安息角の測定値に及ぼす実験条件の影響*

(注入角法の場合)

青山 道夫** 重 吉 孝 正**

The Effect of Experimental Conditions on the Angle of Repose of Poured Powder

by

Michio AOYAMA and Takamasa SHIGEYOSHI

(Research Laboratory, Yaskawa Electric Mfg. Co., Ltd., Kitakyūshū)

In this experiment, the effects of apparatus factors, such as the base ring diameter, the pouring rate, etc. on the angle of repose ϕ_r of the poured powder have been studied.

By using the apparent fraction of the void ϵ^* of the poured powder and its adhesion property, the authors have tried to explain the dependency of ϕ_r on the apparatus factors.

In this case, the apparatus factors for the angle of repose of the poured powder are as follows :

- (1) The base ring diameter D_r (mm)
- (2) The pouring rate Q (g/min)
- (3) The spatter height H_s (mm)
- (4) The base ring height h_r (mm)

Magnesium hydroxide, garnet, talc, artificial stone (white marble), glass bead, and lycopodium were used as sample powder.

The results obtained are summarized as follows :

- (1) As D_r increases, ϕ_r of all sample powder decreases and ϵ^* of talc, glass bead, and artificial stone decreases, but ϵ^* of lycopodium, garnet, and magnesium hydroxide is constant.
- (2) As Q increases, ϕ_r and ϵ^* of all sample powder decrease.
- (3) As H_s increases, ϕ_r of magnesium hydroxide and artificial stone increases, and ϕ_r of lycopodium decreases, but ϵ^* of all these powder decreases.
- (4) As h_r increases, in the case of the artificial stone, ϕ_r and ϵ^* take the maximum value and then they decrease again.

For the dependency of ϕ_r on these apparatus factors, the following are matters of great importance.

- (1) Packing of the poured powder by its own weight.
- (2) Break down of the top of the heap of the poured powder by falling powder.
- (3) The pile up effect on the top of the heap of the poured powder by its adhesion property.
- (4) In fine powders their coagulated secondary particles moved as flowing units through the spatter, but, in the case of the large H_s , these coagulated particles were broken into primary particles during the falling.

(Received Feb. 1, 1969)

1 はじめに

安息角は粉体の付着性と関連した特性量である。その一見単純素朴な測定や現象にも粉体特有の性質がよく現われており、まず十分に解明されていない。

特に粉体特性に注目して実験を行なうので、一般にはそれを測定する装置および条件は case by case で普遍性がなく、実験条件に対する因子も報告されていない。

そこで筆者らは各種の粉体の安息角を注入法で測定し、実験条件の影響を明らかにするとともに、その間の関連を注入粉体の空げき率と付着性（経験的に得られた定性的な感じ）の2点から考察を試みた。その結果同じように注入される粉体でも、その粉体によってたい積粉体の生成プロセスが異なると考えてよい現象を認めたので報告をする。

2 実験方法および試料について

実験装置の略図を Fig. 1 に示す。粉体を振動スパーテルによって注入した。円形のベースの上にはリン

* 原稿受理 昭和44年2月1日

** (株)安川電機製作所研究所 北九州市八幡区藤田

Fig. 1. Schematic figure of experimental method and experimental parameter.

グを設け注入粉体の底面径を規制した。また、ベースの下にはスポンジ・ダンパを敷いて、振動がたい積粉体層に加わらないようにした。たい積粉体の高さは読取り顕微鏡で行なった。

注入角法における実験のパラメータは次に示す四つを考えた。

- (1) D_r : ベース・リングの直径
- (2) H_s : ベースからスパータ先端までの高さ
- (3) h_r : ベース・リングの高さ
- (4) Q : 粉体の平均注入速度 (注入粉体重量を注入時間で割ったもの)

この四つを実験パラメータとしてたい積粉体の安息角および空げき率を求めた。

なお安息角 ϕ_r は次式で求め 5 回の測定値の平均で表わした。

$$\phi_r = \tan^{-1}(H/(D_r/2))$$

またたい積粉体層の見掛け空げき率 ϵ^* は、その粉体の重量 W と体積 V から近似的に求めた。

$$\epsilon^* = 1 - \rho_a / \rho_t$$

ρ_t : 粉体真密度

ρ_a : 粉体見掛け密度

$$W / \left(\frac{1}{3} \pi \left(\frac{D_r}{2} \right)^2 H + \pi \left(\frac{D_r}{2} \right)^2 h_r \right)$$

使用した粉体の特性値を Table I に示す。 S_w は空気透過法の値であり、 d_{s_w} は比表面積径である。なお寒水砂は S_w の値は測定しておらず、 44μ ふり下とこのことのみ表記してある。

Table I. Characteristics of sample powders.

Material	ρ_t (g/cm ³)	S_w (cm ² /g)	d_{s_w} (μ)
Magnesium hydroxide	2.29	30,300	0.86
Talc	2.77	11,390	1.9
Garnet	3.81	1,380	11.4
Artificial stone (White marble)	2.7	(-44 μ)	
Glass bead	2.5	1,740	13.8
Lycopodium	1.1	4,680	14.4

ρ_t : Density, S_w : Specific surface, d_{s_w} : Specific surface diameter.

3 実験結果と検討

3.1 ベース・リング径 D_r の影響

H_s , h_r , Q をそれぞれ一定に保って ϕ_r , ϵ^* に対する D_r の効果を調べた。

Fig. 2 (a) および (b) に見られるように、どの粉体についても D_r の ϕ_r に対する効果は、すでに多くの報告になされているのとまったく同じ傾向である。^{*1}

しかし Fig. 2 (a) は D_r に対して ϵ^* が一定になっている粉体 (石松子, ざくろ石, 水酸化マグネシウム) であり, Fig. 2 (b) は D_r に対して ϵ^* が反比例的に変化している粉体 (寒水砂, タルク, ガラスビーズ) である。

付着性に乏しい石松子と付着性の大きい水酸化マグネシウムとが同じ傾向にあるのは、奇異に感ぜられるがこれは次のように考えられる。

水酸化マグネシウムは付着性が大きいために、振動

Fig. 2. Relation of ϕ_r and ϵ^* vs. D_r . White key is ϕ_r and black key is ϵ^* .

*1 たとえば、粉体工学研究会附着凝集グループ会・会員発表データ

スパークルの中を移動してくる間に二次粒子に造粒されて落下する。したがって、この場合たい積層は二次粒子によって構成されている。しかも、二次粒子にもかかわらず他の粉体に比較して ϕ_r が大きいのは、 ϵ^* が0.92と大きいことから推定できるように、二次粒子自体の重量は非常に軽く、落下時の衝撃によるたい積層頂点部の破壊や自重による圧密もなく、その付着性のために高く山積みが可能なためと思われる。

一方 D_r に対して ϵ^* が反比例的に変化する粉体は、自重による圧密効果が顕著に現われてきたものであり、それによる ϕ_r の低下がでてきたものであろう。

このようにたい積層の ϵ^* が一定のまま D_r に対して ϕ_r が変化する場合と、 D_r に対して ϵ^* も ϕ_r も変化する場合の粉体のたい積層生成プロセスは本質的に異なるものと思う。しかし、この点については、配位数など粒子の配列状態を表わす特性値を使って、さらに検討を加えるべきであらう。

3・2 注入速度 Q の影響

D_r , h_r , H_s を一定に保って Q の ϕ_r , ϵ^* に対する効果を調べた。

Q の影響は軽い二次粒子を形成する水酸化マグネシウムや密度の小さい石松子については、あまり顕著な効果は見られない。しかし、Fig. 3(b)に示したように吸着水分によって二次粒子を作りやすいガラスビーズは、比較的重量の重い二次粒子としてスパークルから供給されるため圧密とたい積層頂点部の破壊によって、 Q が大きくなると ϕ_r , ϵ^* とも小さくなってくる

Fig. 3. Relation of ϕ_r and ϵ^* vs. Q . White key is ϕ_r and black key is ϵ^* .

と考えられる。

3・3 スパークルの高さ H_s の影響

次に D_r , h_r , Q を一定に保って H_s の ϕ_r , ϵ^* に対する効果を調べた。

水酸化マグネシウムと寒水砂の ϕ_r に対する傾向と、石松子の ϕ_r に対する傾向とはまったく逆である。しかし、いずれの場合も ϵ^* はほとんど変化していない。このことから ϕ_r に対する H_s の効果を次のように考えることができる。

Fig. 4. Relation of ϕ_r and ϵ^* vs. H_s . White key is ϕ_r and black key is ϵ^* .

H_s が高くなると ϕ_r が低くなると石松子は、スパークルから落下した粒子の衝撃力によるたい積粉体の頂点の破壊のためと思われる。すなわち、頂点部の粒子相互間の付着力も弱く、不安定な配列状態のため上からの衝撃によってたい積粉体の頂点部の破壊が起きていることは、 ϵ^* が一定であることから推定される。

また、水酸化マグネシウムや寒水砂のように付着性の強い粉体は、振動スパークルの中を移動するときに造粒され、さらに造粒された粒子どうしが付着して巨大な凝集粒子としてスパークルから排出される。

しかし、 H_s が高くなるとたい積粉体の頂点に到達する間に空気抵抗などによってふたたび二次粒子、一次粒子に分離していく粉体が多くなる。したがって、

Fig. 5. (a) The break down of the top of a mountain by falling lycopodium powders.

(b) The coagulated $Mg(OH)_2$ particles were broken into primary particles during the falling. And the pile up effect occurs on the mountain by its adhesion property.

この場合落下粒子の見掛け粒径が小さくなってくるために、 ϕ_r が大きくなったものと思われる。これは実験中にスパータルから排出される粉体の状態の観察から得られた推定である。

なお、この二つのプロセスをモデル的に表わすと Fig. 5 のようになる。

3・4 ベース・リングの高さ h_r の影響

最後に D_r , H_s , Q を一定に保って h_r の ϕ_r , ϵ^* に対する効果をざくろ石で調べた。

リングの有る場合とない場合とではたい積粉体の底部周辺は粒子の配列状態に差があるはずであるから、

Fig. 6. Relation of ϕ_r and ϵ^* vs. h_r . White key is ϕ_r and black key is ϵ^* .

ϕ_r の値には違いが生ずるが、リングの高さには関係しないであろう。しかし、この実験例では、 ϕ_r の値は $h_r=0$ (リングのない場合で $D_r=35$ mm の台のみ) $h_r>0$ (リングが有る場合) とでは違いが生じているが、 h_r が大きくなるに従って ϕ_r は一定とはならなかった。一方 ϵ^* についてはあまり顕著な変化はないが、ほぼ ϕ_r の変化に追随している。

この結果についてはさらに実験を重ね検討を加えていく必要があり、現在のところその理由は明らかでない。

4 む す び

注入角法による安息角は運動粉体が順次たい積しながら静止状態に移行する過程で現われる現象であり、一見単純素朴な現象であるが、おのおのの粉体の特性が顕著に現われてくる複雑な現象である。

したがって、実験条件(装置の因子)もおのおのの粉体について、それぞれ特有の現われ方をしており、簡単に論ずることはできない。それはたい積粉体層の見掛け空げき率と粉体の付着性から考えて、たい積粉体層が生成されていくプロセスがおのおのの粉体によって異なるためであろうと推定されるからである。

(昭和43年10月3日 第6回粉体に関する討論会にて講演)