

波状路床上の流れの3次元特性について

上 野 鉄 男

ON THE THREE-DIMENSIONAL CHARACTERISTICS OF SHEAR FLOWS OVER WAVY BEDS

By Tetsuo UENO

Synopsis

The three-dimensional characteristics of shear flows over wavy beds are examined experimentally. In order to avoid the difficulty of measurements, experimental conditions are made as simple as possible. That is, measurements are made on the flows with low Reynolds number over channel bed of simplified two-dimensional form.

On the visual study of these flows, it is made clear that turbulent characteristics in the range of low frequency play an important role on the formation of alluvial river beds and the transversal scales of these turbulent lent characteristics are given as the function of Reynolds number of the flow and the ratio of ridge height to water depth.

1. 緒 言

著者は、これまでの研究において、移動床流れにおける乱れの果たす役割を明らかにするための基礎的な知識を得ることを目的として、固定された波状路床上における流れの構造を実験的に検討してきた^{1),2)}。ホットフィルム流速計による乱れ計測および流向検出装置や染料を用いて流況を調べた結果、三角波や櫛を用いた波状路床上の流れの水路中心線上における平均速度、乱れ速度の分布および死水域近傍の流況の平均的な特性が明らかにされた。

しかし、これまでの研究においては、流れの計測は水路中心線上の断面に限られており、この断面上で流況を表わした図³⁾においては平均的に表現された流線が交わるなどの矛盾が発生し、また、現象そのものの実態を把握する上でも多くの不十分さを残すものとなった。この欠陥は、流れの幾何学的な境界条件を2次元的に与えたことに伴って、流れの特性をも2次元的な方法で扱えようとしたことによるものと考えられる。そこで、本研究においては波状路床上の流れの3次元特性を詳細に把握することを目的とした。

しかし、現象を3次元的に把握するための計測は必ずしも容易ではない。そこで、ここでは現象をできるだけ単純化することにより、まず流れの本質を把握することとした。そのために、幾何学的な境界条件としては、円滑な水路床上に直角二等辺三角形という単純な断面形状を持つ櫛を1本だけ設置することとした。また、水理学的な条件としては、低いレイノルズ数を持つ流れにおいて実験を行なった。低レイノルズ数の流れを用いた理由は、その状態での流れは比較的単純な構造を持ち、しかも、その平均的な流れの特性から高いレイノルズ数を持つ流れの低周波数部分の乱れの持つ3次元特性をある程度類推することが可能であると考えたからであり、さらに、この場合には流れの可視化による方法も比較的有利に用いることができるからである。

2. 実験装置および方法

実験は先述の主旨に基づいて低レイノルズ数の流れで行なった。ところで、低レイノルズ数の流れを得るには一般に次の方法が考えられる。

- ① 流速を小さくする。
- ② 水深を小さくする。
- ③ 粘性の大きな流体を用いる。
- ④ 上の3つを適当に組み合わせる。

以上のうち、実測の精度や路床の条件などから、②については一定の制約があるので、ここでは①と③の方法を用いることとした。③の方法による一連の実験(実験1)では限られた実験条件の下で流れの3次元な特性を微視的かつ詳細に把握することに重点を置き、①の方法による一連の実験(実験2)では実験条件をできるだけ多様に変化させて、流れの3次元な特性を表わす巨視的な量について検討した。

i) 実験1: 流体としては粘性を大きくするために水にグリセリンを加えた混合液を用いたが、実験時の動粘性係数 ν は $0.059\text{cm}^2/\text{sec}$ であった。実験は長さ6m, 幅20cm, 高さ15cm, 路床勾配1/500の透明アクリライト樹脂製の直線水路で行なわれた。実験時の流れは下流端をせき上げ状態にして、計測点での水深を4.4cmとしたが、このときの水路中心線上の流速分布はFig. 1に示す通りであって、水深方向に平均した流速 $\bar{U}$ は $6.1\text{cm}/\text{sec}$ である。したがって、水深 H と平均流速 $\bar{U}$ を用いたレイノルズ数 Re は455, フルード数 Fr は0.093となる。

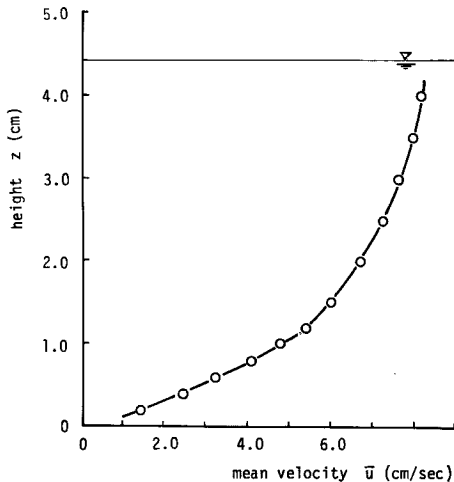


Fig. 1 Distribution of mean velocity.

以上の水理条件の下で、まず高さ1cmの直角二等辺三角形断面を有する棧を水路横断方向に全幅にわたり1本設置した場合(実験1-1)と同じ断面の棧を長さ4cmとして水路横断方向に設置した場合(実験1-2)について実測を行なった。実測は、以上の各場合について、水路の横断方向にかつ水平に張られた長さ8.6cmの白金線(陰極)から水の電気分解によって発生する水素気泡をトレーサに用いて、それを水路の底面と側面から写真撮影するという方法で行なった。

ii) 実験2: 実験は長さ12m, 幅40cm, 高さ30cm, 路床勾配1/500の直線水路で行なわれたが、そのうち長さ2.8mの計測部分は透明アクリライト樹脂で作られており、水路底面および側面からの流況の観測が可能

なようにしてある。流体としては水を用い、また、レイノルズ数を小さくするために流量は $2.0\text{ l}/\text{sec}$ 以下の小さなものを用いることにした。

実験における水理条件としては流量をほぼ0.35, 0.59, 0.80, 1.00, 1.20, 1.44, 1.67および $2.00\text{ l}/\text{sec}$ の8段階に変化させ、それぞれの流量に対して、水路下流端をせき上げることにより、計測点での水深を2, 3, 4, 6, 8および10cmの6段階に変化させた。つぎに、路床形態としては直角二等辺三角形断面を有する金属製の棧を1本水路上流端から6.2mの位置に水路の横断方向にかつ水路幅一はいに設置したのを用いたが、棧高さについては、先に述べた流量と水深の組合せによる48種の水理条件のおおの下で、0.5, 1.0, 1.5および2.0cmの4段階に変化させた。路床近傍の流況は、路床に撒かれた過マンガン酸カリウムが水に溶けて流下する状況を各ケースについて15~20枚づつ水路の上部から写真撮影するという方法で把握された。

3. 棧の後流域内の流れの3次元な機構——実験1——

Photo. 1は実験1-1のもとで、棧の下流側において、棧の頂点からの距離 x がそれぞれ2, 4, 6, 8および10cmの各断面で水路床からの高さ z が0.2cmの位置に水素気泡発生用の白金線電極を水平かつ水路横断方向に設置し、それに5Hzの周波数で電圧をかけたとき発生した水素気泡の流下する状況を水路底面か

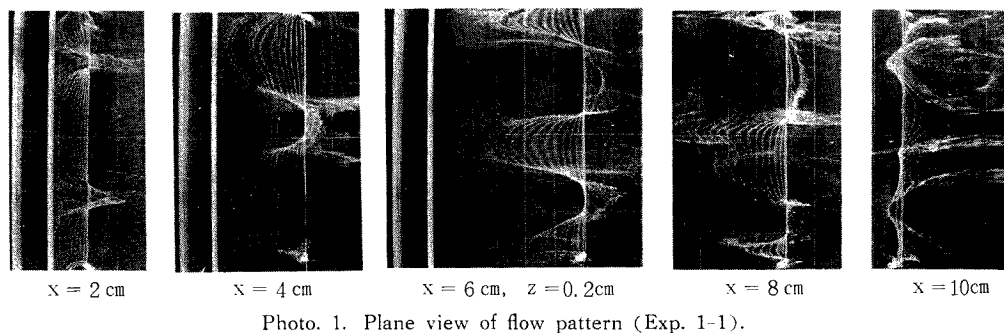


Photo. 1. Plane view of flow pattern (Exp. 1-1).

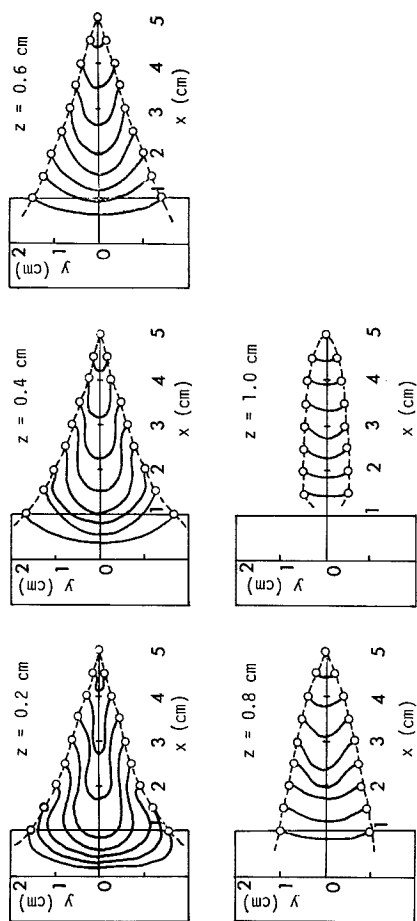


Fig. 2 Expansions of back flows.

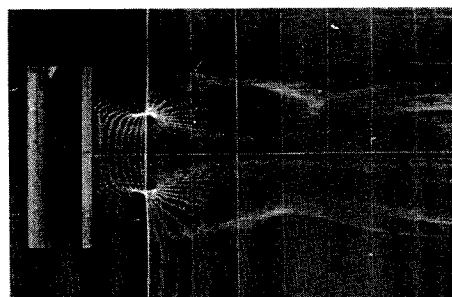
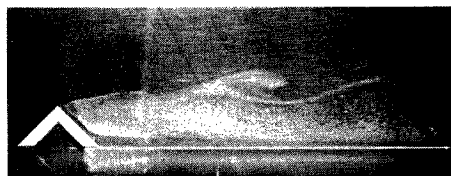
(a) $x = 2.0$ cm, $z = 0.2$ cm.(b) $x = 2.0$ cm, $z = 0.2$ cm.

Photo. 2. (a) Plane view and (b) side view of flow pattern (Exp. 1-2).

ら写真撮影したものである。これらの写真においてとくに注目すべきことは、路床の幾何学的な形状が2次元であるにもかかわらず、流れの模様が棧の長さ方向（水路横断方向）に変化していることである。さらに詳しく現象を検討すると、次の点が指摘される。

- ① 棧の後流域内の $z = 0.2$ cmの平面に含まれる流れには正流域と逆流域とが水路横断方向に交互に存在し

ている。

② 逆流域を構成する流れは、正流域の流れから供給されている。すなわち、水路横断方向のかなり大きな流速成分が存在することが認められる。

③ 棧の頂点からの距離 x が大きくなるほど逆流域の幅は小さくなる。

④ 陰極を $x=10\text{cm}$ より下流に置くと逆流が無くなるという事実から、 $x=10\text{cm}$ 付近にいわゆる reattachment point が生じているものと考えられるが、そこでの流況を示す写真からもわかるように、reatachment point での上昇流の発生する位置は固定したものではなく、時間とともに横方向に変化する。さらに、reatachment point の位置は水路縦断方向にも変化しており、厳密に言うならば、 $x=10\text{cm}$ の位置は reattachment point の下流端位置と表現すべきものである。

⑤ 逆流域の範囲も時間とともに変化するが、隣り合う逆流域の中心間の水路幅方向の距離はほぼ一定しており、その距離はこの場合ほぼ 4cm である。

以上のように、棧を水路の全幅にわたって設置した場合には、逆流域の範囲が時間とともに変化するために、棧の後流域の逆流および上昇流の特性を詳細にわたって把握することが困難である。ところで、隣り合う逆流域の中心間の水路幅方向の距離がほぼ一定で 4cm 程度であるという先の指摘に着目すると、この場合の流況は長さ 4cm の棧を水路中央部に水路横断方向に設置した場合 (実験 1-2) の流れとある程度の共通性を持っていると考えてよいであろう。そこで、次に実験 1-2 について検討する。Photo. 2 の (a) および (b) は、水素気泡発生位置が $x=2\text{cm}$, $z=0.2\text{cm}$ の場合の水路底面および水路側面からの写真撮影結果の一例である。水素気泡の発生周波数は 5Hz である。ここで、(b) は流れの対称面内の流況を示したものであるが、その写真撮影は流れの対称面およびそのごく近傍だけを照らすように、幅 3.5mm のスリットを通して平行光線を水路底面から照射することによって。

Fig. 2 は、Photo. 2 (a) の撮影方法を用い、水素気泡を発生させる高さ z を $0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ および 1.0cm と変え、さらに各高さにおいて棧頂からの距離 x を $1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5$ および 5.0cm とした場合の水素気泡の逆流する平面的な範囲を示したものである。本図と Photo. 2 (a) から次のことが認められる。

- ① 逆流域の幅は下流ほど狭くなっている。
- ② 水路床から遠ざかるほど逆流域の幅が狭くなっている。
- ③ 逆流流速は流れの対称面に近づくほど大きくなっている。

つぎに、Fig. 3 は流れの対称面内の各位置で発生した水素気泡の時間的平均的な痕跡線を、Photo. 2 (b) の方法で写真撮影した結果から求めたものであるが、このような流線模様が流れの対称面内に生じるためには両側方から流れの供給がなければならないことは明らかである。

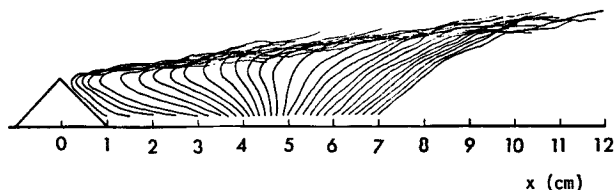


Fig. 3 Flow pattern of central section.

4. 河床波と流れとの相互作用に関する考察

以上の実験は、初めにも断ったように低レイノルズ数の流れについて行なったものであるが、路床の幾何学的な形状が2次的に与えられた場合にも、路床近傍の流れは3次的特性を有し、流況は時間的に変化する

という注目すべき現象が生じることを示している。

ところで、著者は前報²⁾において、流下方向に等間隔にかつ水路横断方向に設置された三角波や棧の上の比較的高いレイノルズ数の流れの水路中心線上の断面における変動特性を観察したが、この場合にも路床の幾何学的な条件が2次元であるにもかかわらず、3次元な特性を持つ流れの発生が認められ、流れの実態を2次元的な方法で把握し、表現することが非常に困難であることが明らかになった。このような路床面上の流れの3次元的な変動特性は低周波数領域における乱れの特性を意味しており、上記の事実は、路床形態と乱れとの相互作用の問題を考えるに際しては、とくに低周波数領域での乱れの特性に注目する必要があることを改めて示している。

波状路床上の流れにおいては、路床近傍において乱れ速度が大きくなることが重要な特徴であり、砂粒の運動もこれと関連づけて考えられてきた。流速変動の一定時間内の連続した計測結果を平均的に処理するという従来の乱れ計測方法は、以上に明らかにしてきた諸事実から、低周波数領域での乱れが河床波の形成に果たす役割を明らかにする上で不十分であることが指摘される。すなわち、移動床流れにおける砂粒の運動は、乱れ速度の大きさと直接的に結びつけられるべきではなく、路床近傍における上昇流そのものの強さや方向、さらには上昇流の発生する範囲や持続時間などといった比較的短時間における平均流の3次元特性および時間変動特性から考える必要があろう。

つぎに、このような3次元特性を有する流れと路床形態の関連を考えると、初期の路床条件がたとえ2次元な場合でも、先述のように横方向に変化を有する3次元な流れが発生し得るわけで、このような流れが3次元な河床形態を発生させる主要な原因となり得るものと考えられる。

5. 水理条件と流れの3次元特性——実験2——

移動床流れを解明する上で、路床の条件や水理条件によってどのような特性を持った流れが発生するかを検討することは非常に重要な課題であるが、本研究においては先述の3次元な特性を持つ流れの水路幅方向の変動スケールに着目して実験を行なった。**Photo. 3**に流量が $1.01/\text{sec}$ （水深 H を長さのスケールにとって表わしたレイノルズ数 Re は2140）の場合の流況の写真撮影例を示す。棧高さ h が0.5, 1.0, 1.5および2.0cmの4通りの路床条件のもとで水深 H を10, 8, 6, 4, 3および2cmとした場合の流況が示されており、流れは写真の左から右へ向っているが、流れの3次元な構造が棧の前面に山形の模様を形成する。この山形の模様および棧近傍での流況について説明する。まず、棧より上流の路床面に撒かれた粒状の過マンガン酸カリウムが水に溶けて流下し始めると路床面近傍は一面赤紫色で覆われる。流れが棧の直上流に達すると、路床面近傍の強い横方向の流れのために、路床面近傍を流下してきた流れは写真に示された山形の模様の境界面に集中して棧を乗り越えて流下することになる。また、このようにして棧を乗り越えて流下する流れのために、棧の下流においては先の**Photo. 1**について述べたような特性が生じるものと考えられる。また、写真の山形の模様が時間とともに変化するとは言うまでもない。写真は棧高さ h が大きくなるほど、また、水深 H が大きくなるほど山形模様の横方向の長さが大きくなることを示しているが、これらがどのような関係にあるかをつきに検討する。

Photo. 3にみられる山形の模様の横方向の各スケールの代表値として、各1枚の写真に現われた山形の模様の横方向のスケールのうち最大のものを読み取り、各実験ケースについて15～20枚の写真から読み取った上の値を平均したもの L_y を考える。**Photo. 3 (a)**に見られるように、同じ流量の場合にも、 $H=10\text{cm}$ の場合には山形の模様の発生が不十分なため、また $H=2\text{cm}$ の場合には流速が大きくなって山形の模様の発生が複雑になっているため横方向の代表スケール L_y を求めることはできない。**Fig. 4**は、上の方法で L_y を求めることのできた場合についての路床および水理条件を、縦軸に断面平均流速と水深を用いたレイノルズ数 Re 、横軸にフルード数 F_r をとって示したものである。各条件で記号が重ならずにずれているのは、実験中の流量の微妙な変化や水深を所定の大きさに設定する際の誤差によるものであるが、これの実験結果に与える影響はほとんど無視できるものと考えられる。なお、水路下流端をせき上げたために計測点近傍の水面勾配は、 L_y を読

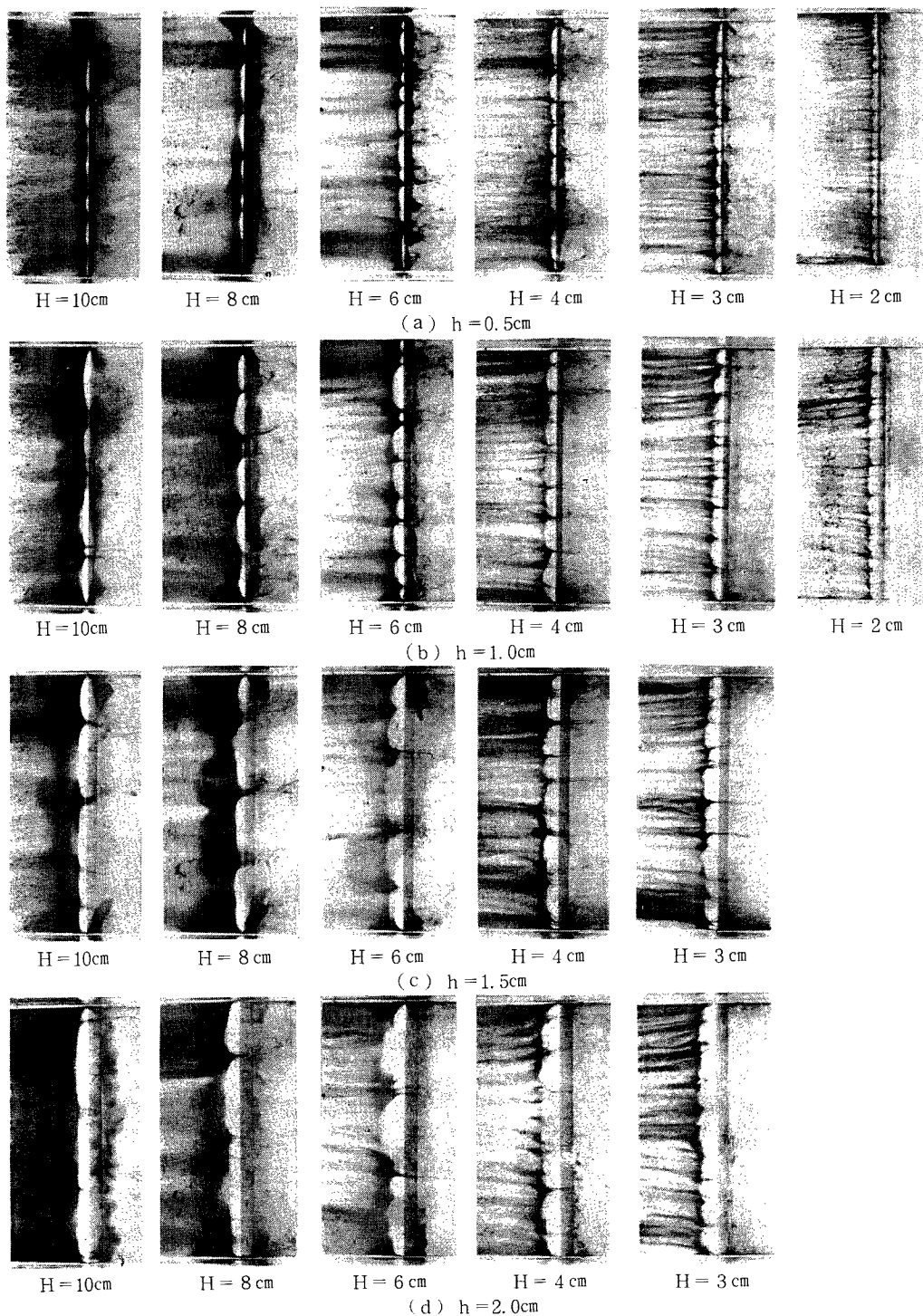


Photo. 3. Plane view of flow pattern (exp. 2).

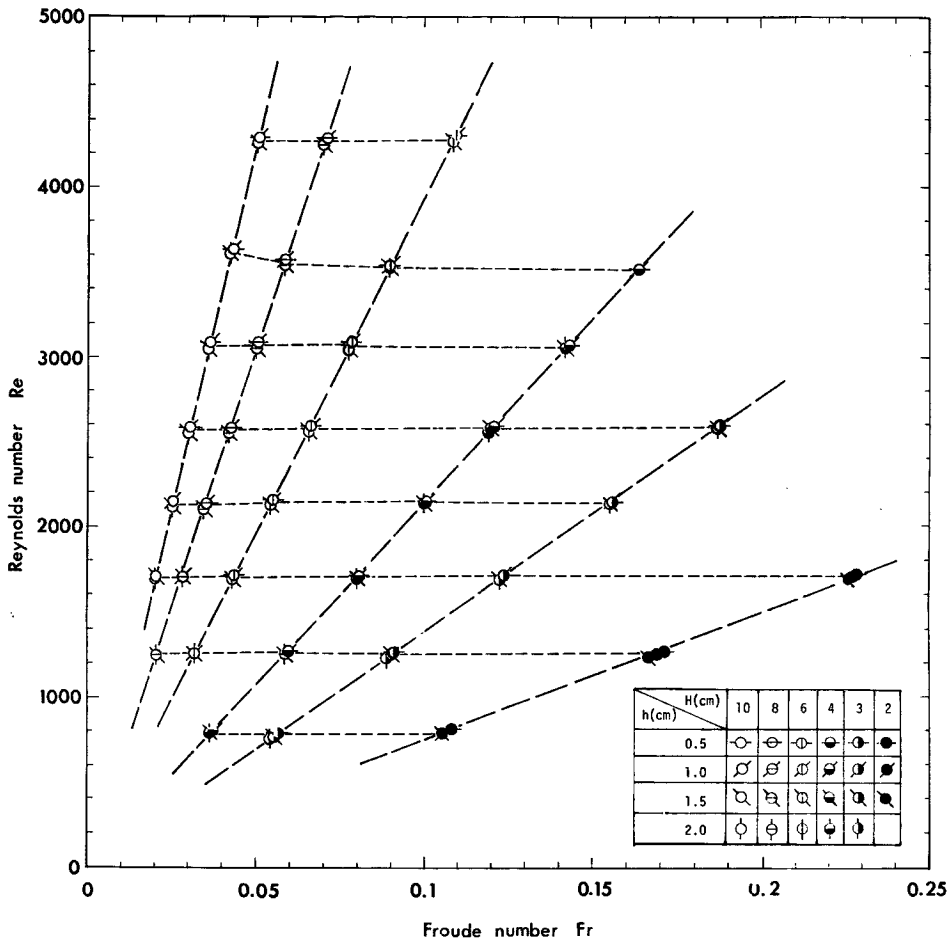


Fig. 4 Experimental conditions.

み取った範囲において、ほとんど水平に近く、最大のものでも1/2500程度であった。

Fig. 5 は横方向の代表スケール L_y と水深 H および棧高さ h との関係を示したものである。図からわかるように、同じレイノルズ数を持つ流れに対しては、異なる高さの棧を用いた場合にも、 h/H が同じであれば L_y/H はほぼ等しくなる。したがって、同じ Re に対して L_y/H をプロットしたものは、 h が異なっても1つの曲線上に乗る。また、 Re が大きくなると L_y/H の値は小さくなり、 L_y/H と h/H の関係を表わす曲線は下方に来る。以上の関係をひとまず、

$$L_y/H = \alpha(h/H)^m \dots\dots\dots (1)$$

で表わすすると、 m および α は図から h/H および Re の関数としてつぎのように与えられることとなる。

$$m = f_1(h/H, Re) \dots\dots\dots (2)$$

$$\alpha = f_2(h/H, Re) \dots\dots\dots (3)$$

Fig. 6 は式(2)の関係を図示したものである。本実験条件の範囲では、 m は0.2から0.8までの範囲に含まれる。一方、移動床流れにおける砂堆の波高 d について Yalin³⁾ は次式を提案している。

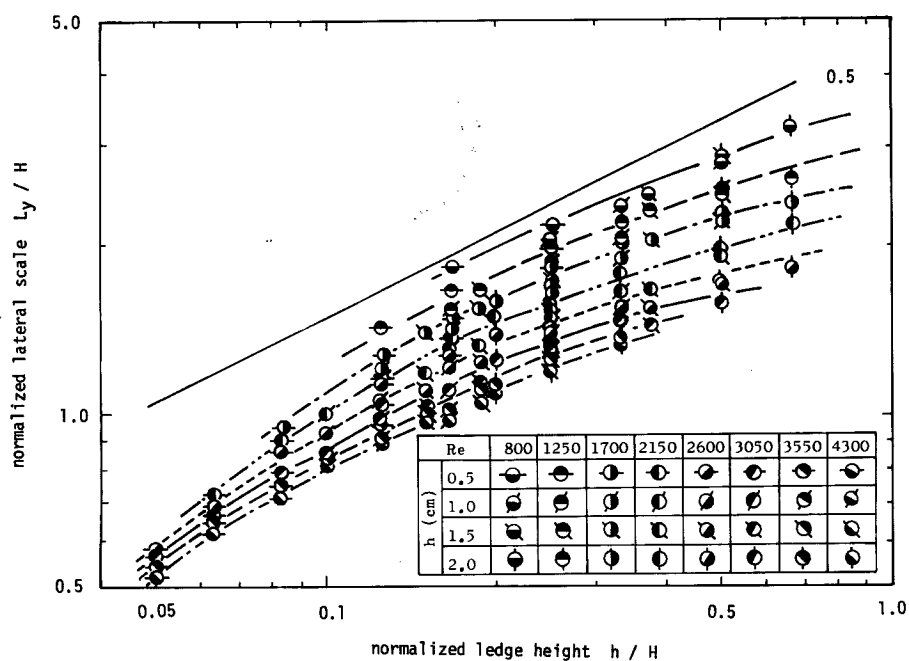
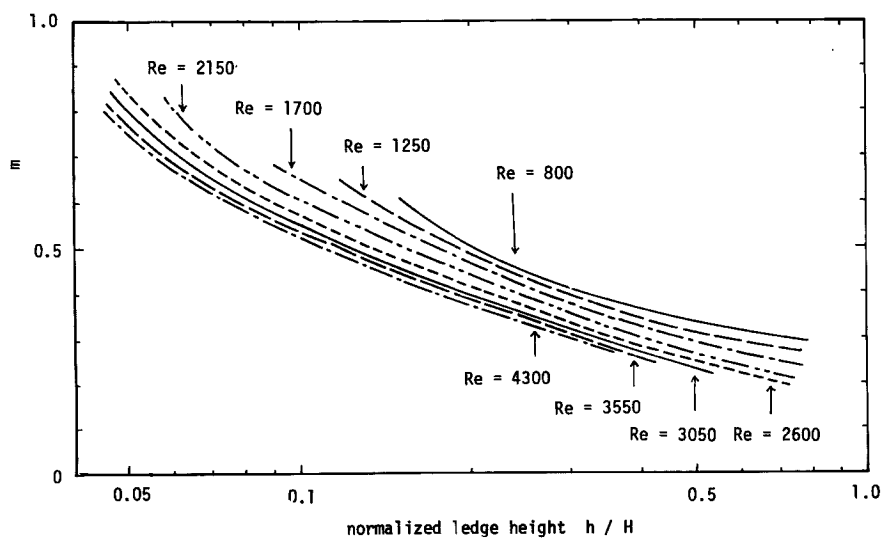
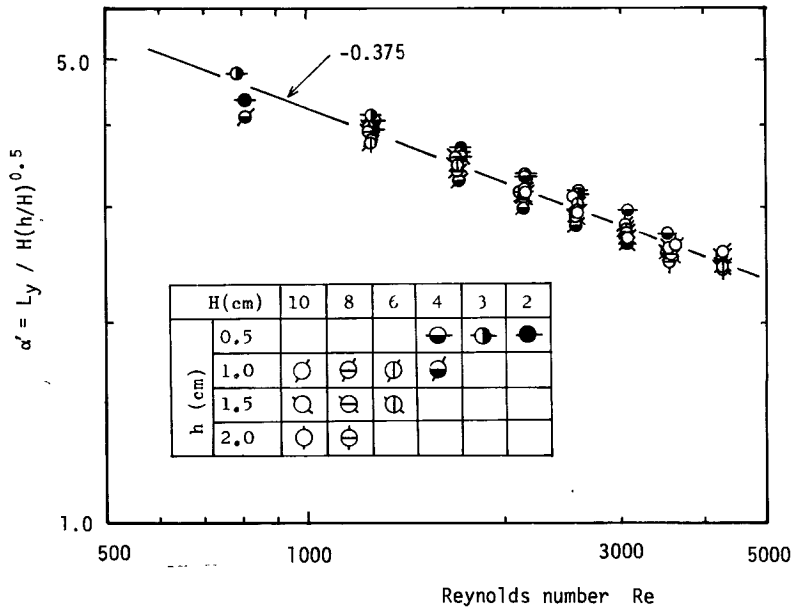


Fig. 5 Variation of lateral scale.

Fig. 6 Variation of m .

Fig. 7 Variation of α' .

$$\frac{d}{H} = \frac{1}{6} \left(1 - \frac{\tau_c}{\tau_0} \right) \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 τ_0 は河床せん断力、 τ_c は移動限界河床せん断力である。また、芦田ら⁴⁾のまとめた結果によると、式(4)の係数は大体1/6から1/2までの範囲に分布していることが指摘されているが、これらを考慮に入れて d/H はほぼ0.1~0.25程度と考えて、 h/H についても0.1~0.25の範囲において m の値を検討する。この場合には、 m の値は0.33~0.65の範囲に含まれるが、平均的には0.5に近い値であると考えられよう。すなわち、砂堆が発生するような路床条件を考え、この場合に $m \approx 0.5$ と近似すると式(1)はつぎようになる。

$$L_y/H = \alpha' (h/H)^{0.5} \dots\dots\dots (5)$$

この場合には、 α' は Re の関数となり、つぎようになる。

$$\alpha' = f_3(Re) \dots\dots\dots (6)$$

Fig. 7 は h/H が0.1~0.25の範囲に入る場合について α' を求めて、式(6)の関係を検討したものである。 h/H が上記の範囲で $m \approx 0.5$ と近似したことおよび実験結果そのもののバラツキなどのために、同じ Re に対する α' の値にはかなりのバラツキが見られるが、平均値からのずれはほぼ数パーセント以内に入っている。このように、路床条件や水理条件が変化しても、 h/H が0.1~0.25という河床形態を考慮に入れた範囲内では、式(5)および(6)が横方向の代表スケール L_y の特性を表わす式として、その妥当性が高いものと考えられる。さらに、本実験条件の範囲内では、**Fig. 7** からひとまず求めて見ると、式(6)は、

$$\alpha' = 56.4 Re^{-0.375} \dots\dots\dots (7)$$

となる。

式(5)および(6)から、 Re と h を一定とし、 H のみを変化させた場合、 L_y は $H^{0.5}$ に比例すること、また、 Re と H を一定とし、 h のみを変化させた場合、 L_y は $h^{0.5}$ に比例することがわかる。この事実の物理的な意味は

現在のところ十分に説明できないが、流れの巨視的な構造を考える上で注目すべきことであろう。

6. 結 語

以上、直角二等辺三角形という単純な断面形状を持つ棧を1本だけ路床に設置した状態で、低いレイノルズ数の流れを用いて、流れの可視化法によって波状路床上の流れの3次元特性について実験的検討を行なったが、本研究によって得られた結果はつぎのようである。

1. 水とグリセリンの混合液を用いた低レイノルズ数の流れにおいて、路床に直角二等辺三角形の棧を1本だけ設置した場合の棧の後流域内における流れの実態が詳細に把握された。これにより、路床の幾何学的な形状が2次元的に与えられた場合にも、路床近傍の流れは3次元特性を有し、流況は時間的に変化するということが明らかとなった。

したがって、移動床流れを取り扱う場合においても、上の事実を十分考慮して、砂粒の運動や路床形態と流水との関連といった問題を解明していく必要がある。

2. 低レイノルズ数の水流において、路床に直角二等辺三角形の棧を1本だけ設置した場合に、流れの可視化法によって得られた横方向の現象変化を代表するスケール L_y を検討した。その結果、棧高さ h と水深 H の比が0.1から0.25までの範囲に対して、 L_y/H は式(5)および(6)で表わされるように、レイノルズ数 Re と h/H の関数で表わされることが明らかになった。

本実験条件は、実河川の流れと比較するとレイノルズ数の大きさの面でも、幾何学的な境界条件の複雑さの面においても、かなり異なったものであることは言うまでもない。しかし、本実験で得られた結論は実河川流れにおける河床の3次元特性を考察する上で示唆を与えるものと考えられる。

最後に、本研究を進めるに当たり、終始熱心な御指導と御援助をいただいた今本博健教授ならびに宇民正助手に深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 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.
- 2) 上野鉄男：波状路床上の流れにおける乱れ特性について(2)，京都大学防災研究所年報，第17号B，1974，pp. 717—724.
- 3) Yalin M. S. : Geometrical properties of Sand Waves, proc. ASCE HY5, 1964.
- 4) 芦田和男：移動床流れの河床形状，第16回水理講演会講演集，1972，pp. 133—139.