

博 士 論 文

回転フィルタによるエアロゾル粒子の捕集

Aerosol particles Collection by Centrifugal Filter

金沢大学大学院自然科学研究科

物質科学専攻

学籍番号 1323132006

氏名 中島秀介

主任指導教員 大谷吉生教授

提出年月日 2017年6月29日

目次

第1章 緒論

1-1	研究背景	1
1-2	本論文の目的と構成	3

第2章 回転フィルタのろ過理論

2-1	粒子捕集機構	6
2-2	捕集効率の推定	8
2-3	圧力損失の推定	24

第3章 回転フィルタの性能評価

3-1	回転フィルタ(Holder rotation type)の設計	27
3-2	実験装置および方法	29
3-3	実験結果	30
3-3-1	捕集効率	30
3-3-2	圧力損失	36
3-4	回転フィルタの設計:回転フィルタの応用例	40
3-5	まとめ	49

第4章 回転フィルタのミスト捕集への応用

4-1	回転フィルタ(Filter rotation type)の設計	51
4-2	固体粒子を用いた性能評価	53
4-3	実験結果	55
4-3-1	捕集効率	55
4-3-2	圧力損失	58
4-4	ミスト捕集性能評価	59
4-5	実験装置および方法	59
4-6	実験結果	63
4-6-1	捕集効率	63
4-6-2	ホールドアップ量	68

4-7	まとめ	70
第5章	結言	71
	Nomenclature	74
	References	77
	謝辞	81

第 1 章 緒論

1-1 研究背景

エアフィルタは、空気中からエアロゾル粒子やミストを除去・捕集するためのフィルタであり、最も簡単かつ経済的な空気清浄法として、マスク、空調、粒子の大気サンプルとして多く利用される。エアフィルタは、ブラウン拡散、さえぎり、慣性、重力といった機械的捕集機構によって粒子を捕集するが、一般的に、サブミクロンの範囲で、いずれの捕集機構も効かず最も捕集しにくい粒径、すなわち最大透過粒子径 (MPPS)が存在することが知られている(Hinds, 1982)¹⁾。これは、エアロゾル粒子を対象とした粒子捕集では、微小粒子はブラウン拡散によって、一方で、粗大粒子は慣性やさえぎりで捕集されるため、それぞれ粒径が小さいまたは大きいほど捕集効率は高くなり、ちょうどサブミクロンの範囲の粒子の捕集が困難となってしまうからである。これに対して、HEPA フィルタなどの高性能フィルタでは、繊維径を小さくすることにより捕集効率を向上する取り組みがなされている (Yokochi A., 1984)²⁾。しかし、この際、圧力損失も同時に増加してしまうことが問題点として挙げられる。この圧力損失と捕集効率の相反する問題を解決するためのひとつの工夫として、エレクトレットフィルタの利用が挙げられる。エレクトレットフィルタは、繊維に電荷を付与することで、静電気力を利用してサブミクロンサイズの粒子を低圧力損失で捕集することが可能である(J. van Turnhout *et al*, 1981;Brown *et al*. 1988; Romay *et al*. 1998; Kanaoka *et al.*, 1987; Lee *et al.*, 2002 ; Chazelet *et al.*, 2011)³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾。しかし、エレクトレットフィルタの問題点として、長期間使用時に粒子がフィルタろ材表面に蓄積し、電荷が中和されて捕集効率が急激に低下してしまうことが挙げられる。また、堆積粒

子によるさえぎり効果の増大により圧力損失が増大してしまうこと、油や有機溶剤のミストまたは蒸気に暴露された際に、捕集されたミストが繊維表面を濡らすように覆うことによる遮蔽効果が生じること、あるいは、有機液体がエレクトレット繊維の分極電荷を中和させるために、捕集効率が低下することがエレクトレットフィルタの問題点として明らかになっている(Otani *et al.* 1993, Xiao *et al.*, 2014; Choi *et al.*, 2014)⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾。近年では、圧力損失と捕集効率の問題を解決するもう一つの工夫として、繊維の直径をナノオーダーまで微細化したナノファイバが注目されている。ナノファイバは、繊維状で空気の速度が0にならない、すべり効果が発現するため、低圧力損失・高効率でエアロゾル粒子を捕集することが出来るフィルタのろ材として開発が進められている(Huang *et al.*, 2003)¹²⁾。しかし、現状のナノファイバは大量生産することが困難であり、製造コストが高いこと、機械的強度が不十分であること、そして、均一な繊維充填構造を形成が困難であることが課題となっている(Barhate and Ramakrishna 2007; Veli E. Kalayci *et al.* 2005)¹³⁾¹⁴⁾。以上のことから、ナノファイバの使用分野は限られる。そこで本研究では、従来の機械的捕集機構に他の外力を組み合わせたフィルタを開発することにより、この圧力損失と捕集効率の相反する問題を解決できると考えた。

本論文では、粒子捕集に作用する新たな外力として遠心力を加算し、繊維層を回転させながら粒子を捕集する新しいタイプのフィルタ“回転フィルタ”(Holder rotation type)を提案した。この回転フィルタでは、フィルタホルダ全体を回転させることにより、圧力損失を大きく増加させずに高い捕集効率で粒子を捕集することが期待できる。遠心力を利用して粒子を捕集する同じような取り組みは、ロータリーフィルタと呼ばれる装置が新東工業株式会社で製作されており入手することが可能である(Sintokogio, Ltd. 2015)¹⁵⁾。回転フィルタとロータリーフィ

ルタの大きな違いは、回転フィルタはサブミクロンオーダーの範囲の粒子を捕集できるように、気流に対して垂直に粒子へ遠心力を作用させたことである。それに対して、ロータリーフィルタでは、遠心力は気流と平行に作用しており、捕集する目標粒径サイズは大部分が数ミクロンオーダーの範囲である。遠心力を気流に対して垂直に作用させることで、本研究室で開発した回転フィルタは、フィルタろ材内の粒子の滞留時間が長い深層ろ過であること、ろ過された空気中の粒子の流出がない等、従来のフィルタよりも多くの利点を有している。

回転フィルタのもう一つの利点は、回転フィルタのミスト捕集への応用が挙げられる。従来のフィルタでは、ミストを捕集した際に、繊維層に蓄積した液滴が合一して再飛散してしまうことが課題であった (Kanaoka *et al.*, 1982)¹⁶⁾。一方で、回転フィルタをミストの捕集に応用する場合は(Filter rotation type)、フィルタホルダを固定し回転フィルタ内に設置されたフィルタろ材のみを回転させることにより、繊維層に蓄積された液滴は遠心力によって遠心方向に移動し、再飛散させた後に回収でき、ミストの効果的な捕集が期待できる。

本研究では、まずラボスケールの回転フィルタ(Holder rotation type)を設計・開発し、試作した装置を用いて回転フィルタの基礎的な特性について実験的および理論的に解析を行った。次に、回転フィルタ(Filter rotation type)のミスト捕集への応用について検討した。

1-2 本論文の目的と構成

本研究では、エアフィルタによる粒子捕集に作用する新たな外力として、遠心力に着目して、繊維充填層を回転させるフィルタ、すなわち回転フィルタを着想した。従来のフィルタでは、サブミクロンオーダーの範囲で最も捕集しにくい粒

径(MPPS)が存在してしまうため、繊維径を小さくすることで捕集効率を高くする HEPA フィルタなどの高性能フィルタを開発する試みが行われてきたが、この際、圧力損失が同時に増加してしまうという問題が生じてしまう。このような圧力損失と捕集効率の相反する問題を解決するために、エレクトレットフィルタや繊維を微細化したナノファイバの利用などが挙げられる。しかし、エレクトレットの問題点として、長期間使用時に粒子がフィルタに蓄積することで、捕集効率が急激に低下することが挙げられる。また、ナノファイバは、製造コストが高く、また均一な繊維充填構造を形成することが困難である。そこで本研究では、回転フィルタの原理実証およびミスト捕集への応用を目的とする。

以下に各章の内容を簡単に紹介する。

第 1 章 エアフィルタが粒子捕集をする際の課題について簡潔に述べた。その問題を解決するために、従来の捕集機構に新しい外力を加算した“回転フィルタ (Holder rotation type)”を考案した。そして、本論文の目的と構成について述べた。

第 2 章 回転フィルタのろ過理論についてまとめた。

第 3 章 回転フィルタの原理を実証するために、まず、ラボスケールの回転フィルタ (Holder rotation type) を設計・試作した。そして、回転フィルタの捕集効率 E と圧力損失 ΔP を実験的および理論的に評価した。また、回転フィルタの設計を行い従来のエアフィルタと理論的に比較することで、回転フィルタの実現性について議論した。

第 4 章 ミストを捕集する際に、繊維層に蓄積した液滴が合一して再飛散してしまう問題を解決するために、回転フィルタ(Filter rotation type)のミスト捕集への応用を検討した。まず、Filter rotation type の回転フィルタの構造の考案・開発を行った。次に、固体粒子を試験エアロゾル粒子とした実験では、捕集効率および圧力損失を実験的および理論的に評価することで、フィルタ内に流体が通過するか評価した。そして、ミストを試験エアロゾル粒子とした実験では、回転フィルタの捕集効率 E を実験的および理論的に評価した。最後に、フィルタを回転させたときのホールドアップ量の変化について実験的に評価した。

第 5 章 本論文の結論を各章ごとにまとめた。

第2章 回転フィルタのろ過理論

本章では、回転フィルタの粒子捕集機構について概説し、次に、捕集効率および圧力損失の理論的な推定方法について述べる。

2-1 粒子捕集機構

それでは、回転フィルタの粒子捕集機構について説明する。本研究で提案する回転フィルタは、モーターまたは圧縮空気で回転する。ここで、回転フィルタの概略図を Figure 2-1 に示す。回転フィルタの設計パラメータには、フィルタ物性に関するパラメータと、回転フィルタの操作パラメータが考えられる。フィルタの物性パラメータは、繊維径 D_f 、充填率 α およびフィルタ厚み L に加えて、フィルタカートリッジの内半径 R_1 、円筒状のフィルタの外半径 R_2 の 5 つである。一方、操作パラメータは、回転速度 ω および流量 Q の 2 つである。フィルタが回転速度 ω で回転する際には、遠心力 F_c が粒子に作用する。これにより、粒子が円周方向に微小移動し繊維に沈着するため、捕集効率が大幅に向上する。この際、フィルタの回転と同時に流体がほぼ同じ速度で回転するため、フィルタと繊維間で相互作用がほとんどなく圧力損失がほとんど増加しないことが期待される。以上のことから、回転フィルタは従来のフィルタが抱えていた、圧力損失と捕集効率の相反する問題を解決できる理想的なフィルタである。

さらに、回転フィルタには、以下の 4 つのメリットの実現が期待される。(1)FFU のようなファンとともにフィルタを回転させることにより、圧力損失 0 のフィルタを実現すること。(2) 圧縮空気を導入させることで、モーターを使用せずにフィルタの回転を可能にすること。ここで、プロペラは回転フィルタの回転軸に

取り付けられ、ダクト内に設置し、プロペラに接続されたフィルタはモーターなしで圧縮空気により回転させられる。(3)再飛散した粒子は、遠心力によりフィルタホルダの外壁に移動することで捕集されるため、粒子の再飛散が生じないこと。これは、ミストエリミネータとして回転フィルタをミスト捕集で応用する場合に大きな利点である。(4) 運転する際に、洗浄機のようにフィルタを回転させることで、フィルタの自動洗浄が可能であること。以上の4点である。回転フィルタでは、フィルタを回転させることにより、従来のエアフィルタよりも3つのパラメータ(R_1 、 R_2 、回転数: $\omega/2\pi$)を多くのフィルタパラメータを持つ。これらを調整することにより、各流量における自分が求める捕集効率と圧力損失を実現できる回転フィルタを設計することが可能である。

回転フィルタが活躍できる用途は様々あり、例えば、PM2.5や工場・作業現場から発生した煙霧の除去、掃除機、換気扇、オイルミストに対するミストエリミネータ、粉体製品の回収、スクラバーからの再飛散液滴の除去などが挙げられる。さらに、回転フィルタは、回転速度を変化させることによりカットオフ径を変更することが可能であるため、粒子を分級することに用いることが可能である(Shimazu K., 2017)¹⁷⁾。回転フィルタの最も重要な用途は、圧力損失が高いために用いることができなかった捕集効率の高い従来のフィルタに代わり、回転フィルタを用いることが出来ることである。

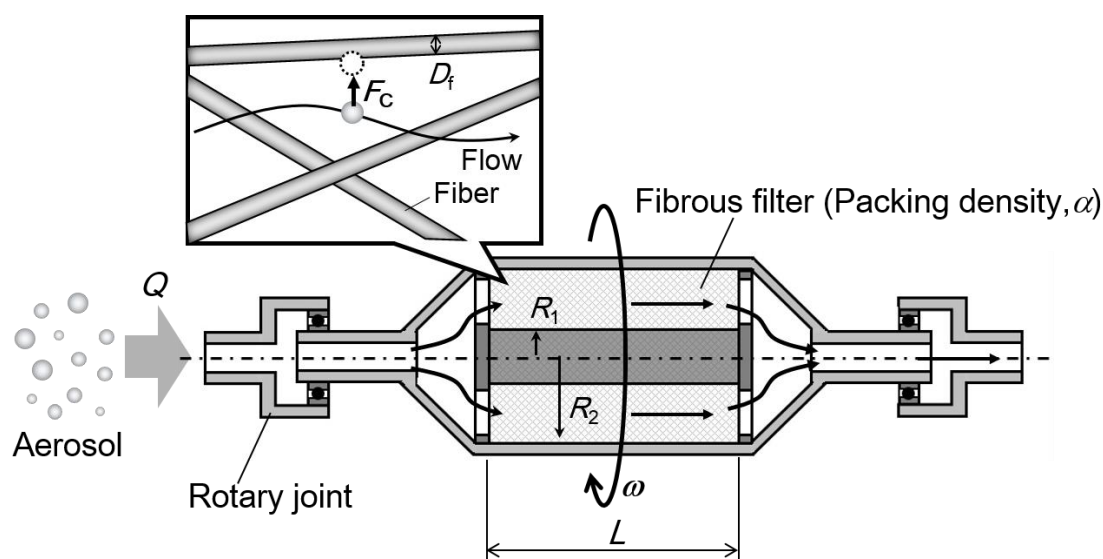


Figure 2-1 Basic concept of aerosol collection by Holder rotation type centrifugal filter.

2-2 捕集効率の推定

それでは、回転フィルタの捕集効率 E について述べる。一般的に繊維層フィルタは空間率が 90%以上であり、平均繊維間距離は繊維径の数倍以上になることから、それぞれの繊維は単独で粒子の捕集体として働くと考えられる。すなわち、繊維一本の捕集効率、すなわち単一繊維捕集効率 η が分かれば、フィルタ全体の粒子捕集効率 E を推定できる。捕集効率は、フィルタ前後の粒子の濃度比として次式で定義され、

$$E = 1 - \frac{N_{out}}{N_{in}} \quad (2-1)$$

ここで、 N_{in} はフィルタに流入する粒子個数濃度、 N_{out} はフィルタから流出する粒子個数濃度である。捕集効率と単一繊維捕集効率の関係を導くために、Figure 2-2 に示すフィルタろ過モデルに対して、繊維層内微小厚さ dL 前後の、粒子量の物質収支をとる。

$$uAN - uA(N + dN) = \eta D_f l A u_0 N dx \quad (2-2)$$

$$l = \frac{4\alpha}{\pi D_f^2} \quad (2-3)$$

$$u = u_0(1 - \alpha) \quad (2-4)$$

ここで、 A はフィルタ断面積、 u は空塔速度、 u_0 は層内速度(ろ過速度)、 l はフィルタ単位堆積中の繊維の全長である。Eq.(2-3)および Eq.(2-4)を、Eq.(2-2)に代入して、式を整理すると、

$$\frac{dN}{N} = -\frac{4\alpha\eta}{\pi D_f(1-\alpha)} dx \quad (2-5)$$

ここで、境界条件として、フィルタ入り口 $x=0$ における粒子個数濃度 $N=N_{in}$ 、フィルタ出口 $x=L$ における出口個数濃度 $N=N_{out}$ として、Eq.(2-5)の両辺を積分すると、次式が得られる。

$$\ln\left(\frac{N_{out}}{N_{in}}\right) = \frac{-4\alpha L}{\pi D_f(1-\alpha)} \eta \quad (2-6)$$

$$E = 1 - \exp\left(\frac{-4\alpha L}{\pi D_f(1-\alpha)} \eta\right) \quad (2-7)$$

Eq.(2-7)に示すように、フィルタの厚みが増加すると共に指数関数的に減少するため、対数透過式 (Log-penetrating expression) と呼ばれ、単一繊維捕集効率 η が分かればフィルタの捕集効率を推定することが出来る。ここで、回転フィルタの単一繊維捕集効率には従来のエアフィルタと同様に加算性が成立すると仮定し、さえぎり、拡散さえぎり、慣性さえぎり、重力および遠心力による単一繊維捕集効率の和として次式で表した。

$$\eta = \eta_{DR} + \eta_{IR} + \eta_G + \eta_C - \eta_R \quad (2-8)$$

ここで、下付文字 R、D、I、G、C はそれぞれ、さえぎり、拡散、慣性、重力、遠心力を表す。それぞれの捕集機構による単一繊維捕集効率は以下に記述する。

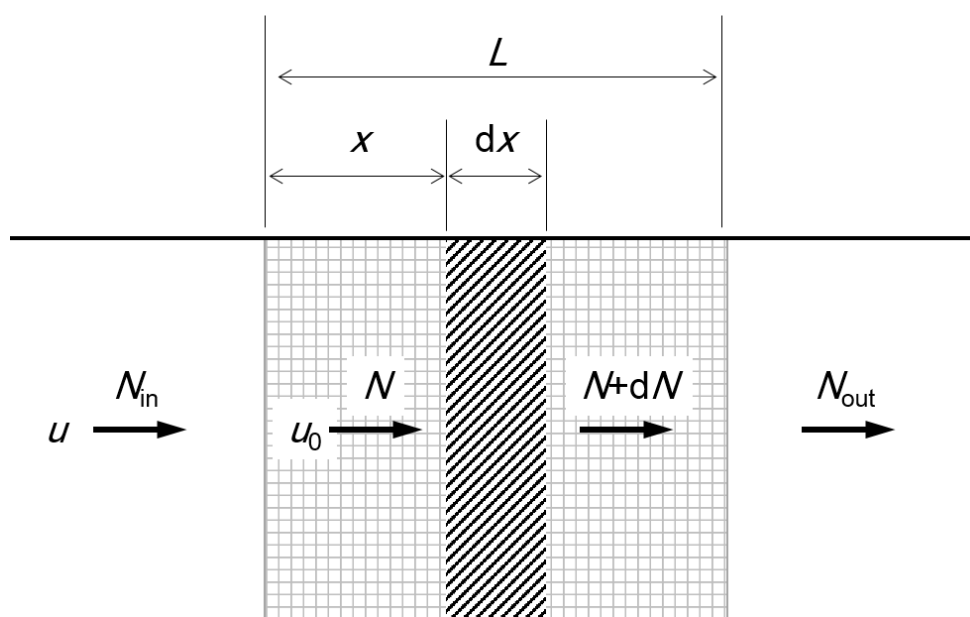


Figure 2-2 Model of mass balance of Log-penetration expression.

(a) さえぎり単一繊維捕集効率 η_R

さえぎり単一繊維捕集効率は Eq.(2-9) で与えられる (Stechkina and Fuchs, 1966)¹⁸⁾。

$$\eta_R = \frac{1}{2h_K} \left[2(1+R) \ln(1+R) - (1+R) + \left(\frac{1}{1+R} \right) \right] \quad (2-9)$$

ここで R は Eq.(2-10) で定義されるさえぎりパラメータ、 h_K は Eq.(2-11) で定義される桑原流れにおける水力学因子である (Kuwabara, 1959)¹⁹⁾。

$$R = \frac{D_p}{D_f} \quad (2-10)$$

$$h_K = -0.5 \ln \alpha + \alpha - 0.25\alpha^2 + 0.75 \quad (2-11)$$

ここで、 D_p は粒径を表す。

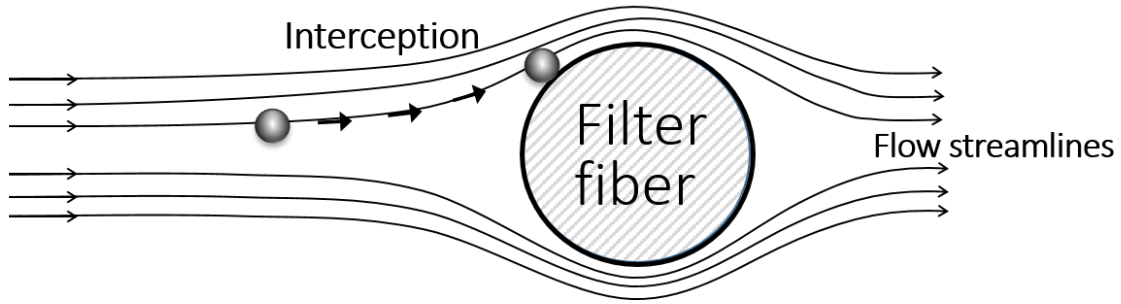


Figure 2-3 Single fiber collection of particle by interception.

(b) 拡散さえぎり単一繊維捕集効率 η_{DR}

拡散さえぎり単一捕集効率は、Eq.(2-12)で与えられる(Kirsch and Stechkina, 1975)²⁰⁾。

$$\eta_{DR} = 2.9h_k^{-1/3}Pe^{-2/3} + 0.624Pe^{-1} + 1.24h_K^{-1/3}Pe^{-1/2}R^{2/3} + \eta_R \quad (2-12)$$

$$Pe = \frac{u_0 D_f}{D} \quad (2-13)$$

$$D = \frac{kTC_c}{3\pi\mu D_p} \quad (2-14)$$

$$C_c = 1 + \frac{2\lambda}{D_p} \left[1.257 + 0.4 \exp\left(-0.55 \frac{D_p}{\lambda}\right) \right] \quad (2-15)$$

ここで Pe はペクレ数、 D は拡散係数、 C_c はカニンガムの補正係数、 k はボルツマン定数、 T は温度、 μ は流体の粘度、 λ は気体分子の平均自由行程である。Eq.(2-12)中に示すように、さえぎり単一繊維捕集効率 η_R が考慮されており、 $\eta_{DR} + \eta_R$ と加えた場合、さえぎりが2重に加算されたことと同義であるため、Eq.(2-8)で示すように、さえぎりの項を差し引くことで回転フィルタの単一繊維捕集効率を表した。

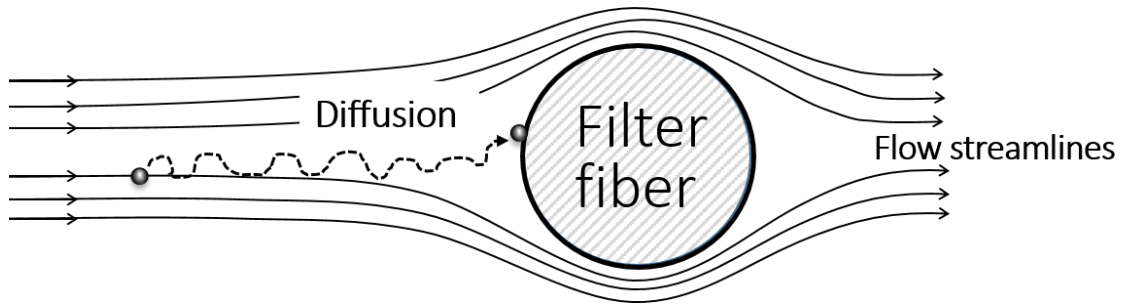


Fig. 2-4 Single fiber collection of particle by diffusion.

(c) 慣性さえぎり単一繊維捕集効率 η_{IR}

慣性さえぎり単一繊維捕集効率は、慣性効果の比較的小さい $Stk \ll 1$ において、Eq.(2-16)で与えられる(Stechkina et al., 1969)²¹⁾。

$$\eta_{IR} = h_K^{-2} Stk \left((29.6 - 28\alpha^{0.62}) R^2 - 27.5 R^{2.8} \right) + \eta_R \quad (2-16)$$

$$Stk = \frac{C_c \rho_p u_0 D_p^2}{9\mu D_f} \quad (2-17)$$

ここで、 ρ_p は粒子の密度である。 Stk はストークス数であり、粒子の運動量に比例し、繊維の直径に反比例する。

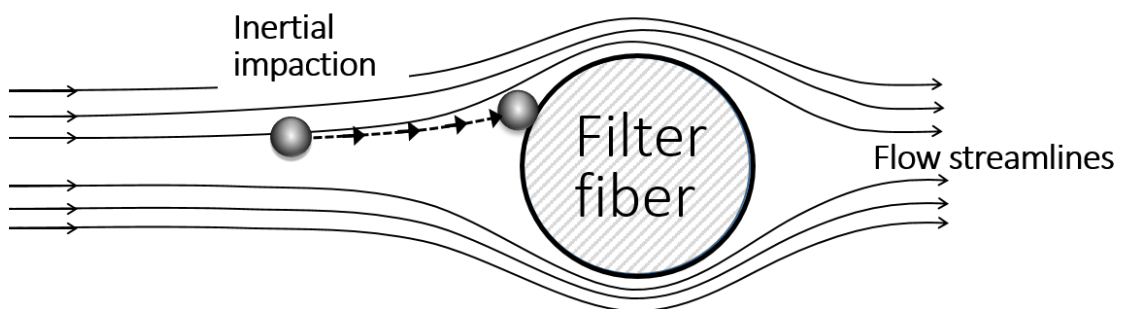


Figure 2-5 Single fiber collection of particle by inertial impaction.

(d) 重力沈降単一繊維捕集効率 η_G (Yoshioka, N., et al., 1972)²²⁾

重力沈降単一繊維捕集効率について説明するために、まず重力さえぎり単一繊維捕集効率 η_{RG} について概説する。Figure 2-6 に示す、重力と流れ方向が一致する上下流、および Figure 2-7 に示すような、重力が流れと直角方向(水平流)のそれぞれについて説明する。粒子の運動方程式は Eq.(2-18)で表され、

$$m \frac{dv}{dt} = -(v - u) \times 6\pi\mu D_p + mg + F_{ext} \quad (2-18)$$

ここで、 v は粒子の速度、 F_{ext} は慣性および重力以外の外力である。Eq.(2-18)において、慣性及び、重力以外の外力を無視し流体抵抗が Stokes の法則に従うとすると、 x 、 y 方向速度成分はそれぞれ次式のように表される。

上下流：

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\partial\psi}{\partial y} + v_t, \quad \frac{dy}{dt} = -\frac{\partial\psi}{\partial x} \quad (2-19)$$

$$v_t = \frac{D_p^2 \rho_p g}{18\mu} \quad (2-20)$$

水平流：

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\partial\psi}{\partial y}, \quad \frac{dy}{dt} = -\frac{\partial\psi}{\partial x} - v_t \quad (2-21)$$

ここで、 v_t は終末沈降速度、 ψ は次式で定義される流れ関数である。

$$u_x = \frac{\partial\psi}{\partial x}, \quad u_y = \frac{\partial\psi}{\partial y} \quad (2-22)$$

(i) 上下流

運動方程式 Eq.(2-19)を変形すると、

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\partial}{\partial y} (\psi + v_t y) = \frac{\partial\varphi}{\partial y}$$

$$\frac{dy}{dt} = -\frac{\partial}{\partial x}(\psi + v_t y) = -\frac{\partial \varphi}{\partial x} \quad (2-23)$$

ここで、

$$\varphi = \psi + v_t y \quad (2-24)$$

で定義される φ を導入すると、は Eq.(2-23)より、

$$\frac{dx}{dt} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \frac{dy}{dt} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial y} = \frac{\partial \varphi}{\partial y} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial x} - \frac{\partial \varphi}{\partial x} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial y} = 0 \quad (2-25)$$

の関係を満足する。Eq.(2-25)からわかるように、 φ は粒子に関して流体の流れ関数 ψ と同じ性質をもつ。次に、Eq.(2-25)を無次元化すると、

$$\bar{\varphi} = \bar{\psi} + G\bar{y} \quad (2-26)$$

ここで、 G は無次元の終末沈降速度で重力パラメータである。Eq.(2-26)において流線が、

$$\bar{\psi} = \bar{\psi}(Re, \alpha, \bar{x}, \bar{y}) \quad (2-27)$$

の形で与えられると、これを Eq.(2-26)に代入すれば、 $\bar{\varphi}$ のある値に対し、この式を満足するいくつかの点 (\bar{x}, \bar{y}) を連ねた曲線が粒子軌跡である。単一繊維捕集効率は、上記で求められた粒子軌跡から限界粒子軌跡を見出すことで求める。

Figure 2-6 において、無次元半径 R の粒子の限界粒子軌跡は点 $P(x_p, y_p)$ において円柱に接する。したがって、

$$\left(\frac{d\bar{r}}{d\bar{t}}\right)_p = \left(\frac{d\bar{x}}{d\bar{t}}\right)_p \cos \theta_p + \left(\frac{d\bar{y}}{d\bar{t}}\right)_p \sin \theta_p = 0 \quad (2-28)$$

Eq.(2-28)に Eq.(2-19)および次式、

$$\cos \theta_p = \frac{\bar{x}_p}{\sqrt{\bar{x}_p^2 + \bar{y}_p^2}}, \quad \sin \theta_p = \frac{\bar{y}_p}{\sqrt{\bar{x}_p^2 + \bar{y}_p^2}} \quad (2-29)$$

を適用すると、点 $P(x_p, y_p)$ が定まる。上下流では、粘性流、ポテンシャル流はいずれの場合も限界粒子は y 軸上の $P_1(0, 1+R)$ または $P_2(0, -1-R)$ で円柱に衝突、粒子捕集される。Figure 2-6 に示すように、この粒子が円柱の十分前方の点 (x_0, y_0)

を通るとし、その点での粒子および空気の流れ関数を $\bar{\varphi}_{lim}, \bar{\psi}_{lim}$ とすると、Eq.(2-26)より、

$$\bar{\varphi}_{lim} = \bar{\psi}_{lim} + G\bar{y}_0 \quad (2-30)$$

限界粒子は点 $P_1(0, 1+R)$ においても Eq.(2-26) を満足するから、

$$\bar{\varphi}_{lim} = \bar{\psi}_p + G(1+R) \quad (2-31)$$

となる。ここで、 $\bar{\psi}_p$ は点 P における値であり Eq.(2-27) より、

$$\bar{\psi} = \bar{\psi}(Re, \alpha, \bar{x}_p, \bar{y}_p) \quad (2-32)$$

単一円筒の効率 η_{GR} は、円筒無限前方における捕集に有効な流れ断面積を通過する粒子量の円筒断面積を通過する粒子量に対する比、で定義される。ここで、粒子濃度が均一の条件であれば、これは空気流量比で置き換えられるから、重力さえぎり単一繊維捕集効率 η_{GR} は、次式で与えられる。

$$\eta_{GR} = \frac{2\bar{\psi}_{lim}}{u_0 D_f} = \bar{\psi}_{lim} = \bar{y}_0 = \frac{\bar{\psi}_p + G(1+R)}{1+G} \quad (2-33)$$

さえぎり単一繊維捕集効率が無視できる場合、 $R=0$ 、 $\bar{\psi}_p = 0$ とおくと、重力単一繊維捕集効率 η_G は、

$$\eta_G = \frac{G}{1+G} \quad (2-34)$$

(ii) 水平流

水平流についても、上下流と同様の方法で導出することが可能である。ただし、単一円筒の効率 η_G は、上下流の場合、前述のように流体の流体比で定義してよかったが、水平流では円筒に捕集される粒子が通過する円筒無限前方の流れ断面は Figure 2-7 に示すように、 x 軸方向よりかなり上方に位置している。ここでは x 軸に平行、つまり断面に直角に流れているが、粒子は重力の影響を受けて円筒に

向かいこの断面を通過するはずである。したがって、粒子が通過する実際の断面積は、もとの断面積の $1/\sqrt{1+G^2}$ となる。このことを考慮し、上下流と同様に、さえぎり単一繊維捕集効率が無視できる場合、 $R=0$ 、 $\bar{\psi}_p = 0$ とおくと、水平流の重力単一繊維捕集効率 η_G は次式で与えられる。

$$\eta_G = \frac{G}{\sqrt{1+G^2}} \quad (2-35)$$

ここで、重力パラメータ G は、捕集対象である粒子の粒径もしくは操作条件である流速により決定される。重力パラメータを粒径に対してプロットした理論線を Figure 2-8 に示す。Figure 2-8 に示すように、粒径が大きくなるごとに重力パラメータは大きくなるのに対して、流速が大きくなるごとに重力パラメータは小さくなる。さらに、重力パラメータの大きさは、粒径が数ミクロン程度までの範囲では小さく ($G < 1/100$)、本研究では MPPS が存在する粒径がサブミクロンオーダーの範囲およびミストの液滴分布を捕集する数ミクロンの範囲では、 $1 \gg G$ が成立するとし、上下流および水平流の重力単一繊維捕集効率は、次式で表した。

$$\eta_G = G \quad (2-36)$$

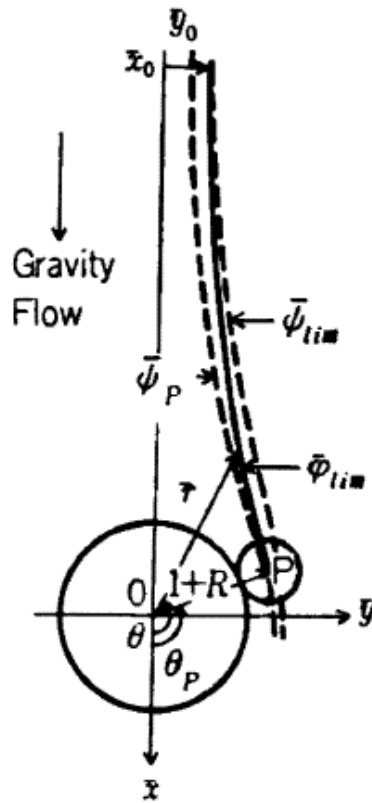


Figure 2-6 Limiting particle trajectory (vertical flow).

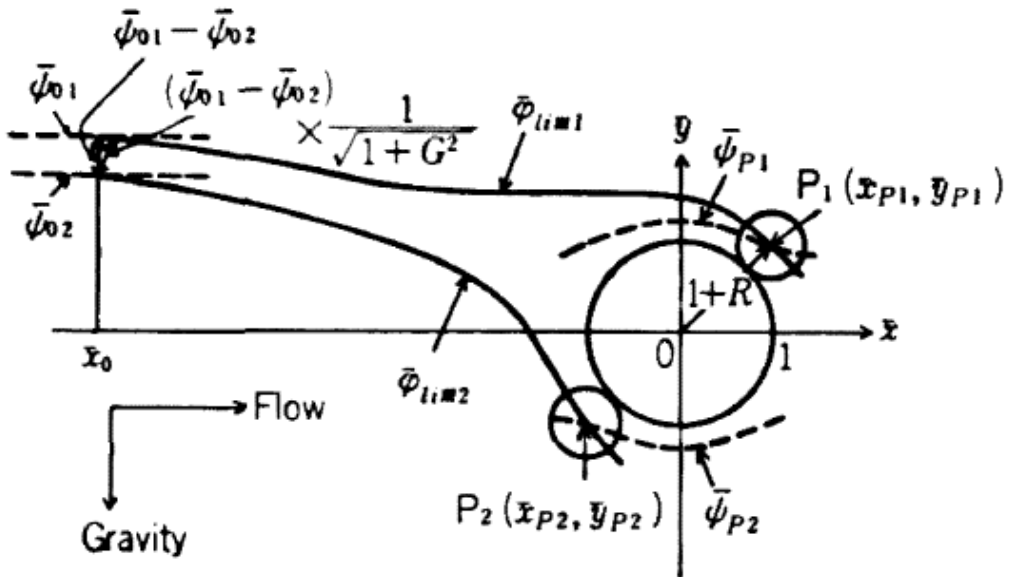


Figure 2-7 Limiting particle trajectory (horizontal flow).

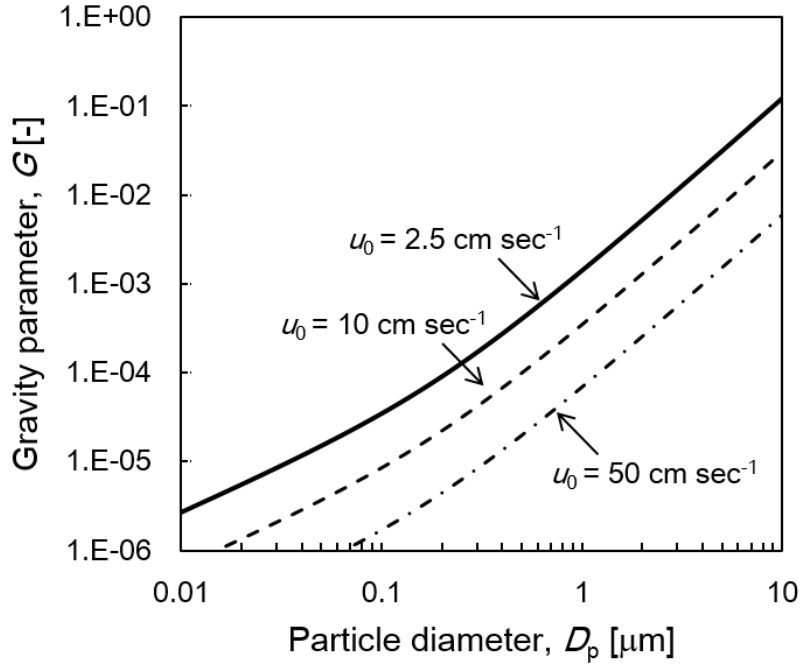


Figure 2-8 Gravity parameter against particle diameter

$$(\rho = 1.2 \text{ kg m}^{-3}, \rho_p = 1053 \text{ kg m}^{-3}).$$

(e) 遠心力 η_c

本研究では、遠心力による単一繊維捕集効率は、重力と同様に与えられるとして、Eq. (2-37)で表される(Nakajima S. *et al.*, 2015)²³⁾。

$$\eta_c = \frac{v_c}{u_0} \quad (2-37)$$

そして、遠心沈降速度である v_c は、Eq. (2-38)で与えられる。

$$v_c = v_t \left(\frac{r\omega^2}{g} \right) = v_t Z_c \quad (2-38)$$

$$r = \frac{R_1 + R_2}{2} \quad (2-39)$$

$$u = \frac{Q}{\pi(R_2^2 - R_1^2)} \quad (2-40)$$

ここで、 Z_c は遠心効果と呼ばれ、遠心加速度と重力加速度の比である。回転フ

フィルタでは、フィルタの半径方向で回転半径は変化するが、遠心力による単一繊維捕集効率の計算に際して、回転半径 r は簡略化して内半径 R_1 および外半径 R_2 の算術平均である。以上、回転フィルタの各捕集機構による単一繊維捕集効率について説明した。

次に、各パラメータが回転フィルタの捕集効率に与える影響を理論的に推測した。Figure 2-9 は、前述した理論より求めた単一繊維捕集効率を粒子径に対してプロットした理論推定線である。計算では、この後説明する実際の回転フィルタに用いたフィルタ物性である、繊維径 $25\ \mu\text{m}$ 、充填率 0.01 、フィルタ内半径 $5\ \text{mm}$ 、フィルタ外半径 $20\ \text{mm}$ 、フィルタ厚みを $30\ \text{mm}$ とし、操作パラメータである流量は $3.6\ \text{L min}^{-1}$ とした。まず、微小粒径においては、緑の線で示す拡散さえぎりが支配的な捕集機構であり、青と黒の線で示した、慣性さえぎりと重力があまり捕集に関与しないことが分かる。一方で、大粒径においては、粒径が大きくなるため、青の線で示す慣性さえぎりが緑と黒の線で示した拡散さえぎりと重力よりも捕集に優位に関与することが分かる。これに対して、新しい機械的捕集機構としてフィルタを回転させることで遠心力を生じさせ粒子に作用させるとすると、ピンク、オレンジ、赤の線で示すように、回転速度が増加するとともに単一繊維捕集効率が向上し、サブミクロンからミクロンオーダーの粒径範囲にかけて、遠心力が他の捕集機構よりも優位に粒子捕集に関与することが推察された。

繊維径 $50\ \mu\text{m}$ 、充填率 0.03 のフィルタを用いて粒子を捕集する場合の、各捕集機構に対する単一繊維捕集効率をろ過速度に対してプロットした理論推定線を Figure 2-10 に示す。ここで、操作条件はろ過速度 $0\sim 2\ \text{m sec}^{-1}$ 、回転速度は $0\sim 6000\ \text{rpm}$ であり、Figure 2-11(a)および(b)は、それぞれ違う粒径に対する理論推定線を示している ($D_p = 0.5$ and $1.0\ \mu\text{m}$)。Figure 2-10 (a)に示すように、ろ過速度を

大きくするにつれて、拡散さえぎり、重力沈降、遠心力は単一繊維捕集効率が小さくなる。また、ターゲットである粒子が小さいため、慣性さえぎり単一繊維捕集効率が小さい。一方で、遠心力はフィルタの回転速度の増加とともに、幅広い速度範囲で単一繊維捕集効率が向上する。次に、粒径 $1.0 \mu\text{m}$ の粒子を捕集する場合を推定した結果(Figure 2-10 (b))を見ると、同様の傾向であり、フィルタろ材を回転させることで幅広い速度範囲で捕集効率を向上させることが可能であると予想された。

次に、充填率 0.03、ろ過速度 5.0 cm sec^{-1} において粒径 $0.5 \mu\text{m}$ の粒子を捕集する場合の、捕集効率をフィルタの回転速度に対してプロットした理論推定線を Figure 2-11 に示す。図に示すように、フィルタを回転させない場合、特に太い繊維($D_f = 50$ and $250 \mu\text{m}$)は、ほぼ粒子を捕集できない。しかし、回転速度を増加させるとともに捕集効率が大幅に向上し、繊維径 $50 \mu\text{m}$ のフィルタでは 6000 rpm 回転させることで粒子を約 90%程度捕集できると予想された。一般的なエアフィルタでは、繊維径を小さくすることで、捕集効率が向上させる取り組みがなされている。しかし、前述したようにこれは同時に圧力損失も増加するという問題が生じる。それに対して、回転フィルタでは、無回転状態では粒子を捕集できない太い繊維をフィルタろ材として用いることで、図に示すように、フィルタろ材を回転させることにより粒子を捕集することが可能であると予想される。

以上の Figure 2-9~ Figure 2-11 から、回転フィルタはフィルタろ材を回転させることで、サブミクロンから数ミクロンの範囲のエアロゾル粒子の捕集効率を向上させることが可能であり、さらに、低圧力損失で粒子捕集を行うことができる太い繊維を回転させることで MPPS が存在するサブミクロンの範囲の粒子の捕集効率を大幅に向上させることが可能であると予想された。このことから、回転フィルタは、従来のエアフィルタの問題を同時に解決することが出来る理想

的なフィルタであると考えられる。

次に、回転速度の増加により遠心力が増加した場合に、単純化した遠心力単一繊維捕集効率である Eq. (2-37)が成立するかについて検討した。これは、重力沈降単一繊維捕集効率では $G \ll 1$ が成立するために Eq. (2-36)のように単純化できるものの、遠心力では、回転速度を増加させた場合に v_c/u_0 が大きくなり、Eq.(2-37)が成立しない可能性が示唆されたためである。

流れ方向は、本実験で用いた Holder rotation type を対象として水平流とし、遠心力単一繊維捕集効率 η_c は次式を用いた。

$$\eta_c = \frac{v_c/u_0}{\sqrt{1+v_c/u_0^2}} \quad (2-41)$$

Eq.(2-37)と Eq.(2-41)から推算される理論推算値を比較することで評価した。Eq.(2-37)および Eq.(2-41)から推算される、単一繊維捕集効率を回転速度に対してプロットした理論推算値を図を Figure 2-12 に示す。プロットが Eq.(2-37)、曲線が Eq.(2-41)の理論推算値である。図からわかるように、回転速度 10000 rpm まで増加させても粒径 0.2、0.5 μm ではほぼ変化しなかった。一方で、粒径 1.0 μm の粒子に対しては、約 6000 rpm から差が現れ、フィルタろ材を 10000 rpm で回転させるとすると単一繊維捕集効率の大きさに約 29%の差が生じると推察された。したがって、10000 rpm という高速回転を用いる条件を想定する場合は、単純化した Eq.(2-36)ではなく Eq.(2-41)を選択することが適切だと考えられる。後で説明するが、本実験条件では最高回転速度 3000 rpm で実験を行うため、Eq.(2-36)を遠心力単一繊維捕集効率として用いて良いと言える。

次章では、回転フィルタのパラメータを変化させることで実験的に捕集効率を求め、従来のろ過理論により回転フィルタの捕集効率を推定することが可能か評価した。

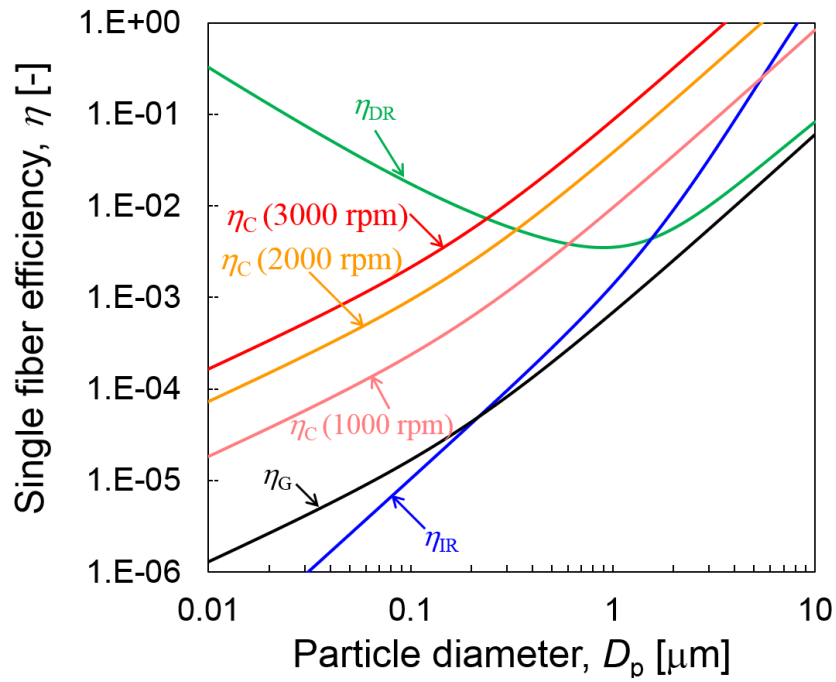
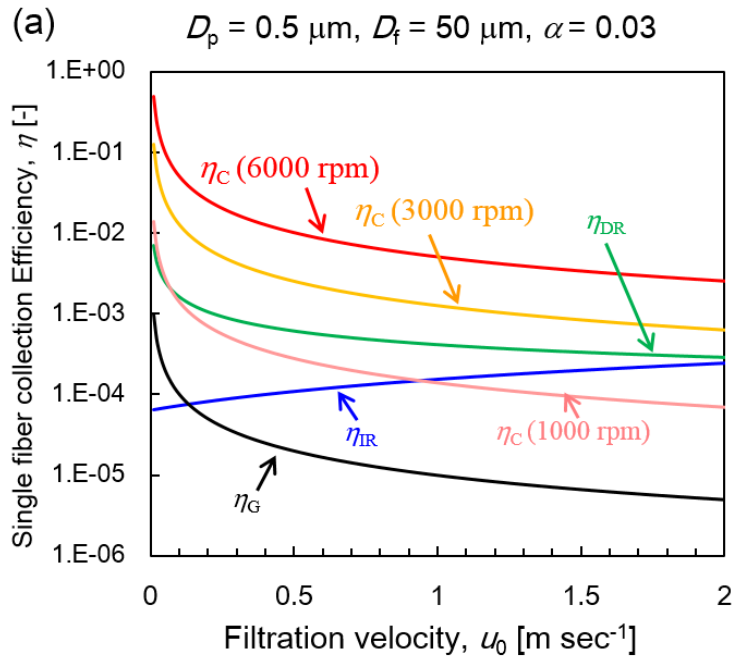


Figure 2-9 Single fiber collection efficiency against particle diameter.

($D_f = 25 \mu\text{m}$, $\alpha = 0.01$, $R_1 = 5 \text{ mm}$, $R_2 = 20 \text{ mm}$, $L = 30 \text{ mm}$, $u_0 = 5.0 \text{ cm sec}^{-1}$)



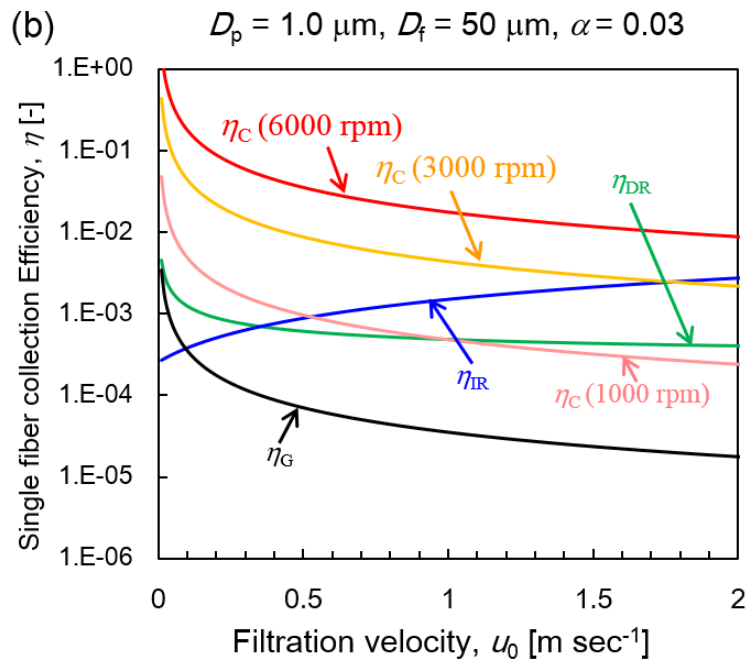


Figure 2-10 Single fiber collection efficiency against filtration velocity.

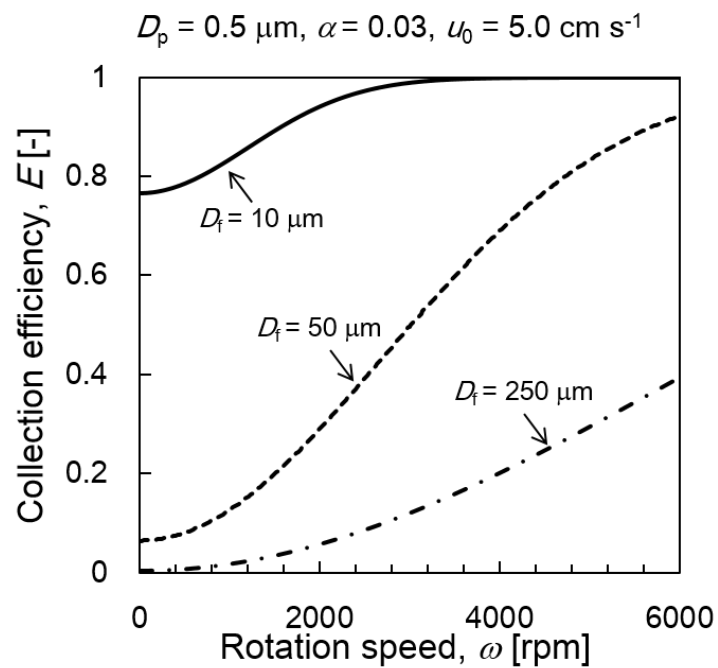


Figure 2-11 Collection efficiency against rotation speed.

Curves are predicted by Eq. (2-7).

$D_f = 50 \mu\text{m}$, $\alpha = 0.01$, $R_1 = 5 \text{ mm}$, $R_2 = 20 \text{ mm}$, $L = 30 \text{ mm}$, $u_0 = 5.0 \text{ cm sec}^{-1}$

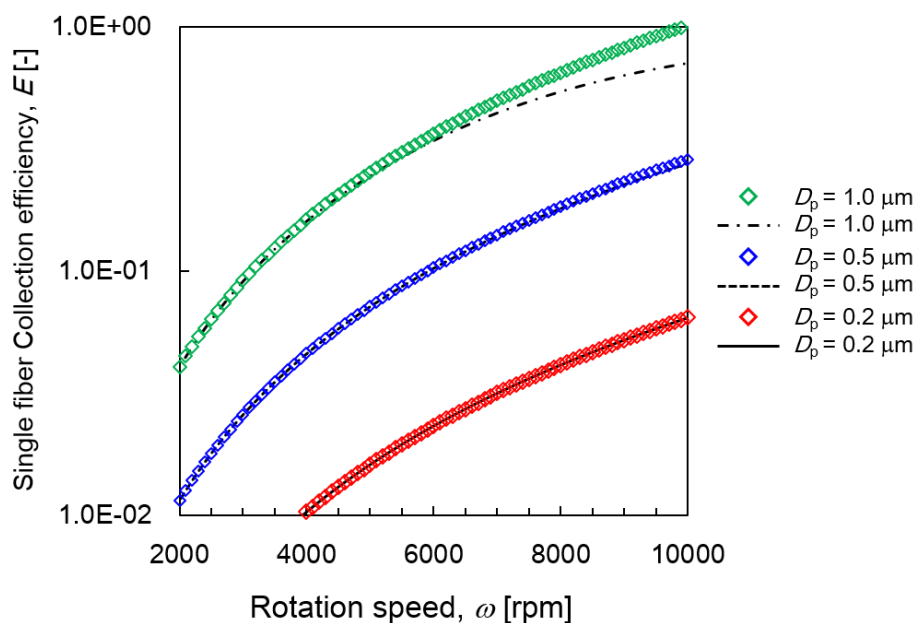


Figure 2-12 The comparison of single fiber collection efficiency of centrifugal force.

2-3 圧力損失の推定

フィルタを構成する物質は、そこを流れる気流に対して抵抗を与える。これを圧力損失 ΔP と呼ぶ。フィルタの圧力損失は、フィルタの厚みと流量に直接比例する。フィルタの性質(繊維または孔の大きさ、充填率、ろ過速度あるいはフィルタ厚み等)は、どのパラメータが変化しても特定の粒径に対する捕集効率および圧力損失の両方とも変化を引き起こす。

非圧縮性流体が充填層内を層流で流れるときの圧力損失は、一般に次式のDarcyの式に従う。

$$\Delta P = k_0 \mu u L \quad (2-42)$$

ここで、 k_0 は充填層の構造により決定される定数である。充填層の圧力損失を解析する際の考え方として、円管模型理論と効力理論がある。前者は充填層を、円

管を通路の集合体として解析する手法で、低い充填率の多孔質または充填層のモデルとして用いられる。Kozeny-Carman の式がこれに該当する。それに対して、後者は単位となる充填物の効力から圧力を推定しようとする考え方である。繊維層のように繊維間距離が十分離れた充填層には、多くの場合、抗力理論が適用される。本理論によると、単位長さの繊維の受ける流体抵抗 F 、厚さ L 、断面積 A の繊維層フィルタの圧力損失は、次式で与えられる。

$$\Delta P u A = F l u_0 A L \quad (2-43)$$

Eq. (2-41) および Eq. (2-42) を整理すると、圧力損失は Eq. (2-43) で表される。

$$\Delta P = \frac{4\alpha L}{\pi D_f^2 (1-\alpha)} F \quad (2-44)$$

ここで、抵抗係数 C_D を定義に従い導入すると、抵抗係数 F は流れに直角な円柱に対し、次式で表される。

$$F = C_D D_f \frac{\rho u_0^2}{2} \quad (2-45)$$

また、抵抗係数 F を 3 次元配列の一般の繊維層に適用できるようにすると、

$$F = C_{DE} D_f \frac{\rho u^2}{2} \quad (2-46)$$

$$C_{DE} = C_{DE}(K, \alpha, Re) \quad (2-47)$$

で表される。ここで、 C_{DE} は有効抵抗係数である。Eq. (2-44)、Eq. (2-46) より、Eq. (2-48) で圧力損失は表される。

$$\Delta P = C_{DE} \frac{2\alpha \rho u^2 L}{\pi(1-\alpha) D_f} \quad (2-48)$$

ここで、Table 2-1 に従来の研究で得られている、常圧下における有効抵抗係数をまとめたものを表で示した。

Table 2-1 Effective resistance coefficient at ambient pressure.

研究者	抵抗係数 C_{DE}	番号	摘要
Langmuir ²⁴⁾	$\frac{8\pi B}{Re} \frac{1}{-\ln\alpha + 2\alpha - \alpha^2/2 - 3/2}$	a	円管模型 B=1.4 (流れに垂直)
Davies ²⁵⁾	$\frac{32\pi}{Re} \alpha^{0.5}(1 + 56\alpha^3)$	b	次元解析、実験式
Lamb ²⁶⁾	$\frac{8\pi}{Re} \frac{1}{2 - \ln Re}$	c	流れに垂直、孤立円柱理論
Iberall ²⁷⁾	$\frac{8\pi}{Re}$	d	流れに平行、孤立円柱理論
Iberall ²⁷⁾	$\frac{4.8\pi}{Re} \frac{2.4 - \ln Re}{2 - \ln Re}$	e	半実験式、Eq.(C), (D)の組み合わせ
Chen ²⁷⁾	$\frac{2}{Re} \frac{k_2}{\ln(k_3\alpha^{-0.5})}$	f	$k_2 = 6.1$ $k_3 = 0.64$
Happel ²⁸⁾	$\frac{8\pi}{Re} \frac{1}{-\ln\alpha + 2\alpha - \alpha^2/2 - 3/2}$	g	流れに平行な円柱群理論
Happel ²⁸⁾	$\frac{16\pi}{Re} \frac{1}{-\ln\alpha - (1 - \alpha^2)/(1 + \alpha^2)}$	h	流れに垂直な円柱群理論
Kuwabara ¹⁹⁾	$\frac{16\pi}{Re} \frac{1}{-\ln\alpha + 2\alpha - \alpha^2/2 - 3/2}$	i	流れに垂直な円柱群理論
Kimura and Iiya ^{29), 30)}	$0.6 + \frac{4.7}{\sqrt{Re}} + \frac{11}{Re}$ $10^{-3} < Re < 10^2, 3 < D_f < 270 \mu\text{m}$ (Eq. (2-46)中の u を u_0 として、 ΔP を計算する)	j	実験式、繊維断面が非円形の場合、円相当径 $\sqrt{4A_f/\pi}$ を用いる ここで、 A_f は繊維断面積である。

第3章 回転フィルタの性能評価

前章で記述したように、フィルタを回転させることで、サブミクロンオーダーの範囲の粒子を効率的に捕集することが可能であると予想される。そこで本章では、固体粒子の試験粒子を用いて、実験的に捕集効率および圧力損失を計測することで、本研究室で試作した回転フィルタの性能を評価した。また、ろ過理論を用いて回転フィルタの設計を行い、一般換気用のエアフィルタへ応用した際の回転フィルタの実現性について議論した。

3-1 回転フィルタ(Holder rotation type)の設計

本実験で試作した回転フィルタ(Holder rotation type)の概略図を Figure 3-1 に示す。フィルタホルダの内部に円筒状の繊維層フィルタを設置し、フィルタ内半径および外半径はそれぞれ 5 mm と 20 mm、フィルタ厚みは 30 mm である。回転フィルタの入り口および出口のチューブの外径は 8 mm、それを回転フィルタの回転部であるロータリージョイント(Showa Giken Industrial Co. Ltd., RJ-RXE 1008 RH)に接続し、フィルタホルダ全体を AC モーター(MBMS021BLS; Panasonic Corporation)を用いることにより、最大 3000 rpm 回転させながら回転フィルタの入り口から導入されるエアロゾル粒子を捕集できるようにした。回転フィルタの寸法および実験条件を Table 3-1 に示す。回転フィルタの捕集効率の推定に従うとすると、フィルタが回転しない場合($D_f=10 \mu\text{m}$, $L=30 \text{ mm}$, $\alpha=0.01$, $u_0=2.5 \text{ cm sec}^{-1}$)、粒径 $0.6 \mu\text{m}$ に対して捕集効率が 0.42 であるが、回転速度を 3000 rpm まで増加させることにより捕集効率を 0.95 まで大幅に向上できることが予想される。

フィルタろ材として繊維状のステンレスファイバ (SUS)を採用し、繊維径 10、25、50 μm のフィルタろ材を回転フィルタの中心部の円筒状の部分に均一になるように設置した。繊維層フィルタの充填率 α は、SUS 繊維の質量 M で表される次の式から計算した。

$$\alpha = \frac{M}{\pi(R_2^2 - R_1^2)\rho_f L} \quad (3-1)$$

実験では、充填率は 0.01 で充填された SUS 繊維の質量を調整することで、 $\alpha = 0.01$ に固定していたが、不均一な充填もしくは遠心力による圧縮により局所的な充填密度の変化が生じた。従って、捕集効率を推察する際には、捕集効率曲線を実験結果にフィッティングさせることで有効充填率 α_{eff} を実験的に決定した。

Table 3-1 Dimensions of centrifugal filter and experimental condition.

Inner diameter, R_1 [mm]	5
Outer diameter, R_2 [mm]	20
Filter thickness, L [mm]	30
Packing density, α [-]	0.01
Fiber diameter, D_f [μm]	10, 25, 50
Filtration velocity, u_0 [cm sec^{-1}]	2.5~15
Rotation speed, ω [rpm]	0~3000

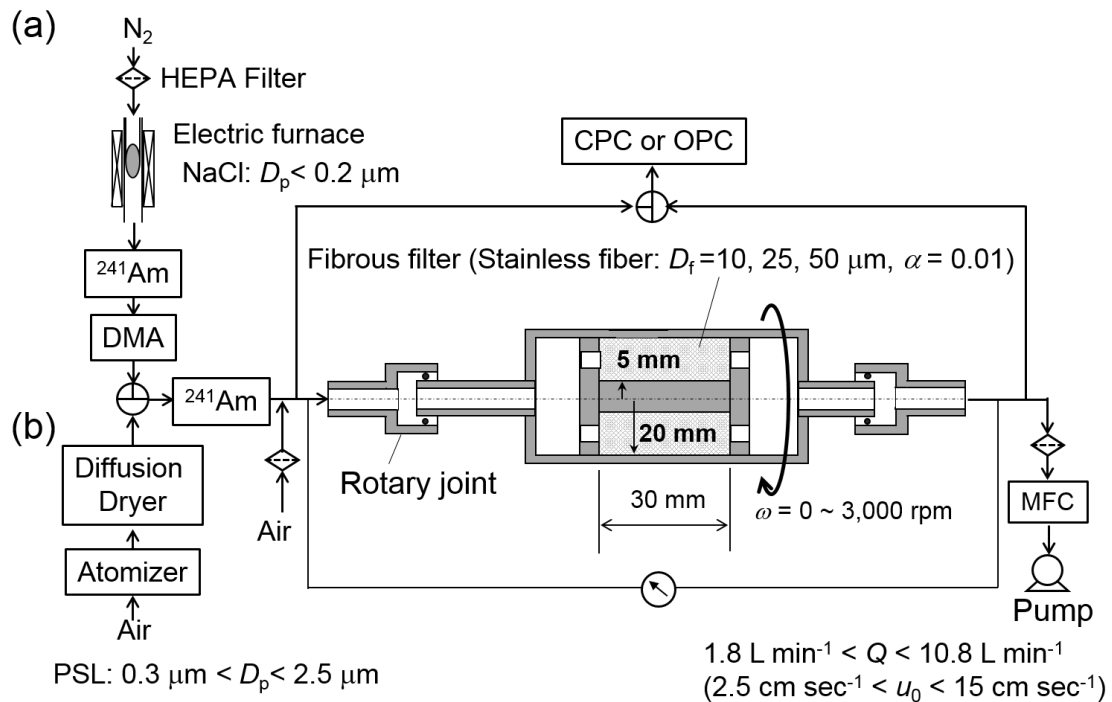


Figure 3-1 Experimental setup and schematic diagram of Holder rotation type centrifugal filter.

3-2 実験装置および方法

実験経路図を Figure 3-1 に示す。実験経路は、大きく分けて、粒子発生部、粒子を捕集する回転フィルタ、入り口と出口の粒子の個数濃度を計測する計測部で構成されている。発生粒子は、粗大粒子としては、Polystyrene latex 粒子(PSL; JSR Co.)を、微小粒子としては NaCl 粒子を用いた。

PSL 粒子は、粒径 0.5、0.8、1.0、2.0、2.5 μm の PSL 粒子の懸濁液を 1-JET エアロゾルアトマイザー(ATM; TSI model 9302)により噴霧し、生成した液滴をディフュージョンドライヤーに通過させた。そして、乾燥させることで得られた粒子を、放射性物質 ^{241}Am に通過させることで電氣的に中和させ、清浄空気と混合

した後に、回転フィルタに粒子を導入して捕集した。PSL 粒子の個数濃度は、光散乱式粒子計数器 (OPC; Optical particle sizer, Rion model KC-01E)により計測した。捕集効率は、回転フィルタの入り口および出口から計測される個数濃度を比較することで評価した。ここで、同時計測誤差が生じないように、100 個/cm³の個数濃度を維持して捕集効率を評価した。その際、同時に圧力損失をマノメータ (testo 512; Testo India Pvt.Ltd.)により計測した。

NaCl 粒子は、電気炉を用いて蒸発・凝縮させることで発生させた。この手法で生成される試験粒子を用いることにより、微小な粒子(10~200 nm)の捕集効率を実験的に評価した。単分散粒子を得るために、粒子を ²⁴¹Am に通過させることで 2 極性分布にした後に、微分型静電分級器 (DMA; Differential Mobility Analyzer, TSI model 3081 long DMA)によって分級した。次に、得られた単分散粒子は、再度 ²⁴¹Am を通過させることにより電氣的に中和させた後に、回転フィルタに導入して粒子を捕集した。単分散および電氣的に中和された NaCl 粒子は、清浄空気と混合し、試験粒子として回転フィルタに導入した。N₂ ガス流量は 1 L min⁻¹ であり、空気流量は 0.8 L min⁻¹~9.8 L min⁻¹ に変化させて実験を行った。粒子個数濃度は、凝縮粒子カウンター(CPC; Condensation Particle Counter, TSI model 3775 CPC)により計測した。

3-3 実験結果

3-3-1 捕集効率

ろ過速度が 5.0 cm sec⁻¹、回転速度を 0~3000 rpm の場合における、捕集効率を粒径に対してプロットしたものを Figure 3-2 に示す。ここで、繊維径は 10、25、

50 μm である。Figure 3-2 (a)に示すように、フィルタを回転させていない場合、MPPS では捕集効率が 20%と粒子をあまり捕集できなかった。ここで、フィルタを回転させていない場合の回転フィルタの MPPS が粒径 0.5 μm 程と従来のフィルタの MPPS よりも大きい理由は、圧力損失を小さくするために、本実験では繊維径 10 μm よりも太い繊維状フィルタろ材を採用したためである。粒径 0.5 μm 以上の粒子に対しては、フィルタを回転速度 1000、2000、3000 rpm で回転させると、粒径 0.5 μm 以上の粒子の捕集効率が大幅に向上させることができ、粒径 1.36 μm の PSL 粒子を 96%も捕集することが可能であることが分かった。一方で、粒径 0.2 μm 以下の粒子に対しては、フィルタを回転させても捕集効率はほとんど変化しなかった。また、回転速度を増加させると、MPPS は粒径 0.5 μm ($\omega = 0$ rpm)から粒径 0.2 μm ($\omega = 3000$ rpm)と、小粒径側にシフトすることが分かった。Figure 3-2 (b)および(c)は、繊維径が 25 または 50 μm のときの、捕集効率を粒径に対してプロットした図である。より粗大な繊維径でも同様に、粒径 0.2 μm 以下の粒子に対しては回転速度の依存性が見られなかったが、粒径 0.5 μm 以上の粒子に対してはフィルタの回転速度を向上させると明らかな捕集効率の増加が見られた。以上より、回転フィルタを用いることで、遠心力が粗大粒子に対して働くことで捕集効率が向上することを実験的に確かめられた。Figure 3-2 の曲線は、Eq. (2-7)から求められる捕集効率の理論推算値である。前述したように、有効充填率は実験結果とフィッティングすることで実験的に決定した。本実験では、粒径 0.2 μm 以下の粒径範囲における捕集効率は拡散捕集機構の領域であり、回転速度の依存性が見られなかった。そこで、有効充填率を決定する際には、理論推算値を粒径 0.2 μm 以下に対してフィッティングを行うことで、有効充填率を決定した。その結果、繊維径 10、25、50 μm の有効充填率は、それぞれ 0.007、0.01、0.02 となった。実験結果と理論推算値を比較すると、

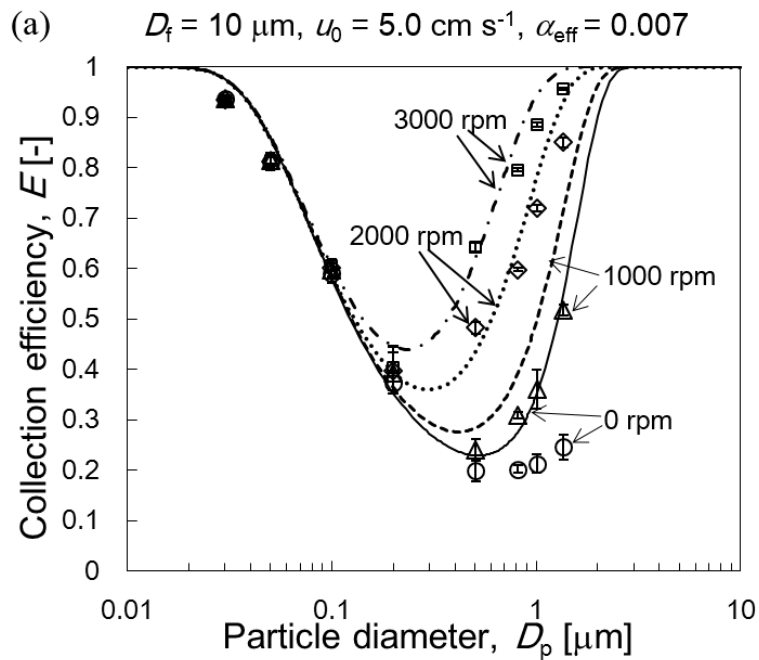
Figure 3-2 に示すように、理論推算値はいずれの回転速度に対しても実験値と良い一致を示していることが分かる。また、繊維径を変化させても同様に理論によって実験データをよく説明できることが分かった。

次に、繊維径 25 μm 、有効充填率 0.01 のフィルタを回転速度 0~3000 rpm まで回転させることで粒径 0.814 μm の粒子を捕集する場合の、回転フィルタの捕集効率をろ過速度に対してプロットした図を Figure 3-3 に示す。ここで、曲線は理論推算値である。図に示すように、ろ過速度の増加とともに捕集効率は小さくなった。これは、ろ過速度が大きくなるにつれて粒子の繊維層内における滞留時間が小さくなるため、捕集効率が小さくなったと考えられる。一方で、回転速度の増加とともに捕集効率は向上した。また、図に示すように、実験結果と理論推算値を比較すると、いずれのろ過速度・回転速度に対しても理論によって実験データを良く説明できている。以上の結果から、ろ過速度を幅広く変化させても、遠心力が粒子に対して作用し捕集効率が向上することを実験的および理論的に確かめられた。

以上の Figure 3-2 および Figure 3-3 から、回転フィルタを用いることで機械的な捕集機構に加えて遠心力が作用することで粒子捕集効率を向上させられるという回転フィルタの原理を実験的に確かめられ、従来の単一繊維捕集理論および対数透過側を回転フィルタの設計に用いることが可能であることが分かった。

ろ過速度 5.0 cm sec^{-1} 、繊維径 10、25、50 μm のフィルタろ材を用いた場合における、粒径を固定して回転速度を変化させた図を Figure 3-4 に示す。ここで、プロットは実験結果、曲線が理論推算値を示している。実験における回転速度の限界が 3000rpm であり、Figure 3-4 (a)に示すように、フィルタを回転させることにより粒径 1.0 μm ($\rho_p = 1,053 \text{ kg m}^{-3}$)の粒子に対する捕集効率を向上させることで 80%程度の粒子を捕集した。ここで、フィルタろ材の回転速度を増加させら

れるとすると、図に示すように、繊維径 $10\ \mu\text{m}$ のフィルタろ材を $4000\ \text{rpm}$ で回転させることでほぼ全ての粒子を捕集可能であると予想された。一方、Figure 3-4(b)は、粒径 $0.2\ \mu\text{m}$ の粒子を捕集する場合を示している。粒径 $0.2\ \mu\text{m}$ の粒子に対しては、 $3000\ \text{rpm}$ まで回転速度を増加させても捕集効率を向上させることは出来ないが、理論的には回転速度を $20000\ \text{rpm}$ まで増加させることで、ほぼ全ての粒子を捕集可能であると予想された。高速回転を利用した機器として製品化されているもので、エアロゾル質量分級装置(APM; Aerosol mass particle analyzer)や遠心分離機が存在しており、それぞれ最高回転速度が $14000\ \text{rpm}$ と $20000\ \text{rpm}$ である。今回の試作機は、最高回転速度が $3500\ \text{rpm}$ の部品であるロータリージョイント (RJ-RXE 1008RH, Showa Giken Industrial Co.Ltd.)を用いたが、今後より微小な粒子を捕集するために、回転部にこれらの機器に使用される部品、または磁性流体シールを用いることを検討することで解決したいと考えている。



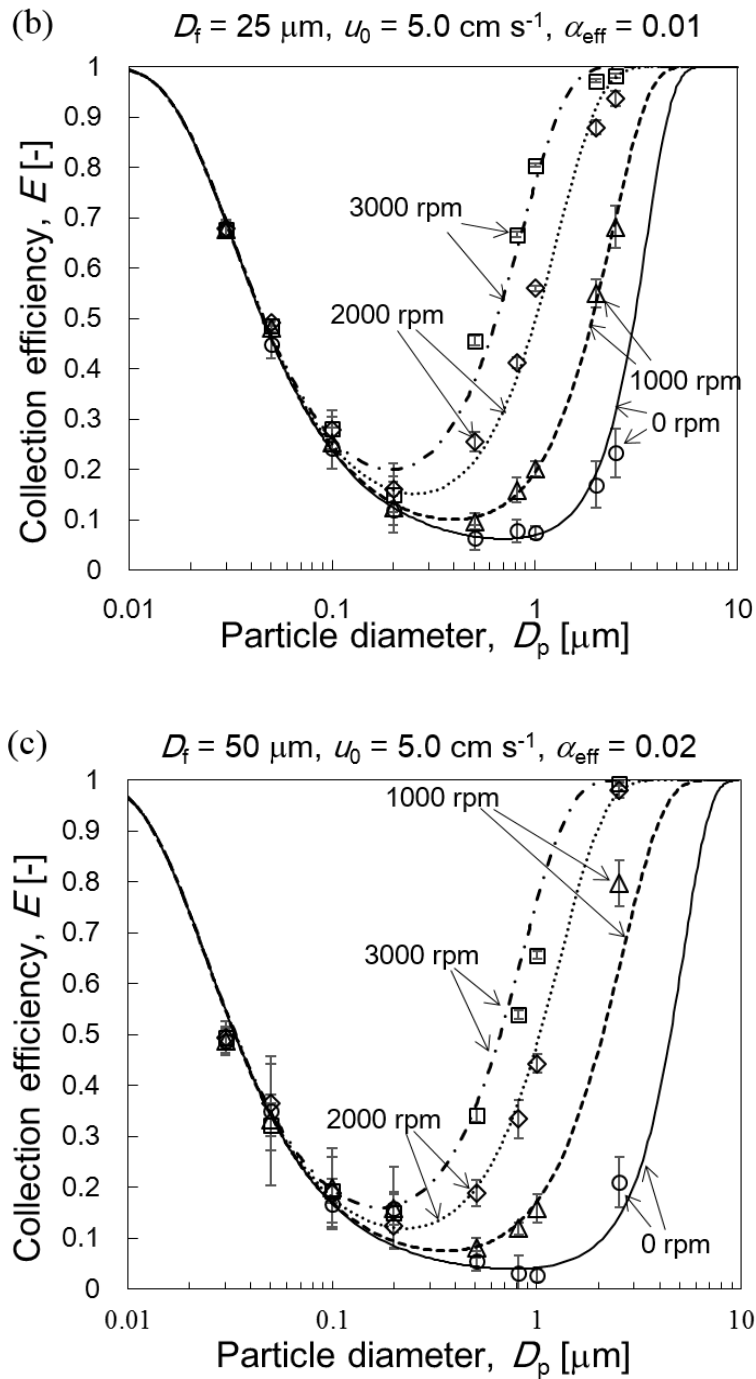


Figure 3-2 Collection efficiencies of centrifugal filter against particle diameter ($u_0 = 5.0 \text{ cm sec}^{-1}$, $D_f = 10, 25, 50 \mu\text{m}$). Curves are predicted by Equation (2-7), and symbols are experimental data.

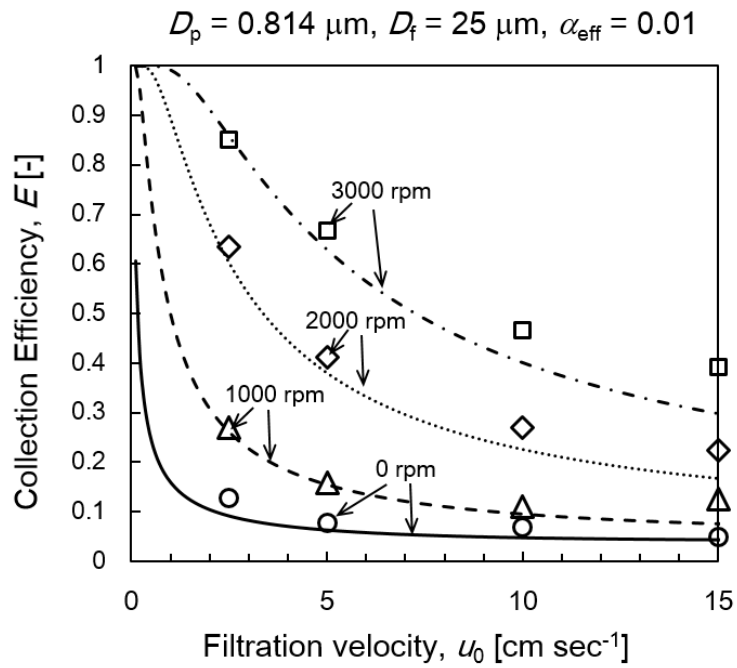
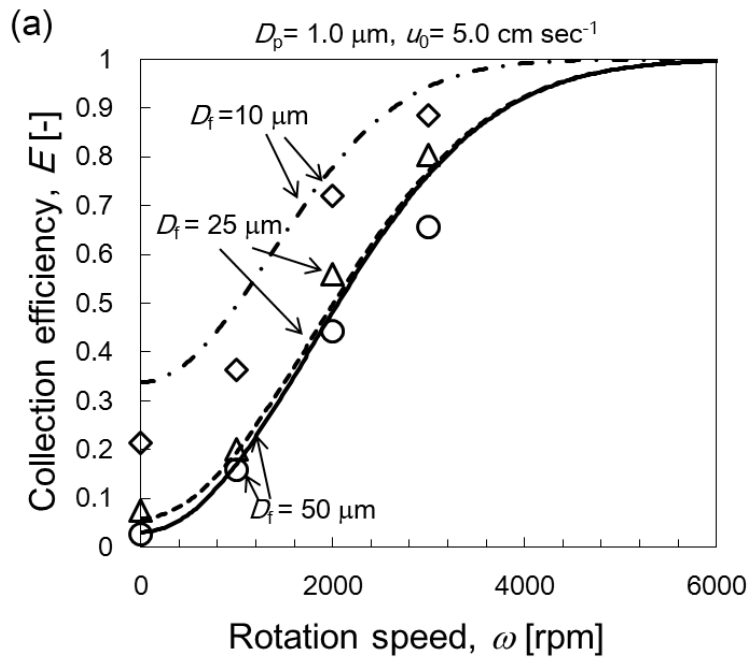


Figure 3-3 Collection efficiency of centrifugal filter against filtration velocity. Curves are predicted lines by equations (2-7), and symbols are experimental data.



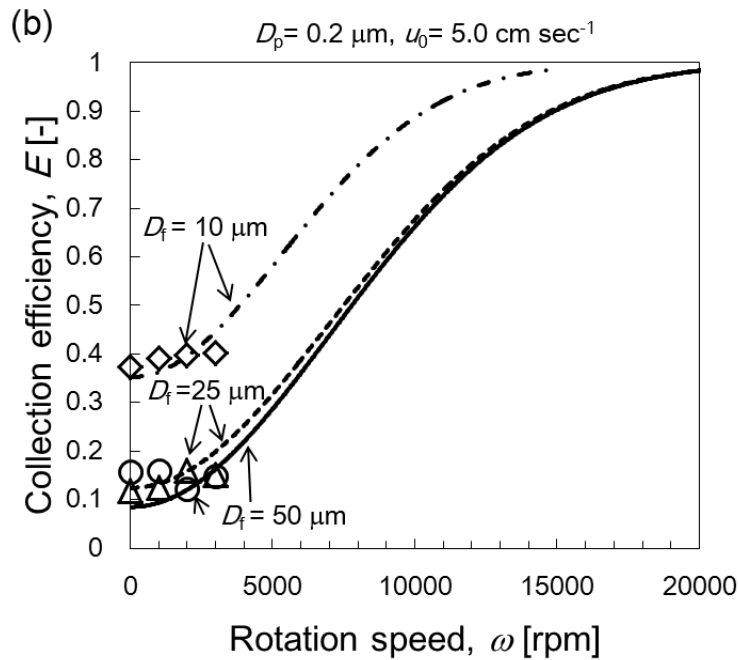


Figure 3-4 Collection efficiencies of centrifugal filter against rotation speed at the fixed filtration velocity, u_0 of 5.0 cm sec^{-1} . Curves are predicted lines by equations (2-7), and symbols are experimental data.

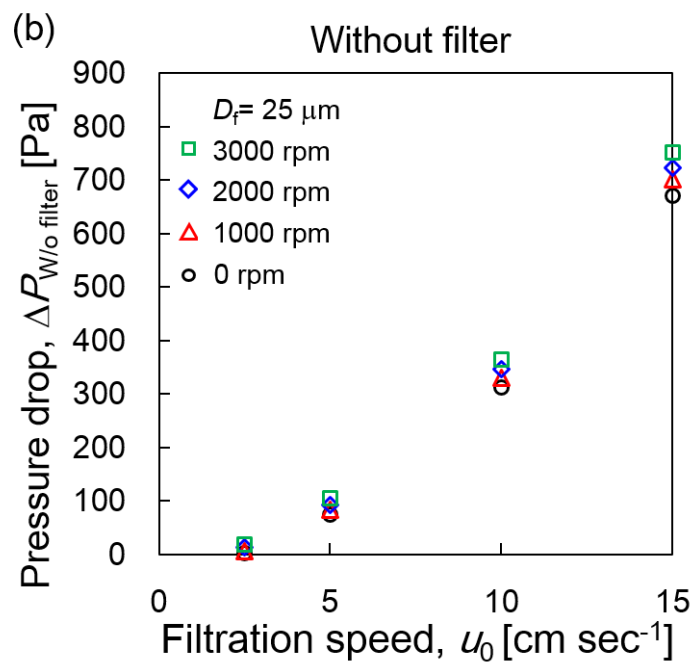
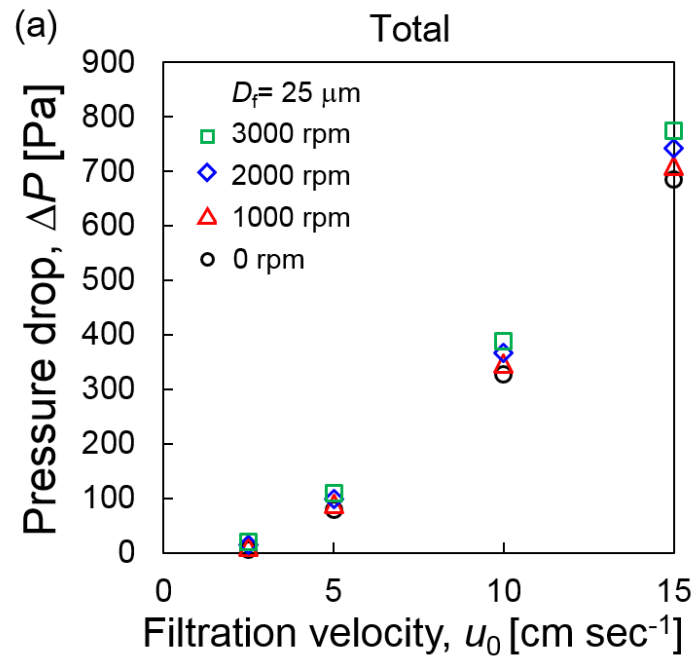
3-3-2 圧力損失

フィルタの性能を決定する、もう一つの重要因子は圧力損失である。Figure 3-5 は、繊維径 $25 \mu\text{m}$ のフィルタろ材を用いて、フィルタを回転速度 $0 \sim 3000 \text{ rpm}$ まで回転させたときの、圧力損失をろ過速度に対してプロットした図である。(a) は全体の圧力損失、(b) は経路の圧力損失、(c) はフィルタろ材の圧力損失である。Figure 3-5 (a)に示すように、フィルタを回転させなかったときと、フィルタを 1000 、 2000 、 3000 rpm で回転させた場合を比較すると、回転速度の増加による圧力損失の上昇は 100Pa 以下と僅かであることが分かった。Figure 3-5 (b)を見ると、経路の圧力損失はろ過速度が増加するにつれて曲線を描くように増加した。

Figure 3-5 (a)と(b)を比較すると、それぞれの圧力損失に差はほとんどなく、Figure 3-5 (c)に示すように、フィルタの圧力損失が小さく経路の圧力損失が支配的だったからだと考えられる。また、Figure 3-5 (c)を見ると、フィルタが回転していない場合でも、フィルタの圧力損失がろ過速度に対して比例関係を示していない。これは、フィルタの回転により装置内の流れが変化することで、圧力損失の加算性が単純に成立しなかったと考えられる。

ろ過速度が 5.0 cm sec^{-1} 、繊維径を変化させた場合における、圧力損失を回転速度に対してプロットした図を Figure 3-6 に示す。また、フィルタを設置しなかった経路の圧力損失も図中の黒のプロットで示す。回転速度の増加とともにそれぞれの圧力損失が回転速度に対して増加した。図からわかるように、いずれの繊維径のフィルタろ材を用いても、経路の圧力損失に対して平行であり、フィルタろ材の抵抗は圧力損失の増加に影響を与えないことが示唆された。

以上 Figure 3-2～Figure 3-6 の結果から、本研究室で開発した Holder rotation type の回転フィルタは、フィルタを回転させることで圧力損失を大幅に増加させずに捕集効率を大幅に向上させることが可能であるといえる。



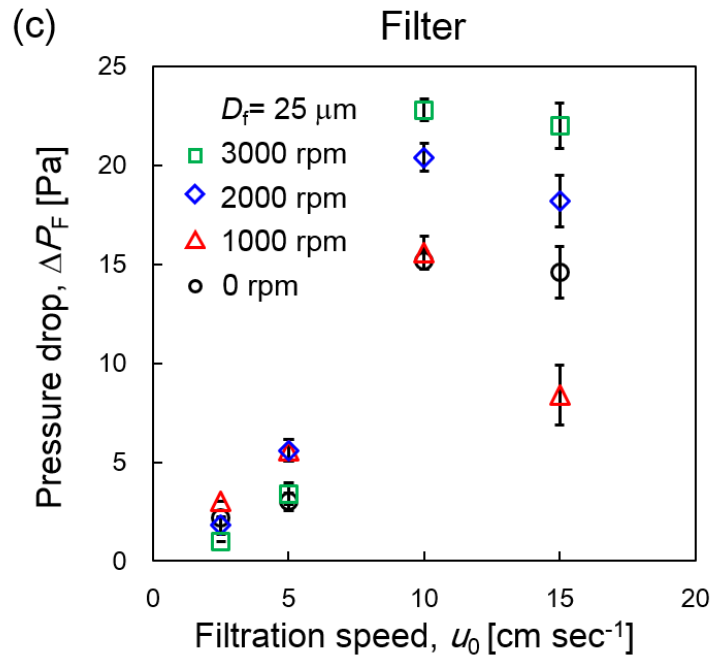


Figure 3-5 Pressure drop of centrifugal filter against the filter velocity with the rotation speed as a parameter ($\alpha = 0.01$).

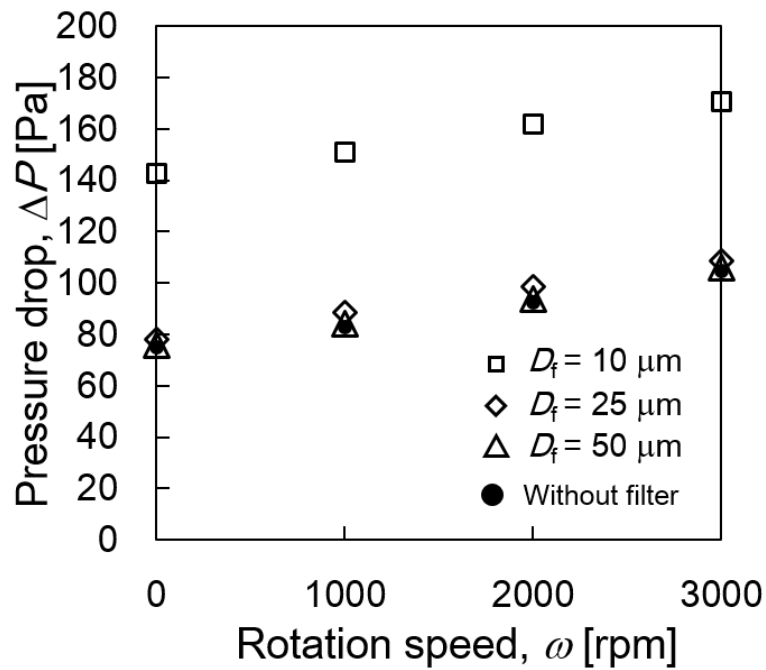


Figure 3-6 Pressure drop of centrifugal filter consisting of fibers with different diameter as a function of rotation speed at a fixed filtration velocity, u_0 , of 5.0 cm sec^{-1} ($\alpha = 0.01$).

3-4 回転フィルタの設計:回転フィルタの応用例

本節では、一般換気用エアフィルタへの回転フィルタの応用例について述べる。回転フィルタを従来のエアフィルタと理論的に比較することで、回転フィルタの実現性について議論した。比較対象は HEPA フィルタおよび中性能フィルタ採用した。

(a) HEPA フィルタ

HEPA フィルタは、繊維径を小さくすることにより高効率の捕集効率を実現したフィルタである。JIS Z 8122 によれば、HEPA フィルタは、定格風量 $56 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ で粒径 $0.3 \text{ }\mu\text{m}$ に対して 0.9997 以上の初期捕集効率をもち、かつ初期圧力損失が 245Pa 以下の性能を有するエアフィルタと定義されている。ここでは、回転フィルタを用いることにより、回転フィルタの応用例の一つとして HEPA フィルタを対象とした回転フィルタの実現性について評価した。フィルタユニットの概略図を Figure 3-7 に示す。寸法の参考として、HEPA フィルタが設置されるフィルタユニットを比較対象とする。Figure 3-7 に示すように、フィルタユニット内に回転フィルタを設置する場合、最大外半径は 210 mm、最大フィルタ厚みは 290 mm とした。この際、フィルタホルダ、ロータリージョイント(回転部)、モーター等のフィルタろ材以外の設置は含んでいない。以上をまとめると、回転フィルタを HEPA フィルタとして応用するためには、以下の 3 つの条件を同時に満たす必要がある。

1. 定格風量 $56 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ における、初期圧力損失は 245 Pa 以下
2. 粒径 $0.3 \text{ }\mu\text{m}$ の粒子の総合捕集効率が 0.9997 以上

3. 最大外半径 210 mm 以下、最大フィルタ厚み 290 mm 以下を満たす

フィルタ外半径をフィルタ厚みに対してプロットした理論推定線を Figure 3-8 に示す。ここで、圧力損失を小さくするため、繊維径は 50 μm 、充填率は 0.003 および 0.01 を採用し、圧力損失 245 Pa を満たすフィルタ外半径およびフィルタ厚みの条件を求めた。その結果、理論上、図に示す曲線上の点(L, R_2)の寸法の回転フィルタを設計することで、HEPA フィルタの圧力損失の条件を満たすことが可能である。

次に、充填率 0.003 および 0.01 での、捕集効率を回転速度に対してプロットした理論推定線を Figure 3-9 に示す。Figure 3-9 (a)に示すように、大きい回転フィルタ($L = 200 \text{ mm}, R_2 = 199 \text{ mm}$)の場合、約 88500 rpm で捕集効率 0.9997 を達成できる。しかし、回転させるフィルタろ材が大きいだけでなく回転速度が大きくなり現実的ではない。それに対して、小さい回転フィルタ($L = 100 \text{ mm}, R_2 = 140 \text{ mm}$)の場合、捕集効率 0.9997 を達成するにはフィルタろ材を約 208000 rpm 回転させなければならず現実的ではない。充填率を変化させた Figure 3-9 (b)を見ると、大きい回転フィルタ($L = 200 \text{ mm}, R_2 = 427 \text{ mm}$)の場合、約 15600 rpm で捕集効率 0.9997 を達成できるものの、回転させるフィルタろ材が大きい。一方で、小さい回転フィルタ($L = 100 \text{ mm}, R_2 = 302 \text{ mm}$)の場合、捕集効率 0.9997 を達成するには、フィルタろ材を約 36800 rpm 回転させる必要がある。以上から、現状では回転フィルタを HEPA フィルタとして応用することは困難であると推察された。

HEPA フィルタは、拡散域に近い粒径 0.3 μm の粒子のみを試験粒子としており、かつ捕集効率 0.9997 と非常に高い性能が求められるエアフィルタである。回転フィルタは、フィルタろ材の回転によるサブミクロン以上の範囲の粒子の

効率的な捕集が可能であるため、HEPA フィルタよりも、前段として用いられる中性能フィルタやプレフィルタとして用いることが効果的である。そこで次に、中性能フィルタを対象として回転フィルタの実現性について検討した。

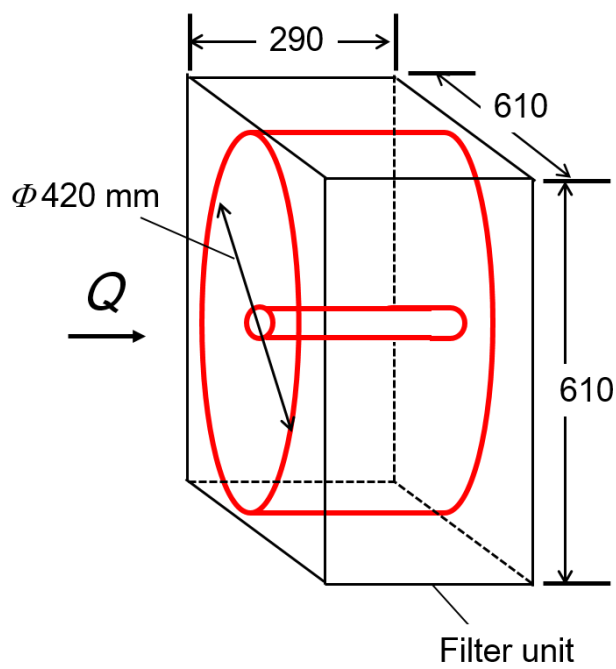


Figure 3-7 Schematic diagram of filter unit and centrifugal filter.

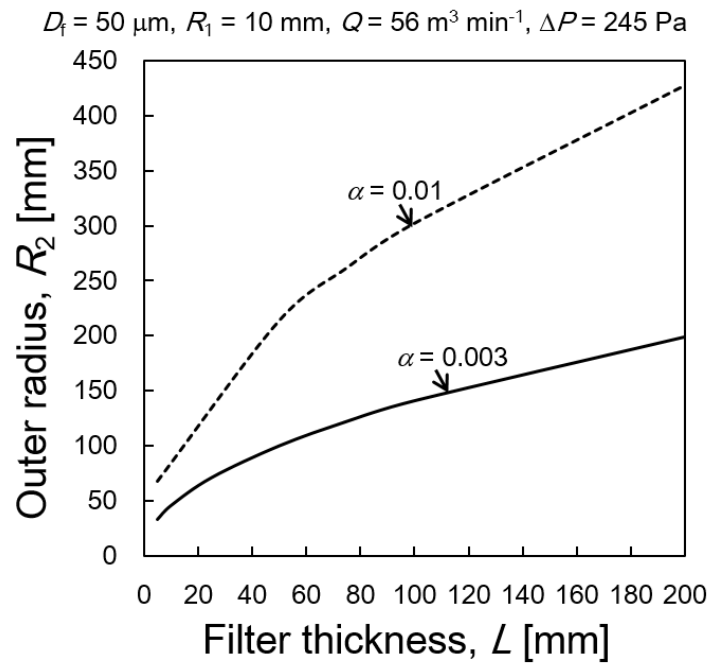
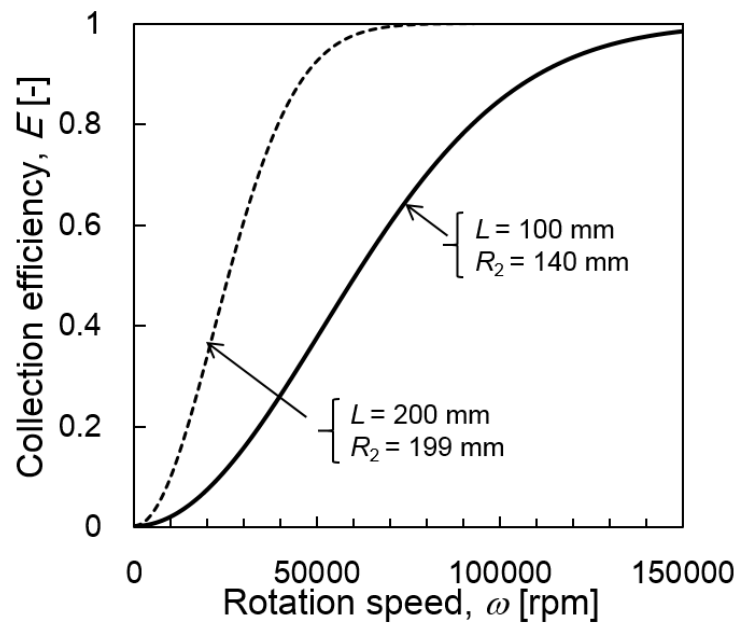


Figure 3-8 Outer radius against filter thickness when pressure drop is 245 Pa.

(a) $D_1 = 50 \mu\text{m}$, $\alpha = 0.003$, $R_1 = 10 \text{ mm}$, $Q = 56 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$, $\Delta P = 245 \text{ Pa}$



(b) $D_f = 50 \mu\text{m}$, $\alpha = 0.01$, $R_1 = 10 \text{ mm}$, $Q = 56 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$, $\Delta P = 245 \text{ Pa}$

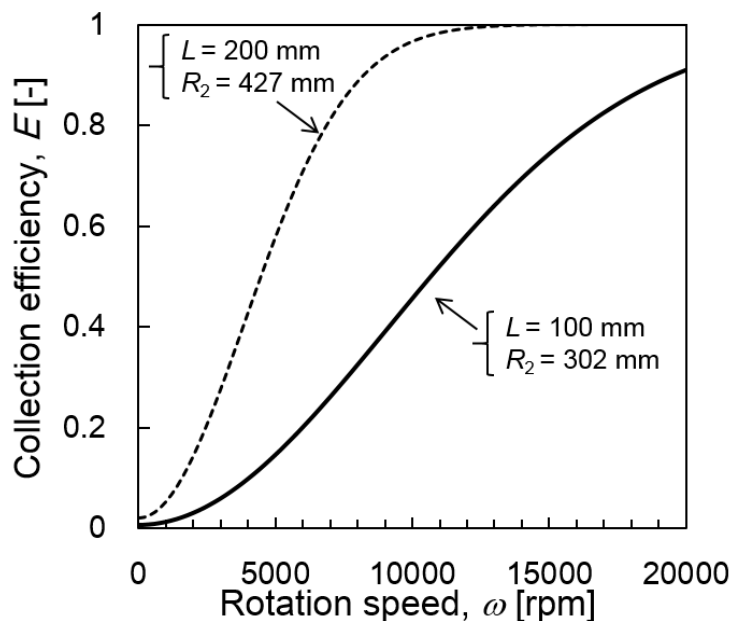


Figure 3-9 Collection efficiency against rotation speed when pressure drop is 245 Pa.

(b) 中性能フィルタ

中性能フィルタは、粒径 $1 \sim 5 \mu\text{m}$ の粉塵の捕集を目的とし、事務所ビル等の空調用フィルタ、またはクリーンルームにおける HEPA フィルタの前段フィルタとして使用される。JIS B 9908 によれば、中性能フィルタは、粒径 $0.4 \mu\text{m}$ に対する初期捕集効率が 0.99 未満のフィルタユニットと定められている。今回は、回転フィルタの応用例の対象として、フィルタユニットに設置された定格風量 $56 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ における初期圧力損失が 59 Pa 以下、そして JIS 平均比色法で求めた粒子の総合捕集効率が 0.9 以上を満たす中高性能エアフィルタ (TDWP-90; AQC Corporation) を対象とし、中高性能エアフィルタを対象とした回転フィルタの実現性について評価した。

JIS 平均比色法とは、光の透過度の差から粒径 $0.3 \mu\text{m}$ 以上の粉塵の捕集効率

を評価する手法である。一般換気用エアフィルタに関する ISO16890 では、粒径 0.3 μm 以上の粒子の分布については、次式で表す大気塵粒子径分布 f を用いて評価する。

$$q_3(\ln D_p) = y \cdot f(\ln D_p, \sigma_{gA}, D_{p50A}) + (1 - y) \cdot f(\ln D_p, \sigma_{gB}, D_{p50B}) \quad (3-2)$$

$$f(\ln D_p, \sigma_g, D_{p50}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \ln \sigma_g} \exp \left[-\frac{(\ln D_p - \ln D_{p50})^2}{2 \cdot \ln^2 \sigma_g} \right] \quad (3-3)$$

ここで、Eq.(3-2)の y は Fine mode と Coarse mode の粒子の混合比で、添え字 A, B は Fine mode、Coarse mode を表す。 D_{p50} は幾何平均径、 σ_g は幾何標準偏差である。都市部大気(Fine mode)と郊外大気(Coarse mode)に対して、混合比 y と幾何平均径 D_{p50} は Table 3-2 で与えられる。下つき添え字 u は都市部、 s は郊外を表す。そして、捕集効率は次に示す粒子状捕集物質捕集率(ePM_x)に従ってフィルタを分類する。

$$ePM_x = \frac{\sum_{i=1}^n E_{A,i} \cdot q_3(\ln \bar{D}_{pi}) \cdot \Delta \ln D_{pi}}{\sum_{i=1}^n q_3(\ln \bar{D}_{pi}) \cdot \Delta \ln D_{pi}} \quad (3-4)$$

ここで、 \bar{D}_{pi} は測定区分の幾何平均で、標準的粒径分布 q_3 として、 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} の計算では都市部の粒径分布を、 PM_{10} の計算では郊外の粒径分布を使用する。 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 、 PM_1 に対しては様々な定義があるが、ISO16890 の規格では添え字の数字で示す粒径以下の大気塵粒子として定義されており、それぞれの粒径の粒子に対する捕集効率を ePM_x として表記することとされている。本節では、粒径 0.3 μm 以上の粒子の総合捕集効率を評価するため、粒径範囲が広い郊外大気の粒径分布に対する粒子状物質捕集率 ePM_{10} を評価した。

以上を整理すると、回転フィルタを中性能フィルタ(TDWP-90)として応用するためには、以下の 2 つの条件を同時に満たす必要がある。

1. 定格風量 $56 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ における、初期圧力損失は 59 Pa
2. 捕集効率 $e\text{PM}_{10}$ が 0.9 以上

Figure 3-10 は、フィルタ外半径をフィルタ厚みに対してプロットした理論推定線である。ここで、圧力損失を小さくするため、繊維径は $50 \mu\text{m}$ 、充填率は 0.003 を選択し、 59 Pa を満たすフィルタ外半径およびフィルタ厚みの条件を求めた。理論上、図に示す曲線上の点(L, R_2)の寸法の回転フィルタを設計することで、中性能フィルタの圧力損失の条件を満たすことが可能である。

次に、Figure 3-11 は、捕集効率 $e\text{PM}_{10}$ を回転速度に対してプロットした理論推定線である。図からわかるように、大きい回転フィルタ($L = 100 \text{ mm}, R_2 = 286 \text{ mm}$)の場合、約 8500 rpm で捕集効率 0.9 を達成できる。しかし、フィルタろ材が大きく、高速回転させるには現実的ではない。それに対して、小さい回転フィルタ($L = 25 \text{ mm}, R_2 = 143 \text{ mm}$)の場合、捕集効率 0.9 を達成するにはフィルタろ材を約 47000 rpm 回転させる必要があり、回転速度が大きく現実的ではない。中程度の大きさの回転フィルタ($L = 50 \text{ mm}, R_2 = 202 \text{ mm}$)の場合、フィルタろ材を約 20000 rpm 回転させることで捕集効率 0.9 を達成することができる。以上のことから、回転フィルタの寸法または回転速度が大きいため、対象とした中性能フィルタへの回転フィルタの応用が困難であることがわかった。この原因として、ラボスケールの操作条件と異なる大きい流量に回転フィルタが対応できていないこと、今回対象とした中性能フィルタの捕集効率(0.9)の条件が目標値として高かったことが挙げられる。そこで、目標値とする捕集効率を 0.8 と下げ、さらに小流量条件で運転すると仮定した場合の、回転フィルタのエアフィルタとしての実現性について検討した。

寸法を先ほどの小さい回転フィルタと同じ場合の、小流量 $2.0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-3}$ と大流

量 $56 \text{ m}^3 \text{ min}^{-3}$ での推定結果と比較した結果を Figure 3-12 に示す。図に示すように、流量を小さくすることで、理論的には 8900 rpm と先ほどよりも小さい回転速度で 90% の粒子の捕集が可能である。また、対象とする捕集効率を 0.8 とすると、約 5000 rpm で条件を達成することができ現実的な回転速度である。流量が小さいエアフィルタを用いた製品では空気清浄機があり、一般的に風量は数 $\text{m}^3 \text{ min}^{-3}$ の範囲である。以上の結果から、回転フィルタは大流量条件で使用される中性能フィルタへの応用は難しいものの、対象とする捕集効率を調整することで、小流量条件で運転される空気清浄機などの一般換気用エアフィルタへの応用が期待できることがわかった。

Table 3-2 Bimodal particle size distribution of standard atmospheric dust.

Fine mode			Coarse mode		
	A	B		A	B
$D_{p50, u} [\mu\text{m}]$	0.3	10	$D_{p50, s} [\mu\text{m}]$	0.25	11
$\sigma_{g, u}$	2.2	3.1	$\sigma_{g, s}$	2.2	4
y_u	0.45		y_s	0.18	

$D_f = 50 \mu\text{m}$, $\alpha = 0.003$, $R_1 = 10 \text{ mm}$, $Q = 56 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$, $\Delta P = 59 \text{ Pa}$

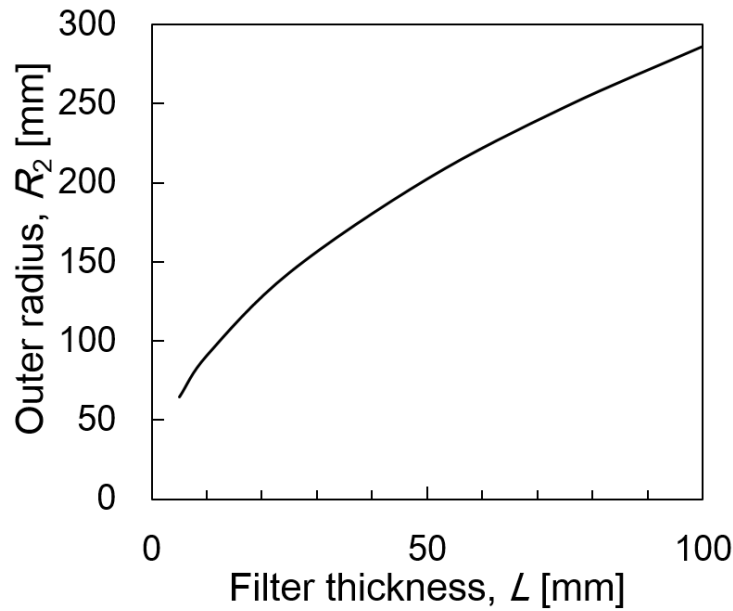


Figure 3-10 Outer radius against filter thickness when pressure drop is 59 Pa.

$D_f = 50 \mu\text{m}$, $\alpha = 0.003$, $R_1 = 10 \text{ mm}$, $Q = 56 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$, $\Delta P = 59 \text{ Pa}$

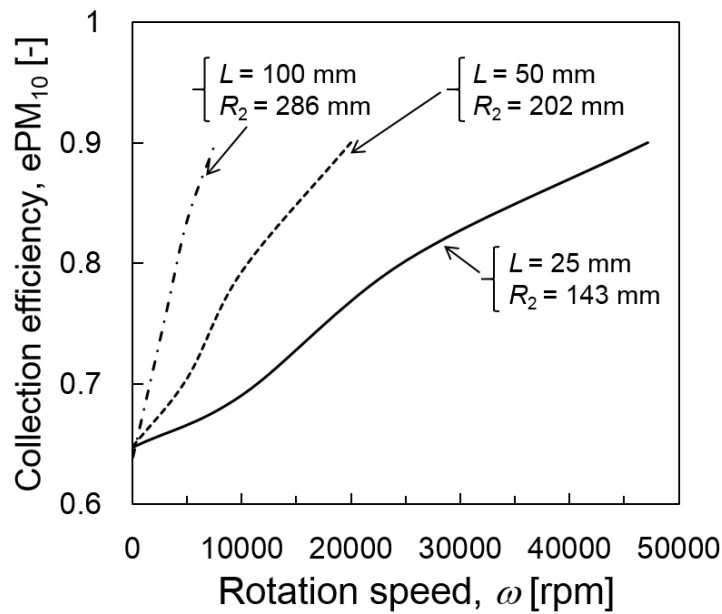


Figure 3-11 Collection efficiency, $e_{PM_{10}}$, against rotation speed when pressure drop is

59 Pa.

$D_f = 50 \mu\text{m}$, $\alpha = 0.003$, $R_1 = 10 \text{ mm}$, $R_2 = 143 \text{ mm}$, $L = 25 \text{ mm}$

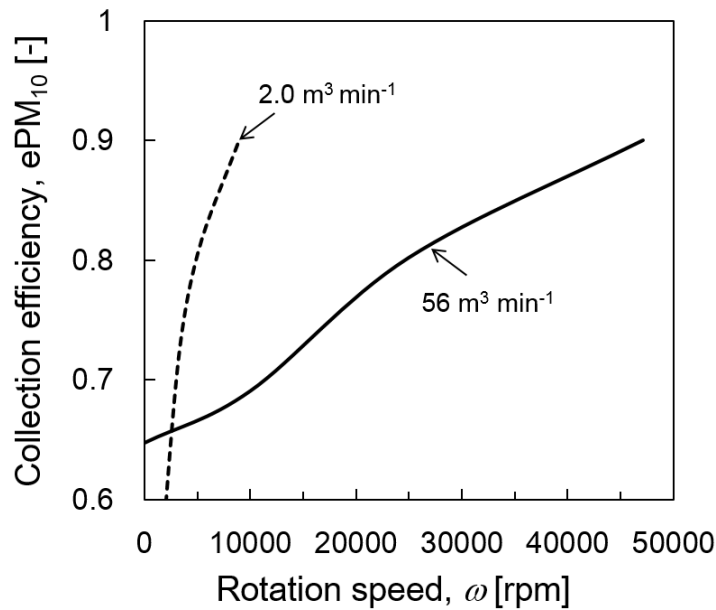


Figure 3-12 Collection efficiency, ePM₁₀, against rotation speed ($Q = 2.0, 56 \text{ m}^3 \text{ min}^{-3}$).

3-5 まとめ

本章では、粒子捕集に作用する新たな外力として遠心力を加算し、繊維層を回転させながら粒子を捕集する、新しいエアフィルタである Holder rotation type の回転フィルタを提案・開発した。Holder rotation type では、繊維径 10~50 μm 、ろ過速度 2.5~15 cm sec^{-1} の幅広い範囲で回転フィルタを用いた場合、機械的な捕集機構に加えて粒子に遠心力が作用することで捕集効率が向上することを実験的に確かめられた。以下に、結論を示す。

1. Holder rotation type の回転フィルタは、フィルタろ材を回転させることで、圧力損失を大きく増加させずにサブミクロン以上の粒子の捕集効率を大幅に向上させることが可能である。

2. 捕集効率 E が対数透過則に従うことを明らかにした。この結果より、従来から用いられている単一繊維捕集理論および対数透過則を、回転フィルタの設計に用いることが可能だといえる。
3. 回転フィルタは、HEPA フィルタのように捕集効率が高い条件、または定格流量ほどの大流量条件で運転するには適していない。しかし、対象とする粒子状物質捕集率 ePM_{10} を調整そして小流量条件にすることで回転フィルタの運転が現実的になり、風量が数 $m^3 \text{ min}^{-3}$ の範囲で運転される空気清浄機である一般換気用エアフィルタへの応用が期待できる。

第4章 回転フィルタのミスト捕集への応用

従来のフィルタでは、繊維層に蓄積した液滴が合一して再飛散しまう。そこで本研究では、この問題の解決法として、回転フィルタ内に設置されたフィルタのみを回転させることでエアロゾル粒子を捕集する **Filter rotation type** の回転フィルタをミスト捕集へ応用することにした。**Filter rotation type** の回転フィルタは、フィルタを回転させることで、繊維層に蓄積した液滴を遠心力によって外側に移動させ、再飛散させた後にミストを回収する。これにより、蓄積したミストの効果的な捕集が期待できる。本章では、まず、**Filter rotation type** の回転フィルタの設計を行い、次に、固体粒子を試験エアロゾル粒子とした実験では、捕集効率および圧力損失を実験的および理論的に評価することで、フィルタ内に流体が通過するかについて評価した。ミストを試験エアロゾル粒子とした実験では、回転フィルタの捕集効率を実験的および理論的に評価した。最後に、フィルタを回転させたときのホールドアップ量の変化について実験的に評価した。

4-1 回転フィルタ(**Filter rotation type**)の設計

Filter rotation type の回転フィルタの概略図を Figure 4-1 に示す。Figure 4-1 に示すように、フィルタろ材は回転フィルタの中心に設置されており、フィルタろ材をフィルタカートリッジ内に入れ回転フィルタ内に固定し、中心のフィルタカートリッジとフィルタろ材が一緒に回転するような構造となっている。フィルタと壁の間には隙間には隙間を設けており、フィルタろ材を回転させることで生じた遠心力により繊維層内に蓄積された液滴が円周方向に移動し、最終的に外壁に向かって再飛散させた液滴を回収することが目的である。ここで、液滴

の回収には、フィルタろ材下に設置したドレイン部で連続的に回収できるような構造となっている。しかし、Filter rotation type では、導入されたエアロゾル粒子が壁とフィルタろ材の隙間を通過することで、フィルタろ材内にエアロゾル粒子が通過しない可能性が考えられる。したがって、フィルタろ材を通過する空気の割合を制限することで、エアロゾル粒子をいかにフィルタろ材内へ通過させられるかが重要な課題である。このことから我々は、1. 入り口とフィルタまでの隙間を小さく設計する、2. フィルタと壁の隙間を小さく設計する、3. この入り口と出口の 2 カ所にオリフィスを設置することで、フィルタ内へ流体が通過するよう試みた。

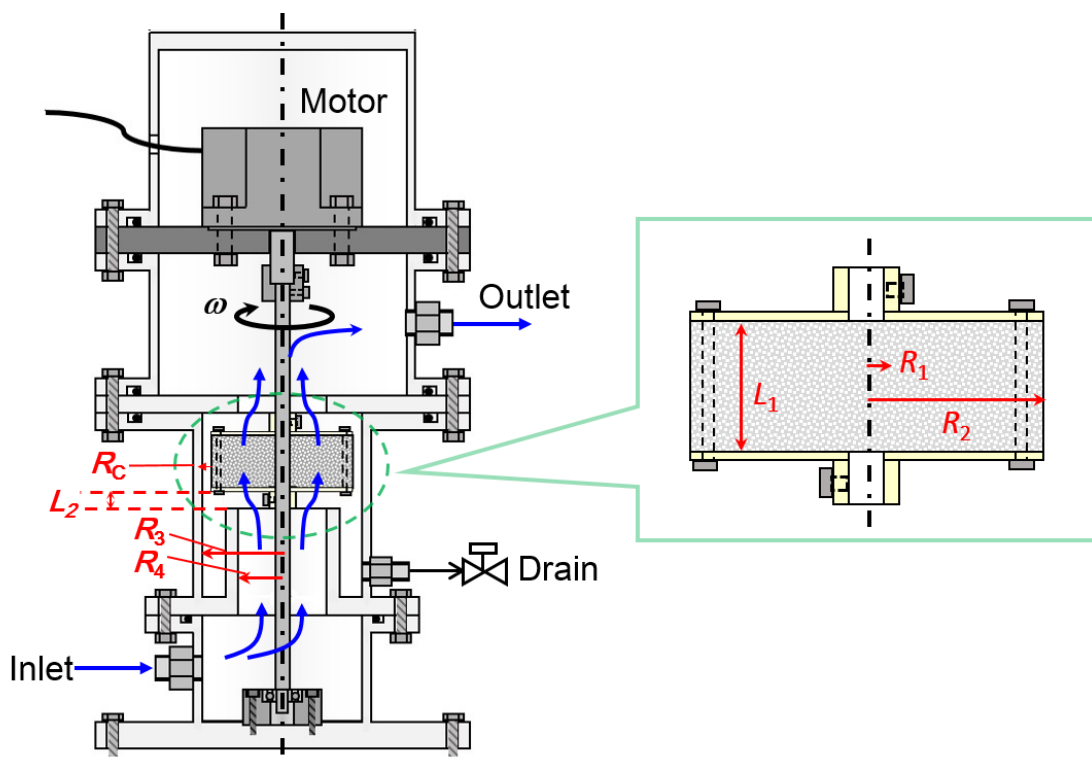


Figure 4-1 Schematic diagram of Filter rotation type centrifugal filter.

4-2 固体粒子を用いた性能評価

実験経路図を Figure 4-2 に示す。フィルタ内半径 4 mm は、フィルタ外半径 40 mm は、フィルタの厚さ 20 mm、フィルタとオリフィスまでの長さは 15 mm である。試験粒子は、粒径 0.814 と 1.694 μm の PSL の単分散粒子を用いた。PSL の懸濁液を ATM により噴霧し、ディフュージョンドライヤーにより乾燥させた後に、回転フィルタ内に導入させ、フィルタを回転させることで粒子を捕集した。ここで、空塔速度 2.5~15 cm sec^{-1} 、回転速度 0~2000 rpm の条件で実験を行った。回転フィルタの寸法および実験条件を Table 4-1 に示す。

本実験では、回転フィルタのフィルタろ材として、繊維径 140 μm および 240 μm のウレタンの多孔質フィルタを用いた。フィルタの厚みは、ノギスを用いて 5箇所計測し、その平均値を用いた。充填率は Eq. (4-1) で表され、

$$\alpha = \frac{M_{\text{average}}}{\rho_F V} \quad (4-1)$$

$$V = LW^2 \quad (4-2)$$

ここで、 M_{average} は汎用電子天秤 (FX-1200i; A & D Company) により計量されたフィルタ質量の平均値、 ρ_F はろ材の密度、 W はフィルタ幅、そして V はフィルタの厚み L とフィルタ幅 W から計算されたフィルタの体積である。ウレタンフィルタの構造は、光学顕微鏡を用いて観察し、光学顕微鏡により観察したフィルタの画像を Figure 4-3 に示す。繊維径の計測は、画像処理ソフトウェア (image processing program, Image J) を用いて 50 枚の画像を撮影し、各画像で 3 点を計測し、その平均値を繊維径とした。

Table 4-1 Dimensions of centrifugal filter and experimental condition.

Inner radius, R_1 [mm]	4
Outer radius, R_2 [mm]	40
Filter thickness, L [mm]	20
Packing density, α [-]	0.03
Fiber diameter, D_f [μm]	140, 240 (Urethane)
Air velocity, u [cm sec^{-1}]	2.5~15
Rotation speed, ω [rpm]	0~2000
Test particle	PSL
Particle diameter, D_p [μm]	0.814, 1.694

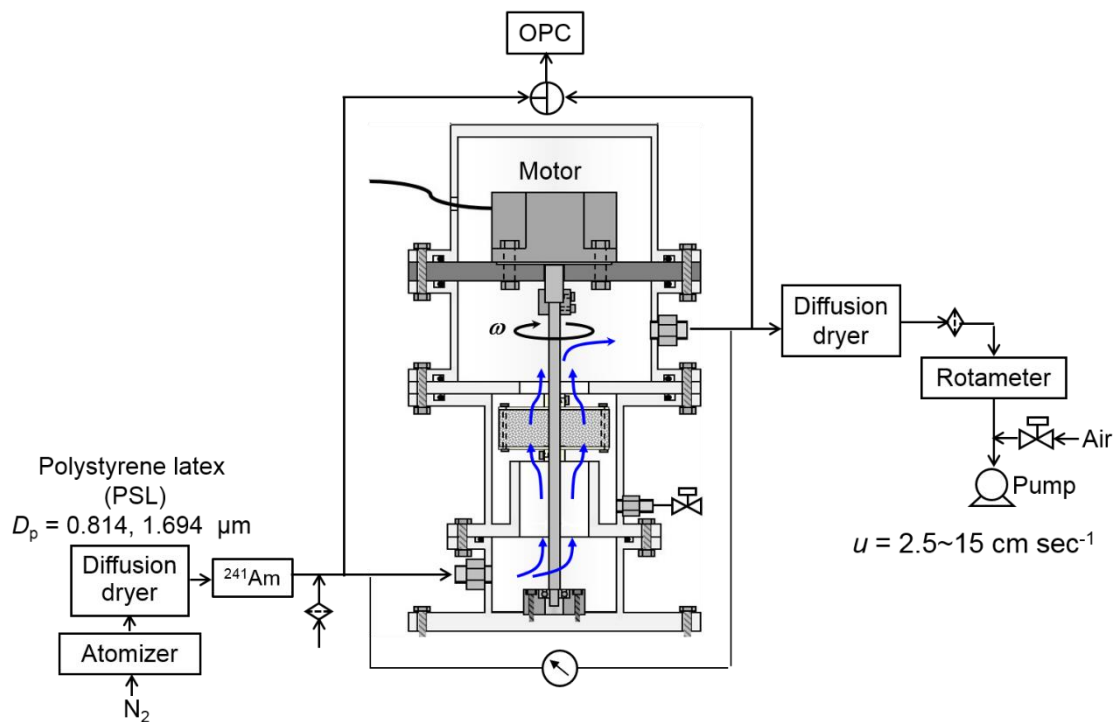
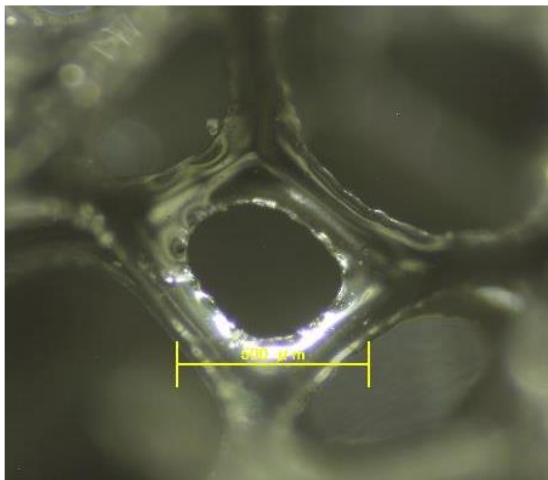


Figure 4-2 Experimental setup to evaluate particle filtration performance.

(a) 140 μm



(b) 240 μm

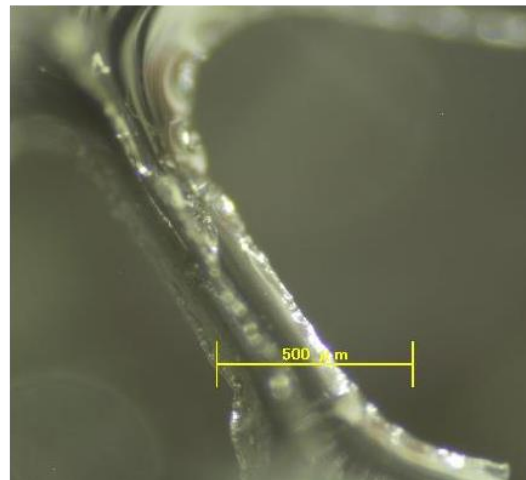


Figure 4-3 Optical microscopic images of urethane filter.

4-3 実験結果

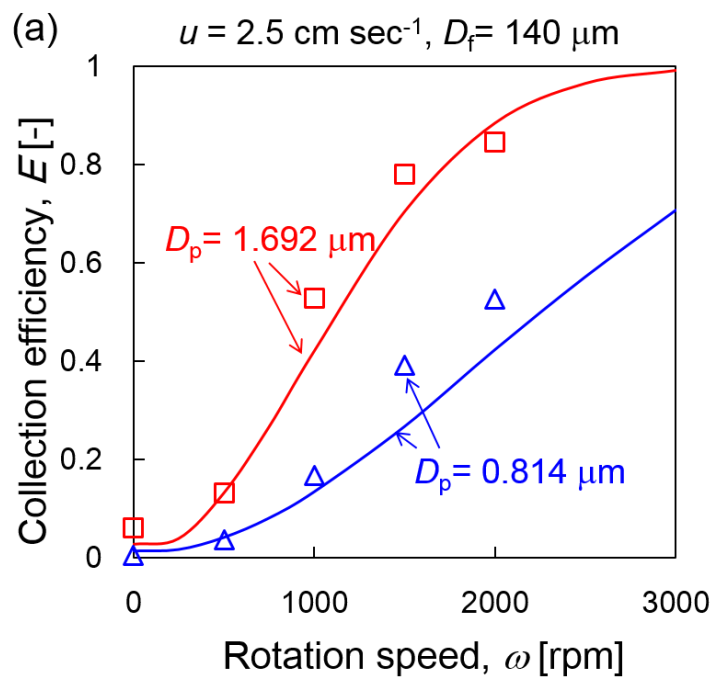
4-3-1 捕集効率

空塔速度 $2.5\sim 7.5\text{ cm sec}^{-1}$ 、繊維径 $140\ \mu\text{m}$ のフィルタで粒径 0.814 および $1.694\ \mu\text{m}$ の PSL 試験粒子を捕集したときの、捕集効率を回転速度に対してプロットした図を Figure 4-4 に示す。Figure 4-4 に示すように、回転速度の増加とともに捕集効率が向上することがわかり、Holder rotation type と同様の傾向が得られた。次に、先ほどの実験結果を実線で示す理論推算値と比較した。ここで理論推算値は、Holder rotation type で使用した理論式 Eq. (2-7) を基にして、Filter rotation type に隙間が無いと仮定して計算を行った。図からわかるように、実験結果と理論推算値が良い一致を示すことがわかった。

空塔速度 2.5 cm sec^{-1} 、繊維径 $140\ \mu\text{m}$ および $240\ \mu\text{m}$ のフィルタを用いて粒径 $1.694\ \mu\text{m}$ の PSL 粒子を捕集したときの、捕集効率に対して回転速度をプロット

した図を Figure 4-5 に示す。実線は理論推算値を示している。図に示すように、繊維径を $240\ \mu\text{m}$ と粗大にしても理論推算値が実験結果と良く説明できていることがわかる。

以上の Figure 4-4 および Figure 4-5 から、隙間が存在する Filter rotation type の回転フィルタのフィルタろ材内に、流体をほぼ通過させてエアロゾル粒子を捕集することが出来ることがわかった。



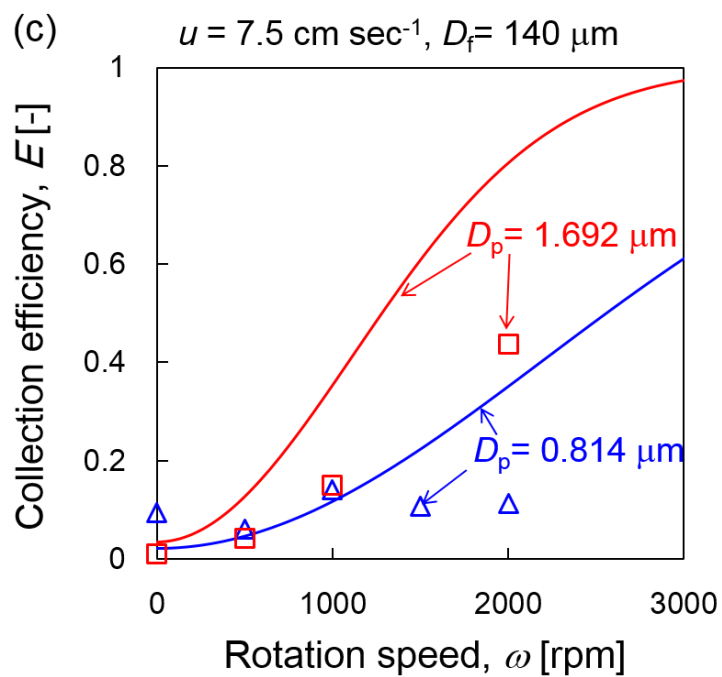
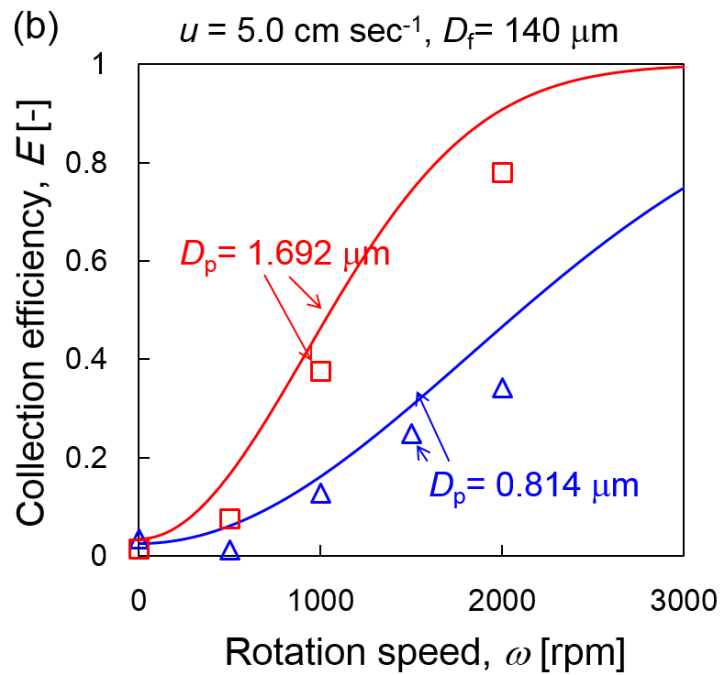


Figure 4-4 Collection efficiency of rotation type centrifugal filter against rotation speed ($\alpha = 0.03$). Curves are predicted by Eq. (2-7), symbols are experimental data.

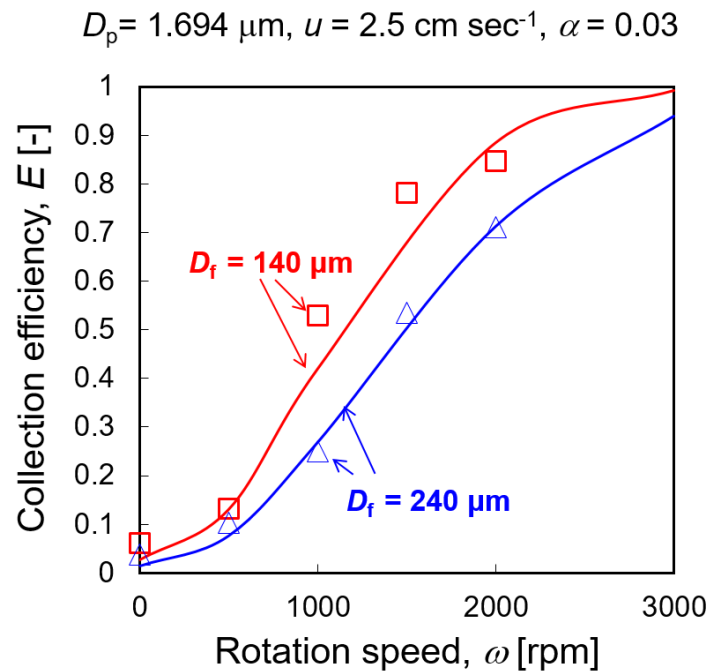


Figure 4-5 Collection efficiency against rotation speed with fiber diameter as parameter.

4-3-2 圧力損失

空塔速度を $2.5 \sim 15 \text{ cm sec}^{-1}$ まで変化させたときの、圧力損失をフィルタの回転速度に対してプロットした図を Figure 4-6 に示す。Figure 4-6 に示すように、空塔速度の増加とともに圧力損失が増加した。しかし、回転速度を変化させても、圧力損失は変化しなかった。

以上の Figure 4-4～Figure 4-6 から、Filter rotation type でも Holder rotation type と同様、フィルタを回転させることで圧力損失を大幅に増加させずに捕集効率を大幅に向上させることが可能であるといえる。

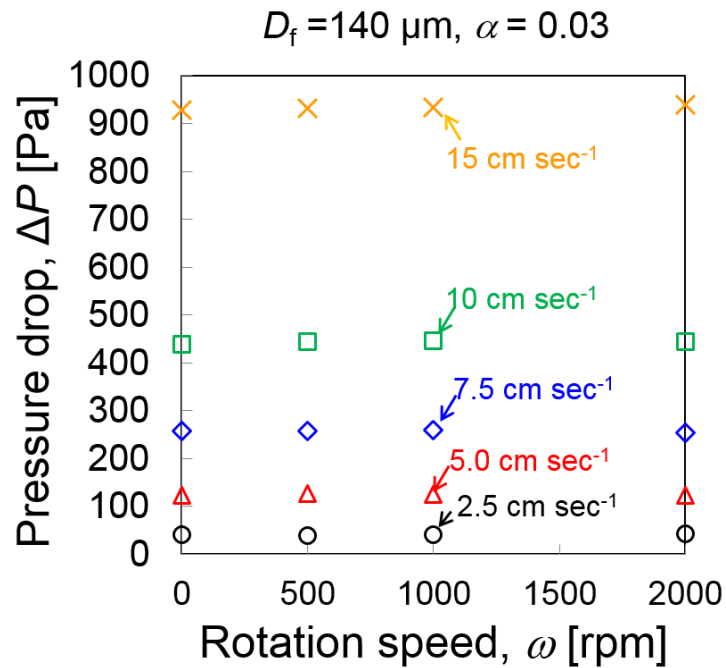


Figure 4-6 Pressure drop as a function of rotation speed.

4-4 ミスト捕集性能評価

4-5 実験装置および方法

ミスト捕集実験の実験経路を Figure 4-7 に示す。試験液滴は、質量濃度 1.0 wt% の NaCl 水溶液の液滴を採用し、捕集効率を求めるために用いた。NaCl 水溶液は ATM により噴霧し、空気により希釈した後に液滴を回転フィルタへと導入した。そして、回転フィルタ内に設置したフィルタろ材を回転させることで液滴を捕集した。空塔速度は 2.5 および 5.0 cm sec⁻¹、回転速度は 0~2000 rpm の条件で実験を行った。実験条件を Table 4-2 に示す。また、光学顕微鏡により観察したフィルタの画像を Figure 4-8 に示す。繊維径の計測および平均値の算出は、ウレタンフィルタと同様の手法で行った。

ここで、液滴の粒径分布は、ディフージョンドライヤーにより乾燥された NaCl 粒子を、DMA と CPC によって計測される回転フィルタの上流と下流の粒子の粒径分布を、液滴の粒径分布へ計算によりかけ戻すことで求めた。これは、液滴の粒径分布は Eq. (4-3)に従うため、固体の NaCl 粒子の粒径分布を計測した後に Eq. (4-3)から NaCl 水溶液の液滴の粒径分布を計算により求めた。

$$D_d = D_p \left(\frac{\rho_p}{x_{NaCl} \rho_l} \right)^{1/3} \quad (4-3)$$

ここで、 D_d は液滴径、 x_{NaCl} は NaCl 粒子の質量分率、 ρ は液滴の密度である。粒子の粒径分布および Eq. (4-3)から算出された液滴の粒径分布を Figure 4-9 に示す。図のように、適切な濃度の NaCl 水溶液の濃度を採用し液滴を乾燥させることで、ミクロンサイズの範囲の粒径分布の試験液滴を調整した。

Filter rotation type の回転フィルタの入り口および出口における液滴の粒径分布を Figure 4-10 に示す。図からわかるように、回転フィルタ内で無視できない量 (14%)の液滴が損失していることがわかった。したがって、回転フィルタの液滴の捕集効率を求める際には、Eq. (4-4)を用いて計算した(Porstendörfer, J. *et al.*, 1977; May, K. R., 1973)³¹⁾³²⁾。

$$E = 1 - \frac{N_{out}}{N_{w/o\ filter}} \quad (4-4)$$

ここで、 $N_{w/o\ filter}$ は回転フィルタ内にフィルタろ材を設置せずに出口から計測された液滴の個数濃度である。

Table 4-2 Physical properties of test filter and experimental conditions.

Inner radius, R_1 [mm]	4
Outer radius, R_2 [mm]	42.5
Filter thickness, L [mm]	30
Packing density, α [-]	0.013
Fiber diameter, D_f [μm]	42 (PET)
Air velocity, u [cm sec^{-1}]	2.5, 5
Rotation speed, ω [rpm]	0~2000
Test particle	NaCl droplets

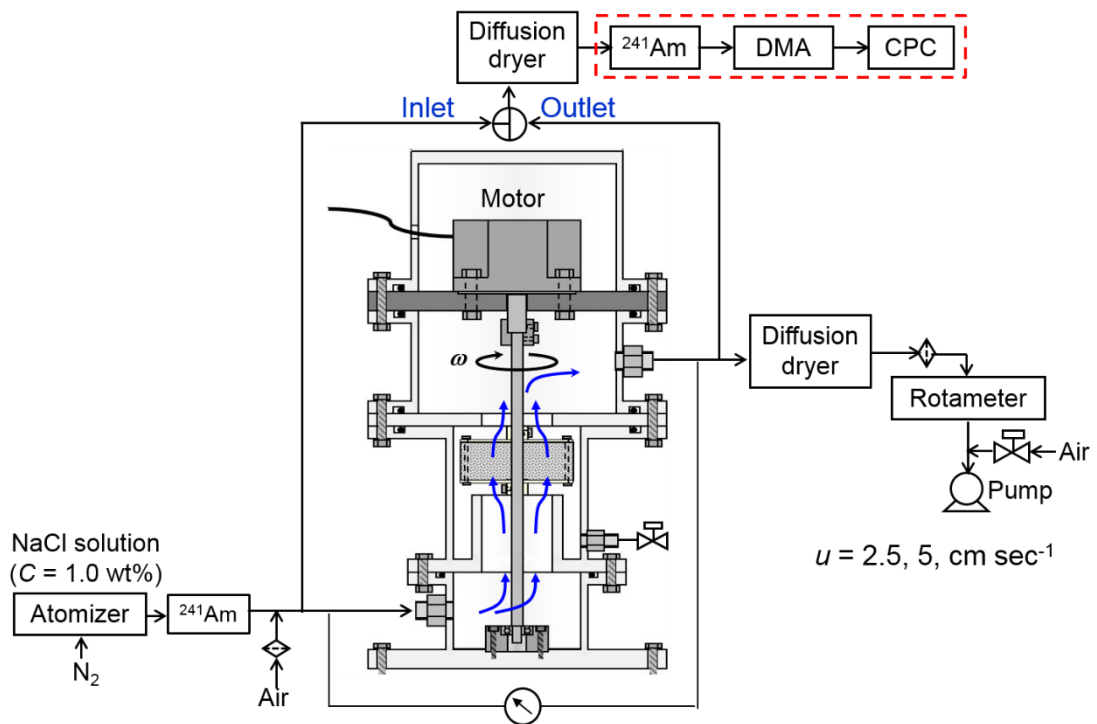


Figure 4-7 Experimental setup to evaluate mist filtration performance.

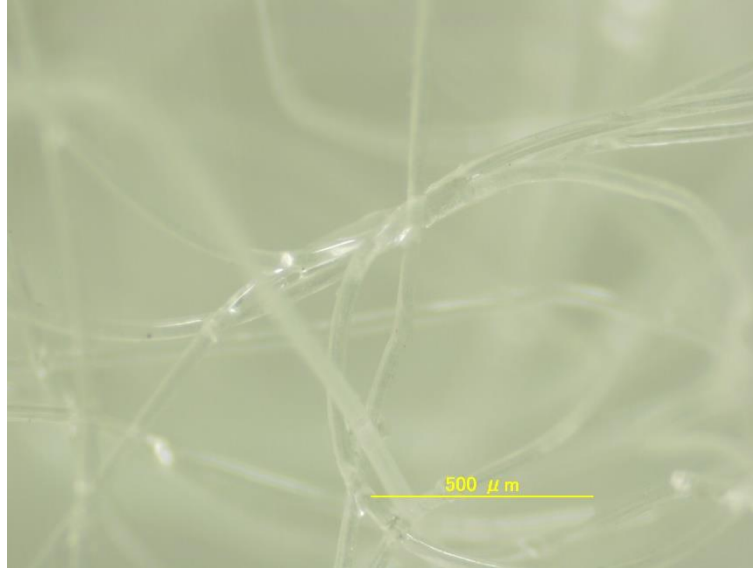


Figure 4-8 Optical microscopic images of PET filter.

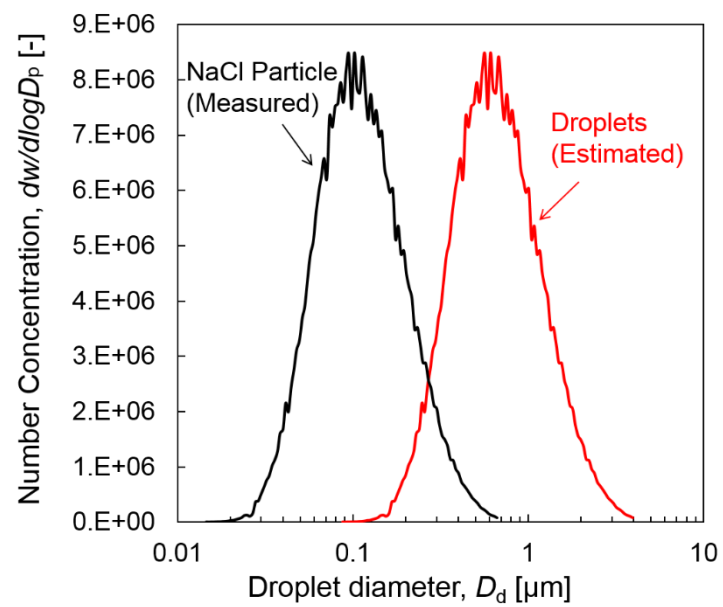


Figure 4-9 Size distributions of measured NaCl particles and calculated NaCl droplets at $u = 2.5 \text{ cm sec}^{-1}$.

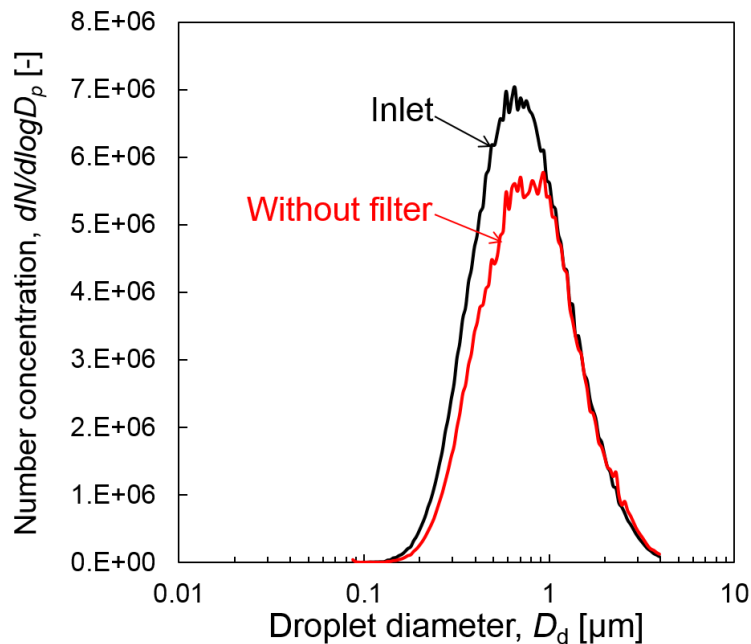


Figure 4-10 Droplet size distributions of inlet and outlet without installation of filter media in device at $u = 2.5 \text{ cm sec}^{-1}$.

4-6 実験結果

4-6-1 捕集効率

空塔速度が 2.5 および 5.0 cm sec^{-1} における、捕集効率を粒径に対してプロットした図を Figure 4-11 に示す。Figure 4-11 (a)に示すように、フィルタろ材を回転させない場合、ほとんど液滴を捕集できていないことが分かる。しかし、フィルタろ材を 1000 、 2000 、 3000 rpm の回転速度で回転させると、捕集効率が大幅に向上することが分かった。また、Figure 4-11 (b)に示すように、空塔速度が 5.0 cm sec^{-1} と大きくした場合も回転速度への依存性がみられ、特に、ミクロンオーダーの範囲で液滴を捕集できることがわかった。サブミクロンオーダーの範囲

の液滴が捕集できなかつたのは、粒径が小さく遠心力が効果的に作用しなかつたと考えられる。(Nakajima S. *et al.* 2015)²³)。Figure 4-11 の実験結果を明らかにするために、実験結果と理論推算値を比較した。単一繊維捕集効率を基にして捕集効率を推算し、先ほどの実験結果と推算値を比較した図を Figure 4-12 に示す。実線が理論推算値を示している。Figure 4-12 (a)に示すように、回転フィルタの捕集効率は理論推算値よりも全体的に小さくなった。また、速度条件を変化させた Figure 4-12(b)でも同様の傾向が見られ、この原因として、回転フィルタに導入される前に経路内で液滴が乾燥空気と混合されることにより液滴が蒸発し、液滴径が減少したからだと推察した。これを確かめるため、実験値を小粒径側にシフトさせ推算値と比較した結果、Figure 4-13 に示すように、液滴が 40%蒸発したときに推算値と実験値は良い一致を示した。この結果から、40%の液滴の蒸発が一致しなかつた原因であると示唆された。

混合空気の状態は、液滴の蒸発と液滴径分布に強く影響を与える。したがって、蒸発速度と液滴径分布の変化率を特定することは困難である。今後、Filter rotation type の回転フィルタをミスト捕集へ応用するためには、周辺環境の空気の状態および生成されたミストの液滴径分布の変化との関係について研究する必要がある。

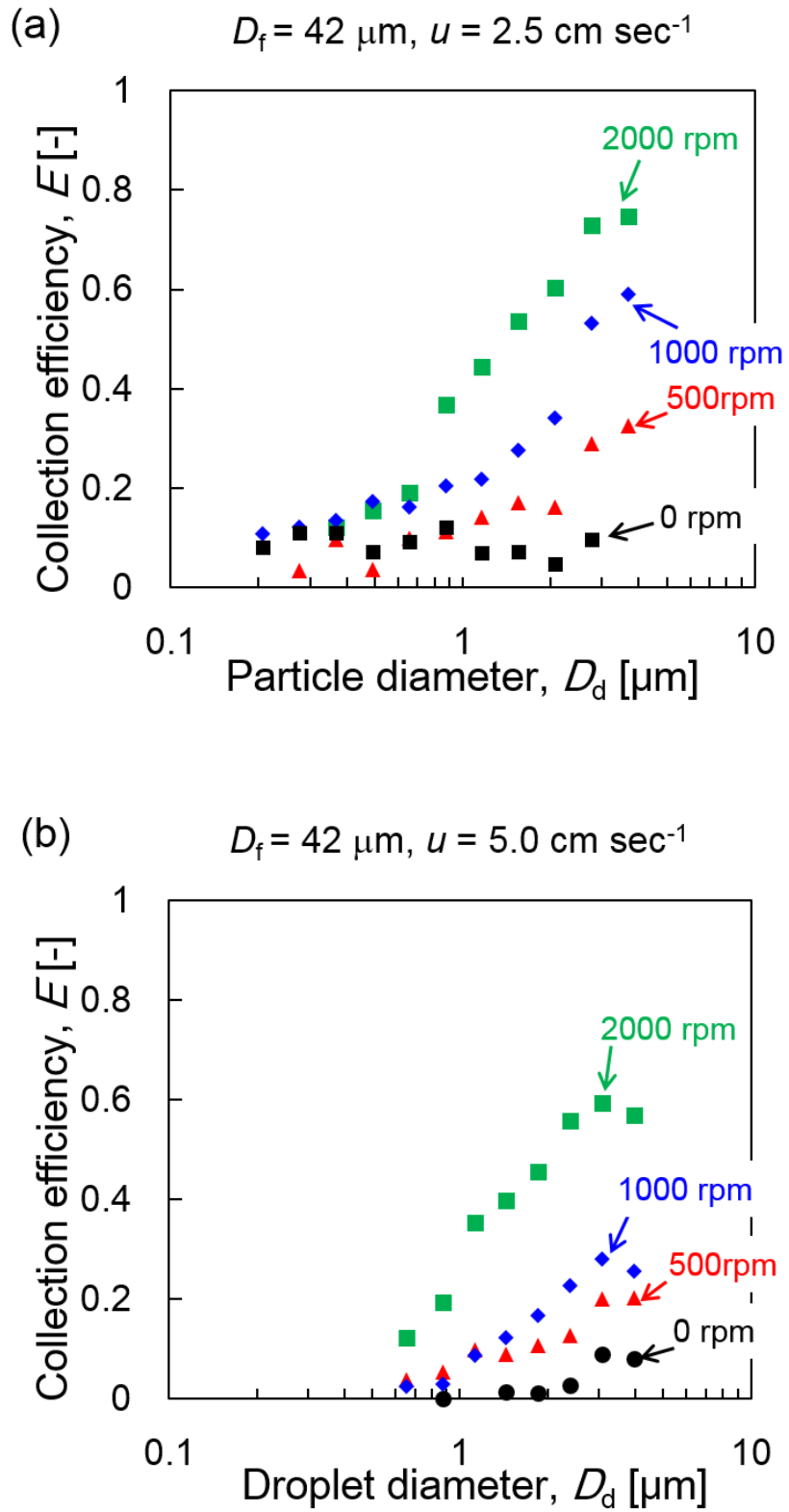


Figure 4-11 Mist collection efficiency as a function of droplet diameter.

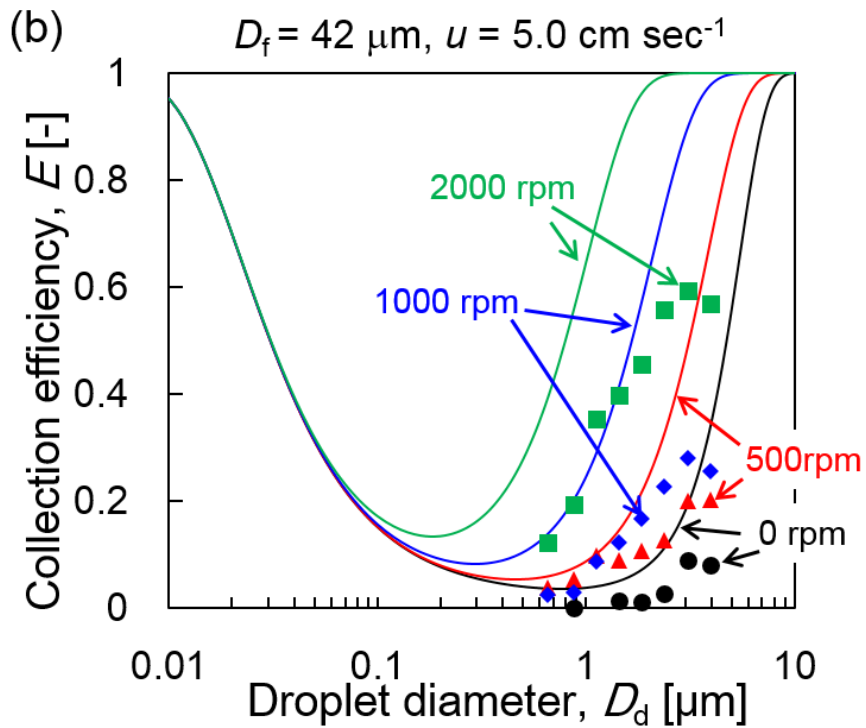
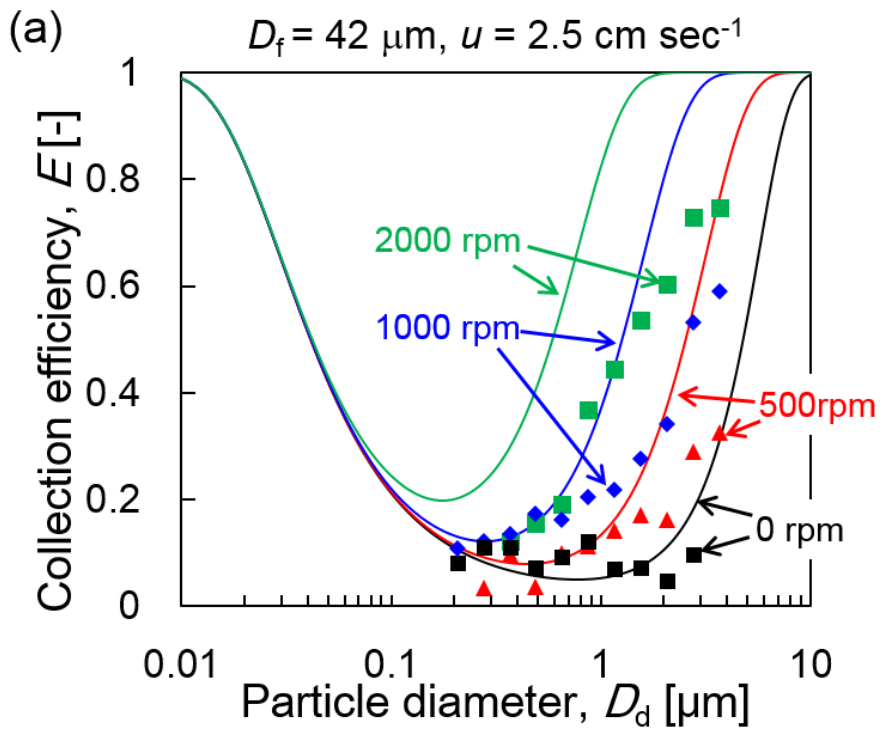


Figure 4-12 Predicted line of mist collection efficiency.

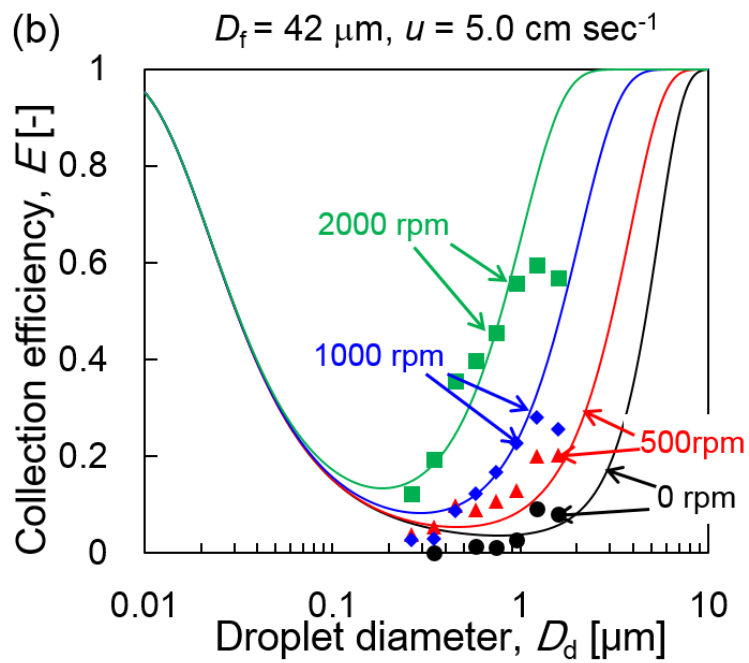
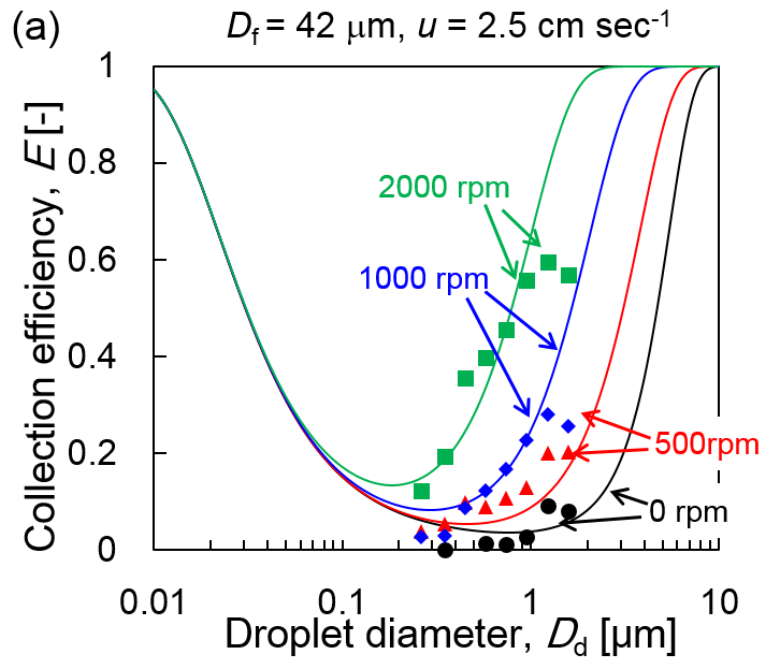


Figure 4-13 Collection efficiency accounting for 40% reduction in droplet diameter.

4-6-2 ホールドアップ量

Filter rotation type の回転フィルタの液滴除去性能を評価するために、異なる回転速度でフィルタろ材を回転させた後のホールドアップ量について評価した。NaCl 水溶液(1.0 wt%)に浸したフィルタろ材を回転フィルタに設置し、フィルタは所定の速度($0 \text{ rpm} < \omega < 2000 \text{ rpm}$)で3分間回転させ、回転させた後にフィルタろ材を汎用電子天秤(FX-1200i; A & D Company)により計量した。ここで、空塔速度は 15 cm sec^{-1} である。ホールドアップ量は、回転後のフィルタろ材の質量と乾燥状態のフィルタろ材の質量を比較することで評価した。

ホールドアップ量を回転速度に対してプロットした図を Figure 4-14 に示す。Figure 4-14 に示すように、フィルタろ材を 2000 rpm の回転速度で回転させることで、ほとんどの液滴をフィルタ中から除去できることが分かった。次に、空塔速度 15 cm sec^{-1} 、フィルタろ材を 2000 rpm で回転させたときの、液滴が再飛散する様子を映した静止画を Figure 4-15 に示す。図に示すように、フィルタの回転に伴い遠心方向に液滴は再飛散し、外壁に衝突しさらに液滴径が大きくなった液滴が重力の影響により流れ落ちている。

以上の Figure 4-14 および Figure 4-15 の結果から、Filter rotation type の回転フィルタはフィルタろ材を回転させることで、繊維層に蓄積する液滴を遠心方向に再飛散させることで液滴を除去することが可能であり、高い流速条件下でろ過された空気中へのフィルタからの再飛散抑制が期待できる。また、下流部に設置されたドレイン部で液滴の連続的な除去・回収を行うことが可能である。上記の2点は、Filter rotation type の回転フィルタをミスト捕集へ応用する上で大きな利点である。

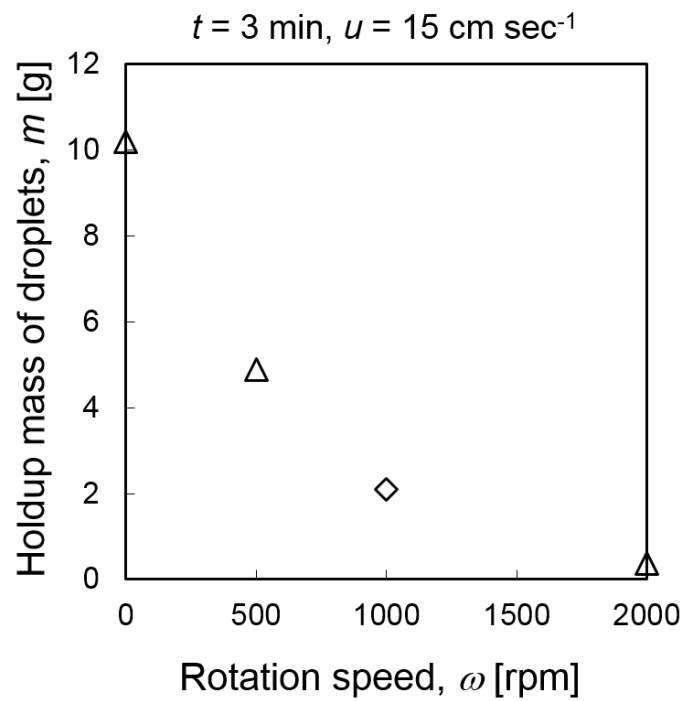


Figure 4-14 Mass of re-entrained and remained solution in filter media after rotation ($D_f = 42 \mu\text{m}$, $R_2 = 42.5 \text{ mm}$, $L = 30 \text{ mm}$).

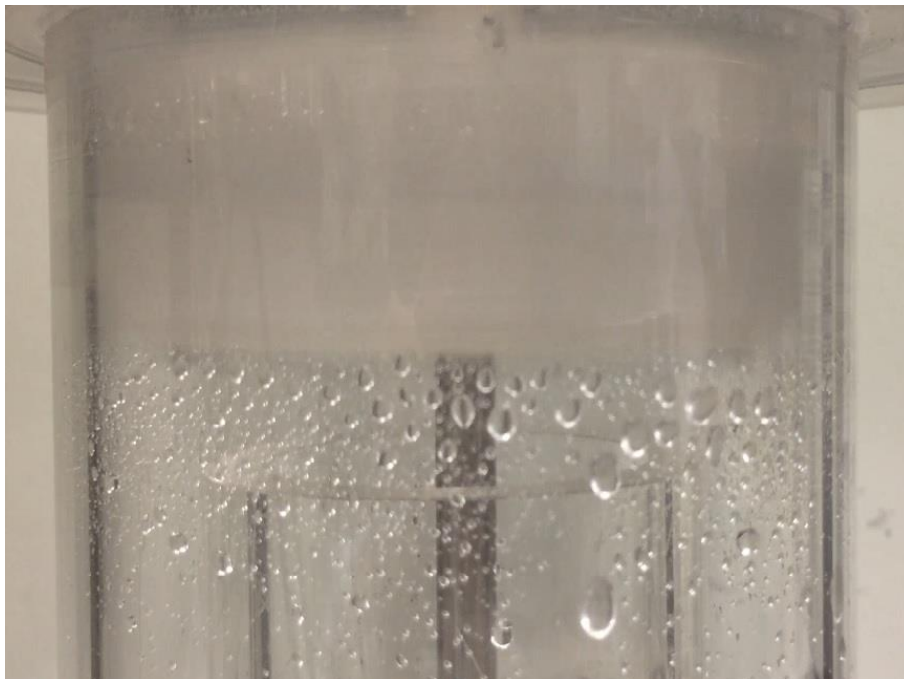


Figure 4-15 Droplets re-entrained to centrifugal direction.

4-7 まとめ

本章では、新しいタイプである Filter rotation type の回転フィルタを提案・開発した。Filter rotation type の回転フィルタでは、フィルタと固定円筒壁との隙間を通過する空気の流れを防止するために、特別な注意を払った。Filter rotation type の回転フィルタでは、以下の結論が得られた。

1. 入り口領域を回転軸の周りに閉じ込め、フィルタろ材と回転フィルタの外壁の隙間を最小限に抑えることにより、ほとんどの空気がフィルタろ材内を通過した。
2. 固体粒子の捕集効率は、圧力損失を増加させずにフィルタろ材の回転により向上させることが出来、理論推算値と良く一致した。
3. 液滴の実験的捕集効率は液滴の蒸発を考慮に入れた推定値と良く一致している。
4. フィルタろ材内に蓄積した液滴は回転速度を大きくすることでほぼ全て除去・回収することができ、今後、Filter rotation type の回転フィルタのミスト捕集への応用が期待できる。

第5章 結言

従来のエアフィルタは、一般的にサブミクロンオーダーの範囲でいずれの捕集機構も効かない、最も捕集しにくい粒径(MPPS)が存在することが知られている。しかし、捕集効率を向上させるためには、圧力損失が同時に増加してしまう。この圧力損失と捕集効率の相反する問題を解決するために、エレクトレットフィルタや繊維を微細化したナノファイバの利用などが挙げられるが、エレクトレットフィルタは、長期間使用時に粒子がフィルタに蓄積することで、捕集効率が急激に低下することが問題点として挙げられ、ナノファイバは製造コストが高く、また均一な繊維充填構造を形成すること困難であることが問題点として挙げられる。そこで本研究では、粒子捕集に作用する新たな外力として遠心力に着目し、繊維充填層を回転させるフィルタである回転フィルタを着想し問題解決に取り組んだ。

次に、回転フィルタの応用としてミスト捕集への応用を試みた。従来のフィルタでは、ミストを捕集した際に、繊維層に蓄積した液滴が合一して再飛散してしまうことが課題である。一方で、回転フィルタをミストの捕集に応用する場合は(Filter rotation type)、回転フィルタ内に設置されたフィルタろ材のみを回転させることで、繊維層に蓄積された液滴を遠心力によって遠心方向に移動・再飛散させた後に回収できるために、ミストの効果的な捕集が期待できる。

以上のことから本研究では、まずラボスケールの回転フィルタ(Holder rotation type)を設計・開発し、試作した装置を用いて回転フィルタの基礎的な特性について実験的および理論的に解析すること、および回転フィルタ(Filter rotation type)のミスト捕集への応用を目的とした。本論文において得られた結果に関して、以下に総括する。

第2章では、回転フィルタのろ過理論について説明した。幅広い速度範囲($0 < u_0 < 2.0 \text{ m sec}^{-1}$)で、フィルタろ材を 3000、6000 rpm と高速回転させれば、サブミクロンの粒子である粒径 $0.5 \mu\text{m}$ の粒子に対して、遠心力が他の捕集機構よりも粒子捕集に優位に作用することが単一繊維捕集理論により予想された。また、圧力損失が小さい太い繊維($D_f = 50 \mu\text{m}$)では、フィルタろ材を回転させない場合、粒子をほぼ捕集できないが、フィルタを 6000 rpm まで回転させることで約 90% の粒子を捕集できると推察された。これらの結果から、回転フィルタを用いることで捕集効率を変えずに MPPS に対する捕集効率の向上が可能であり、太い繊維を用いることで従来よりも低圧力損失で運転が可能であると予想された。また、回転速度を増加させた場合に、単純化した単一繊維捕集効率 $\eta_c = v_c/u_0$ が成立するか検討した結果、回転速度が大きい条件で考慮する必要があることがわかった。本実験では最高回転速度が 3000 rpm であるため、遠心力単一繊維捕集率は $\eta_c = v_c/u_0$ を用いて実験結果と比較した。

第3章においては、フィルタホルダ全体を回転させることにより遠心力を生じさせ、粒子に作用させる Holder rotation type の回転フィルタの性能評価を実験的および理論的に検討した。その結果、繊維状フィルタを回転させることにより、捕集効率の向上を実験的に確かめた。さらに、回転フィルタの捕集効率は、回転速度とろ過速度ならびに繊維径の依存性があり、機械的捕集機構と遠心力を考慮した従来の単一繊維捕集効率を用いた対数透過則によって説明することができ、この結果から、従来のろ過理論を回転フィルタの設計に用いることが可能であることがわかった。また、フィルタの回転による圧力損失の増加が小さかったため、圧力損失を変化させずに回転速度を変えることで捕集効率を向上、または調整することができた。以上のことから、今後、ミストセパレータ、分級器など

多くの分野での回転フィルタの幅広い用途、および回転速度をさらに増加させることによる微小な粒子の分離・捕集への利用が期待できる。回転フィルタは、HEPA フィルタのように捕集効率が高い条件、または定格流量ほどの大流量条件で運転するには適していないが、対象とする粒子状物質捕集率 ePM_{10} を調整して小流量条件にすることにより回転フィルタの運転が現実的になり、風量が数 $m^3 \text{ min}^{-3}$ の範囲で運転される空気清浄機である一般換気用エアフィルタへの応用が期待できる。

第 4 章においては、Filter rotation type の回転フィルタが提案・開発された。Filter rotation type では、フィルタと固定円筒壁との隙間を通過する空気の流れを防止するために特別な注意を払った、入り口の領域をフィルタの回転軸の近くに閉じ込め、フィルタと外壁との間の隙間を最小限に抑えることにより、ほとんどの空気が回転フィルタを通過した。固体粒子の捕集効率は、フィルタを回転させることにより、ほとんど圧力損失を増加させずに大幅に向上した上、理論推算値と良く一致した。ミストの実験的捕集効率は、液滴の蒸発を考慮した予測と良く一致した。これらの結果から、Filter rotation type でも Holder rotation type と同様に遠心力が粒子に作用することにより、粒子を捕集できることがわかった。フィルタろ材内に蓄積した液滴は回転速度を大きくすることでほぼ全て除去・回収することができ、今後、Filter rotation type の回転フィルタのミスト捕集への応用が期待できる。

Nomenclature

A	Cross sectional area	$[\text{m}^2]$
A_f	Cross sectional area of fiber	$[\text{m}^2]$
C_c	Cunningham's slip correction factor	$[-]$
C_D	Drag coefficient	$[-]$
C_{DE}	Effective drag coefficient	$[-]$
D_d	Diameter of droplet	$[\text{m}]$
D_f	Diameter of fiber	$[\text{m}]$
D_p	Diameter of particle	$[\text{m}]$
ΔP	Pressure drop	$[\text{Pa}]$
ΔP_F	Pressure drop of filter	$[\text{Pa}]$
$\Delta P_{\text{w/o filter}}$	Pressure drop of without filter	$[\text{Pa}]$
D	Diffusion coefficient of particle	$[\text{m}^2 \text{sec}^{-1}]$
E	Collection efficiency	$[-]$
F	Fluid drag force	$[\text{N}]$
F_C	Centrifugal force	$[\text{N}]$
F_{ext}	External force	$[\text{N}]$
G	Gravity parameter	$[-]$
g	Acceleration gravity	$[\text{m s}^{-2}]$
h_K	Kuwabara's hydrodynamic factor	$[-]$
k_0	Constant number determined by structure of packed bed	$[\text{m}^{-1} \text{sec}^{-2}]$
L	Filter thickness	$[\text{m}]$
l	Total fiber length per unit filter volume	$[\text{m m}^{-3}]$

M	Mass of filter	[kg]
M_{average}	Average of mass of filter	[kg]
N_{in}	Particle number concentration at inlet of centrifugal filter	[1/m ³]
N_{out}	Particle number concentration at outlet of centrifugal filter	[1/m ³]
$N_{\text{w/o filter}}$	Particle number concentration without filter at outlet of centrifugal filter.	[1/m ³]
Pe	Peclet number	[-]
Q	Volumetric flow rate	[m ³ sec ⁻¹]
q_f	Quariry factor	[Pa ⁻¹]
R	Interception parameter	[-]
r	Rotation radius	[m]
R_1	Inner radius	[m]
R_2	Outer radius	[m]
T	Temperature	[°C]
u	Air velocity	[m sec ⁻¹]
u_0	Filtration velocity	[m sec ⁻¹]
v_C	Terminal settling velocity of centrifugal force	[m sec ⁻¹]
v_t	Terminal settling velocity	[m sec ⁻¹]
V	Volume of filter	[m ³]
v	Velocity of particle	[m sec ⁻¹]
W	Width of filter	[m]
x_{NaCl}	Mass fraction of NaCl	[-]
Z_C	Centrifugal factor	[-]

α	Packing density	[-]
α_{eff}	Effective packing density	[-]
ω	Rotation speed	[rpm]
η	Total single fiber collection efficiency	[-]
η_C	Single fiber collection efficiency of centrifugal force	[-]
η_{DR}	Single fiber collection efficiency of Brownian diffusion and interception	[-]
η_G	Single fiber collection efficiency of gravity	[-]
η_{IR}	Single fiber collection efficiency of inertia and interception	[-]
η_{R}	Single fiber collection efficiency of interception	[-]
λ	Mean free path of gas molecules	[m]
μ	Viscosity of air	[Pa sec]
φ	Stream function of particle	[m ³ sec ⁻¹]
ψ	Stream function of fluid	[m ³ sec ⁻¹]
$\bar{\varphi}_{\text{lim}}$	Dimensionless stream function of fluid along the limiting particle trajectory	[-]
ρ	Density of air	[kg m ⁻³]
ρ_{F}	Density of fiber	[kg m ⁻³]
ρ_{d}	Density of droplet	[kg m ⁻³]
ρ_{p}	Density of particle	[kg m ⁻³]

References

1. Hinds, W. C. (1982). *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*, John Wiley & Sons, New York, p. 198,
2. Yokochi A. (1984). HEPA フィルタに関する最近の動向, 保険物理, 19: 249-258.
3. Turnhout. J.V., Hoeneveld W. J., ADAMSE J. W. C. and Van Rossen L. M. (1981). Electret Filters for High-Efficiency and High-Flow Air Cleaning, IEEE transactions on industry applications, IA-17:240-248.
4. Brown, R.C., Wake, D., Gray, R. and Bostock, G.J. (1988). Effect of industrial aerosol on the performance of electrically charged filter material, Ann. Occup. Hyg., 32:271-294.
5. Romay, F. J., Liu, B. Y. H. and Chae, S. J. (1998). Experimental Study of Electrostatic Capture Mechanisms in Commercial Electret Filters, Aerosol Sci Technol., 28:224-234.
6. Kanaoka, C., Emi, H., Otani, Y., and Iiyama, T. (1987). Effect of Charging State of Particles on Electret Filtration. Aerosol Sci. Technol., 7:1-13.
7. Lee, M. H., Otani, Y., Namiki, N., and Emi, H. (2002). Prediction of Collection Efficiency of High-Performance Electret Filters. J. Chem. Eng. Jpn., 35:57-62.
8. Chazelet, S., Bemer, D., and Gripari, F. (2011). Effect of the Test Aerosol Charge on the Penetration Through Electret Filter. Sep. Purif. Technol., 79:352-356.
9. Otani, Y., Emi, H. and Mori, J. (1993). Initial collection efficiency of electret filter and its durability for solid and liquid particles, KONA Powder and Particle, 11:207-214.

10. Xiao, H., Song, Y., and Chen, G. (2014). Correlation between charge decay and solvent effect for melt-blown polypropylene electret filter fabrics. *J. Electrostat.*, 72:311–314.
11. Hyun-Jin C., Eun-Seon P., Jeong-Uk K., Sung H. K., and Myong-Hwa L. (2015). Experimental Study on Charge Decay of Electret Filter Due to Organic Solvent Exposure. *Aerosol Science and Technology*, 49:977–983.
12. Huang Z.M., Zhang Y.Z., Kotaki M., Ramakrishna S. (2003). A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites, *Composites Science and Technology*, 63: 2223–2253.
13. Barhate, R.S. and Ramakrishna, S. (2007). Nanofibrous filtering media: Filtration problems and solutions from tiny materials, *J. Membrane Sci.*, 296:1-8.
14. Kalayci, V. E., Patra, P. K., Kim, Y. K., Ugbolue, S. C. and Warner, S. B. (2005). Charge consequences in electrospun polyacrylonitrile (PAN) nanofibers, *Polymer*, 46: 7191-7200.
15. Sintokogio, Ltd. Website,
<http://www.sinto.co.jp/product/environment/kogatasyuzin/dusmic/mxa/index.html>
(in Japanese, accessed 18 June, 2015).
16. Kanaoka, C., Emi, H., Fujii, N. and Yamaguchi, M. (1982). Collection and Re-Entrainment of Mist Particles from a Fibrous Filter, *Kagaku Kougaku Ronbunshu*, 8:624-628.
17. Shimazu, K. (2017). 回転フィルタを用いたエアロゾルの粒子径分布測定, 修士論文, 1-47.
18. Stechkina, I. B. and Fucks, N. A. (1966). Studies on Fibrous Aerosol Filters—I. Calculation of Diffusional Deposition of Aerosols in Fibrous Filters, *Aerosol Sci.*

- Technol., 9:59-64.
19. Kuwabara, S. (1959). The forces experienced by randomly distributed parallel circular cylinders or spheres in a viscous flow at small Reynolds numbers, *J. Phys. Soc. Jpn.*, 14:527-532.
 20. Kirsch, A. A. and Stechkina, I. B. (1978). *Fundamental of aerosol science*, D. T. Shaw, eds, John Wiley & Sons, New York, 164-205.
 21. Stechkina, I. B., Kirsch, A. A. and Fuchs, N. A. (1969). Studies on Fibrous Aerosol Filters—IV Calculation of Aerosol Deposition in Model Filters in the Range of Maximum Penetration, *Ann. Occup. Hyg.*, 12:1-8.
 22. Yoshioka, N., Emi, H., Kanaoka, C. and Yasunami, M. (1972). Collection efficiency of aerosol by an isolated cylinder -Gravity and Inertia Predominant Region, *Kagaku Kougaku*, 36:313-319.
 23. Nakajima, S., Kumita, M., Matsushashi, H., Higashi, H., Seto, T. and Otani, Y. (2015). Centrifugal Filter for Aerosol Collection. *Aerosol Science and Technology*, 49(10), 959-965.
 24. Langmuir, I. (1942). OSRD Report No.865.
 25. Davies C. N. (1952). *Proc. Inst. Mech. Engrs. (London)*, 131, 185.
 26. Lamb, H. (1932). *Hydrodynamics*, 6th Ed., Cambridge Univ. Pr., p. 612-616.
 27. Chen, C. Y. (1955). *Chem. Revs.*, 55, 174.
 28. Happel, J. (1959). *AIChE J.*, 5, 174.
 29. Kimura N., Iiya K. (1959). *Kagaku-kougaku*, 23, 792.
 30. Kimura N., Iiya K. (1969). *Kagaku-kougaku*, 5, 174.
 31. Porstendörfer, J., Gebhart, J., & Röbig, G. (1977). Effect of evaporation on the size distribution of nebulized aerosols. *Journal of Aerosol Science*, 8(6), 371-380.

32. May, K. R. (1973). The Collison nebulizer: description, performance and application. *Journal of Aerosol Science*, 4(3), 235IN1239-238243.
33. Matsuhashi, H. (2015). ミスト除去用エアフィルタの開発と性能評価, 修士論文.

謝辞

本研究を進めるにあたって、温かい激励と御指導をいただきました、金沢大学理工研究域自然システム学系の大谷吉生教授に心より感謝申し上げます。大谷教授には、本研究を行う機会を与えていただいたと同時に、公私にわたり多く御支援をいただきました。心より感謝申し上げます。そして、本研究を進めるにあたって、研究内容の検討から論文の作成まで、研究全般にわたり懇切かつ細微にわたる御指導をいただきました、金沢大学理工研究域自然システム学系の瀬戸章文教授に深く感謝申し上げます。金沢大学理工研究域自然システム学系の汲田幹夫准教授、東秀憲准教授には、論文の執筆を行うにあたり貴重なご助力をいただきました、心より感謝いたします。

本研究を遂行するにあたっては、金沢大学熱流体・粒子システム研究グループの皆様の御支援なくしては成し遂げられませんでした。特に、共同研究テーマであった、松橋弘明様、Tong Junjie 様に心より感謝申し上げます。最後に、金沢大学熱流体・粒子システム研究グループの在研生および卒業生の方々と、ここに御名前を挙げることでできなかった多くの皆様に心より感謝申し上げます。

平成 29 年 6 月 29 日

中 島 秀 介