

複断面開水路流れの水理特性に関する実験的研究
Characteristics of Flow in an Open Channel with Flood Plains

京都大学防災研究所 正 員 今 本 博 健
京都大学防災研究所 正 員 石 垣 泰 輔

1. はじめに

複断面開水路流れでは低水路内の流れと高水敷上の流れとの間に強い相互作用が存在し、その内部構造については不明の点が多い。本研究は流速計を用いたオイラー的計測法と可視化法を用いたラグランジュ的計測法により、流れの内部構造について実験的検討を加えたものである。

実験水路としては幅 20 cm, 40 cm および 100 cm の 3 種の長方形断面水路に高水敷を設置したものを用いた。流速計としてはプロペラ流速計およびホットフィルム流速計を用い、平均流速計測のみについては前者を、乱れ速度計測を含む場合には後者を用いた。また、流れの可視化にはアルミニウム粉末を塗布したおが屑あるいは水素気泡をトレーサーとし、その動きを 35mm スチルカメラにより撮影した。

2. 平均流速の横断分布特性

横断分布形状に関する従来の研究は、Rajaratnum-Ahmadi¹⁾らの実験的研究が挙げられ以下に示す分布式が提案されている。すなわち、

低水路部: $\frac{U-U_0}{U_1-U_0} = 1-0.75\left(\frac{y_1}{b_m}\right)^2$ (1)

高水敷部: $\frac{U-U_2}{U_0-U_2} = \exp\{-(\ln 2)\left(\frac{y_2}{b_f}\right)^2\}$ (2)

と表わされ、低水路部では放物線近似、高水敷部では噴流近似がなされている。なお、式中の記号は図-1に示すように、 U_0 は低水路部と高水敷部境界面上の流速、 U_1 および U_2 は低水路部および高水敷部での代表流速、 b_m は $(U-U_0)/(U_1-U_0)=0.25$ となる y_1 軸上の横断距離、 b_f は $(U-U_2)/(U_0-U_2)=0.50$ となる y_2 軸上の横断距離である。

つぎに、平均流速の横断分布計測結果により分布特性について検討する。計測は100cm 幅水路を用いて表-1に示した水理条件のもとで行なった。図-2は Case A-3 の場合について横断測線の鉛直高さを変化させた時の計測結果が示されている。図より分布形状は鉛直高さにより若干異なるが、いずれの高さにおいても高水敷先端付近で流速の極大値および極小値を示している。このような分布特性は図-3に示すように水理条件を変えた場合にも同様に認められるが、低水路水深の増加とともに極大値と極小値の差が大きくなり、その存在が顕著となっている。

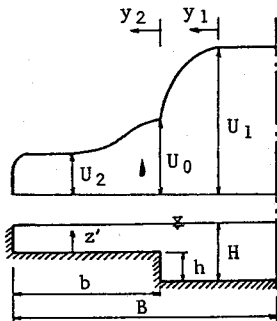


図-1

表-1 水理条件表 (A)

Case	Bed slope	Discharge	Main channel depth	Reynolds number	Froude number
	I	Q (l/s)	H (cm)	Re	Fr
A-1	1/1000	1.37	1.6	1050	0.35
A-2	1/1000	2.44	2.0	1950	0.39
A-3	1/1000	3.99	2.5	3170	0.42
A-4	1/1000	6.12	3.0	4770	0.47
A-5	1/1000	11.51	4.0	9050	0.54

(Flood plain: width=30.0cm, height=1.0cm)

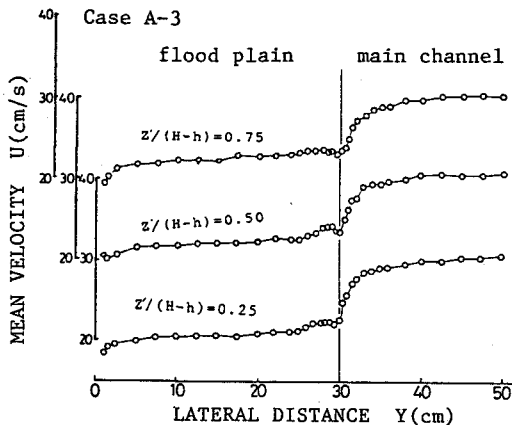


図-2 速度横断分布(1)

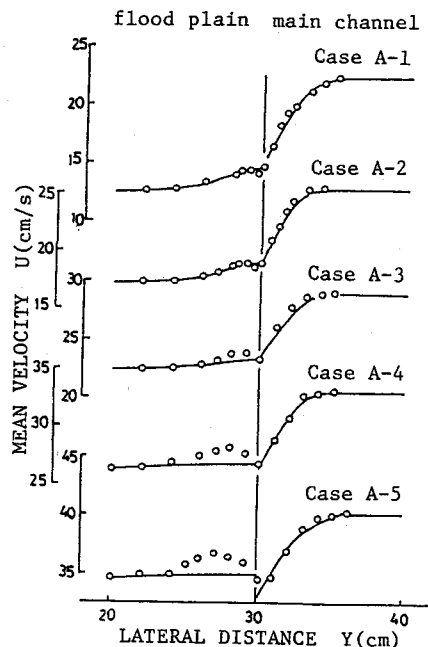


図-4 (1)および(2)式の適合性

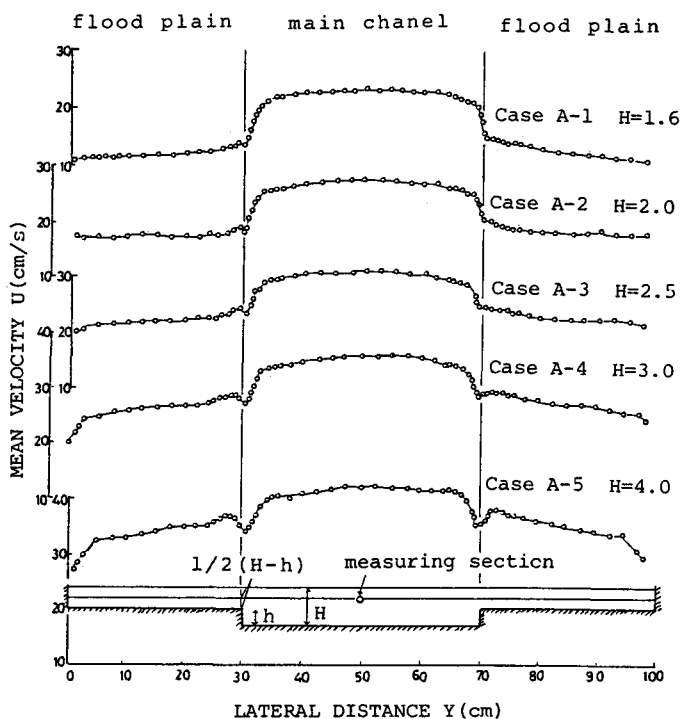


図-3 速度横断分布(2)

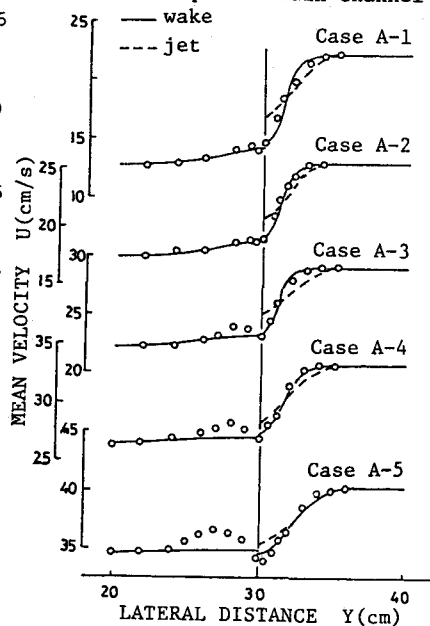


図-5 自由せん断流との適合性

つぎに、Rajaratnum-Ahmadiの(1)および(2)式の適用性について検討すると図-4のようになる。なお、図中の計測値は各ケースの高水敷上半水深位置のものを用いた。図より、(1)式および(2)式の適用性は認められるが局所的には一致していない。なお、式中の b_m あるいは b_f と水理条件との関係は不明であるためここでは計測結果より推定した。さらに、図-5は噴流および後流の分布式の適用を試みた結果であって図より、低水路部では後流の分布式の適用性が噴流に比して優れ高水敷部では両者とも適用可能であるが、Rajaratnumの提案式と同様に局所的には一致していない。なお、図中の曲線はGörtlerの解を用いて算定し

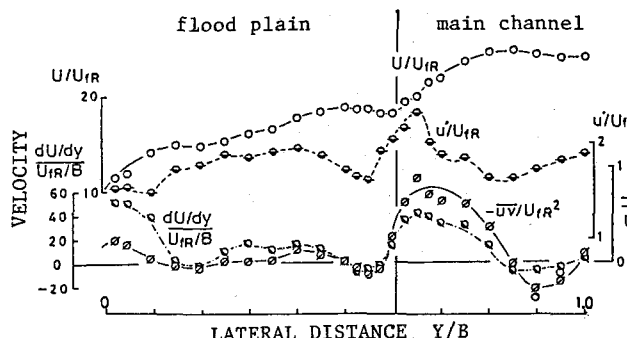


図-6 レイノルズ応力分布

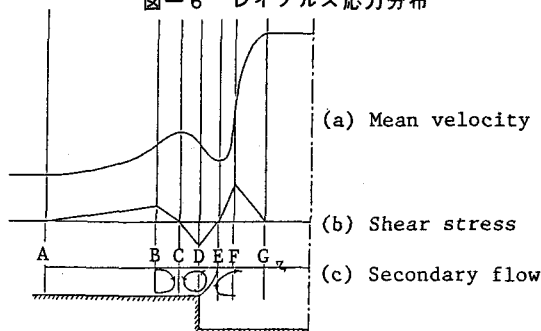


図-7 速度分布と流れの内部構造

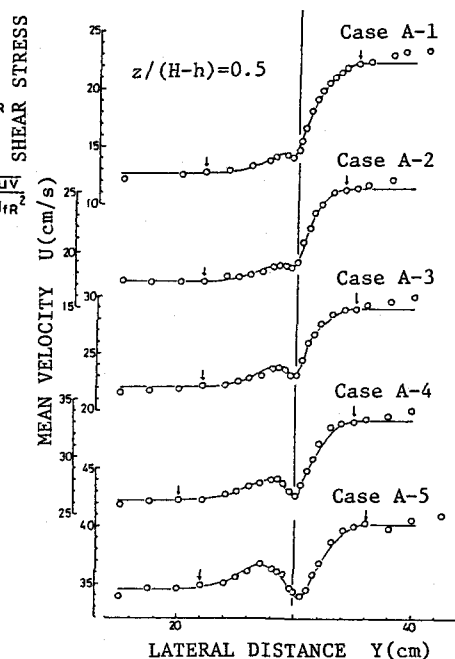


図-8 提案式の適合性

たものである。

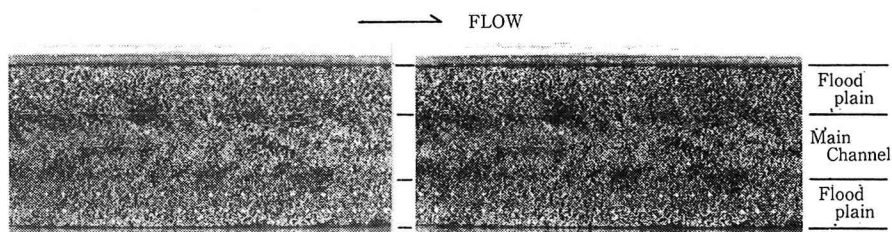
以上のように(1),(2)式あるいは噴流等の分布式の適用には問題があるが,これは境界部付近の流れの内部構造が考慮されていないためと考えられる。そこで,低水路部と高水敷部の境界付近で強いせん断力が働き,その場では自由せん断流と同様にせん断力 τ がレイノルズ応力のみで表わされるとしてPrandtlの第2仮定の適用を考える。すなわち, $\tau = \rho \epsilon (dU/dy)$, $\epsilon = k d \Delta u$ と表わす。ここに, ρ は密度, ϵ は横断方向の渦動粘性係数, d は横断方向スケール, Δu は流速差および k は定数である。

図-6はレイノルズ応力の計測結果²⁾を示したものであるが,併示した速度勾配 dU/dy の分布との比較よりPrandtlの第2仮定の適応が妥当であることが知れる。そこで,レイノルズ応力の分布を図-7に示すような三角形分布と仮定し速度の横断分布を求めると同図に示したような分布形が得られる。すなわち,図に示すように6区間に分割し,それぞれの区間の幅を d_i , $\tau_i=0$ となる点より y_i 軸をとり, $y_i=0$ での速度を U_i , $y_i=d_i$ での速度を $\bar{U}_i + \Delta U_i$ とすると,各区间での速度 U_i は, $U_i = \bar{U}_i + \Delta U_i \cdot (y_i/d_i)^2$ と表わされる。図-8はこうにして得られる分布形と計測結果とを比較したものであり境界部の極大値および極小値をよく表わしている。また,流れの内部構造と横断分布形との関係を推察すると図-7に示すような2次流が考えられる。すなわち,速度分布の極小値は高水敷先端より自由水面に向う斜昇流が通過する位置を示し,極大値は斜昇流により喚起された縦渦が下降する位置を示していると考えられる。^{3),4)}

このようにレイノルズ応力分布を考慮すれば横断分布形状を表わすことが可能であるが,提案式は分割数が多く決定すべきパラメーターが多いため実用には具し難い。また,パラメーターと水理条件の関係が不明であり今後,詳細な検討が必要である。

3. 自由表面上における流況特性

自由表面上における流況を2台の35mmスチルカメラにより撮影した一例を示したものが写真-1である。これらの写真は,アルミニウム粉末を塗布したおが屑をトレーサーとし,微小時間間隔(本研究では30ms)において40cm幅水路上方2.3mの位置より撮影されたものである。なお,照明には500Wのヨウ素ランプ

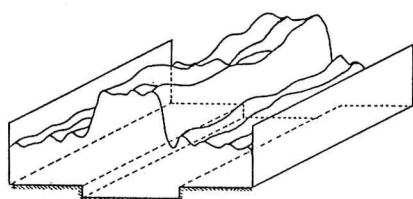


写真－１ カメロン撮影例

表－２ 水理条件表（Ｂ）

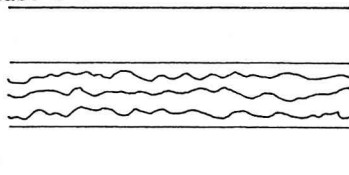
Case	Bed slope I	Discharge Q(l/s)	Main channel depth H(cm)	Reynolds number Re	Froude number Fr
B-1	1/1000	0.50	2.0	2150	0.36
B-2	1/1000	0.92	2.5	1750	0.36
B-3	1/1000	1.45	3.0	2690	0.37
B-4	1/1000	3.03	4.0	5410	0.43

(Flood plain: width=12.0cm, height=2.0cm)

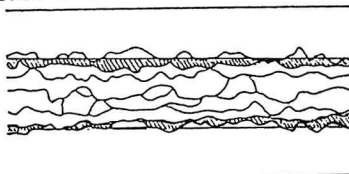


図－９ 速度分布の立体視像

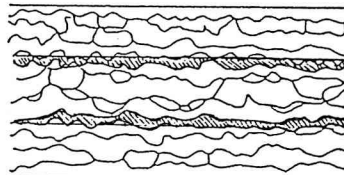
Case B-1



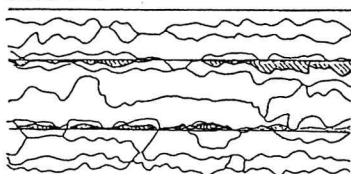
Case B-2



Case B-3



Case B-4



図－１０ 峰 線

４灯を用い，露光時間 $T=1/500$ 秒，絞り $F=2.8$ とした。これら２枚の写真を実体視すると，カメロン効果により瞬間速度の平面分布を図－９のような立体視像として観察できる。すなわち，横断方向に見ると流速の横断分布特性と同様の分布形を示しており，微視的には高速域（高い部分）と低速域（低い部分）が横断方向に交互に配列され縦断方向にゆらいでいるのが観察される。

つぎに，高速域と低速域の配列を見るために高速域を縦断方向に連ねた峯線を図化したものが図－１０である。図より，峯線は複雑な形状を示し，低水路水深の変化にともなってその間隔や本数が変化している。また，図中斜線をほどこした部分は高水敷先端付近に形状された顕著な低速域を示している。ここで，速度の速い部分は縦渦が下降する部分に相当し，速度の遅い部分は縦渦が上昇する部分に相当することと，複断面流れの内部構造との関連を考慮すると斜線部は斜昇流が水面に達した位置と考えられ，その部分が島状に分布していることより斜昇流の間欠性がうかがわれる。なお，実験は表－２に示す水理条件で行なった。

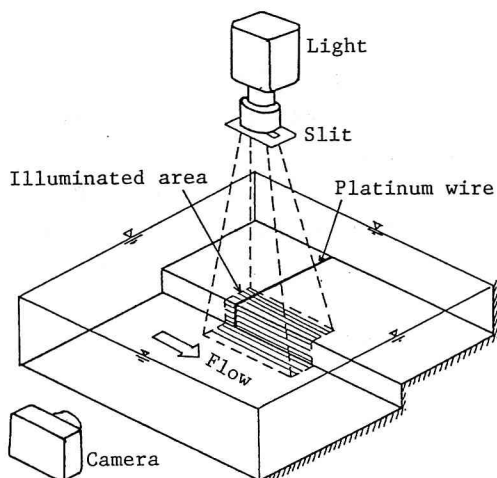


図-11 水素気泡法による斜昇流の可視化装置

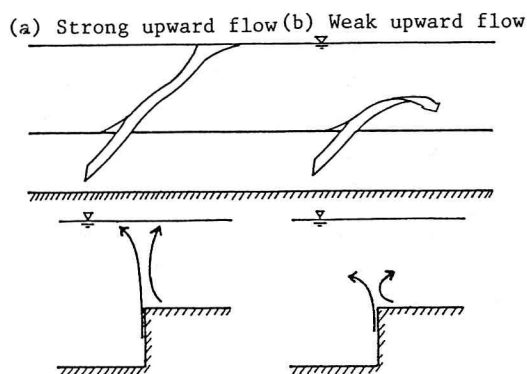


図-12 斜昇流の模式図

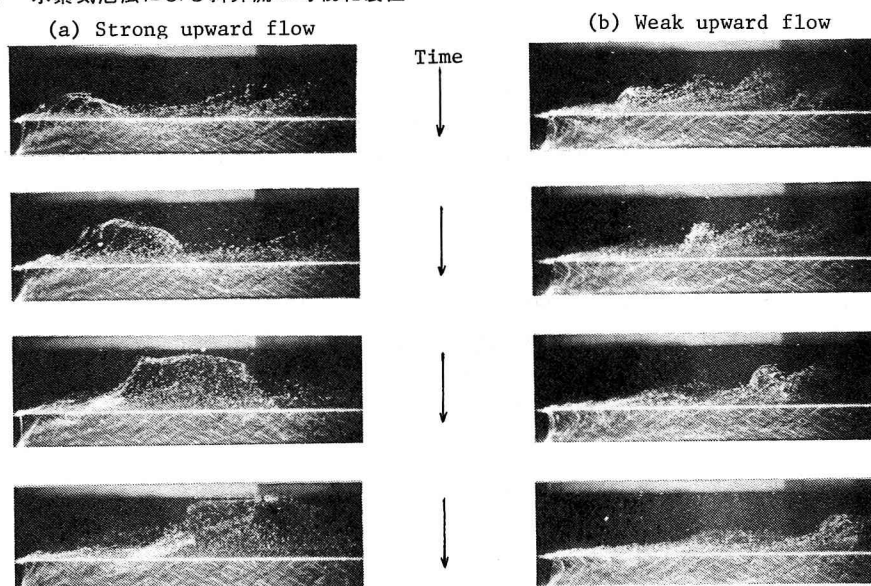


写真-2 斜 昇 流

4. 高水敷先端付近における斜昇流の特性

斜昇流の特性を見るために、幅 20 cm、深さ 10 cm、長さ 2 m の水路内に高さ 1.1 cm、幅 12 cm の高水敷を片側に設置し、水素気泡をトレーサーとして図-11 に示すような方法で可視化実験を行なった。なお、水理条件は低水路水深 3.0 cm、流量 0.318 l/s、勾配 $i = 1/1700$ 、レイノルズ数は $Re = 1160$ である。

写真-2 は、毎秒 3.8 コマで連続撮影を行なったものである。(a) は、高水敷先端付近で間欠的に発生する強い上昇流であり水面まで達しているのが観察される。一方 (b) は、(a) のような強い上昇流と次の強い上昇流の間で発生する弱い上昇流であり、高水敷先端より少し上る程度で下方にひきもどされる。このように、2 種の状態が観察され、(a) のような強い上昇流が間欠的に発生し、その間に (b) のような弱い上昇流が存在する。また、流況を目視観察したところ、(a) のような強い上昇流は高水敷先端で発生し、ボイル状に上昇して水面に達するのに対し、(b) のような弱い上昇流は高水敷先端より少し上昇したところで低水路内の速い流れにひきずり込まれて行く現象が見られた。以上の 2 種の上昇流を模式的に示すと図-12 のように表わされる。

5. おわりに

以上、複断面開水路流れの水理特性について検討を行なったが、その主な結果を示すと次のようである。

1) 平均流速の横断分布形状は、Rajaratnumらによる提案式および自由せん断流の分布式では局所的に表わせない部分がある。2) 本研究で提案された分布式は境界部付近のレイノルズ応力分布を考慮したもので速度の極大値および極小値をよく表わしている。しかしながら、決定すべきパラメーターが多く複雑であり水理条件との関係を検討する必要がある。3) カメロン効果を利用して自由表面の瞬間流速の平面分布が観察され流れの内部構造との関係が推察された。4) 水素気泡法による高水敷先端の斜昇流の挙動について観察を行ない、水面まで達する強い上昇流が間欠的に発生することと、強い上昇流と次の強い上昇流の間に弱い上昇流が存在することが知れた。今後は、流れの3次元構造および抵抗特性について研究を進めて行く予定である。

参 考 文 献

- 1) Rajaratnum, N. and Ahmadi, R.M.; Interaction between main channel and flood plain, Jour. of Hydraulic Div. Proc. ASEC, Vol.105, HY5, 1979, pp.573-588.
- 2) 今本博健, 久下俊夫: 複断面流れの水理特性に関する基礎的研究, 京都大学防災研究所年報, 第17号B, 昭49.10, pp.665-679.
- 3) 石垣泰輔, 今本博健, 木下聖司: 複断面開水路流れの速度分布特性について, 第37回土木学会年次学術講演会講演概要, Ⅱ-240, 1982.
- 4) 今本博健, 石垣泰輔, 稲田修一: 複断面開水路流れの水理特性について(1), 京都大学防災研究所年報, 第25号B-2, 昭57.4, pp.509-527.