

植生周辺の掃流過程と中州の発達

BED LOAD TRANSPORT AROUND VEGETATED AREA AND DEVELOPMENT PROCESS OF ISLAND

¹辻本哲郎・²辻倉裕喜

Tetsuro TSUJIMOTO and Hiroki TSUJIKURA

¹正会員 工博 名古屋大学大学院助教授 工学研究科地圏環境工学専攻 (〒464-01 名古屋市千種区不老町)

²学生会員 金沢大学大学院工学研究科 土木建設工学専攻修士課程 (〒920 金沢市小立野2-11-30)

The river landscape is characterized by an interrelating system of flow, sediment transport, morphology and vegetation, and it should contribute various functions of rivers such as flood control, water resources utilization, amenity for human life and eco-system preservation. Recent change of boundary conditions such as amount and its fluctuation of water discharge and sediment supplied to the fluvial reach has disturbed river landscape. In order to restore the river landscape to its original or potential one, its responding characteristics to the impact to change the boundary conditions should be understood. In this study, based on field observation, development of sand island covered by vegetation (willow bush) has been discussed. Then, essential process contributed to the above phenomenon has been postulated to be described through analyzing bed-load transport process around vegetated area.

Key Words : River landscape, bed-load transport, fractional transport, sorting, vegetation, flow with vegetation, river morphology, sand island, river restoration

1. まえがき

近年, 中流部とくに扇状地の河道は, 上流部で砂防が進んだり, ダムが建設されたことなどにより, 河床低下の傾向にある場合が多く, 護岸など河川構造物の根入れ不足などが懸念され対策がとられてきた。しかし, 最近のように, 持続的発展をキーワードとして治水や利水ばかりでなく環境, とくに生態系保全機能をも考えた河川管理・整備という観点にたつと, 河床低下傾向にある河道の他の側面, たとえば, 河道植生の繁茂, 流路の河床のアーマー化や, armor coatの間隙が細砂やシルトで詰まった状態となっていること, 瀬や淵などの不規則性が少なくなっていることなどによる生態, 生息環境の変質にも注意を払うようになってきている。最近, Mississippi川の侵食制御を目指すプロジェクト (Demonstration Erosion Control Project) の総括として, 河床低下を伴う河川景観の変状に着目したシンポジウム (Conference on Management of Landscapes Disturbed by Channel Incision) が開催され, 河床低下に伴うさま

ざまな側面での問題点が議論された¹⁾。我が国では, 一旦堆積して形成された沖積河川が, 供給土砂量の減少で河床低下傾向に転じたという特徴があり, また新しい河道計画を, 現状の河相を出来るだけ尊重したかたちで進めようという考え方も出てきている。一方, 我が国では, なお, 平成7年7月北陸河川災害に見られるように, 集中豪雨などの際に山間部で大量の土砂が生産され, 河床上昇を伴う河道での移動床過程が生じて, 災害をひきおこす場合がある。とくに, 河床上昇中 (aggradation) の洪水で, 局所洗掘災害が助長される可能性が指摘されている²⁾。こうした中で, 河相, 河川景観が, 供給土砂や流況の変化に対してどのように応答するかを明らかにすることは, 現在の河川景観の認識や, その将来の予測だけでなく, 新たな施設を配置した場合の影響評価, また治水・利水機能を確保しながらも, 水・土砂の放流制御などで固有の生態・生息環境を維持する工夫とその評価を可能にするものと期待される。

本研究は, 典型的な扇状地河川である手取川 (石川県) での中州の調査に基づいて, 植生に影響され

る掃流過程で、どのように中州が発達するかを検討するものである。これに先行して、辻本・北村³⁾は同じ河川でも、アーマー化した礫床部で、植生周辺に本来はwash load成分である細砂が堆積し、低水時にそれが陸化したところへ植生が侵攻することで中州が下流に向かって延伸する過程を見だし、それを模擬植生を用いた水路実験で再現すると共に、数値解析によって説明した。本研究では、その少し下流の砂利河道で出水時に掃流移動が期待される場で、中州を調査、その発達過程を推定すると共に、植生周辺の掃流過程の解析から説明を行おうとするものである。

2. 河相・河川環境の概念

ここで、本研究で用いる河相、河川景観という語の定義をしておこう。河相は、水流、流砂、河道・河床形態の相互作用系を基本とするが、現に設置されている構造物、それに植生を含めて考える相互作用系である（図1参照）。これまで構造物が治水・利水・親水機能を担ってきたが、ほとんどが単目的で、今日のように河川にとくに生態系保全機能を加えて多機能を求める場合、河相全体でその機能を受け持つようにしなければならない。この場合、系の相互作用がそのcompromiseをはかる鍵となっている⁴⁾。たとえばこの河相の相互作用系自体あるいは構成要素のそれぞれが生息環境（habitat）を提供している。このように期待されるさまざまな機能を発揮している河相を「河川景観」（river landscape）と呼ぶことにすれば、今日的河川整備・管理の対象はまさにこの河川景観ということになる。

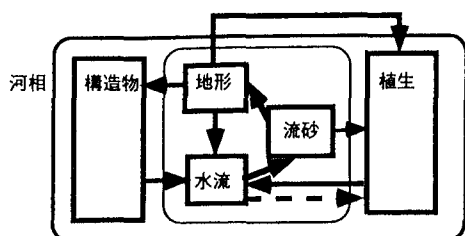


図1 河相を構成する相互作用系

3. 手取川における中州の調査

手取川河口から8.0km付近の中州について、地形、河床材料、植生について調査を行った。微地形・植生の同時調査は、著者らが整理してきた方法^{5), 6)}に準拠したが、さらに成長錐を用いた年輪調査による樹齢調査を追加した。

手取川は石川県を流れる流域面積809km²、流路延

長72kmの一級河川で、下流約17kmが直轄区間で、この部分は平均勾配1/145の典型的な扇状地河川である（計画高水流量は5000m³/s）。1980年に手取ダムが完成して土砂供給がほとんど扞止されたうえ、出水規模が小さくなっている。図2は年最大流量の経年変化を示すが、ダム完成後は年最大流量が減少していることがわかる（ダム建設前の1960~1980年の平均年最大流量が1650m³/s程度であるのに対し、1981~1995年の平均年最大流量は900m³/s程度）。図にはダムがない場合に換算した流量も比較して示した。とくに12~14kmのarmor coat形成の顕著なところについて、その破壊流量は2000m³/s程度と推定されており⁷⁾、近年この規模の出水は激減している。

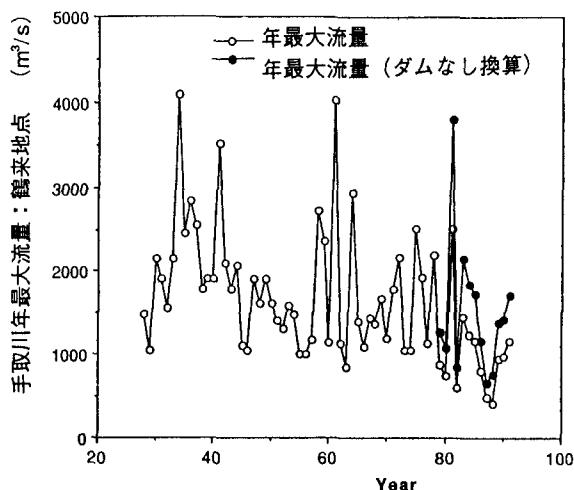


図2 手取川鶴来地点での年最大流量

調査対象とした中州は河口から8.4~8.0kmに存在するもので、この部分は顕著なarmor coatが形成されておらず、出水時の掃流形式での土砂移動が期待される。

調査は1996年夏に行い、河床材料調査の一部を1997年夏に追加した。スタジア測量による微地形測量と植生調査の結果を図3、4に示す。中州は縦断方向の長さが約300mで、幅は約70mで、河道内では孤立して存在する。測量時は低水状態で、そのときの水面から中州の頂点までの高さは約1.2mである。洪水時に中州を横断する流れが発生したと見られ、中州の上・下流端部が切断され、とくに植生が分断されているので、主として中央の部分に着目して検討した。こうした測量に加えて、この領域でとくに優先しているアキグミを中心に個々の樹木について成長錐による年輪調査を行った。標本は対象区域で均等分布で90本を抽出、その根元近傍でコアサンプルを採取した。この結果を樹齢についてのコンター表示で図5に示す。

中州の中央部分について、中心軸に沿った縦断形状を図6に示し、それにその軸に沿う樹齢変化（図

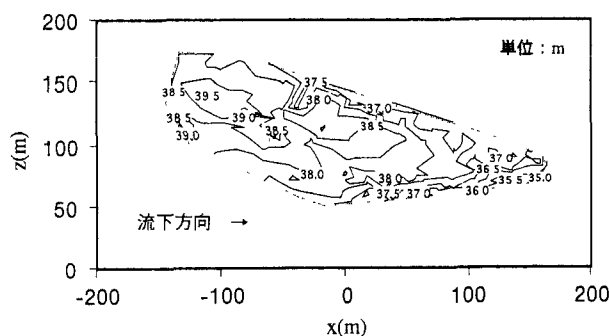


図3 手取川中州地形の等高線表示

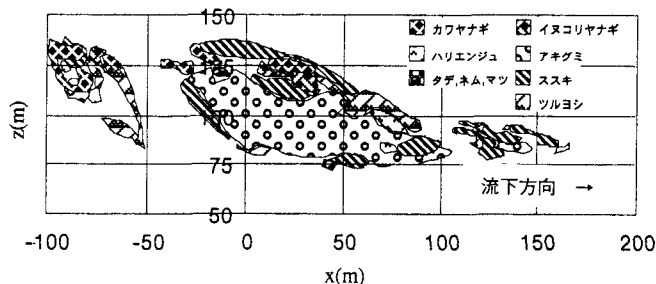


図4 手取川中州の植生の分布

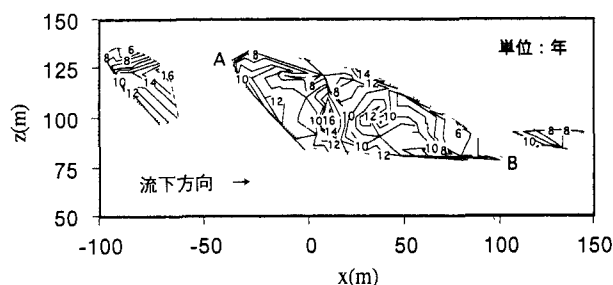


図5 手取川中州植生の樹齢分布

5の樹齢コンターより作成)を重ねた。縦断形状は、この軸に沿う測量時(低水状況)の水面からの高さで表示した。図によると、樹齢変化と堆積高さの変化が比例しており、アキグミやカワヤナギの特性から堆積による陸化と植生域の拡大が互いに補完しながら中州の形成が進んだものと推測される。横断軸に沿って同様に堆積高さや樹齢の変化を重ねた場合もこのような相似性が認められる。すなわち、植物群落が周辺の洪水時の流速を低減し、周辺に土砂堆積が進み、低水状態で陸化した領域に植物が侵攻して、次の洪水の時にはさらなる土砂堆積を促進するといったプロセスで中州の発達が進んだものと思われる。ところで、辻本・北村³⁾が先に扱ったアーマー化された礫床での浮遊砂堆積を素過程とする群落・中州の拡大は下流への堆積と植生の侵攻で、そのため相対的にかなり細長い中州・群落が発達した。図6はこれと様相が異なる。とくに下流への陸域の

発達、植生群落の側方への拡大などは、浮遊砂の堆積を素過程とした仮設では説明できない。実際、この区間は砂利で覆われており、洪水時には掃流運搬が活発と見られ、植生周辺での掃流砂運動を素過程とした説明が必要と考えられる。

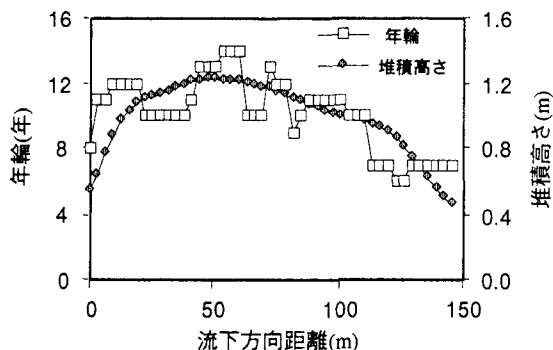


図6 堆積高さや植生の樹齢変化の相似性

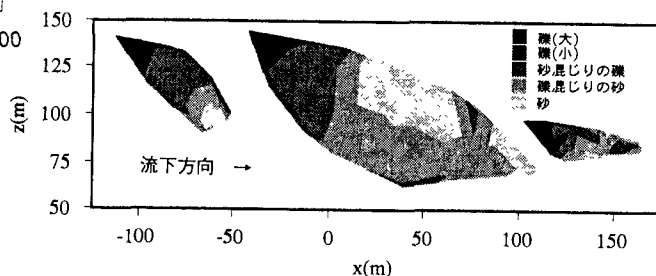


図7 手取川中州の河床材料の空間分布

図7は中州部分の表層の河床材料の空間分布を示す。図中の粒径のクラス区分は以下の通りである。5:粒径30~50cmの大礫, 4:粒径10~30cmの小礫, 3:砂混じりの礫(20cm程度以下の礫に砂が多少混ざったもの), 2:礫混じりの砂(砂に20cm程度以下の礫が多少混ざったもの), 1:砂。図によると、上流部で粗く、下流部で細かい傾向が見られる。こうした分級結果も掃流砂が、中州の発達にかかわっており、とくに上流側への発達には掃流砂によるものと推定された。

4. 植生周辺の掃流過程

植生周辺の流れについては、植生を離散的物体と見做し、抗力項を運動量式に付加し、抵抗力による仕事分の乱れエネルギーの生成、散逸を付加した水深平均された2次元の基礎方程式で乱流モデルにk-εモデルを用いた解析³⁾を行った。底面摩擦についてはRastogi & Rodi⁸⁾の方法を用いて扱った。基礎式は付録に付す。

掃流砂と河床変動、分級過程の扱いについては、以下に混合砂礫を対象として説明する。混合砂礫は

粒径によってクラス分けし、粒径別に扱う。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。

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

ここに、

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

q_B : 掃流砂量 (実質体積表示), 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。式 (1) は、芦田・道上式⁹⁾を混合砂礫に援用したものである。ここで、粒径別限界掃流力 τ_{ci} については、堆積過程を考えるので、移動中の砂の停止が問題であり、次の式で与える¹⁰⁾。

$$\frac{\tau_{*ci}}{\tau_{*cm}} = \left(\frac{d_i}{d_m}\right)^{-1} \quad (3)$$

ここに、 τ_{cm} : 混合砂礫における平均粒径の砂の限界掃流力で、ここでは平均粒径の砂が均一粒径で存在する場合のそれに等しいとする。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} に配分した。 ϕ は掃流砂礫の運動方程式を流れの偏向角 γ , 河床横断勾配 $(\partial y_b/\partial z)$ が小さいと仮定して線形結合として求められた次式¹¹⁾を用いる。

$$\tan \phi = \tan \gamma + \sqrt{\frac{1}{\mu_d \mu_f}} \sqrt{\frac{\tau_{*ci}}{\tau_{*i}}} \frac{\partial y_b}{\partial z} \quad (4)$$

ここに、 y_b : 河床高さ, μ_t , μ_d : 砂の静止摩擦係数及び動摩擦係数である。

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_B (流出分はマイナスで表現する) は、下記のように表される。

$$\Delta q_i = -\frac{1}{1-\rho_0} \left(\frac{\partial q_{Bxi}}{\partial x} + \frac{\partial q_{Bzi}}{\partial z} \right) \Delta x \Delta z \Delta t \quad (5)$$

ここに、 ρ_0 : 砂の空隙率である。

河床変動は次式で与えられる。

$$\frac{\partial y_b}{\partial t} = \frac{1}{\Delta x \Delta z \Delta t} \sum_{i=1}^N \Delta q_i \quad (6)$$

ここに、 N : 粒度によるクラス数である。

一方、次式で記述される分級過程が河床変動に伴う。平野¹²⁾の考え方にならって厚さ θ_e の層でのみ交換が起きると仮定し、河床上昇 ($\partial y_b/\partial t > 0$) に対しては、

$$p_i(t + \Delta t) = \frac{p_i(t) \cdot \left\{ \theta_e \Delta x \Delta z - \sum_{k=1}^N \Delta q_k(t) \right\} + \Delta q_i(t)}{\theta_e \Delta x \Delta z} \quad (7)$$

河床低下 ($\partial y_b/\partial t < 0$) に対して、

$$p_i(t + \Delta t) = \frac{p_i(t) \cdot \theta_e \Delta x \Delta z - p_{i0} \cdot \sum_{k=1}^N \Delta q_k(t) + \Delta q_i(t)}{\theta_e \Delta x \Delta z} \quad (8)$$

を用いる。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 $\Delta q_i < p_i(t) \theta_e \Delta x \Delta z$ のときは $\Delta q_i = p_i(t) \theta_e \Delta x \Delta z$ として (交換層に存在していたものの以上には出ていかない) 計算を進める。

5. 植生周辺の河床変動に関する数値計算例

辻本・北村^{3), 13)}の研究と同様のアプローチ、すなわち実河川に見られる現象を抽象化して、模擬植生を用いた実験水路実験 (洪水、低水の繰り返しと植物区域の変化も考慮した実験) とその数値解析による記述を想定して、実験室規模の現象を想定して数値解析を行った。数値計算の条件は下記のとおりである。路床勾配 $i_b = 1/100$, 水路幅 $B = 40\text{cm}$, 植生域を縦断方向長さ $L_v = 20\text{cm}$, 幅 $B_v = 4.0\text{cm}$ で水路中央に想定した。植生密度は $\lambda = 0.1\text{cm}^{-1}$ と仮定した。植生は非水没とし、植生密度は、植生による単位体積あたりの流水遮蔽面積で定義される。河床材料はここでは均一とし、 $d = 0.16\text{cm}$ とした。また初期河床形状は平坦である。下流端で等流条件を課し、上流端で供給流砂量を平衡流砂量のほか、過大、過少のいくつかを想定して計算を行った。実験条件の想定は扇状地河道での過程を相対水深を支配パラメータと認識して再現しようとしたものである。

流量 $Q = 3000\text{cm}^3/\text{s}$ とした場合について計算・実験を行った。計算領域は植生域をはさんで 400cm とした。

図8, 9は、平衡流砂量 q_{Be} を上流端から給砂した場合について、それぞれ、通水40分後の植生周辺の水深平均流速のコンター及び河床等高線を示したものである。計算によれば植生周辺以外で顕著な河床変動はない。土砂堆積は植生域上流側に集中している。なお平衡流砂量の場合と言っても植生の横に加速領域に対応して河床がわずかに低下する領域がある。図10は水路実験の結果であり、上述の計算は、実験結果の特徴を表現できているものと言える。

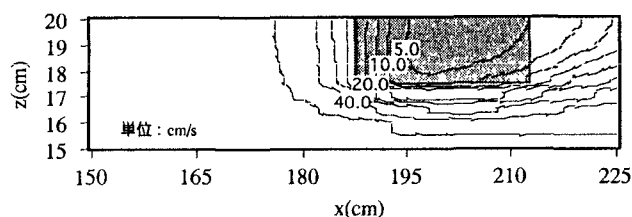


図8 植生周囲の水深平均流速の等値線図
(数値計算結果)

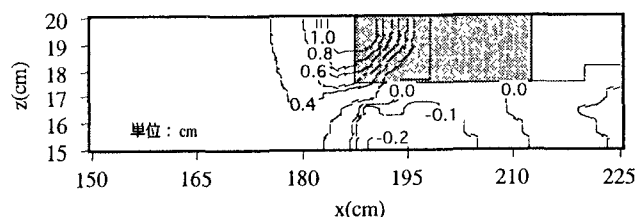


図9 通水40分後の植生周囲の河床形状
(数値計算結果)

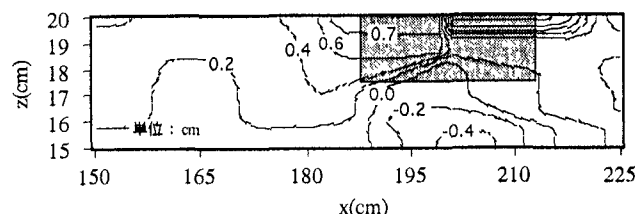


図10 通水40分後の植生周囲の河床形状
(水路実験結果)

次に、上流端からの供給土砂量 q_{Bin} (単位幅あたり)を変えて計算した。すなわち、(a) 過小給砂の場合 ($q_{Bin}=0.75q_{Be}$)、(b) 過大給砂の場合 ($q_{Bin}=1.25q_{Be}$)を想定した。図11は計算結果、図12は実験結果を示す。図13は計算結果について、平衡流砂量を給砂する場合も含めて、植生中央部の断面での横断形状 ($z=20\text{cm}$ が水路中央対象軸)で示して、平衡河道、河床上昇傾向河道 (aggradation), 河床低下傾向河道 (degradation)での河床変化性状の相違を比較したものである。河床低下傾向の場合には植生と流路

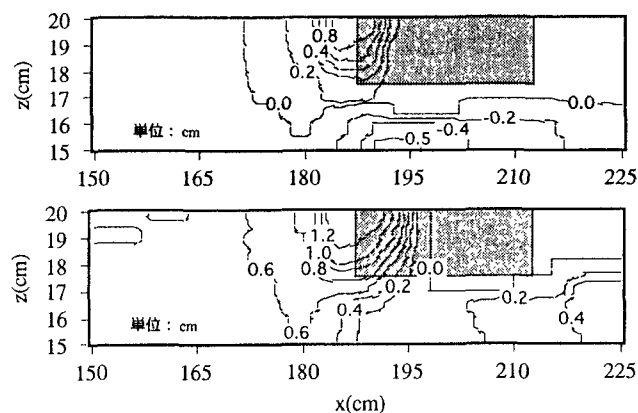


図11 通水40分後の植生周囲の河床形状
(数値計算結果)

の間に横断斜面が出来、低水の時には植生領域がその斜面も含めて浮き上がる傾向にあり、植生域の保持と共に植生が横断斜面に進出し、次の出水時にはさらに土砂を捕捉して、植生域・中州が横断方向に拡大することが示唆されている。河床上昇状況での出水では植生域を残して土砂堆積が生じ、中州が埋没し、低水時にむしろ流水が集中してきて植生域拡大にはならない。このように、土砂供給状態により、植生周囲河床変動とその後の植生域の挙動への影響は大きく異なることが推測される。

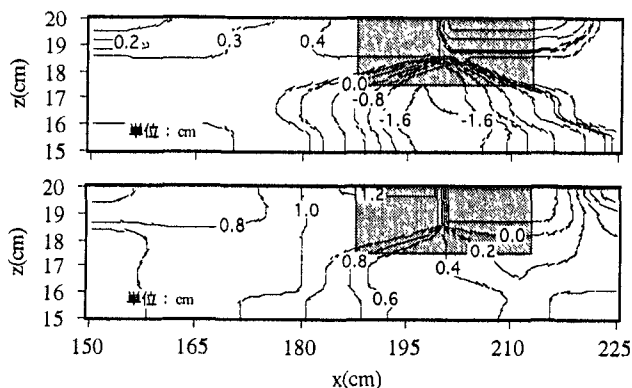


図12 通水40分後の植生周囲の河床形状
(水路実験結果)

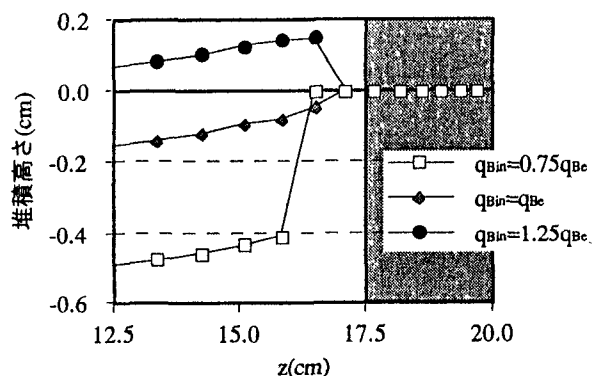


図13 通水40分後の植生中央部横断面形状
(数値計算結果)

6. あとがき

本研究では、手取川中州での、植生 (種類及び樹齢) と微地形ならびに河床材料調査を行い、アーマ化した礫床での浮遊砂堆積による中州・植生域の発達とは異なる形式の発達過程を見だし、これが植生に影響された掃流過程の特性に起因するものと考えて、その解析手法を整え、計算例を示した。

本研究によって、掃流過程を基本とした植生域周辺の河床変動を、混合粒径の場合を含めて取り扱うようになり、また均一粒径砂での計算例から、掃流砂が卓越する場合中州・植生域の発達は上流へ進行し、また植生域周辺の河床変動が上流からの土砂

供給状況に強く影響されること、とくに河床低下傾向の場合、植生域・中州が側方にも拡大することが示唆された。今後、さまざまな条件（土砂供給条件、洪水・低水の繰り返し、混合砂礫で分級を伴う場合、掃流・浮遊の組み合わせられた場合など）での計算と水路実験で、河相変化の仕組みをより詳細に明らかにしていきたいと考えている。

謝辞：本研究の遂行にあたり、成長錐による樹木の年輪調査については建設省土木研究所河川環境研究室・萱場祐一氏から、植生付近の流れと河床変動の数値解析に当たっては京都大学大学院環境地球工学専攻・北村忠紀助手からアドバイスをいただいた。現地調査においては、植物学者のMs. Christine Peralá (Salix International Inc., USA) に現地でアドバイスを得たほか、当時金沢大学大学院学生・山本貴章君（現・ニュージェック）、工学部学生・大迫裕美君（現・日水コン）の協力を得た。ともに記して謝意を表します。

付録

植生周辺の流れの解析の基礎式は次の通りである。

$$\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 x} \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 z} \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_{v\varepsilon} P_{kv} + C_{b\varepsilon} P_{kb}) - C_2 h \frac{\varepsilon^2}{k} \\
 & \nu_T = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \\
 & P_k = h\nu_T \left\{ 2 \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial W}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} \right)^2 \right\} \\
 & F_x = \frac{1}{2} C_D \lambda h U \sqrt{U^2 + W^2}; \quad F_z = \frac{1}{2} C_D \lambda h W \sqrt{U^2 + W^2} \\
 & \tau_{bx} = C_f U \sqrt{U^2 + W^2}; \quad \tau_{bz} = C_f W \sqrt{U^2 + W^2} \\
 & P_{kv} = F_x U + F_z W; \quad P_{kb} = \tau_{bx} U + \tau_{bz} W
 \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，C₁，C₂，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³⁾，底面摩擦抵抗に関わる係数C_{be}についてはRastogi & Rodi⁸⁾により次式から算定する。

$$C_{be} = 3.6 \frac{C_2}{C_1} \frac{k}{\varepsilon} \frac{C_\mu^{1/2}}{C_f^{3/4}} \sqrt{U^2 + W^2}$$

参考文献

- 1) Wang, S.Y., E.J. Langendoen and F.D. Shields ed. : *Management of Landscapes Disturbed by Channel Incision*, The University of Mississippi, 1997, 1134p.
- 2) 芦田和男・辻本哲郎：H7.7.11-7.12豪雨による北陸地方河川の災害特性，平成7年度河川災害に関するシンポジウム，pp.37-58, 1996.
- 3) 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，pp.1003-1008, 1996.
- 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・岡田敏治・村瀬尚：扇状地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，第37巻，pp.207-212, 1993.
- 6) 河川環境管理財団：河川の植生と河道特性，河川総合研究所資料，第1号，pp.101-111, 1995.
- 7) 小俣篤・常田賢一：手取川の扇状地河道における側岸侵食の実態，第2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.227-232, 1993.
- 8) Rastogi, A.K. and W.Rodi : Predictions of heat and mass transfer in open channels, *Jour. Hydraul. Eng.*, ASCE, Vol.104, No.3, pp.397-420, 1978.
- 9) 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，pp.259-273, 1971.
- 10) 辻本哲郎・本橋健：混合砂礫床の粗粒化について，土木学会論文集，No.417/II-13，pp.91-98, 1990.
- 11) Nakagawa, H., T. Tsujimoto and S. Murakami : Non-equilibrium bed load transport along side slope of an alluvial stream, *Proc. 3rd International Symposium on River Sedimentation*, Jackson, Mississippi, USA, pp.885-893, 1986.
- 12) 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，pp.55-65, 1971.
- 13) 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，pp.199-204, 1996.

(1997.9.30受付)