撃力を用いた粉体粒子輸送技術の開発

日本工業大学 基幹工学部機械工学科

小林 和也

1. はじめに

粉体は数 10 µm~数 mm 程度の大きさをもった粒子の集合体である.日常生活のいたるところに存在しており, 医薬品や塗料といった様々な製品の生産や輸送プロセスに関わっている. これまでに粉体粒子の粒径や形状,表面特性,および粒子間相互作用により多様な物理的および化学的特性を示すことが先行研究から明らかにされている¹⁻²⁾.一般的に粒子径が小さくなるほど反応性が増加するため,微細化粉体は工学的な応用において非常に重要である.一方で,微細化させることによって粒子間の付着力が増加し,流動性が悪化することも知られている. 流動性が低い粉体の場合,状況によっては配管内輸送時に流動の偏在化や閉塞が生じることで,製品の安定した製造が困難になることが知られている³⁾.また,空気輸送の場合には,輸送空気と粒子特性の相互的関係より,輸送用配管の摩耗,粉体の破砕による粒径・形状変化などが発生することも課題とされている.このようなことから,様々な目的に応じて製造された粉体に適用可能であり,必要な量の粉体を目的箇所へ効率的に輸送可能な技術を確立することができれば,粉体に関係する様々な工業技術への応用・発展に寄与することができると考えられる.

そこで本研究では、大型の装置を使用せずに、粒径が異なる粉体を輸送する技術として、衝撃力を利用した新たなジェット射出手法について検討し、粉体のジェット生成時における動的 挙動および粉体層の流動特性を明らかにすることを目的とする.本稿ではこれらの研究結果に ついて状況を報告する.

2. 実験方法

本実験で使用する粉体は、まず単純化した粉体を仮定するために、球形のガラスビーズ (Fuji Manufacturing Co.)を用いた. 粒径範囲は平均値 45 µm, 70 µm (密度 2.5 g/cm³) であ

る.実験ではガラス製の試験管(内径 16 mm)を用 いることで内部の粉体の挙動を高速度カメラによっ て詳細に観察できるようにした.この試験管に粉体 を底部から高さ Lg = 25 mm, 50 mm, 100 mm で充填 する.この際,粉体の初期充填率が変わらないよう に,あらかじめ試験管を複数回タッピングしながら 粉体の高さを調整している.また,あらかじめ粉体 表面には,試験管底部のような半球形状(直径 15 mm)を有するガラス棒を用いて凹面形状を付与す る.実験は小林ら4)によって行われた撃力付与方法 を使用する.実験セットアップを図1に示す.金属 フックを取り付けたシリコンキャップで密閉する.



電磁石を用いて試験管全体を吊り下げ,全体を静止させる.最後に,電磁石を切ることによって試験管を自由落下させて,金属製の床材に衝突させる.本研究ではこのように試験管を自由落下させて床材と衝突させた時の衝撃力を駆動力とする.試験管の落下高さHについては 10 mm~150 mm の範囲で調査を行った.ジェット射出の様子は高速度カメラ(FASTCAM SA5, Photron Co.)を用いて,撮影速度 30,000 fps の条件で撮影を行った.

3. 代表的なジェット生成挙動

本実験によって得られた代表的な粉体 のジェット生成挙動を図1に示す.ここで、 (a)は平均粒径 45 µm, 粉体層の厚み Lg=25 mm, (b)は平均粒径 70 µm, 粉体層の厚み Lg = 25 mm, (c)は平均粒径 45 µm, 粉体層 の厚み Lg = 100 mm である. なお, 落下高 さは全て 30 mm である. 図中で試験管内部 の黒い領域が粉体層である. t = -3 ms は試 験管が金属床材の衝突する寸前である.t= 0msで試験管が金属床材に衝突する.この ことによって, (a)(b)では t=3 ms で粉体表 面が盛り上がるが、(c)ではそれが見られな い. t = 9 ms 以降では, (a)(b)では次第に先 細形状のジェットとして、同じように伸 長・飛翔していることがわかる (t=9ms~ 21 ms). すなわち, この範囲で粒径を変化 させても、ジェット挙動には大きな変化は 見られないことがわかった.一方で,(c)で は t = 9 ms 以降で同様にジェットが生成し ていることがわかるが, 伸長・飛翔の様子 は明らかに(a)(b)に比べると遅いことがわ かる.このように衝撃力を用いることで, 粉体を先細形状のジェットとして射出す ることに成功した.また,凹面形状を統一 すればジェットの制御性も高いことも明 らかになった.



図2 代表的なジェット生成挙動

4. 粉体層の厚み Lg に対するジェット速度 Vjet

生成されたジェットの速度を解析するため、以下に示すようなパラメータの定義を行う. 図 2 のように試験管が床材と衝突した瞬間を t = 0.0 ms として定義し、そこからの経過時間 $\Delta t = 10.0 \text{ ms}$ における試験管の床材からの跳ね返り高さ ΔH 、t = 0.0 ms の粉体表面位置から伸 長したジェット先端位置までの距離 l_j を測定する.ここで、床材に衝突した試験管の跳ね返 り速度は $V' = \Delta H / \Delta t$ と定義する.また, 試験管の床材への衝突速度は $V_0 = (2gH)^{1/2}$ として粉体に与える初期速度 $U_0 \in U_0 = V_0$ + V'のように定義する⁴⁻⁵⁾.ここで,重力 加速度 g は 9.81 m/s² とする.さらに,ジ ェット速度については $V_{jet} = (l_j - \Delta H) / \Delta t$ と定義して算出する.各条件で 3–5 個のデ ータを取得し,代表値として平均値,エラ ーバーとして標準偏差を用いる.

粉体の粒径および試験管内の粉体層の厚 みLgを変化させた際のジェット速度につい て調査した結果を図3に示す.図3は粒径 45 μm および 70 μm を使用した実験で,粉 体層の厚み Lg を 25 mm, 50 mm, 100 mm と 変化させた際の各落下高さ(図3では初期 速度 Uoの中に含まれている) に対するジェ ット速度 V_{jet}の依存性を示している.なお, 各シンボルの意味は図中に示された通りで ある.これ見ると、Lg=25mm、50mmの範 囲では概ね速度帯は同じであり、共に線形 に増加していることがわかる.一方で, Lg= 75 mm, 100 mm では前に比べて速度が次第 に減速していることがわかる.特に100mm では顕著に速度が減速しており、この傾向 は図2で示したジェット挙動とも一致して いる.これは粉体層の厚みが増加するに伴



図3 各条件におけるジェット速度の変化



図4 粉体系と液体系のジェット速度比較

って,粉体層を構成する粒子数が次第に増加し,接触数などに起因した内部の摩擦特性が変化 したことによって,衝撃によって付与されたエネルギーの散逸が増加したことが影響であると 考えられる.

最後に従来知られている液体系とジェット速度の比較を行なった. 図 4 は図 3 でも示した 各条件における粉体系の実験結果に、単純液体であるシリコーンオイル(10 cSt)を用いて同 じ Lg の範囲において行った実験結果を新たに加えて、ジェット速度 Vjet / U0 の Lg 依存性につ いてまとめたものである.なお、各シンボルの意味は図中に示された通りである.図 4 より Lg = 50 mm 程度までは液体系の方が若干早い傾向にはあるものの、概ね同じ速度帯にあることが わかる. Lg が増加すると、液体系の場合は Lg の増加に伴って速度が増速していることがわか る.これはある Lg を超えた際に衝撃によって液体中にキャビテーション気泡が発生し、それ がジェットの増速に寄与しているためである⁵⁾.一方で、粉体系の場合では、図 2 や図 3 でも 示したように、Lg の増加に伴って速度は次第に減速していることがわかる.すなわち、Lg の増 加に伴って内部の摩擦特性変化に起因したエネルギー散逸の増加がジェット速度の減速に関 連していることが示唆された.このように粉体系では Lg が小さい範囲においては、従来知ら れている液体系と比較的類似した傾向を示すことがわかった.一方で,Lgが増加することで両 者の速度帯に大きな変化が現れることが明らかになった^の.

5. まとめ

本研究では、従来のような大型の装置を使用せずに、粒径が異なる粉体を輸送する技術として、衝撃力を利用した新たなジェット射出手法について検討した。今回は平均粒径 45 μ m および 70 μ m の粉体を衝撃力によって先細形状のジェットとして射出できることを明らかにした。また、衝撃力の強さ(落下高さ)および粉体層の厚み L_g を変化させると、 $L_g = 25$ mm、50 mm の範囲では概ね速度帯は同じであることがわかった。これは同時に行った液体系のジェット速度とも概ね一致していた。一方で、 $L_g = 75$ mm、100 mm と増加させると、エネルギー散逸などの影響によって、ジェット速度が次第に減少することが明らかとなった(液体系の場合は増速する場合がある点も粉体系とは異なる)。今後はより幅広い粒径まで適用範囲を広げて、本手法によって射出したジェット挙動をより詳細に検討を進めたいと考えている。

謝辞

本研究を遂行するにあたり,公益財団法人天野工業技術研究所から多大なご支援を頂きま した.ここに記して謝意を示します.

参考文献

- 1) G. V. Barbosa-Cenovas, E. Ortega-Rivas, P. Juliano, H. Yan, Food powders: physical properties, processing, and functionality, Vol. 86, Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York (2005).
- B. Bhandari, N. Bansal, M. Zhang, P. Schuck, Handbook of food powders: processes and properties, Elsevier, Amsterdam, Netherlands (2023).
- J. Duran, Sands, Powders and grains: introduction to the physics of granular materials, Springer-Verlag, New York (1999).
- 小林 和也,佐藤 悠月,増田 恵治,斎藤 浩希,田川 義之,"撃力により駆動する粉体ジェットの 生成と挙動解析,"混相流, Vol. 38, No. 3, pp. 319-326 (2024).
- 5) A. Kiyama, Y. Tagawa, K. Ando, and M. Kameda, "Effects of a water hammer and cavitation on jet formation in a test tube." Journal of Fluid Mechanics, Vol. 787, pp. 224-236 (2016).
- 6) K. U. Kobayashi, Pradipto, and Y. Tagawa, Manuscript submitted for publication (2025).