

中規模河床形態の形成条件

藤田裕一郎・村本 嘉雄・古川 隆司

FORMATIVE CONDITIONS OF MESO-SCALE RIVER BED CONFIGURATION

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

Synopsis

The formative conditions of meso scale river bed configuration have not been clarified under high ratio of the stream depth to the grain size h/d conditions, because of the scarcity of observed data with precise hydraulic conditions due to difficulties in the execution of experiments.

In this paper, however, experiments were conducted under the conditions of $h/d > 10^3$, and results of the experiments are mentioned about characteristics of sand bars and micro scale bed configuration as well as hydraulic conditions. The sand bars were classified by means of the geometrical characteristics and of the formative process. Their formative conditions indicate a limit of the applicability of previous criteria for the bar formation obtained from bar data in the flat bed. Physical meanings of this limit are considered on the viewpoints of the initial height of the disturbed bed in order to extend the applicability of the authors' criterion. As a results of this consideration, a modified criterion is proposed, which takes effects of the sand waves in the lower regime into account by using their height instead of the grain size. This criterion is examined by a few results observed and is discussed from the difference between the formative process of the bar in the flat bed and that in the ripple bed. Furthermore, a difference of this concept from stability theories of the bed variation and upper limits of the tractive force for the bar formation is discussed.

1. 序 論

沖積地河川に形成される河床形態のうち河幅規模のものが、砂州、あるいは水深規模までの砂漣・砂堆・反砂堆などの小規模河床形態との対比で、中規模河床形態と呼ばれ、それには合流点・彎曲部・河口などの局所的な河道条件に対して形成されるものと、比較的一様な河道に現われる移動性の交互砂州や複列砂州などが含まれることは周知のとおりである。これらの砂州はいずれも河道の維持に大きな影響を与えるが、とくに後者は一様な直線河道にさえ強い局所擾乱をもたらす点で治水・利水上問題とされることが多く、単に中規模河床形態の形成条件といえば通常直線流路の場合が対象とされている。この問題については交互砂州の形成条件を中心にしてこれまでに河床変動の安定理論や次元解析的考察に立脚した数多くの研究が、基礎実験や河川調査によって得られた資料を駆使して行われてきている¹⁾。

しかしながら、理論の検証や考察の基礎となるこれらの実測資料のうちで、水深・粒径比が100を越えるものは河川資料のみであって砂州を形成した水理条件の明確な実測資料がほとんどなく、このため水深・粒径比の大きい条件下での砂州の挙動は実態すら十分把握されていない。同時に、従来の実験では、主に砂州の基本特性を把握する目的で砂漣・砂堆発生の抑制が図られたこと、及び実験規模上の制約から交互砂州や複列砂州の形成条件下で掃流力の維持のために平坦床や反砂堆の現われる路床勾配が必然的に選択されたことの2つの理由によって、中規模河床形態と lower regime の河床波の共存²⁾ や相互作用に関する実験資料もほとんど得られていない。したがって、水深・粒径比が容易に 10^3 を超える実河川の砂州の諸特性の推

定は未だに困難な状況にあって、現在、水深・粒径比の大きい条件下での系統的な実験による資料の蓄積と現象の把握が強く望まれている。

しかしながら、このような実験には、小粒径の砂を用いた場合でもかなり大きい幅と長さの水路とそれに対応する各種の大型装置が要求され、このことが上述のように現在まで実験資料の集積が進んでいない主な理由と考えられる。たとえば、大型水路を用いた河床形態に関する実験として著名な Guy・Simons・Richardson³⁾ の実験でさえも、小規模河床形態を対象にしているために水深・粒径比は 120 から 2000 にも達するが、幅 2.44 m に比して水路長はその19倍弱の 45.7 m であって、水路幅の数倍の波長を持ちその上に 1~2 波長程度の発達区間を要する砂州は高々 1, 2 個形成されるのみと考えられ、その水理特性を把握するための実験としては不十分な長さであることがわかる。事実、中規模河床形態の形成された実験は準砂州⁴⁾ と判断される数例のみである。大型水路において明確な砂州の形成された例は池田⁵⁾ によって示されているが、用いられた砂礫径が約 6mm と大きいために 4m の水路幅もかわらず水深・粒径比は 10^2 を越えてはいない。同様の実験は、小川・深見⁶⁾ や藤田・村本・堀池⁷⁾ によっても幅 2m の水路において行われているがやはり水深・粒径比は 80 以下にとどまっている。

以上から、本研究では水深・粒径比が 10^2 を越える条件において中規模河床形態に関する実験を行い、その形成過程と形状特性に基づいて形成された砂州を分類し、それらの形成条件、小規模河床形態との共存及び両者の相互作用について考察する。

2. 中規模河床形態の形成条件に関する実験

2.1 実験装置と実験方法

実験は、宇治川水理実験所の河川災害総合基礎実験施設の河道部水路⁸⁾ において行われた。同水路の 43 m 区間をサンドスクレーパーで 1/300 に荒均した後にその中心線に沿って直線溝を掘り、両側壁をコンクリート型枠用合板で固定するとともに底面をビニールシートで覆い、その中に実験砂を厚さ約 20cm で敷きつめ、所定幅の固定側壁移動水路を設けた。

初期河床は、サンドスクレーパーのブレードに水路幅と同幅のアタッチメントを取付け、所定勾配に整形し、さらに表面をコテで滑かに処理した。実験区間からの浸透漏水を避けるために上流側の容量 60m³ 以上の減勢池に水を満たして一昼夜以上放置した後、所定の流量を通水して実験を開始した。給水は 7l/s 以下の小流量の場合は小型ポンプで減勢池と帰還水路を直結して行い、それ以上の流量には備付けの給水システムを用いた。流量の検定はいずれも減勢池内に設置した直角三角堰で行った。実験は、Run G-1 以外では現象の進行状況に応じた時間間隔で停水し、停水前に水位を測定し、停水後に河床高と流砂量の測定と給砂を行いながら進めた。掃流力が小さく現象の極めて遅い Run G-1 では終了まで連続的に通水し、河床高も通水したまま測定し、その間給砂は行わなかった。

測定の座標軸は、上流端を 0m として流下方向に x 軸を、水路中心を 4.00m として右から左の横断方向に y 軸を、鉛直下方に z 軸をとっている。水理量の測定は x 方向に 1m 間隔のデータが得られるように行った。すなわち、河床高は、測定台車上のトラバース装置に連続式砂面計 (KK ケネック社製) を取付け、それを横断方向に等速移動させて y 方向の連続計測を x 方向 1m 間隔で行い、水位はサーボ式波高計 (KK ケネック製) を $y=3.5, 4.0$ 及び 4.5 m の 3 点に設置し、台車を走行して得た x 方向連続計測記録を 1m 間隔で読取った。

流砂量は、水路下流端に縦 1.8m×横 1.8m×深さ 0.45m の箱を接続し、そこに貯った土砂量を計測して求めたが、実験砂が細粒であったために捕捉率が悪く測定精度は低いようであった。測定後の土砂を上流端から 5m までの区間に一様に撤き、給砂とした。

実験の平面連続写真を現象の進行速度に応じたほぼ一定の時間間隔で、トレーサーに過マンガン配カリウムあるいはアルミニウム粉末を用いて撮影し、河床形態の変化と移動の状況及び流況の記録とした。

2.2 実験条件

はじめに、流路幅Bは、砂州の発達区間の長さをこれまでの実験^{4,7)} から水路幅の5倍強と考え、幅の数倍の波長を持つ砂州が数個形成されるように幅の30倍以上の実験区間長を確保するために1.3mとした。一方、実験砂は、水深・粒径比を大きくするために、入手容易なできるだけ細粒のものとして、Fig. 1に示した粒度分布を持つ平均粒径 $d_m=0.206$ mm, 中央粒径 $d_{50}=0.185$ mm の鑄型用6号砂(日本珪砂KK製)を用いた。

この水路幅と粒径及びスクレーパーで設定可能な6種の勾配に対し、砂州の形成領域区分図⁹⁾の各領域における流量と流砂量を芦田・道上⁹⁾の抵抗算定法と掃流砂量式によって予測しておき、その結果に基づいていずれも水深・(平均)粒径比が 10^2 を越えるようなTable 1の4種の実験条件を設定した。すなわち、これらの区分図においてRun G-1はlower regimeで交互砂州領域に、Run G-2及びG-4はlower regimeで準砂州領域に、Run G-3はtransitionで交互砂州と準砂州領域の境界付近に位置するように条件が与えられている。

2.3 実験の結果

(1) 実験経過の特徴

実験では、上述の設定条件に応じてそれぞれ特徴的な河床形態とその挙動が観察された。ここではそれらの特徴を観察と平面連続写真によって要約する。

Run G-1では、掃流力が小さくて流砂量が極めて少かったので、砂灘は初期河床の凹凸に支配されて局所的に不規則な広がりを持って発生した。ついで、それはPhoto. 1(a)のように、斜め下流の方向に幅をやや広げながら帯状の列となって伝播してゆく。この砂灘の列は側壁に到達すると反射するように折返して単列あるいは複列の蛇行状の連なりを呈する。通水時間 T が100時間以上になって河床全面が砂灘で覆われた後もこの列は砂灘が最も発達しているために明瞭である。この前後から側壁近傍に深掘れ部が認められ始め、 $T=150$ hr となると砂州状の河床の高まりが明確になって、 $T=160$ hr 以後では単列状に砂州の連った区間では水流の蛇行も明らかになる。しかし、砂州の波長(水流蛇行の半波長に相当)はほとんど4m以下であって短い。この後、砂州は単列状のものと複列状のものとが混在したまま波高が発達し、Photo. 1(b)のように前縁が非常に明確になっていくが、砂灘は砂州上であっても存在し、河床全面を覆ったままである。

上述の砂州の形成過程における河床横断形状の変化の一例を実験区間中央部の $x=21$ m について示せばFig. 2のようである。この断面では初期河床の凹部を中央に残したまま砂灘の発達で $T=60$ hr まで続き、その発達した砂灘で覆われていた河床に $T=150$ hr になって砂州に対応した深掘れが右岸寄りに現われている。この深掘れはより右側に近付くとともに深さを増しており、顕著な単列状の砂州が形成されたと思われる。

Run G-2では、流砂量が多く水はやや濁っていて浮流砂もかなり生じていたが、それに応じて河床の変化の速度も早く、通水開始と同時に河床全面で一斉に発生した long crested な砂灘は直ちに乱れて3次元的な形状に移り、波長・波高を発達させていった。しかし、このような砂灘の活発な挙動に比較すると砂州の発生は遅く、Photo. 2(a)のように $T=6$ hr でも河床には砂灘のみが顕著であって、砂州の前縁が認められるのは $T=11$ hr 以降である。現われた前縁は交互砂州状に連なっており、砂州は発達を続けながらゆっ

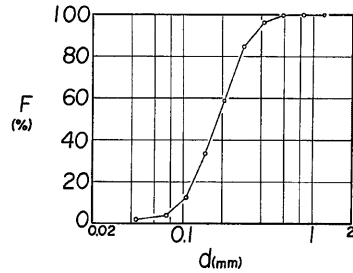


Fig. 1 Grain size accumulation curve of the sand used.

Table 1 Experimental conditions.

Run No.	Width (m)	Discharge (l/s)	Initial slope	Mean diameter (mm)	Flow duration (hr-min)
G-1	1.3	6.0	1/500	0.206	307-15
G-2	1.3	20.0	1/500	0.206	39-51
G-3	1.3	13.0	1/200	0.206	35-23
G-4	1.3	20.0	1/1000	0.206	68-10



Photo. 1 Bed configuration in Run G-1; (a) $T=15^{\text{hr}} 40'$, (b) $T=307^{\text{hr}} 0'$ (final state).

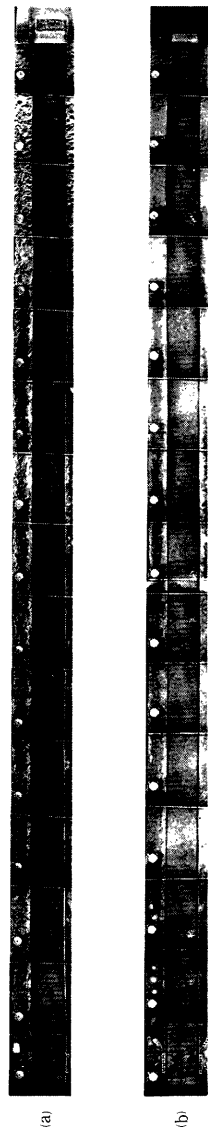


Photo. 2 Bed configuration in Run G-2; (a) $T=1^{\text{hr}} 24'$, (b) $T=38^{\text{hr}} 30'$ (final state).

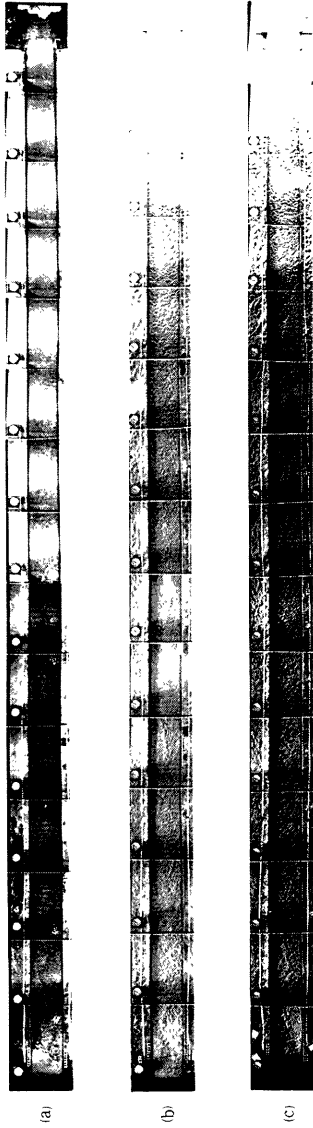


Photo. 3 Bed configuration in Run G-3; (a) $T=0^{\text{hr}} 23'$, (b) $T=24^{\text{hr}} 0'$, (c) $T=35^{\text{hr}} 23'$ (final state).

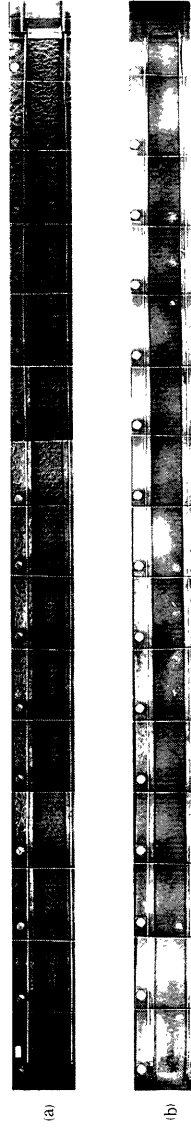


Photo. 4 Bed configuration in Run G-4; (a) $T=8^{\text{hr}} 0'$, (b) $T=66^{\text{hr}} 10'$ (final state).

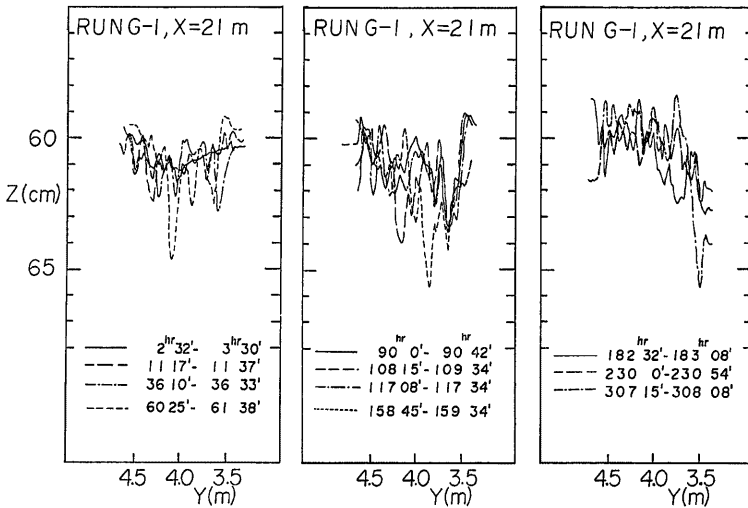


Fig. 2 Stream bed variation in a cross section.

くりと流下して最終時点に至ったが、この場合も **Photo. 2 (b)** のように砂澁が河床全面を覆っており、しかも砂州の上下でその形状に明確な差異はみられなかった。

Run G-3 では、通水とともに上流から砂澁が伝播していった。しかし、 $T=22'$ になると **Photo. 3 (a)** のように $x=24\text{ m}$ よりも下流の区間では水路中心線を境にして、右岸側半分はそのまま砂澁が発達を続けたが、左岸側は波長約 10 cm の小さな upper regime の水面波に覆われ、流路全体では transition と見なされる流況を示した。その後この左岸側半分の upper regime の河床は平坦河床となってほぼ同じ幅で上流方向に伝播してゆき、 $T=1^{\text{hr}} 10'$ には $x=7\sim 8\text{ m}$ にまで到達し、その上にはすでに多くの斜め縞が現われていた。 $T=2^{\text{hr}} 10'$ には $x=15\sim 25\text{ m}$ 区間に早くも砂州の前縁が形成され、同時に $x=33\text{ m}$ よりも下流の区間では平坦河床が水路の右半分に移って、 $T=3^{\text{hr}} 50'$ の停水時では、平坦河床の領域が $x=28.5\text{ m}$ を境にして左右の側壁に沿って波長 13.5 m の交互砂州状に 2 分されており、上流側では平坦河床と砂澁河床との間に高低差が認められる程度になっていた。この 2 つの平坦河床の位置関係は下流側のものが流出してしまう $T=11^{\text{hr}} 50'$ まで維持されたが、流路幅 1.3 m に対して 13 m もの長さは砂州の波長として不安定なようで、平坦河床と砂澁河床との境界線の変化に応じて砂州の前縁長は短くなりやすく、砂州が最も明確になった $T=6^{\text{hr}} 46'$ の停水時には前縁はそれぞれ $x=22\sim 31\text{ m}$ と $x=31\sim 40\text{ m}$ にあって波長は 9 m になっていた。しかし、このうちの上流側で発達していた砂州も先端が下流端に近付いた $T=11^{\text{hr}} 53'$ には前縁であった部分がほとんど砂澁に覆われてしまい、波高も著しく減少していた。

このように、Run G-3 では河床が transition にあるので、僅かな水理条件の変化に応じて河床のある領域の regime が急激に変わり、このために平坦河床時に発達途上にあった砂州が砂澁に覆われて不明確になることがしばしば生じた。とくに、 $T=24^{\text{hr}}$ の停水時には、**Photo. 3 (b)** のように流路の大半の区間が砂澁で覆われ、砂州が完全に消滅してしまった。しかし、再び平坦河床になると直ちに前縁が現われ砂州が形成されていき、速やかに **Photo. 3 (c)** の最終状態のような河床に戻っていった。

Run G-4 では、砂澁は下流側ほど早く発達したが、 $T=8^{\text{hr}}$ には **Photo. 4 (a)** のように全区間で一様になり、発達を完了させたようであった。その後 $T=42^{\text{hr}}$ までのかなりの長時間この状態からの変化は河床に現われなかった。しかし、 $T=45^{\text{hr}}$ になると $x=10\sim 30\text{ m}$ 区間に左右交互の河床の高まりとそれに対応す

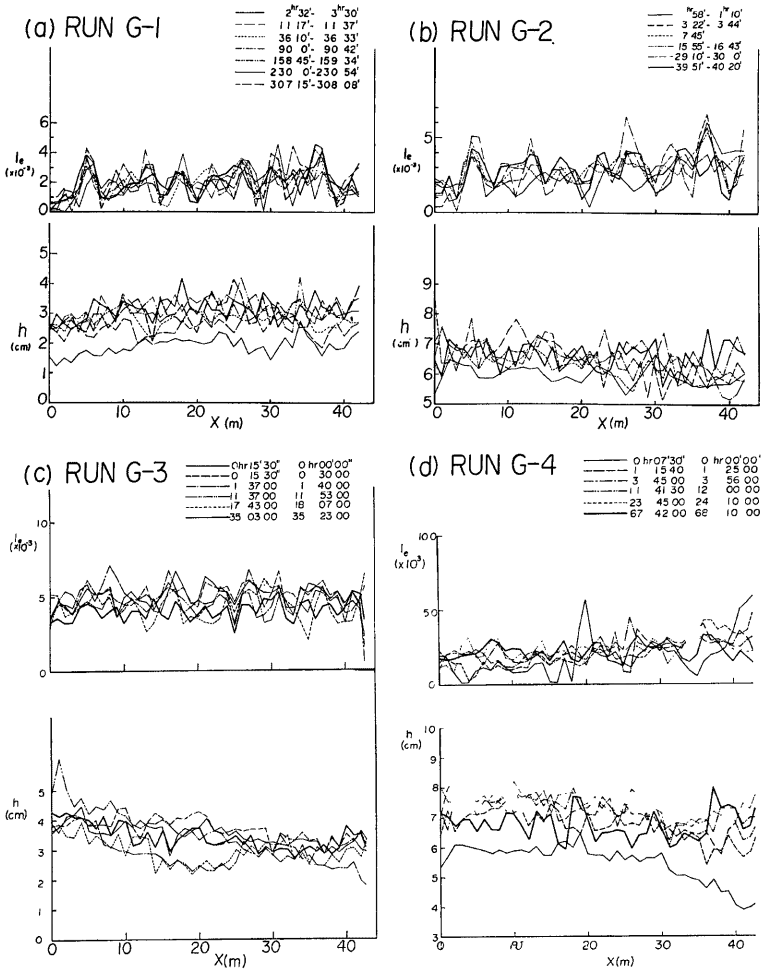


Fig. 3 Longitudinal changes of mean depth and energy slope in the experiments;
 (a) Run G-1, (b) Run G-2, (c) Run G-3, (d) Run G-4.

る洗掘部が認められ、さらに $T=54\text{hr}$ では水流の蛇行も明確になって、波長 5~6m の顕著に発達した砂州が現われた。 $T=68\text{hr } 10'$ の最終状態では、Photo. 4 (b) のように、砂灘で覆われた河床の $x=13\text{m}$ から下流の区間に 6 個の砂州が存在した。

(2) 水理量の変化

本実験のように、流量と流路幅が一定の場合には、種々の水理量は水深 h とエネルギー勾配 I_e から算定されるので、はじめにそれらの流下方向変化を検討する。この h と I_e の変化を Run G-1~G-4 について示せばそれぞれ Fig. 3 (a)~(d) のようである。

Run G-1 では、通水直後上流区間において h の流下方向への明らかな増加傾向が見られ、砂漣が中・下流区間の方で早く発達したことに対応している。この傾向は砂漣の発達による全体的な水深増加とともに不明確になり、 $T=11^{\text{hr}} 30'$ には h の流下方向変化は砂漣による河床高測定値の変動に基く波状変化のみとなる。この波状の変化を除くと、 $T=100^{\text{hr}}$ 以後では h の流下方向変化はほとんど無く、 $h \approx 3\text{cm}$ である。一方、 I_e には明確な波状変化がみられるが、これはいずれの実験にも共通しており、主に、水路側壁上のレベル高の誤差によるものと思われる。したがって、この波状変化を無視すれば、 I_e は初期にはやや流下方向に増加する傾向があるが、その後は上流 5m までの区間を除いて $I_e \approx 2.0 \times 10^{-3}$ の一定値を示し、その流下方向変化は無視できると思われる。

つぎに、Run G-2 では、砂漣の速かな発達に対応して、 h の流下方向の波状変化は $T=3^{\text{hr}}$ に最終段階とほぼ同様の状態を見せている。しかし、 $T=15^{\text{hr}}$ まではそのうちにも流下方向に減少する傾向が認められ、 I_e の変化と逆の傾向にあることがわかる。これらの傾向も $T=29^{\text{hr}}$ には消え、その後 h と I_e はともに流下方向に一定とみなしうる。

Run G-3 では、前述の実験誤差や水面波・河床波による波状変化を無視すると、 I_e は流下方向にも時間的にもほぼ一定していると考えられる。しかし、 h にはいずれの時点でも $x=15\text{m}$ よりも上流側では流下方向に減少、一方、 $x=25\text{m}$ よりも下流側では一定となる傾向が明確であって、上流側ほど lower regime の河床が現われやすかったこと、及び $x=15 \sim 25\text{m}$ の区間では flow regime が良く変化したことに対応している。このため $x < 15\text{m}$ の区間における h の距離的・時間的な値の変化は他の実験に比べて大きい。砂州の生じた $x > 25\text{m}$ に限ればその変化はさほど大きくないことがわかる。

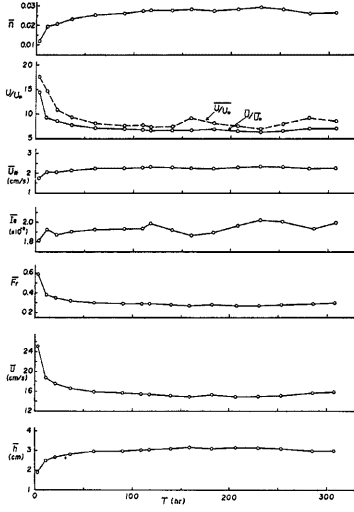
Run G-4 では、Run G-2 と同様に実験の初期から中期にかけて流下方向に h はやや減少、 I_e はわずかに増加する傾向が認められる。しかし、 $T=24^{\text{hr}}$ からは h 及び I_e とも流下方向に一定となって、それは最終状態でも維持されている。

以上のように、いずれの実験においても h と I_e の変化には流下方向に特定の変化傾向が認められる場合は少く、水量の時間的な変化は流下方向の平均値によって明確に把握しようと思われる。Fig. 4 (a)~(d) はそれぞれ Run G-1~4 における流下方向平均の水深 \bar{h} 、流速 \bar{U} 、フルード数 \bar{F}_r 、エネルギー勾配 I_e 、摩擦速度 \bar{U}_* 、流速係数 \bar{U}/\bar{U}_* 及びマンニングの粗度係数 \bar{n} の時間的な変化を示したものであり、また Table 2 にはこれらの値が一括表示されている。

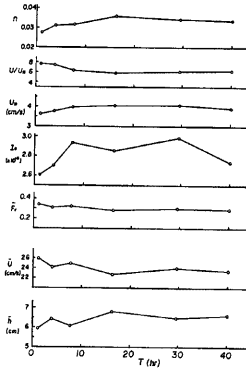
これらの図及び表から、Run G-1 では $T=0^{\text{hr}}$ から $T=60^{\text{hr}}$ の間において \bar{h} は $\bar{h} \approx 2\text{cm}$ から 1.5 倍の $\bar{h} \approx 3\text{cm}$ に初期ほど急激な割合で増加し、それに応じて \bar{U} は $\bar{U} \approx 25\text{cm/sec}$ から $\bar{U} \approx 16\text{cm/sec}$ に、また \bar{F}_r は約 0.6 から 0.3 に減少している。一方、 I_e は $I_e \approx 1.9 \times 10^{-3} \sim 2.0 \times 10^{-3}$ であってほぼ一定であるので、摩擦速度はほぼ $\sqrt{\bar{h}}$ に比例して変化している。これによって流水抵抗も \bar{U}/\bar{U}_* や \bar{n} の変化に見られるように、 $T=0 \sim 90^{\text{hr}}$ の間に初期ほど急激な割合で増加しており、 \bar{U}/\bar{U}_* は約 15 から 7 以下に減少してそこで落ち着いている。このような水深や流水抵抗の増加は明らかに本節(1)で述べた砂漣の発達に対応したものと考えられ、 $T=100^{\text{hr}}$ 前後の流水抵抗増加の落ち着いた時点は河床が発達した砂漣で完全に覆われた時点に一致している。

したがって、Run G-2 (Fig. 4 (b)) のように掃流力が大きく通水後直ちに河床が砂漣で覆われた場合には砂漣の発達に伴う水深の増加は $T=5^{\text{hr}}$ までに終るようであって、その後の $\bar{h} \approx 6.5\text{cm}$ を中心とする \bar{h} の変化は $I_e \approx 2.9 \times 10^{-3}$ を中心とする I_e の変化に呼応した傾向、すなわち I_e が減少すれば \bar{h} が増加し、逆に I_e が増加すれば \bar{h} は減少する傾向を示している。この水深変化をもたらす砂漣の発達した後の I_e の変化はおそらく各停水時での給砂条件のバラツキに起因すると思われる。一方、 $T=5^{\text{hr}}$ までの I_e の増加はやはり初期ほど急激に進行した低下背水による下流区間の河床低下によるものであって、 I_e はその後設定値の $I_0 = 2.0 \times 10^{-3}$ をかなり上回る $I_e \approx 2.9 \times 10^{-3}$ となっている。同様の初期の I_e の増加は掃流力の小さい初期河床勾配 $I_0 = 1.0 \times 10^{-3}$ の Run G-4 (Fig. 4 (d)) においてより緩かつより顕著に生じ、ここでは $T=10^{\text{hr}}$ 以降 $I_e \approx 2.3 \times 10^{-3}$ と設定値の倍以上となっている。このように、緩勾配で比較的水深の大きい移動

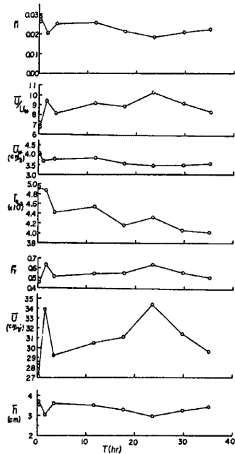
(a) RUN G-1



(b) RUN G-2



(c) RUN G-3



(d) RUN G-4

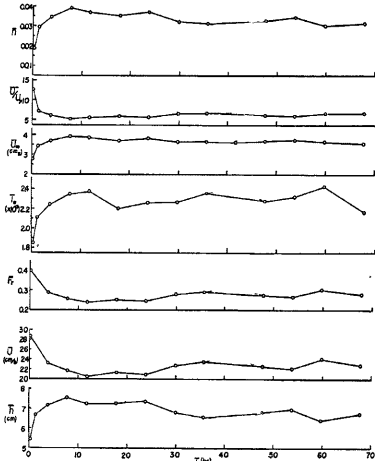


Fig. 4 Changes with time of hydraulic quantities averaged longitudinally; (a) Run G-1, (b) Run G-2, (c) Run G-3, (d) Run G-4.

Table 2 Hydraulic conditions in the experiments.

Run No.	Time hr min	\bar{h} (cm)	\bar{R} (cm)	\bar{U} (cm/sec)	\bar{F}_r	\bar{I}_e ($\times 10^{-3}$)	\bar{U}_* (cm/sec)	\bar{U}/\bar{U}_*	\bar{n}
G-1	2-32	1.90	1.84	25.06	0.59	1.816	1.74	14.40	0.0120
	11-17	2.49	2.40	18.74	0.38	1.926	2.05	9.14	0.0139
	20-59	2.66	2.56	17.55	0.35	1.871	2.05	8.56	0.0207
	36-10	2.81	2.69	16.61	0.32	1.905	2.14	7.76	0.0321
	60-25	2.95	2.82	15.87	0.30	1.925	2.23	7.12	0.0252
	90-00	2.97	2.84	15.68	0.29	1.931	2.25	6.97	0.0258
	109-02	3.03	2.98	15.51	0.29	1.933	2.28	6.80	0.0272
	117-08	3.05	2.91	15.40	0.29	1.987	2.31	6.67	0.0275
	139-15	3.09	2.95	15.14	0.28	1.920	2.28	6.64	0.0274
	158-45	3.16	3.01	14.90	0.27	1.866	2.24	6.65	0.0279
	182-32	3.10	2.95	15.28	0.28	1.895	2.22	6.88	0.0270
	206-45	3.15	3.00	14.91	0.27	1.966	2.30	6.48	0.0282
	230-00	3.12	2.98	14.98	0.27	2.021	2.36	6.35	0.0289
	253-09	3.09	2.95	15.16	0.28	2.008	2.31	6.56	0.0280
	285-24	2.98	2.85	15.70	0.29	1.934	2.24	7.01	0.0259
	307-15	2.98	2.85	15.81	0.30	1.996	2.25	7.03	0.0263
	average after $T=109^{\text{hr}} 02'$	3.08	2.94	15.28	0.28	1.953	2.28	6.71	0.0274
G-2	58	5.95	5.45	25.94	0.34	2.605	3.63	7.61	0.0275
	3-22	6.43	5.85	24.12	0.31	2.703	3.76	7.43	0.0310
	7-45	6.19	5.65	24.93	0.32	2.934	3.98	6.39	0.0316
	15-55	6.80	6.15	22.73	0.28	2.852	4.06	5.85	0.0359
	29-10	6.48	5.89	23.97	0.30	2.985	4.07	6.13	0.0342
	39-51	6.60	5.99	23.41	0.29	2.736	3.91	6.30	0.0336
average after $T=3^{\text{hr}} 22'$	6.50	5.91	23.83	0.30	2.84	3.96	6.42	0.0333	
G-3	0-15	3.63	3.44	27.84	0.471	4.72	4.06	6.99	0.0270
	1-37	3.03	2.89	33.89	0.639	4.87	3.69	9.42	0.0201
	3-19	3.58	3.38	29.21	0.513	4.42	3.77	8.17	0.0251
	11-37	3.51	3.32	30.40	0.559	4.54	3.80	9.23	0.0252
	17-43	3.30	3.13	31.07	0.559	4.18	3.55	8.93	0.0213
	23-30	2.98	2.85	34.36	0.649	4.33	3.45	10.39	0.0186
	29-44	3.25	3.10	31.38	0.566	4.07	3.49	9.23	0.0207
35-03	3.43	3.26	29.56	0.517	4.01	3.56	8.43	0.0222	
average after $T=0^{\text{hr}} 15'$	3.34	3.17	30.96	0.559	4.39	3.67	8.85	0.0225	
G-4	0-07	5.45	5.03	28.64	0.398	1.85	2.76	12.59	0.0186
	1-15	6.68	6.05	23.15	0.288	2.11	3.41	7.14	0.0293
	3-45	7.15	6.44	21.64	0.260	2.24	3.68	6.02	0.0345
	7-46	7.53	6.75	20.49	0.239	2.35	3.91	5.29	0.0390
	11-41	7.23	6.51	21.32	0.254	2.37	3.85	5.62	0.0366
	17-49	7.26	6.35	21.24	0.252	2.20	3.70	5.98	0.0354
	23-45	7.37	6.62	20.39	0.247	2.26	3.79	5.64	0.0370
	29-54	6.80	6.15	22.79	0.281	2.27	3.64	6.54	0.0324
	35-40	6.57	5.97	23.49	0.294	2.36	3.68	6.50	0.0315
	41-40	6.19	5.56	25.04	0.324	2.42	3.60	7.09	0.0286
	47-42	6.82	6.17	22.60	0.277	2.28	3.69	6.23	0.0330
	53-38	6.98	6.30	22.12	0.268	2.32	3.75	6.07	0.0343
	59-40	6.40	5.83	24.18	0.307	2.43	3.67	6.71	0.0304
	67-42	6.75	6.11	22.91	0.283	2.16	3.56	6.55	0.0313
average after $T=3^{\text{hr}} 45'$	6.92	6.23	22.35	0.274	2.31	3.71	6.19	0.0337	

床実験では下流端の実験条件の設定に留意する必要があることがわかる。Run G-4 においても $T=10^{\text{hr}}$ 以後の \bar{h} と I_0 の時間的变化には Run G-2 の場合と同様の呼応した変化傾向が認められる。

このような \bar{h} と I_0 の時間的变化に対応して、Run G-2 では $T=5^{\text{hr}}$ までに \bar{U}_* は $\bar{U}_* \approx 3.6 \text{ cm/sec}$ から $\bar{U}_* \approx 4.0 \text{ cm/sec}$ に増加、逆に $\bar{U}/\bar{U}_* \approx 7.4$ から $\bar{U}/\bar{U}_* \approx 6.3$ に減少した後ともほぼ一定値をとり、一方、Run G-4 では $T=10^{\text{hr}}$ までに \bar{U}_* は $\bar{U}_* \approx 2.7 \text{ cm/sec}$ から $\bar{U}_* \approx 3.9 \text{ cm/sec}$ に増加、 \bar{U}/\bar{U}_* は $\bar{U}/\bar{U}_* \approx 13$ から $\bar{U}/\bar{U}_* \approx 5.5$ に減少した後ともに明瞭な変化は消えている。

以上の砂漣の形成された場合に対し、初期河床勾配が $I_0=1/200$ と比較的急で河床が transition になった Run G-3 では、給砂が不十分であったために上流区間ほど河床低下が著しく、 I_0 は Fig. 4 (c) のように初期では $I_0 \approx I_0$ の 4.9×10^{-3} であったが、その後給砂量に応じて若干の増減は示すが明らかな減少傾向にあって $T=35^{\text{hr}}$ には $I_0 \approx 4.0 \times 10^{-3}$ と I_0 の 80% となっている。一方、水深は $\bar{h} \approx 2.8 \sim 3.6 \text{ cm}$ の間にあって一定の傾向はなく、Run G-2 や G-4 の場合のような I_0 と呼応した変化も認められない。Fig. 3 (c) の流下方向変化と照合すると \bar{h} の増減は主に $x=25\text{m}$ よりも上流の区間における h の増減に基因しているようである。この区間に現われる小規模河床形態に対応して変化するものと思われる。この結果、 \bar{U}_* は大体 $\bar{U}_* \approx 3.4 \sim 3.8 \text{ cm/sec}$ の範囲にあって、 $\sqrt{I_0}$ に比例した減少傾向と $\sqrt{\bar{h}}$ に比例した局所的変動を示すが I_0 の減少が穏やかになった $T=17^{\text{hr}}$ 以降では $\bar{U}_* \approx 3.5 \text{ cm/sec}$ で一定となっている。一方、 \bar{U}/\bar{U}_* は \bar{U}_* の変化が小さいためほぼ \bar{h} に反比例した変化が顕著であり、初期を除いて $\bar{U}/\bar{U}_* \approx 8 \sim 10$ の範囲にあって、Run G-1, G-2, G-4 に比較すると高い値であるが一般には大きい流水抵抗の部類に入っている。これは、lower regime と upper regime とが常に混在していたが前者の方が後者よりも河床上で広面積を占めている場合が多かったこと、及び $\bar{F}_r \approx 0.5 \sim 0.6$ であることに対応している。

2.4 河床変動と砂州の発達

実験の観察や平面連続写真によれば 2.3 (1) で述べたようにいずれの Run においても河床の全部あるいは一部が砂漣に覆われたにもかかわらず砂州が発生した。このような条件下の砂州の形成過程における河床変動について、平均横断形状すなわち平均河床高を回帰した平面からの偏差高を縦断方向に平均した横断形状(蒲鉾型平均横断形状)の検討⁷⁾を行った。対象は砂州の形成されていた区間すなわち Run G-1 では $x=15 \sim 35\text{m}$ 、Run G-2 では $x=9 \sim 40\text{m}$ 、Run G-3 及び G-4 では $x=14 \sim 41\text{m}$ の区間であって、その結果は Fig. 5 (a)~(d) に示されている。

Run G-1 の検討結果 (Fig. 5 (a)) では $T=139^{\text{hr}}$ までの平均横断形状は砂漣の発達に対応したと思われる変化の激しい凹凸を見せるのみで、交互砂州の発達を表す中央部の高まりと両側壁近傍の低下は認められない。しかし、 $T=182^{\text{hr}}$ になると明らかに平均河床高よりも中央部が高くその両側が低くなって約 1cm の高低差を示している。その後砂漣による凹凸を残したままこの高低差は時間とともに増加し、最終状態の $T=307^{\text{hr}}$ では約 2cm に達し平均横断形状は蒲鉾型になっている。

Run G-2 では、Fig. 5 (b) のように砂州の前縁が $T=11^{\text{hr}}$ 前後から明瞭になっていたことに对应して、 $T=15^{\text{hr}} 55'$ から高さ約 1cm の蒲鉾型平均横断形状が明確になっている。その高さは $T=29^{\text{hr}} 10'$ までの約 14 時間で約 4cm に増大し、 $T=39^{\text{hr}} 51'$ でもその形状がほぼ維持されている。これに対して、Fig. 5 (d) の Run G-4 では、砂州の不発生に対応する不規則な凹凸の横断形状が $T=42^{\text{hr}} 10'$ までのかなりの長時間続いている。しかし、2.3 (1) で述べた観察結果と一致して、 $T=48^{\text{hr}} 10'$ になって河床中央部の土砂堆積と側壁近傍の洗掘が明確になり始めると、その後の蒲鉾型横断形状の発達は Run G-2 ほどではないが急速であって、20 時間後の $T=68^{\text{hr}} 10'$ にはその高さは約 3cm に達している。

一方、Fig. 5 (c) の Run G-3 の結果では、 $T=0^{\text{hr}} 30'$ の左岸側 ($y > 4.0\text{m}$) の比較的平滑な形状は(1)で述べた平坦河床に対応したものと思われ、この部分は平坦河床域の伸長と砂漣の発達に伴うその谷部の低下に对应した右岸側の低下のために $T=1^{\text{hr}} 14'$ には相対的に平均河床よりも高くなっている。さらにこの平坦河床上に現われた最初の砂州によって $T=3^{\text{hr}} 50'$ では両側壁沿いの河床高間の高低差が大きくなっている。先述のように、この上流側の砂州によって下流区間では平坦河床の位置が左岸側に移るとともにそこにも砂

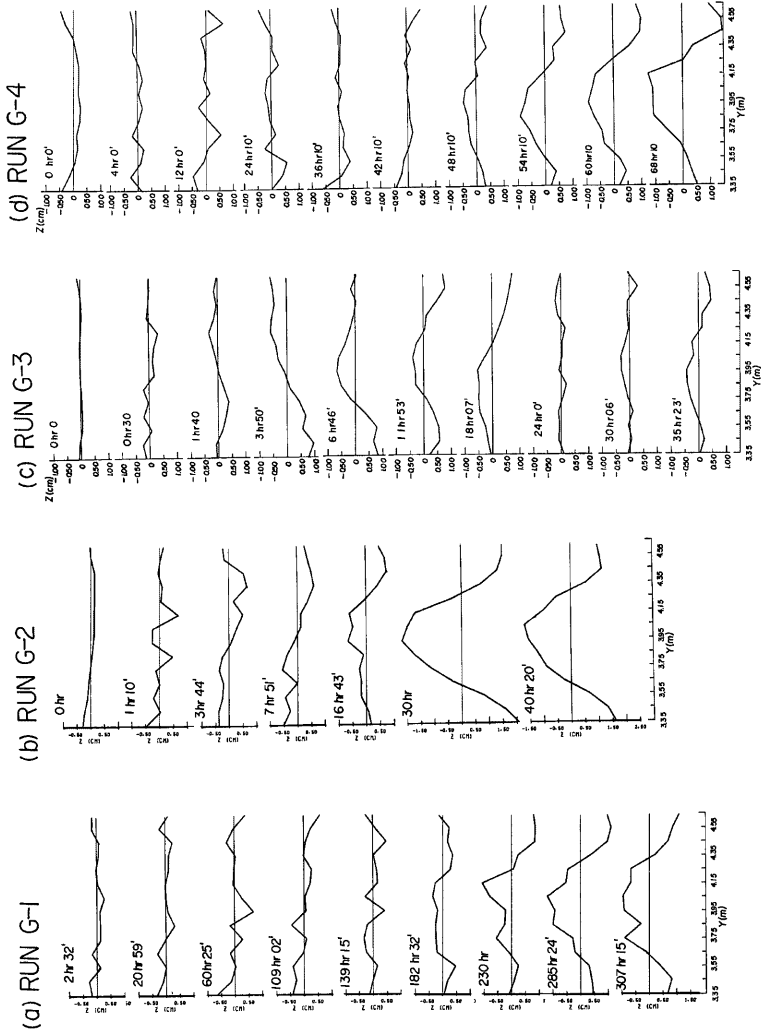


Fig. 5 Formation of Quosset-hut shapes of the stream channel bed averaged longitudinally; (a) Run G-1, (b) Run G-2, (c) Run G-3, (d) Run G-4.

州が形成されていったことに対応して、 $T=6^{\text{hr}} 46'$ では右側壁沿いの河床も低下している。 $T=11^{\text{hr}} 55'$ には、この下流側の砂州は流出してしまい、かつ、上流側の砂州は砂漣に覆われて前縁が不明確になるとともに波高も減衰したので、蒲鉾型平均横断形状の高さは、これらよりも上流側の発達途上の砂州の状態に対応したものであると思われるが、いずれにしても増加していない。

このように、砂州上とそれ以外の部分で flow regime が異なる場合でも交互砂州の形成される場合には平均河床形状は蒲鉾型となって、両側壁近傍から流路中央部に向かう横断方向の土砂移動の生じることが確認される。しかし、その蒲鉾型形状の高さは最大 1cm であって、Run G-1, G-2 及び G-4 において前縁が明確になった時点の高さに達しえたのみである。これらの Run ではその後砂州が顕著に発達していったのに対し、Run G-3 では逆に $T=18^{\text{hr}} 07'$ の横断形状が $T=3^{\text{hr}} 50'$ の形状を逆転したような扁平な形状に戻ったこととわかるように、この時点から砂州は一時減衰段階に入ったとみなされる。これより、Run G-3 の水理条件では、砂州はこのような不安定な状態にあって、波高を発達させ続けることが困難であると判断でき、事実 $x > 20\text{m}$ の区間が砂漣で覆われた $T=24^{\text{hr}} 00'$ では平均河床横断形は初期と同様の平坦な状態に戻っている。この状態から約 6 時間後の $T=30^{\text{hr}} 06'$ では再び中央部の盛上った形状が現われ、 $T=35^{\text{hr}} 23'$ にはその高さが 1cm 近くに達している。これは 2.3 (1) で述べたように平坦河床の出現後直ちに砂州が形成され始めたことに一致している。しかし、これらの砂州も砂漣の発生によって再び減衰する可能性があったこのまま発達していくことは少いように思われる。

以上のように、河床が砂漣で覆われた後に砂州の発生した Run G-1, G-2 及び G-4 では、明確な砂州の前縁の出現に対応する蒲鉾型平均横断形状の形成開始までに、いずれの場合もその後の発達時間に匹敵あるいはそれ以上のかんりの長時間を要している。これに対し、平均に transition の regime にあった Run G-3 では、平坦河床上には急速に砂州の前縁が形成されて、蒲鉾型の平均横断形状も速かに形成されるが、その高さは発達せず、完全に減衰してしまうこともある。これは、砂州は十分発達しきるまでに flow regime の激しい変化の影響を受けて結果的に乱れやすく、不安定な状態にあることを示している。したがって、本節の検討から、小規模河床形態はその形成に砂州からの一方的な影響を受けるのではなくて、むしろ砂州形態の形成過程に大きな影響を与えていることがわかる。

2.5 河床形態の形状特性と砂州の分類

(1) 河床形態の形状特性

Run G-1～G-4 の最終状態において形成されていた砂州及び砂漣の形状特性としてそれらの波長・波高の平均値を一括表示すれば Table 3 のとおりである。この場合砂漣が発達した 3 次元形状をしているので、その波高 Z_r は Fig. 6 に示したように砂州形成区間における河床高の横断方向連続測定結果を用いて決定した。すなわち、1つの砂漣の峯の両側の谷からの高さを計測し、両者の和の 1/2 をその砂漣の波高とし、同一断面で大きい方から 2 つまでとって平均している。一方、その波長 l_r は平面写真から同一の砂漣を見出して測定している。つぎに、砂州の波長 l_B は平面連続写真から前縁の先端を読み取り、相隣る先端間の差

Table 3 Geometrical characteristics of sand waves and the classification of bars formed in the experiments.

Run No.	$\frac{B}{\bar{h}}$	$\frac{\bar{h}}{\bar{d}}$	\bar{l}_r (cm)	\bar{Z}_r (cm)	\bar{l}_B (m)	\bar{Z}_B (cm)	\bar{l}_B/B	\bar{Z}_B/B	Classification of bar
G-1	42.07	150.	20.9	1.90	3.10	5.32	2.38	0.0409	Intermediate form between alternating bar and double row bar
G-2	19.64	321.	18.6	2.03	5.75	9.63	4.42	0.0741	Alternating bar
G-3	39.04	162.	17.4	1.76	8.00	4.50	6.15	0.0346	Intermediate form between semi-bar and alternating bar
G-4	18.79	336.	17.7	2.07	6.13	8.90	4.72	0.0685	Alternating bar

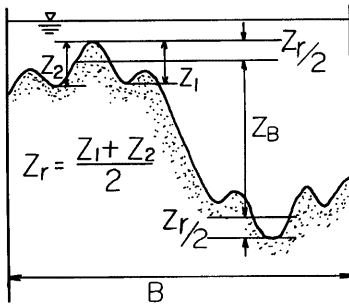


Fig. 6. Schematic sketch of a definition of bar and ripple height.

(2) 砂州の分類

本実験で形成された砂州について、上述の Table 3 に示した無次元波長 \bar{l}_B/B と無次元波高 \bar{Z}_B/B の値及び観察された平面形状に基いて、その分類を著者らの基準⁴⁾を参考にしながら行う。

Run G-1 の場合は、 $\bar{l}_B/B=2.38 \leq 3$ かつ $\bar{Z}_B/B=0.0409 \geq 0.04$ であるので著者らの分類基準によれば砂州は短対角州に区分されるが、前述のように複列砂州状の区間が現われており、また砂漣の影響で \bar{Z}_B が大きく測定されている可能性もあるので、交互砂州と複列砂州の中間的な形態と判断する。つきに、Run G-2 及び Run G-4 では、それぞれ $\bar{l}_B/B=4.42 \geq 4$ かつ $\bar{Z}_B/B=0.074 \geq 0.04$ 及び $\bar{l}_B/B=4.72 \geq 4$ かつ $\bar{Z}_B/B=0.0685 \geq 0.04$ であって、ともに交互砂州の基準を満たしており、観察された平面形状や流況とも一致するのでこれらの場合は交互砂州に分類する。最後に、Run G-3 の場合では、 $\bar{l}_B/B=6.15 \geq 4$ かつ $\bar{Z}_B/B=0.0346 \leq 0.04$ であって波長は交互砂州の基準を満たしており、平面形状も類似しているが波高の発達はやや不十分であって準砂州に分類される。実際、平均横断形状の検討結果からも消滅しやすい未発達砂州の多かったことが示されていたので、準砂州とみなすのが妥当であるが、実験の途中では交互砂州の基準を満足する程度の砂州も形成されていたことを考慮して、ここでは準砂州と交互砂州の中間形態とする。

3. 中規模河床形態の形成条件

3.1 形成条件に関する検討

中規模河床形態の形成条件について、従来の実験結果と本実験の結果とを比較するために、ここでは実測値に基いて作成された主な形成領域区分図を用いる。前述のように水理条件は主として砂漣の発達によって大きく変化していたが、砂州は砂漣が十分に発達した後に形成されたので、検討には Table 2 の各 Run の最下段に示されている水深の時間的変化が落ち着いた後の平均水理量を用いた。

はじめに、鯉川¹⁰⁾と同様の仮説に基いた池田¹¹⁾の形成領域区分図で検討したが、その結果は Fig 7 に示されている。鯉川の領域区分によれば、Run G-1 及び G-3 は交互砂州領域に、Run G-2 と G-4 は小規模河床形態の領域に区分されている。池田の区分線では、Run G-1 と G-3 は明確な前縁線を有する交互砂州領域に、Run G-2 と G-4 は前縁の不明確な交互砂州の領域に属することになる。したがって、鯉川、池田の区分図とはともに前節の分類とは一致せず、明確な交互砂州の Run G-2、G-4 と不明確な Run G-3 の区分図上の位置にはむしろ逆の傾向が認められる。つきに同図の黒木・岸¹²⁾の区分線によれば、Run G-1 と G-3 は交互砂州から lower regime の河床波への遷移領域に入り Run G-4 はこの遷移領域と砂州の非発生領域の境界に位置し、Run G-2 は非発生領域に区分される。すなわち Run G-3 の場合を除いて前節の分類とは一致せず Run G-3 の場合も交互砂州領域との境界線からはかなり離れている。

一方、著者ら⁴⁾の領域区分図と比較すれば Fig 8 のようであって、Run G-1 は交互砂州領域に、Run

もしくは明確な前縁線の上流側終端までの距離として測定し、波高 Z_B は、Fig. 6 のように、各測定断面について砂州上の最高河床高から $Z_r/2$ だけ下がった高さや筋筋の最低河床高から $Z_r/2$ だけ上がった高さの差を求めその砂州区間内の最大値で定義している。

平均波高 \bar{l}_B は、Run G-1 で最短の $\bar{l}_B=3.1$ m, Run G-3 で最長の $\bar{l}_B=8.0$ m の値をとり、平均値の開きとしては大きく、水理条件の差異を表している。同様に平均波高 \bar{Z}_B にも Run G-2 で最大の $\bar{Z}_B=9.6$ cm, Run G-3 で最小の $\bar{Z}_B=4.5$ cm と 2 倍以上の差がみられる。これに対して、砂漣は $\bar{l}_r=17 \sim 21$ cm かつ $Z_r=1.7 \sim 2.1$ cm の範囲にあって、波形勾配が約 0.1、波長・粒径比がほぼ 1000 となり、従来の実測値と同様の形状特性を示している。

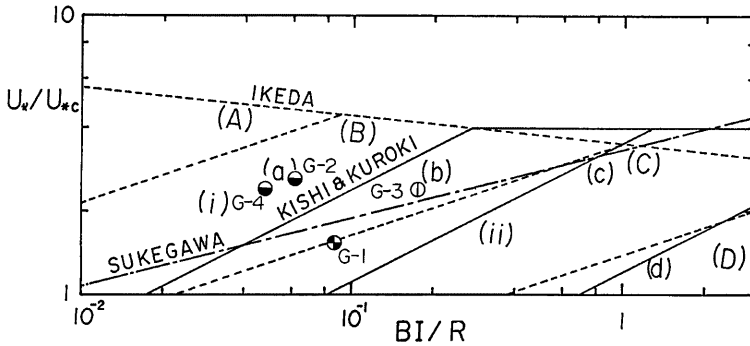


Fig. 7 Formative conditions of the bars formed in the experiments compared with previous criteria by Sukegawa; (i) no appearance of bars, (ii) alternating bars, by Ikeda; (A) no appearance of bars, (B) weak alternating bars, (C) clear alternating bars, (D) double row bars, and by Kuroki-Kishi; (a) no appearance of bars (ripples and dunes), (b) transition from bars to ripples and dunes, (c) alternating bars, (d) double row bars.

G-3 は準砂州領域内の交互砂州領域との境界近くに、Run G-2 と G-4 は準砂州領域にそれぞれの実験値が図示され、Run G-3 は領域区分と良く合致している。同図には、深見⁹⁾の実験結果及び Guy^ら³⁾の実験のうち中規模河床形態のみられた 5 例を記述や写真に基いて再分類して図示している。Guy^らの実験値は区分図と良く一致しており、砂漣の形成が述べられている深見の実験値も複列砂州と交互砂州の各一例を除いて区分図と一致している。

以上のように、Run G-3 及び upper regime あるいは transition にあったと推定される Guy^らの実験値は著者らの領域区分図と良く一致しているが、河床全体が砂漣で覆われた後に砂州の発達した Run G-1, G-2 及び G-4 はいずれも形成された砂州形態と領域区分図とが大きく相違している。また、深見の実験についても、彼の CASE4~6 の水理条件は例えば芦田・道上の区分図では upper regime にプロットされるので砂漣の形成状況に疑問は残るが、上と同様の傾向が指摘できる。

3.2 形成条件に関する考察

水深・粒径比 h/d がともに 10^2 を越えているにもかかわらず、著者らの中規模河床形態の形成領域区分図と一致した Run G-3 及び Guy^らの 5 例と、食い違った Run G-1, G-2 及び G-4 との明確な相違点は、前者が upper regime や transition の河床であったのに対し、後者は lower regime にあって河床が砂漣で覆われていた点であるのでそれに着目して考察する。

これまで、領域区分図の作成に用いられてきた実験値のうち、砂州、とくに交互砂州の形成されていた資料は、ほぼ総てが平坦河床の条件にあったことを考慮すると、それらと大体同じ条件の Run G-3 や Guy^らの実験値が領域区分に合致したのは当然の結果と思われる。一方、Fig 8 のパラメータ h/d の物理的意味を、砂州の発達にかかわる粒径オーダーの河床擾乱が流れに及ぼす影響を示すものと解釈する観点⁴⁾ に立てば、粒径 d を河床の凹凸の構成要素の規模に置換えたパラメータの有効性が直観的に連想される。

確かに、平坦河床の場合では、河床に生じている凹凸の構成要素は砂粒であって、その移動と停止による重なり合いで発生する粒径の何倍かの高さの擾乱に対して、区分図で示されるような条件を h と流路幅 B とが満足した場合にこの擾乱が砂州の形成に繋がるものと考えられる。これに対し、砂漣河床に発生しうる擾乱が、砂漣の波高分布と移動速度の相違から生じる合体によってもたらされると考えることは妥当であろう。1 回もしくは数回の合体によって河床に生じる擾乱の高さは砂漣の波高のオーダーであって、この擾乱

に対して、 h と B が平坦河床と類似のある条件を満たした場合に、それが砂州として形成されていくものと類推される。したがって、このような観点からは Fig 8 の区分図は平坦河床の場合についてのみ適用できるものと判断される。

いま、このような種々の河床状態において砂州の形成に関わる河床擾乱の高さを d' とすると、上述の考えからは、 h/d の代わりに h/d' をパラメータにとった Fig 8 と類似の区分図を想定すれば、それはいずれの河床状態にも共通に用いる中規模河床形態の形成領域区分図になることが予想される。しかし、この擾乱の高さ d' は平坦河床の場合でも d に一致しているのではなく、最も単純にはオーダー 1 の定数 β_f を介してつぎのような比例関係にあると思われる。

$$d' = \beta_f d \quad \dots\dots\dots (1)$$

同様に、砂漣河床においても、 d' がそのまま砂漣の波高 Z_r や砂堆の波高 Z_d の値をそのままとは考えにくく、それぞれ (2) 式および (3) 式の関係があろう。

$$d' = \beta_r Z_r \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$d' = \beta_d Z_d \quad \dots\dots\dots (3)$$

しかしながら、これらの係数については β_f の評価すらできない段階にあって、 β_r, β_d の推定あるいは $h/d' - B/h$ 平面における領域区分線の同定は不可能である。したがって、ここでは多くの実測資料に基づいて得られた Fig. 8 の区分図が平坦河床の場合にはかなり確度の高い砂州の形成条件を与えているので、そ

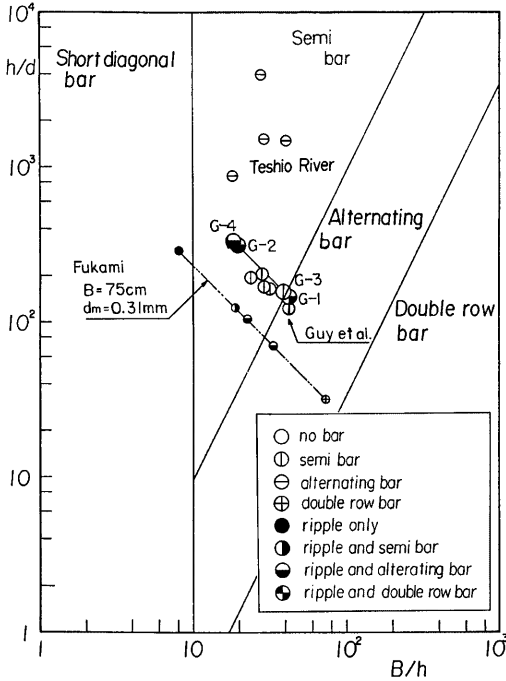


Fig. 8 Formative conditions of the bars formed in the experiments compared with a criterion by the authors'.

れを基準にとることを考える。すなわち、 Δ' の代わりにそれとおそらく比例的な関係にあって、平坦河床の場合 d と等しくなるようなある高さ Δ を想定し、Fig. 9 のように、 d に代えて Δ を用いれば、その $h/\Delta - B/h$ 平面ではいずれの河床状態にあっても Fig. 8 と同じ区分線によって砂州の形成領域が分けられると考える。

3.3 小規模河床形態を考慮した砂州の形成領域区分図

砂州の形成に関して平坦河床のときの粒径に相当する量である Δ を砂漣河床や砂堆河床について適確に評価するには前節で述べた議論を進展させることが必要であるが、ここでは最も単純に砂漣河床および砂堆河床の場合についてそれぞれ (4) 及び (5) 式で Δ を与え、その妥当性を調べる。

$$\Delta = Z_r \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$\Delta = Z_d \quad \dots\dots\dots(5)$$

Fig. 9 には砂漣河床のみ現われた Run G-1, G-2 及び G-4 について Δ として Table 3 の Z_r の実測値を用いて検討した結果を示している。Run G-2 及び G-4 の点は交互砂州の領域に入っていて分類結果と良く一致している。一方、Run G-1 の点も複列砂州の領域に入り観察された形態に近付いており、検討結果はこの領域区分図が本実験の場合かなり妥当であることを示している。また、同図には砂堆河床の一例として、天塩川下流部の検討結果を示している。この場合の Δ は池田・伊勢屋¹³⁾ による実測河床波高 $Z_d = 15 \sim 47$ cm の平均的な値として $\Delta = 30$ cm を与えており、砂州の形態と河道・水理条件は北海道開発局の資料¹⁴⁾ に基づいている。 d を用いた Fig. 8 と比較すると、天塩川の場合も実測による Δ を用いた Fig. 9 の領域区分図の

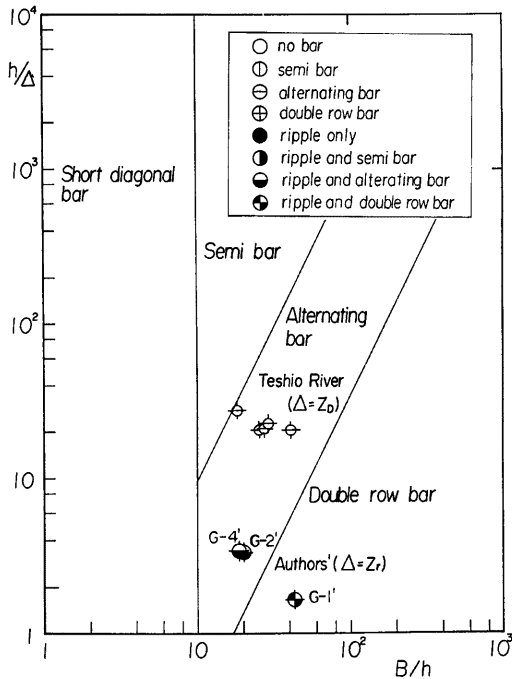


Fig. 9 A modified criterion for the formation of the meso-scale bed configuration.

方が砂州形態と良く合致している。

つぎに、砂漣・砂堆河床における Δ を従来の形状特性に関する研究結果から、砂漣河床では次式で、

$$\Delta = Z_r = 100d \quad \dots\dots\dots(6)$$

一方、砂堆河床では Z_a を Yalin・Korhonen¹⁵⁾ のダイヤグラムを用いて予測し、同様の検討を試みた。この場合も、Run G-1, G-2 及び G-4 では実測の Z_r がほぼ粒径の100倍であったので上述と同じ結果となったが、深見の実験や天塩川の例では Δ が大きくなり、良好な結果が得られなかった。その原因としては、天塩川の場合、Yalin らによる波形勾配の予測値は実測値と大体一致するが、実測波長 6~7m に対し予測値が 40m 以上となり、 Z_a が実測値の数倍の 2m 以上になったことが考えられる。一方、深見の実験では、前述のように砂漣の形成状況に疑問のあった点が不一致の理由の一つと考えられる。しかし、従来の区分図上で、砂漣の形成領域に入っている実験でも下方にプロットされ、単純に(4)式を仮定したことにも不一致の原因がある。事実、Run G-1 の砂州が交互砂州と複列砂州との中間形態であったことに基いて、Run G-1 の実験点が Fig. 9 において両領域の境界線に来るように Δ を修正すれば次式のようになる。

$$\Delta = Z_r / (4 \sim 5) \quad \dots\dots\dots(7)$$

このときも Run G-2, G-4 は交互砂州領域に位置し、深見の実験値も砂漣形成領域に入っているものは各砂州領域に一致する。

さらに、この結果は側岸侵食性流路実験に基いた流路形態の形成領域区分図¹⁶⁾において、 h/d が 10^2 以上であって砂漣河床が形成された後に砂州や蛇行流路が現われたと考えられる Ackers や Ackers・Charlton の実験資料の区分線が、 $h/d < 10^2$ の場合の区分線よりも 17~30倍上方に平行移動していた事実と合致する。

しかし、砂堆河床については砂州と関連付けられた資料が極めて少いので、従来の研究から推定した場合の妥当性については明らかにできない。今後水理条件の明確な実測資料の集積が必要と思われる。

4. 中規模河床形態の形成条件に関する考察

4.1 形成過程に関する考察

平坦河床における従来の研究⁷⁾によれば、通常砂州前縁の形成につながらるとみられる河床上の斜め縞の発生は非常に速く、短時間で明確な前縁が形成され、一般に砂州の発達時間の大半は波高の増加過程で費されている。これに対し、本実験では、Run G-3 を除いて、いずれの場合も砂州が明確な前縁を持つに至るまでに費された時間はその後の波高の発達に要した時間に匹敵しており、際立った特徴となっている。前縁の形成にこのような長時間を必要としたことは、平坦河床の場合から類推して、砂州に関わる河床擾乱の形成速度に強く関係していると考えられる。

砂漣河床の場合、この擾乱が平坦河床の斜め縞と類似した合体によって峯の高まった砂漣の斜め列であるのかの点については実証例がなく、憶測の域を出ないが、擾乱の形成速度が砂漣の発達速度あるいはその合体速度に依存するとみなすことは妥当であり、そのオーダーは波高を流砂量で除した速度に関係すると考えられよう。一方、平坦河床の場合、斜め縞の形成速度は砂粒の移動速度あるいは単位幅当りの流砂量を粒径で除した速度に近いオーダーと思われる。したがって、両河床状態における河床擾乱の形成時間の間には、(6)式によって単純に考えれば、同程度の流砂量について約 2 オーダーの相違が見積られる。

また、本実験のようにほぼ同一形状の砂漣が形成される場合には、明確な砂州の前縁が生じるまでの時間は、単位幅流砂量にほぼ反比例して、Run G-2, G-4, G-1 の順に長くなっていくと予想され、これは実験結果と一致している。

つぎに、一部に平坦河床の現われた Run G-3 ではその上に比較的短時間で前縁が形成され、交互砂州が発達しかかった時点で従来の傾向と一致している。しかし、波高が十分発達しないうちに砂漣に覆われ、砂州は消滅した。この砂漣河床が上述と同程度の長時間継続しておれば、Run G-1 あるいは Run G-2, G-4 と同様の過程を辿り、一方、平坦河床が持続しておれば波高がさらに増加した可能性が考えられる。

4.2 河床安定論との関連について

中規模河床形態の形成条件に関する理論的研究は、近年平面2次元せん断流の基礎式を用いた河床変動の線形安定解析が主流を占めている。その理論は、河床を連続体とみなした基礎式系に流水抵抗や砂粒の運動に関する考察に基づいて不連続体である河床の特性を順次組込んできており、ますます精緻なものとなっている。また、最近の研究では各種の水理パラメータの組合せについて解析結果を形成領域区分図として図示することが可能になっており、たとえば黒木・岸¹⁷⁾の研究では Fig. 8 と同じ $h/d-B/h$ 平面に河床勾配 I をパラメータにした区分図が示されている。しかしながら、安定理論ではその構成上、式系に含まれるこれらのパラメータはいずれも限定された物理的意味を付与されており、上の例では流路幅水深比 B/h は河床形態の横断方向のモードを、 h/d は河床せん断力と流水抵抗を、及び I は河床せん断力と流れの状態を決定するパラメータであって、理論上 h/d について流れに及ぼす河床擾乱の規模の尺度といった解釈の入る余地は無い。実際、河床の初期擾乱の幾何形状、すなわち波長、幅（モード）、及び高さ（大きさ）は安定理論の基礎式中に別の形で明確に含まれており、波長（流下方向の波数）とモード（横断方向の波数）は擾乱の増幅率の主要な支配パラメータとなっている。しかし、擾乱の高さは線形安定論の特性上増幅率に全く反映されない結果になっていて、理論では擾乱が如何に小さくともその発達・減衰は、波長とモードに水理条件を表す2つのパラメータを加えた4つのパラメータの組合せによって決定され、得られた領域区分図からは準砂州のような中間形態の形成領域は排除される。

したがって、線形安定理論では砂州の形成につながるような河床の擾乱の高さに関する考察は不可能であって、平坦河床と砂澁河床とについて得られた領域区分図間の相違はおそらく Fredsøe¹⁸⁾ が平坦、砂堆河床について示したと同様に抵抗則と有効掃流力の評価の差異を示すだけのものとなる。このように、河床安定論に3で述べた観点を反映させていくには、少くとも増幅率に擾乱の高さの効果を導入していく必要がある。

4.3 形成条件と掃流力

水理条件の明確な中規模河床形態の実測資料に基づいて、砂州は掃流力が大きくなると波高が急激に減少して形成されなくなると判断されており、その上限は大体次式で表わされている¹⁹⁾。

$$\tau_* \geq 0.6 \quad \text{or} \quad \tau/\tau_c = 12 \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 τ_* は無次元掃流力であって $\tau_* = u_*^2/(\sigma/\rho - 1)gd$ 、 τ 及び τ_c はそれぞれ掃流力と限界掃流力、また、 σ は砂の密度、 ρ は水の密度、 g は重力の加速度である。(8) 式の形成上限値は平坦河床の実験資料から見出されたものであって、本実験のような lower regime の場合への適用性は明らかでない。

これまでの考察では(8)式の上限値は掃流砂形態の変化に対応しているものと想定されているが、一般に lower regime の河床波が存在する場合掃流砂は有効掃流力に支配され、有効掃流力は河床波の形状、主に波形勾配を介して全掃流力と関係する。すなわち、全掃流力の増加とともに有効掃流力は徐々に増加して、ある段階で河床波が減衰始めると急激に全掃流力に対する割合を増し、平坦河床になった時点で全掃流力に一致すると考えられている。砂州の存在しうる上限値もこの有効掃流力の変化に対応しているとみられるが、砂澁や砂堆の崩壊開始時の無次元有効掃流力 τ_{*c} は不明であって、それと砂州形成の上限値との関係も推定できない。したがって、いま lower regime の河床波の存在する限り交互砂州は形成されると仮定すると、砂澁の場合 $\tau/\tau_c \approx 14^{20)}$ がほぼその存在の上限であるので、水理条件は砂澁の崩壊とともに h/d が急増して形成領域外に出るか、あるいは $\tau_* = \tau_{*c} \geq 0.6$ となって上限値を越え、結局その上限値は平坦河床の場合とほぼ一致すると思われる。一方、砂堆の場合上限値は $\tau/\tau_c \approx 65^{20)}$ であるので、それに応じて lower regime の河川では砂州は $\tau_* \approx 3$ 前後の条件まで形成されている可能性が考えられる。この場合に $\tau_{*c} \approx 0.6$ となっているのかという点については今後実測資料も混えた詳細な検討が望まれる。

5. 結 論

中規模河床形態の形成条件に関して、従来水理条件の明確な実測資料の乏しかった水深・粒径比の大きい場合の実験の重要性を指摘するとともに、大型水路で行った実験の概要を示しそれらの結果を詳細に述べて、砂州と河床形態の特徴と水理条件を明らかにした。ついで、形状特性と形成過程に基いて形成された砂州を分類し、従来の領域区分図によってそれらの形成条件に関する検討を行った。そこで見出された適用限界について河床擾乱の規模に基いた考察を加え、小規模河床形態を考慮した砂州の形成領域区分図を提案し、その適用性を一、二の例について明らかにした。さらに、パラメータ『 Δ 』に関して、その妥当性を砂州の形成過程の相連に基いて論証した。また、河床安定論とここで示した概念との相違点を明らかにするとともに、小規模河床形態と共存する場合の砂州形成の上限を与える掃流力にも言及した。本研究で得られた主な結果はつぎのとおりである。

(1) 水深・粒径比を 10^2 以上にした 4 つの実験では、それぞれ特徴的な挙動を示す河床形態が現われた。すなわち、砂漣の発達に 100 時間を要し、その後 180 時間程度から単列状と複列状の砂州が同時に発達していった Run G-1、砂漣の発達が早く、砂州の出現も比較的速かで発達の著しかった Run G-2、河床の約半分に平坦床が現われ、その部分に急激に砂州は形成されていたが、河床の regime の変化の影響を受けて砂州の発達しなかった Run G-3、及び砂漣の発達は比較的速かで 10 時間程度で平衡状態に達したが砂州の発生には 45 時間も要した Run G-4 である。

(2) 水理条件は Run G-1、G-2 及び G-4 は lower regime に入り、Run G-3 は transition であったが、lower regime の場合は砂漣の発達に伴って通水初期ほど水深と流水抵抗が著しく増加し、一方、transition の場合は flow regime の変化による水深変化が現われた。また、水深が大きく、河床勾配の小さい場合には下流区間の低下背水の影響が無視しえなくなることも指摘された。

(3) 平均河床横断形状の検討では、lower regime にあって河床が砂漣で覆われていても、また transition の場合でも砂州の発達時には蒲鉾型横断形状の現われることが見出されたが、この形状は lower regime ではいずれの場合も、形成開始までの時間がそれから発達終了までの時間よりも長かった。

(4) 形状特性の検討によれば、lower regime の河床形態は発達した砂州の上下を問わず同一の形状であって粒径の約 1000 倍の波長を有し、明らかに砂漣の特性を示す。一方、形成された砂州は、形状特性と形成過程に基いて、Run G-2 と G-4 は交互砂州に、Run G-1、G-3 はそれぞれ交互砂州と複列砂州の、準砂州と交互砂州の中間形態に分類された。

(5) 本実験の砂州の形成条件は Run G-3 を除いて従来の形成領域区分図とは一致しなかったが、著者らの区分図は水深・粒径比の大きい場合でも平坦河床の実験値には適合することが示された。この適用限界から、砂州の形成条件に対する砂漣の存在の重要性が認識され、さらに、Run G-3 の砂州も砂漣の形成によって不明確になることと合わせて、lower regime の河床波の方がむしろ中規模河床形態を支配している可能性のあることを指摘した。

(6) 初期擾乱の規模と水深や水路幅との関係を考察し、河床の凹凸の構成要素に応じて、著者らの区分図のパラメータ h/d の d を変化させれば、平坦河床の場合と同一の区分線によって形成領域が表されたと考え、その検討を行って良好な結果を得た。すなわち、

(7) 粒径の代わりに河床擾乱の代表高『 Δ 』を用いた領域区分図において、 Δ を砂漣や砂堆の実測波高にとって本実験の結果や天塩川の例を検討した結果、領域区分図に適用性のあること、及び砂漣河床の場合では、 Δ を砂漣の波高の $1/5 \sim 1/4$ にとると実験値との適合がさらに良くなることを見出した。

(8) 砂漣のように河床擾乱の代表高が大きい場合には砂州の形成開始に長時間を要することが指摘され、実験の結果とも一致した。

以上、本研究によって多くの知見が得られたが、それらを確かめていくために、今後実測結果をさらに累積していくとともに、砂漣河床で砂州の形成されていく機構を解明してゆきたいと考えている。

最後に、実験の遂行や資料の整理の惜しみない協力を頂いた小池剛君（北海道開発局）、北田勝治君（KK 鴻池組）、宮坂裕文君（南海電鉄 KK）に感謝します。なお実験資料の整理には防災研究所防災科学資料センターの FACOM-M140 及び化学研究所中央計算機室の FACOM-M160 を用いたこと、並びに研究の一部は文部省科学研究費補助金奨励研究（A）（代表者 藤田裕一郎）の補助を受けたことを付記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 土木学会水理委員会：中規模河床形態，「洪水流の三次元的流況と流路形態に関する研究」土木学会水理委員会，研究小委員会報告書（代表者 芦田和男），第3章，1982，pp. 58-86.
- 2) 深見親雄：中規模河床波を含めた河床形態領域区分，河川における土砂の移動機構に関する研究ノート，Ⅱ編，土研資料集第1416号，1978，pp. 117-155.
- 3) Guy, H. P., D. B. Simons and E. V. Richardson: Summary of alluvial channel data from flume experiments, 1956-61, U. S. Geol. Survey Prof. Paper, 462-I, 1966.
- 4) 村本嘉雄・藤田裕一郎：中規模河床形態に関する研究，京都大学防災研究所年報，第20号B-2，1977，pp. 243-258.
- 5) 池田宏：大型水路による細礫の流送実験(1)——掃流砂量に及ぼす限界ストリーム・パワーの影響——，筑波大学水理実験センター報告，No. 5，1981，pp. 35-48.
- 6) 小川良市・深見親雄：単列砂礫堆と二列砂礫堆の中間的形態について，土木学会第34回年次学術講演会講演概要集，Ⅱ-95，1979，pp. 189-190.
- 7) 藤田裕一郎・村本嘉雄・堀田周二：交互砂州の発達過程に関する研究，京都大学防災研究所年報，第24号B-2，1981，pp. 411-431.
- 8) 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.
- 9) 芦田和男・道上正規：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，第206号，1972，pp. 56-69.
- 10) 鮎川登：実験水路における交互砂州（砂れき堆）の形成条件，土木学会論文報告集，第207号，1972，pp. 47-50.
- 11) 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.
- 12) 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），沖積河川における河床形態と流体抵抗の研究（研究代表者岸力），最終報告書，1975，pp. 80-88.
- 13) 池田宏・伊勢屋ふじこ：天塩川下流部における河床形と流砂の観測，北方科学調査報告1，筑波大学，1980，pp. 27-44.
- 14) 北海道開発局土木試験所：蛇行特性調査資料集，1979，pp. 643-699.
- 15) Yalin, M. S. and E. Karahan: Steepness of sedimentary dunes, Proc., ASCE, Jour., Hy. div., Vol. 105, No. HY 4, 1979, pp. 381-392.
- 16) 藤田裕一郎・村本嘉雄：流路形態の形成過程に関する研究，京都大学防災研究所年報，第23号B-2，1980，pp. 475-492.
- 17) 黒木幹男・岸力：沖積河道の流路形態の領域区分に関する研究，第26回水理講演会論文集，土木学会水理委員会，1982，pp. 51-56.
- 18) Fredsøe, J.: Meandering and braiding of rivers, Jour. Fluid Mechanics, Vol. 84, Part 4, 1978, pp. 609-624.
- 19) 村本嘉雄・藤田裕一郎：中規模河床形態の分類と形成条件，第22回水理講演会論文集，土木学会水理委員会，1978，pp. 275-282.
- 20) Yalin, M. S.: Mechanics of Sediment Transport, Pergamon Press, 1972, pp. 248-249.