

粒子充填層フィルターによる集塵プロセスの 数学モデルについて

吉福 功美・伊地知和也
(受理 平成7年5月31日)

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

Isami YOSHIFUKU and Kazuya IJICHI

A mathematical model of dust collection by the granular packed bed model is presented and confirmed by experimentation with fly ash to a glass beads packed bed. The model is based on a partial differential equation for concentration of dust particles in the air stream, and an equation for uncaptured dust particles in a filter, which is captured in a circular paper filter. The experimental results in dust entrance concentration $C_i = 6.59E-3 \sim 1.10E-03 \text{ kg/m}^3$ 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 $1.0E-09 \text{ (m}^2/\text{s)}$ and re-entrained factor $1.0E-05 \text{ (1/s)}$.

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個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わ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、その解析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^{3,4)}。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²⁾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¹⁾が報告されているに過ぎない。

本研究では、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る。

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る。充填塔は透明アクリル樹脂製の円筒形で内径50mm長さ800mmで、長さ630mmの整流区間と50mmの濾過部および120mm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 $D_p = 3.3\mu\text{m}$ 、密度 $\rho_p =$

2.19E+03kg/m³のフライアッシュ10種で1分当たり0.5g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15gの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一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、オリフイ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、圧力損失を測定するようになっている。濾過部の充填物は平均粒径1.83mmのガラスビーズで空間率は0.35である。塔径50mmの場合は粉塵の供給濃度 C_i は $6.59E-03 \sim 1.10E-02$ [kg/m³] の範囲であり、気流の通過速度は $0.2 \sim 0.6$ [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。

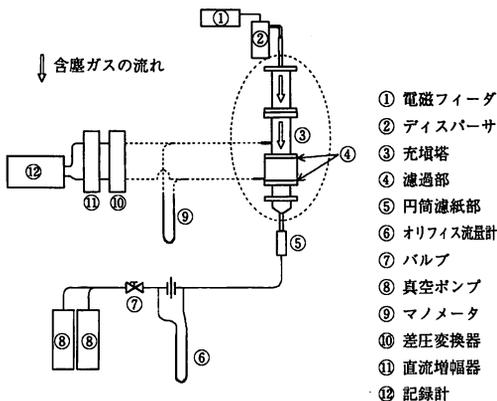


図1 装置図

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. 数学モデルの作成

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数式モデルを提案する。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学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。充填粒子は均一粒径で塔に均一に充填されており、捕集される粉塵粒子も均一粒径である。また粉塵は一様な濃度で充填層に流入しその捕集のメカニズムは一次元拡散モデルに従うが再飛散現象については気流中の粉塵濃度 C に依存する項を考慮に入れるものとする。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = p_1 \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - u \cdot \frac{\partial C}{\partial x} + p_2 \cdot C \quad (1)$$

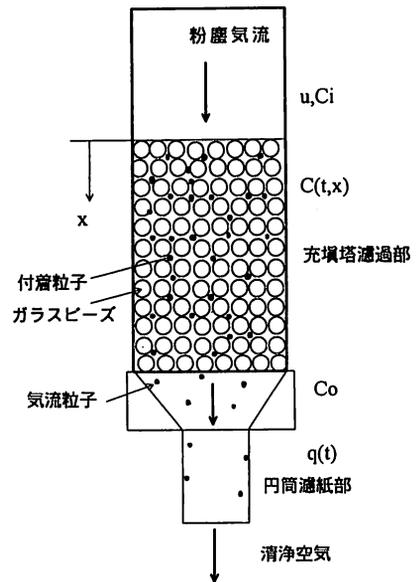


図2 充填塔モデル図

ここで、初期条件は

$$C = 0 \quad \text{at } t = 0$$

境界条件は

$$C = C_i \quad \text{at } x = 0$$

$$\partial C / \partial x = 0 \quad \text{at } x = L$$

である。上式で p_1 は粉塵の充填粒子への付着、堆積数に対応するもので堆積係数と、また p_2 は飛散係数と名づける。

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 C_0 を求めることができる。この出口での濃度 C_0 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。

$$q(t) = u \cdot S \cdot \int C_0 dt \quad (2)$$

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 p_1 , p_2 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 C_0 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 p_1 , p_2 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 p_1 , p_2 を選定するようになっている。

なお今回は $q(t)$ に着目して気流粉塵濃度 $C(t, x)$ についての数学モデルを作成したが、付着粒子濃度 $m(t, x)$ に着目して数学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 $u = 0.255 \text{ m/s}$ 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 3 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) $q(\text{kg}) \times 10^3$ 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。このことは通過速度 $u = 0.43, 0.59 \text{ m/s}$ の場合 (図 4, 図 5) で

も同様であった。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、実験データと良好な一致が見られるが、これは上述の数学モデルの妥当性を示している。次のような結果を得た。

通過速度 $u = 0.255 (\text{m/s})$ の場合 :

堆積係数 $p_1 = 0.7\text{E}-9$, 飛散係数 $p_2 = 0.7\text{E}-05$

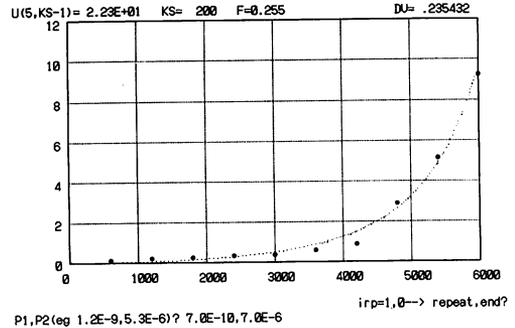


図 3 円筒濾紙部での捕集量の時間経過曲線 ($u = 0.255 \text{ m/s}$)

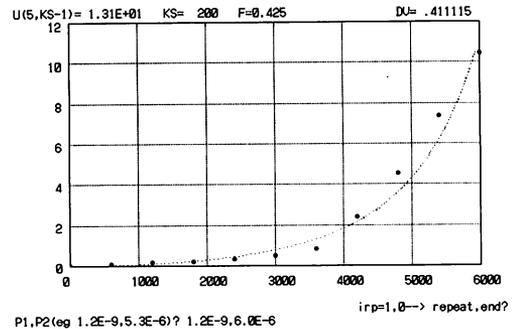


図 4 円筒濾紙部での捕集量の時間経過曲線 ($u = 0.425 \text{ m/s}$)

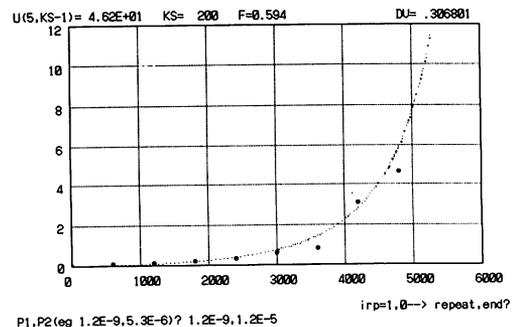


図 5 円筒濾紙部での捕集量の時間経過曲線 ($u = 0.594 \text{ m/s}$)

通過速度 $u = 0.42$ (m/s) の場合 :

堆積係数 $p_1 = 1.2E-9$, 飛散係数 $p_2 = 0.6E-05$

通過速度 $u = 0.594$ (m/s) の場合 :

堆積係数 $p_1 = 1.2E-9$, 飛散係数 $p_2 = 1.2E-05$

堆積係数は速度の違い $u = 0.255$ m/s の場合は小さい値をとり、飛散係数は $u = 0.594$ m/s の場合には大きな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75mmの充填塔を用いた実験でも本報告の数学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、数学モデルを提案し、偏微分方程式の解法シミュレータを開発した。これを用いて、濾過部を通過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 $1.0E-09$ (m²/s) の、飛散係数は $1.0E-05$ (1/s) のオーダーであることを見いだした。

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、菊永孝子氏に感謝する。

記号

C	: 気流中の粉塵濃度	[kg/m ³]
C _i	: 濾過部入り口での粉塵濃度	[kg/m ³]
C _o	: 濾過部出口での粉塵濃度	[kg/m ³]
L	: 濾過部の長さ	[m]
m	: 堆積粉塵の濃度	[kg/m ³]
p ₁	: 堆積係数	[m ² /s]
p ₂	: 飛散係数	[1/s]
q	: 円筒濾紙部での捕集量	[kg]
S	: 濾過部断面積	[m ²]
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]

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)