微粉体の水平輸送におけるプラグ性状が 圧力損失に及ぼす影響

Effect of Plug Characteristics on Pressure Drop in Horizontal Conveyance of Fine Powder

上崎 勇也, 飯村 健次, 鈴木 道隆, 廣田 満昭

Yuya Kouzaki, Kenji Iimura, Michitaka Suzuki, Mitsuaki Hirota

Received 19 February 2002 ; Accepted 17 May 2002

The effects of powder plug characteristics in a horizontal pipe were investigated both numerically and experimentally. The results show that the pressure drop depends on the dynamic friction coefficient of powder as well as the plug characteristics. The correlation between the dynamic friction coefficient of powder and the plug characteristics revealed that the pressure drop should be estimated from the dynamic wall friction coefficient at a low plug velocity, whereas it should be estimated from the dynamic internal friction coefficient at a high plug velocity.

Keywords : Pneumatic conveyance, Plug, Dynamic friction coefficient, Pressure drop, Friction factor

1. 緒 言

粉体輸送は、各種粉体プロセス間の橋渡しとして重要な操作の一つである。中でも、高濃度低速輸送は粉塵の飛散や粒子の粉化が少なく、また所要動力も低減できるために広く用いられている¹⁻³⁾。

近年、プロセスラインの自動化や製品の高品質化が求められるようになり、そのため、粉体輸送時における輸送管内での粉体閉塞やコンタミなどの防止が非常に重要な課題となっている。これら粉体輸送時に生じる諸問題の解決法の一つに、輸送管内の粉体プラグを安定させる方法が考えられる。これまで、著者らは一軸偏心ネジポンプを粉体供給装置として用い、粉体の高濃度低速輸送実験を行い、粉体輸送時における圧力損失の推定法を確立⁴⁾してきた。しかし、粉体輸送時における圧力損失に直接関係していると考えられるプラグの性状に関する検討は行っていない。

そこで、本報告では、光センサーを用いて粉体輸送時のプラグの個数、長さおよび速度などを求め、それ

Fig. 1 Flow patterns of powder

らよりプラグの空間率や重量などのプラグ性状を算出した。その結果、粉体輸送時の圧力損失にプラグ性状が影響を及ぼしていることが確認されたので、ここに報告する。

2. 実験装置および方法

Fig. 1 は、粉体の空気輸送における管内粉体の流動様式を示したものである。一般に、粉体の空気輸送は低濃度高速輸送と高濃度低速輸送に大別される。低濃度高速輸送は Fig. 1 (a) に示すように、輸送管内に気流によって粒子を飛翔させる。気流速度は約

粉体工学会2001年度秋期研究発表会(2001年11月、大阪)にて発表
姫路工業大学工学部産業機械工学科

(〒671-2201 姫路市書写2167) TEL 0792-67-4842

Department of Chemical Engineering, Faculty of
Engineering, Himeji Institute of Technology

(2167 Shosha, Himeji 671-2201)

① Hopper ② Pipe ③ Air inlet ④ Motor ⑤ Load cell
⑥ Sensor ⑦ Progressive cavity pump
⑧ Pressure gauge ⑨ Differential pressure gauge

Fig. 2 Schematic diagram of apparatus

① Transmitter A ② Receiver A ③ Transmitter B
④ Receiver B ⑤ Transport pipe

Fig. 3 Arrangement of optical sensor

20m/s と高速であるため、粒子同士の衝突や粒子と管壁面との衝突により、粒子の粉化や輸送管の摩耗などが生じ、しばしば問題となる。それに対し、高濃度低速輸送は Fig. 1 (b) に示すように、管底部に滞留層が生じ、その上をプラグ状の粉体が流れる。流速は約 2m/s と低速であるため、粒子の粉化や輸送管の摩耗は低減できるが、滞留層が存在するため、輸送管内に粒子が残留する。しかし、Fig. 1 (c) に示すような安定したプラグを形成させることにより、粒子の粉化や輸送管摩耗がさらに少なく、粒子の残留量も減少させることができるものと期待される。

そこで本実験では、Fig. 1 (c) のような安定したプラグを形成するような場合のみについての実験を行い、その時の圧力損失とプラグ性状の関係について検討を行う。

実験装置の概略を Fig. 2 に示す。試料粉体を粉体ホッパー①より一軸偏心ネジポンプ⑦（兵神装備（株）製モノポンプ）を用いて輸送管内②に供給し、ポンプ出口付近に設けた空気穴③より 2 次空気を吹き込むことによって輸送実験を行った。定常輸送時の管内の

圧力を 2 箇所に取り付けた圧力計⑧で、粉体の積算重量をロードセル⑤で、固-気 2 相流の流量をオリフィス流量計⑨でそれぞれ測定した。また、光センサーの測定精度を確認するため、ビデオカメラを用いて輸送管内のプラグの流動状態を撮影し、画像からプラグの個数、長さおよび速度などを求めた。

光センサー⑥は Fig. 3 に示すように、光透過型のもを用い、発光側と受光側を一組とする。センサー 2 組を、それらの光軸が管の中心軸と一致する水平面上に設置する。発光側の光が受光側に到達するかどうかでプラグの有無を判断し、それによりプラグの個数、長さおよび速度を求めた。

試料粉体として、ケイ石粉 (Silica)、フライアッシュ (Flyash) および二種類の消石灰 (Slaked lime) A、B の計 4 種類を使用した。なお、消石灰 B は A を分級し、粒径分布幅を狭くしたものである。各試料の 50 % 粒子径と分布幅、粒子密度、粒子-壁面間動摩擦係数および粒子-粒子間動摩擦係数を Table 1 に示す。粒子-壁面間動摩擦係数（以下、壁面動摩擦係数と呼ぶ） μ_w 、粒子-粒子間動摩擦係数（以下、内部

Table 1 Properties of sample powder

Sample powder	50 % Particle diameter D_{50} (μm)	Particle density ρ_p (kg/m^3)	Diameter ratio D_{95}/D_5 (-)	Dynamic wall friction coefficient μ_w (-)	Dynamic internal friction coefficient μ_i (-)	Void fraction of loose packed bed ε_r (-)
Silica	4.4	2630	13.4	0.51	0.79	0.78
Flyash	8.0	2330	17.6	0.43	0.58	0.68
Slaked lime A	4.4	2330	53.1	0.47	0.76	0.82
Slaked lime B	4.6	2330	18.4	0.48	0.67	0.86

Table 2 Experimental conditions

Test No.	Sample powder	Pipe diameter D (m)	Plug velocity V_p (m/s)	Mass flow rate of powder Q (kg/s)	Loading ratio (-)
1	Silica	0.0116	0.85~2.5	0.034	110~350
2	Silica	0.0089	0.69~2.7	0.014	75~300
3	Silica	0.0156	0.75~2.1	0.072	150~500
4	Flyash	0.0089	0.70~1.5	0.012	130~300
5	Slaked lime A	0.0089	0.71~1.2	0.010	90~170
6	Slaked lime B	0.0106	0.66~1.6	0.020	55~150

動摩擦係数と呼ぶ) μ_i は、粉体輸送時における圧力損失を推定するための計算に用いた。動摩擦係数は粉体層のせん断試験から得られる限界状態線の勾配から求めているが、その測定法についてはすでに報告⁵⁾しているの、ここでは省く。また、試料の粒子径分布幅については、質量基準積算ふるい下 95 % 径と 5 % 径の比 D_{95}/D_5 で示している。

本実験では、粉体輸送時における輸送管内の流動状態の観察を容易にするため、輸送管として、長さ 1.6m のガラス管を用い、これを 2 個の圧力計の間に設置した。また、各試料における実験条件を Table 2 に示しているが、試料ごとに輸送管内径を変えることにより、いずれの試料を用いた場合においても、安定したプラグが形成されるような条件下で輸送実験を行った。

3. 実験結果および考察

3. 1 圧力損失の推定

著者らは前報⁴⁾で、粉体の水平管内高濃度低速輸送において、粉体の壁面動摩擦係数または内部動摩擦係数を用いた圧力損失係数の推定法について報告しているので、ここではその結果を示す。

圧力損失係数 λ およびフルード数 Fr を Eqs. (1), (2) のように定義すると、Eq. (3) が得られる。

$$\lambda = \frac{2D \cdot \Delta p}{l \cdot \rho_p (1 - \varepsilon) V_p^2} \quad (1)$$

$$Fr = \frac{V_p^2}{g \cdot D} \quad (2)$$

$$\frac{\lambda}{\mu} = \frac{4}{Fr} \quad (3)$$

ここで、輸送管内径を D (m)、圧力測定間の圧損を Δp (Pa)、圧力測定間距離を l (m)、粒子密度を

Fig. 4 Relation between λ/μ_i and Fr

ρ_p (kg/m³), 測定区間内粉体の空間率を ε (-), プラグ流速を V_p (m/s), 重力加速度を g (m/s²), 動摩擦係数を μ (-) とする。

Fig. 4 に、粉体輸送時の圧力損失係数と粉体の内部動摩擦係数の比 λ/μ_i 対フルード数 Fr の関係を示す。ただし、実測による圧損はプラグの通過による変動があるので、平均値を用いている。図中の実線は、単に粉体重量が輸送管壁面に作用すると考えた場合、破線は粉体圧が静水圧的に輸送管壁面に作用すると考えた場合の圧力損失係数の理論値を示している。ほとんどの実験結果が 2 本の理論線の間に位置しており、微粉体のプラグ輸送において、安定したプラグが形成された場合には、粉体の動摩擦係数を用いることによって圧力損失係数の推定が可能であることが分かる。しかし、フルード数の小さい領域における実験結果は実線に近いのに対し、フルード数が大きくなると破線に近づく傾向が認められ、実験値と理論値の勾配が異なっている。さらに、管内の粉体圧力については、実

Fig. 5 Effect of measuring method on V_p

線の場合は粉体重量のみ、破線の場合は静水圧的に作用するものと考えている。図からも分かるように、これら両者の間には2倍の差があるが、この点に関する考察はなされていない。したがって、前報⁴⁾で示したように、プラグ輸送における圧力損失係数は粉体の動摩擦係数を用いて推定は可能であるが、理論線は実験結果を正確には表現していないものと考えられる。

そこで、ここでは、光センサーを用いてプラグの個数、長さおよび速度を求め、それらよりプラグの空間率などのプラグ性状を算出し、圧力損失とプラグ性状の関係について検討を行う。

3.2 光センサーの測定精度

光センサーの測定精度を確認するため、ビデオカメラおよび光センサーを用いてプラグ輸送時におけるプラグの個数、長さおよび速度を求め、それらの結果の比較を行った。

Fig. 5は、それぞれの方法で求めたプラグ速度の結果を示したものである。光センサーとビデオカメラを用いた測定結果がほぼ一致しており、光センサーによる測定が可能であることが分かる。

ここには示していないが、プラグの個数および長さについても同様の結果が得られたので、以後は光センサーを用いて実験を行った。

3.3 プラグ性状と圧力損失の関係

輸送時の管内を通過する粉体プラグの通過頻度および平均長さを $n(1/s)$ 、 $L(m)$ 、粉体の質量流量を $Q(kg/s)$ 、輸送管断面積を $A(m^2)$ とすると、プラグ1個あたりのかさ密度 $\rho_b(kg/m^3)$ はEq. (4) で与えられる。

Fig. 6 Relation between λ and Fr

$$\rho_b = \frac{Q}{n \cdot L \cdot A} \quad (4)$$

また、プラグ1個あたりの空間率 $\varepsilon_p(-)$ はEq. (5) のようになる。

$$\varepsilon_p = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_p} \quad (5)$$

なお、圧力損失係数 λ とフルード数 Fr の関係は前報⁴⁾でも示したように、Eq. (3) で与えられる。

また、辻⁶⁾が示したように、管内粉体は管壁面に対して静水圧的に作用するものとして取り扱っている。

Fig. 6に、ケイ石粉を定量供給した場合のフルード数 Fr と圧力損失係数 λ の関係を示す。図中の直線はEq. (3) から求められる推定値を示しており、実線が壁面動摩擦係数、破線が内部動摩擦係数を用いた結果を表している。 Fr が小さい領域では、実験結果は壁

Fig. 7 Variation of ε_p with Fr

Fig. 8 Relation between λ and Fr

面動摩擦係数を用いた理論線によく一致している。しかし、 Fr がおよそ 20 よりも大きくなると、実験結果は壁面動摩擦係数を用いた理論線から外れ、内部動摩擦係数を用いた理論線に近づいていく傾向が認められる。

Fig. 7 は、フルード数 Fr (プラグ速度) がプラグ 1 個当たりの平均空間率 ε_p に及ぼす影響を示したものである。 Fr が小さい領域における ε_p は、 Fr が大きくなるにつれて減少している。そして、Fig. 6 において、実験結果が壁面動摩擦係数を用いた理論線から外れ始める Fr が 20 近辺において ε_p は極小となり、さらに Fr が大きくなると、逆に、 Fr の増加とともに ε_p は大きくなっている。なお、図中の実線はプラグ粉体のゆるみの空間率を表したものである。

他の試料を用いた場合のフルード数 Fr と圧力損失係数 λ の関係を Fig. 8 に示す。いずれの結果も、ケイ石粉の場合とほぼ同様の傾向が認められた。すなわち、 Fr が小さい領域においては壁面動摩擦係数を用いて求めた実線近傍に実験結果は集中している。しかし、 Fr が大きくなると実験結果は実線から外れていき、内部動摩擦係数を用いて求めた破線に合うようになる。

また、Figs. 6 および 8 に示した圧力損失係数 λ

は、粉体圧は静水圧的に管壁に作用しているものと考えて求めたものであるが、これらの理論線は実験結果を十分に説明している。したがって、安定したプラグ状態で粉体輸送が行われている場合、粉体圧は静水圧的に管壁に作用しているものと思われる。

Fig. 9 は、フルード数 Fr – プラグの空間率 ε_p の関係を示したものである。これらの結果も、ケイ石粉の場合とほぼ同様の傾向が認められた。すなわち、 ε_p が大きくなり始めるときの Fr に着目すると、Fig. 8 において実験結果が実線から外れ始めるときの Fr とほぼ同じ値になっている。

以上の結果より、 Fr が小さい領域においては、プラグ内部の粒子同士の相対運動はほとんど生じていない。しかし、 Fr が大きくなると、プラグ内部の粒子同士に相対運動が生じるために空間率が增大するものと考えられる。

このように、安定したプラグ状態で粉体輸送が行われていても、プラグの性状は低流速領域と高流速領域では異なっている。そのため、粉体輸送時の圧力損失はこのプラグの性状の影響を受ける。すなわち、 Fr の小さい領域ではプラグ内部での粒子の相対運動はほとんど生じないため、圧力損失係数は壁面動摩擦係数を用いて推定できる。しかし、 Fr が大きくなるにし

Fig. 9 Variation of ε_p with Fr

たがって、プラグ内部での粒子の相対運動によって粒子同士に摩擦が生じるため、壁面動摩擦係数を用いた理論線から外れる。そして、さらに Fr が大きくなると管底部に滞留層が生じ始めるため、内部動摩擦係数を用いた理論線と一致するようになるものと考えられる。

また、Fig. 9 において、 Fr の小さい領域におけるプラグの空間率が変化する様子は、試料によって異なっている。すなわち、ケイ石粉の場合、フルード数の小さい領域において空間率が減少する傾向が明確に現れている。それに対してフライアッシュの場合、そのような傾向はわずかで、それほど明確には認められない。この原因については、様々な因子が影響しているものと考えられ、本実験結果だけでは特定することはできなかった。しかし、今回用いた試料では、ケイ石粉が最も付着性が高く、消石灰、フライアッシュの順に付着性が小さくなっており、これもその一因と考えている。

5. 結 言

プラグ輸送におけるプラグ性状と圧力損失の関係を検討するために、光センサーを用いてプラグ性状を測定し、つぎのような結果を得た。

プラグ輸送時において、輸送管壁面に対する粉体圧は静水圧的に作用し、プラグ速度の小さい領域ではプラグー壁面間の摩擦が支配的となるため、圧力損失係数は壁面動摩擦係数を用いて推定できる。しかし、プラグ速度が大きくなると、プラグ内部での粒子同士の相対運動による摩擦が生じるため、壁面動摩擦係数を用いた理論線から外れ、さらにプラグ速度が大きくなり、管底部に滞留層が生じ始めると内部動摩擦係数を用いた理論線と一致するようになる。

〔謝辞〕本実験の遂行に当たり、一軸偏心ネジポンプを兵神装備株式会社から御提供頂きました。ここに記して謝意を表します。

Nomenclature

A : cross-sectional area of transport pipe	(m^2)	Δp : pressure drop	(Pa)
D_5 : 5 % particle diameter	(μm)	ε : average void fraction of powder bed in pipe	(-)
D_{50} : 50 % particle diameter	(μm)	ε_r : void fraction of loose packed bed	(-)
D_{95} : 95 % particle diameter	(μm)	ε_p : void fraction of plug	(-)
Fr : Froude number	(-)	λ : friction factor	(-)
g : acceleration of gravity	(m/s^2)	μ : dynamic friction coefficient	(-)
L : length of plug	(m)	μ_i : dynamic internal friction coefficient	(-)
l : distance between pressure gauges	(m)	μ_w : dynamic wall friction coefficient	(-)
n : frequency of plug	(s^{-1})	ρ_b : bulk density of plug	(kg/m^3)
Q : mass flow rate of powder	(kg/s)	ρ_p : particle density	(kg/m^3)
V_a : air velocity	(m/s)		
V_p : plug velocity	(m/s)		

References

- 1) Kano, T.: "Funryutai Kuukiyusou Souchi no Soyoyou Douryoku Teigen ni Tuiteno 2, 3 no Houkoku", *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **19**, 740 (1982)
- 2) Morikawa, Y.: "Teisoku Kounoudo Kuuki Yusou", *The Micromeritics. Japan*, **34**, 66 (1990)
- 3) Uchida, N.: "Kuuki Yusou System Sekkei", *Powder Sci. and Eng., Jappan*, **24**, 10, 44 (1992)
- 4) Hirota, M., T. Matumoto, M. Adomi, Y. Kiya and M. Suzuki: "The Effect of the Mechanical Properties of Powder on the Characteristics of Dense Phase Horizontal Conveyance of Powder", *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **34**, 394 (1997)
- 5) Hirota, M., T. Kobayashi, O. Sano and T. Oshima: "Expansion and Contraction Behavior of a Powder Bed in a Shear Process", *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **21**, 137 (1984)
- 6) Tsuji, H.: "Kuukiyusou no Kiso", p. 114, Youken-do (1984)