

厚生労働科学研究費補助金

労働安全衛生総合研究事業

ナノマテリアルの簡易測定法の開発及び

ばく露防止対策に関する研究

平成22年度 総括研究報告書

主任研究者 名古屋俊士

平成23年(2011)年4月

目 次

I. 総括研究報告

ナノマテリアルの簡易測定法にお開発及びばく露防止対策等

関する研究

A. 研究目的	1
B. 研究方法	2
1. 基礎研究	
1. 1 ナノマテリアル粒子捕集用サーマルプレシピテーターの開発	2
1. 2 各種濃度測定器のナノマテリアルに対する捕集特性	16
1. 3. 現場測定	50
E. 結論	62
F. 健康危険情報	67
G. 研究発表	67
H. 知的財産権の出願・登録状況	68

II. 研究成果の刊行に関する一覧表

厚生労働科学研究費補助金（労働安全総合 研究事業）
（総括） 研究報告書

ナノマテリアルの簡易測定法の開発及びばく露防止対策に関する研究

研究者代表者 名古屋俊士 早稲田大学理工学術院 教授

研究要旨

A. 研究目的

ナノマテリアルの開発が急速に進められている中、労働者の健康確保のためには、作業環境中のナノマテリアルの測定が必要である。しかしながら、現在ナノマテリアルの測定は限られた専門機関でしか対応できない状況にある。また、現状の作業環境におけるナノマテリアルは種類も多く、製造や加工などの工程も異なり、作業形態も異なることから、粒子の形態も異なるケースが多い。そこで、労働者の健康管理の観点から目的に応じた作業環境管理を行うシステムの構築が必要である。つまり、市販の簡易測定器を用いた現状の状況把握のための一次スクリーニングを目的とした測定を実施する。さらに、一次スクリーニングの評価結果を受けて、その目的に応じた管理すべきナノ粒子を対象とした二次スクリーニングを目的とした測定を実施するといったシステムの構築である。現在の限られた専門機関でしか対応できないナノマテリアルの測定から脱却し、労働環境の管理レベルに応じた測定法及び評価法を確立する事が急務である。まず、ナノマテリアル取り扱い現場で市販の粉じん計等を用いて作業環境測定を実施し、一次スクリーニングの適用可能な測定器の選定、次に、二次スクリーニングの適用可能な測定器の選定を行う。さらに、最終判断を行うための三次スクリーニングに適用可能な測定器の選定を行う。三次スクリーニングまでの結果を総合的に判断して、作業環境管理を行うためにどのような測定器の組み合わせが良いかを判断する。その一連の流れをマニュアル化する。次に、その判断に基づき作業環境管理のための測定を行い作業環境の環境評価を行う。また、そうした一連の測定の流れを総合的に判断して、特に二次スクリーニングの測定目的に必要な簡易型ナノ粒子測定器を測定機器メーカーの協力を得て開発することもこの研究の特徴ある。

次に、現場測定から曝露防止対策として局所排気装置等の果たす役割は重要であるため、現場測定からどのような作業にどのような型式・性能のものが有効であるかの知見を収集する。こうした試みは、まだ行われていないのが実情と考える。また、正確な知見も得られていない繊維状粒子のバグフィルターによる繊維状粒子の捕集効率に関する基礎研究で培った経験を生かして、小型実験用除塵装置を作製し、正確な知見の得ら

れていないナノマテリアルに対するフィルター等の捕集特性に関する検討を行う。さらに、労働者の健康確保のために忘れてならないのは防じんマスクである。この研究に関しては、我が国の最先端を歩み、業界をリードしている実績と経験から、防じんマスクろ過材のナノ粒子の捕集特性を容易に計測することができる粒径の揃った試験粒子を発生する装置を開発し、市販されている防じんマスクのナノ粒子の対する捕集効率を求め、これによりナノ粒子取扱い作業者の曝露防止に寄与する情報提供を行う。

22年度は、デジタル粉じん計 LD-5 及び P-5H 型、パーティクルカウンター GT-526、ナノマテリアル測定用凝縮粒子カウンタ (CPC)、電子顕微鏡観察試料捕集用オープンフェイスサンプラー、ナノマテリアル粒度分布測定器 (WPS)、粉じん粒度分布測定装置であるシーオータス、NW-354 型ローボリュームサンプラーをナノ粒子取扱い作業現場に持ち込んで測定を行い、どの粉じん計及び粒度分布計による測定が現場測定に適しているかの検証を試みたが、残念ながら測定を実施した全ての企業との間で「機密保持契約書」を結んでからの測定となり、測定結果を 1 企業の一部分しか公表出来ない状況となった。

そこで、各測定機器のナノマテリアル取扱い作業環境における測定経験を生かしナノマテリアルを連続発生させる装置を試作し、そこで発生させたナノ粒子を各種測定器で測定することで、現場適用可能な測定器の検証を行った。その現場と基礎実験成果を総合的に検討し、ナノマテリアル取扱い作業環境における作業環境管理フローを作成した。また、現場測定から、ナノサイズの粒子を電子顕微鏡で観察することに特化したフィルターの選定及び専用測定器の開発の必要性からサーマルプレシピテーターの開発を行った。さらに、ナノマテリアルを連続発生させる装置を試作したことで、23 年度以降に予定していた小型実験用除じん装置のフィルターの性能評価及び防じんマスクろ過材のナノ粒子の捕集特性を把握する事を可能にした。

B. 研究方法

1. 基礎研究

1. 1 ナノマテリアル粒子捕集用サーマルプレシピテーターの開発

1 実験目的

従来の作業環境中の粉じん濃度測定と異なり、ナノサイズの粒子を測定するためにはそれに特化した測定機器が必要となる。しかしながら、多くの装置は元来一般大気やクリーンルーム等比較的汚染の少ない環境において測定することを前提としている面があり、作業環境のような濃度の高いことが予想される環境での使用には向いていない場合が多い。また、作業環境中には作業由来の粒子の他に一般大気中に存在するナノサイズの粒子も混在しているため、それらを区別して評価する必要がある。そのため、粒子を捕集して電子顕微鏡観察や化学分析を行うことが重要となる。

熱泳動法は粒子の捕集法の一つであるが、ナノサイズの粒子に対する捕集に関する知見は少ない。そこで本研究では、熱泳動法を利用した捕集装置であるサーマルプレシピテーターを開発して、ナノサイズの粒子の捕集特性を検討した。

2. サーマルプレシピテーターの概要

サーマルプレシピテーターは、熱泳動という現象を利用して粉じんを捕集装置である。熱泳動とは、温度こう配がある空間に粒子が存在するとき、その粒子は温度が低下する方向に力を受けるために引き起こされる現象である。これは、粒子は低温側よりも高温側の気体分子から受ける力の方が大きいために起きる。熱泳動の概念図を図 1.1 に示す。

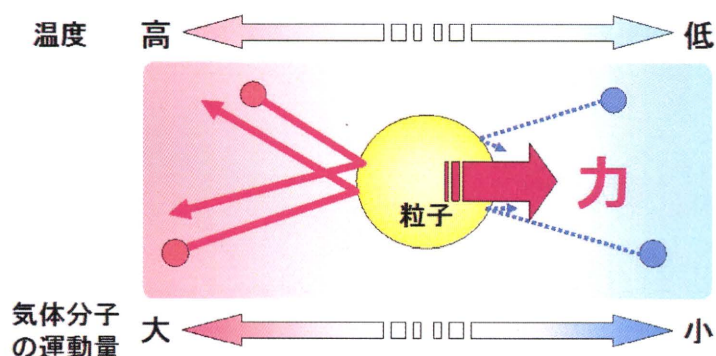


図 1.1 熱泳動の概念図

ただし、熱泳動はあまり大きな力ではないため、サーマルプレシピテーターの吸引流量はあまり大きくできないが、小さい粒子 ($10[\mu\text{m}]$ 以下) であればほぼ 100[%]の捕集効果を持つ、といった特徴を持っている。そのため、サーマルプレシピテーターの用途は、光学あるいは電子顕微鏡で観察するような少量の粒子を捕集するのに適している。

本研究で使用した装置は、柴田科学株式会社により開発されたサーマルプレシピテーターであり、この装置の外観図を図 1.2、その仕様を表 1.1 に示す。

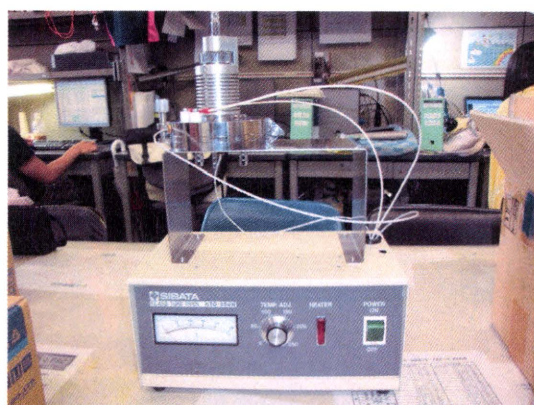


図 1.2 サーマルプレシピテーター外観

表 1.1 サーマルプレシピテーター の仕様

電源	交流 100[V] 約 100[W]
温度こう配	循環水との温度差：0～250 [°C]
	ヒートプレートと採じん面の間隔：可変
流量	0.1～1 [L/min]
大きさ	約 210 (D) × 320 (W) × 330 (H) [mm]
重量	10 [kg]

3. シミュレーション

3. 1 実験目的

捕集実験を行う前に、数値計算によるシミュレーションを行い、流量、平板間温度差、平板間隔、粒径を変えた時、どのように捕集特性が変化するかを確認した。粒子の沈着位置は鉛直方向の速度と水平方向の速度の合成で決定される。ここでは系を単純化するために鉛直方向の速度は、熱泳動力で決まり、水平方向の速度はポンプの流量で決まるものとする。粒子の沈着の様子を図 1.3 に示す。図 1.3 は実験に用いた捕集部を簡略化しており、赤色で示された上部の平板が加熱側、水色で示された下部の平板が冷却側である。平板は円形であり、空気の流れは円状に拡散していく条件を想定している。なお、これらの速度の計算方法については、3.2 および 3.3 で具体的に述べる。

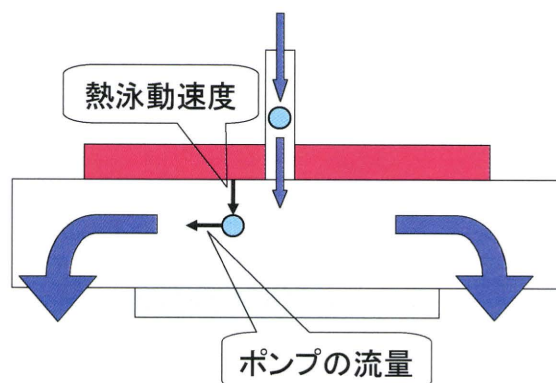


図 1.3 粒子の沈着の様子

3. 2 鉛直方向速度

熱泳動速度の基本式は、平均自由行程以上の場合以下の式で規定される。平均自由行程とは、分子が他の粒子に妨害されることなく進むことが出来ること平均距離であり、大気圧では約 68nm である。よってシミュレーションでは平均自由行程を 68nm とした。また、表 1.2 として使用した文字と値を示す。表の定数の値は 1atm、25°Cの時のものを使用した。

$$V_{th} = \frac{-3\eta C_c H \Delta T}{2\rho_g T}$$

ここで C_c はすべり補正係数という、粒子が他の分子の間を通るときに、その表面ですべり、速くなるので補正する係数で

$$C_c = 1 + \frac{2\lambda}{d_p} \left[\alpha + \beta \exp\left(-\gamma \frac{d_p}{2\lambda}\right) \right]$$

と定義される。 α 、 β 、 γ は定数であり、本研究では Hinds らの値($\alpha=1170$ 、 $\beta=0.525$ 、 $\gamma=0.780$)²⁾を使用した。 H は定数で、

$$H = \left(\frac{1}{1 + \frac{6\lambda}{d}} \right) \left(\frac{\frac{\kappa_a + 4.4 \frac{\lambda}{d}}{\kappa_p}}{1 + \frac{2\kappa_a + 8.8 \frac{\lambda}{d}}{\kappa_p}} \right)$$

である。

また、平均自由行程以下では、

$$V_{th} = \frac{-0.55\eta\Delta T}{\rho_g T}$$

となる。

表 1.2 使用した文字と値

記号	名前	単位	値
η	粘性係数	pa・s	0.0000182
C_c	すべり補正係数		式(5.2)
ρ_g	気体密度(空気)	g/cm ³	0.0012929
H	係数		式(5.3)
ΔT	温度勾配	K/cm	設定による
T	絶対温度	K	300
κ_a	空気の熱伝導率	W/(mK)	0.02614
κ_p	粒子の熱伝導率	W/(mK)	0.12
d	粒径	nm	設定による

3. 3 水平方向速度

水平方向の速度は、流量と断面積で規定される。水平方向の速度を V とすると、

$$V = \frac{Q}{A}$$

となる。ここで、 Q は流量(ml/min)、 A は速度に対して垂直な断面積(cm^2)である。断面積は時間の経過と共に増加するので、次第に速度は遅くなる

3. 4 シミュレーション結果

基本条件を設定し、そこから流量、平板間温度差、平板間隔、粒径のうち1つの条件を変化させて、シミュレーションを行った。タイムステップは 0.001 s として、それぞれ鉛直方向速度と水平方向速度を計算した。基本条件を表 1.3 に、値の変化幅を表 1.4 に示す。また、このときの軸の取り方は、図 1.4 に示したように水平方向は右向きを正に、鉛直方向は上向きを正にした。

結果として、流量のみを変化させたグラフを図 1.5 に、平板間温度差のみを変化させたグラフを図 1.6 に、平板間隔のみを変化させたグラフを図 1.7 に、粒径のみを変化させたグラフを図 1.8 に示す。

表 1.3 基本条件

流量	100ml/min
平板間温度差	150°C
平板間隔	0.3cm
粒径	100nm

表 1.4 値の変化幅

流量	100~1000ml/min
平板間温度差	100~250°C
平板間隔	0.5~2.5cm
粒径	70~200nm

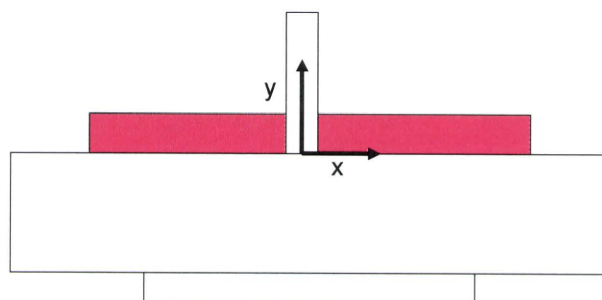


図 1.4 サーマルプレシピテーター内の軸の取り方

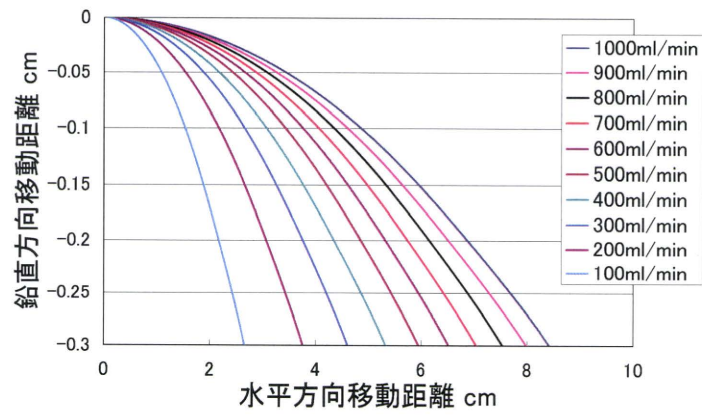


図 1.5 流量のシミュレーション結果

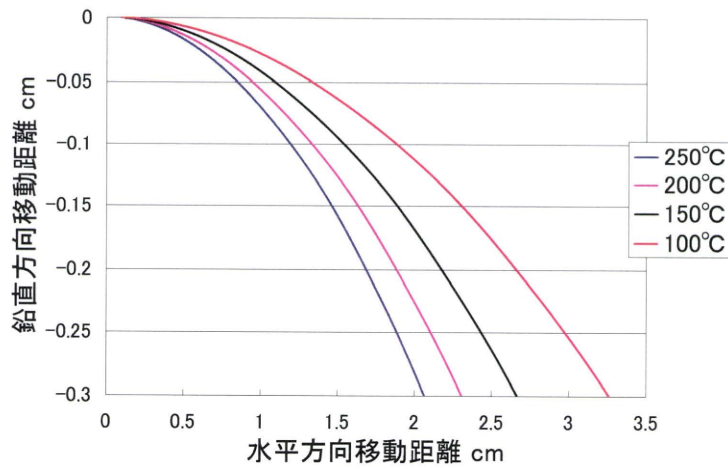


図 1.6 平板間温度差のシミュレーション結果

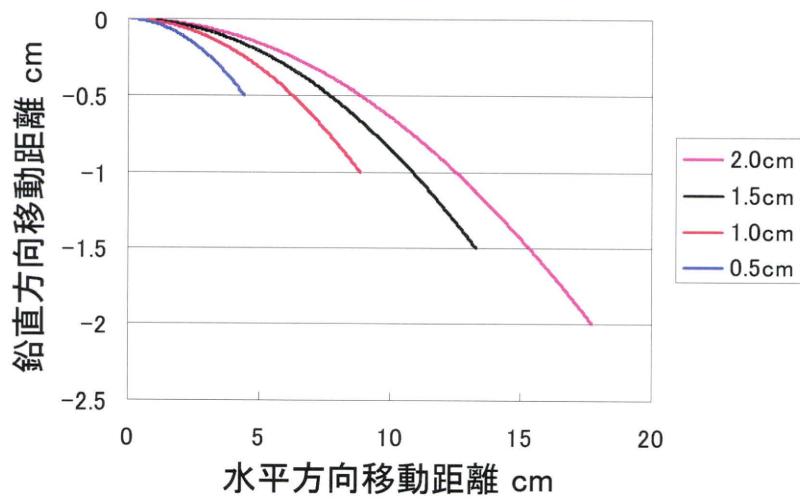


図 1.7 平板間隔のシミュレーション結果

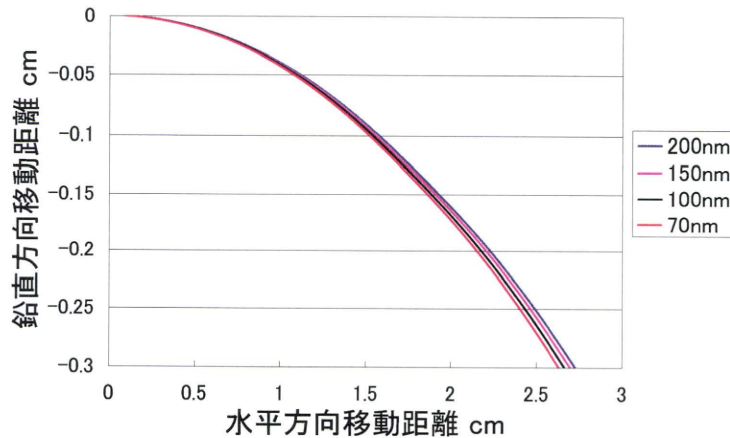


図 1.8 粒径のシミュレーション結果

3. 5 考察

今回シミュレーションを行った条件の中では、図 1.5 に見られる様に流量の変化が一番効果の大きいことがわかった。より低流量にすることで、より多くの粒子を中心付近に捕集出来ることが期待される。また、図 1.6 より平板間の温度差も捕集位置に大きな効果のあることが示された。温度差の場合、温度差が小さいほど単位温度差当りではより大きな効果が出る結果となっていることから、温度差を小さく設定する際には注意が必要である。サーマルプレシピテーターによる捕集において、捕集粒子に対する変質等の影響を考慮すると、温度差は小さい方が望ましいため、この点は重要である。図 1.8 より、平板間隔も同様に重要であることが示された。今回は 0.5 cm が限界であったが、他の報告では 0.01 cm の例もあるため、平板間隔をさらに狭める工夫を行うことは非常に有効であろう。

最後に粒径についてであるが、70 nm から 200 nm の間でほぼ差が見られなかった。すなわち熱泳動力に関しては粒径は大きな寄与を与えていないということである。このことから、100 nm の PSL 粒子で行った捕集実験の結果は他の粒径に対しても有効であるということがいえる。ただし、粒径が大きくなると重力沈降等、その他の影響が大きくなるため、その点には留意する必要がある。また平均自由行程以下では式に従うとされている。今回は捕集実験と同条件で感度実験を行ったため、平均自由行程以下の粒子についてはシミュレーションを行わなかったが、実際のナノ粒子の捕集を行う際には、より小さな粒子の挙動をシミュレーションすることで有用な情報が得られるであろう。

上述の通り、捕集に関する感度実験より、各パラメータが与える効果を知ることが出来た。しかしながら、今回は最も単純な系で検討を行ったため、より現実に近い条件にして、可能な限り再現することで沈着に関するより正確な情報を得たいと考えた。

4 ナノ粒子捕集実験

4. 1 実験系の構成

ナノ粒子捕集実験として、静電噴霧式の粒子発生装置であるシングルエレクトロスプレーESP-01(柴田科学製)により発生させた粒径 100nm のポリスチレンラテックス(PSL)標準粒子をサーマルプレシピテーターにより捕集し、走査電子顕微鏡(SEM)により観察することで捕集特性の検討を行った。実験系は、送気、発生、捕集、観察の4つの段階により構成されており、このうち実験装置は送気から捕集までの3段階で構成されている。実験装置内の流れを図 1.9 に示す。

まず送気部分では、Gilian AirCon-2 エアサンプリングポンプ(Sensidyne 製)を用いて室内空気をシリカゲル管、除粒フィルター)に通気させ、空気に含まれている水分や粒子を除去した後、PSL 標準粒子を発生させる際に必要な清浄空気として ESP-01 に送り込む。次に発生部分では、ESP-01 内でシリンジポンプにより調製した PSL 標準粒子懸濁液を送液し、キャピラリー管と対向電極間の電界により発生する微小液滴を希釈乾燥させることにより、目的の粒子を発生させる。その後、PSL 標準粒子を含んだ空気を送り出し、サーマルプレシピテーターで捕集する。このようにして捕集された PSL 標準粒子を SEM により観察した。実験状況を図 1.10 に示す。

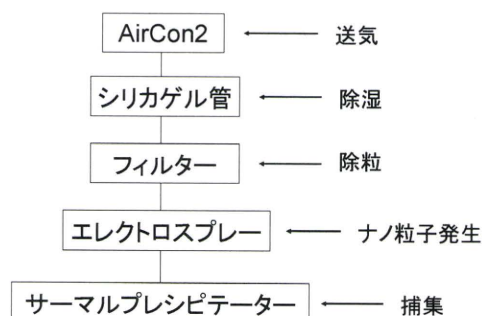


図 1.9 実験装置内の流れ



図 1.10 実験状況

4. 2 ポリスチレンラテックス標準粒子発生手順

PSL 標準粒子は、JSR 株式会社の STADEX SC-0100-D を使用した。粒径は 100 nm である。これは、PSL 標準粒子の水分散体であり、(独)産業技術総合研究所 (AIST)、米国立標準技術研究所 (NIST) に対して、トレーサビリティを有している。PSL 標準粒子は水中に分散させてあるため、実験で使用するためには緩衝液が必要となる。本実験では、酢酸アンモニウム水溶液を導電率が 2 mS/cm となるように調製し、緩衝液として使用した。この緩衝液 1 ml 中に STADEX SC-0100-D を 1 滴分散させ、超音波攪拌を 10 分行い、均一に分散されたことを確認したのち、シリンジ内に導入し、ESP-01 に接続した。PSL 標準粒子を分散させた溶液はシリンジポンプにより押し出され、印加電圧 2.83 kV をかけることで、静電噴霧により、空気中に 100 nm の PSL 標準粒子として発生させた。

4. 3 捕集条件

使用したサーマルプレシピテーターは柴田科学製で、気中の粒子をスライドガラス (76×26 mm) 上に捕集することが出来る。変化させたパラメータとしては、流量 (0.3～0.5 l/min) と温度差 (100～200℃)、平板間隔 (3～5 mm) である。平板間隔に関しては、装置が故障し、修理した際に、5 mm から 3 mm になってしまったが、実験したところ、捕集条件にあまり差異が認められなかったため、平板間隔に関しては、同条件下とみなし、考察する。流量の調整は、ESP-01 とサーマルプレシピテーターの間に流量計を挟んで確認した。

4. 4 観察方法

SEM の観察倍率を 30,000 倍として、スライドガラスの端から中心に向かって粒子個数の計数を行った。粒子の計数条件として、視野内に粒子の中心が含まれているかいないかで計数対象とするかどうかを判断した。

4. 5 実験結果

まず初めに、FE-SEM (JEOL-JSM-6500F、日本電子製) による観察画像を図 1.11 に示す。図 1.11 の通り、スライドガラス上に直径 100 nm 程度の粒子が多く捕集されていることが確認された。次に、実際に今回の計数時に観察された粒子の SEM 像を図 1.12 に示す。一般に、SEM の性能として 30,000 倍での観察は困難であるが、調整次第では 100nm の PSL 標準粒子を観察することが可能であり、いくつかの試料について観察結果を得ることが出来たので、以下にそれらについて述べる。

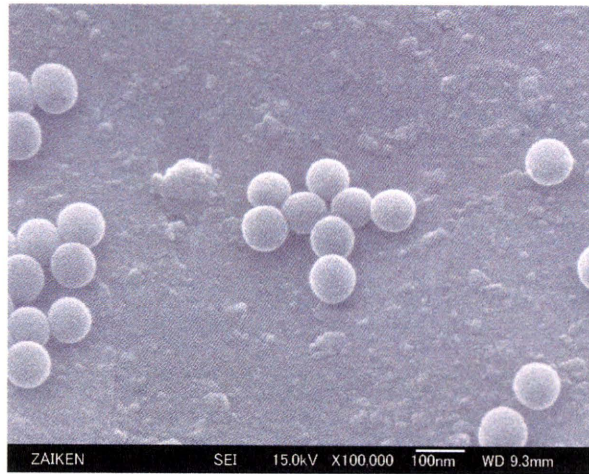


図 1.11 FE-SEM 観察画像



図 1.12 (A) PSL 粒子のSEM観察画像(×30,000)

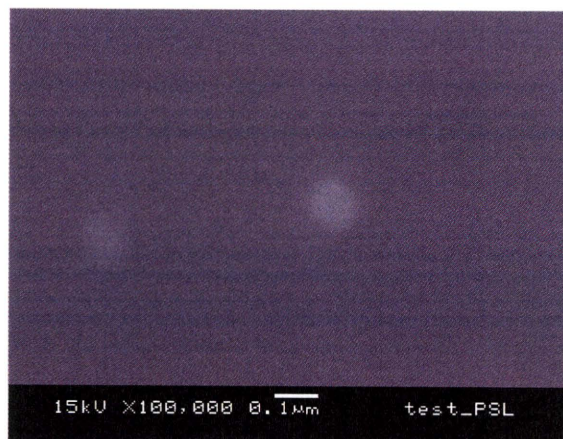


図 1.12 (B) PSL のSEM観察画像粒子(×100,000)

平板間の温度差を検討した実験の条件を表 1.5 に、流量の変化を検討した実験の条件を表 1.6 に示す。また、実験結果として得られた個数分布のグラフをそれぞれ図 1.12、図 1.13 に示す。ただし、横軸はスライドガラスの観察幅を示し、0 mm はスライドガラスの中心を、38 mm はスライドガラスの右端を示している。粒子はスライドガラス全面に捕集されるが、観察が著しく困難であるので、捕集状況が左右対称であることから右側半面の観察結果を示した。

表 1.5 平板間温度差の実験条件

実験	流量 ℓ/min	平板間温度差 $^{\circ}\text{C}$	平板間隔 cm
I	0.5	200	0.5
II	0.5	100	0.5

表 1.6 流量変化の実験条件

実験	流量 ℓ/min	平板間温度差 $^{\circ}\text{C}$	平板間隔 mm
I	0.5	100	0.5
II	0.3	100	0.3
III	0.5	200	0.5
IV	0.3	200	0.3

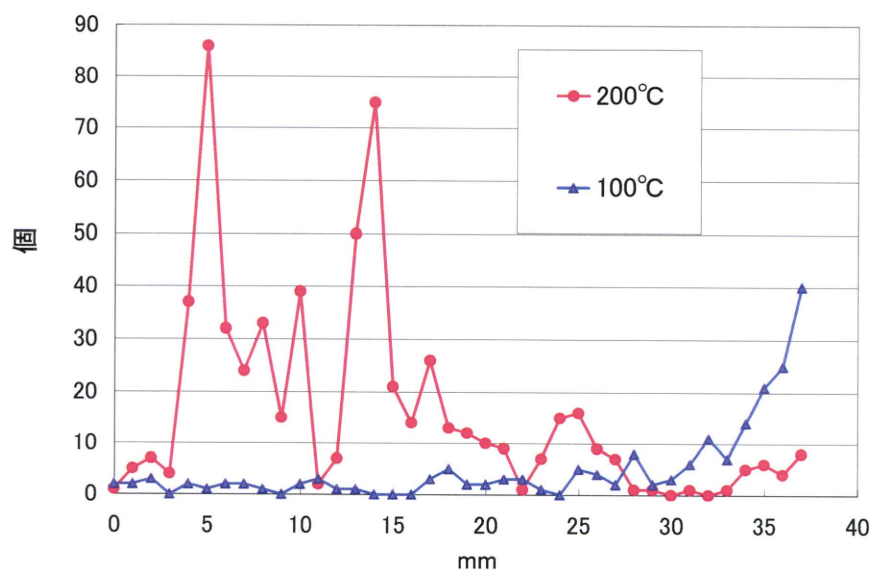


図 1.12 平板間温度差実験結果

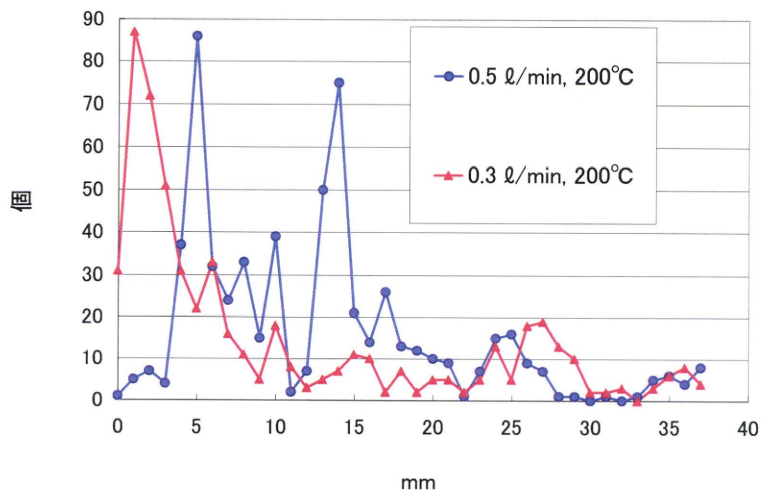


図 1.13(a) 流量変化実験結果(200°C)

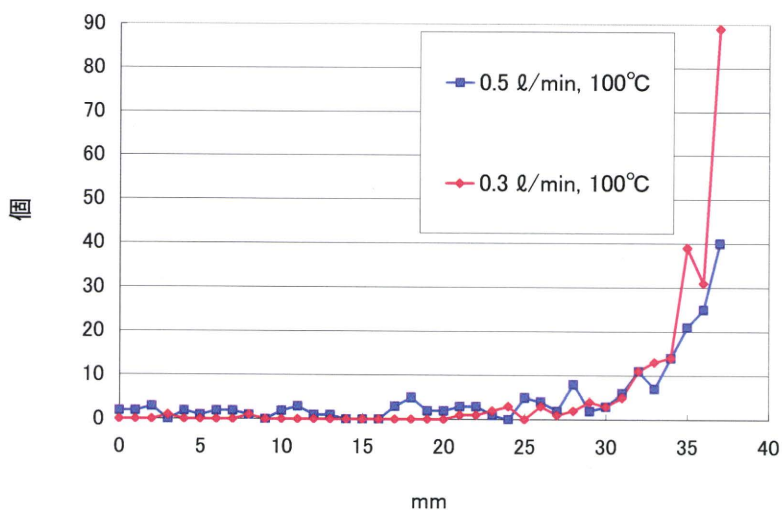


図 1.13(b) 流量変化実験結果(100°C)

4. 6 考察

熱泳動の原理から、温度差が大きく、流量が小さい条件下において、粒子はスライドガラス表面上に速く沈着すると予想されたが、実際に温度差を大きく、流量を小さく変化させた条件下で、粒子がより中心に近い範囲に沈着することが確認された。数値計算による感度実験からも、パラメータを変えたことによる影響の傾向と実際の捕集実験は一致していることが確認できた。感度実験としては流量のファクターが最も影響があると分かったが、実験では検証出来ない要因もシミュレーションにより、情報が得られる

ので、それらの知見をサーマルプレシピテーターの実験にも適応することにより、より精度の良いサーマルプレシピテーターの開発に役立てる予定である。

5 ナノマテリアル捕集実験

標準粒子を用いた実験系で確立した最適条件を元に、実際に工業的に製造されているナノマテリアルへの適応を試みた。対象とした物質はカーボンナノチューブ(CNT)および炭化ケイ素である。FE-SEMによる観察画像を図 1.14 および図 1.15 に示す。これらの結果から、実際に工場等で取り扱われているナノマテリアルに対してもサーマルプレシピテーターによる捕集が有効であることを示すことが出来た。



図 1.14 FE-SEM 観察画像(CNT)



図 1.15 FE-SEM 観察画像(炭化ケイ素)

6 まとめ

サーマルプレシピテーターにより、PSL 標準粒子を捕集できることが確認された。シミュレーションと基礎研究により、ナノ粒子は、温度差が大きく、流量も少ないほうが速く沈着することが確認された。また、実際のナノマテリアルに対してもサーマルプレシピテーターによる捕集が有効であることが確認された。今後は、現場適応を考えて、作業現場において測定を行い、ナノ粒子の最適捕集条件の検討、及び現場適応のための改良を行い、顕微鏡観察用の捕集器としてのサーマルプレシピテーターを完成させる。

1. 2 各種濃度測定器のナノマテリアルに対する計数特性

現在市販されている各種測定機器をナノマテリアル取扱い現場に持ち込み、どの測定機器がナノマテリアル現場における作業環境管理に使用できるかを検証する目的で、各種測定機器のナノマテリアルに対する捕集特性を把握するための基礎実験を行った。基礎実験の対象とした測定機器は、光学系の相対濃度計であるデジタル粉じん計 LD-5、光学系により個数濃度を測定するパーティクルカウンターである GT-526、ナノマテリアルを測定対象としている凝縮粒子カウンタ CPC 及びナノマテリアルの粒度分布が測定可能な粒度分布測定器 SMPS 及び WPS である。

1 使用測定器の概略

ナノマテリアル捕集に関する基礎研究に使用した相対粉じん計、個数濃度測定器及び粒度分布測定器の概要は、下記の通りである。ただし、基礎研究には使用しなかったが、現場測定には使用したのでシーオタスについても詳解する。

① オープンフェイス型サンプラー

吸引流量2.5L/minで直径25mmのろ紙上に粒子を捕集し、電子顕微鏡 (FE-SEM) 観察用試料を作製するために用いる。

② シーオタス (Sioutas Cascade Impactor, SKC製)

シーオタスは、慣性衝突の原理を用い、5ステージで細かく分粒できる仕様であり、流量を9 L/minに設定することで空気動力学径(以下、PM)2.5、1.0、0.50、0.25 μm で分

級することができる粒度分布測定器で、最小捕集粒度は、ナノ粒子を含む0.25 μm 以下の粒子の捕集が可能である。シーオタスの外観を図2.1、内部構造を図2.2に示す。



図 2.1 シーオタス外観

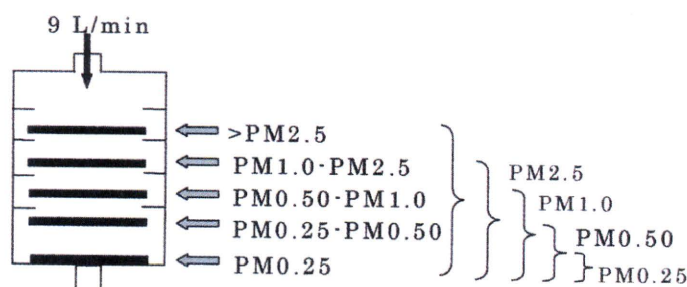


図2.2 シーオタスの内部構造

③パーティクルカウンター (GT-526)

パーティクルカウンターは、個数濃度を測定する測定器で、マイクロプロセッサ制御により、粒子数をレーザー光の光源と検出器により測定する。0.3、0.5、0.7、1.0、2.0、5.0 μm の粒径を測定可能で、1 分間ごとの単位体積当たりの粒子数を記録する。GT-526 の仕様を表 2.1 に示す。

表 2.1 GT-526 の仕様

粒径範囲	6 チャンネル (0.3 μm 、0.5 μm 、0.7 μm 、1.0 μm 、2.0 μm 、5.0 μm)
濃度範囲	0・立方フィート当たり 3000000 粒子 (105900 粒子/L)
精度	$\pm 10\%$ 、校正エアロゾルに対して
感度	0.3 μm で S/N 比が 2:1 のとき、底部に対するピーク=2
流量	0.1 立方フィート (2.83L/min) 値
サンプル時間	可変：1~999 秒
ホールドタイム	可変：0~999 秒
光源	レーザーダイオード、30 mW、780 nm
電源	6V ニッケル水素内蔵バッテリーパック
寸法	高さ=159mm 幅=102mm 厚さ=54mm
重量	約 880g
動作温度	0 $^{\circ}\text{C}$ ~+50 $^{\circ}\text{C}$
ストレージ温度	-20 $^{\circ}\text{C}$ ~+60 $^{\circ}\text{C}$

④相対濃度計

デジタル粉じん計LD-5

⑤凝縮式粒子計数器：(Condensation Particle Counter、CPC)

CPC は数 nm 以上の粒子の総個数濃度を測定する装置である。粒径が 100nm 以下の粒子は散乱光強度が微弱なために、粒径を成長させることにより光散乱光強度を十分な大きさにすることで測定を可能にしている。CPC は粒子を凝縮成長させる部分と光検出器で構成される。導入された粒子はアルコール等の溶媒のプール内で溶媒の蒸気と混合される。その後、凝縮管で冷却されて粒子上への溶媒の凝縮により 4 μm 程度の大きな粒子に成長する。個々の成長した粒子にレーザー光を当て、粒子の散乱光のパルス光を検出器で検出して計数される。CPC の測定粒径範囲は、0.015~1 μm 、濃度範囲は、0~100000 particles/cm、外観を図 2.3 に、CPC の仕様を表 2.2 に示す。

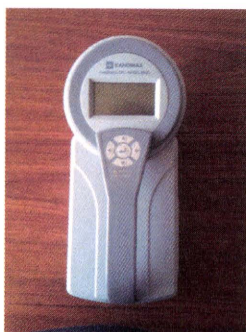


図 2.3 CPC の外観

表 2.2 CPC の仕様

測定粒径範囲		0.015～1 μm
濃度範囲		0～100000 particles/cm ³
カウント効率		50nm:100±20%(15nm:50%以上)
偽計数		1 particle/cm ³ 以下
流量		エアロゾル：100cc/min. トータル：700cc/min
アルコール	種類	イソプロピルアルコール(純度:99.5%)
	連続使用時間	約 5 時間(at21℃)
インレット部絶対圧		150～1150hPa
計測モード		Repeat/Program/Counter
通信		USB
プリンター通信形式		パリティ:なし、ビット長:8 ビット、ストップビット:1
メモリー (最大)		10,000 データ
電源	Type	単 3 アルカリ/ニッケル水素電池×6 本
	連続使用時間	アルカリ電池:約 5 時間/ニッケル水素電池:約 8 時間
環境温度範囲		15～30℃
寸法		120(W)×280(H)×130(D)mm
重量		約 1500g(バッテリーなし)

⑥走査型移動度粒径測定器(Scanning Mobility Particle Sizer、SMPS:TSI Inc.製)

SMPS は、数 nm から数百 nm の粒径分布を個数基準で測定する装置である。SMPS はエアロゾル荷電中和器、微分型電気移動度分析器 (Differential Mobility Analyzer : DMA)、凝縮式粒子計数器で構成される。粒子を含んだサンプルガスは、まず荷電中和器に導入される。ここでは放射線源を用いて空気中に正負空気イオンを発生させ、エアロゾルが持つ帯電量の分布を中和 (平衡電荷) の状態にして既知の帯電パターン (平均は 0 価、一部の粒子は 1 価あるいは多価に帯電) にする。その後、粒子を含んだサン