

第II部門 棧粗度乱流場における水面変動の発生過程に関する実験的検討

神戸大学大学院工学研究科 学生会員 ○谷 昂二郎  
 神戸大学大学院工学研究科 学生会員 大上 旭  
 神戸大学大学院工学研究科 正会員 藤田 一郎

1. はじめに

粗面乱流の研究の歴史は古く、数多くの研究者がその内部構造について詳細な検討を行ってきたが、水面の変動と内部の乱流構造を相互に結びつける考察はあまり為されていないように思われる。近年ではVOF法を用いたLESによる高度な数値計算での検討も行われているが<sup>1)</sup>、実現象の解明には実験による検討が不可欠である。そこで本研究では水面変動の発生過程を明らかにすべく、棧粗度を設置した流れを対象としてPIVによる可視化実験と画像処理を用いた水面変動計測の同時計測を行った。

2. 実験概要

本研究で用いた水路は長さ約6m、幅約0.3mの可変勾配式循環型直線水路である。水路縦断面に対して2台の同期された高速度カメラを用いて内部流と水面変動の同時計測を行った。(図-1)水深は $h_m=6\text{cm}$ で一定とし、水路底面には粗度高さ $k=0.9\text{cm}$ のアルミニウム製角柱棧粗度を設置した。粗度の設置間隔は無次元粗度間隔 $L/k=2.5, 5, 7.5, 10$ の4通り実施した。またフルード数 $Fr$ は0.1から0.6の間で変化させ、粗度間隔毎に3ケース設定実施した。内部流速場は本研究室にて開発された時空間微分法を用いたPIVにより算出し、水面変動は撮影画像を二値化する独自の手法を用いて計測した。

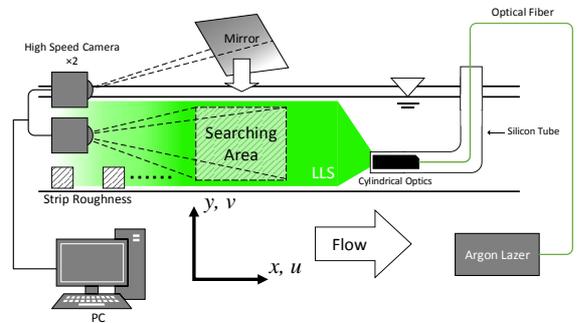


図-1 同時計測装置概略図

3. 統計的手法による検討

水面変動は非常に不規則な値をとるため、その大きさを比較する際には単純に最大振幅を用いるべきではなく、RMS振幅、すなわち水面変動強度による評価が一般的である。水面変動強度 $h'_{rms}$ は以下に示す(1)式により定義される。内部の乱れの強さとして、(2)式に示す乱れエネルギー $k$ を定義し、これと水面変動強度を比較すると、図-2に示す通り、両者は強い正の相関を持つことがわかった。すなわち、内部の乱れが強いほど水面も激しく変動するということである。ここに、 $u'$ および $v'$ は速度変動であり、 $\langle \rangle$ は検査範囲全体でのアンサンブル平均を表す。

$$h'_{rms} = \sqrt{\overline{(h - \bar{h})^2}} \tag{1}$$

$$k = \frac{\langle u'^2 \rangle + \langle v'^2 \rangle}{2} \tag{2}$$

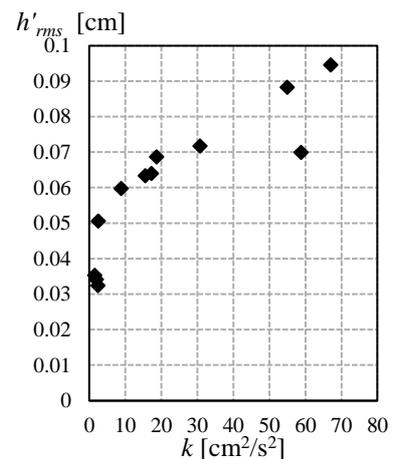


図-2 水面変動強度と乱れエネルギー

しかしながら、以上の考察では水面変動の発生過程の解明には至らない。そこで、著者らは条件付サンプリングという手法を採った。条件付きサンプリングとはある物理量が条件を満たしたときの他の物理量の傾向を把握するための手法である。今回は水面変動による条件付けを行ったが、設定した条件は

キーワード：粗面乱流，水面変動，PIV，条件付サンプリング

連絡先：〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1 神戸大学 藤田研究室 [ifujita@kobe-u.ac.jp](mailto:ifujita@kobe-u.ac.jp)

二つで、一つ目は水面変動  $h'$  が  $h'_{rms}$  より大きくなる時、つまり水面が大きく盛り上がる時であり、二つ目は  $h'$  が  $-h'_{rms}$  より小さくなる時、つまり水面が大きく下がる時である。図-3 にこれら二つの条件を満たしたデータを平均化して得られた、主流方向の乱流強度の空間分布および水面形を示す。条件付けに用いた水面変動の値は図中に×印で示した位置での値である。水面が大きく下がる時には、強い乱れが水面のかなり近いところまで及んでいることがわかる。鉛直方向の乱流強度についても同様の傾向が見られたほか、同様にして各条件で主流速を算出すると、水面が大きく下がる時の方が、流速が小さくなるという結果も得られた。

以上までの考察を総合すると、水面の変動は内部の乱れ（渦とも言い換えられる）により発生し、乱れが水面付近に到達すると、流速が大きく低減し、水面が下がるという一連の過程が予測される。

4. 水面変動の発生過程

前節にて予測された水面変動の発生過程を、同時計測により得られた水面形および内部流速場の瞬時データを用いて確認する。統計的手法により導かれた仮説に対しては実現象との比較が最も重要である。図-4 に同時計測された瞬時データの時系列の一例を示す。  $x/k=5$ 、つまり粗度間のちょうど中間地点の水面位置に注目してみると、上流側の粗度要素付近で発生した渦が水面まで到達し、それに伴って水面位置が低下していることが確認できる。また、それに伴って水面が低下した箇所の前後では水面位置が上昇していることも確認できる。前節にて統計的手法に基づき立てられた仮説と実現象との間に明確な齟齬はなく、この仮説はある程度信頼に足るものと考えて差し支えはないだろう。つまり、水面変動の発生要因は底面で発達した渦であり、この渦が水面に到達することで水面を低下させ、水面変動が発生するのである。

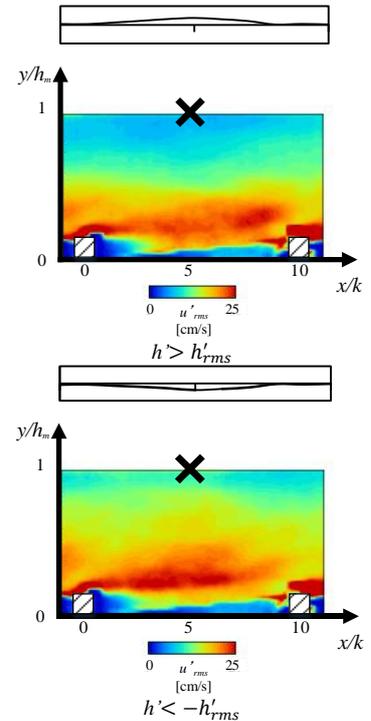


図-3 各条件における乱流強度 ( $Lk=10, Fr=0.6$ )

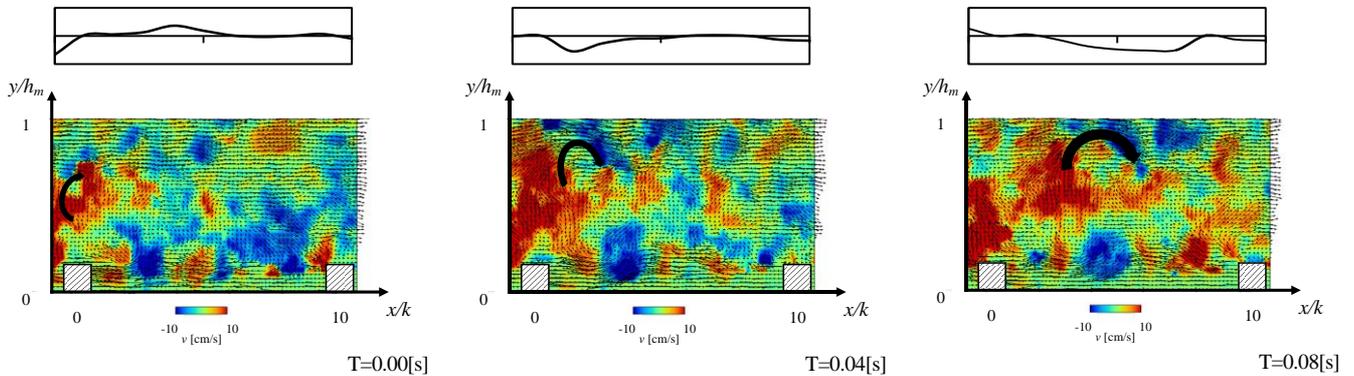


図-4 水面形および内部流速場の時系列 ( $Lk=10, Fr=0.6$ )

5. おわりに

本研究ではPIVによる可視化実験および画像解析による水面変動計測の同時計測を実施し、条件付きサンプリングなどの手法を用いることで粗度を設置した開水路流れにおける水面変動の発生過程を明らかにした。本研究で得られた知見は前述の同時計測が精度よく行えて初めて得られるものである。今後は数値計算との比較や実河川を対象とした計測も視野に入れて研究を進める予定である。

参考文献

1) 吉村英人・大上旭・藤田一郎: 粗度を設置した開水路乱流場の LES による水面変動特性の解析, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.71, No.4, I\_607-I\_612, 2015.