

縦筋河床の形成領域と乱れに関する実験的研究

Experimental Study on the Relation between Longitudinal Vortices and Sand Ribbons Formation

九州大学 工学部 正 員○大本照憲 T.OHMOTO
九州大学 工学部 正 員 平野宗夫 M.HIRANO

1. はじめに

長方形直線開水路流れにおいては、一般に二次流（Prandtl の第二種二次流）が存在し、流れは三次元的様相を呈する。アスペクト比（水路幅／水深比）が 10 以上の滑面開水路流れにおいては、水路中央部で安定した縦渦は観測されない。一方、河床が粗面の場合には、この二次流は水深スケールの直径を有する並列した縦渦群として比較的安定した形態を取り、浮流砂を含んだ場合さらに安定化し、水路横断面内における運動量および物質の輸送に大きく寄与することが認められた¹⁾。また、移動床流れにおいては Sand Ribbons と呼ばれる縦筋が主流と平行に規則的に形成され、縦渦と縦筋とは相互作用のかなり強いことが示唆されている²⁾。従来、実験は滑面水路の隅角部に発生する縦渦³⁾、または人工縦筋粗度等を河床に設けることによって誘起した縦渦⁴⁾を対象とする場合が多く、平坦移動床が縦渦の作用によって縦筋河床に遷移する機構を解明するには不十分と考えられる。

本研究では、まずはじめに、中央粒径が異なる5種類の河床材料を用いて縦筋河床の形成領域を実験的に明らかにする。次に、縦渦と縦筋との相互作用を明らかにするため縦筋の十分に発達した河床波上で流速変動を測定し、乱流特性と縦筋の関係についての考察を試みる。

2. 実験装置および方法

実験に使用した水路は、長さ 10 m、幅30 cm、深さ30 cm のアクリル樹脂製可変勾配水路で、測定部の長さは 8 m である。河床材料は、中央粒径 d_{50} および幾何標準偏差 $\sigma_g = \sqrt{d_{84}/d_{16}}$ が、各々、2.85mmと1.23 1.90mmと1.17, 0.94mmと1.26, 0.57mmと1.47 および 0.29mmと1.17 の 5 種類の均一に近い砂である。縦筋河床が発生・発達する過程を調べるために、以下の手順で実験を行った。河床材料を測定長全域に亘って厚さ 3cmで均一に敷き均し、所定の勾配、流量に設定し、下流端の堰の高さを調整してほぼ等流と見なせる状態から実験を開始した。摩擦速度の時間的変化を調べるために、水位および水深をポイントゲージを用いて、水路中心線に沿って 1m 間隔で計測した。また、縦筋の横断形状は、縦筋が平衡状態に達したと見なされる時点で、超音波測深器を用いて測定し、掃流砂量は厚さ1mmの仕切り板を有する捕砂器によって幅方向に1cm間隔で計測した。

次に、縦筋上の乱流特性を明らかにするために、表-1 の実験条件下で縦筋が水路全域に亘って平衡状態に達した後に、水路入口より 5m 下流位置において計測を行った。流速の測定は熱線流速計システムに x 型エンドフロープローブを使用し、流速の主流方向成分と鉛直方向成分の同時計測および主流方向成分と幅方向成分の同時計測を、同一地点で行った。計測

結果は、サンプリング周波数75HzでAD変換した後、一測点 4096個のデータに関して統計処理を施した。

3. 実験結果とその考察

(1) 縦筋河床の発達過程

移動床上においては、水流と河床砂との複雑な相互作用により形成される河床波は、多種多様な形態を取り、一般に時間的・空間的構造において不規則な変動特性を示す。しかし、流れの主流部で観察される組織渦の一つである並列らせん流が移動床流れにおいて卓

表 - 1 実験条件

流量 Q	5.34 l/sec
水深 H	5.53 cm
平均流速 Um	32.19 cm/sec
摩擦速度 u*	1.88 cm/sec
水路勾配 I _o	1/500
エネルギー勾配 I _e	1/1535
レイノルズ数	17800
フルード数	0.437
砂粒レイノルズ数	17.66
中央粒径 d ₅₀	0.94 mm

越する場合、河床にはかなり規則的で明瞭な縦筋が発生・発達することが観察される。写真-1は、平均流速 $U_m=36.9$ cm/sec、水路勾配 $i_o=1/500$, エネルギー勾配 $i_e=1/504$ 水深 $H=4.97$ cm, 河床材料 $d_{50}=0.94$ mmの実験条件の下で通水し、60分経過した際の縦筋河床である。主流に平行に形成された2本の

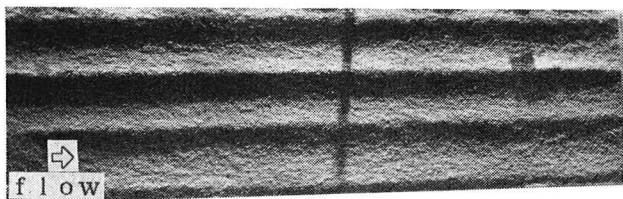


写真-1 縦筋河床

SAND RIDGES は、波高が5 mmで水路幅をちょうど三分する形で配列していることが認められる。固定床における縦渦の上昇流は水路側壁より水深の奇数倍の位置に発生しやすいが、移動床では縦渦の上昇流部に当たるSAND RIDGEは側壁より水深の偶数倍の位置において

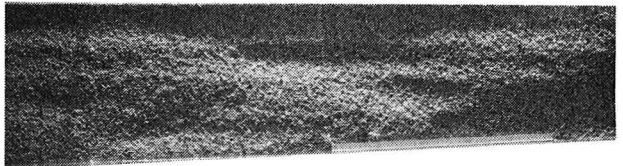
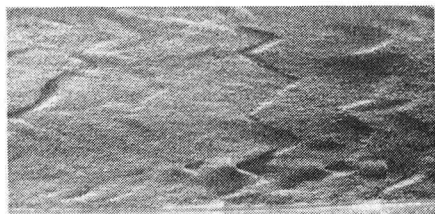


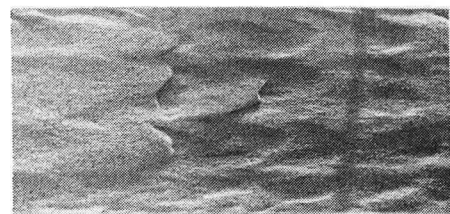
写真-2 縦筋と砂堆

形成されることが注目される。SAND RIDGE上では砂はほとんど動かず、SAND TROUGH上でのみ掃流砂が存在し、その運動形態は転動であった。また、諸処で二次元性の砂堆が SAND TROUGH上で観察された。写真-2は砂れき堆と縦筋が共存している様子を撮影したものである。実験条件は、 $U_m=57$ cm/sec, $i_o=1/90$, $i_s=1/99$, $H=4.05$ cm, $d_{50}=1.90$ mm であり、通水後 20分経過して

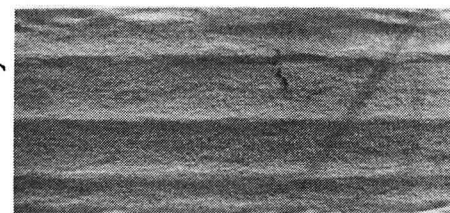


(a) 発生過程 ($t=6$ min)

いる。さらに水深を小さくした場合、河床には始めに縦筋が発生・発達し、続いて徐々に砂れき堆が発達し、水流の蛇行が激しくなり縦筋の消滅する様子が観察された。水深に較べて水流の蛇行の曲率半径が十分に大きい場合には、実河川において砂れき堆と縦筋は共存することが推察される。写真-3(a)~(c)の一連の写真は、無次元限界掃流力 $\tau_{*c}=0.034$ の河床砂に対して無次元掃流力 $\tau_{*}=0.051$ で通水した際の縦筋の発生・発達過程を示したものである。実験は、 $U_m=29.63$ cm/sec, $H=3.33$ cm, $i_o=1/500$, $i_e=1/689$, $d_{50}=0.57$ mmの下で行われた。実験開始後、数分経過すると路床には至るところで河床波の峰線が水路横断方向に水深の二倍程度の長さスケールを単位としてくさび状に交錯する紋様が現れた {写真-3(a)}。このような斜め交錯縞は、次第に砂堆に発達すると共に、横断方向に水深の二倍程度の長さスケールで縦筋が発達しているのが観察された {写真-3(b)}。縦渦と縦筋との相互作用は次第に強まり、通水後 1 時間 30分経過したころには {写真-3(c)}、砂堆は減衰し河床波は縦筋の形成領域にあることが認められた。写真-3(a)と3(c)を比較すれば、斜め交錯縞のくさびの頂点を結ぶ線がSAND TROUGHの位置に対応することがわかる。通水初期に形成された斜め交錯縞は縦渦の影響により掃流力が幅方向に変化することによって形成されたものと考えられる。



(b) 発達過程 ($t=26$ min)



(c) 平衡過程 ($t=1$ hr 30 min)

写真-3 縦筋の発生・発達過程

(2) 縦筋河床の形成領域

河床形態は、その代表的長さスケールが水深に相当する小規

模河床形態と河幅に相当する中規模河床形態に大別されている⁵⁾。小規模河床形態は鉛直乱流場に規定され、支配要素である流れのフルード数と砂粒レイノルズ数によって砂漣、砂堆、遷移河床、動的平坦河床、反砂堆に分類され、中規模河床形態は水平乱流場に支配されることから水路幅と水深の比によって形成領域が区分されることが知られている。

ところで、上記の河床形態とは発生機構を異にし、縦渦の作用により形成される縦筋河床が存在する。縦筋は、水深スケールの現象であることから河床形態を規模で分類すれば小規模河床形態に含まれる。実際河川では自由水面の流況等により古くからその存在は認められ⁶⁾、実験水路においても観察されているが⁷⁾、その形成領域について十分な検討はなされていない。固定床開水路の実験結果を参照すれば、縦渦は河床が滑面の場合には水路隅角部近傍を除いては観測されなかったのに対して、河床が粗面では比較的安定して存在することが認められた。今本等⁸⁾は、種々の粗度要素を路床に設置し、二次流の安定性について検討している。その結果、二次流は摩擦速度の増大にともなって安定化する事を指摘している。視点を変えれば、二次流発生以外の外的要因を持たず、粘性底層の形成された流れ場においては、縦渦は発達および安定化しない事が考えられる。

図-1 は、目視観察を通して主に縦筋河床と認められるものを中心に、無次元掃流力 $\tau_* = u_*^2 / \rho g d$ と砂粒レイノルズ数 Re_* に対してプロットしたものである。図から明らかなように、 Re_* が10以下では縦筋の発生しない事がわかる。砂粒レイノルズ数は、固定床では河床が粗面か滑面かを判断する物理量であり、移動床においては砂漣と砂堆を区分する重要なパラメータとなる。VALIN⁹⁾は Re_* が 10 以下では河床にはもはや砂漣以外形成されないことを示した。砂粒レイノルズ数 $Re_* < 10$ および無次元掃流力 $\tau_* > \tau_{*c}$ から砂漣のみが形成される粒径は $d < 0.57\text{mm}$ であり、河床材料として $d_{50} = 0.29\text{mm}$ を用いた実験では河床には砂漣のみが発生し縦筋は観察されなかった。また、縦筋が明瞭に現れるのは掃流力が限界掃流力よりわずかに越えた所に当たり、掃流力の増加とともに縦筋は砂堆と共存していることが分かる。

図-2 は、同一の実験結果を GARDE・RAJU による領域区分図⁵⁾にプロットしたものである。縦筋の発生は、丁度、過去の実験データの欠落部分に当たる所で現れており、水深／粒径比 H/d が 100 以下で限界掃流力より僅かに大きい場合に起こるようである。図-1および 図-2から縦筋が発達する時の掃流力の範囲は下

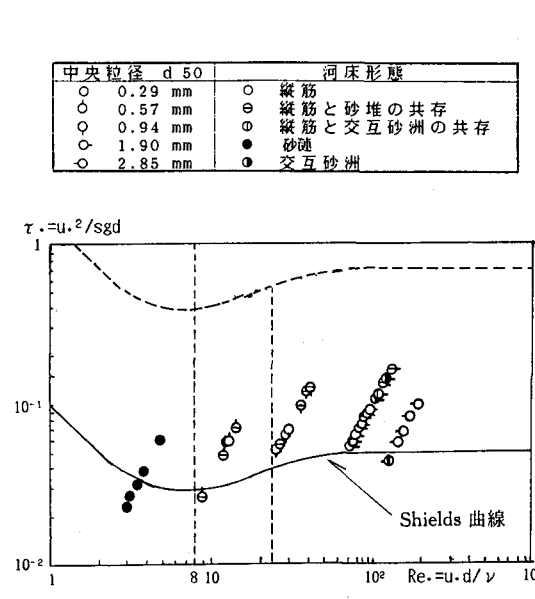


図-1 τ_* と Re_* との関係図における縦筋の形成領域

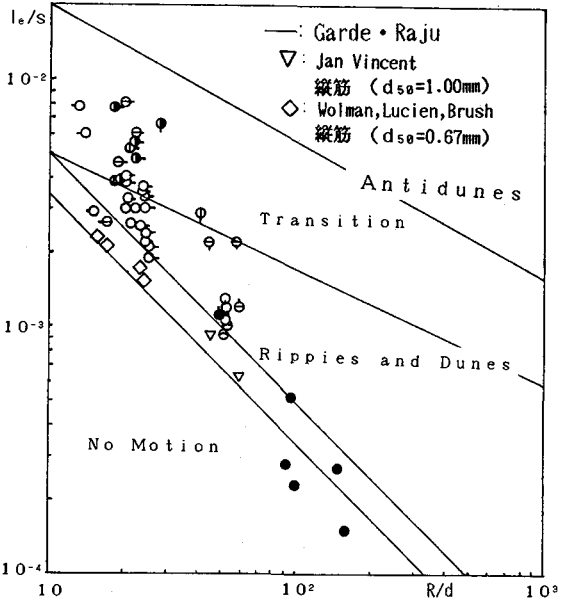


図-2 小規模河床形態の領域区分

限に限界掃流力を持ち、上限には砂堆が発達する時の掃流力を持つ事が推察される。

(3) 縦筋形状および掃流砂量の横断分布

移動床上看られる各種の河床形態と乱流構造とは密接な関係にあることから、河床波の発生・発達機構を水流の乱れ特性と結び付けて解明しようとする試みがなされ、いくつかの興味ある知見が得られている。平坦な初期河床から縦筋河床に遷移する過程において、縦渦と縦筋は相互に作用を及ぼし、縦渦は強くなり安定化すると共に縦筋は発達する関係にある。縦渦によって誘起された横断方向の壁面せん断応力と重力の横断方向成分がバランスして縦筋河床は平衡状態に達する。

図-3 は、表-1の実験条件の下で通水し 2 時間経過した際の河床波形状である。縦筋の波高は、水路入口より $X=2m, 3m, 4m$ および $5m$ において何れも $6\sim 7mm$ の範囲にあり、その形状は主流方向に相似であることがわかる。図-4 は、表-1 の水理条件とは若干異なり $Q=5.50$ l/sec, $U_m=37.57$ cm/sec, $H=4.88$ cm, $i_o=1/400$, $i_s=1/504$, $d_{50}=0.94$ mm, $u_*=3.08$ cm/sec における掃流砂量の横断分布である。縦筋の発達と共に、縦渦は強まり、安定化して掃流力を幅方向に大きく変化させ、その結果、掃流砂量を幅方向に不均一にさせる作用のあることが認められる。

(4) 平均流速と二次流成分の横断分布

座標系は、主流方向を X 軸、鉛直方向を Y 軸、横断方向を Z 軸に取り、 Z 軸の原点は水路中央に置いている。図-5 は、平均主流速の横断方向の分布を示す。低速域は $SAND\ RIDGE$ の形成された $z=-8.0$ cm および $z=5.0$ cm 付近に、高速域は $SAND\ TROUGH$ の中央部である $z=-11$ cm, -1 cm および 9 cm にあたる。最大流速差は河床近傍で大きく、断面平均流速の20%程度にまで達することがわかり、縦筋の形成領域にある河川においては、流量観測の精度に大きな影響を与えることが考えられる。

二次流の平均鉛直方向成分および平均幅方向成分を、各々、図-6および 図-7に示す。 $SAND\ RIDGE$ 上で上昇流、 $SAND\ TROUGH$ 上で下降流という縦筋と縦渦との基本的関係が明瞭に現れていることがわかる。上昇流および下降流の平均流速の絶対値は、断面平均流速の約2%の値を示している。二次流の平均幅方向成分は、水面下 4.7 cm と 2.2 cm では逆位相の関係にある。即ち、河床近傍では $SAND\ TROUGH$ から $SAND\ RIDGE$ に向かう平均流、半水深付近から水面までの領域では逆に $SAND\ RIDGE$ から $SAND\ TROUGH$ に向かう平均流成分のあることが認められる。

(2) 乱れ強度およびレイノルズ応力の横断分布

図-8～10は、各々、主流方向、鉛直方向および幅方向の乱れ強度の横断方向の分布である。無次元化に用いた摩擦速度は、水深とエネルギー勾配によって算定されている。各方向の乱れの強さは、 $SAND\ RIDGE$ 上方で強く、 $SAND\ TROUGH$ 上方では弱い。乱れ強度の横断方向に関する変動幅は、何れも河床近傍および水面近傍では小さく半水深付近で大きくなる傾向を持ち、各成分で見れば最大変動幅は主流方向では摩擦速度の25%程度、鉛直方向および幅方向では摩擦速度の12%程度であることがわかる。

縦渦の発生の要因となる鉛直方向と幅方向との乱れ強さの差を 図-11に示す。図から明らかなように $(\overline{w'^2} - \overline{v'^2})/u_*^2$ は、 $SAND\ RIDGE$ 上で大きく $SAND\ TROUGH$ 上で小さい。また、その横断方向の変化は $SAND\ RIDGE$ を挟む相隣の河床面上で大きな値を示すことから、この傾斜面に沿って強い縦渦が形成され 図-5に示す上昇流の発生したことが推察できる。

図-12 は、レイノルズ応力 $-\overline{u'v'}$ の横断分布を示す。レイノルズ応力 $-\overline{u'v'}$ を $SAND\ RIDGE$ 上と $SAND\ TROUGH$ 上で比較すると、河床付近では $SAND\ TROUGH$ 上において若干大きく、半水深および水面付近では逆に $SAND\ RIDGE$ 上において大きくなっている。即ち、半水深および水面付近では二次流の影響により特徴的な波状分布を呈し、レイノルズ応力は乱れの強さとは同位相、平均主流速とは逆位相の関係にあることが認められる。

図-13は、レイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$ の横断方向に関する分布である。レイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$ は、横断方

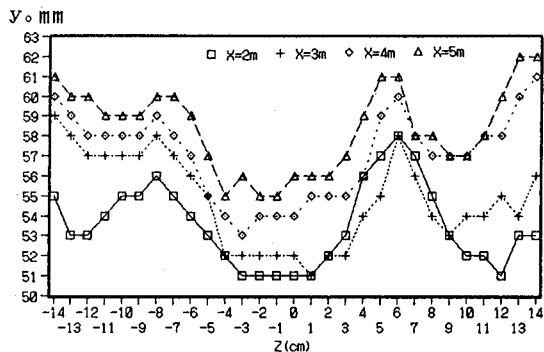


図-3 縦筋の横断形状

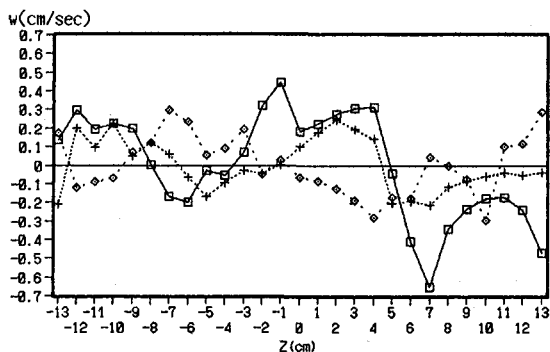


図-7 幅方向の平均流速 W の横断形状

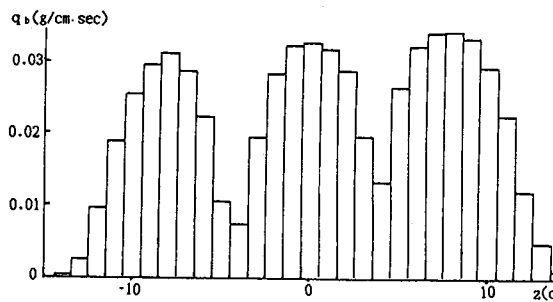


図-4 掃流砂量の横断分布

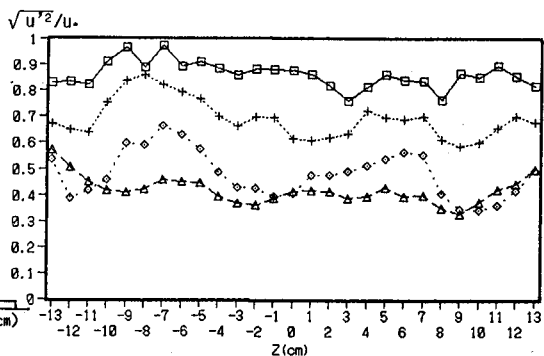


図-8 主流方向の乱れ強度 ($\sqrt{u'^2}/u_*$) の横断形状

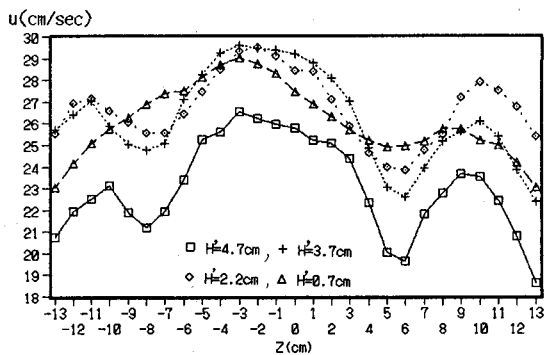


図-5 平均主流速 U の横断形状

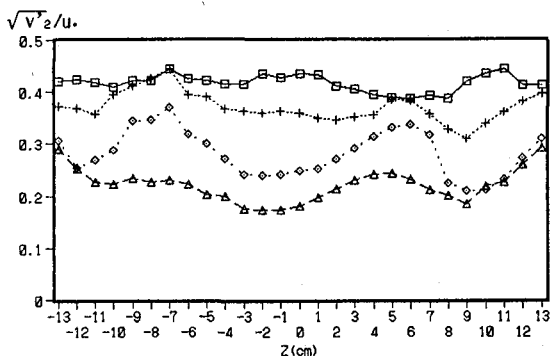


図-9 鉛直方向の乱れ強度 ($\sqrt{v'^2}/u_*$) の横断形状

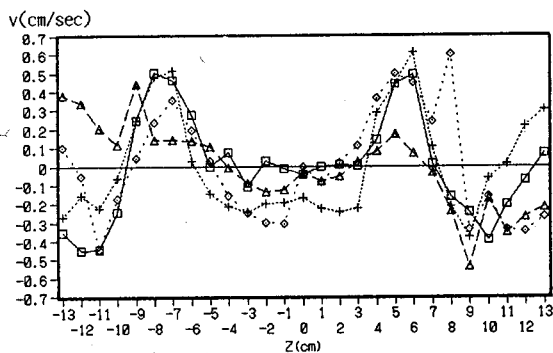


図-6 鉛直方向の平均流速 V の横断形状

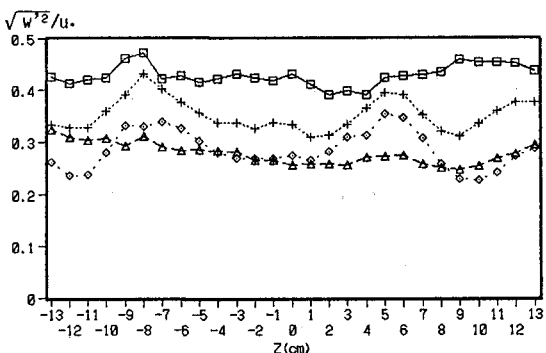


図-10 幅方向の乱れ強度 ($\sqrt{w'^2}/u_*$) の横断形状

向に SAND RIDGE上では負から正へと急激な変化を示し、SAND TROUGH上では緩やかに正から負へと変わることがわかる。なお、図-7~9 に示された乱れ強さの横断分布を詳細に見れば、SAND RIDGE上 でやや窪んだ形状を示している。このような傾向は、固定床開水路実験においても僅かに現れていたが、移動床ではかなり明瞭である。平均主流速の幅方向変化率の極大値と $-\overline{u'w'}$ の極大値を用いて乱れエネルギーの発生項 $-\overline{u'w'} \cdot \partial U / \partial z$ を概算すれば、SAND RIDGE上における乱れエネルギーの発生項 $-\overline{u'v'} \partial U / \partial y$ の約 40 %であった。乱れの強さが SAND RIDGE 直上で極大値を取らず、その両側で現れたのは乱れの発生項 $-\overline{u'w'} \cdot \partial U / \partial z$ の効いたものと考えられる。

4. あとがき

本研究では、縦筋河床の発生・発達過程およびその形成領域について実験的検討がなされた。また、縦筋の発達した流れにおいては縦渦は強まり、安定化すると共に、横断方向のレイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$ が乱れエネルギーの発生に重要な働きをすることが認められた。

最後に、本学・技官 松岡雅博氏、本学・学生 石丸英伸君、澤田誠一 君、中濱正博君には実験およびデータ解析に熱心な協力を得た。ここに記して謝意を表します。

<参考文献>

- (1) 平野宗夫, 大本照憲, 松枝修治: 流速変動と浮流砂濃度に関する実験的研究, 第30回, 水理講演会論文集, 1986.
- (2) 木下良作: 石狩川河動変遷調査(本編, 参考編), 科学技術庁資源局資料, No.36, 1961
- (3) 富永晃宏, 江崎一博: 長方形断面水路の三次元乱流構造に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 第357, 1985.
- (4) 中川博次, 福次家久, 富永晃宏: 開水路流れにおける横断方向の渦構造と大規模乱流, 土木学会論文報告集, 第 312, 1981.
- (5) 水理委員会移動床流れの抵抗と河床形状研究小委員会: 移動床流れにおける河床形態と粗度, 土木学会論文報告集, 第210, 1973.
- (6) Karkz, S.: Harrow Marks, Current-Aligned Sedimentary Structures, J. Geology, vol. 75, 1967.
- (7) 芦田和男, 奈良井修二: 河床形態の変動特性に関する研究, 京大防災研年報, 第 20号, B-2, 1977.
- (8) 今本博健, 宇民 正, 上野鉄男, 日紫喜剛啓, 仲井公哉: 開水路流れの大規模乱流構造と構造物周辺の局所流との関連について
- (9) Yalin, M.S.: Mechanics of Sediment Transport, Pergamon Press, Oxford, 1972.

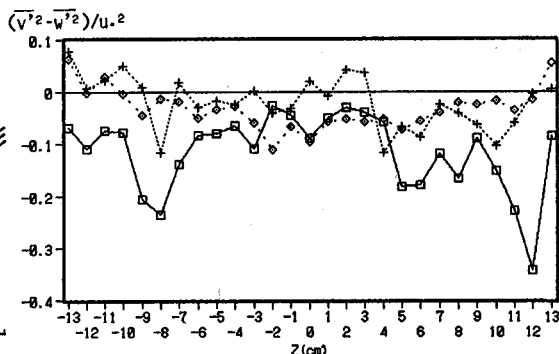


図-1 1 $(\overline{v'^2 - w'^2})/u.^2$ の横断変化特性

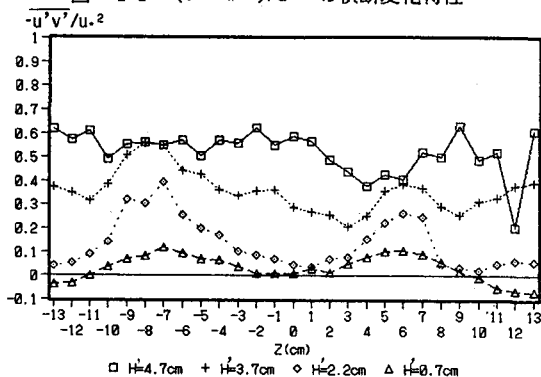


図-1 2 レイノルズ応力 $(-\overline{u'v'})/u.^2$ の横断分布

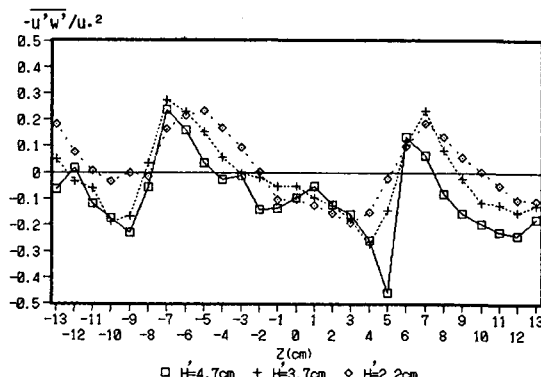


図-1 3 レイノルズ応力 $(-\overline{u'w'})/u.^2$ の横断分布