

論文の内容の要旨

Thesis Summary

論文題目 固体-流体連成問題におけるマルチスケールシミュレーション
に向けた数値解析モデルの開発

Development of the numerical model for the multiscale numerical simulation in the
solid-fluid multiphase flow

氏名 森 勇稀

(本文 Body)

1 緒言

粉体や固体-流体混相流は、様々な産業分野に応用されている。プロセスの最適化や運用改善を行うためには内部で発生している現象を解明することが必要不可欠であるが、粉体や固体-流体混相流はマルチスケール現象である場合が多いため、現象の詳細な把握のために数値解析を行う際にはマルチスケールシミュレーションが必要不可欠である。しかし、マルチスケールシミュレーションを産業用プロセスの設計最適化や現象把握のために利用するためには、マクロ・ミクロのシミュレーションそれぞれに数値解析の応用が困難な問題が未だ多く残存していた。そこで本研究ではこれらの問題を解決するために大物体を伴う固体-流体混相流の数値解析手法、大規模湿潤粉体のための液架橋粗視化モデル、および移動壁面を伴う非球形粒子による固体-流体混相流の数値解析手法を開発し、その妥当性検証を行う。

2 大物体を伴う固気混相流数値解析

2.1 序論

粉体粒子に対してサイズ差の非常に大きな物体が混在している固体-流体混相流は、産業分野において広く現れる流れである。これらの流れの中での大物体の挙動は全体のプロセ

ス効率にも影響を与えるため、詳細な挙動把握が重要である。そこで、本研究では大物体-流体間相互作用力を IBM (Immersed Boundary Method) によって計算し、大物体-固体粒子間力を大物体内に仮想的に配置した粒子を用いて DEM (Discrete Element Method) によって解析する DEM-IBM 大物体モデルの開発を行う。モデルの妥当性を検証するため、流動層内における球状大物体の運動挙動解析を行い、その結果を実験結果と比較する。さらに、任意形状の大物体を扱うことが可能になることを示すため、円柱状の大物体を伴う流動層において数値解析を行う。

2.2 解析条件

既存研究における流動層実験と同等の体系を用いて解析を行った。計算体系の大きさは $600 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ であり、矩形の流動層装置である。球状および円柱状の大物体形状を用い、それぞれ異なる 6 つの大物体密度を用いて数値解析を行った。流体は空気を想定し、流入速度は 1.4 m/s とした。

2.3 結果・考察

球状大物体を用いた体系では、大物体の密度と粉体層の密度比によって大物体の挙動が大きく変化することが確認された。すなわち、粉体層の密度に対して大物体の密度が非常に低い場合には大物体が粉体層表面で揺動するのに対し、大物体密度が高い場合には大物体が粉体層下部に完全に沈降するということが分かった。これらの定性的な現象は実験結果とよく一致しており、また流動終了後の大物体位置や大物体にはたらく力などの定量的な値が実験結果と数値解析結果においてよく一致した。さらに、円柱状物体を用いた体系での数値解析では、球状物体と同様に大物体密度が高いほど大物体の平均的な位置が減少する傾向が見られたが、円柱状物体では大物体の揺動幅が球状物体よりも大きくなること、および球状物体が完全に沈降するような密度比であっても揺動を行う場合があることなどが確認された。

2.4 結論

本研究では DEM-IBM 大物体モデルを開発し、手法の妥当性を検証した。その結果、大物体の揺動挙動などが実験結果と数値解析結果において定性的によく一致した。また、流動終了後の大物体位置や大物体にはたらく力についても、実験結果と数値解析結果が定量的によく一致した。また、円柱状物体を用いた体系での数値解析では、平均的な位置については球状大物体と同様の傾向を見せるが、揺動の振幅や完全に沈降する密度などが球状大物体と異なるという結果が得られた。本研究ではこのような円柱状大物体を伴う固体-流体混相流の数値解析に初めて成功した。これらのことから、本研究で開発した DEM-IBM 大物体モデルによって任意形状の大物体を伴う固体-流体混相流の数値解析が可能であるということが示された。

3 DEM 粗視化モデルにおける液架橋力モデルの構築

3.1 序論

粉体に液滴が添加されると粉体粒子間に液架橋が発生し、この液架橋力によって粉体が

凝集する。これにより、湿潤粉体は乾燥粉体では見られなかった特異な挙動を見せることが知られている。また、産業用装置のように大規模な装置では、数兆を超える膨大な数の粉体粒子を扱う場合がある。これに対し、粒子群を代表粒子によってモデル化する粗視化モデルが開発された。粗視化モデルによる数値解析は産業用体系などの大規模体系にも応用が進んでいるが、その一方で湿潤粉体に対する粗視化モデルは確立していなかった。そこで本研究では、粗視化モデルの仮定を踏襲した新しい液架橋力粗視化モデルの開発を行う。また、本研究で開発した液架橋粗視化モデルの妥当性を確認するため、実粒子による数値解析と粗視化モデルによる数値解析結果を比較する。

3.2 解析条件

本研究では、回転円筒容器を用いて数値解析を行った。回転円筒容器は直径 100 mm、厚さ 100 mm の円筒である。実粒子径は 1 mm とし、粒子数は 135,000 とした。回転円筒容器において、液量の異なる 2 つのケースを設定し、実粒子による数値解析、開発した新しい液架橋粗視化モデルによる数値解析、既存の液架橋粗視化モデル、および単純に大きな粒子を用いた数値解析を行った。

3.3 結果・考察

実粒子による数値解析においては、容器内を滑るようにして振動する挙動が確認された。しかし、既存の液架橋力粗視化モデルにおいては、容器内を滑らずに循環する挙動を示し、実粒子の挙動を十分に模擬できなかった。これに対し、本研究で開発した新しい液架橋粗視化モデルでは実粒子の挙動を定性的に非常によく模擬することができた。また、新しい液架橋粗視化モデルによる数値解析結果は、実粒子による数値解析結果と粒子層の高さや容器にはたらくトルクなどの定量的な値もよく一致した。

3.4 結論

本研究では、大規模な湿潤粉体解析に適用できる新しい液架橋粗視化モデルを開発し、回転円筒容器の数値解析によって開発手法の有効性および妥当性の検証を行った。その結果、回転円筒容器内の数値解析においては、従来の液架橋粗視化モデルでは実粒子の挙動を十分に模擬できないのに対し、新しい液架橋粗視化モデルでは定性的・定量的に実粒子の挙動をよく模擬できることが示された。このことから、本研究で開発した新しい液架橋粗視化モデルによって、大規模な湿潤粉体挙動を模擬することができるということが示された。

4 移動壁面を伴う楕円体粒子による固気混相流シミュレーション

4.1 序論

粉体を扱う産業用プロセスにおいては、様々な形状の粒子を扱っており、粒子形状が現象に与える影響を把握することは非常に重要である。粒子の非球形を考慮したモデルを適用した数値解析は、未だ矩形の流動層など、非常に単純な体系への応用のみが研究されており、産業用装置のように複雑形状壁面や移動壁面を持つ体系へ適用することができる数値解析手法は存在しなかった。そこで本研究では、著者らがこれまでに開発した移動壁面を伴

う体系を簡便かつ精度よく解析できる数値解析手法に対し、楕円体粒子モデルを適用することで、移動壁面を伴う非球形粒子による固体-流体混相流を解析することができる新しい数値解析手法の開発を行う。

4.2 解析条件

本研究では、まず数値解析の妥当性検証のために流動層において開発手法による数値解析結果を既存の数値解析結果と比較した。体系は 60 mm×600 mm×3600 mm の矩形流動層で、円盤状の扁球粒子、および針状の長球粒子を用いて、流入速度を変化させた数値解析を行った。次に、本研究で開発した手法が移動壁面と非球形粒子を伴う固体-流体混相流に適用可能であることを示すため、金型充填装置における数値解析を行った。体系は 10 mm×30 mm×35 mm の金型充填装置で、金型の形状および粒子形状を変えた体系において空気の有無による挙動の変化を解析した。

4.3 結果・考察

流動層の数値解析においては、本研究で開発した手法による数値解析結果と既存の数値解析結果は粉体層の流動挙動などの定性的挙動、および圧力損失の定量的な値が非常によく一致した。また、金型充填装置の数値解析においては、空気の影響を考慮しない場合には粒子が金型全体を充填し、粒子の非球形による接触構造の差によって充填量に差が発生するのに対し、空気の影響を考慮した場合には粒子形状によって流体抗力の受けやすさが変化することで充填率に大きな差が生まれるということが分かった。本研究では金型充填装置のような移動壁面および非球形粒子を伴う固体-流体混相流の数値解析に初めて成功した。

4.4 結論

本研究では、移動壁面を伴う非球形粒子による固体-流体混相流を解析できる新しい数値解析手法の開発を行い、その妥当性検証および金型充填装置への応用を行った。その結果、本研究で開発した手法により金型充填装置のような移動壁面および非球形粒子を伴う固体-流体混相流の数値解析に初めて成功し、金型充填装置内の粉体充填メカニズムを解明することができた。これらのことから、本研究で開発した手法により、移動壁面および非球形粒子を伴う固体-流体混相流の数値解析を行うことが可能になった。

5 結言

本研究では、固体-流体連成問題のマルチスケールシミュレーションに向けた数値解析モデルの開発を目的として、大物体を伴う固体-流体混相流の数値解析手法、大規模湿潤粉体のための液架橋粗視化モデル、および移動壁面を伴う非球形粒子による固体-流体混相流の数値解析手法を開発した。これにより、これまで固体-流体連成問題におけるマルチスケールシミュレーションを行う際に残存していた問題を解決することができ、産業用プロセスなどの大規模な体系においてマルチスケールシミュレーションによる現象の詳細な把握を行うことが可能になることが期待される。