

## 9

## 溶接作業におけるヒューム中ナノ粒子に関する研究

## Element Structure and Concentration of Nano-sized Metal Fume

京都大学 劉露 西岡和久 松井康人 中山亜紀 米田稔

Kyoto Univ. Liu Lu, Kazuhisa NISHIOKA, Yasuto MATSUI, Aki NAKAYAMA, Minoru YONEDA

## 1. はじめに

空気中に粒子が飛散している状態を総称してエアロゾルと呼ぶ。その中で、個体が粉碎や研磨、爆破などの機械的な力により生じる粒子を粉じん、固体が蒸発してその後に凝集してできた粒子をヒュームと定義している。1960年に公布されたじん肺法では、じん肺を「鉱物性粉じんを吸入することによって生じたじん肺およびこれと肺結核の合併した病気」としているが、1977年の改訂を受け、「粉じんを吸入することによって肺に生じた線維増殖性変化を主体とする疾病」と改められ、原因となる粉じんにヒュームも含まれるようになった。厚生労働省人口動態統計資料によると、じん肺を原死因とする年次別死亡数は1959年には289人で、1995年には1,334人と増加しており、その後徐々に減少している。

じん肺の発症メカニズムについては、完全に明らかにされていないが、1) 粉じんの化学組成、2) 粉じんの物理的性状および粒径、3) 粉じんの曝露量と曝露期間、4) 粉じんに対する感受性の個人差、の4点が要因であると考えられている。また、溶接作業工が作業を終えた数時間後に、咳、胸部圧迫感、発熱（ヒューム熱）、知覚異常などの症状を示すことが知られているが、本疾患のメカニズムについても詳しく分かっていない。

本研究でははじめに、溶接ヒューム中に含まれるナノオーダー（100 nm 以下）粒子の計測を試みた。現在は多種のナノ粒子計測器が販売されているが、測定原理の違いにより、粒径がリアルタイムで計測できるものや、ある粒径範囲の個数濃度のみを表示させるものがあり、すべてを網羅している機器は無い。また、これらは非常に高額である為に、作業環境測定で汎用性の高い、デジタル粉じん計を併用することで、これらの代用が可能かどうかの検討も行うこととした。

## 2. 実験方法

## 2. 1 溶接条件とサンプリング

2010年に、TIG溶接法による溶接作業を、(株)島津製作所三条工場内で実施した。1回の溶接はトーチの温度上昇から最大で7分間とし、同条件でこれを2回行った。溶接電圧は40～50 V(最大で90 V)であり、印加電流量は55～60 Aとした。シールドガスには、Arガスをを用い流速8 L/minにて送気した。溶接ワイヤはステンレス（SUS 308L、19 % Cr - 10 % Ni - Fe）、母材にはステンレス（SUS 304L、18 % Cr - 9 % Ni - Fe）を使用した。母材とワイヤの距離は、約5 mmとなるように心がけた。

## 2. 2 計測方法

溶接ヒュームの個数濃度および粒度分布データの取得は、以下の方法により行った。

## 1) 光散乱方式濃度計による重量濃度計測

光散乱方式濃度計を用いた重量濃度は、同一粒子系の溶接ヒュームの重量濃度に対して比例的な関係にある散乱光量（相対濃度） $C_R$  (cpm) を測定することにより求められる。計測した相対濃度に重量濃度変換係数  $K$  ( $\text{mg}/\text{m}^3/\text{cpm}$ ) を乗じることで、溶接ヒュームの光散乱方式濃度計による重量濃度  $C_2$  ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) に換算が可能である。本計測では2009年の小嶋らの報告<sup>1)</sup>から、換算係数を0.0098として濃度算出を行った。相対濃度計測には、柴田科学のデジタル粉じん計（LD-3B）（測定範囲：0.001～10.00  $\text{mg}/\text{m}^3$ ）を4台使い、溶接台の四つの角に設置した。これらの測定は、溶接中の7分間とし2回計測を行った。

## 2) 溶接ヒュームの粒度分布測定

粒度分布の測定には、島津製作所が開発している微分型電気移動測定装置（DMA；differential mobility analyze, Wyckoff, DM-2A）を用いて、100～300 nm 付近のヒュームの粒度分布を得た。DMA 計測では、シーガス流速を 10 L/min とし、エアロゾル流量が 1.5 L/min でサンプリングを行った。1) と同様に 7 分間の計測を 2 回試みた。同時に、大気中のバックグラウンド値や溶接現場構内のバックグラウンド値を島津製作所外にて実施した。

### 3) CPC による個数濃度計測

凝集式粒子カウンター（CPC、Condensation Particle Counter, TSI, MODEL3025A）を用いて、3～3000 nm の粒子径帯の個数濃度を計測した。CPC のサンプリング流量は 1.5 L/min と設定し、溶接の始まる 6 分前から溶接終わった後の 7 分後まで計測を実施した。本装置についても、同時に大気中のバックグラウンド値を計測するために、京都市市役所南側の広場にて計測を行った。

## 3. 結果と考察

### 3. 1 溶接ヒューム中粒子の重量濃度

CPC で計測が可能な中心粒径である 1500 nm を使い、3～3000 nm の粒子径帯の重量濃度を算出した。図 1 に CPC とデジタル粉じん計による粒子の重量濃度を示す。デジタル粉じん計の結果（図中の点線）では、1 回目の計測よりも 2 回目に計測したが濃度高い傾向にあった。CPC は、7 分間の溶接中の一瞬溶接が止まるタイミングに合わせて値が減少しており、リアルタイムに重量濃度を反映していることが確認できた。溶接が開始されると、デジタル粉じん計も CPC も値が急激に上昇しており、本来ナノ粒子が計測できないデジタル粉じん計でも、濃度上昇は捉える事が示唆される。その一方で、一度粒子濃度が上昇すると値が下がりにくく、リアルタイム計測には不向きであることが考えられた。

ヒュームは、発生直後は粒径が数 nm から数百 nm の極めて微細な一次粒子が主体である。その後、一次粒子はお互いにフロック凝集し、粒径が最大で数程度となる二次粒子が生成される<sup>2)</sup>。そのため、時間の経過とともに、一次粒子が凝集して数  $\mu\text{m}$  の二次粒子に生成して、CPC が計測できる範囲を超えてしまう可能性も考えられる。これに伴い、マイクロオーダーの二次粒子が計測できるデジタル粉じん計は、濃度が上昇する。

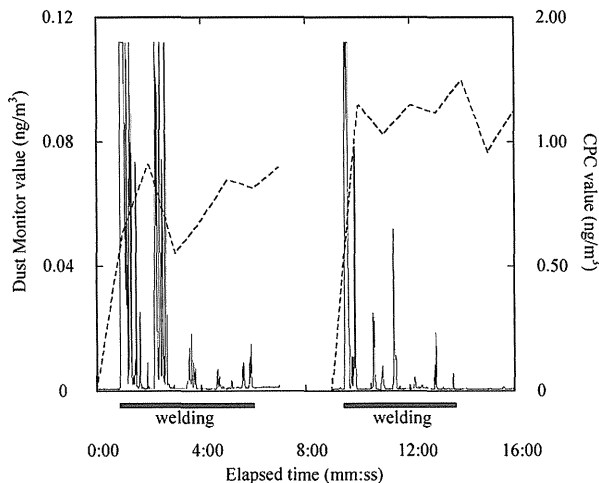


図1 CPCとデジタル粉じん計による溶接ヒュームの重量濃度計測結果

### 3. 2 溶接ヒュームのナノ粒子の粒度分布

図 2 に DMA を用いた 100～300 nm 付近の粒度分布および各粒径ごとの重量濃度を示す。粒子は溶接の母

材として使用したステンレス（SUS308）から比重は  $7.93\text{ g/cm}^3$  とし、個数濃度から重量濃度を算出した。この結果から、粒径のピーク値は  $10\text{ nm}$  付近であることが確認できた。これまでの労働衛生管理では、ヒュームはマイクロオーダー粒子が主であると考えられてきたが、ナノオーダーでも特に粒径が小さい粒子が大量発生していることが分かった。重量濃度に換算すると、粒径が大きくなるとともに、値が大きくなることが分かり、超微小粒子の計測では個数濃度での評価が重要と考える。

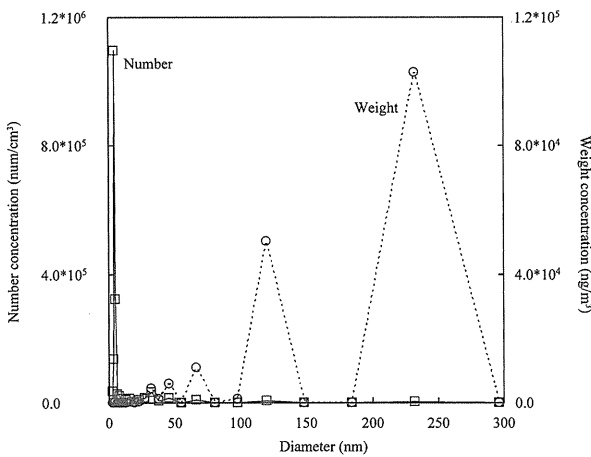


図2 ヒューム中ナノ粒子の個数濃度と重量濃度測定結果

3. 3 溶接ヒューム中ナノ粒子の個数濃度

図3にCPCを用い、大気中、溶接前後および溶接中の個数濃度を計測した結果を示す。図から分かるように、大気中で計測した個数濃度が一番高く、 $1\text{ cm}^3$ あたりに  $10^4$ 個を超える値であった。この原因として、朝の通勤時であったため、幹線道路を走行する車からの排気ガスが考えられる。特にディーゼルエンジン車では、排気ガスに多くのナノ粒子が含まれることが報告されている。また、溶接前後や溶接を止めた時間帯には、溶接中よりの個数濃度が低かった。2回の溶接の間の計測では、平均値が  $10^4$  個/ $\text{cm}^3$ を示しており、この原因として、溶接後にもヒュームが気中に残っていた可能性が考えられる。

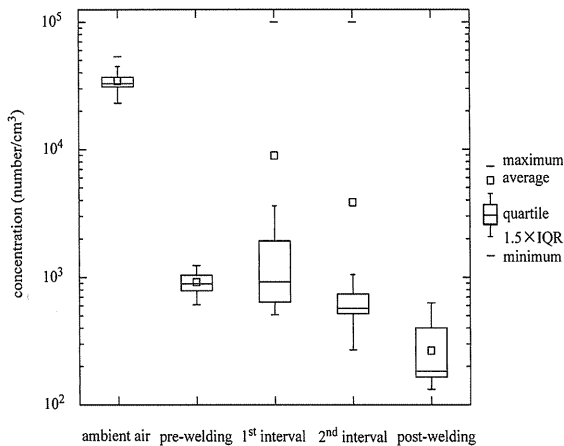


図3 CPCによる大気中と溶接前後、溶接の間の粒子の個数濃度測定結果

#### 4. 結論

TIG溶接におけるDMAを用いた粒度分布の測定結果により、粒径のピーク値は10 nm付近であることが確認できた。他の研究報告では、軟鋼溶接における粒径のピーク値は250 nm付近であり、1～10 nm付近にも個数濃度の上昇が観察されている(松井康人, 2010)<sup>3)</sup>。GMAW (ガス金属アーク溶接) における測定結果では、粒径のピーク値は100 nm付近であった(Zimmer, 2001)<sup>4)</sup>。これらの結果と比較すると、溶接方法により発生する粒径が異なることが示唆される。また、同じ溶接においても、捕集の場所や方法が変わると、粒度分布も変わるとの報告(Zimmer, 2000)<sup>5)</sup>があり、計測法の確立も今後必要と考える。

デジタル粉じん計の結果では、CPCの結果と値は大きく異なるものの、ターゲットとしている粒径が大きく異なる為、二次粒子の発生も考慮に入れた評価を行う必要がある。今回の計測で、ナノ粒子のバックグラウンド値は高い事が明らかとなり、個数濃度や重量濃度などの定量的評価だけでは、作業環境管理には十分とは言えず、定性的評価も視野に入れた評価法の確立が急がれる。

**謝辞** 本研究の溶接ヒュームの発生において、島津製作所に技術補助と実験場所をご提供頂いた、環境BUの木本様に感謝申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 小嶋純(2009):炭酸ガスアーク溶接ヒュームの質量濃度変換係数 併行測定における採取位置の影響,産衛誌,2009,51 : 141-143.
- 2) 福地信義、田中耕平、和泉考作、胡長洪 : 労働環境安全のための工場内溶接・切断ヒュームの拡散制御に関する研究 (その1内業工場内ヒューム濃度計測) : pp.86
- 3) 松井康人、高岡昌輝、米田稔 : 溶接作業における金属ナノ粒子の化学形態に関する研究 : 97
- 4) Anthony T. Zimmer, Paul A. Baron, Pratim Biswas.(2001):*The influence of operation parameters on number-weighted aerosol size distribution generated from a gas metal arc welding process*, p.519-531
- 5) Anthony T. Zimmer, Pratim Biswas. (2000):*Characterization of the aerosols resulting from arc welding processes*, p.993-1008

**キーワード** : ナノ粒子、ヒューム、労働衛生

**Key Words** : nanoparticle, welding fume, occupational health