

現場測定によるナノマテリアル取り扱い職場のばく露アセスメント および各種ナノ測定方法の評価

鷹屋 光俊^{*1} 芹田 富美雄^{*1*2} 小野 真理子^{*1} 篠原 也寸志^{*1}
三浦 伸彦^{*2} 齊藤 宏之^{*1} 甲田 茂樹^{*3}

ナノマテリアルを扱っている職場において、実際に労働者がナノマテリアル由来の気中微粒子にばく露されるかどうかについては関心が高いが、実態はよくわからない。またナノ粒子を測定することが可能とされる装置はあるが、実際に工場環境で有効な測定結果を出すかどうかは不明である。そこで、我々は、炭素材料・金属酸化物の双方のナノマテリアル取り扱い職場で、ナノ対応測定装置による測定と、空气中粒子の捕集-成分分析および電子顕微鏡観察を行いナノマテリアルへのばく露アセスメントを行うと共に、作業・材料毎に、上記ナノ粒子測定装置がどの程度使用可能なのかについて評価した。

その結果、袋詰めを始めとした、ナノマテリアルを粉体として扱う作業場で、ばく露の可能性が高いことがわかった。また、ナノマテリアルは、100nmよりも大きなサブミクロン～ミクロンの大きさに凝集している場合が多く、ナノ粒子測定装置よりもむしろサブミクロンサイズの粒子測定装置の方がナノマテリアル由来の粒子発生をモニターする方法として有用であった。<100nm以下のナノ粒子を測定する装置では、バックグラウンド粒子濃度の変化に隠れ、作業に由来したナノ粒子発生を確認できる例はむしろ少なかった。

キーワード: ナノテクノロジー, ナノ粒子, ナノマテリアル, ナノ材料, CNC, SMPS, 電子顕微鏡。

1 緒言

ナノテクノロジーを利用した職場環境において、労働者のナノマテリアル（ナノ材料とも呼ばれるが本項ではナノマテリアルと呼ぶ）由来の有害物ばく露による健康障害を予防するために、ナノ粒子のばく露の実態を把握し、工程の見直し、工学的対策、保護具の着用などで、ばく露を制御する必要がある¹⁻⁶⁾。これらの対策を行う際、まず労働者のばく露を正しく評価する事が不可欠である。ナノマテリアルは、新しく職場環境に入ってきた物質であるので、新たに測定・評価方法を開発する必要がある。ただし、ナノマテリアルについては、ハザード評価が定まっておらず、対象となる物質も限定されない。つまり、何をどこまで計るべきなのかという目標が決まっていない。

我々の研究グループは、このような状況下において、労働者の健康を守るには、今何ができるかを探るため、有望と思われる各種の機器を様々なナノマテリアル取り扱い職場に持ち込み、機器の評価およびナノマテリアル取り扱い職場の現状の把握を行い、労働者へのばく露評価をどのように行えばいいのかについて研究を進めてきた⁷⁻¹²⁾。

現在、多くの労働者が関わっていると推定されるナノマテリアルは、金属酸化物とカーボンブラック（CB）である。これらに加え、今後成長が期待されている、カーボンナノチューブ（CNT）、フラーレン等について、有効な管理方法が求められている。CNT・フラーレンは

新しい物質であるために、一から評価方法を構築する必要がある。一方、金属酸化物・CBは、ともに昔から広く使用されているが、ナノマテリアル化にともない新たな影響が懸念され、ナノマテリアルとしての管理が求められている物質であり、粒子サイズがナノスケール（<100nm）ではないものと、粒子径がナノスケールであるナノ粒子とを分けて測定・管理する必要がある。このため、化学的には同一の物質をどうやってサイズ別に分けて分析するか、小さい基本の粒子（一次粒子）が多数集まっている凝集塊の評価をどうするかといった問題がある。

職場の空气中に存在するナノ粒子を化学組成にかかわらず計数し、ナノマテリアルへのばく露評価とするというのとは一つの方法として考えられる。粒子測定は、ポータブル型の装置でリアルタイム測定が可能であるという利点もある。一方問題点として、作業由来以外の多数のナノスケール粒子の存在がある。通常的环境空気中には1立方センチメートル中に数千個のナノ粒子が存在している。一方で、作業に伴う粒子の発生数も数千個/cm³のオーダーか、それ以下である場合が多い。このため、ナノスケール粒子の濃度をリアルタイムで測定していても、作業と明確に関連づけて発生を確認できた例はごくわずかであった。一方、ナノ粒子に比べ、比較的バックグラウンド粒子数が少ないサブミクロン径粒子（0.5 - 1μm）に関しては、作業に関連づけられた発生を比較的確実にとらえることは可能である。ナノ粒子は凝集によりサブミクロン粒子に速やかに移行すると考えられているため、サブミクロン径粒子濃度の変化を指標として、作業内容の見直しや局所排気装置の効果確認などを行うことは有用だと考えている。

*1 環境計測管理研究グループ

*2 (社)日本作業環境測定協会

*3 健康障害予防研究グループ

*4 有害性評価研究グループ

粒子測定と異なり、リアルタイム測定はできないが、ナノマテリアルそのものを分析する方法があれば、環境管理、ばく露評価にとっては一番確実な方法となる。

成分分析では、それぞれの物質ごとに十分な感度を持つ分析法の開発が待たれると共に各物質共通の問題として、試料の捕集方法がある。粒子径別に捕集を行っても、大きな粒子の混入を完全に避けることはできない。成分分析は質量濃度測定であるため、少数の大粒径粒子の混入が結果に大きな影響を与える。電子顕微鏡で観察すると、小粒径粒子のみを捕集しているはずのフィルター上で大粒径粒子が観察される例はしばしばある。凝集粒子と凝集していない粒子の有害性に大差が無ければ、粒径別サンプリングはそもそも不要だが、今後有害性に関する研究が進み、空气中に一次粒子として存在している粒子のみの濃度を測定しなくてはならないとなれば大きな問題となる。

2 調査の内容

表1に、今回調査を行った調査対象物質および作業内容を示す。

表1 調査対象物質および工程

材料	作業
フラーレン	材料秤量
フラーレン	反応容器からの取り出し
CNT	袋詰め
炭素系材料	製造装置保守
セラミック微粒子	反応容器からの取り出し
セラミック微粒子	表面処理
金属塩（非水溶性）	焼成および炉への材料秤量
酸化亜鉛	焼成
酸化亜鉛	袋詰め
酸化チタン	袋詰め
酸化チタン	乾燥
炭素系材料	袋詰め

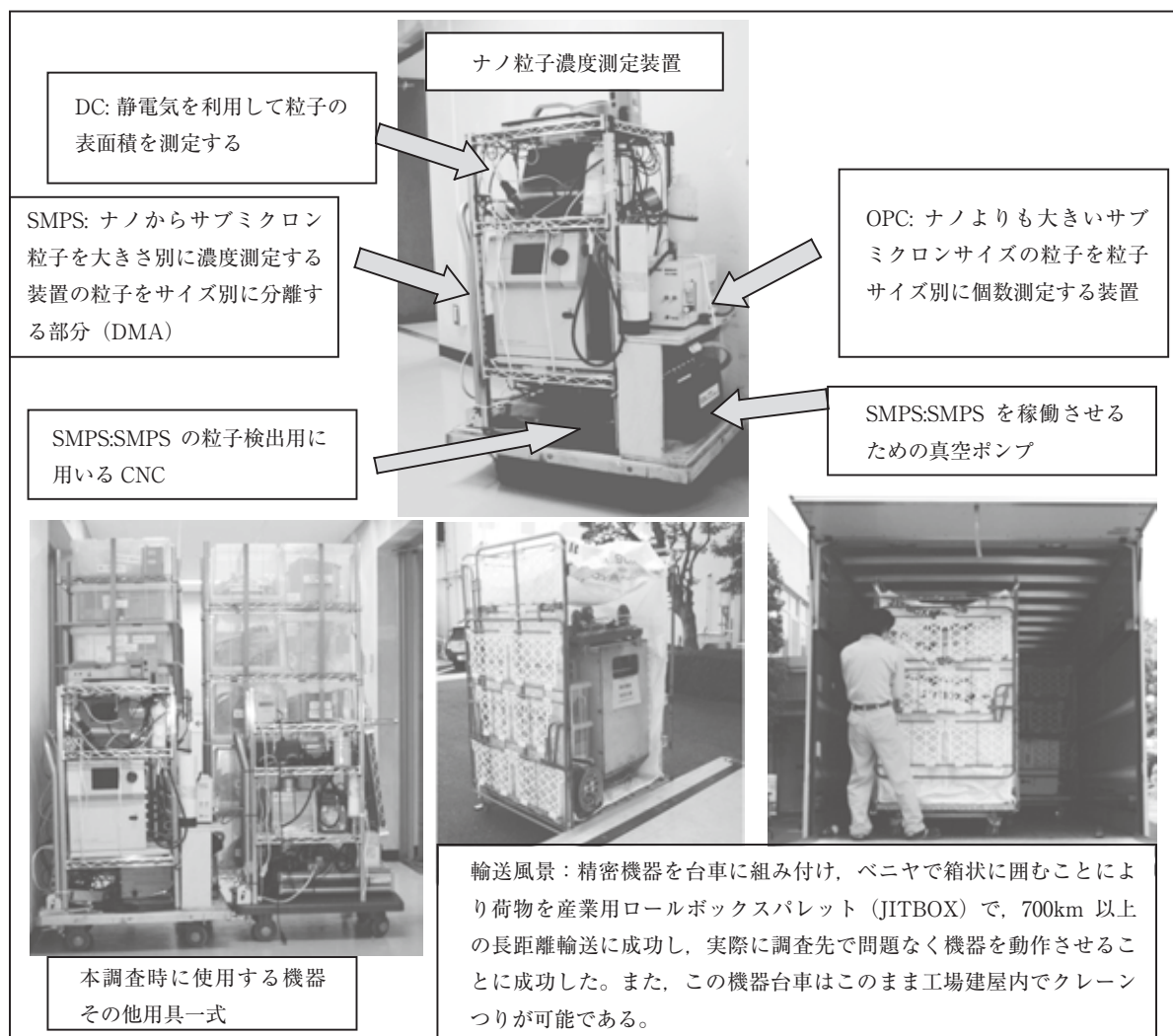


図1 本調査に用いる機器及び機器の輸送

表2 本調査で用いる測定機器

名称	略称	測定対象	目的
凝縮核カウンター	CNC	10nm～1000nmの気中粒子個数濃度	ナノ粒子濃度の時間変化
走査モビリティ粒子サイザー	SMPS	10~400nmまでの気中粒子を大きさ(128段階)別に濃度測定(一測定にほぼ3分必要)	粒径分布(発生源により粒径分布が異なる可能性がある)
光散乱粒子カウンター	OPC	300nm~5000nmの空気中粒子個数濃度(粒子サイズを4から5段階に分けて測定可能)	ナノマテリアルが凝集した粒子の濃度測定
表面積計	DC	空気中に存在する肺胞到達粒子(7μm以下)の総表面積	ナノ粒子の有害性は表面積に比例するという仮説に基づく

調査は、測定対象の工程・材料・対象作業場の規模により異なる点があるものの、おおむね下記の手順で行った。

1) 予備調査

調査を受け入れてくれる事業場にて、調査概要の説明を行うとともに、事業場より、取り扱い材料・工程の概要について説明を受ける。作業場を訪問・作業内容の観察を行い、作業者がばく露する可能性がある作業場所・時間を予測し、その後実施する本調査の調査場所・測定時間を決定する参考とする。必要に応じて、ポータブル型の簡易測定器を持ち込み、本調査の測定場所の絞り込みを行う。

2) 本調査の概要

予備調査の結果をもとに、測定装置・気中粒子捕集装置を作業場に設置して、測定および捕集を行う。測定・捕集とも、対象作業が行われていない時間と作業が行われている時間の双方について行い。また一部の測定装置については、同時刻に工場建屋外あるいは建屋への空気導入口で測定を行い、大気中のバックグラウンド粒子の変化も測定する。これは、測定値に変化が見られた場合に作業に由来するものか、周辺環境の変化に由来するものかの判断材料となる。測定値そのものは装置が時間とともに自動的に記録するが、測定値と作業内容との関連づけを行うために、作業場での機械の運転状況、作業者の動き、ドア、窓の開閉、輸送機械(トラック・フォークリフト)の出入りなどの変化を時刻とともに記録する。固定測定点での濃度変化は、空気中粒子捕集では、作業者のばく露状況と乖離する可能性があるため、簡易測定器、小型の捕集装置を作業者の体に取り付け、個人ばく露濃度測定を併せて行う。ただし、作業内容によっては、防護服の着用や、暑熱下における激しい作業など、個人ばく露測定・捕集装置の装着に問題がある作業もある。この場合は、測定者が作業者に代わり、個人ばく露測定・捕集装置を取り付け、作業者の邪魔にならないようにしながら、作業者の呼吸域に近い空気が捕集できるように行動する。

これら一連の作業を行うため、本測定では一作業場の

調査に、4～6名程度の人員を要する、また時間は、作業時間にも依存するが、2日～3日間必要となる。

図1に現場に持ち込む装置の概要との現場への輸送風景を示す。今回の調査では、通常は、空調・ノイズ対策などが十分なされた実験室で使用する仕様の装置についても、台車上に輸送用のラックを組み付け、ベニヤ板で保護箱を作った上で、測定器の使用環境としては適切とは言いがたい工場に実際に持ち込み測定を試みた。また、工場内の高所での測定も行えるように機器ラックはそのままクレーンで吊れる構造とした。実際に、工場内の中2階での測定を行う際に天井クレーンを用いて機器を設置した例があった。

3) 現場で測定を行う機器

表2は、実際に作業場で測定を行う機器の名称と測定対象との関係を示したものである。各装置の動作原理の詳細などは他の文献に譲り、本研究でこれらの装置を使用する目的につて下記に述べる。

ナノマテリアル取り扱い職場でもっとも関心が高いのはナノ(100nm以下)粒子が実際に労働環境中に存在しているかどうかである。したがって、ナノ粒子の濃度測定を行える凝縮核カウンター(CNC)によりナノ粒子の濃度測定を行う。ただし、空気中にはナノマテリアルを扱っていないくても、ディーゼル排気ガス由来などのナノ粒子が多数存在する。クリーンルームではない、通常の工場内で、おおむね5000~15000個/ccにも達する。

このため、ナノ粒子の濃度測定を行っても、作業に関連したナノ粒子の発生を確認できない場合が多い。そこで、ナノ粒子の個数濃度に加え、大きさ別の濃度(粒度分布)測定を行う。この目的に用いるのが走査モビリティ粒子サイザー(SMPS)である。SMPSは、粒子をサイズ別に分けるDMAという装置とCNCを組み合わせたもので、約3分間かけて、10から400nmまでの範囲の粒子を粒子サイズ別に最大128段階に分けて測定することが可能である。外気のナノ粒子と作業由来のナノ粒子の粒径分布が異なっている場合、この装置を用いることにより、作業由来のナノ粒子の発生を観測することができる。

ナノ材料を取り扱う場合、ナノ材料が元のナノの大きさにまでばらばらになって空気中に放出されるほかに、数十～数千個のナノ粒子が塊（凝集粒子）として空気中に放出される可能性も非常に高い。現在のところ、ナノ粒子としてばく露された場合と凝集粒子としてばく露された場合で健康影響が同じかどうかの知見はないが、ナノ材料由来の粒子であれ、凝集していてもばく露を防止した方が良いと考えられる。そこで、凝集した状態で空気中に放出された粒子を測定するために光散乱カウンター（OPC）とよばれる装置を用いて空気中粒子の個数濃度を測定する。

OPCは通常、300nm-5000nmの粒径範囲を5～6段階に分けて大きさ別の粒子個数濃度を測定する。本研究では、300nm, 500nm, 1000nm, 2000nm, 5000nmの5段階に分けて濃度測定する装置を用いた。

ナノ粒子がより大きなミクロンサイズの粒子よりも有害性が高い理由として（同じ質量あたりなら）ナノ粒子のほうがミクロンサイズ粒子よりも表面積が大きいため、生体に対する活性が高いのではないかという説がある。そこで、粒子の表面積を測定する装置による評価も併せて行っている。

4) 粒子の捕集と、分析・電子顕微鏡観察

作業場における粒子の捕集には粒子の大きさ別に捕集するカスケードインパクターを用いる。図2の左がカスケードインパクターの原理を示したもので、インパクター内で試料空気の流れが強制的に曲げられるような構造をもっており、気流の流線に沿って移動できる粒子と流線から外れて捕集材に衝突する大きな粒子とに分離することができる。これがインパクター捕集の原理であり、内部のノズルの大きさ（捕集対象粒子）を変えたインパクターを複数並べたものがカスケードインパクターである。

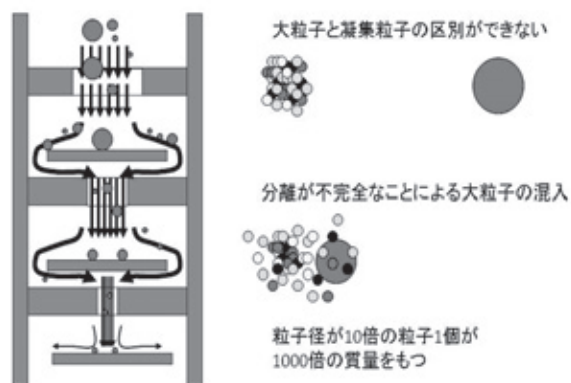


図2 カスケードインパクター

尚、インパクターが示す粒子径は空気動力学径とよばれ、比重1の粒子の空気中での挙動を基準にして決められた大きさである。比重が1ではない粒子の場合、幾何学的なサイズと空気動力学径は一致しないため、電子顕微鏡観察や、SMPSやOPCといった粒子径を測定する装置のデータと比較する場合注意する必要がある。

インパクターには図2の右に示したようないくつかの欠点があるものの、実用的には、空気中粒子を複数の多きさ別に捕集することができる唯一の装置である。本研究では、空気中粒子を <250nm, >250nm, >500nm, >1000nm, > 2500nm の5段階に分離するシウタスインプクターを用い、必要に応じて粒子を肺胞まで到達する4 μm以下と気管壁に付着するなどして肺胞まで到達しない4 μm以上の大きさに分離するロウポリウムサンプラーを併用して捕集を行った。

表3 捕集した粒子の分析方法

方法	使用するフィルター	対象物質
質量濃度測定	テフロンバインダーガラス繊維	全て
走査電子顕微鏡観察 (SEM)	ポリカーボネートメンブランフィルター	全て・特に形態観察が重要なもの
透過電子顕微鏡観察 (TEM)	電顕用メッシュに静電捕集	他の方法では粒子の特定が困難だと予想される場合
誘導結合プラズマ発光分析/質量分析	セルロースメンブランフィルター	金属化合物
元素状/有機性炭素モニター (EC/OC)	石英フィルター	カーボンブラック、カーボンナノチューブ等
高速液体クロマトグラフィー (HPLC)	石英フィルター	フラーレン

尚、本来であれば、ナノ粒子とそれ以外 (>100nm) の分離が行えるサンプラーを用いることが望ましいが、より小さな粒子を捕集するためにはインパクターのノズルを通過する空気の流れを速くする必要がある。空気の流れの制限により、インパクターを100nmで分離するようにインパクターを動作させると装置が大型化し、工場内に多数の捕集装置を持ちこむことができないため、100nmではなく、250nmで分離する装置を用いた。作業場の空気より捕集して来た試料は、質量濃度・各種成分の化学分析・電子顕微鏡観察を行う。表3に用いる分析方法と使用するフィルターを示す。

質量濃度は、粒子状物質のばく露アセスメントを行う際にもっとも基本的な量であるが、ナノ粒子の場合、粒子径が小さく粒子一個一個の質量がきわめて小さい、いままで労働環境中で管理してきたのは1 μm前後の粒子だが、これに比べ直径が1/10しかなく、比重が同じだと仮定すれば、一個あたりの質量は1/1000しかない。従って、実際には質量濃度を測定できない場合も多い。

電子顕微鏡観察は、特に対象とする粒子がCNTの様に繊維状であるなど特徴的な形状を有する場合に、実際にナノ材料が作業環境空气中に放出されたかどうかを知る決め手となる。一方で、電子顕微鏡観察では、粒子の発生の有無を知ることはできても、定量的な評価を行うためには、捕集したフィルターの全表面を観察して、視野内に存在する粒子の種類と数を計数処理すると

いう膨大な作業を有するため、普段の管理に用いるには適当ではない。

金属酸化物などの材料を扱っている場合は、誘導結合プラズマ発光分光方や質量分析法（ICP-AES/MS）を用いて空気中粒子中の金属濃度の測定を行うことにより、労働環境空気中のナノマテリアル由来粒子を測定した。同様にフラーレンの場合は、トルエンなどの有機溶媒に粒子を溶解した後、高速液体クロマトグラフ（HPLC）による分析を行い、フラーレン量を求めた。また、CNTやカーボンブラック（CB）については、粒子を決まった熱プログラムと酸素量制御の元で燃焼させ、その燃焼パターンから、粒子中の炭素がどのような形で存在しているか进行分析する元素状/有機性炭素モニター（EC/OCモニター）を用いて測定を行う。この装置は、元々ディーゼル排ガスの評価用に開発された装置だが、装置の条件を調整してナノマテリアルの評価に用いる方法を当研究所で研究・開発を行っている。この方法に関しては本報告書中の別論文で詳細を説明する。

5) データ解析

捕集したサンプルの分析ならびに、電子顕微鏡観察とともに、測定器のデータの解析を行う。手順としては、まず、全ての測定結果を時系列に一つのグラフにプロットする。粒度分布が得られるSMPSのデータも粒子径別の粒子濃度の時間変化のグラフとしてプロットする。その上で、作業記録の時間とつきあわせることにより、特定の作業に伴う粒子の発生の有無、粒度分布の変化の有無などがあるかどうか調べる。また周辺のバックグラウンド粒子の濃度が大きく変化しているような場合は、光化学スモッグの発生などの気象要因の有無を情報検索して調べる。このようにして、具体的な作業によりナノマテリアル粒子が労働環境空气中に放出された可能性を調べる。

6) 結果の説明

データの解析・成分分析・電子顕微鏡観察などの結果がまとまった時点で、調査対象企業に向向き、結果の説明を行う。場合によっては、作業内容の改善を提案し、改善後再度調査を行い改善策の評価を行うこともある。その上で、他の企業においてもナノマテリアル取り扱いなどに参考となる事例が見いだされた場合は、調査企業と公表の範囲（調査企業の企業秘密などに触れない範囲）を調整し、論文などの形で公表する。以上が一連の調査の流れになる。

3 実際の作業場での測定例

実際の作業場の測定の結果例として、フラーレン加工工場・CNTの袋詰め工程、酸化チタンの袋詰め工程の結果を示す。図3はフラーレン加工工場において、反応装置から反応容器を取り出し、グローブボックス内で金属ヘラを用いて反応容器から反応混合物を掻き取り回収する作業の際の粒子発生を示したものである。

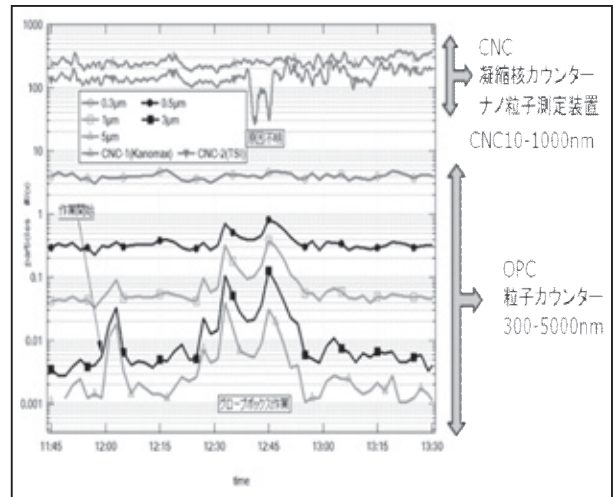


図3 フラーレン反応生成物の反応炉からの取り出し作業における粒子濃度変化⁷⁾

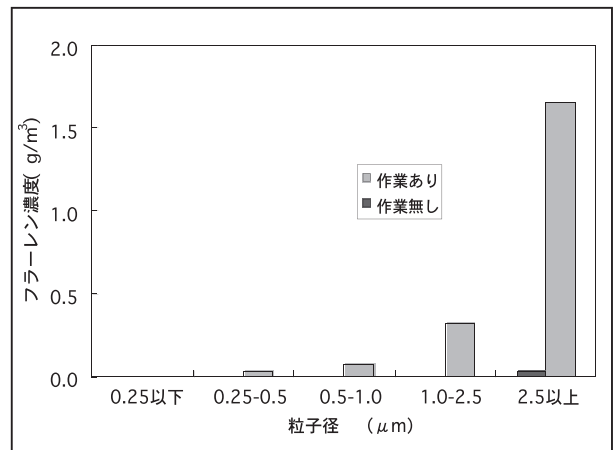


図4 HPLCによるフラーレン濃度測定⁷⁾

作業開始時と、グローブボックス開閉時に粒子の発生がみられるが、いずれもミクロン径の粒子であり、ナノ粒子の発生はみられない。このことは、HPLCによるフラーレン濃度測定（図4）の結果からも裏付けられている。この作業場では、ナノマテリアル由来粒子の発生が認められるが、その大きさはミクロン径が中心であるため、今までのミクロン径の粉じん粒子を対象とした、ばく露予防対策が十分有効であると考えられたが、当該企業では、さらに対策を進め、上記の粒子発生が認められた反応容器からの反応混合物掻き取り作業を、完全に密閉したグローブボックス内での作業に置き換えている。

図5は、袋詰め作業中の空気中粒子の発生例である。この作業場では、ホッパーより1バッチ分の製品をまずフレキシブルコンテナに取り出し、その後作業員が出荷単位の袋に小分け包装を行う作業を行っている。粒径別に示した濃度変化のうち、100nm以下と、100-200nmはSMPSのデータから再計算して求めた粒子濃度（個/cc）である。100nm以下の小粒径粒子の濃度は作業とは全く関係が無く、粒子の大半が外気由来であることが予想できる。最初のホッパーからの取り出し作業では、

1 μ m 以下から 100nm 程度までのサブミクロン径の粒子の発生がみられる。その後の小分け作業では、より大きいミクロン径の粒子の発生がみられる。この作業においても、サブミクロンからミクロン径粒子に対するばく露防止対策が有効であると予想される。

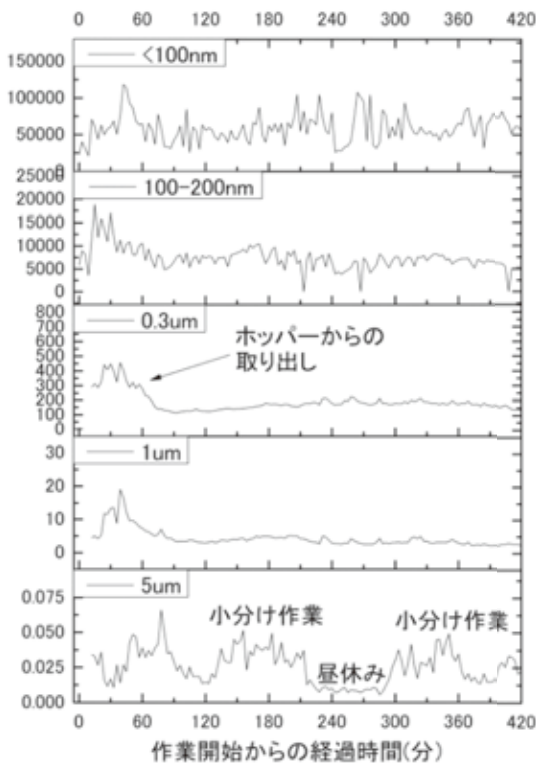


図5 CNT 袋詰め工程における粒子濃度変化

図6はSMPSによる粒径分布の作業の有無での変化をみたものである。図6の左図では、作業の有無で粒径分布が変わっていない、粒子濃度は変化しているが、実際の作業記録とつきあわせると、粉体取り扱い作業より前、準備段階で粒子濃度の上昇が始まっている。これは、準備段階で室内の局所排気装置の運転速度を上げたため、外気がより多く室内に供給されたため、外気由来の粒子濃度の上昇がみられたのではないかと推定している。一方、バックグラウンド由来の粒子数が少ない場合、同じ作業場所において、作業とともに粒径分布の形状が変化している観測例もみられた。200nm 付近にみられるサブピークは作業由来の粒子発生だと考えられる。ただし、同一作業で粒径分布変化がみられない場合もあり、粒子濃度測定および粒径分布測定だけで、粒子の発生の有無を判定するのは困難な場合が多いということを図6の測定例は示している。

4 測定装置・分析法の問題点

多数の作業現場に装置を持ち込んだ結果として、各種装置の限界とどこまで有用な情報を得ることができるかについてわかりつつある。本項では、特に装置として解決すべき課題を中心に説明する。

ナノ粒子を対象とした測定装置、特に SMPS は、本

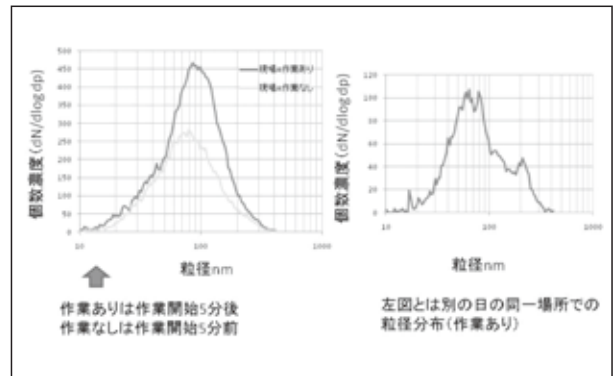


図6 酸化チタン袋詰め工程における気中粒子の粒径分布変化

来実験室で用いる機器であり、電源・機器の置き場所など実際の作業現場で運転するためには課題も大きいですが、この点については、台車上にラックを構築し組み付ける等の工夫で解決可能である。どうしても解決できない問題として防爆の問題がある。防爆仕様の装置が市販されていないのが問題ではなく、SMPSの測定原理上、装置内で試料空気に高電圧を印加する部分を有するため、防爆装置を作ることが不可能だという解決不可能な問題である。SMPSだけではなく、DC（表面積計）も、装置内で試料空気に高電圧を印加するため、防爆対策を施した装置を作ることにはできない。

CNCについては、測定結果が外気由来のナノ粒子の影響を大きくうけるため、クリーンルームなど限られた環境でなければ、有用な情報を得られなかった。このほか、装置の運用の問題としては、CNC（SMPSの検出部に使われているものも含む）は、装置内にアルコールを使用し、装置からの排気にアルコールを含んでいる。このアルコール蒸気が、工場内に設備されている警報装置（可燃ガス漏洩検知）を誤動作させる可能性があるため、測定ができなかった作業場があった。CNCについては、アルコールの代わりに水を用いる装置も実用化・市販されているが、測定精度、安定性などの点でアルコール使用の装置の方が優れているようである。

測定作業場は、温度・湿度が必ずしも精密測定器の使用範囲内に収まるとは限らない。ナノマテリアル取り扱い作業場には、しばしば反応・焼成などに用いる炉が存在して、室内の温度が高い場合が多かった。温度条件が既定の範囲内を逸脱していればどのような装置でも正常に動作しない場合が多いが、特に CNC の場合は、装置内部でアルコール（水）の過飽和蒸気を使用しており、装置内部の温度制御を厳密に行う必要があるため、高温に関する装置の許容範囲が狭く、測定がうまく行えないことがあった。

このようにナノ粒子を対象とした装置を現場で運用するためには、装置そのものの改良と運用方法に関するノウハウの蓄積がまだまだ不足しているといえる。一方、ナノよりも少し大きいサブミクロン径の粒子を計測する OPC は、非常に有用なツールであるといえる。サブミクロンサイズでは、大気由来のバックグラウンド粒子濃

度もさほど高くないため、作業に伴う粒子発生があれば、明確につかむことができる。ただし、OPC が示す数字はあくまでもナノではなくサブミクロンサイズの粒子についてであるため、得られる数値を用いた環境の良否の判定に用いるのは適当ではない。OPC の結果が示す相対的な濃度変化を利用して、問題のある作業工程の洗い出しや対策の効果についての評価などにその結果の利用はとどめるべきである。

電子顕微鏡観察は、CNT のように扱う材料に形態的な特徴がある場合などに、空气中にナノマテリアルが放出されているのかどうかの判定に非常に有力な情報を提供する。一方で、あるかないかではなく、どの程度空气中に放出されているか、について定量的に判定するためには、多くの観察視野について観測される粒子を計数し、統計処理する必要がある、非常に手間がかかる。

実務面では電子顕微鏡観察には別の問題が存在する。それは情報量が多すぎることである。空气中粒子を捕集したものを電子顕微鏡観察した結果、工場から外に出て行く製品由来の粒子の他に、原料や中間体由来の気中粒子が観測されることがある。これらの粒子の形状・凝集状態については、製造に関するノウハウなど企業秘密に属する情報が含まれている場合が多く、電子顕微鏡観察による管理を行う場合、試料および写真の情報管理などを厳密に行う必要がある場合も多いと考えられる。

5 結論

ナノマテリアル取り扱い職場の労働環境管理を行う場合、簡易的には、ナノマテリアルの取り扱いに伴い、ナノ粒子と同時に発生する、より大きな凝集粒子（サブミクロンサイズ）を OPC などの装置で評価するというのが一番有用な方法であると考えられる。ただし、あくまでも、これはナノマテリアル由来の気中粒子が凝集体であれ 100nm 以下のナノ粒子であれ、質量あたりの毒性は変わらないという仮定に基づく簡易な評価であり、今後毒性に関する研究結果の蓄積により、ナノ粒子そのものの管理を行う必要がでてきた場合は、異なる対処法が必要となる。

ナノ粒子についての測定および管理は、マニュアルやフローシートに沿って、決まった装置を決まった順序で用いて結果を得るということは不可能であり、労働衛生と、扱うナノマテリアルの双方の専門家が情報を持ち寄り、多数の測定装置・分析装置を適切に組み合わせることにより、材料・作業工程ごとに評価方法をオーダーメイドで作成する必要がある。これらの制限は、バックグラウンド由来の粒子の多さ、空気の物性などの自然法則により制限されているため、よほどの技術的ブレークスルーがない限り、変わらないのではないかと考える。

参考文献

1) National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) . Strategic Plan for NIOSH Nanotechnology

Research: Filling the Knowledge Gaps. [Online] 2008. [cited 2009 Nov 23]; available from: URL: http://www.cdc.gov/niosh/topics/nanotech/strat_plan.html.

2) Federal Institute for Occupational Safety and Health (ドイツ連邦労働安全衛生研究所, BAuA) . Guidance for Handling and Use of Nanomaterials at the Workplace. [Online] 2007. [cited 2009 Nov 23]; available from: URL: http://www.baua.de/nn_7554/en/Topics-from-A-to-Z/Hazardous-Substances/Nanotechnology/pdf/guidance.pdf.

3) Institut de recherche Robert-Sauv en sant et en s 残urit du travail (ロベール・ソウベ労働安全衛生研究所, IRSST) . Best Practices Guide to Synthetic Nanoparticle Risk Managemen. [Online] 2009. [cited 2009 Nov 23]; available from: URL: <http://www.irsst.qc.ca/files/documents/PubIRSST/R-599.pdf>.

4) 厚生労働省労働基準局. ナノマテリアル製造・取扱い作業現場における当面のばく露防止のための予防的対応について. 基発第 0207004 号, 2008.

5) 厚生労働省労働基準局. ヒトに対する有害性が明らかでない化学物質に対する労働者ばく露の予防的対策に関する検討会：ヒトに対する有害性が明らかでない化学物質に対する労働者ばく露の予防的対策に関する検討会（ナノマテリアル）報告書. [Online] 2008. [cited 2009 Nov 23]; available from: URL: <http://www.mhlw.go.jp/shingi/2008/11/dl/s1126-6a.pdf>.

6) 厚生労働省労働基準局. ナノマテリアル製造・取扱い作業現場における当面のばく露防止のための予防的対応について. 基発第 0331013 号, 2009.

7) 甲田茂樹. ナノマテリアル取扱いと労働衛生の課題. 労働の科学, 2009; **64** (4) : 13-15.

8) Ono-Ogasawara M, Serita F and Takaya M. Distinguishing nanomaterial particles from background airborne particulate matter for quantitative exposure assessment. J Nanoparticle Res, 2009 ; **11**: 1651-1659.

9) 鷹屋光俊. ナノ粒子と作業環境での測定・分析 労働衛生工学, 2010, **49**: 13-20

10) 鷹屋光俊, 芹田富美雄, 小野真理子, 篠原也寸志, 齊藤宏之, 甲田茂樹. 多層カーボンナノチューブ製造工場における気中粒子の測定及び炭素分析 1 - 袋詰め作業 -, 産業衛生学雑誌, 2010, **52** (4) : 182-188

11) 甲田茂樹「ナノマテリアルの労働衛生に関する調査」結果報告 [Online] 2008. [cited 2009 Sep 10]. http://www.jniosh.go.jp/joho/nano/files/jniosh/Nanomaterial_Questionnaire2008.pdf

12) 甲田茂樹, 鷹屋光俊, 小野真理子, 芹田富美雄, 篠原也寸志, 齊藤宏之. ナノテク取り扱い職場の現場例 その 1 フラーレン加工. [Online] 2008. [cited 2009 Sep 10]. http://www.jniosh.go.jp/joho/nano/files/jniosh/report_fullerene_081028.pdf

(平成 22 年 9 月 16 日受理)