

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

ANNUAL CHANGES IN COMMUNITY DYNAMICS OF INVERTEBRATE IN
DOWNSTREAM RIFFLE OF FUTASE-DAM AND MOVABILITY OF BED
MATERIAL IN LOW FLOW CHANNEL AFTER ARTIFICIAL SAND SUPPLY

田中規夫¹・古里栄一²・木村國男³

Norio TANAKA, Eiichi FURUSATO and Kunio KIMURA

¹正会員 工博 埼玉大学大学院教授 理工学研究科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255)

²正会員 博(工) 埼玉大学大学院助教 理工学研究科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255)

³非会員 前・所長 国土交通省 関東地方整備局 二瀬ダム管理所 (〒369-1901 埼玉県秩父市大滝3931-1)

For clarifying the effects of sand supply on the down stream riffle of Futase-Dam, field survey data on bed material and invertebrate composition from autumn to early spring were analyzed. Particle size distribution was shifted to small size after the sand supply. During winter season, from autumn to early spring, changes in invertebrate community showed different temporal pattern before and after the sand supply. These tendencies occurred after sand supply are no increase in the abundance of net-spinning caddis-worms (*Torichoptera*), increase in autumn EPT% and increase in M_N (movability number) during winter. This study has proposed to use diversity-movability loop based on Tsuda hypothesis. Before sand supply, community succession to climax under armored bed which is extremely stable habitat can be estimated in the loop. Moreover, the effects of sand supply on invertebrate community can be recognized as retrogressive succession in the loop caused by unstable stream bed.

Key Words : Bed material size, movability number, retrogressive succession, Tsuda hypothesis

1. はじめに

貯水池での堆砂の進行抑制および下流河川での粗粒化や河床低下の改善対策として近年土砂還元やフラッシュ放流等が数多く実施されている^{1), 2), 3), 4)}。土砂還元を適切に実施するためには、下流河川低水路の物理環境や生態系のレスポンスに関する理解が不可欠である。

河川環境において水生昆虫は重要な生態系構成要素の一つであり、土砂還元事業による改善効果の一つとして水生昆虫群集の健全化も期待されている。水生昆虫の存在する河川低水路空間は出水頻度が高いことが特徴の一つであり、物理環境や生態系が出水により攪乱を受けることを考慮した動的な現象として理解することが重要である。水生昆虫群集の現地での分布特性や出水への応答についてはわが国では古くから研究事例がある^{5), 6), 7)}。近年は、土砂還元やフラッシュ放流等の人為的な物理的攪乱の影響評価に関する多くの報告例がある^{1), 3), 8)}。しかしながら、フラッシュ放流の規模や還元する土砂の粒径について、生態系との関係から明確な指針は存在しない⁴⁾。

以上を踏まえ、本研究では河床の安定性という観点から水生昆虫群集の遷移に関する新しい指標を作成し、これを用いて二瀬ダム下流における水生昆虫の動態を土砂還元前後の河床材料変化とあわせて評価するものである。

2. 二瀬ダムおよび土砂還元事業

(1) 二瀬ダムおよび土砂還元事業の概要

昭和36年に運用が開始された荒川水系の二瀬ダムは運用から約50年が経過し、貯水池における堆砂進行による計画以上の堆積進行に加え、下流河川の河床低下・粗粒化が顕著となり、ダム管理上の課題となっている。そのため、平成15年度より貯水池での堆砂進行の抑制に加えて、ダム下流の河川環境の保全・再生を目的とした土砂掃流試験を実施している。表-1に平成15年度以降の土砂還元量を示す。流入河川に設置された貯砂ダム等で採取した土砂をダム直下左岸に置き砂し、出水時に流下させている。置き砂は非洪水期の秋季から早春にかけて約2ヶ月間で行われ、翌年の出水時に自然流下させている。

表-1 二瀬ダムにおける土砂還元状況 [m³/y]

年度	置き砂量	概算流量	d_{10} *
H15	13,000	—	170
H16	11,700	13,000	120
H17	5,400	11,700	14
H18	5,300	5,400	28
H19	11,600	5,300	91
H20	8,100	5,000	50
H21	8,800	12,300	94
H22	14,000	17,200	65
H23	—	4000	50

*H19までは面積格子法、H20以降は線格子法による測定結果である。

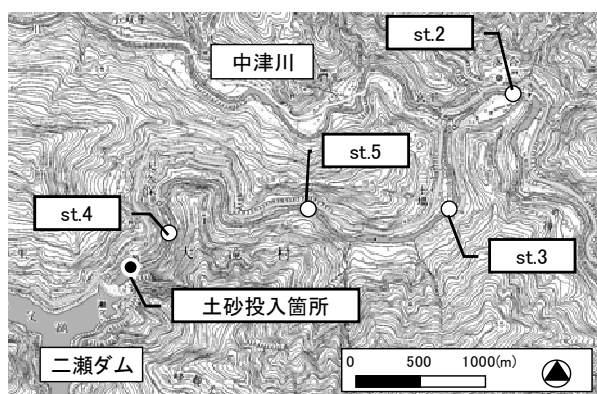


図-1 二瀬ダム下流河川の概要および調査地点図

表-1の流量は、翌年の置き砂前に目視観測によって置き砂時に比べて減少した容積を出水時の流量として評価したものである。土砂還元量は、二瀬ダムへの流入土砂量の1~2割程度に相当する（計画堆砂量：51,000m³/年、実績年平均堆砂量：79,000m³/年）。

(2) モニタリング調査内容

土砂還元事業の一環として水生生物や河床材料等のモニタリング調査がダム下流5地点で継続的に実施されている（図-1）。本論文では以下の方法で得られたデータを用いて解析を実施した。河床材料調査は、平成15年から平成19年までは面積格子法（1mマス）、平成20年以降は線格子法（計測点間隔、0.3~0.5m；約100サンプル）により測定した。調査時期は例年11月と12月である。水生昆虫は、一般的な手法として、サーバネット（50cm×50cm）を用いて、各調査地点のリーチにおいて、現存量が多いと推定される早瀬ユニットで3コドラート採取した。採取後のホルマリン固定および室内でのソーティングについては公定法に基づいて行った。調査時期は、秋季から早春季にかけて基本的に例年3回を基本としたが、調査年によっては2回の場合もある。調査地点は図-1に示す二瀬ダム直下（st.4）および中津川合流前のダム下流2.7km地点のst.3を対象とした。

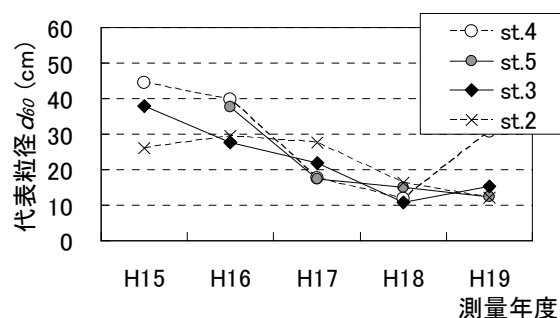


図-2 二瀬ダム下流各地点における代表粒径の経年変化

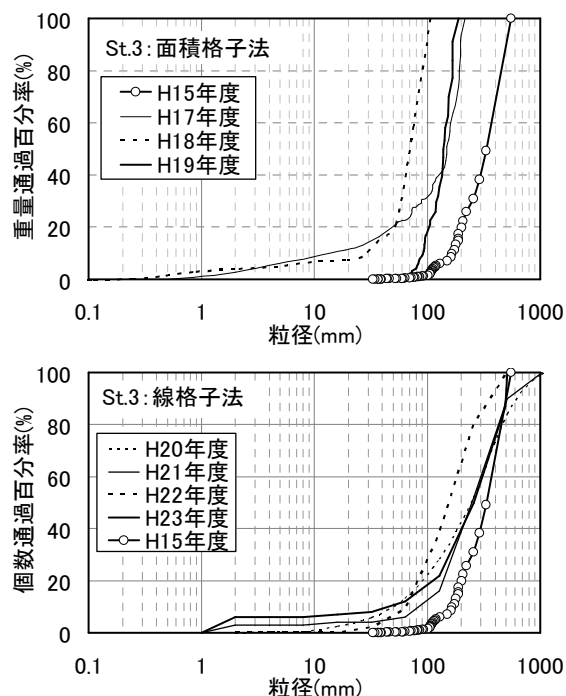


図-3 st.3における粒度分布の経年変化（上：面積格子法 H15~19，下：線格子法H20~23，比較のためにH15年度データも示した）

(3) 土砂還元の下流河川への影響

a) 河床材料

図-2に下流調査地点における代表粒径の経年変化を、面積格子法で調査されていた期間について示す。土砂還元前（H15）は全地点において代表粒径は25cm以上の大礫であり、顕著な粗粒化状態であった。土砂還元実施後は徐々に小型化し、平成17年以降は全地点において10から20cmの範囲となっている。こうした傾向は粒度分布の経年変化においても確認できる（図-3）。土砂還元実施前は40cm以上の巨礫が60%以上を占めており、10%値も粒径20cmの大礫であった。平成16年以降の土砂還元実施後は小型化している傾向が明確である。とりわけ平成17年は一時的に10%粒径は5cm、90%粒径は約15cmにまで小型化した。こうしたサイズの変化は表-1に示した流下土砂量の変化と対応していると考えられる。なお、横断測量結果から断面形状の顕著な変化は平成15年以降現在

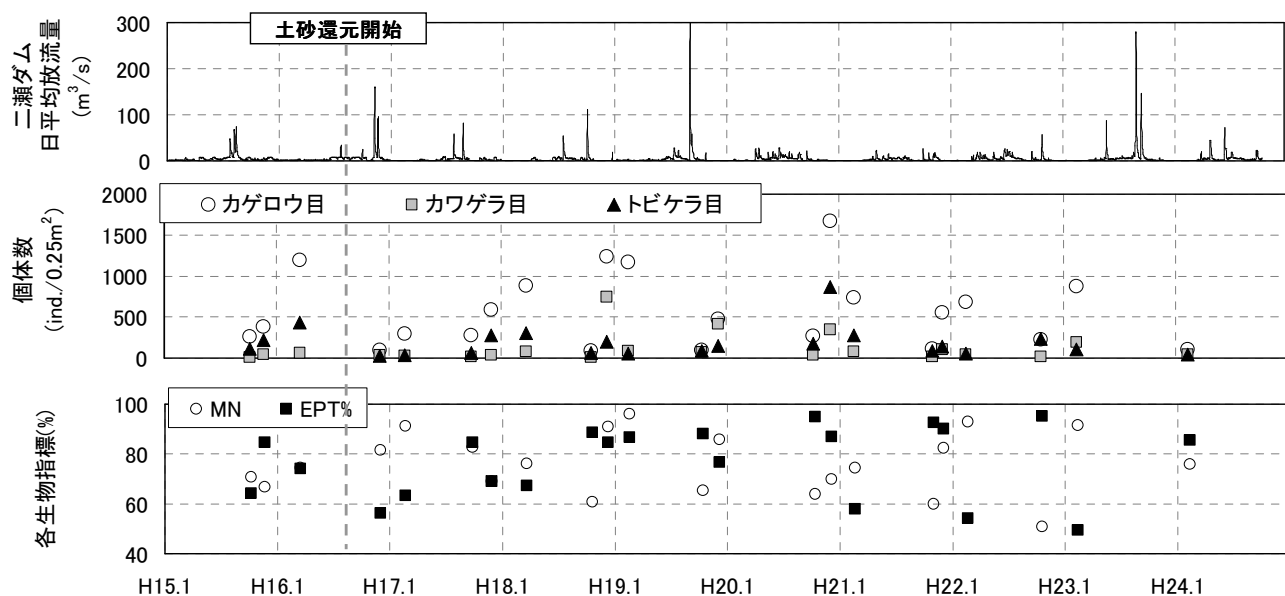


図-4 二瀬ダム下流(st. 3)における水生昆虫群集の変化

まで確認されていない。以上より、土砂還元の直接的な影響としては、ほぼ移動しなくなっていた粗粒分の空隙および上部に、還元された土砂が供給されるとともに、一定規模の出水で移動する移動性の高い河床状態が形成されていることが推定される。これは、図-3に示す平成17年以降の河床材料の若干の大型化からも推定される。表-1に示すように、平成16年および17年の土砂流下量は平成18年から20年度に比べると倍以上であった。平成17年に生じた材料小型化状態が維持されないのは、粒径10cm以下の中礫や砂成分が移動性材料として存在していることが原因として考えられる。これは、生態系への土砂還元の影響を考える上で、単なる材料サイズの小型化だけでなく河床材料移動性の変化として着目される。

b) 水生昆虫群集

土砂還元前後での水生昆虫群集の変化を評価するために、図-4に平成15年より平成23年までのst.3地点における二瀬ダム日平均放流量および水生昆虫群集の変動を示す。秋から早春にかけてのカゲロウやカワゲラ等の各目レベルでの変化に着目すると、土砂還元前である平成15年秋季から翌年春季にかけてトビケラ目が増加傾向であったのに対して、土砂還元後はそうした顕著な変化が確認できなくなっている(図-4(b))。図-4(c)に水生昆虫群集の指標として、EPT指数(全底生動物個体数に対するカゲロウ・カワゲラ・トビケラ個体数の和の百分率、図中ではEPT%と表記)に加え、本論文で提案する水生昆虫群集の移動性指数(M_N)を示した。なお、 M_N の詳細については次章で述べる。秋データのEPT指数が土砂還元後経年的に増加しつつあること、および M_N の秋季から冬季にかけての増加が土砂還元後に増加したことが確認できる。(図-4(b))。これらは後に詳述するように土砂還元による河床材料サイズの小型化の影響により生じた

と考えられる。

3. 多様度－移動性ループ

(1) 津田仮説データの再考察による H' - M_N ループの提案

本論文においては、水生昆虫群集の遷移に関する古典的な知見である「津田仮説」のオリジナルデータ⁷⁾から作成した「多様度－移動性(H' - M_N)ループ」を用いて、土砂還元による水生昆虫群集の動態解析を行う。なお、近年は河川水生昆虫群集の指標として、EPT指数を用いることがあるが⁴⁾、同指標は出水への応答性の異なるトビケラ目やカゲロウ目を分離していないことから、出水の影響評価という観点から新たな指標を提案する。

図-5に、津田・御勢⁷⁾のデータを用いて、目レベルでの変化に加えて、EPT指数や多様度指数等の変化を示す。本データは、河床の安定状態で得られたものであり、出水による影響の無い条件での変化を示している⁷⁾。匍匐型から造網型への優占生活型の変化がカゲロウ目からトビケラ目への変化と対応していることがわかる。

図-5(c)で用いた指標は下式で定義される。

$$M_N = \frac{E + P}{E + P + T} \quad (1)$$

$$H' = - \sum_{i=1}^S p_i \ln p_i \quad (2)$$

ここに、 H' はShannonの多様度指数であり、 p_i は種 i の個体数の全個体数に対する比、 S は種数を示す。 M_N (Movability Number)は、本研究で提案する移動性指数であり、移動性の高い水生昆虫の豊富さを示す。 E 、 P 、 T はそれぞれカゲロウ目、カワゲラ目、トビケラ目の個体数であり、カゲロウ、カワゲラ個体数のEPT全個体数に対する比とした。河床が安定した期間における遷移の進行状況を表す指標として、出水後に避難エリアから瀬へ

の再帰が早い種の存在割合の大きさを意味している。移動性の高い遊泳型・匍匐型は主にカゲロウ目とカワゲラ目に含まれ、移動性の低い造網型はトビケラ目に限られることに基づく。

なお、更に詳細な分類群を用いた定義式も考えられるが、本論文では最もシンプルな形態として式(1)を用いた。図-5より分かるとおり、ピークとなる時期のずれは存在するが、 M_N と多様度とはほぼ類似した変動を示している。瀬における多様度上昇時の高い M_N の状態は、遷移系列の中間的な状態であることを示している。 M_N は多様度の高い状態を推定可能な簡易な指標として活用できる可能性がある。

(2)多様度－移動性ループの提案

図-6にこのデータを M_N および H' に対してプロットした結果を示す。両指数が時間の進行とともに半時計回りのループ状の軌跡を示す。極相に至る遷移過程における多様度指数と移動性指数との変動が、分散性の高い水生昆虫の再侵入と定着およびその後の造網型トビケラによるハビタット占有による多様度減少として生じた過程を示している。これは、津田仮説を定量的に表現したものといえる。なお、図-6の本ループの半時計回り方向の位相変化はハビタット安定時の遷移を示すのに対して、流量増加や河床材料の移動等が生じた場合には遷移の退行としてループの逆方向への変化が生じると考えられる。

4. 二瀬ダム下流地点への H' - M_N ループの適用

図-7に、ダム直下地点(st.4)および下流2.7km地点(st.3)における土砂還元前後の水生昆虫データから評価した H' と M_N の値を示す。なお、H16からH19年までの期間は、土砂還元による影響が生じつつある期間とし、土砂還元実施後の代表年としてH20年度を用いた。図-4(c)からもわかるとおり、平成20年度は土砂還元後における秋季の高い M_N や、秋季から春季までの M_N の上昇が明確であることに加え、調査期間にも目立った出水が生じていない年である。図-7より、土砂還元前の平成15年度データは、図-6の津田仮説データと同様に半時計回りの軌跡となっており、秋季から春季にかけてループ上で遷移の進行が生じている。特にダム直下のst.4でその傾向が顕著であり、春季は M_N が0となるデータも確認できる。平成15年度のst.4地点は粗粒化が顕著であり代表粒径も約45cmの巨礫であったことに加え、流量が少ないために河床は安定したことによる遷移の進行と極相への到達が生じたと考えられる。

一方、土砂還元実施後の平成20年では、両地点において時計回りの変化を示している。これは、土砂還元により小型サイズの材料が増加したことにより、秋季から早春に生じるパルス的な小規模出水が小型の河床材料を

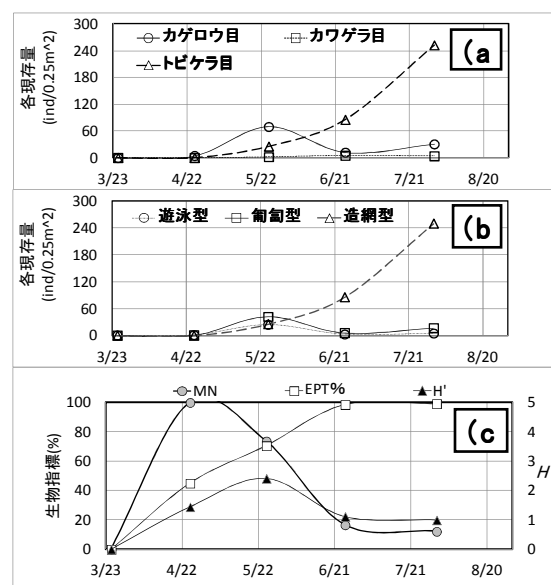


図-5 津田仮説データに基づく生活型や多様度指数の変化 (a, 目別, b生活型別, c, 指標)

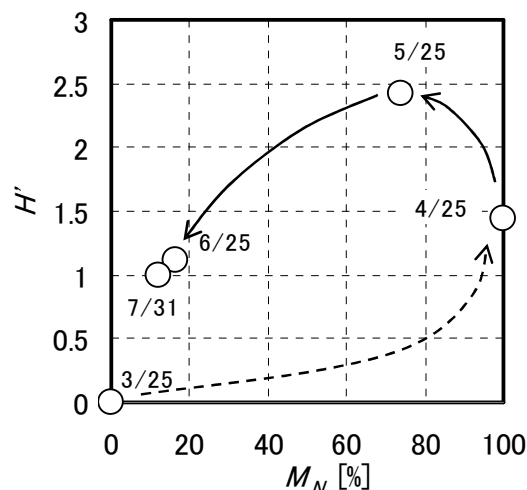


図-6 津田仮説データに基づく移動性指数－多様度指数空間における遷移過程 (矢印の軌跡は遷移の進行過程を示す)

移動させ、巣を造るのに適した安定環境が無かったことが原因として考えられる。なお、冬季の現地観測において、数cm程度のサイズを境にして、大型材料上に見られた大量の付着物や糸状藻類が小型の砂礫上には確認できないことから、冬季において小型砂礫成分は移動しやすくなっていると考えられる。表-1に示すように d_{10} は土砂還元前は17cmであり大礫相当のサイズであったのに対して土砂還元後は流量量に応じた経年的な変動はあるものの5cm前後に顕著に小型化して中礫相当のサイズとなっている。上述した目視観測の結果とあわせて考えれば、土砂還元後は非洪水期においても移動しやすい成分の材料が増加していることを示していると考えられる。

5. 考察

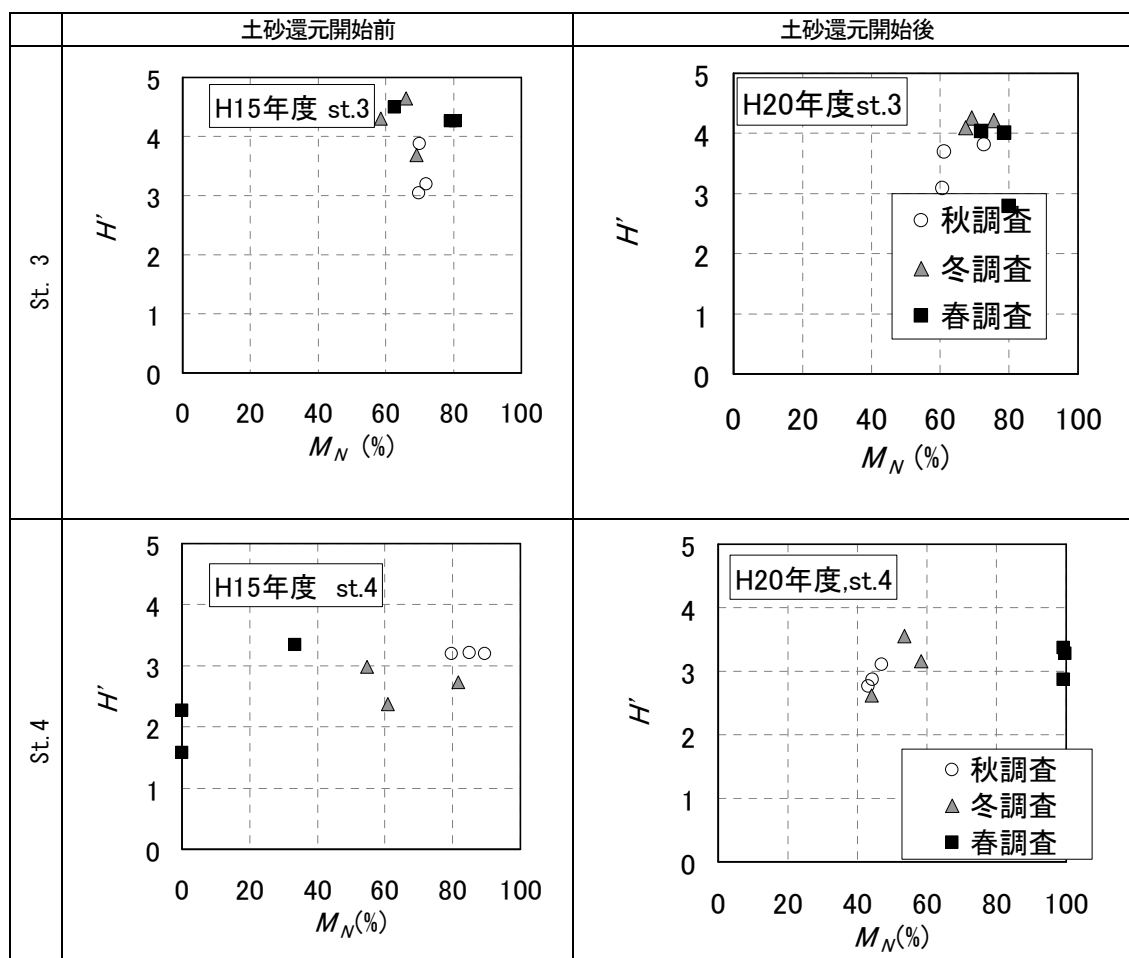


図-7 二瀬ダム下流地点の移動性 M_N —多様度 H' 分布図(左：土砂還元開始前(H15年度)，右：土砂還元開始後(H20))

本研究では、低水路生態系、特に水生昆虫群集への土砂還元の影響評価を行ったものである。これにより、数ヶ月の期間であっても水生昆虫群集は大きく変動するとともに、その変動は河床材料の変化や小規模出水影響の受けやすさの違いに由来する可能性を指摘した。これらと、関連する既往研究との関係について整理すると以下のとおりである。

近年河川環境の健全性の指標としては、我が国でもEPT指数が使われることがある。しかし、出水影響の大きい河川低水路の生態系を工学的に扱うためには、EPT指数には出水による物理場の変化に伴う水生昆虫への影響が考慮されていないという問題がある。本研究では、安定状態で生じる水生昆虫群集遷移を評価するための新たな群集指標として、津田仮説⁷⁾に基づいた M_N を提案し、これを二瀬ダム下流に対して土砂還元前後で適用した。この指標は、出水後に避難エリアから瀬への再帰が早い種の存在割合の大きさを示すものであり、本研究対象箇所においては、遷移の進行を表現するのに適していると考えられる。しかし、本論文では最も単純化した指標を用いたので、今後、河川の特徴を考慮するなど、さらに改良していく必要がある。

水生昆虫群集とハビタットの関係については、図-5や図-7に示したように、ほぼ同一の特性を有すると考えられる場においても、遷移の進行や退行によって数ヶ月の時間スケールで群集構成は大きく異なる。古典的な研究ではこうした観点の現地調査^{5), 6), 7)}が多く実施されていたが、近年は物理環境との関係に関する研究例^{8), 9), 10)}が多く、重要な知見を提供している。しかしながら、現地調査で得られたデータは、遷移の進行あるいは退行によって生じる不定な群集の一つの時間側面、いわば瞬間値と、あるハビタットとの関係である。今後の研究では動態を含めて理解していくことが必要である。

こうした水生昆虫群集の動的平衡状態の評価のためには、調査時に対する出水の規模および履歴の評価が重要となる。出水の具体的な作用としては、①昆虫体そのものの流体力による直接流失、②当該昆虫が存在する基盤(河床)材料の移動による間接流失の二つが存在する¹¹⁾。①については、PHABSIM等の基礎データとしての物理環境選好性¹²⁾の知見があるが、現地データでの相関分析に基づくものが多く、低水路空間で生じている具体的な現象への忠実度に関する問題¹³⁾が指摘されている。Shahら¹⁴⁾は、出水への感度の大きいと推定される遊泳型のチラゲロウを用いて、虫体の歩行および流失限界に関す

る限界水理条件を室内水路実験により明らかにしており、今後はこうした生態水工学的な研究が必要であろう。②は破局的流失¹¹⁾を引き起こす重要な現象であり、河床の安定性と水生昆虫群集に関する研究¹²⁾が行われている。

水生昆虫のハビタットという観点からは、河道形態の変化を生じさせない程度の小規模出水による、小型河床材料のわずかな移動であっても、そこに水生昆虫が存在すれば流失が生じる。河床攪乱の評価例として、生息場評価指標としての河床攪乱の強度⁹⁾、発生頻度¹⁰⁾の研究例があるが、多くの研究では河床材料サイズとして代表粒径を扱っている。しかし、水生昆虫を対象とした場合には小型サイズの粒径の安定性が重要であることは、Gibbinsら¹¹⁾によっても指摘されている。本研究の対象地点の代表粒径は冬季の小規模出水では動かないくらい大きいことから、小型サイズの粒径の移動性に注目していく必要がある。今後は、土砂還元計画および管理手法に関連するもののみならず、河川事業に関連して低水路の生態系に着目した調査や評価を行う場合には、出水の影響について、小型粒径の移動性評価といった観点を含めることが必要であると考えられる。

5. まとめ

本研究においては、土砂還元事業の実施されている二瀬ダム下流河川を対象として土砂還元前後の河床材料の移動性と水生昆虫群集の関係について検討を行った。本論文により得られた結論は以下の通りである。

1)土砂還元後の二瀬ダム下流河川においては、河床材料の細粒化が生じ、小規模かつ短期的な流量増加時においても移動する可能性の大きい砂礫成分が増加した。

2)土砂還元後の水生昆虫相の特徴として、秋季のカゲロウやカワゲラ現存量の経年的な増加傾向や、安定した河床状態で増加しやすいトビケラ目の秋季から早春季にかけての増加が見られなくなったことが確認された。これらは、土砂還元によって渓流域の河川が本来有する移動性の高い河床材料条件や出水時の避難所等、多様な低水路内空間構造が形成されたためであると推測された。

3)多様性－移動性ループを土砂還元前後の二瀬ダム下流データに適用した結果、土砂還元実施前は安定した河床条件で生じるループ上の遷移が生じていたこと、実施後はループの退行が生じていたことが明らかとなった。水生昆虫群集の動的変化は、多様性－移動性ループ上で理解できることが明らかとなった。

4)小粒径成分は河道形態変化に対して大きな影響は無いが低水路・水際生態系の評価や管理の上で重要である。

謝辞：本研究の実施にあたって、埼玉大学工学部建設工学科4年(当時)原田匠さんにデータ整理等で協力して頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 大杉奉功, 尾澤卓思, 小笠原智宏, 角哲也: フラッシュ放流による河川掃流効果に関する検討, 河川技術に関する論文集, 6, pp. 185-190, 2000.
- 2) 田中則和, 浦上将人, 宮川勇二: 生物の生息環境改善に資するフラッシュ放流計画手法, 河川技術論文集, 9, pp. 103-108, 2003.
- 3) 坂本博文, 中村甚一, 角哲也, 浅見和弘: 真名川ダム弾力的管理試験における「フラッシュ放流」の計画と効果の評価について, 河川技術論文集, 12, pp. 271-276, 2006.
- 4) 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—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—, 国土技術政策総合研究所資料, 第445号, 2008.
- 5) 津田松苗, 小松典: 伊勢湾台風4年後の吉野川の水生昆虫群集, 日本生態学会誌, 14, pp. 43-49, 1964.
- 6) 御勢久右衛門: 大和吉野川における瀬の底生動物群集の遷移, 日本生態学会誌, 18, pp. 147-157, 1968.
- 7) 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.
- 8) 西田守, 浅見和弘, 石澤伸彰, 熊澤一正, 中沢重一: ダム下流河川における試験湛水時の流量制御, その後の粗粒化と土砂還元に伴う底生動物の変化—11年間にわたる三春ダム下流河川のモニタリング結果—, 応用生態工学, 14, pp. 63-74, 2011.
- 9) 小林草平, 中西哲, 尾嶋百合香, 天野邦彦: 愛知県豊川における瀬の物理特性と底生動物現存量, 陸水学雑誌, 71, pp. 147-164, 2010.
- 10) 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, 7, 297-302, 2001.
- 11) Gibbins, C., Batalla, R. J. and Vericat, D.: Invertebrate drift and benthic exhaustion during disturbance: Response of mayflies (*Ephemeroptera*) to increasing shear stress and river-bed instability. *River research and applications*, 26, pp. 499-511, 2010.
- 12) Hart, D. D. and Finelli, C. M.: Physical-biological coupling in streams: the pervasive effects of flow on benthic, *Annu. Rev. Syst.*, 30, pp. 363-95, 1999.
- 13) Lancaster, J. and Downes, B. J.: Linking the hydraulic world of individual organisms to ecological processes: putting ecology into ecohydraulics, *River Research and Applications*, 26, pp. 385-403, 2010.
- 14) Shah, P., Tanaka, N. and Furusato, E.: An experimental study on an invertebrate (*Isonychia japonica*) response to approach velocity and blocks as refugia. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)* 69: I_235-I_240. 2013.

(2013. 4. 4 受付)