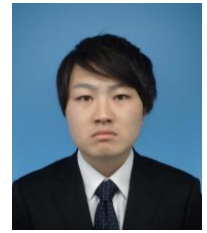


フィルタのピンホールに関する研究  
 - ETFL モデルと ST モデルの理論的比較 -



ETFL モデル      ST モデル      ピンホール  
 HEPA フィルタ   透過率      リーク

AJ16079      土屋 悠太  
 指導教員      西村 直也

1. はじめに

エアフィルタは空調機器などで使われており、空気を清浄にする役割を持つ。エアフィルタは粒子の捕集効率によって分類され、部屋に求められる空気清浄度によって使い分けられる。クリーンルームと呼ばれる薬品や半導体の製造空間では、高い空気清浄度が求められるため粒子の捕集効率が約 99.97% と高性能な HEPA フィルタ (High Efficiency Particulate Air Filter) などが採用される。

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ことをリークという。リークはクリーンルームにおいて大きな問題となる。そこでピンホール部の透過率が研究されてきた。ピンホールを扱う際、これを単純な孔と考える以外にモデル化の方法が二つ存在する。

一つ目が ST (Simple Tube) モデル<sup>1)</sup> である。ST モデル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方法である。図 1 に示すようにピンホールを平滑な壁面で構成された円筒形の孔として扱う。しかし、実際にピンホールがある場合、一部の粒子がピンホールを通過し、一部の粒子はピンホール内の壁面に付着する。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。

そこで Yamada ら<sup>2)</sup> は、ETFL (Equivalent Thin Filter Layer) モデルを提案した。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するモデルである。元々フィルタには隙間が多く、HEPA フィルタでは全体積のうち 95% 以上が隙間になっている。そのため、ピンホールが開いたとしても 95% が 100% になったに過ぎず急激に性状が変化するとは考えづらい。図 1 に示すように、ETFL モデルは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。ETFL モデルは 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、実際により近いモデルである。Yamada らは実験の結果から、HEPA フィルタにおいてピンホール直径 (以下孔径) 0.1~0.2mm、面風速 0.07~0.7m/s の範囲で  $m$  は 1/12 に収束すると結論づけた。

現在 ETFL モデルは、限られた範囲でしか検証されていない。ピンホールの透過率は、フィルタ効率 (繊維径、厚さ、充填率)、面風速、孔径の 3 つを変えることで

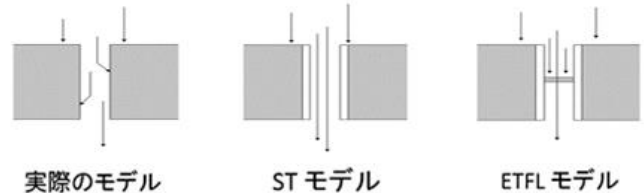


図 1 繊維層フィルタのエアロゾル浸透モデル

表 1 計算条件

dl[mm]	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
n[number]	0	2000	1500	1000	300	200
Uo[m/s]	0.0192	0.0192	0.0192	0.0192	0.0192	0.0192
	0.0384	0.0384	0.0384	0.0384	0.0384	0.0384

変化する。ETFL モデルはこの 3 方向に拡張の可能性がある。本研究では、パラメータを変化させた際の 2 つのモデルの特性を明らかにすることを目的とする。

2. 研究方法

フィルタの透過率について、ST モデルの理論値、ETFL モデルの理論値、実験値の 3 つを比較することで 2 つのモデルの比較検討を行う。ST モデルの理論値は以下の式にて算出する。

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

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

ここで  $h = \frac{\zeta}{\kappa} \left( \frac{d_p}{2} \right)^4$ ,  $\kappa = \frac{2Q_l}{\pi} \left( \frac{d_p}{2} \right)^4 D$

- $\zeta$  : 測定地点 ( $0 < \zeta < 1$ ) [-]
- $d_p$  : 粒子直径 [m]
- $D$  : ブラウン拡散係数 [ $\text{cm}^2/\text{s}$ ]
- $Q_l$  : 孔内流量 [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
- $l$  : リークに対する
- $f$  : フィルタ (正常部) に対する
- $u$  : フィルタ濾材に対する面速度における
- $m$  : フィルタ厚さ比 とする。

ETFL モデルの理論値は以下の式にて算出する。

$$P_{l,u} = (P_{f,u/m})^m$$

$$P_f = \exp\left(\frac{4\alpha E_f t}{\pi d_f}\right)$$

- $\alpha$  : 充填率 [-]
- $t$  : フィルタ厚さ [m]
- $d_f$  : 繊維径 [m]

$$E_f \approx E_R + E_I + E_D + E_{DR} + E_G$$

- $E_R$  : 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

但し、これらの値はピンホール部の透過率であるため実験値と比較する際はフィルタ全体での透過率に変換して使用する。

実験値は表 1 の条件で実験を行い計測したため、理論値も表 1 の条件で算出した。 $d_1$  は孔径、 $n$  は孔数、 $U_0$  は面風速を表す。

### 3. 孔径と透過率の関係

#### (1) 透過率の粒径依存性

図 2~4 は面風速 0.0192m/s 一定で孔径を 0.4、0.6、0.8mm と変化させたときのフィルタ全体の透過率を表している。図 2~4 の実験値からフィルタにピンホールが開いていても透過率が 100%にはならないことがわかる。また、フィルタには最も透過率が高くなってしまふ最大透過粒径 (MPPS) が必ず現れ、フィルタの種類によって現れる粒径は変化する。図 2~4 において、ST モデルはこの特徴が現れないのに対し、ETFL モデルではこの特徴を表すことができ、実際の現象に近いモデルであるといえる。

#### (2) ETFL モデルの考察

ピンホール直径を増加させたとき、 $m=1/12$  のままでは実験値から大きく外れた値となった。そこで、 $m=1/12$ 、 $1/24$ 、 $1/36$  と  $m$  の値を減少させていくことで実験値に近い値を得た。また図 2~4 の実験値を比較すると MPPS 以下の粒径で透過率が大幅に上昇し、MPPS 以上の粒径では増加幅が少ないことがわかる。つまり、フィルタに開いた孔径が大きくなるという現象は、ETFL モデルにおいて  $m$  の値を小さくすることで表現できる。図示したのは面風速 0.0192m/s のものであるが、0.0384m/s においても同様の傾向がみられた。ただし、孔径 1.0mm においては ETFL モデルと大きく外れた値となった。

### 4. 結論

- ・フィルタリークを扱うモデルとして ETFL モデルは ST モデルよりも優れている
  - ・ETFL モデルはピンホール直径 0.8mm 程度までは、 $m$  の値を変化させることで適用可能なモデルである
- 実際に  $m$  の値をどのように変化させるのかは、実験データを蓄積し検討する必要がある。

ETFL モデルはフィルタの性能、面風速、孔径の 3 つに大きく影響を受ける。今回は孔径について検証したが、他 2 つのパラメータについての検証もまだ十分になされていない。フィルタ性能はフィルタの種類をすることで、面風速はポンプの流量や、フィルタの面積を変化させることで検証が可能である。

ピンホール部透過率からフィルタ全体の透過率へ変換する際、孔内流量が必要である。この値は孔径、孔数、

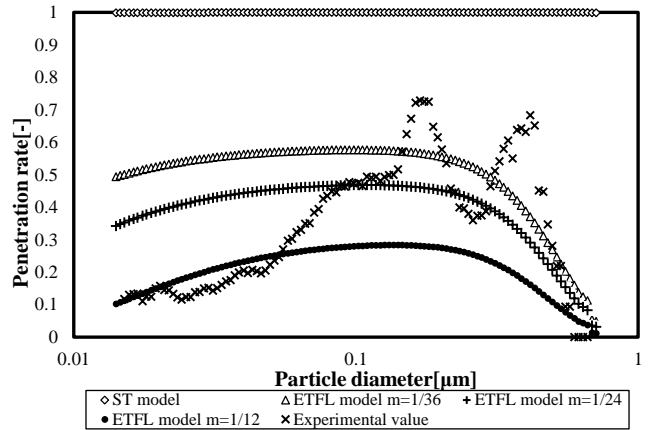


図 2 孔径 0.4mm, 面風速 0.0192m/s の透過率

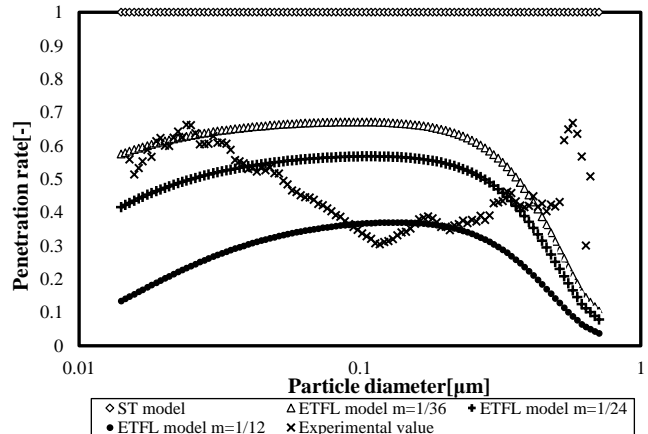


図 3 孔径 0.6mm, 面風速 0.0192m/s の透過率

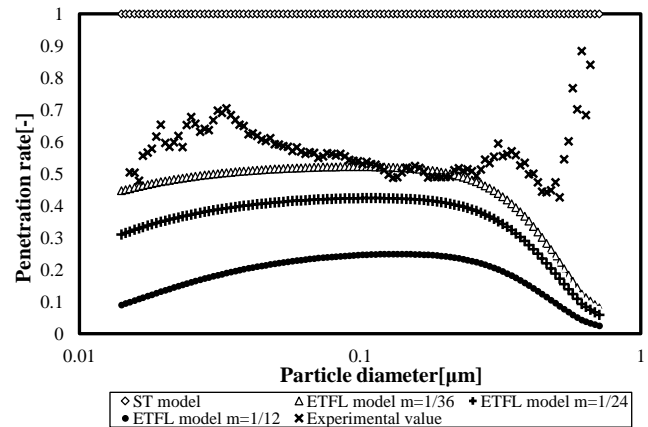


図 4 孔径 0.8mm, 面風速 0.0192m/s の透過率

上下差圧に影響される。孔径、孔数を極端に増加させる場合、流量算出法は修正が必要になるかもしれない。特に大きな影響を与える差圧は、ピンホール周りの微小領域での圧力測定が必要であり大きな検討課題となる。

### 引用・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, エアロゾル研究 11(1), p35-43 (1996)
- 3) Hinds, W.C.: エアロゾルテクノロジー, 井上書院, 1985
- 4) 西村 直也: 高性能繊維層フィルタにおけるリーク特性, 日本建築学会計画系論文集 第 515 号, p83-88, (1999)