

樹林化河道の洪水流況と浮遊砂輸送 に関する数値計算

NUMERICAL STUDY ON THE FLOOD-FLOW STAGE IN GRAVEL-BED RIVER WITH THE EXCESSIVE REVERINE TREES

清水義彦¹・小葉竹重機²・新船隆行³

Yoshihiko SHIMIZU, Shigeki KOBATAKE and Takayuki ARAFUNE

¹正会員 工博 群馬大学助教授 工学部建設工学科 (〒365-8515 桐生市天神町1-5-1)

²正会員 工博 群馬大学教授 工学部建設工学科 (〒365-8515 桐生市天神町1-5-1)

³学生会員 群馬大学大学院工学研究科 (〒365-8515 桐生市天神町1-5-1)

Recently reverine trees in the course of gravel bed-river have extremely increased and enlarged their covered-area over bars and flood plain. Such a situation brings about problems of river management for the environmental aspects as well as the safety of rivers against flood. In order to clarify such problems, we should get the knowledge about the flow with vegetation-covered zones.

In this study, the applicability of a 2D-numerical flow model including vegetation drag effect is verified for the upstream reach of the river Watarase which has the averaged bed slope of about 1/150 and has the characteristics of the segment-1 reach with the excessive reverine trees. Calculated results are compared with the results obtained by the observation after flood and predict an increase in water-level depending on the vegetation density and predict the concentration field of suspended fine sand.

Key Words : instream vegetation, 2D-numerical flow model, turbulence model, gravel-bed river, flow with vegetation, suspended transport, concentration field

1. はじめに

近年, 河道内植生の著しい繁茂によって樹林化が進み, 河川管理上の懸案事項となっている箇所が少なくない。とくに, 礫床河川ではセグメント特有の玉石川原が草本類, 木本類によって占有されてくる状況は, 河相固有の景観構造の変化を与えるとともに, そこでのハビタートも潜在自然なものから変質させられている。

さらに, 河道内樹林化と流れ, 土砂輸送との相互作用系が生み出す地形変化, 樹林化した状況での大規模出水時の疎通障害の懸念など様々な水理学的な問題があり, これらに対して十分な解答が得られていないのが現状である。

本研究では, セグメント1の河相特性をもつ礫床河川で, 狭窄部区間があり, 樹林化の進んだ中州や高水敷が豊富に存在する利根川支川・渡良瀬川(利根川合流点からの51km付近)を対象として, 著者ら^{1), 2)}がすでに提案している植生流れの解析法を一般化座標系平面流解析に適用し, 洪水時の流況特性を検討する。とくに, 現地の樹木繁茂状況を考慮した上での洪水流況や樹木群密

生度と水位上昇の関係を見積もる。また, こうした場において平面2次元の枠組みのもとに浮遊砂輸送を検討する。ここでは, 樹林地表層を形成する細砂分もセグメント1河道の河床構成材料の一部であるとの考え³⁾のもとに, これが低水路の巻き上げによって流路全体にどのような空間分布(濃度分布)をもたらしかを数値計算から予測している。そして, 樹林地の存在によって細砂の堆積領域を求め, 植生の拡大可能領域を予測する。

2. 数値計算の方法

流れの基礎式は平面2次元流の連続式および運動量輸送式である。これらを一般化座標系(ξ, η)に変換し, かつ, 流速ベクトル, 流量ベクトルの反変成分を未知量とする基礎方程式系を用いて解析する。このような方程式系は長田⁴⁾によれば, 次のように示されている。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{h}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{Uh}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{Vh}{J} \right) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{Q^\xi}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{UQ^\xi}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{VQ^\xi}{J} \right) \\ & - \frac{M}{J} \left(U \frac{\partial \xi_x}{\partial \xi} + V \frac{\partial \xi_x}{\partial \eta} \right) - \frac{N}{J} \left(U \frac{\partial \xi_y}{\partial \xi} + V \frac{\partial \xi_y}{\partial \eta} \right) \\ & = -gh \left(\frac{\xi_x^2 + \xi_y^2}{J} \frac{\partial z_s}{\partial \xi} + \frac{\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y}{J} \frac{\partial z_s}{\partial \eta} \right) - \frac{\tau_b^\xi}{\rho J} - \frac{F^\xi}{\rho J} \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & + \frac{\xi_x^2}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} (-\overline{u'^2}h) + \frac{\xi_x \eta_x}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} (-\overline{u'^2}h) \\ & + \frac{\xi_y^2}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} (-\overline{v'^2}h) + \frac{\xi_y \eta_y}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} (-\overline{v'^2}h) \\ & + \frac{\xi_x \eta_y + \xi_y \eta_{xy}}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} (-\overline{u'v'}h) + \frac{2\xi_x \xi_y}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} (-\overline{u'v'}h) \\ & \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{Q^\eta}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{UQ^\eta}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{VQ^\eta}{J} \right) \\ & - \frac{M}{J} \left(U \frac{\partial \eta_x}{\partial \xi} + V \frac{\partial \eta_x}{\partial \eta} \right) - \frac{N}{J} \left(U \frac{\partial \eta_y}{\partial \xi} + V \frac{\partial \eta_y}{\partial \eta} \right) \\ & = -gh \left(\frac{\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y}{J} \frac{\partial z_s}{\partial \xi} + \frac{\eta_x^2 + \eta_y^2}{J} \frac{\partial z_s}{\partial \eta} \right) - \frac{\tau_b^\eta}{\rho J} - \frac{F^\eta}{\rho J} \quad (3) \\ & + \frac{\xi_x \eta_x}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} (-\overline{u'^2}h) + \frac{\eta_x^2}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} (-\overline{u'^2}h) \\ & + \frac{\xi_y \eta_y}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} (-\overline{v'^2}h) + \frac{\eta_y^2}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} (-\overline{v'^2}h) \\ & + \frac{\xi_x \eta_y + \xi_y \eta_{xy}}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} (-\overline{u'v'}h) + \frac{2\eta_x \eta_y}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} (-\overline{u'v'}h) \end{aligned}$$

ここに、 $\xi_x, \xi_y, \eta_x, \eta_y$; 座標変換のメトリックス

(添え字に関する微分を表す), J ; 座標変換のヤコビアンで、流速ベクトル及び流量フラックスの反変成分は以下となる。

$$U \equiv \xi_x u + \xi_y v, V \equiv \eta_x u + \eta_y v \quad (4)$$

$$Q^\xi \equiv \xi_x M + \xi_y N, Q^\eta \equiv \eta_x M + \eta_y N$$

ここに、 u, v ; デカルト座標系での x, y 方向流速, M, N ; x, y 方向流量フラックス ($M=uh, N=vh, h$; 水深), z_s は基準面からの高さである。

また、底面せん断応力の反変成分は、

$$\tau_b^\xi \equiv \xi_x \tau_{bx} + \xi_y \tau_{by}, \tau_b^\eta \equiv \eta_x \tau_{bx} + \eta_y \tau_{by} \quad (5)$$

$$\tau_{bx} = \frac{\rho g n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}}, \tau_{by} = \frac{\rho g n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (6)$$

となる (g ; 重力加速度, n ; Manning粗度係数)。

一方、式 (2), (3) には、樹木による形状抵抗力の反変成分が次のように取り込まれている。

$$F^\xi \equiv \xi_x F_x + \xi_y F_y, F^\eta \equiv \eta_x F_x + \eta_y F_y, \quad (7)$$

$$F_x = \frac{1}{2} \rho C_D \lambda h u \sqrt{u^2 + v^2} \quad (8)$$

$$F_y = \frac{1}{2} \rho C_D \lambda h v \sqrt{u^2 + v^2}$$

ここに、 C_D ; 植生の形状抵抗係数, λ ; 植生の密生度 (流体の単位体積に占める植生の遮蔽面積) である。

さて、レイノルズ応力項については、

$$-\overline{u'^2} = 2\nu_t \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) - \frac{2}{3}k, -\overline{v'^2} = 2\nu_t \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{2}{3}k \quad (9)$$

$$-\overline{u'v'} = \nu_t \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)$$

であり (k ; 乱れエネルギー), 渦動粘性係数 ν_t は清水ら^{11), 2)}, 植生の形状抵抗による乱れ生成を考慮した k 方程式モデルから次式のように与える (ただし $K=kh$)。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{K}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{UK}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{VK}{J} \right) \\ & = \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{\Gamma_K}{J} (\xi_x^2 + \xi_y^2) \frac{\partial k}{\partial \xi} + \frac{\Gamma_K}{J} (\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y) \frac{\partial k}{\partial \eta} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{\Gamma_K}{J} (\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y) \frac{\partial k}{\partial \xi} + \frac{\Gamma_K}{J} (\eta_x^2 + \eta_y^2) \frac{\partial k}{\partial \eta} \right) \\ & + (P_k + P_{kf} - \varepsilon)/J \quad (10) \end{aligned}$$

ここに、乱れエネルギー生成項 P_k は、

$$P_k \equiv h \nu_t \left[2(\xi_x u_\xi + \eta_x u_\eta)^2 + 2(\xi_y v_\xi + \eta_y v_\eta)^2 + h \nu_t (\xi_y u_\xi + \eta_y u_\eta + \xi_x v_\xi + \eta_x v_\eta)^2 \right] \quad (11)$$

であり、植生の形状抵抗による乱れ生成 P_{kf} は、

$$P_{kf} = F_x u + F_y v \quad (12)$$

である。 ε を乱れエネルギーの逸散率として、 k 方程式モデルでは、

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \varepsilon = C_{\varepsilon d} \frac{k^{3/2}}{L} \quad (13)$$

と与える。ここで L は乱れの長さスケールであり、清水らにより、 $L = \alpha h$ とおけば模擬植生を用いた水理実験から選ばれた値として $\alpha = 0.4$ とするのが妥当である²⁾。また、乱れエネルギー輸送式における拡散項の係数は、

$$\Gamma_k = h \nu_t / \sigma_k \quad (14)$$

であり、乱流モデルの係数は標準値を用いた ($C_\mu = 0.09$, $C_{\varepsilon d} = 0.17$, $\sigma_k = 1.0$)。

基礎方程式系をスタッガード格子を用いて離散化する。離散化の詳細については長田⁵⁾に詳しく解説されているので参照されたい。

3. 計算対象河道の特性

計算対象とした渡良瀬川（流域面積2,600km²）の区間は利根川合流点からの51km付近で、ここには河岸砂州や中州によって形成された陸地部に豊富な植生が存在している。平均河床勾配1/140、平均粒径71.8mmで、セグメント特性が1に分類される礫床河川であり、特徴的な平面形は明確な単列型の低水路をもつこと、また、51.4km付近は狭窄部となって、その下流には安定して中州が形成されていることである（写真1参照）。こうした狭窄部の存在や護岸による横侵食の抑制によって、近年、平面形の変化はあまり生じていない。

計算対象区間内のほとんどの州は、ハリエンジュ（ニセアカシア）、ヤナギ類に代表される木本類で占有されている。とくに、狭窄部下流の中州は樹林化する傾向が強く、伐採が行われているものの、数年で樹林地が回復している。図1にはこの中州における木本類の経年的な占有変化を示した（地形変化がほぼ同じと判断できる年度をまとめて一つの期間として表示）。図2は同中州において、過去に伐採している箇所と、伐採が行われていない箇所において、辺長20m格子内でサンプリングされた幹直径別の本数分布を示したものである（幹直径は根元で計測）。伐採が行われていない箇所では、直径15－20cmクラスのものが多く、これは樹高にして10－12m程度である。一方、樹木の伐採（間引き）されている箇所では、短期間で見ると密生度の高い低木林をむしろ形成し易い。樹林地の平均的な密生度(λ)は、

λ = (nD_m) / s^2 (15)

から求められ（n；本数，D_m；平均幹径，s：サンプリング格子幅），過去に伐採経験のある箇所ではλ＝0.0231m⁻¹，伐採のない箇所では0.013m⁻¹となる。

さて、ハリエンジュ樹林に覆われた中州では、図3から、経年的に中州上・下流側で堆積傾向、低水路で河床低下傾向となっている。とくに、州表層には図4に示す粒度構成をもつ細砂層が形成され、これが樹林化を産む一つの要因となっている（図には出水後新たに堆砂し、細砂層になり得るものも加えた）。河道地形の比高差が顕著になること、州の樹林化が進むことで、こうした細砂分が新たに堆積し平水時の植生繁茂の機会が与えられる³⁾。

写真 1 対象地点の航空写真

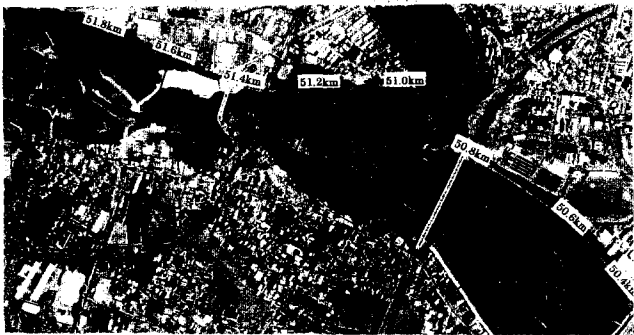


図 1 中州植生の経年変化

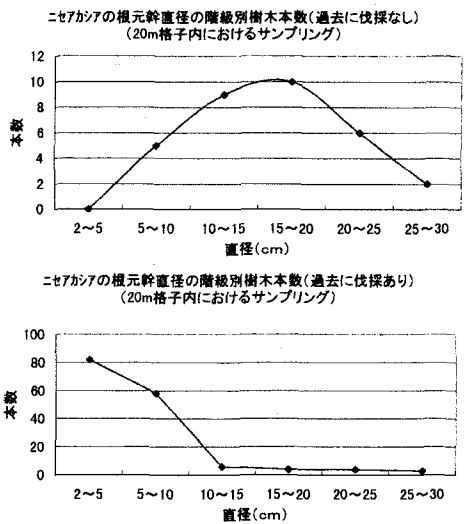


図 2 ハリエンジュ（ニセアカシア）幹直径別本数分布

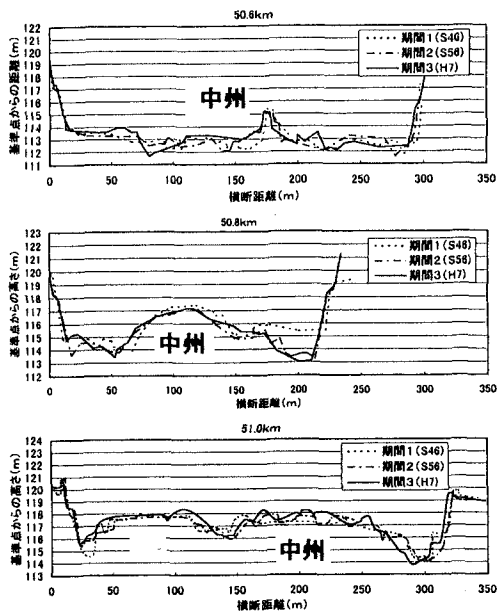


図 3 中州の横断地形の経年変化

4. 洪水流況の再現計算

はじめに、既往洪水の再現計算から、数値計算モデルの妥当性を検討する。対象出水は平成10年9月台風5号時のもので、計算区間上流高津戸地点で最大流量1420m³/s(計画高水流量3500m³/s)である。現地調査から得られた樹林地形成区分(図5、李・藤田ら⁶⁾、藤田ら⁷⁾にならって整理したもの)を考慮し、樹林化の進む砂州では比高約1.3m以上に樹木群粗度を配置して計算に反映させた($C_p=1.0$; 植生の形状抵抗係数)。粗度係数は $n=0.032$ とし、下流端では水位・流量曲線を設定して水位を与え、また、現地のハリエンジュの背丈を考慮して樹木群は非水没粗度とした。

図6に計算流速ベクトルを示す。狭窄部下流の中州付近では、比高差のため、流水が左右に分岐される。ただし、このクラスの出水では中州は若干冠水する程度で、樹木群との流れの干渉作用は小さい。図7に計算水位縦断面図を示す。同図には建設省が実施した洪水痕跡結果も合わせて表示した。これより、痕跡水位と計算水位との対応はよく、計算モデルの妥当性ととともに、粗度係数の設定も妥当であることが示された。

5. 大規模出水の流況予測

次に流量規模を大きくした条件での流況を予測する(計算流量3500m³/sで計画規模)。図8に流速ベクトル、図9に計算水位縦断面図、図10に横断面水面形の縦断変化を示す(樹木群がない場合の計算結果も合わせて表示)。狭窄部上流側(51.6kmまで)では狭窄による堰上げ効果によって水位上昇しており、樹木が繁茂したとしてもその区間での水位上昇分が顕著に増すことはなく、むしろ、より上流側に樹木群があることで水位上昇区間が助長されている。一方、狭窄部直下では中州が樹林化することで顕著な水位上昇が認められる。ここは狭窄断面と中州の樹木群の効果によって、計算対象区間内でもっとも顕著に水位上昇が生まれる箇所(51.0km)で、現況の樹林地密度($\lambda=0.0231m^{-1}$)に対する相対密度と水位上昇分の関係も計算から求めた(図11)。これより、大規模出水時には現況密度で2m程度、密度を半分にしても1.5m程度の水位上昇が見込まれる。

樹林化した中州が大規模出水時においても地形変化しないとして、移動限界の礫径分布を計算すると図12を得る。中州が樹林化した場合、その左岸水際では大きな掃流力が働き、径80cm以上の礫群も移動可能であることが推定される。

6. 細砂の浮遊砂輸送

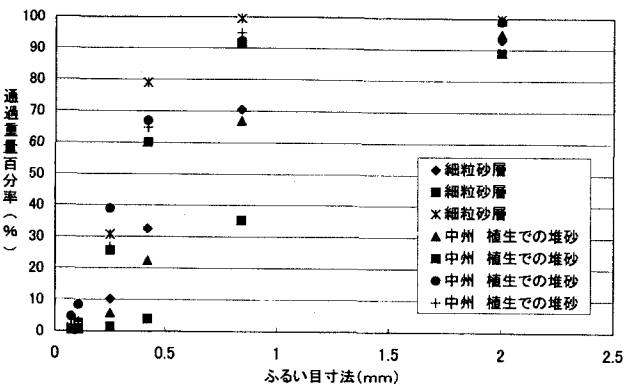


図4 樹林地を形成する細粒砂層の粒度構成

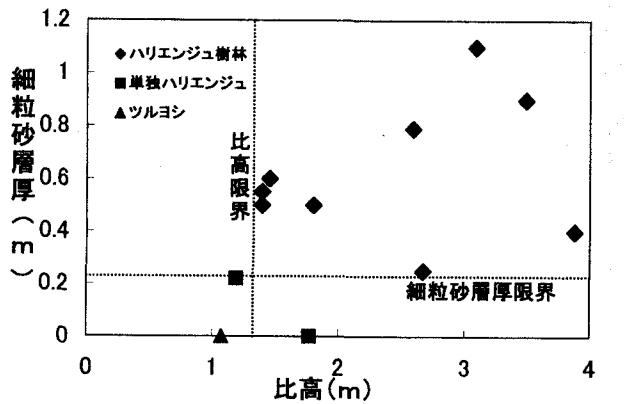


図5 樹林地形成区分

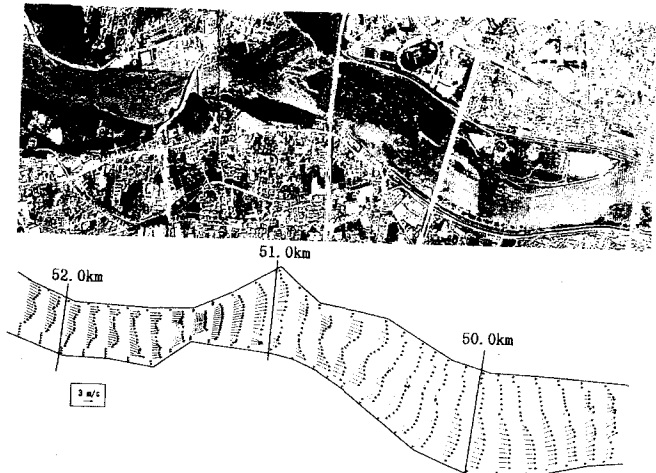


図6 H10.9洪水の再現計算(流速ベクトル)

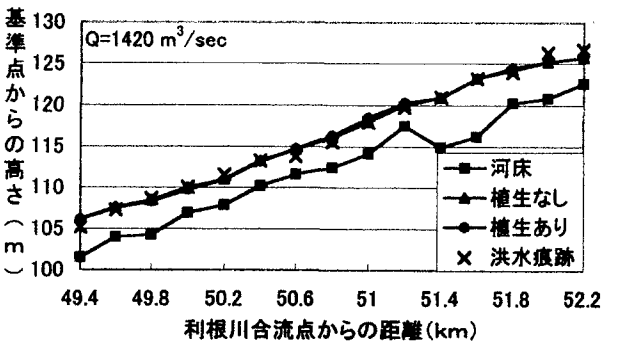


図7 H10.9洪水の再現計算(水位縦断)

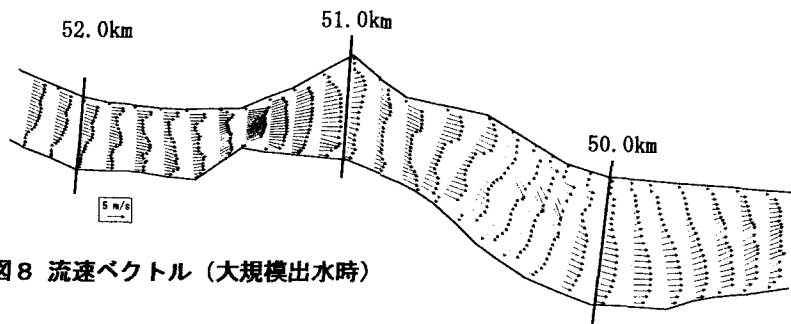


図8 流速ベクトル（大規模出水時）

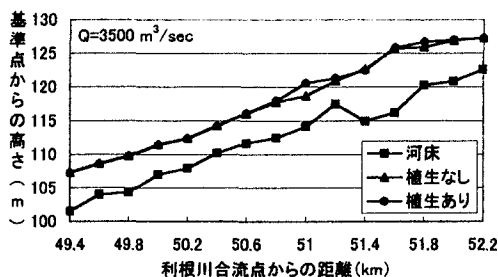


図9 計算水位縦断面図

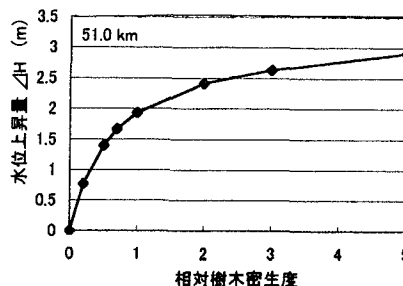


図11 相対密度（現況を1とする）と水位上昇分

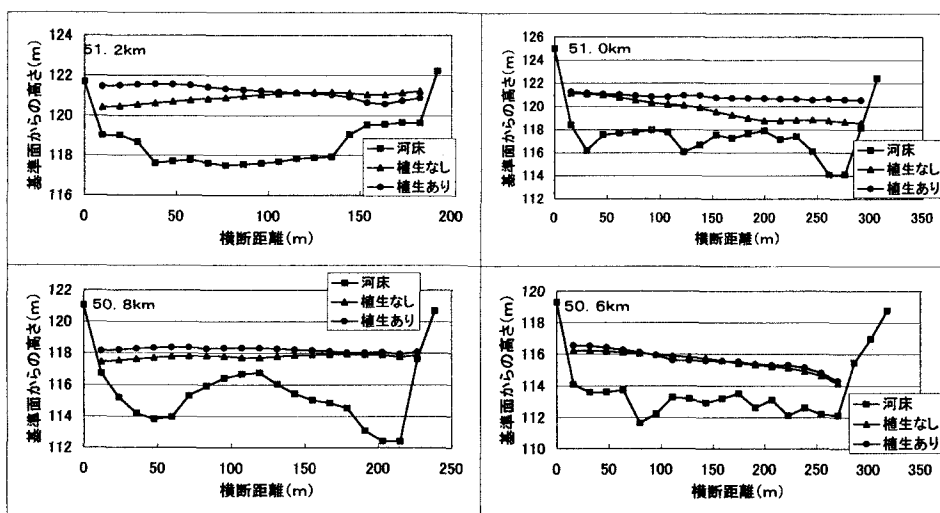


図10 計算横断水位

平面2次元の枠組みでの浮遊砂輸送式は次式となる。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{Ch}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{UCh}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{VCh}{J} \right) \\ &= \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{\Gamma_c}{J} (\xi_x^2 + \xi_y^2) \frac{\partial C}{\partial \xi} + \frac{\Gamma_c}{J} (\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y) \frac{\partial C}{\partial \eta} \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{\Gamma_c}{J} (\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y) \frac{\partial C}{\partial \xi} + \frac{\Gamma_c}{J} (\eta_x^2 + \eta_y^2) \frac{\partial C}{\partial \eta} \right) \\ &+ SC/J \end{aligned} \quad (16)$$

$$SC \equiv K_{SC} \left(\frac{u_*}{w_0} \right)^2 w_0 - \alpha w_0 C \quad (17)$$

ここに、 Γ_c ；浮遊砂拡散係数、 C ；浮遊砂濃度（水深平均値）、 w_0 ；砂の沈降速度、 α ；底面近傍濃度に換算する係数で、 SC は正味の巻き上げ量である。計算流量は3500m³/s、対象とする細砂の平均径を0.5mm（図4）、上流流入濃度はゼロとして計算河道内でのみ細砂浮遊砂

が生産される状況を想定して計算した。図13に浮遊砂濃度の空間分布を示す（細砂濃度が高いほど白く表示）。細砂浮遊砂の生産場は低水路河道であり、比高の高いところでは巻き上げの低減と沈降により浮遊砂濃度は低い。同図には中州が樹木で覆われた状況とそうでない状況を比較して示してある。中州が狭窄部下流にあるため、中州自身の比高が高くとも大きな掃流力ため細砂の巻き上げは活発である。一方、中州が樹木で覆われると、細砂の巻き上げは極端に減少し、浮遊砂濃度は低くなる。こうした状況は低水路との間に顕著な濃度勾配を産み、樹林地への細砂の拡散と沈降堆積によって細粒砂層を形成しやすい。また、巻き上げの少ない低濃度領域が樹林化中州背後の下流まで見られること（図13、50.6kmから下流）は辻本・北村によって示された水理実験結果と一致し、彼らが提案している植生周辺の堆積地形形成のシナリオと対応する⁸⁾。計算設定流量ほど大規模でなくとも、渡良瀬川では1200m³/s以上の出水は近年頻繁で（低水路

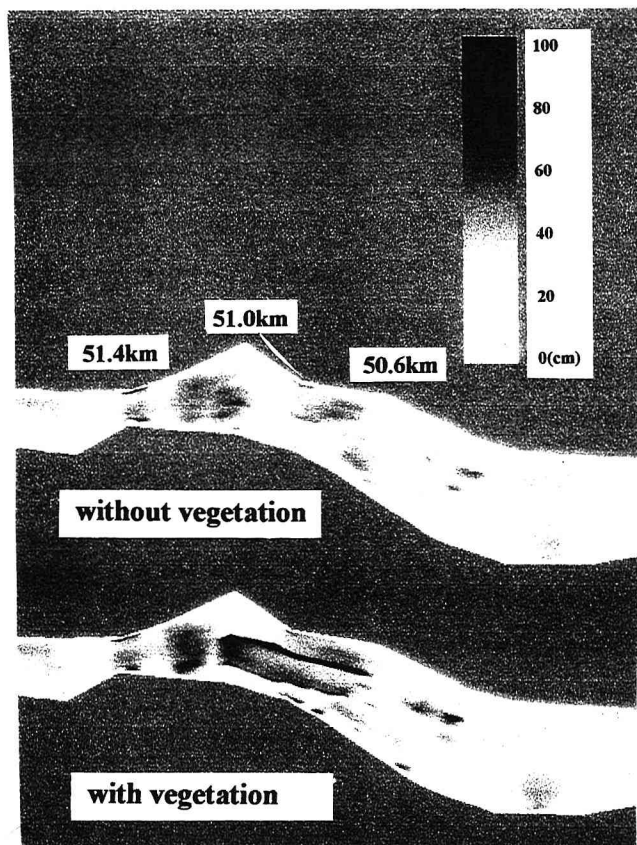


図 12 移動限界粒径の平面分布

満杯流量は $1000\text{m}^3/\text{s}$ 程度), 樹林地中州の下流への経年的な拡大という状況(図1)はこうしたシナリオによって支持される。

7. あとがき

本研究では、狭窄部地形と中州を有する樹林化したリーチ周辺の洪水流況と浮遊砂輸送を数値計算から検討した。ここでは、流水に対しての樹木の変形や破壊及び流失は考えていない。大規模出水時を想定する場合、樹木群の破壊、あるいは流下物の樹林地内補足による遮蔽効果の増加など、実際にはさまざまな要因が取り込まれる必要がある。こうした問題についても素過程を検討し、数値計算手法に取り込んで行きたいと考えている。

謝辞: 本研究を進めるにあたり文部省科学研究費・基盤研究(C)(代表: 清水義彦)の補助を受けた。一般化座標系を用いた計算については京都大学助手長田信寿氏にアドバイスを頂き、同氏が作成されたプログラムを修正して用いた。また、河道変遷研究会(財・河川環境管理財団)において計算結果について有意義な意見を頂いた。さらに、建設省渡良瀬川工事事務所調査課・向井正大氏、小沢光昭氏には現地調査資料や多くの示唆を頂き、群馬大学大学院工学研究科・岡田理志君、岩崎工君には観測、データ整理での協力を得た。記して謝意を表します。

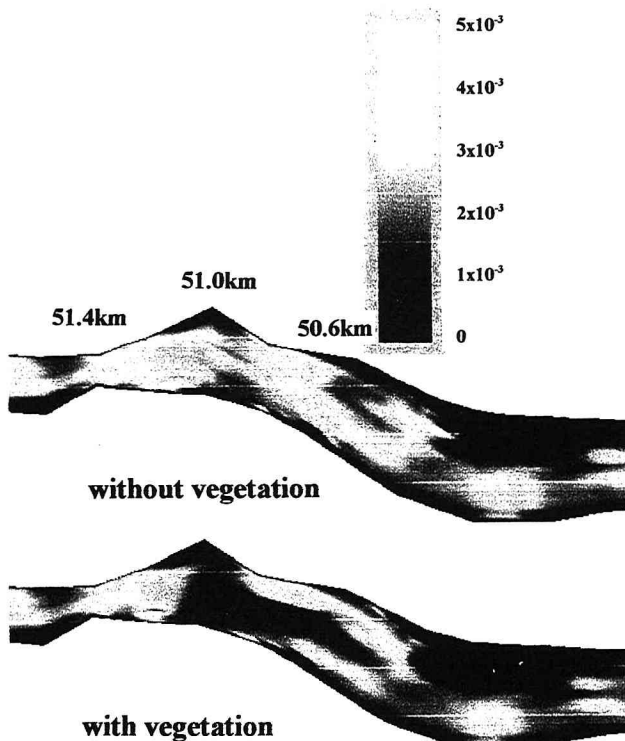


図 13 細砂浮遊砂濃度の平面分布

参考文献

- 1) 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, pp.35-44, 1992.
- 2) 清水義彦, 辻本哲郎: 植生帯を伴う流れ場の平面2次元解析, 水工学論文集, 第39巻, pp.513-518, 1995.
- 3) 清水義彦, 小葉竹重機, 新船隆行, 岡田理志: 礫床河川の河道内樹林化に関する一考察, 第43巻, pp.971-976, 1999.
- 4) 長田信寿, 細田尚, 村本芳雄: 河岸侵食を伴う河道変動の特性とその数値解析法に関する研究, 土木学会論文集, No.621/II-47 pp.23-39, 1999.
- 5) 長田信寿: 一般化座標系を用いた平面2次元非定常流れの数値解析, 水工学における計算機利用の講習会講義集, 土木学会水理委員会基礎水理部会, 61-76, 1999.
- 6) 李参熙, 藤田光一, 塚原隆夫, 渡辺敏, 山本晃一, 望月達也: 礫床河川の樹林化に果たす洪水と細粒土砂流送の役割, 水工学論文集, 第42巻, pp.433-438, 1998.
- 7) 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(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), pp.117-122, 1998.
- 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, pp.1003-1008, 1996.

(1999.9.30受付)