エアレート時における オリフィス付きスタンドパイプからの粉粒体排出

竹下 武成,* 渥美 邦夫,* 神保 元二**

Discharge of Aerated Granular Materials from a Standpipe with an Orifice

by

Takenari TAKESHITA,[†] Kunio ATSUMI[†] and Genji JIMBO^{††}

Injecting air into a standpipe with an orifice, the aeration rate, the flow rate of granular materials and the air pressure distribution in the standpipe are measured. The relationship between the aeration rate and the flow rate of granular materials for different particle diameters, orifice diameters and the locations of air injection are examined, and the following conclusion is drawn.

The flow rate of granular materials can be adjusted by aeration. For air injection closer to the orifice and for a smaller particle diameter, a higher flow rate of granular materials can be expected. These relationships are explained by the modified de Jong's and Crewdson's equation, and the experimental data are correlated by a computable equation with an error of $\pm 30\%$, except for some of small particles for which these relationships are influenced by the adhesion of the particles. For small particles, these relationships are improved by aeration, but are insufficient.

Key Words : Standpipe, Aeration, Orifice, Granular Materials, Air Pressure

1. 緒 言

近年、化学工業におけるプロセス中で粉粒体原料の連続供給、輸送、排出に対する操作の難しさが指摘されている。特に微粉体を取り扱う際には、その集合体による物性の影響も加わって種々の問題点が生じる。粉粒体原料の連続供給、輸送、排出には、ホッパーおよびスタンドパイプがよく使われている。また粉粒体を用いる循環系装置ではスタンドパイプは重力やエア

レーションによって、低圧力から高圧力に対して粒子を移動させるために使われる。これらの最もよく知られている応用例は触媒による接触分解反応のプラントである。その際、スタンドパイプに空気を吹き込むことにより、比較的簡単に粉粒体の原料輸送量を変化させることが出来ることが、本研究室の過去の実験結果などから分かっているが^{1,2)}、空気吹き込み位置の影響についての基礎的研究はまだ十分でないのが現状である³⁾。

そこで、本研究では、スタンドパイプ側面から空気を吹き込み、粉粒体排出量、空気吹き込み量、パイプ内の空気圧分布を測定し、空気吹き込み量と粉粒体排出量の相関関係を各粒子径、オリフィス口径、特に吹き込み位置について求め、これらについて比較検討した。その結果、Crewdsonの理論を発展させた粉粒体排出量に関する推算式を得たので報告する。

平成元年3月23日受付

粉体工学会昭和63年度秋期研究発表会(1988年11月、東京)にて発表

* 静岡大学工学部化学工学科(〒432 浜松市城北3-5-1)
TEL 0534-71-1171 内線 411

** 名古屋大学工学部化学工学科(〒464 名古屋市千種区不老町)
TEL 052-781-5111

† Dept. of Chem. Eng., Shizuoka University, 3-5-1
Johoku, Hamamatsu-shi, 432

†† Dept. of Chem. Eng., Nagoya University, Furo-Cho,
Chikusa-ku, Nagoya 464

2. 実験装置および実験方法

実験装置の概略をFig.1に示す。装置はおもにサブホッパー①、メインホッパー②、アクリル製のスタンドパイプ⑥、黄銅製のオリフィス⑩および空気吹き込み系から成る。空気吹き込み系は、コンプレッサー⑨とローターメーター⑧から成り立っており、ビニール管によってエアージェクター④と結ばれている。

実験方法はスタンドパイプ下部にオリフィスをセッ
トし、このオリフィスにおける排出口を閉じ、サブホ
ッパー、メインホッパー、スタンドパイプに粒子を充
填する。排出口を開け粒子を排出させ、ローターメー
ターで空気吹き込み量を調節しながらコンプレッサー
によってエアージェクターから空気を吹き込む。
圧力測定用マノメーターを見てパイプ内の空気圧が一
定になったら、パイプ内の空気圧分布を測定し、同時
に粒子を一定時間捕集し、排出量を求める。

Fig. 1 Experimental apparatus

Table 1 Experimental conditions

Half angle of hopper	θ [°]	15
Orifice diameter	D_o [mm]	6, 8, 10, 12
Length of standpipe	L [m]	2.0
Inner diameter of standpipe	D [m]	0.0203
Position of aeration	L_a [m]	0.1, 0.7, 1.3, 1.9
Diameter of glass beads	d_p [μ m]	51, 85, 168, 508
Flow rate of aeration	O_{in} [m ³ /s]	$0 \sim 4 \times 10^{-4}$

Table 2 Characteristics of glass beads

Mean diameter	$d_p[\mu\text{m}]$	51	85	168	508
True density	$\rho_s[\text{kg/m}^3]$	2501	2519	2503	2539
Bulk density	$\rho_b[\text{kg/m}^3]$	1451	1461	1452	1473
Angles of repose	$\phi_r[\text{rad}]$	0.679	0.579	0.436	0.335

実験条件を**Table 1**に示す。また、使用したガラスビーズの物性値を**Table 2**に示す。

3. 実験結果および考察

3.1 空气压力

Fig.2 に $d_p=85\mu\text{m}$, $D_0=8\text{mm}$, $L_a=0.1, 0.7$, 1.3m の条件に対するスタンドパイプ内の空気の圧力分布を示す。スタンドパイプの両端の圧力が大気圧で、ほぼ直線的に変化して空気吹き込み位置で最大値になっている。したがって、充填層における圧力損失の理論を適用することが可能であると考えられる。また、 $d_p=51\mu\text{m}$ のとき以外は、同様の結果が得られた。

Fig. 3 に $d_p = 51 \mu\text{m}$, $D_0 = 8 \text{mm}$, $L_a = 0.1, 0.7$, 1.3m の場合を示す。大粒子と同様に最大値は空気吹き込み位置になっているが、圧力は曲線的に変化している。これは、小粒子になると、重力よりも流体抗力を大きく受けるので、吹き込み位置では粒子の流れを乱し易くなることと、付着力により粒子の流れ方向に空間率の分布ができるためと考えられる。

3.2 空間率

Fig.4 に示すようにスタンドパイプを空気吹き込み

Fig. 2 Air pressure distribution

Fig. 3 Air pressure distribution

Fig. 4 Air pressure and air flow in the standpipe

位置で上下二つに分けて考え、それぞれに Eq.(1) に示す Ergun の式を適用する。

$$\frac{\Delta P}{Z} = 150 \frac{(1-\epsilon)^2 \mu}{\epsilon^3 d_p^2} u + 1.75 \frac{(1-\epsilon) \rho}{\epsilon^3 d_p} u^2 \quad (1)$$

ここで ΔP は空気圧力損失、 Z は充填層の層高、 ϵ は空間率、 μ は空気の粘度、 u は空塔速度、 d_p は粒子径、 ρ は空気の密度である。

その際、空塔速度を相対速度に直し、圧力勾配 $\Delta P/Z$ 、粒子排出量 W_s に実測値を代入した上下の圧力式と $Q_{in} = Q_u + Q_d$ 、いわゆる、吹き込み空気量 Q_{in} 、上、下部に向かう空気量 Q_u 、 Q_d との収支式を連立させることにより、空間率を求めた。その計算結果を Fig.5 にしめす。

粒子径が $d_p = 85 \mu\text{m}$ のガラスビーズでは $L_a = 1.9 \text{ m}$ か

Fig. 5 Void fraction

ら空気を吹き込んだ場合を除いては比較的空間率は一定である。 $L_a = 1.9 \text{ m}$ の場合は吹き込み位置がホッパー部に近いため、上に吹き抜ける空気が多くなり空間率が大きくなると考えられるが、ホッパー部の影響もあり実験的にも理論的にも今後の検討の余地のあるところである。 $d_p = 168, 508 \mu\text{m}$ のときも同様の結果が得られた。

しかし、 $d_p = 51 \mu\text{m}$ のガラスビーズの空間率はバラつきが大きく、全体的に大きな値になっている。これは、小粒子の場合、粒子間の付着力が大きく、かつ、流体抵抗の影響を大きく受けるためと考えられる。それぞれの粒子径について $L_a = 1.9 \text{ m}$ のデータを除いた空間率の平均値をとると、Table 3 のようになる。

3.3 粒子排出量

Figs. 6, 7 に空気吹き込み量 Q_{in} と粒子排出量 W_s の関係が示してある。これより、空気吹き込み量が多い

Table 3 Void fraction

Diameter of glass beads $d_p [\mu\text{m}]$	51	85	168	508
Void fraction $\epsilon [-]$	0.458	0.411	0.403	0.401

Fig. 6 Flow rate of granular materials

Fig. 7 Flow rate of granular materials

ほど粒子排出量が増加していることがわかる。

Fig. 6 は空気吹き込み位置別に示したもので、空気吹き込み位置がオリフィスに近いほど、空気吹き込み量の増加に対して粒子排出量の増加の割合が大きくなることがわかる。これは吹き込み位置より上部の圧損の大きいものほど、オリフィスを抜ける空気量が多いためである。他のオリフィス口径でも同様であった。

また Fig. 7 は、粒子径別に示してあるが、ある程度の空気吹き込み量の場合には、粒子径が小さい粒子ほど同じ吹き込み量における粒子排出量が多くなっている。しかし、吹き込み量が小量のときには粒子径が小さいほど排出量は少ない。これは、 $Q_{in}=0$ のときの圧力分布はオリフィスのところで逆圧となるため、小粒子はほど大きな抵抗をうけ、排出量を減少させることと付着力のためと考えられる。吹き込み量が小量の場合はこの状態となっていると推察される。

3.4 計算値と実験値との比較

Fig. 4 に示すスタンドパイプ下部のオリフィスにおける空気圧差と粒子排出量の関係は、de Jong らの式で表わされるが^{5),6)}、この式には粒子と空気の相対速度が 0、すなわち空気圧力差が 0 になっても重力によって排出する場合に対して表現がなされていない。そこで、重力項に空気圧力項を加える Crewdson らの考えを導入して次のように表わされるものとする⁴⁾。

$$W_s = C_D F (2\rho_b \Delta P_o + g D_o \rho_b^2)^{1/2} \quad (2)$$

W_s は粒子の質量流速、 g は重力加速度、 D_o はオリフィス口径、 ΔP_o はオリフィスにおける空気圧力損失、 ρ_b はかさ密度、 C_D は排出係数、 F は $\pi(D_o - k d_p)^2/4$ で表わされる有効排出面積、 k は empty annulus 定数である。

さらに、Eq.(2) の空気圧差 ΔP_o は充填層の圧損失を基にした de Jong らの関係式で表わされるとする^{5),6)}。

$$\Delta P_o = k_1 (v_o - v_{so}) r_o + k_2 (v_o - v_{so})^2 r_o / 3 \quad (3)$$

$$k_1 = 150 \frac{\mu(1-\epsilon)^2}{d_p^2 \epsilon^2}, \quad k_2 = 1.75 \frac{\rho(1-\epsilon)}{d_p \epsilon}$$

ここで、 r_o は $0.5 D_o$ で、 v_o 、 v_{so} はそれぞれ r_o における空気、粒子速度である。

Eqs.(2)、(3) と速度と流量の関係から排出量 W_s に対して 2 次式が導かれ、その式を W_s について解くと次の式が得られる。

$$W_s = \left[-\rho_b C_D^2 (b + \frac{2a}{\epsilon} Q_d) + \rho_b C_D \left\{ \frac{4a}{\epsilon^2} Q_d^2 + \frac{4b}{\epsilon} Q_d + C_D^2 b^2 + 4gF^2 D_o (1 - a C_D^2) \right\}^{1/2} \right] / 2(1 - a C_D^2) \quad (4)$$

$$a = \frac{1.75 \rho D_o}{12 d_p \rho_b \epsilon} \left(1 - \frac{k d_p}{D_o} \right)^4, \quad b = \frac{150 \pi \mu D_o^3 (1-\epsilon)}{8 d_p^2 \rho_b \epsilon^2} \left(1 - \frac{k d_p}{D_o} \right)^4$$

また、Fig. 4 に示すようにスタンドパイプを吹き込み位置から上下に分けて、その空気の圧力損失を Eq.(1) を用いて表わす。これと $Q_{in} = Q_u + Q_d$ の関係を使って Q_d と W_s の関係式を導き、Eq.(4) と連立させ、数値計算を行う。ここで、オリフィス付近の空間率は一定と見なすことができないが、オリフィス部で流路が絞られ、かつ空気によって半強制的に流れているため、その変化は小さいものと思われるので、Table 3 に示した空間率を用いて実験範囲における排出量の実測値に合う排出係数 C_D と empty annulus 定数 k を求めると $C_D = 0.61$ 、 $k = 1.4$ となった。計算粒子排出量を Figs. 6、7 の実線で示す。

Fig. 8 に全範囲に対する実験値と計算値の比較を示す。これより、 $d_p = 85 \sim 508 \mu m$ のガラスビーズでは実験値と計算値は比較的近い値で、 $\pm 30\%$ に相関されていることがわかる。しかし、 $L_a = 1.9 m$ の場合は数値の低いものであるが、計算値の方が大きくなっている。これは計算に用いた空間率が小さいためと考えられる。 $d_p = 51 \mu m$ のガラスビーズにおいては $\pm 30\%$ を

Fig. 8 $W_s(cal)$ vs. $W_s(ex)$

越える値が多くなっている。これは、3.2節で述べた空間率のパラつきが多くなっていることが、最も大きな要因である。

4. 結 論

オリフィス付きスタンドパイプに空気を吹き込み粉粒体排出量に対する空気吹き込み量の影響を調べた結果、本実験範囲内では次の結論を得た。

1) オリフィス付スタンドパイプに空気を吹き込む

ことにより、粉粒体排出量を制御することができるが、小粒子になると、付着力等の影響を考慮に入れる必要がある。

2) 空気吹き込み位置がオリフィスに近いほど、また小粒子ほど粉粒体排出量を増加させることができる。これらの相関関係はオリフィスにおける粉粒体排出量に関するCrewdsonの式を発展させた本推算式により、小粒子の一部を除いて±30%の誤差で表わされる。

Nomenclature

C_D : discharge coefficient	[-]	v_o : air velocity through orifice	[m/s]
D_o : orifice diameter	[mm or m]	v_{so} : particle velocity through orifice	[m/s]
d_p : particle diameter	[μ m or m]	W_s : mass flow rate of particle	[kg/s]
F : effective area of orifice	[m ²]	Z : height of packed bed	[m]
g : gravitational acceleration	[m/s ²]	ϵ : voidage	[-]
L : standpipe length	[m]	ΔP : air pressure drop	[Pa]
L_a : aeration location	[m]	ΔP_o : air pressure drop at orifice	[Pa]
P : air pressure	[Pa]	μ : air viscosity	[Pa·s]
Q_d : air flow rate downwards in standpipe	[m ³ /s]	ρ : air density	[kg/m ³]
Q_{in} : aeration rate	[m ³ /s]	ρ_b : bulk density	[kg/m ³]
Q_u : air flow rate upwards in standpipe	[m ³ /s]	ρ_s : particle density	[kg/m ³]
u : superficial velocity	[m/s]		

References

- 1) Chen Y. M., S. Rangachari and R. Jackson : *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, **23**, 254 (1984)
- 2) Takeshita T. et al. : *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **14**, 304 (1988)
- 3) Leung L. S. and P. J. Jones : *Powder Technol.*, **20**, 145 (1978)
- 4) Crewdson B. J., A. L. Ormond and R. M. Nedderman : *Powder Technol.*, **16**, 197 (1977)
- 5) de Jong J. A. H. : *Powder Technol.*, **12**, 197 (1975)
- 6) de Jong J. A. H. and O. E. J. J. M. Hoelen : *Powder Technol.*, **12**, 201 (1975)