

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 11 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2023

課題番号：20K05196

研究課題名(和文) 機械的振動の導入による微粉体の流動化・対流混合状態の制御と工学的応用

研究課題名(英文) Effect of mechanical vibration on particle mixing/separation characteristics in a fluidized bed

研究代表者

馬渡 佳秀 (Mawatari, Yoshihide)

九州工業大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号：70380722

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：微粉体をガス通気と機械的振動の併用操作する振動流動層を用いてハンドリング性の向上に寄与する諸因子を検討し工学的に応用する可能性を探索した。微粉体の流動性が改善する一因として常在化したガスチャネルやクラックの連続的な破壊挙動が挙げられるが、今回の可視化実験と画像解析による数値化により観察結果との良好な一致が見られ、新たに最もクラックが破壊・再生されるガス通気と振動の操作条件の存在を示唆することが出来た。また、振動由来の粒子運動を詳細に観察し、密度差のある二成分系粉体層を対象にした場合、振動由来の粒子運動は流動化状態では分離を促進する一方で固定層の通気条件では混合を促進することが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

微粉体ハンドリングでは、強い粒子間の凝集性により形成される凝集体が積層しているため、粒子混合性の低下が問題になる。本研究では、振動場で発現する粒子運動が凝集体の破壊と共に不均一なガス流れの抑制に及ぼす影響を明らかにする。加振により不均一なガス流れを導くクラックの常在化を抑制し、画像解析から効果的にクラックを破壊できる条件を見出した。さらに振動由来の粒子運動の効果を二成分系粉体層の混合/分離状態で確認した。振動由来の粒子運動は層が流動化状態では分離が進行し、層が固定層の状態では混合が促進した。これらの知見は操作中に粒子物性が変化する、造粒、コーティング、反応等の系で活用する際に有用である。

研究成果の概要(英文)：This study aimed to investigate the cooperation of gas flow and mechanical vibration (vibrating fluidized bed) to handle fine cohesive particles. One of the reasons why the fine cohesive particle is difficult to fluidize with only by gas flow is the formation of stable gas channels/cracks. In this study, the behavior of the crack breakage was evaluated by digital image analysis. It was found that proper operation conditions where vigorous gas crack breakage occurred existed. To examine the effect of the particle motion induced by the vibration on fluidized bed operation, mixing/segregation behaviors were examined for binary density difference particles. When the vibration intensity was larger than a certain magnitude, the particle motion was observed even without gas bubble generation. Such particle motion induced by the vibration enhanced the segregation when the bed was fluidized by the gas flow while the mixing was enhanced when the bed was fixed bed.

研究分野：Chemical engineering, Fluidization technology

キーワード：Fluidized bed Vibration Particle motion

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

医薬品・電池材料などの分野では高機能な微粉体材料の活用が進んでおり、同時にハンドリング技術の進歩が期待されている。しかし、微粉体ハンドリングでは、強い粒子間の凝集性により形成される凝集体が複雑に積層しているため、粒子(凝集体)混合性の低下が問題である。本研究では、粒子間に作用する凝集力に対する分離力として、ガス流れと機械的な振動を併用して解決する。振動の伝播によって凝集体を破壊し、ガス偏流の抑制と粒子対流現象(粒子混合)を誘導し、微粉体(凝集系)のハンドリング性を向上させる。具体的には、外力(振動・ガス流速)による凝集状態とガス透過状態の変化を粉体層の圧力損失の変動特性から把握し、共存して発生する粒子対流状態(粒子移動速度、混合度)との関係を明らかにする。得られた知見をもとに、良好な粒子混合と固気間の接触状態が必要とされる粉体コーティングプロセスへ適用して工学的応用への可能性を評価する。

2. 研究の目的

微粉体層へのガス通気と加振により、凝集体の破壊とガス偏流抑制の程度を定量的に把握し、同時に発現する粒子対流状態との関連性を理解する、このことで振動付加により導入される粒子対流混合状態が微粉体層の流動層ハンドリングの向上に寄与する機構を明らかにすることである。

3. 研究の方法

実施項目(1): ガスチャネルの破壊挙動と粒子対流状態の定量化の検討

振動場におけるガスチャネルの破壊挙動をデジタル撮影し解析する。解析範囲を設定しガスチャネルの構造的な長さ/幅、発生数等を画像解析により数値化する。ここで凝集体が明確に観察できるようであれば凝集体のサイズを測定する。平均粒子径が $10\ \mu\text{m}$ の球状シリカを用いた。

実施項目(2): 振動場の粒子対流状態を利用したバルクハンドリング

実施項目(1)の結果を踏まえながら、ガス通気量・振動の強さの大小により粒子混合性が気泡(通気量大)から粒子対流状態(通気量小)へと変化することが予想されるため、良好なコーティング状態に必要な操作条件である粒子運動状態を評価し、気流と振動の併用操作による微粉体コーティング操作への応用可能性を検討する。粒子運動状態はトレーサー粒子の移動速度を画像解析から測定する。また、コーティング操作進行中では粒子物性に分布が生じる可能性がある。本テーマで設定するガス通気量と振動条件の組み合わせにより物性差のある多成分系粉体層の混合性を評価しコーティング操作上の課題を検証する。

4. 研究成果

実施項目(1): ガスチャネルの破壊挙動と粒子対流状態の定量化の検討

ガス通気量および加振条件を固定して粉体層の流動状態を観察した。振動を付加しないガス通気のみ条件(図1(a)~(c))では、通気初期に主に水平方向に大きなクラックが形成され、その後形成されたクラックは通気時間が増加しても変化なく常在化した。振動付加条件では振動振幅増加と共に形成されるクラックが微細化し、連続的に破壊と再生が繰り返される挙動が観察された(図1(d)~(e))。更に振動振幅を増加させた加振条件(図1(g)~(i))では比較的高いガス流速のガス供給条件で比較的大きな構造を有するクラックが形成され、そのクラック間の間隙を小さな凝集体が層上部へ移動する様子が観察された。また、適切な加振条件およびガス供給条件の範囲で水平方向に大きな空間が形成され層上部へ上昇する状態が連続的なチャネルの破壊・再生挙動と共存するフローパターンが観察された。

図2に操作条件である振動振幅と空塔ガス速度の関係から粉体層がどのようなフローパターンを示していたのかを表したフローパターンマップを示す。無振動時(ガス通気のみ)及び低振動振幅時ではガス通気直後に形成されたクラックが常在化し、ある程度の時間が経過しても粉体層の状態は変化しなかった。振動振幅を増加し、かつ比較的高いガス流速が低い操作条件では、ガスチャネルの連続的な破壊・再生挙動が発生した。更に振動振幅を増加させると前述のガスチャネルの連続的な破壊・再生挙動が観察できた操作条件が拡大したが、ガス流速が高い条件では再びクラックが形成・常在化し粉体層の構造的な時間的変化が停止

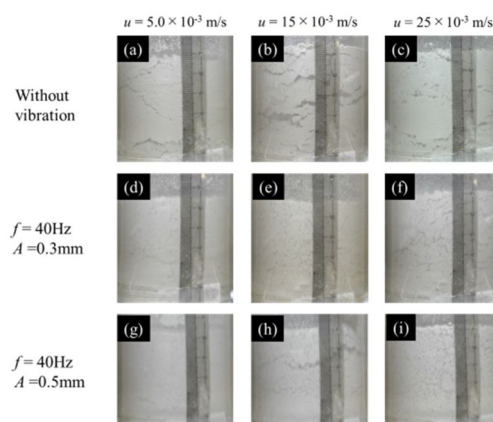


図1 粉体層側面観察結果 (f = 40 Hz)

する状態が観察された。

供給するガス流量と加振条件により粉体層のフローパターンが動的に変化する程度を評価するために、粉体層の高さ方向に $5\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ の解析エリアを設け、対象エリア内の輝度分布を画像解析により算出した。この手法では微細なクラックの形成と破壊挙動を輝度値の変化から評価するために二値化処理による閾値設定を採用せず輝度値の変化を直接評価する方法を採用した。測定エリア内の輝度分布の標準偏差の時間変化を求め、更に操作条件により変化するベースの粉体層輝度値を加味するために変動係数を算出して粉体層挙動の動的な激しさを相対的に比較した。図3にクラックが常在化したガス通気のみケースとガス通気と振動を併用し連続的なクラックの形成・再生挙動が観察されたケースについて、実際の解析エリア内の平均輝度時間変化を示す。クラックが常在化した場合は平均輝度値は時間経過に依らずほぼ一定であるのに対し、クラックの破壊・再生が連続的に行われているケースでは平均輝度値が時間発展と共に大きく変動していることがわかる。

図4に連続的なクラックの破壊・再生が観察された上限 ($U = 1$ に相当) と下限 ($U = 0$ に相当) のガス流速で規格化した無次元ガス流速 (U) と平均輝度値の時間変化の標準偏差から算出した変動係数との関係を示す。無次元ガス流速が0から1の間で変動係数が大きく増加し、その増加の程度は振動振幅の増加と共に大きくなっていることが示された。また、加振条件により変動係数が最大値を示すガス流速が個別存在していることも明らかとなり、このことは従来は観察指標であった加振によるクラックの連続的な破壊・再生挙動が最も動的に進行している操作条件が存在していることを示唆している。

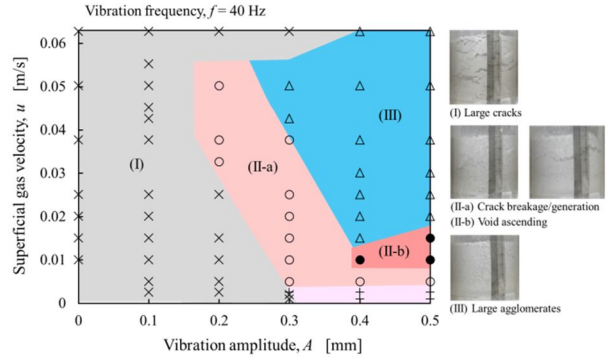


図2 フローパターンマップ (振動周波数は40 Hz 固定)

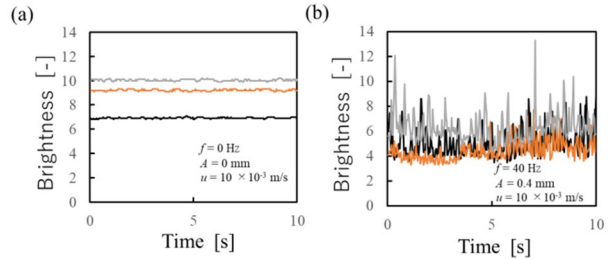


図3 平均輝度の経時変化, (a)ガス通気のみ, 振動無し, (b)ガス通気, 振動の併用

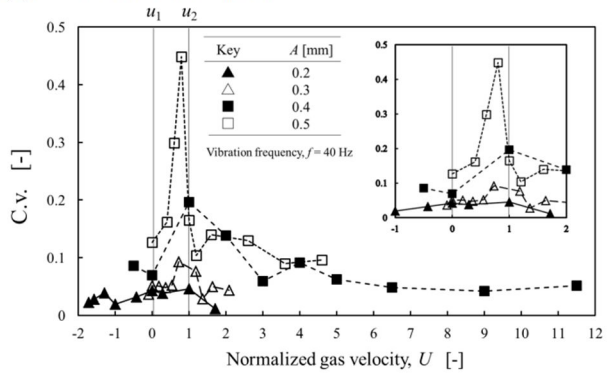


図4 無次元ガス流速と輝度変動係数の関係

実施項目(2)：振動場の粒子対流状態を利用したバルクハンドリング

実施項目(1)の観察結果から、ガス通気と機械的振動の併用操作により微粉体の流動性向上をフローパターンの可視化と画像解析により数値化することで評価したが、クラックの形成と共に存在を確認できた凝集体の正確な測定、および振動由来の粒子運動である粒子対流状態の数値化は不十分であった。そこで、振動由来の粒子運動である粒子対流状態を可視化し粒子運動速度を評価できるような粒子径で流動化特性に及ぼす影響を検討した。実験は粒子径がほぼ同一の $60\text{ }\mu\text{m}$ 、密度差 (2500 kg/m^3 , 4500 kg/m^3) のある2成分系の粉体層を対象に混合性を評価した。所定のガス通気量と加振条件で所定時間操作し、その後ガス供給と加振を同時に停止し静止層を得た。静止層の上部から所定高さ毎に粉体をサンプルしその重量を測定した。サンプルした粉体層体積とその重量から、粉体層高さ方向の平均密度分布を得た。同時に粉体層を構成する二成分が上層と下層に分離した際には分離高さを測定し、層全体の層高さに対する比を層高比として算出した。層高比が小さくなるほど定性的には分離度が高い状態と言える。

図5に操作条件である振動振幅と空塔

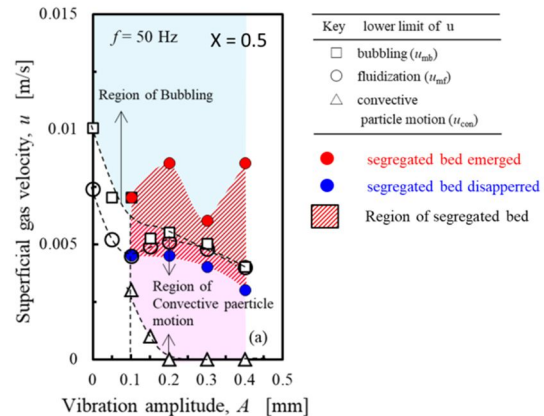


図5 二成分系粉体層のフローパターンマップ

ガス流速の関係から、粉体層のフローパターン分布と粉体層が上下二層に分離した分離状態が発生した範囲を同時に示した。上下2層が発生する操作条件はガス通気のみでは発生せず、ガス通気と振動付加の併用により初めて発生させ得ること、また、粉体層に振動由来の発生する操作条件とも一致していることがわかった。図6に上下2層に分離した状態における層高比のガス流速依存性を示した。図5に示したフローパターンマップでガス通気が無い振動のみ付加して粒子運動が発生するような操作条件では、上下2層が発生した後に徐々に層高比が増加した。これは振動由来の粒子運動が上下2層に分離した各層を再び混合状態へ変化させていることを意味している。

図7には粉体層側面からの観察でトレーサー粒子を用いた粒子移動速度と層高比のガス流速依存性の一例を示している。高ガス流速では気泡が観察されており粒子運動は気泡の発生とその攪乱効果が支配的になっていることが推察される。ガス流速を減少させたにしがって気泡発生が停止し同時に粒子移動速度も急激に減少している。その後、最小気泡流動化速度付近のガス流速で粒子移動速度が再度増加し同時に上下2層の分離状態が発生している。さらにガス流速が減少すると粒子運動が減少に転じると共に層高比が増加して粉体層は2層から1層の混合状態へ遷移した。これらの結果から、粒子運動が粉体層の分離状態の発生に影響を及ぼしていること、最小流動化速度以下の固定層領域における粒子運動は粉体層全体の混合に寄与することが実験的に明らかとなった。

研究成果まとめ

微粉体をガス通気と機械的振動の併用操作する振動流動層を用いてハンドリング性の向上に寄与する諸因子を検討し工学的に応用する可能性を探索した。微粉体の流動性が改善する一因として常在化したガスチャネルやクラックの連続的な破壊挙動が挙げられるが、今回の可視化実験と画像解析による数値化により観察結果との良好な一致が見られ、新たに最もクラックが破壊・再生されるガス通気と振動の操作条件の存在を示唆することが出来た。また、振動由来の粒子運動を詳細に観察し、密度差のある二成分系粉体層を対象にした場合、振動由来の粒子運動は流動化状態では分離を促進する一方で固定層のガス通気条件では混合を促進することが明らかとなった。これらの知見は操作中に粒子物性が変化する操作系、例えば造粒、コーティング、反応等の系で流動層操作を活用する際に有用であると考えられる。また、微粉体の粒子対流状態は観察結果を数値化するには至らなかったが今後更に新たな評価法を開発して現象の理解を進めたいと考える。

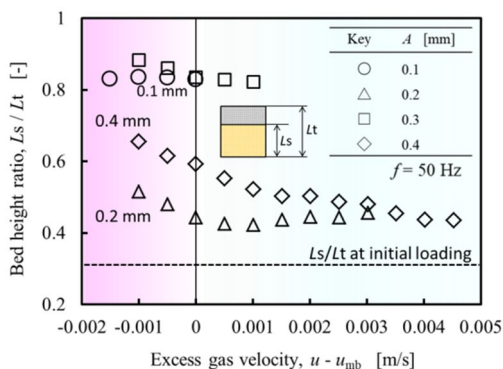


図6 分離層高比の過剰ガス流速依存性

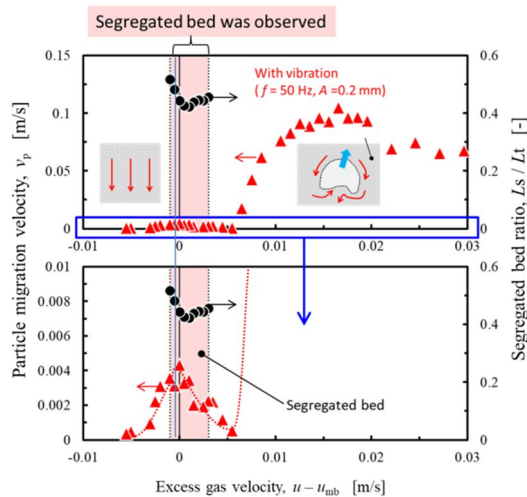


図7 過剰ガス流速と粒子移動速度及び分離層高比の関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Atsuto Kogane, Kenya Kuwagi, Yoshihide Mawatari, Libby Davoren, Jonathan Seville, David Parker	4. 巻 4
2. 論文標題 CONVECTIVE FLOW VELOCITY OF PARTICLES IN A VIBRATED POWDER BED	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics Communications	6. 最初と最後の頁 7501
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/2399-6528/ab6e12	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Jun Oshitani, Ryo Sugo, Yoshihide Mawatari, Takuya Tsuji, Zhaohua Jiang and George V. Franks	4. 巻 31
2. 論文標題 Dry separation of fine particulate sand mixture based on density-segregation in a vibro-fluidized bed	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Adv. Powder Technol.	6. 最初と最後の頁 4082-4088
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.appt.2020.08.016	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Jun Oshitani, Masaki Hino, Shinichiro Oshiro, Yoshihide Mawatari, Takuya Tsuji, Zhaohua Jiang and George V. Franks	4. 巻 33
2. 論文標題 Conversion air velocity at which reverse density segregation converts to normal density segregation in a vibrated fluidized bed of binary particulate mixtures	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Adv. Powder Technol.	6. 最初と最後の頁 103583
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.appt.2022.103583	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 馬渡佳秀, 中村領佑, 園田恭平
2. 発表標題 機械的振動とガス流れの併用場における微粉体の流動状態
3. 学会等名 混相流シンポジウム2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 馬渡佳秀, 岩村直起
2. 発表標題 二成分系粉体層の流動化特性及び混合/分離状態に及ぼす機械的振動付加の影響
3. 学会等名 第53回化学工学会秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 水津地博, 馬渡佳秀
2. 発表標題 機械的振動付加が微粉体のガス流動化様式の遷移に及ぼす影響
3. 学会等名 粉体工学会秋期研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 馬渡佳秀, 中村領佑, 園田恭平, 水津地博
2. 発表標題 振動・気流併用場における微粉体の流動様式の遷移
3. 学会等名 第59回粉体に関する討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 馬渡佳秀, 小森義郎
2. 発表標題 振動場における粒子運動が気泡流動化に及ぼす影響
3. 学会等名 第58回粉体に関する討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yoshihide Mawatari , Takao Ohmori
2. 発表標題 Effect of a Mechanical Vibration on Dense Phase Void Fraction in a Gas-solid Fluidized Bed
3. 学会等名 The 8th Asian Particle Technology Symposium (APT2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 馬渡佳秀, 大森貴央
2. 発表標題 機械的振動付加が粒子濃厚相空隙率と気泡流動化状態の変化に及ぼす影響
3. 学会等名 第27回流動化・粒子プロセッシングシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩村直起, 馬渡佳秀, 押谷潤
2. 発表標題 振動場における密度差のある二成分系粉体層の流動化挙動
3. 学会等名 第26回流動化・粒子プロセッシングシンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大森貴央, 馬渡佳秀
2. 発表標題 振動付加が流動層内の気泡フローパターンと粒子濃厚相空隙率に及ぼす影響
3. 学会等名 第26回流動化・粒子プロセッシングシンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 馬渡佳秀, 中村領佑, 園田恭平
2. 発表標題 微粉体の機械的振動場における粒子対流現象と流動化状態に及ぼす影響
3. 学会等名 第26回流動化・粒子プロセッシングシンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Naoki Iwamura, Yoshihide Mawatari and Jun Oshitani
2. 発表標題 Fluidization Characteristics for Binary Density Difference Powders under Mechanical Bed Vibration
3. 学会等名 The 8th Asian Particle Technology Symposium (APT2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yoshihide Mawatari, Ryosuke Nakamura, Kyohei Sonoda and Chihiro Suizu
2. 発表標題 Migration Characteristics of Fine Cohesive Particles in a Vibrating Gas-Solid Fluidized Bed
3. 学会等名 FLUIDIZATION XVII (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 馬渡佳秀, 野澤拓人
2. 発表標題 機械的振動と気流の併用場における微粉体の凝集流動化挙動
3. 学会等名 混相流シンポジウム2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 馬渡佳秀, 岩村直起
2. 発表標題 振動流動層における二成分系粉体層の流動化特性と混合・分離状態
3. 学会等名 第54回化学工学会秋季大会
4. 発表年 2023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