総 説

振動を与えられた粉粒体の流動性*

Some Fluid-like Properties of Granular Solid in Vibrating Field

吉 田 哲 夫**

Tetsuo Yoshida

向 阪 保 雄**

Yasuo Kousaka

1. ま え が き

振動といえば機械工学などの分野ではしばしば有害視されその防止策に悩まされることが多いが、粉体工学の分野ではこれによって種々の有益な効果がもたらされることが多い。粉体工学に関係のある分野における振動の有効な応用例として、ふるい分け、輸送、供給、粉碎、密充てん、造粒、振動によって形成される流動層など数多くあげることができる¹⁾。一方有害な場合の例としては地震時の建屋基礎の支持力低下という現象、あるいは流動を促進させるつもりで与えた振動が粉体を密充てんしかえって流動を阻害してしまう現象などがあげられる。粉体に振動を与えることによって現われる諸現象のうち本報告では流動現象について、いままでわれわれが行なってきた二三の基礎的な研究結果をもとに考察することにする²⁻⁵⁾。

振動を与えられた粒体の流動現象とは、振動によって粉体がより流体的な性質をおびる現象をいうが、このような現象をより正確に表現しようとするときには、流動性の難易を示す何らかの尺度がまず必要であり、またこのような尺度を用いたうえで、どのようなメカニズムで流動性が増加するのかをとらえてゆくことが必要となってくる。ところが実際には、粉体の集合体としての諸性質そのものがあまり明確でないことと、さらにそのうえ振動という影響因子が加わるため流動性の尺度もかなり明確さを欠いてしまう。本報告では比較的解析しやすいような流動性の尺度を選び、また粉体としては非付着性でしかも粒子径の粗いものを対象とし、さらに与える振動も上下方向の正弦波振動に限って考察を行なった。

2. 流動性を表わす尺度について

一般に粉体の流動性を一つの簡単な尺度で表現することはきわめて困難であり、ニュートン流体のように、

shear stress と shear rate の関係つまり流動曲線を描くことによってその流動性がほぼ表示されてしまうというようなわけにはいかない。そこで本報告では粉体の流動性を表わす尺度として次の三つのものを用いた。すなわち

(i) ストーマ粘度計による回転せん断抵抗

(ii) 安息角の変化速度

(iii) オリフィスからの流出速度

(i) は流体の場合の流動性を表わす一つの尺度となるストーマ粘度計を用いて流体とのアナログな——実際にはアナログは成立しないが表面上——扱いをしようとするもので、粉体層内に挿入された回転円筒のせん断抵抗の大小から流動性の難易を判定しようとするものである。(ii) は粉体の流動性の難易を表わす静的な一尺度である安息角を、振動を与えたときのようにこれが時時刻刻変化する動的な場合にまで拡張して使用し、安息角の変化速度を流動性の一尺度とするものである。(iii) はもともと粉体の動的な流動性を示すオリフィスからの粉体の流出速度が、振動を与えることによってどのように変化するかを調べ、静止重力場と振動場における流出速度の比較において流動性を判定しようとするものである。

3. 上下方向に正弦波振動をする 容器内にある粉体層の運動

以上述べたような尺度を用いて振動を与えられた粉体の流動現象を考察するまえに、振動する容器内にある粉体層の運動が一体どのようなのかを知っておく必要がある。以下これについて略述する。

いま一個の非反発性物体が上下方向に正弦波振動する板の上にあるときには、物体の受ける空気抵抗を無視すると、その変位、物体と板との衝突速度、物体が受ける加速度などを理論的に解析することができる⁶⁾。与える振動加速度が $3.3g$ より大きくなると運動はかなり複雑となるがそれでも与える振動加速度に応じてその運動は規制される⁶⁾。この場合、運動が外乱に対して安定かどうかが問題となるが、このことに関しても外乱を除く

* 昭和44年2月1日受理

** 大阪市立大学工学部 (大阪市住吉区杉本町459)
TEL 06-692-1231

これらのほかに、またこれらと関連して、粉体層は一体となって運動しているかどうか、すなわち上層と下層との運動がほぼ同じであるかどうかが問題である。上層と下層とで運動の異なる原因としては、器壁まさつ（層の高さに応じてまさつ力が異なることによる）および粉体層のひずみ変形などによる影響が考えられる。したが

なお振動する容器内にある粉粒体の運動に関して、Kroll^{10,11)} Batel¹²⁾, Schmid¹³⁾, Bachmann¹⁴⁾, 吉田ら²⁾などの報告がある。

振動を与えた場合の流動性について述べる前に、その基礎となる通気時の流動性について考える。図1に示すように下部から通気された層内にストーマ粘度計の回転円筒を挿入し、この円筒が回転しはじめるときの限界のおもりの有効重量 W_{TC} を通気流速 U を変えて測定すると図2が得られた。このように W_{TC} と U/U_{mf} が1次の関係にあることは、つぎのような考察から理解される。

粉体層内の水平方向応力は Janssen によれば

$$\sigma_2 = \frac{D_b \rho_{a0} g}{4 \mu_i k g_c} \left\{ 1 - \exp \left(- \frac{4 \mu_i k h}{D_b} \right) \right\} \quad \cdots \cdots (1)$$

この同じ層に通気すれば、流れが層流では、(1)式中のかさ密度 ρ_{a0} は ρ_a に変化し

$$\rho_a = \rho_{a0} (1 - U/U_{mf}) \quad (0 \leq U \leq U_{mf}) \quad \cdots \cdots (2)$$

となり、他は変わらないとすると

$$\sigma_2 \propto \rho_a = \rho_{a0} (1 - U/U_{mf}) \quad \cdots \cdots (3)$$

また円筒の回転抵抗のモーメントは σ_2 に円筒面におけるまさつ係数をかけたものと考えれば

$$\text{回転抵抗のモーメント} \propto W_{TC} \propto \sigma_2 \propto \rho_{a0} (1 - U/U_{mf}) \quad \cdots \cdots (4)$$

すなわち W_{TC} と U/U_{mf} とは1次の関係となる。

このようにストーマ粘度計の回転せん断抵抗はつるすおりの有効重量 W_{TC} の大小で表現され、この重量 W_{TC} は粉体のみかけの重さ（いまの場合通気によって粉体はみかけ上軽くなる）と直線関係にあることがわかったので、つぎにこのような性質をとり入れて、振動を与えた場合のストーマ粘度計の回転円筒の動きについて考察する。

さきの通気の場合のみかけのかさ密度 ρ_a に相当するものとしては、この場合

(粉体が跳躍していない位相角に対して)

$$\rho_a = \rho_{a0} (1 - K \sin \omega t) \quad \cdots \cdots (5)$$

(粉体が跳躍している位相角に対して)

$$\rho_a = 0 \quad \cdots \cdots (6)$$

このことは加振粉体層内に挿入された粘度計の回転円筒に作用する抵抗のモーメントも振動の1サイクル中(5)、(6)式の ρ_a に比例して時時刻刻変化していることを意味しており、したがって従来一般に振動によって層内のせん断抵抗が減少するといわれているのは¹⁵⁾、これらの平均的な値が静止重力場に比べて減少するということを示しているにほかならないと考えられる。

回転円筒の運動を考えるにさきだって、 W_T なるおもりによってH軸つまり回転円筒に伝達される回転モーメントは系の伝達効率を1とすれば

$$\frac{r_1 r_3}{r_2} W_T = R W_T \quad \cdots \cdots (7)$$

また静止粉体層中に挿入された回転円筒が $W = W_T'$ なるおもりによって回転しはじめたとし

$$R W_T' - F = R W_0 \quad \cdots \cdots (8)$$

で定義される W_0 を考える。ここで F は回転する系の抵抗損失のモーメントであり、したがって W_0 は動力の伝達損失がないとしたときの回転円筒に有効に作用するおもりの重量に相当する。この $R W_0$ を用いて回転円筒におよぼされるせん断抵抗のモーメント M_r を表わすと

(跳躍していない位相角に対して)

$$M_r = R W_0 (1 - K \sin \omega t) \quad \cdots \cdots (9)$$

(跳躍している位相角に対して)

$$M_r = 0 \quad \cdots \cdots (10)$$

H軸からみたおもりをも考慮した慣性モーメントを I とすれば、以上のことからH軸の回転角 θ に関する次の運動方程式が得られる。

(跳躍していない位相角に対して)

$$I \ddot{\theta} = R W_T - F - R W_0 (1 - K \sin \omega t) \quad \cdots \cdots (11)$$

(跳躍している位相角に対して)

$$I \ddot{\theta} = R W_T - F \quad \cdots \cdots (12)$$

この式を解いた結果だけを示すと、円筒が1回転するに要する時間 T は

($K \leq 1$ の場合……粉体は跳躍運動をしない)

$$T = \frac{8 \pi^2 I f}{S} \quad \cdots \cdots (13)$$

ただし

$$S \equiv -\frac{B}{2}(\beta - \alpha)^2 - C\{(\sin \beta - \sin \alpha) \dots\dots(20)$$

$$-(\beta - \alpha) \cos \alpha\} \dots\dots(14)$$

$$B \equiv (W_0 - W_T)R + F \dots\dots(15)$$

$$C \equiv KRW_0 \dots\dots(16)$$

($K > 1$ の場合……粉体は跳躍運動をともなう)

$$T = \frac{8\pi^3 If}{S_1 + S_2 + S_3} \dots\dots(17)$$

ただし

$$S_1 \equiv -\frac{B}{2}(\gamma - \alpha)^2 - C\{(\sin \gamma - \sin \alpha) \dots\dots(18)$$

$$S_2 \equiv \frac{D}{2}(\delta - \gamma)^2 - B(\gamma - \alpha)(\delta - \gamma) \dots\dots(19)$$

$$+ C(\cos \alpha - \cos \gamma)(\delta - \gamma)$$

$$S_3 \equiv -\frac{B}{2}(\beta - \delta)\{\beta - \delta + 2(\gamma - \alpha)\}$$

$$- C\{\sin \beta - \sin \delta - (\beta - \delta)(\cos \delta$$

$$- \cos \gamma + \cos \alpha)\} + D(\delta - \gamma)(\beta - \delta)$$

図 3 (a) 粉体層と容器の運動 ($K \leq 1$)
(b) 粉体層に作用する加速度 ($K \leq 1$)

図 4 (a) 粉体層と容器の運動 ($K > 1$)
(b) 粉体層に作用する加速度 ($K > 1$)

$$D \equiv RW_T - F \dots\dots(21)$$

上式中の α , β , γ , δ は図 3, 4 に示すように、それぞれ円筒が回転しはじめる振動の位相角、停止するときの位相角、層が跳躍するときの位相角、容器底に落下したときの位相角であり計算により求められる。

以上のようにして求めた計算値と実験値との比較した一例を図 5 に示す。この図からわかるように、このような比較的単純な解析でストーマ粘度計を用いたときの流動性がある程度説明づけられた。なお前記の式からわかるように、このような尺度を用いたときの流動性を支配する因子は、与える振動の加速度および振動数（あるいは振幅）であり、せん断速度はこれらのほかに層内で運動する系の慣性モーメントが関係していることがわかる。

4. 2 安息角の変化速度による流動性の表示³⁾

非付着性の粗い粉体(ガラスビーズ 24~32メッシュ)を着色した層としない層とを交互に積み重ね二次元的な粉体の山を形成し(二枚の仕切られたガラス板の間に粉体の山を形成し)、振動によってこれがどのように崩れてゆくかをまず写真撮影により観察したところ、このような粉体では山の表面の粉体がかかりあるいはすべりによって下に移動し山が崩壊してゆくことが観察された。粉体の山がこのような崩壊するためには、何らかの外力が働かねばならないが、この場合に考えられる外力は衝撃力とこのほか加速度が時々刻々変化すること以外に考えられない。ここで衝撃力というのは振動によ

図 5 ストーマ粘度計による実験値と計算値との比較

ていったん跳躍した粉体層が落下して振動する板に衝突するときに生じるものである。この衝突するときの速度を v とし、衝突時に粉体を圧縮する衝撃圧縮時間を Δt とすると、図 6 に示すような層表面にある質量 m なる着目粒子の運動方程式は、その運動が振動の 1 サイクル毎に完結する定常状態にあるときには

$$m\ddot{x} = -F_i\mu - m\alpha_v(\mu\cos\phi_{ra}'' - \sin\phi_{ra}'') \quad \dots\dots(22)$$

ここで $m\alpha_v$ は振動板上にある粉体の時時刻刻変化する見かけの重量であり、 F_i は粉体と振動板とが衝突したときに作用する衝撃圧縮力であり

$$F_i = \frac{mv \cos \phi_{ra}''}{\Delta t} \quad \dots\dots(23)$$

で表わせる。(22)式において右辺第二項は第一項に比べて小さいのでこれを無視して解くと振動の一サイクルで粒子の進む距離は

図 6 加振時における二次元粉体山表面にある着目粒子の力の釣り合いおよび速度成分

$$x_s = \frac{v\Delta t \tan \phi_{ra}'' \sin \phi_{ra}''}{2\mu} \quad (K>1) \quad \dots\dots(24)$$

一方粉体の山の角度が $d\phi_{ra}''$ 減少するに要する時間 dt を

$$dt \propto \frac{[d\phi_{ra}'' \text{ 減少するために移動しなければならぬ粒子の平均距離}]}{[\text{粒子の移動距離}]} \times \frac{[d\phi_{ra}'' \text{ 減少するために移動しなければならぬ単位表面積あたりの粒子の平均体積}]}{\dots\dots(25)}$$

とおくと、安息角の減少速度は

$$\frac{d\phi_{ra}''}{dt} = -\frac{1}{2\psi} \sin^3 \phi_{ra}'' \quad \dots\dots(26)$$

ただし

$$\psi = A_1 \frac{C_1 \mu}{vf\Delta t(C_1, v, \mu\dots)} \quad \dots\dots(27)$$

これを積分すれば ϕ_{ra}'' と t との関係が求まるが、式中の ψ の中には前述の衝撃圧縮時間 Δt ——粉体層が振動板に衝突し圧縮変形がはじまり Δt 時間後に変形を終了する——を含んでおり、しかもこれは理論的に予測されがたいので、このものを適当な値に選んでやると図 7 に示すように実験値はこの式でかなりよく整理できることがわかる。しかし ψ のなかに含まれる粉体の動的圧縮時の応答に関する Δt なる値は粉碎などの面から検討されてはいるものの現在まだ明らかにはなっておらないので^{8,9)}、以上のような解析だけでは安息角の変化速度

図 7 加振時における安息角の変化 ○: $K=1.9$, $f=60\text{c.p.s.}$, $C_1=7\text{cm}^2$ ●: $K=3.1$, $f=60\text{c.p.s.}$, $C_1=7\text{cm}^2$ ×: $K=1.9$, $f=20\text{c.p.s.}$, $C_1=7\text{cm}^2$

を定量的に表現することができない。

4.3 オリフィスからの粉体の流出速度による流動性の表示⁴⁾

静止重力場においても粉体が流出するようなオリフィス径, すなわち限界流出口径より大きいオリフィス径を用いた場合についてまず考察する。

重力場における粉体オリフィスの流出速度に関する従来の多くの式は

$$W_s = A_0 g^{1/2} \quad \cdots \cdots (28)$$

すなわち, 流出速度は粉体を受けている重力の加速度の $1/2$ 乗に比例した形で表現されている。また Brown らは重力場以外の一定加速度場においても流出速度がその加速度の $1/2$ 乗に比例することを確認している。振動を与えた場合にはこの加速度が時間とともに変化するがこのような非定常な加速度の場においてもやはりこのような関係が成立するかどうかを調べた。この場合もしも(28)式が成立するならば任意の時間 t における流出速度 W_v は

$$W_v = A_0 \{g(1 - K \sin \omega t)\}^{1/2} \quad \cdots \cdots (29)$$

ここで振動場での平均的な流出速度が静止場に対してどれだけ変化するかを知るために, 振動の一周期に相当する時間に流出する粉体の量を静止場と振動場に対して求めこれら両者の比(振動場/静止場)をとって比較すると

$$\Psi_r = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} (1 - K \sin \omega t)^{1/2} dt \quad (K \leq 1) \quad \cdots \cdots (30)$$

図8 オリフィス径 $D_0 >$ 限界流出口径 D_c の場合の実験と計算結果

$$\Psi_r = \frac{\omega}{2\pi} \int_{\delta/\omega}^{(\tau+2\pi)/\omega} (1 - K \sin \omega t)^{1/2} dt \quad (K > 1) \quad \cdots \cdots (31)$$

これらの計算結果と実験結果をあわせて示した一例が図8であり, これより $K \leq 1$ では以上のような関係が成立するが, $K > 1$ では加速度が変動するだけでなく粉体は跳躍運動をするので衝撃力も作用し実験値は計算値からはずれてしまうことがわかる。しかしいづれにせよわれわれの行なった実験条件では振動を与えることによって, この場合には, 流出速度が減少しいわゆる流動性が悪くなることが認められた。

つぎに静止重力場においては粉体は流出しえない, すなわち限界流出口径より小さいオリフィス径を用いた場合について考察する。この場合振動を与えないときにはオリフィス上には粉体の安定な静的架橋が形成されていてこれが粉体の流出を妨げているが, これに振動を与えると, この架橋が崩壊して流出がみられるようになる。したがって振動は粉体の静的架橋の崩壊に密接に関連していることは明らかである。この場合にも, さきと同様に, 振動場における平均の流出速度が静止場に比してどのように変るかを知るために, これら両者の比(振動場/静止場)をとってこれを Ψ_r' とおき実験値を整理すると一例として図9が得られた。ただし, この場合基準となる静止場での流出速度としては限界流出口径より大きいオリフィスを用いたときの流出実験からの外挿値を用いた。一方架橋の崩壊には粉体層とオリフィス板との衝突速度が関係していることが予想されるので, 振動実験の場合と同じ粉体, 容器を用いて, この衝突速度を任意に再現できるタッピング実験を行なってこれを調べた。図10はその実験結果の一例でこれより架橋の崩壊には衝突速度, 換言すれば衝撃力が関係していること, さらに架橋の崩壊頻度 $p \approx 100\%$ となる衝突速度のあることが

図9 オリフィス径 $D_0 <$ 限界流出口径 D_c の実験結果

図 10 タッピングによる衝突速度と架橋崩壊頻度の実験結果 (各実験点は300回の試行より求めた)

わかる。ところで図9の Ψ_r' が最高となるときの衝突速度を計算してみるとこれが前述のタッピング実験の $p=100\%$ となる衝突速度 v_{rc}' にほぼ合致していることが認められた。これらのことから、図9, 10を対応させて説明すると、粉体が跳躍しない $K \leq 1$ のときには衝撃力が働かないため架橋の崩壊はほとんどおこらず、 K が1より大きくなるとともに、架橋の崩壊頻度が増加し流出量が K とともに増え、架橋の崩壊頻度が 100% となる付近で流出速度が最大となり、さらに K が増えると静的架橋の存在しない、限界流出口径より大きいオリフィスを用いた場合と同様に逆に流出速度が減少するということである。

5. む す び

振動を与えられた非付着性粉体の流動現象を厳密に解析することはきわめて困難なことであるが、解析への一つのアプローチの仕方として

- i) 与える振動は上下方向の正弦波振動である
- ii) 振動場における粉体層の運動は一個の非反発性物体のそれとほぼ同じである。逆にこのような扱いができるような実験条件を選ぶ

という条件のもとに、また流動性を表わす尺度としてつ

ぎの三つのものを用いて考察を行なった。

- i) ストーマ粘度計による回転せん断抵抗
- ii) 安息角の変化速度
- iii) オリフィスからの流出速度

その結果それぞれの尺度を用いたときの流動現象についてつぎの結論が得られた。

- i) 振動場における粉体のみかけ上の重さは、振動の一サイクル中時時刻刻変化しており、この層内におけるせん断抵抗もこれに応じて非定常的に変化しているものとして解析し、実験結果をほぼ定量的に説明することができた。この場合せん断抵抗を減少させるおもな支配因子は与える振動の加速度と、振動数（あるいは振幅）であり、せん断速度はこれらのほかに層内で運動する系の慣性モーメントが関係していることを見出した。
- ii) 安息角の減少は粉体層表面の粒子のころがりあるいはすべりが支配的であることを観測し、粉体の跳躍運動のさい生じる衝撃力によって山が崩壊してゆくものとして単純化した解析を行ない、定性的ではあるがこの場合のメカニズムの説明づけを行なった。
- iii) 重力場において粉体が自然流出するオリフィスを用い、これに重力加速度以下の振動を与えた場合、その流出量は振動によって時時刻刻変化する加速度の1/2乗にほぼ比例するものとして解析し実験結果をほぼ説明できた。また限界流出口径より小さいオリフィス、すなわち重力場において粉体が自然流出不可能なオリフィスを用いた場合に振動を与えると、粉体が流出するようになるが、これには振動によって跳躍した粉体が落下してオリフィス板に衝突するときに作用する衝撃力が、粉体の静的架橋を崩壊させるのに役立っていることをタッピングによる実験を併用して見出した。

記 号

a_0 : 振動の振幅	[m]
A_1, A_0, k : 定数	
C_1 : 図6に示す二次元粉体山の断面積	[m ²]
D_b : 粉体層の径	[m]
F : 回転系の抵抗損失のモーメント	[Kg・m]
F_i : 図式に示す衝撃圧縮力	[Kg]
f : 振動数	[1/sec]
h : 層の深さ	[m]
I : 主軸に関する慣性モーメント	[Kg・m・sec ²]
K : 振動強度 $= a_0 \omega^2 / g$	[—]
m : 着目粒子の質量	[kg]
M_r : 粉体層内にある円筒に作用する抵抗モーメント	[Kg・m]
$\Delta p_b, \Delta p_d$: 圧力損失, 図1参照	[mmAq]

$R : r_1 r_3 / r_2$	[m]
r_1, r_2, r_3, r_4 : 図1参照	[m]
T : 円筒が1回転するに要する時間	[sec]
t : 時間	[sec]
Δt : 衝撃圧縮時間	[sec]
U, U_{mf} : 空塔速度, 流動開始時の空塔速度	[m/sec]
v : 粉体層が容器底板に衝突するときの速度	[m/sec]
v_{rc}' : タッピング実験で架橋崩壊頻度がほぼ100%となる衝突速度	[m/sec]
W_0 : (8)式で定義されるおもりの重量	[Kg]
W_s : 図式に示す重力場における粉体の流出速度	[kg/sec]
W_T : 図1で示されるおもりの重量	[Kg]

$W_{T'}$: 静止粉体層内にある円筒が回転しはじめる
 のおりの有効重量 [Kg]
 W_{TC} : 通気した粉体層内にある円筒が回転しはじめる
 ときのおりの有効重量 [Kg]
 W_v : 振動場における粉体の流出速度 [kg/sec]
 x : 図6参照 [m]
 x_d : 容器の変位 [m]
 x_p : 層の変位 [m]
 x_s : 振動の一サイクルで粒子の進む距離 [m]
 $\alpha, \beta, \gamma, \delta$: 図3, 4参照 [rad]
 θ : II軸のまわりの回転角 [rad]
 μ, μ_t : まさつ係数 [-]

ρ_a : (2), (5), (6)式で示される粉体のみかけ上のかさ
 密度 [kg/m³]
 ρ_{ao} : 粉体のかさ密度 [kg/m³]
 σ_2 : 粉体層の水平方向応力 [Kg/m²]
 ϕ_{ra}'' : 振動を与えて t sec 後の安息角 [度]
 Ψ : 図式で示される値 [-]
 Ψ_r : 限界流出口径より大きい場合の静止場に対する
 振動場の流出速度の比 [-]
 Ψ_r' : 限界流出口径より小さい場合の静止場に対する
 振動場の流出速度の比 [-]
 ω : 振動の角速度 [rad/sec]

引用文献

- 吉田, 向阪: 粉体工学, 4, 91 (1967) プラント工学社
- 吉田, 向阪: 化学工学, 30, 1019 (1966)
- 吉田, 向阪: 化学工学, 32, 82 (1968)
- 吉田, 向阪, 油谷: 化学工学, 32, 470 (1968)
- 吉田, 向阪, 綾, 北村: 日本機械学会論文集 34巻
1217 (1968)
- 吉田, 向阪, 北村: 化学工学協会第33年会要旨集E305
- 井上, 宮浦, 西山: 日本機械学会論文集 33巻915(1967)
- 中川, 奥田, 稲村, 八島: 化学工学, 22, 624 (1958)
- 上滝, 早野, 沢田, 森山: 日本機械学会九州支部第 19
期 前刷91 (1966)
- Kroll, W.: *Chem. Ing. Tech.*, 27, 33 (1955)
- Kroll, W.: *Forsch. Gebiete Ing.*, 20, 2 (1954)
- Batel, W.: *Chem. Ing. Tech.*, 30, 567 (1958)
- Schmid, H.: *Fördern und Heben*, 606 (1965)
- Bachmann, D.: *Verfahrenstechnik Z. VDI-Beiheft*,
Nr. 2, 43 (1940)
- Mogami, T.: *Proc. of the 3rd Int. Conf. on Soil
Mechanics and Foundation Engng.*, 152 Session
2/15 (1953)

要 旨

振動状態における粉体の流動性

粉体を振動状態におくと流動しやすくなるので、液体と同様に回転粘度計を用いてその“粘度”を測定することができる。粒度の異なる数種の α -アルミナを用いて、振動条件を変えた時の“粘度”の変化や、粒度との関係を検討した。

装置としては市販のストーマー粘度計を用い、外筒をパイプレーターにとりつけ、周囲をマントルヒーターで加熱できるようにした。パイプレーターは振動数が120 cpsに固定されているので、パイプレーターに加える電圧を変えて振幅のみを変化させた。実験は空気中の湿度の影響を避けるため、100℃に加熱した状態で行なった。

一定量の試料粉体を外筒に入れ、一定の電圧をかけて粉体を振動させ、荷重 W をかけると内筒が回転して定常状態に達する。この荷重 W に対してその時の回転速度 R をプロットすると一つの流動曲線が得られる。この流動曲線はいわゆる構造粘性をもった液体の流動曲線によくにている。電圧を高くするとこの曲線がたってくるが、電圧が低い場合には荷重が小さい間はこう配が小さく、ある W 値から急激にたってくる。ここでは内筒面と粉体

層の間にすべりがおこったと考えられる。電圧を低くするにしたがってこのすべりのおこる荷重 W が大きくなる。この状態の極限は、応力の小さい間はまったく流動せず、ある応力に達するとすべりのみがおこるという固体的挙動になると思われる。

この流動曲線から一定のずり速度におけるみかけの粘度 η_a を求めて、これと振幅の関係を求めてみると、液体の粘度の温度依存性によくにて、振幅が大きくなると η_a が減少するが、振幅が非常に大きくなると η_a が再び上昇する傾向がある。粒子の振動を分子の熱運動に対応させて考えると、このような η_a の変化は固体→液体→気体の変化に対応している。

みかけ粘度 η_a に対する粒子径の効果は、振幅が大きい場合には、粒子径が大きいほど η_a が大きくなっている。しかし振幅が小さい場合には、数 μ 付近に極小ができて、これより粒子径が小さくなると再び η_a が大きくなる。これは微粉体では凝集2次粒子が流動単位になっているが、振幅の増大によりこれがこわれて流動単位が小さくなるためと考えられる。(西野 操)