

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

物質科学専攻 熱流体粒子システム研究グループ 中島秀介

主任指導教員 大谷吉生教授

Abstract

There exists the most penetrating particle size (MPPS) in submicron size range for which none of the collection mechanisms work effectively. In this study, we propose, a new type of filter named as “centrifugal filter”, which collects aerosol particles by centrifugal force together with the conventional mechanical collection mechanisms. In addition, re-entrainment of collected droplets is of serious concern for the conventional air filters. In this study, first, the fundamental collection characteristics of Holder rotation type centrifugal filters were studied both theoretically and experimentally. Then, Filter rotation type that filter media is rotate in centrifugal filter was designed and constructed, we proposed to introduce centrifugal force for the collection of mist by increasing the collection efficiency and prevent droplet re-entrainment (Filter rotation type). As a result, we found that the collection efficiency of filter is enhanced significantly by rotating the filter without increasing the pressure drop and that the filter efficiency is well predicted by the conventional filtration theory accounting for the centrifugal force. In the case of collection of mist by Filter rotation type centrifugal filter, the droplets accumulated on filter media was re-entrained to centrifugal direction with rotation of filter media and removed by the rotation of filter media.

1. 緒言

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多く利用される。ブラウン拡散、さえぎり、慣性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。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り、一方で、回転フィルタ(Filter rotation type)をミストの捕集に応用する場合は、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、ラボスケールの回転フィルタを設計・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のミスト捕集への応用について検討した。

2. 回転フィルタの捕集機構

回転フィルタの概略図を Figure 2-1 に示す。フィルタは内半径 R_1 、外半径 R_2 、厚み L の円筒状で、エアロゾルは軸方向(Figure 2-1 中、左から右方向)に流れる構造である。空気はフィルタとともに、角速度 ω で回転するため、流れ方向と直角に粒子に遠心力が作用する。機械的捕集機構に加えて、遠心力による粒子の移動により、捕集効率が大きくなると考えられる。また、フィルタと繊維間の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。

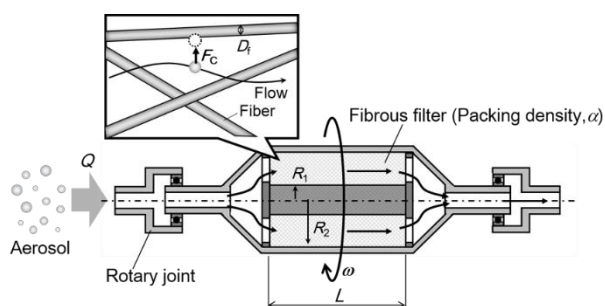


Figure 2-1 Basic concept of aerosol collection by Holder rotation type centrifugal filter.

回転フィルタの捕集効率は対数透過則に従うものとして、Eq.(2-1)で与えられる。また、単一繊維捕集効率 η はさえぎり、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 Eq.(2-2)で表される。

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

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

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。本研究では、遠心力による単一繊維捕集効率を重力と同様に与えられるとして、Eq.(2-3) と Eq.(2-4)を用いた。

$$\eta_C = \frac{v_C}{u_0} \quad (2-3)$$

$$v_C = v_t \left(\frac{r\omega^2}{g}\right) = v_t Z_C \quad (2-4)$$

ここで、 v_t は粒子の終末沈降速度、 Z_C は遠心効果である。回転フィルタでは、フ

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 の算術平均とした。

3. 回転フィルタの性能評価

3-1. 実験装置および方法

実験経路図を Figure 3-1 に示す。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、生成した微小な粒子(10~200 nm)を ^{241}Am に通過させた後に、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。得られた単分散粒子は、再度 ^{241}Am 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。粒子個数濃度は、凝縮粒子計数器(CPC; Condensation Particle Counter, TSI model 3775 CPC)により計測した。次に、Polystyrene latex 粒子(PSL; JSR Co.)は、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、生成された液滴をディフュージョンドライヤーに通過させ、乾燥させることで得られた粒子は ^{241}Am に通過させた後に、回転フィルタへ導入して捕集した。PSL 粒子の個数濃度は、光散乱式計数器 (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。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。

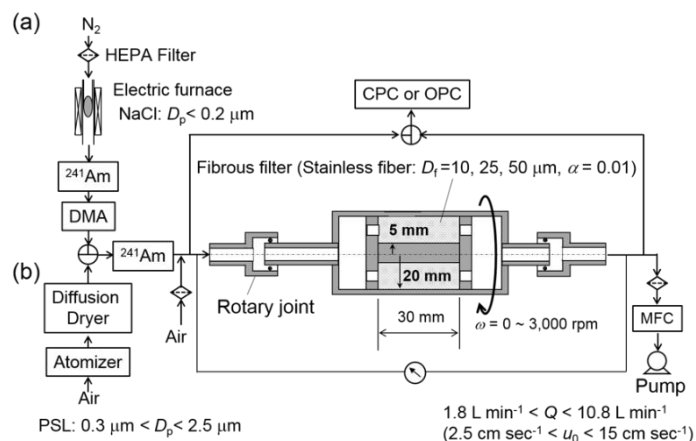


Figure 3-1 Experimental setup.

3-2. 実験結果

捕集効率を粒径に対してプロットした図を Figure 3-2 に示す。Figure 3-2 (a)に示すように、繊維径 10 μm では、フィルタを回転させていないとき、MPPS で捕集効率が 20%と粒子をあまり捕集できなかったものの、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増加させると捕集効率が大幅に向上するこ

とがわかった。次に、Figure 3-2 (b)からわかるように、繊維径を変化させても、粒径 $0.2 \mu\text{m}$ 以下の粒子に対しては回転速度の依存性が見られず、粒径 $0.5 \mu\text{m}$ 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みられた。このように、回転フィルタを用いると、機械的な捕集機構に加えて、遠心力が作用するために、粗大粒子に対して捕集効率の顕著な向上がみられることが実験的に確かめられた。Figure 3-2 の曲線は、Eq. (2-1)から求められる捕集効率の理論推算値である。これらの結果と実験値と比較すると、いずれも実験値と良い一致を示していることが分かる。このことから、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側は、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。

次に、粒径を固定して回転速度変化させた図を Figure 3-3 に示す。Figure 3-3(a) は、粒径 $1.0 \mu\text{m}$ の粒子を捕集する場合の、捕集効率を回転速度に対してプロットしたものである。実験における回転速度の限界が 3000rpm であり、粒径 $1.0 \mu\text{m}$ では 80% 程度の粒子を捕集することができる。そして、回転速度を増加させることができれば、理論推算値に示すように、繊維径 $10 \mu\text{m}$ のフィルタでは 4000rpm の回転速度でほぼ全ての粒子を捕集することが可能です。それに対して、Figure 3-3(b)は、粒径 $0.2 \mu\text{m}$ の粒子を捕集する場合である。図からわかるように、 $3,000 \text{rpm}$ 回転させても粒径 $0.2 \mu\text{m}$ の粒子の捕集効率を向上させることが困難であることがわかる。しかし、理論的には 2万 rpm 回転させることができれば、拡散域の粒径 $0.2 \mu\text{m}$ 粒子をほぼ全て捕集できると予想された。

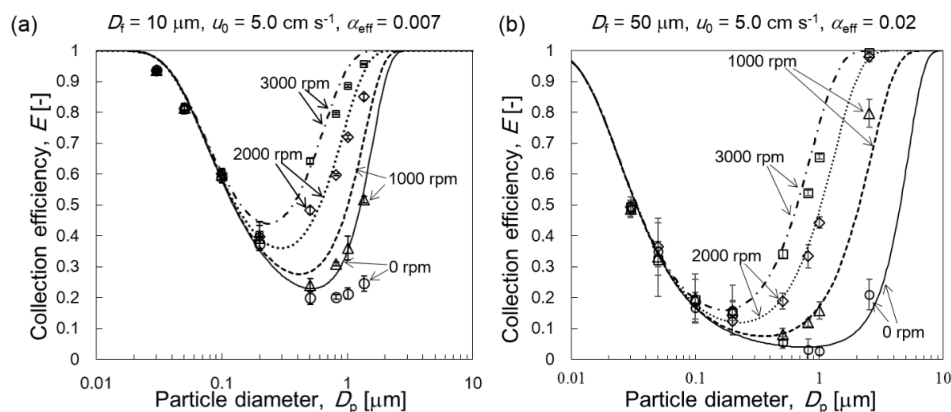


Figure 3-2 Collection efficiencies of centrifugal filter against particle diameter ($u_0 = 5.0 \text{ cm sec}^{-1}$, $D_f = 10, 25, 50 \mu\text{m}$).

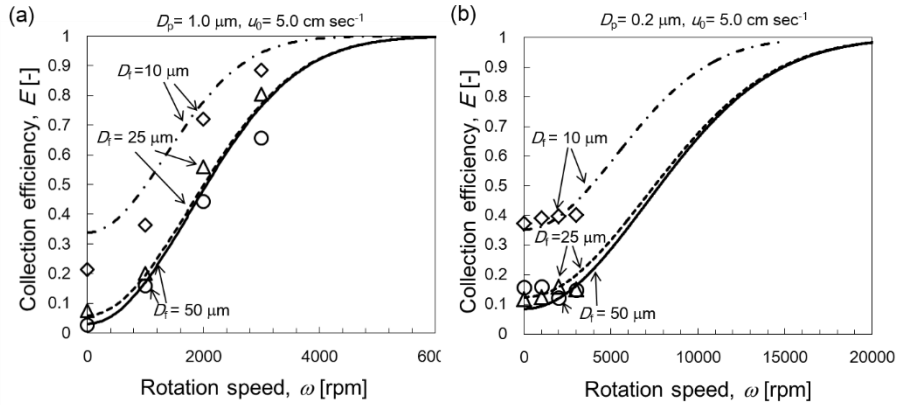


Figure 3-3 Collection efficiencies of centrifugal filter against rotation speed at the fixed filtration velocity, u_0 of 5.0 cm sec^{-1} .

圧力損失をろ過速度に対してプロットした図を Figure 3-4 に示す。Figure 3-4 (a)はフィルタの圧力損失をろ過速度に対してプロットしたものである。図からわかるように、フィルタの圧力損失がろ過速度に比例しなかった。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ためだと考えられる。Figure 3-4 (b)は、全体の圧力損失の実験結果であり、図からわかるように、回転速度の増加による圧力損失の上昇は 100 Pa 以下と僅かであることが分かった。

以上 Figure 3-2～Figure 3-4 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。

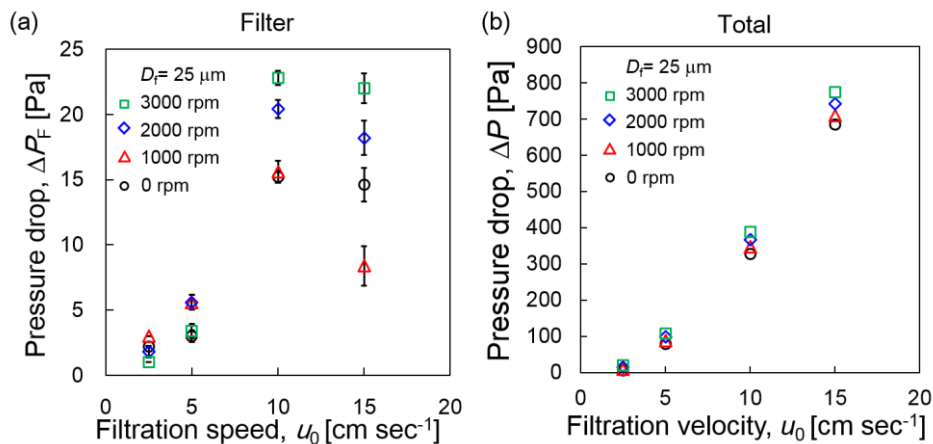


Figure 3-4 Collection efficiencies of centrifugal filter against rotation speed at the fixed filtration velocity, u_0 of 5.0 cm sec^{-1} .

4. 回転フィルタのミスト捕集への応用

ミスト捕集への応用を考慮した回転フィルタ (Filter rotation type) の概略図を

Figure 4-1 に示す。図に示すように、フィルタろ材は回転フィルタの中心に設置され、フィルタホルダを固定して中心のフィルタろ材のみが回転する。**Filter rotation type** では、導入されたエアロゾル粒子がフィルタろ材と壁の間を通過することで、フィルタ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。1.入り口とフィルタまでの隙間を小さくする、2.フィルタと壁の隙間を小さくする、そして、3.この入り口と出口の2カ所には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。

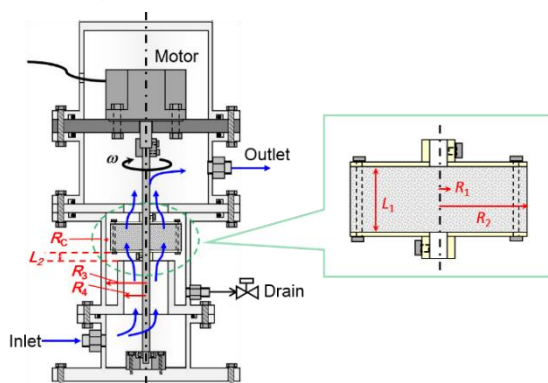


Figure 4-1 Schematic diagram of mist separator type of centrifugal filter.

4-1. 固体粒子を用いた性能評価

4-1-1. 実験装置および方法

Figure 4-2 (a)の実験経路を用いて固体粒子を用いた性能評価実験を行った。実験経路は、Figure 3-1 と同じものを用い、回転フィルタは **Filter rotation type** に変更し、試験粒子は粒径 0.814 、 $1.694 \mu\text{m}$ の PSL 粒子の単分散粒子を用いた。ここで、空塔速度は $2.5 \sim 15 \text{ cm sec}^{-1}$ 、回転速度は $0 \sim 2000 \text{ rpm}$ で実験を行った。

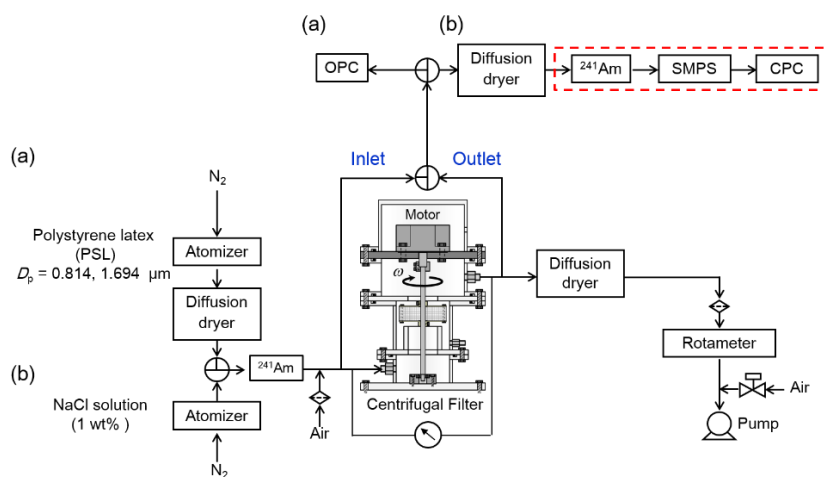


Figure 4-2 Experimental setup. Particle filtration performance was experimented with (a), and mist filtration performance was experimented with (b).

4-1-2. 実験結果

捕集効率を回転速度に対してプロットした図を Figure 4-3 に示す。実線が理論推算値を示しており、Holder rotation type で使用した理論式 Eq. (2-1) を基にして、Filter rotation type では隙間が無いと仮定して計算を行った。その結果、実験値と理論推算値が良い一致を示すことがわかった。この結果から、フィルタ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たと考えられる。

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 4-4 に示す。図に示すように、ろ過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 4-3 と Figure 4-4 から、Filter rotation type も Holder rotation type と同様に、フィルタろ材の回転により圧力損失を増加させずに捕集効率を向上させられることがわかった。

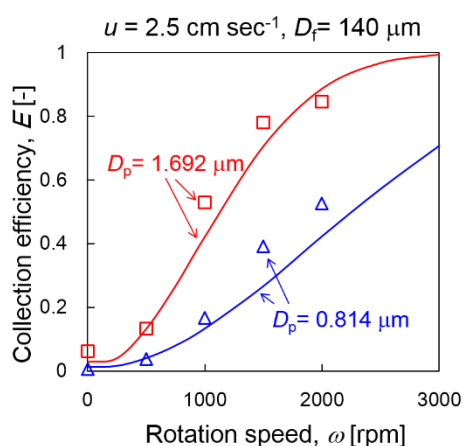


Figure 4-3

Collection efficiency of rotation type

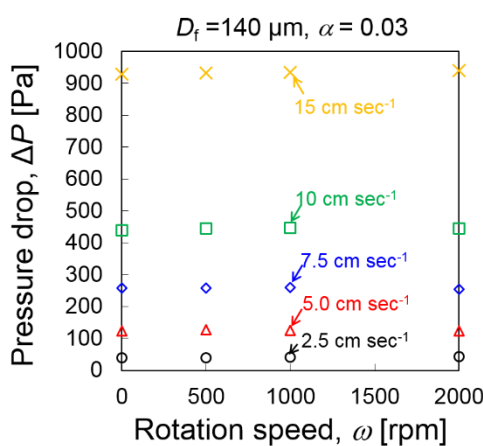


Figure 4-4

Pressure drop a function of rotation speed.

4-2. ミストの捕集性能評価

Figure 4-2 (b) の実験経路を用いてミスト捕集実験を行った。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 により噴霧させ、乾燥空気により希釈し、²⁴¹Am を通過させて平衡帯電状態にした後に、回転フィルタに導入させ、回転フィルタ内に設置したフィルタを回転させて液滴を捕集した。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。ここで、液滴の粒径分布は、ディフュ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。

4-2-1. 実験結果

捕集効率を粒径に対してプロットした図を Figure 4-5 に示す。図に示すように、

回転しない場合、ほとんどミストを捕集できていないことが分かる。しかし、回転速度の増加とともに捕集効率が大幅に向上することが分かった。Figure 4-5 の曲線は、Eq. (2-1)から求められる捕集効率の理論推算値である。回転フィルタの捕集効率は推算値よりも全体的に小さくなった。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で、液滴が蒸発し、液滴径が減少したからだと推察した。そこで、小粒径側に実験値を推算値とフィッティングすると、Figure 4-6 に示すように、液滴が40%蒸発したときに理論推算値と実験値は良い一致を示した。このことから、40%の液滴の蒸発が一致しなかった原因だと考えられる。混合空気の状態は、ミスト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。

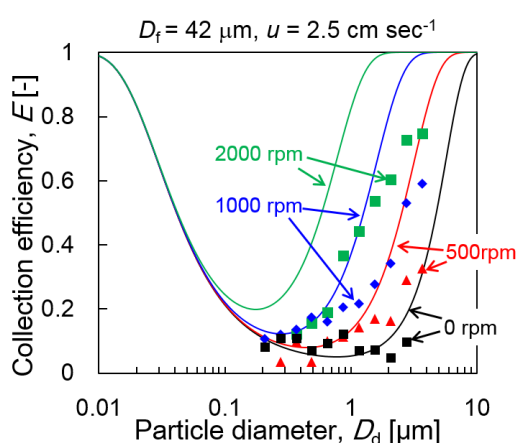


Figure 4-5

Mist collection efficiency as a function of droplet diameter.

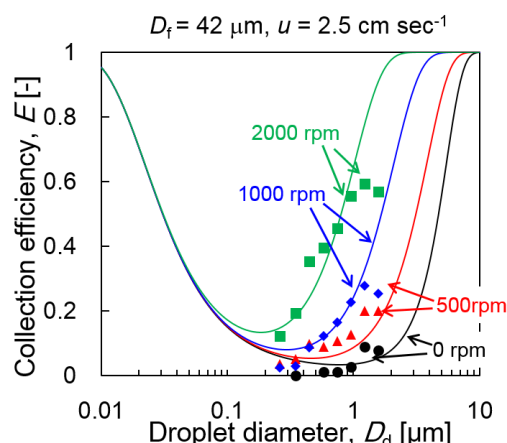


Figure 4-6

Collection efficiency accounting for 40% reduction in droplet diameter.

4-3. 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、フィルタは所定の回転速度($0 \text{ rpm} < \omega < 2000 \text{ rpm}$)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、回転後のフィルタの質量と乾燥状態のフィルタ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 4-7 に示す。図に示すように、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 4-8 に示す。図から分かるように、フィルタの回転に伴い遠心方向に液滴を再飛散させ、外壁に衝突し付着した大きな液滴が重力の影響により流れ落ちている。

以上の Figure 4-7 および Figure 4-8 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、繊維層に蓄積された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、ドレイン部で液滴の連続的な回収を行うことが可能であり、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になると言える。

$D_f = 42 \text{ }\mu\text{m}$, $R_2 = 42.5 \text{ mm}$, $L = 30 \text{ mm}$, $u = 15 \text{ cm sec}^{-1}$, $t = 3 \text{ min}$

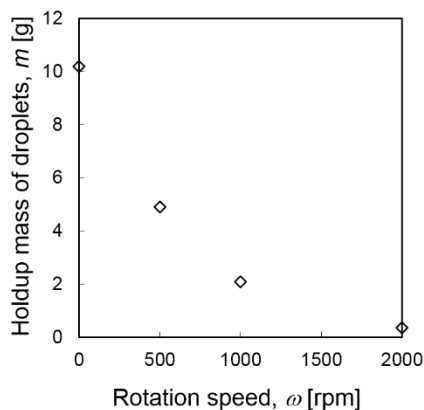


Figure 4-7

Mass of re-entrained and remained solution in filter media after rotation.



Figure 4-8

Droplets re-entrained to centrifugal direction.

5. 総論

回転フィルタを用いることにより、フィルタろ材の回転により生じた遠心力をエアロゾル粒子に作用させることで圧力損失を大きく増加させずに捕集効率を大幅に向上させることが出来ることが確かめられた。さらに、装置を改良し回転速度を増加させることで、ミクロンオーダーの粒子だけでなく拡散域の粒径 $0.2 \text{ }\mu\text{m}$ のエアロゾルを捕集することも可能であると理論的に予想された。また、回転フィルタのミスト捕集への応用では、フィルタを回転させることで繊維層に蓄積される液滴を遠心方向に再飛散させた後に効果的に回収できるため、Filter rotation type は大きな利点を有していることがわかった。

学位論文審査報告書（甲）

1. 学位論文題目（外国語の場合は和訳を付けること。）

回転フィルタによるエアロゾル粒子の捕集

2. 論文提出者 (1) 所属 物質科学 専攻

(2) 氏名 中島 秀介

3. 審査結果の要旨（600～650字）

平成29年7月12日に学位論文予備審査会を開催して、提出された博士論文および研究業績を精査した。8月1日に口頭発表と質疑応答を行い、その後開催した論文審査委員会において、以下のように決定した。高効率と低圧損を同時に実現できる高性能エアフィルタの開発は、永遠のテーマである。本論文では、流れに平行な軸でフィルタを回転させることによって、従来の機械的捕集機構に加えて遠心力を利用する、まったく新しい高性能なエアフィルタ「回転フィルタ」を提案した。本論文では、(1) フィルタを回転させた場合、フィルタ内部の空気もフィルタと共に回転するため、フィルタ繊維と空気の間回転による相対速度が生じないため、圧力損失は回転数によって変化しない、(2) 回転フィルタの捕集効率は、単一繊維捕集効率に基づく従来のろ過理論において、遠心力による単一繊維捕集効率を加えることより推定できる、(3) 試作した回転フィルタにおいて、無回転ではほとんど捕れなかった $1\mu\text{m}$ 粒子が、回転数3000rpmではほぼ100%捕集できる、(4) 拡散域のサブミクロン以下の小さな粒子の捕集効率は回転によって変化しない、ことを明らかにした。さらに、回転フィルタを、再飛散が問題となる液滴粒子の捕集に適用し、回転フィルタでは、捕集された液滴を迅速にフィルタから排除できるため、再飛散フリーのフィルタを実現できることを示した。

以上のように、本論文は、新規の回転フィルタを提案して性能評価を行い、その性能の理論的予測法を確立するとともに、実用化への指針を示しており、博士（工学）の学位に相応しいと判断する。

4. 審査結果 (1) 判定（いずれかに○印） 合格 ・ 不合格

(2) 授与学位 博士（工学）