

複断面彎曲開水路流れの水力特性について (1)

今本 博健・石垣 泰輔・藤沢 寛

ON THE CHARACTERISTICS OF OPEN CHANNEL FLOW IN BEND WITH FLOOD PLAINS

By *Hirotake* IMAMOTO, *Taisuke* ISHIGAKI and *Hiroshi* FUJISAWA

Synopsis

In a curved channel there are spiral motions ocured by centrifugal force. And in an open channel that consists of a main channel and flood plains, the flow has a complex turbulent structure because of interaction between flow in a main channel and it in flood plains. So it is difficult to clarify characteristics of an open channel flow in bend with flood plains.

In this paper it is the objective to elucidate the turbulent structure of this flow by measurements of velocity and flow visualization. From experimental results it is confirmed that three independent spiral motions exist in bend with two flood plains.

1. はじめに

複断面彎曲開水路における流れは、複断面流れの特性と彎曲流れの特性とが絡み合い、きわめて複雑な性状を呈する。すなわち、複断面直線流れは高水敷の存在のため、低水路部と高水敷部との境界近傍の流れにより特徴づけられ、Zheleznyakov¹⁾、Sellin²⁾らによって指摘されているように、強いせん断力が存在するとともに、高水敷端より水面に向かって低平均・高乱れ速度領域がひろがり、そこに斜昇流が存在していることが既報³⁾で指摘されている。一方、単断面彎曲流れは、古くは Boussinesq⁴⁾により研究され、Thomson⁵⁾が初めてらせん流を観察して以来、その流れは遠心力にもとづく強いらせん流により特徴づけられるとされている。このように、複断面直線流れおよび単断面彎曲流れに関しては、それぞれ、定性的な特性はかなり明らかにされているものの、複断面彎曲開水路流れについては、ほとんど研究されておらず不明な点が多く残されている。

本研究は、複断面彎曲開水路流れの水力特性を解明する基礎として、流れの内部構造について実験的検討を、プロベラ流速計およびホットフィルム流速計を用いた点計測および流れの可視化法を用いて行ない、いくつかの興味ある結果が得られている。また、単断面彎曲流れとの比較も適宜行なわれている。

2. 複断面彎曲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 Fig. 1 に示すように、幅 20cm、深さ 15cm のアクリル樹脂製の長方形断面彎曲水路であって、上流側直線部 3.1m、下流側 4.1m の間に彎曲角 180° 、水路中心の曲率半径 $r_c=60$ cm、曲率半径・水路幅比 $r_c/B=3.0$ の彎曲部が挿入されており、路床勾配は $I=1/500$ に設定されている。実験水路は長方形単断面であるため、幅 6cm、高さ 1.06cm のアクリル板を、実験水路の両側壁に沿い水路全長にわたって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。

流量は、高水槽内に設置された三角せきにより計測されている。なお、実験にあたっては、送水管途中に

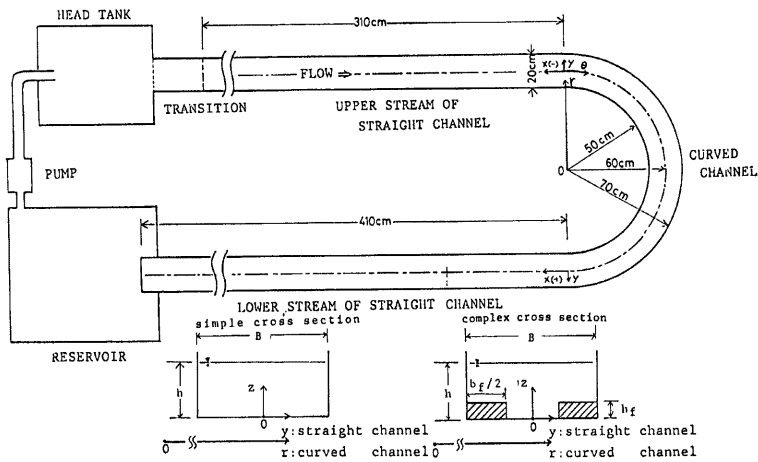


Fig. 1 Experimental channel.

設置された流量調節バルブにより流量を設定した。水深の計測には 1/10mm 読みのポイントゲージを用い、水路下流端における低下背水の影響を避けるため、下流端に設けられた可動せきにより水深の調節を行っている。

流速の計測には、流下方向の平均速度計測用として直径 3mm の超小型プロベラ流速計を用いるとともに、3成分の平均および乱れ速度計測には2成分用X型ホットフィルム流速計を用いている。これらの流速計より得られる出力パルス数あるいは出力電圧と速度との関係は、静水中を一定速度で流速計プローブを移動させる方法により得られた検定曲線と与えられている。なお、ホットフィルム流速計は、水温変化および微細粒子のプローブへの付着に伴い応答特性が変化するため、計測時の温度補償を行なうとともに、計測前には常にプローブを洗浄して微細粒子の付着による応答特性の変化がないことをペン書きレコーダーおよびシンククロスコープで監視している。

なお、プロベラ流速計の出力パルス数は、デジタル・カウンターを用いて数値化した。また、ホットフィルム流速計により得られたデータの処理は、流速計の出力電圧を一旦データレコーダーに記録したのち、A-D 変換器により数値化し電算処理を行なったが、数値化におけるサンプリング周波数は 20Hz、データ個数は500個としている。

流れの可視化は、観測用トレーサーとして平均粒径 0.006cm の砂粒子、直径約 0.2cm の電算パンチ屑、平均粒径 0.011cm の塩化ビニル粒子およびアルミニウム粉末を塗付したおが屑を用い、35m/m スチルカメラを1台あるいは2台用いてモノラル撮影およびステレオ撮影を行っている。

2.2 実験方法

本研究における実験は、水深計測、プロベラ流速計およびホットフィルム流速計を用いた点計測および面的な計測法としての流れの可視化の3種に分けられ、それぞれ、以下のような方法で行なった。

水深計測：縦断および横断水面形特性について検討を行なうために、直線水路部では 0.5m 毎に、彎曲水路部では 15° 毎を基準として縦断水面形の計測を行なうとともに、水路横断方向に各測線上で 1cm 毎の計測を彎曲部で 15° 毎に行ない横断水面形を得ている。

速度計測：平均および乱れ速度場の特性を検討するために、プロベラ流速計および2成分X型ホットフィルム流速計を用いて計測を行なった。流下方向平均速度の計測にはプロベラ流速計を用い、縦断方向の3な

いし5測線に沿って、鉛直方向に数点ないし10数点計測を行なって鉛直分布を得るとともに、横断方向にも各測線上で1cm毎の計測を彎曲部で15°毎に行なっている。一方、平均および乱れ速度の3成分の計測は、2成分X型ホットフィルム流速計により一断面65~105点の計測を行なっている。

流れの可視化：複断面彎曲開水路流れの流況特性を検討するために、本研究では、i) 路床近傍の流況特性、ii) 表面流況特性、iii) 表面ボイルの特性、iv) 瞬間表面流速の平面分布特性の4項目について流れの可視化を行ない若干の検討を加えた。それぞれの実験方法は以下のようである。i)の路床近傍の流況では、砂粒子(平均粒径0.006cm)を観測用トレーサーとし、ii)の表面流況では、電算パンチ層(直径約0.2cm)を観測用トレーサーとして使い、鉛直上方に設置した35m/m スチルカメラにより、各断面数枚の撮影が行なわれている。iii)の表面ボイルの撮影は、塩化ビニル粒子(直径0.01cm)を観測用トレーサーとしてi)と同様の方法で行なわれている。iv)の実験では、微小時間間隔において撮影されたほぼ同様の写真を実体視すると、写真上の観測用トレーサーの移動距離の違い、すなわち、速度の違いが横視差となつてかなりの起伏をもって速度分布が立体的に可視化される、いわゆるカメロン効果⁶⁾を利用したカメロン撮影が行なわれている。その原理は Fig. 2 に示すようである。本研究では、水路鉛直上方に2台の35m/m スチルカメラを設置し、水晶発振器を用いた撮影間隔制御装置により、撮影間隔を30msに設定して各断面4ペアの撮影が行なわれている。

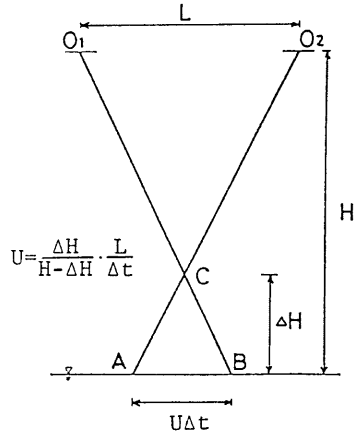


Fig. 2 Cameron effect.

3. 複断面彎曲開水路流れの水力特性

複断面彎曲開水路流れの水力特性を解明する基礎として、本研究では、水面形特性、平均および乱れ速度場の特性および流況特性について若干の検討を行なったので以下に示す。なお、座標系は、直線部と彎曲部で異なり、直線部では流下方向を x (ただし、彎曲部入口より上流側は負、彎曲部出口より下流側を正としている)、横断方向を y (水路中心線を $y=0$ とする)、鉛直上方を z (路床面を $z=0$ とする) とした直交座標系が、彎曲部では流下方向を θ (彎曲部入口を $\theta=0$ とする)、横断方向を r (曲率半径を用いる)、鉛直上方を z (路床面を $z=0$ とする) とした円柱座標系が用いられている。本実験における水力条件は Table 1 にまとめられている。

3.1 水面形特性

3.1.1 縦断水面形特性

彎曲部では、遠心力の作用により水路の横断方向に水面勾配を生じるとともに、流下方向にも局部的に水位上昇部が現れる。Fig. 3 は、単断面彎曲流および複断面彎曲流において、各断面の平均水位 H の縦断変化を示したものである。なお水位 H は彎曲部入口 ($\theta=0$) の路床高を基準としている。

単断面彎曲流では、彎曲部流入前 ($x=-1.0\text{m}$ 付近) から彎曲部出口 ($\theta=180^\circ$) の区間においては上流直線部に比して水深が大きくなり、彎曲部流出直後 ($x=0.2\sim 1.0\text{m}$) では逆に減少する傾向が認められる。水位上昇は、 $\theta=60^\circ$ 付近で極大値を示しているが、この区間は後の検討で示すように、遠心力による2次流の発生領域への遷移領域に相当するものである。なお、下流端付近において若干、せき上げ背水による水位上昇がみられるが、彎曲部への影響はほとんどない。

Table 1 Hydraulics conditions in simple and complex cross section.

Series-S: simple cross section						
Case	Q (l/s)	h_0 (cm)	U_0 (cm/s)	R_e	F_r	T (°C)
S-1	0.407	1.01	20.15	1832	0.640	19.93
S-2	0.738	1.48	24.93	2766	0.655	14.31
S-3	1.233	2.00	30.83	5190	0.696	20.69
S-4	1.658	2.51	33.03	5870	0.666	15.42
S-5	2.273	3.01	37.76	8908	0.695	21.06
S-6	3.470	4.03	43.05	12570	0.685	21.28
S-7	4.663	5.03	46.35	15861	0.660	21.19

Series-C1: complex cross section						
Case	Q (l/s)	h_f (cm)	h_0 (cm)	U_0 (cm/s)	R_e	T (°C)
C1-1	0.251	1.06	1.44	15.61	742	5.72
C1-2	0.644	1.06	2.00	23.61	2334	14.72
C1-3	1.083	1.06	2.50	29.05	3787	14.94
C1-4	1.466	1.06	2.98	31.27	4872	14.36
C1-5	1.870	1.06	3.47	32.99	4554	4.94
C1-6	2.404	1.06	3.97	36.05	5821	5.72

Fig. 3 には複断面彎曲流での結果が併示されているが、単断面彎曲流と同様に、彎曲部での水位上昇が認められる。

3.1.2 横断水面形特性

彎曲部では横断方向に水面勾配を生じるが、主流による遠心力と横断方向の水面勾配が均衡すると仮定し、Ippen-Drinker²⁾ が導入した平均水深および平均比エネルギーが直線部と同一であるという仮定を用いると、自由渦型流速分布および強制渦型流速分布に基づく横断水面形は、それぞれ、つぎのように表わされる。

$$\frac{h-\bar{h}}{\left(\frac{U_0^2}{2g}\right)} = 1 - \frac{\left\{1 - \frac{1}{4}\left(\frac{B}{r_c}\right)^2\right\}}{\left\{\left(\frac{B}{r_c}\right)^2 \cdot \left(\frac{r}{B}\right)^2\right\}} \quad \dots\dots\dots(3.1)$$

$$\frac{h-\bar{h}}{\left(\frac{U_0^2}{2g}\right)} = \frac{\left\{\left(\frac{B}{r_c}\right)^2 \cdot \left(\frac{r}{B}\right)^2\right\}}{\left\{1 + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{B}{r_c}\right)^2\right\}} - 1 \quad \dots\dots\dots(3.2)$$

ここに、 h は水深、 \bar{h} は各断面の平均水深、 U_0 は上流側での断面平均流速、 g は重力加速度、 B は水路幅、 r_c は水路中央の曲率半径である。

単断面彎曲流における一例を示すと Fig. 4 のようであり、彎曲流入直後の $\theta=15^\circ$ および 30° では、(3.1) 式で示した凸状の自由渦型横断水面形に比較的一致しているのに対し、 $\theta=60^\circ$ より下流側では (3.2) 式で示した凹状の強制渦型横断水面形の適合性が認められる。これより、彎曲部の流れは、自由渦型から強制渦型へ遷移することが確認され、その遷移区間においては、横断水面形が水路中央で凸状、内・外岸側で凹状となっていることより、自由渦型から強制渦型への遷移は、内・外岸側より始まり水路中央へ及ぶものと考えられる。また、この遷移は、流量が小さいほど早くなるという結果が得られており、村本³⁾ によるレイノルズ数が減少するほど、また、水深・水路幅比が減少するほど完全発達域への移行が早くなるという傾向と一致している。

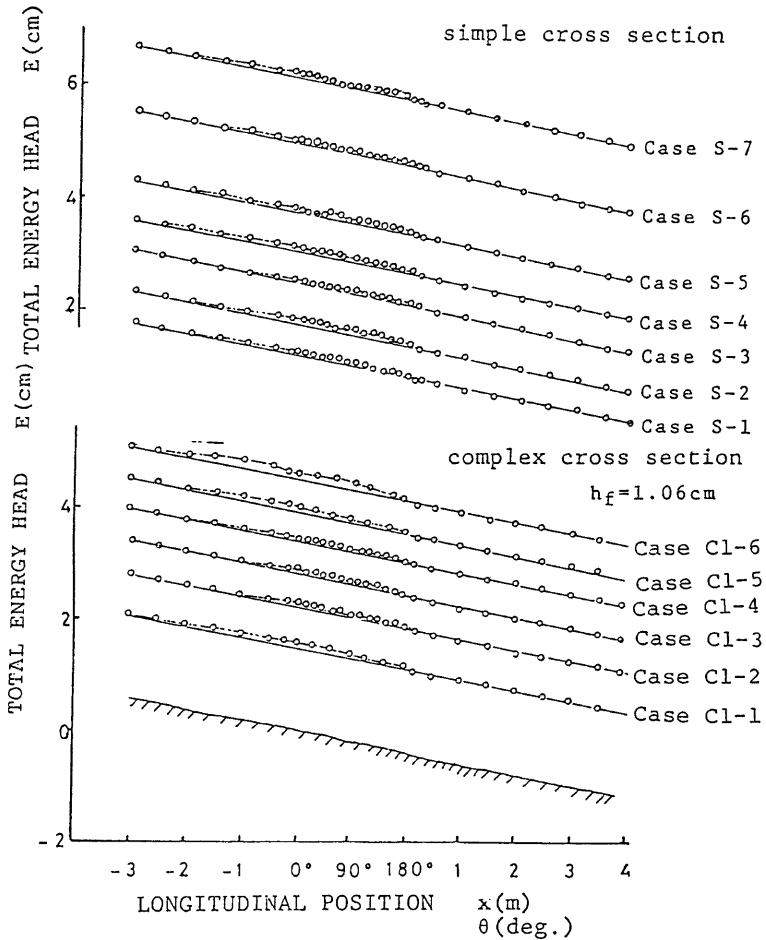


Fig. 3 Longitudinal profiles of water surface.

一方、複断面彎曲流での計測例は、Fig. 5 に示され、内岸側高水敷上では、彎曲部流入直後の $\theta=15^\circ\sim 45^\circ$ で水面勾配が低水路内の水面勾配と同程度となった後、凹状となる傾向が認められる。また、彎曲部流入直後の水面形を単断面彎曲流のものと比較すると、自由渦型流速分布の領域に相当し、かなり大きな流速が生じていると考えられる。

外岸側高水敷上の横断面水面形は、彎曲部流入直後には高水敷先端付近の水面勾配が大きく、外岸側側壁付近での水面勾配は小さいが、流下するにつれて側壁付近の水面勾配が高水敷先端付近のものより大きくなる傾向が認められる。

低水路内の横断面水面形は、彎曲部流入直後で凸状となり、流下とともに凹状に移行して行く傾向が認められるものの、単断面彎曲流の場合ほど顕著ではない。

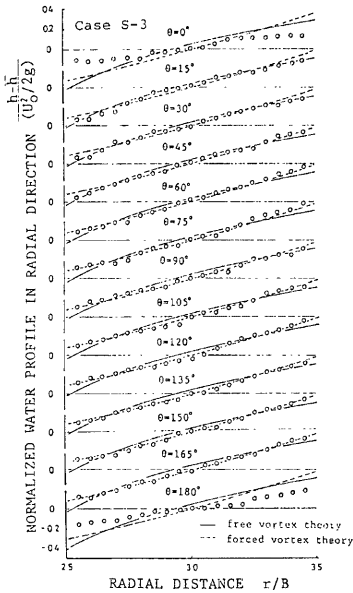


Fig. 4 Lateral profiles of water surface in simple cross section.

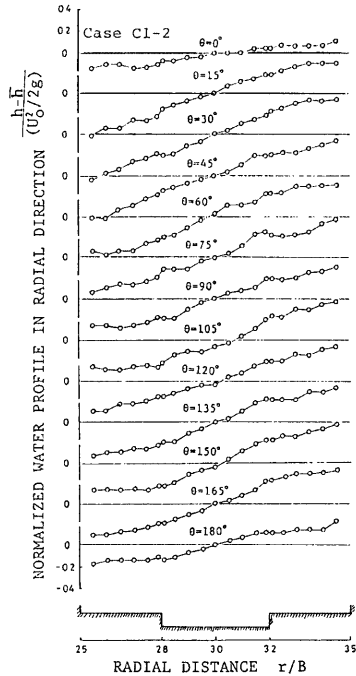


Fig. 5 Lateral profiles of water surface in complex cross section.

3.2 平均および乱れ速度場の特性

前節では、複断面彎曲水路における流れを断面平均的な観点より検討したが、ここでは、プロベラ流速計および2成分X型ホットフィルム流速計を用いた平均速度および乱れ速度の詳細な計測結果に基づき、流れの内部構造について検討を行なう。

3.2.1 平均速度場の特性

単断面彎曲流れでは、主流の流速分布に起因する遠心力と圧力勾配との差により2次流が発生することが知られており、村本⁹⁾により、2次流の発生、発達および完全発達域の3つの領域が定義されている。

等流速線図：Fig. 6 および Fig. 7 は、単断面および複断面彎曲流れにおける主流流速の横断面内等流速線図の計測例である。

単断面彎曲流れでは、Fig. 6 に示すように、彎曲部流入直後は角運動量 $U \cdot r$ が保存するため、自由渦型流速分布となり内岸側で流速が大きくなるが、彎曲部流入にともなって生じるらせん流により、内岸側壁近くでは路床付近の低速流体が水面付近に達するため、その部分の流速は減少し、逆に外岸側壁近くでは水面の高速流体が路床付近に達するため、その部分の流速は増加する。このように、流下とともに、内岸側に生じた最大流速の領域が外岸側路床付近 (相対水深で $z/H \approx 0.2 \sim 0.3$) へ移行し、強制渦型流速分布に遷移していることが認められる。また、彎曲部流出後も、水面付近で流速が増加し路床付近の流速が減少するものの、彎曲による影響は強く存在している。

一方、Fig. 7 に示した複断面彎曲流れでの計測結果を見ると、上流側直線部においては、高水敷先端付近よ

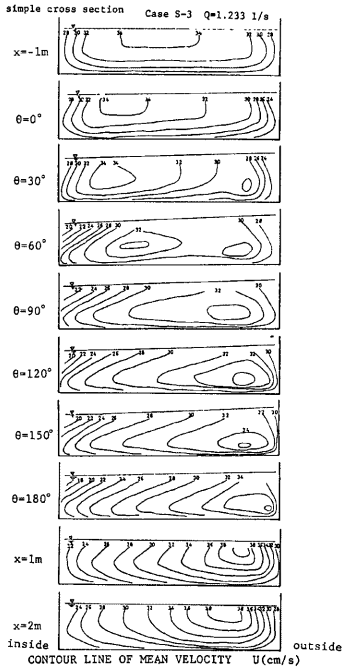


Fig. 6 Iso-velocity lines of longitudinal mean velocity in simple cross section.

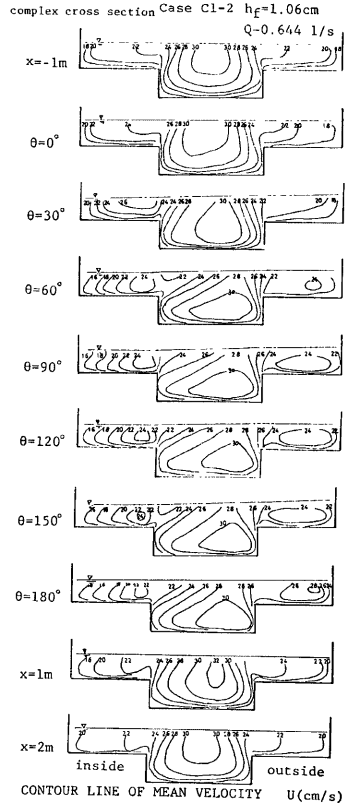


Fig. 7 Iso-velocity lines of longitudinal mean velocity in complex cross section.

り低水路内自由表面に向かって広がる低平均速度の領域が存在するとともに、低水路内の高平均速度の領域が高水敷上の自由表面近傍へと広がっている。彎曲部に流入すると、内岸側高水敷先端付近の低流速領域が明確となり、直線部に比して低水路中央寄りの自由表面に向う一方、外岸側高水敷先端付近の低流速領域はやや外岸側に片寄ることが認められる。また、低水路内に着目すると、上流側直線部において水路中央自由表面近傍にあった最大流速点が、彎曲部流入とともに内岸側に移行し、流下とともに外岸側路床付近へと移っている。高水敷上での最大流速は、内岸側高水敷先端付近および外壁付近に生じている。

以上のように、複断面彎曲流れの内部構造は、高水敷上および低水路内の3つの領域に区分されることが推測される。

流速横断分布：等流速線図により単断面および複断面彎曲部の主流流速分布特性の概略が説明されたが、ここでは、Fig. 8 および Fig. 9 に示す流速横断分布図により流下方向の遷移特性について検討を加える。

Fig. 8 は、単断面彎曲部における半水深付近での主流流速横断分布を示したものであり、図中の実線および破線はそれぞれ自由渦型および強制渦型流速分布を示す。図より、彎曲流入部において流速は、内岸側

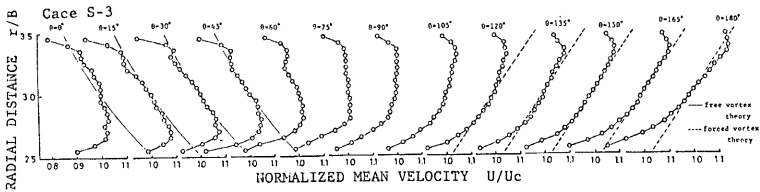


Fig. 8 Lateral distribution of longitudinal mean velocity in simple cross section.

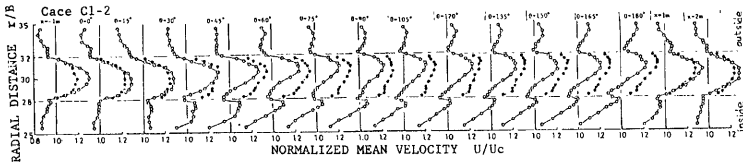


Fig. 9 Lateral distribution of longitudinal mean velocity in complex cross section.

で増大，外岸側で減少し， $\theta=30^\circ$ 付近までは自由渦型流速分布形にほぼ一致するが，流下とともに一樣分布となった後，外岸側の流速が増大し， $\theta=150^\circ$ 付近以降では強制渦型流速分布形にほぼ一致する。このように，単断面彎曲流では，彎曲流入直後に自由渦型分布，彎曲流出部において強制渦型分布を示す。

複断面彎曲部における高水敷上の半水深および低水路内での高水敷半高さでの流速横断分布の計測結果の一例を示したものが Fig. 9 である。図より，複断面彎曲流では彎曲部内においても上流側直線部に見られる複断面流れ特有の分布特性を変化させることなく，彎曲による影響を重ね合せたものとなっている。すなわち，高水敷上半水深における横断分布形に見られるように，高水敷側より離れるにつれて流速は増加し，高水敷先端付近で一旦減少したのち，低水路内で急増するという分布特性は彎曲部でも明確に認められる。したがって，彎曲部においても，高水敷先端付近で流速が減少することより，高水敷先端付近より低水路内自由表面に向う斜昇流が存在すると推測される。このように，複断面流れの特性は変化しないが，彎曲による影響により，内岸側高水敷上では， $\theta=30^\circ$ 付近までは直線部に比して流速は横断方向全体にわたって増加し，流下とともに側壁付近より流速が減少し，内岸側高水敷先端付近で極大値を示す横断勾配の大きな分布となっている。低水路内では， $\theta=30^\circ$ まで内岸側の流速が増大する傾向を示すが， $\theta=30^\circ$ 以降では外岸側の流速が増大し，低水路中央より外岸側で流速の最大値を生じる。また，外岸側高水敷上においては，彎曲部流入後， $\theta=30^\circ$ 付近までは一旦減少し，流下とともに徐々に増加してゆくが，内岸側高水敷上ほど横断勾配は急ではない。

一方，低水路高水敷半高さでの横断分布形をみると，彎曲部流入後，内岸側の流速が増大するが，流下とともに最大流速点は外岸側へ移行して行く単断面彎曲流れと同様の傾向を示している。また，彎曲内では，高水敷上半水深における流速に比して大となっている。

速度ベクトル：2成分X型ホットフィルム流速計による計測より得られた横断方向および鉛直方向の平均流速 V および W の合成ベクトル図を示すと，Fig. 10, Fig. 11 のようである。彎曲部におけるらせん流は Thomson⁹⁾ が初めて詳細な観測を行なって以来，Mockmore¹⁰⁾，Shukry¹¹⁾ などによって確認されているが，Fig. 10 に示した速度ベクトルの計測結果によっても確かめられる。このように，単断面彎曲流では断面スケールのらせん流がみられるが，複断面彎曲流では，Fig. 11 に示すように複数個のらせん流の存在が認められる。すなわち，複断面流れ特有の高水敷先端近傍より自由表面に向う斜昇流と，彎曲部特有のらせん流が互いに組み合さり，高水敷上および低水路内で独立に彎曲らせん流が存在している。

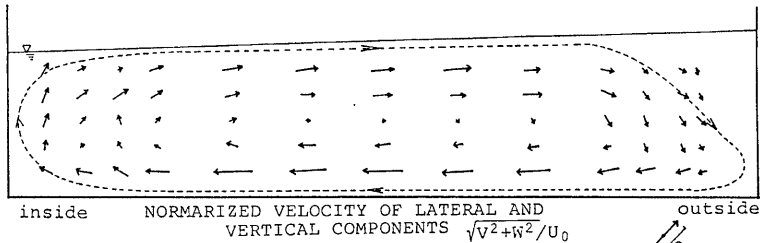


Fig. 10 Distribution of mean velocity of lateral and vertical components in simple cross section.

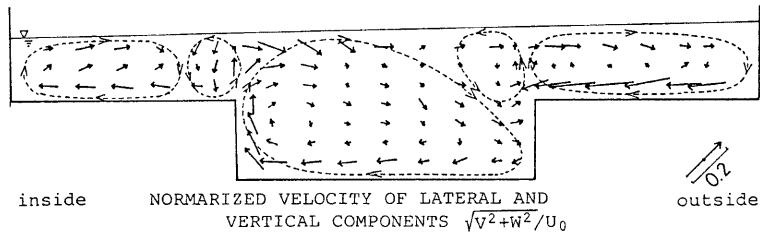


Fig. 11 Distribution of mean velocity of lateral and vertical components in complex cross section.

3.2.2 乱れ速度場の特性

彎曲部における乱れ特性に関する研究は比較的少なく、単断面彎曲流で Eskirazi・Yen¹²⁾、Margolis・Lumley¹³⁾、Yen¹⁴⁾、Másiar¹⁵⁾、村本・遠藤¹⁶⁾などの実験的研究があり、複断面彎曲流についてはほとんどなく、複断面流れについて既報⁹⁾があるものの、一般的な性質を明らかにするには至っていない。

乱れ速度の大きさを流下方向、横断および鉛直方向の3方向の合成量により等乱れ速度線図として表わすと、単断面彎曲流および複断面彎曲流では、各々、Fig. 12 および Fig. 13 のようになる。

単断面彎曲流の計測例 Fig. 12 を見ると、彎曲部に流入するとともに乱れ速度は大きくなり、 $\theta=60^\circ$ 付近で最大となったのち減少し、 $\theta=120^\circ$ 以降ではほとんど変化しない。これは、2次流の発生・発達特性と一致し、発生域で増加、発達域で減少、完全発達域ではほとんど変化しない。また、流下とともに内岸側および外岸側の路床付近に乱れの小さな領域が広がるのが認められる。

複断面彎曲流での計測例は Fig. 13 のようであり、既報⁹⁾が指摘したように高水敷先端付近で高乱れ速度の領域が形成されており、彎曲部に入ると高水敷先端より低水路自由表面に向う高乱れ速度の領域は、内岸側では鉛直上方に向い、外岸側では低水路自由表面に向っている。この部分は、速度ベクトルの計測例 Fig. 11 に示したように、彎曲の影響によるらせん流と反対回りの2次流が形成される領域であり、激しい流体の混合が生じていると考えられる。

3.3 流況特性

前節で述べたように、複断面彎曲流においては、彎曲流特有のらせん流と複断面特有の斜昇流により特徴づけられ、Fig. 11 に示すような流れの内部構造を点計測の結果を確認するとともに、面的にとらえた流れの特性について検討した結果を示す。

3.3.1 流向と内部構造

路床付近および水面において適当なトレーサーを用いれば、そこでの流向を可視化することができる。本研究では、路床付近の流向可視に平均粒径 0.006cm の珪砂 8号を用い、自由表面の流向可視には直径 0.2cm

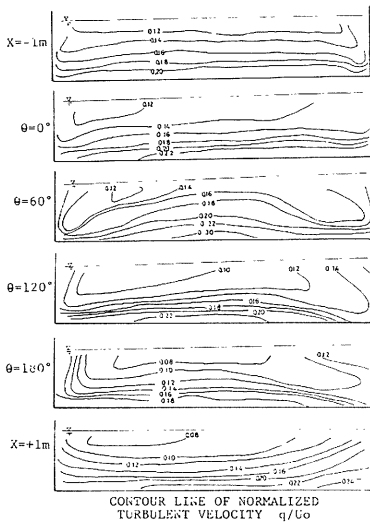


Fig. 12 Iso-velocity lines of turbulent velocity in simple cross section.

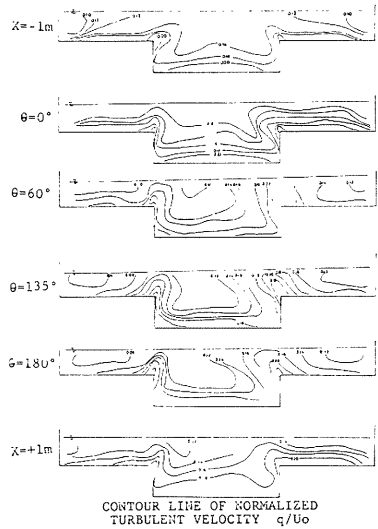


Fig. 13 Iso-velocity lines of turbulent velocity in complex cross section.

の電算パンチ屑を用いた。**Photo. 1** および **Photo. 2** は、路床付近および自由表面での流況の撮影例である。写真より、路床付近では内岸向きの流れが卓越し、自由表面ではかなり複雑となっているものの、外岸向きの流れが卓越していることがわかる。これらの写真より観測用トレーサーの軌跡を図化し、各断面において接線方向からの偏角を外岸側を正として計測すると流向の横断分布を知ることが出来る。**Fig. 14** は彎曲角 $\theta=90^\circ$ における流向の計測例を、その結果より推定される内部構造とともに示したものである。図より、路床付近では低水路面および左・右岸高水敷上のいずれにおいても内岸向きの流向となっているが、自由表面付近の流向は横断位置により逆向きとなっており、前節でも示したように、流れは低水路内と左・右高水敷上の3つの部分に分かれるようである。これは、複断面流れに見られる高水敷先端付近に形成される斜昇流が彎曲部においても存在しているためと考えられる。

3.3.2 水面ボイル

複断面流れでは、高水敷先端付近に形成された斜昇流が水面に達し、ボイル状の渦を形成する部分が観察

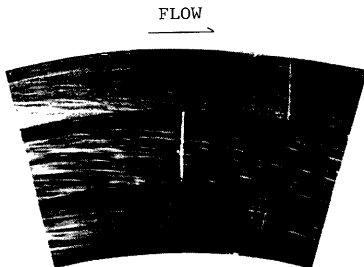


Photo. 1 Flow near the bed. ($\theta=90^\circ$)

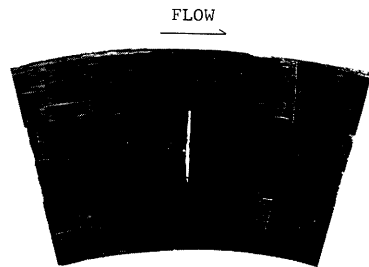


Photo. 2 Flow on the water surface. ($\theta=90^\circ$)

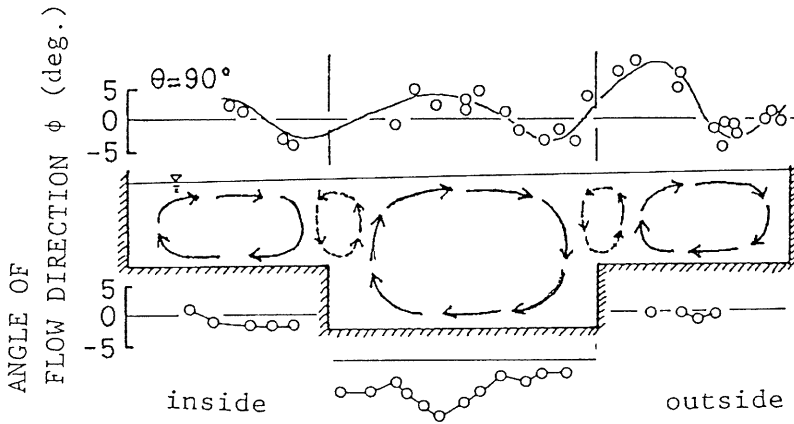


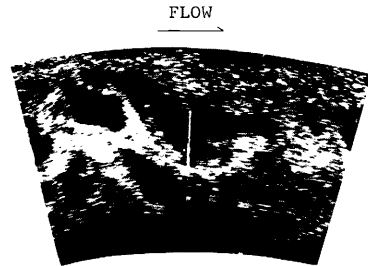
Fig. 14 Sketch of turbulent structure.

され、彎曲部では遠心力の効果により斜昇流の発生がさらに顕著となる。Photo. 3 は、塩化ビニル粒子を観測用トレーサーとして水面ボイルを撮影した一例であり、ボイルの発生により、その付近の塩化ビニル粒子が周囲に押しやられるため、写真上では黒く見える。水面ボイルは、彎曲部に入ると発生個数は増加し、その発生位置も直線部では高水敷端よりやや低水路内であったものが、彎曲部では内岸側でさらに低水路側に、外岸側では高水敷上に押し寄せられることが指摘されている¹⁷⁾。

3.3.3 複断面彎曲流の構造

複断面彎曲水路において、アルミニウム粉末を塗布したおが竹を観測用トレーサーとしてカメラ撮影を行った。カメラ撮影とは、2台の35mm スチルカメラを用い、微小時間間隔(本研究では30ms)にて撮影するもので、2枚のほぼ同様の写真が得られる。これら2枚の写真を立体視鏡にて立体視すると、トレーサーの速度差が横視差となり、かなりの起伏をもって浮き上って見え、瞬間速度の平面分布が可視化される。本研究に用いた観測用トレーサーは、流れに十分追随していると考えられ、立体視された瞬間速度の平面分布を水流の速度分布と考える。撮影は、彎曲部上・下流($x = -1\text{m}, 1\text{m}$)、彎曲部で $\theta = 0^\circ$ より 30° 毎に各断面4ヶ所行なわれており、その撮影例を示すとPhoto. 4およびPhoto. 5のようである。写真上、水路中央付近で横断方向に白線を引いた部分が低水路部であり、左右両岸が高水敷である。いずれの写真を見ても、低水路と高水敷の境界付近トレーサーの存在しない部分が認められるが、これは前項で示した水面ボイルに相当するものである。これらの写真を立体視し、簡単な図化機にて等速度線図を抽くとFig. 15のような結果が得られる。ただし、瞬間速度が可視化されているため、速度変動あるいはゆらぎのために各区間の結果を連ねることに問題はあるものの、各区間において得られた写真によると、高速部および低速部の位置はほぼ同様であり、定性的な検討を行なうことにはそれほど問題にはならない。

複断面流れでは、上流側直線部($x = -1\text{m}$)に見られるように、低水路と高水敷上では流速差があり、その境界部で極大値および極小値を示す流速横断分布が見られる³⁾。彎曲流入直前より、外岸側高水敷上に比して内岸側高水敷上の速度が増加するとともに、低水路内の高速部が内岸側に偏っている。低水路内および内

Photo. 3 Boils on the water surface. ($\theta = 90^\circ$)

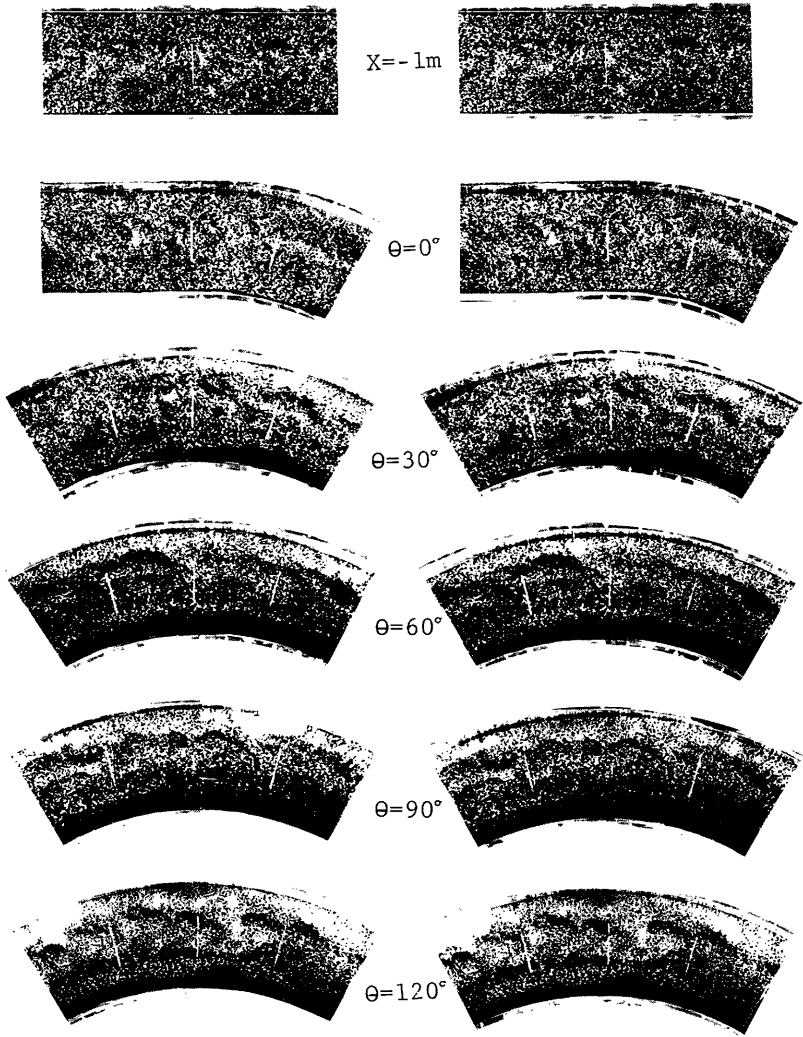


Photo. 4 Example photograph using Cameron effect.

岸側高水敷上の高速部は、彎曲部流入後 $\theta = 30^\circ$ 付近までに内岸側から外岸側へ移行し、 $\theta = 60^\circ$ 付近を過ぎるとほぼ外岸寄りの位置で安定している。一方、外岸側高水敷上では、彎曲部流入後、横断方向一様に流速が減少し、 $\theta = 90^\circ$ を過ぎた地点より外岸側に高速部が表われ、 $\theta = 150^\circ$ 付近では低水路内の流速と同程度の高流速となっている。

ここで、可視化された結果と内部構造との関係を、点計測による結果を参考にして推察すると、高速部は、2次流が下降する位置に相当し、低速部は2次流が上昇する位置に相当すると考えられる。複断面彎曲部で

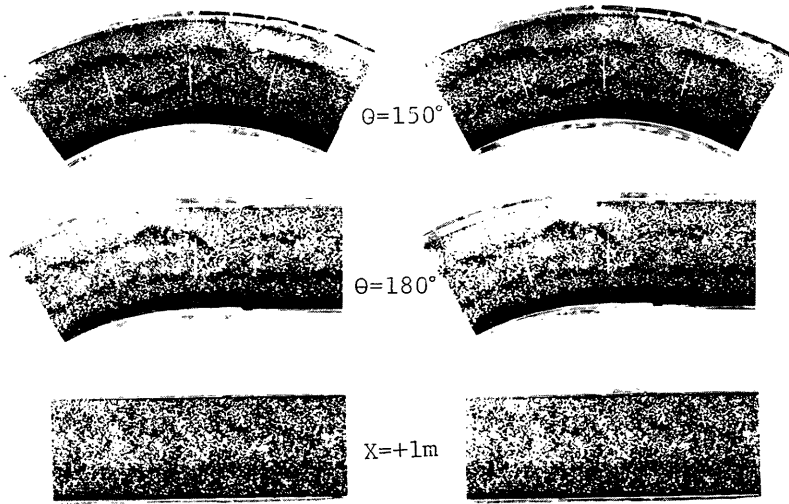


Photo. 5 Example photograph using Cameron effect.

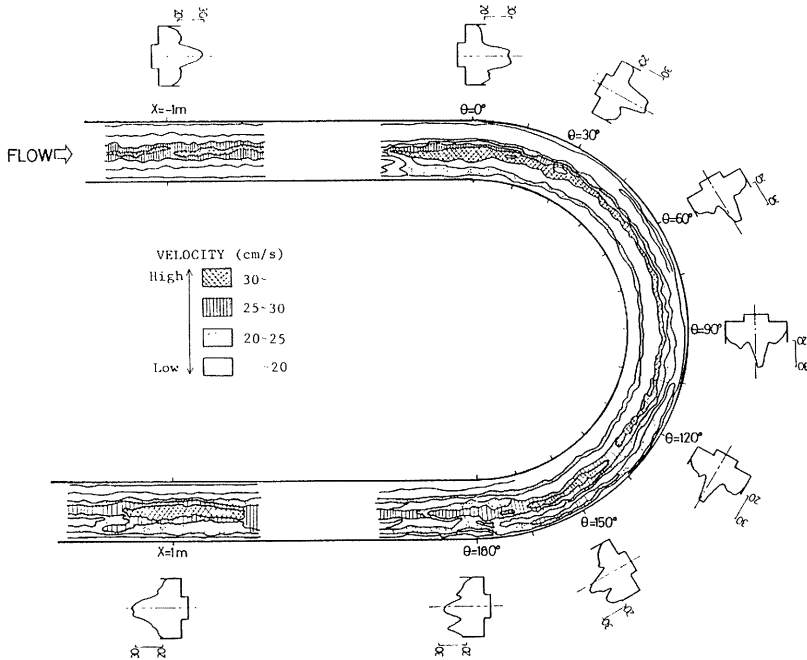


Fig. 15 Iso-velocity lines of longitudinal mean velocity in complex cross section.

は、Fig. 14 に示したように、彎曲の影響によるらせん流と複断面流れ特有の斜昇流に起因する2次流により流れの内部構造が記述される。このことと、前述した可視化結果より、低水路内および内岸側高水敷上ではらせん流が単断面彎曲流と同様の発生・発達過程を経るが、外岸側高水敷上ではらせん流の発生・発達が遅れ、彎曲部後半に急激に顕在化すると考えられる。そのため、Fig. 15 の彎曲流出部より下流では、外岸側高水敷上の流れの影響を受けて外高内低の流速横断分布となっている。

4. 結 論

本研究は、複断面彎曲開水路流れの水利特性について実験的検討を加えたものであって、得られた成果を要約して列挙すると次のようである。

- 1) 複断面彎曲流の縦断水面形は、単断面彎曲流と同様に彎曲内で水位が上昇する傾向が見られる。
- 2) 単断面彎曲流の横断水面形は、彎曲部前半では自由渦型横断水面形、彎曲部後半では強制渦型横断水面形と比較的よく一致するが、複断面彎曲流では、内・外岸側高水敷上および低水路内でそれぞれ異なった傾向を示し、非常に複雑となっている。
- 3) 流下方向平均流速の分布より、彎曲部においても直線部と同様、低水路と高水敷上の流れに分割されるとともに、それぞれの分割部で最大流速点は流下するにつれて外岸側の路床近くへ移行して行く。
- 4) 単断面彎曲流の流速横断分布は、自由渦型分布から強制渦型分布へと移行して行くことが確かめられたが、複断面彎曲流では、内岸側高水敷上および低水路内では単断面の場合と同様の傾向を示すが、外岸側高水敷上のそれはあまり顕著ではない。
- 5) 横断方向および鉛直方向平均流速の計測より得られた速度ベクトル図より、複断面彎曲流では、彎曲の影響によるらせん流と複断面流れ特有の斜昇流に起因する2次流により、Fig. 14 に示すような内部構造が記述される。
- 6) 乱れ速度の計測結果より、複断面彎曲流においても、高水敷先端付近に高乱れ速度の領域が存在し、内岸側では鉛直上方に、外岸側では低水路自由表面に向かって広がっている。
- 7) 表面付近および路床付近の流向を可視化した結果より、複断面彎曲流の内部構造が Fig. 14 のようであることが確かめられた。また、カメロン効果を利用したステレオ撮影の有効性が確かめられ、瞬間速度の平面分布が得られた。

以上のように、複断面彎曲開水路流れの水利特性に関して、実験的検討を行ない、流れの内部構造についていくつかの知見が得られたが、今後は、流れの3次元構造および抵抗特性について検討する予定である。

最後に、本研究の遂行に際し、実験ならびにデータ解析に協力された稲田修一氏（現建設省）および京都大学大学院生、石橋良啓氏に対し深堪なる謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Zheleznyakov, G. V.: Gidravlicheshe obosnovanie metodov rechnoi gidrometrii, Izdatelstvo Akademii Nauk, SSSR, Moskva-Leningrad, 1950.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) Boussinesq, J.: Mémoire sur l'influence de frottement dans les mouvements réguliers des fluides, XII-Essai sur le mouvement permanents d'un liquide dans un canal horizontal à axe circulaire, Jour. de Math. Pures et Appl., 2^{ème} Série, Tome XIII, 1868, p. 413.
- 5) Thomson, J.: On the origin of windings of rivers in alluvial plains with remarks on the flow of water

- in bends in pipes, Proc. Royal Soc., A25, 1876, p. 5.
- 6) Cameron, H. L.: Measurement of water current velocities by Parallax Method, Photogrammetric Engineering 18, 1952.
 - 7) Ippen, A. and Drinker, P. A.: Boundary shear stresses in curved trapezoidal channels, Proc. ASCE, Vol. 88, 1962.
 - 8) 村本嘉雄：彎曲部の流れ，水理学・水文学における最近の進歩，土木学会関西・中部支部，1967.
 - 9) 村本嘉雄・井上喬之：開水路彎曲流の内部機構，京都大学防災研究所年報，第8号，昭.40，pp. 415-427.
 - 10) Mockmore, C. A.: Flow around bends in stable channels, Trans. ASCE, Vol. 109, 1944.
 - 11) Shukry, A.: Flow around bends in an open flume, Trans. ASCE, Vol. 115, 1950.
 - 12) Eskinazi, S. and Yeh, H.: An investigation on fully developed turbulent flows in a curved channels, Jour. of Aero. Sci., Vol. 23, 1956.
 - 13) Margolis, D. P. and Lumley, J. L.: Curved turbulent mixing layer, The Physics of Fluids, Vol. 8, 1965.
 - 14) Yen, B. T.: Characteristics of subcritical flow in a meandering channel, Report of Institute Hydraulic Research, Univ. of Iowa, 1965.
 - 15) Măsiar, E.: The effect of bend on the distribution and development of the macroturbulence intensity in open channel-beds, Proc. 12th Congress of IAHR, B-18, 1967.
 - 16) 村本嘉雄・遠藤幸一：彎曲水路における乱れの特性について，京都大学防災研究所年報，第13号B，昭.45.3，pp. 311-321.
 - 17) 石垣泰輔・今本博健・稲田修一：複断面開水路彎曲流の流況特性に関する実験的研究，第36回土木学会年次学術講演会講演概要，II-231, 1981.