

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 芦田和男
 京都大学防災研究所 正員 高橋 保

1.はじめに：水に土砂を含む流れの機構は、濃度の薄いものでは容積濃度がせいぜい2~3%程度である浮遊砂と、濃度の大きいものでは粘土粒子等の極微細な粒子を含む流れおよび粒径が比較的大きく水深・粒径比が10程度のオーダの土石流が主として研究されてきた。しかしこの中間的な濃度および粒径における流動機構については不明な点が多い。著者らはその究明のために粒径、土砂濃度を系統的に変化させて実験を行いつつあり、いくつかの知見を得た¹⁾。ここでは土砂を多量に含む流れの流動機構の考え(モデル)を示すとともに実験結果と比較し考察する。

2.流動機構：水などに多量の粒子を含む流れについて、粒子どうしの衝突による運動量の交換と、粒子及び流体がある大きさの塊として動くことによる運動の交換とが考えられる。いま粒子及び流体がある塊として移動したとしても平均的にみると粒子は均一に分布していると仮定する。従って粒子が格子状に配列しているとも仮定するとせん断力は、

$$\tau = r_m l^2 \left(\frac{du}{dy} \right)^2 + a_i \sin \alpha (\lambda d)^2 \left(\frac{du}{dy} \right)^2 \quad \dots (1)$$

と表わすことができる。ここに、 $r_m = \rho + (\alpha - \rho)C$: d かけの平均密度、 ρ, α : 水及び粒子の密度、 d : 粒子径、 C : 粒子の容積濃度、 $\lambda = 1/(\alpha/\rho)^{1/3} - 1$: 線濃度、 α : 粒子どうしの衝突角、 a_i : 定数、 l : 混合距離。式(1)の右辺第一項は混合の効果であるが代表的な粒径が粒径 d 程度がそれ以下の場合には、粒子間の水の乱れによる効果である。ここでは粒径 d よりも大きな場合を考えている。右辺の第二項は粒子の衝突の効果であるが、濃度が低くなると無視され得ることが推測される。開水路において水深方向にも濃度が一定であるとすれば、水路床より y の高さのせん断力は、

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

である。ここに、 g : 重力加速度、 θ : 水路こう配、 h : 水深。式(1)と(2)が釣り合っており、混合距離を $l = \kappa y$... (3) と仮定し、 $1 \gg y/h$ である近似を行うと、一般解は

$$u/u_* = \frac{1}{\kappa} \ln \{ 2\kappa y + 2\sqrt{\kappa^2 y^2 + a_i \sin \alpha (\alpha/r_m) (\lambda d)^2} \} + A_0 \quad (4)$$

である。ここに、 $u_* = \sqrt{g h \sin \theta}$: 摩擦速度、 A_0 : 積分定数、境界条件として $y = y_0$ で $u = 0$ とする。また、式(4)は $\kappa \rightarrow 0$ すなわち $\lambda \rightarrow 0$ において清水の理論と適合しなければならぬ。いま壁面が滑らかな場合を考えると、 $y_0 = \frac{\nu}{\alpha u_*}$ 、 $a = 1/9.025$... (5) となる。よって滑らかな場合の流速分布式は次式のように表わすことができる。

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{\frac{y}{h} + \sqrt{\left(\frac{y}{h}\right)^2 + \lambda^2 \left(\frac{a_i \sin \alpha}{\kappa}\right) \left(\frac{\alpha}{r_m}\right) \left(\frac{d}{h}\right)^2}}{\frac{a}{R_*} + \sqrt{\left(\frac{a}{R_*}\right)^2 + \lambda^2 \left(\frac{a_i \sin \alpha}{\kappa}\right) \left(\frac{\alpha}{r_m}\right) \left(\frac{d}{h}\right)^2}}, R_* = \frac{u_* h}{\nu} \quad \dots (6)$$

同様に粗面の場合において、 $\kappa = 0$ で清水の流速分布と一致しなければならぬから、 $y_0 = b h$ 、 $b = \frac{1}{30}$... (7) となり、流速分布式は、

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{\frac{y}{h} + \sqrt{\left(\frac{y}{h}\right)^2 + \lambda^2 \left(\frac{a_i \sin \alpha}{\kappa}\right) \left(\frac{\alpha}{r_m}\right) \left(\frac{d}{h}\right)^2}}{\frac{b h}{h} + \sqrt{\left(\frac{b h}{h}\right)^2 + \lambda^2 \left(\frac{a_i \sin \alpha}{\kappa}\right) \left(\frac{\alpha}{r_m}\right) \left(\frac{d}{h}\right)^2}} \quad \dots (8)$$

3.実験：実験水路は長さ12m、幅12.5~15.0cm、両側面透明アクリルで10°~20°のこう配可変水路である。実験材料は粒径 $d = 0.21 \sim 0.09 \text{ mm}$ 、密度 $\alpha = 2.62 \sim 2.67 \text{ g/cm}^3$ の土砂を用いた。水路の上流側6mに土砂を湿潤状態

で深さ約15mm程度さなうし、上流端より水を給水して高濃度の流れを発生させ実験を行つた。流速分布の測定は下流端より2~3m上流側で行つた。濃度の変化は水路の上流端より6mの $x=3$ 、すなわち水路中央部で清水を給水することにより得た。また、土砂等が落下し流速を測定する部分の水路床はペンキ仕上りの滑面である。

4考察：粒径・水深比 d/h が小さく、比較的粒径が大きい高濃度流れについては粒子どうしの衝突が支配的であるとするダイラタントモデルがよく適応することが明らかにされており²⁾、次式のよう

に表わされている。

$$u/u_* = \frac{2}{3} \left(\frac{y}{h} \right) \left\{ \frac{1}{2c(1-c)} \left[c + (1-c) \frac{\rho}{\rho_s} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \left(\frac{1}{\lambda} \right) \left[1 - \left(1 - \frac{y}{h} \right)^{\frac{3}{2}} \right]$$
 図-1は容積濃度 $c=0.33$ の比較的高濃度の場合である。実験結果とダイラタントモデルとは比較的良好に一致しており、この程度の粒径・水深でも衝突の効果が大きいことがうかがえる。また図中に滑面乱流の流速分布及び式(6)の結果を示した。式(6)における K を実験結果に合うように決めてみると浮遊砂の考えの K の減少と同程度の値を示しており、以下次式を用いた K で図中の式(6)の結果を示した。

$$\frac{K_0}{K} = \frac{(1+\alpha'c)}{2} \left[1 + \{ 1 + 4BK_0(1+\alpha'c)S_1 \}^{\frac{1}{2}} \right],$$

$$S_1 = \frac{2(r-1)u_*}{u_*^2 \ln \frac{h}{d}} \cdot \frac{(h-d)}{[1+(r-1)c]} \quad \dots (10)$$

図-2, 3のように濃度が0.28, 0.12と下がるにつれてダイラタントモデルは実験結果と離れ、衝突の効果が減少することからうかがえる。特に $c=0.1$, $\lambda \approx 1$ 程度になると衝突の効果が非常に小さくなると思われる。これらのことより粒径・水深比 $\frac{d}{h}$ が20程度の場合では濃度 c が0.3より小さくなると粒子の衝突の効果は減少するようになる。また図-4は $c=0.28$ で図-2に対応するが、粒径・水深比 d/h が約45である。この場合、衝突の効果が小さくなっていることがうかがえ、衝突と混合の効果が d/h によっても変化することが示唆される。一方、式(6)は浮遊砂の考えからの K による式(10)程度の値で実験結果と比較的良好な一致を示した。

謝辞：本研究は一部文部省科学研究費(特別研究費)の補助を受けて行われ、感謝する。
 参考文献：1) 新井、高橋、水工学研究所誌、1982-11, 2) 高橋、水工学31-2, 30-A-1, 3) 田中、土砂全集、昭和34年

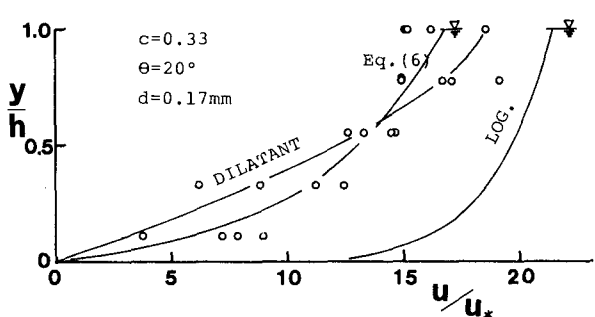


図-1

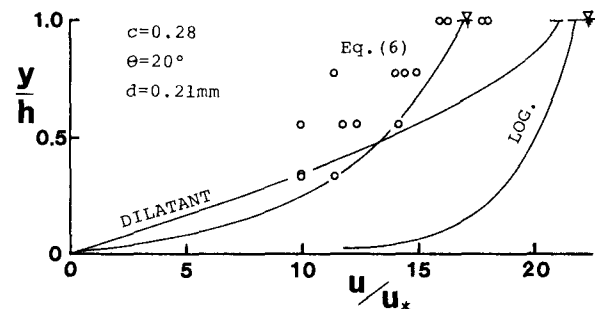


図-2

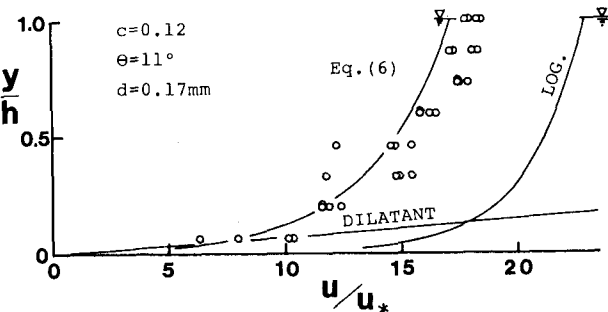


図-3

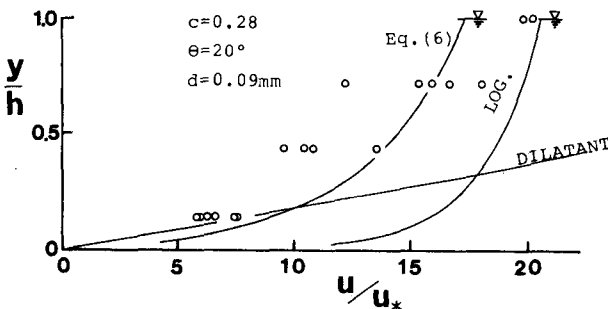


図-4