

固定波面上の開水路乱流特性

Turbulence of Open-Channel Flows on a Wavy Bed

九州大学工学部	松永 信博	Nobuhiro Matsunaga
九州大学工学部	竹原 幸生	Kosei Takehara
九州大学工学部	柴田 敏彦	Toshihiko Shibata
九州大学工学部	小松 利光	Toshimitsu Komatsu

The characteristics have been investigated experimentally of turbulence of open-channel flows on a sinusoidal solid bed. The experiments have been carried out on two kinds of flows, i.e., dune type flow and anti-dune type flow. The dune type flow forms a core region, in which the characteristics quantities of turbulence are constant in the flow direction. As for the anti-dune type flow, the region is not observed and the turbulent quantities vary in the flow direction. In the both flows, the vertical distribution of the Reynolds stress takes a minimum value in the region from crest to trough. This is due to the passing of an organized eddy.

Keywords: Open-Channel flow, Turbulence, Organized eddy

1. はじめに

河床波は、河川における底質の浮遊砂量に影響を与える1つの重要な因子であり、その発生原因を解明することは流体力学上大変興味深い問題でもある。このため、Hsu & Kennedy¹⁾ や日野・宮永²⁾ その他多くの研究者達によって、理論的あるいは実験的に固定波面上の流れや乱れの特性が調べられてきた。松永・並川・小松³⁾ は、二次元波状境界面をもつ開水路流 (dune, anti-dune, chute & pool の3つのタイプの流れ) において乱流特性を調べ、いくつかの知見を得た。その1つとして、anti-dune type の流れにおいては、峰の背後から谷にかけてレイノルズ応力の鉛直分布に極小値が見られることを指摘した。この特性は、Hsu & Kennedy によって得られた波状境界をもつ管路流におけるレイノルズ応力分布にも観察される。松永らは、その発生原因を波峰の背後から発生する組織的構造を持った流れの流下によるものと結論づけた。

本研究は、さらに実験を加えることにより dune type と anti-dune type の流れにおける乱れ特性を定性的に明らかにするとともに、流速の2点同時測定を行うことによりレイノルズ応力の鉛直分布が極小値をとる原因について詳しく調べることを目的としている。

2. 実験方法および実験条件

実験に用いた水路は、全長 12m、幅 15cm、深さ 30cm で水路床勾配を 20/1000 まで自由に変えることのできる可変勾配型水路である。上流側 6m の区間は助走区間とし、平坦固定床を設置した。一方、下流側には波長 22cm、波高 1.0cm の正弦波を 24 波設置した。水路床勾配を適当に選び、流量を調節することにより dune type と anti-dune type の流れを作った。dune type と anti-dune type の流れの水理条

件を表-1に示す。フルード数 Fr とレイノルズ数 Re は断面平均流速と平均水深を用いて定義されている。固定床の峰の位置での水位をポイントゲージで測定し、水面勾配を求め、それが水路床勾配とほぼ等しくなる区間をテストセクションに選んだ。流速測定は、テストセクションの固定床1波長間にわたって行われた。

図-1に、測定位置を示す。1~17の位置において、水面近傍での静圧と基準圧との差圧を測ることにより、水面形を求めた。次に、平坦固定床上の流れがほぼ等流と見なせる位置と波状境界面上の1~17の位置において、管径2mmのピトー管を底面に沿って密着させ、動圧を測定した。この動圧から底面より0.1cmの高さにおける流下方向の流速を求め、波状底面上の摩擦速度 u_* を次のように算定した。

$$u_* = \frac{u_w}{u_o} \sqrt{gRI}$$

ここで、 u_w は波状底面上0.1cmにおける平均流速、 u_o は平坦固定床上0.1cmにおける平均流速、 $\sqrt{gRI}$ は等流を仮定した際の摩擦速度である。表-1において

与えられた $\bar{u}_*$ は、測定位置1~17における u_* の平均値である。

流速測定にはx型2方向ホットフィルム流速計と1方向L.D.Vを用いた。L.D.Vは測定位置3の底面から0.3cmの高さに固定し、水平方向の流速測定に用いられた。流速の鉛直分布を得るために2方向ホットフィルムを矢印で示した位置にセットした。L.D.Vの信号とホットフィルム流速計の信号は同時にデータレコーダに収録された。流速信号のA/D変換においてサンプリングタイムは8/1000秒、サンプリング個数は16384個であった。

表-1 水理条件

流れのtype	dune type	anti-dune type
水路床勾配	2/1000	8/1000
断面平均流速 $\bar{U}_B$ (cm/s)	50.6	88.8
平均摩擦速度 $\bar{u}_*$ (cm/s)	2.79	4.16
波状部の平均水深 $\bar{h}$ (cm)	7.62	3.43
Fr	0.582	1.53
Re	3.82×10^4	3.31×10^4

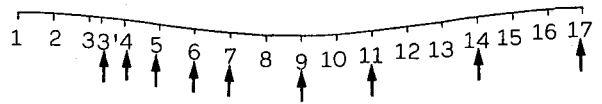


図-1 測定位置

3. 実験結果

3.1 dune type flow における乱れ

図-2に乱れ強度の鉛直分布を示す。 z は底面から鉛直上向きにとられており、 h は測定位置における水深である。 u と v はそれぞれ水平方向、鉛直方向の速度変動強度である。図中の実線は、松永ら³⁾によって得られたdune type における乱れ強度分布の近似曲線である。一方、破線は開水路乱流の乱れ強度分布に対し指数形を仮定して得られた関係

$$u/u_* = 2.30e^{-z/h}, \quad v/u_* = 1.27e^{-z/h} \quad \dots (1) \text{ を示す (称津}^{4) \text{ 参照)}。}$$

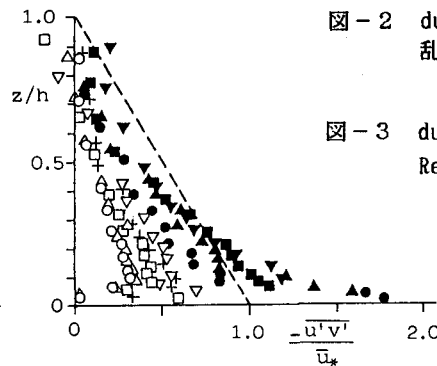
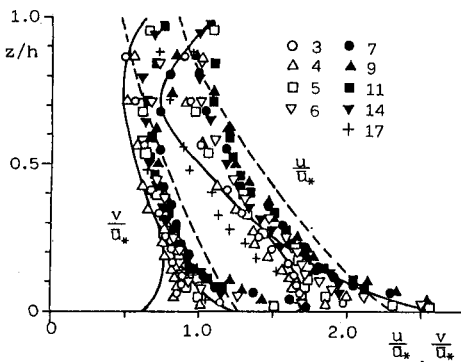


図-2 dune type flow の乱れ強度分布

図-3 dune type flow の Reynolds 応力分布

$z/h \geq 0.3$ において u/u_* の測定結果は多少ばらついているが、 u/u_* および v/u_* の鉛直分布は実線で示した傾向と類似のパターンを示す。dune type flow の乱れ強度分布は $z/h \geq 0.3$ において流下方向に一定値をとり constant core region を形成する。一方、 $z/h \leq 0.3$ では底面と水面形の変化のため流れの加速・減速の効果が現れる。流れが加速する区間 9~17 において境界層は薄くなり、乱れ強度は小さくなる。壁面近傍における u/u_* および v/u_* の値はそれぞれ 1.5~3.0, 0.75~1.5 の間で系統的に変化する。その平均値は等流が壁面近傍でとる値とほぼ一致する。以下の図においては、図中のシンボルと測定位置とは対応がとられている。

図-3にレイノルズ応力を水深と平均摩擦速度で無次元化したものを示す。破線は等流におけるせん断応力分布である。底面近傍の値に限ると、図より峰の背後(測定位置 4)で $-\overline{u'v'}/\bar{u}_*^2$ の値は最小となり、流れが減速されるにつれ増加し、谷(測定位置 9)で最大となる。その値は平均摩擦速度の約 0.7 倍から 1.7 倍の値をとり、等流における値を中心に系統的に変化する。流れの加速・減速の効果による底面付近のレイノルズ応力に関するこのような明瞭な変化は、Hsu & Kennedy による波状管路流の実験においては認められなかった。今回の測定結果からは、レイノルズ応力分布において constant core region は $z/h \geq 0.5$ で形成され、水表面の影響もあつて等流における分布に比べて急激に減少する。

図-4にレイノルズ応力の鉛直分布を示す。anti-dune type の流れの場合と同様(松永ら³⁾参照)、dune type においても流れの減速域において鉛直分布に明瞭な極小値が認められる。図中の実線は、その極小値の位置を連ねたものであり、その高さは z/h

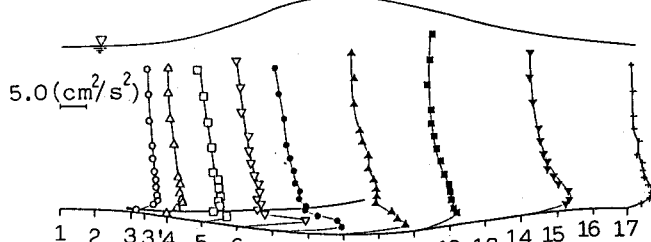


図-4 dune type flow の Reynolds 応力の鉛直分布

≤ 0.3 で constant core region 内にあることがわかる。一方、流れが加速域に入ると、鉛直分布に明瞭な極小値は現れなくなる。以下では、この極小値に着目して考察を加える。

図-5, 6は、前図において示したレイノルズ応力分布が極小値をとる測点における乱れの周波数スペクトルとレイノルズ応力のコヒーレンスを示したものである。図-5からわかるように測定位置 3', 4, 5, 6 では 0.35Hz 付近に乱れエネルギーのピークが見られる。また、測定位置 7 では卓越周波数が 0.17Hz になっている。このことから、レイノルズ応力が極小値をとる点では、周期的に大きなエネルギーを持った乱れ(以下で、これを組織渦と呼ぶ)が通過し、それは流下しながら合体するものと考えられる。図-7から、エネルギースペクトルが卓越する周波数において、レイノルズ応力も卓越することがわかる。このことは、

峰の背後で周期的に発生した組織渦は、大きなレイノルズ応力を持っており、高

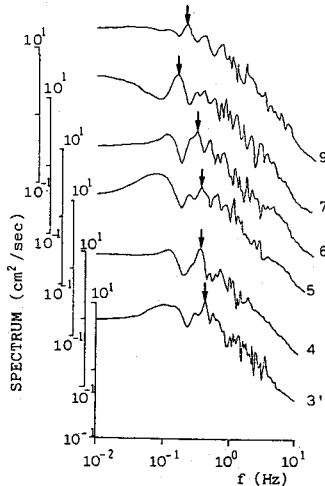


図-5 組織渦の通過点における u' のパワースペクトル

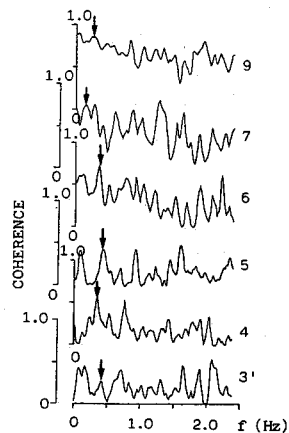


図-6 L.D.V.と組織渦の通過点での乱れのコヒーレンス

周波の乱れの発生に大きく寄与していることを意味する。

図-7は、図-5, 6で明かとなった卓越周波数が、0~1.0Hz 内にあることを考慮して、測定位置 3 において L.D.V の信号 u' とホットフィルム流速計からの信号 u' との相互スペクトルを求め、0~1.0Hz のバンドパスフィルターをかけ、それをフーリエ逆変換することによって求めた相互相

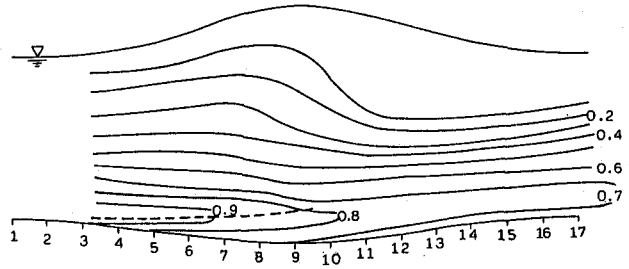


図-7 0~1.0 Hz における相互相関係数の等値線図

関係数の最大値について描いた等値線図である。図中の破線は、図-5で示したレイノルズ応力の極小値を連ねたものである。0~1.0Hz の周波数の乱れにおいて、峰背後の乱れと強い相関を持つ乱れは波状底面に沿って分布しており、その分布形はレイノルズ応力の極小値を連ねた線にほぼ一致している。このことから、周期的に発生した組織渦は破線に沿って流下することが裏付けられる。その渦の流下速度を相互相関係数の遅れ時間から算定したところ断面平均流速とほぼ同じであった。また、等値線の間隔が波状底面の谷から峰にかけて狭くなっていることから、0~1.0Hz 付近の乱れは主流の加速・減速の影響を強く受けると考えられる。

図-8は、測定位置 7 における結果を例にとり0~1.0Hz, 1.0~10Hz, 10Hz 以上の周波数帯内の乱れによるレイノルズ応力を分離したものである。図-5で示した全周波数におけるレイノルズ応力が極小値をとる現象に寄与している乱れは、卓越周波数付近の乱れであり、むしろ卓越周波数から十分離れたタイムスケールを持つ乱れはこの現象にほとんど寄与しないことがわかる。

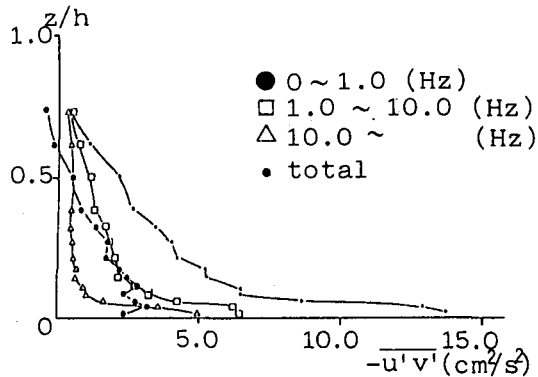


図-8 周波数帯別の Reynolds 応力分布

3.2 anti-dune type flow における乱れ

図-9に無次元乱れ強度 u/u_* および v/u_* の鉛直分布を示す。図中の破線は(1)式で与えられる等流における関係を示す。anti-dune type の場合は、水深が非常に浅いため底面や水表面の影響が全水深にわたって現れる。このため、constant core region の存在は認められず、水深の全域にわたって系統

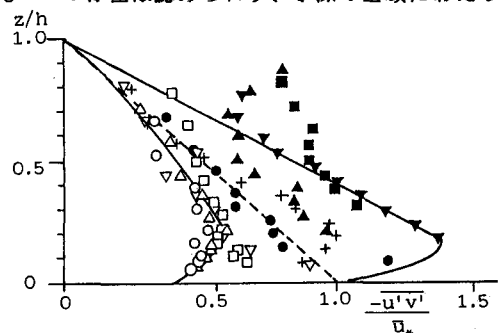
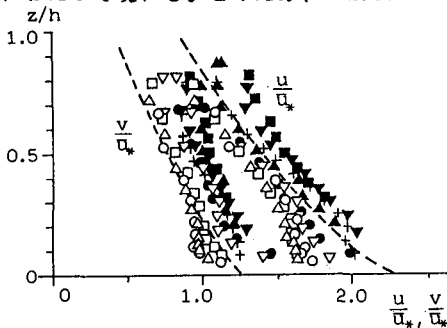


図-9 anti-dune type flow の乱れ強度分布

図-10 anti-dune type flow の Reynolds 応力分布

だった変化がみられる。乱れ強度分布は波峰背後の測定位置 4 付近で最も小さくなり、測定位置 15 付近で最大となる。この原因として、anti-dune type の流れは底面と水面形とがほぼ同位相のため、水深変化による加速・減速の効果をあまり受けず、むしろ重力による加速・減速の効果を受けるものと考えられる。

図-10 に平均摩擦速度で無次元化されたレイノルズ応力の鉛直分布を示す。図中の破線は等流におけるせん断応力分布である。測定結果は、実線で示すようにほぼ直線分布をなすが、破線を中心に系統的に変化している。峰の背後では、レイノルズ応力は非常に小さくなり、底面の変曲点付近の測定位置 15 では最大となっている。さらに、dune type とは異なる特徴の1つとして、底面近傍をのぞいて波峰 17 と谷 9 におけるレイノルズ応力がほぼ等しいことが揚げられる。以下では、レイノルズ応力の鉛直分布に極小値が現れる特徴について、dune type の場合と同様の考察を試みる。

図-11 はレイノルズ応力の鉛直分布である。今回の実験では dune type の場合のような明瞭な極小値は認められないが、少々強引に連ねた線が実線である。

極小値をもつ点における u' のスペクトルと、 $-\overline{u'v'}$ のコヒーレンスを示したものがそれぞれ図-12, 13 である。dune の場合と同様、卓越周波数が認められ、その周波数の乱れはレイノルズ応力に大きく寄与していることがわかる。

図-14 は、L.D.V の u' とホットフィルム流速計からの信号 u' に、0~5.0Hz までのバンドパスフィルターをかけて相互相関係数を求め、その最大値を等値線で結んだものである。極小値を連ねた線（図中の破線）と等値線の分布形とはほぼ一致する。

図-15 は、測定位置 6 における結果を例にとり、0~5.0Hz, 5.0~15Hz, 15Hz 以上の周波数帯内の乱れによるレイノルズ応力を分離して示したものである。dune type の場合と同様、全周波数におけるレイノルズ応力が極小値を持つ現象に寄与している乱れは、dune type の場合と同様、卓越周波数付近の乱れであることがわかる。

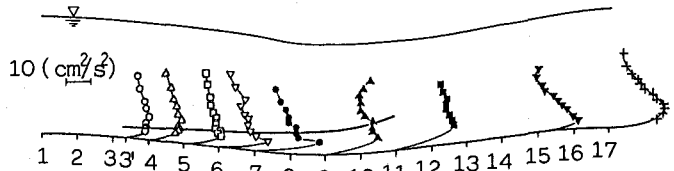


図-11 anti-dune type flow の Reynolds 応力の鉛直分布

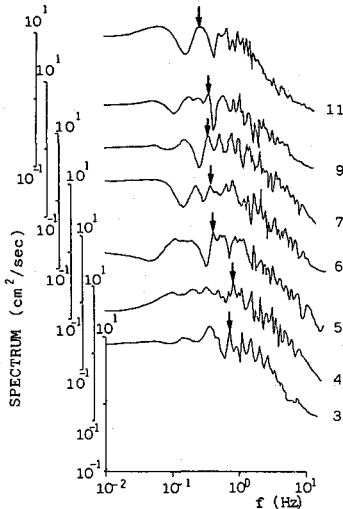


図-12 組織渦の通過点における u' のパワースペクトル

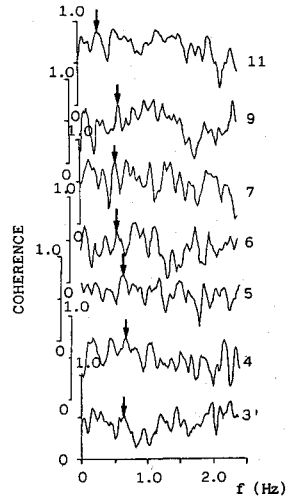


図-13 L.D.V.と組織渦の通過点での乱れのコヒーレンス

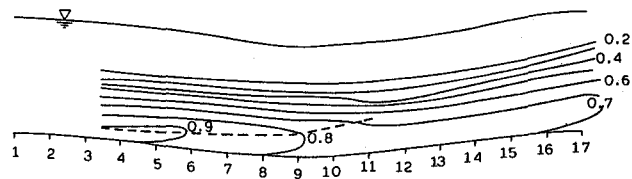


図-14 0~5.0 Hz における相互相関係数の等値線図

4. 結論

波状境界面上を流れる開水路において、dune type と anti-dune type の乱れ特性について調べた。得られた結果は次の通りである。

- (1). dune type の乱れ強度分布は $z/h \geq 0.3$ で constant core region をもち、 $z/h \leq 0.3$ では、

流れの加速・減速の効果

のため等流における乱れ強度分布を中心に系統的に変化する。壁面付近の乱れ強度は減速域で増加し、加速域では減少する。

- (2). anti-dune type の乱れ強度分布には constant core region 現れず、重力による加速・減速の効果のため乱れ強度が全水深にわたって系統的に変化する。
- (3). dune type と anti-dune type の両方の流れにおいて、波峰の背後でレイノルズ応力分布が、極小値をとることが認められた。これは、大きな乱れエネルギーをもった周期的に発生する渦の通過によるものである。その渦自体は平均流からのエネルギー伝達に大きく寄与するが、その周波数に近い乱れはこの渦の流下のためレイノルズ応力を低下させる役割を持つ。

最後に、本研究において実験及びデータ整理に協力して下さった藤田和夫技官、大学院生高畑研君に感謝致します。

参考文献

- 1) Hsu, S.T. and J.F. Kennedy: Turbulent flow in wavy pipes, J.Fluid Mech., 47, 481-502, 1971.
- 2) 日野幹夫・宮永洋一: 波状境界面をもつ2次元管路流の解析, 土木学会論文集, No264, 63-75, 1977.
- 3) Matsunaga, N., T. Namikawa and T. Komatsu: Open-channel flow over a sinusoidal bed, 5th Cong. APRD-IAHR, 185-200, 1986.
- 4) 橋津家久: 開水路乱流構造に関する基礎的研究, 京都大学工学部博士論文, 1977.

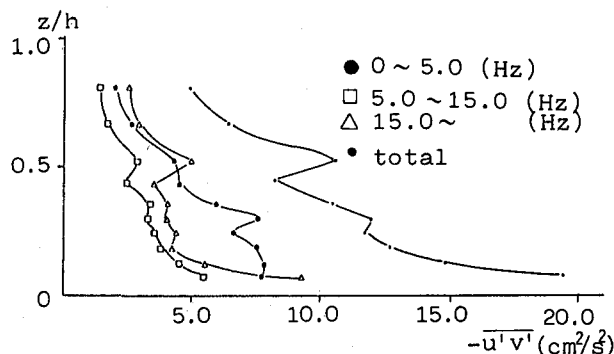


図-15 周波数帯別の Reynolds 応力分布