

京都大学大学院

学生員

浅野 富夫

京都大学防災研究所

正員

今本 博健

京都大学大学院

学生員

大年 邦雄

1. はじめに

開水路浮遊砂流における乱れ特性は、Vanoni¹⁾らの実験結果に基づき、日野²⁾により統一的に説明され、浮遊砂濃度の増加とともに乱れの強さはやや減少し、流れの中心部のエネルギー逸散は増加するとされているが、滑面上の浮遊砂流に関する実験的検証は遅れているようである。しかしながら、ホットフィルム流速計を初めとした乱れ計測器の発達に伴い、高周波数の速度変動の解析も可能となり、浮遊砂流の乱れ特性についてもかなり詳細な実験的検討もなされるようになってきた。本報告は、別報³⁾と同様の見地から、まず滑面上の浮遊砂流の乱れ特性を実験的に明らかにすることを目的としたものであって、乱れ特性量についての定量的検討も加えている。なお、実験装置および方法の詳細は既報^{4),5)}のとおりである。

2. 相関およびスペクトル特性

浮遊砂流における時間相関係数 $R(t)$ の計測例として、半水深におけるものを示すと図-1のようになる。図において、 $R(t)$ の特性は同一条件における清水流の場合と比較して顕著な差異を示さず、 $R(t)$ は遅れ時間 t の増加とともに減衰し0に近づいている。なお、この減衰過程は t の小さい領域における急激な減衰と t の大きい領域における緩やかな減衰とに大別されるが、これは開水路乱流場が水深および水路幅などに支配される乱れによって構成されるという、いわゆる多重構造性としての特性を示すものである。さらに、 $R(t)$ は、パーストの発生周期 T_d を示す遅れ時間において、緩やかなピーク (second mild maximum) を示している。

一方、図-2は図-1に対応した次元エネルギー・スペクトル $S(k)$ を波数表示したものであって、図中の f_B はサンプリング周波数、 N はデータ数、 N_R は繰返し数をそれぞれ表している。図において、 $S(k)$ は $R(t)$ と同様に浮遊砂流と清水流とで顕著な差異を示さず、低波数領域では波数 k に関係なくほぼ一定 (図-2は $k \cdot S(k)$ で表示されているため1の勾配) となるとともに、中間波数領域では k の $-5/3$ 乗に、高波数領域では k の -3 乗に比例して減少しており、それぞれ、生成、慣性および粘性領域におけるスペクトル相似則が浮遊砂流においても適用されることが知れる。さらに、図に示された $S(k)$ には、生成および慣性領域がそれぞれ2ヶ所に認められ、乱れの多重構造性が $S(k)$ からも確かめられる。なお、高波数側のスペクトルは水深に、低波数側のスペクトルは2次流の幅にそれぞれ関係しているものと考えられる。

3. 乱れ特性量

開水路乱流場は多重構造性であるため、乱れ特性量を実験的に検討する場合、その評価法は非常に重要な問題となり、できるだけ計測スケールに支配されない解析法を用いる必要があるが、本研究では次の方法に

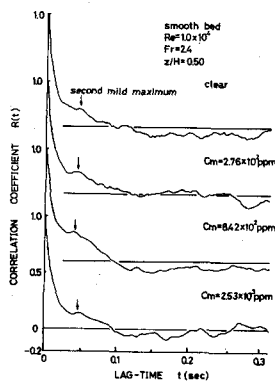


図-1

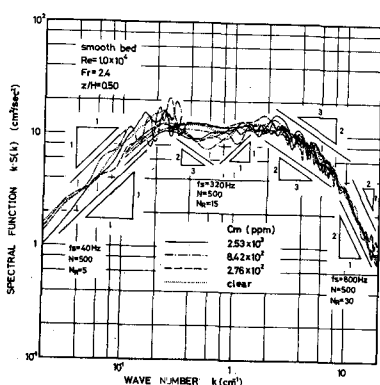


図-2

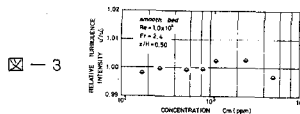


図-3

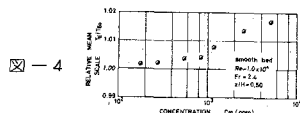


図-4

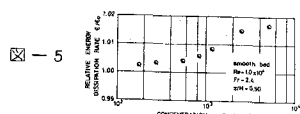


図-5

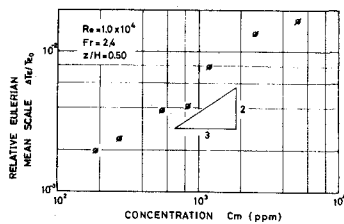


図-6

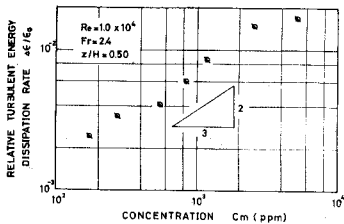


図-7

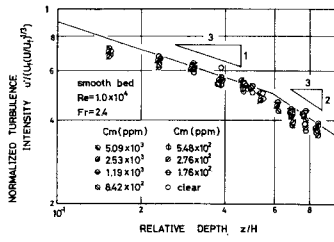


図-8

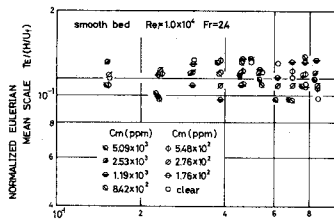


図-9

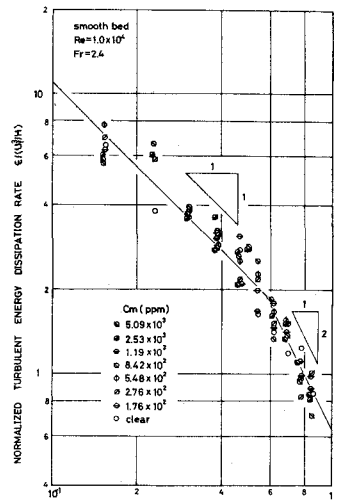


図-10

より乱れの強さ u' , 平均スケール T_B およびエネルギー逸散率 ε を評価している⁵⁾。まず, T_B はバーストの発生周期 T_d と一致するとみなされるため, $R(t)$ より算定した T_d より T_B を評価し, u' は平均値評価時間を T_B の 10² 倍程度としたときの速度変動の r.m.s. より評価している。一方, ε は慣性領域の $S(k)$ に Kolmogorov⁷⁾ の -5/3 乗則を適用し, 次式により評価している。すなわち,

$$S(k) = S_E \cdot \varepsilon^{-2/3} k^{-5/3} \quad S_E = 0.47 \quad (1)$$

図-3, 4, 5 は以上のようにして評価した u' , T_B , ε の一例として半水深におけるものを示したものであって, それぞれ, 清水流における u'_0 , T_{B0} , ε_0 で無次元化されている。図より, u' が浮遊砂の平均重量濃度 C_m に関係なくほぼ一定とみなされるのに対し, T_B および ε は C_m の増加とともに増加することが知れる。さらに, T_B および ε の増分 $\Delta T_B (= T_B - T_{B0})$ および $\Delta \varepsilon (= \varepsilon - \varepsilon_0)$ について示すと図-6 および 7 のようになり, $\Delta T_B / T_{B0}$ および $\Delta \varepsilon / \varepsilon_0$ は同程度の大きさであって, それぞれ C_m の b'' 乗に比例して増加する傾向が認められる。すなわち,

$$\Delta T_B / T_{B0} = \Delta \varepsilon / \varepsilon_0 = a'' C_m^{b''} \quad (2)$$

図より, 指数 b'' は 2/3 程度と推定され, また比例係数 a'' は別報³⁾ に示した抵抗係数の増分 ΔC_f に対する係数 a の 1/6 程度と推定される。

さらに, u' , T_B , ε をレイノルズ数相似則から導かれる方法⁸⁾ によって無次元化して示すと図-8, 9, 10 のようになり, 別報³⁾ に示した清水流に対する普遍関数表示式が浮遊砂流についても適用されるようである。

$$1) \quad 0.1 < z/H \leq 0.6$$

$$2) \quad 0.6 < z/H < 0.9$$

$$\frac{u'}{U_F (U/U_F)^{1/3}} = 0.42 (z/H)^{-2/3} \quad (3)$$

$$\frac{u'}{U_F (U/U_F)^{1/3}} = 0.35 (z/H)^{-2/3} \quad (6)$$

$$\frac{T_B}{H/U_F} = 0.115 \quad (4)$$

$$\frac{T_B}{H/U_F} = 0.115 \quad (7)$$

$$\frac{\varepsilon}{U_F^3/H} = 1.1 (z/H)^{-1} \quad (5)$$

$$\frac{\varepsilon}{U_F^3/H} = 0.63 (z/H)^{-2} \quad (8)$$

4. おわりに

以上のように, 滑面上の浮遊砂流の乱れ特性がかなり明らかにされてきたが, 粗面上の浮遊砂流の特性とは必ずしも一致しておらず, さらに詳細な検討が必要であろう。また, 本研究では浮遊砂の濃度のみに着目したが, 粒子の粒径, 比重などの効果についても今後検討していきたい。

参考文献

- 1) Vanoni: Proc. ASCE, 70, 1944.
- 2) 日野: 土木学会論文集, 92, 1963.
- 3) 今本・浅野・大年: 第32回年講, 1977.
- 4) 今本・浅野・大年: 昭和52年度関西支部.
- 5) 今本・浅野・石垣: 昭和52年度関西支部.
- 6) 今本・浅野: 第19回水理講演会, 1975.
- 7) Kolmogorov: Doklady, 32, 1941.
- 8) 今本: 土木学会論文報告集, 197, 1972.
- 9) 幸道・今本・浅野: 第32回年講, 1977.