

## 『こわれ、易い粒体の高濃度低速空気輸送』

早野延男\*・原田教男\*・上滝具貞\*\*

### High Density, Low Velocity Pneumatic Conveying of the Fragile Materials

Nobuo HAYANO, Norio HARADA and Tomosada JYOTAKI

#### Abstract

From the aspect of factory hygiene and other reasons for sanitation, pneumatic conveying of granular solids has been increasing recently. Generally, this transportation method works efficiently in situations in which the velocity of the air and the concentration of solid materials in the duct is high.

On the other hand, high velocity transportation causes the breakage of granules especially when the materials conveyed are brittle. Reasons for the breakage of granules are thought to be due to the collision between particles and the impaction of particles with the duct wall.

As the results of the breakage, usually, size reduction of granules occurs, this means the products are of poor quality. In trying to solve these problems we made test equipment in which the granules are conveyed very slowly (average velocity; 1.54 m/sec), slide together in the duct as clusters (a train of slugs). Using the above equipment we have observed the velocity of each slug, the quantity of the transported rate of the granules, and the flowing pattern of the slugs in the duct. For the evaluation of the extent of breakage of the particles, the size distribution of the particles before and after the experiments was compared. Some of the quantitative results are as follows;

1. In this series of experiments, pressure head of the fan was maintained at 585 mmAq and the flow rate of air was 1.3~1.5 m<sup>3</sup>/min.
2. The pressure drop across the slugs in the duct was 483 mmAq for Nylon chips and 563 mmAq in the case of M. S. G..
3. After several conveyings, the extent of the shortening of M. S. G. was about 0.1 mm in length (arithmetic mean diameter).

#### 1. は し が き

粉粒体の輸送方法として空気輸送装置は、輸送物の飛散、異物の混入、汚損がなく他の輸送方式にない多くの長所を持っている<sup>1)</sup>。一方、輸送速度が大きいため粒相互あるいは粒と輸送管との衝突により、輸送物の破碎、摩耗が比較的大きく製品の劣化が問題となる。この欠点の解決策として高濃度低速輸送を行う方法が最近注目されつつある<sup>2)3)</sup>。

一般に高濃度低速輸送装置は、材料を柱状または栓状(閉塞層)として輸送するので粒子相互の衝突が少く、材料の破碎、摩耗が少いといわれている。しか

し、この輸送方式については、圧力損失、輸送速度、破碎の程度、柱状層または栓状層の形成機構等に関する実験データが非常に少ないのが現状である。特に水平輸送の場合は、輸送管下部の粒子群は上部の粒子群の重力による影響を受けるので、管上部より下部に亘って粒子の移動速度が遅くなり、柱状層または栓状層の形状維持が難しくなる。このため、装置の設計については経験に頼る所が多い状態と思われる。

以上の事情から、今回高濃度低速輸送装置を試作し、水平輸送の場合の圧損、輸送速度、材料の破碎の程度、フローパターンなどについて測定を行い、輸送機構解明の第1歩としての基礎実験を行ったので報告

\* 生産機械工学科

\*\* 九州工業大学機械工学科

する。

2. 実験装置

試作した実験装置の全体図を Fig. 1 に示す。図中の供給用ホッパー⑦の容積は約60lであり、充填された輸送物はホッパー下部に連結されている供給器⑧に流下する構造になっている。この供給器内に堆積した輸送物を水平な輸送管⑨内に押込むために、パイプA⑥から圧縮空気を供給する。水平管内に輸送物が充分詰まった時点で、パイプA⑥から供給されている圧縮空気を遮断してパイプB⑤から圧縮空気を送り込むと、供給器⑧の中にあるパイプB⑤の吐出し口の近傍で輸送物が切取られ、閉塞層が作られて、これが

圧縮空気でパイプ⑨中を輸送される。このように圧縮空気をパイプAとパイプBから交互に供給するために、各々のパイプには、ソレノイドバルブ④と③が取り付けられている。ソレノイドバルブの開閉操作は、Fig. 2 に示されているように、2個のタイマーを使った制御回路で行われる。バルブの開及び閉の時間は0~180(sec)の範囲で任意に選ぶことができる。また、供給器及び輸送管は内部の輸送物の流動状態観測のため、供給器は透明なアクリル製であり、輸送管はガラス管(内径75mmφ)となっている。輸送中の閉塞層の圧損を測定するために、Fig. 1に示されているI, II, IIIの3個所に測圧タップが設けてあり、a及びb点で静圧及び全圧を測定した。

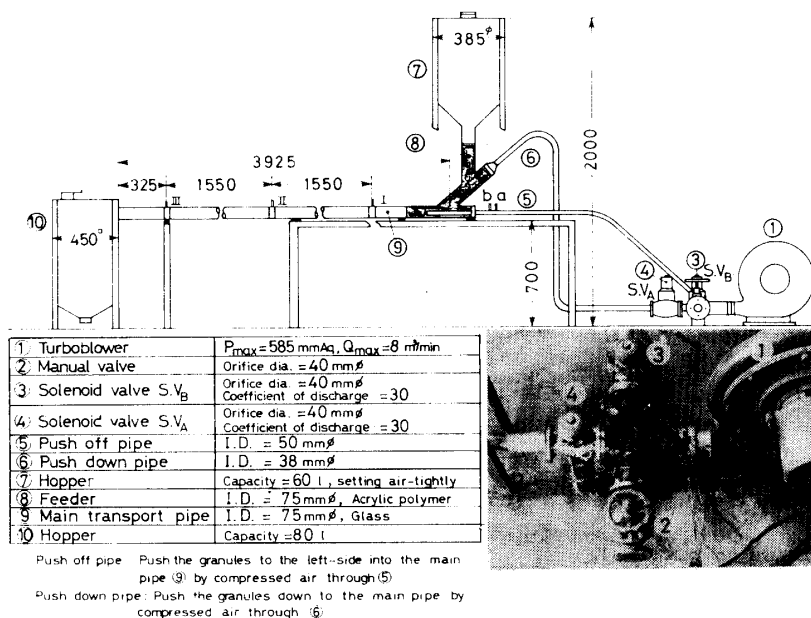


Fig. 1 Test equipment of "high density, low velocity pneumatic conveyor"

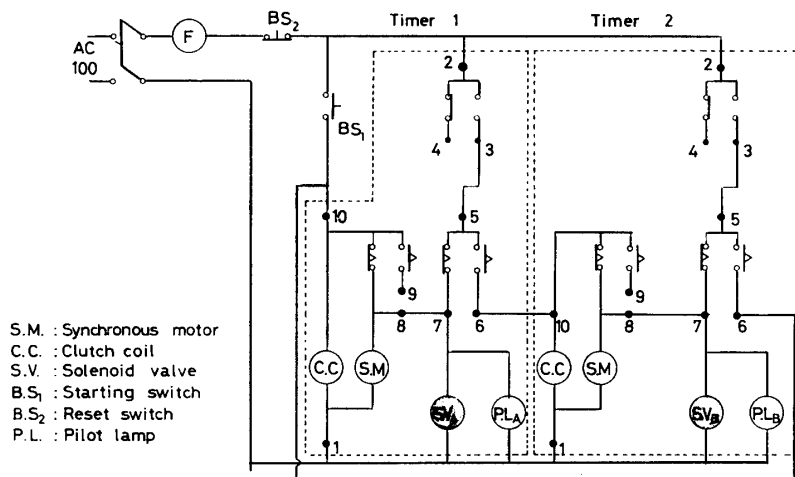


Fig. 2 Sequential control circuit for the valve system

3. 実験方法

実験に使用した輸送材料は、M. S. G. (グルタミン酸モノナトリウム; Mono-Sodium L-Glutamate) とナイロンチップの2種類でその物性値は Table 1 に示されている。

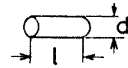

	Nylon chip	M. S. G.
Density (g/cm <sup>3</sup> )	1.12	1.63
Bulk density (g/cm <sup>3</sup> )	0.736	0.776
Coefficient of the wall friction (-)	0.191	0.309
Coefficient of the internal friction(-)	0.403	0.770
Angle of repose (°)	26.7	45
Shape of particles	 $\bar{l} = 2.45 \text{ mm}$ $\bar{d} = 2.68 \text{ mm}$	 $\bar{l}_p = 1.15 \text{ mm}$ $\bar{d} = 0.49 \text{ mm}$

Table 1. Physical properties of the samples

試料を輸送中の管内空気圧の変動は、各測定点 (Fig. 1 参照) で Fig. 3 のような測定回路で測定した。Fig. 3 の測圧器の受圧面は、直径 30mmφ、厚さ 0.4 mm のリン青銅板のダイヤフラム型測圧器で、温度補償回路を持っている。使用した測圧器の構造及び校正曲線は、Fig. 4 及び Fig. 5 に示されている。また、閉塞層の圧力損失は測定点 I と III (Fig. 1 参照) において同時に圧力波形を記録し、閉塞層がこの測定区間に存在している時の I-III 間の差圧を記録波形から求め圧力損失とした。

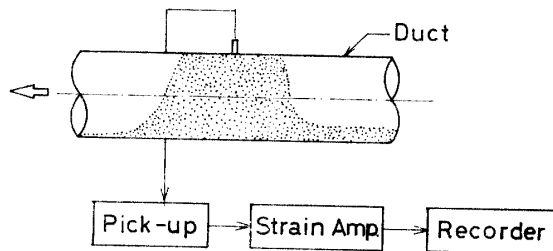


Fig. 3 Schematic diagram of the pressure measuring device

閉塞層の長さは、写真撮影によって測定し、移動速度は i) ストロボを使用して写真撮影を行う方法と ii) 管路の2箇所 (間隔; 3.1m) で圧力を同時に記録し、2箇所の測定区間に閉塞層が滞留している時間を圧力波形から読み取ることによって求める方法の2通りの測定を行った。また、輸送量は補集用ホッパーに

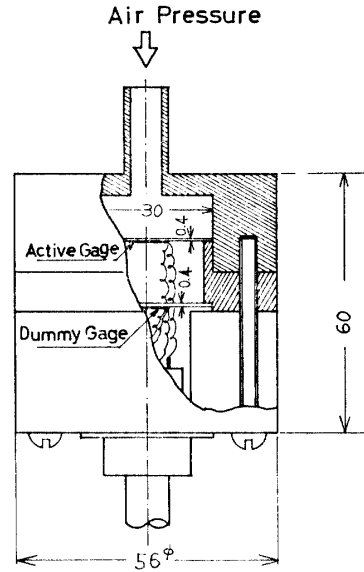


Fig. 4 The pressure pick-up

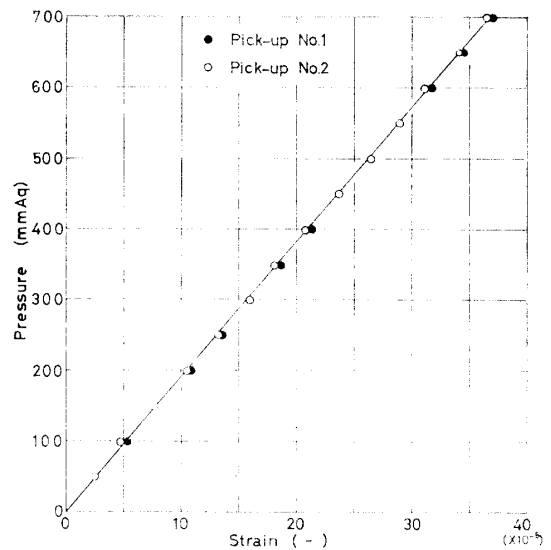


Fig. 5 The calibration curves of the pressure pick-up

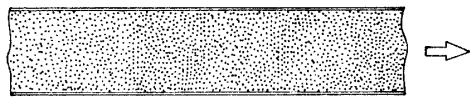
補集した材料を台秤 (最小目盛 50g) を用いて秤量した。

輸送による材料の破碎の程度を調べるために、輸送前後の粒度分布を顕微鏡法により測定し比較した。

4. 実験結果

4.1 フローパターンと管路の圧力分布

高濃度低速輸送は、Fig. 6 のように2種類の輸送形態に分類できる。Fig. 6 の (a) は柱状輸送で、輸送物が管内に完全に充填された状態で連続的に輸送さ



(a) Rod-like flow



(b) Slug flow

Fig. 6 Two types of "high density, low velocity" transport

れ、粒子相互の運動は少い。図中の (b) はスラッグ輸送で輸送物は、断続的に輸送され、一つの閉塞層内では粒子相互間にわずかに運動がみられる。輸送速度は、一般に柱状輸送の方が遅く、したがって単位時間当りの輸送量はスラッグ輸送より少い。また、柱状の場合輸送物を連続して移動させるため、管摩擦による圧力損失の割合が大きくなる。

本実験は Fig. 6 の (b) のスラッグ輸送であり、使用した 2 種の輸送材料では、ナイロンチップの方が閉塞層が壊れにくく、圧損も小さく輸送状態は良好であった。

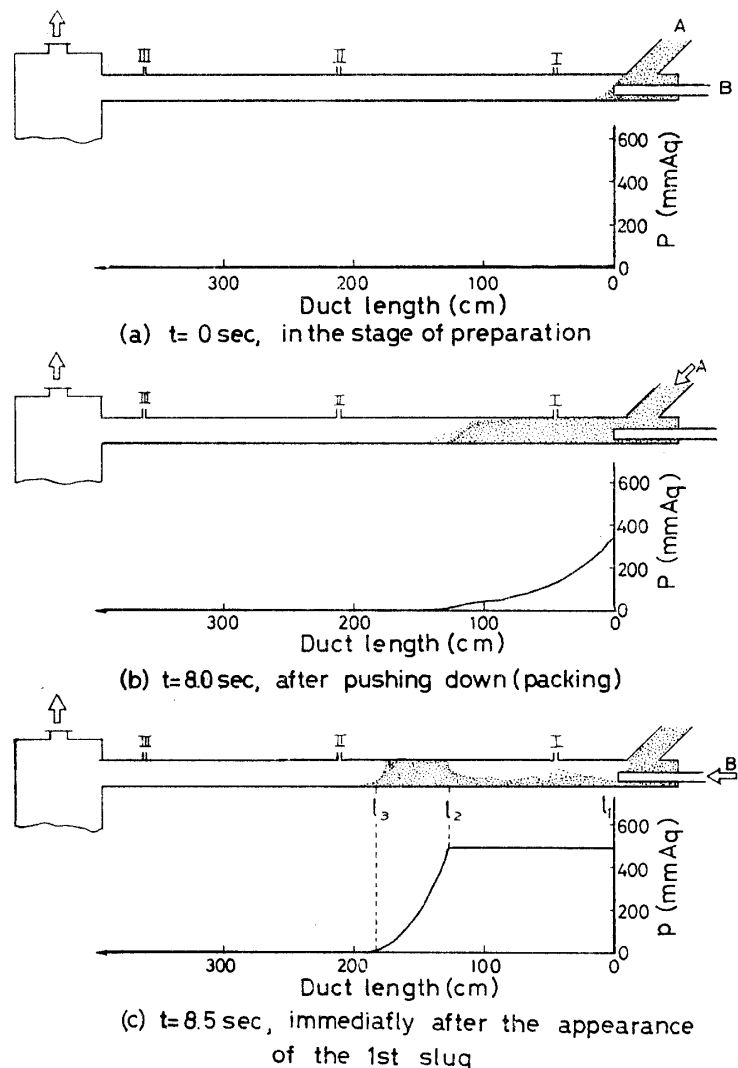
ここでは、ナイロンチップの水平輸送のフローパターンを Fig. 7 を用いて説明する。タイマーの設定時間は、管内に材料を充填する時間 (Fig. 7 (a) の A 部から圧縮空気を送り込む時間) を 8.1 秒とし、閉塞層の形成及び輸送に要する時間 (Fig. 7 (a) の B から圧縮空気を送り込む時間) を 5.5 秒とした。タイマーをこの時間に設定した場合、ナイロンチップの輸送に際して閉塞層の形成が最も良好であった。

図中の (a) は、水平な輸送管へ輸送物を充填する前 ( $t=0$ ) の状態で、輸送物は供給用ホッパーから自然落下し、図のようにフィーダー内に堆積している。

図の (b) は、A 部から圧縮空気を送り始めて、約 8.0 秒経過した時の状態で、輸送物は水平管に設置されている静圧タップ I と II のほぼ中間あたりまで充填している。この時の管路内の静圧分布は、図の (b) に表わされており、輸送物のない所では圧力はほぼ大気圧になっている。

図の (c) は、輸送開始直後の状態 (圧縮空気の流入が、A 部から B 部に切替った直後約 8.5 秒) で、管内に充填されていた輸送物は、図のように第 1 番目の閉塞層を形成し栓状になって輸送される。この閉塞層が通過した後、管路底部には材料が一部残っている。一方管路の圧力分布は、閉塞層上流側から供給器までの間 (図 (c) の  $l_2$  から  $l_1$  まで) は、ほぼ一定の圧力分布を示し (ナイロンチップの場合静圧は約 490 mmAq)、閉塞層下流側 (図 (c) の  $l_3$  点) から捕集用ホッパー間は、ほぼ大気圧になっている。

Fig. 7 の (d) は、第 1 番目の閉塞層が下流側 (出口側) に輸送された状態とその圧力分布を示す。(約



9.7秒)

図の (e) は、第1番目のスラッグが輸送管外に排出された瞬間(約10.5秒)の状態、管内に残留するナイロンチップは図のように静圧タップIの近くに最も多く堆積している。

この状態の直後に第1番目の閉塞層が管外に排出されるために、一時的に輸送管内は閉塞層が存在しない状態となり、B部からの圧縮空気が流入するために通常の空気輸送の状態(これを暫定的に乱流的輸送と仮称する)となり、このため静圧タップIの近くに残留していたナイロンチップは吹き飛ばされ、これが輸送管を塞ぐのでその結果第2番目の閉塞層が発生する。

図の (f) は、2番目の閉塞層が出来た状態とその圧力分布を示している。この2番目の閉塞層が管外に排出されると、約1秒間の乱流輸送状態になり、管内に残留していたナイロンチップはほぼ完全に排出される。乱流輸送の後、セットされたタイマーにより、流入する圧縮空気はB部からA部に切替り、(a)~(f)の動作を繰返す。

以上より本実験装置によるナイロンチップのスラッグ輸送では、閉塞層の形成及び輸送の動作区分は Fig. 8 のようになる。(M. S. G. の場合、各閉塞層の輸送期間が幾分長くなり、乱流輸送の期間が短くなる。)

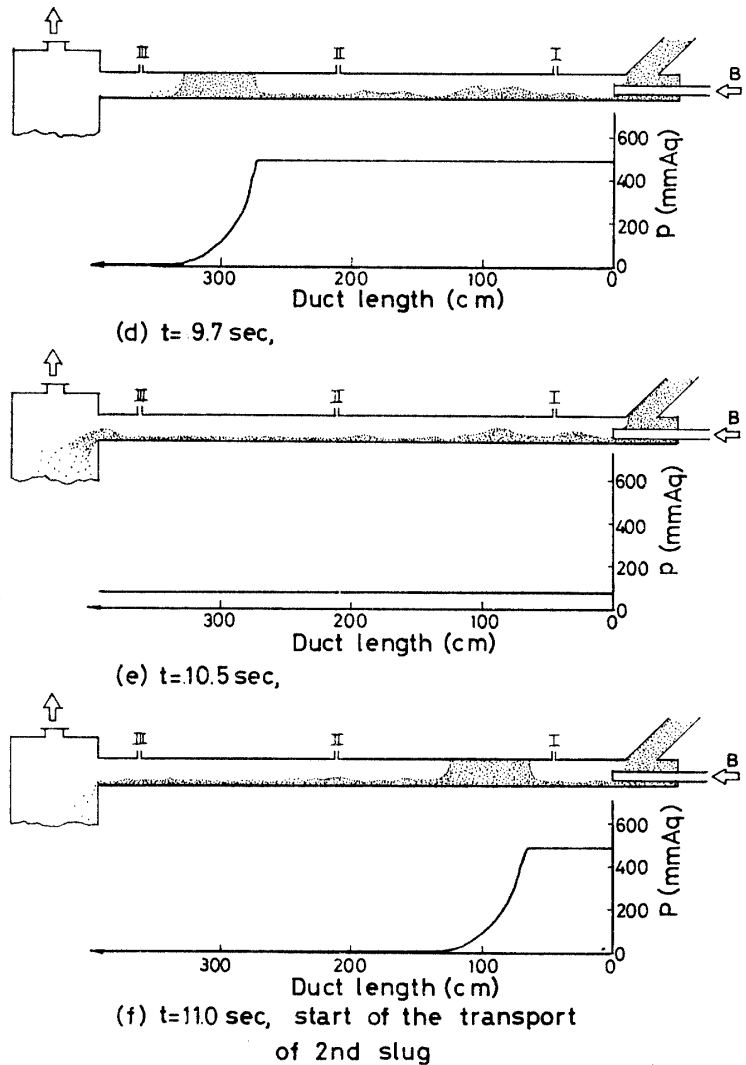


Fig. 7 Illustration of the transport and the change of pressure

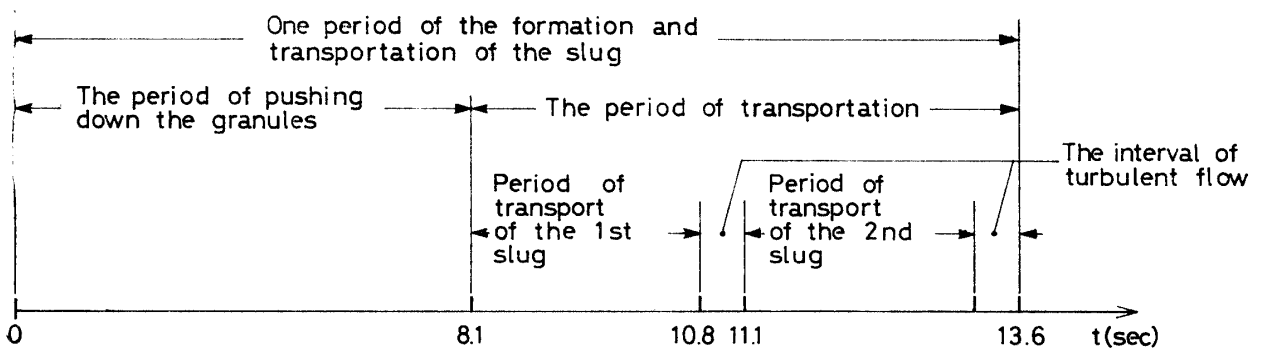


Fig. 8 The development of the transport of slug

4.2 スラッグ輸送中の管路内の圧力測定と閉塞層の圧力損失

ここでは、M. S. G. の輸送中における管路の2個所の測定点(間隔3.1m)の圧力変化を同時記録し

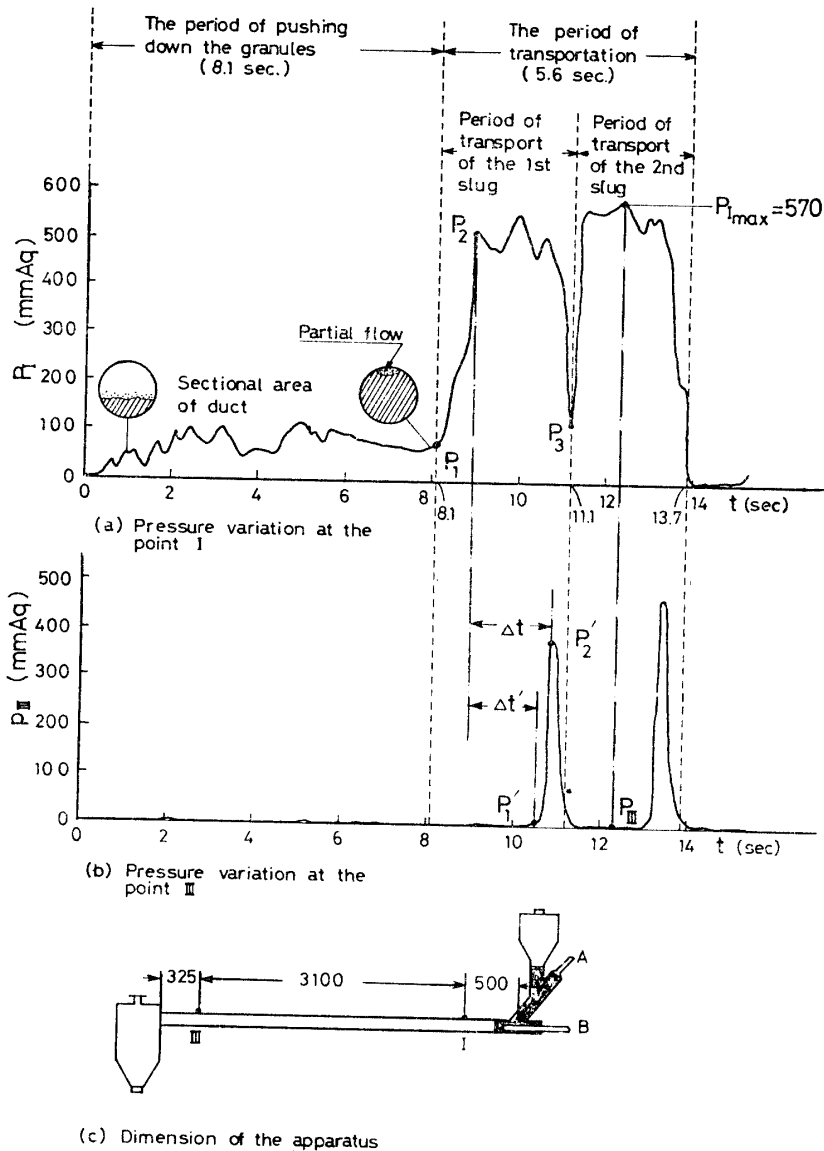


Fig. 9 Illustration of the pressure variation in the pipe

た結果について述べる。Fig. 9 ((a), (b)) は同図 (c) に示されている 2 個所 (I 及び III) での圧力変動の測定結果で、閉塞層の形成・輸送の 1 周期間の波形である。(Fig. 8 参照)

Fig. 9 (a) は、測定点 I での圧力変化を示しており、ホッパーからの充填期間は 8.1 秒、輸送期間 (5.6 秒) は (a) 図の  $t=8.1\sim 13.7$  秒間で図 (c) に示されている B 部から圧縮空気が送り込まれる期間である。充填期間における測定点 I での圧力  $P_I$  が、 $0\sim 100\text{mmAq}$  の範囲で複雑に変動しているのが見受けられる。これは供給器から押込まれた輸送物により、I の所の管断面が徐々に塞がれてゆき、約 8 秒経過した時には管断面がほぼ完全に塞がれ、輸送管上部に部分流 (Fig. 9 (a)) が発生する。この間、輸送物によ

って部分流の断面積が複雑に変化するため、A 部 ((c) 図参照) から流入する空気量が変動するためと考えられる。

Fig. 9 (a) の 8.1 秒からの波形の立上り部分 ( $P_1\sim P_2$ ) は、測定点 I の近傍で閉塞層が形成され、その閉塞層の上流側 (入口側) が、測定点 I の部分を通ずるまでの閉塞層内の圧力分布を示すものと考えられる。この最初の波形の山 ((a) 図の  $P_1\sim P_2\sim P_3$ ) は第 1 番目の閉塞層の輸送期間であり、 $t=11.1$  秒になると閉塞層が輸送管外に排出されるため、輸送管内は乱流輸送となり圧力 (静圧) は小さくなる。 $t=11.7\sim 13.7$  秒間は第 2 番目の閉塞層の輸送期間を示す。

Fig. 9 の (b) は測定点 III での圧力  $P_{III}$  を示したもので、この測定位置は (c) 図に示されるように輸送

管の出口近くにあり、したがって閉塞層がこの測定点に到達してから管外に排出されるまでの期間が短くなるため、時間巾の狭い波形となる。また、輸送管路の圧力分布は閉塞層を境に入口側は高い圧力で、出口側はほぼ大気圧となるので、(b) 図の最初の波形の山は測定点Ⅰの近傍で発生した第1番目の閉塞層が、測定点Ⅲの所に到達することによって現われたものである。同様に、2番目の山は第2番目の閉塞層が測定点Ⅲに到達したことを示している。(b) 図の最初の山の立上り部分 ( $P'_{1} \sim P'_{2}$ ) は閉塞層の先端(出口側)が、Ⅲの所に到達して、後端(入口側)が通過するまでの閉塞層内の圧力分布と考えられる。(b) 図の  $\Delta t$  は閉塞層の後端(入口側)が測定点Ⅰを通過してⅢの所まで移動するに要した時間を示している。 $\Delta t'$  は、閉塞層の後端がⅠの点を通り過ぎて、先端がⅢに達するまでの所要時間であり、この時間内では閉塞層が測定点Ⅰ-Ⅲ間に存在している。M. S. G. 輸送の場合、閉塞層自身の長さの変化がナイロンチップと比較して複雑で大きいことが観測された。この点については、圧縮機容量、輸送物の物性などの影響もあるのでさらに広範な研究が必要と思われる。

一方、閉塞層の圧力損  $\Delta P(t)$  については、Fig. 9 (a) 及び (b) の  $\Delta t'$  秒間のある時刻における、圧力分布を夫々  $P_I$  及び  $P_{III}$  とすると、閉塞層の圧損  $\Delta P(t)$  は

$$\Delta P(t) = P_I - P_{III} \approx P_I. \quad (P_{III} \approx 0) \dots\dots(1)$$

となる。このようにして2番目以下の閉塞層についても  $\Delta t'$  秒間の  $P_I$  を調べることによって、閉塞層の圧損の瞬時値  $\Delta P(t)$  が求められる。Fig. 9 (a) か

Table 2 Pressure drop across the slug

Test number	Max. pressure drop $\Delta P_{max}$ (mmAq)	
	M.S.G.	Nylon chip
1	549.4	482.9
2	549.4	443.0
3	571.5	482.9
4	562.7	500.6
5	553.8	491.8
6	580.4	474.1
7	575.9	482.9
8	549.4	482.9
9	575.9	465.2
10	—	527.2
Average	563.2	483.4

ら認められるように閉塞層の圧損  $\Delta P$  の変動幅はかなり大きいので(1)式によって求まる各閉塞層の最大圧損値  $\Delta P_{max}$  を  $P_{I,max}$  として Table 2 に示す。(ナイロンチップの測定値も併記)

### 4.3 閉塞層の移動速度と長さの測定

閉塞層の移動速度は、i) ストロボ撮影による方法と ii) 圧力波形によって求める方法との2つの方法を用いて測定したが両者共ほぼ同一結果が得られたので、ここでは ii) の圧力波形から求めた結果について述べる。

閉塞層の移動速度を求めるための圧力波形の測定点は、前述の場合と同じく Fig. 9 (c) のⅠ及びⅢである(Ⅰ-Ⅲの間隔=3.1m)。また、Fig. 9 (b) に示されている時間  $\Delta t'$  は、前記のように閉塞層後端(閉塞層の上流側の表面)が測定点ⅠからⅢに達する迄の所要時間に対応するので、時間  $\Delta t'$  を圧力波形から求めれば閉塞層の移動速度  $V$  は、

$$V = \frac{3.1}{\Delta t'} \quad (\text{m/sec}) \quad \dots\dots(2)$$

で与えられる。

(2)式より求めた閉塞層の移動速度の平均値を Table 3 に示す。Table 3 によると輸送材料が M. S. G. の場合、ナイロンチップと比較して速度が遅くなっている。これは M. S. G. の方が密度が大きく、管摩擦係数も大きいため、管摩擦による損失が大きいためと考えられる。

Table 3 Moving velocity of the slug

Test number	Moving velocity of the slug $V$ (m/sec)	
	Nylon chip	M.S.G.
1	1.98	1.51
2	2.52	1.68
3	1.33	1.59
4	1.62	1.51
5	2.06	1.55
6	2.52	1.51
7	1.97	1.44
8	2.06	1.55
9	2.52	1.55
10	1.97	—
Average	2.055	1.54

一方、閉塞層の長さ  $L$  は、Fig. 10 に示すように輸送管の中心線と交わる閉塞層の前面と後面との間隔

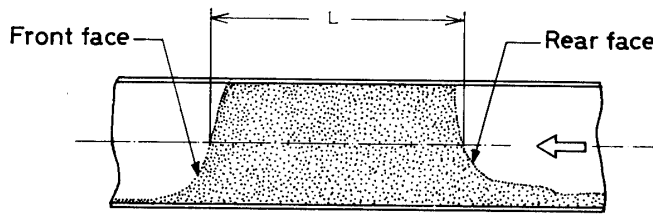


Fig. 10 Details of the moving slug

Table 4 Average length of the slug

Test number	Length of the slug (M.S.G.) L (m)	
	At point I	At point III
1	0.27	0.33
2	0.52	0.18
3	0.20	0.26
4	0.40	0.36
5	0.62	0.35
6	0.46	0.35
7	0.31	0.37
8	0.67	0.41
9	0.35	0.60
10	0.43	0.35
11	0.43	0.51
12	0.30	0.56
13	0.32	0.46
14	0.42	0.25
15	0.38	0.18
16	0.32	0.23
17	0.36	0.28
18	0.36	0.23
19	0.48	0.30
20	0.40	0.27
21	0.49	0.36
22	0.50	0.53
23	0.43	0.40
24	0.46	0.43
25	0.45	0.40
26	—	0.33
27	—	0.46
28	—	0.33
29	—	0.47
30	—	0.42
31	—	0.70
32	—	0.48
33	—	0.40
34	—	0.35
$L_I, L_{II}$	0.405	0.379
L	0.392	

をもって閉塞層の長さ  $L$  とした。また、閉塞層が移動する間の長さ  $L$  は幾分変化するので、変化の状況を調べるため写真撮影は、Fig. 9 の (c) に示されている測定点 I の近く及び III の近くで行った。

Table 4 は上述の方法で測定した M. S. G. の  $L$  の測定値を示す。表より測定点 III の近くでの閉塞層長さ  $L_{II}$  は、I の所での長さ  $L_I$  より短くなっている。これは閉塞層が管内を移動する間に一部の輸送物が管底に残るためである。この残留物の表面が大きく凸凹になった場合、または残留量がある程度多くなると i) 輸送中に閉塞層が分断される。ii) 極端に長い閉塞層となる。iii) 閉塞層が管内に停止して輸送不能になる。などの現象が観測された。この中で、本実験では i) と ii) の場合が多く、iii) の状態は、M. S. G. の閉塞層長さが約 70m 以上になった場合に起っているのが観測された。また、ナイロンチップでは  $L$  が、0.33m であり、 $L$  の変化は少く管内残留量も少かった。

#### 4.4 輸 送 状 態

単位時間当りの輸送量の測定は、材料を輸送管に充填し始める時点から、供給用ホッパーが空になり最後の閉塞層が捕集用ホッパーに入った時迄の捕集用ホッパー内に堆積した量から算出した。

Table 5 Average quantity of transport per unit hour

	Nylon chip	M.S.G.
Average quantity of transport (Kg/h)	735	333

Table 5 は、上述の方法による結果を示す。M. S. G. の場合、ナイロンチップと比較して輸送量が約 2/3 と少いが、この原因の 1 つとしては閉塞層通過後の管内残留量の多いことが考えられる。また、残留している M. S. G. の表面が大きく波打っており、次に通過する閉塞層の障害となっているのが観測された。Fig. 11 は、閉塞層の移動中の写真で管内に残留している材料の状態を示したものである。



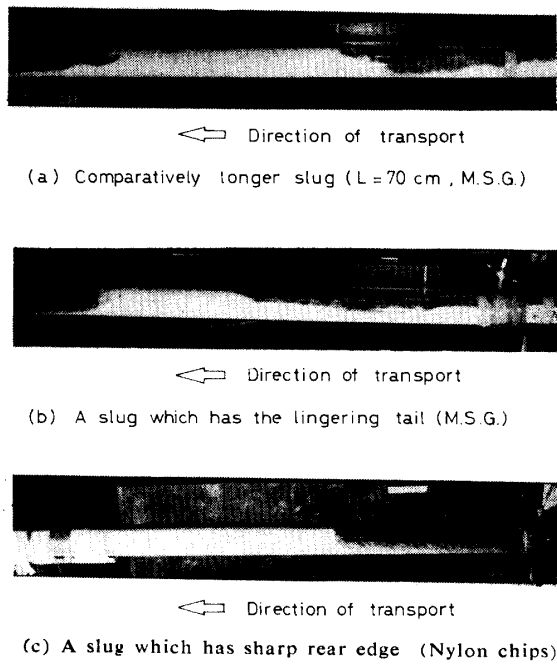


Fig. 11 State of the movement of slug in the pipe

4.5 輸送前後の材料の破碎状態

M. S. G. については輸送中に粒子がこわれるため輸送前後の粒度分布を測定し破碎の程度を調べた。M. S. G. の粒子形状は Fig. 12 に示すように細長く、針状となっている。図の様な形状では粒子がこわれる場合、短軸径の変化は少なく、長軸径が大きく変化するものと考えられる。この点については約 1 m の高さから、ガラス板上に M. S. G. 粒子を落下させ、破碎の状態を調べた所変化したのは長軸径であった事からも推察される。したがって、ここでは長軸径につ

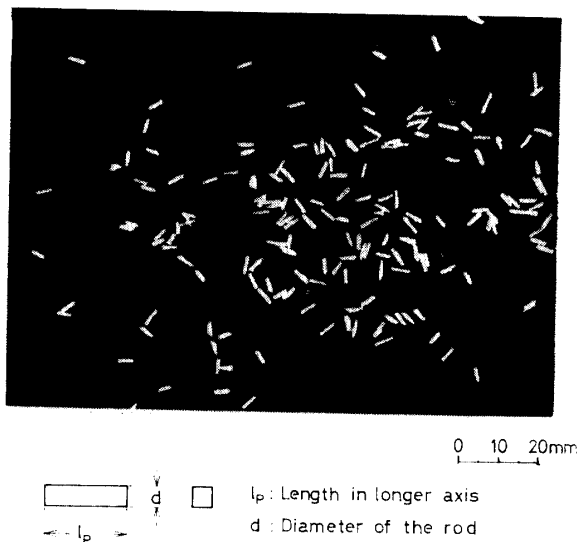


Fig. 12 Shape of M.S.G. (Rod)

いて輸送前後の粒度分布を測定した。

Fig. 13 は、輸送前の M. S. G. の頻度分布と 5 回輸送を繰返した後の頻度分布を示したものである。(1 回の輸送とは、供給用ホッパーに入っている輸送物が捕集用ホッパーへ完全に運び込まれる迄を意味する)

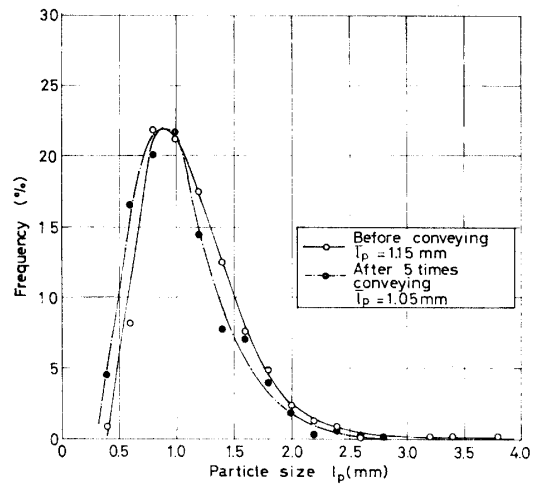


Fig. 13 Size distribution of the granules (M.S.G.)

図より分布曲線は、長軸径の小さい方へ若干移動しており、長さ平均径と比較すると 0.1mm (8.7%) 小さくなっている。破碎の主な原因としては、フローパターンの項 (Fig. 8 参照) で述べたように短時間ではあるが高速空気流 (乱流的輸送) の期間があるためで、この期間にかなりこわれるものと思われる。

5 結 言

以上の実験結果より高濃度低速輸送を行った場合、次のことが明らかになった。

- 1) 粒子の形状が棒状 (針状) で管摩擦係数の大きい M. S. G. は、輸送中に閉塞層の長さ L が変化し易く、管内残留量が多い。(Fig. 11)
- 2) 閉塞層の移動速度は、ナイロンチップの方が M. S. G. より大きい。(Table 3)
- 3) 閉塞層前後の圧力損失は、M. S. G. の方がナイロンチップより大きい。(Table 2)
- 4) M. S. G. 輸送による破碎の程度は、長さ平均径を基準にして 8.7% である。(Fig. 13)

本実験により、高濃度低速輸送は、輸送物の破碎が少く、品質の低下を防止するという面からは望ましい輸送方法と思われる。今回、水平輸送について輸送状

態，破碎の程度を調べたが，実際面への応用を併せ考えて輸送路中に垂直部及び曲管部分を含む場合における閉塞層の圧力損失，移動速度，破碎の程度についての実験を行う予定である。

最後に，実験設備の一部を提供頂きました協和醗酵工業(株)宇部工場長吉本信夫氏並びに実験結果について種々討論して頂いた同工場の各位に感謝致します。また，輸送管材料の一部御提供頂いたサン・アロー化学(株)に対しまして御礼申し上げます。

## 6. 参 考 文 献

- 1) 上滝；粉粒体の空気輸送，日刊工業新聞
- 2) 狩野，渡辺；粉工研.，Vol. 10, No. 9 (1973) 610
- 3) 川上他3名；粉工研.，Vol. 10, No. 9 (1973) 622
- 4) Sok Moon Yoon and Daizo Kunii；Ind. Process Des. Develop.，Vol. 9, No. 4 (1970) 599
- 5) Sabri Ergun；Chem. Eng. Process, Vol. 48, No. 2 (1952) 89

(昭和50年10月1日受理)