

調査報告

 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—

 鷹屋光俊¹, 芹田富美雄¹, 小野真理子², 篠原也寸志¹, 齊藤宏之³, 甲田茂樹⁴
¹独立行政法人労働安全衛生総合研究所環境計測管理研究グループ, ²人間工学・リスク管理研究グループ,
³国際情報・研究振興センター, ⁴有害性評価研究グループ

抄録：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—：鷹屋光俊ほか。独立行政法人労働安全衛生総合研究所環境計測管理研究グループ—目的：近年急速に発展しているナノテクノロジー産業で用いられるナノ材料について、労働者の曝露の実態を把握することを目的に研究を行った。対象と方法：本研究では、多層カーボンナノチューブ(MWCNT)の製造工場を調査対象とした。MWCNTの合成は、密閉された製造装置で行われるため、曝露の可能性が高いと予想された袋詰め工程を調査対象とした。袋詰め工程は、労働者が袋に詰める手動の工程と自動充填機を用いた自動工程の2つの方法で行われていたため、その2つの工程の比較も行った。調査方法は、個人サンプラーによる曝露濃度測定と粒子数と粒径分布をリアルタイムモニタリングする測定器を作業場所近傍に設置し、これと同じ場所で粉じんの質量濃度を測定した。粉じんの質量濃度は、インパクター式分粒装置を用い、吸入性粉じん濃度および、捕集板上に捕集された4 μ m以上の粒子も含む濃度（以下大粒径も含む粉じんの濃度を粉じん濃度と呼ぶ）を測定した。リアルタイムモニタリングには、測定対象の粒子径に応じて以下に示す装置を使用した。ナノスケール粒子測定には、走査モビリティ粒子サイザー(SMPS)を、サブミクロン・ミクロンスケール粒子の測定に光散乱式粒子カウンター(OPC)を使用した。この他、捕集した粒子中のMWCNT量を、元素状/有機炭素モニター(EC/OC)を用いて測定を試みた。結果：労働環境空気中の粒子濃度は手動・

自動の作業場で大差なく、双方とも総粉じん濃度で0.24mg/m³だったが、個人サンプラーを用いて測定した作業者の曝露濃度は、手動工程が2.39/0.39mg/m³(粉じん/吸入性)、自動が0.29/0.08mg/m³(粉じん/吸入性)であった。時系列分析の結果、手動工程でホッパーから一時取り出し容器に移す際とその容器から出荷用の袋に手動で移す際に、ミクロン・サブミクロン径の粒子の飛散が観測された。一方で作業に関連したナノスケールの粒子の発生は観測されなかった。結論：測定の結果、手動作業による袋詰めは、曝露のリスクが高い所謂ホットスポットであることと、自動化の曝露防止改善が優れていることが測定によって実証された。(産衛誌 2010; 52: 182-188)

キーワード：Exposure assessment(s), Hot spots, MWCNT, Nanomaterial, Packing

I. はじめに

ナノテクノロジーの応用拡大に伴い粒子径が100nm以下の大きさの「ナノ材料」の利用が拡大している。

ナノ材料の生体影響は、現時点では不明であるが、ナノテクノロジー利用産業に従事する労働者がナノ材料に曝露することによる健康影響リスクを軽減するために、ガイドラインが各国の研究機関等より提案されている¹⁻³⁾。我が国においては、予防的観点から厚生労働省より、2008年2月26日に、労働基準局長通達「ナノマテリアル製造・取扱い作業現場における当面の曝露防止のための予防的対応について基発第0207004号」⁴⁾が出され、さらに専門家による検討会⁵⁾を経て2009年3月31日に改正通達(基発第0331013号)⁶⁾が出された。改正通達では、ナノ材料を取り扱う作業現場において、工程の改善や保護具の選択等、とるべき対策の指針が示

2009年12月17日受付；2010年4月30日受理

J-STAGE 早期公開日：2010年6月3日

連絡先：鷹屋光俊 〒214-8585 川崎市多摩区長尾6-21-1

独立行政法人労働安全衛生総合研究所

(e-mail : takaya@h.jniosh.go.jp)

されている。

対策を実効あるものにするためには、ナノ材料由来の粒子の飛散状況などの現状を正しく把握することが不可欠である。ナノ材料のうち一次粒子径が100 nm以下の微粒子である「ナノ粒子」に関しては、労働環境中の挙動や、保護具の有効性等について不明な点があり、特に作業現場での、気中濃度測定方法が確立していないという問題がある。ナノサイズの空気中粒子の個数濃度の測定を行うことそのものは可能であるが、一般大気中には例えばディーゼル排気ガス粒子といったナノ材料由来以外のナノサイズの粒子が多数存在しており、かつこれらのバックグラウンド粒子の濃度は、気象条件をはじめとした周辺状況に大きく左右される。従って、ナノサイズ粒子の個数濃度の変化のみで、ナノ材料取り扱い職場の作業環境の状況把握・管理を行うのはきわめて困難であると考えられる。

著者らは、ナノ材料を扱う労働者のナノ材料曝露状況を把握し、環境を管理するために、ナノ材料製造工場の各工程における粒子の飛散状況の測定および、気中粒子の電子顕微鏡観察、化学分析を行っている。

著者らは、ナノテクノロジービジネス推進協議会の協力を得て、2008年に「ナノマテリアルの労働衛生に関する調査」を実施したが、その結果、ナノマテリアルの製造工程において製品の回収、機器への移し替え、作業場の清掃作業は、労働者にナノ粒子曝露の可能性のある、所謂ホットスポットであることを報告してきた^{7,8)}。著者らは、代表的なナノ材料のひとつである多層カーボンナノチューブ (Multi Wall Carbon Nano Tube ; MWCNT) に注目し、MWCNT 製造工場での製造工程から袋詰め工程における気中MWCNT粒子の飛散状況や労働者への曝露状況について評価した。本論文では、ホットスポットの一つと考えられる製品の袋詰め作業において手動工程から自動工程に変更することで、気中MWCNT粒子の飛散状況や、労働者への曝露状況の改善に対する効果を検討した。

II. 研究対象及び研究方法

1) 研究対象とした事業所

今回調査を行った事業所は、化学気相成長法 (Chemical Vapor Deposition ; CVD) によるMWCNT合成を行っている工場である。この方法は、工業規模のMWCNT合成法として最も一般的なものである。この製造工程のうち、粉体の処理や、製品の袋詰め作業などを行っている合成以降の工程のある建屋内の測定を行った。

調査は、2度にわたり合計6日間行った。まず、2008年5月に2日にわたり袋詰め作業時の調査を行った。1度目の調査データを元に、調査項目の追加などを行い、

同年8月に、焼成炉部分の定期保守 (2日間) とそれに引き続いて行われる通常の袋詰め作業について、15日間調査を行った。作業形態が大きく異なる保守作業については、別途報告し、本論文では袋詰め作業時の測定結果について述べる。

2) 調査対象事業場での環境・安全衛生対策

今回調査した事業場では、MWCNTに対するリスクマネジメントの観点から、装置の密閉化と外部環境へ漏洩を防ぐためにHEPAフィルターを使用し、局所および全体換気を行っている。また労働者への曝露を防ぐために、呼吸用保護具・ゴーグル並びに浸透性のない保護衣・手袋の着用を義務づけている。

3) 測定全体の概要

今回はナノからミクロン粒子径の空気中粒子について、個数濃度の時間変化測定を建屋内の粒子発生源と思われる袋詰め作業場所近傍で行うとともに、質量濃度測定並びに、炭素成分分析、電子顕微鏡観察用の試料採取を行った。また、労働者の曝露リスクを把握するために、個人サンプラーを用いて、呼吸域の気中粒子を捕集し、粉じんの質量濃度測定 (吸入性粉じんおよび4 μm以上の粉じんも含む捕集による質量濃度 (以下、粉じん濃度))、炭素成分の分析を行った。本研究ではこの個人サンプラーから得られた結果を作業者の曝露濃度と見なし結果の解析を行った。

今回測定した事業場では、2つの異なる建屋内で2種類の方式で製品の袋詰め作業を行っていた。ひとつは手動工程による袋詰め、大袋に取り出した製品を作業者がひしゃくを用いて小袋に小分けし袋を密封する。以下この作業を手動工程と呼ぶ。Fig. 1Aに示すように、手動工程では、大袋への取り出し・小分け作業を行う場所の約8m後方に下記に示す測定装置並びに捕集装置を置いた。

もう一ヶ所では、製造装置から直接、無人で袋詰めする自動製袋機に導き袋詰めを行っている。Fig. 1Bに示すように、作業者はトラブルが起きない限り、自動製袋機とは別室において、機械の操作および密封済みの袋の箱詰め運び出し作業が中心となる。以下この作業を自動工程による袋詰め作業とよぶ。袋詰め作業自身は別室にいるが、自動製袋機がある部屋にも労働者の出入りはあるので、粒子発生濃度などは自動製袋機の近傍で測定を行った。

4) 使用機器・方法

(1) 粒子個数濃度測定 粒子濃度の時間変化を観測対象粒子径が異なる複数の装置を用いて、粒径が10 nm-5 μmの粒子について観測し、作業内容と突き合わせ、粉じん

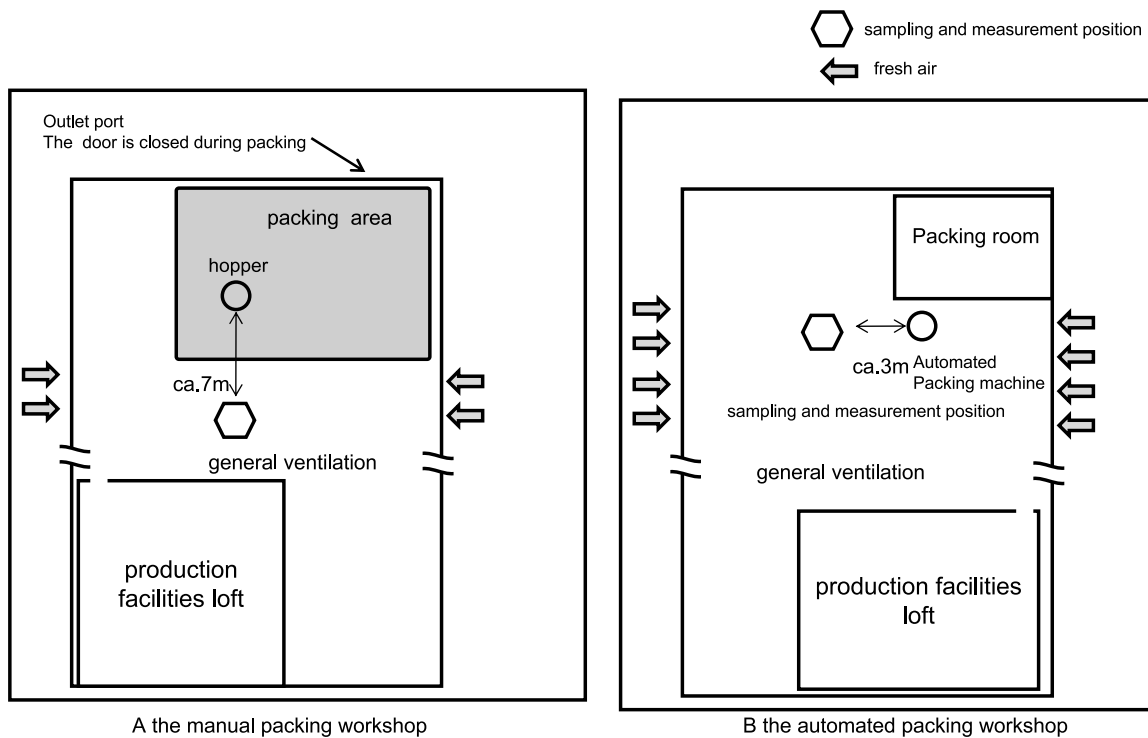


Fig. 1. The layouts of the packing workshops. A) manual packing, B) automated packing. The scales of both figures are different and the aspect ratios are not the actual ratios.

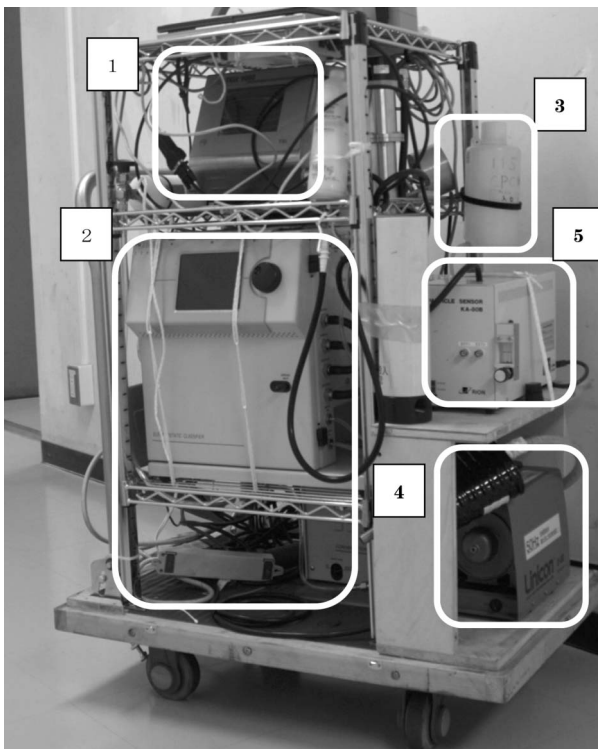


Fig. 2. Measurement devices: 1) surface meter, 2) scanning mobility particle sizer, 3) reservoir tank of 1-butanol for the condensed nuclei counter (CNC), 4) vacuum pump for SMPS, 5) optical particle counter (OPC). The cart settled devices is hoisting up available.

が労働環境に発生する可能性が高い作業時間・工程を推定した。

ナノスケールの粒子数濃度は、ナノスケール粒子粒径別に測定する走査モビリティ粒子サイザー (Scanning Mobility Particle Sizer ; SMPS, 米国 TSI 社製, 3080 微分移動度粒子解析器と 3010 凝縮核カウンターの組み合わせ) を用いて測定した。サブミクロンからミクロン粒径の粒子個数濃度は、0.3, 0.5, 1, 3, 5 μm のサイズ別に粒子の個数濃度を測定できる光散乱式粒子カウンター (Optical Particle Counter ; OPC, リオン製, KA-80B) を用いた。SMPS と OPC は、Fig. 2 に示すように、60 \times 90 cm の台車に固定して設置し、測定対象空気は、導電性シリコンチューブで測定器に導いた。

(2) 試料粒子の捕集・質量濃度測定 試料粒子の採取は、固定捕集点として粒子濃度測定機器と同じ場所で捕集を行った。質量濃度測定用試料の捕集は、フィルターに Pallflex[®] T60A20 (米国 Pall 社製)、テフロンバインドガラス繊維ろ紙を用い、サンプラーは、柴田科学 NW-354 型 PM4 測定用ロウポリウムサンプラーと、LV-40B 型ポンプを用い、NW-354 型の規定の捕集速度である 20 l/min で吸入性粉じんを捕集するとともに、捕集板上の 4 μm 以上の大粒径の粒子の量と吸入性粉じんの量を合わせて粉じんの質量濃度 (以下本論文では、粉じん濃度と呼ぶ) を捕集した。捕集時間は、手動施設では 8 時間、自動工程作業は、5 時間 20 分だった。捕集

時間が異なるのは作業に要した時間が異なるためである。休み時間もポンプは停止しなかった。後述する炭素成分分析には、50%カットオフ径が $> 2.5 \mu\text{m}$, $> 1.0 \mu\text{m}$, $> 0.50 \mu\text{m}$, $> 0.25 \mu\text{m}$, である粒径別サンプリング装置のシウタスインプクター (Sioutas Cascade Impactor, 米国 SKC 社製) を用い、捕集流量を 9 l/min とした。粒子の捕集にはあらかじめ 550°C で4時間空焼きして炭素分を除去した石英繊維ろ紙 2500 QAT-UP (米国 Pall 社製) を使用した。

個人曝露濃度測定は、個人曝露濃度測定用サンプラー (NWPS-254, 柴田科学製) と MP- Σ 3 ポンプを用い 2.5 l/min の流量で吸入性粉じんを T60A20 フィルターに捕集した。捕集時間は、作業時間のみ行い、ポータブル機器などの結果より、2時間 (途中休み時間で交換) あるいは4時間 (途中休みはポンプの停止のみ、昼休みと作業終了後交換) だった。固定点のサンプルと同様に、捕集板上の $4 \mu\text{m}$ 以上の粒子質量を吸入性粉じんの質量と合わせることで、粉じん濃度を求めた。成分分析用の試料には、固定捕集点同様シウタスインプクターを用い、捕集用にはポリカーボネート製メンブランフィルター (アイソポア, VCTP02500, Millipore 製) を使用した。作業者に複数のサンプラーを装着すると、作業性が低下するため、一部の試料はサンプラーを著者が装着して、作業者の近傍に立つことにより採取した。

(3) 炭素成分分析 ディーゼル排出粒子には黒色の元素状炭素 (EC) が多く存在することが知られており、ディーゼル排出粒子の指標として EC を測定する方法が米国労働衛生安全研究所から提案されている⁹⁾。その測定法は、試料中の有機化合物をヘリウム気流下で加熱して気化させ、続いて酸素共存下で昇温しながら EC を燃焼して二酸化炭素とし、発生する有機化合物と二酸化炭素を触媒還元して得られるメタンを水素炎イオン化検出器により測定するものである。異なる加熱温度で異なる有機成分が気化し、異なる結晶構造の EC が燃焼することを応用した炭素分析法である。Myojo¹⁰⁾ らは NMAM 5040 を応用した手法により、模擬的な MWCNT エアロゾルを測定している。作業環境中には EC を含む大気やディーゼルエンジン由来の粒子が含まれていることから、より細かい温度設定が可能な IMPROVE 法¹¹⁾ に準拠した昇温プログラムを用いて MWCNT の測定を行った。本研究の対象施設の MWCNT は、EC を燃焼させるための昇温プログラムのうち、三段階目の設定温度である 920°C で燃焼する。この三段階目で燃焼する EC を EC 3 と呼ぶが、MWCNT 以外の EC はより低い温度で燃焼することから、EC 3 を指標として空気中の MWCNT を分別して定量することとした。本研究では Sunset Lab 社の炭素モニターを用いた。

本分析法の定量下限は 1 m^3 の捕集量で 0.001 mg/m^3

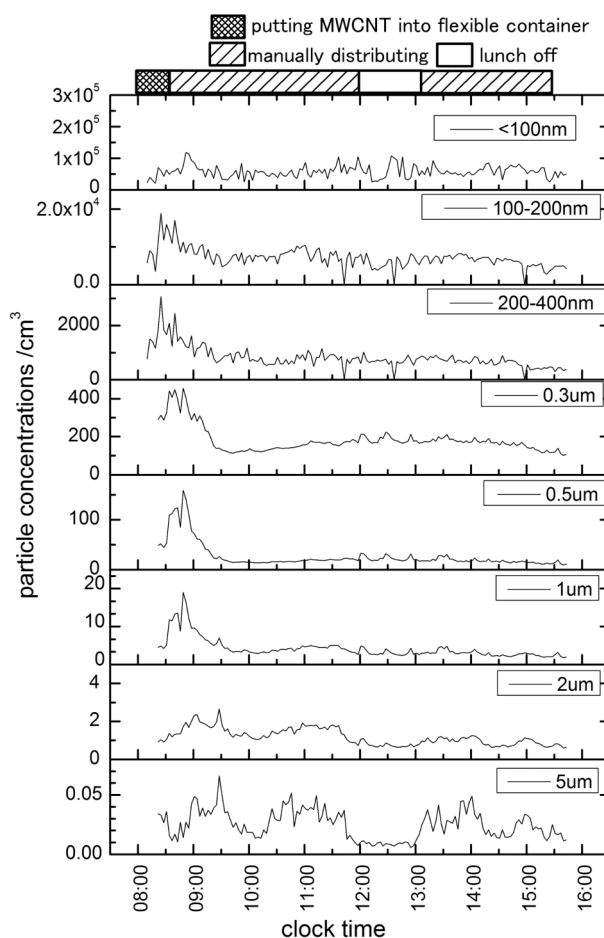


Fig. 3. Real time particle concentration as measured by OPC ($>0.3 \mu\text{m}$) and SMPS (10–400 nm) in the manual packing workshop.

程度であるが、実質の定量下限値はバックグラウンド濃度の安定の程度により変動する。今回の測定に関しては 0.005 mg/m^3 程度と考えられる。

(4) 電子顕微鏡観察 個数濃度測定機器と同じ場所に、設置した PIXE I 1L カスケードインパクト (米国 PIXE 社製) で、ポリカーボネートメンブランフィルターに採取した粒子の走査電子顕微鏡観察、静電気捕集装置 (米国 TSI 社製 TSI 3090) で透過電子顕微鏡用のグリッド上に、採取した試料を透過電子顕微鏡で観察した。ただし、電子顕微鏡写真像は調査対象企業の企業秘密に触れる恐れがあるため、本論文では示さない。

III. 結果および考察

Fig. 3 および Fig. 4 に、OPC (固定) と、SMPS の測定結果から計算した $< 100 \text{ nm}$, $100\text{--}200 \text{ nm}$, $200\text{--}400 \text{ nm}$ の粒子濃度の時間変化を示す。

Fig. 3 は手動工程、Fig. 4 は自動工程における粒子濃度変化を示す。

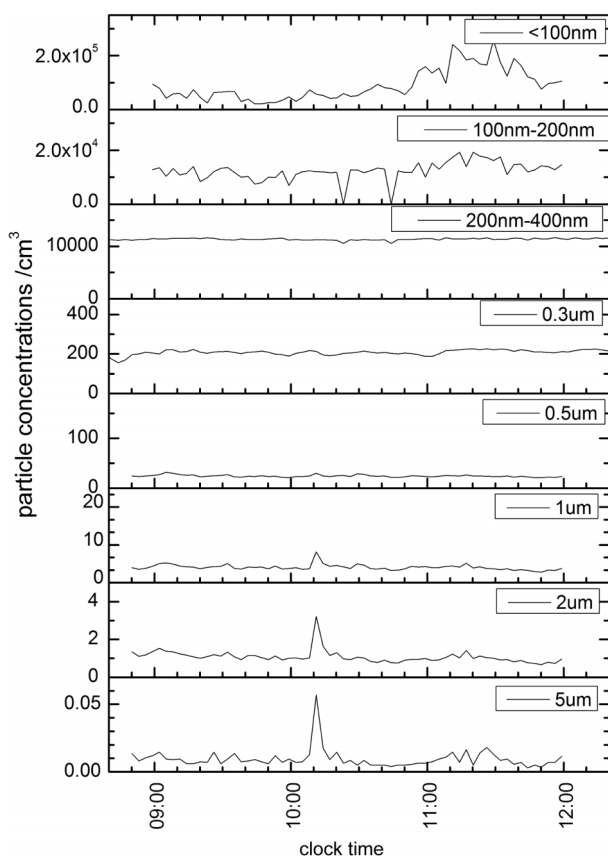


Fig. 4. Real time particle concentration as measured by OPC ($>0.3 \mu\text{m}$) and SMPS (10–400 nm) in the automated workshop.

1) 手動工程作業の粒子濃度変化

Fig. 3に示すように、最初の大袋への袋詰め工程(8:30–9:00)頃において100 nm–1 μm の粒子径の粒子濃度で比較的明瞭に、濃度上昇が観測された。一方、小分け作業(9:00–15:30, 途中12:00–13:00は昼休み)では、作業に関連してこの粒径範囲の粒子の発生は観測されなかった。大袋への袋詰めは反応装置に接続されたホッパーからの取り出しであり、後に続く小分け作業より勢いよく粉体が出てくるため、より小さな粒子の発生があるのではないかと考えられる。

この作業で扱われているMWCNTは繊維状の粒子であり、球形粒子を想定したOPCの計測結果と一対一対応をつけるのは困難であるが、取り扱っているMWCNT粒子は太さが100 nm程度、長さが数 μm であるため、単繊維あるいは数本の繊維が凝集した粒子が、OPCで1 μm 以下の粒子として検出されている可能性が高いと考えている。

100 nm以下の粒子に関しては、大袋への袋詰め、小分け作業の両方の作業とも作業と関連づけられる粒子濃度変化は観測できなかった。また、1 μm より大きな粒子径の粒子は、大袋詰め、小分けの作業内容に関わりな

く、作業中は常に高く、休憩(昼休み)の間は低かった。人の移動や粉体のついた器具・袋などを動かすことによる発じんにより、粒子濃度が高くなっているものと考えられる。

2) 自動工程作業時の粒子濃度変化

自動工程では、全ての粒径の粒子について、作業と関連づけられる粒子の発生は確認できなかった。一度だけミクロンサイズの粒子の濃度が上昇しているが特に関連づけられる作業はない。また、11:00頃からナノサイズの粒子の濃度上昇が観測されている。この上昇に関連づけられる作業内容の変化はない、ポータブル機器で、作業場所と同じ建屋にある製造装置室の影響がないことを確認するとともに、ナノ材料のリスク評価を目的として、同時に調査を行った独立行政法人産業技術総合研究所が測定した外気の測定データ¹²⁾より、外気の影響だと判断した。

3) 質量濃度

環境濃度の質量濃度は、4 μm 以上も含む粉じんの濃度が、外気で0.17 mg/m^3 、手動工程が0.24 mg/m^3 、自動工程が0.24 mg/m^3 であり、外気より若干濃度が高い程度で、建屋内全体の濃度は手動工程も自動製袋も大差なかった。

一方、作業者の曝露濃度に着目すると、手動工程が2.39/0.39 mg/m^3 (粉じん/吸入性)、自動工程が0.29/0.08 mg/m^3 (粉じん/吸入性)であった。手動工程の作業者の曝露濃度は、建屋内の濃度の8倍程度の濃度がある。このことから、手動工程では、工場建屋を汚染するほどの発じんはないが、作業者近傍の粉じん濃度は高いといえる。それとともに、自動工程作業では作業者の個人曝露濃度はかなりよく改善されていることが解る。

4) CNT(炭素)分析

インパクターの全段に捕集された粒子について、EC 3濃度を空気中のCNT濃度とした。屋外のバックグラウンド濃度は0.001 mg/m^3 であった。手動工程の袋詰め作業場近傍では、作業が無いときでも、環境濃度が0.01 mg/m^3 、曝露濃度が0.01 mg/m^3 と、ともに一定量のMWCNTが観察され、粉じん濃度で評価した場合は大差ないものの、MWCNTで評価した場合、手動工程によるMWCNTの建屋内への飛散はある程度あり、建屋内でMWCNTが定常的に存在することが示唆された。自動製袋装置がある建屋のMWCNT濃度は作業が無いときは、屋外濃度と同じ0.001 mg/m^3 であり、自動製袋機により施設が清浄化したことが、質量濃度測定に加え炭素分析の結果でも裏付けられた。

手動工程の作業時では、環境濃度は 0.068 mg/m^3 、作業者の曝露濃度は 0.063 mg/m^3 と、ほぼ同程度で、作業がないときの6倍程度だった。環境濃度の測定点は質量濃度の測定点よりも作業場所に近かった。自動工程の作業では、作業者が普段立ち入らない、自動製袋機が設置されている部屋の環境濃度が 0.027 mg/m^3 で、手動工程作業場の4割程度まで濃度が低くなっている。さらに、作業者が清浄な部屋で袋の箱詰めをしていることにより、個人曝露濃度は 0.009 mg/m^3 と著しく低下していた。

Ⅳ. 結 論

MWCNTの袋詰め工程について、粒子の環境濃度ならびに個人曝露濃度を測定した。手動工程においては、凝集したMWCNTの発じんが観察され、作業者の曝露につながるいわゆるホットスポットであった。一方、袋詰め工程の自動化により、曝露が大幅に減少しており、改善効果が認められた。

謝辞：本研究は独立行政法人労働安全衛生総合研究所が、プロジェクト研究として行っている、「先端産業における労働者のナノ材料の曝露リスクに関する研究」の一環として行ったものである。なお、本研究を行うに当たり、調査先企業ならびに関係者、曝露濃度測定に協力して頂いた作業者の皆様に感謝する。また、本調査は、ナノ材料の環境リスク対策・評価の研究を行っている独立行政法人産業技術総合研究所（AIST）の現場調査と同時に協調して行った。現場における調査、ならびにデータの検証時におけるAISTの小倉勇博士による多大な協力についても感謝を記す。

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-Sauvé en santé et en sécurité du travail (ロベール・ソウベ労働安全衛生研究所, IRSSST). Best practices guide to synthetic nanoparticle risk management. [Online]. 2009 [cited 2009 Nov 23]; Available from: URL: <http://www.irsst.qc.ca/files/documents/PubIRSSST/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: 13-5.
- 8) Ono-Ogasawara M, Serita F, Takaya M. Distinguishing nanomaterial particles from background airborne particulate matter for quantitative exposure assessment. J Nanoparticle Res 2009; 11: 1651-9.
- 9) National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). Method 5040 Issue 3 (Interim) Elemental Carbon (Diesel Exhaust). In: NIOSH Manual of Analytical Methods. Cincinnati: NIOSH, 1999.
- 10) Myojo T, Oyabu T, Nishi K, et al. Aerosol generation and measurement of multi-wall carbon nanotubes. J Nanoparticle Res 2009; 11: 91-9.
- 11) Chow JC, Watson JG, Pritchett LC, et al. The DRI thermal/optical reflectance carbon analysis system: description, evaluation and applications in U.S. Air quality studies. Atmos Environ 1993; 27A: 1185-201.
- 12) 小倉 勇 (産業技術総合研究所), 未公表データ

Airborne Particles in a Multi-wall Carbon Nanotube Production Plant: Observation of Particle Emission and Personal Exposure 1: Measurement in the Packing Process

Mitsutoshi TAKAYA¹, Fumio SERITA¹, Mariko ONO-OGASAWARA², Yasushi SHINOHARA¹, Hiroyuki SAITO³ and Shigeki KODA⁴

¹Working Environment Research Group, ²Human Engineering and Risk Management Research Group, ³International Center for Research Promotion and Informatics, ⁴Hazard Evaluation and Epidemiology Research Group, National Institute of Occupational Safety and Health, 6-21-1 Nagao, Tama-ku, Kawasaki 214-8585, Japan

Abstract: Objectives: In order to assess the exposure risks of multiwall carbon nanotubes (MWCNT) for packing workers, we carried out real-time monitoring in the two types of packing facilities of MWCNT, and exposure measurements for the packing workers. **Methods:** In the real-time monitoring, a scanning mobility particle sizer (SMPS) and an optical particle counter (OPC) were used to measure nanoscale particles and sub-micron/micron scale particles, respectively. A personal sampler with PM 4.0 was used to measure the personal exposures in the packing facilities. **Results:** One of the packing facilities is manually operated and the other is automated. The concentrations of airborne dust in both facilities were almost the same as each other at 0.24 mg/m³ (total dust). However, the results of personal exposure measurements

were quite different between the two facilities. The exposure concentrations of workers in the manually and automated operations were 2.39/0.39 (total/respirable) mg/m³ and 0.29/0.08 (total/respirable) mg/m³, respectively. From the time series study, submicron scale particles were released into the workplace air when the CNT products were put into temporary container bags from a hopper and manually packed into shipping bags. However, the task-related nanoscale particle release was not observed. **Conclusions:** The manual packing operation is one of the “hot spots” in MWCNT production facilities, and automation brings much improvement to reduce MWCNT exposure.

(*San Ei Shi* 2010; 52: 182-188)