

静岡大学 博士論文

粉粒体空気輸送の振動効果による  
所要動力低減に関する研究

**Application of Vibration to Pneumatic Conveyance of Granular Materials  
for Reduction of Power Consumption**

1995年1月

竹内文章

FUMIAKI TAKEUCHI



# 目 次

第 1 章 序論	1
1・1 粉粒体空気輸送の特徴と分類	2
1・2 既往の研究の概要	5
1・3 本研究の目的	10
第 2 章 粒子移動限界におよぼす振動効果	12
2・1 緒言	12
2・2 理論	12
2・2・1 粒子層表面上の速度分布	12
2・2・2 粒子の初期飛散力の計算方法	13
2・2・3 粒子移動限界におよぼす振動効果	14
2・3 供試粉粒体	16
2・4 実験装置および実験方法	17
2・4・1 振動板上における粉粒体の摩擦係数測定装置	17
2・4・2 振動板上における粉粒体の飛散限界測定装置	17
2・5 実験結果および考察	19
2・5・1 振動による摩擦係数の変化	19
2・5・2 振動による粒子移動限界速度の変化	20
2・5・3 掃流底層の厚さの影響	23
2・6 結言	24
第 3 章 乾燥および含水粉粒体輸送への振動効果	26
3・1 緒言	26
3・2 理論	26
3・3 実験装置および実験方法	28
3・4 実験結果および考察	30
3・4・1 含水率および振動による流動様式の変化	30
3・4・2 含水率による圧力損失の変化	32

3・4・3	輸送動力低減のための水分調整および振動効果	33
3・4・4	振動効果におよぼす振動数	34
3・5	結言	35
第4章	水平および傾斜輸送管路への振動効果	36
4・1	緒言	36
4・2	実験装置および実験方法	36
4・3	実験結果および考察	37
4・3・1	輸送中の流動様式	37
4・3・2	振動効果におよぼす振動数	38
4・3・3	傾斜角度による振動効果の相違	39
4・3・4	輸送効率	40
4・4	結言	42
第5章	プラグ輸送限界における所要動力と最適条件	43
5・1	緒言	43
5・2	理論	43
5・3	実験装置および実験方法	46
5・4	実験結果および考察	47
5・4・1	輸送所要動力	47
5・4・2	輸送仕事効率	51
5・4・3	付加圧力損失係数	53
5・4・4	輸送限界フルード数	54
5・4・5	理論式の検討	56
5・5	結言	67
第6章	プラグ輸送限界におよぼす振動効果	58
6・1	緒言	58
6・2	理論	58
6・2・1	振動板上の壁面摩擦係数	58
6・2・2	輸送限界空気圧力におよぼす振動効果	60
6・3	実験装置および実験方法	60

6・3・1	壁面摩擦係数の測定	60
6・3・2	輸送限界空気圧力の測定	61
6・4	実験結果および考察	62
6・4・1	壁面摩擦係数への振動効果	62
6・4・2	輸送限界空気圧力低減への振動効果	63
6・4・3	消費動力の検討	66
6・5	結言	68
第7章 プラグ輸送装置の開発と振動効果		69
7・1	緒言	69
7・2	実験装置および実験方法	69
7・3	実験結果および考察	71
7・3・1	輸送中の流動様式	71
7・3・2	プラグの安定性指数	73
7・3・3	輸送所要動力	74
7・3・4	付加圧力損失係数	78
7・4	実際の装置への応用	79
7・4・1	エアバイブレーターによる振動効果	79
7・4・2	ベンドの効果的形狀	80
7・4・3	ベンド部への振動効果	82
7・5	結言	83
第8章 結論		84
付録		86
使用記号		91
引用文献		96
謝辞		100



# 第 1 章 序 論

工業技術の発展と合理化に伴い、化学、窯業、食品、医薬品をはじめ最近ではエレクトロニクス、バイオテクノロジー、新素材に代表される先端産業等において、原料から製品および廃棄物に至るまで様々な物資を粉体あるいは粒体の形態で扱うことが益々多くなっている。これらの取り扱いのなかで、粉粒体を輸送することは、様々な工程において極めて重要な操作の一つである。なかでも粉粒体状のものを空気で輸送する方式は、システムの自動化・省力化と共に単に輸送ばかりでなく分級、乾燥、除塵、反応等の操作もあわせて行うことが可能である。また有害粉塵やガス等の飛散や輸送物への異物の混入を避けられること、さらに輸送経路を比較的任意に選べるため設備配置の合理化を可能にして、設備費や人件費を軽減できること等、他の方式には見られない利点が多い。

粉粒体空気輸送の方式は、吸引式と本論文で扱う圧送式とに分けられ、圧送式は低濃度高速輸送と高濃度低速輸送とに大別することができる。前者は、輸送に要する所要動力がかなり大きく、粉粒体の破砕および輸送管の摩耗が生じやすい等の問題点があるが、従来から多方面で用いられている。これに対して後者は、これらの問題点を解消する方法として粉粒体をできる限り濃度の高い状態で低速度で輸送する方式である。したがって圧力損失は大きいが必要空気流量が極めて少ないために所要動力が低減でき、粉粒体と輸送管との摩擦による障害が解消されるため注目されている。しかし他の機械的な輸送装置と比較すると、まだ所要動力は大きくその低減が切望されている。

本研究ではまず低濃度高速輸送方式に関して、粒子の移動および飛散現象について、理論的、実験的に解析した。また乾燥および含水粉粒体について空気輸送の圧力損失を表す理論式を導入し、壁面摩擦抵抗が支配的因子であるために輸送管へ振動を加えることと、含水粉粒体では水分の調整との相乗効果によって所要動力をかなり低減できること、さらに水平および傾斜管路

における低濃度高速輸送でも加振によって、所要動力の低減あるいは粉粒体の輸送管路内への堆積・閉塞等の防止技術として応用できることを論じる。

次に高濃度低速輸送方式の代表的な方式として、プラグ輸送方式で単一プラグ層の輸送限界を表す式を理論的に導き、その式の妥当性を示した。またその限界圧力の低減技術、プラグ供給装置の実用性、振動効果等によるプラグ輸送の所要動力の低減技術について論じる。

さらに低濃度高速輸送方式および高濃度低速輸送方式について所要動力を低減するための方策として、両者の比較検討およびその応用技術について明かにする。

## 1・1 粉粒体空気輸送の特徴と分類

### (1) 粉粒体空気輸送の特徴

近代産業では原料から製品にいたるまで粉粒体状の物資を扱うことが多くなり、空気力による粉粒体の輸送方式は、あらゆる方面で用いられている。

その空気輸送が広く利用される理由としては<sup>25)</sup>、

- 1) 輸送物の包装、解封が不要で作業能力が大きく、経費が節減できる。
- 2) 有害物質、粉塵等の飛散がなく環境汚染を起こさない構造が可能である。
- 3) 運転要員は輸送量にかかわらず少人数ですみ、全自動無人運転も可能である。
- 4) 設備が簡単で、据え付け面積が小さく、設備費、修理費が少ない。
- 5) 輸送経路を水平、鉛直、傾斜、曲がりと比較的任意にとることができる。
- 6) 天候や管路周辺の条件に無関係に輸送することができる。
- 7) 輸送物の吸湿、汚損、あるいは異物の混入をさけることができる。
- 8) 比較的定量に輸送することができ、輸送中あるいは輸送の終端で、混合、粉砕、分級、乾燥、加熱、冷却、除塵等の物理的操作あるいは反応等の化学的操作もあわせ行うことができる。
- 9) 長い距離の集約あるいは分散輸送も可能であり、分岐弁によって多様な

流路の変更ができる。

10) 化学的に不安定な粉粒体も特殊ガスを用いて安全に輸送することができる。

空気輸送におけるこれらの長所は、往々にしてその短所を十分に補うことができる。

その主な短所としては、ベルトコンベアー等の機械的輸送方式に比べて比較的エネルギー消費量が多いことが挙げられる。

## (2) 輸送状態の分類

空気輸送装置は大別して大気圧以上の圧縮空気によって吹き流したり押し動かし輸送する圧送式と、管内に大気とともに粉粒体を吸い込んで大気圧以下の気流によって輸送する吸引式とがある。

ここで本研究で取り扱う輸送現象の範囲を明確に把握するために、水平輸送の場合を例にとって輸送状態を分類してみる。

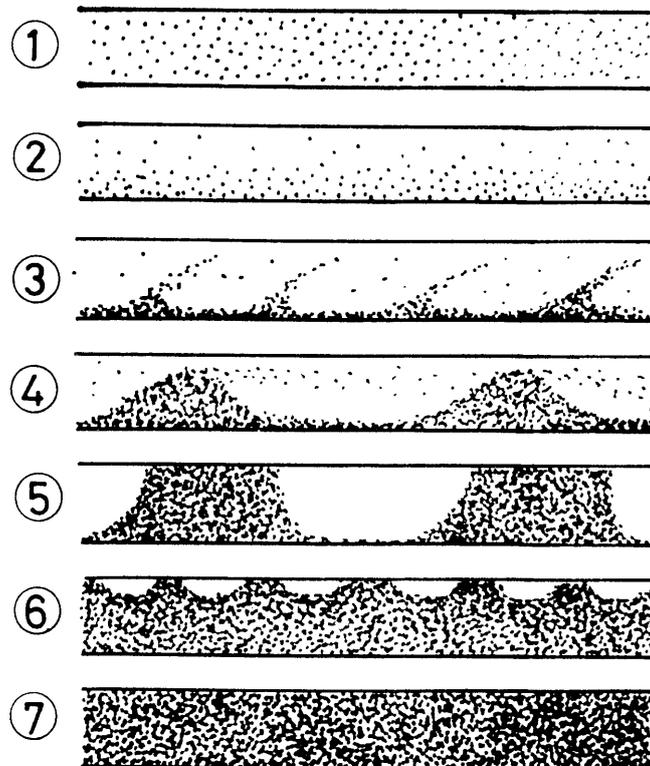


Fig.1-1 Conveying conditions for different mass flow rate of gas and solids

管内における粒子と空気すなわち固気二相流の流れ状態は、粉体物性、輸送管径等によって異なるが、模型的に示せば一般的にFig.1-1 のようになる<sup>2, 8, 6, 9)</sup>。粒子が気流中で均一に分散している①の場合と、柱状の輸送形態あるいは停滞状態となる⑦の場合を両極端として、数段階の流動様式が存在する。一般に気流速の減少につれて①から⑦へ移行する。便宜上①浮遊流、②底密流、③粗密流、④部分流、⑤プラグ流、⑥スラグ流、⑦柱状流と分類される。本論文の第2～4章では、低濃度高速輸送について、①②を中心に粉粒体が低濃度で比較的高速度な輸送状態と③のような上部が浮遊流で下部が堆積流れを示す場合も含めて述べる。後半の第5～7章では高濃度低速輸送について、⑤のようなプラグ輸送方式を中心に述べる。空気速度  $u_a$  と輸送管単位長さ当りの圧力損失  $\Delta p / \Delta L$  との関係は、代表的な流動様式についてまとめるとFig.1-2 のようになる<sup>3, 6, 5, 2, 6, 9)</sup>。図中の①から⑦は、Fig.1-1 の流動様式の番号に対応する。この特性線図では、混合比すなわち粉粒体の質量流量を気体の質量流量で除した値  $\mu_s$  をパラメータとしている。

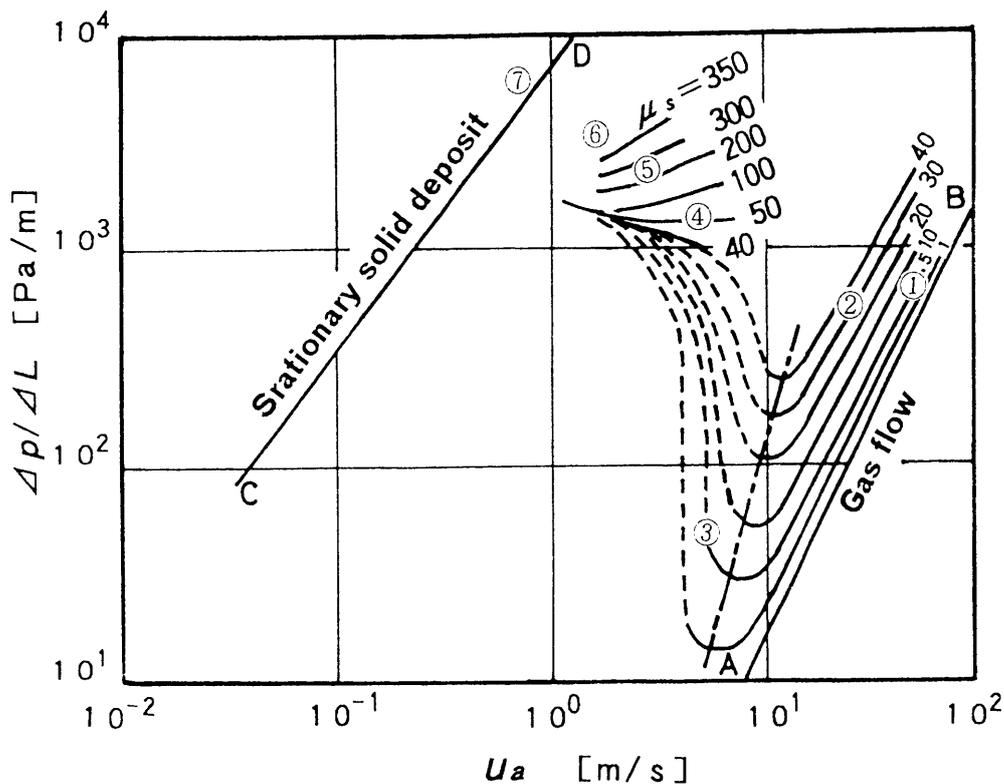


Fig.1-2 Phase diagram for pneumatic conveying of solids

Table 1-1 Flow conditions for the principal states of gas-solids flow

Flow pattern	Air velocity $u_a$ [m/s]	partical velocity $u_s$ ( $u_p$ ) [m/s]	mixing ratio $\mu_s$ [-]
Dilute-phase conveying ①～③	10～30	$(0.3\sim 0.7) u_a$	～30
Strand conveying ④	5～20	$(0.1\sim 0.5) u_a$	40～100
Plug flow conveying ⑤	0.7～3	$(0.6\sim 1.0) u_a$	50～300
Rod-like flow conveying ⑦	～8	$u_a \geq u_s$	400～800

低濃度高速輸送では、 $\mu_s$ が一定のとき  $\Delta p / \Delta L$ を最小にする  $u_a$ が存在することを示している。図中の A B は単相流で、C D は充てん層内を気流のみが流れる場合に相当し、 $\mu_s$ はともに 0である。一般には粒子が管底でしゅう動流を呈し  $\Delta p / \Delta L$ が最小になる③付近を境に、線図ではその最小点を結んだ一点鎖線よりも右側を低濃度高速輸送、左側を高濃度低速輸送という。また空気速度  $u_a$ と粒子速度  $u_s$ および混合比  $\mu_s$ の一般的な値はTable 1-1のとおりである<sup>34)</sup>。

## 1・2 既往の研究の概要

固気混相流あるいは空気輸送の研究は、Gasterstädtら<sup>11)</sup>によって開始された。当初は理論的解析および実験が容易である比較的大きな粒子を小さな混合比で、まっすぐな短い輸送管で輸送する場合の圧力損失についてのものが多く、粒子物性、輸送管内径、輸送空気速度等が異なった場合には適用範囲が狭く、実際上に問題となる粉粒体については実用的では無いことが多かった。このような経過を経てそれ以来 Segler<sup>56)</sup>、Barth<sup>7)</sup>、Welschhof<sup>70)</sup>等によって受け継がれ、新しい構想によって理論的、実験的な研究が進み、特に高混合比の低速度輸送についての研究が進められつつあるが、この方面の経済的な設計技術等は、学術的に体系付けられてなく、特に本論文のように

所要動力低減という観点から具体的な検討を行った研究報告は、ほとんどない現状である。

以下に本研究に関するいくつかの文献を紹介する。

#### (1) 低濃度高速度輸送に関する研究

先にも触れたように低濃度高速度輸送の研究報告は、歴史も古く数多いが、所要動力低減のための具体的な方策について述べられたものは少ない。

空気輸送における損失係数がフルード数の関数であることは Welschof<sup>70)</sup>, Siegel<sup>66)</sup>, Flatow ら<sup>9)</sup>によって実験的に確かめられ、さらに森川ら<sup>42)</sup>は、その両者の相関関係を明らかにしている。

Chepil<sup>8)</sup>は限界摩擦速度と粒子径および粒子密度との関係を実験的に調べ、その速度が最小になる粒子径を示した。

松本<sup>40)</sup>は粒子の浮遊機構として、最小輸送速度に対する粒子径のおよぼす影響について考察し、また水平管における低濃度輸送の輸送限界を与える式を示した<sup>41)</sup>。

富田ら<sup>63)</sup>は水平輸送で被輸送材の管摩擦係数、浮遊速度、速度比および空気の管摩擦係数から管径、空気速度の最適条件が推定できるとしている。

Yang<sup>71)</sup>は管内における空間率、レイノルズ数を考慮して水平管および鉛直管について損失係数を表す式を示した。

森川<sup>47)</sup>は空気輸送におけるベンダの圧力損失および加速損失に関して数種類の90°ベンダについて実験結果を加えて考察している。

富田<sup>65)</sup>は空気輸送におけるベンダの圧力損失に関して、理論的に圧力損失式を導出し圧力損失と粒子速度の推定法と測定法について解説している。

辻<sup>67)</sup>は空気輸送の曲管部における圧力損失の予測方法と設計への手順を記述した。

著者ら<sup>59, 32)</sup>や岡部ら<sup>51)</sup>の飛散防止という観点から行った研究や秋山ら<sup>2)</sup>の非定常流れによる飛散現象を扱った研究は、実際の空気輸送に適した粒子径の選定や輸送管路への堆積や残留防止技術として応用できる。

さらに著者ら<sup>2,9,33)</sup>は吸引式の固気混相流において、吸引ノズル部での圧力損失が非常に大きいことに注目して、粉粒体空気輸送用吸引ノズルの最適形状を理論的、実験的に求めた。

## (2) 高濃度低速輸送方式に関する研究

Barth<sup>7)</sup>は粒子を加速するための圧力損失、粒子を荷上げするための圧力損失、鉛直管の摩擦損失、粒子群の管摩擦による圧力損失の4つの和が全圧力損失になることを説明してその算出式を示した。またその圧力損失を使用して、輸送効率を示す式を求め、その式から気体速度が遅くなると、すなわちフルード数が小さくなると輸送効率が大きくなることを示し、高濃度低速輸送方式の有効性を示唆した。

Welschof<sup>70)</sup>は任意の角度に傾斜した輸送管に対して、粒子堆積層内の微小長さの体積要素に働く力の釣合を考え、柱状輸送の全圧力損失の理論式を気体の体積が一定の場合および等温膨張の場合とに分けて誘導している。またプラグ輸送を除いた様々な流動状態について平均空気速度と圧力損失との関係をまとめた。

Lippert<sup>39)</sup>は浮遊流れおよびしゅう動流れに比べプラグを伴う流れの方が、粒子を輸送するのに必要な動力は小さいことを説明し、柱状層を一定の長さに分割し、それをプラグ状に解きほぐすと同時にそれを押し動かすための空気を送り込む細管（これを二重管という）を輸送管内に設置する方法について研究を行い、輸送管内径と二重管内径との比、二重管の空気孔間隔等の効果的な値について報告している。

さらに Flattら<sup>10)</sup>は動力を二相流の全圧力損失と気体の体積流量との積で表し、浮遊流れに比べプラグを伴う流れのほうが経済的であることを示した。Muschelknautz<sup>48)</sup>は高濃度輸送に必要な空気圧力を運動方程式および等温膨張の式を使って推定している。そしてフルード数をパラメータとして部分流輸送と関連を持たせた実験結果をまとめている。Peterson<sup>52)</sup>は高濃度輸送に関するいくつかの報告をまとめて報告している。

わが国でも高濃度輸送あるいはプラグ輸送に関する研究が行われている。

青木ら<sup>3)</sup>は球形ストッパーを用いて粒体をプラグ状で空気輸送する装置を試作した。その結果ストッパーを投入することによって安定なプラグ流を実現し限界空気速度付近で効率が最も高くなると報告している。さらに付着性粉体についても同様のストッパーを用いた実験を行い、プラグ層内の粉体応力比を算出する実験式を得ている<sup>4)</sup>。

森川ら<sup>44)</sup>はプラグ層形成の基礎となる吹き抜けの研究を行い、モデル解析から吹き抜け圧力を表す簡単な式を導出している。また水平二重管による粒体プラグ輸送に関しても研究しプラグ通過周期に最も大きな影響をおよぼすのは主管空気量であり、プラグ速度あるいは圧力勾配は二重管空気量の影響を大きく受けるとしている<sup>45)</sup>。

辻ら<sup>68)</sup>は二重管方式によるプラグ輸送実験を行い、粒子径および内管空気噴出口のピッチの影響を調べた。

上滝ら<sup>20)</sup>、富田ら<sup>64)</sup>は高濃度空気輸送の代表的なブロータンク式高圧空気輸送について基礎的な研究を行い、粉粒体の輸送量はブロータンクに吹き込まれる空気速度に関係し、配管の圧力損失特性にはあまり影響されないという結論を得ている。

これらの研究によってこの方式は浮遊輸送に比べ、輸送物、輸送管の摩耗が少なく所要動力を低減できることがわかってきたが、他のベルトコンベア一等の機械的な輸送方式と比較すると所要動力が高く、さらにその低減が必要である。

### (3) 粉粒体層への振動効果に関する研究

振動を利用した粉体装置には、電磁フィーダー、ホッパー閉塞防止のために取り付けるバイブレーター、振動ふるい等がある。粉粒体層の振動場での挙動に関する研究は、現象が複雑なため詳細な運動解析を行ったものは少なく報告例も少ない。ここでは振動面上あるいは振動容器内にある粉粒体の運動解析、およびその応用例について既往の研究概要を述べる。

吉見<sup>75)</sup>は砂層等が水平振動によって液体状となりせん断応力を失う液状

化現象について土木工学的な解析の紹介をしており、この方面の理論解析を行ううえで有用である。

木幡ら<sup>3,5)</sup>は振動面上での単一粒子の運動解析と振動する粉体層中で鋼球を引き上げる装置から粉体層の充てん性と流動性に関する検討を行った。

吉田ら<sup>7,3)</sup>は振動による安息角の低減効果について解析および実験を行った。

荒川ら<sup>5)</sup>は振動している粗粉体層に対する微粉体の通過特性について報告している。

坂口<sup>5,4)</sup>は振動しているとき粉体層の飛び上がりおよび着下の際にかなり大きな透過空気抵抗を受けることを説明しその運動方程式を示した。

Kroll<sup>3,7)</sup>は振動を受ける粉体層に働く力は、粉体層底面と容器の間に生じるギャップ圧と重力であり、また層の飛行距離がギャップ圧に比例するとして運動解析を行っている。Krollのモデルは粒径が大きい場合は実験結果と一致するが、粒径が小さくなると実験結果との間にややずれが生じるようになる。

Gutman<sup>1,2)</sup>はこの粒径の影響は振動場での空気の圧縮効果が原因であると考え、Darcyの式と連続の式を用いてKrollと同様の運動解析を行っている。

横山<sup>7,6)</sup>は斜面上の物体（粉粒体ではない）が法線方向の振動を受けた場合のみかけの静止摩擦係数の減少について理論的、実験的に考察している。

実際的な研究として吉田ら<sup>7,4)</sup>は振動するオリフィスからの粉体の流出速度について実験を行い、振動が粉体の架橋防止および強制流出にどのような効果をもたらすかを考察した。また粉粒体の密充てん操作の際に振動が有効であるということもよく知られているが、特に微粉体の充てんに振動を利用した著者ら<sup>5,8)</sup>の報告がある。

林ら<sup>1,3)</sup>は振動輸送についての理論解析および効果的な条件について検討した。その他いくつかの報告があるが、本研究のように管路による粉粒体の空気輸送における振動効果についての報告はない。

### 1・3 本研究の目的

粉粒体の空気輸送装置を計画するにあたっては、まず与えられた条件下で円滑に輸送するために必要な空気源機械の容量を過不足なく見積ることが必要であるが、その所要動力をできるだけ低減することが望ましい。

本研究では、空気流量、圧力損失、混合比に関して輸送条件の両極端にある浮遊輸送とプラグ輸送について検討した。すなわち Fig. 1-2 からわかるように浮遊輸送では  $u_a$  の低減と  $\mu_s$  の増加、プラグ輸送では  $\Delta p$  を低減することが課題である。そこで様々な輸送形態に応用可能である輸送管に振動を加えることによる所要動力を低減する方法についての定説を得ることを目的とした。そのために加振による粒子あるいはプラグ層の移動限界等の解明と実際の輸送において動力を低減する方策を見い出し、さらに粉粒体の堆積、沈着の防止にも応用できる技術的資料を得た。

第2章以下の内容は、次のように要約できる。

前半は従来から広く用いられている低濃度高速輸送方式の所要動力を低減する方法について検討した。第2章ではまず粒子層表面の速度分布および粒子に与えられる初期飛散力の求め方を紹介し、それは粒子の壁面摩擦抵抗の低減によって大きくなり、壁面摩擦係数は振動加速度の増加に比例して減少することを述べた。次に粒子の移動限界におよぼす振動効果について傾斜法と飛散法による実験を行い、振動を加えた場合の壁面摩擦係数は、振動加速度比の増加にしたがって直線的に減少すること、また無次元限界掃流力も振動加速度比の増加にしたがって減少することを明らかにした。第3章では乾燥粉粒体およびトラブルの発生の原因となりやすい含水粉粒体を空気輸送する場合の輸送圧力式を導き、実験結果とよく一致することを示した。空気輸送においては壁面摩擦係数が支配的因子であることから、所要動力を低減するためには含水率を調整することと加振することが効果的で、その両者の相乗効果によって所要動力を大幅に低減できることを確かめた。第4章では実

際の輸送管路を設計・運転するための基礎資料を得るために、水平および種類の傾斜角度を変えた管路で輸送実験を行い考察を加えた。水平および下り勾配の管路では、振動加速度比の増加とともに輸送動力は低減し、輸送効率も振動加速度がある限界値を越えると急増することを示した。

後半は高濃度低速輸送の一方式であるプラグ輸送方式について、輸送限界における理論解析および所要動力低減方法について検討した。第5章では単一プラグの輸送限界における輸送圧力を表す理論式を導き、実験値と比較してその式が妥当であることを示した。また輸送効率等の計算から輸送管径、プラグ長さ、輸送速度等の効果的な条件について示した。第6章ではプラグ輸送方式において所要動力を低減するために、振動板上における粉体層の壁面摩擦係数および単一プラグ輸送限界におよぼす輸送管への振動効果について理論的、実験的に検討した。また水平および鉛直輸送管路における実験で理論式が妥当なことと、その効果的な加振条件を示した。第7章では単一プラグ輸送の解析の応用として、ブロータンクと輸送管の始点に空気を交互に断続して加えることによって、プラグを輸送管に連続的に供給することと、輸送管への加振で所要動力を低減するシステムを設計し、様々な実験によって、安定したプラグを供給するための操作条件を求めた。またプラグの安定性指数、輸送動力、付加圧力損失係数等を求め、加振することが所要動力の低減と安定した輸送を行うために効果的なことを確かめた。次に輸送用の空気源を併用できて、そこからの排気を輸送管に導入して再利用することが可能なエアバイブレーターの使用によって消費動力が低減できることと、さらに圧力損失が上昇する箇所への加振機の並列使用によって停滞、閉塞等のトラブルを防止でき、所要動力を低減できることを確かめた。さらに数種類のベンドを含んだ配管経路による実験で、効果的なベンド形状を調べ、また輸送システムのベンド部への加振効果によって所要動力をかなり低減できることを確かめた。第8章では結論を述べ、その後に付録として両輸送方式について得られた結果と実際への工学的技術をまとめた。

## 第2章 粒子移動限界におよぼす振動効果<sup>60, 32)</sup>

### 2・1 緒言

粒子の移動限界および飛散現象の把握は、粉粒体を取り扱う装置において重要である。著者らはその現象を解明する研究の一環として、静止した粒子の移動限界と飛散現象について理論的および実験的な解析を行った<sup>32, 59)</sup>。また固気噴流中における粒子の飛散現象と堆積について、粒子が飛散してから落下堆積する現象を推測する方法を報告した<sup>14, 21)</sup>。

粉粒体空気輸送において非常に重要な課題は、所要動力の低減である。また管路のベンド部や接続部等での粉粒体の閉塞あるいは残留は、とくに薬品・食品工業等では、品質の安全性等の見地から皆無であることが要求される。

この問題を解決するために、本章では粒子の摩擦速度と飛散力の理論的な解析を行い、粉粒体の種々な物性のなかで壁面摩擦係数の影響が大きく、その低減には振動が効果的であることを考察をした。さらに振動を加えた場合の傾斜板実験装置における粒子の移動限界条件の測定と、風洞実験装置において振動を加えた場合の移動限界摩擦速度の測定結果から、加振状態における壁面摩擦係数の求め方を示した。

### 2・2 理論

#### 2・2・1 粒子層表面上の速度分布

粒子の飛散現象を調べるには、粒子層表面上の速度分布を知ることが必要である。これらについては色々な式が提案されているが、Prandtl<sup>53)</sup>による半理論式が最も妥当である。

Prandtlによれば粒子層の表面に沿って流体が流れる場合、粒子近傍では境界層ができ、高さ方向に速度分布を生ずる。いま粒子層上面からの鉛直距離

$y_j$ のところにおける速度  $u_j$  は次式で表せる。

$$u_j / u_* = \alpha + 5.75 \log(u_* y_j / \nu) \quad (2-1)$$

ここで  $\nu$  は流体の動粘性係数,  $u_*$  は摩擦速度で, 流体の密度を  $\rho_a$ , それによる粒子層表面の摩擦応力を  $\tau$  とすると次式で定義される。

$$u_* = \sqrt{\tau / \rho_a} \quad (2-2)$$

なお Eq. (2-1) 右辺の  $\alpha$  は粒子の大きさによって決まる定数で, Nikuradse<sup>50)</sup> は実験によって, 微細な粒子による層では  $\alpha = 5.50$ , 粗い粒子による層では  $\alpha = 8.48$  を得ている。また石原ら<sup>15)</sup> は, 粗い粒子について粒子径を  $d_s$  とする次式を提案している。

$$u_j / u_* = 8.48 + 5.75 \log(y_j / d_s) \quad (2-3)$$

### 2・2・2 粒子の初期飛散力の計算方法

限界侵食流速理論すなわち粒子に働く流体の推力が限界値以上であると粒子が移動するという考え方にに基づき, 壁面表面で 1 個の粒子が受ける流体推力  $F_D$  を次式で表す。

$$F_D = (\pi / 8) \rho_a \cdot C \cdot d_s^2 \cdot u_\delta^2 \quad (2-4)$$

ここで  $u_\delta$  は粒子近傍における速度,  $C$  は粒子の抵抗係数で, 粒子基準のレイノルズ数を  $Re_\delta = \rho_a \cdot u_\delta \cdot d_s / \mu$  とすると次式で与えられる<sup>38)</sup>。ここで  $\mu$  は流体の粘性係数である。

$$\sqrt{C} = 0.63 + 4.8 / \sqrt{Re_\delta} \quad (2-5)$$

また限界掃流力理論すなわち粒子に働く流体の摩擦力が限界値以上であると粒子が移動するという考え方にに基づき, 壁面での粒子 1 個の摩擦力  $F_R$  は, 粒子の密度  $\rho_s$ , 粒子の壁面摩擦角を  $\phi_w$ , 壁面 (輸送管) の傾斜角を  $\theta$  とすると次式で表せる。

$$F_R = (\pi / 6) d_s^3 (\rho_s - \rho_a) g (\tan \phi_w \cdot \cos \theta + \sin \theta) \quad (2-6)$$

著者らは 1 個の粒子に与えられる力は,  $F_D$  と  $F_R$  の差で与えられ, これを初期飛散力  $B_0$  [N] と定義した。

$B_0$  は Eqs. (2-4), (2-6) から次式で表される。

$$B_0 = F_D - F_R = (\pi/8) \rho_a \cdot C \cdot d_s^2 \cdot u_s^2 - (\pi/6) d_s^3 (\rho_s - \rho_a) g (\tan \phi_w \cdot \cos \theta + \sin \theta) \quad (2-7)$$

ここで  $u_s$  は粒子層上面からの鉛直距離  $y_j$  の位置での速度  $u_j$  の実測値あるいは計算値から Eq. (2-3) によって摩擦速度  $u_*$  を求め、さらに石原ら<sup>16)</sup> が示した次式によって求めることができる。

$$u_s = 8.5 u_* \quad (2-8)$$

$B_0$  の計算値は、実際の現象と強い相関関係があることを報告した<sup>3,2)</sup>。なお  $B_0$  を増大させるには、理論式 Eq. (2-7) から  $u_s$  を大きくすることと壁面摩擦角  $\phi_w$  すなわち壁面摩擦係数を低減することが効果的なことがわかる。粒子密度  $\rho_s$  は小さいほうが  $B_0$  は大きい。 $u_s$  を大きくする方法として、微粒子には粗粒子を混合することや輸送空気をパルス流にすることによって効果があることを確かめた<sup>5,9,2)</sup>。また粒子径  $d_s$  については、限界摩擦速度が最小になる粒子径および飛散量を最大にする粒子径が存在することを示した<sup>5,9)</sup>。

これらの  $B_0$  に影響をおよぼす因子のなかで、様々な輸送状態においてコントロールすることが可能な物性である  $\phi_w$  に注目し、本研究では輸送管に振動を加えることによる壁面摩擦係数の低減効果について重点をおき検討することにした。

### 2・2・3 粒子の移動限界におよぼす振動効果

Fig.2-1 のように質量  $m$  の物体が傾斜角  $\theta$  の平板上に置かれているとする。振動を加えないとき、 $m$  に作用する斜面方向の力は、重力加速度を  $g$  とすると  $m g \sin \theta$  であり、 $\theta$  を徐々に上げていき  $\phi_w$  となると  $m$  が滑り始めるとすると、

$$m g \sin \phi_w = \xi_w m g \cos \phi_w \quad (2-9)$$

の関係が成立ち、 $\tan \phi_w = \xi_w$  となり、 $\xi_w$  は無振の場合の壁面摩擦係数である。

さらに平板面に対して直角な方向に正弦波振動が加えられているとすると、振動の変位  $y$  および加速度  $\ddot{y}$  は次式で表される。

$$y = a_h \sin 2\pi f t \quad (2-10)$$

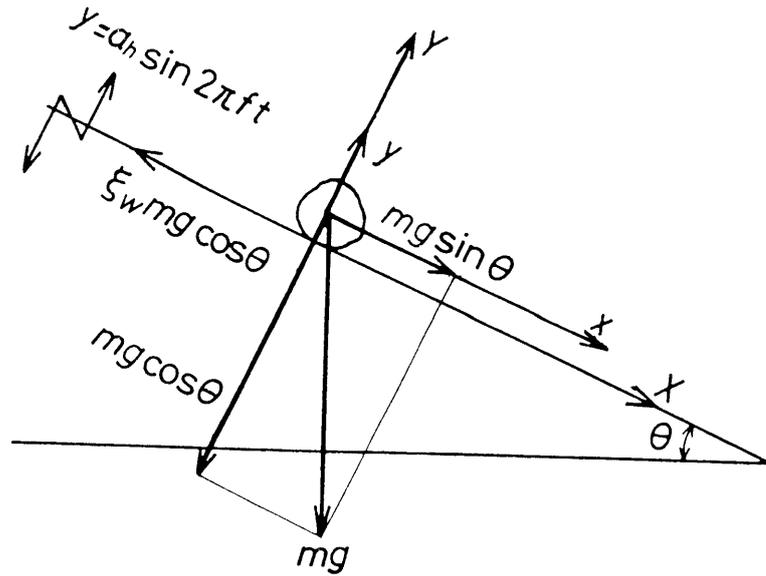


Fig. 2-1 Static friction on the vibrating surface

$$\ddot{y} = - a_h (2 \pi f)^2 \sin 2 \pi f t \quad (2-11)$$

ここで  $a_h$  は振幅 (片振幅),  $f$  は振動数,  $t$  は時間である。このときは  $m$  は斜面と一体に運動するが, 振動加速度  $a_h (2 \pi f)^2$  が大きくなると  $\phi_w$  よりも小さいある角度  $\phi_{wv}$  ですべり始める。このとき

$$m g \sin \phi_{wv} = \xi_w \{ m g \cos \phi_{wv} - m a_h (2 \pi f)^2 \} \quad (2-12)$$

の関係が成立つ。ここで

$$\tan \phi_{wv} = \xi_{wv} \quad (2-13)$$

とおいて,  $\xi_{wv}$  を  $y$  方向の加振状態における摩擦係数とする。振動加速度と重力加速度との比を振動加速度比  $\Lambda$  すなわち

$$\Lambda = a_h (2 \pi f)^2 / g \quad (2-14)$$

とおいて Eqs. (2-13), (2-12), (2-14) から  $0 \leq \xi_{wv} \leq \xi_w$  の条件のもとで解くと<sup>76)</sup>  $\xi_{wv}$  は,

$$\xi_{wv} = \frac{\xi_w (1 - \Lambda \sqrt{1 + \xi_w^2 - \xi_w^2 \Lambda^2})}{1 - \xi_w^2 \Lambda^2} \quad (2-15)$$

で表される。

## 2・3 供試粉粒体

本研究で用いた粉粒体の物性値をまとめてTable 2-1に示す。本章では砂をふるい分けしたものを用いた。粒子径 $d_s$ は顕微鏡法あるいはふるい分け法による重量平均粒子径として表している。安息角 $\phi_r$ およびかさ密度 $\rho_b$ はホソカワミクロン(株)製のパウダーテスターによって、真密度 $\rho_s$ は東芝ベックマン(株)製の空気比較式真密度計で測定した。内部摩擦角 $\phi_i$ は筒井理化学器械(株)製の粉体せん断試験機、壁面摩擦角 $\phi_w$ は自製のせん断試験装置によって測定しアクリル板に対する値とした。

なお実際の空気輸送においては、ここに示す粒子径、真密度等の基本的な物性に加えて、粒子形状、粒子自身の吸湿性等の検討も必要であるが、本研究の流動解析においては、それらの物性の影響因子をも考慮されている物性値として壁面摩擦係数について重点をおき取り扱った。

Table 2-1 Physical properties of granular materials

Sample	Particle diameter $d_s$ [ $\mu\text{m}$ ]	Angle of repose $\phi_r$ [ $^\circ$ ]	Angle of internal friction $\phi_i$ [ $^\circ$ ]	Angle of wall friction* $\phi_w$ [ $^\circ$ ]	Bulk density $\rho_b$ [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	True density $\rho_s$ [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
Calcium carbonate	16.6	51.0	35.6	28.9	760~1350	2600
Sand 1	280	28.0	30.5	23.4	1320~1400	2740
Sand 2	430	28.0	30.7	23.4	1320~1400	2700
Sand 3	670	29.0	30.9	25.5	1320~1400	2680
Sand 4	1020	30.0	31.0	26.8	1320~1400	2670
Sand 5	1440	31.0	32.0	26.1	1320~1400	2650
Sand 6	2030	32.0	32.1	24.6	1320~1400	2650
Millet	1570	33.0	30.1	22.8	824~857	1385
Polystyrene pellets	997	23.4	31.5	21.7	630~870	1070

\* Value of direct shear test on acrylic plate

## 2・4 実験装置および実験方法

### 2・4・1 振動板上における粉粒体の摩擦係数測定装置

振動板上における粉粒体の摩擦係数測定装置の概要をFig.2-2に示す。傾斜したアクリル板上にTable 2-1で示した物性の砂粒（sand 1～6）を一個置き、加振機②によって板面に垂直方向に振動を加える。この加振機は、振

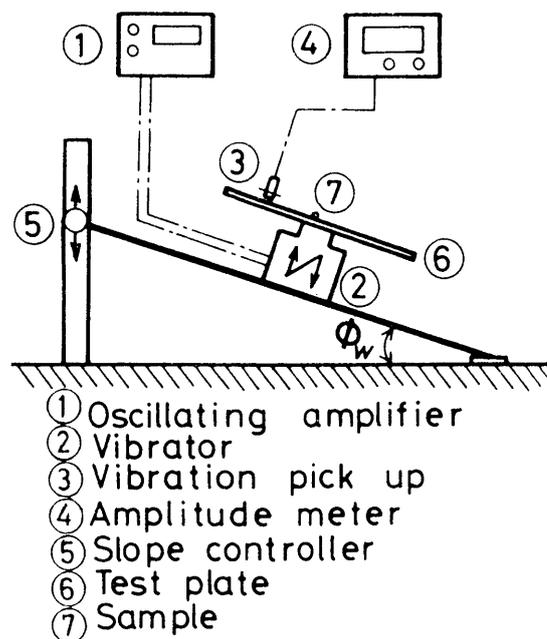


Fig.2-2 Schematic diagram of experimental apparatus to measure static friction coefficient

動数と振幅を発振機①で任意に設定することができるもので、まず始めに設定した傾斜角  $\phi_{wv}$ （粒子移動限界においては摩擦角と定義する）と振動数  $f$  を一定にしておいて、振幅を徐々に大きくしていき粒子が移動する瞬間の振幅を非接触型の振動検出器③を介して振幅計④で読み取る。 $\phi_{wv}$ と  $f$ を各粒子径の粒子について同様な操作を行い、加振条件と加振時の摩擦係数  $\xi_{wv} = \tan \phi_{wv}$ との関係を求める。（無振時の場合の摩擦係数  $\xi_w$ は、傾斜角を徐々に大きくしていき粒子が移動を始める瞬間の角度から求めた。）

### 2・4・2 振動板上における粉粒体の飛散限界測定装置

振動板上の粉粒体粒子が気流によって移動する限界の空気速度を測定する

ための風洞実験装置の概要をFig.2-3に示す。テストダクト⑫はアクリル製で断面は幅50mm、高さ220mmの長方形で、全長は4mである。テストダクトの底面には粗度を与えるために、測定試料と同じ平均粒子径の粒子をニス付けしてある。試料はダクトの中央部へ砂粒どうしの接触がなく単層モデル化できるように散布面積率が25%程度に散布する。空気速度を徐々に高めていき粒子の移動が可能な速度になった後、粒子面を連続的に写真撮影し、その画像から単位時間当りの粒子の移動数を測定する。そのときのダクト横断面

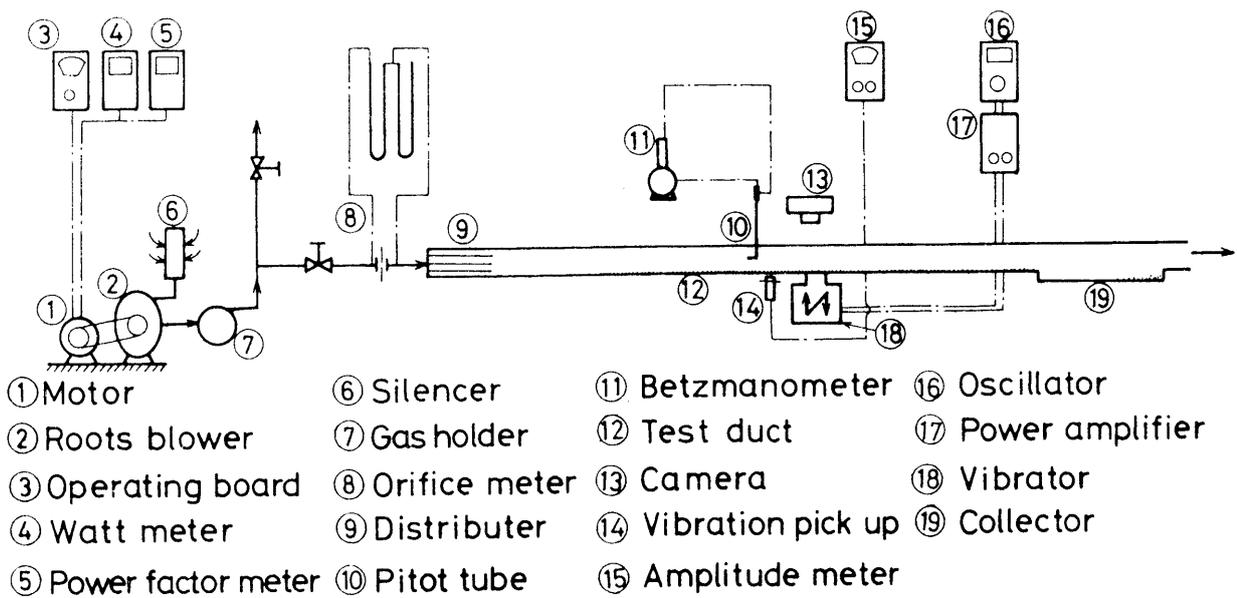


Fig.2-3 Schematic diagram of experimental apparatus to measure critical friction velocity

の縦中心線上の速度分布  $u_j$  をピトー管⑩およびベッツマノメータ⑪を用いて測定し、Eq.(2-3)から粗面の摩擦速度  $u_*$  を次式で求める。一種類の粒子径について速度を4~5段階に変化させて、単位時間当りの粒子の移動数と摩擦速度との関係を求める。次に振幅と振動数を任意に選定できる電磁式の加振機⑱によって鉛直方向の振動を加えた場合について同様に測定する。振幅の測定方法と用いた試料は2・4・1と同じである。

## 2・5 実験結果および考察

### 2・5・1 振動による摩擦係数の変化

Fig.2-4 は加振条件と摩擦係数の関係を知るために、Fig.2-2 の測定装置を用いて行った実験結果の一例で、振動加速度比  $\Lambda$  と、無振の場合の摩擦係数  $\xi_w$  に対する加振時摩擦係数  $\xi_{wv}$  の比すなわち  $\xi_{wv}/\xi_w$  との関係を示す。

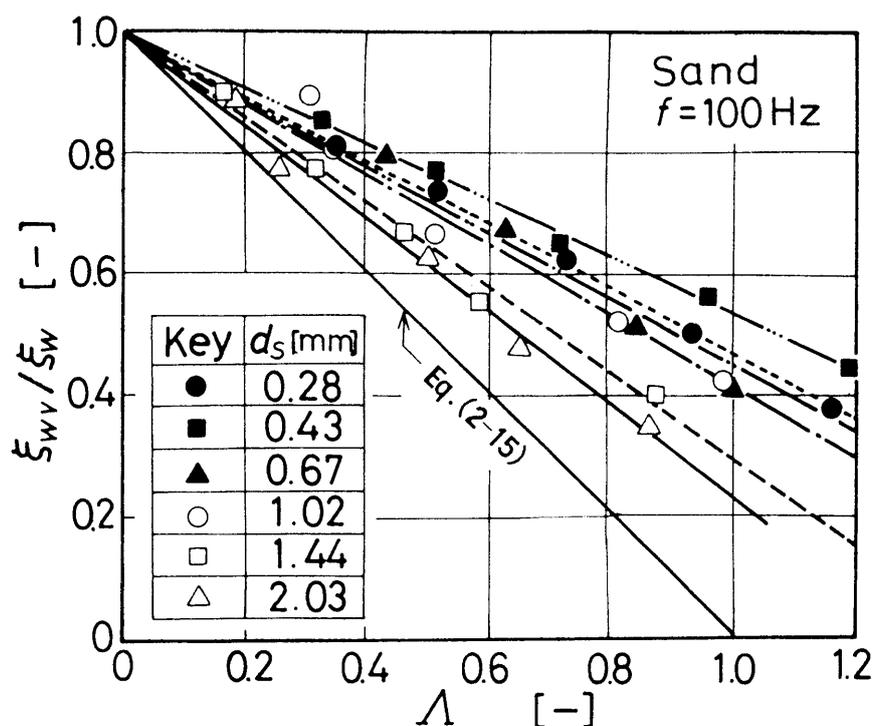


Fig.2-4 Variation of dimensionless static friction coefficient with acceleration ratio

ここで振動数  $f$  は、空気輸送以外の粉粒体を取り扱う装置で加振するときの条件として経験的に好ましいと言われている条件  $40\sim 150\text{Hz}$  の中間値で、 $a_h$  が  $30\mu\text{m}$  程度で  $\Lambda$  が 1 以上となる  $100\text{Hz}$  についてまとめた。図には Eq. (2-15) による値を比較のために示す。いずれの粒子径の場合も  $\Lambda$  の増加にしたがって  $\xi_{wv}$  は直線的に減少する。Eq. (2-15) は、振動板と比較的大きな単一物体間の摩擦係数についての解析によるもので  $\Lambda = 1$  のとき  $\xi_{wv}$  が 0 となるが、本実験では 0 以上の値となった。これは粒子の形状等の相違によるものと考え

えられる。なお本実験範囲内では粒子径が大きい程、振動の影響を受けやすい傾向を示した。

### 2・5・2 振動による粒子移動限界速度の変化

ダクト内の空気速度が砂粒の移動限界付近のとき粗面上の高さ  $y_j$  における速度  $u_j$  と  $y_j/d_s$  との関係を図.2-5 に示す。 $u_j$  と  $\log(y_j/d_s)$  の関係が直線になることから Eq.(2-3) の一般式から摩擦速度  $u_*$  を求めることができる。次に粒子の移動数を移動前に存在した粒子数で除した値の百分率を  $n_s[s^{-1}]$  で表す。この表示法は土屋<sup>6,6)</sup> によって提案されたもので、粒子径

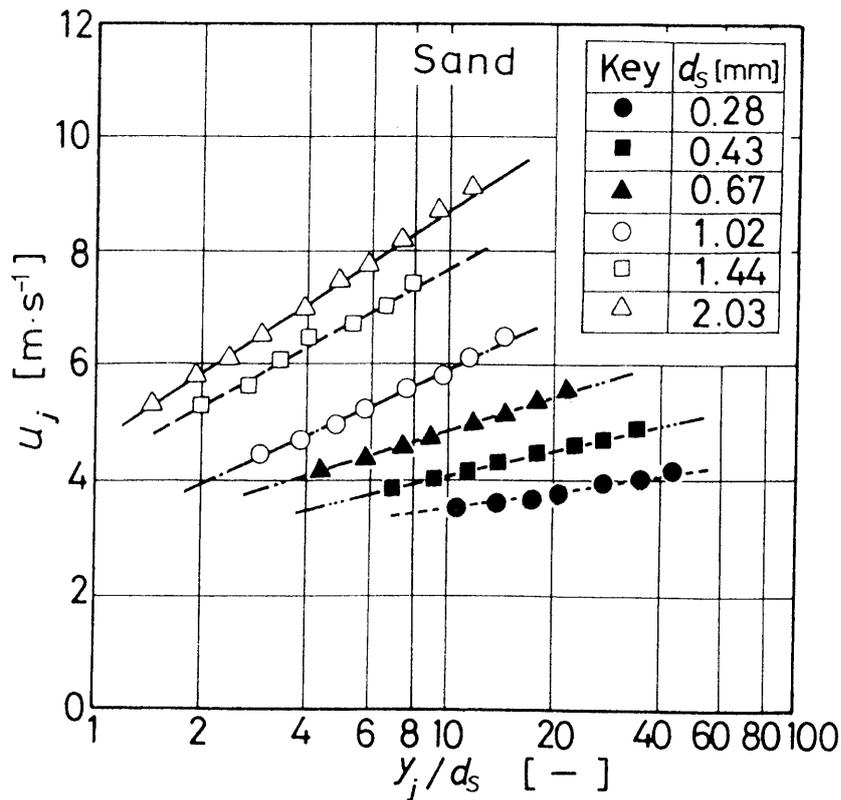


Fig.2-5 Some examples of velocity distributions near initiation for movement of grains

に関係なく粒子の移動状態を規定することができる。Fig.2-6 に  $n_s$  と  $u_*$  の関係を示した。両者の関係は無振の場合も加振の場合もそれぞれほぼ直線で近似できる。土屋らは気流による粒子の移動限界条件は  $n_s = 0s^{-1}$  の場合に

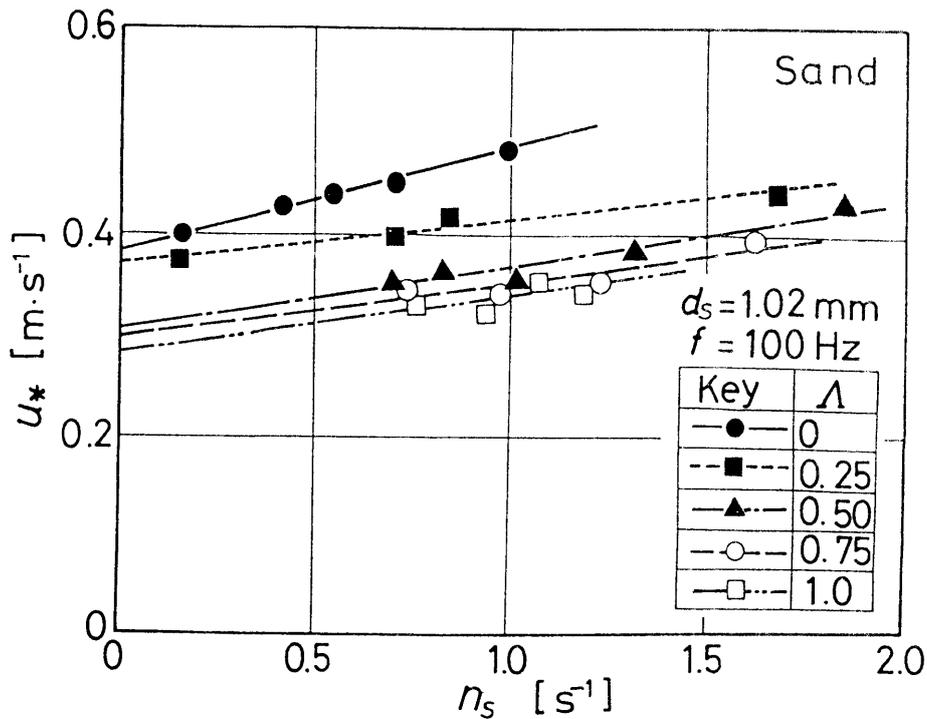


Fig.2-6 Relationship between shear velocity and rate of movement of grains

相当するとの説明をしている。そこでこの図から直線を外挿し  $n_s = 0 \text{ s}^{-1}$  の値を求め、それを限界摩擦速度  $u_{*c}$  とする。

さて限界摩擦速度  $u_{*c}$  を用いた無次元限界掃流力  $u_{*c}^2 / \{(\rho_s / \rho_a - 1) g \cdot d_s \cdot \xi_w\}$  を岩垣ら<sup>16)</sup> は次式で表している。

$$u_{*c}^2 / \{(\rho_s / \rho_a - 1) g \cdot d_s \cdot \xi_w\} = 1 / (\kappa \cdot \phi) \quad (2-16)$$

ここで  $\rho_s$  は粒子の真密度、 $\rho_a$  は空気の密度、 $\phi$  はレイノルズ数  $u_{*c} \cdot d_s / \nu$  の関数、 $\nu$  は空気の動粘性係数、 $\kappa$  はしゃへい係数で気流の場合は  $\kappa = 1.0$ 、水流の場合は  $\kappa = 0.4$  とすれば Eq. (2-16) による値と実験値がよく対応することを報告している。

本実験で無振の場合と加振した場合について、レイノルズ数  $u_{*c} \cdot d_s / \nu$  と無次元限界掃流力  $u_{*c}^2 / \{(\rho_s / \rho_a - 1) g \cdot d_s \cdot \xi_w\}$  の関係を Fig.2-7 に示す。図から無次元限界掃流力は、加振の場合もあるレイノルズ数すなわちある粒子径の場合で極小値をとり、その値は振動加速度比  $\Lambda$  が大きくなるほ

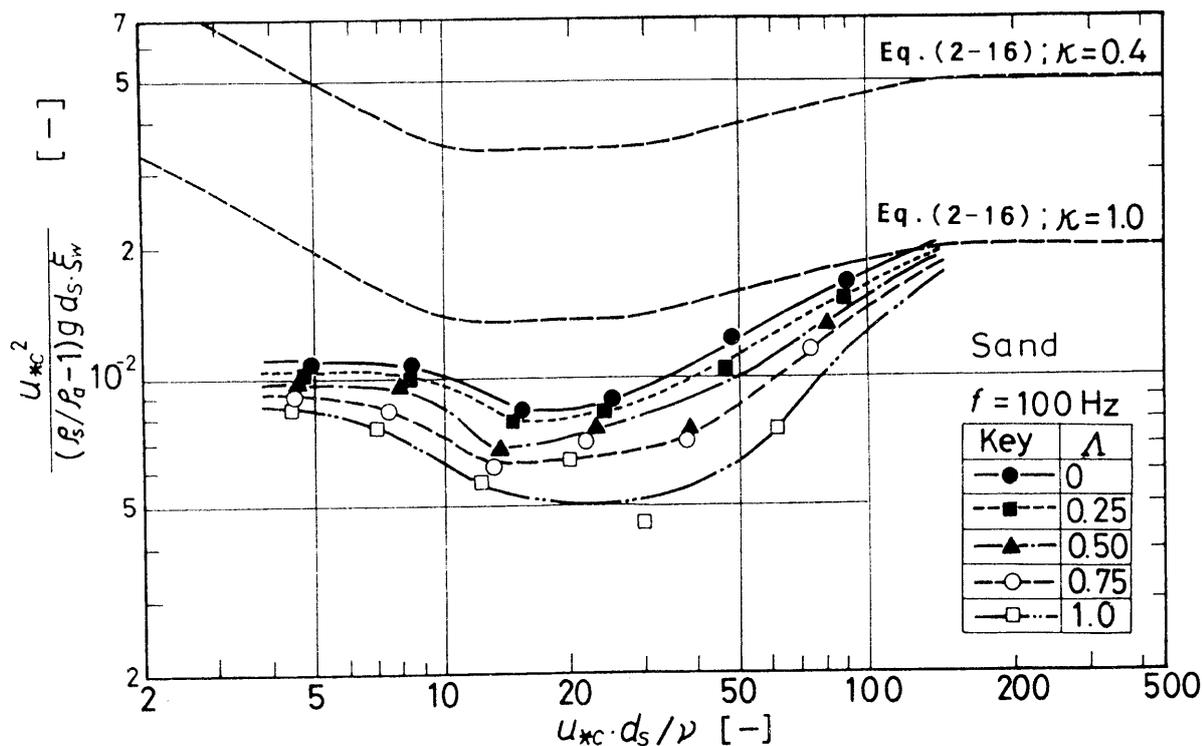


Fig. 2-7 Relationship between dimensionless critical tractive force and Reynolds number under vibration

ど減少することがわかる。なお図中の二本の点線は、Eq. (2-16)による計算式である。本実験による値は、 $\kappa = 1.0$ とした場合の文献値よりも小さい値となった。これは試料の散布面積率および限界摩擦速度の決め方などによって異なると考えられる。粒子を移動させるのに要する気流の力そのものは、無振の場合と加振した場合とで同じと仮定すれば、両者の無次元限界掃流力の相違は、壁面摩擦係数の変化によるものと考えられる。

そこでFig. 2-7に示した無振の場合と加振の場合との無次元限界掃流力の値の比から、いろいろな振動加速度比 $\Lambda$ における摩擦係数 $\xi_{wv}$ を算出することができる(飛散法)。このようにして求めた $\xi_{wv}/\xi_w$ と $\Lambda$ の関係の一例をFig. 2-8に示した。この図にはFig. 2-2の実験装置で測定した結果(傾斜法)も比較のために点線で示した。両者共に $\Lambda$ の増加にしたがって $\xi_{wv}$ が直線的に減少する。傾斜法のほうが飛散法の結果よりも小さい値を示しているが、

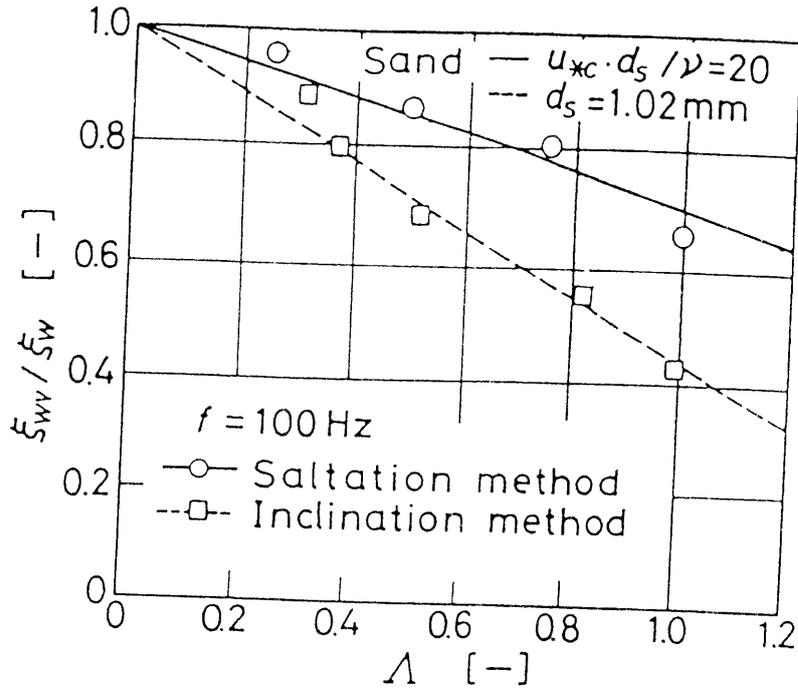


Fig. 2-8 Comparison of dimensionless static friction coefficient under vibration ; inclination method and saltation method

どちらの値が正しいとは、一概にはいえない。飛散法の場合は限界掃流力理論すなわち「粒子に働く流体の摩擦力が限界値以上であると粒子が移動する」という考えに基づき無次元限界掃流力から求めた。傾斜法の場合は空気流れを伴わない単一粒子について測定した結果で、転がり摩擦の因子も含まれている。傾斜法のほうが $\Lambda$ の影響を受けやすいということは、第4章で述べる傾斜輸送管路への振動効果が期待できる。

### 2.5.3 層流底層の厚さの影響

粒子の移動限界速度について力学的に解析を行う場合に、層流底層の厚さが粒子径に対してどの程度であるかについて考察する必要がある。そこで各粒子について移動限界状態における層流底層の厚さ $\delta_L$ を次式で求める<sup>55)</sup>。

$$\delta_L = 5\nu / u_{*c} \quad (2-17)$$

さらに加振による摩擦係数減少の程度を知るために、 $\xi_{wv}/\xi_w$ と $\Lambda$ の関係

$$\xi_{wv} = (1 - \zeta \cdot \Lambda) \xi_w \quad (2-18)$$

から摩擦低減係数 $\zeta$ を算出する。Fig. 2-9 に飛散法によって求めた $\xi_{wv}$ を用

いて  $d_s/\delta_L$  と  $\zeta$  の関係を示した。この図から  $\zeta$  の値が最大となる  $d_s/\delta_L$  が存在することがわかる。これは  $d_s$  が小さい場合は、粒子が層流底層に埋もれている部分が多く、付着力も多くなる。一方  $\delta_L$  に対して  $d_s$  がかなり大きい場合は、粒子の自重によって粒子が飛散しにくくなるために、いずれも振動効果が低くなるためと考えられる。

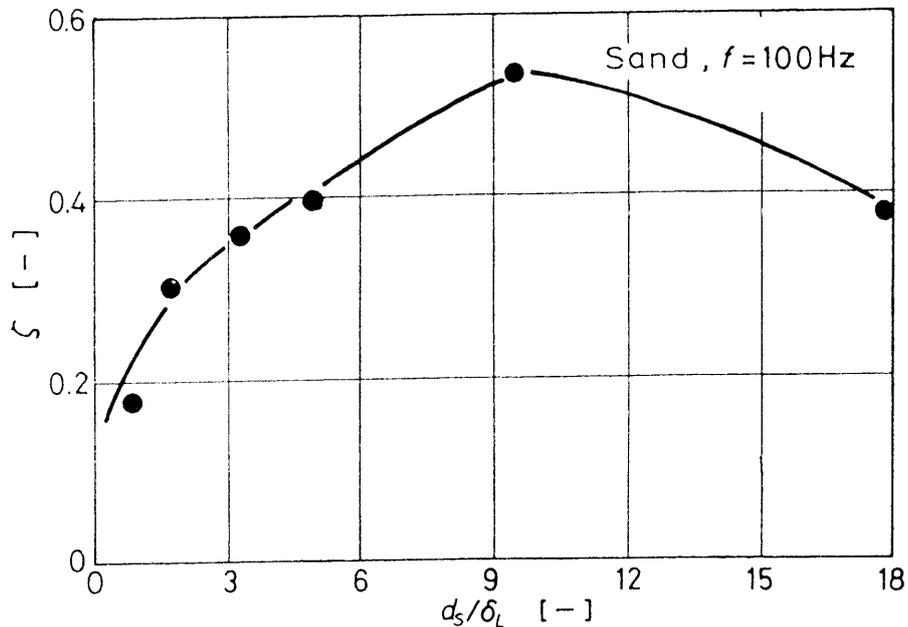


Fig. 2-9 Relationship between decrease factor of friction and ratio of  $d_s$  to  $\delta_L$  under vibration

## 2・6 結言

粒子の移動限界について粒子に与えられる初期飛散力等の解析を行い、さらに粒子移動限界におよぼす振動効果を傾斜法と飛散法について実験的研究を行い次の結論を得た。

(1) 理論的に解析した初期飛散力は、粒子近傍の速度を大きくすることと、壁面摩擦係数を低減することによって大きくすることが可能である。壁面摩擦係数は空気輸送に関する物性のなかで最も支配的因子であり、それを低減するには振動を加えることが効果的である。

(2) 壁面摩擦係数は振動加速度比の増加にしたがって減少し、その関係は直線で近似できる。

(3) 限界摩擦速度を用いた無次元限界掃流力は、加振の場合も無振の場合もそれぞれあるレイノルズ数で極小値をとり、その値は振動加速度比が大きくなる程減少する。

(4) 壁面摩擦係数の低減に加振がどの程度寄与するかを表す摩擦低減係数は、層流底層の厚さ  $\delta_L$  と粒子径  $d_s$  との比がある値のときに最大となる。

## 第3章 乾燥および含水粉粒体輸送への振動効果<sup>6,2)</sup>

### 3・1 緒言

粒子移動限界において加振が壁面摩擦係数の低減に有効なことを前章で述べたが、本章では乾燥粉粒体および取り扱いのうえで様々なトラブルが生じやすい含水粉粒体の輸送への振動効果について述べる。まず輸送圧力を表す理論式を導いた。次に試料としてポリスチレンペレットを用い、含水率の変化による粉粒体の物性測定、輸送中の圧力損失の測定、輸送管に振動を加える方式について、加振条件の変化による輸送圧力損失を実測し、理論値とよく一致することを示した。輸送圧力は、粉粒体の含水率の調整および輸送管への加振によって低減することを確認し、さらに水分と加振の相乗効果による液状化現象の応用によって所要動力を大幅に低減する方法について検討した。

### 3・2 理論

含水状態の粉粒体の輸送における堆積層に作用する力の状態をFig.3-1のように考える。

$A_1$ は空気だけあるいは飛行粒子が存在する部分の断面積、 $A_2$ はその下の空気流れを伴って移動している水分を含んだ堆積層の断面積、 $A_3$ はさらにその下部の水と粉粒体による層で空気流れを伴わない箇所の断面積である。また $R_s$ は堆積層表面における空気流れと飛行粒子によるせん断抵抗力、 $R_w$ は管内壁面と堆積層の摩擦抵抗力、 $P$ は堆積層の推進力、 $W$ は粉粒体による壁面にかかる力である。輸送の圧力損失を $\Delta p$ 、 $A_1$ の管壁面における空気せん断抵抗力を $R_a$ とすると次式が成り立つ。

たい積層が静止している場合：

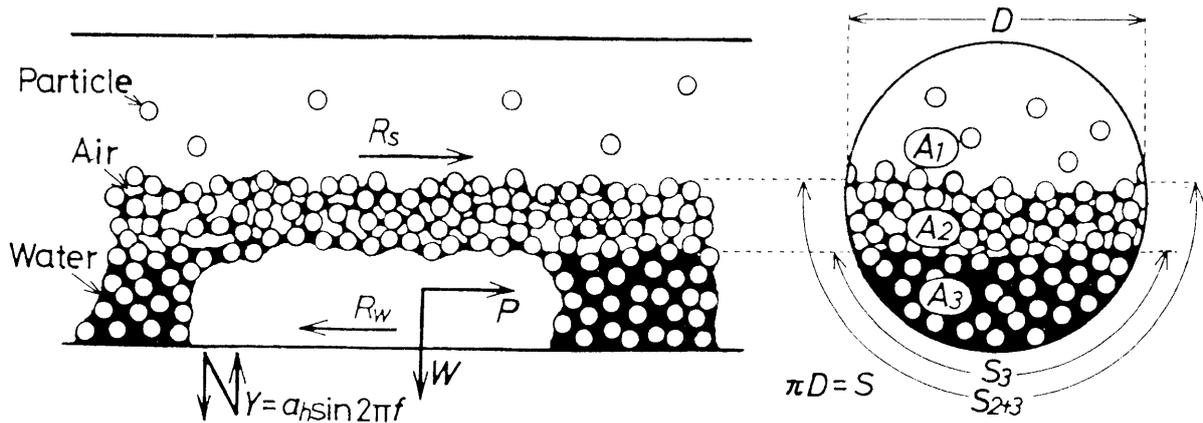


Fig. 3-1 Forces on particles including water

$$\Delta p A_1 = R_s + R_a \quad (3-1)$$

たい積層が移動している場合：

$$P = \Delta p (A_2 + A_3) + R_s = R_w \quad (3-2)$$

含水率は空隙基準含水率(飽和度)  $\Phi$  を用いる。粉粒体層の内部への水分を増加させていくと、水分がある量以上になると内部に長い時間蓄積できなくなり水分は垂れ下がる。この水分を粉粒体層に保持することができる限界の含水率を限界含水率  $\Phi_c$ 、さらに空隙がすべて水で満たされた  $\Phi = 1$  の場合を飽和含水率  $\Phi_s$  と定義し、それぞれの含水状態における壁面摩擦係数と付着力を  $\xi_{wc}$ 、 $\xi_{ws}$  および  $C_c$ 、 $C_s$  と表す。

また管の断面において、内径円周  $S$  のうち  $A_2$  部および  $A_3$  部の堆積層と管内壁面とが接している部分の長さ(周長)を  $S_{2+3}$  さらに  $A_3$  部の飽和堆積層のみが接しているの部分の周長を  $S_3$  とすると、 $\Delta p$  の大きな支配的因子と考えられる  $R_w$  は、測定区間の長さ  $\Delta L$  とすると、

$$R_w = W \left( \xi_{wc} \cdot \frac{S_{2+3} - S_3}{S_{2+3}} + \xi_{ws} \cdot \frac{S_3}{S_{2+3}} \right) + C_c (S_{2+3} - S_3) \Delta L + C_s \cdot S_3 \cdot \Delta L \quad (3-3)$$

ここで粒子密度を  $\rho_s$ 、水の密度を  $\rho_w$ 、粉粒体の平均空間率を  $\varepsilon$  とすると、

$$W = \{ \rho_s (1 - \varepsilon) + \rho_w \varepsilon \} A_3 g \Delta L + \{ \rho_s (1 - \varepsilon) + \rho_w \varepsilon \Phi_c \} A_2 g \Delta L \quad (3-4)$$

で与えられる。なお  $R_a$  は、

$$R_a = \tau_c (S - S_{2+3}) \Delta L \quad (3-5)$$

ここで  $\tau_c$  は気流によるせん断応力で、空気密度  $\rho_a$ 、空気速度  $u_a$  とすると次式で求められる。

$$\tau_c = (\lambda_a / 4) (\rho_a \cdot u_a^2 / 2) \quad (3-5)$$

Eq. (3-5) で  $\lambda_a$  は Blasius の式すなわち

$$\lambda_a = 0.316 Re^{-0.25} \quad (3-6)$$

を満足するものと仮定し、粉粒体層の  $\Phi_c$ 、 $\Phi_s$  の状態における物性および輸送状態を把握することによって、これらの式から  $\Delta p / \Delta L$  の値を算出することができる。

### 3・3 実験装置および実験方法

含水粉粒体の壁面摩擦係数の測定には、Fig.3-2 に示す装置を用いた<sup>1)</sup>。縦350mm、横150mm、深さ100mmの容器内に含水率を調整した粉粒体を入れ、その粉粒体層内に内径52mm、長さ300mmでアクリル製の回転ドラムを水平に

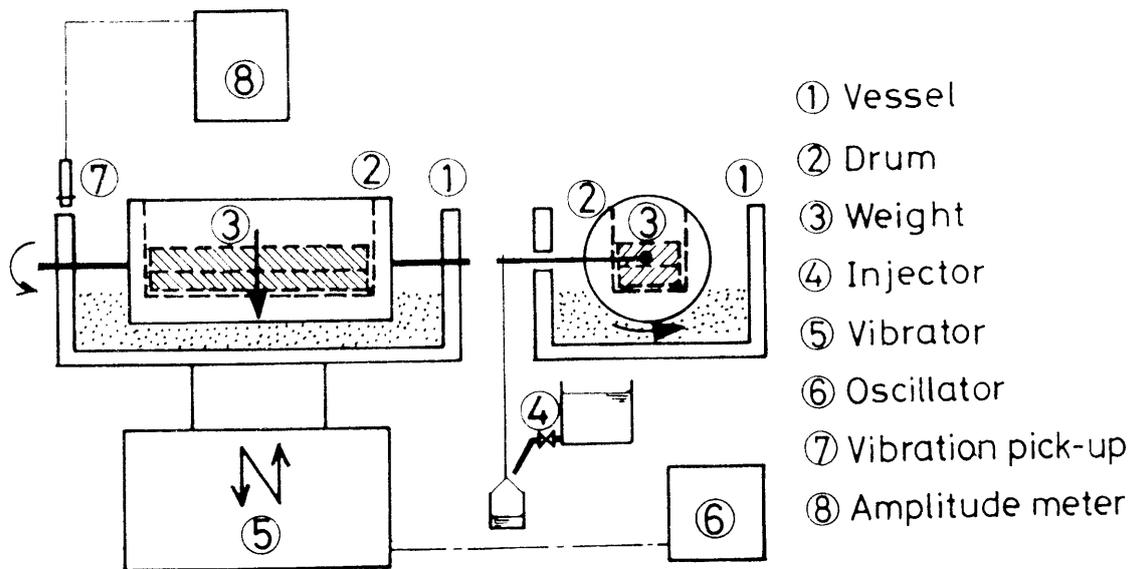


Fig.3-2 Schematic diagram of apparatus to measure wall friction coefficient

セットする。そのドラムに重りを乗せ、ドラムに付けられた容器に注入器で水を滴加していき、ドラムが回転を開始する瞬間のモーメントを測定した。同様の実験を重りの重量を変えて行い、これらの結果から壁面摩擦係数  $\xi_w$  を求めた。すなわち  $\xi_w$  はせん断応力を垂直応力で除した値と定義した。両者の関係があることを確認したため、付着力  $C$  はクーロンの式による接辺すなわち垂直応力が 0 の場合に外挿したせん断力の値とした。またこの装置では、振動している粉体層内での壁面摩擦係数も測定することが可能である。本研究で用いたポリスチレンペレットの物性測定結果を Table 3-1 に示す。

Table 3-1 Physical properties of polystyrene pellet

Properties		Water content	$\Phi = 0$	$\Phi = \Phi_c$	$\Phi = \Phi_s$
Particle diameter	$d_s$ [ mm ]		0.997	—	—
True density	$\rho_s$ [ kg/m <sup>3</sup> ]		1070	—	—
Bulk density	$\rho_b$ [ kg/m <sup>3</sup> ]		650	—	—
Coefficient of wall friction	$\xi_w$ [ — ]		0.397	0.539	0.197
Cohesion	$C$ [ Pa ]		0.153	0.397	0.105

含水粉粒体の空気輸送実験装置の概要を Fig.3-3 に示す。装置は動力部、空気および水の流量測定部、粉体供給部、輸送管路部、加振部、振幅測定部、粒子補給部からなる。輸送管は内径52mm、長さ 4.5mの透明アクリル製である。輸送管には振動数が 3~150Hzの範囲で可変できる加振機が取り付けられてあり、その振幅は非接触型変位計によって測定する。実験方法は粉粒体をホッパーに供給し、所定の空気流速  $u_a$  および輸送粉粒体の  $\Phi$  が所定の値になるように空気と水の流量調節バルブで調節する。輸送状態が定常に達した後、輸送管 1mの区間の圧力損失  $\Delta p$ 、堆積層の状況と厚み等の測定および写真撮影を行う。さらにその輸送条件で水平な輸送管に対して垂直方向の振動を加える。輸送状態が安定してくると同様な測定を行った。輸送粒子量  $M_s$  を 0.04kg/s、空気速度  $u_a$  を 3~9m/sの粗密流で堆積層ができるような領域で、含水率  $\Phi$  を 0~1.5、振動数  $f$  を 40~80Hz、振動加速度比  $A$  を 0~5の条件で実験を行った。

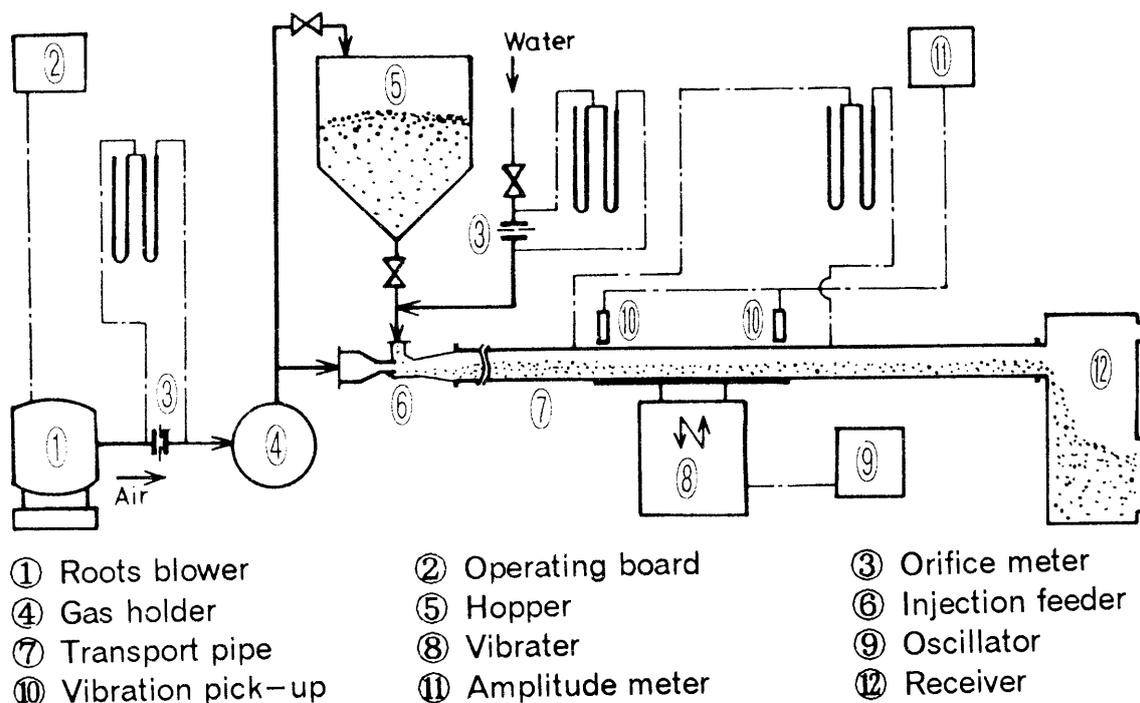


Fig. 3-3 Schematic diagram of experimental apparatus

### 3・4 実験結果および考察

#### 3・4・1 含水率および加振による流動様式の変化

粉粒体の含水率  $\Phi$  の相違によって、流動様式がどのように変わるかを、輸送粒子量  $M_s$  および  $u_a$  を一定として、輸送管に振動を加えない場合と加振した場合について比較検討した。その様子の一例を Fig. 3-4 の写真に示す。

##### (1) 非含水状態

$\Phi = 0$  では堆積層は静止し、その表面上を粒子は飛散状態で進行する。 $u_a$  が遅いと堆積層の厚み  $h$  は増加する。輸送管に振動を加えることによって静止層も移動するために  $h$  は減少し圧力損失は低減する。

##### (2) 不飽和含水状態

$\Phi = 0.5$  程度では堆積層は静止し、その表面に水分を伴った粒子が飛散状態で進行する。堆積層の厚みは一定でなく、その表面は波形状となる。 $u_a$  がある速度以上になると堆積層は塊状になったり、あるいはプラグを形成し

て輸送されるようになる。輸送管に振動を加えることによって、静止層はスムーズに移動するようになり、 $h$ は減少し圧力損失は低減する。

(3) 飽和含水状態

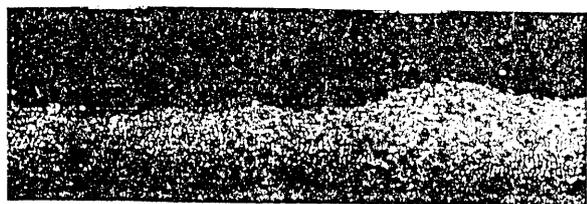
$\Phi = 1.0$ 付近では堆積層は低速で移動する。層表面上には水分を伴った粒



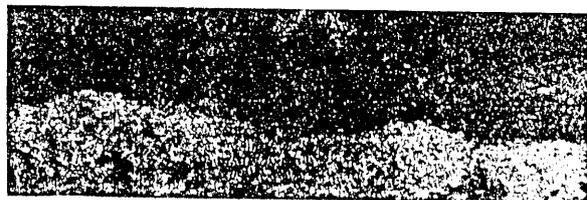
(1-a)  $\Phi = 0$  ,  $\Lambda = 0$



(1-b)  $\Phi = 0$  ,  $\Lambda = 1.0$



(2-a)  $\Phi \approx 0.5$  ,  $\Lambda = 0$



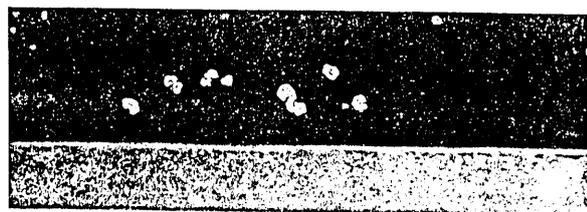
(2-b)  $\Phi \approx 0.5$  ,  $\Lambda = 1.0$



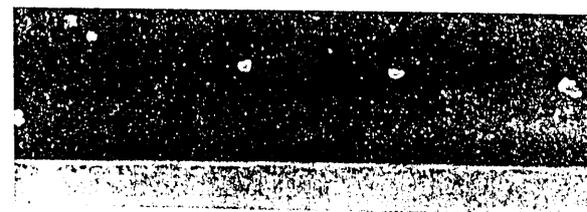
(3-a)  $\Phi \approx 1.0$  ,  $\Lambda = 0$



(3-b)  $\Phi \approx 1.0$  ,  $\Lambda = 1.0$



(4-a)  $\Phi \approx 1.5$  ,  $\Lambda = 0$



(4-b)  $\Phi \approx 1.5$  ,  $\Lambda = 1.0$

$$M_s = 0.04 \text{ kg/s}, \quad u_a = 5.0 \text{ m/s}$$

Fig.3-4 Conveying conditions for different water contents

子が飛行し、管壁に付着するものもある。輸送管に振動を加えることによって、堆積層の流速は早くなる。

#### (4) 過飽和含水状態

$\Phi = 1.5$ 程度では粉粒体のほとんどは水面下に埋没し、水流によって管底を滑るように移動する。輸送管に振動を加えることによって、流動様式はほとんど変わらないが堆積層の流速はさらに早くなる。

#### 3.4.2 含水率による圧力損失の変化

$\Phi$ と $\Delta p/\Delta L$ との関係の一例をFig.3-5に示す。実線はEqs.(3-1~3-6)から求めた値である。計算値と実験値はほぼ一致している。図中にはそれぞれの $\Phi$ における $\xi_w$ の値も示した。 $\Delta p/\Delta L$ は $\Phi = 0.5$ 付近で最大となり、さらに $\Phi$ を増加していくと乾燥状態のその値よりも小さな値となる。この現象は $\xi_w$ の変化すなわち壁面と堆積層の摩擦抵抗力に大きく依存しているものと考えられる。 $\Phi = 1$ のときは $\Phi = \Phi_s$ であるが、遷移域であり物性測定時よりも実際の輸送時では $\Phi < \Phi_s$ となる傾向にあり、実験値のほうが大きい値

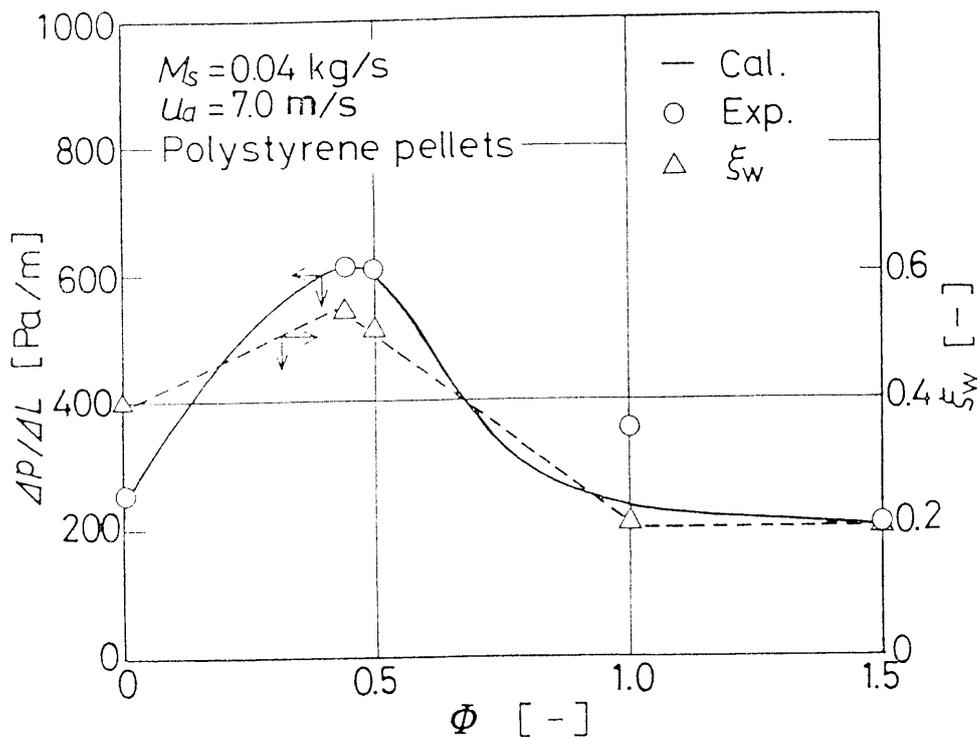


Fig. 3-5 Relationship between pressure drop and water content

となったものと考えられる。 $\Phi = 1.5$ では完全に $\Phi \geq \Phi_s$ の領域であるため、計算値は実験値とほぼ一致している。この解析は、固気液三相流の機構解析においても応用できると考えられる。

### 3.4.3 輸送動力低減のための水分調整および振動効果

粉粒体の空気輸送において粉粒体の水分を調整した場合と輸送管に振動を加えた場合、それらの効果が各々どの程度であるかを調べた。振動加速度比 $\Lambda$ と $\Delta p/\Delta L$ との関係の一例をFig.3-6に示す。 $\Phi = 0.5$ および $\Phi = 1.0$ の場合は、 $\Phi = 0$ および $\Phi = 1.5$ の場合に比べて大きい。 $\Phi = 1.5$ の場合 $\Lambda = 3$ でも、非含水状態で無加振のときの4割程度の圧力損失で輸送が可能であることがわかる。さらに $\Lambda$ を上げると本実験範囲内( $\Lambda = 5.9$ )では2割程度の圧力損失で輸送が可能である。これらの現象は適度な水分の調整と加振との相乗効果による粉粒体の液状化現象によるものと考えられる。

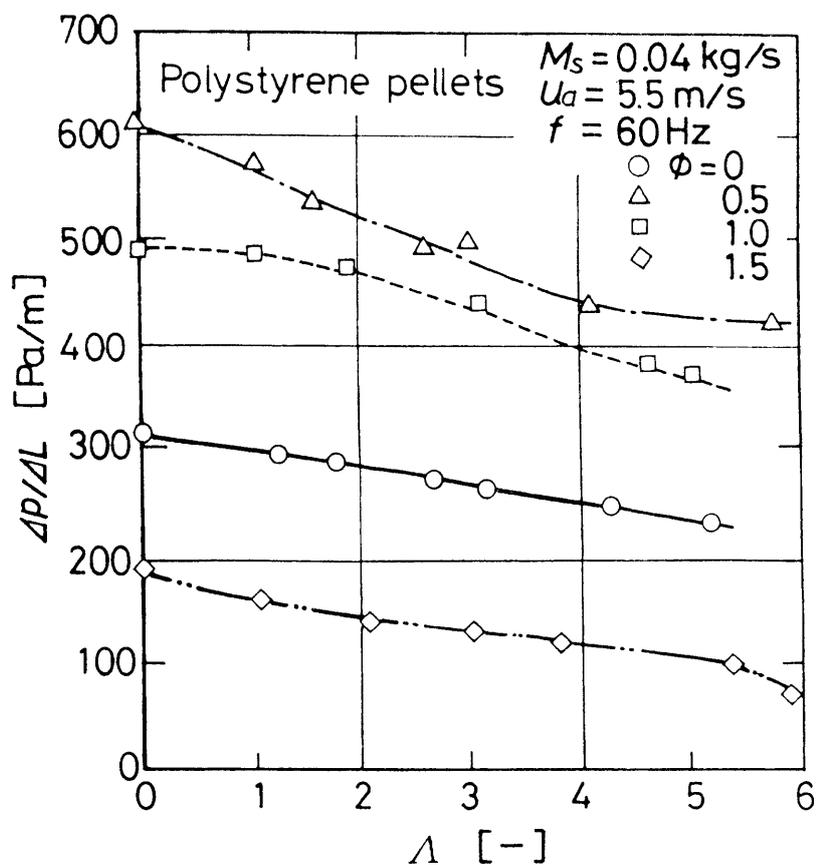


Fig. 3-6 Relationship between pressure drop and acceleration ratio

また本研究では粉粒体が球状で、粒子自体に含水しない粉粒体を用いたが、球形でなくて粒子自体が吸湿性であって  $\xi_w$  が大きな粉粒体の場合は、水分の調整および加振の効果は更に期待できるものと思われる。

### 3.4.4 振動効果におよぼす振動数

乾燥および含水粉粒体の空気輸送において、輸送管に振動を加えることが効果的なことがわかった。そこで輸送効率におよぼす  $f$  の影響を Fig.3-7 に示す。輸送効率  $\eta$  は一般的に輸送によって行われた仕事量と、それに費やした仕事量との比をとして次式で表される。

$$\eta = M_s \cdot g \cdot \Delta L / (\Delta p \cdot Q_a) \quad (3-7)$$

ここで  $\Delta L$  は圧力損失を測定する区間距離、 $Q_a$  は輸送空気流量である。さらに加振機の動力を考慮するために、空気源機械の消費動力  $N_e$ 、加振機の消費動力  $N_v$  として、加振機の動力付加比  $\Gamma$  を次式で求める。

$$\Gamma = (N_e + N_v) / N_e \quad (3-8)$$

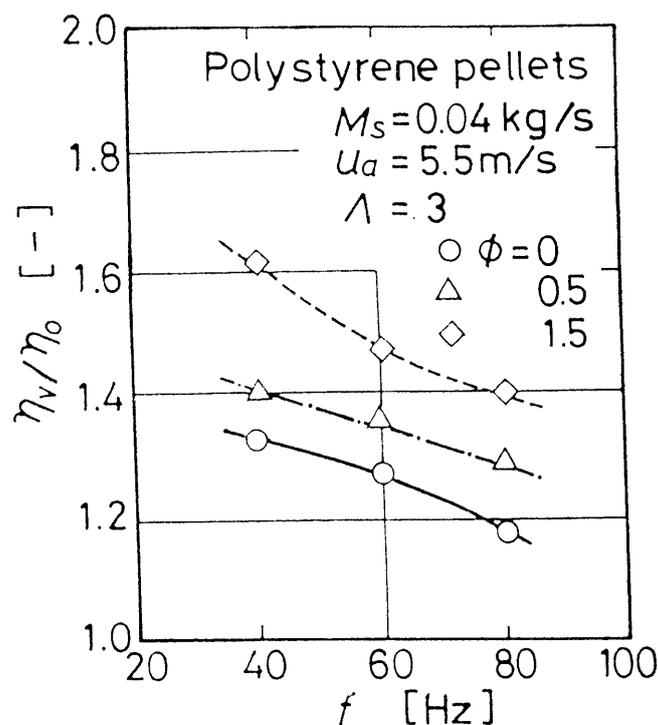


Fig.3-7 Relationship between transport efficiency ratio and frequency of vibration

これを考慮したの輸送効率  $\eta$  は、便宜上次式で求めることができる。

$$\eta = \frac{M_s \cdot g \cdot \Delta L}{\Delta p \cdot Q_a \cdot \Gamma} \quad (3-9)$$

Fig. 3-7の  $\eta_v / \eta_0$  は、Eq. (3-9)による無振の場合に対する加振の場合の輸送効率の計算値である。すなわち振動を加えることによって、どの程度効率が上昇するかを示す。この結果から前章で述べた非含水粉体の場合と同様、同じ  $\Delta$  である場合は  $f$  が小さい方が効果的であるが、 $f$  をむやみに小さくすると、 $a_h$  を大きくする必要があるので装置の耐久性等から好ましくない。なお加振機の消費電力は、空気源機械の消費電力に比べ無視できるほど微小で、Eq. (3-8)で求めた  $\Gamma$  は 1.05程度であった。

### 3・5 結論

乾燥および含水粉粒体の空気輸送について理論解析を行い、含水率と加振条件を変化させた場合について実験を行い次の結論を得た。

- (1) 粉粒体の含水率と輸送圧力損失の関係は、モデルに基づく計算値とほぼ一致し、壁面摩擦係数が大きな支配的因子であることがわかった。
- (2) 水分の調整および加振によって輸送圧力損失を低減できることを明らかにした。また両者の相乗効果による粉粒体の液状化現象で大幅な輸送圧力損失の低減が可能であることを確かめた。
- (4) 輸送圧力損失低減への振動効果は、一般に振動加速度比が一定の場合、振動数が小さいほうが顕著であった。

## 第4章 水平および傾斜輸送管路への振動効果<sup>6.1)</sup>

### 4・1 緒言

本章では前章の応用として、水平および傾斜した輸送管路における所要動力を低減するうえの技術資料を得ることを目的とした。粉粒体を傾斜面を利用して輸送する装置には、重力によるシュート輸送装置、気流あるいは液体による輸送装置等がある<sup>17, 24, 43, 69)</sup>。しかし前者は粉粒体が流れ落ちるための傾斜角度すなわち安息角以上の十分な傾斜角度を必要とし、後者は一般的に輸送動力が大きい等の短所を持っている。ここでは水平ダクトおよび粉粒体の安息角よりも小さい傾斜角度をもつ傾斜ダクトの底面に振動を加え、従来の空気輸送装置における気流の速度よりもはるかに小さい速度によって粉粒体を輸送することを試み、この種の装置における振動効果について考察した。

### 4・2 実験装置および実験方法

実験装置の概要をFig.4-1に示す。テストダクトは透明アクリル製で、断面は50×50mmの正方形で全長は4mである。ダクトの中央には加振機を設けてある。まず試料粉粒体をホッパーから定量的に落下させて供給し、これを気流によって無振状態で輸送し、輸送状態が定常に達してから、圧力損失 $\Delta p_0$ 、堆積層高さ $h_0$ を測定する。さらに加振機によってダクトの底面に垂直方向に振動を加え、そのときの圧力損失 $\Delta p$ 、堆積層高さ $h$ を測定する。加振機は前章と同様に振幅と振動数を任意に選定できる電磁式で、底面に対して垂直方向の振動を加える。振幅は非接触型の変位計によって測定した。実験条件はダクトの傾斜角 $\theta$ を上り勾配を正、下り勾配を負で表して0rad( $0^\circ$ )、 $\pm \pi/18\text{rad}(\pm 10^\circ)$ 、 $\pm \pi/9\text{rad}(\pm 20^\circ)$ 、輸送粒子量 $M_s$ を0.03~0.06

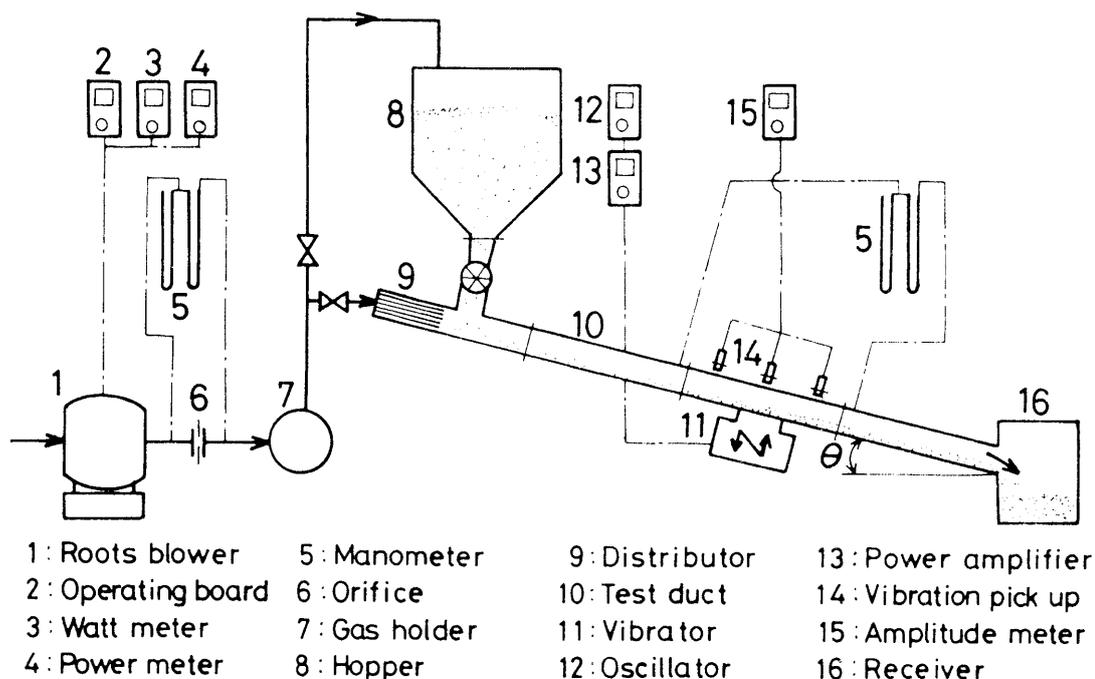


Fig.4-1 Schematic diagram of experimental apparatus ; effect of vibration on inclined conveying duct

kg/s, 空気速度  $u_a$  を 1.5~5.5m/s, 振動数  $f$  を 60~100Hz, 振動加速度比  $\Lambda$  は 0~6 に変化させた。試料としては粟 (Millet) を用い, 物性は Table 2-1 に示した。

## 4・3 実験結果および考察

### 4・3・1 輸送中の流動様式

傾斜輸送管路における輸送中の流動様式は, 傾斜角および気流速度が小さい場合は, 粒子群はダクト上に堆積層を作り, その表面上部が飛散状態で移動する。ダクトに振動を加えた場合における測定区間 1m の圧力損失  $\Delta p$  と堆積層厚み  $h$  の測定結果の一例を Fig.4-2 に示す。  $\Delta p$  は  $\Lambda$  の増加とともに急激に減少する。また  $h$  は堆積層が振動によって膨張する現象と流れ落ちようとする現象が同時に生じるために不特定な挙動を示すが,  $\Lambda$  がある程度大きくなると減少の傾向を示す。さらに  $\Delta p$  および  $h$  は  $f$  が小さい程あるいは

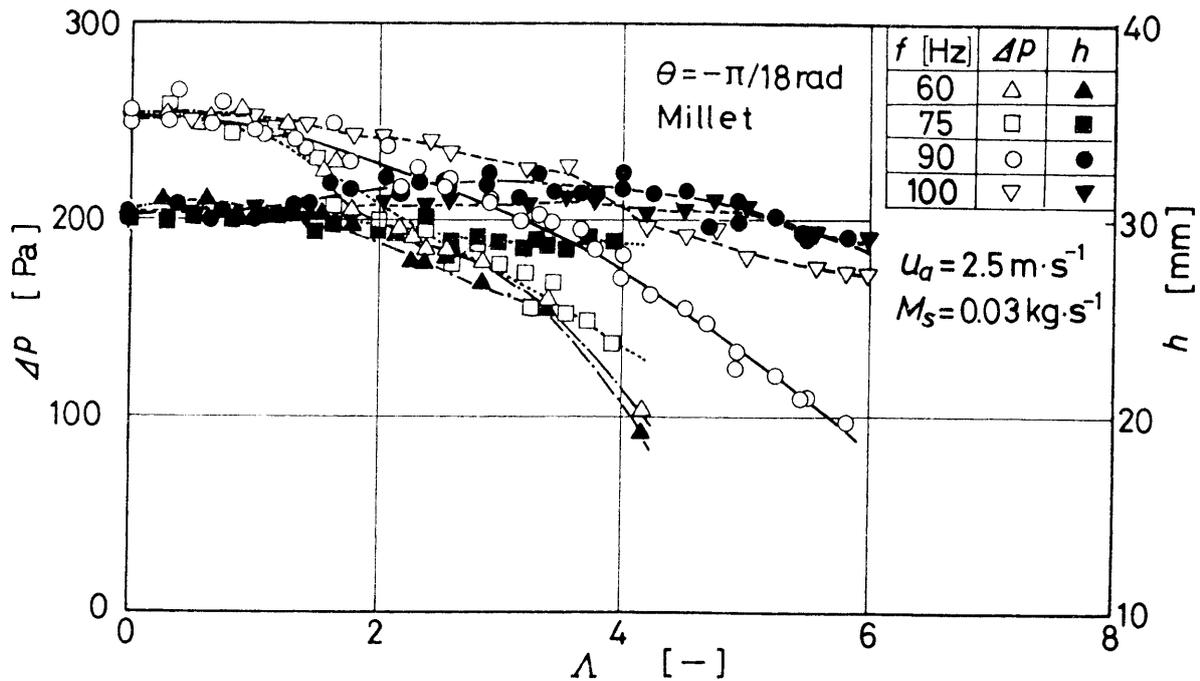


Fig. 4-2 Pressure drop and bed heights under vibration

ダクトの下り勾配の大きい程、 $\Lambda$ の増加に対する減少割合が大きくなった。

#### 4・3・2 振動効果におよぼす振動数

さらに振動条件が振動効果にどの程度影響するかを調べるためにFig.4-3に傾斜角  $-\pi/18\text{rad}$ 、 $\Lambda = 1.0 \sim 4.0$  の場合について、振動数  $f$  と圧力損失比  $\Delta p / \Delta p_0$  の関係を示した。Fig.4-2 からわかるように高い  $\Lambda$  の方が  $\Delta p / \Delta p_0$  は低く、 $\Lambda$  が一定の場合は  $f$  が低いほうが  $\Delta p / \Delta p_0$  が小さくなる。この図の範囲内でも適度な  $\Lambda$  と  $f$  の設定による加振によって、無振の場合の30%の  $\Delta p$  で輸送することが可能である。さらに  $\Lambda$  を高く、 $f$  を低くすることによって  $\Delta p$  の低減が期待できる。しかしむやみに  $\Lambda$  を高く  $f$  を小さく設定することは、振幅が大きくなるので装置の耐久性等の面から好ましくなく、一方  $f$  は過度に大きくすると騒音の問題、加振機的能力等から限界がある。

実際の装置への加振では、 $f$  はここで設定した範囲程度の条件が効果的であると考えられるが、本研究では数種類の加振機を使用したために、その能力および被加振部の重量等によって、設定条件が異なっている場合もある。

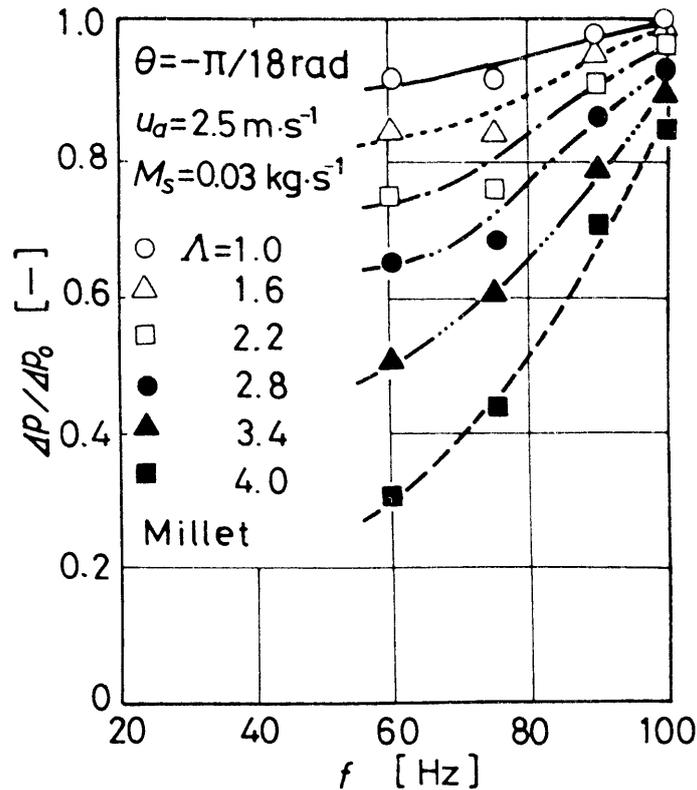


Fig. 4-3 Relationship between pressure drop ratio and frequency of vibration

#### 4・3・3 傾斜角度による振動効果の相違

次に振動効果が傾斜角度によってどのように異なるかを表すために、ダクトの傾斜角が下り勾配  $-\pi/9\text{rad}$  から上り勾配  $+\pi/9\text{rad}$  までの場合について、 $\Lambda$  と  $\Delta p/\Delta p_0$  の関係を Fig. 4-4 に示した。この図から傾きが大きい程  $\Delta p/\Delta p_0$  の変化が大きく、水平および下り勾配の場合は、加振することによって摩擦係数が低減し、粒子は輸送方向に移動しやすくなるために圧力損失は減少する。上り勾配の場合は加振することによって粒子は輸送方向と逆の方向に移動しやすくなり負の効果となる。本実験では輸送混合比が比較的小さい状態で実験を行っているが、後述するようにその値が大きいプラグあるいはスラグ状の輸送形態では、鉛直あるいは上り勾配においても輸送動力の低減が可能である<sup>27, 28)</sup>。下り勾配の場合は、傾斜が大きい程  $\Delta p/\Delta p_0$  の値

が小さく、 $\theta = -\pi/9$ radでは、 $\Lambda$ が1.5程度の加振力で輸送動力をかなり低減することが可能である。

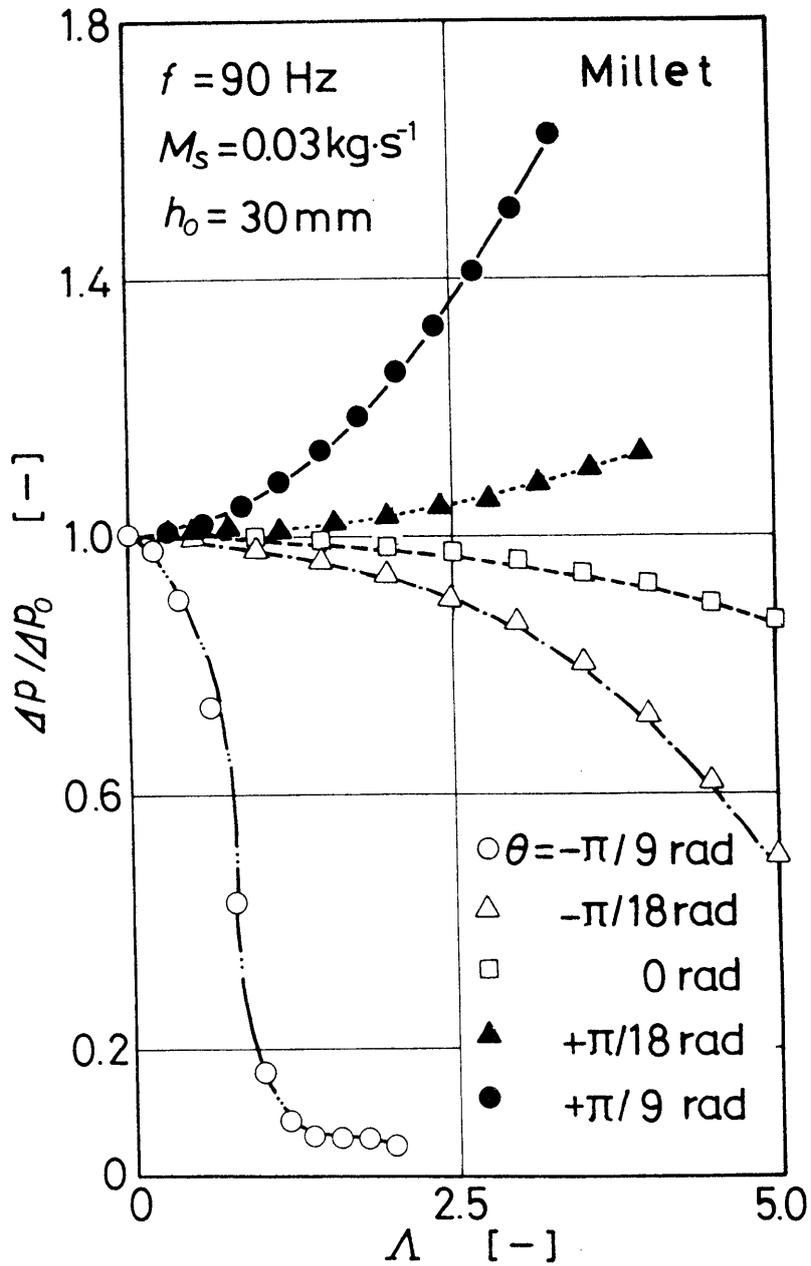


Fig. 4-4 Effect of duct inclination on pressure drop under vibration

#### 4.3.4 輸送効率

輸送効率  $\eta$  は輸送によって行われた仕事量と、それに費やした仕事量との比として、前章と同様に加振機の消費動力を考慮して Eq. (3-9) による計算を

行った。Fig.4-5 は  $\theta = -\pi/9$  radで輸送量  $M_s$  を変えた場合の  $\Lambda$  と  $\eta$  の関係を示す。 $\Lambda = 0.8$  程度までは加振による  $\eta$  の変化は少なく無振の場合と同様に  $M_s$  が大きい程  $\eta$  は高くなる。これは  $\Lambda$  が小さいため加振することが、流動に対してあまり影響をおよぼしていないためと考える。さらに  $\Lambda$  が 0.8~

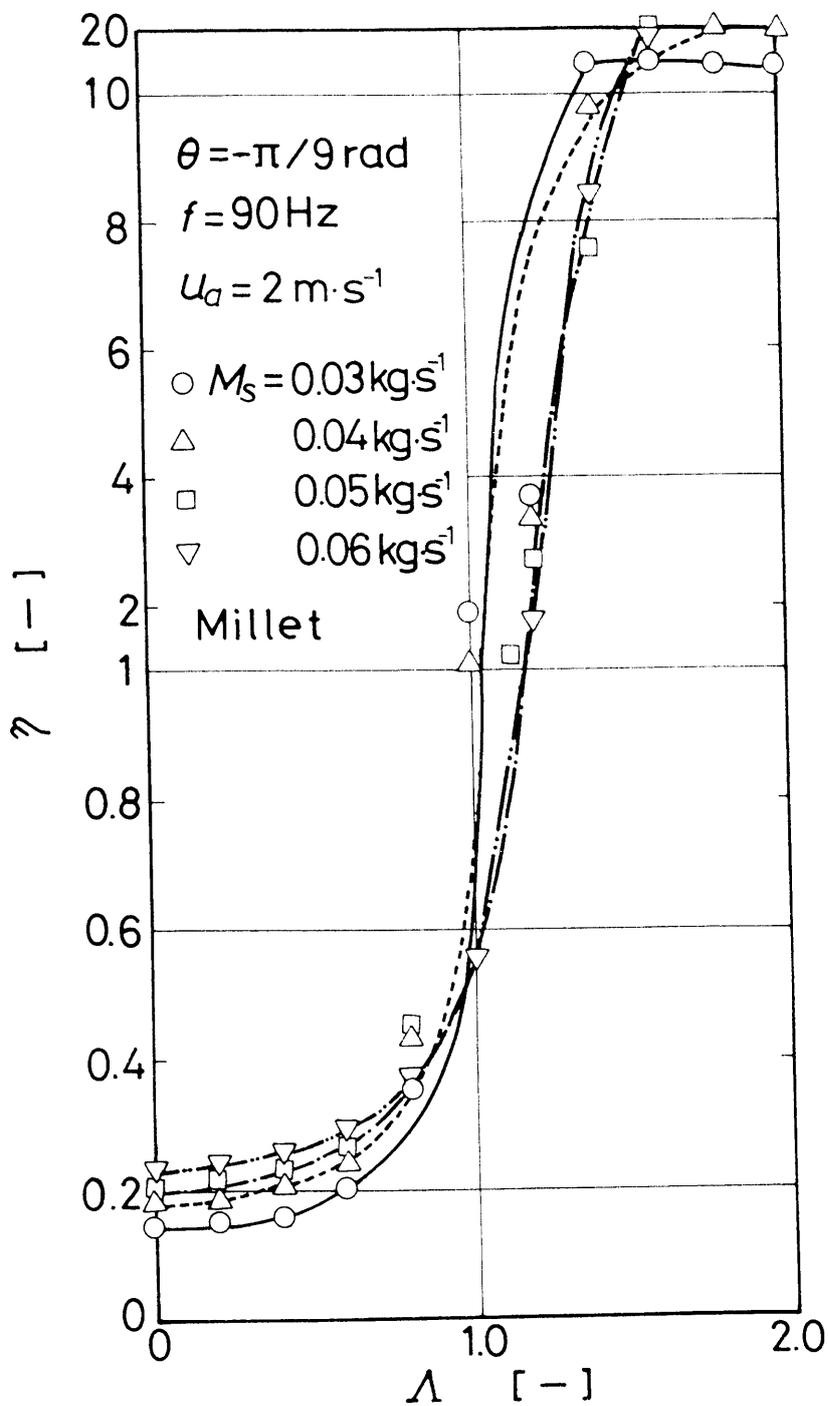


Fig.4-5 Effect of vibration on transport efficiency

1.5の範囲では、 $\eta$ は著しく変化し $\Lambda$ が1.5以上でほぼ定常になる傾向を示した。この図から $\theta = -\pi/9\text{rad}$ （安息角 $\phi_r$ の6割程度の下り勾配）においては、輸送ダクトに $\Lambda = 1.5$ 程度の振動を加えることによって、この程度の低い空気速度でも $\eta$ がかなり上昇することがわかる。

なおEq.(3-8)の $N_v$ は $N_e$ に比べて微小で数%程度であり、実際の空気輸送に応用した場合も加振機の所要動力は、空気源機械の所要動力に比べて数%と試算される<sup>28)</sup>。

#### 4・4 結言

粉粒体の空気送輸送において、水平および傾斜したダクトに振動を加えた場合の効果について実験的研究を行い次の結論を得た。

- (1) 水平および下り勾配の場合には、加振によって輸送動力を低減できるが、上り勾配の場合は負の効果となった。
- (2) 振動加速度比 $\Lambda$ が一定の場合については、振動数が低い方が加振効果が大きい。
- (3) 傾斜角 $\theta = -\pi/9\text{rad}$ の下り勾配の場合は、 $\Lambda = 1.5$ 程度の加振によって、かなり低い空気速度でも輸送効率を急増することができた。

## 第5章 プラグ輸送限界における所要動力と最適条件<sup>22), 23), 31)</sup>

### 5・1 緒言

粉粒体のプラグ輸送は、従来の空気輸送方式に比べ輸送物質の破碎や輸送管路内の摩耗が少なく、またエネルギー効率の高い方法として注目され、研究報告例もいくつもある<sup>3), 10), 39), 42), 46), 49), 57)</sup>。

著者らは比較的早い時期からこの方式に注目し、本方式の所要動力およびその低減方法について検討を重ねてきた<sup>22)</sup>。本章ではまず単一プラグを輸送するために必要な空気圧力を求める理論式を求めた。続いて炭酸カルシウムを用いて単一プラグの水平、鉛直輸送実験を行い、理論式と比較検討し、経済的な輸送方式について考察した。

### 5・2 理論

プラグの輸送現象を力学的に解析するためにFig.5-1に示すように、水平面に対して角度 $\theta$ に傾斜した内径 $D$ 、断面積 $A$ の管内を、長さ $l_p$ のプラグが輸送されていると考え、以下のように仮定する。

(a) 粉体の壁面摩擦係数 $\xi_w$ 、かさ密度 $\rho_b$ はプラグ層全体にわたって一様である。

(b) プラグ層内の断面において管壁方向に働く圧力 $p_r$ は、円周方向に一定である。

(c) プラグ層内で管軸方向に働く圧力は、プラグ層が空気によって受ける圧力 $p_l$ と、空気がプラグ層内を透過することによる動的圧力 $p_k$ とを別々に考え<sup>70)</sup>、その両者の和を輸送圧力 $p_a$ とする。

プラグ層の下流側先端から距離 $l$ の粉体層内に微小長さ $dl$ の層をとり、

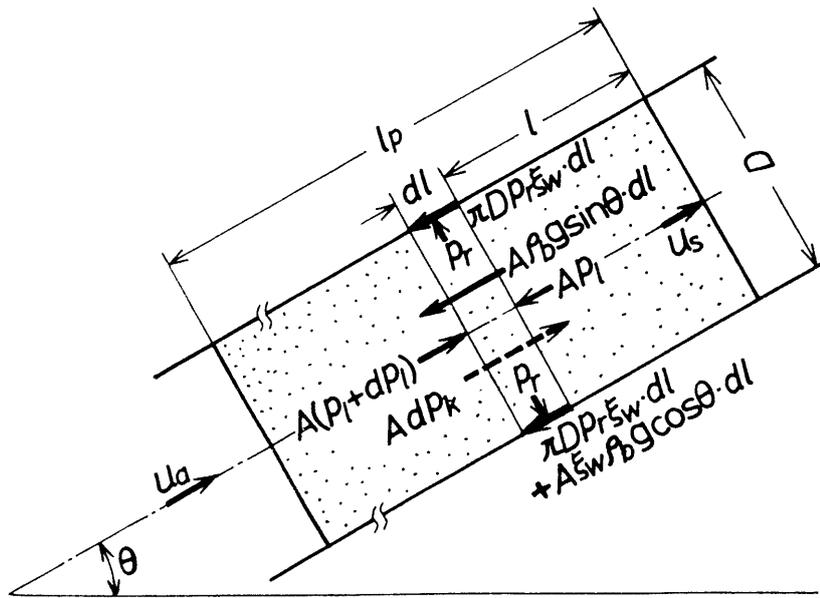


Fig. 5-1 Analytic diagram of forces acting on a plug layer

これに働く力を考える。

(I) 上流側から下流側に働く力；

プラグ層が空気によって受ける推力： $A(p_l + dp_l)$

透過空気圧力による力： $A \cdot dp_k$

このプラグ層内を流れる透過空気圧力は，仮定(c)で述べたように外力によるプラグ層内に働く推力（粉体圧）とは別々に考え<sup>70)</sup>，次の Ergun の式で与えられる<sup>49)</sup>。

$$dp_k = f_k \frac{\rho_a (u_k - u_p)^2}{d_s} \left( \frac{1 - \epsilon}{\epsilon^3} \right) dl \quad (5-1)$$

ここで  $\rho_a$ ：空気の密度 [kg/m<sup>3</sup>]， $u_k$ ：透過空気速度 [m/s]， $u_p$ ：プラグ移動速度 [m/s]， $d_s$ ：平均粒子径 [m]， $\epsilon$ ：プラグ層内の空間率 [-]， $f_k$ ：透過空気に対する抵抗係数 [-]であり，これは空気の動粘性係数を  $\nu$  [m<sup>2</sup>/s]，レイノルズ数  $Re_s = d_s (u_k - u_p) / \nu$  [-]とすると，次式となる。

$$\begin{aligned} f_k &= 1.75 + 150(1 - \epsilon) \left[ \nu / \{ d_s (u_k - u_p) \} \right] \\ &= 1.75 + 150(1 - \epsilon) / Re_s \end{aligned} \quad (5-2)$$

(II) 下流側から上流側に働く力；

推力に対する抗力：	$A p_l$
壁面での摩擦力：	$\pi D p_r \xi_w \cdot d l$
重力による成分：	$A \rho_b g \sin \theta \cdot d l$
重力に対する摩擦力：	$A \xi_w \rho_b g \cos \theta \cdot d l$

以上から力の釣合の式は次のようになる。

$$\begin{aligned}
 & A (p_l + d p_l) + f_k A \frac{\rho_a (u_k - u_p)^2}{d_s} \left( \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3} \right) d l \\
 & = A p_l + \pi D p_r \xi_w \cdot d l + A \rho_b g \sin \theta \cdot d l \\
 & \quad + A \xi_w \rho_b g \cos \theta \cdot d l \tag{5-3}
 \end{aligned}$$

これを整理すると次式を得る。

$$\begin{aligned}
 \frac{d p_l}{d l} & = \frac{4 \xi_w p_l}{D K_p} + (\sin \theta + \xi_w \cos \theta) \rho_b g \\
 & \quad - f_k \frac{\rho_a (u_k - u_p)^2}{d_s} \left( \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3} \right) \tag{5-4}
 \end{aligned}$$

ここで  $K_p$  は管軸方向の圧力  $p_l$  と管壁方向の圧力  $p_r$  との比で、

$$K_p = p_l / p_r \tag{5-5}$$

である。以下の境界条件で、

$$\begin{aligned}
 l = 0 & \quad ; \quad p_l = 0 \\
 l = l_p & \quad ; \quad p_l = p_l
 \end{aligned}$$

Eq. (5-4) を積分すると、長さ  $l_p$  のプラグを輸送する時の空気圧力  $p_a$  は、次式で表すことができる。

$$\begin{aligned}
 p_a \geq p_l & = \frac{D K_p g}{4 \xi_w} \left\{ \exp \left( \frac{4 \xi_w l_p}{D K_p} \right) - 1 \right\} \\
 & \times \left\{ (\sin \theta + \xi_w \cos \theta) \rho_b - f_k \frac{\rho_a (u_k - u_p)^2}{g d_s} \left( \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3} \right) \right\} \tag{5-6}
 \end{aligned}$$

プラグを輸送するのに必要な限界の空気圧力  $p_m$  は、Eq. (5-6) 中の  $K_p$  の値に輸送限界における  $K_{pc}$  を代入することによって求めることができる。この値については、Petersen の論文<sup>5,2)</sup> に紹介してある Lippert の実験結果をまとめ

た式を参考にして、

$$K_{pc} = m (l_p / D)^n \quad (5-7)$$

と考える。ここで係数  $m$ 、指数  $n$  の値は、輸送条件、粉粒体の物性、輸送管内面の粗さ等によって異なる。

また本章で用いたような細かい粉体のプラグ輸送では、 $(u_k - u_p)$  の値は一般的に無視できる程度に小さいので、

$$p_m = \frac{D K_{pc} g}{4 \xi_w} \left\{ \exp \left( \frac{4 \xi_w l_p}{D K_{pc}} \right) - 1 \right\} (\sin \theta + \xi_w \cos \theta) \rho_b \quad (5-8)$$

となる。

### 5・3 実験装置および実験方法

実験装置は Fig.5-2 に示すように動力部、測定部、粉体補集部からなる。測定部は水平管10m、鉛直管 8mで内径が66, 78, 99mmの 3種類について透明アクリル管を取り替えて用いる。試料としては、Table 2-1 に示す物性の炭酸カルシウムを用い、これを輸送管の上流側を取り外し充てんして長さ0.2~0.8mのプラグを作る。このとき圧力損失が無視できる金網を上流端に設けてあり、そこに空間率が均一になるように適切な振動を加えながら充てんする。次に回転数可変のルーツブロワーの風量を徐々に上げていき、プラグが途中で止まることなく輸送される最少の輸送圧力および輸送空気流量を求める。輸送に必要な空気圧力  $p_m (\geq p_l)$  は、プラグの上流側の圧力タップから検出しゲージメータで、そのときの空気流量  $Q_a$  は、オリフィスメータで読み取り、さらに差圧変換器と動ひずみ計を連結して電磁オシログラフによる連続的な記録を行う。また輸送中の空気の静的圧力は、輸送管の数カ所に取り付けた圧力タップによって、壁面に働く圧力  $p_r$  は、Fig.5-2の右上に示すように圧力タップと対称の位置に設けた超小型圧力変換器で検出し、動ひずみ計を介して連続的に記録する。プラグの移動速度はそれらの記録紙上から算出する。

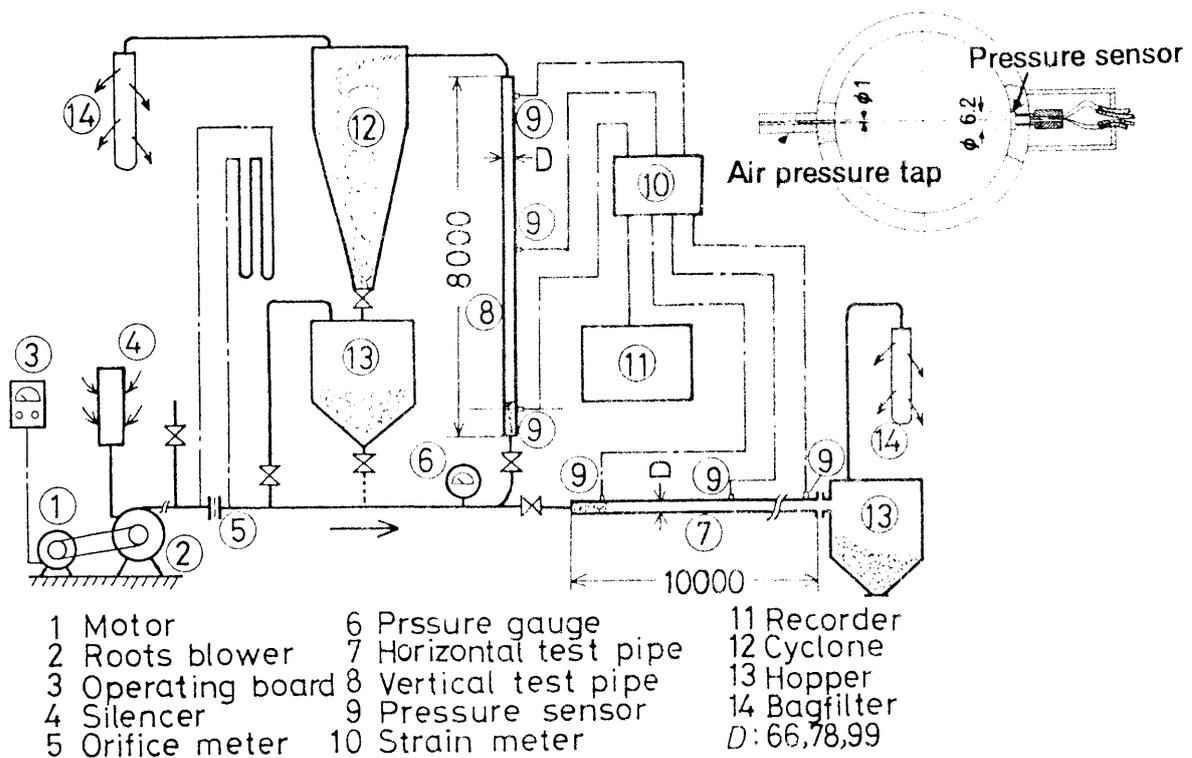


Fig. 5-2 Schematic diagram of experimental apparatus

## 5・4 実験結果および考察

### 5・4・1 輸送所要動力

プラグを輸送するために必要な空気圧力を  $p_m$  [Pa], 空気流量を  $Q_a$  [m<sup>3</sup>/s] とすると, 輸送所要動力  $N_p$  [kW] は次式で表される。

$$N_p = p_m \cdot Q_a / 1000 \quad (5-9)$$

本実験では管径  $D$  およびプラグ長さ  $l_p$  を変えて, プラグが停滞することなく輸送するために必要な最少の  $p_m$  と  $Q_a$  を測定した。それらの実験結果を水平輸送の場合は Fig. 5-3 および Fig. 5-5 鉛直輸送の場合は Fig. 5-4 および Fig. 5-6 に示す。プラグが長い程それを輸送するために必要な空気圧力ならびにそれに伴う空気流量も増大する。また図中にはそれぞれの管径について, 輸送質量が等しくなるプラグ長さを等量線として示す。単位輸送量当りに必要な空気圧力は, 管径が大きい程顕著に小さくなる。これは Eqs. (5-6), (5-8)

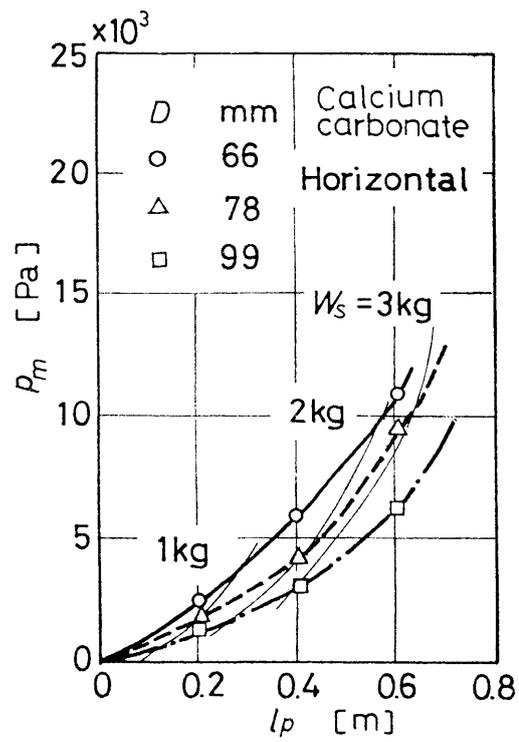


Fig. 5-3 Requisite minimum air pressure for conveying a plug in horizontal pipe

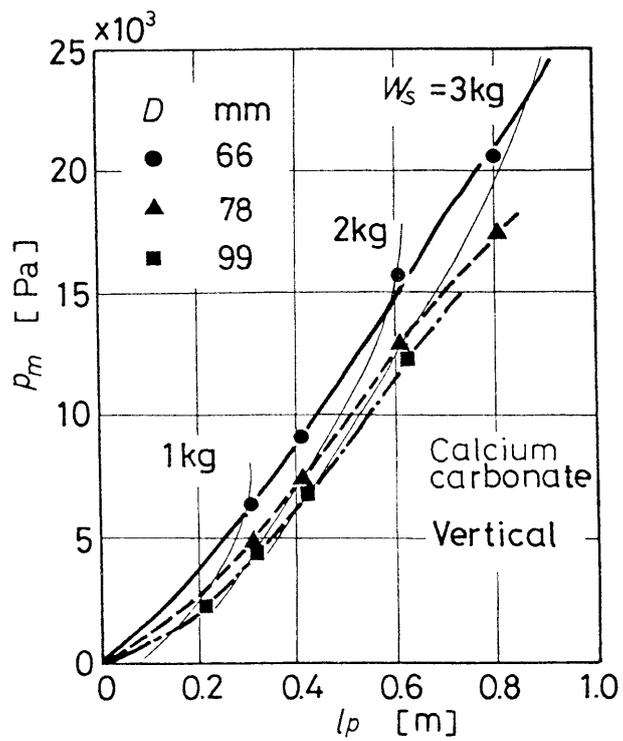


Fig. 5-4 Requisite minimum air pressure for conveying a plug in vertical pipe

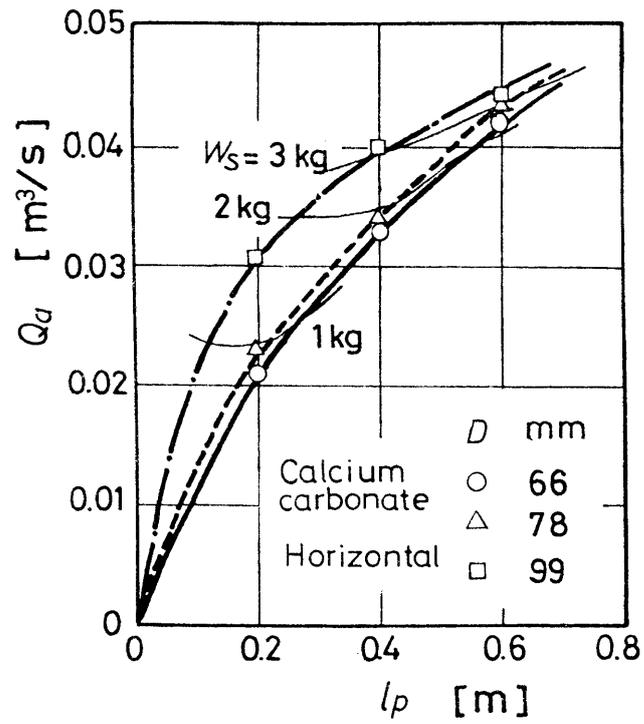


Fig.5-5 Requisite minimum air volume for conveying a plug in horizontal pipe

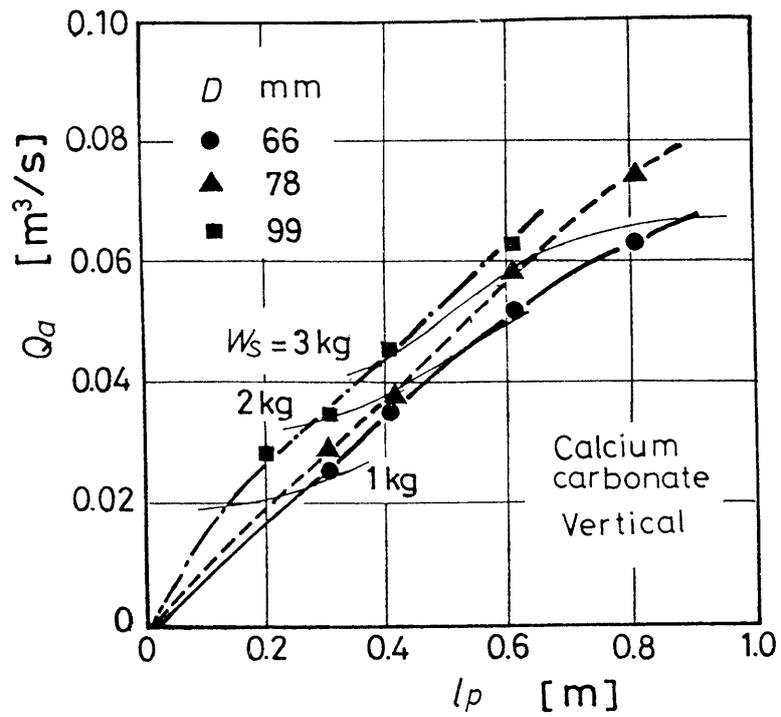


Fig.5-6 Requisite minimum air volume for conveying a plug in vertical pipe

からも予測できる。これに対して単位輸送量当りに必要な空気流量は、管径の影響が少ないことがわかる。したがってEq. (5-9)で与えられる所要動力の大きさは、実際には空気流量よりも空気圧力の大小に影響されると考えられる。そこで Figs. 5-3~5-6 からそれぞれの場合プラグ1個の質量  $W_s$  当りの所要動力を求めるとFig.5-7 のようになる。この図から同一質量のプラグを輸送する場合は、管径が大きいほうが、所要動力が小さいことがわかる。これは管径が大きい程、同一質量のプラグ長さが短くFigs.5-3,5-4 に示したように空気圧力が著しく小さくなることによる。すなわち  $D$  による相違は、単位質量当りの壁面摩擦力が大きく影響していると考えられる。またどの管径についても、水平に比べ鉛直輸送のほうが大きい値を示すのは、重力の影響すなわちEq. (5-3)では右辺第3項が大きく作用するためとされる。

以上のことから、本実験範囲では所要動力を低減するためには、内径の大きい輸送管を用い、空気圧力の低減を図ることが効果的であるといえる。

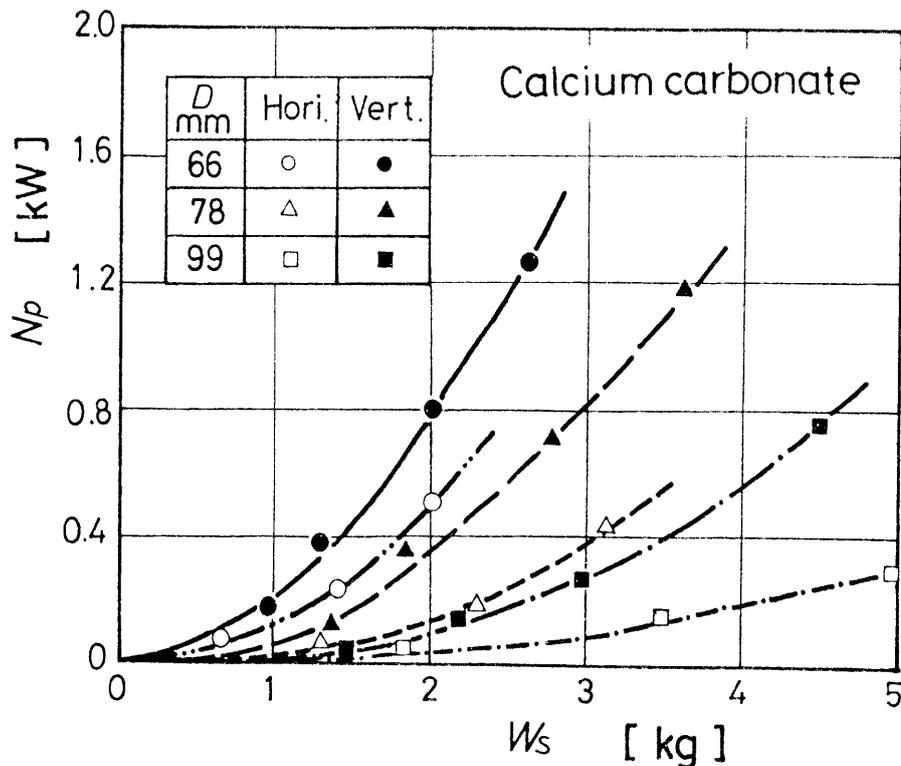


Fig.5-7 Requisite power for conveying a plug

### 5・4・2 輸送仕事効率

先に述べた輸送に必要な所要動力を低減させる条件とともに、実際上その消費動力がどれだけ有効に輸送に使われているかを調べる必要がある。

そこでプラグを輸送することによって行った仕事量と、それに費やした動力との比を輸送仕事効率  $\eta_p$  と定義し次式で表わす。

$$\eta_p = g W_s u_p / ( p_a A u_a ) \quad (5-10)$$

ここで  $W_s$  : 輸送質量[kg],  $u_p$  : プラグ移動速度[m/s],  $p_a$  : 輸送圧力[Pa],  $u_a$  : 空気速度[m/s]である。

Eq.(5-10) で  $\eta_p$  を算出する場合  $u_p$  として定常輸送状態における値を用いる必要がある。そこで輸送距離  $L$  におけるプラグの移動速度の測定値の一例を Fig.5-8 に示す。この図からプラグの加速は、輸送し始めてから約 3~6m 程度で終了していることがわかる。これは浮遊輸送の加速距離に比べかなり短い。そして加速後はそれぞれの場合について 1~4m/s 程度の一定速度で輸送される。この値は Lippert<sup>39)</sup> が示している経済速度に匹敵する。

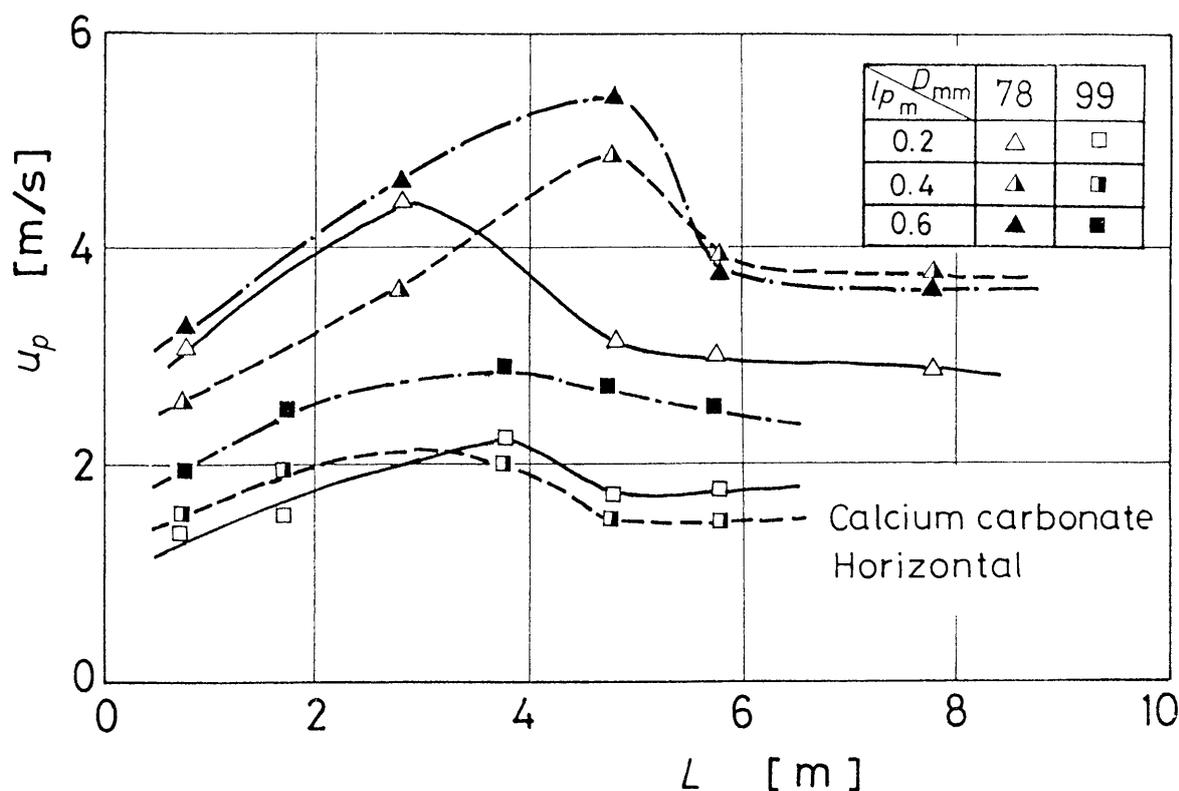


Fig.5-8 Transition of transferred velocity of plug in pipe

この一定速度となった定常輸送状態  $L = 6\text{m}$ での輸送仕事効率を計算し、その結果を  $l_p/D$ に対して描くとFig.5-9 のようになる。この図から同一内径の輸送については、プラグ長さが短い程効率が良いということがわかる。この理由としては、先にも述べたように空気圧力および粉体の壁面摩擦による影響が考えられる。しかし長さが短すぎるとプラグが壊れやすい。その限界値については今後なお検討の必要がある。

次に管径について比較すると、 $D = 78\text{mm}$ の場合が一番大きい効率を示し、Fig.5-7 の所要動力の結果と異なる。これはFig.5-8 から  $D = 78\text{mm}$ の場合に  $u_p$ が  $D = 99\text{mm}$ の場合よりも大きくなり能率的に輸送が行われるためと考えられる。このことは浮遊輸送で管径が80mm程度で速度比が最大になるという上滝<sup>18)</sup>の実験値と一致している。プラグ輸送の場合、管径が小さくなると単位輸送量当り壁面との摩擦量が増大し、管径が大きくなると必要空気流量が大きくなるため、その中間に最適値が存在するものと考えられる。

以上は水平管について述べたが、鉛直輸送の場合も同じ傾向を示した。

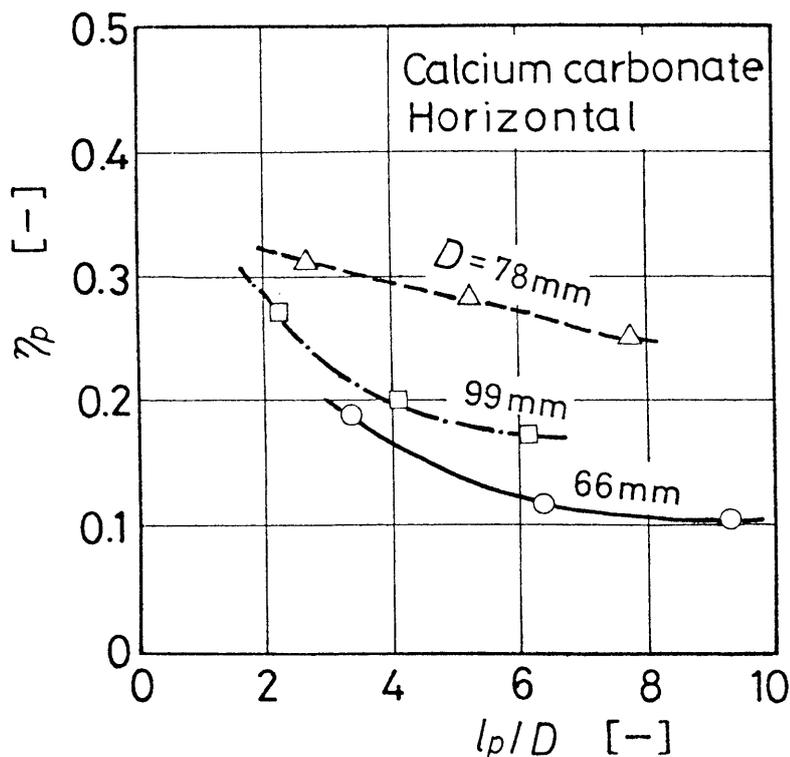


Fig. 5-9 Transport efficiency for conveying a plug

しかし鉛直輸送の場合は、重力に逆らって仕事をする必要があるので、水平に比べ  $u_p/u_a$  が小さくなり、効率は小さい値を示す。このことは綱川らの報告<sup>5,7)</sup>と同じ傾向になる。

### 5・4・3 付加圧力損失係数

流体の速度による動圧に対する圧力損失すなわち付加圧力損失係数のフルード数に対する相似性は、多くの研究者によって論じられているが、浮遊輸送に関するものが多く、プラグ輸送についてはあまり報告されていない。そこで次のような仮定のもとでプラグ輸送の付加圧力損失について考察する。一般的に全圧力損失  $p_m$  は、気流単相流の圧力損失  $\Delta p_o$  とプラグの粉粒体の存在によって付加される圧力損失  $\Delta p_s$  の和となる。

$$p_m = \Delta p_o + \Delta p_s \quad (5-11)$$

とおき、 $\Delta p_o$  と  $\Delta p_s$  は次式で表せる。

$$\Delta p_o = \lambda_a (L/D) (\rho_a/2) u_a^2 \quad (5-12)$$

$$\Delta p_s = \lambda_s (L/D) (\rho_m/2) u_p^2 \quad (5-13)$$

ここで  $\lambda_a$  : 気流のみの管摩擦係数[-],  $\lambda_s$  : 付加圧力損失係数[-],  $\rho_a$  : 空気の密度[kg/m<sup>3</sup>],  $\rho_m$  : 管内平均粒子密度[kg/m<sup>3</sup>]である。

本研究は単一プラグ輸送であるので付加圧力損失係数は、次の計算式で表せる。

$$\lambda_s = \frac{(p_m - \Delta p_o) D^3}{2 W_s u_p^2}$$

プラグ速度基準のフルード数  $Fr_s = u_p / (gD)^{1/2}$  と Eq.(5-14) から求めた  $\lambda_s$  の関係を Fig.5-10 に示す。この図から水平、鉛直輸送どちらの場合も  $Fr_s$  が大きいと  $\lambda_s$  は顕著に小さな値を示すことがわかる。またいずれの関係についても、ほぼ同程度の値となり相似性が成り立つと言ってよい。そこで本実験範囲での  $\lambda_s$  と  $Fr_s$  の関係は次の実験式で表せる。

$$\text{水平輸送} ; \quad \lambda_s = 1.41 Fr_s^{-1.64} \quad (5-15)$$

$$\text{鉛直輸送} ; \quad \lambda_s = 2.57 Fr_s^{-1.81} \quad (5-16)$$

この値は森川ら<sup>4,2)</sup>の浮遊輸送実験による値よりもかなり大きい値を示して

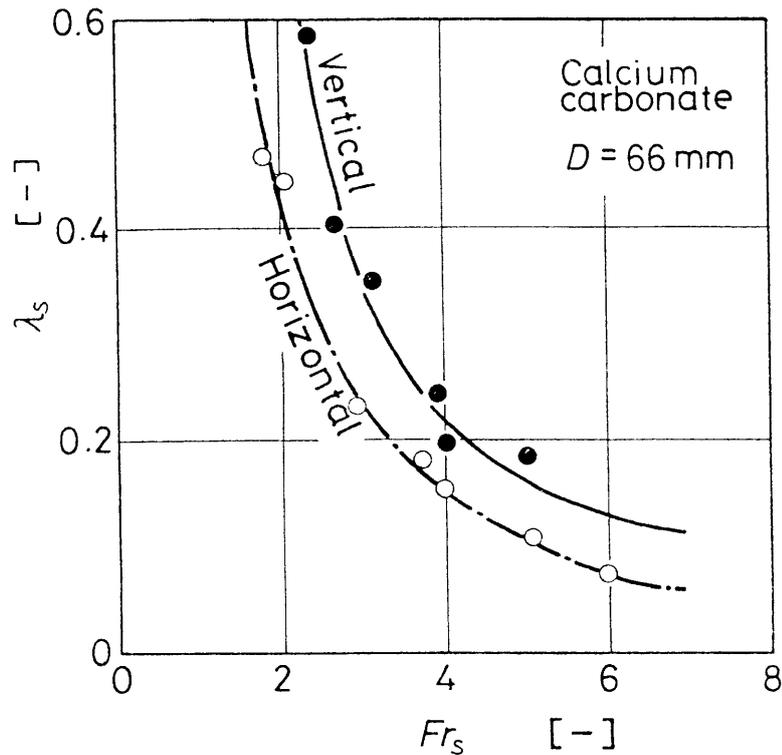


Fig. 5-10 Relationship between additional friction factor and Froude number

いる。これはプラグ輸送のほうが管壁と粒子との接触が多いことによると考えられる。Lippert<sup>39)</sup>のプラグ輸送実験による値とほぼ一致している。

Fig. 5-10 だけについてみると大きなプラグ速度で輸送することが好ましいといえるが、輸送速度の大きい程圧力損失が上昇する傾向がある。したがって本実験範囲内では、 $Fr_s$ に対する $\lambda_s$ の減少がゆるやかになる $Fr_s$ が4程度になるプラグ速度で輸送することが経済的であると考えられる。

#### 5・4・4 輸送限界フルード数

プラグを輸送するための空気速度が過小であると、前述のように付加圧力損失係数が大きくなり、場合によっては輸送しにくくなる恐れがあるので、その限界空気速度を知る必要がある。しかしこの方面の研究もプラグ流については、ほとんど報告されていない。そこで輸送限界の空気速度 $u_c$ 基準のフルード数 $Fr_c = u_c / (gD)^{1/2}$ と混合比 $\mu_s$ の関係について調べてみる。

その結果をFig.5-11に示す。両者の関係は次式で表すことができる。

$$\mu_s = x Fr_c^y / 10^4 \quad (5-17)$$

ここで係数  $x$ ，指数  $y$  は，輸送条件，輸送物の物性などによって異なる。1個のプラグの質量を  $W_s$  [kg]，単位時間当りの輸送プラグ数を  $i$  [ $s^{-1}$ ] とすると  $\mu_s$  は次式で表すことができる。

$$\mu_s = i W_s (\rho_a u_c \pi D^2 / 4) \quad (5-18)$$

Fig.5-11 は  $\mu_s$  と  $Fr_c$  の関係を示したものである。両者の関係は直線関係で示され，管径の影響をみると  $D$  が大きい程小さなフルード数で高混合比の輸送が可能である。Eq.(5-17)で示す係数  $x$  と指数  $y$  は， $D$  によって異なることがわかる。なお図中には Barth<sup>6)</sup> が小麦，上滝<sup>19)</sup> がフライアッシュを用いた浮遊輸送の実験結果をあわせて描いているが，それに比べプラグ輸送ではかなり低い空気輸送で混合比が高い輸送が可能であることがわかる。

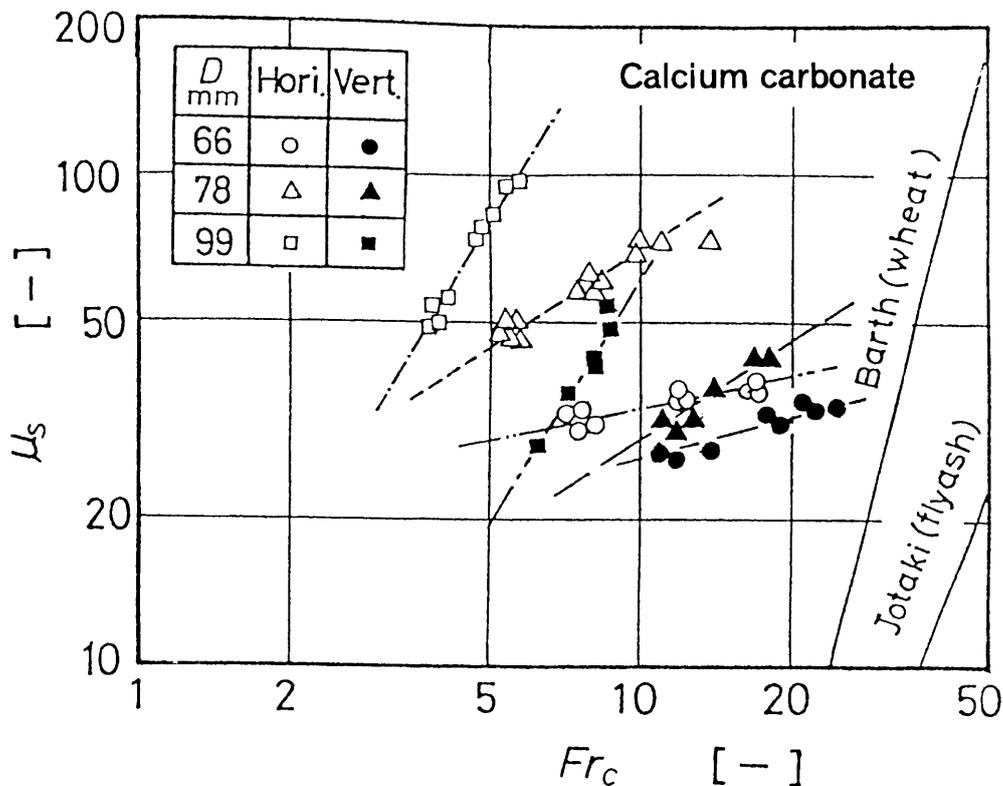


Fig.5-11 Relationship between mixture ratio and Froude number on critical condition

### 5・4・5 理論式の検討

輸送装置の計画にあたっては、輸送するために必要な空気圧力の値を見積る必要がある。理論的に導出したEq.(5-8)から空気圧力を計算するには、 $K_{pc}$ を表すEq.(5-7)の係数  $m$ 、指数  $n$ を知る必要がある。Lippertは実験によって、この指数は  $n = 1$ であることを報告しているが、それではEq.(5-8)において輸送圧力は管径に無関係となる。この値について著者らは、 $n < 1$ であることを実験によって先に確かめた<sup>22)</sup>。さらに本実験による測定結果から、Eq.(5-7)の係数  $m = 3.5$ 、 $n = 0.59$ となり、単一プラグを輸送するために必要な圧力をEq.(5-8)によって算出し、実験値と比較するとFig.5-12になる。両者の値は比較的よく一致するために、理論式はそれぞれの条件における輸送に必要な空気圧力を示すものとして妥当であることがわかる。

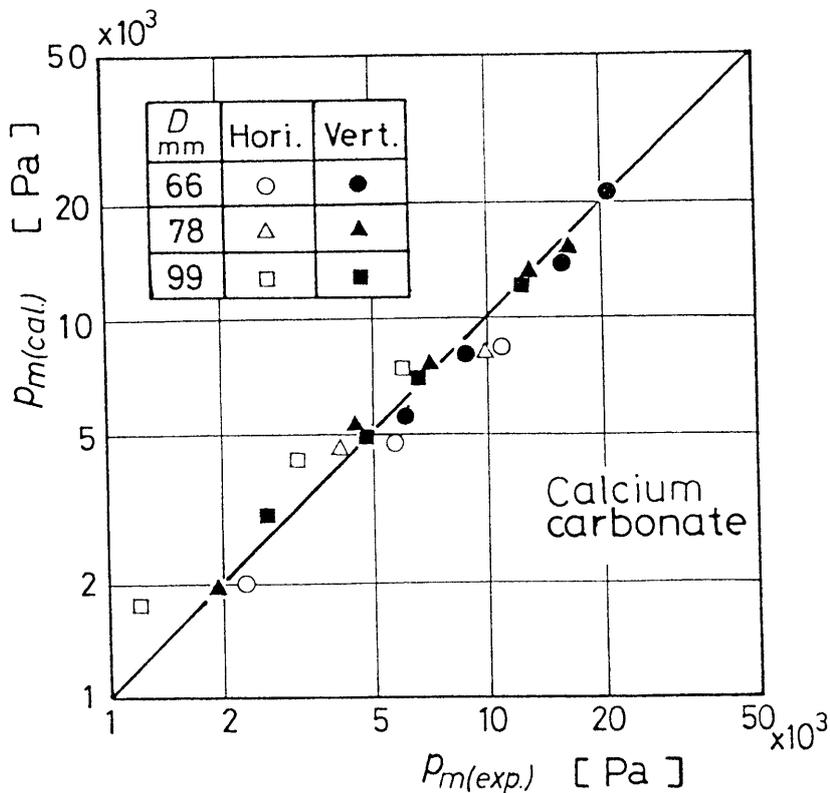


Fig. 5-12 Comparison of experimental and calculated values of requisite air pressure

## 5・5 結言

粉粒体のプラグ輸送方式について、まず単一プラグを輸送するために必要な空気圧力を表す理論式を導き、さらに水平、鉛直の輸送管を用いて実験を行い次の結論を得た。

- (1) 輸送所要動力を低減させるには、ある程度内径の大きい輸送管を用い、輸送量に対する壁面抵抗力の低減を図ることが効果的である。
- (2) 輸送仕事効率を向上させるには、プラグ長さは輸送中に崩れない程度の長さで短いほうが望ましい。
- (3) プラグ移動速度を基準としたフルード数と付加圧力損失係数の関係から、経済的な輸送速度を調べた。
- (4) 限界空気速度を基準としたフルード数と混合比の関係から、輸送管の内径が大きいほど低い空気速度で高濃度な輸送が可能ながわかる。
- (5) 理論的に解析した単一プラグを輸送するために必要な圧力を表す式は、実験値はよく一致することを確かめた。

## 第6章 プラグ輸送限界におよぼす振動効果<sup>27)</sup>

### 6・1 緒言

粉粒体のプラグ空気輸送方式は、所要動力が小さく輸送物の破碎が少ないが、他の機械的輸送方式に比べるとなお所要動力が大きく、その一層の低減が強く要望されている。

本章ではプラグ輸送方式の所要動力を低減する方法として、輸送管に振動を加え、管壁とプラグ間の摩擦を減少させ、それによって輸送空気圧力を低減させることを考案し、その効果と最適条件について調べた。まず平板上の粉体層の壁面摩擦係数を、壁面に振動を加えた場合と加えない場合について測定し、振動による低減効果を調べた。さらに水平および鉛直管路において、単一プラグの輸送限界におよぼす振動効果を調べた。これらの結果から、輸送管に適度な振動を加えることによって所要動力が低減でき、この方式を実際の装置に応用できる見通しを得た。

### 6・2 理論

#### 6・2・1 振動板上の壁面摩擦係数

輸送管に振動を加えた場合の効果を解析するために、まず振動する平板上に置かれた物体の壁面摩擦係数について考える。

まずFig.6-1(a)のように面が静止している場合は、水平面に置かれた質量  $m_s$  の物体が垂直に作用する力は  $m_s g$  であり、この物体に水平力を作用させ動かす瞬間の力を  $F$  とすると、この物体の壁面摩擦係数  $\xi_w$  は、水平力と鉛直力との比で表される。 $m_s$  を変化させて  $F$  を求める実験を、添え文字 1, 2 の場合について測定したとすると、 $\xi_w$  は次式で計算される。

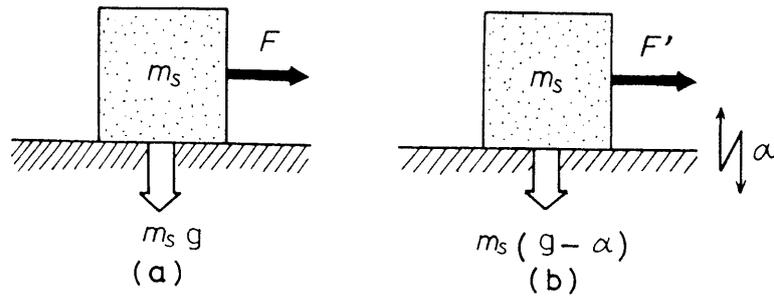


Fig.6-1 Static force and vibratory inertia force acting on a flat plate

$$\xi_w = \frac{F_2 - F_1}{m_{s2}g - m_{s1}g} \quad (6-1)$$

次にFig.6-1(b)のように面に  $m_s$  の物体が置かれ、加速度  $\alpha$  すなわち

$$\alpha = a_h(2\pi f)^2 \quad (6-2)$$

の振動が加えられている場合は、加振状態において鉛直に働く力は、 $m_s(g - \alpha)$  である。このとき物体が面に沿って動き始めるときの水平力を  $F'$  とすると、真の壁面摩擦係数  $\xi_w$  は、Eq.(6-1)と同様に、添え文字 1, 2 の場合のそれぞれの測定値から

$$\xi_w = \frac{F'_2 - F'_1}{m_{s2}(g - \alpha) - m_{s1}(g - \alpha)} \quad (6-3)$$

と表される。しかし実際には  $m_s g$  の鉛直力が測定されるので、この振動状態における見かけの壁面摩擦係数は、次式で表される。

$$\xi_{wv} = \frac{F'_2 - F'_1}{m_{s2}g - m_{s1}g} \quad (6-4)$$

ここで振動加速度比  $\Lambda = \alpha/g$  として、Eqs.(6-3),(6-4)から次式を得る。

$$\xi_{wv} = \frac{(g - \alpha)}{g} \xi_w = (1 - \Lambda) \xi_w \quad (6-5)$$

この式は振動板上の物体についての摩擦係数を表す横山<sup>7,2)</sup>の式と似ている。  $\Lambda$  に対して  $\xi_{wv}$  が直線で近似されることを表し、式も簡素化された。

## 6・2・2 輸送限界空気圧力におよぼす振動効果

水平面に対して角  $\theta$  [rad] 傾斜した内径  $D$  [m] の管で長さ  $l_p$  [m] の単一プラグを輸送するために必要な空気圧力  $p_m$  [Pa] は、前章で解説した次式で表される。

$$p_m = \frac{D K_{pc} g}{4 \xi_w} \left\{ \exp \left( \frac{4 \xi_w l_p}{D K_{pc}} \right) - 1 \right\} (\sin \theta + \xi_w \cos \theta) \rho_b \quad (5-8)$$

$$K_{pc} = m (l_p / D)^n \quad (5-7)$$

Eq. (5-8) は静止した輸送管についての輸送圧力の理論式であるが、この式をもとにして、振動が加えられた管についての輸送圧力を考える。管の振幅と加速度は場所によって異なるが便宜的に輸送管の全体にわたり振幅が均一と考え、管壁面における粉粒体の摩擦係数  $\xi_w$  が Eq. (6-5) で表されるとすると、Eq. (5-8) は次式となる。

$$p_m = \frac{K_{pc} g}{4 \xi_w (1 - \Lambda)} \left\{ \exp \left( \frac{4 \xi_w (1 - \Lambda) l_p}{D K_{pc}} \right) - 1 \right\} \times \{ \sin \theta + \xi_w (1 - \Lambda) \cos \theta \} \rho_b \quad (6-6)$$

Eq. (6-6) によって振動加速度比が与えられれば、振動を加えられた輸送管での輸送限界空気圧力を算出することができる。

## 6・3 実験装置および実験方法

### 6・3・1 壁面摩擦係数の測定

壁面摩擦係数測定装置の概略を Fig. 6-2 に示す。アクリル板上に内側寸法 100 mm 立方で底面に対してエッジ付きのアクリル板製わく④をおき、その中に Table 2-1 に示した物性を示す炭酸カルシウムを充填し、加振機②によって板に鉛直方向の振動を加える。わく全体を水平方向に移動させるために必要な水平力を⑤で測定し、鉛直方向の力との比から壁面摩擦係数を算出する。炭酸カルシウムの充填量と振動条件を数段階に変えて実験を繰り返し、それらの摩擦係数との関係を考察した。この場合の振動数と振幅は発振機①で任

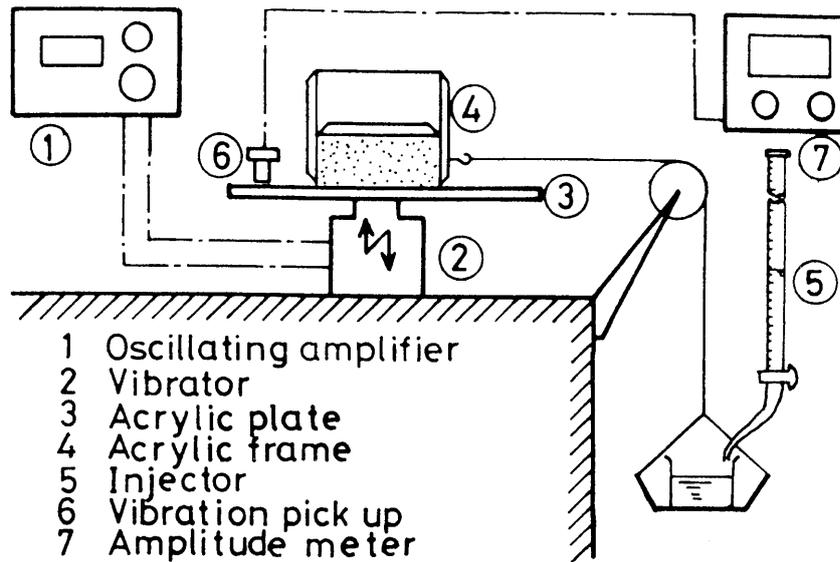


Fig.6-2 Schematic diagram of apparatus to measure friction coefficient

意に調節することができ、振動数はそれに掲示される値をよみ、振幅は非接触型変位計⑥、⑦で測定した。

### 6・3・2 輸送限界空気圧力の測定

輸送実験装置の概要をFig.6-3に示す。装置は動力部、測定部、振動部、粉粒体補集部からなる。水平ならびに鉛直に設置した内径25mm、長さ1mの亚克力管の始点に6・3・1と同じ試料を一定長さ300mmに充填して、いずれも管軸に対して直角の方向、すなわち水平管では鉛直方向、鉛直管では水平方向の振動を加える。ブロワ②から空気流量を徐々に増加し、プラグ層を押し動かす。その際の輸送限界の空気圧力を圧力タップから検出し、差圧変換器⑧、動ひずみ計⑨を介し、電磁オシログラフ⑩に記録する。また振動状態は6・3・1と同様に測定し、ブロワのモータに入力された電力を電力計③と力率計④で測定する。

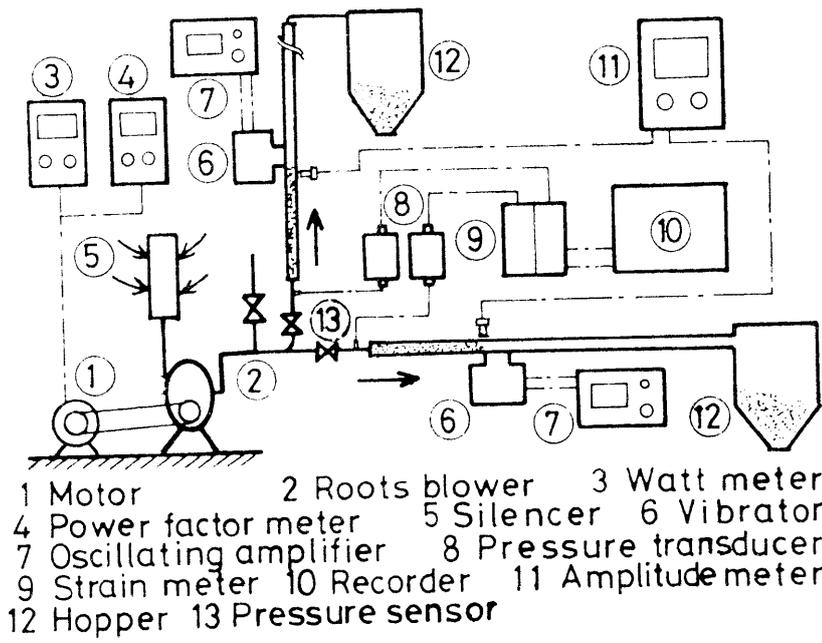


Fig.6-3 Schematic diagram of experimental apparatus

## 6・4 実験結果および考察

### 6・4・1 壁面摩擦係数への振動効果

振動加速度比  $\Lambda$  とみかけの壁面摩擦係数  $\xi_{wv}$  の関係を実験値と Eq.(6-5) の計算値について図に描くと Fig.6-4 のようになる。 $\Lambda$  と  $\xi_{wv}$  の関係は、両者ともに  $\Lambda$  の増加とともに  $\xi_{wv}$  は直線的に減少し、実験値は計算値に比べてやや小さいが同じ傾向を示す。Eq.(6-5) では  $\Lambda$  が 1 のとき  $\xi_{wv}$  が 0 になるが、実験結果では  $\Lambda$  が 1 よりも小さい値の場合に 0 になることが推定される。ところが実際には、この程度の振動を加えても摩擦係数は 0 にはならず有限の値をとることがわかった。これは粉粒体では粒子相互間の相対運動による減衰が著しく、各粒子が一律に振動することがないことに関係があると考えられる。本実験結果から  $\xi_{wv}$  の実測値は、次式で表すことができる。

$$\xi_{wv} = (1 - \zeta \Lambda) \xi_w \quad (2-12)$$

ここで  $\zeta$  は摩擦低減係数で、試料の物性や被振動体の表面状態等で異なることが考えられる。Fig.6-4 の結果については、本実験範囲では、 $\zeta = 1.31$  で

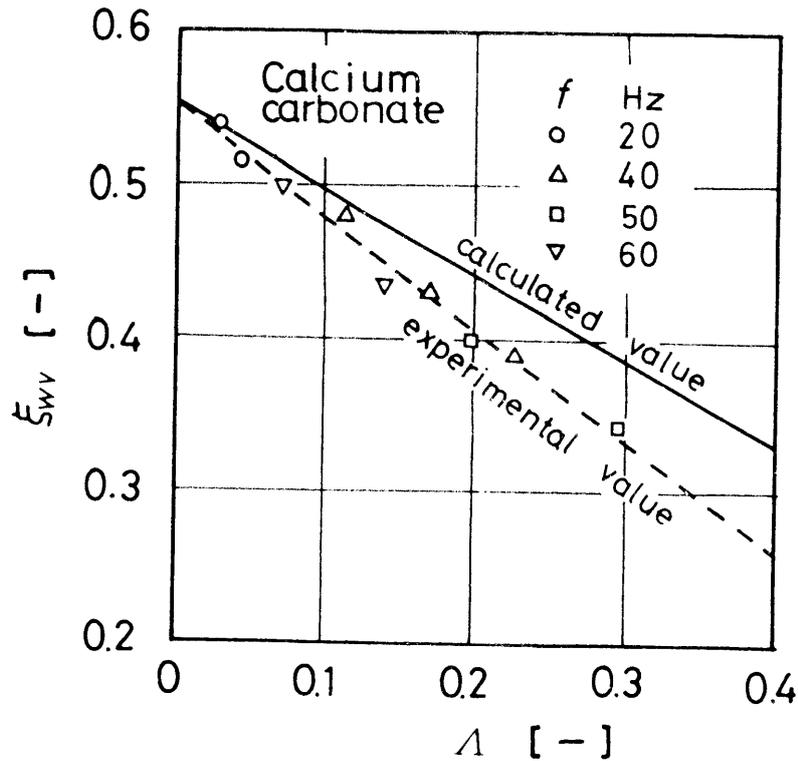


Fig. 6-4 Relationship between coefficients of wall friction and acceleration ratio

ある。また平均粒子径が 0.997mm のポリスチレンペレットについて同じ条件で実験を行ったところ炭酸カルシウムとほぼ同様な傾向が見られ  $\zeta = 1.90$  であった。

#### 6・4・2 輸送限界空気圧力におよぼす振動効果

粉粒体の輸送に必要なとする所要動力を低減するには、輸送の圧力損失を低減させる必要があり、それには動力消費の大きい加速区間すなわちプラグが移動を始めるところでの低減が重要である。そこで本研究では輸送管の始点でプラグ層を作り、それを輸送させるために必要な輸送空気圧力を測定し、さらに輸送管に振動を加えることによる効果の程度を調べた。まずここでは基礎資料として振動数  $f$  と輸送限界空気圧力  $p_m$  との関係を水平管について Fig. 6-5 に、鉛直管について Fig. 6-6 に示す。

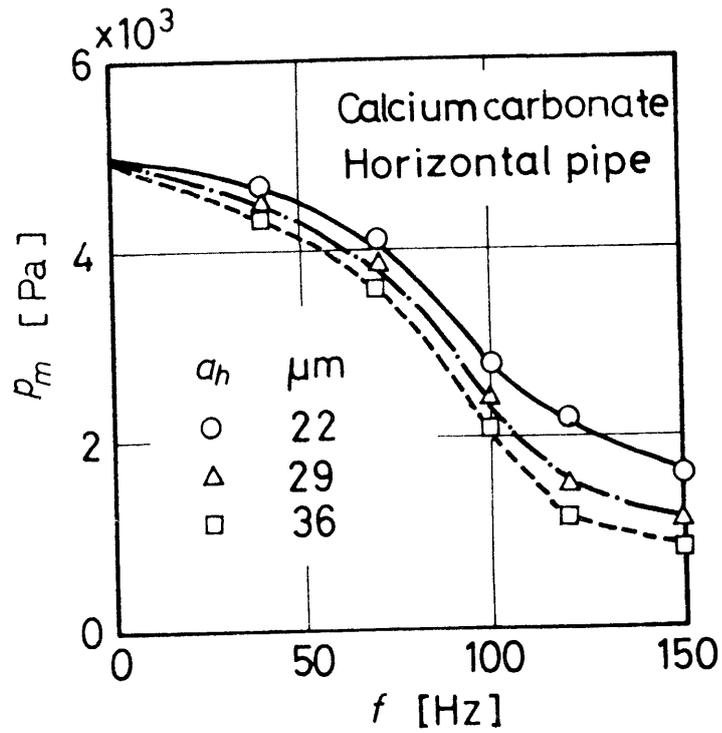


Fig.6-5 Relationship between minimum air pressure required for conveying a plug and vibratory frequency of horizontal pipe

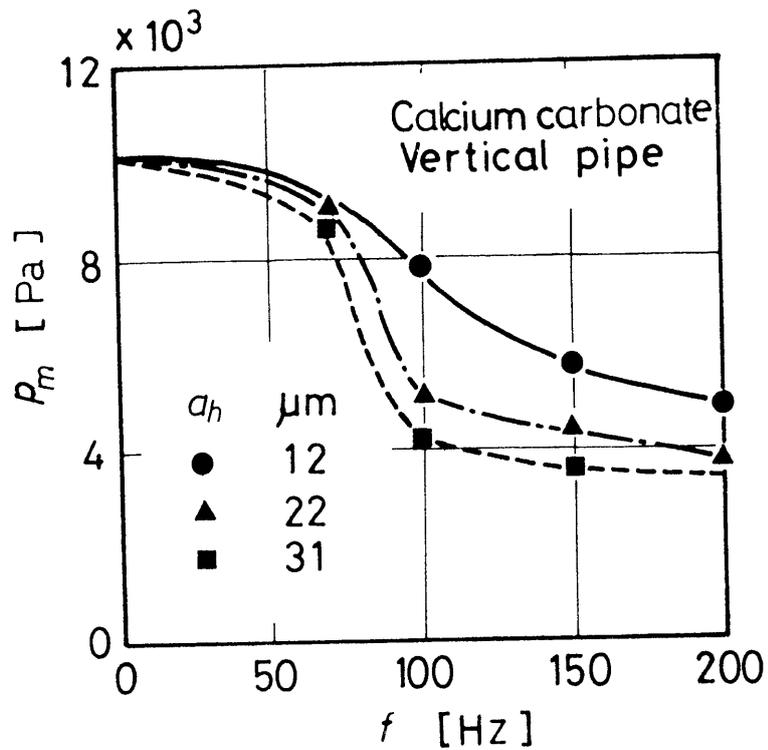


Fig.6-6 Relationship between minimum air pressure required for conveying a plug and vibratory frequency of vertical pipe

Fig. 6-5 と Fig. 6-6 を見ると、いずれの振幅の場合についても  $p_m$  は  $f$  の増加にともない減少することがわかる。本実験の条件では、水平管、鉛直管いずれの振幅の場合も振動数が約 100Hz 程度で  $p_m$  が顕著に低下する傾向が見られる。

次に  $\Lambda$  と  $p_m$  の関係について、Eqs. (5-7), (6-6) から計算した値と実験値との比較を Fig. 6-7 に示す。 $\Lambda$  が小さい領域では計算値は実験値よりもやや小さい値を示している。これは計算にあたってプラグ層のかさ密度をプラグ全体にわたって一様で  $K_{pc}$  を一定として扱っているが、実際には粗密の差が生じたり、振動が一様に伝わらない等の影響のためと考えられる。ここでは水平管の場合について示しているが、加振の場合も無加振の場合と同様に、鉛

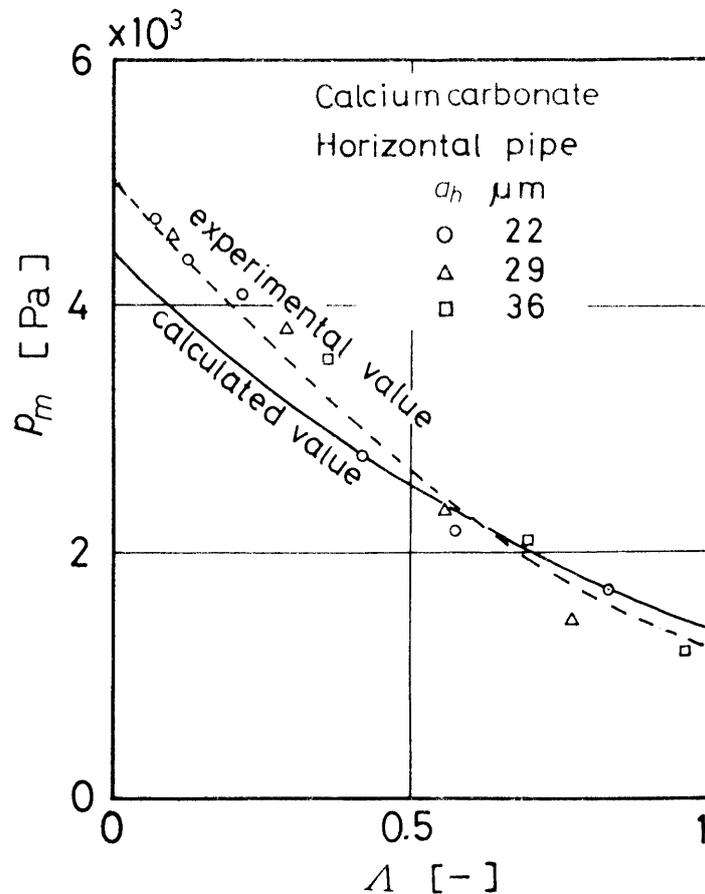


Fig. 6-7 Comparison of calculated minimum air pressure required for conveying a plug with experimental data of various vibratory acceleration of horizontal pipe

直管では水平管の 2 倍程度の  $p_m$  が必要であった。これは Eq. (6-6) の右辺第 2 項の計算からも予測でき、傾斜管路の場合も計算できる。 $p_m$  を減少させるには、 $\Delta$  を増加させることが有効である。計算値と実験値とがほぼ一致することから実際の装置の計画に応用できる。

### 6・4・3 消費動力の検討

輸送に用いる空気による輸送所要動力  $N_p$  [kW] は、前章の Eq. (5-9) で求められる。また空気源機械の入力電力  $N_e$  [kW] は、

$$N_e = N_p / \eta_b + N_0 \quad (6-7)$$

と表わされる。ここで  $\eta_b$  はモータを含めたブロワの効率、 $N_0$  は空転状態の入力電力 [kW] である。

そこで実際に測定した  $N_e$  と  $p_m$  の関係は Fig. 6-8 に示すように直線的になり、上記の単位を用いると次式で表せる。

$$N_e = 3.69 \times 10^{-4} p_m + N_0 \quad (6-8)$$

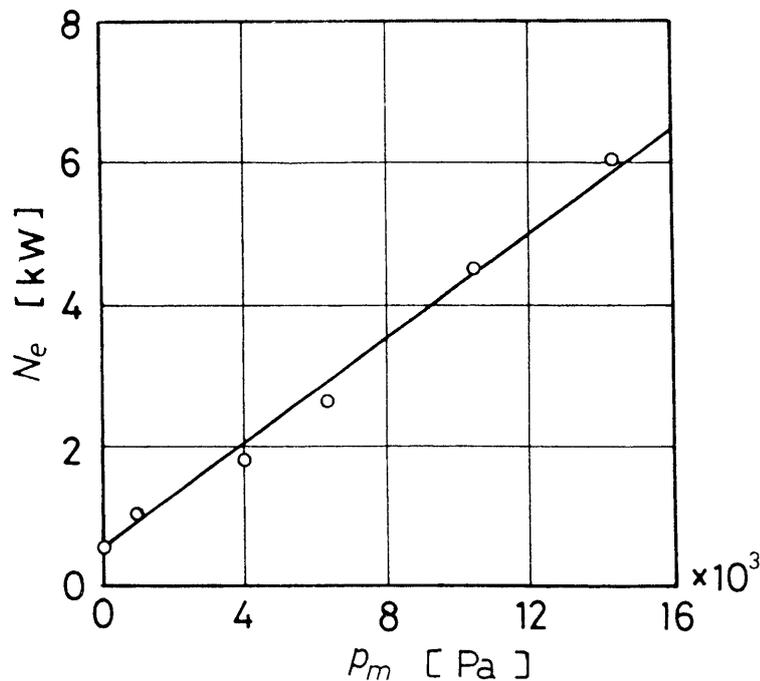


Fig. 6-8 Relationship between electric power input of blower-motor and minimum air pressure required for conveying a plug

次に水平管について振動数  $f$  と入力電力  $N_e$  との関係を Fig.6-9 に示す。振幅によって多少の差があるが、100~150Hz 程度の振動を加えることによって無振動の場合に比べて70%程度の  $N_e$  の低減が見られる。バイブレーターと発振機の所要動力は定格時の力率を1とすると80W程度であるから、所要動力を低減するうえで振動はかなり有効であるといえる。鉛直管についても同様の条件で70%程度の  $N_e$  の低減が見られ、振動を加えることの有効性が確かめられた。

本章の結果は単一プラグでの結果であるが、連続プラグ輸送で、圧力損失が高くなる箇所への並列使用、また適切な振動条件の選定によって、さらに所要動力の低減が期待できる。

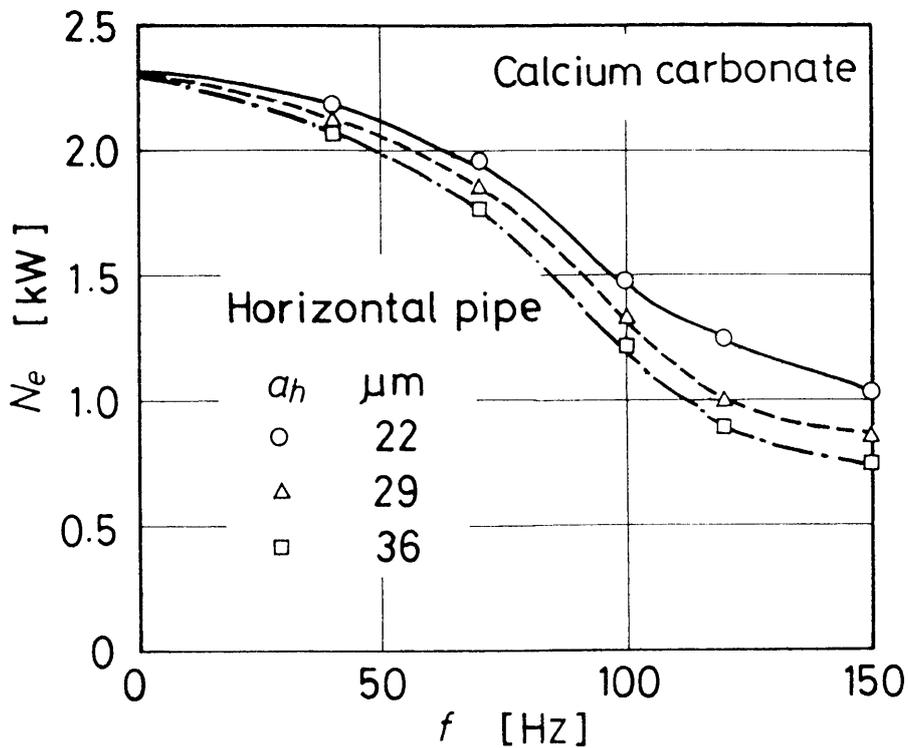


Fig.6-9 Relationship between electric power input of blower-motor and vibratory frequency of horizontal pipe

## 6・5 結言

粉粒体プラグ輸送の所要動力を低減することを目的として、プラグ輸送限界におよぼす輸送管への振動効果について理論解析および実験を行い次の結論を得た。

(1) 壁面摩擦係数は振動加速度の増加にしたがって減少し、本実験の範囲内では振動数約 100～150Hzで顕著な効果が見られる。

(2) 輸送限界空気圧力ならびに所要動力は、振動数あるいは振幅の増加にともない減少し、単一プラグの輸送では70%程度の低減が可能である。

(3) 輸送限界空気圧力のモデル解析による計算値は、測定値とほぼ一致し、装置の計画をするうえで応用できる。

## 第7章 プラグ供給装置の開発と振動効果<sup>28, 30)</sup>

### 7・1 緒言

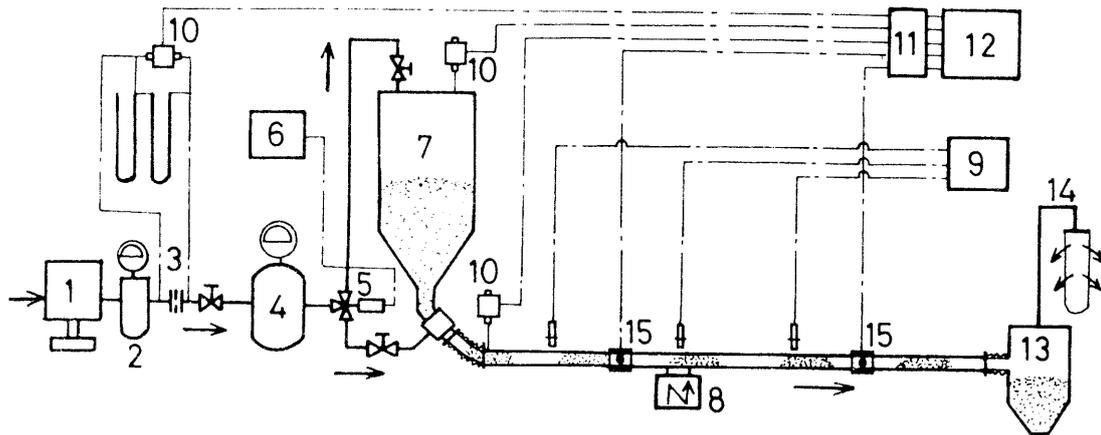
先に単一プラグの輸送限界における理論解析および実験結果から経済的な輸送条件について、さらに輸送管に加振することによって輸送圧力を低減できることを理論的、実際的に証明した。

本章ではブロータンクと輸送管の始点に空気を交互に断続して加えることによって、輸送物をプラグ状態にして連続的に輸送する装置の試作および輸送管に加振することによって所要動力の低減と輸送を安定化する方式を考案した。また実際に水平輸送および数種類のベンドを含んだ配管経路でのプラグ輸送の動特性と加振効果について調べた。さらにエアバイブレーターによる加振効果とその排気の再利用についても検討した。

### 7・2 実験装置および実験方法

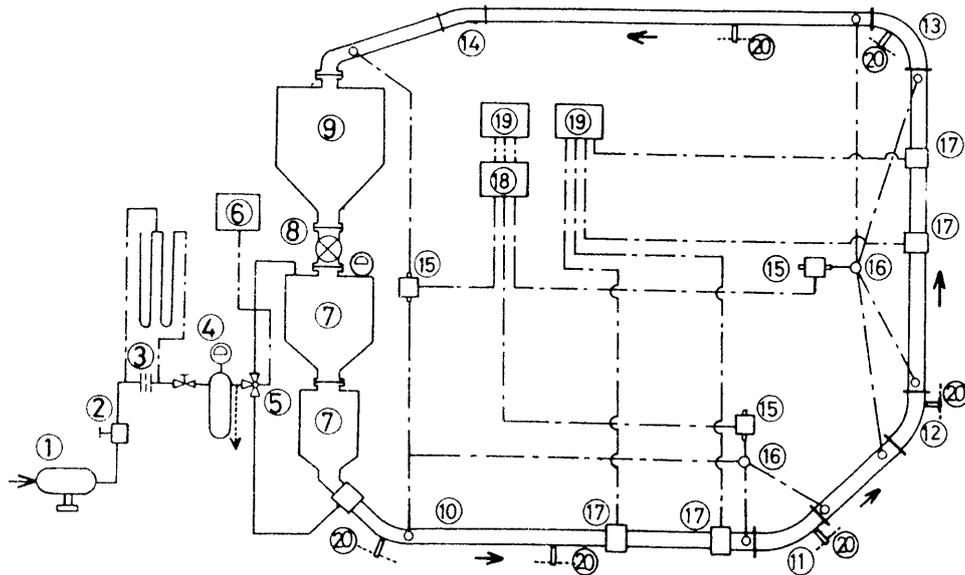
実験装置の概要をFig.7-1に示す。装置は動力部、粉粒体供給部、輸送管部、粉粒体捕集部および加振部から成る。粉粒体をブロータンクに充填し、圧縮空気を電磁弁によってタンク上部（1次側）と輸送管の始点（2次側）から交互に断続して供給する。粉粒体はプラグ状になって輸送管内を流れる。その輸送状態は、レギュレーター、流量調節バルブおよび電磁弁のタイムスイッチで調整する。輸送管は内径52mmの透明アクリル製で、装置(a)の水平5mと、装置(b)の数種類のベンドを含んだ全長16.3mの管路を用いた。試料としては物性をTable 2-1に示した粟（Millet）を用いた。タンクへの充てん量は毎回50～170kgとした。輸送中のオリフィス流量計の前後差圧、タンク内圧力、輸送管の圧力損失分布は、差圧変換器によって、プラグとエアクッション（空気枕）の速度、長さは、個数は輸送管の2箇所に取り付けたフォ

Apparatus(a)



- |                   |                         |                  |
|-------------------|-------------------------|------------------|
| 1: Compressor     | 6: Time switch          | 11: Strain meter |
| 2: Regulator      | 7: Blow tank            | 12: Recorder     |
| 3: Orifice meter  | 8: Vibrator             | 13: Hopper       |
| 4: Air reservoir  | 9: Amplitude            | 14: Bag filter   |
| 5: Solenoid valve | 10: Pressure transducer | 15: Photocell    |

Apparatus(b)



- |                  |                  |                          |                |
|------------------|------------------|--------------------------|----------------|
| ① Compressor     | ⑥ Time switch    | ⑪ Horizontal bend(90°)   | ⑯ Cock         |
| ② Regulator      | ⑦ Blow tank      | ⑫ Vertical bend I (90°)  | ⑰ Photocell    |
| ③ Orifice meter  | ⑧ Ball valve     | ⑬ Vertical bend II (90°) | ⑱ Strain meter |
| ④ Air reservoir  | ⑨ Hopper         | ⑭ Horizontal bend(45°)   | ⑲ Recorder     |
| ⑤ Solenoid valve | ⑩ Transport pipe | ⑮ Pressure transducer    | ⑳ Air vibrator |

Fig. 7-1 Schematic diagram of experimental apparatus

トセルによるプラグ通過検出器によって検出し、いずれも動ひずみ計を介して電磁オシログラフに連続的に記録し解析した。次に輸送管に振動を加えた状態で同様な実験を行った。

装置(a)では加振機は動電型で振動数および振幅は発振機で調節した。振幅は非接触型変位計によって測定した。また振動条件は前章の実験で輸送圧力低減に顕著な効果がみられた振動数  $f = 125\text{Hz}$ 、片振幅  $a_h$  は加振機取り付け位置で  $160\mu\text{m}$  とした。振動は加振点から離れるほど減衰するが、全管にわたって振動加速度比  $A$  が 1 以上得られた。

装置(b)では加振機はコンプレッサーの輸送空気源を併用することが可能なエアバイブレーターを用いて同様な実験を行った。またエアバイブレーターの排気をレギュレーターにもどして、再度輸送空気として有効利用した場合について消費動力の比較を行った。

## 7・3 実験結果および考察

### 7・3・1 輸送中の流動様式

本実験での輸送物の流動様式は、無加振の場合も加振の場合も空気速度  $u_a$  によって変化し、Fig.7-2 に示すように次の 3 種類に大別できる。

(a) プラグ型：停滞する粒子はほとんどなく、輸送物はプラグ状になってほぼ一様に輸送される。

(b) 波動スラグ型：輸送速度が(a)の状態よりも遅い場合に生じ、送られてくるプラグ状の層が停滞していた堆積層を盛り上げて押し進める。

(c) 停滞スラグ型：輸送速度がさらに遅い場合に生じ、管底に停滞してほとんど動かない堆積層ができ、その上部のわずかな空間を輸送物が集団となって通過する。

本実験では無加振における空気速度  $u_a$  [m/s] と上記流動様式(a)~(c)の関係は、ほぼ次のようになった。

- (a) プラグ型 :  $u_a = 1.5 \text{ m/s}$  以上
- (b) 波動スラグ型 :  $u_a = 1.5 \sim 0.8 \text{ m/s}$
- (c) 停滞スラグ型 :  $u_a = 0.8 \text{ m/s}$  以下

輸送物の性状と管内面の摩擦の程度等によっては、必ずしもこのように明確に区別できない場合もある。

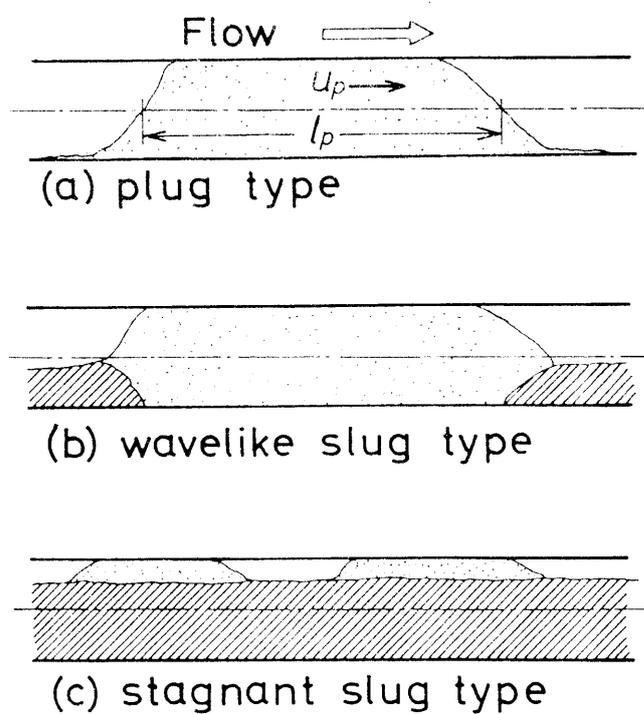


Fig.7-2 Flow patterns of plug

次に無加振と加振における粒子の堆積の程度を調べるために、装置(a)で輸送状態が定常になっている箇所では輸送管の側面から写真撮影し、自由空間面積比  $S_p$  を次式で計算した。

$$S_p = (A - A_s) / A \quad (7-1)$$

ここで  $A$  は輸送管内断面積、 $A_s$  は停滞堆積層の断面積である。Fig.7-3 に  $u_a$  と  $S_p$  の実験結果を示す。この図から  $u_a$  が大きいほど堆積層は少なくなり、また加振によって堆積層すなわち残留物を低減あるいは防止することが可能であることがわかる。これは流動様式が(b),(c)の場合に顕著である。

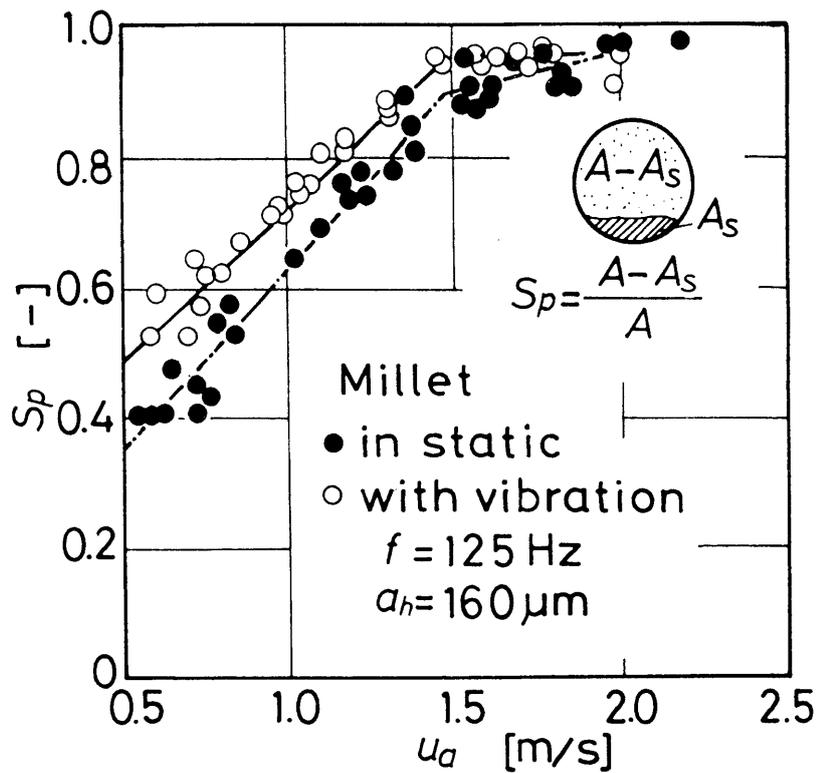


Fig. 7-3 Relationship between scope index of transported plug and air velocity

### 7.3.2 プラグの安定性指数

輸送中の時間の経過にともなう圧力の変化状態は、輸送装置の性能を評価するうえの一つの目安となる。タンク内の圧力は、Fig.7-4 に示すように、輸送開始後、最初のプラグが輸送管終点に達してから最後のプラグが輸送管

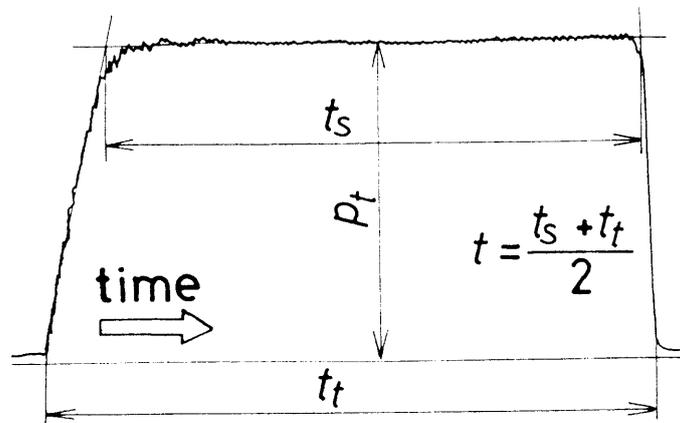


Fig. 7-4 Variation of air pressure in blow tank

始点に供給するまでの間が定常輸送となる。輸送圧力  $p_t$  としては定常時のタンク内圧力をとった。また平均プラグ輸送時間  $t$  [s] は、タンク内の全粉粒体の輸送時間  $t_t$  と定常輸送時間  $t_s$  の算術平均  $t = (t_t + t_s)/2$  として表した。本実験装置では理想的には 1 回の空気断続によって一つのプラグが形成される。その理想的プラグ形成個数に対して輸送管の始点から終点間を輸送させる全プラグ個数  $n_p$  との比を安定性指数  $S_t$  として次式で求める。

$$S_t = \frac{n_p}{t / (\Delta t_1 + \Delta t_2)} \quad (7-2)$$

ここで  $\Delta t_1$ 、 $\Delta t_2$  は 1 次側および 2 次側の供給時間間隔 [s] である。予備実験で  $\Delta t_1$ 、 $\Delta t_2$  をいろいろ変えて実験を行ったが、装置 (a) の水平 5m では理想的なプラグ流となりやすかった  $\Delta t_1 = \Delta t_2 = 0.4$ s で、装置 (b) のベンドを含む長い輸送管路では  $\Delta t_1 > \Delta t_2$  の条件に設定した。一般的に  $\Delta t_1$  を長くするとプラグ長さは長くなり、混合比および輸送効率は大きくなる。また  $\Delta t_2$  を長くするとエアクションの長さが長くなり圧力損失は減少する。

Fig.7-5 は装置 (a) での  $u_a$  と  $S_t$  の関係を示したものである。流動様式が、波動スラグ型およびプラグ型の領域では振動を加えることによって  $S_t$  がかなり増加し、 $u_a$  が 1~2m/s の範囲では、 $S_t$  はほぼ 1 になる。輸送空気圧力が小さい停滞スラグの領域では、加振しても  $S_t$  はほとんど変わらなかった。プラグの安定性は、輸送管壁面の上部と下部におけるプラグの摩擦力の差も関係し、これは輸送形態、輸送速度などによって異なると考えられる。本実験の範囲内では、ある程度空気速度の早い波動スラグ型およびプラグ型の場合に  $S_t$  の増加割合が大きく、所要動力を低減するうえでの加振による効果を期待することができる。

### 7・3・3 輸送所要動力

Fig.7-6 は装置 (a) での空気速度  $u_a$  と輸送圧力  $p_t$  の関係を示したものである。加振の場合は、無振の場合に比べかなり低い  $p_t$  で輸送できることがわかった。両者ともに凹凸を持った曲線となる。これは先に説明したように  $u_a$  によって流動様式が変化するためと考える。停滞スラグ型およびプラグ

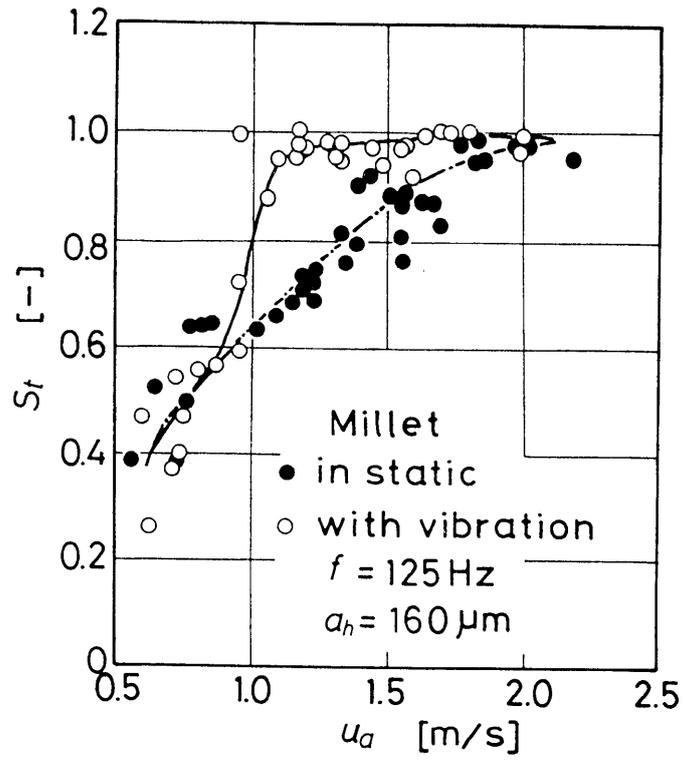


Fig.7-5 Relationship between stability index and air velocity in pipe

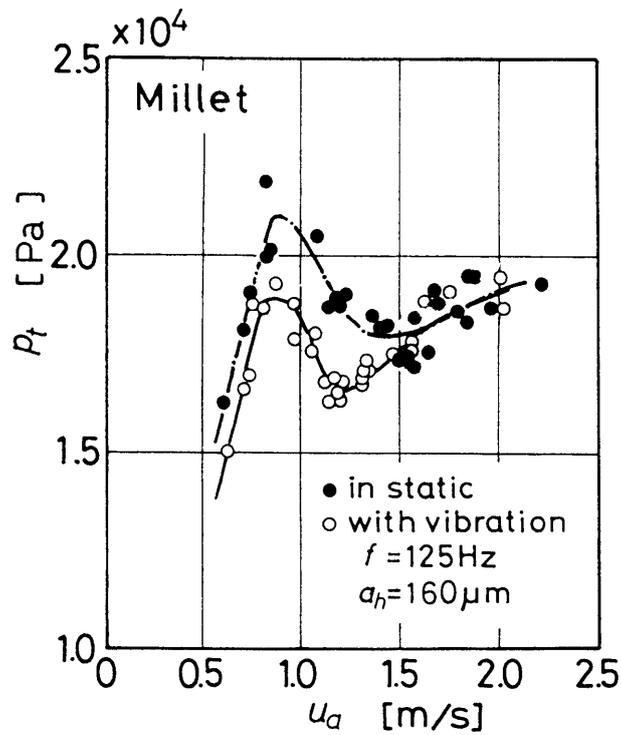


Fig.7-6 Relationship between air pressure in blow tank and air velocity through pipe

型の流動様式の範囲では  $u_a$  が大きくなると  $p_t$  も増加する傾向にあるが、波動型スラグの範囲では、ある  $u_a$  において  $p_t$  が最小値を示す。

プラグ輸送方式では、個々のプラグ前後の圧力差を減少させると輸送圧力の低減につながると言われており森川ら<sup>4,6)</sup>も輸送管路全体の圧力損失は、管内に存在する各プラグの前後差圧の和に一致すると報告している。そこでプラグが長さ  $l_p$  の状態で崩されずに輸送できる下限界プラグ速度  $u_{pc}$  [m/s] を装置(a)で測定し、その状態でのプラグ前後差圧  $\Delta p_p$  を求め Fig.7-7 に示した。ここで  $\Delta p_p$  [Pa] は、輸送管の測定区間  $\Delta L$  [m] の圧力損失  $\Delta p$  [Pa] と、その間にあるいくつかのプラグおよびエアクッションのそれぞれの平均長さ  $l_{p(av)}$ 、 $l_{a(av)}$  [m] から

$$\Delta p_p = \frac{\Delta p (l_{p(av)} + l_{a(av)})}{\Delta L} \quad (7-3)$$

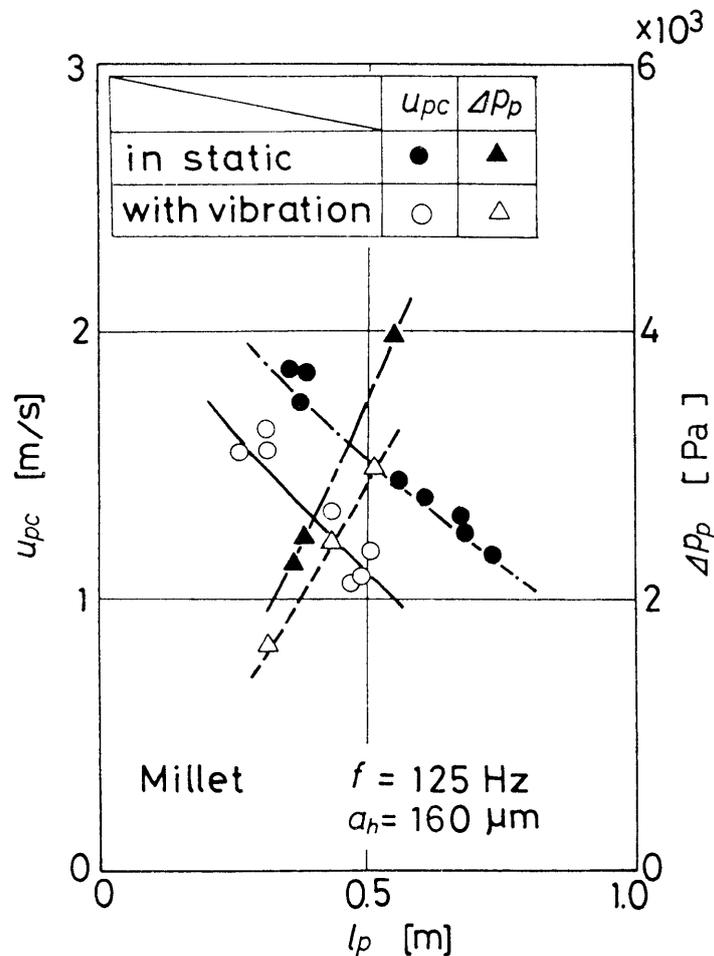


Fig.7-7 Effect of vibration on lower limit velocity of plug

によって計算した。無振の場合も加振の場合も  $l_p$  が短いほど  $u_{pc}$  は大きく、 $\Delta p_p$  は小さくなる。また両者の値は、無振に比べ加振した方が低い値を示し、振動を加えることによる効果が期待できる。

次に輸送装置の性能を所要動力時  $N_c$  [W・s] すなわち空気流量  $Q_a$  [m<sup>3</sup>/s]、輸送圧力  $p_t$  [Pa]、輸送時間  $t$  [s] の積で比較検討してみる。Fig.7-8 は装置 (a) での  $u_a$  と  $N_c$  の関係を示したものである。加振することによって所要動力を低減することができる。Fig.7-6 では最適な輸送条件が判断できなかったが、この図から本実験範囲内では、 $u_a$  が 0.8~1.5m/s 程度すなわち波動スラグ型の領域で振動の効果が顕著に表れ、最適な輸送速度が存在することがわかる。ここで用いた加振機の最大所要動力は空気源機械の動力の約 5%、すなわち Eq. (3-2) による  $\Gamma$  は 1.05 であった。

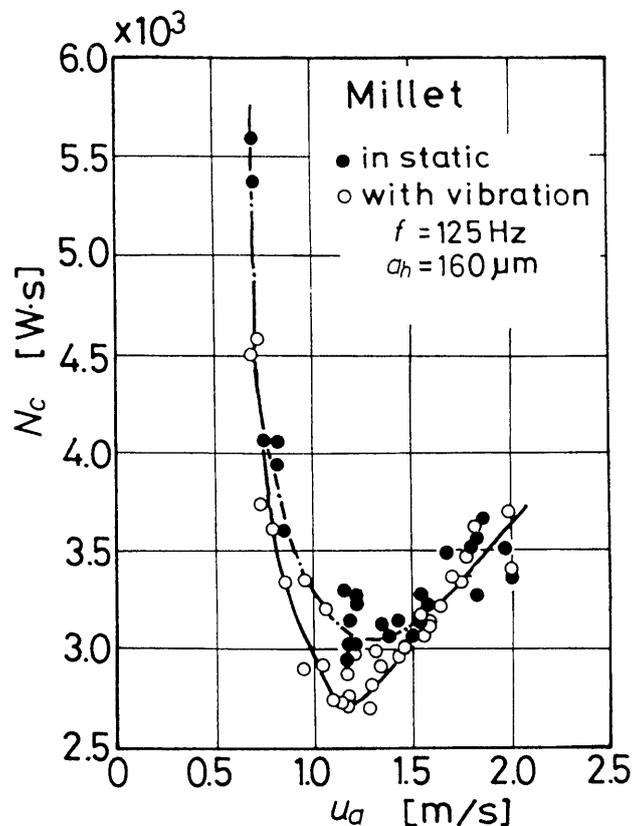


Fig.7-8 Transition of power consumption according to air velocity in pipe

### 7・3・4 付加圧力損失係数

単一プラグ輸送の付加圧力損失係数について第5章で示したが、プラグ輸送の付加圧力損失係数 $\lambda_s$ に関する報告は少ない<sup>4)</sup>。

プラグ輸送では、空気流による圧力損失は微小なので全圧力損失 $\Delta p$ のほとんどは、付加圧力損失 $\Delta p_s$ によるとみなすことができる。すなわち

$$\Delta p \approx \Delta p_s = \lambda_s \frac{\Delta L \rho_m}{2D} u_s^2 \quad (7-4)$$

ここで $D$ は輸送管内径[m]、 $u_s$ は平均粒子速度[m/s]、 $\rho_m$ は管内平均粒子密度[kg/m<sup>3</sup>]であり、粒子質量流量 $G_s$ [kg/s]とすると

$$\rho_m = \frac{G_s}{A \cdot u_s} \quad (7-5)$$

となる。またスラグ型の流れも存在するので、 $u_s$ は平均粒子速度[m/s]は、プラグ速度 $u_p$ [m/s]から次式で求めた。

$$u_s = \frac{u_p(A - A_s)}{A} = u_p S_p \quad (7-6)$$

Fig.7-9 はフルード数 $Fr_s = u_s / (gD)^{1/2}$ と装置(a)での実験によって Eqs.(7-4)~(7-6)から求めた $\lambda_s$ の関係を示したものである。本実験範囲内では混合比 $\mu_s$  すなわち輸送中の濃度に関係なく次の実験式で表される。

$$\lambda_s = 2.06 Fr_s^{-1.96} \quad (100 < \mu_s < 200) \quad (7-7)$$

加振した場合の値も図に合わせて示した。輸送圧力および所要動力が低減できる傾向のある波動スラグ型の領域で $\lambda_s$ は小さくなった。

基本的にはプラグ輸送方式において浮遊輸送と同様に $\lambda_s$ と $Fr_s$ の関係は、相似であると考えてよい。

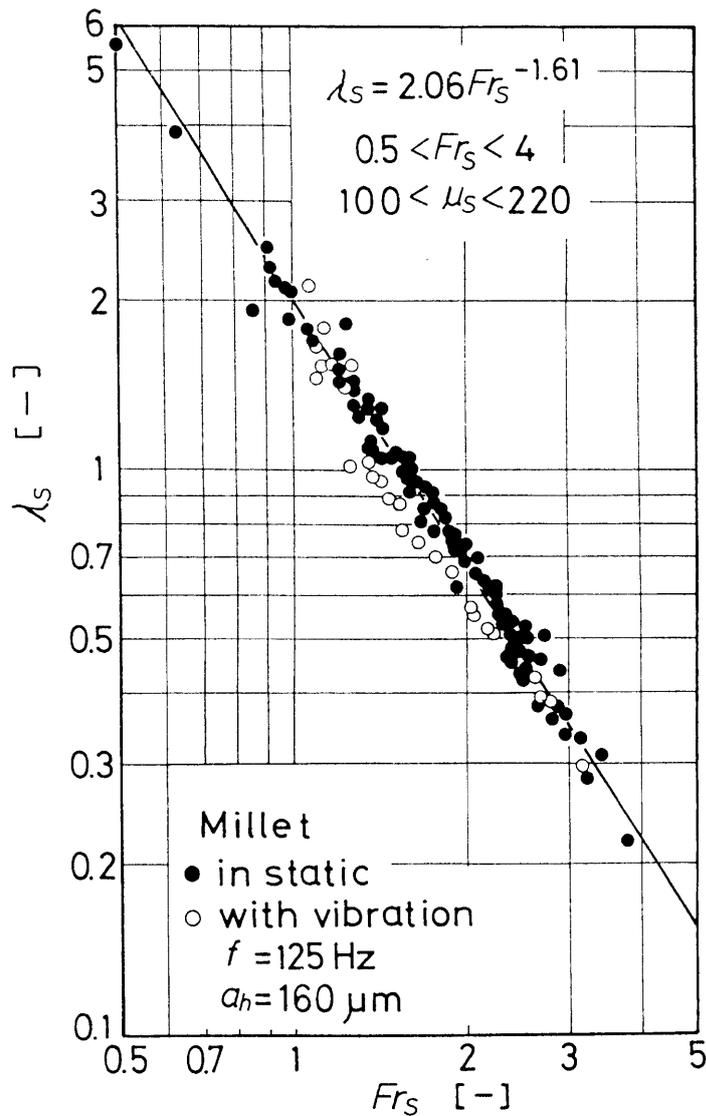


Fig.7-9 Relationship between additional friction factor and Froude number

## 7・4 実際の装置への応用

### 7・4・1 エアバイブレーターによる振動効果

7・3・3で動電型加振機の加振に要する動力は少ないことを述べたが、ここではさらに動力を低減するために、コンプレッサーの空気圧力を併用できるエアバイブレーターによる振動効果について検討した。Fig.7-10は装置(b)で管路5mの輸送管路においてエアバイブレーターで輸送管を加振した場合としない場合について消費動力  $E_c (= Q_a \cdot p_t)$  の比較をした。さらにその

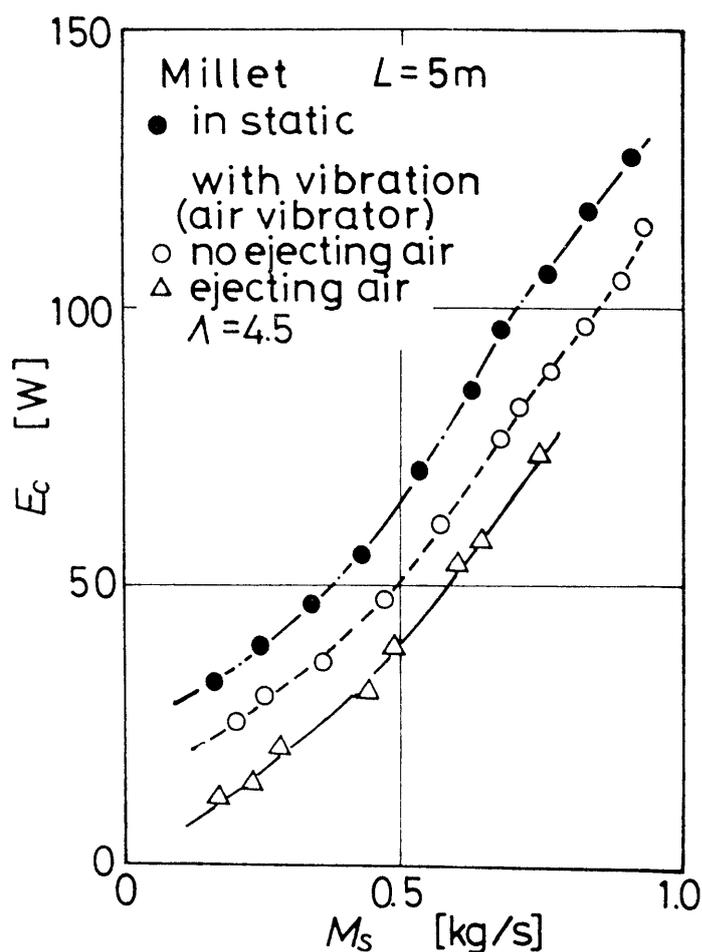


Fig. 7-10 Relationship between power consumption and mass flow rate of particle

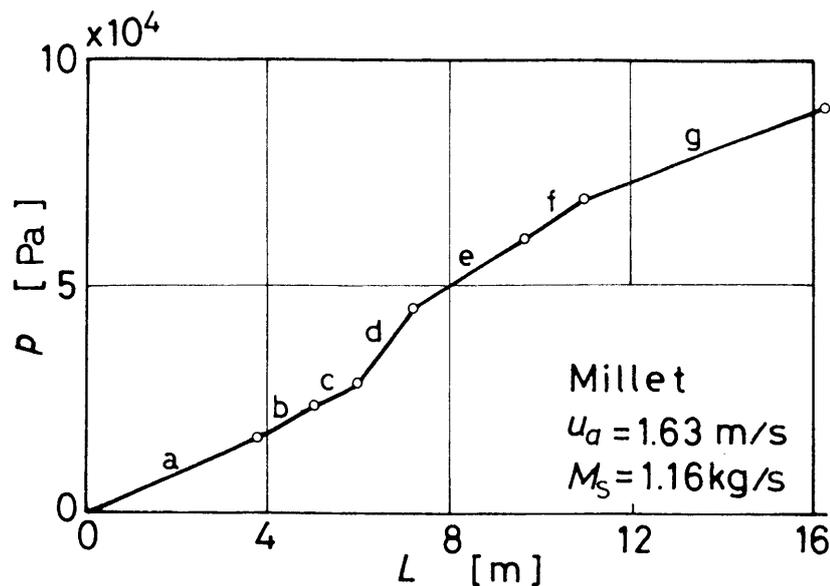
排気を輸送管に導入し輸送空気として有効利用した場合としない場合の比較も行った。この結果から加振によって20%程度、さらに排気の有効利用で15~20%程度の消費動力の低減が可能である。エアバイブレーターの消費動力は1個当たり5~10W程度要するが、実際には輸送距離は長く、エアバイブレーターも並列に数台使用したり、排出空気を一時的に蓄えることによって供給空気量の節約が可能である。

#### 7.4.2 ベンドの効果的形狀

プラグ輸送におけるベンドの効果的形狀について検討した<sup>30)</sup>。流動状態の乱れ、ベンド前後の配管経路などの要因によってその部分の圧力損失値は、ばらついた結果となったが、おおよその傾向がわかった。浮遊輸送等の設計

においてはベンドの曲率半径  $R$  と管内径  $D$  の比すなわち  $R/D$  のみについて圧力損失を見積るのが一般的であるが、プラグ輸送ではその方向性が重要な因子であることがわかった。

Fig.7-11 は装置(b)の  $90^\circ$  ベンドを含んだ全配管経路での圧力損失分布を示したものである。ベンドの方向性は図の b が水平から水平方向(水平ベンド)、d が水平から鉛直方向(鉛直ベンド I)、f が鉛直から水平方向(鉛直ベンド II)である。 $R/D$  については 4.0, 7.5, 11.0 の条件で行ったが、ここではそのなかで圧力損失が少なかった条件における測定値である。この図から鉛直ベンド I が最も大きな圧力損失の勾配を示し、次に鉛直直管、鉛直ベンド II、水平ベンドがほぼ同じ程度の値となった。またそれぞれの箇所の効果的形狀は、本実験範囲内では水平ベンドでは  $R/D = 7.5$ 、鉛直ベンド I では  $R/D = 11.0$ 、鉛直ベンド II では各ベンドによる差異が判別しにくい結果となった。これは水平から鉛直方向に向かうベンドの場合は抵抗が大きいので  $R$  を大きくしたほうが円滑に流れるのに対して、水平あるいは鉛直から水平



- |                                |                                |
|--------------------------------|--------------------------------|
| a. Horizontal straight pipe    | e. Vertical straight pipe      |
| b. Horizontal bend, $R/D=7.5$  | f. Vertical bend II, $R/D=7.5$ |
| c. Horizontal straight pipe    | g. Horizontal straight pipe    |
| d. Vertical bend I, $R/D=11.0$ |                                |

Fig. 7-11 Diagram of pressure drop along the pipe length

方向に向かうベンドの場合は  $R$  をむやみに大きくするとベンド部での抵抗が大きくなるためと考えられる。効果的形狀は輸送条件によって異なり、厳密な測定には、ベンドの前後の直管の距離を十分にとらなければならない。

### 7・4・3 ベンド部への振動効果

圧力損失分布で一番大きな勾配となった鉛直ベンド I における加振効果について Fig.7-12 に示した。図には  $u_a$  に対するベンド部の圧力損失  $\Delta p_b$  を無加振の場合とエアバイブレーターによる加振効果を加振機の取り付け位置を 3通りに変えて比較した。加振することによって15~25%程度の  $\Delta p_b$  を

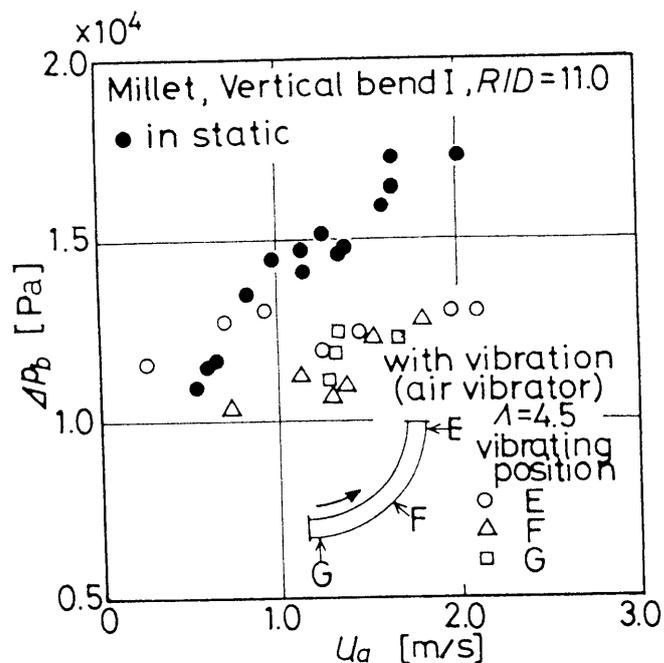


Fig.7-12 Transition of pressure drop in bend according to air velocity with vibration

低減することが可能である。この流れ方向のベンドでは加振の角度は、FおよびGが好ましい。さらに水平ベンド、鉛直ベンドII、鉛直管についての実験では、鉛直ベンドIよりも効果が少なかった。しかし摩擦係数の大きな粉粒体、含水粉粒体、閉塞あるいは停滞している箇所への効果は、かなり大きいことが予測される。

以上の結果から輸送経路の要所に加振機を設置することによってシステム全体として50%程度の所要動力の低減が可能なのが、Fig.7-11の圧力分布

図からも推算できる。

## 7・5 結言

粉粒体のプラグ輸送で安定したプラグを供給する方式の確立と所要動力を低減することを目的として実験から次の結論を得た。

(1) ブロータンクと輸送管の始点に圧縮空気を交互に断続供給する輸送方式について実験結果から両者の供給時間の調整によって輸送条件をコントロールできることを明らかにし、安定的な輸送状態を得るための条件を求めた。これらの条件の把握は輸送トラブルの解消にも役立つ。

(2) 供給した粉粒体がプラグ流となり輸送される際、そのプラグの安定度を示す尺度としてプラグ安定性指数を求めた。その結果から安定的な輸送条件を得た。さらに輸送管を加振することによって安定性指数が増加する領域があることがわかった。

(3) 個々のプラグを崩さずに輸送できる下限界プラグ速度は、輸送管を加振することによってかなり低減することが可能である。

(4) プラグ輸送方式において所要動力を低減できる最適輸送速度が存在し、輸送管を加振すると所要動力はさらに低減することができる。

(5) プラグ輸送方式において付加圧力損失係数は、フルード数の関数となる。輸送管を加振すると流動しやすくなるため同一のフルード数に対しては、振動を加えない場合よりも付加圧力損失係数が小さくなる。

(6) 動電型加振機に代わり空気輸送の空気源を利用できるエアバイブレーターで加振することによって消費動力を低減できる。またそれからの排気を輸送管に導入すると、さらに消費動力が低減できる。

(7) ベンドの形状の影響については、鉛直方向に向かう場合は抵抗が大きいため  $R/D$  を大きくし、水平方向に向かう場合は  $R/D$  をむやみに大きくとる必要はない。またベンド部への振動効果は鉛直方向に向かうベンドにおいて著しく効果的であった。

## 第 8 章 結 論

化学をはじめ各種産業において、粉粒体空気輸送は、原料、中間製品、製品等の輸送を自動化・省力化するだけでなく公害防止・安全の確保等の利点が多いために広く利用されているが、輸送動力の低減が望まれている。本研究は輸送管路での粒子および粉粒体層の移動現象と輸送管への加振の影響を理論的、実験的に解析し、輸送動力を低減する方法を提案した。

前半では低濃度高速輸送方式の所要動力低減を目的として、まず粒子の移動限界の解析で、粒子に与えられる初期飛散力は、粒子と壁面間の摩擦抵抗の低減によって大きくなり、壁面摩擦係数は、振動加速度比の増加に比例して減少する。粒子の移動限界に壁面に振動を加えた場合の壁面摩擦係数、無次元限界掃流力、層流底層の厚さと粒子径との比等の測定結果から、粒子を移動させるのに効果的な加振条件が存在し、加振の影響を受けやすい粒子径が存在した。乾燥および含水粉粒体の空気輸送の解析によって求めた輸送圧力は、実験結果とよく一致し、壁面摩擦が支配的因子であった。含水粉粒体は含水率の調整と加振の相乗効果の利用によって所要動力を大幅に低減できることを確かめた。また種々の傾斜角度を変えた管路で輸送実験を行い輸送動力および輸送効率等を求めた結果、水平および下り勾配の配管では、振動加速度比がある限界を越えると輸送効率は急増した。特に傾斜角度20度程度の下り勾配では、加振することによって輸送効率は、約0.2の値が20にまで大幅に上昇した。

後半では低速高濃度輸送方式の所要動力低減を目的として、プラグ輸送方式について、まず輸送管管径・傾斜角度、プラグの長さ・かさ密度、壁面摩擦係数等を考慮して、単一プラグの輸送に必要な空気圧力式を導いた。実験値と比較した結果、その式が妥当であることと、管径、プラグ長さ等の効果的な輸送条件について示した。次に振動板上における粉体層の壁面摩擦係数と単一プラグの輸送およぼす輸送管への振動効果について、理論的、実験的

解析を行い、プラグ輸送で輸送管を加振することの有効性と効果的な加振条件を示した。さらに単一プラグ輸送の解析に基づいて、輸送管に連続的にプラグを供給し、輸送管に振動を加えるシステムを設計および運転して、加振によってプラグの安定性指数が増加する領域、所要動力低減に最適な輸送速度をみいだした。また輸送用の空気源を併用でき、そこからの排気を輸送管に導入して再利用できるエアバイブレーターの使用によって大幅な所要動力が可能となった。特にベンド部の効果的形狀を求め、その4種類のベンドを含んだ16.3mの輸送経路で、圧力損失が上昇する要所への振動効果について検討した。加振機の消費動力は、実機の輸送空気による動力に比べ非常に低く、無視できる程度である。操作条件によって異なるが、本方式は輸送システム全体として、50%程度の所要動力を低減することが可能であると考えられる。

本研究で得られた方式は、動力指数が著しく低く、単に所要動力の低減だけではなく、輸送管内への粉粒体の堆積、閉塞、沈着等のトラブル防止技術として実際の装置に十分応用できる。

## 付 録

粉粒体空気輸送方式は、吸引式と圧送式に大別でき、さらに圧送式を低圧圧送式と高圧圧送式との二つに分類できる。本論文は第2～4章では低圧圧送で浮遊輸送を代表とする低濃度高速輸送方式、第5～7章では高圧圧送でプラグ輸送を代表とする高濃度低速輸送方式の所要動力低減について述べた。

付録としてこの両輸送方式の特徴および所要動力の低減技術についてまとめた。まず両輸送方式の特徴および主な用途等について整理すると表1のようになる。

表1 低濃度高速輸送方式と高濃度低速輸送方式との比較

項 目	低濃度高速輸送方式	高濃度低速輸送方式
流 動 状 態	浮遊・底密・粗密・部分	プラグ・スラグ
エネルギー利用法	速度エネルギー利用型	圧力エネルギー利用型
輸送圧力 $p_t$ [Pa]	$\sim 5 \times 10^5$	$\sim 3 \times 10^5$
空気速度 $u_a$ [m/s]	15～30	0.1～10
粒子速度 $u_s$ [m/s]	10～20	0.1～8
混 合 比 $\mu_s$ [-]	$\sim 30$	20～300
輸 送 距 離 $L$ [m]	$\sim 200$	$\sim 2000$
主な空気源機械	ルーツブロー、ファンブロー	コンプレッサ、スクリーン圧縮機
主な粉体供給機	ロータリーフィーダー	フロータンク、エアナイフ
おもな用途	一般の原料製造品、薬品、製薬品、窒素ガス等の特殊ガスによるクローズドシステム化が可能	破碎・摩耗・偏析が許されない粉粒体、結晶状粒子、高圧容器への供給輸送、長距離・大容量の輸送

空気輸送装置の設計計画上の要点としては、

- (a) 輸送物の種類：物性、輸送の難易性、有害性
- (b) 輸送量：時間的变化
- (c) 輸送距離：水平・鉛直・傾斜長さ、バンド形状とその流れ方向と個数

等の項目と上記の比較表に基づき装置の方式を決定し、概算計画さらに細かな設計計画を行うことが必要である。

輸送方式によるエネルギー効率の比較を図1に示した。比較上の尺度として輸送量 1t/h で輸送距離 1m 当りの輸送に必要な所要動力を動力指数  $R_p$  [ $\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{t}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ ] で表し輸送距離  $L$  との関係調べた。この図から  $R_p$  はいずれの方式でも  $L$  が長くなると直線的に小さくなる。吸引式は圧送式に比べ  $R_p$  が大きい。著者らは吸引式では、ノズル部で非常に大きな圧力損失があることに注目し、吸引ノズルの性能向上に関する研究<sup>29, 33)</sup>を行ったが、本論文では割愛する。

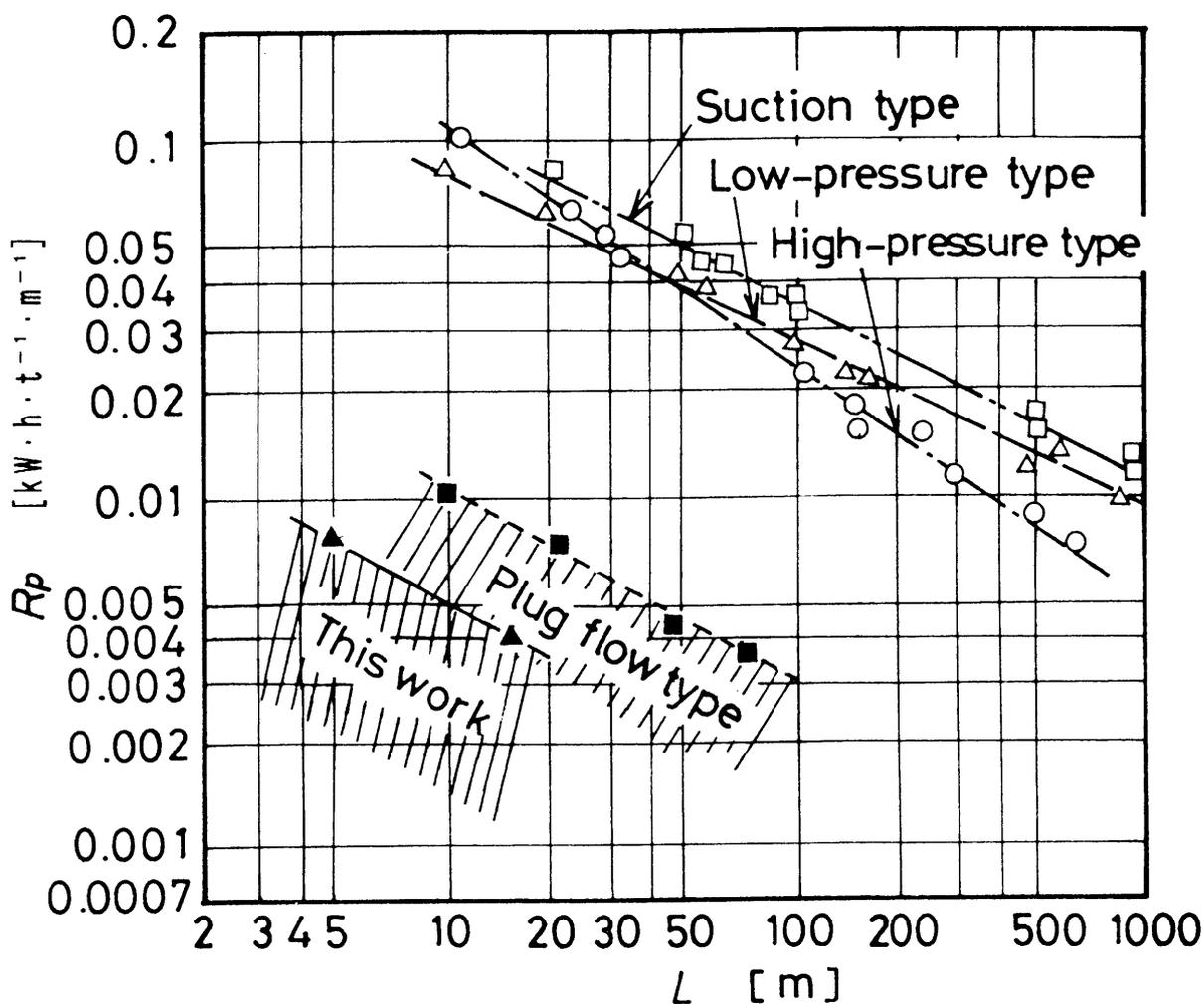


図1 各種粉粒体輸送方式の輸送距離と動力指数の関係

低圧圧送式とプラグ輸送方式を除く高圧圧送式との比較では、 $L$ が50m程度で両者は逆転し、 $L$ が長いときは高圧圧送式の方が $R_p$ は小さい。プラグ輸送方式は粉粒体の物性やプラグを作るメカニズム等によって所要動力が著しく異なるので、 $R_p$ が悪い条件を基準に領域として表した<sup>3,4)</sup>。さらに本研究は輸送距離に制限があり長距離での実験は行っていないが、水平5mの場合とベンドを4個を含んだ16.3mの輸送管路でのプラグ輸送の実験結果で、無加振の場合を基準にして付記した。いずれにしてもプラグ輸送方式によって $R_p$ が $0.01\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{t}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ 以下の輸送が可能である。この値は空気輸送以外の機械的輸送方式と比較すると、バケットコンベヤーやチェーンコンベヤー等の値よりも小さく、ベルトコンベヤーのその値よりも少し高い結果となった。しかしベルトコンベヤー等は $L$ に制限があるのに対して、プラグ輸送方式では $L$ がさらに長い場合は、かなり低い $R_p$ で輸送が可能である。また本研究で得られた加振効果等の利用によって $R_p$ はこの値よりもかなりの低減できる。この加振効果は両輸送方式に応用できる。特に圧力損失が上昇しやすい箇所、摩擦係数の大きな粉粒体、付着性の強い微粉体については著しい効果が得られる。また加振設備の並列設置によって輸送能力を大きく設計することが可能となる。

本研究で得られた粉粒体空気輸送の所要動力低減に関する工学的技術をまとめると表2のようになる。

空気輸送の所要動力低減について実際的な方策として次のことが言える。

浮遊輸送方式では、まず空気速度、混合比等の経済的輸送条件を選定することが重要である。また流動しやすいように粒子径やその形状および管内壁の粗度等を考慮することが必要である。さらに本論文の課題である輸送管路への振動を加えることは効果が大きい。すなわち壁面摩擦係数は振動加速度の増加に比例して減少する。また乾燥および含水粉粒体空気輸送の理論解析で、輸送圧力は、壁面摩擦が支配的因子であり、その低減には加振が効果的である。含水粉粒体では壁面摩擦係数が低くなる含水率が存在し、水分の調整および輸送管への加振による液状化現象によって空気輸送の所要動力をか

表2 粉粒体空気輸送の所要動力低減への工学的技術

方式	着目点	本研究で得られた結果のまとめ
低濃度高速輸送方式	粒子移動限界	<ul style="list-style-type: none"> <li>① 理論的に初期飛散力<math>B_0</math>は、粒子近傍の速度を大きくすることと、壁面摩擦係数<math>\xi_w</math>を低減することによって大きくすることが可能である。<math>\xi_w</math>の低減には壁面への加振が効果的。</li> <li>② 粒子の壁面摩擦係数<math>\xi_w</math>は、振動加速度比<math>A</math>の増加に対して直線的に低減。</li> <li>③ 無次元限界掃流力は、あるレイノズル数(粒子径)で極小。また<math>A</math>が大きい程減少。</li> </ul>
高濃度高速輸送方式	乾燥および含水粉粒体の輸送	<ul style="list-style-type: none"> <li>① 乾燥および含水粉粒体輸送の輸送圧力式の導出。計算値と実験値と一致。</li> <li>② 粉粒体の空気輸送において、壁面摩擦係数<math>\xi_w</math>が支配的因子で輸送管への加振が動力低減に効果的。</li> <li>③ 含水率の調整と加振とによる相乗効果によって動力の大幅な低減が可能 → 液状化現象の応用技術。</li> </ul>
低圧送式	水平・傾斜輸送管路	<ul style="list-style-type: none"> <li>① 浮遊輸送の加振による動力低減には、<math>A</math>が大きく、<math>A</math>が一定では振動数<math>f</math>が小さいほう効果的。</li> <li>② 水平および下り勾配の輸送では、加振することが動力低減に効果的。下り勾配の場合には顕著。</li> </ul>
高濃度低速輸送方式	プラグの輸送限界	<ul style="list-style-type: none"> <li>① プラグ輸送限界の圧力<math>p_m</math>を表す理論式の導出。実験値と一致 <math>p_m = f(D, \xi_w, l_p, \theta, \rho_b, d_s, \epsilon \dots)</math></li> <li>② 実験結果から経済的な輸送条件の導出。<math>N_p, \lambda_p, \dots</math> から<math>D, u_a, u_s, l_p \dots</math>の最適条件。</li> </ul>
高濃度低速輸送方式	プラグ輸送への加振効果	<ul style="list-style-type: none"> <li>① 壁面上の粉体層の壁面摩擦係数<math>\xi_w</math>は、<math>A</math>の増加に対して直線的に低減。</li> <li>② <math>p_m</math>の低減には、輸送管への加振が効果的で理論値と実験値が一致。加振機の動力は全体の数%。</li> </ul>
高圧送式	プラグ供給装置の開発と振動効果 実際への適用	<ul style="list-style-type: none"> <li>① プラグを輸送管に連続的に供給し、輸送管の要所へは振動を加える輸送システムの設計、運転。</li> <li>② 経済的輸送速度の選定によって安定したプラグ輸送が可能。かなり低い<math>u_a</math>で輸送可能。</li> <li>③ 適度な加振をすることによって、広い<math>u_a</math>の範囲でプラグの安定性が向上。</li> <li>④ 輸送圧力、下限界プラグ速度、最適経済速度、付加圧力損失は、加振によって低減。→ 所要動力低減。</li> <li>⑤ 加振にはエアバグレターも効果的、その排気の輸送管へ導入するとさらに動力低減、並列使用も有効。</li> <li>⑥ ベントの効果的形状検討。水平から水平方向ベント、鉛直から鉛直方向ベント、鉛直から水平方向ベント。加振効果は水平から鉛直方向ベントの場合に顕著。</li> </ul>

なり低減できる。また水平および下り勾配や、粒子の停滞部では加振効果が大きい。

次に低速高濃度輸送方式は、プラグ輸送がその代表例で浮遊輸送方式に比べ輸送圧力が高いが、低い空気速度で高濃度な輸送を行うため輸送効率も高い。まず浮遊輸送方式と同様に従来から検討されてきた運転条件、装置特性等の経済的な輸送条件を設定することが重要である。さらに本研究で得られた結果から、プラグ供給箇所、加速領域、ベンド部の圧力損失が上昇する箇所等で、輸送管路に適度な振動を加えることによって圧力損失の減少と同時に輸送状態の安定化が可能である。特に付着性微粉体については、効果は著しい。この加振機の消費動力は、輸送空気による動力に比べ非常に低い。プラグ輸送で、エアバイブレーターを用いる場合、その動力は輸送用の空気源機械の空気を併用できる。またエアバイブレーターの空気使用量および消費動力は少なくその排気も輸送管にもどし再利用できる。実際の装置への応用技術としては、閉塞、停滞等のトラブルが生じやすく圧力損失が大きくなる箇所へ圧力センサー等を設けておき、そこに並列に取り付けられたエアバイブレーターが圧力の上昇を検知すると自動的に稼働するシステムが可能である。振動による装置へのトラブルが気になるが、原子炉等における細管への振動等と異なり、実際の輸送管径に対してこの程度の小さな振幅の場合は問題はない。既に実際の装置に応用されている例も少なくない。

今後、薬・食品類、新素材原料の超微粉体、バイオテクノロジーによる生成物・固定化微生物、スラッジ状廃棄物等の広範囲な分野において物資を乾燥あるいは含水粉粒体の状態で取り扱うことが益々増加し、空気輸送の需要も高まる傾向にある。本研究の成果は、空気輸送全般において十分に適用することが可能であり、工学的価値も大きい。

## 使用記号

$A$	= cross-sectional area of the pipe	[ m <sup>2</sup> ]
$A_1$	= cross-sectional area of a layer of air optionally containing flying particles in Fig.3-1	[ m <sup>2</sup> ]
$A_2$	= cross-sectional area of a water-containing particle layer associated with air flow in Fig.3-1	[ m <sup>2</sup> ]
$A_3$	= cross-sectional area of a layer comprising water and particles without air flow in Fig.3-1	[ m <sup>2</sup> ]
$a_h$	= half-amplitude of vibration	[ μm, m ]
$A_s$	= cross-sectional area of a settled layer	[ m <sup>2</sup> ]
$B_0$	= initial dispersing force	[ N ]
$C$	= drag coefficient	[ - ]
$C_c$	= adhesion strength of critical water content	[ Pa ]
$C_s$	= adhesion strength of saturated water content	[ Pa ]
$D$	= inner diameter of a pipe	[ m ]
$d_s$	= particle diameter	[ μm ]
$F, F'$	= horizontal forces	[ N ]
$f$	= frequency of vibration	[ Hz ]
$F_D$	= fluid thrust	[ N ]
$f_k$	= drag coefficient in Eq.(5-2)	[ - ]
$F_R$	= frictional force of a particle	[ N ]
$F r_c$	= Froude number = $u_c / (gD)^{1/2}$	[ - ]
$F r_s$	= Froude number = $u_s / (gD)^{1/2}$	[ - ]
$g$	= gravitational acceleration	[ m·s <sup>-2</sup> ]

$h$	= height of partial bed under vibration	[ mm ]
$h_o$	= height of partial bed under no vibration	[ mm ]
$i$	= number of plugs per second	[ s <sup>-1</sup> ]
$K_p$	= value of pressure ratio in Eq. (5-5)	[ - ]
$K_{pc}$	= critical value of pressure ratio	[ - ]
$L$	= length of transport pipe	[ m ]
$l$	= distance from pipe entrance	[ m ]
$\Delta L$	= length of transport test pipe	[ m ]
$l_a$	= air cushion length	[ m ]
$l_p$	= plug length	[ m ]
$m$	= coefficient in Eq. (5-7)	[ - ]
$M_s$	= mass flow rate of particles	[ kg · s <sup>-1</sup> ]
$m_s$	= mass of granular materials	[ kg ]
$n$	= index number in Eq. (5-7)	[ - ]
$N_o$	= power consumption of blower at no load	[ kW ]
$N_c$	= power consumption	[ W · s ]
$N_e$	= power consumption of blower	[ kW ]
$N_p$	= power required for conveying a plug	[ kW ]
$n_p$	= number of plugs	[ - ]
$n_s$	= rate of movement of grains	[ s <sup>-1</sup> ]
$N_v$	= power consumption of vibrator	[ kW ]
$p_a$	= air pressure for conveying a plug	[ Pa ]
$p_k$	= pressure loss of air passing through a plug	[ Pa ]
$p_l$	= axial pressure in a plug	[ Pa ]
$p_m$	= requisite minimum air pressure for conveying a plug	[ Pa ]

$p_o$	= pressure loss of air flow passed through a pipe	[Pa]
$p_r$	= normal pressure to the pipe wall in a plug	[Pa]
$p_t$	= pressure in blow tank	[Pa]
$\Delta p$	= pressure drop at $\Delta L$	[Pa]
$\Delta p_b$	= pressure drop in bend	[Pa]
$\Delta p_p$	= pressure drop defined by Eq. (7-3)	[Pa]
$\Delta p_s$	= additional pressure drop due to presence of solids defined by Eqs. (5-13), (7-4)	[Pa]
$\Delta p_o$	= pressure drop across transport test pipe under no vibration	[Pa]
$Q_a$	= volumetric flow rate of air	[m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]
$Re_s$	= Reynolds number = $d_s(u_k - u_s) / \nu$	[-]
$Re_\delta$	= Reynolds number = $\rho_a \cdot u_\delta \cdot d_s / \mu$	[-]
$R_a$	= air shearing resistance	[N]
$R_p$	= rate of power requirement	[kW·h·t <sup>-1</sup> ·m <sup>-1</sup> ]
$R_s$	= shearing resistance between air flow and flying particles	[N]
$R_w$	= friction resistance between pipe wall and deposited particles layer	[N]
$S$	= inner circumference = $\pi D$	[m]
$S_{2+3}$	= inner circumference in contact with layer of $A_2$ and $A_3$	[m]
$S_3$	= inner circumference in contact with layer of $A_3$	[m]
$S_p$	= scope index of transported plug defined by Eq. (7-1)	[-]
$S_t$	= stability index in Eq. (7-2)	[-]
$t$	= transporting time	[s]
$t_s$	= transporting time in steady state	[s]
$t_t$	= total transporting time	[s]
$\Delta t_1$	= regular interval of time for supplying air to the first line	[s]

$\Delta t_2$	= regular interval of time for supplying air to the second line	[ s ]
$u_a$	= air velocity	[ m • s <sup>-1</sup> ]
$u_c$	= critical velocity of conveying air	[ m • s <sup>-1</sup> ]
$u_k$	= velocity of air passing through a plug	[ m • s <sup>-1</sup> ]
$u_p$	= velocity of plug	[ m • s <sup>-1</sup> ]
$u_{pc}$	= lower limit velocity of plug	[ m • s <sup>-1</sup> ]
$u_s$	= particule velocity	[ m • s <sup>-1</sup> ]
$u_j$	= air velocity at $y_j$	[ m • s <sup>-1</sup> ]
$u_{*c}$	= critical fliction velocity	[ m • s <sup>-1</sup> ]
$u_\delta$	= air velocity in the vicinity of particle	[ m • s <sup>-1</sup> ]
$W$	= normal force to the pipe wall	[ N ]
$W_s$	= mass of a plug	[ kg ]
$x$	= coefficient in Eq. (5-17)	[ - ]
$y$	= index number in Eq. (5-17)	[ - ]
$y, y_j$	= distance from surface of powder bed	[ m ]
$\alpha$	= vibratory acceleration	[ m • s <sup>-2</sup> ]
$\Gamma$	= ratio of additional power consumption by vibrator	[ - ]
$\delta_L$	= thickness of laminar sublayer	[ m ]
$\varepsilon$	= void fraction	[ - ]
$\zeta$	= coefficient in Eq. (2-18)	[ - ]
$\eta$	= transport efficiency	[ - ]
$\eta_o$	= transport efficiency in static state	[ - ]
$\eta_b$	= blower efficiency	[ - ]
$\eta_p$	= transport efficiency of plug flow	[ - ]
$\eta_v$	= transport efficiency in vibrating state	[ - ]

$\theta$	= angle of inclination of pipe to the horizontal	[ rad ]
$\kappa$	= coefficient of cover	[ - ]
$\lambda_a$	= friction factor of air flow through the pipe	[ - ]
$\lambda_s$	= additional friction factor of plug flow through the pipe	[ - ]
$\Lambda$	= acceleration ratio = $a_b (2 \pi f)^2 / g$	[ - ]
$\mu$	= viscosity of air	[ Pa · s ]
$\mu_s$	= mixing ratio	[ - ]
$\nu$	= kinematic viscosity of air	[ m <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup> ]
$\xi_w$	= wall friction coefficient under no vibration	[ - ]
$\xi_{wc}$	= wall friction coefficient of critical water content	[ - ]
$\xi_{ws}$	= wall friction coefficient of saturated water content	[ - ]
$\xi_{wv}$	= wall friction coefficient under vibration state	[ - ]
$\rho_a$	= density of air	[ kg · m <sup>-3</sup> ]
$\rho_b$	= bulk density of particles	[ kg · m <sup>-3</sup> ]
$\rho_m$	= mean particle density defined by Eq. (7-5)	[ kg · m <sup>-3</sup> ]
$\rho_s$	= true density of particle	[ kg · m <sup>-3</sup> ]
$\Phi$	= water content	[ - ]
$\Phi_c$	= water content of critical water content	[ - ]
$\Phi_s$	= water content of saturated water content	[ - ]
$\phi_i$	= angle of internal friction	[ rad ]
$\phi_w$	= angle of inclination	[ rad ]
$\phi$	= function of $(u_{*c} \cdot d_s / \nu)$	[ - ]

## 引用文献

- 1) Akiyama,T., T.Naito and T.Kano: *Powder Technol.*, 45,215(1986)
- 2) Akiyama,T., Y.Miyamoto, F.Takeuchi and T.Kano: *J. Soc. Powder Technol., Japan*, 24,443(1987)
- 3) Aoki,R., F.Kamiya, H.Murata and H.Homma: *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, 5,623(1979)
- 4) Aoki,R., Murata,H. Homma and H.Wada: *ibid.*, 6,628(1980)
- 5) Arakawa,M. and M.Nishino: *Zairyou*, 21,562(1972)
- 6) Barth,W.: *Chem. Ing. Tech.*, 26,33(1954)
- 7) Barth,W.: *ibid.*, 32,3(1960)
- 8) Chepil,W.: *Soil Science*, 60,397(1945)
- 9) Flatow,J.: *V.D.I. Forschungsheft*, 555(1973)
- 10) Flatt,W. and W.Allenspach: *Chem. Ing. Tech.*, 41,1173(1969)
- 11) Gasterstädt,J.: *Forsch.-Arb. Ing. -Wes.*, 265(1924)
- 12) Gutman,R,G.: *Trans. Inst. Chem. Eng.*, 54,174(1976)
- 13) Hayasi,M., A.Suzuki and T.Tanaka: *Powder Technol.*, 6,353(1972)
- 14) Hirano,H., T.Kano, Y.Nakatani, T.Ōnishi, S.Sasaki and F.Takeuchi: *J. Res. Assoc. Powder Technol.,Japan*, 14,135(1977)
- 15) Ishihara,T. and Y.Iwagaki: *Disaster Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.*, 2,1(1952)
- 16) Iwagaki,Y.: *Trans. Japan Soc. Civil Eng.*, 41,1(1956)
- 17) Jotaki.T.: “ *Funryūtai no Kūkiyusō* ” ,p.10, Nikkan Kogyo Shimbunsha (1974)
- 18) Jotaki.T.: *ibid.*, p.147(1974)
- 19) Jotaki.T.: *ibid.*, p.271(1974)

- 20) Jotaki,T., Y.Tomita and Y.Tukida: *J. Res. Assoc. Powder Technol.,Japan*, 10,625(1973)
- 21) Kano,T., H.Hirano, Y.Nakatani and F.Takeuchi: *ibid*, 13,63(1976)
- 22) Kano,T.,S.Hirono,F.Takeuchi,H.Sugiyama and M.Tsukiori:*J.Soc. Powder Technol.,Japan*, 15,134(1978)
- 23) Kano,T., F.Takeuchi, H.Sugiyama and E.Yamazaki: *Kagaku Kougaku Ronbunshu*, 6,274(1980)
- 24) Kano,T.: “ *Funryūtai Yuso Sōchi*” ,p.69, Nikkan Kogyo Shimbunsha (1980)
- 25) Kano,T.: *ibid*, p.72,(1980)
- 26) Kano,T.: *ibid*, p.106,(1980)
- 27) Kano,T., F.Takeuchi, E.Yamazaki and H.Tsuzuki: *Kagaku Kougaku Ronbunshu*, 7,126(1981)
- 28) Kano.T., F.Takeuchi, Y.Kondo, M.Utsumi, T.Maeda and K.Takemura: *ibid*, 9,477(1983)
- 29) Kano,T., F.Takeuchi, S.Iida and N.Mima: *ibid*, 10,139(1984)
- 30) Kano.T, M.Utsumi, F.Takeuchi, H.Kuroyanagi and H.Kawade: *ibid*, 10,568(1984)
- 31) Kano,T., F.Takeuchi, H.Sugiyama and E.Yamazaki: *Int. Chem. Eng.*, 24,702(1984)
- 32) Kano,T., F.Takeuchi, K.Jinno and A.Fujiwara: *J. Soc. Powder Technol.,Japan*, 21,18(1984)
- 33) Kano,T., F.Takeuchi, Y.Yoshida and A.Mochizuki: *ibid*, 21,99(1984)
- 34) Kano,T.:*Bulk solids handling* 5,663(1985)
- 35) Kohata,T., K.Gotoh and T.Tanaka: *Kagaku Kōgaku*, 31,55(1967)
- 36) Krambrock,W.: *Verfahrenstechnik*, 12,190(1978)

- 37) Kroll,W.: *Forschung*, 20,2(1954)
- 38) Lappel,C.E. and C.B.Shepherd: *Ind. Eng. Chem.*, 38,605(1940)
- 39) Lippert,A.: *Chem. Ing. Tech.*, 38,350(1966)
- 40) Matsumoto,S.: *Kagaku kōugaku*, 44,331(1980)
- 41) Matsumoto, S.,Hara,M., Saito,S. and Maeda,S.: *J. Chem. Eng., Japan*, 7,425(1974)
- 42) Morikawa,Y., G.Segler and W.Hutt: *Kagaku Kōugaku*, 42,279(1978)
- 43) Morikawa,Y.: “ *Ryūtai-Kotai Nisōryu* ” ,p.84, Nikkan Kogyo Shimbunsha  
(1979)
- 44) Morikawa,Y., Y.Tsuji, H.Honda, M.Yamazaki and T.Mizuno: *Trans.J.S.M.E.Ser.B*,  
45,1642(1979)
- 45) Morikawa,Y., Y.Tsuji, H.Honda and H.Noguchi: *ibid.,Ser.B*,  
46,1273(1980)
- 46) Morikawa,Y., Y.Tsuji, H.Honda and H.Noguchi: *ibid.,Ser.B*,  
47,132(1981)
- 47) Morikawa,K.: *J. Soc. Powder Technol.,Japan*, 19,284(1982)
- 48) Muschelknautz,E. and W.Krambrock: *Chem. Ing. Tech.*, 46,6(1974)
- 49) Müller,H: *Deuts,hebe-u.Fördertech.*, 13,35(1967)
- 50) Nikurades: *V.D.I.Forschungsheft*, 356(1932)
- 51) Okabe,Y. and Y.Ichikawa: *Therm. Nucl. Power*, 33,91(1983)
- 52) Petersen,H.: *Aufbereitungs-Tech.*, 1,35(1973)
- 53) Prandtl,L.: *Zeit. V.D.I.*, 77,105(1933)
- 54) Sakaguchi,K: *J. Res. Asso. Powder Technol.,Japan*, 24,150(1977)
- 55) Schlichting,H.: “ *Boundary-Layer Theory* ” ,p.604, McGraw-Hill,  
New York(1979)
- 56) Siegel,W.: *V.D.I. Forschungsheft*, 538(1970)

- 57) Tsunakawa,H., J.Nakai and R.Aoki: *J. Soc. Powder Technol., Japan*, 16,249(1979)
- 58) Takeuchi,F., S.Fukuda, K.Yamanaka and T.Kano: *ibid*, 22,73(1985)
- 59) Takeuchi,F., T.Kano, S.Yamada, S.Fukuda and K.Yamanaka: *Kagaku Kougaku Ronbunshu*, 11,674(1985)
- 60) Takeuchi,F., T.Kano, R.Aiura and N.Shibata: *ibid*, 12,97(1986)
- 61) Takeuchi,F., T.Kano, T.Yamada and T.Maeda: *ibid*, 12,102(1986)
- 62) Takeuchi,F., T.Kano, T.Yamada and Teruo Takahashi: *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 25,522(1992)
- 63) Tomita,Y., T.Jotaki and M.Inoue: *J. Soc. Powder Technol.,Japan*, 15,389(1978)
- 64) Tomita,Y., T.Jotaki, Y.Jotaki and Y.Tukida: *Trans.J.S.M.E.*, 44,92(1978)
- 65) Tomita,Y.: *J. Soc. Powder Technol.,Japan*, 23,592(1986)
- 66) Tsutiya,Y., Y.Kawata: Disaster Prev. Res. *Inst.,Kyouto Univ.*, 13–B,217(1960)
- 67) Tsuji,Y.: *Kikai no Kenkyu*, 34,20(1982)
- 68) Tsuji,Y., T.Sirakami, Y.Fujiwara and H.Tikai: *Trans.J.S.M.E.Ser.B*, 49,1020(1983)
- 69) Tsuji,Y.: “ *Kūkiyusō no Kiso* ” ,p.57, Yōkendō(1984)
- 70) Welschhof,G.: *V.D.I. Forschungsheft*, 492(1962)
- 71) Yang,W.C.: *AIChE J.*,20,605(1974)
- 72) Yokoyama,Y.: *Kikai Gakkaishi*, 74,630(1971)
- 73) Yoshida,T.,Y.Kousaka, and A.Yutani: *Kagaku kōugaku*, 32,470(1968)
- 74) Yoshida,T. and Y.Kousaka: *ibid*, 32,82(1968)
- 75) Yoshimi,T.: “ *Sunajiban no Ekijyouka* ” ,Gihoudousyuppan(1980)
- 76) Yokoyama,Y.: *J. Japan Soc. Precis. Eng.*, 32,403(1966)

## 謝 辞

本論文をまとめるにあたり、静岡大学工学部教授渥美邦夫先生には懇切な御教示ならびに御鞭撻を賜りました。また静岡大学工学部教授秋山鐵夫先生、同教授荒木信幸先生、同教授柳沢 正先生、同助教授中崎清彦先生には多大の御教示と御助言を賜りました。深く感謝とお礼申し上げます。

本研究を進めるにあたり、終始暖かい御指導と御鞭撻を賜りました前静岡大学工学部教授故狩野 武先生に心から感謝とお礼申し上げます。また本研究をまとめるにあたり、暖かい御指導、御助言を賜りました岡山大学名誉教授（前環境管理センター長）高橋照男先生に深く感謝とお礼申し上げます。

さらに本研究をまとめるにあたり、御助言を賜り、常に励まして頂きました静岡大学工学部部長内田重男先生をはじめ同工学部旧化学工学科の関係諸氏および岡山大学薬学部部長で環境管理センター長の篠田純男先生をはじめ同センターの関係諸氏に心から感謝致します。

最後に本研究の実験を行うにあたり、御協力頂きました当時の静岡大学工学部化学工学科狩野研究室の学生諸氏に対して改めて感謝致します。