

2023年度（第19回）研究助成報告

研究題名	微粉体の振動・ガス通気併用場における対流現象の発生条件・機構に関する研究
研究期間	2023年4月1日～2024年3月31日
研究機関・所属 研究者名	国立大学法人九州工業大学・大学院工学研究院物質工学研究系 馬渡佳秀

1. 研究成果の概要

本研究では付着・凝集性の微粉体を対象にした流動層ハンドリングを目的とし、特に気流と機械的振動の併用操作により発生する粒子運動状態に着目した。振動を付加することにより常在化したガスチャネルを連続的に破壊し、ガス流れの偏流を防ぐことで流動性改善に寄与することが知られているが、同時に振動流動場で発生する粒子運動が流動性改善にどのような影響を及ぼしているのかは不明である。

研究成果として、粒子運動が発生する条件では通常のガス流動化判定で得られる圧力損失曲線からは曲線形状が変化した。具体的には粒子運動が発生する範囲では圧力損失が減少した。粒子移動速度を解析した結果、振動振幅が増加すると粒子移動速度は粒子運動パターンが遷移する（斜方向形成型から山型）と共に増加し、圧力損失の減少の程度が増加することが明らかになった。

2. 助成期間内での研究成果の概要

1. はじめに

一般に粒子径が減少すると粒子間の相互作用が相対的に大きくなり、装置壁への付着や粒子同士の凝集によりハンドリングが困難になることが知られている。大量の粉体をハンドリングできる流動層は、気固間接触特性や粒子混合が良好であることから幅広い産業で活用されているが、付着・凝集性微粒子を対象とした流動層ハンドリングは、ガスチャネルによるガス吹き抜けが支配的となり、良好で再現性のあるハンドリングは難しい。従来より、機械的な振動付加はガスチャネルや凝集体の連続的な破壊により流動性改善手段の一つであることが知られている。

本研究では、振動場で発生する粒子運動について着目し、研究者らは付着・凝集性の微粉体でも適切なガス通気量と振動条件の組み合わせで発生すること、また、対流状態が凝集体サイズの減少にも寄与することを明らかにしてきた。しかし、対流状態の発生機構および対流状態における粉体層内のガス透過特性（圧力損失の変化）については更に理解が必要である。

そこで本研究では、粉体のガス流動化において付着・凝集性であるとされる Geldart 分類の C グループ粒子の振動流動場における粒子対流状態について粉体層の圧力損失および粒子もしくは凝集体の移動特性を測定し、微粉体のガス流れと機械的振動の双方により発生する特異な現象に解明を目的とした。

2. 実験装置及び方法

Fig. 1 に本研究で用いた実験装置の概略図を示す。流動層本体は透明アクリル樹脂製で内径 65 mm であり、ガス分散板としてステンレス鋼製の焼結板を用いた。窒素ガスを流動化ガスとし、マスフローコントローラーで流量を調節してガス分散板を介して粉体層へ供給した。粉体層の圧力損失をデジタルマノメーターにより測定した。振動は流動層本体を加振装置に取り付け、鉛直方向の振動を附加した。実験に用いた粉体は球状のジルコニア粉体で併記粒子径は $8.2 \mu\text{m}$ 、粒子真密度は 5680 kg/m^3 を用いた。

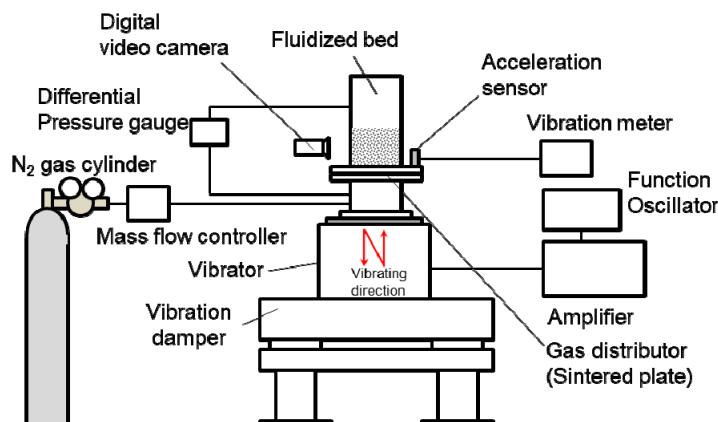


Fig. 1 Experimental apparatus

3. 実験結果及び考察

Fig. 2 に目視観察にて分類した粉体層のフローパターンマップを示す。振動を付加しない場合、粉体層表面にガス吹き抜け場所と考えられる比較的大きなホールが観察され、一度形成したホールはガス流速の大きさを変更しても常在化し変化しなかった。加振する振動振幅（振動周波数は一定）を大きくすると、比較的高ガス流速において層表面が傾斜しながら粒子が移動する粒子対流状態が観察され、更に振動振幅が大きくなると低ガス流速までその範囲は拡大した（図中(c-1)から(c-2))。本研究の実験環境下では振動振幅が 0.18 mm を越えるとガス通気なし、すなわち振動のみで粒子が移動する現象が発現し、粉体振動層で見られる粒子対流状態に相当するものと考えられる。振動振幅の増加により、粒子対流状態は斜面形成を伴う対流状態から山型の対流状態へ低ガス流速の範囲に発生範囲が変化しながら状態が遷移した（図中 (c-3)）。また、高振幅の条件では、高ガス流速を伴うと層表面から連続的に粒子が飛び上がる状態が発生し、明確な粒子の運動状態を観察できなかった（図中(b))。

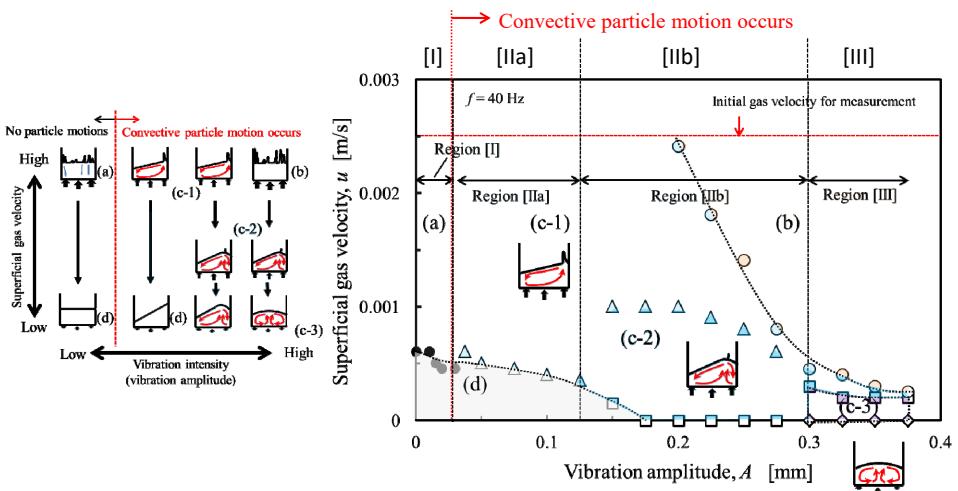


Fig. 2 Flow pattern map

Fig. 3 に粉体層の規格化圧力損失の分布を示す。図中の圧力損失は粉体層が完全にガス流動化した際に得られる理論値で規格化した値の分布を示している（暖色から寒色になるに従い規格化圧力損失は減少している）。粉体層の規格化圧力損失の値は低振幅時に最も高くなり、その後低ガス流速側に減少するは範囲が拡大している。図には Fig. 2 で示したフローパターン分布を重ねて表示している。フローパターンが斜面形成する対流状態から山型の対流状態へ遷移する状態遷移は振動振幅の増加に従い低ガス流速の範囲に拡大しており、これは規格化圧力損失がガス流動化に相当する圧力損失よりも低くなる範囲が低ガス流速側に拡大する傾向と類似している。このことから、振動付加による粒子運動の活性化（粒子対流状態の発達）が粉体層の圧力損失の減少に関与していることが推察される。

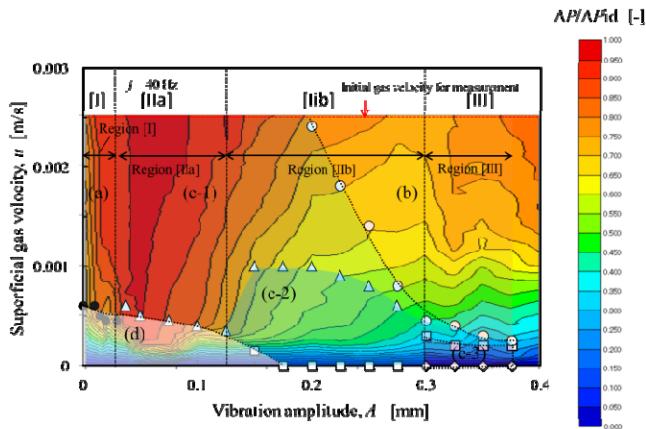


Fig. 3 Contour map of normalized pressure drop

そこで、粉体層表面を移動する凝集体をデジタルビデオカメラもしくは高速度カメラで観察し、画像解析から平均移動速度を算出した。

Fig. 4 には空塔ガス速度と粒子移動速度の関係を示している。振動振幅が増加する同一ガス流速では粒子の平均移動速度は増加しており、粒子対流パターンが斜面形成から山型に遷移すると大幅に増加する結果が得られた。この結果をふまえて Fig. 5 には粒子の平均移動速度とそれが得られたガス流速時の粉体層の圧力損失との関係を示した。振動振幅が増加して粒子の平均移動速度が増加するに従い粉体層の圧力損失が減少する傾向にあることが示され、加振による粒子運動の発生・遷移と粉体層の圧力損失の減少には強い関係性があることが示唆される結果となった。

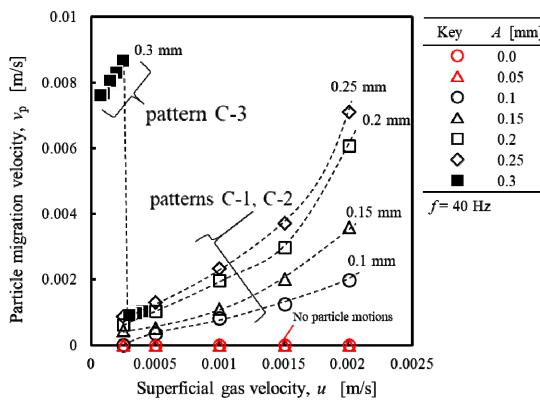


Fig. 4 Relationship between superficial gas velocity and particle migration velocity for different vibration amplitudes

まとめ

本実験で得られた鉛直方向振動の付加により発生する粒子運動は粉体層の圧力損失を減少させ、その減少程度は粒子の移動速度が大きくなる（振動振幅が大きくなり粒子対流状態が発達する）に従い増大する傾向にあることがわかった。更に物性の異なる微粉体で検証を行い、外部振動による発生する微粉体の粒子運動状態の解析と検討から流動機構を明らかにするべく検討を続ける予定である。

最後に、本研究につきまして粉体工学情報センターご関係各位に心から感謝申し上げます。

3. 研究発表

- 馬渡佳秀、岩村直起：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、第 54 回化学工学会秋季大会、C-121、2023 年 9 月 11 日（福岡）
- 馬渡佳秀、野澤拓人：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、混相流シンポジウム 2022、OS0810、2023 年 8 月 24 日（札幌）
- Yoshihide Mawatari, Ryosuke Nakamura, Kyohei Sonoda and Chihiro Suizu, Migration Characteristics of Fine Cohesive Particles in a Vibrating Gas-Solid Fluidized Bed, FLUIDIZATION XVII, E0165, May 22-25(22), 2023 (Edinburgh, UK)

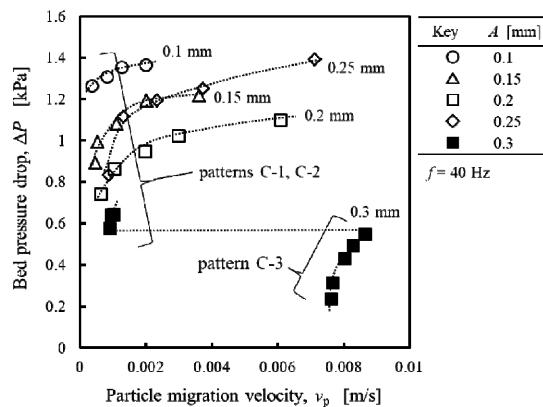


Fig. 5 Relationship between particle migration velocity and bed pressure drop