

# 境界埋め込み法を取り入れたLESによる 開水路棧粗度乱流場の上昇剥離渦の解析

ANALYSIS OF ASCENDING SEPARATED VORTICES GENERATED FROM A STRIP ROUGHNESS BY USING LES WITH IMMERSSED BOUNDARY METHOD

吉村英人<sup>1</sup>・藤田一郎<sup>2</sup>

Hideto YOSHIMURAE and Ichiro FUJITA

<sup>1</sup>学生会員 神戸大学大学院 自然科学研究科博士課程前期課程 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

<sup>2</sup>正会員 学術博 神戸大学教授 工学部建設学科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

A large eddy simulation (LES) of turbulent open-channel flow with strip roughness is performed together with the image analysis by the particle image velocimetry (PIV). In the simulation, an immersed boundary method is introduced in order to be able to simulate arbitrary channel bed topography. In addition, we used a sophisticated LES model to simulate the flow near the complicated boundary without using a damping function. The hydraulic conditions for the simulation and the experiment are restricted to a relatively small Froude number ( $Fr$ ) flow, e.g.  $Fr$  less than 0.25, in order not to generate appreciable water surface fluctuation. The results show favorable agreements regarding the statistical properties such as the mean and the Reynolds stress distributions. Additionally, the instantaneous flow structure at the instance when a separation vortex hit the water surface is investigated, showing that the separated vortex ascends up to the water surface and locally decelerate the convection velocity of the surface profile.

**Key Words :** LES, strip roughness, open-channel turbulence, PIV, immersed boundary method, separation vortex

## 1. まえがき

河川の表面は様々な物理的作用を受けて多種多様な変化を示す。それらの変化を与える要因の一つに風の影響があるが、無風状態でも水面が大きな変動を示す場合があるのは周知のことである。例えば、レイノルズ数の増大に伴う流体内部の乱れの増幅による水面の変動、河床面で発生する乱流渦の水面との衝突による水面の変動、あるいは凹凸を有する河岸から発生する波の影響による水面変動などがそうである。実際の河川で見られるのはこれら複数の要因に基づく変動が重畳したものと考えられる。水面近傍の流れ場はミクロ的に見れば気液界面の現象<sup>1)2)</sup>を解明する点で重要であるが、水面変動をマクロ的に見た場合には面的な幾何学パターンが表面流と何らかの相関を持って移流することが考えられることから、表面流速分布を計測するための事象としても利用価値がある<sup>3)4)5)</sup>。

一方、乱流場の三次元解析手法は近年著しい発達を遂げ、RANSモデルに加えてDNSやLESによる解析が一般

的に行われるようになってきたのは周知のことである<sup>6)7)</sup>。しかしながら、大半の解析は滑面境界を有する流れ場を対象としたものであり、粗度のある流れ場を詳細に数値解析した研究例は少ない。自由水面を有する流れ場を対象とした解析もこれまで数多く行われているが、粗度のある流れや水面変動の大きな流れ場を対象とした研究例は多くない<sup>8)9)</sup>。少なくとも粗度がある流れ場のLES解析においては、水面近傍の流れ場や水面変動を対象とした研究例はほとんどなく、現象論的にも十分な整理がされていないのが現状と思われる。そこで、本研究では水面変動の要因として河床面起因の剥離渦と水表面流場の関係に着目し、LESおよび可視化画像解析(PIV)による検討を行う。本報では粗度要素を有する流れ場の基本的な特性を調べるために、比較的フルード数が低く( $Fr=0.25$ )、顕著な水面変動の発生が予想されない開水路の流れ場に、正方形断面を持つ棧粗度を配置したケースを対象として検討を進める。

## 2. 可視化実験の概要

表-1 水理条件

	Ls05	Ls10
水深 : $h_i$ (cm)	4.0	
平均流速 : $U_m$ (cm/s)	15.6	
相対粗度間隔 : $L/k$	5	10
フルード数 : $Fr$	0.25	
レイノルズ数 : $Re$	6240	
水路床勾配 : $I$	1/500	

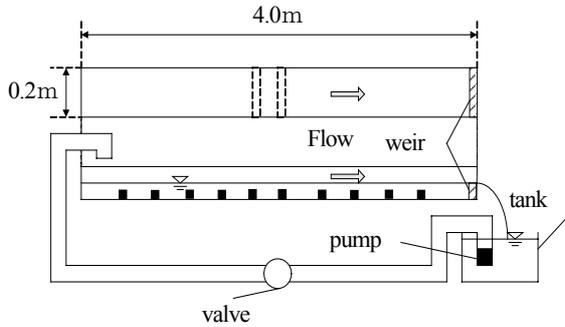


図-1 実験装置

### (1) 実験装置

実験には図-1に示す、水路長4.0m、水路幅0.2mの亚克力製の直線開水路を用いた。栈粗度には高さ $d=0.9\text{cm}$ 、幅 $k=0.9\text{cm}$ のアルミニウム製の正方形栈粗度を用い、栈粗度は水路の上流から下流まで等間隔に配置した。流れの可視化には粒径 $10\mu\text{m}$ のナイロン破砕トレーサーを用い、水路下方よりアルゴンイオンレーザによるレーザシートで照射して得られる流れの鉛直断面を高速ビデオカメラ(110fps)で撮影しPIVにより解析を行った。

### (2) 水理条件

今回行った実験での水理条件を表-1に示す。水深は4cmに固定しフルード数は0.25と水面変動の小さい比較的穏やかな流れを対象とした。ただし、粗度要素上の局所的なフルード数は0.37となる。粗度間隔は相対粗度間隔を $L/k=5$ および10の2通りとした。ここで $L$ は粗度の中心間隔である。粗度間隔が5の場合のケース名をLs05、10の場合をLs10とした。

## 3. 数値計算概要

### (1) 基礎方程式

数値計算は直交格子におけるLESで行った。フィルタ操作を施した非圧縮性流れの連続の式およびN-S方程式を以下に示す。なおN-S方程式は時間的に前進差分した形で示す。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

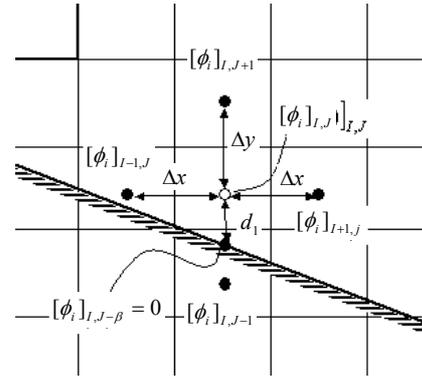


図-2 境界埋め込み法の速度の補間図

$$\begin{aligned} \frac{\bar{u}_i^{n+1} - \bar{u}_i^n}{\Delta t} = & -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \\ & + \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \nu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right\} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} + f_i \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、 $x_i$  :  $i$ 方向座標 ( $i=1,2,3$ ),  $\bar{u}_i$  : グリッド成分の $i$ 方向速度,  $\nu$  : 動粘性係数,  $\nu_t$  : 渦動粘性係数,  $f_i$  : グリッド成分の $i$ 方向外力である。

### (2) 境界埋め込み法 (IBM: Immersed Boundary Method)

実河川における河床面は砂礫で構成された粗面であり、河床波が発生すればさらに河床面の形状は複雑となる。このように複雑な境界形状を有する実際河川の流れ場の詳細を検討するためには、ある程度の自由度を持って境界形状を定義できることが重要である。そこで、本研究では今後様々な底面形状に対する数値計算を行っていくことを視野に入れ、直交格子座標系において任意形状の物体の影響を取り入れることができる境界埋め込み法を前述のLESの解析プログラムに導入することとした。境界埋め込み法はPeskin<sup>10)</sup>などによるフィードバック法やMohd-Yusof<sup>11)</sup>による直接強制法が開発されているが、本研究では計算が簡易かつ安定性の高い直接強制法を用いることにした。境界埋め込み法は壁面境界を外力の形で表現するものであり、壁面近傍および壁面内部の格子点においては外力項が加えられる。その外力項 $f_i$ は以下の式で表される。

$$f_i = -RHS + \frac{U_i^{n+1} - \bar{u}_i^n}{\Delta t} \quad (3)$$

ここでRHSは式(2)の右辺第1項から第4項の和である。 $U_i^{n+1}$ はその隣接格子点での速度と壁面上のゼロ速度を補間することによって与える境界速度であり、壁面内部では $U_i^{n+1} = 0$ とする。境界面における速度の補間方法には図-2に示すように多方向線形補間を用いた。多方向線形補間は壁面最近傍格子点に隣接する6点の速度を用いるもので隣接する格子点が存在する場合にはその点での速度を用い、格子点よりも手前に壁面が存在する場合に

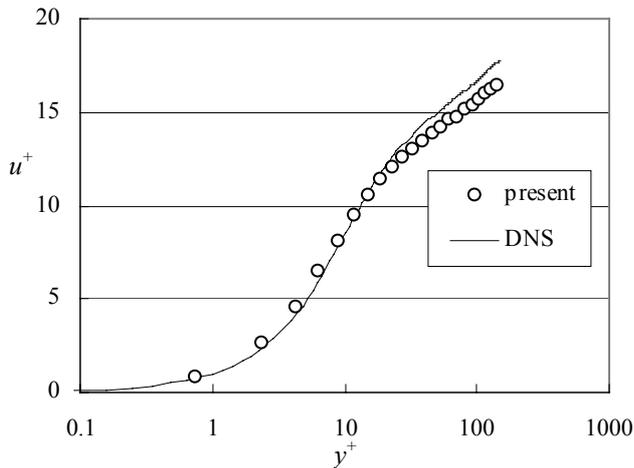


図-3 主流方向平均流速分布

は壁面でのゼロ速度を用い距離による重み付けで補間を行う。

### (3) MTS SGSモデル

LESにおける渦動粘性係数の算出において、従来の標準Smagorinskyモデルを用いると壁面近傍で適切なダンピング関数を乗じなければならないことや、モデル係数を流れ場によって変化させなければならないことなどから、流れの場の局所性を反映することはできない。また、底面形状が複雑になれば、壁面からの距離の定義も煩雑となるため、標準Smagorinskyモデルの適用はさらに困難となる。これらの問題を解決するモデルとしてGermanoら<sup>12)</sup>によって開発されたDynamic SGSモデルがあるが計算不安定に陥りやすい。

そこで、本研究では稲垣らによって開発されたMTS SGSモデル<sup>13)</sup>を用いることとした。このMTS SGSモデルは、時間スケールとして乱れのSGS成分のもつ時間スケールと歪み速度の大きさから与えられる時間スケールとの調和平均を用いることにより、壁面近傍で自動的にダンピングがかかる効果を取り入れることができる。また、計算安定性も高い。MTS SGSモデルによる渦動粘性係数 $\nu_t$ は以下の式で表される。

$$k_{es} = (\bar{u}_k - \hat{u}_k)^2 \quad (4)$$

$$T_s^{-1} = \left( \frac{\bar{\Delta}}{\sqrt{k_{es}}} \right)^{-1} + \left( \frac{C_T}{|\bar{S}|} \right)^{-1} \quad (5)$$

$$\nu_t = C_{MTS} k_{es} T_s \quad (6)$$

ここで、 $C_{MTS}$ および $C_T$ はモデル係数であり、それぞれ標準値である0.05, 10を与える。 $\bar{\Delta}$ はフィルタ幅で $\bar{\Delta} = (\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/3}$ とした。 $|\bar{S}|$ はグリッドスケールの歪み速度テンソルの大きさ、また、 $\hat{u}_k$ はグリッド成分として計算される流速成分にフィルタリング操作を行うことを意味し、ここでは稲垣らと同様にSimpson則を適用した。なお、添字の $k$ は各方向を示す指数である。

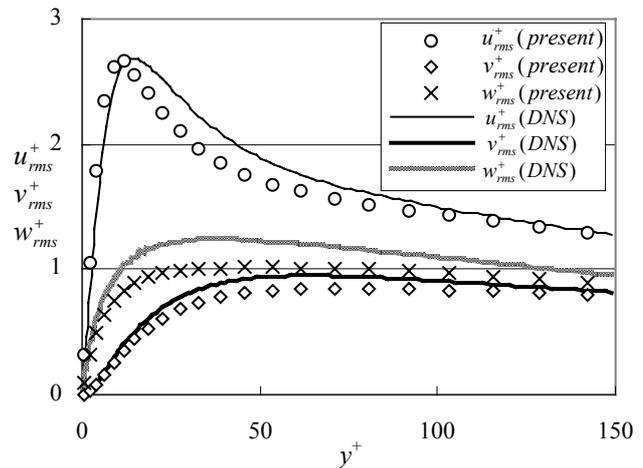


図-4 各方向乱れ強度分布

### (4) 計算条件

計算領域は、主流方向 $x$ 、壁垂直方向 $y$ 、およびスパン方向 $z$ にそれぞれ $(9H, H, H)$ とし、主流方向に周期境界条件を適用することで等間隔に並んだ栈粗度の流れ場を再現した。ここで、 $H$ は平均水深を表す。格子数はそれぞれ $(180, 48, 48)$ とし、 $z$ 方向には等間隔格子を用い、 $x$ 方向および $y$ 方向には $\tanh$ 関数で粗密をつけた不等間隔格子を用いた。主流方向およびスパン方向には周期境界条件、上部境界にはすべり条件、底面境界にはすべりなし条件を適用した。今回は実験で行ったフルード数0.25、相対粗度間隔 $L/k=10$ のケースをシミュレーションの対象とした。なお時間の離散化にはFractional Step法を、移流項の離散化には梶島の対流型補間法<sup>14)</sup>を用い、時間差分スキームには2次精度のAdams-Bashforth法、分子粘性項にはCrank-Nicolson法を用いた。また、無次元時間刻み $\Delta t=5.0 \times 10^{-4}$ で計算を行った。

## 4. 解析結果

### (1) 境界埋め込み法およびMTSのチャンネル乱流での精度検証

境界埋め込み法およびMTSモデルの精度検証のためにチャンネル乱流での計算を行った。計算領域を、主流方向 $x$ 、壁垂直方向 $y$ 、およびスパン方向 $z$ にそれぞれ $(3.84H, H, 1.92H)$ 、格子数はそれぞれ $(48, 48, 48)$ とし、 $x$ 方向および $z$ 方向には等間隔格子を用い、 $y$ 方向には $\tanh$ 関数で粗密をつけた不等間隔格子を用いた。 $H$ はチャンネル高さを示す。主流方向およびスパン方向には周期境界条件、上部と下部の壁面境界には境界埋め込み法によりすべりなし条件を適用した。摩擦レイノルズ数 $Re_\tau=300$ とし一定の圧力勾配を加えて流れを駆動させた。十分に流れを発達させて得られた統計量をDNS<sup>15)</sup>の結果と比較する。図-3に流れ方向の平均流速分布を、図-4に各方向速度成分 $u, v, w$ それぞれの乱れ強度を示す。平均流速分布、乱れ強度ともDNSの結果との対応は概ね良好で

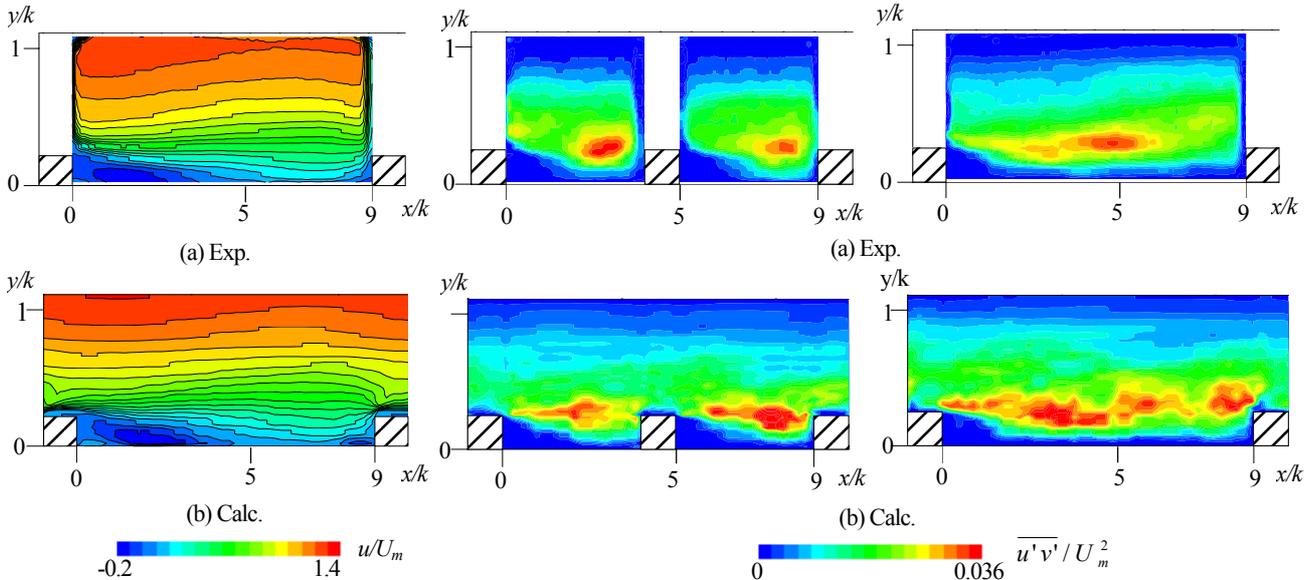


図-5 平均流速分布(Ls10)

図-6 レイノルズ応力分布(左: Ls05 右: Ls10)

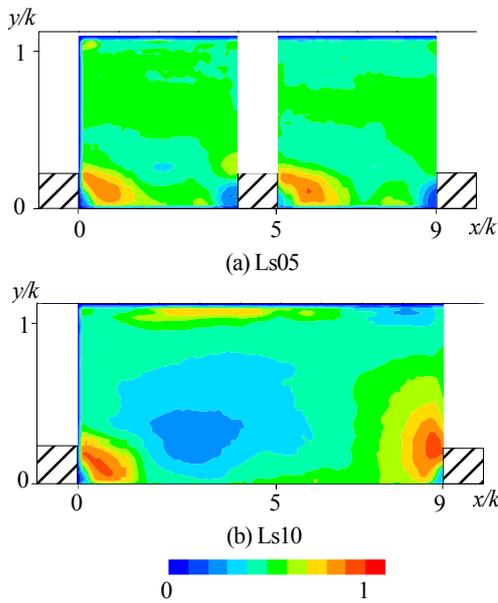


図-7 上昇流( $v>0$ )の発生頻度分布(Exp.)

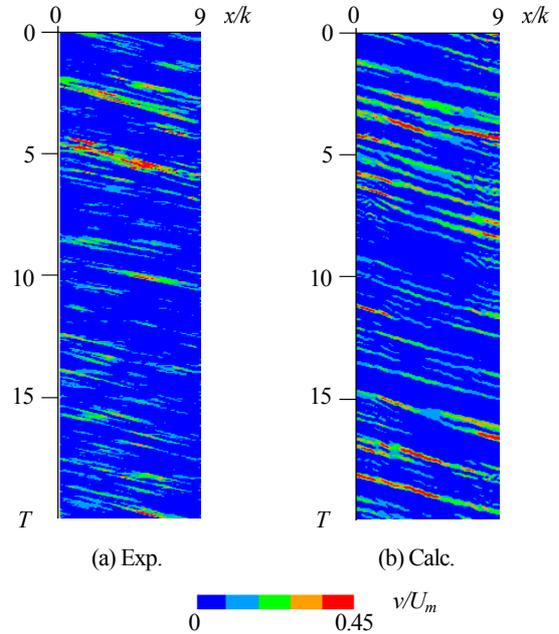


図-8 水面付近における流速鉛直成分の時空間プロット ( $T=tU_m/h_1$ )

あることがわかり、MTSおよび境界埋め込み法の導入が有効であることがわかる。

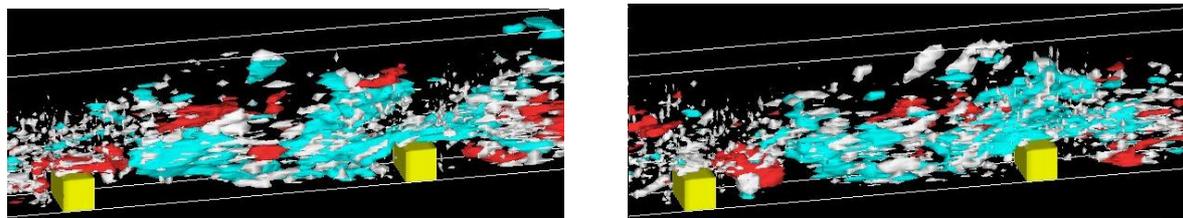
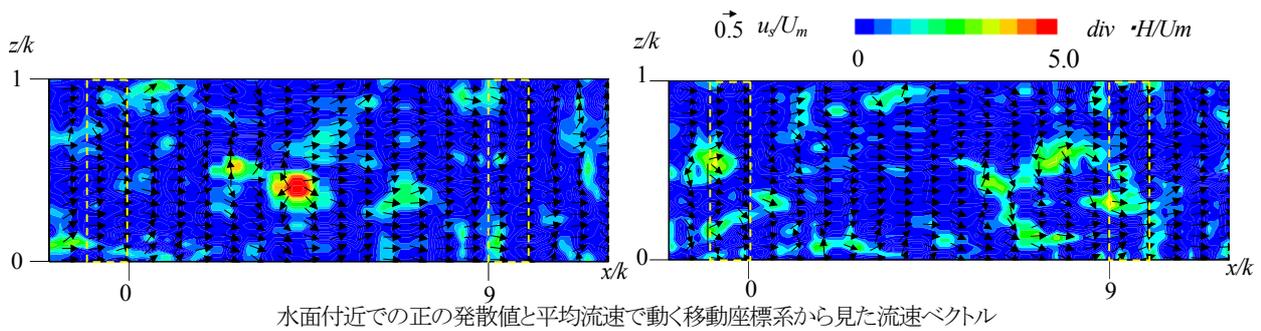
## (2) 平均流速分布およびレイノルズ応力分布の比較

次に栈粗度の流れ場の解析結果を示す。まず、図-5にLs10のケースの平均流速分布図を示す。PIVとLESによる全体的な平均流速分布の一致は良好であることがわかる。特に、 $x/k=5.0$ 付近での再付着あるいは粗度間で発生する再循環渦がLESでも再現できている。また、ここでは示さないが他のケースにおいても良好な結果が得られている。次にレイノルズ応力分布を図-6に示す。Ls05、Ls10両ケースともLESの方が少し大きめにでている所があるものの、どちらも粗度高さにおける自由せん断層で最大値を示すなど、分布形状はよく一致している。

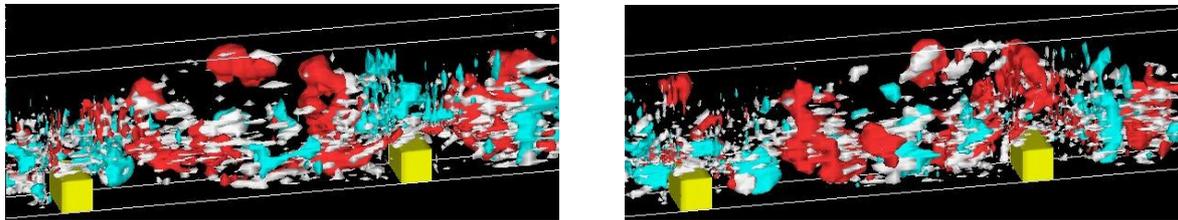
ただし、このレイノルズ応力分布図からもわかるように、粗度要素から水面に向かって放出されると考えられる剥離渦による影響は時間平均された統計量の分布には現われていない。

## (3) 上昇流の発生頻度

平均的な流れ場を見るだけでは間欠的に発生する剥離渦などの上昇流の特性を捉えることはできない。そこで、ここでは速度の鉛直成分に注目し、得られた全時系列データから $v>0$ となる発生頻度を求めた。得られた分布図を図-7に示す。まず、Ls05、Ls10のどちらとも上流側栈粗度後部で頻度が高くなっていることがわかる。これは、栈粗度間で発生する循環渦内の上向きの成分によるものである。また、下流側の栈粗度付近に着目すると、



速度 $u$ 成分(白:速度勾配テンソルの第二不変量 $Q=10$ の領域 赤:高速領域 青:低速領域)



速度 $v$ 成分(白:速度勾配テンソルの第二不変量 $Q=10$ の領域 赤:上昇流領域 青:下降流領域)

$T=0$

$T=0.5$

図-9 三次元流れ場の可視化( $T=tU_m/h_i$ )

上昇流の発生頻度はLs05ではあまり高くないのに対して、Ls10のケースは高い値を示している。これはLs10では棧粗度から剥離した流れが棧粗度間に再付着しそこから発生する上昇流や棧粗度を乗り越える流れによるものであると思われる。一方Ls05では流れが再付着せずに棧粗度間での流れは単なる循環流となっているために、主流域にその影響が及ぶような上昇流はあまり見られない。一方、水面付近の上昇流の特徴に注目してみると、特にLs10の場合に粗度要素の中間付近の水面近傍で発生頻度の局所的な増大が確認できる。これらは、粗度要素によって上向きに流向が変化した剥離上昇流の影響が水面に達したことを示しているものと考えられる。以上のように、棧粗度流れにおける上昇流の発生は、粗度間に再付着点がある場合(Ls10)の方が大きく、再付着点の存在が流れの鉛直方向の変動に重要な役割を果たしているものと思われる。

#### (4) 水面付近での鉛直方向速度成分

水路底面で発生した剥離渦の一部は継続的に上昇し、水面に到達する。この状況を確認するために、PIVでは水面に最も近い高さ( $y/h=0.9$ )、LESでは上面のすべり面付近の高さ( $y/H=0.98$ )における鉛直流速成分の時間変動を調べた。ここでは、時空間的な特徴を比較するために各々の高

さで流れ方向に検査線を想定し、その検査線上の流速の鉛直成分を時空間プロットした。検査線の長さは、各棧粗度の中央間の距離に等しくしている。Ls10のケースを対象として得られた時空間分布図を図-8に示す。この時空間プロットでは鉛直流速成分の正の成分のみを抽出して示してある。この図より、LESによる解析でもPIVとよく似た時空間プロットが得られていることがわかる。特に、間欠的に発生する強い上昇流の成分が検査線の長さ(図の横軸長さ)に渡ってほぼ一定の速度で移流している点が特徴的である。一方、上昇流の出現位置については、PIV、LESとも棧粗度間で発生(赤い部分)しているケースが多いように見受けられる。上昇流の発生頻度についても、LESはPIVの傾向をある程度捉えている。すなわち、比較的短い間隔でいくつかの上昇流がまとまって発生した後、多少の時間をおいて再び発生するような二重構造が見られる。これらの点に関しては今後のさらなる検討が必要である。

#### (5) LESによる三次元流れ場の可視化

ここでは、LESで得られた結果を用いて流れの構造について検討する。図-9は、上から水面における瞬間的な表面流速ベクトルと水面における発散値の分布、速度勾配テンソルの第二不変量(白色)と流れ方向成分の高速領域(赤色)

および低速領域(青色)を合成したものを、そして速度勾配テンソルの第2普遍量(白色)と強い上昇流の領域(赤色)および下降流の領域(青色)を合成したものを $T=0$ および $T=0.5$ の時刻で示す。ただし、このときの表面流速ベクトルは、水面での発散の様子をとらえやすいように平均流速で動く移動座標系から見たベクトル $u_s(=u-U_m)$ ,  $v_s(=v)$ で示す。速度勾配テンソルの第2普遍量 $Q$ のプロットでは、 $Q=10$ の等値面を描画しているが、これは三次元的な剥離渦の領域にほぼ対応する。図-9に示したのは、その剥離渦が水面にまで達している瞬間を捉えたものである。ここで、まず注目すべき点は速度 $u$ 成分の低速領域と渦のある領域がほぼ一致している点、さらにはこの領域が速度 $v$ の高速領域つまり上昇流の発生している領域とも一致している点である。このことは、運動量の低い剥離渦が底面からの強い上昇流により水面近くまで巻き上げられていることを示唆している。図-9に示したよりも前の瞬間の三次元プロットなどを調べてみると、これらの上昇流は特に栈粗度後部の再付着点付近から発生している様子が確認できた。次に上流側の栈粗度に注目すると、時間の経過と共に上流側から高速流体が底面に吹き付けられている様子が確認できる。アニメーション化した3次元プロットなどからは、その瞬間に栈粗度間に存在する低速流体が押し上げられて上昇流となり浮上する状況が多く見られた。一方、剥離渦が水面に達した付近の水表面では強い正の発散値が見られる。これはベクトルプロットからも確認できる。このことから、水表面で見られる湧出しが底面付近で発生した剥離渦の上昇とその水面への衝突によって発生していること、あるいは衝突直前の剥離渦は斜め上方に傾いた軸を有していることなどがわかる。また、 $T=0.5$ においては水面での高発散域は流下とともに減衰している様子をとらえている。

## 5. あとがき

本研究では河床底面で発生する剥離渦が水面変動に及ぼす影響について基本的な特性を調べるために、単純化した粗面である栈粗度を対象として実験および数値解析による検討を行った。その結果、LESによる解析は実験値をうまく説明できることを示した。ただ、実験では二次元平面におけるデータしか得られないために、内部構造についてはLESの結果を用いた検討を行った。今後は、境界埋め込み法の特徴をさらに生かすためにさらに複雑な底面形状で、水面変動が顕著となる高フルード数の流れ場を対象として実験的、解析的検討を進める予定である。

謝辞：本研究は、平成17,18年度科学研究費補助金（基盤研究(C)、「河床・河岸の状態が二次元水面変動パターンに及ぼす影響に関する研究」、研究代表者：藤田一郎、課題番号：17560459）の援助のもとに行われた。

## 参考文献

- 1) Jahne, B. and Haußecker, H.: Air water gas exchange, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol.30, pp.443-468, 1998.
- 2) 角野ら：水表面での気体輸送に関する研究の最新の動向, 土木学会論文集, No.656/II-52, pp.269-287, 2000.
- 3) 藤田一郎, 河村三郎：ビデオ画像解析による河川表面流計測の試み, 水工学論文集, Vol.38, pp.733-738, 1994.
- 4) 藤田一郎他：ITV施設を利用した河川流の画像計測, 河川技術論文集, Vol.8, pp.459-464, 2002.
- 5) 藤田一郎, 椿涼太：時空間画像を利用した河川表面波紋の移流速度計測, 河川技術論文集, Vol.9, pp.55-60, 2003.
- 6) Scardovelli, R. and Zaleski, S.: Direct numerical simulation of free-surface and interfacial flow, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol.31, pp.567-603, 1999.
- 7) Shen, L. and Yue, D. K. P.: Large-eddy simulation of free-surface turbulence, *J. Fluid Mech.*, Vol.440, pp.75-116, 2001.
- 8) Ikeda, T. and Durbin, P.A.: Direct simulations of a rough-wall channel flow, Report No.TF-81, *Flow Physics and Combustion Division*, Stanford University, 2002.
- 9) Xiaohui, S. and Li, C.W.: Large eddy simulation of free surface turbulent flow in partly vegetated open channels, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol.39, pp.919-937, 2002.
- 10) Peskin, C.S.: Numerical analysis of blood flow in the heart, *Journal of Computational Physics*, 25, pp.220-252, 1997.
- 11) Fadln, E.A., Verzicco, R., Orlandi, P. and Mohd-Yusof, J.: Combined Immersed-Boundary Finite-Difference Methods for Three-Dimensional Complex Flow Simulations, *Journal of Computational Physics*, 161-1, pp.35-60, 2000.
- 12) Germano, M., Piomelli, U., Moin, P. and Cabot, W. H.: A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model, *Phys. Fluids*, A3, 7, pp. 1760-1765, 1991.
- 13) 稲垣昌英, 近藤継男, 長野靖尚：実用的なLESのための混合時間スケールSGSモデル, 日本機械学会論文集, B68, 673, pp.2572-2579, 2002.
- 14) 梶島岳夫：対流項の差分形式とその保存性, 日本機械学会論文集, B60, 574, pp.2058-2063, 1994.
- 15) 東京大学熱流体工学研究室 <http://www.thtlab.t.u-tokyo.ac.jp/>

(2006. 9. 30受付)