

微細粒子を高濃度に含む流れの流動特性に関する実験的研究

名城大学理工学部 正員 新井宗之

名城大学大学院 学生員 越智 禅

1. まえがき： 近年は固体粒子を高濃度に含む流れについて数多くの研究がされており、多くのことが判明されてきている。また従来の一流体モデルから多流体（二流体）モデルとしての議論もされはじめているが、粒子と流体間の相互作用について不明な点が多く、また計測が現段階では極めて困難であることから、流れ構造の議論が必ずしも多流体モデルでの有用性が有効となっているとは言えない。また固体粒子を高濃度に含む流れの場合、一流体の連続体とした流れの流速変動をようやく計測することが可能になった段階にあり、ここでは測定された流速から従来の流体モデルについて検討を行った。

2. 実験方法及び条件： 実験水路は図-1に示す通りで、長さ約8m、幅約15cmの循環式可変水路であり、16mmフィルムの高速度カメラにより、水路下端から約1.5m上流で固定して、透明ガラス側壁面を通して、撮影画面を1.2cm*1.1cmで約4000コマ/secondで撮影した。撮影にあたっては流下方向、水深方向の2平面での粒子の動きを、オイラー的に追い、後の結果を流速の時系列変化を図-2に示す。また水路下端で水深方向に5点から採水方法で濃度を測定を行った。実験に使用した粒子は粒径 $d_{50}=0.34(mm)$ 、密度 $\rho=2.57(g/cm^3)$ の珪砂である。また水深は $h=1.1, 1.3(cm)$ であり水路勾配は $\vartheta=16.9^\circ$ である。流れの断面平均容積濃度は $c=0.23, 0.40$ 、粒子の充填容積濃度 $c_s=0.57$ である。

3. 流速変動解析： 撮影フィルムの画像をパーソナルコンピュータ用の画像入力インターフェイスを介し、512*480画素で濃淡レベルを256階調の数値データとして解析に共した。さらに相関法を用いて2画面間の任意の移動ベクトルにより流速を求めた。

4. 考察：粒子を高濃度に含む流れの構成方程式は形式的に次のように表すことができるであろう¹⁾。

$$\tau = c_p + p' \tan \phi + \tau_B + \mu_f' \frac{du}{dz} + K\sigma d^2 \left(\frac{du}{dz} \right)^2 + \rho_a l^2 \left(\frac{du}{dz} \right)^2 \quad (1)$$

ここに、 c_p ：粒1子間の粘着力、 p' ：粒子間に働く静的な圧力、 ϕ ：粒子堆積層の内部摩擦角、 τ_B ：間隙流体のビンガム降伏応力、 μ_f' ：間隙流体の粘性係数、 K ：係数（粒子濃度、粒子間摩擦係数及び反発係数の関数）、 σ ：粒子密度、 d ：粒子径、 ρ_a ：流れの見かけ密度、 l ：乱れ混合距離。

実験では非粘着性粒子を使用し、間隙流体として水を使用しているため、 $c_p=0, \tau_B=0$ とすることができる。ビンガム流体に代表されるように、流れの応力構造の中で降伏応力が卓越するとするモデルがある。

(1)式の場合 $p' \tan \phi$ が降伏応力に相当する項であると見なすことができる。図-2の流速変動の結果や流速分布から容積濃度が $c=0.4$ 程度であっても栓流を生じさせるような降伏応力は認められなかった。また、エネルギー逸散が粒子衝突によってなされると考えるダイラタント流体モデルの場合、(1)式の右辺第5項のみを考慮し作用応力が静水圧分布に等しいとすると、流速分布型を次式のように表すことができる。

$$\frac{u}{u_*} = \frac{2}{3} \left(\frac{h}{d} \right) \left[\frac{1}{a_i \sin \alpha} \left\{ c + (1-c) \frac{\rho}{\sigma} \right\} \right]^{\frac{1}{2}} \left\{ \left(\frac{c_s}{c} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right\} \left\{ 1 - \left(1 - \frac{z}{h} \right)^{\frac{3}{2}} \right\} \quad (2)$$

ここに、 $a_i \sin \alpha = 0.02$ 、 u_* ：摩擦速度 $\sqrt{gh \sin \theta}$

図-4に $c=0.23$ の実験結果と(2)式の関係を示しているが、流速が実験値よりもかなり大きくなるものとなっている。(1)式において粒径 d または濃度 c が小さくなると右辺第5項は相対的に小さくなり、この項だけで外力と釣り合うためには速度勾配 du/dz が大きくなる必要があり、流速が大きくなっている。このため濃度が小さくなる場合や粒子径が小さくなる場合には粒子衝突以外の作用を考慮する必要がある。し

かしながら、流れの中で粒子衝突が連続的に生じていると思われる構造の中では粒子は平均的にある空間で離散した状態にあると考えるのが合理的である。この場合静的な意味の接触応力 $p' \tan \phi$ などを考慮することは先の降伏応力に関する考察からも難しい。そこで著者らは粒子の運動軌跡から流体と粒子の渦としての混合のあることを見出し (1) 式の右辺第 5 項, 6 項を考慮したモデルを示している²⁾。

その流速分布型は

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \left[\ln \left\{ \frac{z}{h} + \sqrt{\left(\frac{z}{h} \right)^2 + \lambda^2 \left(\frac{a_i \sin \alpha}{\kappa^2} \right) \left(\frac{\sigma}{\rho_m} \right) \left(\frac{d}{h} \right)^2} \right\} - \ln \left\{ \frac{a}{R_*} + \sqrt{\left(\frac{a}{R_*} \right)^2 + \lambda^2 \left(\frac{a_i \sin \alpha}{\kappa^2} \right) \left(\frac{\sigma}{\rho_m} \right) \left(\frac{d}{h} \right)^2} \right\} \right] \quad (3)$$

ここに, $R_* = u_* h / \nu$, $a = u_* z_0 / \nu$

ここでの実験結果との比較を図-4に示しているがほぼ妥当な結果となっている。また流速変動も流れにおける混合のあることを示している。完結問題としてのエネルギー逸散のモデルに混合距離モデルを用いている。この場合、混合距離を $l = \kappa z$ と仮定して解いているが、 κ は容積濃度 $c = 0.2$ 程度まで減少し、それより濃度が高くなると増大することが明らかになっている²⁾。図-5は乱れ強度を示したものである。この結果によると濃度が $c = 0.2$ 程度の場合、清水での結果と同程度の傾向があると思われるが、濃度が $c = 0.4$ の場合に乱れ強度はかなり小さくなっている。混合距離 $l = \kappa z$ の仮定では濃度が 0.2 よりも大きくなると、 κ も大きくなり、混合距離も大きくなることが推測されるが、乱れ強度は必ずしもそれには対応していない。高濃度での $l = \kappa z$ と仮定する混合距離モデルの限界を示しているものと思われる。

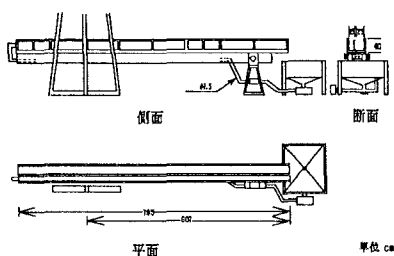


図-1

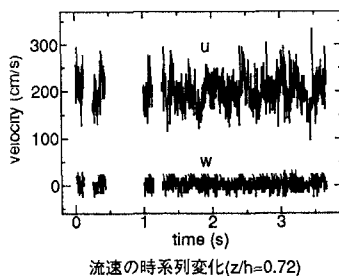


図-2

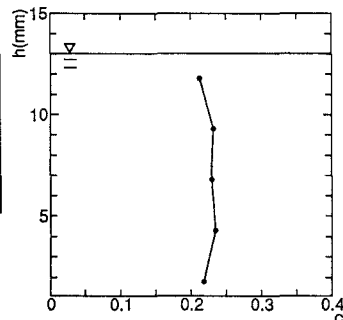


図-3 濃度分布

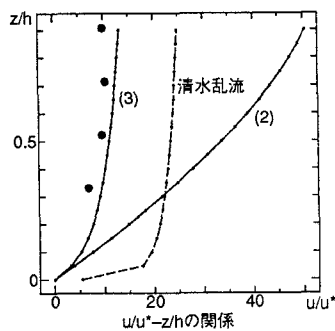
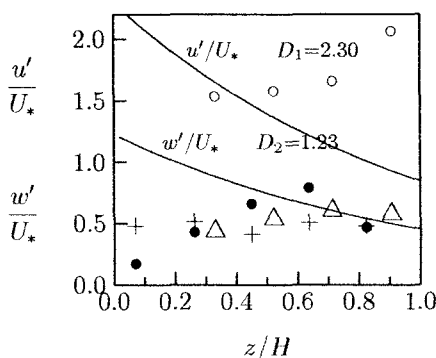


図-4



乱れ強度 (u'/U_* , $w'/U_* - z/h$)
図-5

参考文献: 1) 高橋保; 土砂移動に関するシンポジウム論文集, p 39-55, 1992

2) 新井宗之, 高橋保; 土木学会論文集, II-6, p 69-77, 1986