

II-284

微細粒子を高濃度に含む流れ構造に関する検討

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
 名城大学大学院 学生員 越智 禪

1. はじめに：固体粒子を高濃度を含む流れについては従来より多くの研究がなされ、多くのことが明らかにされてきており、多流体モデルとしての取り扱いもなされるようになってきている。しかし固相液相の二流体であっても相互作用を明らかにすることは容易でなく、多流体モデルの有用性がまだ有効となっていない。また単相流としての取り扱いにおいてもより厳密に表す場合には相互作用を明らかにする必要がある。いずれの場合にも流れのより微細な構造を明らかにする必要があると言える。そこでここでは微細粒子を高濃度を含む流れを高速度カメラを用い流れの流速変動の結果を示すとともに、画像解析方法の違いによる流速変動の違い等について示している。

2. 実験の概要：実験水路は長さ 8m, 幅 14.75cm の循環式可変勾配水路である（図-1）。流況は下流端より約 1.5m 上流で、16mm フィルムの高速度カメラにより透明ガラス側壁面での流れを撮影面 $1.2 \times 1.0\text{cm}$ を約 4000fps で撮影し解析に供した。実験砂は粒径 $d_{50} = 0.34, 0.31\text{mm}$, 単位体積重量 $2.57, 2.59\text{gf/cm}^3$, 粒子の充填容積濃度 $c_s = 0.57$ の珪砂であり、水深は $h = 1.3, 1.1\text{cm}$ である。流れの断面平均濃度は $c = 0.23, 0.40$ であり、水路勾配は $\theta = 16.9^\circ$ でほぼ等流の状態である。また $c = 0.23$ の流れにおける水深方向の濃度分布は採水方式により測定し、ほぼ一様な分布を示した。

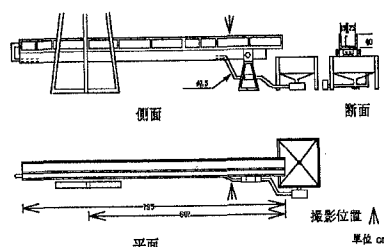


図-1

3. 流速変動解析：撮影フィルムの画像は流下方向、水深方向で 512×480 画素で輝度レベルを 256 階調の数値データとして解析した。2 画像間からの任意の移動ベクトルを得る方法として、画像解析における代表的な方法である相関法¹⁾及びトレーサ追従法の二つの方法で解析を行った。相関法では画像面上の 45×45 , あるいは 55×55 の画素領域を関数とし明度のみを考慮し相関係数を求め、 Δt 秒後の画像面での最大相関係数を中心とした 5×5 の相関係数より相関値の重心位置を Δt 後の移動中心位置とした。相関法による流速変動結果として、 $z/h = 0.72$ の u, w の結果を図-2 に示す。欠測点は解析できなかった点である。トレーサ追従法は本来流水中にトレーサ粒子を混入し、その粒子の移動ベクトルを解析する方法である。任意の点の移動ベクトルを得るにはトレーサ粒子のベクトルからの補間を用いて得る。しかしここではトレーサ粒子を混入させるのではなく相関法で用いた同じ画像データをモニター画面上で視認的に Δt 後の画像上で移動位置を定め任意の点の移動ベクトルを得るものである。これによって得た先と同様な流速を図-3 に示す。いずれの方法によっても流速に大きな変動のあることが認められる。

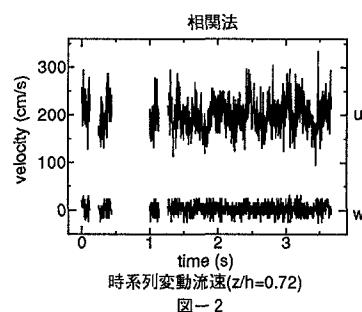


図-2

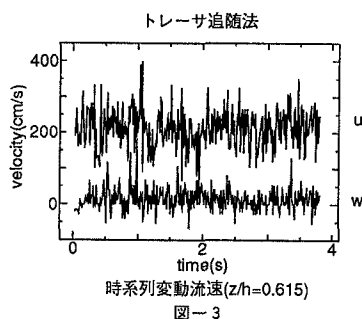


図-3

4. 考察：乱れ強度の水深方向 (z/h) 変化を図-4, 図-5 に示す。図-4 に乱れ強度を断面平均流速で無次元にした値を示しているが、 u, w のいずれもトレーサ追従法の値の方が大きな値となり、相関法に比べると大きな流速変動を表している。図-5 は摩擦速度で無次元化し図中の実線は清水乱流における関係を示している。濃度 $c = 0.23$ の場合、相関法による結果では清水よりも小さな乱れ強度を示しているが、トレーサ追従法では清水と

同程度かそれよりも大きな値を示している。この解析法による差違の原因として相関法は関数として取り扱う領域を平均化し、その領域内の変動を平滑化する傾向を有しているためと考えられる。しかしながらいずれの場合にも乱れの効果が無視し得ないものと思われる。

従来の流体モデルとの比較：固体粒子を含む τ_{xz} 方向の構成則を形式的に表せば式（1）のようである²⁾。粒子相互に粘着性がなく、固体粒子が平均的に離散した状態では式（1）の右辺1～3項は無視し得るものと考えられる。また間隙流体を清水とし慣性項が卓越する流れでは

と考えられる。右辺

第5項の粒子衝突のみを考慮して式（2）が得られ³⁾、 $h/d \leq 20$ でよく適応する。式（1）の第5、乱流混合を表す第6項を考慮すると式（3）が得られ⁴⁾、 $c=0.23$ の実験結果との関係を図-6に示す。図中には式（1）の第6項を清水とした関係も示している。実験結果は $h/d > 30$ であり衝突と乱流混合を考慮した式（3）とよく対応している。実験結果は相関法とトレーサ法の両方の結果が示されているがいずれの場合も式（3）と比較的よく対応している。これは式（3）において混合距離モデルを使用しているためレイノルズ応力が時間平均流速に関係づけられていることにより、乱れの構造を反映していないことによるものと思われる。

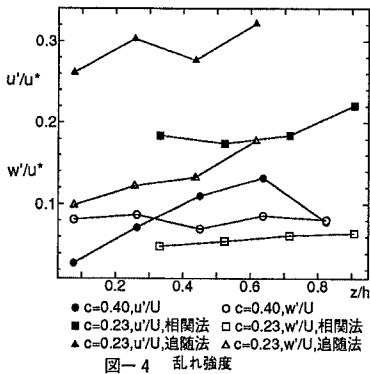


図-4 乱れ強度

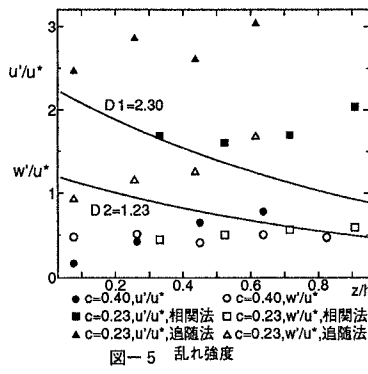


図-5 乱れ強度

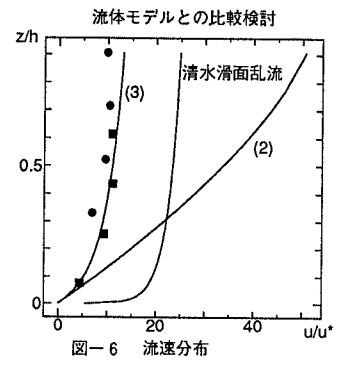


図-6 流速分布

5. あとがき：以上慣性項が卓越する、微細粒子を高濃度に含む流れにおいて乱れ構造のあることを明らかにするとともに、従来の流体モデル比較を行った。今後高濃度流れの乱流構造について検討して行きたい。

参考文献

- 1) 新井宗之、高橋保；水工学論文集，Vol.40，1996,2，pp.1033～1039.
- 2) 高橋保；土砂移動に関するシンポジウム論文集，pp.39～55，1992.
- 3) 高橋保；京都大学防災研究所年報，No.20,B-2，1986.
- 4) 新井宗之；高橋保；土木学会論文集，II-6，pp.69～77，1986.

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

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。

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

ここに、 $a_i \sin \alpha = 0.02$ ，

u_* ：摩擦速度 $\sqrt{gh \sin \theta}$

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

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