

河道植生と流路変動

Changes in Channel Morphology and Riparian Vegetation

辻 本 哲 郎

Tetsuro TSUJIMOTO

1. まえがき

本講習会では「流域の土砂環境」という全体のテーマの中で「河道植生と流路変動」が一つのトピックスとして捉えられている。近年の河道変遷(流路変動)と河道植生動態は、まさに水系の土砂動態を映す鏡であるといっても過言ではない。一方、河川法改正(1997)でも明記されたように、河川管理整備が治水、利水、環境のいずれも等しく目的とするに至って、植生を伴う水系の適正な維持・管理が重要な視点となり、相互に作用を及ぼす植生・河道の動態を把握・予測し、さらには制御する知見・技術が求められている。最近では、河川工学の分野でも、植生動態と関連づけて流路変動・河道変遷が議論されるようになり¹⁾、河川水理学の分野でも、1980年代後半から活発に研究された「植生水理学」が²⁾、移動床水理学と結びついてこうした議論の基礎を支える²⁾ようになってきている。本テキストでは、わが国の今日的状況で流路変動をどう把握するか、河相と呼ばれる河道の植生も含む動態をどのように理解し既述・予測するかという基礎的な観点から始め、扇状地における植生の繁茂・破壊を素過程とした河相変遷をとくに樹林化の傾向や河川へのインパクトに対する応答という視点で捉えること、木曾川の水制群区間(ワンド群)の植生を伴う河川景観変化を河道変遷として捉えること、さらに頻繁に冠水・攪乱される砂河川の微地形変化と砂州域植生の発達との関連などを話題にして、河道植生と流路変動について議論する。

2. 河相とその変遷

一般に流路変動や河道変遷は大きな時空間スケールでの変化を指すことが多いが、わが国では多くの河川で河道が堤防に囲まれ、その範囲内での洪水時の河床変動として生じる河道あるいは流路、ときには滞筋の変動・変遷が捉えられることが多いし、またそれがいわゆる河川管理の対象になっている。「氾濫原」という語も、もともと河川が大きく変動して(ときには自然堤防を越えて)地形を形成したその氾濫原であるが、しばしば、堤防に囲まれた(河川区域)の中での、洪水時には冠水し流水の作用を受けるが、日常的には陸域である「河川敷」と呼ばれる部分を指すことがあり、本論文ではこうした捉え方をしている。

河川という場を観るスケールとして代表的なものに、(i)リーチ、(ii)セグメント、(iii)水系、(iv)流域といった階層がある。リーチは砂州や瀬・淵などの河相を特徴づけるユニットを一对以上含む河道区間、セグメントはそれらの配列が統計的に均質な区間(沖積平野区間、扇状地区間など)、水系は水源山地から河口まで、流域は集水総面積である。とくに、重要な視点は「セグメント」(山本：「沖積河川学」³⁾ 参照)で、河川における様々な状況がそれによって特徴づけられる。とくに、河床勾配、河床材料粒径でグルーピングされ、特徴的な流路・河床形態が出現する。こうした形態的特徴は統計平均的に流路方向に周期的で、その1つの単位がリーチで、リーチ内での様々な要素(河床波、微地形、粒度分などの地形要素、流速、水深などの水理量、植生)の組み合わせが重要な特徴である。セグメントの固有性は重要な視点である一方、これらが水系を通じてある規則に応じた連続性を呈していることも注目される。平均的には、山地から河口までの勾配と粒径の指数減衰的な様相が連続性の骨格ではあるが、地質的条件によって狭窄部がそのあいだに割り込んだり、隆起・沈降の影響で独特の不連続性を示す場合もある。河道変遷・流路変動を議論するとき、リーチでの事象が注目されるが、むしろセグメントがどう変質しつつあるのかといった視点が重要で、こうした変質は実は水系に沿った土砂動態のアンバランスに起因し

ていることが多く、その議論や対策には水系一貫の視点が重要となる。

河道においては、河道(河床・流路)形状と植生によって水流が既定され、流砂がそれ(と地形)に支配され、また流送土砂の分布が形状変化を担っているという相互作用系が形成される。この系には、盛衰のある植生や構造物も加えるべきである。この系の境界条件の主たるものは流況や上流からの供給土砂である。周辺条件が統計的な意味で定常であれば、この相互作用系は動的平衡を指向する。河道(の一部)が直接改変されたり、上記の境界条件が(たとえばダムや砂防、流域改変によって)変化すれば、この系は変化していく。河道変遷を見るのは、単に物理的容器としての河川でなく、その場での水流や流砂の分布、植生なども含めてのものであるべきで、こうした相互作用系で成立する河川の姿を「河相」と呼び⁴⁾、むしろ河相変遷を把握することが重要なのである。さらに、河川区域内で河川が果たすべき機能は、治水・利水・環境の多機能であり、それらは河相のなりたちと対応する(たとえば水位や堤防沿いの流速は治水機能と関連するし、流速や水深、河床材料の空間分布は河川生態系保全機能と関連する⁵⁾)。図1は河相を構成する相互作用系を示すとともに、ここでは、河相が様々な機能を担っている状態でもって「河川景観」を定義している⁴⁾。そのゆえに、河川管理のうえで河相変遷を正確に把握することが必須であり、それに植生動態の相互関与は無視できない。

河相と河川景観

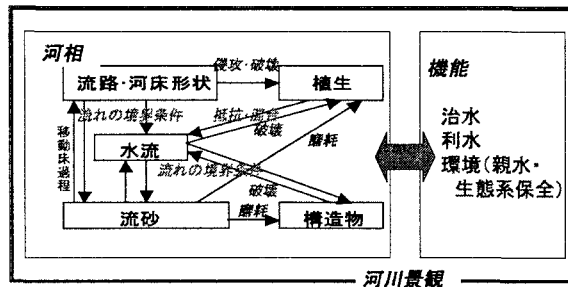


図1 河相における相互作用系と河川が担う機能

さて、河相動態の理解・把握には図1に示される相互作用系の個々の作用(矢印で示す)の記述が必要で、開水路水理学、移動床水理学、植生水理学のほか植生の繁茂・破壊についての知見がこれらに対応している。また機能評価についても従来の河川工学では対象としてこなかった生態系保全機能についても、生息環境評価の水理学が発展しつつある^{5),6)}。

上記にも述べたように、河道変遷(河床変動・流路変動)を議論する場合、何がインパクトでそれに対する応答としてどのような河道変遷が生じたかを明らかにすることが必要だし、そして必要なら適切な復元を考えるというシナリオが描ける。これはまさに、河川管理におけるアセスメント・フォローアップのシナリオである。たとえば、ダム建設によって、下流河道には流況の変化(洪水の強度や頻度の変化)、土砂供給量の減少といったインパクトが与えられるし、本川掘削は支川において遡上する河床変動やそれに伴う河相変化を引き起こすインパクトである。1996年から始まったダム等フォローアップ制度では、単に貯水池だけでなく下流河道の河相(河道動態・生態系)までその対象となってきた。

従来から(長時間スケールの)河道変遷は土地利用と関連していてもむしろ地理学的な研究対象であったし、それが今日においても災害ポテンシャル情報として河川工学的に意義深いものでもある⁷⁾。ただし、近年わが国では連続堤によって河道が固定され、河道内に流路変動・河床変動が拘束された。当然、出水のたびに河床・流路は変動を受けるが、近年のダム建設をはじめとする水系へのインパクトによって、トレンド的あるいは非可逆的变化が認められるようになってきた。たとえば、ダム建設や砂防事業の進展による流送土砂の現象によって生じる慢性的な河床低下・粗粒化(アーミング)が認識され、1970年代には1次元的手法でかなり精度よくそれが記述・予

測できるようになってきた^{8),9)}。しかし、河道動態をより微視的に見れば、濬筋の変化やそれをもたらす砂州(中規模河床形態)の変質、一方では水衝部での局所洗掘の深刻化などが注目されるようになってきた。そして90年代には河道内植生の活発化が「河道内樹林化」として認識されるようになってきた¹⁰⁾。

たとえば、図2は航空写真によって手取川の植生繁茂の状況の経年変化を見たものであるが、河道内で近年植生域の拡大、草本から木本へといった変化が指摘されているところが多い¹⁰⁾。その原因として河床低下や濬筋の固定化による河川敷の乾燥陸化傾向、植生の破壊を促す洪水の強度・頻度の減少など河道動態の変化が推測されるが、ほかにも高水敷利用形態の変化(耕作放棄、薪炭採取の減少など)が原因となっている例も少なくない¹⁰⁾。



図2 手取川中流部の樹林化進行

3. 河道植生と植生周辺の流れと河床変動

河道植生が河道水理や河道動態に大きく関与しているという視点から、河道内植生を把握するということが始められたのは決して古くはない。一方、河川生態系という視点から、「河川水辺の国勢調査」(1990年から)の中で河道内植物が調査されだしたが、必ずしも上記のような河川工学的視点にとって有益な情報として利用できず、工学的視点での調査法確立が急務とされた^{11), 12), 13)}。また、植生を伴う流れの解析も、植生素素をそのまま境界条件とせず離散的な物体として、流体中に占有する体積は無視し、空間平均された抗力のみをカウントする手法が整理された(清水・辻本・中川¹⁴⁾)のをきっかけに、植生層上の流れ、植生帯を伴う流れ、孤立植生周辺の流れなどの特性が実験や数値解析で次々明らかにされてきた¹³⁾。さらに、こうした流れ場の解析を河床変動解析と組み合わせ、今日的な河相変遷の重要な素過程である植生周辺の河床変動が研究された¹⁾。本章では、これらの要点を取りまとめておこう。

植生調査でもっとも重要な視点は、植生分布図と微地形図をオーバーレイすることである。これは、流れや河床変動解析の重要な情報であるだけでなく、立地によって植生繁茂を推測するための知見を整理する上でも重要である。とくに、人工の手が余り入ってない河川数では潜在自然植生¹⁵⁾が優占し、これらについては、その生育(立地)条件は河道内の比高、横断勾配および表層材料と強く相関している¹¹⁾。ただし表層材料については、立地を決定する材料が植生繁茂後それが捕捉した細砂で覆われている場合があるので注意を要する。植物については、河道変遷に貢献するという視点では木本類が対象となるが、流れへの影響を考慮すると、樹高、幹の胸高直径、単位面積あたりの本数(樹数密度、 N)のほか枝ぶりやシルエットも特記すべきであろう(種によって特徴がある)。植生の効果を水理計算に反映させるには、枝や葉を含めた単位体積あたりの流水遮蔽面積($\lambda(\text{m}^2)$)が実測できればよいが、容易ではない。胸高幹径 D 、樹数密度 N がわかっておれば、

$$\lambda = ND$$

で推定する。なお、河相変遷に関連して樹木の成長を推測する必要があるので、成長錐などによって年輪調査から樹齢を調査しておくことが薦められる。基礎資料として、樹高、幹径、樹齢などの相関を樹木種ごとに整理しておくことが望まれる(手取川中流部中州での調査例¹⁶⁾がある)。また、洪水時の樹林破壊の予測に関連して、代表的な樹種(と基盤土壌の組み合わせに対して)について引き倒し試験¹⁷⁾を実施し、抵抗モーメントを調査しておくのも良い。これまでの試験の結果、倒伏限界モーメント($M_c(\text{kgm})$)が次のように胸高幹径($D(\text{cm})$)と関係づけられている¹⁷⁾。

$$M_c = \beta D^2$$

ここに、 β の上限値は7.8、下限値は2.5とされている。

なお、河川では人間活動の活発な部分(耕作地・公園など)を除き、物理条件に応じた潜在植生が繁茂することが多いので、セグメントや比高と植物種は強い関連を示す。表1はセグメントと河畔植生の対応を示す恰好の調査例である¹⁸⁾。

表1 セグメントと植物群落

		セグメント1		セグメント2		セグメント3	
		鬼怒川 46.0 km～101.5 km区間		鬼怒川 0.0 km～46.0 km区間		利根川 0.0 km～45.0 km区間	
		96.0 km地点	55.0 km地点	32.0 km地点	16.5 km地点	27.0 km地点	20.0 km地点
河床勾配		1/600～1/190		1/2,130～1/1,320		逆勾配	
平均粒径		河床材料 約50 mm 砂州上 中～大礫 砂州周縁部 粗砂		河床材料 約0.5 mm テラス上 細砂		河床材料 約0.2 mm 高水敷上 粘土～シルト	
低水路幅		250 m～800 m		100 m～250 m		350 m～1,000 m	
出水時の平均流速		平均年最大流量(1,700 m ³ /s)時 で約2.5 m/s～4.5 m/s		平均年最大流量(1,700 m ³ /s)時 で約1.5 m/s～2.5 m/s		既往洪水(4,500 m ³ /s 1972.9.18) 時で約0.9 m/s～1.6 m/s	
各植物群落の冠水頻度	A	20～0.5	100～250	4～365	4～55	0.33～9	
	B	0.5～0.1	0.3～100	1～4	1～4	――	
	C	0.1以下	0.3以下	0.05～0.67	0.2以下	――	

注) 冠水頻度は、1回/年以上では日平均水位、それ以下では定時観測水位の年最大値によるものである。

	セグメント1	セグメント2	セグメント3
A 群落	ツルヨシ、ネコヤナギ、ススキ、スギナ、カワラヨモギ、カワラサイコ	オオクサキビ、ヤナギダデ、オギ、クサヨシ	ヨシ、マコモ、オギ、カワヤナギ
B 群落	ツルヨシ、灌木類	ギシギシ、オギ、セリ、クサヨシ、カワラメドハギ、カワラケツメイ	セイタカアワダチソウ、ギシギシ
C 群落	ススキ、高木類	タチヤナギ、タケ	

植生周辺の流れは既述のように、植生を透過体であると見なしモデル化される。植生群落によって流速が低減され、そのために生じたせん断によって付加的な混合が現れることが特徴である。このため、次のような事象が出現し、河道変遷の素過程となっている¹⁾。

- (1) 植物孤立群落の下流部への細砂の堆積¹⁹⁾、
- (2) 植物群落上流部での流速低減に伴う掃流砂の堆積¹⁶⁾、
- (3) 側岸に沿う植生帯による流れの流心部への集中(給砂減に伴う河床低下の助長)²⁰⁾、
- (4) 側岸に沿う植生帯による横断混合の助長と側岸方向への流砂の正味輸送^{21), 22), 23)}。

植生を離散的に分布した障害物と見なし解析モデルについて、水深平均された平面2次元の支配方程式を書くことと次の通りである²⁾。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x}(hU) + \frac{\partial}{\partial z}(hW) &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial x}\left(hU^2 - hv_\tau \frac{\partial U}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(hWU - hv_\tau \frac{\partial U}{\partial z}\right) &= -gh \frac{\partial(h+y_b)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(hv_\tau \frac{\partial U}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(hv_\tau \frac{\partial W}{\partial x}\right) - F_x - \tau_{bx} \\ \frac{\partial}{\partial x}\left(hWU - hv_\tau \frac{\partial W}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(hW^2 - hv_\tau \frac{\partial W}{\partial z}\right) &= -gh \frac{\partial(h+y_b)}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}\left(hv_\tau \frac{\partial U}{\partial z}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(hv_\tau \frac{\partial W}{\partial z}\right) - F_z - \tau_{bz} \\ F_x &\equiv \frac{1}{2} C_b \lambda h U \sqrt{U^2 + W^2}; \quad F_z \equiv \frac{1}{2} C_b \lambda h W \sqrt{U^2 + W^2} \\ \tau_{bx} &\equiv C_f U \sqrt{U^2 + W^2}; \quad \tau_{bz} \equiv C_f W \sqrt{U^2 + W^2} \end{aligned}$$

ここに、 x, y, z : 流下方向、水深方向、横断方向座標; U, W : 水深平均された流速の x, z 方向成分; h : 水深、 v_τ : 渦動粘性係数の水深平均値、 y_b : 河床高、 F_x, F_z : 単位面積あたりの水柱に対する植生からの反力; τ_{bx}, τ_{bz} : 底面せん断応力; λ : 植物要素の抵抗係数; C_b : 植生密度(水の単位堆積あたりの遮蔽面積); C_f : 河床の摩擦抵抗係数である。清水らの論文¹⁴⁾では k - ϵ 乱流モデルで渦動粘性係数を評価する仕組みを有するよう、抗力による仕事量をエネルギー生成に加えるという考え方でさらに k 方程式、 ϵ 方程式を追加しているが、渦動粘性係数を摩擦係数と水深に比例させた形に置くなどの簡便なモデルも使われる。

洪水時には土砂輸送が活発で、地形変化が生じる。まず浮遊砂による地形変化は次式で記述される²⁾。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x}\left(hUC - h\epsilon_s \frac{\partial C}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(hWC - h\epsilon_s \frac{\partial C}{\partial z}\right) &= S_s \\ S_s &= w_b C_m - \gamma_s w_b C \end{aligned}$$

ここに、 C : 浮遊砂の水深平均濃度; ϵ_s : 浮遊砂の乱流拡散係数(渦動粘性係数と同一視される); w_b : 沈降速度であり、また、 C_m : 平衡底面濃度; γ_s : 底面濃度と水深平均濃度との比でそれぞれ次式で近似される^{24), 25)}。

$$\begin{aligned} C_m &= 0.002 \left(\frac{u_*}{w_b}\right)^2 \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*}\right)^{1.5} \\ \gamma_s &\equiv \frac{C}{C_m} = \frac{6w_b}{\kappa u_*} \left\{1 - \exp\left(-\frac{6w_b}{\kappa u_*}\right)\right\}^{-1} \end{aligned}$$

ここに、 $\tau_* = u_*^2 / [(\sigma\rho - 1)gd]$: 無次元掃流力、 τ_{*c} : 無次元限界掃流力である。先述の流れの計算で得られた結果をもとに、上記の支配方程式に基づいて浮遊砂の挙動が解析され、河床高(y_b)の時間変化は次の式で記述される。

$$\frac{\partial y_b}{\partial t} = -\frac{S_s}{1 - \rho_0}$$

ここに、 ρ_0 : 砂の空隙率である。

一方、掃流砂については、分級現象(fluvial sorting)の記述にも配慮し、粒径別の扱い(粒径クラスを添字*i*で表す)をする²⁾。掃流砂量式として芦田・道上式²⁶⁾を採用、粒径別限界掃流力を Egiazaroff 式²⁷⁾を修正して²⁸⁾用いると、

$$q_{B,i} \equiv \frac{q_{B,i}}{\sqrt{(\sigma/\rho-1)gd_i}} = 17p_i\tau_{*,i}^{1/2} \left(1 - \frac{\tau_{*,i}}{\tau_{*,i}}\right) \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{*,i}}{\tau_{*,i}}}\right)$$

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

である。ここに、 q_B ：掃流砂量； p_i ：表層(交換層)に占める第*i*クラスの砂の体積割合；添字*m*は平均粒径に対する値を意味する。掃流砂量は以下のように流向 γ と河床横断勾配に応じて決まる流砂方向角によって流下方向、横断方向成分に分配した²⁸⁾のち、表層粒度構成の時間変化、河床高変化の解析がされる²⁾。

$$q_{B\gamma} = q_{B,i} \cos \varphi; \quad q_{Bz} = q_{B,i} \sin \varphi$$

$$\tan \varphi_i = \tan \gamma - \frac{\tau_{*,i}}{\mu_s \mu_b \tau_{*,i}} \frac{\partial y_0}{\partial z}$$

$$p_i(t + \Delta t) = \frac{p_i(t) \cdot \left\{ \theta_i \Delta x \Delta z - \sum_{k=1}^N \Delta q_k(t) \right\} + \Delta q_i(t)}{\theta_i \Delta x \Delta z} \quad (\text{河床上昇時})$$

$$p_i(t + \Delta t) = \frac{p_i(t) \cdot \theta_i \Delta x \Delta z - p_{i0} \cdot \sum_{k=1}^N \Delta q_k(t) + \Delta q_i(t)}{\theta_i \Delta x \Delta z} \quad (\text{河床低下時})$$

$$\frac{\partial y_0}{\partial t} = \frac{1}{\Delta x \Delta z \Delta t} \sum_{i=1}^N \Delta q_i$$

$$\Delta q_i = -\frac{1}{1 - p_{i0}} \left(\frac{\partial q_{B\gamma}}{\partial x} + \frac{\partial q_{Bz}}{\partial z} \right) \Delta x \Delta z \Delta t$$

ここに、 φ ：掃流粒子の運動方向； γ ：流向； $\mu_s \mu_b$ ：砂の静止および動摩擦係数である。また θ_i ：交換層厚(最大粒径程度)、 p_{i0} は貯層層(substratum)の中の粒度クラスの成分の体積割合でここは一定としている。

こうした植生を伴う流れによる河床変動解析の適用性については、模擬植生を用いたいくつかの水路実験によって検証されている^{19),20),21)}。

なお、辻本・北村^{19),20)}は、洪水時のこうした堆積域がその後の低水時に陸化しそこに植生がすばやく侵入する(河原性植物はこうした侵入がきわめて早い)としたシナリオを用いている。すなわち、洪水時のとくに細砂の堆積が低水時の陸化・植生侵入を促進し、(植生を破壊しない)適度な規模の洪水が植生繁茂を促進していると推定した。彼らはこうしたプロセスを、模擬植生を用いた水路実験で示すとともに、数値解析がそれを説明することを示した(図3参照)。すなわち、洪水時における孤立植生の下流側への細砂(浮遊砂の成分)堆積が低水時に植生域の拡大をもたらし、縦断方向に細長い群落が形成されることを示した¹⁹⁾(出水頻度・強度や河床材料、植物密生度などによって決まる平衡群落長さの存在を示唆した)。なお、掃流が卓越する場合は、群落上流部の堆積や群落側方に形成される洗掘孔斜面への植生侵入により、植生は上流方向へ延伸するほか拡幅する¹⁷⁾。また、ローテーションな河床低下⁸⁾にある場合には、側岸植生帯がある場合出水時の河床低下が水路中央に集中し、植生帯が出水、低水の繰り返しのによって水路中央に向かって拡幅してくる²⁰⁾。水路中央部の河床低下量は植生侵入を想定しない場合に比べきわめて大きく、植生動態とあわせて考えなければ河道変遷(流路・河床変動)は記述・予測できないことが明らかにされた。

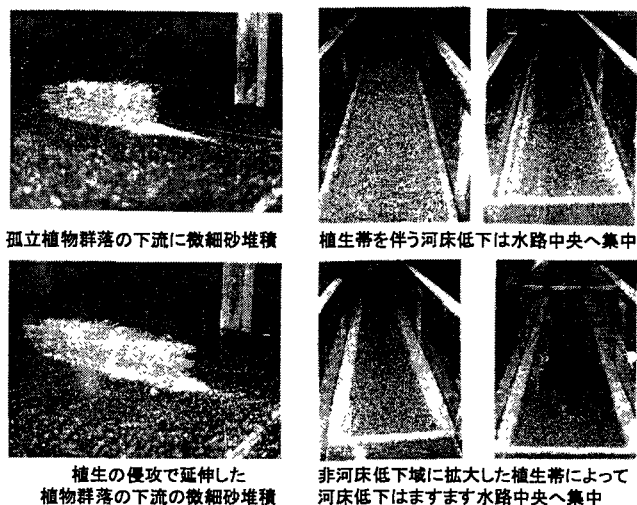


図3 模擬植生を用いた植生周辺の移動床過程についての水路実験

4. 植生の繁茂・破壊—扇状地河道の樹林化

先に述べたように河相変遷に関連して河道内植生の盛衰は河川管理の重要な視点となってきた。航空写真の利用によって河道内植生の盛衰がリーチレベルあるいはセグメントレベルで調べられている。

砂田・岩本・渡邊²⁹⁾は、富士川(釜無川)の植生変遷(植生面積率の経年変化)を航空写真によって調べ、出水履歴との関係を検討した。これに基づいて、指数関数をもとにした植生繁茂関数・破壊関数(その時間スケールをパラメータとする)を想定して、河道植生状態を長期に予測しようとしている。資料解析から、繁茂・破壊速度は急流や川幅水深比の大きい河川ほど大きいという傾向などが得られた。

一方、1998年9月に近年樹林化が進んできた手取川では久々に大出水(2883m³/s)を経験し、これまで樹林化の傾向にあった河道植生がどのように変化したかが注目された。辻本・村上・安井³⁰⁾は航空写真による植生占有面積率の解析を画像解析によって省力化し(図4参照)、大洪水の植生破壊を定量的に認識した。図5にはいくつかの代表区間(扇状地区間約17kmを1kmずつの区間に分割して解析した)の植生占有面積率の経年変化を示す。図によると手取川では1980年頃以前は植生面積占有率は横ばいで推移してきたが、その後急激に拡大していたのが、1998年の大出水でかなりダメージを受けたということが読み取れる。一方、これまでの出水履歴(年最大流量の経年変化)を図5に示す。手取川では1980年に手取川ダム(総貯水容量が約2億m³で、手取川の基本高水6000m³/sを計画高水流量5000m³/sに調節)が完成している。図6では、ダム完成後については洪水調節をしなかった場合

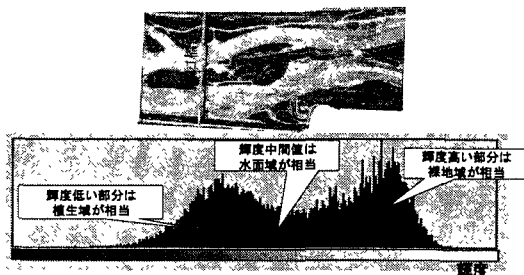


図4 画像解析による植生域・水域・裸地域の区分

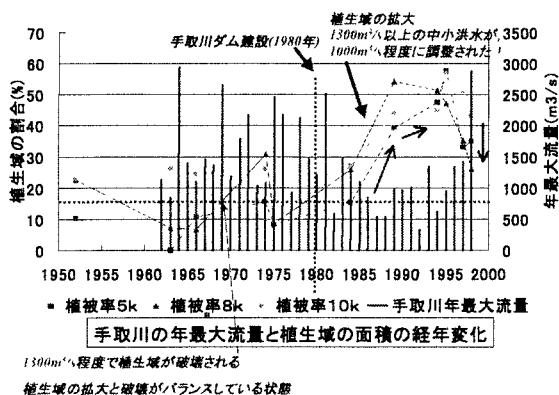


図5 手取川河道植生占有面積率の経年変化

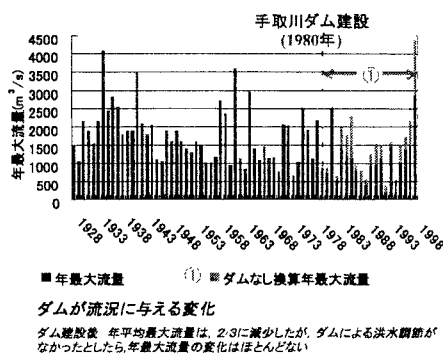


図6 手取川年最大流量の経年変化

の換算流量も示した。これによると、平均年最大流量はダム完成後は1500m³/sから1000m³/s以下に減じたが、これは洪水調節の結果といえる。すなわち、ダム建設後、洪水調節により、平均年最大流量が2/3に減じ、あるいは1300m³/s程度を越える大出水の頻度がきわめて少なくなり、植生の破壊機会が減じて樹林化が拡大したと推論される。

これをもとに、次のようなシナリオを想定した³¹⁾。すなわち、手取川ではダム建設後、扇状地区間では河床低下(砂利採取も大きな要因)やアーマリー化が進行しており、前章で述べた孤立植生群落(ここではヤナギ類およびアキグミの群落)が拡大するに恰好な条件(適度な強度の出水で植生群落の周辺に微細土砂が堆積し、扇状地特有の低水時の陸化による植物侵襲)が整って植生繁茂が進む一方、こうした植生が出水によって破壊される機会が減ったのが樹林化のシナリオと考えた。図7は安倍川について、植生面積占有率の推移と年最大流量を見たものである。安倍川は上流に大規模崩壊地を持ち、計画流量、対象セグメントの勾配、河床材料とも手取川とよく似ているが、本川にダムがなく、現在も河床が上昇気味の河川で、最近でも1500m³/sを越える出水の頻度は高く、植生面積占有率は10%程度で推移している。

繁茂については、先に述べたようにそれに関わる素過程がいくつか示されている。また、藤田・李ら^{32),33)}は多摩川の事例では河床低下に伴い、洪水時の横断混合が活発化し、微細砂が河川敷に堆積してパイオニア的植生が河原に侵入し、その後出水と植物遷移の進行の中で、滞筋の集中化と河川敷の比高増大、樹林化が進むといったシナリオを呈示している(図8,9)。

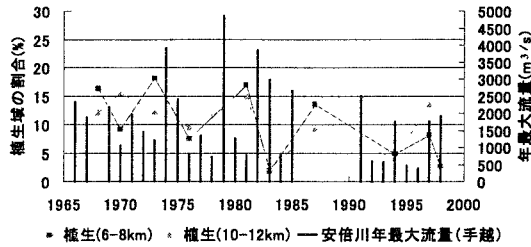


図7 安倍川の河道植生の面積占有率の推移と年最大流量

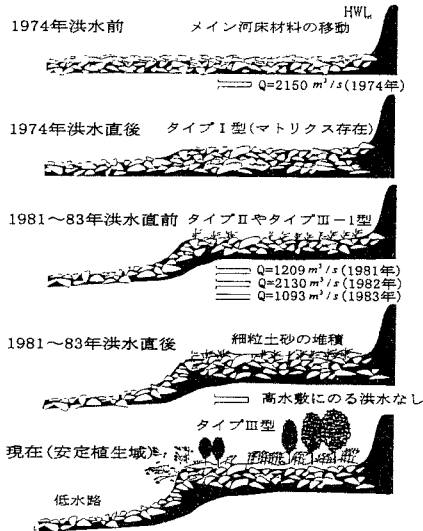


図8 安定植生域形成の過程(藤田・李)

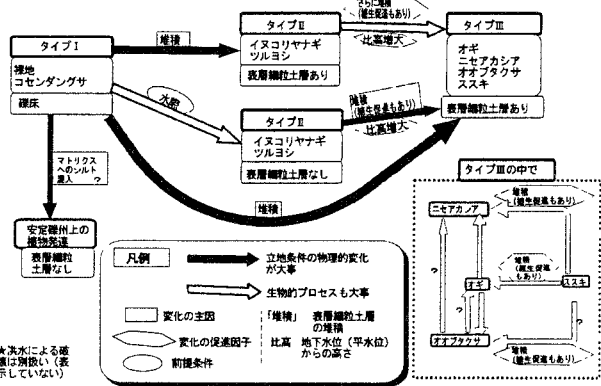


図9 物理基盤形成と植物の遷移(藤田・李)

一方、洪水時の植生破壊の機構については、実現現象の事例観測が難しくこれまで研究は少ないが、1999年の千曲川での大出水(平均年最大流量 $1100\text{m}^3/\text{s}$ に対して、 $3600\text{m}^3/\text{s}$ の出水)に際して、ハリエンジュについて破壊状況が調査された³⁴⁾。倒伏限界との関連や流下物の堆積状況などが検討され、興味深い成果が得られている。流下物の引っ掛かりによる流体力の増加による倒伏のほか、とくに河岸侵食を誘因とする植生基盤の流失などが破壊の要因であることが明らかにされ、定量評価へと向かいつつある³⁴⁾。

さて、手取川扇状地区間について、植生域の拡大速度については必ずしも定量評価されてはいないが、比較的日常的に侵襲しており、大出水のない期間内での航空写真の解析から植生面積拡大速度の概略値が知られている。また、こうした調査の中で、個々の樹木の幹径と樹高、樹齢、樹木数密度などの相関が検討され相関式が得られている。これらを背景にすでに上記で紹介したシナリオが具体的に検討された。ダム建設前では、植生の発生(裸地面積に対し $G\%$ の植生発生率を想定)は見られても、ある程度以上の規模の出水によってこれらが破壊され、貧相な植生状態のまま推移する(図10(1))。これが、扇状地河道の潜在的景観であろう。これに対し、出水の規模や頻度が減少すると、破壊機会は減少し、残った植生は自らの成長によって次第に破壊に対する耐性を得ていく(このモデルでは樹高、幹径が成長)。出水の規模・頻度の減少とともに破壊に対する植生の耐性の増加もあいまって破壊機会は減少、河道内樹林化が進行する(図10(2))。破壊については樹木が散在した条件での水理解析に基づき、植生立地基盤が流失するか否かで(移動限界を超すか否か)で判定されるものと想定した。こうしたモデルで手取

植生域の平衡

- ・洪水の強度・頻度が大きいとき植生域は生育と破壊を繰り返す平衡状態にあり、一方的に増加しない。
- ・ダム建設前の流量特性のもとにおいては植生域はほぼ平衡状態にあると仮定する。

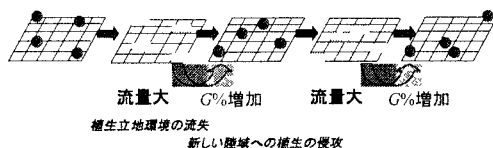


図 10(1) 平衡状態にある礫床河道植生

植生域拡大型

- ・中小洪水しか来襲しない場合、植生破壊の主要因となる河原(立地基盤)の侵食・流失の機会が減少。また、植生化が進むと、周辺の掃流力も減少して破壊機会がさらに減少する。

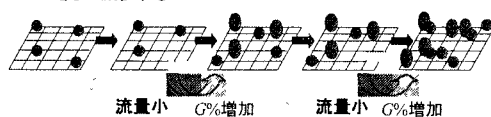


図 10(2) 樹林化の侵食する礫床河道植生

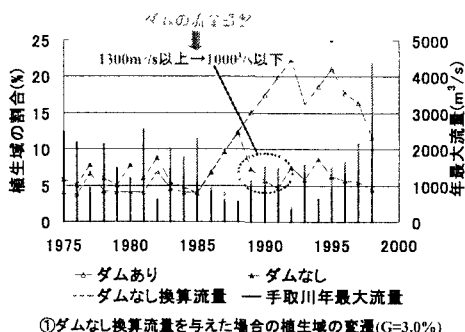


図 11 植生繁茂シミュレーションの結果

川扇状地河道について、ダムによって調節された流況と、ダム調節がなかったとした架空の流況に対してシミュレーションを行うと、図 11 に示すように、両者に有意な差が現れた。今後、どのようなダムでの洪水調節を行うかは(下流河道災害の安全性をにらみながら)、今後の植生動態を左右することが示唆された。

植生の盛衰については、植生の繁茂、破壊のモデルが精緻化されれば、さらに精度の高いシミュレーションモデルが作られて現象の説明ができ、また将来予測も可能となろう。これまでのモデルでは植生の繁茂と破壊は独立に考えられてきたが、清水ら³⁵⁾は利根川水系渡良瀬川での出水後のハリエンジュ群落の破壊とその後の繁茂について調査し、洪水時に倒伏したハリエンジュの幹から、出水後おびただしい数の萌芽が見られ、一気に樹林化をもたらすことに注目している(これを「動的樹林化」と呼んでいる³⁶⁾)。ハリエンジュが河道内樹林化の主役となっている河川は少なくなく、植物種に応じた破壊・繁茂機構も今後の研究課題であろう。また生態学的な視点で、種子の散布と定着発芽条件などについても知見が集積してくれば、植生域拡大・繁茂についてのモデルが精緻化されよう。そのなかで、清水ら³⁶⁾が彼らの言う「動的樹林化」に着目したのは、樹林化というシナリオの中で何が重要な鍵かというのを直感的につかんでおり、これが工学的研究手法の強みであろう。

すでに述べたように、河道動態(河床変動・流路変動)と植生とは互いに相関しあっているものと認識されており、それゆえ植生動態が注目されているのであるが、現在のところ両者が陽に関連したモデルは組まれていない。上記のモデルでも、河床が低下し植生繁茂領域が拡大している前提で議論しているが、植生化とともに進行する河床・流路変動は考慮されていない。たとえば樹林化とともに砂州(河川敷)には土砂が堆積して標高が増加する一方、河床低下は滞筋に集中し、砂州波高の拡大がもたらされる。手取川扇状地河道区間については、既述のモデル³¹⁾では地形が考慮されていなかったが、交互砂州を 2 次元正弦波状地形で近似表現する。波高を幾通りか変えたモデル交互砂州地形で先のシミュレーションを行うと図 12 のようになる。図のように砂州波高(河川敷比高)が高

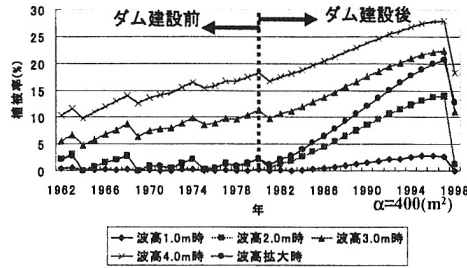


図 12 モデル交互砂州地形での樹林化の進行

いほど樹林化の進むこと、河床低下とあいまって現象が進むと樹林化の進行速度が加速されることなどがわかる。一方、すでに植生が微細砂を捕捉して河川敷高が増加する一方、また滞筋の河床低下を助長することは河川水理学的に既述されるので、総合化されたモデル化を待たばかりである。

土砂供給の減少や洪水の強度や頻度が減少した扇状地河道では、交互砂州が形成されている場合が多いが、河床低下は滞筋に集中し、一方ウォッシュロードとして運ばれてくる微細砂が河川敷に堆積して砂州の波高あるいは河川敷の比高を増加させる。陸化した微細土砂で覆われた空間に植生が侵入するが、植生はウォッシュロードの捕捉を促進する。一方、扇状地河道での大出水ではきわめて大きな掃流力が出現し、植生基盤が流失することで植生破壊がおきるが、洪水の規模・頻度の減少と植物の成長によって植生破壊機会の顕著な減少が見られ、これらの結果として河道内樹林化が進んでおり、今後も、出水状況や河川敷の比高の是正を行わない限り樹林化の傾向は継続するとみられる。洪水疎通障害を解消することだけでなく扇状地河道あるいは礫床河道の「潜在自然河道景観」(河原植生や河原の生態系)を復元するため、多摩川ではハリエンジュの伐採、河川敷の切り下げが試行的に実施された³⁷⁾。しかし、持続的にこうした景観を維持するには、ある程度の規模の出水の頻度と水系一貫した土砂の連続性を取り戻す必要がある。

5. 河道変化と植生繁茂—木曽川水制群とワンド景観

扇状地河道は土砂動態と植生繁茂・破壊といったシステムの理解に恰好な場であったが、ここでは別の例によって河道変遷が植生繁茂を誘起し、さらにそれが新たな河川景観へと変遷していくシナリオを木曽川水制群周辺の景観変化で見てみよう。

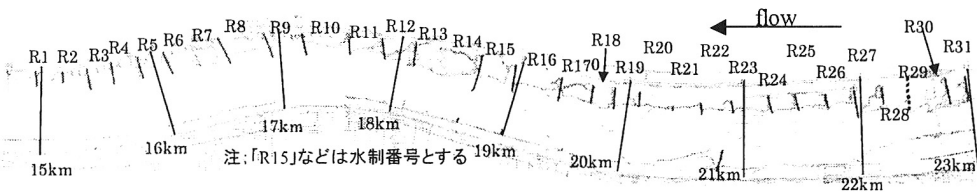


図 13 木曽川下流水制群

	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12	R13	R14	R15	R16	R17	R18	R19	R20	R21	R22	R23	R24	R25	R26	R27	R28	R29	R30	R31
1963	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1975	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	3	5	3	3	2	4	4	4	2	2	2	2	2	2	2	2	4	4	4	3
1982	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	5	5	4	3	4	5	4	5	3	4	5	5	4	4	5	5	5	5	4	4
1987	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	5	5	4	3	4	5	5	5	3	4	5	5	5	5	4	5	5	5	5	4
1991	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	5	5	4	4	4	6	5	5	4	4	4	4	4	4	5	5	5	4	4	4
1995	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	5	5	5	4	4	4	5	5	5	4	5	5	5	5	4	5	5	5	4	4	5

図 14 わんどパターンの経年変化

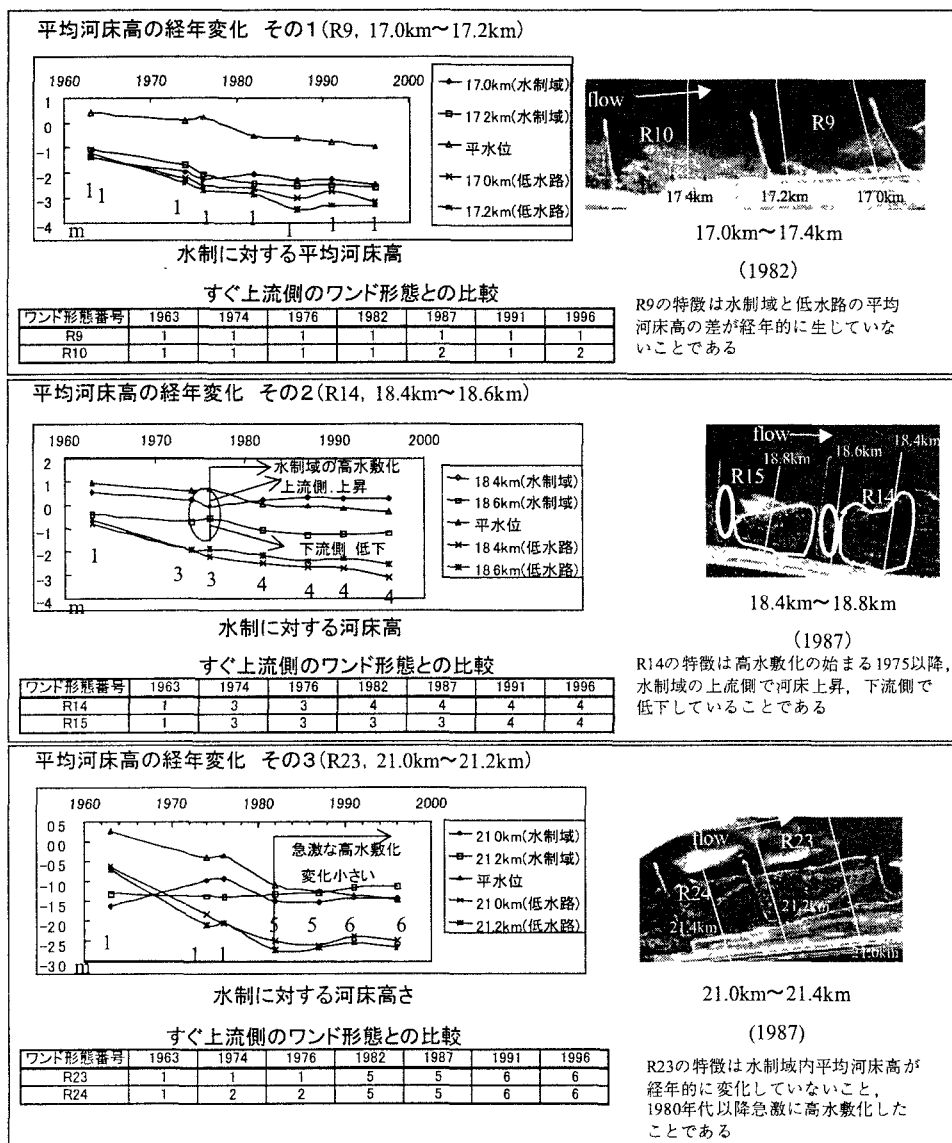


図 15 河床高さの変化とわんど形態

木曽川下流域 15km～25km 区間には、明治改修で航路確保、河岸防御を主目的としたケレップ水制群が設置された。現在この水制群領域は低水路の河床低下により、高水敷化・陸化が進み、樹木群が繁茂し、また場所によっては水制直下流部が局所的に河床低下したワンドとなり、潮位変動による影響で干潟の環境をもたらすなど独特の生物生息場を提供している（図 13 参照）。こうした河相変遷を調べると以下のようなものである^{38),39)}。

図 14 には各水制区間の景観の変遷を航空写真と踏査に基づいて以下の 6 パターンに分けて記した。(1) 水制間領域はほぼすべてが水域。(2) 河岸に沿って陸地化・樹林化。(3)：後方の水制を底辺とした三角形あるいは台形状に陸地化・樹林化。(4) 陸地化・樹林化領域が長方形形状であるが上流側水制背後は水域。(5) 水制間全体が陸地化しているが、本川と連続するたまりが存在。(6)：パターン 5 とほぼ同じであるが、たまりが本川と隔離している。図 14 より、この区間を 3 つに区分できそうで、R9, R14, R23 をその代表とし(各水制を図 13 に示すよう

にR*などと命名した), 詳しく検討した。

図 15 にまとめた資料によって、代表的な水制区間の状況を見ると以下のようである。まず、R9 においては、いずれの年代でも水制域内河床高は平水位よりも小さい。また、水制域内で上下流間の変化はそれほど大きくない。すなわち、水制背後の局所的河床低下は顕著ではない。これは、すぐ上流の水制域 R10 がパターン(1)もしくは(2)であることから、洪水時にはそこでの土砂輸送が激しく、水制をまたいだ流下方向への土砂輸送によって R9 への流入土砂が大きくなり、水制をまたいだ流砂の連続性が保たれていることによるものと考えられる。一方、R14 では、1976 年を境に、それまで水制域内の上下流位置に関わらず河床低下が生じていたのが、上流側で洗掘、下流側で堆積傾向に変わった。これにより、下流側の河床高は平水位よりも大きくなっており、植生が繁茂しやすい状況になっている。すぐ上流の水制域 R15 では、1974 年頃より(3)に遷移して植生の繁茂が激しく、洪水時に R15 から R14 への土砂流入が減少、水制直下流の洗掘をもたらしたのと考えられる。この洗掘域の河床高は平水位よりも小さく、そのため植生の進入はなく、わんど状の水域を保つことが可能となっている。また R23 では、水制域内の上下流位置による河床高さの違いは小さく、したがって水制直下流の河床低下は顕著ではない。この水制間では、1980 年以前には、パターン(1)もしくは(2)であったのが、1980 年以降、(3)、(4)のパターンを経ずに急激に(5)へと移行している。この変化の時点は、水制域河床高がほぼ平水位程度となった時期と対応している。すなわち、すぐ上流の水制間 R24 が樹林化してそこからの流出土砂が減じると同時に、R23 のほとんどの領域も樹林化して、水制直下流の河床低下が生じる前に、河床全体が安定してしまったのと考えられる。

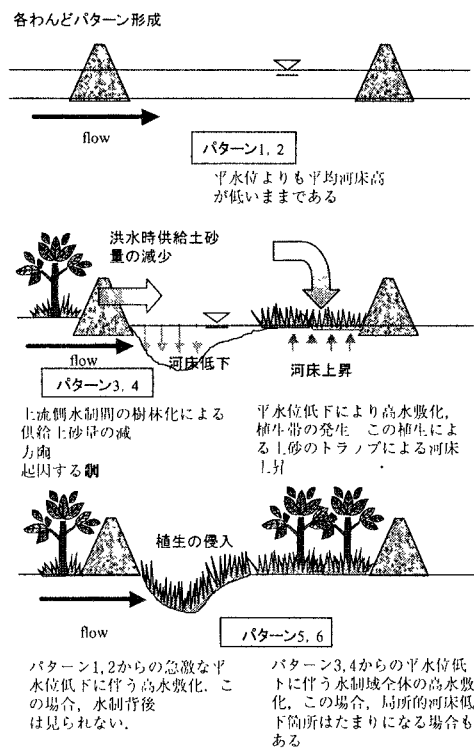


図 16 わんど地形形成に関する仮説

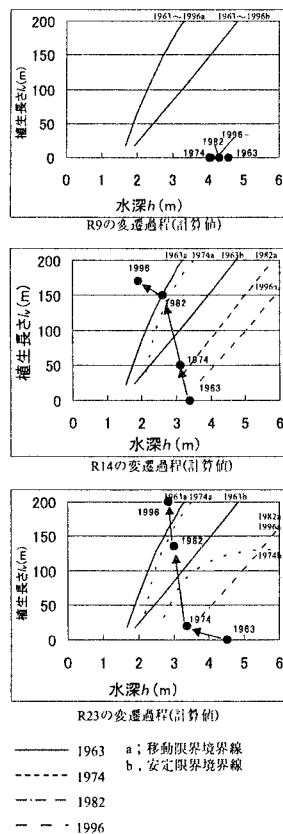


図 17 わんどパターンの変化
(数値解析結果と実際の対応)

上記のことから、水制群区間のワンド群の形成について、図 16 に示すような仮説を提案した。すなわち、わんど地形の形成には、水制をまたぐ流下方向の土砂の連続性に支配される水制直下流の局所的河床低下が重要と考え、水制域を対象に鉛直 2 次元の流れの解析と河床変動解析を行った³⁹⁾。計算条件として、木曽川水制群区間を想定し、平均河床勾配 $i_b=1/4000$ で、水制間距離 $l=200\text{m}$ 、高さ $h_g=1\text{m}$ 、天端長さ 5m 、角度 30° の台形断面ケレップ水制を対象とした。河床材料としては bed-material load の代表的河床材料 0.5mm の中砂を対象とした。また抵抗は小規模河床形態の効果も考慮して $C_f=0.005$ としている。洪水時の水制域水深 h と下流側水制から上流に想定される植生域長さ l_v をパラメータとして、水制域で砂が動かない(限界掃流力以下)限界、局所洗掘孔が不安定になる条件が求められる。これらを先の代表水制区間について計算したものが図 16 で、航空写真データのある各時点での状況を図中にプロットで示した。これによって、このワンド群周辺の河相変遷が説明できた。すなわち、R9 においては、植生に変化はなく、河床変動領域区分線は変化しない。また、実際の状況は常に不安定領域であり、これは安定した洗掘領域が生じていない現状と対応している。また R14 においては、1963 年に不安定領域にあったものが、1974 年にいったん安定洗掘領域に移行したのち、1982 年以降は河床が動かない流域へと移行している。すなわち、いったん水制直下流の局所的河床低下が生じる条件にあったことになる。さらに R23 では、1974 年以前は不安定領域にあるが、1982 年にはいきなり河床が動かない領域に移行する。これは、いったん安定洗掘領域を経ず、したがって水制下流部に水域を形成できなかったことと対応している。

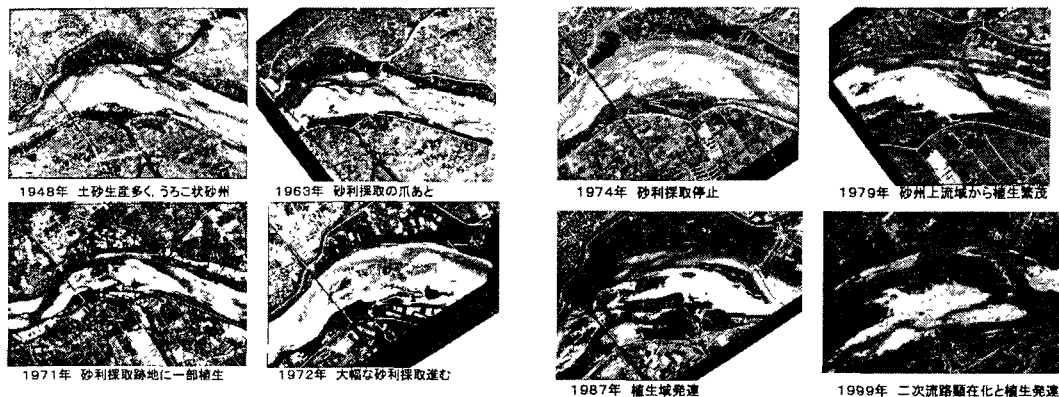
6. 砂河川の砂州地形と植生—木津川砂州リーチの景観変遷

最後に、砂河川のようにしばしば冠水し、砂移動が活発な河道で、砂州というリーチに着目し、より詳細に植生動態との関連で砂州地形の変化を見ることによって、素過程記述に必要な河川水理学の発展を期待したい。

淀川水系の木津川(流域面積 1600km^2 、幹川流路延長 147km 、計画流量 $6100\text{m}^3/\text{s}$)では、多摩川、千曲川という礫河川に続いて 1998 年から「河川生態学術研究」⁴⁰⁾がスタートし、砂河川の砂州域でのハビタートという視点から砂州の微地形・植生の詳細な変遷についての研究が行われている⁴¹⁾。京都府相楽郡木津町から城陽市に至る北流区間のセグメントを対象とし(勾配は約 $1/1150$ で、交互に砂州が形成している。河床材料は主として 0.5mm 程度の細砂、数 mm の細礫、数 cm の中礫の 3 集団からなる)、このセグメントを代表するリーチとして 12km 付近の左岸砂州を中心とする約 2km 区間を研究サイトとしている。対象砂州は、上流肩部に植生域(ヤナギ類、ソルヨシ、セイタカヨシなど)が発達しておりまた、二次流路(secondary channel)、わんど、たまりなどの一時水域(temporary water)が認められる。裸地域にはいくつかの旧流路跡やその折の分級が見られる。また、孤立植生が作るマウンドや分級も特徴的であるといえる。この地先では数 m 以上冠水するような出水が年に数度生起している。図 18 は、対象砂州の変遷を終戦後の米軍写真から今日まで航空写真によって見たものであるが(各写真の右方が上流)、砂州の位置・形状に大きな変化はない。ただし近年、砂州上流肩部の植生域が発達し、それに影響されて滞筋の湾曲がきつくなってきている。また、1998 年の出水によって砂州内の二次流路が固定化された。砂州の形状の変化は顕著でないというものの、着色砂柱埋設による観測(福岡らが洗掘調査に用いた方法を応用したもの⁴²⁾)では、地形変化がほとんどない場所でも数 10cm の砂層が洪水時に置き換わっていることが確認されている⁴¹⁾。

この砂州について、1974 年以降の航空写真と横断測量結果からより詳細に、砂州地形の変化がどのように植生域発達と相関しているかを砂州上流肩部において検討した⁴³⁾。図 19 は 1974 年以降の洪水履歴を示す。

まず、図 20(1)に示すように、航空写真から 1974 年には砂州上の植生はほとんど見られないが、76 年から 84 年にかけて植生帯が水際に発達していることがわかる。横断測量結果を見れば、自然堤防に相当する畝状地形の発達が見られ、そこに植生が立地した。図 19 からわかるように 1977 年から 81 年の間には $3000\text{m}^3/\text{s}$ を越すような出水はなく、こうした畝状地形は植生を伴いながら(破壊されないで)発達したことが推定される(植生帯①の形成)。1982 年には $4000\text{m}^3/\text{s}$ 級の洪水が生起しているが、すでに植生が強固となり(草本から木本へと遷移し)大規模な植生破壊は起こらなかったであろう。なお、この植生帯の内陸側には相対的に低



(1) 終戦後から砂利採取最盛期まで

(2) 砂利採取禁止後最近まで

図 18 木津川 12km 地点砂州の変遷

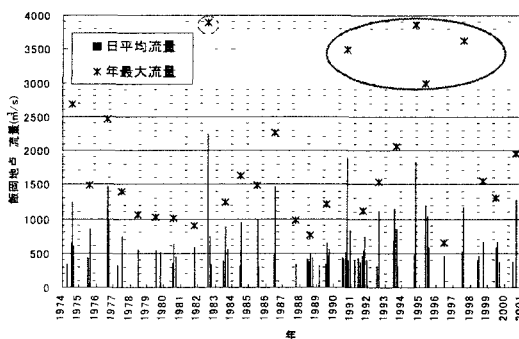
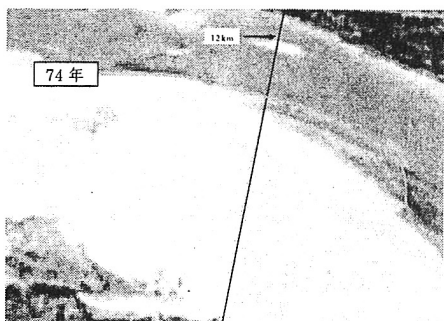


図 19 木津川洪水履歴(飯岡 16km)

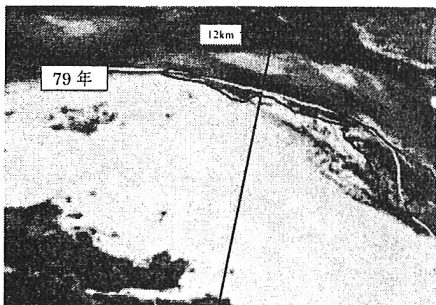
い溝状地形が縦断的につながりにつながり、出水時には二次流路①を形成したであろう(現在もこの流路筋にたまり列がある⁴⁴⁾。

図 20(2)に示される 1985 年の航空写真では、その溝地形のさらに内陸側にも植生帯が出現し(植生帯②)、横断測量結果からもこの位置に畝状地形が発達してきているのが認められる。植生帯②は、二次流路①による自然堤防形成機構によるものと考えられる。こうした畝状地形に植生が立地した。この時期、植生帯①も発達を続けている。植生帯②の内陸側にも縦断方向につながった相対的に低い溝状地形が現れ、出水時には 2 本目の二次流路 ②) となったであろうと推測される(たまり列が現残)。このとき二次流路①も出水時に堆積しないで保全された(流入する浮遊砂は両側の植生帯の横断方向正味輸送された)。

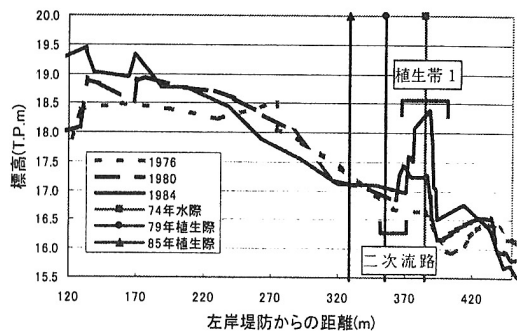
図 20(3)に進むと、植生は次第に内陸側に侵攻しており、個々の植生帯も幅幅と比高の上昇が認められる。二次流路①の比高も上昇し(流量・流速が減少し、横断混合より流路内堆積が卓越)、次第に冠水頻度は減っていったものと見られる。図 20(4)によると、1995 年では二次流路①の比高が上昇しているのに対して二次流路②はなお(とくに 94 年の $4000\text{m}^3/\text{s}$ 級洪水時において活発な横断混合を行い植生帯②の基盤である畝状地形の発達に伴って)比高低下を続けている。二次流路②の内陸側にも植生が侵入し、植生帯③が形成されるとともに新に畝状地形が発達しつつある。植生帯は比高が充分大きくなり冠水頻度は減少し比高の上昇は止まっている。また、植生帯②のさらに内陸側に比高低い溝状地形が現れ、その比高が低下してきた。出水時にはここにも二次流路③が出現することになる。3 本の二次流路は比高が異なり(新しいものほど低い)洪水流量に応じて出現する二次流路の本数は異なる。98 年の $3500\text{m}^3/\text{s}$ を超す洪水で二次流路③は流量が集中して激しく侵食され、現在、二次流路③は常に水域となっている。



(a) 74 年航空写真

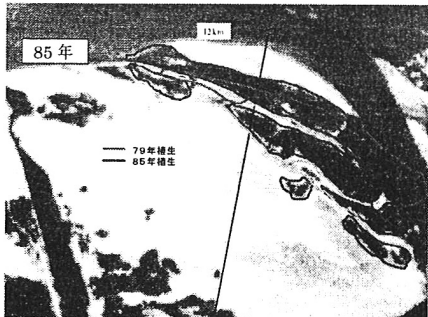


(b) 79 年航空写真

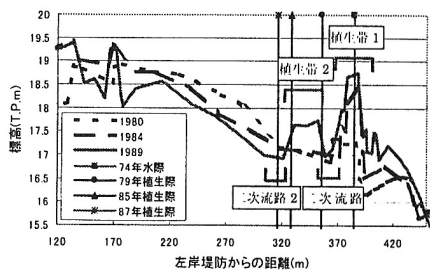


(c) 76～84 年横断地形

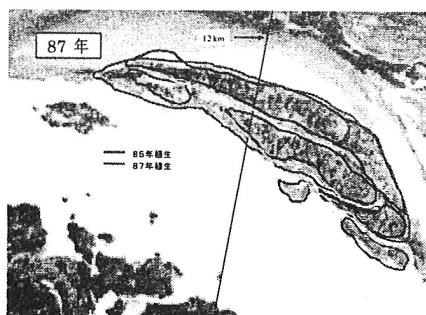
図 20(1) 木津川砂州の変遷(1974 - 1984)



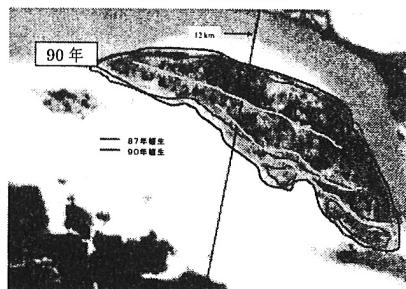
(a) 85 年航空写真



(b) 80～89 年横断地形

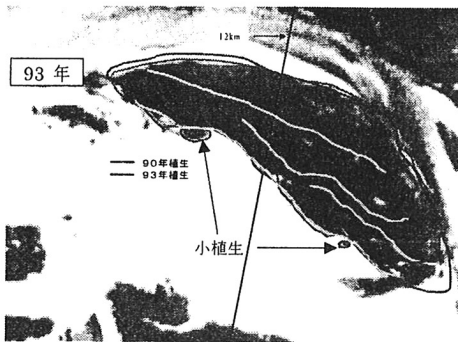


(c) 87 年航空写真

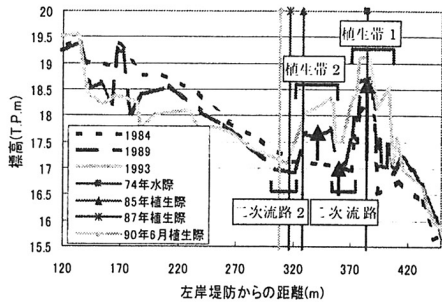


(d) 90 年航空写真

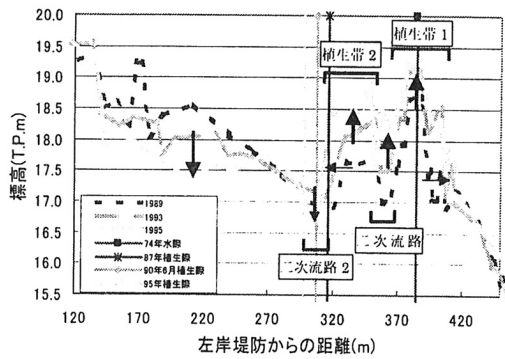
図 20(2) 木津川砂州の変遷(1985 - 1990)



(a) 93 年航空写真

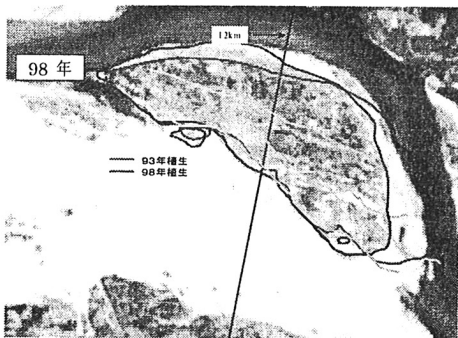


(b) 84～93 年横断地形

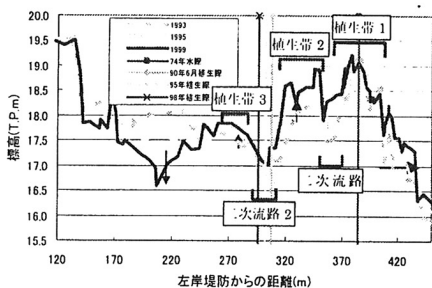


(c) 89～95 年横断地形

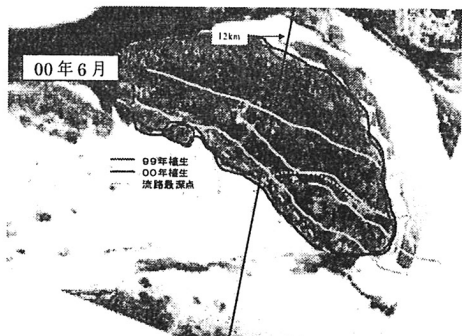
図 20(3) 木津川砂州の変遷(1984 - 1993)



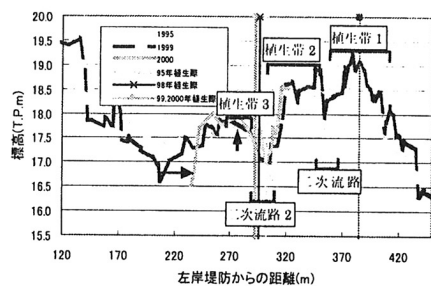
(a) 98 年航空写真



(b) 93～99 年横断地形



(c) 00 年 6 月航空写真



(d) 95～00 年横断地形

図 20(4) 木津川砂州の変遷(1993 - 2000)

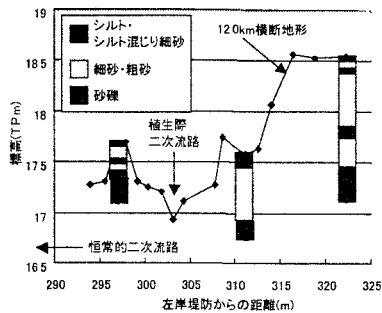


図 21 砂州材料の鉛直分布

図 21 には図 20 と同じ測線上の一部で、砂州材料の鉛直分布を調べたもので、もともとの基盤砂礫の上に、砂が堆積して植生基盤が出来、さらに植生繁茂とともに微細砂を捕捉して地形かつ植生基盤が発達してきたことがうかがえる。

7. あとがき

本テキストでは、植生動態と流路変動がいかに緊密に相互に作用を及ぼしているかを、最近の研究を紹介するなかで強調した。わが国の河川のほとんどは連続堤で堤内地あるいはももとの氾濫原と仕切られているが、河況係数の大きいわが国では必然的に河道内に氾濫原の特性が閉じ込められそれらを強調されたかたちで見ることができし、それが河道設計や新しい河道計画では治水安全度に大きく関わることでもある。1970 年代の移動床水理学の目覚ましい発展は中・長期のスケールの河床変動予測を可能にしたように見えたが、本テキストで強調したように、植生の作用によって、植生の繁茂が進むか進まないかで河道の変化の仕方は大きく異なる。また植生の繁茂は様々な規模の出水と強く関連して決まる。70 年代の河床変動解手法の開発は、ダム下流や本川掘削後の流入支川の河床変動予測であったように、まさに今日的に言えばアセスメントを先取りしていたのだが、やはり河道内植物の動態にまで目はいかなかった(植生は洪水疎通障害源で排除すべきものと見なされていたのであろう)。水系・流域への様々なインパクトの結果として具現してきた河道内樹林化など管理が追いつかなかったり、河川環境との関連で植生をそのまま(議論まで)放置せざる得なかったりという状況から、生態系保全を含む河川環境も治水・利水とともに河川管理の目的となった今日、植生動態・河道動態の一体化した議論は重要な視点である。

ここでは、基本となる概念や素過程およびそれに対する基本的な水理学的アプローチの枠組みなどを説明した後、(1)植生の侵攻・成長と洪水時の破壊のバランスで河相が支配される扇状地河道、(2)明治改修の河川工事である水制群周辺が今日的景観に至った経過としての植生動態・河床変動、(3)冠水頻度の高い砂河川砂州リーチでの植生と微地形の相互作用などの例をとりあげて詳しい説明を行った。これらの題材は、植生・河道変遷における両者の相互作用の仕組みと実態を理解するのに最適のものと考えているが、今後の河川(水系・流域)管理に向けて、どのように植生動態と河道動態(河床変動・流路変動)の予測手法として融合させて応用していくか、またこうした知見からどのようにして最適あるいは順応的な管理方法を提案していくかなど取り組むべき課題も多い。

参考文献

- 1)河川環境管理財団編：河道変遷特性に関する研究—適切な河川環境管理を目指して、平成 10 年度河川整備基金事業報告書、156p., 1999.
- 2)Tsujimoto, T. . Fluvial processes in streams with vegetation, *Jour Hydraul. Res.*, IAHR, Vol.4, No.6, pp.789-803, 1999.

- 3)山本晃一：沖積河川学，山海堂，470p., 1994.
- 4)辻本哲郎：新しい河川景観の概念とその整備，第5回水資源に関するシンポジウム論文集，pp.625-630, 1997.
- 5)辻本哲郎：河川の生態系保全機能の評価に関わる水工学，第36回水工学に関する夏期研修会講義集，Aコース，A-6, 20p., 2000.
- 6)辻本哲郎：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，Aコース，A-1, 20p., 1998.
- 7)大矢雅彦：河道の歴史的変遷，河道変遷特性に関する研究，第3章，(財)河川環境管理財団，pp.19-46, 1998.
- 8)Gessler, J. : Aggradation and degradation, *River Mechanics*, edited by H.W. Shen, Chapter 8, Water Resources Pub., 1971.
- 9)中川博次・辻本哲郎：移動床流れの水理，技報堂出版，310p., 1986.
- 10)河川植生の生育特性に関する研究会：河道内における樹林化実態調査，(財)リバーフロント整備センター，1998.
- 11)辻本哲郎・岡田敏治・村瀬尚：扇状と河川の川原の植物群落と河道特性 - 手取川における調査，水工学論文集，Vol.37，pp.207-212, 1993.
- 12)河川環境管理財団編：河川の植生と河道特性に関する報告書，河川整備基金事業，127p., 1994.
- 13)河川環境管理財団編：河川管理のための植生の調査方法，河川整備基金事業報告書，51p., 1996.
- 14)清水義彦・辻本哲郎・中川博次：直立性植物層を伴う流れ場の数値解析に関する研究，土木学会論文集，No.447/II-19，pp.35-44, 1992.
- 15)Tuexen, R. : Die heutige potentielle natürliche Vegetation als Gegenstand der Vegetations- Kartierung, *Angewandte Pflanzensoziologie*, 13, Stolzenau/Weser, pp.5-42, 1956.
- 16)リバーフロント整備センター編：河川における樹木管理の手引きー河川区域内における樹木の伐採・植樹基準の解説，山海堂，204p., 1999.
- 17)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43巻，pp.457-462, 1998.
- 18)宇多高明・藤田光一・佐々木克也・服部敦・平館治：河道特性による植物群落の分類 - 利根川と鬼怒川を実例として，土木技術資料，Vol.36, No.9, pp.56-61, 1996.
- 19)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拡大過程，水工学論文集，Vol.40，pp.1003-1008, 1996.
- 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，Vol.40，pp.199-204, 1996.
- 21)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，pp.99-108, 1994.
- 22)池田駿介・泉典洋：浮遊砂の横断方向拡散係数について，土木学会論文集，No.434/II-16，pp.47-55, 1991.
- 23)池田駿介・太田健一・長谷川洋：側岸部植生帯が流れおよび粒子態物質の輸送に及ぼす影響，土木学会論文集，No.447/II-19，pp.25-34, 1992.
- 24)辻本哲郎：掃流砂・浮遊砂，流体の非線形現象(池田駿介編)，第6.3節，朝倉書店，p.161, 1992.
- 25)Lane, E.W. and A.A. Kalinske : Engineering calculations of suspended sediment, *Trans. ASCE*, Vol.111, pp.67-102, 1946.
- 26)芦田和男・道上正規：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，No.195，pp.55-65, 1972.
- 27)Egiazaroff, I.V. : Calculation of non-uniform sediment concentration, *Jour. Hydraul. Div.*, ASCE, Vol.91, HY4, pp.73-80, 1965.
- 28)Nakagawa, H., T. Tsujimoto and S. Murakami : Non-equilibrium bed load along side bank, *Proc. 3rd Int. Sym River Sedimentation*, Jackson, Miss., USA, pp.1029-1065, 1986.
- 29)砂田憲吾・岩本尚・渡辺勝彦：出水履歴と河道特性が植生域の長期変動に及ぼす影響に関する基礎的研究，水工学論文集，Vol.42，pp.451-456, 1998.
- 30)辻本哲郎・村上陽子・安井辰彦：手取川における樹林化と大出水時の植生破壊，河川技術に関する論文集，

Vol.5, pp.99-104, 1999.

- 31)辻本哲郎・村上陽子・安井辰弥：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，Vol.45，pp.117-122, 2001.
- 32)藤田光一・渡辺敏・李参熙・塚原隆夫：礫床河川の植生繁茂に及ぼす土砂堆積作用の重要度，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，pp.117-122, 1998.
- 33)李参熙・藤田光一・山本晃一：礫床河道における安定植生域拡大のシナリオー多摩川上流部を対象とした事例分析より，水工学論文集，Vol.43，pp.349-354,1999.
- 34)服部敦・瀬崎智之・吉田昌樹：礫床河道におけるハリエンジュ群落の出水による破壊機構と倒伏発生予測の試み，河川技術論文集，Vol.7, pp.321-326, 2001.
- 35)清水義彦・小葉竹重機・岡田理志・新船隆行・岩崎工：洪水攪乱によるハリエンジュの破壊・再生と河道内樹林化について，河川技術に関する論文集，Vol.6, pp.59-64, 2000.
- 36)清水義彦・小葉竹重機・岡田理志：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，Vol.45，pp.1099-1104, 2001.
- 37)島谷幸宏・高野匡裕：多摩川永田地区における学術研究と河道修復－順応的管理の実践と課題，河川技術論文集，Vol.7, pp.381-386, 2001.
- 38)篠田孝・水谷直樹・松山康忠・辻本哲郎：ケレップ水制周辺の地形履歴から見たワンド形成過程と水辺環境の特性に関する考察，河川技術論文集，Vol.7, pp.333-338, 2001.
- 39)北村忠紀・山田淳夫・辻本哲郎：水制背後の局所的河床低下によるわんど地形の形成，河川技術論文集，Vol.7，pp.327-332, 2001.
- 40)河川生態学術研究会：川の自然環境の解明に向けて，(財)リバーフロント整備センター，10p.,1997.
- 41)辻本哲郎：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, 2001.
- 42)福岡捷二・道中貢・平生昭二：複断面蛇行河川における洪水時の低水路内岸側河床の最大洗掘深調査，水工学論文集，Vol.42, pp.973-978, 1998.
- 43)鷺見哲也・荻島晃・片貝武史・辻本哲郎：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，Vol.6, pp.65-70, 2000.
- 44)鷺見哲也・岩崎充宏・辻本哲郎：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, 2001.