

河川事業に資する生態水理学の現状と課題 ～適切な物理的攪乱状態の管理に向けて～

CURRENT STATUS AND PROBLEMS OF ECO-HYDRAULICS FOR RIVER MANAGEMENTS -TOWARD REGULATION OF INTERMEDIATE DISTURBANCE -

田中規夫^{1,3}・古里栄一^{2,3}
Norio TANAKA, and Eiichi FURUSATO

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埼玉大学研究機構 レジリエント社会研究センター

For proper managements of river/stream, understanding the processes of ecosystem and environments is needed. In this review, current status and problems of eco-hydraulics for river/stream managements are discussed toward regulation of intermediate disturbance. Topics on forestation in gravel bar and invertebrate ecosystem are focused in relation to the prominent effects of physical disturbance on the ecosystem. Common characteristics for both ecosystems are that community composition changes dynamically by physical disturbance. Classification and generalization are needed for solving river management problems related to forestations. Compared to current research status for forestation, the problems have been still remained for understanding the process related to invertebrate community dynamics. Two kinds of approaches are recommended. One is the paradigm shift of hydraulics with temporal and spatial scales because of the small scale phenomenon of invertebrate dynamics. Another is the comprehensive approach for generalizing ecosystem dynamics related to physical disturbance.

Key Words : *Disturbance, Eco-hydraulics, gravel bar vegetation, Aquatic insects, regression*

1. はじめに

1997年の河川法改正に伴い、環境が河川管理の目的として位置づけられ、約16年が経過した。近年までに多くの治水・利水と両立した環境管理のあり方に関する学術的研究が実施され、その一部は河川管理においても適用されて来た。河川技術シンポジウムにおいても2004年に生態学と河川水理学の連携に関するOS¹⁾が開催され、樹林化と付着藻類に関する総説が発表されている。2013年には樹林化研究に関する総説が発表され²⁾、2004年以降の樹林化研究は多様期に相当し知見も蓄積されつつあるが、切り下げ³⁾や伐採⁴⁾等の実務への適用にあたっては課題が残存していることから、今後のシナリオや類型化の必要性が指摘された²⁾。一方、樹林化と並ぶもう一つの河川生態系として、常時水中に没する空間(以後、低水路空間)における、付着藻類、水生昆虫等底生動物および魚類等の生物群集がある。これらに関しては、ダム下流の土砂還元に関連する多くの研究が実施されているが、現地での現象解釈にとどまる傾向があり、樹林化現象に比べて進捗は遅れている。今後は土砂還元の進行過程

の理解や、土砂還元等が低水路生態系へ与える影響のメカニズムの解明が必要である。進展度は異なるがそれぞれ両課題に更なる研究が求められる。

本総説では、別個の問題として扱われてきた砂(礫)州や高水敷における植生問題(以後、砂州植生問題)と、低水路問題の双方を「物理的攪乱(以後、攪乱)」と「生物群集の遷移」という観点から類似問題として扱う。これらに関する学術的知見の現状から共通点と相違点を整理した上で、課題解決に向けた今後の学術の進展および河川技術の向上に寄与する事を目的とする。特に生態水理的な学術的発展が期待される「低水路空間の生態系」に着目するとともに、今後の河川管理においては、「攪乱管理」が必要であるという新しい視点に基づき、海外の学術的現状も踏まえて、その展望を述べる。なお、本総説では「様々な時空間スケールで生じる生態現象を理解・管理するために必要な水理学」を「生態水理学」とし、その中で「物理的攪乱の影響が極めて大きい河川空間において必要な水理学」を特に「攪乱生態水理学」と定義する。紙面の制約上、関連文献のすべてを網羅することはできないため、可能な限り代表性のある文献を当該知見における例として挙げることにする。

2. 本総説の視点：河川空間の生態水理学と攪乱

(1) 生態水理学の定義と本総説の対象

「生態水理学」という概念はHino⁶⁾より提唱されてから⁷⁾、40年弱経過している。日野の生態水理学の総説⁸⁾では、湖沼・貯水池における植物プランクトンの動力学や水質汚濁、河川における沈水植物の抵抗特性に加え、環境中の放射性物質動態まで極めて広い範囲がカバーされており、元々極めて広い学術領域である。本総説は今後の学術的発展や河川管理の実務上の問題解決を考慮して、河川空間における砂州植生と水生昆虫動態に着目し、これに強い影響を与える攪乱現象に関連する現象を対象とする。なお、これらと共通点が多い付着藻類問題は改めて別の機会に述べることにする。

(2) 生態系基盤としての河川空間の特殊性：物理的攪乱

地球上の地圏・水圏のあらゆる空間で、それぞれの場の物理基盤特性に応じた様々な生態系が形成されている。これらの中で、河川生態系は強い攪乱が生じる河川空間を基盤とするために、地球上でも極めて特殊な生態系である。河川空間の攪乱の特徴は、時間的に不定でかつ強度変動の著しい出水時の流水営力によって、基盤である河床表層が移動するだけでなく、その流れ場を規定する河道形態さえもが変動することである。また、そうした攪乱による河床材料の粒径変化は生物の侵入や遷移にも強い影響を与える。河床変動を伴う場合における基盤の攪乱は、その場における生物群集にとっては「破局的攪乱」に値するものであり、全基盤環境消失に相当する。こうした観点から、近年は海外で地形学－水理学－河川生態学の学際研究が積極的に実施されている^{9,10)}。

河川空間における攪乱と生態系の応答特性を考える場合、水位上昇時に生じる諸営力の生物体への直接作用だけでなく、基盤としての河床材料の移動性で生じる間接的な作用も生物体にとっての攪乱であることに十分に留意する必要がある。土砂水理学あるいは移動床水理学の場合は、河川空間構造に応じて生じた流れによる河床材料移動、あるいはそれらの相互作用が対象となる。一方、生態系を考慮する場合には、流水と河床材料のそれぞれが生物体へ作用し、群集の動的平衡を支配する。（3章にて詳述）。これは樹林化現象においては自明であり、倒伏や流失のメカニズムの違い等^{11, 12)}の研究例があるが、低水路生態系でも必要な視点である。

3. 植生および水生昆虫にかかる研究の現状

(1) 共通点：遷移系列と攪乱

図-1に砂州上および低水路空間における生態系遷移と攪乱の影響の模式図を示す。群集構成は遷移系列におけ

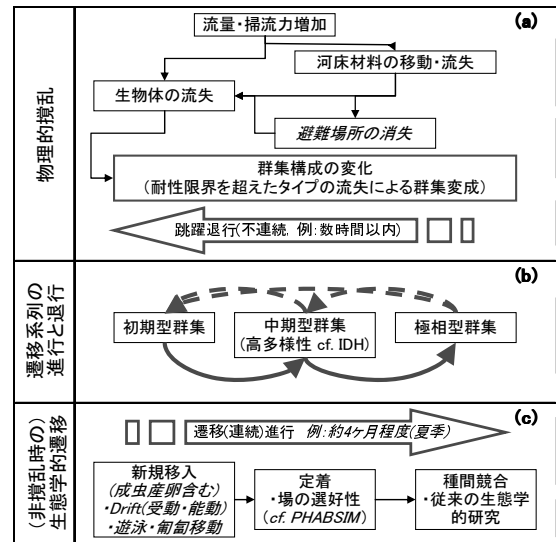


図-1 動的平衡現象¹⁴⁾としての群集変化と駆動力としての外的作用力と群集を形成する内的な作用の影響(斜体字は水生昆虫の場合を示す)

る初期から極相までの範囲で生じる非定常な現象である(図-1 (b)). これは藤田ら¹³⁾が砂州植生の消長について提案したシナリオの一般化に相当する。河川空間は他の生息場に比べ、図-1 (a) の物理的攪乱影響が極めて大きいことが特徴である。

遷移系列(図-1 (b))のそれぞれの局面は、左方向への位相変化である攪乱(外的な作用営力)による遷移の退行(以降では退行と表記する)(図-1 (a))と、右方向への生態学的過程(群集構造を形成する内的な作用)による遷移の進行(図-1 (c))との、相反する作用の結果生じる動的平衡現象である¹⁴⁾。植物群集と水生昆虫群集動態の共通点は、河川水および河床移動性が、退行あるいは基盤環境を変形させる二つの作用を通じて、群集構成の動的状態を支配していることである。河川管理上問題とされている、樹林化現象^{1, 2, 13)}と、粗粒化河床での糸状藻類の過剰繁茂⁵⁾や造網型トビケラの優占^{5, 15)}は、出水攪乱頻度・強度の低下によって物理的条件が長期間安定化した結果、群集構成が図-1 (b) の右端にまで達した状態である。動的平衡の一側面である極相という意味では、時間スケールは異なるものの、これらは同一の現象と解釈できる。河川が元々有していたダイナミズム(攪乱特性)が人為的影響等により変化し、攪乱状態に応じた新たな動的平衡状態へとレジームシフトした場合に、河川管理の課題が発生している場合が多い。砂州植生や低水路生態系にレジームシフトが生じた場合は、状態が変化する前の動的状態に戻すことは困難であり、砂州植生問題や付着藻の異常繁茂現象への対策に効果が見られない場合が発生する。

図-1 (b) の系列を構成する生物種は、基盤の物理環境に応じて異なる。砂州植生であれば砂州比高に応じてハリエンジュあるいはヤナギのいずれかになる事¹³⁾が挙げられる。これは宮本ら²⁾の「類型化」の課題に相当する。

(2) これまでの研究成果

砂州植生については、これまでに図-1の各々のプロセスについて、攪乱による植生動態への影響として、周囲流れ場だけでなく、基盤である河床材料の移動性と基盤上への土砂堆積に関連する様々な研究例がある¹⁾²⁾。図-1(a)の諸過程について、現地での攪乱影響の実態評価¹⁶⁾や、様々な攪乱・破壊形式として、ツルヨシの切断¹⁷⁾、河床材料の移動を伴うハリエンジュの複数の流失形式¹¹⁾、破断と流失の定式化¹²⁾等が報告されている。図-1(b)の遷移系列の実態については、多摩川¹³⁾および天竜川¹⁸⁾等の観測例がある。これらに基づくシナリオや類型化¹³⁾の提案、攪乱による遷移系列退行を考慮したモデル構築^{3, 12, 13)}も実施されている。これらの生態的知見は水理学的な方法によって得られたことに留意すべきである。

一方、砂州植生問題と類似した理解が可能であるにも関わらず、低水路問題については「攪乱営力の作用」－「群集形成」の知見(図-1(a))は少ない。得られている知見の多くは現地調査に基づいて、ダムや土砂還元の影響および水温等の大局的パラメーターと群集との関係の記述にとどまる⁵⁾。こうした研究では「属性の異なる調査データ」－「統計解析による有意差判定」という生態学的研究の手続きが用いられる事が多い。しかし、そもそも使用する水生昆虫の観測データが、同一箇所でも不定な現象の1スナップショットに過ぎない(図-1(b))という観点がないため、時空間的な代表性の課題がある。遷移現象(図-1(b), (c))については古典的な研究¹⁹⁾に加え、近年は攪乱後の遷移過程が報告されている²⁰⁾程度である。攪乱生態水理学の観点からは、土砂還元による攪乱と水生昆虫群集の関係²¹⁾や、攪乱時の小型材料の移動性²²⁾、巨礫後部のマイクロハビタット特性²³⁾、流速増大(攪乱)に対する流れ場の変化と水生昆虫の行動様式等の研究例²⁴⁾がある。海外では、生態水理あるいは水理生態の分野で、多くの研究が実施されている¹⁰⁾。砂州植生問題は我が国の水工学が世界的にも高い研究水準にあるのに対して、低水路問題については更なる攪乱生態水理学的研究が必要である。

(3) 類型化のための一般化の試み

「シナリオ」および「類型化」のためには、図-1(b)に示した現象を定量的に一般化できると有効である。著者らが攪乱生態水理学におけるテンプレートの一つとして提案する遷移数－多様度ループを図-2に示す。これは、図-1に示した群集動態の動的平衡特性に基づくものである。横軸は、遷移系列の進行度を示す指標(遷移数; S_N , Succession Number)の一つとして、水生昆虫群集の移動性指数(M_N , Movability Number,²¹⁾を示している(図-2)。縦軸は、Shannonによる一般的な群集の多様度指数である。遷移数は、植物あるいは水生昆虫等の生物群集の中で、遷移初期種の豊富さを表す。破局的攪乱直後から初期群集が形成される時期を除けば、この値が大きいほど遷移

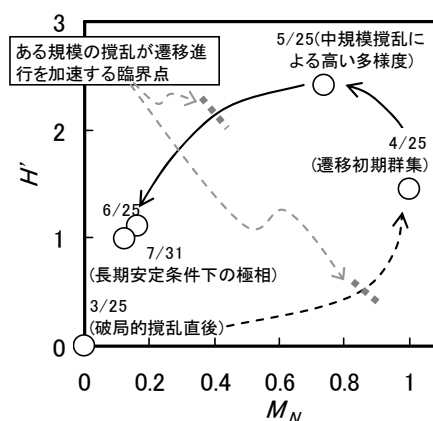


図-2 移動性指数(M_N)－多様度指数(H)ループの例

初期であり、少ないほど競合力の強い種の現存量が豊富であることを意味する。田中ら²¹⁾は、水生昆虫群集の遷移に関する古典的データ¹⁹⁾を用いて、物理的安定条件では、図-2の平面を群集構成は反時計回りに位相変化する事を発見した。破局的攪乱後、侵入と競合に応じて群集が形成され、多様度が攪乱後の中間的な経過時間(極相到達時間の約1/2)で最大となる。これは、近年河川植生においても適用されている²⁵⁾中規模攪乱仮説²⁶⁾に合致する。なお、二瀬ダム下流河川のデータを用いて、土砂還元による河床安定性変化に応じて、退行の位相変化が生じる事も確認されている²¹⁾。時間スケールが異なるが、砂州植生問題における樹林化は図-2の極相状態に相当する。なお掲載は省略するが砂州植生でも上記ループは成立する事を著者らは現地データから確認している。

このループ上の位相変化と攪乱との関係において、レジームシフトの影響も考慮すべきである。ハリエンジュの動的樹林化²⁷⁾や、パイオニア植物の進出可能箇所と裸地の存在限界²⁸⁾は、遷移がループ上のある位置(図-2にイメージをあわせて示す。同図に臨界点と表示)を越えると、ある規模の攪乱は遷移進行を加速する可能性もある事を示している。低水路空間でも河床固化が造網型トビケラにより生じた場合には¹⁵⁾、攪乱耐性の強いグループの水生昆虫のみ残存し、遷移が進行する可能性がある。

(4) 相違点：時空間スケールの違い

両問題の相違点は、①生息空間が常時水没していること、②植生は地形と同様に他の上位生態系に対する基盤空間構造の役割を有するのに対して、水生昆虫には一部を除きそうした基盤機能は無いこと、③両者の体サイズの違いや生活史スケールに応じて考慮すべき時空間スケールが異なり、さらにその基盤の空間構造を規定するスケール(例えば河床の粒度分布で、骨格材料や移動性材料の割合。粗粒化率によって異なる)により攪乱を生じる出水の発生頻度という時間スケールが異なることが挙げられる。特に、③が河川技術および生態水理学において重要で、ダム下流の水生昆虫動態への土砂還元の影響²²⁾は、空間スケールの変化(河床材料の移動性の向

上)が群集遷移の時間スケールに影響を与えた例である。

樹林化は遷移および攪乱の時空間スケール(河床材料サイズを含む)が認識しやすいオーダーの現象である。攪乱による植生分布変化や遷移過程は、草本と樹林の識別は容易であること、砂州や高水敷上での現象は目視で認識可能なことなどから、理解が容易である。攪乱を生じる出水が年最大流量規模以上³⁾であることや植物の流失は80%¹¹⁾あるいは90%粒径¹²⁾の河床材料に関連することは、従来の河川工学の変数を用いて記述することを可能にしている。発生頻度が少ないため、同一河川におけるデータの経年的蓄積が解析時間スケールに対して十分に得られない問題はあるが、従前の河川工学分野の知見の直接利用が可能な現象であると言える。

一方、低水路空間については、常時水没した空間の現象であるために生物の動態を直感的に認識しにくい。群集変化の時間スケールに加えてハビタットを特徴づける空間スケールも砂州植生に比べて小さいことも動的平衡現象(図-1)の理解を困難にしている。時間的には、図-2に示したように、安定した極相状態でなければ1ヶ月で群集構成は大きく変動する。そのため、通常的环境調査でこれを検知することも難しい。しかも、代表的河床材料に対する相対水深の小さい礫床河川では数10cmスケールのわずかな水位変動でも、ハビタット特性は変化する²³⁾。空間的にはヒラタカゲロウが同一ユニットの異なった礫に種レベルで棲み分けている事が75年前に報告されている²⁹⁾。しかし、現在でも同一リーチでの群集の空間分布の調査例は限られている⁹⁾。水生昆虫の空間分布の不均一性を考慮した調査指針も存在せず、現地データの空間的代表性は動態理解において大きな課題である。

以上より、対象とする現象の時空間スケールの違いが、低水路問題の観測および理解を困難にしている。その結果として、(移動床)水理学に基き攪乱を考慮して遷移系列を評価した例が、国内ではほとんど見当たらない。

4. 今後の生態水理学の課題

(1) シナリオと一般化を通じた類型化

本総説で対象とした両生態系に共通して、類型化が今後の課題である。山本³⁰⁾が指摘している「河川事業において必要な生物データの条件」を、河川技術の側からも提案することが必要だと考えられる。樹林化では群落タイプのシナリオが提案されているが¹³⁾、同様に低水路空間の水生昆虫や付着藻類についても必要である。ここで問題となるのが、これら生物群集の類型化である。一般的な系統分類の種は極めて多い事に加え、攪乱や遷移との対応関係が明確ではない。水生昆虫に関して提案されている生活型や摂食機能群等の生態的な類型³¹⁾も攪乱と同様である。古里ら³²⁾は攪乱と遷移の観点から水生昆虫の新しい生態区分として「攪乱戦略型」を提案している。

こうした生物種の区分方法だけでなく、生物群集総体の指標も攪乱の影響を評価する上で重要である。今後は「遷移数(図-2)」のような指標の開発と、攪乱の規模・頻度が遷移数に与える影響を解明することも生態水理学の一分野として望まれる。これらを通じて制御対象とする生態系の動的平衡現象を一般的に理解した上で、個別の箇所の特性に応じた類型化が可能になると考えられる。

(2) 低水路問題：底面付近粗度層の(土砂)水理学

低水路問題に関しては、上述した類型化だけでは不十分であり、図-1に示す各過程の定量的な評価が必要である。これらは生態学的・生物学的な研究のみでは困難であり、攪乱の具体的な作用特性を水理学・河川工学的な観点から評価する必要がある。ただし、これらは既存の水理学で対象とした時空間スケールより小さいことから、新たな水理学の課題が指摘できる(図-3)。

a) 攪乱作用の明確化(図-1(a))と粗度層(図-3)

水生昆虫にとっての攪乱は、①周囲流れ場に応じた虫体への直接営力(平均的な抗力、揚力以外に乱流変動も含む)だけではなく、②基盤である河床材料の移動性の双方から構成される。出水時の作用営力の増加は虫体まわりのマイクロハビタット特性を変化させ、ある閾値を超えると能動移動(匍匐移動および遊泳)ができなくなる。これは、底面数cmスケールで生じる底面粗度層内の現象であり(図-3)、水深平均流速での評価は難しい。しかも粗度のサイズや棧型・溝型の相対間隔のような従来の水理学で課題とする条件に加えて、実河床における礫の存在状況として浮石とはまり石の違いや礫周囲のかみ合わせ、平面配置等の様々な平面・立体構造が底面流れ特性に影響する。これらはハビタットとして極めて重要な要素である³³⁾。相対水深の小さい場合については、例えば中川ら³⁴⁾により流れ構造と乱流特性について検討された、対数分布則の成立しないRoughness sublayerに着目する必要がある。原田ら³⁵⁾はNikora⁹⁾による粗面流れの分類とRoughness sublayerの関係を整理するとともに(図-3)、こうした流れ場の理解が魚類のハビタット評価において重要であることを示した。ところで水生昆虫を含む底生生物にとっての真のハビタットは、Roughness sublayerより更に底部の凹凸範囲に相当するInterfacial layer⁹⁾である(図-3)。低水路問題において虫体への作用営力を評価するためには、上述した河床立体構造を考慮して、対数分布則の成立しないRoughness layer(Roughness sublayerとInterfacial layerの双方からなる層)に関する、更なる水理学的研究が必要となる。

営力が増加してある閾値を超過した場合、虫体そのものの流失(ドリフト)が生じる。ドリフト虫体は魚類の餌資源となるために重要であり、古くから海外で多くの研究事例が存在する。Gibbinsら³⁶⁾は、ドリフト量は流水営力だけでなく、約9N/m²のせん断応力で生じた小型材料の移動で顕著に増加することを報告している。田中・古

里²²⁾は、アーマー化したダム下流河川において水生昆虫群集動態に小型河床材料（2%粒径 d_2 成分）の移動性が影響することを指摘している。河道形態の顕著な変化を伴わない小型河床材料のみの移動も、底生生態系では重要である。混合粒径の移動限界については、従来多くの研究成果^{37),38)}が存在するが、対数則を基本としており、現地河床の多様な立体構造に応じて生じるRoughness layerとの関連も考慮されているとはいいがたい。以上のように、低水路生態系における物理的攪乱作用の理解のためには、従来の水理学よりも時間および空間スケールを小さくした研究が必要である(図-3)。とりわけ、従来の「年最大流量規模以上の出水とこれによる土砂水理学」では対象としていなかった低水路空間の小規模出水に伴う現象を明らかにする必要がある。

b) 攪乱を考慮した水生昆虫の動態の理解(図-1(b))

砂州植生問題と同様に、水生昆虫の遷移系列と攪乱による退行実態の把握と、これに基づく動態シナリオと類型化が必要である。このためには、現地観測の精度を向上させる必要がある。時間的には数ヶ月以内で遷移が生じることから、月数回レベルの調査が必要となる。空間的には調査結果の代表性を上述したハビタットの観点から再検討する必要がある。古里・田中²³⁾は溪流域においては巨礫の相対水深に応じて後部マイクロハビタットが異なることを報告している。今後は、ユニットスケールの研究（例えば、河床材料と砂州の形成過程に関する研究³⁹⁾）と合わせて、河川空間の類型化や代表的な空間構造要素の抽出を行う必要がある。これらの総合的な研究により、低水路の様々な空間構造で生じる流れ特性に基づいて水生昆虫の空間分布不均質性を明らかにすることで、はじめて群集動態の理解が可能となる。

(3) 学際的研究の課題と攪乱管理による河川事業

(1), (2) の課題解決のためには、水理学と生態学の学際領域の更なる連携が必要である。これにより実務においても有用な知見が獲得できる。今後の河川管理の方向性の一つとして、極相に至らないよう「適切な攪乱状態が維持されるような管理」が考えられる。図-2に示したように、中規模攪乱仮説²⁶⁾が河川空間でも成立する可能性がある²⁵⁾。河川空間の生態系を管理するために、河川の特性に応じた適切な攪乱条件を明らかにした上で、これを河川管理における流量および土砂管理に連結させる必要がある。このためには、河床付近の流れや小スケールの土砂移動を含めた水理学に加えて、数10年スケールで生じる攪乱に応じた生態学的な動的平衡現象の一般化と類型化が必要である。流域特性に応じた河相と潜在自然植生の関係⁴⁰⁾も、類型化においては重要な示唆を与えられと考えられる。こうした攪乱生態水理学の学術的充実に基づいた調査・評価方法を構築することにより、河川管理の実務に反映・貢献することが可能になる。

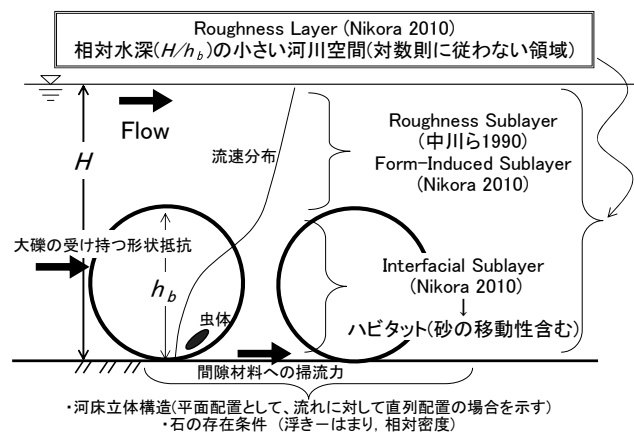


図-3 今後の生態水理学(特に低水路問題)で着目すべき事象(図-1(a)の諸過程の生じる空間)

5. 結論

河川生態系の特徴である攪乱影響の大きさに基づき、植生と水生昆虫群集の特性に関する既存知見を攪乱および遷移の観点から整理した。両者の共通点は、生物群集の攪乱に応じた動的平衡現象が、遷移という時間スケールの中で生じていることである。また、河川管理上問題となっている樹林化や水生昆虫相の多様度劣化等の現象は攪乱強度の低下で生じた極相状態であることを指摘し、一般化のためのテンプレートとして遷移数-多様度ループを提案した。一方、両生態系の大きな相違点は、動態の時空間スケールが異なることである。このため、水生昆虫動態に関する知見が植生動態に比べて十分ではない。時空間スケールを拡大させた生態水理学の新しい学術研究が今後必要である。植生管理を含めて、今後の河川管理の実務を念頭においた河川技術に関する知見の導出には、低水路生態系と砂州植生の双方において動的平衡を一般的に理解する手法を通じた類型化が有効である。その上で、大規模・中規模出水等の相対水深が大きい場合を対象とするだけでなく、平水程度での小規模出水や相対水深が小さい場合の流れの理解と土砂水理学の発展が必要である。そのためには、底生生物のマイクロハビタットである底面付近粗度層近傍の流速分布や乱流特性の理解が重要である。加えて、水理学と連携可能な生物・生態学的指標を構築する等の大局的な視点の研究と、導出した指標における攪乱影響の定量化が有効であり、このためには生態水理学の発展が不可欠である。

謝辞：本研究の一部はWEC応用生態研究助成事業(助成番号, 2013-03; 代表者, 田中規夫), および平成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)より実施された。ここに記して謝意を表す。

参考文献

1) 清水, 戸田: 生態学と河川水理学の連携による河川生態系保全の

- 学術研究に向けて, 河川技術論文集, 第10巻, pp. 7-12, 2004.
- 2) 宮本, 赤松, 戸田: 河川の樹林化課題に対する研究の現状と将来展望, 河川技術論文集, 第19巻, pp. 441-446, 2013.
 - 3) 宮本, 盛岡, 神田, 道奥, 魚谷, 大地, 阿河: 流量変動のインパクトを考慮した河道内樹林動態の確率モデル, 土木学会論文優B1(水工学), 第67巻, pp. I_405-I_1410, 2011.
 - 4) 前野, 赤堀, 児子, 藤井: 旭川の玉柏箇所における植生伐採効果の検討, 水工学論文集, 第54巻, pp. 1225-1230, 2010.
 - 5) 藤田, 富田, 大沼, 小路, 伊藤, 山原: 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.
 - 6) Hino, M.: Eco-hydraulics, An attempt, Proc. IAHR Congr., 17th, Vol. 6, pp. 178-208, 1977.
 - 7) 池田: 生態水理学の現状と課題, 第36回水工学に関する夏期研修会講義集Aコース, A-1, 14p., 土木学会, 2000.
 - 8) 日野: 生態系と水理学, 第14回水工学に関する夏期研修会講義集Aコース, A-4, 7p., 土木学会, 1978.
 - 9) Nikora, V.: Hydrodynamics of Aquatic Ecosystems: An Interface between Ecology, Biomechanics and Environmental Fluid Mechanics, River. Res. Applic., Vol. 26, pp. 367-384, 2010.
 - 10) Lancaster, J. and Downes, B.J.: Linking the hydraulic world of individual organisms to ecological processes: putting ecology into ecohydraulics, River. Res. Applic., Vol. 26 pp. 385-403, 2010.
 - 11) 清水, 長田: 礫河川における河道内樹林地の洪水破壊について, 河川技術論文集, 第8巻, pp. 301-306, 2002.
 - 12) 田中, 八木澤, 福岡: 樹木の洪水破壊指標と流失指標を考慮した礫河川上樹林地の動態評価手法の提案, 土木学会論文集B, 第66巻, pp. 359-370, 2010.
 - 13) 藤田, 李, 渡辺, 塚原, 山本, 望月: 扇状地礫河川における安定植生域消長の機構とシミュレーション, 土木学会論文集, No. 747/II-65, pp. 41-60, 2003.
 - 14) Resh, V.H. et al.: The role of disturbance in stream ecology. J. of the North Amer. Benthological Soci. Vol. 7, pp. 433-455, 1988.
 - 15) 田代, 渡邊, 辻本: 造河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, 第10巻, pp. 489-494, 2004.
 - 16) 戸田, 池田, 熊谷: 礫河川における洪水前後の高水敷植生の変化と栄養塩・有機物の輸送に関する現地観測, 河川技術論文集, 第5巻, pp. 71-76, 1999.
 - 17) 瀬崎, 服部, 近藤, 徳田, 藤田, 吉田: 礫河川上草本植生の流失機構に関する現地調査と考察, 水工学論文集, 第44巻, pp. 825-830, 2000.
 - 18) 戸田, 古川, 辻本: 広域・長期的な河道内植生動態把握に向けた航空写真の更なる活用方法に関する研究—天竜川下流域を対象として—, 土木学会論文集B1(水工学), 第68巻, pp. I_739-I_744, 2012.
 - 19) 津田, 御勢: 川の瀬における水生昆虫の遷移, 生理生態, 12, pp. 243-251, 1964.
 - 20) Mochizuki, S., Kayaba, Y. and Tanida, K.: Responses of benthic invertebrates in an experimental channel to artificial flushes, Hydrobiologia, 603, pp. 73-81, 2008.
 - 21) 田中, 古里, 木村: 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.
 - 22) 田中, 古里: ダム下流礫河川における水生昆虫動態と小型河床材料移動性の人為的土砂供給前後の変化, 土木学会論文集B1(水工学), 第70巻, I_1327-I_1332, 2014.
 - 23) 古里, 田中: 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—, 土木学会論文集B1(水工学), 第70巻, I_1333-I_1338, 2014.
 - 24) 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.
 - 25) Tanaka, N. and Yagisawa, J.: Index of medium-class flood disturbance for increasing diversity of vegetation area at gravel bars or islands in middle of rivers, International J. of River Basin Management, 10, pp. 255-267, 2012.
 - 26) Connell, J.H.: Diversity in tropical rain forests and coral reefs. Science, 199, pp. 1302-1310, 1978.
 - 27) 清水, 小葉竹, 岡田: ハリエンジュによる動的河道内樹林化について, 水工学論文集, 第45巻, pp. 1099-1104, 2001.
 - 28) 辻本, 寺井, 寺元: 木津川下流部の植生繁茂と裸地維持の仕組み, 河川技術論文集, 第8巻, pp. 2002.
 - 29) Imanishi, K.: Mayflies from Japanese torrents IX. Life forms and life zones of mayfly nymphs. I. Introduction, Annot. Zool. Japan, 17, pp. 23-36, 1938.
 - 30) 山本: 沖積河川—構造と動態—, 技法堂出版, 587p, 2010.
 - 31) 竹門: 底生動物の生活形と摂食機能群による河川生態系評価, 日本生態学会誌, 第55巻, pp. 189-197, 2005.
 - 32) 古里, 田中, 坂田: 河川空間の物理的攪乱への応答特性を考慮した水生昆虫群集の新しい生態型区分, 河川技術論文集, 第20巻, 2014(印刷中)
 - 33) Davis, J.A. and Barnuta, L.A.: An ecologically useful classification of mean and near-bed flows in streams and rivers. Freshw. Biol., Vol. 21, pp. 271-282, 1989.
 - 34) 中川, 辻本, 清水: 相対水深の小さな流れの構造に関する実験的研究, 土木学会論文集, 第423号, II-14, pp. 73-81, 1990.
 - 35) 原田, 小野田, 萱場: 粗粒化した石礫河床への土砂供給が遊泳性魚類の空間利用に及ぼす影響に関する一考察, 土木学会論文集B1(水工学) 第70巻, pp. I_1339-I_1344, 2014.
 - 36) Gibbins, C. et al.: Invertebrate drift and benthic exhaustion during disturbance: Response of mayflies (*Ephemeroptera*) to increasing shear stress and river-bed instability. River. Res. Applic., Vol. 26, pp. 499-511, 2010.
 - 37) Egiazaroff, I.V.: Calculation of Nonuniform Sediment Concentration, Proc. ASCE, Vol. 91, HY4, pp. 225-247, 1965.
 - 38) 芦田, 道上: 移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, 第206号, pp. 59-69, 1972.
 - 39) 知花, 山下, 工藤, 柳澤: 横断構造物が河川地所に及ぼす影響とそこに見られる治水・環境両面の特性, 河川技術論文集, 第15巻, pp. 231-236, 2009.
 - 40) 玉井, 奥田, 中村編: 河川生態環境評価法—潜在自然植生を軸として—, 東京大学出版会, 2000.

(2014.4.3受付)