

樹林化した河道の流況観測と 樹林内外の流況・樹木抗力の解析

FIELD MEASUREMENT AND NUMERICAL ANALYSIS OF FLOOD FLOWS
AND FLOW FORCE IN A VEGETATED RIVER CHANNEL

道奥康治¹・宮本仁志²・神田佳一³・大地洋平⁴・阿河一穂⁴・盛岡淳二⁴
魚谷拓矢⁵・吉田一亮⁶・吉村敏⁶

Kohji MICHIOKU, Hitoshi MIYAMOTO, Keiichi KANDA, Yohei OHCHI, Kazuho AGA,
Jyunji MORIOKA, Takuya UOTANI, Kazuaki YOSHIDA, Satoshi YOSHIMURA

¹フェロー会員 工博 神戸大学大学院教授 工学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

²正会員 博(工) 神戸大学大学院准教授 工学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

³正会員 博(工) 明石工業高等専門学校教授 都市システム工学科 (〒674-8501 明石市魚住町西岡679-3)

⁴学生員 神戸大学大学院学生 工学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

⁵学生員 明石工業高等専門学校学生 建築都市システム工学専攻 (〒674-8501 明石市魚住町西岡679-3)

⁶国土交通省姫路河川国道事務所 (〒670-0947 兵庫県姫路市北条1-250)

Vegetation overgrowth in river channels has become a serious engineering problem for river management in Japan. It is not a feasible solution to cut off all the trees on flood plains in the channel maintenance program for river flood protection, ecological conservation, and economic administration. In order to manage the river channels in a lower cost system, it is necessary to make a suitable channel design in which vegetation on flood plains could be flushed out by natural flood flows with certain frequency. As an engineering tool for designing the suitable channel, a two-layer river flow model was developed in this paper, which could simulate the flows in both main channels and flood plains with tree vegetation. A significant feature of the present model is the capability of estimating the bed shear stress and the drag force acting on the vegetation. Field measurements of flood flows and vegetation structures confirmed the model capability. The analysis was in good agreement with the observation both on the flood flow fields and the damaged areas of vegetation in August 2009 flood event in the Kako River. It is expected that the findings from the study would contribute to construction of river management strategy.

Key Words : *Vegetated channel, 2-D flow model, bed shear stress, drag force*

1. はじめに

全国の河川では高水敷上の陸地化と樹林繁茂が進行し、疎通障害や水際遷移帯の喪失など、河道の治水・環境機能を低下させている。伐採・伐木等の維持管理だけで樹林繁茂を抑制することは困難であり、樹林河道の水理・生態特性に関する科学的分析に基づいて、樹林への流水攪乱を誘導する河道改修が必要である。これまで河道内樹木を考慮した河川流解析は多く実施され¹⁾、流れによる樹木損壊の水理学的再現が試みられてきた²⁾。しかし、既往の解析手法では、流水への樹林の影響が抗力あるいは河床粗度の形態でしか評価されておらず、樹林内の透過流と樹林上の越流成分の区別など、樹林河道の流動構造が正確に表現されていない。樹林が完全に冠水するような大規模出水では、樹林内を透過する流れが減速され

る一方、樹冠より上の越流層は高速流れである。水位上昇が樹冠以下にとどまる中小規模の出水とは明らかに樹林の抵抗形態が異なるが、既往のモデルではこれらを区別することはできない。このように出水規模に応じて樹林が流れに及ぼす抵抗を合理的に既述するために、本研究では二次元二層流モデル³⁾を改良して、樹林周辺とともに樹林内の流動構造や樹木に作用する流体力、林床に作用する底面せん断力を再現する。このモデルでは、樹林層と河川流との質量・運動量交換が考慮されている。

本研究では加古川の樹林繁茂区間を対象として、樹林構造や河川地形の測量を実施した。同時に2009年8月における出水時の流速観測を行い、本モデルで流速・水位の再現や流体力と樹木倒伏実績との比較・検証がなされた。次に、高水敷切り下げが樹木流体力の増加に及ぼす効果を評価して、河道改修・流水制御による樹林化抑制の可能性を明らかにし、河川の適正管理に資する知見を

提供する。

2. 二次元二層流モデル

(1) 二次元二層流モデル

図-1のように樹林が繁茂している開水路流を対象とする。樹冠をつなぐ二層界面で河川空間を上下層に分割し、さらに樹林帯を除く開水路領域 (A領域) と樹林帯の領域 (B領域) に区分する。A領域は上下層とも液相の二層開水路流, B領域は上層が樹林上開水路流 (液相) で、下層が樹林内透過流 (固液混相) の二層混相流となっている。B領域と樹林帯下流側のA領域では、上下層の流速差が大きく内部せん断層を有するために、内部界面での質量・運動量交換を考慮した二層流の取り扱いが有効に機能する。A領域の樹林帯から離れたところでは、運動量交換によって上下層の流速差が解消され均質化する。この領域でも二層系として取り扱われるが、流れの状態は一層流と等価である。

(2) A領域の二層流モデル

a) 連続式と連行速度

A領域における連続式は、次式で記述される。

$$\frac{\partial h_m}{\partial t} + \frac{\partial M_m}{\partial x} + \frac{\partial N_m}{\partial y} = -\Gamma_m q_i \quad (2.1)$$

ここで、 m :上下層を判別する添え字 (下層で $m=1$, 上層で $m=2$)、 t :時間、 (x,y) :空間座標、 $(M_m=u_m h_m, N_m=v_m h_m)$:流量フラックスの x,y 方向成分、 (u_m, v_m) :層平均された時間平均流速の x,y 方向成分、 h_m :上下層の厚さ ($h_1=h_v, h_2=h-h_1, h$ は全水深、 h_v は樹高)、 q_i :上下層間の連行速度 (鉛直上向きを正とする) である。 Γ_m は次式の判別パラメータである。

$$\Gamma_m = \begin{cases} 1 & m=1 \text{の時 (下層)} \\ -1 & m=2 \text{の時 (上層)} \end{cases} \quad (2.2)$$

二層系の領域では下層厚さ $h_1=h_v$ は時間的に変化しない。式(2.1)より連行速度 q_i は、次式のように与えられる。

$$q_i = -\left(\frac{\partial M_1}{\partial x} + \frac{\partial N_1}{\partial y} \right) \quad (2.3)$$

b) 運動方程式

A領域における運動量保存は、次式で記述される。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} M_m \\ N_m \end{bmatrix} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ u_m \begin{bmatrix} M_m \\ N_m \end{bmatrix} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ v_m \begin{bmatrix} M_m \\ N_m \end{bmatrix} \right\} \\ & = -gh_m \left[\frac{\partial}{\partial x} z_s + \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{-u_m'^2 h_m}{-v_m' u_m' h_m} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{-u_m' v_m' h_m}{-v_m'^2 h_m} \right] \right] \\ & \quad - \frac{\delta_{m1}^A}{\rho} \begin{bmatrix} \tau_b^x \\ \tau_b^y \end{bmatrix} + \Gamma_m E q_i \begin{bmatrix} u_2 - u_1 \\ v_2 - v_1 \end{bmatrix} - \Gamma_m \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \end{bmatrix} q_i \end{aligned} \quad (2.4)$$

底面せん断力 上下層の運動量交換

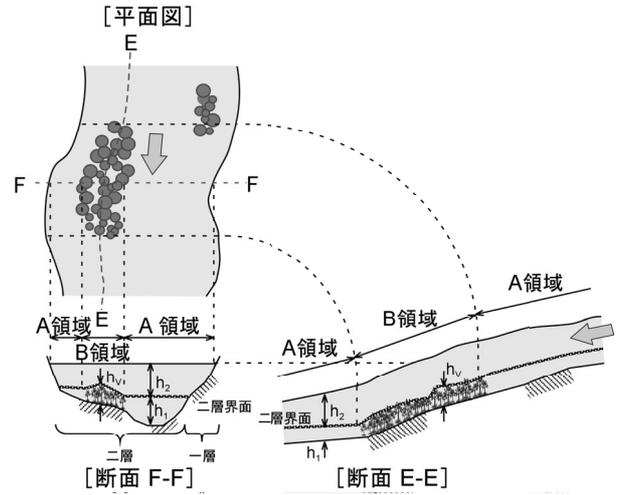


図-1 平面二次元二層流モデル

ここで、 g :重力加速度、 z_s :基準面からの水位、 (τ_b^x, τ_b^y) :底面せん断力の x,y 方向成分、 E :連行係数 (=1とする)、 $(-u_m' v_m', -u_m'^2, -v_m'^2)$:レイノルズ応力、 ρ :水の密度、 (u_i, v_i) :二層境界面での流速の x,y 方向成分である。 δ_{m1}^A は、A領域において $\delta_{11}^A=1$ (下層)、 $\delta_{21}^A=0$ (上層) である。 (τ_b^x, τ_b^y) はマンニングの粗度係数 n より次式で与えられる。

$$(\tau_b^x, \tau_b^y) = \frac{\rho g n^2 \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} (u, v) \quad (2.5)$$

ここで、 (u, v) は次式の全層平均流速である。

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \end{bmatrix} h_1 + \begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \end{bmatrix} h_2 \right) / h \quad (2.6)$$

式(2.4)のレイノルズ応力の層平均値は、文献³⁾と同様に渦動粘性係数で記述される。

(3) B領域の二層流モデル

a) 連続式と連行速度

B領域の連続式、連行速度ならびに上層での運動方程式はA領域と同様に与えられる。一方、B領域の下層 (樹林内透過流) の運動方程式は、次式で記述される。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} M_m \\ N_m \end{bmatrix} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ u_m \begin{bmatrix} M_m \\ N_m \end{bmatrix} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ v_m \begin{bmatrix} M_m \\ N_m \end{bmatrix} \right\} \\ & = -gh_v \left[\frac{\partial}{\partial x} z_s + \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{-u_m'^2 h_v}{-v_m' u_m' h_v} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{-u_m' v_m' h_v}{-v_m'^2 h_v} \right] \right] \\ & \quad - \frac{\delta_{m1}^A}{\rho} \begin{bmatrix} \tau_b^x \\ \tau_b^y \end{bmatrix} - \frac{1}{\rho} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} + \Gamma_m E q_i \begin{bmatrix} u_2 - u_1 \\ v_2 - v_1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \end{bmatrix} q_i \end{aligned} \quad (2.7)$$

底面せん断力 抗力 上下層の運動量交換

ここで、 h_v は樹林の浸水高さ、 (F_x, F_y) は流体力の x,y 方向成分であり、次式で与えられる。

$$(F_x, F_y) = \frac{\rho C_D \lambda_{veg} h_v \sqrt{u_1^2 + v_1^2}}{2} (u_1, v_1) \quad (2.8)$$

ここで、 C_D :樹木の抵抗係数である。Nepf⁴⁾に従い、樹木密度 λ_{veg} は樹木の平均胸高直径 D 、樹木間隔 ΔS の関数として次式のように与えられる。

$$\lambda_{veg} = D / \Delta S^2 = ND \quad (2.9)$$

ここで、 N :単位面積あたりの樹木数(本/m²)である。

3. 対象区間

調査対象は図-2に示す樹林が繁茂した加古川の河口距離23.0-24.4kmの区間である。当該区間を含む加古川流域では、治水上の安全性と生態環境を考慮した樹林の適正管理が課題となっている。冠水頻度を高め植生の新規繁茂や樹林化の進行を抑制する試みとして、図-2中に示す箇所にて2007年に高水敷が切り下げられた。本研究では、当該区間の高水敷切り下げが流速や樹林帯に及ぼす影響についても数値解析により明らかにする。試験施工箇所の直下流に位置する23.6kmの横断面にH-ADCPを設置して(図-2)、出水時における流速の横断方向分布を計測した。

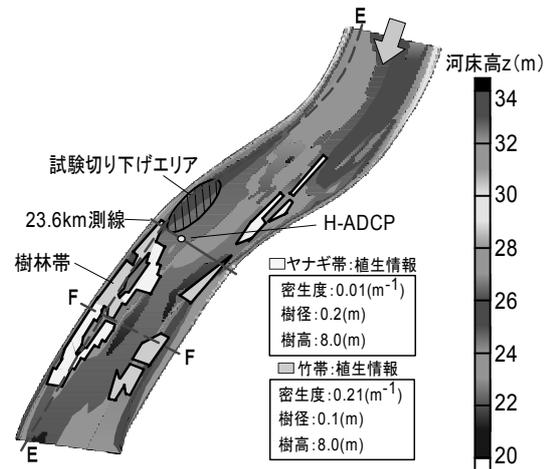


図-2 対象区間における地形と植生

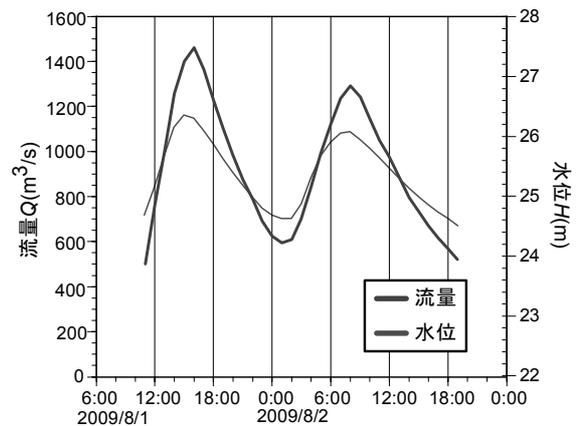


図-3 解析対象とした出水の流量と水位(解析領域の下流端境界)の経時変化

4. 2009年8月の出水を対象とした非定常流解析

(1) 概要

2009年8月1日~2日の出水により、高水敷や樹林帯が冠水し、H-ADCPによって横断面の流速が記録された。出水で観測された図-3に示す流量・水位を境界条件として与え、上述のモデルを用いて流況を再現する。なお、当該出水では水位が樹冠以下に保たれて二層流が形成される領域はなく、全て一層流として解析されている。

(2) 流れの再現と考察

a) H-ADCPによる観測値と数値との比較

本モデルで再現された23.6km測線上における流速の経時変化を図-4に示す。図-5にはH-ADCPによる23.6km測線上の流速計測値を示す。図-4と図-5ともに、横軸は日時、縦軸は右岸からの横断距離を示している。H-ADCPの観測値(図-5)に関しては、特に左岸側において水中浮遊物や濁度が大きいため、十分な測定精度が得られず流速分布に変動が見られる。H-ADCPの仕様に基づいて、十分な計測信頼性が得られる超音波反射強度の範囲を解析との比較対象にすることとした。ここでは、図-4,5中に示す赤枠の時空間領域におけるデータだけを数値解析と比較する。図-4と図-5の比較から、H-ADCPの有効測定範囲では、流速の観測値と解析値が良好に一致しており、本モデルは出水時の流動構造を十分な精度で再現していることが確認された。図-4より、流量とともに流速が増加していること、特に低水路における流速が卓越し

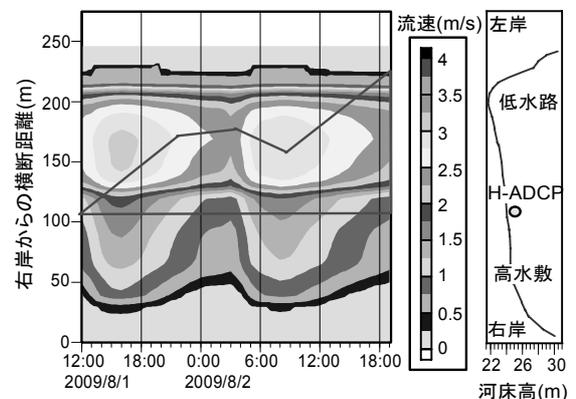


図-4 23.6km測線における解析値

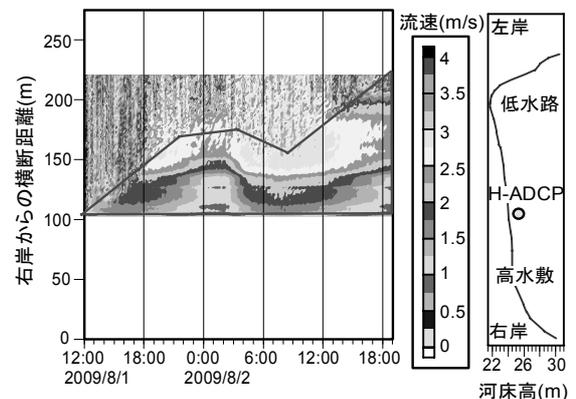


図-5 H-ADCPによる観測値(23.6km測線)

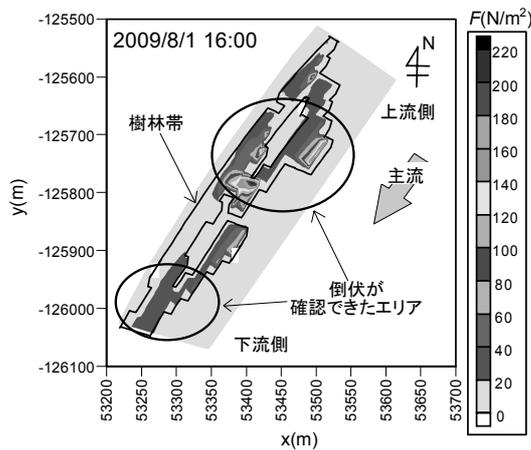


図-6 樹木に作用する流体力

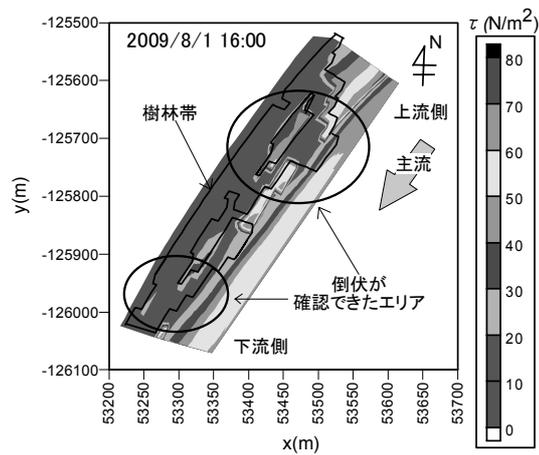


図-7 樹林帯周辺の河床せん断力

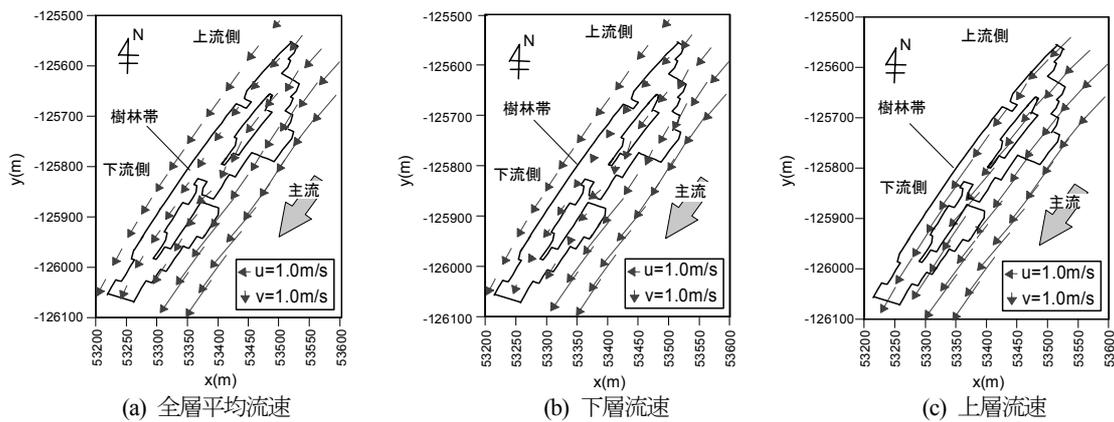


図-8 樹林帯周辺の上下層の流速 (密生度0.05, 流速ベクトルは1/4に間引いている)

ていることが確認される。出水時においては、このように低水路と高水敷の境界で大きな速度せん断が生じて、低水路の河床侵食が進む一方、浮遊土砂は高水敷側へ輸送されて土砂が堆積する。これが高水敷の比高増大・陸地化と樹林化進行の主たる要因であると考えられる。

b) 流体力・河床せん断力と樹木倒伏実態との比較

図-6に樹木に作用する流体力 (式2.7中の右辺第5項) の分布を示す。樹林帯の上流端と樹林帯の主流側に流体力の大きな領域が見られる。前者は水衝部に相当し、後者は樹林帯の東側に隣接する低水路主流部の影響により大きな流体力が発生していると考えられる。出水の樹木への影響を確認するために、出水後に倒伏したと考えられる樹木の状況を確認した。図-6中の黒枠は実績の倒伏樹木の位置を示す。実績の倒伏箇所と流体力が大きい箇所が概ね一致している。樹林帯上流端での樹木倒伏は、大きな流体力が作用したためであると考えられるが、樹林帯下流部での樹木倒伏は、下流端の河床高が小さく樹木を支える堆積層が薄く根が浅いことに起因していると考えられる。

図-7には式2.7の右辺第4項から算出される河床せん断力の分布を示す。樹林帯中央の領域では流速が小さく水位が高いため、河床せん断力は主流部よりも小さい。しかし、樹木の倒伏に対しては、流体抗力がもたらす倒伏モーメントに加えて河床せん断力に起因する洗掘も貢献

する可能性があり、樹木倒伏の判定に際しては流体力とともに河床せん断力にも注意を払う必要がある。

5. 大規模出水時における樹林の影響

(1) 概要

計画高水規模の大きな出水時において樹林が河川の疎通能力に及ぼす影響を検討する。まず、流量時系列の観測値に基づいて、対象区間における100年確率流量をカン式を用いて7,560m³/secと推算する。次に、現況の樹林条件以外に仮想的な樹木密生度を4種類想定し、樹林条件が流況に及ぼす影響を検討する。この水理条件においては、樹木は冠水し、樹冠上の開水路流と樹林内の透過流からなる二層流構造が形成される。

(2) 解析結果と考察

a) 上下層流速

上下層の流れの違いを見るために、図-8に密生度0.01 (現況の密生度は0.005~0.01) における樹林帯周辺の全層平均流速(u, v), 下層流速(u_1, v_1), 上層流速(u_2, v_2)のベクトルを示す。図-8 (b), (c)の比較より、下層流 (樹林内の透過流) と上層流 (樹林上を通過する流れ) では流速差が大きいことがわかる。これによって、上下層界面

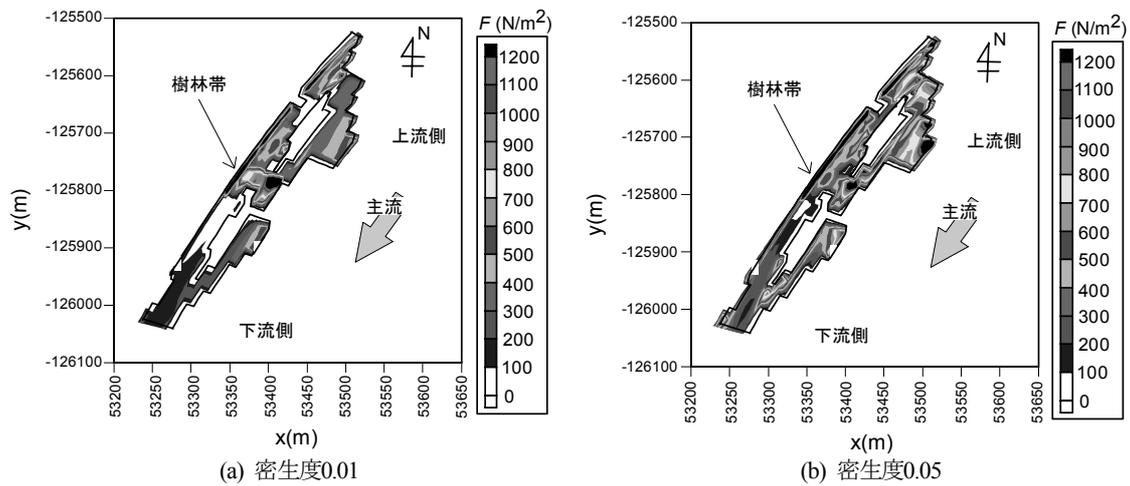


図-9 樹木に作用する流体力

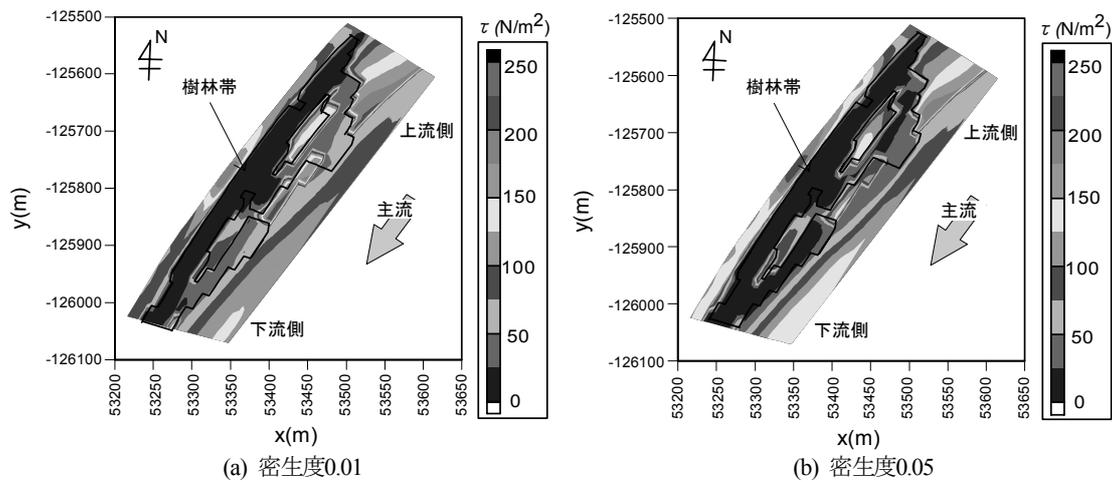


図-10 樹林帯内外の河床せん断力

では質量・運動量が活発に交換されていると推察される。また、全層平均の流速は下層流速に近い。

b) 流体力と河床せん断力の分布

図-9は樹木に作用する流体力の平面分布を示す。密度0.01と0.05の両ケースとも、樹林带上流端の水衝部で大きな流体力が作用し、樹林帯の下流側に向かって減少している。また、密度が大きいほど流体力は樹林帯全域で増加している。図-10には対象区間全域における河床せん断力の分布を示す。樹林内とその周辺では河床せん断力が主流部に比べかなり小さく、特に密度の増加とともにその傾向が強い。河道内樹木の倒伏に対しては、流量規模に加えて樹木の繁茂状況も大きな影響要因であることがわかる。

6. 高水敷の切り下げが流況に及ぼす影響

(1) 概要

図-11には高水敷の切り下げ工事前後の河道地形を示す。本文では工事後の断面を「現況断面」と記す。さらに現況断面のエリアIIをエリアIと同じレベルにまで切り下げた河道断面（以降、仮想断面と呼ぶ）を想定する。

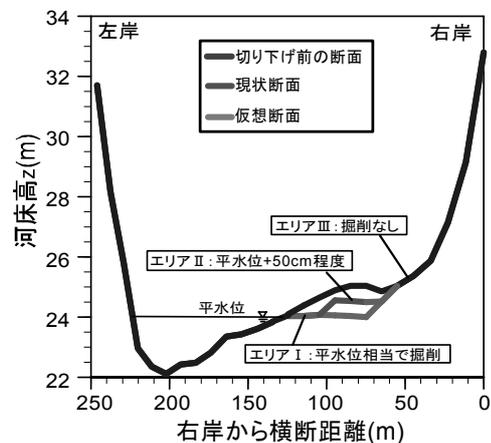


図-11 H-ADCPによる観測値(23.6km測線)

仮想断面における最大切り下げ量は1.2m程度である。計画流量相当の7,560 m³/secを対象として流れを解析し、これらの河道改修が流況に及ぼす影響を明らかにする。

(2) 解析結果および考察

a) 縦断水面形分布

図-12に樹林帯の中央を通る縦断面（図-2のE断面）と樹林帯が存在しないと仮定した場合の同じ縦断面内における水面形と河床地形を示す。ここで、横軸は対象区

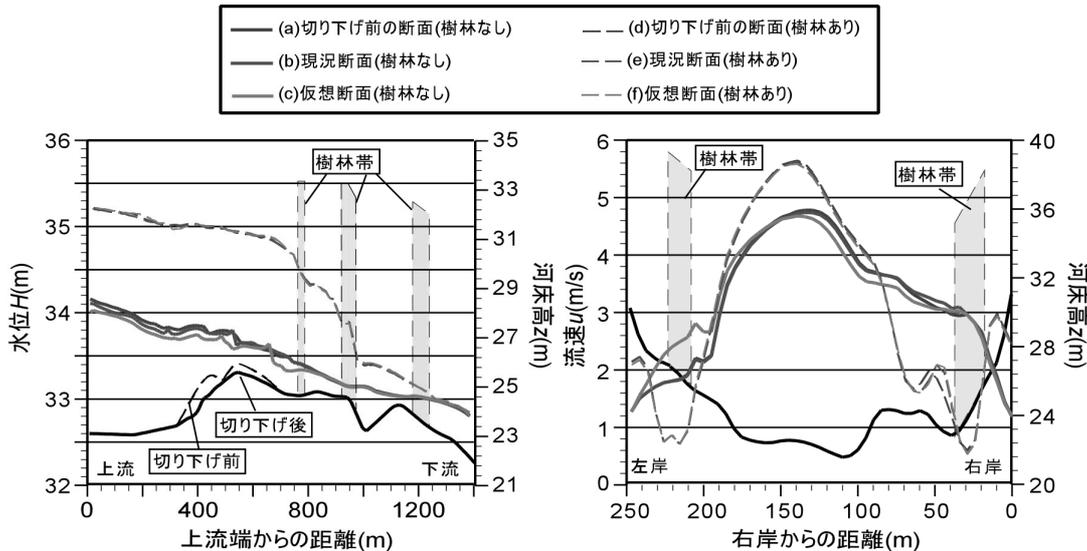


図-12 縦断面水面形分布 (E断面)

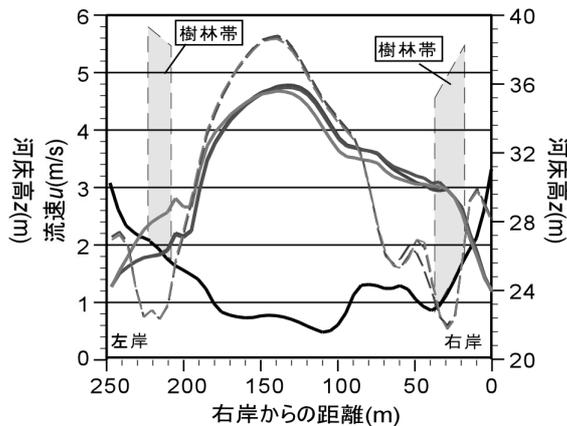


図-13 横断流速分布 (F断面)

間の上流端からの距離を、左縦軸は水位、右縦軸は河床高を示している。図-12より、樹林帯が存在しない場合の(a), (b), (c)では、高水敷切り下げによって上流端での水位が0.1~0.2m程度低下している。一方、樹林帯が存在する(d), (e), (f)においては、高水敷切り下げに伴う上流端水位の低下はそれほど顕著ではない。このように、樹林帯の有無によって高水敷切り下げ効果が非常に異なる。これは、水位低下とともに流水断面に占める樹林帯の割合が増加し、その流水阻害が卓越するためである。また、(a), (b), (c)と(d), (e), (f)との比較から、樹林帯の存在によってその上流側における水位がかなり上昇していることがわかる。

b) 横断流速分布 (樹林内外の流れの構造)

図-13には、樹林帯中央を通る横断面 (図-2のF断面) と、樹林帯が存在しない場合の同じ横断面における全層平均流速と河床高の分布を示す。図-13より、樹林帯が存在しない場合の(a), (b), (c)においては、低水路の流速がかなり低減しており、切り下げによって流下能力が向上していることがわかる。一方、樹林帯が存在する(d), (e), (f)の場合には、高水敷切り下げの効果が限定的であり、(a), (b), (c)の場合ほど顕著でない。また、(a), (b), (c)と(d), (e), (f)との比較から、樹林帯近傍で流速が著しく低減しており、低水路の流速は増加している。樹林帯の存在によって、「低水路-高水敷」間の流速差が大きくなっている。これより、樹林が存在すると低水路の河床洗掘と高水敷上での土砂堆積を促進するような流れの構造が形成され、陸地化・樹林化がさらに加速されると推察される。

7. 結論

本研究によって樹林の特性や河川地形が出水時におけ

る流速・水位に及ぼす影響が明らかになり、樹林化抑制を目指した河川の維持管理を講ずるための様々な知見を得た。実績の流量ハイドログラフを用いた非定常流解析を実施し、H-ADCPによる流速観測値との比較・検証を通して、本モデルは出水時の流動構造を十分な精度で再現していることが確認された。これにより、樹林帯へ作用する流体力や流速分布の詳細など、現地観測だけでは得ることができない情報も分析可能となった。また、実績以外の高水敷切り下げシナリオや現況以外の樹木条件、樹林が完全に冠水するような計画規模の出水など、様々な条件の下で数値解析を実施し、高水敷の切り下げや樹木伐採など、河川整備と維持管理が河川流に及ぼす効果を検討した。以上の検討によって、河川改修などの整備プログラムと樹林帯の特性監視や伐採・伐木管理を一体化して総合的な河川管理を実現することが重要であることが明らかとなった。今後さらに、樹林化抑制に必要な情報収集と調査を進め、河川整備に有用な知見を得ることを目指す。

参考文献

- 1) 前野詩朗・宮内洋介・森 卓也：植生が旭川の洪水流に及ぼす影響の検討，水工学論文集，第48巻，pp.757-762，2004年。
- 2) 福岡捷二・八木澤順治・佐々木寧・田中規夫：河道内樹木の洪水破壊形態と破壊限界値の基盤土壌条件による相違，水工学論文集，第52巻，pp.649-654，2008年。
- 3) 道典康治・南条雅志・石垣泰輔・前野詩朗：捨石水制が冠水した開水路流の二次元二層流モデル，土木学会論文集，No.782/II-70，pp.31-50，2005年。
- 4) Nepf, H.M. 1999. Drag, turbulence, and diffusion in flow through emergent vegetation, Water Resources Research, Vol.35-2, pp.479-489, February.1999.

(2010. 4. 8受付)