

高濃度泥流の乱れ特性について

名城大学理工学部 正会員 新井宗之
 京都大学防災研究所 正会員 高橋 保
 名城大学大学院 学生員 井上 直

1. はじめに：土石流を代表とするような固体粒子を高濃度に含む流れについては近年多くの研究がなされて来ている。しかし流れの構造は必ずしも十分明らかに去れないまま多くの仮定のもとに議論が進展している。そこで本研究では高濃度固液混相流の流れ構造を明らかにすることを目的として、比較的微細な粒子を高濃度に含む流れの乱れ特性について、その測定方法および測定結果について検討した。

2. 実験の概要：実験水路は図-1に示すように、長さ8m、幅14.75cm、深さ30cmの混相流循環式可変勾配水路である。実験砂はほぼ一様粒径の $d_{50}=0.31\text{mm}$ の珪砂で、密度 $\sigma=2.59\text{g/cm}^3$ である。流れの条件は、水路勾配 $\theta=16.9^\circ$ 、水深 $h=1.1\text{cm}$ 、単位幅流量 $q=11.6\text{cm}^2/\text{s}$ 、断面平均容積濃度は $C=0.40$ である。水路下流端より約1.5m上流で透明ガラス側壁面の流れを16mmフィルムの高速度カメラ（NAC社製、E10EE）により約4000コマ/secで撮影した。

3. 解析方法：図-2に解析システムの流れ図を示している。高濃度固液混相流の流れの任意点における流速ベクトルの時系列変動を得ることを目的として、流れを高速度カメラで撮影し、そ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数値データとして取り込んでいる。解像度は512x480画素（ピクセル）で、256階調の濃度値である。撮影画面は約1.2x1.1cmである。2画面間の任意点の移動ベクトルを得る方法としては相関法を用いた。相関法に基づく認識法はSchwarzの不等式の関係から定義される相関係数¹⁾を用いるもので、次式の離散化した関係式を用いている。

$$r_{ab} = \frac{\sum \sum \{(a_{ij}\sqrt{\bar{a}}-1)(b_{ij}\sqrt{\bar{b}}-1)\}}{\sqrt{\sum \sum (a_{ij}\sqrt{\bar{a}}-1)^2} \sqrt{\sum \sum (b_{ij}\sqrt{\bar{b}}-1)^2}} \quad (1)$$

ここで、時刻 t の画像における任意点 P_a を中心とする $m \times m$ の画素のそれぞれの濃度値を a_{ij} とし、 $t + \Delta t$ の画像における点 P_b を中心とする $m \times m$ の画素のそれぞれの濃度値を b_{ij} としている。また $m \times m$ の画素の平均値をそれぞれ $\bar{a}$ 、 $\bar{b}$ としている。そこで、 $t + \Delta t$ の画像上で P_b を1ピクセル単位で移動させ、式(1)による相関値の最も高い位置をその位置を移動位置とするものである。さらに、その最大相関値を中心とした、 5×5 の画素の相関値を重み付けをする方法でピクセル間の補正をし移動位置を補正している。ところで画素パターンにより $m \times m$ の大きさが問題となるが、処理時間の関係などから試行錯誤的な結果で $m=45$ 程度が適切であり²⁾、その大きさを用いている。以上の方法で得られた流速ベクトルの流下方向成分(u)及び水深方向成分(w)の解析結果例が図-3に示されている。まだ補間等の問題があるが、流速成分の時系列データが得られている。

4. 考察：容積濃度が $C=0.40$ というような高濃度の流れにおいて、従来の研究における流動モデルでは粒子と流体のマクロ的な混合はないと層流状のモデルが少なくなかった。図-3の解析例からもわかるように流速成分の時系列的変動は無視し得ないものがある。そこでその乱れ強度を示したものが図-4

(a)、(b)である。流速成分 u 、 w のうち時間平均値を u_0 、 w_0 、その変動成分を u' 、 w' として、主流方向成分を断面平均流速 U との偏差 $\sqrt{u'^2}$ 、 $\sqrt{w'^2}$ と相対水深(z/h)との関係を示したものが図-4(a)である。この場合、流下方向成分 u は水路床付近で小さく水深方向の増加とともに乱れが強くなり、水面近傍で減少する傾向が見られる。一方、水深方向成分は水路床近傍から水面近くまであまり変化しないことが示されている。図-4(b)は同様なことを示しているが、乱れ特性値を普遍関数表示しようとする際に摩擦速度が重要なパラメータであることが清水乱流の研究で明らかにされており、摩擦速度で無次元表示したものである。摩擦速度 U_* の評価方法としては運動方程式を用い、レイノルズ応力分布を測定して式

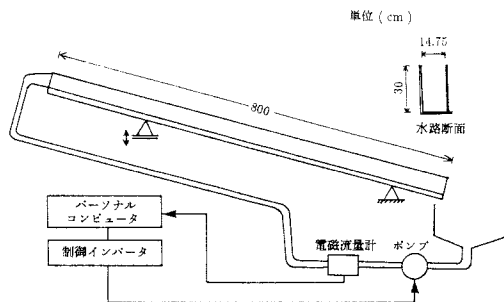


図-1 実験水路

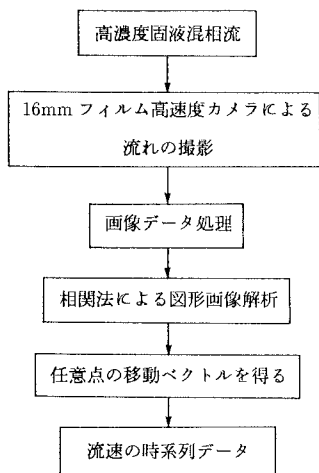


図-2 解析システムの流れ図

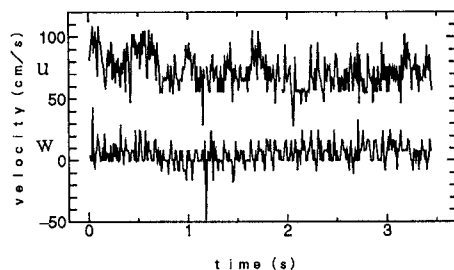


図-3 流速変動解析例 ($z/h=0.64$)

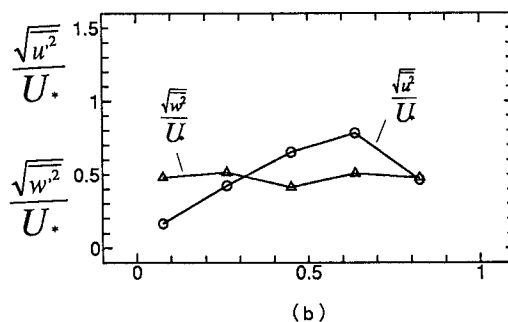
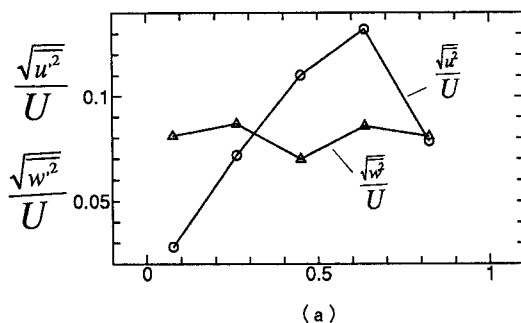


図-4 乱れ強度 ($C=0.40$)

(2) から得ることが合理的であるとされている。³⁾

$$-\frac{\overline{u'w'}}{U_*^2} = (1-\xi) - \frac{1}{R_*} \frac{\partial U^+}{\partial \xi} \quad (2), \quad U_* = \sqrt{ghl} \quad (3)$$

ここに、 $\xi = z/h$, $U^+ = U/U_*$, $R_* = hU_*/\nu$. しかしながらここでは第一近似としてエネルギー勾配 I を用い、式 (3) によっている. 従来の清水での結果によれば、水深方向の変動成分 w の特性は河床付近から水面まであまり変化せずほぼ一様な乱れ強度があり、ここで測定された結果も非常に高濃度であるにもかかわらずほぼ同様な傾向を示している. しかしながら流下方向成分 u は、清水の場合、水路床付近で大きく水面方向に減少することが明らかにされているが、ここで測定された結果はそれとかなり異なっていることが示されている.

参考文献 1) 磯部考温; 相関係数及びスペクトル—その測定と応用—, 東京大学出版会, 昭和 42. 2) 新井宗之, 高橋保; 高濃度泥流の乱れ測定について, 土木学会第 49 回年講演演概要集, II-290, pp. 580-581, 1994. 3) 柁津家久; 開水路乱流の乱れ強度に関する研究, 土木学会論文集報告集, NQ 261, pp. 67-76, 1977.