

京都大学工学部地球工学科 学生員 ○山田 修三
 京都大学大学院工学研究科 正会員 牛島 省
 京都大学大学院工学研究科 フェロー 瀬津 家久

1. はじめに

本研究では、液相中に含まれる大粒径粒子の運動と周囲の流れ場を精度よく予測する数値解析手法を開発するため、基礎実験を行うとともに数値解法に関する考察を行った。実験では、流体中を移動する大粒径粒子の挙動を把握するために画像処理を利用した計測を行い、粒子の時間的な位置変化を調べた。また粒子に作用する流体力や接触力の評価に考察を加えた解法を提案し、実験で見られた現象と計算結果を比較することによって、計算手法の有効性に検討を加えた。

2. 数値解法

本研究では、水理現象に広く見られる以下のような特徴を有する粒子-流体混合系に対する解法を得ることを目的とする。まず粒子は、後流渦などにより流れ場の変調を明確に引き起こす粒径¹⁾より十分大きいスケールを有するものを対象とする。また、粒子数密度が比較的高く、粒子が他の粒子や境界面から受ける影響が無視できず、またそれらとの接触作用も重要となるような場合を考える。これらの特徴を有する粒子の解法を得るために、コロケート格子配置に基づく高次精度の非圧縮性流体解析法²⁾を混合系全体に用いて粒子周囲の流れと粒子に作用する流体力を求めることとした。さらに、粒子の接触作用を適切に再現するため、個別要素法³⁾のモデルを利用する。以上の特徴を有する解法として、F-DEM(Fluid-based Distinct Element Method)を提案した。

3. 水理実験

次に、数値解法の有効性を検証するために、数種類の水理実験を行い、得られた実験結果を数値解析結果と比較する。ここでは、容器内の鉛直壁面近傍を落下する粒子の位置変化を計測する実験について述べる。粒子が境界面付近を移動する場合には、粒子周辺に生ずる流れが壁面の影響を受け、粒子の運動に影響を及ぼす場合がある。そこで、この実験により粒子が壁面から受ける影響を観察し、同時に数値解析結果とも比較する。

実験装置は、一辺が94mmの正方形断面で高さが180mmの水槽である。またこの実験における大粒径粒子として、断面の直径 d が20mm、軸方向長さ50mmの亚克力製の円柱を使用した。円柱の比重は約1.2である。ここで粒子として球ではなく円柱を使用するのは、本実験では粒子の3次元運動ではなく、2次元運動に着目するためである。図-1に示すように、この水槽に水を入れて水深 H を150mmとし、図中の h が100mm、 a が5mmとなる点から円柱を落下させる。

そして円柱の挙動を、毎秒30フレームの画像を取得するビデオカメラで撮影し、画像処理を行い円柱の中心点の軌跡を求める。この際用いる座標系は、水槽の正面に向かって左下を原点とし、原点から右側に x 座標、上側に y 座標を取ったものである。

実験で撮影した映像を元に画像処理を行って得られた円柱の位置の時間変化を図-2に示す。この実験結果の大きな特徴は、円柱が壁から大きく離れるような挙動を示すことである。投入条件の誤差などが原因で、落下する円柱の軌跡に多少ばらつきが見られたが、いずれの場合にも円柱は壁から遠ざかる運動を明確に示し、底面に到達するときの位置は $x/d = 2 \sim 3.5$ となった。

一方、数値解析では、水槽内の領域を計算対象として、これを 80×120 の等しい計算セルに分割した。セル幅は1.25mmであり、円柱断面の直径はセル幅の16倍に相当する。上記の実験と同様の条件で円柱を水中で落下させる計算を行った。動粘性係数は水の物性値とほぼ一致するよう $1.0 \text{ mm}^2/\text{s}$ とした。この条件において数値解析した結果を実験結果と比較したものが図-2である。この結果に示されるように、円柱が壁面から離れる特性は適切に再現されており、実験結果ともおおむね一致する。計算結果では、さらに円柱が落下すると x 方向の運動がおさまり、再び鉛直下方に落下するようになる。これは実験では明確には見られない現象である。

ここで、円柱が壁面から離れるような特性を示す原因について考察する。まず計算により導かれた円柱周辺に生ずる渦度分布を図-3に示す。落下開始直後には円柱背後に一对の渦が形成されるが、円柱と壁面間で加速された流れのために壁面側の渦は円柱から離脱する。このために反対側の低圧渦だけが残る、これにより x 方向へ向かう圧力が生じる。その結果、円柱は壁面から離れる方向に移動すると考えられる。円柱がさらに落下すると、壁面の影響が弱まり、円柱の壁面側にも再び渦が発生する。右下方へ向かう円柱の背後に生じるこの渦は $-x$ 方向に作用する圧力をもたらす。このために円柱の x 方向の運動は弱まり、鉛直下方へ向かう運動に変化して行くと考えることができる。

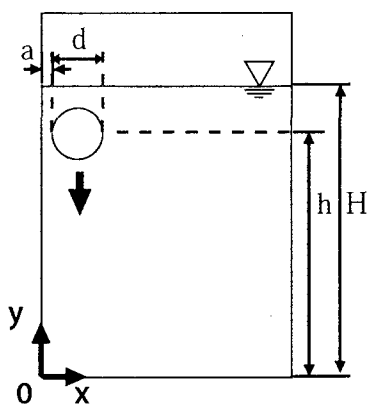


図1 壁面近傍からの円柱落下実験の概略図

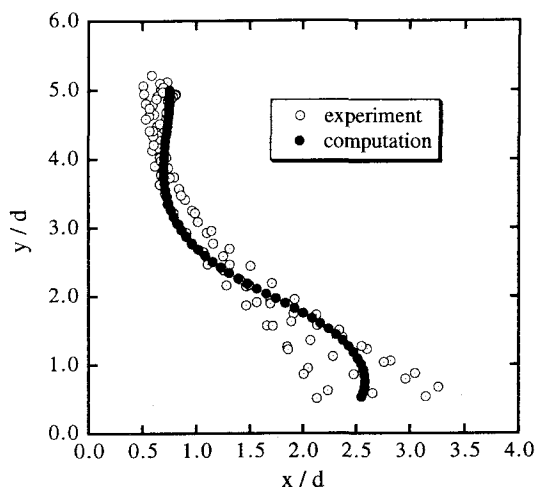


図2 実験結果と計算結果との比較

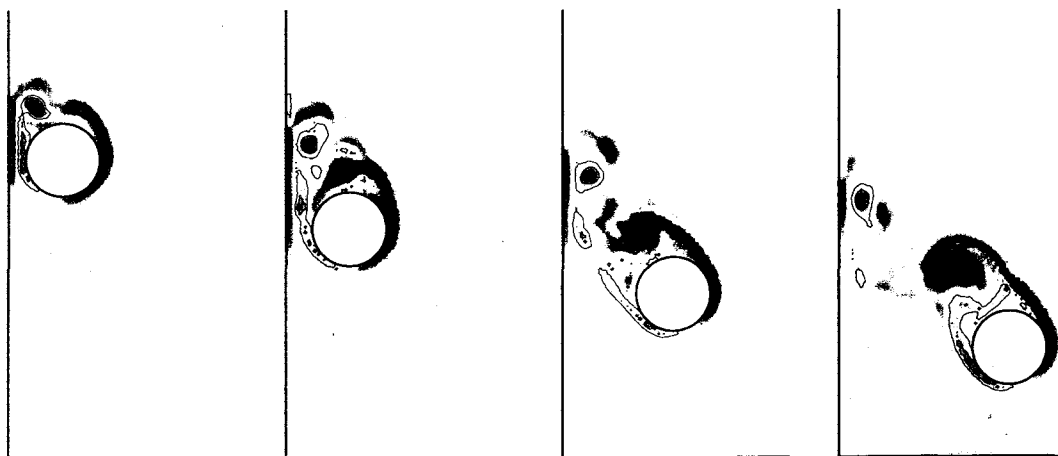


図3 壁面近傍を落下する円柱の計算結果

(濃淡および等高線は渦度を表す。等高線間隔は 40 s^{-1} ，破線は負の値。左から $t=0.25(\text{s}), 0.375(\text{s}), 0.50(\text{s}), 0.625(\text{s})$)

4. おわりに

実験により確認された、壁面から離れるように円柱が落下する様子は、数値計算においても再現することができた。本報では省略したが、容器内で2円柱を落下させる実験や、複数の円柱を水中斜面上で接触移動させる実験との比較においても数値解析結果の妥当性が示されている。今後は、円柱周りの渦の発生やそれにより円柱が受ける流体力などを確認するための詳細な計測を行い、解析手法の適用性を検討する予定である。

最後に、本研究に御協力頂いた京都大学大学院工学研究科修士課程竹村雅樹氏に謝意を表します。

参考文献

- 1) R. A. Gore and C. T. Crowe. Effect of particle size on modulating turbulent intensity. *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 15, No. 2, pp. 279–285, 1989.
- 2) 牛島 省, 瀬津 家久. 移動一般座標系を用いたコロケート格子による自由水面流れの数値解析手法. 土木学会論文集, No. 698/II-58, pp. 11–19, 2002.
- 3) P. A. Cundall and O. D. L. Strack. A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique*, Vol. 29, No. 1, pp. 47–65, 1979.