

# 造網型トビケラの棲み込みによる河床の固結化

## EFFECT OF INHABITATION OF NET-SPINNING CADDIS LARVAE ON SUBSTRATUM ADHESION IN A COBBLE RIVER

田代 喬<sup>1</sup>・渡邊慎多郎<sup>2</sup>・辻本哲郎<sup>3</sup>

Takashi TASHIRO, Shintaro WATANABE and Tetsuro TSUJIMOTO

<sup>1</sup>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 専門研究員  
(〒501-6021 岐阜県羽島郡川島町笠田町官有地無番地)

<sup>2</sup>正会員 工修 愛知県建設部砂防課 (〒460-8501 名古屋市中区三の丸3-1-2)

<sup>3</sup>正会員 工博 名古屋大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻  
(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

Net-spinning caddis larvae set up nets and retreats on the substratum in a cobble river. Abundance of these caddis larvae causes "substratum adhesion" which suppresses the flux of bed-load transport, because it binds large amount of bed-materials. In this paper, we employed the following approaches: field investigation to survey their annual change in population and their habitat conditions; laboratory experiment in a flume with the caddis larvae to examine the magnitude of substratum adhesion. According to the field investigation, the growth process and the preference of habitat condition of the caddis larvae could be clarified. On the other hand, the experimental results showed that the adhesive strength due to the nets and the retreats made the critical tractive force of bed-material appreciably larger. By taking account of these results, we can evaluate the "substratum adhesion" due to the inhabitation of net-spinning caddis larvae in the cobble river.

**Key Words :** *Net-spinning caddis larvae, cobble river with less disturbance, substratum adhesion, bed-load transport, annual change in caddis inhabitation*

### 1. はじめに

ダム下流などで見られるアーマー化した河床では、攪乱機会の減少に伴い、糸状緑藻が繁茂し、底生動物相が変化するなど生態系の変質が見られる<sup>1)</sup>。このような生態系変質のメカニズムを分析するに当たっては、個々の攪乱機会が生物生息場へ及ぼすインパクトを定量的に評価する必要がある。著者ら<sup>2)~4)</sup>はこれまで、攪乱機会減少に伴う生態系変質のうち、付着藻群落の異常繁茂を対象とした検討を行う中で、掃流砂礫による付着藻群落の剥離効果の評価を試みてきた。このように、河床攪乱は、主に河床材料の輸送によって担われているため、実河道においてその輸送量を適正に評価することが必要とされるが、複雑な環境を呈する河床上の流砂量の見積りはなお課題として残されている<sup>4)</sup>。すなわち、実際の河床は、①浮き石帯、沈み石帯といった物理的環境要因に加え、②底生動物などの棲み込みによる環境変化に見られる生物的環境要因によって形成されると考えられる。既

に①の影響については、砂面からの礫の露出高さをパラメータとし、礫間隙を流れる掃流砂に対して、露出礫による流れの遮蔽効果を導入することによって、考慮してきた<sup>2)~4)</sup>。②の影響については、かつては造網型トビケラ幼虫の営巣による環境改変作用が注目されていた<sup>5)</sup>に過ぎなかったが、最近になり、Statzner *et al.*<sup>6)</sup>によって初めて実験的に検証された。彼らは、礫周辺に網を張り営巣するシマトビケラ科 (*Hydropsyche*) 幼虫を用いた水路実験から、砂礫の限界掃流力は路床に棲み込んだ *Hydropsyche* 幼虫の生息密度の増加に伴って増加することを示した<sup>6)</sup>。この結果は、造網型トビケラの棲み込みによる河床の固結化を数値的に確認した点で有意義であるものの、系統的な整理が不十分であるため、依然としてデータのばらつきが大きいなどの問題を有している。

以上に鑑み、本研究では、造網型トビケラの棲み込みによる河床の固結化が河床攪乱作用に及ぼす影響についての定量的な把握を目的とする。河床が低攪乱化された矢作川中流のリーチを対象とし、当該地点において優占するヒゲナガカワトビケラ (*Stenopsyche marmorata*) と

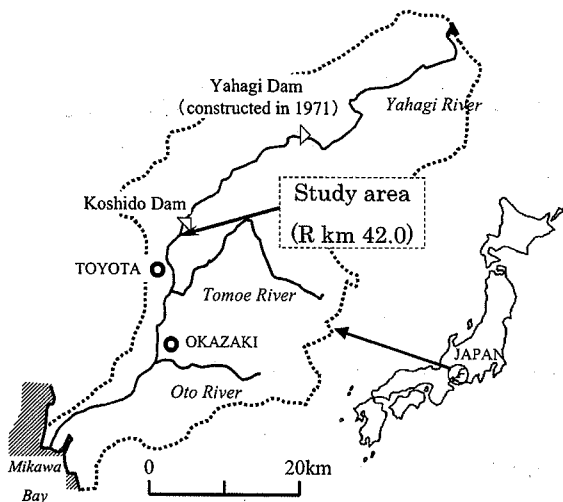


図-1 矢作川流域の概要と調査対象区間の位置づけ

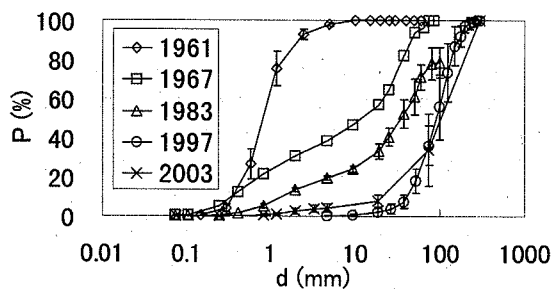


図-2 矢作川42km地点における河床構成材料の粒度分布 (1961~1997は国土交通省中部地方整備局提供)

オオシマトビケラ (*Macrostemum radiatus*) について、両種幼虫の個体群の年間変動を調べ、生息場の実態把握を試みる。さらに、室内実験水路において両種のトビケラを営巣させ、営巣による河床材料の固結強度並びに無次元限界掃流力の計測・算定を行う。これらの結果を併せ、造網型トビケラの棲み込みによる河床の固結化の実態について議論を展開する。

## 2. 矢作川中流における造網型トビケラ幼虫

矢作川は長野県大川入山 (標高1,980 m) を水源に発し、長野、岐阜、愛知の3県を流れ三河湾にそそぐ、幹線流路延長117 km、流域面積は1,830 km<sup>2</sup>の1級河川である。かつては典型的な砂河川であったが、砂利採取、砂防整備、ダム建設などの人的インパクトにより、中流部では近年、河床低下を伴ったアーマー化が進み、河床攪乱頻度も急激に減少してきた<sup>7)</sup>。調査対象区間は、42 km 地点付近のリーチで、砂州と瀬・淵構造によって特徴付けられる矢作川中流の典型的な区間である。図-1に矢作川流域の概要と対象区間の位置を示す。また、図-2には当該地点における河床構成材料の粒度分布の経年変化を示す。図より、近年の河床構成材料は、主として粒径5~

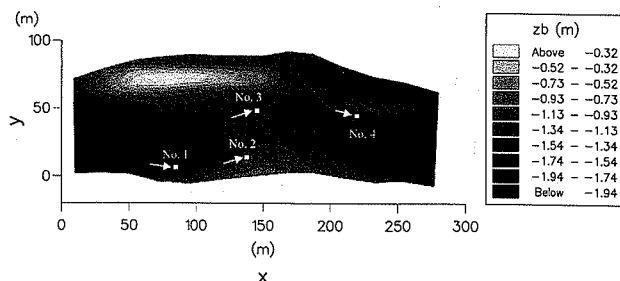


図-3 調査対象区間における河床高コンター図と設置コドラート (No. 1~4, 矢印は流向)

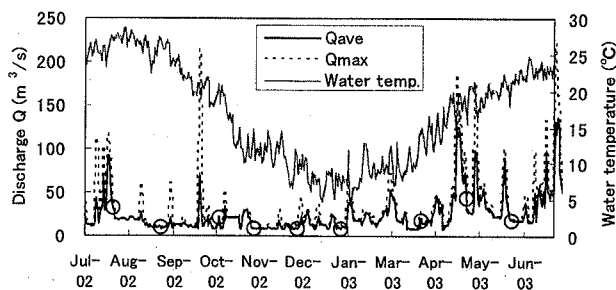


図-4 調査期間中の流量 ( $Q_{ave}$ : 日平均流量,  $Q_{max}$ : 日最大流量) および水温の日変化と調査実施日 (○にて表示)

20 cmの礫集団により構成されていることが分かる。

### (1) 調査地、調査項目および手法

図-3には対象区間における河床高コンター図を、図-4には調査期間中の流量および水温の日変化を示す。ここでの流量データは、豊田市平戸橋町地内のダム (45.8 km 地点) および発電所からの放流量であり、水温データは、日平均気温データ<sup>8)</sup>と対象区間における実測水温をもとに推定した日平均値である。

調査は2002年7月から1年間にわたり、計9回実施した。造網型トビケラを含む底生動物サンプルの採取は、図-3に示すコドラート (50 cm × 50 cm) にてサーバーネット (網目サイズ2 mm) を用い、行った。各コドラートは、瀬・淵構造の変化に伴う物理環境の違いを代表するように、それぞれ、No. 1: 淵, No. 2: 平瀬, No. 3: 平瀬~早瀬, No. 4: 早瀬に設定した。各調査時点において、水温、濁度をHORIBA W-23 (堀場製作所製) を用いて計測するとともに、各コドラート中心部における水深を測定し、その6割水深地点における流速を電磁流速計 (KENEK VE10) により計測した。

### (2) 調査結果と考察

底生動物調査の結果、No. 1地点 (淵) 以外では、ヒゲナガカワトビケラとオオシマトビケラが優占しており、No. 4地点では、特にオオシマトビケラ現存量が卓越していた。この結果は、近年の矢作川中流においてオオシマトビケラの分布拡大を指摘した内田の報告<sup>9)</sup>と一致し

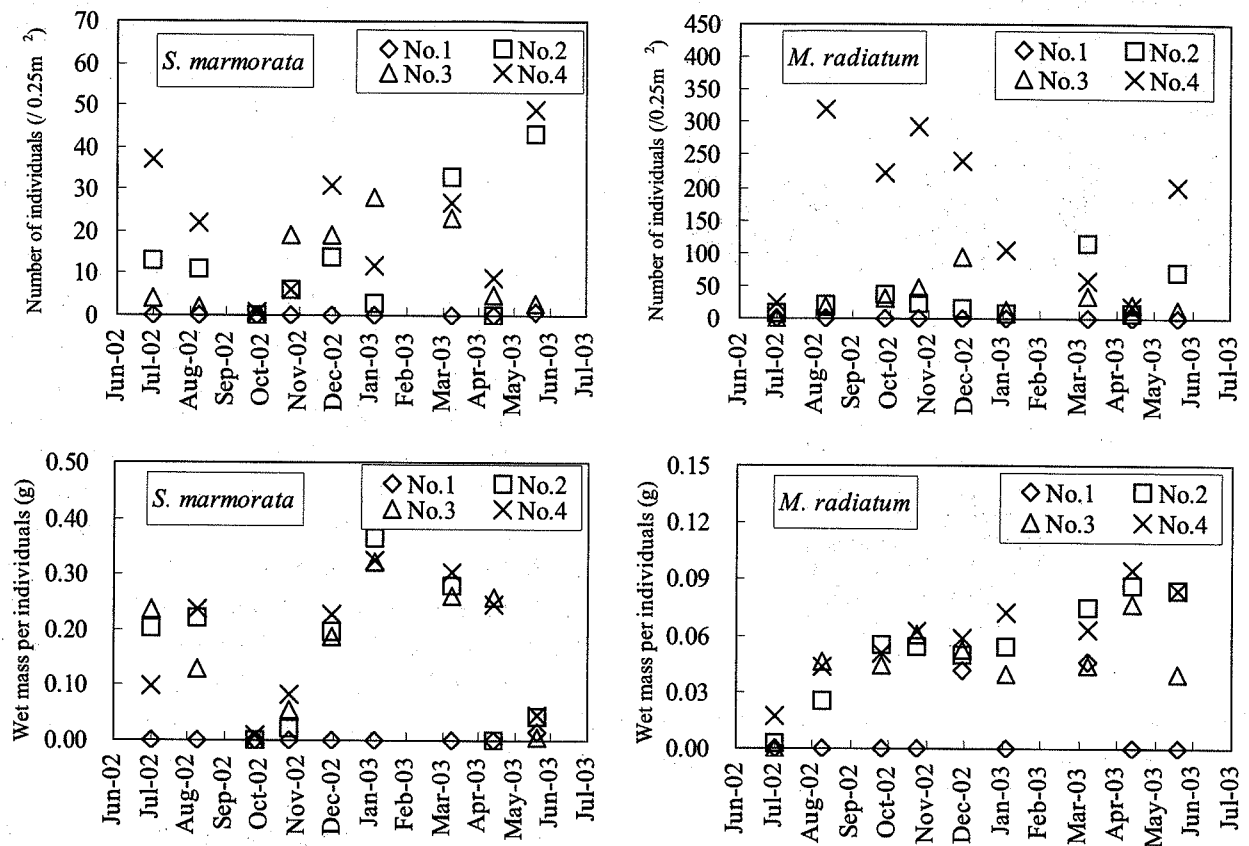


図5 各コドラートにおけるヒゲナガカワトビケラ (*S. marmorata*) とオオシマトビケラ (*M. radiatum*) 個体群の年間変動 (上: 個体数変化, 下: 1個体あたりの平均湿潤重量の変化)

ている。両種の幼虫個体群の年間変動を、個体数変化と1個体あたりの平均湿潤重量からまとめ、図-5に示す。

ヒゲナガカワトビケラ個体群では、6~7月と1~3月に平均湿潤重量において2回のピークを示し、8~10月と4~5月に採捕個体数が減少した。一方、オオシマトビケラ個体群では、4~5月に平均湿潤重量における1回のピークが確認され、同時期には採捕個体数が減少した。両種に見られるこうした個体群の変動は、成長過程における蛹化・羽化に伴う水界からの個体数の減少と卵からの孵化及び成長に伴う個体数の増加によるものと考えられる。したがって、本対象区間においてヒゲナガカワトビケラは2世代/年、オオシマトビケラは1世代/年であることが推察される。また、データのばらつきの大いなる個体数変化に比べ、個体重量の変化は各コドラートによらずほぼ同様であった。このことから、本対象区間における両種の個体群動態は、個体数の変化に大きく依存していることが分かる。

コドラート設置位置の違いによる生息状況の違いについて、淵 (No. 1地点) では両種幼虫ともほとんど生息していなかった。その他には、ヒゲナガカワトビケラでは環境の違いによる明確な特徴を見出すことは出来なかったが、オオシマトビケラでは早瀬 (No. 4地点) で高密度な生息が顕著であった。一般に、オオシマトビ

ケラは営巣材料とする砂が豊富で適度な流れも有する平瀬に多いとされている<sup>9)</sup>。しかしながら、矢作川対象区間における現河床では、図-2中の2003年データ (No. 1~4地点の平均±標準偏差) のように河床構成材料の粒度分布が均一化してきており、平瀬においても砂が少ない状況にある。つまり、現地のオオシマトビケラは流速への生息選好性を優先させた結果、このように特殊な生息選好性を示したものと考えられる。

### 3. 造網型トビケラの営巣による河床の固結化

矢作川中流で優占するヒゲナガカワトビケラとオオシマトビケラを対象として、室内実験水路において両種の営巣による河床の固結化の定量的評価に関する検討を行い、考察を行った。特に、営巣による河床材料の固結強度を調べ、営巣状況に伴って変化する河床材料の限界掃流力について評価した。

#### (1) 実験装置および手法

既往の文献<sup>9)</sup>および前章の調査から、ヒゲナガカワトビケラは石・礫などの大粒径材料を、オオシマトビケラは砂などの小粒径材料を固結化させることが分かっている

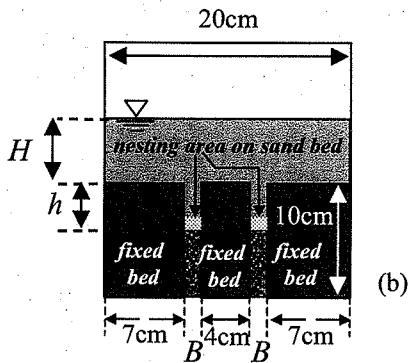
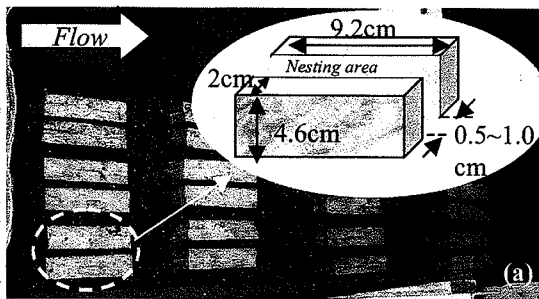


図-6 (a) ヒゲナガカワトビケラの固結強度測定に関する実験装置の概要と (b) オオシマトビケラ営巣による砂の掃流限界変化に関する実験装置断面図の概要

る。本実験では、(a) ヒゲナガカワトビケラの営巣による材料の固結強度をばねばかりを用いて実測する一方、(b) オオシマトビケラの営巣状況によって変化する砂の限界掃流力を水路実験の結果から算定した。なお、ばねばかりを用いて固結強度を実測するというアイデアは、高尾ら<sup>10)</sup>が現地観測において行った手法を援用したものである。ここでの実験に使用した水路は、全長6m、水路幅20cmの広矩形断面を有する可変勾配水路であり、一定流量の通水が可能である。

#### a) ヒゲナガカワトビケラの営巣による固結強度と礫の掃流限界の変化

図-6(a)に実験装置の概要を示す。ここでのヒゲナガカワトビケラの営巣基質となる材料は、営巣による固結部分の面積を算出可能な人工材料(固結部面: 42.32cm<sup>2</sup>, 図-6(a)参照)であり、敷石用タイルを半分にカットし張り合わせて作成した。一定流量通水中の実験水路内に、この材料を2枚一組として、流れに沿うように一定期間設置し、その間隙部(5mm程度)にヒゲナガカワトビケラを営巣させた。ここでの実験水路内の平均流速は、10cm/s程度であった。この一組の材料を剥がすのに必要な力を固結力と捉え、ばねばかりによって測定した固結力を固結部面積で除すことによって、固結強度を得た。この際、各材料に営巣するヒゲナガカワトビケラの湿潤重量を測定し、同様に固結部面積で除すことによってその生息密度を調べた。なお、実験中の水温、営巣期間も併せて記録した。

このように得られた固結強度をもとに石・礫の移動限界の変化を議論する。芦田ら<sup>11)</sup>は、粘着性材料を含む砂礫の移動限界について、こうした砂礫の無次元限界掃流力 $\tau_{*cc}$ の算定式として次式を提案している。

$$\tau_{*cc} = \tau_{*c} \left\{ 1 + \frac{s_* A_2}{\mu_f A_3} \cdot \frac{f_c}{\rho(\sigma/\rho - 1)gd_c} \right\} \quad (1)$$

ここで、 $\tau_{*c}$ : 粘着性材料を含まない砂礫の無次元限界掃流力、 $s_*$ : 砂礫の接着面積率、 $A_2$ : 砂礫の2次元形状係数、 $A_3$ : 砂礫の3次元形状係数、 $\mu_f$ : 静止摩擦係数、 $f_c$ : 砂礫に働く粘着強度、 $\sigma$ : 砂礫の密度、 $\rho$ : 水の密度、 $g$ : 重力加速度、 $d_c$ : 砂礫径を表す。彼ら<sup>11)</sup>のように、粘土などの粘着性材料を対象とした場合には、粘着強度などのパラメータを実測することが難しいために、実現象に即した議論をしにくい面があった。しかし、造網型トビケラの棲み込みによる河床の固結化の影響を論じる際には、上式中の $f_c$ を実測された固結強度で置換することにより、砂礫の移動限界状態の変化を議論できる。そこで本研究では、上述の考え方を援用し以下のヒゲナガカワトビケラの棲み込みに伴う無次元限界掃流力の変化を評価することとした。

#### b) オオシマトビケラの営巣による砂の掃流限界の変化

図-6(b)に実験水路断面図の概要を示す。図中の木製固定床は、その表面に路床粗度の均一化のために砂を貼り付け、オオシマトビケラ営巣のためのスリット幅( $B = 6\text{mm}$ )を確保しながら設置した。

実験開始時点において、スリット内を埋める砂は掃流限界状態としてあり、流砂の静的平衡状態が確保されている。したがって、ここでの砂の無次元(限界)掃流力は次式により見積もることが可能である。

$$\tau_* = \frac{RI}{(\sigma/\rho - 1)d_s}, \quad R = \frac{(H+h) \cdot B}{2h+B} \quad (2)$$

ここで、 $R$ : 径深、 $I$ : 実験水路の路床勾配、 $d_s$ : 砂の粒径(ここでは1.3mm)、 $H$ : 水深(固定床からの水位高さ)、 $h$ : 固定床からの砂面深さである。一般に、限界掃流力は、対象とする材料の粒径によって決定されるが、式(1)にも示されるように対象材料が粘着性を有していたり、ここで扱っているように固結などの影響を受けたりする場合には増大する。そこで本実験では、流砂の静的平衡状態が確保されている初期状態の路床にオオシマトビケラを投入し、一定期間(1週間)営巣させた後に、掃流力増加のために路小勾配を順次増加させながら、掃流限界状態を再現することとした。各限界状態での諸量を測定し、式(2)に代入することにより、オオシマトビケラの棲み込みによる影響を受けた無次元限界掃流力の再評価が可能となる。各実験ケースにおいては、砂面上のオオシマトビケラの営巣密度も併せて測定した。

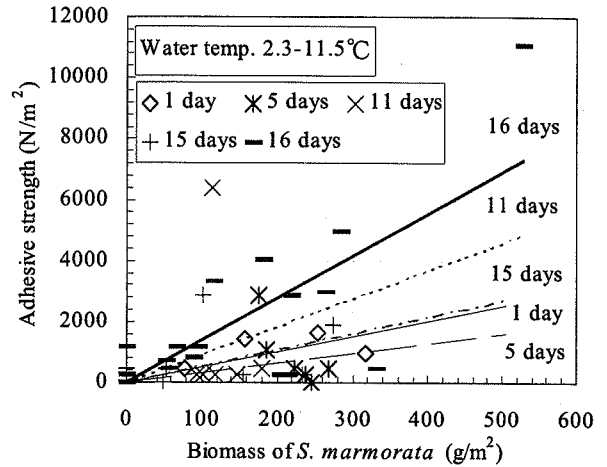
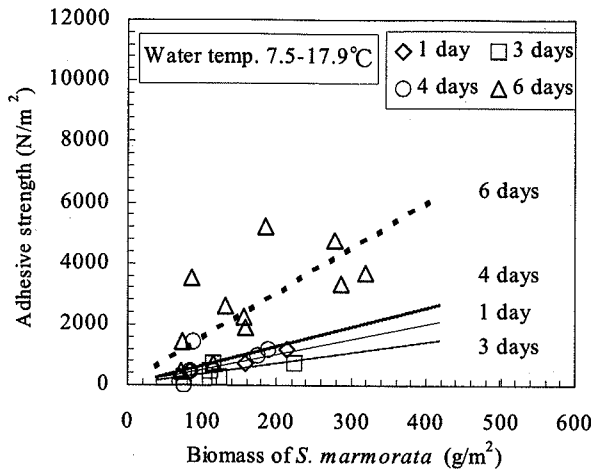


図-7 ヒゲナガカワトビケラの棲み込み現存量と河床材料固結強度の関係 (左: 水温7.5-17.9°C条件, 右: 水温2.3-11.5°C条件)

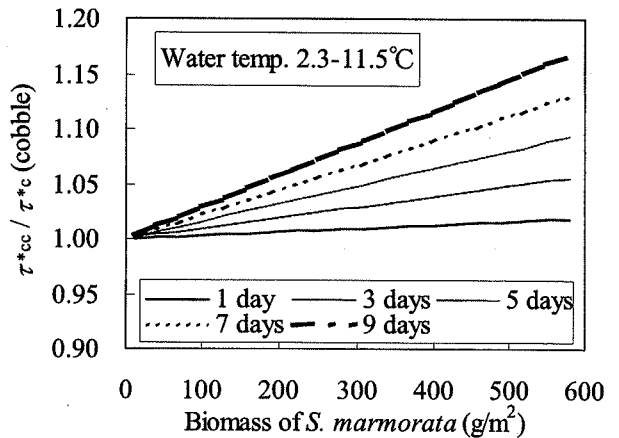
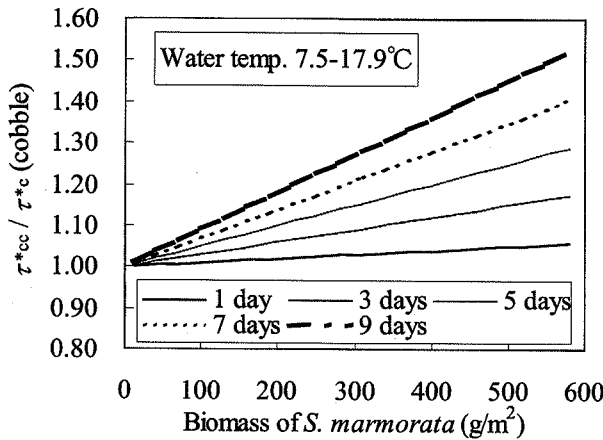


図-8 ヒゲナガカワトビケラの棲み込み現存量と礫の無次元限界掃流力の関係 (左: 水温7.5-17.9°C条件, 右: 水温2.3-11.5°C条件)

## (2) 実験結果と考察

### a) ヒゲナガカワトビケラの営巣による固結強度と礫の掃流限界の変化

ヒゲナガカワトビケラの棲み込み現存量と固結強度、礫の無次元限界掃流力の関係を、それぞれ図-7, 8に示す。図中の凡例は営巣期間長さを表している。また、図-8中の無次元限界掃流力の算定 (式(1)参照) に当たっては、矢作川中流をイメージして砂礫径 $d_c$ を10cm, 砂礫の接着面積率 $s_s$ を0.5とし、固結強度 $f_c$ は図-7の関係 (営巣期間ごとに直線にて表示) から与えた。なお、両図の横軸に示される棲み込み現存量が、図-5に見られる生息密度に比べて非常に大きな生息密度となっていることは注意を要する。つまり、ここでの生息密度は営巣可能空間における生息密度であり、コドラート内のそれとは本質的に異なる。礫間に営巣するヒゲナガカワトビケラの営巣可能空間は、コドラート内において限定されていることを考慮すれば、ここでの無次元掃流力の変化は実河道においても十分に起こりうる変化であると考えられる。

ヒゲナガカワトビケラの営巣による固結強度、限界掃流力への影響は、棲み込み現存量と営巣にかけた時間長さに依存して変化することが分かる。さらに、営巣中の水温条件の違いによっても大きく変化することが確認され、この変化は生物活性の違いによるものと推察される。しかし、水温変化による影響を議論するには更なるデータ、知見の蓄積が必要となるものと思われる。

### b) オオシマトビケラの営巣による砂の掃流限界の変化

図-9には、オオシマトビケラの営巣密度と砂の無次元限界掃流力の関係を示す。図中の凡例の実験ケースは、オオシマトビケラの投入個体数の違いに応じて設定した。Case 1はトビケラ未投入の実験ケースであり、このケースの $\tau_{cc}/\tau_c$ 比がほぼ1.0であることは、式(2)による無次元限界掃流力の算定法が適正であったことを示している。なお、Case 2および3のデータはそれぞれ2種類存在するが、実験水路においてオオシマトビケラの営巣可能なスリットが2本存在し (図-6 (b) 参照)、各スリットごとにデータ整理を行ったことによる。図より、オオシマトビケラの営巣密度の増加に応じ、砂の限界掃流力が大き

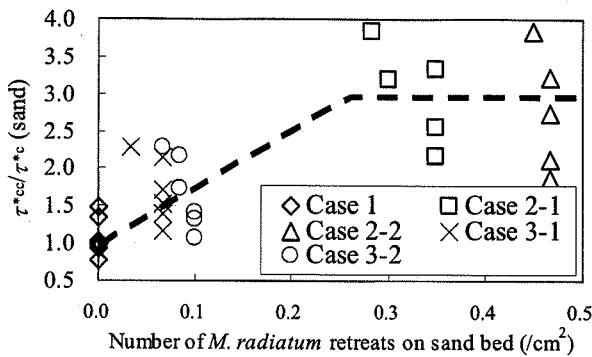


図-9 オオシマトビケラの砂面上における営巣密度と砂の無次元限界掃流力の関係

くなっていることが分かる。これらの関係は、例えば図中の破線のように近似できる。

また、図-9中のデータプロットによれば、オオシマトビケラの営巣による砂の限界掃流力はある程度のばらつきを有していた。このばらつきに関しては、実験中の観察に基づいた次のような解釈が可能である。例えば、営巣密度の大きなCase 2では掃流力の増加に伴い、まず、営巣に使われた砂の一粒一粒が剥がされ、次いで、砂を固めて造られた巣の一部が崩れ剥離して、最終的に一つの巣全体が固定床から流失するといった様子が確認された。ここで、巣の流失が見られた際の摩擦速度は、砂面上で5cm/s程度であった。図中の無次元限界掃流力データは、こうした掃流限界状態における砂塊の大きさの違いを区別せずに全て粒径 $d_s = 1.3\text{mm}$ として扱ったためにばらつきが生じたものと考えられ、その一部は過大評価されている可能性がある。このような団粒構造を呈する砂の見かけ上の粒径、密度を調べるのは難しいが、オオシマトビケラの営巣による砂の無次元限界掃流力の変化は、営巣密度が大きい場合でも実際には $\tau_{*cd}/\tau_{*cc}$ 比で2.0～3.0程度に抑えられるものと思われる。

#### 4. おわりに

本研究は、掃流砂礫による河床攪乱が河川生態系に重要であるとの認識から、造網型トビケラの棲み込みによる河床の固結化の定量的評価を目的としたものである。以下に得られた結論をまとめる。

矢作川中流における造網型トビケラ幼虫の個体群動態をコドラート手法により調査した結果、ヒゲナガカワトビケラは2世代/年、オオシマトビケラは1世代/年の生活環を有していることが推察された。また、両種は淵には生息しなかったが、早瀬でのオオシマトビケラ生息数の卓越が確認された。この要因として現地河床における営巣材たる砂の減少が考えられた。

室内実験水路において造網型トビケラの営巣に伴う河床の固結化を調べた結果、両種の生物体量および営巣数

の増加に伴って固結強度、限界掃流力が上昇することを確認した。特にヒゲナガカワトビケラについては、営巣期間の長さ、営巣中の水温条件による固結強度の違いを実験的に示した。

今後は引き続き、低攪乱礫床を有する河川において生じている河床固結の実態把握に努めるとともに、河床攪乱の強度、頻度の変化が生物生息場に及ぼす影響の解明を目指し、取り組んでいきたい。

#### 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) 田代喬, 渡邊慎多郎, 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.
- 3) 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.
- 4) 田代喬, 辻本哲郎: 低攪乱礫床における付着藻類剥離効果の評価とそれに基づく繁茂動態モデルの構築, 水工学論文集, 第48巻, pp.1537-1542, 2004.
- 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 (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, pp.95-128, 1995.
- 6) Statzner, B., Arens, M.F., Champagne, J.Y., Morel, R. & Herouin, E.: Silk-producing stream insects and gravel erosion: Significant biological effects shear stress, *Water Resources Res.* Vol. 35, pp.3495-3506, 1999.
- 7) 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.
- 8) 気象庁電子閲覧室: 豊田地域気象観測所 (東経137度10.6分, 北緯35度7.9分) における気象観測資料, <http://www.data.kishou.go.jp/>, 2002-2003.
- 9) 内田朝子: 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, No. 1, pp.59-80, 1997.
- 10) 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.
- 11) 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.

(2004. 4. 7受付)