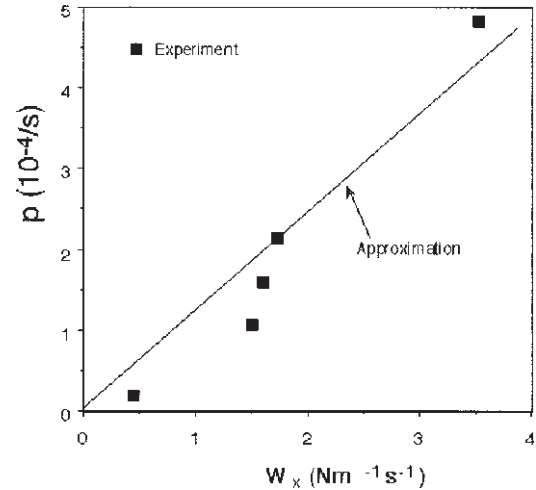


図 24 単位時間、単位面積あたりの砂礫のなす摩擦による仕事量と剥離特性値の関係。

とした)、 $u_*$ ：摩擦速度である。これより、滑面水路においては、 $W_x$  は流砂量 (砂礫投入速度に相当) に比例し、砂礫径、摩擦速度の増加関数となることがわかる。

#### (c) カワシオグサの剥離特性値とサルテーション砂礫のなす摩擦力による仕事量の関係

本実験における諸量を式 (6) に代入して得られる  $W_x$  と剥離特性を表す  $p$  値の関係を図 24 に示す。図より、両者の間にはほぼ線形的な関係が認められ、次式での近似が可能である。

$$p = \alpha W_x = \alpha \gamma q_B d^{1/3} u_*^{2/3} \quad (7)$$

ここで、 $\alpha$ ：カワシオグサの成長状態に依存する係数であり、本実験で用いられた長さ 3 cm 程度の状態では、本実験の範囲で  $\alpha = 1.23 \times 10^{-4} (\text{N}^{-1} \text{m})$  程度が適当である。図 24 の関係は、カワシオグサの剥離が摩擦力によっているという考えを裏付けるものである。

#### 河床攪乱によるカワシオグサの剥離・除去に関する検討

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。前章では、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、長さが3 cm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、大きさで攪乱レベル(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6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、造網型底生動物の住処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。藻類が剥離するのに十分な流体力が期待できないし、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すほか、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 (Whitford and Schumacher, 1961)。

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。

### (1) 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(寺本, 1997)。ここでは、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、飽和植被率に対して、植被率がどの程度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  $A^* = A/A_{\max}$  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 (寺本, 1997)。

$$\frac{dA^*}{dt} = \varepsilon(1-A^*)A^* \quad (8)$$

ここで、 $\varepsilon$  : 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。

$$A^* = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{A_0^*} - 1\right) \exp(-\varepsilon t)} \quad (9)$$

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、(8)式の右辺に剥離効果を表す  $-pA$  を加えることにより、無次元植被率  $A^*$  の消長は次式で記述される。

$$\frac{dA^*}{dt} = (\varepsilon - p)A^* - \varepsilon A^{*2} \quad (10)$$

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。

$$A^* = \frac{1}{\frac{\varepsilon}{\varepsilon - p} + \left(\frac{1}{A_0^*} - \frac{\varepsilon}{\varepsilon - p}\right) \exp\{-(\varepsilon - p)t\}} \quad (11)$$

また、平衡状態での相対植被率  $A_e^*$  は、式(10)で  $dA^*/dt=0$  として、次のようになる。

$$A_e^* = \frac{\varepsilon - p}{\varepsilon} \quad (12)$$

掃流砂移動が完全にとまってしまったときの  $p$  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

に關係する(河川工学の分野でも、最近、赤松ほか(2000)や浅枝ほか(2000)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(2001)は、古岸地区において、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。この結果によれば、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(0.5~0.8 m/s)と遅い領域(0.2~0.4 m/s)で行われていた。タイル設置後約3~5ヵ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 $A^*$ の時間的变化は図25に示すとおりで、式(9)が最も実測値と適合するように成長率 $\varepsilon$ 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。

さて、流量の変動を有限の時間ステップごとに与え、式(11)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 $\Delta t$ 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 $A_e^*$ についての漸化式は次のようである。

$$A_{i+1}^* = \frac{1}{\frac{\varepsilon}{\varepsilon - p_i} + \left( \frac{1}{A_i^*} - \frac{\varepsilon}{\varepsilon - p_i} \right) \exp\{-(\varepsilon - p_i)\Delta t\}} \quad (13)$$

添字 $i$ : 時間ステップ $i$ の量であることを示す。

## (2) 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26のようにモデル化して考える。すなわち、粒径 $d_c$ 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 $\Delta_G$ と砂面の高さの差を $\Delta_G$ とする。これは前述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 $\Delta_G/d_c$ で定義される。このとき、河床の等価砂粗度 $k_s$ は、単純に $\Delta_G$ 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(14)で求める。

$$h = \left\{ \frac{(\Delta_G + d_s)^{1/3} q^2}{7.66^2 g I_e} \right\}^{3/10} \quad (14)$$

ここに、 $g$ は重力加速度である。

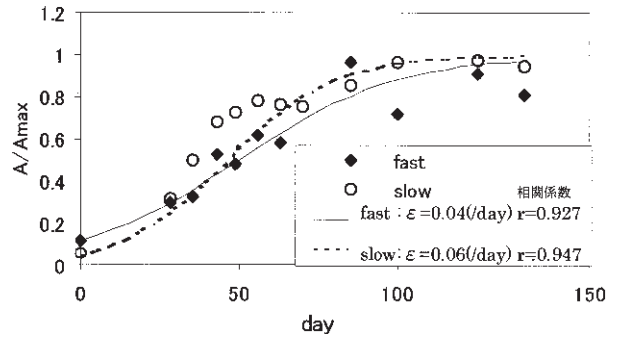


図25 攪乱の無い状況でのカワシオグサ相対植被率の時間変化。

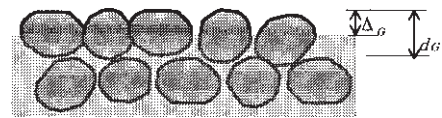


図26 アーマー化路床のモデル。

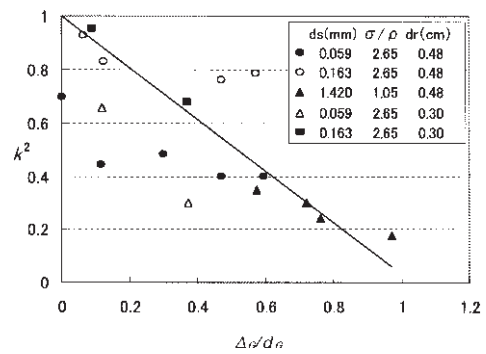


図27 礫の露出率に対する砂面遮蔽係数の見積り。

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(1986)に倣って遮蔽係数 $\kappa$ を導入する。遮蔽係数を用いて、砂面有効無次元掃流力 $\tau_{*e}$ は次式のように書ける。

$$\tau_{*e} = \frac{k^2 h l_e}{(\sigma/\rho - 1) d_s} \quad (15)$$

芦田・藤田(1986)および道上ほか(1992)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。

$$k^2 = 1 - \frac{\Delta_G}{d_c} \quad (16)$$

このようにして見積もられた有効掃流力を、芦田・道上式(1972)に適用して礫間を流送される流砂量を評価する。

さて、式(2)では、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。

$$\frac{dA}{dt} = -pA \quad (17)$$

ここで、 $p$ ：剥離率であり、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、日単位では次のように書ける。

$$p = (24 \times 3600) \alpha W_x (\text{day}^{-1}) \quad (18)$$

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 3 cm 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。

一方、サルテーション運動する砂が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 (1983) による滑面上でのサルテーション運動解析をもとに、次のように書けることが分かっている (式 (6) 再掲)。

$$W_x = \gamma q_b d_s^{1/3} u_{*c}^{2/3} \quad (19)$$

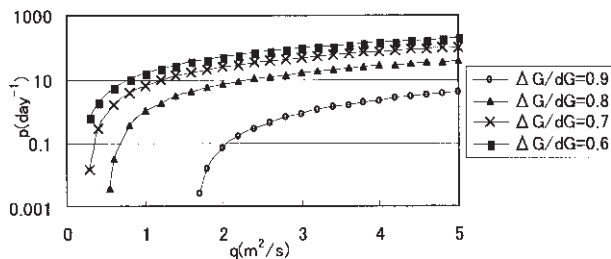


図 28 単位幅流量とカワシオグサ剥離率の関係。

ここで、 $\gamma$ ：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。

上記の式 (18), (19) は滑面条件で確認されたものであり、ここで対象とした矢作川の礫床のような粗面条件とは異なる。そのため、定量的な記述のためには粗面条件下での検討が必要であるが、定性的な傾向の把握は可能であると考え、以下では上記モデルを採用した。

以上により、単位幅流量  $q$  に対する剥離特性の変化を見積ることができる。矢作川中流域の現状代表値 ( $d_0 = 0.1\text{m}$ ,  $d_s = 0.002\text{m}$ ,  $I_e = 1/670$ ) に対して試算したものを図 28 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。

### (3) カワシオグサ繁茂動態シミュレーションの例

矢作川 42 km 地点の上流には、中部電力越戸ダム (45.8km 地点) が存在するので、その放流量を 42 km 地点の河道流量とみなした。1973 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 29 は、砂面からの礫頂部の突出度とレキの粒径の比

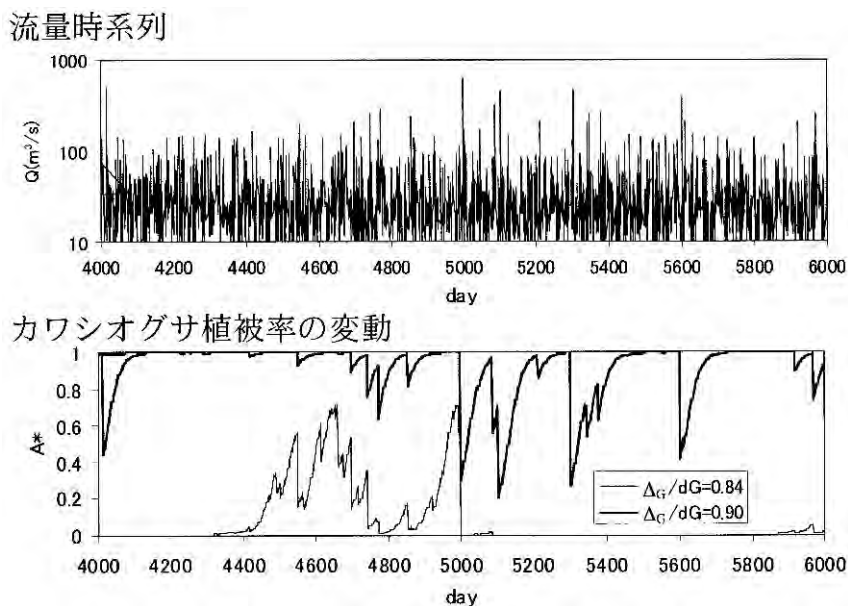


図 29 カワシオグサ繁茂動態のシミュレーション例。

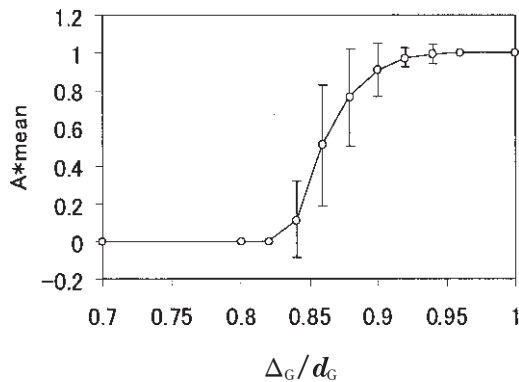


図30 露出率による平均相対植被率の変化。

$\Delta_G/d_G$  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。

$\Delta_G/d_G=0.90$  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、 $\Delta_G/d_G=0.84$  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30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  $\Delta_G/d_G$  に対して示したもので、 $\Delta_G/d_G > 0.90$  では大きな流量での剥離も生じにくくなり、 $\Delta_G/d_G < 0.80$  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、 $\Delta_G/d_G$  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、 $\Delta_G/d_G$  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  $\Delta_G/d_G=0.80$  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、 $\Delta_G/d_G < 0.80$  程度である必要がある。

## おわりに

本研究は、矢作川中流域における生物生息場の変質状況の把握を目的として、文献・資料整理、現地調査、室内実験を通して得られた結果を用いて、河川工学的視点からの考察・検討を行ったものであり、以下の4点に集約される。すなわち、①文献・資料分析からの矢作川中流域の河道動態の把握、②底生魚・底生動物の分布調査を通じた生息場の現状把握、③付着藻類カワシオグサの

異常繁茂の抑制を目的とした室内水理実験による剥離試験、④個体群動態モデルを導入したカワシオグサの繁茂動態シミュレーションである。

これら各々は、それぞれ未解決な問題を多く抱えており、独立した主題として取り扱うべき色合いも強いと考えられる。しかしながら、生態系という生物の集合体とそれを取り巻く非生物的環境の複合システムを研究対象とする以上、何れの視点も欠くことの出来ない要素であり、それぞれ重視していく必要があると言えよう。現段階では、生態系というシステム内における繋がりは、底生魚の生息場評価や付着藻類の繁茂動態シミュレーションに見られるように、非生物的環境と各生物との繋がりを対象としているに過ぎない。しかし、食物連鎖、競争を通じた生物間相互作用を導入出来れば、本研究では個別に記述してきた魚類、底生動物、付着藻類を複合的に取り扱える可能性がある。今後は、こうした領域に踏み込んで研究を進めていき、河川生態系内の様々な繋がりを考慮することによって、河川生態系の適正な評価手法の確立を目指していきたいと考えている。

## 謝 辞

国土交通省豊橋工事事務所、中部電力越戸ダム管理所には、貴重な河床形状データ、河床構成材料データ、流量データを提供して戴いた。本研究を進めるに当たって、パシフィックコンサルタンツインターナショナル(株) (当時名古屋大学大学院講師) 北村忠紀氏には多岐にわたるご指導を戴いた。内田朝子氏、白金晶子氏、山本敏哉氏を始め、豊田市矢作川研究所の方々には、多くの助言を戴いた。現地調査及びデータ整理にあたっては、名古屋大学大学院生加賀真介氏、同渡邊慎多郎氏の協力を得た。ここに記して、御礼申し上げます。

## 参考文献

- 赤松良久・戸田祐嗣・池田駿介 (2000) : 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, 6 : 113-118.
- 中村俊六・小出水規行 (1999) : IFIM 入門・付録. IFIM 入門 : 145-150. アメリカ合衆国内務省・国立生物研究所 (テリー ワドゥル・中村俊六訳), リバーフロント整備センター.
- 浅枝隆・ズン ソンホン・藤野毅 (2000) : 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, 6 : 119-124.
- 芦田和男・道上正規 (1972) : 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, 206 : 59-69.
- 芦田和男・藤田正治 (1986) : 河床粒子の浮遊機構とそのモデル化. 土木学会論文集, 375 : 79-88.

- Brock, J. T., Royer, T. V., Snyder, E. B. & Thomas, S. A. (1999) : Periphyton Metabolism: A Chamber Approach, The Controlled Flood in Grand Canyon. Geophysical Monograph, 110 : 217-223.
- 石橋毅(1983) : ダム排砂設備の流下砂礫による摩耗・損傷に関する水理学的研究. 土木学会論文報告集, 334 : 103-112.
- Joska, M. A. & Bolton, J. J. (1994) : Guide to Filamentous Freshwater Macroalgae in South Africa.
- 黒木幹男・岸力(1994) : 中規模河床形態の領域区分に関する理論的研究. 土木学会論文報告集, 342 : 87-96.
- 道上正規・藤田正治・三村光太郎 (1992) : 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 : 264-265.
- 森下依理子(1996) : 川と湖の博物館4 水環境カルテ. 山海堂, 東京.
- 中村
- Petts, G. E. (1984) : Impounded Rivers, Perspectives for Ecological management. Wiley, J. & Sons.
- Power, M. E. (1991) : Shifts in the effects of tuff-weaving midges on filamentous algae. Am. Mid. Natl., 125 : 275-285.
- Power, M. E. (1992) : Hydrologic and trophic controls of seasonal algal blooms in northern Californian rivers. Arch. Hydrobiol., 125 (4) : 385-410.
- 白金晶子 (2001) : 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(矢作川古巣プロジェクト)平成12年度報告書, 古巣プロジェクト事務局(編) : 53-60, 豊田市矢作川研究所.
- 竹門康弘・谷田一三・玉置昭夫・向井宏・川端善一郎 (1995) : 棲み場所の生態学. 平凡社, 古巣プロジェクト事務局(編) : 53-60, 豊田市矢作川研究所.
- 田中蕃(1997) : 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, 1 : 175-202.
- 田中蕃(1998) : 砂利投入による河床構造回復の試みとその効果II. 矢作川研究, 2 : 191-224.
- 田中蕃(1999) : 砂利投入による河床構造回復の試みとその効果III. 矢作川研究, 3 : 203-246.
- 田代喬・辻本哲郎(2002) : 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, 46 : 1151-1156.
- 寺本英 (1997) : 数理生態学, 朝倉書店.
- 辻本哲郎(2000) : 河川の生態系保全機能の評価に関わる水工学, 第36回水工学に関わる夏期研修会講義集, Aコース, A-6, 20 p.
- 辻本哲郎・田代喬・伊藤壯志 (2000) : 生活圏の連結性に着目した魚類生息場評価法の提案と河道内微地形の役割評価. 河川技術に関する論文集, 6 : 167-172.
- 内田朝子 (1997) : 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, 1 : 59-80.
- 内田朝子(2000) : 矢作川における付着藻類と底生動物その4. 矢作川研究, 4 : 5-18.
- Whitford, L. A. and Schumacher, G. J. (1961) : Effect of current on mineral uptake and respiration by a freshwater alga. Limnol. Oceanogr., 6 : 423-425.
- Whitton, B. A. (1970) : Biology of *Cladophora* in freshwaters. Water Research, 4 : 457-476.
- 山本晃一 (1994) : 沖積河川学. 山海堂, 東京.
- 山本敏哉(2000) : アユ釣りの記録からたどった釣果の変遷. 矢作川研究, 4 : 169-176.

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