集塵操作で汙紙上に形成された粉体層の 空間率分布

森 康 維*, 藤 田 孝 之*

Distribution of Void Fraction in a Powder Layer Formed on Filter Paper by Dust Collection

by

Yasushige MORI[†] and Takayuki FUJITA[†]

The distribution of the void fraction in the powder layer is one of the most fundamental properties in the estimation of pressure loss through the powder layer formed by filter dust collection. In this report, the void fraction of the fly ash powder layer collected on a filter paper is discussed. It was confirmed that the powder layer formed by air flow loaded dust has a distribution of the void fraction in the direction of air flow. The void fraction was 0.8 at the surface and was 0.6 at the bottom of the powder layer. The relationship between the average void fraction and the thickness of the powder layer could satisfactorily be estimated by using Kawakita's or our experimental correlations as the compression equation, and Carman's equation as the permeation equation. The effect of Knudsen flow on the permeation increased as the void fraction decreased.

Key Words : Filter Dust Collection, Compression by Flow, Void Fraction, Powder Layer, Pressure Loss

緒 言

微小粒子で構成された粉体層の堆積構造を知ること
は、粉末冶金、鋳物工業等の製品の品質を決めるう
えに必要なだけでなく、貯槽、混合、凝集、造粒さら
には集塵の各操作を検討するうえにも重要である。一
般に粉体層はその形成時に働く力を無視し、均一等方
性の構造を持つとされるか、もしくは重力を考慮した
構造を持つとされてきた。しかし実際の粉体層では何
らかの力で圧縮されて形成されることが多い。特に集塵

操作で形成される場合は、静電気力、慣性力、気流に
よる圧力などの力が働く。

本報では、気流中に浮遊している粒子が集められ、
粉体層を形成し、気流の圧力で圧縮を受ける粉体層の
空間率の分布を測定し、空間率分布、粉体層の厚さが
粉体の圧縮式から推定できることを示した。

1. 堆積粉体層の空間率分布の推定

汙紙上に粉体が捕集堆積し、粉体層が形成されると
ともに気流で圧縮される場合を考える。**Fig.1** のよ
うに厚さ L の粉体層を考える。厚さ方向の座標軸の原点
を粉体層表面にとり、粉体層の表面の空間率を ϵ_0 、汙
紙上の粉体層の空間率を ϵ_L とする。

粉体層内の微小厚さ dx における気流通過によって発
生する静圧の変化 dp_0 は、

$$f(\epsilon) \cdot dp_0 = -\mu S_0^2 u dx \quad (1)$$

平成2年10月17日受付

粉体工学会春期研究発表会(1982年5月、大阪)にて発表

* 京都大学工学部化学工学教室(〒606 京都市左京区吉田本町)

TEL 075-753-5576

[†] Dept. of Chemical Engineering, Kyoto University,

Yoshida-Honmachi, Sakyo-ku, Kyoto 606

Fig. 1 Powder layer formed by dust filtration

と表現できる。ここで $f(\epsilon)$ は空間率関数であり、Kozeny-Carman式では、 $\epsilon^3/\{k(1-\epsilon)^2\}$ である。粉体層厚さ x までの静圧降下(すなわち圧力損失) Δp は、

$$\Delta p \equiv \int_{p_{ax}}^{p_{a0}} dp_a = \int_x^0 -\frac{\mu S_v^2 u}{f(\epsilon)} dx \quad (2)$$

である。またこの厚さまでの粉体の自重は、次式となる。

$$\int_0^x (1-\epsilon) \rho_p g dx \quad (3)$$

壁の影響を無視すると、厚さ x における粉体層に加わる力(圧縮力) P は、次式で表現できる。

$$P = \Delta p + \int_0^x (1-\epsilon) \rho_p g dx \quad (4)$$

ここで空間率 ϵ は x の関数であり、単調減少関数と予想される。そこで x を ϵ で表わす次の関数を定義する。

$$x \equiv h(\epsilon) \quad \text{ただし, } h(\epsilon_0) = 0 \quad (5)$$

$$h(\epsilon_L) = L$$

Eq.(5)の微分値を $h'(\epsilon) (= dx/d\epsilon)$ とすると、Eqs.(2), (4)から

$$P = \int_{\epsilon_0}^{\epsilon_L} h'(\epsilon) \left\{ \frac{\mu S_v^2 u}{f(\epsilon)} + (1-\epsilon) \rho_p g \right\} d\epsilon \quad (6)$$

となる。

一方粉体の圧縮式として種々の関数が提出されているが、いずれも空間率の関数として表現されている。

$$P = q(\epsilon) \quad (7)$$

Eqs.(6), (7)を比較すると、

$$h'(\epsilon) = q'(\epsilon) / \left\{ \frac{\mu S_v^2 u}{f(\epsilon)} + (1-\epsilon) \rho_p g \right\} \quad (8)$$

となる。ただし $q'(\epsilon) = dq(\epsilon)/d\epsilon$ である。

Eqs.(2), (5), (8)を用いると、粉体層厚さ L 、平均空間率 $\bar{\epsilon}$ 、粉体層通過時の圧力損失 Δp は次のように求まる。

$$L = h(\epsilon_L) = \int_{\epsilon_0}^{\epsilon_L} h'(\epsilon) d\epsilon \quad (9)$$

$$\bar{\epsilon} = \frac{1}{L} \int_0^L \epsilon dx = \frac{1}{L} \int_{\epsilon_0}^{\epsilon_L} \epsilon h'(\epsilon) d\epsilon \quad (10)$$

$$\Delta p = \mu S_v^2 u \int_{\epsilon_0}^{\epsilon_L} h'(\epsilon) / f(\epsilon) d\epsilon \quad (11)$$

また堆積粉体層の単位面積当りの重さは、

$$M = \int_0^L (1-\epsilon) \rho_p dx = \rho_p L (1-\bar{\epsilon}) \quad (12)$$

で求まる。

微粉体の堆積で、空間率が比較的大きく厚さが薄い場合、粉体の重さはほとんど考慮する必要がないと考えられる。この場合、Eq.(4)の右辺第2項が無視でき、 L 、 $\bar{\epsilon}$ 、 Δp は次式となる。

$$Lu = \frac{1}{\mu S_v^2} \int_{\epsilon_0}^{\epsilon_L} q'(\epsilon) f(\epsilon) d\epsilon \quad (13)$$

$$\bar{\epsilon} = \int_{\epsilon_0}^{\epsilon_L} \epsilon q'(\epsilon) f(\epsilon) d\epsilon / \int_{\epsilon_0}^{\epsilon_L} q'(\epsilon) f(\epsilon) d\epsilon \quad (14)$$

$$\Delta p = \int_{\epsilon_0}^{\epsilon_L} q'(\epsilon) d\epsilon = q(\epsilon_L) - q(\epsilon_0)$$

2. 実験方法

乾燥機で 115°C 、1 昼夜以上乾燥させたフライアッシュ (JIS No. 10) を 30 分程度室内に放置・冷却したのを供試粉体とした。供試粉体を定量的に (10~20 mg/min) ミキサー型分散機に供給し、分散させた。分散した粉体を混合箱(容量約 2ℓ)に送り、凝集体を分離するとともに、粉体濃度をより均一化した。浮遊粉体の一部をサンプリングし、針状型除電部を通過させ帯電量を減少させた後、直径 3cm の沓紙 (Sartorius 製メンブレンフィルター、細孔径 0.6μm) 上に捕集した。粉体重量は直示天秤で、粉体層厚さは顕微鏡(倍率 200 倍)で測定した。粉体層厚さは沓紙上で均一ではなく、10 箇所以上測定し、その平均値を厚さとした。1 箇所のみ繰り返し測定精度は 5μm 以下で、誤差は 3% 以下であった。粉体層の均一度は、一般に層厚さが厚くなる程悪くなり、10% 程度のばらつきが生じた。

3 種類の流速を使用し、測定期間中一定にした。粒子の真密度はピクノメータ法で 2.47 g/cm^3 と求めた。粒子の個数基準平均径および幾何標準偏差を、気相沈降法で測定し、それぞれ 1.5μm、1.67 と得た。これより比表面積は $2.1 \times 10^6 \text{ m}^2/\text{m}^3$ となる。

分銅による圧密実験は、目開き 149μm (100 メッシュ) のふるいを通して、供試粉体を容器内に自然落下させ、形成した粉体層を用いた。

3. 空間率関数 $f(\varepsilon)$

空間率関数の採用にあたって、層流域で最も一般的なKozeny-Carman式と、微粉体層内に適用される分子流補正を考慮したCarman式を、透過流動式とすると、 $f(\varepsilon)$ は次式となる²⁾。

Kozeny-Carman式

$$f(\varepsilon) = \frac{\varepsilon^3}{k(1-\varepsilon)^2} \quad (17)$$

Carman式

$$f(\varepsilon) = \frac{\varepsilon^3}{k(1-\varepsilon)^2} \left\{ 1 + \frac{8}{3} \sqrt{\frac{2RT}{\pi M_a}} \cdot \frac{\delta k_0 \mu S_v}{\bar{p}} \cdot \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon} \right\} \quad (18)$$

本報の計算では、室温 $T = 293 \text{ K}$ 、空気平均分子量 $M_a = 28.9$ 、Kozeny定数 $k = 5$ を用いた。poiseuille流に対する分子流の寄与を表わす δ および流路断面形状に依存する係数 k_0 の値は、Carmanらがカーボンブラックの実験結果との比較に使用した値($\delta = 0.93$, $k_0 = 2.5$)を採用した。

4. 圧縮式 $q(\varepsilon)$ の決定

粉体の圧縮に関する適当な理論式は提出されていないようである。そこで供試粉体を分銅で圧密する実験を行なった。自然落下で形成された粉体層の平均空間率は0.73程度であった。圧密時の平均空間率は0.62～0.69と余り変えることができなかったが、**Fig. 2**に示すように、片対数もしくは両対数紙でほぼ直線となる実験結果を得た。

実験結果から物理的に矛盾のない式として、次式を考えた。

$$P = \alpha (\varepsilon^{-\beta} - \varepsilon_0^{-\beta}) \quad (19)$$

Fig. 2 Relationship between average void fraction and compressive force at compression experiments

Table 1 The values of the parameters of the compression equations in Figure 2

Equation	ε_0	α	β
Our (19)	0.8	11.5	18.9
Athy (20)	0.694	6.9×10^5	—
	0.8	2.1×10^5	—
Balshin (21)	—	3.4	20.4
Kawakita (22)	0.8	0.50	5.8×10^3

また粉体の圧縮に関する数多くの実験式⁴⁾のうち、比較的実験結果と一致するとされている式として、

Athyの式¹⁾

$$P = \alpha \{\ln \varepsilon_0 - \ln \varepsilon\} \quad (20)$$

Balshinの式

$$P = \exp \left\{ -\frac{\alpha}{(1-\varepsilon)} + \beta \right\} \quad (21)$$

川北の式⁶⁾

$$P = \frac{\beta(\varepsilon_0 - \varepsilon)}{\{(1-\varepsilon_0) + (\alpha-1)(1-\varepsilon)\}} \quad (22)$$

ここで α , β は実験定数であり、 ε_0 は圧縮力が存在しない場合の空間率である。本報では、空気中に浮遊している粉体が粉体層の第1層として存在する時の空間率を ε_0 と考えることにする。なおBalshinの式では $\varepsilon_0 = 1$ と考えられる。

α , β , ε_0 をフィッティングパラメータとして、実験値との比較を**Fig. 2**と**Table 1**に示す。川北の式およびEq.(19)は、定数が3個であり、この図から ε_0 を一義的に決めることは困難である。これに対してAthyの式では実験結果とよい一致を示すのは $\varepsilon_0 \approx 0.7$ である。後述のように本研究の方法では平均空間率が0.8にも達する結果も観察されている。Athyの式で $\varepsilon_0 = 0.8$ とすると、**Fig. 2**に示すように、大きく実験結果とずれ、高空間率領域を含む実験に適用するには無理なようである。

5. 実験結果および計算との比較

捕集堆積実験の結果を**Fig. 3**に示す。堆積粉体層が薄いと、平均空間率は0.75を越えている。堆積量が増加するにつれて、平均空間率は減少し、ほぼ一定値に漸近するようである。また気流の通過速度が速い程その減少割合は大きい。

捕集堆積粉体層には、予想通り空間率分布の存在することが判明したので、圧縮式 $q(\varepsilon)$ の実験定数 ε_0 を求める。**Figs. 4～7**にKozeny-Carman式と、各圧縮式を用いた場合の $u \cdot L$ と $\bar{\varepsilon}$ の関係を、 ε_0 をパラメータにして図示した。Athyの式では、計算と捕集堆積

Fig. 3 Effect of air flow rate on average void fraction of powder layer formed by dust filtration

Fig. 4 Relationship between the void fraction and the thickness of dust layer using Athy's and Kozeny-Carman's equations

Fig. 5 Relationship between the void fraction and the thickness of dust layer using Kawakita's and Kozeny-Carman's equations

実験値では、Fig. 2 の圧密実験結果と合う $\epsilon_0 = 0.694$ を含めて、いずれの ϵ_0 でも一致しない。他の圧縮式において計算がほぼ実験結果を表現するのは、川北の式で $\epsilon_0 = 0.8$ 、Eq.(19)では $\epsilon_0 = 0.85$ 程度である。なお Balshin の式では $\epsilon_0 = 1$ である。

Fig. 6 Relationship between the void fraction and the thickness of dust layer using equation 19 and Kozeny-Carman's equation

Fig. 7 Effect of Knudsen flow on the formation of powder layer by air flow, when Balshin's equation was used

分子集合体において、気体からガス状液体へ移行する際の空間率は約 0.765 とされており、粉体のランダム分散系の凝接触状態がこれに対応すると考えられる⁵⁾。今、粒子がほぼ単一径で球形であれば、空間率 0.765 が本報における ϵ_0 に相当するはずである。しかし実験では明らかに 0.765 以上であることから、少なくとも堆積した粉体層表面近傍は、等方的充填構造ではなく、粒子間付着力や静電気力によって樹枝状の堆積構造を形成していると推定される。

分子流の補正の影響を Figs. 7～9 に示す。平均空間率が小さくなると、分子流の補正を考慮の方が実験値と一致する傾向にある。また粉体の自重の影響は小さく、無視してよい。

Figs. 10～12 に気流の通過速度を変えた場合の粉体層厚さと堆積量の関係を示す。川北の式と Eq.(19) は特に実験値と一致している。空間率関数には Carman

Fig. 8 Effect of Knudsen flow on the formation of powder layer by air flow, when Kawakita's equation was used

Fig. 9 Effect of Knudsen flow on the formation of powder layer by air flow, when equation 19 was used

Fig. 10 Estimation of the thickness of powder layer by Balshin's equation

Fig. 11 Estimation of the thickness of powder layer by Kawakita's equation

Fig. 12 Estimation of the thickness of powder layer by equation 19

の分子流補正式を用いた。

しかしながら圧力損失の推定には、Fig. 13に示すように良い結果が得られない。川北の式とEq. (19)はほぼ同じ値を、Balshinの式はそれらより低い圧力損失を示し、いずれも実測値の1/2～1/3程度である。前2者の圧密式では ϵ_0 を大きくすれば実測値と一致させることは可能となるが、 $u \cdot L$ と $\bar{\epsilon}$ の関係において、計算と実測が一致しなくなる。この原因として、支持体汚紙内部に粉体が目詰りすることが挙げられるが、今回の実験では装置の制約上確認することができなかった。他の有力な原因として、供試粉体の粒度分布の存在が考えられる。粉体層形成の際、小粒径粉塵が粉体層内に侵入しやすく、その結果粉体層の厚さ方向の空

Fig. 13 Comparison of the measured and the calculated pressure loss of powder layer

間率分布が、本報の計算値よりも広がる。すなわち、 ϵ_0 はもう少し大きく、沓紙上の空間率は計算値より小さくなることで、平均空間率は等しくても圧力損失は大きくなると推定される。この点については、粒子径の揃った試料で実験を行なうなど今後の検討が必要で

あろう。また本報の方法で形成された堆積層表面は、圧力損失を減少させる方向に充填された構造と推定される。空間率が大きいと、この影響は余り大きくないと予想されるが、考慮すべき課題であろう。

結 言

気流中に浮遊した粒子が沓紙上に捕集され形成した粉体層の厚さ、重量および気流による圧力損失を測定し、以下の結論を得た。

1) 粉体層は気流によって圧縮され、厚さ方向に空間率分布を持つ。平均粒子径 $1.5\mu\text{m}$ 、幾何標準偏差 1.67 のフライアッシュ (JIS No. 10) では最も疎な堆積状態で、0.8 程度の空間率となる。これは堆積層表面では、樹枝状堆積のような非等方的充填であることを示唆している。

2) 圧縮特性式として川北の式または本報で示した実験式 (Eq.(19)) を用い、透過流動式として分子流の補正を考えた Carman の式を用いると、粉体層内の平均空間率と層厚さとの関係を推定できる。分子流補正の影響は低空間率で大きくなる。また粉体自重の影響は無視できる。

Nomenclature

g : acceleration due to gravity	($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	S_p : surface area per unit volume of a particle	(m^{-1})
k : Kozeny's constant	(-)	T : temperature	(K)
k_o : shape factor	(-)	u : air flow velocity	($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
L : thickness of powder layer formed on a filter paper by dust collection	(m)	δ : variable factor, expressing the effect of Knudsen flow	(-)
M : weight of powder layer per unit filtered area	($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)	ϵ : local void fraction in the powder layer	(-)
M_a : molecular weight of air	(-)	μ : viscosity of air	($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)
P : compressive force	(Pa)	ρ_p : particle density	($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
P_a : air pressure	(Pa)	(superscript)	
Δp : pressure loss of air flow through powder layer	(Pa)	- : average	
R : gas constant	($\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	(subscript)	
		0 : surface of the powder layer	
		L : bottom of the powder layer	

References

- 1) Athy, L. F. : *Bull. Am. Assoc. Petroleum Geologists*, **14**, 1 (1930)
- 2) Carman, P. C. and J. C. Arnell : *Cen. J. Res., Sec. A*, **26**, 128 (1948)
- 3) Heckel, R. W. : *Trans. Met. Soc. AIME*, **221**, 671 (1961)
- 4) for example : Fujita, S. and H. Touhata (eds.) : 'Kagaku Kogaku II (2nd ed.)', p.60, Tokyo Kagaku Doujin (1972)
- 5) Gotho, K. : *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **15**, 220 (1978)
- 6) Kawakita, K. and O. Tsutsumi : *Zairyou*, **14**, 707 (1965)