

複断面開水路流れの水力特性について (1)

今本 博健・石垣 泰輔・稲田 修一

ON THE HYDRAULICS OF AN OPEN CHANNEL FLOW IN COMPLEX CROSS SECTION

By *Hirotake* IMAMOTO, *Taisuke* ISHIGAKI and *Shuichi* INADA

Synopsis

In the open channel that consists of a main channel and flood plains, the flow has the complex turbulent structure not to have been clarified yet. So the resistance to flow has not clarified completely. It is the objective of this paper to elucidate the turbulent structure of this flow experimentally.

From the results of mean velocity measurements using hot-film anemometers or propeller current meters and a flow visualization using Cameron effect, it is confirmed that several kinds of secondary motions exist in a main channel and flood plains.

1. は じ め に

複断面開水路流れは、高水敷先端付近より自由表面に向う斜昇流が存在するなど、複雑な性状を示し、その抵抗および内部構造には不明の点が多い¹⁾。従来の複断面開水路流れに関する研究は、例えば断面分割法のように、流量計算に直接結びつけようとする経験的なものが多い。また、低水路部と高水敷部との境界面近傍では、激しい流体混合が生じ強いせん断力の生じることが、Zheleznyakov²⁾, Sellin³⁾ らによって指摘されており、最近では、玉井ら⁴⁾によって可視化法による境界部付近の渦について検討されている。しかしながら、内部構造については、2,3の例を除いてあまり検討されておらず、未解明の部分が残されている。

本研究は、複断面開水路流れの水力特性を解明するため、その内部構造について、プロベラ流速計、ホットフィルム流速計を用いた点的な側面と、カメロン効果を利用した可視化法による面的な側面から検討を行ない、いくつかの興味のある結果が得られている。

2. 複断面開水路流れに関する実験

2.1 実験装置

本研究に用いた実験水路は、幅40cm、深さ20cm、長さ13m 滑面直線水路である。実験水路は長方形単断面を有するため、左右両岸に沿い水路全長にわたってアクリル板を敷設することにより、複断面水路として用いられるようになっている。

これらの水路はいずれも循環式であり、流量は送水管途中に設置されたバルブにより調節されるとともに、高水敷内に設置された台形せきにより計量されるようになっている。

水深の計測には、1/10mm 読みのポイントゲージを用い、流下方向に1m ごとに計測し、等流とみなされる区間で平均水深を求めている。速度の計測には、直径3mmの超小型プロベラ流速計、ホットフィルム流速計を用いており、両流速計ともに、静水中を移動させる検定法により、出力パルス数、出力電圧と速度との関係が求められている。なお、ホットフィルム流速計の使用に際しては、温度変化および微細粒子のプロープへの付着により応答特性が変化するため、これらの影響を極力除去する努力がなされている。

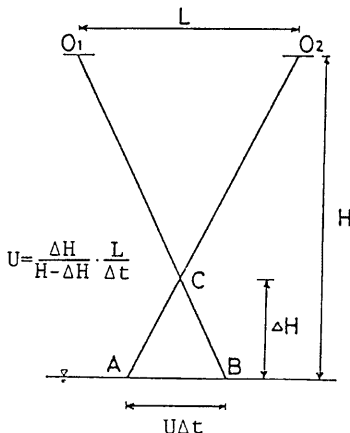


Fig. 1 Cameron effect.

なお、プロペラ流速計については30秒間の出力パルス数をデジタルカウンタにより読みとり、出力パルス数—速度検定曲線を用いて速度に変換している。ホットフィルム流速計の出力電圧は、データレコーダに記録させたのち、A—D変換器により数値化し、京都大学大型計算機センターのコンピュータにより処理されており、そのサンプリング周波数は $f_s=20\text{Hz}$ 、データ数は500個である。流れの可視化は、水路上方の撮影台に設置された2台のカメラを用い、500Wのヨウ素ランプ4灯を照明装置として行なわれ、トレーサとして、アルミニウム粉末を塗付したおが屑を用いている。

2.2 実験方法

本研究では、複断面水路における定常等流状態の流れを対象として、速度計測および流れの可視化が行なわれており、それぞれ以下のである。

まず最初に、複断面水路の流れが等流になっているかについて検討を行なった。すなわち、水路全長にわたって

1m毎に水深計測を行なった結果より、等流区間を判定し、その区間で8～10点の計測値を平均して等流水深とした。その結果、速度計測断面を、40cm幅水路では下流端より4.5mとし、100cm幅水路では下流より7mとしている。

複断面開水路流れの平均速度分布を知るため40cm幅水路ではホットフィルム流速計を用いて主流方面平均速度計測を行ない、100cm幅水路では、直径3mmの超小型プロペラ流速計を用いて主流方向平均速度の計測を行なっている。計測にあたっては40cm幅水路で一断面100～120点、100cm幅水路では一横断測線60～70点計測を行ない、とくに低水路部と高水敷部の境界付近を密に行なっている。

つぎに、複断面開水路流れを面的にとらえるため、流れの可視化法を用いた実験が行なわれている。すなわち、観測用トレーサとしてアルミニウム粉末を塗布したおが屑を用い、微小時間間隔で2枚の写真を撮影すると、ほぼ同様の写真が得られ、この2枚の写真を実体鏡を用いて実体視すると、観測用トレーサの微小撮影時間間隔内の移動距離の差が横視差となり、観測面がかなりの起伏をもって可視化される。本実験では、観測用トレーサは水面に浮遊しており、流れに十分追従しているものと考えられ、上記の実体視像は、瞬間表面流速の平面分布を示している。このように、速度が実体視されることは、カメロン効果⁹⁾と呼ばれており、その原理はFig. 1に示すようである。このようにカメロン効果を利用した撮影を、ここではカメロン撮影と呼ぶことにする。

カメロン撮影は、水路上方2.3mに設置された撮影台に、2台の35m/mスチルカメラを流下方向に並べ、照明に500Wのヨウ素ランプ4灯を用いて、露光時間 $T=1/500$ 秒、絞り $F=2.8$ 、撮影時間間隔 $\Delta T=30\text{ms}$ の撮影条件で行なわれている。なお、撮影時間間隔の制御は、水晶発振器を内蔵した撮影間隔制御装置により行なわれている。

3. 複断面開水路流れの水力特性

3.1 複断面流れの抵抗特性

複断面開水路流れは、高水敷の存在のため、水深の変化により各種水量が高水敷高を境に不連続的に変化する。また、流れが高水敷上に及んだ場合、低水路部と高水敷部の境界付近で流体の激しい混合が生じる。これらの点を考慮すると、複断面開水路流れの抵抗特性は、表面抵抗と境界部付近の内部抵抗が組み合さり

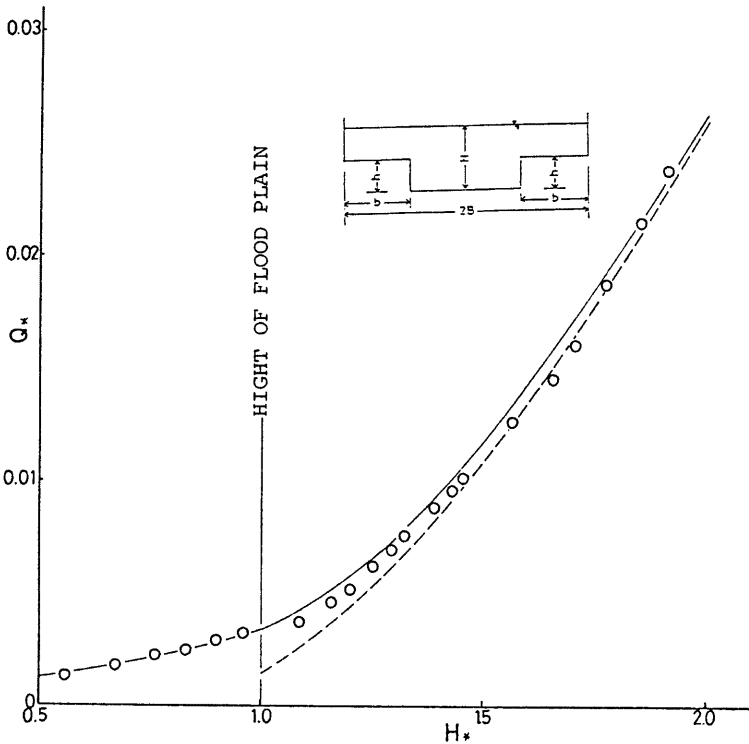


Fig. 2 Relation between discharge and depth of main channel.

複雑なものとなっていると考えられる。従来、複断面開水路流れの抵抗特性に関する研究は流量計算に直接結びつくものが多く、最も単純な断面分割が用いられているが、境界面をせん断力が0となる面として用いる Yen-Overton⁶⁾の提案、森平⁷⁾、Zhelezhyakov²⁾などの補正係数を用いる方法、最近では、境界部の渦を考慮した玉井ら⁸⁾の方法が提案されている。しかしながら、実用上は最も単純な分割法が用いられているのが現状である。

本研究では、複断面開水路流れの内部構造を解明することにより、抵抗特性を検討しようとするものである。ここでは、流量・水深曲線の計測に基づいて複断面開水路流れの概略的な抵抗特性について記す。

流量・水深曲線の一例として、水路幅 $2B=100\text{cm}$ 、高水敷幅 $b=40\text{cm}$ 、高水敷高 $h=5\text{cm}$ 、路床勾配 $I=1/400$ とした場合の流量 Q と低水路部水深 H の関係を無次元化して示すと Fig. 2 のようになる。ここで、無次元化流量 Q_* は、無次元化低水路部水深 $H_*=H/h$ 、無次元化高水敷幅 $b_*=b/B$ および無次元化高水敷高 $h_*=h/B$ と、平均流速公式としてマニング公式を用いた場合、単断面法および断面分割法により次式によって算定されるものである。

$$\text{単断面法: } Q_* = \frac{nQ}{2I^{1/2} B^{2/3}} = \frac{\{h_*(Q_* - b_*)\}^{5/3}}{(h_* + H_* + 1)^{2/3}} \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\text{断面分割法: } Q_* = \frac{nQ}{2I^{1/2} B^{2/3}} = \frac{\{b_* h_*(H_* - 1)\}^{5/3}}{\{b_* + h_*(H_* - 1)\}^{2/3}} + \frac{\{h_*(1 - b_*)H_*\}^{5/3}}{(h_* + 1 - b_*)^{2/3}} \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 n はマンニングの粗度係数である。ただし、上式は低水路部水深が高水敷高より大きい場合を対象とし、(2) 式は鉛直分割法によるものであって、図中に破線で(1)式を、実線で(2) 式の結果を示す。計測された流量および水深より図中○印で示した結果が得られ、流れが低水路部に限定されている場合は単断面法によく合うが、流れが高水敷部に及ぶと計測値は単断面法と断面分割法による計算結果の中間値を示し、 H_w の増加とともに単断面法による計算結果に漸近する。ここで、重要な結果は、高水敷高さを境にして流量が不連続的に変化することであり、以下、この領域について検討を加える。

実測値は離散的であるが、流量 Q と低水路部水深 H が片対数紙上で直線近似が可能なことを利用し、 $Q=CH^m$ (c, m : 定数) として関係を求めることにより連続量として取り扱い、抵抗の表示法に抵抗係数 $f' = 2(U_f/U_m)^2$ (U_f/U_m) を用いて f' と Q の関係を整理すると Fig. 3 のようになる。ここに、摩擦速度は $U_f = \sqrt{gRI}$ (g : 重力加速度、 R : 径深)、断面平均流速は $U_m = Q/A$ (A : 通水断面積) として算定している。図より、抵抗係数 f' は流量 Q により複雑な変化を示し、同一流量に対して抵抗係数 f' が2値存在する領域が認められる。流量増加時には、 $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow e$ 、流量減少時には、 $e \rightarrow d \rightarrow f \rightarrow g \rightarrow a$ という異なった径路をたどると考えられる。また、 f' とレイノルズ数 $Re = U_m R/\nu$ (ν : 動粘性係数) の関係を示した Fig. 4 についても同様な傾向を示している。このような抵抗の2値性は、Sellin⁹⁾の研究にも見い出され、この領域についての検討は、複断面開水路流れの抵抗特性を解明する上で重要と考えられる。そのためには、複断面開水路流れの内部構造を知る必要があり、以下にその実験的検討結果を示す。

3.2 平均速度分布

本節では、複断面開水路流れの内部構造を、ホットフィルム流速計およびプロベラ流速計による平均速度の計測結果に基づき検討を行なう。

3.2.1 平均速度分布特性

平均速度 U の計測結果の一例として、40cm 幅水路において、高水敷幅 12cm、高水敷高 2cm、低水路部水深 4.0cm、流量 3.110l/s とした場合について、ホットフィルム流速計による計測値の鉛直分布および横断分布を示すと Fig. 5a および Fig. 5b のようである。

Fig. 5a は速度 U の鉛直分布を示したものであり、平均速度 U および路床からの鉛直高さ Z は、それ

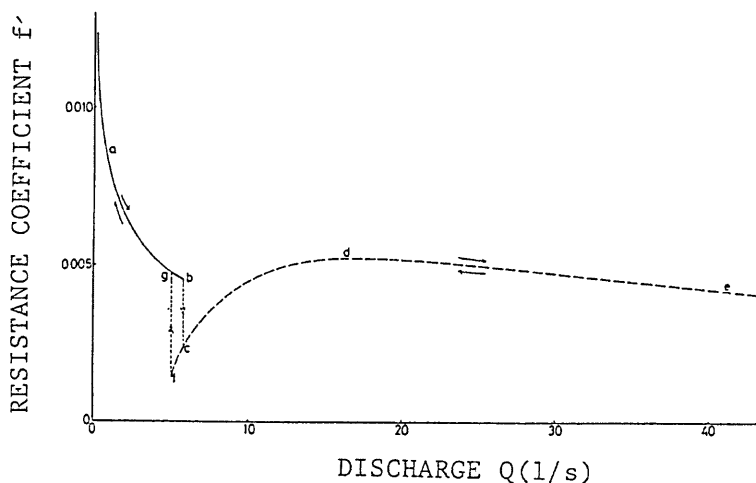


Fig. 3 Relation between resistance factor and discharge.

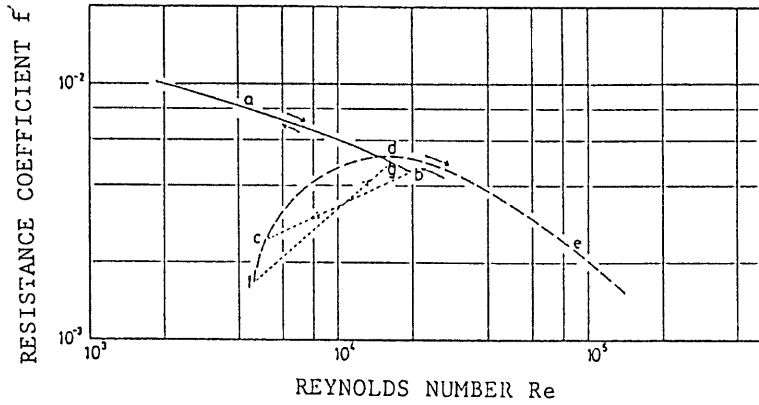


Fig. 4 Relation between resistance factor and Reynolds number.

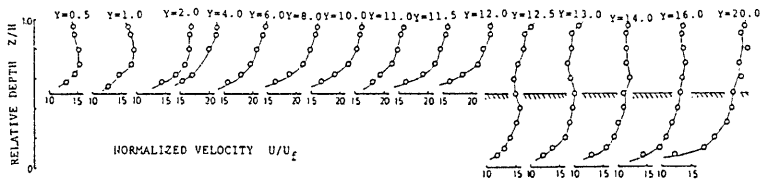


Fig. 5a Vertical distribution of longitudinal mean velocity.

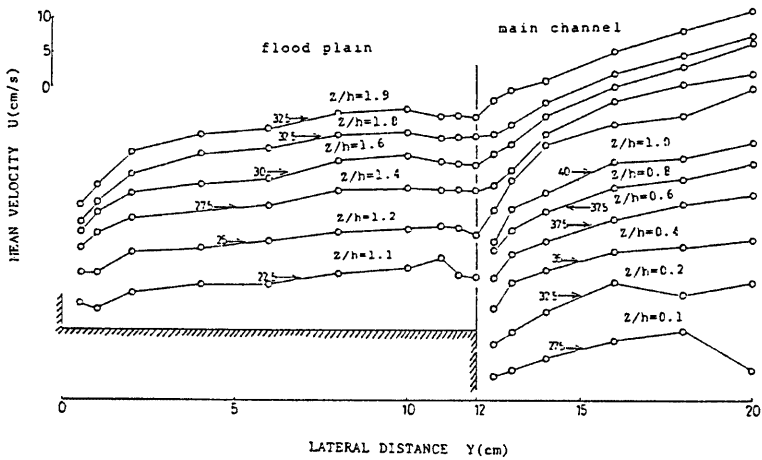


Fig. 5b Lateral distribution of longitudinal mean velocity.

それ、各部の水深を用いた摩擦速度（低水路部： $U_f = \sqrt{gHI}$ ，高水敷部： $U_f = \sqrt{g(H-h)I}$ ）および低水路部水深 H で基準化されている。図より、低水路部中央付近では、 Z の増加とともに U は単調増加しているが、低水路部側壁（ $y=12\text{cm}$ ）に近づくにつれ、自由水面での U の増加が緩慢になり、側壁近傍では、高水敷高きよりやや上方で極小値を示す分布となっている。一方、高水敷部での結果を見ると、高水敷先端に近づくにつれて速度勾配は大きくなり、低水路部の速い流れにより加速されていることが窺われる。

Fig. 5b は横断分布を示したもので、計測値に若干のばらつきはあるものの、つぎのような特性が認められる。すなわち、高水敷高より上部での横断分布は、高水敷部側壁より離れるにつれて急増し、ほぼ一定になった後、高水敷端に近づくにつれ漸増し、既報¹⁹⁾で指摘したように極大値、極小値を示した後、低水路部に入って急増し、低水路部中央付近で最大となる。一方、低水路部の高水敷高以下の部分での分布は、低水路部側壁近傍で急増した後漸増し、低水路中央部で最大となっている。

以上のように、複断面開水路流れにおける鉛直および横断速度分布には特徴があり、とくに高水敷高より上部での横断分布に複断面流れ特有の分布特性が顕著に見られる。しかしながら、**Fig. 5b** に示した横断分布では、低水路部中央で速度が最大となっており、流れの2次元性が保たれておらず、対岸の影響が含まれていると考えられる。そこで、低水路部および高水敷部で流れの2次元性を保つため、水路幅・水深比を10以上とし **Table 1** に示すような水利条件のもとでプロペラ流速計による計測を行なった。なお、**Table 1** には次節で示す可視化実験の水利条件が併示されている。

Fig. 6 は 100cm 幅水路において、高水敷幅 30cm、高水敷高 1cm とし、低水路部水深を種々に変化した場合について、高水敷部半水深における速度の横断分布を示したものである。図より、いずれの場合にも、低水路部および高水敷部で速度が一定となる区間が存在し、流れの2次元性は保たれていると言える。分布特性は、**Fig. 5b** で示したものと同様であるが、低水路部水深が大きくなるにしたがって、低水路部と高水敷部の境界付近の極値の存在が顕著なものになっている。**Fig. 7** には低水路部水深 3cm の場合について、横断測線の鉛直高さを変えた場合の計測結果が示されているが、分布形状に顕著な差異は認められず、前述した分布特性は水深方向にはほぼ一様であると言える。

3.2.2 速度分布の相似性

Fig. 6 の結果をみると、自由せん断流の速度分布形との相似性が推察され、ここでは、噴流、後流および2次元せん断層を対象として得られている分布式と計測値との適合性を検討する。また、複断面開水路流れの速度の横断分布形については、Rajaratnum-Ahmadi²⁰⁾により実験的検討がなされ次式が提案されているので、ここにあわせてその適合性について検討する。

Table 1 Hydraulics conditions in velocity measurement and flow visualization.

Case	Bed slope I	Width $2B(\text{cm})$	Flood plains		Discharge $Q(l/s)$	Main Channel Depth $H(\text{cm})$	Temperature $T_w(^{\circ}\text{C})$	Reynolds number Re	Froude number Fr
			Width $b(\text{cm})$	Height $h(\text{cm})$					
A-1	1/1000	100	30.0	1.0	1.37	1.6	12.29	1050	0.35
A-2	1/1000	100	30.0	1.0	2.44	2.0	13.11	1950	0.39
A-3	1/1000	100	30.0	1.0	3.99	2.5	13.12	3170	0.42
A-4	1/1000	100	30.0	1.0	6.12	3.0	12.95	4770	0.47
A-5	1/1000	100	30.0	1.0	11.51	4.0	13.70	9050	0.54
B-1	1/1000	40	12.0	2.0	0.50	2.0	14.06	2150	0.36
B-2	1/1000	40	12.0	2.0	0.92	2.5	14.16	1750	0.36
B-3	1/1000	40	12.0	2.0	1.45	3.0	14.10	2690	0.37
B-4	1/1000	40	12.0	2.0	3.03	4.0	14.16	5410	0.43

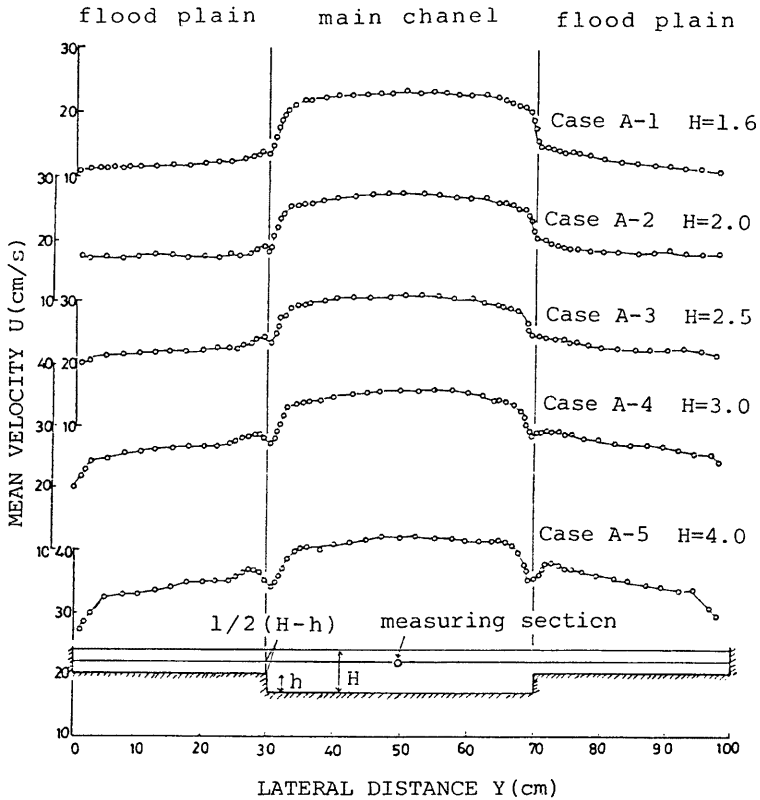


Fig. 6 Lateral distribution of longitudinal mean velocity.

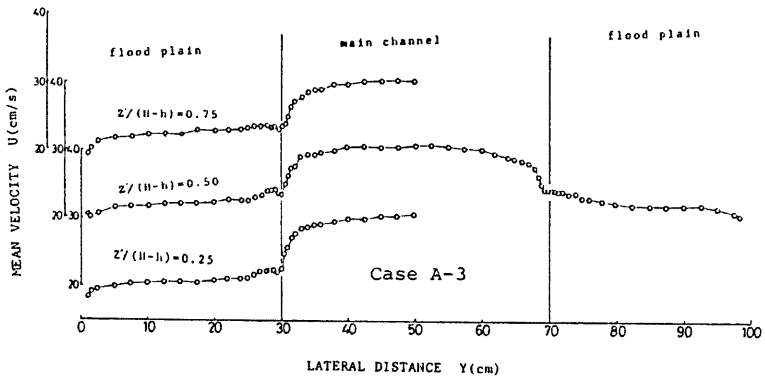


Fig. 7 Lateral distribution of longitudinal mean velocity.

$$\text{低水路部: } \frac{U-U_0}{U_1-U_0} = 1 - 0.75 \left(\frac{y_1}{b_m} \right)^2 \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$\text{高水敷部: } \frac{U-U_2}{U_0-U_2} = \exp \left\{ 1 - (\ln 2) \left(\frac{y_2}{b_f} \right)^2 \right\} \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここに, U_0 : 低水敷部境界面上の流速, U_1 および U_2 : 低水路部および高水敷部での代表流速, b_m : $(U-U_0)/(U_1-U_0)=0.25$ となる低水路部中央から高水敷部側に測った横断距離, b_f : $(U-U_2)/(U_0-U_2)=0.50$ となる低水路部・高水敷部境界から高水敷部側に測った横断距離である。

本研究では, 低水路部と高水敷部を連続して考慮した場合と, 分離して取り扱った場合について前述した分布形との相似性を検討する。

低水路部と高水敷部を連続して検討した場合の例として, 水路幅 100cm, 高水敷幅 30cm, 高水敷高 1cm 低水路部水深 2.5cm, 流量 3.99 l/s の場合について検討したものが Fig. 8 である。図中の理論曲線は, 噴流および後流については, それぞれ次式, すなわち,

$$\text{噴 流: } \frac{U-U_2}{U_1-U_2} = 1 - \tanh^2 \left(\frac{\eta}{1.125} \right) \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$\text{後 流: } \frac{U_1-U}{U_1-U_2} = \exp \{ -(\ln 2)\eta^2 \} \quad \dots\dots\dots(6)$$

で表わされる Görtler の解を用い, 2次元せん断層については Tollmien の数値解を用いている¹⁰⁾。ここに $\eta = y'/b_{1/2}$ で表わされ, $b_{1/2}$ は半値半幅である。また, 基準化する際の代表流速 U_1, U_2 および代表距離 $b_{1/2}$:

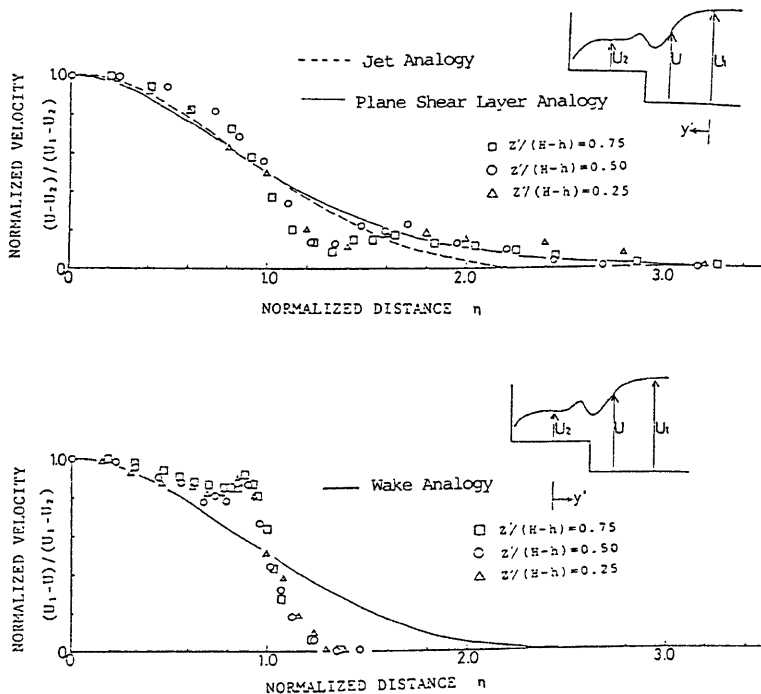


Fig. 8 Lateral distribution of normalized mean velocity.

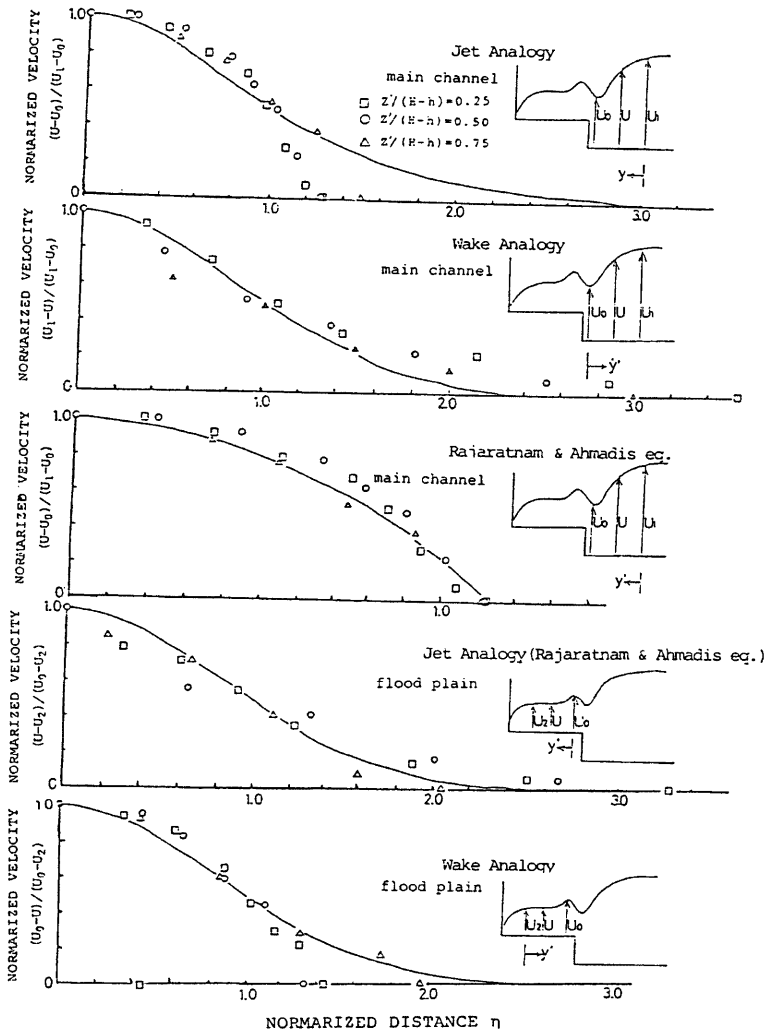


Fig. 9 Lateral distribution of normalized mean velocity.

は、速度の横断分布計測結果より、低水路部および高水敷部で速度が一定とみなせる区間の境界部側の値を代表流速とし、それらの横断位置からの距離を代表距離とした。

図より、測線高 z' の違いによる分布形の差異は認められず、水深方向には横断分布形の相似性が満足されていることと、3種の分布形の適合性を見ると、後流のものに比して噴流および2次元せん断層の分布形の適合性が優れているものの低水路部と高水敷部の境界付近に相当する $\eta=1.0 \sim 1.6$ の区間で計測値が分布式より下方の値を示していることが知れる。これは、前項でも示したように、境界部付近に認められる速度

の極大値および極小値の存在によるものである。

つぎに、低水路部と高水敷部を分離して検討した場合について、Fig. 8 と同じ水理条件のもとでの結果を示すと Fig. 9 のようになる。ここで、 U_1 および U_2 は前述した基準で決定し、 U_0 は低水路部と高水敷部の境界での値を用いており、代表距離もそれに準じて決定した。また、噴流の分布式と2次元せん断層の分布式はほぼ同様であるため、ここでは噴流の分布式で代表するとともに、Rajaratnum-Ahmadi の提案式の検討も行なっている。

図より、低水路部においては、Rajaratnum-Ahmadi の提案式の適合性が最も優れており、噴流および後流の分布式は、 η の大きな領域、すなわち、噴流では高水敷側、後流では低水路部中央で若干適合性が悪くなっている。一方、高水敷部の結果を見ると、噴流および後流の分布式はいずれもほぼ同様の適合性を示しているが、 η の大きな領域、すなわち、噴流では高水敷部側壁側、後流では高水敷先端付近で適合性が悪くなっている。なお、Rajaratnum-Ahmadi の提案式は水理学的に不明確な点があり、一般的とは言えないことを考慮しておく必要がある。

以上、それぞれの分布式との相似性について検討し、いずれの分布式を用いてもある程度の適合性が得られることが知れたが、これらの検討は、速度の横断分布形状から直感的に分布形の相似性を知ろうとするもので、複断面開水路流れの内部構造に基づくものではない。したがって、本研究では、複断面開水路流れの内部構造に基づいた観点より次項において分布形状の検討を行なう。

3.2.3 平均速度分布と内部構造

複断面開水路流れの内部構造に関する研究は比較的少なく、Townsend¹¹⁾ による乱れ速度の検討および堀川・岩崎¹²⁾ によって実験結果に基づいた2次流の数値計算が行なわれているにすぎないが、ここでは既報¹⁾ で行なわれた詳細な実験的検討の結果に基づいて、前項で検討した速度の横断分布と内部構造について検討する。

複断面開水路流れにおいては、低水路部と高水敷部の境界面付近で流体の混合が生じせん断力が働くが、せん断力 τ は固体壁面が存在しないため、粘性による層流摩擦は乱流摩擦に比して小さいため無視され、レイノルズ応力のみによって表わされる。このような場での流れは自由せん断流と呼ばれ、レイノルズ応力に関しては Prandtl の第2仮定がよく用いられる。すなわち、

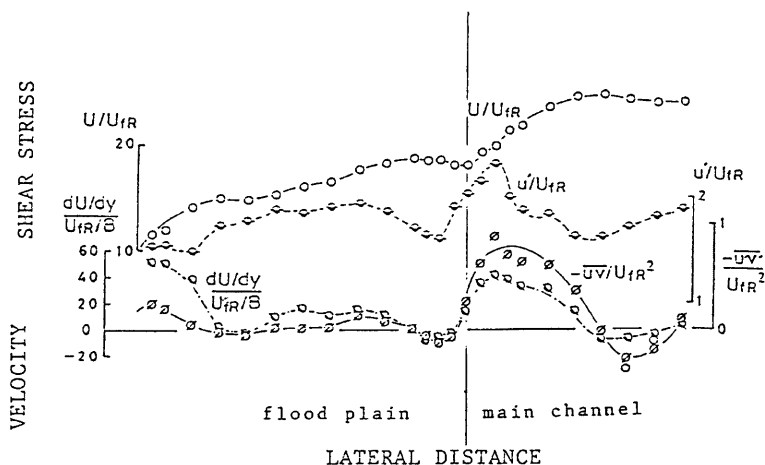


Fig. 10 Lateral distribution of longitudinal mean velocity and Reynolds stresses.

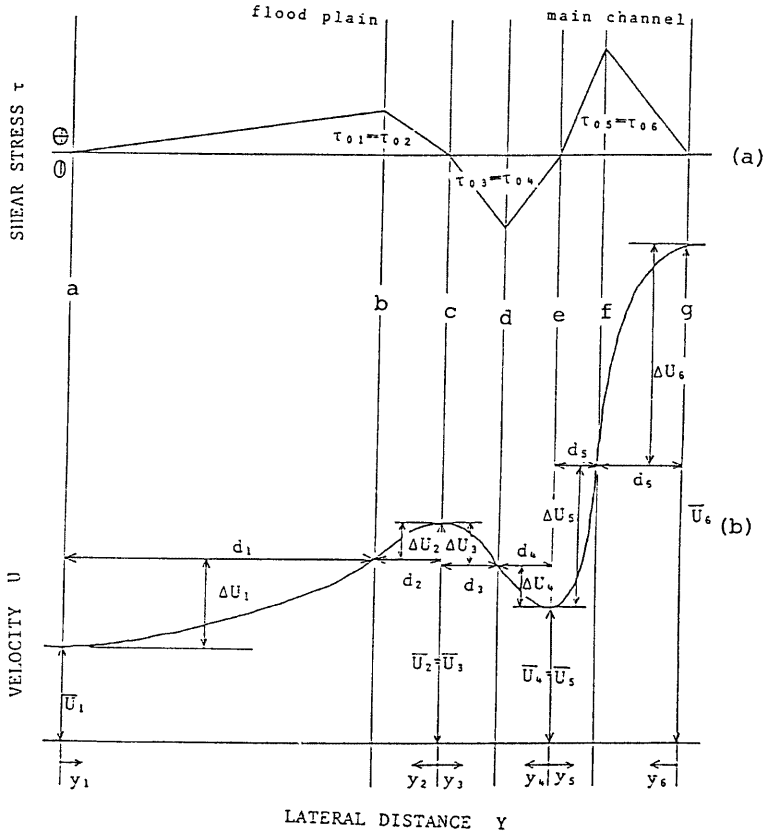


Fig. 11 Lateral distribution model of longitudinal mean velocity and Reynolds stress.

$$\tau = \rho \epsilon \frac{du}{dy} \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$\epsilon = k d \Delta u \quad \dots\dots\dots(8)$$

ここに、 τ :せん断力、 ρ :密度、 ϵ :横断方向の渦動粘性係数、 d :横断方向スケール、 Δu :流速差および k :定数である。上式より明らかなように、せん断力分布すなわちレイノルズ応力分布が与えられれば、速度の横断分布が得られる。高橋¹³⁾は、低水路内でレイノルズ応力の分布が一樣とし、横断方向スケールが水深に規定されると仮定して速度の横断分布形を導いているが、高水敷部は速度一定としており、境界部の内部構造は考慮されていない。

本研究では、既報¹⁾のレイノルズ応力の測定結果 Fig. 10 をもとに、速度の横断分布形について検討を行なう。Fig. 10 より、レイノルズ応力 $-\rho \bar{u}'v'$ は、高水敷部側壁付近で極大値をとり、高水敷部中央付近ではほぼ 0 に近い値を示したのち、高水敷端に近づくにつれ増加して極大値を示したのち、境界部付近で負の極小値を示し、低水路部に入って急増して正の極大値をとり、低水路中央付近の 0 に近い値に漸減している。以上の分布形状より、レイノルズ応力分布はその増加傾向の違いによりいくつかの区間に分けられ、各区間

において第一次近似として直線近似を行なって分布形を模式的に表示すると、Fig. 11 (a) のような分布形が得られる。ただし、ここでは低水路部と高水敷部の境界付近のみを取り扱うこととする。

レイノルズ応力分布を Fig. 11 (a) のように仮定すると、(7)式に示されたレイノルズ応力と速度勾配の関係より、Fig. 11(b) に示すような速度の横断分布が描かれる。ここで、a~g 点の区間は、低水路部と高水敷部の境界付近での流体混合による影響が表われる区間を示すことになる。この区間を、図に示すようにさらに6区間に分割し、高水敷部側より1~6区間とすると i 区間での任意の位置におけるせん断力 τ_i は、

$$\tau_i = \frac{y_i}{d_i} \tau_{0i} \quad \dots\dots\dots(9)$$

と表わされる。ここに、 τ_{0i} は i 区間での最大せん断力を示す。また、 i 区間での横断方向スケールを区間長 d_i とすれば、(7) 式および (8) 式より

$$\tau_i = \rho \cdot \epsilon_i \cdot \frac{du_i}{dy_i} \quad \dots\dots\dots(10)$$

$$\epsilon_i = k_i \cdot d_i \cdot \Delta U_i \quad \dots\dots\dots(11)$$

となる。以上の3式により、 i 区間での流速 U_i は、 $y_i=0$ での流速を $\bar{U}_i$ とすると、

$$U_i = \frac{\tau_{0i}}{2\rho k_i \cdot d_i^2 \cdot \Delta U_i} \cdot y_i^2 + \bar{U}_i \quad \dots\dots\dots(12)$$

と表わされる。ここで、 $y_i=d_i$ の時、 $U_i = \bar{U}_i + \Delta U_i$ であることを考慮すれば、(12) 式は

$$U_i = \bar{U}_i + \Delta U_i \cdot \left(\frac{y_i}{d_i} \right)^2 \quad \dots\dots\dots(13)$$

と変形される。(13) 式は各区間での速度分布を表わしているが、 $\bar{U}_i$ 、 ΔU_i および d_i は未知であり、この式

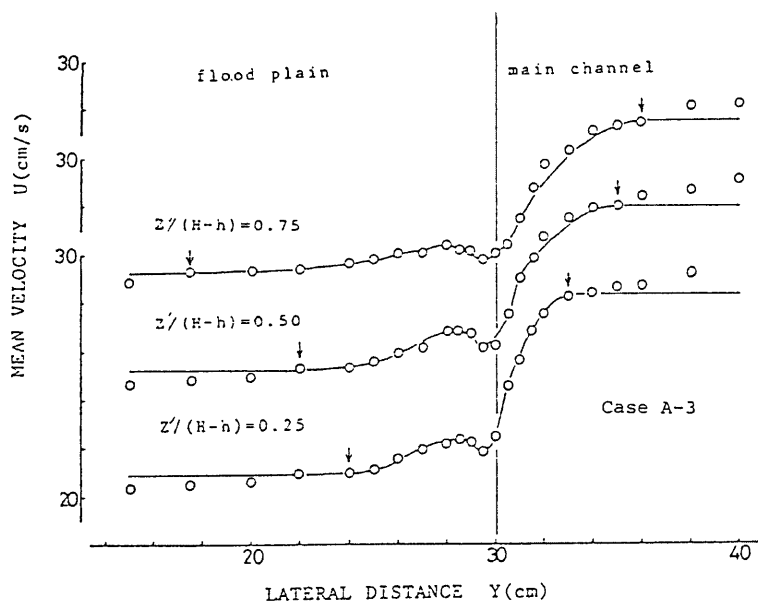


Fig. 12 Verification of lateral distribution model of longitudinal mean velocity.

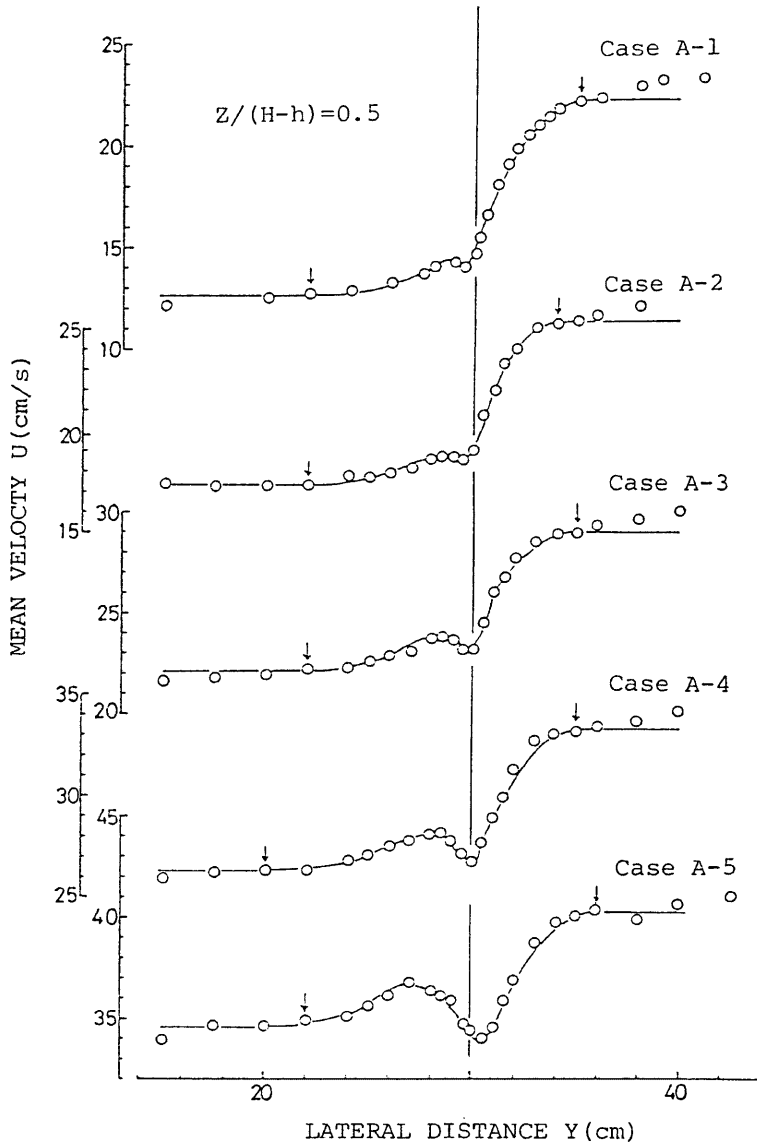


Fig. 13 Verification of lateral distribution model of longitudinal mean velocity.

からは一意的に分布形を決定することはできない。しかしながら、各区間端点での速度の連続条件を考慮すると、 a, c, e, g 点での速度 $\bar{U}_1, \bar{U}_2, \bar{U}_3$ および $\bar{U}_0$ を与えることに残りの未知量は決定され、分布形が求まることになる。

(13) 式を計測結果に適用した一例として、Table 1 に示した Case A-3 の低水路部水深 2.5cm の場合について示すと Fig. 12 のようである。図中、矢印で示した点が a および g 点に相当する。図より、(13) 式の適合性は非常によく、速度の横断分布は 2 次式で十分近似し得ることが知れ、レイノルズ応力を三角形分布とした仮定の妥当性がうかがわれる。また、低水路部水深を変化させた場合についても、Fig. 13 に示すように (13) 式の適合性が認められる。

しかしながら、与条件として、本来予測されねばならない低水路部、高水敷部の速度 $\bar{U}_1, \bar{U}_2$ および境界部付近の極大値 $\bar{U}_3$ 、極小値 $\bar{U}_4$ が用いられており、現段階では実用上無力であるが、(13) 式を適用することにより、低水路部と高水敷部の境界付近で流体が互いに干渉し合う領域を決定することが出来、その区間幅と水利条件の関係が得られれば、複断面開水路流れの内部構造を知る上で非常に有益と考えられる。

低水路部および高水敷部の流れが相互干渉する領域を、高水端先端からの距離を、低水路部側に d_m 、高水敷部側に d_f として整理すると Fig. 14 のようになる。図より、自由水面に近づくにつれ領域が広がるとともに、低水路部水深が増すにしたがって、相対的に領域が小さくなる傾向が認められる。また、同一の低水路部水深で、低水路部側と高水敷部側を比較すると、高水敷部側の領域が低水路部側の領域の約 2 倍程度となっている。

以上の検討より、速度の横断分布式として提案した(13)式は、定量的には不明なものの、定性的には速度の横断分布がレイノルズ応力形状より説明されることが知れた。そこで、速度の横断分布のもつ物理的意味について考察する。

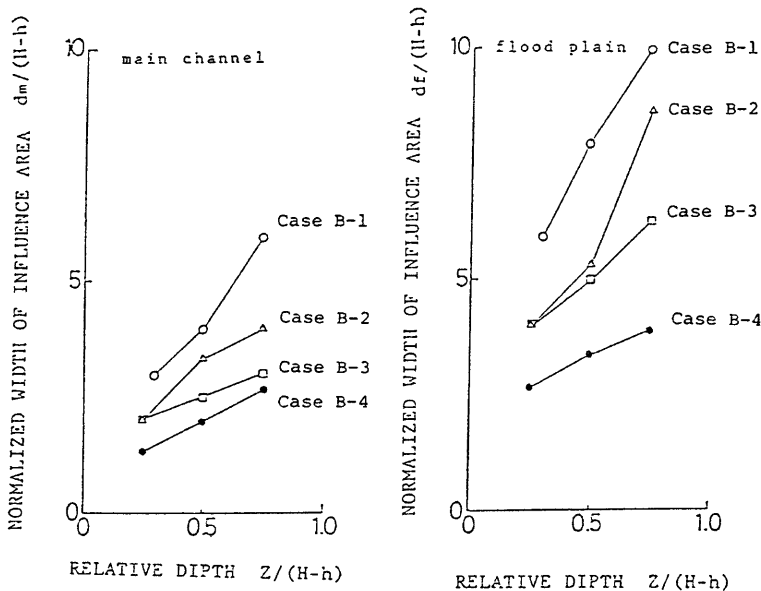


Fig. 14 Width of influence area.

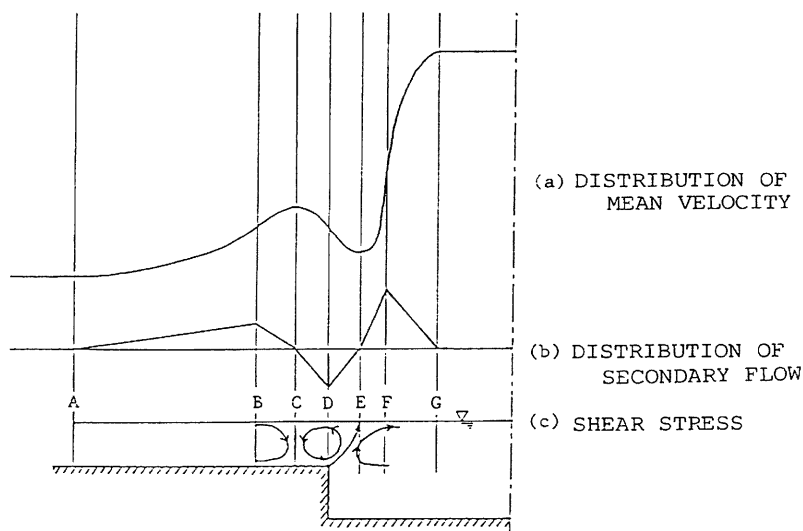


Fig. 15 Relation between the turbulent structure and lateral distribution of longitudinal mean velocity and Reynolds stress.

低水路部と高水敷部の境界付近で速度の横断分布が極大値および極小値を持つことと、従来より指摘されている高水端先端より自由表面に向う斜昇流によって下方にある速度の遅い流体が上方に運ばれることを考慮すれば、境界部付近の内部構造は **Fig. 15** のように推定される。すなわち、速度分布の極小値は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に生ずると考えられる。

4. 複断面開水路流れの流況特性

複断面開水路流れの内部構造を平均速度分布より検討したのが前節であるが、流れは本来3次元的なものであり、内部構造を解明するためには流れを面的に捉える必要がある。その方法として流れの可視化法が有効な手段として用いられているが、本研究ではカメロン効果を利用し、瞬間速度の平面分布を可視化するという方法で検討を行ない、前節で示した結果を確認するとともに、内部構造の3次元的な特性について観察を行なった。

Photo. 1 はカメロン撮影結果の一例として、40cm 幅水路において高水敷幅 12cm、高水敷高 2cm、低水

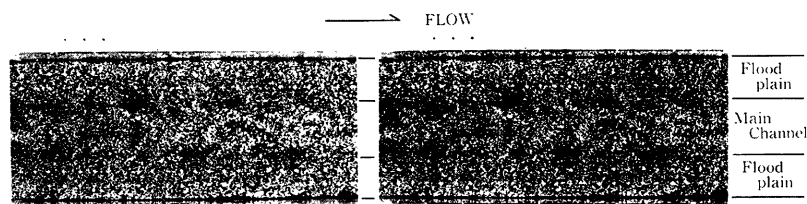


Photo. 1 Example photograph using Cameron effect.

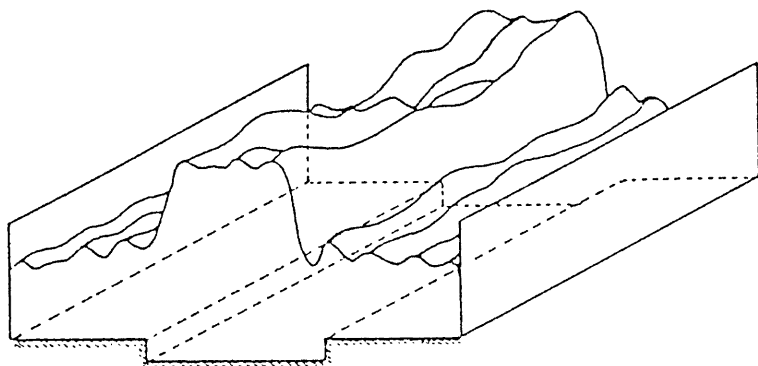


Fig. 16 Image sketch of velocity distribution.

路部水深 3cm, 流量 1.45 l/s の場合について示したものであり, ポリプロピレン粒子を浮子として計測した表面流速は, 低水路部中央付近で約 33cm/s, 高水敷部中央付近で約 18cm/s となっている。

これら2枚の写真を実体鏡にて実体視すると, 同一高さであるはずの水面がかなりの起伏をもって浮びがあり, その実体現象を鳥瞰すると **Fig. 16** のようになる。すなわち, 低水路部と高水敷部では高低差はきりと認められ, 横断方向に見ると, 水路側壁より急激に高くなった面は高水敷部中央のほぼ高さの等しい面に連なり, 高水敷端へ向って高くなる斜面を経た後, 低水路部と高水敷部の境界に存在する若干低くなった面をはさんで低水路部の急斜面から低水路部中央の高い面に接続している。カメラ撮影において速度が

高さとして可視化されることを考慮すれば, ここで得られた実体視像は自由表面での速度分布を表わし, 上述した特性は3.2.1で示した平均速度の横断分布特性とほぼ一致しており, 本研究で用いた可視化法の有効性がうかがわれる。

巨視的に見ると以上のような特性が認められるが, ほぼ高さの等しい面においても高い部分と低い部分が交互に配列されておりかなり複雑な様相を示している。その高い部分の頂点を連ねて得られる峯線を, 40cm 幅水路において高水敷幅 12cm, 高水敷高 2cm として低水路部水深を変化させた場合について図化したものを示すと **Fig. 17** のようになる。図より, 流れの速い部分と遅い部分が不規則に配列されており, 乱流の持つ性質がよく表われている。

実体視像を内部構造との関連から見ると, 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水面に達した部分に相当すると考えられる。とくに, 低水路部と高水敷部の境界付近に生じる斜昇流が水面に達した位置は, **Fig. 17** で斜線をほどきた部分に当たり, 高水敷端より若干低水路側に島状に連なり存在していることが知れる。また, 水深の違いによる特性の変

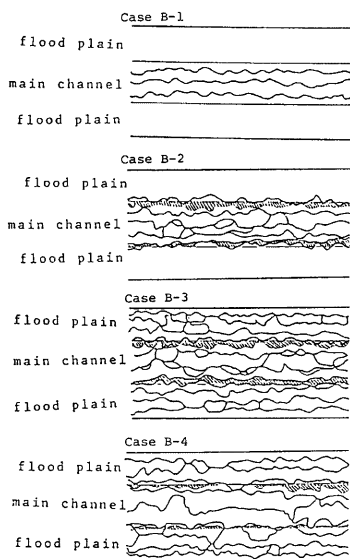


Fig. 17 Sketch of high-speed lines.

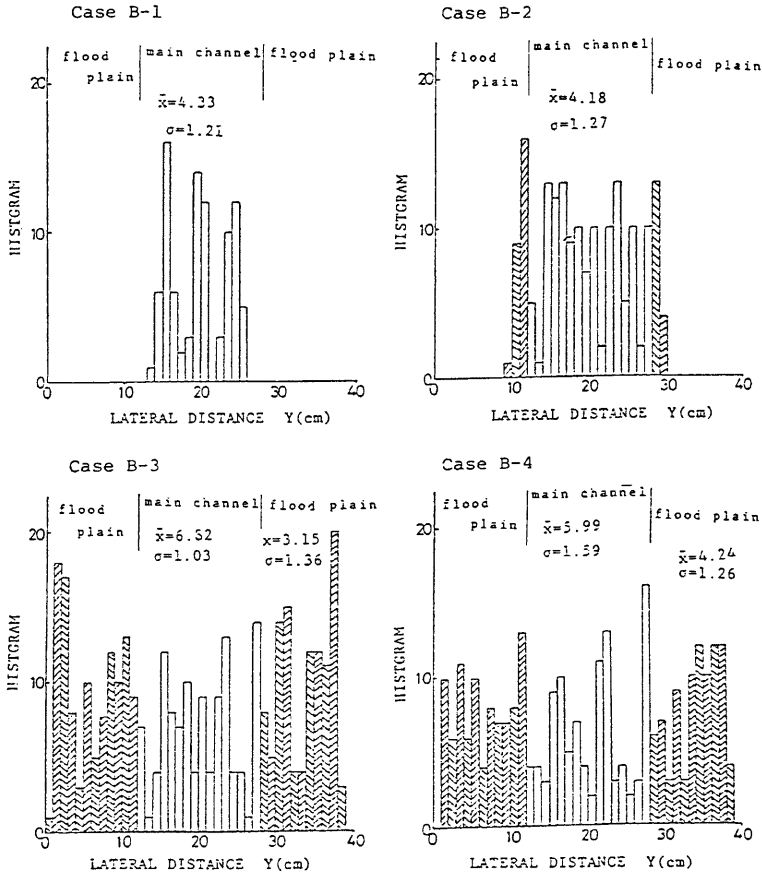


Fig. 18 Histogram of high-speed line's position.

化について見ると、流れが低水路部に限定されている場合は3本の峯線がほぼ等間隔に存在するが、流れが高水敷部に及ぶと峯線はその間隔が広がるとともに複雑な形状をなしている。

峯線が縦渦により表面の速い流体が下降する位置に相当するとすれば、その間隔および発生位置について検討することにより縦渦の配列が推定される。峯線の図化された結果を用い、峯線の発生位置について頻度分布をとると Fig. 18 のような結果が得られる。ここに、発生位置は水路幅 40cm を横断方向に 1cm 幅きざみに分割し、各ケース10枚の写真より抽出された30断面における峯線が各分割域に入る度数としている。なお、図中には低水路部および高水敷部において読み取られた峯線間隔が併記されている。図より、いずれの場合についても発生頻度は低水路部と高水敷部の境界付近の低水路部側で低い部分が存在し、高水敷部側で高い部分が表われている。それ以外の区間では頻度のピークがある間隔をもって表われている。これより、境界部付近では斜昇流が高水敷端よりやや低水路部側で自由表面に達しており、それによって喚起される縦渦が高水敷部に入った位置に発生していることが推察され、前節で得られた内部構造の推定結果の妥当性を

裏づけるものである。境界部以外の区間では流れの2次元性が保たれていれば峯線の間隔がその位置における水深の2倍程度になると考えられるが、ここで検討したケースにおいては一既に言えず、側壁の影響および対岸の高水敷の影響などにより流れが3次元性を持ったものになっている可能性がある。ただし、定量的な評価は現段階ではできず今後の検討を持たねばならない。

5. 結 論

本研究は複断面開水路流れの水利特性を解明するために、流れの内部構造とくに低水路部と高水敷部の境界付近における内部構造について、平均速度分布の計測結果およびカメラン効果を用いた流れの可視化結果に基づいて実験的検討を行なったものであって、得られた結果を列挙するところである。

1) 複断面開水路流れの抵抗特性は、水深が高水敷高付近となる遷移時に特有の変化を示す。すなわち、流れが高水敷上および場合、抵抗係数は不連続に減少したのち増加し、流れが低水路部に限定されていた場合より大きな極大値を示したのち減少する。また、流量の増加時と減少時では抵抗係数の変化経路が異なり、同一流量に対して2つの異なる値が存在し、抵抗は2価性を持つと考えられる。

2) 平均速度の鉛直分布および横断分布については、従来より指摘されている特性が認められた。すなわち、鉛直分布については低水路部の高水敷端付近で高水敷高さにおいて極小値を持つ分布を示し、高水敷部では低水路部流れにより加速されて速度勾配が大きくなる。一方、横断分布については、低水路部と高水敷部の境界付近で極大値および極小値を持つ分布形を示している。

3) 速度の横断分布形状は、自由せん断流の速度分布形状、すなわち、噴流、後流および2次元せん断層とある程度相似性が認められたが、内部構造との関連性を考慮した分布形状の検討が必要であることが指摘された。

4) 既報¹⁾のレイノルズ応力の測定結果に基づいて分布形を仮定することにより、速度の横断分布は(13)式に示すような2次式で十分説明されることが知れた。

5) その結果、低水路部と高水敷部の境界付近の内部構造が推定され、従来より指摘されている高水敷端より自由表面に向う斜昇流とそれにより喚起される縦渦により構成されていることが指摘された。

6) カメロン撮影により、瞬間速度の平面分布が可視化され、平均速度計測に基づいて推定された内部構造の妥当性を裏づける結果が得られ、流れの内部構造を把握する手段としてカメロン撮影は非常に有効であることが知れた。

以上のように、本研究により複断面開水路流れの内部構造について定性的ではあるが、基本的特性についていくつかの興味ある結果が得られた。今後においては、内部構造のモデル化および、カメロン撮影より得られる流れの3次元性について研究を進め、複断面開水路流れの水利特性の解明に役立てたい。

最後に、本研究の遂行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石橋良啓氏および木下聖司氏の両氏に対し深甚なる謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 今本博健, 久下俊夫: 複断面流れの水利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) Zheleznyakov, G. V.: *Gidravlicheshe obosnovanie metodov rechnoi gidrometrii*, Izdatelstvo Akademii Nauk, SSSR, Moskva-Leningrad, 1950.
- 3) Sellin, R. J. H.: A laboratory investigation into the interaction between the flow in the channel of a river and that over its flood plain, *La Houille Blanche*, No. 7, 1964, pp. 793-802.
- 4) 玉井信行, 河原能久: 複断面開水路流れの特性と抵抗則に関する研究, 第25回水利講演会論文集, 1981, pp. 113-118.

- 5) Cameron, H. L.: Measurement of water current velocities by Parallax Method, Photogrammetric Engineering 18, 1952.
- 6) Yen, C. L. and Overton, D. E.: Shape effects on resistance in flood plains, Jour. of Hydraulic Div. Proc. ASCE, Vol. 99, HY1, 1973, pp. 219-238.
- 7) 森平倫生：複断面水路水流の抵抗法則に関する研究，京都大学工学修士学位論文，1961.
- 8) 玉井信行，河原能久，川島文治：複断面流れの抵抗則に関する一考察，第36回土木学会年次学術講演会概要，Ⅱ-254, 1981.
- 9) Rajaratnum, N. and Ahmadi, R. M.: Interaction between main channel and flood plain, Jour. of Hydraulic Div. Proc. ASCE, Vol. 105, HY 5, 1979, pp. 573-588.
- 10) Rajaratnum, N.: Turbulent Jets, 野村安正訳，森北出版，1981.
- 11) Townsend, D. R.: An investigation of turbulence characteristics in a river model of complex cross section, Proc. Institution of Civil Engineers, London, Vol. 40, 1968, pp. 155-175.
- 12) 堀川清司，岩崎光隆：複断面水路の速度分布に関する基礎的研究，第32回土木学会年次学術講演会講演概要，Ⅱ-206, 1977.
- 13) 高橋 保：河道における洪水流の特性に関する研究，京都大学工学博士学位論文，1971.