

## 労働環境における粒子状化学物質のばく露管理と測定・分析技術

独立行政法人労働者健康安全機構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 ばく露評価研究部長

たかや みつとし  
鷹屋 光俊

産業現場で使用される化学物質の種類は6万種類にも及ぶとされ、さらに増加傾向にある。これらすべての化学物質の取り扱いについて細かい規制を法令で規定することはできないため、現在の労働安全衛生法では、使用者が取り扱う化学物質に関してリスクアセスメントを行い様々な対策を行う事とされている。リスク評価には、有害性とばく露の2つを正しく知る必要があるが、ばく露の評価には、分析化学に加えて様々な物理計測や生物学的な知見・技術を組み合わせることが肝要である。

本稿では、職場の空气中に存在する化学物質のうち、様々な形の粒子として存在する物質の環境管理・ばく露評価にはどのような技術が必要なのか、またそれに関して労働安全衛生総合研究所で行っている研究について紹介する。



### 1 はじめに

厚生労働省によれば産業現場で使用されている化学物質は約6万物質あると言われている。それらの化学物質の中には取扱う労働者に深刻な健康影響を与えることが知られているものもあり、健康障害を防止するため、労働者がどの程度化学物質にばく露しているのかを正確に評価して、ばく露防止対策を立てる必要がある。

化学物質の濃度測定には、分析化学の知見・技術を利用することとなるが、労働環境管理および労働者へのばく露管理においては、分析化学に加えて様々な物理計測や生物学的な知見・技術を組み合わせることが必要となる。本稿では、職場に存在する化学物質のうち、エアロゾル状態で労働者にばく露する「粒子状化学物質」の、ばく露管理を行うためにどのような技術が必要とされているかを、「労働安全衛生総合研究所（以下、安衛研とする）」の研究成果・今後の研究課題を交えて紹介する。

### 2 粒子状物質の形と大きさ

ガス・蒸気にはなくて粒子にあるもの、それは形と大きさである。粒子の形と大きさは、体内に取り込まれた後に生体と与える作用および環境中の挙動に影響を与えるため、粒子

状化学物質ばく露の評価には、粒子の成分・濃度を知るという化学分析の技術に加えて、粒子の形・大きさの情報を得るために様々な物理計測の技術を組み合わせることになる。形の情報を知る重要性については、石綿の例を挙げるだけで十分と考えるため、詳しくは別の機会に譲るとして、本稿では主に粒子サイズの重要性について述べる。

粒子の大きさに関する情報を得るための技術のうち基本的なものは「粒子の粒径別サンプリング」である。図1左に示したのは、労働衛生分野で用いられる粒子状物質捕集装置の粒径別捕集効率に関するISO規格(ISO7708:2005)<sup>1)</sup>である。ISO7708:2005では3種類の捕集対象粒子を規定している。このカーブはそれぞれ図1の右側に示す呼吸器内の場所への到達確率を示している。より小さな粒子ほど呼吸器の奥まで到達する。その理由は鼻から吸い込んだ空気が気道内で流れを変え変る際に、大粒子ほどその慣性から空気の流れに乗り切れず呼吸器の壁に衝突するためである。慣性が問題となるため、同直径の粒子であっても密度が異なれば気道内の挙動が違ってくる。図1で示す粒子径は空気動力学径と呼ばれ、粒子の空気中の動きが同じとなる密度が1 g/cm<sup>3</sup>の球形粒子の粒径を示している。密度が1 g/cm<sup>3</sup>以外の粒子は幾何学的な粒径を密度の平方根で

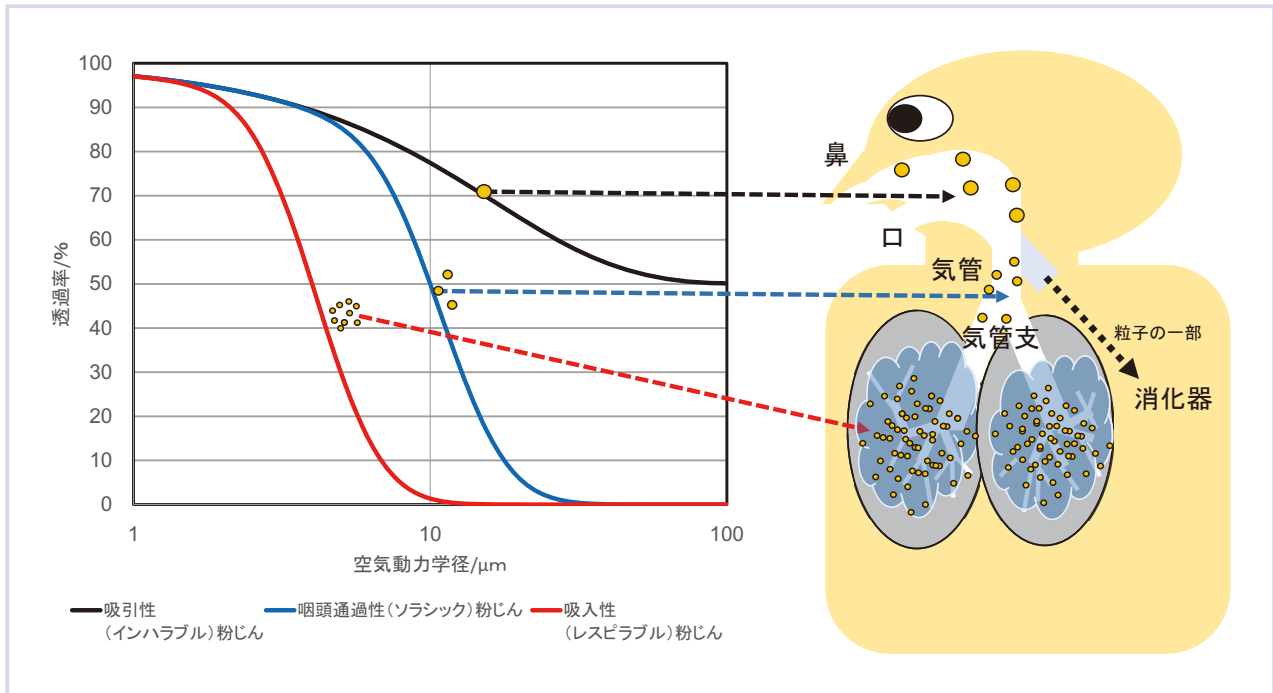


図1 粒子状物質のサンプラーの分粒装置の特性と粒子が到達する部位

割れば空気動力学径を求めることが出来る。ただ形状が球形から大きく外れると空気動力学径を求めることは容易ではない。

3種類の粒子のうち、最も大きな吸引力（インハラブル）粒子は、呼吸器の到達部位と健康影響の大きさに関連がない化学物質の評価に用いる。これらの化学物質は鼻の粘膜や痰に含まれて胃に流れることにより消化器等から体内に吸収されて健康に影響を及ぼす。中間サイズの咽頭透過性（ソラシック）粒子は気管支まで到達した際の健康影響が問題となる物質の評価に用いる。例えば職業性喘息の原因が疑われる金属微粒子を含む切削加工液ミストなどを評価する際には、ソラシック粒子の濃度測定を行うことになる。もっとも小さい吸入性（レスピラブル）粒子は、呼吸器の最も奥の肺胞まで到達する粒子である。吸入性粒子がもたらす職業病でもっともよく知られているのはじん肺であろう。じん肺は古くから職業病として知られるだけでなく患者数も多く、生活の質（Quality of Life いわゆる QOL）に与える影響も深刻であるため、永年その対策について研究されている。また吸入性の粒子についてはサンプリングだけではなく粉じん計に代表されるように物理計測の面でも多くの研究がなされている。

### 3 現在の粒子状物質評価に必要な研究

前項では、粒子状物質に関する大きさや形についておさらいした。それではそれらを踏まえてどのような研究が必要なのだろうか、安衛研で取り組んでいる研究を紹介する。

#### 3.1 電子顕微鏡観察と粒子計測器の利用

作業環境空气中粒子について化学物質量以外の情報を知る方法が必要とされている。この目的において電子顕微鏡観察はとても有用である。我々の経験した例を一つ紹介すれば、カーボンナノチューブ（CNT）を含む染料で染色した糸を使用した織物工場で採取した気中粒子を、走査電子顕微鏡（SEM）観察したところ、繊維くずにCNTと思われる粒子が多数付着したものが含まれることを確認した例がある<sup>2)</sup>。このように電子顕微鏡観察の検出力は非常に高い。一方その定量性については改善の余地がある。顕微鏡観察による粒子の定量分析は、光学顕微鏡による気中の石綿粒子の測定が公定法として採用されていることなどからわかるように、十分に可能である。しかし、電子顕微鏡が必要となるほど観察対象粒子が小さいケースでは当然観察倍率が高くなりその結果、観察できる視野の面積は小さくなる。測定結果の代表性を担保するためにはより多くの視野数を観察する必要があり、画像解析技術などを応用した自動分析の方法を

確立する必要があるため、安衛研でも現在研究に取り組んでいる。

電子顕微鏡の活用として、もう一つ、物理計測装置の信頼性を向上させるという目的で研究を行っている<sup>3)</sup>。空気中の粒子を物理的な計測で測定する装置として、粒子がもつ電荷を計測する方法、粒子散乱する光を検出する方法などがある。これらの装置は、気中粒子を捕集 - 化学分析する方法に比べ感度が不足し、必ずしも十分な定量下限を得られない場合もあるが、リアルタイムに濃度情報が得られる。加えて光散乱を利用した装置では、粒径の情報も得られるものがあり、労働者のばく露リスク低減に非常に有用である。これらの装置は、ポリスチレンラテックス (PSL) と呼ばれる幾何学的粒径を厳密にそろえた球形粒子で校正されている。しかし前項で述べたように実際の労働環境中に存在する粒子は様々な形状を持っている。そこで、電子顕微鏡観察で得た実際の粒子の形状・凝集状態に関する情報と各種の物理計測装置の応答の関係に関する情報を蓄積することにより、粒子計測器を職場の環境管理、労働者のばく露リスク管理により効果的に使用する事が出来ると考えている<sup>4)</sup>。

図2はPSL粒子(左図)と粉体取り扱い作業を模擬した粉じん発生装置<sup>5)</sup>で発生させた粒子(右図)の走査電子顕微鏡写真である。粉じんの発生には試験管に粉体を入れ振動させるボルテックス法や筒内に粉体を落下させる落下法などがあり、電子顕微鏡像の比較により、発生させた粒子を実際に各種の作業現場で採取した気中粒子の形状・凝集状態に

近いものとした上で、その状態で各種の測定装置の応答を評価する実験を行うこととなる。

### 3.2 大粒径粒子のサンプリング・測定

レスピラブル粒子より、粒径が大きいインハラブルやソラシック、特にインハラブル粒子の気中粒子サンプリングについては、方法が確立されているとは言いがたい。その理由の一つは、じん肺対策が非常に重要であったため吸入性の方が、粒子に関する測定・捕集・分析の研究の蓄積が進んでいるということがある。もう一つの理由は、直感的には小さい粒子の方が測定も捕集も難しいように思えるが、実際には大きな粒子の方が捕集も測定も困難だからである。物理的な測定についていえば、粉じん計や粒子カウンターの動作原理である光散乱の感度が高いのはサブミクロンからミクロンの粒径であり、光の波長より十分大きな10 μm程度より粒径が大きい粒子は散乱ではなく光を乱反射することになり、光学的な検出は難しくなる。

捕集に関し、大粒径粒子は沈降速度が速いという問題がある。また電動工具で切削・研磨する際に発生する粉じんなどでは、小粒径の粒子であれば、発生時の運動方向にかかわらず気流によって動くが、大粒径の粒子は慣性が大きく、気流の流れとは異なる方向に飛んで行く場合も多い。その結果として、気中濃度の空間変動・時間変動が大きくなり、作業者と発生源の位置や少しの姿勢の違いが捕集量のばらつきをもたらす事になる。

一方、化学物質の毒性評価に関する研究が進み、許容

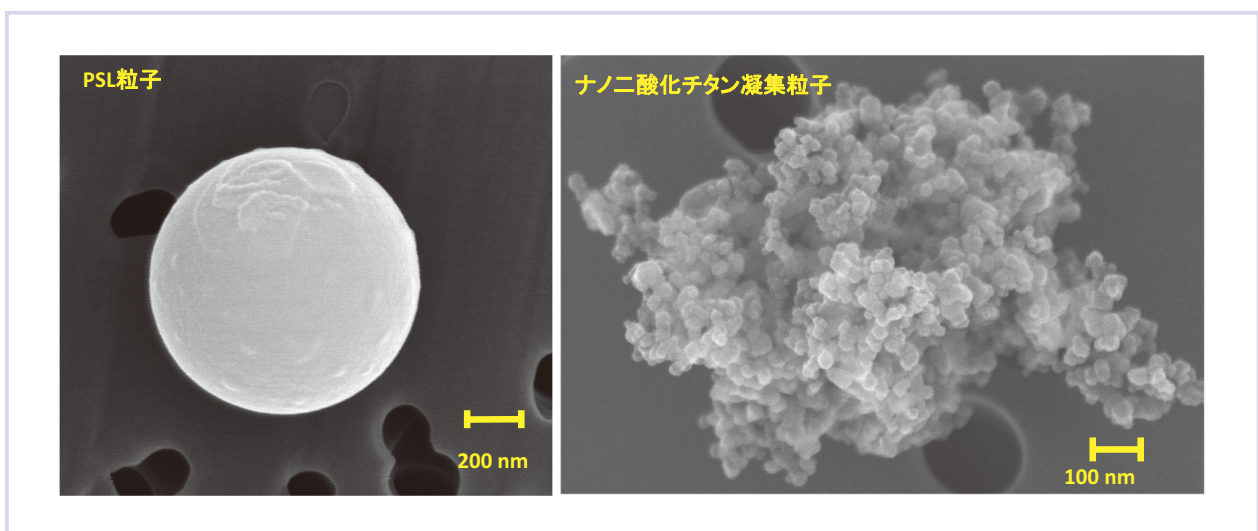


図2 標準粒子 (PSL) と職場の粉じんを模擬した粒子の例



濃度がより低く変更される傾向にあり、大粒径の粒子状物質のばく露リスク評価は難しくなっている。例えば六価クロムやベリリウムなどでは許容濃度が $\mu\text{g}/\text{m}^3$ オーダーに設定されている。その結果インハラブル粒子の捕集を行う場合、許容濃度に相当する物質質量から考えれば、粒径にもよるが数十個から数個、極端な場合は一個以下の粒子数になってしまう。すなわち粒子1個がサンプラー内に飛び込むかどうかという偶然によって測定結果が大きく左右されてしまう。捕集の均一性を保つのがより困難な大粒径の粒子ほど、粒子1個あたりの質量も粒径の3乗に比例して大きくなるためこの影響がより大きくなる。そこで低濃度領域でインハラブル粒子のサンプリングの正当性を担保するために、粒子の粒径分布も含めた挙動に関する知見を積み重ねることが必要である。また、より多くの空気を捕集することにより気中濃度の分母を大きくすることにより、分子が粒子の個数という離散量で表されてしまうという効果を消し去ることができるが、そのようなサンプラーを、労働者に装着可能な重量で実現するためには、さらなる技術開発が必要であり、これらは今後の研究課題である。

### 3.3 表面・溶解特性

粒子には大きさや形があると述べたが、もう一つ、ガスになく粒子にあるものとして表面がある。表面のミクロ的な形状（細孔の有無）の違いにより表面積が大きく異なれば表面で起きる生体内の物質との化学反応が異なる可能性が高い、また局所的に電気的中性が崩れていることにより表面に化学的活性が高い場所が存在する可能性がある。

筆者はかつて、希土類の酸化物粒子の肺内滞在時間に関する基礎的情報を得るための模擬実験を行った。試験管に、純水、生理食塩水、そして食塩、炭酸ナトリウム等に種々の有機酸を加えた肺泡模擬液をいれ、被験物質として希土類酸化物を加え、体温に近い $37^\circ\text{C}$ で数日おいた後、溶液中の金属濃度をICP-MSで測定した。その結果、一部の金属酸化物で主成分の金属ではなく不純物由来の別の金属が高濃度で検出された<sup>6)</sup>。これは粒子からの物質の溶け出し速度が異なる可能性に加え、破碎により粉体を作製する際に不純物が存在している場所が割れやすく、表面に不純物が濃縮されている等の可能性等が考えられた。いずれにしても粒子全体の化学物質量と生体への溶け出し量に差が生じる可能性がある。これは、ばく露評価・生体影響評価の双方で、

生体内での条件に近い形で粒子状物質がどう溶解してゆくのかについて、改めて知見を集積する必要があることを示唆している。現在、ICP-MSがより塩濃度の高い溶液の測定が可能になるなど分析装置の性能が向上した事をうけ、改めて様々な金属化合物に対して肺胞液に限らず、汗を模擬した溶液などへの溶解実験に着手している<sup>7) 8)</sup>。

## 4 おわりに

本稿では、労働環境における気中粒子状化学物質に関する測定の課題及びそれに関連した研究について紹介した。労働安全衛生総合研究所では、今後も化学物質の量に加え、大きさ、形、そして表面に着目して研究を続け、粒子状化学物質のばく露リスクを正確に評価し、リスクを下げる方法を提案して行きたいと考えている。

## 文 献

- 1) S07708 : Air quality -Particle size fraction definitions for health-related sampling.
- 2) M. Takaya, M. Ono-Ogasawara, Y. Shinohara, H. Kubota, S. Tsuruoka, S. Koda : *Ind. Health* **50**, 147 (2012) .
- 3) M. Yamada, M. Takaya, I. Ogura : *Ind. Health* **53**, 511 (2014) .
- 4) 山田丸, 加藤伸之, 鷹屋光俊, 篠原也寸志, 小野真理子, 小倉勇 : 平成30年度労働安全衛生総合研究所年報, 88 (2019) .
- 5) 山田丸 : 労働安全衛生研究, **11**, 73 (2018) .
- 6) M. Takaya, Y. Shinohara, F. Serita, M. Ono-Ogasawara, N. Otaki, T. Toya, A. Takata, K. Yoshida, N. Kohyama : *Ind. Health* **44**, 639 (2006) .
- 7) 韓書平, 鷹屋光俊 : 第59回日本労働衛生工学会講演要旨集, 60 (2019) .
- 8) 韓書平, 鷹屋光俊 : 日本分析化学会第68年会講演要旨集, 623 (2019) .

## 著者略歴

1987年3月 金沢大学理学部化学科卒業  
 1987年4月 労働省入省 現勤務先の前身である産業医学総合研究所に配属  
 以後現在まで 職場の粉じん・化学物質の環境管理・労働者のばく露リスク評価、化学物質に関わる労働災害調査等の業務に従事  
 2019年4月 労働安全衛生総合研究所 作業環境研究グループ部長  
 2020年4月 研究所に新設された化学物質情報管理研究センターに配属され現職

- 研究対象分野 金属類を中心とした粒子状物質の測定・管理方法の開発・評価
- 過去に従事した研究等
  - ・ナノ材料取り扱い職場のリスク管理
  - ・除染作業時における放射性セシウムを含む土壌由来粉じんの測定方法の検討
  - ・トンネル建設現場の粉じん測定方法の検討
  - ・高速道路延命工事中に発生した労働者の鉛中毒、化学物質製造工場における膀胱がん多発事例等の労働災害調査
- 検討会委員等
  - 厚生労働省 化学物質のリスク評価検討会委員
  - 厚生労働省 トンネル建設工事の切羽付近における作業環境等の改善のための技術的事項に関する検討会委員