

レーザー流速計による堰のまわりの流れの計測

薦田 廣章*・森元 賢哉**

Measurements of the Flow around the Weir
by using Laser-Doppler-Velocimeter

by

Hiroaki KOMODA* and Kenya MORIMOTO**

Measurements of velocity around the solid body in the flow is very important in hydraulics. But, it is very difficult to measure velocity exactly, because the vertical profile of velocity behind the solid body so complex that there are almost no or backward components in the main flow direction.

However, in recent year we can measure the small components of flow by using LDV (Laser-Doppler-Velocimeter). So we set up the trapezoid weir model in the open channel with the smooth bottom and measured velocity around the weir model by using LDV. Then, we calculated the turbulent properties from measured data.

1. まえがき

過去から現在に至るまで、水の流れについては様々な研究がなされてきた。粘性を考慮にいれた流体運動の方程式 (Navier-Stokes 方程式) は、Navier(1823), Poisson(1831), Saint-Venant(1843), Stokes(1845)らの研究を経て完成された¹⁾。

層流流れの状況を知るにはこの Navier-Stokes 方程式を解析的に解けばよいが、非線形であるためかなり困難である。最近では計算機の高速度・大容量化により流れの条件によっては計算可能になった。

しかし、自然状態で実在する流れは地下水流れを除くとほとんどが乱流である。例えば数値積分に最も多く用いられる差分法を使って高レイノルズ数の乱流について計算する場合、格子点の数が非常に多くなり多大な計算時間が必要になる。また、流れの中に物体が存在する場合はさらに計算時間が長くなる。

そこで重要となるのが実験による解析である。現在に至るまでに様々な水理条件のもとで乱流に関しての

実験が行われてきたが、まだ発展段階であり、さらに多くの水理条件や実験装置を使って解明する必要がある。

本研究は、開水路内に台形堰を挿入し、そのまわりの流れの流速を LDV (Laser-Doppler-velocimeter) を用いて計測し、その後、得られた流速データをもとに乱流諸量を算定したものである。さらに、数値計算から求められた値と比較検討した。

2. 流速の計測

乱流の諸量を算定するにあたり、まず流速を計算しなければならない。流速の計測には以下のような方法がある²⁾。

1) 浮体追跡法:

軽い小片を水面に浮かせ、カメラを使ってその小片の速度を計測する方法。

2) 圧力法:

平成4年9月30日受理

*社会開発工学科 (Department of Civil Engineering)

**大学院修士課程土木工学専攻 (Graduate Student, Master course of Civil Engineering)

静水圧と総圧を測定して計算により流速を求める方法。

- 3) プロペラ式回転計法：
流れの中にプロペラを挿入し、その回転数から流速を求める方法。
- 4) 熱膜流速計：
ホットフィルムを用いる方法。
- 5) レーザー流速計：
流れの中に粒子を流してやり、その粒子がレーザー光を通過した時の周期から流速を求める方法。

今回行った実験では、流速を感じる部分が小さいという条件と時間変動に対する応答特性が良いという2つの条件を満たしているレーザー流速計を用いた。

レーザー流速計の特徴を以下に列挙する。

- 1) レーザービームが交差する点の流速を測定するため、流れの場を乱すことなく非接触の計測が可能である。
- 2) 流速の計測範囲が非常に広く、低流速でも精度良く計測することができる。
- 3) 流速の瞬間値を連続的に計測することができる。
- 4) 測定体積は、径0.05mm、奥行き0.5mm程度であるので密な計測が可能である。

3. 実験装置

実験水路は、Fig. 1 に示すような、長さ550cm、奥行き30cm、深さ60cm、水路床と壁面がアクリル製の長方形断面の固定開水路で、水路勾配はほとんど水平である。この開水路の上流端は水槽と接続しており、バルブを調節することにより規定流量の水をフィルターを通して開水路に流すことができる。一方、下流端にはゲートが取り付けられてあり、ゲート板を上下に移動させ

ることにより自由表面の形状を変えることができる。今回の一連の実験ではゲート開度は一定とした。ゲートを越流した水は下流の水槽に自由落下し、最終的には循環水路へ戻される。また、下流水槽には流量検定のJIS規格の四角堰が取り付けられている。

実験に先立ち、上記の四角堰の検定を行った。最小二乗法により、次式が求められた。

$$Q = 810 h^{1.312} \quad (1)$$

ここに、 Q は流量(cm^3/s)および h は四角堰の越流水深(cm)である。

また、堰の模型は厚さ1cmのアクリル板で製作した。その寸法をFig. 2に示す。この模型を開水路の上流端より約3mの位置に設置した。

4. 計測および実験方法

流速の計測は、流れの中に注入したシーディング剤のドップラー信号をレーザードップラー流速計により読み取る。そのデータを信号処理器に通して2次元データに変換した後パーソナルコンピュータに入力し、各瞬間の流速の水平方向および鉛直方向成分を求める。さらに、それらの計測値をもとに、平均流速、乱れ強度、乱流運動エネルギーおよびレイノルズ応力の各値を算出する。

なお、今回の実験ではデータ数を300~500個に固定し、データが等時間間隔で取り込まれていると仮定したうえで時間平均操作を行った。一つの測点に対して、3回から4回計測した。また、流量は計測した主流速分布を用いて数値積分を行った。さらに前述の四角堰の越流水深から(1)式を用いて求めた流量も参考としたが、両者の間にはほとんど差異はなかった。

なお、本実験ではレイノルズ数が7000~20000の範囲の乱流で、フルード数が1よりはるかに小さく水面変

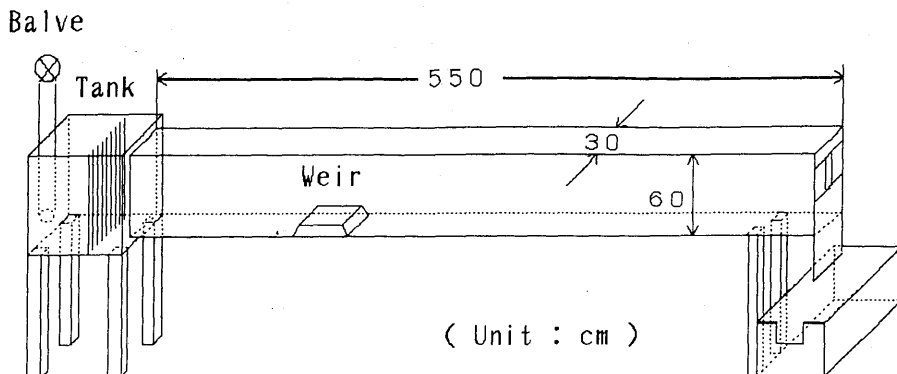


Fig. 1 Open Channel.

Table 1 Conditions of experiments.

CASE	Q (cm ³ /s)	H (cm)	U _m (cm/s)	U* (cm/s)	ν×10 ⁻² (cm ² /s)	Re	Fr
CASE 1	5000	10.98	15.40	0.82	1.07	15000	0.15
CASE 2	3800	10.20	12.72	0.73	1.09	11900	0.13
CASE 3	6500	11.85	18.88	0.98	1.10	20300	0.18
CASE 4	2400	9.31	8.70	0.50	1.10	6800	0.084
CASE 5	7400	12.07	19.06	1.10	1.19	20700	0.19

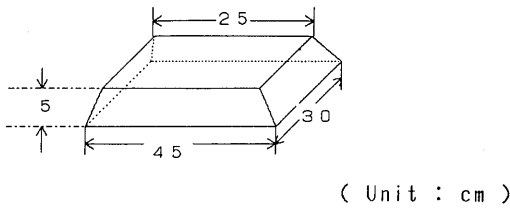


Fig. 2 Model of weir.

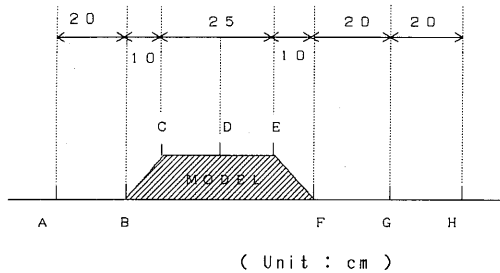


Fig. 3 Sections of measurements.

化がほとんどないような常流を対象とした。実験条件を Table 1 に示す。

計測断面および計測点は以下のとおりである。Fig. 3 に示すような堰の模型のまわりの 8 断面について鉛直方向に 5 mm 刻みで、一断面につき 10~15 点の流速を計測した。計測断面の奥行きは 10 cm とした。

まず、四角堰の越流水深を参考にバルブを調節することにより規定流量を上流水槽に流す。定常状態に達したことを確認して上流断面から流速の計測を開始する。

5. 実験結果および考察

5. 1 摩擦速度

まず流れを規定するうえで重要な量である摩擦速度を求める。いずれのケースにおいても計測断面 A の主流速分布は等流の主流速分布とほとんど一致する。

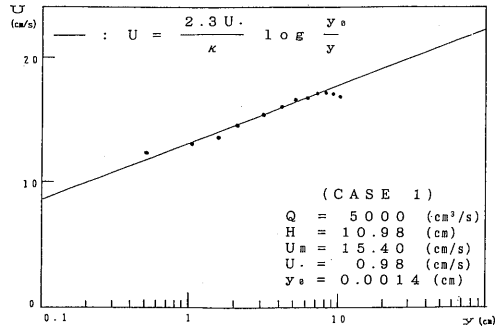


Fig. 4 Distribution of horizontal velocity.

開水路の乱流において、その主流速分布は水路床近傍と水面付近を除いて対数分布則

$$\frac{U}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y}{y_0} \tag{2}$$

に従うことが知られている。ここに U は各瞬間の主流速の平均値、U* は摩擦速度、κ は karman 係数 (κ = 0.41)、y は水路床から計測点までの距離および y₀ は長さの代表値である。そこで、片対数用紙の縦軸 (普通目盛) に計測断面 A の流速 U、横軸 (対数目盛) に y をとり、計測値をプロットして直線近似した。そして、その直線の傾きから摩擦速度 U*、切片から y₀ を求めた。一例として CASE 1 の計算結果を Fig. 4 に示す。

5. 2 水路床が滑面か粗面かの判定

次に、実験水路の水路床が滑面であるか粗面であるかの判定を行った。ここに、開水路における滑面および粗面の水路床の流速分布は次式で示される。

$$\text{滑面: } \frac{U}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{U_* y}{\nu} + A_s \tag{3}$$

(A_s = 5.5)

$$\text{粗面: } \frac{U}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y}{k_s} + A_r \tag{4}$$

(A_r = 8.5)

k_s: 相当粗度

そこで、片対数用紙の縦軸（普通目盛）に U/U_* を、横軸（対数目盛）に U_*y/ν をプロットした。摩擦速度は前節の方法より求めた値を用いた。一例として CASE 1 の結果を Fig. 5 に示す。図中の実線は(3)式の直線である。この図から滑面の流速分布式に従っていることが分かる。つまり、この水路はこの実験の流れに対しては滑面であるといえる。

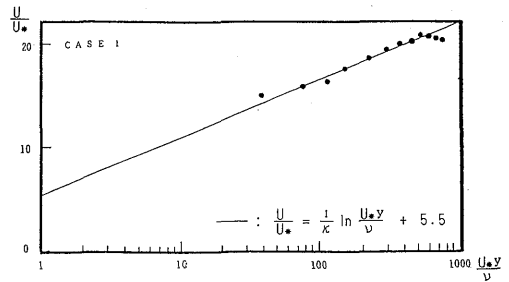


Fig. 5 Distribution of horizontal velocity in the open channel with the smooth bottom.

5. 3 平均流速

1) 水平方向成分

一例として CASE 1 の堰の背後における水平方向平均流速分布を Fig. 6, Fig. 7 および Fig. 8 に示す。流速 U は断面 A の平均流速 U_m で、計測点までの距離 y は各断面の水深 h で無次元化した。以下に各断面の流速分布の特徴を列記する。

断面 A：下流の堰の影響をほとんど受けず、対数分布則に従う。

断面 B：断面 A とよく似た流速分布であるが、断面 A と比較して流速勾配が水路床近傍では小さく、水面近傍では大きい。

断面 C：水路床近傍で最大値をとり、水面に近づくにつれて減少している。

断面 D：対数分布則に従っている。

断面 E：対数分布則に従っている。

断面 F： $y/h=0.3\sim 0.4$ の点で流速が 0 になり、 $y/h=0.2$ の点で逆流の流速は最大となる。

断面 G： $y/h=0.2$ の点で流速が 0 になり、水路床近傍で逆流の流速は最大となる。

断面 H：逆流は発生していないが、上流の堰の影響で水平方向平均流速は対数則に従わない。

2) 鉛直方向成分

鉛直方向の平均流速は断面 B, C, F および G では他の断面と異なる状況を呈する。すなわち、断面 B および C では鉛直上向き成分が観察された。とくに断面 C の水路床近傍では著しく大きい。断面 F および G では、鉛直下向き成分を観察することができた。

以上のことから堰の背後で逆流が存在し、大きな渦が発生していることが分かる。この渦は後流と呼ばれている。台形堰上の流れのように、流速が速くレイノルズ数が非常に大きい流れでは水路床のごく近傍に境界層が存在する。境界層内の流れは流れと反対方向の力を受けしだいに減速し、ついには静止する。この静止点より下流に逆流が発生し、順流と衝突することによって渦が発生する。この現象は境界層の剝離と呼ばれる。本実験では、台形堰の下流側の斜面上で境界層の剝離現象が発生していると予想される。

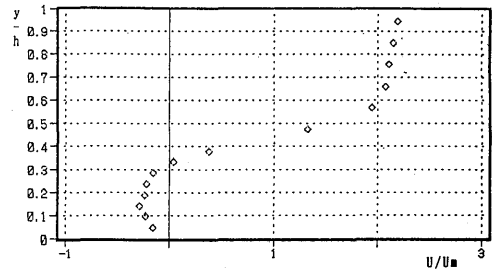


Fig. 6 Distribution of horizontal velocity at Sec.F.

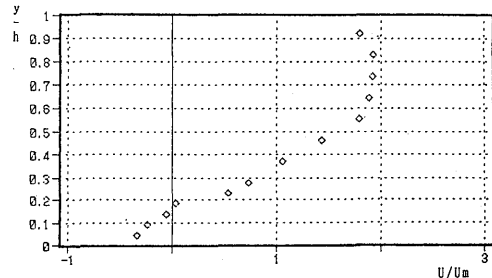


Fig. 7 Distribution of horizontal velocity at Sec.G.

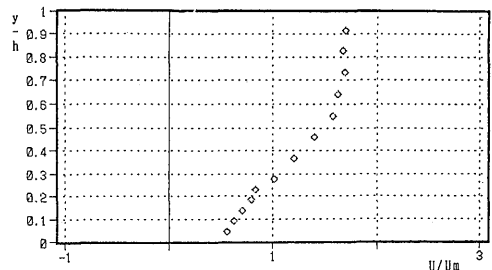


Fig. 8 Distribution of horizontal velocity at Sec.H.

5. 4 乱れ強度

乱れ強度は変動量の 2 乗平均の平方根 (root-mean-square) を用いて計算した。一例として CASE 1 の断

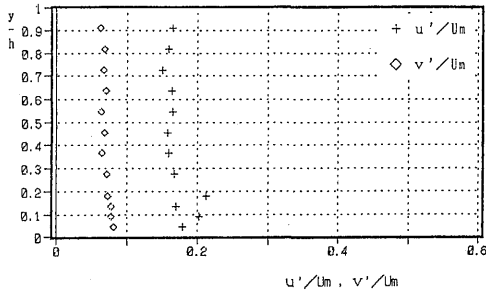


Fig. 9 Distribution of turbulence intensities at Sec.A.

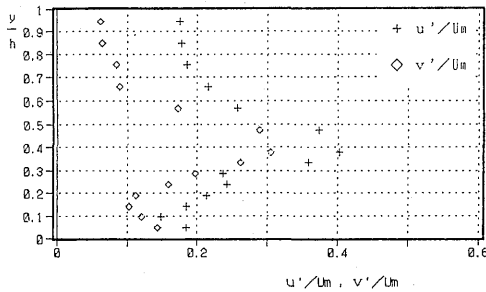


Fig. 10 Distribution of turbulence intensities at Sec.F.

面Aと断面Fにおける水平方向および鉛直方向流速成分の乱れ強度 u' と v' の分布を Fig. 9 および Fig. 10 に示す。以下、各断面の特徴について述べる。

断面A： u' および v' 両者とも水路床近傍でやや大きいものの鉛直方向にほぼ一定である。また u' の値は v' の値の約2倍である。

断面B：断面Aとほぼ同様である。

断面C： v' が水路床近傍で大きな値となる。これは台形堰の斜面に沿う流れが存在するためであると考えられる。

断面D：断面AおよびBに見られる特徴とほぼ同じである。

断面E：断面Dとほぼ同様である。

断面F：主流速が0となる点で u' および v' 両者とも著しく大きな値を観察することができた。

断面G：断面Fとほぼ同様である。

断面H：水路床の近くで u' および v' の両者とも大きな値をとるが、断面FおよびGと比較してやや小さな値となっている。

以上のことから、堰の背後では、渦が発生している近傍の点で流れが大きく乱れ、下流に行くに従い乱れが減少していることが分かる。

5. 5 乱流運動エネルギー

$k \sim \epsilon$ 乱流モデルを用いれば、乱流場はレイノルズ方程式、連続方程式、 k 、 ϵ の輸送方程式および渦動粘性係数に関する方程式で表すことができる。従って、 k の輸送方程式を数値計算することができれば、実験より得られた k の分布と比較することができる。

一般に、乱流運動エネルギー k は

$$k = 0.5 \times (u'^2 + v'^2 + w'^2) \tag{5}$$

で表されるが、本実験では流れに対して横断方向の流速成分 w は計測していない。従って、乱れ強度 w' は計算することができない。そこで、 $v' \approx w'$ と近似して計算した。また、乱流運動エネルギー分布の特徴は乱れ強度分布の特徴とほぼ等しくなる。

6. 数値計算との比較

実験と同時に数値計算も行った³⁾⁴⁾。計算領域は水平方向130個、鉛直方向40個の鉛直方向に不等間隔の格子(底面近傍を密に分割した)である。使用したプログラムは以下の特徴を持っている。

- 1) 基礎式を一般曲線座標で展開しているので、任意の境界形状を取り扱うことが可能である。
- 2) 移流項の差分化に際し、3次精度のQUICKスキームを用いているので、高レイノルズ数の数値計算を行うことができる。
- 3) 乱流場が解析できるように標準的な $k \sim \epsilon$ 乱流モデルを組み込んでいる。
- 4) poisson 方程式解法に関しては、ベクトル化することにより演算時間の短縮を計る。
- 5) 自由表面の境界条件(運動学的、力学的および連続条件)を考慮している。

モデル定数および境界条件は標準的な数値や一般に使用されている条件を用いた。対象はCASE 5である。流入流速境界条件に関しては、CASE 5の断面Aにおける計測値を無次元化したものを用いた。流入壁面に

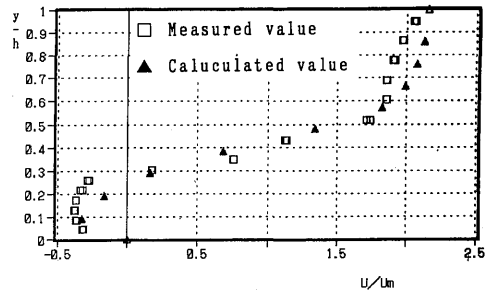


Fig. 11 Measured and calculated values of horizontal velocity at Sec.F.

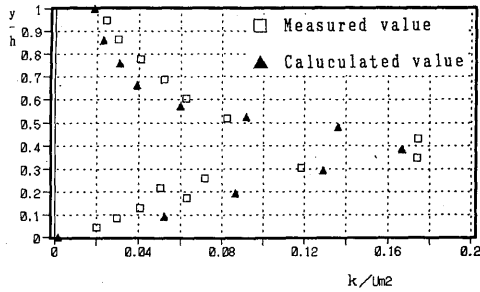


Fig. 12 Measured and calculated values of turbulent energy at Sec.F.

おける k および ε の分布は自由表面を考慮した瀬津の半理論式⁹⁾を用いた。一例として逆流を伴う断面Fの水平方向平均流速および乱流運動エネルギーをFig. 11 および Fig. 12 に示す。両図とも断面Aの平均流速で無次元化しているが、計算値と実験値はほぼ一致する。

7. 結 び

LDV を用いて堰のまわりの流れを計測した結果、以下のことが分かった。

- 1) 順流と逆流が共に存在するような点においても、計測が可能である。
- 2) 2次元の流速をプロットすることにより、台形堰の背後に大きな渦が観測された。
- 3) 流速分布だけでなく、乱流運動エネルギーの分布も数値計算と比較することができる。

問題点としては、以下のことが挙げられる。

- 1) シーディング剤（ポスターカラーの銀粉）の流れに対する影響が不明である。
- 2) レイノルズ応力の分布のばらつきが大きく、計測データの信頼性はあまり高くない。

謝 辞

末筆ながら本研究の実験に協力いただいた、松崎大介（現佐藤工業）、前田繁房（鹿島建設）両君に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 谷一郎；流体力学の進歩・乱流，1980，p.1，丸善株式会社。
- 2) 石原・本間；応用水理学・水理実験下I，1971，pp.117-128，丸善株式会社。
- 3) 薦田・上杉；一般化座標を用いた堰のまわりの流れの数値解析，土木学会西部支部研究発表会講演

概要集，1991，pp.262-263。

- 4) 前田・森元・薦田；一般曲線座標による堰のまわりの流れの数値計算，土木学会西部支部研究発表会講演概要集，1992，pp.330-331。
- 5) 瀬津・中川；自由水面を考慮した開水路乱流の数値計算手法—修正 $k-\varepsilon$ 乱流モデルによる解法—，京都大学防災研究所年報，第29号，B-2，1986，pp.1-27。