

# 蛇行流路の形成過程に関する実験的研究

藤田裕一郎・村本 嘉雄

## EXPERIMENTAL STUDY ON FLUVIAL PROCESS OF MEANDERING CHANNEL FORMATION

By *Yuichiro* FUJITA and *Yoshio* MURAMOTO

### Synopsis

The problem of river meandering is one of the main subject on fluvial hydraulics. A lot of researches have been presented on this problem, especially on the planform of meandering channel and the initiation of meandering stream. However, fluvial process and mechanics of meandering channel formation is not discussed on the basis of experiments in detail.

In this paper, we report the results of large scale experiments carried out in order to clarify a process of meander formation and the sediment balance during the process. The results of experiments are compared with other experiments, and examined about relation between bed load and migration of bars, variation of channel pattern, state of bed load and bank erosion rate of meandering channel and so on. It is obtained that the width related with main stream—thalweg width (= difference between water surface width and point bar width) or width of sediment transport—is relatively constant and has the same value at the final state of uniform channel widening. Main stream alignment is also compared with “sine-generated-curve”, and it seems that the wave length along the main stream, in this experiment, tends to have a constant value. At last, the possibility of hydraulic analysis of meandering process is discussed.

### 1. ま え が き

河川の蛇行現象は、古くから河川技術者や科学者の興味をひき、地形学、河川学、水理学などの各分野で数多くの研究がなされてきている。蛇行現象を支配する条件は多様かつ複雑であるために、現在までその全貌を解明するに至っていないが、これまでの研究によって多くの情報が蓄積されつつある。従来の研究の主なテーマは、

- (1) 蛇行流路の形状要素と水量および地形量との関係
- (2) 蛇行流（砂州）の発生原因と発生条件
- (3) 蛇行流路の形成過程

のように大別できる。(1)については、蛇行河道の線形を時系列とみなしての統計解析、(2)については、摂動法による蛇行流（砂州）の発生条件と卓越蛇行波長に関する解析が多く行なわれて、アプローチが定式化されつつある。しかし、(3)の研究は、河川工学上重要な意義を持つにもかかわらず、蛇行流路の拡幅および流砂の機構に関する実験データも少なく、今後に残されている課題は多い。また、蛇行流路の極限状態に関しては、定性的な指摘がなされているのみでほとんど明らかにされていない。このために、堤防法線形や低水路幅の決定、あるいは新河道内に研究される流路の予測などは極めて困難な問題となっており、主に経験的に行なわれている。

本文は、以上の問題点を踏まえて、蛇行流路の形成過程における拡幅および流砂の機構を明確にするために、流砂状態および土砂収支について綿密な測定を行なった実験の結果について考察している。その内容は、蛇行

に関する他の実験との比較, 砂州の移動と停止, 蛇行発達過程における平面線形および流砂状態と側岸侵食量とに関する検討であって, あわせて蛇行流路の形成過程に関する水理的解析の可能性について考察している。

## 2. 蛇行に関する実験

### 2.1 実験の概要

実験は, 宇治川水理実験所の河川災害総合基礎実験施設河道部水路において一昨年12月に完成した大型給砂装置を用いて, **Table** に示す2ケースについて行なった。測定方法などは, これまで同水路で行なった実験<sup>1)</sup>

Table. Experimental condition.

Exp. No.	Initial Channel Shape			Bed Slope	Stream Length (m)	Discharge (l/sec)	Flow Duration (hr-min)	Average Sand Feeding (cm <sup>2</sup> /sec)
	Trapezoidal Cross Section							
	Bottom Width (cm)	Side Slope	Depth (cm)					
Exp. X	100	1 : 2	20	1/200	42.3	20	17-21	0.25
Exp. XI	50	1 : 2	10	1/200	42.8	15	12-07	0.35

と同様であるが, 今回は, 蛇行形成過程における流砂機構のデータを得るために, 流路変動の線密な測定を行なっている。

### 2.2 従来の実験との比較

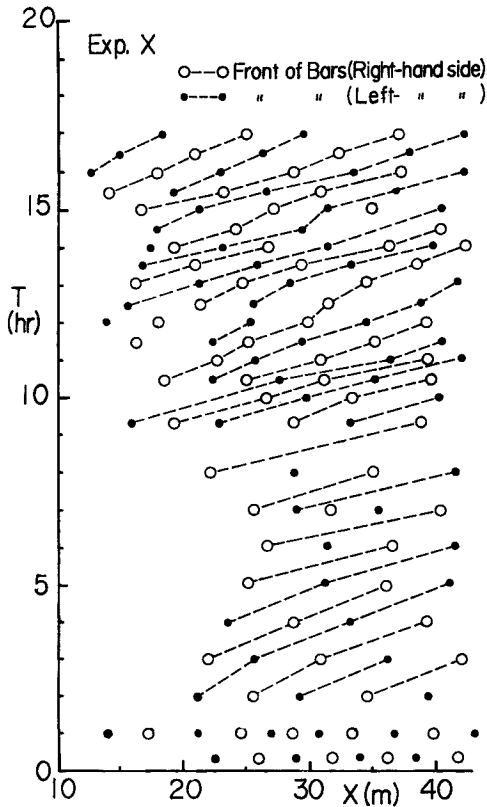


Fig. 1 Migration of fronts of bars.

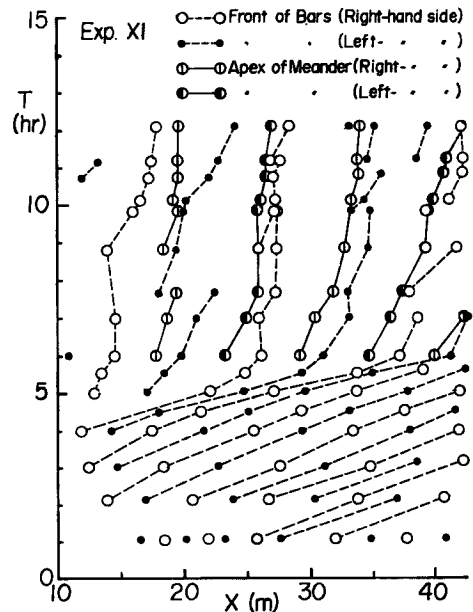


Fig. 2 Migration of fronts of bars and location of meander.

Exp. X, XI の砂州と蛇行の走時曲線を示すとそれぞれ Fig. 1, 2 のようであり、これらは同水路で行なった実験<sup>2)</sup>の走時曲線と同様の傾向を示している。初期流路形状および流量条件としては、Exp. X は Exp. II にほぼ対応し、Exp. XI は Exp. IV および Exp. VI の上流区間に等しく、砂州の波長、波高および移動速度は類似の条件に対して同一の範囲に入ることがわかった。Fig. 1, 2 に示すように、Exp. X は実験時間内に蛇行しなかったが、Exp. XI は  $T=7^{\text{h}}00'$  から蛇行が発達したこと、および Exp. IV は Exp. II よりも10時間以上早く蛇行したことから、河岸高の大きい方が蛇行しにくいことがうかがわれる。

これらの実験条件による蛇行形成過程の相違を説明するために、蛇行振幅  $a$  とその増大率  $\Delta a/\Delta T$  の時間的变化を示すと Fig. 3 のようになる。Exp. IV では、位相の約  $180^\circ$  ずれた蛇行が引続いて発達したため  $a$ ,  $\Delta a/\Delta T \sim T$  の関係は2グループに分かれている。写真測定では、Exp. IV および Exp. XI の最初の水衝部の発生はほぼ同時刻であったが、Exp. IV では種々の位相の蛇行が消長したために、Fig. 3 に示すように発達に差が生じている。そのため、Exp. IV, XI の  $a$  の変化は平行移動によって重り合うが、Exp. II の  $a$  の増大が緩やかで、 $\Delta a/\Delta T$  の値は Exp. IV, XI のほぼ  $1/2$  になっていて、上述の河岸高の影響が認められる。また、Fig. 3 において  $a$  の増大率が小さい蛇行は上流側のものであって、いずれの実験も下流端が段落ちになっているので、蛇行発達に流下方向変化の大きいことがわかる。

つぎに、スケールの異なる実験<sup>3), 4)</sup>について、蛇行振幅の時間的变化に示すと Fig. 4 のようになる。これらの実験の初期こう配はすべて  $1/150$  である。河岸高の異なる実験がないために河岸高の影響は検討できないが、振幅の増大について、つぎのような傾向が認められる。

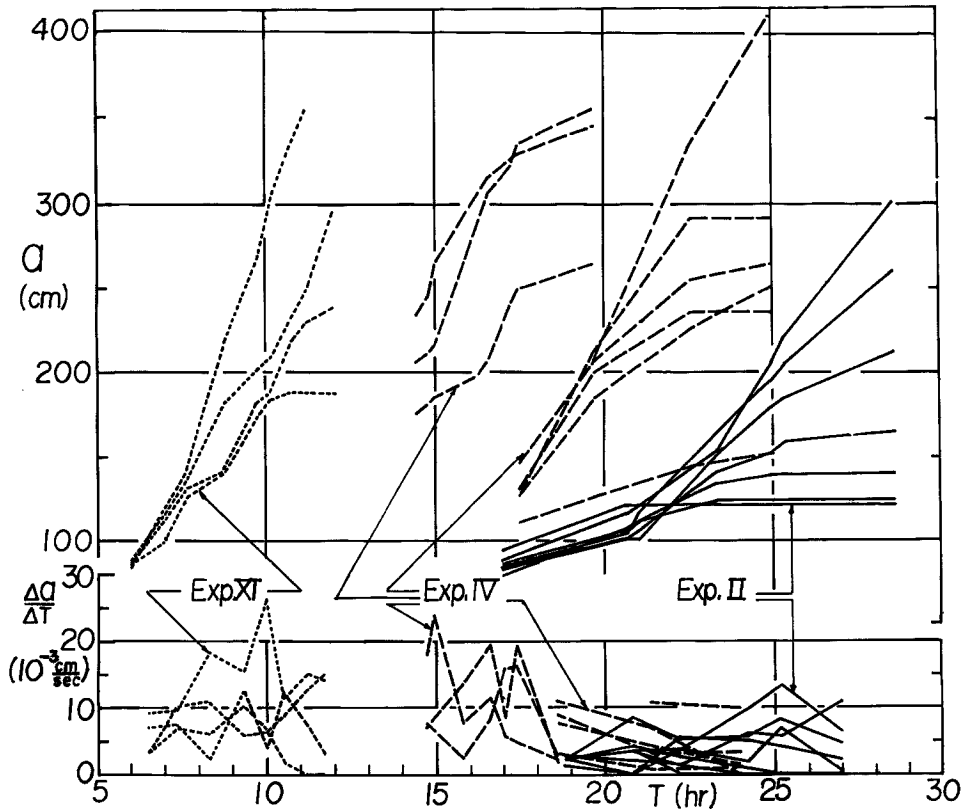


Fig. 3 Variation of amplitude and rate of amplification of meandering channels.

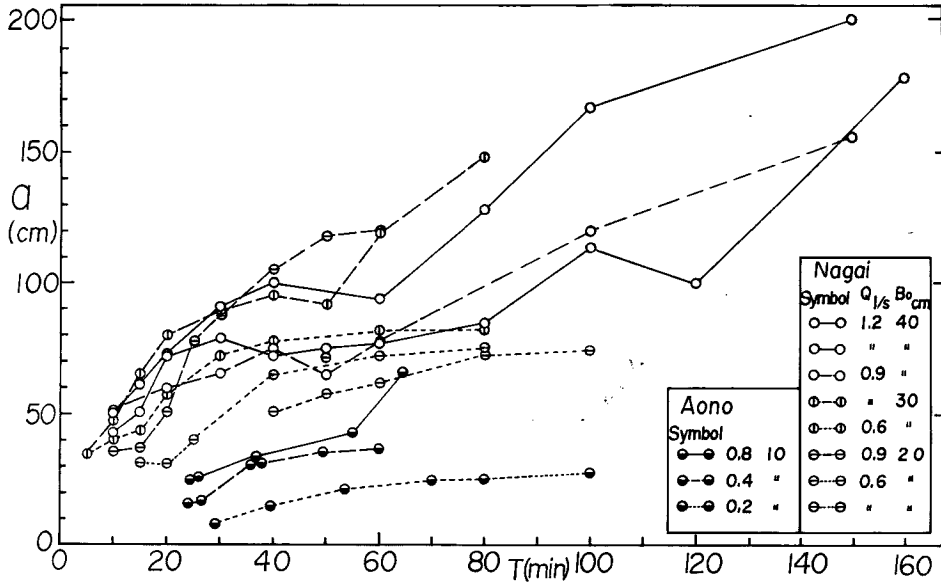


Fig. 4 Variation of amplitude of meandering channels of Aono's and Nagai's experiments.

- (1) 振幅は蛇行の初期に急激に増大し、その後拡幅速度は比較的緩慢になる。
- (2) 振幅の急激な増大の開始および終了の時刻は実験条件によって異なるが、拡幅速度が緩慢となる時点の振幅は、初期幅  $B_0$  に無関係で流量  $Q$  毎にほぼ一定している。
- (3) 振幅の増大率は、同一流量に対して同程度のピーク値を持つ。

Fig. 3 と Fig. 4 との比較によって、Exp. II, IV および XI の実験値は、振幅が急激に増大する過渡状態に相当することがわかる。

### 3. 蛇行流路の形成過程の検討

#### 3.1 砂州の進行と停止

蛇行流路の形成は、直線流路における砂州の発生および発達、砂州の停止と水衝部の固定、蛇行拡幅の発達という段階で進む。ここでは、砂州の移動速度と流砂量との関係、および砂州の停止限界について検討する。

砂州1個の進行に伴う土砂量（通水時間中に下流端から流出した土砂量/流出した砂州の個数） $M_B$  と砂州の平均形状による土砂量  $M'_B = (1-\lambda)(L_B/2)B_W Z_B$  とを比較すると Fig. 5 のようである。ただし、 $\lambda$  は砂の間引き率の  $1/100$ 、 $L_B$  は平均蛇行波長（砂州2波長）、 $B_W$  は平均水面幅および  $Z_B$  は平均砂州波高である。 $M_B$  と  $M'_B$  とは比較的良い相関を示し、流砂量と砂州の移動との対応が良いことがわかる。一方、砂州の移動速度  $V_B$  は、流砂量式として Brown 型の式を用いると、つぎのように表わされる。

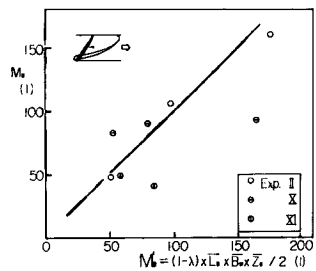


Fig. 5 Comparison of bar volume between  $M_B$  and  $M'_B$ .

$$q_B = M_1 \{ (\sigma/\rho - 1)g \}^{-m} d^{1-m} U_*^{2m+1} \{ 1 - U_{*c}^2/U_*^2 \}^m \dots\dots\dots (1)$$

$$V_B = Q_B / \{ M_B / (L_B/2) \} = q_B / \{ 2(1-\lambda)Z_B \}$$

$$= \frac{M_1}{2(1-\lambda)} \{ (\sigma/\rho - 1)g \}^{-m} d^{1-m} U_*^{2m+1} \{ 1 - U_{*c}^2/U_*^2 \}^m Z_B^{-1} \dots\dots\dots (2)$$

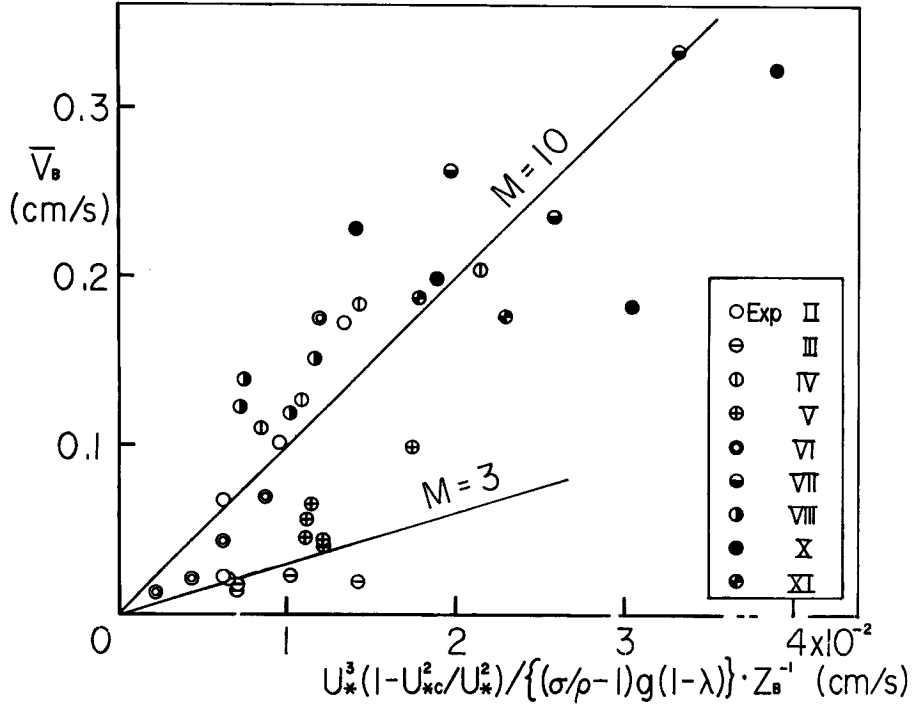


Fig. 6 Comparison of migration velocity of bars between calculated values and observed values.

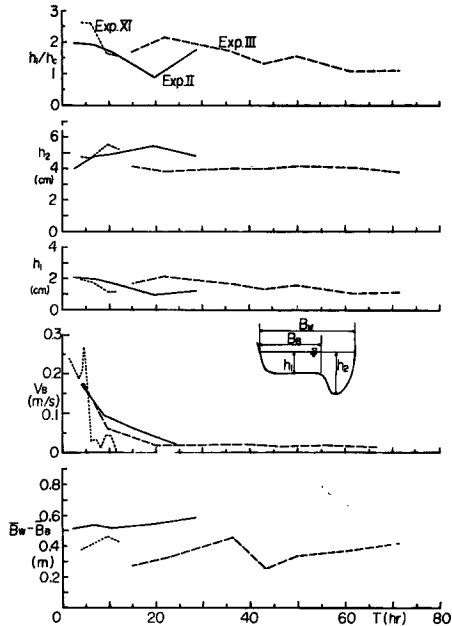


Fig. 7 Inspection of the ceasing of migration of bars.

ただし、 $Q_B$  は全流砂量、 $q_B$  は単位幅流砂量、 $\sigma$  は砂の密度、 $\rho$  は水の密度、 $g$  は重力加速度、 $d$  は砂の粒径、 $U_{*c}$  は限界摩擦速度および  $U_*$  は摩擦速度である。また、定数  $M_1, m$  としては、 $m=1$ , Exp. III, V で  $M_1=3$ , それ以外の実験ケースでは  $M_1=10$  を用いる。Fig. 6 に (2) 式の関係を検討してあるが良く一致していることがわかる。

以上のように、側岸侵食性流路においても砂州が一樣に進行する状態では、全流砂量が砂州の進行を支配していて、 $Z_B$  を知れば流砂量式から  $V_B$  が推定できる。したがって、Fig. 2 の  $T=5^{\text{hr}}30'$  にみられるような砂州の停止は、流路の拡幅および砂州の波高の増大によって、砂州上の流砂能力が減少することと流向の変化によって、砂州を伸長させる方向に流砂の補給が無くなることによると考えられる。

この関係は、砂州上と滞筋との流量配分に支配されるが、その指標として、砂州中央水深  $h_1$ 、滞筋幅 ( $=B_w - B_B$ ;  $B_B$  は砂州幅)、滞の水深  $h_2$  を用いて検討したものが Fig. 7 である。Fig. 7 には、 $h_1$  と移動限界水深  $h_c (=U_{*c}^2/gI_e$ ;  $I_e$  は平均エネルギーこう配) との比

$h_1/h_c$  も示してあり,  $h_1$  の減少および  $h_1/h_c$  の1への漸近と  $V_B$  の減少とは対応しているのが認められる。しかし,  $h_2$  と  $B_W - B_B$  とは一定値に収斂しており, このような簡単な検討からは, 砂州の停止限界の凡その傾向しか明らかでない。停止限界を明確にするには, 流速測定などによって精確な流量配分を把握することが必要であろう。

### 3.2 蛇行の発達過程

砂州の停止とともに蛇行は発達していくが, その過程における流路形状の変化を, Fig. 8 (a)~(c) に示し

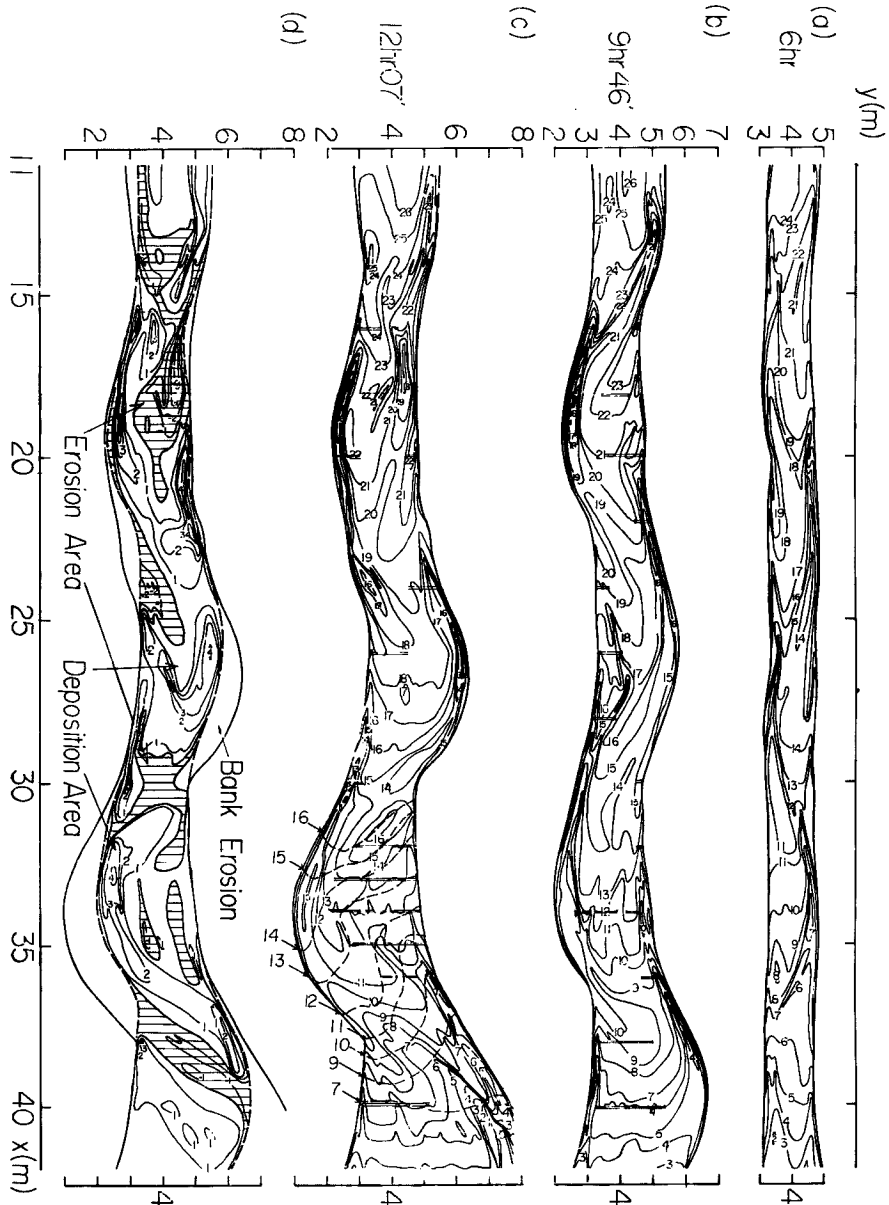


Fig. 8 Process of meandering channel development (a)-(c) and area of deposition and erosion (d).

た河床平面図で説明するとつぎのようである。

$T=6^{\text{hr}}00'$  における砂州と水衝部の対応は  $T=9^{\text{hr}}46'$  まで維持されて発達するが、 $T=12^{\text{hr}}07'$  には上流側からの位相の異なる蛇行が形成されている。砂州の形状は、 $T=6^{\text{hr}}00'$  では前縁が明かであるが、 $T=9^{\text{hr}}46'$  には下流側の前縁が消失するとともに横方向に拡がり、さらに  $T=12^{\text{hr}}07'$  では蛇行転向部が下流側の砂州よりも低くなって、新たな流路が形成される。

滞筋（主流路）の形状は、(a)～(c)の3段階を通じて変化は少なく、転向部に移行する区間の幅はほぼ一様拡幅時の最終状態の値を持ち、前項に述べた  $B_w - B_B$  の傾向と一致している。これは、蛇行拡幅に応じて砂州が横方向に張出していることを示している。 $T=12^{\text{hr}}07'$  の  $x=31\sim 38\text{m}$  に点線で示した等水位線から、主流部と砂州上との水位差が大きいことと、弯曲上流側に堰上げ状態が生じていることがわかる。後者は弯曲ピーク上流側の穏かな流況と下流側の烈しい掃流状態と対応している。また前者は弯曲および転向部下流側の顕著な堆積土砂によるもので、河床高低差が小さいにもかかわらず、弯曲内側に広い浮き州を発生させている。

Fig. 8 (d) は、 $T=9^{\text{hr}}46'$  から  $T=12^{\text{hr}}07'$  にかけての侵食と堆積の分布を表わしたもので、堆積を正とした contour が記入してある。側岸侵食は蛇行弯曲に沿って進行し、河床侵食は主に転向部で生じているが、蛇行位相の変化した  $x=15\sim 20\text{m}$  では河床侵食が大きく側岸侵食は小さい。一方、堆積は、主流路の変動に伴って旧流路を埋め戻す部分と転向部の下流側に生じていて、侵食と堆積とはほぼ対になって生じている。

つぎに、同時間内の  $x=24\sim 36\text{m}$  の蛇行1波長における土砂の収支状態を、河床堆積を砂州の拡張と砂州上の堆積とに分けて側岸侵食量と比較して示すと Fig. 9 のようになり、つぎのことがわかる。

- (1)侵食・堆積とも蛇行弯曲部で大きい。
- (2)側岸侵食と砂州の横方向への発達との対応が良い。
- (3)砂州上への堆積量は流下方向に減少するが、砂州の発達には各弯曲について同程度である。
- (4)上流側の弯曲では土砂収支は釣合っているが、下流側では侵食速度が大きくかつ砂州上の堆積が少ないために流砂量が流下方向に急激に増加している。

以上のことから、土砂収支の上では、上、下流端のような水理条件の変化の大きい場所を除いて、各蛇行弯曲はほぼ一様に発達していくと考えられる。

### 3.3 蛇行流路の平面線形

十分に発達した蛇行流路の平面線形を表わす関数形としてつぎのような式が示されている<sup>5),6)</sup>。

$$\theta = \omega \sin 2\pi \frac{s}{L} \dots\dots\dots (3)$$

あるいは

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{R} \cos 2\pi \frac{s}{L} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $s$  は蛇行流路に沿っての距離、 $\theta$  は  $s$  における接線の平均の流下方向からの偏角、 $\omega$  は  $\theta$  の最大値、 $L$  は  $s$  に沿ってとった蛇行の全長、 $r$  は  $s$  における曲率半径および  $R$  は  $r$  の最小値であり、(4)式は(3)式の微分に対応したものである。

蛇行流路の形成過程における(4)式の適合性を実験値について検討する。Fig. 8 (b), (c) に記入されている二重線は、通水中に砂の移動しなかった部分を表わしているが、その残りの流砂のある幅の中心線が蛇行流路

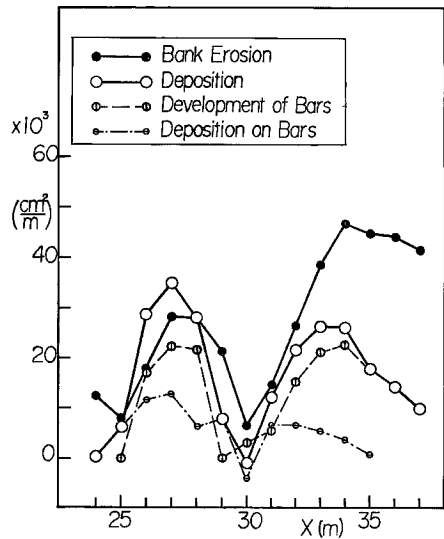


Fig. 9 Sediment balance between development of bar and bank erosion.

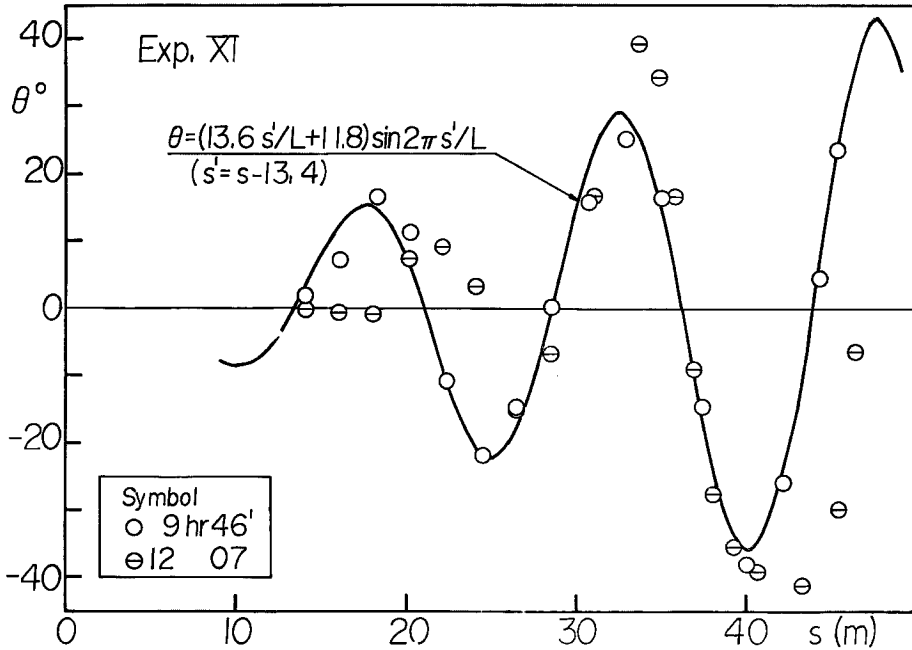


Fig. 10 Variation of deviation angle of tangent ( $\theta$ ) along the main stream path (s).

の線形と考えられる。流路幅の中心線について  $\theta$  と  $s$  とを示すと Fig. 10 のようになり、 $\theta=0$  となる位置が蛇行ピーク、 $\theta$  の極値が転向部に当たっている。 $T=9\text{hr}46'$  では  $L=15.0\sim 15.4\text{m}$  の規則的な周期性がみられるが、 $T=12\text{hr}07'$  では、上流部における蛇行位相の変化および下流部における蛇行弯曲部の砂止め堰への到達によって周期性が失われている。しかし、これらの上、下流部の影響の伝っていない  $s=29\sim 37\text{m}$  の弯曲と新しく発達している  $s=18\sim 25\text{m}$  の弯曲は  $T=9\text{hr}46'$  と同じ波長を示している。

$\theta$  の極値  $\theta_p$  は、 $T=9\text{hr}46'$  および  $12\text{hr}07'$  において  $s$  方向に増大している。 $T=9\text{hr}46'$  では、 $\theta_p$  の  $s$  方向の増加率および  $L$  がほぼ一定であるので、 $\omega$  を  $\theta_p$  の回帰直線

$$\omega = 13.6 \frac{s'}{L} + 11.8 \text{ (度)}, \quad s' = s - 13.4 \text{ (m)}$$

で表わすと Fig. 10 の曲線のようになる。Fig. 10 では  $\theta$  の変化は正弦的であるが、(3)式の曲線を  $\theta_p$  を結ぶ三角波形で置換えても点の分散は同程度になる。この三角波形は、Fig. 11 に示すように円周長が  $L/2$  で回転角が  $\theta_p$  の差に等しい円弧を連ねた流路線形を表わす。したがって Fig. 10 の蛇行形成過程の流路線形は円弧で近似することができる。また、 $\theta_p$  が  $s$  方向に増加し、 $L$  が一定である場合、平均の流下方向 ( $x$  方向) に投影した波長は  $x$  方向に減少し、下流の蛇行弯曲ほど進行が遅いことになる。このような蛇行発達過程では、 $\theta$  あるいは振幅の増大に伴って、 $x$  の一定区間内での蛇行数が増加するので、蛇行弯曲に流下方向変化が生じて一様な発達とはならないと考えられる。

3.4 蛇行の発達機構

写真測定および観察によれば、砂州上に分散する水流は前縁で順次滞筋に流入し、弯曲部の外岸(凹岸)に

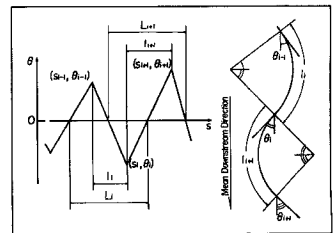


Fig. 11 Schematic sketch of meandering stream.



平行な主流を形成して再び砂州上に分散する。したがって、主流路は、Fig. 12 のように各弯曲毎に滞筋から砂州上に拡がる曲線流とみなせる。この主流路に沿って、3. 2 で検討した土砂の移動状況から考察すると、蛇行の発達機構はつぎの4つの機構を結合したものと考えられる。

- (1)主流に沿う河床変動機構
- (2)弯曲部外岸の側岸侵食機構
- (3)砂州上の侵食および堆積の機構
- (4)砂州の発達機構

(1)~(4)は Fig. 12 に模式的に示されているが、蛇行発達過程の水理的な解析を行なうためにはこれらの機構を明らかにする必要があって、次章で(1)および(2)について実験結果を検討する。

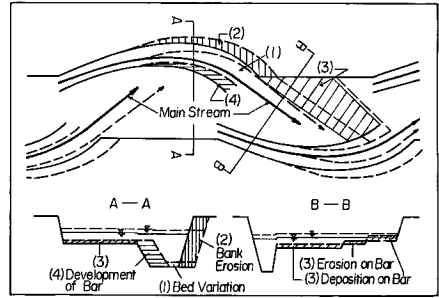


Fig. 12 Schematic sketch of process of meandering channel development.

#### 4. 蛇行発達過程における流砂量と側岸侵食量の検討

##### 4.1 流砂状態と流砂量

蛇行の発達によって単位幅流砂量の分布が大きく変化する。例えば、3. 3 で述べた流砂幅  $B_s$  は蛇行弯曲部ではほぼ一定であるが、転向部で大きくなっている。

$B_s$  の境界における実測水深  $h$  および平均水位と河床高の差  $H-Z$  について、3. 1 と同様の移動限界水深  $h_c$  によって検討すると Fig. 13 のようになる。 $h$  と  $H-Z$  はともに主流沿いでは比較的一致しているが、こう配の大きい領域で分散が大きい。また、蛇行の進行に残された滞筋では砂州による遮蔽域となって水深が大きいかかわらず流砂が存在しない。このように河床の平面形状の影響は大きく、主流路が蛇行する実河川で流砂量の推定の場合に注意が必要である。Fig. 14 には、 $B_s$  と流路幅  $B_D$  の変化を示しているが、 $B_D$  はこれまでの実験と同じ傾向にある。 $B_s$  は、流下方向に振動するが時間的変化は小さく、蛇行転向部を除いて流

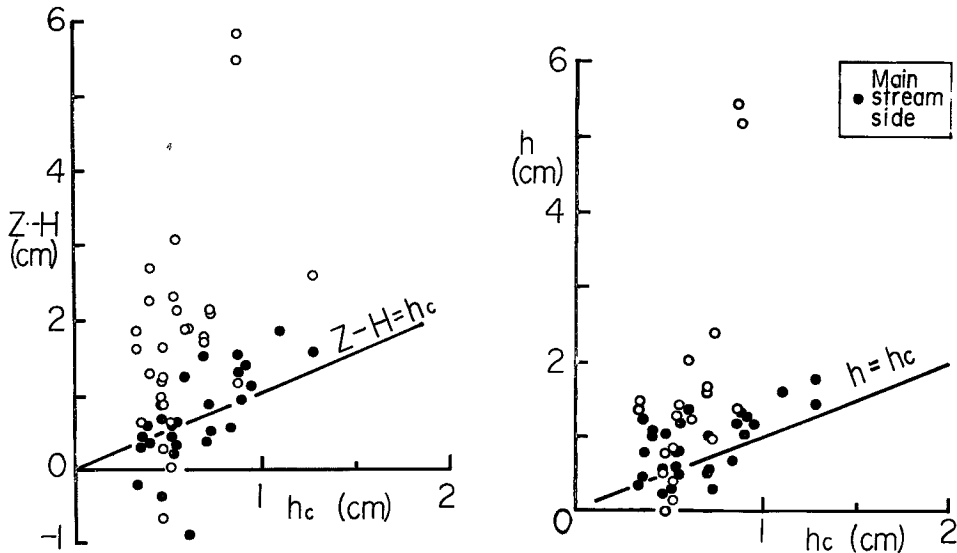


Fig. 13 Inspection of margin of bed load width by critical movement depth.

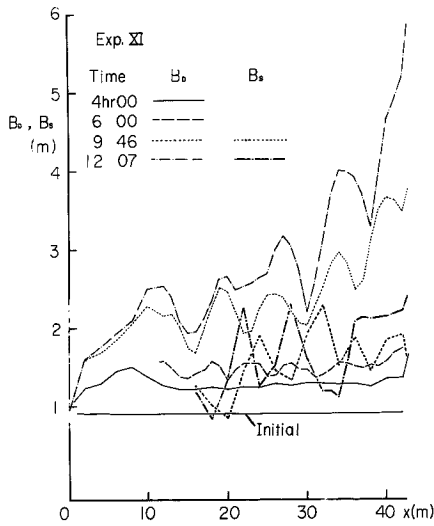


Fig. 14 Variation of channel width ( $B_D$ ) and bed load width ( $B_S$ ).

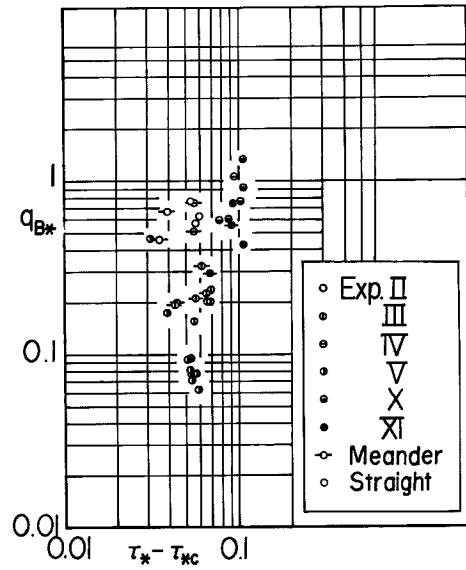


Fig. 15 Comparison of nondimensional relation between straight and meandering channels.

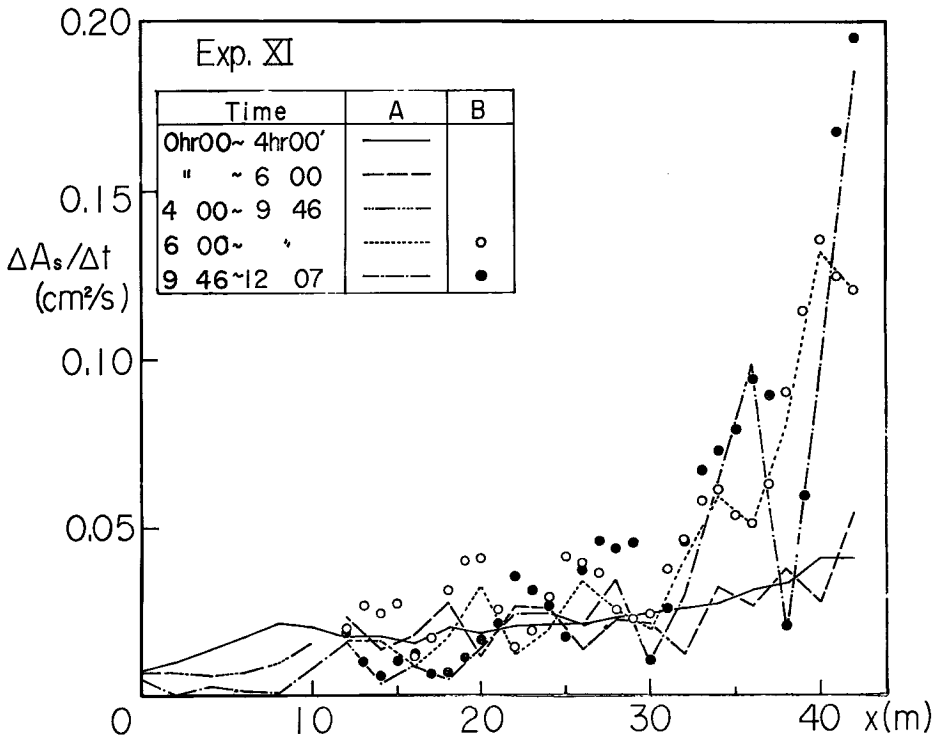


Fig. 16 Variation of bank erosion rate.

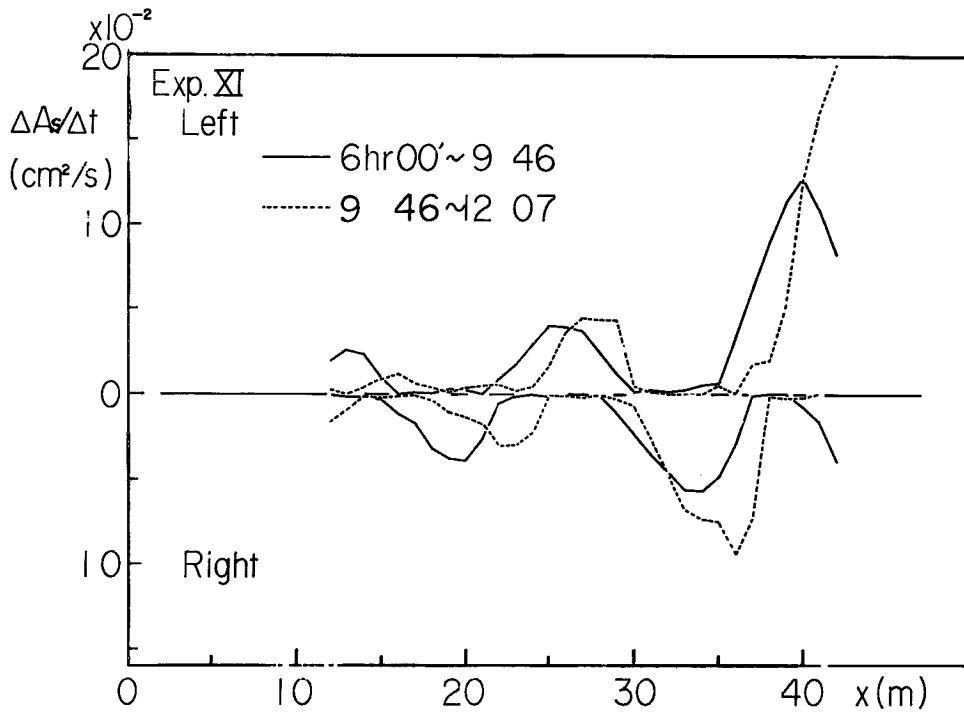


Fig. 17 Distribution of bank erosion rate along the meandering bend.

路全面に流砂のある  $T=6^{\text{hr}}00'$  の  $B_D$  にはほぼ等しい。

つぎに、蛇行発達時と一樣拡幅時における下流端の流砂量について、 $q_{B*}$  と  $\tau_* - \tau_{*c}$  の関係を検討すると Fig. 15 のようになる。ここに、 $q_{B*} = q_B / U_* d$ 、 $\tau_* - \tau_{*c} = (U_*^2 - U_{*c}^2) / \{(\sigma/\rho - 1)gd\}$  である。いずれの実験ケースについても蛇行発達前後で明確な差が現われていない。流砂量濃度について検討した結果でも、蛇行開始時にやや濃度の高くなる傾向がみられたものの顕著でなく、その差も通常の流砂量式の誤差の範囲にあり、蛇行の影響は小さいと思われる。

流砂量に蛇行の影響の小さい理由は、流砂量が主流に支配され、主流には転向部が交互にあって直線水路と類似の条件となり、弯曲部での偏りが修正されることにあると考えられる。

#### 4.2 側岸侵食量

一樣拡幅時と蛇行拡幅時について、側岸侵食速度  $\Delta A_s / \Delta t$  を比較すると Fig. 16 のようである。(A)は台形近似値、(B)は横断面図による精測値であって、 $x=10\sim 30\text{m}$  の蛇行ピークで両者に差はあるが、(A)でもほぼ近似できる。 $\Delta A_s / \Delta t$  は、 $x=0\sim 8\text{m}$  では時間とともに0に近づき、 $x > 32\text{m}$  では時間および  $x$  とともに増大し、烈しい蛇行侵食を示している。 $x=10\sim 30\text{m}$  では  $x$  方向に比較的一様な蛇行侵食が生じていて、 $\Delta A_s / \Delta t$  の平均値は一樣拡幅時からほとんど変化していない。

つぎに、蛇行拡幅時の  $\Delta A_s / \Delta t$  を左右岸に分けて表わすと Fig. 17 のようになる。各蛇行弯曲での  $\Delta A_s / \Delta t$  の分布は、下流側にピークのずれた非対称形を示し、蛇行が  $x$  方向に発達していく状態を表わしている。したがって、侵食最大の位置と振幅最大の位置とは必ずしも一致せず、振幅最大位置の下流へ移動する可能性は大きい。 $T=9^{\text{hr}}46'\sim 12^{\text{hr}}07'$  の  $x=20\text{m}$  付近のピークの乱れは蛇行位相の変化に対応している。

水深単位長当たりの側岸侵食量  $q_s/h = (1-\lambda)(\Delta A_s / \Delta t)/h$  と断面平均流速  $U$  との関係を、蛇行発達時と一樣拡幅時について示すと Fig. 18 のようになる。図中の  $B_w$  および  $B_s$  は、それぞれ水面幅および流砂幅に

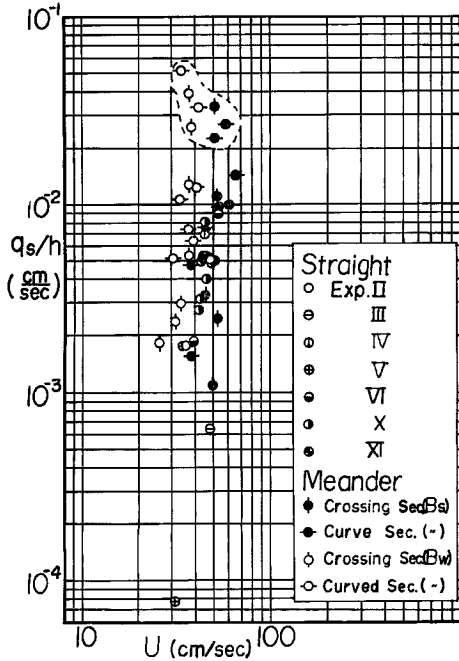


Fig. 18 Comparison of bank erosion rate and mean velocity relation between straight and meandering channels.

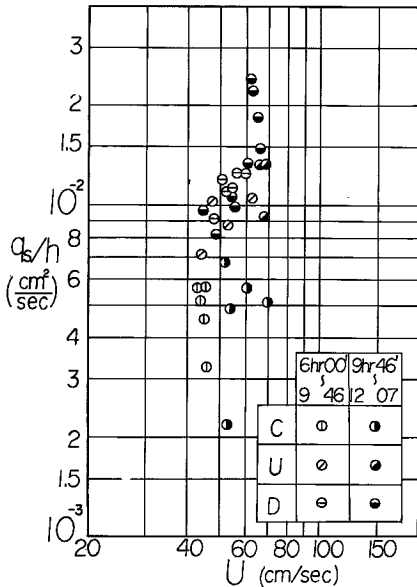


Fig. 19 Relation between bank erosion rate and mean velocity along meandering channel (C: Crossing of meandering channel, U: Upstream part of meandering bend, D: Downstream part of meandering bend).

応する断面から  $U$  および  $h$  を求めて示したものであり、Curved Sec. の値は各蛇行弯曲について  $\Delta A_s/\Delta t$  の極値を挟んだこう配の急変点間の平均値であって、Crossing Sec. はそれ以外の転向部での値である。最下流区間における  $q_s/h$  の値 (点線内) は他の値との差が大きく、これは側岸付近の流速と平均流速との差が大ききことに起因すると考えられる。その他の区間では、 $B_s$  から求めた  $q_s/h$  は一様拡幅時と同じ範囲に入り、平均の侵食量は直線流路でも蛇行流路でも同一の表示が可能と思われる。また、 $B_w$  から求めた  $q_s/h$  と比較すると蛇行拡幅は主に流量の集中によってと考えられる。つぎに蛇行弯曲の各断面について  $q_s/h$  と  $U$  の関係を検討したものが Fig. 19 である。10cm/sec 程度の  $U$  の変動に対して、 $q_s/h$  は、転向部から最大振幅位置まで順次増加し、そこから弯曲の終端まで同程度の値を保つが、再び転向部で激減している。しかし、Fig. 19 の  $q_s/h$  と  $U$  の関係は

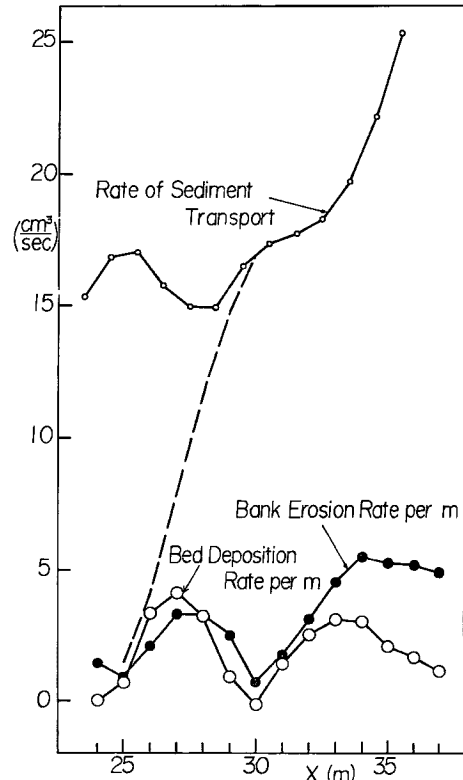


Fig. 20 Comparison among rate of sediment transport, bank erosion rate and bed deposition rate.

Fig. 18 のそれと同じ範囲にあって、最大振幅位置付近では  $U$  の変化との対応も良いことがわかる。したがって、転向部や蛇行弯曲上流部では側岸侵食に対して有効な流速あるいは流量が小さくなっていると考えられる。

最後に、 $x=24\sim 36\text{m}$  の蛇行 1 波長における土砂収支から逆算した流砂量および流下方向 1 m 当たりの側岸侵食量と河床堆積量の流下方向分布を示すと Fig. 20 のようになる。

$x=24\sim 30\text{m}$  では、流砂量は弯曲の上流部で減少、中央部で一定、下流側で増加の傾向を示している。 $x=30\sim 36\text{m}$  では、蛇行侵食が大きく流砂量が急激に増加していて、流砂量に及ぼす側岸侵食の影響は大きい、一様な蛇行の発達に近い状態では砂州の発達と蛇行拡幅が釣合っていて流砂量の変動は小さいようである。

滞筋に沿う流砂量は、砂州の前縁を通過する流砂量と側岸侵食量の累積値であるが、転向部で断面全体の流砂量と等しくなるとし、前縁を通過する流砂量を一定とすると、 $x=25\sim 30\text{m}$  については Fig. 20 の破線のようになる。今後この流砂量分布と水理量との対応を検討するつもりである。

## 5. あとがき

蛇行流路の形成過程を把握するために行なった実験の結果について、主に土砂の移動の面から考察を加えてきたが、得られた結果をまとめるとつぎのようである。

- (1) 上流端から給砂した実験においても、無給砂の場合の下流区間と同様の結果が得られる。
- (2) 蛇行の発達速度は河岸高の小さい方が大きい傾向があって一様拡幅における側岸侵食と同様の特性を示す。
- (3) 砂州が一様に進行する場合は移動速度と流砂量との対応が良く、移動速度は波高と流砂量式から推定できる。
- (4) 主流に関連した幅である滞筋幅あるいは流砂幅などは、一様拡幅後時間的にほとんど変化せず、蛇行転向部に移行する主流幅も時間的にほぼ一定である。
- (5) 主流路の線形は、流下距離および時間とともに半径の変化する円弧で近似できる。
- (6) 流砂量に蛇行の影響はほとんど現われない。
- (7) 一様に蛇行が発達する場合、側岸侵食量の平均値は一様拡幅時のものと大差なく、蛇行弯曲の各部分でも流量の集中を考慮すれば同一の範囲に入る。

以上の結果は今後も検討して明確にしていかなければならないが、本文で指摘するにとどまった主な問題は、

- (1) 蛇行流路の形成過程に対する河岸高の影響
- (2) 砂州および蛇行の発達に伴う流速分布の変化
- (3) 蛇行弯曲部における流砂量、側岸侵食量、砂州の発達速度などと水理量との関係
- (4) 蛇行線形を支配する水理機構

などである。

最後に、本論文をまとめるにあたり、御協力下さった宇治川水理実験所ならびに河川災害研究部門の方々に感謝いたします。なお、本研究の一部は文部省科学研究費総合研究（代表者、北大岸力教授）の補助を受けたことを付記します。

## 参 考 文 献

- 1) 芦田和男・村本嘉雄・奈良井修二・塩入淑史：河道の変動に関する研究(1)——流路の変動過程に関する実験——，京都大学防災研究所年報，第13号 B，1970，pp. 243—260。
- 2) 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。
- 3) 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。
- 4) 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。
- 5) Langbein, W. B., and I. B. Leopold : River Meanders——Theory of Minimum Variance——, U.

- S. Geological Survey Professional Paper 422—H, 1966, pp. H2—H4.
- 6) Englund, F. : Flow and Topology in Channel Bends, proc. of ASCE, Vol. 100, No. HY11, 1974, pp. 1631—1648.