

II-16 交互砂州の流路蛇行による変形

北海道大学工学部 正 員 長谷川和義

同 上 正 員 山 岡 勲

同 上 学生員 ◎岡 洋 一

1. はじめに

沖積河川における蛇行の発生・発達は、主として、河床の交互の起伏が原因となって生ずる水流の偏りによるものと言える。これらの河床起伏の最も重要な構成要素は、交互砂州であるが、ある程度発達した蛇行流路においては、曲りの影響による独自の起伏が、これに加わることになる。すなわち、蛇行の発達過程においては、曲りによって変形を受けた砂州形状が、その先の蛇行の発達を規定するわけで、これらの形状の特性を解明することは、蛇行研究にとって不可欠の課題になっている。

しかし、現在のところ、交互砂州の研究は、直線流路を対象として、発生領域の区分や発生機構を解明することに重点が置かれており、発達した砂州の形状特性や、その曲りによる変形に関する研究は、木下¹、芦田・塩見²、鮭川³など少数の定性的研究に限られている。著者ら⁴は、蛇行流路内の河床形状を、砂州形状と曲りによる洗掘形状の線形和によって表現できるものとして簡単な関数形をあてはめ、それぞれが水流の偏倚にあたえる影響の大きさを比較する研究をおこなってきた。

本研究は、これと同様な観点にたち、蛇行流路における河床形状を以下のような方法によって実験的に調べようとするものである。まず、直線流路内に典型的な形状をもつ交互砂州(単列)を発生させ、十分発達した状態で形状を測定する。次に、これらの砂州の2波の長さで1蛇行する蛇行流路を作成し、直線の場合に等しい水理条件をあたえて砂州を発生させ、発達形状を測定する。両者の形状の比較から、曲りによる変形の特徴を明らかにする。

2. 実験装置と実験方法

(2-1) 用いた実験装置の概要は、図-1(a),(b)に示すとおりであり、直線・曲線水路のいずれも、こり配可変の長8m,幅2mのステージ上に設けられている。これらの水路は、高20cm,幅30cmの矩形断面を有する透明塩ビ製のものであり、使用砂は、中央粒径0.043cm,比重2.66のほぼ均一なふるい砂である。流量測定は、上部水槽の水面上昇速度によっておこなわれた。

実施実験条件は、表-1に示すとおりであって、同表には主要な測定結果も記してある。

(2-2) 直線水路における実験は、5回の予備実験の後に最も典型的な場合の条件を選んでおこなわれ河床をラッカー Spreyによって固定した。河床形状の測定は、測定区間を上流から第3波および4波にとりポイントゲージを用いておこなわれた。測定間隔は横断方向に対し、水深程度の1cmにとり31点、流下方向に対し水深10倍程度の10cmにとって22点を選んでいる。後者は横断測線を表わし上流から順にStation No. 1, 2, … 23としている。

発生砂州長はほぼ等しく、測定区間の2波の長さは220cmとなっている。流速測定は直径3mmのプロベラ流速計(流向測定が可能なように回転台座上に設定)によっておこなわれ各Stationごとに3cmの横断間隔、3mmの垂直間隔において流

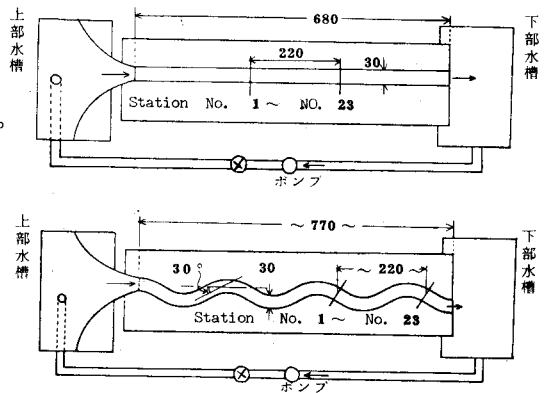


Fig. -1 (a), (b) 実験装置 (cm)

Table-1.

	直線水路	曲線水路
流 量 (l/s)	0.752	0.752
平均河床こう配	1/70.9	1/70.9
平均流速 (cm/s)	32.55	32.21
平均水深 (cm)	0.77	0.89
フルード数 Fr	1.185	1.091
無次元掃流力	0.154	0.178
まざつ係数 f	0.020	0.024
川幅水深比 B/H	37.03	33.71
砂州の平均長 (cm)	208.8	220
砂州の最大波高 (cm)	1.55	3.57

速・流向値を得た。曲線水路は、直線水路の発生砂州の2波長の長さで1蛇行する曲線型を以下の式により与えた。

$$\theta = (\pi/6) \sin(2\pi/220(\text{cm})) \cdot \tilde{s} \quad (\text{radian})$$

ここに θ は、流路中心線の接線が谷軸となす角度であり、 $\tilde{s}$ は曲頂を原点として測った曲線長であって、同式は Sine-generated curve として知られている。 θ の最大値 $\pi/6$ は、砂州の前進がおこらない、一般に「蛇曲」と呼ばれる状態を想定して定めたものであり、兩岸は中心線に直交して15cmずつの幅をとって設けられている。測定区間は上流から第3波長目にとられ河床は速乾性ボンドによって固定された。河床形状及び流速の測定間隔と測定方法は直線の場合と全く同じである。

3. 直線水路における砂州の形状特性

(3-1) 直線水路では、通水後数分で水深の数倍程度の規模をもつ斜め交錯しま模様があらわれ、やがてしまの斜めに連なる線が前進しつつ統合され砂州の前縁にまで発達する。その後、波高を増し本実験では10分程度でほぼ一定の高さに達した。前章で示したとおり、この実験は弱い射流域にあり、小規模河床形態の共存は見られなかったが、通水中しばしば線状に連なる跳水が発生した。形状測定のために停水した時の経過時間は、15分であったが、藤田ら⁵による定常波高の発達時間の推定式

$$Te = 0.57 \frac{l_b}{q_b} \quad (1)$$

ここに l_b : 砂州長、 q_b : 波高、

q_b : 河床流砂量

に対して、実測値を与えると11.8分となるので、

測定形状は十分定常的なものとみなすことができる。観測範囲内における河床の概略の様子は図-2に示すとおりである。同図には、実測の底面流速ベクトルを描いてあるが、砂州上を乗りあげる流れが前縁でとぎれ、かわって前縁に平行する流れが明らかに発達していることがわかる。図-3は、左右岸にそって縦断変化を、図-4(a)~(j)は横断変化をそれぞれ示すものである。これらの図から明らかなように、砂州形状は本来規則的なものではない。しかし、本論文の立場はこれを確率過程とみなすものではなく、以下に述べるように流れとの対応で相当程度確定的に表わしうとするものである。

(3-2) 砂州形状をモデル的に表わす方法として、従来から(2)式の表現がよく用いられてきた。

$$\eta = \frac{\eta'}{H_0} = \frac{Z_b}{2H_0} \sin \frac{2\pi}{2B} n' \cos \frac{2\pi}{L'} s' \quad (2)$$

ここに、 η' : 平均河床高を基準とした河床の高低差(深掘れを正とする)、 H_0 : 平均水深、 B : 流路幅、 L' : 砂州2波の長さ、 n' : 流路中心を原点とし左岸向を正とした横断方向軸、 s' :

流下方向を正とした流路中心線にそって軸。後述のように、(2)式は砂州の基本的な性格をよく反映しているが、図-4の横断形状にもはっきり見られる特徴、偶関数的な横断波形の存在が全く考慮されていない。そこで、これを拡張した(3)式の表現を試み解析を行なうことにする。

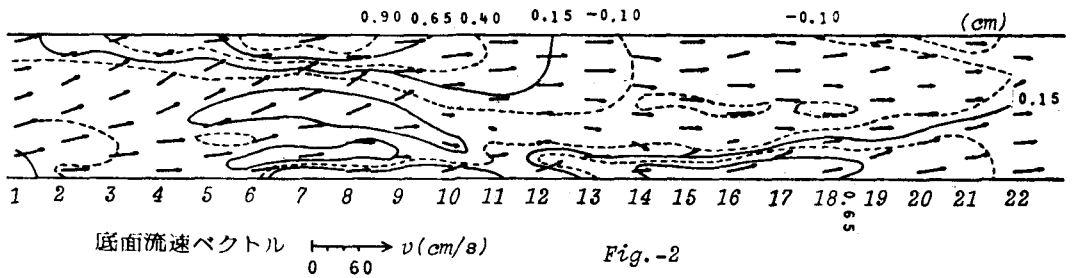


Fig.-2

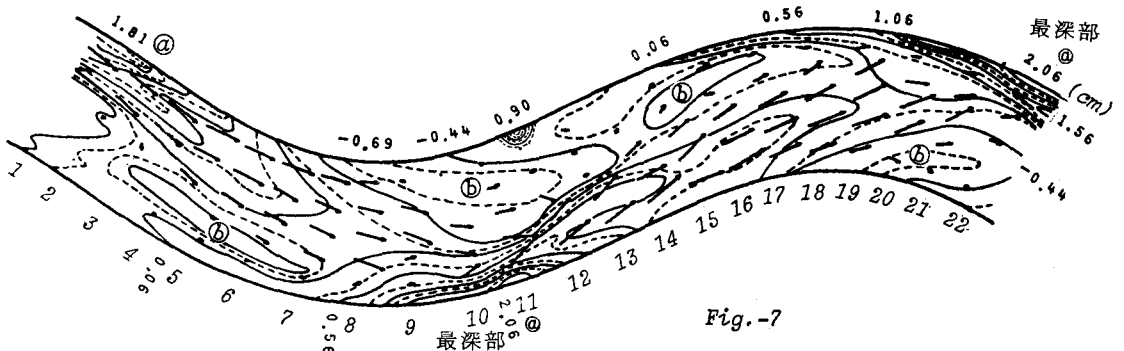


Fig.-7

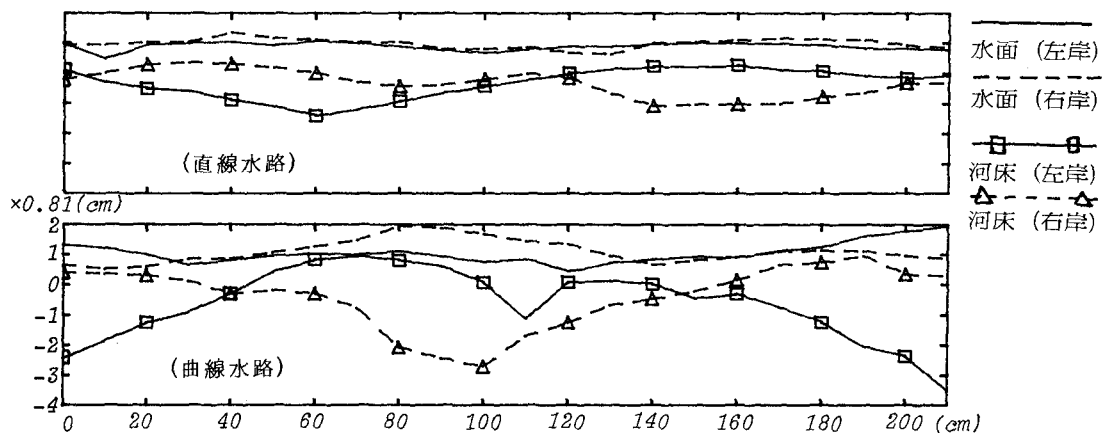


Fig.-3 (直線水路), Fig.-8 (曲線水路) 河床・水面の縦断変化

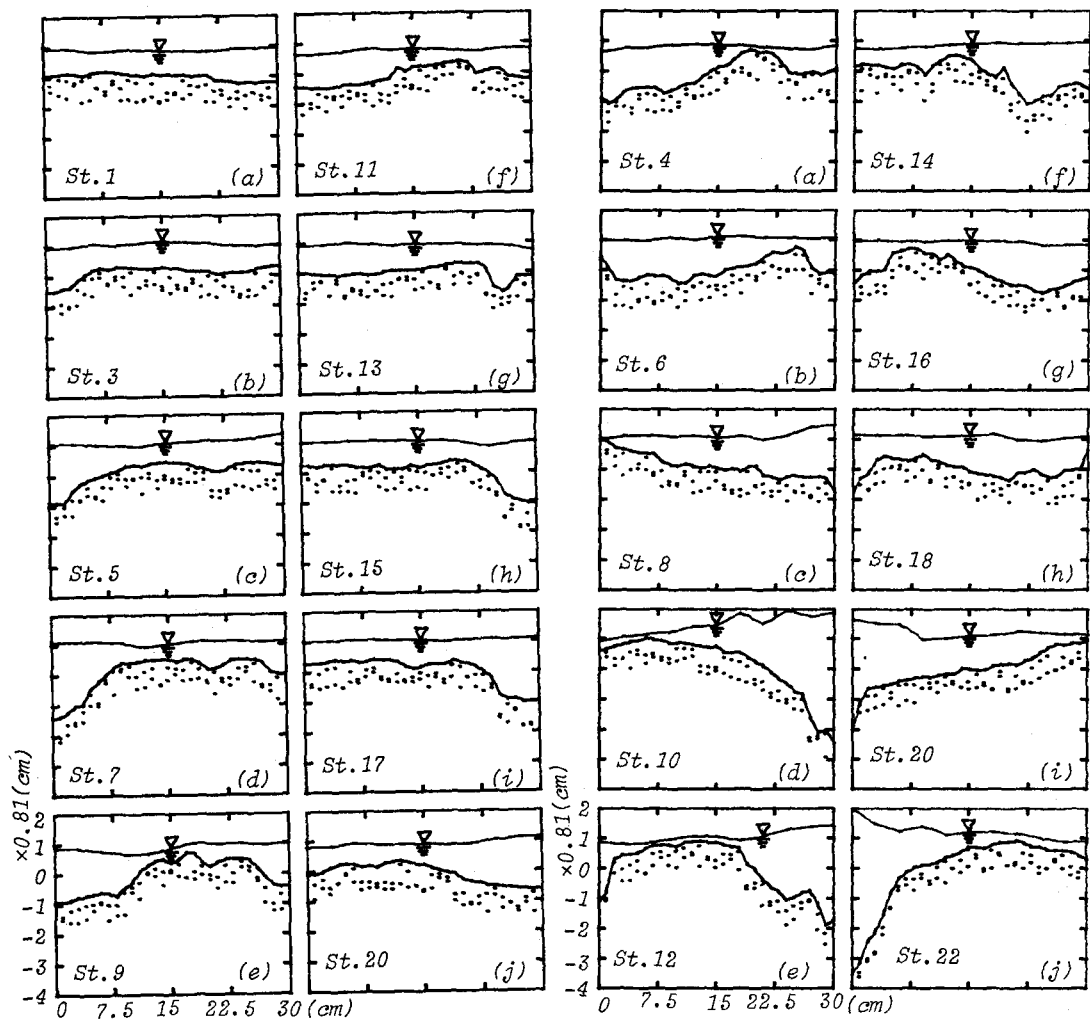


Fig.-4 直線水路の横断変化

Fig.-9 曲線水路の横断変化

$$\eta = \sum_{I=0} \sum_{j=0} \left[a_{2I,j} \cos \frac{2\pi \cdot 2I}{4} n \cdot \cos \frac{2\pi j}{L} s + b_{2I,j} \cos \frac{2\pi \cdot 2I}{4} n \cdot \sin \frac{2\pi j}{L} s \right] \\ + \sum_{I=1} \sum_{j=0} \left[c_{2I-1,j} \sin \frac{2\pi(2I-1)}{4} n \cdot \cos \frac{2\pi j}{L} s + d_{2I-1,j} \sin \frac{2\pi(2I-1)}{4} n \cdot \sin \frac{2\pi j}{L} s \right] \quad (3)$$

ここに、 $i=2I$ または $2I-1$ ($I=1, 2, \dots$) および $j (=1, 2, \dots)$ は、それぞ

れ砂州を構成する横断および縦断方向の波の波数であり、 $a_{2I,j} \sim d_{2I-1,j}$ などは、各波数に対応する波の振幅である。また $H_0 = 0.81 \text{ cm}$ とし、 $L=L'/H_0$, $n=n'/(B/2)$, $s=s'/H_0$ なる無次元表示をおこなっており、横断形状に対する基本周期は $2B/(B/2) = 4$ としている。その場合、図-5のように左右岸を軸とした「折り返し」を考慮すると、 a, b の波数は偶数のみ、 c, d は奇数のみが残ることになる。

「折り返し」は、少数の項で原形を表現できるメリットの他に、複列砂州への拡張を想定しておこなわれるものである。

さて、(3)式は η を二重フーリエ級数に展開すること他にないので、 η の実測値から各フーリエ係数を計算することは容易である。図-6(a), (b) は、このようにして求めた係数を横断形状の奇関数成分

$$\alpha_{2I-1,j} = \sqrt{c_{2I-1,j}^2 + d_{2I-1,j}^2} \\ (I=1, 2, 3, \dots, j=1, 2, 3, \dots) \\ \alpha_{2I-1,0} = |c_{2I-1,0}| \quad (I=1, 2, \dots)$$

$$\text{と、偶関数成分} \quad \alpha_{2I,j} = \sqrt{a_{2I,j}^2 + b_{2I,j}^2} \\ (I=0, 1, 2, 3, \dots, j=1, 2, 3, \dots) \\ \alpha_{2I,0} = |a_{2I,0}| \quad (I=1, 2, \dots)$$

にまとめて表示したものである。この場合、 s の原点は、(2)式との対応をとるため、左岸に最大深掘れ点が表示される位置に選んでおり、その結果 $d_{11} = 0$ となっている。

図によれば、(2)式の $Z_B/2H_0$ に相当する係数

$$\alpha_{11} = |c_{11}| \text{ が } 0.496 \text{ という最大の値を示す。}$$

黒木⁶ は、発達した砂州河床の実験および自然河川のデータから、波高と川幅の間に、

$$Z_b/2H_0 = (0.01 \sim 0.04) \cdot B/H_0 \quad (4) \text{ が成立することを示している。著者らの場合、}$$

$$B/H_0 = 37 \text{ 程度であり、同式からは } Z_b/2H_0 = 0.37 \sim 1.48 \text{ となるので、} \alpha_{11} \text{ が通常}$$

観測される波高のかなりの部分をしめることがわかる。一方、 $j=0$ すなわち、 s 方向に一樣で n 方向にのみ変化をもつ波の成分 $\alpha_{2,0} = |a_{2,0}|$ が 0.278 と第2番目の大きさを示すことは興味深い。 $\alpha_{2,0}$ は、負値なので、 $c_{1,1}$ の成分波などと重なる場合、深掘れ部の深さを大きくする一方、堆積部の岸寄りの高度を下げる働きをする。これは、自然河川にも見られ、「水裏」と呼ばれているが、水深川幅比がある程度以上大きい時に、砂州が複列的な性格をもちはじめることが原因しているものと考えられる。

他の有意と見られる振幅は、 $\alpha_{3,1} = 0.235$, $\alpha_{2,2} = 0.145$, $\alpha_{2,1} = 0.113$ などであり、これらに対応する合計8項の波の成分によって、原データの58%が表示できる。

4. 蛇行流路における砂州の形状特性

(4-1) 蛇行流路内の砂州の形成状態は、芦田、塩見のM1シリーズの実験に似ている。すなわち、通水後間もなく、交錯しますが確認されないうちに、図-7の◎点の近傍河床が激しく洗掘され、この洗掘線

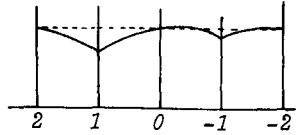


Fig.-5 「折り返し」

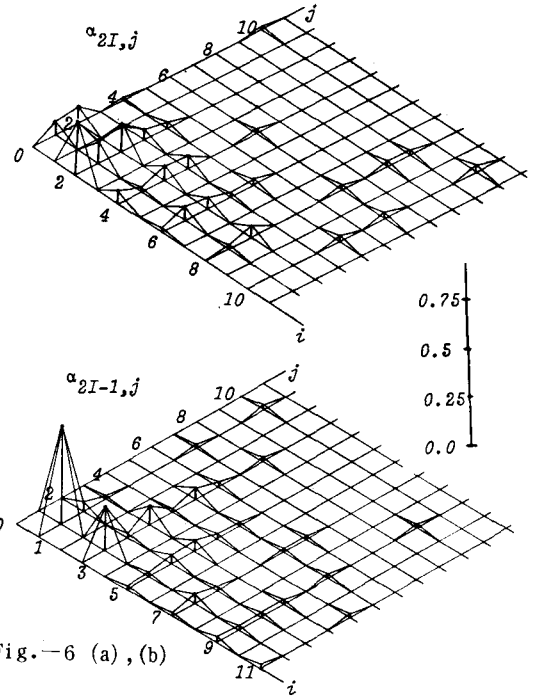


Fig.-6 (a), (b)

にそって砂州の前縁が形成される。このようにして生じた河床形が直線流路の交互砂州と同種のものであるということは、洗掘の影響を受けない図-7の⑥の部分にも明瞭な前縁があらわれていることから確認される。図-7の平面コンター、底面流速ベクトルおよび図-8・図-9(a)～(j)に示す縦横断変化などから知られる蛇行水路内の砂州の特徴は、(1) 前進がおこらないこと、(2) 深掘れ深(波高)がかなり大きいこと、(3) 深掘れ部の@点から対岸の@点にむかう主流部が、砂州にくいこむようにみお筋(Talweg)をつくっていることなどである。(1)の現象は、@-@を結ぶ主流によって運ばれた掃流砂が前縁部に落ちこんだ段階で、前縁と側岸の間のせまい領域の強い流れによってもち去られるためにおこり、平衡状態においては、形状はほとんど変化しない。(2)は、同じ集中化した流れの横断方向成分が、直線の場合に比して相当大きいことによるもので、曲りによる洗掘そのものの反映である。(3)は、直線の場合にも認められるが、蛇行路の場合は、洗掘深が大きいだけくいまが大きくなった、停水時の流量低下によっても助長される。

(4-2) 前章と同様に、 η を(3)式によって表現し、Fig.-10 (a), (b)

各係数を計算する。この場合、流下方向距離は、中心線とそれ以外の測線では異なることになるが、全体を直線状に引きのばして考え、原点は、直線の場合と同じく、左岸に最大の深掘れ点があられる位置に選んでいる。図-10(a), (b)は、 $\alpha_{2I-1,j}$ 、 $\alpha_{2I,j}$ を示すものであるが、最大振幅 $\alpha_{1,1}=|c_{1,1}|=0.972$

が大きいことは当然として、全体の傾向は、直線の場合とあまり変わらない。とくに $\alpha_{2,0}=|a_{2,0}|=0.296$ $\alpha_{3,1}=0.267$ などが直線の場合にほぼ等しいことが注目される。しかし $\alpha_{2,2}$ が 0.425 という第2番目に大きな値を示すことは重要で、検討を要するに思われる。前章と同じく、係数の大きい8項を用いて η を表現すると、原形の57%をあらわすことになる。但し、比較のために

5. 流路蛇行による砂州の変形 $H_0 = 0.81 \text{ cm}$ としている。

(5-1) 蛇行内の砂州が、直線のそれと異なる主要点は、前章に述べた三点であるが、形状に前進性の影響がおよばないものと考え、残りの2点が問題になる。このうち曲りによる洗掘に関しては、Engelund⁷ による解析を利用して、分離することができる。

(もちろん河床形状の線形和を仮定した上であるが)

Engelundは、流路中心線の曲率が

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{R} \cos \frac{2\pi}{L} \tilde{s} \quad (5)$$

にて表わされる流路の河床横断形状が第一近似として

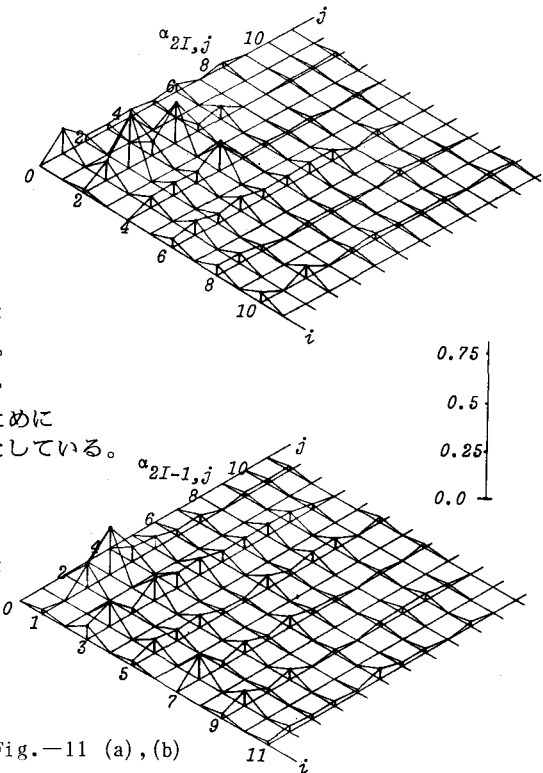
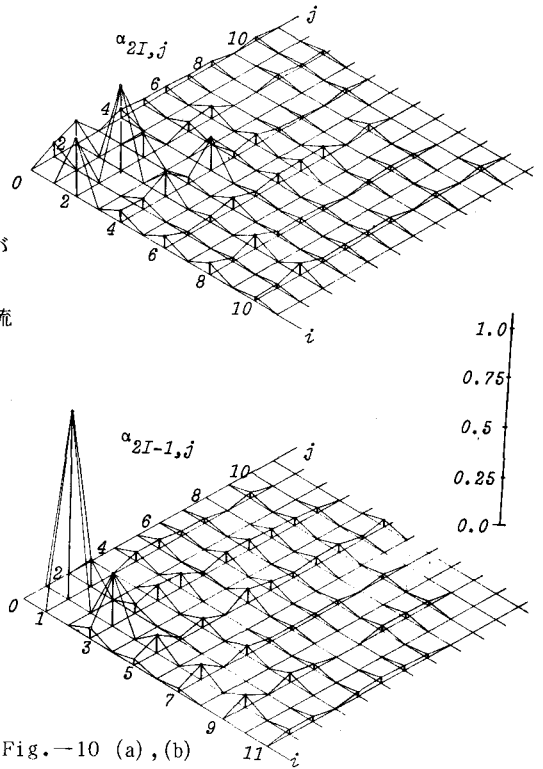


Fig.-11 (a), (b)

$$\eta_r = \left(1 + \frac{n}{\epsilon R} \cos \frac{2\pi}{L} \tilde{s} \right)^A - 1$$

$$\approx \frac{An}{\epsilon R} \cos \frac{2\pi}{L} \tilde{s}$$

のように表わされることを示した。ここに r : 任意点の曲率半径、 R : その最小値、 $\tilde{s}$: 左岸に曲頂があらわれる位置を原点とした流下方向軸、 η_r : 洗掘形

状の平均河床面からの変位で、いずれも H_0 にて無次元化している。また、 $\epsilon = 2H_0/B$ A : 横断面内の二次流によってもたらされる底面流線の傾きの度合と砂のまさつ係数で表現される指数で Engelund は、 $A = 7 \tan \phi \approx 4.0$ をあたえている。第二近似は、(5)、(6) 式の形状をもつ流路内の平面的二次流の解と、流砂連続式とから、数値解によって η_r の修正をおこなっているが、結果の形状は、(6) 式を下流側にシフトした形になっており、 $\tilde{s}$ のかわりに $\tilde{s} - \sigma$ を用いることによって近似できるものと考えられる。実験結果への適用に際しては、 σ を左岸に最深部のあらわれる位置に選ぶことにより

$$\eta_r = \frac{An}{\epsilon R} \cos \frac{2\pi}{L} s \quad (7) \quad \text{とするのが妥当であろう。}$$

(5-2) さて、(7) 式を3章の方法でフーリエ級数に展開すると 次の(8)、(9)式をうる。もし、蛇行内の砂州の最大振幅 $(c_{1,1})'$ と直線のそれ $(c_{1,1})$ との差が、(9) 式の $c_{1,1}$ によって受けもたれているものとすれば、

$$\eta_r = \sum_{I=1}^{\infty} c_{2I-1,1} \sin \frac{2\pi(2I-1)}{4} n \cdot \cos \frac{2\pi}{L} s \quad (8)$$

$$c_{2I-1} = \frac{(-1)^{I-1}}{(2I-1)} \cdot \frac{8A}{\pi^2 \epsilon R}$$

(9) $R = 82.56$, $\epsilon = 0.054$ より $A = 2.62$ をうる。

この値は、Engelund のものよりやや小さいが、池田ら⁸ が、日本の蛇行河川の資料から得た A の平均値 2.89 にはかなり近く興味深い。いま、蛇行内の砂州の成分振幅 $a_{2I,j}$ などから対応する直線の場合のそれらを差し引き、さらに $A = 2.62$ とした時の(9)式を引いた結果を示すと、図-11(a)、(b) のようになる。卓越した成分はほとんど消失しているが、 $a_{2,2}$ 、 $a_{1,3}$ 、 $a_{2,4}$ などが目立っている。これらの残りの成分が、実際にどのような形を表わすかを見るために、 η に変換しなおすと、図-12 のようになる。図中の点線は、平均河床面よりも深くなっている部分をつないだものであるが、図-7 のコンターより明らかなようにこの部分は、みお筋に対応していることが分る。しかし、 $a_{2,2}$ に対応する複列砂州状のゆるやかな起伏は、これと別個のものようであり、今後の検討が必要なものと思われる。

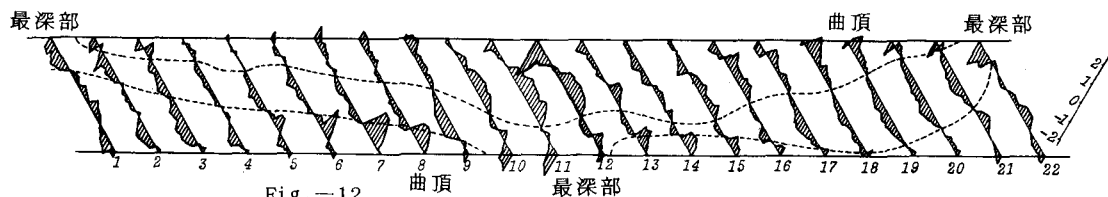


Fig.-12

6. おわりに

本研究によって、蛇行流路内の砂州形状が、「同一水理条件で発生した直線流路内の砂州形状」+「曲りによる洗掘形状」+「みお筋による変形」+「誤差」のように表現しうる見通しを得た。しかし、なにぶんにも実験が一例のみにとどまっており、今後条件を変えた多くの実験により解析を深めることが必要であろう。また形状が線形和として表現しうる根拠を力学的に検討することも重要な課題となる。

本研究は、昭和55年度文部省科学研究費補助金(一般D、課題番号565162、代表者 長谷川和義)の助成を受けておこなわれた。末尾ながらここに記し、謝意にかえる次第である。

参考文献

- 1) 木下良作: 石狩川河道変遷調査、科学技術庁資源局資料 第36号、1961年
- 2) 芦田和男・塩見靖国: 水路における砂礫堆の水理特性について、京大防災研究所年報第9号、1966
- 3) 鮎川 登: 流路形状と砂州の形状特性との関係、「沖積地河川における河床形態と流体抵抗の研究」(代表 岸 力)最終報告書、3、1975
- 4) Hasegawa, K and I. Yamaoka: The effect of plane and bed forms of channels upon the meander development, Proc. of J.S.C.E., No. 296, 1980
- 5) 藤田裕一郎・村本嘉雄・堀池周二: 交互砂州の発達過程に関する考察、土木学会第34回年講概要集 II-97、1979
- 6) 黒木幹男・岸 力・板倉忠興: 交互砂州の水理特性、文献3)最終報告書、5、1975
- 7) Engelund, F.: Flow and bed topography in channel bends, Jour. of Hy. Div. HY-11 ASCE, 1974
- 8) 池田・G. Parker・沢井: 河川蛇行に関する統一見解、土木学会第24回 水講演文集、1980