

# 風による自由水面シアアが 開水路流れの組織乱流渦構造に与える影響

WIND EFFECTS OF FREE-SURFACE SHEAR ON COHERENT TURBULENCE  
VORTICES IN OPEN-CHANNEL FLOWS

山上路生<sup>1</sup>・禰津家久<sup>2</sup>  
Michio SANJOU and Iehisa NEZU

<sup>1</sup>正会員 博(工) 京都大学助教 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>フェロー 工博 京都大学教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (同上)

When wind is generated over the free-surface flows such as actual rivers and artificial channels, a significant velocity shear is generated near the air/water interface as well as boundary layers on the wall. It is inferred that coherent turbulence structure such as hairpin vortex in the near-wall region is also influenced by these interfacial fluctuations. However, a lot of uncertainties remain about the wind effects on the wall turbulence structure. So, PIV measurements were conducted in open-channel flows under the wind flows in order to reveal the effects of interfacial free-surface condition on turbulence structure in the inner and outer layers.

**Key Words :** free-surface velocity shear, coherent structure, hairpin vortex, PIV measurement

## 1. はじめに

Theodorsen(1952)<sup>1)</sup>は乱流境界層に組織乱流構造が存在することを始めて指摘し, 対称形状の脚部をもつヘアピン馬蹄形渦モデルを提案した. Smith(1984)<sup>2)</sup>は水素気泡法によって組織渦を観察し, その挙動特性をヘアピン渦モデルによって説明した. 外層における高速流の可視化は困難なため, 初期の研究の多くが低レイノルズ数流れの内層を対象とした. このため外層における組織渦構造については未解明点が多い. Head & Bandyopadhyay (1981)<sup>3)</sup>はフレームレート1500コマ/秒の高速度カメラを用いて風洞気流の可視化実験を行って高レイノルズ数流れの組織構造の定性的な解明を試みた. その結果, レイノルズ数は組織構造の形成に大きな影響を及ぼすことがわかった. 低レイノルズ数の流れでは微小擾乱は馬蹄形渦やループ渦へと成長する一方で, 高レイノルズ数下ではこれらの渦構造は大きく歪められてヘアピン渦へ変化することがわかった. このヘアピン渦の形成は壁面から上昇する低速ストリークと大きな関係があり, 最近では浮遊砂や掃流砂の輸送現象に影響を与えることが解明されつつある.

この10年間で可視化技術はハードウェア的にもソフトウェア的にも大きく進展し, 内層だけでなく外層におい

ても高精度な定量解析が可能となった. Adrianら(2000)<sup>4)</sup>は乱流境界層でPIV計測を行い, ヘアピン渦が流下方向に複数個並んで群体運動するパケット構造を発見し, 注目される. Tomkins&Adrian(2003)<sup>5)</sup>は対数領域を中心に複数の水平面をPIVで計測して, 乱流境界層の3次元構造を調べるとともにAdrianらのパケットモデルの妥当性を示した. Hurtherら(2007)<sup>6)</sup>は開水路乱流に上述のAdrian法を適用して, 外層にはせん断力による大規模な組織構造が発生し乱れエネルギー輸送に大きな役割をもつことを報告している.

一方, 組織渦構造は壁面だけでなく流速シアアが存在すれば自由水面にも発生することが複数の既往研究で指摘されている. 日野ら(1985)<sup>7)</sup>は吹送流による自由水面領域の境界層が壁面境界層と類似した乱流構造をもつことに着目して, 水素気泡法とカラーシート法を用いて自由水面下における組織構造を定性的に説明するとともに層流から乱流への遷移領域における3次元渦モデルを提案した. Rashidi & Banerjee (1990)<sup>8)</sup>は風によって自由水面に強制的に流速シアアが与えられた開水路流れを扱い, 日野らと同様に自由水面領域でも壁面境界層と同様のストリーク構造が存在することを明らかにした. これらの既往研究はストリーク構造の発生が境界面の種類よりもむしろ流速シアアと重要な関係をもつことを意味

表-1 実験条件

case	H(cm)	$U_{a,max}$ (m/s)	$U_m$ (cm/s)	$U_*$ (cm/s)	$H_s$ (cm)	$I_b$	surface condition
H10	4	0	20.6	1.20	—	1/2500	no-wind
H11		1.9	20.9	1.24	—	1/2500	smooth
H12		3.9	21.9	1.22	0.80	1/2500	ripple

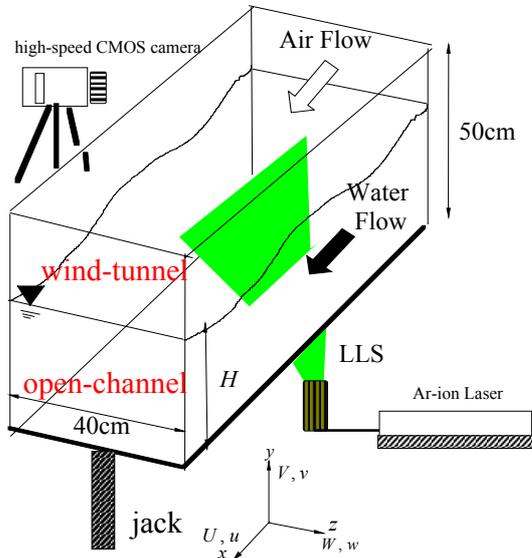


図-1 実験装置

している。自由水面では液相と気相間の物質輸送や運動量交換が行われる。これらは水域環境問題にとって重要な研究テーマでもあるが、自由水面に流速シアをともなう開水路流れにおける組織乱流構造については上述の研究以後、大きな研究進展は残念ながらみられない。

このような研究状況下で、本研究では水面上に風が吹く開水路流れに着目し、組織乱流構造やエネルギー輸送特性について風がない通常の開水路流れとの定量比較を行う。さらに底面シアによる乱流構造と自由水面シアとの相互作用についても考察を行う。自然河川ではこのような底面と水面の2重シア構造はよくみられる現象で、近年の異常気象による暴風雨や台風が頻発する現状では、重要な研究トピックと考えている。

## 2. 実験方法と解析手法

本実験の計測システムを図-1に示す。使用水路は全長10m、幅40cm、高さ50cmの総ガラス製であり、上流側の大型ファンで水流上に風を発生させることが可能である。水流部はインバータモータによって流量の自動制御が可能である。 $x, y$  および  $z$  はそれぞれ、流下方向、鉛直方向および横断方向である。 $U, V$  および  $W$  は各方向における時間平均流速、 $u, v$  および  $w$  はそれぞれ乱れ変動成分を示す。 $H$  は平均水深である。計測部は水路上流端より約7m下流で行われた。水路センターラインに

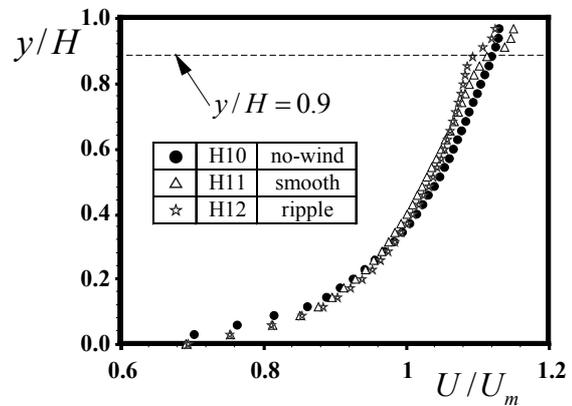


図-2 時間平均流速分布

$$U^+ \equiv U/U_*$$

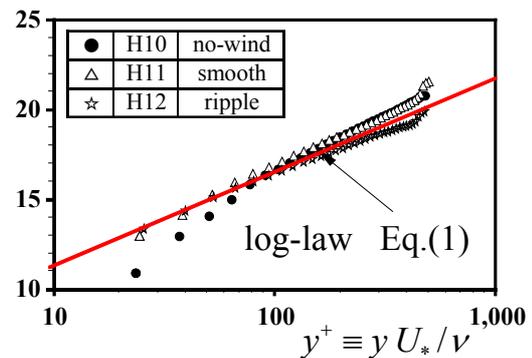


図-3 無次元流速分布

沿って出力2Wの連続YAGレーザーライトシート(LLS)を水路に垂直に水路底から照射した。LLS上のポリスチレン粒子(径 $100\mu\text{m}$ )を水路側方に設置した高速度CMOSカメラ(Detect製)によって撮影した。100Hzのフレームレートで2画像を連続撮影し、得られたペア画像からPIVアルゴリズムによって主流方向と鉛直方向の瞬間流速成分( $\tilde{u}, \tilde{v}$ )を50Hzのサンプリング間隔で求めた。

表-1は実験条件である。水深 $H=4\text{cm}$ の開水路流れをベースケースとして風洞部の断面最大風速 $U_{a,max}$ を0, 1.9および3.9m/sの3通りに変化させた。水面状態はケースH10が無風状態(no-wind)、ケースH11が水面変動が無視できる滑面状態(smooth)およびケースH12が3次元的小波高を有するさざ波状態(ripple)である。 $U_m$ は断面平均流速、 $U_*$ は底面における水流の摩擦速度である。有義波高 $H_s$ は容量式波高計で計測した。 $I_b$ は水路床勾配である。

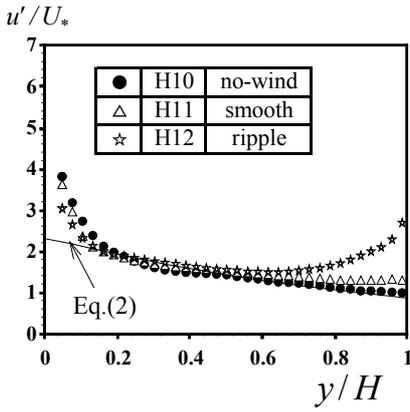


図-4 主流方向乱れ強度

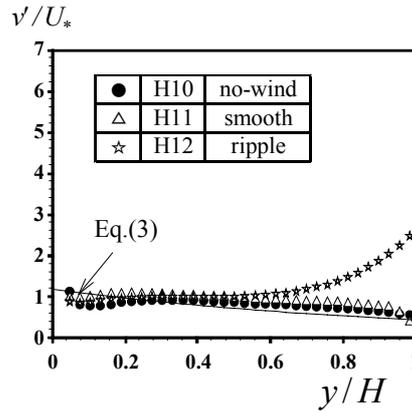


図-5 鉛直方向乱れ強度

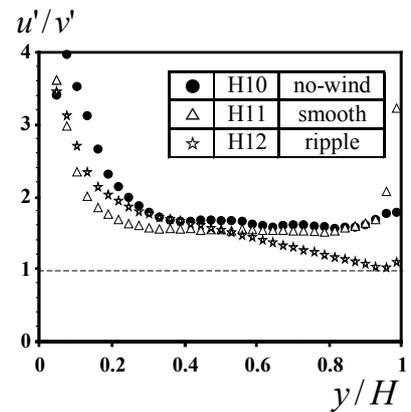


図-6 乱れ強度比の分布

### 3. 実験結果

#### (1) 平均流構造

図-2は平均流速分布を示す。無風の標準開水路ケースでは底面から自由水面に向かって単調に増加するのに対して、風が存在する2ケースでは  $y/H > 0.9$  の自由水面領域で流速が急増する。これは風から水流に運動量が供給されることを意味している。図-3は内部変数で無次元化した平均流速分布である。いずれのケースも内層では式(1)の対数則に従う対数領域が存在し、これより摩擦速度を評価した。

$$U^+ = \frac{1}{\kappa} \ln y^+ + A \quad (1)$$

ここで  $\kappa = 0.412$  および  $A = 5.29$  である。外層ではno-windケース(H10)でwakeがみられる。一方でsmoothケース(H11)とrippleケース(H12)では表層近傍で流速が急増しており、底面と同様に水面でも流速シアが存在し、二重の流速シアが発生することが確認できる。風が吹く2ケースでは底面での流速の落ち込みがno-windケースよりも小さいが、これは風からの運動量供給によって底面の流速が増加したことが原因と考えられる。

#### (2) 乱れ統計量の比較

図-4および図-5はそれぞれ主流方向および鉛直方向の乱れ強度分布である。図中には比較のため、次式で表される開水路流れの普遍関数<sup>9)</sup>も示した。

$$u'/U_* = 2.30 \exp(-y/H) \quad (2)$$

$$v'/U_* = 1.27 \exp(-y/H) \quad (3)$$

no-windケース(H10)については、壁面から水面に向かって乱れ強度が減衰しており、普遍関数と概ね一致する。風速の増加とともに水面付近から開水路ケースとのずれが顕著になる。smoothケースでは鉛直方向乱れ強度  $v'$  は開水路との差異は小さいが、主流方向乱れ強度  $u'$  の差異は  $y/H > 0.6$  で明確となる。またrippleケースでは  $u'$  および  $v'$  の双方ともに  $y/H > 0.4$  の領域で大きく

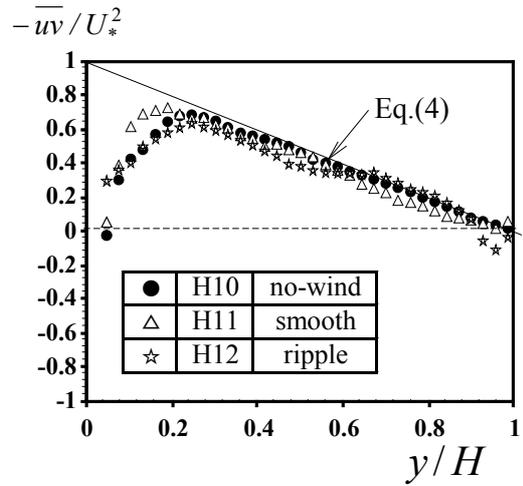


図-7 レイノルズ応力分布

増加する。このような水空気界面における乱れ増加特性は瀬津ら(2003)<sup>10)</sup>のLDA計測結果とも一致する。

乱れの非等方性を考察するために図-6に  $u'/v'$  の分布を示す。no-windケースでは全水深領域で  $u' > v'$  となる。特に壁面では鉛直乱れの減衰が大きいためこの傾向が顕著である。一方でsmoothケースでは水・空気界面で主流速の増加が鉛直流速よりも大きいためこの特性が特に目立つ。rippleケースでは波の上下運動によって  $v'$  が増加するため水面に向かって  $u'/v'$  が減少して、水空気界面では  $u' \cong v'$  となり等方的な乱れ構造が観察される。

図-7は無次元レイノルズ応力分布を示す。図中には式(4)の理論分布式も示した。

$$-\overline{uv}/U_*^2 = 1 - y/H \quad (4)$$

いずれのケースも底面近傍でピークをもち、水面側に減衰する。特にno-windケースでは水面まで直線分布に従う。smoothケースでは水面極近傍で直線分布よりも上方へシフトするが、これは図-2の流速分布で示したように流速シアの増加によるものと考えられる。rippleケースでは  $y/H > 0.9$  で負値をとり既往研究<sup>11)</sup>と一致す

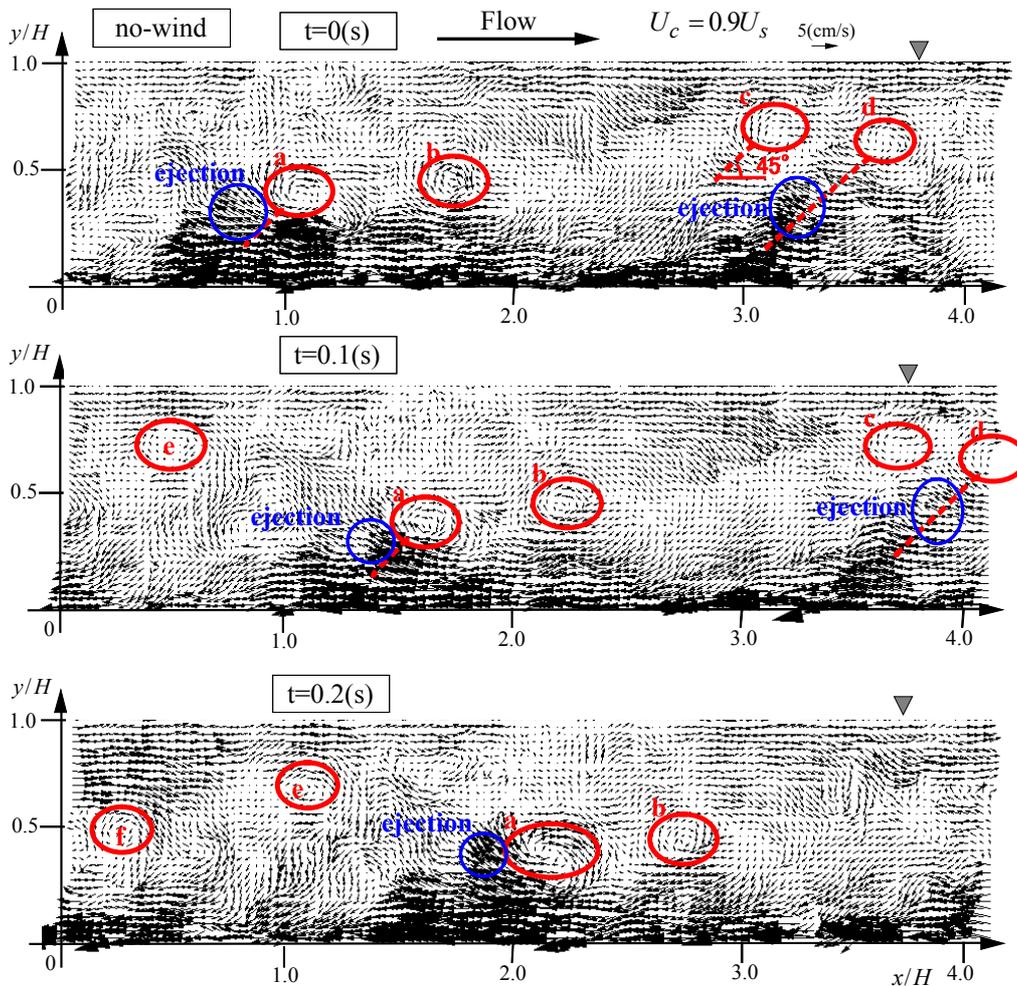


図-8 瞬間ベクトル分布 (no-windケース)

る。位相解析の結果図面は本研究では省略するが、これは自由水面領域においてクレストの位相を中心に流速勾配  $\partial U / \partial y$  が負となることに起因する。

### (3) 瞬間ベクトル構造

no-windケースにおけるヘアピン渦とパケット構造の抽出を行うために、図-8にAdrianら<sup>4)</sup>の方法に従って基準速度  $U_c = 0.9U_s$  を差し引いた相対座標系における瞬間ベクトルの一例を0.1秒の時間間隔で示す。基準速度は底面のヘアピン渦が視覚的にわかるような値を設定した。図-8の理解を助けるために図-9にAdrianら<sup>4)</sup>が提案したヘアピン渦の3次元構造のイメージを示す。まず図-8の  $t=0$  sに注目すると、 $x/H = 0.5 \sim 1$  および  $x/H = 3.0 \sim 3.5$  に底面側で強いエジェクションがみられ、その下流側の上流45度の方向に渦構造aおよびdが観察される。これらは図-9に示すヘアピン渦のレッグ部（エジェクション領域）とヘッド部（渦領域）を意味している。渦bおよびcはヘッドのみであるが、LLSがこれらの渦の中央ラインから横断方向に少しずれた鉛直面を照射したためと思われる。4つの渦a, b, cおよびdは時間とともに下流に輸送される。特にaとbおよびcとdは近

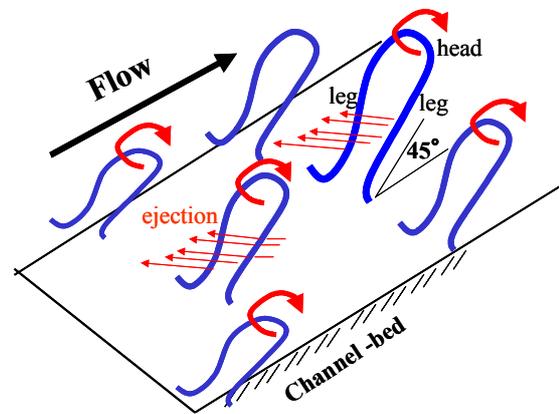


図-9 ヘアピン渦の3次元イメージ(Adrianら<sup>4)</sup>による)

接しながら輸送されるので、ヘアピンが群体化したパケットを構成していることがわかる。このようにPIVによる可視化からヘアピン渦とパケット構造を捉えることができた。

図-10(a)はsmoothケースの瞬間ベクトル分布の一例である。  $U_c = 0.8U_s$  であり、渦aおよびbが観察される。特にbの上流側には強いエジェクションが伴うことからヘアピン渦のヘッド部であることがわかる。風による流

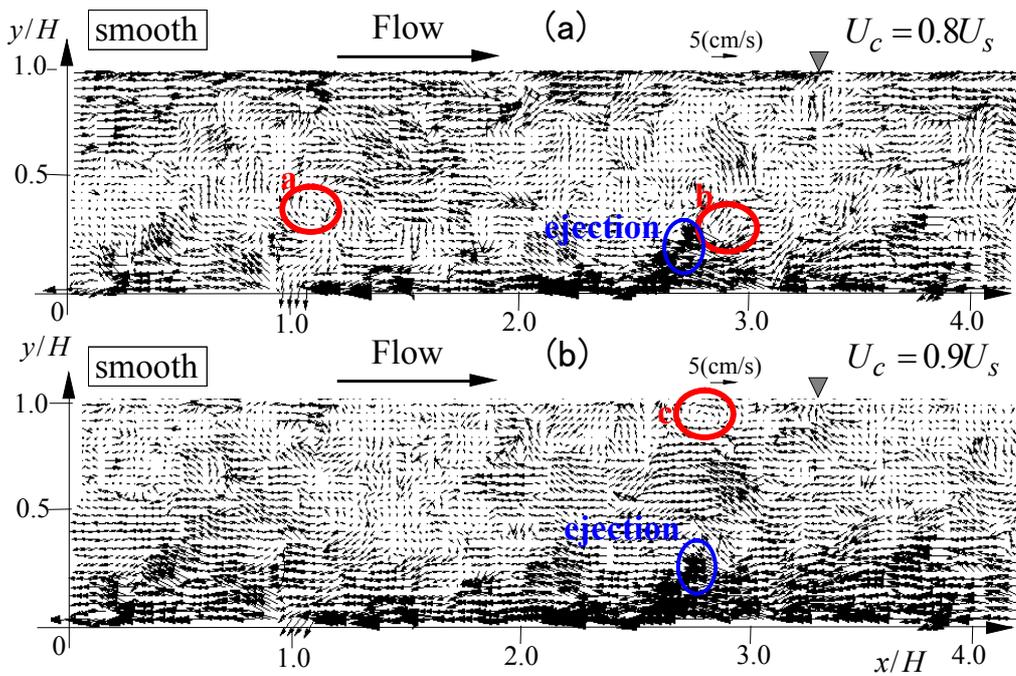


図-10 瞬間ベクトル分布 (smoothケース)

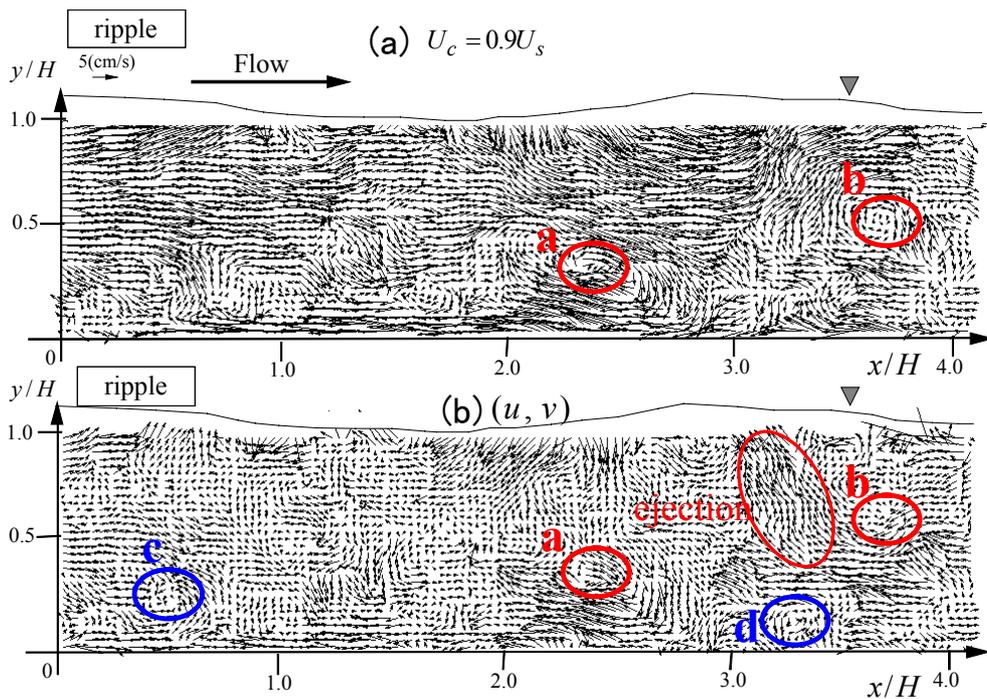


図-11 瞬間ベクトル分布 (rippleケース) , a : 相対座標表示, b : 変動速度ベクトル表示

速シアの存在下でも底面領域ではno-windケースと同様にヘアピン渦が発生するといえる。一方で図-10(b)は同一時刻における $U_c = 0.9U_s$ の結果である。(b)図では自由水面近傍に渦構造cが観察される。この渦が水空気界面の流速シアによって発生したものか、底面で発生したヘアピン渦が上昇したものかは現段階では決定できないが、日野ら<sup>7)</sup>が指摘した水面領域における組織的な渦構造に対応する。

図-11(a)および(b)はそれぞれrippleケースにおける $U_c = 0.9U_s$ の相対表示と変動ベクトル表示 $(u, v)$ の一例である。底面付近でエジェクションとヘアピン渦aが観察される。また半水深領域( $y/H = 0.5$ )でも強いエジェクションを伴う渦構造bがみられる。さらに図(b)では反時計回りの渦cおよびdが観察される。これらはno-windケースではほとんどみられず波動と関連があるものと思われる。

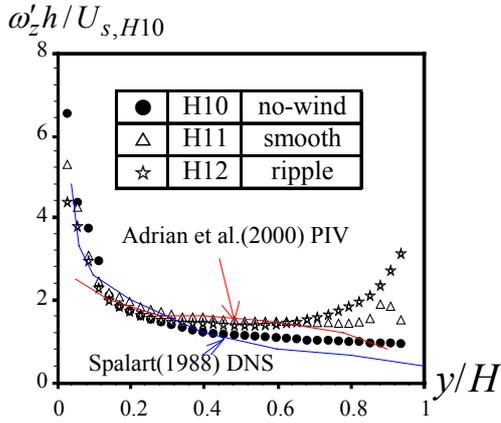


図-12 渦度強度分布

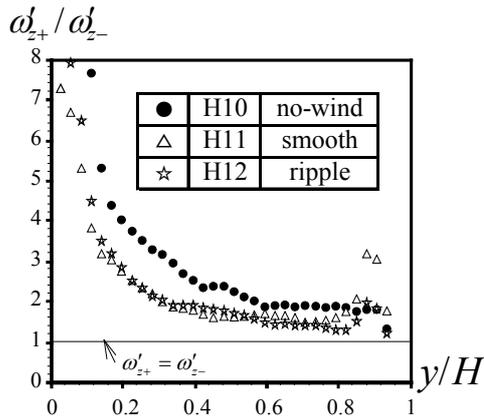


図-13 渦度の回転方向比

#### (4) 瞬間渦度強度

図-12は瞬間渦度の強度分布を示す。渦度強度  $\omega'_z$  は次のように定義する。

$$\omega'_z \equiv \sqrt{(\tilde{\omega}_z - \Omega_z)^2} \quad (5)$$

ここで  $\tilde{\omega}_z$  は横断軸をもつ瞬間渦度および  $\Omega_z$  はその時間平均値である。no-wind ケース(H10)の比較のため、Adrianら<sup>4)</sup>と Spalart(1988)<sup>12)</sup>の境界層における結果も表示した。壁面近傍で大きな値をもち水面に向かって減少する。これは乱れ強度と類似の傾向である。既往研究の結果と同様の分布をもつことがわかる。底面における大きな瞬間渦度は、エジェクションやスweepと関連するループ渦やヘアピン渦の生成・輸送を意味している。同時にこれらが底面で生成され外層にかけて拡散・減衰することも本図から推察される。一方で、風速が増加するとno-wind ケースと比べて水面付近でも瞬間渦度が大きくなることがわかる。これは乱れ強度の分布ともよく対応している。このことから水空気界面においても渦度の生成が行われることがわかる。

図-13は時計回りの渦度 ( $\omega'_z > 0$ ) の強度  $\omega'_{z+}$  と反時計回り ( $\omega'_z < 0$ ) の渦度強度  $\omega'_{z-}$  を比較したものである。no-wind ケースでは  $\omega'_{z+}$  が全水深領域で卓越しておりへ

ヘアピン渦と同一方向回転の渦度が卓越している。smooth ケースでは界面付近で  $\omega'_{z+}$  が  $\omega'_{z-}$  に対して急激に大きくなる。風速が増加すると  $0.1 < y/H < 0.8$  の領域では  $\omega'_{z-}$  の影響が大きくなる。これは界面からの強い下降流や図-11(b)で示したような反時計回りの渦によりヘアピン渦を構成するエジェクションが弱められて、ヘアピン渦の発達抑制された結果と考えられる。

#### 4. おわりに

本研究は水空気界面に流速シアを有する開水路流れにおける組織乱流渦、すなわちヘアピン渦に与える影響を考察したものである。このような二重シア構造をもつ流れでは組織渦はそれぞれのシアで発生し、それらが組み合わさった組織乱流構造を構成する。特にripple ケースでは波の影響によってヘアピン渦の発達が抑制される可能性が示唆された。今後はさらに大きな波高ケースを計測するとともに波と乱れの分離解析を行い、二重シア流れの渦モデルを構築する予定である。

#### 参考文献

- 1) Theodorsen, T., Mechanism of turbulence, *Proc. 2<sup>nd</sup> Midwestern Conf. on Fluid Mech.*, pp.1-19, 1952.
- 2) Smith, C.R., A synthesized model of the near-wall behavior in turbulent boundary layers. *Proc. 8<sup>th</sup> Symposium on Turbulence*, University of Missouri-Rolla, pp. 299-325, 1984.
- 3) Head, M.R. & Bandyopadhyay, P., New aspects of turbulent boundary-layer structure, *J. of Fluid Mech.*, 107, pp.297-338, 1981.
- 4) Adrian, R.J., Meinhart, C.D. & Tomkins, C.D., Vortex organization in the outer region of the turbulent boundary layer, *J. of Fluid Mech.*, 422, pp.1-54, 2000.
- 5) Tomkins, C.D. & Adrian, R.J., Spanwise structure and scale growth in turbulent boundary layers, *J. of Fluid Mech.*, 490, pp.37-74, 2003.
- 6) Hurther, D., Lemmin, U. & Terray, E.A., Turbulent transport in the outer region of rough-wall open-channel flows: the contribution of large coherent shear stress structures (LC3S), *J. of Fluid Mech.*, 574, pp.465-493, 2007.
- 7) 日野幹夫・灘岡和夫・須見徹太郎：吹送流の組織的構造の可視化，土木学会論文集，第357号/II-3，pp.75-80, 1985.
- 8) Rashidi, M. & Banerjee, B., The effect of boundary conditions and shear rate on streak formation and breakdown in turbulent channel flows, *Phys. Fluids*, A3(10), pp.1827-1838, 1990.
- 9) Nezu, I. and Nakagawa, H., *Turbulence in Open-Channel Flows*, IAHR- Monograph, Balkema, 1993
- 10) 瀬津家久・吉田圭介・牛島省：水面上に風シアが存在する開水路流れ場における水・空気層乱流構造に関する基礎的研究，土木学会論文集，第733号/II-63，pp.67-76, 2003.
- 11) Cheung, T. K. and Street, R.L., The turbulent layer in the water at an air-water interface, *J. of Fluid Mech.*, 194, pp. 133-151, 1988.
- 12) Spalart, P.R., Direct numerical simulation of a turbulent boundary layer up to  $Re = 1410$ , *J. of Fluid Mech.*, 187, pp.61-98, 1988.

(2008. 9. 30受付)