

複断面開水路流れにおける低水路流れと高水敷上流れの
混合機構に関する実験的研究

Experimental Study on The Turbulent Mixing
between Main Channel and Flood Plain Flows

今本博健*・石垣泰輔**・武藤裕則***

By Hirotake IMAMOTO, Taisuke ISHIGAKI and Yasunori MUTOH

In a compound open channel the flow velocity on the flood plain and in the main channel shows a marked difference, and a mixing zone exists between these two flows. The objectives of this paper is to study the fluid mixing in this region and compare the mixing with that in the 2-D mixing layer by using the flow visualization results on the water surface and in a transverse cross section of the flow. The analogy between the fluid mixing in a compound open channel and that in the 2-D mixing layer has been demonstrated from the results.
Keywords: compound open channel, turbulent mixing, flow visualization

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^{1)・2)}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、2種の混合機構とは、横断方向の2次元的な混合現象と、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。本論文では、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、2次元混合層流れとの相似性を検討するとともに、速度の横断分布計測結果を用いて混合域の特性について検討する。ここでは、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、水理条件を表-1に示す。

表-1 水理条件表

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	40.0	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

* 正会員 工博 京都大学防災研究所教授
(〒612 京都市伏見区横大路下三栖 宇治川水理実験所)
** 正会員 工修 京都大学防災研究所助手
*** 学生員 京都大学大学院生

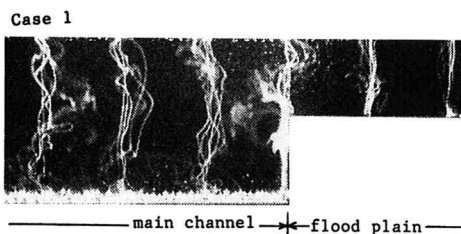


写真-1 水素気泡法による横断面可視化例

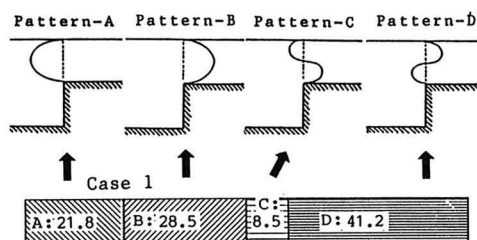


図-1 水素気泡法で得られた4パターン

2. 低水路流れと高水敷上流れの混合機構

2. 1 流況特性

写真-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¹⁾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¹⁾で示したように、境界でのタイムラインの形状は図-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。

微小時間 Δt の間隔で撮影した2枚の写真を実体視すると、 Δt 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³⁾。なお、本実験では、撮影時間間隔 $\Delta t=0.05$ 秒とした。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図-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るとともに、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、図-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、写真-2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 & Roshko⁴⁾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、この結果には前述した2種の混合機構が混在し、それぞれを分離することはできない。

Case 2

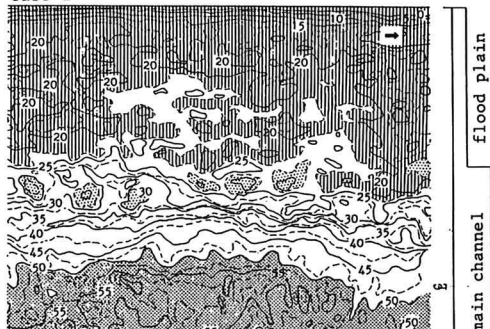


図-2 水面における瞬間速度分布

Case 2

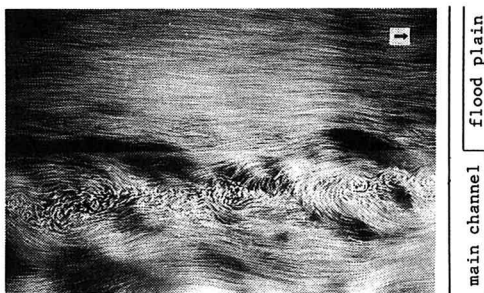


写真-2 混合域の水面渦の撮影例

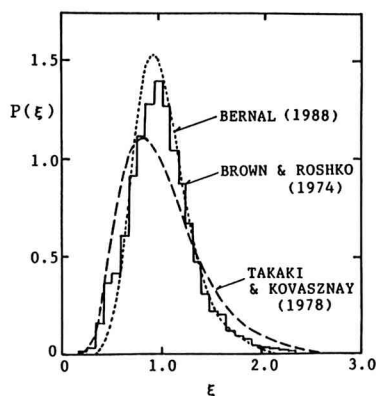


図-3 2次元混合層の渦間隔の分布

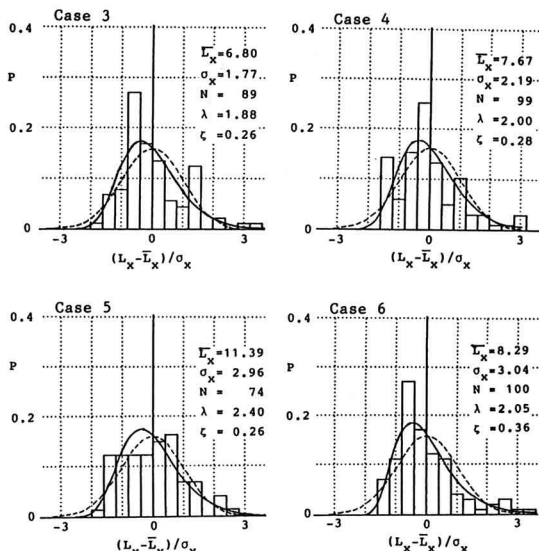


図-4 複断面流れの水面渦間隔の分布

2. 2 混合域の渦列の特性

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。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 & Roshko⁴⁾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、混合層厚が下流程大きく、渦はしだいに大きくなることを示したが、これは従来の渦崩壊過程とは逆の現象であった。それを説明するために多数の渦の挙動を連続写真で解析し、渦の合体が生じていることを初めて示した。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 & Kovasznay⁵⁾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。図-3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、Bernal⁶⁾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。

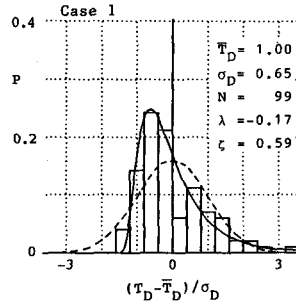
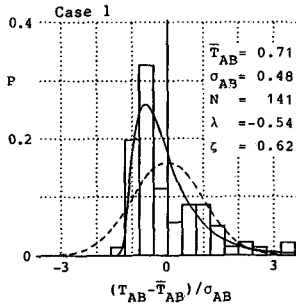


図-5 混合機構別の発生間隔の分布

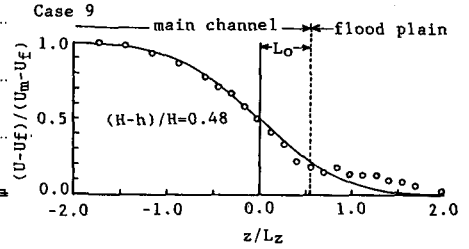


図-6 混合域の速度分布 (その1)

図-4は、写真-2で示した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。しかしながら、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は、横断面流況の解析結果が必要であり、次にこれについて検討を加える。

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、図-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時間間隔を T_{AB} 、Dの発生時間間隔を T_D とし、ビデオカメラで撮影した結果を、既報¹⁾で示した方法で解析して整理したものが図-5である。図では、対数正規分布曲線を実線、正規分布曲線を破線で示している。図より、いずれの混合機構についても発生時間間隔分布は、対数正規分布と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ている。

3. 複断面開水路流れにおける混合域の特性

図-6は、長さ13m、幅39cmの直線水路内に幅12cm、高さ2cm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4cmの流れを対象に、高さ3cm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（図中○印）を示したものである。図より、境界部の速度は、高水敷に近づくにつれて減少し、高水敷先端付近で極小値と極大値を持つ分布形を示すことが知れる。これは、既報⁷⁾で示したように、斜昇流の影響であり、その分布形は、レイノルズ応力 $-\overline{uw}$ の分布からPrandtlの第2仮定を用いて説明される。このように、混合域の速度分布結果においても、低水路流れと高水敷上流れの速度差に基づく速度分布と斜昇流の存在を示す速度分布が表れ、前述した2種の混合機構の存在が伺える。

2次元混合層について得られているGoertlerの解⁸⁾を、次式、

$$\frac{U - U_f}{U_m - U_f} = \frac{1}{2} (1 + \operatorname{erf} \eta), \quad \text{ここに、} \operatorname{erf} \eta = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\eta \exp(-t^2) dt \quad (1)$$

のように表わし、混合域外の低水路流れの平均流速 U_m および混合域外の高水敷上流れの平均流速 U_f を計測値より算定し、 $\eta = z/L_z$ の混合域幅を表わすスケール L_z と $z = 0$ となる混合域中心位置 L_0 を計測結果と上式が一致するように決定すると、図中に示したように、低水路内での速度分布計測結果と(1)式は良い一致を示す。3次元的な混合現象に2次元混合層における結果を適用することには問題が残るものの、混合域中心より低水路側では(1)式と計測値の一致は良く、混合域の幅および位置を表わす L_z および L_0 は、ここに示した方法で評価することが可能と考えられる。

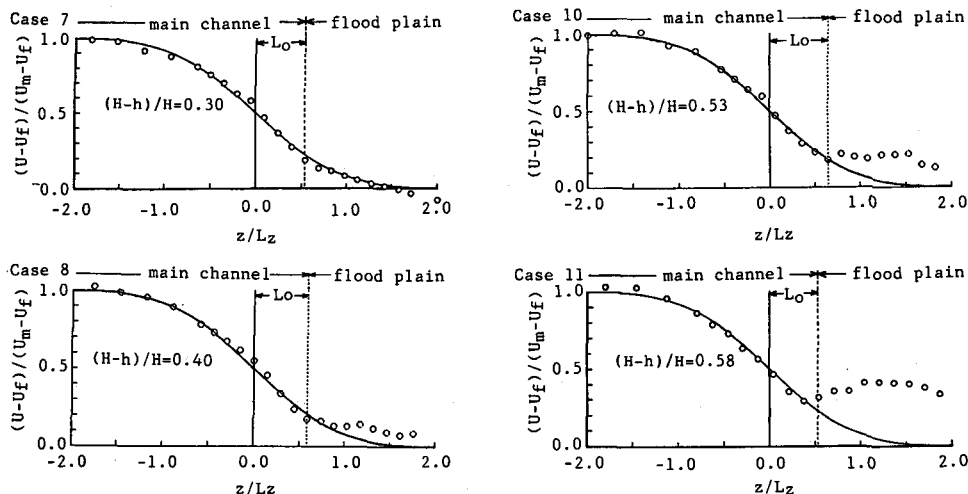


図-7 混合域の速度分布 (その2)

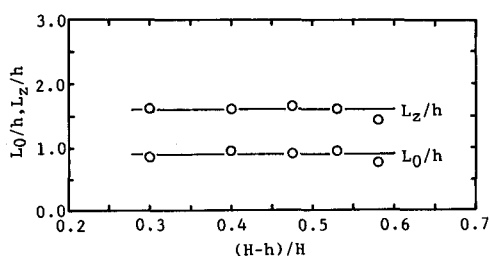


図-8 混合域幅 (L_z) および混合域中心位置 (L_0)

同様の方法で、低水路水深／高水数上水深比の異なる複断面流れの混合域における速度計測結果（高水数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が図-7である。適用に際しては、高水数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 $z/L_z=0$ 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、高水数上の結果についてを見ると、高水数水深／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る。すなわち、高水数水深／低水路水深比が小さい場合には低水路流れと高水数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、高水数水深／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の混合機構が卓越し、高水数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れば説明可能である。また、図より高水数水深／低水路水深比が 0.5以下の範囲では、高水数上の速度分布も (1) 式との良い一致を示しており、この式を用いた速度分布表示が可能であることが知れる。

Goertlerの解との比較より求めた混合域幅および混合域中心位置と、高水数水深／低水路水深比の関係を整理したものが図-8である。図より、高水数高さ h で無次元化した L_0 および L_z は高水数水深／低水路水深比にかかわらず、ほぼ一定値を示しており、高水数高さ 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 は高水数高さの 0.9倍程度、 L_z は 1.6倍程度の値を示している。

4. おわりに

本研究で得られ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次元的な流体混合であり、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による流体混合である。

2) 混合域の渦列と2次元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、その発生間隔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。

3) 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。

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。

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・石垣：複断面開水路流れの斜昇流に関する実験的研究，水工論文集，第34巻，pp.403-408,1990.
- 2) Imamoto, H. and T. Ishigaki : Visualization of secondary flow in a compound open channel, Proc. of 7th Congress of APD-IAHR, Vol. III, pp.485-490, 1990.
- 3) Imamoto, H. and T. Ishigaki : Visualization of velocity distribution by stereo photography, FLOW VISUALIZATION V, Hemisphere, pp.47-52, 1990.
- 4) Brown, G.L. and A. Roshko : On density effects and large structure in turbulent mixing layer, J.F.M., 64, pp.775-816, 1974.
- 5) Takaki, R. and L.S.G. Kovaszny : Statistical theory of vortex merger in the two-dimensional mixing layer, Phy. Fluid 21(2), pp.153-156, 1978.
- 6) Bernal, L.P. : The statistics of the organized vortical structure in turbulent mixing layers, Phy. Fluid 31(9), pp.2533-2543, 1988.
- 7) 今本・石垣：複断面開水路流れの水理特性に関する実験的研究，第27回水講論文集，pp.61-66, 1983.
- 8) Rajaratnam, N. : TURBULENT JETS, 野村安正訳，森北出版，1981.