14506

高濃度固気二相流中での粗大物体の挙動予測モデル開発

A Numerical Model for the Motion of Large Objects
in Dense Gas-Solid Two-Phase Flows

東田 恭平

援助対象者 Scholarship Student: 東田 恭平 Kyohei HIGASHIDA

大阪大学大学院工学研究科 博士課程後期 2 年

Graduate School of Engineering, Osaka University, PhD Student (D2)

E-mail: higashida@cf.mech.eng.osaka-u.ac.jp

研究指導者 Academic Leader: 田中 敏嗣 Toshitsugu TANAKA

教授, Professor

E-mail: Tanaka@mech.eng.osaka-u.ac.jp

成果の概要

1. 緒言

固体粒子を含む固気二相流は、自然界、工業装置内において広く観察される。その中でも、粉粒体を気流で流動化させる気系流動層は、固気二相流の典型的例であり、反応、燃焼、乾燥、造粒、分離などのプロセスに広く用いられている。

流動層の多くの応用において、層内の固体粒子サイズは均一ではなく、流動媒体に比べて非常に大きな粗大物体が混在する。このような層内における固体サイズの大きな違いは、物体の偏析といった特徴的な現象を生じさせることが知られている。したがって、流動層中の粗大物体の挙動を予測することは重要であるが、流動層中を3次元的に動き回る粗大物体を、実験的に観測するのは難しく、未だその挙動は十分に理解されていない。

流動層中の粗大物体運動を数値計算によって予測する試みとして、Tsuji らは、流動層内流

れの数値解析に広く用いられている、DEM-CFD カップリングモデル (Tsuji Y. et al., 1993) をベースとした計算モデルを開発した (Tsuji T. et al., 2014)。Tsuji らは、計算モデルの検証として、十分に流動化させた後に、気体流入を停止させ、その後の粗大物体の高さを実験と比較する方法を採用し、実験と概ね一致することを確認した (Tsuji T. et al., 2014)。しかし、流動化中の粗大物体の位置や、粗大物体に作用する力についての定量的な評価は、十分にはなされておらず、更なる検証が必要である。

そこで本研究では、流動層中の単一球粗大物体に働く力に着目し、数値計算および実験で得られた結果を直接比較した。なお本研究では、粗大物体の浮沈挙動に大きく関わる鉛直方向成分の力についてのみ着目した。実験における力の計測は、Harada らによって開発された、Lagrangian センサーシステム (Harada S. et al., 2011) を用いて行った。この計測システムは、自由に運動する物体に作用する力を、非接触で計測することが可能である。

2. 計算モデル

従来の DEM-CFD カップリングモデルでは、流体計算に用いるセルのサイズを、粒子サイズよりも大きく設定し、また同時に、層内に発生する気泡のようなメゾスケール構造のサイズよりも小さく設定する必要がある。そのため、従来の DEM-CFD カップリングモデルにおいて、計算セルサイズよりも大きな物体を直接扱うことは不可能である。そこで Tsuji らは、このような計算セルサイズよりも大きな物体を、DEM-CFD カップリングモデルの枠組み内で扱う手法として、Fictitious Particle Method を開発した (Tsuji T. et al., 2014)。この手法では、直接数値計算の一種である、Volume penalization 法 (Schneider K., 2005) の考えをもとに、物体を小さな仮想粒子の充填体とモデル化することで、物体-流体間の相互作用を表現している。

流体計算の基礎式は、次に示す局所相平均量に対する連続の式と運動方程式である (Anderson TB. and Jackson R., 1967)。

$$\frac{\partial}{\partial t} \varepsilon + \nabla \cdot (\varepsilon \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon \mathbf{u}) + \nabla \cdot (\varepsilon \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\frac{\varepsilon}{\rho_f} \nabla p + \mathbf{f} \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{u}$, p , ρ_f , ε はそれぞれ、局所相平均された流体速度、圧力、流体の密度、空隙率である。また、 $\mathbf{f}$ は、固体-流体間の運動量交換を表す項である。 $\mathbf{f}$ の与え方については、Tsuji らによって詳しく説明されている (Tsuji T. et al., 2014)。

固体運動は、個々の粒子および粗大物体についての並進と回転の運動方程式を解くことによって計算される。また、固体間の接触力は、ばね、ダッシュポットおよび摩擦スライダーで構成された DEM の接触力モデルを用いて与えた。

3. 実験手法

実験における、粗大物体に働く力の計測は、Harada らによって開発された Lagrangian センサーシステム (Harada S. et al., 2011) を用いて行った。本センサーシステムは、3 軸加速度センサー、3 軸磁気センサーおよび無線モジュールで構成されており、これらが球形の殻の内部に固定されている。センサーからの信号は、無線で PC に送られる。

図 1 に粗大物体とセンサーから出力されるベクトルとの関係を示す。加速度センサーからの出力 $\tilde{\mathbf{a}}$ は、流体力や接触力による動的な加速度 $\mathbf{a}$ に加えて、重力加速度 $\mathbf{g}$ も含まれているため、重力加速度成分のみを取り除く必要がある。しかし、任意の姿勢をとる粗大物体において、加速度センサーの出力から、重力加速度成分のみを除去するのは難しい。そこで、Harada らは、重力と同じ方向の外部磁場を与えることで、これを解決した (Harada S. et al., 2011)。この外部磁場は、磁気センサーによって検出され、その出力 $\tilde{\mathbf{b}}$ を用いることで、重力加速度は次式により求められる。

$$\mathbf{g} = |\mathbf{g}| \frac{\tilde{\mathbf{b}}}{|\tilde{\mathbf{b}}|} \quad (3)$$

式 (3) を用いることで、動的加速度 $\mathbf{a}$ は、次式のように求められる。

Fig. 1 Output of sensor located in magnetic field

$$\mathbf{a} = \tilde{\mathbf{a}} - \left| \mathbf{g} \right| \frac{\tilde{\mathbf{b}}}{|\tilde{\mathbf{b}}|} \quad (4)$$

式 (4) で得られる動的加速度 $\mathbf{a}$ に、粗大物体の質量を掛けることで、粗大物体に働く力を求めることができる。

4. 実験および計算条件

流動層は、奥行き 150 mm、幅 150 mm の矩形流動層である。流動媒体として使用する粒子は、直径 2.3 mm、密度 2443 kg/m³ のガラスビーズであり、初期層高を 150 mm に設定した。粗大物体は直径 30 mm の球であり、密度は 990.3 kg/m³ である。このとき、静止状態の粒子層のかさ密度は 1471 kg/m³ であり、粗大物体と粒子層との密度比は 0.67 となる。また、作動流体には空気を用い、空塔速度 1.4 m/s で

流動層下部から一様に流入させた。本研究では、重力加速度検出用の外部磁場は、磁石板を流動層の上下に設置することで与えた。

計算条件については表 1 に示す。実験、計算ともに、粗大物体の初期位置は層表面中央である。

5. 粗大物体に作用する力とその運動

図 2, 3 に、実験および計算における、粗大物体の運動の様子をそれぞれ示す。今回の条件では、粗大物体と粒子層との密度比は 0.67 で

Table 1 Calculation conditions

Particle and large object	
Particle diameter: d_p [mm]	2.3
Number of particles: N_p [-]	326577
Density of particles: ρ_p [kg/m ³]	2443
Bulk density of particle bed: ρ_b [kg/m ³]	1471
Initial bed height: H_i [mm]	150
Diameter of large object: d_s [mm]	30
Density of large object: ρ_s [kg/m ³]	990.3
ρ_s/ρ_b [-]	0.67
Gas	
Superficial velocity: u_0 [m/s]	1.4
Viscosity: μ_f [Pa s]	1.81×10^{-5}
Density: ρ_f [kg/m ³]	1.205
Calculation	
Time increment: Δt [s]	5.0×10^{-5}
Calculation domain	
Depth: L_x [mm]	150
Width: L_y [mm]	150
Height: L_z [mm]	600
Cell size: Δx [mm]	5.0

Fig. 2 Snapshot of large object and particles (experiment)

Fig. 3 Snapshot of large object and particles (simulation)

Fig. 4 Vertical force acting on large object (experiment)

Fig. 5 Vertical force acting on large object (simulation)

あることから、粗大物体は層内部に貫入することなく、層表面付近で上下運動している様子が観察された。図4、5に、実験および計算で得られた、粗大物体に働く鉛直方向の力をそれぞれ示す。この力は、重力成分を取り除いた動的な力のみを示している。なお、力については、鉛直上向きを正としており、粗大物体に働く重力で正規化している。図2、3に示されている画像は、図4、5中に描かれている矢印の

区間にそれぞれ相当する。区間の最初は、上向きの力によって粗大物体は上昇し、その後上向きの力が減少すると落下する。落下した粗大物体は、粒子層上面に接触し、その時に、大きな上向きの力が瞬間的に生じる。これら一連の粗大物体の運動と、それに対応する力の変化の様子が、実験と計算で良く一致していることが確認された。また、力のピーク値や、ピークの間隔などの特徴も、実験と計算で概ね一致していることが分かる。

6. 結言

流動層内の粗大物体に働く鉛直方向の力について、数値解析結果と、Lagrangian センサーによる計測結果を直接比較した。その結果、両者で良好な一致が確認された。

本稿では、粗大物体が粒子層内部に貫入することがなく、層表面付近を浮遊している条件での比較であったため、今後は層内部を自由運動する条件での比較を行う予定である。

参考文献

- [1] Anderson TB., Jackson R., A fluid mechanical description of fluidized beds, *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 6 (1967) 527–539.
- [2] Harada S., Kobayashi Y., Sawano T., Noguchi E., Direct measurement of fluid force on a particle in liquid by telemetry system, *International Journal of Multiphase Flow*, 37 (2011) 898–905.
- [3] Schneider K., Numerical simulation of the transient flow behaviour in chemical reactors using a penalization method, *Computers & Fluid* 34 (2005) 1223–1238.
- [4] Tsuji T., Higashida K., Okuyama Y., Tanaka T., Fictitious particle method: a numerical model for flows including dense solids with large size difference, *AIChE Journal*, 60 (2014) 1606–1620.
- [5] Tsuji Y., Kawaguchi T., Tanaka T., Discrete particle simulation of 2-dimensional fluidized-bed, *Powder Technology* 77 (1993) 79–87.

外部発表成果

口頭・ポスター発表

1. Higashida K., Yamada T., Tsuji T., Tanaka T., “A numerical model for the motion of large non-spherical object in fluidized bed”, ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2015 (Seoul, Korea, Jul. 26-31, 2015) AJK2015-32744.
2. Higashida K., Rai K., Yoshimori W., Ikegai T., Tsuji T., Harada S., Oshitani J., Tanaka T., “Vertical force acting on large object floating in gas-fluidized bed (Direct comparison between numerical simulation and Lagrangian measurement)”, 2015 AIChE Annual Meeting (Salt Lake City, USA, Nov. 8-13, 2015) 140c.
3. 東田 恭平, 雷 健太, 吉森 亘, 池貝 友喜, 辻 拓也, 原田 周作, 押谷 潤, 田中 敏嗣, “固気流動層内の浮遊粗大物体に作用する鉛直方向の力について (数値解析と Lagrangian センサーによる計測の直接比較)”, 第 21 回流動化・粒子プロセッシングシンポジウム (Kitakyushu, Dec. 10-11, 2015).
4. 辻 拓也, 東田 恭平, 田中 敏嗣, “DEM-CFD カップリング法による大規模流動層解析”, 第 29 回数値流体力学シンポジウム (Fukuoka, Dec. 15-17, 2015) E04-5.