

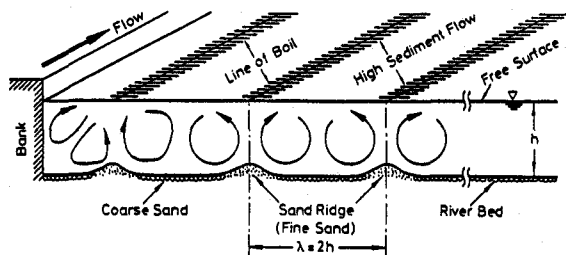
直線開水路乱流の三次元流れに関する実験的研究

Experimental Study on Three-Dimensional Flow in Straight Open Channel

京都大学 工学部 正員 称 津 家 久
京都大学 工学部 正員 中 川 博 次

1. まえがき

直線開水路乱流の三次元流況に関する研究は、この2次流成分が主流の最大流速点の自由水面より降下する現象、水路横断方向への表面流速、浮遊砂濃度分布あるいは河床形状の規則的な変化の原因と考えられ(図・1参照)、基礎水理学のみならず河川工学上からも重要な課題である。筆者らは、この河床の凹凸分布すなわち縦筋(sand ridge)に注目し、これを模擬したダクト流実験を行い、凸部で上昇し凹部で下降する明確な2次流セル(縦渦)を見出し、この内部機構を検討した。¹⁾次に、ダクト流のアスペクト比を系統的に変化させ、縦渦群の発生機構を検討した。²⁾その結果、縦渦はアスペクト比が4以上の平坦なダクト中央部には発生しないが、ダクトのコーナー2次流が惹起すると考えられる縦筋を人工的に設置するとこの両側に一对の縦渦が形成され、このように縦渦と縦筋との相互作用によって図・1のような整然とした2次流セル群が水路全断面に形成されると推測された。ホットフィルムによる開水路実験でも半水深以下の流れのパターンはダクト流と相似で、縦渦と縦筋との密接な関連性は確認されたが、自由水面の存在がこれらの運動機構にいかん影響を及ぼし、流れの三次元流況が形成されるかは依然不明である。しかし、直線水路で見られる2次流速は主流速に比べて高々2~3%の微流速であり、これを実測するには高精度の流速計が必要とされる。筆者の一人は、昨年ドイツのカルスルーエ大学水理研究所に滞在し、0.1%以下の誤差内で水流計測が可能な2色レーザ流速計の処理システムを開発した。³⁾本研究は、この流速計を用いて開水路の2次流成分を詳細に実測したデータを解析したものであり、主流速分布、壁面せん断応力分布及び縦渦パターンに及ぼす自由水面の影響を検討する。



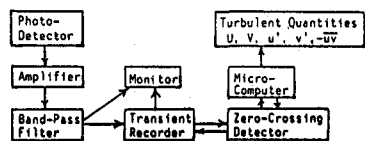
図・1 直線状河川の三次元流れの予想図

2. レーザ流速計の光学系及び信号処理システム

既存の後方散乱型アルゴンレーザ流速計をSN比を高めるために前方散乱型に改造した。レーザは2Wの高強度であり、青と緑の2色に分光され、計4本のビームは周波数シフトを行うためそれぞれブラックスセルを通して計測点で焦点させ、2成分同時計測を行った。受光器は、水路反対側に発光器系とは独立に設置されたが、両光学系の移動装置は精度が0.01mmであり、計測点ごとの微調整は容易であった。通常、散乱粒子が発するドップラ・バースト信号を周波数トラッカで流速変動に変換するアナログ手法がよく用いられるが、ここでは散乱粒子の不連続による信号欠損(ドロップアウト)を避け、SN比の高いバースト信号のみから流速を算定するデジタル手法を採用した。図・2に示すように、個々のバースト信号はデジタルでトランジェントレコーダに記録され、しきい値を設けてSN比の高い信号のみからゼロクロス法によってドップラ周波数が実時間で計算され、これらの集合平均から周波数・速度の変換式を用いて平均流速 U 、 V や乱れ強度 u' 、 v' などの乱流統計量が得られた。5KHz程度の流速変動まで解析でき、バーストの集合平均個数は1500個にとられ、これに要する2成分計測時間は測点ごと約6分間であった。従来のホットフィルム流速計に比べて、特に平均流速(絶対速度)の計測精度が良く、流速の方向特性が何んら検定なしで求められるから2次流成分を高精度に計測できることが判明した。³⁾

3. 実験装置及び解析方法

実験は、水路幅60cm、高さ1m、長さ20mの長方形断面の可変勾配型滑面水路で、等流条件で行われた。表・1に示すように、アスペクト比 B/h (ここで、 B =水路幅、 h =水深)は、1, 2, 6及び10の4通り変えられ、最大流速 U_{max} は約



図・2 レーザ流速計の信号処理システム

60 cm/s とほぼ一定であり、2 次流に及ぼす断面形状の影響を検討できる。また、 $B/h=10$ のケース AW-2 では低レイノルズ数にし、 $B/h=2$ のケース CW-2 では射流にして 2 次流に及ぼすレイノルズ数 Re 及びフルード数 Fr の影響が検討された。⁴⁾ 主流方向を x 軸、鉛直上方を y 軸、水路横断方向を z 軸にとると、計測断面位置は水路上流端から $x=18$ m 下流である。十分に発達した 2 次流を得るためには $x/4R \geq 60$ (ここで、 R は径深) が必要であり、⁵⁾ この条件を満足するように $B/h=1$ 及び 2 のとき水路全長にわたりしきり板を設置し、 $B=20$ cm にした。

レーザ光軸面は水路床に一致するように目視で調節され、さらに鉛直方向の平均流速 $V(z)$ が $\int_{-B/2}^0 V dz \equiv 0$ の収支関係を満足するように光軸の角度が修正された (0.2° 以内の修正だった)。横断方向の流速成分 W をレーザ流速計で計測するにはレーザ光線を河床から入射させねばならず、本実験のような大型水路では不可能である。このため、本研究では十分に発達した乱流条件での連続式を使って、

$$W(y, z) = -\int_{-B/2}^z (\partial V / \partial y) dz \quad (\text{水路中央軸で } z=0 \text{ とする}) \quad \dots\dots\dots (1)$$

と計算された。式 (1) を精度よく求めるために、 V の変化が大きい水路側壁部での計測を密とし、 $\partial V / \partial y$ はスプライン近似曲線の微分から得られた。計測点数は最大 297 点 (AW-1) であり、1 ケースの計測に 3 日間要した。まず、半水深 $y/h=0.5$ の位置で水路全横断面にわたり (U, V) の計測が行われ、その結果、水路中央軸 $z=0$ に関して対称な分布が得られ、 $W(y, z=0)$ もほぼゼロとなり境界条件を満足することから、本実験データは十分な精度をもつものと考えられる。⁴⁾ なお、この開水路流と比較するダクト流の実験は空気流で行われ、熱線で U, V, W の 3 成分が計測された²⁾ (表・1)。 $x/4R$ は若干小さいが、その計測結果は Melling らの水流ダクトの結果によく一致し、⁶⁾ 本実験値と比較・検討が十分できる精度をもつものと考えられる。

4. 実験結果及びその考察

(1) 主流速分布 図・3～6 はアスペクト比 B/h を 10, 6, 2, 1 とそれぞれ変化させたときの主流速 $U(y, z)$ のコンタであり、 U/U_{max} の値が表示されている。図・3(b) にはダクト流の結果を比較のため併示した。図には各断面位置 z で現われる最大流速点 y_{max} を結ぶ最大流速線を太線で示した。この最大流速線の形状は側壁からの距離 $z/h \equiv z/h + B/2h$ に対してアスペクト比によらずにほぼ同じであることが注目される。図・3(a) の AW-1 を例にとると、 $z/h=0.5$ ($z/h=-4.5$) までは DW-1 と、 $z/h=1.0$ までは CW-1 と、 $z/h=3.0$ までは BW-1 とほぼ同じ分布形状をなしている。すなわち、側壁近くでは y_{max}/h は 0.4～0.5 とほぼ一定であり、 $z/h \div 0.2$ から増加するが、 $z/h \div 0.8$ ではほぼ一定の 0.7 に達し、その後、 $z/h=1.8$ から再び増大し、 $z/h=2.2 \sim 2.5$ で自由水面に達する。この結果から、 B/h が 5 以下の開水路では水路中央軸 $z=0$ の位置でさえ、最大流速点は自由水面下に完全に没し、全断面で三次元流況が現われる。主流速コンタの形状に関しても z/h に対してアスペクト比によらずにほぼ同一となり、このことは B/h が大きな流れ場の流速コンタが得られるとこれより小さい B/h でのコンタを推測できることを示している。図・3(b) のダクト流と比較すると、開水路の最大流速線は長く、自由水面の影響が顕著に現われる。コンタの凸部はダクト流では隅角部に張り出すが、開水路流では最大流速線に沿って側壁方向にほぼ水平に張り出し、2 次流パターンが相連することがこれからも推測される。図・7 は河床及び側壁上での主流の対数則を検討した一例である。二次元開水路の流速分布則として、次式が提案され、外部層で式 (2) の第 3 項の Wake 関数を考慮すべきことが指摘された。³⁾

$$U/U_* = \frac{1}{\kappa} \ln yU_*/\nu + A + \frac{2\Pi}{\kappa} \sin^2\left(\frac{\pi}{2} y/y_{max}\right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

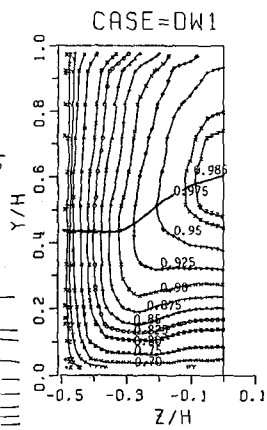
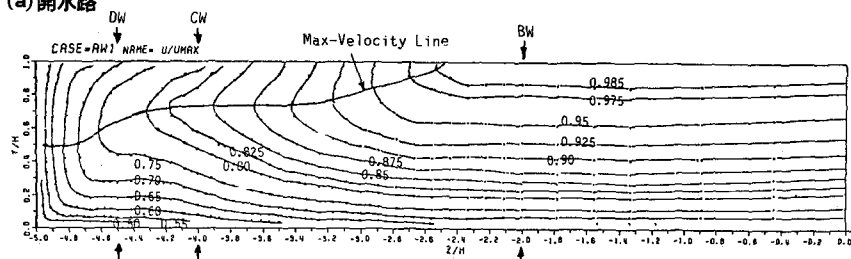
ここで、 $\kappa=0.41$ 、 $A=5.3$ であり、 Π は Re の関数で 0～0.2 の値をもつ。内部層 ($y/y_{max} \leq 0.2$) では通常の対数則となり、実測値との比較から河床及び側壁上のせん断応力 $\tau_b \equiv \rho U_{*b}^2$ 及び $\tau_w \equiv \rho U_{*w}^2$ がそれぞれ評価された。図・7 に示すように、平均流速 U/U_{*b} の鉛直分布は $y^+ \equiv yU_{*b}/\nu$ に対して $z/h=0.1$ 程度の側壁近傍まで内部層内で対数則によく従い、

(a) Open Channel (Water Flow)										
Case	h (cm)	B/h	R (cm)	U _{max} (cm/s)	U _{mc} (cm/s)	$\bar{U}_{sb}$ (cm/s)	$\bar{U}_{sw}$ (cm/s)	Re $\times 10^4$	Fr	x/4R
AW-1	6.0	10.0	5.0	58.70	50.75	2.394	2.074	9.1	0.66	90
AW-2	6.0	10.0	5.0	16.72	14.51	0.764	0.633	2.6	0.19	90
BW-1	10.0	6.0	7.5	55.49	48.64	2.073	1.848	13.7	0.49	60
CW-1	10.1	2.0	5.0	59.01	53.53	2.417	2.376	9.7	0.54	90
CW-2	10.3	1.9	5.1	133.69	122.75	5.196	5.073	23.1	1.22	90
DW-1	19.5	1.0	6.6	58.72	53.55	2.276	2.279	12.8	0.39	68
(b) Closed Duct (Air Flow)										
AA-1	4.0	10.0	3.3	716.2	624.1	31.2	27.5	6.0		38
BA-1	4.0	6.0	3.0	709.5	616.0	30.4	27.8	5.4		42
CA-1	4.0	2.0	2.0	719.7	620.7	31.4	30.2	3.6		63

U_{mc}=Mean Vel. at z=0, $\bar{U}_{sb}$ =Mean Friction Vel. on Bed, $\bar{U}_{sw}$ on Side-Wall

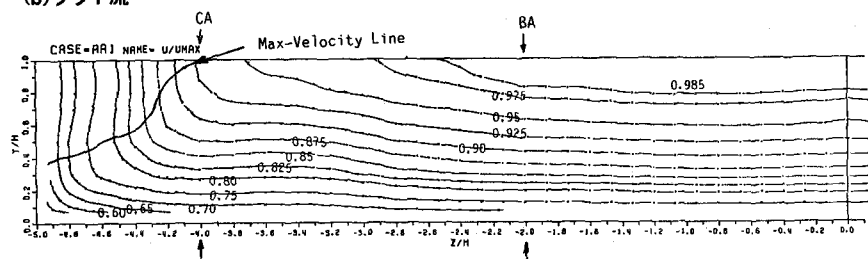
表・1 水理実験表 (開水路流とダクト流)

(a) 開水路

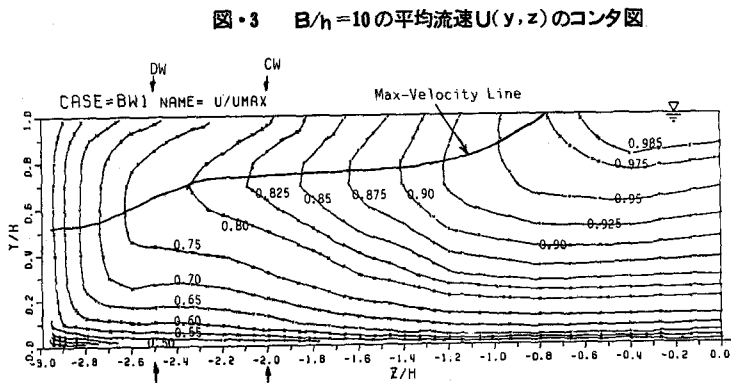


図・6 $B/h=1$ の
平均流速コンタ図

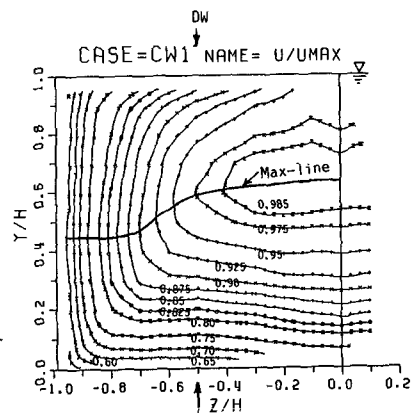
(b) ダクト流



図・3 $B/h=10$ の平均流速 $U(y, z)$ のコンタ図

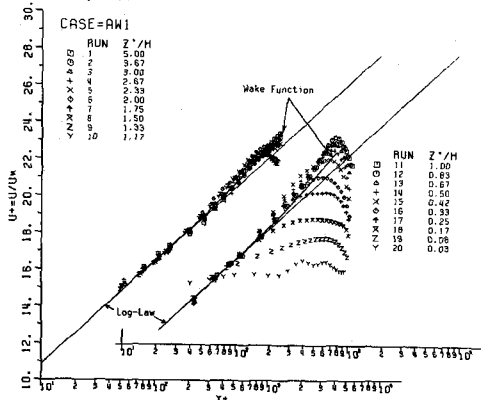


図・4 $B/h=6$ の平均流速コンタ図

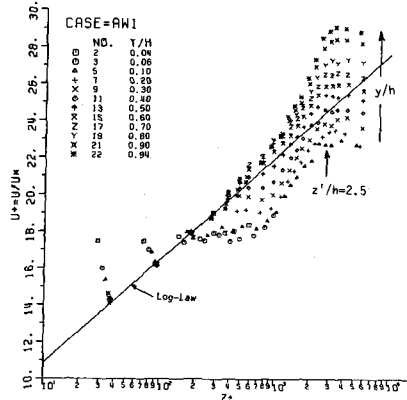


図・5 $B/h=2$ の平均流速コンタ図

(a) 河床上



(b) 側壁上

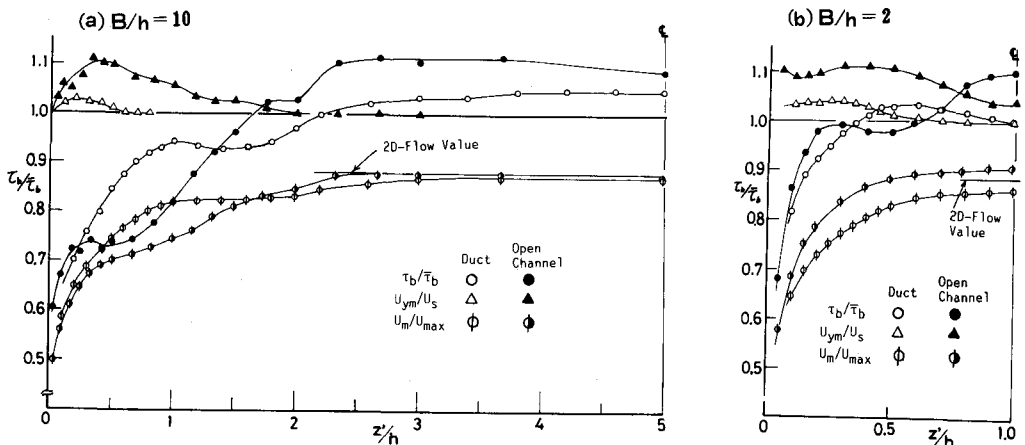


図・7 平均流速分布の対数則表示

また最大流速点が水面下に現われない $y_{max} = h$ となる水路中央領域では図に併示した式 (2) の対数Wake 則に良好に一致し、二次元乱流場が一部形成されていることがわかる。側壁に近づくとき、最大流速点が降下するため外部層の流速は式 (2) より高速側にずれるが、この特性はダクト流²⁾では見られず開水路流特有の現象といえる。 $z/h \leq 0.3$ のさらに側壁近傍では側壁の効果を直接受け、より平坦な分布となる。一方、 $z^+ \equiv z'U_{*w}/\nu$ に対する平均流速の水平分布は半水深 $y/h = 0.5$ 程度で式 (2) と最もよく一致し、河床側ではこれより低速、自由水面側では高速側にずれる。しかし、 $y/h \leq 0.1$ の隅角部を除き、 U の水平分布も内部層で対数側に良好に一致する。以上の結果は、アスペクト比が異なる他のケースでも同様に得られ、 $y/h \leq 0.1$ 及び $z/h \leq 0.1$ の隅角部を除く全潤壁上で内部層に関する対数則分布は良好に成立していることがわかった。

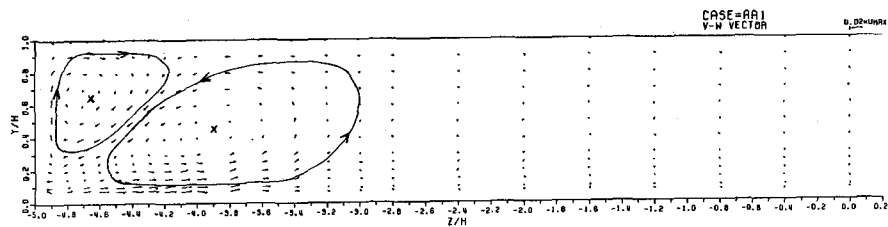
(2) 壁面せん断応力分布 図・8は、上述の結果から得られた河床せん断応力 τ_b をこの横断方向に関する平均的 $\bar{\tau}_b$ で無次元化して示し、ダクト流の結果と比較してある。最大流速点 y_{max} での流速 U_{ym} をその断面位置での表面流速 U_s で比をとり、最大流速降下量の指標とし、また断面平均流速 $U_m(z) \equiv 1/h \int_0^h U(y, z) dy$ の分布を併示した。最大流速点が降下する $z/h \leq 2.5$ の領域に τ_b の特徴的な分布が現われている。すなわち、側壁から離れると τ_b は急増するが、 $z/h \approx 0.3$ で極大値に達した後わずかに減少し、 $z/h \approx 0.7$ 程度から再び増加して水路中央部で一定の最大値に達する。ダクト流でも同様な特性が見られ、この τ_b の緩い極小値がコーナ縦渦の上昇流部に対応することからこの位置に最初の縦筋が形成され、縦渦・縦筋との相互作用が水路中央方向に伝播するという仮説が提案された。²⁾ 開水路で見られる τ_b の極小値の位置はダクト流に比べてかなり側壁側となり、コーナ縦渦のスケールが小さくなることが示唆されるが、このことは後で実際に示される。このような縦渦スケールの相違を反映して、 $\tau_b(z')$ の分布は開水路とダクト流でかなり違っている。特に、 $B/h = 2$ では開水路の中央軸で τ_b は最大値を示すが、ダクト流では逆に極小値を示し、両者で流れの三次元構造がきわめて相違することがわかる。開水路流のもう一つの大きな特徴は、 τ_b の変動幅がダクト流に比べて大きい点であり、水路中央軸上で $\tau_b/\bar{\tau}_b = 1.1$ を示す。 $B/h = 10$ の場合、 U_m/U_{max} の値は開水路とダクトで Re が同程度であり、式 (2) からの計算値によく一致するが、最大流速点が降下すると U_m はダクト流に比べて減少し、流れにくくなるのがわかる。しかし、 $B/h = 2$ では U_{max} 自体二次元乱流値と相違するから U_m/U_{max} をダクト流と直接比較できない。最後に、側壁に沿うせん断応力 τ_w の分布を検討したが、アスペクト比が開水路、ダクト流の相違はほとんど見られず、半水深程度で最大値をもつが、 τ_b に見られた極大・極小特性はなく、 τ_w には縦渦の影響があまり現われないと考えられる。

(3) 縦渦の分布特性 図・9～12は本研究の全ケースにつき、2次流 (V, W) を U_{max} で無次元化し、ベクトル表示したものである。図・9(a)にはダクト流の結果を比較のため併示した。これらの縦渦パターンはダクト流と相当異なり、①自由水面に沿う偏平な水平渦が存在する、②底面渦は B/h の増大とともに増加するが、 B/h がある程度大きくなると分裂して小さなセル状の縦渦群になる点が大きな特徴である。まず、 $B/h = 1$ や 2 とアスペクト比が小さく、最大流速点が完全に水面下に没するケースでは水平渦の規模は底面渦より大きく、水路中央軸上で水面からの強い下降流が生じている。 B/h



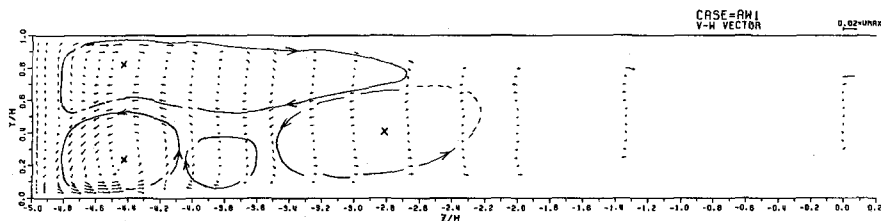
図・8 壁面せん断応力分布及び最大流速点特性

(a) ダクト流



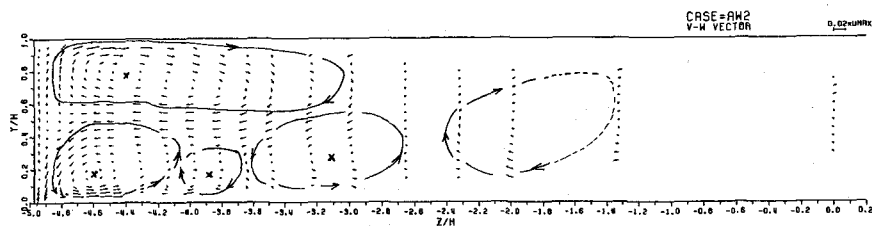
(b) 開水路

$Re = 9.1 \times 10^4$

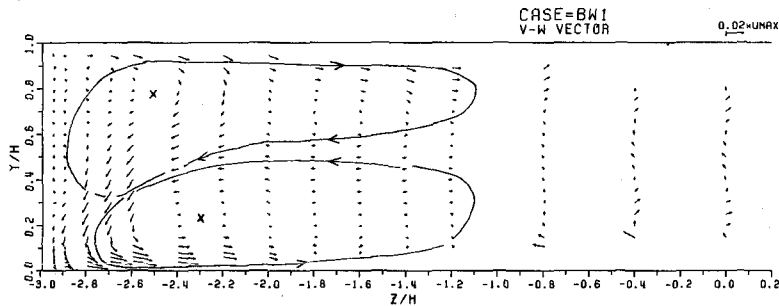


(c) 開水路

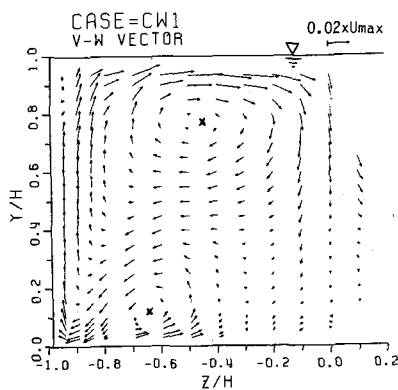
$Re = 2.6 \times 10^4$



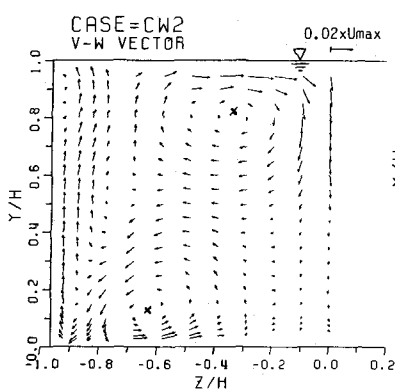
図・9 $B/h = 10$ の縦渦パターン (流速スケールは図の右肩にある)



図・10 $B/h = 6$ の縦渦パターン

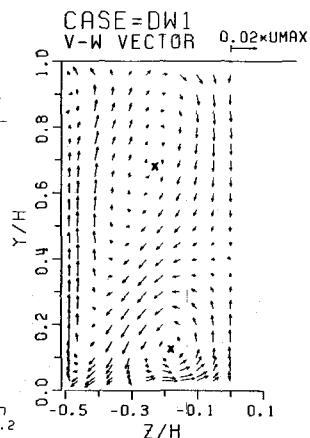


(a) $Fr = 0.54$



図・11 $B/h = 2$ の縦渦パターン

(b) $Fr = 1.22$



図・12 $B/h = 1$ の縦渦パターン

= 2 のダクト流ではコーナ対角線に関して対称な縦渦となることを考慮すると、強い水平渦は自由水面の存在のため生じたと考えられ、鉛直方向の乱れ強度 ν' がより抑制され渦度発生項が増加したためと説明される⁴⁾。 B/h が増加すると、水平渦はより偏平となるが、最大流速線が自由水面に達する $z/h = 2.5$ 以上には大きくならず、両者で強い相関があるものと考えられる。次に、②の底面渦の特性は、図・1の河川で生じる縦渦群（並列らせん流）の発生機構

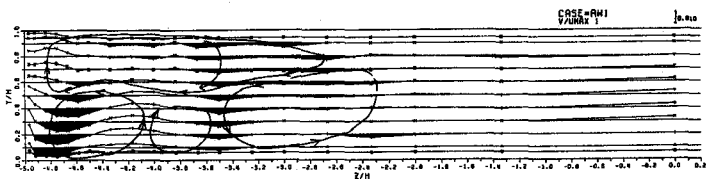
と関連して注目に値する。図・15に、底面のスケール ℓ 及び渦中心位置を側壁からの距離で示した。ダクト流では B/h とともに ℓ は増大して $2h$ 程度のほぼ一定に達するが、開水路流れでは $B/h = 10$ で3つの縦渦セルに分裂している。現在この原因は不明だが、水面渦の増大によって引き起こされたと推測される。すなわち、ダクト流の底面渦は鉛直方向にも増大し、 $y/h = 1$ まで成長して安定であるのに対し、開水路では偏平な強い水平渦が存在するために底面渦の鉛直方向への発達抑制され、分裂したものであろう。 $B/h = 6$ の底面渦は水平渦と同程度であるが、ダクト流では $z/h = 1$ で底面近くの W は最大を示すのに対し²⁾、開水路では非常に小さく、この底面渦が2つに分裂する可能性がある。このように分裂した縦渦セルは水深程度の規模であり、図・1の整然とした縦渦群の形成になるか検討することが最大の課題である。ケースAW-2では $z/h = -2$ 付近に4つ目の縦渦さえ見られる。しかし、図・13に示すように、実測した $V(y, z)$ 成分は $|z/h| \leq 2$ の中央領域ではほぼゼロであり、ここでの縦渦の存在は明確でない。一方、図・14は、 x 方向の渦度 $\xi \equiv \partial W / \partial y - \partial V / \partial z$ のコンタを示すが、これには微弱な縦渦の存在が見られる。いずれにせよ、式(1)に伴う誤差がかなりあり、本実験精度上では、平均流速 U やせん断応力 τ_b を歪ませるほど強い縦渦は中央領域に存在しないと結論される。

5. 結 論

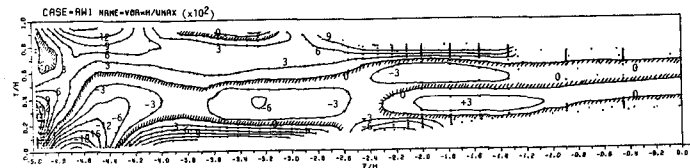
本研究はカールスルーエ大学水理研究所で高精度のレーザ流速計を使って開水路の三次元流況を実測したものである。最大流速点が水面より降下する区間では偏平な水平渦(最大で U_{max} の2%程度)が強く、底面渦はこれに抑制されて縦渦群に分裂する。しかし、水路中央部には強い縦渦は存在せず、 τ_b の変化による縦筋の形成とこの縦筋と縦渦との相互作用がより重要と推測され、自由水面の存在はこのプロセスを助長するものと考えられる。最後に、本実験を遂行するに当たり、アレキサンダー・ホン・フンボルト財団から援助を受けたことを記し、謝意を表したい。

参 考 文 献

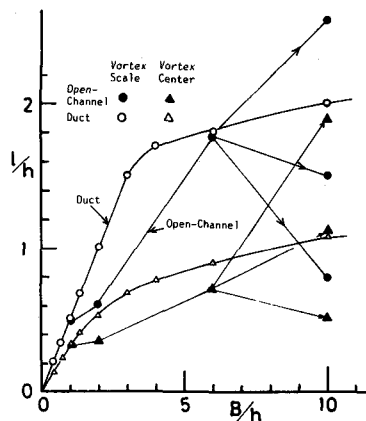
- 1) Nezu and Nakagawa(1984), J. Hydraulic Eng., ASCE, vol. 110, pp. 173-193.
- 2) Nakagawa et al. (1983), 4th Symp. Turbulent Shear Flows, pp. 3.8-3.13.
- 3) Nezu and Rodi (1984), 第2回流れの計測大阪シンポ, pp. 41-57.
- 4) 祢津(1984), 第16回乱流シンポ, pp. 233-237.
- 5) Gessner (1981), Complex Turbulent Flows, pp. 182-212.
- 6) Melling et al. (1976), JFM, vol. 78, pp. 289-315.



図・13 $B/h = 10$ の鉛直速度成分 $V(y, z)$ の分布



図・14 $B/h = 10$ の渦度 ξ のコンタ図



図・15 底面渦のスケール