

固定波面上のせん断乱流構造

Structure of Turbulent Shear Flow over a Wavy Wall

九州大学工学部 正 員 松永 信博
九州大学大学院 学生員 並川 正
九州大学大学院 学生員 榎村 康史
兵庫県 正 員 岩崎日出夫

1. はじめに

砂漣上の流れと乱れの構造を明らかにすることは、底質の浮流機構の解明や浮流砂量の推定に重要である。しかしながら、固定点において移動床上の流れを直接測定することは、多くの困難な問題をかかえている。固定波面上の乱れ特性を解明するために、境界が正弦波である管路流について以前よりかなり詳しい研究がなされているが、^{1), 2)} 波状底面をもった開水路流に関して、乱れ特性を系統的に調べた研究は少ないように思われる。波状底面をもった開水路流において流れや乱れの特性は、水表面の存在のために管路流より複雑なパターンを示す。そして、それらの研究は、砂漣上の底質浮流機構解明のための一助となると考えられる。

本研究の目的は、水路底面として正弦波形の固定床を用い、dune type, chutes & pools type, anti-dune type の水面形をもった流れに対して流速測定を行うことにより、乱れ特性を明らかにすることである。

2. 実験方法ならびに実験条件

今回用いた水路は、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開水路である。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(L) 22 cm、波高 1.0cmの正弦波を24波設置した。固定床は、石こう製である。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, chutes & pools type, anti-dune type の3種類の流れを作った。波状部における測定位置を決定するため、固定床の峰の位置における水位をポイント・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領域（つまり波状部上流端より13波長下流側）を選び、固定床の1波長にわたって測定を行った。

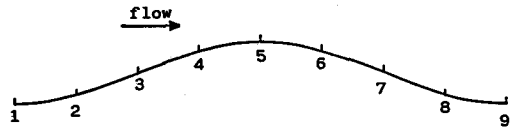


図-1 流速測定位置

表-1 実験条件

Run	1	2	3
流れの type	dune	chutes & pools	anti-dune
水路床勾配	2/1000	14/1000	8/1000
断面平均流速 U_m (cm/s)	52.6	27.3	68.6
波状部平均 水深 $\bar{h}$ (cm)	7.84	2.04	3.19
Fr	0.588	0.552	1.199
Re	3.38×10^4	4.56×10^3	1.79×10^4

まず、水面近傍での静圧と基準静圧との差圧を測ることにより水面形を求め、静圧管を波状底面に密着させることにより、底面圧力を求めた。圧力測定は、22/16cmの間隔で、17点において行われた。次に、2方向X型ホットフィルム プロブを用いることにより、図-1に示すように 1～9 の位置で水平方向と鉛直方向の流速測定を行った。流速計からの出力は、データ・レコーダに記録され、サンプリング・タイム 8/500秒、サンプリング個数 8,192個でA.D.変換された。表-1に、今回行った実験の主要な条件を示す。ここで、Fr と Re は $U_m/\sqrt{g\bar{h}}$ 、 $U_m\bar{h}/\nu$ で定義されたフルード数とレイノルズ数である。

3. 実験結果と考察

図-2は、3つのタイプの流れの形成領域を示したものである。実験に先立って、同じ固定波面を用いて行った数回の実験結果と、福岡等³⁾による移動床実験の結果をプロットしている。図中の実線は、ポテンシャル理論によって得られる $Fr^2 = \tanh(k\bar{h})/k\bar{h}$ の関係を示している。anti-dune type の流れとその他の流れの形成領域は、移動床、固定床に無関係にポテンシャル理論によって説明することができる。chutes & pools type の流れと dune type の流れの形成領域は、実験に基づき破線で示された曲線によって分類することができる。ここで、今回の実験において chutes & pools の流れは、最初 anti-dune type の流れが形成され、それが外部攪乱によって不安定となり、遷移することによって形成されることがしばしば観察されたことを記述しておく。

図-3 (a), (b), (c) に、dune, chutes & pools, anti-dune type の流れの平均流速分布と水面形を示す。dune type の水面形は固定波面と 180° の位相差をもっている。流体は、谷から峰に向かって流れるにつれ、底面と水表面との影響を受け加速される。従って、境界層厚は次第に薄くなり、速度勾配は小さくなる。そして、峰近傍では遠心力の影響も受けて一様流速分布に近くなる。逆に、峰から谷に向かうにつれ流体は

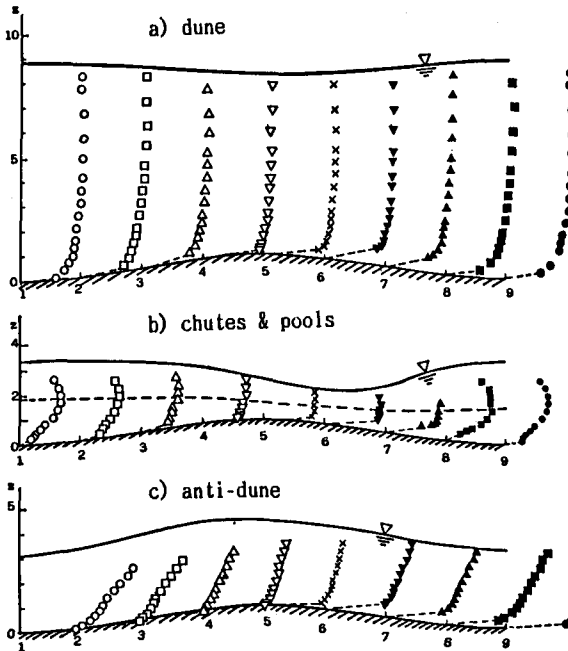


図-3 平均流速分布

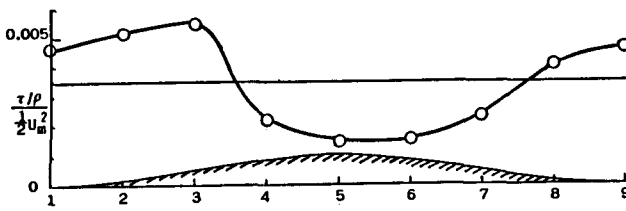


図-4 dune type 流れの底面せん断応力

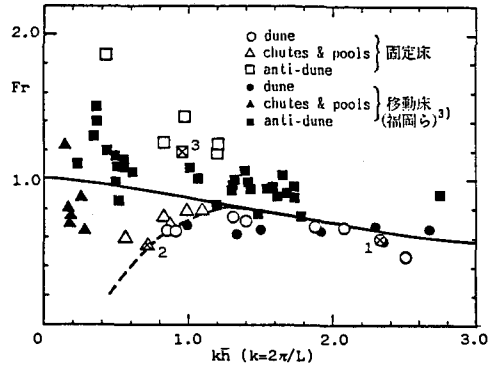


図-2 水面形の形成領域

減速され境界層が発達する。chutes & pools type の水面形は、ほぼ 90° の位相差をもち、峰の背後では射流から常流に遷移するため跳水を伴う。流速分布からも跳水の形成が認められる。破線で示されているように $z/h \approx 0.5$ において、速度勾配が 0 となる層が形成されていることがわかる。anti-dune type では、水面と底面とが同位相となる。流速は底面近傍のみで急激な速度勾配をもち、全水深にわたってほぼ一様な速度勾配をもつクエット・タイプの流

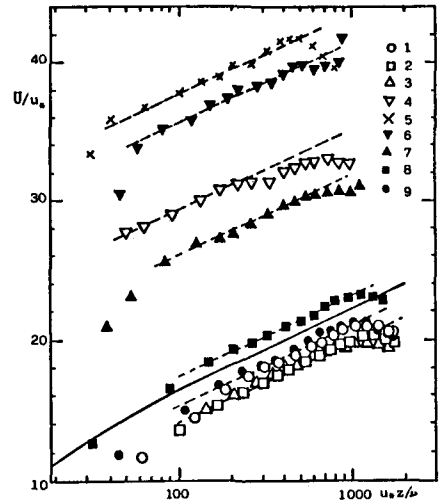


図-5 dune type 流れの平均流速分布 (実線は滑面乱流の平均流速分布を示す)

れが形成される。速度勾配は、遠心力の影響で谷では大きく、峰では小さくなる。

底面に作用する圧力の測定結果によると、それぞれの流れにおいて底面圧力は遠心力の影響で峰付近で静水圧より小さく、谷付近では大きくなる事が認められた。従って、dune type, chutes & pools type においては、圧力分布は水面形とほぼ類似の分布を示し、水面形との位相差はほとんど認められなかった。しかしながら、anti-dune type においては圧力分布は水面形と 180° の位相差をもつことになる。底面に作用する圧力から静水圧を取り除き、遠心力によって生ずる谷と峰における圧力の差を $1/2 \rho U_m^2$ で無次元化したところ、dune type では 5.41×10^{-2} , chutes & pools では 1.97×10^{-2} , anti-dune type では 1.11×10^{-1} の値をとる。dune type や chutes & pools type が小さな値をとる理由として、それらの流れでは遠心力が上向きに作用する峰付近で水深の急激な減少が生じ、加速された流れとなり上向きの遠心力の効果が押えられるためと思われる。

dune type の平均流速分布に対数則をあてはめ、得られた底面せん断応力の分布を示したのが図-4である。図中の直線は、平均値を示す。加速域の凹部においては、遠心力が壁面に向って作用すると同時に、縮流のためせん断応力は増大する。そしてせん断応力は加速域における底面の変曲点で最大値をとる。一方、凸部においては遠心力が上向きに作用するため、せん断応力は急減する。減速域においても遠心力が下向きに作用する凹部に入ると、せん断応力は増加し始める。このことから、峰の背後では剥離は生じていないように思われる。大貫等⁴⁾によってえられた dune type の流れのせん断応力分布には凸部においてせん断応力を急減する特徴は観察されていない。図-5は、得られた摩擦速度 u_* を用いて dune type の平均流速を無次元化したものである。加速・減速域を問わず、対数則が成立していることがわかる。しかしながら、chutes & pools や anti-dune type では、図-3より明らかな様に対数則から u_* を評価することは困難である。

図-6(a)~(c)に各タイプの流れにおける主流方向の乱れ強度 $\sqrt{u'^2}$ の等値線を示す。dune type の乱れ強度分布は、壁面近傍を除いて対称である。乱れ強度の大きい領域が、壁面ごく近傍 ($z/h \leq 0.2$) において形成され、それは加速域より減速域において大きな値をもつ。 $0.7 \geq z/h \geq 0.4$ の領域では乱れは境界の影響を受けず、流線に沿ってほぼ一様な値をもつことがわかる。また、 $z/h \geq 0.7$ では水表面の影響で再び乱れが大きくなっている。chutes & pools では水面形、圧力分布等が底面と位相差をもち非対称となるため、乱れ強度の分布も非対称となる。峰では、流体が加速されているため乱れ強度の小さい領域が形成されるが、減速

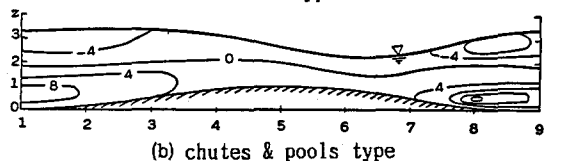
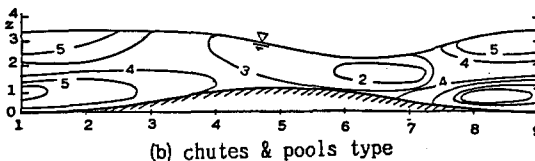
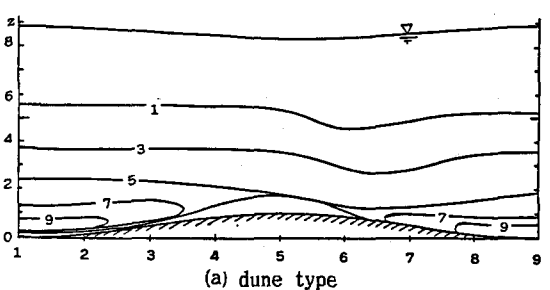
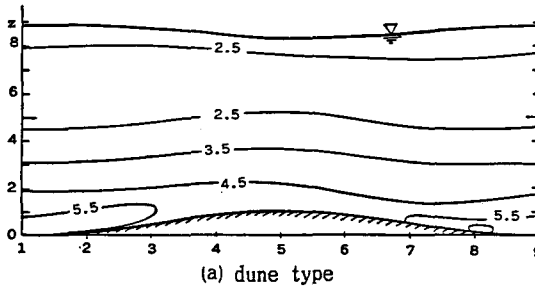


図-6 乱れ強度 $\sqrt{u'^2}$ の contour line (単位 cm/s)

図-7 Reynolds応力 $-\overline{u'v'}$ の contour line

域の谷近傍では非常に大きな乱れが分布する。水表面においても跳水の存在で乱れが卓越していることがわかる。このように、chutes & pools では他の2つのタイプの流れよりかなり小さなRe数にもかかわらず、大きな乱れを形成する。anti-dune type の乱れ強度は、水面形の対称性のためにほぼ対称な分布をしているが、dune type の分布形とは異なり、水深全域にわたって壁面と水表面の影響が見られる。谷近傍では、他の流れのタイプと同様大きな乱れが形成されていることがわかる。鉛直方向の乱れ強度の分布形は、それぞれの流れにおける $\sqrt{u'^2}$ の分布形とはほぼ類似しており、その絶対値は $\sqrt{u'^2}$ の約半分の値をとる。これは、壁面せん断流における乱れの特徴の一つであるが、加速、減速、遠心力等の影響を受けた乱れにおいても成り立つようである。

図-7(a)~(c)は、それぞれのタイプの流れにおける Reynolds 応力の空間分布を示したものである。dune や anti-dune type の Reynolds 応力は、底面近傍を除いて対称な分布をしている。図-6(a)において見られるのと同様、Reynolds 応力においても dune type では境界の影響を受けない層が形成される。一般に平板壁面乱流においては、Reynolds 応力の鉛直分布は壁面近傍で最大値をとりその後単調に減少するが、dune type や anti-dune type の流れの減速域では、Reynolds 応力分布は一度極小値をとった後、増加して極大値をとり、水表面に近づくにつれ再び減少するパターンを示す。(図-10 参照) 特に、anti-dune type においてその傾向が顕著であることより、図-7(c)においてその極小値を連ねた線を破線で示す。Reynolds 応力分布が極小値をもつ理由については、後に若干の考察を行う。ここでは、極小値を連ねた線は、anti-dune において底面の1波長間で水表面近くまで達しているが、dune type においては $z/h \leq 0.2$ 以内に限定されていることを明記しておく。chutes & pools では、Reynolds 応力の分布形は非対称となり、減速域における壁面近傍で非常に大きな値を示す。また、跳水域においてはかなり大きな負の Reynolds 応力を生ずるが、図-3(b)で示されている様に平均流速勾配も負となるため、跳水域は乱れの生成にかなり重要な役割を果たしていることがわかる。 $z/h \approx 0.5$ において平均流速勾配が0となる層が形成されるため、そこでは Reynolds 応力も0に近い値をとる。

図-8は、dune type の乱れ強度を平均摩擦速度 u_* と局所的な水深 h を用いて無次元化したものである。ここで、 u_* は対数則より評価した u_* の平均値である。図中の破線は、 $\sqrt{u'^2}/u_* = 2.30 \exp(-z/h)$ 、 $\sqrt{v'^2}/u_* = 1.27 \exp(-z/h)$ 、で与えられる開水路乱流における関係である。⁵⁾ $z/h \leq 0.4$ において乱れ強度は、加速・減速の影響を受けるが、平均的に壁面近傍で $\sqrt{v'^2}/u_*$ は1.3に近い値をとり、 $\sqrt{u'^2}/u_*$ は2.6程度の値をとる。 $z/h \geq 0.4$ において、壁面の影響を受けない constant core region が形成される。anti-dune や chutes & pools においては、この様な明瞭な constant core region は形成されない。(図-6(b), (c) 参照)

図-9(a)~(c)に、dune, chutes & pools, anti-dune type における乱れの積分長さスケール ℓ の分布を示す。ここで、積分スケール

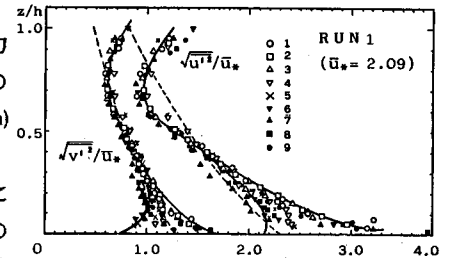
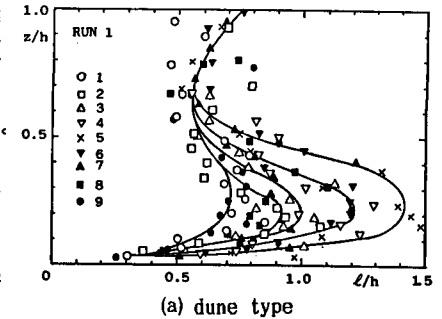
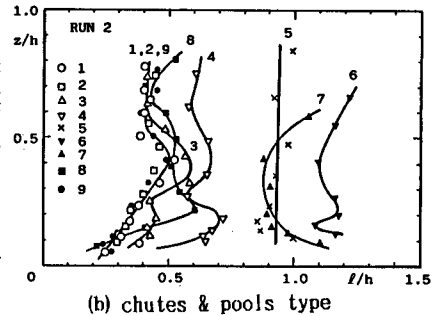


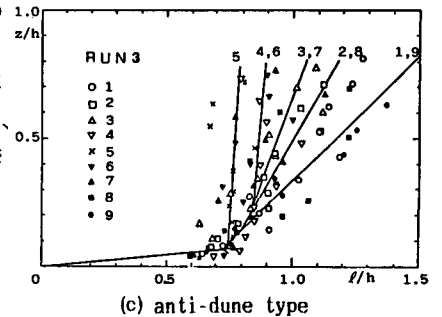
図-8 dune type の乱れ強度分布



(a) dune type



(b) chutes & pools type



(c) anti-dune type

図-9 積分スケールの鉛直分布

は、主流方向の乱れの自己相関に基づき算定されている。全体的に、積分スケールは、水深とほぼ同じオーダーである。dune type における積分長さスケールは他の2つのタイプと異なり、 $z/h \geq 0.5$

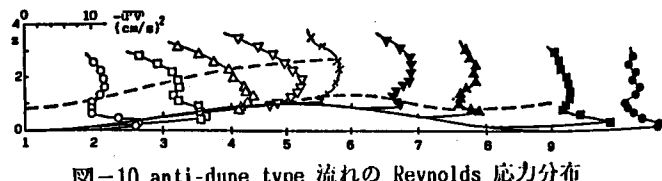


図-10 anti-dune type 流れの Reynolds 応力分布

で $\ell/h \approx 0.6$ の値をとる constant core region が存在する。主流の加速・減速の影響を受け、 $z/h \leq 0.5$ における積分スケール程度の渦は、引き伸ばされたり縮んだりして流下する。 $z/h \approx 0.2$ において、 ℓ/h は極大値をとり、峰において ℓ/h は谷の約2倍に引き伸ばされる。chutes & pools では、平均流速が局所的にかなり変化するため、積分スケールも一波長間で大きく変化する。加速域では底面近傍の渦が引き伸ばされ、峰ではほぼ一様に水深程度まで引き伸ばされる。anti-dune type においては、積分スケールはかなりのばらつきはあるが、壁面近傍では $\ell/h \approx 0.7$ をとり、平均流速勾配に応じて変化する。渦は平均流のせん断によって引き伸ばされたり収縮したりするものと考えられる。anti-dune type の流れでは、加速・減速の効果が軽減されるため、他の2つの type の流れに見られるような峰付近での急激な渦の伸長は生じず、 ℓ/h は 0.7 程度になる。

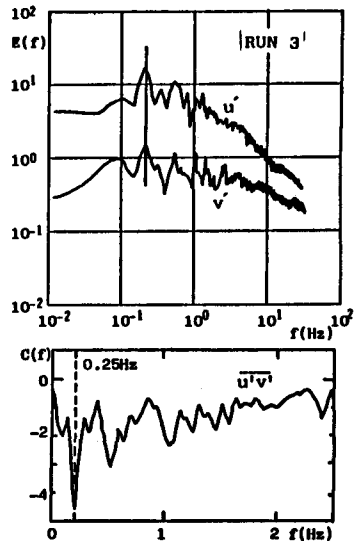


図-11 Reynolds 応力が極小となる位置における乱れエネルギー・スペクトルと $\overline{u'v'}$ のコ・スペクトル

anti-dune や dune type の流れの Reynolds 応力分布に見られる極小値について考察する。図-10 に anti-dune type の Reynolds 応力分布を示す。破線で示すように、峰付近において生じた Reynolds 応力の極小値は、減速域に進むにつれ明瞭となることがわかる。Reynolds 応力が極小となる位置における乱れのスペクトルによると図-11 に示され

るように、0.25Hz 付近に卓越した組織渦が形成されていることがわかる。そして、その卓越周波数における Reynolds 応力は、かなり大きな値を示す。以上の結果を考慮すると、主流によって峰背後で形成され始めた組織渦は、凹面に沿う流れによる遠心力不安定によって明瞭な渦に発達する。その渦の存在は主流の流下を可能にしやすくする働きをもち、それ自身の周波数帯における Reynolds 応力は増加するが流れ場全体の Reynolds 応力を低下させる役割をもつものと考えられる。この組織渦の上昇高さは、dune type においては $z/h \leq 0.2$ に限られており、anti-dune type においては水面面まで達するようである。従って、anti-dune type の流れにおけるこの組織渦の壁面からの放出が constant core region の崩壊に重要な役割を果たしていると考えられる。

4. むすび

- (1) dune type, chutes & pools type, anti-dune type の流れの形成領域は固定床・移動床を問わず、 $Fr-kh$ 平面において分類できる。
- (2) dune type において平均流速は対数分布をしており、chutes & pools では跳水等の影響をうけてかなり複雑である。anti-dune type の流れは速度勾配がほぼ一様なクエット流れに近い流速分布をもつ。
- (3) dune type の流れにおいて、壁面近傍に作用するせん断応力は加速域の変曲点付近で最大となり、峰付近では遠心力の影響で急激に減少する。
- (4) それぞれの流れにおいて乱れ強度は峰背後の壁面近傍において大きな値をとる。特に dune type では、 $z/h \geq 0.4$ で constant core region が形成される。
- (5) 乱れの積分スケールは dune type の流れでは、 $z/h \leq 0.5$ の領域において加速・減速の影響を受け、

伸長収縮をくり返す。anti-dune では、加速・減速の影響よりはむしろ主流の速度勾配に応じた伸縮を行う。

- (6) dune type や anti-dune type の Re 数の大きい流れでは、峰の背後から組織渦が形成され、主流の遠心力不安定によりそれはさらに発達する。この渦の存在は、流れ場の Reynolds 応力を減少する効果をもっている。

最後に、終始有益な討論ならびに助言をして下さいました九州大学小松利光助教授に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Hsu, S.T. and Kennedy, J.F.: Turbulent flow in wavy pipes, J. Fluid Mech., 47, 481-502, 1971.
- 2) 日野幹雄, 宮永洋一: 波状境界面をもつ二次元管路流の解析, 土木学会論文報告集, No.264, 63-75, 1977年.
- 3) 福岡捷二, 奥津一夫, 山坂昌成: 急勾配移動床流れにおける河床波の形状, 伝播特性, 土木学会論文報告集, No.323, 77-89, 1982年.
- 4) 大貫博史, 城衛, 藤堂憲幸, 吉川秀夫: 波状河床上の転動粒子について, 第29回水理講演会論文集, 491-496, 1985年.
- 5) 瀧津家久: 開水路の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年.