植生を伴う開水路流れの数値解析*

Numerical Study on Characteristics of Turbulent Flow in Open-Channels with Vegetation-covered Zone

清水 義彦**

SHIMIZU Yoshihiko

Abstract Recently hydraulics in open-channel flow with vegetated zone becomes important increasingly for river restoration. Vegetated zone can be regarded as a kind of porous region and momentum sink due to the form drag. Flows inside and outside vegetation zones bring about strong shear layer and cause momentum exchange and additional resistance between them. In this paper, the recent studies of numerical calculation on fully developed turbulent flow in open-channel with vegetation zone are outlined: (1) modeling of vegetation for river hydraulics, (2) flow over vegetation, (3) compound channel flow with vegetation, (4) flow with vegetation zone.

Keywords : open-channel flow with vegetated zone, momentum exchange, numerical calculation, turbulence model

1. はじめに

河川の流れは、河床勾配による流下方向への重力成分が駆動力となって生ずる開水路流れであり、河床の摩擦抵抗や、樹木などの障害物があればその形状抵抗によって流れを減速させる。流路が一樣で十分長いときにはこれらの力は釣り合い状態となり、流下方向に変化のない流れ(等流)が生まれる。河道内植生の粗度効果によって流れがどのように変化するか、あるいは植生が流れ方向(流路縦断方向)に十分繁茂した場合に生ずる一様な流れ(等流)のプロファイルがどのようになるか、さらには、それらに伴う土砂輸送と河道の地形変化が河川水理学上の興味の対象となる。

植生は水理学的には透過性を有する粗度として扱われる。ただし、植生のうち、草本類のように流れに対して敏感に変形したり揺れたりすることが無視し得ないものがあるが、ここでは木本類のように変形や揺動がさほど大きくないものを対象

として、変形を無視できる(rigidな)粗度としての扱いで取り込んだ流れの数値解析を紹介する。

2. 植生流れの基本的な性質

河道内植生はその種類ごとに様々な群落を形成しているが、典型的なものとして縦断方向に帯状に群落形成するものがよく見られ、その配置ゾーンは低水路の水際や、中州、高水敷などである¹⁾。そこで、植生群落の水理学的性質を調べるとき、植生群落が縦断方向に帯状に存在するものとして議論するのが便利であり、以後、『植生帯』や『植生層』という言葉でこうした状況を想定している。そして、この植生帯が流路横断面のどこに配置されるかで流れの構造は大きく左右される。

一方、植生帯が水没するかしないかによっても流れの状況は大きく異なる。背丈の低い植生が河床全体を覆って『植生層』を構成する場合洪水時に水没して、植生層内流れとその上の流れ(表面

* 1999.1.16 受付

** 群馬大学工学部建設工学科 〒376-8515 桐生市天神町1-5-1

TEL (0277)30-1642 FAX (0277)30-1601 E-mail: shimz@ce.gunma-u.ac.jp

流)を二層流とした『鉛直2次元流れ』の扱いが有効である。一方、背丈の高い樹木では洪水時に非水没(水没しても被りの水深が大きくない場合も含めて)となることが多く、これが横断面内での位置に配置されても植生帯内外の流れ場は『平面2次元流れ』としての扱いが有効である^{註2}。こうした区分で水理解析の基本的分類を示したものがTable 1である。

さて、植生を伴う開水路流(植生流れ)の特徴は、植生区間の遅い流れと植生のない区間での早い流れ(主流)が互いに運動量を交換・混合することによって生み出される。Photo 1は、水路の半幅を占める植生(模擬植生)が縦断方向に一樣にある場合(植生帯)の水路実験で、インクを注入して得た流体混合の様子である。インクの軌跡より、植生帯境界付近には渦が生じて流体の交番的な横断混合が行われていることが分かる。こうした運動量の混合は植生区間と非植生区間での主流の流速差(横断分布)に起因して生まれ、植生流路での流れの抵抗を増し、その結果、疎通能力を低下させる。Fig. 1に示すように、(a)植生流路(模擬植生として竹ひごを一定の面積密度で配列したもの)と、(b)植生流路の植生域と同一な規模の領域を流水断面積から除外した流路(複断面水路, compound channel^{註3})での疎通能力を比較するための水理

Photo 1 Vortices generated at the boundary of vegetated zone

Table 1 Classification of open-channel flows with vegetation

植生のパターン	水理解析
路床全幅を覆う植生層上の流れ	鉛直2次元
縦断方向に長い植物群落 (植生帯)：非水没	平面2次元
水没	3次元
植物群落と地形(植生を伴う複断面水路)	3次元
流下方向の変化の有無	遷移過程(不等流) ／疑似等流

Fig. 1 Cross-section of compound channel and channel with vegetated zone

注1 一見、不規則に繁茂しているような植生群落もその種に応じて固有な生息空間がある。例えば、水際付近を生息空間とするもの、水際から離れた空間を好むものなどがあり、比高(平時時の水面からの高低差)や河床材料特性などに依存していることが、河道の植生調査から分かっている。

注2 一般に河川の流れは、川幅のスケールに比べて水深のスケールは小さく、水深方向の諸量は平均化して流路の縦横断方向の変化のみを議論することが多い。このような取り扱いを平面2次元流とよぶ。

注3 このような横断面をもつ水路は複断面水路と呼ばれ、平時時には段下の部分(低水路)を流れ、洪水時には流水が段上がりの部分(高水敷、Flood Plain)にもりあげて流れる機能を有している。

実験を行った[1]。Fig. 2は、同一水路勾配のもとに、流量(Q)と水深(h)の関係を実験から得たもので、これより植生水路の方が同一流量に対する水深が大きく、流れの抵抗が大きいことが分かる。実験で用いた植生流路では、植生の占有率(密生度)は1%にも満たずかなりの透過性があるが、それに関わらず、(b)に比べて植生流路の疎通能力が低下する理由は先に述べた流体混合にともなう主流の運動量欠損が生じるからである。

こうした横断混合を直接求めて流れ場を解析するには、横断方向の変動流速による運動量交換を非定常計算を通じて計算しなければならない。一方、こうした周期的な混合も時間平均した場合には応力(レイノルズ応力)の生成として計算に取り込むことも可能である。こうした方法では、運動量混合を担うレイノルズ応力項を適切に評価することで流れ場を定常計算から求めることができる。横断混合を直接計算した数値解析の扱いは5.で述べるとして、4.までは後者の方法での流れの解析について述べることにする。

Fig. 2 $h \sim Q$ relations for compound channel and channel with vegetated

3. 植生に覆われた河床上の流れの解析

さて、植生を流れの解析の中でどのように扱うかであるが、その要素である樹木1本を例にとっても形状は複雑で、抵抗要素という捉え方からでも葉面での摩擦、幹、枝による形状抵抗、各抵抗要素間の干渉など個別にこれらを扱うには煩雑さを伴い、巧い方法とは言えない。数値計算上も形状の複雑な植生群落は容易に差分格子網の中に取り込むことができないし、仮に取り込むことができても種々の形状を有する植生に対して計算手法の一般化を図ることが難しい。そこで、植生を、各抵抗要素よりも大きなスケールで空間平均化した抵抗源として扱うことを考える。これは流れ場を粗視化することに相当し、このとき植生群落はルーズな構造をもつ浸透層と見なし得ることができる。

こうした考えから、植生の幾何形状を差分格子の中に取り込むことはやめて、植生要素は差分格子内にあるものとし、格子のスケール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採用することにする。このとき、平均化された植生群落の形状抵抗(F)は水の単位体積あたり、

$$F = \frac{1}{2} \rho C_D \lambda U^2 \quad (1)$$

と表現され、ここに、 ρ ：水の密度、 C_D ：植生の抗力係数、 U ：流速、 λ ：水の単位体積あたりの植生要素の遮蔽面積(植生密生度)で、 $C_D \lambda$ が植生の種類や成長度に応じて決まるパラメタとなる。

座標系をFig. 3のように設定する。水位が植生群落内にある一様な流れにおいて、底面摩擦の影響が無視できるとき、抵抗力と重力(流れの駆動力)の釣り合いから、次式の透過流速(固有浸透流速ともいう) U_s が決まる。

$$\frac{1}{2} \rho C_D \lambda U_s^2 = \rho g I_e \quad \therefore U_s = \sqrt{\frac{2gI_e}{C_D \lambda}} \equiv K_s \sqrt{I_e} \quad (2)$$

ここで、 I_e ：開水路流れのエネルギー勾配、 g ：重力加速度である。 K_s は透過係数と呼ばれ、植生の種類、繁茂状況に応じて固有な値を取り、植生群落の水理学的性質がこれに集約される。透過係数は、植生モデルによる水理実験のほか、現地

Fig. 3 Schematic figure of flow field

での植生調査や洪水痕跡調査などから評価される。

さて、植生層上にも水深がある場合、先述した運動量混合が植生層内流れとその上の流れ(表面流)の間で起り、表面流にひきずられた形の主流速分布が生まれる(Fig. 4)。この場合、流れの解析では、鉛直(水深)方向(y)と流れ方向(x)の2次元計算でよく、格子平均された流れの基礎式は乱流モデルとしてk-εモデルを採用することにより、次のように書ける[2,3]。

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

$$\begin{aligned} U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} &= gI_e - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p'}{\partial x} - F_x \\ &+ \frac{\partial}{\partial x} \{2(v_t + v) \frac{\partial U}{\partial x}\} + \frac{\partial}{\partial y} \{(v_t + v) (\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial z})\} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p'}{\partial y} - F_y \\ &+ \frac{\partial}{\partial x} \{(v_t + v) (\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x})\} + \frac{\partial}{\partial y} \{2(v_t + v) \frac{\partial V}{\partial y}\} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} U \frac{\partial k}{\partial x} + V \frac{\partial k}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial x} \{(\frac{v_t}{\sigma_k} + v) \frac{\partial k}{\partial x}\} \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \{(\frac{v_t}{\sigma_k} + v) \frac{\partial k}{\partial y}\} + P_k - \epsilon + C_{fk}(F_x U + F_y V) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} U \frac{\partial \epsilon}{\partial x} + V \frac{\partial \epsilon}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial x} \{(\frac{v_t}{\sigma_\epsilon} + v) \frac{\partial \epsilon}{\partial x}\} \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \{(\frac{v_t}{\sigma_\epsilon} + v) \frac{\partial \epsilon}{\partial y}\} \\ &+ \frac{\epsilon}{k} [C_1 \{P_k + C_{f\epsilon} (F_x U + F_y V)\} - C_2 \epsilon] \end{aligned} \quad (7)$$

$$P_k = v_t [2 \{(\frac{\partial U}{\partial x})^2 + (\frac{\partial V}{\partial y})^2\} + (\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x})^2] \quad (8)$$

ここに、(U,V): 時間平均流速の流下、鉛直方向成分、 p' : 静水圧からの圧力偏差分、 k 、 ϵ : 乱れエネルギーとその逸散率、 ν : 動粘性係数、 ν_t : 渦動粘性係数で、k-ε乱流モデルでは、

$$V_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (9)$$

と与える。 $C_\mu (=0.09)$ 、 $C_1 (=1.44)$ 、 $C_2 (=1.92)$ 、 $\sigma_k (=1.0)$ 、 $\sigma_\epsilon (=1.3)$ は数値パラメータでk-ε乱流モデルでの標準値を与えるが[4]、 k 、 ϵ の輸送式に含まれる C_{fk} 、 $C_{f\epsilon}$ は水理実験から同定された値を用いる($C_{fk}=1.0$ 、 $C_{f\epsilon}=1.3$)。また、 F_x 、 F_y は植生の平均的な形状抗力の反力のx,y方向成分である。

$$F_x = \frac{1}{2} C_D \lambda U \sqrt{U^2 + V^2}, \quad F_y = \frac{1}{2} C_D \lambda V \sqrt{U^2 + V^2} \quad (10)$$

上式の基礎式において、植生による流体の運動量吸収項(F_x 、 F_y)があること、植生素素による乱れエネルギーの生成と逸散が力学的な仕事の概念を用いて定式化され、 k 、 ϵ の輸送式に組み込まれていることが特徴となっている。

Fig. 4、5は、モデル植生を用いた水理実験による計測値と数値計算結果を比較したもので、計算値は植生層上の表面流にひきずられた形の主流速分布(クエット流れ)の特徴や、植生層境界(植生層頂部)でレイノルズ応力が最大値となる分布形を巧く表現している。

植生層内での流速やレイノルズ応力の低減は河床を侵食から保護する機能を与えるが、これは植生密度に依存している。Fig. 6は密度を系統的に変化させて主流速分布を求めたもので、密度の増加とともに流速分布に変曲点が見れ、植生

Fig. 4 Velocity distribution of flow over vegetation-covered bed

Fig. 5 Reynolds-stress distribution over vegetation-covered bed

Fig. 6 Change of velocity distribution due to vegetation density

層内では指数関数的に低減する流速分布となることが予測される。

4. 横断面の一部が植生帯で覆われた河道の流れ

複断面流路 (Fig. 1 (b)) では、その高水敷上に樹木などが繁茂した植生帯があり、なかでも、植生帯が低水路水際沿いに繁茂している状況はよく見られる。また、近年、洪水経験が少なくなった河道では、樹木が高水敷いっぱいに繁茂していることもしばしば見られる。高水敷の植生帯は様々な生態生息環境を担うが、反面、洪水の疎通能力阻害の一因にも成りかねない。したがって、高水敷植生帯が、洪水時の流れの構造にどのような影響を及ぼすかを知っておくことは大切である。

Fig. 7 は、流路横断面内に植生帯がある場合の流れについて、(a) 高水敷いっぱいに植生帯がある場合、(b) 植生帯が低水路河岸沿にある場合、(c) 植生帯が高水敷河岸近傍にある場合の3つの

Fig. 7 Calculated isovels of primary velocity

植生帯配置パターンでの主流速コンターを数値計算から求めたものである[5]。ここでは、前述した植生流れの数値解析を準3次元解析に拡張し、乱流モデルとして代数応力モデルを用いた計算から求めた。同図より、低水路河岸沿いに植生帯がある場合や高水敷全幅に植生が繁茂した場合では最大主流速点の横断位置が対岸に偏って存在しており、流心の移動により横断的に非対称な主流場を形成することがわかる。こうした傾向が顕著になれば、植生帯対岸での侵食力が増加し、ひいては治水上のネックを作りかねない状況も生まれてくる可能性がある。

5. 平衡な植生流れの非定常流解析

2. で述べたように、植生帯を伴うような流れでは、Photo 1 に見たように渦構造が出現し、これが流路横断方向での運動量混合に大きな役割を果たしていることが指摘されている[6~8]。これまでの数値計算では、こうした運動量混合は時間平均されたレイノルズ応力に含まれるとして定常計算から平均流場を求めてきた。ここでは、混合の非定常な構造(周期的横断混合)を直接計算して、非定常な流れ場(渦構造)について求めてみる。

植生流路での平面せん断流やそれに伴う横断混合の2次元性は高く、水深方向を平均化した平面2次元流解析が有効である[9~12]。こうした方法は、水深を柱とするコントロールボリュームのスケールで流れ場を粗視化することに他ならず、LES(Large Eddy Simulation)の思想そのものに相当する。すなわち、周期的横断混合を担う渦運動をコントロールボリューム・スケールを基準とした解像度で計算し、コントロールボリューム内の植生要素による乱れエネルギーの生成・逸散はsubgrid scaleの乱流運動として、その流速変動相関をモデル化する。すなわち、周期的横断混合はgrid scaleでの乱流運動として直接計算によって求めることになり、これはLESの概念に立脚した平面2次元流解析(Depth-averaged LES model)と言える[12]。

植生粗度を伴う流路の流下(x)方向、流路横断(z)方向の運動量輸送に関する平面2次元流解析の基礎式は次式で与えられる。

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial uM}{\partial x} + \frac{\partial wM}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} (v_{sgs} \frac{\partial M}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z} (v_{sgs} \frac{\partial M}{\partial z}) + S_u \quad (11)$$

$$S_u \equiv \frac{\partial}{\partial x} (v_{sgs} \frac{\partial M}{\partial x} - \frac{3}{2} K_{sgs}) + \frac{\partial}{\partial z} (v_{sgs} \frac{\partial N}{\partial x}) - gh(\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial z_b}{\partial x}) - C_f \rho \sqrt{u^2 + w^2} - F_x \quad (12)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial uN}{\partial x} + \frac{\partial wN}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} (v_{sgs} \frac{\partial N}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z} (v_{sgs} \frac{\partial N}{\partial z}) + S_w \quad (13)$$

$$S_w \equiv \frac{\partial}{\partial x} (v_{sgs} \frac{\partial M}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial z} (v_{sgs} \frac{\partial N}{\partial z} - \frac{2}{3} K_{sgs}) - gh(\frac{\partial h}{\partial z} + \frac{\partial z_b}{\partial z}) - C_f \rho \sqrt{u^2 + w^2} - F_z \quad (14)$$

また、水柱のコントロールボリュームにおける流体の質量保存式は、

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial z} = 0 \quad (15)$$

となる。ここに、 u, w, h : 流下、横断方向流速、水深で、 uh, wh を M, N とする。また、 z_b : 基準面からの河床高さ、 C_f : 河床の摩擦抵抗係数、 F_x, F_z は植生粗度による抗力の反力成分、添字の sgs (subgrid-scale)は水柱のコントロールボリュームスケール内の乱流運動からの寄与分を示し、 ν_{sgs}, K_{sgs} はそのスケールでの渦粘性係数、乱れエネルギーである。 ν_{sgs} を与えるに際して、Smagorinsky modelの拡張であるYoshizawa & Horiuti[13]の一方程式モデルを援用すると、

$$\nu_{sgs} \equiv C_v \Delta K_{sgs}^{1/2}, \quad \varepsilon = C_\varepsilon K_{sgs}^{3/2} / \Delta \quad (16)$$

となり、 K_{sgs} は次式から与える。

$$\begin{aligned} \frac{\partial K_{sgs} h}{\partial t} + \frac{\partial u K_{sgs} h}{\partial x} + \frac{\partial w K_{sgs} h}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} (v_{sgs} h \frac{\partial K_{sgs}}{\partial x}) \\ + \frac{\partial}{\partial z} (v_{sgs} h \frac{\partial K_{sgs}}{\partial z}) + S_k \end{aligned} \quad (17)$$

ここで、ソース項は、

$$S_k \equiv (P_k + P_{kveg} + P_{kw} - \varepsilon) h \quad (18)$$

であり、この中の P_{kveg} は植生の形状抵抗によって産まれるコントロールボリュームスケール内の乱れエネルギーの生成項で、

$$P_{kveg} \equiv C_{fk} (F_x u + F_z w) \quad (19)$$

として与える。その他の項については、

$$P_k \equiv \nu_{sgs} \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right],$$

$$P_{kw} \equiv C_f (u^2 + w^2)^{3/2} \quad (20)$$

であり、後者はRastogi & Rodi[14] による底面シアによる乱れエネルギーソース項である。 sgs の長さスケール Δ については、平面2次元流解析の粗視化スケールと合わせて

$$\Delta = (h \Delta x \Delta z)^{1/3} \quad (21)$$

とすることが妥当である。ここに $\Delta x, \Delta z$ は x, z 方向の粗視化スケール(差分格子スケール)で、モデル定数は標準値にもとづき設定した($C_v=0.1$,

$C_\varepsilon=1.0, C_{fk}=1.0$)。

差分化のスキームとしては、基礎式の移流項に2次元のQUICKスキームを用い、時間積分にはAdams-Bashforthスキームを用いた。側岸境界ではスリップ条件、流下方向には周期境界条件を課し、乱流計算の初期条件として平均流速の1%程度の大きさをもつランダムノイズを与え、平均流構造が定常になるまで計算を進めた。

Fig. 8 に示すような水路半断面が植生帯によって占有される平衡な流れについての数値計算結果を以下に示す。Fig. 9 は水面形、Fig. 10は主流速

Fig. 8 Schematic figure of channel with vegetated zone

Fig. 9 Spatial distribution of water surface elevation

Fig. 10 Spatial distribution of primary velocity

の計算結果を示したもので、既往の水理実験結果からも指摘されているように、水面形は横断方向に同位相で縦断方向に山・谷を形成し、主流速場も横断方向に特徴的な分布形を持ちながら縦断方向に周期的に変動している。こうした変動は流下方向に一定の速度で移流されている。Fig. 11は流速ベクトル場の計算値(但し横断方向流速は3倍に拡大して表示)で、植生・非植生域での交差的な流出入の存在が認められ、Photo 1に示した傾向が読み取れる。

Fig. 10の主流速の空間平均からの偏差分として縦断変動流速を求め、植生境界付近の縦・横断方

向変動流速、およびその相関($-u'w'$)の空間変化をFig. 12に求めた。これより、植生境界付近で、縦断、横断方向変動流速の位相差がほぼ π となつて最も効率よく横断方向レイノルズ応力を産むことが分かる。こうした知見は水理実験からも指摘されている[7]。Fig. 13, 14には、主流速、横断方向レイノルズ応力の平均値についての計測結果(▲印)と計算値(実線)の比較を示したが、両者の対応は良好である。

こうした渦構造をもつ乱流場では浮遊砂の組織的な輸送も見られる。浮遊砂の輸送過程は横断混合による移流フラックス、沈降フラックス(河床

Fig. 11 Vector expression of horizontal flow behavior

Fig. 12 Longitudinal distributions of velocity fluctuations and production of Reynolds stress

Fig. 13 Longitudinally averaged distributions of primary velocity and Reynolds stress

Fig.14 Calculated concentration-field of suspended sediment

での堆積)、そして河床からの巻き上げによる浮遊砂生成の3つから構成されるが[15,9]、このうち、沈降と巻き上げはコントロールボリュームスケール内の浮遊砂運動として扱われ、これらは基礎式の中でソース項(S_{sc})として記述される。平面2次元流場の浮遊砂濃度(C)の輸送式を

$$\frac{\partial Ch}{\partial t} + \frac{\partial uCh}{\partial x} + \frac{\partial wCh}{\partial z} = -\frac{\partial}{\partial x}(\beta v_{sgs} h \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z}(\beta v_{sgs} h \frac{\partial C}{\partial z}) + S_{sc} \quad (22)$$

として、流れの方程式と組み合わせて解くと、Fig.14の計算濃度場を得る(濃い色ほど濃度の高いことを示している)。横断混合の強い植生境界付近の主流域では浮遊砂の河床からの巻き上げの非線形効果と組織渦による移流フラックスによって周期的な濃度場が形成されていることが分かる。

6. あとがき

本稿では、植生を伴う開水路流れに関する数値計算的な取り扱いについて、著者の研究を簡単に紹介した。昨今、環境を配慮した新しい河川整備の理念が生まれつつあり、植生の繁茂を許しての河川流や河床変動に関する知識の集積がますます必要になってきている。こうした中で、水理実験、現地観測、数値解析が三位一体で進められることによって植生の河川水理学のますますの進展が期待される。

Nomenclature

B : width of channel
 C : sediment concentration
 C_D : drag coefficient of vegetation
 C_f : friction factor of bed
 C_{fk}, C_{fe} : additional parameters

C_μ, C_1, C_2 : numerical parameters of k- ϵ model
 C_ϵ, C_v : numerical parameters of subgrid scale turbulence model
 F_x, F_y, F_z : vegetation drag force
 g : gravitational acceleration
 h : depth of water
 I_o : energy slope of open-channel flow
 I : bed slope
 k : turbulent energy
 K_s : permeability coefficient
 K_{sgs} : turbulent energy contributed by subgrid scale turbulence
 M : = uh
 N : = wh
 p' : pressure deviation
 P_k : production of turbulent energy
 P_{kveg} : production of subgrid scale turbulent energy due to vegetation drag force
 Q : discharge
 t : time
 U, V, W : time-average velocity components
 U_{max} : maximum value of U in cross-section
 U_s : Characteristic velocity in vegetation layer
 u, v, w : velocity components
 u', v', w' : velocity fluctuation
 x : longitudinal distance
 y : height from channel-bed
 z : lateral distance
 $\Delta x, \Delta z$: coarse graining scales for x, z directions in depth-averaged flow analysis

Greek letters

β : reciprocal of turbulent Schmidt number
 ϵ : dissipation rate of turbulence
 ρ : mass density of water
 ν : kinematic viscosity
 ν_t : kinematic eddy viscosity
 ν_{sgs} : kinematic eddy viscosity contributed by subgrid scale turbulence
 $\sigma_k, \sigma_\epsilon$: numerical parameters of k- ϵ model
 λ : vegetation density

参考文献

- [1] Shimizu, Y. and Tsujimoto, T., Comparison of flood-flow structure between compound channel and channel with vegetated zone, Proc. of XXV Congress of IAHR, Tokyo, Vol. I, 97-104, 1993.
- [2] 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、土木学会、水工学論文集、第35巻、477-482(1991)。
- [3] 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、No.447/II-19, pp.35-44 (1992)。
- [4] Rodi, W., Turbulence Models and Their Application, IAHR, Delft, 1980.
- [5] 早坂文香、青木律子、清水義彦、小葉竹重機、高水敷に植生粗度を伴う流れの数値計算、土木学会第48回年次学術講演会講演概要集、第2部、710-711(1993)。
- [6] 池田駿介・太田賢一・長谷川洋、側岸部植生境界の周期渦の発生機構、土木学会論文集、No.443/II-16, pp.47-54(1991)。
- [7] 辻本哲郎・北村忠紀、側岸に沿って植生群落のある流路での水面変動を伴う横断混合、土木学会、水工学論文集、第36巻、pp.273-280(1992)。
- [8] 石川忠晴・高橋和明・細井俊一、河岸植生付近の横断混合流れの位相平均解析、水工学論文集、第37巻、pp.837-840(1993)。
- [9] 灘岡和夫・八木宏、SDS & 2DH モデルを用いた開水路せん断乱流の数値シミュレーション：土木学会論文集、No.473/II-24, pp.35-44(1993)。
- [10] 福岡捷二・渡邊昭英・津森貴行：樹木群を有する開水路における平面せん断流の構造とその解析、土木学会論文集、No.491/II-27, pp.41-50(1994)。
- [11] 清水義彦・辻本哲郎、植生帯を伴う流れ場の平面2次元解析、土木学会、水工学論文集、第39巻、pp.513-518(1995)。
- [12] 清水義彦・辻本哲郎・小葉竹重機、平衡植生流れと浮遊砂輸送に関する数値計算、土木学会、水工学論文集、第41巻、pp.845-850(1997)。
- [13] Yoshizawa, A and Horiuti, K., A statistically-derived subgrid-scale kinetic energy model for large-eddy simulation of turbulent flows, Jour. of the Physical Society of Japan, Vol. 54, No. 8, August, pp. 2834-2839, (1985)。
- [14] Ashok K. Rastogi and Wolfgang Rodi, Prediction of heat and mass transfer in open channels, Jour. of the hydraulics division, ASCE, HY3, pp. 397-420, March (1978)。
- [15] 池田駿介・泉 典洋：浮遊砂の横断方向拡散係数について、土木学会論文集、No.434/II-16, pp.47-55(1991)。