

HEPAフィルタのリーク部の除去機能に関する研究



DZ19160 科埜良太

Keywords

HEPAフィルタ ピンホール リーク
捕集機構

1. 背景と目的

空調機器において空気を洗浄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洗浄力が求められる。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が存在することが報告されている。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である。

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、Gormley理論による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モデルはピンホールのフィルタ壁面に付着する粒子の成分が考慮されていない。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、フィルタの透過率を測定する実験を行い、STモデルとETFLモデルと比較を行ってきた。その際、ETFLモデルの適用範囲について疑問が挙げられた。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。

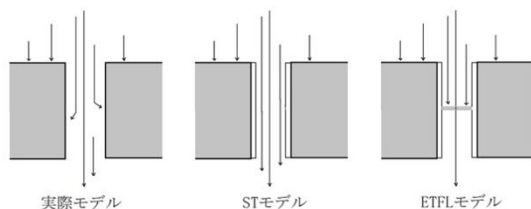


図1 繊維フィルターのエアロゾル浸透モデル

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(interception)

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(inertial impaction)

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(diffusion)

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。

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

E_Y : 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

ただし、 E_{DR} は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_Y 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を確認することが出来る。

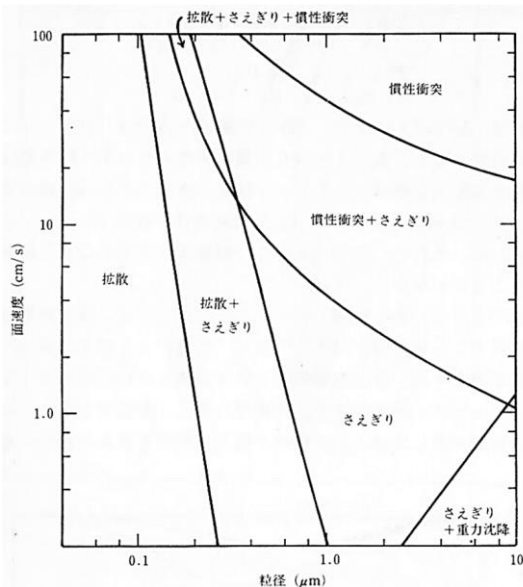


図2 捕集機構の粒径依存性²⁾

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、検討する。同条件で実験されたデータをまとめ平均値を出した。粒径が0.069 μm未満の粒子、0.069 μm以上0.169 μm未満の粒子、0.169 μm以上の粒子、の3つに粒径範囲を分けた。Excelを用いて、各捕集機構の理論値を任意の割合で組み合わせることが出来るグラフを作成した。グラフを用いて、3つの粒径範囲における実験値の近似値を、捕集機構の割合を様々組み合わせることで求めた。近似値グラフと、任意のmを定めたETFLグラフの比較、検討を行った。

2.5 実験概要

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量を測定し、粒子の透過率を求めるという実験である。概略図を図3に示す。フィルタにはピンホールを開ける。ピンホールの孔径は0.2mm、0.4mm、0.6mm、0.8mmとし、それぞれ孔数が300箇所と600箇所を開けたものを用意する。面速度は $U_0=0.0384\text{m/s}$ で一定である。ただし、孔径0.8mm、孔数300のフィルタと孔径0.2mm、孔数600のフィルタは2年分のデータである。

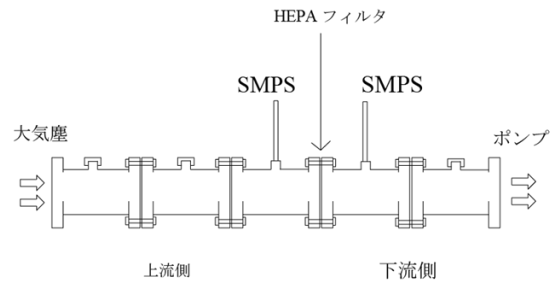


図3 実験装置の概略図

3. 結果と考察

3.1 実験値に基づく捕集機構の割合の検討

図4に示すのは、捕集機構の理論式を用いて、実験値に近いグラフを作成したものの代表的な例である。この図において、横軸は粒径を、縦軸は捕集率を表している。上流側の粒子がフィルタで全て捕集されたとき、捕集率は1となる。グラフは3つに分けた粒径範囲ごとに作成している。このときの捕集機構の割合について、表1に示す。ピンホールのない正常なフィルタの各捕集効率を1としたとき、実際はそれぞれどの程度働いているのかを表している。

各孔径と孔数のフィルタにおける捕集機構の割合についてまとめたものを、表2に示す。表2より、全フィルタの全粒径範囲において、慣性衝突の捕集効率が0.0050であることから、慣性衝突はフィルタに開けたピンホールの孔径、孔数の違いによって影響されていないことが分かる。図2から、この条件では慣性衝突による捕集量は支配的ではないことが読み取れるが、これらを踏まえてほとんど無視できるということが分かった。

全ピンホール条件のフィルタにおいて、粒径が0.069 μm未満の粒子は、拡散の捕集効率が0.0001であることが分かる。図2から分かるように、この粒径範囲では拡散による捕集が最も支配的である。そのため本来は、より強い影響力を持つ捕集機構であるが、このような結果となった。またこのとき、孔径が大きくなるにつれて、さえぎりと拡散粒子のさえぎりによる捕集量の増加の割合は、小さくなっている。

粒径が0.069 μm以上0.169 μm未満の粒子は、図2の通り、さえぎりと拡散、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がバランス良く混ざっている。孔径が同じで孔径のみを変更した場合、孔径が大きくなるにつれ、各捕集効率が小さくなっていることが分かる。孔径が同じで孔数を変更した場合、0.2mmと0.4mmのときは、孔数が300から600に増えると、各捕集効率が小さくなっていることが分かる。しかし、0.6mmのときは拡散の捕集効率が上がっていることが分かる。

粒径が0.169 μm以上の粒子は、孔数が300と600で、それぞれさえぎりの捕集効率が0.0800と0.0300で一定であることが分かる。図 4からこの粒径範囲ではさえぎりによる捕集が最も支配的である。そのため本来は、より強い影響力を持つ捕集機構であるが、このような結果となった。

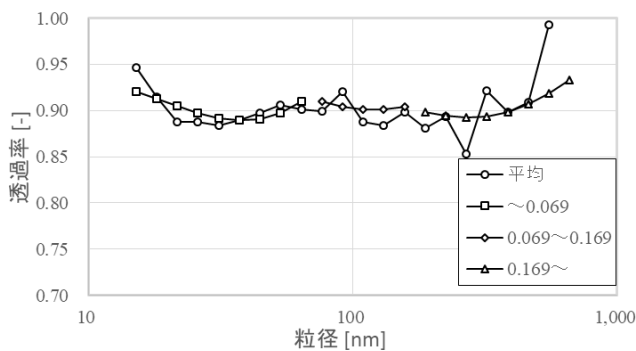


図4 孔径0.4[mm]、孔数300の近似グラフ

表1 孔径0.4[mm]、孔数300の捕集効率の割合

粒径範囲	拡散	慣性	さえぎり	拡さ
~0.069	0.0001	0.005	7	1.6
0.069~0.169	0.02	0.005	0.5	2.1
0.169~	0.15	0.005	0.08	2

表2 捕集効率の割合

ピンホール	粒径範囲	拡散	慣性	さえぎり	拡さ	
孔数 300	0.2 mm	~0.069	0.0001	0.005	6	2.4
		0.069~0.169	0.15	0.005	0.5	2.5
		0.169~	0.15	0.005	0.08	3
	0.4 mm	~0.069	0.0001	0.005	7	1.6
		0.069~0.169	0.02	0.005	0.5	2.1
		0.169~	0.15	0.005	0.08	2
	0.6 mm	~0.069	0.0001	0.005	1.3	0.7
		0.069~0.169	0.01	0.005	0.3	0.75
		0.169~	0.15	0.005	0.08	0.5
0.8 mm	~0.069	0.0001	0.005	0.4	0.4	
	0.069~0.169	0.006	0.005	0.27	0.37	
	0.169~	0.01	0.005	0.08	0.4	
孔数 600	0.2 mm	~0.069	0.0001	0.005	1	1
		0.069~0.169	0.05	0.005	0.6	0.9
		0.169~	0.02	0.005	0.03	1.4
	0.4 mm	~0.069	0.0001	0.005	5	1.3
		0.069~0.169	0.001	0.005	0.4	1.9
		0.169~	0.02	0.005	0.03	1.7
	0.6 mm	~0.069	0.0001	0.005	0.08	0.36
		0.069~0.169	0.02	0.005	0.06	0.2
		0.169~	0.02	0.005	0.03	0.2

3.2 近似グラフとETFLグラフの比較

図5に示すのは、作成した近似グラフと、ETFLグラフを比較したものの代表的な例である。ETFLグラフは最大透過率が近似グラフに合うような任意のmを定めている。各孔径と孔数のフィルタにおけるmについてまとめたものを、表3に示す。なお、表は1/mの値を記している。このとき孔数が300のフィルタでは、孔径が大きくなるにつれmは小さくなっていることが分かる。孔数が600のとき、孔径が0.2mmから0.4mmに大きくなったが、mの値が大きくなっている。

図6,7,8,9に示すのは、近似グラフとETFLグラフの差を比較したものである。この図において、横軸は粒径を、縦軸は捕集率を表している。これより、孔径0.2mm、孔数300のときは、近似グラフとETFLグラフの捕集率の差がほとんどないことが分かる。しかし、孔径が0.4mm、0.6mm、0.8mmとなると、近似グラフとETFLグラフの差が、それぞれ最大0.1、0.37、0.53とあり、大幅に異なることが分かった。

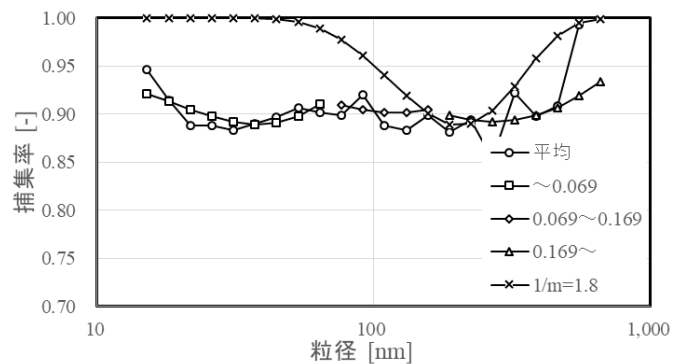


図5 孔径0.4[mm]、孔数300の近似グラフとETFLグラフ

表3 mの値

ピンホール	1/m	
孔数 300	0.2 mm	1.3
	0.4 mm	1.8
	0.6 mm	4.5
	0.8 mm	8
孔数 600	0.2 mm	3
	0.4 mm	2.5
	0.6 mm	15

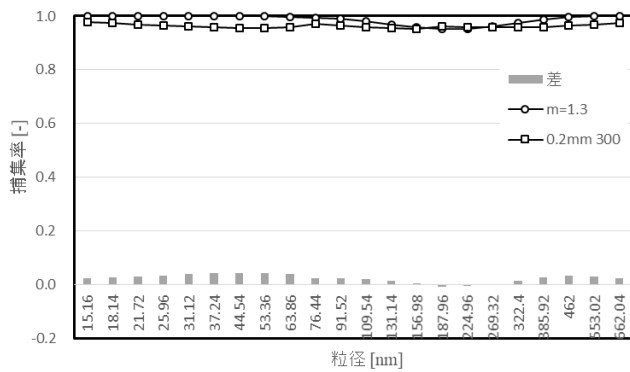


図6 孔径0.2[mm]、孔数300のときの差

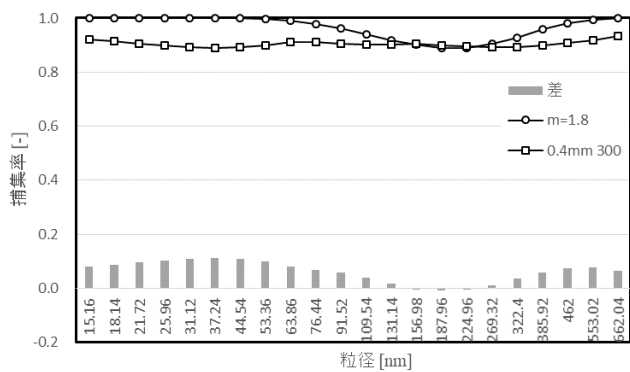


図7 孔径0.4[mm]、孔数300のときの差

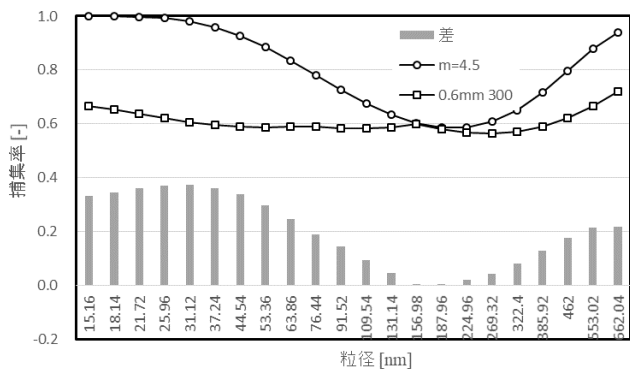


図8 孔径0.6[mm]、孔数300のときの差

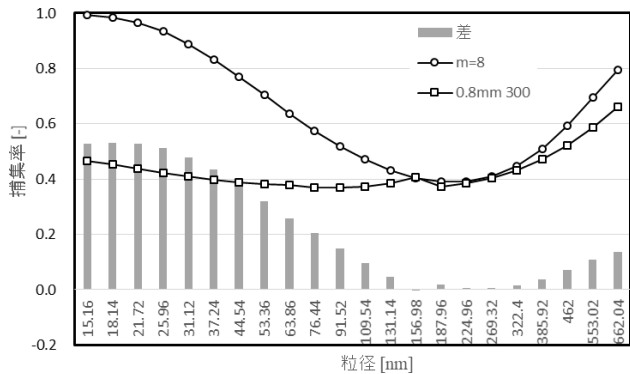


図9 孔径0.8[mm]、孔数300のときの差

3.3 考察

粒径範囲が0.069 μm 未満のグラフについて、支配的な捕集機構である拡散の捕集効率が実際にはあまり機能しておらず、孔径と孔数を変えても一定の値を示すことから、フィルタのピンホールの孔径と孔数の違いは拡散の捕集効率にあまり影響しないことが推測される。同様に、0.169 μm 以上の粒径のグラフについて、支配的なさえぎりによる捕集効率が実際にはあまり機能しておらず、孔径と孔数を変えたときに一定の値を示すことから、フィルタのピンホールの孔径と孔数の違いはさえぎりの捕集効率にはあまり影響しないことが推測される。

ETFLグラフのmの値について、孔数が600のとき、孔径が0.2mmから0.4mmに大きくなったにも関わらず、mの値が大きくなった原因は、孔径0.2mm、孔数600のフィルタの実験データが2年分しかなく、極端なデータとなってしまったことが考えられる。

近似グラフとETFLグラフで捕集率が大幅に異なる理由として、極端に小さい粒径と大きい粒径におけるETFLモデルの再現率の低さがあげられる。これはmの値が小さくなればなるほど顕著に表れていくことが推測される。

3.4 結論

本研究においては、ETFLモデルの適用範囲について実験値と捕集理論を用いて検討を行った。得られた知見を以下に示す。

- 1) 各粒径における捕集効率の影響力の割合が明らかになった。
- 2) この実験の条件では、ETFLモデルで表現し得るのは、孔径が0.2mm、孔数が300のピンホールが開いたフィルタのみである。

今後の課題を以下に示す。

- 1) 本研究では、3つの過去研究のデータを等しく扱ったが、捕集率にばらつきが見られるため、さらなる実験を重ねてより多くのデータを集める必要がある。
- 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、より高い精度で比較、検討を行う必要がある。

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)