

レーザ流速計による開水路流速分布の3次元測定

井幡 英紀
法政大学大学院工学研究科

西谷 隆巨 牧野 立平
法政大学工学部土木工学科

河川の流には、底面、側壁、水面の異なる境界に囲まれた流れ場が存在し、固有の流れの構造が形成されている。これらの流れの構造を解明するには、詳細な流速の3次元計測が必要である。本研究では、開水路乱流における流れの構造を把握する目的で、3次元レーザ流速計を用いて水路横断面内の詳細な流速分布の測定を行った。3次元計測により、主流速の最大値が水面より下方に現れる現象や、2次流が主流速の約2%前後であることが確認された。これは、規則的な流れの構造が存在していることを予想させる。

1. はじめに

開水路流れの側壁近傍は、底面、側壁、水面のそれぞれ異なる境界に囲まれた流れ場が存在することにより、固有の流れの構造が形成されている。また、木下¹⁾は川幅に対して水深の小さい流れにおいては、並列螺旋流が存在することを示唆した。この場合、流水表面には水深の約2倍の間隔で流下方向に塵や気泡が連なった筋状の模様形成され、河床に水面と同じく水深のほぼ2倍の間隔で縦筋が形成される事が指摘されている。

これらの流れの構造を解明するには、詳細な流速の3次元計測が必要であるが、従来の流速計では流体に直接接触させるため、十分なデータを得ることが困難である。また、直線水路における2次流速は通常主流速の数%の微流速であり、これを測定するには高精度の流速計が必要とされる。

近年、高精度な非接触式のレーザ流速計の開発により、流速の詳細な3次元計測が可能となった。今回は、流れの構造を把握することを目的として、非接触の3次元レーザドップラ流速計(LDV)を用いて水路横断面内の流速分布の測定を行った。

2. 実験方法

2.1.1 実験装置・計測システム

実験に使用された水路は、全長10m、幅0.21m、の亚克力製可変勾配型開水路である。また、水路勾配は1/1000である。

計測システムには後方散乱型3次元光ファイバレーザ流速計を使用した。レーザ流速計(LDV)は、1対のレーザ光線を測定点で交差させ流速を測定するもので、非接触であるため流体を乱さずに計測することができる。また、3対の異なる波長(緑、青、紫)のレーザ光線を使用することにより、流速の3成分(主流速・鉛直方向・水路横断方向)の計測が可能である。逆流も計測するため、計6本のビームには、それぞれシフト周波数がかげられ測定点に焦点させられる。測定点を移動するための移動装置には、0.01mmの精度をもつ3次元トラバース装置を使用し、水路側壁から計測を行った。

流体中の散乱粒子(トレーサ粒子)が発するドップラバースト信号は信号処理機によりSN比の高い信号のみからゼロクロス方によってドップラ周波数が計算され、また、周波数・速度の変換式を用いて流速U、V、Wなどが計算される。

2.1.2 実験条件

実験水理条件を Table 1 に示す。

Case A では、主流速成分(水路長方向成分)の1次元計測で、測線間隔は鉛直方向に1mm 間隔で、横断方向には1~2mm 間隔で計測した。Case B では主流速成分と鉛直方向成分の2次元で計測した。測線間隔は水路中央付近から水路半幅の範囲(横断面の右半分)を全て1mm間隔で測定が行われた。Case C は、主流速成分と鉛直方向成分、水路横断方向成分の3次元計測で、測線間隔は鉛直方向に2mm、水路横断方向には2.5mm間隔で、水路右半幅の計測を行った。

Table 1. Hydraulic conditions

		単位	A-1	A-2	B-1	B-2	C-1	C-2	
流量	通水	Q	l/s	0.13	0.22	0.17	0.32	1.50	0.90
水深	断面平均	H	$\times 10^{-2}$ m	1.45	1.20	3.20	3.20	3.80	3.10
アスペクト	比	B/H		14.5	17.5	6.6	6.6	5.5	6.8
流速	断面平均	Um	$\times 10^{-2}$ m/s	4.27	8.73	2.53	4.80	19.0	13.8
レイノルズ	数	Re	$\times 10^2$	5.0	7.2	6.6	8.6	66.0	36.8
フルード	数	Fr		0.11	0.25	0.05	0.09	0.31	0.25

3. 実験結果および考察

3.1 1次元計測

Case A-1 は、Reynolds 数 ($U_m R/\nu$) は 455 で層流状

態である。流速分布は概ね 2 次の曲線上にのった (Fig.1)。Case A-2 は、Reynolds 数は 720 で乱流状態と見なせる。流速分布は片対数表示で表すと (Fig.2)、粘性底層付近の $u./y/ = 8.3$ の値を除いておおむね一直線上にのり、ほぼ乱流の対数分布則に対応している。

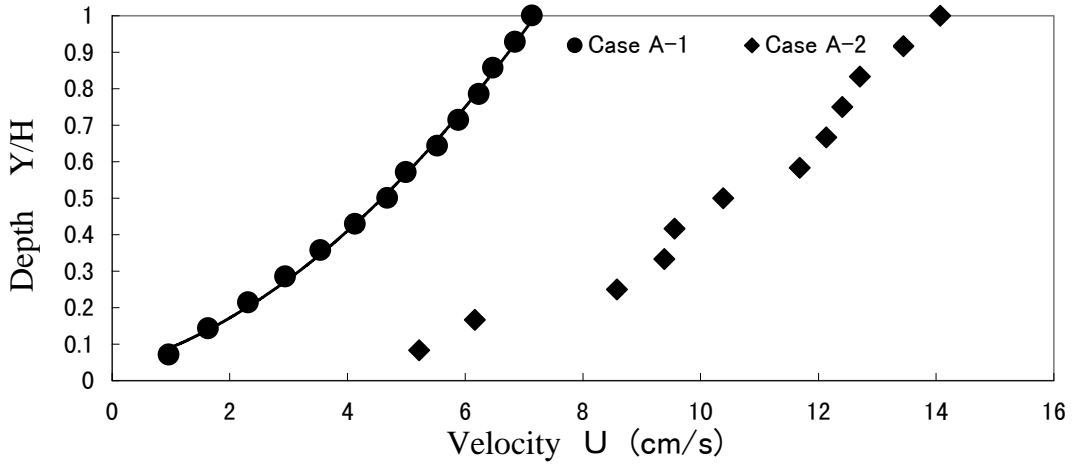


Fig.1 Velocity distributions of main flow (Case a)

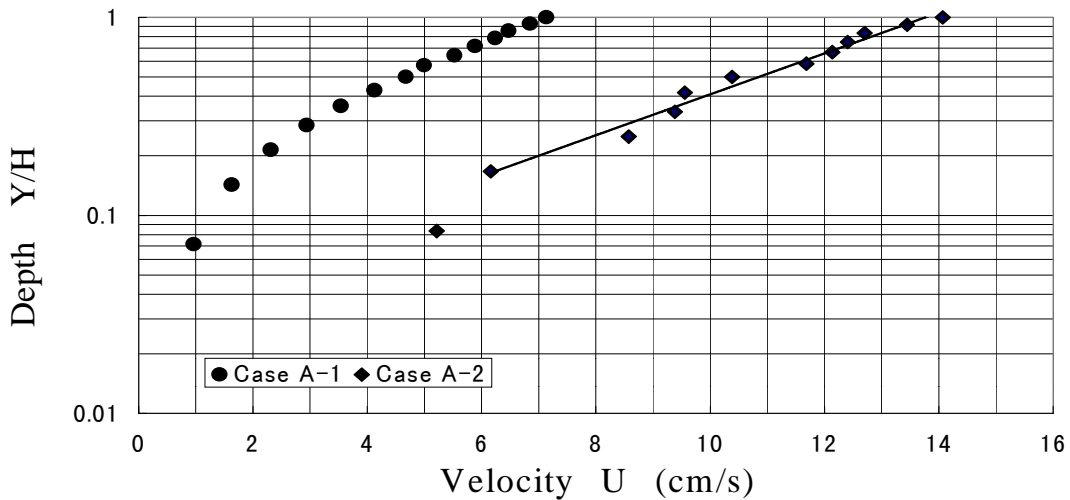


Fig.2 Velocity distributions (Semi-logarithm)

3.2 2次元測定

Fig.3,4 はそれぞれ、Case B-1, Case B-2 の主流速成分 U と断面平均流速 U_m の比 U/U_m の等値線である。図の左側上・下部の空白は、2次元 (主流速成分と鉛直方向成分) 計測の場合、レーザー光が上下斜めに入射するため、水面および水路床で反射してしまい、物理的に測定できない部分である。

Case B-1 の場合は比較的流速が小さく流れは安定し、水路中央部の流速が大きくなっている (Fig.3)。

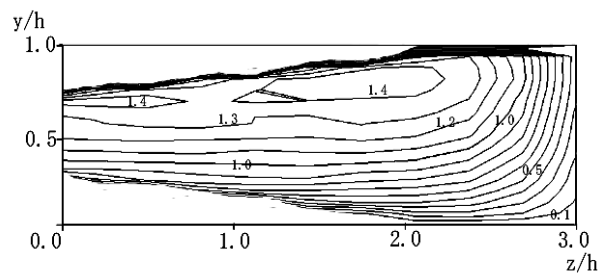


Fig.3 Contours of main velocity U/U_m (Case B-1)

Case B-2 では、前者に比べ断面平均流速が大きく、Reynolds 数は 864 で乱流状態である。主流速成分の比較的高速な部分（灰色の部分）と低速の部分が認められ

る。また、主流速の比較的高速部と低速部に対応して、流速の鉛直方向成分には上昇部と下降部が認められた (Fig.5)。

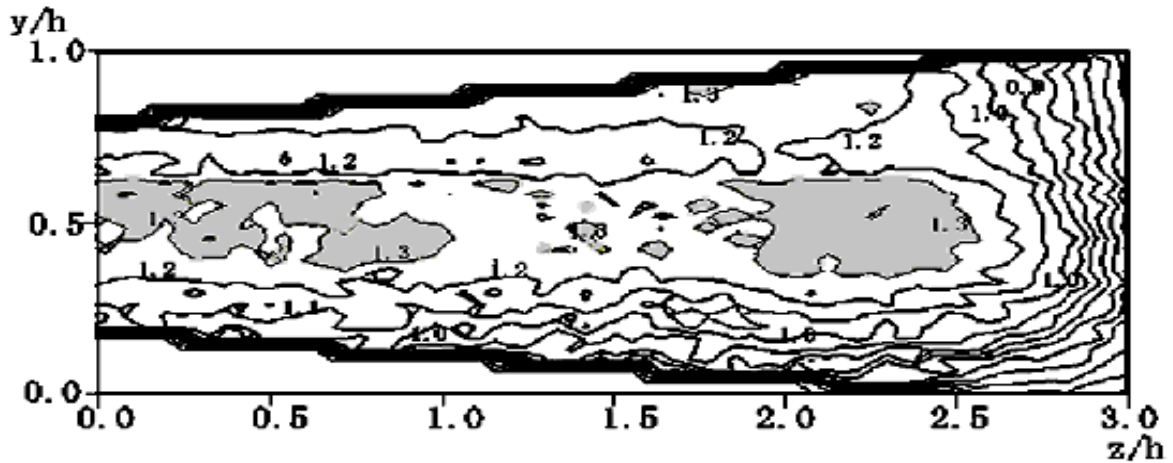


Fig.4 Contours of main velocity U/U_m (Case B-2)

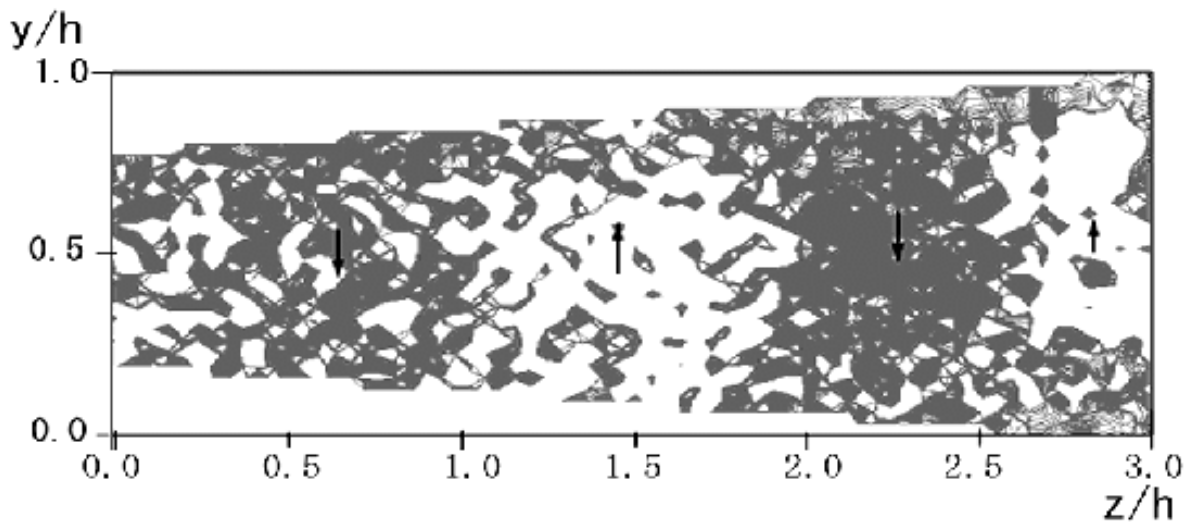


Fig.5 Velocity distribution of vertical direction component (Case B-2)

3.3 3次元測定

Case C の3次元測定において、鉛直方向成分、水路横断方向成分より、水路横断面内のベクトル図を示す (Fig.6,8)。縦軸に水深、横軸に水路横断方向を示す。

Case C-1 では、2次流の大きさは水路中央部より側壁近傍の方が大きく、その大きさは主流速の約2%前後である。また、水路側壁近傍では、鉛直方向に1対の渦の存在が確認できる。

両図とも、 $Z/H = -1.0$ の部分で下降流、 $Z/H = -2.0$ の部分で上昇流があらわれている。それに対応して主流速は、上昇部に比べ下降部の方が速くなっている (Fig.7)。通常、側壁近傍では流速が小さく水路中央に行くにした

がって流速が大きくなるのであるが、下降部で主流速が加速されるため、主流速の大きさが上昇部と下降部で逆転している。

Case C-2 の水路側壁近傍の水深中央付近では、流向が水路側壁に向かっている (Fig.8)。また、この付近の主流速の鉛直分布 (Fig.9) より、側壁から約20mmまでは、主流速の最大値は水深の中央付近であらわれている。したがって、水路側壁近傍では側壁に衝突した2次流が主流速方向に偏向し、その部分の主流速が加速していると考えられる。このことから、乱流状態での主流速の最大値が水面よりも下方に現れる現象は、少なくとも側壁の影響によるものと考えられる。

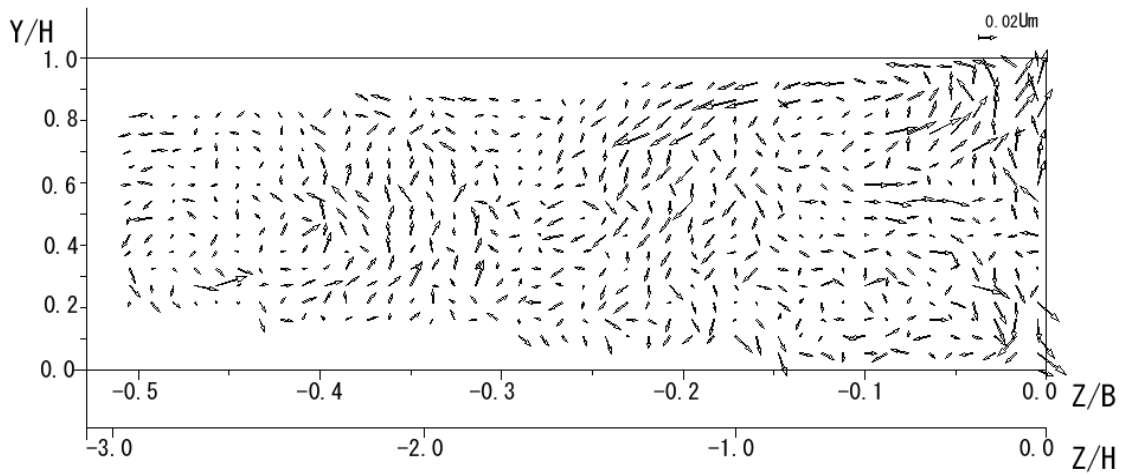


Fig.6 Velocity vectors of secondary flow (Case C-1)

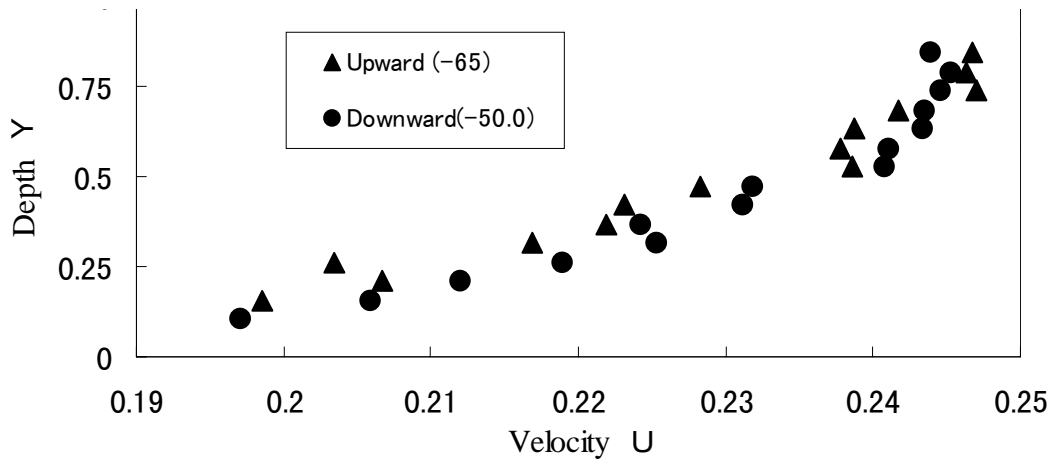


Fig.7 Velocity distributions of main flow (Case C-1)

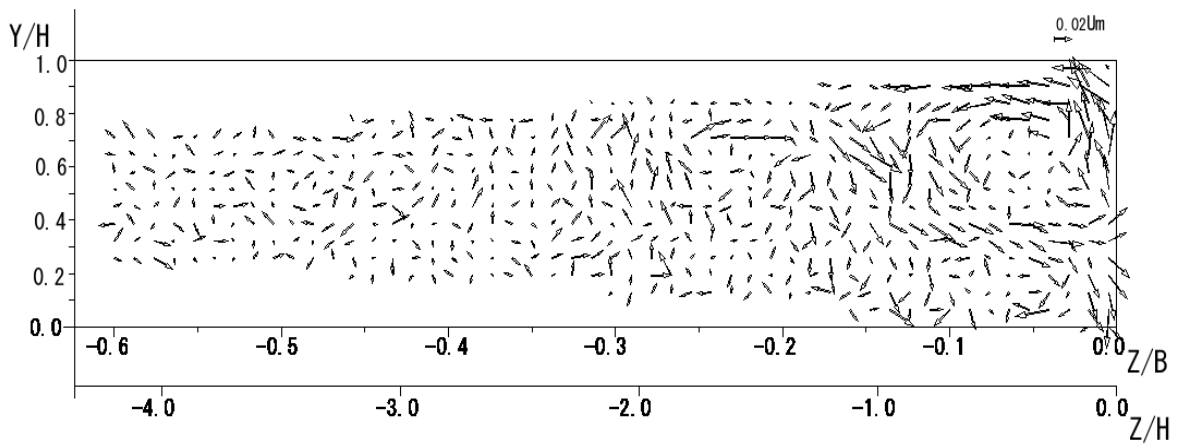


Fig.8 Velocity vectors of secondary flow (Case C-2)

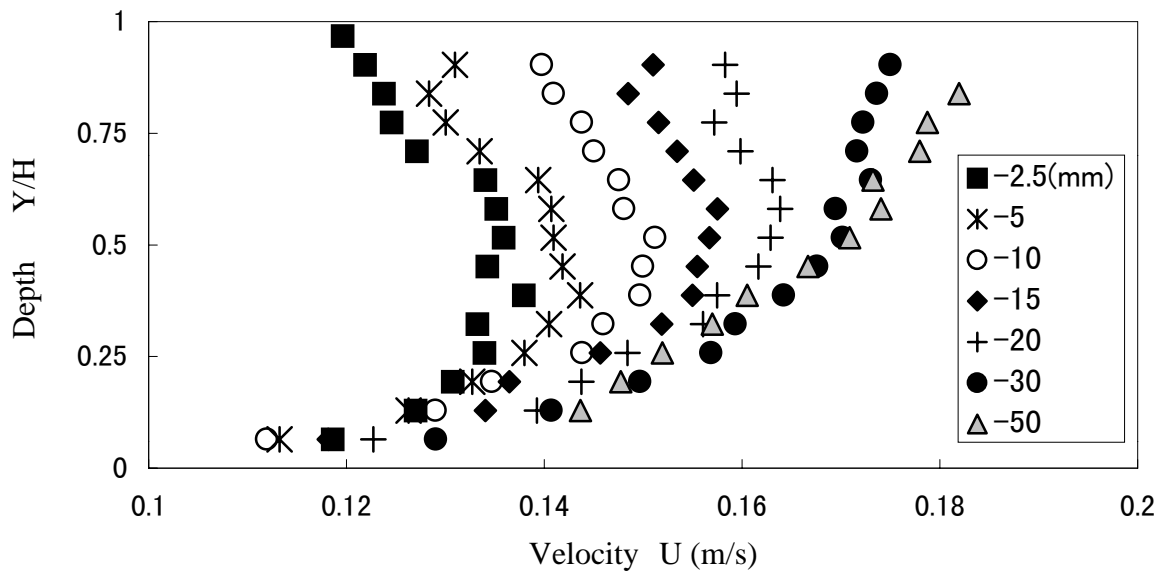


Fig.9 Velocity distributions of main flow (Case C-2)

4. おわりに

レーザ流速計を用いて開水路等流の3次元計測を行った。その結果、以下のような結論が得られた。

- (1) 今回の水理条件下では開水路の2次流は、水路中央部より側壁近傍のほうが大きい。
- (2) 水路横断面内に上昇部と下降部の2次流が形成され、それに対応して下降部の主流速成分は上昇部のそれと比べ相対的に大きい。
- (3) 水路側壁近傍では、上下に回転方向が相反する一対の渦が形成される。
- (4) 2次流が側壁に衝突する部分では、流れが流下方向に偏向し主流速が加速する。

本研究では、1つのプローブで水路側壁から3次元同時計測を行ったが、この場合測定できない個所が出てくる。また、水路側壁がアクリル製のため微細な傷やアクリルの歪み等で、測定が困難な場合がある。

今回の条件下では、明確に並列螺旋流のような流れの構造を見ることが出来なかった。今後様々な条件で、また、移動床で計測を行う必要がある。

参考文献

- [1] 木下良作、"河道形状と洪水流に関する検討業務報告書「並列らせん流に関する実験的研究」"、昭和51年度北海道開発局石狩川開発建設部委託調査、1977年。
- [2] 林泰造、"乱流現象の科学 その解明と制御"、東京大学出版会、1986年。
- [3] 井幡、西谷、牧野、"レーザ流速計による開水路流速分布の測定"、土木学会第26回関東支部技術研究発表会概要集、1999年。
- [4] 井幡、西谷、牧野、"レーザ流速計による開水路二次

元流速分布の測定"、土木学会第54回年次学術講演会概要集、1999年。

[5] 禰津家久、中川博次(1985)、"直線開水路乱流の三次元流れに関する実験的研究"、土木学会第29回水理講演会論文集、1985年、pp.969-774。

[6] 禰津、鬼束、Dan、"2成分LDAを2台用いた開水路流の3次元同時計測"、土木学会水工論文集第43巻、1999年。

キーワード.

LDV、2次流、流れの構造

Summary.

**Three dimensional Measurements of Velocity Distribution in Open Channel Flow
With Laser Doppler Velocimeter**

Hideki IBATA

Civil Engineering Major, Division of Engineering, Graduate School, HOSEI University

Takanobu NISHIYA Rippei MAKINO

Department of Civil Engineering, College of Engineering, HOSEI University

Open channel flow has a structure affected by the boundary walls. Flow velocity has the three direction components which are of main flow direction and the secondary flow directions perpendicular to the former. The main flow is stronger than the other secondary flows. Near the boundary walls, that is, channel bottom, side walls and free surface, the main flow weakened by friction of boundaries, appear distinguished the secondary flows. According to the distance from the side boundaries their influences become diminished, and the flow structure appears at the remote parts. For example, longitudinal helicoidal flow is observed by trajectories of dyestuff. In many cases the secondary flows are too weak to measure their velocities. Still more their turbulent flows make difficult to do so.

This paper is our first report of the measurements of flow by LDV. Some basic results are reaffirmed; that the position of the maximum velocity of main flow is a little beneath the free surface, and that there would be downward and upward velocity zones alternately in the cross section, etc.

Keywords.

LDV, Secondary Flow, Flow Structure