

博士学位論文審査要旨

2022年1月29日

論文題目： 粒子層内での複数落下物体の特異協調挙動に関する研究

学位申請者： 川幡 大知

審査委員：

主査： 理工学研究科 教授 白川 善幸

副査： 理工学研究科 教授 塩井 章久

副査： 理工学研究科 教授 土屋 活美

要 旨：

製品の製造プロセスにおいて、流動性を持ち、多成分の混合が容易である物質が望まれる。しかし、現在取り扱われている物質の多くが固体であり、またバルクの固体では輸送や混合を連続的に行うことはできない。そこでプロセスの効率化のために、固体のまま流動性を持たせることができる「粉体」として取り扱うことが多い。粉体は固体粒子の集合体であり、粉体化によって連続的な輸送や混合操作を行うことができる。一方で、粉体は外力を構成粒子の各接触点で伝達し不連続な流動挙動を示すため、流動性は有するものの、気体や液体のように連続体として取り扱うことができず、粉体特有の挙動を示すことがある。粉体特有の挙動の一つに粒子層内へ複数物体を投入させた際に投入物体が示す特異かつ協調性をもった落下挙動がある。これは低密度粒子で構成された粒子層に高密度の円盤を同時に投入すると、それらが落下に伴って上に凸と下に凸の配置を繰り返しながら落下する挙動である。現在、この発生メカニズムについては詳細が明らかにされていない。そこで本論文では、実験とシミュレーションの両者による検討を通して、特異協調挙動の発生メカニズムの提案と発生条件の解明を行った。

はじめに円盤や形状の異なるいくつかの物体を粒子層内に固定した状態で単一円盤を投入し、粒子層内での円盤の相対位置と円盤周りの粒子流れを観察した。また、2円盤を時間差や初期投入距離を変化させて粒子層内に投入し、2円盤の追い越し挙動のメカニズムを検討した。その結果、固定物体の存在により円盤周りの粒子流れの抑制が見られ、また、複数円盤を投入したことによるフォースチェーンの広がり、円盤下部の領域でフォースチェーンの重ね合わせが生じ、その広がりが大きくなっているものの、落下挙動への影響は小さいことがわかった。さらに、DEMシミュレーションを用いて5円盤を粒子層へ同時に投入した場合について実施した。その結果を基に、特異協調挙動の発生条件と粒子物性(密度、直径、摩擦係数)との関係性を示し、発生メカニズムの詳細を明らかにした。

よって、実験およびシミュレーションによる検討を通して、特異協調挙動の発生メカニズムの提案および挙動の発生条件の解明を行った本論文は、博士(工学)(同志社大学)の学位を授与するにふさわしいものであると認められる。

総合試験結果の要旨

2022年1月29日

論文題目： 粒子層内での複数落下物体の特異協調挙動に関する研究

学位申請者： 川幡 大知

審査委員：

主査： 理工学研究科 教授 白川 善幸

副査： 理工学研究科 教授 塩井 章久

副査： 理工学研究科 教授 土屋 活美

要 旨：

本論文提出者は、2019年3月に本学大学院理工学研究科応用化学専攻博士課程（前期課程）を修了し、2019年4月より本学大学院理工学研究科応用化学専攻博士課程（後期課程）に在籍している。本論文の主たる内容は、Advanced Powder Technology, vol. 31, 1381-1390 (2020), 粉体工学会誌, vol.58, 662-671 (2021), Advanced Powder Technology, vol. 32, 3564-3573 (2021)に掲載され、十分な評価を受けている。

2022年1月29日午後1時00分より約2時間にわたって提出論文に関する学術講演会（博士論文公聴会）が開かれ、種々の質疑討論が行われたが、提出者の説明により十分な理解が得られた。さらに講演会終了後、審査委員により学位論文に関連した諸問題につき口頭試問を実施した結果、十分な学力を確認できた。提出者は、英語による論文発表ならびに国際会議での発表、語学試験にも合格しており、十分な語学能力を有すると認められる。よって、総合試験の結果は合格であると認める。

博士学位論文要旨

論文題目： 粒子層内での複数落下物体の特異協調挙動に関する研究

氏名： 川幡 大知

要旨：

製品の製造プロセスにおいて、流動性を持ち、多成分の混合が容易である物質が望まれる。しかし、現在取り扱われている物質の多くが常温常圧下では固体であり、またバルクの固体では輸送や混合を連続的に行うことはできない。そこで産業プロセスの効率化には、固体のまま流動性を持たせることができるため、「粉体」として取り扱うことが多い。粉体は固体粒子の集合体であり、構成粒子間に粒子の移動を可能とする空隙を有し流動性を持つため、バルクの固体ではできなかった連続的な輸送や混合操作を行うことができる。一方で、粉体は外力を構成粒子の各接触点で伝達し不連続な流動挙動を示すため、流動性は有するものの、気体や液体のように連続体として取り扱うことができず、粉体特有の挙動を示すことがある。粉体特有の挙動の例として、回転ドラム内での偏析、振動による粒子層内対流のパターン変化、振動粒子層の粒度偏析などが挙げられる。

上記以外の粉体特有の挙動として、粒子層内への複数物体を投入させた際に投入物体が示す特異かつ協調性をもった落下挙動(以下、特異協調挙動)が報告されている。この挙動は低密度粒子で構成された奥行きほぼ粒子1個分の粒子層に高密度の5円盤を重力により同時に投入すると、それらが落下に伴って上に凸と下に凸の配置を繰り返しながら鳥の群れが飛ぶように落下する挙動である。現在、初めに生じる上に凸の配置に関してはその発生メカニズムが提案されているものの、それ以降に生じる下に凸や2回目以降の上に凸の配置となるメカニズムについては不明な点が多い。また層粒子物性が挙動発生におよぼす影響についても系統的な議論がなされておらず、不明な点が多い。一方で、本挙動の発生メカニズムのヒントになり得る挙動も報告されており、これは上記の粒子層内に投入する円盤を2個に限定した際に、それらの落下速度が交互に増減を繰り返すことで、連続的な追い越しが発生する挙動である。しかし、その追い越し挙動のメカニズムについても不明な点が多い。特異協調挙動や2円盤の追い越し挙動のメカニズムの発生には円盤周りの粒子流れ、層粒子物性、粒子層内のフォースチェーンが大きく関わっていることが予想されるが、フォースチェーンに関しては実験による検討のみでは取得が困難である。また、層粒子物性のうち1つのみを系統的に変化させた検討や、円盤周りの粒子流れの局所的な解析は、実験では困難であるため、この点からもシミュレーションを併せた検討は重要であると考えられる。そこで本論文では、実験とシミュレーションの両者による検討を通して、特異協調挙動の発生メカニズムの提案と挙動の発生条件の解明を検討した。

本論文の構成として、第1章の序論に始まり、第2章および第3章では実験による検討を通して、2円盤の追い越し挙動のメカニズム解明を試みた。続いて、離散要素法シミュレーション(DEM)を用いて、第4章では第3章で提案した追い越し挙動メカニズムの詳細を確認し、第5章では前章までで得られた知見をもとに5円盤を粒子層投入時に発生する特異協調挙動の発生メカニズムを検討した。そして、本挙動の発生条件の解明のために、第6章では層粒子の物性がおよぼす影響、第7章では容器の前後壁面の摩擦と円盤周りの流体流れがおよぼす影響をそれぞれ検討した。最後に、第8章にて本論文を統括する。

第2章では、円盤や種々の形状の物体を粒子層内に固定した状態で単一円盤を投入し、粒子層内での円盤の相対位置が円盤周りの粒子流れと落下挙動におよぼす影響を観察した。本検討では、

層内固定物体と投入円盤との水平方向表面間距離(5–50 mm)を変化させ、また層内固定物体の投影形状も4種類(円形, 正方形, 上部長方形-下部円形, 上部円形-下部長方形)を用いた。固定物体の形状が円盤の落下挙動におよぼす影響に関しては、不明な点も多くあったものの、形状に関わらず固定物体と円盤の水平方向表面間距離が30 mm以上では、円盤の落下挙動におよぼす影響は小さいことが示された。その水平方向距離が30 mm以下では、固定物体の高さの範囲に落下物体の一部が含まれる場合にはその存在の影響を受けることがわかった。これは固定物体の存在により円盤周りの粒子流れが抑制されるためであると考えられる。一方で、それ以外の落下円盤が固定物体よりも上部や下部に位置する際、円盤の落下速度は固定物体の存在の影響を受けず、落下速度は一定値を取った。

第3章では2円盤を時間差や初期投入距離を変化させて粒子層内に投入し(時間差:0.0–0.154 s, 初期投入距離:0–100 mm), 2円盤の追い越し挙動のメカニズムを検討した。第2章の結果とは異なり、先に投入され下部に位置する円盤は後に投入され上部に位置する円盤の存在の影響を受け、落下速度が減少することで、追い越し挙動が発生することがわかった。この減速は上部に位置する円盤の落下による下部に位置する円盤上部の充填率増加に伴う円盤周りの粒子流れの抑制によって、生じることがわかった。また、その追い越し挙動は初期投入距離が10 mmの条件では時間差が0.076 s以内で、また時間差が0.02–0.03 sの条件では60 mm以下で生じることが確認された。

第4章では、第3章で提案した2円盤の追い越し挙動のメカニズムの詳細を確認すると共に、2円盤を落下させたことによる粒子層内のフォースチェーンの広がり方への影響を観察するため、奥行き1層の2次元DEMシミュレーションを用いて、2円盤を時間差0.076 s, 初期投入距離10 mmの条件で2円盤を投入し、その挙動を解析した。その結果、2円盤の追い越し挙動が確認でき、各追い越し挙動が第3章にて提案したメカニズムで生じていることが確かめられた。また、複数円盤を投入したことによるフォースチェーンの広がりへの影響については、2円盤でその広がり方が変化する前後で落下速度を比較したところ、円盤下部の領域でフォースチェーンの重ね合わせが生じ、その広がりが大きくなっているものの、落下挙動への影響は小さいことがわかった。

第5章では、特異協調挙動の発生メカニズムを提案するために、第4章と同じく2次元DEMシミュレーションを用いて5円盤を粒子層へ同時に投入した。そして、粒子層内のフォースチェーン、円盤上部領域の充填率、円盤周りの粒子流れの結果をもとに特異協調挙動の発生メカニズムを提案した。始めの上に凸の円盤配置はすでに提案されているように、円盤が粒子層表面に衝突時のフォースチェーンによって生じることがわかった。また、下に凸の配置や2回目に上に凸の配置は2円盤による追い越し挙動が各円盤間において時間差で生じることで生じることがわかった。

第6章では、特異協調挙動の発生に必要な粒子物性条件を検討するために、第5章のシミュレーション系において円盤を投入する粒子層の粒子物性(密度, 直径, 摩擦係数)を変化させた。また第6章では、異なる10種類の初期充填構造を用いることで、充填構造のわずかな差異が特異協調挙動へおよぼす影響も検討した。その結果、層粒子の密度や直径の増加に伴う質量増加によって初期充填構造のわずかな差の影響を受けやすくなり、特異協調挙動の発生確率が減少することが確認された。また、その層粒子の質量増加に伴い、上に凸の配置に関しては円盤が粒子層表面と衝突時のフォースチェーンの広がり方が横方向に大きくなることで、下に凸の配置に関しては円盤落下時の円盤周辺から上部への粒子流れの方向が水平に近づくことで、それぞれの凸の配置が水平に近づくことがわかった。一方で、層粒子の摩擦係数がおよぼす影響は密度や直径に比べると小さいことがわかった。

第7章では、容器前後壁の摩擦と粒子層間の流体流れが特異協調挙動へおよぼす影響を検討するために、前章までのDEMシミュレーション系において前後壁から受ける摩擦力をモデル化して導入し、前後壁面-円盤-粒子間の摩擦係数を変化させた。また、局所的な粒子充填率による流

体流れを考慮可能な方法で流体物性(粘度, 密度)を変化させた。その結果, 摩擦係数の増加に伴い, 摩擦係数が相対的に小さい条件ではその配置がより顕著になるが, 相対的に大きい条件では円盤の配置に大きな変化は見られなかった。下に凸の配置に関しては, 摩擦係数の増加に伴って, 摩擦係数が相対的に小さい条件では円盤の配置に大きな変化は見られなかったが, 相対的に大きい条件ではその配置は水平に近づいた。これらの原因はそれぞれ, 上に凸の配置に関しては円盤が粒子層表面に衝突時のフォースチェーンが下方向への広がり方が, 下に凸の配置に関しては円盤の落下速度が減少し円盤周りの粒子流れがそれぞれ変化することに起因すると考えられる。流体物性の影響に関しては, 空気の流体物性を用いた条件では, 流体流れの影響は小さいことがわかった。また流体粘度については, 特異協調挙動発生時の円盤配置への影響は小さかったものの, 流体粘度については, その値が増加するにつれて流体粘度が相対的に大きい条件では下に凸の配置が水平に近づいた。これらの結果は動粘度を用いて整理することができず, 流体密度の増加に伴って円盤周りの粒子流れを引き起こすために必要な力が大きくなるため, 下に凸の配置が水平に近づいたと考えられる。

以上のように, 本論文では実験およびシミュレーションによる検討を通して, 特異協調挙動の発生メカニズムの提案および挙動の発生条件の解明を行った。現在, 特異協調挙動が問題となっているプロセスは報告されていないが, 機能性粒子の作製において粉体プロセスのより高度な制御が今後求められると考えられる。その際に, 今回のような特異協調挙動のメカニズムやその発生条件の検討によって得られた知見が有用になることが期待できる。