

II-48

画像相関法を用いた粒状体の流動解析

東北大学大学院 学生員 ○木ノ本 剛

東北大学大学院 フェロー 沢本 正樹

1. はじめに

粒状体の流動をデジタル画像処理によって解析する場合、粒子の回転や三次元的挙動などによってその計測精度は低下する。特に、粒子の形状が一樣（ガラスビーズなど）な場合には計算機にて個々の粒子の軌跡を正確に追跡することは難しい。このため、形状が一樣な粒子の挙動を解析する場合にはこれまで人の目によって個々の粒子を認識、追跡し、その移動距離、濃度分布を算定する方法が主流であった。

本研究では、計算機にて粒状体の流動を計測することができる画像処理法を確立し、粒状体の流動における移動速度、濃度分布を測定する。そして流動機構に関する知見を深めることを目的とする。

2. 実験概要

実験に用いた流路は幅 10cm、高さ 25cm、長さ 400cm の長方形断面の可変勾配流路(0° ~40°)である。側面は粒子流の様子を観察できるようにアクリル板でできている。流路の上流端にはホッパーを設けている。また流路床には粒子の滑りをなくすために、実験に用いる粒子と同一のものを貼りつけたベニヤ板を敷き、粗面とした。

実験は流路に勾配を与え、流路上端に設置したホッパーの底板を外すことにより粒子流を発生させ、下流端付近において側方、上方から、定常等流状態の粒子流を高速度ビデオカメラで撮影し、ビデオキャプチャードを通して PC 上に時系列画像として取り込む。実験条件を表-1 に示す。

表-1 実験条件

	ガラスビーズ 1mm	ガラスビーズ 3mm
流路勾配(度)	25.4 27.3 30.5	27.3 28.6 30.5
流量(cm ³ /sec)	120~500	280~900
密度(g/cm ³)	28.2	35.4
内部摩擦角 (度)	2.5	2.5

3. 画像相関を利用した粒子認識

実験で用いたガラスビーズなどの球形粒子は照明光に対し特徴的な散乱光を示す。画像の前面にある粒子は同様な散乱光を示すことから、この領域をプレートとし、相関法により粒子認識を行う。

まず、粒子の画像数枚から、特徴的な散乱光を示している領域を抽出し、平均してプレートを作成する。そして作成されたプレートと対象画像との相互相関係数 $C(x, y)$ を以下の式を用いて計算する。

$$C(X, Y) = \frac{\sum_{i=-n/2}^{n/2} \sum_{j=-n/2}^{n/2} c_i c_g}{\sqrt{\sum_{i=-n/2}^{n/2} \sum_{j=-n/2}^{n/2} [c_i]^2} \sqrt{\sum_{i=-n/2}^{n/2} \sum_{j=-n/2}^{n/2} [c_g]^2}} \quad (1)$$

$$C_i = f(x-i, y-j) - f_{ave} \quad (2)$$

$$C_g = g(X-i, Y-i) - g_{ave} \quad (3)$$

ここに、 $f(x, y)$ はプレートの輝度値、 $g(X, Y)$ は対象画像の輝度値を示す。図-1 はプレートと対象画像との相関係数を計算し、相関係数が 50 以上の領域について示したものである。図からわかるように、実際の粒子以外にも、高い相関を示す領域が存在する。そこでこれらの誤った相関を示す領域を過誤の相関領域と定義し、過誤の相関領域を除去する。その方法を以下に示す。

1. 過誤の相関領域は粒子の縁付近に現れることが多いことから、相関領域の周辺に 1 粒径程の領域(領域A)を考え、この領域内に他に相関領域が存在しない場合には粒子として認識する。
2. 過誤の相関領域は、相関係数の分布が異なると考えられる。そこで、相関係数の分布に関する相関係数、領域内の相関係数の最大値が、領域A内の全ての相関領域に対し大きい場合に粒子と認識する。
3. 上の手順において認識された付近において、相関を示している領域は過誤の相関を示していると考えられるので、その領域を削除し、新しく認識される粒子が無くなるまで 1, 2 の手順を繰り返す。
4. 過誤の相関領域は粒子の縁付近に生じるため、領域

A内に存在する相関領域が多くなると考えられるので、このような領域を削除し、以上の手順を繰り返す。

以上の過程を経て認識された粒子を図-2 に示す。多少の誤認識はあるものの良好に粒子を認識していると考えられる。

4. 速度ベクトルの算定

粒子の認識において、3までの過程では粒子の誤認識はほぼ無かったので、3までの過程で認識された粒子の周囲に粒子の大きさ程度のプレートを取り、粒子を認識した画像と連続した画像において、式(1)を用いて相互相関係数を計算し、速度ベクトルを求めた。またこの際、移動量の検索範囲は、移動層上層での移動量の1.5倍程度とし、連続した2枚の画像間での相互相関係数が0.8をとる場合にのみ正確に粒子を追跡したものとした。この作業を50枚程度の画像において行い流速分布を求めた。

5. 実験結果および考察

図-3、図-4 に同一勾配における流量の変化による流速分布形、体積濃度分布の変化を示す。同一勾配で流量を増加すると、移動層の同じ高さにおける速度が、

流量の増加に伴い減少することがわかる。これは図-4からもわかるように、流量の増加に伴い、流動の濃度が増加し粒子間の噛みあわせが大きくなり、速度が低下すると考えられる。また速度分布形において移動層上層において速度勾配が増加するのに伴い、体積濃度は急激に減少していることがわかる。また、図-5、6 に勾配を変化させたときの流速分布、濃度分布を示す。流速分布形は流路の勾配が増加するにつれて、移動層上層で速度勾配が大きくなる分布から、全層にわたり速度勾配が一様化される分布へと変化することがわかる。また同様に濃度分布も勾配により若干変化し、流速分布同様に勾配の増加に伴い、移動層上層に向けて、単調に減少していくような分布形になることがわかる。以上のことから、速度勾配と体積濃度の間に何等かの関係式が成り立つと考えられる。

6. 終わりに

本研究は、粒状体の照明光に対する特徴的な散乱光を利用し、画像相関法により粒子認識、移動速度の算定を精度よく行うことを可能とした。今後は、流動機構を支配する要因について詳しく追及していきたい

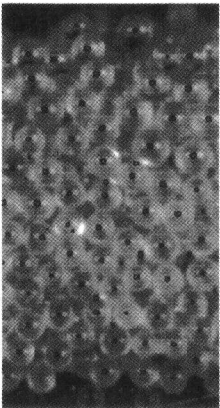


図-1 相関を示す領域

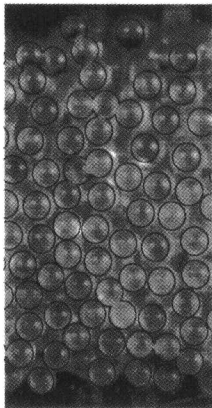


図-2 認識された粒子

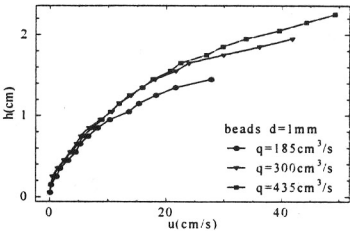


図-3 流量変化による流速分布の変化

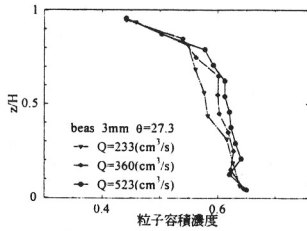


図-4 流量変化による濃度分布の変化

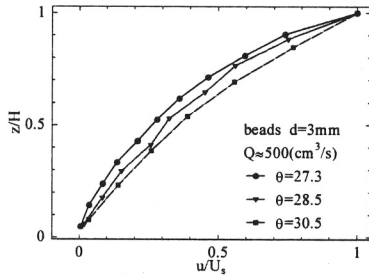


図-5 勾配変化による流速分布の変化

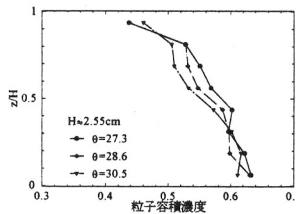


図-6 勾配変化による濃度分布の変化