

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—

芦田和男・村本嘉雄

奈良井修二・塩入淑史

STUDIES ON FLUVIAL PROCESSES OF STREAM CHANNELS (1)

—Experiment of Deformation Process of Alluvial Channels—

By *Kazuo* ASHIDA, *Yoshio* MURAMOTO, *Shūji* NARAI
and *Kiyoshi* SHIOIRI

Synopsis

It is necessary for the regulation and stabilization of rivers to forecast the plane deformation of stream channels and the variation of bed configuration with time. Especially, the prediction of fluvial processes of rivers at the high flow stages is a serious problem for the prevention of river disasters.

We set out the laboratory work on this problem in a large alluvial channel with 130 m in length and 7.5 m in width. This paper describes the outline of the procedure and the several results of the experiments to date. The experiments were conducted in the alluvial channel with trapezoidal cross section of bottom width 100 cm and bed slope 1/200. The variation of hydraulic and sediment factors with time and the deformation of stream channels and bed configurations are discussed in detail.

1. 緒 言

一般に、河川は河道断面および堤防法線によって流路が拘束され、洪水が安全に流下するように設計されている。しかし、河道断面の流送能力を越えるような異常出水時には、洪水流は堤防法線の形状に拘束されずその流量に対応した流路を形成しようとして、いわゆる破堤、氾らんといった甚大な河川災害を蒙す。例えば、最近では、昭和42年8月の羽越豪雨災害における荒川の氾らん状況および本年8月の加茂川、境川、笹川などの水害にみられる。また、洪水流量がそれほど大きくなくても、流れが河道内の大規模な河床形態に支配されてある個所に集中し、水制の倒壊あるいは護岸および堤防の欠壊を招き、ついには破堤に及ぶ場合もしばしば生ずる。われわれはこうした現象を総括して河道の変動といている。河道の変動には長期にわたる河道変遷も含まれるが、とくに、出水時における河道の変動を適確に把握することは、河川災害を予知し、防御する上で極めて重要な問題である。さらに、今日、大河川では掘削方式による河道改修が進められる気運にあるが、掘削河道の変動特性を明らかにし、河道計画および設計の指針を与えることが緊急の課題と考えられる。

河道の変動に関してこれまでなされている研究を大別すると、regime theoryに代表される安定河道形

状の研究と河川の蛇行特性に注目した研究とがあって、実際河川における観測および実験水路における測定結果も数多く発表されている。こうした研究によって河道の形状特性および河床形態に対する水理諸量の影響が検討され、河道の断面形状、平面形状あるいは河床形態の領域区分および発生限界などについて各種の式が提案されている。しかし、その多くは安定あるいは平衡状態の河道を対象としており、河道の変動過程とその機構についてはほとんど明らかになっていない。そのため河道の設計は河道巾あるいは河床こう配を仮定した、いわゆる一次的な河床変動の計算に依存しており、上述のような出水時における河道の変動は全く予測がつかない状態にあるといえよう。

著者等はこれまで研究をふりかえてみて、河道の変動機構を究明するには河道変動の空間的、時間的スケールをなるべく大きくしてその過程を詳細に測定すること、また河床材料、河道の拘束条件および流れの非定常性などの影響を検討し、実際河川の現象の再現をはかることが必要と考え、本年より大規模な水路における実験を開始した。本格的な実験に入ってからまだ日が浅いので実験範囲も極く限られているが、実験の概要とこれまで得た結果について報告する。

2. 実験の概要

2-1 実験装置

実験に用いた水路は河川総合基礎実験施設¹⁾の河道部で、深さ 1.5 m、幅 7.5 m、有効長 243 m の長方形断面のコンクリート製水路である。本年 3 月、この水路に河床を所定のこう配および形状に整形するサン

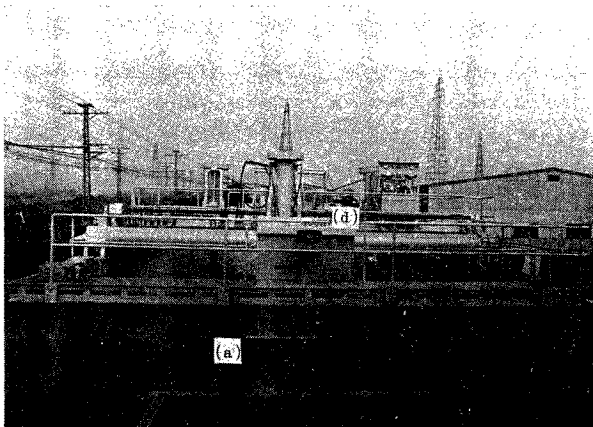


Photo. 1 Sand scraper (looking from upstream).

- (a) Shovel used for roughly scraping and meandering groove shaping.
- (d) Operation table.

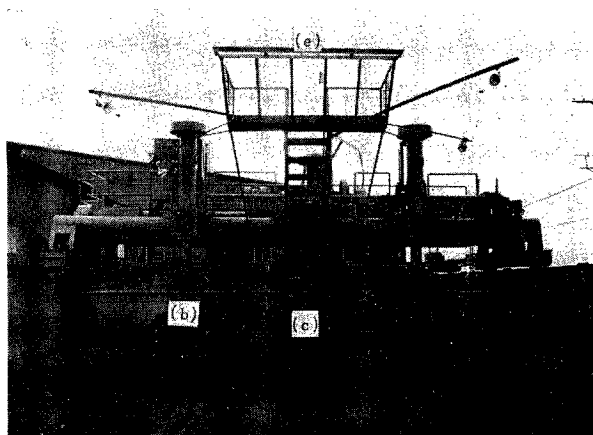


Photo. 2 Sand scraper (looking from downstream).

- (b) Blade for slope setting 1/2000~1/200.
- (c) Attachment plate for straight groove shaping.
- (e) Measurement stage of photograph.

ドスクレーパーを設置した。Photo. 1 および Photo. 2 はそれぞれサンドスクレーパーを水路の上流と下流側から写したもので、その主要部分と機能はつぎのようである。

Photo. 1 の(a)の部分は河床を荒均しするショベルであって、水路全巾にわたる横移動と $0 \sim \pm 90^\circ$ の旋回が同時にできるようになっている。ショベルは横行速度 $0 \sim 25 \text{ m/min}$ 、旋回角速度 $0 \sim 45^\circ/\text{sec}$ の範囲で変速可能なので、ショベル先端に所定の形状のアタッチメントを付けることによって偏角 $0 \sim 90^\circ$ の蛇行流路の整形にも使用できる。アタッチメントとして6種類の長方形および台形断面のプレートを備えている。Photo. 2 で(b)の部分は河床を所定のこう配に敷き均すプレートであって、その中央に直線流路を掘削するアタッチメント(c)が取り付けられている。敷き均しこう配は $1/200, 1/300, 1/500, 1/700, 1/1000, 1/2000$ の6段階で、アタッチメントはショベルのそれと同様である。スクレーパー本体の走行操作、プレートの昇降、ショベルの横行、旋回、昇降の単独および連動操作は Photo. 1 の(d)の操作盤で行なうようになっている。走行速度は 25 m/min である。なお、スクレーパーの前面上方に写真測定台(Photo. 2 (e))が取り付けられている。写真機としては広角レンズ(Supper Angulon)付の乾板写真機が具備されており、河床面で約 $6 \times 8 \text{ m}$ の範囲が撮影できる。

河道部水路における流量の調節はPI制御方式であるが、本実験の場合には小流量の定常流を用いたので上流端の三角堰で流量検定を行なった。また、河床および水位の測定には水路側壁上の計測台車に設置したポイントゲージ($1/10 \text{ mm}$ 読み)を使用した。

2-2 実験条件と測定内容

実験に用いた砂は河川砂(淀川一枚方)であって、その粒度分布曲線を Fig. 1 に示す。実験砂の中央粒径は $d_{50} = 0.61 \text{ mm}$ 、 ϕ スケールより求めた平均粒径、標準偏差はそれぞれ $d_m = 0.87 \text{ mm}$ 、 $s = 2.62$ である。水路に設定した河道は Fig. 2 に示すような台形断面の一樣な流路であって、河道延長 130 m 、敷き均しこう配 $1/200$ である。河道の上流端には約 $1/1$ の円錐状の斜面を作り、その上流約 8 m 区間を整流槽にしてある。下流端は流路の高さの砂止め(高さ 15 cm)を置き、高水敷部分には流路の境界面で拡巾しないようにコンクリートブロックが置いてある。

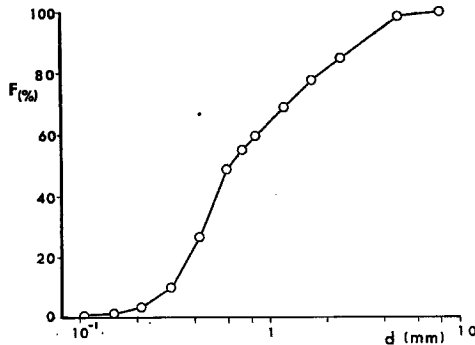


Fig. 1 Grain-size accumulation curve of used sand.

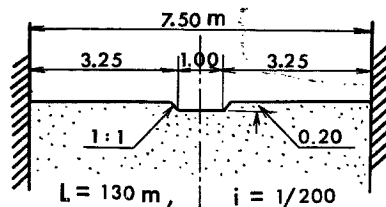


Fig. 2 Cross section of initial channel used in experiments.

Table 1 Experimental cases.

Exp. No.	Discharge Q (l/s)	Duration T (hr-min.)
I-1	7.5	100°
I-2	15.0	30°19'
II	15.0	28°41'

これまで行なった実験は Table 1 に示す 3 ケースである。ただし, Exp. I-2 は Exp. I-1 の継続実験であって, 流量 7.5 l/s で100時間通水後さらに 15.0 l/s で30時間19分通水した。また, Exp. I-1 と Exp. I-2 は予備実験であって, 流況の観察, 実験条件および計測法の検討を主眼とし, Exp. II で河道の変動過程について詳細な測定を行なった。Exp. II の測定内容はつぎのようである。

全通水時間 $T=28^{\circ}41'$ (以下 ° は時間, ' は分単位を表わす) の途中, $2^{\circ}25'$, $6^{\circ}52'$, $10^{\circ}39'$, $19^{\circ}34'$, $28^{\circ}41'$ の 5 時点で停水し, 通水時の測定と停水時の測定を交互に行なった。

通水時の測定内容は水位と河道巾の測定, 河道形状と河床形態の平面写真撮影, 表面浮子による流速測定およびトレーサーによる水面と底面流線の撮影である。水位と河道巾の測定は, 流下方向 (x) に $x=1\sim 130$ m を 4 m 間隔で行ない, 水位は水路中心を入れて横方向 (y) に 50 cm 間隔で測っている。河道の平面撮影は主に河床形態の形状変化と変動速度を検討するために行なったもので, 観測台 (スクレーパー) を撮影範囲が重なる間隔 (3~6 m) で移動し, 河道全長にわたって 1 往復の写真を撮った。河道の同一区間における往復撮影の時間差は 20~30 分である。流速の測定は表面浮子として直径約 2 cm の発泡ポリスチロール円板を用い, 全長を 10 m 毎に区切って, 各区間の流下時間を測る方法と 1 ケの浮子の流下時間を追跡する方法を併用した。区間測定の場合の繰り返し数は 5 回である。また, 流線の測定にはトレーサーとして水面についてはアルミニウム粉と上述のポチスチロール円板, 底面に対しては過マンガン酸カリ結晶を用いた。

一方, 停水時の測定では, 河床高の測定, 河道の平面撮影, 下流端の流出土砂量の測定および河床材料の分析を行なった。河床高の測定では全延長の縦断形状と一区間の横断形状の測定とに分けて行なっている。前者の測点は水位と同じであって, 後者では河床形態あるいは河道蛇曲の顕著な区間を選び, 流下方向 0.5~1 m 間隔, 横方向 10~20 点, 河床形状に対応して測定した。河道の平面撮影は通水時のそれと同じ要領で 1 回行なった。流出土砂量の測定は下流端にブロックで $4\times 5\times 0.2$ m のプールを作って掃流砂を堆積させ, その量を秤で測るとともに堆積容積との比較も行なった。河床材料の分析は実験中は河床に擾乱を与えるので流出土砂だけを検討し, 最終時点で河道全長を 20~30 m 間隔で採砂した。採取個所は 1 断面数点でいづれも表層 1 cm 以内である。

3. 実験結果とその検討

3-1 水理量の検討

(1) 河床高, 水面こう配および水面巾の変化

Exp. II について, $T=0\sim 28^{\circ}41'$ の各時点における断面平均の河床高 \bar{Z} , 水位 \bar{H} および比エネルギー \bar{H}_0 の場所的变化を示すと Fig. 3 のようである。河床高の測定は水位測定後すぐに停水して行なっているので, $T=0$ を除いて他の時点の \bar{Z} と \bar{H} , \bar{H}_0 とはほぼ対応している。この実験では, 図にみるように全体として河床上昇の傾向が顕著であって, 水位および比エネルギーの変化もほとんど河床高の変化に支配され, 同じ状況を示すことがわかる。上流の河床低下域は次第に下流に波及し, 最終時点で流砂の平衡点は約 $x=50$ m に達している。また, 下流端は砂止めで固定され段落ちになっているので, 堆積量が減少し, 水面は低下背水状態になる。その影響範囲をみるために水面こう配 i_w の変化を求めると Fig. 4 のようになる。下流では水面こう配が次第に増大し, 中流および上流では減少する。その結果, 水面こう配の曲線は次第に屈曲していくが, その変曲点はほぼ $x=100$ m 付近にあって変わらないようである。

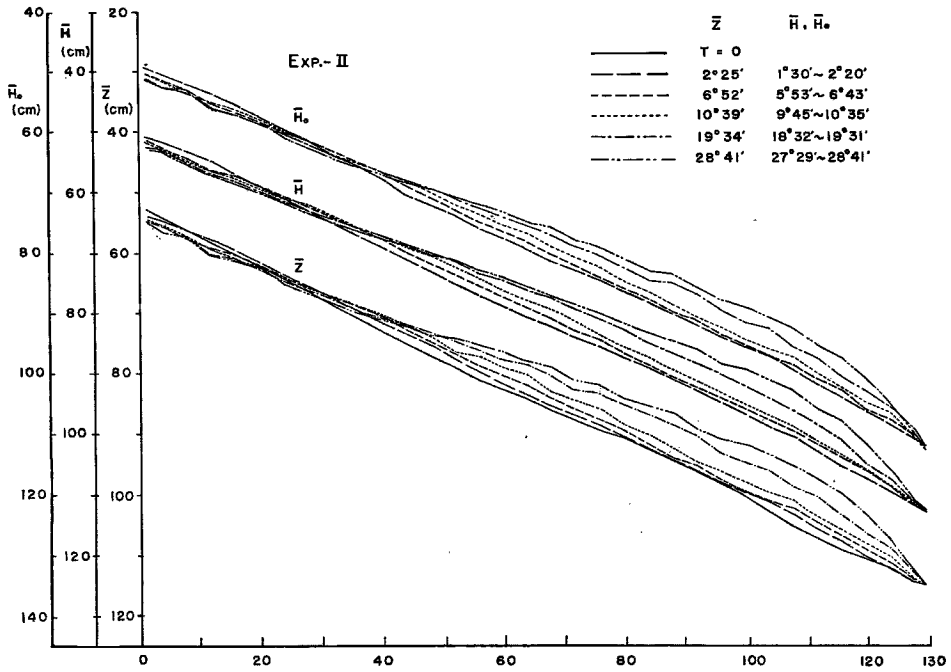


Fig. 3 Variation of mean bed profile, water surface profile and specific energy line with time (Exp. II).

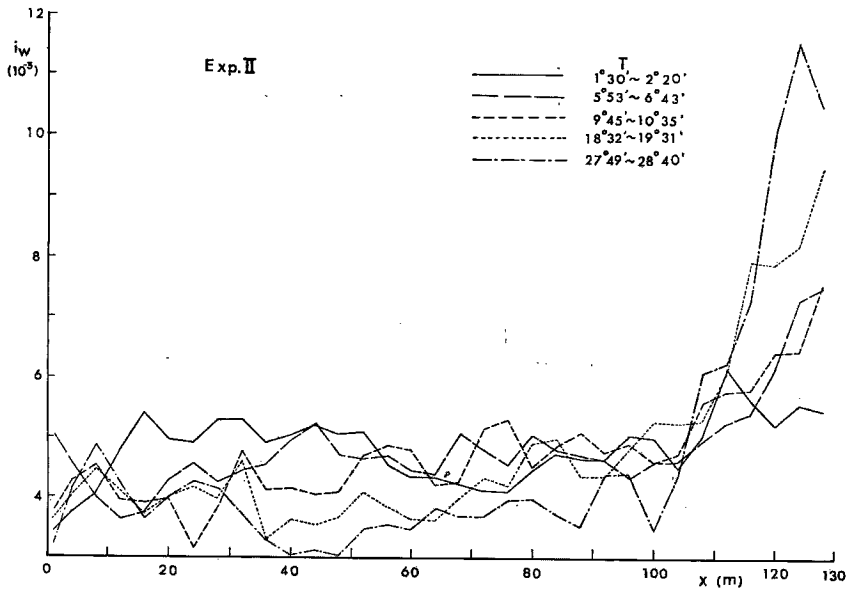


Fig. 4 Variation of longitudinal slopes of water surface with time (Exp. II).

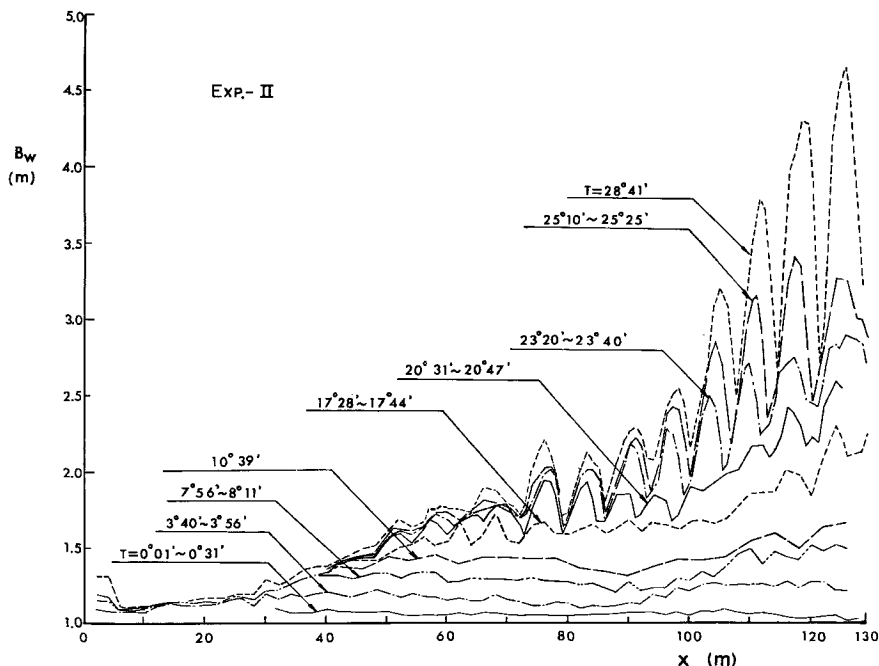


Fig. 5 Variation of water surface width of stream with time (Exp. II).

Fig. 5 は通水および停水時の平面写真から読みとった水面巾 B_w の場所的变化を示したものである。 $T=0^{\circ}01' \sim 10^{\circ}39'$ では、中流および下流はほぼ様な拡巾状態にあるが、 $x=80 \sim 95$ m 区間では拡巾速度が小さく B_w の分布は流下方向にやや中だるみした形をなしている。 $T=17^{\circ}28' \sim 20^{\circ}47'$ では、 $x=50 \sim 95$ m と $x > 110$ m において河道の蛇曲が発生し、 $B_w(x)$ も波状を呈する。 $T=23^{\circ}20' \sim 23^{\circ}40'$ になると、上流の蛇曲の影響が $x=95 \sim 110$ m の間に伝播し、 B_w は $x=50 \sim 130$ m の間で最終時点とほぼ対応した波動形状になる。 $T=25^{\circ}10'$ 以降では、約 $x=100$ m 付近を境にして上、下流の拡巾速度が変化し、上流に比して下流の B_w が急激に増加する。その結果、 $T=28^{\circ}41'$ における B_w の包絡線は i_w の変化と同様に屈曲した形状になり、その変曲点は $x=100$ m 付近に現われる。

つぎに、Exp. I-2 について \bar{Z} , \bar{H} , \bar{H}_0 と B_w の場所的变化を示すと Fig. 6 および Fig. 7 のようになる。Exp. I-2 の場合、 $T=0$ の河道は $Q=7.5$ l/s で100時間通水後の状態にあって、下流端で段落ちになっていない。Exp. I-2 の $T=30^{\circ}19'$ における \bar{Z} , \bar{H} , \bar{H}_0 の形状と Exp. II の $T=28^{\circ}41'$ (Fig. 3) のそれらとを比較すると、 $x=50 \sim 120$ m の範囲で両者はほとんど一致しており、上、下流の一部を除いて前流量 (Exp. I-1) および下流端の影響はみられない。また、 B_w の変化は Exp. II (Fig. 5) と当然違った過程をたどり、最終状態ではほぼ同じスケールの波動形状を示すことがわかる。しかし、Exp. I-2 と Exp. II とでは河道蛇曲の波長分布および拡巾速度の場所的分布は異なっており、このことは 3-3 で述べる。

(2) 平均流速、摩擦速度および粗度係数の変化

Exp. II の平均流速、摩擦速度および Manning の粗度係数などについて (1) と同様な検討を行なったが、断面平均水深の場所的变化に比して時間的変化が顕著でないために特徴的な傾向が認められなかった。そこで、上に述べた \bar{Z} , i_w および B_w の変化に着目して河道全長を上流部、中流部、下流部の三区間に分けて、各区間における平均の断面流速 \bar{U} , 摩擦速度 \bar{U}_* , 粗度係数 n および Froude 数 \bar{F}_r の時間的変化を検討した。上流部の下限となる断面としては、Fig. 2 において $\bar{Z}(x, T)$ と初期河床 $\bar{Z}(x, 0)$ との交点あるいはある測定時とその直前の河床との交点とが考えられる。前者の位置を x_0' , 後者を x_0 としてその

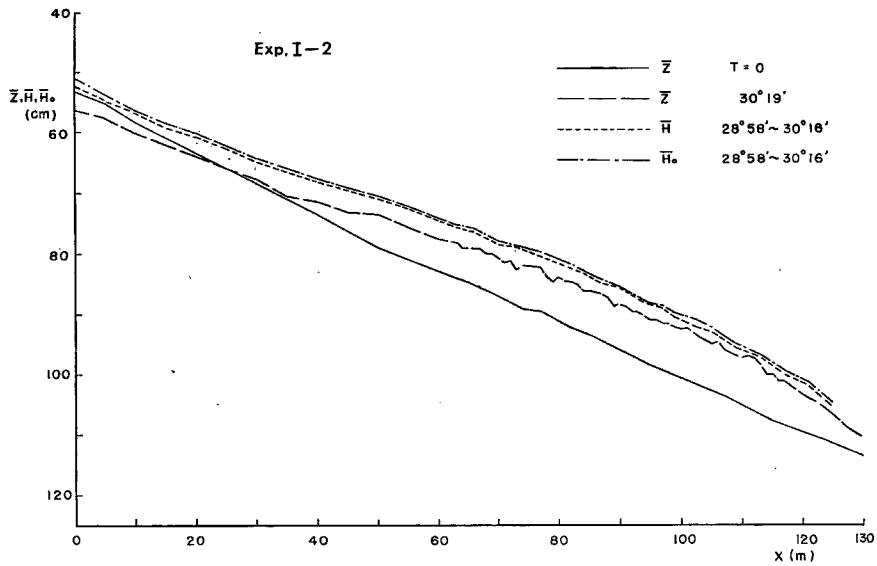


Fig. 6 Variation of mean bed profile, water surface profile and specific energy line with time (Exp. I-2).

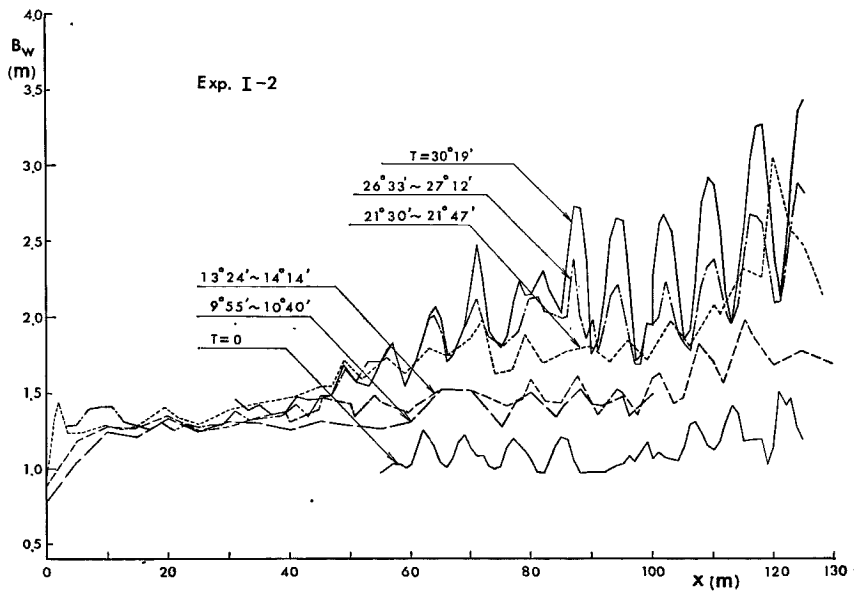


Fig. 7 Variation of water surface width of stream with time (Exp. I-2).

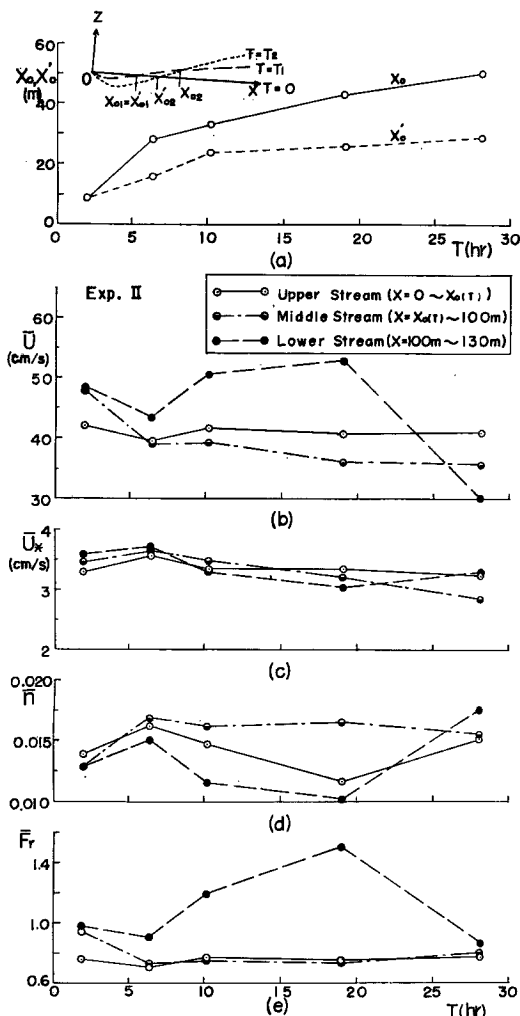


Fig. 8 Variations of equilibrium section of bed load (a) and hydraulic factors (b)~(e) with time in Exp. II: (b) Mean velocity, (c) Shear velocity, (d) Manning's roughness coefficient and (e) Froude number.

は上流部とはほぼ同じであって、中流部と比較すると $T=10^{\circ}25'$, $19^{\circ}02'$ ではむしろ小さい値を示している。

粗度係数は中流部で $T=6^{\circ}25'$ 以降ほぼ一定しており、その平均値は $\bar{n}=0.016$ である。上流部の n は河床が一樣なので中流部より小さく、下流部は \bar{U} と同様に変化が激しく一定の傾向を示さない。最後に、Froude 数は $T=6^{\circ}52'$ 以降、上、中流部では $F_r=0.75$ で一定している。

以上、断面平均の水量場の場所的、時間的変化を検討したが、河道の変動を特徴づける河道巾の変化は河床高、平均流速および摩擦速度の分布からは説明できなく、河床形態および主流路の変化など河道内の平面的な性状について考察する必要がある。

3-2 粒度分布と流砂量の検討

Exp. II の $T=28^{\circ}41'$ で採取した河床砂の粒度分布を示すと Fig. 9 のようである。図で $x=132$ m の

時間的変化を示すと Fig. 8(a) のようになる。 x_0' , x_0 とともにその移動は通水時間の増加とともにゆるやかになり、 x_0' , x_0 の移動速度は初期でそれぞれ 1.6, 4.5 m/hr, $T=28^{\circ}41'$ で 0.4, 0.8 m/hr 程度である。こうした平衡点の位置と Fig. 5 の拡巾特性、3-2 に述べる河床砂の粒度分布の変化および実験中における砂の動き、河床形態の変化などの観察結果とを比較検討し、上流部の下限として、 x_0' より x_0 が妥当と考えた。一方、下流部の上限の断面としては(1)の検討から $x=100$ m を選んだ。

Fig. 8 (b)~(e) は $0 \sim x_0(T)$ を上流部、 $x_0(T) \sim 100$ m を中流部、 $100 \sim 130$ m を下流部として \bar{U} , \bar{U}_* , n および \bar{F}_r の時間的変化を示したものである。平均流速は上流部では時間的にはほぼ一定であって、中流部で顕著に減少する傾向がある。下流部では変化が激しく一定の傾向を示さない。これは下流部では流路の横方向の偏りが大きく、水面巾で流れの特性を表わせないことによる。中流部における流速低下の特徴は表面流速の測定結果でも認められ、 $T=4^{\circ}54' \sim 5^{\circ}31'$, $14^{\circ}11' \sim 14^{\circ}46'$, $22^{\circ}14' \sim 22^{\circ}44'$ における表面流速の平均値 U_s はそれぞれ $U_s=60, 51, 47$ cm/sec であった。

摩擦速度はその時間的変化および3区間の \bar{U}_* 値の差も小さいが、各区分についてつぎのような傾向が認められる。上流部では $\bar{U}_*=3.4$ cm/sec でほぼ一定しており、中流部では一様に減少する傾向が現われ、 $T=6^{\circ}25' \sim 28^{\circ}41'$ の間に $\bar{U}_*=3.6$ cm/sec から $\bar{U}_*=2.9$ cm/sec に減少する。また、下流部における \bar{U}_* の時間的変化は顕著でなく、その値

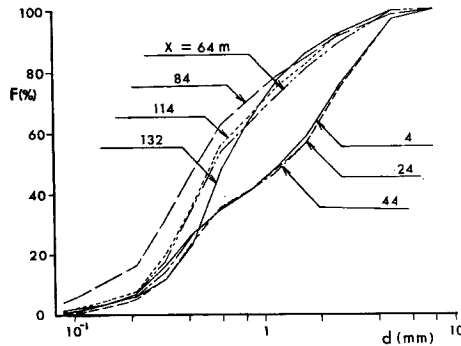


Fig. 9 Grain size accumulation curves of sampling sands at different sections of the stream channel after $T=28^{\circ}41'$. (Exp. II),

曲線は下流端のプールに堆積した流出土砂の分布である。粒度分布曲線は $d=0.5\sim 7\text{ mm}$ の範囲で上に述べた上流部に属する $x=4\sim 44\text{ m}$ と中流および下流部に属する $x=64\sim 132\text{ m}$ の2つの群に分離されているのがわかる。これらの曲線から粒度分布の特性値 d_{50} 、 d_m および s を求めた結果が Table 2 に示してある。同表には $T=2^{\circ}25'$ における流出土砂および実験砂の特性値も比較してある。

$x=4\sim 44\text{ m}$ の区間では、 $d_{50}=1.26\sim 1.30\text{ mm}$ であって、実験砂の d_{50} の約2倍に変化しており、粒度分布曲線からわかるように $d=1\text{ mm}$ 前後の砂が流出して s の値も大きくなっている。 $d_{50}=1.26\sim 1.30\text{ mm}$ に対する限界摩擦速度 U_{*c} を岩垣公式から求めると $U_{*c}=2.70\sim 2.76\text{ cm/sec}$ となり、Fig. 8 (c) に示した上流部で $T=28^{\circ}41'$ の $\bar{U}_*=3.24\text{ cm/sec}$ に比して小さい。しかし、実際にはこの河道区間では砂の動きはみられないので、限界掃流力以下の状態にあると考えられる。掃流力と河床材料との対応を説明するには断面形状、河床面における粒度変化、混合粒径などの影響を検討する必要があるだろう。一方、 $x=64\sim 132\text{ m}$ では、 $d_{50}=0.45\sim 0.62\text{ mm}$ 、 $s=2.17\sim 2.82$ であって、 $T=2^{\circ}25'$ における流出土砂および実験砂の値もこの範囲に入っている。また、同一断面の数点で測定した結果にも特徴的な傾向はみられなく、Exp. II の実験中では中流および下流部における河床砂の粒度構成は実験初期から変化していないようである。なお、Exp. I-1 では粒度分析を行っていないので明確でないが、一断面内でも主流部とそれ以外とは河床面の粒度に差が認められ、実験条件に対応して粒度分布の影響を検討していく必要があるだろう。

つぎに、下流端の堆積土砂から掃流砂量を求めた結果を示すと Table 3 のようになる。同表で Q_B は単位時間の総流出土砂量、 q_B は Q_B を各測定時点における下流部の平均水面巾で割った単位巾流砂量である。また、計算値としては Shields 式および土研式から求めた値が比較してある。実験値と計算値とはほぼ対応している。平均的にみればこうした側方侵食のある流路に対しても従来の流砂量式が適用できるようであるが、側方侵食が急激な場合の流砂量および流路巾、摩擦速度、粗度係数、粒径の代表量の決め方などに問題

Table 2 Properties of sampling sands after Exp. II.

x (m)	4	24	44	64	84	114	132*	Used sand
d_{50} (mm)	1.26	1.28	1.30	0.56	0.45	0.54	0.62(0.54)	0.61
d_m (mm)	1.00	1.06	1.03	0.75	0.59	0.70	0.74(0.70)	0.87
$s = \sqrt{d_{84}/d_{16}}$	3.33	3.16	3.46	2.65	2.82	2.61	2.17(2.63)	2.62
d_m/d_{50}	0.79	0.83	0.79	1.34	1.33	1.30	1.19(1.30)	1.44

* Deposit sand in down stream end pool
() at $T=2^{\circ}30'$

Table 3 Comparison of observed values of sediment transport rate with calculated ones.

Sediment transport rate		T				
		0~2°25'	2°25'~6°52'	6°52'~10°39'	10°39'~19°34'	19°34'~28°41'
Observed values	Q_B (cm ³ /sec)	19.7	30.0	35.1	34.9	36.0
	q_B (cm ² /sec)	0.160	0.213	0.225	0.162	0.101
Calculated values of q_B	Shields E_q .	0.225	0.238	0.172	0.118	0.094
	Sato etc E_q .	0.168	0.112	0.199	0.244	0.042

が残されている。

3-3 河道形状と河床形態の検討

ここでは主として河道形状の変化とそれに支配的な影響を及ぼす大きいスケールの河床形態——砂礫堆²⁾——に注目して述べる。

(1) 河道形状と河床形態の変化

Fig. 10 (a), (b) はそれぞれ Exp. I-2 と Exp. II の河道形状の時間的变化, Fig. 11 (a), (b) (b)' は河床形態の変化を示したものである。Exp. I-1, I-2, II における河道状態の時間的变化を観察および写真測定の結果にもとづいて述べるとつぎのようである。

Exp. I-1 では、通水初期においては砂礫堆は 50 m 付近と 100 m より下流で顕著であって、約20時間たつと 50 m から下流にある砂礫堆の位置がほぼ固定し、水衝部の側方侵食が進む。70~100時間では、Fig. 11 (a) (Exp. I-2, $T=0$) にみられるように砂礫堆の一部が水面上に現われる。流れは $x=60\sim 90$ m の間ではほぼ様な水面巾で蛇行し、 $x=90$ m より下流では流路が分れ中州状態になるが、砂の動きおよび側方侵食の速度は極めて遅くなる。

Exp. I-2 では、通水後1時間で $T=0$ の河床形態は変化し、1~2 m の短い波長の砂礫堆が $x=40\sim 130$ m 区間で発生して、その発達と移動が続く。しかし、河道の側方侵食は $T=0$ の蛇曲形状に支配されて、水衝部が流下方向に一定した位置で進行する。約20時間後に砂礫堆の波長は Fig. 10 (a) の河道蛇曲の半波長程度まで発達する。その後、砂礫堆はほぼ波長変化もなく移動速度も低下して、Fig. 11 (a) の $T=30^{\circ}19'$ に示すような形態になる。河道の蛇曲も20時間以降は下流へ伝播せず、振巾だけ増大する。

Exp. II では、通水後 $T=5^{\circ}\sim 10^{\circ}$ で $x=6$ m より下流に波長 1~2 m の細砂を主体とした薄い砂礫堆が発生する。しかし、砂礫堆上の砂漣も顕著であって、水流および水面の波紋の蛇行性は明らかでない。 $T=20^{\circ}\sim 30^{\circ}$ になると、 $x=0\sim 2$ m では砂の動きが止まり、 $x=4\sim 12$ m 区間は砂漣状態、 $x=20$ m から下流で水面の波紋が波長 2~3 m で蛇行するのが観察される。この時点ですでに Fig. 11 (b), (b)' の $T=2^{\circ}15'$ に示した形態の砂礫堆が発生しているものと考えられる。同図にみるように、それ以降 $T=10^{\circ}39'$ まで、中流と下流部の砂礫堆は $T=2^{\circ}15'$ とほぼ同じ形態で発達する。以上の河床形態の発達過程は Fig. 10 (b) で $T=0^{\circ}31'\sim 10^{\circ}39'$ まで、河道の側方侵食が一樣に進む過程と対応している。

$T=16^{\circ}58'\sim 17^{\circ}21'$ になると、河道の側方侵食が $x=45\sim 95$ m と $x=110$ m から下流の区間で局所的に進行し、蛇曲河道の状態になる。それに伴って側岸からの給砂量も局所的に増大するため砂礫堆の形態が変形し、 $T=19^{\circ}34'$ の図に示すように先端が水路中央部に突出した形あるいは重なり合った形になる。 $T=23^{\circ}20'\sim 28^{\circ}41'$ では $x=95\sim 110$ m 区間の蛇曲も発達し、砂礫堆の変形ならびに側方侵食土砂によって生じた薄い砂堆との重なりがさらに激しくなる。

一方、流路の主流線は $T=23^{\circ}20'$ 頃まで河道の蛇曲に対応している。しかし、それ以降で $x=60\sim 80$ m の砂礫堆が進行すると、その影響が下流に伝わって主流線の蛇行と河道の蛇曲との間に位相差が生じ、河道蛇曲の下流への移動あるいは流路の分離が現われる。Fig. 10 (b) の $T=23^{\circ}20'\sim 28^{\circ}41'$ および Fig. 11 (b)' の $T=28^{\circ}41'$ の段階でこうした不整合蛇行の状況がみられる。しかし、その状態が長く進行する以前

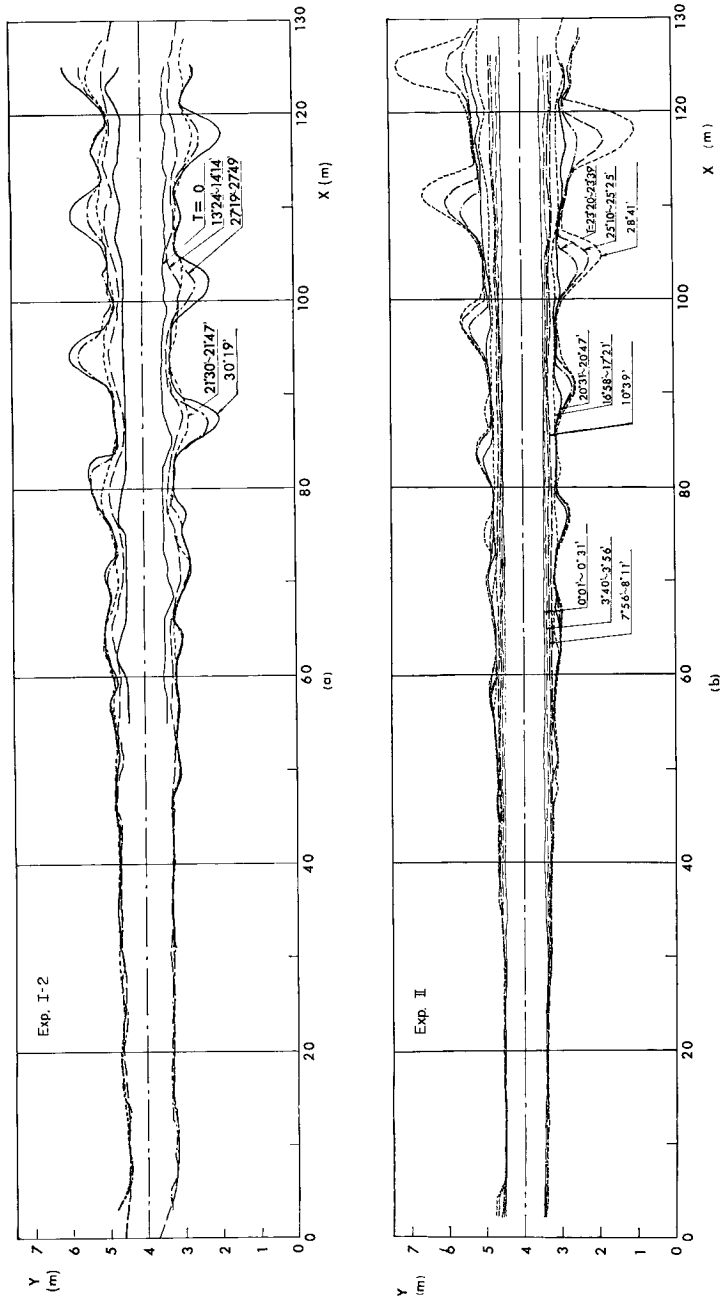


Fig. 10 (a), (b) Deformation processes of stream channels in Exp. I-2 and Exp. II.

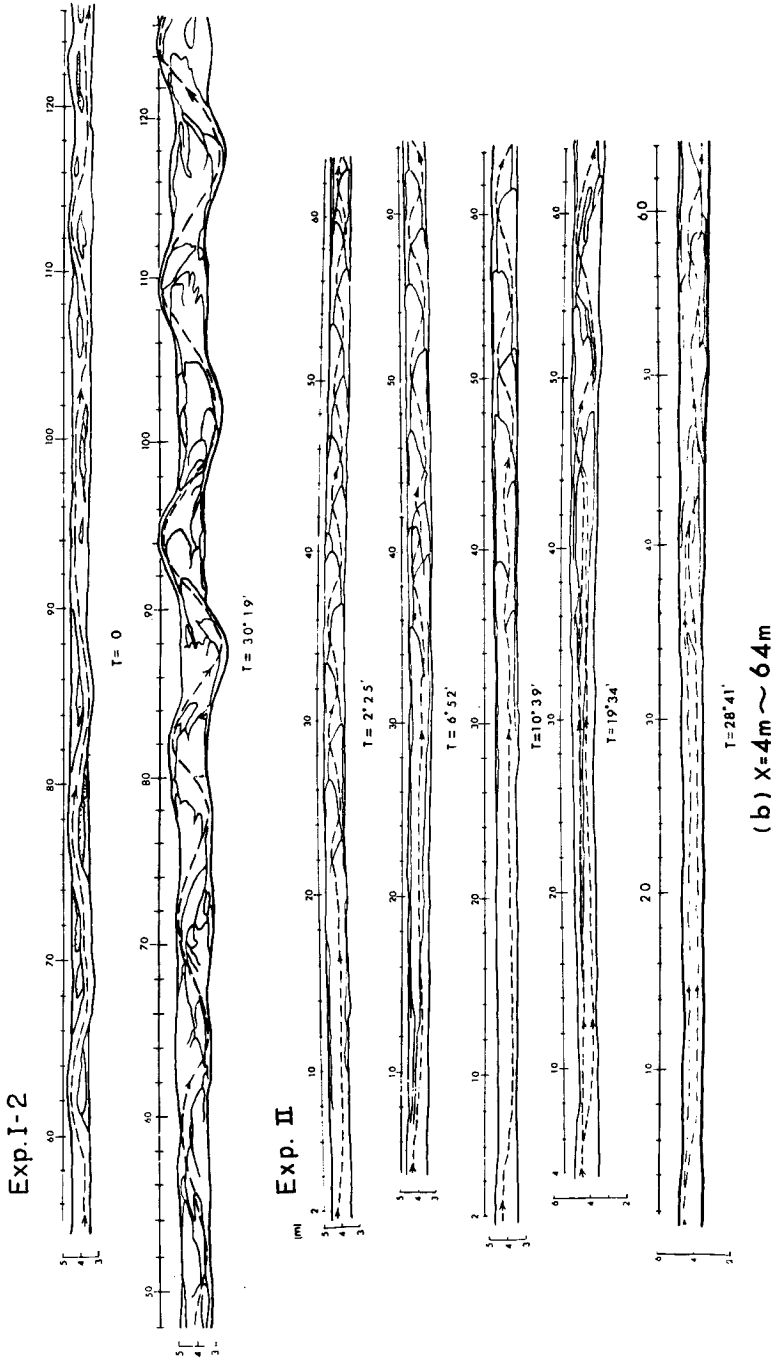


Fig. 11 (a), (b) Developing processes of bed configuration with time in Exp. I-2 and Exp. II.

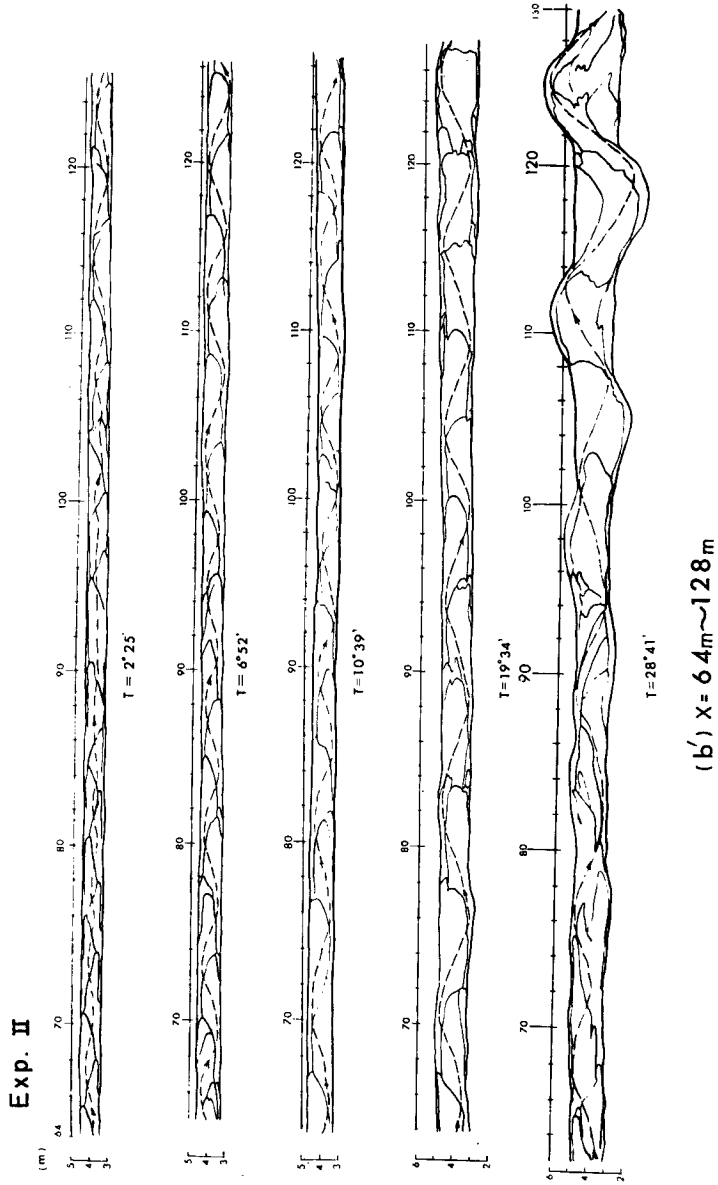


Fig. 11 (b)' Developing processes of bed configuration with time in Exp. II.

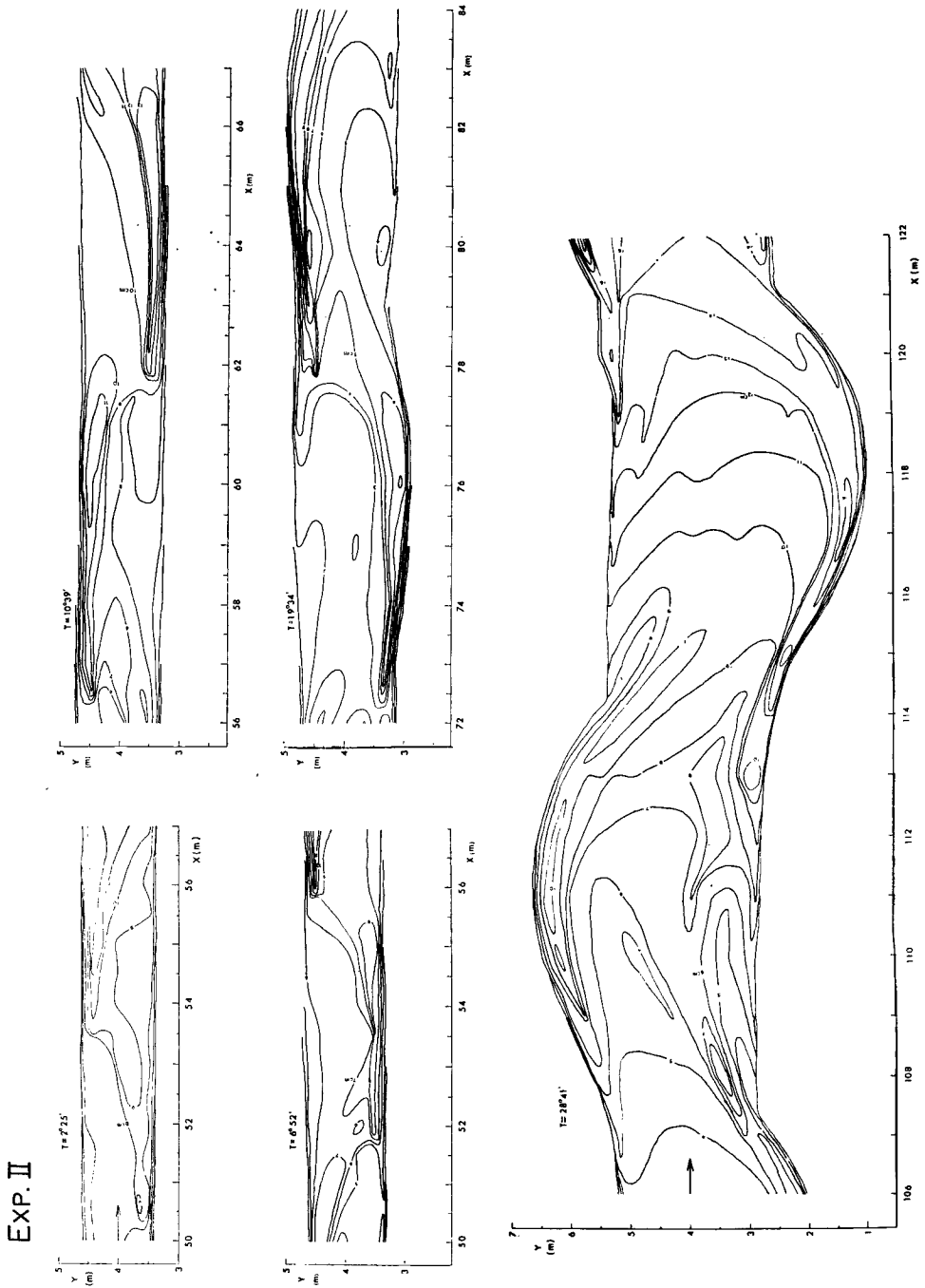


Fig. 12 Changes of bed surface contours or plan forms of Sand Bars with time in Exp. II.

に河道が側壁に達し実験を停止したので、顕著な8の字蛇行（複列蛇行）あるいは網状河道といった河床形態をみるに至っていない。

（2）砂礫堆の形状と移動特性

本実験では給砂を行っていないので、上述のように上流部と中流、下流部とでは河床形態の様相および発生、発達状況もかなり異なる。ここでは、主に河道の蛇曲に関する中流および下流における砂礫堆の形状と移動特性に着目してその時間的変化を検討する。

Fig. 12 は砂礫堆の平面形状の時間的変化を示したもので、砂礫堆2波長（主流線1蛇行）間の河床高の等高線が描かれてある。 $T=2^{\circ}25' \sim 10^{\circ}39'$ では、河道の蛇曲が発生していないので、固定側壁の直線水路でよく観察される砂礫堆と同様に前縁線が弓状に張り出した形態をなし、砂礫堆の1単位が明確である。 $T=19^{\circ}34'$ においても砂礫堆の1単位および配列の変化は少ないが、前縁線が河道の蛇曲部へ押し出されて膨らんだ形態になっている。 $T=28^{\circ}41'$ になると砂礫堆の前縁線は下流の砂礫堆のすその部分に接した形になり、その境界も不明確になる。また、以前に存在した砂礫堆と新たに進行してきた砂礫堆とが一部重なった形になり、主流線は蛇曲の頂部よりやや下流へ移っているのがわかる。このように砂礫堆は河道の蛇曲にともなって、前縁線の下流部分が蛇曲方向に押し出され、上流部分が取り残された形になる。この状態で流路が限定されると、砂礫堆の移動が止まると考えられるが、Exp. II ではその状態に達していない。

つぎに、砂礫堆の高さの時間的変化をみるために、Fig. 12 に示した範囲の河床横断面を水面を一致させて重ね合わせると Fig. 13 のようになる。河道の中央部における最小の河床変動高は $T=2^{\circ}25' \sim 28^{\circ}41'$ の各段階とも 1.5~2.0 cm の範囲にあって、時間的変化は顕著でない。しかし、側岸近くの変動高は $T=2^{\circ}25'$ で約 3 cm に対して $T=6^{\circ}52'$ 、 $10^{\circ}39'$ では 4~4.5 cm になり、河道蛇曲の発生した $T=19^{\circ}34'$ 、 $28^{\circ}41'$ の段階では約 5 cm に達している。各時点それぞれ1区間の測定値なので明確ではないが、蛇曲を発生させる際の砂礫堆の高さには一定の限度があって、本実験の場合にはそれが 4.5~5 cm 程度と考えられる。なお、最大変動高と砂礫堆の波長の比は各段階とも約 0.01 で一定している。

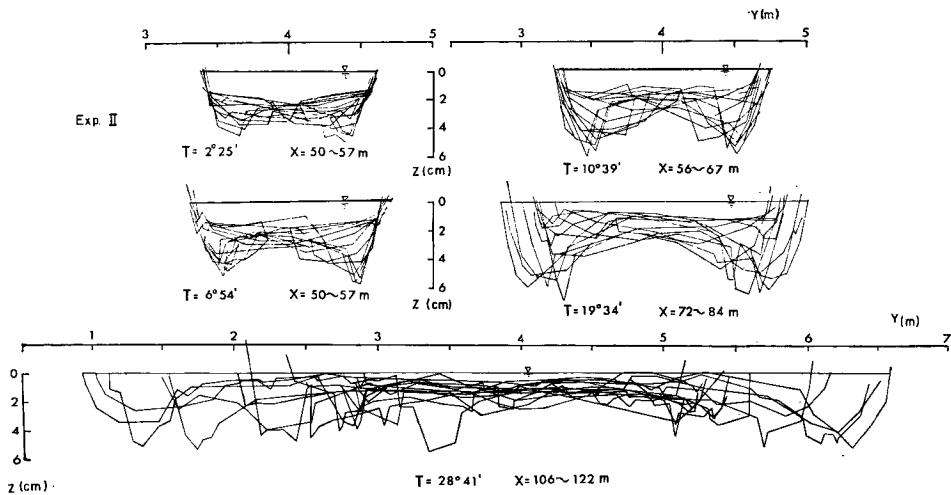


Fig. 13 Changes of cross sections of stream channel with time in Exp. II.

一方、流下方向の各点における砂礫堆の波長と移動速度の時間的変化は Exp. II および Exp. I-2 についてそれぞれ Fig. 14 (a), (b) および Fig. 15 (a), (b) のようになる。ただし、波長 L_B は砂礫堆1個の長さであって水路中心線に沿って測っている。また、移動速度 V_B は主に砂礫堆先端の移動を写真上で追跡したが、砂礫堆が変形した場合には主体となる砂礫堆の代表点の移動量から求めている。

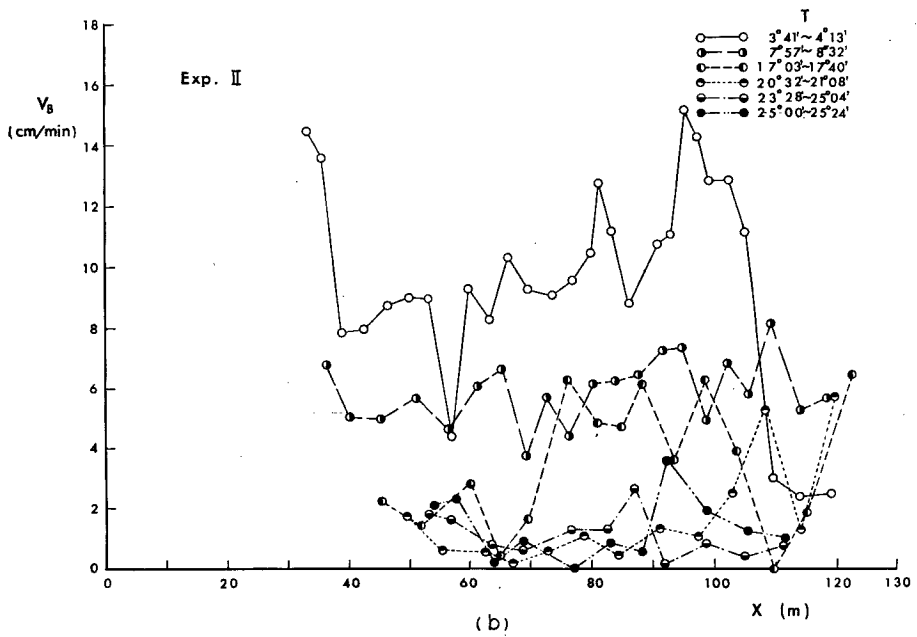
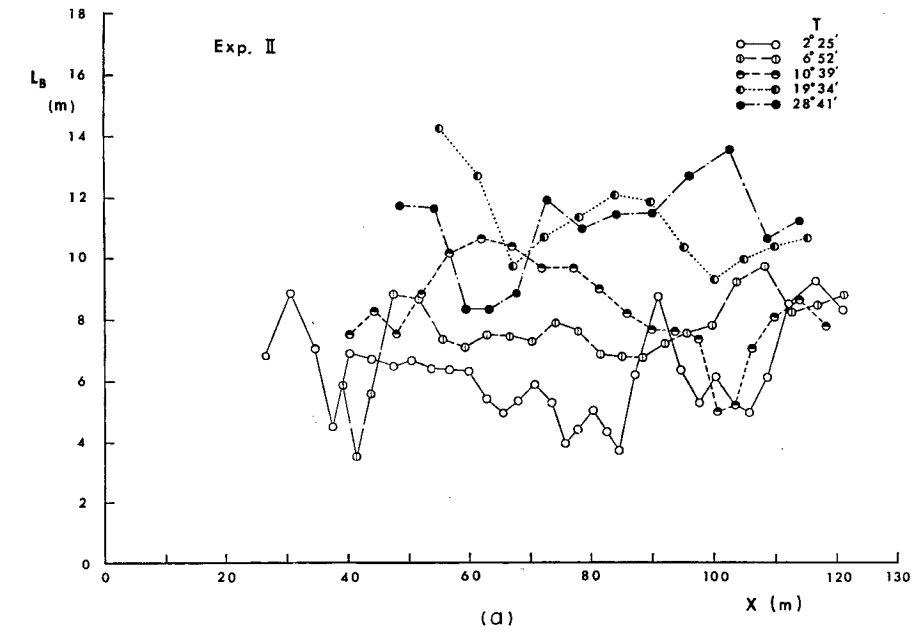


Fig. 14 (a), (b) Variation of lengths and migration velocities of Sand Bars with time in Exp. II.

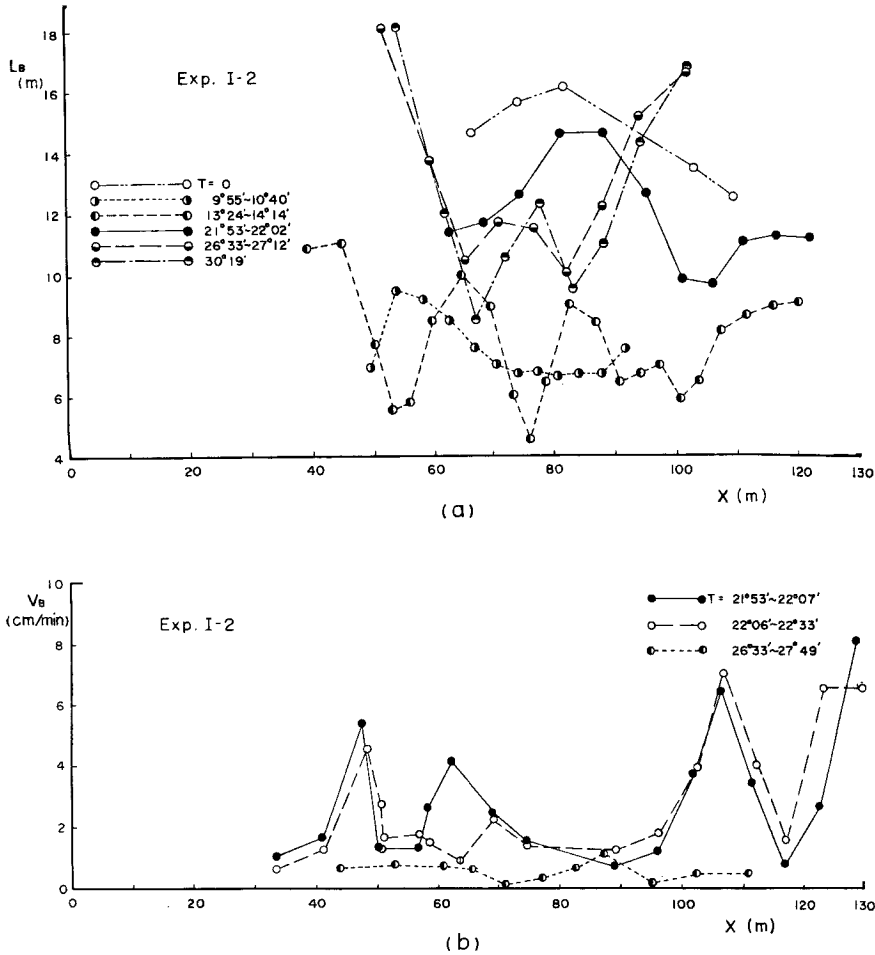


Fig. 15 (a), (b) Variation of lengths and migration velocities of Sand Bars with time in Exp. I-2.

Exp. II の中流部における砂礫堆の波長は $T=2^{\circ}25' \sim 19^{\circ}34'$ の間に $L_B=4 \sim 6$ m から $L_B=10 \sim 12$ m へと約 2 倍に伸びて、それ以降では一定になる。しかし、上流および下流部では中流部より波長が長くなる傾向にあって、上流部の傾向は次第に下流へ伝播していくが下流部の範囲はほぼ一定している。これは 3-1 で述べた河床高、河道巾などの変化に対応しており、主に流砂量の分布に関係するものと考えられる。また、砂礫堆の移動速度は $T=3^{\circ}41' \sim 4^{\circ}13'$ で約 10 cm/sec であるが、 $T=20^{\circ}32'$ 以降では約 1 cm/min になる。すなわち、蛇曲の進行する過程では砂礫堆の発達および流下より変形が主体となっていることがわかる。

Exp. I-2 では、 $T=0$ で存在した $L_B=13 \sim 16$ m の砂礫堆は $T=9^{\circ}55' \sim 10^{\circ}40'$ に $L_B=6 \sim 9$ m へと約 $1/2$ に減少し、その後次第に発達して $T=26^{\circ}35'$ 以降では上流と中流部の砂礫堆は Exp. II とほぼ同じ波長分布に達している。また、移動速度も $T=26^{\circ}33' \sim 27^{\circ}49'$ の時点では Exp. II と同程度になっており、Exp. I-1 の影響はほとんどみられない。しかし、下流部では、Exp. II より波長の伸びが顕著であって、Fig. 10 (a) に示した Exp. I-2 の河道蛇曲が Exp. II に比して波長が長く、振巾の増大速度が小さいことに対応している。なお、本実験の範囲では、砂礫堆の特性量（波長、高さおよび移動速度）と河道蛇曲の特

性量(波長, 振巾とその進行速度および河道巾)の各測点, 各時点における関係には特徴的な傾向はみられなく, $L_B/B_w=4\sim 8$ であった。

4. 結 言

以上, 本文では大型水路における実験の概要と主に $i=1/200$, $Q=15.0\text{ l/s}$ の条件で行なった実験の結果を述べた。この条件の下では河床高の上昇および下流方向への拡巾現象が著しく, 本実験の範囲では平衡状態に達しなかった。従来なされたこの種の実験では主に蛇行発達後の状態を対象としており, 本実験で測定した範囲は極く短い通水時間で生じているようである。例えば, 蛇行発生までの時間(あるいは砂礫堆の長さが一定になるまでの時間)をみると, 木下の実験³⁾ ($B=3.5\sim 13\text{ cm}$, $Q=0.109\text{ l/s}$, $i=1/30$) で5~10分, 永井の実験⁴⁾ ($B=20\sim 40\text{ cm}$, $Q=0.6\sim 1.2\text{ l/s}$, $i=1/50$) で20~40分程度である。本実験と同程度の時間スケールをもつものとしては Rozovskii らの実験⁵⁾ ($B=47\text{ cm}$, $Q=2\text{ l/s}$, $i=0.007$) があって, 約49時間を要しているが資料が十分でなく, 河床上昇と拡巾現象についての比較検討は難しい。

しかし, 実際河川においては河道の拡巾とそれによる堆積は災害時によく経験する現象である。その際, regime theory で考えられているように一定流量に対して一定の河道巾になる方向に現象が進むか, 本実験でみられたように下流へいくにつれて河道巾が拡がる方向が支配的かを明らかにすることは重要な問題であろう。今後, さらに, 河床変動と拡巾現象との関連に着目して研究を進めるとともに, 本実験で観察されなかった複列蛇曲あるいは網状河道の成因を明らかにしたいと考えている。

最後に, 本実験に使用したサンド・スクレーパーは昭和43年度文部省一般研究費によるものであり, その設計, 製作は汽車製造 K. K. によることを付記し, 謝意を表す。また, 実験および整理に際して助力願った朝田正君に謝意を表す次第です。

参 考 文 献

- 1) 矢野勝正・石原安雄: 河川災害総合基礎実験施設について, 京都大学防災研究所年報, 第12号B, 昭44, 3.
- 2) 木下良作: 河床における砂礫堆の形成について, 土木学会論文集, 第42号, 昭32.
- 3) 科学技術庁資源局: 石狩川の河道変遷調査一参考編一科学技術庁資源局資料, 第36号, 昭37.
- 4) 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, 昭30, 3.
- 5) Rozovskii I. L., E. B. Eremenko and B. A. Bazilevitch: Nieuctanobivcieecia Dvidzenie Vodnovo Patoka nidze Hidroelektroctantsui i evo Vliianie na Ryclo, Izdatelictvo «Nauka Dumka», Kiev, 1967, pp.152~192.