水平管空気輸送における粒子と管壁の衝突について*

On the Collision of Particles against the Pipe Wall in Horizontal Pneumatic Conveyance

櫛田 昭** 内海 良治**
Akira Kushida Ryoji Utsumi

1. まえがき

粉粒体の空気輸送において、輸送物質の破砕や摩耗した管壁成分の混入などを嫌うような物質、たとえば薬品、食料品などは、できるだけ管壁との衝突が少ないような条件で輸送することが望ましい。空気輸送中の粒子が管壁に衝突する現象については森・菅沼¹⁾および松本・斎藤²⁾が管壁面における粒子の反発現象を解析して報告しているが、管壁との衝突率と圧力損失係数との関係については報告されていないようである。そこで著者らは輸送の最適条件を見出すための研究の一環として、切り欠きを設けた鋼管製の水平輸送管にけい砂とガラス球を輸送し、もし、切り欠きがなければ管壁と衝突するはずの粒子を取り出し、輸送条件と粒子の衝突率および圧力損失係数との関係を調べたので報告する。

2. 実験方法

Fig. 1は輸送管の終端近くに取り付けた密閉容器の構造を示したもので、容器中の管の側面に内径 d の半分す

Fig. 1 密閉容器の詳細

Fig. 2 実験装置の概略

Table 1 試料の物性

試料	真比重量 (Kg/m ³)	d_{p50} (μm)
6号けい砂	2.63×10^3	220
ガラス球 706 K	2.52×10^3	280
〃 503 K	〃	1,700

Fig. 3 試料の粒度分布

昭和50年6月28日受理
* 第四回粉体に関する討論会にて発表 (昭和41年10月19日 名古屋市教育館)
** 名古屋工業技術試験所 (〒462 名古屋市北区平手町1)
TEL 052-911-2111

Table 2 試料の輸送量範囲

v (m/sec)	6 号 け い 砂		ガ ラ ス 球 706 K		ガ ラ ス 球 503 K	
	最 小 輸 送 量 (Kg/min)	最 大 輸 送 量 (Kg/min)	最 小 輸 送 量 (Kg/min)	最 大 輸 送 量 (Kg/min)	最 小 輸 送 量 (Kg/min)	最 大 輸 送 量 (Kg/min)
25.47	—	—	0.0288	0.1134	0.0474	0.2760
22.30	0.0105	0.1934	—	—	—	—
17.90	0.0117	0.5046	0.0582	0.3828	0.0454	0.2334
12.60	0.0119	0.4200	0.0422	0.4124	0.0470	0.2957
8.88	0.0109	0.4200	0.0384	0.4020	0.0622	0.2240
6.43	0.0126	0.4084	0.0294	0.4798	—	—

なわち $d/2$ の深さで長さが 10mm の切り欠きが設けてある。このような管で粒子を輸送する場合、管壁に対する粒子の衝突状態は切り欠きのない場合に比べて多少異なることが考えられるが、切り欠きの長さが短いのでその変化の程度は無視できるものと仮定する。切り欠き部の下部に設けた受箱は密閉構造で、空気は洩れないようにしてある。Fig. 2 に概略を示す実験装置において、試料を常に上部ホッパー中の一定の高さの範囲内にあるように絶えず補充し、次いで電磁供給器（神鋼シントロン F-00）によって下部ホッパーを経て内径 13.6mm の鋼管製水平輸送管にほぼ定量的に供給して、ここで空気と混合させ長さ 4156mm の輸送管を経てから測定区間に流す。ここには Fig. 1 に示した切り欠きが設けてあり、ここからとび出た粒子を受箱に受ける。測定区間を通過した粒子は捕集器、サイクロンおよびバグフィルタによって捕集し、オリフィスを通過した空気をターボブロアによって排出する。

測定区間において、粒子は定常輸送状態にあることを確認するために、輸送管に圧力測定口を 9 個設け、マンオメータによって圧力損失の勾配を測定した。オリフィスは管内径が 52.6mm で開口比が 0.1056 の標準オリフィスを使用し、その差圧はマンオメータにより測定した。ターボブロアは片側吸込 4 段圧縮型の最大吸引圧力 -800mm Aq、送風量 15m³/min のものを使用した。試料としては Table 1, Fig. 3 に示すような物性および粒度分布をもつ 6 号けい砂（愛知県坂下産）およびガラス球（東芝製）を用いた。

試料の供給量すなわち輸送量は電磁供給器の電圧を変えることにより、また空気流量はブロア用モータの回転数を変えることによって変化させた。Table 2 に試料の輸送量、空気の平均速度などの実験値を示す。

3. 実験結果と考察

3.1 衝突率 η

単位時間当たりの粉粒体の輸送量を G 、輸送管の内径

を d とすれば、輸送管の単位断面積当たりの粉粒体の平均輸送量は $4G/(\pi d^2)$ で表わされる。一方、管の側壁に設けた長さ l_1 、深さ $d/2$ の切り欠きから取り出した粒子の単位時間当たりの量を W_1 とすれば、切り欠きの単位壁面積当たりの捕集量は $W_1/(\pi d l_1/2)$ となり、これは輸送管壁の単位面積当たりの衝突量に等しいと仮定できる。ここで両者の比をとり仮に衝突率と名付け、これを η と表わすことにする。すなわち、

$$\eta = \frac{\text{輸送管壁の単位面積当たりの衝突量}}{\text{輸送管の単位断面積当たりの輸送量}} \\ = \frac{d}{2l_1} \frac{W_1}{G} \quad \dots\dots(1)$$

である。本実験では $d=13.6\text{mm}$ 、 $l_1=10\text{mm}$ であるから

$$\eta = 0.68 \frac{W_1}{G} \quad \dots\dots(2)$$

で表わされる。

3.2 付加圧力損失係数 λ_s

水平直管によって粉粒体を空気輸送する場合、長さ l の定常輸送区間の全圧力損失 ΔP を空気と管壁間の摩擦による損失 ΔP_a と粉粒体による付加損失 ΔP_s との和と考え、

$$\Delta P = \Delta P_a + \Delta P_s \quad \dots\dots(3)$$

とおく。ここで Fanning の式にならって各項を次のように表わすことにする。

$$\Delta P = \lambda \frac{l}{d} \frac{\bar{v}}{2g} v^2 \quad \dots\dots(4)$$

$$\Delta P_a = \lambda_a \frac{l}{d} \frac{\bar{v}}{2g} v^2 \quad \dots\dots(5)$$

Fig. 4 全圧力損失の一例

$$\Delta P_s = \lambda_s \frac{l}{d} \frac{\gamma}{2g} v^2 \quad \dots\dots(6)$$

ここで λ , λ_a , λ_s はそれぞれ全圧力損失係数, 空気と管壁間の摩擦による圧力損失係数, 粉粒体による付加圧力損失係数である。

長さ l の定常輸送区間における圧力損失 ΔP と ΔP_a を実験によって測定し, (3), (6)式からそれぞれの場合についての λ_s の値を求めることができる。

3.3 結果と考察

実験は輸送管中における粒子相互の衝突があまり多くならないように低混合比で行なった。Fig. 4は輸送管に9個の圧力測定口を設けて測定した全圧力損失の一例を示したものである。この図から空気速度が低速の場合も高速の場合も約3000mmの距離において圧力損失の増加

率はほぼ一定となり, 定常輸送状態に達していることがわかる。このことから, 切り欠きの上流側の長さ500mmの区間における ΔP , ΔP_a を測定して λ_s を求めた。

Fig. 5(a)~(c)は G と η との関係を示したもので, G の増加にしたがって η は最初は増加し, 極大値を過ぎてから次第に減少している。また, けい砂の場合は空気速度 v の増加にしたがって η は増加するが, ガラス球の場合は v が12.60m/secのときりがもっとも大きい。

Fig. 6(a), (b)は混合比 m と η との関係を示したもので, m の増加にしたがって η は最初は急激に増加し, 極大値を過ぎてから減少して次第に一定値に漸近している。Fig. 7(a), (b)は η と λ_s との関係を示したものの

Fig. 5 (c) G と η の関係

Fig. 6 (a) m と η の関係

Fig. 5 (b) G と η の関係

Fig. 6 (b) m と η の関係

Fig. 7 (a) η と λ_s の関係

Fig. 7 (b) η と λ_s の関係

Table 3 (7)式の a , b の値

試料	a	b	λ_s の範囲
6号けい砂	0.1422	3.684	0.01 ~ 0.10
ガラス球 706 K	0.1788	3.678	0.007 ~ 0.07

で、実験値は多少ばらついているが、 λ_s のある範囲内において両者の関係はほぼ直線で表わされる。そこで

$$\lambda_s = a - b\eta \quad \dots\dots(7)$$

とおくと、 a 、 b の値は Table 3 のようになる。 a は輸送物質や輸送管径などの実験条件によって決まる定数と思われる。これに対して b は本実験条件内では輸送物質の種類にかかわらずほぼ等しい値を示している。

なお、ガラス球 706K と 6号けい砂とでは d_{p50} があまり変わらないのに Fig. 5, 6 における G (または m) と η の関係がかなり異なるのは、両者の粒子形状と反発性が異なるためと思われる。Fig. 7 によると λ_s が 0 に近いところ、すなわち輸送量が少なく粒子濃度も薄いときは、 η が増加するにしたがい λ_s も次第に増加しているので、管壁と衝突する粒子が λ_s の増加に非常に影響していることがわかる。しかし、極大値をすぎると η は次第に減少して(7)式の関係が成立つようになる。この関係から、輸送量が增大して λ_s が増加しても粒子相互の衝突によって、管壁と衝突する粒子の割合はかえって減少することが考えられ、 λ_s の増加に関係するのは粒子相互および粒子と空気間の相互作用などによる損失であると思われるが、これについてはさらに検討が必要である。

4. ま と め

空気輸送の最適条件を見出すための研究の一環として 6号けい砂とガラス球 706K, 503K を水平管で輸送し、輸送管の終端近くの側面に切り欠きを設けておいて管壁と衝突すべき粒子を取り出し、粒子の輸送量および混合比と壁面への衝突率、粒子による付加圧力損失係数などの関係を調べた。これによって、輸送量または混合比の増加にしたがって衝突率は最初は上昇し、極大値を過ぎてから次第に減少することを確かめた。また、付加圧力損失係数のある範囲内においては衝突率と付加圧力損失係数の間にはほぼ直線関係が成立つことがわかった。

記 号

a	: (7)式の係数	[—]
b	: (7)式の係数	[—]
d	: 輸送管の内径	[m]
d_{p50}	: ふるい上50%の粒子径	[μ m]
G	: 試料の輸送量	[Kg/sec]
g	: 重力の加速度	[m/sec ²]
l	: 圧力損失測定区間の長さ	[m]
l_1	: 衝突率測定用切り欠きの長さ	[m]
m	: 混合比 ($=G/(Qr)$)	[—]
Q	: 空気流量	[m ³ /sec]

号

v	: 空気の平均速度 ($=4Q/(\pi d^2)$)	[m/sec]
W_1	: 切り欠きから取出した粒子の量	[Kg/sec]
ΔP	: 全圧力損失	[Kg/m ²]
ΔP_a	: 空気だけを流したときの圧力損失	[Kg/m ²]
ΔP_s	: 粉粒体による付加圧力損失 ($=\Delta P - \Delta P_a$)	[Kg/m ²]
λ	: 全圧力損失係数 ($=\Delta P / \left(\frac{l}{d} - \frac{\gamma}{2g} v^2 \right)$)	[—]
λ_a	: 空気だけを流したときの圧力損失係数 ($=\Delta P_a / \left(\frac{l}{d} - \frac{\gamma}{2g} v^2 \right)$)	[—]

λ_s	: 粉粒体による付加圧力損失係数	γ	: 空気の比重量	[Kg/m ³]
	$\left(= \Delta P_s / \left(\frac{l}{d} - \frac{\gamma}{2g} v^2 \right) \right)$	η	: 衝突率 ($= d W_1 / (2 l_1 G)$)	[-]

引用文献

- 1) 森芳郎, 菅沼彰: 化学工学, **29**, 615 (1965) *Japan*, **3**, 83 (1970) ; **3**, 223 (1970)
- 2) Matsumoto, S. and Saito, S.: *J. Chem. Eng.*

Authors' Abstract

On the Collision of Particles against the Pipe Wall in Horizontal Pneumatic Conveyance

by

Akira KUSHIDA and Ryoji UTSUMI

(Government Industrial Research Institute, Nagoya)

Using quartz sands and glass beads as solid particles, the relation among η (collision ratio of particles against pipe wall), G (particles flow rate), and λ_s (additional pressure loss coefficient by particles) was examined.

Results obtained are as follows;

- (1) With increasing G , η increased at first to maximum value, and then decreased.
- (2) Following linear relationship between η and λ_s was obtained in some range of λ_s .

$$\lambda_s = a - b\eta$$