

HEPAフィルタのピンホールに関する研究

—ピンホール孔径の変化とETFLモデル適応の関係—

Keywords

HEPAフィルタ ピンホール リーク
捕集機構

DZ20158

向井 太一

1. 背景と目的

空調機器において空気を清浄化する役割はエアフィルタが担っている。医薬品や半導体の製造がおこなわれる場所、クリーンルームではエアフィルタに高い清浄能力が求められる。そこで HEPA フィルタ (High Efficiency Particulate Air Filter) が用いられる。HEPA フィルタは粒子の捕集効率が約 99.97%と高い性能を持つ。しかし、HEPA フィルタには透過しやすい粒径の粒子 (最透過粒径) が存在することが知られている。これは、クリーンルーム等の空気清浄性能が求められる場所において問題となりやすい。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う。ピンホールは今まで 2 つのモデルを用いて比較および検証されてきた。1 つ目は、ST(Simple Tube) モデルである。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 に示すように、ST モデルは管内壁面がなめらかであると考えている。2 つ目は Yamada¹⁾らの理論による ETFL(Equivalent Thin Filter Layer) モデルである。これはリーク部を正常部に対して厚さ 1/m 倍になったフィルタとして見なす。これにより 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、当研究室で継続的に行っている研究であり、これまでフィルタの透過率を測定する実験を行い、実験値と ETFL モデルの理論値との比較を行ってきた。その結果、実験値と理論値に大きな開きがみられ、ETFL モデルの適用範囲についての疑問が挙げられた。そこで本研究では、ETFL モデルの適用範囲を明らかにすることを目的として検討を行った。

2. 捕集理論と手法

2.1 捕集機構

エアロゾル粒子がフィルタ繊維上に沈着する機構として、支配的なものに以下の三つの機構がある。

(1) さえぎり

さえぎりによる捕集は粒子が気体の流線にそって運動しており、繊維に衝突することで起こる。このとき粒子

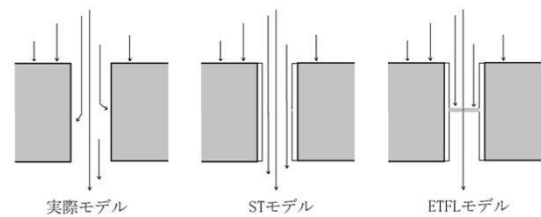


図 1 繊維フィルタのエアロゾル浸透モデル

は完全に流線にそって流れ、慣性もブラウン運動も無視できると仮定している。

(2) 慣性衝突

慣性衝突による捕集は粒子が、繊維の手前で急激に変化する流線に対応することができず、流線をはずれ繊維に衝突することで起こる。粒子の速度、直径、質量が大きくなれば、捕集効率も大きくなる。

(3) 拡散

拡散による捕集は粒子ブラウン運動によって起こる。粒子が繊維の近くを通過するさいに、ブラウン運動によって繊維に衝突する。粒子の粒径が小さいほど支配的になる。

2.2 単一繊維の捕集機構

フィルタの中央にあり、その軸が気流に直交している一本の繊維を取り上げ、粒子がその繊維上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。一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_S の形で定義される。また、さえぎりによる単一繊維捕集効率は E_R 、慣性衝突による単一繊維捕集効率は E_I 、拡散による単一繊維捕集効率は E_D でそれぞれ定義される。

(1)~(3)の捕集機構によって捕集された粒子の和が、フィルタで除去された粒子の和となるのだが、同一粒子に対して複数の捕集機構が働いてしまっている。

これらを踏まえて、全単一捕集機構 E_S の近似式は次のように表すことができる。

$$E_S \cong E_R + E_I + E_D + E_{DR}$$

E_S : 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_S を求めることで、フィルタ全体の捕集率や任意の m に対する ETFL モデルの理論値を求めることが出来る。

2.3 捕集効率の粒径依存性

さえぎり、慣性衝突、拡散による捕集機構は、粒径と面速度によって影響力が異なる。その関係性を示すのが図2である。この図において横軸は粒径を、縦軸は面速度を表している。面速度を一定としたとき、各粒径においてどの捕集機構が最も影響力が大きいかなを確認することが出来る。

2.4 手法

過去に行われた3年分の実験データと理論値を比較、検討した。理論値は昨年使用していたETFLモデルの計算を踏襲し計算した。過去に行った実験では理論値に対して実験値では透過率がかなり大きくなった。実験では既存のETFLモデルよりピンホール孔径が大きい場合に対して行っている。そのためピンホールの中央部分にはETFLモデルが十分に効いていないことが考えられる。この仮説を検証するため、ピンホール部分の透過率をETFLモデルで計算する部分と粒子をすべて透過させる部分の2つに分けて計算を行った。このモデルを図3に示す。

粒子をすべて透過させる部分は透過率を1と設定し、ETFLモデルの適応範囲を5%~95%まで5%刻みで変動させて透過率を計算した。HEPAフィルタのピンホール条件と今回使用する実験値の数を表1に示す。ETFLモデル部分のフィルタの厚さ m は先行研究より12で固定する。その後、ピンホール部分すべてにETFLモデルを適応させた従来の理論値との比較、さらに実験値との比較を行い、仮説の検証を行った。その後、これらの理論値が実験値に近づくにはピンホール部分の透過率をどの程度と設定すればよいのか検討を行った。

2.5 過去に行った実験の概要

今回使用する実験値は過去に当研究室で行った実験より引用する。その実験の概要を以下に示す。SMPSを用いてフィルタの上流側と下流側の粒径ごとの粒子個数濃度を測定し、粒子の透過率を求める実験を行った。概略図を図4に示す。HEPAフィルタにはピンホールを開ける。ピンホールの孔径と孔数、実験値の数および条件は表1に示したものである。面速度は $U_0=0.0384\text{m/s}$ で一定である。

3. 結果

3.1 既存ETFLモデルと今回使用しているモデルの比較

ETFLモデルをピンホール全体に適応した場合と今回

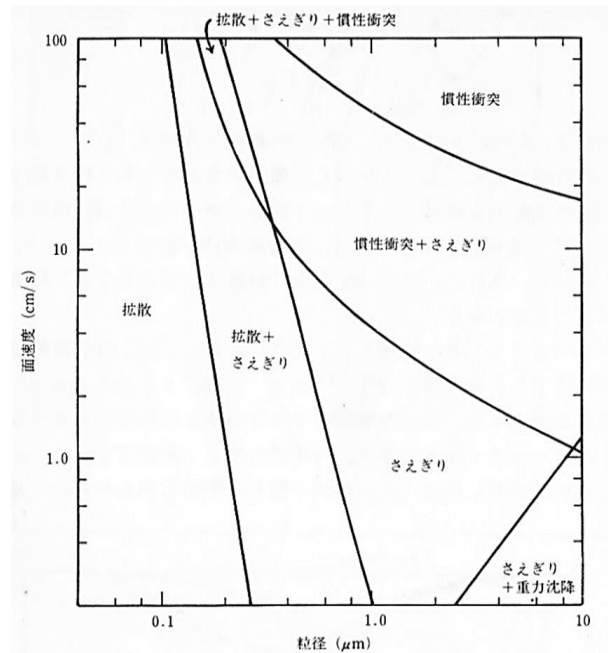


図2 捕集機構の粒径依存性²⁾

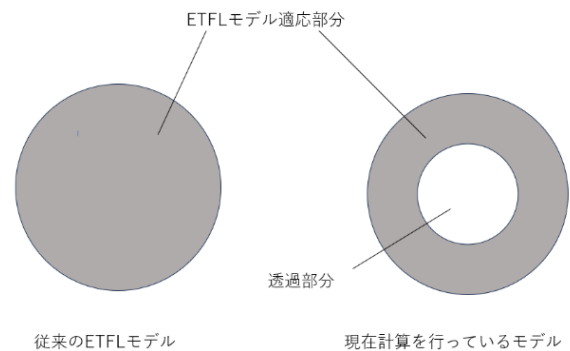


図3 計算に用いたモデル簡略図

表1 各条件と実験値の数

孔径	孔数	
	300個	600個
0.2mm	3個	2個
0.4mm	3個	3個
0.6mm	3個	3個
0.8mm	2個	-

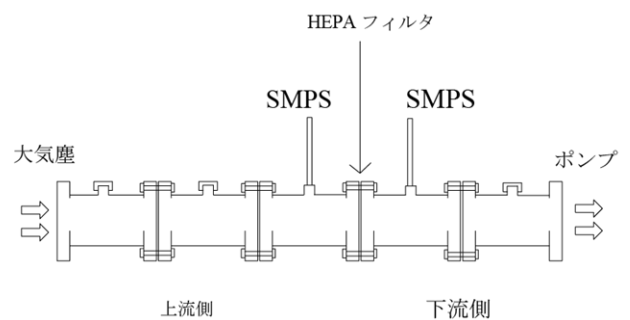


図4 実験装置の概略図

使用しているモデルを比較したグラフを以下に示す。これらの図中においてピンホール中のETFLモデルが適応出来る範囲をETFL適応パーセントとする。ETFL適応パーセントを5%から95%まで5%刻みで変動させていく。ここではグラフ上に代表値として、5%、50%、95%を示す。以下のグラフでは縦軸に透過率、横軸に粒子の粒径をとる。以下に孔径0.2mm、孔数300個の場合を図5に示す。

今回使用しているモデルの理論値は既存モデルの理論値と比較し、粒径の小さな粒子の透過率に大きな開きがみられた。粒径の大きな粒子についても多少の開きがみられた。しかし、粒径が156nm、187nmに近づくと差が小さくなっている。これはHEPAフィルタの最透過粒子径と近い数値になっている。ETFL適応範囲が大きくなるほど既存モデルへの近づき方が大きくなっている。

3.2 実験値と理論値の比較

次にピンホールのETFLモデル適応範囲の代表値として5%、50%、95%の値と実験値、実験値平均を透過率のグラフとして制作したものを図6～12に示す。すでに提示したグラフと同様に縦軸に透過率、横軸に粒径をとる。

実験値と比較すると、各孔径、孔数によって差はあるが、ほとんどの場合、理論値は実験値に対して透過率が低くなっている。どの条件でも理論値において、粒径の小さい粒子、大きい粒子ではETFL適応範囲によって透過率に差が出ているが粒径がHEPAフィルタの最透過粒子径に近づくほど差が小さくなっている。HEPAフィルタの最透過粒子径に近い値では差があまり見られなかった。HEPAフィルタの最透過粒子径付近である粒径187nmではどの条件でも0.02%は抜けている。孔径0.2mm、孔数300、孔径0.6mm、孔数300の条件では粒子径が156nm以上187nm以下ではETFL適応パーセントによらず実験値に近い値をとっている。全体の透過率が大きくなると最大透過粒子径付近でもETFL適応パーセントによる変化が大きくなっている。孔数300では孔径0.2mm、0.6mmのとき比較的实验値と理論値に近いが、孔数600に関してはどれも大きく離れている。

3.3 実験値と近くなる時の理論値

実験値に近づくにはピンホール部分の透過率をどの程度と設定すればよいのかの計算を行った。ピンホール部分の透過率のみを増加させ、ETFLモデルの適応パーセントごとに何倍とすれば実験値平均に近づくのかを図13に示す。このグラフでは縦軸にピンホール部分の透過率増加比率、横軸にピンホール内のETFL適応範囲を示す。

離れた値をとる条件もあったがどの条件でも指数関数的に増加している。ETFLの適応範囲80%以上での増加の仕方が激しく、90%と95%ではどの条件でも約2倍の開きがあった。

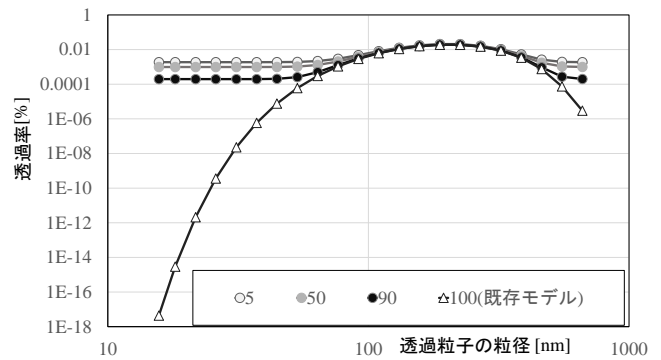


図5 既存ETFLモデルと今回使用しているモデルの比較

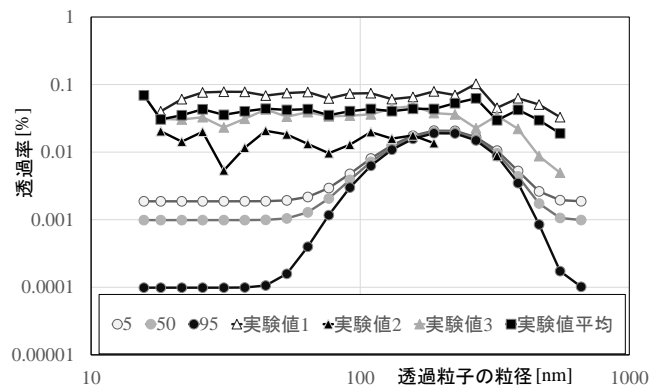


図6 実験値との比較（孔径0.2mm、孔数300）

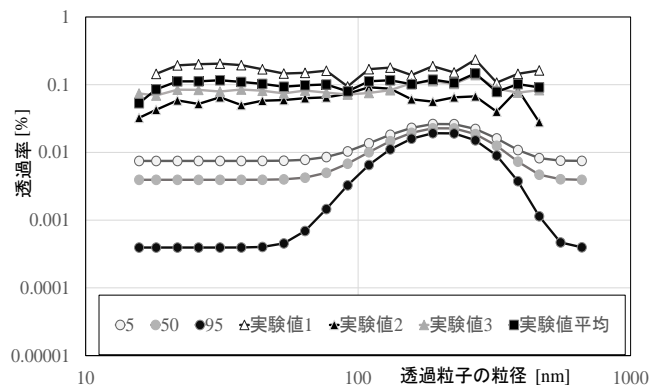


図7 実験値との比較（孔径0.4mm、孔数300）

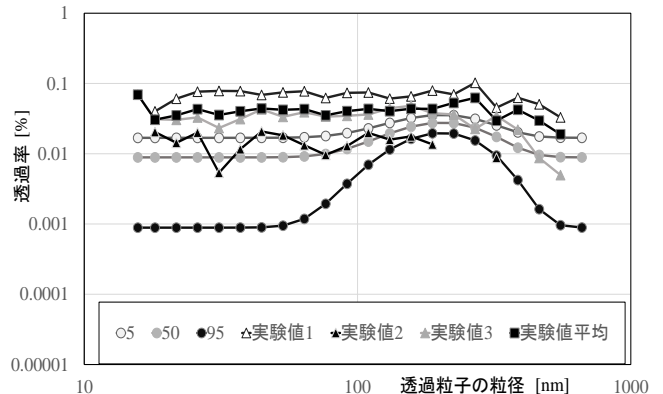


図8 実験値との比較（孔径0.6mm、孔数300）

ETFL適応範囲が95%では孔径0.6mm、孔数300個の条件ではピンホール部分の透過率を37倍することで実験値に近づいたが、それ以外のすべての条件ではピンホール部分の透過率を200倍以上としなければ実験値には近づかなかった。

3.3 考察

今回理論値計算に使用したモデルと既存のモデルを比較すると、粒径が小さい場合は今回使用したモデルが実験値に近づいた。ピンホールのETFLモデル適応範囲に関わらず近づいているため、粒径が小さい粒子に対しては少しでも透過率が1の部分が存在すると大きな影響を与えていると考えられる。逆にHEPAフィルタの最透過粒子径付近ではあまり差がみられず、この粒子径付近ではピンホール部分の透過率に大きな影響はないと考えられる。今回使用したモデルでの理論値は全体としては実験値に近い形のグラフになっている。しかし、透過率自体は実験値に比べて小さくなっている。これは、ピンホールが開くことによって起きる気流の変化によって多量の空気がピンホールに流れていることが原因であると考えられる。Yamada¹⁾らの実験よりも孔径の大きなピンホールで行っているため気流の変化がより大きく発生していることは十分に考えられる。

4 今後の課題

今回計算に使用したモデルでは実験値と理論値に大きな開きがみられた。以下を今後の課題とする。

- 1) ピンホール孔径が大きくなることによる気流の変化を計算に組み込む必要がある。
- 2) フィルタに開けるピンホールの孔径や孔数のパターンを増やして実験し、今回のモデルの理論値との比較を行う。

参考文献

- 1) Yuji YAMADA: A Model of Aerosol Penetration through Fibrous Filters with Pinholes (1995)
- 2) Hinds, W.C.: エアロゾルテクノロジー, 井上書院, (1985)

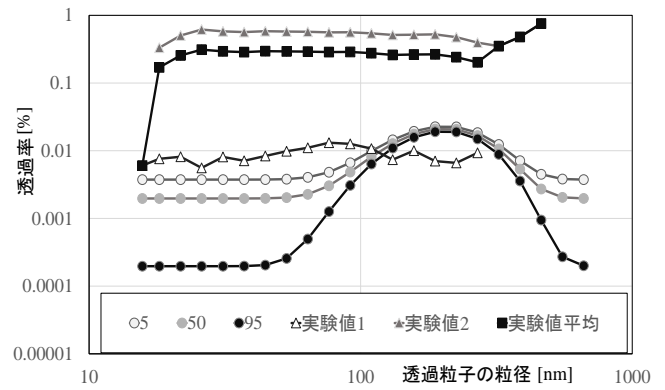


図10 実験値との比較 (孔径0.2mm、孔数600)

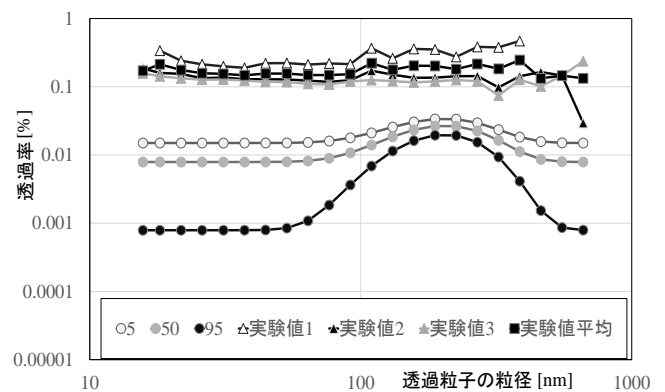


図11 実験値との比較 (孔径0.4mm、孔数600)

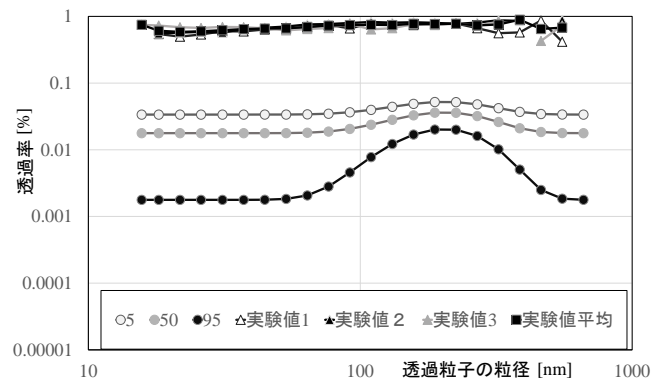


図12 実験値との比較 (孔径0.6mm、孔数600)

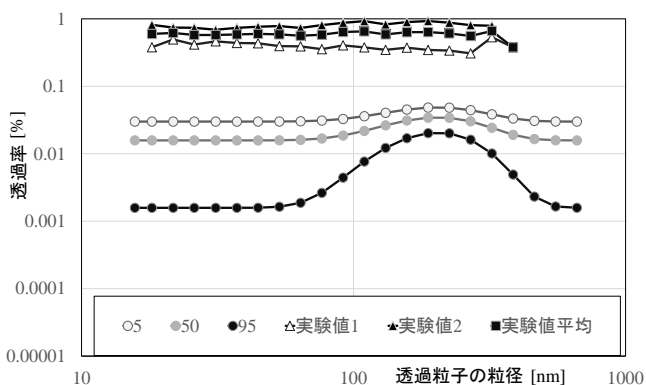


図9 実験値との比較 (孔径0.8mm、孔数300)

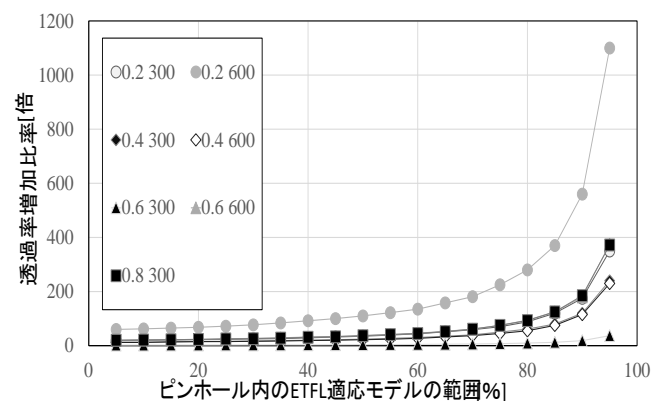


図13 ピンホール部分と透過率増加比率