

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 24 日現在

機関番号：57501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03867

研究課題名(和文)テーパースパイラル型電極パルス電場による粉体薬剤の精密輸送噴霧機構の解明

研究課題名(英文)Explication of mechanism for precision conveying and spraying of pharmaceutical powder by pulse-field of taper spiral type

研究代表者

尾形 公一郎(Ogata, Koichiro)

大分工業高等専門学校・機械工学科・教授

研究者番号：50370028

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：粉体薬剤の管内での安定的な輸送と噴霧を実現するために、モデル粒子(シリカ、ガラスビーズ)や薬剤粉体の粒子特性と粉体特性を調査し、振動流動化と加圧流動化を用いた粉体輸送特性、および高電場による粉体の輸送特性を明らかにすることを目的として研究を行った。その結果、振動流動化輸送実験では、粉体の流動性や通気性が高い粉体で輸送が容易に行えることが明らかとなった。また、加圧流動化輸送実験では、輸送管内で粉体がプラグ流を形成しながら周期的な輸送特性を示すことが確認された。両輸送方法で薬剤粉体の輸送が可能であった。さらに、高電界で発生させたイオン風でモデル粉体と薬剤粉体の輸送が可能であることも確認された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

付着性を有する粉体薬剤の輸送管内での閉塞を防止し、粉体薬剤を安定的に輸送及び噴霧する医療機器の開発が強く求められているが、この目的に対して、本研究で用いた振動流動化輸送と加圧流動化輸送が有効であることを示した。また、取り扱う粉体の粒子径、流動性や通気性等の粉体特性の理解が重要であることも明らかにした。本研究で得られた知見は、本研究で対象とした医療・薬剤分野のみでなく、3Dプリンタ用金属粉末、食品粉体などの粉体化した材料を取り扱う各種輸送プロセスでの展開が期待され、学術的、社会的意義は極めて大きい。

研究成果の概要(英文)：To achieve stable transport and spraying of powdered medicines inside a pipe, we investigated the particle and powder characteristics of model particles (silica, glass beads) and pharmaceutical powders. We researched to clarify the powder transport characteristics using vibration fluidization and pressurized fluidization, as well as the transport characteristics of powders using a high electric field. As a result, the vibration fluidization transport experiment revealed that transport was easy for powders with high flowability and air permeability. In addition, the pressurized fluidization transport experiment confirmed that the powder formed a plug flow inside the transport pipe and showed periodic transport characteristics. It was possible to transport pharmaceutical powders using both transport methods. Furthermore, it was confirmed that the model and pharmaceutical powder could be transported using ionic wind generated by a high electric field.

研究分野：粉体工学

キーワード：粉体輸送 振動流動化 加圧流動化 高電界 流動性 通気性 付着性

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

現在、日本は少子高齢化や人口減少が急速に進んでおり、2060年には65歳以上の高齢者の総人口に占める割合が約40%に達する超高齢化社会を迎えると予想されていることから、政府は「健康長寿社会」を目指した健康・医療戦略を図っている。一方で、消化器系の手術や眼の硝子体手術などを必要とする患者数が大幅に増加しているため、これらの手術での利用が研究されている止血機能や切除した術部を接着する機能を有する粉体薬剤を手術空間で正確に、かつ、安定的に噴霧する医療機器の開発が強く求められている。しかしながら、このような粉体薬剤を使用する場合に、輸送管内での閉塞の発生や、装置内部での粉体ハンドリングおよび制御が困難になると医療事故を引き起こす恐れがあるため、これらのトラブルを未然に防止する必要がある。

ここで、粒子のハンドリングを考えると、一般に、粒子は粒子群の集合体である粉体として取り扱われ、液体中や気体中でハンドリングされるが、医療用薬剤粉体は液体と反応してゲル状になるために、液体中でのハンドリングに適していない。一方、気体中の操作ではゲル化する可能性が少なく、材料の成分を変えずに利用できるといった利点を持つ。このため、医療現場で材料の成分が変化しない気体中で、粉体を安定的にハンドリングし、かつ、定量的に供給する研究は、重要な課題であるとの背景から本研究を推進するに至った。

2. 研究の目的

本研究では、粉体薬剤の管内での安定的な輸送と噴霧を実現するために、モデル粒子(シリカ、ガラスビーズ)や薬剤粉体の粒子特性と粉体特性を調査し、振動流動層による粉体の分散・輸送特性、加圧流動化粉体輸送の輸送特性、および高電場による粉体の輸送特性を明らかにすることを目的として研究を行った。

これらの目的を達成するために、まず、Geldart線図中のC、A粒子に区分される8種類のシリカが持つ粒子物性を調査するために、パウダーレオメーターを用いてせん断試験による付着性評価および通気性試験を行った。次に、パウダーレオメーターで測定した粒子物性値を基に、粉体を分散して輸送するために、振動流動化装置を用いた粉体輸送実験を行い、粒子径の違いによる輸送特性について調査をした。

次に、医療現場では振動装置を使用することへの懸念があるため、本研究では振動装置を使用せずに空気圧のみによって粉体の輸送が可能であることを確認することを目的として、加圧流動化装置を使用し、粉体の輸送特性、圧力特性及び輸送管内の粉体挙動の可視化を行った。

そして、高電場による粉体の輸送特性を知るために、直流電源による高電場中での粉体の帯電特性、電極から発生するイオン風の風速の測定およびパルス電源の製作を行った。

3. 研究の方法

(1) 粉体特性の評価

本研究では、粉体特性に及ぼす粒子径の影響を確認するために、粒子径の異なる8種類のシリカを使用してパウダーレオメーターを用いた粉体特性の測定を行った。パウダーレオメーターは粉体の流動特性、せん断特性およびバルク特性を測定する装置である。本実験ではせん断試験による付着力の測定と通気試験による通気性の測定をそれぞれ同一条件で3回ずつ行った。

(2) 振動流動化粉体輸送実験

実験装置は振動流動化部、粉体分散供給部、粉体輸送部および粉体回収部で構成した。粉体を充てんして振動流動化を行う容器は、薬剤粉体を封入するバイアル瓶の寸法を参考にして、内径18mm、高さ50mmで容器上部に流動化空気供給部と粉体輸送部を備えている。流動化空気供給部は底部から1mm、5mm、10mm、15mmの4種類に変化させ、粉体輸送部は底部から32mmの位置に設置した。流動化空気供給部と粉体輸送部には、外径4mm、内径3mmのビニールチューブを用いた。流動化空気はコンプレッサーで生成後にエアコンビネーション、活性炭フィルターと減圧弁を介してマスフローコントローラで設定流量に調整した上で、粉体分散供給部に導いた。また、容器に鉛直振動を与えるために、容器の底部に防振ばねと鉄板を介して2台の振動モータを取り付けた。振動モータの振動周波数はインバータで制御した。粉体輸送部から送られた粒子は、サイクロンで回収した。実験条件として、粉体分散供給部への空気速度、容器底部から空気供給管の出口部までの高さおよび鉛直方向の振動強度を変化させ、輸送条件の確認、供給空気の圧力測定および単位時間あたりの粉体輸送量の測定を行った。

(3) 加圧流動化粉体輸送実験

輸送装置は粉体供給部と水平輸送管及び粉体回収部で構成した。粉体供給部は内径18mm、高さ65mmの円筒容器を用い、容器底部には流動化空気を均一に供給するために、ろ過径10 μ mの銅の焼結体を設置している。また、粉体供給部上部からも空気を供給できるように設計している。容器底部側面には輸送管との接続のため内径4mmの穴を開けている。空気流量はマスフローコントローラを用いて設定した。粉体供給容器底部の流動化空気圧力と容器内部圧力、輸送管出口圧力の測定には圧力センサを用いた。輸送管は内径4mm、長さ200mmの亚克力パイプを使用し

た. 供給部から輸送管内を輸送された粉体はビーカーで回収した. ビーカーの底部にはロードセルを設置して粉体輸送量を測定した. 今回の実験では振動装置を使用せずに空気圧のみによって粉体の輸送が可能であるかを確認し, その輸送特性などについて調査した.

(4) 高電場による粉体輸送

本研究では, 直流電源の高電界装置を用いて粉体挙動の確認を行った. 装置は一般家庭用電源である交流 100V を摺動式変圧器で調整し, ネオントランスで昇圧している. その出力をダイオードとコンデンサにより, 平滑化して倍電圧での整流を行っており, 直流で電極に流れる装置となっている. 電極は二つとも網目状かつ平行平板となっており, 縦 75mm, 横 60mm である. また, 実験では, 摺動式変圧器で電圧を調整し, 電極上部から粉体を落下させた時の粉体の挙動を確認した. 本実験では粉体薬剤で使用した. 初期充てん量は 1g である. また, 本研究では, 直流電源よりも短時間で瞬間的に電力を発生させることができるパルス電源の製作も行った.

4. 研究成果

(1) 粉体特性の評価

Table 1 に 8 種類のシリカのせん断試験の測定値を示す. 測定値はそれぞれ 3 回の試験の平均値である. Cohesion とは粉体に作用する付着力であり, 平均粒子径が大きくなるに従って, 付着力が小さくなる傾向が見られる. FF はフローファンクションであり, 式(1)で求められる.

$$FF = \sigma_1 / \sigma_c \quad (1)$$

ここで, モールの応力円から得られる一定の最大主応力 σ_1 に対して単軸崩壊強度 σ_c が小さければ流動性が良いと言えるため, FF が大きいほど流動性が良いとされる. Table 1 より平均粒子径が大きくなるに従って FF 値が大きくなる傾向にあることがわかる.

次に, Table 2 に通気試験の測定値を示す. BFE は通気していない粉体中のブレードの移動エネルギーを示し, 粉体の基本特性として最も重要な指標である. また, 式(2)で求められている [10].

$$E = \int_0^H \left(\frac{T}{R \tan \alpha} + F \right) dH \quad (2)$$

ここで, R はブレードの半径, α がブレードの侵入角度, H がブレードの侵入深さである. AE は最大通気流量でのブレードの移動エネルギーを示す. AR は BFE を AE で除した値で通気指標である. Table 2 より, $2.6\mu\text{m}$ の BFE が大きく, その他の条件では 200~250 あたりに推移する結果が得られた. AE も BFE と同様に $2.6\mu\text{m}$ で大きく, 平均粒子径が大きくなるに従って AE が減少する傾向が得られた. AR は $35.1\mu\text{m}$ で減少しているが, 粒子径が大きくなるに従って増加している. この AR の値の増加は AE の低下が影響していると考えられる. これらの結果から, 平均粒子径が大きい粒子の流動性が良いことが分かった.

Table 1 Measurement results by Shear Test

SiO ₂	x_p (μm)	Cohesion (Pa)	FF (-)
A	2.6	369	1.67
B	3.1	315	1.87
C	3.3	264	2.12
D	3.4	312	1.87
E	10.2	214	2.63
F	16.5	184	2.87
G	27.4	159	3.31
H	35.1	118	4.50

Table 2 Measurement results by Aeration Test

SiO ₂	x_p (μm)	BFE (mJ)	AE (mJ)	AR (-)
A	2.6	351	134	2.58
B	3.1	234.3	70.7	3.81
C	3.3	225	61.7	1.02
D	3.4	264	61.8	4.41
E	10.2	186.3	33.7	5.42
F	16.5	218.8	16.7	17.1
G	27.4	266.3	9.67	29.2
H	35.1	219.3	20.1	11.4

(2) 振動流動化粉体輸送実験

実験条件として, 振動強度, 容器内への供給空気速度, 容器底部から供給空気の出口部までの高さを変化させた. 粉体初期充てん量は一定である. 使用粉体は, パウダーレオメーターで測定した 8 種類のシリカ粒子のうち, 平均粒子径が $3.1\mu\text{m}$, $10.2\mu\text{m}$, $35.1\mu\text{m}$ の 3 種類を使用した. Fig.1 に平均粒子径を変化させた条件での供給空気速度 u_a と 1 分間あたりの粉体輸送量の割合 M_p/M_{pi} の関係を示す. 振動強度 $A=9.23$ である. 図より, どの粒子径でも供給空気速度の増加によって粉体輸送量が増加していることが分かる. また, 平均粒子径が大きくなるに従って粉

体輸送量が増加していることも確認できた。これは、パウダーレオメーターのせん断試験による FF 値および通気試験による AR 値の測定結果と同様の結果になっており、粉体の流動性及び通気性が輸送特性に影響することが明らかとなった。

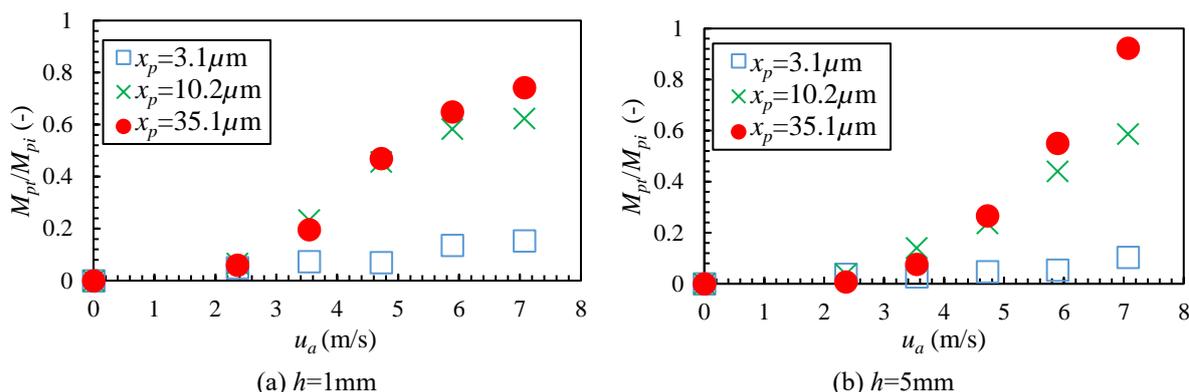


Fig.1 Relationship between the ratio of transported mass and initial mass of powder and supply air velocity ($A=9.23$, $h=1, 5 \text{ mm}$)

次に、粉体輸送量との関係について述べる。Fig.2 に 1 分間の粉体輸送量の割合から算出した輸送状態を示している。それぞれ輸送量の割合の 30%未満が×, 30~60%未満が△, 60~90%未満が○, 90%以上で●と定義している。平均粒子径 $x_p=35.1 \mu\text{m}$, 振動強度 $A=8.18$ である。図より、底部からの空気供給管の高さが低い条件で、輸送量が増加していることが分かる。このとき、容器底部の粉体は流動化特性が向上し、振動流動化によって分散された粉体輸送が可能となっていることが確認された。

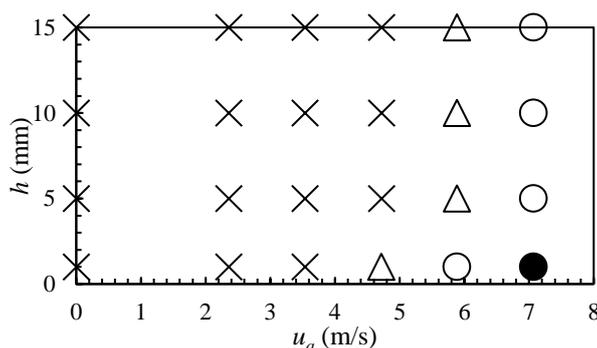


Fig.2 Mapping of powder transportation ($x_p=35.1 \mu\text{m}$, $A=8.18$)

(3) 加圧流動化粉体輸送実験

実験は、粉体供給容器にモデル粒子のガラスビーズと薬剤粉体を充てんし、マスフコントローラーにより設定した空気流を容器底部と上部から供給し、容器内部圧力を上昇させて粉体を輸送した。その後、輸送管内を通過した粉体をビーカーで回収した。本研究では、実際に使用されているバイアル瓶を模擬して粉体供給容器を作成している。実験では粉体供給容器底部と上部の供給空気速度を変化させて実験を行い、各条件での圧力と輸送量の測定を 40 秒間行った。

実験条件は、粉体の初期充てん量 M_{pi} と粉体供給容器上部の流動化空気速度 u_t は一定で、粉体供給容器底部の流動化空気速度 u_b を変化させた。測定した粉体供給容器と輸送管出口部の差圧は M_p と P_{pi} で表している。

Fig.3 にガラスビーズを輸送した場合の輸送量と圧力の時間変化を示す。ここで、 $u_t=24.9 \text{ mm/s}$, $u_b=12.5 \text{ mm/s}$, $t=36\sim 44 \text{ s}$ である。図より、輸送量は階段状に増加し、圧力も周期的に増減する傾向が確認される。この時の輸送管の可視化画像を Fig.4 に示す。Fig.4 (a)より、輸送開始時には輸送管内の粉体は長いプラグを形成して輸送される様子が確認できる。その後、Fig.4 (b)~(d)では、輸送管内で短いプラグを形成しながら水平輸送される傾向が確認された。この粉体流動によって輸送量は階段状に増加し、圧力も周期的に増減することが分かる。

Fig.5 に薬剤粉体を輸送した場合の可視化画像を示す。図のように、ガラスビーズと同様の粉体流動が確認され、適切な加圧流動化を行えば、付着性を有する薬剤粉体の輸送が可能であることが分かった。一方で、薬剤粉体の方がガラスビーズよりも付着性が高く、流動性が悪いために、本研究の実験範囲内では輸送量が減少する結果となったため、今後も更なる検討が必要であるといえる。

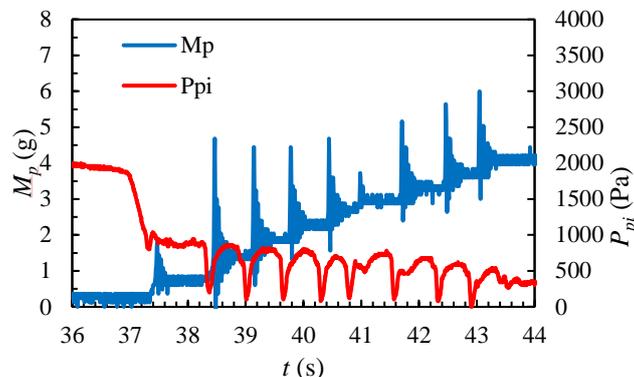


Fig.3 Time histories of the transported mass of powder and the differential air pressure between the top of discharge vessel and the pipeline exit ($u_t=24.9\text{mm/s}$, $u_b=12.5\text{mm/s}$, $t=36\sim 44\text{s}$)

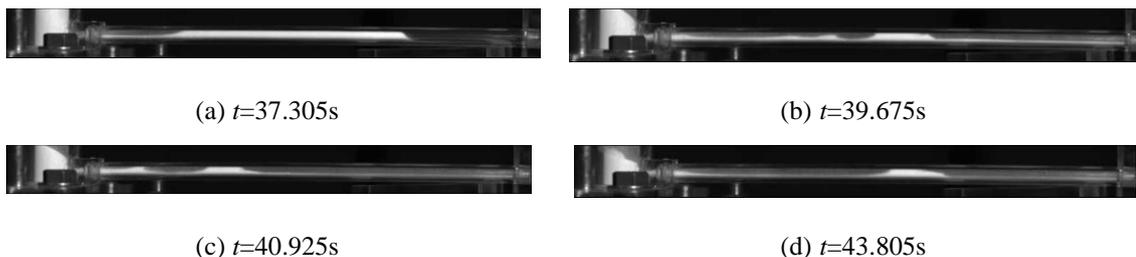


Fig.4 Snapshot of the glass beads powder flow inside horizontal acrylic pipeline ($u_t=24.9\text{mm/s}$, $u_b=12.5\text{mm/s}$)

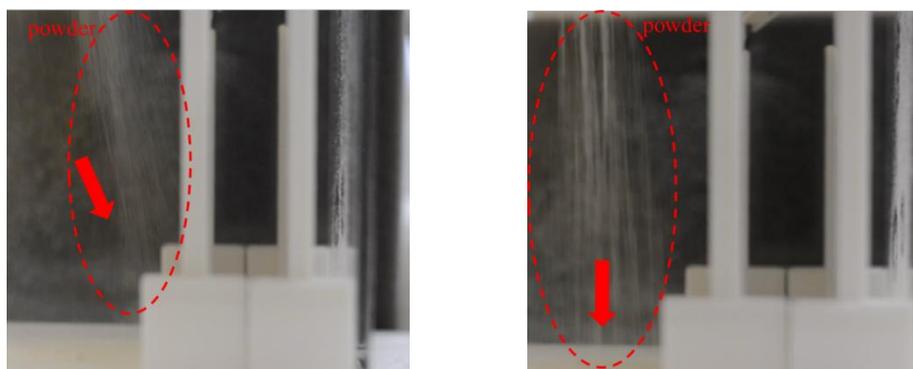


Fig.5 Snapshot of the pharmaceutical powder flow inside horizontal acrylic pipeline ($u_t=22.9\text{mm/s}$, $u_b=11.7\text{mm/s}$)

(4) 高電場による粉体輸送

Fig.6 に高電場中での薬剤粉体の挙動を示す。図の電極配置は、両図共に左(+), 右(-)である。また、(b)は電圧を印加しない 0kV である。図より、(a)は左の電極に引き寄せられており、(b)は自由落下している様子が確認できており、高電場に供給すると挙動に変化が現れることが分かる。これは、薬剤粉体が(-)に帯電しているため、(+)電極に引き寄せられる力を強く受けたと考えられる。このことから、薬剤粉体は(-)に帯電し、粉体が電極に近いほど帯電した際にその電極の影響を受けやすくなると考えられる。しかしながら、今回使用を想定している数十 μm の全ての粉体を高電界で発生するイオン風で輸送することは難しかった。このため、高電界で粉体を輸送する場合には、輸送可能な粒子径や量などの最適化を行い、輸送する必要があることが分かった。

また、コロナ放電によって発生するイオン風の風速は、電圧の大きさより電極間距離とコロナ放電の大きさが影響することが分かった。さらに、パルス電源製作において、巻数比 1:36 のトランスと負荷抵抗 $2\text{k}\Omega$ を介したことで、充電電圧の約 26 倍の出力電圧が発生したことを確認し、製作したパルス電源が正常に動作することが確認できた。



(a) Electrode : Left (+) Right (-) 15kV (b) Electrode : Left (+) Right (-) 0kV

Fig.6 Particle behavior in a high electric field

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 LOPEZ Alejandro, PEDROLLI Lorenzo, OGATA Koichiro
2. 発表標題 CFD DEM open source modelling of pneumatic conveying of fine powders
3. 学会等名 日本混相流学会 混相流シンポジウム2023 講演論文集, E0205
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Alejandro LOPEZ, Lorenzo PEDROLLI, Koichiro OGATA
2. 発表標題 CFD-DEM Simulation of the effect of cohesion in pneumatic conveying and powder discharge
3. 学会等名 Book of Abstract FORM@Iberia 2023, pp.22-23 (国際学会)
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
研究分担者	星 崇仁 (Hoshi Sujin) (10757892)	筑波大学・医学医療系・講師 (12102)	
研究分担者	上野 崇寿 (Ueno Takahisa) (30508867)	大分工業高等専門学校・電気電子工学科・准教授 (57501)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究 分 担 者	稲垣 歩 (Inagaki Ayumu) (50633400)	大分工業高等専門学校・機械工学科・准教授 (57501)	

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			
スペイン	University of Deusto			