

表 3.4(c) T400g の二酸化チタン凝集粒子の捕集予備実験結果

時間(min)	圧力損失(mmH <sub>2</sub> O)	ICP 分析値(ppm)	通過粒子濃度(mg/m <sup>3</sup> )
0～10	20	0.87	0.87
10～20	32	0.23	0.23
20～30	58	0.17	0.17

表 3.4(d) T400TF の二酸化チタン凝集粒子の捕集予備実験結果

時間(min)	圧力損失(mmH <sub>2</sub> O)	ICP 分析値(ppm)	通過粒子濃度(mg/m <sup>3</sup> )
0～10	146	0.058	0.058
10～20	212	0.15	0.15
20～25	300	0.056	0.11

### 3.3.7 考察

実験結果から TS303B、TS401B、T400g の 3 つについては、ほぼ時間経過つまり積層量の増加とともに通過粒子濃度が低下して、T400TF については先の 3 つと傾向が違うものの全体を通して通過粒子濃度が低いということがわかる。これは、過去の研究からわかっているバグフィルターの捕集理論と一致する結果であった。

しかし、今回の実験では、TS303B、TS401B、T400TF に関しては、事前に予定していた 10 分×3 回の実験を行う前に圧力損失が圧損計の目盛りの最高点に達してしまった。

これらのことから、この予備実験の実験方法や条件などを一部改善することにより、バグフィルターの二酸化チタン凝集粒子に対する捕集効率実験を行えると考えられる。

## 3.4 二酸化チタン凝集粒子に対する捕集効率実験

チャンバー内にオープンフェイスサンプラーをセットし、インピンジャーで二酸化チタン粒子をチャンバー内に噴霧させ、バグフィルターろ過材上に二酸化チタンを捕集した。その際、圧力損失の上昇とともにバグフィルターろ過材表面の粒子一次積層量が増加していくため、一定の圧力損失上昇ごとに石英繊維フィルターのみを交換し、その石英繊維フィルターを ICP 発光分光分析した。ICP 発光分光分析の結果から得られる質量濃度を用いて捕集効率を算出するため、サンプラーをもう一つチャンバー内にセットし、バグフィルターろ過材を挟まない石英繊維フィルターのみでの捕集も同時に行った。

### 3.4.1 使用装置

- ・オープンフェイスサンプラー：柴田科学株式会社
- ・ポンプ MP-Σ300：柴田科学株式会社
- ・ポンプ MP-Σ3：柴田科学株式会社
- ・タイゴンチューブ：サンゴバン株式会社
- ・バグフィルター
- ・石英繊維フィルター：東京ダイレック株式会社
- ・ICP 発光分光分析装置 IRIS-Intrepid：サーモサイエンティフィック
- ・インピンジャー

### 3.4.2 実験方法及び実験条件

#### (a) 実験方法

二酸化チタン凝集粒子に対する捕集効率実験の実験方法を以下に示す。

- ① 一つのオープンフェイスサンプラーの中段に直径 35mm のバグフィルター、下段に直径 35mm の石英繊維フィルターをセットする。
- ② もう一方のオープンフェイスサンプラーの下段に直径 35mm の石英繊維フィルターをセットする。
- ③ オープンフェイスサンプラーを二つともスタンドに固定し、チャンバー内に置く。その後、①のオープンフェイスサンプラー下段のコネクターに吸引ポンプ、中段のコネクターに圧損計を接続する。②のオープンフェイスサンプラー下段のコネクターに吸引ポンプを接続する。この様子を図 3.15 に示す。
- ④ ポンプで吸引を開始する。インピンジャーでチャンバー内に二酸化チタンを噴霧し、充滿させる。
- ⑤ 圧損計の目盛りがそれぞれのバグフィルターごとの実験条件の圧力損失上昇に達したら、ポンプを止める。
- ⑥ オープンフェイスサンプラーを二つともチャンバーから取り出し、石英繊維フィルターを交換する。
- ⑦ ②から⑥の手順をそれぞれのバグフィルターろ過材ごとに合計 3 回行う。
- ⑧ 石英繊維フィルターを前処理し、ICP 発光分光分析する。

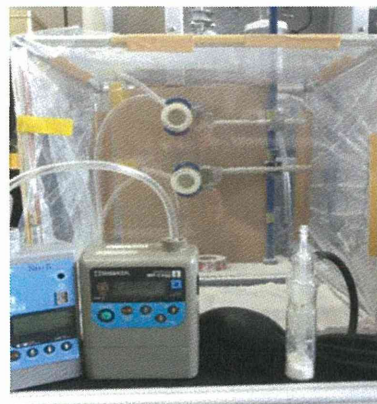


図 3.15 実験装置外観

#### (b) 実験条件

各バグフィルターろ過材の実験条件を表 3.5(a)、表 3.5(b)、表 3.5(c)及び表 3.5(d)に示す。また、捕集効率の計算式を式(3.1)として示す。実験条件は、予備実験や織布と不織布それぞれの適正ろ過速度などをもとにして設定した。

表 3.5(a) TS303B の二酸化チタン凝集粒子に対する捕集効率実験条件

吸引流量	1.0L/min
圧力損失	30、50、70mmH <sub>2</sub> O

表 3.5(b) TS401B の二酸化チタン凝集粒子に対する捕集効率実験条件

吸引流量	1.0L/min
圧力損失	80、140、200mmH <sub>2</sub> O

表 3.5(c) T400g の二酸化チタン凝集粒子に対する捕集効率実験条件

吸引流量	2.0L/min
圧力損失	10、20、30mmH <sub>2</sub> O

表 3.5(d) T400TF の二酸化チタン凝集粒子に対する捕集効率実験条件

吸引流量	2.0L/min
圧力損失	30、50、70mmH <sub>2</sub> O

捕集効率(%) =

$$\frac{\text{石英繊維フィルターのみ質量濃度} - \text{バックアップフィルター質量濃度}}{\text{石英繊維フィルターのみ質量濃度}} \quad (3.1)$$

### 3.4.3 ICP 発光分光分析

#### (a) 石英繊維フィルターの前処理

3.3.3(a)と同様。

#### (b) 検量線の作成

ICP 発光分光分析で Ti の検量線を作成した際の標準溶液の分析結果を表 3.6、検量線を図 3.16 に示す。また、この検量線の定量下限は 0.004ppm であった。

表 3.6 標準溶液の分析結果

	blank	std1	std2	std3
濃度(ppm)	0	0.5025	2.5125	5.025
発光強度(Cts/S)	2.097	59.45	272.1	542.2

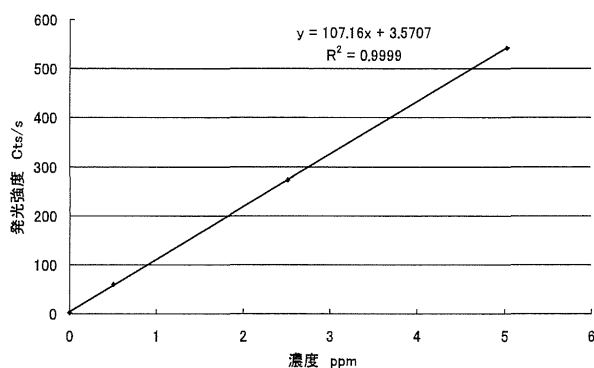


図 3.16 Ti 検量線

### 3.4.4 実験結果

4 種類のバグフィルターろ過材のバックアップ石英繊維フィルターともう一方の石英繊維フィルターの ICP 発光分光分析を行い、図 3.16 の検量線を用いて得られたそれぞれのバグフィルターろ過材の実験結果を表 3.7(a)、表 3.7(b)、表 3.7(c)及び表 3.7(d)に示す。ここで、3.7(a)、表 3.7(b)、表 3.7(c)及び表 3.7(d)の石英繊維フィルターのための ICP 分析値が検量線の範囲を大きく越えているが、実験時には試料溶液を 20 倍希釈し検量線の範囲内で分析し、得られた結果を 20 倍した値を示した。また、各分析結果において式(3.1)を用いて算出した捕集効率を表 3.8 に示す。

表 3.7(a) TS303B の二酸化チタン凝集粒子に対する捕集効率実験結果

バグフィルターろ過材のバックアップフィルター			石英繊維フィルターのみ	
圧力損失 (mmH <sub>2</sub> O)	ICP 分析値 (ppm)	通過粒子濃度 (mg/m <sup>3</sup> )	ICP 分析値 (ppm)	捕集粒子濃度 (mg/m <sup>3</sup> )
10~30	0.51	1.98	27.4	105
30~50	0.085	0.11	75.6	94.5
50~70	0.39	0.77	28.6	57.2

表 3.7(b) TS401B の二酸化チタン凝集粒子に対する捕集効率実験結果

バグフィルターろ過材のバックアップフィルター			石英繊維フィルターのみ	
圧力損失 (mmH <sub>2</sub> O)	ICP 分析値 (ppm)	通過粒子濃度 (mg/m <sup>3</sup> )	ICP 分析値 (ppm)	捕集粒子濃度 (mg/m <sup>3</sup> )
20~80	1.22	4.70	85.0	327
80~140	0.081	0.14	42.7	73.6
140~200	0.082	0.095	39.7	46.1

表 3.7(c) T400g の二酸化チタン凝集粒子に対する捕集効率実験結果

バグフィルターろ過材のバックアップフィルター			石英繊維フィルターのみ	
圧力損失 (mmH <sub>2</sub> O)	ICP 分析値 (ppm)	通過粒子濃度 (mg/m <sup>3</sup> )	ICP 分析値 (ppm)	捕集粒子濃度 (mg/m <sup>3</sup> )
0~10	0.087	0.090	76.8	80.0
10~20	0.069	0.12	56.0	93.3
20~30	0.074	0.15	43.8	87.5

表 3.7(d) T400TF の二酸化チタン凝集粒子に対する捕集効率実験結果

バグフィルターろ過材のバックアップフィルター			石英繊維フィルターのみ	
圧力損失 (mmH <sub>2</sub> O)	ICP 分析値 (ppm)	通過粒子濃度 (mg/m <sup>3</sup> )	ICP 分析値 (ppm)	捕集粒子濃度 (mg/m <sup>3</sup> )
10~30	0.40	0.46	55.0	63.9
30~50	0.12	0.18	98.9	145
50~70	0.24	0.40	78.2	130

表 3.8 各バグフィルターろ過材の捕集効率

バグフィルターろ過材	圧力損失(mmH <sub>2</sub> O)	捕集効率(%)
TS303B	10~30	98.12
	30~50	99.89
	50~70	98.65
TS401B	20~80	98.56
	80~140	99.81
	140~200	99.79
T400g	0~10	99.89
	10~20	99.88
	20~30	99.83
T400TF	10~30	99.28
	30~50	99.88
	50~70	99.70

### 3.4.5 考察

織布である TS303B と TS401B は捕集効率が 98%以上、不織布である T400g と T400TF は捕集効率が 99%以上という結果から、二酸化チタンの凝集粒子に対してバグフィルターろ過材は非常に高い捕集効率を示すことがわかった。また、NEDO プロジェクト(経済産業省委託研究)の提案する二酸化チタンの許容曝露濃度が 0.6mg/m<sup>3</sup>であるが、T400g と T400TF は全ての状態で、TS303B と TS401B については捕集効率が最高になっている状

態で通過粒子濃度を  $0.6\text{mg}/\text{m}^3$  以下に抑えられているという結果であった。これらのことから、バグフィルターろ過材は二酸化チタンの凝集粒子に対して十分な捕集性能をもつと考えられる。

### 3.5 バグフィルターとメカニカルフィルターの比較実験

本研究室では、防じんマスクなどに用いられるメカニカルフィルターのナノ粒子に対する捕集効率を求める実験が過去に行われており、メカニカルフィルターは二酸化チタンナノ粒子に対して有効な捕集性能をもつことがわかっている。そこで、WPS で粒度分布を測定し、粒径毎の捕集効率を求め、CPC で粒子個数濃度を測定し、全粒径に対する捕集効率を求めるという過去に行われたメカニカルフィルターの捕集実験と同様の実験をバグフィルターろ過材でも行い両者の捕集性能を比較した。

バグフィルターろ過材は、4種類とも積層させない状態で実験を行った。また、メカニカルフィルターについては、国家検定で防じんマスク用フィルターの捕集効率によって 99.9%(RL3)、95.0%(RL2)、80.0%(RL1)の3段階に区分されているため、それぞれの区分から1種類ずつ当研究室の過去のデータを引用した。

#### 3.5.1 使用装置

- ・ ディスポーサブルサンプラー：柴田科学株式会社
- ・ ポンプ MP-Σ300：柴田科学株式会社
- ・ タイゴンチューブ：サンゴバン株式会社
- ・ バグフィルターろ過材
- ・ WPS：MODEL 1000XP, MSI Inc.
- ・ CPC(No.1, No.2)：MODEL 3800, KANOMAX
- ・ NANO AEROSOL GENERATOR：柴田科学株式会社

#### 3.5.2 実験方法及び実験条件

##### (a) 実験方法

バグフィルターとメカニカルフィルターの比較実験の実験方法を以下に示す。

- ①  $\text{TiO}_2$ -4 葉さじ小 1/4 とりん酸水素二ナトリウム・12水 0.05g をビーカーに入れ、超純水で 50ml メスアップする。その後、超音波振とうを 30 分行う。
- ② ①で作成した試料をアトマイザーに入れ、NANO AEROSOL GENERATOR にセットする。
- ③ NANO AEROSOL GENERATOR に WPS を接続する。粒子を発生させ、粒子発生状態を測定する。
- ④ CPC(No.1)と CPC(No.2)を WPS に接続し、測定を行う。実験終了後データをまとめる際に、この測定結果から CPC(No.1)と CPC(No.2)の感度補正をする。

- ⑤ 直径 25mm の円形に切り取ったバグフィルターをディスポーサブルサンプラーにセットする。その様子を図 3.17(a)及び図 3.17(b)に示す。
- ⑥ NANO AEROSOL GENERATOR に⑤のディスポーサブルサンプラー、CPC(No.1,No.2)、WPS 及びポンプを接続する。その様子を図 3.18(a)及び図 3.18(b)に示す。
- ⑦ CPC(No.1,No.2)及び WPS で測定を行う。
- ⑧ ⑤から⑦の手順をそれぞれのバグフィルターごとに行う。



図 3.17(a) バグフィルターセット時の  
ディスポーサブルサンプラー外観



図 3.17(b) ディスポーサブル  
サンプラー外観

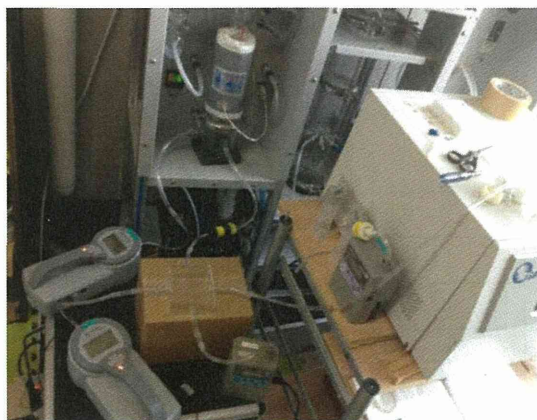


図 3.18(a) 実験装置外観

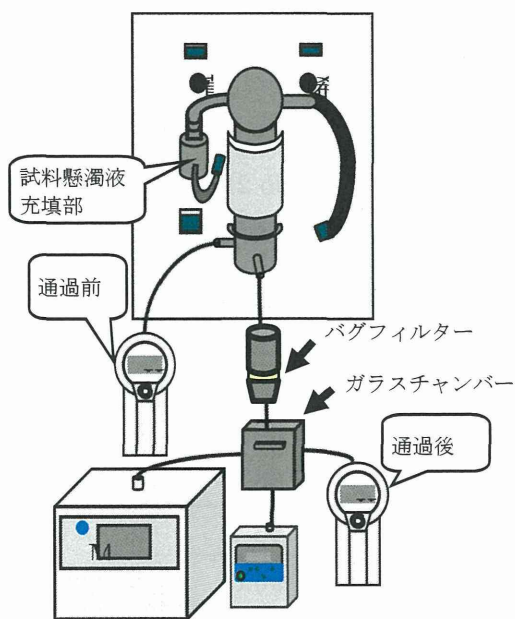


図 3.18(b) 実験装置概略図

(b) 実験条件

実験条件を表 3.9 及び表 3.10 に示し、捕集効率の計算式を式(3.3)として示す。

表 3.9 測定条件

測定時間	20 分	
アトマイザー	希釈流量	7L/min
	噴霧流量	3L/min
	ヒーター温度	80℃
WPS 測定範囲	10nm～500nm で 12ch	
CPC 測定範囲	15nm～1000nm (15nm～50nm:カウント効率 50%以上)	
吸引流量	2.3L/min	

表 4.10 二酸化チタン調整条件

二酸化チタン	TiO <sub>2</sub> -4	1.35mg
分散剤	りん酸水素二ナトリウム・12 水	49.35mg
溶媒	超純水	50ml メスアップ

$$\text{捕集効率 (\%)} = \frac{\text{通過前粒子個数濃度} - \text{通過後粒子個数濃度}}{\text{通過前粒子個数濃度}} \quad \dots (3.3)$$

### 3.5.3 実験結果

粒子の発生状態を示したグラフを図 3.19、粒径毎の捕集効率を示したグラフを図 3.20、全粒径に対する捕集効率を表 3.11 に示す。なお、NANO AEROSOL GENERATOR で粒子を発生させ、バグフィルターろ過材をセットしない状態で WPS を用いて測定した発生粒子の粒度分布と、バグフィルターをセットして測定した通過粒子の粒度分布から粒径毎の捕集効率を算出した。また、CPC(No.1)でバグフィルターろ過材通過前濃度として発生粒子の個数濃度を、CPC(No.2)でバグフィルターろ過材通過後濃度として通過粒子の個数濃度を測定し、式(3.3)より全粒径に対する捕集効率を算出した。

表 3.11 全粒径に対する捕集効率

フィルター	捕集効率(%)
TS303B	85.5
TS401B	85.9
T400g	88.7
T400TF	95.6
L(RL1)	96.4
C2(RL2)	96.9
S4N(RL3)	99.2

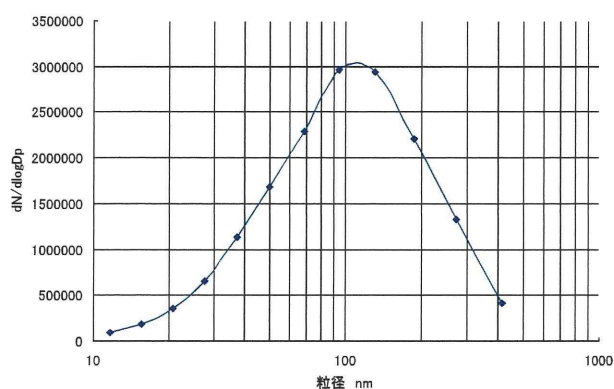


図 3.19 粒子発生状態

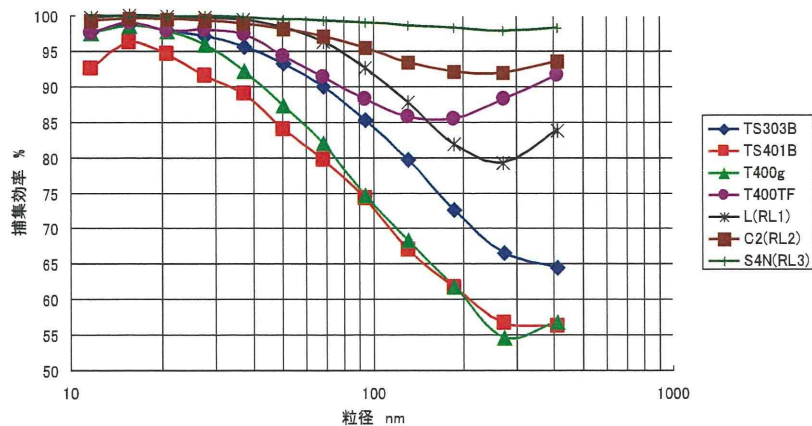


図 3.19 粒径毎の捕集効率

### 3.5.4 考察

図 3.20 からわかるように、メカニカルフィルターはおよそ 200~300nm で捕集効率が最小になっている。これは、小さな粒子に対しては拡散効果が働き、逆に大きな粒子に対してはさえぎり効果や慣性効果、沈降効果が働いているためである。

一方、T400TF を除く 3 種類バグフィルターろ過材は、メカニカルフィルターと比べて粒径が大きくなるにつれて捕集効率が大きく低下していく傾向にあった。これは、バグフィルターろ過材も一次堆積層での捕集粒子量が少ない初期段階では、慣性効果、さえぎり効果、拡散効果、沈降効果などの作用によって粒子を捕集するが、主な捕集は粒子の堆積層によって行われるため、慣性効果や、さえぎり効果、拡散効果、沈降効果などの作用がメカニカルフィルターと比べて弱いと考えられる。しかし、T400TF に関しては、各粒径に対する捕集効率が他の 3 種類よりも非常に高く、そのグラフの挙動もメカニカルフィルターにとっても近いものであった。これは、T400TF だけテフロン多孔質膜が貼り付けてあることが原因ではないかと考えられる。本来、テフロン多孔質膜は熱や薬品による劣化を防ぐためのものであるが、今回の実験結果よナノ粒子の捕集にも影響を及ぼしている可能性があると言える。

また、全粒径に対する捕集効率はメカニカルフィルター 3 種類がすべてのバグフィルターろ過材より大きな値を示したが、これも粒径毎の捕集効率の考察と同様に捕集効果の作用の違いによるものであると考えられる。

このように、メカニカルフィルターとバグフィルターは捕集原理が異なり、メカニカルフィルターの方が高い捕集性能をもつという結果が得られた。しかし、サンプル数が少ないものの T400TF のように素材や構造によっては、バグフィルターもメカニカルフィルターに近い捕集性能をもつと示唆される。



### 3.6 二酸化チタン分散粒子に対する捕集効率実験

二酸化チタンの凝集粒子については、バグフィルターで十分に捕集できることがわかり、メカニカルフィルターとの比較実験より、アトマイザーを用いて発生させた二酸化チタンの分散粒子に対しては、粒子の堆積層が無い状態では、十分な捕集ができていないとわかった。そこで、バグフィルターろ過材 4 種類それぞれで、圧力損失を基準として粒子堆積量が異なる 4 つの状態のものを作成し、NANO AEROSOL GENERATOR で二酸化チタンの分散粒子を発生させ、WPS で粒度分布、CPC で粒子個数濃度を測定し、粒径毎の捕集効率と全粒径に対する捕集効率を求める実験を行った。

#### 3.6.1 使用装置

- ・ サンプラー：柴田科学株式会社
- ・ ポンプ MP-Σ300：柴田科学株式会社
- ・ タイゴンチューブ：サンゴバン株式会社
- ・ バグフィルターろ過材
- ・ WPS：MODEL 1000XP, MSI Inc.
- ・ CPC(No.1, No.2)：MODEL 3800, KANOMAX
- ・ NANO AEROSOL GENERATOR：柴田科学株式会社

#### 3.6.2 実験方法及び実験条件

##### (a) バグフィルターろ過材上への粒子堆積層作成方法

バグフィルターろ過材 4 種類それぞれで、圧力損失を基準として粒子堆積量が異なる 4 つの状態のものを作成した方法を以下に示す。

- ① オープンフェイスサンプラーの中段に直径 35mm のバグフィルターろ過材をセットする。
- ② ①のオープンフェイスサンプラーをスタンドに固定し、チャンバー内に置く。その後、オープンフェイスサンプラー下段のコネクターに吸引ポンプ、中段のコネクターに圧損計を接続する。
- ③ ポンプで吸引を開始する。その後、インピンジャーでチャンバー内に二酸化チタンを噴霧し、充満させる。
- ④ 圧損計の目盛りがそれぞれのバグフィルターごとの実験条件の圧力損失に達したら、ポンプを止める。
- ⑤ チャンバーからオープンフェイスサンプラーを取り出し、バグフィルターろ過材を交換する。
- ⑥ ①から⑤の手順をそれぞれのバグフィルターごとに合計 3 回行う。

##### (b) 二酸化チタン分散粒子に対する捕集効率実験方法

二酸化チタン分散粒子に対する捕集効率実験の実験方法を以下に示す。

- ①  $\text{TiO}_2$ -4 薬さじ小 1/4 とりん酸水素二ナトリウム・12 水 0.05g をビーカーに入れ、超純水で 50ml メスアップする。その後、超音波振とうを 30 分行う。
- ② で作成した試料をアトマイザーに入れ、NANO AEROSOL GENERATOR にセットする。
- ③ NANO AEROSOL GENERATOR に WPS を接続する。粒子を発生させ、粒子発生状態を測定する。
- ④ CPC(No.1)と CPC(No.2)を WPS に接続し、測定を行う。実験終了後データをまとめる際に、この測定結果から CPC(No.1)と CPC(No.2)の感度補正をする。
- ⑤ 4.7.2(a)の手順で粒子を堆積させたバグフィルターろ過材をサンプラーにセットする。その様子を図 3.20(a)及び図 3.20(b)に示す。
- ⑥ NANO AEROSOL GENERATOR に⑤のサンプラー、CPC(No.1, No.2)、WPS 及びポンプを接続する。その様子を図 3.21(a)及び図 3.21(b)に示す。
- ⑦ CPC(No.1, No.2)及び WPS で測定を行う。
- ⑧ ⑪から⑬の手順をそれぞれのバグフィルターろ過材ごとに行う。



図 3.20(a) バグフィルターろ過材セット時のサンプラーの外観



図 3.20(b) サンプラーの外観

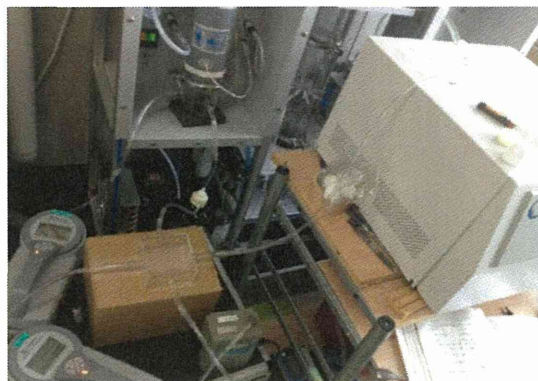


図 3.21(a) 実験装置の外観

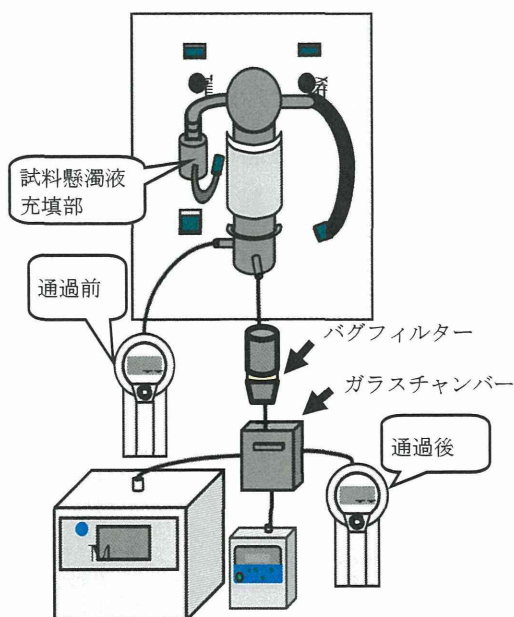


図 3.21(b) 実験装置概略図

(c) 実験条件

実験条件を表 3.12(a)、表 3.12(b)、表 3.12(c)、表 3.12(d)、表 3.13 及び表 3.14 に示す。捕集効率は式(3.3)を用いて計算した。

表 3.12(a) TS303B の粒子堆積層作成条件

吸引流量	1.0L/min
圧力損失	30、50、70mmH <sub>2</sub> O

表 3.12(b) TS401B の粒子堆積層作成条件

吸引流量	1.0L/min
圧力損失	80、140、200mmH <sub>2</sub> O

表 3.12(c) T400g の粒子堆積層作成条件

吸引流量	2.0L/min
圧力損失	10、20、30mmH <sub>2</sub> O

表 3.12(d) T400TF の粒子堆積層作成条件

吸引流量	2.0L/min
圧力損失	30、50、70mmH <sub>2</sub> O

表 3.13 測定条件

測定時間		20 分
アトマイザー	希釈流量	7L/min
	噴霧流量	3L/min
	ヒーター温度	80℃
WPS 測定範囲		10nm～500nm で 12ch
CPC 測定範囲		15nm～1000nm (15nm～50nm:カウント効率 50%以上)
吸引流量	TS303B、TS401B	1.0L/min
	T400g、T400TF	2.0L/min

表 3.14 二酸化チタン調整条件

二酸化チタン	TiO <sub>2</sub> -4	1.20mg
分散剤	りん酸水素二ナトリウム・12 水	49.90mg
溶媒	超純水	50ml メスアップ

3.6.3 実験結果

各バグフィルターろ過材の積層状態の外観図を図 3.22(a)、図 3.22(b)、図 3.22(c)及び図 3.22(d)に示す。また、粒子の発生状態を示したグラフを図 2.23、粒径毎の捕集効率を示したグラフを図 3.24(a)、図 3.24(b)、図 3.24(c)及び図 3.24(d)、全粒径に対する捕集効率を表 3.15 に示す。



図 3.22(a) TS303B の積層状態外観



図 3.22(b) TS401B の積層状態外観



図 3.22(c) T400g の積層状態外観図



図 3.22(d) T400TF の積層状態外観図

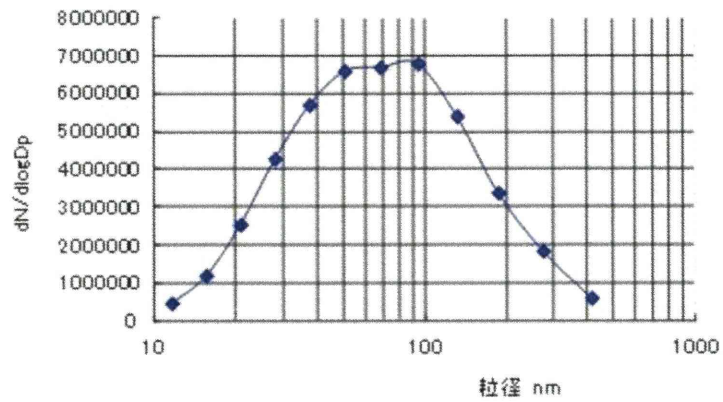


図 3.23 粒子発生状態

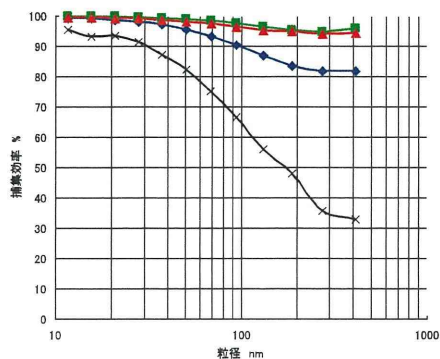


図 3.24(a) TS303B の粒径毎の捕集効率

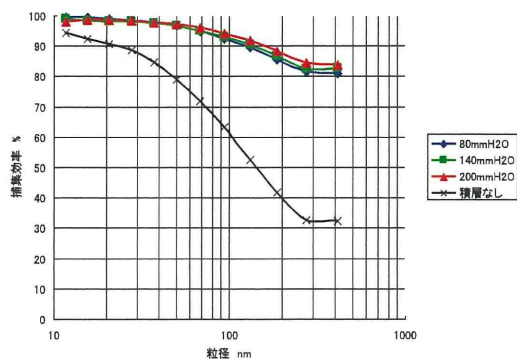


図 3.24(b) TS401B の粒径毎の捕集効率

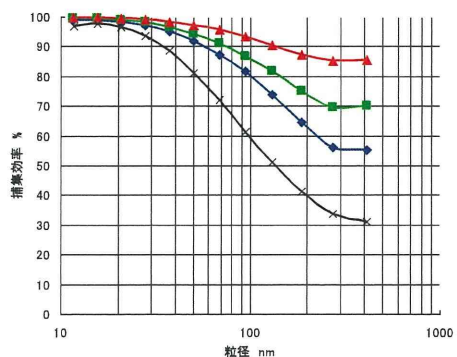


図 3.24(c) T400g の粒径毎の捕集効率

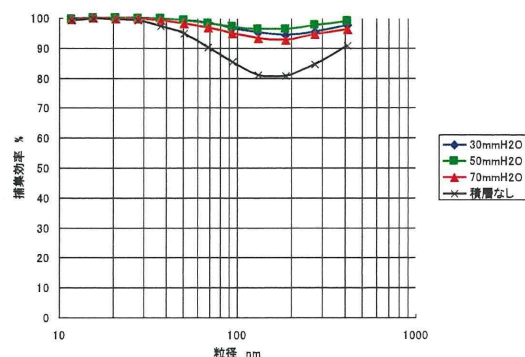


図 3.24(d) T400TF の粒径毎の捕集効率

表 3.15 全粒径に対する捕集効率

バッグフィルター	圧力損失(mmH <sub>2</sub> O)	捕集効率(%)
TS303B	0	59.6
	30	89.5
	50	98.1
	70	97.2
TS401B	0	62.5
	80	92.1
	140	92.8
	200	95.0
T400g	0	71.3
	10	80.6
	20	89.0
	30	94.0
T400TF	0	93.1
	30	98.5
	50	98.9
	70	97.8

### 3.6.4 考察

実験結果から、全てのバッグフィルターろ過材で粒子堆積層が無い状態よりも一次堆積層

である粒子堆積層を作った状態の方が捕集効率が高くなっていることがわかる。これは、バグフィルターろ過材では、慣性効果、さえぎり効果、拡散効果、沈降効果のような捕集作用よりも粒子堆積層による目詰まりによって捕集するという作用の方が強いいためこのような結果になったと考えられる。さらに、それぞれのバグフィルターろ過材の一番捕集効率が高くなっている状態の結果から、適量の粒子堆積層を作ったバグフィルターろ過材ならば二酸化チタン分散粒子は十分に捕集可能であると言える。

それぞれ個別の結果については、織布の TS303B と TS401B は粒子堆積層を作ることによる捕集性能の上昇が非常に顕著であると言える。T400g については、実験を行って他の 3 種類よりも圧力損失が上昇しにくい種類であるとわかったのだが、実験結果から、さらに圧力損失が高い状態、つまり粒子堆積量を増やした状態にすればさらに捕集効率が増えるのではないかと予想できる。T400TF は、粒子堆積層を作らない状態でも捕集性能が非常に高く、粒径毎の捕集効率のグラフの挙動も他の 3 種類とは違っていた。これは、バグフィルターとメカニカルフィルターの比較実験でも述べたように、他のものとフィルター自体の構造が多少違っていることによるものだと考えられる。このように、もともと高い捕集性能を持っていて粒子堆積層を作ることによってさらに捕集効率を上昇させられることと、バグフィルターが粒子堆積層の払い落としをしながら使用するということから、T400TF が実験を行った 4 種類の中で 1 番安定して二酸化チタン粒子の捕集を行えると思われる。しかし、これは実験室系における実験結果であり、実際の現場では様々な条件が加わってくるので、そのようなさらに発展的な部分については今後検討を行いたいと考えている。

### 3.7 総括<sup>2)</sup>

これまでナノ粒子に対するバグフィルターの捕集性能に関する知見がほとんどなかったため、厚生労働省は平成 21 年 3 月 31 日基発第 0331013 号「ナノマテリアルに対するばく露防止等のための予防的対応について」の通達の中で、排気における除塵装置の所で、排気口からナノマテリアル等が排出されないよう、ナノマテリアル等を捕集できるフィルターを備えた除塵装置を局所排気装置に備え付けること、使用するフィルターの選定に当たっては、発散するナノマテリアル等が凝集していることも考慮し、当該ナノマテリアル等の粒径、凝集の状態等を調査した場合、その結果に基づき当該ナノマテリアル等の捕集が可能な適切なフィルターを選定すること。また、当該調査を行わない場合においては HEPA フィルター又はこれと同等以上の性能を有するフィルターを使用することとしている。つまり、バグフィルターの捕集特性の情報を入手していないためにこうした書きぶりになっている。そのため、ナノマテリアル取り扱い作業現場においてバグフィルターは、HEPA フィルター等の交換頻度を減らすための前置きフィルターという位置づけであった。しかし、本研究で行った実験の結果から、二酸化チタンナノ粒子に関して、凝集体も分散しているものも適当な積層状態にあるバグフィルターならば十分に捕集可能であるとわかった。

つまり、HEPA フィルターと同等以上の性能をもつフィルターと組み合わせて使えば非常に効果的であるのは間違いないが、バグフィルターのみでも二酸化チタンナノ粒子の捕集ができるという新しい知見を得ることが出来たと考える。

### 3.8 HEPA フィルターによる酸化チタンナノ粒子の捕集効率

#### 3.8.1 実験目的

二酸化チタンナノ粒子は、厚生労働省にてリスク評価対象候補物質に定められた物質の一つである。そこで、HEPA フィルターのナノ粒子に対する捕集効率を求めするため、二酸化チタンのナノ粒子を用いて捕集性能を検証することを目的として実験を行った。

#### 3.8.2 試験試料及び HEPA フィルター<sup>3)</sup>

本実験で使用した二酸化チタンと分散剤は、それぞれバグフィルター捕集効率実験と同様の日本エアロゾル株式会社製で平均粒径 50nm の TiO<sub>2</sub>-4、関東化学株式会社製のりん酸水素二ナトリウム・12 水である。また、本実験では、日本無機株式会社製の HEPA フィルターを使用した。その外観を図 3.25(a)、図 3.25(b)、仕様を表 3.16 に示す。



図 3.25(a) HEPA フィルター全体の外観

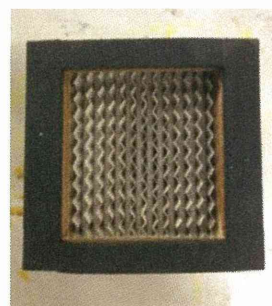


図 3.25(b) HEPA フィルター正面

表 3.16 HEPA フィルター仕様

Model	ATMC-Z-Q-AZ
S.NO.	8104324
Rated CMM	0.4 at 30.6 mmAq
DOP	0.1~0.2 Eff 99.97 %
縦×横×奥行	75mm×70mm×150mm

図 3.25(a)の HEPA フィルター木枠部分を取り外し、取り出した内部の外観を図 3.36(a)、図 3.26(b)に示す。



図 3.26(a) HEPA フィルター内のろ過材を上方から見た図



図 3.26(b) HEPA フィルター内のろ過材を正面から見た図

HEPA フィルター内部は図 3.26(a)及び図 3.26(b)のように、プリーツ様の折り目の付いた細長いシート状ろ過材が折り畳まれ、その間を仕切るように同様な折り目のついたろ過材が挟まっている。それぞれの FE-SEM 観察画像を図 3.27、図 3.28 及び図 3.29 に示す。



図 3.27 シート状ろ過材表面の形態(×2000)

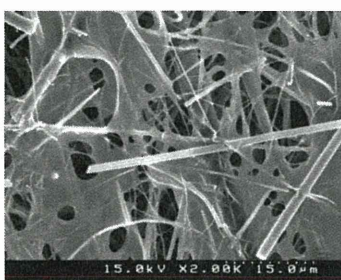


図 3.28 シート状ろ過材裏面の形態(×2000)

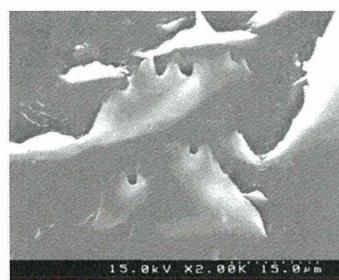


図 3.29 仕切り板ろ過材の表面形態(×2000)

### 3.8.3 使用装置

- ・ サンプルホルダー：柴田科学株式会社
- ・ IP-30L 型吸引ポンプ：柴田科学株式会社
- ・ タイゴンチューブ：サンゴバン株式会社
- ・ HEPA フィルター
- ・ WPS : MODEL 1000XP, MSI Inc.
- ・ CPC(No.1, No.2) : MODEL 3800, KANOMAX
- ・ NANO AEROSOL GENERATOR : 柴田科学株式会社

### 3.8.4 実験方法及び実験条件

バグフィルターの二酸化チタン分散粒子の捕集実験と同様の方法で実験を行ったが、HEPA フィルターはそのままの状態では、WPS や CPC、NANO AEROSOL GENERATOR への接続が困難なため、内部を別のサンプルホルダーにはめ込んで実験を行った。

#### a) 実験方法

HEPA フィルター捕集効率実験の実験方法を以下に示す。



- ①  $\text{TiO}_2$ -4 葉さじ小 1/4 とりん酸水素二ナトリウム・12 水 0.05g をビーカーに入れ、超純水で 50ml メスアップする。その後、超音波振とうを 30 分行う。
- ② で作成した試料をアトマイザーに入れ、NANO AEROSOL GENERATOR にセットする。
- ③ NANO AEROSOL GENERATOR に WPS を接続する。粒子を発生させ、粒子発生状態を測定する。
- ④ CPC(No.1)と CPC(No.2)を WPS に接続し、測定を行う。実験終了後データをまとめる際に、この測定結果から CPC(No.1)と CPC(No.2)の感度補正をする。
- ⑤ HEPA フィルターの内部をサンプルホルダーにセットして、サンプルホルダーを連結させる。その様子を図 3.30(a)及び図 3.30(b)に示す。
- ⑥ NANO AEROSOL GENERATOR に⑤のサンプラー、CPC(No.1, No.2)、WPS 及びポンプを接続する。その様子を図 3.31(a)及び図 3.31(b)に示す。
- ⑦ CPC(No.1, No.2)及び WPS で測定を行う。



図 3.30(a) サンプルホルダーにセットした HEPA フィルター内部

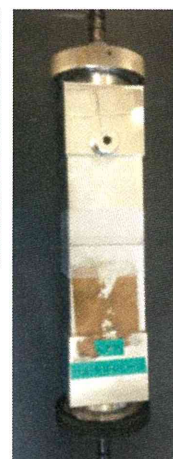


図 3.30(b) HEPA フィルター捕集効率測定用ホルダー

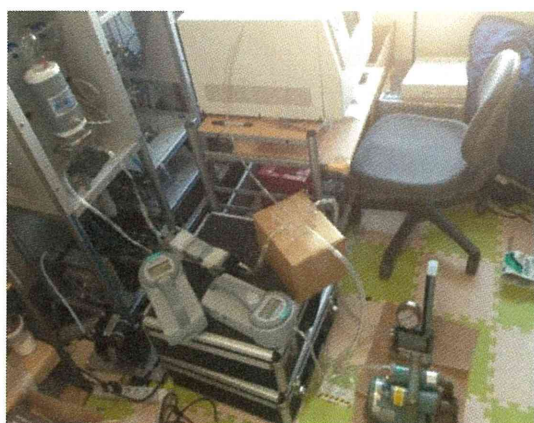


図 3.31(a) 実験装置外観

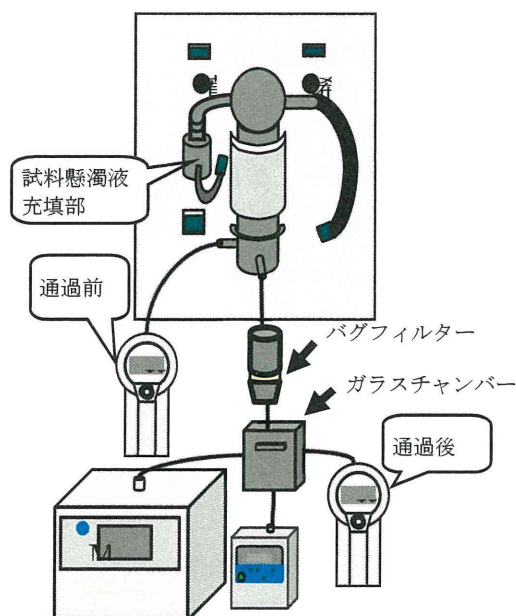


図 3.31(b) 実験装置概略図

#### b) 実験条件

実験条件を表 3.17 及び表 3.18 に示す。今回使用した HEPA フィルターの定格風量が不明だったため、類似した HEPA フィルターの定格風量から吸引流量を計算したが、アトマ

イザーの供給流量の 10.0L/min を超えていた。そのため、吸引流量は現段階の実験系で行える最大の値である 10.0L/min と設定した。

表 3.17 測定条件

測定時間	20 分	
アトマイザー	希釈流量	7L/min
	噴霧流量	3L/min
	ヒーター温度	80°C
WPS 測定範囲	10nm～500nm で 12ch	
CPC 測定範囲	15nm～1000nm (15nm～50nm:カウント効率 50%以上)	
吸引流量	10.0L/min	

表 3.18 二酸化チタン調整条件

二酸化チタン	TiO <sub>2</sub> -4	1.06mg
分散剤	りん酸水素二ナトリウム・12 水	49.74mg
溶媒	超純水	50ml メスアップ

### 3.8.5 実験結果

粒子の発生状態を示したグラフを図 3.32、粒径毎の捕集効率を示したグラフを図 3.33、全粒径に対する捕集効率を表 3.19 に示す。なお、NANO AEROSOL GENERATOR で粒子を発生させ、HEPA フィルターをセットしない状態で WPS を用いて測定した発生粒子の粒度分布と、HEPA フィルターをセットして測定した通過粒子の粒度分布から粒径毎の捕集効率を算出した。また CPC(No.1)で HEPA フィルター通過前濃度として発生粒子の個数濃度を、CPC(No.2)で HEPA フィルター通過後濃度として通過粒子の個数濃度を測定し、全粒径に対する捕集効率を算出した。

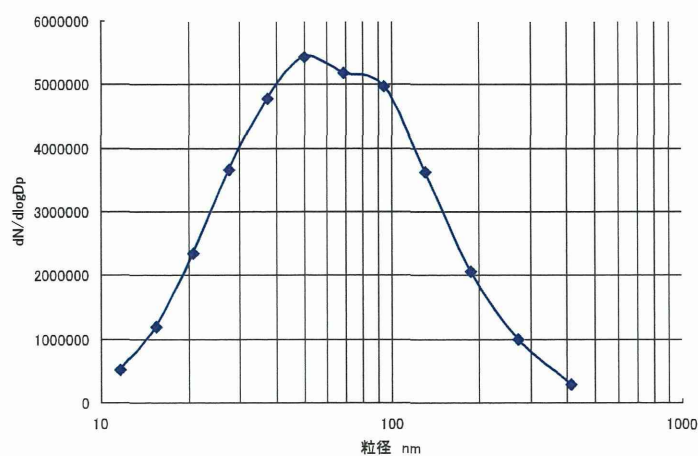


図 3.32 粒子発生状態

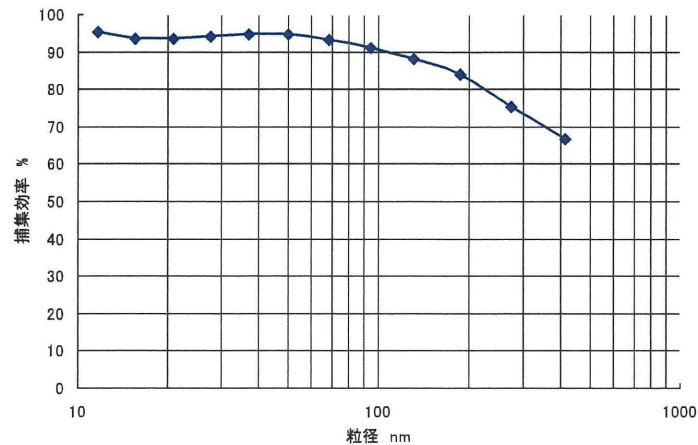


図 3.33 粒径毎の捕集効率

表 3.19 全粒径に対する捕集効率

フィルター	捕集効率(%)
HEPA フィルター	87.5

### 3.8.6 考察

50nm 付近の粒径の粒子が最も発生していることと、100nm 以下の粒径の粒子に対する捕集効率が 90%以上という結果から、HEPA フィルターは 100nm 以下の粒径の粒子を捕集できていると考えられる。また、およそ 200nm のあたりから粒径が大きくなると捕集効率の低下が目立っていた。これらについては、非常に小さな粒径の粒子に対しては拡散効果によって捕集を行うが、約 200~300nm の粒径の粒子に対しては、拡散効果の作用が弱くなり、大きな粒子に対して作用する慣性効果やさえぎり効果、沈降効果も弱くなることから最も捕集効率が低下するというメカニカルフィルターの研究結果と同様の結果であった。

しかし、HEPA フィルターは、JIS 規格で「定格風量で粒径が 0.3 $\mu$ m の粒子に対して 99.97%以上の粒子捕集率をもち、かつ初期圧力損失が 245Pa 以下の性能を持つエアフィルター」と規定されているが、これよりも低い捕集効率値が結果として出てしまった。これは、今回行った実験方法が、ナノ粒子発生装置のナノ粒子発生能力及び HEPA フィルターを通過する粒子の面速等を JIS の規定するエアフィルターの試験方法に合わせる事が出来なかったことが原因であると考えられる。また、WPS や CPC、ナノ粒子発生装置等の実験装置へ接続するために HEPA フィルターを分解してサンプルホルダーに固定したため、サンプルホルダーと HEPA フィルターとを完全に接着することが出来なかった。これによる粒子の漏洩が捕集効率を低下させた最大の要因であったと考えられる。

### 3.8.7 HEPA フィルターの捕集効率実験

#### a) 実験方法

HEPA フィルター内のろ過材の一部を切り出し、図 3.17 に示すディスポーザブルサンプ

ラーに固定した後、3.4.2の実験方法及び実験条件で実験を行った。ただし、発生させた酸化チタンの発生粒子の粒度分布を図 3.34 に示す。

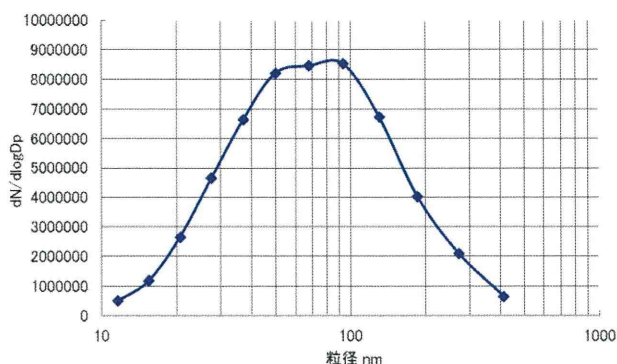


図 3.34 発生させた酸化チタンの粒度分布

### b) 実験結果

捕集実験の結果を図 3.35 に示す。図 3.35 より、捕集効率は 100% となり、漏洩は認められなかった。これは、HEPA フィルターそのもの酸化チタンに対する捕集効率であり、先ほどの様に漏洩が無ければ、HEPA フィルターは 100% の捕集効率があることが明らかとなった。

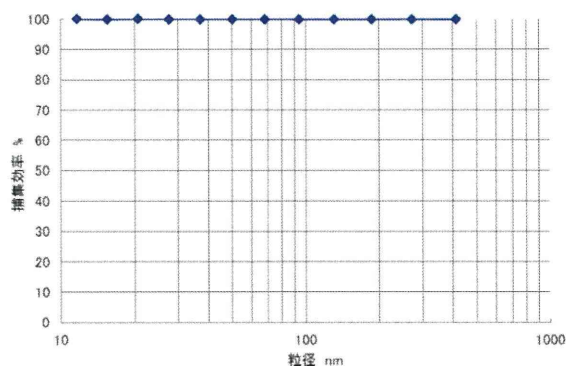


図 3.35 HEPA フィルターによる酸化チタンの捕集効率

### 3.8.8 総括

今回の実験より得られた捕集効率については、前述した実験方法や漏洩等が考えられることから低い値となってしまう可能性があるが、HEPA フィルターそのものによる捕集効率は 100% であった。報告実例の少ない HEPA フィルターの捕集機構について、メカニカルフィルターと同様な捕集機構であることが明らかになったことを意義深いと考える。

## 3.9 バグフィルタを通過して排出される繊維状物質濃度の測定

### 3.9.1 はじめに

石綿含有製品の廃棄物処理に関して、溶融化、ロータリーキルンなどを用いる各種無害化処理工法の開発が行われているが、現在のところ認められているのは溶融処理のみであ