

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 -

SUBSTRATUM ADHESION DUE TO BENTHOS INHABITATION

- FIELD INVESTIGATION IN NAKATSU RIVER OF SAGAMI RIVER SYSTEMS -

田代 喬¹・皆川朋子²・萱場祐一³
Takashi TASHIRO, Tomoko MINAGAWA and Yuichi KAYABA

¹正会員 博（工） 独立行政法人土木研究所 水循環研究グループ自然共生研究センター 専門研究員
（〒501-6021 岐阜県各務原市川島笠田町官有地無番地）

²正会員 博（工） 独立行政法人土木研究所 水循環研究グループ自然共生研究センター 研究員

³正会員 工修 独立行政法人土木研究所 水循環研究グループ自然共生研究センター センター長

Channels with fewer disturbances have been caused not only by physical environmental factors such as armoring below dams, but also by biological factors. In a gravel river with decreased disturbances, the strengths of 'substratum adhesion' on some bed materials were investigated by using simple equipment made from a drag rake and a spring scale. These magnitudes were quantitatively evaluated by estimating the dimensionless critical shear stress of each material. Moreover, statistical analyses were carried out by using these measurements, hydraulic parameters and biological condition together. According to these results, the substratum adhesion was clarified to be caused by the inhabitation of benthic invertebrates and the substratum condition, and to reach about eight times as large as that without the invertebrates. Consequently, the substratum adhesion could be recognized as the serious issue in the controlling flow and disturbance regime for river ecosystem.

Key Words : *Substratum adhesion, benthos, critical shear stress, interstice in riverbed, gravel river, field investigation, statistical analysis*

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⁾、こうした原因のひとつとして低攪乱な河床の存在が挙げられている²⁾。河床の低攪乱化は、粒度組成の変化を伴ういわゆるアーマー化などの物理的要因によって概略的には説明できる。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を数えることによって河床攪乱頻度の低下を表現し、生物相の変化と対応付けた。こうした流量変動などを伴う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⁾、物理的攪乱が生物に与えるインパクトを適正に評価することが今後の河川管理において不可欠であるとの認識が広まってきている。

ところで、実際の河川においては、生物による活動が物理環境を改変することも少なくない。したがって、物

理的環境と生物との相互作用系メカニズムに対する本質的な理解が必要になってくる場合も想定される。従来の河川工学では、例えば、植生群落が周囲の微地形に与える影響については進展させられてきた⁴⁾が、植生群落の消長との相互作用までは考慮されていない。まして、魚類や底生動物といった水中の生物が物理環境を改変させるといった影響については意識すらされてこなかったとあって良い。一方、生態学分野においては、Jones *et al.*⁵⁾が'ecosystem engineer'と名付けたことに始まり、河川でもいくつかの動植物について調査がなされてきた⁶⁾。谷田⁷⁾が指摘した河床間隙に棲み込む造網型トビケラによる環境変更作用は、当初、他の生物にとっての間隙空間の減少を意図したものであったが、材料同士を絹糸で結び付けて営巣する特性から土砂の流送特性へ及ぼす影響に視点が移っていった。既に実験水路においては、Statzner *et al.*⁷⁾およびCardinale *et al.*⁸⁾による検討が行われ、造網型トビケラの営巣による顕著な流送土砂の減少が確認された。しかし、これらは水理学的諸量の取扱が不十分であるために汎用性に乏しいと言わざるを得ない。

以上に鑑みれば、河床の低撓乱化を理解する際にも物理的要因のみならず、生物的要因に対する検討が必要である。前述した室内の実験水路における事例^{7,8)}については、新たに田代ら⁹⁾によって実験が行われ、造網型トビケラの棲み込みによる「河床固化」について水理学的評価がなされた。そこで本研究では、実河道における、造網型トビケラを始めとする底生動物の棲み込みによって引き起こされる河床固化の実態把握を目的とする。低撓乱状態にある河道における現地観測をもとに定量評価を行ったうえで統計解析を援用することで、河床固化の影響要因について考察した。これらの手順はメカニズムの解明を目的とした素過程を抽出する上でも有用なものと思われる。

2. 材料と方法

(1) 調査地および日程

調査地は、神奈川県愛甲郡愛川町を流れる相模川水系中津川の平瀬であり、宮ヶ瀬ダム下流約1.5 km地点に架かる愛川大橋の直上流に位置する。現地河床は大礫（64-256mm）や巨礫（>256mm）の割合が多く（>60 %），水際死水域を除いて河床固化が見受けられる。宮ヶ瀬ダムは1999年から運用が開始された首都圏最大級の多目的ダムであり、河川環境の改善を目的としたフラッシュ放流が計画されている¹¹⁾。本研究は2005/2/22に行われた放流に関する影響調査の一環として行われた。

(2) 調査方法

同一ユニット（平瀬，約10 m×10 m）に位置する河床材料をランダムに15個選定し、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^{12,13)}を参考に、写真-1に示す装置を作成し用いた。計測対象とする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0.25 mm）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を行うことに相当する。さらに、付着物除去後の対象材料を元の位置に戻し、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、底生動物の棲み込みによる材料の移動限界の変化を推定した。上記の調査は、フラッシュ放流によるインパクトを受ける前の2005/2/21に行われた。

また、調査地におけるフラッシュ放流によるインパクト



写真-1 河床固化の測定装置。ばねばかり（置針式丸型テンションゲージ、(株)大場計器製作所製）と熊手にて作成。径10 cm程度の礫には100 N程度の秤量が必要であること¹³⁾から、秤量200 N（最小2 N）で瞬間最高値を計測可能な置針式を採用。

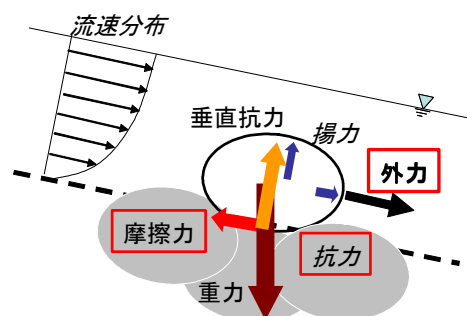


図-1 流水中の河床材料の力の釣り合い

トを推定するために、現地で採取した材料を着色した上で河床上に横断的に設置し、放流前後での変位状況を追跡した。これらの着色礫をサイズによって大小の2クラスに区分し、それぞれのサンプル数は各10とした。なお、各クラスの材料サイズ（平均値±標準偏差）は、大：13.6±1.2 cm，小：8.6±0.6 cmである。

(3) 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Manning-Stricklerの式を示した。

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

$$\tau_* = \rho u_*^2, \quad \frac{U}{u_*} = 7.66 \left(\frac{h}{d} \right)^{1/6} \quad (2)$$

ここで、 $\tau_{*(c)}$ ：無次元（限界）掃流力， x ：底生動物除去前or後を表す添え字， F ：材料移動に必要な引張力， A ：接着部の面積， 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， h ：水深である。はじめに、底生動物除去後の移動限界を対

表-1 調査地の物理環境

	平均	標準偏差
水深 (cm)	20.9	6.2
流速 (cm/s)	33.0	14.1
礫径 (cm)	18.8	2.9
形状係数	0.54	0.14
接着部面積 (cm ²)	217.0	96.8
引張力・前 (N)	80.8	19.9
引張力・後 (N)	32.8	16.2
底生動物現存量 (g)	1.43	0.92
造網型係数	0.80	0.23

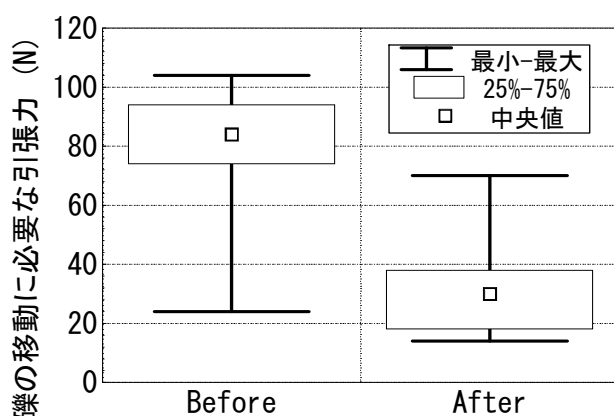


図-2 底生動物除去前後で異なる材料の移動に必要な引張力

象とし、岩垣¹⁴⁾の式から $\tau_{\text{c,after}}$ ($=0.05$) を、計測した流速、水深、粒径 (3軸の平均) から τ_{c} 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部の面積 A を算定した。この接着部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_{c} 、 A と F_{before} から、再度式(1)を用いて $\tau_{\text{c,before}}$ を逆算した。この無次元限界掃流力 $\tau_{\text{c,before}}$ 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を評価する指標となる。

(4) 統計解析を用いた河床固化要因の推定

河床固化と物理環境および底生動物の棲み込み状況との関係を総合的に解釈するために、はじめに 2変量の相関関係の検定を行い、次いで多変量解析を行った。相関関係の検定 (ピアソンの相関係数の検定, 有意水準 5%) は調査時に計測された各種の変量について行った。多変量解析は、はじめに環境の類型化を目的としたクラスター分析 (ウォード法, ユークリッド距離を採用) を行い、ついで因子間の相互関係について考察するために主成分分析を行った。解析に用いた因子は、相関関係の検定の結果を踏まえて共線性を有する ($r > 0.8$) 因子を排除して選定した。選定された8因子は次の通りである。これらはそれぞれ、水理条件、河床材料、底質の構成・

構造、底生動物の棲み込み状況についての特性を示唆するものと考えられる。

- ・ 水深、流速 (6割水深点)
- ・ 河床材料粒径 (3軸径の平均値) および材料の形状係数¹⁵⁾
- ・ 材料同士の接着部面積、底生動物除去後の材料移動に必要な引張力
- ・ 底生動物の現存量および造網型係数¹⁶⁾

ここで、材料の形状係数はMcNown and Malaika¹⁵⁾にしたがい、短軸径を長軸と中軸の幾何平均で除すことにより得た。また、造網型係数は津田¹⁶⁾にしたがい、造網型昆虫の全重量に占める割合を算定することにより得た。なお、多変量解析は統計ソフト STATISTICA (StatSoft Japan株式会社) を用いて行った。

3. 結果と考察

表-1には、調査地の物理環境として物理量データ ($N=15$) および材料単位の底生動物量データ ($N=13$) の平均と標準偏差を併記した。調査を行った計15地点のうち、2点については底生動物量を把握できなかったためである。図-2には、底生動物除去前後における礫の移動に必要な引張力の計測結果を示した。両者の分布とも正規性が確認されたことから、対応のある t 検定を行うとこれら2者の間には有意な差が確認された ($P = 1.44 \times 10^{-9}$)。材料の移動に必要な引張力は、中央値レベルでも1/3程度に減じられていることが分かり、河床固化の顕在化を示唆する結果となった。

河床固化要因の推定に当たっては、全変量が計測できた13地点分を有効データとした。2 (3) の手法により算定された底生動物除去前の無次元限界掃流力を対象に、その他の11変数 (水深、流速、河床材料粒径 (長・中・短径) および形状係数、材料同士の接着部面積、底生動物除去前・後の材料移動に必要な引張力、底生動物現存量、造網型係数) との相関関係について検定したところ、材料同士の接着部面積、底生動物除去後の材料移動に必要な引張力との間のみ、それぞれ有意な相関関係があることが確認された。これらはともに底質の構成・構造の特性に関わるものと考えられるところが興味深い。

図-3には、河床固化の影響を受けた無次元限界掃流力と材料同士の接着部面積および底生動物除去後の材料移動に必要な引張力との関係を示す。それぞれ両者の関係には負の相関があり、材料の接着面積が小さい、あるいは、材料移動に必要な引張力が小さいと無次元限界掃流力が大きくなった。小さな引張力で移動させられるということは対象とした材料が周囲の材料との間に嵌まり込んでいないことを意味するものと考えられる。したがって、材料間の空隙が大きく、周囲の材料と噛み合っていない状態にあると河床固化の影響が大きくなることを示して

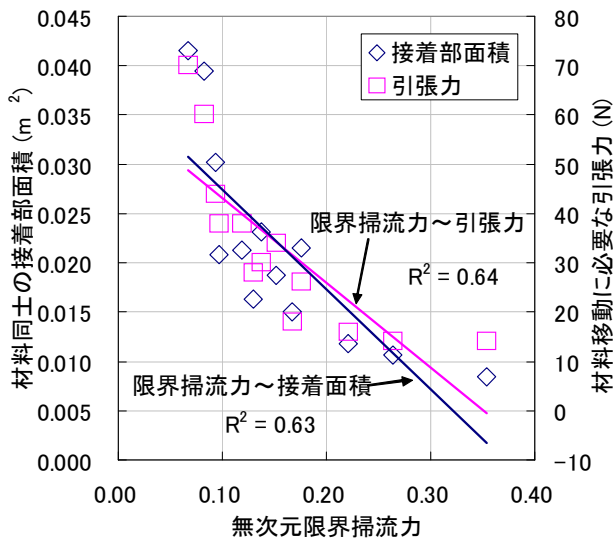


図-3 底生動物除去前の無次元限界掃流力と材料同士の接着部面積*および除去後の材料移動に必要な引張力**との関係 (ただし, *: $P < 0.01$, **: $P < 0.001$)

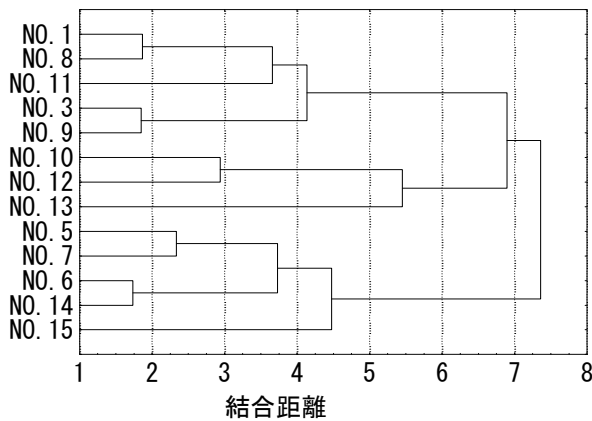


図-4 クラスタ分析による中津川平瀬における調査地点 (13箇所) のデンドログラム

おり、いわゆる浮き石において河床固化が顕在化しやすいことを示す結果になった。

また、ここで見積もられた無次元限界掃流力は、既往の研究における数値 ($\tau_c = 0.05 \sim 0.2$)¹⁰⁾を上回った。ただし、これは実験水路で確認された結果であって、造網型トビケラ (ヒゲナガカワトビケラ属 *Stenopsyche* sp., オオシマトビケラ *Macrostemum radiatum*) のみを扱い、かつ、安定した低流速 (10 cm/s程度) 条件下で制御しやすい人工タイルなどに営巣させたもの¹⁰⁾である。実験水路においてさえ、ヒゲナガカワトビケラ属については、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¹⁰⁾ことから、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考えられる。その他、多様な生物が生息することによって異種間の餌資源をめぐる競争など¹⁷⁾が固化に影響した可能性も考えられる。したがって、今回、見積もられた無

表-2 主成分分析における使用8変数に対する各主成分 (PC1~3) の因子負荷量と寄与率 (*: $P < 0.05$ で有意)

	PC1	PC2	PC3
礫径平均	-0.574	-0.677	0.163
形状係数	-0.192	-0.001	-0.921*
接着部面積	-0.356	0.897*	-0.031
水深	-0.712*	0.048	0.441
流速	-0.262	-0.338	-0.440
引張力・後	-0.845*	0.380	0.069
底生動物現存量	0.632	0.452	-0.072
造網型係数	0.834*	-0.106	0.250
寄与率 (%)	36.0	21.7	16.7

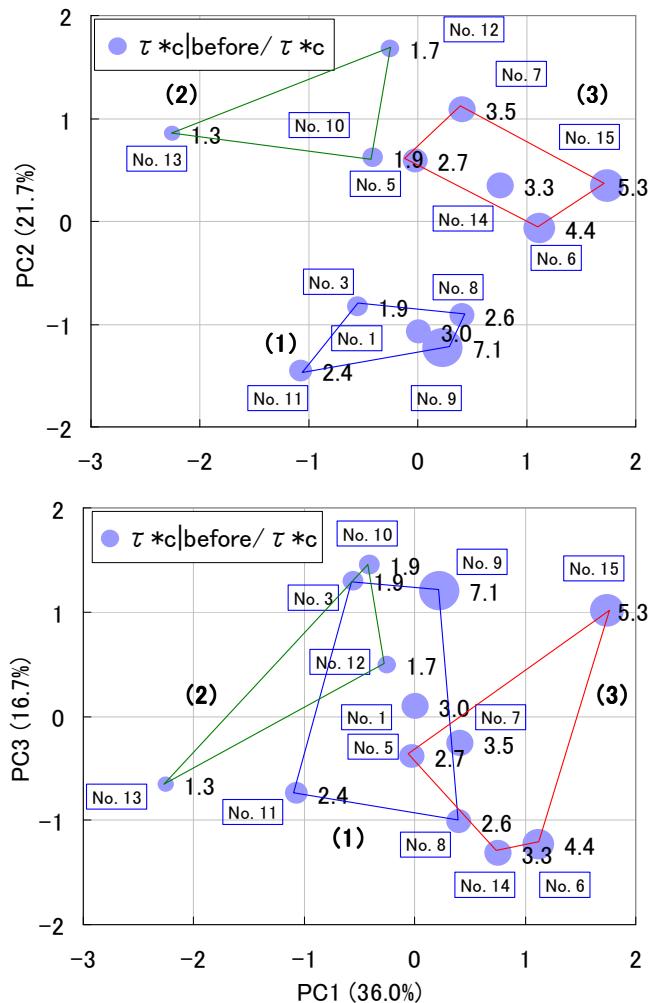


図-5 河床固化の影響要因に関する主成分分析 (括弧内は各主成分の寄与率を示す)

次元限界掃流力が大きくなったのは、実河道という多様な環境条件下における観測結果であったためと考えられ、河床固化という問題の複雑さ、深刻さを改めて裏付けているものと考えられた。

次に、調査地点の環境の類型化を目的としたクラスタ分析を行った結果、(1)No. 1, 8, 11, 3, 9からなるもの、(2)No. 10, 12, 13からなるもの、(3)No. 5, 7, 6, 14, 15からなるもの

るものに三分された。図-4には結果として得られたデンドログラムを示す。(1)~(3)のクラスターにおける河床固化状況について、無次元限界掃流力を対象としたクラスカル・ウォリス検定を行ったところ、危険率5%で帰無仮説が棄却され、クラスターによって無次元限界掃流力に有意な差が確認された。クラスター分析は教師なしの判別分析と呼ばれる¹⁸⁾ように、その要因について考察することはできないが、河床固化状況の観点から調査地の環境を類型化できたものと考えられる。

河床固化に対する環境因子の複合的要因を考察するために主成分分析を行った結果、第3主成分までの固有値が大きく累積寄与率が74 %に達した。表-2には、使用8変数に対する各主成分の因子負荷量と寄与率を示す。第1主成分(PC1)には水深、(底生動物除去後の)引張力、造網型係数、第2主成分(PC2)には接着部面積、第3主成分(PC3)には形状係数が大きく寄与した。これら3軸(PC1~3)によって展開されたバブルチャートを図-5に示す。図中のプロットはそれぞれの地点(図中に枠付で表示)に対応し、バブルの大きさは、固化の影響を受けない岩垣¹⁴⁾の無次元限界掃流力を1.0としてその増分に応じて重み付けられたもので、付記された数値はその比を表す。また、図中のプロットを頂点として描かれた多角形は、先のクラスター分析の結果に基づき、分類された3類型を囲ったものである。各主成分の数値のバラツキとバブルの大きさの関係に着目すると、PC1が大きいほど無次元限界掃流力も大きくなる傾向が見てとれたが、PC2およびPC3ではその傾向が明確でなかった。表中の因子負荷量と併せて考えると、水深および材料を移動させるための引張力が比較的小さく、造網型係数が大きい地点で無次元限界掃流力の数値は大きくなっていた。つまり、水深の浅い浮き石帯に造網型昆虫が多く生息する条件において河床固化が顕在化することを示唆しており、現地での観察結果と一致する結果となった。これは2変量間の相関関係の解析からは導き得なかった結果であり、多変量解析の有用性を示すものと思われる。一方で、無次元掃流力との有意な相関が認められた材料同士の接着部面積は、PC2の数値の挙動をほぼ規定しているにもかかわらず、この主成分分析においては明確な傾向が表れなかった。これについては両者の相関関係が先に偶然検出されたという可能性も否定しきれないが、本調査の分析だけでは結論付けられない。今後、追加調査を行って検証していく必要があるものと思われる。また、PC3に大きく寄与した材料の形状係数も、扁平な材料か否かを判断する基準になり得るため、今後の更なる検討が求められる指標といえよう。

さらに、図中に示される先に類型化された(1)~(3)のクラスターにおける「無次元限界掃流力比」と各主成分の関係を見ると、次のような見方ができる。図-5の上図(PC1~PC2)によれば、PC2が正の領域においてはPC1の数値に応じてクラスター(2)より(3)の方で無次元掃流

力が大きくなる傾向にあったが、負の領域にあるクラスター(1)においては無次元掃流力のバラツキが大きかった。また、下図(PC1~PC3)より、PC3では3つのクラスターを分離できなかった。以上から、各クラスターの環境特性は、大まかに次のように類型化することができる。すなわち、(1)は材料の接着部の小さいが移動に要する外力は程々であることから、やや嵌まり込んだ浮き石状であって、水深、造網型係数も中程度である。(2)は、材料の接着部が大きく移動に要する力も大きいことから嵌り具合の大きい沈み石状であって、水深はやや大きく造網型係数は小さい。(3)は、材料の接着部がやや大きいものの移動に要する力は小さいことから嵌り込みの少ない載り石状(浮き石~沈み石の中間的状態)であって、水深はやや小さく造網型係数は大きい。固化の程度は、図より(2)→(1)→(3)の順に大きくなると考えられ、嵌り込みの少ない材料に造網型昆虫が多く生息することが河床固化の顕在化の条件になるものと推察された。

ところで、フラッシュ放流による影響については、用意した着色礫20個(10地点)のうち流芯に近い5地点で9サンプル、その他にも1サンプルが最大で2.0 m程度移動した。調査時の流量は2.7 m³/sであり、その後のフラッシュ放流時には100.0 m³/sにまで達したが、今回の放流規模は、底生動物による影響を受けていない着色礫が移動し得ない程度であり、放流が河床固化に与える影響については無視できるものと考えられた。なお、今回の放流時水位は、調査地の横断面形状に水面勾配(1/625)に粗度条件($n = 0.0207$)を与えて行った等流計算により再現できたが、本試算も上記を裏付けている。すなわち、100 m³/s流量時における無次元掃流力は、13.6 cm径(着色礫大クラス平均径)の礫に対して0.009、8.6 cm径(同小クラス平均径)の礫に対しても0.014と見積もられ、移動限界値(0.05)とは大きな隔たりがあった。また、固化の影響を受けない礫(着色礫最小の7.7 cm径)の移動にさえ、670~850 m³/s程度の流量規模が必要であると推定され、影響を受けた材料についてはより大きな流量を必要とすることが予想された。調査地においてこれだけの規模のフラッシュ放流は現実的でなく、流量をコントロールするだけで河川環境を再生していくことには限界がある。今後は歴史的な改修の経緯などを振り返りながら、河川の規模に合った断面形状の見直しなども併せた複合的な検討が必要かも知れない。

4. おわりに

本研究では、簡易な計測装置を用いた調査結果とその解析から、実河道における底生動物の棲み込みによる河床固化の実態把握とその影響要因の推定を試みた。得られた結論は以下に集約される。

- ・ 観測結果から、固化が生じている礫の移動要する力

は、生じていない礫の約3倍に達した。

- 底生動物除去前後における材料についての力の釣合を考慮することにより、固化された材料の無次元限界掃流力を推定した。
- 本観測では河床固化の影響を受けた無次元限界掃流力は0.07~0.35と推定され、既往の室内実験のそれ(0.05~0.20)¹⁰⁾よりも大きかった。本結果は実河道の多様な環境の存在が影響したものと考えられた。
- 相関分析から無次元限界掃流力と有意な関係が見出されたのは、材料間の接着面積と底生動物除去後の材料移動に必要な引張力だけであった。
- 調査地内の13地点を対象に、材料粒径および形状係数、材料間の接着部面積、底生動物除去後の材料移動に必要な引張力、水深、流速、底生動物の現存量および造網型係数の8変数を用いてクラスター分析を行ったところ、3類型(浮き石、沈み石、載り石)に区分された。
- 上記3類型における無次元限界掃流力について、クラスカル・ウォリス検定を行ったところ、危険率5%で類型間に有意な差が検出された。
- さらに、前述の8変数を用いた主成分分析により、水深が小さく嵌り込みの少ない材料に造網型昆虫が多いと河床固化が顕在化することが示唆された。

以上より、実河道における河床固化は、実験水路などで想定されたよりも顕著な現象であると推察された。

ただし、本検討はダム下流で低攪乱化が進行した河川を対象として、冬季に限って行われた調査についてのものである。そのため、人為的影響の少ない河川においての実態は不明であるし、季節変化に応じてどのような挙動を示すかについても明らかにはされていない。また、計測した礫そのものの固化を扱っただけであって、河道全体に占める固化の割合がどの程度あるのか、周辺に存在する礫の状態によってどのような影響を被るのかについては把握できていない。今後は、他河川での調査事例を追加していくとともに、季節変化、物理環境の差異や底生動物の群集組成の違いによる影響などについても検討を進めながら、河床固化の実態把握に努めていきたい。

最後に、現地調査に際し、横浜市環境科学研究所福嶋悟博士、土木研究所河川生態チーム対馬孝治博士にご助力いただいた。ここに記して御礼申し上げる。

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) 辻本哲郎：植生を伴う流れの水力、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.

- 5) Jones, C.G., J.H. Lawton and M. Shachak: Organisms as ecosystem engineers, *Oikos*, Vol.69, pp.373-386, 1994.
- 6) 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.
- 7) 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(竹門康弘、谷田一三、玉置昭夫、向井宏、川端善一郎著)、共生の生態学シリーズ7、平凡社、東京、pp.95-128, 1995.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 田代喬、渡邊慎多郎、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.
- 11) 国土交通省関東地方整備局相模川水系広域ダム管理事務所：宮ヶ瀬ダムのフラッシュ放流、<http://www.ktr.mlit.go.jp/sagami/topics/2004/flash/main.htm>.
- 12) 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, *J. N. Am. Benthol. Soc.*, Vol. 16, pp.203-220, 1997.
- 13) 高尾彰、布川雅典、五味高志、根岸淳二郎、中原修：北海道北部の小河川におけるヒゲナガカワトビケラ(*Stenopsyche marmorata*)の巣網が河床礫安定性に及ぼす影響、応用生態工学会第7回研究発表会講演集、pp.5-8, 2003.
- 14) 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.
- 15) McNown, J.S. and Malaika, J.: Effect of particle shape of settling velocity at low Reynolds number, *Trans. AGU*, Vol.31, pp.74-82, 1950.
- 16) 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.
- 17) Hemphill, N.: Competition between two stream dwelling filter-feeders, *Hydropsyche osleri* and *Simulium virgatum*, *Oecologia*, Vol.70, pp.73-80, 1988.
- 18) 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B-1095, 講談社、東京、318p., 1995.

(2005. 9. 30受付)