

◆ 報 文 ◆

底生動物棲み込みによる河床固化について

田代 喬* 皆川朋子** 萱場祐一***

1. はじめに

ダム下流などの人為的影響を強く受けた礫床河川では、糸状緑藻が繁茂し、底生動物の群集組成が変化するなど生態系の変質が生じており¹⁾、アユ (*Plecoglossus altivelis*) 漁獲高の減少や景観の悪化を伴うこともあって、河川管理の直面する問題となっている。こうした原因のひとつとして低攪乱な河床の出現が挙げられ²⁾、その改善に向けてダムからのフラッシュ放流、下流河道における土砂還元などの方策が試みられている。これまでのところ、河床の低攪乱化は、洪水時のハイドロ操作による流況の安定化に加え、流砂の連続性が妨げられた結果、細粒分が流失して生じる粒度組成変化 (アーマー化) によって引き起こされるものと認識されてきた。例えば、北村ら²⁾ は、掃流力が河床材料の移動限界を超過した日数の経年変化によって河床攪乱頻度の低下を表現し、糸状藻類繁茂やアユ漁獲高減少といった生物相の変化と対応付けている。河川の攪乱レジームが生態系を規定する重要な要素であるという考え方は、近年、様々な視点から支持されており³⁾、今後の河川管理においては、物理的攪乱が生物に与えるインパクトと生物の応答 (レスポンス) の適正な評価が必要であるとの認識が広まってきている。

ところで、河床攪乱は河床のアーマー化への依存度が大きく、実質的には河床材料の輸送によって担われる²⁾ ため、その輸送量の適正な評価が必要とされる。しかし、従来の粒径加積曲線だけでは表現しきれない複雑な環境を呈する河床では、①浮き石・沈み石といった表層景観が異なるだけでなく、②棲み込んだ生物などによる環境改変が行われている^{4), 5)} のが実情で、これまでの土砂水理学で扱われてきた材料輸送特性に関する知見が適用できないことも多い⁶⁾。本報では、②の影響のうち、底生動物が棲み込む際に材料を分泌物で

固く結びつけて生じる「河床固化」⁷⁾ の実態把握を目的としたもので、これまでに得られた知見⁸⁾ に新たな調査結果を加え、ダムからのフラッシュ放流、河床型の差異、季節変化、地理的変異による影響について考察し、報告する。

2. 既往の研究

従来の河川工学では、物理環境が生物群集の棲み場所を提供するという基本的認識に基づいていたため、生物活動が物理環境を変化させるという逆方向のプロセスに着目した事例は少なく、せいぜい、植生群落が周囲の微地形に与える影響が論じられた⁹⁾ に過ぎない。ところが、実際の河川において、生物による活動が物理環境を改変する例は少なくない。近年の生態学分野では、環境を改変する生物は「ecosystem engineer」¹⁰⁾ として着目されており、我が国の河川にも普通に生息する生物を対象とした調査研究も徐々に進められ、これらが果たす環境改変作用が確認されてきている¹¹⁾。

本報で取り上げる底生動物は、生息スタイルに応じたさまざまな形態 (生活型) を呈し、古くから生息場所の物理環境との密接な関連性が着目されている^{4), 5)}。中でも、造網型トビケラは分泌する絹糸を使って河床に営巣する特性を有することから、他の底生動物や底生魚にとっての利用空間を変化させ、河床材料の流送特性に影響を与えている⁵⁾。Statzner et al.¹²⁾ および Cardinale et al.¹³⁾ は室内水路により、Downes et al.¹⁴⁾ および Takao et al.¹⁵⁾ は現地観測によって、造網型トビケラを始めとする底生動物の生息が流送土砂を顕著に減少させ、礫の移動特性を変化させることを報告している。これらは系統的な整理、水理学的考察が不十分であったため、定量的な影響評価には至っていないが、これと前後して実験、観測を行った田代ら^{7), 8)} は、底生動物棲み込みによる「河床固化」について、無次元限界掃流力ベースで推定することによって水理学的評価を為し得て

Substratum Adhesion Due to Benthos Inhabitation in Cobble Riffles

表-1 調査地および時期

調査時期	調査河川	調査場所
2005/2/21	相模川水系中津川 宮ヶ瀬ダム下流1.5km	
2005/10/13, 16		
2005/8/2, 3	九頭竜川水系真名川 真名川ダム下流6.4km	
2005/5/20	木曽川	河口から44.0km
2005/8/10		
2005/11/18, 28		

いる。しかし、これらの研究は河道内の限られた河床型（ユニット）を対象として実施されたに過ぎないし、物理環境や季節の変化、流量変動など外的条件の変化による影響については明らかではなかった。

3. 材料と方法

3.1 調査地および時期

調査地は、相模川水系中津川（以下、中津川と表記）、九頭竜川水系真名川（以下、真名川と表記）、木曽川の平瀬または早瀬に設定した（表-1参照）。

中津川調査地の1.5km上流には宮ヶ瀬ダム、真名川調査地の6.4km上流には真名川ダムが存在し、ともに下流河道へのフラッシュ放流（宮ヶ瀬ダム2005/2/22、同10/15：100m³/s、真名川ダム2005/8/2：30m³/s）が計画・実施されている。

3.2 調査方法

同一ユニット（平瀬または早瀬）に位置する大礫（64～256mm）について、各対象材料の3軸径（長径、中径、短径）および河床固化度を計測し、近傍の流速（6割水深点）、水深を調べた。河床固化の計測には、既往の研究^{8), 14), 15)}を参考に、図-1左に示す装置を作成し用いた。対象材料を熊手により捕捉し、流れと同方向に徐々に力を加えながらこれが移動するまで引っ張り続け、移動時点での引張力 F_{before} （底生動物除去前）を記録した。この際、流下物の流失を防ぐために材料の下流にサーバーネット（網目0.25mm）を設置しながら行い、ここでの集積物に移動後の材料から採取した付着物を併せて対象材料ごとの付着物サンプルとした。このサンプルを分析することで対象材料ごとの底生動物の現存量（湿潤重量）を把握した。これは礫単位での底生動物の定量調査に相当する。さらに、付着物除去後の材料を元

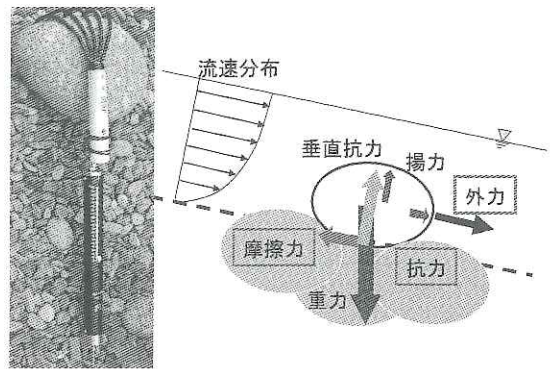


図-1 河床固化の測定装置（左、ばねばかり（置針式）と熊手にて作成）と流水中の河床材料の力の釣り合い（右）

の位置に戻し、再度、移動に必要な引張力 F_{after} （底生動物除去後）を計測した。これら2種の引張力から、底生動物棲み込みによる材料の移動限界の変化を推定した。なお、本方法の性格上、調査地点周辺において、特に流れに面する直上流と移動先となる直下流に礫が存在すると、対象材料当たりの計測値を得られないため、そのような地点は除外した。

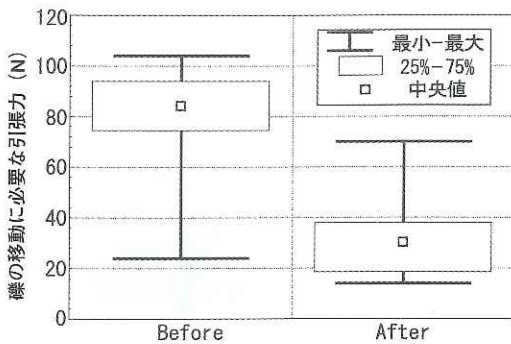
3.3 河床固化要因の推定

2005/2/21に中津川で実施した調査で得られた各種の変量（水深、流速、材料サイズ（長・中・短径）、底生動物除去前・後の材料移動に必要な引張力、底生動物全現存量と造網型昆虫現存量の計9変数）について、はじめに2変量間の相関関係の検定を行い、次いで多変量解析を行った。

相関検定は9変数のすべての組み合わせを対象として、ピアソンの相関係数の検定により行った。多変量解析は、環境の類型化を目的として主成分分析とクラスター分析（ウォード法、ユークリッド距離を採用）を併用した。主成分分析ではサンプル間の特性の違いを因子の複合的影響として考察でき¹⁶⁾、クラスター分析では多変量により客観的に区分できる¹⁶⁾ことから、景観の類型化についての総合的考察が可能となる。また、多変量解析において相関性の高い因子を無作為に解析に用いると、調査・分析項目の偏りによって特定の影響要因による重み付けが発生しうることから、共線性を有する因子（ $r > 0.8$ ）を排除して因子を選定した。なお、多変量解析には統計ソフト SPSS 14.0 J（SPSS Japan Inc.）を用いた。

3.4 河床固化の定量評価

対象材料にかかる力の釣り合いを考え、移動限

図-2 材料移動に要する力 (左: F_{before} 、右: F_{after})

界掃流力を算定した。流れ方向に関する力の釣り合いは流体力による抗力、底面に沿って働く摩擦力によって成り立つが、本調査における引張力(外力)が加わると図-1右のように書ける。式(1)には対象材料の移動限界状態における関係を、式(2)には本研究に用いた粗面平均流速に対する対数分布則を示した。

$$\tau_{*cx} = \tau_* + \frac{F_x}{A} \frac{1}{\rho(\sigma/\rho - 1)gd} \quad (1)$$

$$\tau_* = \frac{u_*^2}{(\sigma/\rho - 1)gd}, \frac{U}{u_*} = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{11.0h}{d} \right) \quad (2)$$

ここで、 $\tau_{*(c)}$ ：無次元(限界)掃流力、 x ：底生動物除去前または後を表す添え字、 F ：材料移動に必要な引張力、 A ：材料下面の接着部面積、 ρ/σ ：水密度/材料密度、 g ：重力加速度、 d ：材料径、 u_* ：摩擦速度、 U ：断面平均流速、 k ：カルマン定数(0.4)、 h ：水深である。はじめに、底生動物除去後の移動限界を対象とし、岩垣¹⁷⁾の式から $\tau_{*clafter}$ ($= 0.05$)を与え、計測した流速、水深、粒径(3軸の平均)から τ_* を求め、実測した F_{after} とともに式(1)に代入することで接着面積 A を算定した。この接着面積は実測不可能ではないが、現地の不攪乱材料を対象とした場合には引き剥がした後に接着部を判定することが困難であるため、この算定方法を採用するものとした。ここで得られた τ_* 、 A と F_{before} から、再度式(1)を用いて $\tau_{*clbefore}$ を逆算した。この無次元限界掃流力 $\tau_{*clbefore}$ が底生動物の棲み込みによって引き起こされた河床固化の評価指標となる。

3.5 フラッシュ放流による影響

2005/8/2に真名川ダム、2005/10/15に宮ヶ瀬ダムで実施された下流河道へのフラッシュ放流前後に実施した調査結果を対象として、推定された

無次元限界掃流力の差の検定を行った。なお、真名川では、平瀬・早瀬といった河床型の類型区分ごとに調査を行ったことから、フラッシュ放流前後と河床型の差異を2要素とする二元配置分散分析を行った。これにより、河床型ごとに区別してフラッシュ放流による影響を考察できる。

3.6 季節と調査場所による河床固化状況の違い

異なる季節におけるデータが確保できる中津川(冬：2005/2/21、秋：同10/14、16)と木曽川(春：2005/5/20、夏：同8/10、秋：同11/18、28)を対象として、中津川については2群の差の検定を、木曽川については一元配置分散分析を行った。さらに、季節と河川の組み合わせにより6種類に区分された調査結果(中津川冬、中津川秋、真名川夏、木曽川春、木曽川夏、木曽川秋)について、無次元限界掃流力を対象としてクラスカル・ワリス検定を行った。

4. 結果と考察

4.1 河床固化の評価とその要因

図-2には、2005/2/21に中津川で実施した調査について、底生動物除去前後における全15地点分の礫の移動に必要な引張力の計測結果を示した。両者の分布には検定を行うまでも無いほどに顕著な差が存在し、底生動物の棲み込みによって河床材料が「固化」されることが示された。

次に、対象9変数が不足なく計測されている14地点分のデータについて、相関検定を行ったところ、河床材料の長軸径と中軸径との間に有意な相関があった($r = 0.64$)ほか、底生動物除去後の材料移動に必要な引張力と水深との間には正の相関関係($r = 0.55$)があった。しかし、最も強い相関が確認されたのは底生動物全現存量と造網型昆虫現存量の関係であった($r = 0.99$)。造網型昆虫の全現存量に対する占有率(造網型係数¹⁸⁾)が2地点を除いて80%を超えていることを踏まえれば、調査地は造網型昆虫が優占する河床であると考えられた。ここでの相関検定における共線性を考慮することにより、水理条件、河床材料、固化の状態、底生動物の棲み込み状況を表す次の8因子が抽出される。

- ・水深、流速
- ・河床材料の長・中・短軸径
- ・底生動物除去前・後の材料移動に必要な引張力

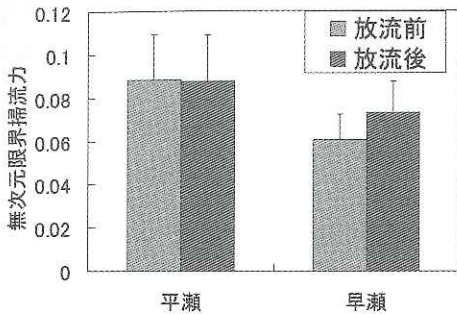


図-4 フラッシュ放流前後の無次元限界掃流力
(真名川の事例。サンプル数各6。)

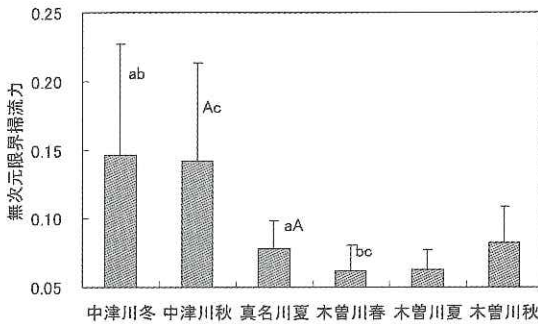


図-5 季節と調査場所による河床固化の違い
(ただし、英大文字: $P < 0.01$ 、英小文字: $P < 0.05$)

施された放流前後において、無次元限界掃流力に有意な差は確認できなかった。図-4には、2005/8/2に真名川で実施された放流前後における無次元限界掃流力の算定結果を示す。放流前/後と河床型の差異(早瀬/平瀬)を2要因とする二元配置分散分析を行ったところ、要因間に交互作用は無く、河床型による有意な差が確認された($P < 0.05$)。すなわち、中津川($2.7 \rightarrow 100 \text{ m}^3/\text{s}$)、真名川($5 \rightarrow 30 \text{ m}^3/\text{s}$)の放流による固化への影響は無く、真名川の河床では平瀬には早瀬よりも顕著な固化が生じていたことが分かった。今回対象としたいいずれのフラッシュ放流においても、調査した大礫を輸送するほどの掃流力は働かないこと(田代ら、未発表)を鑑みても、水位上昇だけのフラッシュ放流によって固化が進行した河床を改善することは難しいものと考えられた。

4.3 季節と調査場所による河床固化状況の違い

中津川の冬・秋、木曽川の春・夏・秋における無次元限界掃流力について河川ごとに比較したところ、統計的に有意な差が認められなかった。ただし、今回の調査は、底生動物群集の組成変化と対応付けられるほどに連続的に追跡された結果で

はないうえ、流況中の調査時の位置づけが不明であることから、実際には変化を追跡できていない可能性も考えられる。河床固化を担う主要な造網型トビケラであるヒゲナガカワトビケラ属(*Stenopsyche* sp.)は、水温の差異によって固化の程度に差が見られることが確認されている¹³⁾ことから、季節や流速、材料など営巣場所の物理条件によって固化の程度に差が現れることは十分に想定されるため、今後、精査する必要があるものと考えられた。

図-5には、季節と調査場所による河床固化の違いとして、本報で取り扱ってきた河床固化に関する調査結果を集約した。図中横軸、時期と場所により区分された6群について、グラスカル・ワリス検定の結果、有意な差が検出された($P = 5.0 \times 10^{-7}$)ため、Scheffe's F testを行ったところ、中津川冬/中津川秋と真名川夏、木曽川春の間に有意な差が検出された(図中に記載)。直上流に大規模なダムを有する中津川(1.6km)、それよりはやや離れた真名川(6.4km)と遠く離れた木曽川の間で固化の状況が異なり、特にダム直下流において顕在化していることが確認された。河床固化を担う存在である造網型トビケラがダム下流において優占することりを考えれば、この結果は十分納得できるものであった。しかし、ダムの影響が及んでいないと思われる木曽川では、統計的な有意さは検出されないものの、季節による違いがやや大きく、真名川と同程度の固化を示す場合もあった。ここで概括した調査結果は系統的に企画されたものではないため、因果関係を考察しにくい面もあるが、河床固化に関する物理環境と生物群集のインパクト・レスポンスを論じるうえで多くの示唆を含んでおり、今後の課題抽出に役立つものを思われる。

5. おわりに

本研究では、簡易な計測装置を用いた調査とその分析から、河床固化の実態および要因推定とフラッシュ放流による影響把握を試みた。その結果、ダム下流のみならず、河床固化は一般的に生じる現象であることが確認され、その要因としては、嵌まり込みの少ない比較的小さな材料で形成された「浮き石」の裏における造網型昆虫の高密度な生息であることが推察された。また、放流や季節

変化による固化状況の変化は観測されなかったものの、早瀬よりも平瀬において卓越し、上流のダムに近づくほど顕在化することが確認された。

今後は、ダム下流河道における流程変化や底生動物の現存量および群集組成の違いが河床固化に及ぼす影響についても検討を進めたい。本研究の成果から、改変された河床の修復には、限界掃流力を超える物理的インパクトの必要性が改めて示されたと言える。ダム下流の生態系修復を図っていくには、人為的に操作可能な放流規模を見極めたうえで、河道規模の見直し、改善箇所の絞込みなどを含めた弾力的な対応が必要であろう。

参考文献

- 1) 谷田一三、竹門康弘：ダムが河川の底生動物へ与える影響、応用生態工学、Vol.2, pp.153-164, 1999.
- 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) 小倉紀雄、山本晃一編著：自然的攪乱・人為的インパクトと河川生態系、技報堂出版、東京、362p.
- 4) 可児藤吉：溪流棲昆虫の生態—カゲロウ・トビケラ・カワゲラその他の幼虫について—、昆虫上巻（古川晴男編）、日本生物誌第四巻、研究社、1944.
- 5) 谷田一三：河川ベントスの棲み込み関係キースピーシーズとしてのトビケラ、棲み場所の生態学、共生の生態学シリーズ7、平凡社、東京、pp.95-128, 1995.
- 6) 田代 喬、渡邊慎一郎、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.
- 7) 田代 喬、渡邊慎一郎、辻本哲郎：造網型トビケラの棲み込みによる河床の固結化、河川技術論文集、Vol. 10, pp.489-494, 2004.
- 8) 田代 喬、皆川朋子、萱場祐一：底生動物の棲み込みによる河床固化—相模川水系中津川における現況を事例として—、水工学論文集、第50巻、pp.1249-1255, 2006.
- 9) 辻本哲郎：植生を伴う流れの水理、土木学会水理委員会・水工学夏期研修会テキスト、第27回、A-5, 22p., 1991.
- 10) Jones, C.G., J.H. Lawton and M. Shachak: Organisms as ecosystem engineers, *Oikos*, Vol.69, pp.373-386, 1994.
- 11) Statzner, B., Sagnes, P., Champagne, J.Y. and Viboud, S.: Contribution of benthic fish to the patch dynamics of gravel and sand transport in streams, *Water Resources Res.*, Vol. 39, pp.1309-1325, 2003.
- 12) 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 Res.* Vol. 35, pp.3495-3506, 1999.
- 13) Cardinale, B.J., Gelmann, E.R. and Palmer, M.A.: Net spinning caddisflies as stream ecosystem engineers: the influence of Hydropsyche on benthic substrate stability, *Functional Ecology*, Vol. 18, pp.381-387, 2004.
- 14) Downes, B.J., Glaister, A. and Lake, P.S.: Spatial variation in the force required to initiate rock movement in 4 upland streams: implications for estimating disturbance frequencies, *Journal of the North American Benthological Society*, Vol. 16, pp.203-220, 1997.
- 15) Takao, A., Junjiro N. Negishi, J.N., Nunokawa, M., Gomi, T., Nakahara, O.: Potential influences of a net-spinning caddisfly (*Trichoptera: Stenopsyche marmorata*) on stream substratum stability in heterogeneous field environments, *Journal of the North American Benthological Society*, Vol.25, No.3, pp.545-555, 2006. 9.
- 16) 新村秀一：パソコンによるデータ解析—統計ソフトを使いこなす—、ブルーバックスB-1095、講談社、東京、318p., 1995.
- 17) 岩垣雄一：限界掃流力に関する流体力学的研究、土木学会論文集、第41号、pp.1-21, 1956.
- 18) 津田松苗：川の底棲動物の現存量をめぐる諸問題 特に造網型昆虫の重要性について、陸水学雑誌、Vol. 20, pp.86-92, 1959.

田代 喬*



独立行政法人土木研究所つくば
中央研究所水環境研究グループ
自然共生研究センター部外研究
員（前 専門研究員、現名古屋
大学工学研究科助教）、工博
Dr. Takashi TASHIRO

皆川朋子**



独立行政法人土木研究所つくば
中央研究所水環境研究グループ
自然共生研究センター主任研究
員、工博
Dr. Tomoko MINIGAWA

萱場祐一***



独立行政法人土木研究所つくば
中央研究所水環境研究グループ
自然共生研究センター長
Yuichi KAYABA