

# 粉粒体輸送用低速・高濃度空気輸送装置

## Plug Flow Type Pneumatic Conveying System

空気輸送の適用範囲拡大のため、低速・高濃度圧送式空気輸送装置の開発を行った。

低速・高濃度圧送式空気輸送装置を実用化するために、二重管形状(だるま管)の輸送管を考案し、実機計画に必要な圧力損失などを理論解析で求め、輸送実験により理論式との照合を行なった。更に、本方式の特長である破碎防止、分級防止及び閉塞防止効果をそれぞれ確認し、従来方式では輸送できなかった粉粒体(顆粒状粉ミルク、含水ケイ砂など)に対して空気輸送が可能となり、新分野へ進出できる見通しを得た。

岩渕富和\* Tomikazu Iwabuchi

川上忠幸\* Tadayuki Kawakami

### 1 緒言

粉粒体輸送の分野では流通機構の合理化のため、ばら輸送が主流を占めている。粉粒体をばらで輸送する手段としては、大別してベルトコンベヤなど機械力によるもの、空気力や水力によるものなどがある。

空気輸送装置は、機械式輸送装置など他の輸送手段に比べて輸送物の残留や飛散がなく、輸送経路の計画が比較的自由であるなど多くの特長があり、石油化学工業界の合成樹脂ペレット、パウダの輸送、窯鉱業界のセメント、アルミナの輸送、食糧・飼料業界での小麦、大豆など穀物の陸揚げなど広い分野で使用されている。

しかし、従来の空気輸送装置はその特性上、輸送物が輸送配管内に停滞して閉塞しないように浮遊する高速気流(約20~40m/s)を利用しているため、次に述べるような欠点があった。

- (1) 輸送粉粒体が輸送管内壁との衝突によって破碎しやすいこと。
- (2) 輸送管が摩耗しやすいこと。
- (3) 形状や粒径の異なる粉粒体を混合輸送すると、分級(形状や粒径の同じ物のブロックに分かれる。)しやすいこと。
- (4) 消費動力が大きいこと。

そこで、日立プラント建設株式会社は、低速度(約5m/s以下)でも輸送できる新しい「低速・高濃度空気輸送装置」を開発した。以下、その内容について紹介する。

### 2 空気輸送方式

#### 2.1 輸送の原理

図1に従来の空気輸送方式である浮遊流輸送方式及び新しい低速・高濃度輸送方式の輸送原理を比較して示す。従来方式では、輸送管内の空気流速が一般に20~40m/sであり、輸送物が高速気流によって吹き飛ばされ浮遊流となって輸送されている。

そこで、低速で輸送すると輸送物は配管内に停滞し、閉塞層が形成され遂には輸送が不能となる。これを防止するためには、閉塞層を幾つかのブロックに分断して輸送すればよい。

その方法として、輸送管を二重管構造とし、空気管から輸送管各部に空気を供給することにより閉塞層を短く分断するとともに、粉体層を流動化して塊状で輸送するものである。この輸送方式をプラグ流輸送方式という。

次に、このプラグ流輸送とするための二重管構造について述べる。

#### 2.2 二重管方式の輸送管の構造

先に低速・高濃度空気輸送装置には、「日立-ガティス方式」があった。この方式は、輸送管と空気管から成る二重管構造であり、その特徴は空気管がゴムでできているため、その弾性効果で輸送物が空気管内に逆流しない長所がある。しかし、材質がゴムであることから輸送中に空気管が脈動して局部的引張り力が働き、破損したりまた輸送物によっては摩耗し切断するなどの問題があった。

本開発では、従来の二重管構造を改良するため空気管への輸送物の逆流がないこと、空気管の摩耗、破損が少ないことを前提として、29件の構造を考えた。その代表例を図2に示す。これらの中からの選定に当たっては、(1)製作が容易なこと

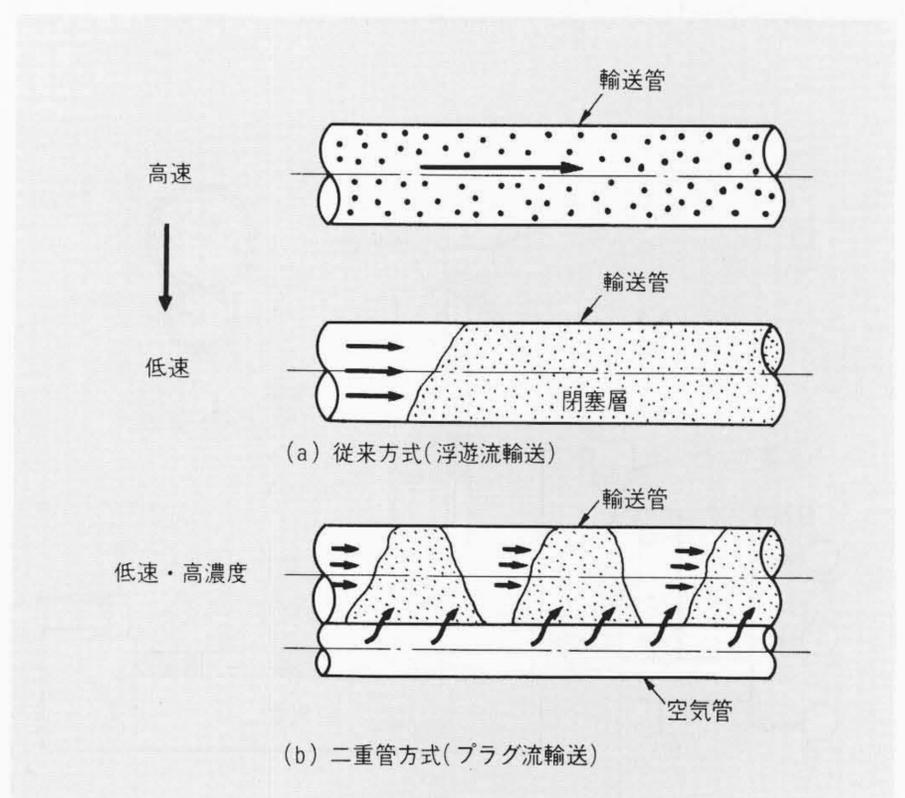


図1 低速・高濃度輸送方式説明図 従来方式では、輸送物を高速気流によって輸送するが、低速にすると閉塞するので二重管方式により閉塞層を分断し、低速で輸送する。

\* 日立プラント建設株式会社

	だるま管	検討例	検討例
構造			
主な評価	製作が容易である。 メンテナンスが容易である。	製作が困難である。 メンテナンスが困難である。	新規性がない。

図2 二重管構造の検討 二重管構造の改良は、空気管の摩耗、破損が少ないこと、空気管への輸送物の逆流がないことなどを前提条件として、(1)製作が容易なこと、(2)メンテナンスが容易なこと、(3)新規性があることなどから「だるま管」を選定した。

と、(2)メンテナンスが容易なこと、(3)新規性があることなどから「だるま管」を選定した。

空気管へ輸送物が逆流することを防止するためには、空気噴出口を小さくするとともに、空気管側の空気圧力を常に輸送管側よりも高く維持するシステムとした。空気管の摩耗、破損防止に対しては硬質管(ステンレスパイプ)を使用し、だるま管の小径部に空気管を挿入し、固定できる構造とした。

### 3 実験項目と実験装置

前述のだるま管を使用して、次のような実験を行なった。

- (1) 輸送空気圧力損失式の確立
- (2) プラグ流輸送の特性調査として、従来方式である低圧・高圧送式空気輸送装置との動力、輸送速度の比較、輸送物の破碎・分級防止効果の確認などを行ない、これらを確認のため図3に示す実験装置を作った。

実験装置の特長は、(1)輸送管を水平、垂直に分けて単純化し、輸送空気圧力損失の理論値と測定値を照合しやすくした

こと、(2)輸送距離の変化の影響を調べるため、管長を容易に変更できること、(3)輸送風量を3台のコンプレッサの組合せにより変えられること、(4)輸送管途中に透明管を入れ輸送状態を観察し、プラグ流速を測定できることなどである。

### 4 実験結果と検討

#### 4.1 輸送空気圧力損失式の確立<sup>1)~5)</sup>

##### (1) 理論計算式の求め方

表1に従来理論計算式の求め方と新しい理論計算式の求め方について示す。従来の理論計算式は、基本的には、単一プラグで輸送物と輸送管との摩擦力だけを考慮して計算式を組み立てた。新しい理論計算式は、実際の輸送状態に合わせて考えたもので、プラグが連続して移動しておりプラグの摩擦力のほかに、その加速度を考慮したものである。式中小括弧内第2項(\*印項)が加速度項であり、小括弧内を輸送距離で積分することによって、連続プラグ流の状態にしている。

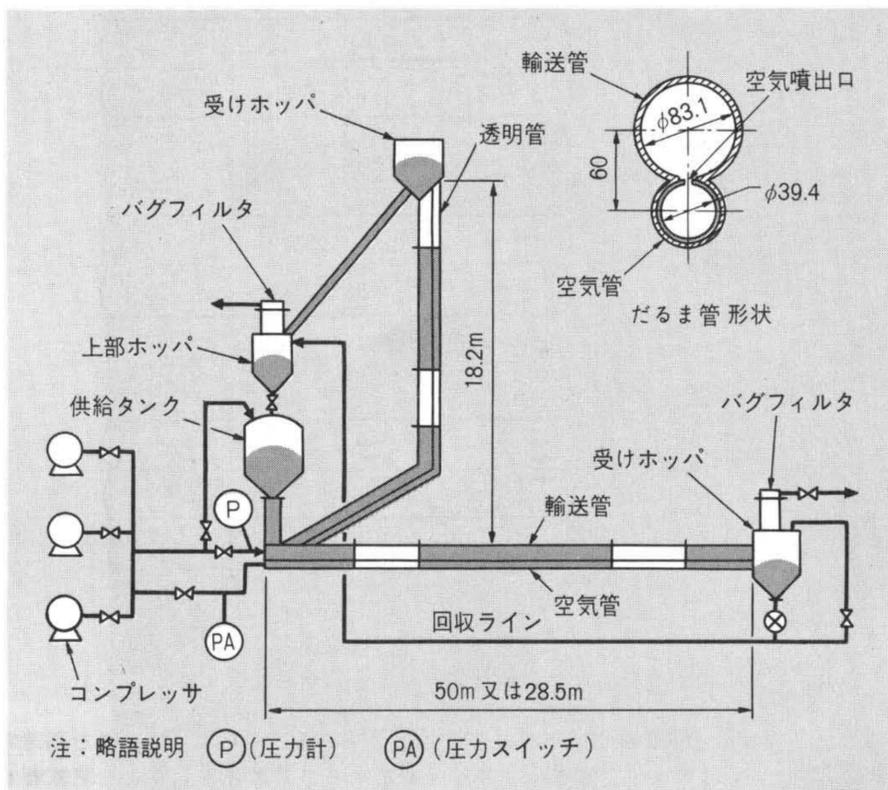


図3 実験装置フローシート だるま管を使用したこの実験装置の特長は、輸送管を水平、垂直に分けて単純化し、輸送距離を容易に変更でき、3台のコンプレッサの組合せで、風量を変えられること、また、輸送管途中に透明管を入れ、輸送状態を観察しプラグ流速を測定できることなどである。

表1 理論計算式の考え方 従来の理論式は、単一プラグで輸送物と輸送管との摩擦力だけを考慮したもので、新しい理論式は実際の輸送状態に合わせて考えたものでプラグは連続して移動しており、摩擦力のほかに加速度を考慮した。

	従来の計算式	新しい計算式
原理図		
計算の条件	(1) 単一プラグ (2) 摩擦力を考慮 (3) 管壁面摩擦係数を輸送実験で求めた。	(1) 連続移動プラグ (2) プラグの加速度は輸送距離に一乗比例する。 (3) 摩擦係数を剪断試験で求めた。
圧損式	$P = \sum \Delta P$ $\Delta P = \frac{\Delta w_{gc}}{A(1-k\mu)} \mu'$	$P = \int_0^L \Delta P = \int_0^L \left( \frac{\Delta w_{gc}}{A(1-k\mu)} \mu' + \frac{\Delta w}{A(1-k\mu)} \alpha \right)$ $P = \frac{4Ggc\mu}{\pi A(1-k\mu)C} \ln \left( \frac{v_{PO} + CL}{v_{PO}} \right) + \frac{GCL}{A(1-k\mu)}$
記号説明	$\mu'$ : 管壁面摩擦係数 $\mu$ : 平面摩擦係数 $C$ : (L)に対するプラグの速度変化	$\Delta w$ : 単一プラグの重さ $G$ : 輸送能力 $\alpha$ : プラグの加速度

(2) 理論計算結果と実験結果

理論計算結果と実験結果では、新しい理論計算式による計算数値は従来の理論計算式による計算値に比べかなり実測値に近づいたが、まだ約30%の誤差があり実機設計に適用するには問題がある。この違いの原因は、プラグの加速度が輸送距離に対し一乗に比例するとした仮定(表1に記載)が間違っていたものと判断し、検討の結果輸送距離に対しその加速度は曲線的に変化していることが判明した。新しい理論計算式を実験結果に基づき、プラグの加速度の考え方を代入して修正した結果を図4に示す。物性の異なる3種類の輸送物の実測値と新しい理論計算式とによる計算値はほぼ一致した。

図5は、輸送管径と距離を変えた場合の結果を示すものであるが、修正した新しい理論計算値は実測値とかなり一致しており、輸送物、輸送管径及び距離が異なった場合でもこの式を適用することができ、実機の設計に使用できる見通しを得た。

4.2 プラグ流輸送方式の特性

(1) 従来の低圧・高圧圧送式空気輸送装置との比較

比較のため、同じ実験装置を使用して従来方式である浮遊流輸送の低圧・高圧圧送式空気輸送について輸送実験を行な

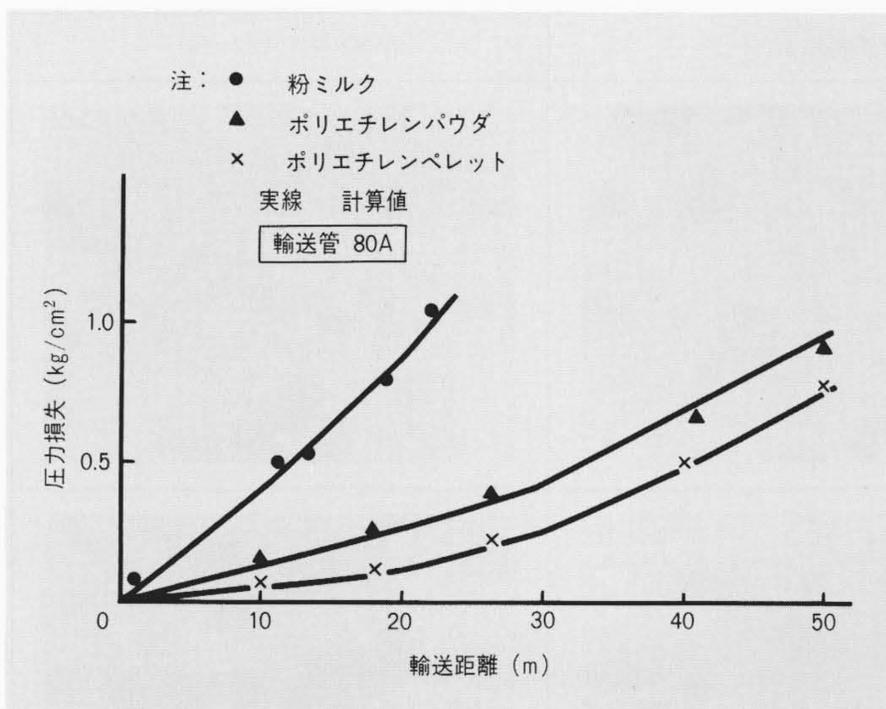


図4 圧力損失計算式の検討 物性の異なる3種類の輸送物の実測値と新しい理論計算式による計算値とはほぼ一致した。

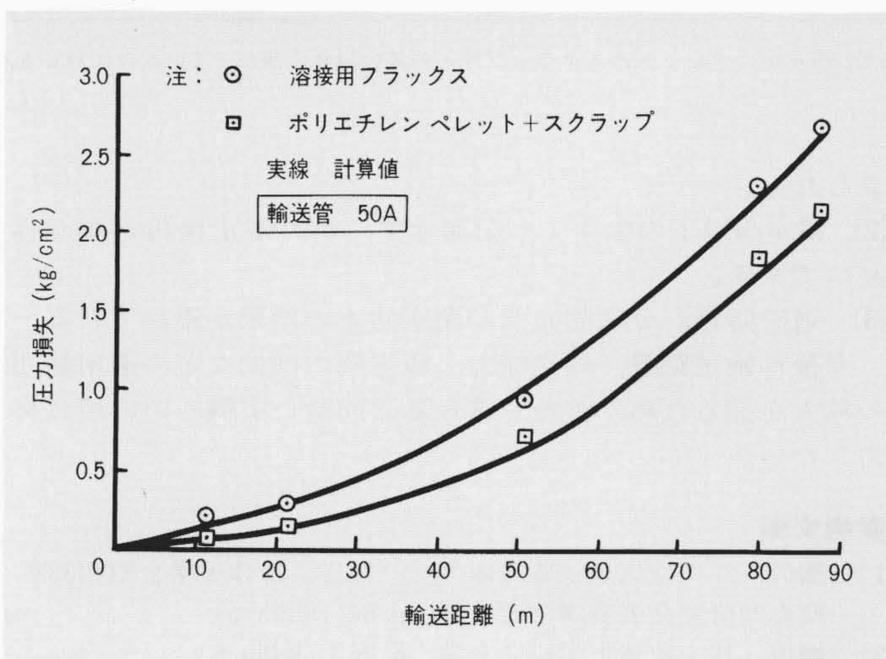


図5 圧力損失計算式の検討 輸送物、輸送管径及び輸送距離を変えた場合でも、新しい理論計算値は実測値とかなり一致している。このことから、新しい理論計算式は実機の設計に使用できる見通しを得た。

表2 プラグ流輸送と浮遊流輸送との比較 プラグ流輸送は5m/s以下で輸送でき、更に輸送途中一時輸送を停止してもそのまま再起動でき、また動力比較では、他との輸送方式の違いによる差はないことが分かった。

輸送形態	方式	輸送可能速度 (m/s)	一時輸送停止後の再起動	①輸送能力 (t/h)	②電動機出力 (kW)	③ $\frac{kW}{t/h}$
プラグ流	低速高濃度	5 ≥	可	4.66	1.38	0.3
浮遊流	低圧	13 ≤	不可	5.60	1.67	0.3
	高圧	8 ≤	不可	14.10	4.35	0.3

注：比較条件 輸送物 ポリエチレンパウダ  
輸送管径 80A  
輸送距離(水平) 50m

った。結果を表2に示す。

輸送可能な空気速度は、低圧圧送方式では13m/s以上、高圧圧送方式では8m/s以上であった。それ以下の速度では各輸送管底に輸送物が停滞し、閉塞して輸送不能となった。だるま管を使用した低速・高濃度輸送方式では、5m/s以下でも輸送可能であり、かつ輸送を一時停止させ、その状態で再起動させた場合でも問題なく輸送可能であった。次に所要電力について比較すると、各方式の最も輸送効率の良い状態では単位輸送量当たりの所要動力は全く同一であり、方式の違いによる差はないことが分かった。また輸送管断面積が同一であるにもかかわらず、低速・高濃度輸送方式の輸送能力が小さいことから、本方式は浮遊流の従来輸送方式に比べて同一輸送能力の場合、輸送管径を大きくする必要がある。

(2) 破碎防止効果

一般に粉粒体の破碎は、輸送物と管壁との衝突や輸送物間の衝突で発生するといわれている。粉ミルクなど顆粒状輸送物は、破碎すると品質の低下を来す。図6、7に粉ミルクメーカーから依頼されて行なった破碎実験の結果を示す。図6は輸送前後の粒度分布を示し、図7は破碎率と輸送速度との関係を示したものである。図7から分かるように、破碎率はほぼ輸送速度の二乗に比例して増大していることから、低速・高濃度輸送方式は破碎防止効果に優れていることが分かる。

なお、破碎率の定義は一般的なものがなく、ここでは下記のように定義した。

破碎率 = 輸送前の累積重量率50%の粒径以下の累積重量率の増加分

(3) 分級防止効果

輸送物の形状、粒径、比重などが異なる粉粒体を混合して従来方式で輸送すると、上記要因によって気流による移動速度が異なり分級されるので、最終製品の品質にばらつきを生ずる。

図8にポリエチレン容器成形工程中の原料輸送に関する実験結果を示す。実験試料はポリエチレンペレットとポリエチレン容器の粉碎物(スクラップ片)との混合物(混合比1:1)で、形状は同図の上部に示すとおりである。

試料の採集は輸送先の受ホッパ内の上部と下部から行なったもので、従来方式(浮遊流輸送)のときは明らかにホッパの上部と下部とでは組成の差がでていた。一方、低速・高濃度輸送方式(プラグ流輸送)では、その差がなく分級防止効果に優れていることが分かる。

(4) 閉塞防止効果

空気輸送装置はパイプ内を空気力によって輸送するため、

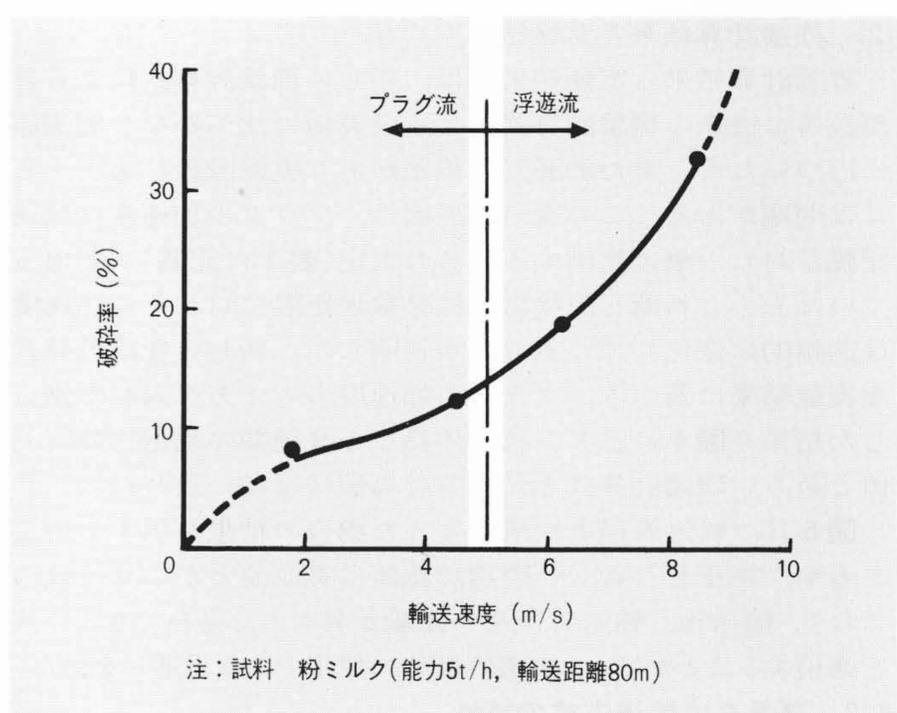
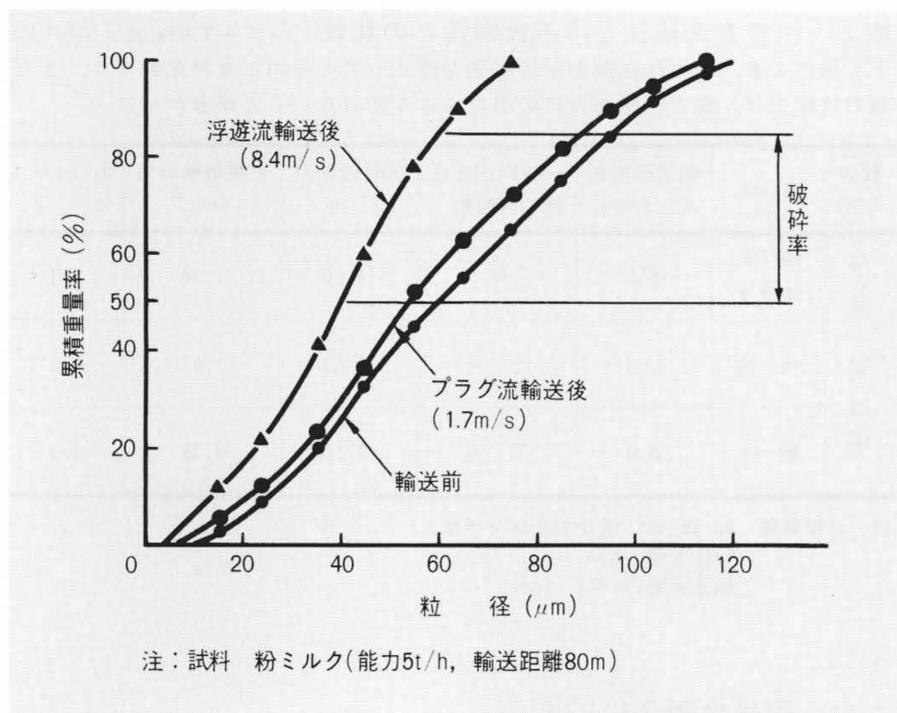


図6 輸送前後の粒度分布の変化 輸送前と輸送後の粒度分布の差を測定したもので、プラグ流輸送は、浮遊流輸送に比べて輸送による破碎防止効果に優れていることが分かる。

図7 破碎率と輸送速度の関係 破碎率はほぼ輸送速度の二乗に比例して増大する。

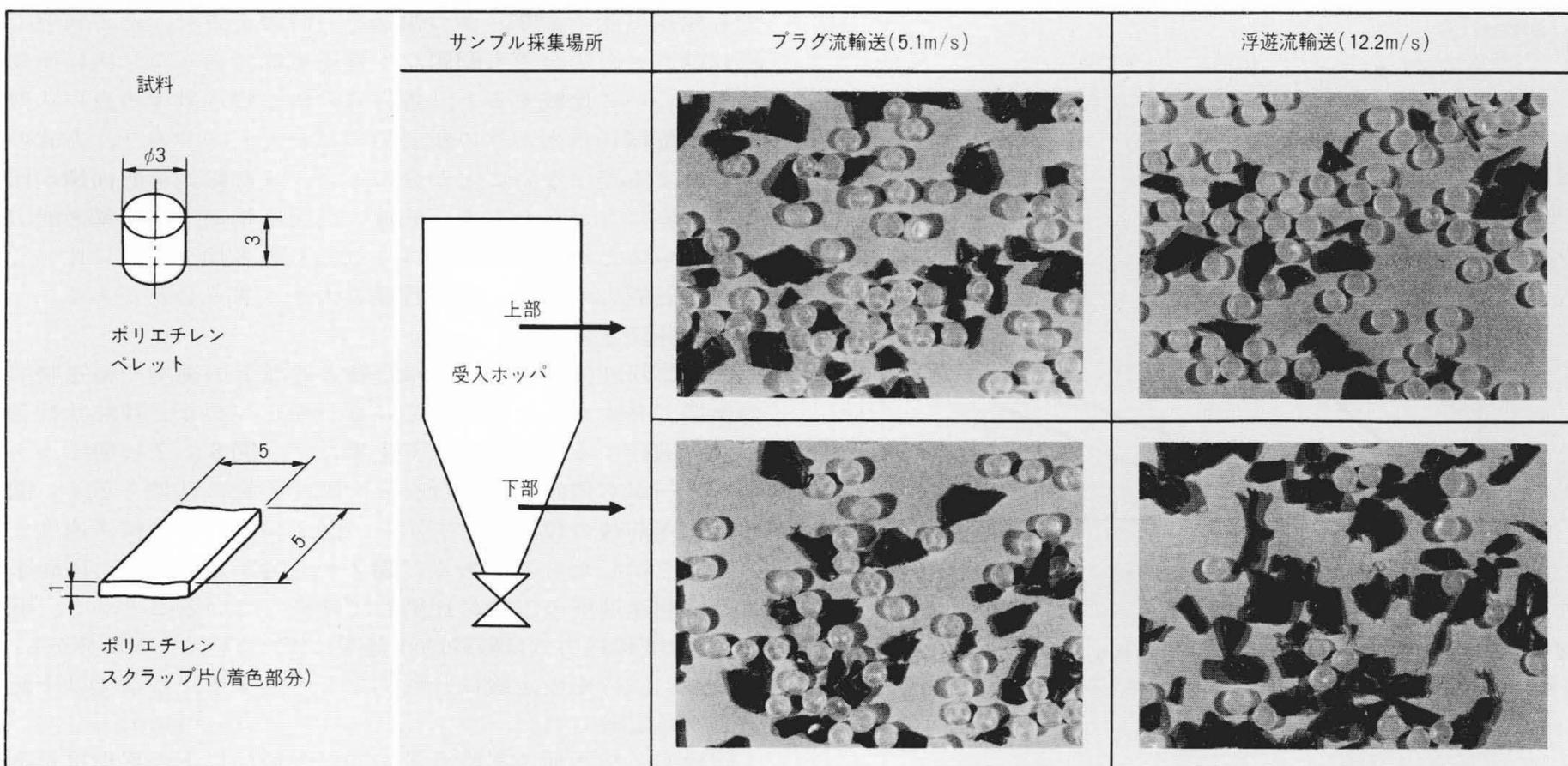


図8 分級防止の効果 従来方式(浮遊流輸送)では受入ホッパ内の上部と下部で、明らかにペレットとスクラップ片との混合割合に差がでていたのに対して、低速・高濃度輸送方式(プラグ流輸送)では差がなく、分級防止効果に優れている。

輸送物の性状(粒径, 比重など)に制約を受けるが、特に水分が少ないことが望ましい。しかし、今回ガラスメーカーから水分含有率の高いケイ砂(真比重3, 含水量12wt%)の輸送実験依頼があり、従来方式では輸送管内に閉塞し輸送できなかったが、低速・高濃度輸送方式では閉塞することなく輸送することができた。更に、輸送途中で一時輸送を停止しても、そのまま再起動できることが分かった。このことから、今まで閉塞して空気輸送できなかった輸送物(含有水分の高い粉粒体など)に対しても輸送することができ、閉塞防止効果に優れていることが分かった。

5 結 言

今回の開発で得た結論をまとめると下記のとおりである。

- (1) 低速・高濃度輸送の輸送圧力損失について、計算式を確

- 立した。
  - (2) 5 m/s以下の輸送でも閉塞せず、かつ停止後再起動が容易にできる。
  - (3) 破碎防止, 分級防止及び閉塞防止の効果が優れている。
- 今後は輸送距離, 輸送能力, 輸送物の種類などの適用範囲の拡大を図るため、実験を重ねると同時に実機への応用に努力したい。

参考文献

- 1) 綱川, 外: 空気による粒体プラグ輸送, 粉体工学会昭和53年度春期研究発表会講演要旨集, p. 64 (昭53-5)
- 2) 綱川, 外: 粉体工学研究会誌, p. 263 (昭50-6)
- 3) 化学工学協会: 化学プロセス集成, p. 979 (昭43-3)
- 4) 狩野: 粉粒体輸送装置, 日刊工業, p. 38, p. 94 (昭44-6)
- 5) 白井: 流動層, 科学技術社, p. 53 (昭43)