

植生を有する開水路流れの3次元流速分布に関する数値シミュレーション Numerical Simulation of 3-D Velocity Distribution in Open-Channel Flows with Vegetation

楠津家久¹⁾、Dan Naot²⁾、中川博次³⁾
by Iehisa NEZU, Dan Naot and Hiroji NAKAGAWA

The three-dimensional (3-D) velocity distribution and the associated secondary currents of turbulent flows in rectangular compound open channels with a vegetated domain at the channel bank and in a flood plain were computer-simulated using a 3-D algebraic stress model(ASM). This 3-D ASM was extended and derived from the non-vegetation flow model of Naot, Nezu and Nakagawa (1993, J. Hyd. Eng., ASCE) that coincided well with experimental data. The present simulation suggested a strong interaction between the main channel and flood plain.

Keywords: Three-dimensional velocity distribution, Secondary currents, Vegetated flow, Turbulence modelling, Compound open-channels.

1. まえがき

最近、河川環境の保全と創造を目的とした河川事業が要請されている。河川を、単に洪水の流水路と考えるのではなく、人間や生態系に豊かな自然や環境・生育を生み出す場（ビオトープ）としてとらえることが重要になってきている。この場合、高水敷を有するいわゆる複断面河道は、平水時には人間や生態系の貴重なオープンスペースとして、また洪水時には治水対策としてきわめて有効である。複断面河道の河川環境に及ぼす影響を考えるには、断面内の2次流を知ることがきわめて重要であり、従来の1次元あるいは平面2次元的な解析では十分ではない¹⁾。このためには、複断面開水路の主流と2次流すなわち流れの3次元乱流構造を解明することが不可欠である。このような研究は、1980年代から日英を中核として世界で活発に研究され出されてきた。Tominaga & Nezu(1993)²⁾は、複断面開水路の3次元構造に関する研究をJHHE特集号でレビューしている。これらの研究の中でもTominaga & Nezu(1991)³⁾による高精度なレーザ流速計を用いた複断面開水路の2次流計測は注目され、このデータベース（TN値という）が国内外でよく引用されている。例えば、筆者ら（1993）^{4), 5)}は、Naot & Rodi(1982)⁶⁾の代数応力モデルを拡張して、複断面開水路の2次流や主流特性を予測する乱流モデルを開発し、TN値と良好な一致をみている。Pezzinga(1994)⁷⁾は、Speziale(1987)⁸⁾の非線形 $k-\epsilon$ モデルを用いてTN値を予測できる計算を行っている。また、Thomas & Williams⁹⁾(1995)は、LESを用いてやはりTN値と同定を行い、複断面水路の3次元乱流計算を開発中である。

本研究は、河川環境とリンクして河道に植生がある実際上の問題を想定して、このような複雑な流れの3次元流速分布や乱れ構造を数値シミュレーションしようとしたものである。

1) 京都大学大学院環境地球工学教室助教授（〒606京都市左京区吉田本町）

2) イスラエル国テルアビブ大学ホロン研究所教授

3) 京都大学大学院環境地球工学教室教授

2. 3次元流速分布のシミュレーションモデル

2.1 植生の抗力モデル

本研究は、流れが十分に発達した複断面内の2次流構造などの乱流構造に焦点を当てているから、水路横断方向を x 軸、鉛直方向を y 軸、主流の流下方向を z 軸にとる。平均流速 (U, V, W) の運動方程式は、次式となる。

$$\begin{aligned} \frac{DU}{Dt} &= -\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{P}{\rho}\right) - \frac{\partial}{\partial x}\overline{u^2} - \frac{\partial}{\partial y}\overline{uw} + F_x & \frac{DV}{Dt} &= -\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{P}{\rho}\right) - \frac{\partial}{\partial x}\overline{vw} - \frac{\partial}{\partial y}\overline{v^2} + F_y & (2 \text{ 次流の式}) \\ \frac{DW}{Dt} &= gI_e - \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{P}{\rho}\right) - \frac{\partial}{\partial x}\overline{uw} - \frac{\partial}{\partial y}\overline{vw} + F_z & & & (主流の運動方程式) \end{aligned} \quad (1)$$

植生は鉛直円柱群にモデル化され、これによる抗力 (F_x, F_y, F_z) は次のようにモデル化される。

$$F_x = C_x KU, \quad F_y = C_y KV, \quad F_z = KW \quad (2) \quad K \equiv (1/2)\rho C_D \sqrt{U^2 + V^2 + W^2} n \cdot D \cdot C(m) \quad (3)$$

ここで、 n は植生の平均密度、 D は平均直径、 $C(m)$ は、植生分布を統計的に平均化する際に生じる係数である。抗力係数 C_D は、レイノルズ数 Re の関数で円柱に関する Schlichting の公式を用いる。 $Re < 10^3$ ならば $C_x = C_y = 1$ であるが、 $Re > 10^3$ では、植生円柱に平行な y 方向には抗力として表面摩擦に置き換える¹⁰⁾。

2.2 k (乱れエネルギー) 方程式と ε (逸散率) 方程式

標準型 $k - \varepsilon$ 方程式に、植生による乱れの発生項 G_v と逸散修正項 T を付加する。

$$\frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{v_i}{\sigma_k} \right) + (G + \eta_k G_v) - \varepsilon - T \quad (4)$$

$$\frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{v_i}{\sigma_\varepsilon} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} (G + \eta_\varepsilon G_v) - C_{\varepsilon 2} \varepsilon) - C_{\varepsilon 3} T \quad (5)$$

$$G_v = F_x U + F_y V + F_z W \quad (6)$$

ここで、 T は逸散修正値である。植生と流れとの境界は、一種の自由せん断層であり、剛な壁面ではない。この特性をモデル化するために、 T が導入され、ここでは簡単に次式で与えた。

$$T = \text{maximum of } 0 \text{ and } (C_{\varepsilon 4} G - \varepsilon) \quad (7)$$

$C_{\varepsilon 4}$ は、モデル定数で、ここでは 0.9 を選んだ。剛な壁面近傍ならば、局所平衡が成り立つから $G = \varepsilon$ であり、 $T = 0$ である。 η_k は、 k 方程式での植生による乱れ発生の効率であり、清水 (1992)¹¹⁾ の実験と同定して、 $\eta_k = 0.07$ とした。また、 η_ε は、 ε 方程式での効率であるが、局所平衡理論より、 η_k と関係つけられる¹⁰⁾。

2.3 3次元代数応力モデル (3D-ASM)

式(1)に現れるレイノルズ応力 $\overline{u_i u_j}$ を直接未知数として、その輸送方程式を新たに導入して式(1)を完結させて解く、いわゆるフルストレート (応力) モデル (FSM) が、理論上最も合理的である。しかし、自由水面を有する開水路の3次元計算にこの応力モデルを適用すると、自由水面のちょっとした条件で収束が悪くなったり計算が不安定になることが多く、まだ実用に供する3次元計算スキームはないようである。

ところで、本研究で対象としているいわゆるプラントルの第2種2次流は、乱れの非等方性によっておこるから、等方性の $k - \varepsilon$ モデルでは計算できない¹⁾。そこで、Naot & Rodi (1982)⁶⁾ が開発した代数応力モデルを植生のある複雑乱流に拡張して、このような流れ場で発生する2次流のレイノルズ応力を次式のようにモデル化する。

$$\overline{u^2} = \frac{k}{C_1} \left\{ \frac{2}{3} \left(\left(\alpha - \frac{1}{2} \beta \right) (1 - G_R) + A_{xx} G_R + C_1 - 1 \right) + \frac{\beta}{\varepsilon} \left(\overline{uw} \frac{\partial W}{\partial x} - \overline{vw} \frac{\partial W}{\partial y} \right) + C_3 \frac{\overline{v^2}}{k} \right\} - 2\nu_t \frac{\partial U}{\partial x} \quad (8)$$

$$\overline{v^2} = \frac{k}{(C_1 + 2C_3)} \left\{ \frac{2}{3} \left(\left(\alpha - \frac{1}{2} \beta \right) (1 - G_R) + A_{yy} G_R + C_1 - 1 \right) + \frac{\beta}{\varepsilon} \left(\overline{vw} \frac{\partial W}{\partial y} - \overline{uw} \frac{\partial W}{\partial x} \right) \right\} - 2\nu_t \frac{\partial V}{\partial y} \quad (9)$$

$$\overline{uv} = \frac{k}{(C_1 + 3C_3/2)} \frac{\beta}{\varepsilon} \left(\overline{uw} \frac{\partial W}{\partial y} + \overline{vw} \frac{\partial W}{\partial x} \right) - \nu_t \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \quad (10)$$

ここで、 $G_R = \eta_k G_v / (G + \eta_k G_v)$ は、全乱れ発生に対する植生のみによる発生の比である。 A_{xx}, A_{yy} は、乱れ発生率に関する非等方性テンソルで、 $A_{xx} = A_{yy} = 0.88$ をとる。

一方、主流方向のレイノルズ応力 $\overline{uw}, \overline{vw}$ は、水面近傍条件を考慮して、以下のように与えられる^{4), 5)}。

$$-\overline{uw} = \frac{C_1 + 5C_3/2}{C_1 + 2C_3} \nu_t \frac{\partial W}{\partial x}, \quad -\overline{vw} = \frac{C_1^2}{(C_1 + 3C_3/2)(C_1 + 2C_3)} \nu_t \frac{\partial W}{\partial y} \quad (11)$$

ここで、渦動粘性係数 ν_t は、式(4)、(5)と次式から $k - \varepsilon$ モデルを構成し、既存のアルゴリズムで容易に解かれる。

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (12), \quad C_\mu = C_\mu(G_R = 0) \left(\frac{C_1 + 2G_R/5}{C_1} \right)^2 \quad (13),$$

以上の連立方程式系を STABKY2 プログラム^{4), 5)}を使って、数値シミュレーションを行った。境界条件は、壁面で Wall function、自由水面でイスラエルモデル（逸散率の勾配条件）を使用した。これらの境界条件を使って、植生がない複断面開水路の3次元数値シミュレーションを行い、実験値と良好な一致が得られている^{4), 5)}。なお、計算のモデル係数は、植生がない場合と同じ値を用いた。詳細は文献4)、5)、10)を参照されたい。

3. 河道半分が植生帯の場合の実験値と計算値との比較

河道に一部あるいは全部にわたって植生がある場合の流れの特性には不明な点が多く、これらの流れを精度よく計測することも一般には容易でない。従来は、ホットフィルム流速計や電磁流速計で流速分布等を計測することが多かったが、本研究のように、乱流シミュレーションの妥当性を検証するには平均流速の絶対値や微流速である2次流の絶対値の高精度なデータベースが必要である。このデータベースを構築するには、高性能なレーザ流速計が不可欠であるが、植生帯を有する流れの高精度なデータベースはまだ入手できないようである。このため、筆者ら(1994)¹²⁾は、最新鋭のファイバ型レーザ流速計を駆使して植生流れの乱流構造を計測しようと研究着手したが、まだ十分なデータは得られていない。

図-1は、植生帯を河道に半分まで設置し、水深を植生高さの2倍にとった場合のレーザ流速計による計測結果の一例である。植生密度 $N=100nHD$ は、6、24、及び96と変化された。ここで、 H は水深である。詳細は、文献12)を参照されたい。一方、図-2は、本研究のシミュレーション計算結果である。計算は、 x 方向に240 H 以上にわたって行い、十分に発達した3次元乱流が得られた。しかし、水理条件によっては、 x 方向に進むと植生境界付近で流速成分が振動をおこした。この原因は現在究明中であるが、植生と流れとの相互作用で発生するいわゆる「穂波現象」を再現しているのではないかと推測している。水路のアスペクト比は若干異なるが、断面内の等流速線に関する実験値と計算値との一致は、概ね良好である。植生が密になると、主流部で最大流速点が水面より降下する傾向がわかる。植生密度が超密となると図-3(a)に見られる複断面水路になるが、この比較より、植生と主流との境界からは複断面特有の「斜昇流」は見られず、植生と主流との横断方向の相互作用がより重要になることがわかる。

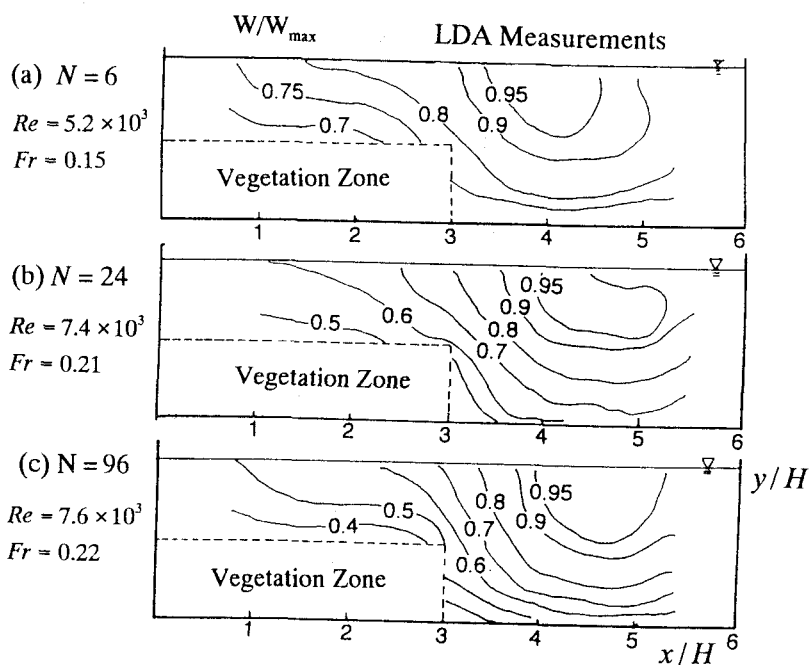


図-1 側方に植生を有する単断面流れのレーザ流速計による等流速線の実験値

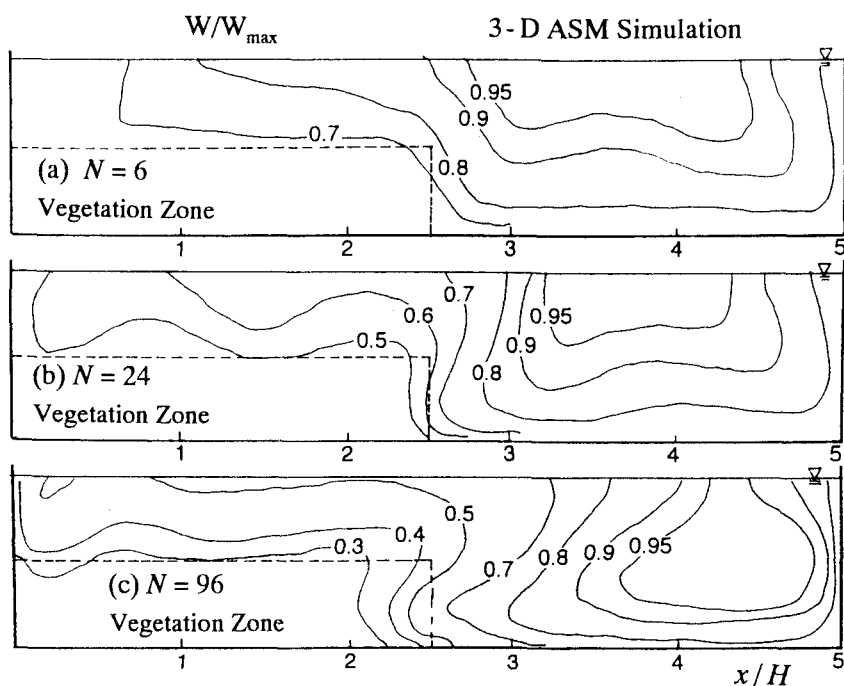


図-2 図-1に対応する数値シミュレーション結果
3次元代数応力モデル(3-D ASM)の結果

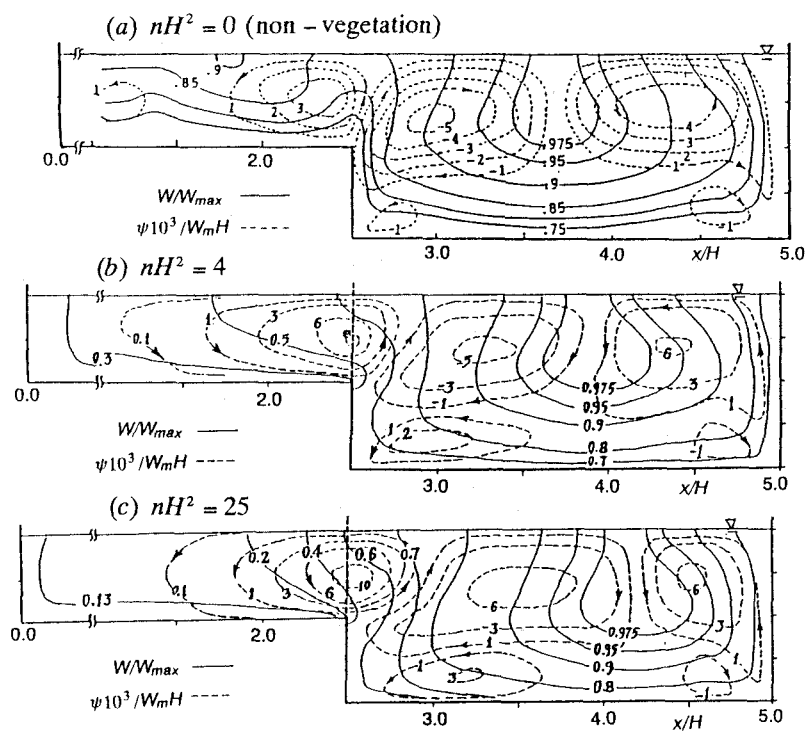


図-3 高水敷に植生を有する複断面流れの等流速線及び2次流の流線の数値シミュレーション結果

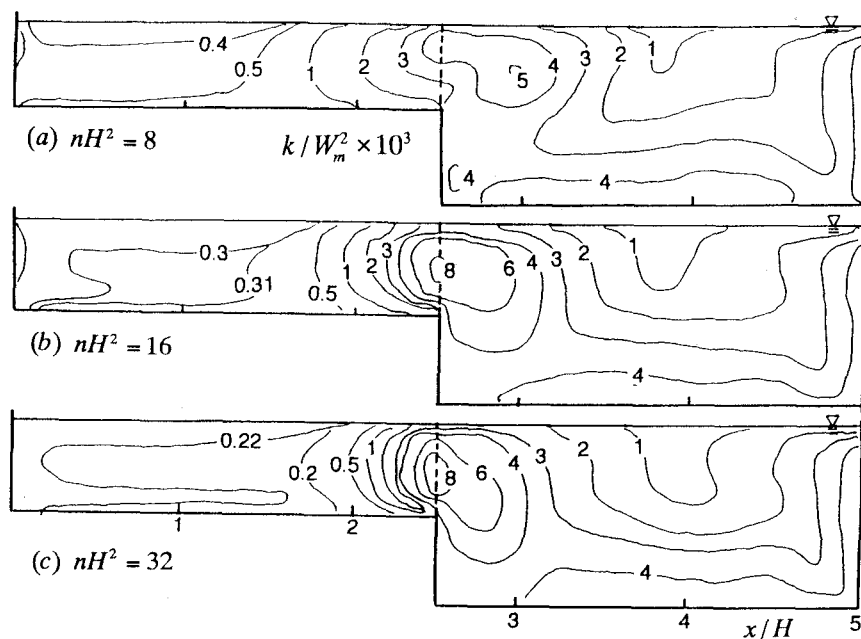


図-4 高水敷に植生を有する複断面流れの乱れエネルギーのコンターの数値シミュレーション結果

4. 複断面の高水敷に植生がある場合の数値シミュレーション

図-3は、(a) 植生がないケース、(b) 植生密度が $nH^2=4$ の疎のケース、(c) $nH^2=25$ の密なケースの主流の平均流速 W の等流速線と、2次流の流線を示したものである。ここで、 H は、低水路の水深で、高水敷の水深は $H/2$ とした。また、水路のアスペクト比は5である。植生モデルは、高水敷のみに植えられていると想定し、シミュレーションを行った。

さて、(a) の植生のないケースは、すでに公表済みで^{4),5)}、レーザ流速計を用いて得られた実験値と良好な一致が得られている。(b) と(c) が植生モデルを3D-ASMに導入して計算した結果である。ところで、本シミュレーション結果と比較すべき実験データを現在まったく持ち合わせていない。しかし、(a) の植生がないケースが実験値と一致していることから、植生があるケースでもある程度定性的な検討ができると期待される。この意味で、本シミュレーションは、全くのPredictionといえる。

植生が密になると、高水敷の流速は低減し、しかも一様化してくることがわかる。最も特徴的な点は、高水敷の植生域と低水路の境界部で激しい相互作用が発生する可能性である。植生がないケースでは、高水敷と低水路の境界部の等流速線は水面側に張り出し、「斜昇流」が発生することがすでに解明されている。植生がつくと、この斜昇流は低水路側に押し出されるようであり、境界部の等流速線は水面側にはもはや張り出さず、低水路側に張り出している。すなわち、高水敷と低水路間で相互作用が植生によってより活発になることが本シミュレーションからいえる。このような特性は、図-1、図-2にも見られる。2次流は、確かに高水敷の側壁側深くでは、植生の抵抗力で減衰するが、境界部ではかえって増進され、これは境界部の強い相互作用によって起こるものと解釈される。

前述したように、植生流れの高精度な3次元乱流計測データはまだ入手できないが、植生による相互作用の活性化は、池田ら(1994)¹³⁾ による流れの可視化観測や辻本ら(1994)¹⁴⁾による植生群流れの土砂輸送の計測から十分に推測できる。このような、植生による相互作用の活性化は、1.で述べたように河川環境を考える上できわめて重要な知見となる。図-4は、乱れエネルギー k のコンターを示している。植生境界部で乱れが惹起されることがよくわかり、上述の相互作用の結果と考えられる。本報告では示さなかったが、この境界部で特徴的な振動が発生するケースも見られ、相互作用の不安定性や組織渦の効果とも考えられ、興味が尽きない課題である。

5. おわりに

本研究で得られた最大の成果は、高水敷に植生がつくと、高水敷と低水路間で流れの相互作用が活発になるであろうことである。この推論の妥当性は、高精度のレーザ流速計を駆使して、実験的に解明されなければならない。また、相互作用の一形態として、「穂波現象」もシミュレーションできそうであり、今後の研究としたい。最後に、本研究は、平成6年度の科研費重点研究(No.06231102)の助成のもとで行われた。

参考文献

- 1) Nezu, I.(1994), 第9回国際水理学会アジアパシフィック国際会議、基調講演論文、pp.1-24.
- 2) Tominaga, A. & Nezu, I.(1993), *Research and Practice of Hydraulic Eng. in Japan, JHHE*, JSCE Special Issues, pp.121-140.
- 3) Tominaga, A. & Nezu, I.(1991), *J. Hydraulic Eng.*, ASCE, vol.117, No. 1, pp.21-41.
- 4) Naot, D., Nezu, I. & Nakagawa, H.(1993a), *J. Hydraulic Eng.*, ASCE, vol.119, No.3, pp.390-408.
- 5) Naot, D., Nezu, I. & Nakagawa, H.(1993b), *J. Hydraulic Eng.*, ASCE, vol.119, No.12, pp.1418-1426.
- 6) Naot, D. & Rodi, W.(1982), *J. Hydraulics Div.*, ASCE, vol.108, pp.948-968.
- 7) Pezzinga, G.(1994), *J. Hydraulic Eng.*, ASCE, vol.120, No.10, pp.1176-1198.
- 8) Speciale, C.G.(1987), *J. Fluid Mech.*, vol.178, pp.459-475.
- 9) Thomas, T.G. & Williams, J.J.R.(1995), *Applied Scientific Research*, (to be published)
- 10) Naot, D., Nezu, I. and Nakagawa, H.(1994), *Proc. Hydraulic Eng*, JSCE, vol.38, pp.437-442.
- 11) 清水義彦(1992), 京都大学学位論文.
- 12) 橋津・阿部・門田(1994), 第26回乱流シンポジウム講演論文集, pp.274-277.
- 13) 池田・村山・空閑(1994), 水工論文集, 土木学会, 第38巻, pp.431-436.
- 14) 辻本・北村・中川(1994), 水工論文集, 土木学会, 第38巻, pp.665-670.