振動毛細管を利用した微粉体の微量定量供給

松坂 修二*, 山本 康史*, 増田 弘昭*

Micro Feeding of a Fine Powder Using a Vibrating Capillary Tube

by

Shuji MATSUSAKA[†], Koji YAMAMOTO[†] and Hiroaki MASUDA[†]

Micro feeding of a fine powder was experimentally investigated by use of a capillary tube ($\leq 1.6\text{mm}$ in diameter) as an exhaust pipe which was vibrated under the conditions of less than 760Hz and $30\mu\text{m}$ in amplitude.

It was found that only the particles near the inside wall vibrated at random, and almost all inner particles were transported as a lump of powder. Particles of $10\mu\text{m}$ in diameter could be discharged continuously at a rate of $0.2\text{mg}\cdot\text{s}^{-1}$. It was also found that the critical frequency for discharging was nearly inversely proportional to the square root of the vibration amplitude. The powder flow rate could be increased with increasing frequency. However, there was a maximum flow rate which depended on the capillary size d and the kinds of powder. The maximum flow rate was found to be proportional to d^n where $n=2\sim 2.5$.

Key Words : Micro Feeding, Vibration, Capillary Tube, Fine Powder, Discharge

1. 緒言

粉体を原材料として造られる機能性材料や複合材料などの高付加価値製品は、わずかな調合の変化でも特性が大きく変わることがあり、研究用だけでなく高度な品質管理が要求される製造プロセス用として、高精度の微量定量供給機の開発が期待されている。

一般に、付着力よりも重力が支配的な粒子径の大きな粉体は比較的容易に供給できるが、粒子径が数十ミクロン以下になると付着性の影響で安定供給が難しくなる。また、供給量を減らすと間欠的な閉塞状態を起こしやすく、連続性を失うことが多い。従来型供給機の中で微粉体の微量定量供給に用いられてきた小型テ

ーブルフィーダーも同様であり、付着性の小さな粉体であれば毎秒数ミリグラムの割合で供給できるが、微粉体では付着・凝集の影響が見られる¹⁾。したがって、微粉体の微量定量供給の精度を高めるためには、供給機から排出される凝集体をできるだけ細分化して連続性をもたせることが必要である。排出口に網目を設けて大きな凝集体の排出を防ぐのも一つの方法であり、微粉体でも毎秒数ミリグラムの割合で供給できることが報告された²⁾。なお、網目の内側には回転ブラシが取り付けられており、微粉体の排出には機械的な外力を必要とする。このように、微粉体の微量定量供給には、効果的な外力を連続して加えることによって微小開口部から排出させることが重要といえる。また、実用性を考慮すると装置が小型であり、供給位置へのアクセス性に優れ、構造ができるだけ簡単なものが望まれる。

本研究では、これらの条件を満たすために振動毛細管を利用した微量定量供給機を考案して、微粉体の排

1994年 7月 7日受付

* 京都大学工学部化学工学教室

(〒606-01 京都市左京区吉田本町) TEL. 075-753-5575

[†] Dept. of Chem. Eng., Kyoto Univ.

(Yoshida-honmachi, Sakyo-ku, Kyoto 606-01)

出挙動に関する実験的検討を行った。

2. 振動毛細管を利用した供給機の機構

供給機の排出口径は、微粉体の供給精度に大きな影響を及ぼすと考えられる。供給機から排出される微小凝集体の体積相当径が排出口径と同程度とすると、凝集粒子のかさ密度が $1 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ のとき、排出量を1mg単位で制御するためには、1.2mm以下の排出口径にしなければならない。このような微小排出口からホッパー内の微粉体をマスフローの状態で安定して排出させるためには、オリフィス状の排出口を設けるのではなく、排出口に向けてテーパを付けて絞り込む必要があり、その先端は必然的に毛細管形状になる。微粉体には付着性があり、毛細管内を重力だけで落下させることはできないため、機械的な外力を加えて強制的に排出させなければならない。ただし、1mm程度の毛細管内に機械的駆動部を設けることは不可能であり、管外から力を加える必要がある。高周波振動を利用すると、粉体の流動性が改善されて垂直円管内の粉体が連続的に排出されることが報告されており³⁾、本実験でも同様の方法を試みる。すなわち、本法は外部振動を毛細管内の粉体に伝えることによって壁面近傍の粒子を流動化させ、その結果として内部粉体と壁面との摩擦応力が低下することを利用して排出を試みるものであり、粒子の慣性を利用して、主に水平方向に跳躍移動させる従来型の振動フィーダとは、機構が基本的に異なる。また、本研究では毛細管を供給端としているため、入口の狭い容器等への供給が容易に行えるという特長がある。

3. 実験装置および方法

供給機の各部寸法をFig. 1に示す。ロート状のホッパーに粉体を満たし、チューブを通して毛細管から排出させた。毛細管上部の粉体圧を一定に保つため、ホッパーと毛細管をつなぐ直管部は、内径(6mm)に対して十分に長くした(200mm)。毛細管は、粉体の移動状態が観察できるようにガラス製とし、異なる先端径のもの($d=0.4 \sim 1.6 \text{ mm}$)を準備した。毛細管の加振は、ガラス製テーパ部の上10mmの位置にクランプで直接固定した小型直流モーター(寸法: $15 \times 20 \times 25 \text{ mm}$, 最大振動数: 760 Hz)の振動を利用しており、振動数は可変直流電源を用いて変化させた。

計測機器を含めた実験装置の概略構成をFig. 2に示す。毛細管からの排出量の測定には、検出精度0.1mgの電子天秤(島津製AEU-210)を使用しており、デー

Fig. 1 Details of the powder feeder

Fig. 2 Schematic diagram of the experimental apparatus

タはコンピュータに自動サンプリングされる。本装置では毛細管全体が一定周期で水平方向に振動しており、毛細管先端の振動を側面から非接触センサー(キーエンス製AS440-01)を用いて検出し、オシロスコープ(日立製V509)で振動数を解析した。毛細管先端の振幅はビデオマイクロスコープ(オリンパス製OVM 1000N)で実測した。なお、粉体は常に毛細管の先端まで充填されており、先端が排出流量の律速になっていた。使用した粉体はTable 1に示すとおりであり、実験は室内環境条件下(温度 $18 \sim 22^\circ \text{C}$, 関係湿度 $30 \sim 40\%$)で行った。

Table 1 Test powders

No.	Material	$D_{p50}(\mu\text{m})$	$\sigma_g(-)$	$\rho_p(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$\rho_{BL}(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$\rho_{BC}(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
1.	Alumina(irregular)	6	1.6	4000	800	1800
2.	Alumina(irregular)	20	1.4	4000	1300	2100
3.	Alumina(spherical)	10	1.7	4000	1600	2400
4.	Fly ash(spherical)	15	2.3	2200	700	1200

4. 実験結果および考察

4. 1 微粉体の毛細管内通過状態

微粉体が振動毛細管内を通過して排出されるときの様子を**Fig. 3**の写真に示す。毛細管の先端径は1.0 mmで、粉体は不規則形状のアルミナ($D_{p50}=20\text{ }\mu\text{m}$)である。Fig. 3(a)は振動数200Hz、振幅20 μm の振動状態を示しており、微粉体(白く見える部分)はガラス製の毛細管内を途切れることなく移動し、毛細管先端から安定して落下している。一方、Fig. 3(b)は振動を停止したときの状態で、微粉体は毛細管の先端まで完全に充填された状態で静止している。毛細管内部の微粉体は振動停止後に遅れて落下することではなく、確実に排出を停止させることができる。

管外からビデオマイクロスコープで観察したときの内壁近傍における粒子挙動の概念図を**Fig. 4**に示す。内壁には外部振動を与えても自ら動くことのできない微粒子が少量付着しており、そのすぐ内側では微小凝集粒子(数十ミクロン以下)あるいは一次粒子が、ミクロンオーダーで高速ランダム運動をしながら重力方向に移動していた。それより内側の粒子にはランダム運動が見られず、粒子同士の位置関係をほとんど変化させずに、ひとかたまりの粉体層として重力方向に安定して移動することがわかった。移動粒子が壁面付着粒子に衝突すると、壁面上の粒子は姿勢を変えたり移動

Fig. 4 Concept of particle flow near inside wall (cross-sectional view)

したりするが、その頻度はあまり多くない。これは、凝集粒子がランダムに運動できる隙間が内壁近傍にあり、移動粒子が壁面とあまり接触していないことを意味する。一般に、粒子を充填すると内壁近傍で局所空間率は高くなるが⁴⁾、ここに見られる隙間はそれとは異なり、付着性微粉体が振動毛細管内を移動するときに生じたもので、この隙間の存在によってランダム運動が起こりやすくなったと思われる。すなわち、微粉体の振動毛細管内移動現象は、壁面近傍における粒子の流動化が壁面との摩擦応力を低下させ、これによって内部粉体層が重力方向に移動したものと考えられる。

4. 2 通過最小振動数

振動数を徐々に下げていき、粉体が毛細管を通過しなくなったときの振動数を通過最小振動数 f_0 と定義する。**Fig. 5**に示すように、通過最小振動数 f_0 は振幅 a の増加にともなって減少するが、その変化の割合はしだいに小さくなる。この関係を利用すれば粉体通過条件をある程度自由に選定することができる。たとえば、振幅を大きくすれば小さな振動数でも通過させられる。逆に、振幅を小さくしたときには高周波振動を用いることによって粉体を通過させることができる。

振幅と振動数から計算できる振動加速度 $a(2\pi f)^2$ を用いて粉体の通過限界を考察する。微粉体が毛細管内

Fig. 3 Observation of powder discharged through a capillary tube
(Alumina $D_{p50}=20\mu\text{m}$, $d=1.0\text{mm}$)

Fig. 5 Relationship between critical frequency f_0 and amplitude a

を通過しはじめるときの限界振動加速度 $a(2\pi f_0)^2$ を実験結果から求めると $1.1 \sim 3.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ であった。この値は重力加速度よりも小さいが、この程度の振動加速度でも壁面近傍の粒子を流動化させて微粉体を通過させられるということは非常に興味深いことである。Fig. 5における限界振動加速度を定数とみなすと、 f_0 は a の平方根に反比例することになる。Fig. 5の実線は、この関係を実験結果に対してフィッティングさせたものである ($a(2\pi f_0)^2 = 2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)。実験結果には多少バラツキがあるが、実線と同様の变化傾向を示しており、通過最小振動数と振幅の関係は限界振動加速度を用いて定性的に説明できることがわかった。

Fig. 6は、異なる4種類の粉体の通過最小振動数 f_0 に及ぼす毛細管径 d の影響を示したものである。いずれの粉体においても、毛細管径の増加にともなって通過最小振動数は減少しており、排出されやすくなることがわかる。粉体種に着目すると、不規則形状粒子の方が球形粒子よりも排出されにくく、同一粉体種(不規則形状アルミナ)では粒子径の小さなものの方が排出されにくい。球形粒子同士で比較すると、アルミナはフライアッシュよりも中位径は小さいが、真球に近

Fig. 6 Effect of the inner diameter of a capillary tube d on critical frequency f_0

く粒度が揃っているため排出されやすくなったと考えられる。なお、球形アルミナのように比較的流動性のよい粉体では、毛細管径を大きくすると ($d \geq 1.2 \text{ mm}$) 振動を停止しても毛細管内の微粉体が引き続き排出されることがあり、供給機の精度を低下させる原因になる。このような場合には、毛細管径を小さくするか、Fig. 5に示したように振幅を小さくして通過最小振動数を高くする必要がある。

4.3 排出流量

積算排出量 M の経時変化を Fig. 7 に示す。それぞれ一定の条件で毛細管を振動させており、排出に対して特別な制御は行っていないが、積算排出量は時間にほぼ比例して増加する。排出流量は振動数によって異なり、150Hzのときには $1.0 \text{ mg} \cdot \text{s}^{-1}$ という微小流量になるが、それでも安定して排出できることがわかった。

Fig. 8は、排出流量 W と振動数 f の関係を振幅 a をパラメータとして示したものである。通過最小振動数を超えると排出流量は振動数とともに増加しており、振動数を変化させることによって排出流量を制御することができる。ただし、排出流量には上限(最大排出流量 W_{max})が存在し、振動数を高くしても、それ以上に排出流量を増加させることはできない。ビデオマイ

Fig. 7 Cumulative mass of powder discharged through a capillary tube as a function of time elapsed

Fig. 8 Relationship between powder flow rate W and frequency f as a function of amplitude a

Fig. 9 Relationship between powder flow rate W and frequency f as a function of the inner diameter of a capillary tube d

クロスコープによる観察結果から、振動数の増加にともなって、内壁近傍でランダム運動をする粒子数が増加し、運動の状態も活発になることがわかった。すなわち、振動数の増加とともに内部粉体層と壁面との摩擦係力が低下し、内部粉体層が移動しやすくなったと考えられる。また、振動数を増加させても壁面近傍粒子の流動化がそれ以上に進まなくなり、摩擦係力の変化が認められなくなったときが、最大排出流量の状態に対応すると考えられる。

Fig. 9は、排出流量 W と振動数 f の関係を毛細管径 d をパラメータとして示したものである。いずれの場合においてもFig. 8と同様の傾向を示すが、最大排出流量は粉体種および毛細管径によって大きく変化することがわかった。

Fig. 10に、最大排出流量 $W_{\max}$ に及ぼす毛細管径 d の影響を示す。最大排出流量は毛細管径 d の2～2.5乗に比例する。オリフィスからの粉体の排出については多くの報告があり⁵⁾、排出流量はオリフィス径の2.5～3乗に比例することが知られているが、本実験では指数がそれより少し小さな値になった。振動毛細管による微粉体の排出が壁面近傍の流動化に基づくものであり、内部の粉体層がひとかたまりとなって排出されることを考慮すると、排出流量は毛細管内断面積に支配

Fig. 10 Effect of the inner diameter of a capillary tube d on maximum powder flow rate $W_{\max}$

されることになるが、この他に粉体層の移動速度、充填率、粉体特性、重力などが影響すると考えられる。これら諸因子の定量的な解析および振動毛細管内移動現象の詳細なメカニズムの解明は今後の課題である。なお、本報では10μm程度の微粉体を用いて振動毛細管内の排出挙動の検討を行ったが、振動加速度を大きくすれば、粒子径のさらに小さな微粉体でも排出は可能と考えられる。

5. 結 言

振動毛細管を利用した微量定量供給機を試作し、微粉体の排出実験を振動数760Hz以下、振幅30μm以下で行い、以下の結論を得た。

1) 壁面近傍の粒子が微小ランダム運動を起こして流動化すると、内部の粉体層はひとかたまりとして重力方向に移動する。その結果として、10μm程度の微粉体を0.2mg・s⁻¹の微小流量でも安定して供給することができた。

2) 微粉体の毛細管内通過限界は振動加速度を用いて定性的に説明できる。すなわち、通過最小振動数は振幅の平方根にほぼ反比例する。

3) 排出流量は振動数とともに増加するが、粉体種および毛細管に応じた最大排出流量が存在する。最大排出流量は、毛細管径の2～2.5乗に比例する。

[謝 辞] 本実験を行うにあたり、日清製粉(株)のご協力を頂いた。ここに記して謝意を表します。

Nomenclature

a : amplitude of vibration at the end of a capillary tube	(m)	t : elapsed time	(s)
D_{p50} : mass median diameter	(m)	W : powder flow rate	($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)
d : inner diameter of a capillary tube	(m)	$W_{\max}$: maximum powder flow rate	($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)
f : frequency of a vibrating capillary tube	(Hz)	σ_g : geometric standard deviation	(—)
f_0 : critical frequency for powder discharge	(Hz)	ρ_p : particle density	($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
M : cumulative mass of discharged powder	(kg)	ρ_{BL} : bulk density of 'loose' packing	($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
		ρ_{BC} : bulk density of 'close' packing	($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

References

- 1) Masuda, H., H. Kurahashi, M. Hirota and K. Inoya : *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **2**, 286(1976)
- 2) Seno, H. and T. Kondo : *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **26**, 340(1989)
- 3) Saito, M., O. Kimura and N. Yoda : *J. Acoustical Soc., Japan*, **45**, 38(1989)
- 4) Ridgway, K. and K. J. Tarbuck : *Brit. Chem. Eng.*, **12**, 384(1967)
- 5) Miwa, S. : "Funryutai Kogaku" pp.207~221, Asakura-shoten(1972)