大礫後部のマイクロハビタット特性と遷移 初期の水生昆虫動態 -剥離流タイプと跳水タイプハビタット- MICROHABITAT CHARACTERISTICS BEHIND LARGE BED MATERIAL AND MACROINVERTEBRATE DYNAMICS - SEPARATION AND HYDRAULIC JUMP TYPE HABITAT -

古里 栄一¹・田中 規夫²
Eiichi FURUSATO and Norio TANAKA

¹正会員 博士(工) 埼玉大学大学院助教 理工学研究科(〒338-8570 さいたま市桜区下大久保255)

²正会員 工博 埼玉大学大学院教授 理工学研究科(同上)

Dynamics of invertebrate community in a gravel bed riffle has been investigated in relation to the microhabitat characteristics of boulder wake region. Two types of microhabitat, separation type (S) and hydraulic jump type (J), were constructed considering typical flow pattern around some boulders in upstream river. The relative depths (ratio of water depth to boulder height, H/h_b) are 2.25 and 1.1 for S and J, respectively. Invertebrate samplings were conducted at the two type habitat and at control. Significant differences have been found not only by velocity profile but also by resilience of invertebrate according to the different H/h_b . In the colonization processes, each tolerance type for disturbance of invertebrate showed different colonization patterns according to the hydraulic characteristics of each experimental microhabitat.

Key Words : Separation, hydraulic jump, preference of invertebrate, refuge, disturbance tolerance

1. はじめに

環境や生態系の視点から適切な河床材料のあり方の明確化は、河川事業における課題の一つである。近年はダム下流における河床低下や粗粒化への対処として土砂還元が試みられているが、経験的適用が多く¹⁾、工学的指針の構築が望まれる。具体的には、どういった河川断面形状や粒度分布がどのような視点から望ましいと言えるのかという命題に対して明確に解答すべきである。このためには流れ場や河床材料と生態系との関係についての定量的かつ具体的な知見が必要である。

本研究では、河川生態系における重要な構成要素である水生昆虫群集を対象とするとともに、河床勾配および河床材料の大きな山地河川を対象とする。こうした河川空間では、虫体に対して主たる河床材料サイズが相対的に大きい場合、ハビタットとして個別材料周囲の流れ場の微細構造が水生昆虫動態にも大きな影響を与えると想定される。河床大型粗度の流れ場に対する影響としては、田中ら²⁾による粗度周辺の渦運動や、田中・金子³⁾による

粗度物体周辺の組織渦による小型材料の移動に加え、高橋・木村⁴⁾による複数配置条件の半球周辺の流況特性に関する先行研究がある。Shamlooら⁵⁾は半球状大型粗度を用いた室内実験により相対水深比の粗度後部流況への影響を議論している。近年は海外でEco-hydraulics分野における活発な研究が実施されており^{6, 7, 8)}、大型河床材料の避難場機能に関する研究例⁹⁾も存在するが、巨礫後流部の流れ場と水生昆虫の動態に関する研究は見当たらない。

本研究は山地礫床河川におけるマイクロハビタットのひとつとして巨礫背後の流れ場に注目し、水生昆虫動態に関する現地実験を行なったものである。巨礫の相対水深比の違いに着目して後流部の流れ場特性の異なる複数の空間構造を造成した上で、造成で生じた人為的な破局的攪乱後の水生昆虫の再侵入・定着過程を現地調査結果に基づき評価した。巨礫後部の流れ場測定に加えて攪乱応答性に基づく水生昆虫の生態型を提案して、水生昆虫の流れ場好性と大型河床材料のハビタット特性に関する知見を得る事を目的とした。なお本研究は調査対象リーチのハビタット特性ではなく、「現地実験」として造成に

よって人為的に形成した河川空間のハビタット特性を対象としたものである。後流域の大型礫の排除により河床材料の小型化した河川空間は水生昆虫の避難所としては機能しにくいことに基づき、流れ場と水生昆虫動態との関係を直接評価する事を試みたものである。

2. 現地実験方法

(1) 巨礫の相対水深比と流れ場特性に関する予備実験

現地実験に先立ち、実験条件の代表性を確認するために礫の相対水深比と後流部の流れ場特性に関する予備的な室内水理実験を行った。実験は矩形断面を有する可変勾配水路(全長15m, 幅0.5m, 深さ0.4m)で、水深 $H=4.1\sim 8.2\text{cm}$ の条件において、現地で採取した中礫(礫高さ $h_b=4.15\sim 4.35\text{cm}$)を用いて、ウォーターブルーで礫後部の流況を目視観測した(流速 $u=25\sim 41\text{cm/s}$, フルード数 $Fr=0.39\sim 0.57$) ($Fr=u/(gH)^{0.5}$; g , 重力加速度)。相対水深比(H/h_b)は1~2に相当する。剥離流および跳水の発生の有無を目視判定した上で、剥離流発生時における再付着点距離(L_r)を礫下流端から下流への距離として定義し観測した。 L_r は、側方から撮影した動画を用いて、流向の不定な河床からの湧昇流発生が L_r の上流側に形成される事を考慮して目視により判定した。なお幅高さ比(b/h_b)の異なる3つの石を実験では用いた。これらの b/h_b は現地の巨礫の変動範囲を考慮して設定した。図-1に実験結果を示す。 H/h_b に応じて再付着点距離は変動し、 H/h_b が1.3あるいは1.5を下回ると、剥離流の再付着点が顕著に短くなる。これはShamlooら⁹⁾の実験値とほぼ一致する。以上より、現地実験では後流部の流れ場の代表性を確保するための H/h_b として、安定した剥離流れが生じる条件については $H/h_b>1.5$ (Separation type, 以降, Sと記載), 跳水発生条件として $H/h_b<1.3$ (Hydraulic Jump type, 以降Jと記載)を現地での巨礫選定条件とした。なお、粗度として半球を用いた先行研究¹⁰⁾においては L_r/h_b は約1.7であったのに対して、礫下部からの回りこみや相対水深の影響により本実験値は若干小さいが概ね類似した値となっている(理由については後述する)。

(2) 現地実験地点

現地実験は、荒川本川最上流部に築造された二瀬ダム(150kp)の下流約2.3kmに位置する平均河床勾配1/64の瀬で実施した(図-2)。本リーチには蛇行区間は無く、水理条件の均質な瀬が流下方向約100mにわたって連続している。二瀬ダム築造により生じた粗粒化および河床低下対策として平成16年以降実施された土砂還元により、粗粒化は解消されつつある¹¹⁾。近年の代表粒径(d_{60})は20cm程度であり瀬全体において河床表層の多くが巨礫で覆われている(図-2, 図-3)。なお本研究は土砂還元の影響評価を目的としていないことから、本事業の記述は省略

図-1 水路実験における相対水深比と後流部再付着点距離との関係(L_r : 再付着点距離; h_b : 礫高; H : 水深)

図-2 現地実験地点(荒川147.6kp 三十槌橋より2013年5月22日撮影。赤点線エリアは実験対象礫箇所)

図-3 礫後流部充填砂礫の粒度分布(H15(土砂還元前), 面積格子法; H24(土砂還元後)線格子法; H25, 重量100分率)

した。詳細は既報¹¹⁾を参照されたい。

(3) 河床空間構造の造成

実験対象巨礫は、対象礫の前部に流れに影響を与えるような局所地形や大型礫等が存在しないことを条件に、水深礫高さ比(H/h_b)の異なる2礫を選定した(表-1)。なお、現地では礫後部に近接して次の巨礫が存在することが多く、巨礫後部流れ場に対して下流側の礫の影響を除外する必要がある。このため、対象礫の後流部に存在した巨

表-1 実験対象礫の概要及び流速測定位置

実験対象礫(サイズ, cm)	流況および測定地点 ^{*1}	現地写真 ^{*2}
[剥離流タイプ(S)] 巨礫後部に剥離が生じ、後流域が形成される。 $(H/h_b=2.25, a=23, b=46, h_b=20)$	<S. type> 	
[跳水タイプ(J)] 巨礫上部に限界水深が存在し、後部に跳水が発生する。 $(H/h_b=1.1, a=40, b=50, h_b=41)$	<J. type> 	

^{*1} 流速測定は横断方向には礫中央部のみとし、流下方向に3地点設定した。調査地点記号は礫後部の位置を示しており、2桁数値は対象礫の幅(b)で無次元化した下流側距離である。^{*2} 白点線は対象巨礫を、矢印は流向を示す。

礫を含む直径約10cm以上の大型礫成分を人力で排除した。排除範囲は、サーバネットサイズおよび流況への影響を考慮して、幅50cm以上、流れ方向長さ約1mの範囲とした。これにより、表-1に示す後部流況を形成した。なお巨礫除去により局所的に河床低下が生じるため、周囲から採取した材料を1箇所あたり約20L補充した(図-3)。本実験では水生昆虫に対する物理的な影響として河床材料の移動ではなく虫体周囲流れ場のみを対象とすることから、人為的造成により新たに生じた河川空間における材料移動を避ける必要がある。これは、河床材料の移動に伴う昆虫体の流失を回避し、流れ場と昆虫との関係のみを評価するためである。補充材料は対象礫後部における移動性を約一分間水中で目視観察して確認し、移動限界より小さな材料を現地でふるい除去して選別した。図-3に補充材料の粒度分布を示した。 d_{50} は約20mmであり、周囲空間に比べて極めて小さい材料である。これらの河床材料は水生昆虫体に対してサイズが小さいため、個々の礫周辺は避難所としての機能は小さいと考え、流況と水生昆虫との関係を直接的に評価することとした。この人為的空間構造の造成は採取対象区域の全河床材料の移動に相当する事から、水生昆虫群集に対する局所的な「破局的攪乱」と位置づけられる⁷⁾。破局的攪乱は様々な攪乱のうち、強い流体力による虫体の直接流失に加え、河床材料そのものの移動・流失により当該箇所の個体群が大規模攪乱後の遷移初期状態に退行する事を意味する。本研究における意義は次節で詳述する。

(3) 調査方法

現地実験は、平成25年5月22日と29日に実施した。5月22日は実験流れ場の造成と造成後の水生昆虫群集の初期値調査を行った。1週間後(5月29日)は巨礫周囲の流れ場測定と2回目の水生昆虫調査を実施した。本研究は競合

や侵入等多様なプロセスからなる水生昆虫動態の中でハビタットへの選好性を対象とする。このため、競合の生じにくい初期遷移過程として破局的攪乱直後と1週間後を対象とした。現地調査項目は巨礫後部の流速調査と水生昆虫採取である。流速は電磁流速計(KENEK Co., VM-2000)を用い、流れ方向流速(u)を100Hzで30秒計測した。測定にあたっては、センサーを固定棒に接続し、検出部が流れにより移動しないよう保持した。計測時間は半球状物体後流部のストローハル数($St=f h_b/U$; f , 渦の放出周波数; U , 代表流速)として0.2を想定して³⁾、放出される最大サイズの渦が約10個程度以上計測可能な時間として設定した。測定位置は、水生昆虫採取装置のサイズと後流域の水利特性を考慮して決定した(表-1)。Sについては剥離流と再付着点をカバーするために、水中観察および予備測定により底部流速の逆流域を確認した上で、礫幅無次元距離として0.0, 0.2, 0.5(それぞれ、D00, D02, D05と表記)で測定を行った。Jについては、跳水のローラー部をカバーできるよう設定した。計測水深は、水面から底上5cmまで約5cm毎とした(表-1)。

水生昆虫は、それぞれの対象礫の後流域において0.5mサイズのサーバネットを用いて定法により採取およびホルマリン固定を行い、実験室に持ち帰り同定を行った。第1回採取は対象礫の後流部の整備および小礫成分充填の約1時間後に実施した。対照区(C)として約10m離れているSとJのほぼ中間の箇所で上記2回調査時に水生昆虫採取を行った。Cは両実験区に侵入する水生昆虫群集のソースとして設定した。なお、昆虫採取作業に伴い上流からドリフトした昆虫のサーバネットへの混入を避けるために、下流側からJ, C, Sの順にサンプルを採取した。

3. 現地実験結果

(1) 実験時の流量変動

図-4に現地実験を実施した期間の流量および調査地点近傍の落合水位観測所の水位データを示す。現地調査を実施した期間は二瀬ダム放流量が一定量に制御されていたために、大きな水位変動は生じていない。表-1に示した H/h_b 条件は1週間維持されていたと推定される。したがって、本実験結果は1週間継続した後の水生昆虫のマイクロハビタット選好性を評価可能であると考えられる。

(2) 巨礫後部の流況

図-5に各実験対象礫の背後における各測定地点の流れ方向流速(u)の鉛直分布の時間平均値を標準偏差と合わせて示す。Sケースでは、礫直下(図-5(a))および0.25b(図-5(b))において、巨礫高の4割付近の水深に流速ピークが存在する。ピーク下部の底面付近では、巨礫後部の剥離流発生に伴う底面付近の間欠的な反転流に伴う流速低下を示していると考えられる。一方、礫より0.5bの距離(図-5(c))において、流速は鉛直方向に一様化しており、剥離流れが再付着した後の流速分布を示している。現地の水中目視観測において、概ね0.5bより短い距離の底面で流向の不定な湧昇流が発生することから、再付着点は礫幅の約1/2(礫高とはほぼ同じ)付近であったと推定される。なお上述したようにはまり石に相当する半球を用いた先行研究¹⁰⁾で得られた再付着点距離は、本実験で観測された距離より長く半球高さの約1.7倍である。図-1に示した室内実験結果でも礫形状によっては再付着点距離は礫高さの1.5倍程度であり、やや短い傾向があった。本研究では回り込む流れの影響が強い浮石を対象としたため、再付着点距離が半球に比べ短くなった可能性がある。物体の3次元的形状特性と後流域の流れ場との関係はハビタット特性として極めて大きな意味を有する事から、今後の重要な研究課題である。なおサーバネット長さは0.5mであることから、Sで得られた水生昆虫サンプルは剥離流の再付着点やその下流も含んでいる。

一方、跳水が発生しているJケース(図-5(d), (e), (f))においては、全測定地点で底部に向かって流速が大きくなる傾向がある。とりわけ礫に近い上流側2地点(図-5(d), (e))では表層部で上流方向に向かう逆流が発生している。Jケースの測定対象範囲は、跳水のローラー部の特徴を示している。ただし、D10地点(礫幅での無次元長さ=1.0)では時間平均値としては表層部逆流は確認できず、跳水のローラー部から下流の常流区間への遷移域であると考えられる。なお流下方向流速 u の絶対値はSケースに比べJケースの方が小さいが、乱れ強度に相当する標準偏差は、全測定箇所においてJケースの方が大きい傾向がある。特に礫直下以外では(図-5(e), (f))、底層においても標準偏差はSケースに比べて明らかに大きい。Premら¹²⁾は、局所時間平均流速だけでなく乱れ強度に応じて、水生昆虫の行動が異なることを指摘してい

図-4 現地調査時期の気象および流量(縦矢印は第1回、第2回調査日を示す。)

図-5 Sケース((a), (b), (c))およびJケース((d), (e), (f))の後流部の流速測定結果(地点記号は表-1参照)

る。後述するように、こうした2礫の流れ場の違いは、底部材料上に存在する水生昆虫の動態に強く影響すると考えられる。

(3) 水生昆虫群集

対照区の水生昆虫群集は第1回および第2回調査においてヒラタカゲロウおよびコカゲロウ、マダラカゲロウ等の匍匐型および遊泳型のカゲロウ目を主体とした類似した群集であった。図-4に示した流況とあわせて考えれば、実験を実施した1週間で顕著な水生昆虫群集の変動は調査対象とした瀬では生じていなかったと推定される。実験結果の評価にあたっては、以下の方法で水生昆虫の分類と定量的な指標化を行った。本研究では、マイクロハビタットの流れ場特性と水生昆虫の動態評価を攪乱に関する応答性に注目して行う事から、生活型¹³⁾を改変し本論文で提案する攪乱生活型を用いた(表-2)。これらの型毎に以下の回帰比率指標を用いて結果評価を行った。なお、ここで示したデータは0.5m枠のサーバネットの平均値であり、Sケースにおいては剥離流の再付着点下流側も含んでいる。

各実験区において遷移初期1週間における各攪乱生活型の回帰の程度を示すパラメータとして式(1)を定義する。

表-2 本論文で用いた水生昆虫の攪乱生活型^{*1}

攪乱生活型 ^{*3}	特徴（攪乱時の回避、応答特性）	生活型との関係	構成 ^{*2}
遊泳型 (Sw)	遊泳行動による不適状況（強流体力、捕食、低い酸素濃度）の回避と、必要行動（羽化のための水面移動等）の実施	従前の遊泳型と同一である。	遊泳型カゲロウ（コカゲロウ、チラカゲロウ等）
匍匐型 (Cr')	常に匍匐行動を行い、分散、捕食等を行う。（特に攪乱流失に対する回避戦略を有しない）	匍匐型からヒラタカゲロウ科を除外したもの	SwとH以外のカゲロウ（マダガガ 吟等）およびカゲラ
境界層避難型 (H)	体高は数mm以下の扁平形状であり、避難所に相当する境界層に常時棲息する（出水時の虫体流失を回避）。	特に定義されていない。	ヒラタカゲロウ科
造網型 (C)	蚕糸で砂礫等を虫体周囲に固定し、巣を造る。（避難所に相当する高い比重の砂礫塊で流失および捕食損失の回避）	従前の造網型と同一である。	シマトビケラ、カワトビケラ等の造網型トビケラ

*1 生活型には掘潜型や携巢型も存在するが^{*3}、主たる生活場が河床材料中であること、本調査では出現しなかったことから本表には含めなかった。 *2 科レベルでの分類である。 *3 かつこ内は図中で示した各型の記号

$$\Delta N_i / \overline{N_c} = \frac{(N_{i7} - N_{i0})}{(N_{ic7} - N_{ic0})/2} \quad (1)$$

ここに、 N 、水生昆虫現存量、添え字は各攪乱生活型、 C は対照区、数字は造成後の経過日数を示す。

本実験区で得られた水生昆虫群集の1週間の変化は、①周囲(対照区)からの歩行および遊泳によるランダム分散および上流からのドリフト分散、②分散で到達した昆虫群集の後流域への侵入および定着からなるものと考えられる。これは、生態学的遷移過程においては、破局的攪乱後の初期過程に相当する。式1では、5月22日から29日までの実験区における水生昆虫群集の変化を周囲の非攪乱場からのランダム分散によるものと仮定して、対照区の2回調査時の平均的な値で無次元化したものである。もし実験対象区のハビタット特性が周囲の対照区と十分に均質であるならば、式1の値は1に近づくと考えられる。一方、ある生活型の現存量が5/29に増加せず式1の値が小さい場合は、当該ハビタットに対する選好性が低いことを意味する。すなわち、周囲からの分散による回帰ポテンシャルが存在するにも関わらず、それぞれのマイクロハビタット特性が選好性と合致しない場合には式1の値は低下することになる。本指標は、各攪乱生活型のハビタット選好性に応じて、定着水生昆虫に対して行われた環境による選択を表現するものである。図-6に、式1より得られた総現存量およびEPT総数に加えて各攪乱生活型の値を示す。総現存量およびEPT総数ともに、Jでは少ない傾向が顕著である。J巨礫後流部では強い乱れにより、水生昆虫の侵入定着が困難であったことが想定される。次に各型で分類すると、Sにおいては遊泳型(Sw)および匍匐型(Cr')に加えて、ヒラタカゲロウ科(H)の増加が顕著である。これらの水生昆虫は比較的分散能力が高いと考えられるために、実験区作成後の1週間で周囲場からの回帰作用が卓越した結果、値が1に近くなったと考えられる。なお、Jでは全型で負の値となった。底面付近の流況や乱れが全てのタイプにとって侵入と定着が困難な条件であったと考えられる。

次に、表-2で示したタイプの中で物理的攪乱に対する残存耐性が最も強いとともに、遷移初期における分散力

が小さいと想定されるトビケラ目の動態について、以下の指標（トビケラ目個体数割合 $T\%$ ）を用いて実験結果の評価を行った。式2はトビケラ目の現存量をカゲロウ、カワゲラ及びトビケラ目の現存量で除したものである。これにより、攪乱耐性の強い分類群のマイクロハビタットとの関係性を評価することとした。

$$T\% = \frac{T}{(E + P + T)} \quad (2)$$

ここに、 T 、 E 、 P はそれぞれトビケラ、カゲロウ、カワゲラの各分類群の現存量を示す。図-7に $T\%$ の値を示す。対照区Cは第1回および第2回調査時ではほぼ変化は見られなかったが、SとJとで全く異なった傾向を示した。Sにおける $T\%$ の顕著な減少は、分散性の大きいトビケラ以外のカゲロウ等のS礫後流域への分散侵入の大きさによると考えられる。

このことから、近接して存在するサイズの類似した巨礫後部は、相対水深比に応じて異なった流れ場特性が存在すること、礫サイズが水生昆虫スケールに比べて大きいために、これらの違いが水生昆虫のハビタットとして全く異なった河川空間を形成していること、が結論として得られる。逆に水生昆虫の攪乱特性から考えれば、移動能力のような水生昆虫の攪乱に対する特性の違いに応じて、ハビタットの流れ場に応じた侵入・定着が現地で生じていることが明らかとなった。なお、W礫のデータは再付着点下流部まで含んだ結果である。再付着点上流部は避難所として機能している可能性があることから、もし再付着点の上流側のマイクロハビタットのみを対象とすれば、流れ場特性に応じた群集動態の相違は更に増大した可能性がある。

近年河川環境の健全性指標として用いられる事の多いEPT指数に含まれるトビケラ目は、同様にこれに含まれるカゲロウ目やカワゲラ目に比べて全く異なった両ハビタットへの再侵入特性を示した。これは今後の河川事業において水生昆虫群集の評価を行う場合、攪乱への応答性・耐性を十分に考慮した水生昆虫評価の必要性を示唆している。更に、こうしたハビタット評価においては礫床河川における空間的多様性を考慮する必要があると考えられる。なお本研究では評価できなかったが、従来の

図-6 実験期間中の水生昆虫個体数の変化(凡例は表-2参照)

図-7 実験期間中のトビケラ目個体数割合T%の各区画における実験前後の変化

河川工学では対象としないような数10cm程度の水位上昇でも、同一礫周辺では性質の全く異なったハビタットが生じる事も本実験結果より明らかである。近年、田中ら¹¹⁾は常時水没した河川空間として定義した「低水路」生態系の攪乱生態水理学として小型材料移動性と小規模出水の重要性を指摘している。これに加え、水生昆虫と流れ場との関係のみを考えた場合でも小規模出水の影響評価が重要であることを本研究結果は示している。

4. まとめ

本研究では、セグメントMに特有な礫床河川のマイクロハビタットの代表要素の一つである巨礫に着目して、後流部の流れ場と水生昆虫群集のハビタット選好性に関する現地実験を、二瀬ダム下流河川において後流部の空間構造を人力で造成して実施した。現地調査は巨礫後流部での流速測定と水生昆虫群集の1週間の変化を対照区とともに把握した。その結果、

- 1) 同一瀬における近傍の巨礫同士であっても、水深ー巨礫高さ比が異なる場合は、後流部にマイクロハビタットとして全く異なった流れ構造が存在していた。
- 2) 破局的攪乱後の水生昆虫群集のそれぞれのマイクロハビタットへの回帰特性は攪乱に対する応答特性に応じた攪乱型に応じて異なっていた。
- 3) 近年使用される事の多いEPT指数はカゲロウ・カワゲラ・トビケラを1つのグループとして扱っているが、ある種のトビケラと他の水生昆虫とではハビタット選好性が全く異なることが明らかになった。

謝辞：本研究の一部は、平成25年度河川整備基金助成事

業(助成番号、25121500；代表者、古里栄一)および一般財団法人水源地環境センター WEC応用生態研究助成事業(助成番号、2013-03；代表者、田中規夫)により実施された。現地調査にあたり、埼玉大学学生の坂田良介君、深代尚志君、根本美咲さんおよびG.A.H.S. Chathuranga君の協力を得た。研究実施および資料提供において関東地方整備局二瀬ダム管理所の協力を得た。ここに記して謝意を示す。

参考文献

- 1) 藤田光一、富田陽子、大沼克弘、小路剛志、伊藤嘉奈子、山原康嗣：日本におけるダムと下流河川の物理環境との関係についての整理・分析ーダムと下流河川の自然環境に関する議論の共通基盤づくりの一助としてー、国土技術政策総合研究所資料、第445号、2008。
- 2) 田中規夫、細川智徳、玉井信行：開水路底面上の大規模粗度付近における渦運動について、水工学論文集、34、pp. 487-492、1990。
- 3) 田中規夫、金子哲也：物体周りの組織渦を利用した浮遊砂の促進について、水工学論文集、35、pp.365-370、1991。
- 4) 高橋迪夫、木村喜代治：河床に点在する半球状の突起周辺の流れの特性、河道水理環境に関するシンポジウム、1、pp. 119-126、1993。
- 5) Shamloo, H., Rajaratnam, N. & Katopodis, C.: Hydraulics of simple habitat structures, J. Hydraulic Res., 39:4, pp. 351-366, 2001。
- 6) Hannah, D. M., Wood, P. J. and Sadler, J. P.: Ecohydrology and hydroecology: A 'new paradigm', Hydrol. Process, 18, pp. 3439-3445, 2004。
- 7) Lake, P.S.: Disturbance, patchiness and diversity in streams. J. North American Benthological Society, 19, pp. 573-592., 2000。
- 8) Lancaster, J. and Downes, B. J.: Linking the Hydraulic World of Individual Organisms to Ecological Processes: Putting Ecology into Ecohydraulics River. Res. Applic., 26, pp. 385-403., 2010。
- 9) Matthaei C.D., Arbuckle C.J. & Townsend C.R.: Stable surface stones as refugia for invertebrates during disturbance in a New Zealand stream, J. North American Benthological Society, Vol. 19(1), pp.82-93, 2000。
- 10) 田中規夫：底面上の3次元ならびに2次元物体後方の組織的渦構造の変動特性、ながれ、10巻2号、pp.93-105, 1991。
- 11) 田中規夫、古里栄一、木村國男：土砂還元実施後の二瀬ダム下流における水生昆虫群集の経年的な動態変化と低水路空間における河床材料の移動性について、河川技術論文集、第19巻、pp. 483-488, 2013。
- 12) P. Shah, N. Tanaka, E. Furusato: Aa experimental study on an invertebrate (*Isonychia japonica*) response to approach flow velocity and blocks as regugia, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering), Vol69, No. 4, I_235-I_240, 2013。
- 13) 津田松苗、御勢久右衛門：川の瀬における水生昆虫の遷移、生理生態、12, pp. 243-251, 1964。

(2013. 9. 30受付)