

II-182 Sand wave 状の粗度における流れと乱れ

九州大学工学部 正員 椿 東一郎
 学正員 原口 裕司
 佐賀大学理工学部 正員 ○渡辺 訓南

1. まえがき

最近移動床に発生する sand wave が掃流砂・浮流砂などに著しい影響をおよぼすことが指摘されているが、抵抗法則や浮遊機構を説明する上では sand wave 上の流れや乱れの構造を明確にする必要がある。本文は dune をモデル化した三角形粗度を用いて、平均流速分布、sand wave の圧力抵抗、底面の流速分布などの平均的な水理量および乱れの強度や scale などの乱れの特性量の一波長間での変化に注目して検討を加えたものである。

2. 実験概要

実験に用いた水路は幅 60 cm で水路底に 2 次元 dune のモデルとして波長 $\lambda = 20$ cm、波高 $H = 1$ cm の木製三角形粗度が 10 m 区間に渡って敷きつめられている。実験は 4 ケースで Ex. 1 ~ 3 では一波長間の水面形、底面の圧力分布、底面流速分布および wake 長が測定され、Ex. 4 では 2 成分ホットフィルム流速計によって平均流速および乱れ速度を計測した。測定断面の一部を図-1 に示すが、断面番号は谷の位置①から測った距離 (cm) を表わしている。水理条件は表-1 のようである。

実験 ケース	Q (l/s)	U (cm/s)	$\bar{h}$ (cm)	I_e	u_* (cm/s)	Re $\times 10^4$	Fr
Ex. 1	20.2	45.6	7.89	$1/571$	3.68	2.67	0.48
Ex. 2	12.8	36.9	5.78	$1/519$	3.30	1.79	0.49
Ex. 3	4.71	21.9	3.58	$1/577$	2.47	0.748	0.37
Ex. 4	12.9	38.3	5.62	$1/535$	3.21	1.74	0.52

表-1 水理条件

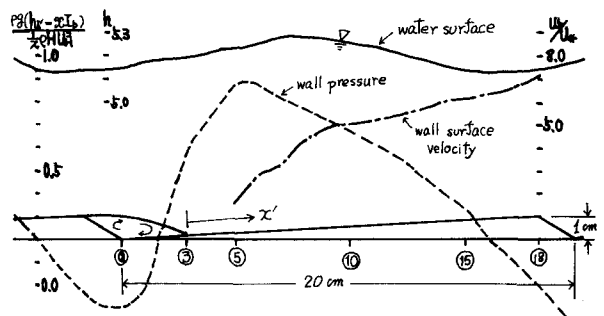


図-1 流れの概況

3. sand wave 上の流れの構造

① sand wave の抵抗； sand wave 上の流れの様子は図-1 に示す (Ex. 2 の場合)。実線および点線は一波長間の水面形と底面の圧力分布で、wake 長は谷から測っていずれも 3 cm 程度である。今、一波長間の全抵抗を $T_0 (= p g \bar{h} I_e)$ 、sand wave の圧力抵抗を D 、背面の摩擦抵抗を τ とすれば、一波長間の力の釣合いは

$$T_0 = \frac{D}{\lambda} + \frac{\tau}{\lambda} \quad (\lambda: \text{reattachment point より山までの距離})$$

である。したがって、圧力分布より求めた圧力抵抗 D を用いると、全抵抗に占める圧力抵抗および摩擦抵抗の割合を見積もることができ、圧力抵抗は $D/T_0 \approx 0.73$ となった。また、sand wave の波高の高さ (平均河床より) における流速は $u_b/u_* \approx 0.88$ 、圧力抵抗係数 $C = D / \frac{1}{2} \rho u_*^2 H$ は $C \approx 0.38$ である。一方、摩擦抵抗は $\tau/T_0 \approx 0.35$ であって、本実験の場合は Yalin の提案した有効掃流力の式 $\tau/T_0 = (q/q_c)^2$ の関係と満足して

いるが、この問題は掃流砂量を見積もる上で重要であり、なお検討が必要であろう。

② 底面の流速分布； sand wave の背面に沿う流速 u_b は図-1 に示すように reattachment point 近傍より山にかけて次第に増大し、山の位置で peak に達する。図-2 によれば u_b/u_* は reattach より距離 x' の 1/2 乗に比例しており、この関係を用いると背面での流砂量は $q_b \sim u_b^3 \sim x'^{3/2}$ となる。このことは、sand wave が形を変えずに ω の

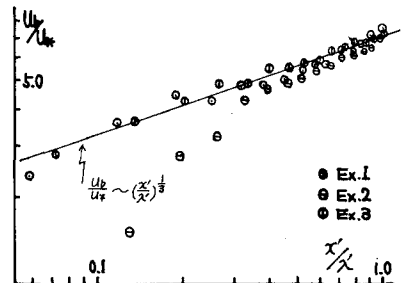


図-2 底面流速分布

速度で進行するとして、流砂量の連続の式および河床高の式から流砂量が $q_b = (1-e)u\tau$ で表わされることに対応している。(e; 砂の空率率)

③平均流速分布：図-3に一波長間の平均流速分布を示す。山⑮では対数則よりは一様に近い分布形をしており、谷⑩～reattachment point ③までは河床の逆流渦の影響を受けて速度勾配が急変し、いわゆる減速領域を形成し、その後⑮までの区間ではほぼ対数則 $u/u_* = 5.75 \log_0 y/h$ に従い山⑮までが加速領域となる。

4. sand wave 上の乱れの特性

④乱れの強度：乱れ強度の分布を Kennedy, Laufer の結果と共に図-4, 5に示す。 u' については Kennedy と同様な傾向を示しており、減速領域では wake の影響で大きな値を持ち、加速領域では減少していくのがわかる。 v' についてはその傾向がなお著しく現われており、移動床の場合砂粒は山を過ぎたところではこの鉛直方向の強い乱れに補えられて上方に運ばれていくものと思われる。この傾向は u' , v' 共に y/h の値がほぼ 0.3 以下について特に顕著であり、これは流速分布の加速・減速の著しい領域と一致している。

⑤エネルギー-消散率と乱れの scale；エネルギー-消散率および micro scale を Taylor の凍結乱流の仮定を用いて波数スペクトルより算定した。一波長間のエネルギー-消散率は図-6のように変化し、いわゆる減速領域では流れのはくりによるエネルギーの消散が顕著であり、reattachment point を過ぎると山にかけて次第に減少していく様子がみられる。また Taylor の micro scale もこれに対応して減速領域では小さく reattachment point での最小値より加速領域にかけて大きくなり山で最大となる。平均 scale についても micro scale とほぼ同様な変化がみられた。

③乱れのパワースペクトル；

各断面における河床近傍の波数スペクトルを図-7に示す。いずれにおいても $-5/3$ 乗則に従う慣性領域と -3 乗則に従う粘性領域の存在が認められる。減速領域では high wave number 成分の占める割合が大きくなり、加速領域で山にかけて次第に減少していくのがわかる。

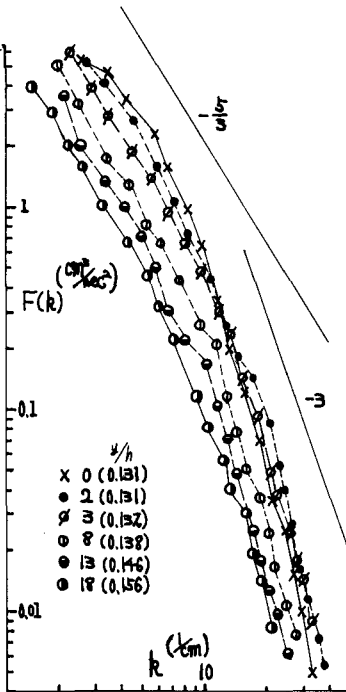


図-7 乱れのスペクトル

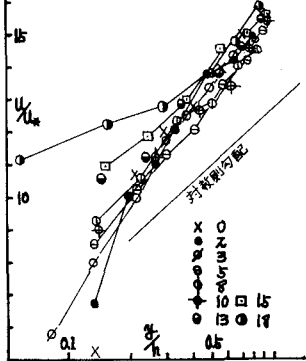


図-3 平均流速分布

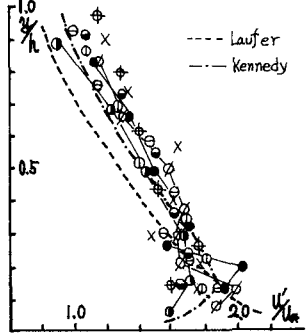


図-4 乱れの強度 (u')

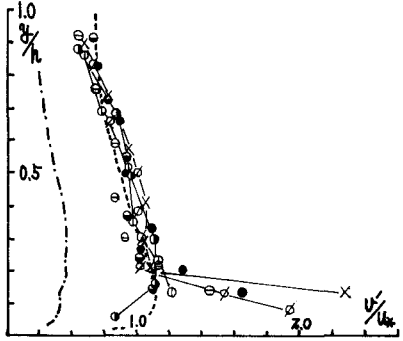


図-5 乱れの強度 (v')

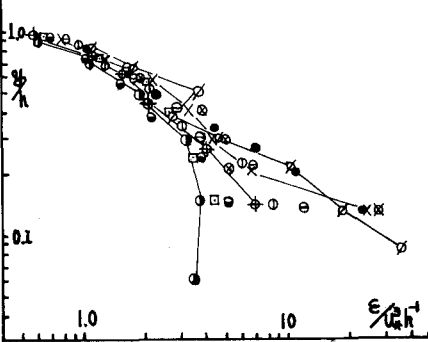


図-6 エネルギー-消散率