

交互砂州の発生過程に関する二、三の実験

藤田裕一郎・小池 剛・古川 隆司・村本 嘉雄

EXPERIMENTS ON THE INITIAL STAGE OF ALTERNATE BAR FORMATION

By *Yuichiro FUJITA, Tsuyoshi KOIKE, Takashi FURUKAWA*
and *Yoshio MURAMOTO*

Synopsis

We have conducted two types of experiments to elucidate the initial stage of alternate bar formation, the process to appearance bar edges. In one of them it has been investigated on a movable bed and in the other one on semi-fixed beds *i. e.* sand layers on a fixed bed. Motions of sand grain groups were observed to form ephemeral patterns of small scales, but they did not change into oblique edges longer than channel width. Migrating disturbance also failed to cause the oblique edges. On the semi-fixed beds, bed forms varied with the thicknesses of the layers *e. g.* longitudinal streaks on the very thin layer, a row of long-crested antidunes on the thick enough one. When it was medium, several rows of short-crested antidunes occurred and their trough lines propagated in the oblique directions, producing a staggered pattern of small scour holes and oblique edges. Thus, their directions should be a function of the Froude number, whereas that of bar edges, proportional to ratios of the width to the wave length, are known to be less related with the Froude number. Moreover, in any experiments these oblique edges were not found actually to change into bar edges, which appeared with any types of antidunes closely related to the oblique edge formation. We concluded that alternate bar formation is another instability independent of these bed forms.

1. 緒 論

河床、河岸の局所洗掘を引起し、流路変動の原因となる交互砂州の水理特性のうち、定常流量下における形成条件、形状特性、流況特性、発達過程などについては最近までの研究でかなり明らかにされてきた。しかし平坦な河床から交互砂州が発生していく過程については理論的、実験的に研究が進められているが、以下に述べるように、現在のところ明確になっているとは言い難い。

理論的には、交互砂州の発生は平面2次元の河床変動の不安定の一つと考えられるので、その機構を水流の基礎式、2次元の流砂の式、流水抵抗則及び主として砂粒の運動特性に基いて付加される諸仮定で表現し、ついで河床に想定される個々の擾乱に基因する摂動で基礎式系を線形化した後、その擾乱の増幅過程として交互砂州の発生過程を取扱っている。用いられる基礎式の型式と諸仮定に各理論の特徴があり、それら全体が交互砂州の発生原因を表現している。理論の妥当性は、その最終結果である砂州の形成条件や波長の比較で検証されていて、最近では導入する諸仮定における工夫や数値的な取扱いの併用で明確な形成領域区分図¹⁾なども得られている。

しかしながら、現在の理論ではいずれの解も初期擾乱の波高に比例する形であるので、その値によって各水理量の変化速度の絶対値が異なり、本来理論で予測しなければならない発生過程における河床形状や流況の時間的变化は全く検討することができない。したがって、諸仮定の妥当性の検証は不十分のままとなっているが、検証のためには、ある程度合理的に初期擾乱の波高を確定する方法を見出して理論と現象との対応

を付けるようにしていく必要がある。これは、実際に発達していく交互砂州の形状がかなり初期から理論で仮定されている正弦波形状と異った三角波状のものである点からも重要であろう。そのような形状が短時間に河床変動の伝播速度の相違による碎波として形成されるとは考え難く、この特徴的な形状は交互砂州の発生原因と不可分の関係にあると思われる。また、理論では準砂州のような中間的な形態は排除されてしまうが、この点を改善していくためにも発生過程を実測のものと比較していく努力が必要であろう。

上述のように、現段階では、交互砂州の発生過程に重点を置いた実験の重要性が高くなってきているが、一方、従来の実験的研究では発生過程に関しては観察結果の定性的な記述²⁾が主であって、それも遷移河床条件に限られている。それによれば、平坦な初期河床に通水するとしばらく後に河床に多数の斜め縞模様が現われ、そのうちのあるものの段差が増加して砂州の前縁となっていくとされている。したがって、交互砂州の発生過程はこのような斜め縞の発生過程と斜め縞から砂州前縁への移行過程の2つに区分されることになる。しかし、池田³⁾は最近の研究の中で斜め交錯縞は一つの独立した形態であって、必ずしも交互砂州前縁の先駆形態ではないことを述べており、上述の発生過程については、やはり現象自体の観察が重要な段階にあるといえる。これよりこの過程を的確に把握しようとする実験的研究が必要であると考えられ、著者らはこの目的で数年に亘って研究を進めてきている。同様の目的で行われた研究に福岡ら⁴⁾ものがあるが、最初から河床に大きな人工擾乱が与えられており、このように大きな擾乱が形成されるまでの過程が無視されている点や現象自体がそれほど把握されていない段階で当初からかなりの仮説を設けて実験を進めている点に発生過程の解明のための研究として物足りないものを感じる。

以上より、本実験では交互砂州の発生過程における現象の把握を図るためにいくつかの工夫を行い、詳細な観察を試みた。実験は、発生過程を長時間維持するために、低い掃流力で移動床で行ったものと接着剤等で固定した初期砂面に薄く着色砂を敷いて行ったものとに分けられ、前者では人工擾乱の影響についても検討している。現時点まで交互砂州の発生原因とその過程について十分明確な結論は得られていないが、二種の実験とそれから得られた結果について以下に述べたい。なお、前者の移動床実験の概要と結果の一部は既に発表⁵⁾しているが、概要については不十分であるのでやや詳しく述べ、一方結果については不必要な重複は避ける。

2. 交互砂州の発生過程に関する移動床実験

2.1 実験の概要

(1) 実験装置

実験には、宇治川水理実験所 R I トレーサー実験施設に設置されている幅 50.2cm、深さ 55cm、長さ 20.4m の循環式鋼製水路を用いた。同水路は、ジャッキで勾配を $-1/100$ から $1/14$ の範囲で変化させることができ、中央 15m 区間が両面ガラス張りとなっている。水路下流端に接続された受水槽の底部は絞込まれていてパイプでポンプに直結しており、ポンプと水路上流端の底部も管路で結ばれている。この管路の途中にはバルブとノズル流量計が挿入されている。水路側壁には □ 型鋼製のレールが敷設しており、その上を敷均しと測定に用いる台車が上流端の無段変速モーターに牽引されて走行するようになっている。また、移動床区間の上流端上方にはロータリーフィーダー型の給砂装置が載せられ、一方、受水槽中にはバネ秤りで吊した金網箱製の流出土砂用トラップが沈められている。

(2) 実験方法

はじめに、実験の座標系を、水路上流端を $x=0m$ として流下方向に x 軸、水路中心線を $y=45cm$ として右側壁から左側壁方向に y 軸、それらに垂直下方に z 軸とのように定めた。ついで、下流端に高さ 8cm の砂止め堰を設け、 $x=2m$ までの 18.4m 区間に平均粒径 $d_m=0.99m$ 、中央粒径 $d_{50}=0.96mm$ 、 $\sqrt{d_{84}/d_{16}}=1.48$ のほぼ一様な砂を敷いて移動床とし、それまでの上流側 2m 区間で流入水が整流できるようにした。

いずれの実験も敷均し板を取けた測定台車を何度か往復させて初期河床を消かに設定し、その後それぞれ

の実験の目的に合わせて適当な時間通水し、停水して河床を測定することを1回から数回繰返した。この間ノズル流量計で検定した流量が時間経過とともに僅かに減少する傾向があったのでバルブ開度を適宜修正した。給砂は、上流端の側壁に印した初期河床位に通水中の河床高が一致するように給砂装置を調節して行い、一方、流砂量は各停水毎に受水槽内のトラップの重量を前述のバネ秤りで直接計測して算定した。

流況や河床形態の変化状況の追跡のため、通水中の適当な間隔の時点と停水直後に測定台車に搭載したカメラで平面連続写真を撮り、さらにほとんどの実験で停水時に河床のスケッチを行い、各砂州の位置を記録した。

水位は停水直前に台車に取付けたサーボ式水位計で水路中央 $y=45\text{cm}$ での縦断変化を測定した。河床高の測定は実験目的によって方法を変えているが、いずれも触針式砂面計を用いた。すなわち、Run H-1, H-2-1 及び H-3-1 では砂州の発生から平衡状態までの過程の観察及び従来の結果²⁾との比較を目的として数回停水し、Run H-1 と H-2-1 では x 方向 0.5m 間隔の34断面で y 方向 5cm 毎の11点と砂州前縁の直上・直下の河床高を測定し、平均河床高と水理量及び砂州高を求めた。Run H-3-1 では、形成初期過程の河床形態の波高の把握に重点を置いて、水路を完全に横切るような長い砂州前縁については先端部・中央部及び終端付近の3個所で、他の短く不明瞭な斜め縞については中央付近の1個所でその直上・直下の河床高を測定した。その平均水理量は $x=3, 11$ 及び 19m の3断面の $y=20, 45$ 及び 70cm のみの河床高から算定した。

Run H-2-2, H-2-3 及び H-3-2 は河床面に移動する人工擾乱を与えた実験であって、人工擾乱は台車から直径 $\phi=5\text{mm}$ の針金を初期河床面に約 5mm 食込ませるように下して与え、移動速度の大きい場合は台車をモーターで牽引し、小さい場合は人力で押した。これらの実験では、台車上方のカメラ台から平面写真を30秒毎に撮影し、さらに Run H-2-3 では発生した斜め縞のうち3つの波高と移動速度を計測した。

Run H-4-1 及び H-4-2 では、河床高・水位の測定による平均水理条件の確認とともに、レールの高さにカメラを据え左側面からスリットを通して移動砂粒が明るく写るように照明して5秒間隔で平面写真を撮影した。Run H-5 及び H-6 では Run H-4 よりもさらに詳細に河床面を観察するためにそれぞれ 16mm シネカメラ及び VTR を用いて河床撮影を行った。なお Run H-3-2, H-4-1 及び H-6 でも停水時に河床に発生した斜め縞の波長・波高の測定と写真撮影を行っている。

(3) 実験条件

実験条件は、Table 1 に上述の測定項目とともにまとめて示した通りである。すなわち、河床面の観察が容易となるように顕著な小規模河床形態の発生しない transition からやや upper regime に入る条件を選び、さらに中規模河床形態の形成領域区分図上で交互砂州の発生領域の中央付近に入るように所与の水路幅 $B=50.2\text{cm}$ と平均粒径 $d_m=0.99\text{mm}$ に対して平均水深 h が $h=2\text{cm}$ 前後となるように設定した。また、斜め縞の形成に関して流砂量や Froude 数 F の影響を知るために勾配を 1/200 と 1/100 の2段階に変化させており、Run H-2-1 は Run H-2-1, 2, H-4-1, 2, H-5, H-6 の、一方 Run H-3-1 は H-3-2 の基準実験である。

Run H-2-2, 3 及び H-3-2 における人工擾乱の移動速度はつきのように決めている。まず Run H-2-2 では以下の1次元の河床変動の伝播速度を目安として与えた。すなわち、水面形の式

$$\frac{dh}{dx} = \frac{i_0 - \frac{dz}{dx} - \frac{n^2 Q^2}{B^2 h^{10/3}}}{1 - F^2} \dots\dots\dots(1)$$

流砂の連続式

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \frac{\partial q_B}{\partial x} = 0 \dots\dots\dots(2)$$

流砂量式³⁾

$$\frac{q_B}{\sqrt{(\sigma/\rho-1)gd_m^3}} = 17\tau_{*c}^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*}\right) \left(1 - \frac{U_{*c}}{U_*}\right) \dots\dots\dots(3)$$

ここに、 i_0 は路床勾配、 z は河床高、 n は Manning の粗度係数、 Q は流量、 λ は河床の空隙率、 q_B は単位幅当たりの流砂量、 σ は砂の密度、 ρ は水の密度、 g は重力の加速度、 τ_{*c} は無次元有効掃流力、 τ_{*c} は無次元限界掃流力、 τ_{*c} は無次元掃流力、 U_{*c} は限界摩擦速度、 U_{*c} は摩擦速度である。(2)式から

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left(\frac{\partial q_B}{\partial \tau_{*c}} \frac{\partial \tau_{*c}}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial x} \right) = 0$$

に(1)及び(3)式を代入すると

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \frac{7}{6} \frac{q_B(3+U_{*c}/U_{*c})}{h(1-F_r^2)(1-\tau_{*c}/\tau_{*c})} \frac{\partial z}{\partial x} = \frac{1}{1-\lambda} \cdot \frac{7}{6} \frac{q_B(3+U_{*c}/U_{*c}) \left(i_0 - \frac{n^2 Q^2}{B^2 h^{10/3}} \right)}{h(1-F_r^2)(1-\tau_{*c}/\tau_{*c})} \dots\dots\dots(4)$$

となり、(4)式の特性表示により次式の伝播速度が求まる。

$$\frac{dx}{dt} = \frac{7 \cdot 17 \sqrt{(\sigma/\rho-1)g d_n^3 \tau_{*c}^{*2/2} (1-U_{*c}/U_{*c}) (3+U_{*c}/U_{*c})}}{6(1-\lambda)(1-F_r^2)h} \dots\dots\dots(5)$$

道上⁵⁾ による抵抗算定法に基いて予測した実験条件から $Q=4l/s$, $h=2cm$, $U_{*c}=U_{*c}=3.1cm/s$, $F_r=0.92$, $q_B=0.029cm^2/sec$ と $U_{*c}=2.34cm/sec$, $\sigma/\rho=1.65$, $\lambda=0.4$ を代入して $dx/dt=1.6cm/sec$ を得る。しかしながら、この速度は牽引モーターの負荷限界付近であったために実際の移動速度は 1.4cm/sec であった。

Run H-2-3 では周辺に発生している斜め縞の移動速度と等しくなるように人力で台車を移動し、その速度は30秒間隔で撮影した写真から読み取ったが、平均的に $dx/dt=0.55cm/sec$ であった。この場合、針金の先端にガムテープを巻いて $\phi=1cm$ 程度にし、さらに針金を砂面にかなり突込んで擾乱を大きくしている。

Run H-3-2 では、明瞭な斜め縞の波高を 5mm と仮定し、 $\lambda=0.4$ と仮定して流砂の連続式 $dx/dt=q_B/(1-\lambda)Z_B$ (6) から牽引モーターで $dx/dt=2.3cm/sec$ に設定した。この場合 Z_B は明瞭な斜め縞の波高である。

Table 1 Hydraulic conditions and remarks

Run No.	Discharge Q (l/s)	Channel slope I	Mean depth h (cm)	Froude number F_r	Energy slope I_e ($\times 10^{-3}$)	Shear velocity U_{*c} (cm/sec)
H-1	1.90	1/200	1.36	0.77	5.43	2.62
H-2-1*	4.02	Do.	2.11	0.84	5.57	3.26
H-2-2	Do.	Do.				
H-2-3	Do.	Do.				
H-3-1**	5.6	1/100	2.06	1.23	9.62	4.24
H-3-2	Do.	Do.				
H-4-1	4.02	1/200	2.31	0.73	5.0	3.22
H-4-2	Do.	Do.	2.30	0.74	5.0	3.21
H-5	Do.	Do.				
H-6	Do.	Do.	2.11	0.84	5.0	3.09

$B=50.2cm$, $d_n=0.99mm$, $U_{*c}=2.34cm/sec$, * $T_e=200min$, ** $T_e=73min$ (T_e : Fully

2.2 実験の結果

(1) 河床形態の形状特性の時間的変化

各基準実験における河床形態の時間的変化の特徴については既述⁵⁾しているのでここではその形状特性の変化を述べる。はじめに、Run H-2-1, H-3-1, H-4 及び H-6 における河床形態の変化状況の見取り図を河床のスケッチ及び平面写真に基いて示せば Fig. 1 のようである。いずれの実験も開始後の時間 $T=10$ 数分までは斜め縞が互いに交叉しながら存在しているが、交互砂州の前縁が明確になった段階では砂州上の斜め縞は平行的になり、ほとんど交わらなくなっている。これらの斜め縞及び砂州前縁の波長 l_B 及び波高 Z_B の測定値を交互砂州の発達時間 T で無次元化した時間で4段階に分けて Fig. 2 に示している。同図から形成初期では Z_B の分布に比して l_B の分布の広がっており、 Z_B は粒径の数倍までは容易に達するが、その後は l_B が水路幅の2~3倍の $l_B=1.0\sim 1.5$ m になるまで増加しにくいことがわかる。また、時間が経過するにつれて、形成初期状態と同様の形状特性 ($Z_B < 0.5$ cm, $l_B < 1.0$ m) にとどまったままの形態の集合とその集合から抜け出して、 l_B と Z_B がともに発達していく形態とに分けることができる。このような相違がどのように生じるかを明確にしようような検討の必要性が指摘される。

つぎに、これらの形状特性の変化をこれまでのもの²⁾と比較すれば Fig. 3 のようであって、波長の発達が波高の発達よりも早く止まる傾向はより明確になっている。これは、発達のいずれの段階でも上述の測定値をすべて平均して用いていたことの影響であって、波長、波高及び流砂量の実測値を用いた交互砂州の発達時間 T の予測値²⁾が Run H-2-1, H-3-1 とも実測の値よりも小さくなったことに対応している。

また、詳細に河床形状を測定した Run H-2-1 の平均横断形状の時間的変化を検討した結果、典型的な交互砂州の形成過程であったことが判った。それから算定した横断方向流砂強度 \hat{q}_B/q_B ²⁾ を従来のものと比較すれば Fig. 4 のように同一範囲に入るが、本実験では \hat{q}_B/q_B は明らかに1つのピークを持った時間的変化を示している、これは交互砂州の発達機構⁷⁾から定性的に予測される土砂移動状況と合致した特性である。なお、下流端流出土砂量は時間的に水量が変化していないことに対応してほぼ一定であったが、(3)式より

of movable bed experiments.

Nondimensional tractive force τ_*	Flow duration T (min)	Remarks
0.0429	61.5	
0.0664	330.	Base run when $I=1/200$.
	26.5	Artificial disturbance migrating at 1.6cm/sec.
	36.7	Ditto at 0.55cm/sec.
0.112	73	Base run when $I=1/100$.
	15	Artificial disturbance migrating at 2.3cm/sec.
0.0648	11.7	Photographing of rhombic patterns.
0.0645	12	Ditto. A 16mm cinecamera was used.
0.0596	13	Video tape recording.

development time of alternate bar).

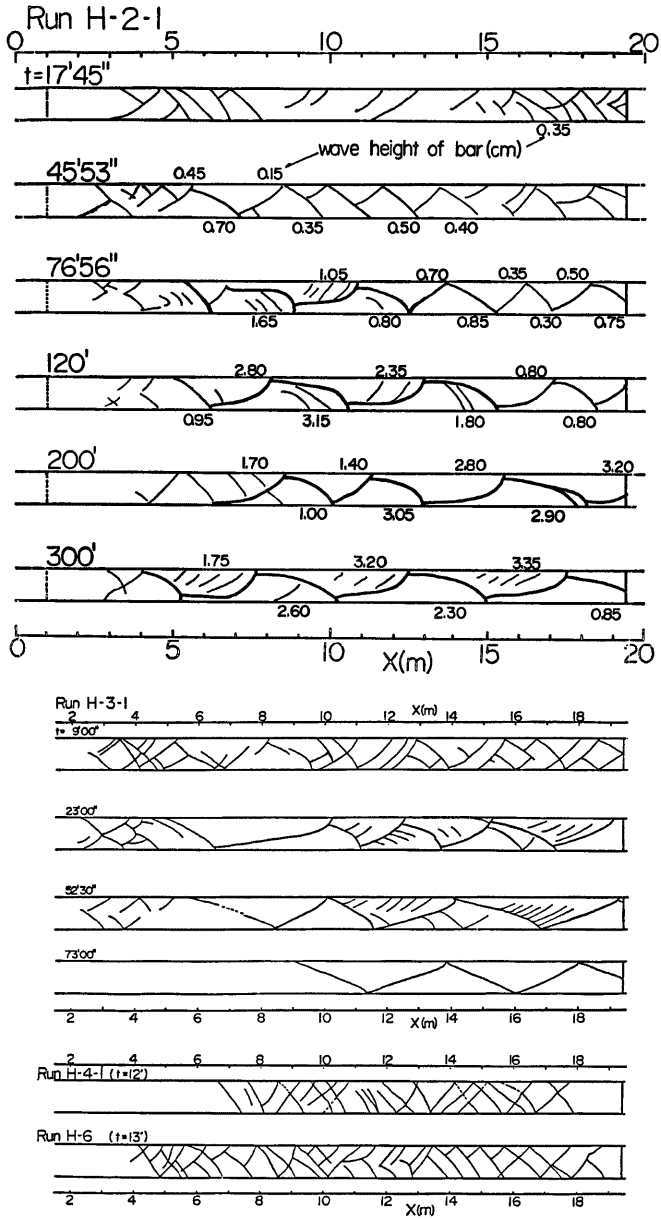


Fig. 1 Sketches of bed form variations

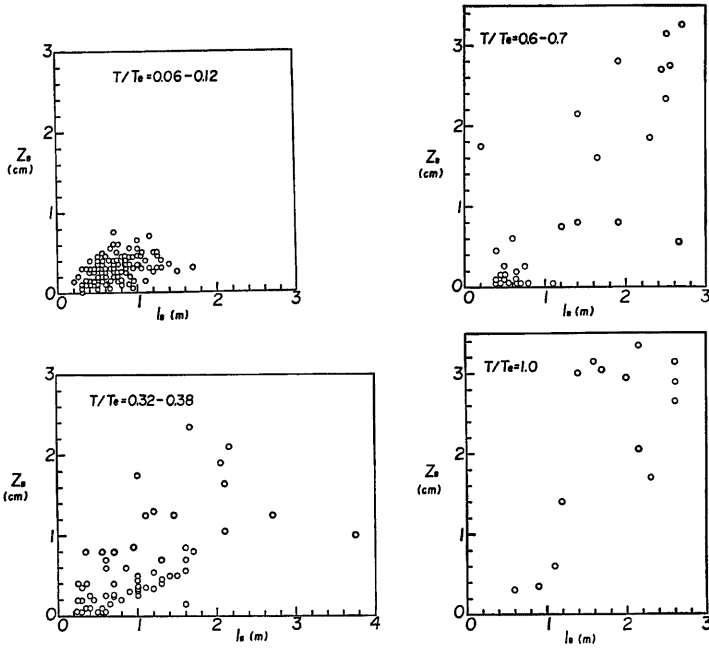


Fig. 2 Variations of length (l_B) and height (Z_B) of bed forms

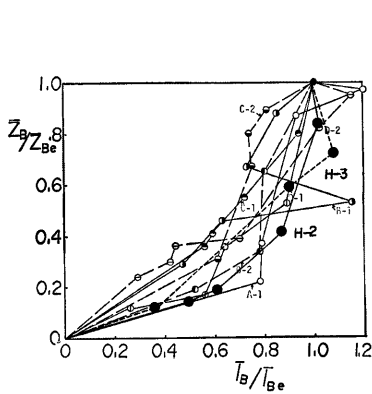


Fig. 3 Characteristics of the process of alternate bar development

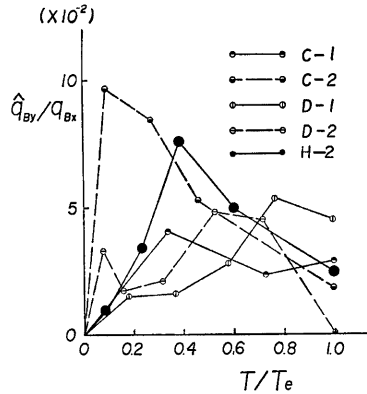


Fig. 4 Comparison of present data with previous ones of an intensity of lateral sediment transport (\hat{q}_{By}/q_B)

もやや小さい値となった。これには下流端砂止め堰の高さと受水槽内の流砂のトラップの不完全さが影響している。

以上のように、本実験で設定した水理条件は最初の予測通り典型的な交互砂州の形成過程に対応したものとなっていることが判る。

(2) 斜め縞の形成過程

Run H-4,5 及び 6 において 35mm カメラ, 16mm シネカメラ及び VTR で記録した河床の状況から斜め縞の形成の追跡を試みた。

通水開始直後では河床全体に亘って砂粒の移動が起り、注意すると横断方向に砂粒の良く動いている所と動きにくい所が存在している。動きの活発な所では砂粒が上流側から次々と剥ぎ取られていき、それらは1つの筋のように左右に揺れながら流下していく。しかし、個々の筋は持続時間が短く間欠的に消長し、発生場所も固定していない。

実験条件によって異なるが、通水後約1分経過すると砂粒移動の活発な筋が不明確になり、砂粒は上流側に亘んだ逆雁行状に連なって移動するようになる。ついで、この連なって移動する砂粒の中に停止するものが現われると、さらにその近傍の砂粒が順次停止していくようである。それが両側から伝わってくる結果、移動時とは逆の下流に向って突出た停止砂粒の前縁線が見出される。この前縁線の段差は砂粒径の1~2程度とみられ、持続時間が短く容易に移動砂粒の発生場所に変わりうる。しかし、中には上流からの流下砂粒を捕捉するものもあって、このような局所的な砂粒の堆積による段差の発生が斜め縞形成の引金になる可能性がある。

この点に関してさらに詳しく砂粒群の動きを追うために Run H-4-2 で撮影した5秒間隔の白黒写真を検討した。Photo. 1 はその1コマであって、側方から照明しているので周開りも明るく写っている部分が高い箇所と判断できる。そこで、カラーデータシステムで白黒の濃淡を明るい部分から順次白・緑・赤・黒と着色してコントラストを強調し、浮び上がった縞模様を Fig. 5 のようにトレースしてその挙動を追跡した。なお、写真では照明の都合で上部側壁近くほど明るく水路中央が暗くなるので1枚を上半分と下半分に分けて処理している。

Photo. 1 や Fig. 5 から判るようにいくつかの斜め縞は交錯しながら水路全体に発生しており、それらに囲まれた1つの区画は菱形をしている。個々の菱形はほぼ同程度の大きさであって、砂州の初期形状に関する1つの最小単位として取扱える可能性が考えられる。しかしながら、上述の方法でこの菱形模様の移動や変化を追跡した結果では、前後の連続関係が明瞭であるのは写真の2, 3枚の間であって、個々の菱形模様の持続時間は最大10数秒と非常に短い。このように、河床には次々に新しい菱形が出来ては消えていき、これがどのようにして斜め縞に変化していくかはやはり把握することができなかった。

(3) 河床に与えた人工擾乱の影響



Photo. 1 A plane picture of sand bed at the initial stage of alternate bar formation

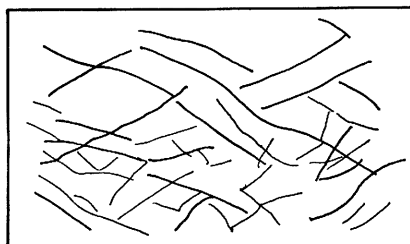


Fig. 5 Rhombic patterns of a sand bed traced from Photo. 1

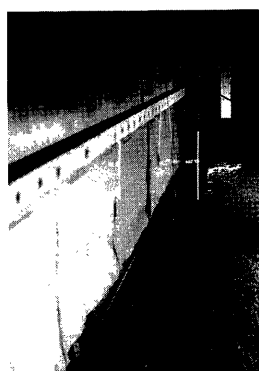
前項のように、自然に発生する河床擾乱の発達過程を捉えることは極めて困難であったので、人工的に与えた擾乱の影響を明確にして交互砂州の発生過程に関する情報の把握を試みた。従来、交互砂州は、交互に配置した水制のような人工擾乱によって強制的に形成しようとしても形成条件下であれば形成されず、逆に形成条件内であれば人工擾乱に無関係に形成されるといわれている。しかし、後者の場合は人工擾乱が固定されたものであって、河床を移動している砂粒群に持続的な効果を持つ擾乱でなかったために無関係になったものとも解釈できる。そこで、ここでは人工擾乱を河床変動の伝播特性や初期の砂州前縁の移動特性などに合わせて移動させればそこから砂州が発生しやすくなると考え、前節のような移動速度の擾乱を河床に与えた。

最初に、河床変動の伝播速度に設定した Run H-2-2 の結果について述べる。通水開始とともに台車を動かかし始め $T=11'20''$ で停水して河床上を観察すれば擾乱の先からかすかに縞らしいものが認められたが、その波高は高々 1mm であった。その後通水を再開したが $T=19'$ に台車が下流端に達したので再び上流に戻して実験を続行し、 $T=27'$ に停水した。その時の河床状況は **Photo. 2 (a), (b)** のようである。擾乱のやや下流に斜めに水の溜った所があって斜め縞の生じている様子が見られる。しかし、その波高は約 1mm であり、水路中央部には縦溝が形成されているので、人工擾乱とこの縦溝のどちらが影響して斜め縞が生じたのか判断できない。しかも、**Photo. 2 (a)** のように、 $T=11'20''$ 及び $27'$ とも河床の他の部分では人工擾乱無関係に明瞭な斜め縞が形成されており、人工擾乱でそれらが生じやすくなるとは言い難い。

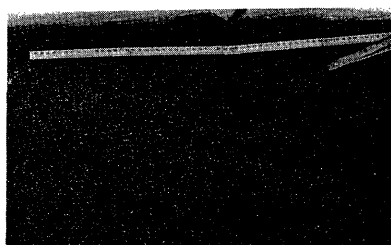
また、この人工擾乱は通水中下流側に形成されている斜め縞を次々に追越して移動したことが観察されており、斜め縞を引起す擾乱の移動速度は(5)式で与えられるものよりも小さいと判断される。この相違は、初期の砂州前縁について既に指摘しているように、斜め縞の伝播が(5)式のような河床面の波の伝播ではなくてむしろ(6)式のような土砂の流れに対応したものであるためと考えられる。

そこで、Run H-2-3 では擾乱の移動速度を前述のように周辺の斜め縞のものに合せたが、擾乱自体も大きくされていたのでその周辺が局所洗掘され、洗掘土砂が 5cm ほど下流に堆積してあたかも砂州の先端のような働きを示すようであった。 $T=32'$ 頃からは **Photo. 3 (a)** のように水面には擾乱を与える針金による衝撃波の他に砂州前縁に沿ってみられるような表面波が生じている。**Photo. 3 (b)** は $T=36'40''$ の停水時の河床状態を示したものであって、擾乱の先から水路中央部付近まで斜め縞が延びている。しかし、この後擾乱を小さくして実験を再開したが、この斜め縞は維持することができず、したがって斜め縞から砂州前縁への移行も観察されなかった。

最後に、Run H-3-2 では河床上に発生した小規模河床形態 (antidunes) のために人工擾乱の影響はかき消されたかのようであって、擾乱からは何の変化も認められなかった。同一水理条件の Run H-3-1 の **Fig. 1** の見取り図では斜め縞も砂州前縁も形成されているので、自然に発生する砂州前縁等に繋がる擾乱

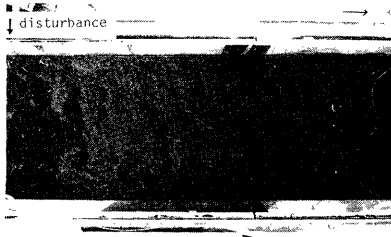


(a) Looking downstream

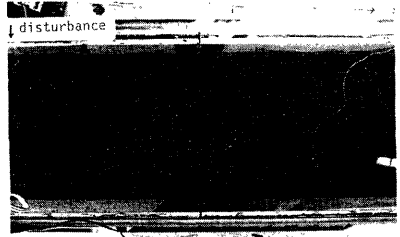


(b) Flowing from left to right

Photo. 2 Pictures of a sand bed on which an artificial disturbance was imposed.



(a) $T=32'$



(b) $T=36'40''$

Photo. 3 Pictures of a sand bed on which a fairly large artificial disturbance was imposed.

は antidunes によって消滅するようなものではないと判断される。

2.3 検討と考察

(1) 斜め縞の水利特性

形成された斜め縞の特性について、ここではその方向が Chang⁸⁾ らの言うように F_r に関係するかをこれまでの実験⁹⁾ における初期河床の写真も用いて検討した。

結果は Fig. 6 のようであって、黒点の斜め縞の方向 $\tan \gamma_s$ (γ_s は斜め縞と水路中心線とのなす角) は、 F_r の増加とともにその最大値が減少しており、Chang らの指摘に一致しているように見える。しかしながら、 $\tan \gamma_s$ が急激に減少する F_r の範囲は

$0.8 \leq F_r < 1.2$ と狭く、かつ最小値の分布には F_r の影響は認められない。同図上にはある程度発達した段階後の砂州前縁の方向として B/l_B を白丸印で示して比較してある。それらは 1, 2 の例外を除いて $\tan \gamma_s$ の最小値よりも小さく、従来の指摘通り波長は F_r の影響を受けていない。また、 $\tan \gamma_s$ に関する上の結果は、それが初期の砂州の波長に關係していると考え、波長の長いすなわち低波数の河床擾乱ほど F_r に無関係に發生するという林¹⁰⁾ や銚川¹¹⁾ などの安定理論の結果と定性的に一致している。この点について結論を下すにはさらに詳しい比較を行う必要があるが、現段階でいえば発達する砂州の波長と形成初期過程に卓越する河床形態の波長との関係は薄く、両者の形態は別個のものであって、したがって彼らの理論から交互砂州の波長を予測することは困難と考えられる。

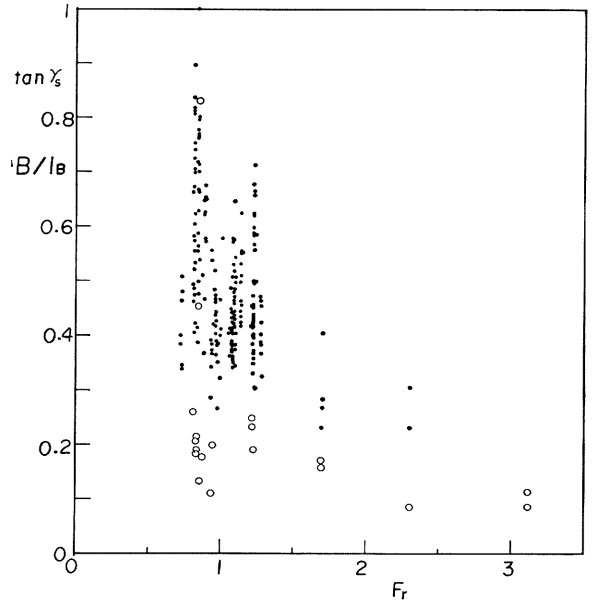


Fig. 6 Directions of oblique edges on a sand bed as a function of F_r .

しかしながら、砂州の発生初期過程に現われている形態の波長については、この $\tan \gamma$ はかなり重要な意味を持った特性量と考えられ、Fig. 6 の結果はその平均的な変化が F 、数に影響されることを示している。しかしいずれにせよ、交互砂州の波長の初期値がこのような特性を示してもそれが既に提案している機構⁹⁾によって発達していくのであれば、その機構はほぼ F 、に無関係であるので、最終的な波長が F 、と無関係となるという特性は説明することが可能となろう。

(2) 交互砂州の発生過程に関する考察

本章の実験では、河床面の詳細な観察と測定を行ったにもかかわらず、従来指摘されてきた交互砂州の発生過程、すなわち、砂粒径程度の波高を持った菱形模様、あるいは無数に交錯した斜め縞の中のあるものが、何等かの、例えば、ある水理条件下で発達速度が最大になるとか、あるいはのり上げや統合などの機構を通じて選択されて明瞭な斜め縞となり、さらにこれらが統合されて砂州前線となっていく過程は確認できなかった。

すなわち、最初に現われる菱形模様の継続時間は高々10数秒であり、粒径の2、3倍程度の河床擾乱は小規模河床形態や水流自体の乱れでフラッシュされてしまって水路全幅まで影響を与え得ない。一方、Run H-2-3のように砂州先端程度のかなり大きな擾乱が維持されればそれによって新たな前縁が形成されるようであるが、しかし、通水初期からこのように大きな擾乱が河床面に存在しているとは考えにくい。したがって、それ自体は順次変化して不明瞭となりながら連鎖反応的に拡大していくような擾乱を考え、その初期要素を菱形模様のような粒径程度の擾乱に求めざるを得ない。いずれにしても、交互砂州の発生過程は、従来想定されていたような、初期擾乱が水路全域で一様に砂粒径程度から段々と発達していくものではなく、上述のような機構が河床の一部区間に偶発的に現われて、そこにのみ急速に明確な砂州の前縁を発生させるものと判断される。この位置の予測が現段階では不可能であるため、実験的に砂州の発生過程を的確に観察することは容易でない。

上述のように、交互砂州の発生過程では、全区間での連続的な観察記録を作成しておかなければ現象の把握が困難であり、その観察も個々の砂粒運動のみでなくある集団として移動している砂粒群の追跡も可能としておく必要がある。つまり、斜め縞の形成に繋がる河床面の全体的な挙動と砂粒運動の特性の関係を明確に出来るような範囲の時間的にも空間的にも連続な観察記録の作成を図らねばならない。また、本章の実験では、移動砂粒と静止砂粒の判別や水面波や小規模河床形態のために砂粒運動の追跡が困難であったがこの点も避けねばならない。次章ではこれらの点を考慮して交互砂州の発生過程を明確にするために試みた半固定床実験について述べる。

3. 交互砂州の発生過程に関する半固定床実験

3.1 実験の概要

(1) 実験装置

実験は、宇治川水理実験所本館1階に設置されている幅70cm、深さ55cm、全長14.8mのコンクリート製水路（河川構造物模型実験水路）で行った。この水路のほぼ全長に亘って内側に鋼製の仕切壁を設け、その中に平均厚さ20cmで実験砂を敷いて幅40cmの移動床水路とした。水路の側方には中央がヒンジで固定されたレールが備えられている。それを所定勾配に調整し、片側8本ずつある支柱に固定した後、上載の測定台車に敷均し板を取付けて数回往復して初期路床勾配を設定する。また、水路下流端にあるゲートを全閉すれば水路に水を溜めることが可能であって、下流側から路床の水締めができる。

給水は定水槽を持つ備付けの循環系統で行い、流量は大小2ヶ所のバルブで調整し、水路上流端に設置した台形堰の計量水槽で検定した。

なお、この水路では測定の座標系をつぎのようにしている。すなわち、 x 軸は水路下流端を $x=0\text{m}$ として上流方向に、 y 軸は右側壁を $y=30\text{cm}$ として左側壁方向にとり、それらに垂直下方に z 軸をとっている。

(2) 実験条件と実験方法

実験に用いた砂は平均粒径 $d_m=0.64\text{mm}$ 、中央粒径 $d_{50}=0.63\text{mm}$ 、 $\sqrt{d_{94}/d_{16}}=1.32$ のほぼ均一な濾過砂

Table 2 Initial conditions and remarks of semi-fixed bed experiments

Run No	Discharge Q l/s	Channel Slope I	Bed condition	Thickness of sand layer (mm)	Remarks
L-1	2.5	1/200	movable	—	
L-2	Do.	Do.	Do.	—	
L-3	Do.	Do.	semi-fixed	less than 1	Bed was fixed by adhesive agent.
L-4	Do.	Do.	Do.	1~2	
L-5	Do.	Do.	Do.	3.2*	Bed was refixed.
L-6	Do.	Do.	Do.	1.6*	
L-7	Do.	Do.	Do.	0.53*	Fixed bed was partially ruined.
L-8	1.98	1/150	Do.	1~2	Bed was fixed by cement powder.
L-9	Do.	Do.	Do.	1~2	Videotape recording.

* Thickness of steel plates inserted between the blade support and the carriage frame.

である。各実験の設定条件及び主な特徴は **Table 2** に一括して示している。前章の実験と同様に transition 乃至 upper regime となり、かつ交互砂州の形成領域に入るように配慮している。

表中の Run L-1, 2 は, Run L-3~7 に対応する移動床実験であって, 交互砂州の発生・発達過程の特徴を把握しておくための予備的なものである。実験は, 上流端からロータリーフィーダー型給砂装置で流砂量に相当する砂を補給しながら行い, 停水後に下流端でトラップした流出土砂量を測定した。通水中は水路下流上方から全景写真を, 停水後は測定台車から平面連続写真を撮影した。また, 通水開始直後と停水直前に水位を測定し, 初期と停水後の河床高を測定したが, 測定には他の Run L-3~9 と同様に触針式砂面計を用いた。

Run L-3~9 が前章で指摘した発生過程の観察の困難を避けるために, 敷均した初期河床を固定して適当な厚さに着色砂を敷いて行った実験である。このような半固定状態によって, 現象を交互砂州の発生初期過程に限定して, かつ移動砂粒と静止砂粒を強制的に区別し, 小規模河床形態の発達を抑制するとともに, 僅かな波高の河床形態も容易に観察しうるものと考えた。初期砂面の固定は Run L-3, 5 及び 8 に先立って行っている。Run L-3 の場合には, 水で薄めたボンド CH18 (木工用ボンド) をスプレーガンで吹付けた上に, それにアクリル樹脂系の水性黒色ペイントを混ぜたものをさらに吹付けて, 砂面の固定と同時に河床形態の可視化を図った。しかし, Run L-4 の最終段階では下部に溜まった空気によって固定面の凹凸が著しくなったので, 凹凸を均らして空気を抜くとともに固定面上に数 mm 厚さで砂を敷均らし, 再び上述と同じ方法で砂面を固定した。Run L-7 の終了後水路を移動床に戻す必要があったので, Run L-8 では, 初期河床勾配を 1/200 から 1/150 に変化して湿潤させた砂面にセメント粉を撒いてより完全に固定した。

固定床上の砂層の厚さは実験の進行に合わせて河床形態の発生やその可視化が容易になるように試行錯誤で決定したが, その大体の値は **Table 2** にまとめた通りである。その設定は, Run L-3 及び 4 では測定台車上に給砂装置を載せて河床に撒いた後刷毛等でできるだけ様に均して行い, Run L-5~9 では固定床の高さに合せた敷均し板の台車との取付け部に種々の厚さの鉄板を挟んでおいて着色砂面を掻均して行った。**Table 2** の値のうち星印のついた Run L-5~7 の値は挟んだ鉄板の厚みを表し, Run L-8, 9 は取付け部の一方のみに挟んだので実測河床値で補正している。また, Run L-3, 4 では着色砂の被覆状況を変化させるために通水中に適宜給砂しているので値は一応の目安である。

通水中の河床形態の変化を, Run L-3, 4 では台車からの平面写真と斜め写真の撮影で, Run L-5~7 では同じく斜め写真の撮影のみで, Run L-8, 9 ではそれぞれ台車と水路下流にある階段上から VTR で記録し, 発生過程の検討に供した。

Table 3 Hydraulic conditions of the semi-fixed bed experiments

Run No	Time T (hr-min)	Mean depth \bar{h} (cm)	Mean velocity \bar{U} (cm/sec)	Froude No. F_r	Energy slope \bar{F}_r ($\times 10^{-3}$)	Shear velocity \bar{U}_* (cm/sec)	Velocity coefficient \bar{U}/\bar{U}_*
L-2	0-00	1.75	35.2	0.86	4.81	2.78	11.9
	1-24	1.80	33.9	0.81	5.04	2.94	11.8
L-3	0-00	1.80	34.3	0.82	5.43	3.02	12.24
L-6	2-05	1.75	35.9	0.87	4.44	2.63	14.50
L-8	0-44	1.44	34.5	0.92	6.12	2.84	12.28
L-9	1-30	1.40	35.7	0.97	5.94	2.75	13.00
	0-00	1.48	33.3	0.88	6.32	2.92	11.43

平均水量の測定は Run L-3, 6, 8 及び 9 について前述のように触針式砂面計で行っており, Run L-6, 8 では停水時に河床形態の波高も測定している。Table 3 には算定した平均水量を Run L-2 のものとともに示しているが, 設定勾配による相違以外では, 半固定床の場合の流水抵抗が僅かに低い程度であって, 水理条件に明白な差は現われていない。なお, Run L-2~4 では直径 5mm の小型流速計 4 台とサーボ式水位計 1 台で流速と水位変動の測定も試みたが, 現在まで特徴的な結果は得られていないので以下では触れない。

3.2 実験結果

(1) 移動床実験における河床形態の特徴

Run L-2 では, 通水直後, Run L-1 と同様に, 河床にはかすかに斜め縞が形成されているようであるが, 河床面を凝視していても判別するのは困難である。その状態から数分経過すると小さな反砂堆の列で Photo 4(a) のように水路全体が覆われる。通水後 20 分を過ぎると, 明らかに蛇行した反砂堆の連なりが見

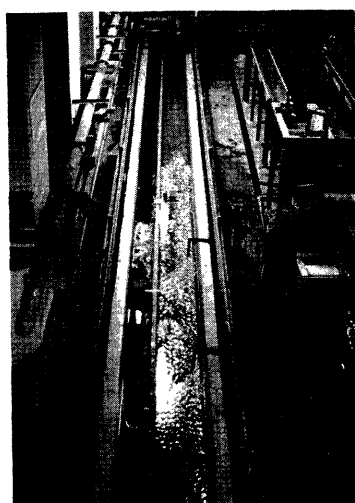
(a) $T=7'$ (b) $T=30'$

Photo. 4 Bed configuration in Run L-2

られ、波高は大きくないが砂州の前縁も確認できる。この後、砂州は発達を続け、84分の停水時には平均波長 $l_B=1.4\text{m}$ ($l_B/B=3.41$)、同波高 $Z_B=1.50\text{cm}$ ($Z_B/B=0.037$) の交互砂州となった。

この Run L-2 の特徴は上述のように顕著な反砂堆の列が形成されたことであって、前章の Run II-2-1 と勾配、 F 、 U_* 、 U_{*c} ともそれほど変わらないにもかかわらず際立った相違を示している。Run II-3-1 では類似の反砂堆がかなり形成されていたので、両者間にその発生限界が存在している可能性がある。この反砂堆の連なりは半固定床実験でも着色砂層が厚いほど顕著に発生しており、Run L-5 のように厚い場合の挙動はここでのものと似ている。Run L-2 の場合、Photo 4. (b) のように、砂州の不明確な上流区間では水路幅 40cm の間に2~3本の連なりが間欠的に交互に消長を繰返した。すなわち、左側壁寄りに発生したある連なりは2、3秒間持続した後横断方向に幅を広げて2次元的な形状となった直後に消滅し、逆に右側壁寄りに発生して幅を拡げるというかなり周期的な変化を示す。一方、交互砂州の形成された中、下流部では、砂州によって流量集中が維持されるためか、定在的な反砂堆の連なりが砂州上に1、2本形成されている。この連なりの間隔は約10cmであり、並列螺旋流の間隔の2、3倍であって、それとの直接的な関連はないと思われる。

(2) 半固定床実験における河床形態

初期に敷いた砂層が厚い所でも2、3mm程度、平均1mm以下のRun L-3では、無給砂で開始した通水直後にPhoto 5 (a) のように、河床の大半で並列螺旋流に対応した縦乱状の砂の集まりが生じ、形成を予想した斜め縞は砂層のやや厚い所にかすかに認められる。流水面も極めて滑かで乱れの小さい乱況にあるように感じられた。この状態から、河床砂の被覆状態によって河床形態が相違することが予想されたので、 $T=50'$ から $x=9.2\text{m}$ で給砂を開始した。

その結果、河床砂の移動が活発になり、それに応じて水流中の乱れも増加するようになって、 $T=64'$ 以後給砂位置から斜め縞が発生し始めた。しばらくして給砂を停止すると上流から縦乱河床に戻っていき、水流の乱れが鎮静するとともに斜め縞も消え始める。その後給砂を再開すると前回と同様の状況が現われ、 $T=94'52''$ のPhoto 5 (b) のように、河床には多くの斜め縞が形成された。

以上の事実から Run L-4 では着色砂を2~3mmの厚さに敷いて通水しているが、通水直後に河床は乱



(a) $T=25''$

(b) $T=92'30''$

Photo. 5 Patterns of a sand layer in Run L-3

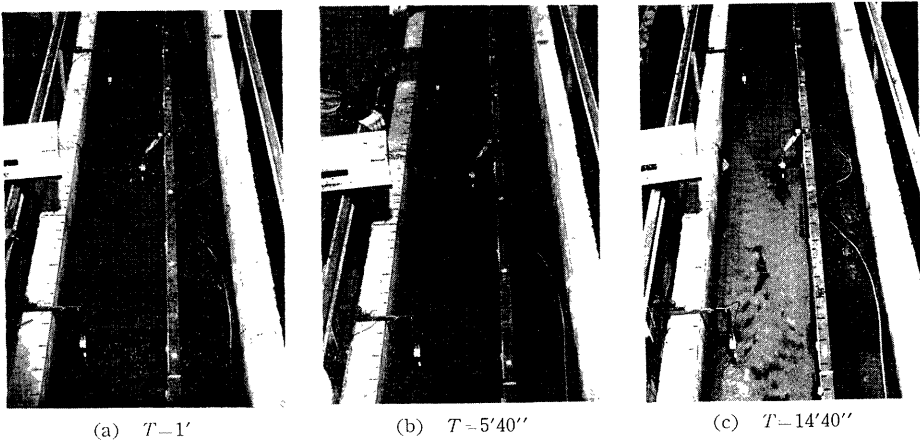


Photo. 6 Patterns of a sand layer in Run L-4

れ、 $T=10''$ には 2 次元的な反砂堆が現われる。これは $T=20''$ には発達して河床全体に広がり、3 次元的な形状に変化していく。この時点で河床には斜め縞模様が認められる。反砂堆による水面波の 3 次元性が強まるとともに、Photo. 6 (a) のように河床には多数の交錯した斜め縞模様が生じていくが、その長さは短く、 x 軸となす角度も初期の砂州前縁の場合よりもかなり大きい。

このような斜め縞の交錯状況はその後も持続したが、砂層の薄い部分では反砂堆の谷の位置に黒い固定床が露出して、Photo. 6 (b) のようにその配列が容易に把握できる。それによれば、反砂堆は局所的に千鳥状の規則的な配列をしており、その峰の部分には鱗状に並んでいる。また、観察される斜め縞はこの鱗の境目を連ねた方向である。

上の $T=5'40''$ から $T=14'40''$ までの写真の欠測のためにその間の河床形態の変化は追跡できないが、 $T=14'40''$ では Photo. 6 (c) のように砂州前縁と判断される形態が発生している。この形態の長さは $T=5'40''$ までの斜め縞よりも長く、 x 軸となす角もは小さくなっている。また、固定床の露出状況からは、反砂堆の谷を結ぶ斜め縞が砂州前縁の連続性を阻害するかのように位置しているとみられ、斜め縞が砂州前縁

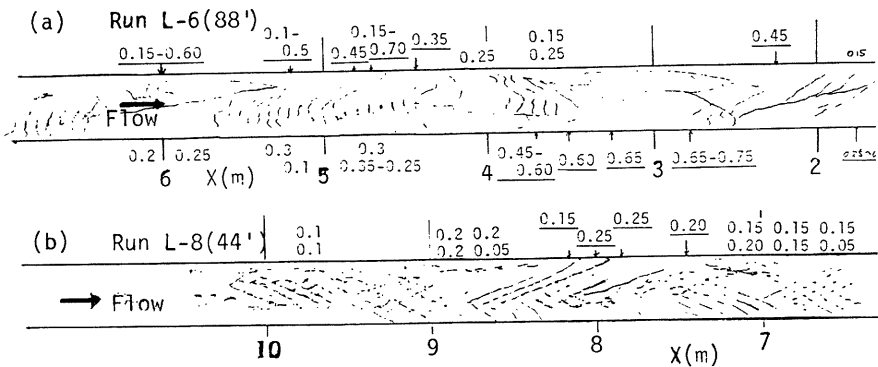


Fig. 7 Sketches of configuration of a sand layer on the fixed bed. Numerics indicate wave heights of the forms and underlines denote the bar edges.

の先駆形態となっているとは考えにくく、前章の結論と一致する。

上述の前縁発生までの欠測を補うべく Run L-5~9 を行った。厚さ 3.2mm の鉄板を挟んで敷均した Run L-5 では前述の Run L-2 と類似の反砂堆が生じたが、砂層が厚く河床形態の可視化が困難であったので $T=43'$ で実験を打ち切った。その半分の 1.6mm 厚の鉄板による Run L-6 でも河床の可視化は不十分であって、最終的に Fig. 7 (a) のように砂州形態が出現したが、欠測された過程を埋めることはできなかった。また、Run L-7 では実験を開始したが固定床の傷みが甚しかったので中止せざるを得なかった。これらに対して、Run L-8 及び 9 ではこの過程を VTR による連続記録から捕捉しようとした。しかし、Fig. 7 (b) に示したように砂州形態が現われ、斜め縞の観察も比較的容易であったにもかかわらず、主に縞め縞の消長に着目して選んだ撮影位置とビデオカメラのズームングの限界のためにいずれも上の過程を捉えることは出来なかった。

以上のように、Run L-3~9 でも前章での実験と同様に交互砂州の発生してくる過程を明確に観察することは困難であった。そこで次節では、通水初期に現われてくる無数の斜め縞の中に Photo. 6 (c) のような砂州前縁に繋がっていく形態が内在しているかについて検討と考察を行った。

3.3 検討と考察

(1) 斜め縞の平面形状の変化

Run L-4 以外の実験では、砂州の前縁形態が現われなかったか、出現が遅かったので、ここでは Run L-4 を対象として前述の検討を行った。撮影した平面写真では写っている範囲が狭く、斜め縞相互の関連や全体的な変化状況が捉えられない。したがって、Photo. 6 のような斜め写真と路床面との関係がほぼ中心投影問題として取扱えることに着目して、比較的広い範囲の河床形態の変化を平面図上に表した。すなわち、中心投影された 2 平面間の座標変換の関係は次式¹²⁾

$$x = \frac{a_1x' + b_1y' + c_1}{a_3x' + b_3y' + c_3}, \quad y = \frac{a_2x' + b_2y' + c_2}{a_3x' + b_3y' + c_3} \dots\dots\dots(7)$$

ただし、

$$\begin{vmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{vmatrix} \neq 0$$

で与えられることが知られているので、いずれの 3 点も同一直線上にない 4 つの既知対応点から上式の係数

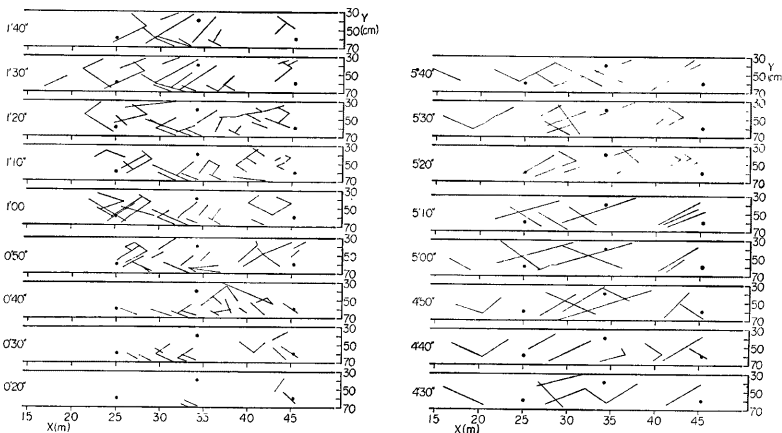


Fig. 8 Changes of rhombic patterns of a sand layer on the fixed bed

a_i, b_i, c_i ($i=1, 2, 3$) を決めて、写真上の座標 (x', y') を実座標 (x, y) に変換していった。既知対応点は、位置の明確な3台の流速計のプロペラの点と水路側壁の目盛 ($x=3.5\text{m}, y=70.0\text{cm}$) の4点である。

Fig. 8 及び Fig. 9 はそのようにして図化した例であって、Fig. 8 は $T=0\sim 5'$ に発生した斜め縞の、Fig. 9 は $T=15'\sim 19'$ の砂州前縁の挙動を表している。なお、実際に形成された斜め縞は必ずしも Fig. 8 のような1本の直線ではないが、同図では一続きと判断されるものの始点と終点を結んで示している。また、砂層の厚い部分では小さな縞模様を判別が困難なため、図化しえなかったものもあったと思われる。しかし、これらの点を考慮してもつぎの特徴は明らかである。

個々の斜め縞は形成時間も持続時間も短く、10秒間で消滅するものもある。 x 軸とのなす角は30度以上のものが多く、長さはほとんどのものが水路幅以下であり、通水初期ほど短いものが多い。しかし、時間が経過するにつれて $T=3'00''$ の $x=2.5\sim 3.5\text{m}$ のように長さが増加し、角度の減少した斜め縞が生じる。このような縞は非常に持続性が良く、写真の無くなる $T=5'40''$ 以後も残存している。これより発生した斜め縞は下記の2種類に分類することができよう。

- ①通水直後から発生し、水路幅未満の長さで x 軸となす角が30度以上あり、高々数10秒しか持続しないもの。
- ②通水開始から現われるまでの時間が長く、水路幅以上の長さを持ち x 軸とのなす角の比較的小さい、3分以上の持続性を持ったもの

一方、Fig. 9 の砂州前縁は測定誤差もあって円滑な挙動を示さないが、明らかに持続性が高く、あたかも上の②の形態を延長したような特徴を示している。

(2) 斜め縞の方向と長さの変化

上述の斜め縞の特性をより明確にするために、Fig. 8 及び Fig. 9 から、各形態の x 軸となす角 θ とその長さ λ を読み取り、時間的変化を検討した。結果は Fig. 10 及び Fig. 11 に示したようであるが、混乱を避けるため20秒以上継続したもののみ図示している。

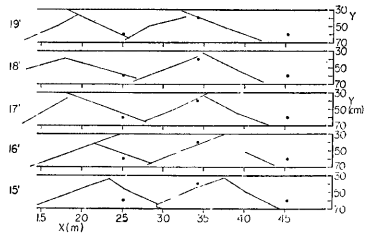


Fig. 9 Changes of bar edges formed on the sand layer

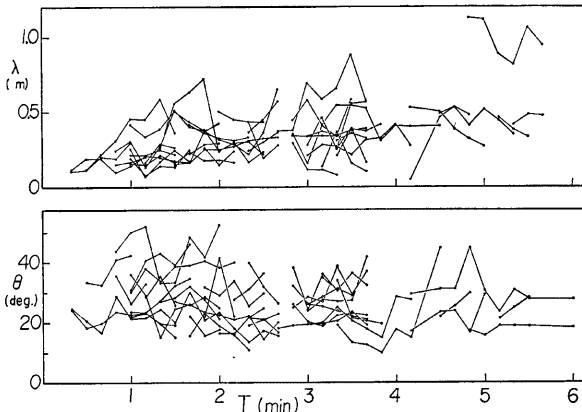


Fig. 10 Changes of directions (θ) and lengths (λ) of the rhombic patterns

Fig. 10 によれば、 θ の初期のばらつきが大きく、逆に λ は後ほど分布の広がる傾向がある。 $\theta > 25^\circ$ のものは長くても数10秒しか持続しないのに対し、 $\theta < 25^\circ$ のものは大半が1分以上持続していて前述の分類に対応している。また、 $\theta > 25^\circ$ のものは時間的な変動の大きい傾向があって不安定である。一方、 λ については必ずしも長いものの持続性が良いとは言いが、明らかに伸長過程にあるものは持続しており、水路幅長以上に伸びたものが消滅する場合はその直前に λ が急減している。したがって、この斜め縞が砂州の前縁に変化していくためには、 λ の伸長過程が維持され続けていなければならないと考えられる。

しかし、Fig. 11 に示されているように、砂州前縁の λ は $\lambda = 70 \sim 100 \text{cm}$ であって、斜め縞のピーク値と大差がなく、また、 θ も $\theta = 20 \sim 25^\circ$ であって斜め縞の θ の分布内に含まれているにもかかわらずほぼ一定の値が維持されている。したがって、両者は比較的似た外見をしているがその維持あるいは形成の機構は異なると考えるのが妥当であろう。

(3) 斜め縞と交互砂州の前縁の形成に関する考察

移動床の Run L-2 及び半固定床の Run L-3~9 の結果を比較すると、明らかに移動可能な砂層の厚さによって形成される河床形態が異なることがわかる。すなわち、砂層が極めて薄い場合には Run L-3 のように縦筋が生じ、これは前章の低掃流力の Run H-1 の場合⁵⁾ と類似の形態であると考えられる。一方、移動床や Run L-5 のように砂層の厚い場合には、薄い場合よりも幅の広い2次元性の強い反砂堆の連なりが形成されるようである。この連なりは、Fig. 7 (a) の Run L-6 のように砂州前縁が形成された場合にも砂

層が厚く集中した部分で生じていて、移動可能な砂層が厚くある程度の流量集中があれば発生するようである。これに対し、Run L-4 や 8 のように砂層の厚さを制限すると反砂堆の列の幅は狭くなり3次元性を増す。観察や VTR 等の記録によると、Fig. 12 のように1、2個できた反砂堆は、斜め下流に伝播してゆき、固定床露出部を規則的に配列していく。Fig. 7 (b) の露出部の多くはそうにして現われたものと考えられ、それによって明瞭な斜め縞が形成されている。しかし、Fig. 12 にも現われているように、この反砂堆の配列は常に上流側に新たに生じた反砂堆の影響を受けるので、位相の整合した列が伝播してきた場合には長さ λ が急伸し、逆位相の場合には急減してしまふと考えられる。これが Fig. 10 のように斜め縞の消長が激しくかつ、伸長しているものの持続性が高くなることの理由の1つであろう。

このような反砂堆の伝播で河床の露出箇所が千鳥状の配置となるのはそこで上流の両側から伝播してきた2つの谷部が重なるためと思われる。また、自由水面の存在下で発生する反砂堆はこの斜め縞は基因しているので、その方向が F の関数となることは妥当であって、Fig. 6 の $\tan \gamma$ の平均的な挙動も説明できる可能性がある。一方、この伝播の機構は、河床に局所的に生じた凹凸の影響の伝播機構と本質的に同一とみなされる。したがって、人工的に河床につけられた凹みから発生した段差を砂州の前縁に直接的に結付ける⁴⁾

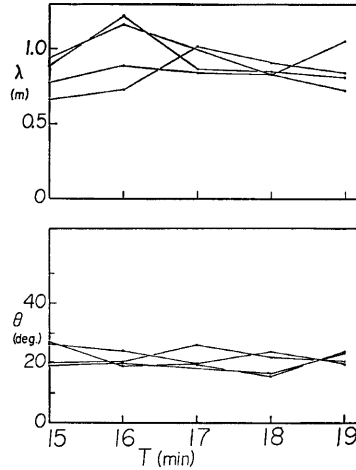


Fig. 11 Changes of directions (θ) and lengths (λ) of the bar edges

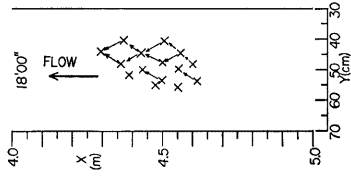


Fig. 12 Propagation of three dimensional antidunes observed on the sand layer (Formation of the rhombic patterns)

ことには無理がある。

以上のような移動可能な砂層厚さによって形態のやや変化する反砂堆とそれに基因する斜め縞に対し、交互砂州の前縁は反砂堆の形態の相違に無関係に形成されており、既に前項で指摘したように、斜め縞と砂州前縁とは形成と維持の機構が異っていると推論される。例えば、Fig. 10 で砂州前縁に関すると思われる形態は、 $T=4'50''$ に突然 λ 約1m の波長で現われたものであろう。この形態は、Fig. 8 の $x=2.7\sim 3.7$ m 区間で右上流から左下流に向かって伸びている縞であって、原写真ではその長さの半分は露出した固定床との境界線となっている。このように、最初から急に長い形態が現われた理由として、なだらかな形状をした長波長の擾乱発達に伴いその谷部全面で一度に固定床が露出し始めたためであるとの考えを無視することはできない。この点は、Fig. 7 (b) で砂面の高い部分に対応する白い部分が交互に存在していることでも支持され、河床安定理論の前提と類似した特徴である。しかし、Fig. 7 (b) に示したように、この段階で早くも0.25 cm 以上の高さの前縁が明確になっていて、安定理論が適用できるとしてもそれが妥当な段階は極く初期に限られてしまう可能性が高い。

上述の点を考慮すれば、交互砂州の発生過程における河床形態の平面形状の把握を中心とした本実験で砂州の初期形状を明らかにするには限界のあることがわかる。とくに、Fig. 13 に示した Run L-8 の河床横断形状のように、明確な砂州の前縁は砂層の厚いところに形成されやすく可視化を意図した、本実験の方法でも把握が困難となる。したがって、河床高の測定が不可欠となるが、Fig. 7 (b) のような河床形状でも Fig. 13 には起伏がほとんど現われていないことから判るように、長区間に亘る詳細な測定を短時間々隔で行わねば効果が期待できない。今後は、装置等に工夫を加えてそのような測定を行っていかねばならない。

4. 結 論

中規模河床形態の中心的な形態である交互砂州の発生過程について、従来の実験の観察に基いた指摘の不明確な点を除き、河床安定理論の諸前提の妥当性を検証する第一歩として、本研究では移動床及び半固定床の2種の実験を行った。すなわち、従来の観察による交互砂州の発生、発達過程は、

砂粒運動 $\textcircled{1}$ → 斜め縞 $\textcircled{2}$ → 砂州前縁 $\textcircled{3}$ → 交互砂州

のように要約できるので、ここでは①と②の過程の解明を目的として、はじめに、移動床実験で各条件が、既に明らかにされている典型的な交互砂州の形成過程に対応したものであることを基準実験で確認した後、河床形態の詳細な観察を中心に実験を進めていった。その結果を以下にまとめて結論とする。

砂粒運動に着目した Run H-4~6 の結果では、砂粒の群としての移動と停止の中で河床に菱形模様が見わたることが確認されたが、持続時間は最大10数秒であって、斜め縞の前駆形態と考えるには無理があり、その繋がりを見出すこともできなかった。また、移動する人工擾乱によって斜め縞を形成させようとしたがかなり大きなものを周辺の斜め縞と同速度で移動させた場合以外は発生しなかった。したがって、斜め縞は

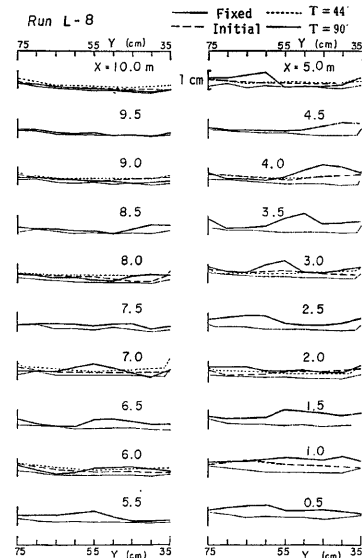


Fig. 13 Cross-sectional shapes of a sand layer on the fixed bed in Run L-8

このような単一の局所擾乱が原因となるものではないと判断された。

移動可能な砂層の厚さを制限した半固定床実験では、その厚さによって、同一水理条件でも発生する河床形態が異なった。かなり薄い場合は縦筋が、厚い場合には2次元的な広幅の反砂堆の列が、中間的な厚さでは3次元性の強い反砂堆が形成される。最後の3次元的な反砂堆から明確な斜め縞が生じることが認められ、その特徴は斜め写真から中心投影原理で読取って解析した斜め縞の挙動と一致した。この結果は、斜め縞の平均的な方向がFroude数の関数となった第2章での検討結果と対応している。これは、逆に、反砂堆が顕著ではないHシリーズの実験で現われる斜め縞も同一の機構で形成されたことの傍証となり得、自由水面と関係しないような砂粒運動のみのパターンが斜め縞の引金である可能性は低くなる。また、H及びLシリーズのすべての実験で無数の斜め縞を注意深く観察し、多くの写真、映像記録によって繰返し検討したが、斜め縞から砂州前縁に移行する②の過程を捕捉することはできなかった。この事実、及び斜め縞と密接な関係にあると判った反砂堆の形態の差異に無関係に砂州の前縁が形成されたRun L-4~8の結果は、両者が独立したものであることを示している。したがって、交互砂州は独自の不安定機構に拠って発生すると結論付けられる。さらに、交互砂州の発生状況をみると、通常1個(長水路では離れた位置に別のものも生じ得る)の砂州が著しく早く明確になるので、この不安定性は河床に一樣に存在していないか、あるいは何かの要因に非常に敏感なものであると推察される。

このような河床に内在した不安定機構の存在は、緒論で述べた河床安定理論の前提と対応してくる。しかしながら、従来の理論の修正を図ることも必要であるが、この不安定機構の特性を現象面から把握していくことが現段階では重要であろう。本文中でも指摘したように、このためには河床形態の立体的な形状を敏速に測定していくことが不可欠であって、今後、実験装置・計測装置を改良し、上述の特性を明らかにしてゆきたいと考えている。

本研究の遂行には昭和58年度文部省科学研究費補助金奨励研究(A)の補助を受けた。ここに関係各位に謝意を表す。また、実験に協力して頂いた河川災害部門中村行雄技官、本学大学院学生田村多志志君(現三井建設勤務)、同赤松英樹君に感謝します。

参 考 文 献

- 1) 土木学会水理委員会：洪水流の三次元流況と流路形態に関する研究(3. 中規模河床形態)，1982，pp. 59-64.
- 2) 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研究，京大防災研年報，第24号B-2，1981，pp. 411-431.
- 3) 池田 宏：水路における斜め交錯模様と斜行砂州の形成，第27回水理講演会論文集，1983，pp. 709-714.
- 4) 福岡捷二・中村徹立・安陪和雄・五十嵐崇博：移動床流れにおける側岸の水理的役割——特に，交互砂州の発生・伝播との関連について——，第27回水理講演会論文集，1983，pp. 681-688.
- 5) 藤田裕一郎・小池 剛・村本嘉雄：交互砂州の波長の発達機構，第29回水理講演会論文集，1985，pp. 485-490.
- 6) 道上正規：流砂と河床変動に関する基礎的研究，京都大学学位論文，1972.
- 7) 藤田裕一郎・村本嘉雄・堀池周二・小池 剛：交互砂州の発達機構，第26回水理講演会論文集，1982，pp. 25-30.
- 8) Chang, H. Y. and D. B. Simons: The Bed Configuration of Straight Sand Bed Channels When Flow is Nearly Critical, J. Fluid Mech., Vol. 42, 1970, pp. 491-495.
- 9) 村本嘉雄・藤田裕一郎・小池 剛・古川隆司：中規模河床形態の形成条件に関する実験，昭和56年度土木学会関西支部年次学術講演会講演概要，II-50.
- 10) 林 泰造：河川蛇行の成因についての研究，土木学会論文報告集，第180号，1970，pp. 61-70.
- 11) 鮎川 登：河川蛇行の発生限界に関する研究，土木学会論文報告集，第181号，1970，pp. 67-76.
- 12) 例えば，石原藤次郎・森 忠次：新版測量学，応用編，丸善，1965，pp. 397-399.