

## LDVによる開水路流れの速度ベクトル計測について (3)

今本 博健・石垣 泰輔・梶間 厚邦

### VELOCITY VECTOR MEASUREMENT BY LASER DOPPLER VELOCIMETER IN AN OPEN CHANNEL FLOW (3)

By *Hirotake* IMAMOTO, *Taisuke* ISHIGAKI  
and *Atsukuni* KAJIMA

#### Synopsis

Three dimensional structure of turbulent flow near a corner in an open channel was investigated experimentally. LDV measurements of all velocity components were carried out in three rectangular channels which had different aspect ratio,  $B/H=1$  to 5. And also a flow visualization technique was used.

In experiments, it was confirmed that two kinds of dominant secondary flow, which occurred intermittently, were observed near the corner, one was flow to the corner and the other departed from the vicinity of side wall near the water surface. Based on the results, a model of three dimensional structure of flow near a corner is illustrated.

#### 1. はじめに

二次流は、主流の曲りにより引き起されるもの（第一種の二次流）と、乱れの非一様性に起因するもの（第二種）の2種に分類されることが Prandtl<sup>1)</sup> により指摘されている。本報は後者を対象としており、主に開水路流れにおける従来の研究を要約すると以下のようである。

Nikuradse<sup>2)</sup> は、非円形管における流下方向の平均速度を詳細に計測し、等速度線が隅角部に向って歪曲するという結果を得、Prandtl はこの結果を第二種の二次流によるものと説明した。このような現象論的な研究により、最大流速点が水面より降下する現象および水面の浮遊物が水路中心部にかたよる現象などについて検討されて来た。近年、木下<sup>3)</sup> が、洪水時の河川表面を航空写真で観察し、流下方向に並んだボイルからなる縦筋と浮遊物の収斂線が横断方向に水深程度の間隔で並ぶことより並列らせん流の存在を指摘して以来、森ら<sup>4)</sup>、今本ら<sup>5)</sup>、中川ら<sup>6)</sup>により開水路流れに見られる二次流と縦渦について研究されている。一方、ダクト流についても多く研究され、Brundrett & Baines<sup>7)</sup>、Gessner & Jones<sup>8)</sup>、Perkins<sup>9)</sup> らがコーナ部の流れについて詳細な計測を行っている。以上は実験的研究であるが、理論的研究は Einstein & Li<sup>10)</sup> が流下方向の渦度に関する式を用いて二次流の存在を間接的に証明して以来、石原・村本<sup>11)</sup>による局所的な圧力勾配に基づく説明、林・山田<sup>12)</sup>および吉川・池田<sup>13)</sup>の渦度式に基づく検討、および黒木・岸<sup>14)</sup>の不安定解析を用いた検討などが行われている。一方、Chiu<sup>15)</sup> や Naot & Rodi<sup>16)</sup> により数値解析法により開水路流れの二次流が計算されている。

このように多くの研究がなされているが、二次流あるいはそれにより誘起される縦渦は、従来の点計測法では捉えにくく可視化法等による定性的な検討が主になされ、その発生機構や詳細な構造については未解明の点が多く残されている。本研究は、このような乱流状態の開水路流れに見られる組織立った流れの3次元の挙動を定量的評価により解明することを目的としている。その第一段階として、LDV による速度3成分同時計測法（速度ベクトル計測法）の有効性を確かめ<sup>17)</sup>、その手法を水深規模の縦渦が安定して存在する粗

Table 1 Hydraulic conditions

Case	Channel width $B$ (cm)	Depth $H$ (cm)	Discharge $Q$ (l/s)	Slope $I_s$	Reynolds number $R_s$	Froude number $F_s$
LDV measurement $B/H=1$	4.0	4.01	0.329	1/1200	2900	0.57
〃 $B/H=3$	12.0	4.00	1.200	1/1100	5800	0.52
〃 $B/H=5$	20.0	4.00	2.055	1/1400	7700	0.48
Flow visualization $B/H=5$	20.0	3.98	1.478	1/500	6100	0.30

面上の流れに適用して流れの3次元構造について検討して来た<sup>18)</sup>。本報は、前述した従来の研究により二次流の存在が指摘されている隅角部付近の3次元構造を検討するため、開水路側壁近傍の流れに上記の計測法を適用した結果を示すものである。

ここに用いた水理条件をまとめて **Table 1** に示す。

## 2. 速度ベクトル計測法による検討

### 2.1 平均速度場の特性

#### (1) 平均速度分布特性

ここでは **Fig. 1** に示す各格子点において行った速度3成分の同時計測結果を用い、開水路側壁近傍の平均速度場の特性について検討する。なお、各点での計測時間は256秒であり、周波数200 Hzにてサンプリングした51200個のデータを統計処理した。

**Fig. 2** は、流下方向平均速度  $U$  の等速度線を各ケースについて示したものである。各ケースの結果を比較すると、同一の  $z/H$  の範囲の分布は定性的に良く一致しており、側壁からの距離が分布形を決定する一つのパラメータとなることが示唆される。図中、水路幅・水深比 ( $B/H$ ) が1および3の場合には、最大流速点の降下が水路中央まで明確に認められるが、 $B/H=5$  では  $z/H=2$  付近までその影響が見られる。また、いずれのケースにおいても、水面付近の等速度線が水路中央に傾いているのが認められるとともに、 $B/H=3$  および5では隅角凹部への等速度線のひずみと  $z/H=0.5\sim 0.75$  付近の上方へのひずみが見られる。これらは、隅角凹部で見られる二次流と関係する結果であり、後述の二次流ベクトルの計測結果でよく

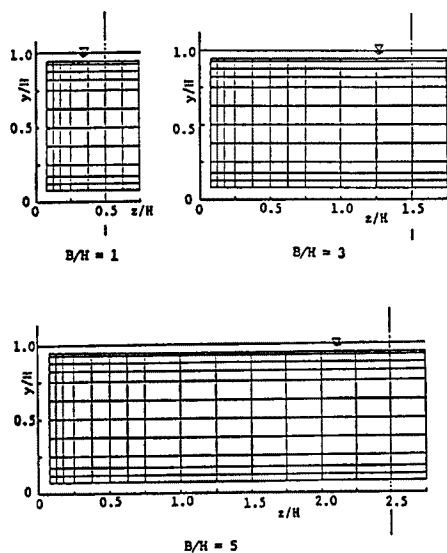


Fig. 1 Measuring points by LDV.

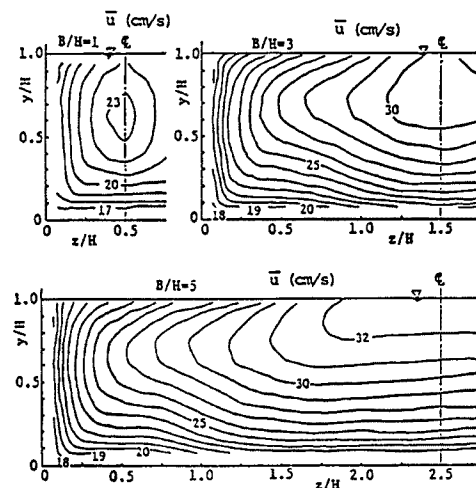


Fig. 2 Contour lines of longitudinal mean velocity  $U$ .

説明される。

次に、 $U$  の鉛直分布を側壁からの距離の異なるいくつかの測線について  $B/H=5$  の結果のみ Fig. 3 に示す。なお、データ整理に用いた摩擦速度  $U_\tau$  は、各測線毎に底面近傍の計測結果を用いてカルマン定数  $\kappa=0.4$  として算定したものをを用いている。図より、 $z/H=1.5$  より側壁寄りの部分では 2 次元開水路流れで見られる速度分布から水面付近より徐々に離脱し、側壁極近傍では一様な分布となることが知れる。他のケースについても同様の結果を示すことが Fig. 2 の結果から推定される。

(2) 二次流速度分布特性

Fig. 4 に二次流速度ベクトルの計測結果を示す。図中、 $V$  は鉛直方向平均速度、 $W$  は横断方向平均速度の長時間平均値であり、これらをベクトルで示したものである。図より、いずれのケースにおいても隅角凹部へ向う流れと、 $z/H=0.5\sim 0.75$  の範囲で上昇する流れ、および水面付近での水路中央へ向う二次流の存在が明確に認められる。これらの流れの存在は、Fig. 2 に示した等速度線の歪曲を説明するものである。二次流の強さは、水面で最も大きく局所平均流速の 5% 程度であり、隅角凹部へ向う流れで 2% 程度である。

図に示した計測結果を用いて計算される流下方向渦度  $\xi \left( \frac{\partial W}{\partial y} - \frac{\partial V}{\partial z} \right)$  の分布を等値線で示すと Fig. 5 のようになる。水面付近の渦と隅角部底面での渦の存在が明確に示されており、 $B/H=5$  のよび 3 における隅角部底面の渦は、そのスケール、渦度の大きさがほぼ同等である。一方、 $B/H=1$  の場合には、両側壁および底面の影響を強く受け、渦のスケール、渦度の大きさも小さなものとなっている。水面での渦は偏平であり、 $B/H=5$  では  $z/H=2.0$ 、 $B/H=3$  では

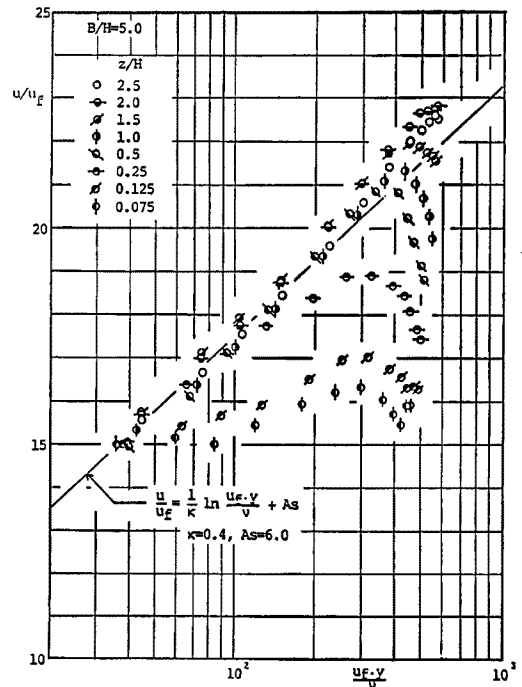


Fig. 3 Vertical distribution of longitudinal mean velocity  $U$ .

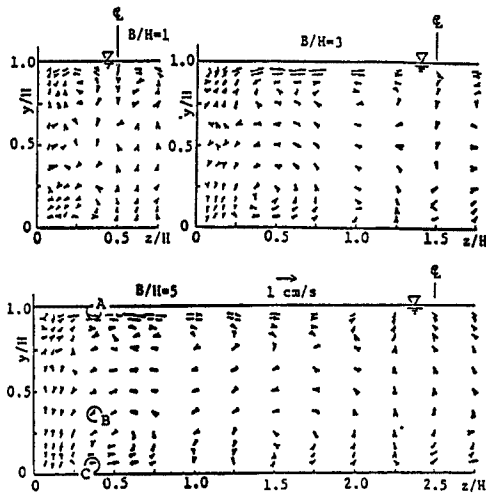


Fig. 4 Secondary flow vectors in cross sections.

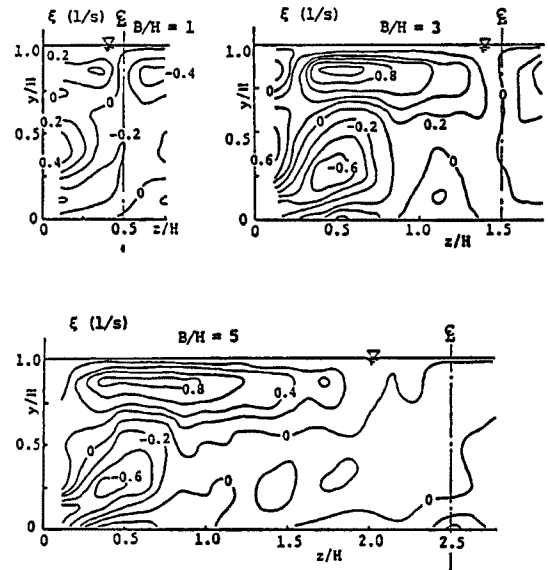


Fig. 5 Contour lines of longitudinal component of vorticity,  $\xi = \frac{\partial W}{\partial y} - \frac{\partial V}{\partial z}$ .

$z/H=1.5$  の水路中央まで及んでいる。しかしながら、このような偏平な渦の存在には疑問が残され、後述する流れの可視化結果により再検討する。

以上の結果より、側壁近傍にはつぎのような二次流の存在が指摘される。すなわち、隅角凹部に向う流れが底面に沿って回り込み、 $z/H=0.5\sim 0.75$  付近で上昇して半水深程度のスケールを持つ縦渦を形成するものと、隅角凹部に向った流れが側壁に沿って上昇し、水面の存在のために水路中央部へ方向を変えるものの2種の流れである。

次に Fig. 4 で示した二次流ベクトルの経時変化を、図中の  $B/H=5$  の結果に示した A~C の3点について Fig. 6 に示し、それらの変化特性について考察する。A 点は、水路中央へ向う流れの卓越した水面付近の計測点、B 点は隅角部に向う二次流が顕著に認められる点、および C はその二次流が底面に沿って流れる路床付近の点である。なお、流下方向速度については平均値との差を用いており、鉛直方向速度  $V$  は上向きが正、横断方向速度  $W$  は水路中央向きが正であり、速度そのものを表わしている。なお、波形およびベクトルは、0.1 秒の移動平均を施した後のデータを用いて示している。

水面近傍における A 点の結果を見ると、二次流の卓越方向は水路中央に向う方向であり、 $W>0$  の極大値と  $u<0$  の相関関係より、強い二次流の発生とそれに伴う低速流体の水路中央への輸送が確認される。また、それらは定常的に発生するものではなく間欠的であることが変動波形より知れる。B 点での変動波形より、 $u$  と  $V$  については  $u$  の極大値と  $V<0$ 、極小値と  $V>0$  が良い対応を示すこと、 $u$ 、 $V$ 、 $W$  の3成分について見ると  $u$ : 極大、 $V<0$ 、 $W<0$  が卓越した相関を持つこと、が認められる。これより、この点では流体の混合が激しく、長時間平均値で捉えると、隅角部へ向う流れが卓越しているという事が分かる。また、卓越した流れはこの点でも間欠的である。C 点では、 $W$  は多くの時間において正であり、低速流体の間欠的上昇 ( $u<0$ 、 $V>0$ ) が認められる。

これらの結果より、二次流の間欠性が指摘されるが、その卓越方向の速度ベクトルの発生周期を図より算定し、水深  $H$  と局所平均流速  $U$  で無次元化して示すと、A 点で 1.55、B および C 点ではそれぞれ 1.13、1.00 となり、流下方向の間隔は水深程度であることが推定される。また、二次流の強さは、Fig. 4 で示したように、平均値で見ると最大でも局所平均流速の 5% 程度であるが、瞬間的には 10% を大きく越える大きさとなる。

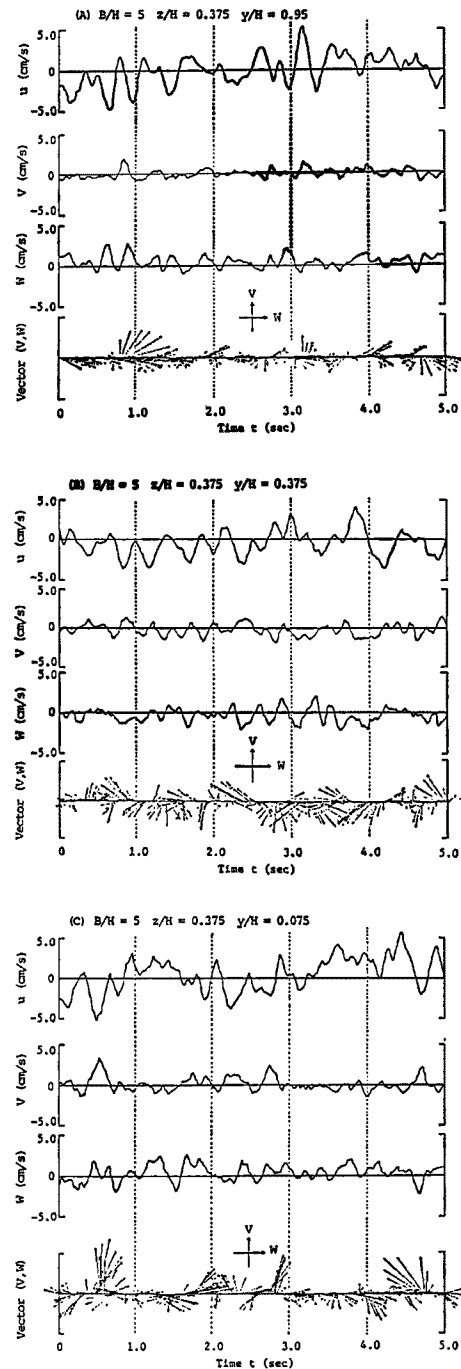


Fig. 6 Fluctuation of primary and secondary flow velocity.

2.2 乱れ特性

(1) 乱れの強さ, レイノルズ応力分布

乱れエネルギー  $k$  ( $= (u'^2 + v'^2 + w'^2)/2$ ) の分布を摩擦速度  $U_f$  の2乗で無次元化して Fig. 7 に示す。図より, いずれのケースにおいても側壁近傍の分布は同一の  $z/H$  に対してはほぼ同形であり, 低乱れ領域の隅角凹部への突出, 水面付近の高乱れ領域の水路中央方向への凸状分布などから, 2.1 で示したような二次流の存在が確認される。このように分布形が側壁からの距離  $z/H$  で推定されるため,  $B/H=5$  の結果を用いて Fig. 8 に乱れの強さ  $u', v', w'$  の各成分の鉛直分布を各測線において示し, それらの分布特性について見る。図は各成分を  $U_f$  で無次元化して示しており, 水路中央 ( $z/H=2.5$ ) での乱れの強さは  $u' > w' > v'$  の大小関係を示し, 路床で大きく水面に近づくにつれて減少する2次元流れと同様の分布特性を示しているが, 側壁に近づくにつれて乱れの強さが鉛直方向に一様化する傾向を示し, 側壁近傍の  $z/H=0.125$  では  $u' > v' > w'$  となり, 側壁の影響を強く受けている。 $u'$  の分布について見ると,  $z/H=2.0$  より水面付近から乱れの強さが増大し, 側壁近傍では鉛直方向にほぼ一様な分布となっている。水面付近の  $u'$  の増大は水路中央に向う二次流の影響と考えられる。

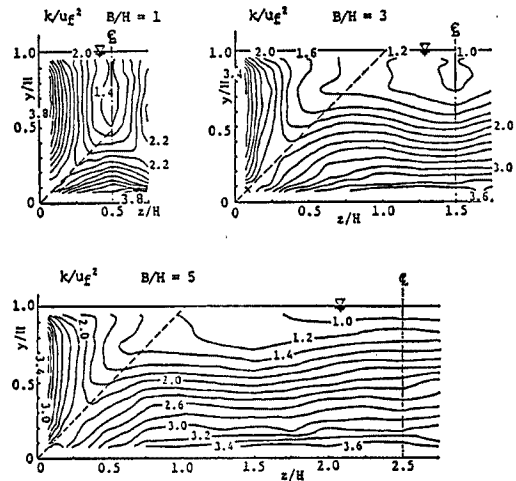


Fig. 7 Turbulence kinetic energy  $k$ .

以上のように, 乱れの強さは3次元的な分布を示すが壁面近傍での値には普遍性が見られ, いずれのケースにおいても  $u'/U_f \approx 2, v'/U_f \approx 1.0$  (底面) ~あるいは 1.3 (側壁),  $w'/U_f \approx 1.3$  (底面) あるいは 1.0 (側壁),  $k/U_f^2 \approx 3.6$  程度の値を示す。

次にレイノルズ応力  $-\overline{uv}, -\overline{vw}, -\overline{uw}$  の分布特性について検討するが,  $B/H=1$  および 3 の結果につ

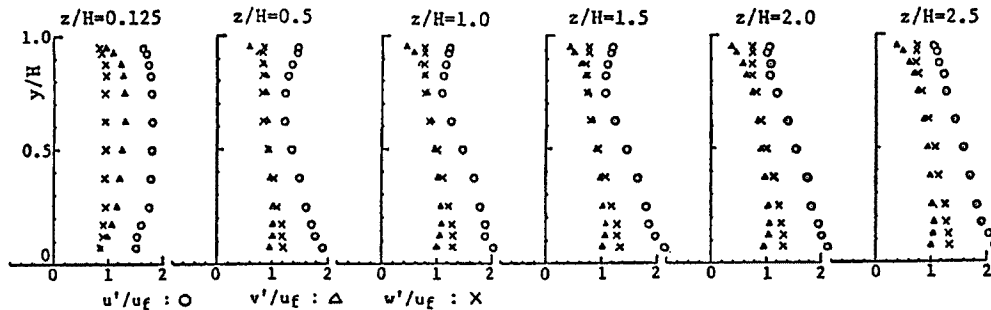


Fig. 8 Distribution of turbulence intensities,  $u', v',$  and  $w'$ .

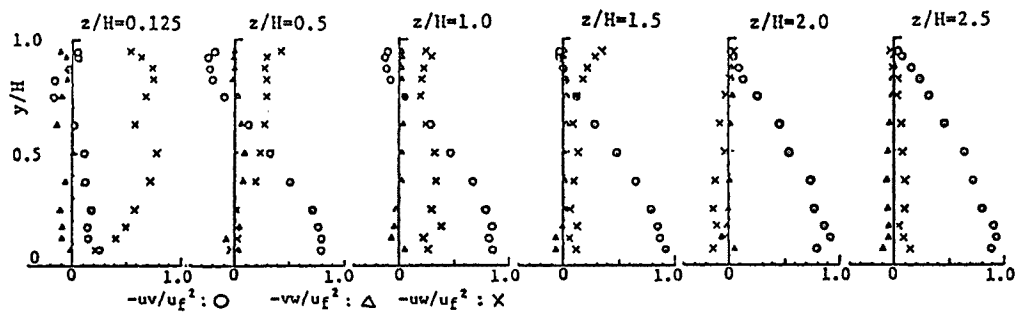


Fig. 9 Distribution of Reynolds stress,  $-\overline{uv}, -\overline{vw}, -\overline{uw}$ .

いては  $z/H=5$  の結果において同一の  $z/H$  の分布で特性が代表されるため、ここでは Fig. 9 に示した結果を用いる。

図は各レイノルズ応力を  $U_0^2$  で無次元化して示しており、乱れの強さと同様に  $z/H=2.5$  では二次流れと同様の分布を示すが、側壁に近づくにつれて  $-\overline{uv}$  が減少するとともに  $-\overline{uw}$  が増加している。また、 $-\overline{uv}$  が 0 となる位置は最大流速点の降下位置と対応しており、 $z/H=2.0$  より側壁側では二次流の影響により  $-\overline{uv}$  の分布に負の領域が認められる。一方、 $-\overline{uw}$  の分布を見ると、側壁に近づくにつれて水面近傍より増加し、側壁近傍で最も大きな値を示す。なお、 $-\overline{vw}$  はいずれの側線においても小さくほぼ 0 に近い値となっている。

以上のレイノルズ応力の分布と二次流との関係を次のような考え方により検討する。すなわち、後述する乱れエネルギーの生成項  $(-\overline{uv} \frac{\partial U}{\partial y}$  および  $-\overline{uw} \frac{\partial U}{\partial z})$  がほぼ全断面において正となるため、レイノルズ応力と速度勾配は同一符号を有する必要がある、それらの符号と境界条件を考慮して二次流の方向を推定する。

まず、 $-\overline{uv}$  について見ると、側壁に近づくにつれて水面付近に負の領域が現われ低速流体の流れが推測されるとともに、側壁極近傍の水面近くで再び正の部分が見われ、この付近に微小な二次流の存在が推定される。また  $-\overline{uw}$  について見ると水路中央ではほぼ 0、 $z/H=2.25$  で負、 $z/H=1.75$  ではほぼ 0、 $z/H=1.5$  で正となることが全水深について言える。これより、横断方向の速度分布が  $z/H=2.5$  で極小値、 $z/H=1.75$  で極大値となることが推定され、 $z/H=1.75$  で上昇、 $z/H=2.5$  で下降という水深規模の渦構造の存在が確かめられる。また、隅角部付近について見ると  $-\overline{uv}$  と  $-\overline{uw}$  の一致する点は、隅角のほぼ 2 等分線上にあり、この線上での流体要素は 2 等分線を含む面内で回転するような力を受け、それが隅角部に向う二次流の誘因になると考えられる。

## (2) 乱れエネルギーの生成項および逸散率

ここでは、乱れエネルギーの生成項および逸散項の分布について、 $B/H=5$  の結果を用いて検討する。

Fig. 10 は、乱れエネルギーの生成項を  $-\overline{uv} \frac{\partial U}{\partial y}$ 、 $-\overline{uw} \frac{\partial U}{\partial z}$  とその和について横断面内の分布を等値線図で示したものである。図より、乱れの生成については底面が支配的な領域と側壁が支配的な領域が明確に

判別され、隅角を二等分する線で分けられる。また隅角凹部へ向う二次流の最も顕著に現われる領域では、 $-\overline{uv}$  と  $-\overline{uw}$  による乱れの生成が相互に干渉し合う位置であることが知れる。

Fig. 11 は、乱れのエネルギースペクトルの慣性領域に Kolmogorov の  $-5/3$  乗則を適用して算定したエネルギー逸散率  $\epsilon$  を  $U_0^3/H$  で無次元化した値の等値線図を示したものである。なお、スペクトルはデータ数 1024 個、繰り返し数 50 回として計算したものであり、スペクトル定数は  $C=0.5$  としている。この図を Fig. 10 の生成項の分布と

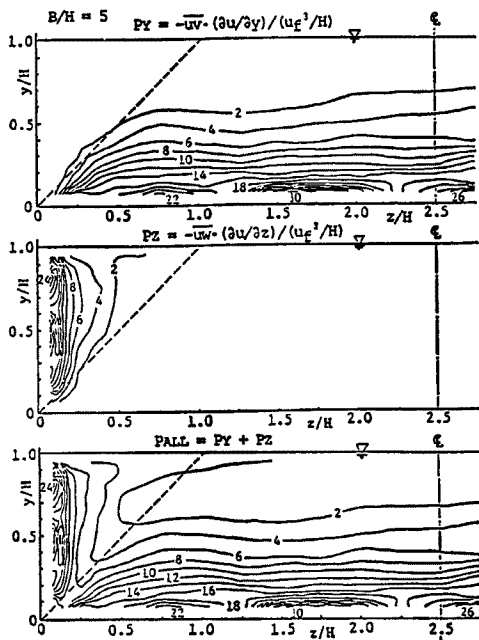


Fig. 10 Turbulence energy production.

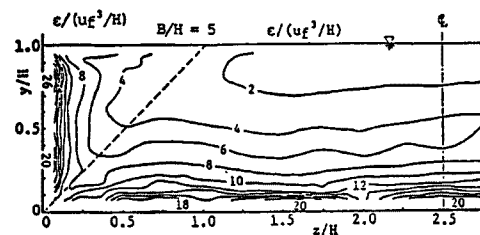


Fig. 11 Turbulence energy dissipation rate  $\epsilon$ .

比較して見ると、分布特性そのものは比較的類似しており、水路中央部付近では、生成項と逸散項が釣り合う平衡領域の存在が見られるが、隅角部付近では生成項の方が逸散項より大きく、乱れエネルギーの輸送項および拡散項が乱れエネルギー収支に寄与していることが知れる。

### 3. 側壁近傍の流れの3次元構造

#### 3.1 可視化法による検討

前章において長時間平均場より隅角凹部近傍の流れの3次元構造について検討したが、これらの構造は間欠性を有し、定常的に存在するものではないため、長時間平均場で捉えにくいものである。このため、可視化法などの瞬間的に場の情報が得られる方法により検討を加える必要があり、ここでは、中立粒子を用いたトレーサ法を用いて検討する。実験装置および方法は、既報<sup>17)</sup>に示す通りであるが、概要は次のようである。すなわち、平均粒径 0.45 mm、比重 1.05 のポリスチレン粒子をトレーサとして用い、5 mW の He-Ne レーザ光源にて作られるシート光で照明し、35 mm スチルカメラおよび内視鏡を用いたビデオカメラにより流れの水平・縦断・横断面を可視化する方法である。

**Photo 1** は、半水深の高さにおける水平断面流況の移動撮影結果であり、撮影条件は、絞り  $F=1.2$ 、露光時間  $T=1/4$  秒、4倍の増感現像をしている。以下に示す可視化結果は  $B/H=5$  のケースにおけるものであり、流れは紙面に向かって左から右、カメラを設置した台車の速度は断面平均流速である。また、照明用レーザ・ビームを所定の時間間隔にて遮断することにより痕跡線の長さに変化をつけてトレーサの移動方向が判別できる工夫をしており、ここに示した写真では痕跡線の長いものから短いものに向う方向がトレーサの移動方向である。

**Fig. 12** は、水面近傍 ( $y/H=0.9$ )、半水深 ( $y/H=0.5$ ) および路床近傍 ( $y/H=0.1$ ) の各高さにおける水平断面流況の撮影結果より、各断面において共通して見られる流況が捉えられているネガフィルムを用い、トレーサのパスラインを図化したものである。図より、(a) の水面近傍の結果では、 $z/H=0.25$  付近で側壁

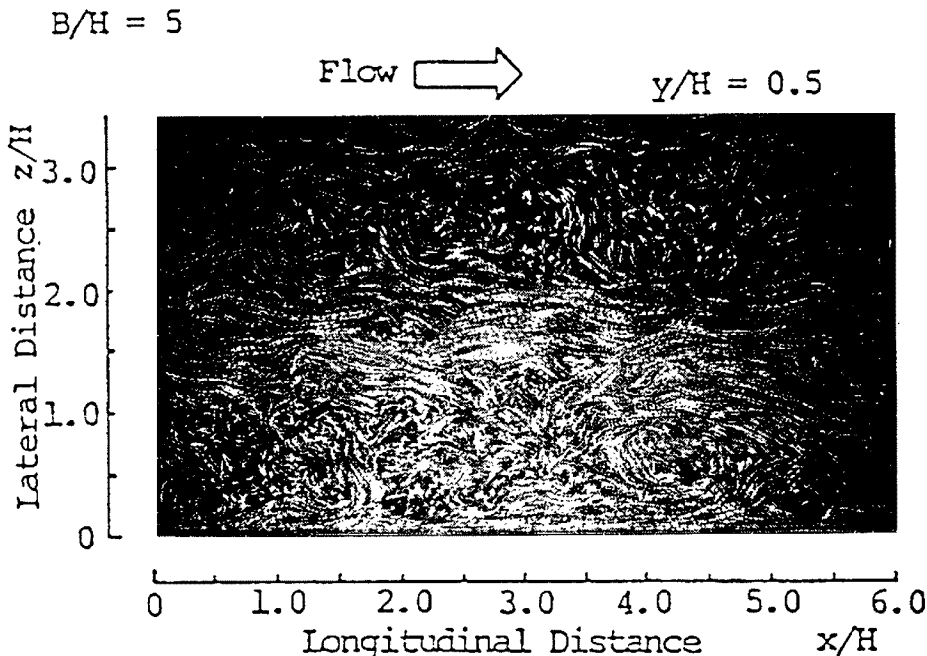


Photo. 1 Example photograph of pass lines of neutral tracers in a horizontal section near the water surface obtained by a camera set on a moving carriage.

に向う流れと水路中央に向う流れとに分れており、流体の連続性および水面近傍の結果であることを考慮すれば、上昇する流体の存在が推察される。一方、 $z/H=1.5\sim 2.0$  付近では粒子の集中が見られ、この付近での流体の沈み込みが推察される。(b)の半水深高さにおける結果では、 $z/H=0.5\sim 1.0$  の範囲で側壁から水路中央へ向う動きおよびその下流側で水路中央から側壁へ向う動きが対となって認められる。これは従来多くの研究結果により指摘されている隅角部へ向う流れを捉えたものと考えられ、その間欠性が伺える。 $z/H=1.5$  付近では粒子の集中が見られ、 $z/H=2.5$  付近では粒子の発散が島状に見られる。次に(c)の路床近傍における結果を見ると、 $z/H=0.5\sim 1.0$  付近では粒子の集中、 $z/H=1.0\sim 2.0$  では粒子の発散、および  $z/H=2.5$  付近では再び粒子の集中が認められ、路床近傍という条件を考慮すると、それぞれ、上昇、下降、上昇という流体の動きが推察される。

Fig. 13 は、縦断面流況の撮影結果とパスラインのトレース図を、側壁近傍および側壁より  $0.5H$  ごとに示した結果であり、 $z/H=2.5$  の位置は水路中央に相当する。

(a)の側壁近傍の結果を見ると、水面付近に粒子の集中する箇所が見られるものの、全体としては上方に向う動きを示し、側壁に沿った低速流体の上昇が観察される。(b)の  $z/H=0.5$  および(c)の  $z/H=1.0$  の結果では、路床より水面までの全域で複雑な粒子の挙動が見られ、トレーサの移動方向も上昇と下降の両者が認められる。また、粒子の集中する箇所の存在より横断方向の動きが推察される。 $z/H=1.5$  および  $z/H=2$  では路床近傍を除いてゆるやかにトレーサが下降するのが観察され、水深規模の流体の上昇に比して流体の下降は拡がりを持つものと考えられる。一方、 $z/H=2.5$  の水路中央では路床より水面まで達する

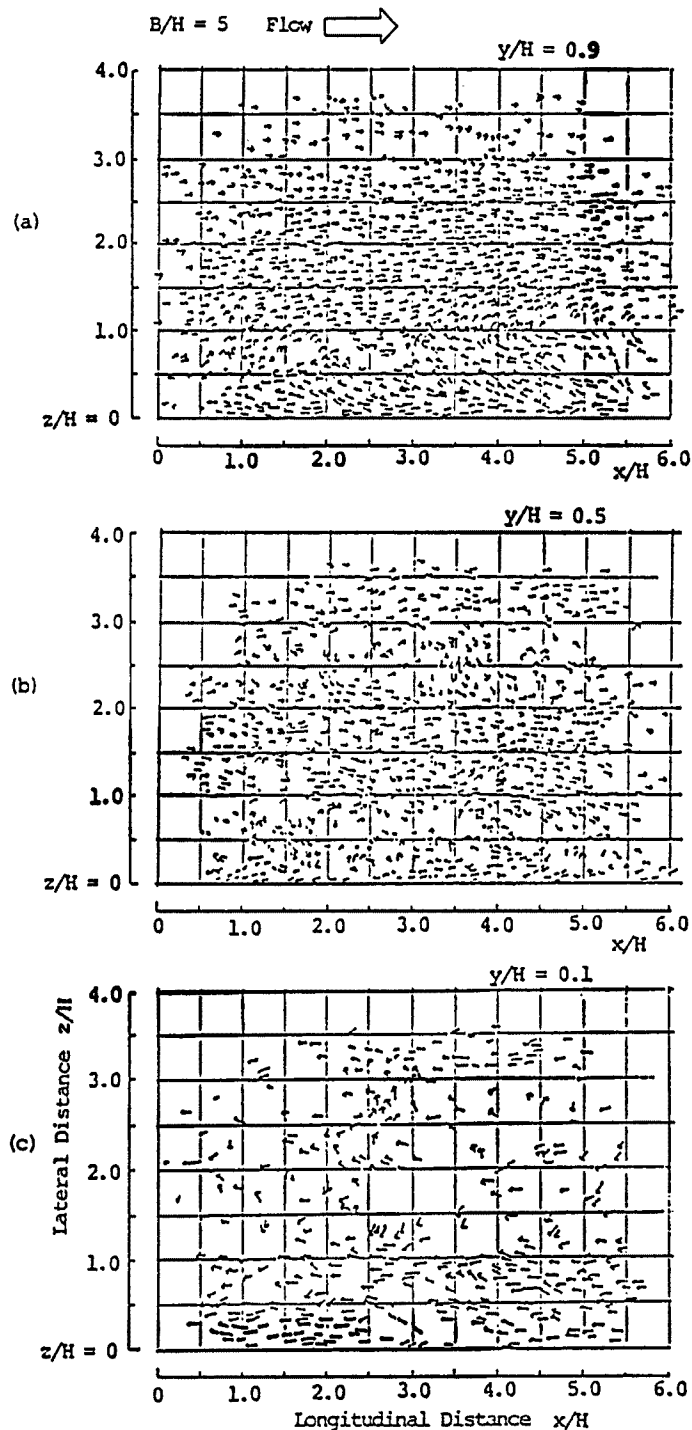


Fig. 12 Pass lines of neutral tracers in horizontal sections,  $y/H=0.9, 0.5$  and  $0.1$ .



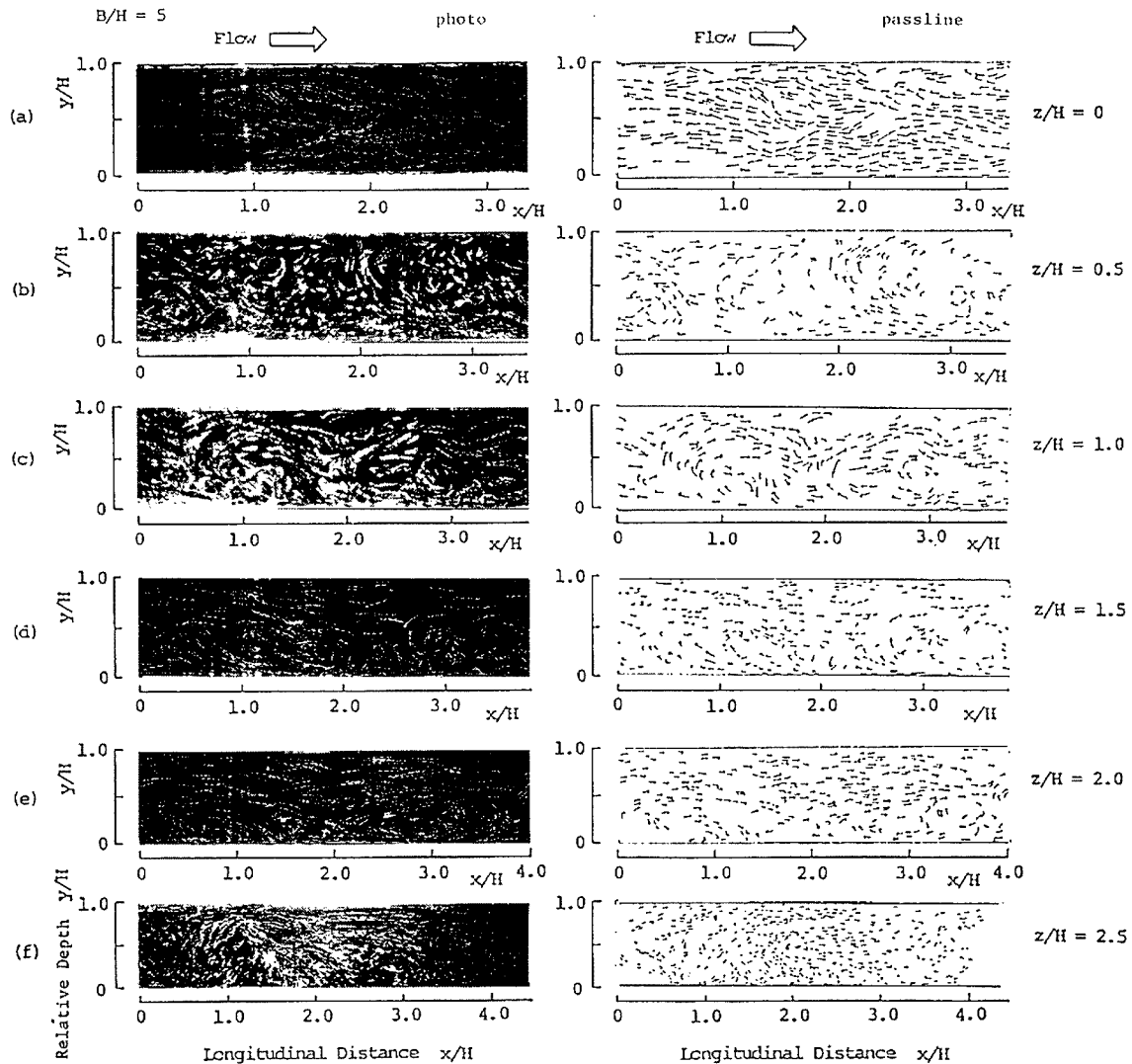


Fig. 13 Pass lines of neutral tracers in vertical sections,  $z/H=0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5$ .

水深規模の流体の動きが間欠的に観察され、図に示すように ( $x/H=1.0\sim 1.5$  付近), 急激な上昇をする。

以上のように、間欠的ではあるが、水深規模の組織的な流体の挙動が観察され、これらの結果と 2 で示した LDV による計測結果を合わせて、次節で流れの 3 次元構造の推定を行なう。

### 3.2 側壁近傍の流れの 3 次元構造

ここで、側壁近傍の流れの 3 次元構造について得られた知見を要約して示すと以下のものであり、a)~d) は LDV による速度ベクトル計測結果より、e)~f) は可視化結果より得られたものである。

- a) 流下方向の等流速度の歪曲より、水面付近での側壁より水路中央へ向う二次流、および隅角凹部への流れと  $z/H=0.5\sim 0.75$  での上昇する流れが同時に認められる。
- b) 二次流ベクトルの計測結果およびその結果を用いて得られた流下方向渦度の分布より、a) で示した二次流の存在と、隅角部底面側の渦構造および水面付近での扁平な渦構造の存在が指摘される。
- c) 二次流ベクトルの経時変化の検討より、a) で示された二次流の間欠性が示されるとともに、その流下方向間隔が水深のオーダーであることが推定される。
- d) 平均速度場における結果より、側壁近傍の流れは  $B/H$  に依らず側壁からの距離で統計量の分布が推定

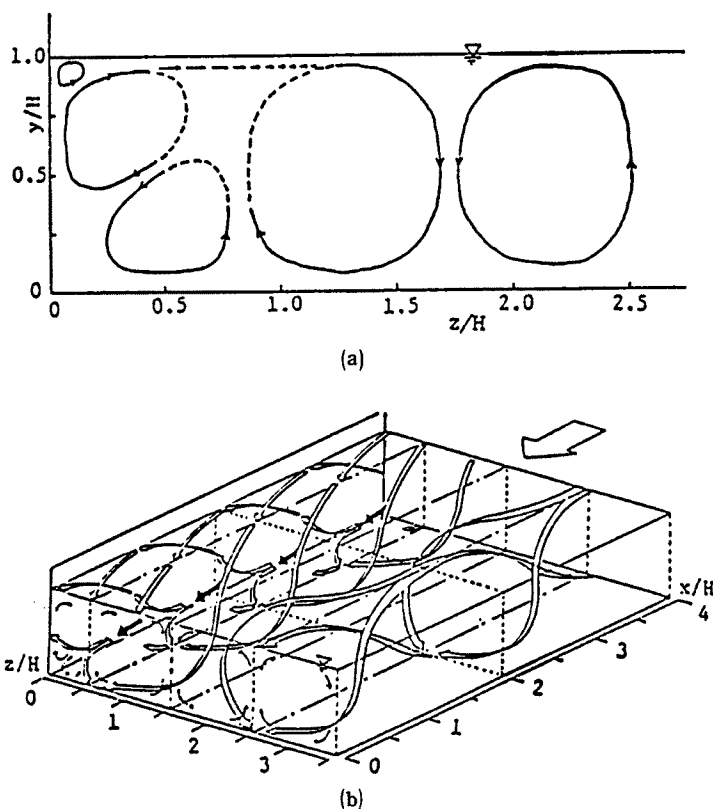


Fig. 14 Model of three-dimensional structure of a flow near a corner in an open channel flow.

されることより、側壁近傍の流れの構造には相似性が見られる。

- e) 水面近傍では、側壁より  $0.25H$  付近での流体の上昇および  $1.5 \sim 2.0H$  付近での流体の下降が見られ、半水深では間欠的な隅角部への流れとそれを補う逆方向の流れが  $z/H = 0.5 \sim 1.0$  付近で見られる。また、路床では、 $z/H = 0.5 \sim 1.0$  で上昇、 $z/H = 1.0 \sim 2.0$  で下降、 $z/H = 2.5$  で上昇する流体の動きがある。
- f) 縦断面で見ると、側壁近傍では上昇、 $z/H = 0.5 \sim 1.0$  で上昇と下降、 $z/H = 1.5 \sim 2.0$  で下降、 $z/H = 2.5$  で上昇という流体の挙動が観察された。

以上の点と、前節までに述べた結果を説明するものとして、横断面内では Fig. 14(a) のような渦構造が考えられるが、前述したようにこれらは3次元的な構造を有し、その間欠性などを考慮して3次元的に描くと Fig. 14(b) のようになる。すなわち、隅角部2等分線上に生じた隅角凹部へ向う二次流（図中黒矢印）は間欠的に発生し、その後側壁と底面に沿って分離する。側壁へ向う流れは壁面に沿って上昇して水面に達し、水面の存在のため水路中央部へと方向を変え、 $z/H = 1.5 \sim 2.0$  付近でゆるやかに沈み込む。一方、底面に向った流れは  $z/H = 0.5 \sim 1.0$  の付近で上昇し、新たに生じた二次流にまき込まれて再び隅角凹部へ向う。なお、(b) に示した水面付近での扁平な渦構造は可視化結果では確認されず、いくつかの渦構造の合成されたものが長時間平均値に表われたものと考えられる。また、水路中央部に見られる二次流に誘起された縦渦とは、図に示すような関係にあると考えられるが、詳細については今後さらに検討する必要がある。

#### 4. おわりに

本研究は、開水路流れの側壁近傍を対象にして3種の水路幅・水深比の水路でLDVによる速度ベクトル

計測および中立粒子トレーサ法による流れの可視化を行った結果を用い、その流れの3次元構造について検討したものである。以下にその主な結果を示す。

- 1) 側壁近傍で計測された平均速度等の統計量の分布には強い相似性があり、 $B/H$  の値に依らず側壁から同一の位置  $z/H$  における分布形は同様の結果となる。
- 2) 同様のことが、そこに存在する二次流およびそれにより誘起される渦構造にも言える。ここで卓起した二次流は、水面近傍における側壁付近より水路中央へ向う流れおよび半水深付近より隅角の2等分線上を凹部に向う流れとそれが底面に沿って流れ  $z/H=0.5\sim 1.0$  上昇するものである。
- 3) これらの流れは間欠的に発生し、その発生間隔は局所平均流速と水深で規定される時間スケールと同程度であり、その強さの最大値は平均流速の10%を大きく越えるものである。
- 4) 以上の点は速度計測と流れの可視化結果の両者より確かめられ、側壁近傍の流れの構造を説明するモデルとして Fig. 14 が示された。
- 5) また、 $B/H=5$  のケースにおいて水路中央部分における水深規模の縦渦の存在が、レイノルズ応力および乱れエネルギーの生成項の分布より推定された。

今後は、詳細なデータ解析と実験により流れの構造の普遍的特性について検討して行く予定である。

最後に、本研究を遂行するにあたり実験ならびにデータ解析に協力された京都大学大学院生の西田雅氏に対し謝意を表します。

#### 参 考 文 献

- 1) Prandtl, L.: Essentials of fluid dynamics, Blackie, London, 1952.
- 2) Nikuradse, J.: Untersuchungen über die Geschwindigkeitsverteilung in Turbulenten Strömungen, Diss. Göttingen, 1926. after Schlichting, H, Boundary-layer theory, McGRAW-HILL, 1968.
- 3) 木下良作：航空写真による洪水流の解析，その乱流構造と表面の流れかたの特性について，日本写真測量学会誌，Vol. 6, No. 1, 1967, pp. 1-17.
- 4) 森 明巨，黒木幹雄，岸 力：開水路で見い出された二次渦に関する実験，第26回土木学会年次学術講演会概要集 II-107, 1971.
- 5) 今本博健，宇民 正，上野鉄男，日紫喜剛啓，仲井公哉：開水路流れの大規模乱流構造と構造物周辺の局所流との関連について，京都大学防災研究所年報，第22号 B-2, 1979, pp. 469-490.
- 6) 中川博次，称津家久，富永晃宏：開水路流れにおける横断方向の縞構造と大規模乱流，土木学会論文報告集，321号，1981, pp. 93-105.
- 7) Brundrett, E. and W.D. Baines: The production and diffusion of vorticity in duct flow, J. Fluid Mech., 19, 1964, pp. 375-394.
- 8) Gessner, F.B. and J.B. Jones: On some aspects of fully-developed turbulent flow in rectangular channels, J. Fluid Mech., 23, 1965, pp. 689-713.
- 9) Perkins, H. J.: The formation of streamwise vorticity in turbulent flow, J. Fluid Mech., 44, 1970, pp. 721-740.
- 10) Einstein, H. A. and H. Li.: Secondary currents in straight channels, Trans. American Geophysical Union, Vol. 39, No. 6, 1958, pp. 1085-1088.
- 11) 石原藤次郎，村本嘉雄：二次流の発生機構について，第7回水理講演会論文集，1962, pp. 77-82.
- 12) 林 泰造，山田 正：開水路における縦渦の形成に関する研究，第21回水理講演会論文集，1977, pp. 245-253.
- 13) 吉川秀夫・池田駿介：正方形断面を持つ直線水路の速度分布に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，No. 250, 1976, pp. 63-71.

- 14) 黒木幹男・岸 力：開水路に発生する縦渦の構造の研究，土木学会論文報告集，312号，1981，pp. 83-92.
- 15) Chiu, C. L. and D. E. Hsiung : Secondary flow, shear stress and sediment transport, Jour. of Hydraulics Division, Proc. ASCE, Vol. 107, HY7, 1981, pp. 879-898.
- 16) Naot, D. and W. Rodi : Calculation of secondary currents in channel flow, Jour. of Hydraulics Division, Proc. ASCE, Vol 108, 1982, pp. 948-968.
- 17) 今本博健・石垣泰輔：LDV による開水路流れの速度ベクトル計測について(1)，京都大学防災研究所年報，第28号，B-2，1985，pp. 471-486.
- 18) 今本博健・石垣泰輔・梶間厚邦：LDV による開水路流れの速度ベクトル計測について(2)，京都大学防災研究所年報，第29号，B-2，1986，pp. 627-645.