

交互砂州上の流況特性に関する実験的研究 EXPERIMENTAL STUDY ON THE FLOW CHARACTERISTIC OVER ALTERNATING BAR

京都大学防災研究所 正会員 藤田 裕一郎

1. まえがき

交互砂州の発達に伴って、水流が蛇行し水衝部が生じて流路変動が引起こされるなど、河道の安定が損われることは周知のとおりであって、このような交互砂州上の流況を明確にすることの治水上の重要性は高く、これまで空中写真による洪水時の河川流況の解析あるいは実験水路における測定結果が報告されている。しかし、流況の詳細な測定は水路実験であっても多大の労力が必要とされるため、これらの報告はいずれも特定の条件に限られたものであって、広範囲の条件下において系統的に交互砂州上の流況を明確にしようとしたものではなく、蛇行特性と平均水理量あるいは砂州形状との対応関係は明らかにされていない。したがって、交互砂州の河道の安全に及ぼす影響の定量的評価はほとんど不可能であるといえる。

また、交互砂州上の流況と平均水理量と砂州形状との関係が明らかになれば、流況と土砂移動との関係を考察して、交互砂州の発達あるいは変形機構を水理学的に究明しようと考えられ、交互砂州の形成条件の物理的意義の解明や非正常条件下の砂州の挙動の予測が可能となると思われる。

以上より、本研究では交互砂州上の平面的な流況と平均水理量および砂州形状との関係を実験的に明確にすることを目的として、広汎な実験条件を得るために斜め段落ちを最も単純化された交互砂州の模型と考え、系統的な実験を行った。その結果と移動床水路における交互砂州上の流況とを比較して両者の対応関係を明らかにするとともに、蛇行特性と水理条件と砂州形状との関係を見出し、それに基づいて交互砂州の形成条件および形成過程について考察する。

2. 交互砂州上の流況に関する実験

(1) 固定床実験

(装置と方法) 実験装置と測定方法は既報に述べられているが、使用水路は幅 50.2 cm 長さ 20.5 m の可変こう配鋼製循環水路であり、測定はポイントゲージに取付けた直径 5 mm のプロペラ流速計を用いている。単段落ちの場合には下流端を適宜堰上げて水面こう配が水路こう配 ($I_0 = 5.7 \times 10^{-4}$) にほぼ等しくなるようにしており、一方連続交互段落ちは、単段落ちの上流側に前縁を逆向きにした単段落ちを上載、接続して作成し、この場合は水路を逆こう配にして等流状態に近づけている。いずれの段落ちの場合にもトタン板の凹凸と L 型鋼枠の歪によって縦横断面形に多少の不整が生じたが、砂州上の流れでは個々の砂州形状に若干の差異があってもほぼ同様の流況が観察されるので、基本的な流況特性はこの不整に影響されないものと判断した。

(実験条件) 段落ちの諸量は図 1 の模式図に記されており、実験条件は表に示したとおりであって、段落ち長 $L = 1\text{ m}$ と 2 m の実験に重点がおかれ、連続段落ちでは段落ち区間中央の水深が 2 cm になるようにしている。表中の Run No は実験条件に対応して付けられており、W は連続段落ちを表している。通水流量は測定された流速の断面積分値を全区間で平均して求めたが、この平均値と各断面値との差は大部分の実験で $\pm 8\%$ 以内であった。しかし、小流量の場合には 10% 程度に及ぶこともあったので、測定流速はすべての断面で流量が等しくなるように補正している。

なお以下で用いる座標系は、水路縦方向に x 軸、横方向に y 軸 (水路中心: $y = 50\text{ cm}$)、鉛直方向に z 軸をとり、さらに段落ち開始位置から下流に x' 軸をとっている。

(2) 移動床実験

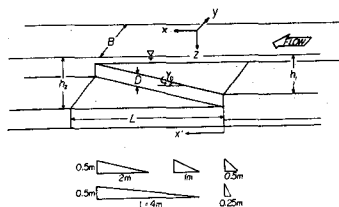


図 1 斜め段落ちの模式図

実験は、平均粒径 $d_m = 0.88\text{ mm}$ の比較的粒度分布の広い砂が敷かれている幅 7.5 m の大型水路内に仕切壁を設けて幅 2 m の固定側壁水路とし、 43 m の区間長を約 $1/500$ に敷均し、流量 $Q = 42.88\text{ l/s}$ を約 440 分間通水して交互砂州を発達させた後、1個の砂州に着目して5断面において下流から順次プロベラ流速計で流速分布を測定した。計測の所要時間は約 60 分であってその間の砂州の移動は約 2 m 、また変形は写真測定結果から判断すると極めて僅かであったので、計測結果には砂州の移動に関する位置の補正のみ行って検討に供している。

3. 斜め段落ち流れと交互砂州上の流れの基本特性

単段落ち流れの基本特性については既報に詳述しており、段高 $D = 0.5\text{ cm}$ の場合も $D = 2.0\text{ cm}$ や 1.0 cm の場合とほぼ同様であるので、ここでは単段落ちについては簡単に述べ、主に連続段落ちおよび交互砂州上の流況の基本特性について述べる。

(1) 流速の断面分布特性

最初に単段落ちの例としてRun 2027と2022の流速分布の流下方向変化および L の相違による流況の変化を数例の段落ち終端断面について示せばそれぞれ図2および図3のようである。 $h_1 \neq 7\text{ cm}$ の実験での最大流速点は水面からかなり下がった位置にあるが、 $L = 1 \sim 4\text{ m}$ の場合では、この点は段落ち区間の通過に伴って D の大きいほど明確に左岸側（段下側）に移動するが通過後は速かに中央部へ戻る。また、段落ち区間の等流速線はいずれも前縁上で上に凸な形状となり、この付近に上昇流が存在していることを暗示している。この等流速線の歪も D の大きい方が明確であって、それは前縁下部に形成されている剝離渦の影響と考えられる。

$h_1 \neq 7\text{ cm}$ の場合、この歪は流水断面の下部に限られていて、流心付近の等流速線形状は滑らかで、ほとんど乱れていない。しかし、 $h_1 \neq 2\text{ cm}$ の実験では、前縁部の上昇流は低流速部を押し上げて流速のピークを二分しており、全水深に亘って影響するようである。このため、流速分布は段落ち区間で複雑に変化し、最大流速位置の変化は $h_1 \neq 7\text{ cm}$ の場合のように単純ではない。さらに、Run 2022や1022では、 $y = 70\text{ cm}$ の流速が段落ち終端付近で0であるように左岸方向に移動する流量の割合は大きく、またこの右側壁付近の等流速線はほぼ鉛直であって、鉛直方向の水流の混合の強いことが窺われる。

$L = 1 \sim 4\text{ m}$ の場合の比較結果では、 $L = 4\text{ m}$ の場合は $L = 2\text{ m}$ の場合と大差は認められないがより単純な形状であって、剝離渦による前縁上の等流速線の歪は小さく、右側壁近傍に死水域も発生しない。一方、 $L = 1\text{ m}$ の場合では、図3のRun 1027における等流速線の強い乱れあるいはRun 1022での極めて複雑

表 実験条件

Run No.	L (m)	D (cm)	h_1 (cm)	h_2 (cm)	Q (l/s)
4027	4.0	2.0	6.82	9.45	16.5
4022			2.38	4.48	2.93
4017	1.0	7.22	9.50	20.8	
4012			2.25	2.87	2.82
2027	2.0	2.0	7.22	9.50	16.7
2022			2.38	4.60	2.71
2017	1.0	7.25	8.58	21.7	
2012			2.32	3.13	2.85
20057	0.5	6.94	7.08	17.7	
20054			3.89	4.15	7.29
20052			2.03	2.51	2.67
20051			0.82	1.65	0.94
1027	1.0	2.0	7.23	9.54	16.4
1022			2.38	4.58	2.79
1017	1.0	7.61	8.85	21.7	
1012			2.32	3.18	2.71
10057	0.5	6.63	7.16	17.6	
10054			3.90	4.49	7.44
10052			2.08	2.60	2.73
10051			0.99	1.53	0.89
527	0.5	2.0	7.48	9.54	17.0
522			2.38	4.36	2.57
227	0.25		7.48	9.52	17.0
222			2.38	4.45	2.90
W2022	2.0		3.44	2.7	1.31
W1022	1.0		2.36	5.4	1.87

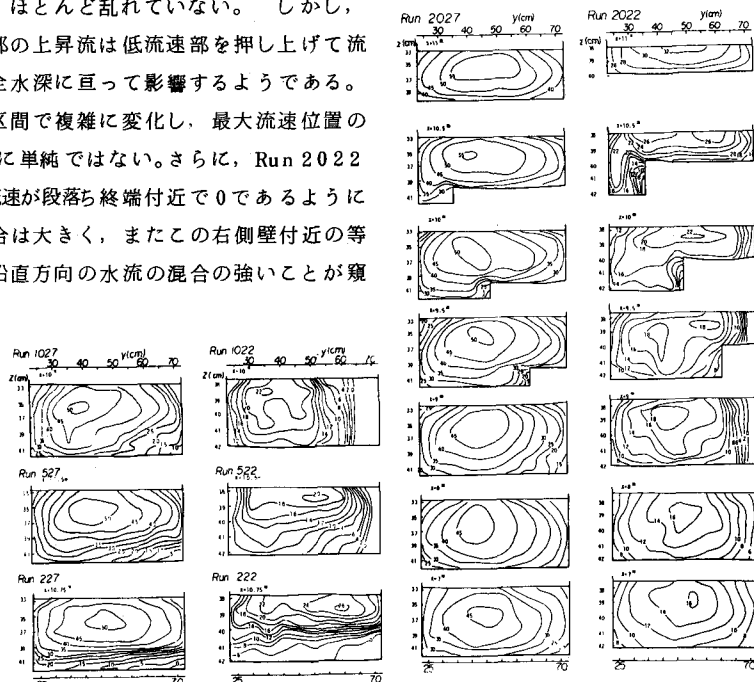


図3 段落ち終端断面の流速分布

図2 断面流速分布 ($L = 2\text{ m}$)

な流速分布形状と全断面面積の10%に及ぶ死水域の存在に示されるように、前縁直下の剝離渦の影響が強く、また左岸側への流量供給も多くて、斜め段落ちの効果が顕著である。

以上の1~4 mの場合に対して、 $L = 0.25\text{ m}$ の実験では、段落ち上面付近の高さに水平な等流速線が密に走り、とくに Run 222 では逆流域も生じていて、通常の段落ち流れに近い特性が観察される。一方、 $L = 0.5\text{ m}$ の場合では流心の偏りや死水域が認められ、かつ段上付近に水平に近い密な等流速線も形成されていて、 $L = 1\text{ m}$ の場合と $L = 0.25\text{ m}$ の場合との中間的な特性を示すことがわかる。

つぎに、連続交互段落ちの場合を示せば図4のようである。対応する条件の単段落ちとの明白な相違は死水域が消滅している点であるが、これらの流況は、単段落ちのものを逆向きにつないで接続部で死水域を消すように平滑化したものとみなせ、連続段落ちの流速分布特性は単段落ちのものと基本的に対応していると判断できる。

最後に、交互砂州上の流れについて同様の検討結果を示せば図5のようである。最大流速位置は単段落ち流れと同様に流下に伴って砂州上から滞筋に移動し、滞筋では順次側岸に近づきかつや下方に向っている。また前縁付近では、流速が低く等流速線が上に凸であって、前縁に沿って上昇し側壁に沿って下降する二次流が存在すると推定され、これによって流速分布にピークが2個所現われる区間も生じる。以上より、交互砂州上の流速分布特性は、段落ち長と段高が大きく水深の比較的小さい斜め段落ち流れのものと類似性の強いことが推察される。

(2) 流速の平面分布特性

底面上3.5 mmの流速の平面分布を単段落ち流れの4例について示せば図6のようである。いずれの場合も段落ち開始断面に流速のピーク値が現われ、段上では前縁に沿って帯状の減速域が、また段下では前縁からやや離れて平行な加速域が存在している。前者の

減速域は剝離渦の上昇流の影響と考えられ、一方後者の加速域は、 $L = 0.25 \sim 0.5\text{ m}$ の場合では段落ち部から下流1~2 mと比較的長く続いていて再付着点から流速分布が回復していく通常の段落ちとはほぼ同様であるが、 $L = 1 \sim 4\text{ m}$ の場合では短く、前縁の下流20~40 cmの区間に限ら

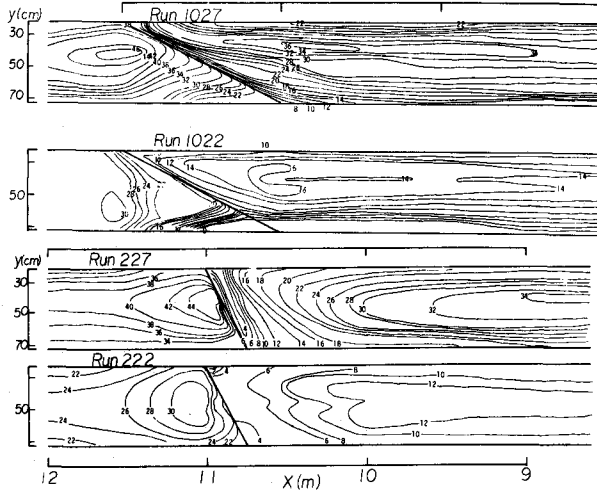


図6 底面流速分布(単段落ち)

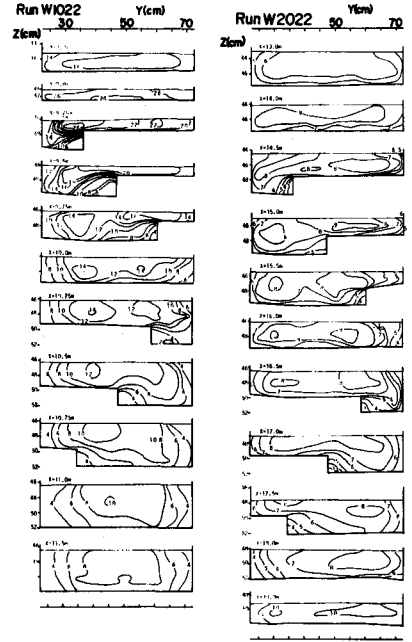


図4 断面流速分布(連続段落ち)

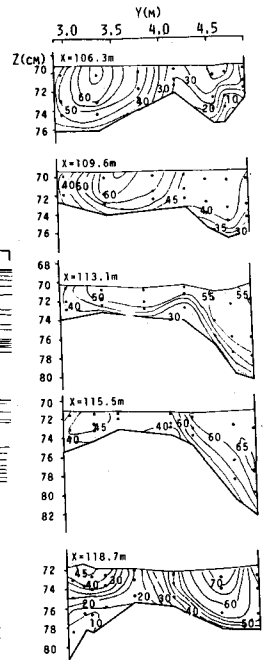


図5 砂州上の流速分布

れていて、 L あるいは D の相違による差は小さい。また $L = 1\text{ m}$ の場合では、Run

1022にみられるように h_1/D の値の小さいときに形成される広範囲の死水域が特徴的である。

図7は連続段落ちについて同様の図示を行ったものである。Run 1022およびRun 2022とも前述のように死水域は形成されておらず、また1段目の段下から2段目の段上にかけて、加速域と減速域の混ざったやや複雑な流速分布を示すが、全体的な流速分布は単段落ちの場合との共通性の強いことが認められる。しかし、水流の蛇行状態が明確になってつきに示す交互砂州上の流況により近づいている。

交互砂州上の流れでは底面近傍の流速測定が困難であったので図5に基いて鉛直平均流速の平面分布を作成し図8に示している。砂州上では流下に伴って流速が低下してゆき、点線で示された前縁付近は水流の減速域となっている。一方、瀬筋では、上流側砂州の先端に近い $x = 106 \sim 108\text{ m}$ での流速は低いが、流下するにつれて砂州上から水流の供給を受けて流速は増大し、 $x = 118\text{ m}$ において $y = 4.9\text{ m}$ 付近に最大流速が現われている。図8は、移動床上の測定結果であり、かつ実験規模や水理条件が相当異っているにもかかわらず、形成された交互砂州を固定して測定された井口や銚川の結果と極めて相似な流速分布状況を示している。これは、交互砂州の形成される条件下であれば、他の水理条件や規模が異っていても相似な流況の生じることを示唆している。

また、この流況と斜め段落ち上の流況との比較は、前者が平均流速、後者が底面近傍流速を示したものであり、前縁形状もかなり異っているので容易ではないが、砂州長を段落ち長に等しくなるように圧縮した流況を想定すれば、水深の小さい $L = 1 \sim 4\text{ m}$ の斜め段落ち流れとの対応が考えられ、両者の流況に相似した関係を認めることは妥当であろう。

(3) 底面流向特性

底面に貼付された糸によって測定された流向分布の例を図9に示している。Run 2022では段上で前縁に向いた流れが形成されている。このような流向分布は $D = 0.5\text{ cm}$ のRun 20051でも顕著ではないが認められ、 $L = 1\text{ m}$ 以上の斜め段落ち流れの基本特性の一つと考えられる。前縁直下の流向は、剝離渦が前縁に平行な軸を持つ螺旋流となっていることを示している。これに対し、Run 522ではこの螺旋流の弱まって流向が乱れ、段直下には逆方向の戻り流れも現われている。このような傾向はRun 222ではより顕著となり、戻り流れのみが明瞭であって螺旋流的な特徴はほとんど認められない。したがって、本水路では $L = 0.5\text{ m}$ が螺旋流状の剝離渦の形成限界とみなせる。この値が剝離渦を“Open”と“Close”に区分したAllen⁷⁾の限界角度 45° に一致していることは興味深い。

Run 2022の底面流向分布は、交互砂州上の砂粒の移動方向から推定される流向あるいは砂州を固定して測られた流向の平面分布と良く対応しており、この点においても斜め段落ち流れと交互砂州上の流れとの基本的特性は共通している。

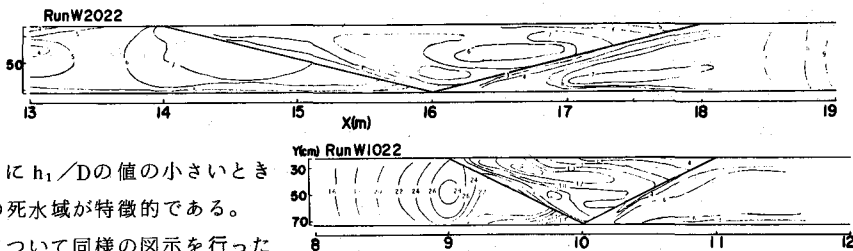


図7 底面流速分布（連続段落ち）

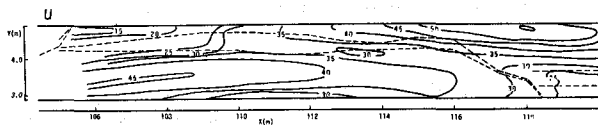


図8 砂州上の平均流速の平面分布（ cm/sec 単位）

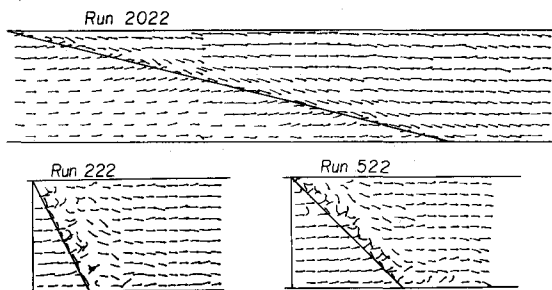


図9 底面流向特性（単段落ち）

また、上述の剝離渦の特性についても検討⁶⁾しているが、剝離渦は段上前縁付近の低流速域と関連していると思われる、砂州前縁線の形成・維持機構を考える上で重要であろう。しかし、その規模から判断すれば、交互砂州による大規模な蛇行特性にはほとんど影響しないと考えられる。

以上の検討によって、直線流路に流路幅の2倍以上の長さを持つ斜め段落ちを導入すれば、流心が偏位して彎曲流的な特性が現われ、さらに斜め段落ちを逆向きに連続すれば水流は蛇行し、水深が小さいときに交互砂州上の流れとほぼ似た流況が形成されることが明らかにされた。彎曲流の流況は渦度特性の変化によって表されるので、それにならって簡単な検討を行った結果では、 $L = 1\text{ m}$ の場合に鉛直方向の渦度成分（水平渦）が最大になることが見出された。しかし、斜め段落ち流れでは通常の彎曲流とは異った複雑さの流速変化が生じ、また実験規模や測定上の制約もあって、渦度変化の検討では交互砂州上の蛇行特性を十分明確にできないようである。したがって、次章ではこの蛇行特性を主に単位幅流量の場所的变化に基いて検討し、その強度と砂州あるいは段落ち形状および流路条件との関係を明確にする。

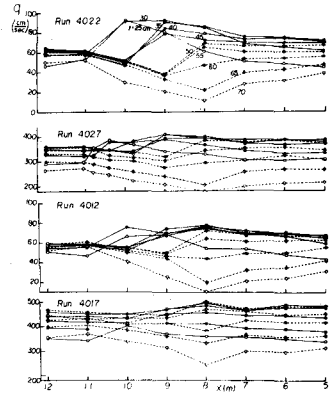


図10 q の場所的变化(単段落ち)

4. 蛇行特性に関する検討

(1) 単位幅流量の変化と流心の偏位

流速を水深方向に積分して単位幅流量を q を求め、その場所的变化を $L = 4\text{ m}$ の場合について示せば図10のようである。 q は前縁通過直後に急激に増大するがその後の減少は q_{25} （添字25は $y = 25\text{ cm}$ の測線を示す）

を除いてわずかであり、前縁通過に伴う増加流量はほとんど段上側から供給されているので、段上部の q は減少を続けとくに q_{65} や q_{70} の減少量は大きく、このような単位幅流量の変化は L が 1 m 以上の単段落ち流れでは常に明確であった。つぎに、連続段落ち流れについて同様の検討を行った結果を示せば図11のようであって、やはり単段落ちを逆向きに接続したような変化を示している。とくに、 L の大きいRun W 2022では第1段目と第2段目における q の変化に大差はなく、ともにRun 4022の場合に似た様相を示している。一方、交互砂州上の流れにおける q の変化状況を平均単位幅流量 $\bar{q}$ と砂州長 b_s で無次元化して示せば図12のようである。 q の変化は連続段落ちの対応区間のものと良く一致しており、ここでも水深の大きくない場合の斜め段落ち流れと交互砂州上の流れとの基本的な対応の良いことがわかる。

図13は、上述の流量の偏りの状況の実験条件による差異を検討するために、 q の最大値 q_M と最小値の現われる q_{70} の変化を $\bar{q}$ で無次元化し、 D/h_1 の値ごとにまとめて示したものである。いずれの実験結果においても、段落ち開始位置では $1 < q_M/\bar{q} < 1.1$ かつ $0.8 < q_{70}/\bar{q} < 1$ であるが、流下するにつれて $q_M/\bar{q}$ は増

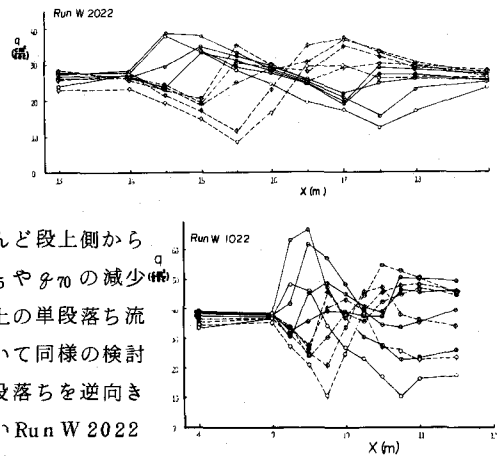


図11 q の場所的变化(連続段落ち)

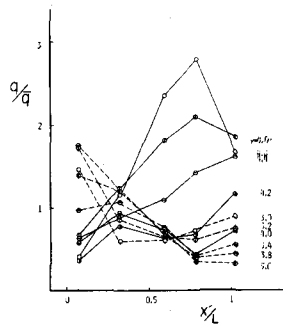


図12 交互砂州上の q の変化

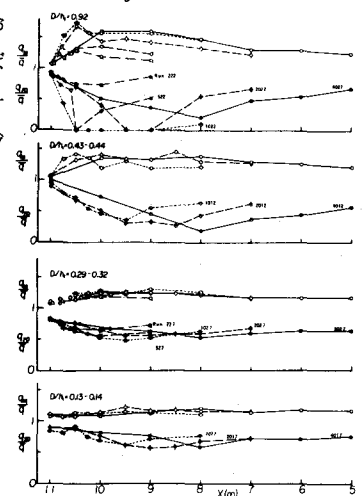


図13 $q_M/\bar{q}$ と $q_{70}/\bar{q}$ の変化(単段落ち)

加した後に減少し、一方 $q_{70}/\bar{q}$ は減少した後増加して、両者の差は一度開いた後再び最初の値に近づいていく。また、前者の最大増加量は後者の最大減少量より小さい。これは、図 10 のように q は前縁通過時に急増した後では減少せずかつその急増量は前縁

通過位置によらずほぼ一定であるのに対し、 q_{70} は段落ち区間では常に左岸方向への流量供給があるために減少を続けることによっている。同様の検討を連続段落ちについて行えば図 14 のようであるが、第 2 段目については q_{70} に替えて q_{25} を用いている。Run W1022 および Run W2022 における $q_m/\bar{q}$ と $q_{70}/\bar{q}$ あるいは $q_{25}/\bar{q}$ の流下方向変化は、 $q_{70}/\bar{q}$ ($q_{25}/\bar{q}$) が 0 にならない点を除いて、やはり D と L がそれぞれ

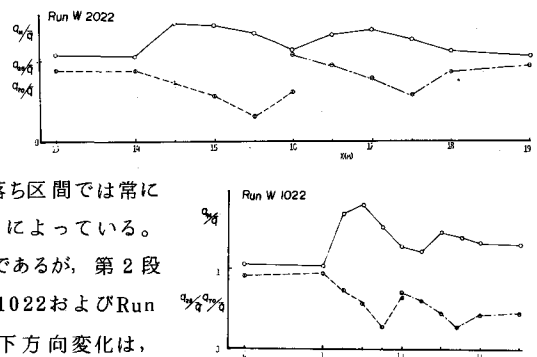


図 14 $q_m/\bar{q}$ と $q_{70}/\bar{q}$ の変化 (連続段落ち)

対応する Run 1022 および Run 2022 の場合を連続させたものに近いことが明らかである。このような検討は交互砂州上の流れについては直接行われていないが図 12 によって容易に考える。すなわち、 $q_m/\bar{q}$ は $q/\bar{q}$ の上方の包絡線であり、一方 $q_{70}/\bar{q}$ にはこの場合 $y=8.0m$ の $q/\bar{q}$ が対応するのでこれらの流下方向変化に着目すれば良く、それによれば $q_m/\bar{q}$ の最大値が斜め段落ちの場合の約 1.7 に比して約 2.8 と相当大きくなっている以外では、全体的な変化の状況は連続段落ちとくに Run W 2022 の場合と高い相似性を持つようである。

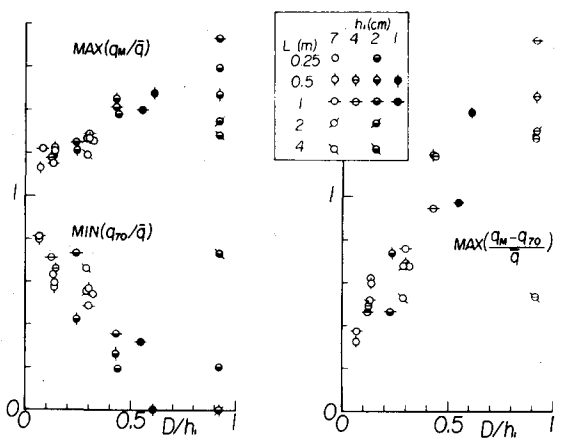


図 15 $MAX(q_m/\bar{q})$, $MIN(q_{70}/\bar{q})$, $MAX\{(q_m - q_{70})/\bar{q}\}$ と D/h_1 との関係

つぎに、 $q_m/\bar{q}$ と $q_{70}/\bar{q}$ ($q_{25}/\bar{q}$) およびこれらの差の極値、 $MAX(q_m/\bar{q})$, $MIN(q_{70}/\bar{q})$ および $MAX\{(q_m - q_{70})/\bar{q}\}$ と D/h_1 および L との関係を示せば図 15 のようである。いずれの L の値に対しても $MAX(q_m/\bar{q})$ および $MAX\{(q_m - q_{70})/\bar{q}\}$ は D/h_1 の増加とともに増加し、逆に $MIN(q_{70}/\bar{q})$ は減少する傾向にある。しかし、 $L = 0.25m$ の場合のこの変化は極めて小さく、また $L = 0.5m$ の場合では $MIN(q_{70}/\bar{q})$ の減少は大きいが $MAX(q_m/\bar{q})$ の増加はわずかであって、この傾向は $L = 0.25m$ の段落ちは蛇行流を生ぜず、また $L = 0.5m$ の段落ちは水流の蛇行に関して限界的な効果を与えることに対応しているものと考えられる。 L が $1m$ 以上の場合では $MAX(q_m/\bar{q})$ と $MAX\{(q_m - q_{70})/\bar{q}\}$ の増加および $MIN(q_{70}/\bar{q})$ の減少はそれぞれ D/h_1 の増加にほぼ比例しており、明らかに D/h_1 は蛇行特性の主要な支配量の一つである。交互砂州の形成条件に関する検討結果から蛇行特性の支配量の一つになると推定される B/h_1 の影響については、その異った値に対する D/h_1 の重複区間が狭いので明確な結論は下し難いが、 B/h_1 の大きい場合の方が小さい

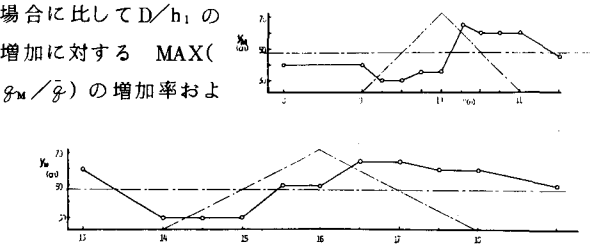


図 17 y_m の変化 (連続段落ち)

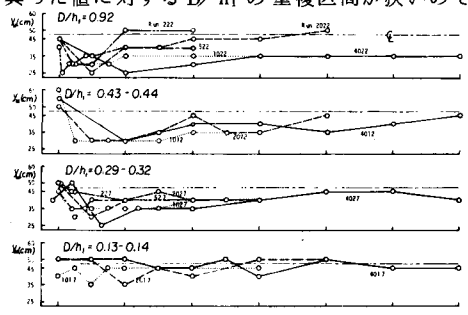


図 16 y_m の変化 (単段落ち)

び $\text{MIN}(g_{70}/\bar{g})$ の減少率がともに大きい傾向が認められるようである。

最後に、主流位置の指標として g_m の生ずる y 座標 y_m をとり、その流下方向変化を図 13 と同様にして示せば図 16 のようである。 D/h_1 が大きい場合には流心は側壁近くまで大きく偏るが、 D/h_1 が小さい場合には水路中心線から大きく離れることは少く、離れたときも中心部への回復は速い。また、 $D = 0.5 \text{ cm}$ の実験では全体的に y_m の変化に不規則性が見られ、段高が低い場合の流心位置の決定には河床の若干の凹凸など他の要因の影響も強く現われるようである。図 17 は同様の検討を連続段落ちについて行ったものであって、明確な一波長の蛇行を示しており、砂州上の平均流速分布(図 8) から推定される主流路の蛇行状態に良く一致しているようである。I

以上のように、斜め段落ち流れの蛇行特性は単位幅流量の最大値および最小値の変化によってかなり明確にされたが、蛇行の強度の指標としては平面的な流向の方がより適切であると考えられるので、つぎにこの流向について検討を行う。

(2) 鉛直平均の流向特性

流向特性は、3. 3) で述べたような直接計測からも明らかにされるが、それらは糸の揺ぎや水面の波立ちのために十分な精度が期待できない場合が多いので、ここでは単位幅流量の変化量に基いて測定断面間、測線間の平均流向を求め、それを検討する。すなわち、図 18 に示されたように、測定断面 I および II において g の分布が知られていれば、測線に平行にとられた検査面 ①、②……を横切る単位長当りの平均の横断方向流量 g_{y1} 、 g_{y2} 、……が算定できる。この横断方向流量 g_y と g の I、II 断面の平均分布によって平均的な単位幅流量ベクトル $\vec{g}$ が得られ、前者を後者で除せば流向 $\tan \theta$ が求められる。この手順によって得られる $\vec{g}$ と $\tan \theta$ は、本実験のように斜め段落ち区間に両端を含めて 5 つの測定断面がある場合には、蛇行の平均強度の検討にとって適当な平均値となり、各実験間の精度も一定する。

図 19 は、 $\vec{g}$ の平面分布を流向の相違が明確になるように g_y のみ 10 倍して図示したものである。Run 2022 について図 9 と比較すると、鉛直平均の流向分布と底面流向分布とは前縁直下の剝離域を除いて良い対応を示し、Run 2022 のように底面流向が明確に測定できる場合にはそれによって平均流向の推定が可能と思われる。また、図 18 では、段落ち区間の上流部での左岸側への流量供給とそれに伴う段上流量の減少および下流部段下での放射状の水流が特徴的であり、これらの特徴が実験条件に強く支配されていることがわかる。たとえば、流向変化は、段落ち区間で同程度の流量移動(図 13)があるので、 $L = 1 \text{ m}$ の場合の方が $L = 2 \text{ m}$ の場合よりも顕著であり、また一定の L に対しては D/h_1 の影響が大きくて D/h_1 の増加に伴う流向角の増加は著しい。つぎに、Run 2017 と Run 20052 とを比較すると、後者の方が D/h_1 がやや小さいにもかかわらず流向角はわずかに大きくなっていて、 B/h_1 の大きい方が蛇行特性が強く現われるが、同一の B/h_1 の実験、たとえ

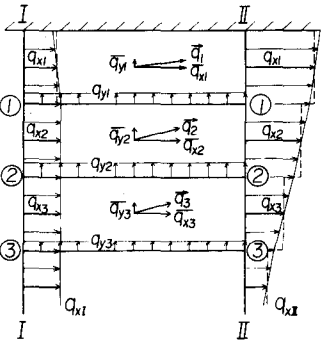


図 18 平均流向の算定図

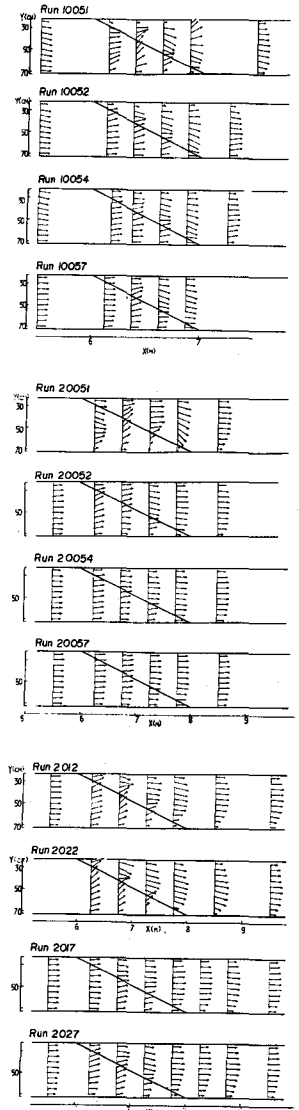


図 19 $\vec{g}$ の平面分布(単段落ち)

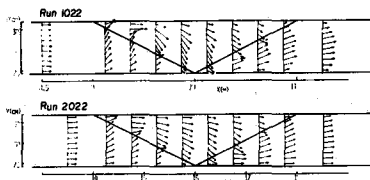


図 20 $\vec{g}$ の平面分布(連続段落ち)

ば Run 2022, 2012 および 20052 における D/h_1 の影響に比べると B/h_1 の影響は相当小さい。

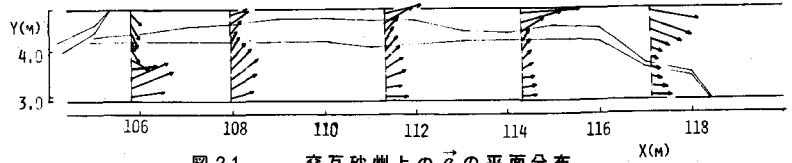


図 20 は、連続段落ち流れ

図 21 交互砂州上の $\bar{\beta}$ の平面分布

について図 19 と同様の結果を示したものであって、条件の対応する単段落ち流れの図と比較すると全体的な特徴は一致しているが、第 1 段落ち終端付近の水流が第 2 段落ちの影響を受けて大きく右岸に向いており、単段落ちの場合に形成される死水域の消滅と対応している。このように、連続段落ち流れでは各段落ちの終端付近に引き続く段落ちの影響が現われる点で単段落ち流れと相違しているが、段上の流況は単段落ち流れで十分表されていることがわかる。

交互砂州上の流れについて同様の図を示せば図 21 のようである。同図では $x = 111 \sim 115 m$ 区間の滞筋の流量がその上流区間よりも著しく増加しており、一方砂州上では中央区間の流向は大きく左岸向きとなって右岸付近の流量は順次減少している。このように砂州上から滞筋に大量に流入した水流は $x = 117 m$ 付近で下流側の砂州上に放射状に発散していて、斜め段落ち流れの段下の流況に近い。

以上のように、平面的な流向特性も斜め段落ち流れは交互砂州上の流れを良く模擬していると判断できるが、この流向の代表値として $\tan \delta$ が最大となる段落ち区間の上流部の段上前縁付近すなわち $x'/L = 0.125$ の $y = 30, 40, 45 cm$ および $x'/L = 0.375$ の $y = 45, 55, 50 cm$ の $\tan \delta$ の平均値 $\tan \bar{\delta}$ をとり、 $\tan \bar{\delta}$ と $D/\bar{h}$ の関係を示せば図 22 のようである。ただし $\bar{h}$ は段落ち区間の平均水深すなわち $\bar{h} = (h_1 + h_2)/2$ である。

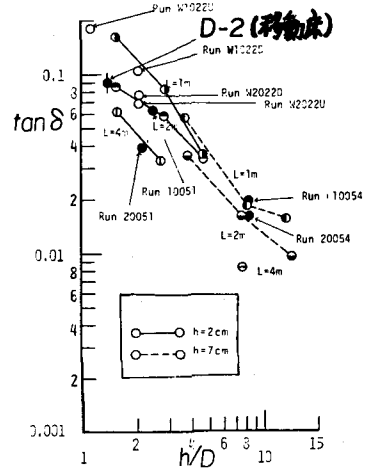


図 22 $\tan \bar{\delta}$ と $D/\bar{h}$ との関係

図では、 $\tan \delta \propto (\bar{h}/d)^{-1}$ (1) の関係が明らかであって、連続段落ちの実験値も同一の範囲に含まれ、この関係は Fredsøe⁸⁾ が平均流に斜交する河床突起上の流れについて行った線形解析の結果と一致する傾向である。さらに交互砂州中央部の平均流向も $D = \frac{1}{2} Z_B$ とすれば斜め段落ちの実験値の間に入り、したがって、交互砂州の波高が大きくなれば、それに比例して水流の蛇行が強くなることが推定される。(1) 式の比例係数は L によって変化し、 $L = 1 \sim 4 m$ の間では L が小さい方が大きくなる傾向にある。一方、 $B/\bar{h}$ の相違による $\tan \bar{\delta}$ の変化については、同図上で $B/\bar{h}$ のほぼ等しい実験値が結ばれているが、 $D/\bar{h}$ の重複する区間が短いので明確な傾向は窺えない。これは、一度河床上に交互砂州が形成されると $B/\bar{h}$ が交互砂州の形成条件よりも小さくなった場合でも水流の蛇行は残存することを示唆している。

5. 交互砂州の形成条件と形成過程について

(1) 交互砂州上の流れと斜め段落ち流れとの対応

交互砂州上の流れと斜め段落ち流れとは、これまで検討してきたように、両者で $B/\bar{h}$ および $Z_B/\bar{h}$ あるいは $D/\bar{h}$ がそれぞれほぼ一致する値を持つときに相似な流況が現われ、これらの値のいずれかが懸離れた値をとるときにはかなり異った流況が形成される。これは前縁の平面形状に差異はあるが、両者における水流の蛇行が同一の機構によって生じることを示唆するものと考えられ、後者は前者の単純化模型として前者の基本的な水理特性を十分に表しているものと判断できる。したがって、 $B/\bar{h}$ が前者に一致し、 $D/\bar{h}$ が小さいときの斜め段落ち流れは、形成初期段階の交互砂州上の流れを模擬するものであり、 $B/\bar{h}$ が小さく、 $D/\bar{h}$ が大きいときの流れは短対角州上の流れあるいは交互砂州形成後水深の増大した河道の流れを表すものと考えて差支えないと思われる。

(2) 交互砂州の形成条件と形成初期過程

交互砂州は、種々の波長の直線状の前縁を持った河床擾乱のうち特定の範囲のものが、ある条件下で選択されて発達して形成され、この形成条件の支配パラメーターは B/h および h/d である。⁹⁾砂州の発達、水流の擾乱に基因する流砂量の不均衡が持続されて生じ、一般にその擾乱は河床の擾乱によってもたらされると考えられている。したがって、河床擾乱に基く水流の擾乱が上層の一樣流によって河床近傍に限定される場合には、それによって平面的な流砂量の不均衡が維持されるとは考えにくい。

さて、交互砂州の形成初期にみられる河床擾乱は、実験観察によれば周知のように、平均流に斜交する直線状の河床の不連続線であって、斜め段落ちと相似な形状を有する。この不連続線の段差は粒径の2、3倍程度であると考えられるので、形成条件のパラメーター h/d は斜め段落ち流れの D/h の逆数に相当し、 h/d の小さい場合は段差の大きい斜め段落ち流れに対応することになって、 h/d の流況に及ぼす影響はたとえば図22にみられるように大きい。一方、図2によって横断面内の流速分布に及ぼす斜め段落ちの影響をみれば $h_1 \div 7\text{ cm}$ すなわち $B/h_1 \div 7$ の場合の流速分布の擾乱は断面の下部のみに留まり、全体に及んでいないが、 $h_1 \div 2\text{ cm}$ すなわち $B/h_1 \div 25$ の場合では流水断面全体に及んでいるようである。同様の傾向は D/h_1 がそれぞれ0.80および0.43と比較的近いRun 2027およびRun 2012を比較した場合にも当てはまり、このような流速分布の擾乱に及ぼす D/h_1 の効果は二次的であって、 $L=2\text{ m}$ の場合では $B/h \div 25$ のときに河床擾乱の影響が顕著になると考えられる。同様の傾向は $L=4\text{ m}$ の場合にはあまり明確ではないが、 $L=1\text{ m}$ の場合にはより顕著になるようであって、 $B/h \div 25$ のときには $L/B=2\sim4$ の河床擾乱の影響が卓越すると判断される。しかし、この場合も h/d が相当に大きいすなわち初期擾乱の D/h がかなり小さいときには斜め段落ち流れの特性は現われにくい。

以上のように、 h/d が適当な値を持ち、 B/h が25前後であれば、移動床では $L/B=2\sim4$ の擾乱に対応した河床形態が形成されていく可能性が高く、実際 $L/B=2\sim4$ は交互砂州の発達初期に最も出現頻度の高い無次元波長 $\ell_w/B=2\sim4$ に対応している。このような波長の選択が行われた後に交互砂州は発達し、砂州上の流れは D/h の大きい斜め段落ち流れに対応して、横断方向流速の大きい流況を示すようになるが、この砂州の発達過程¹⁰⁾については、流況と土砂の移動状況との関連を明らかにしていく必要がある。

6. あとがき

交互砂州上の流況が水利条件や砂州形状の異った場合にどのように変化するかを知るために、斜め段落ちを交互砂州の最も単純な模型と考えて広汎な実験を行い、種々の知見を得てその結果に基いて、交互砂州の発達した後は水深が増大して交互砂州の形成条件が満されなくとも蛇行流が残存し、交互砂州の形成初期過程では $L/B=2\sim4$ に対応する形状の砂州が卓越する可能性を指摘した。今後、こうした蛇行流の特性を河岸侵食機構に導入して、その河道の安全に及ぼす影響の定量的評価についての考察を予定している。

最後に、本研究を進めるにあたり終始熱心に適切な指導をして下さった村本嘉雄教授、実験の遂行と資料整理に尽力してくれた堀池周二君（京都市）と小池剛君（本学大学院学生）に謝意を表する次第です。

参考文献

- 1) 木下良作：第14回水工学シリーズ，1978.
- 2) 芦田和男・塩見靖国：京大防災研年報，第9号，1966.
- 3) 井口昌平：東大生産研報告，Vol. 14，1965.
- 4) 鮎川 登：科学技術庁資源調査所，1971.
- 5) 村本嘉雄・藤田裕一郎：京大防災研年報，第19号，1976.
- 6) 村本嘉雄・藤田裕一郎：京大防災研年報，第21号，1978.
- 7) Allen, J. L. R. : Current Ripples, North Holland Publishing Co. 1968.
- 8) Fredsøe, J. : Jour. of Fluid Mech., Vol. 66, Part 1, 1974.
- 9) 村本嘉雄・藤田裕一郎：京大防災研年報，第20号，1977.
- 10) 藤田裕一郎・村本嘉雄・堀池周二：第34回年講，1979.