

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：13401

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K14922

研究課題名（和文）マルチスケール・マルチフィジックス個別要素法による粉体解析手法の開発

研究課題名（英文）Development of Powder Analysis Method Using Multiscale and Multiphysics Distinct Element Method

研究代表者

吉田 達哉（Yoshida, Tatsuya）

福井大学・学術研究院工学系部門・准教授

研究者番号：20734544

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：粉体の挙動を解析するために個別要素法が一般的に用いられるが、大量の微細な粒子要素を用いて解析する際に、計算時間を短縮するために多数の微細な粒子をひとつの粗視化粒子で再現する粗視化個別要素法が用いられる。本研究課題では、より多くの微細な粒子をひとつの粒子要素で再現した際に粒子の挙動および機械構造要素との接触力の再現性の向上のための手法を提案した。合わせて粗視化要素を用いた個別要素法における粒子要素間の熱伝導解析を導入した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

粉体プロセスにおいて実際の粒子径で解析を行うと必要な粒子要素数が膨大になり、スーパーコンピュータでも工業スケールでの解析は不可能であるため、粒子要素を削減するための粗視化が必要になる。粗視化を適用し粒子の挙動、接触力および熱伝導の解析精度を向上できることは粉体機械の設計および運転に関する技術の高度化に資すると考えられる。

研究成果の概要（英文）：The distinct element method is commonly used to analyze the behavior of powders. The coarse-grained distinct element method reproduces a large number of fine particles with a single coarse-grained particle to reduce computation time when analyzing a large number of particle elements. In this research, methods are proposed to improve the reproducibility of particle behavior and contact forces with mechanical structure elements when a large number of fine particles are reproduced with a single coarse-grained particle element. In addition, heat conduction analysis between particle elements in the coarse-grained distinct element method is applied.

研究分野：機械力学

キーワード：粉体 粒状体 ボールミル 個別要素法 粗視化 連成解析 熱伝導解析

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

粉砕・混合工程などの粉体プロセスにおいては、処理装置の粉砕メカニズムの理解とプロセス条件の適正化が必要となる。そのために、CAE 技術による粉砕・混合性能の予測が有効であるとされている。粉体や粒状体の解析手法として粒子要素を用いた個別要素法がある。個別要素法では粒子間の相互作用力を計算し、粒子要素の運動方程式を数値積分することで、粉体の離散的挙動を時間領域で把握できる。しかし、粉体プロセスの解析において、実際の粒子径と同じ粒子径の解析粒子を使用して解析を行うと必要な粒子要素数が膨大になり、現状のスーパーコンピュータでも実際の工業スケールでの粉体プロセスの解析は不可能である。そのため、解析に使用する粒子要素を削減するために、図 1 のように多数の微細な粒子(オリジナル粒子)を単一の粗視化粒子で表す方法が提案されている^[1]。しかし、粉砕・混合といった粒子間の相互作用が支配的なシステムにおける検証がなされていない。加えて粉体プロセス機器の設計においては、機械要素側へ及ぼす影響の把握が重要ではあるが、機械要素(剛体・弾性体)と粗視化粒子の相互作用に関しては十分に検討がなされていない。粉体プロセスでは機械要素との接触も考慮して解析を行う必要がある。粒子間の相互作用がまた、粉体プロセスで重要になるのが熱の発生であり、一般的に粉砕機が消費するエネルギーの 90% は熱エネルギーに変わるといわれている。粉砕や攪拌における材料同士の摩擦や内部損失による熱の発生により材料が反応し変質するため、粉体プロセス機器の設計においては破砕・混合中の熱の発生および伝達メカニズムの把握が重要である。

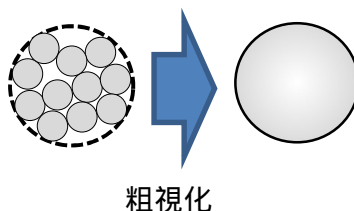


図 1 粒子要素の粗視化

2. 研究の目的

(1) オリジナル粒子間の非弾性衝突によるエネルギー損失の再現

粗視化する際の仮定として粗視化粒子要素内に内包されることになるオリジナル粒子間の相互作用力は無視されている。本来、粒子同士の非弾性衝突により粒子群の運動エネルギーは減少するが、粗視化された粒子に関しては減少しない。そのため、粗視化倍率が大きくなるにつれて粗視化粒子の運動エネルギーの総和はオリジナル粒子の運動エネルギーの総和より大きくなると思われる。そこで、本研究課題では、粗視化することで考慮されなくなるオリジナル粒子間の衝突による運動エネルギーの損失を見積り、粗視化粒子に作用する等価的な速度比例型の減衰力を与える。

(2) 粒子および構造物間接触力計算の改良

従来提案されている粗視化個別要素法では粒子間および機械要素との接触力を計算するために、線形ばねと粘性ダンパーを並列に接続したフォークトモデルにより接触力を算出しているが、本研究課題ではヘルツの接触ばねに基づく非線形ばねを使用することで、接触力の改善を図る。さらに、粗視化した個別要素法解析によって得られた機械要素との接触力の解析結果を入力とした有限要素振動解析の解析結果の改善もあわせて図る。

(3) 粗視化個別要素法への熱解析への応用

本研究課題で採用する粗視化手法において、粒子要素間および壁面間の熱伝達を再現するモデルを構築する。

3. 研究の方法

(1) 粒子要素の粗視化とモデル化の対象

本研究では山井^[2]が提案する粗視化の方法を採用して、粒子要素を粗視化する。この方法では、体積分率 ρ (スケール粒子とオリジナル粒子の体積比)により粒子間の空隙も考慮することになり、粗視化前後で粒子間の空隙を含めた粒子群の見かけの体積を制御できるといった特徴がある(図 2)。また、粗視化後の粒子径 r_c は粗視化前のオリジナル粒子径 r_o に加えてスケール倍率 l を決定することで求められる。

本研究における解析対象はボールミルであり、ミル内の粉砕物を個別要素法によりモデル化し、運転時のミル内部の粒子の挙動を解析する。ボールミル内容物の見かけの体積が粗視化前後で変化すると、ミル回転時の内容物をモデル化した粒子の挙動が大きく変化してしまうことを代表者らの以前の研究でも確認しているため、上記の粗視化の手法を採用している。

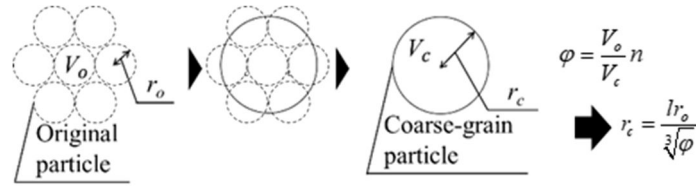


図2 オリジナル粒子の粗視化

(2) オリジナル粒子間の非弾性衝突によるエネルギー損失の再現

粒子間の非弾性衝突によりエネルギー損失が生じ、粒子の速度が減速されることになるが、これまでに提案されている粗視手法では粗視化することでひとつの粗視化粒子としてモデル化されるオリジナル粒子同士の衝突によるエネルギー損失が考慮されていない。ここで、本研究では、粗視化粒子に内包されることになる粒子間の衝突によるエネルギー損失を見積り、速度に比例する減衰力として与える。粗視化の条件に加えて、粗視化前のオリジナル粒子の状態における粒子の平均速度とその分散をから得られた情報をもとに、それらに比例する速度減衰として減衰力を与える。今回は下記の式を用いて減衰係数を求めた。

$$c_s = \frac{4\sqrt{\pi}}{3} \frac{d_o^2 m_o n_o^2}{V_s} (1-e) \alpha_o^{\frac{3}{2}} v_s^2 \quad (1)$$

d_o はオリジナル粒子の直径、 m_o はオリジナル粒子の質量、 n_o は粗視化粒子に含まれるオリジナル粒子の数、 V_s は粗視化粒子の体積、 e は跳ね返り係数、 v_s は粗視化粒子の速度、 α_o はオリジナル粒子の平均速度の2乗と速度の分散 σ^2 の比例係数をそれぞれ表す。

(3) 粒子および構造物間接触力計算の改良

これまでに提案された粗視化法では粒子間および構造物との接触力を計算する際には線形ばね要素を用いたものが要されているが、通常の個別要素法解析で広く用いられているヘルツの接触理論に基づくばね要素を導入した。これにより、接触時の粒子間または粒子-構造物間の距離の3/2乗に比例した非線形ばね要素による接触力を計算することになる。

本研究での解析対象はボールミルであり、壁面を有限要素法でモデル化を行い、ボールミル稼働時の個別要素法解析によって計算した粒子の壁面への接触力を外力として振動解析を行う。粗視化前後の解析結果を比較し接触力の計算方法の有効性を確認する。

(4) 粗視化個別要素法における熱伝導の解析

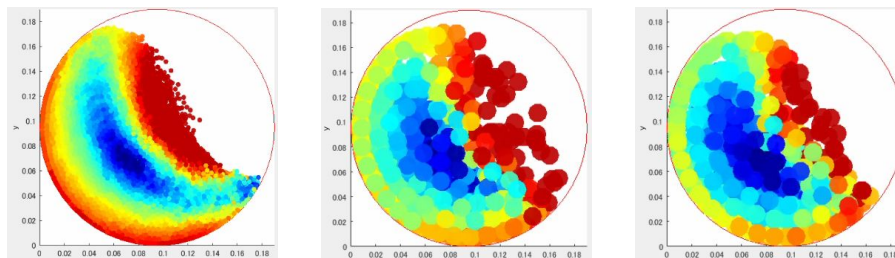
粒子間および粒子-壁面間の熱伝達に関してはすでに様々なモデルが提案されているが、本研究課題では桜井ら^[3]提案している粒子または壁面間の接触面とその近傍の空気による熱伝導を考慮した。本章(1)で示した本研究における粗視化個別要素法においても適用可能か検証した。

4. 研究成果

(1) オリジナル粒子間の非弾性衝突によるエネルギー損失の再現

ボールミル運転時の内部の粒子を粗視化する場合と粗視化しない場合で解析を行った。図3にミル内部の粒子の挙動と粒子の速度を色で示す。解析に減衰を付加していない場合は数多くの粒子が粒子群から離れ、放物運動を行いオリジナル粒子と比べて速度が増加することが確認できた。一方、減衰を付加することで、粒子の運動速度が抑制され、オリジナル粒子の挙動に近づくことが確認できた。

本研究課題では粒子間の粗視化されるオリジナル粒子の衝突にのみ着目したが、粒子が接触しながら回転する際に転がり摩擦による運動エネルギーの損失も発生していると考えられる。そのため、より正確な予測のためにはオリジナル粒子同士の接触時の転がり摩擦も考慮したモデルが必要になると考えられる。

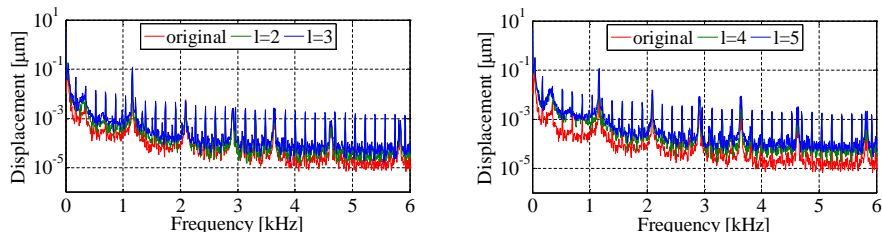


(a)オリジナル粒子 (b)減衰なし (c)減衰あり

図3 ボールミル運転時の内部粒子の運動の様子 (スケール倍率 = 4)

(2) 粒子および構造物間接触力計算の改良による振動解析への影響

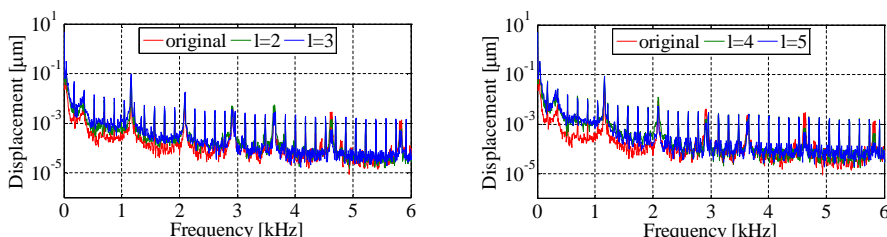
粒子間および壁面間の接触力をヘルツの接触理論に基づき計算して、ボールミル運転時の内部の粒子の挙動とボールミル壁面との接触力を解析し、壁面との接触力を入力としてミル壁面の有限要素振動解析を行った。図 4 に従来の線形ばねモデルによって接触力も計算する個別要素法の結果をもとに振動解析を行った結果を示す。また、図 5 に同様に提案したモデルを使用した振動解析の結果を示す。従来の線形ばねによる接触力の算出するモデルではスケール倍率に比例して応答が増加する傾向がみられた。一方ヘルツの接触理論に基づく非線形ばね要素を用いたモデルでは倍率が 4 以上でも線形ばねモデルよりも粗視化前の応答に近い結果を示した。



(a) スケール倍率=2、3

(b) スケール倍率=4、5

図 4 線形ばねモデルを使用した場合のミル壁面の振動応答



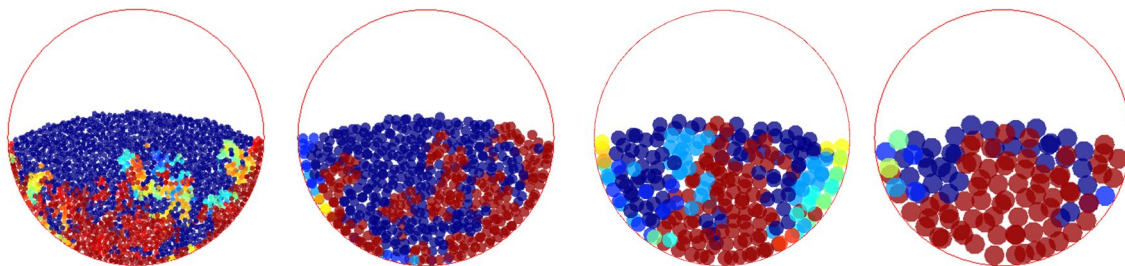
(a) スケール倍率=2、3

(b) スケール倍率=4、5

図 5 提案した接触計算モデルを使用した場合のミル壁面の振動応答

(4) 粗視化個別要素法における熱伝導の解析

初期の粒子温度を 20、ミル壁面の温度を 30 に設定して熱伝導解析を行った。なお、このときミルは回転させず、静止状態で解析を行った。オリジナル粒子および粗視化粒子を用いた解析結果を図 6 に示す。粗視化内が上昇するにつれて、温度上昇した範囲が広がっていることがわかる。この原因としては、粒子の初期配置の影響に加えて、粗視化による空間分解能の低下と粗視化粒子内の温度分布が一定と仮定したことにより熱の伝導経路が少なくなり、粒子温度が上昇しやすくなったと考えられる。オリジナル粒子間の非弾性衝突によるエネルギー損失の再現と同様に、粗視化粒子内のオリジナル粒子内の熱伝導の挙動も考慮する必要があると考えられる。



(a) オリジナル粒子 (b) スケール倍率 = 2 (c) スケール倍率 = 3 (d) スケール倍率 = 4

図 6 粗視化個別要素法における粒子および壁面間の熱伝導解析の結果

引用文献

- [1] 酒井幹夫, 越塚誠一, 竹田宏, 改良型代表粒子モデルの開発離散要素法シミュレーションの大規模体系への適用, 粉体工学会誌, 43(1), pp.4-12(2006).
- [2] 山井三龜夫, 中田 洋一, スケール則に基づく DEM シミュレーション, Journal of the Society of Powder Technology, Japan, 55(2), pp.95-103 (2018).
- [3] 櫻井拓也, 南智博, 川口寿裕, 辻拓也, 田中敏嗣, 辻裕, 流動層内熱流動問題の DEM-CFD 解析およびサーモグラフィ計測, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series B, 75(753), pp.1041-1048(2009).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 森下 優大, 吉田 達哉, 鞍谷 文保
2. 発表標題 粉碎物の混合粒径がボールミル壁面の振動・放射音に及ぼす影響
3. 学会等名 Dynamics & Design Conference 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉川颯汰, 野村将志, 吉田達哉, 鞍谷文保
2. 発表標題 ボールミルのモデル化と粗視化手法を用いた実稼働時振動解析
3. 学会等名 日本設計工学会北陸支部令和4年度研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 野村将志, 吉田達哉, 鞍谷文保, 吉川颯汰
2. 発表標題 個別要素法の粗視化手法における接触力モデルの提案とボールミル壁面の振動解析への適用
3. 学会等名 Dynamics and Design Conference 2022
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------