粉塵負荷を伴う粒子充てん層フィルターの集塵特性

森 英 利*, 木 村 典 夫**, 外 山 茂 樹*

The Performance of Granular Bed Filters with Dust Loading

by

Hidetoshi MORI[†], Norio KIMURA^{††} and Shigeki TOYAMA^{††}

The present paper deals with the filtration performance of granular bed filters during dust loading. It is verified that time changes in collection efficiency and dust load distributions in filters can be easily evaluated on the basis of the interception model. In this model, aerosol particles accumulate on a granule surface with a constant porosity, and interception by these particles is the predominant mechanism causing the increase in collection efficiency. The approximate expression representing the average collection efficiency at a given time is presented, and it is compared favorably with the experiments. It is also shown that pressure loss buildup caused by retained particles can be predicted from the same model, in consideration of the Kozeny flow in a bed.

Key Words : Dust Collection, Aerosol Filtration, Granular Bed Filters, Collection Efficiency, Pressure Loss, Dust Load

1. 緒 言

粒子充てん層フィルターを用いた集塵操作では、通常汚過の進行に伴って捕集効率と圧力損失が増加傾向を示す。この現象はいわゆる粉塵負荷に起因するもので、その解析は、フィルターの操作特性を予測する上で実用上極めて重要な課題となっている¹⁾。粉塵負荷の影響に関する研究については実験的なものが多く、Miyamotoら^{2, 3)}、Moriら⁴⁾による積算捕集効率の経時変化に関するものや、椿⁵⁾による集塵特性に関する実験式の提案、またFanら⁶⁻⁸⁾、O' Meliaら⁹⁾、Tareら¹⁰⁾によ

る確率過程に基づく汚過モデルの検討などが報告されているが、実験定数となるパラメーターの種々な実験条件下での決定が課題となっている。一方流路モデルを用いた解析では、Beizaieら¹¹⁾、Pendseら¹²⁾によって流路壁への粉塵の堆積過程のシミュレーションが報告されている。

一般に粉塵負荷を伴う場合、充填層内の流れは捕集粉塵の影響により清浄時のものとはかなり異なることが予想され、理論的に捕集効率を求めることは困難と言える。そこで著者らは、粉塵負荷を伴う粒子充てん層フィルターの捕集効率のより簡便な推定法を得ることを目的として、粉塵負荷による捕集効率の上昇が堆積した粉塵によるさえぎり効果に支配されると仮定したさえぎりモデルの提案を行い、実測値との差異を実験的に補正した推定法を与えた¹³⁾。これによれば単一球あたりの捕集効率増加分が容易に算出でき、また粒子充てん層内での粉塵捕集分布などかなりの精度で推定できることを実験的に確かめた¹⁴⁾。このさえぎりモデルは瞬間捕集効率の推定に関するもので、一方粉塵負

平成3年7月18日受付

* 名古屋大学工学部分子化学工学科

(〒464名古屋市千種区不老町)

TEL 052-781-5111内線3624

** 鈴鹿工業高等専門学校

(〒510-02鈴鹿市白子町)

TEL 0593-86-1031

† Dept. of Chem. Eng., Nagoya Univ., Nagoya 464-01

†† Suzuka College of Tech. Shiroko-cho, Suzuka 510-02

荷に伴う圧力損失の上昇は捕捉されている粉塵の比表面積の増加に起因すると考えられるため、充てん層内で捕捉されている積算の粉塵負荷量を見積る必要がある。

本報では、粉塵負荷に伴う粒子充てん層フィルターの集塵特性を解析することを目的として、さえぎりモデルに基づいて捕集効率、積算平均捕集効率および圧力損失の経時変化の推定を行い、その妥当性について実験的に考察した。

2. 実験方法

実験装置は既報¹³⁻¹⁵⁾と同様であるので省略する。供試エアロゾルはLaMer-Sinclair型の蒸発凝縮法によって発生させたステアリン酸(密度 $\rho_p=940\text{kg/m}^3$)の単分散粒子である。瞬間捕集効率の経時変化は、汙過速度を一定として、粒子充てん層の上流側および下流側エアロゾル粒子濃度を光散乱式濃度計によって測定して求めた。任意時間までの平均捕集効率 E_{av} は、この経時変化を次式によって図積分することにより求めた。

$$E_{av} = \frac{1}{C_i v t} \int_0^{C_i v t} E d(C_i v t) \quad (1)$$

ここで $C_i v t$ (kg/m^2)は積算流入粉塵負荷量を表している。充てん粒子には径の異なる数種のガラスビーズを用い、充てん層厚さを変化させて実験を行った。Table 1に本報で使用した実験条件をまとめて示す。

3. 実験結果および考察

3.1 粉塵負荷時の捕集効率

粉塵負荷に伴う粒子充てん層フィルターの全透過率は、単一球あたりの捕集効率が初期捕集効率と粉塵負荷に伴う効率上昇分の和で与えられると仮定すれば、次式によって求めることができる¹³⁾。

$$1-E = (1-E_0) \exp\left(-\frac{3}{2} \frac{1-\epsilon}{\epsilon} \frac{L}{D_c} \Delta\eta\right) \quad (2)$$

Table 1 Experimental conditions

Granule diameter D_c (μm)	186~1037
Filter thickness L (m)	0.0085~0.08
Porosity ϵ (-)	0.38~0.42
Filtration velocity v (m/s)	0.024~0.67
Aerosol particle diameter D_p (μm)	1.1~1.8
Density of aerosol particle ρ_p (kg/m^3)	940
Aerosol concentration C_i (kg/m^3)	$(0.18 \sim 2.2) \times 10^{-4}$

ここで $(1-E_0)$ は清浄時フィルターの全透過率で、対数透過則(3)により与えられる。

$$1-E_0 = \exp\left(-\frac{3}{2} \frac{1-\epsilon}{\epsilon} \frac{L}{D_c} \eta_0\right) \quad (3)$$

さえぎりモデルでは、粉塵負荷による捕集効率の上昇を捕捉されたエアロゾル粒子によるさえぎり効果に起因すると仮定し、Eq.(2)における効率増加分 $\Delta\eta$ を

$$\Delta\eta = \eta_{im} - \eta_{i0} \quad (4)$$

で与える¹³⁾。ここで η_{im} および η_{i0} はそれぞれ負荷時と清浄時の単一球あたりのさえぎり捕集効率を表している。 η_{im} については、エアロゾル粒子が充てん粒子まわりにある空間率 ϵ_p で層状に堆積してゆく過程を考え、Kuwabaraのセル流れを適用した次式で与えられている¹³⁾。

$$\eta_{im} = \frac{A}{1+N_R} + B(1+N_R) + C(1+N_R)^2 + D(1+N_R)^4$$

$$A = \frac{5-2r^3}{10K_w}, B = -\frac{3}{2K_w}, C = \frac{2+r^3}{2K_w}, D = -\frac{3r^3}{10K_w}$$

ただし

$$r^3 = 1-\epsilon$$

$$K_w = 1 - \frac{9}{5} r + r^3 - \frac{1}{5} r^6$$

$$N_R = (2n+1)N_R$$

$$n = \left(\frac{m_0}{\rho_p D_p}\right) \frac{\eta_0}{4} / N_R K_p \quad (5)$$

上式において n はエアロゾル粒子の見かけの堆積層数を、また $m_0=C_i v t$ は流入粉塵負荷量を表している。清浄時のさえぎり捕集効率 η_{i0} は $n=0$ として上式より算出される。また K_p はさえぎりモデルを実験的に補正するために導入された係数で、堆積粉塵層内の充てん率 $(1-\epsilon_p)$ の影響をも含めた形で n を補正しており、実験的に次式が求められている¹³⁾。

$$K_p = 0.054 / N_R^{0.4} \quad (6)$$

充てん層全捕集効率の経時変化を、無次元流入粉塵負荷量 $m_0/\rho_p D_p$ に対して点綴した結果としてFigs. 1および2に示した。実線が捕集効率の推定結果で、種々な条件下において、さえぎりモデルにより負荷量の増加にともなう捕集効率の経時変化が精度よく推定されることが確かめられる。なおEq.(2)における初期捕集効率の推算式としては、著者らが半理論的に求めた¹³⁾拡散さえぎり捕集効率の推定式Eq.(7)を使用した。

$$\eta_0 = 16N_{p0}^{-2/3} + 60N_{p0}^{-1/3} N_R + 1.5N_R^2 \quad (7)$$

3.2 粉塵負荷時の圧力損失

粉塵負荷に伴う粒子充てん層フィルターの圧力損失については、確率過程モデルやいくつかの実験式が提案されているが、ここではその経時変化の簡便な推定法

Fig. 1 Time changes in collection and average collection efficiency

Fig. 2 Time changes in collection and average collection efficiency

を得ることを目的として、圧力損失の上昇が汚材まわりに堆積した捕集粒子によりみかけ上汚材の比表面積が増加することによる抗力の上昇に起因していると考え^{16, 17)}。

粒子充填層に清浄空気を流した場合の圧力損失を、摩擦係数と修正レイノルズ数との関係として点綴した結果をFig. 3に示す。図の結果より、本実験範囲ではKozeny式が成立していることが確認される。このことを考慮して、粉塵負荷を伴う場合の圧力損失もKozeny式を用いて次式で表されると仮定する¹⁸⁾。

$$\frac{\Delta P_m}{L} = \frac{5 S_{vm}^2}{(1 - \epsilon_m)^3} \mu v \quad (8)$$

ここで S_{vm} (1/m)は粉塵負荷時の充てん層単位体積あたりの比表面積で、汚材まわりに粉塵が一様空間率で堆積してゆくさえぎりモデルに基づき、汚材と粉塵の比表面積の和として次式で与えることとする¹⁸⁾。

$$S_{vm} = \frac{6(1 - \epsilon)}{D_c} + \frac{6m}{\rho_p D_p K_p} \quad (9)$$

式中の m (kg/m³)は充てん層単位体積あたりの平均捕集粉塵負荷量を表し、また負荷時の空間率 ϵ_m はその初期

Fig. 3 Friction factor of the clean granular bed

値 ϵ と堆積粉塵のみかけ体積より次式で算出される。

$$\epsilon_m = \epsilon - \frac{m}{\rho_p K_p} \quad (10)$$

ここでEqs.(9)および(10)において、エアロゾル粒子堆積層内の充てん率 $(1 - \epsilon_p)$ の代わりに、前出のさえぎりモデルで得られている実験的補正係数 K_p の値を用いることとした。Eqs.(8)~(10)により、粉塵負荷時と清浄時の圧力損失比 $\Delta P_m / \Delta P_0$ は無次元捕集粉塵負荷量 m / ρ_p の関数として与えることができ、推定値と実測値との比較をした例をFig. 4に示した。ここで m の実測値は平均捕集効率 E_{av} をEq.(1)により実験的に算出し、 $m = (C_i v t / L) E_{av}$ の関係より求めた。図より実線で示された推定結果は実測値と比較的良好一致を示しており、粉塵負荷を伴う場合にもKozeny式の関係を利用して圧力損失の上昇を簡便に推定できることが確かめられる。

3.3 粉塵負荷時の平均捕集効率

さえぎりモデルにより瞬間捕集効率の流入粉塵負荷量に対する経時変化を推定することは可能であるが、一方圧力損失の上昇については堆積粉塵による比表面積の増加に起因すると仮定しているために、層内捕集粉塵負荷量との関係として与えられている。そのため圧力損失と流入粉塵負荷量との関係を求めるには、任意時間までの平均捕集効率を求める必要があるが、Eq.(1)で定義される E_{av} については瞬間効率 E の関数形によって流入負荷量に対して直接積分することができない。そこで本報では、 E_{av} の近似式を用いることとする。格⁵⁾は全透過率と圧力損失の相関から、それぞれの上昇比を捕集粉塵負荷量に関する指数関数で表した次式と等価な実験式を提案しその妥当性を検討している。

$$\frac{1 - E}{1 - E_0} = \exp(-\alpha L m) \quad (11)$$

ここで α は充てん層および汚過条件で決まる実験定数で

Fig. 4 Comparison between the calculated and observed pressure loss as a function of dimensionless retained dust loads

ある。本報でも上式の成立を仮定すれば、上式より得られる E の m に対する変化量

$$\frac{-1}{1-E_0} \frac{dE}{dm} = -\alpha L \exp(-\alpha L m) \quad (12)$$

と Eq. (11) との比より次式が導出される。

$$\frac{dE}{1-E} = \alpha L dm = \alpha E d(C_i vt) \quad (13)$$

Eq. (13) を 汚過開始時間より任意時間まで積分すれば、瞬間捕集効率と流入粉塵負荷量との関係として次式を得ることができる。

$$\frac{E(1-E_0)}{E_0(1-E)} = \exp(C_i vt) \alpha \quad (14)$$

Eqs. (11) および (14) から平均捕集効率 E_{av} は $Lm = C_i vt E_{av}$ の関係より、任意時間での瞬間捕集効率と初期捕集効率を用いて次式のように導くことができる。

$$E_{av} = \log \left(\frac{1-E_0}{1-E} \right) / \log \frac{E(1-E_0)}{E_0(1-E)} \quad (15)$$

Figs. 1 および 2 には、Eq. (1) より算出した実測値と Eq. (15) による推定値の比較も併せて示してある。Eq. (11) とさえぎりモデルより導かれる Eq. (2) とを比較す

ると、 α は汚過の進行に伴って少しずつ減少する値をとることが数値計算により確認できるが、Eq. (15) の導出では一定と仮定した。そのため Eq. (15) の適合性には多少問題が残るものの、図の結果より近似推定式としては十分使用可能であると言える。

平均捕集効率が瞬間捕集効率との関係で表されれば、圧力損失の経時変化も流入粉塵負荷量の関数として表すことができる。Fig. 5 には種々な実験条件下で得られた圧力損失の上昇比を流入粉塵負荷量に対して点綴した結果を示した。図で示されるように、比較的よい精度で圧力損失の上昇傾向を推定できることが確かめられる。また図において推定結果は瞬間捕集効率 E がほぼ 1 となる時間までの計算結果が示されているが、実験値はいずれの場合も少し前の時点より急激に上昇する傾向を示している。これは、充てん層による内部汚過から表面汚過へ移行する過程であることを示していると考えられ、特に充てん層入り口部分での粉塵堆積の様子が変化しているものと推察される。

3.4 粒子層内粉塵捕集分布

充てん層内での捕集負荷量分布や圧力損失分布は、上述のさえぎりモデルを分割した充てん層の各層に適用することにより、各分割層で対数透過則の成立を仮定して推定することができる。Figs. 6 および 7 には、厚さ 5mm の充てん層を 9 層重ねて行った実験より得られた、各層での平均捕集負荷量 m_1 (kg/m^2) の経時変化と推定結果との比較¹⁴⁾、および各流入粉塵負荷量に対応した

Fig. 5 Time changes in pressure loss buildup in beds with dust loads

Fig. 6 Time changes in dust load and the predicted pressure loss distributions

Fig. 7 Time changes in dust load and the predicted pressure loss distributions

各層における圧力損失の上昇比 $\Delta P_{mi} / \Delta P_{0i}$ の推定結果を示した。捕集負荷量の実測値は各時間毎に各層の重量変化から求めたもので、また推定値も5mm厚さ充てん層での値として表してある。均一径粒子充填層では一般に図のような負荷量分布の変化が認められ、時間の経過に伴い特に入り口部分での堆積傾向が著しくなっていくのがわかる。また圧力損失も負荷量分布に対応した分布で上昇することが確認され、充てん粒子径も小さい方が特に入り口部分での捕集負荷量および圧力損失の上昇率が大きいくことがわかる。このように均一径粒子充填層では捕集負荷量が入り口部分に偏る傾向が

みられるが、層内での粉塵堆積状態を変化させれば、粒子層フィルターの集塵特性も種々変化させることができると考えられる。

繊維充てん層を用いたエアフィルターでは、空間率や繊維径に勾配を付けることによりフィルターの集塵特性や寿命を変化できることが報告されているが¹⁰⁾、粒子充てん層では空間率はほとんど変化させることができないため充てん粒子径の変化が主となる。そこで充てん粒子径を変化させたいくつかのサンプル充てん層について、各粒子径の充てん層で対数透過則の成立を仮定して、捕集効率や圧力損失および負荷量分布の変化などを

さえぎりモデルにより考察した。いずれも厚さ9mmの充てん層を5層重ねた場合とし、汙過条件はすべてFig.6の場合と同じとした。Fig.8にはFig.6で示した充てん層(S-1充填層)との集塵性能を比較するために、 $D_c=759\mu\text{m}$ を中心としてその前後に粒子径を直線的に変化させた充てん粒子を配した場合(S-2充てん層)について、負荷量分布と圧力損失分布および捕集効率分布をさえぎりモデルより求めた結果を示した。ここで充填粒子径はS-1充てん層と初期圧力損失 ΔP_0 が等しくなるように決めてある。S-1充てん層よりも小粒子を充てん層後部に配しているため、汙過の初期においては中心から後方にかけて捕集負荷量が集中しているのがみられるが、時間の経過に伴い充てん層中心部にその最大値が現れてくる傾向がみられる。Fig.9は充てん層全体としての捕集効率と圧力損失の経時変化を表したもので、図よりS-2充てん層はS-1充てん層に比べて捕集効率には大きな差がないものの、圧力損失の急激な上昇を抑えていることが分かる。これは均一径粒子充てん層でみられるように、圧力損失の急激な上昇が充てん層入り口部での粒子負荷量の集中に起因しているためで、S-2充てん層のように粉塵の堆積を充てん層内部へ分散させることにより圧力損失の上昇が緩和されることを示している。Fig.10には本研究で用いた充てん粒子の最大径と最小径をそれぞれ入り口側と出口側に配し、他の3層に粒径を直線的に変化させた場合(S-3充てん層)、双曲線的に減少させた場合(S-4充てん層)およびその逆の関数形で減少させた場合(S-5充てん層)とについての捕集負荷量分布の計算結果を示した。いずれのサンプル充てん層も

Fig. 9 Time changes in overall collection efficiency and pressure loss buildup in the sample filters

Fig.9 でみられるように、S-1 および S-2 充てん層よりも小粒子を充てんしているために、捕集効率の経時変化はかなり急激となっている。しかし S-3~S-5 の充てん層全体としての捕集効率の経時変化には大きな違いがみられないものの、圧力損失の上昇傾向は全く異なっていることが確かめられる。S-5 充てん層の形式では時間が経過しても出口側のみに負荷量の最大値が現れており、圧力損失の上昇も急激である。一方 S-4 充てん層ではその最大値が時間の経過に伴って入り口側へ移行してゆく様子がわかる。また S-3 充てん層でも最大値が後方に現れ始めていることが認められ、このことから負荷量分布の最大値を後方から入り口方向へ変化させるような充てん粒子の組み合わせを用いることにより、圧力損失の急激な上昇を抑えることができると考えられる。S-2, S-3 および S-4 充てん層内での各層ごとの捕集効率 E_i と圧力損失上昇比 $\Delta P_{mi}/\Delta P_{0i}$ の

Fig. 8 Distributions of dust load, collection efficiency, and pressure loss in the sample filter S-2

Fig. 10 Variations of dust load distributions in the sample filters S-3, S-4, and S-5

Fig. 11 Variations of collection efficiency and pressure loss distributions in the sample filters S-3, S-4, and S-5

経時変化の計算結果をFig.11に示した。それぞれ捕集負荷量分布に対応した経時変化を示していることが確認される。

このように充てん粒子径を変化させた粒子充てん層フィルターを利用することによりフィルターの集塵特性も任意に変化させることが可能で、その特性もさえぎりモデルにより予測することができる。粒子充てん層フィルターは実用的には移動層形式で使用されることが多く、粒子径の異なる数種の粒子を配した充てん層を個別に移動させる直交流形式の移動層集塵に上記の手法が応用できると考えている。

4. 結 言

粉塵負荷を伴う粒子充てん層フィルターの集塵特性をさえぎりモデルを用いて考察し、以下の結果を得た。

(1) 捕集効率の経時変化は、堆積粉塵によるさえぎり効果が効率上昇を支配すると仮定して簡便に推定で

きることを実験的に示した。また任意時間までの平均捕集効率を、さえぎりモデルより得られる瞬間捕集効率と初期捕集効率の関数として表した近似推定式で与え、その十分な有用性を実験により確かめた。

(2) 粉塵負荷にともなう圧力損失の上昇が捕捉粉塵による比表面積の増加に起因すると仮定し、さえぎりモデルを基に層内捕集負荷量との関係として与え、その妥当性を実験的に確かめた。また平均捕集効率の近似式を用いて、流入粉塵負荷量に対する経時変化として与えた。

(3) 分割した充てん層の各層にさえぎりモデルを適用することにより、充てん層内での捕集負荷量分布の経時変化がよく推定できることを実験により確かめた。また充てん粒子径を変化させた充てん層の組み合わせにより層内での粉塵堆積状態を変化させることができ、これにより充てん層全体の圧力損失の上昇傾向を制御できることを示した。

Nomenclature

C_i : inlet mass concentration of aerosol particles (kg /m ³)	ΔP_0 : pressure loss of a clean bed (Pa)
D_{BM} : diffusion coefficient (m ² /s)	ΔP_m : pressure loss with dust loading (Pa)
D_c : mean diameter of packed granule (m)	Re' : modified Reynolds number (—)
D_p : diameter of aerosol particles (m)	S_v : specific surface area of a bed (l/m)
E_0 : overall collection efficiency at the initial stage (—)	S_{vm} : specific surface area of a bed with dust loading (l/m)
E : overall collection efficiency with dust loads (—)	t : filtration time (s)
E_{av} : cumulative collection efficiency at a given time (—)	v : filtration velocity (m/s)
K_p : correction factor introduced in the interception model (—)	ϵ : porosity of a bed (—)
L : filter thickness (—)	ϵ_m : porosity of a bed with dust loading (—)
m_0 : C_i vt, inlet dust load (kg /m ²)	ϵ_p : porosity of captured particle layers (—)
m_i : captured dust load in the i -th bed (kg /m ²)	η_0 : single collection efficiency in a clean filter (—)
m : overall captured dust load in a filter (kg /m ³)	η_m : single collection efficiency with dust loads (—)
n : number of particle layers captured on a collector (—)	λ' : friction factor (—)
N_{Pe} : $\nu D_c/D_{BM}$, Peclet number (—)	μ : viscosity of gas (Pa·s)
N_R : D_p/D_c , interception parameter (—)	ρ : density of gas (kg /m ³)
	ρ_p : density of aerosol particles (kg /m ³)
	< Subscript >
	i : i -th bed

References

- Emi, H. : *J. Aerosol Res. Japan*, **4**, 256 (1989)
- Miyamoto, S. and H. L. Bohn : *J. Air Pollution Cont. Asso.*, **24**, 1051 (1974)
- idem. : *ibid.*, **25**, 40(1975)
- Mori, Y. and K. Iinoya : Proc. Int. Symp. on Powder Tech., Kyoto, p.557 (1981)
- Tsubaki, J. : Preprints of Hokuriku Meeting of the Soc. of Chem. Engrs. Japan, p.218 (1986)
- Fan, L. T., S. H. Hwang, S. T. Chou and R. Nassar : *Chem. Eng. Commun.*, **35**, 101 (1985)
- idem. : *AIChE J.*, **31**, 1781 (1985)
- idem. : *Chem. Eng. Sci.*, **41**, 2017 (1986)
- O'Melia, C. R. and W. Ali : *Prog. Water Technol.*, **10**, 167 (1978)
- Tare, V. and C. Venkobachar : *Envir. Sci. Technol.*, **19**, 497 (1985)
- Beizaie, M., C. S. Wang and C. Tien : *Chem. Eng. Commun.*, **13**, 153 (1981)
- Pendse, H. and C. Tien : *J. Colloid Interface Sci.*, **87**, 225 (1982)
- Kimura, N., H. Mori, Y. Murase, S. Jingasa and M. Shirato : *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **13**, 780 (1987)
- Kimura, N. M. Kanamori, H. Mori and M. Shirato : *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **15**, 119 (1989)
- Kimura, N., H. Mori, T. Tomita, H. Yagi and M. Shirato : *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **9**, 536 (1983)
- Kimura, N. and K. Iinoya : *Kagaku Kogaku*, **33**, 1255 (1969)
- Yoshioka, N., H. Emi, M. Yasunami and H. Sato : *Kagaku Kogaku*, **33**, 1013 (1969)
- Toyama, S., H. Mori and Y. Mizutani : *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **13**, 621 (1987)
- Kanaoka, C. : *J. Aerosol Res., Japan*, **4**, 256(1989)