

論文の内容の要旨

Thesis Summary

論文題目 メッシュフリー粒子法を用いた混相流シミュレーション手法の開発
と産業応用

Title of Dissertation Developmeent and industrial application of a meshfree particle
method for a multi-phase flow

氏名 高畑 和弥

Name of Author Kazuya Takabatake

(本文 Body)

1 緒言

固体粒子を含む混相流は、原子力工学をはじめ、化学工学や製薬、製造業など幅広い分野でよく見られる現象である。現象の解明や設計・運転条件の最適化、歩留まりの向上や品質管理の観点から、数値シミュレーションの導入が期待されている。固相を伴う混相流では、離散要素法 (Discrete Element Method: DEM) と数値流体力学法 (Computational Fluid Dynamics: CFD) を連成した DEM-CFD 法が広く用いられている。近年の著しい計算機の性能向上に伴い、数値シミュレーション分野においてより現実に近い体系での検証が望まれており、新たなモデルの開発やその妥当性の検証が行われている。本研究では、産業応用に資する計算手法として、メッシュフリー粒子法を用いた混相流シミュレーション手法を開発し、手法の妥当性を示すために検証計算を行う。

2 トロイダル近似を用いた液架橋の数値シミュレーション

2.1 序論

湿潤粉体のシミュレーションには液架橋力モデルを導入した DEM がよく用いられる。トロイダル近似を用いた液架橋力モデルは液量に依らず計算可能な手法となっている。他方、その導入実績は未だ少なく、妥当性の検証が必要であった。本研究では、トロイダル近似によるモデルを用いて 3 本ロールミルにおける湿潤粉体の付着挙動のシミュレーションを行う。3 本ロールミルでは、粉体はロール中央を通過した後、必ず高速回転するロール側に付着し、最終的に最も速いロール側で回収される。長く使われてきた装置にも関わらず、湿潤粉体が必ず高速のロール側に付着するメカニズムは知られておらず、歩留まりの向上、品質の改善といった点で問題となっていた。本研究では、数値解析によって高速のロール側に付

着する現象を模擬することで本手法の妥当性を示す。加えて、左右のロール間に働く液架橋力のバランスを調べることで、高速のロール側に付着するメカニズムを解明する。

2.2 解析条件

半径 100 mm の 2 本のロールを最も狭い中央部分で 300 μm の隙間を空けて配置した。ランダムにパッキングした 36,000 個の直径 15 μm の粒子を、含水率が粒子総体積の 10% となるように設定し、ロール間に投入した。Case 1 では左右のロールの回転速度をともに 0.25 m/s に、Case 2 では左のロールを 0.25 m/s、右のロールを 0.50 m/s にした。

2.3 結果・考察

Case 1 では、左右のロールは同じ速度で回転させた。粒子の初期配置を変えると左のロールに付着するケースもあれば、右のロールに付着するケースもあった。この初期配置をそれぞれ、Type 1 および Type 2 と呼ぶ。Case 2 では、右のロールの回転速度を 0.50 m/s として計算を行った。Type 1 および Type 2 のいずれの初期配置においても、右側のロールに付着する様子が見られた。トロイダル近似による液架橋力モデルを用いて、湿潤粉体が高速のロール側に付着する現象の模擬に成功し、本手法の妥当性が示された。また、Case 1、2 のいずれのケースにおいても、ロールとロール中央軸を通過した粒子間にはたらく液架橋力は、付着したロール側で大きくなっていた。このことから、液架橋力のバランスによって付着方向が決定することが示された。

2.4 結論

本研究では、トロイダル近似による液架橋力モデルを導入した DEM を用いて、湿潤粉体の挙動を解析した。ロールに速度差がない場合は粒子の初期配置によって付着する方向が変わったが、速度差がある場合は実際の現象と同様に、高速のロール側に付着する様子がシミュレーションによって模擬された。左右のロール間の液架橋力のバランスによって、付着方向が決まることが、シミュレーションによって示された。以上の結果から、トロイダル近似を用いた液架橋力モデルの妥当性が示され、また、3 本ロールミルにおける湿潤粉体の付着メカニズムを解明できた。

3 密度スケーリング手法を用いた固気混相流シミュレーション

3.1 序論

既存の埋込境界法を用いた DEM-CFD 法では、壁面内部を速度を補正した流体として扱っているが、圧力ポアソン方程式 (PPE) を計算した際に壁面内部に不自然な流れが生じてしまうことが、先行研究によって報告されている。これを解決するため、PPE に密度スケーリングを与える手法が開発された。本モデルを用いることで流体の壁面への漏出が低減されることが示されたが、検証例は単相流のシミュレーションに限定されていた。本研究では、密度スケーリング手法を固気混相流体系に適用し、固相を伴う混相流における本手法の有効性を示す。

3.2 解析条件

本研究では、固気混相流体系としてガイドチューブ付き噴流層を選択した。容器下部の

中央から、噴流ガスとして 20 m/s の空気を流入させた。密度スケーリング手法の有効性を示すため、1 から 1,000 まで 4 つの異なるスケーリング定数を用いて計算結果の比較を行った。

3.3 結果・考察

密度スケーリングを用いないケースでは、中央ではなく右方に偏った流れが生じ、定常に至った。他方、密度スケーリングを適用したケースでは、中央の流路で噴流化が見られた。密度スケーリングを用いない場合、壁面内部を貫通する流れが生じたため、非対称な流れが生じたと考えられる。一方、密度スケーリングを適用することによって、流体と固体壁面におけるメッシュの連結が切れ、PPE による流体の漏れが低減されたため中央で速い流れが生じたと考えられる。以上の結果から、密度スケーリング手法を導入することによって、固気混相流体系の計算精度が向上したことが示された。

3.4 結論

本研究では、密度スケーリング手法を固気混相流体系へと適用し、その有効性を示すため、噴流層体系にて検証計算を行った。密度スケーリングを適用しない場合、右方に偏った流れが生じた。他方、密度スケーリングを用いた場合、中央の流路で速い流れが観測された。これは密度スケーリング手法によって、流体と固体壁面における連結が弱くなり、PPE による流体の漏れが低減されたためと考えられる。密度スケーリング手法を用いることで、課題であった埋め込み境界法の精度が向上し、固体流体問題においても計算精度を向上させることが示された。

4 薄板を有する固気混相流のシミュレーション

4.1 序論

DEM-CFD 法では、空隙率に基づいて流体の計算を行う局所体積平均が導入されている。空隙率を精度よく評価するためには、十分な数の粒子が格子内部に存在している必要があるため、流体の格子幅は粒子径と比較して大きく設定する必要がある。そのため、既存の手法では薄板を含む体系を計算できないという問題があった。本研究では、薄板を有する固体流体問題の計算手法として Dual grid model と符号付距離関数法、埋込境界法を連成した新しい離散化手法(Flexible Eulerian Lagrangian method: FELM)を開発する。開発手法の妥当性を検証するため、実験との比較を行う。

4.2 解析・実験条件

本研究では、検証体系として薄板スリットを有する流動層を選択した。流動層には、6 枚の薄いスリット(厚さ 2 mm)を配置した。FELM では流体の計算に 1 mm の格子を、空隙率の計算に 3 mm の格子を用いて計算を行った。比較対象として、既存手法では流体格子を 3 mm として計算を行った。また、妥当性を示すために、同体系において実験を行った。

4.3 結果・考察

FELM を用いたシミュレーションでは全ての流路で流動化が起こっており、実験の結果とよく一致していた。一方で、既存の手法を用いた場合、流動化は起こらなかった。薄板近く

の流速を調べたところ、FELM では薄い壁面を模擬できていたため、壁面近傍での Non-slip 境界が模擬されていた。他方、既存の手法では解像度が低いため、壁面と流体の境界面を精度よく捉えられず、Non-slip 境界が模擬できていなかった。以上の結果から、FELM を用いることで既存手法では計算できないような薄板を有する体系が計算可能となり、また実験の結果を模擬できていたことからその妥当性が示された。

4.4 結論

本研究では、薄板を有する固気混相流体系の計算手法として、FELM を開発し、その妥当性の検証のために実験結果との比較を行った。既存の手法では流動化が起らなかったのに対し、FELM では実験と同様に流動化が見られた。これは本モデルによって薄板を解像できたためと考えられる。以上の結果から、FELM によって薄板を有する固気混相流が計算可能となることが示された。

5 結言

本研究では、固体粒子を含む混相流現象の高精度解析を目的に、メッシュフリー粒子法を用いた混相流の計算手法の開発を行った。

トロイダル近似による液架橋モデルを導入した DEM の妥当性検証のために、3 本ロールミルにおける湿潤粉体の付着挙動シミュレーションを行った。湿潤粉体が高速のロール側に付着する様子がシミュレーションによって模擬されており、本モデルの妥当性が示された。また、付着方向が左右のロールの液架橋力のバランスによって決まることがシミュレーション結果によって示され、数値解析手法によって 3 本ロールミルにおける湿潤粉体の付着メカニズムの解明に成功した。

固気混相流における密度スケーリング手法の有効性を示すために、噴流層体系に適用した。密度スケーリングを導入しなかった場合、一方に偏る不自然な流れが生じたが、他方、密度スケーリングを導入した場合には、中央流路で速い流れが観測された。密度スケーリングによって、壁面と流体セルの連結が弱くなったためと考えられる。以上の結果から、密度スケーリング手法によって固気混相流の計算精度を向上させられることが検証計算によって示された。

薄板を有する固気混相流の計算手法として、FELM の開発を行い、実験との比較を通してその妥当性の検証を行った。FELM は実験と同様の流動化現象を模擬できており、その妥当性が示された。他方、既存手法では、解像度不足のため壁面と流体の境界をとらえることができず、流動化現象を模擬できなかった。以上の結果から、FELM を用いることで、既存手法では困難であった薄板を有する固気混相流が計算可能となることが示された。

以上、3 つの体系においてそれぞれ検証計算を行った。トロイダル近似を用いた液架橋力モデル、固気混相流における密度スケーリング手法および FELM の妥当性および産業体系への適用可能性を示すことができた。