

# 吉野川河道内に残留した水防竹林の 管理計画に関する数値解析的検討

NUMERICAL ESTIMATION OF EFFICIENCY OF  
BANBOO GROVE MANAGEMENT PLAN IN THE YOSHINO RIVER

岡部健士<sup>1</sup>・田村隆雄<sup>2</sup>

Takeshi OKABE, Takao TAMURA

<sup>1</sup>フェロー会員 工博 徳島大学教授 工学部建設工学科 (〒770-8506 徳島市南常三島町2-1)

<sup>2</sup>正会員 博(工) 徳島大学准教授 工学部建設工学科 (〒770-8506 徳島市南常三島町2-1)

This study is concerned with a management plan of riverine bamboo groves which used to play an important role of flood protection but have been neglected in a river course after levee construction. The study site is a river channel between Tachino and Kamo on the right and left sides, respectively, and located in an upstream reach of the Yoshino River in Shikoku, Japan. A numerical model of two-dimensional shallow water flow was composed by taking account of form drag of bamboo bodies and influence of secondary flow on bed shear stress. This model was validated based on an observation results of surface velocity of an actual flood flow and was utilized to clarify the variation of river flow due to reduction of area and population density of bamboo forests. As a result, useful information was obtained for drawing up a reasonable bamboo grove management plan.

**Key Words :** Riverine bamboo grove, management plan, case study, Two-dimensional shallow water-flow model, The Yoshino River in Shikoku, Japan

## 1. はじめに

我が国の諸河川では、1970年代以降、洪水敷や砂州上での樹林化が顕在化してきた。現存する樹林帯は水防林としての歴史を持つものが築堤により河道内に取り込まれたのち拡大・密生化したり、砂州の安定化にともなって発生・発達してきたものであるが、その分布範囲や密度があるレベル以上になると、河道の洪水疎通能の低減や滞り部深掘れの助長などの治水障害を引き起こす。一方、河道内の樹林帯は、生態系基盤の主要要素として河川環境保全に重要な役割を果たしている。現在、河道管理の現場では、樹林帯に対する中・長期的な管理計画の策定を図ろうとしているが、そこで求められているものは、伐採や間引きなど樹林帯への人為的インパクトを可能な限り小さくしつつ治水目標を達成できる管理方針の確立である。

徳島県を東西に縦断する吉野川では、その平野部の上流区間(岩津地点より上流)が昭和40年に国の直轄区間に編入のち本格的な連続築堤・堤防補強の事業が進められ、平成19年時点における当該区間の堤防整備率は約69%まで達している<sup>1)</sup>。直轄編入以前における当該区間の治水は、断続的で小規模な堤防と連続的で広大な水防竹林に依存していたが、これらの水防竹林は、地元からの要請もあって築堤事業概成後もほとんど解消されな

かった。以来、河道内に残留した竹林は、若干拡大する傾向を呈したこともあって、今では幅が河道幅の30～50%にまで達している箇所が少なくない(写真-1)。そして、竹林の連続性が高く、幅がとくに広い区間においては前述のような洪水疎通能の低減や滞り部深掘れの進行という治水障害が明らかに認められており、河川管理者には早急な対応策の検討と実施が求められている。

本研究は、最近築堤工事が概成した吉野川の太刀野・加茂区間を対象として、当該区間に残留した竹林に対する合理的な管理計画の策定に資するため、間引きや伐採などのインパクトが洪水流況に及ぼす影響を、植生の存在と河床面抵抗への二次流の影響を考慮した2次元浅水流モデルによる数値解析に基づいて検討したものである。



写真-1 吉野川の河道内に残留した水防竹林

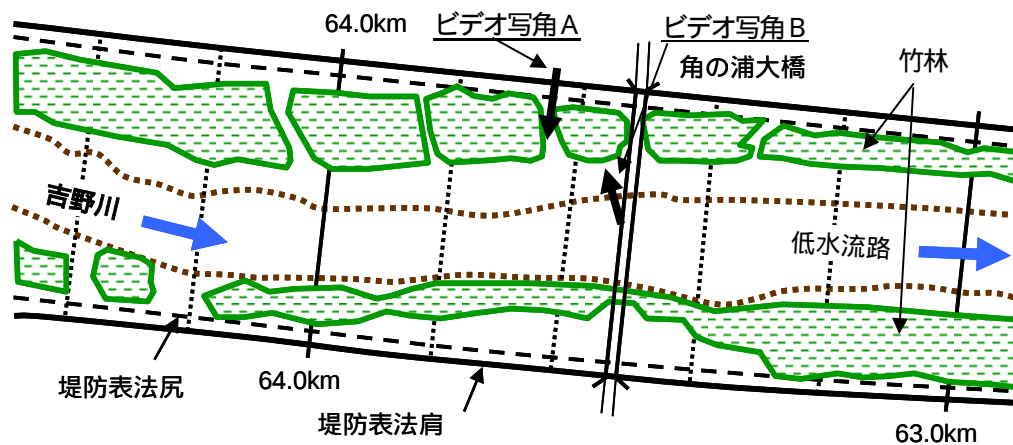


図-1 検討対象区間の河道概要と竹林の分布

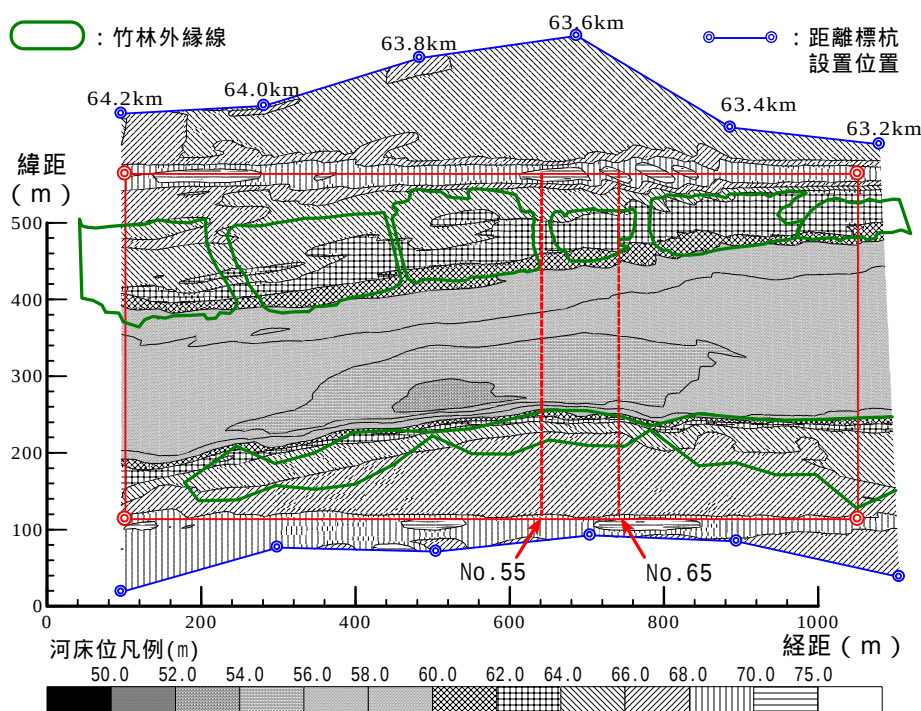


図-2 検討対象区間の地形

## 2. 検討対象区間の概要

本研究の対象区間は、吉野川距離標63km～65kmに位置する太刀野・加茂区間である。この区間は平成に入るまでは全くの無堤区間であり、流路の両岸には50～150mのほぼ連続した水防竹林と小規模で断続的な自然または人工堤防が存在するのみであったが、左岸・太刀野地先では平成5～18年度に、右岸・加茂地先では平成3～19年度に計画堤防が概成した。

図-1に、河道の現状を示す。堤防法線は左右岸とも直線状であり、河道幅はほぼ一定の約450mとなっている。低水流路は河道中央部を緩く蛇行しているが、その左岸側は寄り洲状の地形であり、右岸側は、低水護

岸も施された整備済みの高水敷となっている。残留する竹林の分布範囲を緑色の線で示した。竹林は、一部には途切れている箇所もあるが、左岸堤防と右岸高水敷外縁に沿って帯状に分布しており、その幅は、左右岸の合計で河道幅の30～40%に達している。優占種はマダケとモウソウチクで、近年は管理されていないために、個体密度は2～4本/m<sup>2</sup>と過密状態になっている。

図-2に、後述する流れの数値解析の対象領域（赤線で表示、堤防法線を含む）とされた区間の地盤標高の分布を示した。竹林は、左右岸ごとに、低水面からの比高がほぼ同じ領域に成立している。また、外縁部が緩やかな凸状を呈している右岸高水敷の先端付近には、最大で4mに達する深掘れ部が形成されている。

### 3. 数値解析モデル

#### (1) 基礎式

植生帯の影響を受ける河川流の平面流況の数値解析法としては、従来、多様なモデルが提案され、現地流況の推算にも利用されている<sup>2), 3), 4)</sup>。これらの多くでは解析の基本座標として一般曲線座標が用いられているが、本研究の計算対象区間はほぼ直線状であることから、解析の基礎方程式には、デカルト座標系について記述された、植生の抵抗と二次流が河床面抵抗に及ぼす影響を考慮した2次元非定常浅水方程式を採用した。流れの連続数と運動方程式は以下のようなものである<sup>5)</sup>。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial uM}{\partial x} + \frac{\partial vM}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\partial \tau_{xx} h}{\rho \partial x} + \frac{\partial \tau_{xy} h}{\rho \partial y} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} - \frac{C_D \lambda_D h u \sqrt{u^2 + v^2}}{2} \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial uN}{\partial x} + \frac{\partial vN}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\partial \tau_{xy} h}{\rho \partial x} + \frac{\partial \tau_{yy} h}{\rho \partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho} - \frac{C_D \lambda_D h v \sqrt{u^2 + v^2}}{2} \quad (3)$$

ここに、 $t$ ：時間、 $x, y$ ：水平直交座標、 $h$ ：水深、 $H$ ：水位、 $M, N$ ： $x, y$ 方向の流量フラックス、 $u, v$ ： $x, y$ 方向の水深平均流速、 $\tau_{xx}, \tau_{yy}, \tau_{xy}$ ：レイノルズ応力、 $\tau_{bx}, \tau_{by}$ ： $x, y$ 方向の底面せん断応力、 $C_D$ ：竹固体の抗力係数、 $\lambda_D$ ：竹林の密生度（流れ場単位容積当たりの竹の抵抗面積）、 $\rho$ ：水の密度、 $g$ ：重力加速度である。

レイノルズ応力には、ゼロ方程式モデルを適用する。

$$\frac{\tau_{xx}}{\rho} = 2\nu_t \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \frac{\tau_{xy}}{\rho} = 2\nu_t \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \frac{\tau_{xy}}{\rho} = \nu_t \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (4)$$

ここに、 $\nu_t$ ：渦動粘性係数で、経験係数 $\alpha_t$ を用いて $\nu_t = \alpha_t u_* h$ により算定する。 $\tau_{bx}, \tau_{by}$ は、水深平均流の流線の湾曲が誘起する二次流の影響を考慮して求められる（詳細は後述）底面上、相当粗度の高さの位置（以下、底面近傍という）での $x, y$ 方向流速 $u_b, v_b$ を用い、これらが粗面对数則に従うものと仮定すれば、次式のように定式化できる。

$$\frac{\tau_{bx}}{\rho} = \frac{u_b \sqrt{u_b^2 + v_b^2}}{8.5^2}, \quad \frac{\tau_{by}}{\rho} = \frac{v_b \sqrt{u_b^2 + v_b^2}}{8.5^2} \quad (5)$$

上式の $u_b, v_b$ については、Engelund<sup>6)</sup>を参考に、水深平均流が底面近傍で持つと見なされる流速の大きさと $x$ 軸からの偏角を $U_S, \theta$  ( $\tan \theta = v/u$ )、二次流流速の大きさと $x$ 軸からの偏角を $V_S, \phi$ として、次式で表す。

$$u_b = U_B \cos \theta + V_S \cos \phi \\ v_b = U_B \sin \theta + V_S \sin \phi \quad (6)$$

$V_S$ は、Engelund<sup>6)</sup>が提示した水深平均流線からの底面近傍の実流速の偏倚角に対する半経験式を適用すれば、

$$V_S = N_* U_B h \cdot |K| \quad (7)$$

と表される。ここに、 $N_*$ は係数で7.0とする。また、 $U_B$ はManning式と粗面对数則の組み合わせにより、

$$U_B = \frac{8.5n\sqrt{g} \cdot \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/6}} \quad (8)$$

と記述できる。さらに、 $K$ は水深平均流の流線の曲率で、その速度成分を用いて次式のように表される<sup>7)</sup>。

$$K = \frac{\text{sign}(1, u)}{(u^2 + v^2)^{3/2}} \left\{ u \left( u \frac{\partial v}{\partial x} - v \frac{\partial u}{\partial x} \right) + v \left( u \frac{\partial v}{\partial y} - v \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right\} \quad (9) \\ \equiv \text{sign}(1, u) \phi(u, v)$$

ここに、 $\text{sign}(1, u)$ は、 $u$ の正、負に対して+1, -1をとる関数とする。そして、(7)および(9)式を用いれば、(6)式をつぎのように書き直すことができる。

$$u_b = U_B \cos \theta - N_* U_B h \phi(u, v) \sin \theta \\ v_b = U_B \sin \theta + N_* U_B h \phi(u, v) \cos \theta \quad (10)$$

#### (2) 数値計算法

(1)～(3)式の離散化は、一様サイズの計算格子に変数定義点をスタガード形式で配置して行った。離散化の要領は井上<sup>8)</sup>の方法をほぼ踏襲した。すなわち、時間進行にはleap-frog法を適用し、空間微分項の離散化では、有限体積法を基本とするが、流量フラックスの移流量の評価には風上差分の考え方を取り入れた。他の微分項の離散化には中央差分法を用いた。さらに、底面摩擦項と竹林抗力の項に起因する数値振動（Vasilievの不安定）を抑制するため、両者の離散化式には未知量の流量フラックスを線形性が失われない形で含ませた。

#### (3) 洪水観測資料に基づく適合性の検討

図-1に示した現場では、平成17年9月7日、台風14号がもたらした最大流量が9,327m<sup>3</sup>/secの出水を対象に、洪水表面流速のビデオ観測が行われた実績がある。すなわち、洪水低減期の推定流量が7,100m<sup>3</sup>/secの時点で図-1に示した写角AおよびBで得られたビデオ映像から、PTV, LSPIV, STIVなどにより表面流速を検出した<sup>9), 10)</sup>。

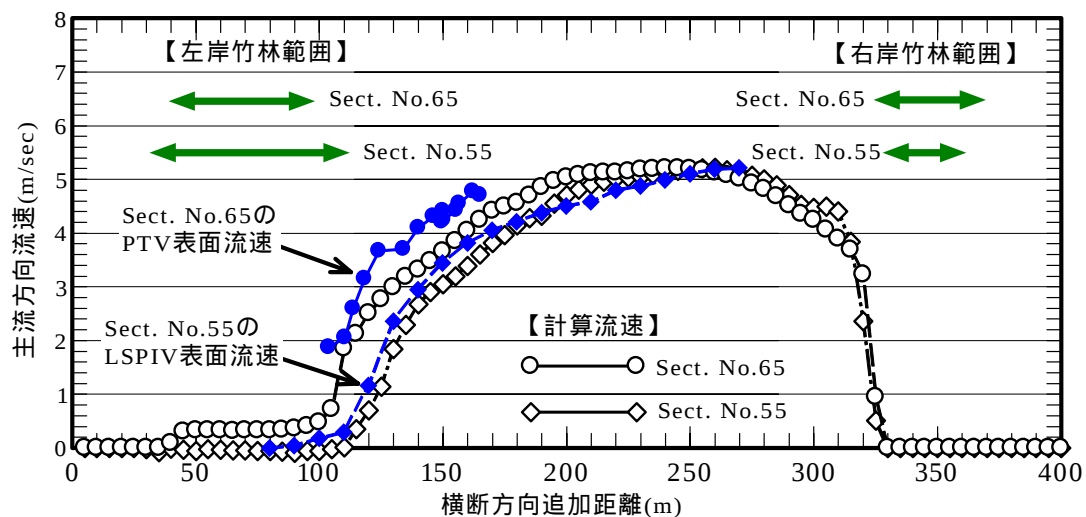


図-3 水深平均流速の計算結果と表面流速の観測結果の比較

このうち、写角Aの映像からは、左岸堤防の近傍から右岸竹林の水表側外縁付近に至る約250mの範囲（俯角：約2～7度）、写角Bの映像からは左岸竹林の水表側外縁から約70mの範囲（俯角：約12～35度）における表面流速の横断分布が推定された。以下においては、これらの流速資料と計算結果の比較を通して、基礎式中のパラメータや河床粗度係数の適正值を検討する。

数値解析の対象は、図-2の赤線で示された矩形領域とした。この領域の縦断方向（ $x$ 軸方向）の辺長は960m、横断方向（ $y$ 軸方向）のそれは450mであり、長辺を堤防天端中心線にほぼ一致させている。そして、この領域に $x$ および $y$ 方向の間隔をそれぞれ10.0mおよび5.0mとした計算メッシュ被せた。メッシュ中心の地盤高さの入力データは、主として航空レーザープロファイラーによる5mメッシュのDEMデータから作成したが、欠測の水中部は定期横断測量成果（約200m間隔）で補間した。また、竹林の密生度 $\lambda_D$ には、竹林の個体密度と胸高直径の現地調査結果に基づき一律 $0.214\text{m}^{-1}$ を与えた。計算では、まず、当該洪水の痕跡水位をある程度するように調整した、62.0km断面を出発断面とする準2次元計算モデルを用いて流れの初期状態を設定し、ついで、下流端の水位と上流端の縦断方向流量フラックスを初期値に固定する境界条件のもとに、流れ場が収束するまで非定常流計算を続行した。

計算は、 $\alpha_t$ 、 $C_D$ ならびに河床粗度係数 $n_b$ の設定値を種々に変化させて多数実施し、その結果と流速観測や撮影時に写角Aの断面で実施した水位計測の結果とが整合するような値の組み合わせを探索した。その結果、 $\alpha_t = 5/15$ 、 $C_D = 1.4$ 、 $n_b = 0.026$ とするのが適

切であるとの結論に達した。 $\alpha_t$ の値は、広長方形水路内の植生などを伴わない等流でのものと比較すれば5倍程度大きい。これは、竹林域と主流域の間に生じる大規模な水平混合の影響と思われる。また、 $C_D$ の値は、一様流中に置かれた無限長の円柱について知られている1.2程度に比して約20%大きい。この理由としては、竹個体に作用する抗力の代表流速に水深平均流速を用いていることや植生密生度の空間分布を考慮していないことなどが考えられる。

図-3は、 $\alpha_t$ 、 $C_D$ および $n_b$ を上記のように設定した場合について、計算結果と観測結果を比較したものである。ここに、Sect. No. は計算メッシュの $y$ 方向格子線に上流→下流の向きに付した番号で、Sect. No.55 およびSect. No.65 は、それぞれ写角AおよびBによる水面ビデオ観測の結果から表面流速の横断分布を求めた断面に対応している。なお、ここでは、Sect. No.55およびNo.65での観測値として、それぞれLSPIVおよびPTVによるものを採用したが、前述の3種の流速検出手法による結果には大差がなかったことを付記しておく。

図において、計算流速は竹林に近い領域では観測値の80～90%となっているが、前者は水深平均流速、後者は水面流速であることを考慮すると、この領域での適合性は概ね良好と判断される。一方、Sect. No.55の主流部中央付近では計算流速が観測流速とほぼ同等か若干上回る傾向が現れている。この原因としては、まず、計算における $n_b$ や河床地形の設定の不適切などが考えられる。ただし、観測値にも俯角が極めて小さい画像からの検出値には信頼性を欠く面があるので、適合性のさらなる向上の方法については現在も検討中である。

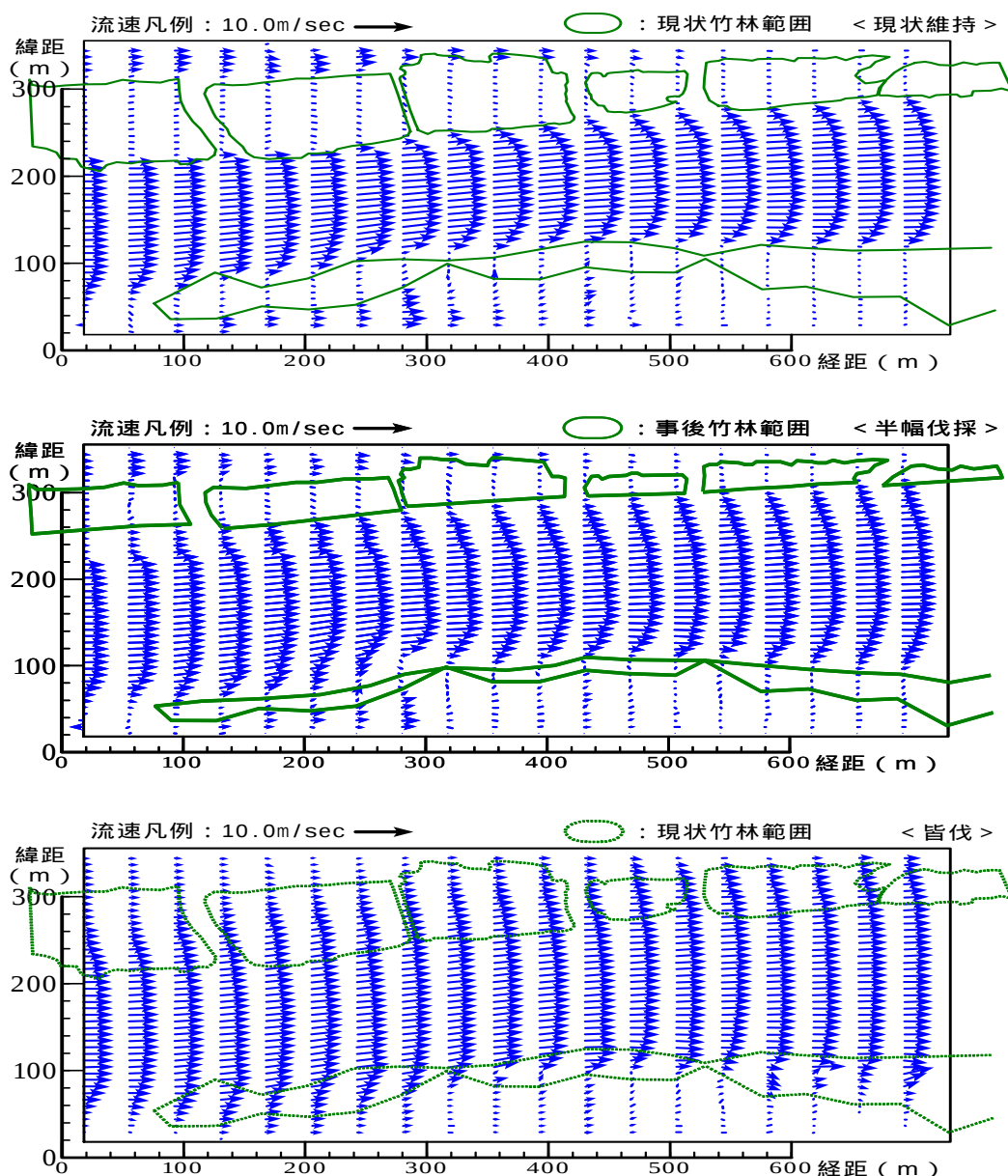


図-4 竹林を現状維持した場合と伐採した場合における流速ベクトル分布の比較

#### 4. 竹林管理が洪水流況に及ぼす影響

前章で構築した計算モデルを用いて、現地竹林に関して想定される竹林管理の具体案が洪水流の平面流況や水位縦断分布に及ぼす影響を検討した。

検討計算では、対象地点の既往最大規模の洪水のピーク流量に匹敵する $14,000\text{m}^3/\text{sec}$ の流量を想定した。竹林の管理条件としては、分布範囲や密生度を現状に維持する場合、密生度は現状維持とするが分布範囲については、両岸の竹林の分布幅がともに現状の75%あるいは50%となるように水表側を帯状に伐採する場合、分布範囲は現状維持とするが、密生度を、現存竹林の全域に

おいて一様に現状の50%、25%、10%、さらには0%（すなわち皆伐）とする場合を想定し、各々に応じて計算メッシュの竹林属性である存在 / 非存在の因数（0 or 1）や密生度 $\lambda_D$ を変化させた。このほか、パラメータ $\alpha_t$ 、 $C_D$ および $n_b$ には、竹林の管理条件によらず一律に前章で得られた値を与えた。

図-4は、密生度を現状維持として竹林幅を縮小する場合の流況変化を調べたものである。上から順に、分布範囲を現状に維持する場合、両岸の竹林の水表側半幅のみを伐採・削除する場合、竹林を皆伐する場合における流速ベクトルの分布状況を描いて比較している。

竹林が存在すると、その中では主流域に比して流速が著しく低減し、流れ場は一部を除きほとんど死水域の状

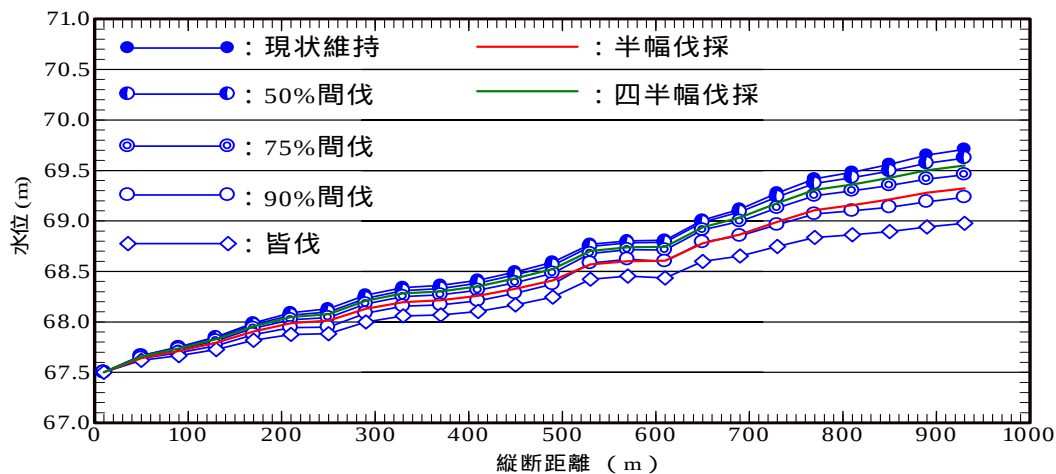


図-5 竹林の管理方法が水位縦断分布に及ぼす影響

態となっている。このため、とくに現状維持の場合には、洪水流の実質流動幅は、見かけの河道幅の50%程度にしかになっていない。竹林幅を削減すると水の流動幅はそれなりに増大してる。ただし、とくに左岸の砂州領域では竹林域の河床が主流域に比して段丘状に高くなっているため、伐採域での流量増はその幅に対応してはいないと思われる。右岸高水敷上の流量にも、計算区間の上下流端付近以外では、竹林幅の縮小による効果が顕著には認められない。一方、堤防防護の観点から表ノリ面に沿う領域の流速に着目すると、現状維持の場合に比較的高速の流れが存在しているが、伐採範囲の増加につれてそれが解消する傾向が認められる。

図-5は、想定した竹林管理の全ケースについて、水位の縦断分布状況を比較したものである。なお、下流端水位は、前節の場合と同様に、準2次元計算モデルで決定した。間伐は、その率を75%以上などと皆伐状態に近い程度まで大きくしなければ実質的な水位低減にはつながらないことが見て取れる。また、半幅伐採は、結果として90%間伐に近い効果を発揮するようである。

## 5. まとめ

以上、本研究では、かつての伝統的水防竹林が築堤後も河道内に残留している吉野川の太刀野・加茂区間に着目し、その管理計画の合理化ならびに地域への説得性向上に資するために、伐採や間引きなどの人為的インパクトが洪水流況に及ぼす影響を数値計算により定量的に把握することを試みた。

まず、既往のノウハウを参考に、植生を伴う2次元非定常浅水流の数値解析モデルを新たに構築した。本モデルは、水深平均流線の湾曲による二次流が河床面抵抗に及ぼす影響を簡便な方法で評価しているとともに、比較的安定した計算を行うことができる。

ついで、本モデルの主要パラメータを現地洪水流のビデオ観測成果に基づいて同定したのち、幾つかの具体的な竹林管理方法案について、それが平面流

況や水位に及ぼす影響を予測した事例を提示した。これらは、伐採や間伐の範囲や程度の適正化を図るために有用な情報になるものと思われる。ただし、本研究の範囲内では、計算モデルの主要パラメータの値が繁茂状況や洪水規模によらないことを前提としている。この点の妥当性については今後、さらに現地観測資料を集積して検討する必要がある。

## 参考文献

- 1) 国土交通省四国地方整備局：吉野川水系河川整備計画【再修正素案】，2007。
- 2) 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。
- 3) 福岡捷二，渡邊明英：水面形の時間変化と非定常二次元解析を用いた洪水流量ハイドログラフと貯留量の高精度推算，土木学会論文集，No.761/ -67，pp.45-56，2004。
- 4) 重枝未玲，朝位孝二，坂本洋ほか：樹木群を考慮した平面2次元数値モデルによる乙津川の洪水流解析，水工学論文集，第50巻，pp.1171-1176，2006。
- 5) 清水義彦，辻本哲朗：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.513-518，1999。
- 6) Engelund, F.: Flow and Bed Topography in Channel Bends, Jour. of Hydraulic Div., ASCE, Vol.100, HY11, pp.1631-1648, 1974.
- 7) 清水康行，藤田陸博，平野道夫：連続床止め工を有する複断面河道における流れと河床変動の計算，水工学論文集，第43巻，pp.683-688，1999。
- 8) 井上和也：土木学会水理委員会編・水理公式集例題プログラム集，平成13年度版，2002。(on CDR)
- 9) 藤田一郎，椿涼太，岡部健士，富尾恒一，藤井啓：河川表面のハイビジョンビデオ映像を用いた吉野川洪水流の流量・流速計測，河川技術論文集，第12巻，pp.127-132，2006。
- 10) 岡部健士，藤田一郎，椿涼太，和久田敦志：現地洪水流の表面ビデオ映像に対するLSPIV解析の適用要領，水工学論文集，第51巻，pp.1087-1092，2007。

(2008.9.30受付)