多自然型川づくりのための混相流研究*

Contribution of Multiphase-Flow Research to River Restoration

辻 本 哲 郎 **

TSUJIMOTO Tetsuro

Abstract River restoration is a current topic in river engineering, where multiple functions of rivers such as the safety against flood, water resources utilization, amenity of human life and ecological system conservation are desired to be satisfied simultaneously. For this purpose, the technique to control the interactions among flow, sediment transport, vegetation and river morphology is strongly required. It is supported by fluvial hydraulics, hydraulics of flow with vegetation and habitat hydraulics, and the research from the view point of multiphase-flow study is expected to contribute them. In this paper, the new understanding of river restoration is explained by using the concept of "river landscape", and it is discussed how the recent development of study on fluvial hydraulics related to riparian vegetation contributes to it. Since the mechanics of sediment transport and modeling of flow with vegetation are reviewed by the other authors of this volume, the studies on fractional transport of graded sediment with sorting process and the riparian morphology related to vegetation growth are focussed on herein.

Keywords : river restoration, fluvial hydraulics, sediment transport, fluvial sorting, vegetation

1.まえがき

自然共生、多自然といった語が河川周辺で話題になっている。利便性を性急に追及してきた結果、様々な弊害が目立つぐらい自然の持っている特性が失われたことへの反省や、自然らしさが一つのデザインとしての価値を持つ時代となっていることにもよるのだろう。こうした自然あるいは自然の特性をいかした川づくりを一般に多自然型川づくりと呼んでいるが、こうした語が一般的になってきたここ10年でも、その持つ意味は大きく変わってきている。こうした経緯と、最新の多自然型川づくりの根本的な考え方を紹介したい。また、これを意識した川づくりでは、単に洪水時の高水位を堤防で護ったり、堰を造って水資源を生み出すためのものより広範な基礎学術・技術が必要と

される。その中で、混相流の分野から興味のある課題や、混相流の基本的な考え方が取り入れられている面は多く、本文ではこうしたトピックスに触れたい。多自然型川づくりでは、土砂輸送（流砂）とそれによる河道動態、河川域植生の存在とその流水への影響が大きな鍵になっており、本特集では、河川技術を支える「河川水理学」の分野でこれらに対してどのような混相流的観点からの研究がおこなわれているか、いくつかのレビューが寄せられることになっている。

2.河川整備の考え方の進展

平成9年、河川法が改正され、治水、利水に加えて環境が河川整備の目的と明記されることとなった。河川行政の根幹である河川法は明治29年に制

* 1999.1.30受付

** 名古屋大学大学院工学研究科地圏環境工学専攻 〒464-8603 名古屋市千種区不老町
TEL (052) 789-4625 FAX (052) 789-3727 E-mail : tsujimoto@genv.nagoya-u.ac.jp

定され、昭和39年に改定された。明治29年の旧河川法では、治水の根幹が規定され、昭和39年の新河川法で利水が加えられ、そして平成9年の改正で環境が加えられたものと総括できる。

もっとも、河川環境を河川管理・整備の目的に加えるという考え方は、すでに昭和56年12月の河川審議会答申で指摘され、護岸や河川構造物のデザインや親水性などに配慮することが始まった。その後、河川への親しみも自然環境への指向が高まっていき、また先行していたドイツ、スイスなどから近自然工法（Naturnahe Wasserbau, close-to-nature river improvement）が紹介され、建設省でも「多自然型川づくり」推進の通達を出す（平成2年）など、河川環境も親水機能から自然環境保全機能へと質的变化してきた。ただ、自然らしさが十分に理解されず、緩勾配河川に瀬やせせらぎ、巨石配置を無理やりつくったり、なじまない植物や魚類を導入するなど、今日的な河川の自然の理解からみると混乱した状況も少なくなかった。その後、いくつかの多自然型川づくりの事例を重ね、河川水辺の国勢調査の実施（平成2年度より）という経験を積む中で、河川環境機能の中で、生態系保全機能が明確にされたのは平成7年の河川審議会答申であった（その時点までの推移を文献[1]にまとめてある）。その後、翌年の答申を経て、河川環境を含む河川整備の新しい考え方がほぼ固まり、平成9年の河川法改正につながったものである。平成9年には環境影響評価法も制定され、いわゆる環境アセスメントが、公害防止、希少・貴重種の保護を主体とした従来のいわゆる閣議決定アセスから、生態系保全を意識したものへ整備されたことと連携していることも注目すべきことである（たとえば文献[2]参照）。

3. 河相・河川景観の概念

河川は水流、流砂、河道地形、植生構造物、植生の相互作用系として認識され、これはFig.1のように示される。たとえば、構造物、植生、地形に影響された水流が土砂を移動させ、地形変化を通して構造物の安全性・機能を脅かしたり、植生の盛衰に影響し、さらにそれがまた流れを変化させるという相互作用である。また点線で示すような副次的な作用もある（水流による植生の変形や、地形の流砂への直接的影響、乱流構造に及ぼす流砂の影響など）。このような相互作用が作り出す

河川の状態を「河相」と定義する[3]。

Fig.1 River system and landscape

水系において、気象・地形条件に応じて上流から、渓流部、山地河川、扇状地区間、沖積地河川、河口部などごとに、河床材料や河道内微地形と水理諸量（たとえば水深や流速）の空間分布のパターン（州や、瀬・淵など）、河道植生さらにはさまざまな生き物の生活の場としての利用の仕方などが固有性を示すことが多い。こうした性質は、先述の河相の相互作用系の平衡指向の結果と言える。この特徴あるかたまりが「セグメント」で、近年河川管理での重要な視点と認識されるようになった（山本[4]）。すなわちセグメントは主として河道勾配に対応して河床材量や河床・流路性状、水理量の空間分布だけでなく、水際植生、生息生物も固有な区間で、河川管理はそれぞれに応じて考えるべきだと認識されるようになってきている。

1997年の河川法改正をあげるまでもなく、今日、河川整備・管理は治水・利水だけでなく親水（リクリエーション、アメニティ機能）、生態系保全といった環境機能も目的にとらえている。こうした多機能を同時に満足するには、これまでのように、単一の機能を目的とした単一の構造物による対応（治水目的の堤防や、護岸・水制や利水目的の堰など）では無理になっている。河相、すなわちFig.1の様々な要素やそのコンビネーションでこれを担うという考えが重要になっているのである。事実、生息環境という観点からみても、水流そのものが魚類などの水生動物のそれを規定しているし、河川区域の陸域は洪水時に冠水して河床として変化を受けた地形にその頻度に応じて植生が繁茂して形成されたものでそれが様々な生物に生息場を提供していることは容易に推測される。とくに植生域周辺では微細な地形と表層粒度構成

が形成され、これが更なる植物の生育とさまざまな生物の恰好のすみかとなっている。

生態学の分野においても生息環境に生態系が保持されている状態でもって「景観（ランドスケープ）」を定義すると同様に、「河川景観」とは「河相でさまざまな機能を担っている状態」と定義するのが、今後の河川の管理・整備を考えるうえで合理的である[3]。とくに、生態系保全などの環境機能をも満足した河川景観管理を考えることが真に多自然型川づくりであり、多自然型川づくりも、近自然材料を用いた部分的・場当たりの単なる close-to-nature river improvement でなく、河相すなわち水流・流砂・地形・植生の相互作用が健全に働く状況に管理するという意味で、river restoration といった語で表現されるようなものへと質的に変化してきた。

4. 河川景観管理を支える学術領域

河相で河川に期待される様々な機能を担おうという河川景観管理に当たっては、河相あるいはその変遷過程の記述が必須となる。

河相の相互作用系の中で、土砂を輸送し、また輸送されている土砂が水流に影響する仕組みが、河川水理学では、流砂水理と呼ばれる分野で、固液混相流の領域である。河川では、掃流と浮遊に分類し、1940年代、1970～1980年代に研究が進み、とくに前者では様々な流砂量式の提案から当時の河川工学的実用に耐える流砂量推定が可能となったし、後者では地形変化（移動床過程）記述が相当に進んだといえる（たとえば、[5]参照）。また、植生を伴う流れの水理は、植生が河川の実環境機能に重要な役割を果たすことから、80年代後半から河川水理学のホットな話題となり、活発な研究が進められた分野である（たとえば、[6]参照）。こうした移動床水理、植生水理の分野の学術の進展が重要で、本特集の各著者が述べるであろうように、混相流研究の基盤的考え方がこれを支えて今なお発展途上にある。

一方、景観として把握するには次にそれぞれの機能の評価が必須である。治水機能、利水機能の評価は従来よりすでに確立してきた部分もあるが、他の機能との調整（compromise）の中でその機能を追求するとなると、なお、今後の研究に待つところも多い。ところが、生態系保全機能の評価となると、少なくとも河川工学分野ではこれまで

はほとんど経験がなく、今後生態学との連携を含めて展開が必要とされている。新しい環境影響評価もこれなしには実施できない。現在注目されている方向は、生息場（ハビタート、habitat）という概念を持ち込んで、すなわち生息の物理環境におきかえて評価するもので、河川水理の分野では生息環境水理（habitat hydraulics）という語をあてて研究が始まっている（たとえば[7]参照）。生態系は、物理環境がそれを支えているだけでなく、生物・生物相互作用も重要な役割を果たしており、物理環境のみで生態系を評価しえないのは当然と言えるが、生態系の定量的評価の嚆矢ではあった。なお、生態作用も含めて取り扱おうとの視点（eco-hydraulics）も指摘されている。こうした分野にも今日の混相流研究に見られる基本的発想などで有用となるものは多いと期待されている。

5. 河相の記述手法

これまで述べてきたシナリオで河川景観管理をするとき、もっとも重要なのは、とくに植生がからむ複雑な流れでどのような水域・陸域環境がもたらされ、それが植生繁茂とともにどのように変遷しているかであろう。水を中心に議論してきた治水計画では断面平均された流れを対象とする一次元解析が主流であったが、多機能の調整という観点から治水機能に限っても、河岸侵食や水衝対策と言った観点から二次元、三次元解析が必要となってくるだろうし、多機能調整の鍵である植生の存在する流路の流れの解析では二次元以上の解析が必須となる。また生息環境も比較的局所的な生息環境特性が議論されるのでこれが避けられない。こうした状況を考えると、植生の存在、局所的な地形や表層粒度（粗度）の影響を取りこめる流れの解析、河床変化、表層粒度変化（分級）を取りこめる河床変動解析（及びその基本となる流砂挙動の記述）が、河川水理学の必須であることがわかる。こうした必要性を支える基礎研究が進められているところであり、最新の状況が本特集で紹介されるはずだが、ここでは、現在これまで述べてきた河川景観管理に実用できるレベルでのシナリオを以下に示そう。

上記の観点で、ここでは、平面二次元解析（推進平均の流れ場を対象とする）の枠組みで、地形、粒度構成、植生を考慮したものの例を示す[7, 8]。その流れの基礎式は以下の通りである。植生につ

いては、離散的な障害物と見なし、運動量式で空間平均抗力を考えるほか、乱流構造の変化に配慮し k - ε モデルを採用するとともにその輸送式において植生の抗力に起因する仕事に相当する乱れエネルギーの生成・散逸を考慮した[7, 9].

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x}(hU) + \frac{\partial}{\partial z}(hW) = 0 \\ & \frac{\partial}{\partial x}\left(hU^2 - h\nu_T \frac{\partial U}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(hWU - h\nu_T \frac{\partial U}{\partial z}\right) = \\ & -gh\frac{\partial(h+y_b)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(h\nu_T \frac{\partial U}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(h\nu_T \frac{\partial W}{\partial z}\right) - F_x - \tau_{bx} \\ & \frac{\partial}{\partial x}\left(hWU - h\nu_T \frac{\partial W}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(hW^2 - h\nu_T \frac{\partial W}{\partial z}\right) = \\ & -gh\frac{\partial(h+y_b)}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}\left(h\nu_T \frac{\partial U}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(h\nu_T \frac{\partial W}{\partial z}\right) - F_z - \tau_{bz} \\ & \frac{\partial}{\partial x}\left(hUk - h\frac{\nu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(hWk - h\frac{\nu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z}\right) = \\ & P_k + P_{kv} + P_{kb} - h\varepsilon \\ & \frac{\partial}{\partial x}\left(hU\varepsilon - h\frac{\nu_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(hW\varepsilon - h\frac{\nu_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z}\right) = \\ & = C_1 \frac{\varepsilon}{k} (P_k + C_{ve}P_{kv} + C_{be}P_{kb}) - C_2 h \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned}$$

ここで、 (x, z) : 流下方向、横断方向座標、 (U, W) : 流下・横断方向の水深平均流速、 h : 水深、 y_b : 基準面からの路床高、 ν_T : 渦動粘性係数、 k : 乱れエネルギー、 ε : 乱れエネルギーの逸散率、 C_f : 路床の摩擦抵抗係数、 C_D : 植生要素の抗力係数、 λ : 流体の単位体積あたりの植生要素による遮蔽面積である。乱流モデルのモデル定数 C_μ , C_1 , C_2 , σ_k , σ_ε については標準値を用い、さらに植生の形状抵抗に関わる係数 C_{ve} については鉛直2次元の植生層を伴う流れ場の実測から決められた1.3を用い[8]、底面摩擦抵抗に関わる係数 C_{be} についてはRastogi & Rodi [10]により次式から算定する。

流れが解ければその成果に基づいて浮遊砂の挙動とそれに伴う河床変動が次のように解析される。

浮遊砂についてはその挙動は次式の水深平均された移流拡散方程式に支配される[8].

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x}\left(hUC - h\varepsilon_s \frac{\partial C}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(hWC - h\varepsilon_s \frac{\partial C}{\partial z}\right) = S_c \\ & S_c = w_0 C_{ae} - \gamma_s w_0 C \end{aligned}$$

ここで、 ε_s : 浮遊砂の拡散係数の水深平均値、 C : 水深平均された浮遊砂濃度、 w_0 : 砂の沈降速度で、

平衡基準面濃度 C_{ae} については次式で与える[11].

$$C_{ae} = 0.002 \left(\frac{u_*}{w_0} \right)^2 \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*} \right)^{1.5}$$

また、 γ_s は、底面濃度を水深平均濃度と関係づけるパラメータで、指数型の平衡濃度分布形を仮定すると、下記のようなである。

$$\gamma_s \equiv \frac{15w_0}{u_*}$$

S_c は $(1-\rho_0)(\partial y_b/\partial t)$ を表し、これより河床変化が計算される。ここに、 w_0 : 砂の沈降速度、 ρ_0 : 砂の空隙率、 y_b : 河床高である。

掃流砂については混合の場合は、粒径によって移動特性が異なり表層で分級が生じることの重要性に鑑み、粒径別に取り扱う。ここでは、粒径スケールの非平衡性は無視し次式によって粒径別流砂量を評価する[5, 12].

$$\begin{aligned} q_{B*i} & \equiv \frac{q_{Bi}}{\sqrt{(\sigma/\rho-1)gd_i^3}} \\ & = 17p_i\tau_{*i}^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_{*ci}}{\tau_{*i}} \right) \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{*ci}}{\tau_{*i}}} \right) \end{aligned}$$

ここに、

$$\tau_{*i} \equiv \frac{u_*^2}{(\sigma/\rho-1)gd_i}$$

d_i : 第 i クラスの砂の粒径、 d_m : 平均粒径、 p_i : 表層(交換層)における第 i クラスの砂の体積占有率、 u_* : 摩擦速度、 σ : 砂の密度、 ρ : 水の密度、 g : 重力加速度、 τ_* : 無次元掃流力、 τ_{*c} : 限界掃流力である。下付添字 i は粒度のクラスを表す。上式は、芦田・道上式[12]を混合砂礫に援用したものである。

混合粒径砂では、粒径ごとに移動限界が異なる。下式はEgiazaroff[13]によって導かれた式で $d_i/d_m < 0.4$ の細砂分について芦田・道上[12]が修正したものである。

$$\frac{\tau_{*ci}}{\tau_{*cm}} = \begin{cases} \left\{ \frac{\ln 19}{\ln(19d_i/d_m)} \right\}^2; & (d_i/d_m \geq 0.4) \\ 0.85; & (d_i/d_m < 0.4) \end{cases}$$

ここに、 d_i : 第 i クラスの砂の粒径、 τ_{*ci} : 第 i クラ

スの砂の粒径別無次元限界掃流力, τ_{*cm} : 平均粒径の砂の粒径別無次元限界掃流力で均一粒径砂のそれと同一視される場合が多い。

上式で求められた掃流砂量は, 掃流砂礫の運動方向角 ϕ によって縦断方向, 横断方向成分, q_{Bx} , q_{Bz} に配分する[5,14]. ϕ も下記のように粒径別に適用して求める。

$$\tan \phi_i = \tan \gamma + \sqrt{\frac{1}{\mu_d \mu_f}} \sqrt{\frac{\tau_{*ci}}{\tau_{*i}}} \frac{\partial y_b}{\partial z}$$

河床の微小面積 $\Delta x \Delta z$ における微小時間 Δt での, 第 i クラスの砂の見掛け上の砂の堆積分 Δq_{Bi} (流出分をマイナス表示) は, 下記のように表される。

$$\Delta q_i = -\frac{1}{1 - \rho_0} \left(\frac{\partial q_{Bxi}}{\partial x} + \frac{\partial q_{Bzi}}{\partial z} \right) \Delta x \Delta z \Delta t$$

一方, 河床変動は次式で与えられる。

$$\frac{\partial y_b}{\partial t} = \frac{1}{\Delta x \Delta z \Delta t} \sum_{i=1}^N \Delta q_i$$

ここに, N : 粒度によるクラス数である。

河床変動に伴う分級過程を平野[15]の考え方にならって厚さ q_e の層でのみ交換が起きると仮定して考えると, 河床上昇 ($\partial y_b / \partial t > 0$), 低下 ($\partial y_b / \partial t < 0$) に対して, それぞれ次のように表される。

$$p_i(t + \Delta t) = \frac{p_i(t) \cdot \left\{ \theta_e \Delta x \Delta z - \sum_{k=1}^N \Delta q_k(t) \right\} + \Delta q_i(t)}{\theta_e \Delta x \Delta z}$$

$$p_i(t + \Delta t) = \frac{p_i(t) \cdot \theta_e \Delta x \Delta z - p_{i0} \cdot \sum_{k=1}^N \Delta q_k(t) + \Delta q_i(t)}{\theta_e \Delta x \Delta z}$$

ここに, p_{i0} : 貯累層における第 i クラスの砂の体積占有率である。 Δt は, $|\sum \Delta q_k| < \theta_e \Delta x \Delta z$ を満足するように設定し, また $\Delta q_k < p_i(t) \theta_e \Delta x \Delta z$ のときは $\Delta q_k = p_i(t) \theta_e \Delta x \Delta z$ として (交換層に存在していたもの以上には出ていかない) 計算を進める[16]。

掃流砂では, 小規模河床形態の発生機構など非平衡性が重要な意味を持つ場合がある (Nakagawa-Tsujimoto, [17])。混合砂でも縦断交互分級 (gravel sheet), 横断交互分級 (縦筋) の形成機構では非平衡性が重要な役割を果た

す。これについては, 文献[18]を参考にされたい。また植生帯を伴う流れでは横断混合にともない浮遊砂が植生帯周辺に堆積するが, こうした横断混合に貢献する流れの低周波変動は掃流砂の非平衡性とあいまって植生帯近傍に立て筋を形成するし, 混合粒径の場合は分級縦筋となる[19]。

6. 植生繁茂と河道動態

近年流域の開発やダム建設, 砂防工事, 河道掘削などの大規模で急激な河道へのインパクトにより, 河相が大きく変化し, それとともに機能特に生態系保全機能に支障の出ているものが見られる。こうした河相の顕在化した変質を是正することが多自然型川づくり (River Restoration) に課せられた本質的課題と言える (Fig.2 参照)。

Fig.2 Change of river landscape

こうした河相変質の中で注目されるのは, 河道動態が植生繁茂を介在して助長されている例である。辻本・北村[20, 8]はたとえば上流からの土砂供給の途絶えた流路での河床低下 (rotational degradation) が低水時の側岸植生帯の繁茂を許した状態で洪水・低水が繰り返されることによって極めて助長されることや, 孤立植生域を中心にした中州の発達も低水時の植生域拡大に大きく依存していることなどを, 現地観測, 模擬植生を用いた室内実験, 上記の河相記述手法を用いた数値解析によって示した。

孤立植生周辺の洪水時の河床変動を解析した例を示すと Fig.3 のようで, 植生域上流側に堆積域を生じ, 側方及び下流に河床低下域が現れる (下流側のそれはこの図のより下流側なので, 示されていない)。この洪水の後, 水の低い状況では (とくに扇状地河川のように低水時流量が小さい場合) 植生側方で流れが河床低下領域に集中し, 植生域側方にも斜面が陸化する。こうした上流と側方の陸化領域にはこの時期植生 (扇状地河川で

Fig.3 Deposition of bed-load sediment upstream of vegetated area

は主としてカワヤナギ)がこの領域に侵攻し、次の洪水はより大きな植生域として迎えることになる。こうした状況を数値計算でシミュレートすると、Fig.4に示すように植生域の長さ・幅とも加速度的に拡大することになる。個々の例について詳細な検討はされていないが、最近の扇状地河川の植生を伴う中州の拡大はこうした植生とそれに伴い堆積現象の繰り返しが大きな役割を果たしていると推測される[16]。

多くの河道が混合粒径からなる。このことを考慮して解析した結果はFig.5に示す通りである[21]。図には表層縦断方向変化を示した。均一粒径砂についての結果も併示したが、河床高変化が若干抑制された。これは分級、とくに河床低下部の粗粒化 (armoring) によるものである。堆積部については細粒化する場合が多いが、流量が大きい場合には堆積域表層も粗粒化している。ただしその時間経過を見ればFig.6に示されるように、堆積初期は細粒化しているが、後に粗粒化して平衡堆積域となるものと思われる[21]。

Fig.4 Increase of length and width of vegetated area with repetition of flood and low-stage water

ところで、ダム下流など土砂供給が急減して河床低下している河道では、こうした分級が河床低下とあいまって河道全体が粗粒化する。こうした

Fig.5 Longitudinal variations of bed configuration and mean diameter of surface layer along a centerline

Fig.6 Temporal change of bed configuration and mean diameter of surface layer along a centerline

状況では洪水時においてももはや掃流砂移動は見られないが、残流域や河岸からの微細土砂がウォッシュロードとして浮遊形式で輸送される。こうした浮遊微細土砂も植生域には堆積する。Fig.3で扱ったような孤立植生域周辺の流れの解析を行って、

微細砂の堆積状況を計算すると、Fig.7に示すように掃流砂の堆積と異なり、植生域の下流側に堆積することがわかる。図には植生行き周辺の流れと堆積速度の計算結果を植生域の長さを2種類変化させて示したものである[8]。植生域の長さが短い場合、浮遊砂の堆積は植生域下流に広がるが、植生域が長ければ、植生域への堆積が目立ち植生域下流堆積域は大きくない。こうした状況は室内実験水路でも再現できる。たとえば、植生は釣り堀用のフィルターを圧縮したり引き伸ばして透過度を調整して使えるし、粗粒化した路床（アーマコート）はニス付けした砂粒で、ウォッシュロードの微細砂はポリプロピレン粒子をモデルとして実験した例がPhoto 1に示される。白く写っている堆積域は洪水のあとの低水時には陸化し、植生が侵攻することが想定されるが、実験においても先の模擬植生を堆積域に附加設置することで植生域拡大を表すことができ、こうした実験を繰り返すことによって、洪水・低水の繰り返しによって植生域がどのように拡大していくか調べた。これによると、植生域は下流へ延伸するが、Fig.8に示すように、平衡長さへと向かう変化傾向を示す。これは数値解析でも再現でき、植生の密度や洪水頻度・強度によって異なる平衡植生域長さが決まる。

Fig.7 Flow around vegetated area and deposition rate of suspended fine sediment (calculated)

Photo 1 Model vegetation and deposition at its downstream

Photo 2 Enlargement process of vegetated island in a laboratory flume

Fig.8 Increase of length of vegetation area (experiment)

以上に示したように、河相の変遷は植生の盛衰と関連した地形変化過程であり、こうしたプロセスの記述と予測が河川景観管理・整備の重要な基礎的知見として必要とされている。

Fig.9 Increase of length of vegetation area (calculated)

7.あとなぎ

本文では、多自然型川づくりにかかわる混相流の話題として、河川工学・水理学の分野で注目されている側面を論述することとした。多自然型川づくりは一般の人にも馴染みのある言葉になってきたようだが、河川整備という観点でこの語も、その中身は変化してきている。最近の理解として、治水・利水・環境機能の調整（コンプロマイズ）が必須になった今、河川景観管理、すなわち、水流、流砂、河道地形（表層粒度も含めて）、植生の相互作用系としての河相の制御が必要であるという観点を示した。このとき、植生理や流砂水理学に混相流研究の観点からも興味あるアイデアや手法が使われている。河川工学・水理学における混相流研究のレビューが本特集でなされるにあたり、こうした観点からこれらをまとめてみるというのも、別の立場の研究者からみて興味を持ていただくことになれば幸いである。

参考文献

- [1] 辻本哲郎, 河川環境の在り方とその実現に向けて, 金沢大学大学教育開放センター紀要, 15, 1-17 (1995)
- [2] 足立敏之, 環境影響評価法と河川環境に関わる技術指針, 山から海にいたる河川水系の総合管理の技術, 土木学会中部支部平成10年度第1回技術講座, 17-32, (1998)
- [3] 辻本哲郎, 河川景観の変質とその潜在自然への回復, 第4回河道の水理と河川環境に関するシンポジウム論文集, 土木学会, 147-152 (1998)
- [4] 山本晃一, 河道特性論, 土木研究所資料, 第2662号, 169-185 (1988)

- [5] 中川博次・辻本哲郎, 移動床流れの水理, 技報堂出版, 350p., (1986)
- [6] 辻本哲郎, 河道植生と河川水理, 河川水理学基礎講座講義集, 応用生態工学研究会, 101-112 (1995)
- [7] 辻本哲郎, 生息環境評価の水理学, 河川水理学基礎講座講義集, 応用生態工学研究会, 113-124 (1995)
- [8] 辻本哲郎・北村忠紀: 植生周辺での洪水時の浮遊砂堆積と植生域の拡大過程, 水工学論文集, 第40巻, 1003-1008 (1996)
- [9] 清水義彦・辻本哲郎・中川博次: 直立性植生層を伴う流れ場の数値計算に関する研究, 土木学会論文集, No.447/II-19, 35-44 (1992)
- [10] Rastogi, A.K. & W.Rodi, Predictions of heat and mass transfer in open channels, *Jour. Hydraul. Eng.*, ASCE, Vol.104, No.3, 397-420 (1978)
- [11] 辻本哲郎, 掃流砂と浮遊砂, 流体の非線形現象, 池田駿介編, 朝倉書店, 147-162, (1992)
- [12] 芦田和男・道上正規, 混合砂礫の流砂量と河床変動に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第14号B2, 259-273 (1971)
- [13] Eglazaroff, I.V., Calculation of nonuniform sediment concentration, *Jour. Hydraul. Div.*, ASCE, Vol.91, HY4, 225-246 (1965)
- [14] Nakagawa, H., T. Tsujimoto & S. Murakami, Non-equilibrium bed load transport along side slope of an alluvial stream, *Proc. 3rd Int. Symp. River Sedimentation*, Jackson, Miss., USA, 885-893 (1986)
- [15] 平野宗夫, Armoringを伴う河床変動について, 土木学会論文集, No.195, 55-65 (1971)
- [16] 辻本哲郎・辻倉裕喜, 植生周辺の掃流過程と中州の発達, 水工学論文集, 第42巻, 457-462 (1998)
- [17] Nakagawa, H., T. Tsujimoto, Sand bed instability due to bed load motion, *Jour. Hydraul. Div.*, ASCE, Vol.106, HY12, 2029-2051 (1980)
- [18] Tsujimoto, T., Fractional transport rate and fluvial sorting, *Grain Sorting Seminar, Mitteilungen*, VAW-ETHZ, Vol.117, 227-249 (1992)
- [19] 辻本哲郎, 北村忠紀, 中川博次, 側岸部植生群落周辺の掃流過程と分級, 土木学会論文集, No.527/II-33, 99-108 (1994)
- [20] 辻本哲郎・北村忠紀, 河床低下に及ぼす植生繁茂の影響, 水工学論文集, 第40巻, 199-204 (1996)
- [21] 辻本哲郎・辻倉裕喜・村上陽子, 植生周辺の微細地形と表層粒度構成, 第4回河道水理と河川環境シンポジウム, 123-128 (1998)