特集：河川の自然復元 FEATURES : RIVER RESTORATION

生態学的視点による河川の自然復元：生態的循環と連続性について

谷田 一三

大阪府立大学総合科学部自然環境科学科

〒599-8531 堺市学園町1-1

Kazumi TANIDA¹⁾: Ecological perspectives in river restoration, in views from ecological spiraling and continuity. *Ecol. Civil Eng.* 2(1), 37-45, 1999.

1) Department of Integrated Arts and Sciences, Osaka Prefecture University, Gakuencho 1-1, Sakai-shi 599-8531, Japan

Abstract : Unidirectional transport of material is a prominent and unique feature of river ecosystems. The transportation and accompanying ecological processes are well documented by the river continuum concept. River restoration works should pay enough attentions to the ecological processes attributed by longitudinal continuity and riparian/ channel interactions shown in the concept. Other important ecological processes in river ecosystems are transient storage and subsequent release of organic matters and nutrients from up- to down-streams : ecological spiraling. Benthic animal communities, bio-films (algae, microbes and fine particulate sediment) and leaf-litter packs work as effective biological storage apparatuses. Side channels, bank-side pools and hyporheic zones also work as effective geomorphological storage apparatuses. Upstream migration of fishes and aquatic insects populations works as an important recycling or transport of material from marine or downstream to upstream.

Key words : ecological spiraling, biotic storage, river continuum concept, nutrient, bio-diversity, benthic animals, anadromous fish

はじめに

河川生態系には、陸上や海洋、湖沼など他の生態システムと異なるいくつかの特性があるが、その中でもっとも重要な特性は、重力による水と堆積物の上流から下流への移動に伴う、単一方向の物質やエネルギーの運搬作用が卓越することであろう。とくに、日本列島の河川のように、傾斜が急で流程の短い河川では、この運搬作用で流域も含めた河川系から急速に物質などが流失することになる。源流から河口まで 100 km 程度の河川を考えれば、平均秒速 0.5 m の流れで運ばれれば、50 時間あまりで海に出てしまう。このような短時間に有機物や栄養塩が生態系から失われれば、植物も動物も棲めない河川

となる。有機物や栄養塩が滞留しながら上流から下流へ運ばれ、それらを河川生物が繰り返し利用すること（生態的循環：スパイラルリング）(Wallace et al. 1977) で、河川の豊かな生態系が成立している（谷田 1998）。

ストックに対してフローの大きな河川では（安田ほか 1989），連続的に物質やエネルギーが供給されることによって各々の場の生態系が維持されている。上流部は周辺からの，中・下流部は周辺に加えて上流側からの，物質やエネルギーの流入によって生態系が維持されている。この連続性については，河川連続体仮説（Vannote et al. 1980）がその枠組みを提示している。

河川での滞留（一時的な貯留）と生態的循環を促進し，物質やエネルギーの滞留時間を延ばしているのは，まずは生物群集そのものである。また，河川の河床内間隙や流路周辺の止水的環境も，この滞留と循環に大きな役割

を果たしている。

いっぽう、生物作用によって重力に抗して下流から上流へ運ばれる物質やエネルギーは、流下量に対しては絶対的に少ないものの、その生態的な重要性は意外に大きいようだ。近年は、回遊性の魚類による海洋から河川への栄養塩の輸送が、河川生態系の維持に必要な役割を果たしているとの研究も多い (Bilby et al. 1996; Garman & Macko 1998)。

本稿では、この滞留と生態的循環と、上流から下流への連続性と周辺から流路への連続性とに焦点をあてて、生物群集や生態システムから見た河川の自然復元における留意点を考えて見たい。

河川連続体仮説とスパイラルリング

Vannote et al. (1980) が提出した仮説は、河川生態系を理解する枠組みとしては広く認知されている (例えば Ward 1992; Allan 1995; 谷田 1998)。自然河川では温度、川幅、流量などの環境要因は、上流から下流へと連続的に変化する。物質、エネルギーそして生態影響も、基本的には上流から下流へ向かう。

河川の生態系を支える基礎エネルギーは大きく見て2つある。1つは太陽エネルギーで、これは流水中の付着藻類や水生植物を育て、それらが直接、間接に河川動物の餌となる。もう1つの基礎エネルギーは、周辺森林などから供給される落葉などである。光エネルギーを基本とする生植物 (古典的) 食物連鎖に加えて、落葉などの外来性有機物を基礎とする腐食食物連鎖や微生物食物連鎖が重要な機能を果たすのが河川の特長である (Cummins 1973; Cummins et al. 1980, 1983; 谷田 1998)。もっとも、最近では安定同位体による食物連鎖の解析に基づき、従来の研究による上流域での外来性有機物の役割は過大評価されているとの指摘もあるが (Fry 1992; France 1995)、落葉などの外来性有機物が、下流に比べて上流においてより重要なことは安定同位体を使った研究でも支持されている (Rounick & Hicks 1985)。

上流では河畔林が繁り水辺に迫るために、落葉などの外来性有機物の供給は多いが、樹冠が流路を覆い河床への到達光量が少なく、付着藻類や水生植物群集は発達しない。ここでは落葉を基礎資源とする腐食食物連鎖が卓越する。中流域では川幅が広がり河床への日照量は大きくなり、藻類や水生植物の生産量が大きくなり、生植物を基礎資源とする古典的食物連鎖が卓越する。上流から供給される小型化された (ダウンサイジング) 有機物粒

子 (微細有機物粒子: FPOM) も、重要な餌資源となる。下流域では、河川は深くなり水中の懸濁物も増え河床への到達光量は再び低下し、生植物による生産速度は減少する。上流から流れてくる微細有機物粒子が基礎資源となる腐食食物連鎖が主体となる。

このような基本的な機構変化に対応して、底生動物の群集組成も変化する。上流域では、落葉などに依存するシュレダー shredder (破碎食者) が優占する。エグリトビケラ科 Limnephilidae やカクツツトビケラ科 Lepidostomatidae など簡巢を作るトビケラ幼虫が多い (谷田 1985 などを参照)。これらは、落葉とその上に生える微生物 (カビ、バクテリア) を餌とし (Coffman et al. 1971; Cummins et al. 1980)、食べ残し、糞などとして FPOM を排出し、それが繰り返して利用される (Wallace et al. 1977; Shepard & Minshall 1984)。

中流域では、付着藻類などの生植物群集の発達に伴い、とくに石面の付着藻類を餌とするグレーザー Grazer (スクレーパー Scraper, 刈り取り食者) が増加するとともに、上流などで細かくされた有機物 (FPOM) を餌とするコレクター Collector (収集食者) も増える。ヒラタカゲロウ科 Heptageniidae は水生昆虫グレーザーの代表だが、アユ *Plecoglossus altivelis*; Temminck et Schlegel も魚類中では異例のほぼ藻類専食のグレーザーである (Kawanabe 1959)。水中を流れてくる有機物を餌とする濾過摂食型のコレクター、とくに造網性トビケラのシマトビケラ科 Hydropsychidae やヒゲナガカワトビケラ科 Stenopsychidae の幼虫が物質循環に大きな役割を担う (Wallace et al. 1977)。

下流域では、上流から流れてきて河床に堆積する FPOM を餌とする堆積物コレクター Deposit collector や、河床付近を漂う細かい有機物を餌とする懸濁物コレクター Suspension collector が多くなる。主要なメンバーは、二枚貝類、ミミズ類 (水生貧毛類: イトミミズ科、ミズミミズ科など)、ユスリカ科幼虫などである。浅海の砂泥底の底生動物の群集構造との類似性が高くなる。

上流で河畔林などから供給された粗大有機物である落葉は、生物的過程に加えて物理的、化学的過程によっても、徐々ダウンサイジングされていく。溶存態有機物の一部は、コロイド形成過程などの物理化学作用で再結合し、FPOM として利用される (Cummins 1973)。

このように、河川に供給された落葉などを起源とする有機物は、繰り返して生物に使われながら下流方向に運ばれ (生態的循環: スパイラルリング) (Wallace et al. 1977; Newbold 1996)、基本的には粒子の小型化が進む。

このような生態のプロセスによって、早い流れの河川であっても有機物や栄養塩の滞留時間が長くなる。この生態的循環が健全に行われることが、豊かな河川生態系を保持する基本であり、生態系に配慮した河川の自然復元を考えるときには、この点についての配慮が必要である。

生物群集による貯留

河川内では有機物の滞留時間が長くなる機構には様々なものがある (Fig. 1)。

そもそも、多様な生物が河川内の各々に適した場で成長・発育することが重要である。例えば、日本の河川に多く、世界でも最も高い生物生産性を記録しているヒゲナガワトビケラ *Stenopsyche marmorata* Navas の場合には (御勢 1977), 上流から流れてくる中程度の大きさの植物性有機物や動物 (遺体や破片も含む) を、やや粗い目の捕獲網で捉える (松井 1972; 湯浅 1987)。流下有機物という継続的に供給される資源を利用して、河川昆虫としては大きな身体と非常に高い密度を維持し (御勢 1977; 青谷・横山 1990), 自らの生物体として有機物の貯留をする。このトビケラだけでなく、種々の底生動物が、様々な方法で、いろいろなサイズと質の有機物を利用し、それを自分自身の身体に変えることが、有機物の滞留時間の延長に大きな機能を果たしている (Fig. 2)。濾過摂食や懸濁物摂食の底生動物は、本来は流れさってしまう有機物を生物体として効率的に貯留するので、生態的な意義はとくに大きい (Wallace et al. 1977)。

群集としての貯留効果には、生活環、摂食した餌の転

換効率、排泄速度といった要素が関連しているはずである。生活環が長く大型の種類ほど、生物体としての貯留機能は大きいだろう。その点でも、先に触れたヒゲナガワトビケラなどの造網性トビケラは、密度や生体量が卓越するだけでなく、半年以上の比較的長い生活史を持つので (Nishimura 1966; 御勢 1977; 谷田 1980; 青谷・横山 1987), その貯留効果は大きい。

底生動物以外で貯留に大きな役割を果たしているのは、付着藻類と微生物群集からなるバイオフィーム Biofilm (生物被膜) だろう。付着藻類単独では生体量が少なく回転の早い群集だが、それに堆積物や微生物が共存したバイオフィームでは、かなり様相が違ってくる。珪藻や藍藻類を中心とした付着藻類は、それらの微細な立体構造によって (Round et al. 1990; Allan 1995), 微細有機物 (FPOM) や微細土砂を捕捉するとともに、シアノバクテリア (光合成細菌) も含む微生物群集が発達する。その厚いマットは、洪水などの攪乱には不安定であり、厚い膜構造で光量が減少するために生体あたりの生産速度は必ずしも高くはないが、平水時には栄養塩や微細粒子の保持能力は高い (Hynes 1970)。バイオフィームは、各々の規模は小さいが、動物群集より形成速度が早く河床面の被度も大きく、貯留装置としては重要な役割を果たす。

生物群集ではないが、流路の周辺から供給される落葉落枝は、有機物の貯留装置として、また随伴する生物群集の豊かさと固有性によって、有機物と栄養塩の滞留に大きな役割を果たしている。落葉は、洪水の頻度と規模に対応して、その流入量などが変化する (Cummins et al.

Fig. 1. Biological and geomorphological apparatuses to promote ecological spiraling of organic matter and nutrient.

Fig. 2. Nutrient and organic matter spiraling among surface run, sub-surface run and benthic animal community.

1983). 落葉堆は、すでに述べたような物理的・化学的・生物的過程によって分解が進む。永続性の高い落葉堆は、河川流路周辺の陸上や隔離的な水体、あるいは流路内の緩流部に形成され、そこから徐々に有機物や栄養塩が河川系に供給される。また、河床内間隙に捕捉された落葉は、微生物活動の中心となり栄養塩などの供給源となる (Pusch et al. 1998)。

河川食物連鎖の特性

陸上生態系においては、鱗翅目の幼虫などは生植物を餌とし、かつ食性の幅の狭い狭食性の種類が多い。陸上の鱗翅目と姉妹群をなすものが淡水で幼虫時代を送る毛翅 (トビケラ) 目であるが (Wiggins 1996), この仲間の幼虫は一部の蘚苔類専食者を除いて (カメノコヒメトビケラ属 *Palaeagapetus*: Ito & Hattori 1986; Ito 1991), 鱗翅目のような専食性の種類は少ない。肉食, 落葉食, 濾過あるいは堆積物コレクター, それに付着藻類食といったレベルの食性区分 (摂食機能群: Cummins 1973; Merrit & Cummins 1995) で見ても, 2つ以上の区分にまたがる種類が多く, 発育段階に対応して食性を変化させる種類も多い (谷田 1982; 新名 1995, 1996)。底生動物群集の主要な要素である水生昆虫類では, このような傾向は, トビケラ類だけでなくカゲロウ類やカワゲラ類にも見られる。

このような汎食性ないしは雑食性の傾向は, 攪乱頻度が高く, 環境予測性の低い河川環境では, 明らかに適度の高い性質であろう。その議論は別にして, このよう

な雑食性の構成要素の多い河川底生動物群集における食物網では, 他の食物網に比べて, 格段に高い結合度 (Connectance), すなわちネットワークの複雑さが見られる (Travares-Cromer & Williams 1996; 新名 1996)。このような結合度の高い食物網は, 必然的に底辺から頂点への食物段階の数を増加させることで, 物質・エネルギーの循環と滞留を促進させることになる。

河川の地形的構造による循環と滞留の促進 周辺の水体

河川周辺部には, ワンドやタマリと通称される緩流部や止水部が成立する。このような場所は, 本流と一定程度隔離されているために, 水や有機物, それに栄養塩の滞留時間を延ばす機能を持っている。とくに, 本流から一定程度隔離された水体は, 高水時にも有機物が急速に排出されることを防ぐ。従来, 流程の短い日本の河川では発見されないとされてきた河川性プランクトンが, 長良川などから発見された (Murakami et al. 1992; Murakami et al. 1994)。これらのプランクトンの供給源としても, 河川周辺部の生息場所は重要な役割を果たしていると推察されるが, この点については実証的研究はない。

垂表流水と河床内間隙

表流水に比べて流れの緩やかな垂表流水 (伏流水) も, 有機物や栄養塩の貯留と供給の場として注目されている。

地下水ー垂表流水は、物質とエネルギーの貯留場として重要な役割を果たすことが、様々な研究で明らかになってきた (Smock et al. 1992; Stanford & Ward 1993; Plenet et al. 1995).

河床内間隙は、光、溶存酸素、そして流速環境が、表流水とは非常に異なった環境である。この部分は、表流水から供給される有機物、栄養塩によって成立する生態系であり、完全に他栄養的な生態系である (Jones & Holmes 1996). 物質やエネルギーは物理的なプロセスによって、表流水と交換されるだけでなく、生物学的なプロセスによっても交換が促進される。

この垂表流水の流れる河床内間隙には、一時的生息者、恒常的生息者を含めて、豊かな動物群集が発見されている (Williams 1984; Gibert et al. 1994). ミミズ類は典型的な恒常的生息者で、陸上のミミズと同様に河床内間隙の生物学的更新に貢献しているだろう。水生昆虫類は、成虫期や繁殖期にはこの生息場所を離れるので、基本的には一時的生息者である。ユスリカ科 (双翅目) Chironomidae, カワゲラ類の一部、ヒメドロムシ科 (甲虫目) Elmidae には、この生息場所に限って棲む種類 (専門家) がいる。また、カゲロウ類やカワゲラ類の多くの種類の若齢幼虫が、この部分を保育所あるいは避難所として利用する。これらの水生昆虫類幼虫は、河床内間隙に貯留された有機物を、河床表面や陸上に生物的に輸送する役割も持っている。これらの間隙生物群集は、洪水などの攪乱に対して生残する比率が高く、攪乱後の群集回復の供給源としても重要であると指摘されている (Williams 1980). 間隙動物群集の貯留・供給装置としての重要性は、もっと注目されていだろう。

溪畔植生

溪畔林や河畔植生は、栄養塩の動態について、2つの大きな役割を担っている (Osborne & Kovacic 1993; Tabacchi et al. 1998). 1つは陸域からの過剰な栄養塩の一時的貯留で、これは農地、牧畜地などからの栄養塩負荷を軽減して、河川の富栄養化を防ぐ。また、ヨシなどの河川周辺の植生は、河川水あるいは河川堆積物から有機物を吸収し、植生帯による自浄作用を通じて富栄養化を防止すると同時に、栄養塩を植物体として貯留する。植物体が枯死したのちも、CPOM などの粒状有機物 (POM) の形で徐々に基礎資源として河川生態系に供給されることになる。これらの滞留と循環に要する時間は、溶存有機物や流下有機物などよりは格段に長く、河川生

態系の基礎資源供給に大きな役割を果たすことになる。植生帯の保水機能は、河川の流出を安定化させることで、群集の安定化にも寄与する。

また、水際の植生が創出する生息場所は、底生動物や魚類にとって必須の場であり (岩崎ほか 1997; Tabacchi et al. 1998), 固有性の高いファウナや仔稚魚期に不可欠の保育場・避難場所となる。水流を低減させる効果は、土砂などの堆積物の捕捉機能を持つだけでなく、流下有機物を集中的に堆積させる効果もある。

遡上行動による下流や海洋からの回帰的循環

魚類、とくに通し回遊魚による海洋環境からの栄養塩の回帰は、最近とくに注目を集めている研究課題である。とくにサケ科魚類は、産卵、繁殖に伴う死亡個体が、海洋環境の窒素や磷を直接に溪流に持ち込むことで、とくに基礎生産の潜在的レベルをあげると考えられている。

採卵などのすんだギンザケ *Salmo kisutch* Walbaum の雌雄の死体を河川に実験的に配置し、その移動や利用を調べた研究 (Cederholm et al. 1989) は、死体の多くが肉食性や腐食性の獣や鳥類に利用され、それらの捕食者からの栄養塩の回帰が、河川の生産構造に大きな影響を与えることが示されている。これらの通し回遊性魚類は、遡河量も多く、繁殖後の死体も河川に残り、被食や分解によっても栄養塩を河川生態系に供給する。このような形で、栄養塩の回帰は安定同位体を用いた研究でも確かめられている (Bilby et al. 1996). サケ科魚類の産卵遡上の多い寒帯から温帯北部の河川では、このような形で海洋からの栄養塩の回帰は、重要な意義をもっている。また、安定同位体を用いた研究でも、遡河してきた魚類からの栄養塩が、食物網を通して河川の生態系に貢献するとの研究がある (Garman & Macko 1998). 日本国内では、サケマス類の河川回遊個体群の多くが、河口付近で捕獲され人工採卵用親魚や漁獲になり、自然の遡上産卵群は皆無に近い。漁業資源の保全の観点からは、現実的、便宜的には仕方がないのかもしれないが、河川における栄養塩の循環・回帰から見ると大きな問題である。

水生昆虫類の生活環と循環

河川底生動物群集の重要な構成要素である水生昆虫類の多くは、成虫期には陸上環境、とくに河畔陸域を利用する。一時的に河川を離れることで、洪水などの攪乱が

起きてても流下することがなく、結果として滞留時間の延長に寄与することになる。また、産卵や繁殖のために河川に戻る個体、とくに産卵後の雌個体はスベントとして魚などの重要な餌となり（竹門 1992）、物質とエネルギーの河川生態系への再帰に貢献している。未成熟の成虫として羽化する種類、クロカワゲラ科 Capniidae やエグリトビケラ類 Limnephilidae では、少なくとも個体レベルで見れば、陸上生態系から窒素などの栄養塩を河川生態系へ付加する役割を果たしていることになる。

Colonization cycle は、幼虫時代の流下による上流部の個体群の損耗を雌成虫などが遡上することで補償する機構として、Waters (1965) が提唱して以来、多くの水生昆虫個体群で観察、確認されている。日本の河川に生息する種類では、ヒゲナガカワトビケラ *Stenopsyche marmorata* Navas については優れた研究がある（Nishimura 1976; 西村 1987）。河川や個体群によっては、遡上の頻度や強度は異なるようだが、大型の種類であり、かつ個体サイズの大きな雌の個体群レベルの遡上行動は、栄養塩の上流への回帰として大きな役割を果たしている。もちろん、ヒゲナガカワトビケラ以外の水生昆虫でも、多くの種類で産卵遡上飛行が確認されている（谷田ほか 1991）。

河川の生態循環を促進する自然復元

以上に述べてきたように河川の生態系を保全するような河川の自然復元計画については、有機物と栄養塩の生態的循環を補償する貯留装置の保全と、河川の連続性の保全が必要になる。それらを保全するためには、少なくとも次の 4 点を考えなければならないだろう。

1) 生物群集の種多様性、機能的多様性の保全と回復、
2) 横断方向の循環と連続性、3) 鉛直方向の循環と連続性、
4) 流程方向の循環と連続性。

河川の生物多様性、とくに種多様性と機能的多様性の保全は、それ自身が貯留と生態循環を加速することについてはすでに述べた。しかも、個々の種や、魚類だけといった部分群集ではなくて、基礎生産者と捕食者を含む 2 次生産者の全体が、この機能を受け持っていることは、河川の実態（新名 1995, 1996）から見ても明らかであろう。

横断方向の循環の確保には、河川内での循環と河川と周辺との循環の確保がある。前者は、とくに河川縁辺に形成される緩流部や植生帯に伴う生息場所を保全復元することと、それらと主流路との間の物理的な循環と生物

的な循環を確保することがある。人工ワンドの造成などの試みは多くの河川でなされているが、場の造成だけではなくて、適度の貯留と循環の確保にも十分な配慮が必要である（松崎ほか 1997）。この場合にも、冠水頻度を含む本流との連関性をどのように確保するかを考えるには、その場所と生態系の特性を十二分に理解する必要がある。

鉛直方向の循環の確保については、とくに河床内を流れる亜表流水と、その流れる場である河床内間隙の保全・回復が重要である。この部分は、河床表面が微細粒子によって目詰まりすることで、表流水との交換が阻害されたり、河床内間隙に微細粒子が蓄積することで、亜表流水の流れが極端に小さくなる。これらの状態では、間隙は急速に嫌氣的環境となり、生物の生息に適さなくなる。これらの目詰まりを避けるためには、洪水などの攪乱などによって河床が更新され、透過性などの性質が確保されなければならない。また、亜表流水は、流路内だけではなく、流路周辺や上流との回廊として機能しており、その流況はかなり複雑である。堰堤などの横断構造物は、表面水の流れや土砂移動の動態を変えるだけでなく、この亜表流水の流れにも大きな影響を与える（谷田 1998）。

流路内の瀬・淵構造だけでなく、河川周辺部に複雑な地形が形成され水生生物の生息場所ができることや、河床内間隙が生物の生存に適した状態として更新されるためには、適度な土砂供給が補償されることとともに、土砂などの堆積物の更新のために、一定規模以上の洪水などによる攪乱が不可欠である。これらの攪乱を、許容するような河川管理が今後は不可欠である。

流程方向の循環の確保については、魚道などの技術の発展で（ダム水源地環境整備センター編 1998）、一定程度は魚類の移動を確保できるようになったように思われる。しかし、魚類の移動可能性については、個体レベルで評価するだけではなく、個体群レベルで、さらには生態系や物質循環のレベルでも、自然状態に近い循環が確保されているかどうかを評価する必要がある。また、水生昆虫類など、空中や陸上を移動する動物群にとっても、大型の横断構造物（大ダム、砂防堰堤）は大きな障害になっている。これら問題点をどのように解決するかは、今後の課題である。

流程方向の移動障害で、意外に看過されてきたのは、魚類や底生動物の本流と支流との間での移動である。渓谷河川では、自然状態でも本流側の水量が多いために侵食が進み、支流との間に落差が生じ滝などの移動障害に

なっている場合が多い。支流は、イワナなどの魚類(丸山 1981, 1998)や両生類の産卵場所として、極めて重要な場所である。一部の支流は、少なくとも増水時にはイワナなどの遡上が可能な形で残っているで、陸封隔離されているイワナなどの個体群が維持されてきた。しかし、本流の河床が土砂の採取などで低下して本流と支流との落差が大きくなり、かつ出水がダムなどでカットされると、本流から支流への移動が極めて困難になる。これらの障壁に対しても、本流などに作られる人工構築物を同様の配慮が払われる必要がある。

流程方向の連続性を確保する自然復元

河川連続体仮説に基づいて、上流から下流への連続性を考えるとき、もっとも問題になるのは、大小のダムの存在であろう。ダムは、水温や水質の変化勾配に大きな影響を与えるだけでなく、堆積物・物質・エネルギーの輸送にも大きな影響を与える。土砂堆積物の移動障害とそれに伴う下流部の河川や海岸地形の変化は、広く注目を集めている問題である。また、ダム湖における湖沼性植物プランクトンの発生は、ダム湖から流出する水の栄養塩濃度を変化させる可能性がある。いっぽう、シマトビケラ類などは、流出してくるプランクトンを利用することで、密度が上昇する場合もある。これらの点と、河川生態システム、とくに上流から下流への生態的連続性は、それだけで大きな課題である。この点は稿を改めて考えることにしたい。

謝 辞

本稿をまとめる契機は、1998年10月4日に神戸大学で開催された「土木学会平成10年度全国大会研究討論会・河川の自然復元にむけて」での講演と討論である。座長の東京大学大学院工学研究科の玉井信行教授をはじめとする、同学会水理委員会・環境工学委員会・環境システム委員会の方々には、講演の機会を与えて頂いたことを感謝する。また、本誌の編集委員長の竹門康弘博士と担当編集委員の名古屋大学大学院工学研究科の辻本哲郎教授には、本稿をまとめるにあたって多大のご配慮を頂いた。

この議論をまとめるにあたっては、当研究室の同僚の竹門康弘博士をはじめとする学内外の方々との共同研究や討論に負うところが多い。また、本研究の一部には、下記のファンドを使用した。文部省の科学研究費補助金、

谷田一三を代表とする一般研究(C)(平成5, 6年度: 河川性水生昆虫類の分類・生態基礎情報の統合的研究, 課題番号 05640714), 萌芽的研究(平成8, 9年度: 河川の堆積物挙動と生物群集の動態, 課題番号 08874106), 日本学術振興会国際共同研究(極東地域の河川生態系の構造と機能に関する研究-代表: 田中晋, 極東地域河川の生物的多様性に関する生態学的研究-代表: 谷田一三)による研究助成, (財)河川環境管理財団の河川整備基金による研究助成, (財)日本生命財団の研究助成, 京都大学防災研究所水資源研究センターのプロジェクト研究及び特定共同研究。

摘 要

河川の自然復元についての生態的視点として、河川における有機物、栄養塩、エネルギーの生態的循環(スパイラリング)を確保することが重要で、そのためには豊かな生物群集の保全が肝要であることを指摘した。また、上流と下流、周辺と河川、河床内間隙の亜表流水と表流水における連続性の確保が重要であることも指摘した。また、河川生態系における滞留時間を延ばす生物的な貯留装置として、底生動物群集、バイオフィーム(生物被膜)、河川周辺植生、落葉堆積が重要な機能を持つことを示した。物理的な貯留装置としては、河川の周辺部に形成されるワンドやタマリが重要な働きを持つことを指摘した。回遊性魚類や遡上習性をもつ水生昆虫類は、下流、あるいは海洋から上流への栄養塩などの回帰に重要な役割を果たすことを概説した。

引用文献

- Allan J. D. (1995) Stream Ecology, Structure and Function of Running Waters. Chapman & Hall, London.
- 青谷晃吉・横山宣雄(1987) 東北地方におけるヒゲナガカワトビケラ属2種の生活環について。陸水学雑誌 48: 41-53.
- 青谷晃吉・横山宣雄(1990) 東北地方におけるヒゲナガカワトビケラ属2種の生産量について。陸水学雑誌 51: 249-260.
- Bilby R. E., Fransen B. R. & Bisson P. A (1996) Incorporation of nitrogen and carbon from spawning coho salmon into the trophic system of small streams: evidence from stable isotopes. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 53: 164-173.
- Cederholm C. J., Houstin D. B. Cole D. L. & Scarlett W. J. (1989) Fate of coho salmon carcasses in spawning streams. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 46: 1347-1355.
- Coffman W. P., Cummins K. W. & Wuycheck J. C. (1971) Energy flow in a woodland stream ecosystem: 1. Tissue support trophic structure of the autumnal community.

- Archiv für Hydrobiologie 68: 232-276.
- Cummins, K. W. (1973) Trophic relations of aquatic insects. Annual Review of Entomology, 18: 183-206.
- Cummins, K. W., Sedell J. R., Swanson F. C., Minshall G. W., Fischer S. G., Cushing C. E., Petersen R. C. & Vannote R. L. (1983) Organic matter budgets for stream ecosystems: problems in their evaluation. In Stream Ecology, Application and Testing of General Ecological Theory (eds. J. R. Barnes & G. W. Minshall), pp. 299-353. Plenum Press, New York & London
- Cummins K. W., Spengler G. L., Ward G. M., Speaker R. M., Ovink R. W., Mahan D. C. & Mattingly R. L. (1980) Processing of confined and naturally entrained leaf litter in a woodland stream ecosystem. Limnology and Oceanography, 25: 952-957.
- ダム水源地環境整備センター (編) (1998) 最新魚道の設計—魚道と関連施設—. 信山社サイテック, 東京.
- France R. (1995) Critical examination of stable isotope analysis as a means for tracing carbon pathways in stream ecosystems. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 52: 651-656.
- Fry B. (1992) Stable isotope diagrams of freshwater food webs. Ecology 72: 2293-2297.
- Garman G. C. & Macko S. A. (1998) Contribution of marine-derived organic matter to an Atlantic coast, freshwater, tidal stream by anadromous clupeid fishes. Journal of North American Benthological Society 17: 277-285.
- Gibert J., Stanford J. A., Dole-Oliver M.-J. & Ward J. V. (1994) Basic attributes of groundwater ecosystems and prospects for research. In: Groundwater Ecology (eds. J. Gibert, D. L. Danielopol & J. A. Stanford), pp. 7-40. Academic Press, San Diego.
- 御勢久右衛門 (1977) 奈良県吉野川における底生動物の生態学的研究 II. 吉野川における底生動物の生産速度について. 淡水生物 20: 1-22.
- Hynes H. B. N. (1970) The Ecology of Running Waters. University of Toronto Press, Ontario.
- Ito T. (1991) Description of a new species of *Palaeagapetus* from central Japan, with notes on bionomics (Trichoptera, Hydroptilidae). Japanese Journal of Entomology 59: 357-366.
- Ito T. & Hattori T. (1986) Description of a new species of *Palaeagapetus* (Trichoptera, Hydroptilidae) from northern Japan, with notes on bionomics. Kontyû, Tokyo 54: 143-151.
- 岩崎敬二・大塚泰介・中山耕至 (1997) 賀茂川中流域の川岸植物群落内の中・大型水生動物群集. 陸水学雑誌 58: 277-291.
- Jones J. B. Jr & Holmes R. M. (1996) Surface-subsurface interactions in stream ecosystems. Trends in Ecology and Evolution 11: 239-242.
- Kawanabe H. (1959) Food competition among fishes in some rivers of Kyoto Prefecture, Japan. Memoirs of the College of Science, University of Kyoto, Series B 26: 253-268.
- 松井ゆう (1972) ヒゲナガカワトビケラの巣について. 吉野川の生物生産力の研究, 4: 31-36.
- 丸山 隆 (1981) ヤマメ *Salmo (Onchrhynchus) masou masou* (Brevoort) とイワナ *Salvelinus leucomaenis* (Pallas) の比較生態学的研究 I. 由良川上谷における産卵床の形状と立地条件. 日本生態学会誌 31: 269-284.
- 丸山 隆 (1998) 蛇谷の天然イワナは守れるか? はくさん 26 (2): 2-5.
- 松崎浩憲・玉井信行・河原能久・牧野一正・佐藤康晴・清川仁 (1997) 多摩川人工わんどの特性と維持管理への提言. 新しい河川整備・管理の理念とそれを支援する河川技術に関するシンポジウム論文集, pp. 231-236.
- Merritt R. W. & Cummins K. W. (eds.) (1996) An Introduction to the Aquatic Insects of North America. 3rd. edition. Kendall/Hunt, Dobque, Iowa.
- Murakami T., Isaji C., Kuroda N., Yoshida K. & Haga H. (1992) Potamoplanktonic diatoms in the Nagara River; flora, population dynamics and influences on water quality. Japanese Journal of Limnology 53: 1-12.
- Murakami T., Isaji C., Kuroda N., Yoshida K., Haga H., Watanabe Y. & Saijo Y. (1994) Development of potamoplanktonic diatoms in downreaches of Japanese rivers. Japanese Journal of Limnology 55: 13-21.
- Newbold J. D. (1996) Cycles and spirals of nutrients. In: River flows and channel forms (eds. G. Petts & P. Clow), pp. 130-159. Blackwell Science. Oxford.
- Nishimura N. (1966) Ecological studies on the net-spinning caddisfly, *Stenopsyche griseipennis* McLachlan (Trichoptera, Stenopsychidae) 1. Life history and habit. Mushi 39: 103-114+3 pls.
- Nishimura, N. (1976) Ecological studies on net-spinning caddisfly, *Stenopsyche griseipennis* McLachlan 4. Upstream migration and extension of breeding zone. Physiology and Ecology, Japan 17: 179-183.
- 西村 登 (1987) ヒゲナガカワトビケラ. 文一総合出版, 東京.
- Osborne L. L. & Kovacic D. A. (1993) Riparian vegetated buffer strips in water-quality restoration and stream management. Freshwater Biology 29: 243-258.
- Plenet S., Gibert J. & Marmonier P. (1995) Biotic and abiotic interactions between surface and interstitial systems in rivers. Ecography 18: 296-309.
- Pusch M., Fiebig D., Brettar I., Eisenmann H., Ellis B. K., Kaplan L. A., Lock M. A., Naegeli M. W., & Traunspurger W. (1998) The role of micro-organisms in the ecological connectivity of running waters. Freshwater Biology 40: 453-495.
- Round F. E., Crawford R. M. & Mann D. G. (1990) The Diatom, Biology and Morphology of the Genera. Cambridge University Press, Cambridge.
- Rounick J. S. & Hicks B. J. (1985) The stable isotope ratios of fish and their invertebrate prey in four New Zealand rivers. Freshwater Biology 15: 207-214.
- Shepard, R. B. & Minshall G. W. (1984) Role of benthic insect feces in a Rocky Mountain stream: fecal production and support of consumer growth. Holarctic Ecology 7: 119-127.
- 新名史典 (1995) 河川底生動物群集の食物網の実態とその動的側面. 「河川性水生昆虫類の分類・生態基礎情報の統合的

- 研究」(谷田一三編), pp. 60-69. 文部省科学研究費補助金報告書.
- 新名史典 (1996) 河川昆虫群集の食物網, 多様性と動態. 海洋と生物, **18**: 434-440.
- Smock L. A., Gladden J. E., Riekenberg J. L., Smith L. C. & Black C. R. (1992) Lotic macroinvertebrate production in three dimensions: channel surface, hyporheic, and floodplain environments. *Ecology* **73**: 876-886.
- Stanford J. A. & Ward J. V. (1993) A perspective on stream-catchment connections. An ecosystem perspective of alluvial rivers: connectivity and the hyporheic corridor. *Journal of North American Benthological Society* **12**: 48-60.
- Tabacchi E., Correll D. L., Hauer R., Pinay G., Planty-Tachcchi A.-M. & Wissmar R. C. (1998) Development, maintenance and role of riparian vegetation in the river landscape. *Freshwater Biology* **40**: 497-516.
- 竹門康弘 (1992) 溪流魚とカゲロウの食う食われる関係. フライの雑誌 **19**: 32-39.
- 谷田一三 (1980) 貴船川におけるシマトビケラ属3種の生活史と分布, とくに生活環の変異と密度と幼虫の成長との関連について. 陸水学雑誌 **41**: 95-111.
- 谷田一三 (1982) トビケラの生態学. 昆虫と自然 **17**(8): 7-11.
- 谷田一三 (1985) 毛翅目(トビケラ目). 「日本産水生昆虫検索図説」(川合楨次編), pp. 167-215. 東海大学出版会, 東京.
- 谷田一三 (1998) 河川の底生動物群集—水生昆虫を中心に. 「水辺環境の保全—生物群集の視点から」(江崎保男・田中哲夫編), pp. 195-216. 朝倉書店, 東京.
- 谷田一三・野崎隆夫・田代忠之・田代法之 (1991) CADDIS トビケラとフライフィッシング. 廣済堂出版, 東京.
- Travares-Cromar A. F. & Williams D. D. (1996) The importance of temporal resolution in food web analysis: Evidence from a detritus-based stream. *Ecological Monographs* **66**: 91-113.
- Vannote R. L., Minshall G. W., Cummins K. W., Sedell J. R. & Cushing C. E. (1980) The river continuum concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **37**: 130-137.
- Wallace J. B., Webster J. R. & Woodall W. R. (1977) The role of filter feeders in flowing waters. *Archiv für Hydrobiologie* **79**: 506-532.
- Ward J. V. (1992) Aquatic Insect Ecology 1. Biology and Habitat. John Wiley & Sons, New York.
- Waters T. F. (1965) Interpretation of invertebrate drift in streams. *Ecology* **46**: 327-334.
- Wiggins G. B. (1996) Larvae of the North American Caddisfly Genera (Trichoptera) Second Edition. University of Toronto Press, Toronto, Buffalo, London.
- Williams D. D. (1984) The hyporheic zone as a habitat for aquatic insects and associated arthropods. The Ecology of Aquatic Insects (eds. V. H. Resh & D. M. Rosenberg), pp. 430-455.
- Williams D. D. (1980) Temporal patterns in recolonization of stream benthos. *Archiv für Hydrobiologie* **90**: 56-74.
- 安田卓哉・市川秀夫・小倉紀雄 (1989) 裏高尾の山地溪流における有機物収支. 陸水学雑誌 **50**: 227-234.
- 湯浅義明 (1987) ヒゲナガカワトビケラの飼育と展示. インセクタリウム **24**: 212-217.