

氏名(本籍) 都 田 昌 之 (宮城県)

学位の種類 工 学 博 士

学位記番号 工 博 第 2 9 8 号

学位授与年月日 昭和 4 6 月 3 月 2 5 日

学位授与の要件 学位規則第 5 条第 1 項該当

研究科専門課程 東北大学大学院工学研究科
(博士課程) 化学工学専攻

学位論文題目 固液混相流動に関する研究

(主査)

論文審査委員 教授 前田 四郎 教授 梅屋 薫

教授 大谷 茂盛 教授 斎藤正三郎

論 文 内 容 要 旨

化学工業において固液混相流動は単に輸送操作としてのみならず、固体と流体との接触操作としての応用も考えられるが、従来迄のこの種の研究は輸送動力の算定に必要な水平、垂直管における圧力損失に関するものが多く、流動機構については現象の複雑さのためか未だ普遍的なものは得られていない。

本研究は粗粒子系固液混相流動の水平、垂直管ならびに曲り管における圧力損失について詳細な検討を加えると同時に、混相流中の粒子速度、粒子分散状態、流体の速度分布などの測定を行ない、化学工学的立場から混相流の流動機構を解明することを目的としたものである。

本論文は粗粒子系固液混相流動についてまとめたものであり、8章からなっている。

第1章は緒論であり、本研究の目的を述べ、既往の諸家の研究について概説した。

第2章では本研究に用いた水平、垂直管および曲り管（水平曲り管と水平から立ち上がる鉛直曲り管）の実験装置を説明し、流量、供給粒子濃度、管内粒子濃度、圧力損失、流体の速度分布、粒子分散状態および粒子速度などに関する諸測定方法について検討し、測定方法が信頼性の高いものであることを示した。

第3章では水平、垂直管および曲り管における流動状態について検討を加えた。

水平管の場合、流動状態は重力、供給粒子濃度、粒子の物理的性質（粒径、比重、形状、終末速度など）の影響を多分に受けるが、混相流の平均流速の増加に伴って流動状態は大別すると固定層→摺動層→不均一浮遊層の三形態を示しながら変化する。

垂直管の場合、粒子の分散される方向が重力方向と直角であるため水平管ほど流動状態は複雑ではないが、混相流の平均流速の増加に伴って粒子は流速の速い管中央に集められて輸送される。しかし、比重の小さいポリスチレン粒子においては流速に関係なく粒子は管内にほぼ均一に分散されて輸送される。

水平曲り管の場合、低流速（1.5 [m/s]以下）において粒子は管壁に沿って曲りの外側から内側に流れこむ流体の二次流の影響を強く受け、曲りの内側方向に巻き上げられながら輸送される。この傾向は曲率半径が小さくなるに従って顕著になる。一方高流速では粒子に働く遠心力が大きくなり、殆ど多くの粒子は曲りの外周壁に沿って輸送される。

鉛直曲り管（水平から立ち上がる曲り管）の場合、重力、遠心力の影響が強く粒子は主として曲りの外周壁に沿って輸送されるが、流速が遅い程曲り管の出口付近において二次流の影響が現われ粒子は管内に分散される。また、垂直管における管内粒子濃度の時間的変動を光導電硫化カドミウムセルを用いて捕え、管内濃度の時間的変動が全くランダムなものではなく周期性を持つことを明らかにした。

第4章は水平、垂直管の圧力損失について述べている。

水平管の場合は簡単なモデルを提案し圧力損失機構について検討を加え、水平管の全圧力損失（ $\Delta P_T/L$ ）が、(1)管壁と水との摩擦による圧力損失、(2)粒子を浮遊させるに必要な圧力損失、(3)粒子と管壁との摩擦による圧力損失の和として次式で表わされることを示した。

$$\frac{\Delta P_T}{L} = \frac{2f_w \bar{U}_w^2}{gD} + \frac{1}{\pi D} + (1-k) m_T \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right) f_s + k m_T \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right) \frac{U_T}{U_w}$$

ここで、 D ：管径、 f_w, f_s ：それぞれ管壁と流体および粒子との摩擦係数、 g ：重力の加速度、

k : 全粒子に対する浮遊している粒子の割合, l_w : 長辺長, m_T : 管内粒子濃度, U_T : 終末速度
 \bar{u}_w : 混相流中の流体の速度, ρ_w, ρ_B : それぞれ流体, 固体の密度。

さらに, Durand によって得られた実験式の無次元項の物理的意味を明らかにし次の実験式を得た。

$$\frac{\Delta P_T - \Delta P_W}{m_c \cdot \Delta P_W} = 6.1 \left\{ \frac{\sqrt{C_D} \cdot \bar{u}_m^2}{gD (\rho_B / \rho_w - 1)} \right\}^{-1.2}$$

ここで, ΔP_W : 水みの圧力損失, C_D : 流体抗力係数, \bar{u}_m : 混相流の平均流速。

垂直管の場合, 全圧力損失 ($\Delta P_T / L$) が管壁と水との摩擦による圧力損失と粒子ホールドアップ (粒子を浮遊させるに必要な圧力損失と流体が粒子に与えるポテンシャルエネルギーによる圧力損失との和) との和として次式により表わされる。

$$\frac{\Delta P_T}{L} = \frac{2f_w \bar{u}_w^2}{gD} + m_T (\rho_B / \rho_w - 1)$$

水平曲り管の場合, 終末速度の小さいポリスチレン粒子においては供給粒子濃度 m_c が 20 [vol. %] 以上の時でさえ水平管と同様, 曲り管の圧力損失 ΔP_{BmH} に粒子付加による影響が見られず, 水みの曲り管の圧力損失 ΔP_{BW} に一致する。一方終末速度の大きいガラス粒子の場合, 粒子付加圧力損失 ($\Delta P_{BmH} = \Delta P_{BmH} - \Delta P_{BW}$) は供給粒子濃度 m_c の増加と共に増大するが, 混相流の平均流速 \bar{u}_m によらずほぼ一定の値を示す。また, 曲率半径 $R = 0$ [cm] および 1.2 [cm] で粒径 0.99 [mm] のガラス粒子の場合に限って粒子付加圧力損失がみられない特異な現象が見られる。さらに水平曲り管における粒子付加圧力損失は m_c と $\bar{u}_m^2 / gR (\rho_B / \rho_w - 1)$ の無次元項により関係付けられ, 次の実験式を得た。

$$\frac{\Delta P_{BmH} - \Delta P_{BW}}{\Delta P_{BW}} = 4.4 \left\{ \frac{\bar{u}_m^2}{gR (\rho_B / \rho_w - 1)} \right\}^{-0.65} \cdot m_c^{1.04}$$

ただし, $d_B = 0.99, 1.89$ [mm] (ガラス粒子)

$$R = 24, 48$$
 [cm]

鉛直曲り管の場合, ポリスチレン粒子およびガラス粒子共に粒子付加圧力損失は供給粒子濃度 m_c の増加とともに増大するが, 混相流の平均流速 \bar{u}_m によらずほぼ一定の値を示す。この傾向は水平曲り管の場合と同様である。また粒子付加圧力損失と水みの圧力損失との比が m_c と $\bar{u}_m^2 / gR (\rho_B / \rho_w - 1)$ の関数であることが判った。なお, 曲り管を含む管路の圧力損失は曲率半径が大きくなるほど小さくなるが, 曲率半径によるその差異は小さい。

第5章においては水平, 垂直管の流体の速度分布について検討している。

水平管における流体の速度分布は管軸に対して非対称であり、固定層が形成された場合粒子層表面に大きな速度勾配が存在し、また浮遊粒子を伴った摺動層内の流体の速度分布は一樣であるが、粒子浮遊層に大きな速度勾配が存在するのが観測された。一方、垂直管における流体の速度分布は管軸に対して対称であり、高流速においては供給粒子濃度が5〔vol. %〕以下の場合流体の速度分布は水のみの場合と一致する。しかし、低流速においては流体の速度分布が一樣流のそれに近づく傾向があることが認められた。

第6章においては単一粒子速度ならびに混相流中の粒子速度について述べている。

水平管における単一粒子の速度は平均流速 \bar{U}_w よりも常に小さいが、垂直管の場合には粒速が大きくなるに従って流体の平均流速よりも大きくなる。この傾向は混相流中における粒子速度のそれと同様である。また、垂直管における単一粒子速度の実験式として次式を得た。

$$\left(1.23 - \frac{U_g}{\bar{U}_w}\right) = 1.03 \left(\frac{d_g}{D}\right)^{0.18} \left(\frac{gD}{\bar{U}_w^2}\right)^{0.43} (\rho_g/\rho_w - 1)^{0.45}$$

混相流中の粒子速度は水平曲り管では水平直管よりも速く、鉛直曲り管においては水平管、曲り管、垂直管の順に速くなる。さらに、粒子速度、流動状態の観察結果から水平曲り管および鉛直曲り管は管路の閉塞現象の直接的大きな原因とはなり得ない。

第7章では水平、垂直管の粒子分散状態について検討を行なっている。

粒子分散状態の測定は粒子同志の相互作用が比較的少ないと考えられる供給粒子濃度が1〔vol. %〕以下を対象として行なった。

水平管の場合、終末速度の小さいポリスチレン粒子においては管底にやや粒子が多いものの粒子は管内にほぼ均一に分散され、この分布形は流速によらずほぼ一定である。一方終末速度の大きいガラス粒子の場合には、殆どの粒子が管底に存在する。また、擬似乱数を応用して乱流の模擬を行ない管壁と粒子との反発を考慮して単一粒子の運動方程式の数値解析を試みた結果、濃度の小さい場合、粒子分散状態を決定する粒子浮遊飛行の一原因として、粒子と管壁との反発および管径方向に変動する乱流変動の速度成分が考えられることを明らかにした。

垂直管においては終末速度の小さいポリスチレン粒子の場合・流速によらずほぼ均一に管内に粒子は分散される。一方、ガラス粒子および砂粒子の場合には低流速において粒子は管壁付近に多く管中心部に少ない所謂リング状の分布を示すが、流速の増加に伴って粒子は管中心部に多く分布する傾向にある。また、擬似乱数を用いて管径方向の乱流変動成分の模擬を行ない、マルコフ過程を応用して高流速における粒子分散状態の模擬を行なった結果、流速が速くなるに従って粒子が管中央部に集まる一原因として管径方向の乱流変動成分が考えられ得ることを明らかにした。

第8章は以上の結果を総括した。

審査結果の要旨

化学工業において固液混相流動は単に輸送操作としてのみならず、接触操作としての応用も考えられるが、従来までのこの種の研究は水平、垂直管における輸送動力の算定に必要な圧力損失に関するものが多く、流動機構については現象の複雑さのため未だ普遍的な結果は得られていない。

本研究は水平、垂直管ならびに曲り管における圧力損失について詳細な検討を加えると同時に、混相流の流動機構を解明することを目的としたもので、粗粒子系固液混相流動についてまとめたものであり、8章からなっている。

第1章は緒論であり、本研究の目的を述べ、既往の研究について概説している。

第2章では、本研究に用いた水平、垂直管および曲り管の実験装置を説明し、管内粒子濃度、圧力損失、流体の速度分布、粒子分散状態および粒子速度などに関する測定方法について検討し、測定操作が信頼性の高いものであることを示している。

第3章では、水平、垂直管および曲り管における流動状態の差異について検討を加えると同時に、垂直管における管内濃度の時間的変動を捕え、統計的方法により考察を加えている。

第4章は圧力損失について述べている。すなわち水平管の場合は、簡単なモデルを提案し圧力損失機構について検討すると同時に、粗粒子系混相流に関する Durand の実験式の無次元項の物理的意味を明確にした。それに対して垂直管の場合は、単に粒子ホールドアップによるエネルギー損失が粒子付加圧力損失の主因子であることを示した。曲り管の場合は、圧力損失が供給粒子濃度と曲率半径 R を代表長さにとったフルード数により整理出来ることを示した。

第5章においては、水平、垂直管における流体の速度分布について比較検討を行なっている。

第6章では、水平、垂直管における粒子の挙動とその速度について比較検討を行なった。更に、曲り管の粒子速度を捕え直管路のそれと比較検討すると同時に、曲り管における粒子の挙動を単一粒子の運動方程式の数値解析から求め、曲り流れに発生する二次流が粒子の挙動に大きな影響を与えることを明らかにした。

第7章では、水平、垂直管の粒子分布について述べると共に、一様乱数を応用して乱流成分を模擬し、粒子分布に与える乱れの影響について検討を加えた。

第8章は以上の結果を総括した。

以上要するに本論文は、固液混相流動に関する系統的な研究により混相流動の諸問題を解析し、理論的、実験的にすぐれた知見を得たもので、化学工学ならびに化学工業に寄与するところが少なくない。

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。