

速度場と水面変動の同時計測システムを用いた 粗面乱流場における水面波形の 移流特性に関する一考察

ADVECTION FEATURES OF WATER SURFACE WAVE IN ROUGH WALL
TURBULENT OPEN-CHANNEL USING SIMULTANEOUS MEASUREMENT
SYSTEM OF VELOCITY FIELD AND SURFACE FLUCTUATION

古谷勇樹¹・藤田一郎²
Yuki FURUTANI and Ichiro FUJITA

¹ 学生会員 神戸大学大学院工学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

² 正会員 神戸大学大学院工学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

It is commonly observed that open-channel water surface exhibits a variety of complicated patterns as the increase of the flow. In the actual river flow conditions, such a pattern can be utilized as a sort of surface flow indicator because the pattern is convected in the downstream direction with the surface flow in flood flow condition in most cases. However, such a surface flow feature has not been investigated in detail in the laboratory scale experiment especially with regard to the velocity field just beneath the water surface. Therefore we developed a simultaneous measurement system of water surface fluctuation and velocity distribution in longitudinal vertical plane and compare the advection feature of the surface flow pattern generated by rough-wall turbulence. It was made clear that the surface patterns are convected with speed almost comparable to the surface flow within the examined hydraulic conditions and the surface configuration is closely related to the large-scale vortices impinging on the surface from below.

Key Words: rough-wall turbulence, surface wave, PTV, wave advection, open-channel turbulence, STIV

1. はじめに

開水路の流れは管水路流れとは異なって気液境界面を有するため、流況に応じて様々な水面の様相を呈する。例えば、流体中に橋脚のような物体が存在すればその後流によって水面変動が生じ、風速が大きくなれば静止状態の水面にも重力波が現れる。このような直接的な外的要因がない場合でも、流れが乱流状態になれば河床境界面等からの影響が水面にまで及び、より複雑な水面変動が発生する。その傾向は、河床面粗度の影響が強い場合にさらに強まる。実河川を対象に考えれば、洪水時に特に顕著となる水面の凹凸は粗面乱流場において底面粗度の影響を受けた結果現れたものと解釈できる。

一方、粗面乱流場に関する研究は乱流境界層を対象として古くから行われており、いわば古典的とも言えるものであるが^{1,2)}、近年のPIV (Particle Image Velocimetry) などの画像解析計測技術の発達に伴い、乱流構造や大規模組織渦等に関する研究が進みレビューも行われている^{3,4)}。また、乱流構造と水面変動に関する研究も行われ、水面の存在が乱流構造に及ぼす影響などが検討されている⁵⁻¹¹⁾。しかしながら、水面に発生した凹凸(以降、水面波紋と称する)の

特性に関する検討は滑面乱流を対象とした研究¹²⁾を除けばほとんど行われていない。

水面波紋の実河川レベルの応用としては、洪水時における表面流への追従性が検討され、流木などの流下物の速度との対応が経験的に良好なことから、非接触型の流速計測法に利用されている¹³⁻¹⁵⁾。しかしながら、すべての水面波紋が表面流に追従するわけでもないため、表面流追従波紋の発生条件に関する検討が必要である。そこで、本研究ではまず実験室レベルのレイノルズ数において、粗面乱流場で発生する水面波紋の移流特性に関する詳細な検討を行った。

2. 実験装置および画像計測システム

実験には、図-1に示す長さ約6m、幅0.3mの全面ガラス張りの循環式開水路を用いた。流量は電磁流量計で計測し、水位は下流端のセキで調整した。河床面の粗度要素としては半径1.5cmの木製の半球を用い、千鳥状に密に底面に配置した。半球粗度は木製であるため、水中に放置すると水分を吸収して膨張し、粗面から剥がれることがあった。そこで、個々の半球をペンキ塗装し、仕上げにニス塗布す

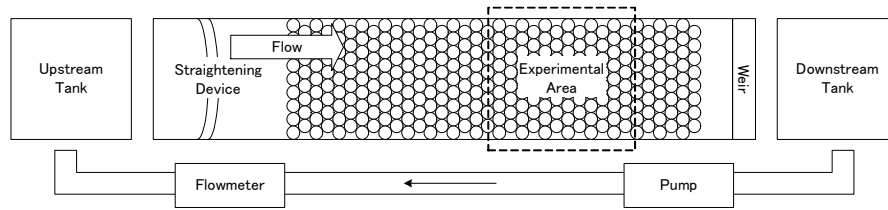


図-1 実験装置

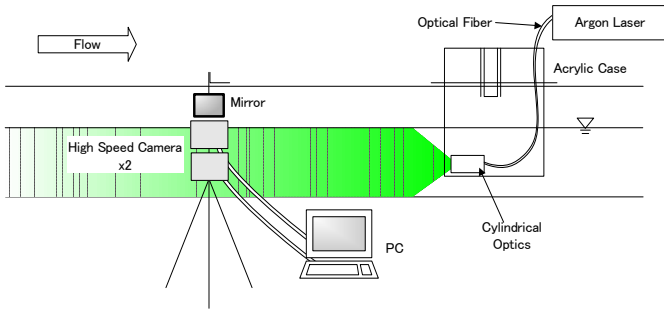
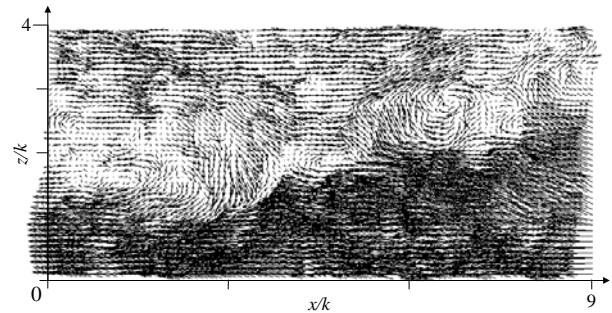


図-2 画像計測システム

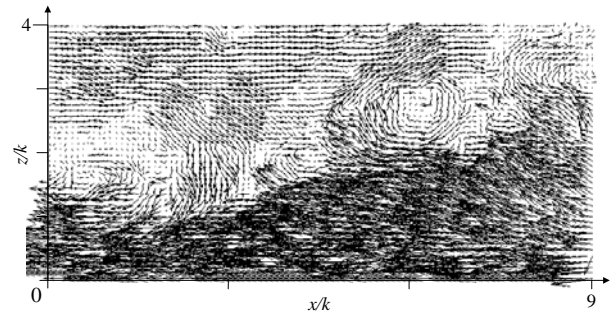
ることで水分膨張を抑えた。

画像計測システムの概略を図-2 に示す。計測の対象は水路中央の縦断面とし、アルゴンイオンレーザーからのレーザー光を光ファイバを通してシリンドリカルレンズに導き、そこで光膜を生成させた。水面変動が顕著でない場合には水面の上方からの照射で問題ないが、本研究のように水面変形が無視できない場合には光膜が大きく揺らぎ、画像計測は行えない。そこで、シリンドリカルレンズが中にちょうど入る大きさの縦長のケースを作成し、それを計測断面の下流側に水没した状態で固定させた。このケースの底面に上流に向けてシリンドリカルレンズを設置することで、レーザー光膜を水の内部から均等に縦断面内に照射することができるようになった。撮影の様子を図-2 に示す。トレーサには、直径が約 $50\mu\text{m}$ のナイロン破碎粒子を用いた。

可視化された縦断面画像の撮影にはデジタルハイスピードカメラ（ディテクト製，HAS500）を用いた。撮影画素数は最大で 1024×992 で、 500fps での撮影が可能である。今回の実験での1画素サイズは約 0.15mm である。水面変動の計測には、もう1台のHAS500を用い、水面近くに固定したミラーに映った光膜を横から撮影した。光膜を若干斜め上から見る撮影アングルとなっているため、光膜と水面が交差するラインが変動する様子を良好に捉えることができる。2台のハイスピードカメラは同期をとっているため、縦断面内の二次元流速場と水面変動の同時計測が可能となった。画像の取得は通常の場合では連続サンプリングだが、例えば 500fps の場合には画像キャプチャボードに搭載したメモリの制約から4秒程度のサンプリングしか行えない。このような場合には *frame straddling* のモードで計測を行った。すなわち、連続する画像ペアの間隔は高速 (ex. 500fps) にして画像間の粒子移動量を小



(a) PIV



(b) PTV

図-3 画像計測法の比較(表面流速 $\times 0.9$ の移動座標からみた瞬間値の結果、PTV は格子点に再配分後)

さく保つが、画像ペア間の時間間隔は長め (ex. 100fps) にとって相対的に長い計測時間を確保するようにした。この計測モードは、外部同期用のパルス信号をパルスジェネレータで発生させ、それをマスター側のキャプチャボードに送ることによって実現させた。

3. 画像解析手法

(1) 流れ場の計測

通常、本研究が対象とするような粒子画像の画像解析では、PIVを使うことが一般的である。PIVは境界面のない流体内部の解析では問題ないが、壁面や水面近傍のように流体とは異なる境界が存在すると計測精度が低下する。本研究では特に水面近傍の速度場に注目するために、PIVではなくPTV(Particle Tracking Velocimetry)を用いて解析を行った。PTVのアルゴリズムはいくつかあるが、ここでは一般的な二値化相関法(BICC: Binary Image Cross Correlation method)¹⁶⁾を用いた。また、粒子画

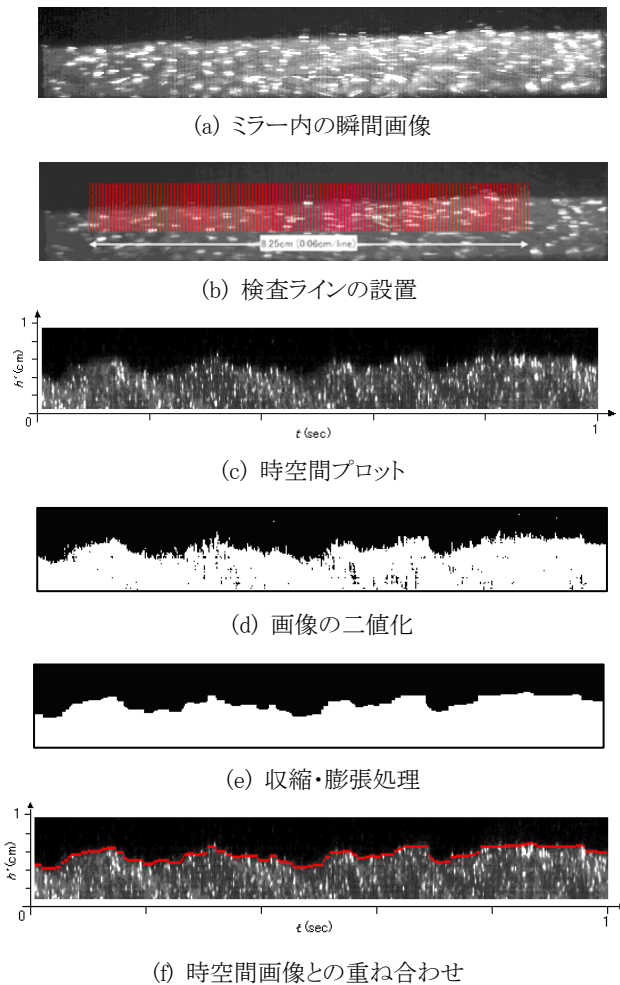


図-4 水面変動の画像計測手順

像の二値化には粒子マスク法¹⁷⁾を適用した. 図-3(a)にPTVによる計測結果の一例を示す. x は主流方向距離, z は鉛直方向距離であり粗度高さ $k=1.5\text{cm}$ で無次元化している. この例では検出された約3,500個の流速ベクトルを格子点に再配分し, 表面流速の0.9倍の値を差し引いてプロットした. 比較のために同じ瞬間のPIVによる結果を図-3(b)に示した. PIVのベクトル間隔は縦横ともに10画素であり, PTVはそれに合わせて再配分を行っている. PIVでは, テンプレート(40x40画素)が水面から50%まではみ出ることを許した解析を行っているが, 水面近傍の流速ベクトルは全体的に平坦な分布を示している. これに対し, PTVの結果は水面から底面までの全領域に渡って微細な流れの構造を捉えることができている.

(2) 水面変動と波形移流速度の計測

図-2に示したミラー内の瞬間画像の一例を図-4(a)に示す. 光膜面の位置は輝度の変化として目視でも容易に識別できる. 本研究ではスプラッシングを伴うような水面変動ではなく一価関数的に変動が変化する場を対象としているため, 水面上方から下に向かって輝度を調べ, その変化が最大となる点を求めればよい. ここでは, CMOSカメラの特性上, 画像

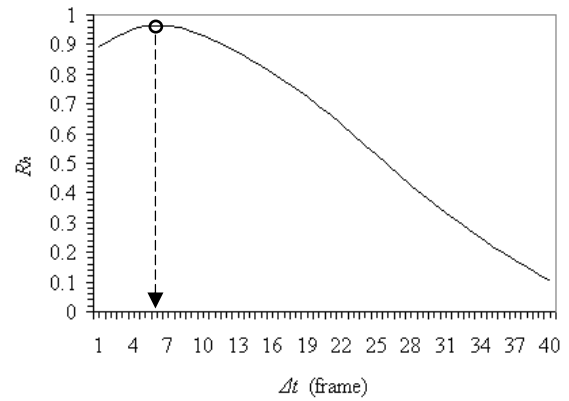


図-5 水面波形分布の相互相関プロット

垂直方向に発生する縞状のノイズの影響とレーザ光膜が減衰し流下方向で輝度値が変化する影響を取り除くため, 図-4(b)に示すように多数の鉛直検査ラインを設定し, 固定点における時間変動を図-4(c)のような時空間プロットとして求めた. このような画像に二値化処理(図-4(d))を行い, その際に残存するノイズを除去するために白色で示される画素を周囲に対して膨張, あるいは収縮させる処理を何度か施した後(図-4(e)), 各点の時間変動値を求めた. 図-4(f)に処理後の水面変動を元の時空間画像に重ねた結果を示すが, 良好に水面位置が検出されていることがわかる.

この処理を各検査ラインに対して行い, 場所の異なる水面変動パターンを比較することで波形の移流特性の把握が可能となる. いま, ある検査ラインの水面変動を h_i , 別の位置の検査ラインの水面変動を h_j とする. この2つの変動パターンを時間軸方向に Δt ずつずらしながら次式の相互相関係数 R_h を算出し, 検査ライン間の距離を R_h がピーク値を与える Δt で割れば平均的な波形の移流速度を求めることができる.

$$R_h(\Delta t) = \frac{\sum \{h_i - \bar{h}_i\} \{h_j(\Delta t) - \bar{h}_j\}}{\sqrt{\sum \{h_i - \bar{h}_i\}^2} \sqrt{\sum \{h_j(\Delta t) - \bar{h}_j\}^2}} \quad (1)$$

R_h の分布の一例を図-5に示すが, 明瞭なピークが生じていることがわかる. 実際には検査ラインの様々なペアに対して移流速度を算出し, その算術平均を平均移流速度とした.

(3) 表面流速の計測

水表面の流速は, 計測断面の上流側からトレーサ(粒径 $50\mu\text{m}$)を散布し, その流下状況を水面変動計測用のミラーを通してハイスピードカメラで撮影して求めた. 計測には, 検査線上の速度を正確に計測できるSTIV(Space-Time Image Velocimetry)¹⁵⁾を利用した. 水面変動と計測位置を一致させるためにSTIVの検査線の位置を光膜の位置に合わせて時空間画像を生成し, そこに現れた縞パターンの傾きから表面流速を算出した.

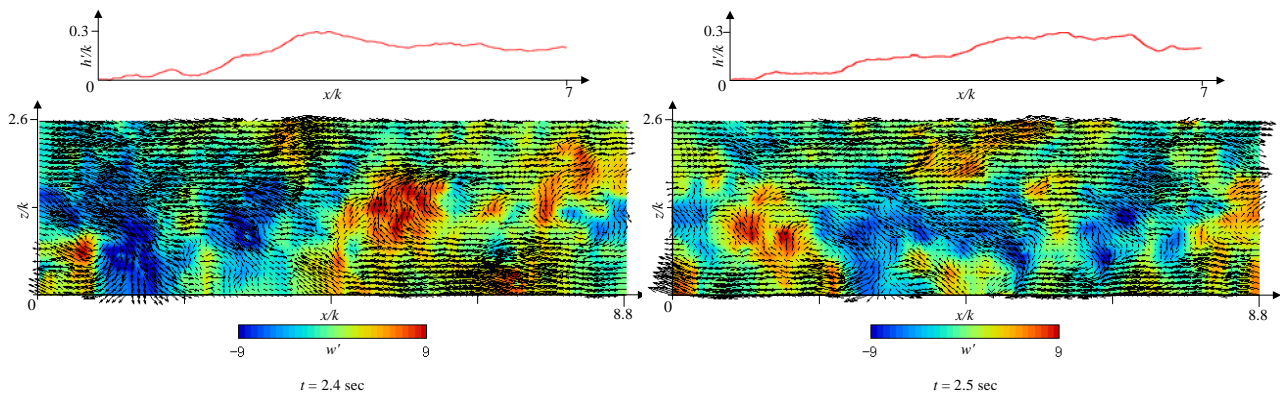


図-7 水面変動と速度場の関係(Case1)

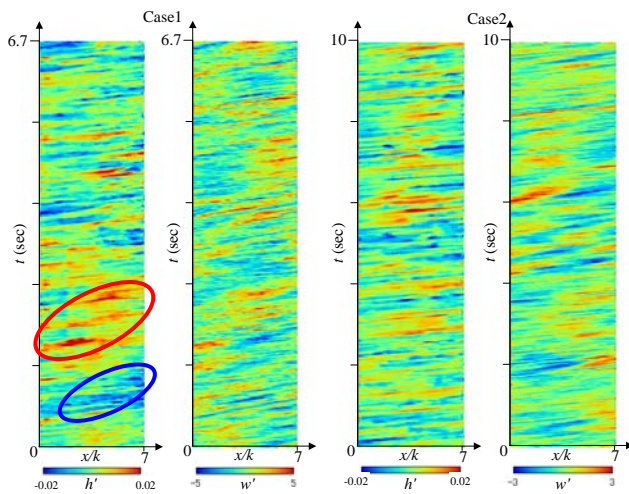


図-6 水面変動と水面直下の鉛直成分の時空間プロット

4. 水面と流れの同時計測結果

(1) 水理条件

今回の実験の水理条件を表-1に示した. この実験に先立ち, 水面の輝度分散値解析によって水面変動の移流が発生する水理条件を調べた結果¹⁸⁾から, Case1は水面変動の移流が卓越している条件, Case2は水面変動の移流が発生し始める条件に相当することがわかっている. h は粗度要素底面から水面までの高さ, H は h から粗度を均した際の底面からの粗度高さを減じた幾何学的基準面からの水深を表す. フルード数やレイノルズ数は H を用いて求めている. 粗度要素の高さは1.5cmなので, 相対粗度高さは3程度であり, 底面粗度の影響を強く受ける流れ場となっている.

(2) 水面変動と水面直下の鉛直流速成分の比較

図-6に水面変動と流れ場の同時計測から得られた結果を示す. この図は, 横軸に流れ方向の空間軸, 縦軸に時間軸をとり, 水面変動と平均水面より約1.5mm下の水平ライン上で得られた流速ベクトルの鉛直成分の時間発展を示したものである. 水面変動に着目すると, 水面の凹凸が交互に検査断面に到達していること

表-1 水理条件

	I	$Q(\text{cm}^3/\text{sec})$	$h(\text{cm})$	$H(\text{cm})$	$Um(\text{cm/s})$	Fr	Re
Case1	1/100	5000	4.99	4.08	40.85	0.646	16667
Case2	1/250	5000	5.26	4.35	38.30	0.586	16667

がわかる. その間隔は必ずしも規則的なものではないが, 微細な変動の上に青丸で示すような大規模な凹的な変動や赤丸で示すような凸的な変動がまとまって発生している. 流れ方向へは検査線の始端から終端まで継続している場合もあれば, 途中で符号が逆転している場合も見受けられる. 水面変動の符号が途中で変化することは考えられないため, ここで示された水面変化は他の要因によるものと考えてよい.

そこで, 鉛直成分の時間変化に着目すると, 水面変動と全く同一ではないが, きわめて類似した移流パターンを示していることがわかる. パターンの傾きは移流速度を表すが, 水面変動の場合の傾きとほぼ一致している. このことは, 水面変動が水面直下の流れ場に強く依存していることを示唆している.

(3) 水面変動と水面直下の鉛直流速成分の比較

流れ場と水面変動の関係を示すために, 0.1秒間隔の瞬間速度ベクトル(表面流速 $\times 0.9$ を差し引いたもの)とそのときの水面形を図-7にプロットした. 水面近傍の速度ベクトル場に注目すると, 最初 $x/k=4.4$ 付近にあった上昇流の部分が0.1秒後には, $x/k=5$ 付近にまで移動している. この部分は水面下方から上昇してきた渦塊に対応する. 最初が水面に到達した直後の状況で, 0.1秒後には水面に沿ってその渦塊が移動している. 各瞬間の水面形をベクトル場の上方にプロットしているが, 上昇流成分が卓越する場所で水位が上昇していることがわかる. また, 水面の凸部が下流に移動している様子もよくわかる. 図-6に表れた縞パターンはこのような現象が頻発していることを示している. すなわち, 水面直下で上昇流が卓越している部分で局所的な水面上昇が発生しているものと考えられる. そこで, 水面変動と内部速度場の各点における時間方向の相互相関を調べた. 図-8は縦断面内の各点の鉛直速度成分と水面変動の相関を算出した後で主流方向に平均化したものをプロット

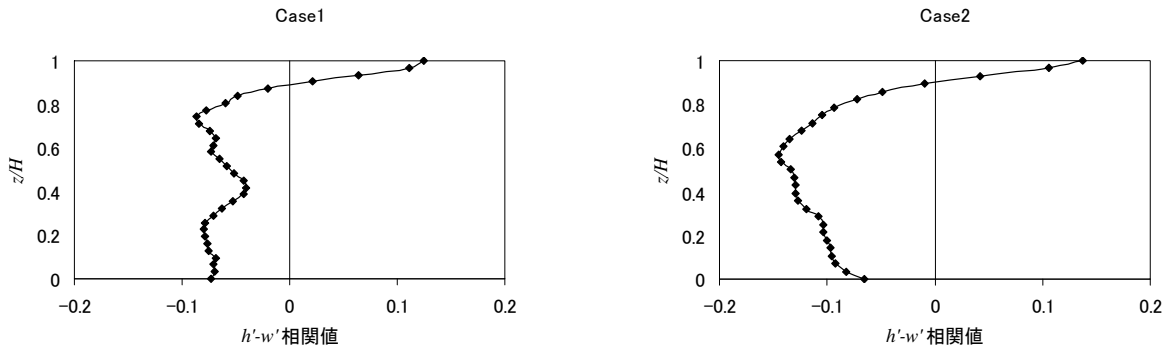


図-8 水面変動と内部流れの相関関係

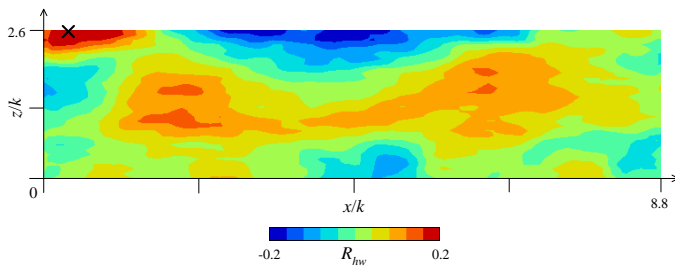


図-9 相関係数 R_{hw} の空間分布(Case1)

している。相互相関係数の算出には式(1)と同一のものを用いた。強い相関ではないが、水面から水深の0.1倍の深さまでは相互相関値が正となっており、水面変動の影響が及んでいる層があることがわかる。一方、水面付近を除けば相関は負となっている。これは図-7からもわかるように今回の実験条件で生成される渦のスケールが水深オーダーになる場合もあり、その渦が水面に上向きに衝突しているときには、渦の下面付近では下降流が平均的に卓越してくるためと思われる。

図-9はCase1において×で示される固定位置での水面変動と鉛直断面の各点における鉛直方向速度変動との相関係数 R_{hw} の分布である。固定点付近では最大0.2程度の明瞭な正の相関を示しており、他の領域でも何らかの相関分布が見られる。禰津・中山⁶⁾の滑面・ Fr 数0.6程度のケースにおける結果では、最大の相関値が0.04程度、また水面変動と内部流速場の相関がほとんどみられないなど、今回の粗面のケースとは異なる結果が得られている点が注目される。

(4) 水面に到達する渦塊の軌跡

上で示したような上昇流がどのような経路で水面に到達するのかについて調べてみた。図-10(a)はある2つの瞬間のベクトル場を示す。単純な渦度分布では渦の中心を明確に捉えることができないため、図中コンターには次式で示されるような簡便に渦中心を捉えることができる渦コアの検出式¹⁹⁾の Δ の値をプロットしている。

$$\Delta = p^2 - 4q \quad (2)$$

ここに、

$$p = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z}, \quad q = \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial x}$$

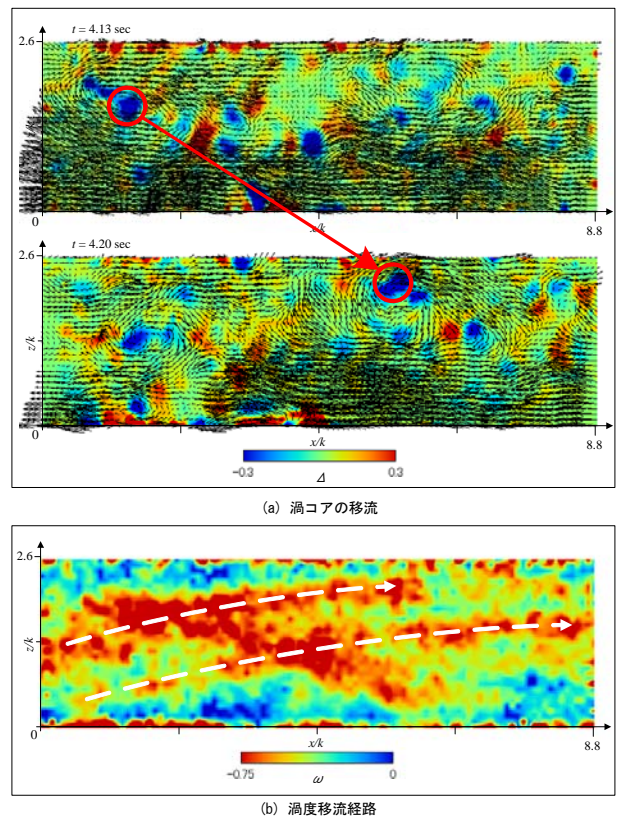


図-10 水面に到達する渦塊の軌道(Case1)

Δ は二次元場の渦コアを検出するための判別式で、負の値になる部分に渦コアが存在する。図を見ると、○で示した渦が上昇しながら下流に移動していることがわかる。この様子を連続的に捉えるために、0.07秒間、21枚の渦度の瞬間データのうち、 Δ の値が負となる部分だけを抽出し、それらの値を多重合成してプロットしたのが図-10(b)である。図-10(b)では、渦塊は底面付近から白い破線で示したような軌跡で水面近くに到達しようとしている状況が良好にとらえられている。図に2本の白線で示される軌跡があることからわかるように、このような上昇流の交互の発生が図-6の間隔のある縞パターンとなって現れたものと考えられる。

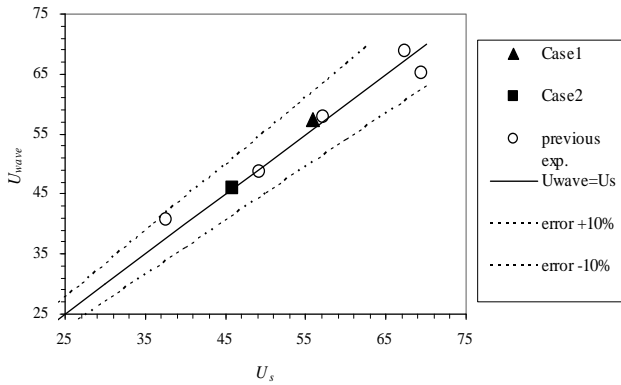


図-11 水面変動の移流速度と表面流速の比較

(5) 水面波紋の移流速度と表面流速の比較

図-11は各ケースにおける波形移流速度 U_{wave} と表面流速 U_s の比較図である。図中には参考のため過去の実験データから得られた結果をプロットした。この図を見るとどのケースにおいても波形移流速度と表面流速はほぼ一致しており、誤差も10%以内に収まっていることがわかる。

5. おわりに

本研究では、水面変動がある程度発達した粗面乱流場を対象として速度場と水面変動場の同時計測を行った。得られた結論を以下にまとめる。

- 1) 波形移流と水面近傍の乱れ構造の移流のパターンには類似性がみられ、水面変動が水面直下の乱れ構造に大きく影響を受けている。
- 2) 水面波形は水面直下の鉛直方向速度成分に追従しており、鉛直方向速度成分は渦塊の水面への到達に起因していると考えられる。
- 3) 内部流速場と水面変動の相関値より、水面から水深の1割程度の深さまで水面変動と鉛直方向流速に相関があることがわかった。
- 4) 水面変動に影響を与える渦塊は底面粗度近傍のせん断層で発生し、流下しながら徐々に上昇して水面に到達する。
- 5) 渦塊到達によって発生した水面変動は表面速度とほぼ同じ速度で移流していることがわかった。

今回の実験的検討では、水理条件が限られていたため、一般的な波紋移流に関しては十分な考察ができていない。今後は、様々な粗度形態に対する検討や波紋移流限界等に関して研究を進めていく。また、今回は鉛直断面での内部流とそのライン上の水面変動との関係を調査したが、今後水路横断方向も含む空間的な分布に対する検討も行っていきたい。内部流と水面変動の移流速度の関係性についても更に深く検討していく予定である。

参考文献

- 1) Grass AJ: Structural features of turbulent flow over smooth and rough boundaries. *J Fluid Mech.*, 50, pp.233–255, 1971.
- 2) Perry, A. E. & Joubert, P. N.: Rough wall boundary layers in adverse pressure gradients. *J. Fluid Mech.*, 17, pp.193–211, 1963.
- 3) Robinson, S. K.: Coherent motion in the turbulent boundary layer. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 23, pp.601–639, 1991.
- 4) Jimenez, J.: Turbulent flows over rough walls. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 36, 173–196, 2004.
- 5) 禰津家久, 中山忠暢: 自由水面近傍の乱流構造と水面変動との関連性に関する研究, 土木学会論文集, No.593/II-43, pp69-78, 1998.
- 6) 禰津家久, 中山忠暢: 自由水面近傍における組織渦の時空間相関構造に関する研究, 土木学会論文集, No.586/II-42, pp51-60, 1998.
- 7) Komori, S., Murakami, Y., and Ueda, H.: The relationship between surface-renewal and bursting motions in an open channel flow, *J. Fluid. Mech.*, Vol.203, pp.103-123, 1989.
- 8) 中山忠暢, 禰津家久: 開水路流れにおけるバーストの水面近傍での挙動及び乱れ構造との関連性について, 土木学会論文集, No.635/II-49, pp31-40, 1999.
- 9) Rashidi, M. and Banerjee, S.: Turbulence structure in free-surface channel flow, *Phys. Fluids*, Vol.31, No.9, pp.2491-2503, 1988.
- 10) Hurther, D., U. Lemmin, and E. A. Terry: Turbulent transport in the outer region of rough-wall open channel flows: the contribution of large coherent shear stress structures(LC3S), *J. Fluid Mech.*, Vol.574, pp.465–493, 2007.
- 11) 藤田一郎, 江見崇: 底面粗度による剥離渦発生と水面変動の関係について, 応用力学論文集, Vol.9, pp.987-996, 2006.
- 12) 宮本仁志, 下山顕治: 開水路流れにおける水面変動と乱れの空間相関構造, 水工学論文集, Vol.47, pp.439-444, 2003.
- 13) 藤田一郎: 実河川を対象とした画像計測技術, 2003年度水工学に関する夏期研修会講義集, 水工学シリーズ 03-A-2, 2003.
- 14) 藤田一郎, 安藤敬済, 堤 志帆, 岡部健士: STIVによる劣悪な撮影条件での河川洪水流計測, 水工学論文集, 53巻, pp.1003–1008, 2009.
- 15) Fujita, I., Watanabe, H. and Tsubaki, R.: Development of a non-intrusive and efficient flow monitoring technique: The space time image velocimetry (STIV), *International Journal of River Basin Management*, Vol.5, No.2, pp.105-114, 2007.
- 16) 藤田一郎: 開水路乱流に対する画像計測精度の比較検討, 水工学論文集, 43巻, p.359-364, 1999.
- 17) Takehara, K. and Etoh, T.: A study on particle identification in PTV-particle mask correlation method-, *J. Visualiz.*, Vol. 1(3), pp.313-323, 1999.
- 18) 古谷勇樹, 藤田一郎, 松島仁志: 開水路粗面乱流場における水面変動場の特性, 第37回可視化シンポジウム講演論文集, Vol.29, Suppl., No.1, pp.343-346, 2009.
- 19) Jung, Y., Y., Wontae, K. and Jaeyong, S.: High-definition PIV analysis on vortex shedding in the cylinder wake, *Proceedings of Japan-Korea Joint PIV Seminar*, pp.1-10, 2002.