

II—25 迂曲状流路内における交互砂州の形状特性

北海道大学・工学部 正員 山岡 勲

同 上 正員 長谷川和義

同 上 学生員 渡辺 康玄

同 上 学生員 岡 睦夫

1. はじめに

すでに明らかにされてきたように、沖積蛇行の性質と状態は、その彎曲が生みだす遠心力の作用と、河床に形成される交互砂州の作用の両者によって規定される。これら二つの作用の水流に対する働きは、多くの場合、同調的なものであり、結果として現われる河床の洗掘形状は、両作用がそれぞれ単独に形成する形状を、線形的に足し合わせたものと見なすことができる。^{1) 2) 3)}しかし、蛇行の発達にともなう流路の延長に従って、交互砂州が分裂し、流路内で両作用が逆行する場合の生ずることがある。沖積蛇行におけるこのような形態の存在をはじめて発見し、分類を行なったのは木下⁴⁾であるが彼はこのような流路を「迂曲流路」と呼び、前述の同調的な場合の「蛇曲流路」と区別した。木下による迂曲流路のより明確な定義は、「/ 蛇行中に砂礫堆(交互砂州)が3個以上形成される」ということであるが、/ 蛇行中の同調的な砂州個数である2個を越える数の砂州の所在箇所では、流路の作用との間で何らかの対抗関係が生じていることになる。

迂曲流路は、木下の研究の対象となった石狩川においてかつて数多く見い出されたが、相次ぐショートカットと、自然短絡のために、現在はほとんど存在しない。しかし本道河川は、未だ自然河川の性格が強く、とりわけ中小の河川には迂曲箇所が多く認められるので、これらに関する研究は実用上も重要である。現在までに、迂曲状態を明確に意識してなされた研究は、木下のものを除いて極めて少なく、永納ら⁵⁾に限られるが、彼らは、中心角 306° の円弧水路中に交互砂州を発生させ、遠心力と逆向的な働きをもつ砂州に関する観測を行ない、興味深い性質を報じている。

本研究は、自然河川の迂曲形状を参考にして定めた実験水路中に交互砂州を発生させ、両作用の同調的および逆向的な発現によって生じた河床形状の性質を、昨年までに著者らが用いてきた二重フーリエ解析による手法によって明らかにしようとするものである。流路蛇行の発達要因である流線の河岸偏倚が主として河床起伏に基づくということは、迂曲の場合にも同様である。⁶⁾したがって、これらの研究は迂曲流路変動を考える上にも基礎的な知識を提供することになる。

2. 実験の目的と方法

(2-1) 実験の目的と方法

迂曲段階に達した蛇行流路の形状は、様々なパターンを示す。しかし、流路の変動過程を考える、あるいは水衝部を知り、河道の安定化を考える上で特に興味深い形態は、平面形状そのものというよりも、平面形状と砂州の組み合わせり方である。前章で触れたように、迂曲流路には流路の作用と砂州の作用が逆になる部分が表われるが、木下は、このような現象をその場所における砂州の接続形式の違いとしてとらえ、B型、C型の区分を行なっている。こうした接続形式の典型例は、多くの場合、/ 蛇行の曲頂を越えた下流側に現われるようである。

そこで、実験水路は、以下のような方法によって決めることにした。すなわち、(1)「石狩川河道変遷調査・附図」⁷⁾の中から迂曲形状としては比較的初期の発達段階(谷軸と流路接線のなす角(蛇行偏角) θ の最大値が 90° 前後の段階)にあるが、典型的な砂州の接続形式を含む地点を7箇所選ぶ。

(2) それらの形状を $\theta - \tilde{S}$ (流路長)にて表現してフーリエ解析を行ない、第1, 第2振幅成分をとり出しておのおのを平均化する。(3) これらの平均成分をもとに、蛇行中心が谷軸にそろう、振幅が実験架台に収まるような関数形を次式のように定める。

$$\theta = 1.47 \cos \left\{ \frac{2\pi}{432(\text{cm})} (\tilde{S}' - 1.39^{\text{cm}}) \right\} + 0.20 \sin \left\{ 3 \cdot \frac{2\pi}{432(\text{cm})} (\tilde{S}' - 1.39^{\text{cm}}) \right\}$$
ただし、 $\tilde{S}'$ は、流路の変曲点を原点によって測った流路長である。上式は第1項がsine generated curveに対応するが、第2項にその3倍の波

数の波が加えられた形をしている。このため同式で表わされる形状は、図-1,2 に示される如く、曲頂から下流側の曲率が緩やかになっており、自然河川によく見る形状を呈する。なお、従来までの表現と同様に曲頂位置に原点をとり、時計まわりが正となるように符号を定めると、曲率は次式となる。

$$\frac{1}{r} = - \frac{d\theta}{ds} = \frac{1}{46.90(\text{cm})} \cos \frac{2\pi}{432(\text{cm})} \tilde{s} - \frac{1}{114.59(\text{cm})} \sin \frac{6\pi}{432(\text{cm})} \tilde{s} \quad \tilde{s} = \tilde{s}' - 109.39 \text{ cm}$$

以上の線形をもつ幅22cm,高20cm,長/3.4mの矩形断面水路を、透明アクリル板によって作成し、既設の架台（可変勾配）上に設置する。これに篩砂を敷きならし、交互砂州を発生させるわけであるが、砂州の発生水理条件を確認するためと、迂曲内砂州形状との比較のために、同一断面を有する直線流路を用いた実験を行なう。

(2-2) 直線水路実験

本年度の使用砂は、中央粒径0.76mm,均等係数/1.27,比重2.546の珪砂であり、各実験に先だってこれらの測定が行なわれた。

直線水路における砂州発生実験は、6通り行なわれたが、典型的な形状が得られたのはST-4,5,6,8の4例であり、このうちST-6（常流）および8（弱射流）の水理量を用いて迂曲実験を実施した。なお一連の実験で給水は、循環用ラインポンプにより行なわれ、流量は給水バルブによって調節し、上部水槽の水位上昇速度によって測定した。河床形状の測定は、典型的な一波長区間を対象に、流下方向に9cm間隔、横断方向に/

cm間隔（23点）でポイントゲージを用いてなされ、また水深は、移動床の状態で観測区間の数断面につき、左右岸と中央で測定している。これらの水理量の一覧を表-1に掲げる。

		ME-5	ME-6	ST-6	ST-8	ST-4	ST-5
水路幅	B (cm)	22.0	22.0	22.0	22.0	22.0	22.0
流量	Q (cm ³ /s)	866.47	940.90	868.4	782.9	828.1	953.6
勾配	I	1/120	1/80	1/120	1/80	1/100	1/200
平均流速	U ₀ (cm/s)	28.54	29.70	30.65	35.59	31.83	27.61
平均水深	H ₀ (cm)	1.38	1.44	1.30	1.20	1.20	1.57
砂州波長	L (cm)	216	216(144)	260	189	189	(171)
フルード数	Fr	0.776	0.791	0.859	1.038	0.928	0.704
無次元掃流力	τ _A	0.098	0.153	0.092	0.128	0.102	0.067
摩擦係数	f	0.028	0.040	0.023	0.023	0.023	0.020
川幅水深比	B/H ₀	15.94	15.28	16.92	18.33	18.33	14.01
	B/H ₀ · I	0.133	0.191	0.141	0.229	0.183	0.070
無次元波数	2π H ₀ / L	0.020	0.021	0.031	0.040	0.040	(0.058)
流路蛇行長	L (cm)	432	432	—	—	—	—

表-1

(2-3) 迂曲水路実験

迂曲水路における河床勾配は、蛇曲水路などと異なり、敷砂を架台底面に平行にならすことによって設定するわけにはいかない。このようにすると谷軸に平行する部分が急となり、これに交差する部分が緩くなるので、流路中心線に沿って9cmごとに設けた観測断面について所定河床高を計算し、レベルによってこれを設定した。

河床形状の測定は、今年度新たに開発した形状読取装置（光反射をとらえるセンサーとパルシングモータを組み合わせたもので、0.1mmの分解能を有する）を使用し、各観測断面につき0.5cmの間隔で横断形状をとらえた。測定範囲は、明瞭な底面形状を示した/波長区間（49断面）とし、また装置の傾斜を補正するようにした。水面形および流速の測定は、河床を石コウにて固定化した後に行なわれ水面形は河床とまったく同様な方法で、流速は半波長（25断面）につき、横断方向2cm間隔（/2点）水深方向3mm間隔で、径3mmのプロペラ流速計を用いて行なわれた。

実験は、ST-6の水理量に対応するME-5と、ST-8に対応するME-6の二種類が行なわれたが、彎曲に伴う河床起伏の増大および平面形状の影響によって粗度が増加しており、表-1に見られるように必ずしも同一の水理量が実現していない。

3. 実験の結果

(3-1) Run ST-4,5,6,8の各実験は、定常状態に達するのにそれぞれ/80分,420分,30分,25分程度要した。このうち、ST-5は、掃流力が限界値に近く、長時間を要して縦筋状の河床から次第に交互砂州へ発達した。このときの砂州長は、非常に長く（流路幅の/5倍強）表-1に示す値は半波長である。後述するように半波長区間のデータを/波長とみなした解析においても他の実験例と同様な傾向を示すことは、長波長砂州の性格にかかわるものとして興味深い。比較実験の対象となったST-6は、

ST-4とともに、砂州発生条件としては小規模河床側に近く、このため初期には短対角州の発生が見られた。しかし、砂州への移行後は長めの波長を示し、形も美麗であった。ST-4では長時間にわたる通水中に / 度発生した砂州が消滅し、再び成長するというくり返しが現われている。ST-8は、弱い射流状態の実験であり、最も整った砂州の形成を見せたが、 $Fr \approx 1$ の実験につきものの線状跳水が時おり発生した。

(3-2) 迂曲流路実験では、Run ME-5,6ともに、通水と同時に曲頂部上流の内岸側 (図-1中のb附近) および、曲頂部下流の内岸側 (図-1中f 附近) からの洗掘がまず始まり、これを契機に前縁状のものが形成された。すなわち、曲頂上流では、内岸における掘れが水流を集中させ、これが直進して外岸に衝たり (図-1 c)、この点での洗掘を開始する。曲頂における砂州は、このようにして約2分程度で形成される。一方、曲頂下流では、内岸から斜め下流に伸びる掘れのほかに、すぐ上の水衝部で掘り出された砂の堆積が生じ、前縁が通常の砂州とは逆の、内にひっこむ弧形を描いた砂州が張り出すようになる。ME-5は、約20分で定常状態に達し、図-1のような底面形状を形成した。同図中の数値は、平均河床面から高度差をmm単位にて表示したものである。図から明らかなように最深部は流路曲率最大点の直上 c 附近にあり、平均面からの掘れは平均水深の3倍に達している。ここには外岸側壁に平行する形で砂州の前縁が存在するが曲りによる洗掘と砂州による起伏が同位相で重なり合っている。一方、次に続く砂州は、彎曲による洗掘とは逆位相をもって形成されているようであり、f~h の逆弧形の前縁を有するが、彎曲の影響で外岸の g 側が深く掘れている。このため、この部分の砂州の先端は舌状を呈し流れも、g の20cmほど上流から左右に分岐し、g の下流で合流している (文献6 参照)。この砂州は、木下の定義による「B型」の接続形態にあるものと見られるが、同時にまた永納らの定義による「外岸性砂州」に相当している。底面形状の大局的な様子は、以上のとおりであるが、詳細に観測すると、c から e にかけて、深掘れ砂による短波長の外岸性砂州が時おり成長してくるのが分る。これは、上述のB型砂州に合体したり消滅したり不安定である。

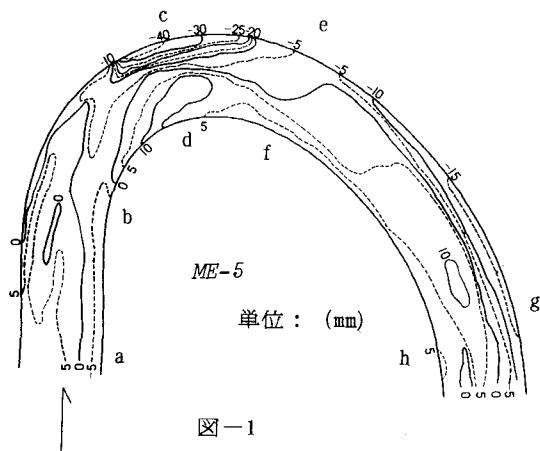


図-1

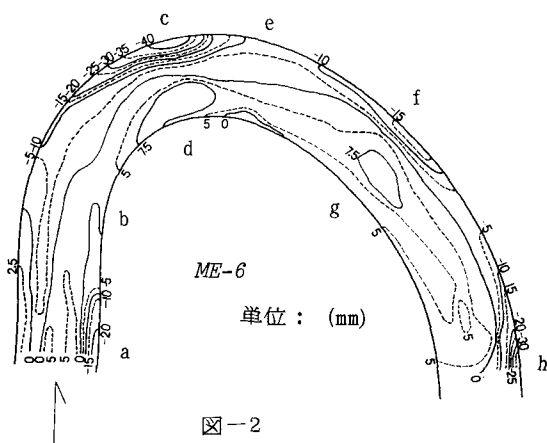


図-2

ME-6は、通水後17分ほどで定常状態となりME-5と似た形状を呈するが、図-2に示すとおり、重要な違いが見い出される。すなわち、a の洗掘深が20mmに達し、かなりの流量がこの部分に集中する。この流れは、蛇行して対岸の凹壁に衝り、河床を深くえぐるが、ME-5に比較すると最深部をはさむ深掘れ部の縦断勾配が、上流側で緩、下流側で急というように逆になっておりまた最深点はやや下流に移動している。砂州は外岸側壁に平行する形で d 側に付くが、これに続くものが小規模ながら図の e の部分に、曲りの作用とは逆むきになる形で現われる。後者は、ME-5のケースで述べた短波長の外岸性砂州に対応するものであり、伸びたり縮んだり不安定である。もう一つ下流の砂州は内岸性—すなわち曲りの作用と同調的な向きを有しており f から h にかけて全体的に外岸側が掘れている。この部分は詳細に見ると f の位置にも舌状の先端が出来ており、f の掘れを引きおこしているが、これを独立の砂州と見るか否かは明確ではない。とりわけ、砂州の先端にあたる h の深掘れは大

きい。eの外岸性砂州が伸び切れず、gの側から伸びる内岸性砂州が成長するという現象は、永納らの円弧水路では観察されておらず、迂曲流路に特有なものようである。eの砂州は、B型の接続形態をもつが、これを無視すれば、以下の砂州はC型の接続形態にあり、木下の観測結果と類似な現象が生じている。すなわち、fまたはhの部分は、もし側岸が可食性のものであれば、大きく削られる場所であり、これにともなう中州の形成が容易に生ずるように見える。実際、fまたはhにおける砂州の先端の形は、ME-5のものに比較しても、さらに丸味を帯びており、流れの停滞もはっきりしている。

4. 迂曲流路における河床形状の特徴

(4-1) 振幅スペクトル

昨年までと同様に、河床形状を平均河床面からの変位置によって表わし、これを平均水深 $\bar{H}_0$ によって無次元化して η とすれば、次式の様に二重フーリエ級数に展開し解析することができる。

$$\eta = \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \sin\left(\frac{i\pi x}{L} + \frac{j\pi y}{B}\right) \{A_{sij} \sin \frac{2j\pi}{L} + A_{cij} \cos \frac{2j\pi}{L}\} \quad \text{ここで } s \text{ 及び } n \text{ は、それぞれ流下方向軸および横断方向軸を平均水深 } \bar{H}_0 \text{ 及び流路半幅 } \bar{B}/2 \text{ にて無次元化したものである。また } i, j \text{ はそれぞれ、流路幅の2倍を基本周期とする } n \text{ 軸方向の波の波数、及び / 蛇行長を基本周期とする } s \text{ 軸方向の波の波数であり、} A_{sij}, A_{cij} \text{ は } i, j \text{ の波の正弦及び余弦振幅である (} \bar{H}_0 \text{ にて無次元化されている)。いま無次元量 } \alpha_{ij} = \sqrt{A_{sij}^2 + A_{cij}^2} \text{ より線スペクトルを求め、さらに } \phi_{ij} = \tan^{-1} A_{sij}/A_{cij} \text{ によって各波の位相を求めれば、河床形状の性質は、これらによって調べることができる。図-3 a, b, c, dはRun ST-6, 8 及びRun ME-5, 6 における } \alpha_{ij} \text{ を表わしたものである。ただし } i, j \text{ が } / 0 \text{ を越える高周波成分は省略}$$

図-3 a, b, c, dはRun ST-6, 8 及びRun ME-5, 6 における α_{ij} を表わしたものである。ただし i, j が $/ 0$ を越える高周波成分は省略

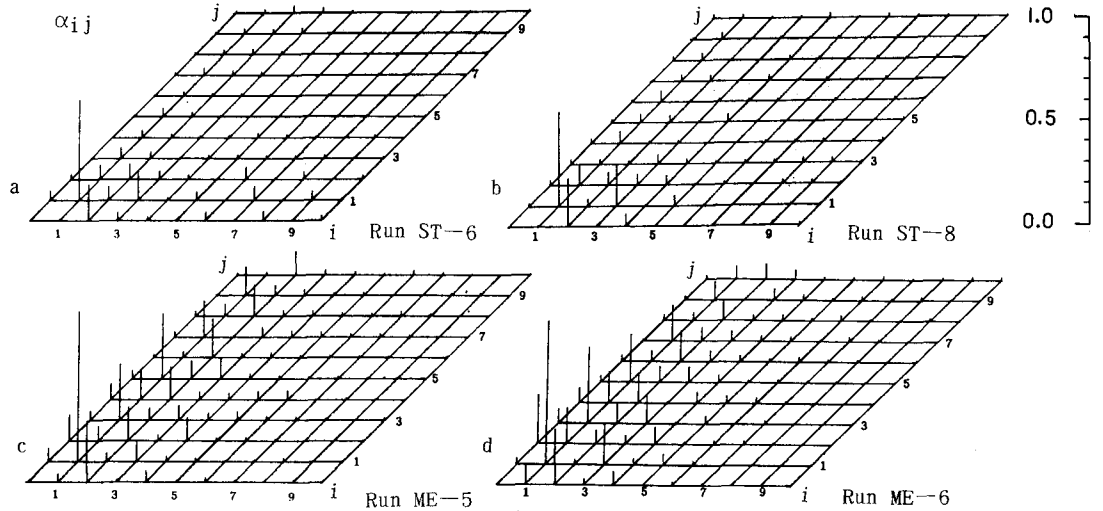


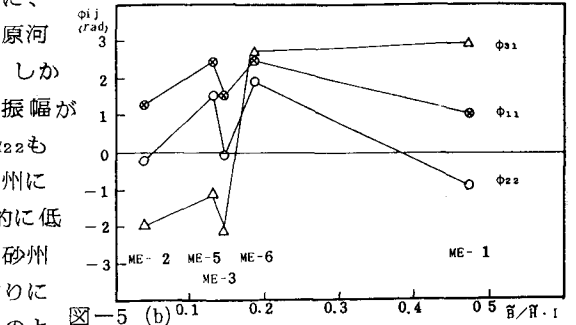
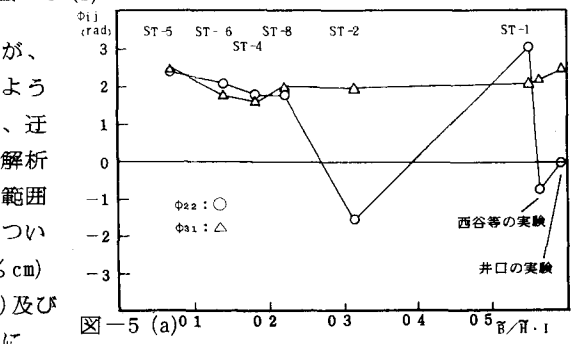
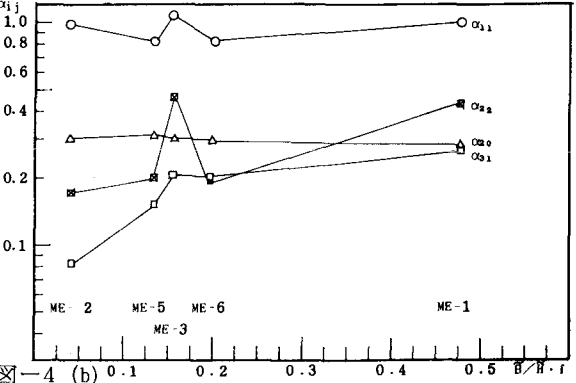
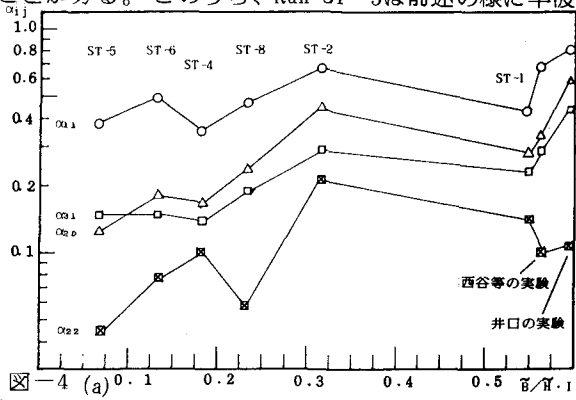
図-3

RUN NO	ME-5				ME-6			
主要成分振幅	順位	値	再現率 (%)	位相角 (rad)	順位	値	再現率 (%)	位相角 (rad)
α_{11}	1	0.801	29.2	0	1	0.804	30.8	0
α_{20}	2	0.308	40.4	0	2	0.288	41.1	0
α_{12}	3	0.255	44.7	-2.57	6	0.157		-2.57
α_{22}	4	0.209	47.9	3.00	4	0.196	47.1	-3.02
α_{01}	5	0.200	51.4	2.51	5	0.191	49.9	-0.74
α_{31}	7	0.155		2.74	3	0.211	44.1	0.30
RUN NO	ST-6				ST-8			
α_{11}	1	0.489	34.3	0	1	0.459	28.2	0
α_{20}	2	0.180	45.5	0	2	0.237	49.2	0
α_{31}	3	0.149	49.7	1.82	3	0.199	59.1	2.00
α_{22}	4	0.077	51.3	2.07	5	0.061	63.2	-2.30
α_{12}	5	0.070	52.8	-2.41	4	0.110	62.2	1.79
RUN NO	ST-4				ST-5			
α_{11}	1	0.348	20.8	0	1	0.372	25.3	0
α_{20}	2	0.169	32.1	0	4	0.127	44.7	0
α_{31}	3	0.138	36.5	1.67	2	0.142	29.5	2.46
α_{22}	4	0.099	38.5	1.82		0.045		2.44
α_{12}	5	0.092	41.0	1.43	5	0.123	49.3	0.11
α_{10}		0.052		0	3	0.136	36.8	0

表-2

している。直線の2つの実験を比較すると、主要な点で両者はほとんど違いがない。このことは他の実験についても同様であり、上位の振幅値を示す波数は、ほぼ等しい。このことをより端的に示したものが図-4(a)および表-2である。同図は、主要な α_{ij} を、 $\tilde{B}/\tilde{H}_0 \cdot I$ を横軸にとって比較したものであるが、第1位から4位までの順序が、ほとんど同じであるだけでなくそれらが砂州の区分パラメータとしてよく用いられる $\tilde{B}/\tilde{H}_0 \cdot I$ の関数として現われていることが分る。このうち、Run ST-5は前述の様に半波長（砂州/個分）のデータを/波長とみなして計算しているが、結果は他の実験と似かよったものになっている。このことは、長く伸びた砂州がやがて分裂する事実と思ひあわせて、興味深い。一方、Run ME-5,6 に関するスペクトルの結果は、s 軸方向の高周波成分が、 $j \sim 0$ に至るまで尾を引き、迂曲流路内の河床形状が予想以上に複雑であることを示している。こうした現象は、第1に、/蛇行中に砂州が3個以上（今の実験では4~5個）存在するため、もはや流路形状に関する波数と河床形状に関するそれ

が対応しなくなるために起るものと考えられ、第2に、前章で述べたような深掘れが、左右岸交互ではなく、外岸側にのみ数箇所にあられ、しかもそれらの波長が短いために生ずるものと考えられる。しかし、図-3 c, d ともに i が奇数の場合の j の偶数成分および、これと逆の i が偶数の場合の j の奇数成分が一様に低い値を示している。これは、河床形が半蛇行ごとに同一の形態を呈していることの証左であり、河床形状が基本的に流路形状によって規定されていることが分る。前章で触れた様にME-5はB型の、ME-6はC型の接続形態を有すると考えられるが、流路長を基本としたスペクトル図からはうかがいようがない。そこで、砂州長に焦点を合わせるために、迂曲長の半分のデータを取り出し、同様なフーリエ解析を行うことにする。ただし、砂州二個が含まれる範囲をME-5については、曲頂から約26cm、ME-6については、約35cm 下流の点から、半迂曲長（2/6cm）下の区間にとることにする。結果は、図-4(a), (b) 及び表-2 に示すとおりである。非常に興味深いことに、この様な扱いをすると、上位の5~6項によって原河床の再現が、かなりの程度可能になる（表-2）。しかも、図-4(b)に見られるように、 α_{11} 、 α_{20} の成分振幅が他の蛇曲実験とはほぼ同一の値をとり、また α_{31} 、 α_{22} も上位を占るようになる。ただし昨年来、蛇行内砂州に固有な成分として指摘してきた α_{22} の値は、相対的に低く現われる。これは、対象としている流路形が、砂州の/波長の間で正しく周期的になっておらず、曲りに伴う洗掘深が非周期的なためと考えられる。以上のよ



うに、曲頂下流の緩曲率部分に位置する砂州（ME-5では外岸性、ME-6では内岸性砂州）から数えて2波をとると、これらは見かけの変形にもかかわらず、蛇行内砂州の性質を明瞭に有している。逆に言えば、この様な解法においても、外岸性、内岸性の違いを単純にとらえることができず、かなり高波数域を問題にしなければならないことが分る。接続形態の違いに着目すればむしろ、図-1,2 にあらわした領域をデータとして解析すべきであるが、現在までに成し得ていない。

(4-2) 各成分波の位相

砂州形状をいくつかの成分波によって合成するためには、互いの位相差に関する知識が不可欠である。さらに、平面形状に対する位相は、水衝部や深掘れ部の位置を意味し、極めて重要である。図-5 (a) は、直線砂州の位相角 ϕ_{ij} を、 $i=j=1$ の波を基本にして表わしたものである。主要成分の内、 ϕ_{s1} がほぼ一定の 2 rad （約 $1/3$ 波長）を示すのが注目される。 ϕ_{s2} は、今年度実験では一定に近い値を示すものの、他の実験値には系統性がない。もとより直線流路内の砂州は絶えず前進しており、しかも波数 j に応じて前進速度が異なる可能性があるので、これらに関してはさらに検討する必要がある。図-5 (b) は、蛇行流路における成分波の位相角を、流路形状を基本にして表わしたものである。ただし、ME-5, 6の迂曲実験は、前節と同様、砂州2個分に相等するデータを解析しているが、対応する流路形状は、曲頂位置が同一で $2/6\text{ cm}$ の蛇行長、 46.9 cm の最大曲率を有するsine-generated curveを想定している。したがって、これらの値は比較の上でも問題がないわけではない。さて、図によると最も重要な $i=j=1$ の成分波の位相角 ϕ_{11} は、非砂州条件にあるME-2を含めて、 $1 \sim 2\text{ rad}$ （ $1/6 \sim 1/3$ 蛇行長）程度の値を示す。また ϕ_{s1} は、 $\bar{B}/\bar{H} \cdot I$ のある値を境に、正負に分れる様に見えるが、この事を断定するにはデータが少なすぎる様である。前節にも触れたとおり $i=j=2$ の波は、流路形の影響が強く現われている可能性があり、ME-5,6を並べて考えるには問題がある。これらを除いたときに ϕ_{s2} は、ゼロ近くの値を示すが、前述した前進性の影響も含めて検討が必要である。B型、C型の接続形態の違いを反映している可能性があるものは ϕ_{s1} である。すなわち、ME-5の外岸性砂州は、ME-6の内岸性砂州に対しておよそ半波長ずれた関係にあり、これが ϕ_{s1} の正負を分けている様に思われるが、先述の様に $\bar{B}/\bar{H} \cdot I$ によって普遍的に生ずる現象かもしれない。

5. まとめ

- (1) 自然河川を参考にして定めた迂曲状流路に交互砂州を発生させた結果、水理条件の違いによって曲頂下流に外岸性砂州の卓越する形態(B型接続)と、内岸性砂州の卓越する形態(C型接続)とが生じた。
- (2) 両形態とも、曲頂の上流に最深部が発生し、内岸側に固定砂州が現われる。
- (3) 迂曲流路内の全般にわたる河床形状は複雑であり、迂曲流路長を基本周期とするスペクトル解析では、高波数にわたって有効値が存在する結果となる。原因の一つに、流路形状と河床形状の基本周期の不一致がある。
- (4) 砂州波長を基本周期にとったスペクトル解析では、蛇曲実験の結果と多くの共通点を示す様になり、5項程度の主要成分によって、原形状をかなり再現できる様になる。しかし、B型、C型の接続形態の違いを感知するまでには至らない。
- (5) B型、C型の違いを反映している可能性があるものに、 $i=3, j=1$ の波の位相角がある。

謝辞：本研究を進めるにあたり、昭和57年度文部省科研費（一般B57460148 代表 山岡勲）の助成を受けた。記して謝意にかえる次第である。

参考文献

- 1) 長谷川・山岡・岡：交互砂州の流路蛇行による変形、土木学会北海道支部論文報告集第37号、1981、2
- 2) 長谷川・山岡：発達した交互砂州の性状に関する実験と解析、土木学会第26回水理講演会論文集、1982、2
- 3) 長谷川・山岡・田中：流路蛇行の影響を受けた河床波の形状特性、土木学会北海道支部論文報告集第38号、1982、2
- 4) 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、11
- 5) 永納・福岡・山坂・竹内：彎曲水路の交互砂州、土木学会第37回年講概要集Ⅱ-276、1982、10
- 6) 長谷川・山岡・渡辺・笹島：迂曲流路内の砂州上の流れに関する実験と理論、土木学会北海道支部論文報告集第39号、1983、2
- 7) 木下良作：石狩川河道変遷調査一付図一、科学技術庁資源局資料第36号、1960、5