

氏名・（本籍）	いち き けん ご 市 來 健 吾
学位の種類	博 士（理 学）
学位記番号	理博第1503号
学位授与年月日	平成9年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科，専攻	東北大学大学院理学研究科（博士課程）物理学専攻
学位論文題目	粉体流動層の粒子ダイナミックス
論文審査委員	（主査）教授 佐藤 武郎 教授 都築 俊夫，教授 新関 駒二郎 助教授 早川 尚男 （京都大学）

論 文 目 次

第1章 はじめに

1. 1 何を研究するのか
1. 2 研究の背景
1. 3 構成

第2章 現実の流動層と理想流動層

2. 1 現実の流動層
 2. 1. 1 流動層の構成要素
 2. 1. 2 流動層の示す現象
 2. 1. 3 流動状態の分類
2. 2 流動層の研究
2. 3 理想流動層
 2. 3. 1 流体力学的相互作用
 2. 3. 2 粒子間衝突
 2. 3. 3 理想流動層の定義

第3章 シミュレーション方法

3. 1 粒子の運動方程式
3. 2 流体力学的相互作用
 3. 2. 1 ストークス近似(低レイノルズ数近似)
 3. 2. 2 希薄な場合の相互作用行列
 3. 2. 3 2体問題
 3. 2. 4 高濃度での相互作用行列
 3. 2. 5 周期境界条件
3. 3 粒子慣性の導入
 3. 3. 1 粒子慣性の無い場合

- 3. 3. 2 粒子慣性の導入の困難
- 3. 3. 3 lubricationの繰り込み
- 3. 3. 4 無次元化
- 3. 3. 5 繰り込みの物理的意味
- 3. 3. 6 固定粒子

第4章 計算結果と解析

- 4. 1 シミュレーションの設定
 - 4. 1. 1 パラメータ空間
 - 4. 1. 2 シミュレーションのサイズについて
- 4. 2 動的挙動
 - 4. 2. 1 振動的挙動と気泡
 - 4. 2. 2 気泡状態とチャンネル状態
 - 4. 2. 3 気泡生成周期
 - 4. 2. 4 気泡の上昇速度の流入速度依存性
- 4. 3 定常状態
 - 4. 3. 1 平均運動エネルギー
 - 4. 3. 2 流動層の平均重心
 - 4. 3. 3 自己拡散係数
 - 4. 3. 4 有効粘性率
 - 4. 3. 5 速度分布

第5章 議論

- 5. 1 シミュレーション結果の解釈
 - 5. 1. 1 ストークス数依存性
 - 5. 1. 2 流入速度依存性
 - 5. 1. 3 液体とのアナロジー
- 5. 2 一様状態の欠如

第6章 結論と課題

- 6. 1 結論
- 6. 2 課題

論文内容要旨

本研究では粉体流動層の数値解析を行う。本研究の特徴は、これまでに開発されて来た手法のほとんどが現象論的に流体と粒子の相互作用を導入したのに対し、この流体力学的相互作用を正確に扱いモデルの構成を行った点である。このようなモデルを構成する為に、粒子集団を連続体近似で扱うのではなく、個々の粒子の運動を直接扱う。また現実の流動層から最小限の基本的なメカニズムのみを取り出して「理想流動層」を定義し、この系をモデル化する。これは、現実の粉体流動層は一般に粒子の大きさや系に流し込む流体の流速の範囲が広く、これら全てを包括的に記述する第一原理的なモデルの構成は不可能である為である。

粒子と流体の相互作用は本来流体の粘性による摩擦の効果である為、理想流動層では粘性が支配的な低

レイノルズ数の極限で流体を記述する。粒子間の直接相互作用は剛体的で、衝突は弾性とした。また粒子は全て同じ大きさの球とし、粒径や質量、形状の分布は無視した。低レイノルズ数を仮定している為、流入流速が大きな場合の挙動、例えば希薄流動状態や輸送状態などを記述するのは不可能である。従って現実の流動層の示す現象の中でも静止状態から流動状態への流動化現象と、気泡流動状態を含む比較的穏やかな流動状態が直接の考察対象となる。

モデル化で最も重要な低レイノルズ数での粒子間相互作用は、支配方程式の線形性の為に、粒子速度と流体に及ぼす力とを関係づける行列によって表される。この行列は粒子濃度が希薄な場合や2粒子のみの場合は求められている。今考察しようとする粒子濃度が高く多くの粒子が存在する場合は、希薄な場合と2粒子の場合の解をセルフコンシステントに結合する方法が良い結果を示す事が、コロイド粒子系の数値シミュレーションに於いて示された。本研究ではこの近似の正当性を確認する意味から、沈澱現象での平均沈降速度の解析にこの近似を用い、既存の解析が改善される事を示す。

粉体はコロイド粒子と異なり粒子の慣性が重要となる。しかし低レイノルズ数での粒子間相互作用を用いると、この相互作用の近接効果の持つ特異性(抵抗の発散)の為に、モデルに有効に慣性を導入できないことが分かる。本研究ではこの特異性を繰り込んだ慣性を用いる事でモデルを構成した。この繰り込みが現実の系の振舞を良く再現する事は、現実の系では流体の連続性の限界や粒子表面での凹凸などにより流体力学的相互作用の特異性が隠されることを意味する。

このモデルを特徴付けるパラメータは、流入速度と無次元化された粒子質量であるストークス数である。このパラメータ空間で系統的に数値シミュレーションを行う。この結果、流入速度に流動化相転移が生じる臨界流速が存在する事が分かる。流動層の膨張率と流入速度の関係も実験結果を定性的に再現する。また流動状態はチャンネル状態と気泡状態の2種類があり、ストークス数がこれらの状態を特徴付けることが分かる。

粒子の運動エネルギーの振舞から、流入速度が「温度」の役割を持つ事が示唆される。この「温度」を用いて揺動散逸定理(アインシュタインの関係)を理想流動層に適用し、自己拡散係数から有効粘性率を定義する。この有効粘性の流入速度依存性が、現実の実験結果と無矛盾である事が示される。また有効粘性率はストークス数依存性を含めて速度分布の非ガウス性の強さと極めて良く一致している事が分かる。

これらの結果は液体論で用いられる空孔模型で説明する事が出来る。つまり理想流動層の定常状態と液体の間に強い類似性が示される。

論文審査の結果の要旨

砂のような粉体粒子が推積した静止状態に下方より粘性流体を流し込む時、粉体は流動状態へ変化する。この現象は流動化現象と呼ばれている。

流動状態には、主として、一様流動状態、気泡状態、チャンネル状態という3つのパターンが存在することが、経験的に知られている。

本研究は、「粉体粒子系が、粘性流体を媒介として相互作用を行う」という物理的に明解なモデルを定式化し、計算機実験によって、上述の3つのパターンを再現できるかどうかを調べたものである。

定式化においては、粉体粒子サイズでのレイノルズ数が小さい領域を扱うこととし、粒子に働く力としては、流体から受ける粘性力、重力、及び粒子間衝突力（完全弾性衝突）のみを考慮した。

実際の計算で必要となる高い粒子濃度での粒子間の流体力学的相互作用の計算のために Stokesian dynamics 法を拡張し、有限の粒子慣性をもつ粒子系に適用する為の数値手法を開発した。粒子慣性は、流体力学的相互作用が有する lubrication の特異性を繰り込んだ形で導入する、という定式化を考案した。以上の定式化を基にシミュレーションを行い、流動化現象が出現するための臨界流速が存在することを数値的に示した。

また、粉体粒子の慣性の大きさを特徴づけるストークス数にも臨界値が存在することが示され、これを境として気泡状態—チャンネル状態の転移があることを見出した。

本論文は、流体力学的相互作用という物理的に明解なモデルに立脚して流動化現象を再現してみようという、最初の試みであり、一様流動状態を再現することはできなかったものの、気泡状態—チャンネル状態の転移を見出した。この成果は、本論文で展開した手法の将来性を示唆するものである。

従って、市來健吾提出の論文は博士（理学）の学位論文として合格と認める。