

個別粒子分析法による気中粒子状物質測定の信頼性の向上に関する研究

Study on particulate measurement based on individual particle analyses.

山田 丸*1, 鷹屋光俊*1, 緒方裕子*1, 小野真理子*2, 篠原也寸志*3, 加藤伸之*3*4,
韓 書平*3*5, 小倉 勇*5

ばく露評価研究部*1 化学物質情報管理部*2 元労働安全衛生総合研究所*3 京都大学*4
産業技術総合研究所*5

■ YAMADA Maromu, TAKAYA Mitsutoshi, OGATA Hiroko, ONO-OGASAWARA Mariko, SHINOHARA Yasushi, KATO Nobuyuki, HAN Shuping, and OGURA Isamu

粒子状物質を吸入することによって発症する、じん肺、がん、中毒症などは労働衛生の分野において、また社会的にも大きな問題である。これらの疾病は古くから知られているが、科学技術の進歩にともない発生した新たな素材、たとえばナノマテリアルや、半導体で利用される高純度の結晶質シリカ粒子などに対しては、従来の作業環境測定による気中粒子状物質の測定法で作業環境やばく露状況を十分に把握できるのか問題視されている。また、毒性研究の進展にともない、たとえば溶接作業で発生するヒューム等も近年より厳しい規制による管理が必要とされるようになった。このように、新規物質や従来の物質でも新たな知見に基づいて健康影響が懸念される物質については、リスク評価の観点から、より精密な測定法が求められる。そこで本研究では、電子顕微鏡を利用した個別粒子分析に基づく気中粒子状物質の測定法について検討を実施した。電子顕微鏡による分析は、直接的に個々の粒子のサイズと形状を把握でき、さらには含有する元素及び粒子内での元素の偏在を観察可能という利点がある。これらは、作業環境中での粒子状物質の動態を把握する上で重要な情報であるとともに、体内に入った際の粒子の挙動についても必要な知見となる。このようにメリットの多い分析法であるが、定量的な評価を行う場合にはまだ課題が残されている。そこで、本研究を通じて個別粒子分析法の基礎的な検証から現場調査での活用まで包括的な検討を行った。

1 研究の背景

科学技術の進歩にともない100 nm以下のサイズまたは構造を有する材料（ナノマテリアル）が製造・使用されるようになり、それらのばく露による健康影響が懸念されている¹⁾。また毒性研究の進展にともない、溶接作業で発生するヒューム等による発がん性²⁾及び神経毒性なども議論されており、国内においては令和3年4月1日からより厳しい規制によって管理がなされるようになった³⁾。さらに、ずい道建設作業場においても、労働者のじん肺発症者をなくすべく、より厳しい管理がなされる

ようになった⁴⁾。ここに一例を挙げたように、粒子状物質を吸入することにより発症する職業性疾病は、労働衛生の分野において、また社会的にも大きな問題である。

労働環境の気中粒子状物質（以下、気中粒子とする）の計測は、ばく露アセスメントや職業病の原因の探索のために行われる。後者においては気中粒子の粒径や形態、構成元素等に関する情報が必要とされる一方、前者ではデジタル粉じん計やフィルター捕集による質量濃度測定といった簡便な方法が用いられ、粒径分布や形態についての基礎的なデータが欠けてしまう。これらの情報を得る最も有効な測定方法の一つは電子顕微鏡観察である。ただし、観察像の代表性の担保、定量性、測定者による測定結果のバラツキが問題となるため、その解決及び労働環境での電子顕微鏡を用いた測定法の提案が望まれる。

現在の法令に基づく作業環境測定では、単一の粒径で分級した気中粒子（たとえばレスピラブル粒子）の質量濃度のみを測定することになっている。しかし、リスク評価の観点では気中粒子の空気力学的振舞いや粒子の性状についてより詳しい情報を得る必要がある。また、

*1 労働安全衛生総合研究所 化学物質情報管理研究センター ばく露評価研究部

*2 労働安全衛生総合研究所 化学物質情報管理研究センター 化学物質情報管理部

*3 元労働安全衛生総合研究所

*4 京都大学

*5 産業技術総合研究所

連絡先：〒214-8585 神奈川県川崎市多摩区長尾 6-21-1

労働安全衛生総合研究所 化学物質情報管理研究センター ばく露評価研究部 山田 丸^{*1}

E-mail: yamadam@h.jniosh.johas.go.jp

体内に入った粒子の沈着や移動等の動態を評価する際には、粒径だけでなく粒子の形状や構成元素など包括的な情報が必要になってくる。このようなことから、走査電子顕微鏡 (SEM) による個別粒子分析法について、ラボで実施する基礎研究、及びそれらの知見を活かし実際の作業現場で実施する個別粒子分析の情報は、今後のリスク評価において一助になると考える。

2 研究の概要

本プロジェクト研究では、走査電子顕微鏡 (SEM) を用いた個別粒子分析法の検討を通じて、(i) SEM による分析結果の代表性を担保するための分析手法を確立すること、及び (ii) エアロゾル測定装置を用いて作業現場の測定を行う場合に問題となる、ばく露の過大/過小評価に影響を及ぼす粒子の形態等の要因を検証することを目的として実施した。(i) については、アスベスト分析に関する手引書やエアロゾル分野の論文等で提案されている方法を参考にし、粒子等試料の捕集法、観察法、データ処理法に関して最適な条件を検討した。(ii) については、SEM とエアロゾル測定装置 (後述するリアルタイム測定装置) による分析結果を突き合わせ、測定値のずれについて検証した。また、個別粒子分析法による測定の結果がばく露測定や評価に有用であるか検証するために、複数箇所の現場調査等を通じて実データを取得した。以下、各項目の概要を述べる。

1) 室内実験

1-i) SEM による個別粒子分析法に関する基礎検討

SEM による粒子観察は、粒子捕集、前処理、観察、データ処理 (画像解析) の順で実施される。以下に、それぞれについて検討を行った内容を記す。ここでは SEM に搭載されているエネルギー分散型 X 線分析装置 (EDS) による元素分析法に関する内容も含む。また、高分解能モデルの SEM と卓上型 SEM による粒子観察像を比較した内容についても言及する。

① 粒子捕集法

個別粒子分析法についての基礎検討を行うにあたり、ラボにおいて基準となる気中粒子の発生方法を確立する必要がある。本研究では、アトマイザー法、ボルテックスシェーカー法、スターラー法、蒸発凝縮法、エレクトロスプレー法により、実験にあわせて、単分散の標準粒子から多分散のナノ粒子凝集体まで発生する方法を確立し、後述の実験に用いた^{5,6)}。

気中粒子を捕集しSEMで観察する場合、表面が平滑で均一の孔が空いているポリカーボネートメンブレンフィルター (以下、PCフィルター) を用いることが多い。PCフィルターは様々な孔径のものが市販されており、その中から任意の孔径のものを選択できるが次の点に留意しなければならない。気中粒子を捕集する際に孔が小さすぎると大きな圧力損失を生じてポンプで空気を吸引でき

なくなる。逆に孔が大きすぎると観察したい微小な粒子が通り抜けてしまう。ただし、孔径が分析対象の粒子より大きい場合であっても、粒子とフィルターの相互作用 (慣性・さえぎり・拡散の効果) により、その一部は一定の確率でフィルター表面に捕集される。SEM観察で気中粒子の濃度を定量的に評価しようとする場合、フィルター表面における粒子の捕集効率 (表面捕集効率) を確認する必要がある。本研究では、実際の現場での使用が見込まれる小型のポンプを考慮し、孔径が約400nm以上のPCフィルターを選定し評価した。また、評価対象の粒子はナノマテリアルやヒューム等を想定してナノ～サブミクロンサイズの粒子を対象として実験システムを構築した。実験ではまず理想的な条件下 (PCフィルターのみを実験システムに組み込む) において表面捕集効率を確認した。その次に、より現場での使用方法に即した評価を行うため、現場で利用されるサンプラーと同様にPCフィルターの下にセルロース繊維製サポートパッドを敷いた状態で、表面捕集効率を計測した。サポートパッド使用の有無で表面捕集効率にほとんど差は見られず、この方法を現場で活用できる可能性が示唆された。この詳細は、「SEM観察に用いる気中粒子捕集用ポリカーボネートメンブレンフィルターの表面捕集効率の評価」として独立した報告書として本SRRに掲載したのでそちらを参照されたい。

以上の実験から、ナノからサブミクロンサイズ領域の気中粒子が測定対象となる現場 (例えば、ナノマテリアル取り扱い作業や溶接作業など) において、たとえ測定対象の粒子がフィルター孔径より小さい場合であっても、SEM-EDSによる気中粒子観察の結果から定量的な評価に繋げられる可能性が示された。

② 前処理

PCフィルターは非導電物質であるため、捕集した粒子の形態や元素をSEM-EDSで分析する際は、前処理として導電化処理を施す必要がある。本研究では導電化処理としてイオンスパッター法 (プラチナ、タングステン)、真空蒸着法 (カーボン)、プラズマ化学気相成長法 (オスミウム) を網羅的に検討し、各方法のメリット・デメリットを明確にするとともに、観察対象の粒径や化学成分を考慮した上でどの処理法が適しているか確認した^{6,7)}。近年では分解能が飛躍的に向上した高分解能モデルのSEMが用いられるようになっており、ナノサイズの粒子も観察できるようになっている。このような高分解能モデルによる高倍率観察では前述したコーティングの種類によってはナノ粒子の粒径や粒子表面のナノ構造の解釈を誤る可能性が示された。この点については、ナノマテリアル取り扱い時の安全性評価に関する国際プロジェクト (NanoHarmony project, EU Horizon 2020) のばく露評価に関するワークショップ (Workshop on Gap Analysis and Data Requirements to support TG and GD Development, 2020年11月9日開催) においても本研究で得た知見に基づきコメントをした。また、近年は導電化のコーティング材の選択肢が広がっていることから、

EDS分析においては分析対象元素を考慮してコーティング材を選択することも重要であると考え。

③ 観察・データ処理

PCフィルターに捕集した粒子を対象として個別粒子自動分析の手法及び条件を検討した。ここでの粒子自動分析のアルゴリズムは、固定倍率で得た観察像から二値化手法により粒子のみを検出し、EDSにより各粒子の面分析を実施する方法である。この方法により、粒子一つ一つの粒径・形状のパラメータを取得し、それらに対応する元素組成情報の取得が可能となった。この手法は、サブミクロン以上の比較的粗大な粒子に対しては有効であった。一方、より微小で複雑な形状を持つ粒子にこの自動分析を試みた結果、たとえば数100 nm以下の溶接ヒュームに対しては精度よく分析できなかった。この理由として、粒子のサイズ分布がナノからマイクロメートルと幅が広く、形状もナノ粒子が凝集した複雑なものであったこと、及び、SEM像を取得する際に、PCフィルターの孔のエッジ部分と粒子のコントラストが同程度となってしまう、現状の二値化手法では十分に区別できなかったことが考えられる。これらの問題を解決するためには、前者では複数の観察倍率を設定し倍率ごとに各粒径範囲の粒子を精度良く測定できるか検討し、また後者では粒子元素分析を併用することで粒子の判別を実施する方法も考えられる。溶接ヒューム粒子等の微小かつ複雑な形状の粒子に対する自動分析化には、粒子検出条件のさらなる検討が必要であるという課題が残された。今後、分析の労力の軽減や分析者の恣意なく24時間稼働し客観的データが得られるという自動分析の利点を、微小かつ複雑な形状の粒子にも活かすためにさらなる条件検討を実施する予定である。

④ SEM機種モデルの違いによる粒子観察像の比較

SEMは機種モデルによって電子銃や検出器など原理や性能が異なり、粒子の見え方も一様ではない。そのため、機種モデルが異なった場合にこれまでの観察手法や結果のまとめ方を一般化できるか確認する必要がある。そこで、異なるモデルのSEMで同一試料を比較観察した⁸⁾。一つは高分解能モデルの、ショットキー電界放出型SEM-EDS（以下、FE-SEMと呼ぶ。当研究所の装置を使用）であり、もう一方は卓上型SEM-EDS（以下、卓上SEMと呼ぶ。熊本県立大学の装置を使用）である。比較では、粒径や形状、元素組成の異なる複数の種類の試料を用意した。両SEMで分析条件をできるかぎり合わせるために、導電性処理、観察倍率、及び加速電圧を同じ条件にし、サンプルごとに機種間の比較観察を行った。その結果、約1 μm以上の粒子であれば両者の見え方に大きな違いはみられなかった。ただし、数100 nm以下の粒子を観察対象とする場合、またはミクロンサイズの粒子であってもその表面の構造を観察する場合は、FE-SEMによる観察が適していることを確認した。一方で、EDS分析においては個別粒子の面分析では大きな差は見られなかったが、マッピングのような多くのシグナル量を必要とする分析ではFE-SEMの方がより短時間で十分な量の

シグナルを得られるため作業効率の面で優位性が認められた。溶接ヒュームやナノマテリアルをはじめとしたナノ粒子の観察、また粒子の表面や粒子形態の情報が必要な場合は、卓上SEMでは凝集体か単独粒子かの区別や、粒子内部の不純物の検出などの分析が難しい。このような場合、FE-SEMによる観察が必須である。ただし、数100 nm以上の比較的単純な形状の粒子の観察では、現在市販されている卓上SEMでも十分な観察像が得られた。近年は卓上SEMの開発が進み性能が向上し、広く普及し始めていることから、今後、作業環境における気中粒子の確認などその利用方法を提案し検討されることが望まれる。

1-ii) 個別粒子分析結果及びリアルタイムエアロゾル測定装置の測定結果に基づく質量濃度推定に関する検討

気中粒子（アスベスト等の繊維状物質は除く）の作業環境濃度または作業者のばく露量を評価する際は質量基準で評価されており、質量情報は極めて重要な情報である。一方で、SEMによる個別粒子分析やリアルタイムで個数濃度を取得できるエアロゾル測定装置（以下、リアルタイム測定装置とする）は、個数基準のデータを取得するため、個数と質量の関連性あるいは個別粒子分析の利点を明らかにするのが望ましい。

また、SEMによる個別粒子分析法は短時間のサンプリングでも分析に十分な試料量を得られるとはいえ、数秒から数分間隔での時間変動をモニタリングすることを目的とした分析には適さない。そのため、短時間の変動をモニタリングするためには、数秒から数分程度の時間分解能で連続的にデータを取得可能なリアルタイム測定装置を使用する方法が一つ提案される。しかし、これらの測定原理や設計が異なる粒子測定法の間では結果にずれが生じる可能性がある。

そこで本研究では、原理が異なる装置間のずれを検証するために、複数種のリアルタイム測定装置及びSEM個別粒子分析法の測定結果を比較検討した。また、粒子の形状が複雑なナノ粒子凝集体に対して、個数濃度から質量濃度を見積もるために、凝集体の空隙を考慮した粒子一粒の密度（粒子密度）を推定する方法を検討した。

ここではその実験の一例を紹介する。実験ではナノマテリアル粉末（二酸化チタン粒子）を使用し、多分散のナノ粒子凝集体の形で気中に発生させた。この気中粒子を空気動力学エアロゾル分級装置（AAC）により空気動力学的に分級し、サブミクロンサイズの単分散粒子を生成し、リアルタイム測定装置の一つである光散乱式粒子サイザー（OPS）で粒径分布を測定した。あわせて、SEMにおいても粒子観察像に基づいて粒径分布を測定した。その結果、粒径が小さいほどリアルタイム測定装置によるデータとSEMによる結果に差が生じた。また、空気動力学径とSEM観察像から、凝集体の空隙を考慮した粒子一粒の密度（粒子密度）を計算によって求め、二酸化チタンの真密度の1/2～1/4であると推定された。これらの実験結果の一部は、本SRRに「**走査電子顕微鏡を用いた個別粒子分析によるナノマテリアル凝集体の粒子**

密度推定及び形状のキャラクタリゼーション」というタイトルで報告する。

2) 実試料または現場調査への個別粒子分析法の応用

現場調査又は模擬発生によって、溶接ヒューム等粒子、ずい道建設に伴い発生する粒子、ナノマテリアル（カーボンナノチューブ及びブラックカーボン）、高純度結晶質シリカ粉末粒子を対象に、個別粒子分析の結果を得たので、その概要を以下に記す。

a) 溶接ヒューム等（模擬発生及び現場調査）：

・模擬作業

溶接作業に伴って発生するヒューム等粒子は、溶接条件によって様々な化学組成と形態をとる。これらが溶接ヒュームばく露に関連する疾病に影響を及ぼすと考えられる。そのため、研究所内で、CO₂ アーク溶接の模擬作業を実施し溶接ヒューム及び溶接スラグの特徴に焦点を当てた個別粒子分析法を実施した。特に、フラックス剤入りの溶加材から発生させた溶接ヒュームの表面近傍の元素分布と粒子径との関係に着目してSEM・EDS分析を行った。その結果、ヒューム及びスラグ粒子の表面において、フラックス剤が起源のBiが特徴的な分布パターン（凝集した状態で点在する）を示した。溶接スラグのMn含有量は溶接ヒュームのMn含有量に依存していた。スラグは層構造を形成しており、下層は、Ti、Al及びCで構成され、その上をMnが覆い、最上層をNa酸化物が覆っていることが確認された。溶接ヒューム及びスラグの表面分析と粒子径の計測から導かれたこれらの結果は、溶接ヒュームばく露の新たな評価モデルを構築する際に有用な知見と考える。以上の研究結果は、国際誌⁹⁾及び本SRR「ステンレス鋼フラックス入りアーク溶接工程から発生する粒子状物質中の金属元素のSEM・EDSによる分析方法の検討」にて詳述する。

・現場調査

実際の作業現場3か所において溶接作業中に発生した溶接ヒューム等の気中粒子をフィルター捕集し、それらをSEM・EDS及び蛍光X線分析装置（XRF）で分析した。XRFによる分析では、フィルターに捕集した全粒子を一括して分析し、その結果溶接ヒュームはFeが主要な元素であり、次にMnの割合が高かった。SEM・EDSによる個別粒子分析では、Kato他（2022）⁹⁾による溶接模擬作業での結果と同じように、現場試料でもナノサイズ粒子の凝集体（ナノ粒子凝集体）、ミクロンサイズの球状粒子（球状ミクロン粒子）、ミクロンサイズの不定形粒子が観察された。このうち、ナノ粒子凝集体のSEM・EDS分析結果は、XRF分析結果と同様の元素組成を示した。一方で、球状ミクロン粒子からはTiやAl等の元素が高い割合で検出された。形状により元素組成が異なる事実は、呼吸器沈着部位や保護具選定にも影響すると考えられ、ばく露評価を実施するにはこのような個別粒子分析のデータが重要であることが示唆される。

ただし、溶接の種類や溶接ワイヤーやフラックス等の

材料が異なると、気中粒子の成分や粒径・形態等も異なることが考えられるため、さらなる知見の蓄積が必要である。

b) ずい道建設に伴って発生する粒子（現場調査）：

ずい道建設現場の掘削作業に伴って発生する粉じんの測定は、デジタル粉じん計またはフィルター秤量による質量濃度測定が主である。本研究では、OPSとSEMによる個別粒子分析を採用し、ずい道掘削作業中の粉じんのキャラクタリゼーションを試みた。作業中の気中粉じん濃度は数mg/m³に達することもあり、かなり高濃度の環境であった。そのような環境においてOPSによって粒径別の濃度変動を測定した。また、コンクリート吹付作業の高濃度時にSEM観察用の試料を採集するため1分間のサンプリングを実施した。その個別粒子分析により、各粒子を元素組成によりタイプ分けした。その結果、粗大粒子ではコンクリート由来の割合が高いが、サブミクロンサイズでは重機の排ガス由来粒子の割合も無視できないことが確認された。今回、個別粒子分析法を現場に適用し、短時間サンプリングで、粒径ごとの粒子タイプとそれぞれの存在率を把握できることを確認した。上記の結果の一部は建災防の検討会で活用され、また今後データを解析して論文としてまとめる予定である。

c) ナノマテリアル（模擬発生）：

カーボンナノチューブ(CNT)は少量でも樹脂の特性を向上させることが可能なため、産業への応用が期待される材料であり、使用量が増加している。CNTの気中濃度測定を行う際には、その飛散特性を考慮してサンプラーを選定する必要があるため、本研究では室内でCNTを模擬的に発生させ、CNTエアロゾルを衝突型の多段インパクターで捕集し、炭素分析により炭素成分の情報と粒径の質量分布、SEMにより形態の情報を得た。CNTは凝集粒子として飛散することが多いが、CNTの種類によっては単独の短い繊維が繊維状粒子として飛散するものがあることが確認された。凝集粒子を多段インパクターで捕集する際の留意点やCNTの定量法の妥当性については、小野他¹⁰⁾及び本SRR「ナノマテリアルの飛散状態とばく露評価－カーボンナノチューブとカーボンブラックについて－」にて詳述した。

d) 高純度結晶質シリカ粒子（模擬発生）：

結晶質シリカ粒子にばく露する可能性のある作業現場で濃度を測定する場合、気中粒子をろ過捕集したフィルターを、マイクロ天秤により秤量し、粉末X線回折法(XRD)で結晶質シリカを定量する方法がとられる。しかし、個人サンプラーのように吸引流量の小さい捕集装置を使用する場合、気中濃度が数10 µg/m³という低濃度環境においては、数時間以上あるいは終日のサンプリングが必要となる。粉じん計を用いれば高い時間分解能で濃度の変動を確認できるが、例えば大気環境中のバックグラウンド粒子濃度が測定対象のシリカ粒子濃度よりも高濃度の

場合は、測定値がバックグラウンドに由来するのか分からず、測定値が利用できない可能性がある。したがって、これに代わる手法として、粒径別に個々のエアロゾル粒子をカウントするエアロゾル測定装置（たとえばOPS）と個々の粒子の元素組成を同定できるSEM-EDSを併用した分析法が提案される。

一方で、高純度の結晶質シリカ粉末を用いて分析法の検討をしたところ、バルク試料をXRF等で分析を行うとシリカ以外の不純物もわずかに存在することが確認された。この不純物が、シリカ粒子とは別の粒子単体として存在しているのか、あるいはシリカ粒子に包含した状態で存在しているのか、個別粒子分析によりその混合状態を把握できた。さらに画像解析により粒径ごとに個数濃度と前述の混合状態の関係を明らかにできた。本法は、高純度シリカ取り扱い現場等における測定方法として有効な手法だと考える。

3 今後の課題・展開

ナノマテリアルの毒性の懸念は現在においても払拭されておらず国際的にもまだ活発に議論されており、現状においてそのばく露評価法やナノマテリアル粒子のキャラクタリゼーションの研究や規格化が望まれている。

一方で産業の副産物としてのナノ粒子、たとえば溶接ヒュームは、国際がん研究機関においてグループ1に分類され、国内においても令和3年4月1日に特定化学物質に指定された。このようにナノ粒子の毒性影響を把握するためには従来の環境測定法に加え、ここでその一端を紹介したように、SEMによる個別粒子分析法を駆使したばく露評価法が今後ますます重要になってくると考える。また、溶接ヒューム粒子や高純度シリカ粒子をはじめとして数多くの粒子状物質は、有害性が指摘されているものの、その発生機序等がまだまだ明らかにされていない。そのため有害性評価においても個別粒子分析による粒子キャラクタリゼーションの情報蓄積は必要であると考える。

以上の成果は、引き続き論文としてまとめ公表に努めるとともに、個別粒子分析法については広く現場で利用可能とするため、手順書等を作成し公表する予定である。

参 考 文 献

- 1) OECD. Important issues on risk assessment of manufactured nanomaterials, Series on the Safety of Manufactured Nanomaterials No. 103. ENV/CBC/MONO(2022)3. 2022.
- 2) IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Welding, molybdenum trioxide, and indium tin oxide. Lyon, France. International Agency for Research on Cancer; 2018.
- 3) 厚生労働省労働基準局. 労働安全衛生法施行令の一部を改正する政令等の施行等について.2020; 基発0422第4号
- 4) 厚生労働省労働基準局. ずい道等建設工事における粉じ

ん対策に関するガイドラインの改正について. 2020; 基発0720 第2号

- 5) 労働安全衛生総合研究所. 平成30年度年報. 2018; 88-91.
- 6) 労働安全衛生総合研究所. 令和元年度年報. 2019; 128-131.
- 7) 労働安全衛生総合研究所. 令和2年度年報. 2020; 94-96.
- 8) 労働安全衛生総合研究所. 令和3年度年報. 2021. (in press)
- 9) Nobuyuki Kato, Maromu Yamada, Jun Ojima, Mitsutoshi Takaya. Analytical method using SEM-EDS for metal elements present in particulate matter generated from stainless steel flux-cored arc welding process, Journal of Hazardous Materials. 2022; 424 Part B: 127412.
- 10) 小野真理子, 山田丸. 炭素系ナノマテリアルの飛散状態の確認—カーボンナノチューブについて—. 労働安全衛生研究. 2019; 12: 95-100.

研究業績リスト

課題名：個別粒子分析法による気中粒子状物質測定信頼性の向上に関する研究

| 平成 30 年度 (2018 年) | | |
|-------------------|--------|--|
| 1 | 国内学術集会 | 山田丸, Sheng-Chieh Chen, David Y.H. Pui (2018) 走査電子顕微鏡による粉じんばくろ測定に関する研究：分級器とフィルタの検討. 第91回日本産業衛生学会, 産業衛生学雑誌, Vol. 60, p.305. |
| 2 | 国内学術集会 | 山田丸, Sheng-Chieh Chen, David Y.H. Pui (2018) SEM を用いた粉じん濃度測定法：ポリカーボネートフィルタによる粉じん捕集法の検討. 日本顕微鏡学会第 74 回学術講演会, 発表要旨集, p.199. |
| 令和 1 年度 (2019 年) | | |
| 1 | 原著論文 | 小野真理子, 山田丸 (2019) 炭素系ナノマテリアルの飛散状態の確認—カーボンナノチューブについて—. 労働安全衛生研究, Vol.12.No.2, pp.95-100. |
| 2 | 国際学術集会 | Mitsutoshi Takaya (2019) Risk Assessment of Exposure to Nanomaterial Dusts in Workplace, Environment Measurement and Personal Exposure Measurement. Keynote 6 “Assessment of Nano Particles & PM 2.5 Exposure”, Asian Network of Occupational Hygiene Conference (ANOI) 2019, Bangkok. |
| 3 | 国内学術集会 | 加藤伸之, 山田丸, 小嶋純, 鷹屋光俊(2019)SEM-EDS を利用した有害金属を含有する溶接ヒュームの個別測定に関する研究, 日本顕微鏡学会第 75 回学術講演会, 発表要旨集, Vol. 54 (Suppl), p.193. |
| 4 | 国内学術集会 | 山田丸, 篠原也寸志, 小野真理子, 鷹屋光俊(2019)SEM による気中粒子観察のための前処理及び分析条件に関する検討, 第 59 回日本労働衛生工学会抄録集 |
| 5 | 国内学術集会 | 小野真理子, 山田丸, 東久保一郎(2019)炭素系ナノマテリアルの粒径分布と凝集状態の観察, 第 59 回日本労働衛生工学会抄録集 |
| 令和 2 年度 (2020 年) | | |
| 1 | 国際学術集会 | Maromu Yamada, Mitsutoshi Takaya, Mariko Ono-Ogasawara (2020) Characterization of particle shape and density of TiO ₂ nanomaterial agglomerates through individual particle observation with SEM. 9 th Nano Conference-International Symposium on Nanotechnology, Occupational and Environmental Health, Online. |
| 2 | その他 | NanoHarmony project (EU Horizon 2020) ‘Workshop on Gap Analysis and Data Requirements to Support Test Guideline and Guidance Document Development’ に山田丸がエキスパートとして参加し, ナノマテリアル粉じんの電子顕微鏡観察法に関して本研究で得た知見を基にコメントした. |
| 令和 3 年度 (2021 年) | | |
| 1 | 原著論文 | Nobuyuki Kato, Maromu Yamada, Jun Ojima, Mitsutoshi Takaya (2022) Analytical method using SEM-EDS for metal elements present in particulate matter generated from stainless steel flux-cored arc welding process, Journal of Hazardous Materials, Vol.424, Part B, 127412. |