

名城大学理工学部 正員 新井宗之
京都大学防災研究所 正員 高橋 保

1.はじめに：水と土砂の高濃度の流れの流動機構は、含まれている粒子の粒径と濃度によって変化することが知られている。すなわち高濃度で粒子が比較的大きな場合は粒子の衝突の効果が支配的なダイラタント流体、粒子径が粘工程度の高濃度の場合にはビンガム流体モデルがよく適応するとされている。著者らはこれらの流動機構の変化における粒子径や濃度の限界を明らかにすべく一連の実験を行、て来たが、流動特性は単に粒子径や濃度のみによって変化するのでなく、粒径水深比(h/d)によっても変化することが分、て来た。そして流動機構も単にダイラタント流体、ビンガム流体のみならず粒子の衝突効果と乱れによる混合効果の両方が重要な場合のあることが分、た。ここではそのような流れの機構について述べる。

2.実験条件及び実験方法：実験砂は粒径が $d_{50} = 0.0094 \sim 0.028 \text{ cm}$ 、砂の密度は $\rho = 2.62 \sim 2.67 \text{ g/cm}^3$ 、土砂の体積濃度は $c = 0.09 \sim 0.35$ 、水路勾配は $\theta = 10^\circ \sim 20^\circ$ である。実験水路は長さ 12 m 、水路幅は下流より 6 m から 12.5 m 、上流側 6 m から 15 cm の側面硬質透明アクリルであり、上流側 6 m に実験砂を $15 \sim 20 \text{ cm}$ 敷き潤滑状態にしてから上流端より給水し泥流を発生させた。低濃度の実験では発生した泥流に水路中央部で清水を加えた。流速分布の測定は水路下流端から $1 \sim 2 \text{ m}$ 上流で測定した。なお水深は $h = 0.65 \sim 1.25 \text{ cm}$ で、水深粒径比は $h/d = 29 \sim 133$ である。

3.理論：比較的小さい粒径の高濃度流れでは粒子どうしが衝突し合う他に乱流によ、て粒子を含んだ流体塊が混合するものと考えられる。水深方向の平均濃度が一定であると、乱れの大きさも粒子径よりも大きなものであるとすると、せん断力は、
$$\tau = r_m l^2 \left(\frac{du}{dy} \right)^2 + a_i \sin \alpha \propto (\lambda d)^2 \left(\frac{du}{dy} \right)^2 \quad \dots (1)$$

のように、大規模な流混合と粒子の衝突の効果の乱として表わせるであろう。また、せん断力は

$$\tau = \tau_m \sin \theta (h - y) \quad \dots (2)$$

であるから、混合距離 l を $l = \kappa y$ と仮定し、 $1 \gg y/h$ の

近似で式(1)、(2)より流速 u を求めれば、
$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left| \frac{Y + \sqrt{Y^2 + \phi^2}}{Y_0 + \sqrt{Y_0^2 + \phi^2}} \right| \quad \dots (3)$$

または
$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \left\{ \sinh^{-1} \left(\frac{Y}{\phi} \right) - \sinh^{-1} \left(\frac{Y_0}{\phi} \right) \right\} \quad \dots (3')$$

となる。滑面の場合： $Y_0 = \frac{\alpha}{R_*}$ 、 $R_* = \frac{u_* h}{\nu}$ 、 $\alpha = 1/9.025 \dots (4)$

完全粗面の場合： $Y_0 = \frac{b R_*}{h}$ 、 $R_* = \text{粗度高さ}$ 、 $b = 1/30 \dots (5)$

である。ここで、 $Y = \frac{\tau}{h}$ 、 $u_* = \sqrt{g h \sin \theta}$ 、 $\phi^2 = \lambda^2 \left(\frac{a_i \sin \alpha}{\kappa^2} \right) \left(\frac{\alpha}{r_m} \right) \left(\frac{d}{h} \right)^2 \dots (6)$

$r_m = \rho + (\rho - \rho_s) C$ ：見掛けの平均密度、 λ ：線濃度。

図-1は滑面水路における粒子径 0.1 mm 以下の粒子を用いた場合の流速分布であり、図-2は水路床に実験砂と同じ粒子を付けた粗面における実験結果である。1) づれの場合も粒子どうしの衝突だけや乱れだけの考えでは測定結果を十分に説明し得ず、両方の効果を考慮に入れた式(3)でよく説明されることわかる。

と、3で式(3)又は(3')を積分して断面平均流速 $\bar{u}$ を求めると、

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \left\{ \ln \frac{1 + \sqrt{1 + \phi^2}}{Y_0 + \sqrt{Y_0^2 + \phi^2}} - \sqrt{1 + \phi^2} + \phi \right\} \quad \dots (7)$$

または

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \left\{ \sinh^{-1} \left(\frac{1}{\phi} \right) - \sinh^{-1} \left(\frac{Y_0}{\phi} \right) - \sqrt{1 + \phi^2} + \phi \right\} \quad \dots (7')$$

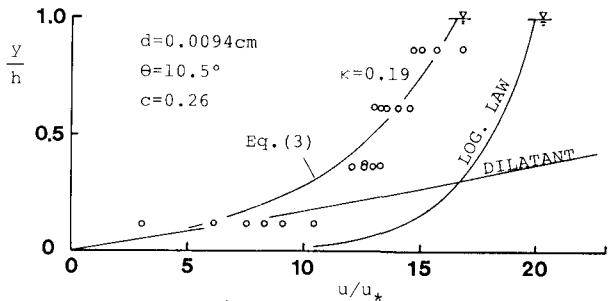


図-1

であり、滑面、粗面における γ_0 は式(4)、(5)である。

4. カルマン定数：図-1、図-2でLOG. LAWと書いた実線は清水乱流の流速分布を示しているが実験値はいずれもこれより大幅に小さい流れを示している。濃度の増加に伴い、減少するカルマン定数 K を用いると通常の対数則では u/u_* はさらに大きくなり実験結果と一層違う結果となる。このことは粒子が固別に周囲の流体の流れによって浮遊させられているという浮遊砂の考えがこのような高濃度の場合にはもはや適用できないことを示唆しているものと思われる。

ここで、混合距離を $\lambda = K\gamma$ と仮定しているが、実験結果を式(3)で表わすとき最もよく適合する K を求めてこれと体積濃度 c との関係を示すと図-3のようである。これによると濃度が $c=0.1 \sim 0.2$ までは K が減少するが、それよりも濃度が高くなると K は一定もしくは増加する傾向のあることがうかがわれる。 $c=0.35$ 以上の濃度のデータが少なく、濃度 c の増加とともに K が一樣に減少するのではないようである。

5. 抵抗則： U/u_* と z/d の関係を図-4に示す。ただし測定値の U は流速分布の測定結果から求めたものである。また(7)式を示す値は $u_* = 18.3 \text{ cm/s}$, $R_* = 1830$ で $K=0.25$ ($c=0.3$)と 0.28 ($c=0.1$)の場合について求めたものである。ダイラタント流体モデルでは次式
$$U/u_* = \frac{2}{3} \left[\frac{1}{\alpha_1 \alpha_2 \alpha} \left\{ c + (1-c) \frac{\rho}{\rho_s} \right\} \right]^{\frac{1}{2}} \frac{1}{\lambda} \left(\frac{z}{d} \right) \quad (8)$$
を用いている。ただし $c=0.3$ の場合のみを示した。破線は清水の完全粗面乱流の式で $\rho_s = d$ とした結果である。実験結果によれば濃度が $c=0.3$ や $c=0.35$ のように高い場合であっても z/d (あるいは γ)が大きな値の状態では粒まじりの衝突だけでなくダイラタント流体モデルよりも衝突と流れの効果を考慮した式(7)と比較的よく適合している。そして粒子の衝突の効果が卓越する状態から混合の効果も相対的に強い影響を与え始める粒径水深比 z/d は本実験の勾配範囲では $z/d \approx 35$ 程度である。

6. おわりに：乱流混合と粒子の衝突効果の流体モデルにおける混合距離 λ 、カルマン定数 K と濃度 c との関係を実験的に明らかにした。また $\theta = 10^\circ \sim 20^\circ$ の範囲で粒子の衝突の効果から混合の効果も相対的に強くなる粒径・水深比(z/d)の値を示した。

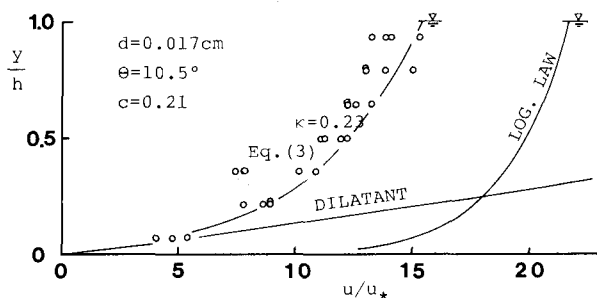


図-2

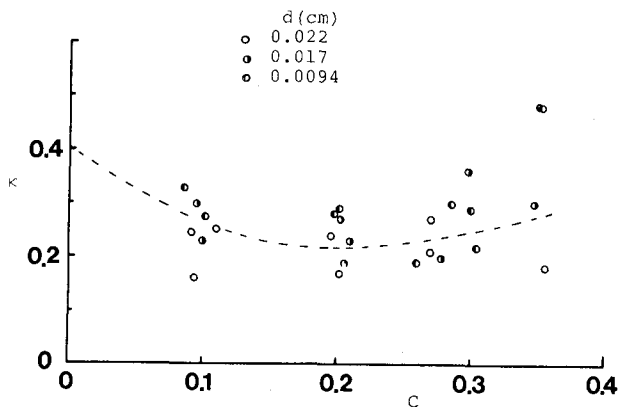


図-3 カルマン定数と濃度の関係

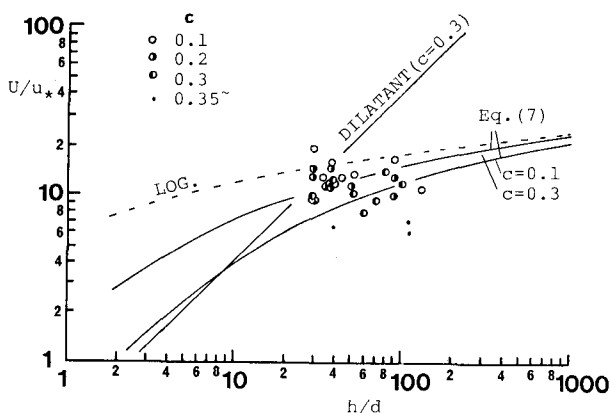


図-4 抵抗則