

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：水と土砂の高濃度流体の流動に関して、従来、ビンガム流体モデルとダイラタントモデルが代表的なものとされ、粘土粒子のような微細な材料ではビンガム流体モデルが適合し、粒子径が粗い場合は相対水深（流動深／代表粒径）の小さいときダイラタント流体モデルが適合することが実験的に確かめられてきた。しかしながら、粒子径が比較的粗い場合でも、相対水深が大きいときにはダイラタント流体モデルは適合しなくなる。その原因として著者は相対水深が大きくなると粒子同士の衝突効果に加えて粒子群があるスケールの流体塊となつて流動する乱流混合効果が重要な役割を演ずるためであると考え、新しい流動モデルを提案し、それが実験値をよく説明することを発表してきた。¹⁾

ところで、このような相対水深の大きい高濃度流れでの流体分布形は層流モデルにおける二次放物線の流速分布形とも類似であり、著者のモデルの妥当性の検証には、直接流れの乱流の状況を測定する必要性が残されている。したがって、ここでは実際ににおいて高濃度流れにおける粒子の軌跡を追跡し、その運動状態を明らかにし、著者の理論の適合性を明確にする。

2.実験条件及び方法：実験砂は $d_{50}=0.49\sim0.99\text{ mm}$ 、密度は $\rho=2.65\sim2.70\text{ g/cm}^3$ の珪砂であり、流れの土砂濃度は $C=0.42$ （容積濃度）である。実験水路は水路床ベンキ仕上げの滑面、側面アクリルで幅 12.5 cm 、長さ 11 m 、勾配 2.0° である。水路の上流側約 5 m に実験砂を湿润状態で厚さ $15\sim20\text{ cm}$ に堆積させ、上流端より水を給水して泥流を発生させた。濃度を高くするために給水中、土砂表面を人為的にかく乱した。下流端から $2\sim2.5\text{ m}$ の位置で水路側面より 16 mm の高速度カメラ（ハイカムハイスピードカメラ、レットレークラウトリ－社製）で撮影し、粒子の軌跡を読みとった。流れの平均濃度は水路下流端で採水して測定した。

3.考察：図-3は粒子径 $d_{50}=0.49\text{ mm}$ 、容積濃度 $C=0.42$ の流れにおける一粒子の運動軌跡を示している。座標は移動座標系で $u_*=63\text{ cm/s}$ で移動している。これはほぼその付近の平均流速を示している。図-3は河床からの無次元高さ $z/h=0.5$ 付近にある、 z/h が 0.6 程度まで上昇した後、 $z/h=0.3$ まで降下し $z/h=0.4$ 程度へ移行したことを示している。また、図-1は粒子径 $d_{50}=0.99\text{ mm}$ の場合の粒子運動軌跡を示している。振幅は前の場合より小さくなっているが同様に水深方向の粒子の運動が認められる。これらは1個の粒子の運動を追跡した結果であるが、観測によればこの粒子付近の粒子は集団でほぼ同様の運動をしており、あるスケールの流体塊の乱流運動の存在を示唆している。この実験の他

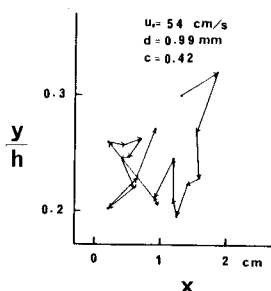


図-1 粒子軌跡

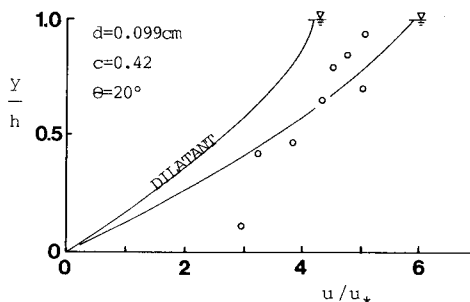


図-2 流速分布

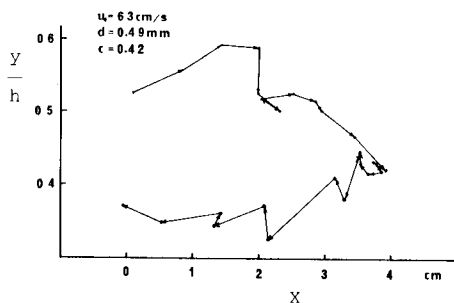


図-3 粒子軌跡

にも35mm スカールカメラを水路側面で流下方向に移動させながら撮影したところ、容積濃度 $C=0.4$ 程度の高濃度でも粒子径 d_{50} が $0.2 \sim 1\text{mm}$ で流体塊としての乱れが認められた。したがって、高濃度の粒子流れにおいては、相対水深が大きいとき、衝突効果と混合効果の両方が重要であるとする著者らの考え方の妥当性が検証された。

図-2、図-4は粒子の軌跡を追跡した結果から求めた水深方向の平均流速分布である。図中の実線はダイラタント流体モデルと混合・粒子衝突を考慮した場合の理論流速分布である。これらの図および先に行った他の実験ケースに対する図-5から明らかなように、混合を考慮した式が比較的よく実験値を説明している。ただし今回の実験は相対水深が $10 \sim 20$ 程度と小さく、混合モデルとダイラタント流体モデルの速度分布の差が小さい領域であり、とくに $d_{50} \sim 1\text{mm}$ (図-2) の場合にはスリッパ流速を導入すればダイラタント流体の流速分布形にも似ているものと判断される。

図-6は u/u_* と h/d の関係を以前の実験値とともに示したもので、今回の図-1～図-4に相当する結果は+印で示した。図中の実線は混合モデルの式¹⁾

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

ただし、滑面の場合 $Y_0 = a/R_0$, $R_0 = u_*^2/\nu$, $a = 1/1025$

$$\phi^2 = \lambda^2 \left(\frac{a_i \sin \alpha}{K^2} \right) \left(\frac{a}{r_*} \right) \left(\frac{d}{h} \right)^2$$

と、ダイラタント流体モデルの式²⁾

$$u/u_* = \frac{2}{5} \left[\frac{1}{a_i \sin \alpha} \left\{ C + (1-C) \frac{\rho}{\alpha} \right\} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{1}{\lambda} (h/d) \quad \dots (2)$$

を示している。

4. おわりに：容積濃度が $C=0.4$ 程度であっても粒子径が水深に対して相対的に小さい場合、顕著な水深方向の混合のあることが認められ、著者らの流体モデルの妥当性が明らかにされた。

参考文献

1) 新井、高橋；泥流の流動機構について、第39回年議(昭59.10)

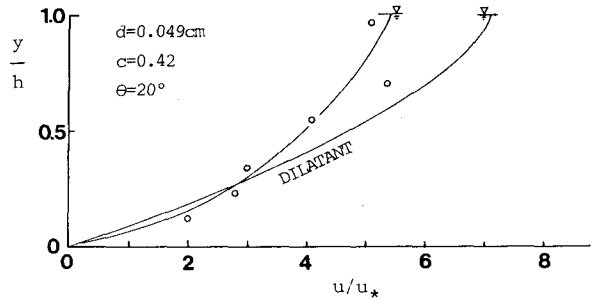


図-4 流速分布

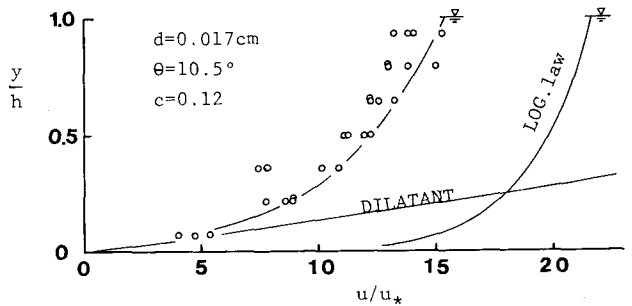


図-5 流速分布

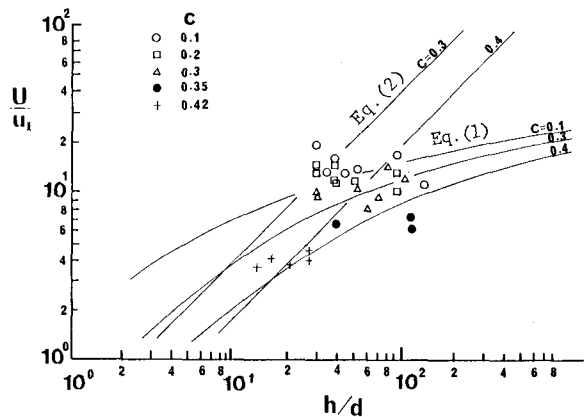


図-6 抵抗則