粒子群の充填・排出特性に及ぼす 粒子形状の影響

The Shape Effect of Particles on Their Packing and Discharging Characteristics

杉本 益規*, 山本 健市*, 宮嶋 俊明*, 川上 隆司*
Masunori SUGIMOTO*, Kenichi YAMAMOTO*, Toshiaki MIYAJIMA*, Takashi KAWAKAMI*

To investigate the shape effect of particles on their static and dynamic characteristics, the void fraction ε of a packing bed in a cylinder and the discharge rate V_0 of particles through a circular orifice were measured by using many kinds of materials differing in particle shape, size d_p and density ρ .

The particle shapes for each material were evaluated by a pair of shape indices ϕ and ζ . These indices were defined as a measure of circularity and smoothness of a particle profile in our previous paper. The experimental results were discussed using the multiple regression analysis.

The following experimental results were obtained: (1) The void fraction ε depended on the microscopic shape index ζ of each particle rather than on the macroscopic one ϕ . (2) The term $V_0/(\sqrt{g}d_p^{2.5})$, which represents the discharge characteristics of particles through an orifice, could be correlated as a function of $\zeta^{5.94}$ and $(D_0/d_p)^{2.8}$, regardless of ϕ .

As a result, it was confirmed that the static and dynamic behavior of particles was closely connected with the surface roughness of each particle.

Key Words : Particle Shape, Packing Fraction, Discharge Rate, Circular Orifice, Multiple Regression Analysis

1. 緒 言

粉粒体プロセスにおいて、粉粒体の様々な挙動は、粒子の形状特性をはじめ諸物性及び装置特性に大きく依存することが知られている¹⁾。しかし、粉粒体の挙動、特に粒子群の静的及び動的特性と粒子形状との関係についての研究報告は必ずしも多いとはいえない²⁾。その理由の一つに、粒子形状の特定化と希望する形状粒子群の入手の困難さに起因するところが多いものと考えられる。

粒子形状の特定化は最近の画像処理解析技術の発展にともない、比較的容易にできるようになってきている³⁻⁵⁾。しかし、粒子群の挙動に及ぼす粒子形状特性の影響についての研究は未だ十分とはいえない。

本報では、粒子の挙動に及ぼす粒子形状の影響をより定量的に検討するために、粉粒体の静的特性値の一つである容器内での粒子充填特性、及び動的特性値の一つである粉体オリフィスからの排出特性について粒子形状および粒子径の異なる各種不規則形状粒子群を用いて実験を行った。これらの結果を、先に定義した二つの形状指数⁶⁾をもとに重回帰分析法⁷⁾により検討し、2, 3の知見を得たので報告する。

2. 実 験

2.1 実験試料と粒子形状の評価法

実験試料とその特性値をTable 1に示す。本実験では、各試料ごとに1~10種類の粒子径 d_p (m)(篩目開き平均径)の異なる粒子群(計38種類)が採用された。なお、同表にはこれらの各試料の粒子径と、各形状指数(円形度 ϕ (-), 平滑度 ζ (-))の各範囲を付記した。ここで、 ϕ および ζ は筆者らの一人が先に定義した形状指数であり⁶⁾、いずれも各試料ごとに無作為に抽出された約500個の粒子の各形状指数の平均値である。なお、

1996年 6月 21日受付

化学工学会第61年会(1996年 4月, 名古屋)にて発表

* 富山大学工学部物質工学科

(〒930 富山市五福 3190) TEL. 0764-45-6829

Dept. of Mater. Sci. and Eng., Toyama Univ.

(3190 Gofuku, Toyama 930)

Table 1 Materials used

Materials	True density $\rho(\text{kg/m}^3)$	Diameter ^{*2)} $d_p(\mu\text{m})$	Circularity ^{*3)} $\phi(-)$	Smoothness ^{*3)} $\zeta(-)$	Number of kinds ^{*4)}
Silica sand A	2670	163, ..., 920	0.856, ..., 0.880	0.899, ..., 0.916	(10)
Silica sand B	2660	163, ..., 920	0.904, ..., 0.914	0.902, ..., 0.912	(10)
Silica sand C	2640	163, 213	0.857, 0.872	0.901, 0.900	(2)
Silica sand D	2650	273, ..., 920	0.859, ..., 0.890	0.895, ..., 0.903	(3)
Mullite beads	3070	76, ..., 460	0.955, ..., 0.968	0.961, ..., 0.968	(5)
Glass beads	2190	505, ..., 920	0.936, ..., 0.982	0.944, ..., 0.970	(3)
Crushed silica sand A	2660	920	0.839	0.869	(1)
Crushed silica sand B	2660	920	0.849	0.880	(1)
Alumina	1960 ^{*1)}	545, ..., 920	0.849, ..., 0.857	0.849, ..., 0.877	(3)

* 1) apparent density of a particle

* 2) mean value of sieve openings

* 3) mean value for about 500 particles in total

* 4) total kinds of materials differing in d_p , ϕ and ζ

Fig. 1 Definition of circularity ϕ and smoothness ζ by image analysis for particle image P

本報で採用されたこれら二つの形状指数(円形度 ϕ 及び平滑度 ζ)の定義及びその測定法を、以下に略記する。

Fig. 1に示すごとく粒子投影画像Pを楕円の輪郭に凹凸を有する画像とみなし、その形状の特徴を二つの形状指数に分解し、以下のごとく定義した。すなわち、

(I) 円形度 ϕ : 粒子画像の偏平の度合いを示す巨視的な形状指数の一つとして、

$$\phi = \frac{\text{粒子画像のHeywood径}(d_H)}{\text{相当楕円Eの長径}(D_e)} \quad (1)$$

(II) 平滑度 ζ : 相当楕円Eを基準とした粒子画像の輪郭の凹凸の度合いを示す微視的な形状指数の一つとして、

$$\zeta = \frac{\text{相当楕円Eの周長}(P_e)}{\text{粒子画像の周長}(P_p)} \quad (2)$$

なお、これらにより算出される値はいずれも $0 < \phi \leq 1.0$, $0 < \zeta \leq 1.0$ の範囲にて評価できる。従って、画像

が真円に近い場合 $\phi=1.0$, $\zeta=1.0$ に近く、平滑楕円ならば $\phi < 1.0$, $\zeta=1.0$ となる⁸⁾。

ここで、相当楕円Eとはその面積(A_e)及び長短軸比(D_e/S_e)が各々粒子画像の面積(A_p)及び長短比(D_p/S_p)に等しい楕円と定義した。

また、これらの計測には、まず顕微鏡で拡大された粒子の投影画像を画像解析装置に取り込み、各粒子の投影画像より長径(D_p)(最長径)、短径(S_p)(長径に対する幅)、周長(P_p)、面積(A_p)を測定した。次に、これらの測定値より相当楕円Eの周長(P_e)、長径(D_e)を算出し、 ϕ および ζ を求めた。なお、粒子投影画像を画像解析装置に取り込む時には、各粒子をできるだけ安定な姿勢に保ち、また個々の粒子画像の大きさの違いによる ϕ 及び ζ の測定誤差の変動を小さくするため、粒子画像がほぼ一定の大きさとなるように、試料毎に顕微鏡の拡大率を調節した。

Fig. 2(a)~(d)には、本実験で採用された代表的な試料粒子の投影画像及び各試料の形状指数の平均値を示す(Table 1参照)。Fig. 2(a)に示すガラスビーズの粒子画像はいずれも平滑円に近いことが認められる。従って、これらの形状指数 ϕ および ζ はいずれも1.0に近い値を示している。一方、Fig. 2(d)は破碎された珪砂の代表的画像である。これらは、いずれも長短比が大きく、かつ凹凸の度合いも大きい輪郭を有する粒子群である。それらの形状指数 ϕ および ζ は共に比較的小さい値を示している。

また、実体顕微鏡による粒子の3次元形状の観察においても、Fig. 2(a)の粒子群は表面が平滑な球状に近い粒子であり、一方、Fig. 2(d)の粒子群は表面に凹凸を有する角状の粒子群であることが確かめられた。

Fig. 2 Representative particle images sampled from each material and average shape indices (cf. Table 1)

2. 2 実験方法

2. 2. 1 充填特性に関する実験方法

粒子群の静的特性値の一つとして、本報では、2重管引上げ法⁹⁾によって形成された容器内粒子充填層の空隙率 ε に着目した。**Fig. 3**にその実験装置の概略を示す。

本実験では内径40mmのメスシリンダー内に垂直に立

Fig. 3 Experimental apparatus for measurement of void fraction in a packed bed

てられた内径17mmのガラス内管に、層高約500mmまで試料を装填した後、内管を静かに鉛直方向に引き上げつつ、メスシリンダー内に試料を充填した。その充填層の嵩容積および質量を測定することにより充填層内の空隙率 ε を求めた。なお、本実験で使用された試料の粒子径 d_p はいずれも充填用メスシリンダー内径 D_V に対して十分小さく($d_p/D_V=0.0019\sim0.023$)、壁効果が無視できることを確かめた。

2. 2. 2 排出特性に関する実験方法

粒子の動的特性値の一つとして、ガラス円筒内底部中心に設けられた水平平板円形オリフィス型排出口からの粒子排出速度 $V_0(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$ を採用した。**Fig. 4**に実験装置の概略を示す。

粒子排出速度 V_0 の測定には、内径40mmのガラス円筒容器内に2重管引上げ法により試料を装填(嵩容積約 200cm^3 、層高約160mm)した後、同ガラス容器底部に設けられたオリフィスからの試料の排出を開始し、容器内の粒子層外周部の高さが約30mmに達する間(排出速度がほぼ一定に保持されている間)の排出試料の質量 M 及び時間 t を測定することにより、試料の平均排出容積速度 $V_0(=(M/\rho)/t)$ を求めた。

ここで、本報ではオリフィス口径 $D_0(=5, 7, 10, 13, 15\text{mm})$ の異なる5種類のオリフィス板(厚さ3mm、真鍮製)を使用し、 $d_p/D_0=0.013\sim0.13$ の範囲において実験を行った。

なお、本報で採用された ε 、 V_0 の値は、同一条件の下で5~10回計測された結果の平均値である。

Fig. 4 Experimental apparatus for measurement of particle discharge rate through a circular orifice

Fig. 5 Effects of circularity ϕ (in Fig. (a)) and smoothness ζ (in Fig. (b)) on void fraction ε , respectively

3. 実験結果及び考察

3. 1 空隙率に関する実験結果及び考察

3. 1. 1 空隙率に関する実験結果

Fig. 5(a), (b)は各試料の充填層内空隙率 ε と円形度 ϕ あるいは平滑度 ζ との関係について、各試料の粒子径 d_p をパラメータに全実験結果をそれぞれ示したものである。これらの図においては、いずれの粒子径 d_p にも無関係に、 ε は ϕ および ζ と比較的強い負の相関があり、 ϕ および ζ が1.0に近い粒子ほど、空隙率 ε が小さくなる傾向にあるように見える。

しかし、本実験で用いた試料粒子群では、その形状指数 ϕ と ζ との間に相関(単相関係数 $r=0.889$)が認められたことから、Fig. 5に示したような整理法では、 ε に対して二つの形状指数 ϕ および ζ が各々どのような影響を及ぼしているかを明確に知ることは困難であると考えた。

そこで以下に示すごとく、各独立変数の間に相関がある場合の要因分析に対して有効な一手法である重回帰分析法をもとに、 ε に及ぼす各形状指数及び粒子径の影響について検討することを試みた。

3. 1. 2 空隙率 ε に及ぼす各種要因の分析

本実験に使用した粒子のサイズはいずれも充填容器内径に対して十分小さいことから、本報では器壁の効果を無視し、次式のように、 ε を円形度 ϕ 、平滑度 ζ 、粒子径 d_p の関数とおいた。

$$\varepsilon = f(\phi, \zeta, d_p) \quad (3)$$

ここで、上式の関係がEq. (4)で与えられるものと仮定し、同式の両辺の対数をとることにより線形化すればEq. (5)を得る。なお、Eq. (5)における p_i ($i=1\sim3$)は偏回帰係数 * 、 $\ln k_e$ は定数項である。

$$\varepsilon = k_e \phi^{p_1} \zeta^{p_2} d_p^{p_3} \quad (4)$$

$$\ln \varepsilon = \ln k_e + p_1 \ln \phi + p_2 \ln \zeta + p_3 \ln d_p \quad (5)$$

本報ではEq. (5)に示す重回帰モデル式に基づき、本実験結果について線形重回帰分析を行った結果、次式を得た。

$$\varepsilon = 0.363 \phi^{-0.258} \zeta^{-2.41} d_p^{-0.0102} \quad (6)$$

また、その分析結果の詳細をTable 2(a)に示す。同表より、 ζ を除く他の変数(ϕ 及び d_p)に関する偏 F 値 * (F)が共に2.0より小さいことが分かる。本報では、重回帰分析において偏 F 値が2.0を下回る独立変数は従属変数には影響を及ぼしてはいないものと判断する一般的手法 $^{7)}$ を採用し、以下のごとく検討してみた。

この手法に基づけばTable 2(a)に示すように、二つの変数 ϕ 及び d_p に関する偏 F 値は共に2.0より小さいため、そのような変数 ϕ 、 d_p を含むEq. (6)による ε の推定は有効ではないものと判断される。

そこで、まず、Eq. (4)において ϕ を無視し、 ε を ζ と d_p のみの関数とした場合について、重回帰分析を行った結果、次式を得た。

$$\varepsilon = 0.357 \zeta^{-2.73} d_p^{-0.012} \quad (: R=0.956) \quad (7)$$

分析結果の詳細をTable 2(b)に示す。同表に示すように、 d_p に関する偏 F 値は共に2.0より大きいことが分かる。これより、Eq. (7)におけるこれ二つの変数 ζ 及び d_p は有意となり、 ε 、 ζ 及び d_p の関係を与える式

* 偏回帰係数は特定の独立変数が従属変数に及ぼす影響の度合いを表す。また偏 F 値は推定された偏回帰係数の信頼性に関する一指標である。すなわち、独立変数が二つ以上からなる線形重回帰式においては、着目の独立変数に関する偏回帰係数は他のすべての独立変数を一定にしたときの着目独立変数に関する単回帰係数に相当する。また、各独立変数が従属変数の予測に寄与しているか否かを統計的に検定する指標の一つとして、各独立変数に対する偏 F 値が用いられる(詳細については参考文献7)等を参照)。

Table 2 Results of multiple regression analysis for void fraction ε
 (: effects of $\ln\phi$, $\ln\zeta$ and $\ln d_p$ on $\ln\varepsilon$)

	$\ln\phi$	$\ln\zeta$	$\ln d_p$	$\ln k_\varepsilon$	Corresponding equation
p_i	-0.258	-2.41	-0.0102	-1.01	Eq. (6)
p_i^*	-0.128	-0.857	-0.0716	0	
(a) F	1.37	58.9	1.85	—	
γ_i	-0.200	-0.801	-0.230	—	
VIF	4.78	5.01	1.11	—	
p_i	—	-2.73	-0.0120	-1.03	Eq. (7)
p_i^*	—	-0.973	-0.0849	0	
(b) F	—	354	2.70	—	
γ_i	—	-0.955	-0.271	—	
VIF	—	1.06	1.06	—	
p_i	-0.323	-2.28	—	-0.931	Eq. (9)
p_i^*	-0.160	-0.811	—	0	
(c) F	2.20	56.6	—	—	
γ_i	-0.246	-0.790	—	—	
VIF	4.56	4.56	—	—

Fig. 6 Effects of smoothness ζ and particle diameter d_p on void fraction ε

として、同式の有効性が確かめられた。

Fig. 6はEq. (7)による計算値と実測値を比較したものである。同式に基づく重相関係数($R=0.956$)が比較的大きく、また両者は $\pm 5\%$ の誤差範囲内で一致していることから、Eq. (7)は ε の推算式の一つとして十分有効なものといえる。

ここで、Table 2(b)の結果より、 ε に及ぼす ζ 及び d_p の影響の度合いについて比較・検討してみる。本実験試料では ζ と d_p の分布が異なるため、Eq. (7)におけるそれらの指数の大きさを基に、 ζ 及び d_p の ε に及ぼす影響の度合いを比較することは難しい。

そこで、前述の重回帰モデル式Eq. (5)中の各変数($\ln\varepsilon$, $\ln\zeta$, $\ln d_p$)の分布がいずれも平均0、分散1.0となるように標準化**した後、Eq. (8)の重回帰モデル式に

基づき、前述と同様の手順によって重回帰分析を行い、各標準偏回帰係数 p_i ($i=2,3$)を求めた。その結果をTable 2(b)に示す。

$$\ln\varepsilon^* = p_2^* \ln\zeta^* + p_3^* \ln d_p^* \quad (8)$$

同表より、 ζ^* に関する標準偏回帰係数の絶対値($|p_2^*| = 0.973$)は d_p^* のそれ($|p_3^*| = 0.0849$)に比較して約10倍とかなり大きい。これより、本実験範囲では、 ε に及ぼす ζ の影響は d_p よりもかなり大きいことが推測される。

また、 ε は d_p よりも ζ との間により密接な相関関係があることは、Table 2(b)中に示した ζ に関する偏相関係数の絶対値($|\gamma_i| = 0.955$)が d_p のそれ($|\gamma_i| = 0.271$)よりもかなり大きいことから裏付けられる。

次に、 ε に及ぼす二つの形状指数 ϕ と ζ の影響の度合いについて検討する。すなわち、Eq. (4)において d_p を無視し、 ε を ϕ 及び ζ のみの関数と置き、先と同様な方法により重回帰分析を行った。その結果、次式を得た。

$$\varepsilon = 0.394\phi^{-0.323} \zeta^{-2.28} \quad (: R=0.956) \quad (9)$$

その重回帰分析の詳細をTable 2(c)に示す。同表より ϕ 及び ζ に関する偏 F 値は共に2.0より大きく、また重相関係数($R=0.956$)も大きいことから、 ε の推算が

** 例えば、 $\ln\varepsilon$ の場合には、 $\ln\varepsilon^* = (\ln\varepsilon - \ln\bar{\varepsilon}) / \sigma_{\ln\varepsilon}$ によって標準化された変数 $\ln\varepsilon^*$ を求めた。ここで、 $\ln\bar{\varepsilon}$ は $\ln\varepsilon$ の平均値、 $\sigma_{\ln\varepsilon}$ は $\ln\varepsilon$ の標準偏差である。また、 $\ln\zeta$ 及び $\ln d_p$ もこれと同様の手順により標準化し、 $\ln\zeta^*$, $\ln d_p^*$ を求めた。

前述のEq.(7)と同様に、Eq.(9)によっても可能であるものといえる。

ここで、 ε に及ぼす ϕ と ζ の影響の度合いを比較するために、先の場合と同様に、標準化された各変数をもとに重回帰分析を行った。その結果得られた標準偏回帰係数 p_i^* をTable 2(c)に示す。同表より、 ζ^* に関する標準偏回帰係数の値は ϕ^* のそれに比較して約5倍であることから、 ϕ よりも ζ の方が ε により大きな影響を及ぼしているものと言える。

一方、偏相関係数 γ_i に着目すると、Table 2(c)に示すように ζ に関する $|\gamma_i|$ (=0.790)は ϕ の $|\gamma_i|$ (=0.246)に比較してかなり大きいことから、 ϕ よりも ζ の方が ε との間により強い相関関係があることが分かる。

以上の結果より、本実験で用いられた各種不規則形状粒子群においては、充填層内の空隙率 ε は粒子の巨視的な偏平の度合い(ϕ)よりも粒子表面の微視的な特徴、すなわち、粒子表面の凹凸(ζ)による粒子間の摩擦特性によってより大きく支配されるものと推定される。

なお、Table 2(a)～(c)での分析結果において、いずれの独立変数に関する分散拡大要因VIFも10より小さく¹⁰⁾、独立変数間の相関による多重共線性の問題は生じておらず、分析結果は有効であるといえる。

3. 2 排出速度に関する実験結果及び考察

3. 2. 1 排出速度に関する実験結果

Fig. 7(a), (b)は排出速度 V_0 に及ぼすオリフィス口径 D_0 の影響を形状の異なる各試料について、代表的な粒子径 $d_p=323, 920\mu\text{m}$ の各粒子群別に、それぞれまとめたものである。

これらの図では、いずれの粒子径においても V_0 は D_0 と強い相関があり、 D_0 が大きいほど、排出速度 V_0 が大きくなる傾向が見られる。また、 V_0 は粒子形状(ϕ, ζ)や粒子径(d_p)によっても影響を受けていることが認められる。

3. 2. 2 排出速度 V_0 に及ぼす各種要因の分析

排出速度に関する実験結果について、先の ε に関する場合と同様に、 V_0 に及ぼす形状指数及び粒子径等の各種要因の影響を重回帰分析により検討を試みた。

V_0 に影響を及ぼす因子として、Eq.(10)に示すように、円形度 ϕ 、平滑度 ζ 、重力加速度 g 、粒子径 d_p 、オリフィス口径 D_0 を考え、次元解析によりEq.(11)を得た。

$$V_0 = f(\phi, \zeta, g, d_p, D_0) \quad (V_0 = (M/\rho)/t) \quad (10)$$

Fig. 7 Effects of orifice diameter D_0 on particle discharge rate V_0 .

$$\frac{V_0}{\sqrt{g} d_p^{2.5}} = k_v \phi^{p_1} \zeta^{p_2} \left(\frac{D_0}{d_p} \right)^{p_3} \quad (11)$$

ここで k_v は定数項である。

Eq.(11)の両辺の対数を取り、Eq.(12)のごとく線形化し、本実験結果をもとに線形重回帰分析を行った。その結果Eq.(13)を得た。

$$\ln \left(\frac{V_0}{\sqrt{g} d_p^{2.5}} \right) = \ln k_v + p_1 \ln \phi + p_2 \ln \zeta + p_3 \ln \left(\frac{D_0}{d_p} \right) \quad (12)$$

$$\frac{V_0}{\sqrt{g} d_p^{2.5}} = 0.149 \phi^{-0.594} \zeta^{6.65} \left(\frac{D_0}{d_p} \right)^{2.8} \quad (13)$$

その分析結果の詳細をTable 3(a)に示す。同表より、 ϕ に関する偏F値のみが2.0より小さいことが分かる。よって、Eq.(12)において ϕ を無視した場合について、再び重回帰分析を行った結果、Eq.(14)を得た(Table 3(b)参照)。

$$\frac{V_0}{\sqrt{g} d_p^{2.5}} = 0.147 \zeta^{5.94} \left(\frac{D_0}{d_p} \right)^{2.8} \quad (14)$$

同表より、 ζ 及び D_0/d_p に関する偏F値は共に2.0より

Table 3 Results of multiple regression analysis for characteristics of particle discharge rate

	$\ln\phi$	$\ln\zeta$	$\ln(D_o/d_p)$	$\ln k_v$	Corresponding equation
p_i	-0.594	6.65	2.80	-1.90	Eq. (13)
p_i^*	-0.0150	0.124	0.983	0	
(a) F	0.690	46.8	12300	—	
γ_i	-0.104	0.653	0.997	—	
VIF	4.51	4.50	1.07	—	
p_i	—	5.94	2.80	-1.92	Eq. (14)
p_i^*	—	0.111	0.985	0	
(b) F	—	168	13300	—	
γ_i	—	0.851	0.998	—	
VIF	—	1.00	1.00	—

Fig. 8 Final correlation of experimental results with calculated ones by Eq. (14) on discharge characteristics of particles through circular orifice

も大きいことから、Eq. (14)が有効であることが確かめられる。

Fig. 8はEq. (14)による計算値と実測値とを比較して示したものであり、両者の重相関係数 $R(=0.998)$ が1.0にかなり近いことから、Eq. (14)による粒子排出速度 V_o の推算は十分可能であることが分かる。

なお、Eq. (14)におけるオリフィス口径と粒子径との比 D_o/d_p に関する指数2.8の値は、これまでに報告されている幾つかの結果^{11,12)}とほぼ一致している。

以上の結果より、粉体オリフィスからの粒子排出速度項 $V_o/(\sqrt{g} d_p^{2.5})$ は、主として粒子表面の微視的な形状特性(すなわち、粒子表面の凹凸の度合い(ζ))、及びオリフィス口径と粒子径との比 D_o/d_p に依存するものと考えられる。

4. 結 言

粒子充填層内での空隙率 ϵ および粉体オリフィスからの粒子排出速度に及ぼす二つの形状指数(ϕ , ζ)および粒子径 d_p の影響について、重回帰分析法に基づいて検討した。その結果以下の知見を得た。

(1)容器内に充填された粒子群の空隙率 ϵ は、粒子の巨視的な形状特性である偏平の度合い(ϕ)よりも、粒子表面の微視的な形状特性、すなわち、粒子表面の凹凸(ζ)によって大きく支配される。

(2)一方、粉体オリフィスからの粒子排出速度特性に関しては、 $V_o/(\sqrt{g} d_p^{2.5})$ は、主として粒子表面の微視的な形状特性(粒子表面の凹凸の度合い(ζ))、及び、オリフィス口径と粒子径との比 D_o/d_p に依存する。

以上の結果より、粉粒体の挙動は粒子の形状特性、特に平滑度 ζ にかなり支配されるものと考えられる。これは粒子間の摩擦特性に起因するものと推測される。

[謝 辞]実験の遂行にあたっては当時学生であった越間研吾氏の協力を得た。ここに謝意を表します。

Nomenclature

A_c : area of equivalent circle	(m^2)	$(=2\sqrt{A_p D_p}/(\pi S_p))$	(m)
A_e : area of equivalent ellipse	(m^2)	D_o : diameter of orifice(aperture)	(m)
A_p : area of particle image	(m^2)	D_p : maximum length of particle image	(m)
D_e : maximum length of equivalent ellipse		D_v : inside diameter of vessel	(m)

d_H : Heywood diameter of particle image ($=2\sqrt{A_p/\pi}$)	(m)	($=2\sqrt{A_p S_p/(\pi D_p)}$)	(m)
d_p : average diameter of particles by sieve analysis	(m)	S_p : breadth of particle image	(m)
F : partial F-value	(-)	t : time required for discharge of particles	(s)
g : gravitational acceleration	($m \cdot s^{-2}$)	VIF : variance inflation factor	(-)
k_v : constant in Eq.(11)	(-)	V_O : volumetric discharge rate of particles through orifice($= (M/\rho)/t$)	($m^3 \cdot s^{-1}$)
k_e : constant in Eq.(4)	(m^{-Ph})	γ_i : partial correlation coefficient in multiple regression analysis	(-)
M : mass of discharged material	(kg)	ε : void fraction of packing	(-)
P_e : perimeter of equivalent ellipse ($= 4 \int_0^{\pi/2} \sqrt{(D_e/2)^2 \sin^2 \theta + (S_e/2)^2 \cos^2 \theta} d\theta$)	(m)	ζ : smoothness defined by Eq.(2)	(-)
P_p : perimeter of particle image	(m)	ρ : true density of particles	($kg \cdot m^{-3}$)
p_i : regression coefficients in Eqs.(5) or (12)	(-)	ϕ : circularity defined by Eq.(1)	(-)
R : multiple correlation coefficient	(-)	<Superscript>	
r : single correlation coefficient	(-)	* : standardized variable of which mean and standard deviation represent 0 and 1.0, respectively	
S_e : breadth of equivalent ellipse			

References

- 1) Miwa, S. : "Funryutai Kogaku", p.65, Asakura Shoten(1972)
- 2) Suzuki, M., R. Yamanaka, T. Nagayama and T. Oshima : "Effect of Particle Shape on Void Fraction in Particle Packing Bed", Preprint of 21th Summer Symposium, Soc. of Powder Technol., Japan, pp.20-24, Kannami(1985)
- 3) Tsubaki, J., G. Jimbo and R. Wade : "A Study on the Shape Characterization of Particles", *J. Soc. Mat. Sci., Japan*, **24**, 38(1975)
- 4) Suzuki, M. : "Fractal Dimension and Its Application for Powder Technology", *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **27**, 693(1990)
- 5) Sakai, T., M. Fujikawa, S. E. Laurich-McIntyre and R. C. Bradt : "Quantitative Analysis for Shape Irregularity of Ceramic Particles Based on Richardson Effect", *J. Soc. Mat. Sci., Japan*, **40**, 1605(1992)
- 6) Sugimoto, M., N. Yokota and H. Nakazawa : "Characterization of a Particle by a Pair of Shape Indexes", *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **26**, 624(1989)
- 7) Okuno, T., H. Kume, T. Haga and T. Yoshizawa : "Tahenryo Kaisekiho", revised ed., p. 135-143, Nikkagiren Shuppansha(1971)
- 8) Sugimoto, M., N. Yokota and H. Miyanaga : "The Simultaneous Operation of Granulation, Grinding and Separation in a Continuous Tumbling Conical Granulator-On the Shape Evaluation of the Granules and Granulating Conditions-", *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **30**, 563(1993)
- 9) Iinoya, K.(ed.) : "Funtai Kogaku Handbook", p. 103, Asakura Shoten(1965)
- 10) Chatterjee, S. and B. Price : "Regression Analysis by Example", 2nd ed., p.191, John Wiley & Sons, Inc.(1991)
- 11) Zenz, F. A. : "How to Predict Gravity Flow Rates", *Petroleum Refiner*, **36**, 162(1957)
- 12) Tanaka, T. and S. Kawai : "Gravitational Flow of Particles from Hopper Funnels", *Kagaku Kogaku*, **20**, 144(1956)