

# 粒子充填層フィルターによる集塵プロセスの物理モデルについて

伊地知和也・吉福 功美

(受理 平成8年5月31日)

## On the Physical Model of Dust Collection Process by Granular Packed Bed Filter

Kazuya IJICHI and Isami Yoshifuku

A physical model of dust collection by the granular packed bed is presented and confirmed by experimentation with fly ash to a glass beads packed bed. The two partial equations for concentration of dust particles in the air stream and concentration of dust particles in packed solid phase obtained from this model are solved by the solution simulator developed in our laboratory. The experimental results in dust entrance concentration  $C_i = 6.59 \times 10^{-3} \sim 1.10 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$  and of superficial velocity  $u = 0.255 \sim 0.594 \text{ m/s}$ , showed the compatibility of the model and the values of parameters of the model, with a piling factor  $(85 \sim 95) \times 10^{-3} \text{ (m}^2/\text{s)}$  and re-entrained factor  $0.0175 \times 10^{-3} \text{ (1/s)}$ .

### 緒 言

近年、種々な産業分野で、有価物の回収として含塵ガス中の固体微粒子を効果的に分離捕集することが要求されるようになった。このことは環境衛生上からも重要な問題となっている。粒子充填層フィルターは固形粒子を充填した層に含塵ガスを通過させることによってダストを分離捕集する装置であって、上記の目的に適合する装置である。その濾材の材質を適切に選べば、濾布式フィルターで処理が困難といわれる高温、高湿含塵ガスの集塵装置として有用であり、高温排ガス中のエネルギー有効利用の観点からもその実用化のための研究が待たれている。

粒子充填層フィルターを用いた集塵操作では、通常濾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、その課題はフィルターの操作特性を予測する上で極めて重要な課題となっている<sup>3, 4)</sup>。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、理論的なアプローチとしては、Fanら<sup>2)</sup>による確率過程に基づく濾過モデルの検討や流路モデルを用いた解析での粉塵

の堆積過程のシミュレーション<sup>1)</sup>が報告されているに過ぎない。

先に我々は<sup>5)</sup>、このフィルターでの粉塵濃度の時間的、場所的变化について新しい数学モデルを開発し、濾過部での未捕集量の実験結果と比較することによって、粉塵負荷のメカニズムへのアプローチを試みた。しかしながら、この試みは偏微分方程式シミュレータ上で行われたもので、特定の実験データによく合う数学モデルを見つけたというに過ぎず、多くの実験データに適合するとは限らないという欠点がある。そこで本報告では濾過集塵のメカニズムに対して物理モデルを提案し、得られた2元の連立偏微分方程式を解法シミュレータにかけることにした。その結果実験で得られたデータと良好な一致を見るようなパラメータを得た。

### 1. 実験装置と実験方法

使用した粒子充填層フィルターすなわち濾過部を含む実験装置を図1に示す。装置は電磁フィーダ、ディスペンサ、充填塔、円筒濾紙部、流量計および真空ポンプ等から成っていて、真空ポンプによる吸引式であ

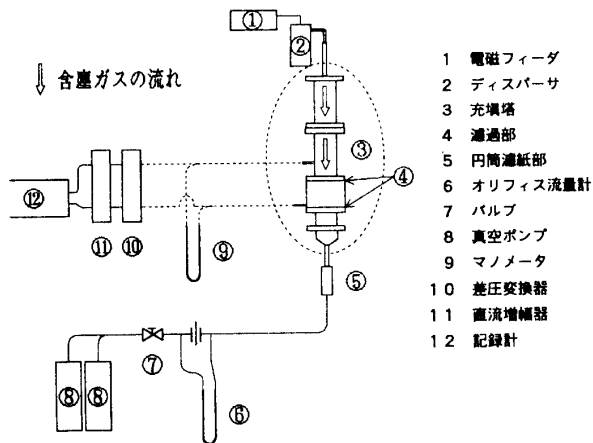


図1 装置図

る。充填塔は透明アクリル樹脂製の円筒形で内径 50 mm 長さ 800 mm で、長さ 630 mm の整流区間と 50 mm の濾過部および 120 mm の円錐形出口区間から成っている。濾過部はその上、下部に14メッシュの金網が取り付けられており、実験中は塩化ビニール製のフランジで固定されているが実験後は塔本体から分離できるようになっている。

実験に用いた粉塵は平均径  $D_p = 3.30 \mu\text{m}$ 、密度  $\rho_p = 2.19 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  のフライアッシュ10種で1分当たり 0.5 g の供給を目安として実験時間に対応する量を電磁フィーダに準備する。例えば実験時間 30 分の場合は 15 g に試料を用いることになる。電磁フィーダに供給された粉体はディスペーサで均一に分散され充填塔に入る。そこで粉塵気流として充填塔を下向きに通過し整流部で様な速度分布となり、濾過部で大部分が集塵され残りは円筒濾紙で捕集される。空気流量はバルブで調節され、オリフィス流量計で測定する。濾過部は圧力タップが取り付けられており、圧力損失を測定できるようになっている。濾過部の充填物は平均粒径 1.83 mm のガラスビーズで空間率は 0.35 である。塔径 50 mm の場合は粉塵の供給濃度  $C_i$  は  $6.59 \times 10^{-3} \sim 1.10 \times 10^{-2} \text{ [kg/m}^3]$  の範囲であり、気流の通過速度は  $0.2 \sim 0.6 \text{ [m/s]}$  の範囲で3種類とした。

次に実験方法について述べる。記録計などの電源を入れ、濾材の充填、円筒濾紙の装着などを行い装置を組み立てる。次に真空ポンプ、ディスペーサの電源を入れ、ガス流量の調整をバルブで行い、流量が一定になるのを待つ。電磁フィーダに所定量の試料粉体を入れ、ストップウォッチを押し実験を開始する。所定の時間捕集実験を終えたら装置を分解し、濾過部内の堆

積粉塵のサンプリングを行い、また円筒濾紙部での捕集量などを測定する。例えば実験開始後10分後に装置を分解し測定したものは10分のデータとし、次に実験開始後20分で行い分解し測定するという非連続方式を採用した。測定値は濾過部での粉塵堆積量、円筒濾紙での捕集量、濾過部内の空間率、濾過部での圧力損失などである。

供給された粉塵で濾過部に到達しないで管壁などに付着したものは供給量には算入しないことにし、また濾過部から円筒濾紙部の間の管壁に付着した粉塵は円筒濾紙部での捕集量とみなした。

## 2. 物理モデルの作成

ここでは濾過部を通過し円筒濾紙部で捕集された粉塵の堆積量  $q(t)$  のデータから充填層での時間的、場所的な粉塵堆積量の変化の数式モデルを検討することにする。まず、次のような仮定をおく、粉塵は様な濃度で充填層に流入し、充填粒子は均一粒径で塔に様に充填されており、捕集される粉塵粒子も均一粒径である。実験結果によると、実験後始めの頃は徐々に堆積量が増し、ある時間経過すると再飛散現象が起きることが分かっており、このことを基に以下のような物理モデルを提案する。図2において濾過部入り口から下方へ  $x$  軸をとる。粉塵は濃度  $C_i$  で濾過部に入り、 $C_o$  で出ていく。気流中の粉塵の濃度は時間  $t$ 、距離  $x$  の関数でこれを  $C(t, x)$  と表わす。同じように充填粒子に付着した粉塵の濃度を  $m(t, x)$  と表現する。ここで濾過部入り口から距離  $x$  の所に長さ  $dx$  の微小部分を取り、これが空間と充填粒子相からなっているものとする。今充填層の空間率を  $\varepsilon$  とすれば、この微小空間の体積は  $\varepsilon Adz$  で微小粒子相の体積は  $(1-\varepsilon)Adz$  である。また充填層の単位体積あたりの接触面積を  $a$  とすればこの微小部分の接触面積は  $A \cdot a \cdot dx$  ( $\text{m}^2$ ) である。単位の接触面積あたりの粉塵の粒子相への付着速度を  $Na$  ( $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ ) とし、粒子相から空間への飛散速度を  $Nb$  ( $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ ) とするとこの微小区間では粒子の付着量は  $Na \cdot A \cdot a \cdot dx$  ( $\text{kg/s}$ )、飛散量は  $Nb \cdot A \cdot a \cdot dx$  ( $\text{kg/s}$ ) と表せる。

図3に示すような物理モデルに対して物質収支をとると微小空間での粉塵については次の偏微分方程式が導かれる。

$$\frac{\partial C}{\partial x} + \varepsilon \frac{\partial C}{\partial t} = -(Na - Nb)a \quad (1)$$

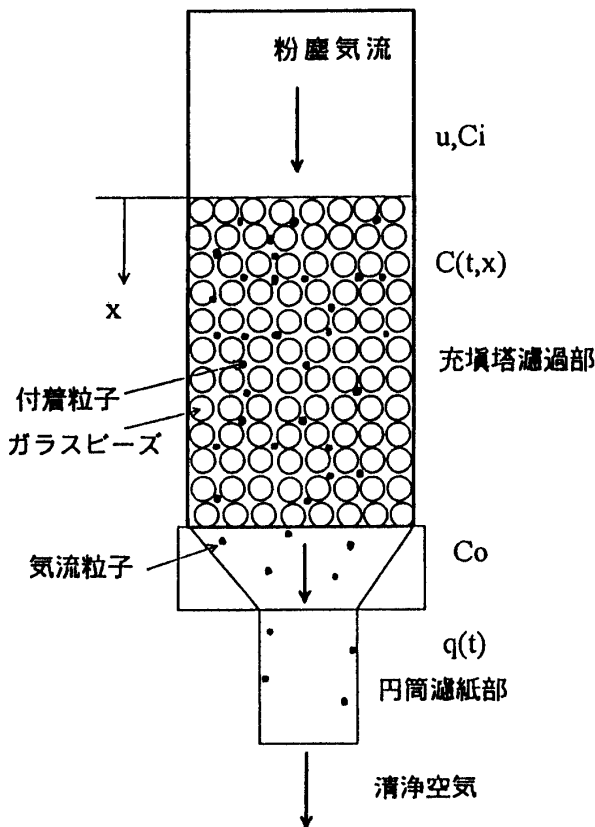


図2 充填塔モデル図

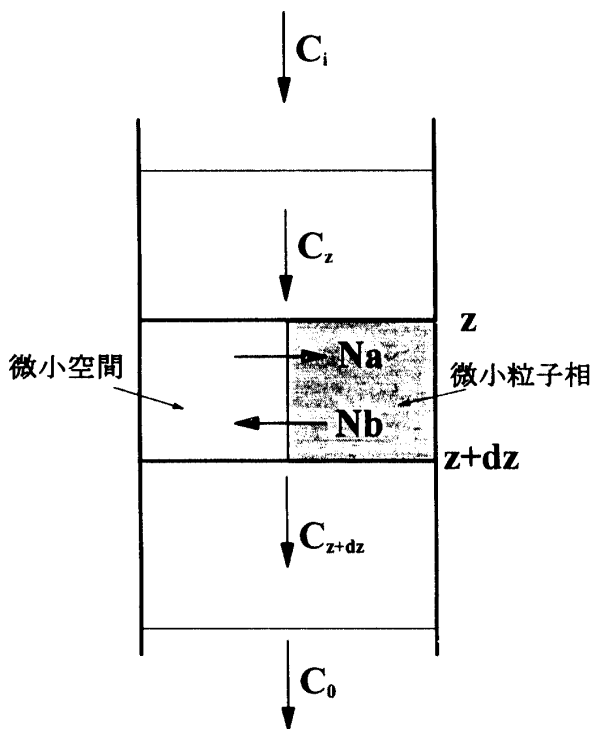


図3 物理モデル図

同じく微小粒子相では

$$(1-\varepsilon)\frac{\partial m}{\partial t} = (Na - Nb)a \quad (2)$$

が得られる。

ここで粉塵の付着，飛散は流速と粉塵濃度に比例するという仮定を立てる。

$$(Na - Nb)a = \lambda uC \quad (3)$$

従って(1)(2)式は

$$u \frac{\partial C}{\partial x} + \varepsilon \frac{\partial C}{\partial t} = -\lambda uC \quad (4)$$

$$(1-\varepsilon)\frac{\partial m}{\partial t} = \lambda uC \quad (5)$$

ここで，初期条件は

$$C = 0 \text{ and } m = 0 \text{ at } t = 0$$

境界条件は

$$C = Ci \text{ at } x = 0$$

$$dC/dx = 0 \text{ at } x = L$$

である。上式でここで付着飛散定数  $\lambda$  は実験に合うように決めるべきパラメータであり，例えば

$$\lambda = \lambda_0 - \lambda_{1,i} \quad (6)$$

という形を想定すればパラメータ  $\lambda_0$  は粉塵の充填粒子への堆積係数，また  $\lambda_{1,i}$  は飛散係数と名づけることができる。

上式を初期，境界条件の下で解くと粉塵濃度  $C$  の時間的，場所的变化が分かるから濾過部出口での粉塵濃度  $Co$  を求めることができる。この出口での濃度  $Co$  に対応する粉塵がそのまま排出されるとすると，円筒濾紙部での捕集量すなわち濾過部での未捕集量  $q(t)$  は次式で計算できる。ここで濾過部を通過した粉塵は円筒濾紙部で完全に捕集されるとする。従って次式を想定する。

$$q(t) = u \cdot S \cdot \int C \text{Codt} \quad (7)$$

我々は次のような偏微分方程式の解法シミュレータを開発した。始めにパラメータ P1, P2 を適当に仮定し，偏微分方程式を Crank-Nicolson 法で解き， $x=L$  での粉塵濃度  $Co$  を計算し，(2)式から Simpson の数値積分法で未捕集量  $q$  を計算し， $q$  の実験データがプロットしてある上に挿入する。ここでパラメータ P1, P2 は繰り返し用いられるようになっており，プロット点と計算点との誤差が画面にでる。この誤差を小さ

くするようなパラメーター P1, P2 を選定するようになっていく。

なお今回は  $q(t)$  に着目して気流粉塵濃度  $C(t, x)$  についての数式モデルを作成したが、付着粒子濃度  $m(t, x)$  に着目して数式モデルを作成することもできよう。

### 3. 実験結果

気流の通過速度  $u=0.255$  m/s に対し非連続方式の実験時間 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 分としたときの実験結果を図4に示す。これは濾過部通過量(すなわち円筒濾紙での捕集量 [g]) すなわち  $q$  (kg)  $\times 10^3$  の経時変化(時間は秒)を示している。一般に始めは通過量は徐々に増加するが、ある時間経過すると急激に増加する傾向すなわち再飛散現象が見られる。解法シミュレータを適用した結果は図では鎖線として示してあり、ここで(6)式を想定しパラメーター  $\lambda_0, \lambda_1$  に対して 85, 0.0175 という値を入れると実験データと良好な一致が見られる。このことは通過速度  $u=0.43$  および 0.59 (m/s) の場合(図5, 図6)でも同様であった。これは上述の物理モデルと(3), (6)式の妥当性を示している。次のような結果を得た。

通過速度  $u=0.255$  (m/s) の場合:

堆積係数  $\lambda_0=85 \times 10^{-3}$  飛散係数  $\lambda_1=0.0175 \times 10^{-3}$

通過速度  $u=0.425$  (m/s) の場合:

堆積係数  $\lambda_0=90 \times 10^{-3}$  飛散係数  $\lambda_1=0.0175 \times 10^{-3}$

通過速度  $u=0.594$  (m/s) の場合:

堆積係数  $\lambda_0=95 \times 10^{-3}$  飛散係数  $\lambda_1=0.0175 \times 10^{-3}$

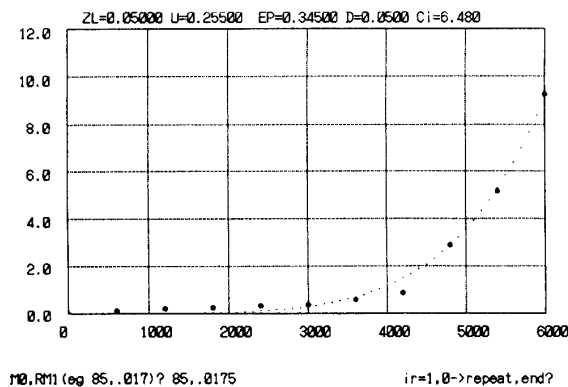


図4 円筒濾紙部での捕集量の時間経過曲線 ( $u=0.255$  m/s)

堆積係数は速度が増すと大きくなる傾向があり、飛散係数は一定値を取ることが分かる。なお本報告では示していないが、塔径 75 mm の充填塔を用いた実験でも本報告の物理モデルが当てはまること、再飛散が起き難いことが分かっている。またこれらのパラメータは粉塵粒子、充填粒子の物性その他塔径、入り口粉塵濃度、通過速度などの操作変数等によって定まると考えられる。今後これらの相関についての研究が待たれる。またこの充填層フィルターでの再飛散現象がどういう場合に起きるのかといった研究も必要であると考えられる。

### 結 論

粒子充填層フィルターを用いた集塵操作について、物理モデルを提案し、開発した偏微分方程式の解法シミュレータを適用した。これを用いて、濾過部を通過

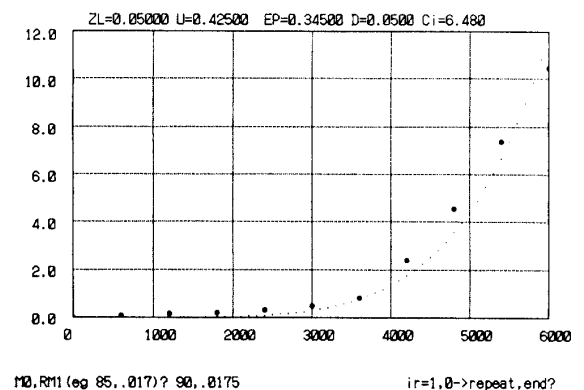


図5 円筒濾紙部での捕集量の時間経過曲線 ( $u=0.425$  m/s)

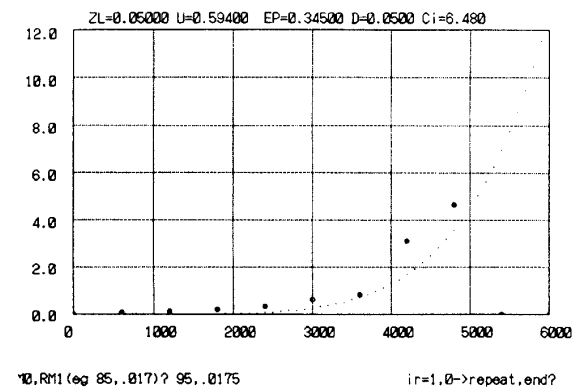


図6 円筒濾紙部での捕集量の時間経過曲線 ( $u=0.594$  m/s)

して円筒濾紙部で捕集された粉塵量の実験データから2個のパラメータを簡単に求めることができる。本実験の範囲ではこのモデルが実験結果に適合することと、堆積係数は流速によって変わるが90 (m<sup>2</sup>/s) 前後の値を、飛散係数は一定値 0.0175 (1/s) の値をとることが分かった。

#### 謝 辞

本研究で実験およびソフトウェアの開発に携わった当時の学生、木下和徳、田原崇志、菊永孝子および小暮優香氏に感謝する。

#### 記 号

$C$	：気流中の粉塵濃度	[kg/m <sup>3</sup> ]
$C_i$	：濾過部入り口での粉塵濃度	[kg/m <sup>3</sup> ]
$C_o$	：濾過部出口での粉塵濃度	[kg/m <sup>3</sup> ]
$L$	：濾過部の長さ	[m]
$m$	：堆積粉塵の濃度	[kg/m <sup>3</sup> ]
$Na$	：付着速度	[kg/m <sup>2</sup> ·s]
$Nb$	：飛散速度	[kg/m <sup>2</sup> ·s]
$q$	：円筒濾紙部での捕集量	[g]
$S$	：濾過部断面積	[m <sup>2</sup> ]
$t$	：時間	[s]
$u$	：気流の濾過部通過速度	[m/s]
$x$	：濾過部での距離	[m]
$\lambda_0$	：堆積係数	[m <sup>2</sup> /s]
$\lambda_1$	：飛散係数	[1/s]

#### 引用文献

- 1) Beizaie, M., et al.: Chem. Eng. Commun., 13,153 (1981)
- 2) Fan, L.T., et al.: AIChE J. 31,1781 (1985)
- 3) 木村, 他: 化学工学論文集, 15, 119 (1989)
- 4) 木村, 他: 粉体工学会誌, 29, 18 (1992)
- 5) 吉福功美, 伊地知和也: 鹿児島大学工学部研究報告, 第37号, 117 (1995)