

# 開水路乱流における水面変動の移流特性

## ADVECTION CHARACTERISTICS OF WATER SURFACE FLUCTUATIONS IN OPEN-CHANNEL TURBULENT FLOWS

宮本仁志

Hitoshi MIYAMOTO

正会員 博士(工学) 神戸大学助教授 工学部建設学科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

In this paper, I experimentally examine advection characteristics of water surface fluctuations in open-channel turbulent flows. Instantaneous velocity vectors and corresponding water surface profiles are measured by using an image processing technique. At first, the time series of the water-surface profiles from the measurements precisely indicate that the water-surface fluctuation is propagated with a constant advection velocity. Then, the spatiotemporal correlation analysis of the water-surface fluctuations as well as turbulence in the flows discloses that the advection velocity of the water surface fluctuation is smaller than the mean bulk velocity, while that of the turbulence of the flow is the same as the corresponding velocity of the mean velocity distribution. Also, it is found that the ratio of the advection velocity of the water surface fluctuation with the mean bulk velocity becomes smaller as the Froude number decreases.

**Key Words:** open-channel flow, water surface fluctuation, advection velocity, turbulence, spatiotemporal correlation analysis, simultaneous image measurement

### 1. はしがき

開水路流れにおける自由水表面の挙動は、水面直下の乱流構造に影響を及ぼすため水表面を介しての気体輸送や運動量交換に関連し、その挙動解明は河川の自浄作用など水環境の観点からも重要と考えられる。また、近年、実河川水面上の波紋を画像解析することにより表面流速を推定し、それより河川流量など河川計画・管理上重要な水理量を算出しようとする画像計測手法が精力的に開発されており<sup>1),2)</sup>、自由水表面の変動(凹凸)情報が有効に利用されはじめている。しかしながら、流速が大きくなり水面変動が顕著になる場合の水面変動と内部の乱流構造の関連性については未解明の部分が大きく、また、実河川画像計測の場合、画像の相関より推定された水面流速が実際の河道内流速をどの程度反映するのかについての詳細は分からない部分が多い。したがって、開水路での水面変動の挙動特性を基礎的立場からの確に把握し、界面での流れの現象を解明することが重要と考えられる。

本論文では、開水路での瞬時の水面分布と流速ベクトルを、ハイスピードカメラを用いた水面・流速の同時画

像計測法<sup>3)</sup>により測定し、得られた水面・流速の変動成分に時空間相関解析を施すことによって、それら変動成分の流下方向移流速度を評価する。また、得られた移流速度と内部の平均流分布などを比較することによって、フルード数の変化に伴う水面変動の移流特性を考究する。

自由表面境界を有する乱流に関する近年での実験的アプローチとしては、筆者らの研究<sup>4-6)</sup>、瀬津・中山による研究<sup>7),8)</sup>などが挙げられる。筆者らは、高解像度カメラとYAGレーザーを用いて同時画像計測<sup>3)</sup>によって水面・流速を計測し、POD(proper orthogonal decomposition)と同時空間相関解析を用いることにより、同一空間スケールをもつ水面変動成分と流体内部の乱流構造には明確な相関があること<sup>4),5)</sup>、水面直下における水面変動の影響層の存在とそのフルード数依存性<sup>6)</sup>などを実験的に明らかにしている。また、瀬津・中山は、レーザー流速計と超音波波高計を用いて乱流と水面変動を詳細に計測し、乱れ強度、エネルギー収支の検討により水面近傍の領域では管路流に比べて著しく乱流構造が異なること<sup>7)</sup>、時空間相関解析により壁面近傍の組織渦と自由水面近傍の組織渦との関連性があること<sup>8)</sup>などを報告している。しかしながら、著者らの研究ではYAGレーザーを用いているために計測値の時間分解能が不足することにより、また、

表-1 水理条件

| Case | $Q$ (cm <sup>3</sup> /s) | $H$ (cm) | $\bar{U}$ (cm/s) | $U_*$ (cm/s) | $1/I$ | $Fr$ | $Re$              |
|------|--------------------------|----------|------------------|--------------|-------|------|-------------------|
| 1    | $5.0 \times 10^3$        | 2.0      | 102.1            | 5.17         | 1/65  | 2.33 | $2.0 \times 10^4$ |
| 2    |                          | 2.5      | 79.3             | 4.20         | 1/134 | 1.60 |                   |
| 3    |                          | 3.0      | 67.1             | 3.51         | 1/215 | 1.24 |                   |
| 4    |                          | 3.5      | 56.5             | 3.01         | 1/347 | 0.96 |                   |
| 5    |                          | 4.0      | 50.4             | 2.75         | 1/476 | 0.81 |                   |

ここに、 $Q$ : 流量,  $H$ : 平均水深,  $\bar{U}$ : 断面平均流速,  $U_*$ : 底面摩擦速度,  $I$ : 水路床勾配,  $Fr = \bar{U} / (gH)^{1/2}$ : フルード数,  $Re = \bar{U} H / \nu$ : レイノルズ数,  $g$ : 重力加速度,  $\nu$ : 動粘性係数.

後者の研究ではレーザー流速計を用いた点計測が主体のため空間分解能が不足することにより、水面変動・流速変動の移流・伝播特性に関しては未だ詳細には検討されていないと考えられる.

## 2. 室内水理実験と同時画像計測

### (1) 水理条件

実験水路は、長さ10m、幅  $B = 0.25$ mの亚克力製直線水路である。開水路せん断乱流を起因とする水面変動を発生させて計測するために、水路下部構造の剛性を上げて水路の撓み極力抑え、水路側面・底面における亚克力水路継目のシリコン処理方法の検討を行い、また、上流側流入口のベルマウス設計・設置を丁寧に行った。結果として、実験中の水面には側壁からの波の発生は殆ど見られなかった。さらに、計測断面は、水路床からの乱流境界層が十分に発達したと考えられる、水路上流端から約7.5mにおける水路中央鉛直断面とした。したがって、今後の詳細かつ丁寧な計測値の解析は必要ではあるが、現時点では本研究で取り扱っている水面変動は開水路せん断乱流が主要因のものと考えてよいと思われる。

水理条件を表-1に示す。実験では、レイノルズ数  $Re = \bar{U} H / \nu$  を  $2.0 \times 10^4$  で一定にし、フルード数  $Fr = \bar{U} / (gH)^{1/2}$  を  $0.81 \sim 2.33$  まで系統的に射流～限界流～常流と変化させている。このフルード数  $Fr$  の条件設定に際しては既往の研究<sup>7),8)</sup> ので条件範囲を参考にして、今回は水面変動が強調され解析が比較的容易になると考えられる射流を中心に設定を行った。実河川での通常の洪水流に対応する常流条件中心の実験は今後実施する予定である。また、水理条件の設定にあたっては、側壁の影響が少なくなるように、横断方向のアスペクト比を大きくとるようにした ( $B/H > 6.0$ )。

### (2) 水面と流速の同時画像計測手法

図-1に計測システムの概要を示す。流水中に比重が約1.02、粒径0.075～0.150mmの高分子ポリマー粒子を投入

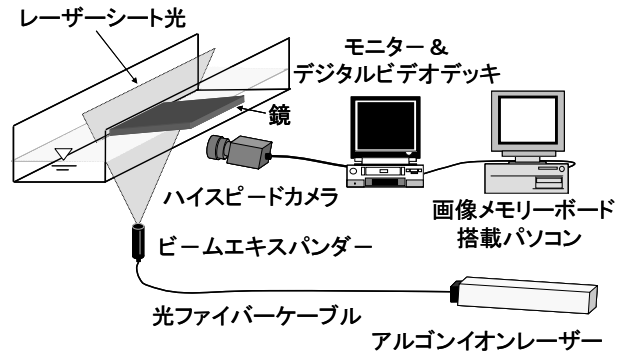


図-1 画像計測システムの概要

し、計測対象断面をレーザーシート光で可視化する。鏡を用いることにより可視化断面での流体内部と水面形状を同一画像フレーム内で撮影し、PIVと水面形状の抽出アルゴリズムにより流速ベクトルと水面分布をそれぞれ測定する<sup>3)</sup>。PIV解析により得られる流速ベクトルのサンプリング周波数はCase1で400Hz、その他のCaseで240Hzであり、高速度カメラにおける一画素の実長は0.18～0.36mmである。統計解析に際しては、後述の図-2に示すような瞬時の流速ベクトル・水深の測定データを約6500～10900(実験Caseによって異なる)用いて、統計量などを算出した。

座標系などの設定については、2次元のカーテシアン座標系を採用し、水路床の一点を原点として流下方向に  $x$  軸を、それに垂直な上向き方向を  $y$  軸とした。 $x, y$  軸方向の瞬間流速ベクトルの各方向成分を  $u, v$  とし、時間(もしくは統計)平均流速ベクトル、変動成分の各成分を  $(\bar{U}, \bar{V}), (u', v')$ 、断面平均流速を  $\bar{U} (= Q/BH)$  とした。水面分布に関しては、瞬時の水深を  $h$ 、平均水深および変動成分をそれぞれ  $H, h'$  とした。

## 3. 時空間相関解析法

本研究では、時空間相関係数を用いることによって、水面の変動と内部の乱流成分の移流特性を調べる。解析対象とした物理量は、後述のように、水面変動成分  $h'$  および流速変動成分  $u'$  である。

変動成分  $f(x_{ref}, t_p)$  と  $g(x, t_p + \tau)$  との時空間相関係数  $COR_{fg}(x, \tau)$  は次式で与えられる。

$$COR_{fg}(x, \tau) = \frac{\sum_{p=1}^M f(x_{ref}, t_p) g(x, t_p + \tau)}{(\sum_{p=1}^M f(x_{ref}, t_p)^2)^{1/2} \cdot (\sum_{p=1}^M g(x, t_p + \tau)^2)^{1/2}} \quad (1)$$

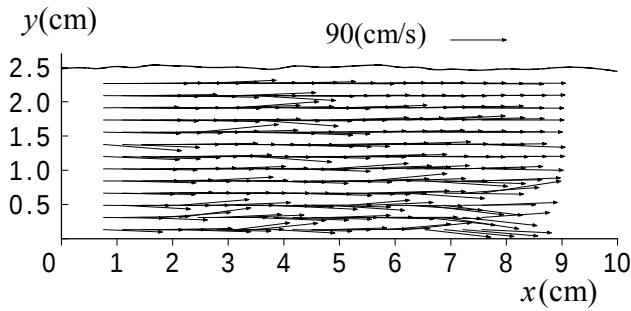


図-2 瞬時の流速ベクトルと水深分布  
(Case 2:  $Fr = 1.60$ )

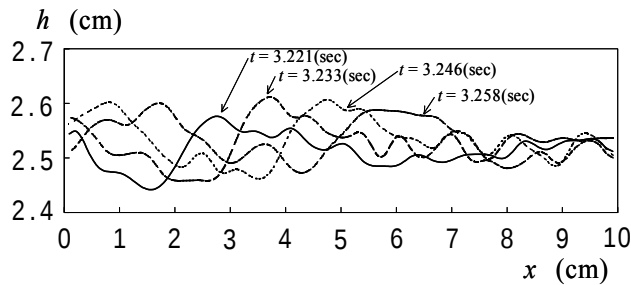


図-3 水深の経時変化 (Case 2:  $Fr = 1.60$ )

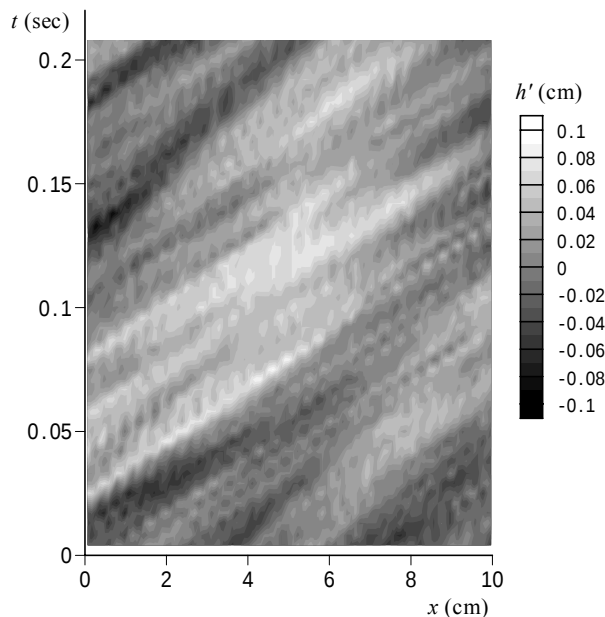


図-4 水面変動成分の時空間分布  
(Case 2:  $Fr = 1.60$ )

ここに、 $x_{ref}$ および $x$ は変動成分 $f, g$ の位置ベクトルであり、下付添字“ref”は参照とする変動成分の位置ベクトルであることを表す。 $t_p$ は計測の離散時間、 $M$ は全離散時間点数であり、 $\tau$ は対象とする変動成分間のラグタイムである。

## 4. 結果と考察

### (1) 瞬時の流れ場

瞬時の水深 $h$ および流速ベクトル( $u, v$ )の計測結果(Case 2:  $Fr = 1.60$ )を図-2に示す。水路床近傍の流速は、壁面せん断によって、ある程度の空間スケールをもって上下に変動している。水面はほぼ水平であるが、空間スケールが約3～4cmの微小な凹凸が存在している。画像の撮影時間間隔(1/400もしくは1/240 sec)ごとに時々刻々得られる、これら瞬時の流れ場のデータを用いて、以下の考察を行う。

### (2) 水面の経時変化

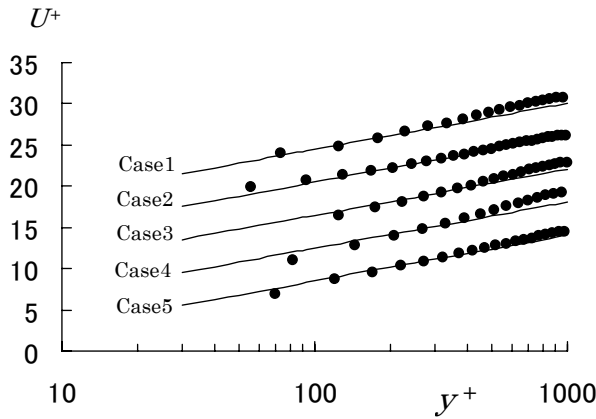
図-3はCase2 ( $Fr = 1.60$ )における水深 $h$ の経時変化であり、1/80 sec毎の水面形状が重ねて表示されている。瞬時の水深は、平均水深 $H$ に対して約 $\pm 0.1$ cmの幅をもち、流下方向に変動している。時間の経過とともに、水面分布は若干変形されながら下流側に移動しているのがわかる。さらに、 $t = 3.246, 3.258$  secにおいて上流側で波頂が新たに現れており、水面が波動的に変動していることが推察される。

図-4に水面の変動成分 $h'$ の時空間分布を示す(Case 2:  $Fr = 1.60$ )。時空間( $x-t$ )平面上において水面変動 $h'$ の濃淡の模様が一定の角度をもって右上がりになっていることから、水面変動 $h'$ は流下方向にほぼ一定の速度で移流・伝播していることが確認される。また、他のCaseにおいても、この右上がりの濃淡縞模様の分布は明確に現れており、各Caseにおいて水面変動 $h'$ はほぼ一定の移流速度をもっていることがわかった。

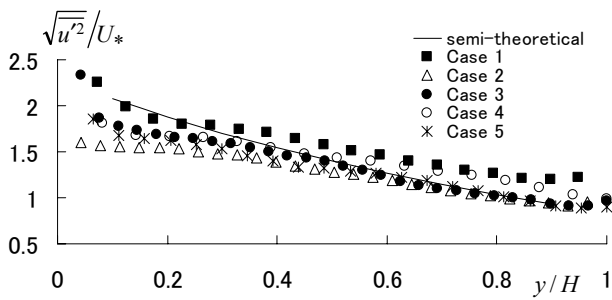
本研究においては、この水面変動 $h'$ の移流速度と開水路流れの平均流速・乱れの移流速度との関係、また、 $h'$ の移流速度に対するフルード数の依存性を調べるために、時空間相関解析を用いた検討を行う。その時空間相関解析の前に、比較の対象となる流速成分の統計量を次項で算出しておく。

### (3) 流速の統計量

図-5に流速成分の統計量を示す。図-5(a)は無次元平均流速 $U^+$ の鉛直分布であり、図-5(b)は $x$ 方向乱れ強度 $\sqrt{u'^2}/U^*$ の鉛直分布である。ここで、図-5(a)において、 $U^+ = U/U^*$ 、 $y^+ = yU^*/\nu$ である。 $U^+$ は、図-5(a)に併示した対数則分布とよく一致しており、限界流に近いCase 4 ( $Fr = 0.96$ )では、水表面近傍においてwake領域が明確に存在していることがわかる。一方、 $\sqrt{u'^2}/U^*$ の分布は、水面に向かって減衰しており、併示した禰津らの半理論曲線<sup>9)</sup>に比較的一致している。これらより、同時画像計測によって得られた流速ベクトルにおいて、本研究で解析対象とする $x$ 方向流速成分は、その統計量が既往の知見と定量的にほぼ一致しており、それらの精度が検証さ



(a) x方向無次元平均流速分布（実線は対数則分布であり，比較のために縦軸を調整している．）



(b) x方向乱れ強度の鉛直分布

図-5 流速成分の統計量

れたと考えられる．

#### (4) 水面変動・乱れの時空間相関

次に，水面変動成分  $h'$  および流速変動成分  $u'$  が流下方向にどのように移流・伝播しているのかを検討するために，時空間相関解析式(1)を行う．

図-6は，Case 1( $Fr = 2.33$ )における水面変動成分  $h'$  の自己時空間相関係数  $COR_{hh}(x; \tau)$  の流下方向分布である．図中にはラグタイム  $\tau=0$  から 0.075 sec まで 0.0025 sec 毎の  $COR_{hh}(x; \tau)$  の分布が重ねて示されており，左から右側の分布曲線になるに従ってラグタイム  $\tau$  が大きくなる．ラグタイム  $\tau=0$  の同時相関においては，参照位置  $x_{ref} = 3.0\text{cm}$  において  $COR_{hh}(x; \tau=0) = 1.0$  の極大値をもつベル型の分布になっており，ラグタイム  $\tau$  が大きくなるほど， $COR_{hh}(x; \tau)$  は減衰し，極大値の現れる位置も流下方向に移動していく．この  $COR_{hh}(x; \tau)$  の極大値の移動速度が水面変動  $h'$  の流下方向への平均的な移流速度を表すことになる．

図-7に，Case 1( $Fr = 2.33$ )におけるx方向流速変動成分  $u'$  の自己時空間相関係数  $COR_{uu}$  の空間分布を示す．参照位置は  $\{x, y\}_{ref} = \{1.56, 1.47\}\text{cm}$  であり，水面から約  $1/4H$  における乱れの相関  $COR_{uu}$  を算出している．水面変動

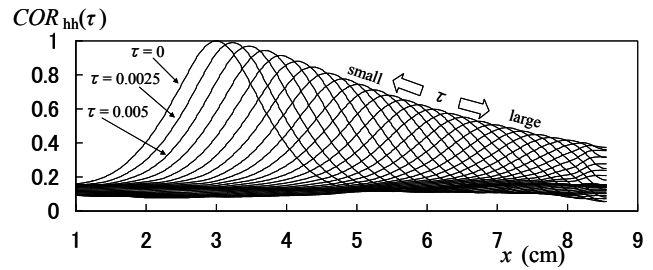
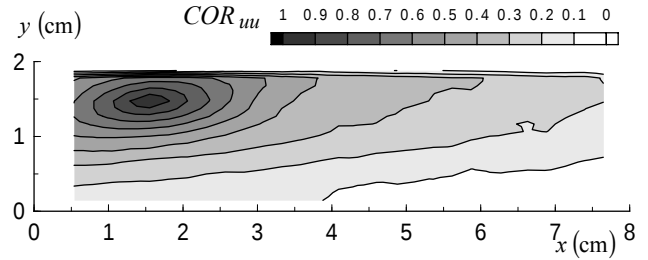
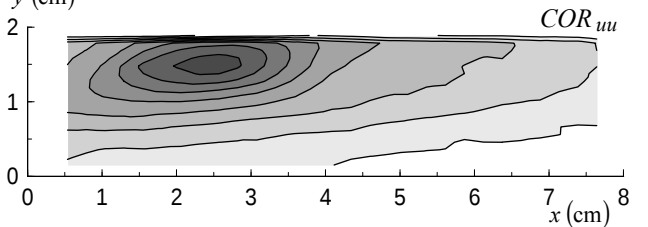


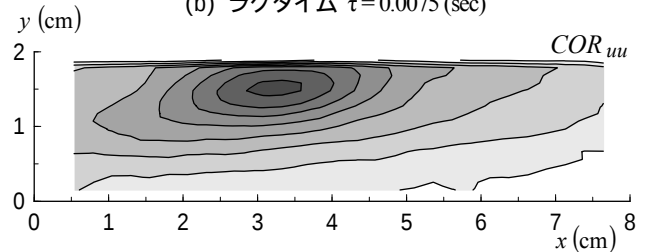
図-6 水面変動の時空間相関係数の流下方向分布  
(Case 1:  $Fr=2.33$  ,  $x_{ref}=3.0\text{cm}$ を参照位置としている．)



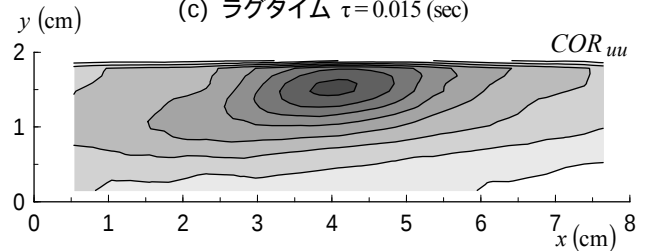
(a) ラグタイム  $\tau=0$



(b) ラグタイム  $\tau=0.0075\text{ (sec)}$



(c) ラグタイム  $\tau=0.015\text{ (sec)}$



(d) ラグタイム  $\tau=0.0225\text{ (sec)}$

図-7 x方向流速変動成分の時空間相関係数の空間分布  
(Case 1:  $Fr = 2.33$  ,  $\{x, y\}_{ref} = \{1.56, 1.47\}\text{cm}$ を参照位置としている．)

成分  $h'$  の自己時空間相関係数  $COR_{hh}$  と同様に，図-7より， $COR_{uu}$  はラグタイム  $\tau$  が大きくなるほど減衰し，極大値の現れる位置が流下方向に一定速度で移流していく

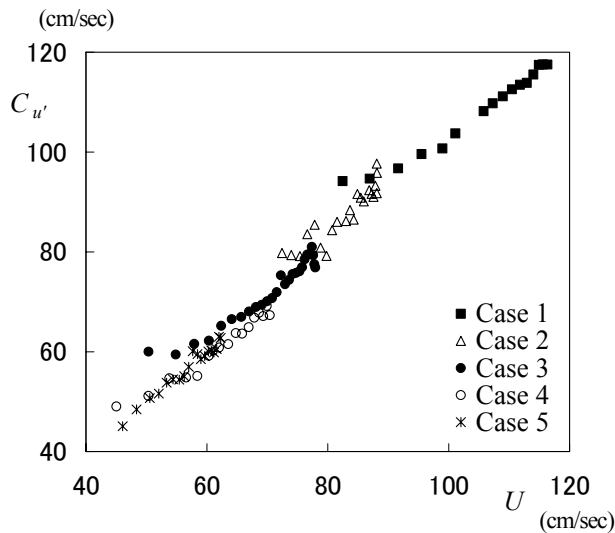


図-8 乱れの移流速度と時間平均流速の関係

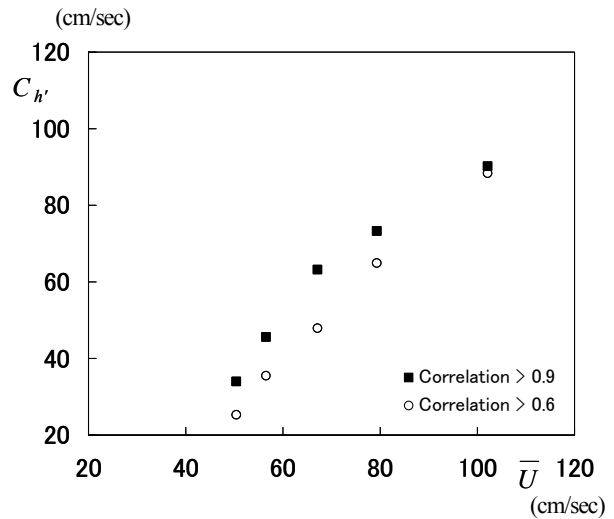


図-9 水面変動の移流速度と断面平均流速の関係

ことがわかる。

図-6・7において示された、ラグタイム  $\tau$  に伴う自己時空間相関係数の変化については、実験の全Caseをとおり定性的に同じ傾向を示しており、各Caseにおいて極大値の移動から移流速度が評価できることとなる。

#### (5) 水面変動・乱れの移流特性

図-8は、前述のようにして自己時空間相関係数  $COR_{uu}$  の極大値から求めた流速変動成分  $u'$  の移流速度  $C_{u'}$  と、時間平均流速  $U(y)$  との関係である。図中の点は、 $x_{ref}$  を一定にして  $y_{ref}$  を水表面近傍から水路床近傍まで変化させて算出した  $COR_{uu}$  を、それぞれ対応する  $U(y_{ref})$  ごとにプロットしたものである。図中での各シンボルのプロット群(例えば、■)において、右上の点が水面近傍での値に、左下のものが水路床近傍での値にそれぞれ対応する。これより、移流速度  $C_{u'}$  はほぼ時間平均流速  $U(y)$  と同じ値をとることがわかり、 $U(y)$  にのって乱れ  $u'$  が輸送されていること、すなわち、いわゆるTaylorの凍結乱流の仮説<sup>10)</sup> が成り立っていることが確認できる。

図-9は、図-8と同様にして求めた、水面変動成分  $h'$  の移流速度  $C_{h'}$  と断面平均流速  $\bar{U}$  の関係である。図中において、シンボル■・○は、それぞれ極大値の相関係数が0.9・0.6以上のデータから求めた移流速度を表す。従って、後者○は前者■に比べて長時間平均の移流速度を算出したことに対応する。図より、すべてのCaseにおいて移流速度  $C_{h'}$  は断面平均流速  $\bar{U}$  より低い値をとっていることがわかる。また、水表面近傍での時間平均流速  $U(y)$  が断面平均流速  $\bar{U}$  よりも大きい値をとることから、水面変動成分  $h'$  は、その位置  $y$  での  $U(y)$  に追従する内部の流速変動成分とは異なり、水表面近傍での  $U(y)$  よりもかなり小さい値をとることがわかる。

次に、水面変動成分  $h'$  の移流速度  $C_{h'}$  におけるフルー

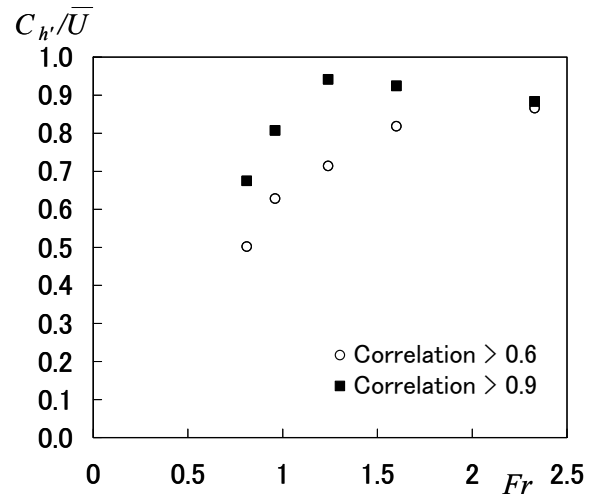


図-10 水面変動の無次元移流速度とフルード数の関係

ド数  $Fr$  の依存性を検討する。図-10は、断面平均流速  $\bar{U}$  で規準化した無次元移流速度  $C_{h'}/\bar{U}$  とフルード数  $Fr$  の関係である。これより、 $Fr$  数が小さくなるにつれて  $C_{h'}/\bar{U}$  が小さな値をとることがわかる。特に、フルード数が1.0以下の常流条件においては、水面変動成分  $h'$  の移流速度  $C_{h'}$  は断面平均流速  $\bar{U}$  (もしくは、水表面近傍での時間平均流速  $U(y)$ ) に比べてかなり小さくなることわかる。

以上の結果は室内水理実験により得られたものではあるが、実河川表面流の画像計測<sup>1),2)</sup>においても原理的には同様の相関解析を行っていることから、水表面流速を過小評価している可能性が示唆される。ただし、これに関しては、本研究では計測値の相関解析を行って水面・流速変動間の関係を明らかにしている段階であり、今後、計測されていない水路横断方向への水面変動伝播の影響や実験水路スケールに起因する表面張力などの影響を考慮に入れて解析を行い、最終的な結論を導く必要がある。

また、筆者らの前報における同時の空間相関解析<sup>4-6)</sup>からは、同一空間スケールの水面変動と内部の流速変動には有意な相関が確認されており、本研究で得られた結果と合わせて、今後、開水路流れにおける自由水表面の挙動メカニズムも検討していく予定である。

## 5. 結 論

開水路乱流において、 $Re=2.0 \times 10^4$ 、 $Fr = 0.81 \sim 2.33$ の条件で室内水理実験を行い、同時画像計測法により瞬時の水面分布と流速ベクトルを測定した。得られた計測値に時空間相関解析を適用することにより、水面変動と内部の乱れの移流特性を検討した。得られた成果をまとめると、以下のようなものである。

- (1) 流速変動成分の移流速度は、その位置での時間平均流速とほぼ同じ値をとることがわかり、本実験の範囲において、Taylorの凍結乱流の仮説が成り立っていることが確認された。
- (2) 一方、水面変動成分の移流速度は、時間平均流速に追従する内部の流速変動成分とは異なり、断面平均流速もしくは水表面近傍での時間平均流速よりも小さい値をとることがわかった。
- (3) その水面変動の移流速度は、 $Fr$ 数が小さくなるにしたがって、断面平均流速に比べて、より小さな値をとるようになる。特に、本実験の範囲においては、流れが常流の条件となる場合に減少傾向が顕著である。

謝辞：本研究の実験を遂行するにあたり、当時神戸大学学生であった下山顕治氏、稲岡克彦氏の協力を得た。記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) Fujita, I., Muste, M., and Kruger, A.: Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic applications, *J. Hydr. Res.*, Vol.36, No.3, pp.397-414, 1998.
- 2) 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, 第38巻, pp.733-738, 1994.
- 3) 宮本仁志, 神田 徹, 大江和正, 下山顕治: 水面・流速の同時画像計測法の開発と水面変動を伴う開水路凹部流れの解析, 土木学会論文集, No.726/ -62, pp.41-53, 2003.
- 4) 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, 第47巻, pp.439-444, 2003.
- 5) Miyamoto, H. and Shimoyama, K.: Spatial correlation structures of water surface fluctuation with turbulence in open-channel shear flows, *Journal of Hydrosience and Hydraulic Engineering*, Vol. 22, No.1, pp.37-50, 2004.
- 6) Miyamoto, H. and Shimoyama, K.: Experimental study on influence range of water surface fluctuations in turbulent open-channel flows, *The Sixth International Conference on Hydrosience and Engineering (ICHE-2004)*, Brisbane, Australia, Proc. CD-ROM, 2004.
- 7) 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, pp.69-78, 1998.
- 8) 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, pp.51-60, 1998.
- 9) Nezu, I. and Nakagawa, H.: *Turbulence in open-channel flows*, pp. 53-62, IAHR-Monograph, A. A. Balkema, Rotterdam, 1993.
- 10) たとえば, Tennekes, H. and Lumley, J.L.: *A first course in turbulence*, pp.248-256, The MIT Press, 1972.

(2005.9.30受付)