

フィルタのピンホールに関する研究

－ ETFLモデルと捕集機構の比較 －

Keywords

HEPAフィルタ ピンホール MPPS
STモデル ETFLモデル 捕集機構



DZ18658 竹内 諒

1. 背景と目的

エアフィルタはエアコン等の空調機器において空気を清浄する役割を持つ。エアフィルタは、その用途に応じて様々な種類があり、薬品や半導体を製造するクリーンルームと呼ばれる空間では高い空気清浄力が求められるため、粒子の捕集効率が約99.97%と高い性能を持つHEPAフィルタ (High Efficiency Particulate Air Filter) が用いられる。

しかし、HEPAフィルタがいかに高性能とはいえず、一定の粒径の粒子がすり抜けやすいという欠点が存在する。フィルタが損傷してピンホールができ、そこから粒子が漏れ出す現象をリークといい、リークする粒子量が多い粒径のことを最大透過粒子径 (Most Penetrating Particle Size, MPPS) という。このリークは、クリーンルームなどの高い空気清浄性能が求められる空間において、大きな問題になりやすい。そこでピンホール部の透過率が研究されてきた。ピンホールを2つのモデルを用いて比較および検証する。

1つ目は、Gormley¹⁾理論によるST(Simple Tube)モデルであり、これはピンホールをフィルタにチューブを通したように考える。図1に示すとおり、STモデルはピンホールが単純な円筒形で構成されたモデルとなっており、孔を通過する粒子と、壁面に付着する粒子が存在する。しかし、STモデルではピンホールのフィルタ壁面に付着する粒子の成分が十分に考慮されていない。

2つ目は、Yamadaら²⁾の理論によるETFL(Equivalent Thin Filter Layer)モデルであり、これはピンホールをフィルタの厚さが薄くなったものと考えられる。ETFLモデルは図1に示すとおり、ピンホールを正常部に対して厚さ m 倍になったフィルタとして扱うため、STモデルよりも透過率の粒径依存性を表現することができる。

フィルタのピンホールに関する研究は、当研究室にて継続的に行っている研究であり、本研究の前身となる昨年度の研究では、フィルタの透過率を測定する実験を行った際、結果検証の課題として次の2点が挙げられた。

(1) 実験データの正確性

粒子量の測定に用いる機器である走査式モビリティパーティクルサイザー (Scanning Mobility Particle Sizer :

SMPS) が 1 台のみの実験であったため、測定の正確性が不十分の可能性があり、さらなるデータの蓄積が必要である。

(2) 各モデルとの比較

実験データの検証において、ETFL モデルが孔径を変化させても m の値を変化させることで適用可能だと示すことができる範囲と、ST モデルが適用可能な範囲とで区別されたが、果たしてこれらの違いは何が原因で生じているのか。また3つの捕集機構(ブラウン拡散、さえぎり、慣性衝突)のうち、どれが強く影響しているのかが明確ではない。

本研究では、上記2点の課題から実験による更なるデータを収集し、改めてフィルタの特性を検証することを目的とする。特に捕集機構とデータの関連性に対して重点的に着目し、各実験データから得られた共通点や相違点からETFLモデルに対する更なる考察を試みる。

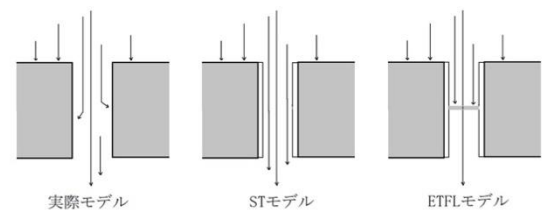


図1 繊維フィルターのエアロゾル浸透モデル

2. 測定概要と手法

SMPSを用いてフィルターの上流側と下流側の粒径ごとの粒子量をそれぞれ90分間測定し、ピンホール部における粒子の透過率を求める。

ピンホールの孔径は0.2[mm]、0.4[mm]、0.6[mm]、0.8[mm]とし、それぞれ孔数が300および600箇所を開けたものを用意する。

空気流量はローボリューム・エアサンプラ (Low Volume Air Sampler : LV)を用いて 11.0[L/min]とし、このときフィルタにおける面風速は0.0384[m/s]となる。

2.1 実験

フィルタを透過する粒子の特性を調べる装置を作成する。図2のようにフランジ管・Oリング・チューブを複数

繋げ、HEPAフィルタは2つのOリングで挟む。これらの
接合部はボルトとナットを用いて密閉し、実験中のズレ
や空気の侵入を防ぐ。

2.2 理論値の算出と捕集理論³⁾

(1) STモデル

$$P_{st} = 0.8191e^{-7.314h} + 0.0975e^{-44.6h} + 0.0325e^{-114h} \quad (h \geq 0.01)$$

$$= 1 - 4.07h^{2/3} + 2.4h + 0.446h^{4/3} \quad (h < 0.01)$$

$$h = \frac{\zeta}{\kappa} \left(\frac{d_p}{2} \right)^4 \quad \kappa = \frac{2Q_l}{\pi} \left(\frac{d_p}{2} \right)^4$$

ζ	: 測定地点 ($0 < \zeta < 1$)	[-]
d_p	: 粒子直径	[m]
D	: ブラウン拡散係数	[cm ² /s]
C_c	: カニングム補正係数	[-]

(2) ETFLモデル

$$P_{L,u} = (P_{f,u/m})^m \quad \alpha : \text{充填率} \quad [-]$$

$$P_f = \exp\left(\frac{4\alpha E_T t}{\pi d_f}\right) \quad T : \text{フィルタの厚さ} \quad [m]$$

$$d_f : \text{繊維径} \quad [m]$$

(3) 捕集機構

維層フィルタによる濾過は複雑な過程であり、これら
の捕集機構をフィルタ全体で検討することは難しい。そ
こで、単一繊維による粒子の捕集について分析すること
によって、1つ1つの要素をパラメータ化し、その効果を
明らかにすることができる。

この方法では、フィルタの中央にあり、その軸が気流
に直交している1本の繊維を取り上げ、粒子がその繊維状
に捕集されるいくつかの機構について分析する。粒子は
繊維に衝突すると、繊維に付着し、完全にエアロゾルの
流れから除去されると仮定する。

1本の繊維がエアロゾルの流れから粒子を除去する効率
は、単一繊維捕集効率 E_Σ の形で定義される。 E_Σ は繊維の
投影面積により定まる範囲を通して繊維に接近してくる
粒子に対する、最終的に繊維状に捕集された粒子数の比
である。つまり、式に表すと、

$$E_\Sigma = \frac{\text{単位長さあたりの捕集粒子数}}{\text{単位長さあたりの幾何学的に入射可能な粒子数}}$$

となる。

さえぎり効果、慣性衝突効果、拡散効果による捕集機
構も同様に単一捕集効率を考える。

$$E_\Sigma = E_R + E_I + E_D + E_{DR} + E_G$$

E_Σ	: 全単一繊維捕集効率
E_R	: さえぎりによる単一繊維捕集効率
E_I	: 慣性衝突による単一繊維捕集効率
E_D	: 拡散による単一繊維捕集効率
E_{DR}	: 拡散粒子のさえぎりによる捕集量の増加を考慮する 捕集効率
E_G	: 重力降下による単一繊維捕集効率

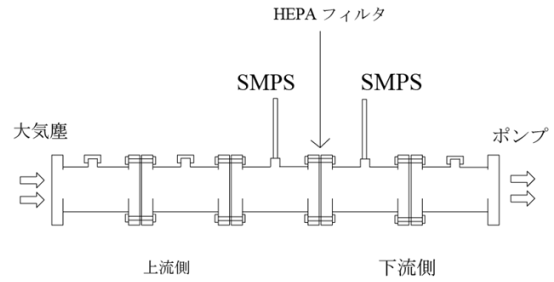


図2 実験装置の概略図

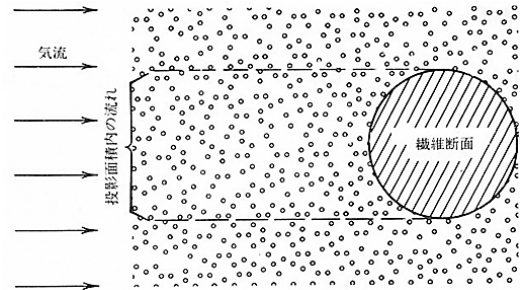


図3 単一繊維の捕集機構

(3-1) さえぎりによる単一繊維の捕集機構

濾過材を形成している繊維などの空隙が、粉じん粒子
の大きさより狭いため粒子が捕集される現象をさえぎり
効果という。さえぎり効果は、たとえ同じ粒径の粒子
であっても、粒子を運ぶ気体の流線によって捕集されたり
、されなかったりする。ここで、さえぎりを考える場
合には、慣性もブラウン運動も無視できると仮定してい
る。さえぎりは、粒子がもともとのっていた流線を外れ
ることのない唯一の捕集機構である。

(3-2) 慣性衝突による単一繊維の捕集機構

ある速さをもった粒子はその質量に応じた慣性をもつ
ているため、濾過層を空気が通過する際に濾過層中にお
ける空気の複雑な軌跡から外れて濾過材を形成している
繊維などに衝突し、捕集される。これが慣性衝突効果で
あり、一般に慣性衝突によるエアロゾルの捕集は、エア
ロゾルの直径や密度が大きいほど、また繊維の直径が小
さいほどその捕集効果は大きくなる。

(3-3) 拡散による単一繊維の捕集機構

非常に微少な粉じんは空気中でブラウン運動をしてい
て、このような粒子を含む空気が濾過材を通過する際、
ブラウン運動により流線から外れて濾過材を形成してい
る繊維などに衝突し、捕集される現象を拡散効果とい
う。この拡散効果によるエアロゾルの繊維への付着は、
一般的に粒子径が小さいほど大きい。

(4) 捕集効率の粒径依存性と理論値

図4に示すように、さえぎり、慣性衝突、拡散による捕
集効果は、それぞれ粒径によって影響力が異なる。実測

において、実験中は面速度を一定とするため、ある面速度（一定）のとき、各粒径においてどの捕集効率が最も影響力が強いかを確認することができる。

この図より、面速度を変化させても、粒径が小さいときは拡散による捕集効率が大きく、粒径が大きくなるにつれさえぎりや慣性衝突による捕集効率が大きくなるのが共通点として挙げられる。つまり、捕集効率にはそれぞれ粒径依存性があり、理論上は各粒径においてどの捕集効率がどのくらい影響しているかの理論値を計算することができる。また、各粒径における捕集機構の影響力比を図5に示す。

3. 測定結果と考察

面速度 $U_0=0.0384[m/s]$ （一定）のもと、孔径と孔数を変化させたとき、実験値と理論値にどのような差異が生じるのかをグラフから考察する。図6～図8は、考察する上で分かりやすいパラメータの測定結果であり、縦軸が透過率[-]、横軸が粒径 $[\mu m]$ を表す。

3.1 測定結果に対する考察

孔数が少ないほうはグラフが凹型になり、第一変曲点から第二変曲点の間はフィルタを通過する粒子数が少なくなる傾向にあるため、その粒径間ではETFLモデルにおける仮想フィルタの厚さ m はより小さい（薄い）ものとみなすことができる。つまり、ある一定の粒径間において影響するブラウン拡散の捕集（が他の範囲に比べ大きいとみなす）には、孔数の少なさによる補正が必要と考えられる。

さえぎりや慣性衝突の交点以降の粒径において粒子が実験値を挟むETFLモデルの理論値から飛び出す傾向がある。また、孔径が大きいほど小さい粒径のものも飛び出している。

基本的には孔径が少ない方が、実験値がETFLモデルの $m=1/12$ の理論値に近くなり、同じ孔径の場合、孔数が少ない実験値の方がETFLモデルの $m=1/12$ の理論値に近くなる。

孔数が300のとき、実験値のグラフが右下がりとなる場合が多く、この範囲で影響力が支配的である拡散による捕集機構が、理論値に比べ大きくなってしまっていると考えられる。

拡散による捕集機構の影響力がさえぎりや慣性衝突による捕集機構の影響力より小さい粒径範囲では、実験値のグラフが理論値からはずれることが多い。これには孔径や孔数によって大小の差があるが、基本的にさえぎりおよび慣性衝突における捕集機構の影響力は理論値に比べ小さくなっていることが分かる。またこの傾向は、同じ孔径の場合、孔数が多い方が顕著である。

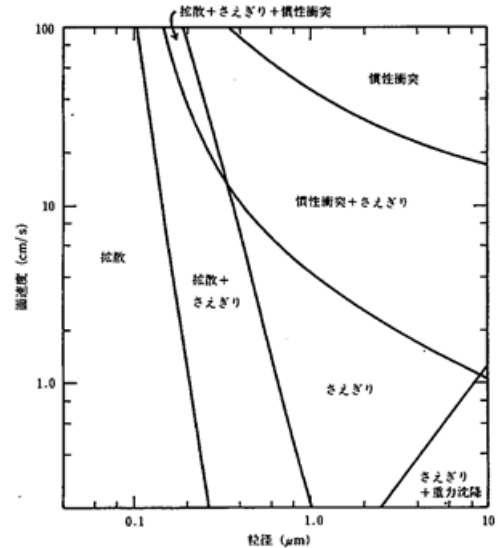


図4 捕集効率の粒径依存性

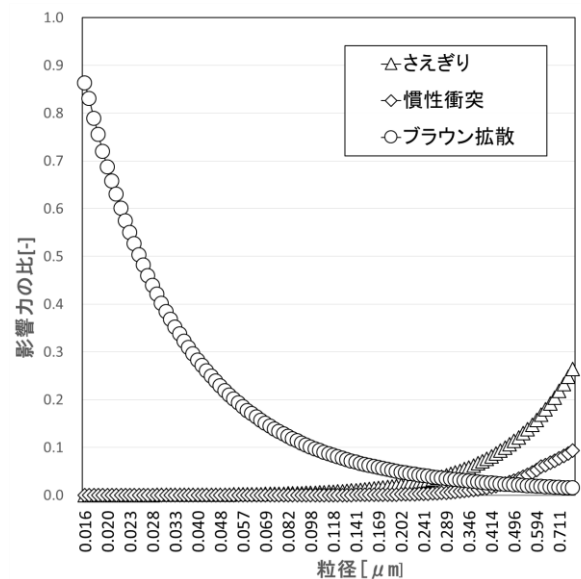


図5 各粒径における捕集機構の影響力比

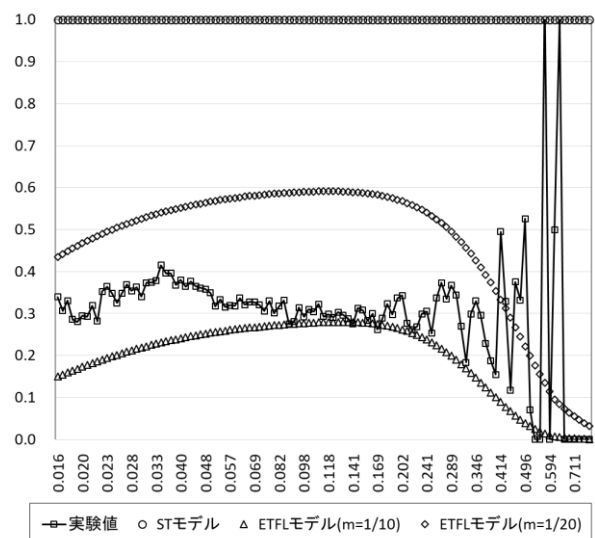


図6 孔径0.6[mm]、孔数300

3.2 理論値に対する、実際の捕集機構の影響力

実験値のグラフと、それに近いETFLモデル理論値のグラフとの差を、捕集機構の理論値に対する実際の捕集機構の影響力の比として考えたとき、捕集機構の影響力[%]は右下の図9のように表すことができる。

測定結果から、拡散以外の捕集機構、特に慣性衝突による捕集機構は理論値に比べ、実際の影響力はかなり小さい。そこで、図7に対し、慣性衝突を除いた、拡散とさえぎりによる捕集機構のみが影響しているものとしてETFLモデルの理論値を考えると、理論値のグラフは図8のように実験値の形状に近くなる。面速度の影響を受けやすい慣性衝突による捕集機構は、測定条件によって理論値は必ず必要性があると考えられる。

3.3 測定結果から得られる推測

山なりの形状である理論値のグラフに比べて凹型になる傾向は、この範囲において実際には理論値以上に拡散による影響力が強いことが考えられる。この傾向を、同じ孔径で孔数を変化させて比較した場合、孔数600よりも孔数300の方が顕著であり、より孔数が少ないフィルタの方が拡散による捕集効果が大きいと推測される。逆に、孔数が多い方が理論値に近いグラフ形状となる。

大きい粒径範囲では、慣性衝突による捕集機構の影響力は著しく小さいため、実験値のグラフはETFLモデル理論値から大きくはずれる。これは、本実験における面速度 $U_0=0.0384[m/s]$ （一定）の条件下では、大きい粒子の慣性力がかかなり大きくなり、空気の軌道からはずれて本来捕集される粒子もフィルタをすり抜けやすくなっているからであると推測できる。

3.4 今後の課題

同じ孔径条件のもとで、孔数を300や600より少ない、または多い場合において、第一変曲点から第二変曲点における実験値と理論値の差を比較することで、拡散による捕集機構と孔数の関係と影響力を検証する必要がある。

また、本実験における面速度 $U_0=0.0384[m/s]$ （一定）の条件下では、慣性衝突による捕集機構の影響力は理論値に比べ、実際にはほとんどないものであるとみなすことができた。しかし、面速度を小さくした場合、粒子の慣性は小さくなるため、慣性衝突による捕集機構の影響力が大きくなることを検証する必要がある。

本実験においてはフィルタの面積は実験器具として用いたOリングの面積と同等として扱ったが、加工しやすいアクリル板等を用いて擬似的にフィルタの面積を減少させた場合も面速度が大きくなり、風量が小さくても慣性衝突による捕集機構の影響力が小さくなるのかを検証する余地もある。

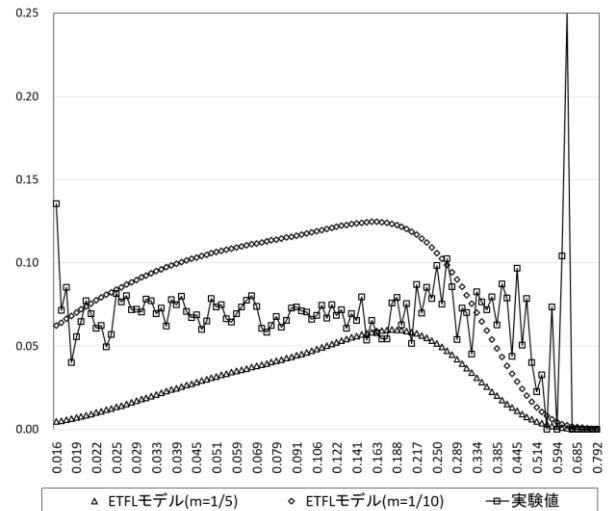


図7 孔径0.2[mm]、孔数300

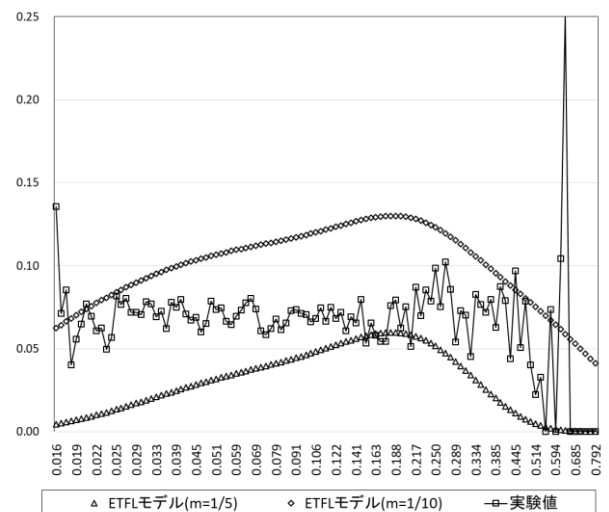


図8 孔径0.2[mm]、孔数300（慣性衝突を考慮しない）

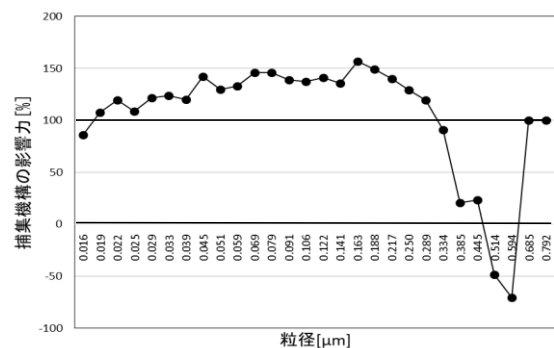


図9 理論値に対する実際の捕集機構の影響力

参考文献

- 1) Gormley, P.G. and Kennedy, M.: Diffusion from a Stream Flowing through a Cylindrical Tube, Proc. Of Royal Irish Academy, Vol.52A, (1949)
- 2) Yuji YAMADA: A Model of Aerosol Penetration through Fibrous Filters with Pinholes (1995)
- 3) Hinds, W.C.: エアロゾルテクノロジー, 井上書院, (1985)