



研究ノート

固気二相流における無次元数

森 川 敬 信*

1. はじめに

日本機械学会誌の毎年の特集「機械工学年鑑」では、流体力学分野を最近では

- (1) 非圧縮流れ
- (2) 圧縮流れ
- (3) 混相流
- (4) キャピテーション
- (5) 流体機械要素
- (6) 非ニュートン流体
- (7) 電磁流体・希薄気体
- (8) 流体計測

に分けている。(3)の混相流は、さらに

- (i) 固液二相流
- (ii) 固気二相流
- (iii) 気液二相流

に分類されている。筆者の研究分野は、この中の固気二相流に属し、1940年代の後半以降に、研究が飛躍的に盛んになった。現在では、流体力学の一領域としての体系化のための研究と、工業の諸分野で対象となる固体粒子の空気輸送に直接に関連のある現象を取扱うので、実際の輸送装置の設計指針を得るための研究とに大別できる。

2. 流動状態の多様性

管の中で気流とともに流れる固体粒子の流動状態は多様である。それを分類して示す一方法は、図1の表わし方である。縦軸には、管の単位長さについての圧力降下 $\Delta p / \Delta l$ 、横軸には気流の平均速度 v を選んであり、パラメータとして、固体粒子と気体の単位時間の質量流量

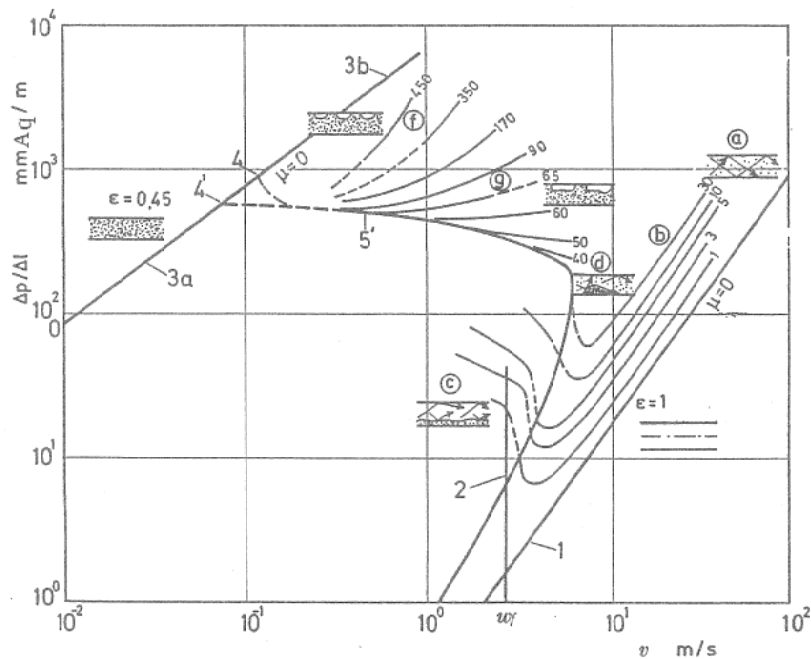


図1. 水平管内固気二相流の流動様式
(管径: 10mm, 粒子平均直径350 μ m)

*森川敬信 (Yoshinobu MORIKAWA), 大阪大学, 工学部, 産業機械工学科, 教授, 工学博士, 機械工学

比, いわゆる混合比がとられている. 図の中の④～⑤の相互に相異なる流動様式を, 同一に取扱うことはできないので, ここではこれらのうち, 浮遊流れと呼ばれる, 1, 2両曲線の間の領域に限定して記してみる.

3. 流体现象と無次元数

流体の諸現象を取扱う場合に, 無次元数がよく用いられる. これは流体现象の力学的相似性を考える上で, きわめて重要であり, レイノルズ数は最もよく用いられる無次元数である.

固気二相流の分野においても, 研究の初期には, レイノルズ数が用いられたけれども, 満足な結果は得られず, 早くからその現象に関連する適切な無次元数を見つける必要性が感じられていた. 現象に関係のある諸因子を機械的に組合わせてみれば, 種々の無次元数を作ることができるが, それらのうち, 固気二相流の領域で, 定着して用いられるようになったのは, フルード数である. ただしその定義は一義的でなく, 現象によって異なった定義を採用するところに取扱いの妙がある.

固気二相流の直管内の定速流れにおいて, 固体粒子のために付加される圧力降下 ΔP_K を

$$\Delta P_K = \lambda_K \frac{\Delta l}{d} \frac{\rho_L}{2} v^2 \quad (1)$$

ただし, d : 管の内径, ρ_L : 気体密度で表わし, 固体粒子の平均速度 c を用いて定義したフルード数

$$Fr^* = c / \sqrt{gd} \quad (2)$$

ただし, g : 重力の加速度

と, 式(1)の係数 λ_K の関係を求めると, 図2が得られる. この図には, 鉛直管の内径を, 5, 10, 20cm, 固体粒子の平均直径を1~7.6mm, その密度を1070~7850kg/m³のように, 広範囲に変化させて行った測定値が用いられている. この図は, 管の内径, 固体粒子の特性ならびに混合比に関係なく, λ_K が一つの曲線で与えられ, 縦軸と横軸の量の間に, 明瞭な関数関係のあることを示している. 水平管, 傾斜管についても, 全く同じ取扱いをすることができる. 定速部においては, 固体粒子の平均速度と気流平均速度との間には, 次に示すように, 一定の関

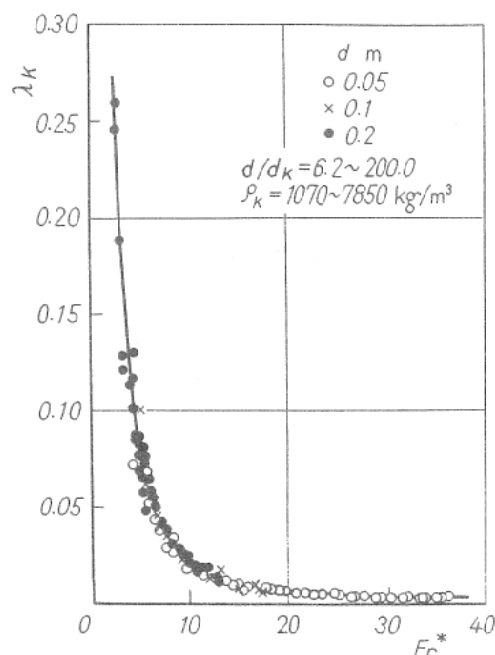


図2. 鉛直管における λ_K と Fr^* の関係

係があるが, 図2の Fr^* のかわりに, 気流の平均速度を用いて定義したフルード数

$$Fr = v / \sqrt{gd} \quad (3)$$

を用いる場合, 満天の星のようにプロットが散らばり, 図2のような関数関係を明らかにすることはできない.

固体粒子と管壁との間の摩擦応力 τ_s は, 固体粒子の慣性に比例するものと考え,

$$\tau_s = \frac{1}{2} \rho_{KFO} c^2 \frac{\lambda_z^*}{4} \quad (4)$$

ただし, ρ_{KFO} : 固体粒子群の分散密度で与えられる. 比例定数 λ_z^* は, 固体粒子の種類と管の材質との組合せによって定まる定数と仮定されてきた. さきに用いた鉛直管の実験結果を用いて, λ_z^* は Fr^* , μ に無関係に, それぞれの固体粒子と管の材質の組合せに対して一定値となり, 仮定の正しかったことが証明された.

固体粒子の平均速度は, 鉛直管の定速流れにおいて, 理論的に

$$\frac{c}{v} = \frac{1 - \frac{Fr_f}{Fr} \sqrt{1 + \frac{\lambda_z^*}{2} (Fr^2 - Fr_f^2)}}{1 - \frac{\lambda_z^*}{2} Fr_f^2} \quad (5)$$

で求めることができる. 式の中の Fr_f は, 固体粒子の浮遊速度 W_f を用いて定義したフルード

数

$$Fr_f = w_f / \sqrt{gd} \quad (6)$$

である。上に述べた λ_z^* の値を用いて、式(5)から得られる c/v と、実験から得られる c/v とを比較すれば、図3のように、きわめてよい一致を示すことがわかる。なお、図3の横軸には、 W_f/v をとってあるが、これは Fr_f/Fr と同じである。

4. おわりに

与えられた紙数に限りがあるので、無次元数に限定して、固気二相流の取扱いの一端を紹介した。本文に示したように、フルード数を適切に選ぶことによって、複雑な固気二相流の特性に関して、種々の関数関係を簡明に表わすことができる。

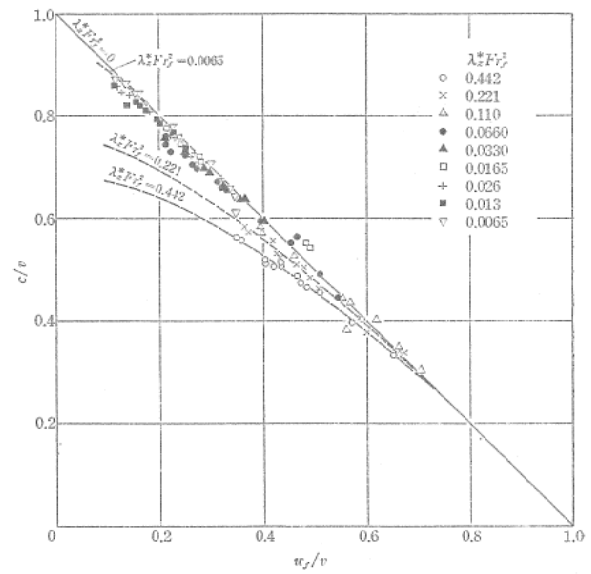


図3. 速度比

