

# 斜め段落ち流れに関する実験的研究

村 本 嘉 雄・藤 田 裕 一 郎

## EXPERIMENTAL STUDY ON THE FLOW OVER ABRUPT DROPS WITH OBLIQUE EDGE

By *Yoshio MURAMOTO and Yuichiro FUJITA*

### Synopsis

In order to elucidate the physical significance of the criterion of alternating bar formation in previous paper<sup>1)</sup>, experimental work has been carried out on the hydraulic characteristics of the flow over abrupt drops with oblique edge to mean flow direction, which are adopted as simplified models of alternating bars at early stage of their developing process.

In this paper, experimental results of the distribution of flow velocity and direction and the brief examination in the shift of main flow part, the characteristic of separation zone under oblique edge and the vorticity variation of average flow are described. Finally, the correspondence of the flow over these abrupt drops to that over alternating bars is discussed and the following results are concluded: The macroscopic view of the former flow is resemble to the latter under the condition of rather long edge and small depth, and it has large possibility that bars with twice to four times length of channel width are predominant at early stage of their growing process.

### 1. は し が き

本研究は、前報<sup>1)</sup>において明らかにした交互砂州の形成条件の物理的意義を解明するために、形成初期の砂州形状を平均流に斜交する前縁を持つ段落ちによって単純化し、種々の水理条件に応じて変化する斜め段落ち周辺の流況特性を実験的に把握して、砂州の形成条件の支配パラメータの流況に及ぼす影響について検討しようとするものである。さらに、著者ら<sup>2)</sup>は、砂州の発達過程に関して、側岸付近の土砂が流路中央部に移動することによって砂州高が増大することを見出しているが、このような土砂移動をもたらす流況と支配パラメータとの関係について考察を加えようとするものである。また、同時に、種々の流量条件下において生じる流心位置の変化特性から、洪水時の流況あるいは側岸侵食性流路の蛇行幅と交互砂州の関係などに関する知見を得ることもあわせて目的としている。

斜め段落ち上の流れに関しては、Allen<sup>3)</sup>による定性的な実験および考察が知られているが、対象が小規模河床形態であるため、流路幅・水深比および斜め段落ち長・流路幅比は比較的小さい範囲にとどまっている。本研究ではこれらの比の広い範囲の実験が行われ、また流速・流向の量的把握ははかられている。

本文では、流速・流向分布特性を述べ、流心の変位、前縁下部の剥離渦の特性および渦度の変化について検討を加え、最後に砂州上の流れとの対応について言及している。

### 2. 実 験 の 概 要

#### 2.1 実験装置と実験方法

実験に用いた水路は宇治川水理実験所内の幅 50.2cm、深さ 55cm、長さ 20.5m の鋼製循環式水路であって、中央 15m 区間が両面ガラス張りとなっており、ジャッキによって 0~1/20 のこう配に設定できる。また、

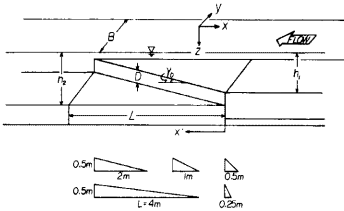


Fig. 1. Schematic Sketch and Notation.

水路側壁にはレールが設置されており、上流端の無段変速モータによって牽引される写真撮影台車が上載されている。

斜め段落ちは、20mm×20mmのL型鋼でFig. 1に示すような5種類の三角形の枠を作り、その上面にトタン板をハンダ付けしたものを一対ずつ作成し、いずれかの一対を水路に向い合せに敷いて、上流側に適当な台を入れて所定の段落ち高さに設定した。この段落ちの上下流部には長さ5.5mの長方形の台を接続し、下流端を適宜堰上げて等流状態に近づくようにしている。

測定は、水位、路床高、流速および流向について行い、水位と路床高はポイントゲージに取り付けられた流速計の先端で測定し、流向はその先端に結び付けた糸の先端がプロペラ軸の延長方向に取り付けた鉄線と一致するようにポイントゲージを回転させて測定した。使用した流速計は計測技研KK製のVA403型超小型流速計であってプロペラの直径は5mmで水路床上3.5mmまでの測定が可能である。

各々の実験条件に対し、流速・流向の測定は、段落ちをはさむ7～9断面において、横断方向に5cm間隔で10測線を取り、鉛直方向6～11点について行っている。

また、底面流向の平面分布が段落ち上に5cm×5cm間隔で貼付した糸の写真撮影から求められている。

## 2.2 実験条件

実験条件はTableに示すとおりであって、段落ち長 $L=4m, 2m$ および $1m$ に対して段落ち高さ $D=2.2cm$ および $1.0cm$ の2種類、 $L=0.5$ および $0.25m$ に対して $D=2.2cm$ の1種類である。それらの組合せに対して上流一様区間の水深 $h_1$ を約 $2cm$ および $7cm$ に設定して実験を行った。実験流量は測定した流速の断面積分によって求めたが、各断面によって差があるためその平均値とした。流量の大きい場合この差はほ

Table Experimental Condition.

Run No.	Length of abrupt drop $L$ (m)	Deviation angle of edge $\gamma_D$ (°)	Height of abrupt drop $D$ (cm)	Depth of up-stream reach $h_1$ (cm)	Depth of down-stream reach $h_2$ (cm)	Dis-charge $Q$ (l/s)	Average water temperature $T$ (°C)	$D/h_1$	Channel bed slope $i_0$
4027	4.0	7.1	2.2	6.82	9.45	16.5	12	0.32	$5.7 \times 10^{-4}$
4022	"	"	"	2.38	4.48	2.93	13	0.92	"
4017	"	"	1.0	7.22	9.50	20.8	14.5	0.14	"
4012	"	"	"	2.25	2.87	2.82	18	0.44	"
2027	2.0	14.0	2.2	7.22	9.50	16.7	10	0.30	"
2022	"	"	"	2.38	4.60	2.71	13	0.92	"
2017	"	"	1.0	7.25	8.58	21.7	17	0.14	"
2012	"	"	"	2.33	3.13	2.85	20	0.42	"
1027	1.0	26.6	2.2	7.23	9.50	16.4	9	0.30	"
1022	"	"	"	2.38	4.58	2.79	15	0.92	"
1017	"	"	1.0	7.61	8.85	21.7	17	0.13	"
1012	"	"	"	2.32	3.18	2.71	16	0.43	"
527	0.5	45.0	2.2	7.48	9.54	17.0	13.5	0.29	"
522	"	"	"	2.38	4.36	2.57	14	0.92	"
227	0.25	63.4	2.2	7.48	9.52	17.0	13	0.29	"
222	"	"	"	2.38	4.45	2.90	15.5	0.92	"

とんど $\pm 2\%$ 以内であったが、小流量では $\pm 10\%$ になる場合もみられた。このため、すべての実験について各断面の流量が等しくなるように流速の補正を行っている。

計測のための座標系は Fig. 1 に示すように、水路下流端を 0m として上流方向に  $x$  軸、左岸から右岸に向けて  $y$  軸（水路中心線： $y=47.5\text{cm}$ ）、および鉛直下方に  $z$  軸をとっている。斜め段落ちの開始点は Run 4027 のみ  $x=11.08\text{m}$  その他はすべて  $x=11\text{m}$  であって、開始点から下流に向けて  $x'$  軸をとっている。

### 3. 実験結果の検討

#### 3.1 斜め段落ち流れの流速・流向分布

##### (1) 流速分布特性

斜め段落ち流れの概況を把握するために、実験のすべての断面について等流速線図を作成してその特徴を検討した。 $L=2\text{m}$  の場合の流速分布を示せば Fig. 2 のようである。Run2027 および Run2017 のように  $h_1=7\text{cm}$  の実験ではいずれも最大流速点は水面下に存在する。この場合の最大流速点は斜め段落ち部の通過に伴って、左岸側に偏位するか、通過後はすみやかに中央部に戻るようである。このような流心の変化に対応して、たとえば Run2027 の  $y=70\text{cm}$  付近の流速は  $x=10.5\text{m}, 9\text{m}$  および  $7\text{m}$  と下流するにつれて、約  $35\text{cm/sec}$ ,  $15\text{cm/sec}$  および  $25\text{cm/sec}$  のように変化している。

斜め段落ち上を横切る等流速線は前縁の付近で上に凸となり、この部分に剝離渦による上昇流が存在しているようで、歪まれた等流速線は Run2017 の  $x=9\text{m}$  の断面下部にみられるように下流に維持されていく場合がある。しかし、このような歪は  $h_1=7\text{cm}$  の場合には流水断面の下部に限られるようであって、流心付近の等流速線の形状はほとんど乱れていない。

一方、 $h_1=2\text{cm}$  の Run2022 および Run2012 では前縁部の上昇流は、低流速部を押し上げ、流速ピークが 2カ所に現われるなど全水深にわたって影響し、流速分布形状は段落ちの通過に伴って複雑に変化する。このため最大流速点の偏位は  $h_1=7\text{cm}$  の場合のように単純ではないが、 $y=70\text{cm}$  の流速は Run2022 の場合  $x=9.5\text{m}$  および  $9\text{m}$  では 0 となるようで、左岸方向に移動する流量の割合が大きいの。また、このような場所の等流速線はほぼ鉛直になっており、鉛直方向の混合も大きいことがわかる。

以上の傾向は  $L=4\text{m}$  および  $1\text{m}$  の場合にも観察されるが、 $L=2\text{m}$  の場合と比較してそれぞれの特徴を要約するところのようである。

Run4022 および Run4012 の流速分布形は、それぞれ Run2022 および Run2012 のものと大差はみられないが、より単純な形状であって前縁の剝離渦の効果は強くなく、また死水域もみられない。しかし、流心は段落ち通過後も  $y=35\sim 40\text{cm}$  の間にあり、左右岸の速度差は  $L=2\text{m}$  の場合よりも大きい。

$L=1\text{m}$  の場合はいずれの測定結果もこの剝離渦による上昇流の影響の強いことを示している。すなわち、Run1027 では  $h_1=7.23\text{cm}$  であるが Fig. 3 に示されているように流速分布形には強い歪が残り、流心も左岸側に偏位している。一方、Run1022 では Fig. 3 にみられるように Run2022 よりも非常に複雑な流速分布形となり、かつ死水域が全断面積の 10 数%にも達して、斜め段落ちの効果は顕著に現われている。

$L=0.25\text{m}$  (Run227 および Run222) の場合では段落ち上面付近に等流速線が水平に密に走り、Run222 では逆流域も存在して通常の段落ち流れに近い特性を示すようである。一方、Run522 では流心の偏りと死水域が認められるが段上付近に密な等流速線も見られて、 $L=1\text{m}$  の場合と  $L=0.25$  の場合の中間的な特性を示している。

##### (2) 底面近傍の流速分布特性

斜め段落ち流れの平面的な特徴を底面近傍流速の分布図によって、 $L=4\text{m}, 1\text{m}$  および  $0.25\text{m}$  の場合について示すとそれぞれ Fig. 4, Fig. 5 および Fig. 6 のようである。いずれの場合も段落ちの開始する  $x=11\text{m}$  で縮流効果がみられるために流速のピーク値が現れている。また、Run227 および Run222 はともに段落ちの下流方向に長い区間にわたって流速が増大し、reattachment point から流速分布が回復していく通常の段落ち流れに近い特性を示している。一方、 $L=4\text{m}$  および  $1\text{m}$  の場合では流速の増大する区間は短く、

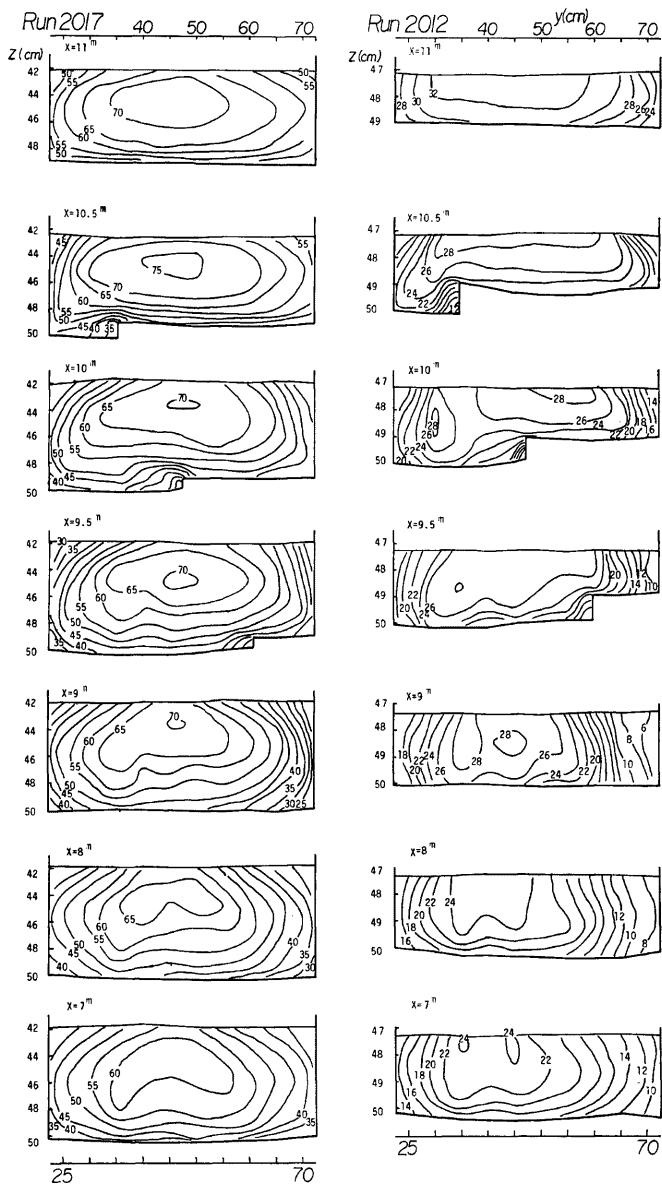


Fig. 2.(1). Cross-sectional velocity distribution ( $L=2$  m).

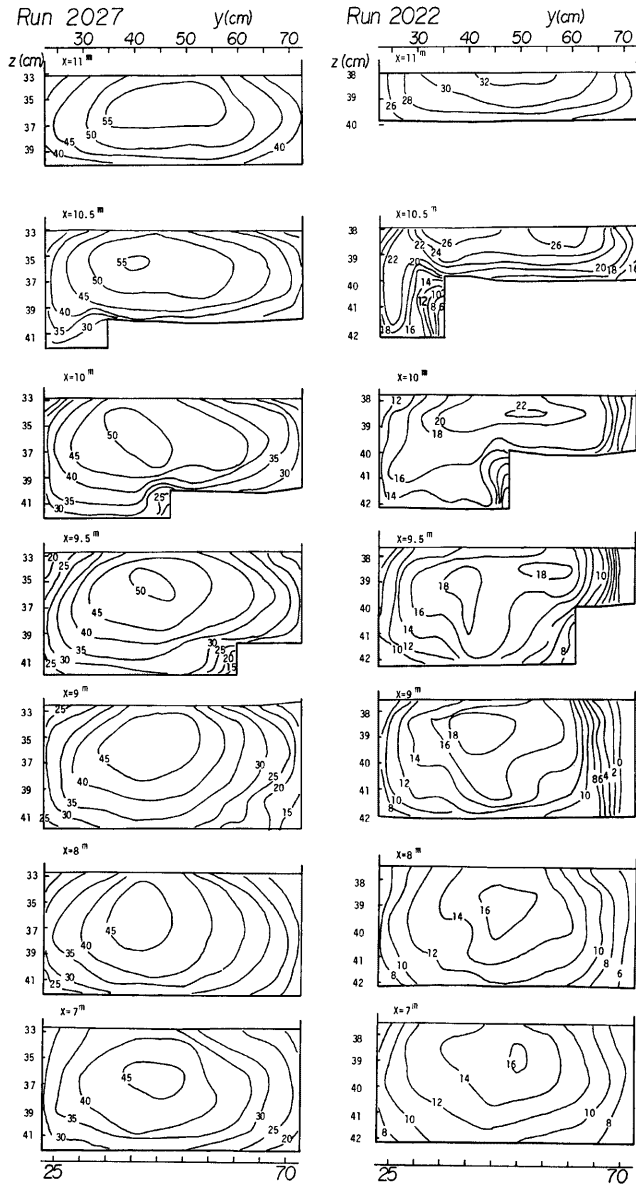


Fig. 2.(2). Cross-sectional velocity distribution ( $L=2$  m).

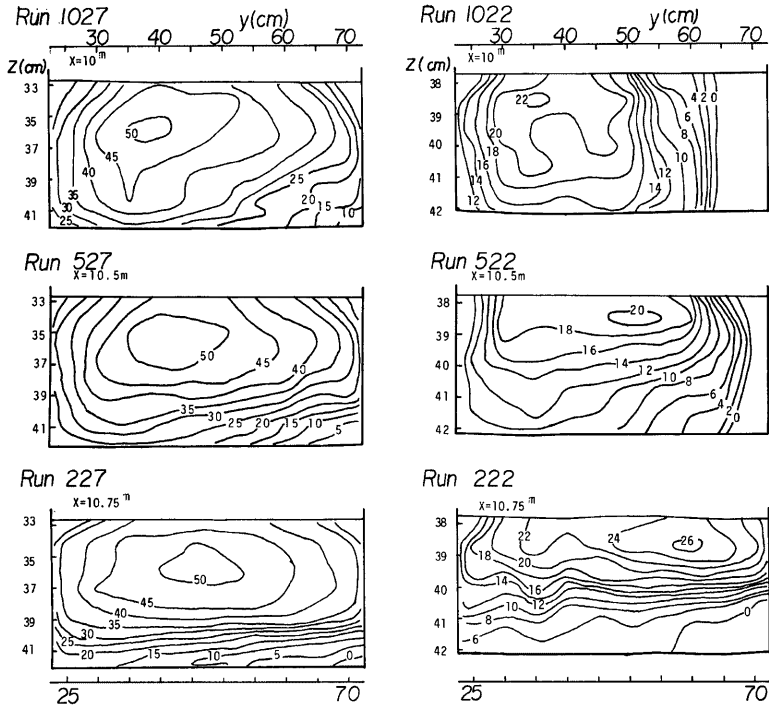


Fig. 3. Cross-sectional velocity distribution at the ends of the abrupt drops with oblique edge.

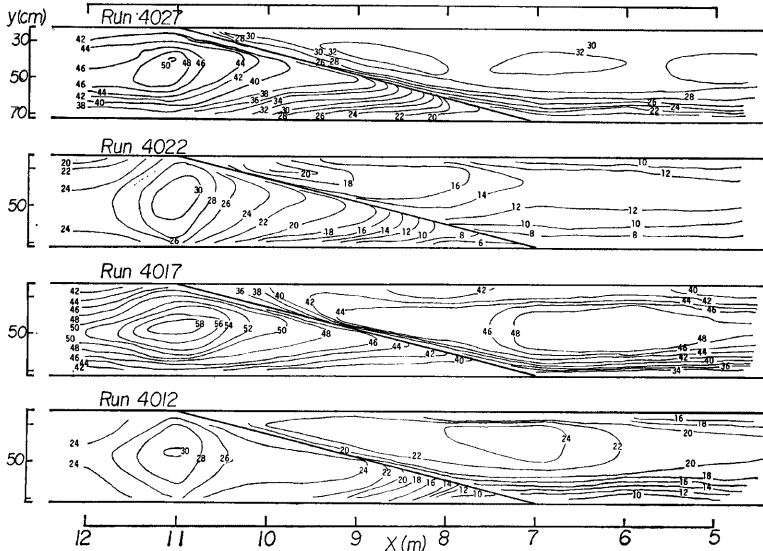


Fig. 4. Plane distribution of velocity near the channel bed ( $L=4$  m).

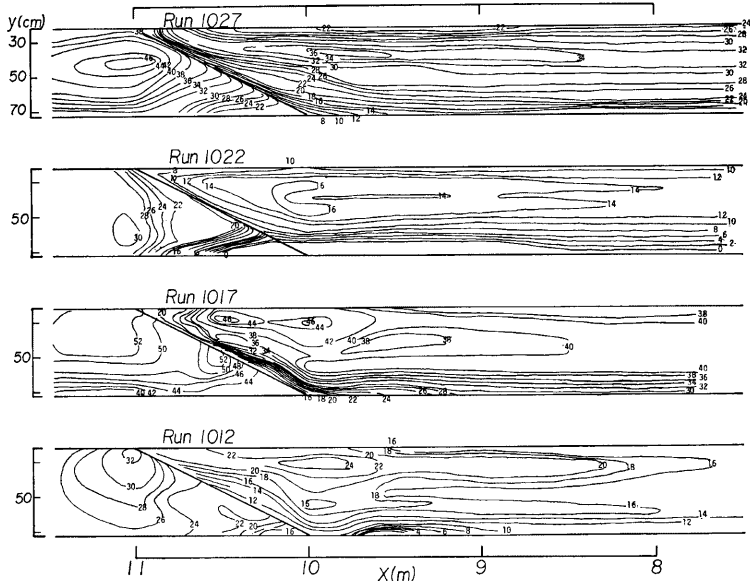


Fig. 5. Plane distribution of velocity near the channel bed ( $L=1$  m).

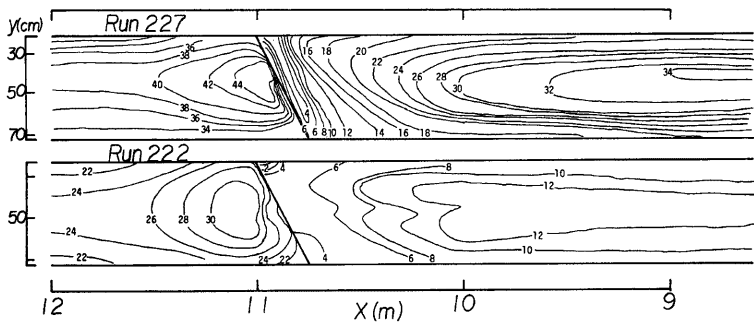


Fig. 6. Plane distribution of velocity near the channel bed ( $L=0.25$  m).

前縁から 20~30cm に限られている。 $L=4m$  の場合には全体に  $L=1m$  の場合に比して単純な分布形状を示している。さらに  $D/h_1$  が小さいほど等流速線がすみやかに  $x$  軸に平行になっていく傾向が認められる。 $L=1m$  の場合、Run222 にみられる広い死水域が特徴的であり、全体に複雑な形状を示すのは前述の横断方向の流量移動の割合が大きいことおよび上昇流の影響が強いことによると考えられる。また、この上昇流は、 $L=4m$  および  $1m$  の場合、前縁の段上側で流速がやや低下する傾向に関与していると推定される。

### (3) 流向特性

流速計に結びつけた糸によって測定した流向角から横断方向の流速成分を求めた例を Run1072 および

Run1022 について図示すると Fig. 7 のようである。ただし、y 軸の 5cm 長の矢印が流速 10cm/sec を表す。段上で左岸に向う流れ、段下では右岸に向う流れが生じている。段上の左岸に向う流れは流速分布の流下方向変化から推定される流れと一致する。また、段下の右岸に向う流れは水深に無関係に存在するようである。

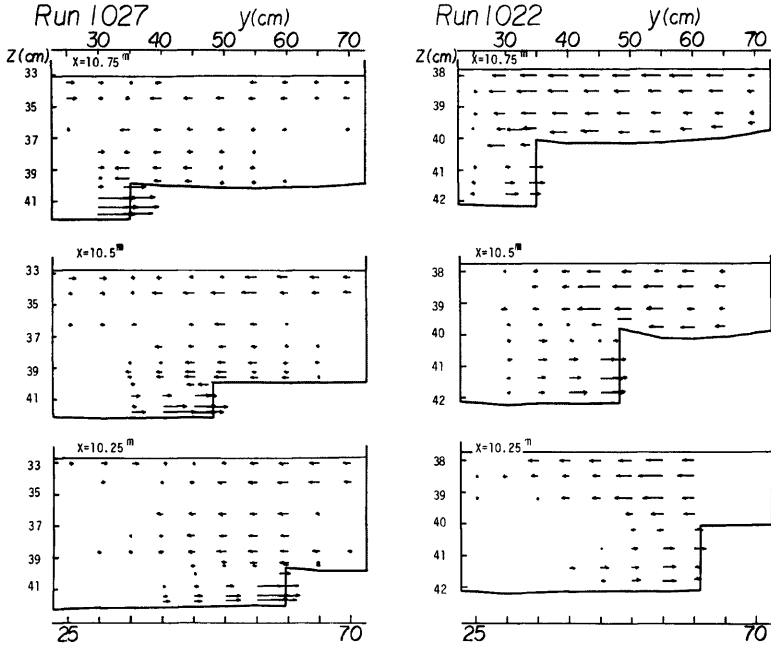


Fig. 7. Cross-sectional distribution of transverse velocity component.

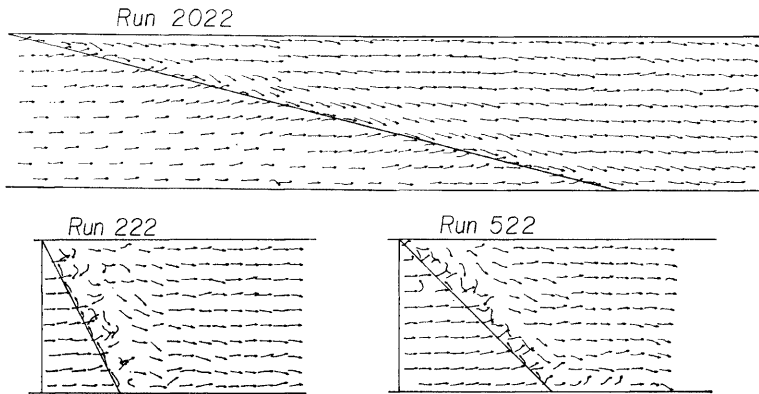


Fig. 8. Flow direction on the channel bed.



つぎに底面に貼り付けた糸の写真撮影によって得られた底面流向図を Run2022, Run522 および Run222 について示すと Fig. 8 のようである。Run2022 の場合、段上では前縁に近づくにつれて明瞭な左岸寄りの流向を示し、段下では前縁に沿って幅約 12cm の剝離渦による前縁にほぼ平行な流れが形成されている。L=4m, 2m および 1m ではすべての実験において同様の流向がみられる。一方、Run522 および Run222 ではともに段下で乱れた流向を示すが、前縁直下で L=1m~4m の場合とは逆方向の明らかな戻り流れを生じることが特徴的である。このような流向は Run227 でも存在し、L=0.25m の場合には安定しているが、Run527 では観察されず、L=0.5m の場合には水理条件に左右されるようである。この L=0.5m は Allen<sup>9)</sup> が剝離渦を“Open”と“Close”に分類した限界角度 45°に対応している。

つぎに、これらの実験結果に基づいて斜め段落ち流れの特性に関して二、三の検討を行う。

### 3.2 斜め段落ち流れの特性

#### (1) 流心の偏位

単位幅流量  $q$  の流下方向変化を  $L=4m$  の場合について示すと Fig. 9 のようである。 $q$  は前縁の通過時に急激に増大し、段下部の単位幅流量は  $q_{25}$  (添字 25 は  $y=25cm$  の測線を示す) を除いて、その後の減少はわずかであるために、段落ちの通過時の増加流量はほとんど段上から供給される。このため、段上の単位幅流量は減少を続け、とくに  $q_{70}$  や  $q_{85}$  の減少量は著しい。このような単位幅流量の変化傾向はいずれの実験条件においても現れている。しかし、単位幅流量の最大値  $q_M$  の現れる位置  $y_M$  には実験条件による差異が認められ、この点について以下で検討する。

ほぼ同一の  $D/h_1$  毎に、 $y_M$  の流下方向変化を検討すると Fig. 10 のようであり、また、 $x'/L=1$  の断面における  $y_M$  と  $L$  との対応を示すと Fig. 11 のようである。Fig. 10 では  $D/h_1=0.92$  の場合やや不明確であるが、 $D/h_1$  が減少するにつれて  $y_M$  は水路中心線に近づく傾向がみられる。一方、Fig. 11 では、いずれの  $D/h_1$  に対しても  $L=1m$  の場合の流心位置は水路中心線から最も遠ざかることがわかる。

つぎに、 $q_M/\bar{q}$  および  $q_{70}/\bar{q}$  ( $\bar{q}$ : 平均の単位幅流量) の流下方向変化を Fig. 10 と同様  $D/h_1$  で 4 つに分けて検討すると Fig. 12 のようである。いずれの実験結果でも  $x=11m$  では  $q_M/\bar{q} < 1.1$  また  $q_{70}/\bar{q} > 0.8$  であって、流下方向に前者は一度増加後減少、後者は減少後増加するが、後者の最大減少量は前者の最大増加量よりも大きい。また、 $D/h_1$  が小さい場合  $q_M/\bar{q}$ ,  $q_{70}/\bar{q}$  とともに流下方向の変化幅および  $L$  による差異が小さい。この点に関して、それぞれの  $L$  について  $D/h_1$  と  $q_M/\bar{q}$  の最大値  $MAX(q_M/\bar{q})$ ,  $q_{70}/\bar{q}$  の最小値  $MIN(q_{70}/\bar{q})$  および  $(q_M - q_{70})/\bar{q}$  の最大値  $MAX\{(q_M - q_{70})/\bar{q}\}$  との関係を図示すると Fig. 13 のようである。いずれの  $L$  についても  $D/h_1$  が増加すれば  $MAX(q_M/\bar{q})$  および  $MAX\{(q_M - q_{70})/\bar{q}\}$  は増大し、一方  $MIN(q_{70}/\bar{q})$  は減少する。しかし、 $MAX\{(q_M - q_{70})/\bar{q}\}$  の図に顕著に認められるように  $L=4m$  および  $2m$  では、 $h_1=2cm$  の実験値 ( $D/h_1=0.43$  および  $D/h_1=0.92$ ) と  $h_1=7cm$  の実験値 ( $D/h_1=0.13$  および  $D/h_1=0.29$ ) とでは  $D/h_1$  の増加に伴うそれぞれの  $MAX\{(q_M - q_{70})/\bar{q}\}$  の増加傾向には  $D/h_1=0.29\sim 0.43$  にかけて飛躍があり、 $h_1$  あるいは流路幅・水深比  $B/h_1$  などの影響が考えられる。また、それぞれの  $h_1$  における  $MAX\{(q_M - q_{70})/\bar{q}\}$  の増加率は  $h_1=2cm$  および  $h_1=7cm$  とともに  $L=4m, 2m, 1m$  の順に大きくなっていて、 $L$  の

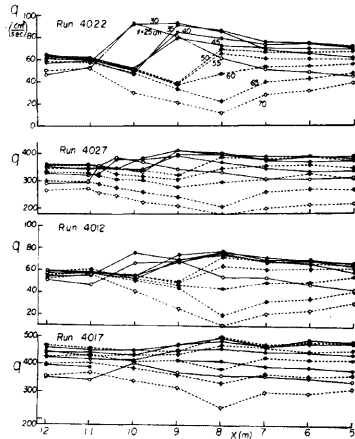


Fig. 9. Longitudinal variation of discharge per unit width.

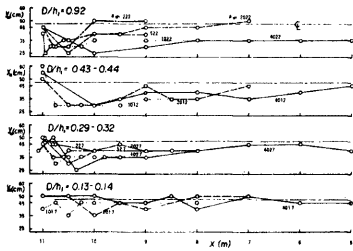


Fig. 10. Longitudinal variation of the position of maximum discharge.

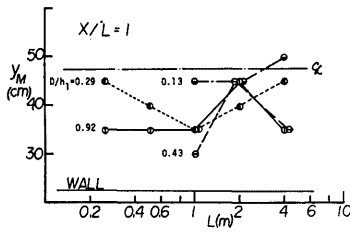


Fig. 11. The position of maximum discharge at the ends of abrupt drops.

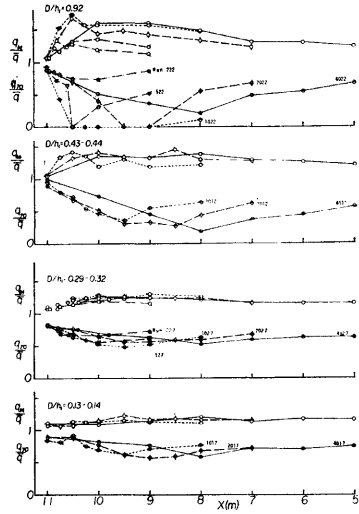


Fig. 12. Longitudinal variation of  $q_M/\bar{q}$  and  $q_{T0}/\bar{q}$ .

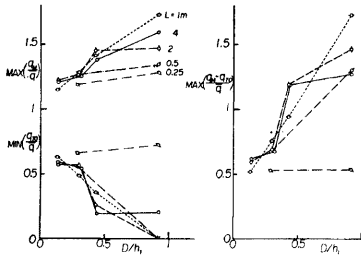


Fig. 13. Relation between  $D/h_1$  and  $MAX\left(\frac{q_M}{\bar{q}}\right)$ ,  $MIN\left(\frac{q_{T0}}{\bar{q}}\right)$  and  $MAX\left(\frac{q_M - q_{T0}}{\bar{q}}\right)$ .

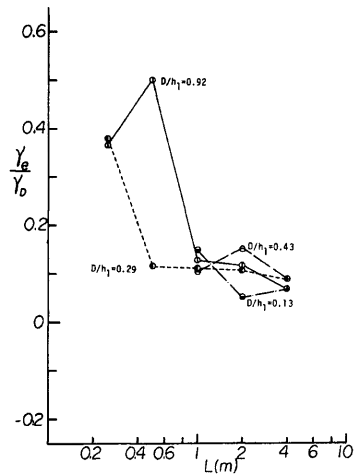


Fig. 14. Relation between  $\gamma_e/\gamma_p$  and  $L$ .

影響がみとめられるようであるが、このような現象の原因については今後の検討が必要である。

(2) 段落ち前縁に沿う流れ

Fig. 8 に示されたように、前縁では剥離渦によって前縁に沿う流れが形成されている。この流れに関して、前縁から 1cm 離れた点の底面近傍の流向および流速との関係について検討すれば、それぞれ Fig. 14 および Fig. 15 である。

Fig. 14 は、底面流向と  $x'$  軸とのなす角  $\gamma_e$  および前縁と  $x'$  軸とのなす角  $\gamma_D$  を考え、両者の比  $\gamma_e/\gamma_D$  と  $L$  との関係をも  $D/h_1$  をパラメータにして図示したものであって、 $\gamma_e/\gamma_D > 90^\circ/\gamma_D$  の場合、流向は流下方向に対して逆流成分を持つことを表す。 $L=0.5\text{m}$  の実験値は  $D/h_1=0.92$  に対して  $\gamma_e/\gamma_D \approx 5$  であって逆流しており、一方、 $D/h_1=0.29$  では  $\gamma_e/\gamma_D=1.3$  であって前縁に平行な流れとなっていて、3.1 (3) で述べたように実験条件の相違によって流向が変化することがわかる。また、 $L=0.25\text{m}$  の場合では  $D/h_1=0.92$  および  $D/h_1=0.29$  の実験値はともに  $\gamma_e/\gamma_D \approx 3.5$  であって、安定した逆流の存在することが示されている。一方、 $L=1\text{m}, 2\text{m}$  および  $4\text{m}$  ではすべての実験値は  $\gamma_e/\gamma_D=0.5\sim 1.5$  の範囲にあって、前縁にほぼ平行して流れている。このように、 $D/h_1$  による差は明確でないが、 $D=1\text{cm}$  の場合の実験値は  $D=2.2\text{cm}$  の場合に比してややバラつくようである、段落ち高さが低い場合には剥離渦は乱されやすいようである。

Fig. 15 は、この流速の絶対値  $U_e$  を上流一様区間の断面平均流速  $U_1$  で無次元化して Fig. 14 と同様の検討を行ったものである。 $L$  の増加とともに、 $U_e/U_1$  は逆流流速から順流流速へと一様に増加している。 $U_e/U_1$  と  $D/h_1$  との関係も明確でないが、同じ  $h_1$  で比較すると、 $D=1\text{cm}$  の実験値の方が  $D=2.2\text{cm}$  のものよりも大きく、両者の差は  $h_1 \approx 2\text{cm}$  の場合に大きい。

つぎに、Fig. 16 はこの底面流速の  $y$  方向成分  $v_e$  の変化を示したものである。いずれの  $D/h_1$  の値に対しても  $L=1\text{m}$  で極大値を取る変化特性を示し、3.1 で述べた死水域が最も発達して、段上の  $y$  の負方向への供給流量が最大となる  $L=1\text{m}$  おいて、前縁に沿って  $y$  の正方向に向う補償的な流れが最大となっている。

以上のような流れが形成される原因について、Allen<sup>3)</sup> は reattachment point 付近の圧力差に基く定性的な説明をしているが、あまり明確でなく今後検討していく必要がある。

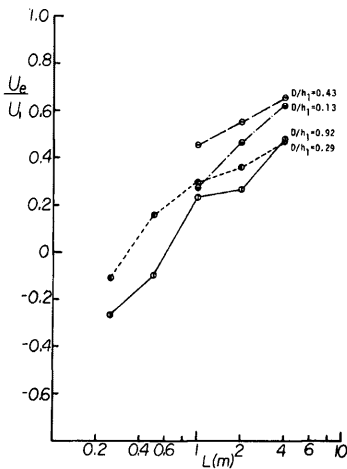


Fig. 15. Relation between  $U_e/U_1$  and  $L$ .

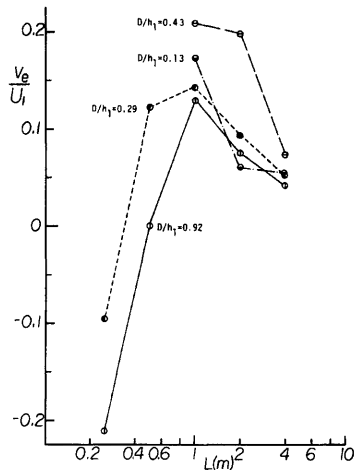


Fig. 16. Relation between  $v_e/U_1$  and  $L$ .

(3) 渦度の変化

これまで述べたように、直線水路であっても斜面段落ちによって流心は蛇行して、段落ち通過後の流速分布は彎曲部のものに類似の形状を示す。彎曲部における三次元的な流況は渦度成分の変化によって表現される<sup>4)</sup>が、斜め段落ち流れの渦度の変化について簡単に検討する。本実験では流速の3成分測定は行っておらず、また測定断面間隔が大きいため、一定の流管に沿う渦度ベクトルの十分な評価は困難である。ここでは、断面中央部の平均流に着目して、渦度ベクトル  $\vec{\omega}$  の y 方向成分  $\eta$  および x 方向成分  $\zeta$  に関係する量としてそれぞれ  $\eta' = U_M/h_M$  および  $\zeta' = \{U(y_1) - U(y_2)\}/|y_1 - y_2|$  を用いる。ここに、 $U(y)$  は y における流速の鉛直方向の平均値を表し、 $U_M$  および  $h_M$  はそれぞれ  $y=40\text{cm} \sim 55\text{cm}$  における  $U(y)$  および水深の平均値であり、また  $y_1$  および  $y_2$  はそれぞれ  $y=25\text{cm}$  および  $60\text{cm}$  にとっている。

$\eta'$  および  $\zeta'$  の流下方向変化を例示すると Fig. 17 のようである。 $\eta'$  はいずれの実験結果でも、3.1 (2) で述べた縮流効果のために  $x=11\text{m}$  において増大した後、段落の通過に伴って減少し通過後ほぼ一定となるような変化をする。このように、 $\eta'$  は流水断面積の増加に伴って減少し、 $\eta'$  の定義から推定される変化特性と対応している。一方、 $\zeta'$  は、Run4027 や Run1027 のように、流下方向にだらかなきピークを形成する変化特性を示すものが多いが、Run227 や Run222 のように  $L=0.25\text{m}$  で段落ち長の短い場合には、 $\zeta'$  の増加は極めてわずかである。Run1017 および Run1012 の場合も  $\zeta'$  の増加はわずかであるが、この理由は、Fig. 5 に示されているように、段落ち通過に伴って同一断面内に2カ所の流速ピークが現れるためであると考えられ、同様の現象は Run2022 にもみられた。 $\vec{\omega}$  の x 方向成分  $\xi$  も、Fig. 7 に示したように y 方向流速成分の顕著な断面では存在していると考えられるが、糸による流向の測定精度や前縁に沿う強い剝離渦の評価に問題があるので  $\xi$  の検討は行っていない。

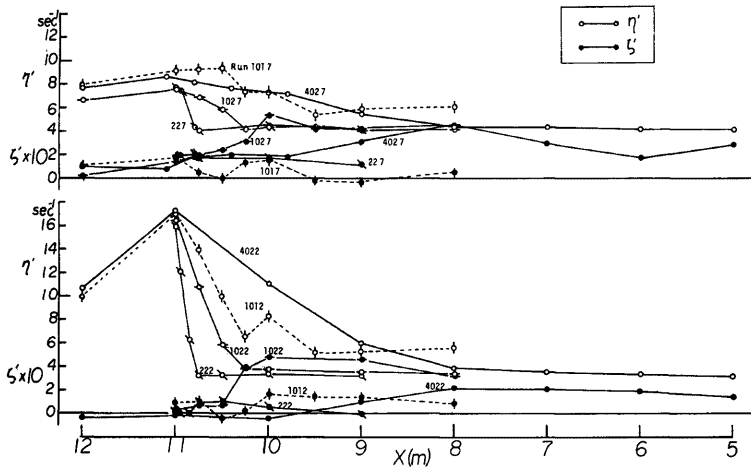


Fig. 17. Longitudinal variation of  $\eta'$  and  $\zeta'$ .

斜め段落ち通過に伴う  $\eta$  の変形によって  $\zeta$  が発生すると考えれば、 $\eta$  と  $\zeta$  との間には  $L/B$  あるいは  $D/h_1$  を媒介とする関係が存在すると思われる。 $L/B=0$ ,  $L/B=\infty$  ( $B$ : 水路幅) で  $\zeta=0$  また  $D/h_1=0$  で  $\zeta=0$  であることから、単純にこれらが相乗的に  $\eta$  に作用して  $\zeta$  が形成されると考えて、 $\zeta_{\max}'$  と  $\eta_{12}' \cdot \frac{B}{L} \cdot \frac{D}{h_1}$  との関係を検討すれば Fig. 18 のようである。ここに、 $\zeta_{\max}'$  は  $\zeta'$  の最大値、 $\eta_{12}'$  は上流一

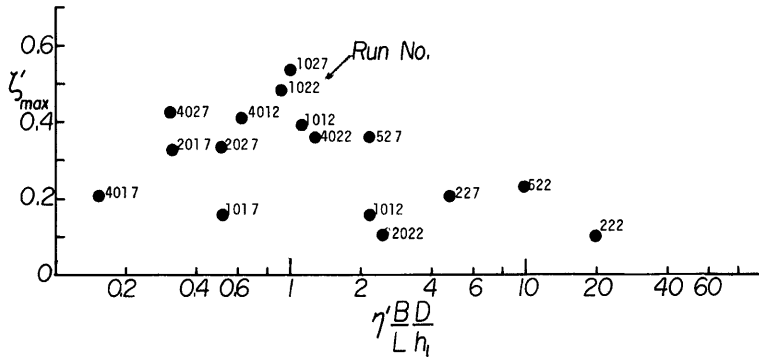


Fig. 18. Relation between  $\zeta_{MAX}'$  and  $\eta_{12}' \cdot \frac{B}{L} \cdot \frac{D}{h_1}$ .

様区間の代表値としてとった  $x=12m$  の  $\eta'$  の値である。前述の流速分布にピークが2つ現われる Run1017, Run1012 および Run2022 を除けば、 $\zeta_{MAX}'$  は  $\eta_{12}' \cdot \frac{B}{L} \cdot \frac{D}{h_1} = 1$  において最大値をとる変化特性が示されており、ピークの実験値は  $L=1m$  のものである。Fig. 17 からわかるように、 $\eta_{12}'$  の値の範囲はほぼ  $7 \sim 10 \text{sec}^{-1}$  と比較的せまいので、 $\frac{B}{L} \cdot \frac{D}{h_1} = 0.1$  前後の段落ち形状の場合に  $\eta$  から  $\zeta$  への変換が最大となる可能性が高い。

以上、斜め段落ち流れの渦度特性について簡単な検討を行ったが、今後実験結果を詳細に解析して、前縁の剝離渦を含めた流れの内部機構について検討していきたい。

#### 4. 斜め段落ち流れと交互砂州上の流れ

##### 4.1 流況の対応について

前節で述べた実験結果から、斜め段落ち流れと砂州上の流れとの対応について考察する。

砂州上の流れは、明瞭な主流の蛇行とそれに付随する低流速域の存在および前縁下部に沿って主流向と斜交する底面流の存在によって特徴づけられる。つきに、これらの特徴に対して斜め段落ち流れとの対応を検討してみる。

主流の蛇行に関しては、斜め段落ち流れでの流心の偏位が対応する現象と考えられるが、水深の大きい  $h_1 \approx 7cm$  の実験結果では Fig. 11 でわかるようにいずれの場合も流心の偏位は小さい。一方、 $h_1 \approx 2cm$  の場合、流心の偏位はいずれの実験結果についても大きく、Fig. 4, Fig. 5 および Fig. 6 でわかるように低流速域の存在も顕著である。つきに、前縁下部に沿い主流に斜交する底面流は、Fig. 14 で検討したように  $L=1m, 2m$  および  $4m$  の場合に安定して存在している。以上から、 $L=1 \sim 4m, h_1 \approx 2cm$  の斜め段落ち流れは巨視的にみれば砂州上の流れと対応している。さらに、砂州の前縁形状は下流側に弓状に張出しているので、その形状をたとえば  $L=4m$  と  $1m$  の斜め段落ちを接続して模擬すれば、両者の流況はより近づくと考えられる。すなわち、Fig. 4 の Run4022 および Fig. 5 の Run1022 の底面流速分布を  $y=40cm$  で前縁が一致するように接続して流況を推定すれば、斜め段落ち上では段落ち終端付近に低流速域が形成され、一方、段下では徐々に流速が増加して終端付近で最大となるようであって、砂州上の流速の平面分布形状<sup>9)</sup>に近くなる。

しかし、前縁に沿う底面流は、両者の流れとも同一の機構で発生すると考えられるが、砂州上の主流の蛇行と斜め段落ち流れの流心の変位とが同一の機構によって形成されると判断するためには、両者についてさらに詳細に検討する必要がある。

#### 4.2 斜め段落ち流れと交互砂州の発達機構

交互砂州の形成条件に関する重要なパラメータは流路幅・水深比  $B/h$  である。一方、砂州の形成の初期過程では、種々の波長の直線的な前縁を持った河床擾乱のうち、特定の波長の擾乱が選択されて発達していく。したがって、ここでは、実験結果から  $B/h_1$  および  $L$  が異なる場合の流況の相違を指摘し、交互砂州の発達機構との関連について考察する。

砂州は、水理条件の擾乱によってもたらされる平面的な流砂量の不均衡によって発達する。しかし、その擾乱が上層の一流によって河床近傍に限定される場合には、擾乱は移流によって下流に影響するものの平面的な水理条件の不均衡をもたらすようになるとは考えにくい。いま、その擾乱が斜め段落ちのような河床上の不連続性によって生じるとすると、Fig. 2 および Fig. 3 の流速分布の測定結果では、水深が  $h_1=7\text{cm}$  と大きく  $B/h_1=7$  の場合には、斜め段落ちによって生じる流速分布の擾乱は流水断面全体には及ばないようである。一方、 $h_1=2\text{cm}$ 、 $B/h_1=25$  の場合には斜め段落ちによって生じる擾乱によって流速分布は、 $L=4\text{m}$  および  $L\leq 0.5\text{m}$  の実験結果を除いて、全断面にわたって大きな変化を受ける。以上の傾向は  $D/h_1$  がそれぞれ 0.30 および 0.43 と比較的近い Run2027 および Run2012 の実験結果についてもみられ、このような流況の変化に及ぼす  $D/h_1$  の影響は二次的であると考えられる。したがって、 $B/h_1=25$  であって、 $L=1\text{m}$  あるいは  $2\text{m}$  すなわち  $L/B=2$  あるいは 4 の場合に河床擾乱の影響が最大となり、移動床ではこのような擾乱に対応する河床が形成されていく可能性が高い。さらに、3 で述べた実験結果でもこの条件において単位幅流量や底面流速分布に最も顕著な偏りが生じており、このような条件下の移動床では流砂量の平均分布の偏りは大きいと推定される。

つぎに、河床変動は、底面の流向と流砂量の分布状態に支配されるが、流砂量が底面近傍の流速に対応していると考えられるので、Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6 および Fig. 8 に示すような底面近傍の流速と流向の分布図から 2, 3 のケースについて河床変動を推定するとつぎのようである。

$B/h_1$  の小さい Run4027, Run4017, Run1027 および Run1017 の場合には、流向と等流速線の方向はほぼ一致しているので、流線に沿う流砂量の変化は小さく、河床変動はみられない。一方、 $B/h_1=25$  である Run4022 や Run1022 の場合は、流線が等流速線を横切る場所がみられ、段落ち下で洗掘された土砂が下流に向けて分散堆積し、段上では段落ち終端付近にかけて堆積するようであって、段高は増加する傾向にある。また、砂州の発達過程では側岸近傍から水路中央部に向う流砂が重要な役割を担う<sup>3)</sup>が、Fig. 15 に示されるようにその方向の底面流速は  $L$  が大きいほど大きく、波長の長い砂州が選択されていく過程との対応が考えられる。

最後に、3.1 (1) で述べた前縁の剝離渦に伴う上昇流によって段上の前縁に沿った部分の流速が減少する傾向が段落ち面が砂州前縁のように傾斜している場合にも確認されれば、これによって砂州の前縁が維持される可能性が考えられる。この点に関しては今後さらに詳細に実験的な検討を行うつもりである。

以上のように、実験結果からは、砂州の発達過程の初期には Run1022 や Run2022 に対応するような流況が形成されていると推定される。この場合の  $B/h_1=25$  は実験水路規模において最も砂州が発達する条件<sup>1)</sup>に対応しており、しかも  $L/B=2\sim 4$  は発達初期に最も出現頻度の高い無次元砂州長  $l_B/B=2\sim 4$  に対応している。

## 5. 結 論

交互砂州の初期形状を模擬した斜め段落ち上の流れに関して実験的な研究を行い、つぎの結論を得た。水路幅  $B=50\text{cm}$  の場合、斜め段落ち長  $L$  が  $0.5\text{m}$  を越えれば彎曲流的な特性が生じ、 $L=1\text{m}$  程度で流心位置や単位幅流量の偏り、前縁の剝離渦による上昇流の影響などの特性が極大となる。また、 $B/h_1=25$  であれば  $L=1\sim 4\text{m}$  の斜め段落ち流れと砂州上の流れとの巨視的な対応は良い。つぎに流況に与える斜め段落ちの影響は  $B/h_1=7$  では小さく、 $B/h_1=25$  では大きい。とくに、 $L=1\sim 2\text{m}$  では顕著であって初期にはこのような擾乱が卓越する可能性が高い。このとき  $L/B=2\sim 4$  であって、発達初期の無次元砂州長  $l_B/B=2\sim 4$  に

対応している。

今後、斜め段落ち流れの流下方向の渦度の変化と前縁に沿う剝離渦に着目して、流れの内部機構を明確にして砂州上の主流の蛇行の形成機構および前縁形状の維持機構について研究を進めていきたい。

最後に、本研究を行なうにあたり、実験遂行および資料・図面の整理に尽力してくれた本学大学院学生堀池周二君をはじめ河川災害部門の方々に深謝いたします。

#### 参 考 文 献

- 1) 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.
- 2) 村本嘉雄・藤田裕一郎・堀池周二：砂州の発達機構について，昭和53年度土木学会関西支部年次学術講演会講演概要，土木学会関西支部，1978, pp. II-69-1-2.
- 3) Allen, J. R. L.: Current Ripples—Their Relation to Patterns of Water and Sediment Motion, North-Holland Publishing Co., 1968, pp. 150-226.
- 4) 村本嘉雄・井上喬之：開水路弯曲流の内部機構，京都大学防災研究所年報第8号，1965, pp. 415-427.
- 5) 鮎川 登：直線河道における流れの蛇行現象に関する水理学的研究，科学技術庁資源調査所，1971, pp. 285-290.