

河床波上の流れの三次元構造

宇 民 正・上 野 鉄 男

STRUCTURE OF THE FLOW OVER SAND RIPPLES

By *Tadashi* UTAMI and *Tetsuo* UENO

Synopsis

Techniques of flow visualization are used to make clear the three dimensional structure of the flow over ripples. Sterographs of the flow over ripples, pictures of the flow in the longitudinal cross-sections and pictures of the flow patterns on the water surface are obtained by using the moving cameras or the fixed cameras.

For the flow over ripples, the slant spiral flow which occurs in the rear side of ripples plays an important role in sediment transport. So, in this paper, attention is payed on the movement of the slant spiral flows in examinining the structure of the flow over ripples.

On the basis of the data and the pictures obtained, the model on the three dimensional stucture of the flow over ripples are proposed, in which the relation among a slant spiral flow, an upflow, a down flow, a secondary flow and bed configulations is made clear.

1. 概 説

移動床流れにおける抵抗特性・流砂量特性・河床形態特性および流れの構造の特性は相互に対応関係をもっており、それらのうちの一つの解明はその他の諸特性の解明に役立つであろう。本報告は、小規模河床形態の中でもとりわけ形状の三次元性が強い砂漣上の流れの構造について主として流れの可視化の手法を用いて観察した結果を示したものである。

河床波上の流れの構造に関する初期の研究としては、局所的に生じる渦がボイルに発展する様子を記述した Matthes¹⁾の研究があるが、これはどちらかといえば砂堆上の流れを対象としている。砂漣上の流れの構造については Blasius²⁾, Znamenskaya³⁾ および Allen⁴⁾の研究がある。とくに Znamenskaya は局所的な深掘れ部分の不安定な渦構造に注意を払っている。Allen は人工的に作った三次元的な河床波上の流れの構造をその河床面における流況から堆察している。

以上の研究はいづれも河床波上の流れの特徴を定性的に記述したものであるが、Raudkivi⁵⁾は人工の二次元河床波上の流れの乱れ特性・剪断応力特性等について詳細な実験的検討を行なった。同様な検討は今本・上野⁶⁾によってもなされている。さらに板倉・岸⁷⁾は二次元的な人工河床上の流れに生じるボイルの特性を乱れのスペクトル特性の面から検討している。これらの研究もやはり単純化された形状の砂堆河床上の流れを取扱っていると見做される。

一方上野⁸⁾は、幾何学的な境界条件が二次元的な河床形状の上の流れでもその構造は三次元的となることを示した。また木下⁹⁾は人工の三次元的なうろこ状河床の上の流れを詳細に観察し、その三次元的な構造を明らかにした。

著者^{10), 11)}らは、砂漣を砂堆から現象論的に区別するものは、斜めらせん流が流砂機構の中で支配的であるか否かであることを見出し、砂漣の発達過程の中で果す斜めらせん流の重要な役割を指摘した。斜めらせん流というのは砂漣河床に局所的な深掘れを形成する渦運動であり、その軸が一般に主流流下方向と一定の傾きをもっていることから著者らはこう呼んでいるものである。斜らせん流の存在は既に Znamenskaya³⁾

により指摘されている。またその果す役割については、木下⁹⁾は二次流との関わりにおいて、また池田¹²⁾は浮遊砂との関わりにおいてその重要性を指摘している。

本研究においても、現象把握の一つの鍵としてこの斜めらせん流に注目して観察を進めることとした。

2. 実験方法と実験条件

2.1 実験方法

移動床流れでは文字通り河床が刻々に変化するので、固定点計測法は意味をなさない。したがって流れの可視化の手法が現象把握のための有力な手段となる。その方法による場合でも、次のような制約がある。すなわち、第一に局所的な深掘れの中の流況や高い河床波の裏側の流況を側方から観察することは制約されている。第二に撮影された結果は瞬時の現象をとらえたものであり、それがどれほど現象全体を代表しているかを推測することが困難である。第三に水面を通して上方から流況を撮影する場合には、河床に黒い色を塗ることができないので、トレーサーと河床とのコントラストが悪くなり、またトレーサーの位置の読み取りにも困難を伴う。以上の諸事項を考慮した結果、本研究では刻々に変化する移動床河床波上の流れの各瞬間の様子を可視化する方法、ならびに同様の水理条件の下で形成された河床波を固定し、その上の流れを繰返し可視化する方法を並用することにより現象把握の精度の向上を図ることにした。

(1) 移動床河床波上の流れの観察

移動床上の流れの観察のためには先に述べた色々の制約が伴うが、結局水路の真上に二台のカメラを上下流方向に15cm離して並べて置き、流れの状況を立体撮影する方法を用いることにした。トレーサーとしては直径1～3mmの球状のポリスチレン粒子を蛍光塗料で着色したものをを用い、それが流下する様子を紫外線ランプで照明することにより撮影した。移動床の場合には河床に黒色塗料を塗ることができないので、可視光線でトレーサーを照明すると河床面にも光が当たって照し出されるため、トレーサーと河床面とのコントラストが悪くなる。紫外線ランプを用いた上記の方法によりこのような障害を除去することができた。トレーサーとしては、その密度が水の密度より小さなものから大きなものまでいろいろなものが得られた。ここの三次元流況写真においては、河床近傍の流況を重視したので水の密度より僅かに大きい密度をもつトレーサーを選り出して用いた。写真画面の上で複数のトレーサーが交錯して識別が難しくなることをさけるため、トレーサーの着色には数種の色を用い、カラーフィルムを用いて撮影した。また、得られた写真から流速の目安を得るために、軸対象位置に二つの孔のあいた円板を写真機のレンズの直前で毎秒12回転ほどの速さで回転させることにより視野を周期的に巡った。このようにして得られた写真の一例が **Photo. 1** に示されている。

同じ撮影装置を用いて水面流況の撮影も行なった。この場合には、水の密度より僅かに小さい密度のトレーサーを選り出して用いた。このようなトレーサーの流下の模様を一定速度で移動するカメラで流し撮りした。

(2) 固定された河床波上の流れの観察

ある一定の水理条件の下で形成された移動床河床波を、その上にセメントを撒いて固定した。固定された河床波の上の流れについて、その各縦断面および水面における流況の平面写真ならびに全水深にわたる流況の立体写真を繰返し撮影した。縦断面および水面の流況の撮影のためには、トレーサーとして直径0.1～0.3mmの球状のポリスチレン粒子を用い、当該断面あるいは水面をスリット状光線で照明することにより撮影を行なった。トレーサーは水と共に循環させられている。撮影方法としては、固定されたカメラで撮影する方法および一定速度で移動するカメラで流し撮りする方法の二種類の方法を用いた。立体写真の方法は、先に述べた移動床上的流れの撮影方法と同じである。

2.2 実験条件

実験水路は幅40cm、長さ8mの木製水路で、そのほぼ中央部1mにおいては、側方からの水流の観察が

Table 1. Experimental conditions

	Discharge (l/s)	Width (cm)	Slope	Grain Size (mm)	Mean Depth (cm)	Bed Condition
Case A	6.0	40	0.002	0.53	6.6	Movable
Case B	5.2	40	0.002	0.29	6.3	Movable
Case C	6.0	40	0.002	0.29	6.8	Fixed

可能なように、あるいは側方からの照明が可能なように、側壁板が透明の亚克力樹脂板でできている。河床砂としては平均粒径が 0.29 mm の砂と 0.53 mm の砂の二種類を用いた。実験は砂漣の上の流れを対象として行なわれた。上野¹¹⁾による傾域区分図を参考にして、砂漣の生じる水理条件として水路勾配 $1/500$ 、流量 $5\sim 6\text{ l/s}$ を採用した。具体的な実験条件は **Table 1** に示すとおりである。

3. 移動床河床波上の流れの構造と河床波形状

移動床流れでは河床波が刻々と変化し、発達してゆくので、その上での流れの構造も同じものは二度と起らないと言える。また、ごく短時間に限ると河床形態は変化しないと見なせるが、同じ河床形状のもとでも流れが激しく変化する上に、投入されたトレーサーの水中での分布状態がその都度変化するので、写真に撮られる流れの状態は一コマ毎に異なったものとなる。ここでは、写真としては一コマ毎に異なっているものの、流れの運動として共通する特徴を有しているものを見出し、それを指摘することとした。

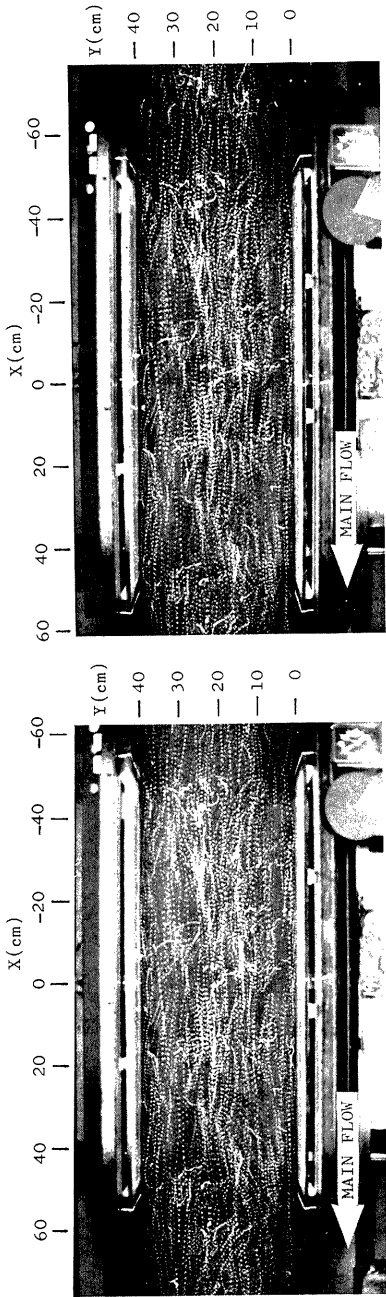
移動床流れの実験は、使用砂の平均粒径 (d_m) 0.53 mm 、流量 (Q) 6.0 l/s 、河床勾配 (I) $1/500$ の場合 (Case A) と d_m が 0.29 mm 、 Q が 5.2 l/s 、 I が $1/500$ の場合 (Case B) の2種類の実験条件のもとで行われた。

3.1 移動床河床波上の流れの可視化

Photo. 1 は Case A の三次元流況の撮影例であり、上下流方向に 15 cm 隔てて設置された2台のカメラのうち (a) は下流側のカメラで、(b) は上流側のカメラで撮影されたものである。これらは通水開始後 100 分経過したときの流況であり、このときの河床の状況を **Photo. 2** に示すが、河床波は波高、波長とも十分に発達した状態にある。**Photo. 2** において、河床波の前面が二段になっているところが数箇所にとわって認められるが、それらの下流側の段はいずれも水路横断方向とかなりの角度を持っており、この下流側の段に接してその下流側で斜めらせん流の発生が観察された。斜めらせん流の実態は **Photo. 1** においては3箇所で見えられており、それらは写真に示されているような (X, Y) 座標にして ($-10\text{ cm}, 28\text{ cm}$)、($48\text{ cm}, 20\text{ cm}$) および ($55\text{ cm}, 10\text{ cm}$) の位置にある。また、これらの位置は **Photo. 2** において、斜めらせん流による深掘れが認められる場所である。これらの写真を実体視して上記の3箇所をよく観察すると、これらの場所ではトレーサーが流下方向と斜交する軸を持つらせん運動をしていることが明瞭に認められる。また、河床もこのような斜めらせん流によって洗掘されつつある状態にあることがよくわかる。

Photo. 1 の座標が ($48\text{ cm}, 20\text{ cm}$) の部分では、斜めらせん流の流況が特別に把握されているので、写真を拡大してさらに詳細に観察した。その結果、斜めらせん流の回転径が 3.6 cm 、斜めらせん流の河床面近くの流速が約 19 cm/s 、斜めらせん流に導入されたトレーサーの上流側での流速が約 32 cm/s 、斜めらせん流内を流れる軸方向流量が約 0.2 l/s という数値が得られた。一方、この時点での流れの状態は、水深が 6.6 cm 、断面平均流速が 22.7 cm/s 、水面でのトレーサーの平均流速が 32.3 cm/s であった。

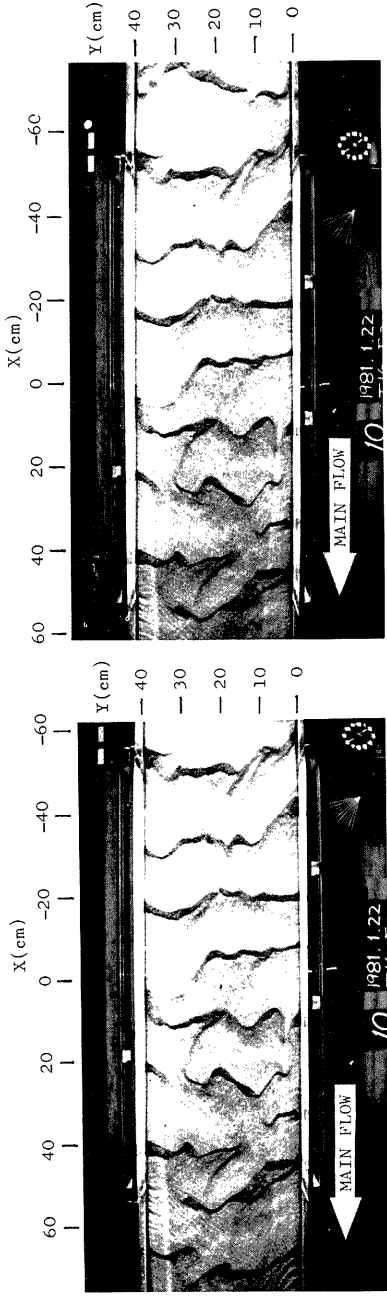
このような結果をもとにして、流れの状態を考察するとつぎのようになる。斜めらせん流を構成する流れは主流部分から供給されており、そのために主流の持つ大きな運動量が河床のごく近くにまで運搬されることになる。その結果、斜めらせん流による河床の洗掘・砂粒の運搬は激しくなる。このような流れの機構は河床波の後流域に形成される死水域の流れとは構造を全く異にしている。砂漣河床の場合にはこのような特



(a)

Photo. 1 Stereographs of the flow over sand ripples (Colour film, ASA 400, T 0.5 s, F 2.0).

(b)



(a)

Photo. 2 Stereographs of the bed form of sand ripples (Colour film, ASA 400, T 0.5 s, F 2.0).

(b)

別な働きを有する斜めらせん流が河床波の発達に支配的な役割を果たしているのである。

つぎに水面近傍の流れについて検討する。**Photo. 3** は *Case B* の水面近傍の流況の撮影例である。上下流方向に 15cm 隔てて設置されたカメラのうち、(a) は下流側のカメラで、(b) は上流側のカメラで同時に撮影されたものであり、カメラを搭載した台車の移動速度は 32.3 cm/s であった。これらの写真は、通水後約 1 時間経過した時の流況を示しており、河床波の発達はほぼ平衡に達した状態にある。

Photo. 3 において注目されるのは、(X, Y) 座標にして (47 cm, 10 cm) の位置にある水面近傍での湧昇流の実態である。これらの写真を実体視することにより、上記の部分ではトレーサーが下方から上方へと移動し、水面に達してからはそれらが放射状に広がってゆく様子が認められる。このような水面近傍の流況は、*Case A*、*Case B* とも 2 時間通水を継続しながら 10 分間隔で撮影された。これらの写真から求められる湧昇流の水面での空間的広がりや速度は同じ水理条件のもとではほぼ似通った値をとっている。すなわち、*Case A* の場合には湧昇流の水面での広がりには 7.3~8.3 cm、トレーサーの広がる速度は約 5 cm/s となり、*Case B* の場合にはその広がりには 5.8~7.8 cm、その速度は 4~5 cm/s となっている。また、後述の固定された河床波上の流れの縦断面流況を撮影した **Photo. 8 (c)** の写真から、湧昇流が水面で放射状に広がってゆく運動は水面下 1.0~1.5 cm 程度にまで及んでいることがわかる。これらの結果から水面に到達する湧昇流に伴う流量を求めると、*Case A* では 0.12~0.18 l/s となり、*Case B* では 0.09~0.14 l/s となる。これらの値は、全流量の 2~3% に当る。

3.2 河床の縦断面形状の経時変化

Fig. 1 は *Case A* における $Y=13$ cm, $Y=16$ cm, ならびに $Y=19$ cm の三つの河床縦断面形状の経時変化を示したものである。図で、右側の数字は通水開始後の経過時間を示している。これらの断面の中に斜め

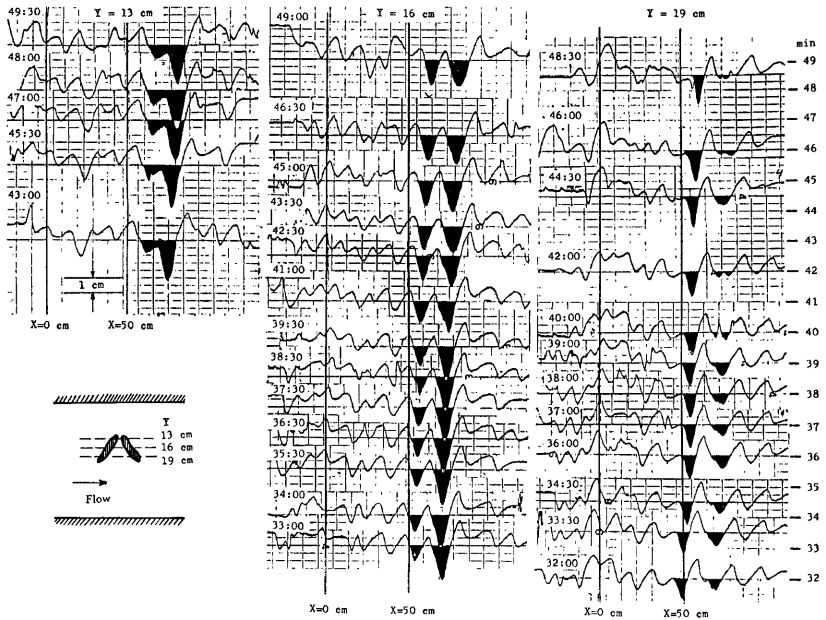
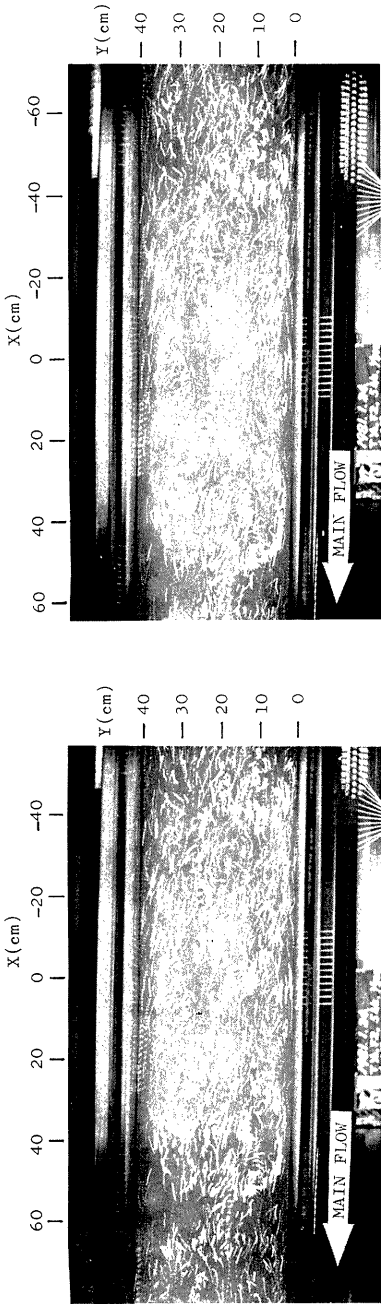


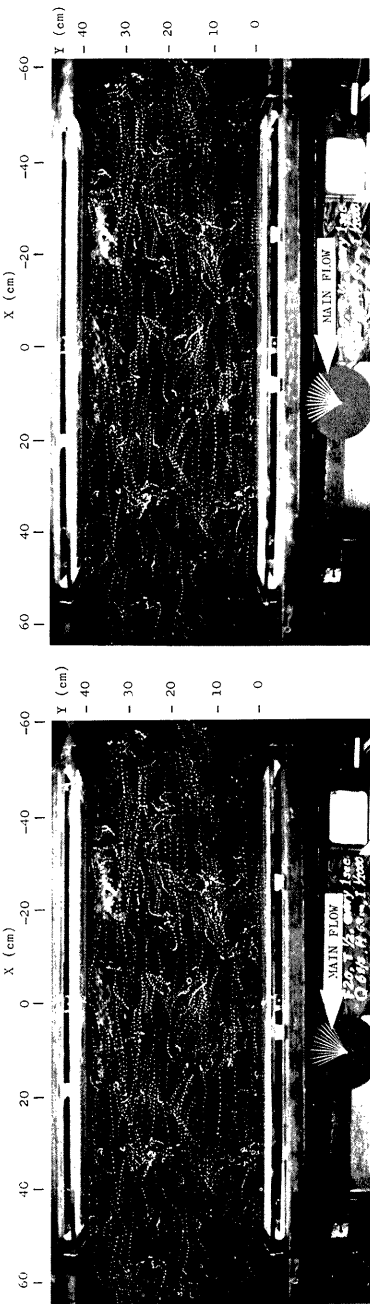
Fig. 1. Time variation of bed forms in longitudinal cross-sections.



(a)

Photo. 3 Stereographs of the flow patterns near water surface (Colour film, ASA 400, T 0.5 s, F 2.0).

(b)



(a)

Photo. 4 Stereographs of the flow over fixed sand ripples (Example 1, Tri X film, ASA 400, T 0.5 s, F 2.0).

(b)

らせん流による深掘れ孔が二つ捉えられており、その部分は図では黒く塗りつぶされている。この斜めらせん流の概略的な平面的配置が図の左下に示されている。

本図から、斜めらせん流が河床の局所的な深掘れに強く寄与していることがあらためて指摘される。また上流側の斜めらせん流による深掘れは、経過時間44分30秒における $Y=19\text{ cm}$ 断面で最も深くっており、その地点より洗掘孔に沿って下流側ほど広く浅くなっている。一方、下流側の斜めらせん流による洗掘孔は、経過時間45分30秒における $Y=13\text{ cm}$ の断面で最も深く、やはり洗掘孔に沿って下流側へ行くにつれて幅広く浅くなっていることがわかる。

つぎに、洗掘孔の下流側の土砂の堆積状況を見てみると、 $Y=16\text{ cm}$ の縦断面においては斜めらせん流による局所洗掘孔より下流側では河床はほとんど堆積も洗掘もなしに下流側に平行移動している。一方、 $Y=13\text{ cm}$ および $Y=19\text{ cm}$ の縦断面においては、斜めらせん流による局所洗掘孔より下流側で堆積が進行していることがわかる。これらの観察結果ならびに目視観察結果から、斜めらせん流は土砂を斜め下流側により多く流送させながら、それによる洗掘孔を徐々に下流側へ移動させてゆくことがわかる。

4. 固定された河床波上の流れの構造

平均粒径 0.29 mm 、水路幅 40 cm 、流量 6 l/s 、勾配 $1/500$ なる水利条件 (Case C) の下で生じた砂澁をセメントで固定し、その上の流況を可視化法により観察した。そのときの水深は平均して 6.8 cm であった。

4.1 河床面上の流況

Fig. 2 に実測に用いた河床波の平面形状ならびに河床面上における流況のスケッチを示す。本図で黒く塗った部分は河床波の前縁の斜面、矢印は河床面上における流向、点を施した部分は死水域をそれぞれ示して

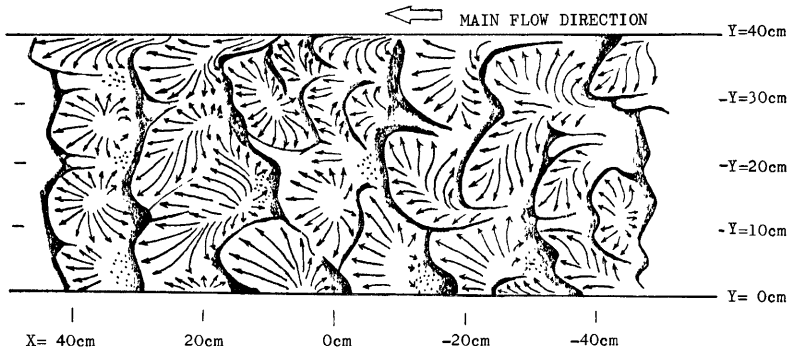


Fig. 2. Bed form of the fixed sand ripples and stream lines on the bed.

いる。一連の流向が主流と逆方向になるまでまきこんでいる部分は斜めらせん流の存在を意味している。また、流れが発散している部分は洗掘部分、収束している部分は堆積部分に相当している。とくに放射状に流れが発散している所ではその直上流にある斜めらせん流の作用によって局所的な深い洗掘孔が発達している。この場合、局所洗掘孔の最深部は流線のよどみ点よりわずかに上流の位置になっている。このことは、斜めらせん流が発達している所で局所洗掘力が最も大きいことを意味している。一方、堆積部分は個々の河床波の前縁および隣り合う二つの河床波が互に接する部分である。後者の部分には二本の相ならぶ縦筋状の河床形状が形成されることが多い。

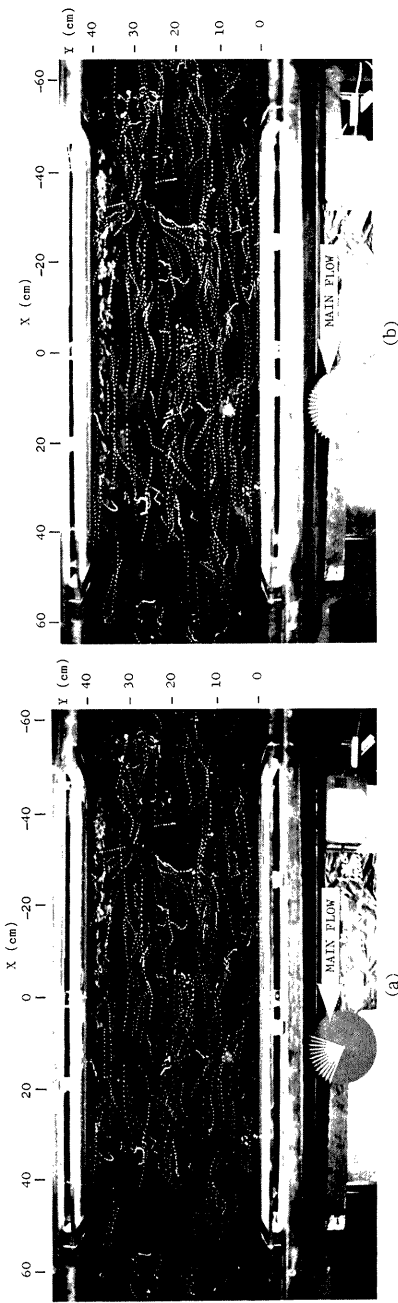


Photo. 5 Stereographs of the flow over fixed sand ripples (Example 2, Tri X film, ASA 400, T 0.5 s, F 2.0).

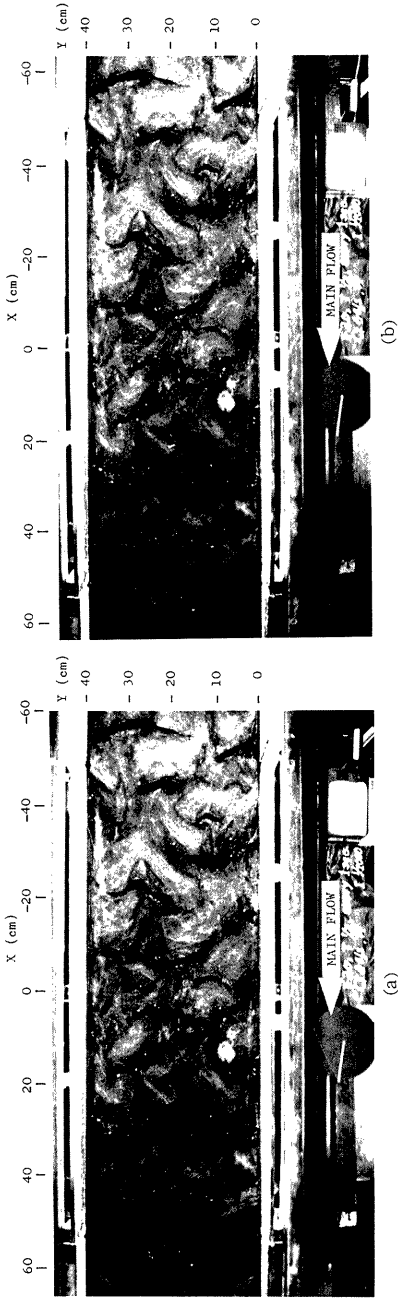


Photo. 6 Stereographs of the bed form of fixed sand ripples.

(X, Y) 座標にして ($-30\text{ cm}, 5\text{ cm}$) の所ならびにその周辺, および ($-15\text{ cm}, 4\text{ cm}$) の所ならびにその周辺には比較的大きな死水域が存在している。これらの死水域はそれらの直上流にある波高の大きな河床波の後流域に対応したものであるが, ここでは斜めらせん流は生じていない。ここでは, 以前に斜めらせん流が生じて局所的な深掘れができていたが, その後その上流側の河床波が伸びてきたため, その河床波の相対的な高さが大きくなり, 同時に斜めらせん流も消滅したものと考えられる。

4.2 河床波上の流れの三次元構造

移動床上の流れの三次元流況の撮影装置ならびにトレーサーを用いて, 固定された河床波上の流れの三次元流況の実体写真撮影を行なった。得られた結果のうち典型的な二組の実体写真を **Photo. 4** および **Photo. 5** に示す。これらの写真によると, (X, Y) 座標にして ($-27\text{ cm}, 20\text{ cm}$) の位置に強大な斜めらせん流が認められ, さらに ($5\text{ cm}, 5\text{ cm}$) の位置および ($25\text{ cm}, 20\text{ cm}$) の位置にもそれほど強大ではないが斜めらせん流の存在が認められる。この場合における河床形状を示している **Photo. 6** を実体視して, これらの位置における河床形状を見てみると, その何れにおいても **Fig. 1** に示されたような局所的な流れを伴う独特の河床形状が認められる。**Photo. 4** および **Photo. 5** によると, 斜めらせん流内の流速が $10\sim 15\text{ cm/s}$ に達していることがわかるが, このように断面平均流速 22 cm/s の $45\sim 68\%$ にも達する流速が河床のごく近傍で生じることからも, 上記のような局所的深掘れが引き起こされることが背ける。

とくに ($-27\text{ cm}, 20\text{ cm}$) の付近の斜めらせん流に注目すると, 斜めらせん流の始点付近では主流が急激に下降して斜めらせん流に向っており, 斜めらせん流を構成する流体は主流から供給されていること, 斜めらせん流の始点付近では下降流が形成されることがあらためて認められる。一方斜めらせん流の末尾に相当する ($-23\text{ cm}, 14\text{ cm}$) 付近ではこの斜めらせん流による横断方向の流れと ($-27\text{ cm}, 7\text{ cm}$) 付近の斜めらせん流による横断方向流れとが衝突して強い湧昇流が広範囲に形成されている。斜めらせん流による横断方向の流量は $0.10\sim 0.15\text{ l/s}$ で全流量の $1.5\sim 2.5\%$ に相当しており, 斜めらせん流の始点付近での下降流, 末尾付近での湧昇流の形成に寄与している。従ってもし斜めらせん流が規則的に配置されるならば, 流れの中に安定した二次流が形成されることも予想される。

一方 ($55\text{ cm}, 26\text{ cm}$), ($-15\text{ cm}, 5\text{ cm}$), ($30\text{ cm}, 5\text{ cm}$) および ($30\text{ cm}, 26\text{ cm}$) の各位置に死水域の存在が認められる。この域内での流体運動は緩慢で平均流速は 0 から数 cm/s の程度であり, 死水域と主流との流れの交換も偶然的である。このような流速が河床の洗掘をもたらすには不充分であるにもかかわらず, これら死水域が局所的な深掘れを伴っていることがある。これは, この位置に以前に斜めらせん流があったそれが深掘れを形成したものと考えられる。

以上のように, 同じ河床波後流域での流体運動でも斜めらせん流と死水域とではその構造も役割も全く異なっており, とりわけ斜めらせん流は河床の洗掘, 土砂運搬, 湧昇流・下降流の形成などに重要な役割を果すことが認められる。

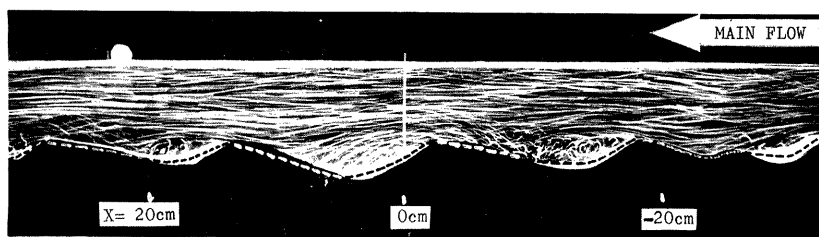
4.3 縦断面内の流況

(1) $Y=1.7\text{ cm}$ 断面

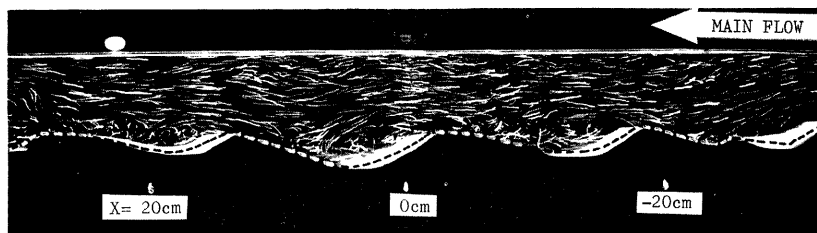
$Y=1.7\text{ cm}$ の縦断面内の流況を可視化した結果を **Photo. 7** に示す。本写真において (a) は固定されたカメラから撮影したものであり, (b) は速度 16.7 cm/s で移動するカメラからいわゆる流し撮りの方法を用いて撮影したものである。皸線は河床の縦断形状を示している。

Fig. 2 に示されている河床面上での流況と対応させると明かなように, 本写真の $X=5\text{ cm}$ の所の局所洗掘孔周辺の流況は斜めらせん流の始まり (上流端) の状況を示している。ここでは流線は下降流を形成して河床波の背面に衝突し, その一部が斜めらせん流の方へまきこまれてゆく。河床の最深点は, 水流が河床に衝突する点より若干上流側となっており, 斜めらせん流の洗掘力の大きさを示している。

一方 $X=20\text{ cm}$ の所の洗掘孔は斜めらせん流の下流端に相当しており, 斜めらせん流の断面を示すいくつかの渦運動が観察される。これら渦運動の再付着点に相当する所には写真に見られるような局所的な上昇流

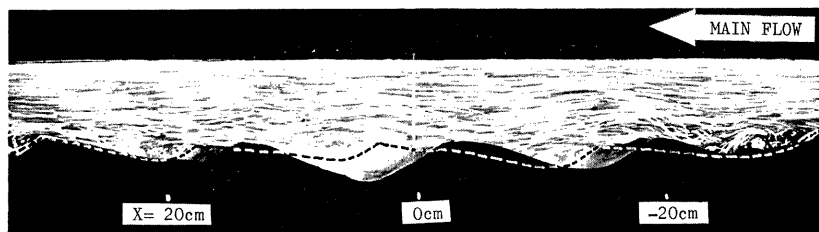


(a) Picture by the fixed camera (Tri X film, ASA 400, T 1/4 s, F 2.8)

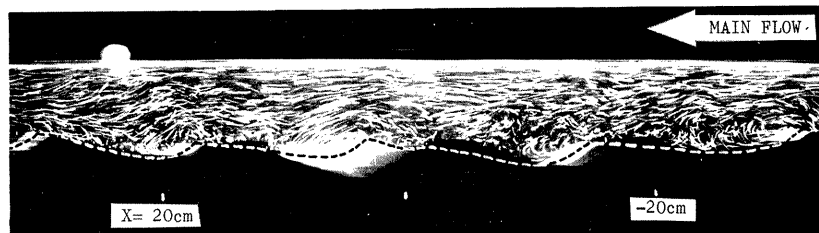


(b) Picture by the camera moving with the velocity of 16.7 cm/s
(Tri X film, ASA 400, T 1/8 s, F 5.6).

Photo. 7 Flow patterns in the longitudinal cross-section $Y=1.7$ cm.



(a) Picture by the fixed camera (Tri X film, ASA 400, T 1/8 s, F 2.8).



(b) Picture by the camera moving with the velocity of 16.7 cm/s
(Tri X film, ASA 400, T 1/8 s, F 2.4).

Photo. 8 Flow patterns in the longitudinal cross-section $Y=6.4$ cm.

がたまに生じている。

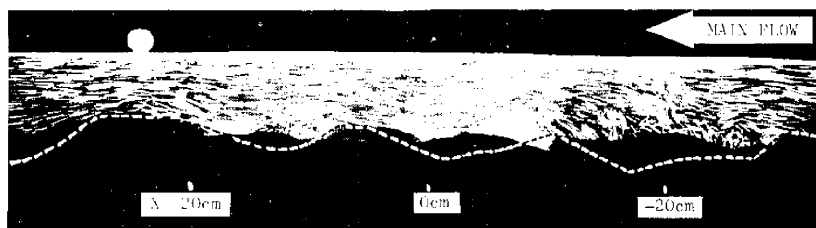
$X = -15 \text{ cm}$ の所の洗掘孔は、先に述べたように、斜めらせん流による洗掘孔がその上流側の河床波の前進により埋戻され、斜めらせん流は消滅して単なる死水域として残っているものである。このような死水域の再付着点あたりからも局所的な上昇流が渦をまくような形で生じているのが認められる。

(2) $Y = 6.4 \text{ cm}$ 断面

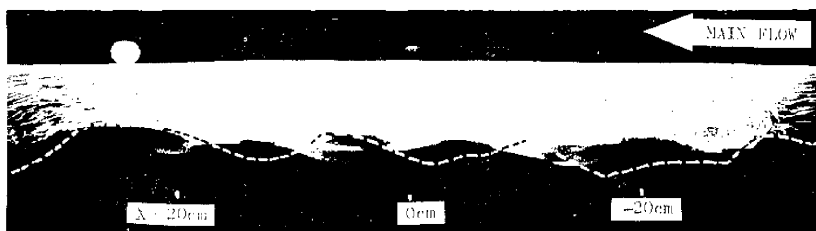
$Y = 6.4 \text{ cm}$ の縦断面写真を **Photo. 8** に示す。このうち (a) は固定されたカメラから撮影されたものであり、(b) は速度 16.7 cm で移動するカメラから流し撮りしたものである。側壁面近くの河床波に妨げられて見えにくくはあるが、 $X = 5 \text{ cm}$ 付近および $X = 20 \text{ cm}$ 付近の河床近くに斜めらせん流の断面を示す渦運動が見られる。一方 $X = -10 \text{ cm}$ 付近および $X = -25 \text{ cm}$ 付近の洗掘孔は死水域となっている。この死水域の再付着点の $X = -20 \text{ cm}$ 付近で局所的な上昇流がたまに生じるのが観察された。その様子は **Photo. 8 (a)** にとらえられている。

(3) $Y = 13.4 \text{ cm}$ 断面

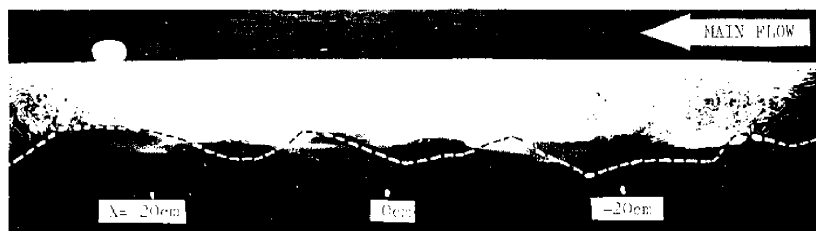
$Y = 13.4 \text{ cm}$ の縦断面内の流況の写真を **Photo. 9** に示す。このうち、(a) は固定されたカメラから撮っ



(a) Picture by the fixed camera (Tri X film, ASA 400, T 1/15 s, F 2.4).



(b) Picture by the camera moving with the velocity of 16.7 cm/s (Tri X film, ASA 400, T 1/8 s, F 2.4).

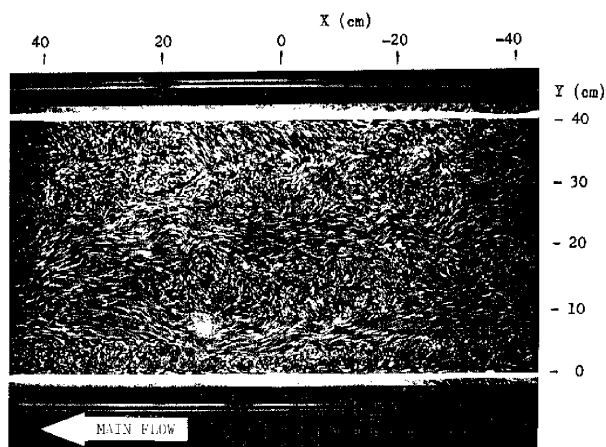


(c) Picture by the camera moving with the velocity of 25 cm/s (Tri X film, ASA 400, T 1/8 s, F 2.4).

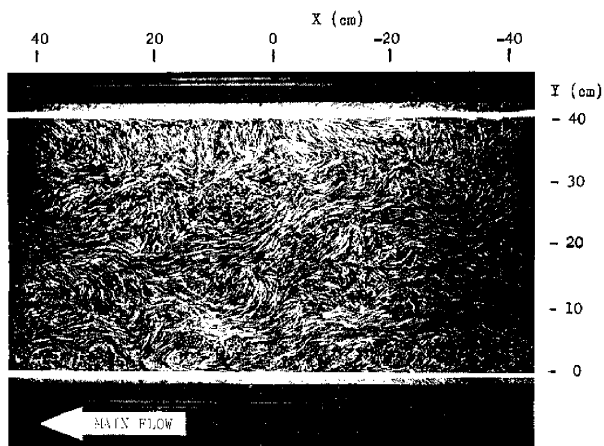
Photo. 9 Flow patterns in the longitudinal cross-section $Y = 13.4 \text{ cm}$.

たものであり、(b)は 16.7 cm/s の速さで移動するカメラから流し撮りしたもの、(c)は同じく 25 cm/s の速度のカメラから流し撮りしたものである。

この断面における流況写真において、 $X = -30\text{ cm}$ から -10 cm にかけて湧昇流が共通して観察された。この湧昇流はその発生領域が広範にわたっており、またほとんど絶えることなく発生している。Fig. 2の河床面上の流況を見ると、ここでは相隣る二つの河床波が接する部分に相当しており、河床面近くで収束する流線が湧昇流を形成するものと考えられる。また(c)は断面平均流速に近い速度のカメラから流し撮りしたものであるが、この写真から、水深規模の流れの交換が存在していること、および、先にふれた湧昇流は水面に達した後水平方向に広がる様子を示しているが、その広がる厚みは水面下 $1\sim 1.5\text{ cm}$ 程であることがわかる。



(a) Example 1



(b) Example 2

Photo. 10 Flow patterns near water surface (Tri X film, ASA 400, T $1/4\text{ s}$, F 2.8).

4.4 水面近傍の流況

Case C の実験条件の下で、水面近傍の 1 cm ほどの厚さの部分のスリット状の光線で照明し、水路上方に据付けられたカメラで水面近傍の流況を撮影した。トレーサーとしては 0.1~0.3 mm の粒径のポリスチレン粒子を用い、これを水に混ぜて水と共に循環させた。得られた写真のうちの一例を **Photo.10** に示す。これらの写真は流下方向に 25 cm/s の速さで移動するカメラにより流し撮りされたものである。水面における流速の平均は 32.5 cm/s であるから、これらの写真でトレーサーの軌跡が長く写っている所は流速が比較的大きい部分であり、トレーサーの軌跡が短かく写っている所は流速が小さな部分である。

流速が大きな部分は曲折はあるが一応帯状に流下方向に連なっているのに対し、流速が小さな部分は不連続的に分布する塊状の領域内に現われている。これは、湧昇流が河床形状に対応しながら断続的に生じているためと考えられる。

次に水面におけるこれらの流況と河床面における流況との相互関連性について検討する。河床面における流況は **Fig.2** に示されているが、ここで流線の発散する所では下降流が、また収束する所では湧昇流がそれぞれ形成されることが推察される。そこで、河床面上の流線の発散部分には網目状の印を、そして流線の収束部分にはたて格子状の印をつけたものが **Fig.3** である。この図と **Photo.10** とを比較してみると、水

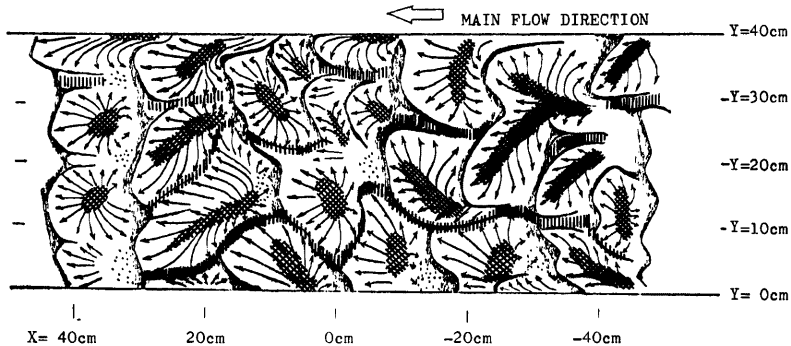


Fig. 3. Convergent region (marked with stripes) and divergent region (marked with lattice) of stream lines on the ripple bed.

面における高速領域は河床面上の流線の発散する領域を概略的に連結するような形になっており、一方水面における低速領域は河床面上の流線の収束する領域とおおよそ一致していることがわかる。以上から、河床面における流線の発散領域、換言すると斜めらせん流の始点から中程にかけての領域はその近辺で下降流をひき起しており、水面においてもそれに近い部分は流下方向流速が速くなること、一方河床面における流線の収束領域では湧昇流がひき起され、水面上のその近くの領域では流下方向流速が遅くなることがわかる。

5. 砂漣上の流れの構造のモデル化

以上述べて来たように、斜めらせん流は河床を深く洗掘しながらその土砂をまき上げ斜め下流方向に流送する。同時に斜めらせん流は湧昇流や下降流を形成する。したがって、河床形状やその上の流れの構造はこの斜めらせん流の強さと配置によって決って来るといえる。ここでは以上に得られた知見に基づいて、斜めらせん流の配置に応じてどのような河床波形状や流れの構造ができるかを概略的にまとめて見た。

5.1 斜めらせん流が一つ孤立してある場合

この場合における河床形状ならびに河床上における流向の概略は **Fig.4** のようである。図で実線は河床

面の等高線を、矢印は河床面における流向を、そして破線は河床面の形状が急激に変化する位置を示している。また、図において上流側へまわりこむような一連の流線群が斜めらせん流を表わしている。

図に示されているように、河床の最深部は流線のよどみ点ではなく、それより若干上流側に生じている。このことは斜めらせん流の洗掘力の強さを示している。河床上を掃流される砂粒はほぼ図の矢印に沿って移動し、さらに斜めらせん流により巻上げられた砂粒は主流により下流側へ運ばれてゆく。

5.2 二つの斜めらせん流が並んである場合

二つの斜めらせん流が並んである場合の中でも典型的な場合として、強さの等しい斜めらせん流が横方向に並んでいる時の河床形状ならびに河床面上の流向の概略を

Fig. 5 (a), (b) に示した。(a) 図のような配列の場合には河床面上の流線が収束する所で堆積が生じ、スリッパのような形の河床波が生じる。河床面上で収束する流れのために、この河床波上では上昇流が形成される。

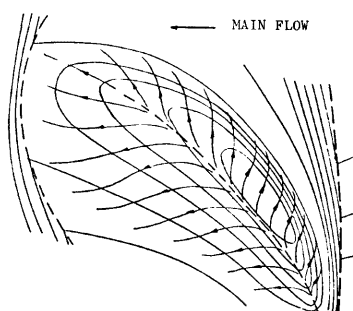
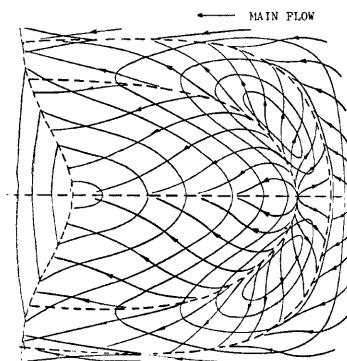
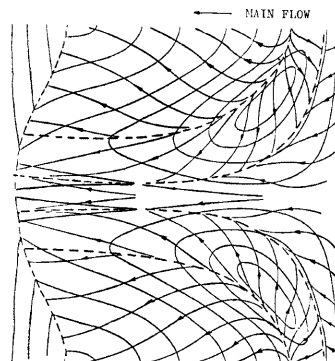


Fig. 4 Bed form and stream lines on the bed due to an isolated slant spiral flow.



(a) Bed form of slipper type.



(b) Bed form of two parallel longitudinal streaks.

Fig. 5. Bed form and stream lines on the bed due to two slant spiral flows arranged side by side.

一方(b)図のような配列の場合には、二つの斜めらせん流の間に流線が収束する線が並列して二本生じ、ここに縦筋状の河床波が二本形成される。ここでの流れの収束は非常に強いため、この縦筋状の河床波の上では強い湧昇流が形成されている。先に **Photo. 9** で示された湧昇流はこのような部分に相当する。

水理条件とりわけ砂粒径により河床形状の特徴は若干異なってくるが、基本的には砂漣河床の形状は上記の三種の基本的な形状の組合わせとして成立っているようである。

5.3 斜めらせん流が規則的に配列されている場合

斜めらせん流の配列状況に規則性を見出すことはかなり困難であるが、ここでは簡単のために、河床波が

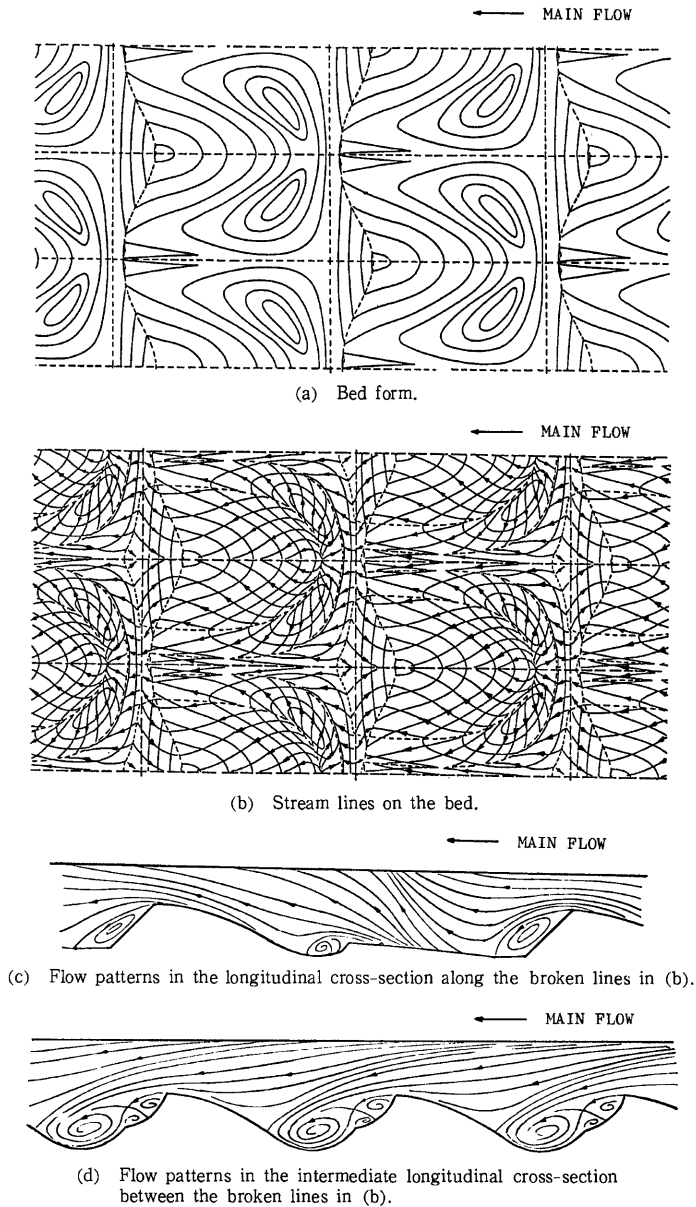


Fig. 6 Bed form and stream lines on the bed due to regularly arranged slant spiral flows.

流下方ならびに横断方向に周期的かつ規則的に配列されている場合について検討する。その場合の河床形状は、その等高線が Fig. 6 (a) のように表わされるものであるとした。

同図 (b) には河床面上における流向の概要を示している。本図で馬蹄型の渦運動が描かれているが、これが斜めらせん流である。この斜めらせん流の中程が河床の局所洗掘孔の最深部に対応している。

同図 (c) には (b) 図の破線に沿う縦断面内の流況を示している。この縦断面内には波高の大きな河床波とそれが小さな河床波とが流下方向に交互に現われる。波高の小さな河床波は、相隣る斜めらせん流の接する部分における縦筋状の河床波に相当し、そこでは河床面近くで収束する流線のために強い湧昇流が形成される。

一方波高の大きな河床波は、斜めらせん流により降下・収束させられたために生じた土砂の堆積を示しており、ここでも流れはゆるい上昇流を形成する。このように、この断面内ではほとんどすべての位置にわたって流向は上向きである。なお、波高の小さな河床波の後流域の小さな回転運動は、斜めらせん流のはじまりを示している。一方波高の大きな河床波の後流域の大きな回転運動は二次元的でゆっくりしたものであり、死水域と見なせるものである。

Fig. 6 (d) には、(b) 図の破線の間における縦断面内の流況を示している。この図における大きな渦運動が斜めらせん流で、それはこの断面のあたりで最も強くなっており、それによる局所洗掘も最も深くなっている。斜めらせん流を構成する流体は主流から供給されており、そのためにこの断面ではほとんどすべての位置で流れは下降流となっている。すなわち、水面近くの大きな運動量をもつ主流の一部が河床面に衝突し、そのうちの一部は斜めらせん流を構成して河床の局所深掘れに寄与し、他の一部は河床波の背面上の掃流砂に寄与する。このような流れの状況は Photo. 7 に示されている。

以上述べたように、(c) 図で示される断面では主として上昇流が生じ、(d) 図で示される断面では主として下降流が生じるため、本図のように河床波が周期的かつ規則的に配列されている場合には、その河床波上の流れには規則的な二次流が生成される。

6. 結 言

小規模河床形態の中でもとりわけ流れの三次元性の強い砂漣上の流れの構造を主として可視化の手法を用いて実験的に解明した。流れの観察にあたっては斜めらせん流の役割に注目した。本研究は、斜めらせん流の発生機構の解明にまで到らなかったで、まだ所期の目的の中ばにしか達していないが、現象理解の基礎となる多くの興味ある現象の写真がえられた。また、斜めらせん流と河床形状、上昇流、下降流、二次流などとの相互関連性が明らかにされた。その具体的内容は 5. に示されている。

本研究を行なうにあたり今本博健教授から有益な助言をえた。また本研究の途上において自由学園の木下良作博士の研究にふれ多くの教示をうけた。末筆ながら深甚の謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Matthes, G. H.: Macroturbulence in natural stream flow, Trans., A. G. U., Vol. 28, No. 2, 1947, pp. 255-265.
- 2) Blasius, Von H.: Über die Abhängigkeit der Formen der Riffeln und Geschiebebanke vom Gefälle, Zeitschrift für Bauwesen, 60, 1910, pp. 466-472.
- 3) Znamenskaya, N. S.: Experimental study of the dune movement of sediment, Soviet Hydrology, Selected papers, No. 3, 1963, pp. 253-275.
- 4) Allen, John R. L.: "Current Ripples", North-Holland Publishing Company, 1968, pp. 284-293.
- 5) Raudkivi, A. J.: Bed forms in Alluvial channels, Jour. Fluid Mechanics, Vol. 26, Part 3, 1966, pp. 507-514.
- 6) 今本博健・上野鉄男: 波状路床上の流れにおける乱れ特性について, 京都大学防災研究所年報, 第16号 B, 1973, pp. 521-531.

- 7) Itakura, T. and T. Kishi: Open channel flow with suspended sediments on sand waves, Third International Symposium on Stochastic Hydraulics, I.A.H.R., 1980, pp. 589-598.
- 8) 上野鉄男：波状路床上の流れの三次元的特性について，京都大学防災研究所年報，第18号 B, 1975, pp. 679-688.
- 9) 木下良作：並列らせん流に関する実験的研究，河道形状と洪水流に関する検討業務報告書，石狩川開発建設部，1977, 135 p.
- 10) 上野鉄男・宇民正・有本俊志：河床波の発生・発達過程に関する実験的研究（2），京都大学防災研究所年報，第22号B-2, 1979, pp. 521-535.
- 11) 上野鉄男：砂れんと砂堆の発生領域について，第25回水理講演会論文集，土木学会水理委員会, 1981, pp. 93-98.
- 12) Ikeda, S.: Suspended sediment on sand ripples, Third International Symposium on Stochastic Hydraulics, I.A.H.R., 1980, pp. 599-608.