

(第15回) 2019年度・研究助成報告

研究題名	実粉末の粒子特性と形状を反映した粉体押出成形過程シミュレーション手法の基盤技術開発
研究期間	2019年4月1日～2021年3月31日
研究機関・所属 研究者名	産業技術総合研究所・磁性粉末冶金研究センター 曾田 力央

1. 2019 (2020) 年度研究成果の概要

粉体押出成形では、原料の流動挙動が成形体の均一性や欠陥の有無に大きく影響する。特に、粒子に異方性がある場合には押出成形中に粒子の一部が配向し、これが欠陥の原因となる場合がある。そのため、配向を制御することは重要であるが、製品内部の配向分布は粒子形状や装置の流路形状に強く依存するため、成形機内部の力場を理解が必要になる。そこで本研究では、固体粒子の運動解析に DEM、流体の挙動の解析に MPS 法を用いて粉体押出成形過程のシミュレーション手法の基盤技術開発を行った。通常の DEM では球形粒子しか取り扱えないため、球形粒子を連結することで任意の形状を表現できるように拡張した。開発したシミュレーションモデルを用いて、円筒容器内部を流れる針状粒子の配向挙動を解析した結果、中心付近は比較的初期の粉体濃度と配向状態を保つが、壁面付近は流体の速度勾配によって、粒子は流れ方向に配向し、粉体が密になることがわかった。これは、実験で報告されている傾向と同じであり今回開発したシミュレーション手法の妥当性を確認できた。

2. 助成期間内での研究成果の概要

1. 緒言

湿潤粉体に圧力を加え、金型を通すことで一定断面形状の製品を得る粉体押出成形は、セラミックスや機能性材料などの粉体成形に広く用いられている。押出成形では原料の流動挙動が成形体の均一性や欠陥の有無に大きく影響する。例えば、粒子の形状に異方性がある場合、粒子が流れの方向に配向するが内部の流速の差によって、図1に示す通り、中心付近の粒子よりも外側の粒子のほうが配向しやすいことが報告されている¹⁾。粒子濃度に関しても中心付近が疎に、外側は密になる傾向がある。このような、押出成形における粒子の配向現象は自動車排ガス用の触媒担体の製造などで粒子の配向で積極的に用いられる一方で、配向むらが焼結や乾燥時の収縮挙動の不均一につながり、欠陥の原因になる

こともある²⁾。いずれの場合においても、押出成形において、その配向を制御することは重要であるが、製品内部の配向分布は粒子形状や装置の流路形状に強く依存するため、押出成形によって高い品質の成形体を得るには、成形機内部の複雑な力場の理解と適切な原料粉末や装置設計、最適条件での運転が求められる。

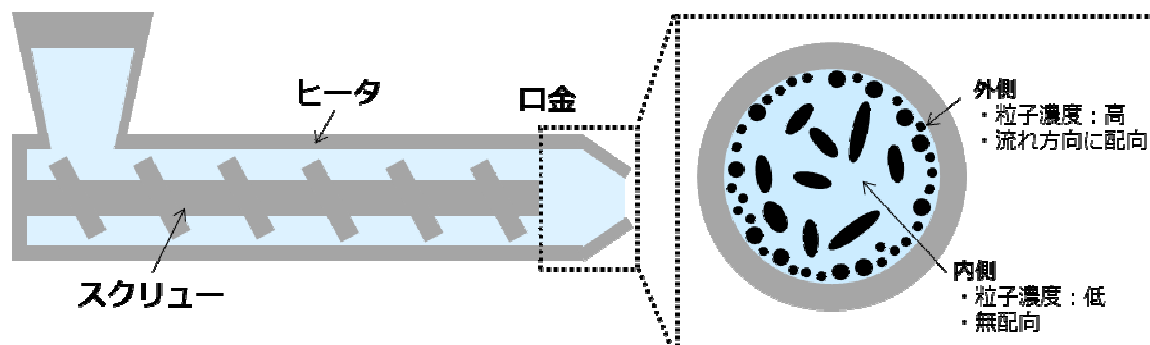


図1 押出成形機内部の粒子配向^{1,2)}

これらの課題への対応として、従来は実験主体のアプローチが一般的であった。しかし、実験では成形機内部を直接観察することは困難な上、条件を変えて実験を行うには多大な時間とコストがかかる問題がある。一方で、数値シミュレーションには成形機内部の詳細な解析が可能であるという利点があるが、これまで押出成形のシミュレーションで一般的に用いられてきた FEM(有限要素法)など連続体力学に基づく解析手法では、粒度分布や粒子摩擦、粒子形状を考慮した解析は不可能であり、押出成形中の粒子の配向現象などを解析するには不十分であった。そこで本研究では、押出成形機内部を精緻に解析可能な新しいシミュレーション法を構築し、従来の実験や連続体力学に立脚する解析手法では不可能であった、成形機内の複雑な力学場を解析することで流動挙動を明らかにすることを目的とし、そのファーストステップとして、粒子法に基づく新しい押出成形過程のシミュレーション法を開発した。さらに、異方性を持つ粒子の成形機内での配向挙動を明らかにするため、シンプルな成形機口金部分を模擬したシミュレーションを行った。

2. シミュレーション方法

粉体物性を正確に考慮した粒子運動のシミュレーションを可能にするため、固体粒子の運動解析には離散要素法³⁾ (Discrete Element Method: DEM) を用いた。ただし、通常の DEM で扱う粒子形状は球形であり、その他の形状の取扱いはできない。そこで、本研究では、図2に示すように、球形粒子を複数結合した、「クラスター粒子」で不定形状粒子を表現した。

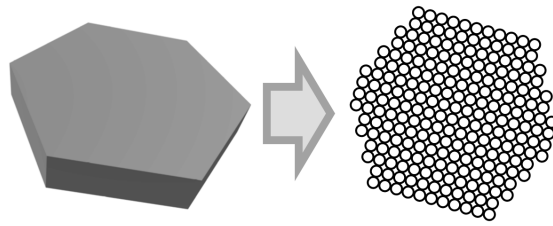


図2 クラスター粒子による不定形状粒子の表現

流体解析にはMPS (Moving Particle Semi-implicit) 法^{4,5)}を用いた。MPS法は液体を液滴 (MPS 粒子) に分割して流体解析を行う手法であり、DEMと同じ粒子法であるため、粒子と流体をシームレスに取り扱うことができる。さらに、複雑な装置形状の取扱いも容易なため、装置内部の流路形状が複雑な押出成形機のシミュレーションに適していると考えられる。本研究では、越塚らが開発したオリジナルのMPS法のアルゴリズムに田中ら⁶⁾が提案している圧力振動抑制モデルによる修正を加えた計算方法を用いて解析を行った。

3.シミュレーション条件

開発したDEM-MPS法による押出成形機のシミュレーションモデルを用いて、成形機口金付近の異方性粒子の配向挙動を模擬したシミュレーションを行った。シミュレーションした装置形状および粒子の初期配置を図3に、用いた固体粒子と流体の物性値を表1に示す。直径10cm、長さ80cmの円筒形容器の内部を流体で満たし、右端から流体を0.05m/sの一定速度で流体を流入、左端から流出させ、粒子と流体の流動挙動および粒子の配向挙動を観察した。固体粒子はアスペクト比6の針状粒子とし、これを流体の流入境界付近に500個配置して解析を行った。なお、計算を簡略化するため、流入境界から固体粒子の流入はなく、流体のみが流入するものとした。粒子の初期配置は、粒子の長手方向が流れと平行方向の場合と、垂直方向の場合の二つの条件で計算を行った。

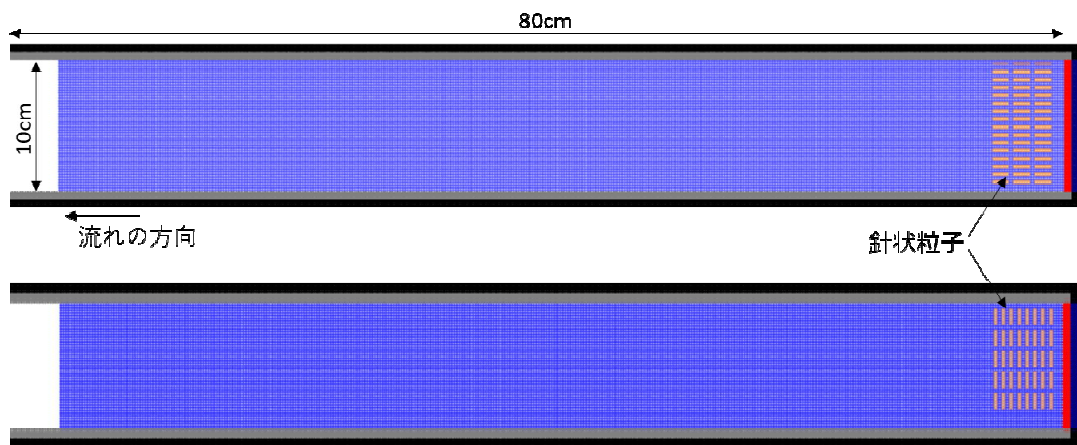


図3 装置形状および粒子の初期配置（青：流体粒子，オレンジ：固体（針状）粒子； 上：針状粒子を流れと平行方向に配置，下：針状粒子を流れと垂直方向に配置）

表1 シミュレーションで用いた物性値

Fluid		
Density	kg/m ³	1000
Viscosity	Pa s	1.0
Solid		
Particle shape		Needle
Aspect ratio		6
Particle diameter	mm	2x12
Density	kg/m ³	3820
Young's modulus	MPa	1.0
Friction coefficient	-	0.5
Rolling friction coefficient	-	1.89

4. 結果及び考察

図4にシミュレーション開始3秒後における，内部のシミュレーション分布を示す．今回のシミュレーション条件では，円筒容器の中心付近では容器半径方向の速度勾配が小さく，外側ほど速度勾配が大きくなった．また，針状粒子が存在する領域より流出側と流入側では，針状粒子の影響で流速分布にやや違いがみられた．

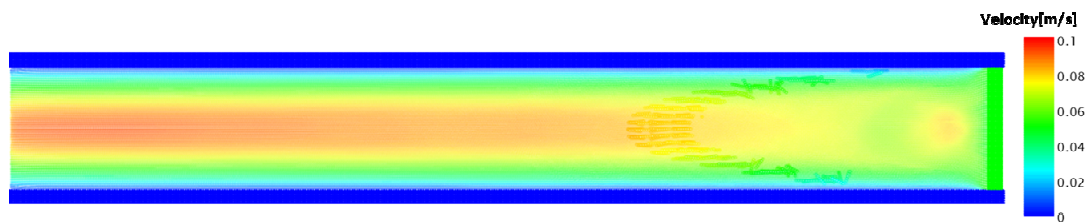


図4 内部の流速分布（針状粒子を流れと平行に配置した場合）

図5に針状粒子を流れと平行な向きに置いた場合のシミュレーション結果を、図6に針状粒子を流れと垂直な向きに置いた場合のシミュレーション結果を示す。なお、流体の流れを可視化するため、流入する流体の色を0.1秒ごとに変えて可視化している。針状粒子をいずれの向きで置いた場合も、半径方向の速度勾配の小さい中心付近では、比較的初期の配置を保ったまま移動していくことがわかった。特に、円筒容器の中心付近では、針状粒子を垂直に配置した場合でもほぼ最初と同じ向きが維持されることがわかった。一方、円筒容器の外周付近を流れる粒子は、針状粒子を流れと垂直の向きに置いた場合、徐々に粒子が回転しながら、流れの方向と平行になるように粒子が配向した。針状粒子を流れと平行方向に配置した場合も、一度粒子が回転したのち、再び流れと平行方向に配向する様子が観察された。粒子の濃度に関しても、中心付近は初期配置と同様の疎な状態を保っているのに対して、容器の外周付近を流れる針状粒子は塊上になって流出方向に向かって流れていくことがわかった。これらの粒子の配向挙動は、円筒容器を流れる流体の半径方向の速度勾配が、容器中心部付近では小さく、壁に近くなるにつれて大きくなることに起因すると考えられる。実際の押出成形の実験においても、側壁付近で粒子が配向し中心付近はランダムな状態を保つことが報告されていることから、本研究で開発した押出成形シミュレーションモデルの妥当性が定性的に確認できた。

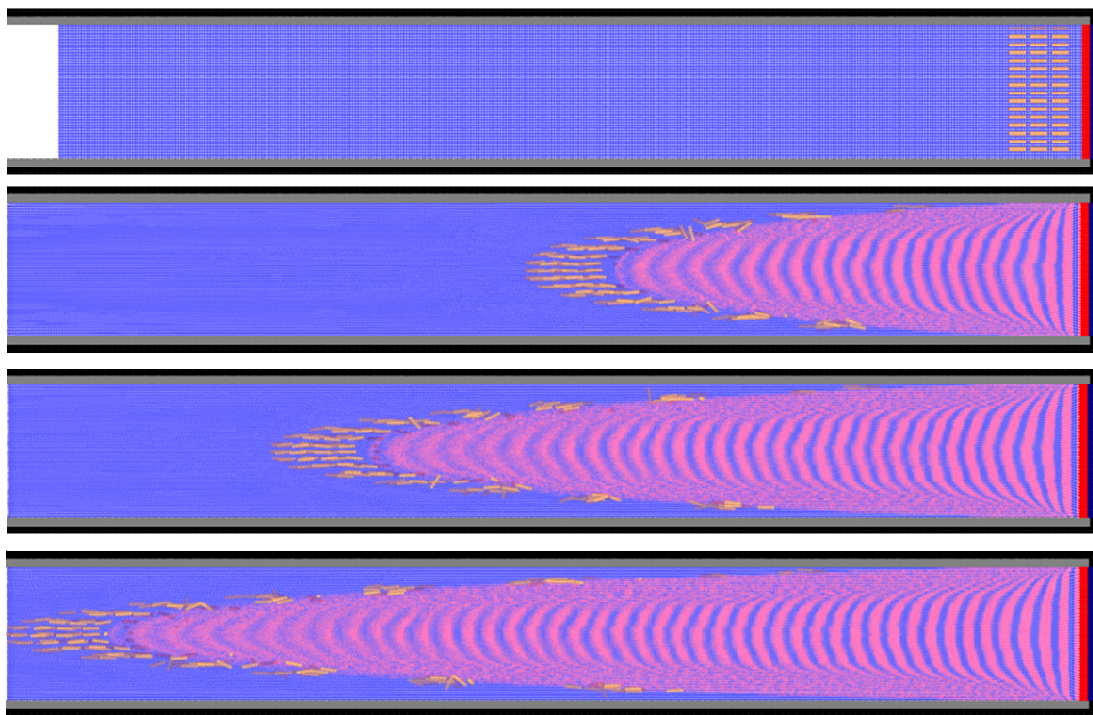


図 5 粒子と流体運動の可視化結果
 (針状粒子を流れと平行に配置した場合)

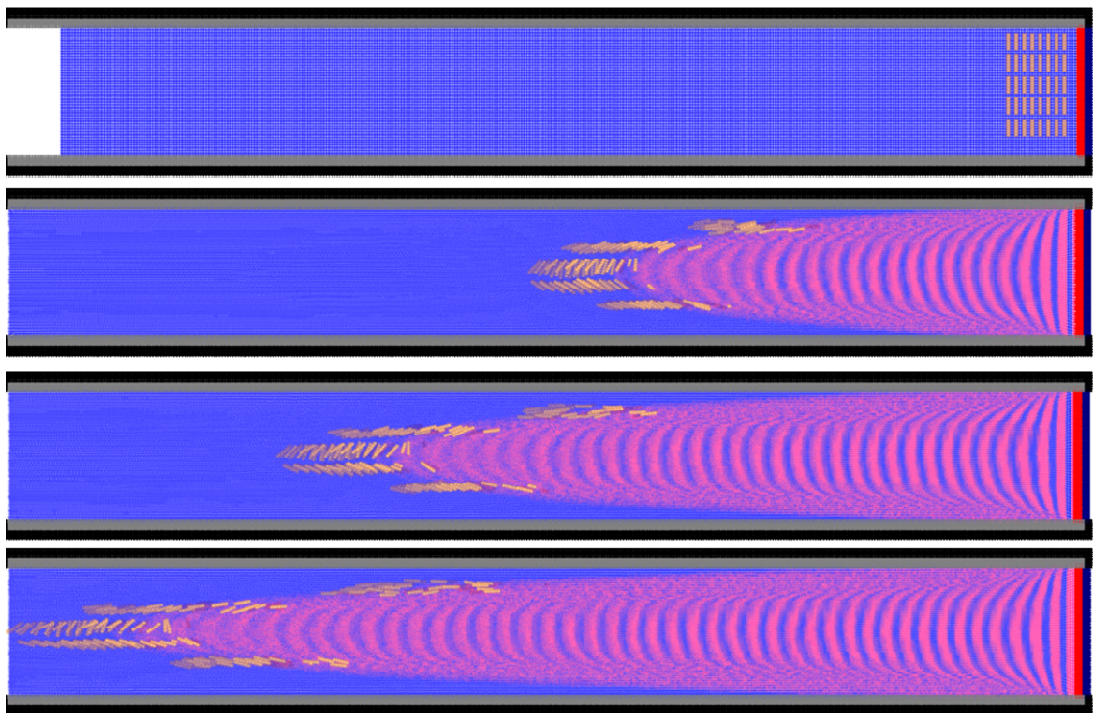


図 6 粒子と流体運動の可視化結果
 (針状粒子を流れと垂直に配置した場合)

5. 結言

DEM-MPS 法による押出成形シミュレーションモデルを構築した。クラスター粒子モデルによって球形粒子を連結することで任意の形状を表現できるように DEM を拡張することで、異方性粒子の取り扱いが可能になった。流体解析には粒子法による非圧縮流体のシミュレーション手法である MPS 法を用いることで、粒子と流体のシームレスな解析を実現できた。シミュレーションの妥当性を検証するため行った、円筒容器内部を流れる針状粒子の配向挙動解析では、中心付近を流れる粒子はほとんど初期配置を保ったまま流動するのに対して、壁面付近の粒子は流れ方向に配向し、初期の配置よりも粒子同士が密な状態になる様子が観察された。この挙動は既往の実験で報告された結果と同様の傾向である。今後、シミュレーションモデルをさらに精緻化することが必要だが、本研究で開発した粒子法による押出成形シミュレーションモデルは、成形機内部の力場を理解や、粉末や装置の設計、最適運転条件の探索への有用なツールになると考えられる。

最後に、本研究に対し助成を頂きました、粉体工学情報センターの関係各位に心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) S. Blackburn, H. Mills and N. El-Bakbaki, *British Ceramic Transactions*. (1998), 97(5), 205-213.
- 2) 藤ら セラミックス粉体成形の壁 セラミックス基盤工学研究センター年報 (2007) Vol.7, 29-43
- 3) P.A. Cundall and O.D.L. Stack: *Geotechnique*, **29** (1979), 47.
- 4) S. Koshizuka et al.: *Nucl. Sci. Eng.*, 123, 421-434 (1996)
- 5) 越塚 誠一：数値流体力学, 培風館, (1997)
- 6) 田中ら, *Transactions of JSCES*, Vol. 2008, 20080025, (2008).

3. 研究発表

曾田力央, 尾崎公洋 : DEM-MPS 法を用いた押出成形過程における粒子配向挙動のシミュレーション, 粉体工学会 2021 年度春期研究発表会にて発表予定