

画像相関法による粒状体の流動解析

首都高速道路公団 正会員 ○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、粒子の形状が一様（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、形状が一様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. 実験概略

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。側面は流動を視覚的に把握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、実験に用いた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る。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、ビデオキャプチャボードを通して PC 上に時系列画像として取り込む。

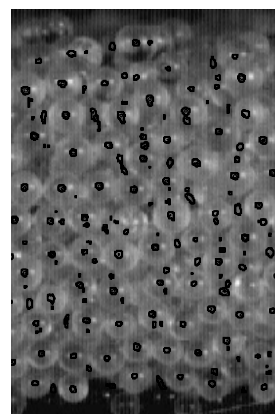
3. 画像処理

実験に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。そこで、特徴的な散乱光を示している領域を基本プレートとし、解析対象画像との間で相互相関係数 $C(x, y)$ を式(1)を用いて計算する。相互相関係数が 0.55 以上の領域を解析対象画像に重ねて示したのが図-1 である。粒子が存在しないにもかかわらず高い相関を示す領域が存在することが見受けられる。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。過誤の相関領域の除去は、着目する領域の周辺に半径が 1 粒径程の領域(領域 A)をとり、領域 A 内で相関を示す領域の有無、相互相関係数の最大値、相互相関係数の分布に関する相互相関係数等を比較することにより行う。結果として認識された粒子が図-2 である。多少の誤認識はあるものの良好に粒子を認識していることがわかる。体積濃度分布は、上述の手法により認識された粒子より計算される相対分布、流速分布と流量から計算される流れの輸送濃度から計算することができる。また、移動量の算定は認識された粒子付近の領域と連続する画像間での相互相関係数を計算し求める。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。また、流速分布を求める際の解析量は 50 枚程度とした。

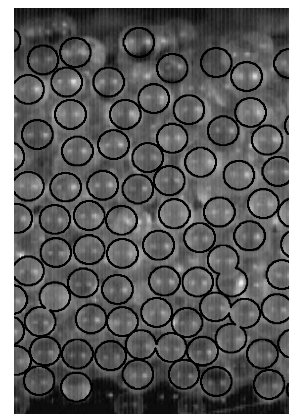
$$C(X, Y) = \frac{\sum_{i=-n/2}^{n/2} \sum_{j=-n/2}^{n/2} C_f C_g}{\sqrt{\sum_{i=-n/2}^{n/2} \sum_{j=-n/2}^{n/2} [C_f]^2 \sum_{i=-n/2}^{n/2} \sum_{j=-n/2}^{n/2} [C_g]^2}} \quad (1)$$

$$C_f = f(x-i, y-j) - f_{ave} \quad (2) \quad f(x, y) \text{ 基本プレートの輝度値}$$

$$C_g = g(X-i, Y-i) - g_{ave} \quad (3) \quad g(x, y) \text{ 解析対象画像の輝度値}$$



-1 相関を示す領域



-2 認識された粒子

key words : 画像相関法, 衝突力, 摩擦力, 濃度分布

連絡先 〒980-8579 仙台市青葉区新巻字青葉 06 TEL022-217-7515

4. 実験結果および応力機構に関する考察

実験結果 図-3、図-4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。流速分布形の変化は、勾配が緩い場合には、極めて高濃度で流動するため、粒子が密に詰まるため粒子間の接触効果が大きく速度の減衰が下層に向かうほど大きくなる。しかし、勾配が増加に伴い流動における濃度が減少する。そのため、粒子間の接触効果が弱まり各層の移動速度が増加する。その結果、全層にわたり速度勾配が存在し、速度勾配の高さ方向の変化も小さくなり、単純せん断状態を形成すると考えられる。

図-5は輸送濃度と勾配、流量の関係を示した図である。流れの平均濃度である輸送濃度は、流量の増加に伴い増加し、勾配の増加に伴い減少することがわかる。

応力機構に関する考察 粒状体の流動には、流動の影響を受ける動的な応力である衝突力と、流動の影響を受けない静的な応力である摩擦力とが考えられる。これらの応力を李¹⁾にならい以下のように表す

$$\tau_c = a\rho_s \lambda^2 d^2 \sin(\theta) (du/dz)^2 \quad (4) \quad \lambda = d/S_d = \left[(C_m/C)^{\frac{1}{3}} - 1 \right]^{-1} \quad (5)$$

$$\tau_s = \beta C_T(z) \rho_s g (H-z) \cos(\theta) \tan(\phi_D) \quad (6) \quad C_T(H) = \gamma H^\alpha T^{-0.325} \quad (8)$$

$$\beta = \begin{cases} \beta = 0 & \text{for } C_t(z) \leq 0.5 \\ \beta = \alpha \left[(C_t(z) - 0.5) / (c_* - 0.5) \right]^{0.5} & \text{for } 0.5 \leq C_t(z) \leq c_* \\ \beta = 1 & \text{for } c_* \leq C_t(z) \end{cases} \quad (7)$$

ここに、 a, α, γ : 定数、 ρ_s, d : 固体粒子の密度と粒径、 C, C_m, C_* : 固体粒子の濃度、最大濃度(=0.74)、移動可能最大濃度で(0.9 C_m)、 λ : 線濃度、 $1:\sin\theta$ 、 β : 全応力に占める静的な応力の割合である。 β は高橋ら²⁾のモデルを用いた。式(8)は、輸送濃度が勾配と流量に関数であるという仮定の基に導いた実験式である。式(8)を移動層の各部に適用し、計算される濃度分布と、実験値を比較したのが図-6である。両者は良好に一致し、式(8)は妥当であるといえる。

以上の式を2次元定常等流状態の支配方程式に代入すると、流速分布の計算値を得ることができる。流速分布の計算値と実験値の比較を図-7に示す。計算値は実験値を良好にしているといえる。

5. おわりに

画像相関法により粒子を認識、追跡することを試み可能であることを示した。また、粒子間に作用する応力として衝突力と摩擦力を考え妥当性を検討した。

1) 李 立亜, 沢本 正樹, 佐藤 忠浩: 粒子間の衝突力についての研究, 水工学論文集, 第37巻, pp.599-604, 1993.

2) 高橋 保, 辻本 浩志: 斜面状の粒状体流れの流動機構, 土木学会論文集, No.565/2-39, pp.57-71

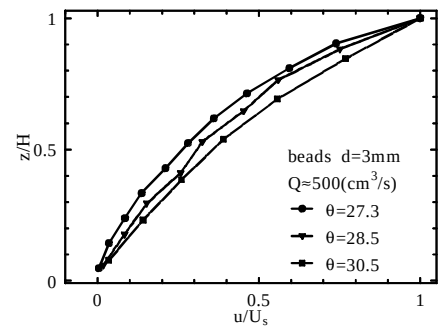


図-3 流速分布の勾配による変化

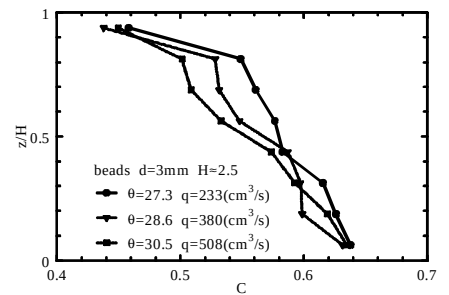


図-4 濃度分布の勾配による変化

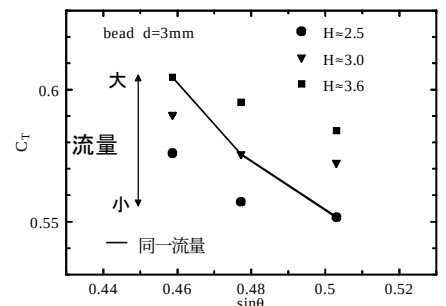


図-5 輸送濃度と勾配、流量の関係

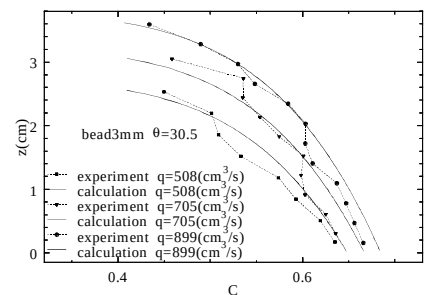


図-6 濃度分布の計算、実験値の比較

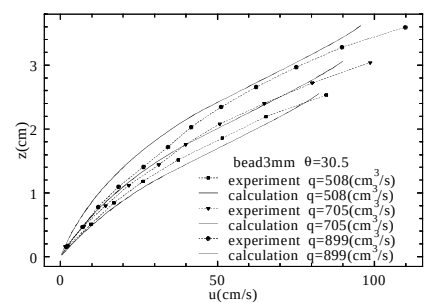


図-7 流速分布の計算、実験値の比較