鉛直管内固気二相流の閉そく限界

— J. Flatow のデータについての分析 —

Critical Velocity of Air-Solid Two-Phase Flow in Vertical Pipe

— Further Consideration about the Data of J. Flatow —

森 川 敬 信* 杉 田 尚 弘*

Yoshinobu MORIKAWA, Naohiro SUGITA

Key Words : Air-Solid Two-Phase Flow, Vertical Pneumatic Conveying, Critical Velocity

1. まえがき

管内の固気二相流について、閉そく限界を取扱った研究は、水平管を対象として行われたものが多く¹⁻¹³⁾、また気流速度の小さい領域において、固体粒子群の不安定流動を取扱った研究も、水平管の場合に多く見られる^{9, 14-16)}。それに対して、鉛直管の場合には、一般に気流速度が固体粒子の浮遊速度よりも大きければよいというおおまかな目安があるためか、閉そく限界についての研究は、水平管の場合よりも少なく^{3, 4, 17-19)}、また固体粒子群の不安定流動についての研究も少ない²⁰⁻²²⁾。

閉そく限界には、用いた送風機や圧縮機特性、実験装置などが関与するので、個々の装置で得られた測定値を、そのまま他の場合に適用できないこともあり、すべての測定値を統一して表わすことは難しいといわれている。しかし閉そく限界は実用面において、空気輸送装置の計画や設計に際して、有用な値であることにかわりない。鉛直管内の閉そく限界に対して、現時点において利用できる測定値はきわめて少ないが^{4, 18)}、ここでは主として文献 18) の測定値を用いて考察を試みた。

2. 閉そく限界の定義

鉛直管内の固気二相流において、気流速度が減少すれば、固体粒子に働く空気力は、粒子に働く重力や摩

擦力に打ち勝つことができなくなり、定常な浮遊輸送の状態が破れ、不安定な流れに移行し、遂には管路は閉そくするに至る。本資料を作成するにあたって、主として使用するのは、粗い固体粒子の特性と管の内径を変化させて行った実験の測定値¹⁸⁾である。閉そく限界の定義は研究者によって多少の相違があり、厳密には必ずしも一定していない。この実験¹⁸⁾においては、定常な浮遊輸送がくずれ始める直前の気流速度 v_s を、閉そく限界としている。この速度 v_s は、圧力降下が最小になるときの気流速度よりも大きい¹⁸⁾。

3. 測定結果に対する考察

3.1 固体粒子および管径

文献 18) においては、表 1 に示す固体粒子と鋼管管径が実験に用いられた。この実験において用いられた空気源は遠心送風機である。また文献 4) では、固体粒子として平均直径 $d_p = 4.2\text{mm}$ 、浮遊速度 $w_f = 9.7\text{m/s}$ の小麦、管径 $D = 125\text{mm}$ の鋼管が用いられた。この場合、実験に用いられた送風機の型式については明示されていない。

3.2 閉そく限界における粒子速度

2. において記したように、ここで取扱っている閉そく限界においては、固体粒子はまだたい積を開始していないと考えられるので、そのときの粒子速度 c を

$$\frac{c/v_s}{\{1 - (c/v_s)\}^2} = \frac{g v_s G_p \Delta l}{F w_f^2 (\Delta p - \Delta p_f)} \quad (1)$$

によって求めてみる。上式⁵⁾において、 F : 管の断面積、 Δl : 管の長さ、 Δp : 二相流の直管部の全圧力損失、 Δp_f : 気体単相流の圧力損失である。また固体粒子の質

平成 3 年 3 月 8 日受付

* 大阪産業大学工学部交通機械工学科

(〒574 大東市中垣内 3-1-1) TEL 0720-75-3001 内線 3417

表 1 実験に用いた粒子および管(鉛直管)¹⁸⁾

	a ルピナス	b とうもろ こし	c 小 麦	d ポリスチレンペ 小	e ポリスチレンペ 中	f ポリスチレンペ 大	g 鋼 球	h ガラス球
粒子の平均直径 d_p (mm)	6.11	7.6	3.6	1.0	1.66	2.7	1.13	1.21
粒子の密度 ρ_p (kg/m ³)	1363	1399	1422	1070	1070	1070	7850	2990
浮遊速度 w_f (m/s)	11.3	10.7	7.8	3.5	4.8	6.3	12.0	7.8
管の内径 D (mm)	100		200					

図 1 速度比の値

図 2 v_s/w_f と μ の関係

量流量 G_p と気体質量流量 G_f との比

$$\mu = G_p / G_f \quad (2)$$

によって混合比を定義する。

式(1)によって得られた粒子速度 c は、閉そく限界の気流速度 v_s との間に図 1 のような関係を示す。図中のアルファベットの記号は、表 1 中のそれに対応している。図は固体粒子の浮遊速度をパラメータとして表してあって、管径と混合比にかかわらず、 c と v_s は直線関係にあって、浮遊速度が大きいほど、この直線は右に平行に移動している。図において

$$c/v_s \approx 0.3 \sim 0.6 \quad (3)$$

であり、気流速度が十分に大きい領域の c/v の値²³⁾ よりも小さくなっている。

3.3 v_s/w_f と μ の関係

v_s/w_f と μ の関係を、 w_f をパラメータとして各固体粒子ごとに表せば、図 2 が得られる。図によれば、 v_s/w_f は 1 より大きい値をとり、各固体粒子ごとに、混合比の増加とともに大きくなる。浮遊速度の小さい固体粒子の場合は、浮遊速度の大きい固体粒子の場合よりも、同一の混合比に対して、 v_s/w_f の値が大きくなる傾向が示されている。しかし $D=0.1$ m および $D=0.2$ m のいずれの場合にも、取扱われた固体粒子のうち¹⁸⁾、浮遊速度の大きい 3 粒子に限って、この傾向が破られている。また固体粒子 c と h は浮遊速度が同じであるにもかかわらず、異なった線上に位置している。たい積

を生じ始める直前の、気流速度の小さい領域において、浮遊速度が同じであっても、粒子形の著しい相違が、図 2 の c、h 二つの線としてあらわれる原因となっているのかどうかについては、少ない測定値のもとでは結論しにくい。

3.4 フルード数と混合比の関係

気流速度 v_s を用いて、

$$Fr_s = v_s / \sqrt{gD} \quad (4)$$

によって、フルード数を定義する。この Fr_s と、 v_s に対応する混合比 μ との関係は図 3 のようになる。図によれば、 $D=0.1$ m と $D=0.2$ m の場合に対して、浮遊速度ごとに一つの曲線が得られ、浮遊速度が大きいほど、曲線は右へ移動する。図 2 の場合と同様に、 $D=0.1$ m

図 3 フルード数と混合比の関係

と $D = 0.2\text{m}$ における固体粒子 c は、同じ浮遊速度をもつ固体粒子 h とは、異なった位置を占めている。なお、図には文献 4) における測定値から得られる関係も鎖線で示されている。この場合の固体粒子は c と同じ粒子であって、ある範囲において c 曲線と合っている。

4. あとがき

鉛直管内固気二相流の閉そく限界について、本資料で取扱った測定値の範囲内では、次のような考察結果が得られる。

(1) 速度比の値は、気流速度の大きい定速部におけ

る値よりも小さい。

(2) 閉そくを生じさせないためには、気流速度と固体粒子の浮遊速度との比の値は、当然 1 より大きいことが必要であるが、その比の値は混合比とともに大きくなる。

(3) 閉そく限界におけるフルード数と混合比との間に、一定の関係がある。

しかし 1. において記したように、鉛直管内の粗い粒子の閉そく限界についての実験結果はあまりにも少ないので、今後測定値が多く示されるようになれば、ここで取扱った内容をさらに検討する必要がある。

引用文献

- 1) Segler, G. : Dissertation, TH München(1934)
- 2) Barth, W. : *Chem.-Ing.-Tech.*, 26, 29(1954)
- 3) Zenz, F. A. : *Petroleum Refiner*, 36, 133(1957)
- 4) Günther, W. : Dissertation, TH Karlsruhe(1957)
- 5) Welschhof, G. : *VDI-Forsch.-Heft* 492(1962)
- 6) Flatow, J. and W. Siegel : *Crundl. Landtechn.*, 19, 125(1969)
- 7) Muschelknautz, E. and W. Krambrock : *Chem.-Ing.-Tech.*, 41, 1164(1969)
- 8) Siegel, W. : *VDI-Forsch.-Heft* 538(1970)
- 9) Rizk, F. : Dissertation, Univ. Karlsruhe(1973)
- 10) Matsumoto, S., M. Hara, S. Saito and S. Maeda : *Jour. Chem. Eng. Japan*, 7, 425(1974)
- 11) Matsumoto, S., S. Harada, S. Saito and S. Maeda : *Jour. Chem. Eng. Japan*, 8, 331(1975)
- 12) Matsumoto, S., M. Kikuta and S. Maeda : *Jour. Chem. Eng. Japan*, 10, 273(1977)
- 13) 渡辺敬三, 板垣喜春, 加藤 宏 : 機械学会論文集, 55, B, 25(1989)
- 14) Bohnet, M. : *VDI-Forsch. -Heft* 507(1965)
- 15) 辻 裕, 森川敬信, 三好真一, 中野裕介 : 機械学会論文集, 48, B, 656(1982)
- 16) Tsuji, Y. and Y. Morikawa : *Int. J. Multiphase Flow*, 8, 329 (1982)
- 17) Nagel, R. and R. Ibing : *Braunkohle, Wärme und Energie*, 2, 53 (1960)
- 18) Flatow, J. : *VDI-Forsch. -Heft* 555 (1973)
- 19) Leung, L. S. and R. J. Wiles : *Ind. Eng. Chem., Process Des. Dev.* 15, 552 (1976)
- 20) Leh, L. : *Chem. Eng. Progress*, 67, 58 (1971)
- 21) Yang, W. C. : *Pneumotransport* 3, Paper E5 (1976)
- 22) Leung, L. S. : *Powder Techn.*, 25, 185 (1980)
- 23) 森川敬信, Segler, G. and Hutt, W. : 化学工学, 42, 279 (1978)

英文誌の購読について

英文誌 (Advanced Powder Technology) 第 2 巻・第 2 号が発行されました。
会告欄 541 ページに目次を掲載しております。本英文誌の購読方法は本学会誌第 27 巻 (1990 年) 第 4 号 288 ページに案内してありますので御覧下さい。