スクリーフィーダーの供給特性に及ぼす粉体のかさ密度 および流動性の影響

Effect of Bulk Density and Flowability of Powders on the Feed Rate of Screw Feeder

木俣 光正^{a*}, 辻川 浩雄^a, 松本 幹治^b

Mitsumasa Kimata, Hiroo Tsujikawa, Kanji Matsumoto

The effect of mechanical properties and rotating speed of screw on the feed rate was studied using aluminum hydroxide powder and calcium carbonate powder treated with stearic acid. In general, linear relationship was obtained between the feed rate and the rotating speed of screw although the linearity is somewhat weak for two types of untreated powder and those treated with 0.2wt% stearic acid. As the stearic acid concentration increased, the feed rate, that is, the slope of straight line α , increased. The aerated and packed bulk densities increased with the stearic acid concentration, implying that the flowability of powder was improved as the concentration of stearic acid became higher. The value of α was well correlated with the bulk density of powder collected at the outlet of screw feeder and the flowability measured by the shear tests and tensile strenght tests.

Key Words : Screw feeder, Flowability, Stearic acid, Aluminium hydroxide powder, Calcium carbonate powder

1. 緒 言

粉粒体の供給特性は装置の種類、粉体の特性（粉体の種類、粒度分布、密度、流動性など）の影響を受ける。特にホッパー内の付着やフィーダーへの付着は、供給量を変動させ供給操作のトラブルの原因となる。したがって、円滑な供給を行うには供給する粉体の物性に適合する供給装置の選定が必要になる。スクリーフィーダーは粉粒体の連続供給機として広く使用されており、粒子排出量に関する操作条件、実験式が

報告されている¹⁾。しかし、供給特性を表す式の中に含まれる粉体物性は、フィーダー内のかさ密度のみであり、粉粒体の力学的特性と供給特性の関係に関する研究は少ない^{2, 3)}。

そこで本研究では、流動特性の異なるステアリン酸処理粉体を用い、スクリーフィーダーにおける粉体の供給速度、供給精度と粉体の力学的特性の関係について検討した。滑沢剤あるいは疎水化剤として使用されているステアリン酸による粉体表面処理は、粒径分布にほとんど影響を与えずに流動特性を変化させることが可能であり⁴⁾、粒子径の影響を小さくすることができる。なお、粉体の流動性はタッピング試験および平行平板型剪断試験^{5, 6)}、水平2分割セル型引張破断試験⁷⁾により得られる流動度 FI により評価し、フィーダー内の粉体物性はスクリーフィーダーから排出された粉体のかさ密度により評価した。

2. 実 験

2.1 試料粉体

本実験に用いた試料粉体は、水酸化アルミニウム B-103、炭酸カルシウム P-30 および B-103、P-30 をステアリン酸で表面処理した粉体（日本軽金属(株)提供）である。試料粉体の表面処理は以下の方法で行

2000年9月1日受付

a 粉体工学会夏期シンポジウム（2000年7月、神奈川県葉山）にて発表

神奈川県立大学応用化学科

(〒243-0292 厚木市下荻野1030) TEL 046-291-3216

Department of Applied Chemistry, Kanagawa Institute of Technology

(1030 Shimo-ogino, Atsugi-shi, 243-0292)

b 横浜国立大学工学部物質工学科

(〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5) TEL 045-339-4008

Department of Material Science and Chemical Engineering, Yokohama National University

(79-5 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama-shi, 240-8501)

* 現 山形大学工学部物質化学工学科

(〒992-8510 米沢市城南4-3-16) TEL 0238-26-3157

Department of Chemistry and Chemical Engineering, Yamagata University

(4-3-16 Jonan, Yonezawa-shi, Yamagata 992-8510)

Fig. 1 Cumulative particle size distribution of sample powder

った。2kgの未処理水酸化アルミニウム粉体または炭酸カルシウム粉体と0.1~1.0wt%のステアリン酸を同時に内容積約 10^{-2}m^3 のヘンシェルミキサーに入れ、約353Kに加温しながら攪拌羽根で約15m/sの先端速度で10分間混合した。Fig. 1に、レーザー回折式粒度分布測定装置（㈱セイシン企業 LMS-30）により測定した試料粉体の粒子径分布を示した。なお、試料粉体はヘキサメタリン酸ナトリウム0.1wt%水溶液に分散後、この懸濁液を測定適正濃度になるまで希釈して粒子径分布を測定した（㈱セイシン企業に

測定依頼）。Fig. 1より、ステアリン酸処理しても水酸化アルミニウムB-103、炭酸カルシウムP-30のメディアン径はそれぞれ約 $6.9\mu\text{m}$ 、 $3.6\mu\text{m}$ であり、粒子径分布にほとんど影響を及ぼさないことが確認できた。これらの粉体はそれぞれ大気中338K、12時間以上加熱乾燥し、その後、密閉性の良い容器に入れ充分冷却したものを測定試料として用い、一度使用した粉体は再度乾燥させて用いた。なお、粉体の真密度は厳密にはステアリン酸処理により変化すると思われるが、処理濃度が最大1.0wt%と少ないことからすべてB-103およびP-30はそれぞれ 2.4×10^3 および $2.7\times 10^3\text{kg/m}^3$ とした。

2.2 実験装置

スクリーフィーダー（赤武エンジニアリング㈱製）の概略をFig. 2に示す。フィーダー内径は45mm、スクリーは外径35mm、シャフト直径は18mmであり、ピッチはホッパー側から粉体排出口まで32mmから28mmと徐々に狭くなっている。なお、ホッパーには試料粉体の閉塞防止およびフィーダー内に粉体を安定供給させるため、リボン型の攪拌機を設置した。また、フィーダーから排出された粉体の質量を計測するため、ロードセルはADコンバーターを介してパソコンと接続させた。

Fig. 2 Schematic diagram of screw feeder

タッピング試験は、タッピング高さ 20mm のパウダーテスタ（ホソカワミクロン(株) PT-E）のタッピング装置を利用して行い、タッピング用セルは内径 50mm、高さ 100mm、内容積 190cm³ のポリプロピレン製容器を作製した。

引張破断試験および剪断試験は、パウダーベッドテスタ（三協パイオテック(株) PTHN-13BA）により行った。引張破断用セルは可動部と固定部からなっており、直径 50mm、高さ 20mm の円筒型で、水平方向に 2 分割させる構造になっている。剪断試験はノッチ付きの平行平板式であり、上部可動板と粉体層の接触面積は 35cm² である。

2. 3 実験方法

2. 3. 1 スクリューフィーダーの粉体供給試験

スクリューフィーダー付属のホッパーに乾燥済みの試料粉体を目開き 2.80mm、直径 150mm のステンレス製標準ふるいを通して投入し、ホッパー内に設置した攪拌機を 0.17～0.33rps にて回転させた。フィーダーのスクリュー回転数を 0.17～0.82rps に設定し、スクリューの回転と同時にロードセルによる排出口からの粉体質量の計測を開始した。ロードセルから得られた粉体質量データは、AD コンバータを介してパソコン内に 1～5 秒間隔で保存した。

2. 3. 2 粉体の力学的特性の測定

タッピング試験は、試料をシリンダの上方から目開き 710 μ m のふるいを通して粗充填し、上面を水平にすりきり所定回数タッピングを行った。ゆるみ見かけ密度をタッピング回数 $n=0$ 、かため見かけ密度はタッピングを繰り返しても粉体層高さが変わらなくなった $n=1200$ の粉体の容積（粉体層高さ最大、最小の 2 カ所の平均値）から求めた。

引張破断および剪断試験は前報⁸⁾と同様の方法で行った。得られた実験結果から、Warren-Spring 式による破壊包絡線を描き、これに接するモール円により単軸崩壊応力 f_c を求めた。また、受動破壊応力 σ_1 は平行平板型剪断試験機を使用しているため、粉体層にかけた圧密応力 p の値を用いた⁸⁾。

2. 3. 3 スクリューフィーダー内のかさ密度測定

供給速度がフィーダー内粉体のかさ密度に与える影響を調査するため、フィーダーから排出された粉体のかさ密度を測定した。測定には、直径 50mm、高さ 50mm、内容積 100cm³ のステンレス製容器を使用した。スクリューを回転させた後、重力の影響をあまり受けないように容器をスクリューフィーダー粉体排出口のすぐ下に設置し、左右に動かしながら排出された

Fig. 3 Effect of powder mass in hopper on feed rate

粉体を容器に満たした。容器の上端を水平にすり切り、粉体質量を測定することによりかさ密度を算出した。なお、この方法により測定されたかさ密度は、必ずしもフィーダー内における粉体の真のかさ密度と一致しない可能性はあるが、相対的な値を得る方法としては有効であると思われる。

3. 結果および考察

3. 1 スクリューフィーダーの供給特性

3. 1. 1 ホッパー内粉体量の影響

スクリューフィーダーの供給速度は、ホッパー内の粉体量により影響を受けるとと思われる。Fig. 3 に、スクリューが回転している間、ホッパー内の粉体量を、ホッパー上端から 100mm（約 2kg）または上端から 200mm（約 0.5kg）のところで一定となるように、ふるいを通して粉体を連続的にホッパーに投入したときに、ロードセルから得られる粉体の供給量の経時変化を示した。使用した粉体は炭酸カルシウム P-30 未処理のものであり、スクリュー回転数は 0.82rps とした。図より、ホッパー内の粉体量の違いによりフィーダーの供給量は異なり、ホッパー内の粉体量が多ければ供給速度も大きくなることがわかる。これは、ホッパー内の粉体量が多いほど粉体がホッパー内で圧密されたからであると思われる。このように、ホッパー内の粉体量が供給速度に影響を及ぼすため、以後の実験はスクリューが回転している間、粉体投入高さがホッパー上端から 100mm のところで一定になるようにホッパー上部から連続的に粉体を供給して行った。

Fig. 4 Effect of powder temperature in feeder on feed rate

3. 1. 2 粉体温度の影響

使用する粉体は 338K にて乾燥後、室温まで冷却する。粉体の温度が供給速度に及ぼす影響を調査した。Fig. 4 に、乾燥した粉体をほとんど冷却せずに用いたものと室温まで冷却したものの粉体供給量の経時変化を示す。なお、使用した粉体は炭酸カルシウム P-30 未処理および 0.1wt % ステアリン酸処理したものであり、スクリー回転数は 0.82 rps とした。図中に示した温度は、フィーダーから排出された粉体の温度の平均値である。図より、ステアリン酸処理した粉体の方が供給速度は大きくなっているが、粉体温度の違いによる供給量の違いは見られなかった。しかしながら、本実験では供給速度の測定は実験条件を一定にするため、室温まで冷却した粉体を用いた。

3. 1. 3 スクリー回転数の影響

Fig. 5 に、水酸化アルミニウム粉体 B-103 を用いたときの、フィーダーの供給速度 X とスクリー回転数 N の関係を示した。このとき、供給速度は 5 秒間隔で得られた供給量の平均値により求めたものであり、図中のエラーバーは標準偏差を示している。図より、未処理粉体を除いて 0.75 rps 以下の回転数において直線関係が得られ、以下の式で整理することができた。

$$X = \alpha \cdot N \quad (1)$$

ただし、 α は実験定数である。また、ステアリン酸濃度の増加とともに同じ回転数における供給速度は大きくなり、 α の値も大きくなることがわかった。回転数 0.82 rps を見るといずれも比較的标准偏差が大きく、特にステアリン酸処理したものの供給速度は急激に変

Fig. 5 Relationship between X and N (B-103 powder)

Fig. 6 Relationship between X and N (P-30 powder)

化している。また、未処理粉体の場合、0.42 rps を境として供給速度は低下している。いずれの場合も再現性があるために、このような異常挙動が生じる原因としてフィーダーの構造、フィーダー内のかき密度、壁面摩擦の変化などの影響が考えられるが詳細は不明である。

Fig. 6 に、炭酸カルシウム粉体 P-30 を用いたときの供給速度 X と回転数 N の関係を示した。Fig. 5 と同様の方法により供給速度を求め、標準偏差をエラーバーで示した。図より、ステアリン酸濃度が高くなると供給速度は大きくなることがわかる。また、0.2 wt % ステアリン酸処理は 0.52 rps 以下、未処理 P-30 粉体では 0.42 rps 以下、その他は全ての回転域で直線関係が得られており、水酸化アルミニウム粉体 B-103 と同様に Eq. (1) により整理することができる。

Fig. 7 Effect of stearic acid concentration on three kinds of bulk density

標準偏差は B-103 粉体に比べて大きくなっており、粒子径など粉体物性の影響が現れているものと思われる。未処理粉体と 0.2wt % ステアリン酸処理 P-30 粉体は、ある回転数以上で低回転数時の直線関係からずれ、かつ未処理粉体と 0.2wt % ステアリン酸処理粉体とのずれの傾向は異なるが、その原因は現状では明らかではない。

3.2 粉体の力学的特性に及ぼすステアリン酸濃度の影響

3.2.1 かさ密度

供給速度に影響を及ぼす因子のひとつであるフィーダー内の粉体のかさ密度を測定するため、フィーダーから排出された粉体のかさ密度測定を行った。Fig. 7 に、回転数 0.52 rps における B-103 および P-30 粉体の排出された粉体のかさ密度とステアリン酸濃度の関係を示した。また、タッピング試験から得られた粉体の力学的特性である、ゆるみ、かため見かけ密度も合わせて示した。図より、ステアリン酸濃度が高くなるとともにかさ密度は大きくなっていることがわかる。また、ゆるみおよびかため見かけ密度をみると、ステアリン酸濃度によるフィーダー内のかさ密度の変化と相関関係を示していることから、ステアリン酸濃度が高いほど粉体の流動性がよく、ホッパーやフィーダー内での空隙率が低くなっていることが考えられる。

3.2.2 流動性

引張破断試験および剪断試験から得られる粉体の力

Fig. 8 Relationship between porosity of P-30 powder bed and flow index

学的特性、特に流動性に及ぼすステアリン酸濃度の影響を次式で示される流動度 FI により評価した。

$$FI = \frac{f_c}{\rho \cdot g} \quad (2)$$

このとき、 f_c は単軸崩壊応力、 ρ はかさ密度、 g は重力加速度である。Fig. 8 に、炭酸カルシウム粉体 P-30 を用いたときの FI と空隙率 ε との関係を示す。図より、片対数上で直線関係が得られており、我々が既に報告した水酸化アルミニウム粉体 B-103 の場合と同様に、 FI について以下に示す実験式が成り立つことがわかる⁸⁾。

$$FI = k_{FI} \exp(-\varepsilon/d) \quad (3)$$

ただし、 k_{FI} 、 d は実験定数である。B-103 の場合は、直線の傾き、すなわち $-1/d$ がステアリン酸濃度によらずほぼ一定であったが、P-30 の場合は直線の傾きがステアリン酸濃度の増加とともに小さくなっていることがわかる。このことから、P-30 もステアリン酸処理することにより B-103 と同様に流動性が良くなることがわかった。

3.3 供給特性と粉体の力学的特性の相関

ここでは、供給特性と粉体の力学的特性を比較し、その相関関係について検討した。Fig. 9 に、Eq. (1) により求めた比例定数 α と、フィーダーから排出された粉体のかさ密度およびタッピング試験により求めたゆるみ、かため見かけ密度との関係を示した。なお、 α の値は変曲点が生じる粉体の場合は低回転時の直線から求めたものである。図より、 α とそれぞれ 3 種類のかさ密度は両対数グラフ上で直線関係を示して

Fig. 9 Relationship between α and bulk density of powder

り、良好な相関が得られることがわかった。また、直線の傾きは粉体の種類により異なっているが、種類が同じであればその傾きはほぼ一定である。フィーダーから排出された粉体のかさ密度は、いずれの粉体においてもゆるみおよびかため見かけ密度の間に位置していることがわかる。

Fig. 10に、供給特性を示す α と粉体の流動性に関連する k_{FI} との関係を示した。図より、いずれの試料粉体においても α と k_{FI} は両対数グラフ上で直線関係を示しており、良好な相関が認められることがわかった。 FI は静止粉体層が崩壊するときの流動特性であり、スクリーフィーダー内の粉体の状態とは異なるが、粉体の流動性が良いほど、供給速度は大きくなった。したがって、力学的特性は供給特性に影響を及ぼしていると考えられる。また、Figs. 9, 10における直線の傾きはP-30に比べてB-103の方が大きいことから、B-103粉体の方が供給速度に対してかさ密度および流動性の影響が大きいことがわかった。このような差が生じた理由として、粒子径、付着力、フィーダー壁面の摩擦力など様々な影響が考えられるが詳細は不明である。さらに多くの種類の粉体について検討する必要があると思われる。

4. 結 言

ステアリン酸処理することにより流動性を変化させた炭酸カルシウム粉体P-30および水酸化アルミニウ

Fig. 10 Relationship between α and k_{FI}

ム粉体B-103を用いて、スクリーフィーダーの供給特性および粉体の力学的特性について比較検討し、次のような結果を得た。

- 1) 試料粉体表面へのステアリン酸処理濃度が高いほど、同じ回転数の供給速度は大きくなった。すなわち、供給速度はスクリー回転数にほぼ比例し、Eq. (1)で表現できた。しかしながら、未処理粉体および0.2wt%ステアリン酸処理粉体においては、ある回転数以上で低回転数時の直線関係からずれる傾向を示した。
- 2) ステアリン酸処理濃度が高いほど、ゆるみおよびかため見かけ密度、フィーダーから排出された粉体のかさ密度が大きくなり、流動性が向上した。
- 3) スクリーフィーダーの供給特性を示す実験定数 α は、フィーダーから排出された粉体のかさ密度、ゆるみ、かため見かけ密度および粉体の流動性に関する実験定数 k_{FI} との間に良好な相関が得られた。

「謝辞」本研究を行うに当たり各種の試料粉体の提供を受けた日本軽金属(株)、粒子径を測定していただいた(株)セイシン企業、パウダーベッドテストを借用させて戴いた三協パイオテック(株)、パウダーテスターを借用させて戴いたホソカワミクロン(株)、スクリーフィーダーを借用させて戴いた赤武エンジニアリング(株)、また、実験に協力していただいた神奈川工科大学学生の塙幸久君、平山孝雄君、芳司健太郎君に対し、ここに謝意を表します。

Nomenclature

d : constant in Eq. (3)
 FI : flow index

(-) f_c : unconfined yield stress (kPa)
 (m) g : gravitational acceleration (m/s²)

k_{FI} : constant in Eq. (3)	(m)	α : constant in Eq. (1)	(kg)
N : rotating speed	(rps)	ε : porosity of powder bed	(-)
n : number of tapping	(-)	ρ : bulk density	(kg/m ³)
p : pre-consolidation stress	(kPa)	σ_1 : major consolidation stress	(kPa)
X : feed rate	(kg/s)		

References

- 1) Aoki, R. *et al.* : "Hunryutai no Chozo to Kyokuyusochi", p. 247, Nikkan Kogyo (1976),
Aoki, R. *et al.* : "Hunryutai no Bulk Handring Gijutsu", p. 207, Nikkan Kogyo (1985),
Hayashi, T. : "Powder Technology Pocket Book", pp. 282-288, Kogyo Chosakai (1998)
- 2) Masuda, H., H. Kurahashi, M. Hirota and K. Iinoya : "Micro-Feeding by Table Feeder", *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **2**, 286-290 (1976)
- 3) Matsumoto, K., G. Hong and K. Watanabe : "Effect of Powder Properties on the Feed Rate in Table Feeder", *Proceeding of the Fourth Korea-Japan Powder Technology Seminar*, 235-240 (1991)
- 4) Matsumoto, K., H. Akutsu, A. Yoshimidzu, G. Hong and K. Watanabe : "The Measurement of the Wettability of Hydrophobic Powder by the Constant Flow Method", *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **25**, 359-364 (1988)
- 5) Hirota, M., T. Kobayashi and T. Oshima : "Proper Test Conditions for Measurement by a Direct Shear Tester with Parallel Plates", *ibid.*, **20**, 493-498 (1983)
- 6) Hirota, M., T. Kobayashi, O. Sano and T. Oshima : "Expansion and Contraction Behavior of a Powder Bed in a Shear Process", *ibid.*, **21**, 137-142 (1984)
- 7) Farley, R. and F. H. H. Valentin : "Problems Associated with Storage Hoppers", *Trans. Inst. Chem. Eng.*, **43**, 193-198 (1965)
- 8) Kimata, M., H. Tsujikawa and K. Matsumoto : "Evaluation of Flow Properties of Aluminum Hydroxide Powder Treated with Stearic Acid", *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **36**, 258-265 (1999)