付着性粉体のプラグ状空気輸送

青木 隆一*・村田 博**
本間 宏・和田 英夫***

横浜国立大学工学部 化学工学科†

球形ストッパーを用いた付着性粉体のプラグ状空気輸送に関する実験研究を、試料粉体として小麦粉、ストッパーとしてピンポン玉を使用して行った。プラグと管壁面との間の摩擦応力 τ_w は、プラグ層高 H およびプラグ速度 U が小さいほど小さくなるという実験結果から、 H 、 U および τ_w に関する実験式を得た。また、上昇中のプラグにおける粉体圧の理論式とプラグ差圧の実測結果から、プラグの流動性の目安となる粉体応力比 k を求めた。さらに、定常揚送の可能な全範囲の実験データから、層高が小さく、また、輸送限界風速付近での低速輸送という条件で最も効率が高くなることが示された。

緒 言

粉粒体をプラグ状にして輸送するプラグ輸送は、従来の空気輸送方式に比べ、粒子の破碎・摩擦が少なく、消費動力も低い輸送方式として注目されているが²⁻⁶⁾、安定したプラグ輸送状態を得るためには、装置に特別な処置を施す必要があることと、その長所を発揮できる用途が制約されるために、一般的な輸送装置として広範囲に使用されるには至っていない。

著者らは前報¹⁾において、輸送試料に菜種を使用し、安定なプラグ流を実現させるために球形ストッパーを挿入する方法を提案し、プラグの流動特性に対する操作諸因子の影響について報告した。さらに、菜種のような粒体のプラグ輸送におけるプラグ差圧、プラグ速度および輸送効率の推算手順を示した。

本研究では、適用範囲を粒体から粉体へ拡張するために、試料として付着性粉体である小麦粉を選び、菜種の場合と同様にストッパーとしてピンポン玉をプラグ層下部に挿入する輸送方式で、安定したプラグを形成し、その流動特性および定常運転状態における操作諸因子の影響を調べた。

また、この装置を使用して運転計画を立てる場合に必要となる輸送条件および効率の推算手順を示した。

1. 実験装置および実験方法

1・1 単一プラグ輸送実験装置

Fig. 1 に単一プラグ輸送実験装置の概略を示す。輸送管は内径 $D_T=3.88$ cm、長さ(揚程) $L=200$ cm のアクリル管を使用した。輸送試料としては付着性粉体である小麦粉 ($\gamma_p=1.46$ gf/cm³) を用い、これを輸送管入口部に充填して真空ポンプで減圧し、垂直上方に輸送した****。この時、安定したプラグ流を実現するためプラグ層下部に球形ストッパーとしてピンポン玉 ($W_B=2.55$ gf, $D_B=0.182$ cm) を挿入した。輸送管上部には静圧タップおよび1組のフォトセンサーを設け、定常状態で上昇するプラグの差圧 Δp および速度 U を測定した。また、試料回収ホッパーと真空ポンプとの間に圧力調節バルブおよびサージタンクを設け、輸送管圧力の調節と真空ポンプによる圧力振動を防いだ。

1・2 連続定常輸送実験装置

連続定常輸送装置は単一プラグ輸送装置に試料供給槽およびストッパー供給管を取り付け、試料供給槽の上下振動と球形ストッパーであるピンポン玉の挿入によって連続的なプラグ輸送を実現するために試作したものである。この装置は Fig. 2 に示すように試料供給部、輸送管およびセパレータから成り、真空ポンプによる吸引輸送方式である。なお、試料には単一プラグ輸送で用いた小麦粉を使用した。偏心カムおよび無段変速機によって試料供給部に全振幅 1 cm、振動数 ν (本実験では $\nu=150, 250, 350$ min⁻¹ について行った) の上下振動を与えてピンポン玉をストッパー供給管から輸送管へ挿入した。なお、ピンポン玉はストッパー供給管を通して輸送管内へ流れる空気の吸引作用と試料供給槽の振動によって自然に挿入された。輸送管には単一プラグ輸送装置と同じも

† 〒240 横浜市保土ヶ谷区常盤台 156

* 東京大学工学部 化学工学科

** 日清製粉(株)

*** 第一製薬(株)

**** プラグ輸送には実用上は圧送式が主として用いられている。吸引式と圧送式とはプラグ流れの状態が厳密には同じでないが、基礎的な力学解析は同じように取り扱うことができる。したがってストッパーの供給に都合のよい吸引方式で実験を行った。この結果を圧送式の実機に適用するにあたっては減圧下のプラグの挙動と異なる点があることに留意する必要がある。

Fig. 1 Experimental apparatus for measuring pressure drop across a single plug

のを用い、フォトセンサー、静圧タップを設けてプラグ速度、プラグ差圧および輸送管の全圧損を測定した。セバレータは直列に継がれた三つのホッパーから成り、真中のホッパーによって輸送量を測定した。

2. 単一プラグの垂直上昇運動

Fig. 3 に示すような単一プラグの垂直上昇運動に関しては、力の釣り合いから次式が成立する。

$$\frac{\pi}{4g} D_T^2 \gamma_B H_S \frac{dU_s}{dt} = \frac{\pi}{4} D_T^2 \Delta p_s - \frac{\pi}{4} D_T^2 \gamma_B' H_S - \tau_w \pi D_T H_s - \tau_{wa} \pi D_T (H_{12} - H_s)$$

ただし、

$$\gamma_B' = \gamma_B - \frac{\Delta p_M}{H_s} \quad (1)$$

ここで Δp_M は空気がプラグ層内を透過することによる圧降下を表し、次式のように Ergun の式で表される。

$$\frac{\Delta p_M g_c}{H_s} = 1.75 \frac{1-\epsilon}{\epsilon^3} \frac{\rho_f}{D_p} (U_f - U_s)^2 + 150 \frac{(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3} \frac{\mu_f}{D_p^2} (U_f - U_s) \quad (2)$$

しかしながら小麦粉のような粉体ではプラグ層内の空気の透過が無視できるほど小さいので $U_f = U_s$ と近似でき、 $\Delta p_M = 0$ となる。したがって Eq. (1) におけるプラグのみかけ上のかさ比重量 γ_B' は γ_B に等しくなる。また、プラグが定常上昇運動している場合には $dU_s/dt = 0$ になり、さらに空気と管壁との摩擦を無視すればプラグ差圧を表す式は次のようになる。

$$\Delta p_s = \left(\gamma_B + \frac{4\tau_w}{D_T} \right) H_s \quad (3)$$

Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

Fig. 3 Motion of single plug

このプラグ差圧は Figs. 4, 5 に示すように層高の小さな低速度のプラグほど小さくなり、その結果 Eq. (3) におけるプラグと輸送管壁面との摩擦応力 τ_w は Figs. 6, 7 のようになる。これらの図から τ_w は層高の小さな低速度のプラグほど小さくなるのがわかる。プラグの粉体圧は層高の増加と共に指数曲線状に増加する (Eq. (7)) から τ_w が層高の小さいほど小さいのは当然であるが、プラグ速度と τ_w との関係は実験式によらざるをえない。すなわち、層高およびかさ比重量のほぼ等しいプラグでは τ_w と U_s との関係は次式で近似できる。

$$\tau_w = \alpha U_s + \beta \quad (4)$$

したがって、Eqs. (3), (4) よりプラグ速度 U_s を表す式が得られる。

$$U_s = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{D_T \Delta p_s}{4H_s} - \frac{D_T \gamma_B}{4} - \beta \right) \quad (5)$$

ただし、定数 α , β の値は実験によって定める必要がある、本実験では Table 1 に示すような値となる。

プラグを鉛直輸送する場合、輸送効率 η はプラグが行う仕事量とそれに費した動力との比として次式のように

Fig. 4 Relationship between Δp_s and H_s

Fig. 5 Relationship between Δp_s and U_s

Table 1 Values of α and β

H_s [cm]	6~7	11~12	19~20
Δp_s [gf/cm²]	4~10	10~26	35~53
α [—]	2.86×10^{-3}	4.73×10^{-3}	4.80×10^{-3}
β [—]	-0.553	-1.018	-0.921

表される。

$$\eta = \frac{G_p L}{\Delta p Q_f} = \frac{n H_s \gamma_B U_s}{\Delta p U_f} \quad (6)$$

ここに n は輸送管の長さ L に存在するプラグ個数であり、 Δp は輸送管全体の圧損を表す。したがって単一プラグの場合には $n=1$ 、 $\Delta p=\Delta p_s$ となる。Fig. 8 は単一プラグの輸送効率を示すものであるが、この図から輸送効率は層高が小さく低速度で上昇するプラグほど大きくなることからわかる。

Fig. 6 Relationship between τ_w and H_s

Fig. 7 Relationship between τ_w and U_s

3. 上昇プラグにおける粉体圧

付着性粉体の上昇プラグ層内に働く力は Fig. 9 のようになり、これをもとにプラグ層の深さ h における粉体圧 p を求めると次式のようになる。

$$\begin{aligned} h < h_c; \quad p &= \left(\gamma_B' + \frac{4\mu_w \sigma_T}{D_T} \right) h \\ h \geq h_c; \quad p &= \left\{ \left(1 - \frac{1}{k} \right) \sigma_T + \frac{D_T \gamma_B'}{4\mu_w k} \right\} \\ &\quad \times \left\{ \exp \left(\frac{4\mu_w k (h - h_c)}{D_T} \right) - 1 \right\} \\ &\quad + p_c \exp \left(\frac{4\mu_w k (h - h_c)}{D_T} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

ただし、

$$p_c = \sigma_T \left(\frac{1}{k} - 1 \right) \quad h_c = \frac{\sigma_T (1/k - 1)}{\gamma_B + 4\mu_w \sigma_T / D_T}$$

ここに γ_B' は前述のように γ_B に等しくなる。この式の h にプラグ層高 H_s を代入すると Eq. (7) で示される粉体圧 p はプラグの底圧を表すことになる。一方、Eq. (3) で表されるプラグ差圧は定常上昇時におけるプラグの背

Fig. 8 Conveying efficiency of single plug

圧を表している。したがって定常上昇時においては Eq. (7) で表されるプラグの底圧と Eq. (3) で表されるプラグ差圧とは等しくなる。このことから μ_w , σ_T , k の値が既知であれば Eq. (7) を用いて定常上昇時のプラグ差圧を知ることができる。そこで、傾斜板法によって μ_w , σ_T を求め、これらの値はプラグの層高、速度によらず一定値を示すものと仮定して、プラグ層内の粉体応力比 k を算出すると、Fig. 10 のようになる。この図からわかるように k の値は層高、プラグ速度によって異なり、本実験の範囲では次のような実験式で表すことができる。

$$\left. \begin{aligned} U_s &= 340 \sim 370 \text{ cm/s}; k = 0.68 \left(\frac{H_s}{D_T} \right)^{-0.67} \\ U_s &= 430 \sim 460 \text{ cm/s}; k = 0.99 \left(\frac{H_s}{D_T} \right)^{-0.75} \\ U_s &= 540 \sim 570 \text{ cm/s}; k = 1.33 \left(\frac{H_s}{D_T} \right)^{-0.95} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

(ただし、 $\gamma_B = 0.63 \sim 0.67 \text{ gf/cm}^3$)

粉体応力比 k は流体の場合は 1、剛体の場合は 0 と考えられるから、プラグはみかけ上は層高が小さいほど、また、プラグ速度が大きいくほど流体的な挙動を示すといえることができる。しかしながら、Eq. (8) は μ_w , σ_T を一定値と考えた場合に成立する式であって、実際には μ_w , σ_T の値も層高やプラグ速度によって変化する可能性があるため、今後さらに検討の必要がある。

4. 連続定常プラグ流れ

本実験で試作し使用した連続定常輸送実験装置の最も

* 限界風速が 50 cm/s 付近というのはこの装置における小麦粉の値であり、参考にはなるが一般性のある値ではないと考えられる。プラグ層の輸送速度（風速と等しい）は理論的にはプラグ差圧と壁面摩擦抵抗が釣り合う条件から決まるが、実際には τ_w に関する因子が複雑で、通常の空気輸送における saltation velocity に相当する関係式は得られていない。本実験装置では 50 cm/s 以下の風速では空気はストッパー供給管から粒子層を吹き抜け、揚送管にストッパーが供給されないという状態のためプラグは形成されず、粉体はまったく輸送されなかった。

Fig. 9 Pressure balance in particle bed of a plug

Fig. 10 Relationship between k and H_s/D_T

大きな特徴は、試料供給槽の上下振動と吸引流の作用で連続的に挿入された球形ストッパーによって安定したプラグが形成されていることである。Figs. 11~14 は Fig. 2 で示される連続輸送実験装置から得られた諸特性を振動数 ν 、フルード数 $Fr = U_f^2/gD_T$ についてまとめたものである。振動数の影響については前報¹⁾において定性的な考察を行ったが本報でもその傾向は同じで、 ν がある程度大きくなると輸送量、プラグ頻度、プラグ層高は一定になった。なお、本実験装置における輸送限界風速は 50 cm/s 付近であり、これ以下の風速ではプラグが形成されなかった*。

また、揚送管における圧損 Δp_T は付加圧力損失係数を λ として

$$\Delta p_T = \Delta p_f + \lambda \frac{L}{D_T} \frac{\gamma_f}{2g} U_f^2 m \quad (9)$$

で表される。ここで、 Δp_f は気流単相流の圧力損失、 m は混合比を表す。なお、式中の λ はプラグ層高 H_s 、混合比 m およびフルード数 Fr に関係すると考えられるが、本実験の範囲では Fig. 15 に示すように H_s , m の影響は見られず、フルード数だけの関数として次のような実験式で表される。

$$\lambda = 2.77 Fr^{-1.10} \quad (10)$$

以上の測定結果をもとに、本実験装置におけるプラグ揚送の運転計画は次のような順序で行うことができる。

Fig. 11 Relationship between G_p and Fr

Fig. 13 Relationship between m and Fr

Fig. 12 Relationship between H_s and Fr

Fig. 14 Relationship between f and Fr

Fig. 15 Relationship between λ and Fr

- 1) 輸送量 G_p , 振動数 ν , 管径 D_T , 揚送管長さ L の設定

本装置では, $G_p=5\sim30$ gf/s, $\nu=150, 250, 350$ min $^{-1}$, $D_T=3.88$ cm, $L=200$ cm である.

- 2) 風速 U_f , プラグ層高 H_s , プラグ速度 U_s の決定

Fig. 11 より U_f が, Fig. 12 より H_s が求められる。また, 本実験では $U_s=U_f$ と近似できる。

- 3) プラグ生成頻度 f , 揚送管に存在するプラグ個数 n , プラグとプラグとの距離 (ピッチ) l の算出
Eqs. (11), (12), (13) よりそれぞれ f, n, l が求められる。

$$f = \frac{4G_p}{\pi D_T^2 H_s \gamma_B} \quad (11)$$

ただし, γ_B は実験により決定する。

$$n = \frac{f \cdot L}{U_s} \quad (12)$$

$$l = \frac{U_s}{f} \quad (13)$$

- 4) プラグによる揚送管の圧損 Δp_T の算出

Eqs. (9), (10) より Δp_T が求められる。なお, 本実験装置の場合, Eq. (9) 中の Δp_f は無視しうる。

- 5) プラグ 1 個あたりの圧損 Δp_s の算出
次式より求められる。

$$\Delta p_s = \frac{1}{n} (\Delta p_T - \Delta p_f) \quad (14)$$

- 6) 吸引部（輸送管入口部）の圧損 Δp_N の算出
吸引部の圧損は次式のような実験式から求められる。

$$\Delta p_N = 1.72 \times 10^4 \frac{\gamma_f}{2g} U_f^2 Fr^{-0.28} \quad (15)$$

- 7) 輸送管の全圧損 Δp の算出
全圧損は次式のように Δp_T と Δp_N の和として表される。

$$\Delta p = \Delta p_T + \Delta p_N \quad (16)$$

- 8) 輸送効率 η の算出
輸送効率は Eq. (6) から求められる。

この手順にしたがってフルード数 Fr に対する輸送効率を求めると Fig. 16 の曲線になり、実測値と比較的よく一致する。なお、この図が示すように連続輸送における輸送効率はプラグ 1 個あたりの効率 (Fig. 6 参照) に比べかなり小さな値になるが、これは輸送管の全圧損 Δp のうちで吸引部の圧損がかなり大きな割合を占めるためである。

結 言

本研究で用いた小麦粉のような微粉体のプラグでは粒子層内を空気がほとんど透過しないため、その推進力はプラグの背圧である空気圧力となる。したがって、その流動特性には粒体の場合に比べて多少の相異が見られ、以下に示すような結論を得た。

- 1) 定常状態で上昇する単一プラグの輸送効率は、層高が小さく低速度で移動するプラグほど高くなる。
- 2) 同一層高のプラグの場合、 τ_w は U_s と Eq. (4) に示すような直線関係で近似でき、これを Eq. (3) に代入することによりプラグ速度に関する Eq. (5) を得る。
- 3) 付着性粉体の単一プラグを揚送するのに必要な空気圧力は Eq. (8) から求められ、式中の k の値はプラグ速度、プラグ層高によって変化する。
- 4) 連続定常輸送に関しては菜種の場合と同様に輸送限界風速付近で効率が最も高くなる。また供給部の振動数は 250 1/min 以上では輸送状態に変化がなくなり、この状態がそれ以下の頻度での輸送状態よりも効率が高い。

Nomenclature

D_p	= particle diameter	[cm]
D_T	= diameter of transport pipe	[cm]
Fr	= Froude number ($U_f^2/g \cdot D_T$)	[—]
f	= frequency of plug formation	[s ⁻¹]
G_p	= delivery rate of particles	[gf/s]
H_s	= height of particle bed of a plug	[cm]

Fig. 16 Relationship between η and Fr

k	= ratio of horizontal to vertical pressure in a plug	[—]
L	= length of transport pipe	[cm]
l	= pitch	[cm]
m	= mixing ratio	[—]
n	= number of plugs existing in transport pipe	[—]
p	= pressure in particle bed of a plug	[gf/cm ²]
Δp	= total pressure drop across transport pipe	[gf/cm ²]
p_c	= unconfined yield stress of a plug	[gf/cm ²]
Δp_f	= pressure drop across transport pipe by air	[gf/cm ²]
Δp_M	= pressure drop due to permeation of air through a plug	[gf/cm ²]
Δp_N	= pressure drop at inlet of transport pipe	[gf/cm ²]
Δp_s	= pressure drop across a plug	[gf/cm ²]
Δp_T	= pressure drop across transport pipe	[gf/cm ²]
Q_f	= volumetric flow rate of air	[cm ³ /s]
U_f	= air velocity	[cm/s]
U_s	= plug velocity	[cm/s]
W_B	= weight of spherical stopper	[gf]
γ_B	= specific weight of plug	[gf/cm ³]
γ_B'	= apparent specific weight of plug	[gf/cm ³]
γ_f	= specific weight of air	[gf/cm ³]
γ_p	= specific weight of particle	[gf/cm ³]
ε	= void fraction of particle bed	[—]
η	= conveying efficiency in continuous transport	[—]
η_s	= conveying efficiency of single plug	[—]
λ	= additional pressure drop coefficient in continuous transport	[—]
μ_f	= viscosity of air	[g/cm · s]
μ_w	= coefficient of friction between a plug and pipe wall	[—]
ν	= frequency of feeder	[min ⁻¹]
ρ_f	= density of air	[g/cm ³]
σ_T	= tensile strength of plug	[gf/cm ²]

τ_w = friction stress between a plug and pipe wall [gf/cm²]
 τ_{wa} = friction stress between air and pipe wall [gf/cm²]

Literature cited

- 1) Aoki, R., F. Kamiya, H. Murata and H. Homma: *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, 5, 623 (1979)

- 2) Kano, T., F. Takeuchi, H. Sugiyama and E. Yamazaki: *ibid.*, 6, 274 (1980)
 3) Lippert, A.: *Chem. Ing. Techn.*, 38, 350 (1966)
 4) Morikawa, T.: "Ryutai-Kotai Nisoryu", p. 173, Nikkan Kogyo Shinbunsha (1979)
 5) Jotaki, T.: "Funryutai no Kūkiyuso", p. 267, Nikkan Kogyo Shinbunsha (1974)

(1980年4月10日受理; 化学工学協会第45年会(大阪, 1980年4月)にて一部発表)

Plug-Type Pneumatic Conveying of Cohesive Powder

Ryuichi Aoki*, Hiroshi Murata**, Hiroshi Homma
 and Hideo Wada***

Dept. of Chem. Eng., Yokohama National Univ., Yokohama 240

Experimental study concerning plug-type pneumatic conveying of cohesive powder with spherical stoppers has been made using flour as material powder and table tennis balls as stoppers.

The experimental observations that friction stress τ_w between plug and pipe wall decreased with decreasing plug length H_s and plug velocity U_s led to experimental equations correlating H_s , U_s and τ_w .

Stress ratio k , which characterizes the flow property of plug, is calculated based on theoretical consideration on the powder pressure in a moving bed and measured pressure difference across the plug.

From the data covering the whole range of possible steady flow, it is concluded that efficiency is highest where the plug length is as short as possible and the air speed is as close as possible to the critical conveying velocity.

* Dept. of Chem. Eng., Univ. of Tokyo

** Nissin Seifun Co., Ltd.

*** Daiichi Seiyaku Co., Ltd.