

エアフィルタの現状と新たな応用 Present Status of Air Filters and Exploration of Their New Applications

大谷 吉生
Yoshio OTANI

金沢大学大学院 自然科学研究科 自然システム学専攻 教授
Professor, Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University, Japan

Abstract

Air filters have been commonly used for the removal of airborne particles. Currently the major concerns of air filters are (1) improvement of collection performance - a filter with a low pressure drop and a high collection efficiency, (2) influence of dust load on filter performance - prediction of filter life and development of a filter with a longer life, and (3) collection efficiency of nanoparticles - thermal rebound of sub-10 nm particles on fiber surfaces. In addition to the conventional usages of air filters, they may also be used for the classification of aerosol particles by tuning the filter structure and filtration conditions. Inertial filter is a low-pass filter, which may be used for the sampling of atmospheric particles and continuous measurement of PM_{2.5} or PM_{0.1}. The bounce-off of particles on fiber surfaces may be utilized to achieve "sieving" of aerosol particles. Another topic of filter is the collection efficiency of air filter for PM_{2.5}. Combination of centrifugal force with air filter may solve many problems which the conventional air filters are confronted with now.

1. はじめに

エアフィルタは、空気中に浮遊する粒子を除去して、清浄空気を得る最も簡単で経済的な装置である。エアフィルタの初期性能については、Fuchsらのグループが1970年代に精力的に研究を行い、その成果はFundamentals of Aerosol Science¹⁾の中でまとめられ、現在の空気ろ過理論が形成されている。1970年代といえば、電気移動度解析装置(DMA)、凝縮粒子計数機(CPC)が普及する前であり、確立された単分散エアロゾル粒子発生法、測定法がない中で、サブミクロン以下の粒子に対するフィルタ捕集効率の測定はさぞかし大変な作業であったことは想像に難くない。この本の中で、Kirschらは様々なフィルタの課題を指摘しているが、今、改めてこの本を読み返してみると、未だに解決されていない問題が多く残されていることに驚く。

ここでは、古くて新しいエアフィルタの課題についてこれまでの筆者らの取り組みを紹介するとともに、粒子捕集以外のエアフィルタの利用法について紹介したい。

2. エアフィルタの課題

エアフィルタには、(1)高捕集効率、(2)低圧力損失、に加え、(3)長寿命であること、が求められる。これらの要求事項は、エアフィルタの永遠の課題であり、現在も、低圧損、高捕集効率、長寿命を実現するため、さまざまな研究が行われている。その中でも、ナノファイバーフィルタはすべり流れ効果による圧力損失の低減と、捕集体の代表長さ(繊維径)の微小化による捕集効率の増大の両方が同時に見込めるため、多くのフィルタメーカーで開発研究、製品開発が行われている。図1は、各機械的捕集機構(慣性、重力、拡

散, さえぎり) によるエアフィルタの単一繊維捕集効率を, 粒子径の関数として示したものである。この図から, 繊維径を小さくすると, いずれの機械的捕集機構による単一繊維捕集効率も上昇することがわかる。

以下では, 筆者らのこれまでの研究の中から, ナノファイバーフィルタに関する検討結果に加え, 粉塵負荷時のフィルタ性能を評価する試験法の妥当性に関する研究, 粒子とガス分子の境界サイズ (サブ 10 nm) 粒子に対するフィルタの捕集効率評価法に関する研究を紹介する。

2.1 ナノファイバーフィルタ

繊維の微細化がエアフィルタの高性能化に有効なことは古くから知られており, 1 μm 以下のガラス繊維からなる HEPA フィルタは高捕集効率エアフィルタの代表的な例である。しかし, 繊維を微細化すると圧力損失も同時に高くなるため, HEPA フィルタの使用は, クリーンルームなど比較的限られたものであった。近年, 静電紡糸法などナノファイバーを製造する技術が開発され, 高性能 (高効率, 低圧損) のために, 繊維の充填構造を如何に制御するが開発研究の中心になっている。

図 1 は, テイジンで開発されたナノフロント低圧損フィルタ²⁾の断面写真である。繊維径が細くなると, 微細繊維だけで繊維層フィルタを作製しようとすると, どうしても充填率が高くなり, 繊維充填も不均一となる。このため, 図 2 に示すナノファイバーフィルタでは, ナノファイバーの繊維径は 700 nm 程度と比較的太いが, 10 μm 程度の太い繊維と混合することにより, ナノファイバーの充填率を低く抑えると同時に, ナノファイバーの均一な分散を実現している。フィルタの充填率が小さくなると粉塵が堆積した際の圧力損失の増加を低く抑えることができるため, フィルタの長寿命化においても極めて有利である。エアフィルタの捕集効率と圧力損失を同時に考慮してフィルタ性能を比較するために, 次式に示すフィルタ性能評価の指標 Q_f が用いられる。

$$Q_f = \frac{-\ln P}{\Delta p}$$

ここで, P はフィルタからの粒子透過率, Δp は圧力損失である。 Q_f は, ろ過速度, 捕集対象となる粒子径が一定の場合, どのろ材を使用すれば低圧力損失, 高捕集効率を実現できるかの目安で, この値が大きいほど, 高捕集効率, 低圧力損失のろ材となる。

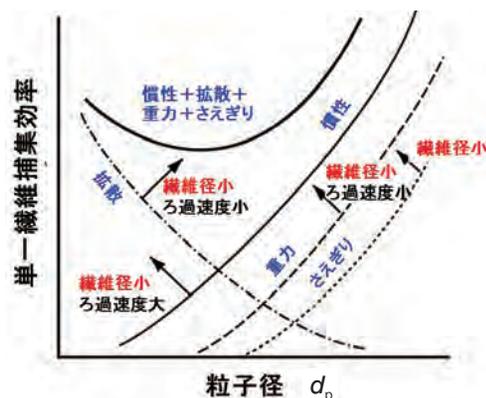


図 1 エアフィルタの単一繊維捕集効率
Fig. 1 Single fiber collection efficiency of air filters due to mechanical collection mechanisms

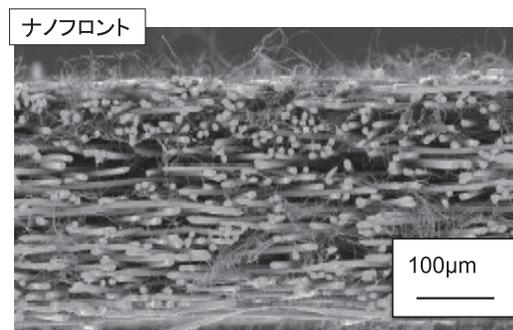


図 2 テイジン・ナノフロント低圧損フィルタ²⁾
Fig. 2 Cross-sectional view of nanofiber filter

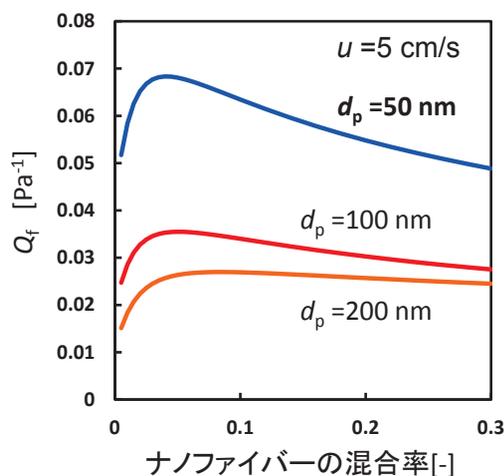


図 3 ナノファイバーフィルタ性能評価 Q_f へのナノファイバー混合率影響
Fig. 3 Quality factor of nanofiber filters as a function of mixing fraction of nanofibers

図3は、ナノファイバーとミクロンファイバーの混合割合を変えてナノファイバーフィルタを作製し、その圧力損失と粒径 $d_p = 50, 100, 200 \text{ nm}$ に対する捕集効率より Q_f を求め、それらをナノファイバーの混合率（質量基準）に対してプロットしたものである。この図より、比較的少ないナノファイバーの混合率5%程度で、低圧損、高効率を実現できるろ材を作製できることがわかる。繊維の微細化によるフィルタ圧力損失の低減は、繊維径が空気平均自由行程（1気圧、25℃で約65nm）に近くなると顕著になることから、さらに微細なナノファイバーで図2のようなフィルタ構造を実現できれば、より高性能なエアフィルタを作製できるものと考えられる。

2.2 粉塵負荷時のフィルタ性能試験法

中高性能フィルタユニットの寿命を評価する際には、JIS B 9908 形式2（ $0.4 \mu\text{m}$ に対する初期捕集率が99%未満）に基づいた試験を行う必要がある。JIS B 9908 に基づいた試験において、粒径別粒子捕集率、試験粉塵供給量、圧力損失の経時変化は、いずれも試験粒子として JIS Z 8901 に規定に規定されている試験用粉体1の11種（関東ローム、通称 JIS-11 粉体）が採用されている。そして、この規格の試験粉塵供給量の測定では、試験粉塵濃度 $70 \pm 30 \text{ mg/m}^3$ で、粒子は、一次粒子まで安定して分散供給でき、再凝集しないものを用いなければならない。しかし、実際の試験において、粒子濃度が高濃度で帯電しているため、粒子の分散が不完全で凝集粒子が存在し、試験粉塵供給量が変化している可能性がある。さらに、試験粒子を用いたフィルタの加速試験で得られた粉塵負荷特性は、実際の使用環境での性能を再現できないことも、大きな問題となっている。この原因として、試験に用いた JIS-11 粉体に凝集粒子が多く存在し、大気塵の粒度分布と異なっていることがあげられる。

図4は、JIS B 9908 に採用されているエジェクタより大きな分散力が得られる流動層（流動槽式粒子発生器、日本カノマックス）、粉碎に使用されるスーパージェットミル（日清エンジニアリング）により試験粒子を発生させて、減圧インパクター（ELPI, Dekati）で測定した JIS-11 粉体の粒度分布を、一次粒子（SEMにより測定し空気力学径に換算）と大気塵の粒度分布と比較して示す。図より、スーパージェットミルで発生させた場合、エジェクタよりも中位径は小さく、大気塵に近い粒径となっていることがわかる。こ

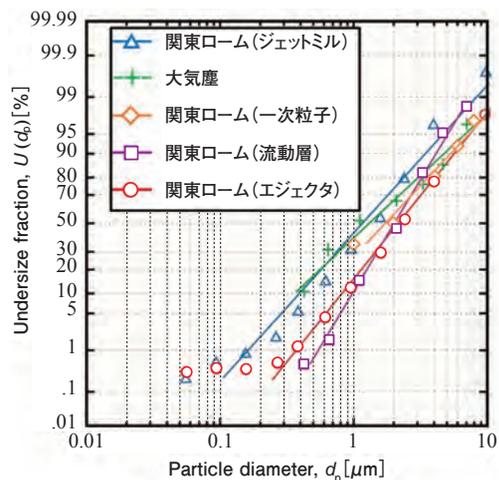


図4 発生器による JIS11 種粉体の粒度分布の違い
Fig. 4 Size distribution of JIS-11 Kanto Loam powder dispersed by various aerosol generators

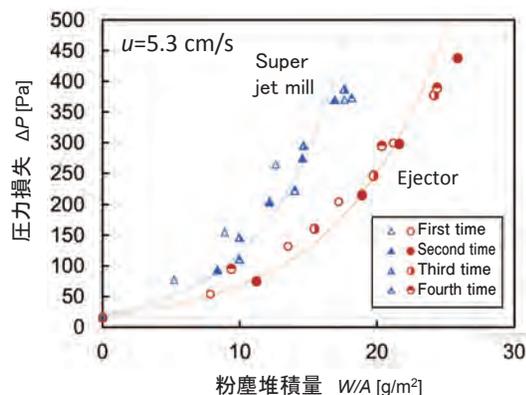


図5 JIS-11 種粉塵負荷による圧力損失の経時変化
Fig. 5 Pressure drop evolution by loading JIS-11 powder dispersed by Super-jet mill and ejector

のことから、大気塵に近い粒度分布を持つ粉塵負荷試験用 JIS-11 粒子を発生させるには、エジェクタよりも分散力の強いスーパージェットミル等が必要といえる。

図5に、エジェクタおよびスーパージェットミルによって JIS-11 粉体を分散し、中性能フィルタに負荷した場合の圧力損失の経時変化を示す。同図において、同じ形状のキーで、黒塗り、半塗り、白抜きの違いは、繰り返し試験の回数の違いを示している。同図より、いずれの粒子発生器を使用しても、JIS-11 試験粉体では、比較的良好な再現性が得られることがわかる。また、スーパージェットミルにより試験粉体を分散したほうが、エジェクタを用いた場合よりも圧力

損失の増加速度は大きく、最終圧力損失 (375 Pa) に達する粉塵堆積量はエジェクタよりも 50 % 以上小さくなっている。このように、試験粒子の分散状態は、粉塵負荷時の圧力損失に大きく影響する。したがって、図 4 に示したように一次粒子径が大気塵と比較的近い JIS-11 種粉体であっても、分散が不十分であれば大気塵負荷時と全く異なった粉塵保持容量を与えると言える。

2.3 サブ 10 nm 粒子に対するフィルタの捕集効率

エアフィルタのろ過理論は、繊維表面に衝突した粒子は付着することを前提にしている。これに対し、熱運動速度が大きいガス分子は、繊維表面で跳ね返る。では、粒子とガス分子の境界、サブ 10 nm の粒子は、繊維表面に付着するのか、それとも跳ね返るのか？これまで、この疑問に対する答えを得るため、実験的・理論的検討³⁻⁶⁾が行われ、最近では、2 nm 程度がその境界として考えられている。しかし、サブ 10 nm の粒子に対するフィルタ捕集効率の測定は、単分散サブ 10 nm の粒子の発生法が確立されていないのに加え、信頼できる測定法がないため、極めて困難なのが現状である。筆者らは、エレクトロスプレーにより発生したマクロ分子イオンを単分散試験粒子として用い、凝縮粒子計数装置 CPC またはエアロゾルエレクトロメータ AE で検出するフィルタ性能測定法を提案している。

図 6 は、エレクトロスプレーによりポリエチレングリコール (PEG) 粒子を発生し、微分型電気移動度分級装置 DMA で分級して得られた粒子の粒子径を、PEG の分子量に対してプロットしたものである。同図の実線は、Saucy ら⁷⁾によって報告された PEG 分子量と粒径の関係である。この図より、PEG 分子量を変えることによって、試験粒子の大きさを制御でき、分子量 1000 の PEG を用いると 1.8 nm の単分散粒子を発生できることがわかる。1.8 nm の粒子を計数できる凝縮粒子計数装置 CPC はないが、DMA によって分級された粒子は単一の電荷を有するのでエアロゾルエレクトロメータ AE で粒子の電荷を測定すれば、粒子濃度を測定できる。

図 7 は、PEG の単分散マクロ分子イオンを用いてフィルタ (ワイヤメッシュ) の捕集効率を測定し、それから求められる単一繊維の捕集効率を、拡散の尺度であるペクレ数に対してプロットしたものである。図中の直線は、純粋な拡散による単一繊維捕集効率の半

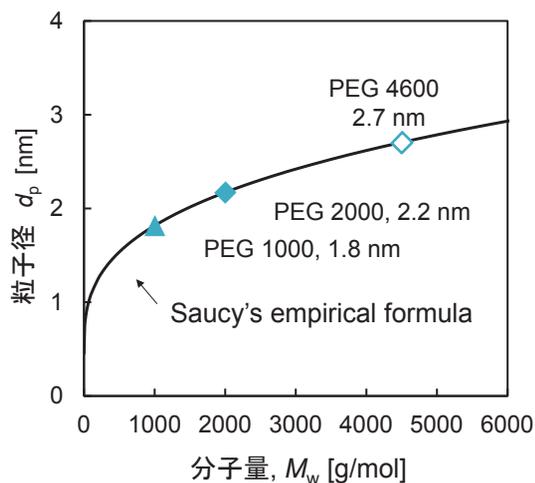


図 6 ポリエチレングリコールの分子量と単分子イオン径の関係

Fig. 6 Relationship between particle size and molecular weight of polyethylene glycol (PEG)

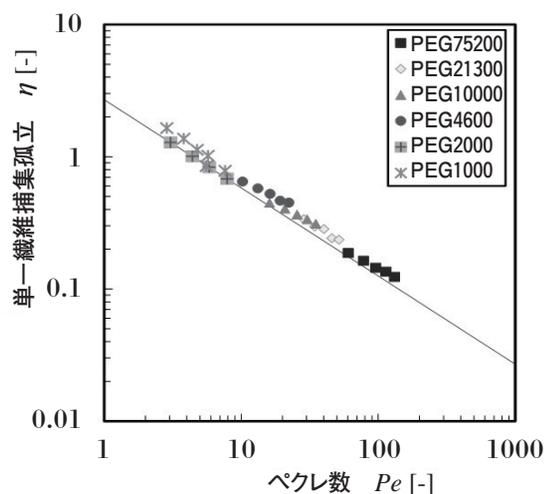


図 7 単一繊維捕集効率とペクレ数の関係

Fig. 7 Single fiber collection efficiency of PEG as a function of Peclet number

実験式による推定線で、いずれの分子量の PEG 粒子であってもこの計算線に一致していることがわかる。このことから、分子量 1000 の PEG 粒子 (電気移動度径 1.8 nm) であっても、繊維表面での粒子の跳ね返りは起こっていないと言える。

3. エアフィルタへの新たな提案

ナノファイバーフィルタを実現できたとしても、捕集機構として機械的捕集機構に依存している限り、低

圧力損失、高捕集効率をいう要求事項に対し、大きなブレイクスルーとなる画期的なフィルタの実現は難しいと考えられる。そこで筆者らは、機械的捕集機構以外の粒子の捕集機構—遠心力とフィルタを組み合わせた回転フィルタ⁸⁾を考案した。回転フィルタの実施例を図8に示す。ここで提案する回転フィルタは、フィルタの回転軸と平行にエアロゾルが流れることにより、捕集機構として遠心力が加わるだけでなく、圧力損失が低く繊維径の太い材料であってもフィルタ内での粒子の滞留時間が長くなるため、高い捕集効率が期待できる。加えて、気流と直角方向に遠心力が作用するため、フィルタ内部に捕集された粒子を半径方向に飛散させ粒子を回収することも可能である。これにより、ミストなど再飛散現象が困難なエアロゾルに対しても、再飛散のないフィルタを実現できる。

図9は、回転フィルタの回転数による粒径別捕集効率の変化を示している。回転フィルタは繊維径 $50\mu\text{m}$ のSUS繊維であり、円筒状フィルタの内径 $R_1=5\text{mm}$ 、外径 $R_2=20\text{mm}$ 、長さ $L=30\text{mm}$ である。図中の実線は、従来のフィルタろ過理論による単一繊維捕集効率に遠心力によるものを加えた推定線である。フィルタ繊維径が $50\mu\text{m}$ と、通常のフィルタに比べて極めて太いため、フィルタが回転していない場合、 $0.2\mu\text{m}\sim 2\mu\text{m}$ の粒子で捕集効率は10%以下である。しかし、フィルタを回転させるとサブミクロン以上の粒子の捕集効率が顕著に増加し、3000rpmでは、 $1\mu\text{m}$ の粒子に対して80%以上の捕集効率を達成できている。図10は、回転フィルタの回転数による圧力損失の変化を示している。フィルタの圧力損失が低いので、流路抵抗が相対的に高くなるため圧力損失はろ過速度に対して放物線になっているが、回転数を増加させても圧力損失の増加はごくわずかである。このように、フィルタを回転させて遠心力を利用すれば、いずれの機械的捕集機構も有効に働かないサブミクロン粒子に対して、ほとんど圧力損失を増加させることなく、捕集効率を増加させることが可能である。さらに回転フィルタの大きなメリットは、同じろ材であっても回転数を変化させることによって捕集効率が可変であることにある。粒子濃度が低いときはフィルタを回転させず、濃くなったときのみフィルタを回転させる、あるいは、粒子径が大きときは回転数を小さく抑え、微小粒子を捕集するときは回転数を増加させるといった、粒子濃度、粒子径に応じたフィルタ捕集効率の制御が可能である。

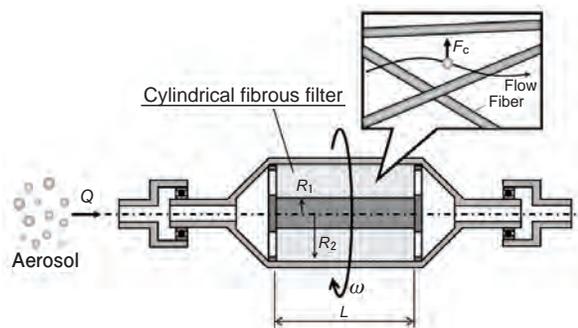


図8 回転フィルタの実施例
Fig. 8 Illustration of centrifugal filter

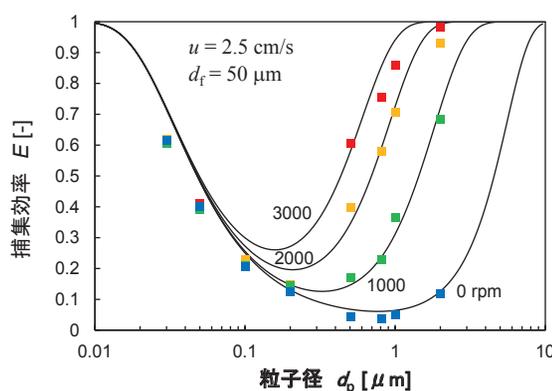


図9 回転フィルタの捕集効率
($R_1=5\text{mm}$, $R_2=20\text{mm}$, $L=30\text{mm}$)
Fig. 9 Fractional collection efficiency of centrifugal filter at various rotation speed

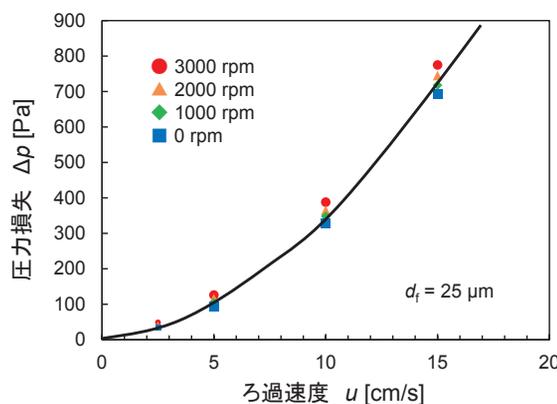


図10 回転フィルタの圧力損失
($R_1=5\text{mm}$, $R_2=20\text{mm}$, $L=30\text{mm}$)
Fig. 10 Pressure drop of centrifugal filter

4. エアフィルタの新たな応用

すべての多孔質体は、気体からの粒子の分離・捕集に使用可能と言える。以下では、フィルタの粒子捕集

以外への応用について、フィルタを粒子の分級に利用した慣性フィルタ⁷⁾、金属スクリーンを用いたエアロゾル粒子のふるい分けについて簡単に紹介する。

4.1 慣性フィルタ

慣性フィルタは、低圧力損失でサブミクロン粒子の分級を可能にした粒子の分級装置である。図 11 は、カスケードインパクトの最終段 (PM 0.1 分離用) に慣性フィルタを採用したナノサンプラー¹⁰⁾ の分離曲線を示している。固体衝突板のインパクトを用いた上段に比べて慣性フィルタの最終段の分離曲線は多少緩やかになっているが、50%カットオフサイズ $0.1\mu\text{m}$ を達成できているのがわかる。インパクトのノズル径は小さくても数 $10\mu\text{m}$ であるのに対し、フィルタでは μm オーダーの繊維径が代表長さになるため、慣性の尺度となる Stokes 数を大きくできるため、比較的小さな気流速度で微小粒子まで分離できる。気流速度が小さく抑えられるため、圧力損失も小さくできる。

4.2 金属スクリーンによるエアロゾルのふるい分け

高速で粒子が繊維に衝突すると粒子の跳ね返りが顕著になるため、慣性フィルタでは、粒子の跳ね返りを抑える工夫が必要となる。ここで紹介する金属スクリーンは、この粒子の跳ね返りを積極的に利用してエアロゾル粒子の大きさによって粒子を分級しようとする装置である。

図 12 に示すように、近年の微細加工技術の発達により、一様なミクロンオーダーの目開きを持つ金属スクリーンの製造が可能になっている。この写真には、目開きよりも大きな PSL 粒子が付着している状態を示している。粒子がスクリーンに全く付着しない状況を実現できれば、目開きよりも大きな粒子のみがスクリーンに捕集され、それ以下の粒子を通過させることが可能となる。図 13 は、目開き $2.5\mu\text{m}$ の金属スクリーンに PSL 粒子を通して分離効率を測定した結果である。図中の実線は、粒子が全てスクリーンに付着する場合の理論線である。この図より、目開きより大きな粒子の分離効率は 100% であり、それよりも小さな粒子の分離効率はろ過速度が大きくなるほど小さくなっている。そして、速度が 3m/s 以上になると $0.3\mu\text{m}$ ~ $2.5\mu\text{m}$ の粒子の捕集効率は 10% 程度で、ほとんどの粒子が跳ね返っていることがわかる。この図より、 $0.3\mu\text{m}$ 以上の PSL 粒子を 3m/s 以上で金属スクリーンに通せば、目開きのサイズにより、ほぼ幾何学的な粒

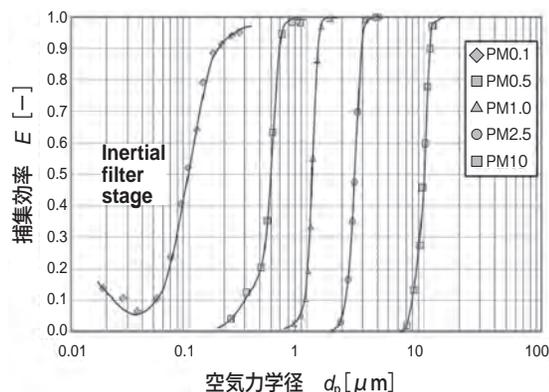


図 11 ナノサンプラーの分離曲線 (日本カノマックス, Model 3180)

Fig. 11 Classification performance of Nanosampler

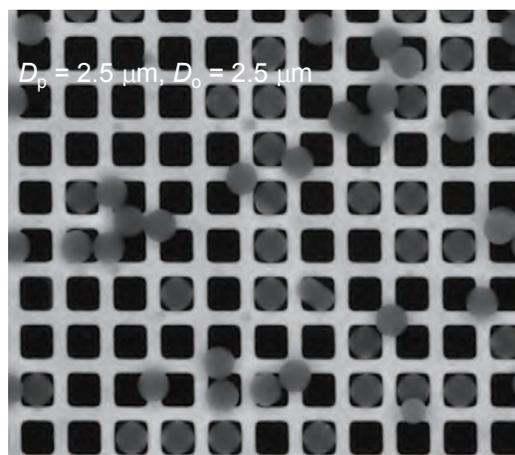


図 12 金属スクリーン

Fig. 12 Photograph of metal screen with uniform openings

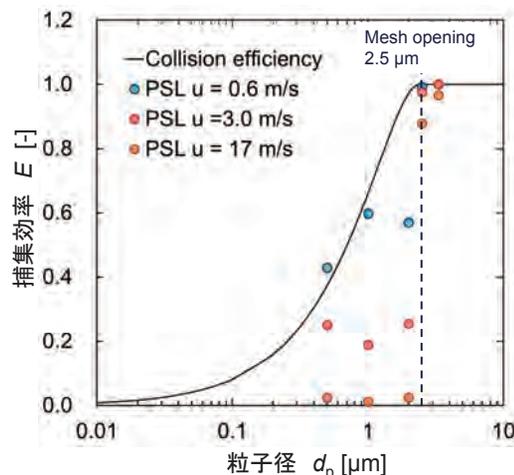


図 13 金属スクリーンの分離曲線

Fig. 13 Collection efficiency of metal screen for PSL particles at various filtration velocities

子の大きさだけで粒子をふるい分けできると言える。

5. おわりに

エアフィルタは、さまざまな産業で使用されているものの脇役的な感が強く、エアフィルタを研究対象とする専門家は少ない。しかし、エアフィルタはなくてはならない重要な存在である。産業を支える縁の下の

力持ち的存在である。粒子を捕集するため、何でも良いからフィルタを着けて置けばよいというものではない。このため、捕集対象となる粒子に対して最適なフィルタを選択できるフィルタの分類と評価法の確立は急務である。また、拙稿で紹介したような、脇役でなく、主役となるようなエアフィルタの応用を開発することにより、今後、ますますエアフィルタの存在が大きくなるものと期待する。

参考文献

- 1) A.A. Kirsch and I.B. Stechina (1978): The theory of aerosol filtration with fibrous filters, in Fundamentals of Aerosol Science (Ed. D.T. Shaw), Wiley.
- 2) http://www.teijin.co.jp/products/advanced_fibers/poly/museum/pdf/nano_report05.pdf
- 3) H.C. Wang and G. Kasper (1991): Filtration efficiency of nanometer-size aerosol particles, J. of Aerosol Sc., 22, 31-41.
- 4) G. Mouret, S. Chazelet., D. Thomas, D. Bemer (2011) : Discussion about the thermal rebound of nanoparticles, Separation and Purification Technology, 78, 125-131.
- 5) M. Heim, B.J. Mullins, M. Wild, J. Meyer, G. Kasper (2005): Filtration efficiency of aerosol particles below 20 nanometers, Aerosol Sci. and Technol., 39, 782-789.
- 6) M. Heim, M. Attoui, G. Kasper (2010): The efficiency of diffusional particle collection onto wire grids in the mobility equivalent size range of 1.2-8 nm, J. of Aerosol Sci., 41, 207-222.
- 7) D.A. Saucy, S. Ude, I.W. Lenggoro, and J. Fernandez de la Mora (2004): Mass analysis of water-soluble polymers by mobility measurement of charge-reduced ions generated by electrosprays, Analytical Chemistry, 76, 1045-53.
- 8) 大谷吉生, 瀬戸章文, 微粒子捕集装置, 特願 2014-081553.
- 9) Y. Otani, K. Eryu, M. Furuuchi, N. Tajima, P. Tekasakul (2007): Inertial classification of nanoparticles with fibrous filters, Aerosol and Air Quality Research, 7, 343-352.
- 10) http://www.kanomax.co.jp/product/index_0101.html.