

## 複断面開水路流れの水理特性について(5)

今本 博健・石垣 泰輔・武藤 裕則

### ON THE HYDRAULICS OF AN OPEN CHANNEL FLOW IN COMPLEX CROSS SECTION (5)

By *Hirotake* IMAMOTO, *Taisuke* ISHIGAKI and *Yasunori* MUTOH

#### Synopsis

In a compound open channel the flow velocity on the flood plain and it in the main channel are different, and a mixing zone exists between the two flows. It is necessary to clarify the flow structure in this region for investigating the interaction between main channel and flood plain flows. In this paper it is the objectives to clarify the fluid mixing in this region and compare the mixing with it in the 2-D mixing layer by using the flow visualization results on the water surface and in a cross section of the flow. The analogy between the fluid mixing in a compound open channel and it in the 2-D mixing layer has been recognized from the results.

#### 1. はじめに

複断面開水路流れでは、低水路と高水敷上流れの速度が異なるために境界部で流体の混合が生じ、流れの抵抗が増加する。既報<sup>1),2)</sup>では、横断面内流況の可視化結果をもとに、横断面内の2次流の挙動、低水路流れと高水敷上流れの混合現象について検討を加えた。その結果をもとに、斜昇流により水深規模の縦渦が生起すること、水平混合および鉛直混合のそれぞれが卓越する2種の混合機構が存在することなどを指摘するとともに、それらの時系列変化についても検討した。なお、ここで水平混合とは、2次元混合層に見られるような横断方向のスケールの大きな2次元の混合現象であり、鉛直混合とは、複断面開水路流れに特有の斜昇流により引き起こされる流体の3次元混合現象である。本報告は、これらの2種の混合機構を、カメロン効果を利用して得られる瞬間速度の平面分布で再確認するとともに、それぞれの統計的特性を検討し、類似する2次元混合層流れとの相似性を利用して混合域幅・混合域中心位置および混合域での速度分布について検討するのが目的である。

本論文では、横断面流況可視化結果、カメロン撮影結果およびLDVによる速度分布計測結果を用いており、水理条件をTable 1に示す。

#### 2. 低水路流れと高水敷上流れの混合機構

**Photo. 1**は横断面内に鉛直に設置した白金線より発生する水素気泡が形成するタイムラインを可視化した一例を示したものである。これは、水路下流端に設置した観測窓を通し、スリット状の光により照明された流れの横断面内における水素気泡の挙動を35mmスチルカメラにより撮影する方法<sup>1)</sup>で得られたものである。なお写真は、300mmの望遠レンズを用い、絞りF=2.8、露光時間1/30で時間間隔0.1秒毎に

Table 1. Hydraulic conditions

Case No.	Slope I	Discharge Q(l/sec)	Channel width B(cm)	Water depth H(cm)	Flood-plain width b(cm)	Flood-plain height h(cm)	Reynolds number Re	Froude number Fr
1	1/800	1.35	39.0	4.0	12.0	2.0	3630	0.16
2	1/1000	24.50	100.0	9.3	40.0	6.0	22300	0.47
3	1/1000	0.92	40.0	2.5	12.0	2.0	1750	0.36
4	1/1000	1.45	40.0	3.0	12.0	2.0	2690	0.37
5	1/1000	3.03	40.0	4.0	12.0	2.0	5410	0.43
6	1/1000	5.45	39.0	5.0	12.0	2.0	9350	0.51
7	1/800	2.42	39.0	3.0	12.0	2.1	5380	0.58
8	1/800	3.35	39.0	3.5	12.0	2.1	7290	0.61
9	1/800	4.21	39.0	4.0	12.0	2.1	8950	0.61
10	1/800	5.32	39.0	4.5	12.0	2.1	11060	0.63
11	1/800	6.25	39.0	5.0	12.0	2.1	12720	0.63

Case 1

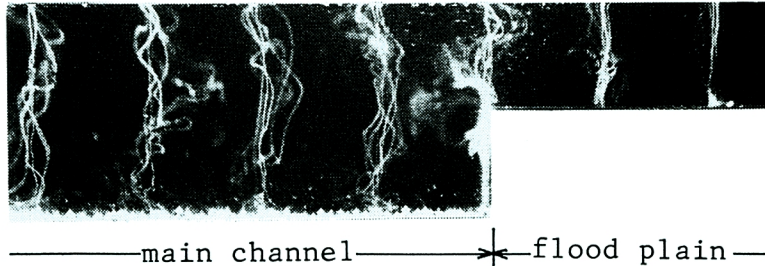


Photo. 1. Example photograph of time lines in a cross section of a flow by the hydrogen bubble method.

発生するタイムラインを撮影したものである。写真に示すように、タイムラインは横断方向に変形しており、2次流が生じていることを明確に示している。低水路と高水敷の境界に設置した白金線より発生するタイムラインの形状を見ると、水面で高水敷側に凸、下部で低水路側に凸となっており、時計回りの縦渦の存在が知れるとともに、逆方向に回転する渦の存在が低水路側に認められる。既報<sup>1)</sup>で示したように、境界でのタイムラインの形状は Fig. 1 に示すような4種のパターンに分類され、それぞれのパターンの生起割合は、同図の帯グラフのような結果となっている。タイムラインの形状と境界部での流体の挙動との関係を考慮すると、A および B のパターンは、水平方向の流体の移動を示すものであり、水平方向の2次元的な混合を表わすものである。以下、この混合機構を第1の混合機構と呼ぶ。一方、C および D のパターンは、縦渦による水平および鉛直方向の3次元的な混合を示すものであり、斜昇流に誘起される縦渦に起因するものである。以下、この混合機構を第2の混合機構と呼ぶ。このように、2種の混合機構が存在すること、および、その生起割合は図に示すようにほぼ同程度であることが分かる。

Photo. 2 に示すような2枚の写真を微小時間  $\Delta t$  の間隔で撮影したものを実体視すると、 $\Delta t$  間におけるトレーサの移動距離が視差差となり、それぞれのトレーサの移動距離に比例した高低差が可視化できる。この移動距離は速度に比例するものであり、この方法を用いると瞬間的な速度分布を可視化することが可能となる。このように速度が高低差として実体視されることはカメロン効果<sup>3)</sup>と呼ばれ、実験水路においても流れの状況を知る有用な方法であることが指摘されている<sup>4)</sup>。ここで示した写真は、アルミニウム粉末を塗布したおが屑をトレーサとして用い、水面における速度分布を可視化したものである。なお、撮影条件は、絞り  $F=1.2$ 、露光時間  $T=1/500$ 、撮影時間間隔  $\Delta t=0.05$  秒である。

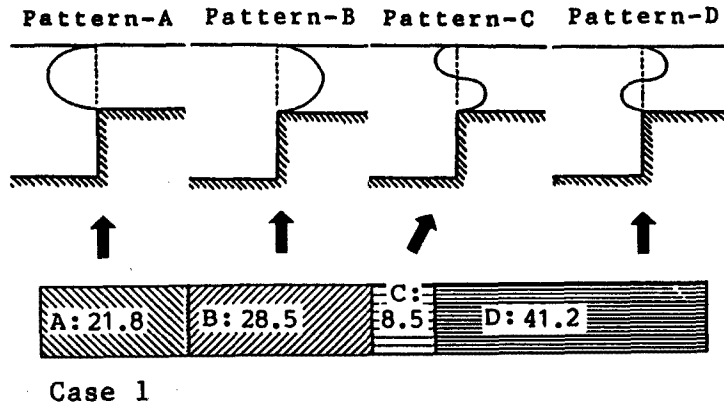


Fig. 1. Four patterns of time line at the boundary between main channel and flood plain in a cross section of a flow, and percentage of each pattern by the hydrogen bubble method.

**Case 2**

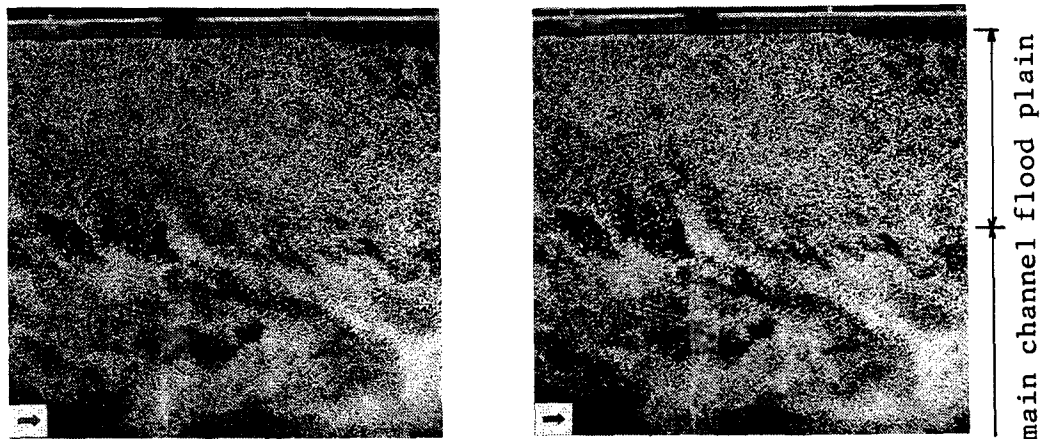


Photo. 2. A pair of photographs of a flow on the water surface by Cameron's parallax method.

この1組の写真を航空写真の図化を専門とする技術者に依頼し、流下方向速度のコンター図を描いた結果が Fig. 2 である。図では、低水路内の主流部、高水敷上の低速部および境界部の局所的低速部に模様をつけて示している。境界部付近を混合域と呼ぶと、混合域では高水敷上の低速流体と低水路の高速流体が横断方向に混合するスケールの大きな現象と、低水路内に少し入った位置で縦断方向に並ぶ局所的低速部の存在が見られる。この結果が水面におけるものであることを考慮すると、局所的低速部は下方より斜昇流により輸送された低速流体が水面に達したことを示すものと考えられる。この結果より、混合域では2種の混合機構が存在することが再確認され、横断面流況より指摘した結果の妥当性を示している。

境界部における流体の混合は、Fig. 2 で明確に見られるように低水路流れと高水敷上流れの速度差に起因するものであり、境界部の水面流況を移動撮影すると、Photo. 3 のような渦が可視化される。これらの渦は2次元混合層流れについて Brown & Roshko<sup>5)</sup> が示したものと類似しており、流下方向に渦列が形成されている。しかしながら、この結果では、前述した2種の混合機構が混在しており、それぞれを分離することはできない。

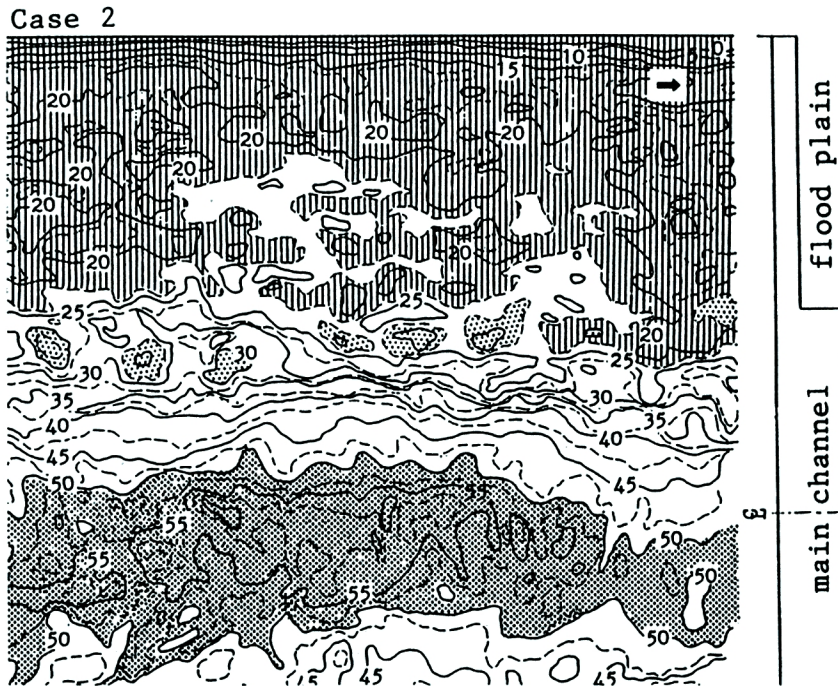


Fig. 2. Instantaneous distribution of streamwise velocity on the water surface by Cameron's parallax method.

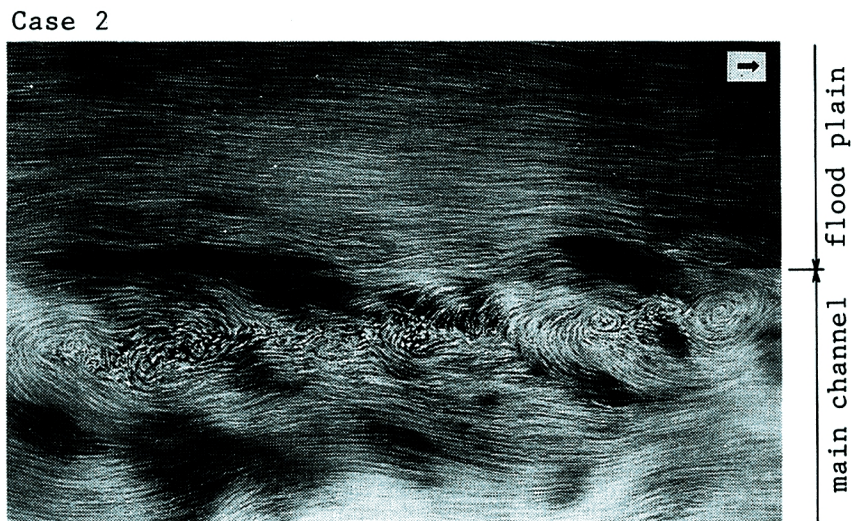


Photo. 3. Vortexes on the water surface in the mixing zone by a camera moving at the same speed of the mean velocity in the zone.

### 3. 2次元混合層流れとの比較

二つの異なる速度をもつ流れの境界面近傍を対象とした2次元混合層と、低水路流れと高水敷上流れの境界部の流れは、作用する剪断力および渦の形成が速度差に起因するものであり、類似した流れであることは容易に推定することが可能である。ただし、2次元混合層が流下方向に層厚が増加して動的平衡状態に達するのに対し、複断面開水路流れの混合域では前章で述べたように3次元的な平衡状態であるという差異がある。ここでは、2次元混合層流れについて研究が行なわれてる速度分布および境界面に形成される渦列について概説するとともに、複断面開水路流れの混合域における結果と比較検討する。

#### 3.1 混合域の速度分布特性の比較

2次元混合層では、異なる速度  $U_0$  および  $U_1 (U_0 > U_1)$  をもつ流れの境界面で流体の混合が生じ、流下するにつれて層厚が増加するが、速度分布には相似性があることが知られている。混合層の厚さスケールを  $l$  とすると、速度分布は次式で表わされる。

$$\frac{u-U_1}{U_0-U_1} = f(z/l) = f(\eta) \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $u$  は局所流速、 $z$  は流れに直角な方向の座標である。(1)式の解としては、Prandtlの混合距離理論を用いた Tollmien の解および渦動粘性係数を一定とする Prandtl の第2仮定を用いた Goertler の解が得られており、いずれの解についても実験値と良い一致を示すことが知られている<sup>6)</sup>。ここでは、複断面開水路流れにおいて著者らが示したように、レイノルズ応力  $-\overline{uw}$  の分布と速度分布の関係が Prandtl の第2仮定を用いて良く説明されるという結果<sup>7)</sup>に基づき、Goertlerの解を用いて以下の検討を行うこととする。

Goertler は、Prandtl の第2仮定、

$$\tau = \rho k C_1 x (U_0 - U_1) \frac{\partial u}{\partial z} \dots\dots\dots (2)$$

を用いている。なお、 $\rho$  は密度、 $k$  および  $C_1$  は定数、 $x$  は流れ方向座標である。また、次のように仮定した流れ関数を用いている。

$$\psi = \bar{U} x F(\eta) \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $\bar{U} = (U_0 + U_1)/2$ 、 $\eta = \sigma z/x$ 、 $\sigma$  は定数である。これらを2次元混合層の運動方程式、

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \tau}{\partial z} \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \dots\dots\dots (5)$$

に代入し、得られた微分方程式の第一次近似解として導いた結果が次式の Goertler の解である。すなわち、

$$\frac{u-U_1}{U_0-U_1} = \frac{1}{2} (1 + \operatorname{erf} \eta) \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 $\operatorname{erf} \eta = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\eta \exp(-t^2) dt$  で表わされる誤差関数である。これを複断面開水路流れの混合域における速度分布計測結果と比較し、その適用性について検討する。 $U_m$  を混合域外の低水路流れの平均流速、 $U_f$  を混合域外の高水敷上流れの平均流速、 $L_z$  を混合域幅を表わすスケール、 $U$  を混合域での局所平均流速とすれば、(6)式は、

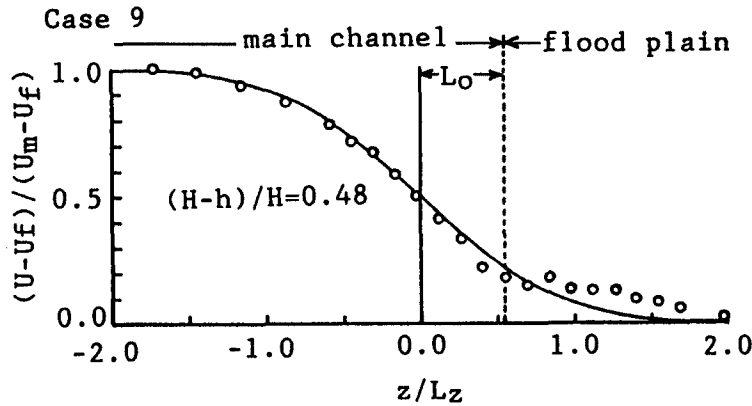


Fig. 3. Lateral distribution of velocity in the mixing zone, compared with Goertler's solution for the 2-D mixing layer.

$$\frac{U-U_f}{U_m-U_f} = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{z}{L_z} \right) \right\} \quad \dots\dots\dots (7)$$

のようになる。

Fig. 3は、長さ13 m、幅39 cmの直線水路内に幅12 cm、高さ2 cmの高水敷を片側に設置した複断面水路において、低水路水深4 cmの流れを対象に、高さ3 cmの横断測線（高水敷上の半水深高さ）に沿ってLDVにより計測した速度分布を示したものである。図中、低水路と高水敷の境界部の混合域について(7)式を用いて計算される速度分布を併示しており、計算値と計測値の良い一致が見られる。なお、 $U_m$ および $U_f$ は計測値より決定し、 $L_z$ および混合域中心位置は計測値と計算値が一致するように試行錯誤を繰り返して決定した。この結果は、2次元混合層で用いられている速度分布式が、複断面開水路流れの混合域についても適用できることを示すとともに、次章において検討する混合域幅および混合域中心位置の決定に(7)式を用いることができることを示している。

### 3.2 混合域の渦列の特性比較

境界面に沿って形成される2次元渦列を可視化し、その組織的構造についてBrown & Roshko<sup>6)</sup>が検討して以来、2次元混合層の渦列に関する研究が行われている。彼らは、混合層における密度差の影響について検討することを目的とした研究において、シャドウグラフ法を用いた流れの可視化結果で2次元渦列の存在を発見した。混合層は下流程厚くなり、渦はしだいに大きくなることが示されたが、これは従来の渦崩壊過程とは逆の現象であった。それを説明する現象として、多数の渦の挙動を連続写真で解析した結果、渦の合体が生じていることを初めて示した。また、このような渦列の存在は、水流を対象として染料による可視化を行ったWinant & Browand<sup>9)</sup>の結果によっても示されている。

このような渦列は、合体あるいは分裂を経て動的平衡状態に達するものであるが、Takaki & Kovaszny<sup>9)</sup>により、渦どうしが相互に影響を及ぼさず、確率的に合体すると仮定して渦間隔分布関数が対数正規分布で表されることが指摘された。Fig. 4は、Takakiらが示した渦間隔 $L$ をその平均値 $\langle L \rangle$ で基準化した $\xi=L/\langle L \rangle$ を確率変数とした渦間隔分布関数 $P(\xi)$ とBrown & Roshkoの渦間隔の計測結果を比較して示したものである。図より、渦間隔は対数正規分布を示すことが知れる。また、Bernal<sup>10)</sup>は、渦の合体がKolmogorovの示した渦の崩壊過程の逆過程であると仮定し、渦間隔が対数正規分布となることを理論的に検討し、図に併示したような結果を示している。いずれの分布関数も対数正

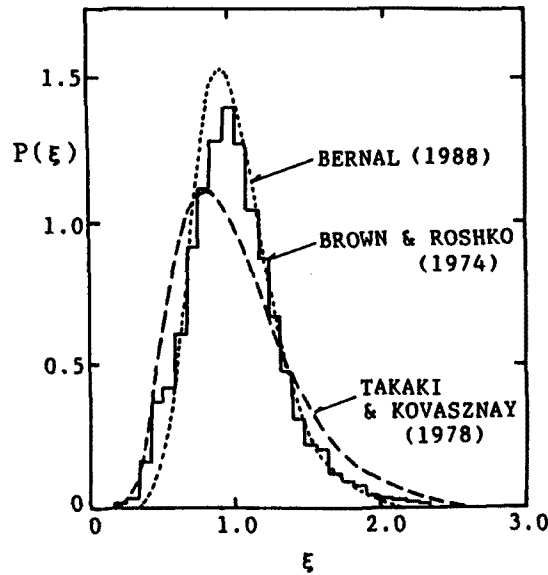


Fig. 4. Probability distribution of the vortex spacing in the 2-D mixing layer after Brown and Roshko<sup>6)</sup>, Takaki and Kovaszny<sup>9)</sup> and Bernal<sup>10)</sup>.

規分布関数であるが、分布幅が異なり、 $\ln \xi$ の r.m.s.値 $\xi$ と比較すると、Takaki らの $\xi = 0.39$ に対して Bernal の値は $\xi = 0.28$ であり、Bernal の結果の方が Brown らの実験値により近い分布となっている。

Fig. 5 は、前章で示したような複断面開水路流れの混合域における水面渦の可視化結果を用いて渦間隔 $L_x$ を測定し、その確率分布を示したものである。図中の曲線は、実線が対数正規分布、破線が正規分布曲線である。図を見ると、対数正規分布と計測値の一致がより良好であり、2次元混合層の渦列と複断面開水路流れの混合域における渦列の特性に相似性が伺える。なお、 $\xi$ の値は Bernal の示した値に近いものとなっている。しかしながら、Photo. 3 の説明でも述べたように、複断面開水路流れで観察される混合域の水面渦には2次元的な混合と3次元的な混合の両者が混在しており、2次元的な水平混合のみについて比較検討するために横断面流況の解析結果を用いて次に検討する。

横断面内に鉛直に張った白金線より発生する水素気泡列の形状は、Fig. 1 に示したように4パターンに分類することができ、2種の混合機構が存在することを示した。A および B のパターンが2次元の水平方向の混合現象に相当し、D のパターンが鉛直混合も含む斜昇流による混合に相当する。したがって、A および B を同一の現象として計測した発生間隔を $T_{AB}$ 、D の発生間隔を $T_D$ とし、ビデオカメラで撮影した結果を、既報<sup>1)</sup>で示した方法で解析して整理したものが Fig. 6 である。また、それぞれのパターンの継続時間 $D_{AB}$  および $D_D$ についても計測し、Fig. 7 に示す結果を得た。いずれの図についても、対数正規分布曲線を実線で、正規分布曲線を破線で併示している。図より、いずれの混合機構についても発生時間間隔分布、継続時間分布の双方とも対数正規分布の適合性が良好であり、2次元混合層の渦列と類似した統計的特性を有することが示された。

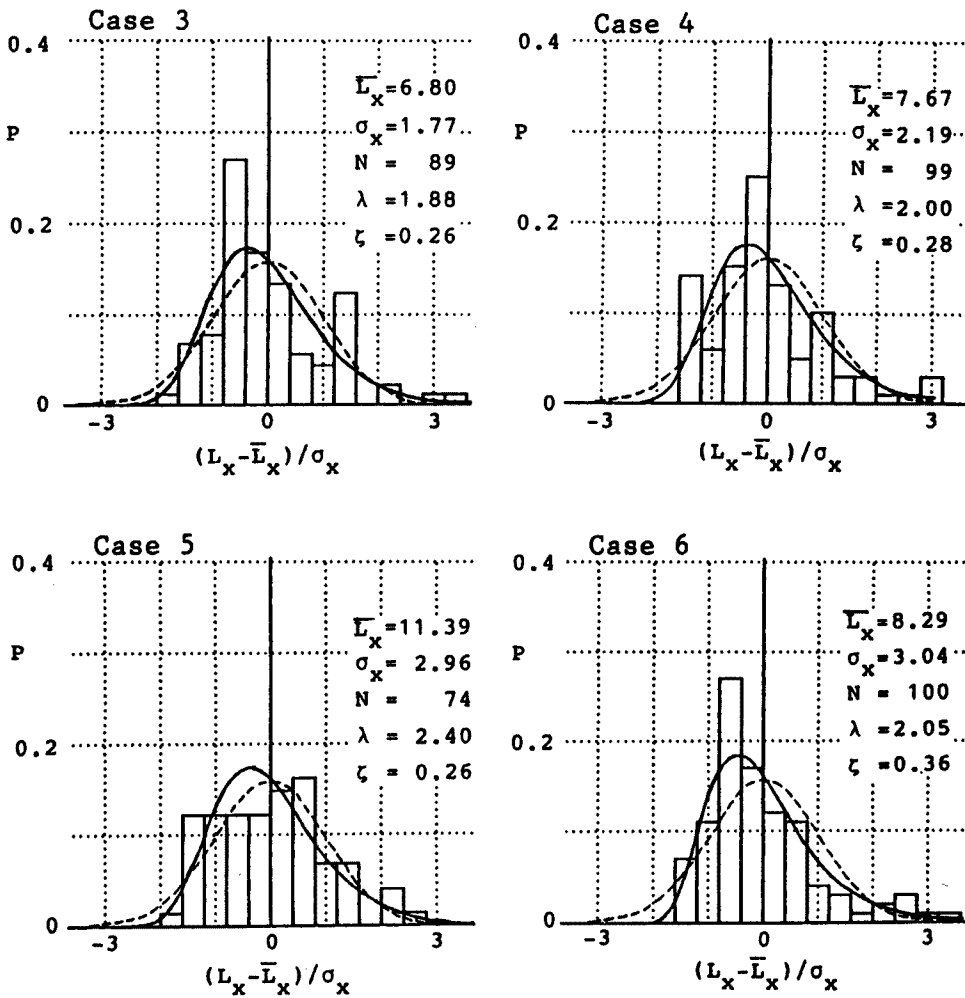


Fig. 5. Probability distribution of the vortex spacing in the mixing zone of a compound open channel flow: —, log-normal distribution, ----, normal distribution.

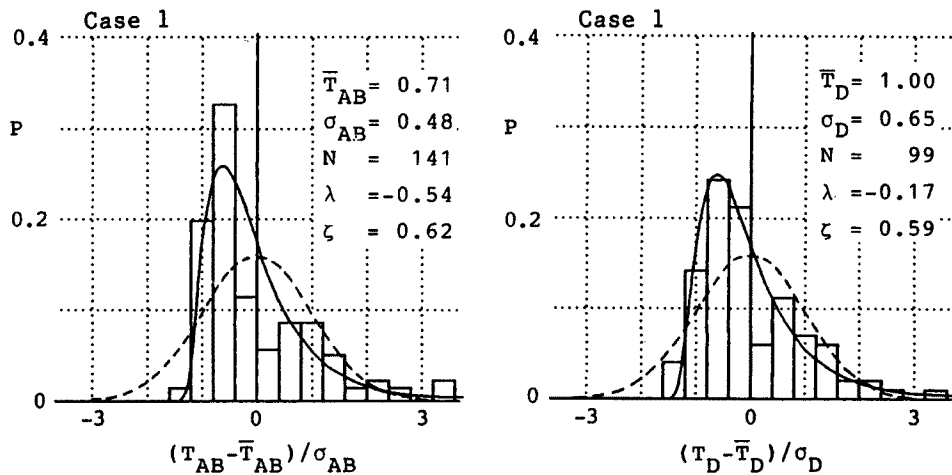


Fig. 6. Probability distribution of time-intervals of two mixing patterns: —, log-normal distribution, ----, normal distribution.



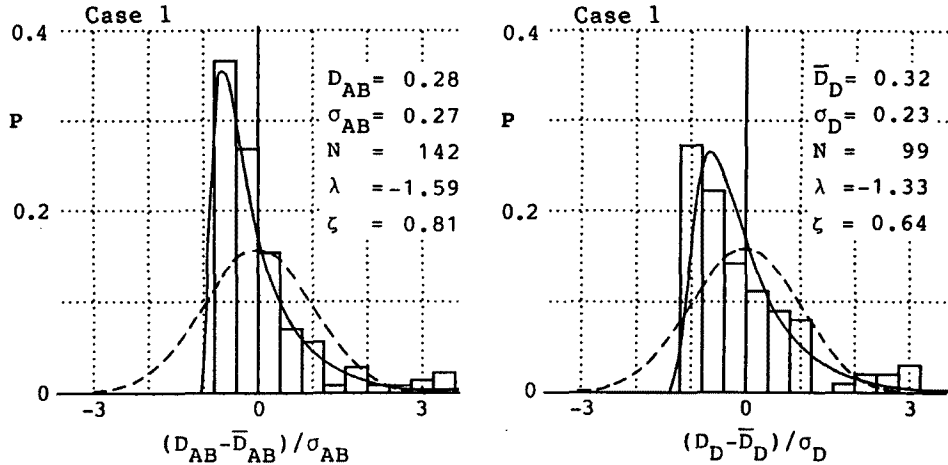


Fig. 7. Probability distribution of duration of two mixing patterns : —, log-normal distribution, ----, normal distribution.

#### 4. 複断面開水路流れにおける混合域の特性に関する検討

前章で示したように、複断面開水路流れの混合域における速度横断分布は、2次元混合層に対して得られた Goertler の解で表わされる。本章では、Goertler の解を適用することにより得られる混合域幅および混合域中心位置と水力条件との関係について検討するとともに、得られた成果をもとに、複断面開水路流れの混合域における速度分布について検討する。直線複断面水路流の通水断面形状を規定する要素は、水路幅  $B$ 、高水敷幅  $b$ 、高水敷高さ  $h$ 、低水路水深  $H$  であるが、低水路幅 / 低水路水深比および高水敷幅 / 高水敷上水深比が大きい場合、混合域の流れは  $H$  および  $h$  が流れを規定する要素となる。本研究では、低水路幅 / 低水路水深比および高水敷幅 / 高水敷上水深比をなるべく大きくするために、片側高水敷とし、高水敷高さ 2.1 cm に対して低水路水深を 3 ~ 5 cm の間で変化させた条件で LDV による速度分布計測を行った。(Table 1)

##### 4.1 混合域幅および混合域中心位置

Fig. 8 は混合域における速度計測結果（高水敷上水深の半水深高さでの結果）と Goertler の解とを比較して示したものであり、(7)式を用いて計算したものである。適用に際しては、高水敷先端付近の分布形状が斜昇流の影響を受けることを考慮し、第1の混合機構に適用される Goertler の解と低水路内の計測結果との一致に重点を置いた。図より、いずれのケースにおいても、混合域中心位置  $z/L_2 = 0$  より低水路側における計測値と計算値の一致は非常に良く、本手法の妥当性を示す結果となっている。一方、高水敷上の結果についてを見ると、高水敷水深 / 低水路水深比  $(H-h)/H$  が大きくなるにつれて計算値と計測値の差異が顕著となっている。これは、流れの構造との関連で説明されている。すなわち、高水敷水深 / 低水路水深比が小さい場合には低水路流れと高水敷流れの速度差が大きく、第1の混合機構が卓越するのに対し、高水敷水深 / 低水路水深比が大きくなるにつれて速度差が減少し、第1の混合機構に比べて相対的に第2の混合機構が卓越するようになり、高水敷先端近傍の速度分布に大きな影響を与えるようになるためであると考えられる。これは、第2の混合機構を引き起こす斜昇流は、単断面開水路流れにもともと存在する2次流が高水敷先端付近における流れの境界条件の影響を受け、その強度を増したものであ

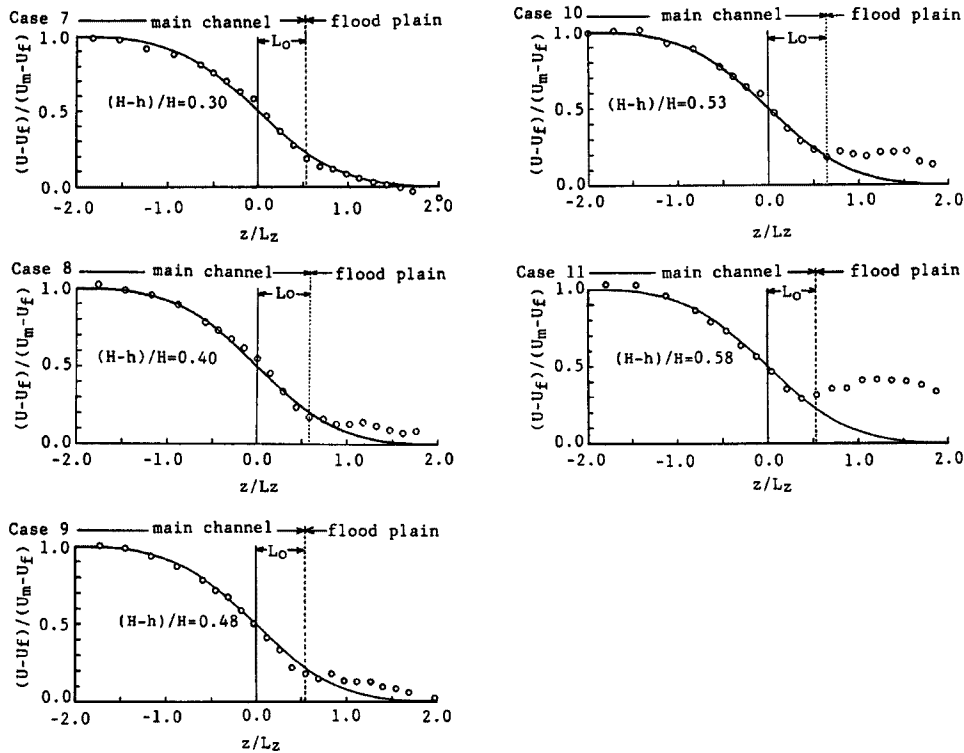


Fig. 8. Lateral distribution of velocity in the mixing zone with Goertler's solution for the 2-D mixing layer.

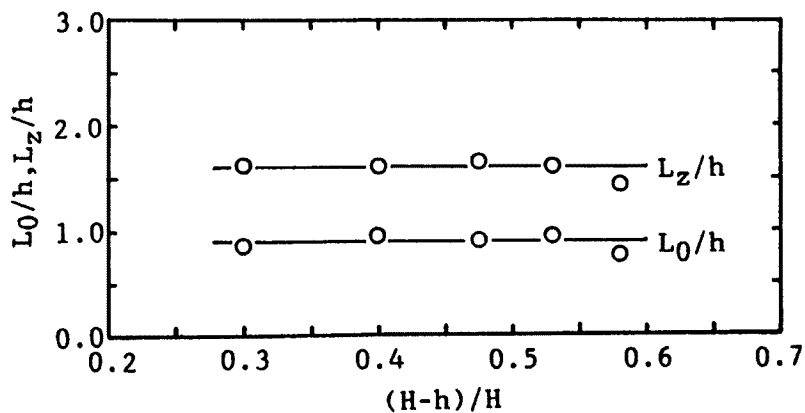


Fig. 9. The width of the mixing zone,  $L_z$ , and the distance (between the center of the zone and the flood plain's edge),  $L_0$ .

ると考えれば説明可能である。なお、わが国の一級可川では、高水敷水深/低水路水深比が0.5以下が大  
半であり<sup>11)</sup>、この範囲では図に示すように(7)式での速度分布表示が可能であると考えられる。

ここで、(7)式を適用する際の手順について述べる。(7)式を用いるために決定すべきパラメータは、低  
水路内平均速度  $U_m$ 、高水敷上平均速度  $U_f$ 、混合域の幅スケール  $L_z$  である。まず、本実験の条件下では  
低水路内に速度の一定領域が存在し、これより低水路流れの平均流速  $U_m$  は容易に決定できる。つぎに、  
(7)式の右辺に含まれる誤差関数は、 $z/L_z = 1$  で0.843、2で0.995となることにより、 $-2.0 < z/L_z < 2.0$

の範囲を対象とし、 $L_z$  および  $L_0$  を試行錯誤で変更し、低水路内の計測値と計算値を一致させる方法を用いて (7) 式のパラメータを決定した。混合域幅および混合域中心位置と高水敷水深 / 低水路水深比の関係を整理したものが Fig. 9 である。図より、高水敷高さ  $h$  で無次元化した  $L_0$  および  $L_z$  は高水敷水深 / 低水路水深比にかかわらず、ほぼ一定値を示しており、高水敷高さ  $h$  が速度分布形を決める重要なパラメータであることが知れる。なお、 $L_0$  は高水敷高さの 0.9 倍程度、 $L_z$  は 1.6 倍程度の値を示している。

4.2 混合域における速度分布の検討

Fig. 9 に示したように、(7) 式を用いて混合域の速度分布を算定するためのパラメータ 4 個の内、混合域幅と混合域中心位置  $L_0$ 、 $L_z$  が高水敷高さ  $h$  より決定されるとすれば、 $U_m$  および  $U_f$  あるいはその比  $U_f/U_m$  が分かれば速度分布が計算されることになる。ここでは、以下に述べる簡便法で  $U_f/U_m$  を決定して計測結果と比較する。

次の 2 つの仮定を用いる。まず、混合域外の低水路流れおよび高水敷上流れにおいて、断面平均流速は Manning 式で計算することができ、それぞれ、 $V_m = (1/n_m)H_m^{2/3}I_m^{1/2}$ 、 $V_f = (1/n_f)H_f^{2/3}I_f^{1/2}$  で表わされる。ここに、添え字  $m$  は低水路流れ、 $f$  は高水敷上流れを表わしており、 $V$  は断面平均流速、 $n$  は Manning の粗度係数、 $H$  は水深、 $I$  は勾配である。第 2 の仮定として、 $V_m$  および  $V_f$  が計算される位置での鉛直方向の速度分布は対数則に従い、摩擦速度は  $u_* = (gHI)^{1/2}$  で計算される。

以上の仮定を用いると、(7) 式で用いる低水路流れの平均速度  $U_m$  は、

$$\frac{U_m}{V_m} = 1 + \frac{u_{*m}}{\kappa V_m} \left\{ 1 + \ln \left( \frac{y_m}{H_m} \right) \right\} \dots\dots\dots (8)$$

と表わされる。ここに、 $\kappa$  はカルマン定数 (= 0.4)、 $y_m$  は (7) 式で計算しようとする横断測線高さである。つぎに、 $V_m = (1/n_m)H_m^{2/3}I_m^{1/2}$  および  $u_{*m} = (gH_m I_m)^{1/2}$  を (8) 式に代入すると次式が得られる。

$$\frac{U_m}{V_m} = 1 + \frac{n_m g^{1/2}}{\kappa H_m^{1/6}} \left\{ 1 + \ln \left( \frac{y_m}{H_m} \right) \right\} \dots\dots\dots (9)$$

同様に高水敷上流れについても (9) 式の添え字を  $f$  とした次式、

$$\frac{U_f}{V_f} = 1 + \frac{n_f g^{1/2}}{\kappa H_f^{1/6}} \left\{ 1 + \ln \left( \frac{y_f}{H_f} \right) \right\} \dots\dots\dots (10)$$

が得られる。(9) の右边を  $C_m$  とし、高水敷上流れについても (10) 式の右边を  $C_f$  とすると、 $U_m$  および  $U_f$  は、

$$\begin{aligned} \text{低水路流れ} & : U_m = C_m V_m \dots\dots\dots \\ \text{高水敷上流れ} & : U_f = C_f V_f \dots\dots\dots \end{aligned} \dots\dots\dots (11)$$

と表わされ、速度比  $U_f/U_m$  が計算される。

つぎに、前節で示した結果と比較する。いま対象としている水路では低水路と高水敷はアクリル樹脂製であり、Manning の粗度係数  $n$  は 0.01 程度で同じであり、路床勾配も変わらない。そこで、 $n_m = n_f$ 、 $I_m = I_f$  として速度比  $U_f/U_m$  を表わすと、

$$\frac{U_f}{U_m} = \frac{C_f V_f}{C_m V_m} = \frac{C_f}{C_m} \left( \frac{H_f}{H_m} \right)^{2/3} \dots\dots\dots (12)$$

のようになる。Fig. 8 の結果より得られる速度比  $U_f/U_m$  と (12) 式で得られる結果を比較して示したものが Table 2 であり、両者の一致は良好である。この結果は、ここに示した簡便法により複断面開水路流れの混合域における速度分布を表わすことが可能であることを示している。ただし、速度分布の計測結果

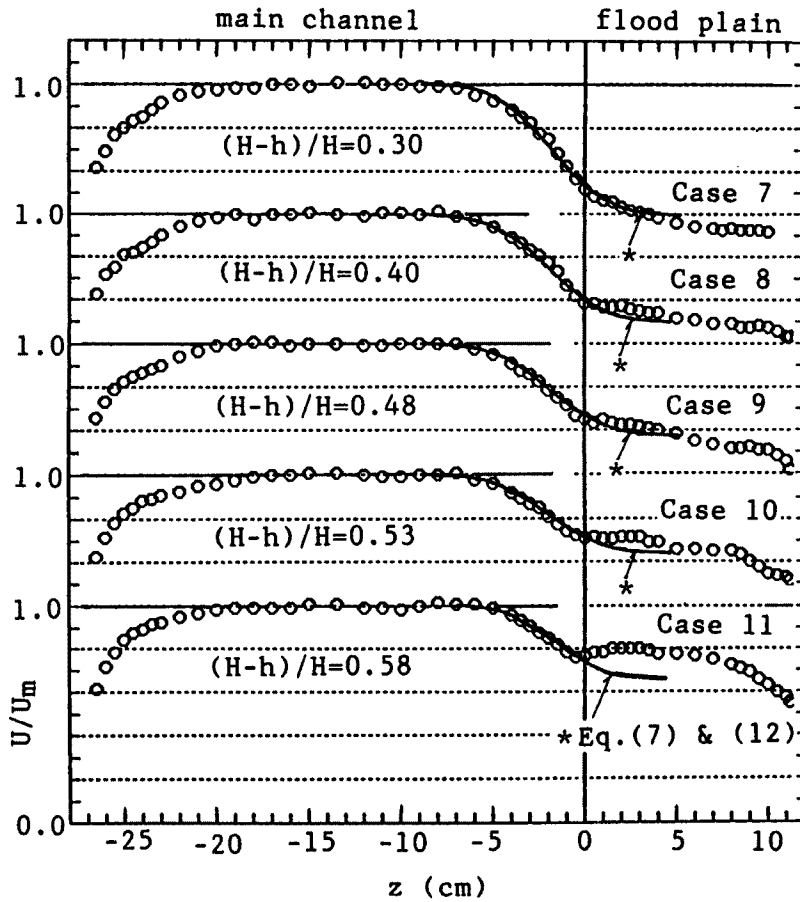


Fig. 10. Lateral distribution of velocity and calculated distribution in the mixing zone by Eq.(7) and Eq.(12).

Table 2. Comparison of velocity ratios,  $U_f/U_m$ , determined by the experiments and the ratios by Eq. (12)

Case	$U_f/U_m$	
	Experiments	Eq. (12)
7	0.40	0.415
8	0.50	0.510
9	0.57	0.577
10	0.64	0.627
11	0.66	0.667

ここに示した簡便法による混合域の速度分布（図中の実線）を比較して示した Fig. 10 の結果が示すように、高水敷水深/低水路水深比が小さく、斜昇流に起因する第2の混合機構が卓越しない場合という制約条件がある。

### 5. おわりに

本研究では、複断面開水路流れの低水路と高水敷の境界部における流体混合現象について、可視化結果に基づいて混合機構を検討するとともに、2次元混合層流れとの比較を行なって混合現象の類似点について考察し、2

次元混合層を対象として得られた Goertler の速度分布式の適用性について検討することにより、混合域の特性について検討した。主な結果をまとめるとつぎのようになる。

1) 低水路流れと高水敷上流れの混合現象を、流れの可視化結果をもとに検討した結果、複断面開水路流れの混合域には2種の混合機構が存在することが指摘された。第1の混合機構は、2次元混合層と同

様に水平方向の速度差に起因する2次元な流体混合であり、第2の混合機構は、高水敷先端に生ずる斜昇流に起因する縦渦（2次流セル）による流体混合である。

2) 混合域の速度分布と2次元混合層を対象としたGoertlerの解を比較した結果、低水路内の計測値と計算値の一致は良好であるが、高水敷上の両者の一致は高水敷上水深/低水路水深比が大きくなるにつれて悪くなるという結果となった。これは、高水敷上水深/低水路水深比が大きくなるにつれて斜昇流に起因する第2の混合機構が相対的に強くなり、その結果、高水敷先端付近の速度分布が影響を受けてGoertlerの解との差異が顕著となるためである。

3) 混合域の渦列と2次混合層の渦列の特性を比較した結果、いずれの渦間隔分布も対数正規分布することが知れ、両者が類似した現象であることが指摘された。また、複断面開水路流れの2種の混合機構のいずれについても、渦の発生間隔および継続時間が対数正規分布に従うことを実験結果で示し、2種の混合機構が同様の統計的特性を有することが知れた。

4) Goertlerの解を混合域に適用することにより得られる混合域幅および混合域中心位置を、種々の高水敷水深/低水路水深比の流れについて求めた結果、両者共に高水敷高さにより決定される量であることが示された。この結果を用い、低水路流れの平均速度と高水敷上流れの平均速度の比 $U_l/U_m$ を、マンニング式と対数速度分布式の成立を仮定した簡便法により決定する方法を併用すれば、混合域の速度分布が計算可能であることが示された。

以上が、本研究で得られた主な結果であるが、複断面開水路流れを規定するパラメータは多く、その組み合わせによって流れが規定されるため、より広範囲の実験条件下での計測が今後必要と考えられる。

#### 参 考 文 献

- 1) 今本博健・石垣泰輔：複断面開水路流れの水利特性について（4），京大防災研年報，第33号B-2，1990，pp.559-569.
- 2) Imamoto, H. and T. Ishigaki: Visualization of secondary flow in a compound open channel, Proc. of 7th Congress of The Asian and Pacific Regional Division of The International Association for Hydraulic Research, Vol. III, 1990, pp.485-490.
- 3) Cameron, H.L.: The Measurement of water current velocities by parallax methods, Photogrammetric Engineering 18, 1952, pp.99-104.
- 4) Imamoto, H. and T. Ishigaki: Visualization of velocity distribution by stereo photography, FLOW VISUALIZATION V, Hemisphere, 1990, pp.47-52.
- 5) Brown, G.L. and A. Roshko: On density effects and large structure in turbulent mixing layer, J. Fluid Mech., 64, 1974, pp.775-816.
- 6) Rajaratnam, N.: TURBULENT JETS, 野村安正訳，森北出版，1981.
- 7) 今本博健・石垣泰輔・稲田修一：複断面開水路流れの水利特性について（1），京大防災研年報，第25号B-2，1982，pp.509-527.
- 8) Winant, C.D. and F.K. Browand: Vortex pairing: the mechanism of turbulent mixing layer growth at moderate Reynolds numbers, J. Fluid Mech., 63, 1974, pp.237-255.
- 9) Takaki, R. and L.S.G. Kovaszny: Statistical theory of vortex merger in the two-dimensional mixing layer, Phy. Fluid 21 (2), 1978, pp.153-156.
- 10) Bernal, L.P.: The statistics of the organized vortical structure in turbulent mixing layers, Phy. Fluid 31 (9), 1988, pp.2533-2543.
- 11) 今本博健・石垣泰輔：複断面流れの水利特性について—内部構造に及ぼす断面形状効果—，第21回自然災害シンポジウム講演概要集，1984，pp.337-340.