

## 粒体の高濃度低速空気輸送 (第2報)

早野延男\*・原田教男\*\*・渡 等\*\*\*・上滝具貞\*\*\*\*

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

Nobuo HAYANO, Norio HARADA, Hitoshi WATARI

and Tomosada JYŌTAKI

#### Abstract

This report concerns so called 'high density, low velocity' pneumatic conveying method of granular materials. This method of transport of granules has two big profits. Namely, i) it is suitable for the transport of fragile granules and ii) it causes smaller abrasion inside surface of the duct owing to the low velocity of granules. To avoid the breakage of fragile granules we prepared test equipment in which the granules are conveyed as clusters (a train of slugs) with very slow velocity (about 1 m/s).

This time, we made a test of transport with the horizontal square duct (cross section;  $6.6 \times 6.6$  cm, length; 4.5 m) and measured the pressure drop across the slug, velocity distribution in the slug, and the transported rate of granules.

Results obtained are as follows;

1. In this experiment, the pressure drop  $\Delta p$  across the slug was largest in the beginning of transport. For rape-seed  $\Delta p$  was 560 mm Aq, for nylon chip  $\Delta p=473$  mm Aq, and for N. P. K. (a kind of granular fertilizer)  $\Delta p=490$  mm Aq.
2. Average transport velocity of the slug  $\bar{v}$  was 1.2 m/s for rape-seed, 1.19 m/s for N. P. K., and for nylon chip  $\bar{v}$  was 1.06 m/s.
3. Flowing pattern inside the slug became clear for the case of rape-seed.

#### 1. はしがき

一般に高濃度低速空気輸送装置は、動力消費量が多いという不利な点はあるが輸送物の破碎<sup>4),5)</sup>や輸送管の摩耗が少いという長所を持っている。これは輸送物を柱状または栓状(閉塞層)として輸送するので、所要動力は大きくなるが、粒子相互の衝突が少く、柱状または閉塞管の移動速度が小さいためである<sup>4)</sup>。しかし、この輸送方式については圧力損失、柱状層または栓状層の形成機構等に関し実験データが少いため空気源所要動力の計算が確実に行なえず、このため輸送不能になったり、また閉塞層が崩れて乱流輸送になるこ

とがある。特に、実用的な輸送経路として不可欠の水平な輸送管では、形成された閉塞層の下部の粒子群は上部の粒子群の影響を受けるため管上部から下部にわたって粒子の移動速度が遅くなり閉塞層の形状維持が難しい。

以上の事情から閉塞層内粒子の運動を調べるために断面が正方形の輸送管を用い、水平輸送の場合の圧損、閉塞層内粒子の速度分布、フローパターン等について測定を行ない輸送機構について検討したので報告する。

#### 2. 実験装置及び方法

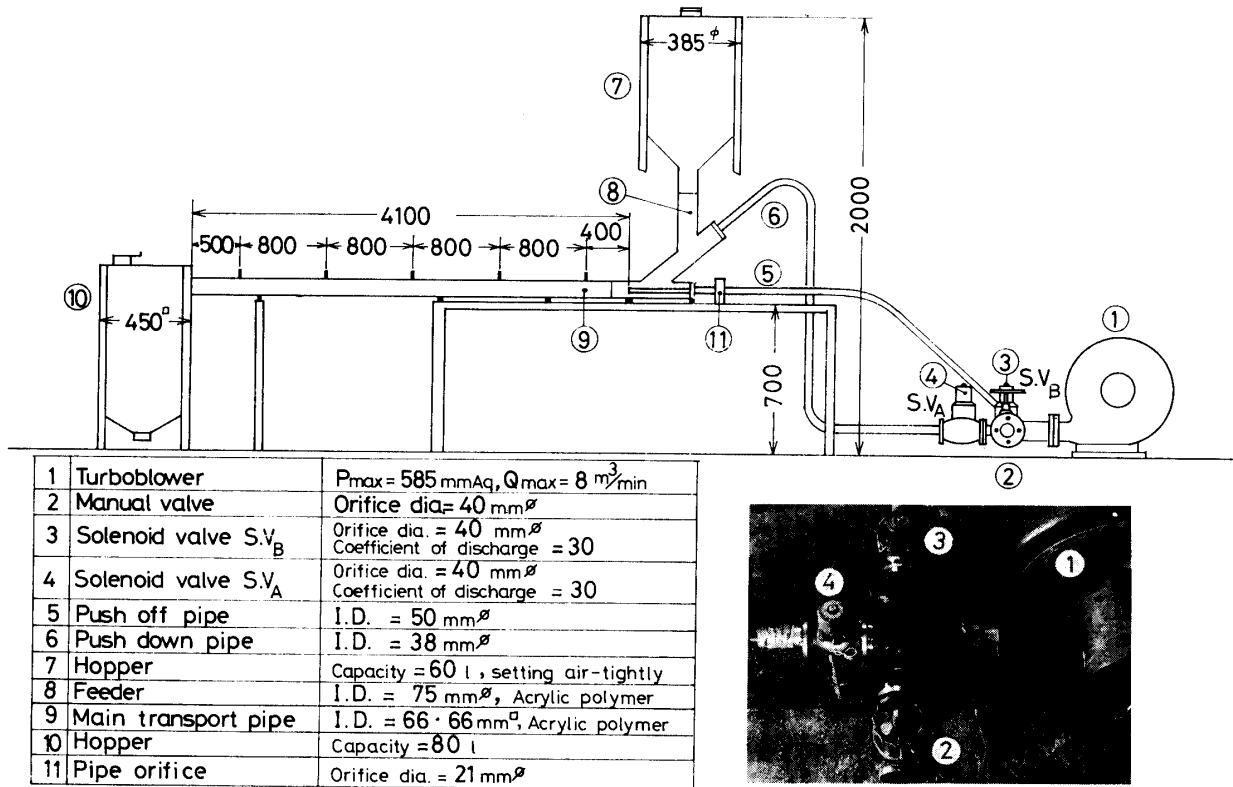
試作した実験装置の全体図を Fig. 1 に示す。図中の供給用ホッパー⑦の容積は約60 l であり、充填された輸送物はホッパー下部に連結されている供給器⑧に流下する構造になっている。この供給器内に堆積した輸送物を水平な輸送管⑨内に押込むために、パイプ A 6

\* 山口大学工学部生産機械工学科

\*\* 徳山工業高等専門学校

\*\*\* 菱成産業株式会社

\*\*\*\* 九州工業大学機械工学科

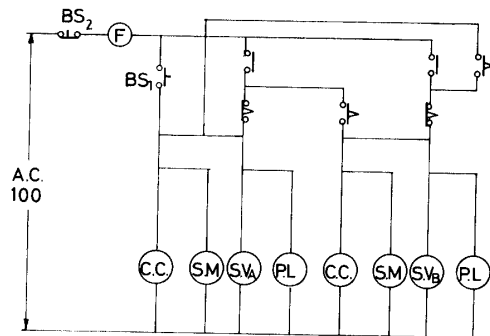


Push off pipe : Push the granules to the left-side into the main pipe ⑨ by compressed air through ⑤  
 Push down pipe : Push the granules down to the main pipe by compressed air through ⑥

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

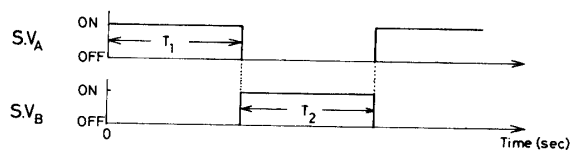
から圧縮空気を供給する。水平管内に輸送物が充分詰込まれた時点で、パイプA 6から供給されている圧縮空気を遮断してパイプB ⑤から圧縮空気を送り込むと、供給器⑧の中にあるパイプB ⑤の吐出し口の近傍で輸送物が切取られ、閉塞層（スラッグ）が作られて、これが圧縮空気でパイプ⑨中を輸送される。このように圧縮空気でパイプAとパイプBから交互に供給するために、各々のパイプにはソレノイドバルブ④と③が取り付けられている。ソレノイドバルブ(S.V.)の開閉操作は、Fig. 2(a)に示されるように2個のタイマーを使った制御回路で行なわれる。このS.V.の動作状態はFig. 2(b)のタイムチャートに示されている。

また、輸送管はスラッグの移動速度及びスラッグ内粒子の速度分布測定のため、透明なアクリル製で6.6cm×6.6cmの正方形断面になっている。材料輸送中の管内空気圧の変化及びその分布状態はFig. 1に示されるように80cm間隔で設置されている5箇所の静圧タップにおいて測定した。この圧力検出回路はFig. 3のようになっている。図中の測圧器の受圧面は直径30mmφ、厚さ0.3mmのリン青銅板のダイヤフラム型測圧器である。測圧器の構造及び校正曲線はFig. 4に示



SM : Synchronous motor  
 C.C. : Clutch coil  
 S.V. : Solenoid valve  
 BS : Starting switch  
 B.S. : Reset switch  
 P.L. : Pilot lamp

(a) Control circuit of valves



$T_1$  : The period of pushing down the granules  
 $T_2$  : The period of transportation

(b) Time chart

Fig. 2 Sequential control circuit for the solenoid valve system and its time-chart

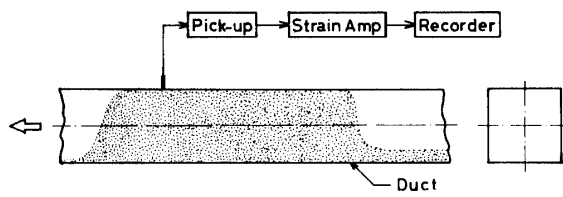


Fig. 3 Schematic diagram of the pressure measuring device

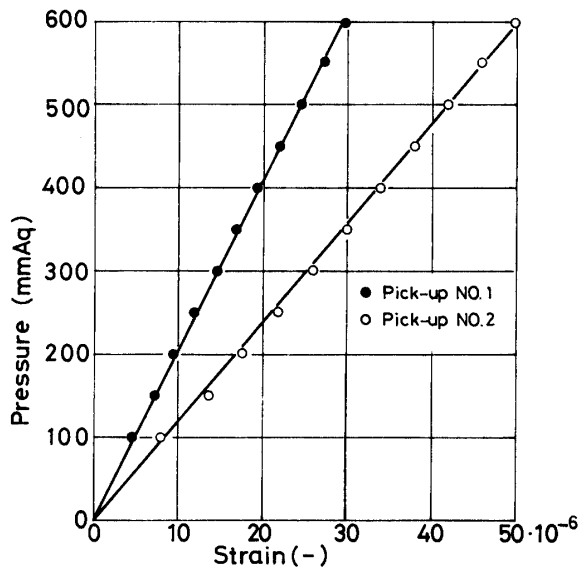
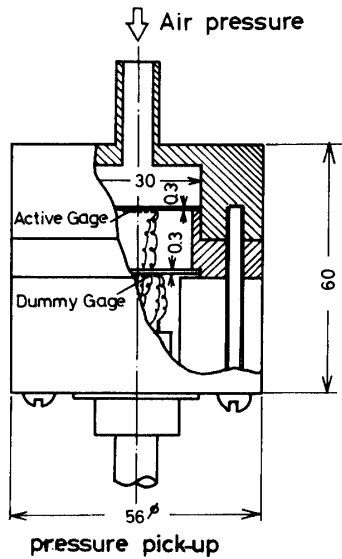


Fig. 4 Internal structure and the calibration curves of the pressure pick-up

されており、本実験の測定範囲 0~600mmAq で良好な直線性となっている。スラッグの圧力損失は隣接する 2 箇所の測定点での圧力波形の差から求めた。また、スラッグ内粒子の速度分布及びスラッグ長さは写真撮影によって求めた。Table 1 には本実験に使用した菜

種、N.P.K (塩加リン安)、ナイロンチップの物性値を示す。

Table 1 Physical property of the samples

Materials	Nylon-chip	N.P. K.	Rape-seed
Density (g/cm <sup>3</sup> )	1.14	1.6	1.12
Bulk density (g/cm <sup>3</sup> )	0.681	0.862	0.621
Coefficient of the wall friction (-) (Acrylic polymer)	0.320	0.276	0.345
Coefficient of the internal friction (-)	0.397	0.647	0.482
Shape of particles	l=2.45mm d=2.68mm		

### 3.1 フローパターンと管内圧力分布

本実験装置では、材料を輸送管内に充填する期間と、その材料を切取って閉塞層を形成して運ぶ輸送期間の 2 つの動作状態があり、輸送物は管内を栓状となって断続的に運ばれる (スラッグ輸送と呼ぶ)。

ここでは、菜種の水平輸送について Fig. 5 を用いて説明する。タイマーの設定時間は、輸送管に材料を充填する時間 (Fig. 5(a) の A 部から圧縮空気を送り込む時間) を 7.0 秒とし、閉塞層の形成及び輸送のための時間 (Fig. 5 (a) の B 部から圧縮空気を送り込む時間) を 7.5 秒とした。

Fig. 5 の (a) 図 (菜種) は水平な輸送管 (断面形状: 6.6cm x 6.6cm) へ輸送物を充填する直前 (t=0) の状態で、輸送材料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 7.0 秒経過した時の状態で、輸送物は測圧タップ 2 の直前まで充填している。この状態での管路内静圧分布は (b) 図に示されており、輸送物のない所では圧力はほぼ大気圧で、測定点 1 の所では約 184 mmAq になっている (充填終了状態)。

図の (c) は、輸送開始直後の状態 (圧縮空気の流入するところが A 部から B 部に切替った直後で (a) 図の状態から約 8.5 秒経過した状態) である。管内に充填されていた輸送物は B 部から圧縮空気が急激に流入してくるために切取られ、図のように第一番目の閉塞層を形成して栓状になって輸送される。この状態での管路の圧力分布は閉塞層上流側から供給器までの間 (図の測圧タップ 2 から圧縮空気の流入口までの) はほぼ一定の圧力分布を示しており、閉塞層下流側 (図の測

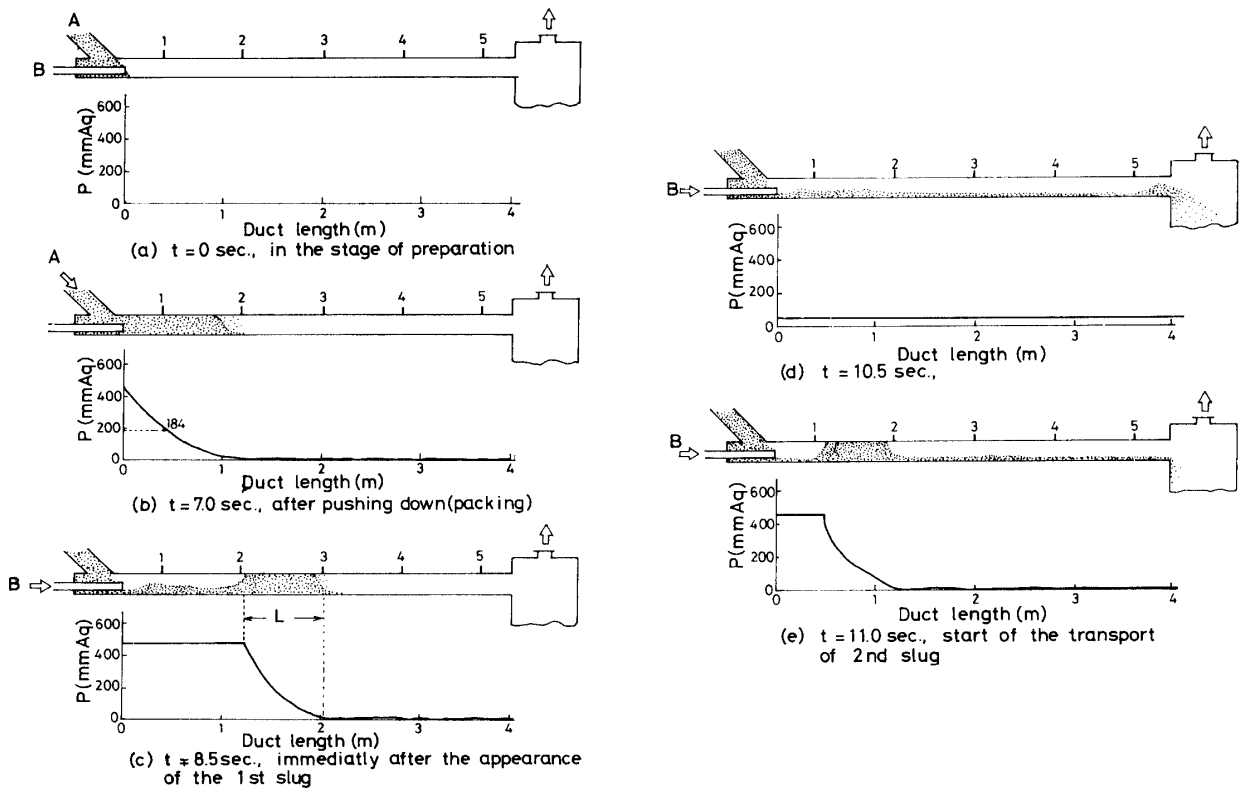


Fig. 5 Illustration of the transport and the change of pressure (for rape-seed)

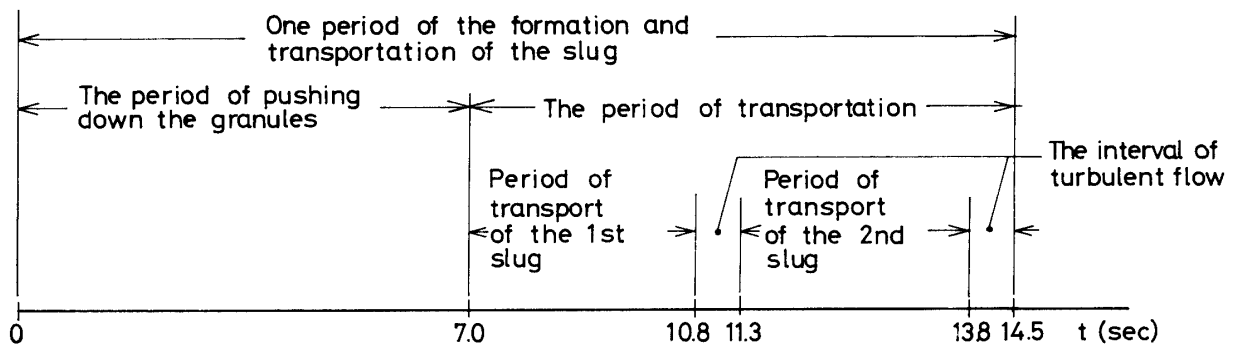


Fig. 6 State of the formation and transport of the slug

圧タップ3の位置)から捕集用ホッパー間はほぼ大気圧となっている。

Fig. 5 (d) は第一番目の閉塞層が輸送管外に排出されている時(約10.5秒経過)の状態を示す。輸送管底部には図のように菜種が残留しており、測圧タップ1の近くが最も多く高さは40mm程度、測圧タップ2~5間で厚みが20mm程度で底部に堆積している。

この第1番目の閉塞層が管外へ完全に排出されると、一時的に輸送管内には閉塞層が存在しない状態になるのでB部からの流入空気量(約3 m<sup>3</sup>/min)が大きくなる。このため管内は通常空気輸送(乱流輸送と仮称する)となり、測圧タップ1の近くに残留していた

輸送材料が吹き飛ばされ、輸送管を塞ぎその結果第2番目の閉塞層が発生する。

Fig. (e) は第2番目の閉塞層が出来た直後の状態と管路の圧力分布を示す。この2番目の閉塞層が輸送管外に排出されると約1秒間乱流輸送になり、管底に残留していた菜種は大部分排出される。乱流輸送の後、タイマーにより流入する圧縮空気はB部からA部に切り替わり Fig. 5 (a)~(e)の動作を繰り返す。

以上より本実験装置による菜種のスラッグ輸送における閉塞層の形成及びその輸送の動作区分は、Fig. 6のようになる。Fig. 6の第2番目の閉塞層が輸送された後(t=13.8以後)、乱流輸送の区間があるが、輸送

物の“こわれ”を防止する意味でこの区間は可能なかぎり短い方がよい。

### 3.2 圧力損失とスラッグの移動状態

Fig. 7 には菜種を輸送した場合の測定点2で記録された圧力波形 (a) 図と輸送期間中のスラッグの位置 (b) 図が示されている。タイマーの設定は充填期間が7.0秒で輸送期間は7.5秒である。

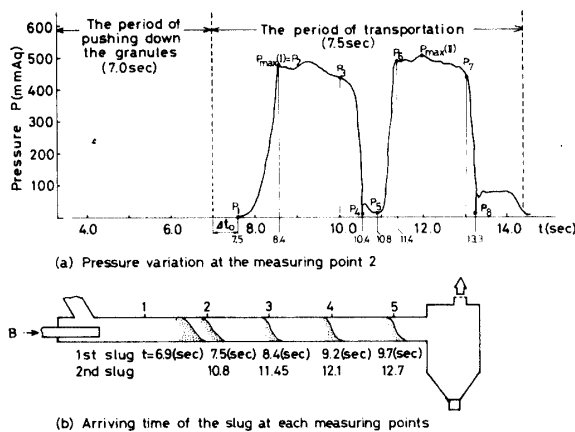


Fig. 7 Illustration of the pressure variation in the duct and the corresponding slug positions (rape-seed)

Fig. 7(a) をみると  $t=0\sim 7.5$  秒迄の測定点2の圧力は、 $P=0$  となり、 $t=7.5$  秒を経過してから上昇を始め、8.4秒になると最大圧力  $P_{max}(I)$  になっている。この7.5秒からの圧力上昇 ( $P_1$  から  $P_2$ ) の原因は、(b) 図に示されているように輸送開始直前 ( $t=6.9$  秒) に測定点2の近くまで充填していた菜種が、輸送開始 (B部から圧縮空気が流入する) と同時に押出されるために、1 番目のスラッグが形成され、その前面が測定点2を通過するためである。次に  $t=8.4$  秒になるとスラッグはさらに移動してその前面はほぼ測定点3の所に達しており、後面は測定点2を通過する。よって、(a) 図の  $\Delta t_0$  秒間はスラッグが形成されて2の所に到達するまでの所要時間 (この間  $P=0$ ) で、 $t=7.5\sim 8.4$  秒間の圧力上昇 ( $P_1$  から  $P_2$ ) は、1 番目のスラッグ内の圧力分布を示すものと考えられる。また約10秒まではスラッグが管内に存在する ((b) 図測定点5にスラッグが到達するのは約9.9秒) と考えられるので、8.4~10秒間の圧力変化 ( $P_3$  から  $P_5$ ) は、スラッグが2の所を通過して5に到達するまでの状態を示すものと考えられる。約10.4秒になるとスラッグは完全に捕集用ホッパー内に入り、輸送管が空の状態となり、B部 ((b) 図参照) から高速で空気が流入するため乱流輸送

の状態になり静圧は急激に減少する。この乱流輸送状態になると同時に測定点1の近くに残留していた菜種が吹き飛ばされて第2のスラッグが形成される。 $t=10.8$  秒になると第2のスラッグの前面が測定点2に到達するため再び圧力が上昇を始め ( $P_5\sim P_6$ )、このスラッグが捕集用ホッパーに回収された時 ( $t=13.3$  秒)、管内の静圧 ( $P_8$ ) は急激に減少する。

以上の輸送状態から圧力測定点にスラッグの前面が到達するまで圧力は、 $P=0$  であり、スラッグの後面が通過する時、各スラッグ共圧力はほぼ最大値 ( $P_2$  及び  $P_6$ ) となる。したがって、(a) 図の  $P_2$  及び  $P_6$  値はスラッグ前後の差圧 (下流側圧力  $P=0$  なので) の瞬時値と考えられる。(圧力損失) スラッグの移動中の最大圧力損失は、ほとんどの場合  $P_2$  及び  $P_6$  値になるが、輸送中にスラッグの密度が変化するために、(a) 図の  $P_{max}(II)$  のように測定点を通過してから現われることがある。

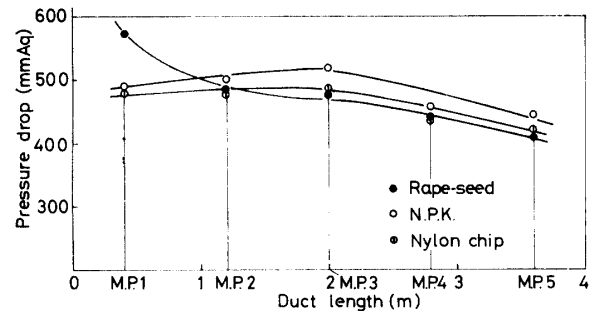


Fig. 8 Pressure drop across the slug in the moving state

Fig. 8 は上述の方法で各測定点での圧力波形から最大圧損  $P_{max}$  を求め、これをスラッグの圧損としてスラッグが移動する間 (輸送管内にスラッグが滞在する間) の圧損変化を調べたものである。この図からナイロンチップとN.P.K.は測定点3あたりまで圧損が増加してゆき、その後減少の傾向となっている。このことからナイロンチップとN.P.K.については測定点3の近傍でスラッグは最も密な状態と考えられる。

一方菜種の場合は、輸送開始点 (測定点1) では560mmAq と大きな圧損を示しているが、密度が小さく流動性が良いためスラッグが移動中に粗な状態になり易いために圧損が減少するものと思われる。

### 3.3 スラッグの移動速度とスラッグ内粒子の速度分布

ここでは圧力波形から求めたスラッグの移動速度と

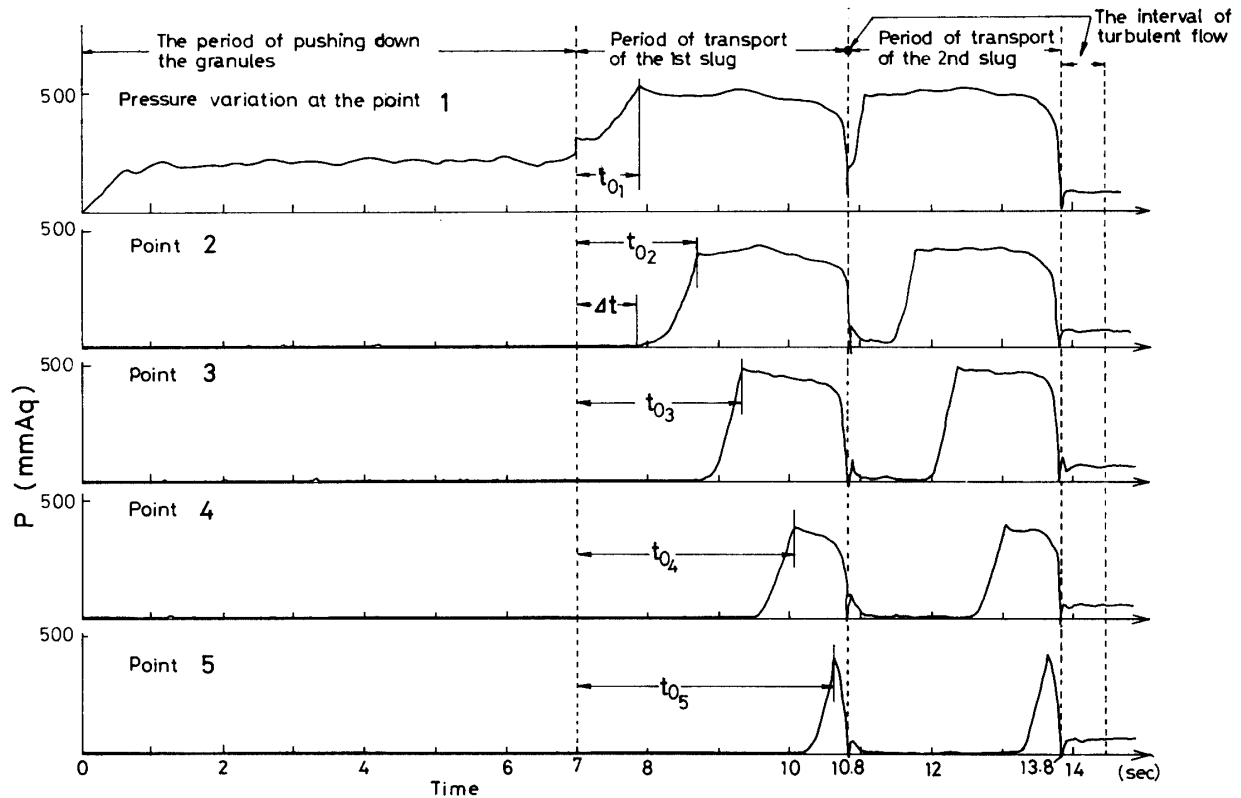


Fig. 9 Prepressure variations in each measuring points (rape-seed)

写真撮影によって求めたスラッグ内粒子の速度分布について述べる。

Fig. 9 には菜種のスラッグ輸送を行なった場合の一周期間の各測定点（5箇所）における圧力変化の状態が示されている。各測定位置での圧力波形には、 $t=7.0\sim 13.8$ 秒の間に2つの山が現われているが、これはスラッグが2つ輸送されるためである（この間の状態については3.2で詳述）。図の中で測定点1では、他の測定点と異り充填開始（ $t=0$ ）とほとんど同時に圧力の上昇がみられる。この圧力測定位置は供給器内のパイプBの圧縮空気吐出口（Fig. 7 (b) 参照）から40cmの所に在り、充填を開始すると供給器から送り込まれる輸送物は直ちにこの測定位置に到達し、徐々に輸送管を塞いでゆき、約2秒後には測定点1の管断面はほぼ完全に塞がれる。以後輸送管上部には部分流が発生し、この部分流によって粒子が少量づつ運ばれて約6.9秒後には測定点2の手前（約10～15cm程度）まで輸送物は充填する。このように測定点1の下流側が輸送物によって徐々に塞がれ、パイプAから送り込まれる圧縮空気の流れが悪くなるために圧力が増加してゆくものと思われる。 $t=7.0$ 秒になると急激にB部から圧縮空気が吐出され、測定点1の近くに充填していた材料がさらに密な充填状態となり、圧力は増加

する。（同時にスラッグが移動を開始する）輸送開始（ $t=7.0$ ）してから  $\Delta t$  秒後に測定点2の圧力が増加するのは、測定点1の近くで形成されたスラッグの前面がこの位置に到達したことを示しており、 $t_{02}$  秒はスラッグの後面が測定点2の所に達したことを示す（3.2で詳述）。同様にして  $t_{03}\sim t_{05}$  の時間はスラッグが移動を始めてから各測定点にスラッグ後面が到達するための所要時間と考えられる。よって、測定点1から2へスラッグが移動するための所要時間は、 $t_{02}-t_{01}$  で与えられる。また、この間の距離は80cmとなっているので（Fig. 7(b) 図）、1と2の間のスラッグの移動速度  $V$  は

$$V = \frac{0.8}{t_{02} - t_{01}} \quad (\text{m/s})$$

で与えられる。同様にして、80cm間隔で設置してある隣接する2つの測定点間のスラッグの移動速度が求められる。

上述の方法で3種類の材料についてスラッグの移動速度を求め、輸送中のスラッグの速度変化を調べたのが Fig. 10 に示されている。一方、スラッグ内粒子の速度分布は測定点1-2間で写真撮影して求めた。Fig. 11 は菜種を輸送した場合の測定結果で、図 (a) には粒子の水平方向の速度分布が示され、図 (b) にはスラッ

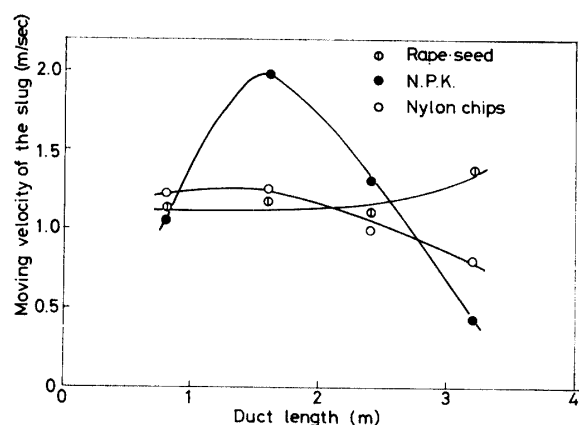


Fig. 10 Variation of the velocity of the slug

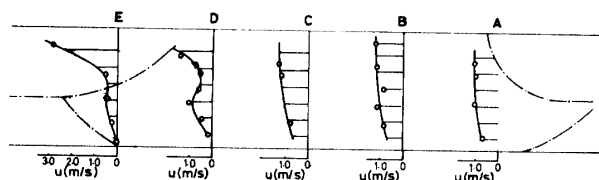


Fig. 11 a) Velocity distribution in the slug (rape-seed)

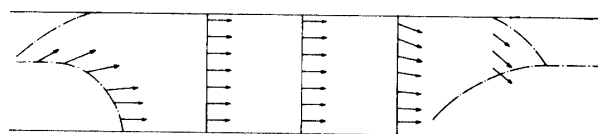


Fig. 11 b) Trajectories of the particles in the slug

管内粒子の移動する方向が示されている。このスラッグの長さは約 56cm で、最大圧損  $P_{max}$  は 560 mmAq 程度であった。図 (a) の A~E までの各測定点はスラッグ上流側より 12cm 間隔で示されている。A~E の各々の速度分布をみると輸送管上部は速度が大きく、下部は小さくなっている。これは管上部の粒子群の重量が下部の粒子群に影響するために、管底部では粒子と管壁との摩擦力が大きいためと考えられる。また図 (a) の中心線より上部はほぼ 1.2 m/sec の速度にな

っており、この速度は圧力波形から求めたスラッグの移動速度の 1-2 間での測定結果 (Fig. 10 の菜種の場合) とほぼ同じ値となっている。D,E の速度分布をみると上部に 1.5~3.0m/s の速度が現われているが、この測定値は一点鎖線で示されるスラッグ前面の近くに在る粒子のものである。この部分の粒子はスラッグ内からいきなり自由空間に投出され、しかも粒子の運動を妨げるものがないため大きい速度になるものと思われる。

### 3.4 輸送状態

Table 2 にはそれぞれの輸送材料についての平均スラッグ長さ  $L$  と輸送量と管内残留量が示されている。スラッグの長さ  $L$  は Fig. 12 に示されているように、輸送管の中心線と交わるスラッグ前面と後面の間隔を測定した。また、輸送量は材料を輸送管に充填し始める時から供給用ホッパーが空になり、最後のスラッグが捕集用ホッパーに入った時迄の時間に捕集用ホッパーに堆積した量から算出した。今回行なった水平輸送では、スラッグが通過した後に、管底部に材料が残留し、次のスラッグの移動速度 (したがって輸送量に影響する) に影響しているのが観測されたので、この残留高さをも付記した。Table 2 の菜種のスラッグ長の括弧内の数値は第 2 番目のスラッグ長を示す。N.P.K., ナイロンチップの輸送では、スラッグが 2 個出来るのは稀で、ほとんど 1 個であった。表より各材料のスラッグ長は、ほぼ同じ値を示している。しかし、輸送量は菜種がもっとも大きい。これは輸送の 1 周期間に、スラッグが 2 つ発生し効率が良いためと思われる。

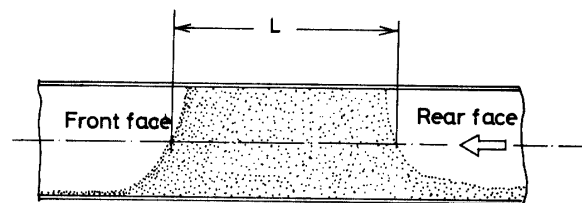


Fig. 12 Details of the moving slug

Table 2 Characteristic quantities of the slug transport

Materials	Rape-seed	Nylon-chip	N. P. K.
Length of slug (cm)	62.99 (49.45)	63.95	65.32
Residual height (cm)	2.2	4.0	3.0
Average quantity of transport (kg/h)	666.4	357.2	366.9

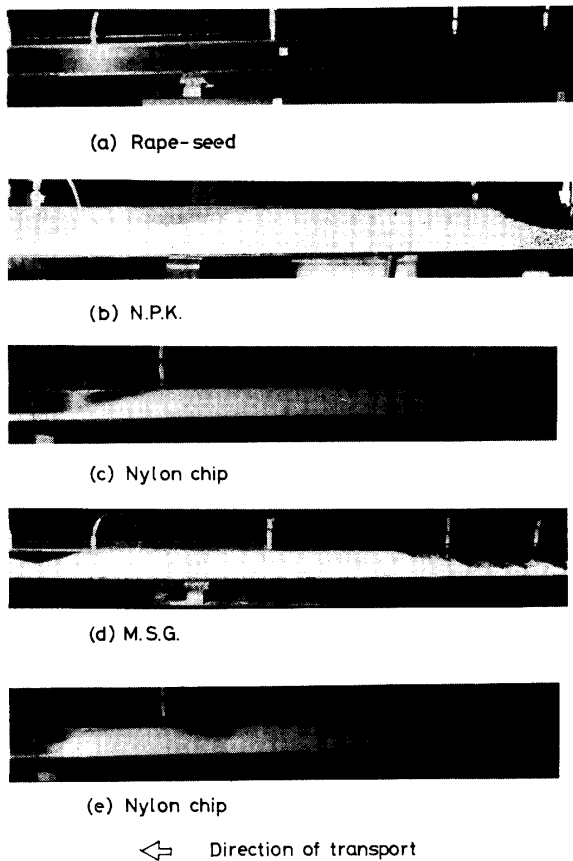


Fig. 13 Flowing pattern of the several granules

Fig. 13 には、測定点 2-3 間で撮影した各輸送材料のプラグが示されている。Fig. 13 の(d)は、M.S.G (グルタミン酸モノナトリウム) のプラグの写真で今回の実験で、輸送不能になった一例として併記した。この M.S.G は、粒子形状が針状で、長さ 1.15mm,  $0.49 \times 0.49$  の断面を持つ角柱である。したがって、他の輸送物と比較して小さい粒子で、管摩擦係数 0.309, 内部摩擦係数 0.77 と大きく、輸送し難い材料である。この材料の場合、1つのプラグが、通過した後の管底に残った輸送物の表面が、写真のように凸凹となり、次に送られてくるプラグの障害となり、管内が完全に閉鎖された状態となり、輸送出来なくなる。水平輸送を行なう場合、管底部に残留量があるため、プラグは、この残留している材料の上をすべるように輸送される。このため、内部摩擦係数の影響が大きく現われるものと考えられる。一方、N.P.K.のように内部摩擦係数の大きい材料であっても、粒子径が 2.65mm 程度と大きい場合は、充填状態のプラグ内の空隙が大きくなり、圧縮空気が通過し易くなるために完全に空気の流れを塞ぐことは起らないため、プラグの下流側から、材料がくずれて、プラグ長が短くなって輸送されるようである。この状態が明白に現われると、

1つの閉塞層が2つに分割されて輸送される。Fig. 13 (e) は、ナイロンチップの場合であるが、プラグが輸送途中で停止する直前に写真のように2つに別れて、再び輸送されはじめた1例である。

### 3.5 輸送風量の測定

プラグを輸送中の風量の変化は、Fig. 1 に示されているように、パイプ B に取り付けられたオリフイス流量計で測定した。Fig. 14 は、各々の材料における輸送期間中 (パイプ B から圧縮空気が吹込まれる) の風量変化である。

図の(a)は、N.P.K. 輸送の場合で、輸送開始 ( $t = 7.0$ ) と同時に風量  $Q$  は増加を始め、 $Q = 1.3 \text{ m}^3/\text{min}$  (図中の②) まで上昇し、一旦減少してから③→④→⑤と増加している。図の③になるのは、約  $t = 9.4$  秒あたりで、プラグの前面は大体測定点 3 と 4 の中間を移動中である。このように輸送中に風量に変化するのは、プラグ内粒子の詰っている状態に変化があるためと思われる。図中の④の点は、プラグが管外に排出される直前の風量を示しており、完全に排出されると輸送管内が空となり、短時間の乱流輸送となるた

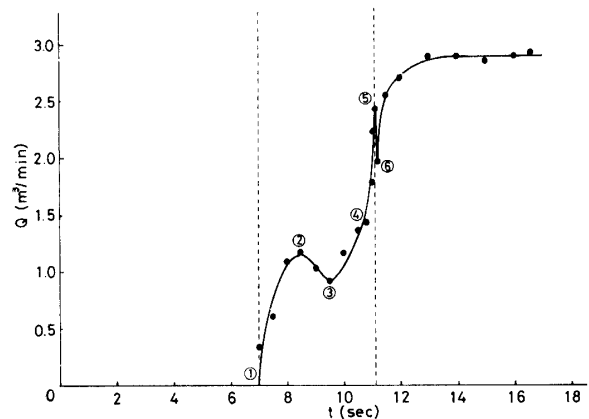


Fig. 14 (a) N.P.K.

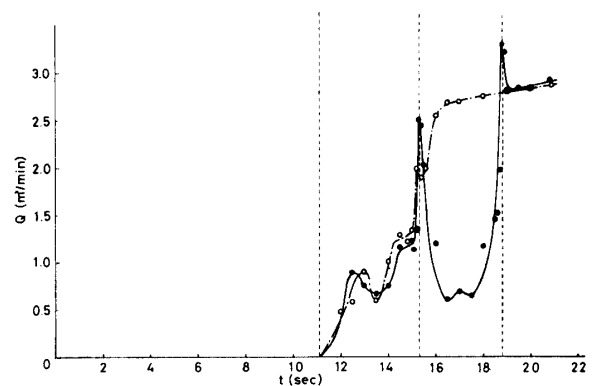


Fig. 14 (b) Nylon-chip



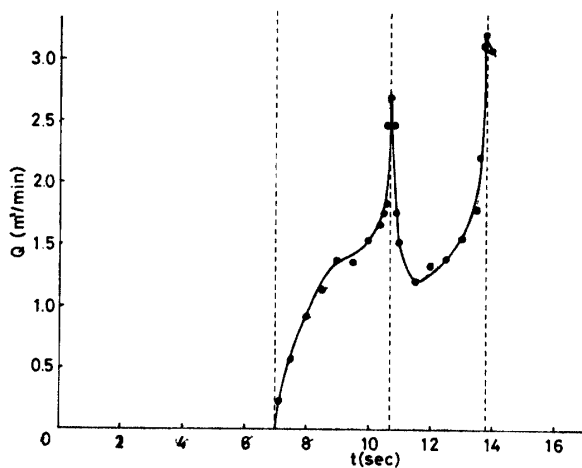


Fig. 14 (c) Rape-seed

Fig. 14 Variation of the flowing air in transport

め、風量は④→⑤と急激に増加する。また、⑤→⑥と風量が減少するのは、一時、管内が乱流状態となるため、測定点1の近くの管底に残留していた輸送物が吹き飛ばされて輸送管を塞ぐためである。しかしN.P.K.の場合、この時第2のスラッグが不完全で直ちに崩れるために再び乱流輸送となる。

図の(b)は、ナイロンチップ輸送の場合で、この材料では、時々2つのスラッグが発生するので併記した。○印がスラッグ1つの場合で  $t=15.5$  秒あたりから管内は乱流輸送となり、風量は増加してゆく。●印は、スラッグが2つの場合の風量で、輸送開始 ( $t=11.0$  秒) から、1番目のスラッグが管外に排出されるまで ( $t=15.5$ ) の●印と○印を比較すると、ほぼ同じ傾向を示している。スラッグが1つしか出来ない原因として、管内残留量の影響が大きいと考えられるが、この

点については輸送状態、特にスラッグ内粒子の運動状態との関係について調べる必要があると思われる。

図の(c)は、菜種の場合でスラッグは、2つ出来る。しかも、1番目のスラッグが移動を始めてから ( $t=7.0$ )、管外に排出されるまで ( $t=10.7$ )、風量はほぼ直線的に増加しており、他の材料と比較して風量の変動は少い。

#### 4. 結 語

以上の実験結果より、次の事柄が明らかとなった。

- 1) スラッグは管底部に残留する粒体層の上をすべるように、移動する。よって、密度が大きく内部摩擦係数が大きいN.P.K.のような材料は管底部に残留し易い。
- 2) 菜種のスラッグ内粒子の速度分布を求めた結果、輸送管上部(中心線より上部)は、ほぼ  $1.2\text{m/s}$  と大きく管底部では  $0.5\text{m/s}$  程度となり遅い。
- 3) 輸送量は、スラッグが2つ出来る菜種の場合が最も多く、 $666.4\text{kg/n}$  となった。
- 4) スラッグが移動中の風量は、ナイロンチップ、N.P.K.では変動が大きいのが、菜種の場合変動が少くほぼ直線的に増加する。(Fig. 14)

#### 参 考 文 献

- 1) A. Lippert; Chem. Ing. Techn., **38**, 350 (1966)
- 2) 上滝; 粉粒体の空気輸送, 日刊工業新聞.
- 3) 狩野, 渡辺; 粉工研., Vol. 10, No. 9, (1973) 622.
- 5) 早野, 原田, 上滝; 山口大学工学部研究報告, Vol. 25, No. 2, (1975)

(昭和51年4月15日 受理)