

蛇行流路の形成過程に関する研究

村 本 嘉 雄 ・ 藤 田 裕 一 郎

STUDIES ON FLUVIAL PROCESS OF STREAM CHANNEL MEANDERING

By Yoshio MURAMOTO and Yuichiro FUJITA

Synopsis

In addition to the previous experiments of stream channel process, the results of two experiments which have been conducted by the use of the stream channels with different initial bank height are reported. One of them forms a braided channel because of steep bed slope caused by immediate collapse of side bank in the beginning of experiment. The condition of meandering channel formation and the characteristics of the bars in channels with bank erosion is examined by the application of $BI/R-U_*|U_{*c}$ criteria.

The hydraulic analysis of the process of channel meandering is developed, considering that meandering bends progress by the concentration of discharge in main stream which is formed between front of bar and outer bank line. In this analysis, orthogonal curvilinear co-ordinates are taken along the center line of main stream on the initial bed plane and in-flow to main stream from upstream side bar and out-flow from main stream on downstream side bar are considered, and outer bank erosion rate is assumed to be in proportion to depth and to third power of velocity. The computational procedure are very complicated and several assumptions are introduced. The analytical results show the characteristics of meander development and agree with the results of experiment.

1. は し が き

蛇行流路を取扱った研究の中で、とくにその形成に関してこれまでに行われた研究は、

- (1) 側岸固定流路内に生じる蛇行流あるいは交互砂州に関する研究
- (2) 側岸の交互侵食を伴う流路蛇行（自由蛇行）に関する研究

に大別される。(1)には、基礎式の線形化によって河床あるいは水流の安定性を吟味して、砂州の発生条件や卓越波長を考察した研究、および発達した砂州の形成領域と波長・波高・移動速度などその特性量を検討した研究がある。一方、(2)は実験水路での流路変動に関する基礎研究が主であって、種々の条件下での実験データが集積されつつあり、また、近年実河川での側岸侵食を伴う蛇行流路の変動に関する継続的な観測調査の結果^{1,2)}などが報告されてきている。**Table 1**に側岸侵食性流路を用いて行われた蛇行に関する主な実験条件を示した。これらの実験は流入部の攻撃角や給砂の有無によって分類され、初期の研究には攻撃角を与えたものが多いが、交互砂州と流路蛇行の関連が指摘³⁾されてからは攻撃角を与えた実験は少なくなってきた。

前報⁴⁾では、従来の自由蛇行の実験でふれられていない蛇行流路の発達過程における土砂収支を詳細な測定によって明確にし、蛇行流路の発達機構について考察した。本報では、その中で指摘するにとどまった蛇行の発達に及ぼす河岸高の影響について追加実験を行い、その結果について考察するとともに蛇行流路の形成条件と蛇行の発生に伴う砂州の特性量の変化について検討する。また、前報での考察に基づいて蛇行発達過程に関する一次元的解析を試み、解析結果ならびに実験値に対する適用性について考察する。

Table 1. Previous experiments on stream channel process with bank erosion.

Experimentalist (year)	Dimension of Experimental Flume Width × Length	Bed Material Diameter (mm)	Initial Stream Channel Width and Shape (cm)	Initial Bed Slope	Entrance Angle	Discharge (l/s)	Depth (cm)
Friedkin ¹⁰⁾ (1945)	4m × 14.6m	silt, sand $d_{50}=0.02\sim1.5$	10~50 trapezoid	1/333~1/111	0, 30°~90°	0.28 ~ 12.2	1.5 ~ 9.0
Nagai ¹¹⁾ (1955)	11.6 × 36.6	mainly sand/silt=2/1 sand $d_{50}=1.0$	10~40 trapezoid	1/50	0, 45°	0.6 ~ 1.2	0.4 ~ 0.9
Aono ¹²⁾ (1957)	2.2 × 18.0	sand $d_{50}=0.51$	8~20 trapezoid	1/50~1/500	0	0.2 ~ 1.6	0.5 ~ 2.0
Sawada ¹³⁾ (1958)	2.2 × 18.0	sand $d_{50}=0.51$	10 trapezoid	1/100~1/200	15°~45°	0.2 ~ 1.2	
Kinoshita ¹⁴⁾ (1959)	0.8 × 3.6	silt, sand $d_{50}=0.0015\sim0.8$	3.0~13 rectangular	1/9~1/30	0, 45°	0.05 ~ 0.11	1.0 ~ 2.5
Wolman ¹⁵⁾ (1961)	1.2 × 15.6	mainly sand $d_m=0.77$ sand $d_{50}=0.67$ 2.0	12.8~25.6 trapezoid	1/141~1/1000 1/100~1/416	0	0.28 ~ 1.9 0.90 ~ 7.9	
Stebbins ¹⁶⁾ (1962)	0.9 × 8.1	sand $d_{50}=1.0$	5~40 rectangular	1/72~1/677	0	0.052 ~ 4.17	0.5 ~ 2.7
Ackers ¹⁷⁾ (1964)	30 × 90	sand $d_{50}=0.16$ 0.34	76~297 trapezoid	1/348~1/2439	0	11.1 ~ 148.3	5.4 ~ 20.6
Rozovski ¹⁸⁾ (1967)	6 × 36	sand $d_{50}=0.40$	47, 100 trapezoid, rectangular	1/143	0	steady unsteady 0.5~8, 1.3~9	20
Bazilievitch Hasegawa, Kudo, ¹⁹⁾ (1968)	0.5 × 11.5	sand $d_m=0.46$	10 rectangular	1/30~1/100	0	0.04 ~ 0.25	
Adachi ²⁰⁾ (1969)	2 × 25	sand $d_m=0.43$		1/115~1/14	0	1.0 ~ 2.4	1.0 ~ 2.0
Ackers ^{21, 22, 23)} (1970)	10.36 × 91.44	sand $d_{50}=0.15$		1/700~1/303	0	6 ~ 90	2.19 ~ 7.80
Schumm ²⁴⁾ (1972)	7.32 × 30.5	sand $d_m=0.7$	30.5 rectangular	1/50~1/1000	0, 40°	4.25	1.65 ~ 5.18
Hickin ²⁵⁾ (1972)	1 × 3.7	quartz sand $d_{50}=0.454$ $d_m=0.499$	8.5	0.0087~ 0.070	0	0.0193~ 0.153	0.2 ~ 0.7
Bordas ²⁶⁾ (1973)	15 × 28	sand $d_m=0.22$	20~200 60	1/167 1/100~1/500	0	4	
Yamaoka ²⁷⁾ (1975)	0.8 × 15	sand $d_{50}=0.26$	11 triangle	1/50~1/100	0	0.235~ 0.4	

2. 蛇行流路の形成に関する実験的検討

2.1 蛇行の形成に及ぼす初期河岸高の影響

蛇行形成後の流路形状に対する初期横断形状の影響は比較的小さいといわれているが、これまでの実験から形成過程では河岸高の大きい方が交互の蛇行拡幅状態が顕著になるのが遅く、また振幅の増大速度も低い傾向にあることが指摘されている⁴⁾。この影響を明確にするために Exp. XII および Exp. XIII の2ケースの実験を行った。実験条件はこれまでのもの^{4,5)}とまとめて **Table 2** に示すが、Exp. XII および Exp. XIII は Exp. XI に対して初期河岸高のみそれぞれ4倍および2倍になっている。つぎにこれらの実験結果を主に Exp. XI と比較して検討する。

Table 2. Initial conditions of experiments.

Exp. No.	Cross Section of Channel (Trapezoidal shape)			Bed Slope	Stream Length (m)	Dis- charge (l/s)	Flow Duration (hr-min)	Notation
	Bottom Width (cm)	Side Slope	Depth (cm)					
I-1 -2	100	1 : 1	20	1/200	130	7.5 15.0	100-00 30-19	
II	100	1 : 1	20	1/200	128	15.0	28-41	
III	50	1 : 2	10	1/200	120	6.0	71-26	
IV	50	1 : 2	10	1/200	110	15.0	25-00	
V U.R. D.R.	50	1 : 2	10	1/200 1/500	110	6.0	55-30	Two Step slope
VI U.R. D.R.	50	1 : 2	10	1/200 1/500	110	15.0	37-30	"
VII	50	1 : 2	10	1/200	110	6.0~30.0	31-00	Varying Flow
VIII	25	1 : 2	5	1/200	110	5.0	22-00	
IX	50	1 : 2	10	1/200	110	15.0	30-00	Left side: loose Right side: rigid
X	100	1 : 2	20	1/200	42.3	20.0	17-21	Sand Supply
XI	50	1 : 2	10	1/200	42.8	15.0	12-07	"
XII	50	2 : 1	40	1/200	42.4	15.0	44-35	"
XIII	50	1 : 1	20	1/200	42.8	15.0	15-40	"

U.R.: Upstream Reach, D.R.: Downstream Reach

Exp. XI~XIII の3ケースはいずれも通水初期には一様拡幅状態がみられるが、河岸高の大きいほど上流から中流にかけての河岸上昇量が大きい。通水時間 $T=4\text{hr}$ における上、中流区間での平均河床上昇量は河岸高の大きい Exp. XII, XIII, XI の順にそれぞれ約 15 cm, 6 cm および 4 cm であって、下流区間の平均河床こう配の増大をもたらしている。一方、流路幅はそれぞれ 1.15 m, 1.0 m および 1.25 m であって側岸斜面の急な Exp. XII の初期の河岸の崩落量が大きく、河岸高の低い順に拡幅速度が増大する傾向は通水初期では明確でない。しかし、その後は河岸高の差による拡幅速度の差が明確になって、 $T=10\text{hr}$ では Exp. XII, XIII および XI の流路幅はそれぞれ 1.3 m, 1.7 m および 2.0 m となる。この一様拡幅過程について、側方侵食を伴う河床変動の一次元解析法^{5,28)}を適用した結果は、Exp. XI と Exp. XIII では実験値と比較的良好一致したが、Exp. XII では初期の河床上昇量に関して実験値との差が大きく、このような場合には、初期の崩落完了後の流路形状を初期条件として与えることが必要である。

さらに、蛇行拡幅の特徴である流路幅の流下方向への波状的变化は、Exp. XI では $T=6\text{hr}$ 、Exp. XIII では $T=8\text{hr}$ にみられるが、Exp. XII では $T=23\sim 25\text{hr}$ であって河岸高の相違によって顕著な差が生じ

ている。この蛇行幅過程は、Exp. XI では交互砂州の発達に対応して現れたが、Exp. XII および Exp. XIII の砂州と蛇行の走時曲線を示すとそれぞれ Fig. 1 および Fig. 2 のようになり、Exp. XI の場合⁴⁾に比してともに砂州の走時曲線の乱れは大きく、砂州先端と蛇行彎曲頂点との対応も悪い。Exp. XII では

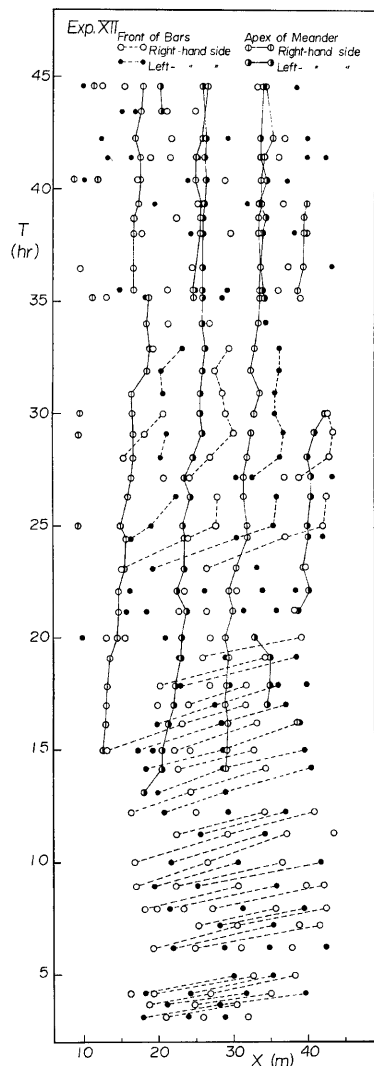


Fig. 1. Migration of bars and location of meander bends in Exp. XII.

$T=15\text{hr}$ で緩かな彎曲が形成され、それが $T=35\sim 40\text{hr}$ まで発達を続けるが、砂州は彎曲とは無関係に進行し波高も約 2 cm と小さい。この彎曲は、上流端における給砂量分布に僅かな偏りが生じて流入位置が流路中心からずれたために形成されたものと考えられる。 $T=27\text{hr}$ からの砂州の停止も彎曲の発達に対応したものではなく、幅が進み砂州位置と主流位置が一致しなくなったことに起因しており、そのため砂州の後退すら生じている。 $T=30\text{hr}$ 以降になると主流の分裂や激しい変遷がみられ、網状流路の様相を呈し始め、砂州間には時間的な対応がつきにくくなる。また、幅の進行も主流路が側岸近くに存在する時に限られ、新たな彎曲部の形成もみられる。このような網状流路の発生は Exp. I~XI のうち定常流量実験ではみられなかったものである。

一方、Exp. XIII の場合も Exp. XII と同様の流入部の偏りによって $T=4\text{hr}$ 以後上流からつぎつぎに彎曲が形成され下流に伝播したが、それに対応して砂州も上流から順次停止しながら発達し、 $T=8\sim 10\text{hr}$ では Exp. XI と類似した蛇行の発達過程を示してい

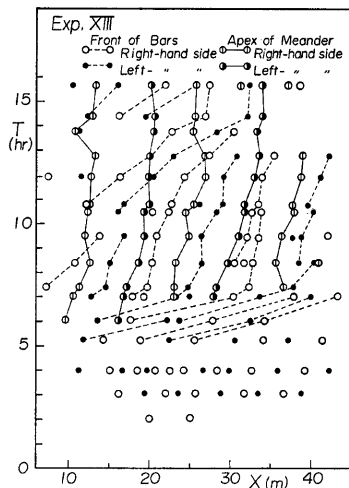


Fig. 2. Migration of bars and location of meander bends in Exp. XIII.

る。しかし、その後上流端での給砂量を制御して流入位置を水路中心線に沿うように修正したところ、上・中流部に波高約 4 cm の発達した砂州が形成され、約 5 cm/min の速度で流下し始め、この影響で彎曲に対応した砂州も前進を再開した。このため、 $T=13h30'$ に $x=37$ m の転向部で cut off が起こり、 $x=30$ m より下流の主流部に急激な河床低下が生じ兩岸に河岸段丘が形成され、また上・中流部の砂州も変形と波高の減少を生じている。これらの現象は蛇行の発達には水衝部の固定が最も重要であることを示している。

以上のように、Exp. XI と Exp. XII および Exp. XIII とでは流路の形成過程にかなりの相違がみられるが、つぎに流路状態の違いと水理条件との関連について検討を行う。

2.2 蛇行流路の形成条件

蛇行流路が形成される水理条件については、従来主に側岸固定水路における砂州の発生について検討されているが、側岸侵食性流路での実験値を蛇行・非蛇行に分類して整理したものは少ない。最近砂州形成条件（領域区分）のパラメーターとして提案されている無次元量 BI/R （あるいは BI/h ）と $U_*/U_{*c}^{0.7,8)}$ を用いて、Table 2 の Exp. I~XIII および Table 1 に示した従来の側岸侵食性流路での実験結果を検討する。ただし、 B は流路幅、 I は河床こう配、 R は径深、 h は水深、 U_* は摩擦速度および U_{*c} は限界摩擦速度である。

従来の実験結果は、主に流入部の攻撃角（流入角）や給砂などの上流端条件が蛇行形成過程に差異を生じさせ、給砂の有無は主として上流区間に、また攻撃角の変化はほぼ全区間に影響するという傾向を示している。攻撃角の無い場合、一般に蛇行の形成は、一様な拡幅と交互砂州の発達・進行、砂州の停止と交互の蛇行侵食という過程を経るので、ここでは流路の状態をつぎの 3 つに分類する。

- (i) 砂州も蛇行もみられない状態
- (ii) 砂州は発生しているが進行が速く、側岸には明確な彎曲部が生じていない状態
- (iii) 側岸に明確な交互の彎曲があって砂州はほぼ停止しており、流路が蛇行している状態

なお、Exp. XII の網状流路は (iii) に含めている。

Fig. 3 は Exp. I~XIII のうち定常流量の実験結果を整理したものであって、同図には鮭川⁶⁾、池田⁷⁾ および黒木ら⁸⁾ による側岸固定流路の領域区分をそれぞれ一点鎖線、破線および実線で記入しており、各領域の説明は Table 3 に示されている。実験値は各領域区分の境界付近に混在しているが、(i)~(iii) の流路状態ごとにまとまりをみせている。これらの実験で砂州の形成領域は

$$1.3 < U_*/U_{*c} \leq 3.5(BI/R)^{1/4} \quad \text{および} \quad U_*/U_{*c} \leq 2.4(BI/R)^{-1/10} \quad \dots\dots\dots(1)$$

そのうち蛇行形成領域は

$$1.3 < U_*/U_{*c} \leq 3.0(BI/R)^{1/4} \quad \text{および} \quad U_*/U_{*c} \leq 2.0(BI/R)^{-1/10} \quad \dots\dots\dots(2)$$

となっていて、単列砂州領域がほぼ自由蛇行の形成領域にあたっており、交互砂州が充分に発達するのと同時に蛇行に移行すると考えられる。また、砂州発生の U_*/U_{*c} 上限値は池田や黒木らの値の約 $1/2$ であって、側岸が非粘性で侵食されやすい条件では速かな拡幅のために大きな U_*/U_{*c} の値が維持されず、実験値は図中を蛇行発達の早いものほど急速に右下方に移動する (Fig. 5 参照)。上流区間は、無給砂の場合には河床低下や Armouring のため砂州は形成されず領域区分とも一致しているが、給砂した場合は中・下流区間と同一領域にあっても砂州・蛇行とも発生しにくい傾向にあって、砂州の発達に必要な流入部の長さ（助走区間）が存在すると考えられる。

Table 1 に示した従来の実験のうち攻撃角の無いものについて同様の検討をすると Fig. 4 のようであって、Ackers¹⁷⁾ および Ackers-Charlton^{22,23)} の実験値以外は Fig. 3 と類似した傾向を示すが、実験区間長の短い側岸侵食実験²⁸⁾ で砂州が発生しなかったのは Fig. 3 の給砂時の上流区間と同じ現象であると思われる。Ackers および Ackers-Charlton の実験値は他の実験値より 1 order ずれた形で流路状態別にまとまっている。これは、彼等がこの種の実験としては小さい 1/1000 前後の河床こう配や粘性のある河岸材料を用いたことなどに基因すると考えられ、Fig. 3 の場合でも河床こう配 1/500 の実験値は 1/200 の実験

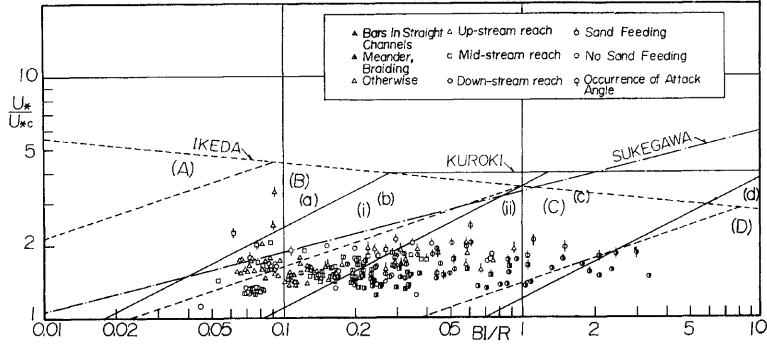


Fig. 3. Domain of meandering channel formation.

Table 3. Explanation of Fig. 3.

Classification	Sukegawa	Ikeda	Kuroki
No Appearance of Bars	(i)	(A)	(a)
Appearance of weak Bars or Transition	(ii)	(B)	(b)
Appearance of Alternating bar		(C)	(c)
Appearance of Double bars or Braiding		(D)	(d)

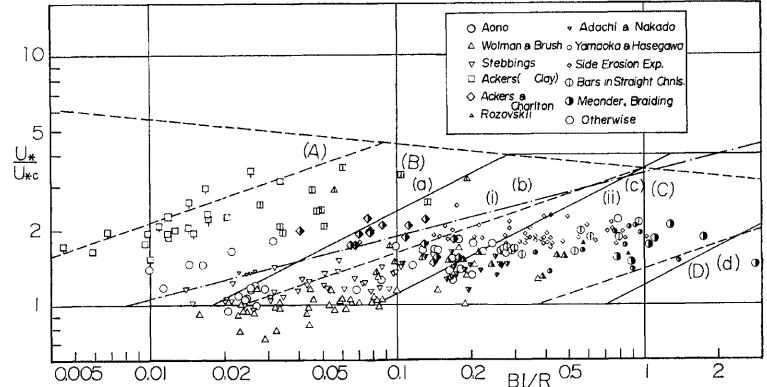


Fig. 4. Domain of meandering channel formation.

値に比して砂州の存在範囲が左方に寄る傾向がみられた。しかし、このような傾向の現われる理由については今後他の水理量などとの関連から追究していく必要がある。

つぎに、Fig. 5 には上流端に攻撃角が与えられた実験値が検討されている。データは少ないものの Fig. 3 および Fig. 4 に比して広い範囲で蛇行が発生するようである。さらに Fig. 5 には Exp. XI~XIII の下

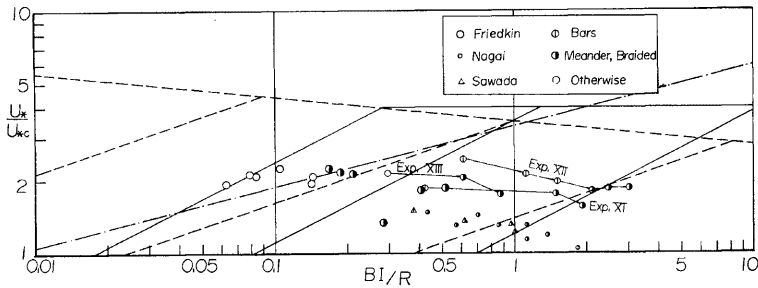


Fig. 5. Domain of meandering channel formation (experiments with angle of attack).

流路の実験値の時間的変化も示されているが、これらは前述のように図中をやや右下がり移動しており、網状流路の Exp. XII は Exp. XI および Exp. XIII に比して大きな U^*/U_{*c} の値を維持していることがわかる。

以上の検討によって、側岸侵食性流路における蛇行の形成領域の概要を把握することができたが、用いた実験値の中には流路状態の詳細が不明確なものも含まれており、さらに精確な検討を行うにはこの点が明確な実験値の蓄積が必要である。また、領域区分図の無次元量についても、 BI/R 軸に沿って河床こう配の差違によって実験値が別れる傾向にあって、今後理論的な面をも踏まえた検討を進めていかねばならない。

Fig. 3 の検討で明らかになったように、Exp. I～XIII の場合は、ほとんどの蛇行形成は交互砂州の充分な発達直後に起きている。したがって、次節でこの充分に発達した砂州の特性を把握するために、直線流路と蛇行流路形成後における砂州の特性量の差違について検討する。

2.3 蛇行形成過程における砂州特性量の変化

砂州の特性量としては、波長 L_B 、波高 Z_B 、幅 B 、移動速度 V_B などがあるが、著者らはこれまでの研究⁵⁾においてこれらの特性量の間につきのような関係を指摘している。

$$L_B \sim B \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$L_B \sim Z_B \quad \dots\dots\dots (4)$$

および流量と砂州の移動速度との対応が良い場合には

$$V_B \sim L_B^{-2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

蛇行振幅開始の限界時における砂州の特性量について検討するために、直線流路時と蛇行流路時について(3)～(5)式の対応関係を調べるとそれぞれ Fig. 6, Fig. 7 および Fig. 8 のようである。

Fig. 6 の流路幅と波長とはほぼ(3)式の対応関係にあるが、蛇行時と直線時とは分離されている。蛇行時の実験値は直線時より上方にあって、流量 Q の大きい Exp. II, Exp. IV および Exp. VI では $L_B > 10.5\text{m}$ の範囲に、また小流量の Exp. III, Exp. V および Exp. VIII では $L_B > 8\text{m}$ の範囲に集中している。しかし、蛇行流路では流路幅 B のとり方に任意性があるので(3)式の比例定数について蛇行時と直線時の相違を明確にするにはさらに詳細な検討が必要である。Exp. XII は網状流路時の値を検討しているが、Exp. XI, Exp. XII および Exp. XIII は Exp. IV と同じ領域に入っている。蛇行形成が開始する限界時の流路幅は一樣振幅状態が維持される最終時の幅であって重要な意味を持つと考えられるが、この点に関しては今後十分な検討を行う必要がある。

Fig. 7 の波長と波高の関係は、蛇行時のものが波長・波高とも大きい領域に入っていて、砂州が十分に発達して直ちに蛇行したことを裏付けている。しかし、Exp. XIII は小さい波長・波高でも蛇行していて、流路の流入部の偏りによる蛇行形成と対応しており、また Exp. XII では網状流路形成後の方が波高が減少し、発達過程にある砂州が網状流路発生時で減衰していくものと考えられる。波高は流量の大きい方が大

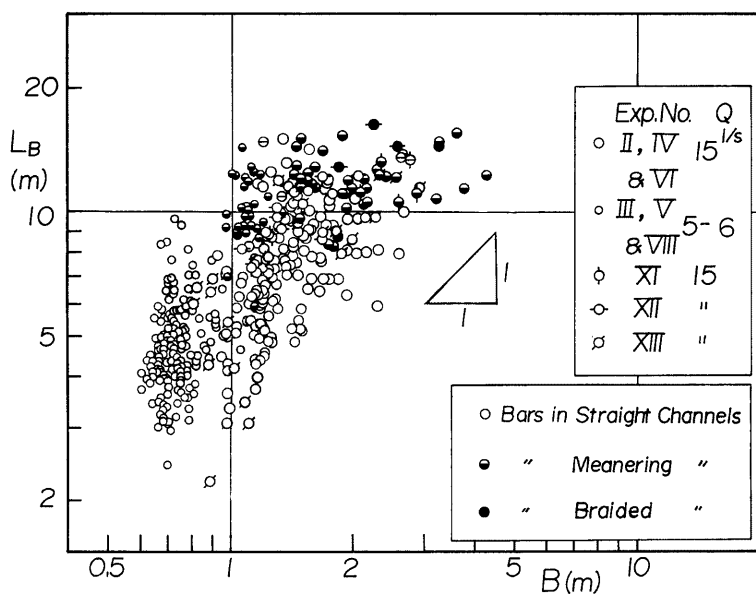


Fig. 6. Relations between channel width (B) and bar length (L_B) in straight channel and meandering channel.

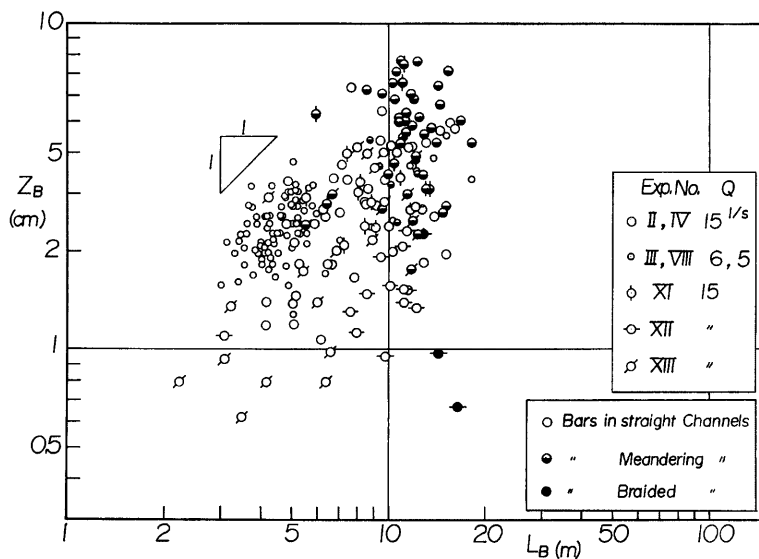


Fig. 7. Relations between length (L_B) and height (Z_B) of bars in straight channel and meandering channel.

きく、蛇行形成時の波高は $Q=6\text{ l/s}$ で約 2.5 cm 以上、 $Q=15\text{ l/s}$ で約 4 cm 以上となっている。

最後に、Fig. 8 に示した波長と移動速度との関係は、給砂した場合でも直線時は (5) 式の関係にあり、蛇行開始限界の波長以上となると移動速度が急激に低下することを示している。しかし、Exp. XII では網状流路発生後でも移動速度は大きく、このような流路状態に砂州はほぼ無関係であると考えられる。

以上のように、初期の堆積によって河床こう配が約 1/100 に増大した Exp. XII を除けば、給砂条件、河岸高の条件などに無関係に中・下流区間には同じ特性を持った砂州の形成されることが明らかになった。また、これまでの実験に関しては、蛇行の発生する限界時の砂州の特性量もほぼ把握することができ、このような特性量が蛇行形成過程の初期には維持されているものと考えられる。一方、網状流路では、発達領域にあった砂州が拡幅や河床こう配の増大による水理条件の変化によって発達が阻止され、減衰する領域に入ら場合に生じると考えられる。今後このような条件について実験的・理論的研究を進めていかねばならない。

次章では、上述のように砂州形状の変化が一定状態に漸進し、移動速度が低下して、水衝部が固定された直後に現われる蛇行流路の発達過程に関する水理学的な解析法について考察する。

3. 蛇行流路の発達に関する解析

3.1 基礎式

前報⁴⁾において、蛇行流路の形成機構を滞筋から砂州上に拡がる主流路に注目して、(1) 主流に沿う河床変動、(2) 彎曲部外岸の侵食、(3) 砂州上の侵食と堆積、(4) 砂州の発達の4つの機構が結合したものであることを指摘した。このうち(3)は(1)に付随したものとすれば、流下方向に一樣な蛇行が連続して発達する場合の水理学的モデルと一次元解析の基礎式はつぎようになる。

Fig. 9 に示すように、空間に固定した座標系として初期流路の中心線を x 軸、それと直角に y 軸、および $x-y$ 平面と垂直上方に z 軸をとり、流路の変化過程に伴って移動する直交曲線座標系として $x-y$ 平面上に主流路の中心線に沿って x_1 軸、それと直交する方向に x_2 軸、および $x-y$ 平面と垂直上方に x_3 軸をとると、 x, y, z 座標と x_1, x_2, x_3 座標との関係はつぎようになる。

$$x = \int_0^{x_1} \cos\theta(x_1) dx_1 - x_2 \sin\theta(x_1) + x_0 \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$y = \int_0^{x_1} \sin\theta(x_1) dx_1 + x_2 \cos\theta(x_1) + y_0 \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$z = x_3 \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 $\theta(x_1)$ は x_1 軸と x 軸のなす角、 (x_0, y_0) は x_1, x_2, x_3 座標原点の x, y 座標である。

流下方向に一樣な蛇行が連続して発達する条件では、流路の平面形状 $F(x, y)$ は蛇行の半波長 l で周期的変化をするのでつぎの関係がある。

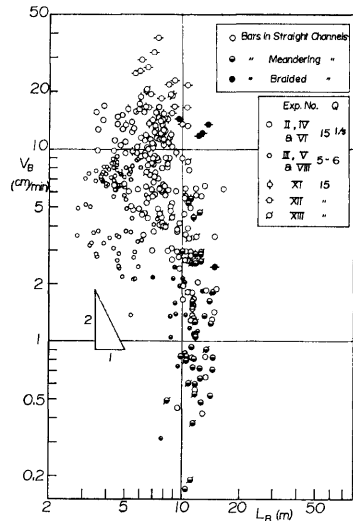


Fig. 8. Relations between length (L_B) and migration velocity (V_B) of bars in straight channel and meandering channel.

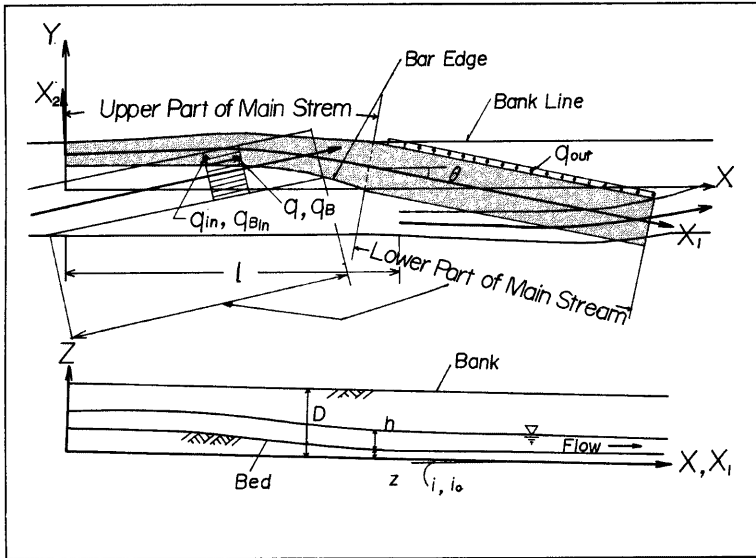


Fig. 9. Definition sketch and co-ordinate systems.

$$F(x+l, -y) = F(x, y) \quad \dots\dots\dots(9)$$

外岸の侵食に対して流量の集中が支配的と考えられる^{4,9)}ので、砂州上の流量が順次滞筋に沿う主流路（主流の上流区間）へ横流入するものと仮定すると、Fig. 9 に示したように砂州上の単位幅の流量 q 、流砂量 q_B のうち主流路に直角な成分 q_{in} 、 $q_{B in}$ が主流路に横流入する。主流路の断面を上流区間では砂州前縁から外岸（凹岸）に至る長方形、砂州上の下流区間では上流区間の終端の幅をもつ長方形で近似し、さらに下流区間では主流部以外の砂州上へ分散する流れを横越流流量 q_{out} で表す。以上のモデルから主流に沿う河床変動に関する一次元解析の基礎式はつぎのように表される。

すなわち、流路の形状変化が緩慢な場合を考えると、水流の連続式、運動方程式および Manning の抵抗則はそれぞれ

$$\frac{\partial Q}{\partial x_1} = \begin{cases} -q_{in} & (0 \leq x_1 \leq x_{1B}) \\ -q_{out} & (x_{1B} \leq x_1 \leq x_{1L}) \end{cases} \quad \dots\dots\dots(10)$$

$$I_e = i_0 \cos \theta - \frac{\partial z}{\partial x_1} - \left(1 - \frac{\alpha}{g} \frac{Q^2}{B^3 h^3}\right) \frac{\partial h}{\partial x_1} + \frac{\alpha}{g} \frac{Q^2}{B^3 h^2} \frac{\partial B}{\partial x_1} - \frac{\alpha}{g} \frac{Q}{B^2 h^2} \frac{\partial Q}{\partial x_1} \quad \dots\dots\dots(11)$$

$$U = \frac{Q}{Bh} = \frac{1}{n} R^{2/3} I_e^{1/2}, \quad \begin{cases} R = Bh / (B + 2h) & (0 \leq x_1 \leq x_{1B}) \\ R \approx h & (x_{1B} \leq x_1 \leq x_{1L}) \end{cases} \quad \dots\dots\dots(12)$$

となる。ここに、 Q は主流路断面流量、 q_{in} 、 q_{out} はそれぞれ単位幅当りの流入、流出流量で流出を正にとる。また、 x_{1B} 、 x_{1L} はそれぞれ上流区間、下流区間の終端の x_1 座標を表し、 I_e はエネルギーこう配、 i_0 は x 軸に沿う河床こう配、 z は河床高、 B は主流路の幅、 U は平均流速、 α はエネルギー補正係数、 g は重力加速度および n は Manning の粗度係数である。

一方、流砂の連続式は

$$B \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{1 - \lambda_b} \frac{\partial Q_B}{\partial x_1} = \frac{1}{1 - \lambda_b} \{ (1 + \kappa B_0) q_s + \alpha_B (1 + \kappa B_1) q_{B in} \} \quad \dots\dots\dots(13)$$

$$q_s = (1 - \lambda_s)(D - z) \frac{\partial B_0}{\partial t} \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$(1 - \alpha_B)q_{B \text{ in}} = -(1 - \lambda_b)(z_B - z) \frac{\partial B_I}{\partial t} \quad \dots\dots\dots (15)$$

で表される。また、流砂量式および外岸の侵食量式はそれぞれつぎのように仮定する⁹⁾。

$$Q_B = q_B B = K \{ (\sigma / \rho - 1) g \}^{(1-p)/2} d^{(3-p)/2} U^p B \quad \dots\dots\dots (16)$$

$$q_s = E \{ (\sigma / \rho - 1) g d \}^{(1-f)/2} U^f h \quad \dots\dots\dots (17)$$

ただし、 λ_b , λ_s はそれぞれ河床、河岸の空げき率の 1/100, q_B は単位幅流砂量, Q_B は主流の全流砂量, q_s は外岸侵食量, α_B は $q_{B \text{ in}}$ うち前縁を通過するものの割合, κ は x_1 軸の曲率, B_I , B_0 はそれぞれ砂州前縁、外岸の x_2 座標であって $B = B_0 - B_I$, D は河岸高, z_B は砂州高, σ , ρ はそれぞれ砂と水の密度, d は砂の粒径, t は時間および K , p , E , f は実験定数である。

一様な蛇行発達の場合, q_{in} , $q_{B \text{ in}}$ および z_B は (9) 式から求められ、対応する位置を上流側砂州という意味で添字 (u) で表すと、それぞれつぎようになる。

$$q_{\text{in}} = -q_u \sin \varphi (1 + \kappa B_I) \quad \dots\dots\dots (18)$$

$$q_{B \text{ in}} = q_{Bu} \sin \varphi \quad \dots\dots\dots (19)$$

$$z_B = z_u \quad \dots\dots\dots (20)$$

ただし、 φ は流入角であってつぎの通りである。

$$\sin \varphi = \sin \theta_u \cos \theta - \cos \theta_u \sin \theta \quad \dots\dots\dots (21)$$

また、砂州上の流出量 q_{out} は横越流の式で仮定するが、土砂の横流出による主流部以外の砂州の上昇の効果を指数関数で表現して、

$$q_{\text{out}} = \frac{2}{3} C_0 \sqrt{2g(h + z - S)^3} = \frac{2\sqrt{2}g}{3} C_0 h^{3/2} e^{-\eta t} \quad \dots\dots\dots (22)$$

ここに、 C_0 は越流係数, S は主流部以外の砂州高および η は通減係数である。

つぎに、以上の基礎式を蛇行の半波長 l および総流量 Q_t によって、時間は l^2/Q_t , 流量は Q_t/l , 長さは l および単位幅当りの流れは Q_t/l でそれぞれ割り、無次元化して整理すると、つぎのようにまとめられる。

$$\frac{\partial \tilde{Q}}{\partial \tilde{x}_1} = -\tilde{q}_{\text{in}} \quad (0 \leq \tilde{x}_1 \leq \tilde{x}_{1B}) \quad \dots\dots\dots (23)$$

$$\frac{\partial \tilde{Q}}{\partial \tilde{x}_1} = -\tilde{q}_{\text{out}} \quad (\tilde{x}_{1B} \leq \tilde{x}_1 \leq \tilde{x}_{1L}) \quad \dots\dots\dots (23')$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tilde{z}}{\partial \tilde{t}} = K_s \left[-i_0 \frac{\partial}{\partial \tilde{x}_1} (\cos \theta) + \frac{\partial^2 \tilde{z}}{\partial \tilde{x}_1^2} + (1 - \alpha F_h^2) \frac{\partial^2 \tilde{h}}{\partial \tilde{x}_1^2} + \alpha F_B^2 \frac{\partial^2 \tilde{B}}{\partial \tilde{x}_1^2} + \frac{3\alpha F_h^2}{\tilde{h}} \left(\frac{\partial \tilde{h}}{\partial \tilde{x}_1} \right)^2 \right. \\ \left. + \frac{4\alpha F_h^2}{\tilde{h}} \frac{\partial \tilde{h}}{\partial \tilde{x}_1} \frac{\partial \tilde{B}}{\partial \tilde{x}_1} + \frac{3\alpha F_B^2}{\tilde{B}} \left(\frac{\partial \tilde{B}}{\partial \tilde{x}_1} \right)^2 + \frac{\alpha F_0^2}{\tilde{B}^2 \tilde{h}^2} \left\{ \left(\frac{\partial \tilde{Q}}{\partial \tilde{x}_1} \right)^2 - \tilde{Q} \frac{\partial^2 \tilde{Q}}{\partial \tilde{x}_1^2} \right\} + \frac{4}{3} \frac{I_e}{\tilde{h}} \frac{\partial \tilde{h}}{\partial \tilde{x}_1} + \frac{2}{p} \frac{I_e}{\tilde{B}} \frac{\partial \tilde{B}}{\partial \tilde{x}_1} \right] \\ + \frac{1 + \tilde{\kappa} \tilde{B}_0 \tilde{q}_s}{1 - \lambda_b} \frac{\tilde{q}_s}{\tilde{B}} + \alpha_B \frac{1 + \tilde{\kappa} \tilde{B}_I \tilde{q}_{B \text{ in}}}{1 - \lambda_b} \frac{\tilde{q}_{B \text{ in}}}{\tilde{B}} \quad \dots\dots\dots (24) \end{aligned}$$

$$K_s = \frac{p}{2(1 - \lambda_b)} \frac{\tilde{q}_B}{I_e} \quad \dots\dots\dots (25)$$

$$I_e = K_n \frac{\tilde{Q}^2}{\tilde{h}^2 \tilde{B}^2 \tilde{R}^{1/3}} = i_0 \cos \theta - \frac{\partial \tilde{z}}{\partial \tilde{x}_1} - (1 - \alpha F_h^2) \frac{\partial \tilde{h}}{\partial \tilde{x}_1} + \alpha F_B^2 \frac{\partial \tilde{B}}{\partial \tilde{x}_1} - \alpha F_0^2 \frac{\tilde{Q}}{\tilde{B}^2 \tilde{h}^2} \frac{\partial \tilde{Q}}{\partial \tilde{x}_1} \quad \dots\dots\dots (26)$$

$$\tilde{q}_B = K_B (\tilde{Q} / \tilde{B} \tilde{h})^p \quad \dots\dots\dots (27)$$

$$\frac{\partial \tilde{B}_0}{\partial \tilde{t}} = \frac{1}{1 - \lambda_s} \frac{\tilde{q}_s}{\tilde{D} - \tilde{z}} \quad \dots\dots\dots (28)$$

$$\tilde{q}_s = K_s \tilde{h} (\tilde{Q} / \tilde{B} \tilde{h})^f \quad \dots\dots\dots (29)$$

$$\frac{\partial \tilde{B}_I}{\partial \tilde{t}} = \frac{1 - \alpha_B}{1 - \lambda_b} \sin \varphi \frac{\tilde{q}_{B \text{ in}}}{2\tilde{B} - \tilde{z}} \quad \dots\dots\dots (30)$$

$$\tilde{q}_{\text{in}} = \tilde{q}_u \sin \varphi (1 + \tilde{\kappa} \tilde{B}_I) \quad \dots\dots\dots (31)$$

$$\bar{q}_{Bin} = \bar{q}_{Bu} \sin \varphi \quad \dots\dots\dots (32)$$

$$\bar{z}_B = \bar{z}_u \quad \dots\dots\dots (33)$$

$$\bar{q}_{out} = K_0 \bar{h}^{3/2} e^{-\xi \bar{r}} \quad \dots\dots\dots (34)$$

ここに、 $\sim$ は無次元量を表し、各係数はつぎの通りである。

$$K_n = n^2 Q_0^2 / I_0^3, \quad K_B = K \{ (\sigma/\rho - 1) g d \}^{(1-p)/2} d Q_0^{p-1} I_0^{1-2p},$$

$$K_s = E \{ (\sigma/\rho - 1) g d \}^{(1-f)/2} Q_0^{f-1} I_0^{2-2f}, \quad K_0 = \frac{2\sqrt{2}}{3} \frac{C_0}{F_0}, \quad F_0^2 = \frac{Q_0^2}{g I_0^3},$$

$$F_A^2 = \frac{\bar{Q}^2}{\bar{B}^3 \bar{h}^3} F_0^2, \quad F_B^2 = \frac{\bar{Q}^2}{\bar{B}^3 \bar{h}^2} F_0^2, \quad \xi = \frac{I_0^3 \eta}{\bar{Q}_0}$$

以上の式から、上流区間については (23)～(33) の各式、下流区間については (23')～(27) および (34) の各式を連立させれば蛇行流路の発達過程の解析が可能となる。

3.2 数値解析の方法

解析を簡単化するために、(23) 式の各項の order を概算した結果から影響の大きいと思われる項のみ残し、上、下流区間についてそれぞれ (24'), (24'') 式のように近似化したが、上流区間において横流入流量による流量変化項を重視している。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{z}}{\partial \bar{t}} = K_s \left[\frac{\partial^2 \bar{z}}{\partial \bar{x}_1^2} - i_0 \frac{\partial}{\partial \bar{x}_1} (\cos \theta) + \frac{\alpha F_0^2}{\bar{B}^2 \bar{h}^2} \left(\frac{\partial \bar{Q}}{\partial \bar{x}_1} \right)^2 + I_s \left(\frac{4}{3} \frac{1}{\bar{h}} \frac{\partial \bar{h}}{\partial \bar{x}_1} + \frac{2}{\bar{p}} \frac{I_s}{\bar{B}} \frac{\partial \bar{B}}{\partial \bar{x}_1} \right) \right] \\ + \frac{1 + \kappa \bar{B}_0 \bar{q}_s}{1 - \lambda_b \bar{B}} + \alpha_B \frac{1 + \kappa \bar{B}_I \bar{q}_{Bin}}{1 - \lambda_b \bar{B}} \quad (0 \leq \bar{x}_1 \leq \bar{x}_{1B}) \quad \dots\dots\dots (24') \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \bar{z}}{\partial \bar{t}} = K_s \frac{\partial^2 \bar{z}}{\partial \bar{x}_1^2} \quad (\bar{x}_{1B} < \bar{x}_1 \leq \bar{x}_{1L}) \quad \dots\dots\dots (24'')$$

さらに幅一定と仮定した下流区間では (26) 式を近似化した次式を用いる。

$$I_s = K_n \bar{Q}^2 / \bar{B}^2 \bar{h}^{1/3} = i_0 \cos \theta - \frac{\partial \bar{z}}{\partial \bar{x}_1} \quad (\bar{x}_{1B} < \bar{x}_1 \leq \bar{x}_{1L}) \quad \dots\dots\dots (26')$$

したがって、解析は上流区間では (23), (24') および (25)～(33) の各式、下流区間では (23'), (24''), (25), (26'), (27) および (34) の各式を $\bar{x}, \bar{t}$ について差分化して行う。

3.2.1 解析の手順

数値解析に用いた方法を箇条書きにするとつぎのようである。

(a) 主流路の中心線として $\bar{x}_1$ 軸を求め、これを差分 $\Delta \bar{x}_1$ で区切り、(8), (9) 式によって $\bar{x}_1$ 軸上の区分点 $\bar{x}_{1i}$ の $\bar{x}, \bar{y}$ 座標を定めておく。

(b) この $\bar{x}_{1i}$ から外岸および内岸に垂線をおろし、それぞれの $\bar{x}_2$ 座標 ($\bar{B}_0$ および $\bar{B}_1$) と $\bar{x}, \bar{y}$ 座標を求め、また河床高 $\bar{z}$ も前回区分点での値から各 $\bar{x}_{1i}$ に内挿し、主流路の形状を定める。 $\bar{x}_1$ 軸の下流端は流入部の終端に対応した点として求め、境界条件の導入を行う。

(c) この主流路に前述の各式を適用して流路変動の解析を行う。その手順はつぎの (i)～(iii) による。

(i) 上流区間での流水および流砂の横流入条件を定めるために、(23'), (26'), (27) および (33) 式によって下流区間の水理量を求める。また、砂州上から横流出した流量はすべて上流区間の最上流端 ($\bar{x}_1=0$) に流入するとみなし、 $\bar{x}_1=\bar{x}_{1B}$ での流量とこの上流端流量との和が総流量と誤差 2% で合致するように繰返し計算を行っている。

(ii) (i) で求めた下流区間における最上流端の水位を境界条件として、(23), (26) および (31) 式によって上流区間の水面形を常流と仮定して計算するが、射流が現れるところは限界流で近似する。

(iii) (i), (ii) で求めた水理量によって、上流区間の流路変動を (24'), (27)～(30), (32) および (33) 式、下流区間のそれを (24''), (25) および (27) の各式によって計算する。また、上、下流区間の境界点でも内挿によって水理量を求め (28) および (29) によって拡幅量を計算する。

(d) 本実験条件の場合には、(c) の 1 step ($dt=1\text{sec}$) の計算による主流形状の変化は極めて小さいので、約 2 分間は x_1 軸を固定し、その後つぎのように上、下流区間の境界点の移動を考え、 x_1 軸を移動させる。すなわち、上流区間の最下流区分点の外岸と拡張後の境界点の外岸とを結ぶ線が初期流路の外岸と交わる点を新たな境界点と定め、再び (a) に戻り同様の計算を繰返す。

3.2.2 解析に用いた条件

上述の (a)～(d) によって解析を行う際に用いた仮定や条件などをまとめて示すとつぎのようである。

(a) 境界条件：上流端では流砂量も小さく、河床高の変化も小さいので初期値に固定している。下流端は蛇行の発達に伴う流向の変化や砂州の発達による位置の移動のために合理的な境界条件の設定は困難であるが、ここでは、

(1) 実験での砂州の平均河床こう配を用いる場合

(2) 1 step 上流の断面での流砂がそのまま流出すると考えて、1 step 上流の断面と同じこう配を用いる場合

の 2 種類の条件について検討する。

(b) 下流区間の流向と幅：これらは上流区間（彎曲部）の終端における主流の方向と砂州の 3 次元的な形状とによって決定されるものであるが、本解析においては前者のみによって決定し、流向偏角は計算過程で生じる不合理を避けるために前回の値を下回らないという制約条件を付加している。

(c) 横流入の範囲と砂州の張出し量：下流区間の流向と幅によっては、横流入のある範囲が 1, 2 断面のみに集中してしまうことが生じる。実際の現象では、このような場合の流入する砂州上の主流幅は流下方向に増加している点を考慮して、横流入範囲を上流側の 2 断面まで広げている。また、砂州の張出しは z と z_B とに差が無くなった時点から生じないとしている。さらに砂州上で主流から横流出する流砂分を考慮して補正係数を導入している。

(d) エネルギーこう配：下流区間は (26') 式から河床が逆こう配になった時エネルギーこう配が負となる。(a) の (1) の境界条件ではこのような結果が生じるが、解析はエネルギーこう配に下限値を設定して行っている。

(e) 流路の移動限界：流砂量および侵食量式は (16), (17) 式で仮定しており、移動限界条件が考慮されていないので移動限界流速 U_c を導入し、 $U \leq U_c$ のとき流路変動が停止する条件を与えている。 U_c は U_{*c} と抵抗の関係から $U_c=27\text{ cm/sec}$ としたが、この値は検討する必要がある。

(f) 彎曲部の法線形状：彎曲部の滑かさを考慮して、 y 方向に張出しているときには、外岸、内岸ともに 2 次の微係数を持つ 2 次曲線で近似的に、その他の場合は直線とみなしている。

(g) 初期条件：主流路の初期形状は、Fig. 10 の細線で示すように砂州の固定し始めた時点の平面形状および縦断面形状を理想化して与えているが、下流区間の初期こう配はエネルギーこう配が負とならないように、実験値よりも大きい $1/500$ を与えている。また、初期の流量配分は横断形状から横流入完了後の主流に総流量の 75% を与え、残り 25% が砂州上での総流出量であって単位幅当り $6\text{ cm}^3/\text{sec}/\text{cm}$ としている。

(h) 定数と差分間隔：計算に用いた定数は Exp. XI を対象としてつぎの通りである。

$$n = 0.013, \quad \lambda_b = 0.38, \quad \lambda_s = 0.42, \quad D = 10\text{ cm}, \quad \alpha_B = 0 \quad \sigma/\rho = 2.65, \quad Q_t = 15\text{ l/s}$$

$$g = 980\text{ cm/sec}^2, \quad d = 0.088\text{ cm}, \quad K = 0.004, \quad E = 0.00001, \quad p = f = 3, \quad i_0 = 1/200$$

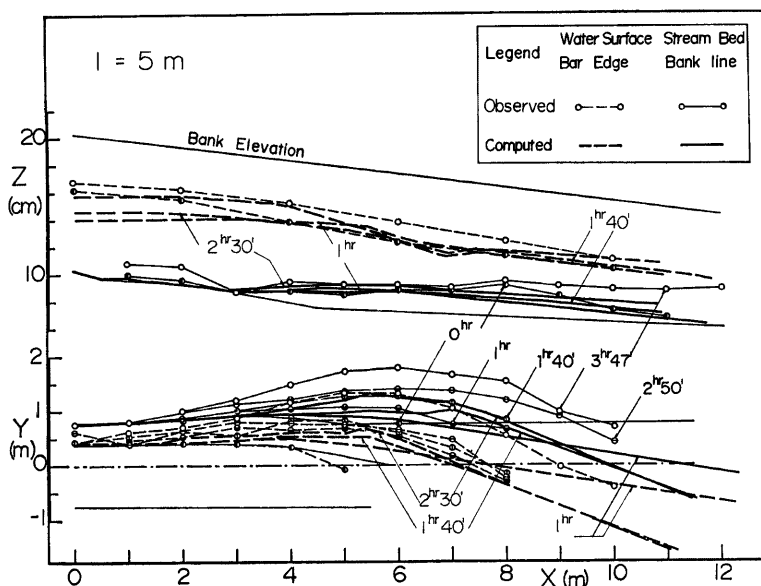
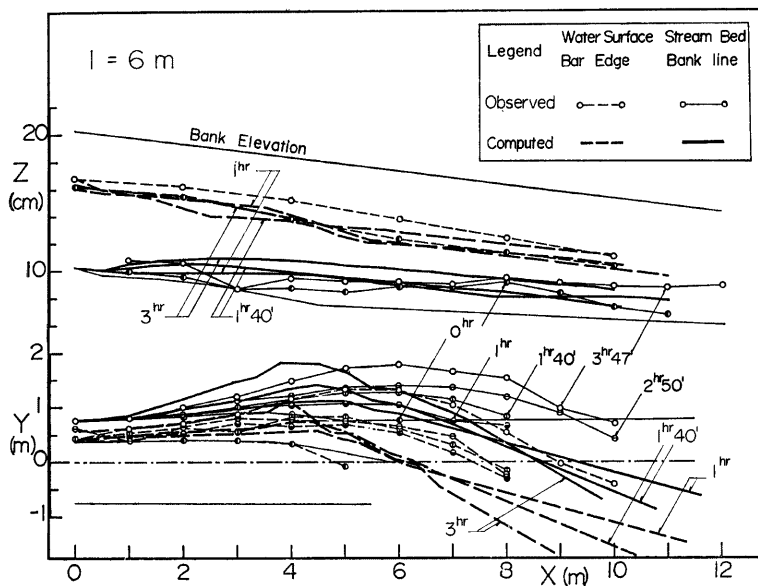
また差分は $dx_1=50\text{ cm}$, $dt=1\text{sec}$ を用いている。

3.3 解析結果の検討

3.2.2 に述べた (a) の (1) あるいは (2) の境界条件を用い、蛇行の半波長 l を変化させて行った解析結果について検討する。

(a) 下流端の河床こう配を 1 step 上流断面でのこう配で与えた場合

このときは河床に逆こう配は生ぜず (d) の条件は不要であるが、 l を 5 m, 6 m および 7 m にとったと

Fig. 10 (a). $l=5$ m.Fig. 10 (b). $l=6$ m.

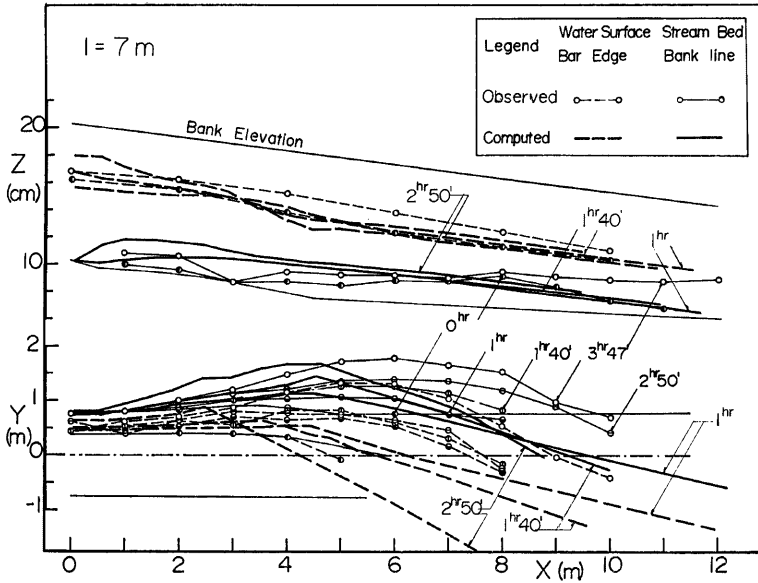
Fig. 10 (c). $l = 7$ m.

Fig. 10(a)~(c). Comparison of observed values with theoretical results of meandering process in three different meander length.

きの縦断形状と横断形状の解析結果を一蛇行彎曲について示すとそれぞれ **Fig. 10 (a), (b)** および **(c)** のようである。いずれの場合も $T=1\text{hr}$ の縦断形状には初期河床にみられた $x=4.5\text{ m}$ のこの配の急変点が残っており、縦断形状への初期条件の影響は早く消えるようであり、このような短区間では河床変動に対する境界条件の影響が大きい。 $l=7\text{ m}$ の下流区間では $T=1\text{ hr}$ には境界条件に対応した動的平衡状態に近づいてその後の河床変動は小さく、最下流部以外では実験値の傾向とも一致している。また上流区間の河床変動には(23')式の流量変化項の影響が大きいようであり、とくに $l=7\text{ m}$ では、流路幅が $20\sim 50\text{ cm}$ と小さい $x=0.5\sim 2.0\text{ m}$ 区間に流入流量が集中した $T=2\text{ hr}$ 以後に河床上昇速度が増大している。この流入区間の河床上昇は $l=5\text{ m}$ および $l=6\text{ m}$ でもみられ、流入区間が短くなって単位幅当りの流入流量が増加すれば河床上昇は顕著になる。水面形には横流入によるせき上げ状態が現われていて、蛇行彎曲の上流部分で実測される⁴⁾せき上げ現象と似た形状をみせている。

一方、蛇行彎曲のピーク位置は l の大きい方が上流側にあるが、これは l が大きいほど横流入の範囲が彎曲部の上流側に生じ、流入完了前後に現われる最大流速点も上流側になるためであって、砂州の張出す範囲も上流側となる。このことは、 l が大きい場合に主として横方向に発達する蛇行、小さい場合に下流へ進行しながら発達する蛇行が形成される可能性を示している。また、解析結果では、最大流速点が横流入範囲のやや下流側に現われることが多いが、これは蛇行彎曲のピーク位置が砂州張出しピーク位置よりも下流側に形成される蛇行発達過程の初期の実験結果と対応する。 $l=7\text{ m}$ では上述のように横流区間が $x=0.5\sim 2.5\text{ m}$ に限られ、計算条件から砂州の発達がこの区間のみで生じたために、 $T=2\text{ hr}$ で下流区間の主流幅が急激に増大して、幅変化の影響も河床上昇の一因となっている。このように横流入が砂州の上流側のみに限られた場合、実際の現象では流入砂のある部分は前縁に沿って流送されて、流入位置より下流側の砂州の前縁の発

達に費されるものと考えられ、今後このような条件を解析に導入する必要がある。

実験値との対応は、いずれの場合も下流区間の流向はほぼ類似しているが、蛇行振幅の発達点では $l=6\text{m}$ および 7m が良く、彎曲部の下流への進行の点では $l=5\text{m}$ が良い。しかし、彎曲部の進行は、2.3で検討した蛇行発達の限界時の半波長に近い $l=5\text{m}$ の場合においても、 $T=2\text{hr}$ から実験値に比して進行速度が低下している。これは主に彎曲部終端において、外岸の拡幅に追隨する砂州の成長度合が小さく主流幅が広くなり過ぎること(26')式による水深の計算値が実験値を上回ることによって、流速が実験値の $\frac{1}{2}\sim\frac{2}{3}$ となり、拡幅速度が低下するために生じている。

(b) 下流端の河床こう配およびエネルギーこう配の下限値を与えた場合

Fig. 11 に下流端河床こう配およびエネルギーこう配の下限値としてそれぞれ $1/2000$ および $1/500$ を与え、 $l=6\text{m}$ について解析した結果を一例として示す。この場合も $T=1\text{hr}$ ですでに下流区間河床は境界条件の $1/2000$ に近づいていて、初期条件の影響は短時間で消滅しており、その後の河床変動量は小さくなって動的平衡状態に漸近し、実験値との対応もかなり良い。しかし、平面形状は(a)の場合に比して滑かではあるが、蛇行発達は実験値の $\frac{1}{2}$ 程度にしか達していない。河床こう配が約 $1/2000$ の下流区間では前述の条件からエネルギーこう配には $1/500$ が与えられ、この値によって計算された流速は最大 40cm/sec 程度であって、流砂量、外岸侵食量とも小さく、蛇行の発達は抑制されている。したがって、この下限値として実験結果などから適当なものを与えれば、実験値に近い蛇行流路の形成過程が計算される可能性がある。

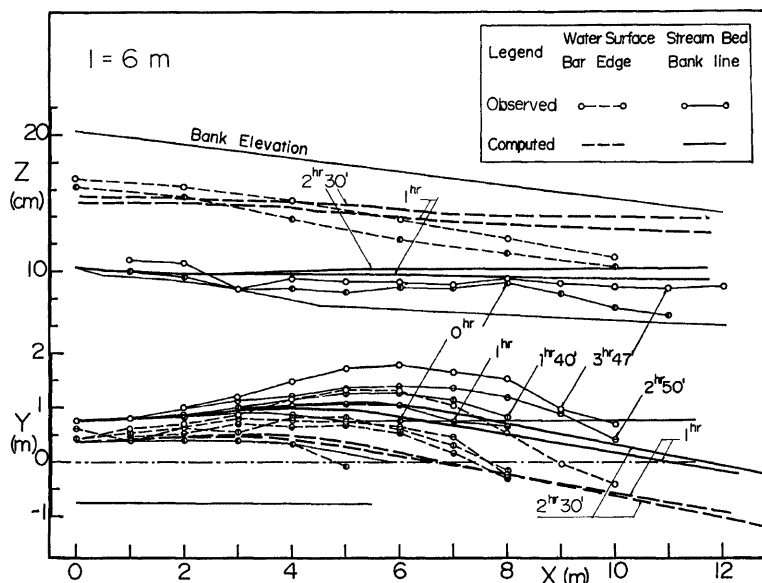


Fig. 11. Comparison of observed values with theoretical results of meandering process (another boundary condition).

以上のように、(a) および (b) の解析結果は、ともに実験値を完全には満足していないが、本解析によって種々の境界条件の変化に伴う蛇行の発達過程を検討することが可能であろう。現段階の解析は蛇行発達の初期に限られているが、今後長時間にわたる蛇行の進行と流下方向に水理条件が変化する場合の検討を進

めるつもりである。つぎに、本解析法上の問題点について簡単に検討する。

3.4 本解析法の問題点

蛇行流路の発達過程という複雑な3次元の現象を、流水および流砂が横流入する1次元的な水理学的モデルによって取扱う本解析法には多くの問題点が含まれている。その問題点を大別すると、現象をモデルに置換する時に含まれるものと、実際に数値解析を行う場合に含まれるものとがある。それらの主なものを列記すると、前者には、

- (a) 蛇行が流下方向に連続して一様に発達するという条件
- (b) 主流路の形状に関する仮定
- (c) 主流路における横流入・横流出の条件
- (d) 主流が曲線流の特性を持つ場合の条件の導入
- (e) 流砂量則、側岸侵食量則および抵抗則の仮定

などがあり、一方数値解上の問題点としてはつぎのようなものがあげられる。

- (f) 境界条件
- (g) 基礎式の近似
- (h) 差分計算の安定条件と収束条件
- (i) その他の3.2.2で導入した条件

蛇行形成が本来 stochastic な特性をもつものであったとしても、地形・地質・水理条件などが一様な理想的な場を考えると (a) の条件はほぼ満足され、実験的にもそれに近い形成過程がみられる。(b) については砂州前縁を境に流況が一変するので次元モデルでは許されよう。しかし3.2.2で述べたように砂州上の主流の流向、幅などには問題が残される。(c) の流出の仮定は良いと考えられるが流入条件には砂州上と滞筋の流れの干渉を考慮した仮定を導入する必要がある。また(d) については本実験の範囲では、蛇行彎曲部の主流路に沿っては流下方向に直角な河床波が卓越しており、sinuosity が最大1.4程度の彎曲では流入による影響が大きく、彎曲流の特性はほとんどみられないようであって、それ以上の迂曲流路において遠心力の効果が重要となると考えられる。(g) の検討は実験値によって各項の order を比較しなければならないが、計算結果から判断すると(26')式の水深変化項の省略が最も問題である。この項を導入すると、3.2.2(d)の条件は不要となるが、さらに下流端水深を境界条件として与える必要が生じる。最後に(h)については、(25)式から2の2階の項に対する安定条件は定まるが、従来の流路変動解析のように一様に安定化の方向には向かわず、また移動座標系を用いているために厳密な安定・収束条件は不明であって、解析結果から判断して $dx_1=50\text{ cm}$ および $dt=1\text{ sec}$ を用いた。

以上の問題点のうち、前述のように(a)の条件を緩和させて、流下方向に水理条件の変化する場合の蛇行形成について、境界条件との関連から今後考察を進めていくつもりである。

4. あ と が き

蛇行流路の形成過程に関して、前半で河岸高の異なる実験の結果について、その相違を指摘して、蛇行流路形成領域および流路蛇行に移行する砂州の特性量について検討を行い、後半で蛇行発達過程の解析法と解析結果について考察を行った。

下流端を固定した実験では、河岸高の差は初期の河岸崩落による河床こう配の差となって水理条件に影響し、定常流量下でも網状流路が形成された。蛇行形成に対する水理条件の検討では、 $BI/R-U_*/U_{*c}$ による形成領域の傾向を明らかにして、著者らの実験では蛇行の形成が砂州の充分な発達のにちに生起することを述べた。つぎに蛇行形成に伴う砂州の特性量の変化について検討し、上流端で流量に偏りが生じた実験結果および砂州の移動速度が減少してから蛇行が発達することから、水衝部の固定が蛇行形成に重要であることを指摘した。

つづいて、砂州の発達直後に水衝部が固定して蛇行が形成される過程について、主流路への流量集中を考慮した一次元的な蛇行発達の解析を行い、実験結果とのかなりの適合をみた。しかし、3.4で指摘したように解析法には種々の問題点が含まれており、さらに現象に則して考察を進め、解析モデルの修正ならびに与えた制約条件を緩和する方法について検討を行うつもりである。

また、直線流路から蛇行形成に移る限界状態において砂州の移動速度が減少し、水衝部が固定する機構については、本論文で取扱うことができなかった。この点を究明することは、流路変動の研究における最大の課題の一つであって、さらに実験的、理論的に研究を進める必要がある。

最後に、実験とその整理に協力して頂いた京都大学工学部交通土木工学科卒業生（現在 K.K. 森本組勤務）青木健一君ならびに河川災害研究部門の諸兄に謝意を表します。また、本解析の数値計算には京都大学大型計算機センター FACOM 230-75 ならびに防災研究所防災科学資料センター FACOM 230-25 を用いたことを付記します。

参 考 文 献

- 1) Daniel, J.F.: Channel Movement of Meandering Indiana Streams, Physiographic and Hydraulic Studies on Rivers, USGS, Prof. Paper 732-A, 1971.
- 2) Lewin, J.: Initiation of Bed Forms and Meanders in Coarse-grained Sediment, Geol. Soc. America Bull., vol. 87, 1976, pp. 281-285.
- 3) 木下良作：河床における砂礫堆の形成について—蛇行の実態の観察—, 土木学会論文集, 第42号, 1957.
- 4) 藤田裕一郎, 村本嘉雄：蛇行流路の形成過程に関する実験的研究, 京都大学防災研究所年報, 第18号 B, 1975, pp. 551-564.
- 5) 村本嘉雄, 田中修市, 藤田裕一郎：河道の変動に関する研究 (3)—流路変動の一次元解析と蛇行流路の形成過程—, 京都大学防災研究所年報, 第15号 B, 1972, pp. 385-404.
- 6) 鮎川 登：直線河道における砂礫堆の形成条件について, 第26回土木学会年次学術講演会講演概要集, 1971, pp. 189-190.
- 7) 池田 宏：実験水路における砂礫堆とその形成条件, 地理学評論, Vol. 46-7, 1973, pp. 435-451.
- 8) 黒木幹男, 岸 力, 板倉忠興：交互砂州の水理特性, 文部省科学研究費総合 (A), 沖積地河川における河床形態と流体抵抗の研究, 最終報告書, 1975, pp. 80-88.
- 9) 村本嘉雄, 藤田裕一郎：蛇行の発達に関する水理学的考察, 第30回土木学会年次学術講演会講演概要集, 1975, pp. 346-347.
- 10) Friedkin, J.F.: A Laboratory Study of the Meandering of Alluvial Rivers, U.S. Waterways Experiment Station, 1945.
- 11) 永井靖郎：河道の安定に関する実験的研究, 京都大学修士卒業論文, 1955.
- 12) 青野 尚：河川の蛇行に関する実験的研究, 京都大学修士卒業論文, 1957.
- 13) 沢田健吉：河川の蛇行の実験的研究, 京都大学修士卒業論文, 1958.
- 14) 木下良作：石狩川河道変遷調査—参考編—, 科学技術庁資源局資料, 第36号, 1961.
- 15) Wolman, M.G. and L.M. Brush: Factors Controlling the Size and Shape of Stream Channels in Coarse Noncohesive Sands, USGS, Prof. Paper 282-G, 1961.
- 16) Stebbings, J.: The Shape of Self-Formed Model Alluvial Channels, Proc. of ICE, Vol. 25, Paper 664, 2, 1963, pp 485-510.
- 17) Ackers, P.: Experiments on Small Stream in Alluvium, Proc. ASCE, Vol. 90, HY4, 1964, pp 1-37.
- 18) Rozovskii, I.L., E.B. Erememko and B.A. Bazilievitch: Nieuclanobivcieencia Dvidzenie Vodnovo

- Patoka nidge Gidroelectroctantsui evo Vliianie na Ryclo, Izdatelictvo «Nauka Dumka», Kiev, 1967, pp. 152–192.
- 19) 長谷川和義, 工藤一磨, 山岡 勲: 水路蛇曲に関する一実験, 第23回土木学会年次学術講演会講演概要集, 1968.
 - 20) 足立昭平, 中藤達昭: 沖積流路の拡幅に関する実験的考察, 第24回土木学会年次学術講演会講演概要集, 1969.
 - 21) Ackers, P. and F.G. Charlton: Meander Geometry Arising from Varying Flows, Journal of Hydrology, 11, 1970, pp. 230–252.
 - 22) Ackers, P. and F.G. Charlton: The Geometry of Small Meandering Streams, Proc. of ICE, Paper 7328S, 1970.
 - 23) Ackers, P. and F.G. Charlton: The Slope and Resistance of Small Meandering Channels, Proc. of ICE, Paper 7362S, 1970.
 - 24) Schumm, S.A and H.R. Khan: Experimental Study of Channel Patterns, Geol. Soc. America Bull., Vol. 83, 1972, pp. 1755–1770.
 - 25) Hickin, E.J.: Pseudomeanders and Point Dunes—A Flume Study, American Journal of Science, Vol. 272, 1972, pp. 762–799.
 - 26) Bordas, M: Conditions Initiales et Equilibre d'un Canal Alluvial, Proc. 15th Congress of IAHR, Vol 1, A-19, 1973, pp. 143–150.
 - 27) 山岡 勲, 長谷川和義: 自由蛇行流路の流体抵抗について, 文部省科学研究費総合 (A), 沖積地河川における河床形態と流体抵抗の研究, 最終報告書, 1975, pp. 89–97.
 - 28) 藤田裕一郎: 側方侵食を伴う河床変動に関する研究, 京都大学修士論文, 1973.