

氏名(本籍)	今野宏卓(宮城県)
学位の種類	工学博士
学位記番号	工第103号
学位授与年月日	昭和45年3月6日
学位授与の要件	学位規則第5条第2項該当
最終学歴	昭和36年3月 東北大学大学院工学研究科機械工学専攻 修士課程修了
学位論文題目	固気系混相流動に関する化学工学的研究

(主査)

審査委員	教授 前田 四郎 教授 徳久 寛
	教授 梅屋 薫 教授 大谷 茂盛

論 文 内 容 要 旨

本論文は9章からなっている。

第1章においては本研究の動機とその目的を述べ、化学工学における種々の混相流動を概説した。さらに固気系混相流動に関する研究を調査し検討した。

第2章では本実験に用いた水平管、垂直管の実験装置を説明し、使用した粒子の種類および性状を述べた。さらに圧力損失、粒子速度、管内粒子の分布および流体の速度分布などに関する諸測定法について説明を加えた。

第3章においては固気系混相流動におよぼす諸因子の影響、すなわち粒子の加速区間、管内壁面の粗さ、流動状態の時間的变化、粒子の飛行状態の様相、および静電気の発生による影響などについて

て検討を加えた。これによって測定誤差以外にこれらの諸因子が、固気系混相流動に影響することを明らかにした。

第4章は水平管内における固気系混相流動の実験結果について述べ、検討を行なった。さらに粒子附加圧力損失に関して、簡単なモデルを提案して解析を行なった。

第5章は垂直管内における固気系混相流動の実験結果について述べ、検討を加えた。

第6章においては水平管および垂直管内の固気系混相流れの流動機構を比較検討した。

第7章では固気系混相流動と類似と考えられる固液系混相流動とを比較検討し両者の相違点を明らかにした。

第8章においては固気系混相流れの応用の一つとして石油系炭化水素（重質油）の熱分解を連続的に行なうべく輸送層型管状反応器を試作し、実験を行なった結果を述べた。

第9章においては本論文を総括した。以下各章ごとに内容の概略を述べる。

第1章 緒 論

輸送層における固気混相流動は化学工業においては輸送操作としてのみならず、近年反応操作あるいは気流乾燥などに広く応用されてきている。輸送操作としてはいわゆる空気輸送（Pneumatic Conveying）と呼ばれ古くより多方面に使用されており、これに関する研究も多い。しかしその研究の主体は動力算定のための圧力損失に関するものであり、しかもその結果が研究者によりかなり異なり普遍的なものは未だ得られていない。

流系反応器として反応操作などに固気系混相流動を利用する場合、化学工学的な見地からは単に圧力損失のみならず流動機構そのものを解明する必要がある。

このため固気系混相流動における圧力損失に関して、詳細な検討を加えると同時に流体および粒子の運動にも着目し、混相流れにおける流動機構を解明し、操作上、設計上の資料を得る事を目的とした。

最後にこの研究の過程で得られた知見を石油化学工業に応用するため、輸送層型反応炉を試作し、灯油などの熱分解を行なってその反応工学的解析を試みた。

以上の研究の動機と目的に引き続いて本章では混相流動全般について概説し、また国の内外における固気系混相流動の既往の研究について、圧力損失、粒子速度、粒子の管内分布などの面より概説した。

第2章 実験装置と測定方法

本章では実験装置、実験に用いた固体粒子の性状について述べ、続いて圧力損失、粒子速度、粒子の分布状態ならびに流体速度分布の測定法について説明した。すなわち水平管の実験装置は長さ

1.6 m、内径2.5.8 mmと4.6.8 mmの2通りのパイレックスガラス管、垂直管は垂直部長さ8 m、内径2.6.5 mmと4.6.8 mmの2通りのパイレックスガラス管を測定管として用いた。

装置の概略はFig. 1およびFig. 2に示す。

輸送方式は圧送式、空気流への粒子の混入は自然落下方式とした。ブロワーから送られる空気は粒子供給管より落下する粒子を伴ない混相流となる。この混相流は測定管を通り、回収管を経てサイクロンで空気と粒子が分離され、粒子は再び粒子供給管へ戻されるようになっている。

なお各種の測定は、粒子の十分な助走区間を通過した後に行なうべく、水平管においては粒子供給点より1.3 m下流で、垂直管では立上り部分より7 mの所で行なった。

本実験に用いた粒子はガラスおよび銅の球形粒子、ポリスチロール球形粒子、粟、牧草の種子（ヘアリーベッチ）の5種を用い密度をかえた実験を行ない、ガラスおよび銅粒子については粒径をかえた実験も行なった。

Table 1 に使用粒子とその性状を示した。

いずれの粒子も丁寧に分級し、その幾何平均径をもって代表径とした。

圧力損失の測定は管壁に設けた圧力損失測定用タップによる水柱マンノメーターを用いて行なった。粒子速度は1/1000 秒間隔で発

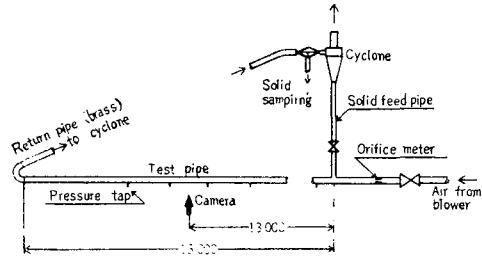


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

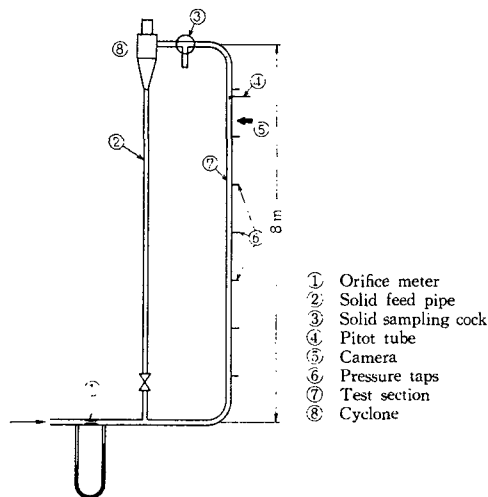


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus for vertical transport

Table 1 Properties of the solid materials

material	density ρ_s (kg m ⁻³)	diameter d_p (mm)	standard deviation σ	free falling velocity $u_{f,0}$ (m s ⁻¹)	$J_{0.25,0.25}$
Glass	2500	0.12	1.25	0.95	7.9
		0.32	1.07	2.33	34
		0.52	1.10	4.10	112
		1.05	1.05	8.00	360
		1.52	1.07	9.65	360
Copper	8900	0.12	1.08	2.20	15
		0.27	1.11	5.90	49
		0.53	1.12	9.89	339
Hairy vetch	1350	3.25	1.98	10.00	2170
Millet	1440	1.44	1.09	7.13	654

光する二連ストロボ放電管を用いて写真法によった。すなわち Fig・3 に示すように巾約 5 mm のスリットを管にとりつけ、ストロボの光および連続光として 1 Kw の写真用電球により管の中心 5 mm 巾を照らし、ここにある粒子の軌跡を撮影して求めた。粒子の分散状態の測定も写真法によった。望遠レンズを用いて管路の一定区間に存在する全粒子を撮影して求めた。流体の速度分布は、外径 0.5 mm のステンレス管を L 字型にし、これをピトー管として混相流中に挿入して測定した。この際静圧はピトー管挿入部の管壁において測定したため多少の誤差は含まれるであろうが流速分布の大略の傾向は求められるものと考えた。

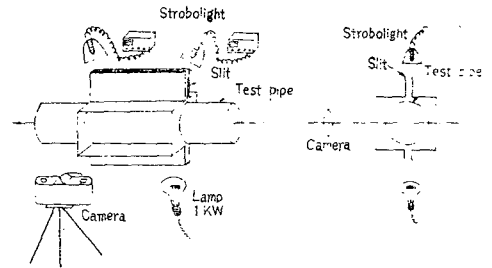


Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus for measuring particle velocity and particle distribution

第 3 章 固気系混相流動におよぼす諸因子の影響とその検討

固気系の混相流動は空気流速 U_a 、粒子の性状、混合比、管の太さおよびその状態などの諸因子の影響をうける。

本章においては固気混相流におよぼす上記項目以外の諸因子を抽出して、それらの影響について検討を加えた。

- 1) 粒子の加速区間について：水平管については粒子供給点より約 1.4 m まで、垂直管では立上り部分より約 7 m まで 1 ~ 2 m 間隔で圧力損失を測定した。その結果が Fig・4 および Fig・5 である。混合比 m の大きくなるにつれて水平管および垂直管いずれの場合も粒子加速区間は長くなるが、本実験範囲では水平管の場合 8 ~ 9 m、垂直管では 4 ~ 5 m を必要とすることがわかる。

したがって本研究の諸量測定は水平管では粒子供給点より 1.3 m 下流、垂直管では立上りより 7 m 離れた位置で行なった。

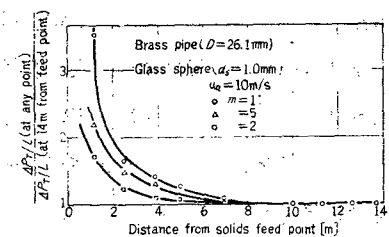


Fig. 4 Effect of particle acceleration length on pressure drop

2) 管内面の粗さの影響：市販の1" ガス管 A および B の 2 本について、空気のみを流した単一相の圧力損失を測定したところ、A、B 両者とも同一の値を示した。この A、B のガス管内に同じ球形ガラス粒子を混入し混合比 m をかえて実験したところ全く異なった値を示した (Fig. 6)。このことは管内の表面状態のわずかな差が衝突粒子の運動に大きく影響を与えるためと思われる。現在のところパイプの表面粗さを定量的に規定することは困難なので、内面が滑らかと思われるガラス管をテスト管として用いた。

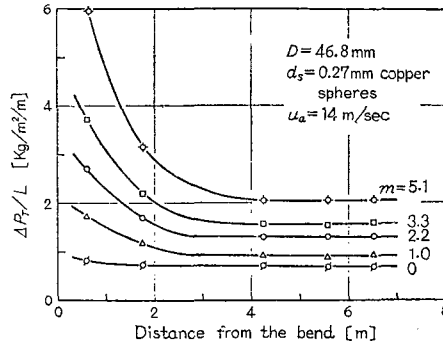


Fig. 5 Effect of particle acceleration on pressure drop in vertical transport

3) 流動状態の時間変化：肉眼観察上流れが落ち着いた定常流とみなせるときこの流動状態が時間的に如何なる変動をするか調べるため、一つの目安として流れの単位体積中に存在する粒子の数を 5 秒毎に測定した。その 1 例が Fig. 7 である。このように混相流は時間的に不規則であるが、本実験ではこの脈動を防ぐことが困難であったので 1 回の測定に数十枚の写真を取り、求められた値の平均値をもって粒子速度、粒子の管内分布などを決定した。

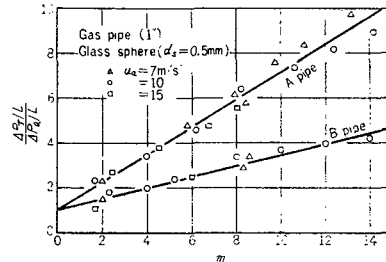


Fig. 6 Effect of roughness of pipe on pressure drop

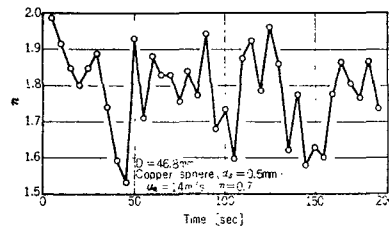


Fig. 7 Fluctuation of number of particles in unit volume

4) 粒子の飛行状態の様相：密度、粒径の等しい 2 種の異なるガラス粒子を使用した場合、全く様相の異なる流動状態を示す場合がある。すなわち粒子が管軸にはほぼ平行に飛ぶ場合と、管壁に激しく衝突しながら飛ぶ場合である。この粒子の運動形態によって圧力損失、粒子速度は異なる。管軸に平行に飛ぶ場合、圧力損失は混合比と共に直線的に増加するが、激しい衝突の場合は圧力損失は前者より大きくしかも一般に混合比 1 近辺でその勾配が変化する。粒子速度については、管軸に平行に飛ぶ粒子の場合は、粒子速度と空気速度の比 u_s / u_a が混合比によらずほぼ一定であるのに対しランダム運動の粒子は、混合比が小さい所では、 u_s / u_a は小さく、 m の増加につれて大きくなり平行に飛ぶ場合の値に漸近して行く、

(Fig. 8)。なお粒子分散状態についてはランダム運動をする粒子の方が均一に分散するようになる。

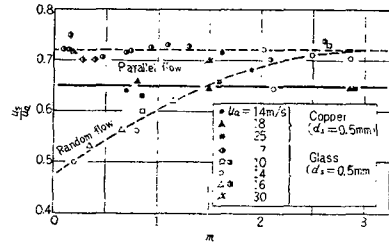


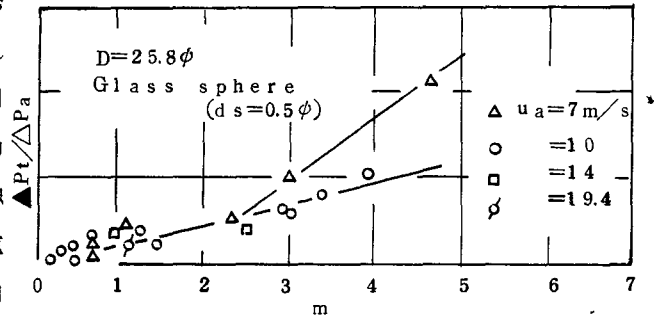
Fig. 8 u_s/u_a vs. charging mass ratio

- 5) 静電気の発生による影響：粒子と管壁との摩擦により静電気の発生がみられた。使用粒子，取入空気湿度によって影響されるが，相対湿度 45%，混合比 $m = 7$ ，ガラス粒子混相流で 60 kV に達する場合もある。ただこの発生電位と圧力損失とはあまり関係がなかった。

第 4 章 水平管内における固気混相流動に関する実験結果とその考察

固気混相流動においては，管内の全粒子が浮遊状態で飛行する場合と一部の粒子が管底に集積しそれが管底を這って行くように観察される場合とがある。後者は空気速度がある程度小さいか，混合比が大きい場合にみられる。Fig. 9 に同一空気速度で粒子の混入量を増して行なった場合の圧力損失比 $\Delta P_s / \Delta P_a$ を示した。ある混合比以上でその傾斜が急に大となる。この変曲点より一部の粒子が管底に集積しはじめると思われる。

従ってこの二つの流動状態には大きな相違があり，同一に論ずることは出来ないと考えられるので，以下の実験は粒子が浮遊状態で流動し，しかも管軸にはほぼ平行に飛ぶ場合のみを取扱った。固気系混相流動における固体粒子の速度が如何程であるか，またそれが操作条件および諸因子によってどのように影響されるかを知ることは混相流れの機構を解明する上からも，輸送動力および物質移動速度などの推算，流系反応器における触媒粒子の滞在時間などの推定のために重要なことである。そこで先ず粒子の管内速度分布の概略を求めたところ，混合比 m が 2 以下においては粒子速度は管断面



ではほぼ等しいことがわかった。次に粒子速度は本実験範囲においては u_s / u_a は粒子の性状によって異なるが、風速 u_a と混合比 m に関してほぼ一定値をとる。そこで粒子1ヶについての運動方程式をたてて u_s / u_a に関する式を導きこれにもとづいて実験データを整理したところ

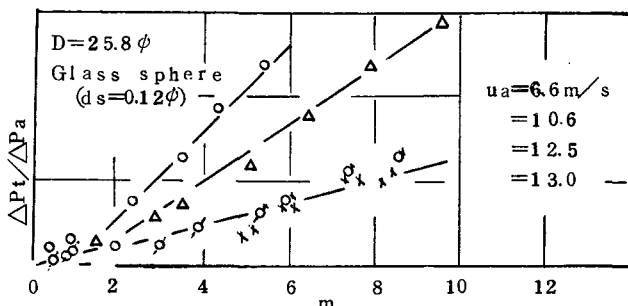


Fig9 Pressure drop vs. chaying mass ratio

$$\frac{u_a - u_s}{u_a} = \frac{1.35 \times 10^{-3}}{D} \left(\frac{u_t}{\sqrt{gD}} \right)^{0.65} \quad \text{ただし } u_t : \text{定常落下速度}$$

で良く表わし得た。

圧力損失を知ることは空気輸送のための動力推定に必要なことは勿論、U字管圧力計による圧力損失測定という簡単な方法により、固気系混相流動の挙動が巨視的に検討できるという利点がある。混相流の実験に先だちテスト管に空気のみを流して摩擦係数がBlasiusの式で得られる値とほぼ一致することを確かめた。次に混相流の圧力損失を整理した結果、圧力損失を整理した結果、圧力損失 $\Delta P_T / L$ と混合比の関係は古くから指摘されているように直線関係で表わされた。

また全部の実験値に関して風速 u_a をパラメーターにして混合比との関係を求めてみると一つの線上に乗り、圧力損失は粒子径、密度および性状にはほとんど関係なく、混合比、空気速度および管径の影響をうけることがわかった。そこで、粒子を加えたことによる圧力損失 $\Delta P_s / L$ を便宜上Fanningの式と同じ形で表わし得るものとし、これを若干変形して実験データより係数を求めた所、次の実験式を得た。

$$\frac{\Delta P_s}{L} = 0.033 \frac{u_a}{\sqrt{gD}} \rho_a m$$

ところで混相流の粒子の附加による圧力損失増加 ΔP_s についてはその本質的な機構はまだ明らかにされていない。ここでは粒子と管壁との衝突に着目して粒子による附加圧力損失についての検討を行なった。

管内を飛行する粒子は管壁と衝突し、反撥して飛行し、再度管壁と衝突する・・・・・・を繰返している。すなわち粒子は管壁と衝突をくりかえしながら管内を輸送されるが、この際に管との摩擦などによるエネルギー損失がある。このエネルギー損失を気流が何らかの方法でおぎなうて、混

相流は見掛上定常状態を保っているものと考え、気流はこのエネルギーをおぎなうために附加圧力損失 ΔP_s を生じるものとみなした。

先ず球が平面と衝突する際を考える (Fig・10)。衝突前の球の速度 V_{z0} 、 V_{y0} および角度 w_1 は次の式より求まる。

$$V_{z1} = V_{z0} + \mu (1+e) V_{y0}$$

$$V_{y1} = -e V_{y0}$$

$$w_1 = w_0 + \frac{5\mu(1+e)V_{y0}}{2r}$$

ただしこれらは衝突点で粒子がすべるとしたときの値である (e : 粒子の反撥係数, μ : 粒子と平面の動摩擦係数, r : 粒子半径)。
従ってこの時の粒子のエネルギー損失 E は次式で与えられる。

$$E = \frac{1}{2} M_s \{ (V_{z0}^2 + V_{y0}^2) - (V_{z1}^2 + V_{y1}^2) \} + \frac{1}{2} I (w_0^2 - w_1^2)$$

これらの式を三次元的に拡張し円管内の衝突に適用した。この際簡単なため次のごとき仮定を置いた。(1)軸方向速度 V_z 、管断面方向速度 $(V_x^2 + V_y^2)^{1/2}$ および回転の角速度 w は衝突により変化するが、その後直ちに元の値に回復する。(2)衝突時においては回転の軸は粒子の飛行軌跡に直角で、かつ衝突点での円管の接平面に平行、(3)反撥した粒子は(1)の仮定のごとく速度成分を回復した後、重力の場における運動を行ないつつ飛行し次の衝突を行なう。この際の空気抵抗は無視する。等の仮定の下に粒子は管頂の高さより落下しはじめるものとしてこの運動を解き、粒子のエネルギー損失を電子計算機により算出した。これを圧力損失に換算したのがFig・11である。これによって粒子と管壁との衝突によるエネルギー損失が附加圧力損失の主要原因になり得ることがわかる。

粒子の管内粒子分布に関しては管を水平方向に7等分し各セクションに滞在する粒子個数を測定した。これを半対数紙上にプロットしたところ、いずれの場合もほぼ直線状の分布曲線が得られた。その例をFig・12に示す。しかしこの直線の勾

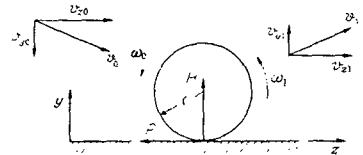


Fig. 10 Two-dimensional coordinate system of a single spherical solid particle colliding with the wall

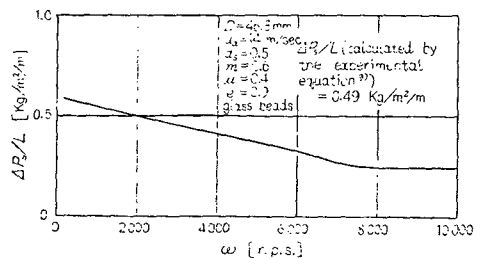


Fig. 11 Calculated pressure drop (effect of angular velocity)

配に影響する因子はいまだ定量的にはつかめていない。流体の速度分布については、最初に空気のみを流したときの空気速度分布を測定し、従来いわれている $1/7$ 乗則 $\frac{u}{u_{max}} = \left(\frac{y}{R}\right)^{1/7}$ によく一致することを確認した。混相流の流体速度分布は管軸に対して非対称になり混合比が増すにつれて、 u_{max} の位置が次第に中心より上方に移行する。(Fig. 13 参照)。このように水平管においては流体速度分布は混合比や粒子径によって影響されることがわかった。

第5章 垂直管内における固気混相流動に関する実験結果とその考察

粒子速度分布に関しては測定の結果、水平管の場合と同様管断面ではほぼ一様な速度であることがわかった。(Fig. 14)

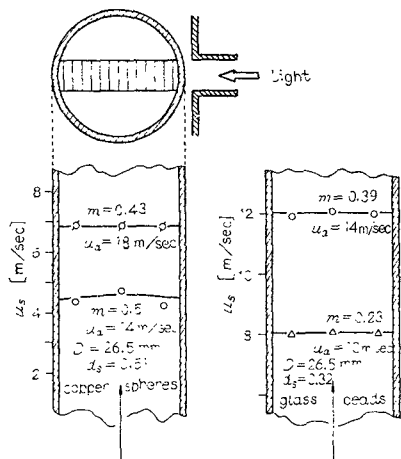


Fig. 14 Particle velocity profiles in vertical transport

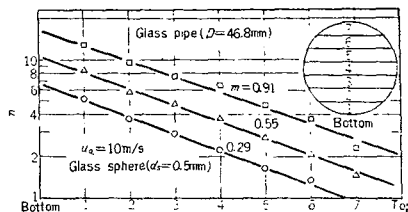


Fig. 12 Particle distribution in the pipe

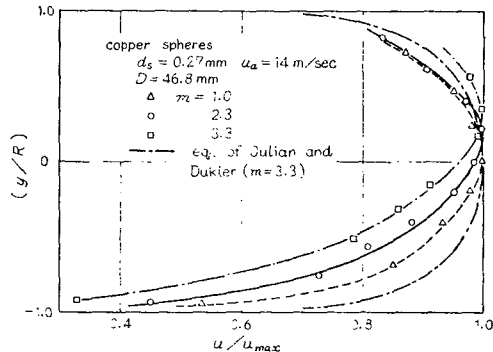


Fig. 13 Air velocity profiles in horizontal transport

また垂直管における粒子速度はほぼ空気速度 u_a と粒子の定常落下速度 u_t との差で示された (Fig. 15)。

次に垂直管における混相流の全圧力損失 ΔP_t の測定値を水平管の場合と同様縦軸にとり、混合比 m を横軸にとって点綴すると直線となる。今垂直管における全圧力損

失は、空気流の圧力損失 ΔP_a 、粒子の
 ホールドアップによる静水頭 ΔP_H およ
 び粒子を附加したことによる圧力損失
 ΔP_s の和で表わされるものと仮定すると

$$\frac{\Delta P t}{L} = \frac{\Delta P a}{L} + \frac{\Delta P h}{L} + \frac{\Delta P s}{L}$$

この式の右辺の第二項の ΔP_h は次式よ
 り求まる。

$$\Delta P_H = L \rho d s = L \frac{G s}{A u_s}$$

垂直管の附加圧力損失 ΔP_s を求めた結果、水平管の場合と同様粒子径や粒子の種類にあまり影響
 されないことがわかった。また ΔP_s は水平管と同様な型の実験式でまとめられた。

$$\Delta P_s = 5.7 \times 10^{-2} \frac{u a}{\sqrt{g D}} m \rho a$$

垂直管においては管軸を通るように設けられた巾数ミリのスリット（粒子速度測定に用いたもの
 と同じもの）を通して光が照射され、この領域にある粒子のみ撮影して管内粒子分布を求めた。そ
 の結果を Fig・16-a

～Fig・16-d に示し
 た。水平管における粒
 子の分散状態は高さ方
 向に指数関数的に分布
 したが垂直管における
 球形ガラスおよび銅粒
 子の場合はいづれも中
 心部より管壁の方が幾
 分多かったが、ポリス
 チロールの場合はこれ
 と逆の傾向を示した。
 この垂直管の粒子分布
 は粒径や風速にあまり
 影響を受けず、混合比

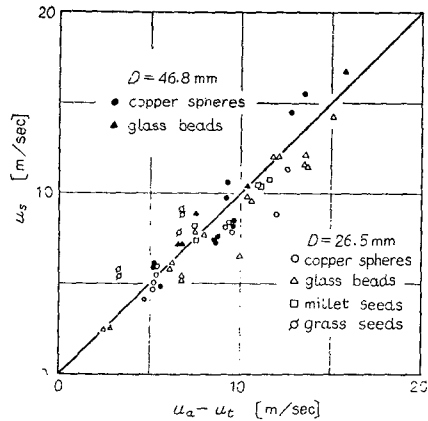


Fig. 15 u_s vs. $(u_a - u_t)$ in vertical transport

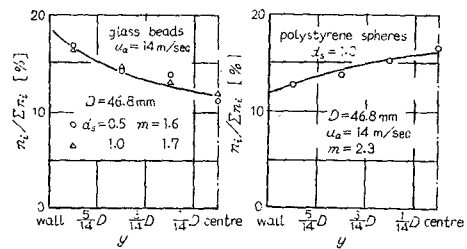


Fig. 16-a Particle distribution in vertical pipe (effect of particle diameter)

Fig. 16-b Particle distribution in vertical pipe

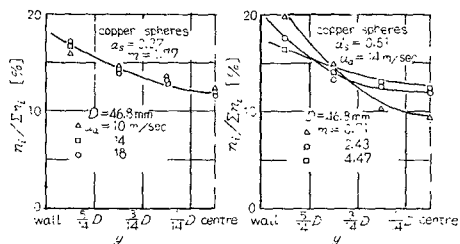


Fig. 16-c Particle distribution in vertical pipe (effect of air velocity)

Fig. 16-d Particle distribution in vertical pipe (effect of mass flow ratio)

によって影響される。

流体の速度分布に関しては垂直管の場合空気の場合と大差なく粒径、風速、粒子密度、混合比などを変えて実験を行なったが、これらの速度分布に対する影響は本実験範囲においては少なくほぼ Fig. 17 と同様であった。

第6章 水平・垂直固気混相流動の比較とその検討

粒子の管内速度分布に関しては水平・垂直管共に管断面に対し一様な速度を持つことがわかった。粒子速度に関しては水平管の場合速度比 u_s/u_a ，垂直管の場合速度差 $(u_a - u_s)$ でまとめると実測値がよく整理出来た。

水平管の場合は管壁と粒子がかなりの頻度で衝突し、このため粒子の減速の割合が比較的大きいのに対し垂直管の場合は衝突の割合が少なく、粒子の衝突に要する時間が比較的長く、衝突により一旦減速された粒子が気流により十分その速度を回復した後、次の衝突を行なうため比較的簡単な形で表わされたものと思われる。また垂直管の場合は粒子速度は管径の影響をうけないが、水平管の場合は、管径によって影響され、管径が大きくなるにつれて u_s は u_a に近い速度を持つであろうことが予想される。粒子速度におよぼす粒子の物性値としては、水平・垂直管ともに、自由落下速度 u_t として影響をうける。

粒子の附加圧力損失に関しては Fig. 18 に示すごとく、同一空気速度、同一混合比の輸送条件において垂直管の方が水平管より ΔP_s は大きくなる傾向がある。

粒子分散状態は水平管の場合高さ方向

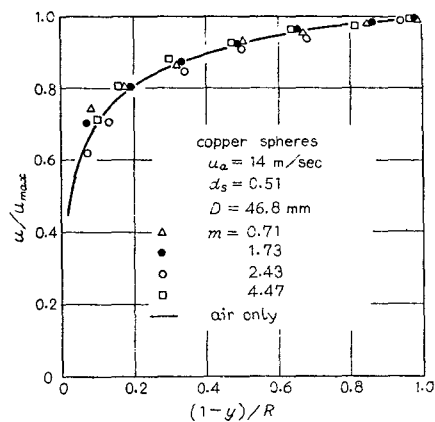


Fig. 17 Air velocity profiles in vertical transport

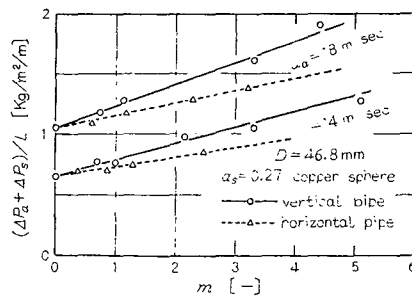


Fig. 18 Comparison of pressure drop for horizontal and vertical transport of copper spheres

に指数関数的に分布し、管軸には非対称となり混合比を高めて行くと、この非対称性は益々激しくなり管底に粒子が多くなる。これに対し垂直管の方は粒子の性状により管壁の方が濃い場合と、その逆の場合があるが、管軸に対して対称であり混合比を高めて行くと均一分散に近づく。空気速度分布に関しては、水平管では管軸に対し非対称となり、空気のみを流した場合の分布曲線を上方へずらせたような形となり、しかも粒子の径、粒子密度、混合比などによって影響を受ける。しかし垂直管にあっては管軸に対し対称で、上記の因子にほとんど影響されず、空気のみを流したときの分布にはば一致する。

第7章 固気系、固液系混相流動の比較

固気系混相流動に非常によく類似している混相流れに固液系混相流動がある。気体あるいは液体の一相流の流動を取扱う場合には気体と液体とでは密度および粘度の差はあるが一般には流れとしての相似則が成立ち、両者は圧縮性の大小の違いで区分されている。

混相流れにおいては、固気系では粒子の慣性力である程度粒子は気流と別個に動き得るのに対し、固液系では慣性力は液と粒子の抵抗力で減殺され粒子の動きは液の動きに従いやすくなるものと予想される。この二つの場合では色々と異なった流動機構を示すのは当然であろう。水平・垂直管のそれぞれについて、固気・固液系混相流れの圧力損失、流体速度分布、粒子の分散状態などについての比較検討を行ない、両者の違いを明らかにした。

第8章 輸送層型管状反応器の試作とそれによる石油系炭化水素の熱分解

前章までに得られた知見を石油化学工業の方面に応用せんがために輸送層型管状反応器を試作し、石油の重質油の熱分解を行なった。すなわち石油類の熱分解に際して管壁に沈積する炭素質を、混相流における粒子と管壁の激しい衝突を利用して除去排出しようというものである。原料としては灯油、軽油ならびに軽油とA重油との混合物を用い、温度650～770℃の範囲で運転し、(1)析出炭素質は固体粒子によって連続的に系外に排出され、重質石油留分の分解は支障なく行なわれる。(2)炭素質析出を抑制するため従来のように原料油蒸気中に水蒸気を混入する必要はない。(3)重質石油留分を本反応器で分解するときのガス化率および気体生成物組成はいづれも現在工業的に行なわれているナフサ分解の場合とほぼ同じである。(4)反応管出口温度が高い場合の液状生成物はほとんど純粋に芳香族炭化水素のみからなる。したがってこのものから必要成分を分離することは容易であり合成化学用粗原料として役立たせることが出来る。などの結果を得た。

第 9 章

結論として本論文を要約し第 3 章から第 8 章までの実験結果を総括した。

審 査 結 果 の 要 旨

固気系混相流動は化学工業において近年輸送操作のみならず反応操作あるいは気流乾燥などにも広く応用されてきている。特に輸送操作としては多方面に使用されており、これに関する研究も多い。しかしその研究の主体は動力算定のため圧力損失に関するものであり、しかもその結果が研究者によりかなり異なり、普遍的な結論は未だ得られていない。

本研究ではこのように実験結果が研究者により異なる原因を探求し、また単に圧力損失のみならず化学工業的見地から粒子の運動にも着目して流動機構を解明し、これを工業上に応用せんとしたものである。

本論文はこれらの研究結果をとりまとめたもので、全編9章からなっている。

第1章は緒論であり本研究の意図を明らかにしている。

第2章は実験装置について説明し、圧力損失、粒子速度、管内粒子分布および流体速度の測定法を述べ、従来法に較べ精度のある測定方法を確立した。

第3章は諸研究者によって得られた結果について比較考察し、固気混相流動に影響をおよぼす諸因子について詳細な実験的検討を行なったものである。

第4章では、前章で得た結果をもとにして実験条件を定め、水平管内における固気系混相流動をとりあつた。そして粒子速度および粒子付加圧力損失に関する実験式を示し粒子は高さ方向に指数関数的に分布していることを明白にした。さらに粒子付加圧力損失に対してはモデルを提案し解析した結果、粒子と管壁との衝突によるエネルギー損失が流子付加圧力損失の主因子であることを解明した。

第5章においては垂直管内における固気系混相流動をとりあつかい、水平管の場合と同様、粒子速度、付加圧力損失に関する実験式を提出した。

第6章においては第4章および第5章で明らかにした水平、垂直管内混相流動を比較し、空気流では同一に取扱えるこの二つの流れが、粒子付加の場合の流動においては全く異なる結果を示すことを指摘した。

第7章では本研究と併行して行なった固液系混相流動と比較検討し、両者の違いを明らかにした。

第8章では上述の知見を重質油の熱分解に応用し、輸送層型管状反応器を試作した。これはこの分野で問題となっている石油の重質溜分の熱分解の際、管壁への炭素質附着の問題の一解決策となり得るものである。実験の結果では炭素による閉塞の障害もなく、連続的に操業可能であることを示した。

第9章は総括である。

以上要するに本論文は固気系混相流動について理論的，実験的にすぐれた知見を得たもので，化学工学に寄与するとともに石油化学工業への応用を可能にした点においてすぐれたものである。

よって，本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。