131 開水路壁面せん断力の PTV による計測

藤田 一郎 (岐阜大学工学部), 原 基樹 (アイ・エヌ・エー(株))
中島丈晴[○] (岐阜大学大学院)

Measurement of Wall Shear Stresses of Open-Channel Flow by PTV

Ichiro Fujita*, Motoki Hara**, and Takeharu Nakashima***

ABSTRACT

Wall shear stress distributions of open-channel flows were measured making use of the binary image cross-correlation method (BICC), one of the PTV techniques. Flow fields close to the wall were visualized by a laser light sheet with small tracer particles and the particle images were recorded on a DV format tape using a digital video camera. The images were transferred to a personal computer as a movie file(an AVI file), divided into a series of bit map files(BMP files), and finally transformed to gray-scale binary data before the PTV analysis. Thousands of consecutive images were successfully captured by using this procedure. The shear stresses were estimated from the distributions of turbulence properties very close to the wall. Several estimation methods were compared and their accuracy was discussed in detail.

1. はじめに

流れ場における流速の計測は LDV の発達で非常に高精度に行えるようになってきたが、壁面せん断応力の計測手法は流速計測に比べると精度や簡便さの点でまだ十分な発達は遂げていない。しかしながら、一方で PTV の発達により、従来の点計測手法では困難であった壁面極近傍流れの計測が可能となってきたのも事実であり¹⁾、速度場の情報から間接的に正確なせん断応力の情報を引き出すこともできるようになってきた。本研究では、一様な開水路流れを対象として壁面せん断応力に関するいくつかの評価法を比較検討した後、複雑な流れ場に対する計測例を示し、その有効性について検討する。

2. 実験装置および画像解析システム

実験には長さ 7 m, 幅 0.3m, 勾配 1/2600 の循環式アクリル製水路を用いた。流れの可視化は空冷式アルゴンイオンレーザからの光を光ファイバーを経由してビームイクスパンダーで光膜化し、流体中に混入させたナイロン粒子 (平均粒径約 50 μ m) によって行った。光膜は目的によって水平あるいは鉛直面に形成させた。

可視化画像の記録にはデジタルビデオカメラ (SONY 製 VX1000) を用い、以下の手順で量子化を行った。

- DV フォーマットで記録されたビデオ画像をパソコンベースのノンリニアビデオ編集装置 (EPSON 製, CREASENSE) で 1 つのムービーファイル (AVI ファイル) としてハードディスクに保存する。
- AVI ファイルを一続きのビットマップファイル (BMP) 群に変換する。(Adobe Premiere を利用)
- BMP ファイルを gray scale のバイナリファイルに変換する。(custom program を利用)

撮影は各断面で約 10 分行い、そのうち 5 分間程度の場面 (約 10000 フレーム) をピックアップして処理を行った。画像の記録には 4 倍速の CD-R 装置 (YAMAHA 製 CDR-400tx-VK) を用い、1 枚のメディアに約 1900 枚の画像データを保存した。

実験は等流状態と水路側壁の一方にブロックを設置して流れを複雑な状態にした 2 ケースで行った。実験条件を Table 1 に示す。

Table 1 Experimental condition

	RUN1	RUN2
Condition	uniform flow	flow with a block
H(cm)	2.54	3.92
Um(cm/s)	13.14	8.93
Fr	0.263	0.144

* Department of Civil Engineering, Gifu University, member

** INA Corporation, non-member

*** Graduate School, Gifu Univ., non-member

3. PTV 解析

流速計測には PTV のうち、二値化相関法(BICC)を用いた。二値化の手順は、1)エッジ検出 2)平滑化 3)原画像と 2)の画像の加算 4)しきい値設定による二値化画像生成 5)収縮・膨張処理によるノイズ除去、である。テンプレートサイズは 31x31pixel,画像サンプリングはフレーム画像をフィールド分割して用いたので 60Hz である。PTV 解析では流速ベクトルはランダムな点で得られるが、本研究では局所的な流れは壁面方向に一樣と仮定してデータのサンプリングを行った。すなわち、壁面から等距離で、ある幅の中に存在する速度ベクトルは同一母集団の集合と見なした。具体的には壁面から 1mm ピッチの計測空間を設定し、その中に入る流速ベクトルはすべてその空間の中央のデータと見なして乱流統計処理を行った。ただし、ケースによっては壁面近傍でさらにそのピッチを細かくして空間分解能を高める工夫をした。サンプリング幅は RUN1 では 4cm, RUN2 では 2cm とした。

4. 実験結果ならびに考察(RUN1)

4.1 底面せん断応力

この実験では流れに平行な水路中央の鉛直断面に光膜を照射し、約 9000 枚の画像から二次元流速分布を計測した。Fig.1, Fig.2 に平均流速分布とレイノルズ応力分布を示す。データ個数は各点 3000~6000 程度である。等流状態の底面せん断応力の推定法には数通りあるが、Fig.1 では Fig.2 から得られた摩擦速度 ($U_* = 0.915\text{cm/s}$) を用いて無次元プロットを行った。外層領域で平均流速の滑面対数則に良く一致していることがわかる。底面から 1mm 以下の点においてもサンプリングを行ってみたが、底面におけるトレーサ(比重 1.02)の沈降あるいはサンプリング時間内の大きなせん断変形量の影響もあってか、良好なデータは得られなかった。

一方、重力成分と全せん断応力との釣り合いから求まる平均せん断応力、 $U_* = (gRI)^{1/2}$ の値は 0.905cm/s で相対誤差は 1%程度であった。また、対数則から求めた値は $U_* = 0.930\text{cm/s}$ で誤差 2%程度、底面極近傍の流速分布に粘性底層での線形分布 ($y^+ = U^*$) を当てはめて求めた値は $U_* = 0.906\text{cm/s}$ で誤差 1%程度であった。このように一様に発達した開水路二次元境界層の底面せん断応力は、どの方法を用いても最大 2%程度の誤差範囲におさまることがわかった。

4.2 横断面内流速および二次流の分布

4つの水平断面の平均流速から構成した横断面内の平均流速分布を Fig.3 に示す。鉛直方向の測定間隔はかなり粗いが、コーナーに向かう高速域の貫入とそれに伴う二次流の特徴をよく捉えている²⁾。また、側壁水面付近の分

Fig.1 Mean velocity distribution (RUN1)

Fig.2 Reynolds stress distribution (RUN1)

Fig.3 Cross-sectional distribution of u

Fig.4 Horizontal distribution of u at $y/h=0.13$

Fig.5 Vertical distribution of shear velocity along the side wall

Fig.6(1) Horizontal velocity distribution for RUN2

Fig.6(2) Horizontal velocity distribution for RUN2

布は小スケールの二次流構造の存在を示唆しており興味深い。

4.3 側壁せん断応力

Fig.4 に $y/h=0.13$ の水平断面における平均流速分布を示す。 z は側壁に垂直方向の座標をさす。側壁にはトレーサが滞ることがないため、粘性底層内まで良好に流速分布が求まっている。したがって、以降の壁面摩擦速度は粘性底層内の線形分布式から求めた。図より、対数則による算定は困難なことがわかる。側壁のせん断応力分布を Fig.5 に示す。側壁近傍の乱流構造の影響を受けて S 字状の分布形を示していることがわかる。

5. 実験結果ならびに考察 (RUN2)

この実験では、水路 (幅 0.3m) の一方の側壁に長さ $L=0.2\text{m}$ 、幅 $B=0.1\text{m}$ のブロックを設置して急縮・急拡流を発生させ、それが対岸側壁に及ぼす影響について検討した。このケースでは水平光膜の高さは固定 (底面から 1.5cm) し、流下方向のせん断応力や乱流諸量の分布を調べた。取り扱った画像量は各断面約 10000 枚である。

5.1 平均流速分布

Fig.6 に横断方向の平均流速分布を示す。 x 軸はブロックの上流端の位置を原点として下流方向にとり、流下方向の 6 測線に対して計測を行っている。摩擦速度は同じく粘性底層内の線形分布を利用して求めた。図からわかるように、流下方向に平均流の変化があっても粘性底層はその普遍性を保っているが、その外層部は主流部の影響を大きく受けている。特に外層部はブロック末端より下流側で相対的に加速され、 $x/B=4.17$ 付近である程度元の状態に回復していることがわかる。なお、ブロック背後の循環領域の再付着点は $x/B=3$ 付近に存在した。

5.2 側壁せん断応力

摩擦速度の流下方向の分布を Fig.7 に示す。急縮部 (ブロック部分) でピーク値を示した後、値が漸減する様子が良好に捉えられている。ちなみに、ブロックを設置していない場合と比較すると摩擦速度はピーク値で約 1.7 倍程度増大していた。

5.3 乱流特性

Fig.8 に乱れ強度分布と Reynolds 応力分布の流下方

向への変化を示す。急縮によって流下方向の乱れ u' は次第に増大していくが、水平方向の乱れ w' には大きな変化が見られないことがわかる。また、再付着点の対岸側($x/B=3.17$)では u' , Reynolds 応力ともに急激な増大傾向, w' も増加傾向を示している。これは、ブロック先端からの剥離流れが水平方向に乱流拡散し、対岸側にその影響が到達した結果生じた現象と思われる。特に、Reynolds 応力分布の相対的な増加は著しいため、壁面近傍で線形分布を仮定して得られる摩擦速度の分布は Fig.7 とは矛盾してくる。この点に関しては今後の検討を要する。

6. おわりに

デジタルビデオの利用によって大量の画像データの解析が容易になり、壁面近傍の乱流構造や壁面せん断応力分布をある程度明らかにすることができた。ただ、壁面近くでは流れのせん断変形量が大きく、二値化相関法でのマッチングミスも避けられないように思えた。今後はさらに高精度のマッチング手法あるいは二値化手法の改良によって詳細な検討を進めて行く必要がある。

参考文献

- 1) Cowen, E.A. and Monismith, S.G.: A hybrid digital particle tracking velocimetry technique, *Exp. in Fluids*, Vol.22, pp.199-211, 1997.
- 2) Nezu, I. and Nakagawa, H.: *Turbulence in open-channel flows*, IAHM Monograph series, Balkema, 1993.

Fig.7 Longitudinal distribution of shear velocity (RUN 2)

Fig.8 Longitudinal distributions of turbulence properties in a horizontal plane