容器内粉粒体層の底圧分布と空気抵抗*

Vertical Bottom Pressure Distribution and Air Resistance in a Bin

森山 龍一** 早野 延男***

Ryuichi MORIYAMA Nobuo HAYANO

上 滝 具 貞****

Tomosada JOTAKI

1. 緒 言

容器内粉粒体層の底圧に分布があり、その原因が粒子間の摩擦や粒子と壁との摩擦による局所的なアーチングによるものであることはすでに報告された多くの研究から理解できる¹⁻⁴⁾。筆者らも、先に、そのアーチングのメカニズムを知るために、粒子径の大きさ^{5,7)}や容器径の大きさ⁸⁾や供給法^{5,8)}や供給速度⁸⁾や粉と粒の混合層⁶⁾(粉体の性質を変えた)や壁がないときの安息角の底圧を測定して、それらの特性から底圧分布のメカニズムを考察してきた。これらのアーチングを支配している内部摩擦力や壁摩擦力は粒子間の接触数や粒子と壁の接触数と密接に関係があるので、層の充てん状態が疎であるか密であるかによって異なると思われる。しかし、底圧分布と充てん層の疎密の関係についてはあまり報告されていない。本報告では底圧分布が極端に違う2通りの充てん方法、すなわち、容器の中央へ供給する方法(中央供給)と容器の周辺へ一様に供給する方法(周辺供給)を用いて、底圧分布と層の疎・密との関係を調べるのが目的である。

すでに報告しているように⁹⁾、底圧分布は壁面での粉体の支持され方に関係があり、供給点から若干離れたところにその支持点ができる。たとえば、容器の中央に供給した場合、粉粒体は中央から壁面方向に滑って充てんされる。しかし、その時、壁面で一時支持された不完全なアーチの状態で積載されていくので、後から加わる荷重まで支持できなくて、壁面で周期的に滑り崩壊する。その結果、粒子の配列に転移が多く生じて空隙率の

大きい充てん層になる⁸⁾。逆に、壁面付近に一様に粉粒体を供給すると、粒子は壁面に平行に落下し、粒子間の衝撃などで粒子の配列は良く、後から加わる荷重による層の急激な剪断も少ないので、比較的密な充てん層になることが考えられる。以上のようなことから、粉粒体を容器へ供給する方法を変えて、充てん層の空気抵抗を測定し、その増減から容器底部の粉体圧を観察した結果、2, 3の知見が得られたので報告する。

2. 実験装置および方法

実験装置の概略を Fig. 1 に示す。粉粒体槽は円筒形容器(内径 206 mm の鋼管)で、下部の空気室との間に厚さ 20 mm のしんちゅう板(2 mm の穴を約 7000 個、開孔率で 66% あり、その上に、粉が漏れないように 300 メッシュのステンレス網を貼付している⁷⁾。ただし、粉体圧測定用の圧力計^{13,14)}を埋めている所は除いている)を取り付けた。流量は四分円ノズルで測定した。

実験方法は、まず、上部のホッパーから一定の試料を

Fig. 1 実験装置

昭和55年11月20受付

*粉体工学会昭和54年度秋期研究発表会にて発表 (1979.11 東京)

**福岡教育大学技術科 (〒811-41 宗像市赤間 729)

TEL 09403-2-2381

***山口大学工学部生産機械工学科 (〒755 宇部市常盤台)

TEL 0836-31-5100

****九州共立大学工学部機械工学科 (〒804 北九州市八幡西区折尾自由ヶ丘) TEL 093-691-3333

Table 1 粉粒体の性質

Properties	Particle Size 10 ⁻³ mm	Bulk Density (g/cm ³)	Coe. of Internal Friction	Feed velocity (orifice 20 mm) (g/s)
GB 733	44-88	1.50	0.27	167
GB 708	297-710	1.52	0.415	161
GB 501	500-710	1.51	0.428	142
Sea Sand	170-710	1.34	0.608	156

供給する（この量は層高が70 cmになるように1 lの計量容器で求めた見かけ密度を用いて計算したので、実測した層高はTable 2のようになる）。なお、供給はオリフィス20 mmによる自然落下で、各試料の供給速度はTable 1のようになる。次に、供給直後の粉体圧および下方の空気室の圧力を20, 40, 60, 70, 75, 80 mm Hgまで変化させたときの空気流量と粉体圧(p_v)を測定する。そのときの測定点は容器中央から壁方向へ $r=0, 2.5, 4, 5, 6, 7, 9$ cmの7点である。使用した試料の性質をTable 1に示す。ここで、見かけ密度の測定は1 lの計量容器を用いて適当に粒子の自由表面が水平になるように揺すって目盛りを合わせる方法で求めた。内部摩擦係数は直径206 mmで高さ60 mmの直接剪断セルを用いた。

3. 実験結果および考察

3.1 粉体圧(p_v)と空気圧(p_a)について

最初に、粉粒体を容器へ供給した直後の底圧分布をFig. 2に示す（これらの測定値はかなり再現性が良いので2回測定の平均値である）。

これによると、前述のように、中央供給と周辺供給では粉体圧分布がかなり異なることがわかる。

次に（Fig. 1 参照）、充てん層の下部から空気を流すと、空気室の空気圧 P_a が増加し粉体圧は減少する。今、空気室の空気圧を粒子層を透過するときの抵抗と

考えると、充てん層が疎であるときは空気が流れやすく、粒子間を通る流体の摩擦力によって比較的急速に粉体圧は減少する。しかし、逆に、粒子間が密で空気の流れが少ないときは粉体圧の変化も少ないものと考えられる。

このことを確かめるために、まず、空気圧(p_a)の増加に対する粉体圧の変化を検討した。

その実験の一例として、GB 708の中央供給（Fig. 3）と周辺供給（Fig. 4）の場合を示す。また、中央供給と周辺供給の壁付近と中央部の変化を比較して見た（Fig. 5）。

その結果、次のような特徴がわかった。

- 1) 周辺供給より中央供給の方が空気室の圧力(p_a)の増加に対する粉体圧(p_v)の減少が急速である。（Fig. 3, 4）
- 2) 中央供給は供給直後(p_a が零のとき)の粉体圧の高い周辺部（容器の中央より壁方向に7 cm, 9 cm）で圧力の減少が大きい（Fig. 3）。

Fig. 2 底圧分布
破線は中央供給、実線は周辺供給

Table 2 実験と計算結果

	Average particle size d (mm)	Feed method	Fed bed height L (cm)	Average velocity ($p_a=0$) U_m (cm/s)	Calculated by (3)		Direct measurement		Measuring gauge	
					Porosity ϵ (-)	Bulk density γ (g/cm ³)	Porosity ϵ^* (-)	Bulk density γ^* (g/cm ³)	Porosity ϵ_0 (-)	Bulk density γ_0 (g/cm ³)
GB 708	0.47	Center feed	76.8	18.5	0.46	1.36	0.45	1.386	0.396	1.52
		Perimeter feed	69.9	11.0	0.39	1.54	0.40	1.512		
GB 501	0.605	Center feed	77.7	30.5	0.47	1.34	0.46	1.360	0.40	1.51
		Perimeter feed	70.3	19.0	0.40	1.51	0.40	1.512

Fig. 3 空気圧の増加に対する底圧分布の変化
(中央供給の場合, GB 708)

Fig. 4 空気圧の増加に対する底圧分布の変化
(周辺供給の場合, GB 708)

3) 周辺供給では、 p_a の増加と共にゆっくり減少する傾向はあるが、 $p_a = 70$ mm Hg 付近で急速に減少する (Fig. 4)。

4) 粉体圧 (p_v) が零になる p_a の値は周辺供給の方が若干大きい (Fig. 3, 4)。

中央供給の場合；

1), 2) のように、周辺部の粉体圧の高い部分の圧力の減少割合が急速であることはこの部分の空気の透過する速度が大きいことによるものと考えられる。すなわち、容器の周辺部は疎充てん状態にあるといえる。

周辺供給の場合；

3), 4) の結果より、粉体圧が零となる空気圧が中央供給より若干大きく、流動層になる直前まで、粉体圧の減少割合が小さいことは、中央供給の壁付近に比べて、空

Fig. 5 空気圧の増加に対する底圧分布の変化
(中央供給と周辺供給の比較)

気が透過し難いことを示し、容器の周辺部は比較的密充てんになっていると思われる

(Fig. 5 で、容器中央部と壁付近の粉体圧の減少の傾向の違いが明らかである)。この理由として、落下点の壁付近は落下による粒子間の衝撃で、それ以前に堆積した粒子の再配列などによって、粒子間や粉体層と壁の間が空隙率の小さい充てん状態になっているためと考えられる。

3.2 粉体圧 (p_v) と平均流速 (U_m) について

空気圧 (p_a) と平均流速 (U_m) の関係を Fig. 6 に示す。これによると、供給方法によって空気抵抗がかなり違うことがわかる。すなわち、周辺供給に比べて中央供給の方が同じ流量 (同じ U_m) に対して、空気抵抗が小さくなっている。これは、3.1 で述べたように、中央供給の充てん層が疎充てんであるのと一致する。また、空気流速の関係は、ほぼ

$$p_a \propto U_m^{1.2}$$

となり、層流に近いことがわかる。ただし、本実験のレイノルズ数の範囲は、 $Re = U_m \cdot \rho_f \cdot d / \mu$ で求めて、3.3 ~ 11.7 である。なお、この実験値と Ergun の式との対応は Fig. 6 のようになり、一応、満足される。

次に、粉体圧 (p_v) と平均流速 (U_m) の関係を Fig. 7 (GB 708), Fig. 8 (GB 501) に示す。これによって、 U_m の増加に対する p_v の減少の傾向がわかる。すなわち、周辺供給の場合は流動層になる直前 ($p_v = 0$) で急速に減少するが、中央供給の場合はそれほど急速でない。これは、先の粉体圧 (p_v) と空気圧 (p_a) の傾向と同じである。また、容器への供給の仕方によって、 p_v が零となる U_m の値はかなり違うことがわかる。中央供

Fig. 6 空気圧と平均流速の関係
(ここで P. F は周辺供給, C. F は中央供給を示す)

Fig. 7 平均流速の増加に対する底圧分布の変化
(GB 708 の場合)

Fig. 8 平均流速の増加に対する底圧分布の変化
(GB 501 の場合)

給の平均流速は周辺供給の約1.6倍となっている (Table 2)。

以上のように, 供給方法によって充てん層の平均流速が異なるのは平均空隙率 (ϵ) の違いによるものと思われる。そこで, Ergun の式¹⁰⁾

$$\frac{\Delta p_a g_c}{L} = 150 \frac{(1-\epsilon)^2 \mu U_m}{\epsilon^3 d^2} + 1.75 \frac{(1-\epsilon) \rho_f U_m^2}{\epsilon^3 d} \quad \dots\dots(1)$$

と, 一方, 充てん層の全荷重を W_s [kg] とし, W_s を円筒断面積 (πr^2) で割ったものを空気抵抗 (Δp_a) と等置すれば,

$$\frac{\Delta p_a g_c}{L} = (1-\epsilon)(\rho_s - \rho_f)g \quad \dots\dots(2)$$

となる¹¹⁾ので, 上式を空隙率 (ϵ) について整理すると次のようになる。

$$\epsilon^3 + 150 \frac{\mu U_m}{d^2 \rho_s g} \epsilon - 150 \frac{\mu U_m}{d^2 \rho_s g} - 1.75 \frac{\rho_f U_m^2}{\rho_s d g} = 0 \quad \dots\dots(3)$$

ここで, 平均流速 (U_m) は粉体圧が零となる値を用い, 平均粒子径 (d) は各粒子の粒度分布の中央値を使って計算すると, Table 2 のようになる。一方, 平均の空隙率は供給量 [kg] と層高から求められるので, その結果 (ϵ^*) と比較すると大体よく一致する。さらに, 1l の計量容器を用いて, 適当に粒子の自由表面が水平になるように揺すって目盛に合わせて, 測定した値 (ϵ_0) は周辺供給の値に近いことがわかる。

3.3 粉体圧分布と充てん層の疎・密について

これまでの考察より, 周辺供給の方が中央供給より密充てん層になることが判明した。さらに, 底圧分布と充てん層の疎・密との関係は底圧分布で圧力の高い所が疎充てんで空気が流れやすいと仮定すれば事実をうまく説明できる。すなわち, 底圧は中央供給すれば中央部より周辺部で高くなるので, 主として空気は周辺部を流れる。それに対して, 周辺供給すれば, 逆に, 底圧は周辺部より中央部で高くなり, 空気は主に周辺部より中央部を流れることになる。したがって, 周辺部を流れる中央供給の方が, 空気抵抗は少なく流量が大きくなると考えられる。

以上のことから, 底圧分布は次のようになっていると思われる。

- (1) 落下点は安息角のピークにあたり周辺え (中央供給は壁方向へ, 周辺供給は中央へ) 滑って堆積する。そのとき, 落下点は衝撃などによる粒子の再配列によって密充てんになり, 粒子間の摩擦力は強く, 鉛直荷重の一部が直ぐ側の粉体層の仮想的円筒状の部分に伝わる。円筒部分は固定壁でないの

で、その影響は周辺部へ波及する⁹⁾。

- (2) 中央供給の場合は、容器壁面まで伝わり壁面で支持される。その際、ある一定量まで粒体の一部は壁面で不完全なアーチングによって支持されながら積載されていくが、後から加わる荷重まで支持できなくて滑べりが発生し、その結果、不完全なアーチが崩壊し、粒子間は剪断されて、転移した状態になり空隙率の大きい部分となり、底圧も増加すると考えられる。
- (3) 周辺供給の場合は、周辺部が落下点であるので、逆に、密充てんになり、鉛直荷重の一部は容器中央へ波及するが、中央部に固定壁面がないので、中央部で圧力の増加となる。

4. 結 論

- 1) 容器への供給の仕方によって充てん層の空隙率は

異なる。すなわち、容器の中央部に供給すると、粒の場合は疎充てんになり、周辺部に供給すると密充てんになる。したがって、粒体の容器への充てんという立場からは周辺供給が有利である。なお、供給速度の違いによる空隙率の違いも明らかである¹²⁾が、供給法の違いによる空隙率の違いが大きいように思われる。

- 2) 容器内粉粒体層の底圧分布は密充てん部が低く、疎充てん部が高くなる。
- 3) Ergun の式で計算した結果より、周辺供給の方が空隙率が小さいことが判明した。また、周辺供給の空隙率は計量容器（目盛に適当に揺すって合わせる方法）で測定した値と大体一致する。

記		号		
p_0 : 粉体圧 (容器底圧)	[mmAq]	わせる方法)で測定した空隙率		[—]
p_a : 空気室の圧力	[mmHg]	$4p_a$: 充てん層の空気抵抗		[mmAq]
r : 容器中央から壁方向への距離	[cm]	μ : 空気の粘性係数		[g/cm・sec]
U_m : 円筒形容器を通る平均流速	[cm/s]	d : 平均粒子径		[10 ⁻³ mm]
ϵ : 充てん層の平均空隙率	[—]	ρ_f : 空気の密度		[g/cm ³]
ϵ^* : 容器へ試料を供給したときの層高を測定して求めた空隙率	[—]	ρ_s : 粒子の密度		[g/cm ³]
ϵ_0 : 計量容器 (適当に容器内試料を揺すって目盛りに合		L : 層高		[cm]

文		献	
1) 青木隆一, 森芳郎: 化学工学, 24, No.12, 926 (1960)		(1975)	
2) 早野延男: 京都大学学位論文, p.16 (1970)		8) 上滝具貞, 森山龍一: 粉体工学研究会誌, 14, No.11, 608 (1977)	
3) 吉岡直哉, 都築亀一郎: 粉体工学研究会誌, 4, No.1 633 (1967)		9) 上滝具貞, 森山龍一: 粉体工学会誌, 16, No. 4, 184 (1979)	
4) Takami, A., S. Oka: <i>Powder Tech.</i> , 10, 295 (1974)		10) Ergun, S.: <i>Chem. Eng. Pro.</i> , 48, No.2, 89 (1952)	
5) 上滝具貞, 富田侑嗣, 森山龍一: 粉体工学研究会誌, 10, No.3, 131 (1973)		11) 白井 隆: 流動層, p.52 (1973) 科学技術社	
6) 上滝具貞, 森山龍一: 粉体工学研究会誌, 10, No. 8, 550 (1973)		12) 高木史人, 杉田稔: 粉体工学会誌, 16, No.9, 528 (1979)	
7) 上滝具貞, 森山龍一: 粉体工学研究会誌, 12, No. 4, 217		13) 上滝具貞, 森山龍一: 粉体工学研究会誌, 10, No.7, 386 (1973)	
		14) 森山龍一, 上滝具貞: 粉碎, No.20, 121 (1975)	

Vertical Bottom Pressure Distribution and Air Resistance in a Bin

by

Ryuichi MORIYAMA* Nobuo HAYANO** Tomosada JOTAKI***

(* Department of Technology, Fukuoka University of Education.
 ** Department of Mechanical Engineering for Production, Yamaguchi University.
 *** Department of Mechanical Engineering, Kyushu Kyoritsu University.)

This paper deals with the filling conditions which influence vertical bottom pressure distribution. The bottom pressure differs extremely, dependent on where a certain bulk solid is fed, i. e. either center-feed or perimeter-feed. In order to study the reasons for this, the authors measured the air pressure drop for the filling bed, and calculated the porosity.

From the results, it is found that:

- 1) In the case of center-feed, the porosity in the bed increases more than that of perimeter-feed.
- 2) The porosity of the higher pressure section on the bottom increases more than of the lower pressure section.

For these reasons, it is explained that the porosity is closely related to strength of arching generated by frictional phenomena in the bed.

List of Figures and Tables

Fig. 1 Experimental apparatus.

Fig. 2 Vertical bottom pressure distribution. Broken lines are center-feed.
 Solid lines are perimeter-feed.

Fig. 3 Change of the vertical bottom pressure distribution (p_v) for an increase of the air pressure (p_a) in the air tank. (In the case of center-feed, with GB 708)

Fig. 4 Change of the vertical bottom pressure distribution (p_v) for an increase of the air pressure (p_a) in the air tank. (In the case of perimeter-feed, with GB 708)

Fig. 5 Change of the vertical bottom pressure distribution (p_v) for an increase of the air pressure (p_a) in the air tank. (Comparison

of center-feed and perimeter-feed)

Fig. 6 Relationships between the air pressure in the air tank and the average velocity in the bin. (Where P. F is perimeter-feed, C. F is center-feed.)

Fig. 7 Change of the vertical bottom pressure distribution (p_v) for an increase of the average velocity (U_m) of the air in the bin. (In the case of GB 708)

Fig. 8 Change of the vertical bottom pressure distribution (p_v) for an increase of the average velocity (U_m) of the air in the bin. (In the case of GB 501)

Table 1 Properties of bulk solids.

Table 2 Experimental and calculative results.