

# 博 士 論 文

Doctoral dissertation

回転フィルタのエアロゾル粒子径分布測定への応用

Application of centrifugal filter to aerosol size distribution measurement

金沢大学大学院自然科学研究科

Graduate School of Natural Science and Technology,  
Kanazawa University

自然システム学専攻

Division of Natural System

学籍番号 1424062016

氏 名 田中 豊

主任指導教員名 大谷 吉生

提出年月 2017年 6月

## 目次

第1章	緒言	
1-1	研究背景	4
1-2	既往の研究	5
1-3	研究目的	11
第2章	分級のための回転フィルタの設計	
2-1	回転フィルタの捕集効率の推定	12
2-2	回転フィルタの最大透過粒径と分級原理	14
2-3	回転フィルタのろ過条件、フィルタ物性の決定	16
第3章	回転フィルタの分離特性の評価	
3-1	ポリウレタン多孔体フィルタろ材の物性値	26
3-2	実験装置および実験方法	27
3-3	実験結果および考察	29
第4章	多分散粒子の計測	
4-1	実験方法	35
4-2	実験結果および考察	36
4-3	捕集効率から粒子径分布へのデータ逆変換	39

第5章	粉塵負荷特性	
5-1	実験方法	47
5-2	流速と回転数の変化により生じる再飛散	49
5-3	粉塵堆積による捕集効率の変化	50
第6章	結言	
6-1	総括	53
6-2	今後の課題	54
	Nomenclature	55
	Subscripts	56
	Referances	57
	謝辞	58

# 第1章 緒言

## 1-1 研究背景

近年、室内空気質、大気環境への関心の高まりに伴い、エアロゾル粒子について様々な測定、分析が行われている。なかでも、エアロゾル粒子径分布測定は重要度を増している。様々な工業製品の製造過程で、粒子は中間・最終製品として扱われているが、気中に浮遊することで「有害で、肉眼では捉えられない厄介な物質」という一面も持つ。例えば、半導体や精密部品・食品の製造工程における混入粒子は製品不良を起こす大きな要因である。これらの状況において、製品の性能や品質を制御・管理するため、または汚染の度合いを把握するため、広い濃度範囲で広い粒子径分布を正確に測定する必要がある。

粒子径分布の測定は、粒子を材料として利用する場合において、粒径とそのばらつきが製品の性能・品質を決定することから、極めて重要である。一方、汚染物質としての粒子の場合、粒径分布、粒子組成を調べることにより発生源を推測が可能となるだけでなく、有効な対策を講じることができる。また、PM2.5で代表されるように、粒径によってその有害性が異なるため、大気塵の粒子径分布の測定は粒子の健康影響を評価する上で重要である。

粒子径分布の測定では、粒子径、粒子濃度に応じて、様々な原理を用いた測定装置が用いられる。これは、現時点で、1nm から数10 $\mu\text{m}$ の粒子径の広い範囲を、一つの測定装置でカバーできないことによる。このため、測定原理によって、測定される粒子径が異なり、非球形粒子で密度などの物性が未知の場合は、その換算は容易ではない。加えて、燃焼由来粒子のような高温、高濃度、高湿度の微小粒子を測定する *in situ* 測定法はなく、希釈や除湿といった前処理を行った後に測定しているのが現状である。

例えば、大気塵の粒径範囲 (0.3 $\mu\text{m}$ ~5 $\mu\text{m}$ ) で使用される測定装置として、光散乱を利用したパーティクルカウンター、慣性を利用したアンダーセンエアサンプラーがある。前者はリアルタイムでの測定が可能であるが低濃度のエアロゾルの測定に限定される。後者は、捕集された粒子の粒子組成を測定できるメリットはあるが、サンプリング後の粒子質量の秤量が必要なため、秤量可能な量をサンプリングしなければならず、*in situ*測定ができないという欠点がある。加えて、前者で測定される粒子径は光散乱相当径であり、後者は空気力学系である。このため、屈折率と密度が未知の非球形粒子では、両者による測定結果を相互に変換できないという大きな欠点がある。

そこで、高濃度エアロゾル粒子の空気力学径による粒子径分布を、*in situ*かつリアルタイムで測定できる装置として、回転フィルタを利用することを提案

する。Nakajima et al. (2015)は、フィルタを回転させ粒子に遠心力を加えることで、回転数に応じて捕集効率を変化できるフィルタを開発した。この回転フィルタを、回転数に応じてカットオフ径を自在に変化できる分級器として使用し、下流で粒径識別能を持たない粒子検出器（凝縮粒子計数器、フォトメータなど）を用いれば、空気力学径基準で、高温、高濃度にも対応した粒子径分布測定装置が実現できると考えられる。

## 1-2 既往の研究

前節で述べたように、粒子径分布の測定において、in situか否か、リアルタイム計測か否かかどうかだけでなく、粒子濃度や粒径範囲に応じて様々な測定装置が利用されている。測定装置の主なものについて、測定原理、得られる相当粒径、可能粒径範囲、可測粒子濃度、in situか否か、リアルタイム計測か否かについてTable.1-1にまとめた。本節ではその中でも本研究と対象とする粒径範囲に近い、間接法である光散乱パーティクルカウンター、慣性衝突をアンダーセンエアサンプラー(インパクト)について記述するとともに、回転フィルタに関する既往の研究について述べる。

Table. 1-1 General particle size distribution measurement method.

測定手法・原理	粒子の分散状態	得られる相当粒径	適用可能な粒径範囲	粒径の絶対測定の可否	粒径を得るのに不可欠な粒子情報	粒径分布を有する粒子の測定	測定される濃度
顕微鏡	真空中	幾何相当径	1 nm 以上	可	なし	可	個数
慣性衝突	気中	空気力学径	10 nm - 100 μm	不可	なし	可	個数・質量
飛行時間測定	気中	空気力学径	500 nm - 100 μm	不可	なし	可	個数
重力沈降・遠心沈降	液中	ストークス径	100 nm 以上	可	密度	可	質量
電氣的検知帯	液中	体積相当径	200 nm - 2 μm	不可	非電気伝導性であること	可	個数
静電分級	気中	移動度相当径	1 nm - 1 μm	可	荷電量が1価であること	可	個数
拡散バッテリー	気中	移動度相当径	1 nm - 100 μm	不可	なし	可	個数
レーザー回折(散乱角度)	液中	光散乱相当径	100 nm - 100 μm	可	屈折率	難	体積
光散乱(散乱光強度)	液中・気中	光散乱相当径	100 nm - 100 μm	不可	屈折率	可	個数
動的散乱	液中・気中	移動度相当径	1 nm - 1 μm	可	なし	難	個数
ふるい	粉体・液中	幾何相当径	20 μm 以上	可	なし	可	質量

### 1-2-1 パーティクルカウンター

光散乱を利用した粒子径分布測定装置の一つに、光散乱式粒子計数器（オプティカルパーティクルカウンター、OPC）がある。測定部の概略をFig.1-1に示す。この装置の測定原理は、レーザー光あるいは白色光のビームを粒子が横切ると粒子が光を散乱するため、その散乱光の強度から粒子径を、また散乱光の発生頻度から粒子個数濃度を計測するものである。装置内のエアロゾル流の幅はビーム幅より小さくすることで粒子のすべてを検出できるが、ビーム断面で光強度はガウス分布を取るため、単分散粒子であっても散乱光強度に分布が生じる。このため、粒子径の校正は、既知の粒径の単分散ポリスチレンラテックス標準粒子により行われ、測定される粒子径は、球形のPSL粒子に相当する径—光散乱相当径となる。この装置での粒子濃度 $N$ は

$$N = f/Q \cdot \cdot \cdot (1 - 1)$$

として得られる。ここで $f$ は単位時間当たりに計数された粒子数、 $Q$ はエアロゾルのサンプリング流量である。

散乱光強度は粒径の減少とともに微弱となり、粒子径の2乗に比例するMie散乱域から、粒径の6乗に比例するRaleigh散乱域に入るため、検出が困難になる。このため、光源にタンゲステン光、ハロゲン光を用いた装置では可測最小粒径は0.3 μm程度であり、光源にレーザー光を用いた場合には0.1 μm程度になる。可測上限粒径については、エアロゾル導入部での粒子損失が重要な決定要素で、大きな粒子を慣性衝突により失わないよう、真っ直ぐで内径が一定の試料導入管を使う必要がある。

測定濃度範囲については、下限は装置の偽計数（粒子の含まれない清純空気を試料とした時のバックグラウンド）によって決まる。一方高濃度では、散乱光強度検出後の信号処理速度が十分でない場合と、検出容積内に複数の粒子が同時に存在する場合に計数欠損が生じ、極めて高い濃度ではこれらによる測定誤差が無視できないほど大きくなる（コインシデンスロス）。通常は確率的に平均5%の計数損失が生じる濃度を上限値としている。前者の問題点は電気回路技術の進歩により現在では解決されているが、後者の問題点はこの測定原理に必ず付随するものであるため、完全な解決は不可能である。

この光散乱法による粒子径分布測定はリアルタイムという利点を有するが、校正を行う標準粒子と計測するエアロゾルと屈折率が異なるため誤差が生じること、粒子濃度が高い場合はコインシデンスロスによる計数損失があること、サブミクロン粒子の範囲ではほとんどの計数器について、計数効率は粒径が小

さくなるにしたがって減少すること、電荷を帯びた粒子の場合、計数器のサンプリングシステムにおいて損失が生じるなどの問題点がある。

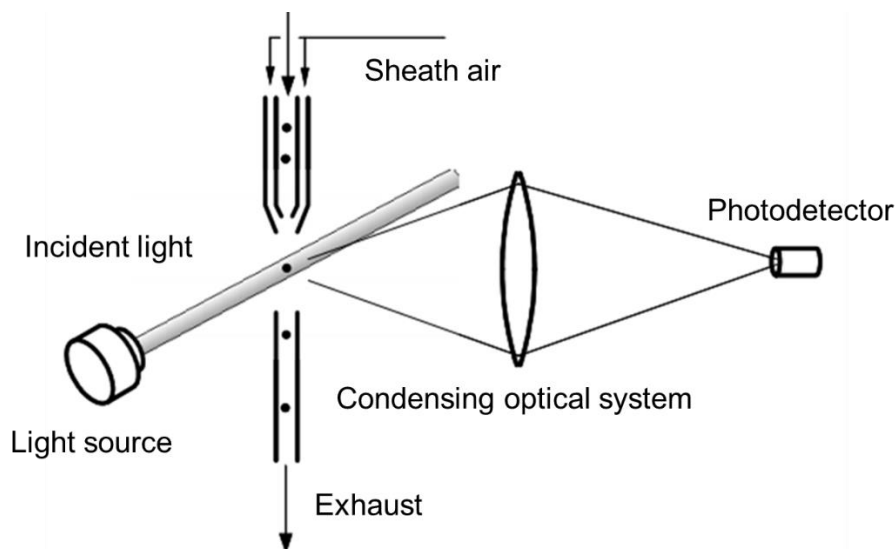


Fig.1-1 Structure of OPC.

### 1-2-3 慣性を利用した粒子径分布測定装置

粒子径分布の測定法として、エアロゾルを分級し、粒径別にサンプリングすることでその質量分布を求める手法がある。その中で最も一般的なものとして、慣性を利用して粒子を分級するインパクターを用いる方法がある。インパクターは、 $0.3\ \mu\text{m}$ から $10\ \mu\text{m}$ 程度の粒子の粒度分布測定や分級に広く用いられている。インパクターの分級原理を Fig. 1-2 に示す。ノズルで粒子を含む気流を加速させ、ノズル下流に設置した衝突板により気流を $90^\circ$  曲げる。この時、慣性の大きな粒子は流線から外れ、捕集板に衝突・捕集される。小さな粒子は流線に沿って運動し続けるため、衝突板に捕集されない。このため、一段のインパクターを用いてエアロゾル粒子を二つの粒径範囲に分級することができる。Ranz and Wong(1952)は、以下に示すインパクターの捕集効率を推定する半実験式を導出した。

$$E = 2.69\sqrt{Stk} - 0.954 \quad \text{for circular nozzle} \cdots (1-2)$$

$$E = 2.44\sqrt{Stk} - 1.379 \quad \text{for rectangular nozzle} \cdots (1-3)$$

$$Stk = \frac{C_c \rho_p D_p^2 v_0}{9\mu D_c} \cdots (1-4)$$

ここで、 $v_0$  はノズル速度、 $C_c$  はカニンガムのすべり補正係数、 $D_c$  はノズル径である。Eq. (1-5) は慣性捕集の尺度を表す Stokes 数であり、粒子の停止距離とノズルの比である。Stokes 数の値が大きいほど粒子の慣性は大きくなる。この時の 50%カットオフ径 ( $D_{p50}$ ) は捕集効率 50%となる  $Stk_{50}$  を用いると次式で与えられる。

$$D_{p50} = \sqrt{\frac{Stk_{50} \frac{9\mu D_c}{C_c \rho_p v}}{\dots}} \quad (1-5)$$

実際の測定ではこのインパクターを直列多段に連結したカスケードインパクターあるいは、ノズルではなく多孔オリフィスを用いたアンダーセンエアサンプラーが使用される。各段のインパクターはインパクターステージと呼ばれ、それらはFig.1-3に示すように、最も大きなカットオフ径を持つオリフィスを最上段にして、カットオフの順に並べられている。各ステージのカットオフ径を小さくするためには、ノズルの径を小さくしたり、各ステージのノズル数を減少させたりする。 $D_c$  を小さくすれば $v_0$ が増加も増加し、両者の効果により  $D_{p50}$ が小さくなる。

カスケードインパクターでは連続的な分級が行われるので、粒子の全体的な分布は、粒子の空気力学径に応じて、一連の連続した粒子群に分けられる。各ステージの質量の測定から、ステージに対応した空気力学径の範囲に含まれる粒子の割合が求められ、これらのデータから、質量分布が決定できる。

以上の議論では、粒子が捕集板の表面に衝突すれば、表面に付着すると仮定しているが、固体粒子の場合には、捕集板に衝突した際に跳ね返りが起きることや、堆積した粒子が再び気流に浮遊し再飛散することがある。そのため、捕集板をグリスの薄い膜でコーティングしたり、フィルタで捕集する。また、捕集量に上限を設ける必要がある。



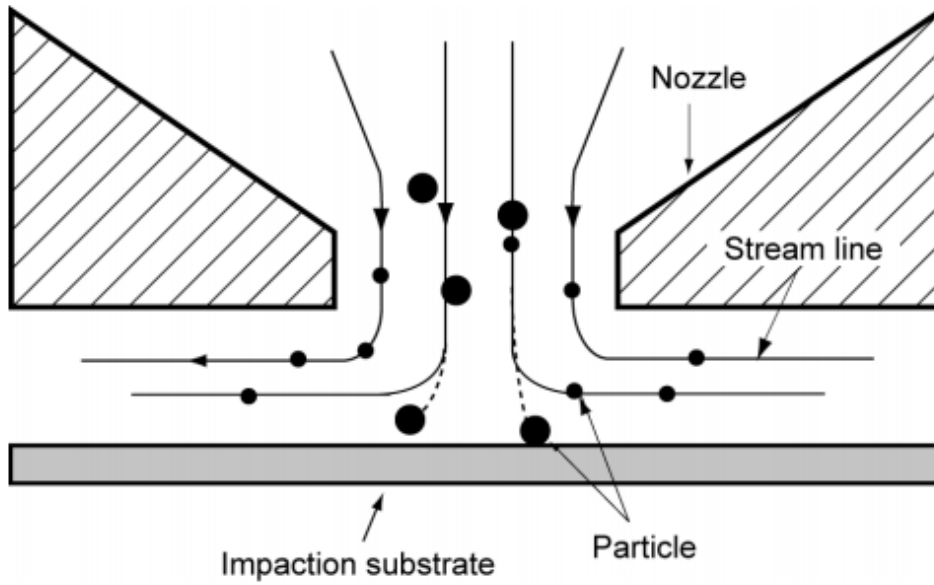


Fig.1-2 Structure of impactor.

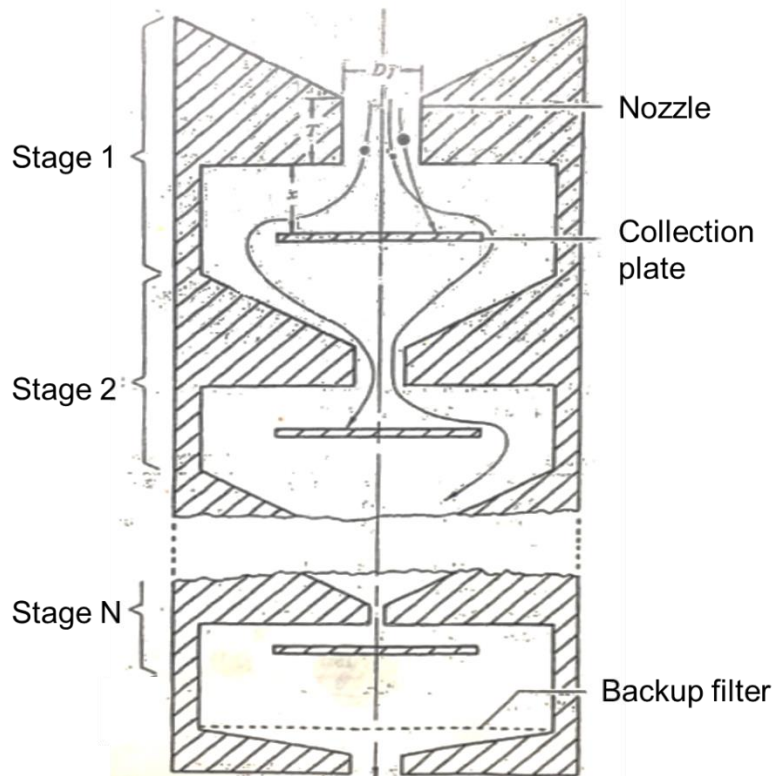


Fig.1-3 Schematic drawing of cascade impactor.

### 1-2-3 回転フィルタ

エアロゾル粒子のろ過では様々な捕集機構が作用することが知られており、繊維によるエアロゾルの捕集では、気流で輸送された粒子が、慣性、重力、静電気力、さえぎり、ブラウン拡散などによって流線からはずれ、繊維に付着することで粒子が捕集される。近年、Nakajima et al. (2015)は遠心力を利用した新たなフィルタとして、気流と平行な回転軸を中心に回転するフィルタにエアロゾル粒子を通過させることで、従来のフィルタの機械的捕集機構に加え、遠心力による粒子の捕集を可能としたフィルタを開発した。その概略図をFig.1-4に示す。このフィルタは回転数の上昇に伴い、圧力損失をほとんど変化させずに粒子の捕集効率を上昇させることができる。

回転フィルタでは、回転数を変化するだけで捕集効率を変化できるので、回転数をスキャンしてフィルタ出口濃度を測定することにより、粒子径分布測定にも応用できると考えられる。

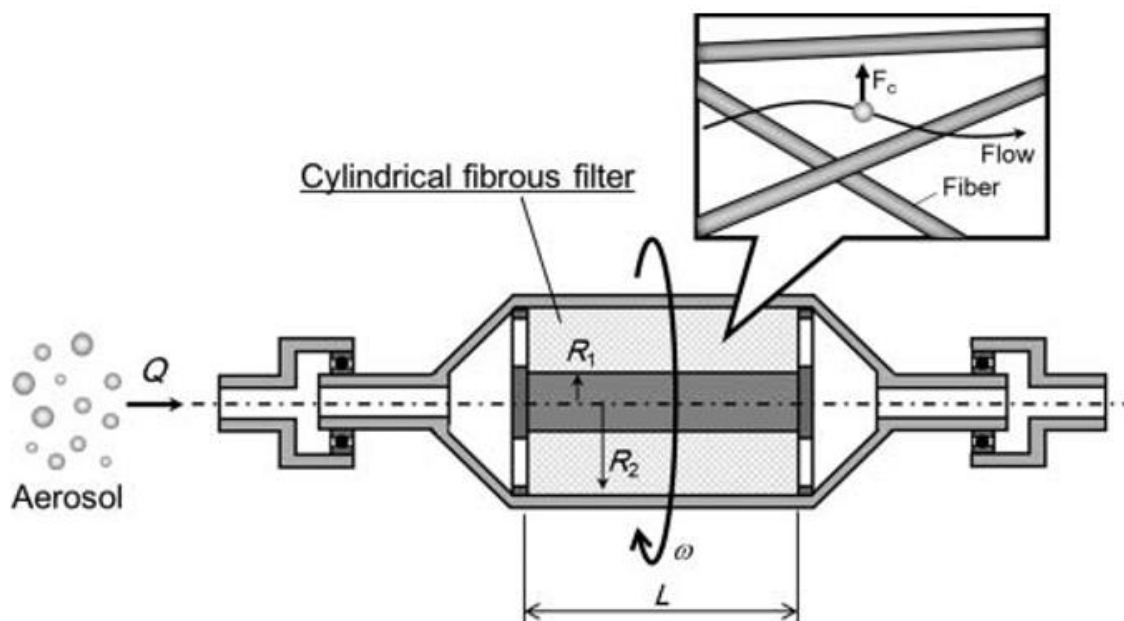


Fig.1-4 Concept of aerosol collection by centrifugal filter. (Nakajima et al. 2015)

### 1-3 研究目的

前述のとおり、室内空気質、大気環境への関心の高まりとともに、エアロゾル粒子の粒子径分布測定的重要性は増しており、様々な分野で測定が行われている。一方、既往の研究でも述べたように、高温、高濃度の粒子の測定は難しく、*in situ* かつリアルタイムで高濃度エアロゾルの粒子径分布を測定する装置は未だ開発されていない。

そこで本研究では、回転フィルタを分級器として位置づけ、粒子径分布を測定できる機能を持たないエアロゾルの検出器と組み合わせることで、高温、高濃度に対応した新たな*in situ*、リアルタイム粒子径分布測定システムの構築を目的とする。このためにまず、回転フィルタを分級器として用いるための、ろ過条件、フィルタろ材の最適化を行い、その分級特性の評価を行った。そして、多分散粒子の測定を行い、測定データから粒子径分布へのデータ処理（逆変換アルゴリズム）について検討を行った。また、フィルタに粉塵が堆積しても回転フィルタの捕集効率に変化せず、粒子の再飛散は起こらないことを確認した。

本論文は以下のような内容で構成されている。

第1章では、粒子径分布測定に関する既往の手法と回転フィルタについて記述した。

第2章では、回転フィルタを分級器として用いるために、ろ過条件、フィルタろ材が分級性能に与える影響について理論的に考察した。

第3章では、2章で求めた結果をもとに作成した回転フィルタについて、単分散粒子であるポリスチレンラテックス（PSL）粒子をもちいてその分級特性の検討を行った。

第4章では、多分散粒子の粒子径分布測定への応用を目指し、そのデータ処理について検討を行った。

第5章では、一度捕集された粒子の再飛散と堆積量における捕集効率への影響を確認するため、回転フィルタの粉塵負荷特性の評価を行った。

そして、第6章では、本研究の総括を示す。

## 第2章 分級のための回転フィルタの設計

前章でも述べたように、回転フィルタを分級器として使用すれば、回転数をスキャンしながら粒子濃度を測定することで粒子径分布測定できると考えられる。そこで本章では、回転フィルタを分級器として用いるために、ろ過条件、フィルタ構造（ろ過速度、繊維径、充填率）の影響について理論的に検討を行った。

### 2-1 回転フィルタの捕集効率の推定

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 $\eta$ 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。

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

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

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。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。

#### 2-1-1 さえぎり単一繊維捕集効率 $\eta_R$

Stechkina and Fuchs<sup>○</sup>)はさえぎり単一繊維捕集効率を Eq.(2-3)で与えた。

$$\eta_R = \frac{1}{2h_K} \left[ 2(1+R) \ln(1+R) - (1+R) + \left( \frac{1}{1+R} \right) \right] \quad \dots (2-3)$$

ここで R は Eq.(2-4) で定義されるさえぎりパラメータ、 $h_K$  は Eq.(2-5)で定義される桑原流れにおける水力学因子<sup>○</sup>)である。

$$R = \frac{d_p}{d_f} \quad \dots (2-4)$$

$$h_K = -0.5 \ln \alpha + \alpha - 0.25\alpha^2 + 0.75 \quad \dots (2-5)$$

#### 2-1-2 拡散さえぎり単一繊維捕集効率 $\eta_{DR}$

Kirsch and Stechkina (1975)<sup>○</sup>)によれば、拡散さえぎり単一捕集効率は Eq.(2-6)で

表される。

$$\eta_{DR} = 2.9h_K^{-1/3}Pe^{-2/3} + 0.624Pe^{-1} + 1.24h_K^{-1/3}Pe^{-1/2}R^{2/3} + \eta_R \cdots (2-6)$$

$$Pe = \frac{u_0 d_f}{D} \cdots (2-7)$$

$$D = \frac{C_c k T}{3\pi\mu d_p} \cdots (2-8)$$

ここで  $Pe$  はペクレ数、 $u_0$  は層内速度、 $d_f$  は繊維径、 $D$  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、 $\mu$  は流体の粘度、 $d_p$  は粒径である。

### 2-1-3 慣性さえぎり単一繊維捕集効率 $\eta_R$

Stechkina ら<sup>○</sup>は慣性効果の比較的小さい  $Stk \ll 1$  において、粒子速度  $v$  は Eq.(2-8) で表される仮定のもとで、桑原の水力学因子  $h_K$  を修正した  $h'_K$  を用い、慣性さえぎり単一繊維捕集効率を Eq.(2-9) で与えている。

$$v = u + Stk \cdot u \cdots (2-9)$$

$$\eta_{IR} = h'_K{}^{-2} Stk ((29.6 - 28\alpha^{0.62})R^2 - 27.5R^{2.8}) + \eta_R \cdots (2-10)$$

$$h'_K = -\frac{1}{2} \ln \alpha - 0.5 \cdots (2-11)$$

$$Stk = \frac{C_c \rho_p d_f u_0 R^2}{9\mu} \cdots (2-12)^{\circ}$$

ここで、 $Stk$  は Eq.(2-12) で定義されるストークス数である。

### 2-1-4 重力沈降単一繊維捕集効率 $\eta_G$

吉岡ら(1972)<sup>○</sup>は重力のみの単一繊維捕集効率を Eq.(2-13) で与えている。

$$\eta_G = G = \frac{v_t}{u_0} (\because G \ll 1) \cdots (2-13)$$

$G$  は重力パラメータと呼ばれる無次元の終末沈降速度であり、Eq.(2-14)で与えられる。

$$G = \frac{C_c d_p^2}{18\mu} \rho_p \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_p}\right) g \frac{1}{u_0} = \frac{v_t}{u_0} \quad \dots (2-14)^{19)}$$

ここで $\rho_p$ は粒子密度、 $\rho_f$ は流体密度、 $g$ は重力加速度、 $v_t$ は粒子の終末沈降速度である。

#### 2-1-5 遠心力による単一繊維捕集効率 $\eta_c$

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.(2-15)を用いた。<sup>○</sup>

$$\eta_c = \frac{v_c}{u_0} \quad \dots (2-15)$$

$$v_c = v_t \left( \frac{r\omega^2}{g} \right) = v_t Z_c \quad \dots (2-16)^{\circ)}$$

ここで $\omega$ は角速度であり、 $Z_c$ 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 $R_1$ と外半径 $R_2$ の算術平均とした。

## 2-2 回転フィルタの最大透過粒径と分級原理

前述の通り、回転フィルタを用いた場合、拡散、慣性、さえぎり、遠心力が捕集機構として主に作用し、それぞれの捕集機構に対して粒径および速度依存性が存在する。慣性は、粒径が大きくなる過速度が速いほど支配的な捕集機構となり、慣性捕集の尺度は Eq.(2-12)で定義される  $Stk$  数である。一方、ブラウン拡散は、粒子が小さくなる過速度が遅いほど支配的な捕集機構となり、拡散捕集の尺度は Eq.(2-7)で定義される  $Pe$  数である。 $Stk$  数が大きいほど慣性が支配的な捕集機構となり、 $Pe$  数が小さいほどブラウン拡散が支配的な捕集機構となる。このため、一般に機械的捕集機構によるフィルタ捕集効率を粒径に対してプロットすると、Fig.2-1 に示すような下に凸の曲線となる。これは、いずれの機

械的捕集機構も粒子捕集に有効に作用しない最大透過粒子径(Most Penetrating Particle Size, MPPS)が存在するためである。これに遠心力が加わると、回転数の増加に伴い、MPPS より大粒子径側の捕集効率曲線は小粒径側に移動するが、分級を目的とする場合は、MPPS より大粒径側の捕集効率曲線の立ち上がりをできるだけ急峻にし、MPPS より小粒径側の捕集効率曲線をできるだけゼロに近づけるようなフィルタ構造、ろ過速度を選定する必要がある。

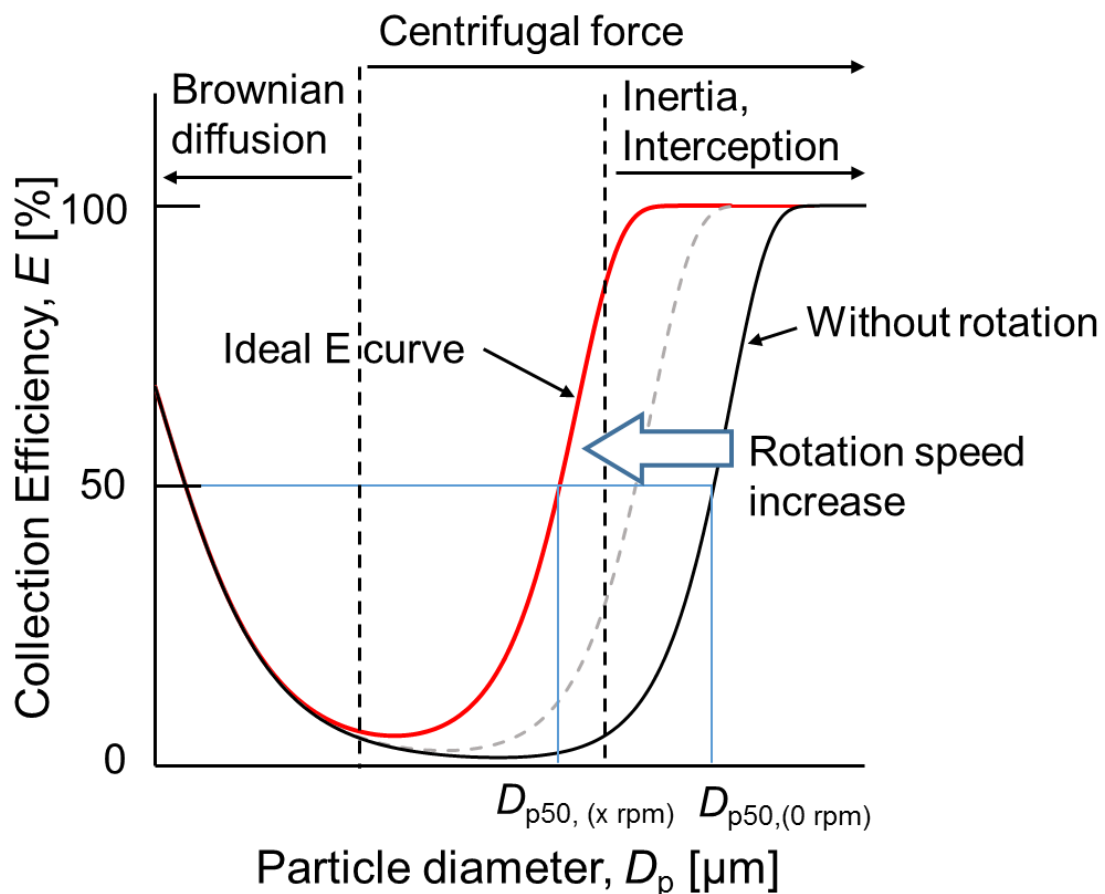


Fig.2-1 Concept of classification with centrifugal filter.

## 2-3 回転フィルタのろ過条件、フィルタ物性の決定

回転フィルタの分級特性に影響を与える因子として、フィルタ構造（繊維径  $D_f$ 、充填率  $\alpha$ 、フィルタ厚み  $L$ ）とろ過速度  $u$  が挙げられる。したがって、本最適化問題は、一定の制約のもとで、「最も急峻な分級曲線を与えるフィルタ構造とろ過条件の決定」に帰着する。

### 2-3-1 制約の設定

回転フィルタの捕集効率は、ろ過条件とフィルタ物性以外に、様々な因子によって変化する。このため、ろ過条件とフィルタ物性の関数として分級曲線を最適化するために、ろ過条件とフィルタ物性以外の因子を、現実的な範囲で制約（設計変数）として設定した。制約を Table 2-1 に、回転フィルタの構造を Fig.2-2 に示す。流量としては、測定装置の使用条件を考え、アンダーセンエアサンプラー（28.3 L/min）より小さく OPC（0.5 L/min）よりも大きい 7 L/min 以上に設定した。フィルタとしては、遠心力のかからない中心をエアロゾル粒子が通過するのを防ぐため円筒状のフィルタを採用し、卓上サイズの装置の想定から内径 10 mm 外径 40 mm とした。また、最大回転速度は装置の安全性とモータの制御精度から 3000 rpm とした。そして、測定対象とする粒子範囲は、光散乱式粒子計測器の測定範囲と同じ 0.3-10  $\mu\text{m}$  とした。

Table.2-1 Constraints (design parameters) of centrifugal filter

Minimum volumetric flow rate, $Q$	7 L/min
Inner radius, $R_1$	10 mm
Outer radius, $R_2$	40 mm
Maximum rotation speed	3000 rpm
Particle size range	0.3 - 10 $\mu\text{m}$



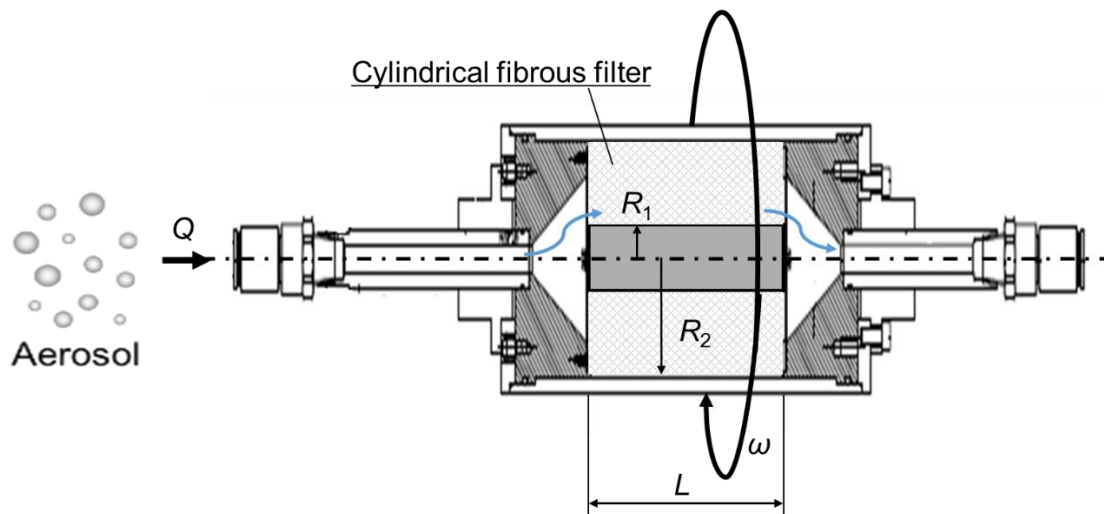


Fig.2-2 Schematic diagram of centrifugal filter.

### 2-3-2 ろ過条件、フィルタ物性が分級特性に与える影響

Eq.(2-1)の対数透過式を用いて、ろ過条件、フィルタ物性を変化させ、回転フィルタの捕集効率  $E$  を計算した。各条件における分級性能の比較には、回転数 0 rpm のときの捕集効率と、50%カットオフ径が 0.6, 1.5, 4  $\mu\text{m}$  となる3種類の分級曲線を採用した。また、急峻な分級曲線の条件として、「回転していない状態でのフィルタの捕集効率が、0.3  $\mu\text{m}$  粒子に対して 10%以下」を追加した。さらに、フィルタ構造である充填率  $\alpha$  とフィルタ厚さ  $L$  は独立変数であるが、 $\alpha \ll 1$  とすると、Eq.(2-1)において分母は  $(1-\alpha) \approx 1$  となるので、充填率とフィルタ厚さの積  $\alpha L$  (フィルタ単位面積当たりの繊維体積) を一つの変数としてまとめた。

#### 2-3-2-1 繊維径が分級特性に与える影響

繊維径による分級曲線の変化を見るため、ろ過速度 2.5 cm/s ( $Q=7.1\text{L/Min}$ )、 $\alpha L = 0.0012$  において、繊維径 100  $\mu\text{m}$ 、200  $\mu\text{m}$ 、300  $\mu\text{m}$  の3種類の繊維径の捕集効率をプロットしたものを Fig.2-3 から Fig.2-5 に示す。これらの図より捕集効率は繊維径が小さいほど慣性捕集による大粒径側での立ち上がりの粒径は小さくなるが、小粒径側で拡散捕集が大きくなることが分かる。これは、繊維径を小さくすることで、Eq.(2-12)で与えられる  $Stk$  数が大きくなり慣性捕集が促進されるが、同時に Eq.(2-7)で与えられる  $Pe$  数が小さくなることで拡散捕集も促進されるためである。

そこで次に、この3種類の条件において、回転数 0 rpm のときの捕集効率と、カットオフ径が 0.6, 1.5, 4  $\mu\text{m}$  となる分級曲線を Fig.2-6 にまとめて示す。

比較した場合、その傾きにはほとんど差異が見られず、同様の分級特性を示している。このときの回転数を比較すると、繊維径が小さいほど、同様のカットオフ径を得るのに必要な回転数は小さくなっていることが分かる。

### 2-3-2-2 ろ過速度が分級特性に与える影響

ろ過速度による分級特性の変化について確認するために、繊維径  $200\ \mu\text{m}$ 、 $\alpha L = 0.0012$  において、ろ過速度  $2.5\ \text{cm/s}$ 、 $5.0\ \text{cm/s}$ 、 $10.0\ \text{cm/s}$  の3種類のろ過速度の捕集効率をプロットしたものを Fig.2-7 から Fig.2-9 に示す。これらの図より捕集効率はろ過速度が速いほど慣性捕集による大粒径側での立ち上がりの粒径は小さくなるとともに、小粒径側の拡散捕集を抑制できることが分かる。これは、ろ過速度を大きくすることで、 $Stk$  数が大きくなり慣性捕集が促進される一方、 $Pe$  数も大きくなるため拡散捕集が抑制されるためである。

しかし、Fig.2-10 に示すように、繊維径の場合と同様カットオフ径が  $0.6$ 、 $1.5$ 、 $4\ \mu\text{m}$  となる3種類の分級曲線を比較した場合、その傾きにはほとんど差異が見られず、同様の分級特性を示している。このときの回転数を比較すると、ろ過速度が大きいほど、同様のカットオフ径を得るのに必要な回転数は大きくなっていることが分かる。特にろ過速度が  $5.0\ \text{cm/s}$  以上では、カットオフ径  $0.6\ \mu\text{m}$  を得るのに  $3000\ \text{rpm}$  を超えた回転速度が必要となっている。

### 2-3-2-3 $\alpha L$ が分級特性に与える影響

$\alpha L$  による分級特性の変化について確認するために、ろ過速度  $2.5\ \text{cm/s}$ 、繊維径  $200\ \mu\text{m}$  において、 $\alpha L = 0.0012$ 、 $0.002$ 、 $0.0028$  の3種類の捕集効率をプロットしたものを Fig.2-11 から Fig.2-13 に示す。これらの図より捕集効率は  $\alpha L$  が大きいほど慣性捕集による大粒径側での立ち上がりの粒径は小さくなり、傾きも鋭くなるが、小粒径側で拡散捕集が大きくなることが分かる。

また、Fig.2-14 に示すカットオフ径が  $0.6$ 、 $1.5$ 、 $4\ \mu\text{m}$  となる3種類の分級曲線を比較した場合、その傾きにはほとんど差異が見られず、同様の分級特性を示した。しかしこのときの回転数を比較すると、 $\alpha L$  が高いほど、同様のカットオフ径を得るのに必要な回転数は小さくなっていることが分かる。

以上の計算結果より、ろ過条件、フィルタ物性により  $0\ \text{rpm}$  での分級特性は変化させることが可能であるが、カットオフ径を決定した場合、回転数を調整することでほぼ同様の分級曲線を描き、繊維径、ろ過速度、 $\alpha L$  が分離曲線の傾きに影響しないことが分かった。これは Eq.(2-15)によって与えられる遠心力による単一繊維捕集  $\eta_c$  が、遠心沈降速度とろ過速度の比によって与えられ、充

填率とろ過速度の関数ではないためである。

よって、本研究では以下の条件全てを満たす繊維径とろ過速度の組み合わせであれば回転フィルタを分級器として用いることができるとした。

- (1) 回転数 3000 rpm 以下で 50%カットオフ径  $0.5 \mu\text{m}$  を達成できること
- (2) 回転していない状態での拡散捕集による微小粒径粒子に対する捕集効率が低いこと ( $0.3 \mu\text{m}$  で捕集効率 10%以下)

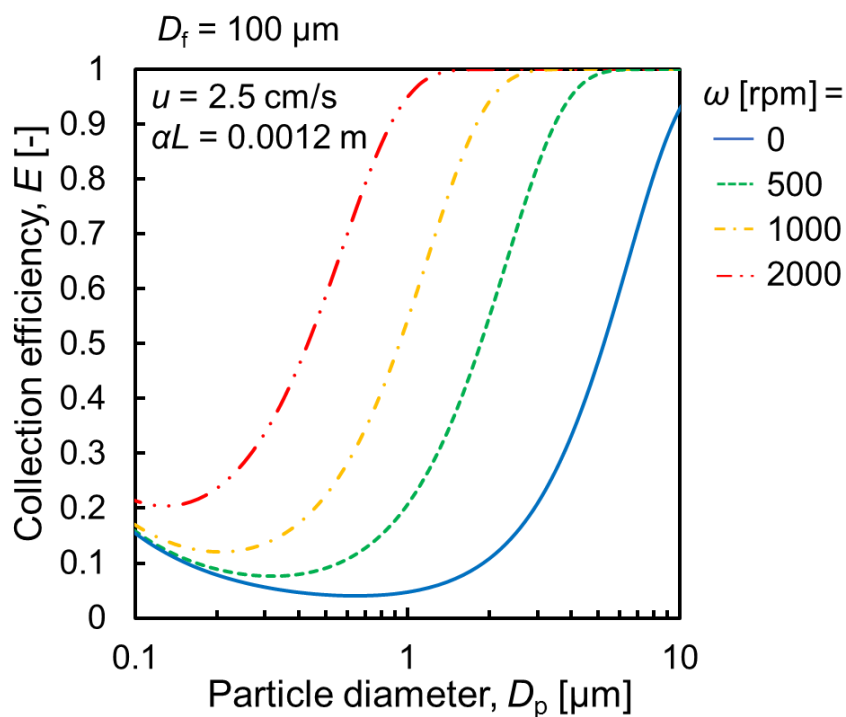


Fig.2-3 Collection efficiency of centrifugal filter. ( $u = 2.5 \text{ cm/s}$ ,  $D_f = 100 \mu\text{m}$ ,  $\alpha L = 0.002$ )

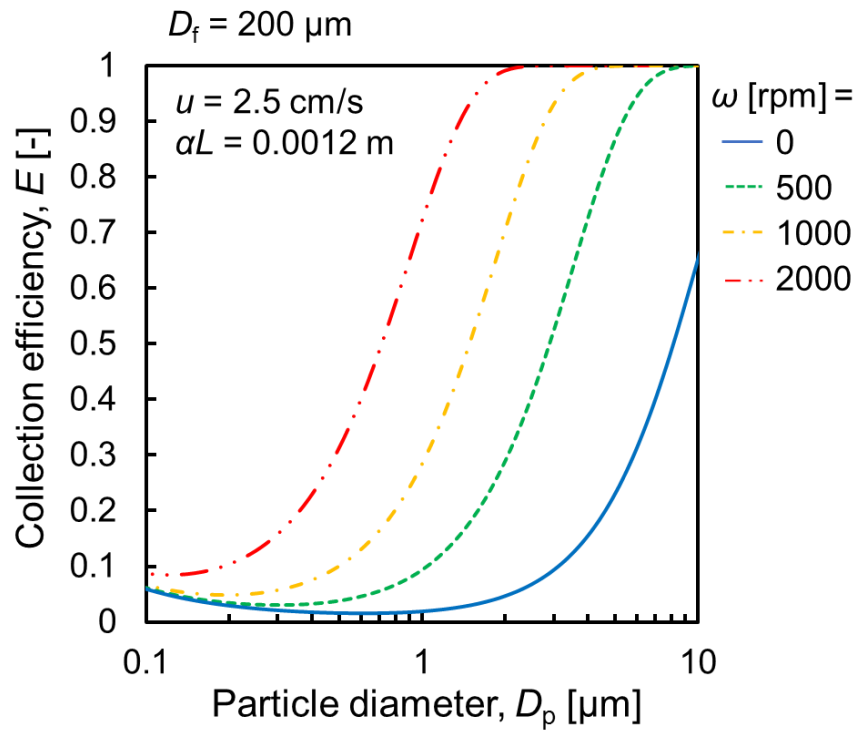


Fig.2-4 Collection efficiency of centrifugal filter. ( $u = 2.5 \text{ cm/s}$ ,  $D_f = 200 \mu\text{m}$ ,  $\alpha L = 0.0012$ )

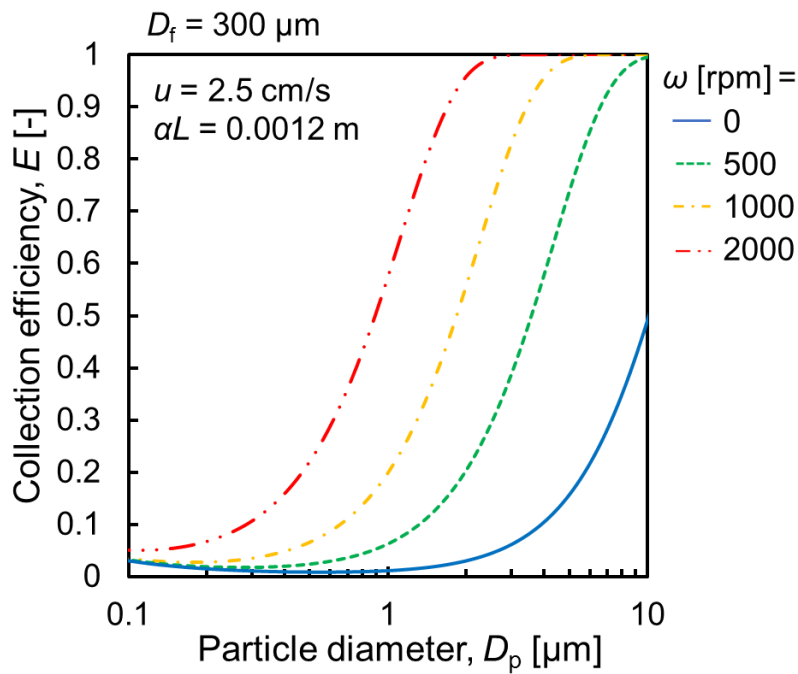


Fig.2-5 Collection efficiency of centrifugal filter. ( $u = 2.5 \text{ cm/s}$ ,  $D_f = 300 \mu\text{m}$ ,  $\alpha L = 0.0012$ )

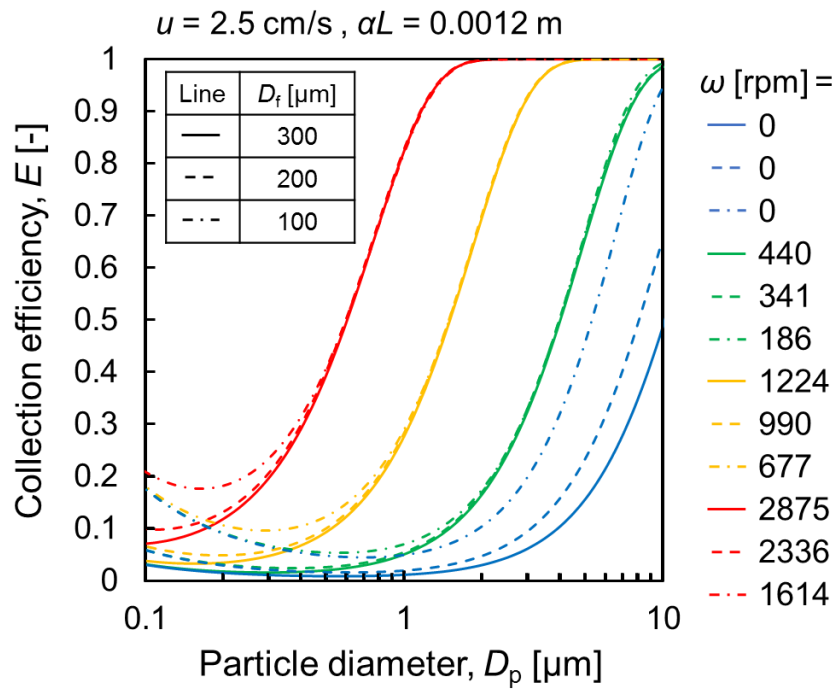


Fig.2-6 Effect of fiber diameter on the total collection efficiency derived from theoretical calculation as a function of particle diameter.

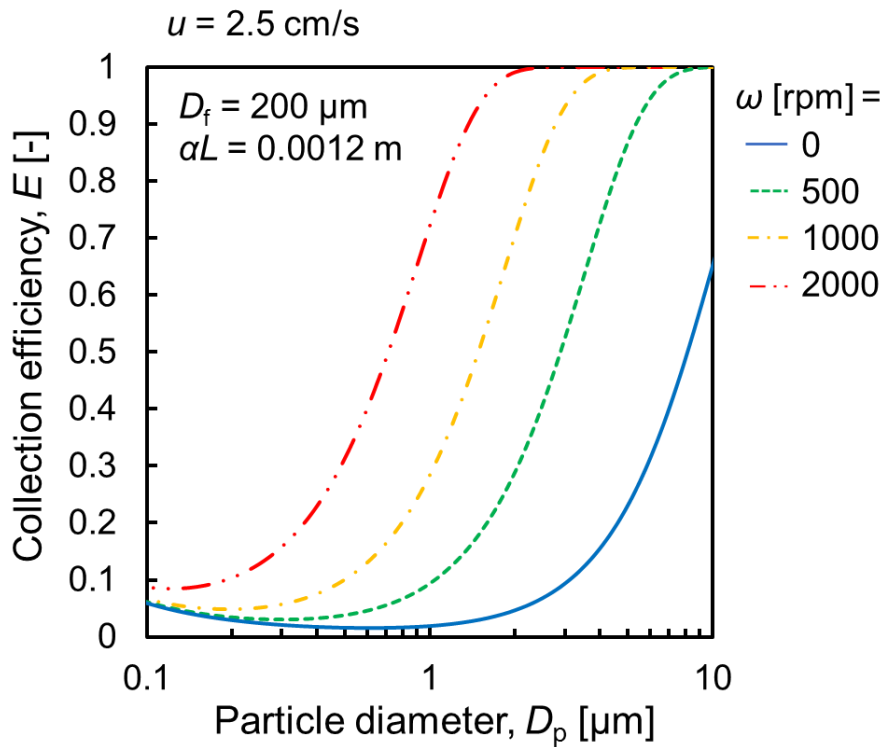


Fig.2-7 Collection efficiency of centrifugal filter. ( $u = 2.5 \text{ cm/s}, D_f = 200 \mu\text{m}, \alpha L = 0.0012$ )

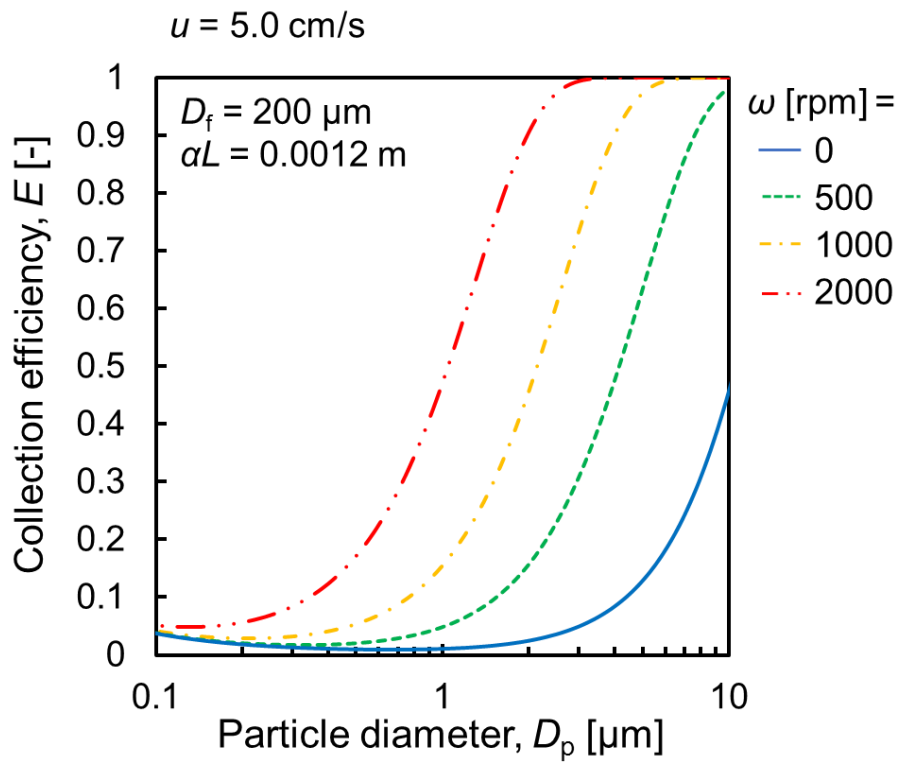


Fig.2-8 Collection efficiency of centrifugal filter. ( $u = 5.0 \text{ cm/s}$ ,  $D_f = 200 \mu\text{m}$ ,  $\alpha L = 0.0012$ )

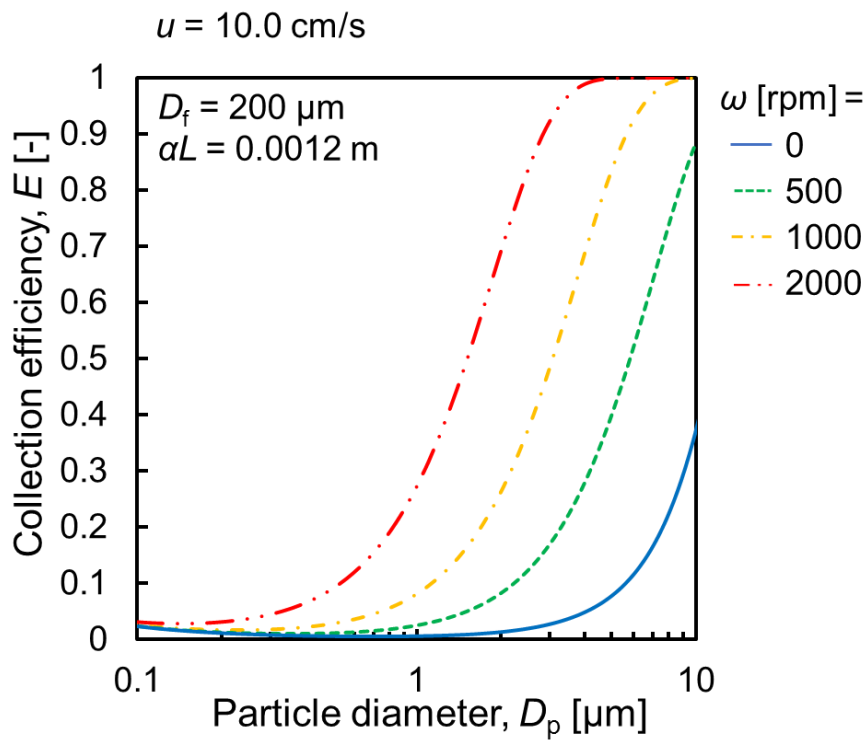


Fig.2-9 Collection efficiency of centrifugal filter. ( $u = 10.0 \text{ cm/s}$ ,  $D_f = 200 \mu\text{m}$ ,  $\alpha L = 0.0012$ )

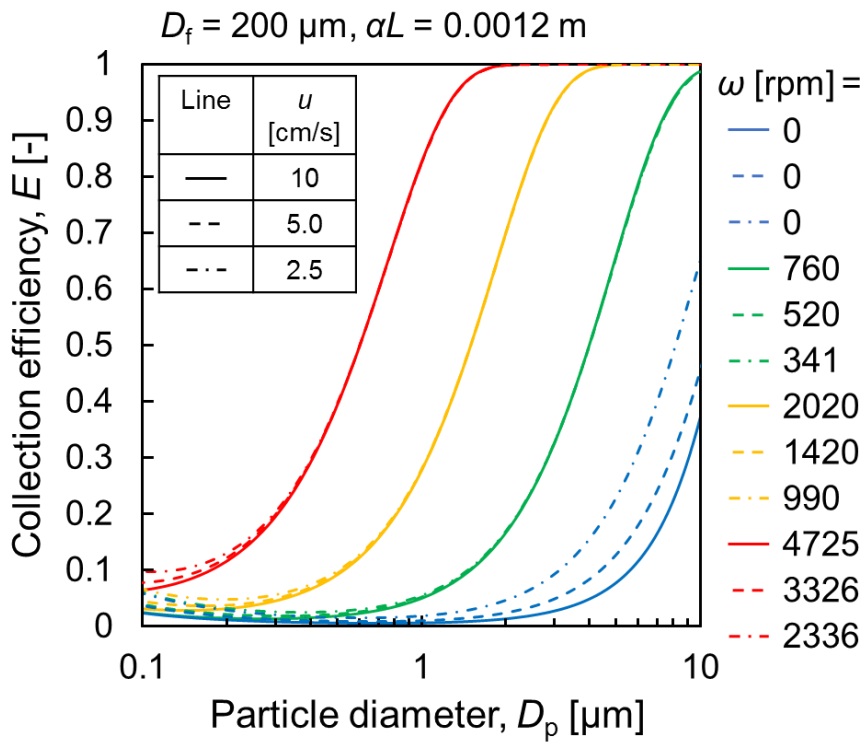


Fig.2-10 Effect of filtration velocity on the total collection efficiency derived from theoretical calculation as a function of particle diameter.

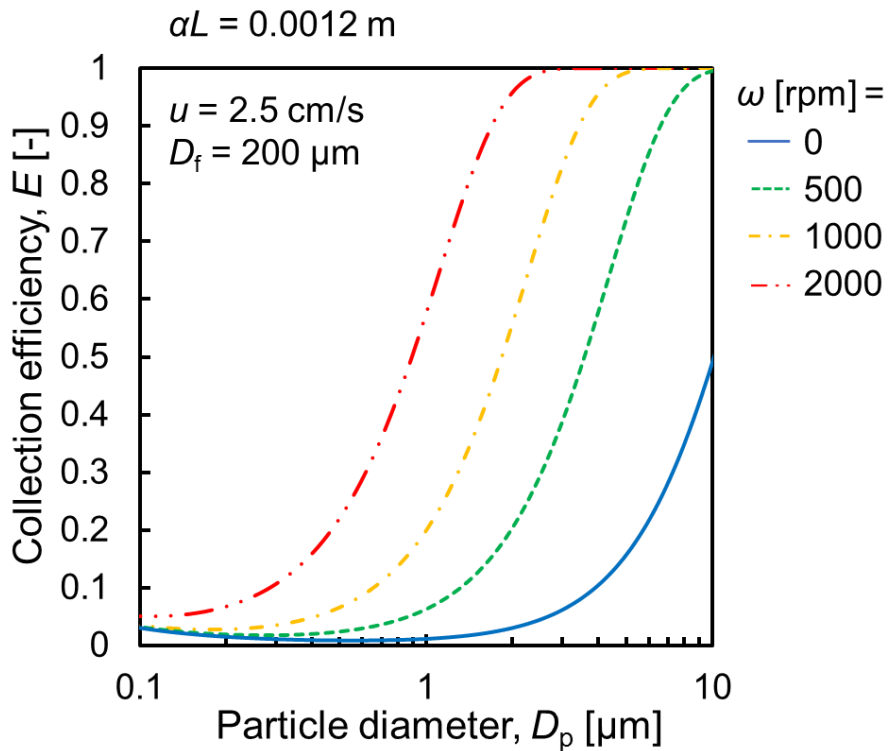


Fig.2-11 Collection efficiency of centrifugal filter. ( $u = 2.5 \text{ cm/s}, D_f = 200 \mu\text{m}, \alpha L = 0.0012$ )

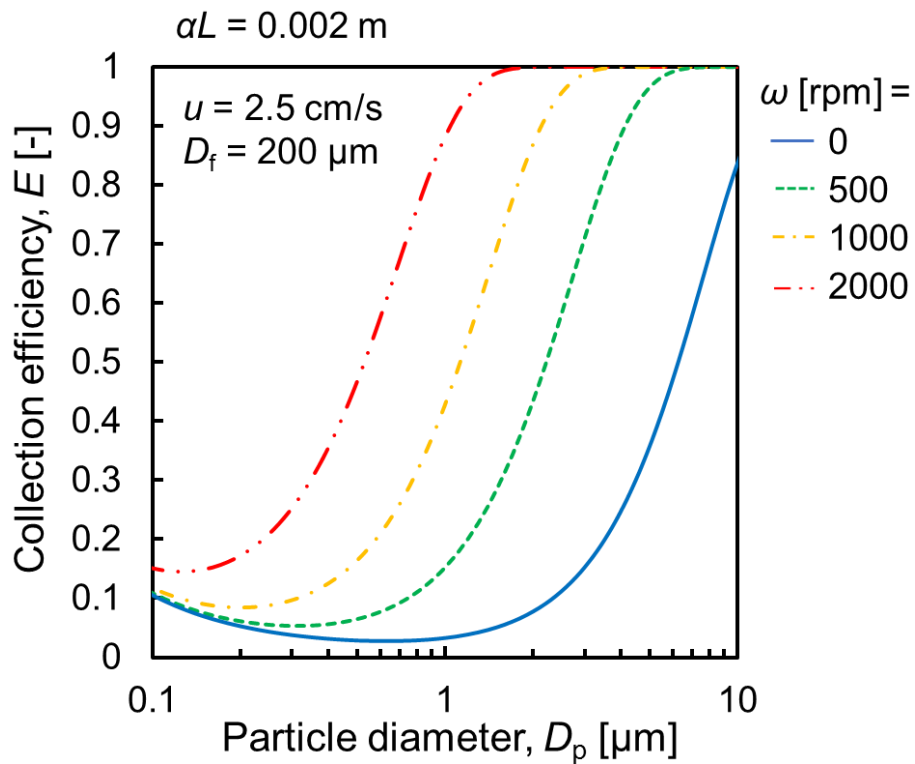


Fig.2-12 Collection efficiency of centrifugal filter. ( $u = 2.5 \text{ cm/s}$ ,  $D_f = 200 \text{ μm}$ ,  $\alpha L = 0.002$ )

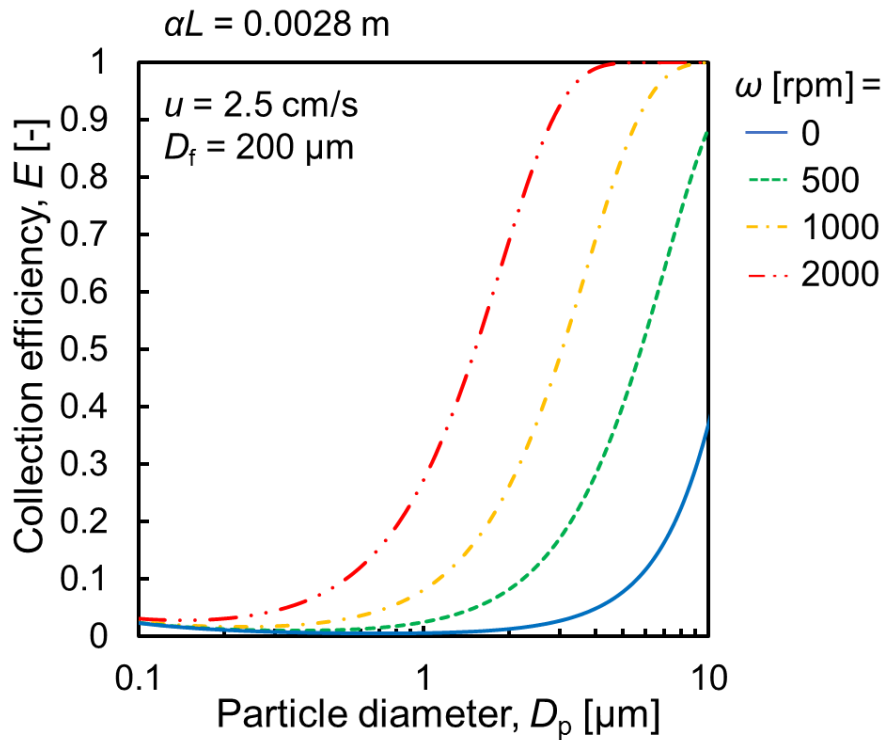


Fig.2-13 Collection efficiency of centrifugal filter. ( $u = 2.5 \text{ cm/s}$ ,  $D_f = 200 \text{ μm}$ ,  $\alpha L = 0.0028$ )



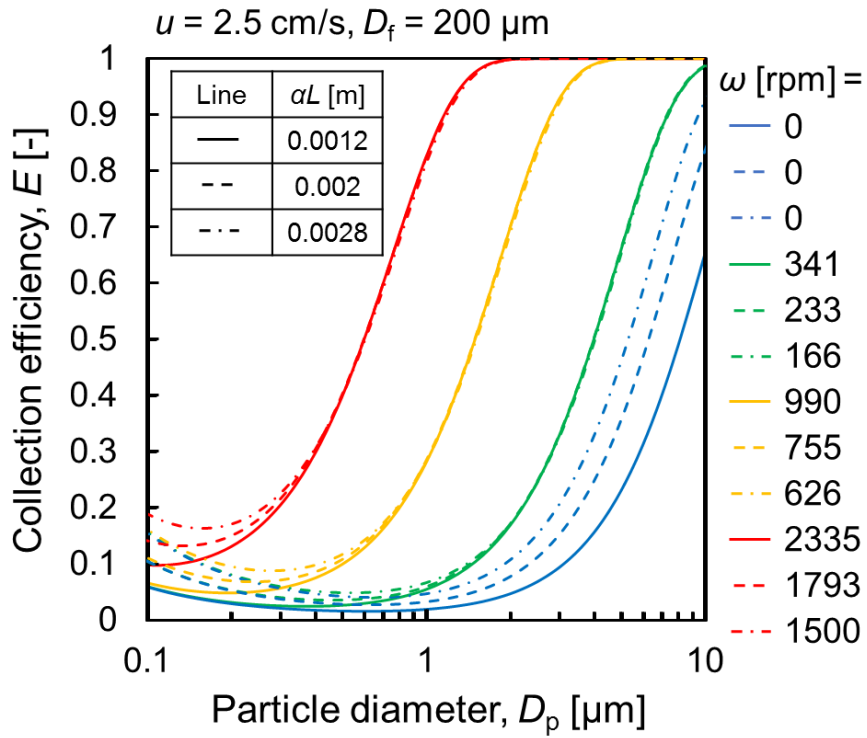


Fig.2-5 Effect of on the  $\alpha L$  on the total collection efficiency derived from theoretical calculation as a function of particle diameter.

### 第3章 回転フィルタの分離特性の評価

前章では回転フィルタを分級装置として使用するための設計条件の計算を行った。そこで本章では計算結果に基づいてフィルタろ材、ろ過条件を選択し、単分散粒子であるPSL粒子を用いてその分級特性について検討を行った。

#### 3-1 ポリウレタン多孔体フィルタろ材の物性値

前章で求めた設計条件を達成するには、フィルタの繊維径が  $100\ \mu\text{m}$  以上必要である。Nakajima *et al.*(2015)は回転フィルタのフィルタろ材としてSUS繊維層フィルタを用いていたが、SUS繊維層フィルタでは繊維径の太さに限界があり、また、SUS繊維をフィルタホルダ内に均一に充填することが困難である。そこで本研究では、十分な厚みを確保することができ、かつ均一な充填率をもつフィルタろ材として、ポリウレタンの多孔体を用いることとした。Table.3-1 にポリウレタン多孔体の物性値、Fig.3-1 にそれぞれの写真と顕微鏡写真を示す。(a)と(b)は厚み  $L$ 、目付  $W$ 、充填率  $\alpha$  がほぼ等しいので、分級性能について、繊維径のみの影響を見ることができる。

Table.2-1 Test filter property

Filter name	(a)	(b)
Fiber diameter, $d_f$ [ $\mu\text{m}$ ]	140	240
Thickness, $L$ [mm]	40	40
Weight, $W$ [ $\text{g}/\text{m}^2$ ]	132	131
Packing density, $\alpha$ [-]	0.030	0.030

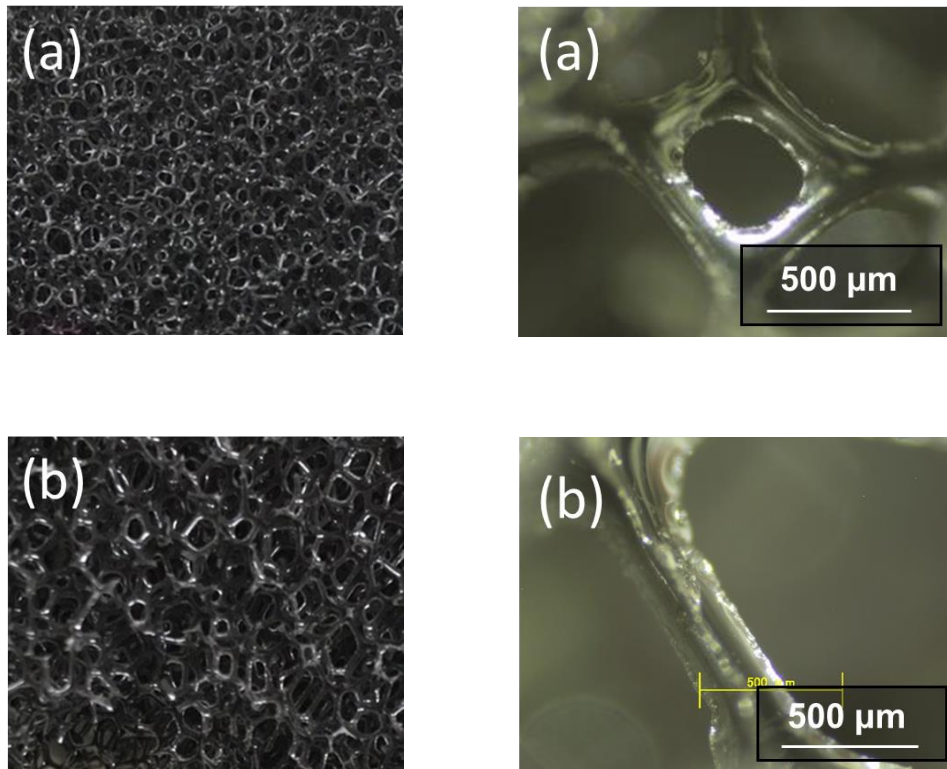


Fig.3-1 Photographs and microscope photographs of test filter

### 3-2 実験装置および実験方法

Fig. 3-2 に示した実験経路を用いて、前述の 2 種類のポリウレタン多孔体フィルタの初期捕集効率の測定を行った。実験条件を Table 3-2 に示す。試験粒子として、粒径が  $0.5 \sim 2.0 \mu\text{m}$  の範囲の単分散状態の Polystyrene-Latex 粒子 (PSL, JSR Co.) を、アトマイザを用いて噴霧し、ディフュージョンドライヤーを通過させ水分除去を行って乾燥した試験粒子を  $\text{Am}^{241}$  放射線源により帯電平衡状態とし、清浄乾燥空気と混合希釈した後にフィルタホルダへ導入した。このときのフィルタ前後の粒子濃度  $C_{\text{in}}$ ,  $C_{\text{out}}$  を、光学式粒子スペクトロメータ OPS (Optical Particle Sizer : OPS, Model 3330 – TSI Inc.) を用いて計測した。

ここで、導入される試験粒子の濃度は常に安定しているわけではなく、時間の経過に伴い変化することがあるため、Table 3-3 に示すように、フィルタ前後の粒子濃度をそれぞれ交互に測定し、各粒径に対する捕集効率  $E_n$  を Eq.(3-1) を用いて求め、Eq.(3-2) を用いて求めた  $E_{\text{ave}}(D_p)$  を各粒径の捕集効率とした。

$$E_n(D_p) = 1 - \frac{C_{out,n}}{\frac{(C_{in,n} + C_{in,n+1})}{2}} \cdot \cdot \cdot (3-1)$$

$$E_{ave}(D_p) = \frac{\sum_{n=1}^5 E_n}{5} \cdot \cdot \cdot (3-2)$$

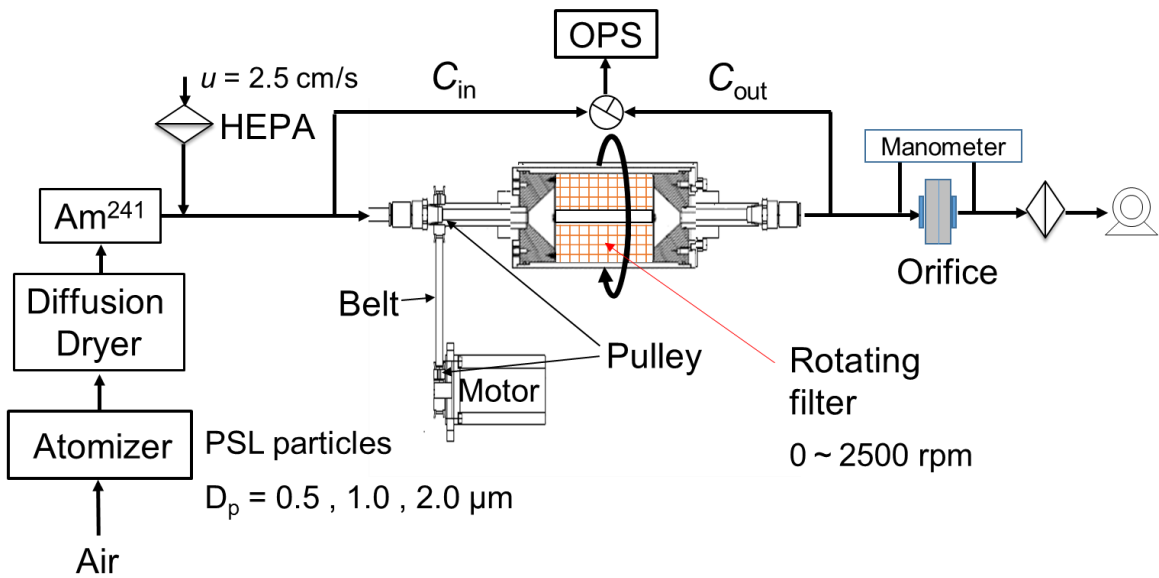


Fig.3-2 Experimental set up

Table 3-2 Experimental Conditions

Inner radius, $R_1$	10 mm
Outer radius, $R_2$	40 mm
Filter thickness, $L$	40 mm
Packing density, $\alpha$	0.03
Fiber diameter, $d_f$	140, 240 $\mu\text{m}$
Air velocity, $u$	2.5, 5.0 cm/s
Rotation speed, $f$	0-2500 rpm
Test particle	PSL
Particle diameter, $d_p$	0.5-2.0 $\mu\text{m}$

Table 3-3 Counting cycle

Count no.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Inlet	$C_{in,1}$		$C_{in,2}$		$C_{in,3}$		$C_{in,4}$		$C_{in,5}$		$C_{in,6}$
Outlet		$C_{out,1}$		$C_{out,2}$		$C_{out,3}$		$C_{out,4}$		$C_{out,5}$	

### 3-3 実験結果および考察

Fig.3-3 から Fig.3-6 に、それぞれの条件における捕集効率の実験結果と 2.1 節で述べた理論による推定線を示す。これらの図は、縦軸に捕集効率を、横軸に回転速度を表したものである。これらの図を見てわかるようにどの条件においても実験値は推定線と非常によく一致しており、2.1 節で示した理論は本実験で用いたポリウレタン多孔体フィルタにおいても適用できることがわかる。また、最適化条件の通り、粒径が大きいほど捕集効率は大きくなっており、流速が小さいと捕集効率は大きくなっている。

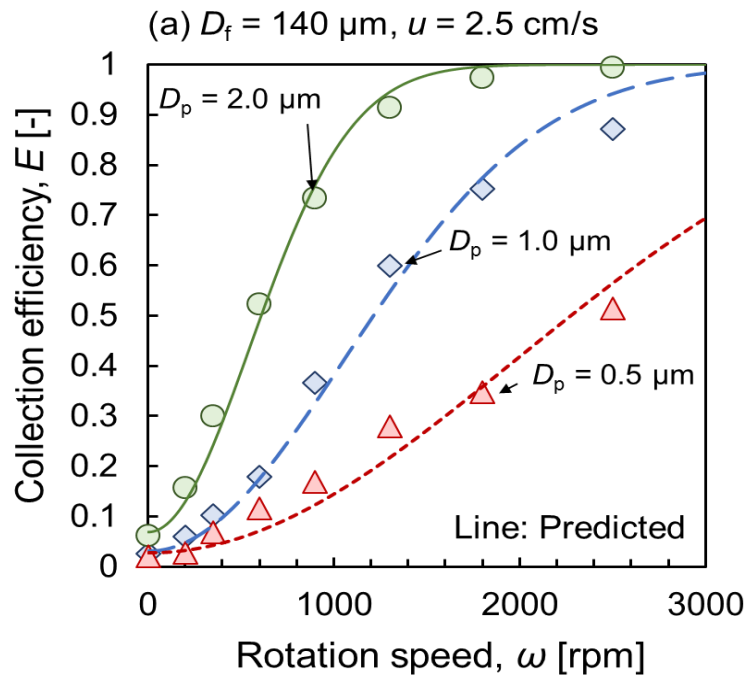


Fig.3-3 Collection efficiency of centrifugal filter ( $D_f = 140 \mu\text{m}$ ,  $u = 2.5 \text{ cm/s}$ )

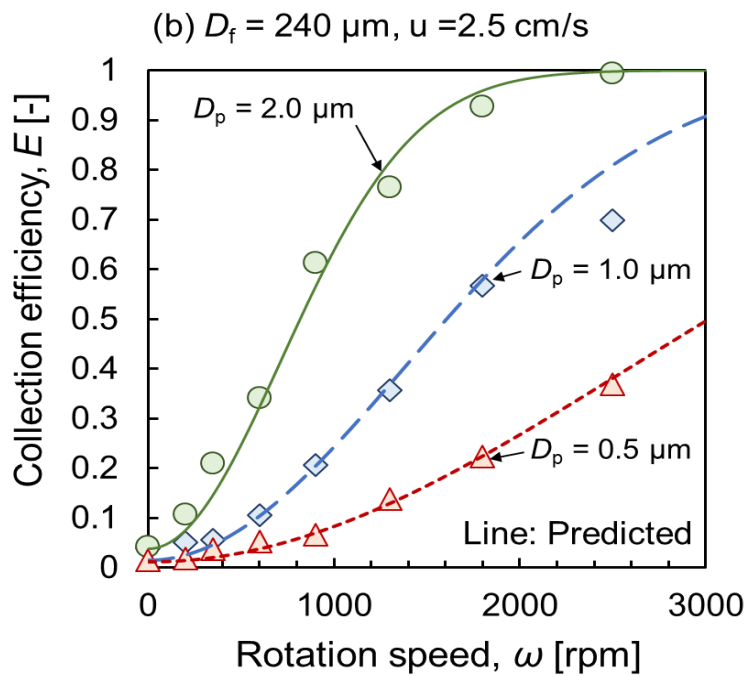


Fig.3-3 Collection efficiency of centrifugal filter ( $D_f = 240 \mu\text{m}$ ,  $u = 2.5 \text{ cm/s}$ )

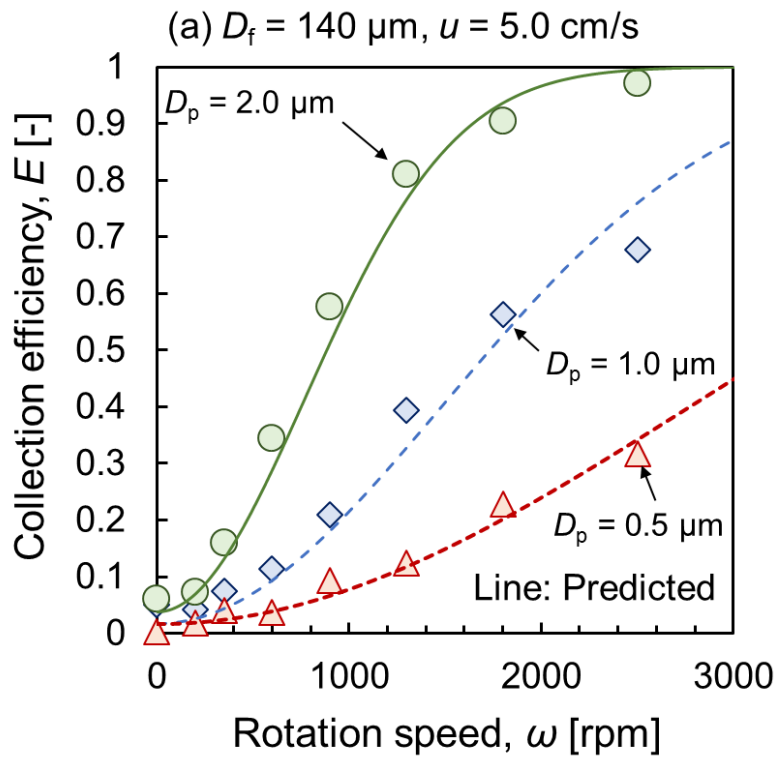


Fig.3-5 Collection efficiency of centrifugal filter ( $D_f = 240 \mu\text{m}$ ,  $u = 5.0 \text{ cm/s}$ )

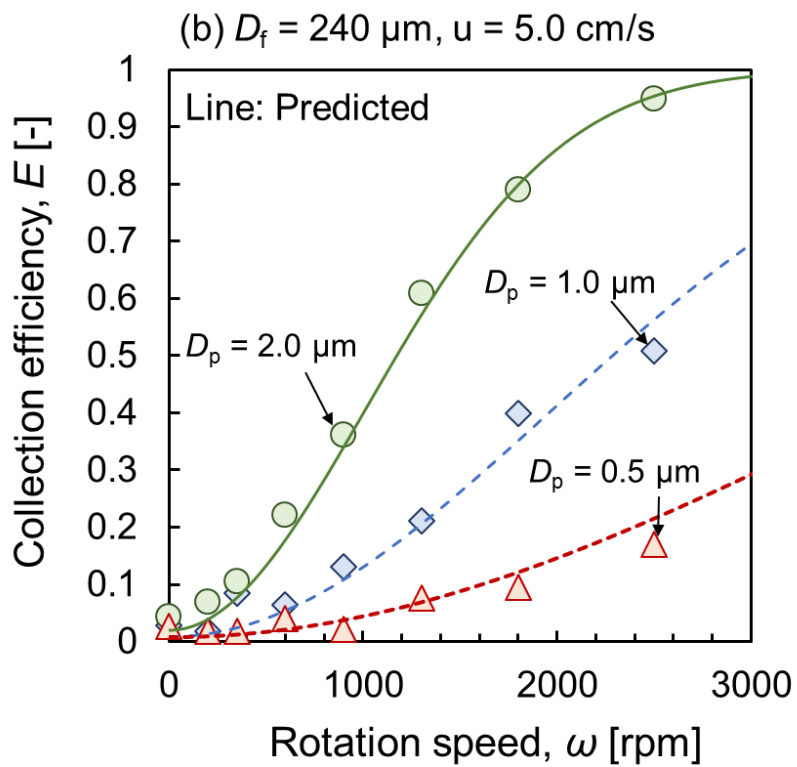


Fig.3-6 Collection efficiency of centrifugal filter ( $D_f = 240 \mu\text{m}$ ,  $u = 5.0 \text{ cm/s}$ )

### 3-3-1 分級曲線の繊維径依存性とろ過速度依存性

第2章3節で示したように繊維径、ろ過速度を変化させてもその回転数を調整することでその分級曲線は同様の傾きをとる。そこで、Fig.3-2とFig.3-3を回転数のスケールを調整して一つの図にまとめたものをFig.3-7に示す。この図からわかるように繊維径140  $\mu\text{m}$ と繊維径240  $\mu\text{m}$ の捕集効率の実験値は回転数のスケールを調整することで一致しており、確かに繊維径による分離特性への影響はないと言える。また、Fig.3-2とFig.3-4を回転数のスケールを調整して一つの図にしたものをFig.3-8に示す。こちらも同様に回転数のスケールを調整することで同様の捕集効率曲線を描き、ろ過速度の分離特性への影響はないことが示されている。

### 3-3-2 カットオフ特性

実験で測定した捕集効率より求めた50%カットオフ径と回転数の関係を示した図をFig.3-9とFig.3-10に示す。図中の実線と破線は理論推定線である。これらの図より、繊維径が小さく、また、ろ過速度が小さい方がより、少ない回転数で小さいカットオフ径を達成できることがわかる。



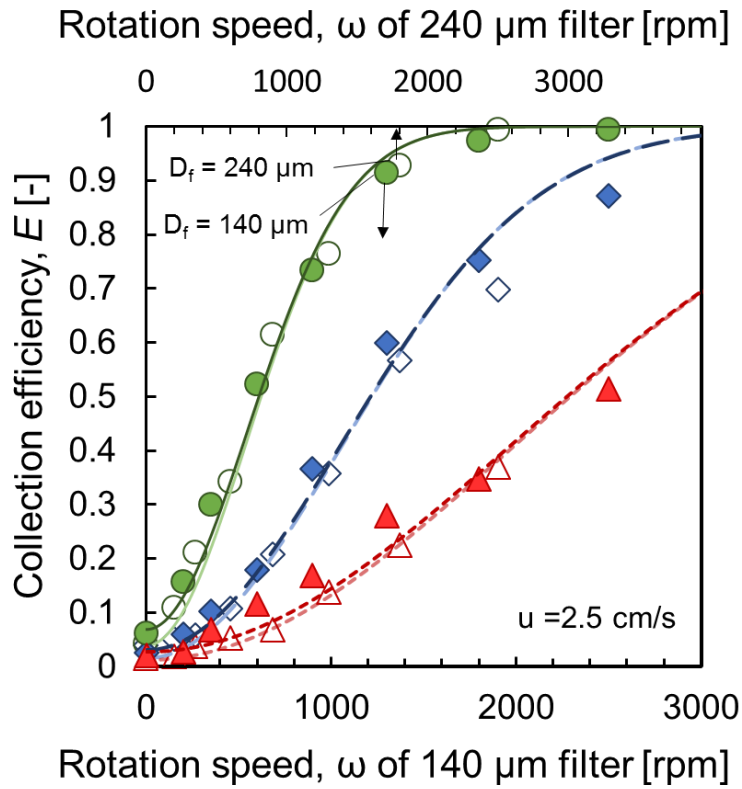


Fig.3-7 Collection efficiency of centrifugal filter ( $u = 2.5 \text{ cm/s}$ )

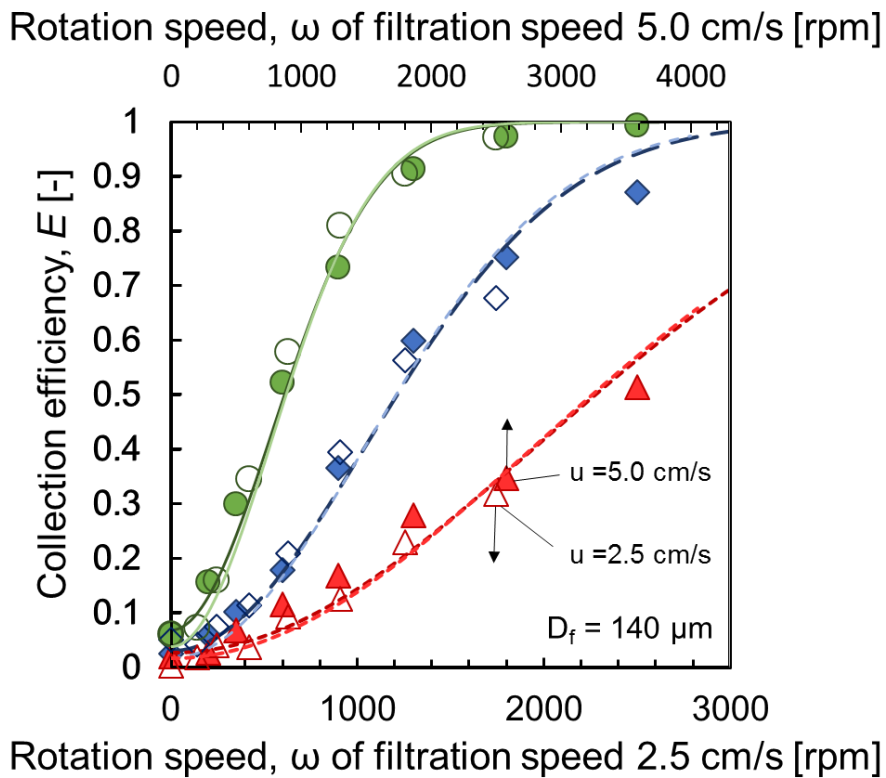


Fig.3-8 Collection efficiency of centrifugal filter ( $D_f = 140 \mu\text{m}$ )

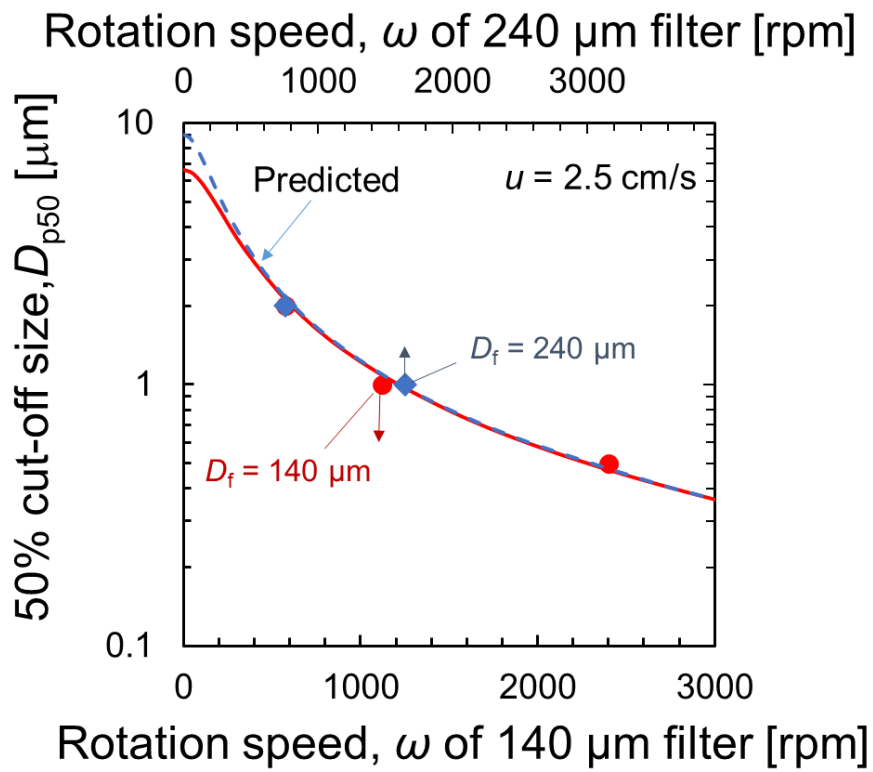


Fig.3-9 50% cut-off size

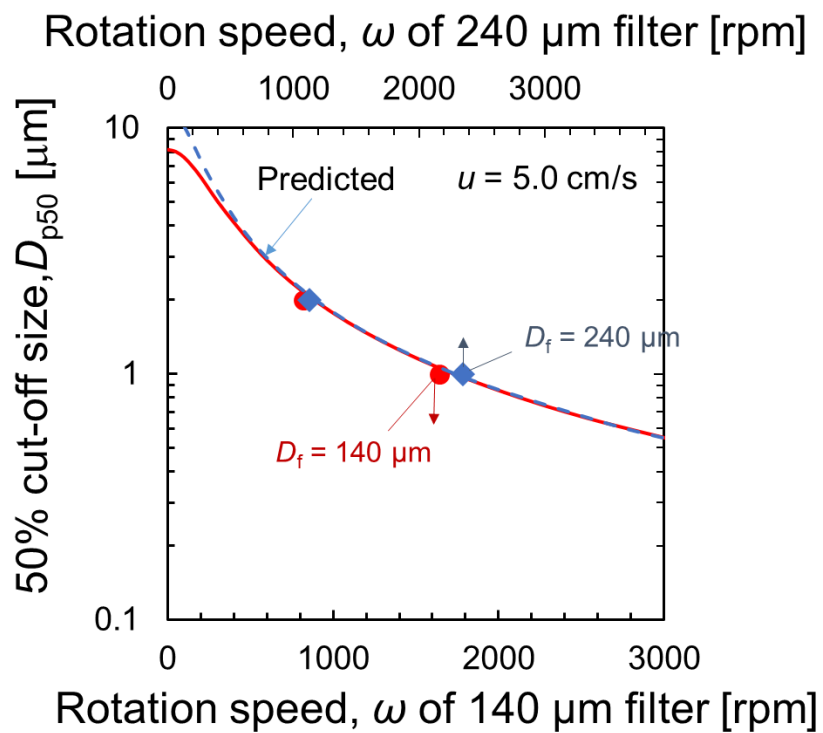


Fig.3-10 50% cut-off size

## 第4章 多分散粒子の計測

3章では単分散の PSL 粒子を用いて回転フィルタの分級性能の評価を行い、理論推定値通りの実験値を得られることが分かった。そこで本章では多分散の JIS11 種関東ローム粉体を用いて、その粒径別捕集効率とトータルの質量捕集効率の測定を行った。また、得られた測定データから粒子径分布へのデータ処理(逆変換アルゴリズム)についても検討を行った。

### 4-1 実験方法

Fig4-1 に示した実験経路を用いて、ポリウレタン多孔体フィルタの粒径別捕集効率とトータルの質量捕集効率の測定を行った。実験条件を Table4-1 に示す。試験粒子は JIS11 種粉体(関東ローム)を流動層によって分散状態にした後、 $Am^{241}$  放射線源により帯電平衡状態とし、清浄乾燥空気と混合希釈した後、フィルタホルダへ導入した。フィルタ前後の粒子個数濃度は光学式粒子スペクトロメータ OPS (Optical Particle Sizer : OPS, Model 3330 – TSI Inc.) を用いて、質量濃度は光散乱式デジタル粉塵計(ダストトラック II MODEL 8530 TSI Inc.) を用いて計測した。ここでも、試験粒子の濃度は常に安定しているわけではないため、第3章2節で述べた方法で粒子の入り口濃度と出口濃度を計算した。また、粒子径分布を比較するためにアンダーセンサンプラーによって粒子径分布の同時測定を行った。

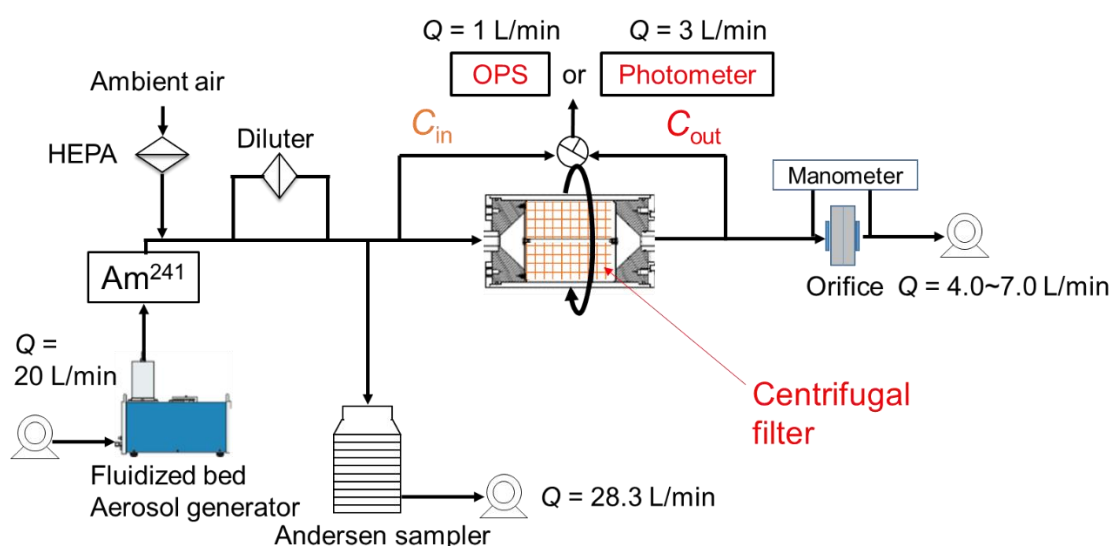


Table 4-1 Experimental Conditions

Inner radius, $R_1$	10 mm
Outer radius, $R_2$	40 mm
Filter thickness, $L$	40 mm
Packing density, $\alpha$	0.03
Fiber diameter, $d_f$	140 $\mu\text{m}$
Air velocity, $u$	2.5 cm/s
Rotation speed, $f$	0-2500 rpm
Test particle	JIS-11
Particle concentration $C$	0.33-5.4 $\text{mg}/\text{m}^3$

#### 4-2 実験結果および考察

Fig.4-2 と Fig.4-3 に粒径別捕集効率の実験結果を示す。これらの図は縦軸に初期捕集効率を横軸に粒径を表したものである。また、図中の実線は第 2 章 1 節で述べた理論推定線を示している。関東ローム粉体の粒径は、本実験で使用した OPS が粒径 0.3 から 10  $\mu\text{m}$  までの間に 16 段階の粒径区分を持つため、それぞれの粒径区分に対して求めた幾何平均径を用いた。これらの結果から、実験値と理論推定線は比較的一致しているとわかる。しかし、回転数が 1800 回転以下では実験値が理論推定線より高くなっている。これは導入した関東ローム粉体の濃度が高いため、 $^{241}\text{Am}$  において十分な平衡帯電状態になっておらず、静電気力による粒子の捕集が行われたためだと考えられる。

また、Fig.4-4 と Fig.4-5 にデジタル粉塵計で測定したトータルの質量捕集効率の実験結果を示す。繊維径 140  $\mu\text{m}$ 、240  $\mu\text{m}$  どちらの条件においても、濃度による捕集効率の違いはほとんど見られず、質量濃度が 0.33~5.4  $\text{mg}/\text{m}^3$  では、回転フィルタは濃度の影響を受けないといえる。つまり、回転フィルタは高濃度の粒子の計測に適応できる可能性が示唆された。

Table 4-2 Key of Fig.4-2 and Fig.4-3

0 rpm	200 rpm	350 rpm	600 rpm
●	■	▲	×
900 rpm	1300 rpm	1800 rpm	2500 rpm
*	+	—	-

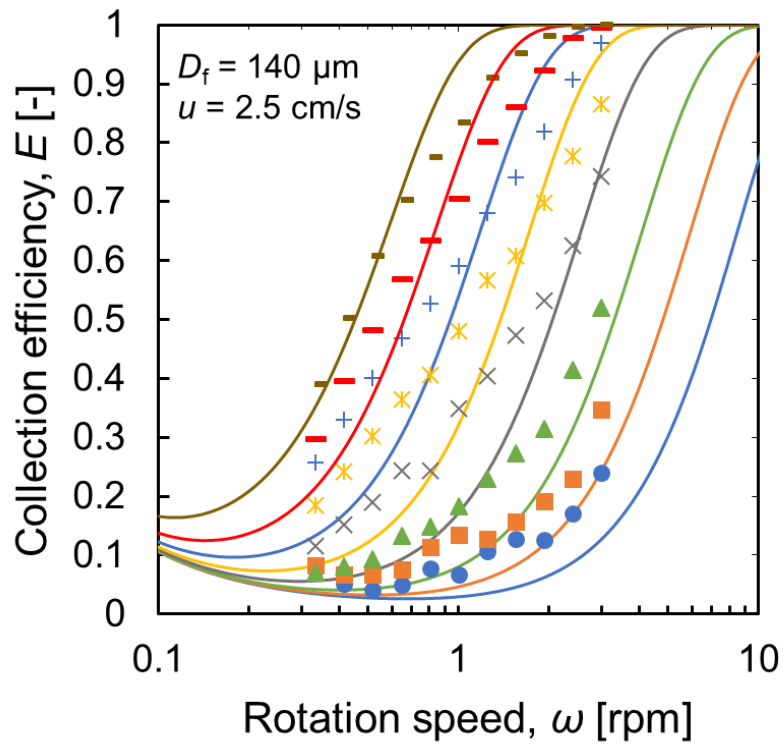


Fig.4-2 Collection efficiency of centrifugal filter ( $D_f = 140 \mu\text{m}$ ,  $u = 2.5 \text{ cm/s}$ )

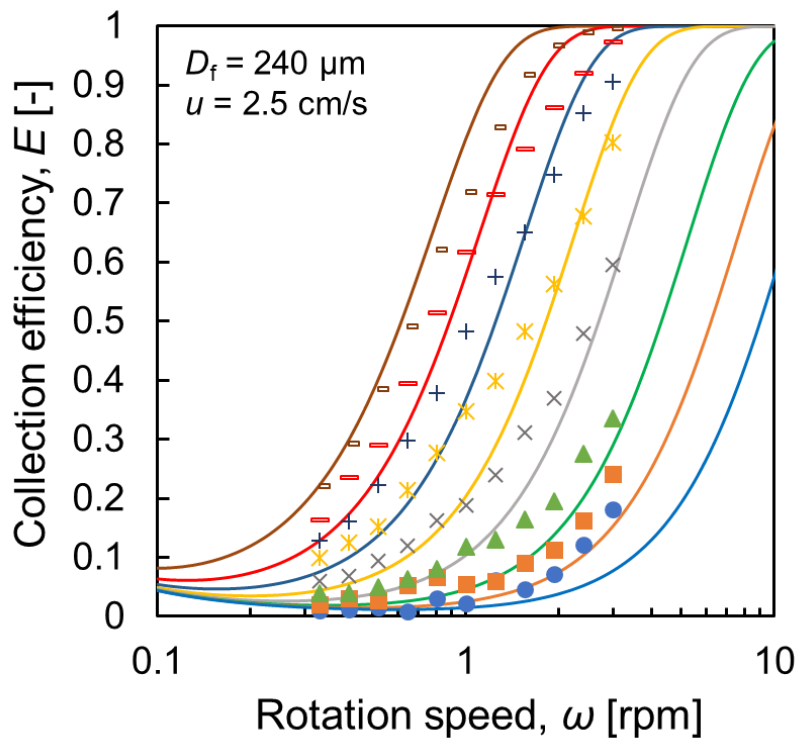


Fig.4-3 Collection efficiency of centrifugal filter ( $D_f = 240 \mu\text{m}$ ,  $u = 2.5 \text{ cm/s}$ )

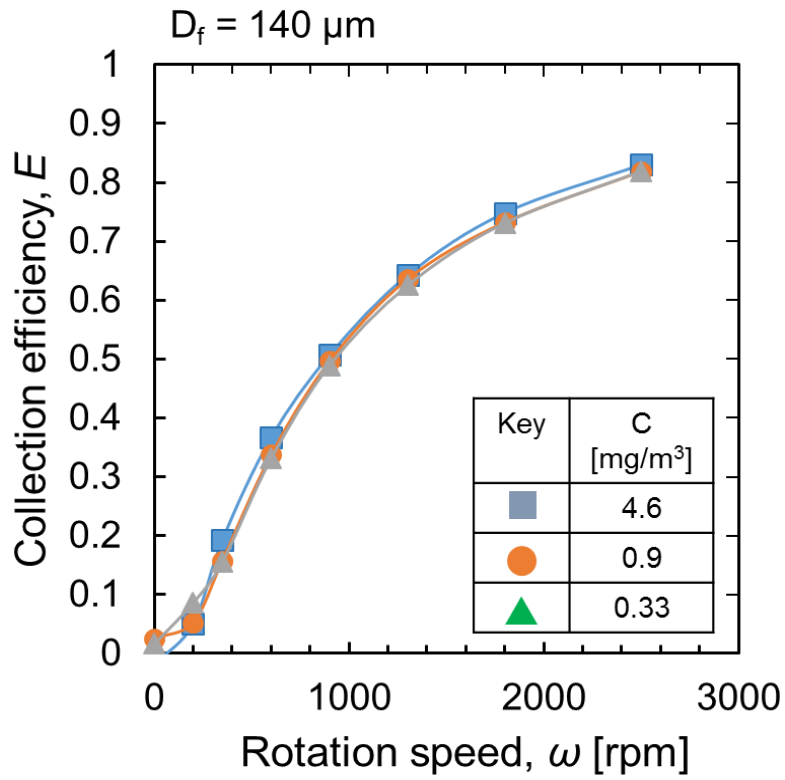


Fig.4-4 Total collection efficiency of centrifugal filter ( $D_f = 140 \mu\text{m}$ ,  $u = 2.5 \text{ cm/s}$ )

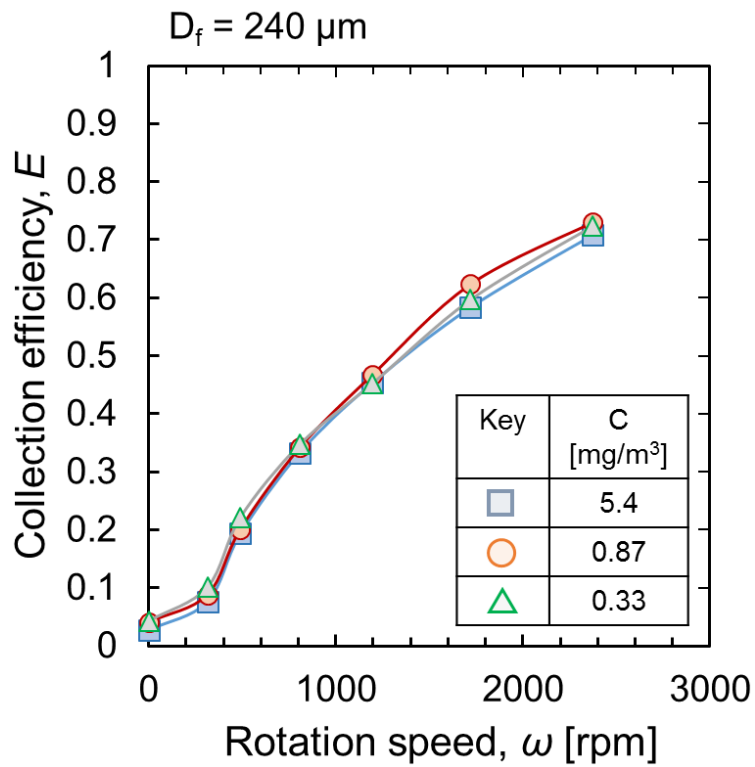


Fig.4-5 Total collection efficiency of centrifugal filter ( $D_f = 240 \mu\text{m}$ ,  $u = 2.5 \text{ cm/s}$ )

### 4-3 捕集効率から粒子径分布へのデータ逆変換

前節において、多分散粒子においても捕集効率は理論推定値と比較的一致しており、また、試験粒子の濃度を変化させても回転フィルタのトータルの質量捕集効率は変化しないことが分かった。そこで本節では、質量捕集効率から試験粒子の粒子径分布のデータ逆変換法について検討を行う。

#### 4-3-1 50%カットオフ径を利用したデータ処理

50%カットオフ径を利用したデータ処理として、まず、50%カットオフ径で粒子が完全に分離されていると仮定してふるい下分率を算出する方法について検討を行った。50%カットオフ径は回転数に対応するため、この仮定のもとでは透過率は累積ふるい下分率としてプロットすることが出来る。つまり透過率を測定するだけでよい、もっとも単純なデータ処理方法といえる。この方法を用いて算出した累積ふるい下分率を対数確率紙にプロットしたものを Fig.4-5 に示す。図には比較として、同時に計測を行ったアンダーセンサンプラーと OPS のふるい下分率を示している。図を見て分かるように、この方法で算出したふるい下分率はアンダーセンサンプラーや OPS に比べ傾きが小さく、分散が大きくなっている。

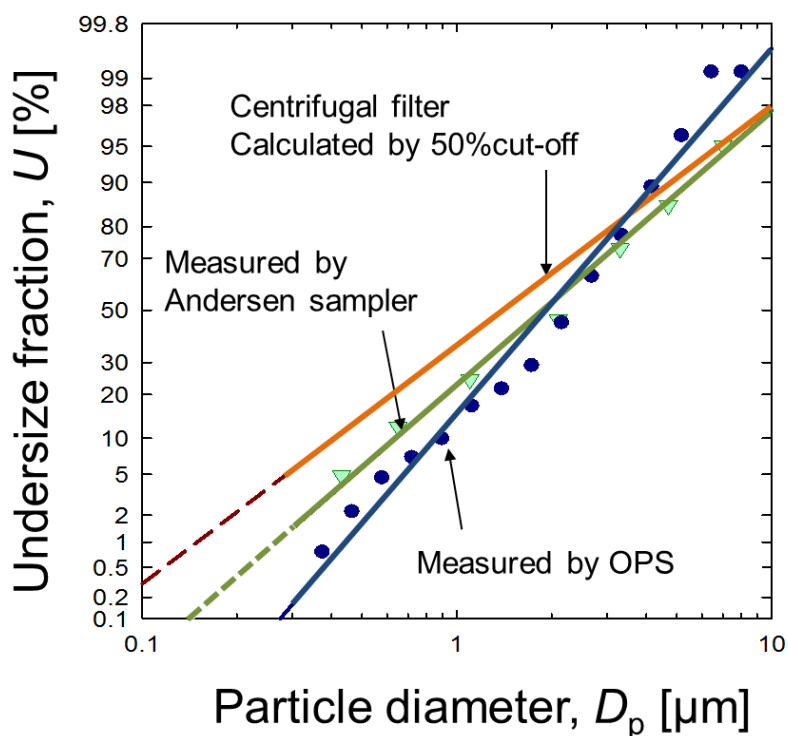


Fig.4-5 Size distribution of JIS11 powder measured by OPS, Andersen sampler and Centrifugal filter

#### 4-3-2 最小二乗法によるデータ逆変換

最小二乗法は、物理実験データの処理において、線形あるいは、非線形パラメータの推定に、また、間接測定の最確値を求める手法として古くから用いられている。そこで、回転フィルタでもこの手法を用いて検討を行った。

まず、粒度分布関数  $f(D_p)$  をもつ多分散エアロゾルの透過率は次式で与えられる。

$$P(D_p) = \int_0^{\infty} f(D_p)T(D_p, \omega) dD_p \cdots (4-1)$$

Eq.(4-1)は  $f(D_p)$  から  $P(D_p)$  への積分変換であり、 $P$  を逆変換することにより、粒度分布関数が得られる。ここで  $T(D_p, \omega)$  は Eq.(2-1) で示される対数透過式である。測定するエアロゾルが対数正規分布に従う場合には  $f(D_p)$  は

$$f(D_p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma D_p} \exp\left[-\frac{(\ln D_p - \ln D_{pg})^2}{2\sigma^2}\right] \cdots (4-2)$$

であり、上式を Eq.(4-1) に代入し、種々の  $D_{p50}$ ,  $\sigma_g$  に対して  $P$  を計算することで粒度分布を逆算する。またこのとき、

$$P_i^{exp} = \int_0^{\infty} f(D_p)T(D_p, \omega_i) dD_p \cdots (4-3)$$

$$P_i^{pred} = \int_0^{\infty} f(D_p)T(D_p, \omega_i) dD_p \cdots (4-4)$$

$$s^2 = \sum_{i=1}^n (P_i^{exp} - P_i^{pred})^2 \cdots (4-5)$$

で示される  $s^2$  が最小となる  $D_{p50}$ ,  $\sigma_g$  を求めたものを Fig.4-6 に示す。また、

$$\left(\frac{dP}{d\omega}\right)_i^{exp} = \left(\frac{\partial \int_0^{\infty} f(D_p)T(D_p, \omega) dD_p}{\partial \omega}\right)_{\omega_i} \cdots (4-6)$$



$$\left(\frac{dP}{d\omega}\right)_i^{pred} = \left(\frac{\partial \int_0^\infty f(D_p)T(D_p, \omega)dD_p}{\partial \omega}\right)_{\omega_i} \dots (4-7)$$

$$s^2 = \sum_{i=1}^n \left[ \left(\frac{dP}{d\omega}\right)_i^{exp} - \left(\frac{dP}{d\omega}\right)_i^{pred} \right]^2 \dots (4-8)$$

で示される  $s^2$  が最小となる  $D_{p50}$ 、 $\sigma_g$  を求めたものを Fig.4-7 に示す。

これらを見て分かるように、透過率から逆算した粒度分布も透過率の傾きから求めた粒度分布関数どちらもアンダーセンサンプラー、OPS で計測した粒度分布より平均径が約 0.8  $\mu\text{m}$  小さく評価されている。しかし分布は同様の傾きを示していることがわかる。

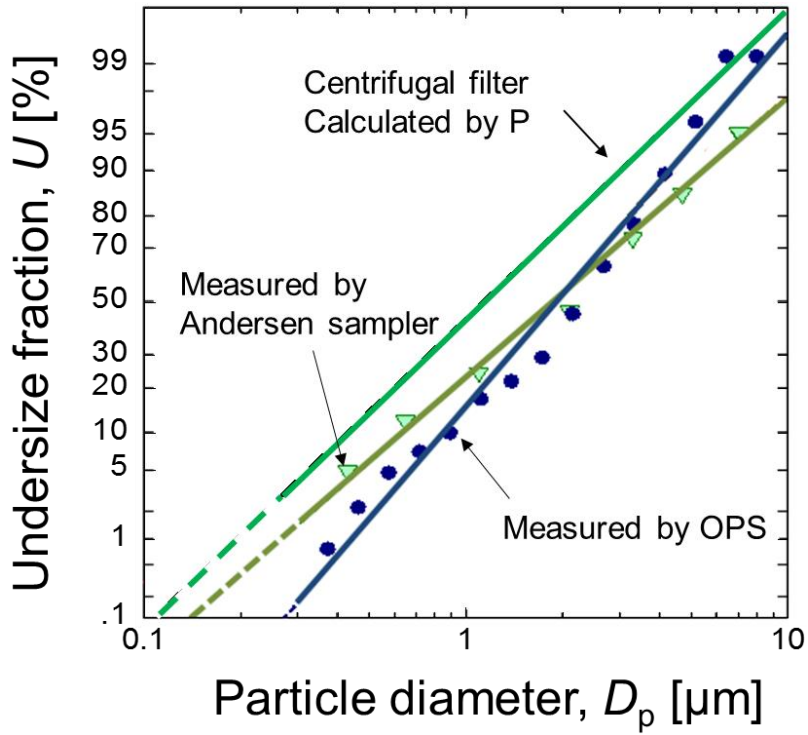


Fig.4-6 Size distribution of JIS11 powder measured by OPS, Andersen sampler and Centrifugal filter

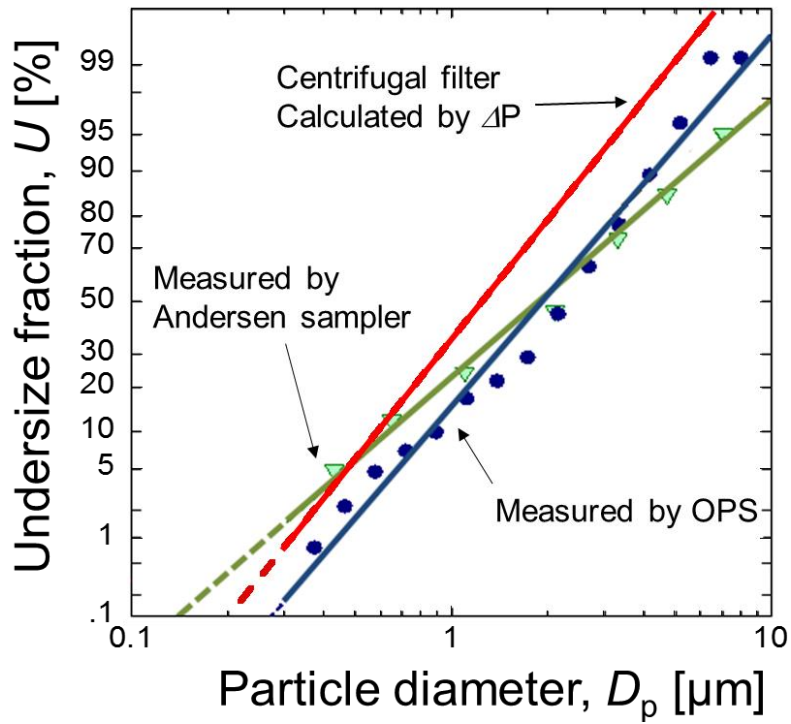


Fig.4-7 Size distribution of JIS11 powder measured by OPS, Andersen sampler and Centrifugal filter

### 4-3-3 平衡粒度法によるデータ逆変換

本節では平衡粒度法を用いた解析について記述する。まず、回転フィルタの入口、出口でのエアロゾルの粒度分布の変化の一例を Fig.4-8 に示す。第2章2節で述べた通り、粒径が大きいほど遠心力によって捕集されやすいので、回転フィルタ出口の分布は相対的に粒径の小さいほうにずれることになる。また、エアロゾルの量も出口におけるほうが少なくなる。この減少を透過率で表現しようとするれば、多分散エアロゾルの透過率  $P$  は次式のように考えられる。

$$P = \frac{\int_0^{\infty} f(D_p)P(\omega, D_p)dD_p}{\int_0^{\infty} f(D_p)dD_p} \dots (4-9)$$

さて、出口の分布の形はおおむね Fig.4-8 のように見て分かるように多少ずれるだけあるが、このままでは解析が困難なため、解析を容易にするために次式で定義される、平衡粒度の概念を導入する。

$$\begin{aligned} P &= \frac{\int_0^{\infty} f(D_p)P(\omega, D_p)dD_p}{\int_0^{\infty} f(D_p)dD_p} = \int_0^{\infty} f(D_p)P(D_p)dD_p \\ &= \int_0^{D_{peq}} f(D_p)dD_p = U(D_{peq}) \dots (4-10) \end{aligned}$$

すなわち、Fig.4-8 において、回転フィルタ出口でのエアロゾル全量（図中の  $S_2$  の面積）を入口における分布のある篩下量（図中面積  $S_1$ ）に対応させ、その時の粒径を  $D_{peq}$  とするわけである。

Eq.(4-10)において右辺はエアロゾルの篩下分布を、また左辺は透過率を与えている。Eq.(4-9)より明らかのように、透過率は  $\omega$  のみによって決定されるので、 $P$  と  $\omega$  の関係を回転数  $\omega$  をパラメータとして表現できれば、任意の分布形を持つエアロゾルの粒度分布を簡単に測定できることになる。そこで、元の分布を Eq.(4-2)で表現される対数正規分布関数  $f(D_p)$  を仮定し、Eq.(4-10)において幾何平均径  $D_{pg}$ 、幾何標準偏差  $\sigma_g$  各々いくつかの値を用いて、 $\omega$  をパラメータにして、平衡粒度  $D_{peq}$  と透過率  $P$  の関係を線図化したものを、Fig.4-9 に示す。 $\sigma_g=1.0 \sim 1.8$ 、 $P=0.8 \sim 0.2$  の範囲では  $\sigma_g$  による  $D_{peq}$  の差は小さいので無視し、 $\sigma_g=1.35$

の線図で代表させた。この上に実験値をプロットすれば粒子径分布が求まる。そこで、この方法で解析した結果を Fig.4-10 に示す。図を見て分かるように、最小二乗法と同様、分散は OPS やアンダーセンサンプラーと同様の傾きとなっているが、平均径は小さく与えられていることが分かる。

以上、3 種の方法を用いて粒子径分布への逆変換を行ったが、いずれの解析においても OPS、アンダーセンサンプラーの測定結果と比べ、平均径が小さく評価されているものの、累積ふるい下分率の傾きである分散は同様の結果をとっている。そのため、回転フィルタを用いた粒子径分布の測定が可能であることは示唆された。しかし、解析法による解析結果の差異はそれほど見られておらず、本研究の結果のみでは平均径が小さくなる原因について詳細に検討できず、今後試験粒子の粒子径分布を変えて検討を行う必要がある。

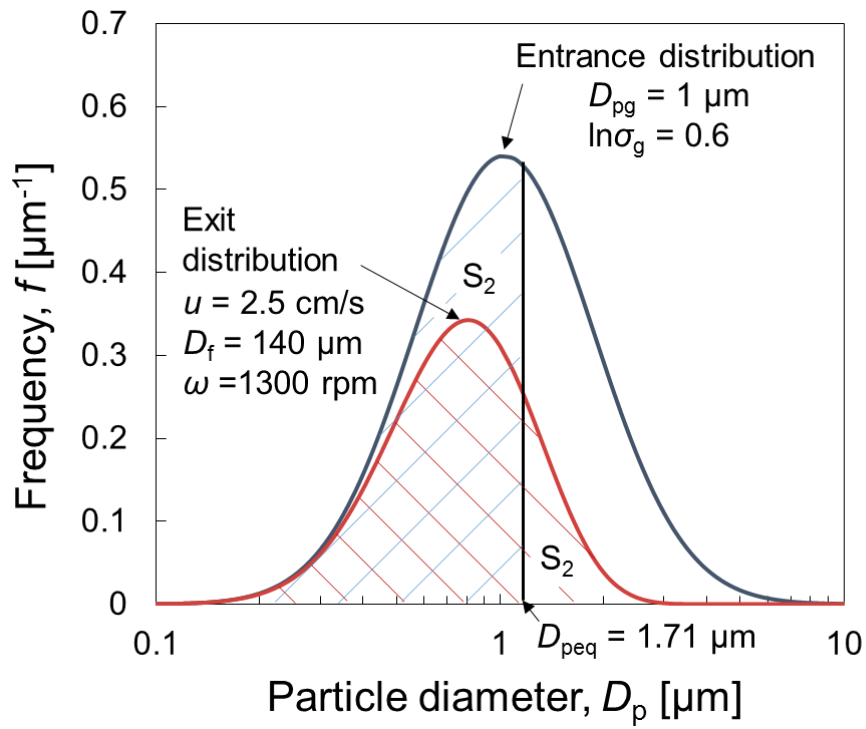


Fig.4-8 Model of size distribution at entrance and exit of centrifugal filter

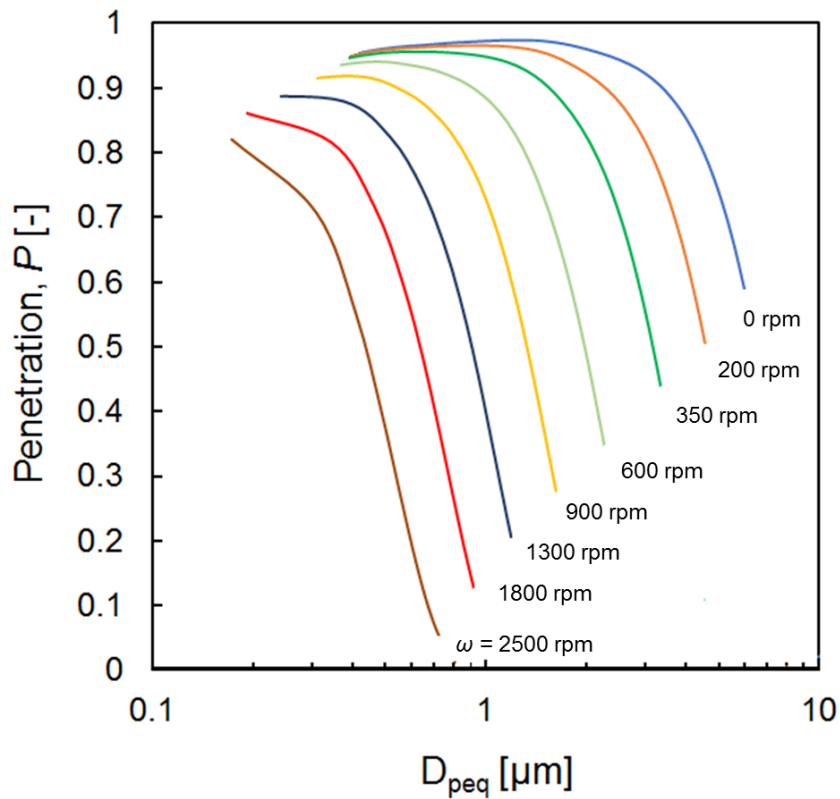


Fig.4-9 Penetration curves of polydisperse particle through a centrifugal filter

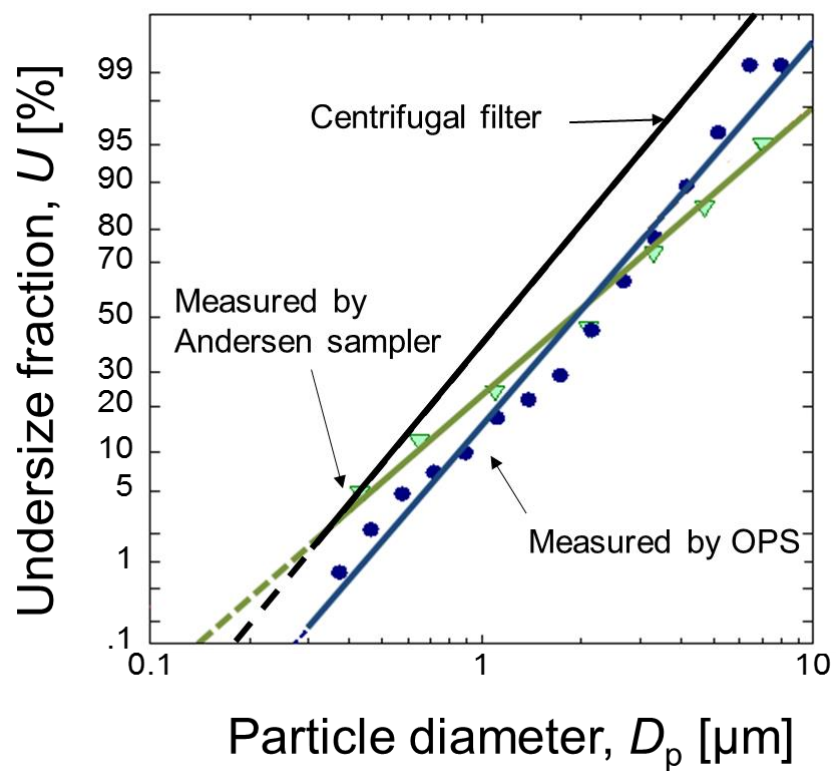


Fig.4-10 Size distribution of JIS11 powder measured by OPS, Andersen sampler and Centrifugal filter

## 第5章 粉塵負荷特性

4章では多分散のJIS11種粒子を用いて回転フィルタの捕集効率の評価と得られた測定データから粒子径分布へのデータ処理(逆変換アルゴリズム)について検討を行った。本章では回転フィルタを粒子径分布測定装置の分級機構として長期的に使用した場合に、粒子の再飛散と堆積量における捕集効率への影響を確認するため、回転フィルタの粉塵負荷特性の評価を行った。

### 5-1 実験方法

本実験で用いたフィルタはTable.5-1で示す通り、充填率が小さくフィルタ厚みも大きいため、捕集粉塵がフィルタの性能に影響を及ぼすまで粒子を負荷するには時間がかかってしまう。そのため本実験ではフィルタに直接JIS11種、関東ローム粉を手でまぶすことで粒子を堆積させた。また、実際の粉塵負荷ではフィルタの上流部で粒子が多く捕集されるため、上流側にJIS11種関東ローム粉体を0.5 g堆積させたフィルタ、下流側に未処理なフィルタを重ねることで十分に粉塵負荷された状態のフィルタを簡略的に再現した。それをFig.5-2に示す実験経路の網目で示す部分に充填し、そこに清浄空気を流した時のフィルタ下流の粒子質量濃度を光散乱式デジタル粉塵計（ダストトラック II MODEL 8530 TSI Inc.）を用いて計測し、その濃度を再飛散した粒子質量濃度とした。流速の調整はマスフローコントローラーを用いて行った。

粉塵堆積量が0.5 gの状態のフィルタの顕微鏡写真と装置への取付をFig. 5-3に示す。

Table.2-1 Test filter property

Fiber diameter, $df$ [ $\mu\text{m}$ ]	140
Thickness, $L$ [mm]	40
Weight, $W$ [g/m <sup>2</sup> ]	132
Packing density, $\alpha$ [-]	0.03
Inner radius, $R1$ [mm]	10
Outer radius, $R2$ [mm]	40

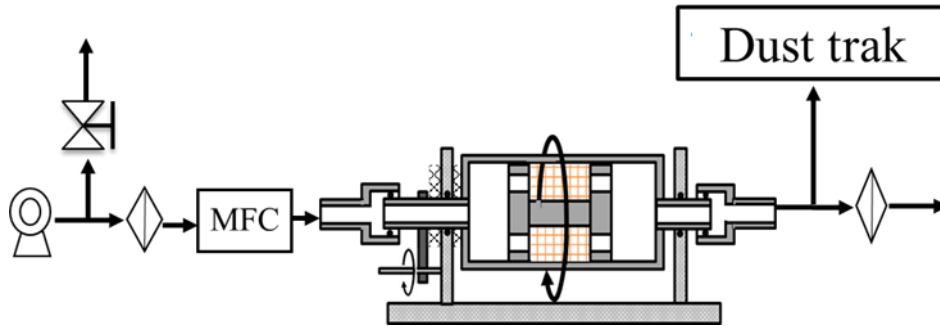


Fig.5-2 experimental setup for determining particle resuspension from centrifugal filter

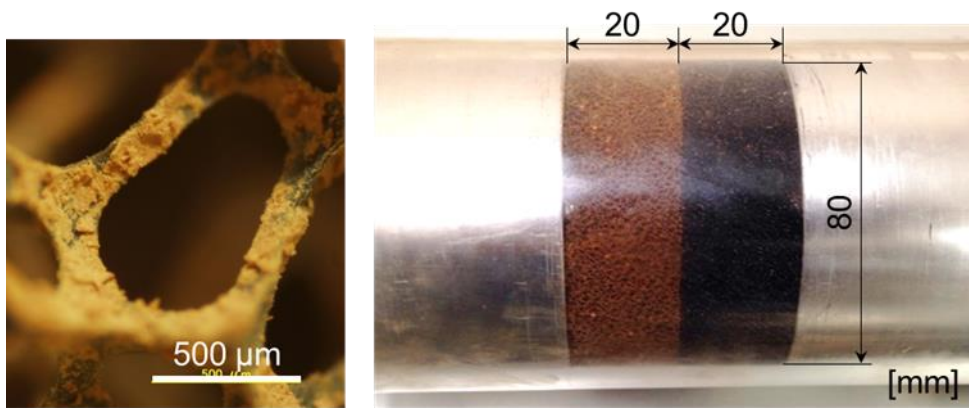


Fig.5-3 Loaded filter with JIS11 and the placement of loaded filter upstream of clean filter for particle reentrainment measurement



## 5-2 流速と回転数の変化により生じる再飛散

流速の変化により生じる再飛散を評価するために、Fig.5-2 に示す実験経路で回転数を 0, 500, 1000 rpm の 3 種類で固定したまま流速を 2.5 ~ 10 cm/s まで 2 分おきに 2.5 cm/s ずつ変化させたときのフィルタ下流の粒子重量濃度の測定を行った。実験結果を Fig.5-4 に示す。同図は流速および回転数の変化に対するフィルタ下流粒子濃度の変化を経過時間に対してプロットしたものである。流速が変化すると時間と同じ時間にフィルタ下流の粒子重量濃度も上昇しており、流速が変化することで再飛散が生じていると考えられる。またその濃度は回転数の増加に伴い減少し、回転数が 1000rpm の場合については流速が変化してもフィルタ下流重量濃度は常に 0 となっていることが分かる。このことから、回転数を増加させるとフィルタ下流の粒子重量濃度が減少するのは流速の変化により繊維から飛散した粒子が、遠心力を受けることでフィルタから出るまでにもう一度捕集されるためと考えられる。

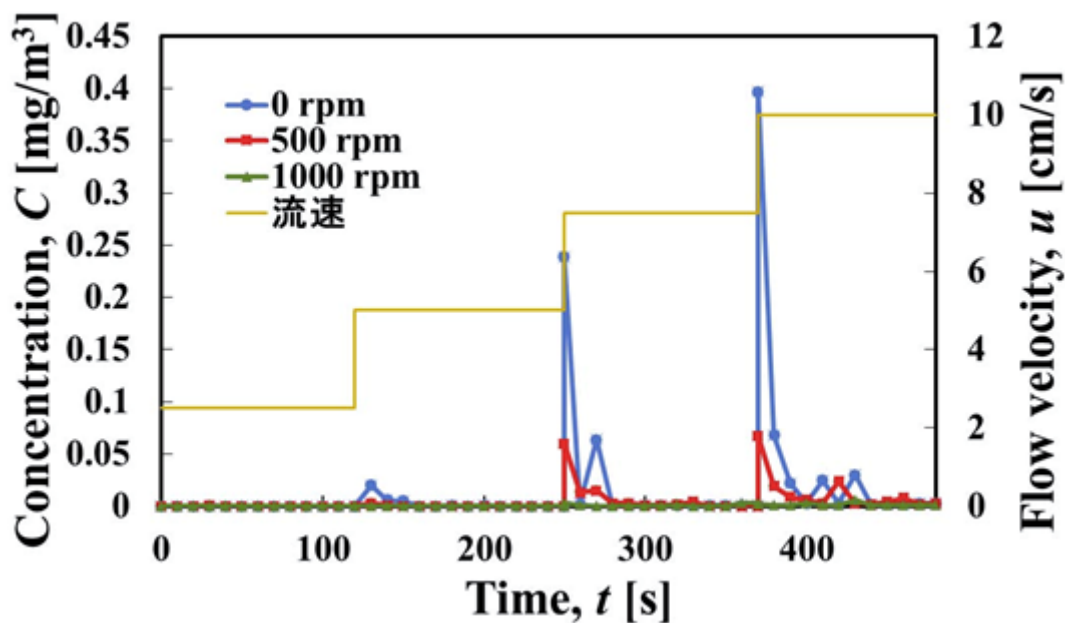


Fig. 5-4 Relationship of resuspension and changing flow velocity

### 5-3 粉塵堆積による捕集効率の変化

試験フィルタ及びフィルタへの粒子の堆積方法については3-1と同様とした。本実験で使用した実験装置図をFig. 5-5に示す。流動層で発生させたJIS11種粉体を $Am^{241}$ 放射線源を用いて帯電平衡状態の粒子とし清浄乾燥空気と混合希釈した後に回転フィルタにろ過速度2.5 cm/sで供給した。その時のフィルタ通過前後の粒子個数濃度を光散乱式粒子分析器であるOPS(Optical Particle Sizer MODEL 3330 TSI Inc.)を用いて測定した。またフィルタの堆積量は0～3.04 gまで変化させ、各堆積量に対する捕集効率を測定した。Fig5-6からFig5-8に粒径別の粉塵堆積による捕集効率の変化の実験結果を示す。同図は縦軸に捕集効率、横軸にフィルタの粉塵堆積量をとったもので、各回転数における堆積量に対する捕集効率の変化を表している。いずれの粒径、回転数においてもプロットは横ばいとなっており堆積量が増加しても捕集効率はほとんど変化していないことが分かる。

以上より、回転フィルタは気流の変化などで粒子が飛散しても遠心力によりほぼすべてフィルタ内部で再捕集でき、カットオフ径を可変させるために回転数を変化させても下流への影響は軽微であること、捕集効率は粉塵堆積量によらず一定であることから粒度分布測定装置として利用可能である。

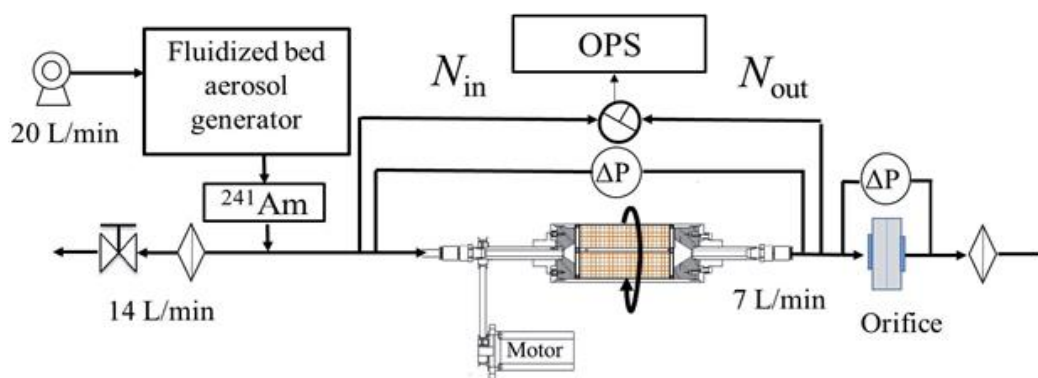


Fig.5-5 experimental setup for determining collection efficiency

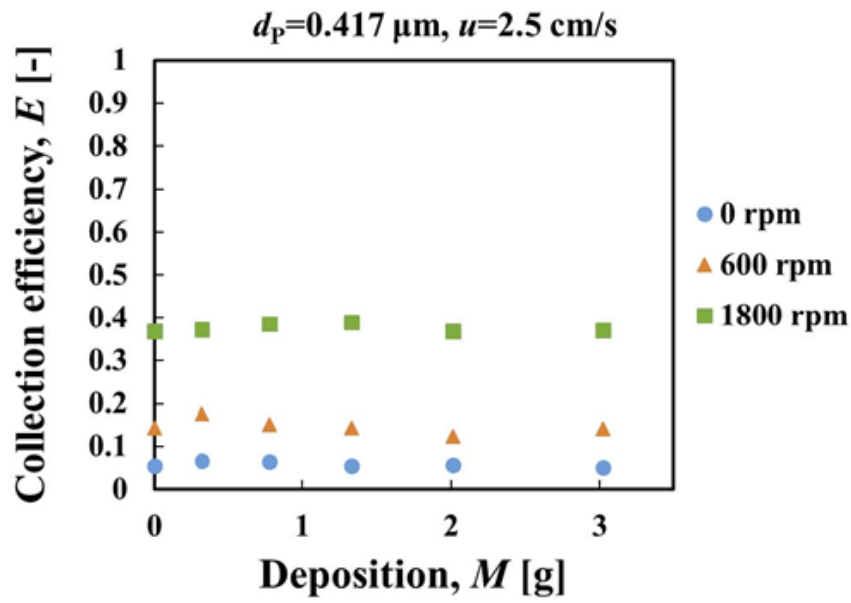


Fig.5-6 Collection efficiency against dust loading

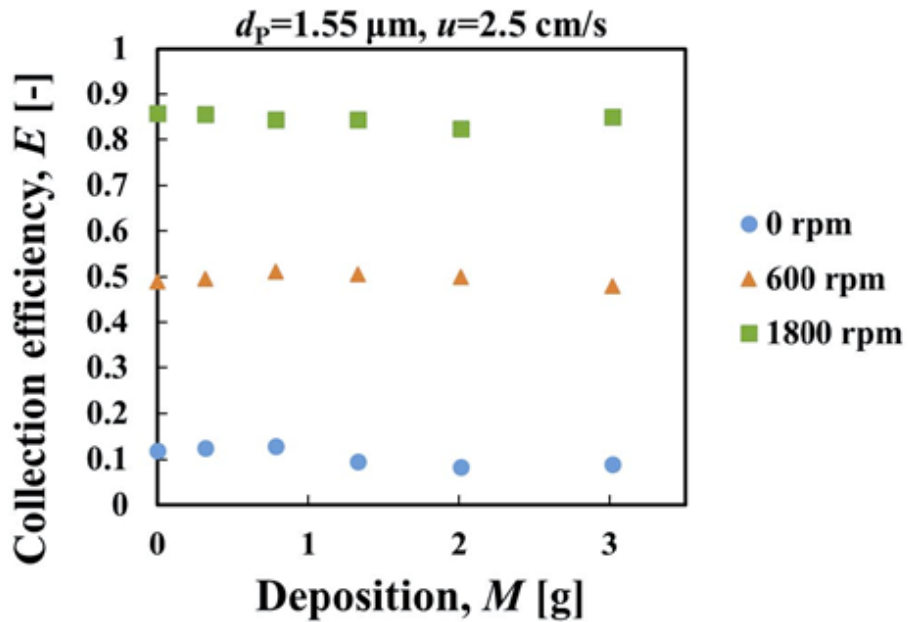


Fig.5-7 Collection efficiency against dust loading

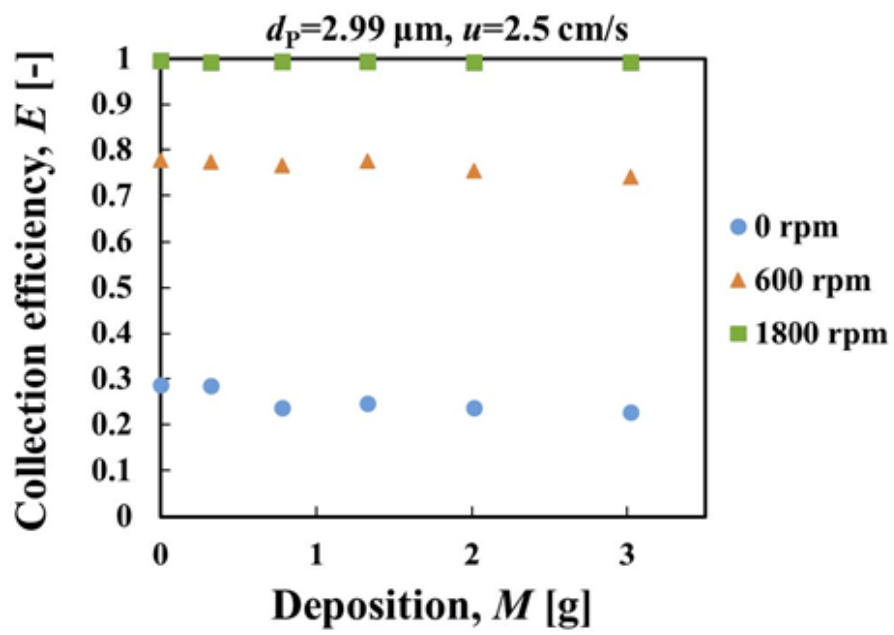


Fig.5-8 Collection efficiency against dust loading

## 第6章 結言

### 6-1 総括

本研究では、回転フィルタを用いて新たなエアロゾル粒子の粒子径分布測定装置の確立を目指し、フィルタ物性、ろ過条件の最適化を行い、粒子径分布測定装置としての適用性を検討した。以下に得られた知見を記述する。

#### 第2章 分級のための回転フィルタの設計

- 回転フィルタの分級性能は単一繊維捕集 $\eta_c$ が、遠心沈降速度とろ過速度の比によって与えられ、充填率と繊維径の関数ではないため、フィルタ物性、ろ過条件を変化させてもその分級曲線の傾きには影響を与えない。
- 繊維径が小さいほど、ろ過速度が小さいほど、 $\alpha L$ が大きいほど、少ない回転数で小さいカットオフ径を達成可能である。

#### 第3章 回転フィルタの分級特性の評価

- 回転フィルタの初期捕集効率の推定はポリウレタン多孔体フィルタにおいても従来のろ過理論で推定可能である。
- カットオフ径の理論推定値と実験値は非常によく一致しており、理論で推定可能である。

#### 第4章 多分散粒子の計測

- 多分散粒子の捕集効率は理論よりもやや高い結果となったが、濃度の変化による捕集効率への影響は見られず、高濃度粒子の測定への応用が可能であることが示唆された。
- いずれの解析法を用いても、OPS、アンダーセンサンプラーで測定した粒子径分布に比べ平均径が小さくなる結果となった。しかし、分散はほぼ同様の値をとることが分かった。

#### 第5章 粉塵負荷特性

- 回転フィルタはろ過速度が変化して粒子が飛散しても遠心力によりほぼすべてフィルタ内部で再捕集が可能で回転数が増加しても再飛散はほとんどない。
- フィルタへの堆積量が増加しても、捕集効率に影響は見られないことから計測器としての繰り返し精度を十分に満たすことができる。

## 6-2 今後の課題

本研究では、回転フィルタをエアロゾル粒子の粒子径分布測定装置へ応用することについて提案を行い、PSL 粒子では理論推定値通りの分級性能を与えることが出来ることを示したが、多分散エアロゾルでは理論推定値よりも捕集効率が大きくなるという結果となった。今後、フィルタの除電や粒子の帯電状態の調整をおこない、静電捕集の影響を評価する必要がある。

また、粒子径分布へのデータ逆変換では1種類の多分散粒子に対してしか評価を行っていないため、今後入口粒子の粒子径分布を変化させて、その応答性を評価するとともに、より最適な解析法についても検討を行う必要があると考えられる。

## Nomenclature

$C$	mass Concentration	[kg/m <sup>3</sup> ]
$C_c$	Cunningham's slip correction factor	[-]
$d$	diameter	[m]
$D$	diffusion coefficient of particle	[m <sup>2</sup> /s]
$D_c$	Nozzle diameter of impactor	[ $\mu$ m]
$d_f$	Fiber diameter	[ $\mu$ m]
$E$	collection efficiency	[-]
$g$	acceleration gravity	[m/s <sup>2</sup> ]
$G$	gravity parameter	[-]
$h_K$	Kuwabara's hydrodynamic factor	[-]
$k$	Boltzmann's constant	[-]
$l$	total fiber length per unit filter volume	[m/m <sup>3</sup> ]
$L$	thickness of filter	[m]
$m$	mass per unit volume	[kg/m <sup>3</sup> ]
$N$	number of particle	[-]
$P$	Penetration	[-]
$Pe$	Peclet number	[-]
$Q$	flow volume	[m <sup>3</sup> ]
$R$	interception parameter	[-]
$t$	time	[s]
$u$	filtration velocity	[m/s]
$v$	velocity of particle	[m/s]
$w$	mass	[kg]
$W$	filter weight per unit area	[kg/m <sup>2</sup> ]
$Z_c$	centrifugal effect	[-]
$\alpha$	packing density of filter	[-]
$\varepsilon$	porosity of filter	[-]
$\eta$	single fiber collection efficiency	[-]
$\lambda$	mean free path of gas molecules	[m]
$\rho$	density	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\mu$	viscosity of air	[Pa · s]

## Subscripts

C	Centrifugal force
D	Diffusional
f	Fiber
G	Gravity force
i	Initial
I	Inertial force
p	particle
R	interception
m	deposited
t	Terminal settling



## References

1. Baron, P. A. (1986). Calibration and use of the aerodynamic particle sizer (APS3300). *Aerosol Sci. Technol.* 5:55-67.
2. Binnig, J., Meyer, J., and Kasper, G. (2007). Calibration of an optical particle counter to provide PM<sub>2.5</sub> mass for well-defined particle materials. *J. Aerosol Sci.* 38:325-332.
3. Cheng, Y. S., Barr, E. B., Marshall, I. A., and Mitchell, J. P. (1993). Calibration and performance of an API aerosizer. *J. Aerosol Sci.* 24:501-514.
4. Dunbar, C., Kataya, A., and Tiangbe, T. (2005). Reducing bounce effects in the Andersen cascade impactor. *Int. J. Pharmaceut.* 301:25-32.
5. Gard, E., Mayer, J. E., Morrical, B. D., Dienes, T., Ferguson, D. P., Prather, K. A. (1997). Real-time analysis of individual atmospheric aerosol particles: Design and performance of a portable ATOFMS. *Anal. Chem.* 69:4083-4091.
6. Hinds, W. C. (1999). *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*. 2nd ed. Wiley & Sons, New York, p.136.
7. McMurry, P. H. (2000). A review of atmospheric aerosol measurements. *Atmos. Environ.* 34:1959-1999.
8. Nakajima, S., Kumita, M., Matsushashi, H., Higashi, H., Seto, T., and Otani, Y. (2015). Centrifugal filter for aerosol collection. *Aerosol Sci. Technol.* 49:959-965.
9. Sachweh, B., Umhauer, H., Ebert, F., Büttner, H., and Friehmelt, R. (1998). In situ optical particle counter with improved coincidence error correction for number concentrations up to 10<sup>7</sup> particles cm<sup>-3</sup>. *J. Aerosol Sci.* 29:1075-1086.
10. 本間 克典(1990). 実用エアロゾルの計測と評価, 技報堂, p122-126
11. 奥山 喜久夫, 増田 弘昭, 諸岡 成治 (1992). 微粒子工学, オーム社
12. 粉体工学会編 (1998). 粉体工学便覧, 日刊工業新聞社

## 謝辞

本論文は筆者が金沢大学大学院 自然科学研究科 自然システム学専攻 博士後期課程に在籍中の研究成果をまとめたものである。同専攻教授 大谷先生には指導教官として本研究の実施の機会を与えて戴き、その遂行にあたって終始、ご指導を戴いた。ここに深謝の意を表します。同専攻教授 瀬戸先生、並びに、同専攻准教授 汲田先生、東先生には副査としてご助言を戴くとともに本論文の細部にわたりご指導を戴きました。ここに深謝の意を表します。本研究の実験では同専攻科博士前期課程の島津氏、同専攻科の小澤氏に実験協力をいただいた。ここに両氏に対して感謝の意を表します。東京ダイレック(株) 代表 白井社長には、本大学院への入学ならびに、研究活動にご理解をいただきました。感謝の意を表します。

研究室の門をたたき、早3年の月日が流れ、日々の社業と研究を両立する事の難しさを実感しながらの活動でした。かつて一度は断念した進学と研究活動への衝動を抑えきれず、思いのままに進んできた期間でした。色々な方にご心配をおかけしたと反省することしきりです。ただ、修了がゴールではないことは明らかです。むしろ本研究室での知見を活かし、今後に生かせるかが皆様への恩返しと考え、これからも日々精進していく所存です。ありがとうございました。

最後に、私の我儘にもかかわらずここまで支えてくれた、家族に心より感謝の意を表して謝辞といたします。

2017年6月30日 田中 豊