# 開水路植生流れにおける組織渦のLES解析

# LARGE EDDY SIMULATION ON COHERENT VORTICES IN VEGETATED CANOPY OPEN-CHANNEL FLOWS

山上路生<sup>1</sup>, 岡本隆明<sup>2</sup>, 禰津家久<sup>3</sup> Michio Sanjou and Takaaki Okamoto and Iehisa Nezu

<sup>1</sup>正会員,博(工),京都大学大学院助手,工学研究科社会基盤工学専攻(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)
<sup>2</sup>学生員,京都大学大学院修士課程,工学研究科社会基盤工学専攻(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)
<sup>3</sup>フェロー,工博,京都大学大学院教授,工学研究科社会基盤工学専攻(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

In actual rivers, many aquatic plants are often observed and they have significant effects on hydrodynamic properties. In such vegetated open-channel flows, velocity profiles are largely changed in the vertical and spanwise directions. The vegetated canopies generate coherent turbulent motions that promote momentum and mass transports between over and within canopy. It is thus needed to investigate these turbulence characteristics and coherent motions in hydraulic engineering and river environment.

In the present study, we conducted a large eddy simulation in vegetated open-channel flows, and revealed numerically the turbulence structure and correlation properties in the whole depth region including within-canopy and over-canopy layers.

Key Words : vegetated open-channel flow, coherent turbulent motions , LES

## 1. はじめに

植生水理の解明は河川水域環境と水防災上において非常に重要な研究トピックである.植生の存在は流れに対して大きな影響をもち、スイープやエジェクションなどの組織的な大規模乱流を引き起こし、植生層の内外におけるスカラー輸送や運動量交換が促進される.これまでに、植生流れの研究は農業科学も含めた水理水工分野において多くの研究者によって進められてきた.著者ら<sup>1)</sup>はに植生キャノピーを有する開水路流れを対象にレーザー流速計を用いた詳細な乱流計測を行って、その基礎水理特性や分散特性を実験的に明らかにした.

ー方で数値解析によるアプローチも数多くみられる.古くはBulke & Stlzenbach(1983)<sup>2)</sup>によるk-εモデルの計算がある.彼らの計算値は実験結果と比較したが,植生の抗力係数については十分な考察を行っておらず,いくつかの検討課題を残すものであった.Shaw & Schumann(1992)<sup>3)</sup>は,抗力係数および植生密度は一定として植生を透過性粗度として扱ったLES計算を行い,野外実験の結果と良好な一致を得た.清水・辻本ら(1992)<sup>4)</sup>は空間平均したレイノルズ方程式を用いて非植生域から植生域への空間遷移過程に注目して,計算結果と実験結果を比較した.Lopes & Garcia(2001)<sup>5)</sup>は乱流運動エネルギーの空間変動を無視し瞬間的な変動にフィットさせて,抗力

係数を過小評価することで乱れ強度が再現できる ことを示した.湯城・岡部ら(2001)<sup>6</sup>は一次元k - ε モ デルをベースにした数値解析を行い,dispersive flux をレイノルズ応力から分離して評価すれば計算精 度が向上することを報告した.Choi & Kang (2004)<sup>7</sup>) は3種類の乱流モデルを用いて半水没および水没 条件の植生開水路流れを計算して,応力方程式モデ ル(RSM)が非水没植生開水路流れの再現精度が良 好であることを示した.最近ではChoi & Kang(2005)<sup>8</sup>はRSMを用いて片側植生流れの3次元 数値解析を行い,Nezu & Onisuka(2001)<sup>9</sup>の計測デー タと比較して主流速の水平面分布において流速の 落ち込み現象を再現した.

このように植生流れの数値解析に関する研究は 国内外で数多く行われてきたが,植生密度を変化さ せて検討しているものは少なく,また植生要素が流 れの瞬間構造におよぼす影響に関する数値解析も ほとんど試みられていない.そこで本研究では植生 密度を粗・密の2通りに変化させた条件下で植生キ ャノピー流れを対象にしたLESを行う.特に前半部 では平均流速を中心に既往の実験データと比較・検 証する.さらに後半部では実験研究でも不明な点が 多く残されている組織乱流渦の挙動や時空間相関 特性を数値的に考察する.この組織構造は浮遊砂の 輸送や堆積,局所洗掘を促進するなど河床変動を引

<b>表-1</b> 計算ケース							
Туре	λ	Q(l/s)	$U_m$ (cm/s)	H(cm)	$h(\mathrm{cm})$	Re	Fr
Α	1.56	6.05	12.0	15.0	5.0	18000	0.10
С	0.38	0.05	12.0	13.0	5.0	18000	0.10



き起こすため、底面植生帯を有する開水路キャノピー流れの数値解法を確立することは水工学および 河川環境上においてきわめて重要であるといえる.

# 2. 基礎式と計算方法

本研究で扱う植生開水路流れの計算ケースは著 者らが昨年度に乱流計測した水理条件<sup>11</sup>に合わせた. 図-1に流れ場と座標系を示す.キャノピー内部を含 めた全水深領域を計算対象にした.計算領域の水路 底面に高さ50mm,幅8mm,厚さ1mmの短冊状の植 生要素を格子状に配置した.本研究では植生が位置 する流下領域をwake領域,植生間の流下領域を non-wake領域と呼び区別する.図-2に示すように要 素間隔を変えて植生密度の異なる2通りの配置パ ターンを設定した.植生要素はカナダモなどの有茎 藻類を単純にモデル化したもので,水流による変形 は考えないものとする<sup>1</sup>.

x, yおよびzはそれぞれ,流下方向,鉛直方向お よび横断方向の座標軸である. $\tilde{u}$ ,  $\tilde{v}$ および $\tilde{w}$ は各 方向における瞬間流速成分,U, VおよびWはそれ ぞれの時間平均流速,u, vおよびwはそれぞれ瞬間 流速の時間平均流速からの偏差すなわち乱れ強度 成分を示す.Hは等流水深,hは植生の高さである.  $B_v$ ,  $L_v$ はそれぞれ横断方向,流下方向の植生配置 間隔である.著者らの水理計測では2成分レーザー 流速計(LDA)とPIVを用い,レーザー光を水路側方 から照射してキャノピー内部も含めた全水深領域 を点計測した.



図-2 植生配置パターン

表-1に水理条件を示す.ここで植生密度λは式 (1)のように単位面積当たりの植生要素の遮蔽面積 (frontal area)で定義した.

$$\lambda = nA/S \tag{1}$$

ここで*S*は面積, *n*は面積*S*の領域上に存在する植 生要素の総数, *A*は植生の流れに垂直な投影面積で ある.

本研究ではRaupach&Thom(1981)<sup>10)</sup> にしたがって *x-z* 面の平面平均量を考察する. 平面平均操作は次 式で表される.

$$\langle \Phi \rangle (y,t) = \frac{1}{A} \iint_{R} \Phi(y) dx dz$$
 (2)

流速や圧力などの水理量 $\Phi$ は式(2)で求められる平 面平均値 $\langle \Phi \rangle$ とその偏差 $\Phi$ "から構成される. 偏差  $\Phi$ "は水理量分布の空間偏差を表すもので, 植生流 れでは後述するdispersive効果において重要な意味 をもつ.

計算グリッドは不等間隔であり,植生要素近傍を 細かく設定した.また植生要素表面にnon-slip条件を 与えることで植生要素を計算領域内に再現した.こ こで計算領域の全格子数は流下方向に140,鉛直方 向に48,横断方向に36である.本研究では植生流れ における組織乱流構造の再現を目指すためにLESを 適用する.LESにおける空間粗視化された連続式と 運動方程式は次のようになる. (連続式)

$$\frac{\partial \hat{u}_i}{\partial x_i} = 0 \qquad (i = 1, 2, 3) \qquad (3)$$

(運動方程式)

$$\frac{\partial \hat{u}_i}{\partial t} + \hat{u}_j \frac{\partial \hat{u}_i}{\partial x_j} = F_i - \frac{\partial \hat{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} (-\tau_{ij} + 2\nu \hat{D}_{ij})$$
(4)

ここに上付ハットは空間平均操作を示す. $F_i$ は外力 項,pは圧力, $D_{ii}$ は歪速度テンソルで,

$$D_{ij} \equiv \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \hat{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \hat{u}_j}{\partial x_i} \right)$$
(5)

と定義される.また  $\tau_{ij}$ は空間平均操作による応力で、 本研究では標準Smagorinskyモデルで計算した<sup>11)</sup>.上 述の基礎式をもとにMAC解法で瞬間流速分布を解 いた.移流項スキームは3次精度風上差分,時間微 分項には2次精度Adams-Bashforth法を用いた.壁面 および自由水面境界には流速の3成分ともNo-Slip 条件を与え,組織渦を発達させるために流下方向及 び横断方向に周期境界条件を与えた.

# 3. 計算結果と考察

## (1) 主流速分布とレイノルズ応力分布の比較

まず計算結果をLDAによる計測結果と比較して 本シミュレーションの精度検証を行う. 図-3に平面 平均した主流速分布 <U>とレイノルズ応力分布 <-uv>の鉛直分布を*λ*=1.56について実験値と比 較した. 結果はそれぞれ植生先端(y=h)における平 面平均値 < $U_h$  > と <  $-uv_h$  > で無次元化した. 計算結 果は実験結果と同様に植生先端付近で変曲点をも ち、植生内部で流速分布が大きく低減しており、そ の特性は実験結果とほぼ一致しているといえる. レ イノルズ応力については植生先端でピーク値をも ち,水面に向かって減少する.計算値は実験値にお けるこの傾向を比較的良好に再現している. 植生層 内では両者に若干のずれが認められるが、この原因 の一つとしてエネルギー局所平衡の仮定が前提の Smagorinskyモデルを用いたことが考えられる. 今後 はダイナミックモデルなどのより高精度なLESモデ ルの導入による計算スキームの改善が必要である. 本論文においては流速シアーによる組織せん断渦 を再現する上での影響は小さいと考えられるため, 本計算モデルによって以下の現象考察を進めてい く.

### (2) 植生による流速分散効果の検討

既往研究から植生流れは植生抵抗により流れが



図-3 主流速分布とレイノルズ応力分布の比較



**図-4** 運動方程式におけるdispersive項とレイノル ズ応力項の比較

空間的に不均一となる.本節では運動方程式におけ る分散効果(dispersive効果<sup>1)</sup>)について考察する. Raupach &Thom(1981)<sup>10)</sup>は運動方程式を水平面で空 間平均して,定常および鉛直2次元流れに対して次 式を導いた.

$$\frac{\partial}{\partial y} \left\langle U''V'' \right\rangle + \frac{\partial}{\partial y} \left\langle \overline{uv} \right\rangle = g \sin \theta - \frac{1}{\rho} \left\langle \frac{\partial P''}{\partial x} \right\rangle + v \left\langle \nabla^2 U'' \right\rangle$$
(6)

左辺第1項は空間平均によって現れたdispersive 項である.右辺はそれぞれ重力項,圧力勾配項およ び粘性項である.

図-4は $\lambda$ =1.56のdispersive項およびレイノルズ応 力項の鉛直分布の計算値を比較したものである. dispersive項およびレイノルズ応力項ともに植生先 端(y/h=1)でピークをもつ.また植生先端における dispersive項のピーク値はレイノルズ応力項の50%





図-6は時間平均鉛直流速成分Vの水平面コンタ ーで、Uと同様に y/h=1.0の結果を示した(斜線部 は負値分布を表す).また値は $\langle U_{\mu} \rangle$ で無次元化した. 粗い植生ケースC (λ=0.38)では計算値および実験 値ともにwake領域で正値分布(V>0)が支配的で上 昇流が卓越しており, non-wake領域では負値分布が 支配的となり下降流(V<0)が卓越している.またこ のVの正負特性は図-5の主流速分布とよく対応し ている. すなわち, U の高速域ではV は負値分布と なり下降流が生じている. 一方でUの低速域ではV は正値分布となり上昇流が発生する. このことから non-wake領域では植生外部 (v/h≥1.0) の高速流が 植生内部(v/h<1.0) へ輸送され,植生周辺領域では 植生内部の低速流が植生外部へ輸送される平均流 構造が明らかになった.またこの平均流構造は次節 で考察する組織乱流構造のsweepおよびejectionと関 連するものと思われる.また密な植生ケースAでは ケースCで観察された平均流構造は顕著ではなく、 この特性は植生密度に依存するものと思われる.ケ ースAおよびCともに負値分布の領域は計算と実験 で差異が認められ、LESモデルの選定やメッシュ依 存性などをチェックしてさらに検討する必要があ る.



**図-7** 瞬間ベクトルの追跡(λ=1.56)

ほどの大きさをもち流体力を評価する上では無視 できないが、底面近傍や植生外部ではレイノルズ応 力項の数パーセントほどで無視できるといえる.

(3) 水平面 (x-z) の時間平均流速コンター

図-5に流れの分散特性が顕著となる植生先端



#### (4) 瞬間ベクトル分布

図-7は植生層外 (y/h>1) と層内 (y/h<1) における運動量の交換が活発と思われる  $\lambda=1.56$  のケースのnon-wake面における瞬間変位ベクトル分布( $\tilde{u}, \tilde{v}$ )の一例をt=0.0 (s)からt=2.0 (s)までの1.0sごとに時系列表示したものである.カラーコンターは瞬間主流速 $\hat{u}$ の分布である.t=0.0 (s)において植生先端付近を中心に高速流の下降ベクトルであるsweep(図中A)が発生している.t=1.0 (s)ではsweep(A)が時間とともに流下方向に輸送され、上流側に低速流の上昇ベクトルであるejection(図中B)が発生している.

ejection(B)は植生層外の $y/h=1.5 \sim 2.0$ 付近まで影響が及んでいるのがわかる. t=2.0 (s)では ejection(B)が流下方向に輸送され,上流側では sweep(図中C)が発生している.このことからejection とsweepが交互発生しているがわかるが,これは他 時刻の瞬間ベクトルにおいても観察され, Finnigan(2000)<sup>12)</sup>もこの特性を実験的に報告してい る.すなわち本計算結果も植生開水路流れにおける 植生外部の高速流がsweepによって植生内部へ輸送 され、その後植生内部の低速流がejectionにより植生 外部へ浮上しているような組織変動サイクルを定 性的に再現できたといえる.

#### (5) 瞬間渦度特性

図-8は*λ*=0.38および1.56のnon-wake領域における瞬間渦度分布の一例を時系列表示した. 渦度は式(7)で定義した.

$$\Omega = \partial \hat{u} / \partial y - \partial \hat{v} / \partial x$$
 (7)  
両ケースとも植生先端付近 ( $y/h=1$ ) において局所  
的に正値の大きな分布がみられ,時間とともに流下  
方向に移流されているのが観察される(図中a, c).  
これは主流速の鉛直方向分布  $U(y)$  が変曲点をもつ  
ことに起因するせん断不安定な組織渦である.  
 $\lambda = 1.56$ では $t = 0.5$  (s)において上流側に渦が生成さ  
れている(図中b).  $\lambda = 0.38$  のケースでは $t = 1.0$  (s)に  
おいて植生内部に渦が入り込んでいるのがみられ  
る.またejection によって植生層外 ( $y/h > 1$ )に輸送



される渦も観察されるがこの渦構造は流速シアー (*∂U / ∂y*)の減少によって時間とともに拡散されて いくものと思われる(図中d).

## (6) 流速と圧力の相関特性

最後に実験では計測が困難な流速と圧力の相関 特性を $\lambda = 0.38$ のケースを中心に数値的に考察する. 図-9は水路センターラインに付近のwake領域の中 心ラインとnon-wake領域の中心ラインにおける速度 と圧力の相関係数 $C_{up}$ を鉛直方向にプロットしたも のである.流下方向の位置は植生要素間の中間とし た.相関係数 $C_{up}$ は次式で定義される.

$$C_{up} = \frac{\overline{u(x, y, z)p(x, y, z)}}{u'(x, y, z)p'(x, y, z)}$$
(8)

ここで $u'=\sqrt{u^2}$ ,  $v'=\sqrt{v^2}$ は乱れ強度である.wake 領域では植生先端で正のピークをもつが,このこと は,瞬間的な高速流による瞬間的な圧力増加および 低速流による圧力減少を意味している.non-wake領 域では植生外部では相関はほぼゼロとなり,圧力と 流速の連動性は比較的小さいことが予想される. 令 後,植生密度をさらに変化させてその影響を調べる とともに植生要素に生じる抗力特性との関連性な ども含めた詳細な圧力変動メカニズムを明らかに したい.

## 4. 結論

本研究では、開水路植生流れを対象に不等間隔格 子を用いた3次元LES解析を行い、実験値との比較 や組織乱流構造について考察した.

1) 運動方程式におけるdispersive効果を検討した結 果,植生先端付近ではdispersive項のピーク値は レイノルズ応力項のピーク値の50%ほどの大き さを持ち流体力を評価する上で無視できないこ とがわかった.

- 2) 植生密度が小さいケースでは流れの局所性が大 きくなり, non-wake領域で下降流が卓越し, wake 領域で上昇流が卓越しPIV計測結果と一致した.
- 3) 瞬間ベクトル分布から植生流れ場に存在する植 生先端付近におけるejection からsweepに移行す るような組織的な変動サイクルを再現すること ができた。
- 4) 瞬間渦度分布から植生先端付近で渦が生成され, ejection やsweepによって渦が植生外部や植生内 部に輸送されているのがみられた.

#### 参考文献

- 禰津家久・山上路生・岡本隆明:植生キャノピー開水路流れの乱流構造とディスパーシブ効果に関する実験的研究,水工学論文集第50巻,土木学会, pp.1135-1140,2006.
- Bulke, R.W. and Stolzenbach, K.D.: Free surface flow through salt marsh grass. MIT-Sea Grant Report MITSG 83-16, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA,1983.
- Shaw, R.H. and Schumann, U.: Large-eddy simulation of turbulent flow above and within a forest, *Boundary-Layer Meteorology.*, vol.61, pp.47-64, 1992.
- 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.
- Lopes, F. and Garcia, M.: Mean flow and turbulence structure of open-channel flow through non-emergent vegetation, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 127(5), pp.392-402, 2001
- 湯城豊勝・岡部健士・濱井宣明:樹木状植生を持つ河 床上の流れの乱流構造とその数値解析法,水工学論文 集,第45巻,pp.847-852,2001
- Choi, S.U., and Kang, H.: Reynolds stress modeling of vegetated open-channel flows, *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, 42(1), pp.3-11, 2004.
- Choi, S.U., and Kang, H.: Numerical investigations of mean flow using the Reynolds stress model, *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, 44(2), pp.203-217, 2005.
- Nezu, I. and Onitsuka, K.: Turbulent structures in partly vegetated open channel flows with LDA and PIV measurements, *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, 39(6), pp.629-642, 2001.
- Raupach, M. R. and Thom, A.S. : Turbulence in and above Plant Canopies, Ann. Rev. *Fluid Mech.*, Vol.13, pp.97-129, 1981.
- 11) 梶島岳夫:乱流の数値シミュレーション,養賢堂, 1999.
- 12) Finnigan, J. J. A.S. : Turbulence in Plant Canopies, Ann. Rev. *Fluid Mech.*, Vol.32, pp.519-571, 2000.