

河川生態系の評価と保全・再生のための課題

RESEARCH TOPICS ON EVALUATION, CONSERVATION AND RESTORATION OF RIVER ECOSYSTEM

辻本哲郎¹

Tetsuro TSUJIMOTO

¹フェロー会員 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)

We should make efforts for sustainability of human civilization, and coexistence with nature is a key. On river and/or river-basin management, ecosystem conservation is important as well as safety against flood and water resources utilization, and river hydraulics collaborated with other discipline such as limnology, biology and ecology, is strongly expected to contribute it. Such efforts have been developed in this decade by research cooperation among these disciplines in the same field, and abundance of knowledge has been accumulated. Now, we have to coordinate them in order to apply them to achieve the purposes for river and/or river-basin management: This paper is challenging to discuss how to evaluate the river ecosystem; and how to overcome the remaining problems for river ecosystem conservation and restoration, through next development of hydraulic engineering.

Key Words : *River ecosystem, nature conservation, restoration, habitat, biomass dynamics, ecological service, river morphology*

1. まえがき

今日、われわれが合意した人類の目標は「持続性」。その実現のためには、安全や資源を手に入れることはもちろんであるが、自然環境保全も重要な項目であると認識されている。国土計画の根幹である流域計画においても、治水、利水に加えて、環境保全が重要な柱と認識されて久しい。流域という視点にたてば、治水・利水もそして自然環境も、降水-流出-蒸発散という「水循環」に駆動されたシステムのマネジメントであることは、広く認識されてきた。流域で集められた水は、水だけでなく様々な物質を運搬する。そしてその経路が流域で、その軸が河川水系ということになる。その経路において、物質運搬（フラックス）が分散・集中され、流域の様々な場所でのストックが変化に富んだものとなる。河川を流れる水であれば「流況」、土砂に着目すれば、土砂生産や浸食は土砂の分散、堆積は集中である。これはしばしば「流砂系」と呼ばれる。その時空間変化は「移動床過程」として地形変化をもたらす。土砂だけでなく様々な物質も水とともに運搬され、その過程で変化を受ける。有機物と無機物の間を行き来する「生元素」も代表的な輸送・変化過程を呈し、しばしば「(自然の)物質循環」と表現される。生元素は、物理的作用のみならず生

化学的作用も受け、その意味で生態系の一部も担うし、また生物生息環境としての水質にも影響する。水循環、流砂系は生物生息場を既定し、様々な生物が行動する「生態系」が構成される。その意味で、生態系は「流域環境」の「鏡」であり、とくにこうしたシステムが河川のダイナミズムを軸として構成されていることはこれまでの話の展開で理解されるどころだ。また、「水循環」、「流砂系」、「物質循環（物質輸送・変化過程）」、「生態系」がそれぞれにシステムを構成し、流域での人間活動の影響を受けて変質し、その「健全さ」への回帰が追求される。ここでは、こうした本来健全な系が人間活動のインパクトへの応答として変質しているという視点で、とくにそれが「鏡」としての生態系に表れているという認識から、その「健全化」シナリオが稼働できるように、生態系の評価および保全・再生への課題について述べる。既に述べたように、生態系は水循環、流砂系などの鏡であり、それゆえに、生態系の成り立ちそのものは生物学や生態学、陸水学の範疇とはいえず、上記の課題への水工学の果たすべき役割は大きい。

河川法改正(1997)とともに、河川管理・整備における生態系への着目の重要性は強く認識され、様々な取り組みは既に始まっている。とくに、今回のテーマにかかわるものとしては、応用生態工学会¹⁾の組織、河川生態学術研究会²⁾、水源地生態研究会議³⁾などの活動があり、水

工学独自の植生水理学の発展など以上に河川生態系の評価、保全・再生への取り組みに向けた研究が進められてきている。本文ではその中から、いくつかの例を引きながら、河川生態系の評価、保全・再生にかかわる話題を、系統化してみよう。

2. 河川生態系の基盤

河川は山と海をつないでいるもので、一概にひとくくりに扱うことは出来ない。ある程度まとまりのあるくくりとして「セグメント」というスケールが河川の大雑把な構造の特徴をつかむのに恰好な概念である。たとえば、溪流、山地河川、谷底平野河川、扇状地河川、沖積平野河川など、河床勾配や河床材料がある範囲内の河道特性に共通点がある。しばしば、砂河川、礫床河川といわれるのもこうした区分である。生態学の方でも、「河川連続体仮説」⁴⁾が知られていて、食性や摂餌型等で分類した生物群が、セグメントレベルで大きく区分される。

こうしたセグメントに応じて、流路形態や河床形態が特徴づけられる。たとえば、図-1は、淀川支川の木津川下流の、交互砂州に特徴づけられる砂河川で、大きさが若干分布するものの統計的には均質集団と見なせる「砂州」の構造を有している。ここではこうしたセグメントの基本構造をStructureと呼ぶことにした。Structureは数年一度程度の大洪水で形成・維持される構造で、河床勾配、河床材料粒径、年最大流量などで基本的な形状・スケールが既定される。こうした構造が、水域においては瀬・淵構造を形成し、そこでの表面流水位差が駆動力となって砂州内伏流を生み出している。

Structure (Segmentの基本的構造)
年1度から数年に一度の洪水で形成・維持
砂州の形状→瀬・淵構造
砂州構成材料



河床勾配、河道断面、年最大流量→砂州波長、波高

図-1 木津川の交互砂州に特徴づけられる砂河川区間

こうしたStructureをクローズアップすると、図-2のようにさまざまな「類型景観」のパッチからなっていることがわかる。滞筋のほか、二次流路 (secondary channel) やわんど、たまりなどの一時水域 (temporary

water)、水際、礫帯や細砂マウンドなどの裸地、草地や樹林域など植生域などである。ここでは、これらの「サブ砂州スケール類型景観」をTextureと呼んでいる。こうしたTextureは毎年何度か来襲する出水で形成・維持されるものである。とくに、Textureでは、その景観の寿命 (Duration) をしっかり見る必要がある。たとえば、たまりの中にはDurationが非常に短いものときわめて長いものがあり、その生態系としての質は全く異なる。逆に言えば、同じTextureであってもDurationが異なれば異なる生態系を支える。

Texture (砂州の表層の景観/サブ砂州スケール景観)
毎年何回か起こるような洪水
砂州表層への堆積・フラッシュ 植生動態
裸地域 細砂パッチ(マウンド)、礫帯
植生域 草地、樹林地
一時水域 わんど・たまり

Duration (寿命、変遷←攪乱・安定化)

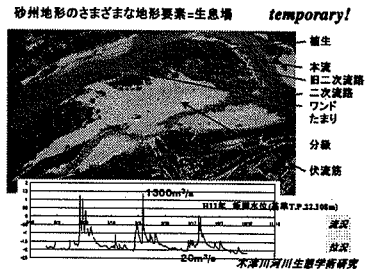


図-2 サブ砂州スケール類型景観(Texture)とそれらの寿命 (Duration)

上記の「物理景観」はまさに流況と流砂系に支配されるものである。そして、このMorphodynamicsには植生が極めて大きな作用をしている。水工学分野では植生を伴う流れについては様々な河道と植生の相対位置の影響も含め研究が蓄積されてきているし、植生を伴う移動床過程の研究も注目されている。ただし、重要なことは地形変化に応じて、植生動態も変化すること。多くの植物の種子は水流に運ばれて定着し、それが洪水などで破壊されることを免れながら群落として定着する動態はまだラフスケッチのままである。また、草本が定着した後、木本に遷移、成長と洪水攪乱による破壊との関係で動的な平衡状況を呈する。樹林化、裸地化などを呈する過程は水工学の重要な研究対象になってきている(図-3)。

こうした様々なスケールが織り成す物理基盤の上に生態系が存立しているということが生態系理解の第一歩である。こうした基盤は、人間活動による流域における水循環、流砂系の変質によって、敏感に影響を受けるものである。河川水系に沿った議論では、流況や流砂系の変化による河道動態の変化についての問題として、より具体的で、とくに、植生動態が関与していることが重要でありそのことが認識されつつある。

植生域の変遷

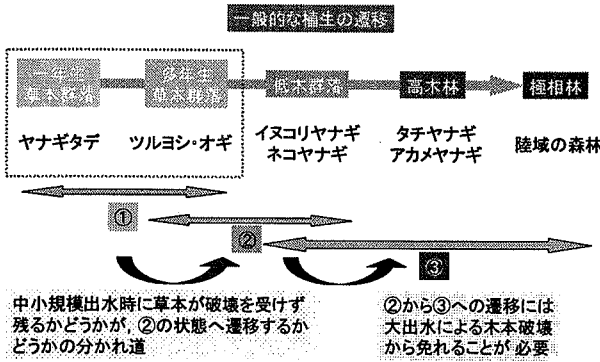


図-3 植生の変遷

3. 生態系評価

(1) 生息場 (Habitat)

97年に定められた環境影響評価法にもとづくアセスメントでも、改正河川法下での河川整備・管理の目標設定においても、生態系の捉え方・評価が難題であった。たとえば、アセスメントの基本である生態系への影響の「回避・低減・代償」といっても、何をどう定量化してやればいいのか問題であった。形式的にこれを解消したのは「生息場」(Habitat)の概念で、生息場への影響の回避・低減、生息場の代償であればイメージはつかみやすかったため、一時は「生態系=生息場」と直結した議論もされた。河川水理学の分野でもこれは比較的取り組みやすい「具現化」で、Habitat Hydraulicsという言葉も出来た。また、PHABSIM(Physical Habitat Simulation)⁵⁾という手法は、特に水域の中での魚類生息場の評価(そして保全、再生)に応用された。PHABSIMでは、生息適性(Habitat Suitability)という生息選好性を定量表示し、流速、水深などの水理指標との関連をあらかじめ知っておいて、流況や地形特性に応じて生息場の分布や配列を議論する。この手法だと、前章で述べた「類型景観」がある「流況」のもとで、対象とする生物の生息にどれくらい適性かが判断される。様々な流況で様々なTextureのパターンに対して、流速や水深を計算する水理ソフトの汎用化とともに、ケーススタディが行われた。

水理諸量と生息適性を関連づける議論の精緻化は生物研究者のテリトリーで、明確な判断は無いし、データの積み上げが大事だといっても作業精度の向上があっても、学術的には行き止まりである。

むしろ本質は別のところにある。仮に一つの生物種が対象であっても、「生息」というのは「生活史」(spawning, hatchery, nursery, feeding, refugeなど)そのものという考えが当然あり、生活史上必要な様々な空間の連結性をどう考えるべきなのかの議論が重要である(図-4)。これによってこそ保全・再生と絡めた工学の視点でのbreak throughができる。

Habitatの時空間構造

生活史上の様々な場の、それぞれの評価とその空間的連結性
連結性の測り方 物理空間を生物の固有スケールで測る
生活圏のスケール 生物のマスと相関

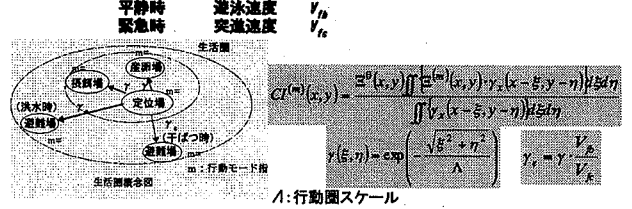


図-4 生活史での利用空間の連結性

Series of sidepools on a sand bar

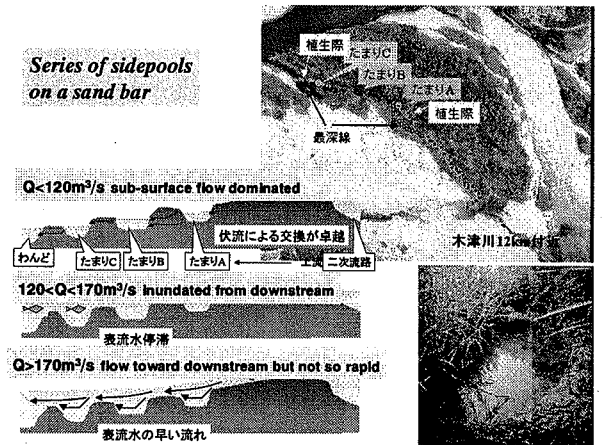


図-5 一時水域の避難場所としての機能

一方、河川景観要素、StructureやTextureのさまざまな類型景観がさまざまな生物活動のどの部分をサポートしているかという視点(景観の生態的機能)での研究も、水工学者ならではのアプローチといえよう。図-5は一時水域が洪水時の避難空間としての生態的機能を有していることを水理的に確認した例である。

また、木津川の砂州では砂礫裸地をチドリ類が営巣に使い分けており、一方水際のシルト質堆積地を採餌地として共有していることがわかった。これが春季の出水が少なく水際が植生(ヤナギタデ)で覆われると、チドリ類はこれまでの堆積地で採餌しなくなる(松原・山岸)。こうした「負の生態的機能」にも着目していく必要がある。

さらに、生息場は様々な生物種に固有であるため、どの生物を評価の対象にするのか、複数種を扱うときに種間の相互作用をどう考えるのか、あるいは種ごとの生息適性のバランスをどう考えるのかが問題となる。また様々な生物種すべてを組上に乗せるのは無理である。どれだけ複数種を並列に選ぶより、相互に関連する複数種からなる「仮想生態系」を想定し、それを対象に、個々の生息場評価を総合化することも新しい視点であろう。

生物種のバランスを云々することについては、生態学では「生物多様性」にかかわるいくつかの指標が提案されている。複数の種を対象とした生息場モデルとこうした多様性にかかわる総合化もHabitat Hydraulicsの次のターゲットである。

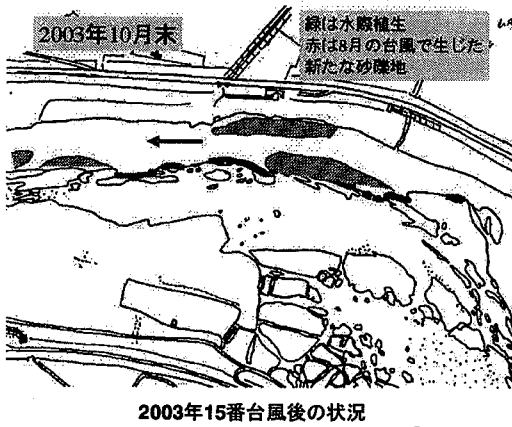


図-6 水際植生がチドリ類の採餌行動を阻害する効果(松原)

複数種からなる生物相互作用の系を想定するには、まだまだ生態学研究者から引き出さねばならない知見は多い。そのひとつが、食物網にかかわるところである。

いずれにせよ、生息場は、河道動態がもつ生態系へのサービスということになる。

(2) 生体量動態(Biomass dynamics)

生息適性の評価は、せいぜい生息ポテンシャルを示すだけで、現実に生態系の活性を示すのはBiomass(生体量)というべきだろう。

Biomassにかかわる議論において汎用される手法は、Population Dynamicsと呼ばれる数値モデルで、古典的な個体数動態モデルとしてロジスティック方程式(増殖・死滅モデル)による表現がある。実は、河道動態に関連して議論されてきた植生繁茂動態モデルもこの範疇にはいる。そこでは増殖率と破壊頻度が動態を表現するパラメータである。一方、付着藻類増殖モデルなどでは、増殖率(剥離率)と環境容量がパラメータとして持ち込まれる。そして、増殖率や環境容量が水理諸量と関係づけられ(図-6参照)、PHABSIMモデルとの連成で、たとえば藻類の時空間繁殖過程が記述できる。

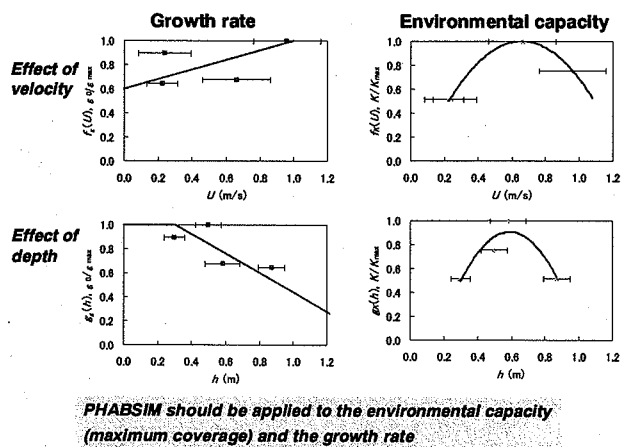


図-6 付着藻類の環境容量・増殖率と水量の関係

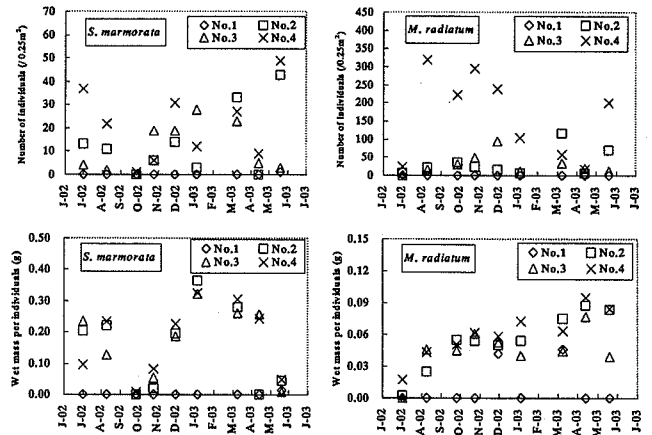


図-7 ヒゲナガカワトビケラ(*S. marmorata*)とオオシマトビケラ(*M. radiatum*)の年間個体群変動(上:個体数変化,下:1個体あたりの平均湿潤重量の変化)

付着藻類などでは個々の生体の成長と個体数の増殖とを区別せず生体量動態として扱われたが、個体の成長と個体数の増殖は一般には別のメカニズムで行われるので、これらを別々に扱うことがより一般的なやり方といえる。たとえば、図-7は矢作川中流域で調査されたヒゲナガカワトビケラ(*S. marmorata*)とオオシマトビケラ(*M. radiatum*)の個体数変化と1個体当たりの成長である(田代)。ヒゲナガカワトビケラ個体群では2回のピーク、オオシマトビケラ個体群では1回のピークが確認され、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。個体重量の変化はほぼ同様であるが、個体数変化は攪乱などに影響されてばらつくため、これによって生態量動態が決まる。

こうした成長・増殖は摂餌に支えられており、餌生物の生体量動態と密接にかかわっている。モデルとしても、食物網にある複数の種からなる生態系を想定して議論することが必要になる(これに対し、(1)で複数種を対応する必要性が指摘されたのはむしろ場の占有に対して)。また、植物や藻類では栄養塩の取り込みが重要で、その意味では物理場としての河道だけでなく、水質や生元素の輸送・変化過程との関連での議論が必要となる。

(3) 生態系サービス(Ecosystem service)

河川景観に応じてそれを生息場とする生物が活動を展開し、それらが生態系を構成する。すなわち、上記のアプローチによって、河道においてさまざまな景観が形成され、それぞれの景観に応じて、生息場として利用され、生体量の時空間分布が決まる。生態学的視点では、この状態の「生物多様性」が高いか低いという視点で、河川生態系の健全性が評価されるのかもしれない。この視点についても、何らかの工学的アプローチが可能であろうが、ここでは後述のように、より生態系の保全・再生戦略に結びつくと推量される「生態系のサービス」という視点での評価について述べる。

ここでは、河川のある類型景観がいくつかの生物に生息場を提供しそこで生物活動が営まれることによる生態系の「サービス」について考える。

たとえば、図-8は淀川支川木津川の複数地点での水質変化を示す。水質項目は硝酸イオン濃度(図の上段)と塩化物イオン濃度(下段)で、前者は夏季に著しい減少が認められる一方、後者には明確な季節変動は認められない。前者は生化学作用を受ける可能性があるイオンで、それが夏季に低下しているのは、活発な生物作用(脱窒)が、砂州区間の伏流通過時におこなわれているものと推測した。こうした仮説にもとづいて、砂州のさまざまな「類型景観」(Textureの部分)でどのような現象が生じているかを評価しようとする研究が進行している。すなわち類型景観ごとに単位面積当たりの生態系サービス(この例では、窒素除去による水質改善)を評価しようとしている。それが可能になると、類型景観ごとのHabitat特性が知られ、そこでの生体量動態が明らかになり、生態系サービスが定量的に評価されることになる。これは砂州における類型景観の保全・再生、ひいては本来の砂州景観の保全が、従来の高エネルギー投入型の環境保全をどれだけ代替できるか、生態系保全による生態系サービスの最効率化というかたちで意義づけられることになる。

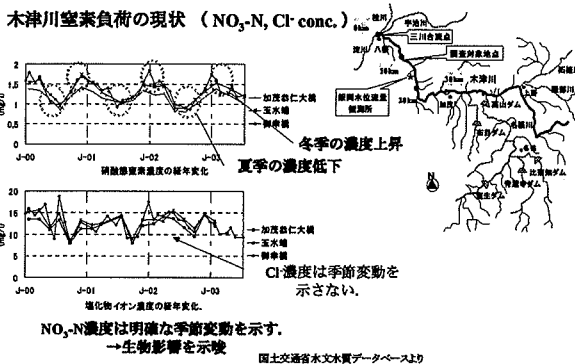


図-8 木津川の水質変化

こうした砂州の生態系サービスは、次のようなさまざまな素過程にもとづいている。基本となるのは、瀬・淵構造を通過する表流水の水位差が駆動する砂州内伏流によるもの。窒素に着目すれば、伏流過程においては、微生物作用によって好気的環境で硝化、嫌気的環境で脱窒が期待される。また、伏流流入場所では物理的なフィルタリングによって流下POM(粒状体有機物)が捕捉される。窒素の輸送・変化過程は硝酸塩イオン濃度で測れるが、確実に硝化・脱窒が起こっているかどうかの判定には窒素の安定同位体比も調べられる。図-9は、両項目の測定により、硝化・脱窒といった生化学作用と、異なる供給源からの硝酸塩の溶出・混合が分別されることを示している。表層からの溶出・混合は、冠水時や降雨時の鉛直浸透流れによっておこなわれる。その供給源である栄養塩ストックは、洪水時に砂州上に捕捉・備蓄されたもの

(吸着された栄養塩やPOM(粒状体有機物)である。その捕捉は表層のTextureに依存しており、とくに植生はその捕捉に大きな役割を果たす。そのプロセスはまさに水工学が扱う対象である。また砂州上の植物の枯死したものの有有機物が無機化したものもストックとなる。

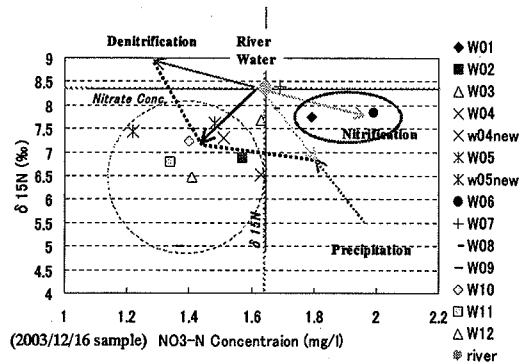


図-9 伏流過程での硝化・脱窒と溶出・混合

伏流に伴う水質変化は、重要な生態系サービスで、河道内の砂州、感潮域で干満によって浸透流・表面流の交換が盛んな干潟、さらには氾濫原の水田下層などでの脱窒作用は、こうした類型景観の河川水系・流域での生態系サービスのゆえに保全される対象となるのである。

砂河川砂州に話を戻すと、先述の伏流入り口でのフィルタリングは、洪水時の攪乱によって更新されて始めて機能が持続的であることに注意する必要がある。また、図-2に示した砂州のTextureからみると、伏流は単純でなく、ひとつの砂州内でもたまり列などで表面流に変態する。たまりでは、藻類の増殖といったかたちで硝酸塩など栄養塩が生物体に取り込まれて水質変化を担う。すなわち、藻類のbiomass dynamicsと関連させた生元素の輸送過程も大きなポイントである。また扱える生元素の種類が限られていても(たとえば窒素しか追跡できなくとも)、生体固有の生元素の構成比から窒素の収支と生体量動態を連成して取り扱うことは可能である。なお、たまりは、出水時に水質・有機物とも攪乱更新(reset)され、Durationが大きな要素となることも注意したい。

このように、砂州の生元素輸送・変化過程における生態系サービスは、砂州を構成するサブ砂州スケール類型景観あるいはさまざまなTextureと関連させたさまざまな素過程によっており、それらの面積比率や配列パターンによってレベルが異なる。水・物質循環、生息場、生体量動態のモデル化によって、砂州河川のStructure, Texture, Duration要素との関連で生態系サービスの評価が定量化されつつあるとよい。

4. 河川生態系の保全と再生

人間活動の持続性を目指して、安全、利便(資源利用)、

環境を整合させながら国土管理していくことが重要であることは言うまでもない。すでに述べたように、それを考える単位としての「流域」は重要な概念で、さらにその実現に向けてその軸である河川でその整合をはかることが次の理由で第一段階となる。水災については河川を軸とする治水が効果的かつそれを補完する形で流域対応を考えるのが筋道だっており、水資源利用も、表面流利用によって公平性が確保される。生態系保全に代表される自然環境保全も、河川が山と海をつなぐもので、生態系が先にも述べたように水循環、流砂系、物質輸送・変化過程の総体(Integrity)であることを考えると、その軸である河川でその保全を考えるのが根本的である。

逆に、人間活動というインパクトへの応答として、水循環、流砂系、物質輸送・変化過程というシステムが変質(degradation)を受けることに気づいたなかで、生態系の変質がその「鏡」であると認識される。

前章までにその生態系の質を定量評価する試みが進んでいることを述べた。こうした定量評価値があれば、図-10に示すように、人間の流域へのインパクトによってそれがどのように変質してきたかをたどることができる。こうした変質をできるだけ抑制しようとするのが「保全」(Conservation)で、大きなインパクトとなる人間の営為(事業)に対してはあらかじめアセスメント(環境影響の回避・低減・代償)を行うことになってきた。生息場だけで判断してきた生態系アセスも前章で述べたように生体量動態、生態系サービスと総合化されたかたちでのそれに改良されるのも遠い先ではない。

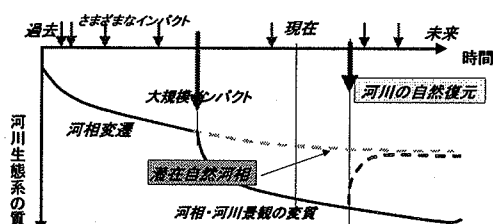


図-10 生態系の変質とアセスメントおよび自然復元

また、これまでのようにアセスメントが十分でなかったり、アセスメント手段・手法が不幸にも十分な対応でなかった場合には、生態系の質の劣化が進む。こうした状況が検知されれば、何らかの対策でもとの生態系の質を取戻す努力(復元, Restoration)がとられることになる。このときにも、生息場の復元、生体量確保、生態系サービス機能の回復(の三位一体)で総合的な生態系復元が探られる。しかしながら、現在のところ、生息場への対応にとどまっている。すなわち河川の生態系を支える機能(Ecological service)を整えるという視点で、このレベルの復元をRehabilitationと呼ぶ場合もある。総合的な自然復元が難しいのは生体量制御になかなか踏み込めないこともあるが、予測(推定)やモニタリングなどで

は積極的にこの側面に足を踏み入れたい。また生態系サービスは生息場と生体量の両軸が評価されて定まるものであるが、生息場の議論と生体量動態推定とで生態系サービスポテンシャルなどは予測できるようにしたい。

上述は、個々の事業を対象としたもので、こういう設定では、かなり具体的に目標が設定される。すなわち、事業というインパクトへのレスポンスとしての影響の緩和である。しかしながら、流域の多くの部分は長い人間活動の歴史の中で、複合的なインパクトに対する総合的レスポンスとして変質し、その「鏡」である生態系が変質している。それに気づいて、「自然再生」が目論まれるようになってきている。河川整備・管理においても複合的なインパクトの中での自然環境保全や自然再生を目的とする事業がなされるようになってきた。とくに、現在、河川整備の基本方針や整備計画が議論されている中で、明確な数値目標を持つ治水や利水(20年に一度の洪水に対する治水安全度や10年に1度の渇水に対する利水安全度など)に比べ、3本柱に並んだはずの「環境」に明確な目的のないことが指摘されている。その大きな原因は生態系の健全さを示す指標として治水・利水に匹敵するものがなかったためで、本文で提示したような生態系サービスを加えた指標化はこの問題を克服する方向を示している。

4. あとがき

本文では、河川生態系の評価が最近の水工学の歩みの中でどのような方向で明らかにされてきているか、また、それを受けて、河川・流域管理における保全・再生を考える上で、その成果をどのように活用していけばいいのか、あるいは活用するためになお克服すべき課題はどこかを提示しようとした。テーマが難題で十分に答えることはできなかったが、せめて本文がこのテーマについて多くの研究者が議論され、あるいは果敢に取り組みれるときの材料になれば幸いであるし、それは水工学の活性・発展につながるものと確信する。

参考文献

- 1) <http://www.eccsj.com/>
- 2) <http://www.rfc.or.jp/sentai/seitai.html>
- 3) <http://www.wec.or.jp/fyouhou/innkai/sentai/seitai.html>
- 4) Vannote, R.L. et al. (1980) The river continuum concept, *Canadian Jour. Fisheries & Aquatic Sciences*, 37, 130-137.
- 5) Nestler, J.M. et al. (1989) Instream habitat modeling techniques, *Alternatives in Regulated River Management*, edited by J.A. Gore & G.E. Petts, CDC Press.

*なお、著者がかかわった研究については(共著論文のみならず、ほかの共同研究では人名のみ記して)、参考文献を省略した。

(2006. 4. 6 受付)