エアレート時におけるオリフィスからの粉粒体の流出特性[†]

竹下 武成

静岡大学工学部 化学工学科^{††}

原田正臣・吉見英樹・山崎量平・神保元二

名古屋大学工学部 化学工学科^{†††}

低部にオリフィスを取り付けたスタンドパイプに空気を吹き込み、オリフィスから粉粒体を排出させる場合の流出特性を明らかにするため、二種類のガラスビーズを用いてオリフィスにおける空気圧降下と粉粒体排出量を測定した。

この結果、本実験の条件に対しても圧降下と粒子流量の関係はCrewdsonらの式によって表されることがわかった。さらに、この圧降下と粒子と空気の相対速度の関係はde Jongの式を修正したもので表され、実験値と一致することがわかった。そして、この二つの式から粒子流量と空気量との関係が得られ、操作条件の空気量から粉粒体排出量が予想できる。

緒 言

近年、諸工業においては複合化及び連続化が進み、特に粉粒体を扱う多くの化学プラントの中では、粒子循環系が注目されている。粒子循環系は移動層、流動層、高速流動層、気流層など様々な特性を持つ層から構成され、重質油の接触分解、ゴミ焼却、石炭のガス化など広く利用されている。

このような粒子循環系において、粒子循環速度の制御すなわち移動経路としてのスタンドパイプに設けたオリフィスやスライドバルブによる粒子の流量コントロールが最も重要である。しかし、スタンドパイプ内の流動及び操作メカニズムは、十分解明されておらず、その設計方法も経験に頼っている有様であり、基礎的な研究も十分とは言えない^{2,7,8)}。

そこで、本研究では低部にオリフィスを設けたスタンドパイプに空気を吹き込み、流出速度を変化させて、空気流量、オリフィス上下の圧力降下、粒子流量を測定し、その流出特性について調べた。これらの結果から、粒子流量とオリフィス上下の圧力降下との相関を検討し、また、その圧力降下とオリフィスにおける粒子とガスとの相対速度についても検討した。この関係から、操作条

件である空気流量と粒子流量との相関式が得られたので、ここに報告する。

1. 実験装置および方法

Fig. 1に示す実験装置はホッパー、内径60mmのスタンドパイプ、オリフィス、タンク、粒子受器等から成っている。Fig. 2にスタンドパイプ下端の見取図およびオリフィス、分散器の寸法図等を示す。実験方法はオリフィスの下部をストッパーで止め、ホッパー及びスタンドパイプ内に試料のガラスビーズを充填する。バルブV2を開けて空気を吹き込みタンク内を加圧した後、粒子を流し、オリフィスより6cm上部にある空気分散器より、スタンドパイプ内の粉粒体に流量 Q_a の空気を上向きに吹き込むと上部に抜ける空気と下部に抜ける空気があるが、本実験では下部に抜ける空気と粒子流量に置換される空気をタンクから流量 Q_d として抜く。そして、流れが定常になった後、空気流量 Q_a 、 Q_d はローターメーターで、粒子流量 W_s はインパクトフローメーターで、またオリフィス上下の圧力降下 $\Delta P (=P_0 - P_r)$ は差圧変換器を用いて測定する。さらにタンクの窓(200×300mm)を開け、タンク内を大気に開放する場合の実験を行い、 Q_a 、 W_s 、 ΔP を測定する。

なお、ガラスビーズの平均径などの実験条件はTable 1に示す。

† 1987年7月30日受理；粉体工学会春期研究発表会(大阪、1987年5月)にて発表

†† 〒432 浜松市城北3-5-1

††† 〒464 名古屋市千種区不老町

Fig. 1 Experimental apparatus

Fig. 2 Lower section of standpipe

2. 実験結果と考察

2.1 粒子流量とオリフィス前後の圧降下

粒子流量とオリフィス前後の圧降下の関係に対して、多数の研究があるが^{1,5,6)}、下記に示すホッパーの上部を加圧した場合のCrewdsonらの式に基づいて³⁾、本実験のタンクを閉じた場合を相関したものがFigs. 3, 4である。

$$\frac{W_s^2}{D_0^4} = C \left(\frac{\pi}{4} \right)^2 \rho_s^2 \left(g \lambda + \frac{4P}{\rho_s} \right) \quad (1)$$

ここで、 $\lambda = \alpha D_0$ である。

Eq.(1)を用いて、流れが関欠流や脈動流になるものを除いた実測値から W_s^2 / D_0^4 と ΔP のグラフを作り、最小二乗法によって直線を求め、その傾きと切片から C, α を求め、さらにそれぞれの粒子径に対し C と α の平均値を

Table 1 Experimental condition

Particle adiameter	d_p [μm]	100, 150
Orifice diameter	D_0 [mm]	6, 8, 10, 12
Air rate of aeration	Q_u [m^3/s]	$0 \sim 3.39 \times 10^{-5}$
Air rate of evacuation	Q_d [m^3/s]	$0 \sim 3.30 \times 10^{-5}$

Fig. 3 Relation between flow rate of particles and gas pressure drop at orifice (tank close)

Fig. 4 Relation between flow rate of particles and gas pressure drop at orifice (tank close)

求めると

$$d_p = 100 \mu\text{m}, C = 0.397 (\sigma = 0.0341),$$

$$\alpha = 0.694 (\sigma = 0.0301)$$

$$d_p = 150 \mu\text{m}, C = 0.372 (\sigma = 0.0270),$$

$$\alpha = 0.622 (\sigma = 0.0634)$$

となる。ここで σ は標準偏差である。Figs. 3, 4 に示す実

Fig. 5 Relation between flow rate of particles and gas pressure drop at orifice (tank open)

線はこの値を使って計算したもので実測値とはほぼ一致していると考えられるが、粒子径によって C, α が異なることと実測値と計算値の一致性において $dp = 150 \mu\text{m}$ に比べて $dp = 100 \mu\text{m}$ の方が悪いのは、湿度などによってもたらされる粒子同志および粒子・壁間の付着力などの物性による影響を小さな粒子径ほど受け易いためと考えられる。

Figs. 3, 4における圧降下 ΔP の負領域においては、測定値は計算値の実線から外れている。これは、この領域ではオリフィスでの粒子の流れが脈動流や間欠流になるため、圧降下の正領域と定常流に基いて考えられたCrewdsonらの式に合わない。

次にタンクを大気へ開放した場合をFig. 5に示す。これは粒子径 $dp = 150 \mu\text{m}$ の場合であり、先ほどと同じようにCrewdsonらの式で相関でき、 C, α についての平均値を求めるとタンクを閉じた場合とほぼ同じとなった。この平均値を用いて求めたのが図中の実線であり、ほとんどの測定値において圧降下 ΔP が正領域であるため、ほぼ測定値を満足していると思われる。

2.2 オリフィス部での相対速度と圧降下

オリフィス前後の空気圧降下 ΔP とオリフィスを通る空気と粒子の相対速度 ($u_0 - v_0$) との関係について de Jongらは次式を提出している⁴⁾。

$$\Delta P = k_1 (u_0 - v_0) r_0 \quad (2)$$

ここで

$$k_1 = 150 \frac{\mu}{(\phi_s \cdot d_p)^2} \left(\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \right)^2, \quad r_0 = \frac{D_0}{2}$$

そこで、タンクを閉じた場合のオリフィス部での u_0 , v_0 を考えると次式で表される。

Fig. 6 Relation between slip velocity and gas pressure at orifice

$$u_0 = \frac{(Q_d - \frac{W_s}{\rho_s})}{\varepsilon A_0} \quad (3)$$

$$v_0 = \frac{W_s}{\rho_s A_0 (1-\varepsilon)} \quad (4)$$

Eqs. (2), (3), (4) から次式がえられる。

$$\Delta P = \frac{k_1 \left[Q_d - \frac{W_s}{\rho_s (1-\varepsilon)} \right] r_0}{\varepsilon A_0} \quad (5)$$

また、タンクを開放した場合は次式となる。

$$\Delta P = k_1 \left(\frac{Q_u}{\varepsilon A_0} \right) r_0 \quad (6)$$

ここで、 $u'_0 = Q_u / \varepsilon A_0$ とおく。

Eqs. (5), (6) における ε は実測できないので、Eqs. (5), (6) を用いて実測値と最も一致する ε を求めるとタンクを閉じた場合は $\varepsilon = 0.42$ 、タンクを開放した場合は $\varepsilon = 0.46$ となり、これらの値を用いてEqs. (5), (6) で計算したものがFig. 6の実線である。

タンクを閉じた場合とタンクを大気へ開放した場合とでは、空間率 ε の値が異なるのは、粒子流量の大きな違い、すなわちFig. 6における相対速度の大きな違いと考えられるが、理論的には今後の課題となる。

2.3 操作条件と粒子流量

タンクを閉じた場合には、Eq. (1) と Eq. (5) より次式が求められ、粒子流量を知ることができる。

$$W_s = \left[\frac{C \rho_s k_1 r_0 A_0}{\varepsilon} Q_d + \frac{C^2 k_1^2 r_0^2 A_0^2}{4 \varepsilon^2 (1-\varepsilon)^2} + C g \lambda \rho_s^2 A_0^2 \right]^{1/2} - \frac{C k_1 r_0 A_0}{2 \varepsilon (1-\varepsilon)} \quad (7)$$

Fig. 7 Relation between flow rate of particles and Q_d ($d_p=100\mu\text{m}$)

Fig. 8 Relation between flow rate of particles and Q_d ($d_p=150\mu\text{m}$)

Eq.(7) には、操作条件の一つとみられる Q_u が入っていないが、これは先に述べているようにオリフィスを通過する空気量で粒子流量がコントロールされるためである。

Figs. 7, 8 にこれらの関係の例を示す。図中の実線は先ほどの C, α, ε の値を用いて計算したものであり、実測値と良好な一致を示している。本実験の全範囲において実測値と Eq.(7) から求めた計算値とを比較したものが **Fig. 9** であり、Eq.(7) は $\pm 30\%$ の誤差で相関される。

また、タンクを開放した場合には、 Q_d を測定できないため、 Q_u が操作因子となり、Eqs.(1), (6) より次式が求められる。

$$W_s = \left[\frac{C \rho_s k_1 r_0 A_0}{\varepsilon} Q_u + C g \lambda \rho_s^2 A_0^2 \right]^{1/2} \quad (8)$$

本実験ではオリフィスから 60mm の近い所に吹き込み口があるので、 Q_u はすべてオリフィスを通して排出されると考えられる。この場合も先ほど求めた C, α, ε を用いて、Eq.(8) より計算した値と実測値を比較すると **Fig. 10** となり、Eq.(8) は $\pm 30\%$ の誤差で相関される。

結 言

本実験範囲内で次のことがわかった。

Fig. 9 W_s cal. vs. W_s obs. (tank close)

Fig. 10 W_s cal. vs. W_s obs. (tank open)

(1) オリフィス下部のタンクを加圧するという条件下においても、粒子流量とオリフィス上下の圧降下の関係は、ホッパーの上部を加圧した場合の Crewdson らの式で表すことができる。

(2) オリフィスにおける圧降下と相対速度の関係は、de Jong らの式を基に提案した式で表すことができる。

(3) Crewdson らの式と de Jong らの式を組み合わせることで、タンクを閉じた場合の操作因子 Q_d と粒子流量との相関式を示した。

(4) タンクを大気開放した場合においても、上述と同じ方法で操作因子 Q_u と粒子流量との相関を明らかにした。

Nomenclature

A_0	= cross-sectional area of orifice	[m^2]
D_0	= orifice diameter	[mm]
d_p	= particle diameter	[μm]

g = acceleration due to gravity	[m/s ²]
ΔP = gas pressure drop at orifice	[Pa]
Q_d = air rate of evacuation	[m ³ /s]
Q_u = air rate of aeration	[m ³ /s]
r_0 = orifice radius	[m]
u_0 = gas velocity at orifice (tank close)	[m/s]
u_0' = gas velocity at orifice (tank open)	[m/s]
v_0 = particle velocity at orifice	[m/s]
W_s = flow rate of particles	[kg/s]
ε = voidage	[-]
μ = air viscosity	[Pa·s]
ρ_s = particle density	[kg/m ³]
ϕ_s = sphericity	[-]

Literature cited

- 1) Carleton, A.J.: *Powder Technol.*, **6**, 91 (1972)
- 2) Chen, Y.M., S. Rangachari and R. Jackson : *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, **23**, 354 (1984)
- 3) Crewdson, B.J., A.L Ormond and R.M.Nedderman: *Powder Technol.*, **21**, 245 (1977)
- 4) de Jong, J.A.H. and Q.H.J.J.M. Hoelcri : *ibid.*, **12**, 201 (1975)
- 5) Holland, J., J.E.P. Miller, C. Schofield and C.A. Shook : *Trans. Inst. Chem. Eng.*, **47**, 154 (1969)
- 6) Leung, L.S., P.J.Jones and T.M.Knowlton: *Powder Technol.*, **19**, 7 (1978)
- 7) Leung L.S. and P.J. Jones: *ibid.*, **20**, 145 (1978)
- 8) Matsen, J.M.: *ibid.*, **7**, 93 (1973)

Characteristic of Aerated Granular Materials Discharging from an Orifice

Takenari Takeshita

Dept. of Chem. Eng., Shizuoka Univ., Hamamatsu 432

Masaomi Harada, Hideki Yoshimi, Ryohei Yamazaki
and Genji Jimbo

Dept. of Chem. Eng., Nagoya Univ., Nagoya 464

Key Words : Granular Materials, Aeration, Air Pressure, Slip Velocity, Orifice

To elucidate the characteristics of aerated granular materials discharging from an orifice installed at the bottom of a standpipe, experiments on pressure drop across the orifice and flow rate of particles were carried out.

It was found the equation by Crewdson *et al.* is applicable to correlate the discharge rate of particles with pressure drop across the orifice in this system. A relation between pressure drop and relative velocity of particles and interstitial air was newly proposed by modifying de Jong's equation and was found to agree with experimental data. Finally, it is concluded that the flow rate of particles as a function of air flow rate can be predicted with accuracy by combining these two relations.