

## 部分的に植生域を有する複断面河道における流れの三次元数値解析

3D Numerical Simulation of Turbulent Flows in Partly Vegetated Compound Open Channel

山本 浩之\*・長谷川史明\*・Jahra Fatima\*\*・河原能久\*\*\*

Hiroyuki YAMAMOTO, Fumiaki HASEGAWA, Fatima JAHRA and Yoshihisa KAWAHARA

\*学生会員 広島大学大学院 工学研究科博士課程前期 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山 1-4-1)

\*\*学生会員 広島大学大学院 工学研究科博士課程後期 (同上)

\*\*\*フェロー会員 工博 広島大学大学院教授 工学研究科 (同上)

Recently riparian vegetation has received much attention in river management for flood control and protection of natural environment to be harmonized, which requires more in-depth understanding of flow characteristics in channels with vegetation. In this study, a 3D numerical model that calculates the flow-vegetation interaction using the standard  $k-\epsilon$  model has been developed. To validate the numerical model, laboratory experiments have been carried out to obtain mean flow field and turbulent quantities in three types of channel with partially vegetated zones. It is found that the numerical results show reasonably good agreement with the measured ones. The velocity in vegetation zone is decreased by the drag of vegetation. It causes horizontal and vertical vortices at the interface between main channel and vegetation zone. Water level increases at the upstream side of vegetation zone and decreases at its back side. The water level difference induces the secondary currents, which changes the distribution of streamwise velocity.

**Key Words :** *turbulent flow, vegetation, compound open channel, 3D numerical simulation, standard  $k-\epsilon$  model*

キーワード: 乱流, 植生, 複断面河道, 三次元数値解析, 標準  $k-\epsilon$  モデル

## 1. 序論

河道内の植生管理は適切な河川管理を行う上で重要な課題の一つである。河道内の植生は、洪水時に抵抗となり河道の洪水処理能力を低下させるが、環境面では生物の生息場や景観の形成等に大きく寄与する。今後の河川整備では、環境面での利点を活かしつつ、治水機能に対する欠点を最小限にする手法や、植生の存在で堤防を保護することによって治水面にもプラスになるような植生管理手法の確立が求められている。

また、日本の河川の中下流部では、低水時の流路安定、堤防付近の流速の低減、高水敷をレクリエーションの場として利用できるなどの利点から、横断面形状として複断面形状を採用する例が多く<sup>1)</sup>、一般的にその高水敷上や低水路との境界部に樹木等の植生が繁茂している。したがって洪水時の流れの構造は、複断面河道形状と植生の相互作用により一層複雑になることが予測される。そのため高い精度の解析モデルの構築が求められており、そこから得られる解析結果を河川の植生管理手法へ反映させ、適切な手法の検討を行うことが必要とされている。

植生を有する複断面河道についての研究は、高水敷上に植生を有する研究において、富永・長尾ら<sup>2,4)</sup>は樹木群の

設置幅・配列を変化させた研究や、比較的短い区間の高水敷植生群を片岸、両岸に有する河道の非定常実験、二次元解析を行っている。また、彼らは植生密度や高水敷高さの影響も検討している。

現在、実務レベルにおいては、福岡ら<sup>5)</sup>が提案した、境界部での運動量輸送を境界混合係数 $f$ を用いた剪断力で評価する、準二次元解析が使用されている。しかし、この解析手法は、現況樹木群の影響を評価することを主目的としたものであり、様々な植生の繁茂状況や育成状況を反映した解析とは言いがたく、適切な伐採、植樹等の検討を行うためにはさらに高度な解析手法の確立が必要である。

植生を有する複断面河道における数値解析では、DNS や LES も考えられるが、現状のコンピュータの性能の限界、実用的な課題への適応の困難さなどを考慮すると、それらは適切な手法とは言い難い。現在、Kang ら<sup>6)</sup>によるレイノルズ応力方程式モデルを用いた解析手法が最も高精度であるといえるが、土砂輸送や植生配置等の影響は十分には検討されていない。

このようにさまざまな角度から研究は行われてきたが、植生周りの流れは複雑であり、まだ十分には解明されていないのが現状である。したがって、植生の管理のためには、さらなる知見の蓄積や実河川での現象に対する総合的な

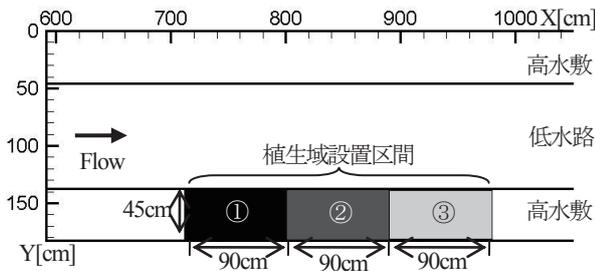


図-1 実験区間の平面図

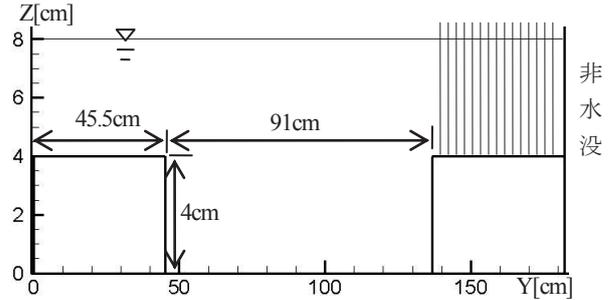


図-2 複断面水路の横断面図

表-1 実験条件

Case	河床勾配 $I_b$	流量 $Q$ [l/s]	平均水深 $h_0$ [cm]	断面平均主流速 $U_m$ [cm/s]	植生密度 $\lambda$ [1/cm]	植生域の
						配置
C1	1/500	38.5	8.2	34.1	0.0333	部分植生域(長さ90cm)
C2-1	1/500	38.5	8.3	33.6	0.0333	間伐植生域(長さ90cm)
C2-2	1/500	30	8.0	27.5	0.0333	間伐植生域(長さ90cm)
C3	1/500	30	8.0	27.5	0.0333	部分植生域(長さ270cm)

解析手法の開発が必要である。

本研究は、片側高水敷上に部分的に植生域を有する複断面河道における流れの特徴を明らかにすることを目的とし、部分植生域を有する複断面開水路で実験を行い、平均流速や乱流量の計測を行った。一方、その計測データを検証用とし、三次元流れを再現する解析手法を開発した。そして実験において確認された現象の理解を数値解析から試みた。

## 2. 開水路実験概要

### 2.1 実験水路・条件

実験では、長さ  $L=21.5\text{m}$ 、幅  $B=1.82\text{m}$  の可変勾配水路を使用した。河床勾配は  $1/500$  に設定し、断面形状は高さ  $4\text{cm}$ 、幅  $45.5\text{cm}$  高水敷を両岸に有する複断面である。高水敷上の短い区間に植生域を設置した。植生流れはすべて定常流とした。図-1 に実験区間の平面図、図-2 に複断面水路の横断面図を諸元とともに示す。

Case C1 では、図-1 に示す植生域設置区間の①のみに、長さ  $90\text{cm}$ 、幅  $45\text{cm}$  の植生域を設置した。また、Case C2 では①と③に植生域を、すなわち、長さ  $90\text{cm}$  の植生域を間隔  $90\text{cm}$  離して2つ設置した。Case C3 では①、②、③すべてに設置し、長さ  $270\text{cm}$  の連続した植生域とした。表-1 に実験条件を示す。

### 2.2 植生モデル

植生モデルは直径  $D=3\text{mm}$ 、高さ  $h_v=5\text{cm}$  の竹串(円柱)であり、流れによる変形はない。植生密度  $\lambda$  は次のように定義する。

$$\lambda = D/(dx \cdot dy) \quad (1)$$

ここで、 $dx, dy$  は流下方向、横断方向の植生モデル中心間の間隔であり、それぞれ等しく  $3\text{cm}$  とする。配置はすべて正方形配置とする。

## 2.3 実験内容・計測機器

まず、全体の流れを把握するために流れの可視化を行った。次に、I型・L型の電磁流速計を用いて流速3成分を計測するとともに、サーボ式水位計により水位データを取得した。流速と水位の計測は2分間、 $10\text{Hz}$  で行った。平均水位の計測にはポイントゲージも使用した。

## 2.4 座標系

座標系は全ケースにおいて、X軸を計測区間の上流端を原点とし流下方向に、Y軸を左岸から右岸向きの横断方向に、Z軸を鉛直上向きに設定した。

## 3. 数値解析手法

### 3.1 基礎方程式

基礎方程式は、連続の式、植生抵抗を考慮したレイノルズ方程式、乱れエネルギー  $k$  及びその散逸率  $\varepsilon$  の輸送方程式である。また、乱流モデルとして標準  $k-\varepsilon$  モデルを用い、植生の影響を抗力に植生密度をかける形でモデル化した。以下にそれらの方程式を示す。

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial U_i U_j}{\partial x_j} = g_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_j} - F_i$$

$$F_i = \frac{\rho}{2} C_D \lambda U_i \sqrt{U_j U_j} \quad (3)$$

$$-\overline{u_i u_j} = -\frac{2}{3} k \delta_{ij} + \nu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial U_j k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_{rod} + S_k - \varepsilon \quad (6)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial U_j \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} [C_{\varepsilon 1} (P_{rod} + S_\varepsilon) - C_{\varepsilon 2} \varepsilon] \quad (7)$$

$$P_{rod} = \nu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \quad (8)$$

$$S_k = C_{\beta k} F_j U_j, \quad S_\varepsilon = C_{\beta \varepsilon} F_j U_j \quad (9)$$

$$C_D = -8.5 \times 10^{-4} \text{Re}_d + 1.5, \quad \text{Re}_d = \sqrt{U_i U_i} D / \nu \quad (10)$$

ここで  $x_i$ ,  $U_i$  ( $i=1\sim 3$ ) は座標及び平均流速に対応し,  $u_i$  は流速の変動成分である. また,  $P$  は平均圧力,  $\rho$  は水の密度,  $\nu$  は水の動粘性係数,  $g_i$  は重力加速度,  $F_i$  は植生抵抗の  $i$  方向成分である. モデル定数は  $C_\mu=0.09$ ,  $\sigma_k=1.0$ ,  $\sigma_\varepsilon=1.3$ ,  $C_{\beta k}=1.44$ ,  $C_{\beta \varepsilon}=1.92$  である. また Lopez-Garcia が提案しているように<sup>7)</sup>,  $k$  方程式での係数  $C_{\beta k}$  を 1.0,  $\varepsilon$  方程式での係数  $C_{\beta \varepsilon}$  を 1.33 に設定した. 抗力係数  $C_D$  は, Poggi ら<sup>8)</sup> が実験から導出した式(10)を用いて, コントロールボリューム毎に算出した.

基礎方程式は有限体積法により離散化し, SIMPLE アルゴリズムを用いて収束解を求めた. 移流項のスキームは, レイノルズ方程式に QUICK スキームを,  $k$ ,  $\varepsilon$  の各輸送方程式ではべき乗則を用いた.

### 3.2 計算条件

境界条件として, 壁面近傍では壁関数法を用いた. 今回の実験では側壁がガラス, 底面がウレタンを用いているため, 本解析では側面を滑面, 底面を粗面 ( $k_s=0.3\text{cm}$ ) として取り扱った. また, 上流端で一様な流れ場を指定し, 下流端では流出条件を与えた. さらに, 水深は一定として, 水面を対称面として扱った. なお, 仮定した水深と実際の水深との差は最大で 4mm 程度であり, かつ局所的である. また, その地点の流速は大きくない. そのため, 水面を対称面として取り扱っても計算精度は大きくは低下しない.

初期条件として, 主流速  $U$  には断面平均流速を,  $V$ ,  $W$

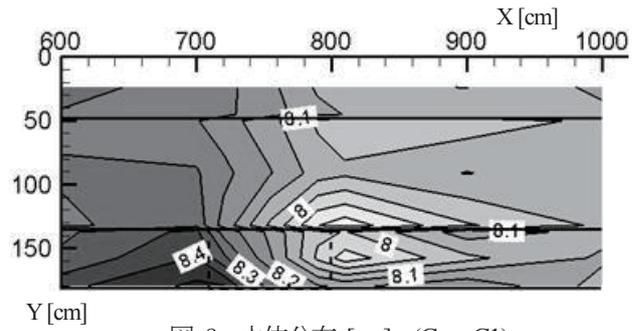


図-3 水位分布 [cm] (Case C1)

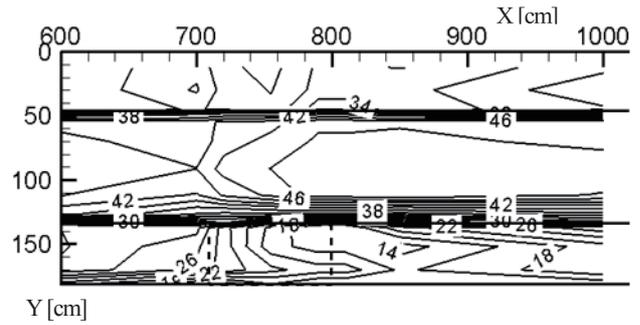


図-4 主流速のコンター [cm/s] (Case C1, Z=6cm)

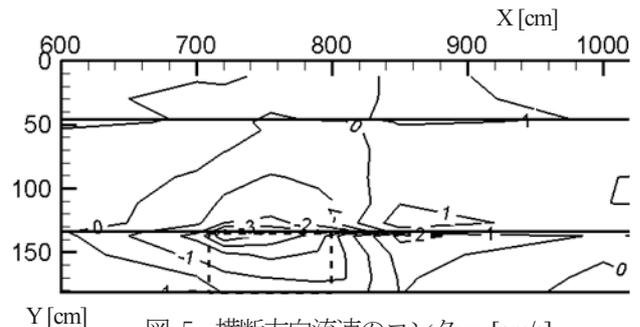
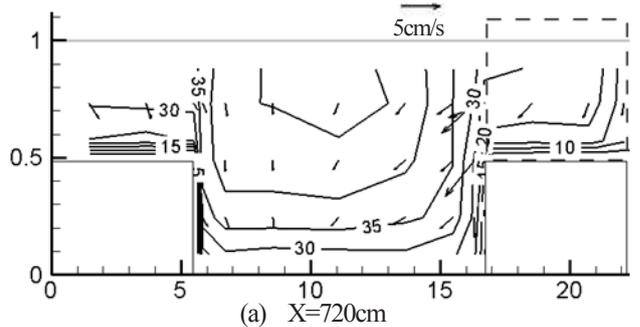
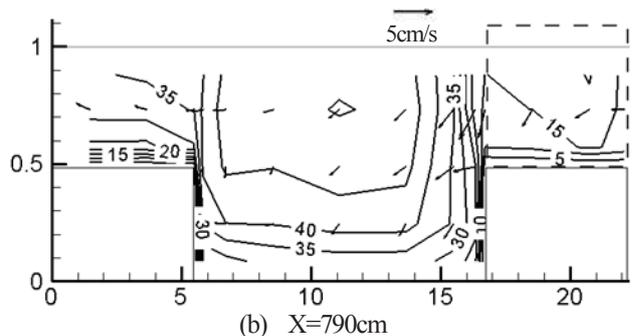


図-5 横断方向流速のコンター [cm/s] (Case C1, Z=6cm)



(a) X=720cm



(b) X=790cm

図-6 主流速コンターと二次流ベクトル [cm/s]

には0を全計算領域にわたり与えた。また、圧力 $P$ には静水圧分布を仮定し、 $k$ ,  $\varepsilon$ ,  $\nu_t$ については、一定値を与えた。

計算格子数は、流れ方向×幅方向×水深方向に、Case C1にて $260 \times 129 \times 22$ 、Case C2-1にて $387 \times 129 \times 23$ 、Case C2-2とC3において $387 \times 129 \times 21$ とした。

#### 4. 実験結果と考察

##### 4.1 Case C1

Case C1では高水敷片側に長さ90cm、幅45cmの植生域が部分的に存在する。図-3, 4, 5は、それぞれ植生域周辺の水位分布、低水路河床から6cm（高水敷上2cm）高さの平面における主流速 $U$ のコンター、及び横断方向流速 $V$ のコンターを示している。図中の点線が植生域の位置を表している。

図-3から、水深は植生域上流端（ $X=710\text{cm}$ ）の側壁付近で最も上昇し、1m上流までその影響が及んでいる。そして、同一断面において横断方向に水位勾配が生じていることがわかる。植生域内では流下方向にも急な水面勾配がついている。また、植生域（高水敷）と低水路の境界部では、水深は低下しており、植生域下流端の低水路との境界付近で最も低下している。植生域より下流部では、高水敷上の水位が、低水路よりわずかではあるが、高くなっている。

図-4から、主流速は植生域上流端から70cm上流断面付近の側壁側から減速し始め、低水路のみならず、植生のない対岸の高水敷上でも流れは加速される。また、植生域内では、流速は低水路との境界付近では低減し、側壁側の方が速くなるという流速差が生じている。その流速差は植生域上流端から20cm流下した断面で既に現れ、流下するにつれて差が拡大している。流れの可視化結果から、植生域上流部には目立った水平渦は確認できなかったため、水位分布が一因であると考えられる。一方、植生域より下流部では高水敷上と主流域での流速差が大きくなるため、水平渦が発生していることが確認された。また、その影響により低水路から高水敷上への流れの乗り上げも確認できる。

図-5では、植生域と低水路の境界付近で、高水敷から低水路に向かって大きな横断方向の流れが発生しているのがわかる。特に、植生域上流部で大きく、最大で断面平均主流速の約12%の大きさを持つ。水深分布からみとれる横断方向水面勾配と関係性が高く、水面勾配が横断方向流速の駆動力の一つとなっていることを伺わせる。また、植生域より下流部では高水敷上の水位が低水路より高いことから、高水敷上への流れの乗り上げは平面渦に伴うものが主であると考えられる。

図-6 (a), (b)は $X=720\text{cm}$ ,  $790\text{cm}$ における横断面内の主流速と二次流ベクトルの分布を示したものである。左右岸の高水敷上の主流速を比較すると、植生の抵抗により流速が低下していることが知られる。また、植生域内においては低水路側の流速が大幅に減速しており、植生域内の遅い主流速をもつ流体塊が低水路に向かって移流されていることがわかる。

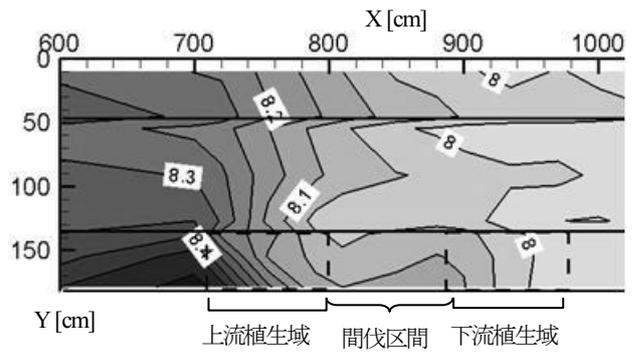


図-7 水位分布 (Case C2-1)

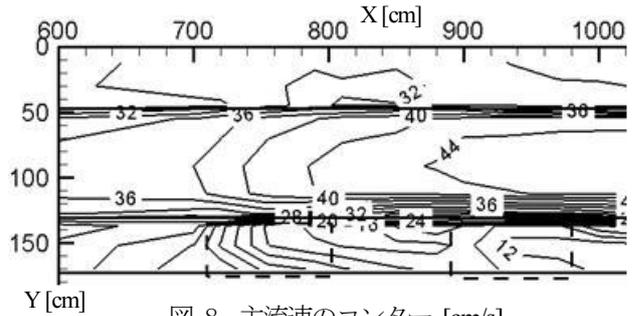


図-8 主流速のコンター [cm/s]  
(Case C2-1, Z=6cm)

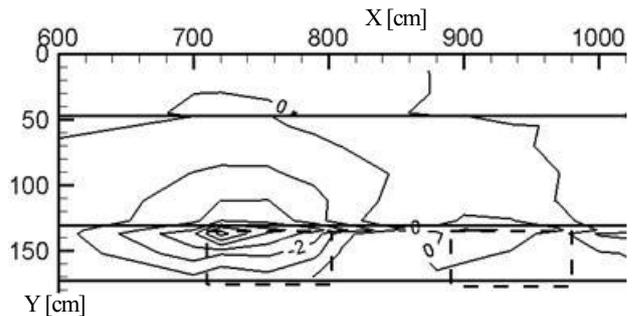


図-9 横断方向流速のコンター [cm/s]  
(Case C2-1, Z=6cm)

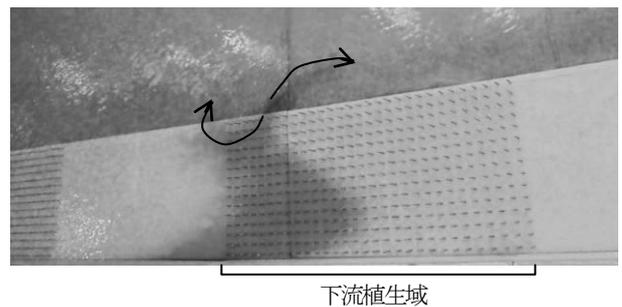


写真-1 下流側の植生域での平面渦 (Case C2-1)

##### 4.2 Case C2

Case C2では90cmの間隔を空けて植生域を設置している。図-7, 8, 9は、それぞれ水位分布、低水路河床から6cm（高水敷上2cm）高さの平面における主流速 $U$ のコンター、及び横断方向流速 $V$ のコンターに関する実験結果である。上流側の植生域付近における流れの特徴は基本的にCase C1と変わらない。すなわち、主流速は、植生域内で低減することに伴って、低水路や対岸の高水敷上では加速

される。また、植生域の前面の側壁付近において水深が増加し、植生内に流下方向と横断方向に大きな水面勾配が形成される。これに伴った、植生域内での主流速分布は側壁付近のほうが境界側よりも速くなるとともに、植生域と低水路の境界付近では、高水敷から低水路に向かう横断方向の流れが発生する。特に、横断方向流速は植生域上流部において大きい。

一方、下流の植生域付近では、植生域と低水路の境界付近で高水敷から低水路の向きに横断方向の流れは発生するが、上流側と比較すると小さい。この要因として、植生による水位上昇が上流側より小さいことが考えられる。すなわち、上下流の植生域間において、低水路から高水敷上への顕著な流れはみられないため、上流植生域を通過した低速の主流速分布がそのまま流下してきたためと考えられる。なお、植生域内で側壁付近の主流速が境界側よりも速くなる現象は見られる。

写真-1 に Case C2-1 における流れの可視化結果を示す。写真より、植生域と低水路の境界部に平面渦が形成されていることが確認でされる。この渦により横断方向の運動量輸送が行われているも推測される。

Case C2-1 と C2-2 で流量を変化させ、流れへの影響をみたが、流れ構造は類似しており、大きな変化は確認できなかった。

### 4.3 Case C3

Case C3 は Case C1 と似ているが、植生域の流れ方向の長さが 90cm から 270cm と長くなっている。図-10 は水位分布の計測結果を示している。これと Case C1 の結果と比較して、植生域前面での水位上昇が小さくなっており、植生内部での水位変化も緩やかであることが知られる。

図-11, 12 は低水路河床から 6cm (高水敷上 2cm) 高さの平面内の主流速  $U$  のコンター、横断方向流速  $V$  のコンターの実験結果を示している。

図-11 と Case C1 の図-4 を比較すると、植生域内ではやはり側壁側と低水路境界側で流速差が発生しているが、2m ほど流下すると、つまり植生域の長さが 2m 以上になると、主流速は横断方向に一樣に近づいている。また、低水路内の主流速は、植生域設置区間において高水敷上の流れが減速されるため、加速され続ける。また、Case C2 と同様に、植生域下流部の低水路との境界部において大規模な平面渦が観測された。

図-12 から、Case C1 と同様に、植生域と低水路の境界部付近で、高水敷から低水路の向きに大きな横断方向の流れが発生しているのがわかる。横断方向の流速は、特に植生域上流部で大きく、その最大流速は断面平均主流速の約 10% の大きさを持ち、発生断面は Case C1 より下流に移動している。また、横断方向の流速は植生域設置区間では方向を変えないが、植生域下流端付近では低水路から高水敷上へ方向を変えている。対岸の高水敷では、植生域上流部の断面 ( $X=755\text{cm}$ ) 付近で、低水路から高水敷方向への横断方向流速が発生している。しかし、その傾向は長い区間続かず、 $X=800\text{cm}$  付近で流向を変えている。それは図-11

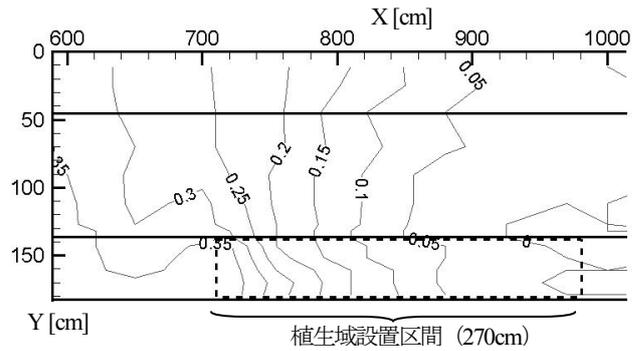


図-10 水位分布 [cm] (Case C3)

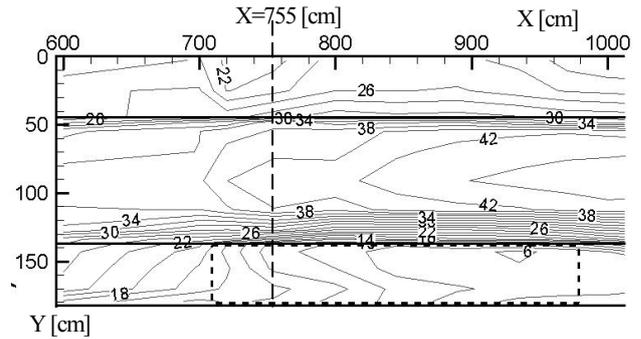


図-11 主流速コンター [cm/s] (Case C3, Z=6cm)

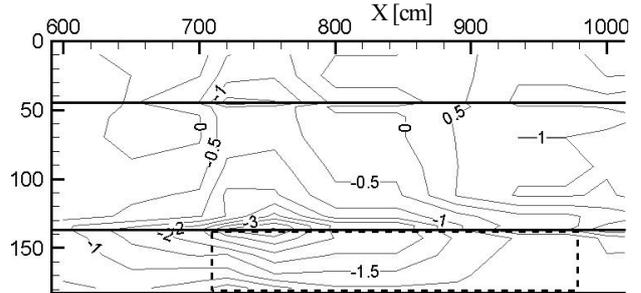
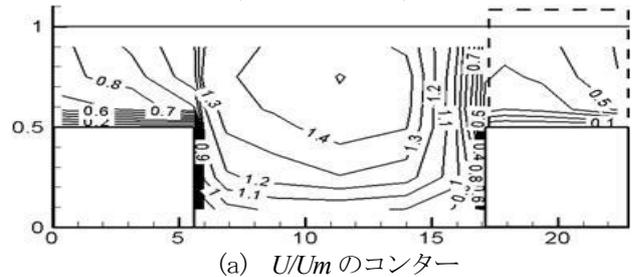
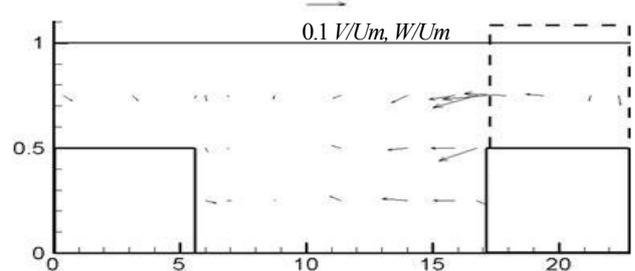


図-12 横断方向流速コンター [cm/s] (Case C3, Z=6cm)



(a)  $U/U_m$  のコンター



(b)  $V/U_m, W/U_m$  のベクトル

図-13 平均流速分布 (計測結果) (Case C3, X=755cm)

で示した対岸の高水敷上の主流速分布に概ね対応している。

図-13 (a), (b) は植生域上流端から 45cm 流下した断面 (X=755cm)における断面平均流速で無次元化した主流速と二次流ベクトルを示したものである。それらの結果は Case C1 の図-6 と類似しており、境界部において、植生域から低水路に二次流が形成され、主流速が横断方向に急変していることが確認される。

#### 4.4 主流方向の運動量の横断方向輸送

図-14に Case C1 における Z=6cm の高さにおける横断方向のレイノルズ応力の縦断変化を示す。植生域の上流部においては低水路側の境界 Y=127cm において大きな値をとるが、下流域においては Y=137cm において最も大きな値をとることが確認できる。

図-15 に、Case C1 において低水路と植生境界部 (Y=137cm) と植生を有していない高水敷境界部 (Y=45cm) を通過する、主流方向の運動量輸送について、その流下方向の変化と、横断方向のレイノルズ応力の縦断変化を示す。図の破線で囲まれた範囲は植生域を示している。植生境界側 (Y=137cm) では、移流と拡散による輸送量は植生域の 30cm 上流でも負の値を示しており、高水敷から低水路側に運動量が輸送されている。この断面は植生域により水位が上昇し、低水路の水位と差が生じ、移流により運動量が輸送されている。植生域においても低水路側に運動量は輸送されるが、レイノルズ応力は小さく、乱れによる輸送の寄与はほとんどないといえる。植生域の下流では、30cm 下流から運動量が高水敷側に輸送され始める。これは横断方向平均流速が高水敷側に向くことに起因している。しかし、レイノルズ応力は大きく負の値を示している。植生域では植生抵抗の存在で乱れは小さかったものの、流向の急変や、横断方向の主流速差が大きくなることから、大きなレイノルズ応力が生じたと考えられる。

一方、非植生域側 (Y=45cm) では、図-9(a)に示すように、輸送量は植生域の対岸では小さく、わずかに高水敷側に輸送されている。植生設置区間の下流部では植生境界側と同一断面で正のピーク値を示している。すなわち、低水路側への輸送を示している。

### 5. 三次元数値解析

#### 5.1 解析結果と実験結果の比較

ここでは、数値解析結果の妥当性の検討を Case C3 を例として取り上げて行う。図-16, 17, 18, 19 (a), (b)は、それぞれ水位分布、低水路河床から 6cm (高水敷上 2cm) 高さの平面における主流速コンター、それと同一の平面内の横断方向流速コンター、及び植生域上流端から 45cm 流下した断面 (X=755cm)における主流速と二次流の解析結果を示している。

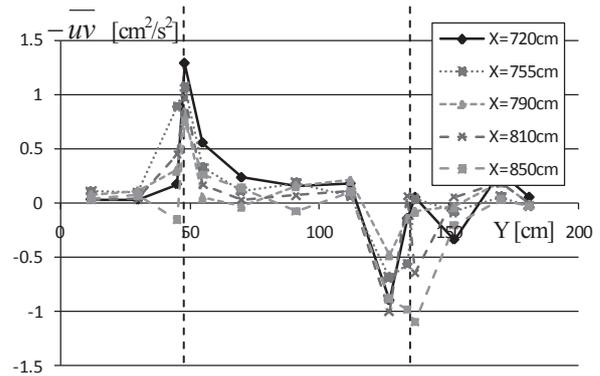
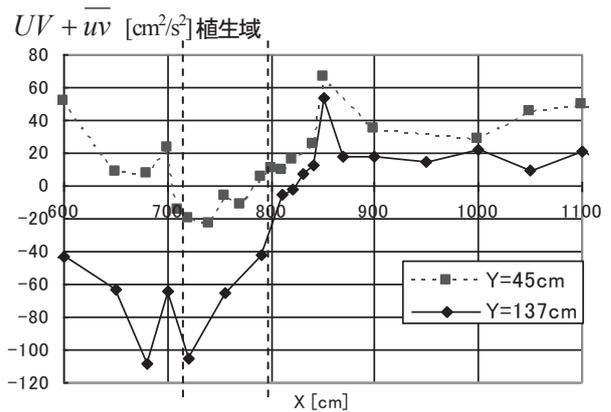
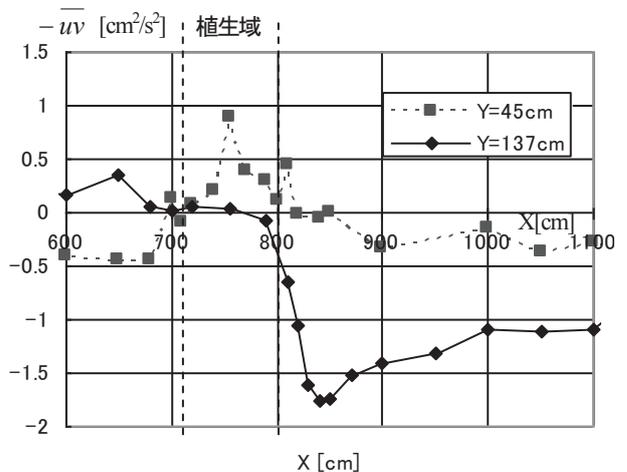


図-14 横断方向レイノルズ応力の縦断変化



(a) 横断方向への運動量輸送の縦断分布



(b) 横断方向レイノルズ応力の縦断分布

図-15 横断方向運動量輸送における乱れの寄与 (Case C1, Z=6cm)

#### (1) 水位分布

図-10 と図-16 を比較すると、解析結果は植生域上流部での水位上昇や植生域内での水面勾配を良好に再現していると考えられる。ただし、詳細に見ると、植生域よりも上流区間に差異が見られること、植生域内での変化が緩やかである点等に改善の余地が認められる。

#### (2) 流速分布

まず、横断面内の平均流速分布を比較する。図-13(a)と図-19(a)より、高水敷上や低水路内での主流速分布の特徴をほぼ再現できていることがわかる。ただし、低水路の水面付近と植生域と低水路の境界付近は再現性が悪い。境界部の再現性に関しては、平面渦の影響が考慮できていない点と、標準  $k-\epsilon$  モデルではレイノルズ応力の非等方性による二次流 (Prandtl の第二種二次流) が再現できないことが考えられる<sup>9)</sup>。そのため、主流の解析結果の等値線は実験結果より滑らかな分布となっていたり、水面より下方で最大流速が生じる現象が再現できていない結果をもたらしている。今後、レイノルズ応力の非等方性を表現できるモデルの導入や、水面での鉛直方向の乱れ強度<sup>10)</sup>の減衰の影響を考慮した境界条件の指定など改良を進めたいと考えている。

次の主流  $U$  の平面分布を検討する。図-11 と図-17 を比較すると、植生域内で流速が低減するのに伴って低水路や対岸高水敷で加速するといった流れや、植生域の上流部で側壁側と低水路境界側で流速差が生じる現象を本解析手法は良好に再現している。ただし、図-11 の実験結果のほうが解析結果よりも植生域内の流速差が大きい。その要因を次のように考えている。本解析では非定常解析を行ったが、流れの可視化で確認できた低水路境界付近で発生する平面渦を再現できていないこと、すなわち、境界付近では計算メッシュを細かくしたものの標準  $k-\epsilon$  モデルでは主流速分布の変曲点を再現できなかったものと考えられる。また、横断方向の水面勾配が解析ではやや過小評価されている。これも側壁付近の主流速の変化を穏やかにしたと考えられる。

## (2) 二次流分布

植生域と低水路の境界部において、高水敷から低水路方向に向かう横断方向流速が発生するが、図-12 と図-18 の比較からも明らかのように、解析結果においてその特徴や良好に再現されている。また、そのピークが現れる箇所 (植生域上流端からやや下流の断面) も上流植生域、下流植生域ともに再現できている。境界部を中心にした楕円形の分布形状や、対岸の高水敷上で高水敷から低水路方向に向かう横断方向流速も良好に再現されている。これらの横断方向流速の発生は植生域の存在によって作り出される水面勾配に起因するものと考えられるが、本解析では水面勾配がほぼ良好に算出されたため、高い再現性がえられたものと考えられる。

また、図-13(b)の実験結果から、植生域と低水路との境界部では、植生域から対岸の隅角部方向へ潜り込む流れが発生している。一方、解析結果においてもその現象が捉えられている。これらの局所的な二次流が水面勾配に起因する流れであり、その大きさも主流の10%ほどの大きさを持つため、本解析法でもある程度再現可能であるといえる。

## 5.2 数値解析を用いた考察

### (1) 植生域上流部の側壁側が境界側より速くなる要因

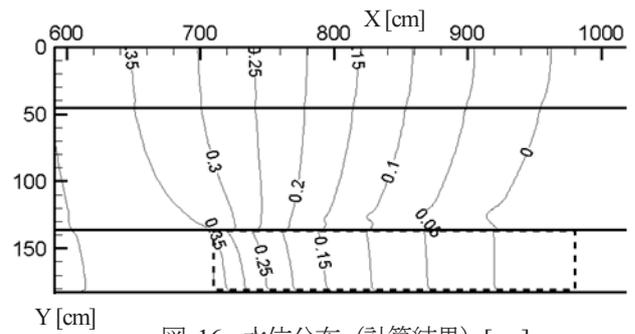


図-16 水位分布 (計算結果) [cm]

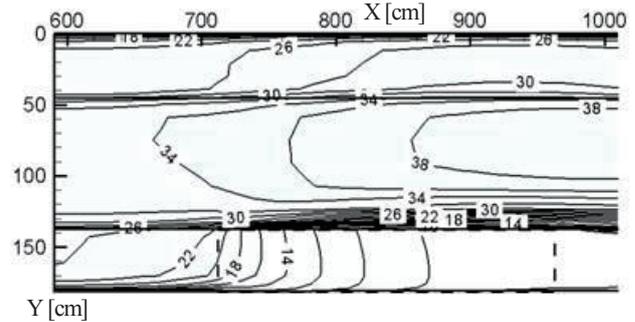


図-17 主流速  $U$  のコンター (計算結果) [cm/s]  
(Case C3,  $Z=6\text{cm}$ )

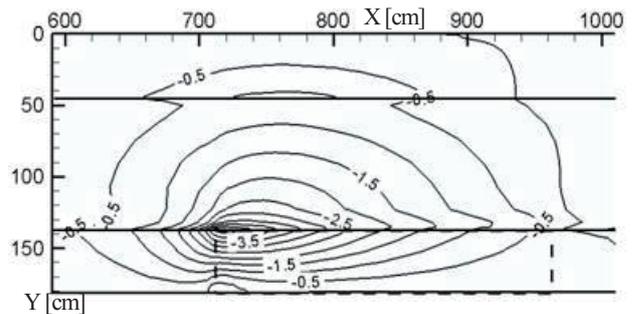
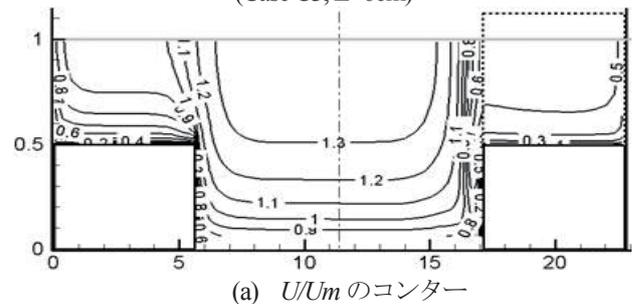
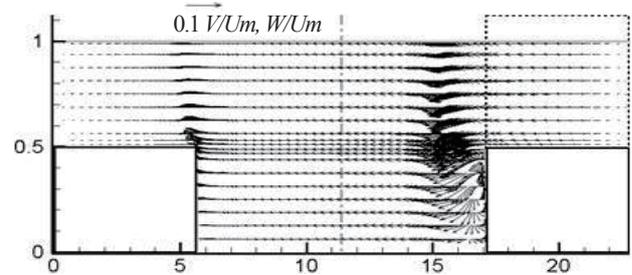


図-18 横断方向流速  $V$  のコンター (計算結果) [cm/s]  
(Case C3,  $Z=6\text{cm}$ )



(a)  $U/U_m$  のコンター



(b)  $V/U_m, W/U_m$  ベクトル

図-19 横断面内の平均流速分布 (計算結果)  
(Case C3,  $Z=75\text{cm}$ )

植生域内の側壁側と境界側で流速差が発生する現象は本研究の全ケースで確認でき、かつ本解析手法でも再現できた。そこで、 $U$ 方程式の各項の大きさを比較することによって、その発生理由を検討する。つまり、どの現象が植生域内の主流速分布の決定に支配的かどうかを検討する。

ここでは簡単のため  $U$  方程式 (式(3)) を以下のように表現する。

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial U_i U_j}{\partial x_j} = -F + g_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_j} - \overline{\frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j}}$$

$$[ \text{非定常} ] + [ \text{移流} ] = [ \text{植生抗力} ] + [ \text{重力+圧力勾配} ] + [ \text{分子粘性} ] + [ \text{レイノルズ応力勾配} ] \quad (10)$$

図-20(a), (b), (c), (d)はそれぞれ Case C3, 底面から高さ 6cm (高水敷上 2cm の高さ) の平面における  $U$  方程式中の移流項, 植生による抗力項, 圧力勾配項, レイノルズ応力勾配項の平面分布である。これらは、特に植生域上流端 ( $X=710\text{cm}$ ) 付近で大きな値を示している。それらに比べ非定常項と分子粘性項は小さい値であるため、省略する。

図-20(a)から、移流項は植生域上流端 ( $X=710\text{cm}$ ) 付近の境界側で大きな負の値をとり、減速していることがわかる。この要因として、図-20(c)に示す重力+圧力勾配項の値以上に、図-20(b)に示す植生による抗力がその個所で強く働いているとともに、図-20(d)のレイノルズ応力勾配項も大きな負の値を示しているからだといえる。それより下流部でも境界側が側壁側よりも減速の度合いが大きいのがわかる。側壁側より境界側のほうが、主流速が速くかつ横断方向流速も大きな値をとるため、植生抗力項は境界側で大きな負の値をとる。一方、植生域上流端での水位上昇に着目した場合、側壁近傍でピーク値が現れるため、側壁側で大きな水面勾配が発生し、重力+圧力勾配項も大きな正の値をとると考えられる。

植生域の上流端から 70cm ほど流下すると (断面  $X=780\text{cm}$ )、植生域内において移流項は横断方向にほぼ負の一定値になり、植生域下流端より 10cm 上流断面 (植生上流端から 260cm 流下断面) において正の値に遷移する。

また、図-20(d)で示すレイノルズ応力勾配項は植生域上流端近傍では大きな負の値をとるが、それより下流の植生域内ではほとんど一定値になる。

以上より、植生域内の上流部において主流速の決定には重力+圧力勾配と植生抵抗が支配的である。植生域内の側壁側で主流が速くなるという現象は、植生域内で植生抗力が境界側で大きな負の値をとるとともに、側壁側のほうが流下方向に大きな圧力勾配となるという水圧分布に起因する。すなわち、側岸側では、加速されるのではなく減速の度合いが小さいために側壁側の流速が低水路境界側の流速より大きくなるといえる。なお、植生域も下流側になると主流方向の流速の変化をもたらす駆動力は幅方向に一様化する。

## 7. 結論

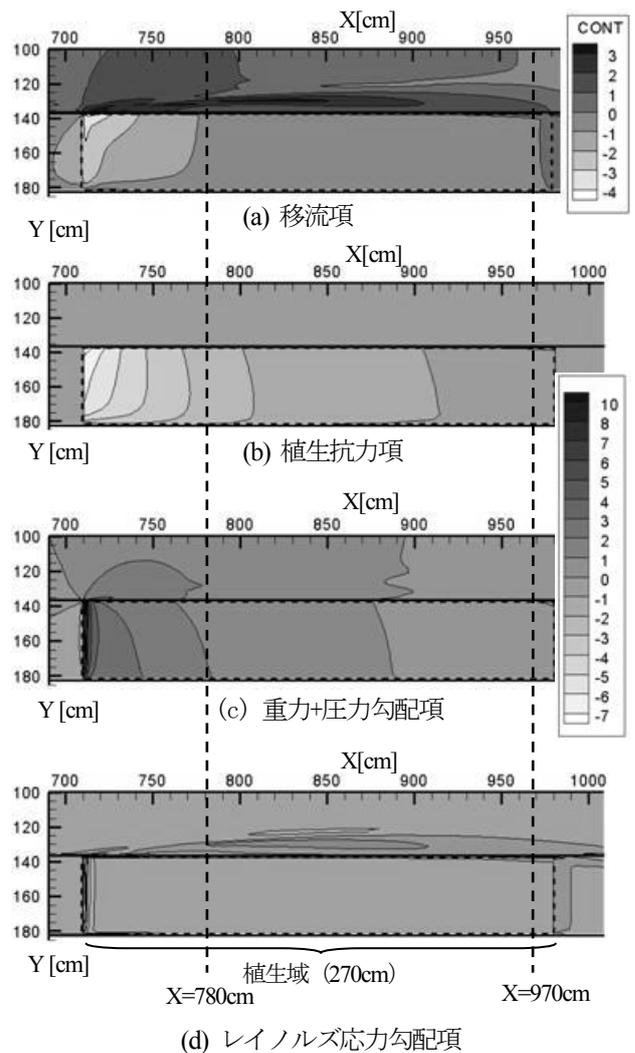


図-20  $U$ 方程式の各項の平面分布 (Case C3,  $Z=6\text{cm}$ )

複断面河道の高水敷片側に局所的に樹木群モデルを設置した河道における流れの特徴について、得られた知見を以下に示す。

- 基本的な流れの特徴として、主流速は植生域内で低減するために、低水路や対岸高水敷上で加速する。また植生域内での主流速分布は側壁付近のほうが境界側よりも速くなる。植生域と低水路の境界付近では、高水敷から低水路の向きに大きな横断方向の流れが発生し、特に植生域上流部でその絶対値は大きくなる。
- 植生域を一区間から二区間にする事で横断方向の水位勾配が増大し、さらに大きな横断方向流速が生じた。しかし、下流植生域の流れに与える影響は上流側に比べ小さい。なぜなら、下流植生域による水位上昇は小規模で、横断方向流速が小さく、移流による横断方向の運動量輸送も小さいためである。しかし、乱れによる輸送は増加する。境界部でより横断方向に大きな速度差がついていることが一因として考えられる。
- 植生域設置区間を長くしても植生域境界部では横断方向水位勾配から、低水路方向への横断方向流速が発

生し続ける。対岸の高水敷においては植生設置区間か  
る。境界部では平面渦が発生する。

次に、植生を有する河道における流れの三次元数値解析  
手法を構築した。本解析手法の特徴を以下に示す。

- ・ 植生を有する水路の流れの特徴や時間平均流速、流  
れ構造を良好に再現できる。
- ・ 水面を対称面と取り扱うが、設定した水面高さと計  
測値の差が小さければ、水圧を静水圧分布と近似す  
ることによって、局所的な水位分布を算出すること  
ができる。
- ・ 水面付近や植生域、高水敷の境界部における主流速  
の再現性は高くない。また、大規模水平渦が発達す  
るなど非定常性が顕著になると再現性は低下する。
- ・ 圧力勾配による二次流は再現可能であるが、レイノ  
ルズ応力の非等方性による二次流 (Prandtl の第二種  
二次流) は再現できない。

また、数値解析結果から得られた知見を示す。

- ・ 植生域内の上流部における主流速の決定には重力  
+圧力勾配と植生抵抗が支配的である。植生域内で  
側壁側が速くなるという現象は、植生域内で植生抗  
力が境界側で大きな負の値をとるとともに、側壁側  
の方が流下方向に大きな圧力勾配となるという水  
圧分布に起因する。すなわち、側岸側が加速される  
というわけではなく、減速の度合いが異なるために  
植生域内で流速差が生じているといえる。

## 参考文献

- 1) 建設省河川局監修：建設省河川砂防技術基準 (案)  
同解説 計画編，山海堂，1993。
- 2) 富永晃宏，長尾正志，劉建，鈴木徹也：洪水流の抵  
抗と流れ構造に及ぼす高水敷樹木群配置の影響，水  
工学論文集，第 39 卷，pp.477-482，1995。

らすでに植生域方向への横断方向流速が発生してい

- 3) 富永晃宏，長尾正志，庄建治朗：局所的樹木群を有  
する複断面水路を通過する洪水波の変形過程，水工  
学論文集，第 41 卷，pp.415-420，1997。
- 4) 富永晃宏，長尾正志：河道内樹木群流れの横断混  
合に及ぼす高水敷高さの影響，水工学論文集，第  
42 卷，1998。
- 5) 福岡捷二，藤田光一，新井田浩：樹木群を有する河  
道の洪水位予測，土木学会論文集，No.447/II-19，  
pp.17-24，1992。
- 6) Kang, H. and Choi, S-U. : Turbulence modeling of  
compound open-channel flows with and without  
vegetation on the floodplain using the Reynolds stress  
model, Advances in Water Resources, Vol. 29, pp.  
1650-1664, 2006.
- 7) Lopez, F. and Garcia, M, H.: Mean flow and  
turbulence structure of open-channel flow through  
non-emergent vegetation, Journal of Hydraulic  
Engineering, vol.127, pp.392-402, 2001.
- 8) Poggi, D. Porporato, A and Ridolfi, L.: The effect  
of vegetation density on canopy sub-layer  
turbulence, Boundary-Layer Meteorology, vol.111,  
pp.565-587, 2004.
- 9) 河原能久，玉井信行：複断面開水路乱流の三  
次元数値解析，第 31 回水理講演会論文集，  
pp.425-429，1987。
- 10) 瀬津家久，中川博次：一様開水路および閉管  
路の三次元乱流構造に関する研究，土木学会  
論文集，No.369 号/II -5，1986。

(2010 年 3 月 9 日 受付)