容器からの粉粒体落下現象に関する研究*

その2. とい付きビンからの粉粒体排出量

An Investigation of the Falling Phenomenon of Granular Materials from a Vessel
Part 2. The flow rate of granular materials from a bin with an inclined open channel

竹 下 武 成** 狩 野 武** 渡 辺 始**
Takenari Takeshita Takeshi Kano Hajime Watanabe
菊 地 秀 志** 山 崎 昭 三**
Hideshi Kikuchi Shozo Yamazaki

1. まえがき

粉粒体を扱う工業では、その排出、供給に重力を利用することが多い。貯槽からの排出に用いるシュートはその一例である。前回、報告した貯槽ビン底部に円管シュートを取り付けた場合¹⁾につづき、ここではビンの側面にシュートとして長方形断面のといを付けた場合の粒子落下特性について報告する。

といのような傾斜平面上の流れは、粉粒体の重力流れを解析する上で重要なものである。といを用いた重力流れの解析は、粉体とビンガム流体とのアナロジー²⁾、粉体ととい底面との間の摩擦係数³⁾、といの上面、側面、底面の粒子速度分布⁴⁾などについてなされている。しかし、貯槽側面からの排出量におよぼす傾斜といの影響についてのまとまった報告はまだその例を見ない。

そこで、本研究では粉粒体としてガラスビーズと砂を用いて、ビン側面からの粒子排出量と傾斜といの幅と傾斜角、ビン排出口の高さなどが排出量に与える影響について調べた。その結果二三の知見を得たので報告する。

2. 実験装置および方法

Fig. 1 に実験装置の概略を示す。粉粒体粒子はホッパー①から角型ビン②に入りビン排出口からガラス製のとい③を通り排出される。実験では流れが定常になったのち一定時間、捕集ビンに粒子を受け、その重量から単位時間当りの排出量を測った。

Fig.1 Experimental apparatus

Table 1 Experimental ranges

d_s [mm]	Glass beads	0.196, 0.458, 1.14, 2.01
	Sand	0.254, 0.359, 0.505, 0.715
B [mm]	12, 22, 35, 50	
H [mm]	12, 18, 24, 30	
θ [degrees]	14 ~ 35	

Table 2 Characteristics of granular materials

Material	Glass beads				sand			
Property								
d_s [mm]	0.196	0.458	1.14	2.01	0.254	0.359	0.505	0.715
γ_s [kg/m ³]	$\times 10^3$ 2.47	2.51	2.46	2.47	2.83	2.72	2.70	2.71
γ_b [kg/m ³]	$\times 10^3$ 1.48	1.55	1.49	1.54	1.50	1.44	1.40	1.36
ϕ_r [degrees]	21.0	23.7	23.0	24.3	33.5	34.5	35.0	36.0

昭和51年7月13日受理
* 粉体工学研究会春期例会にて発表 (1976年6月大阪)
** 静岡大学工学部化学工学科 (〒432 浜松市城北3-5-1)
TEL 0534-71-1171

ビン排出口の高さ H 、とい幅 B 、とい傾斜角 θ を変えた場合について測定した。また、Table 2 は粒子の物性を示し、 γ_s は真比重量、 γ_0 はかさ比重量、 ϕ_r は安息角をあらわす。

3. 実験結果

3. 1 といをつけない場合の排出量

Fig. 2 に排出口面積 S と粒子排出量 W_0 についての実験値を示す。排出口面積が増加するとともに粒子排出量は多くなり、粒子径が小さいほど排出量が多い。また同じ粒子径については、砂の方が排出量が少ない。

排出量に対する粒子径ならびに粒子の種類による違いはおもに内部摩擦角と排出口縁における抵抗の相違によるものと思われる。

3. 2 とい付きビンからの排出量

Fig. 3, 4にとい幅 $B=22\text{mm}$ 、排出口高さ $H=24\text{mm}$

Fig. 2 W_0 vs. S

Fig. 3 Effects of particle size and inclined angle of open channel on flow rate of particle (glass beads)

Fig. 4 Effects of particle size and inclined angle of open channel on flow rate of particle (sand)

Fig. 5 Effects of breadth and angle of the open channel on flow rate of particle

Fig. 6 Effect of height of bin outlet on flow rate of particle

の場合のとい傾斜角 θ が粒子排出量 W に与える影響を示す。各粒子径ともに傾斜角が増すと排出量は増加し、といなしの排出量に近づく。同じ傾斜角ではガラスビーズの粒子径 $d_s=2.01\text{mm}$ の場合を除けば、といなしビンの排出量と同様に粒子径が小さなほど多く排出する。ガラスビーズの粒子径 $d_s=2.01\text{mm}$ のものはといの中で

ちょう躍現象がみられた。これは小さいとい傾斜角でといなしビンの排出量に近づく原因に関係があると思われる。

Fig. 5 にそれぞれの幅 B について、ガラスビーズの粒子径 $d_s=0.196\text{mm}$ 、排出口高さ $H=18\text{mm}$ の場合におけるとい傾斜角 θ と粒子排出量 W の関係を示す。各幅においてとい傾斜角が増加するとといなしの排出量に近づく。この関係はいづれの粒子径、排出口高さに対しても同様であった。

Fig. 6 はそれぞれの排出口高さ H についてガラスビーズの粒子径 $d_s=0.196\text{mm}$ 、幅 $B=35\text{mm}$ の場合におけるとい傾斜角 θ と粒子排出量 W の関係を示す。各排出口高さにおいてとい傾斜角が増加すると、といなしの排出量に近づく。傾斜角が小さいところでは排出口高さの影響は非常に小さい。これは粒子全体がとい上を流れるのではなく、おもに自由表面上の粒子が流れているためと思われる。この関係はいづれの粒子径、幅においても同様であった。さらに **Fig. 5, 6** における関係は砂においても同じであった。

4. 結果の考察

4. 1 角型ビンの側面からの粒子排出量⁵⁾

Janssen の式から容器内の粉体垂直圧 $p_{v(max)}$ は

$$p_{v(max)} = \frac{\gamma_b \cdot A}{\xi_w \cdot L \cdot K_u} \quad \dots\dots(1)$$

で与えられる。ここで、 γ_b ：かさ比重量、 A ：底面積、 L ：周り長さ、 ξ_w ：摩擦係数、 K_u ：主動粉体圧係数である。

また、一方オリフィスにおける流体速度式の圧力差に(1)式の $p_{v(max)}$ 、流体の比重量かわりに γ_b を入れた式を粉粒体の速度式とすると、粒子の速度 u_s は、

$$u_s = c \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot p_{v(max)}}{\gamma_b}} \quad \dots\dots(2)$$

であらわされる。ここで、 c ：定数、 g ：重力加速度である。(2)式に $\gamma_b \cdot A$ をかけると粒子排出量 W_0 は

$$W_0 = c \cdot \gamma_b \cdot A \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot p_{v(max)}}{\gamma_b}} \quad \dots\dots(3)$$

であらわされる。排出口において **Fig. 7** の図中に示すように内部摩擦角を ϕ_i とするとすべり角は $(\pi/4) - (\phi_i/2)$ となる。このすべり面と排出口高さ上端における面とに

Fig. 7 Flow rate of particle from the bin without the open channel

よって出来た斜線の部分の面に $p_{v(max)}$ が働くと考えると(1)式中の A と L は次のようになる。

$$A = B \cdot H \cdot \tan\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi_i}{2}\right),$$

$$L = 2 \left[B + H \tan\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi_i}{2}\right) \right]$$

これと(1)式を(3)式に代入して整理すると次式を得る。

$$W_0 = c \cdot \gamma_b \cdot (B \cdot H)^{1.5} \cdot \sqrt{\frac{g \cdot \tan\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi_i}{2}\right)}{\xi_w \cdot \left[B + H \cdot \tan\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi_i}{2}\right) \right]}} \quad \dots\dots(4)$$

次に排出口縁効果を $B^* = B - (2.1 - 0.8\lambda)Hd_s$ 、 $H^* = -(2.1 - 0.8\lambda)d_s$ のようにあらわし⁵⁾、 $\xi_w = \tan\phi_w \div \tan\phi_r$ 、 ϕ_i を ϕ_r におきかえると(4)式は

$$W_0 = c \cdot \gamma_b \cdot (B^* \cdot H^*)^{1.5} \cdot \sqrt{\frac{g \cdot \tan\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi_r}{2}\right)}{\tan\phi_r \cdot \left[B^* + H^* \cdot \tan\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi_r}{2}\right) \right]}} \quad \dots\dots(5)$$

Fig. 8 Effect of connected plate on flow rate of particle

Fig. 9 Flow pattern of particle on the inclined open channel

となる。ここで、 ϕ_w : 摩擦角、 ϕ_r : 安息角、 λ : 形状係数である。

(5) 式の関係を実測値について図示すると Fig. 7 のように直線が得られ、この傾きから $c=0.475$ となる。

4. 2 とい付きビンの排出量

4. 2. 1 補助板の影響

ビンとといを接合するために Fig. 8 の図中のように排出口に補助板をつけると粒子排出量は減少する。いま補助板のつき出し長さを l とすると、有効な排出口高さは $H - l \tan \phi_r$ で表わされる。ここで l は 10mm 以下で容器底部に水平にとりつけてあり、 ϕ_r は安息角である。この出口の高さを使って H^* を算出し、(5) 式によって計算した値 $W_{cal.}$ と実測値 $W_{exp.}$ を比較した図が Fig. 8 で、両者の値はほぼ一致していることがわかる。

4. 2. 2 傾斜角度による流れ方の変化

とい上の流れを観察すると、傾斜角によって Fig. 9 に示すような 3 通りの流れが見られる。

(a) は傾斜角が小さい場合で、粒子の流れは自由表面付近の粒子が加速的に流れていて、排出口に近いところで図に示すような底部にたい積が見られる。これは Fig. 6 で排出口高さの影響がみられない小さな傾斜角度の流れに相当すると考えられる。

(b) はとい傾斜角を (a) の場合より大きくした場合で、粒子全体がすべりながら流れ、粒子速度はほぼ一定状態に近くなる。

(c) はさらに傾斜角を大きくした場合で、粒子の流れは加速的になり、その中に図のように粒子がちょう躍しながら流れるものがでてくる。また、これらの現象は排出口高さにも影響される。粒子径 2.01mm のガラスビーズではとい傾斜角が小さい場合でも、このちょう躍現象が見られた。

粒子排出量と粒子径の関係は Fig. 3 に示したとおりであるが 2.01mm のガラスビーズでは特異な曲線となるのは、このちょう躍現象の影響のためと思われる。この現象を定量的に表わすにはなお研究の余地がある。

5. まとめ

角型ビンの側面からの粒子排出量は (5) 式であらわされ、ほぼ有効排出口面積の 1.5 乗に比例する。といをつけることによって粒子排出量は減少するが、とい傾斜角を増すと、といなしの場合の粒子排出量に近づく。なお粒子の物性とといの傾斜角とによつては、落下中にちょう躍現象があることがわかった。

使用記号

A : 底面積	[mm ²]	L : 周り長さ	[mm]
B : とい幅	[mm]	l : 補助板の長さ	[mm]
d_s : 平均粒子径	[mm]	$p_{o(max)}$: 粉体の最大垂直圧	[Kg/mm ²]
g : 重力加速度	[mm/sec ²]	S : 排出口面積	[mm ²]
H : 排出口高さ	[mm]	u_s : 粒子速度	[mm/sec]
K_a : 主動粉体圧係数	[—]	W : といをつけた場合の粒子排出量	[Kg/sec]

W_0 : といをつけない場合の粒子排出量	[Kg/sec]	ξ_w : 壁面摩擦係数	[-]
γ_0 : 粒子のかさ比重量	[Kg/m ³ or Kg/mm ³]	ϕ_i : 内部摩擦角	[degrees]
γ_s : 粒子の真比重量	[Kg/m ³]	ϕ_r : 安息角	[degrees]
θ : とい傾斜角	[degrees]	ϕ_w : 壁面摩擦角	[degrees]
λ : 粒子の形状係数	[-]		

引用文献

- 1) 竹下武成, 狩野武, 渡辺始, 伊田哲, 長谷川美登, 粉体工学研究会誌, 13-1 (1976), 13
- 2) Suzuki, A. and Tanaka T., *Ind. Eng. Chem. Fundamentals*, 10-1 (1971) 84.
- 3) Augenstein D. A. and Hogg R., *Powder Technol.*, 10 (1974), 43.
- 4) 内海良治, 上田康, 材料, 20-213 (昭46-6), 773.
- 5) 白井隆, 化学機械, 16-3 (1952), 86.
- 6) 横川明, 日本機械学会論文集 (第2集), 37-301, (昭和46-9), 1688.

Authors' Abstract

An Investigation of the Falling Phenomenon of Granular Materials from a Vessel

Part 2: The flow rate of granular materials from a bin with an inclined open channel

by

Takenari TAKESHITA, Takeshi KANO, Hajime WATANABE, Hideshi KIKUCHI, Shozo YAMAZAKI
(Department of Chemical Engineering, Shizuoka University)

In many cases granular materials in a storage vessel are discharged through an attached chute. In this study, the effects of the properties of materials, the dimensions of the opening of the bin outlet, the inclined angle and the breadth of the rectangular open channel attached as a chute to the side of the rectangular bin on the flow rate of granular materials are investigated. Glass beads and sand are used as granular materials.

In conclusion, the flow rate of granular materials from a rectangular bin is expressed as a function of the properties of particles and the dimensions of the opening of the bin outlet. When an open channel is used as a chute, the flow rate of granular materials becomes lower compared with that for no chute. It increases as the inclined angle of the open channel increases. Qualitatively it is found that the flow rate depends upon the flow pattern of particles in the open channel.