

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

EXPERIMENTAL STUDY ON DETACHMENT OF ATTACHED ALGAE
CLADOPHORA GLOMERATA DUE TO BED LOAD

北村忠紀¹・加藤万貴²・田代喬²・辻本哲郎³

Tadanori KITAMURA, Maki KATOH, Takashi TASHIRO and Tetsuro TSUJIMOTO

¹正会員 博(工学) 名古屋大学大学院助手 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 名古屋大学大学院工学研究科修士課程学生

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

The attached algae *Cladophora glomerata* has been abundant in the Yahagi river during the past decade, causing the degradation of the habitat for Ayu *Plecoglossus altivelis* that is important commercial fish and a symbol of the culture in the river basin. The nuisance growth of the attached algae may be caused by the decrease of the disturbance such as sediment transport as well as the eutrophication in the river.

In the present study, the effect of bed-load transport on the detachment of *Cladophora glomerata* was investigated in an experimental flume. As a result, it was clarified that the speed of the detachment is related to the work done by the dynamic friction force of saltating particles, which shows that the higher sediment transport rate and the larger sediment particle brings about the larger amount of detachment. The addition of sand and gravel in the river in order to remove *Cladophora glomerata* was also discussed with referring the experimental results.

Key Words : *Cladophora glomerata*, detachment, bed-load transport, saltation, flume experiment

1. 研究の背景と目的

近年, 矢作川流域のダム下流部では, 付着性緑藻カワシオグサ *Cladophora glomerata* の異常な繁茂が生じ, 珪藻, そしてそれを餌とするアユの生息場が脅かされている^{1)~3)}. アユは矢作川の貴重な漁業資源であるばかりでなく, 古くからの川文化の象徴でもあり⁴⁾, こうした状況の改善が望まれている.

矢作川は, 幹線流路延長117km, 流域面積1830km²を有し, 長野, 岐阜, 愛知の3県を経て三河湾に注ぐ1級河川である. 治水ならびに農工業用水, 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・堰堤が建設されている. このうち, カワシオグサの異常発生が見られるのは, ダム・堰堤群のなかで下流側に位置する阿摺, 越戸ダムおよび明治頭首工の下流部である¹⁾.

内田¹⁾は矢作川の底生生物の変遷に関する文献調査から, 1960年代以降の底生動物相の変化はこれらの地点での富栄養化と河床の安定化傾向を示すものであり, こうした河川の状況の変化がカワシオグサの異常繁茂と関

係しているものと考えている. 矢作川は砂を流送する川として有名であるが, 当該地点では, 河床のアーマー化が進行し砂礫を中心とする粒径集団の欠乏が観察される. アーマー化した河床は中小洪水では移動されにくく, 河床の攪乱頻度は減少する. こうした河床のアーマー化は, ダム堰による土砂流送の拮止に加えて, 1960年代以降の活発な砂利採取, 砂防事業の進展などによる供給土砂の減少が要因となって生じたものと考えられる.

香川⁵⁾は, ダムによる河川水質の変化について検討し, 深層放流型のダムの下流ではしばしばカワシオグサの繁茂が見られ, その原因としてダム下流の比較的安定した流れとダム湖底からの栄養供給を挙げている. また, ダムの河川生態への影響について取りまとめたPetts⁶⁾の著書によれば, カワシオグサをはじめとする付着性緑藻の異常繁茂は, 富栄養化しさらに河床の攪乱が減少した河川における一般的な傾向であるとされている. これら既往の研究に鑑みて, 矢作川におけるカワシオグサの異常繁茂は河川の富栄養化と河床の安定化に要因があるとする内田¹⁾の考えは十分納得できるものである.

カワシオグサの異常繁茂の要因が富栄養化と河床の安

定化にあるとすれば、珪藻、アユの生息場を復元して、地域固有の文化を保全するという目的に対して考えられる手段は、まずは長期的視点にたち、その要因を直接的に取り除くこと、すなわち、供給土砂を旧来のレベル程度まで回復し河床が頻りに攪乱されるようにすることと水質の改善を目指すことである。しかしながら、これを実現するのは様々な制約から困難な場合が多い。また、仮に実現に向かうとしても、これまで数十年かけて変化してきた河川の状況は、回復するまでにさらに多くの時間を費やすであろう。そこで、短期的視点にたった何らかの代替措置が必要となる。

こうした背景のもと、豊田市矢作川研究所では、1995年度より、阿摺、越戸ダム下流部において、砂利投入による河床構造の改善という野外実験を試み、投入後の河床状況、付着藻類、底生動物の変化を調査している^{7)~9)}。投入された砂利量は、河川規模に比べれば微小なものであり（それでも砂利運搬の手間を考えるとかなりの量ではある）、アーマー化した河床の構造をただちに变化させるものではない。しかしながら、アーマー化した河床の巨礫は中小洪水では移動しなくても、投入された砂礫は容易に移動される。すなわち、アーマー化した河床上を投入砂礫が移動することで河床に攪乱を与えることは可能で、これにより、1)すでに繁茂しているカワシオグサを剥離除去する、もしくは、2)種の遷移中期から後期に現れるといわれているカワシオグサの出現自体を抑制する、ことは期待できる。

これまでの砂利投入結果を見るかぎり、カワシオグサ繁茂抑制効果は必ずしも明確でない。これは、野外実験という枠組みの中で、砂利投入というインプットの制御が難しいこと、砂利投入以外の要因を分離して評価することが困難であるためと思われる。

矢作川研究所では、現在、カワシオグサ繁茂状況のモニタリングを継続的に行っており、繁茂状態の生態学的実態が明らかになるものと期待される。しかしながら、今後、砂利投入という野外実験をいわゆるadaptive managementの枠組みとして継続、発展する上で、その素過程についてある程度定量的な把握を行って砂利投入の期待される効果を想定しておくことが必要である。

本研究では、野外実験の参考となる情報提供を第1の目的とし、上記1)の効果を評価するため、砂礫が河床上を移動することによりカワシオグサが剥離されるとい物理的過程に着目した。これを実験室に再現し、砂礫移動によるカワシオグサ剥離特性の定量評価を試みた。さらに、実際に砂利投入が行われた地区における河川横断地形測量結果をもとに、流量ごとの掃流力を推定し、上記実験結果と合わせて、砂利投入によるカワシオグサ剥離除去の可能性を検討した。

2. 掃流砂によるカワシオグサの剥離に関する実験

(1) 実験方法

実験は図-1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。

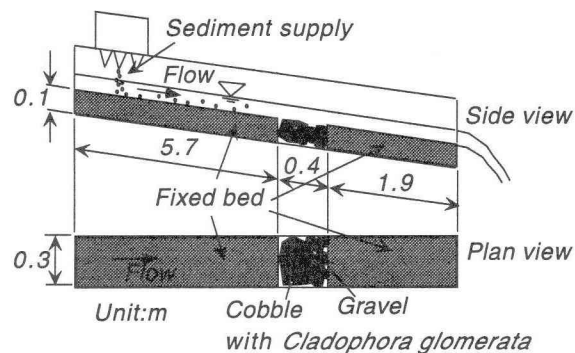


図-1 実験装置の概要

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嵐地区において、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の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。実験ケースごとの採取日と実験日は表-1に示すとおりであり、採取後実験日までは、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3cm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取り付け、砂礫がほぼ一定の速度で供給されるようにした。実験では、平均粒径(d)3.5mmの礫と1.6mm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-1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。

表-1 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 ($10^2\text{m}^3/\text{s}$)	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 ($10^2\text{m}^2/\text{s}$)	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

(2) 砂礫の移動状態とカワシオグサ剥離の様子

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3180s（53分）かけて0.449 m^3 の礫を投入した後のカワシオグサの状態を示す。

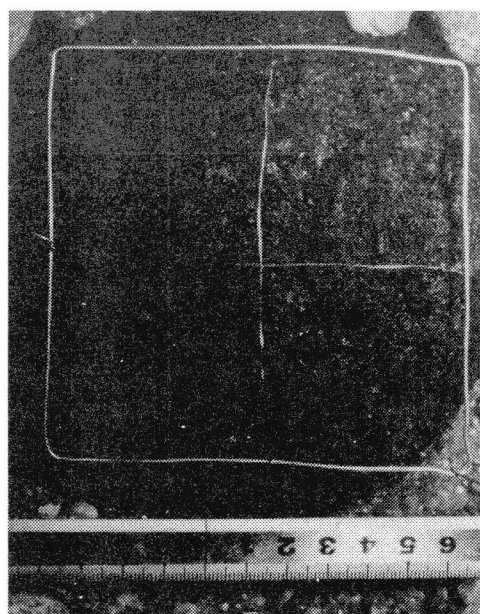
礫を用いたケースでは、礫が巨礫表面にほぼ均質に衝突する様子が観察され、カワシオグサの剥離速度は比較的大きかった。

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。

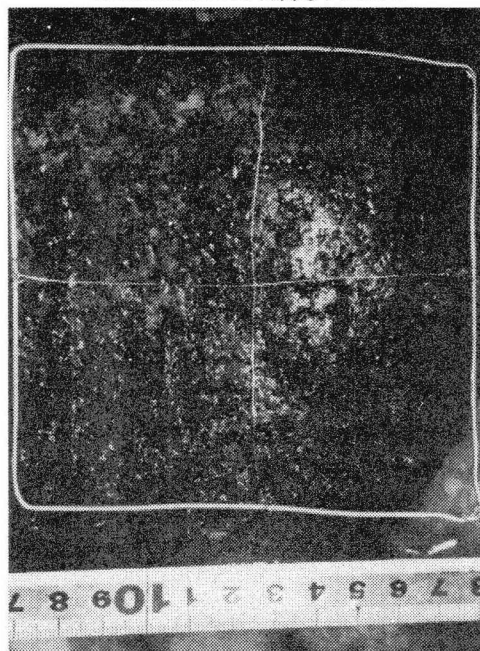
同じ粒径でも掃流力の大きいCase 4では、砂はほぼ均

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。



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

(3) 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、

$$dA = -pAdt \quad (1)$$

とかける。 $t=0$ で $A=A_0$ として、式(1)を解くと、

$$\frac{A}{A_0} = \exp(-pt) \quad (2)$$

が得られる。

図-2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、時間的な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-1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。

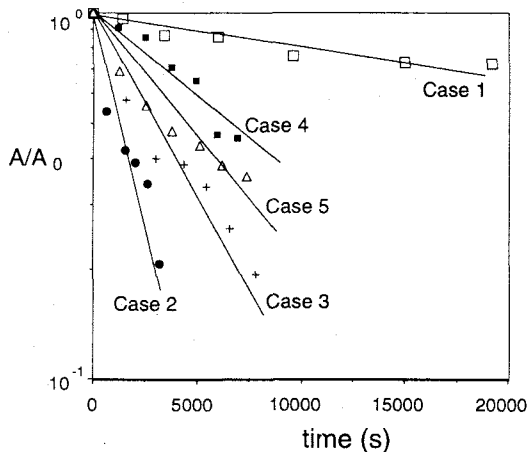


図-2 カワシオグサ繁茂面積の時間変化

3. 剥離要因に関する考察

(1) 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従来より指摘されており¹⁰⁾、本研究ではこうした摩耗とは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。

(2) 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¹⁰⁾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¹⁰⁾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。

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

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。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。

$$E_s = \beta F^{5/3} \quad (4)$$

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。

サルテーション砂礫の衝撃力、跳躍長、河床への進入角度に関して石橋¹⁰⁾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。

$$W_x = \gamma q_B d^{1/3} u_*^{2/3} \quad (5)$$

ここで、 γ : 係数であり、礫では $2.02 \times 10^5 (\text{Nm}^{-1} \text{s}^{2/3})$ 程度となる (ただし、礫の比重を2.65、動摩擦係数を0.4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。

(3) 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(5)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-3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。

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

ここで、 α : 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3cm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-3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。

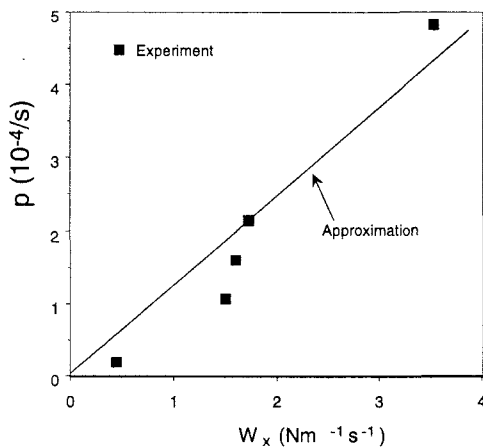


図-3 単位時間、単位面積あたりの砂礫のなす摩擦による仕事量と剥離特性値の関係

4. 砂利投入によるカワシオグサ剥離効果の考察

矢作川越戸ダム下流部古単地区では、1997年1月と1998年3月の2度にわたって、それぞれ1500 m^3 の砂礫（最大粒径約5mm）が側岸より投入されたが、砂利投入がカワシオグサの繁茂抑制に対して効果的か否かは明確に判断されなかった。そこで、今回の実験で得られた結果をもとに、この地区における砂利投入効果を考察する。

矢作川における当該地区周辺の概略を図-4に、代表的断面形状を図-5にそれぞれ示す。平均河床勾配は1/670で、流心部の河床は、アーマー化して巨礫が露出している。図には、適当な流量時の水面を等流計算によって算出して示した。ここで、マンニングの粗度係数 n_T は河床材料粒径を0.2mとしてStricklerの式により求めた。流量 $Q=35\text{m}^3/\text{s}$ が当該地点での過去10年間の平均流量⁴⁾であり、この時の水面下の部分にカワシオグサが繁茂している。

式(6)を用いて、カワシオグサ剥離効果を推定するにあたり、摩擦速度 u_* の評価が必要となる。ここでは、アーマー化された河床における砂礫運動は巨礫の表面に作用する摩擦抵抗が実質的な駆動力となると考える。エネルギー勾配を巨礫による形状抵抗分と巨礫の表面に作用する摩擦抵抗分に分離し、それぞれについて形式的にマンニング式による表示が可能であるとすると、巨礫の表面に作用する摩擦抵抗による摩擦速度 u_{*s} は次のようにかける。

$$u_{*s} = \sqrt{gRS} \frac{n_s}{n_T} \quad (7)$$

ここで、 g :重力加速度、 R :径深、 S :河床勾配、 n_T 、 n_s :それぞれ河床の全抵抗、巨礫の表面に作用する摩擦

抵抗を表すマンニングの粗度係数であり、ここでは、 $n_s = 0.013$ を用いる。

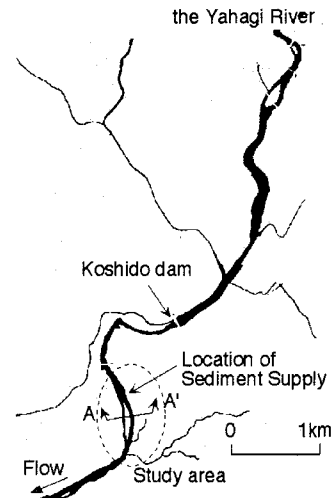


図-4 対象地区周辺の概要

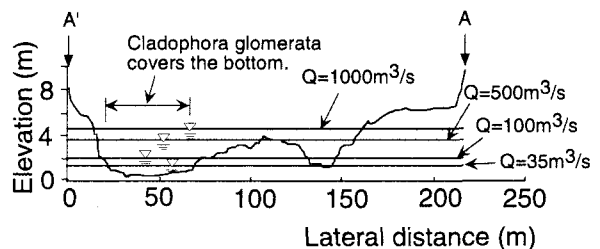


図-5 対象地区の横断面形状と各流量時の水位

式(6)の両辺に、時間 t 、カワシオグサ繁茂領域幅 B をかけると、総砂礫投入量 $V_B (=Btq_B)$ と剥離特性値 p の関係が次のように得られる。

$$ptB = \alpha \gamma V_B d^{1/3} u_{*s}^{2/3} \quad (8)$$

カワシオグサが初期状態から95%剥離されるための V_B は、式(2)を仮定すると、上式で $pt=3$ を代入することにより求められる。様々な流量に対して、等流計算を行い、式(7)によって摩擦速度を見積もって、砂礫径ごとにカワシオグサの剥離が初期状態から95%剥離されるための V_B を求めて、図-6に示した。ただし、次の条件では剥離効果が期待できないとして表示していない：1)砂礫が移動限界以下となる場合、2)砂礫が浮遊状態で輸送される場合（ここでは、 w_0 を砂礫の沈降速度とし、 $\sqrt{gRS}/w_0 > 1$ を浮遊限界とした）。また、 $B=50\text{m}$ とした。

図より、カワシオグサの剥離に対しては、同一流量では、粒径の大きい砂礫の方が総投入量が少なくすむことが理解できる。

カワシオグサの成長状況が今回の実験で用いられた状態かそれに近い場合、上記の推定結果に基づけば、

1500m³という砂利投入量は、それらが1回の洪水時に流れきるものとすれば、その洪水前に繁茂していたカワシオグサをほぼ一掃できる量である可能性がある。

ただし、この推定結果は、砂礫が巨礫間に埋没することなく輸送され、また河道横断方向に一様に砂礫が輸送されることを仮定している。実際には、芦田ら¹¹⁾が示しているように、河床空隙間にある程度貯留を行いながら砂礫が輸送されるだろうし、村本ら¹²⁾が示すように、横断方向への砂礫輸送量の変動が生じる可能性もある。さらには、実際に砂利投入を河道横断方向に均一に行うのは困難で、流砂がある横断位置に集中してしまう可能性もある。今後は、こうした、アーマー化した河床上の砂礫の輸送特性、投入砂礫の平面的分散特性をより正確に把握していく必要がある。

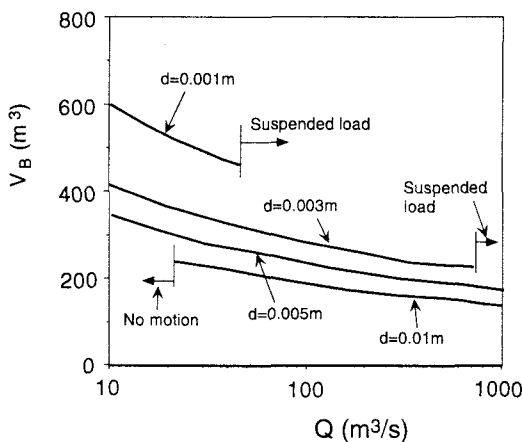


図-6 対象地区においてカワシオグサを95%剥離するのに必要な砂礫投入量の推定

5. あとがき

本研究では、カワシオグサの生えた巨礫を実験室に持ち込み、砂礫を投入して剥離する様子を観察するとともに、その定量的評価を試みた。その結果、カワシオグサの剥離速度は、サルテーション運動する砂礫のなす摩擦力による仕事量と関係づけられることを示した。

さらに、この結果を利用して、実際に砂利投入が行われた地点での砂利投入効果について考察し、カワシオグサの剥離除去に関して、砂利投入は十分に効果を有する可能性のあることが示された。

しかしながら、今後、検討しなければならない課題は多い。一つは、カワシオグサの成長段階ごとの剥離特性をより詳細に検討すること、さらに、今回は存在面積で代表した現存量に加え、生物活性度を示す指標についての検討を行うことである。二つ目は、アーマー化された

河床上での砂礫の輸送状態のより正確な把握である。

さらに、たとえ一度の洪水でカワシオグサを一掃できたとしても、その後攪乱がない状態が続けば再び成長してくるであろうことを考えると、砂利投入のタイミングは非常に重要である。この点に関連して、カワシオグサへの遷移を生じさせないような攪乱の与え方という観点も興味深い。今後、野外観測、野外実験と室内実験を組み合わせた方法による検討を進めたいと考えている。

謝辞：本研究の一部は、矢作川古巣プロジェクト（代表：古川彰（愛知県立大学））の一環として行われたものである。また、本研究に多くの助言をいただいた白金晶子氏をはじめとする矢作川研究所の方々に感謝する。

参考文献

- 1) 内田朝子：矢作川における付着藻類と底生動物の基礎，矢作川研究，No.1，pp.59-80，1997.
- 2) 内田朝子：矢作川における付着藻類と底生動物その2，矢作川研究，No.2，pp.19-32，1998.
- 3) 内田朝子：矢作川における付着藻類と底生動物その3，矢作川研究，No.3，pp.19-34，1999.
- 4) 豊田市，豊田市矢作川研究所，西日本科学研究所：矢作川アユ生態調査報告書，1999.
- 5) 香川尚徳：河川連続体で不連続の原因となるダム貯水による水質変化，応用生態工学，2(2)，pp.145-151，1999.
- 6) Petts, G. E. : Impounded Rivers, Perspectives for Ecological management, John Wiley & Sons, pp.150-157, 1984.
- 7) 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.
- 8) 田中蕃：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，No.2，pp.191-224，1998.
- 9) 田中蕃：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，No.3，pp.203-246，1999.
- 10) 石橋毅：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，第334号，pp.103-112，1983.
- 11) 芦田和男・江頭進治・西本直史：階段状河床波における流砂機構，京都大学防災研究所年報，第29号，B-2，pp.377-390，1986.
- 12) 村本嘉雄・河田恵昭・布村明彦：砂礫河川の掃流砂に関する基礎的研究，京都大学防災研究所年報，第20号，B-2，pp.451-474，1977.

(2000.4.17受付)