

水路横断面内に植生帯を伴う流れ場の数値計算

Numerical Study on Fully-Developed Turbulent Flow in Vegetated and Non-Vegetated Zones
in a Cross-Section of Open Channel

清水義彦*・辻本哲郎**・中川博次***

By Yoshihiko SHIMIZU, Tetsuro TSUJIMOTO and Hiroji NAKAGAWA

Part of cross section of streams is often vegetated, and faster flow over non-vegetated zone and retarded flow in vegetated zone neighbor with each other. In such situations, horizontal mixing of momentum dominates though the flow is three-dimensional. In this paper, numerical 3D calculation of such flows is attempted based on an algebraic stress model. One of the characteristics of the present calculation is that the form drag is taken into account in the vegetation zone. The calculated results explain the flow structure surveyed by flume measurements, and particularly depth-averaged properties can be well described. The model-parameter which contributes the amplitude of cellular motion near the boundary of two regions is favorably neglected, which may imply that the cellular motion no longer dominates in the flow with vegetated zone.

Keywords: open-channel flow, flow with vegetated zone, numerical modelling, algebraic stress model, transverse mixing.

1. まえがき

本研究は水路横断面内で河床の一部が植生によって覆われ、それが水路縦断方向に一樣な幅で群落を形成している場合を想定して、等流状態での流れ場を乱流モデルを用いた数値計算から検討したものである。提案された計算モデルが、植生帯の密生度、植生帯幅のスケールや配置を変えた状況においても水深平均化された主流速分布、レイノルズ応力分布、乱れ強度分布を説明できるかを水路実験との比較から検討し、計算方法の評価を行なうものである。

2. 植生の形状抵抗を考慮した代数応力モデルによる流れ場の計算法

個々の植生粗度形状を具体的な形で差分格子網の中に取り入れ、与えられた境界条件を満足させながら解くことは、膨大な計算量を必要とするばかりか、種々の植生粗度に対して計算手法の一般化を図ることが難しい。著者らは植生粗度群落に対し、これを透水性の高い浸透層とみなすことにより透過係数（抗力係数と植生粗度の密生度から表現される）を評価、種々の植生群落を固有の透過係数を有する多孔質体として扱うことで、流れ場を一般化して議論できるものと判断し検討を進めてきた（辻本¹⁾、清水ら²⁾）。こうした

* 正会員 工修 群馬大学助手 工学部建設工学科

(〒376 桐生市天神1-5-1)

** 正会員 工博 金沢大学助教授 工学部土木建設工学科

*** 正会員 工博 京都大学教授 環境地球工学教室

理由から植生粗度の幾何形状を差分格子に取り込むことによる計算はやめて、植生粗度要素は差分格子内にあるものとし、この差分格子内で空間平均されたレイノルズ方程式を解くことにより流れ場を計算する方法を考える。このような手法は、LES (Large-Eddy Simulation) モデルにおける格子平均と同様であり、著者らはすでに河床に植生層を伴う場合について、同様な手法からk-εモデルにもとづく鉛直2次元の数値計算を行ない、水理実験による各種乱流統計量の計測値との良好な対応を示している(清水ら³⁾・⁴⁾)。空間平均された基礎式には、外力項として植生粗度による形状抵抗項が含まれ、透過係数、すなわち抗力係数と植生の密度が与えられれば種々の植生群落に対しても適用可能な形となっている。

乱流モデルとして2方程式モデルを採用し、基礎式系を流下方向流れが卓越するとして放物形流れの近似を施すと、式(1)~(6)のように定式化される。すなわち、空間平均されたレイノルズ方程式中の形状抵抗項によって消費された平均流エネルギーは乱れエネルギー(k)に変換され、それが乱れエネルギーと逸散率(ε)の輸送式中でsource termとして表現されている。

$$\frac{\partial}{\partial x}(U^2) + \frac{\partial}{\partial y}(VU - \Gamma \frac{\partial U}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(WU - \Gamma \frac{\partial U}{\partial z}) = g \sin \theta - \frac{d}{dx} \left(\frac{P}{\rho} \right) - F_x \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(UV) + \frac{\partial}{\partial y}(V^2 - v \frac{\partial V}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(WV - v \frac{\partial V}{\partial z}) = g \cos \theta - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{P'}{\rho} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\tau_{yy}}{\rho} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\tau_{yz}}{\rho} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(UW) + \frac{\partial}{\partial y}(VW - v \frac{\partial W}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(W^2 - v \frac{\partial W}{\partial z}) = - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{P'}{\rho} \right) - F_z + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\tau_{yz}}{\rho} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\tau_{zz}}{\rho} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(Uk) + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ Vk - \left(v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ Wk - \left(v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial z} \right\} = P_k + C_{fk}(F_x U + F_z W) - \epsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(U\epsilon) + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ V\epsilon - \left(v + \frac{v_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ W\epsilon - \left(v + \frac{v_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial z} \right\} = \frac{\epsilon}{k} [C_{\epsilon 1} \{P_k + C_{fe}(F_x U + F_z W)\} - C_{\epsilon 2} \epsilon] \quad (5)$$

$$P_k = v_t \left\{ \left(\frac{\partial U}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 \right\}, \quad v_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}, \quad \Gamma = v + v_t \quad (6)$$

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad (7)$$

ここに、ρ：水の密度、g：重力加速度、θ：水路床勾配角、ν：動粘性係数、(U, V, W)：時間平均流の流下(x)、鉛直(y)、水路横断(z)方向の速度成分、P, P'：水路断面平均圧力(静水圧近似)とそれからの偏差、F_x, F_z：植生粗度によるx, z方向の単位質量あたりの形状抵抗、C_{dx}, C_{dz}を形状抵抗係数として次のように書ける。

$$F_x = \frac{1}{2} C_{dx} \lambda U \sqrt{U^2 + V^2 + W^2}, \quad F_z = \frac{1}{2} C_{dz} \lambda W \sqrt{U^2 + V^2 + W^2} \quad (8)$$

ここに、λ：植生の密度(水の単位体積あたりの障害物の遮蔽面積)である。

ところで、横断面内の植生帯・非植生帯(滑面)による粗度変化を扱うにあたっては、乱流場は非均質な構造を有することが推測され(中川ら⁵⁾)、縦渦などの大規模組織構造の出現も予想される。また、将来、高水数上の植生を考慮した流れの解析にも適用することを考え、ここでは乱流クロージャーモデルとして非等方性モデル採用することにした。すなわち河原⁶⁾によって複断面開水路流れに適用され、その有用性が示されている応力代数モデル(Laundrer-Yingモデル⁷⁾)を用いる。このとき、レイノルズ応力の表現は以下のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\tau_{xy}}{\rho} &= v_t \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right), \quad \frac{\tau_{zx}}{\rho} = v_t \left(\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} \right), \\ \frac{\tau_{yz}}{\rho} &= C'_{vt} \frac{k}{\epsilon} \left(\frac{\partial U}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial U}{\partial z} \right), \quad \frac{\tau_{yy}}{\rho} = C'_{vt} \frac{k}{\epsilon} \left(\frac{\partial U}{\partial y} \right)^2 - C'_k k, \\ \frac{\tau_{zz}}{\rho} &= C'_{vt} \frac{k}{\epsilon} \left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 - C'_k k \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

ここで、モデル定数はLaunder-Yingモデルの標準値 ($C_k=0.09, C'_k=0.522, C_d=1.44, C_d=1.92, \sigma_k=0.9, \sigma_\epsilon=1.3$) を用いるが、2次流強度を決めるパラメタ (C') については後述する。また、乱れエネルギーと逸散率の輸送式中における形状抵抗にかかる係数 C_{fk}, C_{fe} の値は、鉛直2次元植生流に対し本計算と同様な方法を用いて同定された値 ($C_{fk}=0.07, C_{fe}=0.16$) を用いる (清水ら³⁾)。

3. 水路横断面の一部が植生帯に覆われた路床上での流れの水理実験と数値計算の方法の概要

ここでは後述の数値計算結果に対応する水理実験として、水路横断面の一部が模擬植生で覆われた路床上での開水路実験と数値計算の概要を述べる。実験は長さ12m、幅40cm及び50cmの可変勾配式直線水路内の路床にアクリル板を敷き、その上に高さ(K)のそろった円柱 (直径D) タイプの模擬植生を等しいスペーシング (中心間隔s、密度 $\lambda=nD/s^2$; n: 単位面積あたりの植生の本数) で植えつけて模擬植生を作成した。植生の材料はModel Hとして6-6ナイロン ($K=4.1\text{cm}, D=0.1\text{cm}, \lambda=0.1/\text{cm}$)、Model A ($K=4.6\text{cm}, D=0.15\text{cm}, \lambda=0.0375/\text{cm}$)、Model B ($K=4.6\text{cm}, D=0.15\text{cm}, \lambda=0.0185$) として竹ひご、Model Cとして塩化ビニール樹脂 ($K=4.1\text{cm}, D=0.02\text{cm}, \lambda=0.08$) を使い、Model H, Bはそれぞれ間隔 $s=1\text{cm}, 2\text{cm}$ の正方形格子点に1本、Model Cは正方形格子点 ($s=1\text{cm}$) に4本、Model Aは千鳥状配置 ($s=2\sqrt{2}$) で1本植生を植えている。植生粗度の始まりから3m程度下流で、等流状態を確認し、その付近で流速測定を行なった、Model H上の流れ場は2成分熱線流速計で、他は直径3mmのプロベラ流速計及び小型電磁流速計を用いて計測した。なお、いずれのケースの水理条件 (表1) も水位が植生高さ以下となるように設定し、植生上のかぶり水深はない状態で計測している。

各模擬植生層について、その透水試験をしておけば透過係数(K_s)が評価され、植生による形状抵抗と重力による流れの駆動力の釣り合いから形状抵抗係数が求められる。

$$U_s = K_s \sqrt{I_e} = \sqrt{2gC_d \lambda I_e}$$

(10)

ここに、 U_s : 透過係数から決まる植生に固有な浸透流速 (固有浸透流速と定義)、 I_e : エネルギー勾配である。透過係数から求められた形状抵抗係数 C_d ($=C_{dx}=C_{dz}$) は Model H: $C_d=1.04$, Model A: $C_d=1.2$, Model B: $C_d=0.95$, Model C: $C_d=1.7$ である。

図1に示すように、格子分割された水路横断面内において植生帯内 (黒色に塗られた部分) での計算では前述の形状抵抗係数を与え、植生帯外では形状抵抗係数を0とする。数値計算法に関しては河原⁶⁾のLaunder-Yingモデルを用いた数値計算コードを修正して行なった。すなわち、コントロール・ボリューム法にもとづく基礎式の離散化をstaggered gridについて行ない、離散化式の解法にはPatanker & Spalding⁸⁾のSIMPLEアルゴリズムを用いる。固定境界での境界条件は壁近傍で壁法則が成り立つものとし、壁からの第1格子点では対数則の仮定を与えている。計算条件としては断面形状、水深、河床勾配、流量を与え、流入条件はすべての変数について一様分布とし流下方向変化が小さくなったところでの数値解を等流解として求めた。

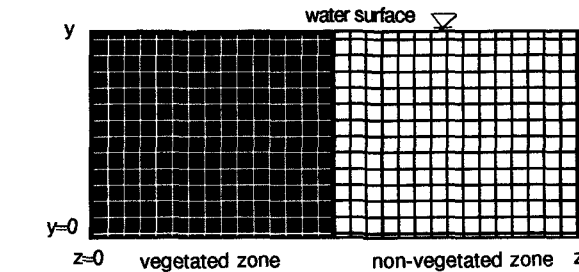


図1 水路横断面

RUN	i_b	h_0 (cm)
H1	0.00170	3.65
H2	0.00387	3.34
A1	0.00170	4.57
B1	0.00170	4.28
B2	0.00174	3.22
B3	0.00268	4.15
B4	0.00164	4.23
C1	0.00165	4.38
E2	0.00171	2.97

4. 水路半断面が植生に覆われた路上の流れに関する数値計算結果

図2, 3, 4は, $z/B=0\sim 0.5$ (B :水路幅)に植生帯がある場合の平均流速, 縦断方向変動流速の乱れ強度 (u_{rms}) および横断流速差に起因するレイノルズ応力 (便宜的に $-\overline{uw}$ で表示) の横断分布を計算したもので, 2次流を考慮した場合と, (b) しない場合についてそれぞれ示している. すなわち, (a) 2次流強度を決めるパラメータ (C') をLaunder-Yingモデルの標準値 ($C'=0.0185$) として与えた場合と乱れの異方性に起因する2次流を無視した場合 ($C'=0$) について計算した. Launder-Yingモデル程度の2次流強度を与えた場合, 図5に示すように植生帯境界の非植生域に2次流セルが形成される. 一方, 植生帯内では形状抵抗の出現によって流れが急速に低減しており, その内部で対となるセルの形成は明確でない. すなわち, 単独のセルとし

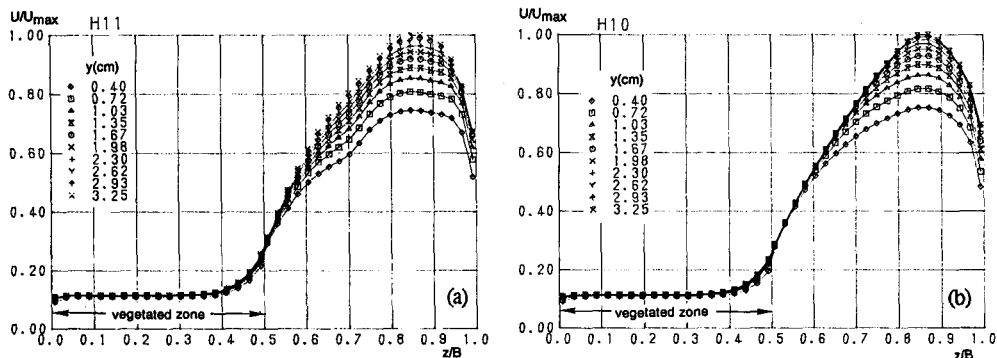


図2 平均流速分布

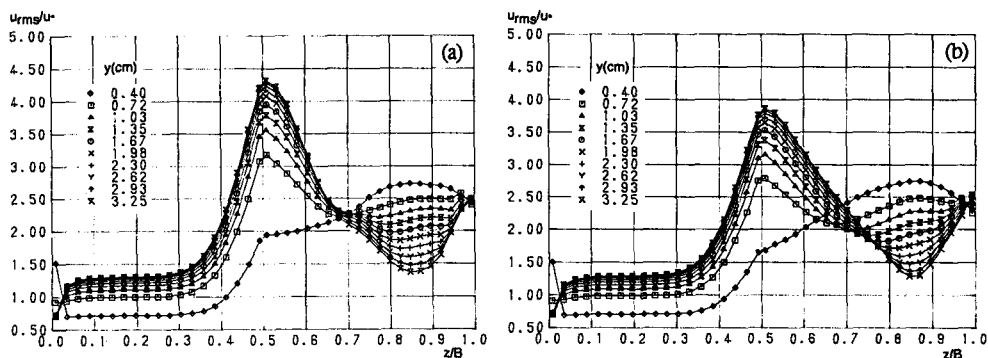


図3 縦断方向乱れ強度

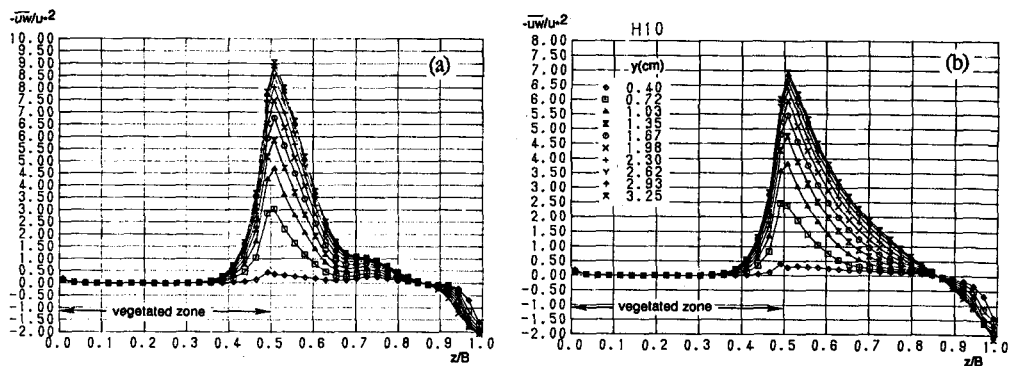


図4 レイノルズ応力分布

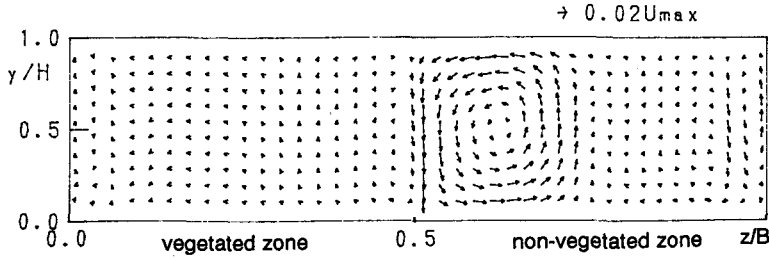


図5 水路横断面内の2次流

で特徴づけられる。このセルが形成される領域とくにセルの非植生側外縁の上昇流域で、主流速 (U : 断面最大流速 U_{max} で無次元化) の横断分布にくびれが生じ (図2(a))、この状況は底面近傍の横断分布ほど顕著である。また、同様な影響は乱れ強度、レイノルズ応力分布にも現われている。一方、2次流の存在を無視した場合、主流速の横断分布に歪みはなく一様な変化を示している (図2(b))。

図6, 7, 8に計算例に対応する計測結果を示す。これによると主流速の横断分布 (図6)にくびれはなく、一様な変化を示しており、むしろ2次流を考慮しない計算結果に近い。植生帯内では非植生域の早い流れに引きずられた形の主流横断分布を形成し、そこではレイノルズ応力も存在することから、非植生域との間に活発な運動量交換が行なわれていることがわかる。非植生域との境界から離れた植生帯内では、主流速分布は鉛直方向にも一様で非植生域との干渉作用を受けない領域、すなわち固有浸透流域の存在が認められる。このような特徴は図2の計算結果とよく一致している。

図7の乱れ強度に関しては、 $z/B=0.6$ 程度を境にして鉛直方向での乱れ強度値の大小関係が逆転し、植生帯境界からはなれた非植生域 (滑面) では通常の底面シアに規定された分布形になることが同図より推定される。これは計算値結果 (図2) でもよく再現され ($z/B=0.7$ 程度を境として変化する)、定性的には妥当な計算結果と判断できる。図8のレイノルズ応力分布についてはばらつきが多く、計算結果のように底面から順次値が増加するという特性 (図4) が必ずしも認められず、計算値の水深方向の分布の妥当性は今後の詳細な計測に待たねばならない。図6, 7, 8から判断して計算値の横断分布は概ね計測値に対応していることがわかり、しかも、2次流の効果を積極的に取り入れる必要も見だされないため、以下では2次流を無視した場合 ($C'=0$) の計算結果を通じて流れ場の特性を検討することにした。

図9は計算で得られた主流速等流速線図の例を示したものである。植生帯との境界 ($z/B=0.5$) も非植生域の主流場に対する壁であると考え、植生のように透過性のある側壁 (permeable wall) は、植生帯内の平均流速が非植生域のそれに比べ小さく、断面流量への貢献がほとんどない場合でも、側壁を通じての乱流混合を許すため非植生域での運動量欠損が大きい。このため、植生帯から構成される壁によるせん断に影響される領域のスケールは、非透過性の側壁 (rigid wall) が作るそれに比べて大きく、図9に見るように流心位置は非透過性の側壁 ($z/B=1.0$) にかなり接近する。

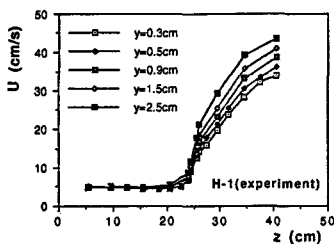


図6 計測された平均流速分布

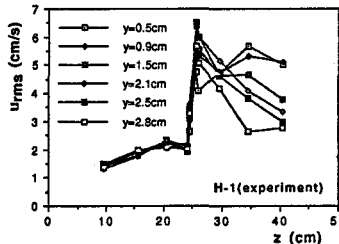


図7 計測された縦断方向乱れ強度

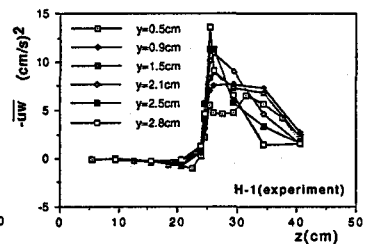


図8 計測されたレイノルズ応力分布

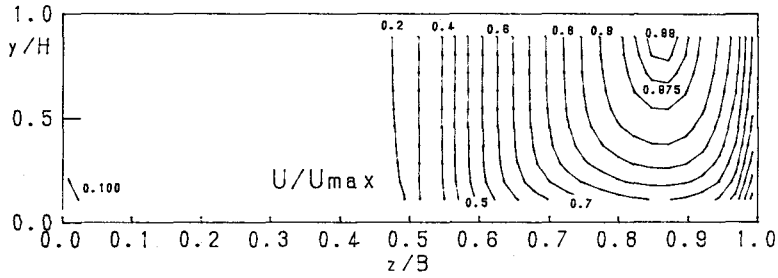


図9 等流速線

図10, 11, 12, 13は水深平均された主流速 ($\langle U \rangle$), 縦断・横断方向変動流速の乱れ強度 ($\langle u_{rms} \rangle$, $\langle w_{rms} \rangle$) およびレイノルズ応力 ($\langle -\overline{uw} \rangle$) の計測値と計算値を比較したものである。乱れエネルギーと逸散率の輸送式中における形状抵抗にかかる係数 C_{fk} , C_{fe} の値は、鉛直2次元植生流に対して同定された値を用いたが、主流速分布の再現性から見ても問題はなく、形状抵抗項の導入によって消費される平均流エネルギーと生成される乱流エネルギーとのバランスにかかるモデル定数を変えることなく現象を説明できることはモデリングの妥当性を示すものと思われる。また、乱れ強度・レイノルズ応力の横断分布の特徴も計算によってよく再現されていること。ただし縦断方向乱れ強度やレイノルズ応力の最大値は植生帯と非植生域との境界に出現するが、横断変動流速の乱れ強度の最大値は計測値がやや非植生域よりにあるのに対し、計算結果では縦断方向乱れ強度やレイノルズ応力の最大値と同様境界でピークをもつ。縦断・横断方向変動流速の乱れ強度のピーク値の位置が異なることを計算値が表現できないのは、等方性モデルを用いている限り当然ではあるが、ノーマルストレスの異方性を考慮しても ($C' \neq 0$) Launder-Yingモデルでは表現できないため (図14), さらに非等方性を考慮したレイノルズ応力モデルの採用が必要かもしれない。

以上の結果ここで提案した計算は、流れの3次元性を含めた定量的な再現性に関しては問題が残るものの、水深平均化された流れ場の特徴をうまく記述できることが示された。

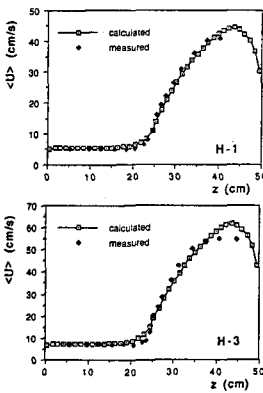


図10 主流速分布

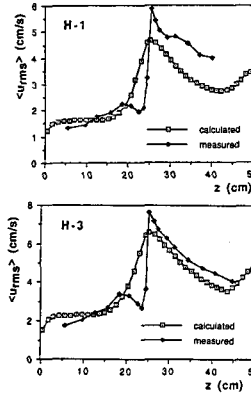


図11 縦断方向乱れ強度

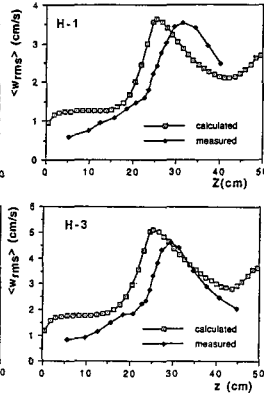


図12 横断方向乱れ強度

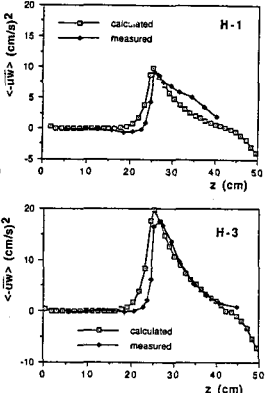


図13 レイノルズ応力分布

5. 植生帯の横断スケールの変えた流れ場の計測と数値計算結果

図15は植生帯幅が12cmの場合の水深平均の主流速横断分布で、計算値と実測値の比較が示してある。A, B, Cのモデルに応じて、植生の密度、配置 (植え方) が異なるにもかかわらず、いずれの水力条件に対しても計算値が示す再現性は良好である。図16は6cmの植生帯が水路壁に、図17はそれが水路中央にある場合での主流速横断分布とレイノルズ応力分布を示す。植生帯幅が小さくなると、運動量交換の影響スケール

が植生帯スケールと同程度またはそれを越えると植生帯内の流れは固有浸透流速に比べ大きい値をとる。干渉領域が植生帯内にわたって出現することは主流速分布のみならず、レイノルズ応力分布からも理解される。

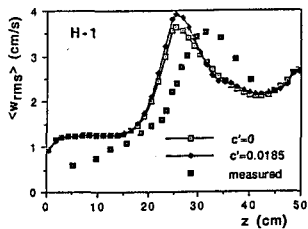


図 1 4 横断方向乱れ強度

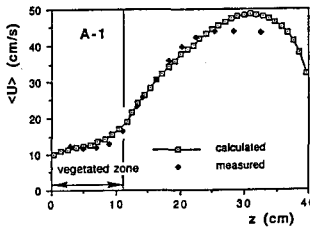


図 1 5 (a) 主流速分布

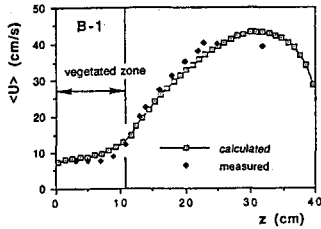


図 1 5 (b) 主流速分布

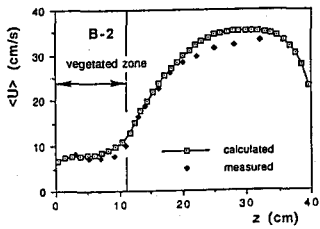


図 1 5 (c) 主流速分布

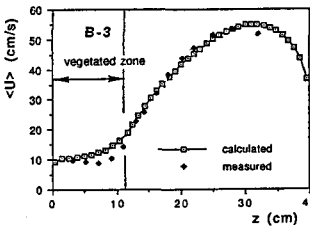


図 1 5 (d) 主流速分布

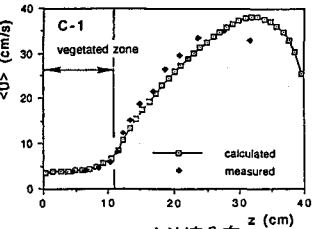


図 1 5 (e) 主流速分布

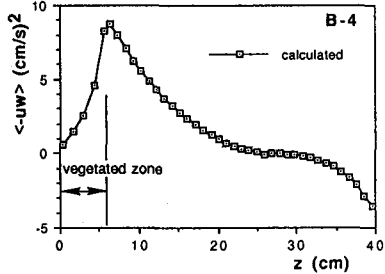
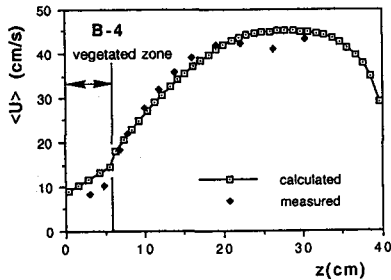


図 1 6 水深平均の主流速とレイノルズ応力分布

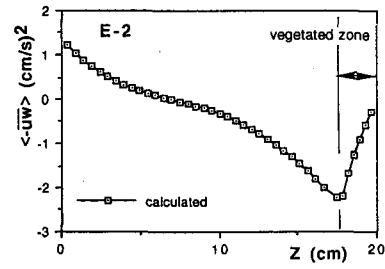
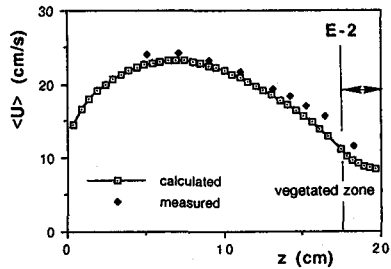


図 1 7 水深平均の主流速とレイノルズ応力分布

6. あとがき

本研究は、水路横断面内での河床の一部が植生によって覆われ、それが水路縦断方向に一樣な幅で群落を形成している場合を想定して、非植生・植生帯境界付近に形成されるせん断層を植生粗度による形状抵抗を考慮した応力代数モデルにもとづいた計算からどの程度説明できるかを検討したものである。一方、現象か

ら見ると、開水路流れではこうした非植生・植生帯境界付近に形成されるせん断層に起因して有意な水位変動が生まれ（藤田・福岡⁹⁾、辻本¹⁾）、乱流場をより複雑な形にしている。平均的な流速分布、シアの分布をほぼ再現できる本計算方法は水平渦の特性を知る有効な手段ではあるが、水平渦、水面変動、横断混合の相互の関係については今後の検討課題である。

本研究を進めるにあたり、東京大学工学部河原能久助教授にはLaunder-Yingモデルにもとづく数値計算コードを提供していただき、また計算モデルに関してご助言をいただきましたことに謝意を表します。さらに実験及びデータ解析に関して熱心にご協力いただいた当時京都大学大学院生岩田美幸君（現建設省）、金沢大学大学院生北村忠紀君及び計算結果の整理に関して熱心にご協力いただいた群馬大学大学院生角田吉章君に謝意を表します。

参考文献

- 1) 辻本哲郎：植生を伴う流れの水理，土木水理委員会水工学シリーズ，91-A-5，pp.1-22，1991.
- 2) 清水義彦・辻本哲郎・中川博次・北村忠紀：直立性植生層を伴う流れ場の構造に関する実験的研究，土木学会論文集，第437号/II-17，pp.31-40，1991.
- 3) 清水義彦・辻本哲郎・北村忠紀：植生に覆われた砂床上流れの浮遊砂濃度分布，水工学論文集，第35巻，pp.477-482，1991.
- 4) 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，土木学会論文集投稿中，1991.
- 5) 中川博次・棚津家久・富永晃宏：各種河床条件における縦渦を伴う流れの乱流構造，京都大学防災研究所年報，第24号B-2，pp.315-338，1981.
- 6) 河原能久：複断面開水路流の三次元数値解析，第31回水理講演会論文集，pp.425-429，1987.
- 7) Launder, B.E. and Ying, W.M. : Prediction of flow and heat transfer in ducts of square cross-section, *Heat and Fluid Flow*, Vol.3, pp.455-461, 1973.
- 8) Patankar, S.V. and Spalding, D.B. : A calculation method for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flow, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.15, pp.1787-1806, 1972.
- 9) 藤田光一・福岡捷二：洪水流における水平混合，土木学会論文集，第429号/II-15，pp.27-36，1991.