

# 固体粒子および中空軽量体の空気輸送

大阪大学工学部産業機械工学科 森 川 敬 信

## 1. 空気輸送

粉粒体を管内の気流によって輸送する空気輸送装置は、ベルトコンベヤ、スクリーンコンベヤ、バケットエレベータその他の機械的な輸送装置に比べると、効率が小さく、所要動力が大きいという欠点がある。しかし工場における製造工程の設備規模が増大し、工場内における各プロセス間の原料、半製品あるいは製品の輸送の自動化が多くなったこととあいまって、この輸送方法の

- (i) 輸送径路を任意に選ぶことができ、
- (ii) 長距離輸送が可能で、
- (iii) 輸送速度、輸送能力が大きく、
- (iv) 管路は密閉されていて、衛生的であり、
- (v) 自動化が容易であり、
- (vi) 省力化に適する

などの特色が、上述の避けられぬ欠点を補ってあまりある場合には、空気輸送が多くの分野で利用されている。このような装置の管内における固体粒子と気流の混相流の現象についての研究は、1950年頃から盛んになり、最近では固体-気体二相流という表現が用いられ、数年前からこの分野の研究に関するシンポジウムや国際会議がほぼ毎年開催されるほどになっている。しかし現象が複雑であるために、未知の部分が多岐にわたるが、また一方では、研究によって得られた結果が装置の設計に役立てられている。

この輸送装置は粉粒体の輸送以外にも、大きな建物内部での書類の輸送用として、気送管という名で用いられてきたが、最近ではプラスチック製の小型容器の輸送用として用いられるようになっている。

## 2. 従来の輸送

表1 港湾における荷上げ用

	輸送量 [t/h]	輸送管 内 径 [mm]	輸 送 距 離 水平+鉛直 [m]	動力 [PS]	混合比
A	100	160	35	125	32
B	100	165	30	160	40
C	150	215	65	350	14
D	150	230	38	300	17
E	150	215	65	350	27
F	150	215	37	295	20
G	400	—	—	—	—

港湾における粉粒体の荷上げ装置の実例のいくつかを示すと表1のようになり、表1のGのように、この分野の輸送能力は最近では400 t/hに達している。工場内で用いられる輸送例は表2に示されている。従来用いられてきたこれらの装置では、管内の流れの状態を模型的に示すと図1のようになる。図1 aは固体粒子が管の断面にはほぼ一様に分布している場合、bは管の下壁面をしゅう動する粒子が生じた場合である。単位時間における固体粒子と気流の重量流量の比は一般に混合比と呼ばれ、図の状態は混合比が小さいか、気流速度が大きい場合に得られる。このような流れにおいて、装置の所要動力を定める基礎となる圧力損失についての研究が最も多く実施されている。たとえば内径40mmの管の、長さ12.5mについての、気流速度と圧

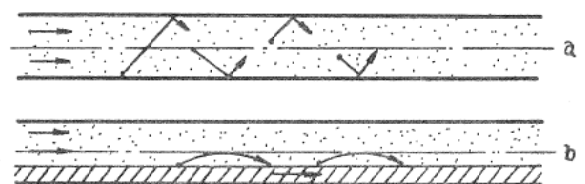


図1 管内の流れの状態

表2 水平輸送の例

	輸送管内径 [mm]	輸送距離 [m]	輸送量		混合比	輸送物質
			固体粒子 [t/h]	空気 [Nm <sup>3</sup> /h]		
A	200	625	113	11358	8.3	鉍石
B	100	570	6.85	360	14.7	フライアッシュ
C	100	570	6.4	945	5.25	砂
D	120	960	4.5	1000	3.5	黄鉄鉍
E	150	90	36	1220	22.7	プラスチック粉末
F	—	50	15	—	—	アルミナ
G	—	100	70	—	—	アルミナ
H	—	22	0.42	—	—	触媒
I	—	650	30	—	—	セメント

力損失との関係は、定速部に対しては図2の鎖線aの右側のようになる<sup>1)</sup>。曲線7は気流の単相流の場合、その他は二相流の場合であって、気流中に含まれる固体粒子の量が多いほど、同じ速度に対する圧力降下は大きくなる。

曲線7の場合の圧力損失  $\Delta p_a$  は

$$\Delta p_a = \lambda_a (l/d) (\rho_a u^2 / 2) \quad (1)$$

によって十分に表わされる。l：管の長さ、d：管の内径、 $\rho_a$ ：気体の密度、u：気流の平均速度、管摩擦係数  $\lambda_a$  は

$$1/\sqrt{\lambda_a} = 2.0 \log(Re\sqrt{\lambda_a}) - 0.8 \quad (2)$$

によって求められたレイノルズ数  $Re = ud/\nu$  が  $10^5$  よりも小さい乱流領域に対しては

$$\lambda_a = 0.3164 Re^{-1/4} \quad (3)$$

を用いることができる。 $\nu$ ：気体の動粘性係数。二相流に対する圧力損失  $\Delta p$  の取扱い方はきわめて多様であるが、その一つは管内の固体粒子によって付加される圧力損失を  $\Delta p_z$  で表わし、

$$\Delta p = \Delta p_a + \Delta p_z \quad (4)$$

とおかれる。 $\Delta p_z$  に消費されるエネルギーは気流から与えられ、 $\Delta p_z$  が固体粒子と管壁との摩擦または衝突による損失  $\Delta p_{z1}$ 、粒子相互の衝突による損失  $\Delta p_{z2}$ 、傾斜管または鉛直管において、固体粒子を重力にさからって輸送するための損失  $\Delta p_{z3}$  から成るものと考えて、それぞれを

$$\Delta p_{z1} = \lambda_{z1} (l/d) (\rho c^2 / 2) \quad (5)$$

$$\Delta p_{z2} = \lambda_{z2} (l/d) (\rho c^2 / 2) \quad (6)$$

$$\Delta p_{z3} = \lambda_{z3} (l/d) (\rho c^2 / 2) \quad (7)$$

とおくことにする。 $\rho$ ：輸送管の単位体積に含まれる粒子群の密度、c：固体粒子の平均速度。このとき、測定によれば係数  $\lambda_{z1}$ 、 $\lambda_{z2}$  および  $\lambda_{z3}$  に対しては、水平管の場合に図3、鉛直

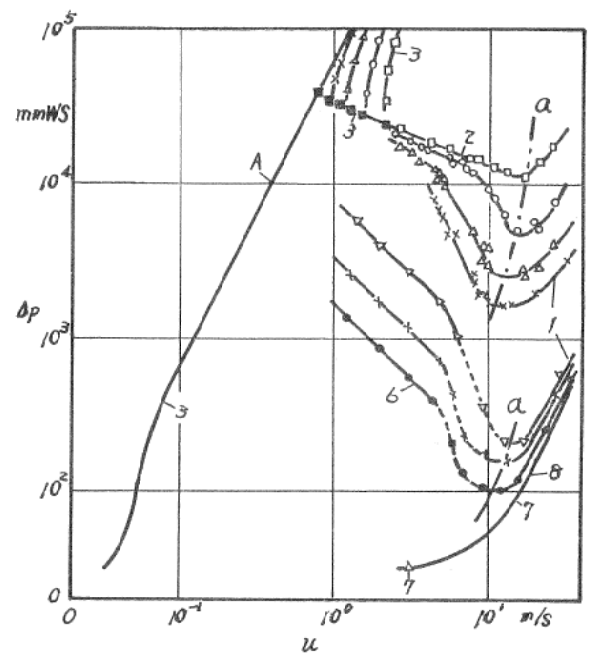


図2 水平管内の圧力損失

アルミナ：× 1 t/h, △ 3 t/h,  
○ 6 t/h, □ 9 t/h, 砂：● 0.05 t/h  
+ 0.1 t/h, ▽ 0.2 t/h.

管の場合に図4の関係が得られる<sup>2)</sup>。係数  $\lambda_{z1}$ 、 $\lambda_{z2}$  および  $\lambda_{z3}$  については、さらに深く考察を進めることができる。たとえば  $\lambda_{z1}$  は図5のように粒子が壁面に衝突するとき、フルード数

$$Fr^* = c / \sqrt{gd} \quad (8)$$

が大きい場合、粒子の軸方向の速度成分の差

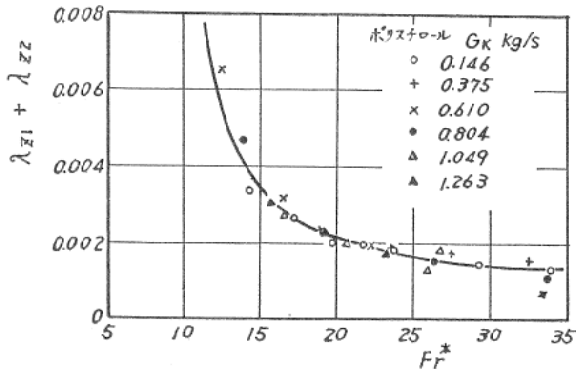


図3 損失係数 ( $\lambda_{z1} + \lambda_{z2}$ ) と  $Fr^*$  の関係

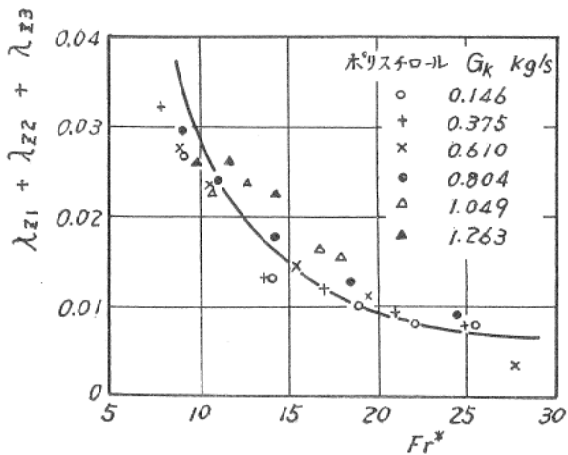


図4 損失係数 ( $\lambda_{z1} + \lambda_{z2} + \lambda_{z3}$ ) と  $Fr^*$  の関係

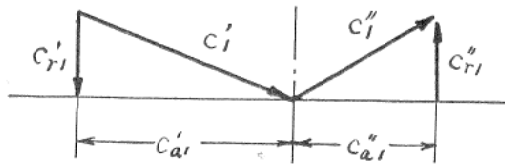


図5 粒子と管壁との衝突

$$\Delta c_a = \Delta c_{a1} = c_{a1}' - c_{a1}''$$

および壁面からはね返るときの半径方向の速度成分

$$c_{r1}' = c_{r1}''$$

を用いて,

$$\lambda_{z1} = 8 \Delta c_{a1} c_{r1} / c^2 \quad (9)$$

のように、損失の生ずる機構に関連させて表わすことができる<sup>3)</sup>。  $\lambda_{z2}$  および  $\lambda_{z3}$  についても同様に、衝突の確率、衝突による運動量変化あるいは仕事を考えて、詳しく取扱うことができる<sup>3)</sup>。

粉状体に対しては、式(5)~(7)のかわりに、

$$\Delta p_z = \lambda_z (l/d) (\rho_a u^2 / 2) \mu \quad (10)$$

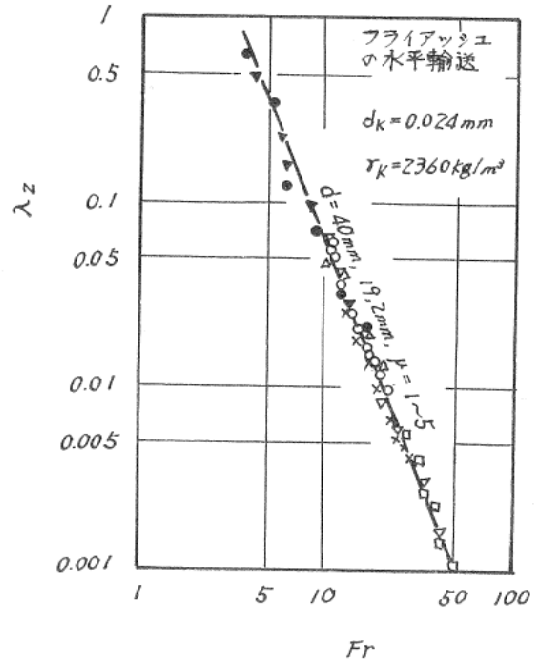


図6 損失係数  $\lambda_z$  と  $Fr$  の関係

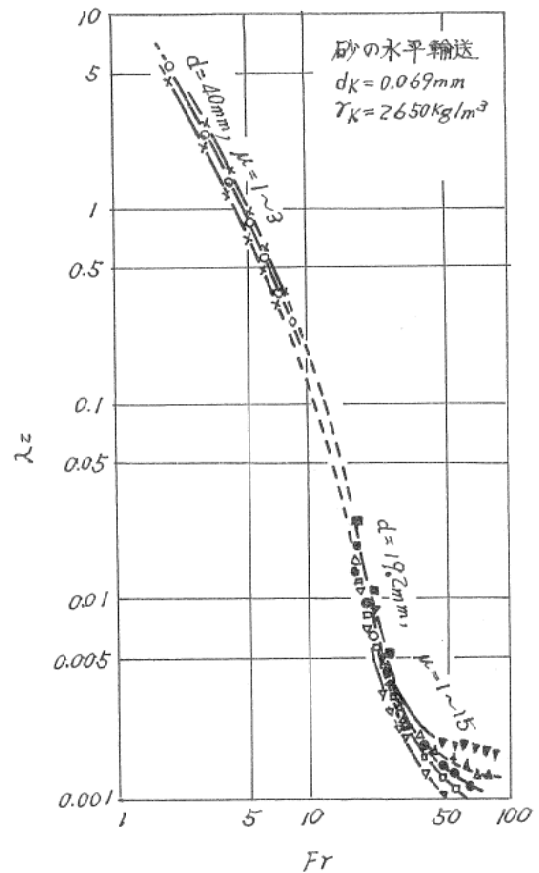


図7 損失係数  $\lambda_z$  と  $Fr$  の関係

とおかれることが多く、測定値から図6および図7が得られる<sup>4)</sup>。  $\mu$ : 混合比。

図3および図4の横軸は、式(8)で定義したフ

ルード数であり、図6および図7の横軸は、

$$Fr = u / \sqrt{gd} \quad (11)$$

で定義したフルード数である。g：重力の加速度。

固体-気体二相流の現象については、一般に力学的相似の条件をすべて満足させることはむづかしいが、それらの条件のうち、式(8)あるいは式(11)のような無次元数を用いることによって、現象をかなり明確に表わすことができるようになってきている。

圧力損失を式(5)~(7)のように表わすとき、二相流の中の固体粒子の速度を知る必要があり、理論的ならびに実験的にその性格が明らかにされてきている。このように、圧力損失の取扱いに付随して生ずる種々の問題が明らかにされるとともに、輸送管路には以上の定速部以外に、加速部、ベンド、エルボ、分岐管等の設けられることが多いので、流れ学の知識を基礎にして、これらの部分についての流れの研究も進められている。

### 3. 混合比の大きい輸送

図2の鎖線aより左の部分では、従来の輸送方法によれば、固体粒子は管内で閉そくを起すので、輸送上避けるべき状態とされてきた。しかし図2の鎖線aの右側部分よりも気流速度を小さくし、管内に図8のようなプラグを形

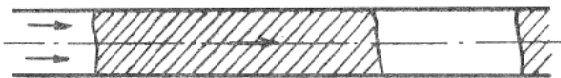


図8 管内の流れの状態

成させると、図2の曲線の結果が得られる。このような輸送には、一般に気流速度は表1および表2の場合よりも著しく小さく、(2~12) m/s が用いられている。逆に混合比は表1および表2の場合よりもはるかに大きく、 $\mu=350\sim 700$  程度を実現させることができるといわれている。実際に図8のような流れの状態を作るための一つの方法が図9に示されている<sup>1)</sup>。この装置は輸送管の中または外部に、一定のピッチで小さい穴を設けた細い管を用い、この穴から輸送管内に気流を噴出させて輸送物質を途切れ

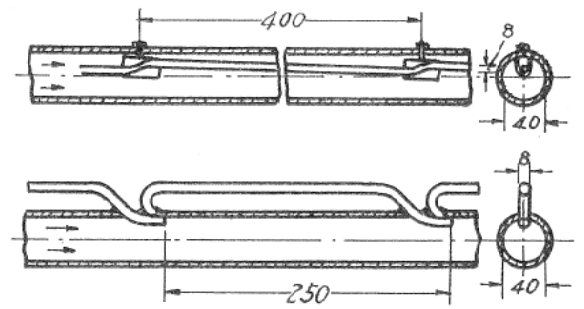


図9 プラグ輸送の場合の輸送管の一例

させ、プラグを形成させるようになっていく。この輸送方法には

- (i) 管路の閉そくの問題は生じない、
- (ii) 管路ならびに輸送物の摩耗が少ない、
- (iii) 空気以外の高価な気体を輸送媒質として使用する場合には、流量が小さいために経費が少なくなる、

(iv) 装置に静電気の発生することが少ないなどの利点があり、従来の空気輸送装置によっては輸送できなかった含水量の多い物質、脂肪含有量の多い物質、粘着性のある物質などを輸送することができ、アルミナをかなりの長距離に輸送することも、この方法によって実現されるようになっている。

輸送例の一部は表3から知ることができる。この装置において生ずる付加圧力損失を式(10)で表わすとき、図10のような結果が得られる<sup>1)</sup>。

表3 プラグ輸送の例

輸送物質	輸送管内径 [mm]	輸送量 [t/h]	輸送距離 [m]	空気量 [Nm <sup>3</sup> /min]
アルミナ	100~125	10	720	6
でんぷん(含水量22%)	100	10	180	4.8
PVC	100	15	180	10
塩	100	17.5	80	8
ココア(脂肪20%)	80	6	75	1.6
染料	65~100	4.5	560	4
砂糖	80	4.2	30	4.2

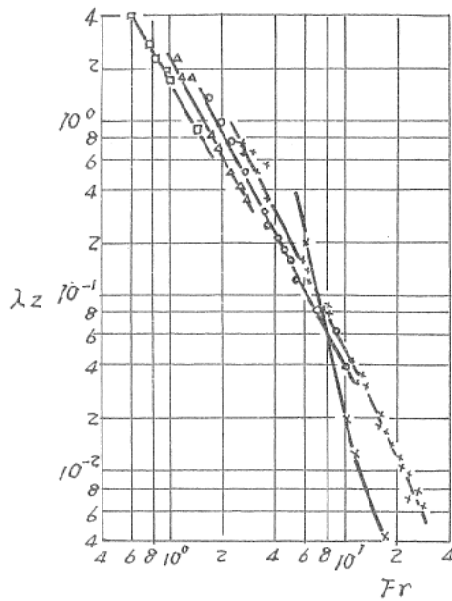


図10 損失係数  $\lambda_z$  と  $Fr$  の関係  
アルミナの鉛直輸送  
混合比： × 8~15  
+ 81~150  
○ 151~300  
△ 301~500  
□ 501~700

#### 4. 中空軽量体の輸送

従来は液体用容器として、もっばらガラス瓶が用いられていたが、最近ではプラスチック製の軽量容器が普及してきた。

図11は中空軽量体の輸送装置である<sup>5)</sup>。成型機によってプラスチックペレットから成型された軽量体3は、コンベヤ1によって空気輸送管

2まで運ばれ、輸送管7によって送り先コンベヤ9まで輸送される。

管路を流れる液体によってカプセルを輸送する現象についての研究は、かなり以前から試みられてきているが、気流によってこのような軽量体を輸送するとき、肉厚の薄い容器に生ずるきずは、充填した液体の漏れる原因となり、製品価値を失なうので、容器の直径と輸送管の内径との関係、輸送速度などの種々の点に考慮を払いながら、装置が設計されるとともに、輸送管の中の流れについての研究が始められている。

#### 5. むすび

空気輸送装置の例をいくつか示し、固体-気体二相流に関する研究の一端を、圧力損失を例にとって示した。

#### 文 献

- 1) Lippert, A, Chem.-Ing.-Techn., **38**-3 (1966), 350.
- 2) 森川, 機械学会論文集, **33**-254 (昭42), 1633.
- 3) Welschof, G, VDI-Forsch.-Heft 492 (1962).
- 4) Bohnet, M, VDI-Forsch.-Heft 507 (1965).
- 5) 大谷, プラスチックス, **21**-12 (昭45), 39.

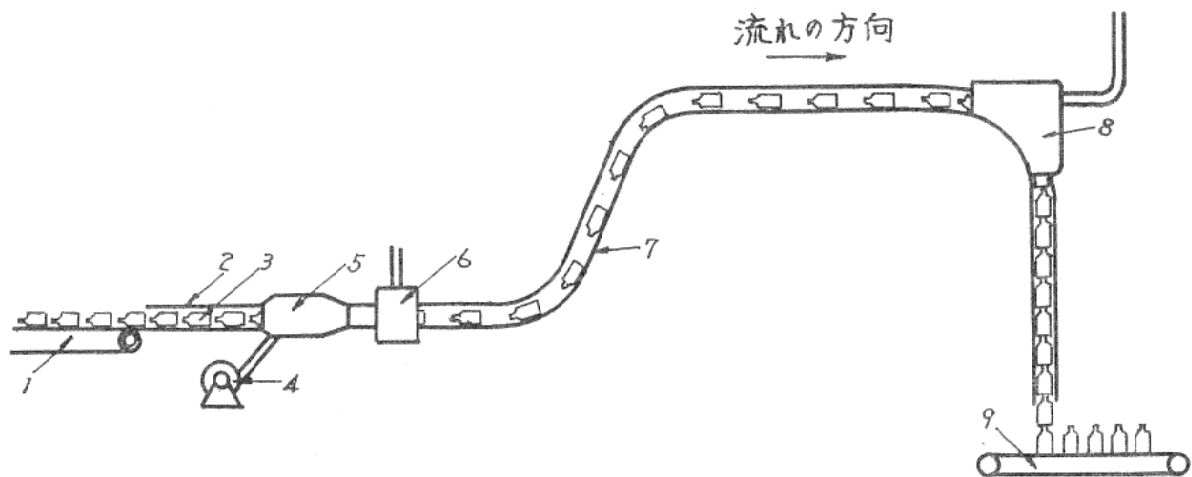


図11 中空軽量体の輸送装置の例