

連続わん曲水路における流れの実験的研究

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE OPEN CHANNEL
FLOW IN CONTINUOUS BENDS

玉井 信行*・池内 幸司**・山崎 晶***

By Nobuyuki TAMAI, Kouji IKEUCHI and Akira YAMAZAKI

1. 序 論

(1) はじめに

わん曲部は河川においてみられる風景のうち、典型的なもの1つである。わん曲部における水理学的な特徴は強い2次流が存在する点にあり、内岸側に寄州が発達し、外岸側には深掘れが生ずるのは周知のことである。また、洪水時には一層強く現われる流水の集中、水位の不均質さなどは、防災にあたって古来より注意が払われてきた。

しかしながら、わん曲部における3次元的な複雑な流れの実態は、現在に至るも十分にはわかっていない。従来の研究を総括的に述べると、理論的・実験的研究の多くは2次流の完全発達域および単独わん曲水路を対象として行われている。また、河川の流れでは代表水深 H_0 と水路の曲率半径 r との比、 H_0/r が1に比し非常に小さく、この条件を満たし、かつ広範な資料が公表されているのは Rozovskii¹⁾ の例のみである。さらに河川においてはわん曲部が連続している。連続わん曲水路で $H_0/r \ll 1$ の条件を満足して実験が行われた例も少なく、Yen²⁾、Hooke³⁾、木下⁴⁾ の例を数えるのみである。

河川において野外観測が行われた例は外国においては報告されており(たとえば文献5)、上流側のわん曲の影響下から下流側のわん曲の影響下へと流れが遷移してゆく過程の概要が報告されている。

(2) 本研究の目的

前節で述べたように河川の実状に即したわん曲部の流れの資料は非常に少なく、また、上・下流に接続する水

路の影響を論ずることのできる資料はほとんどない。河川における観測例が2~3あるが、わん曲の平面形状、河床形状が個々の場合で異なるため、定量的な議論をする場合には必ずしも使いやすい資料とはいえない。本研究においては、一般的な河川の流れと同一の水理条件下で、連続わん曲部の流れの実態を測定した。これにより、わん曲部の縦方向流れの遷移過程および2次流の発達・減衰過程を論ずる理論のための、検証用の資料を呈示し得るものと考えられる。境界の影響を複雑にすることを避け、流れ自体の性質を把握する目的のため、長方形断面の固定床水路を用いた。

2. 実験装置および実験方法

(1) 水路設計の考え方

序論で述べたように、実験の水理条件は河川において生起する範囲に収まるよう配慮した。条件の決定にあたって用いた従来の観測結果は次のようなものである。記号は図-1に従う。蛇行波長については Leopold・Wolman⁷⁾ の結果があり

$$\lambda = aB_0 \dots (1)$$

である。係数 a の値は7~11である。

代表水深を H_0 とすると

$$B_0/H_0 = 7 \sim 10$$

$$\text{および } 20 \sim 50 \dots (2)$$

という結果が Schumm⁸⁾ により50余りの河川に関して得られている。

わん曲中心軸の代表曲率半径 r_c と河川幅との関係は、次式で与えられる。

$$r_c/B_0 \text{ の平均値} = 2.3 \dots (3)$$

なお、Yen²⁾ の資料によれば r_c/B_0 の平均値は5~10

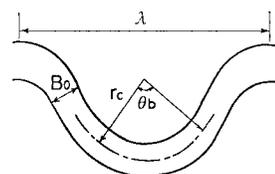


図-1 わん曲部と記号

* 工博 東京大学助教授 土木工学科

** 工修 建設省荒川上流工事事務所

*** 東京大学大学院

程度であるが、これは彼の資料が航路（滞筋）に着目しているゆえと考えられる。

わん曲中心角 θ_b の分布については Yen²⁾ がミシシッピー川とミズーリ川の資料を集めており、 θ_b の非超過確率が 50% を示すのは次式の値となっている。

$$(\theta_b)_{50} = 80^\circ \sim 100^\circ \dots\dots\dots (4)$$

河川の中心軸形状としては蛇行流路曲線 (sine generated curve) も提案されているが、水路製作上の難易さも考え、円弧と直線とが反転して連続する法線形状とした。水路側壁は観測の便宜も考えて透

水路中心軸の曲率半径	$r_c = 0.60 \text{ m}$
わん曲中心角	$\theta_b = 90^\circ$
わん曲間の直線流路長	$l = 0.30 \text{ m}$
水路幅	$B_0 = 0.30 \text{ m}$
蛇行波長	$\lambda = 2.12 \text{ m}$
設計代表水深	$H_0 = 0.030 \text{ m}$

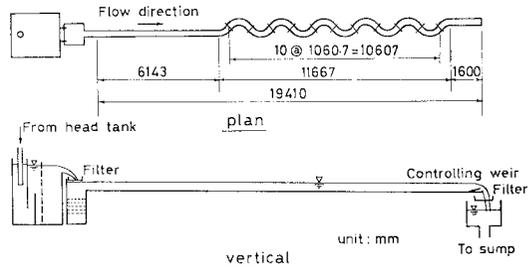
明塩化ビニールとした。採用された実験装置の諸元は表一に示すとおりである (形状については 図一3 を参照)。この結果を式 (1)~(4) と比較する。本装置では $a=7.1$ となり (式 (1)), $B_0/H_0=10.2$ (式 (2)), $r_c/B_0=2.0$ (式 (3)) である。円弧の中間にはさまれた直線部の長さ l については Yen²⁾ により分布が集められており、 l/r_c の非超過確率が 50% を示す値としては

$$(l/r_c)_{50} = 0 \sim 0.9 \dots\dots\dots (5)$$

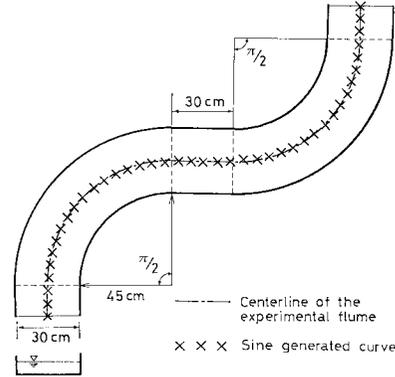
が得られ、本装置では 0.5 となっている。このように表一 の設計値は河川の姿を合理的に反映しているものと考えられる。今回の実験は全体計画の前半部を成すものであり、河川との対比は平面形状の類似にとどまっている。長方形断面で実験を行ったのは連続わん曲水路の流れの基本性状を把握するためと、従来結果との比較を行うためであり、将来は移動床水路における考察を行う予定である。

なお、図一3 にみられるとおり、この水路はほぼ蛇行流路曲線とみなすこともできる。また、日本の河川におけるわん曲形状の特性を 付録-1 に掲げる。この資料は高水時を対象とし、堤防法線に対して測定された結果である。この結果をみるとわん曲中心角については非超過確率 50% の値は 60° 程度であるが、この角度を小さくし過ぎると上下流部の影響がわん曲部全域に及ぶ心配があったので前述の水路形状としたものである。式 (3)、(5) については日本の河川においても同様な関係が成立しているといえる。

残された問題は河床勾配の決定である。この点に関しては、フルード数が河川における値を代表するように定めることとした。Leopold・Maddock⁹⁾ によればフルード数は 0.5 以下という報告がある。実験水路の底面はモルタル仕上げとしたのでマンングの粗度係数は $n=0.012 \sim 0.014$ と考えられ、設計水深 0.03 m より底勾配は 1/1000 とした。このときフルード数は設計値で



図一2 実験装置の概要



図一3 わん曲部の単位形状および蛇行流路曲線との比較

0.43 となる。なお、底勾配は水路中心軸に沿う値を採用し、横断面内の傾きはない。

水路全体の設置状況を 図一2 に示す。互いに反転するわん曲部を 10 個連続させ、最上流部、最下流部には中心角 45° のわん曲部を置き、さらにその上下流に長さがそれぞれ 6.14 m と 1.60 m の直線水路をもつ。わん曲部の単位形状および蛇行流路曲線との比較を 図一3 に示す。

(2) 実験方法および流速計の検定

今回の実験は測定点の数が膨大 (1つの 90° わん曲の中で約 400 点、全体ではこの 10 倍) であるため繰り返し同じ状態を出現させて計測する必要がある。そのため毎回の実験開始時に次のことを行った。第 1 に、円弧の中間に挿入された直線部中央断面における静水圧を測定し、水面勾配が水路床勾配に等しいことを確認した。これは流れが擬似等流状態であるための確認である。第 2 は、水路上流端の量水槽内の水位をポイントゲージで測定し、一定値であることを確認した。これは流量の確認である。

水位の測定は静圧管を 7 本、水平面内に並列させたものを用いた。各静圧管は外径 2.0 mm であり、これを挿入することによる水面上昇は水圧測定に影響することはないと思われる。

流向の計測は絹糸によるタフト法によった。糸のゆらぎが大きい箇所では数十秒間の平均と思われる値を記録

した。そして全計測終了後に結果をグラフ化し、傾向が異なっている箇所についてはすべて再計測を行った。

流速測定には径 3 mm のプロペラ流速計が用いられた。プロペラ軸を流向に一致させて測定を行った。実験初期において流速計の出力が水面付近の計測時に特に低下することが観察された。このため曳行台車による検定を行った。プロペラ設定位置と水面との距離 d が 3 cm 以上であれば出力は一定値となる。したがって、 $d=3$ cm のときの流速 v_3 を水面の効果を受けない流速と考えることができ、これより浅い設定位置深さ d での流速 v_d との間には、重回帰分析により次の関係があることがわかった（重相関係数は 0.9210 であった）。

$$\begin{aligned} \frac{v_d}{v_3} = & 0.878 - 0.03 \left(\frac{v_d}{20} \right) + 0.189 \left(\frac{d}{1.5} \right) \\ & + 0.01 \left(\frac{v_d}{20} \right)^2 - 0.07 \left(\frac{d}{1.5} \right)^2 - 0.015 \\ & \cdot \left(\frac{v_d}{20} \right)^2 \left(\frac{d}{1.5} \right) + 0.019 \left(\frac{v_d}{20} \right) \left(\frac{d}{1.5} \right)^2 \end{aligned}$$

(CGS 単位).....(6)

さらに、プロペラ流速計の出力 v_3 と台車速度 v_t (真流速) との関係は、測定結果に回帰分析を施すことにより次式のように得られた（重相関係数は 0.9997 であった）。

$$v_t = 1.869 + 20.105(v_3/20) - 0.965(v_3/20)^2$$

(CGS 単位).....(7)

流速計の検定は各実験の開始前と終了後に、 $d=3$ cm の位置で実施した。終了時の検定結果が不良の場合には、その日の資料はすべて棄却された。

流量の測定は大型のバケツとストップウォッチを用い、十数回の平均値を採用した。

3. 実験結果の解析および考察

(1) 実験条件

前章で述べた方法により擬似等流状態を出現させた。得られた実態は次のとおりであり、今回の測定はすべてこの条件に対して行われた。

H_0 (全平均水深) : 2.93 cm, Q (流量) : 1.96 l/s
 V (断面平均流速) : 22.3 cm/s, フルード数 : 0.42

擬似等流状態の確認のためには、各断面における平均水位と断面平均の全エネルギー高さを水路長に沿って表示し、底勾配と比較した。図-4 にはこのうち、水位の縦断変化を示す。水面勾配は平均的には 1/1000 で、底勾配に一致していることがわかる。

(2) 用語の定義

本論文中で用いる用語を下記のように定義する。

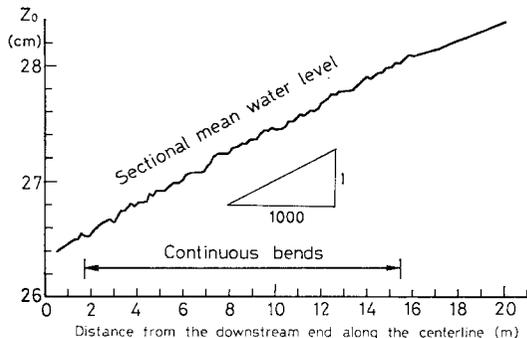


図-4 水位の縦断方向変化

- i) 主流：水路中心軸の接線方向の流速成分。
- ii) 2次流：水路中心軸と直交する方向の流速成分。
- iii) 完全発達域：流速、流向、水深などが主流方向に変化しない領域。
- iv) 水深平均流速：ある点において水深方向に平均化された流速。
- v) 平衡領域：合同な形のわん曲水路が反転しながら連続している場合、流れが擬似等流状態であれば流入部、流出部を除いては流れは周期的に変化するであろう。こうした、わん曲の同位相位置では流況が同一となる領域をよぶ。

(3) 同位相平均法について

水位資料、流速資料などを検討した結果、上下流の直線水路に接続した中心角 45° のわん曲部を除いては、流れは平衡領域となっていることが判明した。すなわち、10個の連続わん曲においては同一のわん曲位置において流れは相等しいことが確認された。したがって、得られた測定結果をわん曲の同位相断面で平均化し、資料の測定精度を向上させることとした。本論文で以下に示す結果はこの同位相平均を施した資料である。

測定断面の呼称は図-5に示すとおりとし、円弧部に挿入された直線部の中央で区切り、単位のわん曲とする。

(4) 水面形状

図-6 (a)~(i) に同位相平均した水深の測定結果を示す(付録-2 参照)。各図面中の横軸は水路横断方向の距離を示し、図面の左側が左岸(外岸)、右側が右岸(内岸)に対応している。水路中心

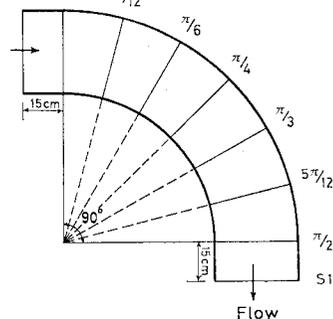


図-5 断面の呼称

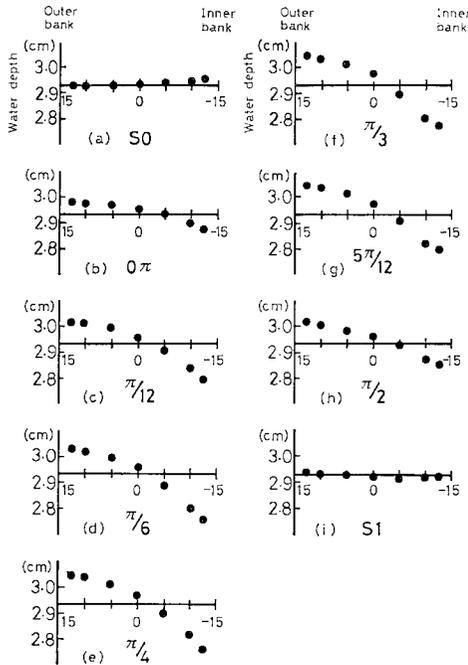


図-6 同位相平均水深の分布

軸に直交し、外岸向きに取った座標軸を n とすると横断方向の水面勾配 I_n は

$$I_n = \partial z_s / \partial n = \partial h / \partial n \dots\dots\dots (8)$$

で示される。 z_s は水面位置、 h は局所的な水深を示す。

図-6 (a) は円弧の中間に挿入された直線部の結果を示す。 $I_n \approx 0$ であり、符号は負であることがわかる。これが円弧部の入口の結果である 図-6 (b) になると I_n は正となっており、以後わん曲を流下するに従いその値が増大し、 $\pi/6$ の断面で最大に達する、 $\pi/6$ から $\pi/3$ の断面ではその値を保ち、それ以後は徐々に減少し、図-6 (i) に示す次のわん曲部との中間点では 図-6 (a) の結果と逆位相になっていることがわかる。

このように横断方向の水面勾配は平衡状態に達していることと、わん曲部の始端・終端付近で 0 となっていることがわかる。したがって、 I_n の増加はわん曲の進行と位相をずらすことなく始まり、その終了と軌を一にして 0 に戻ることがわかる。

(5) 主流速の分布

a) 鉛直方向分布について

図-7 は同位相平均した主流速の鉛直方向分布を各測定位置ごとに示したものである (付録-3 参照)。この図においては、表面において流速が最大となる通常の形状から外れる箇所が数多くみられる。具体的には 図-8 に模式的に示すように、最大流速が水深中央付近で出現する分布形 (A型) とか、底面付近に最大流速が出現する

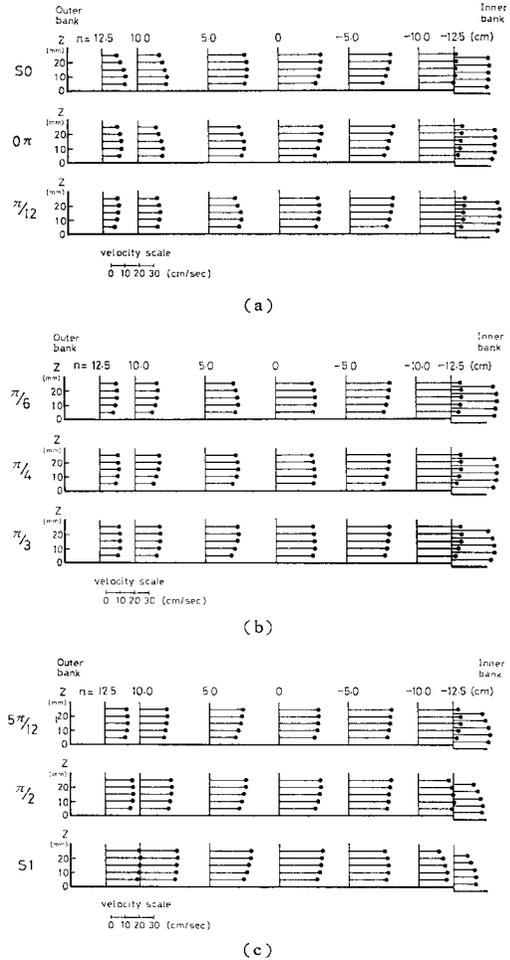


図-7 同位相平均主流速の分布

分布形 (B型) である。

さて、こうした特徴ある分布形の出現位置を眺めてみる。断面 S_0 から $\pi/12$ の間では、A, B 型の流速分布は断面中央から外岸側に見出される。こうした断面においても

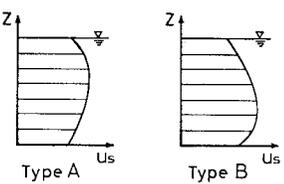


図-8 主流速の鉛直方向分布の模式図

内岸側の分布形では水面付近が最大流速となる通常の型である。次に、 $\pi/6$ から $\pi/3$ の各断面においては外岸寄りの 2 測線での結果は、すでに通常の型に復しつつあり、断面中央および内岸寄りの位置で A, B 型がみられる。さらに流下し $5\pi/12$ から S_1 の断面にかけては、内岸側の 2 つの測線での分布が A, B 型の特性を示す。以上の観察のように、わん曲部流れに特徴的な A, B 型の流速分布がみられる点は、1 つのわん曲の中で当初外岸側にあり、それがしだいに内岸側へ移行してゆく。

また、横断方向に平均化した主流速度の鉛直分布は、

すべての断面でA型とB型との中間的な分布を呈する。これは中心角度180度の3連続わん曲水路でのSiebert・Götz¹⁰⁾の実験においても報告されている。

Yen²⁾は台形断面の90°わん曲水路が2つ接続する配列で実験を行い、同様な結果を得ており、上述の結果は連続わん曲部における水路幅・水深比が約10以上の常流の流れに普遍的な現象と考えられる。

b) 横断方向分布について

主流の水深平均流速を \bar{u}_s で表わし、これの横断方向の分布が次式で表わされるものとする。

$$\bar{u}_s = \alpha \left(\frac{r}{r_c} \right)^m \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 r は各測定位置における曲率半径、 α と m は定数である。

最小2乗法により各点において求められたべき乗の指数 m の流下方向への変化を図-9に示す。図-9にはRozovskii¹⁾の粗面および滑面における資料ならびにYen²⁾の実験から計算された結果を並記してある。今回の実験では m の値は $\pi/12$ で最小となり、以後ゆっくりと増加している。Yenの資料は連続わん曲実験で得られており、今回の結果と類似の挙動を示す。一方、Rozovskiiの資料は180°の中心角を有する単独わん曲の実験による。これをみるとわん曲位置40°から100°にかけて $m \approx -0.8$ の領域がみられ、完全発達域が形成されているやにみえる。また、 $\theta > 180^\circ$ 以降は接続する直線水路内を示しており、単独わん曲ではわん曲の影響は長く下流の直線部に及ぶことを示している。

図-9から結論づけられることは、河川で見られるような中心角が90°程度の連続するわん曲部では、いわゆる自由渦型とか強制渦型といわれる主流の横断方向分布は恒常的には出現しないこと、ならびに完全発達域は存在していないことである。また指数 m は3つの実験を通じてほとんどの領域で負である。これは多くの断面で内岸側の流速が速いことを意味しており、水路幅・水深比の大きい(10以上)の長方形断面水路の流れではかなり普遍的な現象と考えられる。Mosonyi・Meckel・Meder¹¹⁾

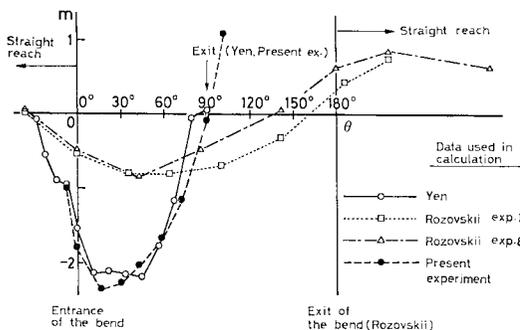


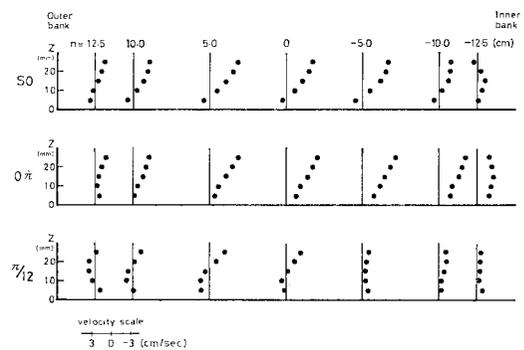
図-9 ベキ数の流下方向の変化

の3連続わん曲水路の例でも、第2わん曲においてはこうした結果が示されている。彼らの論文においては第1わん曲の流れは直線部の影響を受けており、本論文で対象とする平衡領域ではないと考えられる。

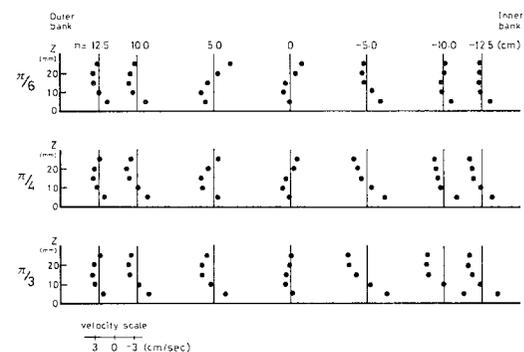
(6) 2次流

a) 鉛直分布形状について

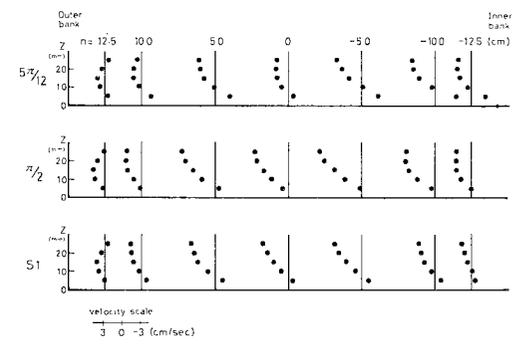
図-10は同位相平均した2次流の鉛直方向分布を、各測定位置ごとに示したものである(付録-4参照)。分布形状が流下方向にどのように変化してゆくかをみると、2次流の発達・減衰の過程を知ることができるであろう。本研究における2次流の流速は、流速ベクトルの



(a)



(b)



(c)

図-10 同位相平均2次流流速の分布

測定より流速の横断方向成分が求められた。プロペラ流速計を用いたため水面および底面のごく近傍での流速測定が不可能であった。しかし流向の測定は水面、底面上でも可能であるので、流向の測定は全域にわたって行われている(付録-5参照)。流向の変化の状況は Yen²⁾ が報告しているものと類似であり、以後の議論はこの流向の測定結果をも参照して進められている。

断面 S0 付近では水面付近で内岸向き、水底付近では外岸向きの分布を呈している。これは1つ前のわん曲部で発達した2次流がそのまま残存しているの、完全発達域で通常みられる2次流の流向分布と逆転しているのである。断面 0π 付近では、底面近くの外岸向きの成分が減衰しているのがわかる。π/12 から π/4 付近までわん曲部を進行すると底面付近での流向は逆転し、内岸向きとなる。水面付近の流況は依然として変わらないので、水面と底面で内岸向き、水深中央部で外岸向きという、速度 0 を 2 回横切る 2 次流の分布となる。π/6 から π/3 の断面にかけては水面付近において内岸向きの 2 次流の大きさが減少を始める。断面 5π/12 から S1 にかけては前わん曲の影響は消え、水面付近では外岸向き、水底付近では内岸向きという、現在のわん曲で発達してきた 2 次流の鉛直方向分布となる。もちろんこうした単純な叙述が最もよく当てはまるのは水路の中央部付近の流れであり、側壁近傍はさらに複雑な変化となる。

b) 断面内の分布について

断面内における 2 次流の流線を、図-10 の結果をもとに描いたのが 図-11 である。断面 S0 においては先行のわん曲による 2 次流が卓越し、それがしだいに現わん曲による 2 次流のパターンに移行している様子がみられる。このようにわん曲が連続している水路での 2 次流

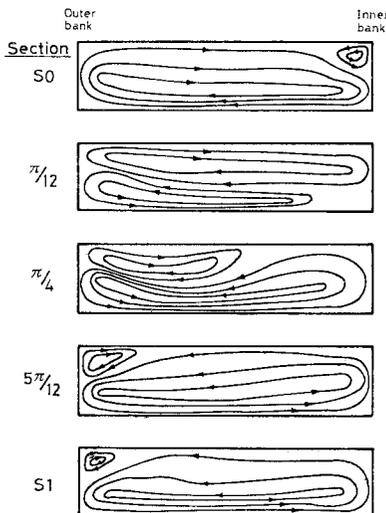


図-11 断面内の流線の変化

を論ずるには、先行するわん曲の影響を無視するわけにはいかないと考えられる。また、河川に多くみられる 90° 程度のわん曲中心角の場合には、完全発達域はあくまで仮定の産物であることがわかる。河床が洗掘し得る場合には完全発達域がみられるが⁶⁾、これは中心角度が 180 度以上のわん曲において堤防満杯時の流れに対して得られている。このときも低水時には完全発達域は消失していると報告されている。

(7) わん曲部の流れの運動方程式の各項の評価

ここでは実験結果を用いて各項の大きさを算出し、各因子の大きさが流下方向にどのように変化するかを検討する。これによりわん曲部の各位置における支配的な成分を見出そうとするものである。

運動量保存則を記述する座標系としては一般の直交曲線座標を用いる。水路中心軸に沿う方向を s 軸とし、それに直交する方向に n 軸をとり、それぞれの速度成分を u_s, u_n とする。ここで、 $ds=r d\theta, r=const.$ と考えれば円筒座標系となり、 $1/r=(1/R)\cos\omega s$ と考えれば蛇行流路曲線を表わす。ここに R は流路の頂部における最小の曲率半径、 $\omega=2\pi/L, L$ は中心軸に沿って測られた蛇行の 1 波長である。

実験水路の法線形状は円弧と直線から成っているの、この境界を表わすには円筒座標系が適する。直線と円弧との接続部では曲率半径が不連続的に変わるの、水流自身はその急激な変化に追従し切れない。流れの可視化においても流線は蛇行流路曲線に類似な緩やかな軌跡を示すことが観察されたため、流線に応じた解析も行うこととしたものである。

a) 運動量保存則

水深 H_0 と代表曲率半径 r_c との比が 1 に比し十分に小さい場合を対象とすれば、圧力は静水圧分布を示す¹⁾。また $H_0/r_c \ll 1$ であることを考慮して、レイノルズ方程式における摩擦応力項の中で微小項を省略する。さらに、鉛直方向の流速成分は壁面の近傍を除いてほぼ 0 に等しい¹⁾。したがって、鉛直速度成分を 0 と仮定し、側壁の近傍を除いた領域を対象とする。こうした前提のもとに s 方向および n 方向の運動量保存則は次式で示される¹²⁾。

$$\left. \begin{aligned} u_s \frac{\partial u_s}{\partial s} + u_n \frac{\partial u_s}{\partial n} + \frac{u_n u_s}{r} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} &= \frac{\partial}{\partial z} \left(\epsilon \frac{\partial u_s}{\partial z} \right) \\ u_s \frac{\partial u_n}{\partial s} + u_n \frac{\partial u_n}{\partial n} - \frac{u_s^2}{r} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} &= \frac{\partial}{\partial z} \left(\epsilon \frac{\partial u_n}{\partial z} \right) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

ここに、 p は圧力、 ϵ は渦動粘性係数、 ρ は密度、 z は鉛直上方に向かう座標軸である。

b) 運動量保存則の差分化

今回の実験では水路横断方向に 7 点、水深方向に 5

点, 流下方向には 9 断面の測定が行われている. したがって, 相隣る 4 辺形を成す測定点の 4 点から, その中央点の水理量を差分式で求め, 式 (10) の各項の大きさを算出した. 式 (10) の右辺は 2 階の微係数であるため測定値を直接用いた数値差分では誤差が大きくなると予測される. したがって $u_s(z)$ を z の 3 次関数で表わし, 係数は測定値に回帰分析を適用して定めた. 渦動粘性係数としては Engelund¹³⁾ が使用した $\epsilon = (1/13)u_*H_0$ を用いた. u_* は摩擦速度である.

次に, n 方向のせん断応力項の評価法を述べる. 式 (10) にも記すように渦動粘性係数は主流方向と横断方向とで等しいと考え, $u_n = \delta u_s$ と表わす. ここに δ は主流と 2 次流のなす角度であり, $\tan \delta \approx \delta$ とした. 各点の $\delta(z)$ の測定値に回帰分析を用い, δ を z の 3 次関数として表わしておく微分操作時にはその結果を用いた.

e) 流下方向の運動量保存則について

各項の大きさは 図-12 に示される格子点 30 か所において, 流下方向には測定 9 断面の中点における値が得られた. 水底からの距離が 0.5 cm から 2.5 cm (この位置は水面下約 0.5 cm) に至る今回の結果の範囲内では, 変化の概況は水深方向にはそれほど変化しないので, ここでは 図-12 に示した (1-3), (3-3), (6-3) の 3 点において得られた各項の大きさを 図-13 に示す. なお, ここでは各項の相対的な関係に特に着目している. また, 今回の測定は壁面から 0.5 cm 以遠に限られているので, 壁面のごく近傍での挙動については言及できない.

主流と 2 次流の相関を表わす項における曲率半径としては, 円と考えたものと蛇行流路曲線と考えたものの 2 つを掲げている. 図-13 をみると慣性項や 2 次流と主流の相互干渉を表わす項は必ずしも小さくなく, 流下に伴って符号を変えたり, あるいはわん曲の後半部では主要な項となっていることが注意される. また, 流下方向の運動量式の評価においては法線形状を円弧と取り扱っても, 蛇行流路曲線を当てはめても結果にはほとんど差がないことがわかる.

次に測定結果の精度について言及しておく. 運動が式 (10) に従うとすれば, 左辺に表示された各項の和 (慣性項 + 求心力項 + 圧力項) は右辺の摩擦項に等しいはずである. 近似的にはこのつり合いは満足されていると考えているが, すべての測定位置でこの条件が満足されているわけではない. 式 (10) を導く過程で省略されている項もあるがこの影響は小さいと考えられ, 図-13 における誤差は計測上のものと微分量を格子点において計測量から内挿する際に発生したものと考えられる. 図-13 において左辺と右辺とのつり合いは, 図中の表示で

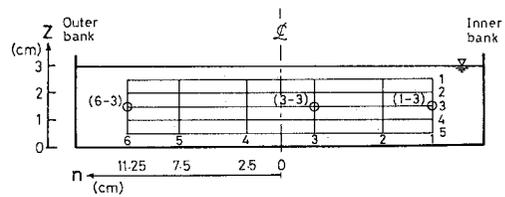
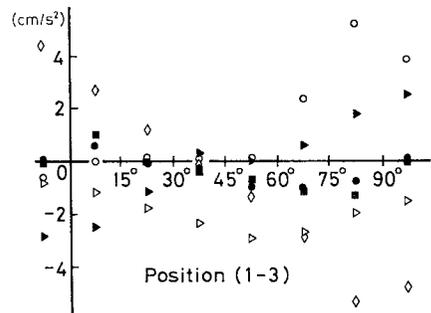
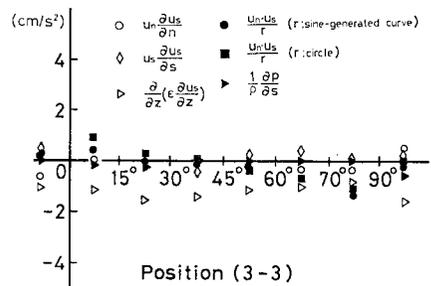


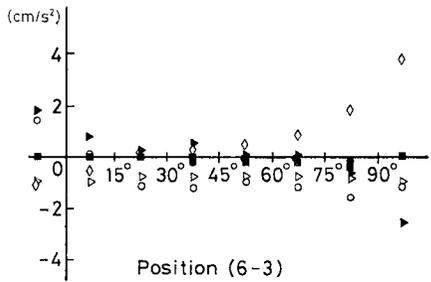
図-12 オーダー比較点の位置と座標



(a)



(b)



(c)

図-13 流下方向運動量式のオーダー比較 (角度はわん曲入口からの値を示す. 0°~90°以外の部分は直線部を示す.)

単位量程度ずれている場合がみられる. したがってこの程度の誤差が含まれていることは覚悟しなくてはならないが, 今回の成果は全体の傾向および相対的な大小関係については表現し得ているものと考えている.

d) 横断方向の運動量保存則について

図-14 は横断方向の運動量保存則の各項を比較したものである. 流下方向の例と同じく, 今回の測定範囲内

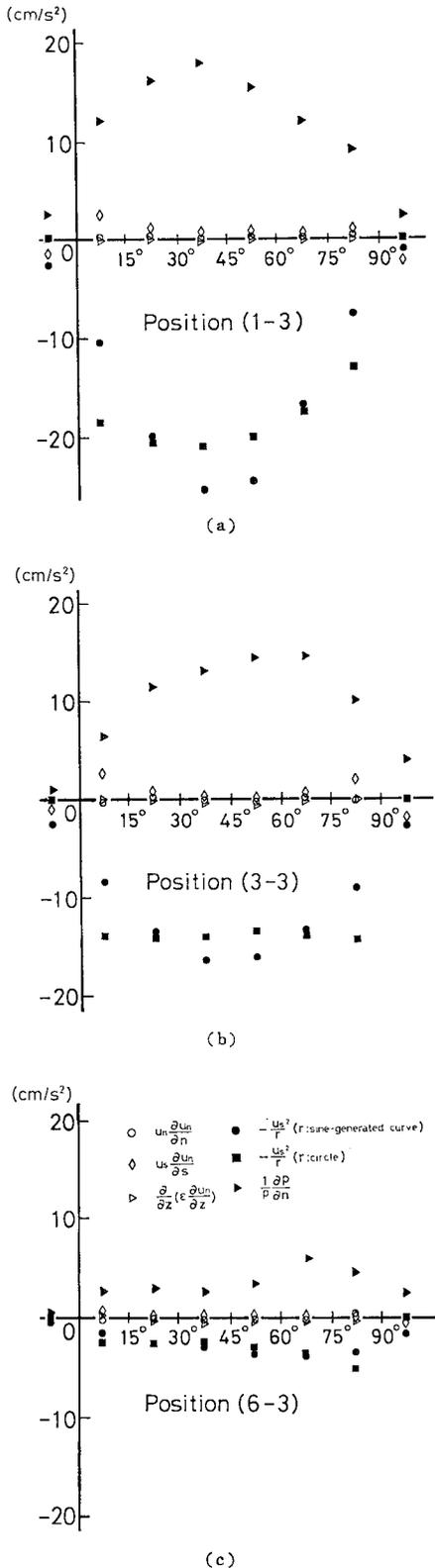


図-14 横断方向運動量式のオーダー比較

では水深方向には大きく変化しないので、同一水深位置において、断面内の流下方向の変化特性を示すことにする。なお、水深方向の変化の特徴は次のとおりである。静水圧分布が成立していれば圧力勾配項は水深方向には一様である。また、乱流においては主流速の分布は底面付近までほぼ一様であるので、求心力項もほぼ一様となる。今回の測定は、こうした前提がほぼ満足されていることを示している。しかし、壁面のごく近傍では摩擦項を考える必要が生ずるものと予測される。曲率半径については流下方向の場合と同じく、2種類の方法を用いている。渦動粘性係数については一定値のほか、鉛直方向に2次放物線分布を示す例についても算定を行ったが結果は図上において見分け得るほどの差はなかった。

図-14 をみるとわん曲部への入口・出口付近を除いては、圧力勾配項と求心力の項とが卓越しており、この両者がつり合っていることがわかる。わん曲の頂点付近ではこれらの項の絶対値も式(10)の2つの式の中で卓越している。入口・出口付近ではこの両者のほかに慣性項のうち $u_s \partial u_n / \partial s$ の項が比較的大きくなり、2次流の発達・減衰過程を論ずるにはこの項を無視し得ないと考えられる。

摩擦項については全域を通じてほぼ0であり、横断方向の運動量式においてはこの項を無視しても差し支えないと思われる。したがって、式(10)の第2式では左辺の和が0となればつり合いがとれているといえる。今回の水路は滑らかなモルタル仕上げであり、粗さを用いたレイノルズ数の値から判断してせいぜい遷移領域内にあるので、底面付近まで計測してもこの結論に変更はないと考えられる。しかし、粗面水路の底面近傍においては新たな計測が必要であろう。

曲率半径に関しては次のことがいえる。図-14 に示される式(10)の第2式の左辺各項の総和を考えると、わん曲部の入口・出口付近では蛇行流路曲線と考えた曲率半径を用いて求心力項を見積った方が左辺の総和が0に近くなる。また、入口から $\pi/6$ から $\pi/3$ 程度の区間では水路壁面の実体である円弧としての半径を用いる方が左辺の総和は0に近づくことがわかった。これは流線自体がそのような形状をとっている結果と考えられ、直線と円弧を接続させた水路における曲率の不連続点付近では流れは必ずしも急速に水路形状に追従せず、緩やかに遷移しているものと考えられる。しかしながらこれは必ずしも剝離が生じているという意味ではなく、わん曲部に流入すると外岸寄りには流線が緩やかに集中し、内岸寄りの領域では流線が緩やかに発散することが観察された。

図-14 に示される結果の精度については、流下方向の場合と同様なことがいえる。

(8) 速度相関項と平均速度との変換係数

u_s および u_n の水深にわたる平均値を \bar{u}_s, \bar{u}_n で示す。理論的な解析では式(10)を水深方向に積分した後準3次元的な解析を行うので、その過程に出現する代表的な相関項についての実験結果を示しておく。ここで、上部の横棒は水深にわたる平均操作を表わす。

$$\left. \begin{aligned} \overline{u_s^2}/\bar{u}_s^2 &= 1.01 \pm 0.008 \\ \bar{u}_s \cdot \bar{u}_n / \overline{u_s u_n} &= 0.83 \pm 0.37 \\ \overline{u_n^2}/\bar{u}_n^2 &= 0.35 \pm 0.31 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(11)$$

ここに右辺の第1項は平均値を示し、第2項は標準偏差を示す。

4. ま と め

水深と曲率半径との比が十分に小さく、河川の流況と類似性をもつ流れを用いてわん曲部の解析を行う際の検証に用い得る資料、および基礎方程式の各項の評価を行い得る資料を得ようとして実験を行った。わん曲部が10個連続する水路で平衡状態が出現することを確認し、同位相平均をとることにより、精度のよい資料が得られたものとする。本研究により得られた結論は次のとおりである。

(1) 横断方向の水面形状はわん曲部の入口・出口付近で水平となる。したがって、横断方向の水面勾配はわん曲部への流入・流出と軌を一にして変化する。

(2) 主流速分布において水面下に最大流速が生ずる。この形式の速度分布はわん曲部の入口付近では外岸寄りに存在し、流下するにつれてその出現位置は内岸側へ移行する。

(3) 中心角度が90°程度で、反転しながら連続している、河川と類似のわん曲部では、流れは全域を通じて大きく変化し、完全発達域は存在しない。

(4) 連続わん曲においては先行するわん曲部で発達した2次流が広い範囲にわたり影響を残すことがわかった。新しいわん曲での2次流はまず底面付近から発達し、先行の2次流の影響を消しつつ成長する。両者が共存した後、わん曲部を2/3程度流下した後に現わん曲で発生した2次流が水面に至る全域を占めることになる。

(5) 流下方向の運動量保存則においては、慣性項や2次流と主流との干渉項が相対的に大きい。またこれらの項は流下方向にその大きさを変え、これがため結論の第2項から第4項に至る現象を産み出していると推測される。

(6) 横断方向の運動量保存則においては、わん曲の入口・出口付近を除いては圧力勾配項と求心力項とのつり合いで運動が定められている。入口・出口付近ではこ

れに加えて2次流の流下方向への変化を表わす慣性項が関与する。また、横断方向の摩擦応力は小さく、無視できる。

謝 辞：河川における興味深い情報を提供し、著者らにこの種の研究の機縁を与えていただいた自由学園の木下良作博士に感謝致します。土木学会水理委員会の研究小委員会「洪水流の3次元流況と流路形態」における討論の機会を第1著者に与えて下さった委員長の京都大学芦田和男教授、部会主査の東北大学首藤伸夫教授に感謝致します。埼玉大学池田駿介助教授には Hooke の論文に関して助力をいただいた。また、東京大学応用水理研究室の廣沢佑輔氏には実験の遂行、図面の製作などでお世話になった。記して謝意を表します。

付録-1 日本の河川におけるわん曲部の幾何特性

この資料は建設省作成の河川管内図、地形図(5万分の1)を中心に下記の河川から得られたものである。括弧内の数値は資料数を示す。北上川(48)、江合川(7)、鳴瀬川(12)、利根川(36)、富士川(20)、揖斐川(8)、長良川(13)、淀川(16)、太田川(12)、江川(9)、吉野川(24)、肝属川(9)。図-A・1に記号を示し、図-A・2~A・4に $\theta_b, r_c/B_0, l/r_c$ の非超過確率を正規確率紙に

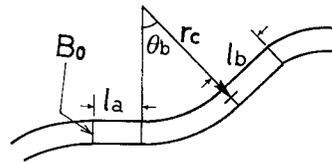


図-A・1

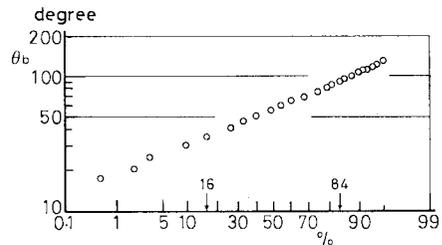


図-A・2

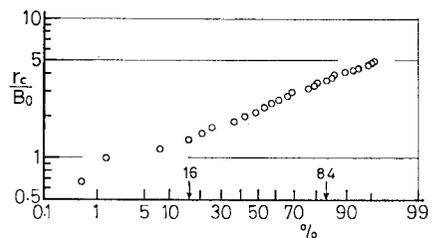


図-A・3

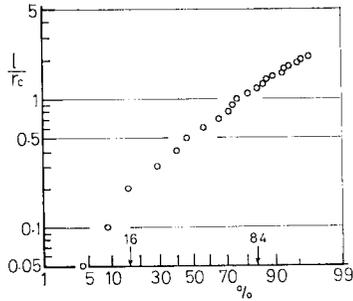


図-A-4

プロットしたものを示す。ここに $l=(l_a+l_b)/2$ とした。縦軸はいずれも対数表示であり、すべての項目に対してほぼ直線関係がみられる。

付録-2 同位相平均水深 h (単位: cm)

Symbol	Section	n (cm)						
		12.5	10.0	5.0	0	-5.0	-10.0	-12.5
A	S 0	2.96	2.95	2.94	2.94	2.93	2.93	2.93
B	0π	2.88	2.90	2.94	2.95	2.97	2.98	2.98
C	$\pi/12$	2.80	2.84	2.91	2.96	3.00	3.01	3.02
D	$\pi/6$	2.76	2.80	2.89	2.96	3.00	3.02	3.03
E	$\pi/4$	2.77	2.81	2.90	2.97	3.02	3.04	3.05
F	$\pi/3$	2.78	2.81	2.89	2.98	3.02	3.04	3.05
G	$5\pi/12$	2.80	2.83	2.91	2.97	3.01	3.04	3.05
H	$\pi/2$	2.86	2.87	2.93	2.96	2.99	3.01	3.02
I	S 1	2.92	2.92	2.92	2.93	2.93	2.94	2.94

n : Distance from the centerline to the outer bank.

付録-3 同位相平均主流速 u_s (単位: cm/s)

Position	Distance from the bottom (cm)				
	2.50	2.00	1.50	1.00	0.50
A-1	24.55	25.03	24.55	24.25	23.27
A-2	26.62	26.85	26.10	25.64	24.89
A-3	29.68	29.00	27.37	26.18	23.99
A-4	29.85	29.80	29.29	28.32	26.31
A-5	25.79	27.41	27.71	27.40	26.12
A-6	15.08	17.71	19.37	20.76	20.13
A-7	10.14	12.77	15.39	16.70	16.40
B-1	28.66	28.94	28.78	28.34	26.94
B-2	30.28	29.89	28.95	28.70	27.29
B-3	31.37	29.73	28.36	27.04	24.82
B-4	29.81	29.98	28.81	27.71	25.55
B-5	21.57	23.56	25.31	25.26	23.28
B-6	12.81	14.50	16.47	17.68	17.00
B-7	10.58	12.38	13.24	13.24	11.79
C-1	30.27	31.49	31.52	31.04	29.73
C-2	31.18	31.65	31.01	30.72	29.46
C-3	30.89	30.36	29.02	27.95	26.16
C-4	27.38	28.15	28.42	27.73	26.07
C-5	18.74	20.54	22.77	23.09	21.56
C-6	13.33	14.62	15.29	14.91	13.44
C-7	10.35	11.53	11.05	9.98	8.36

Position	Distance from the bottom (cm)				
	2.50	2.00	1.50	1.00	0.50
D-1	29.99	32.33	32.39	31.73	30.67
D-2	31.60	32.16	32.18	31.41	30.05
D-3	30.95	30.48	29.60	28.28	26.70
D-4	25.55	27.01	27.94	27.94	26.24
D-5	19.60	21.62	22.86	23.19	21.25
D-6	15.24	16.02	15.53	14.49	12.49
D-7	11.40	12.14	12.02	11.10	9.80
E-1	30.40	32.44	32.36	31.65	29.74
E-2	31.14	31.89	31.77	30.43	28.37
E-3	30.29	30.11	29.18	28.03	26.47
E-4	25.39	26.38	27.12	27.57	26.27
E-5	21.74	22.62	22.96	21.90	19.12
E-6	16.72	17.16	16.22	14.80	13.07
E-7	12.40	12.87	13.19	12.92	11.45
F-1	25.85	28.91	30.28	30.24	27.95
F-2	31.15	31.94	31.55	29.97	27.60
F-3	30.28	30.24	29.60	28.67	27.34
F-4	26.31	26.85	27.31	27.48	26.19
F-5	22.83	23.45	22.77	20.84	18.35
F-6	17.65	17.87	17.51	16.72	15.02
F-7	13.35	14.15	14.30	14.23	12.96
G-1	21.43	23.41	25.90	26.88	25.30
G-2	28.79	30.77	30.53	28.97	27.58
G-3	31.15	30.19	29.68	29.06	27.92
G-4	28.35	28.61	28.23	27.52	25.48
G-5	24.53	23.67	22.51	20.99	18.85
G-6	19.49	19.55	19.20	18.45	17.29
G-7	15.32	16.14	16.30	15.97	14.84
H-1	14.85	17.49	19.93	21.46	20.89
H-2	21.80	23.96	25.17	25.77	24.03
H-3	30.30	29.55	28.90	28.54	27.52
H-4	29.47	30.13	28.97	27.91	25.98
H-5	26.67	26.12	24.38	23.12	21.41
H-6	22.54	22.76	22.30	21.86	20.47
H-7	19.61	20.28	20.26	19.86	18.57
I-1	10.17	12.90	15.44	16.79	16.40
I-2	14.68	17.42	19.27	20.88	20.26
I-3	25.66	27.71	28.29	28.12	26.89
I-4	30.16	30.42	29.97	29.07	27.04
I-5	29.80	29.45	27.80	26.58	24.46
I-6	26.53	27.01	26.32	25.82	25.13
I-7	24.33	25.19	24.74	24.32	23.37

付録-4 同位相平均 2 次流流速

u_n (単位: cm/s)

Position	Distance from the bottom (cm)				
	2.50	2.00	1.50	1.00	0.50
A-1	0.39	-0.52	-1.25	-0.73	0.09
A-2	-1.84	-1.68	-1.43	-0.36	0.77
A-3	-4.06	-3.63	-2.73	-1.16	1.10
A-4	-4.11	-3.46	-2.45	-1.24	0.58
A-5	-4.40	-3.65	-2.48	-1.10	1.04
A-6	-2.60	-2.23	-1.66	-0.48	0.91
A-7	-1.59	-0.99	-0.54	0.22	0.64

Position	Distance from the bottom (cm)				
	2.50	2.00	1.50	1.00	0.50
B-1	-1.85	-2.31	-2.45	-2.26	-1.88
B-2	-4.09	-3.56	-3.14	-2.04	-1.78
B-3	-5.07	-4.25	-3.49	-2.78	-1.81
B-4	-4.83	-4.18	-3.30	-2.19	-1.48
B-5	-4.48	-3.46	-2.51	-1.40	-0.79
B-6	-2.51	-2.04	-1.49	-0.69	-0.24
B-7	-1.63	-1.09	-0.50	-0.31	-0.64
C-1	-0.60	-0.54	-0.47	-0.33	-0.99
C-2	-1.14	-1.20	-0.85	-0.38	-0.46
C-3	-1.02	-0.60	-0.54	-0.46	-0.96
C-4	-2.31	-1.24	-0.27	0.46	0.14
C-5	-2.58	-1.15	0.60	1.43	1.23
C-6	-1.33	-0.27	0.63	0.82	-0.05
C-7	-0.10	0.86	0.87	0.32	-0.82
D-1	0.31	0.26	0.34	0.03	-1.40
D-2	-0.30	-0.18	0.37	0.10	-1.32
D-3	0.39	0.62	0.28	-0.79	-2.13
D-4	-1.81	-0.94	0.68	1.03	-0.01
D-5	-2.58	-0.67	1.03	1.92	1.33
D-6	0.18	1.08	1.18	0.46	-1.37
D-7	0.20	0.73	0.73	-0.05	-1.39
E-1	1.80	1.54	1.18	0.13	-1.70
E-2	1.36	1.15	0.95	0.46	-2.11
E-3	2.01	1.55	0.79	-0.74	-2.80
E-4	-1.09	-0.54	0.62	1.14	0.14
E-5	-0.60	0.79	1.90	1.59	-0.61
E-6	0.94	1.58	1.03	-0.20	-1.68
E-7	-0.05	0.64	0.79	0.17	-0.92
F-1	1.91	2.12	1.49	0.17	-2.53
F-2	2.54	2.74	2.16	-0.02	-3.15
F-3	2.96	2.67	1.69	-0.46	-3.09
F-4	-0.03	0.07	0.71	0.77	-0.23
F-5	1.06	1.75	1.79	0.54	-1.96
F-6	0.91	1.34	1.08	-0.33	-1.81
F-7	-0.29	0.62	0.89	0.46	-0.79
G-1	2.09	2.24	1.96	0.55	-2.32
G-2	3.79	3.60	2.56	0.35	-3.37
G-3	4.14	3.34	2.04	-0.14	-2.61
G-4	1.99	2.05	1.85	1.16	-0.76
G-5	2.66	2.55	1.82	0.22	-2.31
G-6	0.60	1.27	1.29	0.28	-1.47
G-7	-0.61	0.43	1.11	0.74	-0.54
H-1	2.57	2.45	2.40	1.75	0.01
H-2	4.66	4.80	4.26	2.90	0.56
H-3	6.84	6.15	4.51	2.75	0.17
H-4	5.50	5.16	4.20	2.96	1.00
H-5	5.50	4.97	3.67	2.34	-0.48
H-6	2.40	2.59	2.27	1.34	0.11
H-7	0.14	1.27	1.88	1.58	0.23
I-1	1.64	1.08	0.64	-0.12	-0.56
I-2	2.56	2.22	1.72	0.46	-0.91
I-3	4.36	3.64	2.43	0.99	-1.09
I-4	4.18	3.54	2.56	1.20	-0.61
I-5	3.99	3.53	2.84	1.17	-1.13
I-6	1.73	1.60	1.30	0.39	-0.77
I-7	-0.48	0.48	1.24	0.90	0.06

付録-5 同位相平均流向 δ (単位: 度)

(流下方向からの偏差を示し, 正は外岸向き, 負は内岸向きを示す)

Position	Distance from the bottom (cm)						
	Surface	2.50	2.00	1.50	1.00	0.50	0.00
A-1	2.1	0.9	-1.2	-2.9	-1.7	0.2	2.9
A-2	-4.7	-4.0	-3.6	-3.1	-0.8	1.8	5.3
A-3	-9.6	-8.0	-7.2	-5.7	-2.5	2.7	5.9
A-4	-8.8	-7.9	-6.7	-4.8	-2.5	1.4	5.1
A-5	-10.8	-9.9	-7.6	-5.1	-2.3	2.3	5.4
A-6	-11.1	-10.0	-7.3	-5.0	-1.3	2.6	4.7
A-7	-12.5	-9.0	-4.4	-2.0	0.8	2.2	2.3
B-1	-3.1	-3.7	-4.6	-4.9	-4.6	-4.0	-5.3
B-2	-8.4	-7.8	-6.6	-6.2	-4.1	-3.7	-5.1
B-3	-10.0	-9.4	-8.3	-7.1	-5.9	-4.1	-5.6
B-4	-11.0	-9.4	-8.0	-6.6	-4.5	-3.3	-3.5
B-5	-14.8	-12.1	-8.4	-5.7	-3.2	-2.0	-1.6
B-6	-15.1	-11.4	-8.1	-5.1	-2.2	-0.8	-1.8
B-7	-13.8	-8.8	-5.0	-2.2	-1.4	-3.3	-6.0
C-1	-0.6	-1.1	-1.0	-0.8	-0.6	-1.9	-10.7
C-2	-2.4	-2.1	-2.2	-1.6	-0.7	-0.8	-10.0
C-3	-2.2	-1.9	-1.1	-1.0	-0.9	-2.1	-8.7
C-4	-5.9	-4.8	-2.5	-0.5	0.9	0.3	-4.4
C-5	-13.3	-8.0	-3.3	1.5	3.5	3.2	-2.0
C-6	-10.4	-5.7	-1.1	2.4	3.2	-0.2	-6.4
C-7	-5.7	-0.5	4.3	4.5	1.8	-5.8	-13.3
D-1	0.5	0.6	0.5	0.6	0.1	-2.6	-14.7
D-2	-1.1	-0.6	-0.3	0.7	0.2	-2.4	-14.5
D-3	0.8	0.7	1.2	0.6	-1.5	-4.5	-13.6
D-4	-4.9	-4.0	-2.0	1.4	2.1	-0.1	-6.6
D-5	-11.8	-7.5	-1.7	2.6	4.8	3.6	-6.2
D-6	-4.3	0.7	3.9	4.4	1.8	-6.3	-13.6
D-7	-3.8	1.0	3.5	3.5	-0.1	-8.1	-16.9
E-1	3.1	3.4	2.7	2.1	0.3	-3.3	-15.2
E-2	2.3	2.7	2.1	1.7	0.9	-4.2	-17.4
E-3	4.3	3.8	3.0	1.6	-1.4	-6.0	-17.1
E-4	-2.9	-2.4	-1.1	1.4	2.4	0.2	-7.4
E-5	-5.6	-1.5	2.0	4.7	4.2	-1.9	-10.2
E-6	-0.3	3.3	5.3	3.7	-0.8	-7.4	-16.4
E-7	-4.9	-0.2	2.9	3.4	0.8	-4.6	-14.9
F-1	3.5	4.2	4.2	2.8	0.3	-5.2	-14.9
F-2	4.6	4.7	4.9	3.9	-0.0	-6.5	-18.3
F-3	6.2	5.7	5.1	3.3	-0.9	-6.5	-17.4
F-4	0.8	-0.1	0.2	1.5	1.6	-0.5	-9.8
F-5	0.5	2.7	4.3	4.6	1.5	-6.1	-14.6
F-6	0.1	3.1	4.4	3.6	-1.1	-6.8	-15.6
F-7	-8.3	-1.2	2.6	3.7	2.0	-2.6	-11.3
G-1	4.8	5.7	5.5	4.4	1.2	-5.2	-13.8
G-2	7.0	7.6	6.7	4.8	0.7	-7.1	-17.8
G-3	8.2	7.7	6.4	4.0	-0.2	-5.3	-16.0
G-4	4.5	4.1	4.1	3.8	2.5	-1.7	-11.5
G-5	5.6	6.3	6.2	4.7	0.6	-7.0	-14.6
G-6	0.7	1.8	3.8	3.9	0.9	-4.8	-14.2
G-7	-7.5	-2.2	1.6	4.0	2.7	-2.0	-9.4
H-1	11.7	10.0	8.1	6.9	4.7	0.0	-6.7
H-2	12.8	12.3	11.6	9.8	6.5	1.3	-7.9
H-3	13.8	13.1	12.0	9.0	5.6	0.4	-8.4
H-4	11.2	10.8	9.9	8.4	6.1	2.2	-5.1
H-5	12.6	11.9	11.0	8.7	5.8	-1.4	-8.2
H-6	4.8	6.1	6.6	5.9	3.6	0.4	-7.4
H-7	-2.2	0.4	3.6	5.4	4.6	0.8	-4.3

Position	Distance from the bottom (cm)						
	Surface	2.50	2.00	1.50	1.00	0.50	0.00
I-1	12.7	9.2	4.8	2.4	-0.4	-2.0	-2.0
I-2	11.2	10.1	7.3	5.2	1.3	-2.6	-4.5
I-3	10.7	9.8	7.5	4.9	2.0	-2.3	-5.3
I-4	8.5	8.0	6.7	4.9	2.4	-1.3	-4.8
I-5	9.0	7.8	6.9	5.8	2.5	-2.7	-5.9
I-6	4.0	3.7	3.4	2.9	0.9	-1.8	-5.1
I-7	-2.5	-1.1	1.1	2.9	2.1	0.2	-2.7

参考文献

- 1) Rozovskii, J.L. : Flow of Water in Bends of Open Channels, Israel Program for Scientific Translations, 233 p., 1961.
- 2) Yen, B.C. : Characteristics of subcritical flow in a, meandering channel, Inst. of Hyd. Research, The Univ. of Iowa, 77 p., 1965
- 3) Hooke, R.L. : Shear-stress and sediment distribution in a meander bend, UNGI-report 30, Univ. of Uppsala, 58 p., 1974.
- 4) 石狩川開発建設部編：緩流部河道の水流蛇行相似に関する検討業務報告書——三次元流に関する実験的研究——, 164 p., 1981.
- 5) Thorne, C.R. and R.D. Hey : Direct measurements of secondary currents at a river inflexion point, Nature, Vol. 280, pp. 226~228, 1979.
- 6) Jackson, R.G. II. : Velocity-bed-form-texture patterns of meander bends in the lower Wabash River of Illinois and Indiana, Bulletin, Vol. 86, Geol. Soc. Am., pp. 1511~1522, 1975.
- 7) Leopold, L.B. and M.G. Wolman : River meanders, Bulletin of the Geological Soc. America, Vol. 71, pp. 769~793, 1960.
- 8) Schumm, S.S. : The shape of alluvial channels in relation to sediment type, U.S.G.S. Prof. Paper 352-B, 30 p., 1960.
- 9) Leopold, L.B. and T. Maddock, Jr. : The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications, U.S.G.S. Prof. Paper 252, 57 p., 1953.
- 10) Siebert, W. and W. Götz : A study on the deformation of secondary flow in models of rectangular meandering channels, Proc. 16th Congress, IAHR, Vol. 2, pp. 141~149, 1975.
- 11) Mosonyi, E., H. Meckel and G. Meder : Etude de developpement du courant spiral dans des courbes consecutives d'un canal, Proc. 16th Congress, IAHR, Vol. 2, pp. 347~355, 1975.
- 12) Kalkwijk, J.P. Th. and H.J. de Vriend : Computations of the flow in shallow river bends, J. Hyd. Research, IAHR, Vol. 18, No. 4, pp. 327~342, 1980.
- 13) Engelund, F. : Flow and bed topography in channel bends, J. Hyd. Div., Proc. ASCE, Vol. 100, HY 11, pp. 1631~1647, 1974.

(1982.3.31・受付)