

水工学シリーズ04-A-8

河川工学が生態学と連携して描く河川環境目標

名古屋大学大学院工学研究科 教授

辻 本 哲 郎

土木学会
水工学委員会・海岸工学委員会
2004年7月

河川工学が生態学と連携して描く河川環境目標

Indices and Target for River-Landscape Conservation Postulated through Collaborative Study between River Hydraulics and Ecology

辻 本 哲 郎
Tetsuro TSUJIMOTO

1. 序論

1997年わが国では河川法が改正され、治水・利水に加えて環境も河川整備・管理の目的に加えられ、とくに環境面では生態系保全の視点が強調された。治水ではたとえば100年に一度の降雨に対し水災安全度を確保する、利水では10年に一度の渇水を目標とするなど、整備目標が明確になっているが、環境とくに生態系保全の視点で目標が明確化されないため、現在逐次進められている河川整備基本方針のなかでも情緒的な表現にとどまっていたり、単なる配慮事項の域を出ないでいる。これは、保全すべき生態系を明確に表現する指標が確立されていず、またその指標に基づいた数値目標が明確化されていないことがその原因としてあげられる。同年に制定された環境影響評価法においても、新しく生態系アセスメントを実施するに当たって、事業前の環境を損なわないという目標はあっても、それを測る指標が決して明確でないかまたは不十分であると感じられる。また2002年自然再生法が制定され、自然再生事業がスタートしているが、ここにおいてはさらに、生態系保全の目標を適切な指標から設定することがますます重要となって来よう。

河川法改正に先んじて、河川水辺の国勢調査のデータが蓄積され、また河川生態学術研究会(委員長:大島康行(財)自然環境研究センター理事長(2003 まで)、現在山岸哲山階鳥類研究所長)をはじめ、いくつかの河川生態にかかわる研究が活発に行われた。河川工学と生態学の連携が、やはり97年に法制化され生態系を含んだアセスメントになった環境影響評価への貢献を含め河川生態系保全を支援するものと期待され、事実こうした河川工学・生態学の連携はその成果を蓄積してきた。こうした流れについては、水工学に関する夏期講習会のシリーズで著者が解説してきたところでもあるが(2000)、しかしながら、上記に述べたような、生態系記述の指標を明確にしそれに基づいて目標を議論するといった視点の議論に対しては、必ずしもその成果を結実させてきたとは言いがたい。

本稿では、著者が、河川生態学術研究でかかわってきた木津川グループの第1フェイズの研究成果(2003)とそれにもとづいてワーキンググループでおこなった研究の第2フェイズの向かっての議論をもとに、生物・生態、陸水、水文・水理学の共同研究の学際構築されてきた「河川生態工学」が、河川(あるいは流域)整備・管理のなかでの目標設定とその手法にその成果をどのように生かせるかについて議論する。ここでの議論で例にとりあげるのは、木津川河川生態学術研究グループの研究対象である淀川水系木津川下流部の交互砂州が形成される砂河川のセグメントである。このセグメントにおいて、1998年以来、その典型リーチとして選ばれた淀川への合流点から12km地点の砂州を対象とした共同研究が進められてきた(著者が河川技術論文集でその意義と展開については紹介してきた(2001,2002)、2003年12月に第1フェイズの成果が「木津川の総合研究—京田辺地区を中心として」としてとりまとめられた)。一方、国土交通省淀川河川事務所・流域委員会では、住民や学識者の意見も参考に木津川的环境目標をとりまとめており、木津川のこのセグメントにおいては「砂州景観の保全」を謳っている(淀川環境委員会パンフレット、2003)。これは、直感的・情緒的に理解しやすいが、これをどのように河川生態学術の成果から客観的に位置づけ、またそこからどのように施策をさぐるかについては、やはり、指標化に基づいた目標の定量化が出来ていないため、きわめて不

十分な状況といつてよい。そこがこのテーマを取り上げる動機でもある。

2. 河川生態系の基本的理解

河川生態を議論するときに、それがさまざまなスケールの複合として成立していることの認識がまず重要である。これは、実際には流域の他の機能(治水・利水)を議論するときにも実は重要であるのだが、すなわち、流域～水系～セグメント～リーチといったスケールの階層性(図1参照)である。リーチはたとえば、砂州が卓越する河川区域(セグメント)では、砂州一波長分を含むから、必然的に伴う瀬・淵を2ペア含む。砂州の一つ一つの特徴はともかく、統計的に同一母集団を想定する。砂州セグメントでは砂州スケールがリーチスケールであり、ひとつのまとまりのある景観(landscape)である。サブ砂州スケール(砂州よりも小さい空間スケール)のなかにもさまざまな典型的な景観がある(サブ砂州スケール類型景観)。統計的母集団という視点で同一でも個性のあるいくつかの砂州が配置されたセグメントが、メソスケールの景観を作っているし、それは河道だけでなくその周辺も景観に取り込んでいる。沖積河道の氾濫原の自然堤防やその背後湿地などである。

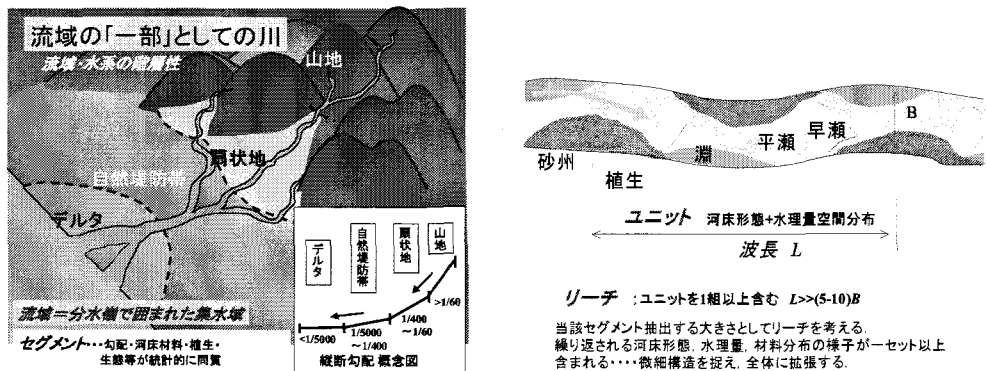


図1 河川・流域を観るスケールの階層性

こうした階層性を持つ「景観」の塊として河川・流域を理解し、とくに「河川整備・管理」としてここではセグメントのスケールで「環境目標」を考えることを想定して、スケールのスライドダウン(構成する小さなスケールで構造を議論)・アップ(小さなスケールでの効果を総合化)を考える。たとえば、砂州セグメントの「目標景観」を考えるにあたっては、その構成要素の砂州のスケールがどのようなサブスケールの類型景観から構成されておりそれらがどのような役割を果たしているかに注目することが第1で、それによって個々の砂州のセグメントにおける役割が認識できるだろう。そしてセグメントが水系(上流から下流まで)のなかで果たす役割を認識し、水系の流域での役割を認識するという手法である。セグメントの「環境目標」は、それより小さいスケールの類型景観の役割を制御するとともに、セグメントの目標が水系・流域の目標の中で果たす位置づけを考えることでもある。

写真1は今回の対象である木津川流域(図-1参照)とその中に占める対象セグメント(0~20km)である。平均勾配は1/1150、平均年最大流量は1800m³/秒、平均川幅300m程度で河床材料は2~5mmの砂である。このセグメントで木津川河川生態学術研究会が選んだリーチは12km付近の砂州で、その航空写真を図3に示す。航空写真に見られるように、砂州の中にはさまざまなサブ砂州スケール類型景観がある。この景観の基盤は、河川地形や氾濫原地形で、流域の表層地形や水文特性に依存する流況と土砂流出現象に起因するものである。このリーチでは、たとえば、本流域の瀬と淵、水際、またわんど、たまり(列)、二次流路などの一時水域

(temporary water), 裸地(細粒マウンドや粗粒化帯など), 草地・灌木林・高木林などの植生域(水域・陸域, 表層粒度, 微地形, 植生の有無), それに加えて伏流域(hyporheic zone)が, サブ砂州スケール類型景観としてあげられる. 図の下方に示すように, この河道域では1年に数回 3m 以上の水位上昇があり, 砂州のかなりの陸域が冠水, 地形変化や分級などの移動床現象や植生の破壊が見られる.

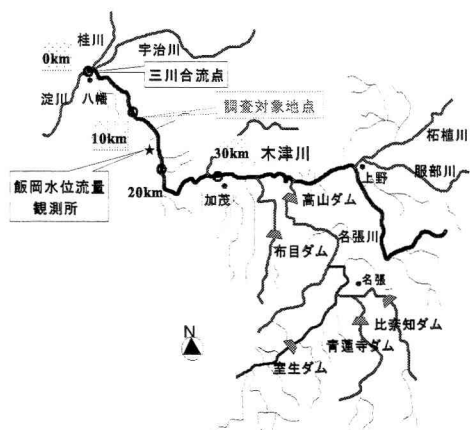


図2 木津川流域

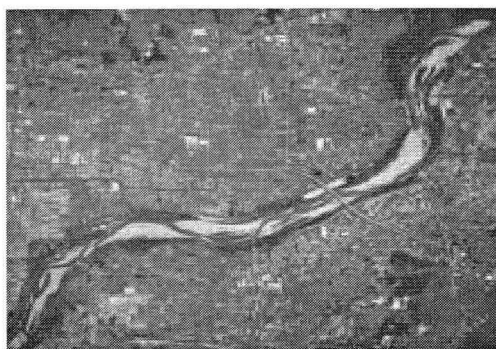


写真1 木津川下流部交互砂州のセグメント

砂州地形のさまざまな地形要素=生息場

temporary!

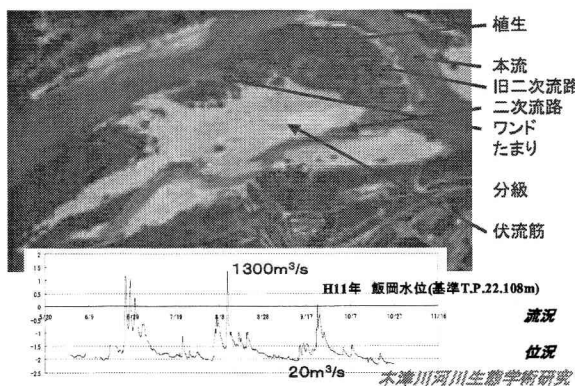


図3 木津川河川生態研究の研究サイトとなった砂州

こうした基盤の上に, それらに応じて生態系が作られ「景観」を呈している. これを把握することが重要である. 生態系は生物のさまざまな種・群集の「生息場」(habitat)としてまず認識される. それらが持続的(sustainability)であるためには, さまざまな種の生物の生活史に応じて要求される場と食物連鎖でかかわるさまざまな生物の存在(bio-diversity)が必要となる. 言い換えれば, 無機的環境としての habitat と食物連鎖・競争・共生といった生物相互作用の側面をあわせもつシステムと理解される. すなわち, 河川生態系にあっては, さまざまな類型景観からなる河道がさまざまな種・群集に生息場を提供し, さまざまな種・群集が生物相互作用系を作り上げているとみられる. こうした生息場提供が「河道」(地形・水流・流砂・植生からなる相互作用系)の役割となる. これを, 概略的に描いたものが図4である. また, 環境影響評価法のもとでのアセス

メント技術としては、生息場の上に形成される生物相互作用系をモデルとして想定するのが難しい現在、(1)食物連鎖の上位性、(2)対象環境での典型性、(3)生息場の特殊性および(4)生活史上の移動性から複数の主・群集を選んでのハビタートの議論に帰結することを推奨している。これらのハビタートの確保が持続性を保障するとの仮説に立っていると見るべきである。

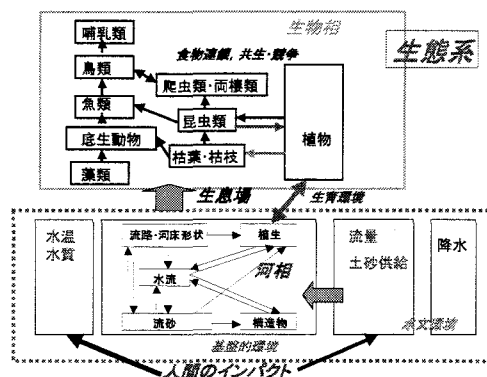


図4 河相が提供する生息場とその上の生物相互作用からなる生態系

一方、このような物理・化学系と生物相互作用から成り立つ生態系は、翻って、河道の無機環境にも影響を及ぼしている(生態系のサービス)。地形形成や水質形成がそれである。この両者を的確に把握できると、たとえば、木津川における砂州景観はさまざまな種・群集の生物系に生息場を提供し、逆にそこに生息する生物群集は地形・水質形成を通して人間活動に影響する。こうした生態系のサービスの評価は保全戦略を前進させるものである。

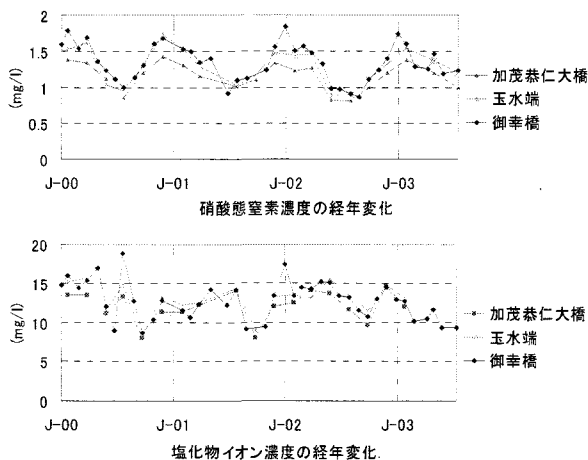


図5 木津川水質の季節変化(Jは各年の1月を示す)

たとえば、木津川下流部の硝酸態窒素濃度の経年変化(図5に国土交通省水質データベースをまとめた、加茂恭仁大橋 30km, 玉水橋 16km, 御幸橋 2km)から、生態系の活動が活発な夏季における顕著な現象が傾向として見て取れる(脱窒過程が示唆される)。また、木津川のこの区間では環境負荷の高い支川流入にもかか

わらず、流程方向の濃度上昇はさほど著しくないとはいえる。これと対照的に(生物作用を受けない)塩化物イオン濃度の季節変化に顕著な変化が見られない。このように、生態系の働きでの水質保全が期待される。こうしたものを「生態系の河川へのサービス」と見、ハビタート提供を「河川の生物群集へのサービス」と見て、両者を評価することによって、「生態系を保全する価値」を評価しようとすることを提案する。このように河川と生態系を「互恵」の関係に見ようとするのがこの考え方の背景である。

3. 河川生態系の基盤としての生息場

生態系の基盤として河川の物理構造についてみてみよう。河川地形・氾濫原地形が流域の表層地質に支配されていること(たとえば木津川や矢作川の流域域は風化した花崗岩地帯で砂の生産が極めて大きく、河床材料に占める砂の割合が大きい)。河床材料は粒度によって、巨石、大礫、中礫、細礫、砂、シルト、粘土と区分されるほか、それが土石流、掃流砂、浮遊砂などの運動形態で運搬されること、また河床との交換の有無すなわち *bed material load* か *wash load* かの区分も重要な視点である。こうした移動床過程によって河道特性としてさまざまな流路形態、河床形態が形成され、リーチ内の景観をセグメントごとに特徴付けている。

リーチにあつては生態系基盤の観点からは、水域・陸域区分が基本であるが、本流、水際、一時水域(二次流路、たまり、わんど)、湿地、裸地、草地、樹林化域などがさまざまな時間スケールで変動していることが特徴で、これらは単に冠水によって変動したり洪水期の地形変化で河道地形自身が変化するものなど、さまざまな時間スケールの変動にさらされている

もうひとつ大事な場は、伏流が活発な領域(伏流域)で水の流量そのものの貢献は(扇状地におけるきわめて低い流量のとき意外は)決して大きくないが、伏流過程での物質輸送・変化や植物生育への水分・栄養分補給の視点で、さらに最近では伏流場の間隙域に生息する生物も注目されている(間隙性生物, *hypohreco*)。

さて、河道の物理特性は、河道相互作用系の「動的平衡」に支配されているが、その境界条件は流量と供給土砂量である。流量は流況(日流量で見たもの)、洪水(時間流量で見たもの)に分けて考えるのがよい。降水が流出過程を経て出現するものであるが、現実には洪水調節、利水補給などさまざまな形の人的影響を受けたものである。土砂供給も大規模な地震・豪雨での崩壊地での生産量に依存するが、現実には砂防事業や貯水ダムによる遮断がある。

こうした背景の中でリーチレベルでの物理基盤の指標としては以下のようにとりまとめられる。

水域 : 流速, 水深, 河床材料(サイズや構造)

陸域 : 礫・砂(←分級 *fluvial sorting*)、土壌(水分保有量)

比高(標高, 地下水位, 冠水頻度)、縦・横断勾配、植生

間隙域: 透水係数, 材料(骨格, 微細粒子)、地下水位(冠水条件)、鉛直浸透・蒸発散

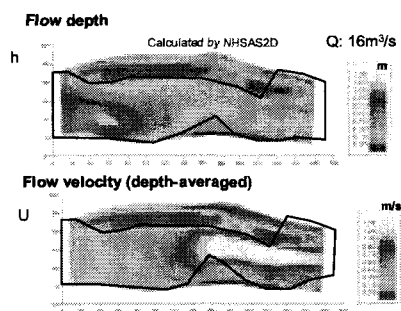


図6 瀬・淵構造での流速・水深の空間分布

浮遊物、堆積物の輸送(集散)・貯留などは餌環境を支配する物理作用である。また、化学基盤である水質にはさまざまな指標があるし、食物網など生物作用もハビタートの議論には欠かせない。

たとえば上記したように、水域では水深・流速と河床材料(底質)の性質(粒径、粒度構成、浮石・はまり石などの堆積構造)がハビタートを規定している。たとえば、図6は矢作川中流域での例である(水深平均2次元数値解析結果。図の線で囲まれた領域では現地計測で計算結果を検証し、数値解析でさまざまな流量での水深・流速分布予測を保証している)。この3者は、決して独立ではないがといって無関係でもない。さまざまな場(微視的類型型景観)を扱うときにはむしろ独立とみてよい。しかしながら類型景観のグループごとに相關しており、無作為メッシュ分割(一般の PHABSIM などではこの方法が普通)より微視的類型景観(指標の領域の組み合わせのグループ)分割のほうが適切な場合も多い。砂州河川の代表的なリーチでは先述したようなサブ砂州スケール類型景観がこれに当たる。すなわち、本流域の瀬と淵、水際、また、わんど、たまり(列)、二次流路などの一時水域(temporary water)、裸地(細粒マウンドや粗粒化帯など)、草地・灌木林・高木林などの植生域(水域・陸域、表層粒度、微地形、植生の有無)、それに加えて伏流域(hyporheic zone)をあげることができる。木津川下流での河川生態学術研究では、細砂マウンドでのアリジゴク(クロコウスバカゲロウ *Hagenomyia micans* の幼虫)の営巣(松良)、礫床のテクスチャに応じたチドリ類(コチドリ *Charadrius placidus*、イカルチドリ *Charadrius dubius*、シロチドリ *Charadrius alexandrius japonensis Deignan*)の営巣(山岸・松原)、魚類による一時水域の洪水時避難場あるいは産卵場、稚仔魚の生育場としての利用、二次流路(浅い水域)での付着藻類繁茂が注目されている。また、水際域での POM(particulate organic matter)の補足、伏流域の間隙性生物(hypohreos)が注目された。液体窒素を砂州に打ち込まれたスチールパイプに注ぐことで間隙域の土壌、水分・水質、生物を同時に凍結させてサンプリングする方法も試みられた(竹門)。

無作為メッシュでさまざまな流量に対して現景観での水深・流速分布などを水理解析で予測することは可能であるので、これおうまく流量による類型景観区分の変化に生かす工夫が必要である。

物理指標の分布をもとに、選好曲線(preference curve)を用いて生息適性(HSI, Habitat Suitability Index)に変換しようとするのが、PHABSIM(Physical Habitat Simulation)あるいはHEP(Habitat Evaluation Procedure)と呼ばれる手法である。流速・水深および底質粒径を物理指標として用いた PHABSIM によって、生息適性分布は大雑把には予測できる。この手法においては、選好曲線の作成、ここの指標に対する評価値を総合化した評価値(CSI)を求める方法などにさらに工夫が必要とされている。指標については、上記に加え、底質の攪乱頻度が支配的との指摘もされている。

PHABSIM はこのように生息場適性に付いて微視的環境が総合化(空間積分されて)されて、リーチやセグメントのスケールでの生息適性を定量化するのに使われる。さらに、その評価値が流量に応じてどのように変化するかを推定し、環境保全に必要な流量、あるいは最適な流量を議論する手法は、IFIM(Instream Flow Incremental Methodology)と呼ぶ(特別なツールやフレームワークを規定したもののみをこう呼ぶ場合があるが、ここでは HSI あるいは CSI を議論しそれらや空間平均値(WUA, Weighted Usable Area)であらわされる生息適性値が流量によってどのように変化するかを見るものというように定義しよう。このようにツール、フレームワークを限定しないほうがこのラインでの今後の発展が望めるからである。

PHABSIM の手法で、各サブ砂州スケール類型景観がどのように特徴付けられ空間的に区分されるかという方法も今後きちんと整理するのがよいだろう。その上で、サブ砂州スケール類型景観ごとの生息適正評価値 X が評価できると、サブ砂州スケール類型景観の面積率が、流量によってどのように変化し、またその占有率で生息適性総合評価値がどう変わるかや、砂州ごとの生息適性評価が(微小メッシュごとの空間積分に比べて)容易にできることになる(省力化でもあるし説明性も向上)。

さて、物理指標ごとの、あるいは類型景観ごとの生息適性評価は個々の種・群集に対してなされるが、この情報から複数の種・群集で構成される生態系の評価にもっていくところに難しさが残っている。その克服のひとつの方向性は法アセスメントの技術マニュアルで示唆された注目種の考え方である。注目種に対して

生息的適性が確保されることが目標となる。生態系の保全目標は多様性を通しての持続性で、注目種はその観点で選ばれたはずである。もうひとつは、生態系はおびただしい主・群集からなるにしても保全対象に付いて特徴が概括的に知られれば、それを構成する単純化されたモデル生態系を描くことである。主・群集数は限られていてもその景観を代表し、しかも、食物連鎖、競争・共生の視点で相互作用の持った主・群集から形成されるもので代表する。たとえば、アーマー化が生じて変質した(あるいは変質が予想される)場で想定された例は図7に示すとおりである。これは、矢作川のダム下流の生態系変質をアユを象徴としてみたときに使われたモデル生態系で、ダムによる土砂供給激減がもたらす河床低下・アーマー化、洪水強度減少の中での底質攪乱機会減少による非糸状性藻類・糸状藻類の盛衰、付着藻類を餌として争うアユ・オイカワ (*Plecoglossus altivelis altivelis*, *Zacco platypus*)、アーマー化後の河床空隙で競争するヒゲナガカワトビケラ (*Stenopsyche*) とオオシマトビケラ (*Macrostemum radiatum*) の幼虫とそれによる底質固結化など相互作用の強いシステムを生態系もモデルとし、人間のインパクトによる変化を見るというアプローチである。

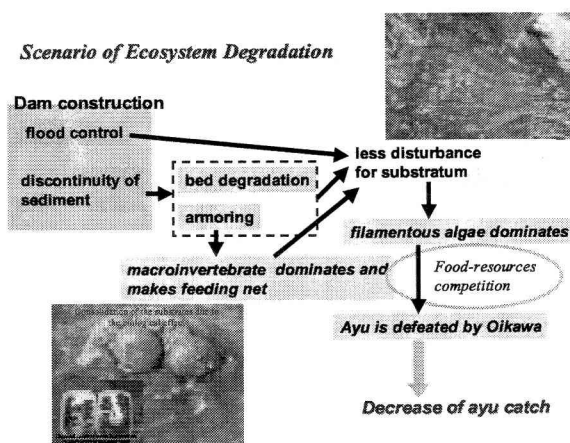


図7 相互作用を重視したモデル生態系の例(矢作川中流域)

4. 生息場の議論から生態系の議論へ

生息場の議論は生息適性すなわち生息できるポテンシャルを推定するものであった。生息適性は場の特性で規定されそれゆえ空間の関数である。もっとも、流量が変動するためそれに応じて生息適性も変動するが効した時間変化特性は先述の IFIM 手法で記述できる。これは IFIM の適正流量あるいは最小流量の議論での役割とともに、流況と生活史を関連させた議論に使える利点である。

一方、生態系の評価は現実には、むしろ生息状況で測れよう。生息状況は、個体数変化とここの個体の成長あるいはその積である生物量(biomass)と対応しており、これらはしばしば数理生態学で議論される Population dynamics で記述される。

生息適性と生息状況はしばしば一致しない。それは生息適性の議論が物理的選好性だけによっており、餌環境や、生活上必要な場所(産卵、孵化、稚仔魚の生育場、採餌場、避難場など)との連結が確保されているか否かの議論を欠いていたからといえる(図8は生活上必要とするさまざまな場の連結性を議論した例で、行動範囲や遊泳能力の議論がされる)。もうひとつは、物理環境はしばしば定常でなく、しかも生物の生息応答に時間を要する場合のあることである。生息場状況の変化は、個体成長、個体数変化とも、時間的

変化率を左辺にもつ微分方程式で記述される．右辺には，増殖，死滅，移入，捕食などの項がある．最も簡単な，増殖・死滅タイプの population dynamics は次式で書ける．

$$\frac{dN}{dt} = \varepsilon N \left(1 - \frac{N}{K} \right) \quad (1)$$

ここに N =個体数(または個体重量)， K =個体数(個体重量)に対する環境容量， ε =成長速度である．

世代交代を必要とする変化では，世代交代の遅い大型生物ほど応答遅れが大きい．一方，移入などは移動能力が大きいものが早く，移動しないものやきわめて遅いものは増殖にのみ依存する．たとえば，魚類は移動によってサブリーチスケールでの生息適性変化に個体数は短時間に応答するが，大きな場では個体数変化はない．一方，付着性藻類ではほとんど増殖・死滅過程で対応するがその応答は魚類の移動応答に対しては遅いが，魚類の増殖応答に比べると早い．短時間スケールで，河道変化への応答(河川改修の影響や多自然型工法の効果を議論する場合)は魚類で早く，付着藻類や底生生物では遅い．前者は生息場適性の議論が生息状況の議論そのものにかわる．一方，後者では生息場で，たとえば，増殖率や環境容量が生息場すなわち場の物理環境特性に支配されるのであって(図9にカワシオグサ *Cladophora glomerata* での例を示す)，生息状況はそれぞれの場での Population Dynamics の議論(PDM=Population dynamic modeling)を経てしかできない．

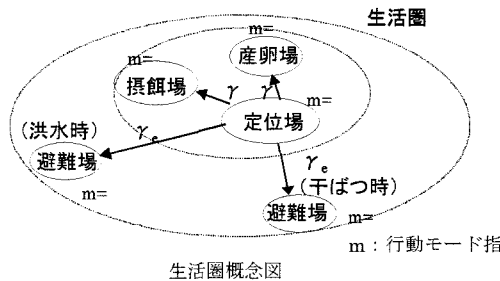


図8 生活上の必要な生息場の連結を考えた生活圏モデル

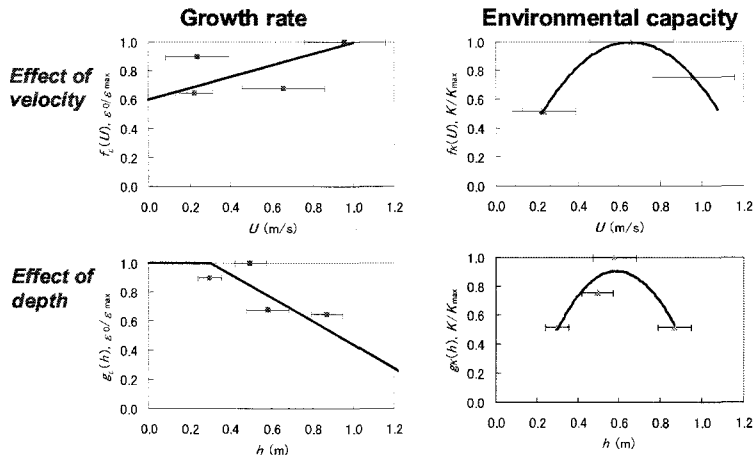


図9 PDM パラメータの生息場依存性

河川工学の分野でもすでに意識しないで PDM は用いられている。河原の植生(ヤナギ林)の拡大過程のシミュレーションがそれである。樹林化の過程においては個々の成長は樹高・幹径増加であり、個体数増加はしばしば植生域拡大とみなされる。植生域拡大と洪水時の破壊(植生の影響で破壊力は減衰)のかねあわせで植生域の拡大過程が記述されている。残存する樹木は生長し、植生域拡大とともに破壊に対する抵抗力をつけるシナリオである。図 10 は手取川の観測例とシミュレーション結果である。

PDM と生息場解析(PHABSIM)の結合が今後の方向として期待される。魚類でも河川改修後、多自然型工法後の生息場変化は PHABSIM で表現できても、セグメントレベルでの生息状況には世代交代を含めた議論が必要である。また付着藻類では、洪水後の過渡期には、生息密度の代償の場所的逆転すら生じる。

なお、PDM においては食物網(競争・共生)を考えることができ、先述のモデル生態系を構成する複数の種に PDM を適用する(連立微分方程式系)ことで、本来生態系保全の目標であった多様性や持続性の議論に進むことが期待される。

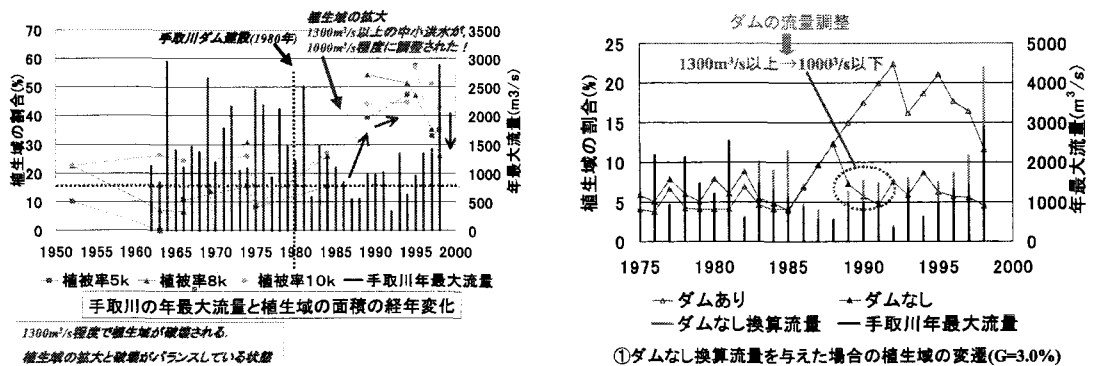


図 10 洪水調節による年最大流量の減少による植生繁茂の実績とシミュレーションによる洪水調節効果の評価

PDM と PHABSIM の結合によってさまざまな生物種・群集の生息状況が記述される。ここにおいてもどのような種構成で生態系をモデル化するか、総合評価をどうするかなどの課題がある。しかし多様性が持続性を支える仕組みや、そうした多様性の指標の開発(従来の多様性指数(Shannon-Wiener の多様性指数(式(2))や Simpson の多様性指数(式(3)))がどのような意味を持っているかを明らかにすることも含めて)への発展が期待される。

$$H = -\sum_{i=1}^S (p_i \log_2 p_i) \quad (2)$$

$$D = \frac{1}{\sum_{i=1}^S p_i} \quad (3)$$

ここに、ここで、 $p_i = n_i/N$, n_i =第 i 種の個体数, N =総個体数, S =種の総数である。

5. 生態系保全と復元

生態系保全や復元の議論は、人間活動が生態系の変質(ecosystem degradation)をもたらしたり、もたらす恐れのあることにもとづいている。とくに土地改変を含むような事業を行う場合あらかじめこのような変質が生じないようにするのがアセスメントであり、アセスメントに有無にかかわらずこうした変質を監視するモニタリングが必要で、変質が明らかになれば適当な時期にレストレーションが期待される。こうしたモニタリングからレストレーションができる仕組みを事業がフォローアップとして持っていることが重要といえる。

こうした Ecosystem degradation を把握ための指標を考えてみよう。図 10 に示すように、生態系の質は生息場・機能(生態系の役割)の側面と種の豊富さ(richness)・生物多様性(bio-diversity)で測れる。もともとの生態系はその両軸の値とも高い状態であったのが、人的インパクトを受けて両値との低い状況になったのが Ecosystem degradation である。この Ecosystem degradation を何らかに定量表示して時間軸とともに示したのが図 11 である。こうした状況でももとの生態系に戻そうとするのが Restoration であるわけだが、現実には Biodiversity, Richness は操作できない場合が多いので、先にも述べた生態系の側面としての Habitat・機能(サービス)の面の回復を目指す場合が多い。こうした行為は Rehabilitation と呼ぶべきものだろうが、現実には River Restoration と称されるものの内容はほとんどが Rehabilitation で、またそういう方向での行動が現実的に適切であることが多い。

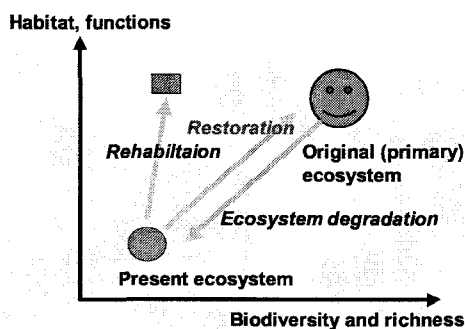


図 10 生態系の状態の表現と変質・復元

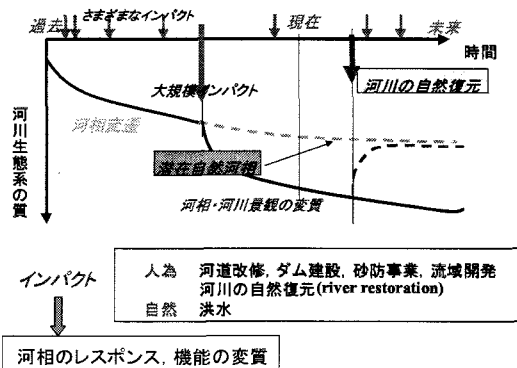


図 11 Ecosystem degradation の進行と復元

このように生態系が把握されていて質の変化が顕在化すると Restoration または Rehabilitation という措置がとられる。この場合は、指標化・定量化が可能となっておれば図 10, 11 にもとづいて比較的明確に目標が描ける。ところが、質の変化が危惧されるときにも「保全計画」が必要となってきた。たとえば、木津川でも、国土交通省淀川河川事務所や環境委員会では「砂州景観の保全」を環境目標として掲げてはいるが、その根拠や具体的目標が必ずしも明らかにされていない。むしろ直感的・情緒的である。今後、価値観が多様に変化する中で、砂州景観の保全といった目標を河川生態学(河川工学と生態学の連携)によってできるだけ客観的に説明でき、治水・利水計画や河川空間利用計画のなかでの生態系保全のポジションを明確にしていける必要がある。

砂州景観保全の意義を河川生態学の視点から意義づけるシナリオは、これまでの議論から次のようである。砂州景観の生態学的役割は互惠、すなわち砂州景観がさまざまな生物に生息場を提供して砂州生態系が形作られ、一方、砂州生態系(物理基盤と生物活動)がたとえば物質循環上の働きをとおして水系・流域への貢献(サービス、たとえば水質浄化)をもたらしている。この互惠機能を定量評価することで砂州景観保全が定量的に

意義づけられるものといえる。

さて、生息場・サービスに付いて、これまでの議論から砂州におけるサブ砂州スケール類型景観がそれぞれのかたちでこれを担っている。各類型景観ごとの役割を明らかにし、ひとつの砂州として、あるいはいくつかの砂州からなるセグメントとしての機能を定量化することが評価シナリオとなる。たとえば、生息場としての役割については、PHABSIM あるいは HEP が、砂州の中のどの部分(サブ砂州スケール類型景観)の働きが大きい(リーチスケール)、さらに砂州スケールでみてどの砂州の役割が大きい(セグメントスケール)を明示する。こうした指標化、モデル化が、サービスについても可能(HGM, Hydrogeomorphic approach, Smith *et al.*, 1995)がその基本的枠組みを暗示している)と考えられ、その方向で砂州の物質循環における役割評価を考えることにした。

すなわち各サブ砂州スケール類型景観 k (その面積割合を A_k で表す) の生息場適性や物質変化における評価を X_j (j はさまざまな機能を表す) であらわすと、それぞれの砂州(ここでは i 番目の砂州とする)の評価値は次のように表される。

$$S_{ij} = \sum_k X_{jk} A_k \quad (4)$$

さまざまな互恵機能が PHABSIM における CSI のように相乗平均によって総合化できるとすると(相乗化平均表示は、どれかの機能がゼロとなると他の機能が生きていても、総合評価がゼロになる点でこうした生態系評価にふさわしいとされる)、次のように表されよう。

$$S_i = \left(\prod_j S_{ij} \right)^{\frac{1}{N}} \quad (5)$$

ここで、 N は考えていく機能の個数である。

6. 河川景観と生態系の変遷・変質

前章で、人的インパクトが河相を変化させ河川生態系が変質し(Ecosystem degradation) そういう状況を踏まえて、保全・復元をどのように考えるかという基本的枠組みを説明したが、本章では現実に河川景観・生態系がどのように変質しているかあるいは予測されるかを木津川の例で見よう。

航空写真と定期横断測量結果(国土交通省淀川河川事務所提供)によって把握された木津川下流の典型的な河道変遷は以下のものである。主たる人的インパクトは、1970 年代の上流域ダム群建設と下流の淀川本川河道掘削である。主として後者が原因で、木津川下流部の河床低下は下流から上流に進行する形で進行し、砂州のなごりとしての陸域と低水路との比高が増大し、おおむね下流から植生化が進行してきている(図 12 参照)。加えて、主として水田利用されていた氾濫原の宅地・市街地化も近年の著しい傾向として見てとれる。

砂州の樹林化については、手取川などの礫床ではカワヤナギを対象としてそのパイオニアとしての領域拡大と洪水による生育地盤の流失による植生域破壊をモデル化してそのプロセスをシミュレーションしたが、木津川砂河川(図 12 参照)ではパイオニア植生はむしろ 1 年生草本であり、草本植生域の定着とその後の樹林化という 2 段階のプロセスを考えるべきである(図 13 参照)。こうした研究は、砂州の河道における平面形との関連や上・下流砂州の植生繁茂状況との関連でどのように変遷していくかの概略を示唆する。また 12km 砂州に着目した地形変遷の分析でも、植生繁茂と畦状地形、二次流路の変遷の特徴が明らかにされており、さらに二次流路の発達と盛衰がたまり列、わんどと関連していることがわかっている。こうした研究が、砂州の変遷、とくにサブ砂州スケールの類型景観の変遷を予測を可能とする。また、この図から、植生が侵攻して来る前の砂州形状は高さも低く単純であるが、植生によって地形変化が促進され、複雑な地形へと変遷して域、それが一時水域などを作り出していることがわかる。砂州の「潜在自然景観」としては単純で扁平な

砂州が、陸化や低水路河床低下などの要因で植生の侵攻を伴い複雑化・多様化してくるのは潜在自然像からは逸脱したものであること、これらは本来(今日失われた)氾濫原潜在自然であることも注意すべきである。

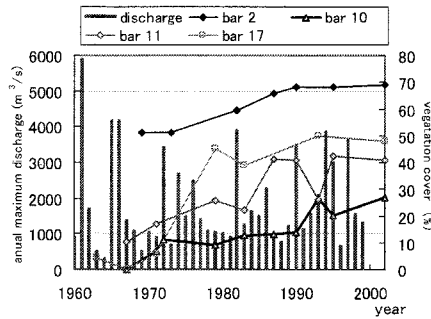


図 12 木津川下流での砂州別植生占有面積比の変化

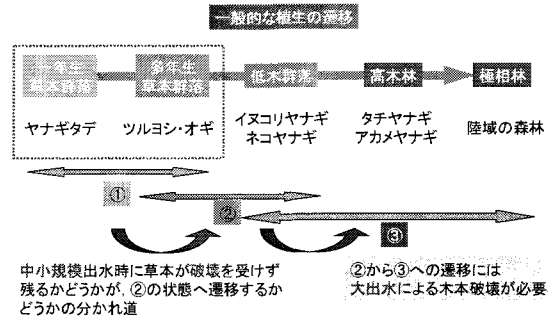


図 13 砂州河川河原植生の遷移パターン

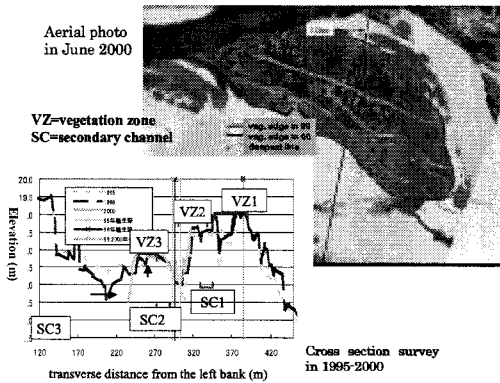


図 14 木津川 12km 砂州での植生域拡大過程

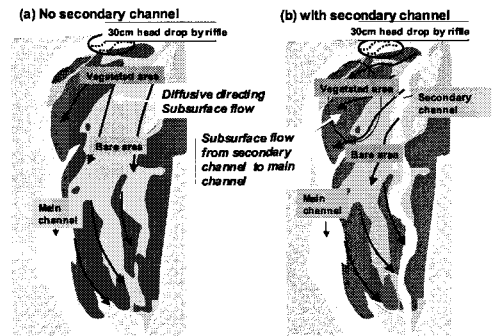


図 15 砂州と伏流環境

なお、表層地形とそれが規定する表流水環境の変化は、伏流環境にも大きな影響を与える。二次流路の存在やタマリ列の散在は伏流環境を規定している(図 15 参照)。こうした研究は、表層地形変化の将来変化予測から伏流挙動の将来的な変化の予測を可能にするものである。フィールドとなった砂州ではおおむねの砂層厚さや代表的な砂州の構成材料粒度などが知られ、伏流挙動のシミュレーションが可能となっている。

6. 砂州での水質変化

砂州に生息場を得た生物群集と砂州という地形と流れという物理過程が、水とともに輸送される「物質の変化過程」にどのように影響しているかが、砂州の価値を評価する上で、生息場適性を測るとともに重要なポイントである。ここでは生元素、とくに窒素の動態に着目する。これには次のようなプロセスが考えられる。

窒素は、①有機態、②アンモニア態、③亜硝酸態、④硝酸態、⑤分子状の容態で存在する。①→②は分解、②→③→④は酸化で硝化と呼ばれる。④→⑤は脱窒で、この過程で窒素は水中から大気中に排出される。生

物体から有機態で、また人間活動から①～④のさまざまな容態で河川水中に放出される窒素が水質汚染の一要素で、(1)②～④を再度生物体に取り込むこと、あるいは(2)⑤脱窒によって窒素が水域から除外されて水質負荷が低減される(浄化)。(1)については光合成と連動するもので、一方、生物体は遺骸(枯死した残骸)としてあるいは食物連鎖を通して排泄・遺骸として再度水中に有機態窒素として戻ってくる(持ち出されることもある)ので、(2)を「真の浄化」と呼ぶことがある。

こうした物質変化の起こる場と状況を考える。リーチを対象とすると、平水時、粒子状の有機物、砂粒子に吸着した物質はしばしば伏流入り口で濾過作用によって分離される。溶存態のものは伏流中で生物作用をうけて化学変化を受ける(硝化、脱窒)。とくに二次流路やたまりで脱窒活性が高く、砂河川での脱窒活性が着目された。なお平水時には二次流路では浅い流れ場で光合成が活発で付着藻類が生育する。伏流水から植物体が蒸散を駆動力として水分とともに栄養分を取り込んで成長する。いまのところ水量(蒸散量)の推定まで目鼻がついているが、どのように栄養分を取り込んで植物体が成長するかについては研究が定量的なレベルに至っていない(取り込む栄養分が評価された場合の植物体の成長に付いては浅枝らの一連の研究がある)。またそれに加えて陸域草本類の枯死や樹木からの落葉・落枝が有機物として表土の上に累積、分解されて存在する。

さて、洪水時には、河道内の生物の遺骸や付着藻類の剥離が水流内の有機態窒素の粒状体流下物濃度を増加させ、それらは、砂州上、とくに植生周辺で捕捉されて堆積する。裸地に比べ、植生域ではこうした有機態窒素の蓄積がおこる。ただし、大出水ではとくに掃流力の大きいところでこうした捕捉・堆積物をフラッシュすることになる(これらは他の堆積しやすいところへ再配分される)。こうしたことから、砂州上では堆積有機物量の空間分布が形成される(植生域では大)。

冠水時や降雨時に鉛直浸透が期待されるが、その折に砂州表層の有機物は溶脱して鉛直浸透し、伏流水脈に合流混合する。こうした効果は降雨時に著しく、冠水時では効果は小さい。伏流過程における脱窒など生化学作用にこうした溶脱・鉛直浸透の混合が連動した形で砂州内での質変化が規定される。

上述のように考えると、伏流域での物質輸送・変化に着目したとしても、その上方のサブ砂州スケール類型景観によって伏流域内のDOが規定され(それによって硝化・脱窒の卓越に違いがある)、鉛直浸透によって持ち込まれるものもフラックスも異なる。

図 16 は木津川の裸地砂州(11km 周辺の砂州、木津川河川生態学術研究重点砂州のすぐ下流の右岸砂州、図 17 参照。また図 18 に観測された伏流挙動を示す)において、伏流水サンプリングし、砂州内伏流過程による硝酸イオン濃度と窒素の安定同位対比変化(脱窒によって重い窒素元素が残る)を同時に調べたものである。窒素は原子量が 12 が普通であるが 14 のものがわずかに存在し、反応が生じる場合、軽いものを優先的に利用することから、硝酸イオンに着目した場合、硝化(硝酸イオン濃度の増加)の場合は安定同位対比が減少する一方、脱窒(硝酸イオン濃度の減少)では安定同位対比が減少することになる。安定同位対比は以下に定義されるものである。

$$\delta^{15}N = \left[\frac{R_{\text{sample}}(^{15}N/^{14}N)}{R_{\text{standard}}(^{15}N/^{14}N)} - 1 \right] \times 1000$$

$N_{\text{standard}} = \text{atmospheric } N_2 (0.0\%)$

この研究では、裸地砂州を選んで、植物体の成長に窒素が使われるという素過程を無視できるようにした。また植生が大量の栄養塩を表層に蓄積している状況の除外を狙った。図 16 によると上記を参考に、見かけ上硝化が認められるが、硝化でも脱窒でもない状況が示唆された。これが、鉛直浸透フラックスとの混合によるものと推測される。そのため、伏流過程で変化しない塩素イオンについても伏流過程に沿う変化を調べた。これは単調減少し、これは鉛直浸透による希釈と考えられた(希釈過程から鉛直浸透量が推定される)。図 16

のような図に鉛直混合を考慮する。カラム試験(現地砂州構成材料を持ち帰り、カラムに詰め人工的に鉛直浸透試験を行ったもの)で溶出過程について調べたところ、砂州材料から溶脱による硝酸イオン濃度の増加、安定同位対比の減少(脱窒を受けていない比較的軽い硝酸イオンの溶出)の著しい地点が存在した。この地点での、硝化・脱窒の状態変化とともに降雨の浸透に伴う溶出分との混合効果を図 16 に矢印で概略的に示した。すなわち、こうした地点で降雨時の鉛直浸透・溶脱と伏流過程での脱窒の混合状況を想定すると、観測データに見られる硝酸塩イオンの減少・安定同位対比減少が説明できる。逆に言うと、伏流過程での脱窒が認識できる。

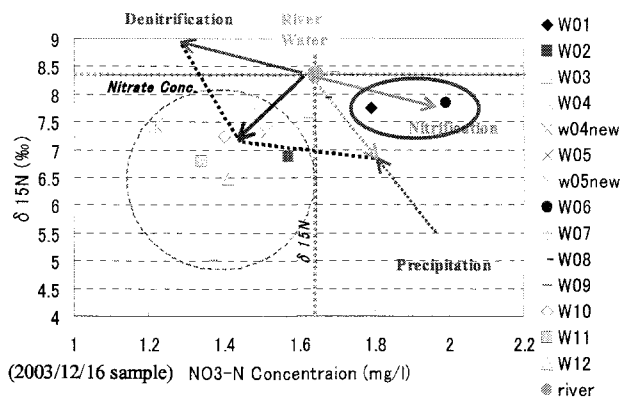


図 16 木津川 11km 砂州における伏流の沿う硝酸イオン濃度の変化と窒素安定同位対比の変化

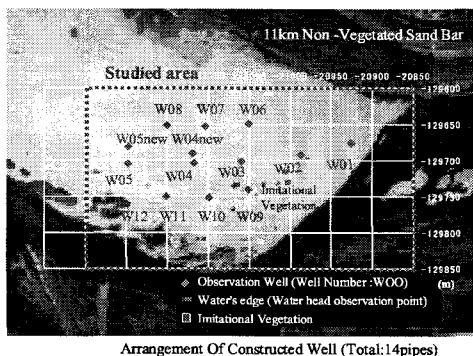


図 17 木津川 11km 砂州におけるサンプリング井戸の配置

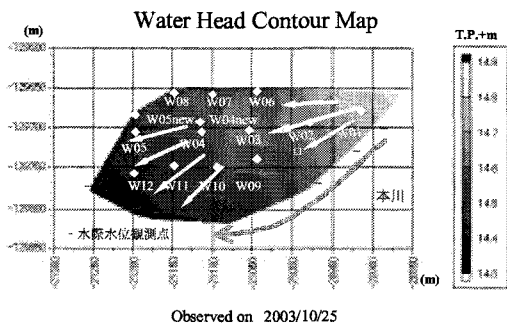


図 18 11km 砂州での伏流挙動

7. 結言

砂州上のさまざまな類型景観ごとにさまざまな生物種・群集が生息場を選好しており、類型景観の組み合わせで砂州上の生物群集構造が規程される。したがって、砂州固有の生物種を保全すべき対象として選定すれば、その個々の生物生息適性をいわゆる PHABSIM (Physical Habitat Simulation) または HEP (Habitat Evaluation Method) のシナリオで、定量評価される。すなわち、生息適性 HSI (Habitat Suitability) を指標とする

とき、対象とする種・群集(i)ごとに類型景観(j)ごとの HSI を点数化(X_{ij})する。どの種を対象とするかや優先するかについてはアセスメントの技術マニュアルが示すような注目種の考え方や、食物連鎖などの相互作用を意識し、またかかわっている問題に応じた簡略なモデル生態系を想定しての議論があることを述べた。なお生物生息量(個体数)へと議論を進めるなら、物理環境の変化に対する応答の速い遅いをとりこむ必要がある。とくに、物理環境の変化を議論するとき、この応答特性を考慮することは必須である。この手法として PDM (Population Dynamic Modeling) が有効で、付着藻類や底生生物のように環境変化に応答するのに時間のかかるものについて工夫されつつある。こうした視点から、PHABSIM(あるいは HEP)と PDM の結合を今後の方向性として示唆した。生態系の評価は多様性や持続性の視点で行われるべきとするなら(注目種はその視点で設定されたとされている)、どのような種・群集の組み合わせでそれが達成でき、それを生息場として支えるかというところまで河川工学的生態学の進展が望まれる。

一方、生態系のサービスについては、たとえば脱窒効果など生元素の物質変化によって評価されるという筋道を切り開いてみた。すなわち、単位流下延長あたりの物質変化量を指標として定量化されよう。第6章で議論したように、物質変化の形態やその活性は、類型景観によって異なり(伏流や鉛直浸透時の溶脱源の蓄積量を規定する表層状況(植生、非植生域など))、また中小あるいは大出水の頻度、降水などのイベント頻度などがそれに影響する。すなわちサブ砂州スケールでの類型景観ごとに評価値が得られる(Y_{ij})。ここで i は着目した物質変化、 j はそれぞれのサブ砂州スケール類型景観である。

以上のように、サブ砂州スケール類型景観がそれぞれの特徴に応じてさまざまな生物に生息場を提供し、サブ砂州スケール類型景観の表層状態が冠水時あるいは降雨時の鉛直浸透を通して伏流過程でおきている硝化・脱窒といった生化学変化による物質変化に混合という形で強く影響している。また表層景観がこうした生化学作用に貢献する微生物生息場を(DO 値を通して)規定していることも重要な視点である。図 19 はこうした仕組みを概括的に描いたものである。

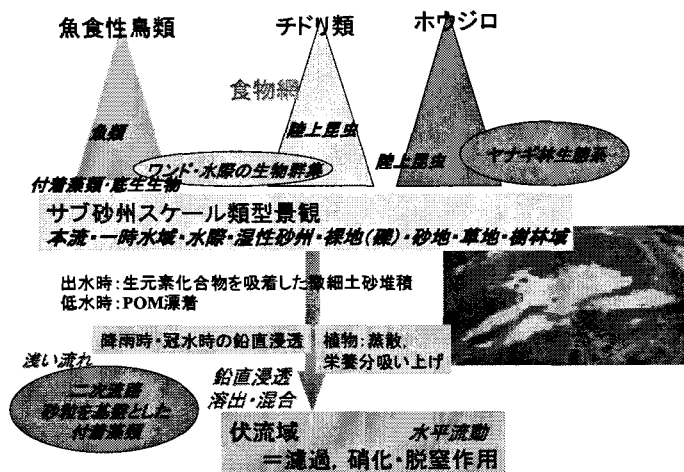


図 19 生息場提供、物質循環機能へのサブ砂州スケール類型景観の役割

このようにして、砂州の両面での機能評価値 X_{ij} , Y_{ij} の高いサブ砂州スケール類型景観を各砂州で重点的に保全することは河川生態系保全で優先度が高いということになる。また砂州上の各サブ砂州スケール類型景観の占有面積率を考慮し、ひとつの砂州としての評価値の積分値の高い砂州はセグメントの中で優先的に保

全すべき砂州ということになる。もっとも、このような面積の重み付けだけで議論するのは第1近似で、実際には各類型景観の配列なども考慮すべきである。

このような手法では、いくつかの対象種・群集の生息適性、生態系サービスについて、ひとつの砂州の中で保全優先度の高いサブ砂州スケール類型景観や、セグメントの中で保全優先度の高い砂州を想定できることになるが、生態的に総合的な優先度をどう決めるかも容易ではない。ひとつの試みとして相乗平均的総合化がひとつの提案となるかもしれない。

以上、河川生態学術研究を通して、河川工学と生態学の連携が、河川管理・流域管理のなかでいまだに頭を悩ませている目標景観へいたる筋道あるいは今後の河川工学としての生態へのアプローチをどうして行くかについて、すこしずつまとまってきたシナリオを述べた。今後の河川環境管理、Ecohydraulics の発展に少しでも貢献できれば幸いである。

なお、本論文をまとめるにあたり、さまざまな形・機会を通じて生態学研究者と議論できたこと、とりわけ木津川河川生態学術研究の実施、リバーフロント整備センターにお世話いただいた「河川環境目標検討研究会」(山岸哲山階鳥類研究所所長)での議論に啓発されたことを記し、謝意を表する。

参考文献

- 1) 河川生態学術研究会木津川グループ (2003) 木津川の総合研究ー京田辺地区を中心としてー, 660p.
- 2) 北村忠紀・加藤万貴・田代喬・辻本哲郎 (2000) 砂利投入による付着藻類カワシオグサの剥離除去に関する実験的研究, 河川技術に関する論文集, Vol.6, pp.125-130.
- 3) 北村忠紀・田代喬・辻本哲郎 (2001) 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.
- 4) 鷺見哲也, 荻島晃, 片貝武史, 辻本哲郎 (2000) 砂州植生域の発達過程と植生の物理環境に関する研究, 河川技術に関する論文集, 第6巻, pp.65-70.
- 5) 鷺見哲也, 颯原宇一郎, 辻本哲郎 (2000) 砂州内の伏流挙動とたまりの水交換性に関する研究, 河川技術に関する論文集, 第6巻, pp.89-94.
- 6) 鷺見哲也, 岩崎充宏, 辻本哲郎 (2001) 木津川砂州上のたまりの平水および洪水時の物理環境, 河川技術論文集, Vol.7, pp.339-344.
- 7) 鷺見哲也, かせ澤成希, 辻本哲郎 (2004) 砂州物理環境の植物蒸散及び水文輸送に与える影響, 河川技術論文集, Vol.10, pp.387-392.
- 8) 生物の多様性分野の環境影響評価技術検討会編 (2002) 環境アセスメント技術ガイド・生態系, (財)自然環境研究センター, 277p.
- 9) 田代喬・辻本哲郎 (2002) 河床攪乱頻度を指標とした生息場評価による瀬・淵構造の変質に関する考察, 水工学論文集, 第46巻, pp.1151-1156.
- 10) 田代喬・伊藤壮志・辻本哲郎 (2002) 生活史における時間的連続性に着目した魚類生息場の評価, 河川技術論文集, Vol.8, pp.277-282.
- 11) 辻本哲郎 (1998) 河川の生態環境水理学序説, 第34回水工学に関する夏期研修会講義集, 名古屋, 土木学会水理委員会, 98-A-1, pp.1-20.
- 12) 辻本哲郎 (2000) 生態系保全機能評価に関わる水工学, 2000年度(第36回)水工学に関する夏期研修会講義集, 土木学会, A6, 20p.
- 13) 辻本哲郎 (2001) 木津川河川生態学術研究の展開状況, 河川技術論文集, Vol.7, pp.351-356.
- 14) 辻本哲郎, 村上陽子, 安井辰弥 (2001) 出水による破壊機会の減少による河道内樹林化, 水工学論文集,

第45巻, pp.1105-1110.

- 15) 辻本哲郎 (2002) 木津川砂州をフィールドとした河川生態に関する生態学・河川水理学の共同研究, 河川技術論文集, Vol.8, pp.7-12.
- 16) 辻本哲郎, 寺井達也, 寺本敦子 (2002) 木津川下流部砂州の植生繁茂と裸地維持の仕組み, 河川技術論文集, Vol.8, pp.307-312, 2002
- 17) 辻本哲郎 (2003) 水域生態系保全-II 考え方と技法, 河川生態系保全への工学からのアプローチ, 日本環境学会九州支部・応用生態工学会, pp.55-82.
- 18) 辻本哲郎 (2004) 砂州景観保全を河川生態工学からどう意義づけるか, 河川技術論文集, Vol.10, pp.43-48.
- 19) 寺本元 (1997) 数理生態学, 朝倉書店: 1-179
- 20) 戸田祐嗣・池田駿介・浅野健・熊谷兼太郎 (2000) 礫床河川における出水前後の高水敷土壌の変化に関する現地観測, 河川技術に関する論文集, Vol.6, pp.71-86.
- 21) 中島治美, 鷺見哲也, 辻本哲郎 (2004) 木津川裸地における伏流水の水質特性, 河川技術論文集, Vol.10, pp.381-386, 2004.
- 22) 森主一 (1997) 動物の生態, 京都大学学術出版会, pp.266-271.
- 23) 山本晃一 (1994) 沖積河川学, 山海堂, 470p., 1994.
- 24) 淀川環境委員会: 自然豊かな淀川を目指して, 淀川環境委員会, 21p., 2002.
- 25) Asaeda, T. and S. Karunaratne (2000) Dynamic modeling of the growth of *Phragmites australis*, *Aquat. Bot.*, Vol.67, pp.301-318.
- 26) Nestler, J.M., R.T. Milhaus and J.B. Kayser (1989) Instream habitat modeling techniques, *Alternative in Regulated River Management*, edited by J.A. Gore and G.E. Petts, CDC Press.
- 27) Smith, R.D., A. Ammann, C. Bartoldus and M.M. Brinson (1995) An approach for assessing wetland functions using hydrogeomorphic classification, reference wetland, and functional indices, Wetland Research Program report, WRP-DE-0.
- 28) Stalnaker, G.B., B.L. Lamb, J. Henriksen, K.D. Bovee and J. Bartholow (1994) The instream flow incremental methodology: a primer for IFIM, National Ecology Research Center, National Biological Survey, Fort Collins, Colorado, USA.
- 29) Tsujimoto, T. (1999) Fluvial processes in streams with vegetation, *Jour. Hydraul. Res.*, IAHR, Vol.4, No.6, pp.789-803.
- 30) Tsujimoto, T. and T. Tashiro (2003) Application of population dynamics modeling to habitat evaluation -Growth of some species of attached algae and its detachment by transported sediment-, *International IFIM User's Workshop*, Fort Collins, Colorado, U. S. A (CD-ROM).
- 31) Tsujimoto, T. and T. Tashiro (2003) Ecosystem degradation and possible restoration -case study in the middle reach of the Yahagi River-, *The First Japan-South Korea Joint Seminar on Ecology and Civil Engineering: Possibility and Limitation of Nature Restoration in Artificially Altered River Ecosystems*, Tokushima, Japan, 2003.8.
- 32) U.S. Fish and Wildlife Service (1980) Habitat Evaluation Procedure (HEP), ESM101-103, Div. Ecological Service, Washington DC.