

高濃度泥流の変動流速測定

A Measurement Method of Fluctuation Velocity of High Concentration Mud-flow
and the Experimental Results

新井宗之* ・ 高橋 保**

By Muneyuki ARAI and Tamotsu TAKAHASHI

It is described a measurement method of velocities in high concentration mud-flow with fine particles and the experimental results. The method is useful by high speed cine camera, digital image data, and analysis method is the auto-correlation method for flow vector. The $m \times m$ piccell area for correlation coefficient is available to $m = 45 \sim 55$ in this system. Time serial velocitis and turbulence are shown by experimental results on the volume concentration $C=0.23$ and 0.40 .

keyword: mesurment method, fluctuation velocity, mud flow, debris flow

1. はじめに

土石流や泥流のように固体粒子を高濃度に含む固液混相流の流れについて従来多くの研究がなされて来ており、多くの事柄が明らかとなつて来ている。このような混相流の流れ構造の表現方法には1流体モデルや多体流体モデルがある^{1) 2)}。多体流体モデルは液相と固相の2流体モデルの場合、固相、液相の相互の応力伝達の構造やエネルギー散逸の関係を明らかにしなければならない点でより厳密ではあるが、実験的な現象の把握も必ずしも容易ではなくまだ十分になされているとは言えない。いずれにおいても流れの構造がどのようなになっているかを明らかにする必要がある。従来の構造の流体モデルとしては、ビンガム流体モデルに代表されるような、粒子の接触による骨格格子構造によって応力伝達、エネルギー散逸が支配されるとするもの、ダイラタント流体モデルに代表されるように粒子衝突によるエネルギー散逸が支配的であるとするもの、乱流モデルのように粒子と流体の混合によってエネルギー散逸による応力が支配的であるとするもの、及びその複合的な作用によるものなどである。これらのモデルは物理的な現象としてはそれぞれかなり異なるものであるが、パラメータを実験結果から適切に同定すれば、同じ現象であってもある程度それぞれのモデルから現象を説明し得るものである。しかし、骨格格子構造による流体モデルの場合には粒子相互が接触していなければならないが、衝突モデルでは平均的に粒子は離散していることになり、相異した構造のモデルとなっている。また、骨格格子による応力と粒子分散の応力の両方を含むモデルもあり、それぞれの流動モデルによって現象が説明されている。相異した流体モデルから流れの速度や濃度がある程度説明されるということは流れの構造が十分把握されていないことを意味しているといえる。

* 正会員 工博 名城大学助教授 理工学部土木工学科
(〒468 名古屋市天白区塩釜口1-501)

** 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所
(〒611 京都府宇治市五ヶ庄)

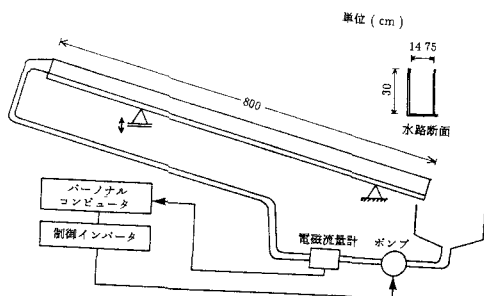


図-2 実験水路

表-1 実験条件

No.	C	h (cm)	q (cm^2/s)	θ (deg.)	d_{50} (mm)	σ (g/cm^3)
1	0.23	1.3	237	16.9	0.31	2.59
2	0.40	1.1	116	16.9	0.31	2.59

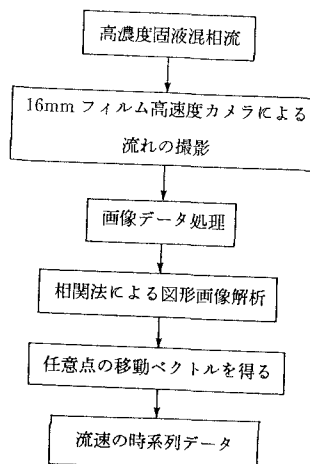


図-1 解析システムの流れ図

一方、著者らは微細な粒子が高濃度に含む流れで粘性項より慣性項が卓越するような場合、粒子の運動軌跡から水深方向の流体塊の混合のあることを明らかにしているが³⁾、まだそれらの乱れ特性などを十分明らかにするに至っていない。これら流れの微細構造が明らかにされていない原因はその測定の困難さに基づいている。しかし流れのさらに微細な構造を把握する必要がある、固体粒子を高濃度に含む流れの任意点での流速変動を測定する方法として、高速度カメラと画像解析を用いる方法について検討した。そこで得られた変動流速例を示すとともに、実験的に得られた乱れ強度についても示す。

2. 実験の概要及び測定方法

測定・解析システムの全体的な流れ図を図-1に示す。実験水路で高濃度固液混相流を発生させ、光学的な16mmフィルムの高速度カメラで流れを撮影し、それを数値画像データに変換後、相関法により任意点の移動ベクトルを解析する。それらを連続的に行い流速の時系列データを得るものである。

実験水路は図-2に示すように長さ8m、幅14.75cmの急勾配可変水路で実験では勾配 $\theta = 16.9^\circ$ である。また水流は循環式で、ポンプ駆動モータをパーソナルコンピュータからのインバータコントロールにより流量を制御している。また流量は電磁流量計を用いて計測しているが、実験に際しては水路下流端で容器による採水方法によっても流量を計測している。また使用したポンプは土砂を高濃度に混入しても駆動が可能であるため固体粒子(珪砂)を水に混入した状態で循環水路として使用した。

流れの状態は水路下流端より1.5m上流で透明ガラス側壁での流れを16mmフィルムの高速度カメラ(NAC社製E10EE)を用いて撮影した。コマ送り速度は約4000コマ/secで、撮影時間は約4秒である。

撮影された16mmフィルムはフィルムアナライザーに装填されたCCDカメラからパーソナルコンピュータに画像IFボードを介して数値データとして取り込んでいる。画像データは512×480画素(ピクセル)で1ピクセル256階調(濃度値)のモノクロ画像データである。

実験条件は表-1に示すように容積濃度 $C = 0.25, 0.4$ 、それぞれの水深 h 、単位幅流量 q は $h = 1.3, 1.1\text{cm}$ 、 $q = 237, 116\text{cm}^2/\text{s}$ であり、実験砂は $d_{50} = 0.31\text{mm}$ 、 $\sigma = 2.59\text{g}/\text{cm}^3$ である。

3. 解析方法

画像内の特定な点の2画像間での移動量を解析する方法として、画像内の特定なマーカーや個別粒子を2画像間で追跡する方法、あるいは画像内の任意の領域について2画像間で最も相関の高い領域を移動領域として求める相関法などがある。後者の方法は粒子など特定なものにとられず任意の領域の移動を解析することから本研究に適していると思われるので後者の相関法を用いて解析することにする。

相関法はパターン認識法の一つで、標準図形を $g^{(r)}(x)$ とし、任意図形を $f(x)$ とすると、Schwarzの不等式の関係

$$\left\{ \int_{-\infty}^{\infty} f(x)g^{(r)}(x) dx \right\}^2 \leq \int_{-\infty}^{\infty} \{f(x)\}^2 dx \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \{g^{(r)}(x)\}^2 dx \tag{1}$$

において、

$$d^{(r)} \equiv \frac{\int_{-\infty}^{\infty} f(x)g^{(r)}(x) dx}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} \{f(x)\}^2 dx} \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} \{g^{(r)}(x)\}^2 dx}} \tag{2}$$

なる定数 $d^{(r)}$ を定義すると

$$-1 \leq d^{(r)} \leq 1 \tag{3}$$

なる関係があり、 $|d^{(r)}|$ の値が最も1に近い $f(x)$ を標準図形 $g^{(r)}(x)$ に最も近いものとする方法である⁴⁾。図形の正規化要素として、(1)明るさ、(2)明度傾斜、(3)平均位置、(4)尺度係数、(5)ボケなどがあるが、ここでは図形の明るさのみを関数値としている。ただし、参照フレームを画像内で移動するため平均位置も考慮するものとなっている。二つの画像間で上式の関係を適応する場合に(2)式を次式のように離散化した式を用いた。

$$r_{ab} = \frac{\sum_j \sum_i \left\{ \left(\frac{a_{ij}}{\bar{a}_{ij}} - 1 \right) \left(\frac{b_{ij}}{\bar{b}_{ij}} - 1 \right) \right\}}{\sqrt{\sum_j \sum_i \left(\frac{a_{ij}}{\bar{a}_{ij}} - 1 \right)^2} \sqrt{\sum_j \sum_i \left(\frac{b_{ij}}{\bar{b}_{ij}} - 1 \right)^2}} \tag{4}$$

ここで a_{ij} は標準図形の $m \times m$ の画素領域での濃度値を示し、 b_{ij} は Δt 後の画像における $m \times m$ の濃度値を示している。 $\bar{a}_{ij}$ 、 $\bar{b}_{ij}$ はそれぞれの領域内での平均値である。

相関法による解析過程の概念を示しているのが図-3である。時刻 t における任意の点 A を中心に $m \times m$ の画素領域が Δt 後の画像でどの位置にあるかを求めるために、 $m \times m$ 画素領域（参照フレーム）の濃度値 a_{ij} 、 b_{ij} より相互相関係数 r_{ab} を求める。計算において時間の短縮などから、画像全領域の r_{ab} を求めず流下方向成分には平均流速の3倍程度、鉛直方向成分では平均流速程度に相当する領域で最大 r_{ab} を求めた。さらに最大 r_{ab} を中心とした 5×5 の相関係数値の重心位置を Δt 後の移動位置として補正している。画素領域の回転移動も考えられるが、ここでは回転を考慮した計算は行っていない。以上の領域の画像内任意領域の移動と時間間隔から任意点の移動ベクトルを求めることができる。

4. 実験結果及び考察

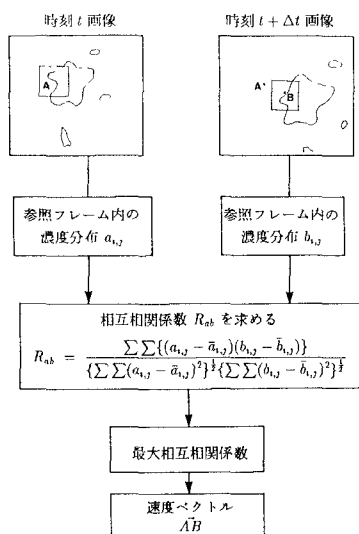


図-3 相関法の概念図⁵⁾

ところで、相関関数を求めるにあたり、 $m \times m$ の領域（参照フレーム）の大きさによって相関関数の最大値の位置が異なる。参照フレームが小さいと異常に大きなベクトルを生じ易くなる。これはここで解析するような画像パターンでは参照フレームが小さすぎると同様なパターンが多く存在し、わずかな違いで相関係数 r_{ab} の最大値が異常な位置に生じ易くなる。対象としている現象は非圧縮性で湧きだし、吸い込みがないことから x, z 軸の直交座標系でそれぞれの速度成分を u, w とすれば、連続の関係、

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

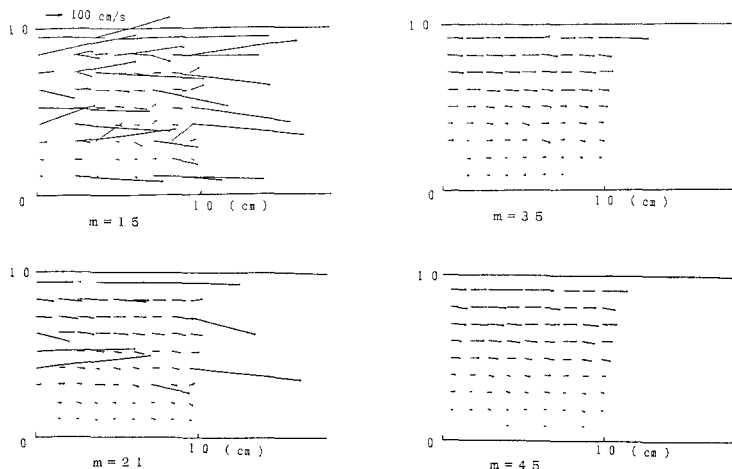
が満足される必要がある。しかし3次元的な流れを2次元的に解析していることなどから上式の右辺は微小領域の中で必ずしも0にはならない。しかしながら0に近い値となるが、著しく異なる場合には異常値が含まれているものと判断される。

図-4は参照フレーム $m \times m$ の大きさを変化させた場合の解析結果を示したものである。開水路の表面流速を1.7mmのトレーサーを用いた実験によると⁵⁾、 $m = 11$ で適切な結果が示されている。しかし本研究では $m = 15$ でも多くの異常値を示しており $m = 45$ 程度ではほぼ異常ベクトルの発生が無くなっている。(5)式の連続式で正しい値に相当する値は十分に検討していないが、ここでは $m = 45 \sim 55$ を用いて解析を行った。

図-5、6は以上の方法で得た時系列流速結果である。図-5が $C = 0.40$ 、図-6が $C = 0.23$ の場合の解析結果例である。いずれも横軸に時間、縦軸に u, w の流速を示している。図-6における欠測部分は画像の明度不足で解析が困難であった。しかしいずれも流速変動のあることが認められる。

水深方向の乱れ強度を示したものが図-7、8である。図-7は、流速成分 u, w のうち変動成分を u', w' として、断面平均流速 U と偏差 $\sqrt{u'^2}$ ($= u'$ として図中に示す)、 $\sqrt{w'^2}$ ($= w'$)との比を相対水深(z/h)の関係で示したものである。この結果によれば $C = 0.23$ の場合、主流速成分 u の変動は平均流速の20%くらいあり、 $C = 0.4$ の場合の流速成分と鉛直方向成分の変動は数%～十数%であることが示されている。図-8は縦軸を摩擦速度 U_* で無次元表示した $u'/U_*, w'/U_*$ で示している。清水乱流の研究で、乱れ特性値を普遍関数表示しようとする場合には摩擦速度が重要なパラメータであることが示されており、レイノルズ応力分布測定から次式より U_* を得ることが合理的とされている⁶⁾。

図-4 参照フレームの大きさと異常ベクトル



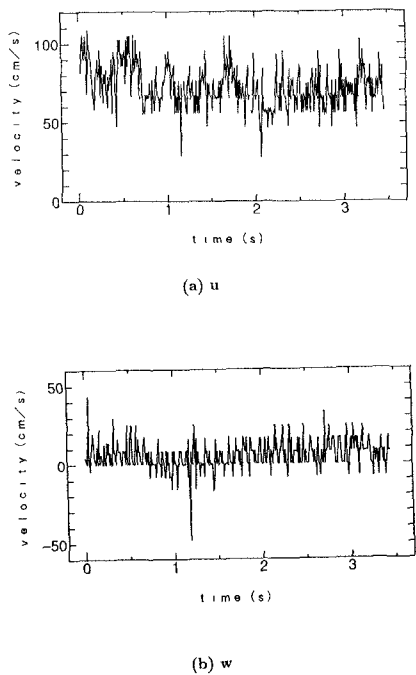


図-5 流速の時系列変化 ($C = 0.4$)

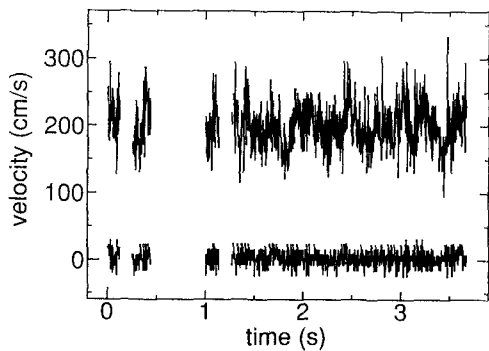


図-6 流速の時系列変化 ($C = 0.23$)

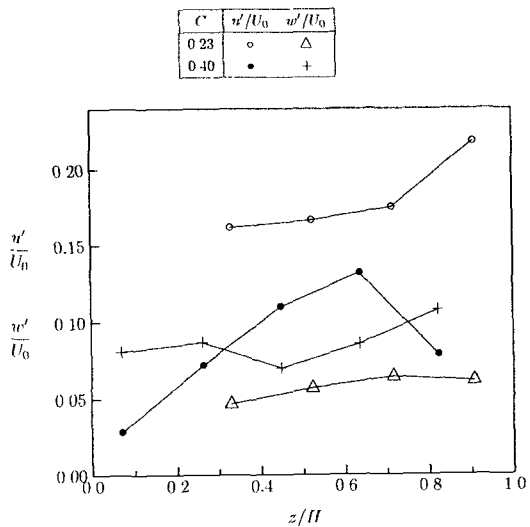


図-7 乱れ強度 ($u'/U_0, w'/u_0$ --- z/h)

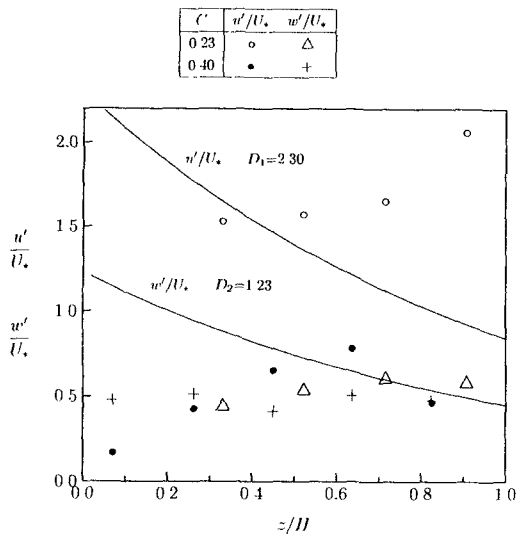


図-8 乱れ強度 ($u'/U_*, w'/u_*$ --- z/h)

$$-\frac{\overline{u'w'}}{U_*^2} = (1 - \xi) - \frac{1}{R_*} \frac{\partial U^+}{\partial \xi} \quad (6)$$

ここに、 $\xi = z/h$ 、 $U^+ = U/U_*$ 、 $R_* = hU_*/\nu$ 。しかしながら、ここでは測定値が少ないことなどから、エネルギー勾配 I を用いて次式によっている。

$$U_* = \sqrt{ghI} \quad (7)$$

図-8の実線は清水乱流中で、 u'/U_* 、 w'/U_* が $D \cdot \exp(-\xi)$ の関係で表される場合のそれぞれ $D_1 = 2.30$ 、 $D_2 = 1.23$ の関係を示したものである。濃度 $C = 0.23$ の場合の u 成分は比較的清水に近い値を示しているが、 $C = 0.4$ の場合にはかなり小さな値となっている。一方、 w 方向成分は比較的清水に近い値を示し、濃度 $C = 0.23$ と 0.4 の場合でも同程度の値であり濃度により変化しないような結果となっている。これらがどのような機構で生じているのかについては今後検討したい。

5. 結 語

微細な固体粒子を高濃度を含む流れの変動流速の測定方法について検討し、高速度カメラを用い相関法による解析方法で流速変動の計測が可能であることを明らかにした。また、その実験結果からの乱れ強度も示した。

参考文献

- 1) 水理委員会共同研究グループ(芦田和男、江頭進治、佐々木幹夫、清水義彦、関根正人、玉井昌宏、藤田正治、宮本邦明、森 明臣)；固液混相流における支配方程式とその適用性、水工学論文集、第39巻、pp.537-550、1995.
- 2) 水理委員会共同研究グループ(芦田和男、江頭進治、佐々木幹夫、清水義彦、関根正人、玉井昌宏、藤田正治、宮本邦明、森 明臣)；固液混相流における支配方程式の構造について、水工学論文集、第38巻、pp.563-570、1994.
- 3) 新井宗之、高橋 保；泥流型土石流の流動機構、土木学会論文集、375/II-6、pp.69-77、1986 .
- 4) 磯部 孝 編；相関関数およびスペクトル、東京大学出版会、pp.272-274、1968.
- 5) 藤田一郎；開水路合流部の流れの構造に関する研究、学位論文、pp.87-100、1990.
- 6) 禰津家久；開水路乱流の乱れ強度に関する研究、土木学会論文報告集、第261号、pp.67-76、1977.