

B-48 溶接ヒュームに含まれるナノ粒子の計測

○劉 露*・西岡 和久・松井 康人・米田 稔

京都大学大学院 工学研究科 都市環境工学専攻 (〒615-8530 京都市西京区京都大学桂)

* E-mail: ryuuro@risk.env.kyoto-u.ac.jp

1. 背景・目的

気体中に飛散している粒子を総称してエアロゾルと呼ぶ。その中で、固体が粉碎や研磨、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。ヒュームは溶接作業後に発生することが知られている。また、近年、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、知覚異常などの症状を示すことが報告されているが、詳しい知見は得られていない。

本研究では、溶接ヒューム中に含まれるナノオーダー (100 nm 以下) 粒子の粒径と粒径別の粒度分布、個数濃度及び重量濃度を計測することを目的とした。現在は多種のナノ粒子計測器が販売されており、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るが、すべてを網羅している機器は無い。

2. 実験方法

(1) 溶接条件

TIG 溶接法による溶接作業を、京都市内のA社工場内で実施した。1回の溶接はトーチの温度上昇から最大で7分間とし、同条件でこれを溶接棒ありの条件で2回、その後溶接棒なしの条件で1回試みた。溶接電圧は90Vであり、印加電流量は90Aとした。シールドガスには、Arガスをを用い流速8L/minにて送気した。溶接ワイヤはステンレスSUS308L (19%Cr-10%Ni-Fe)、母材にはステンレスSUS304L (18%Cr-9%Ni-Fe)を使用した。母材とワイヤの距離は約5mmとした。

(2) 計測方法

溶接ヒュームの重量濃度、粒度分布および個数濃度データの取得は、以下の(a)~(c)の方法により行った。

(a) 光散乱方式濃度計による重量濃度計測

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 C_R (cpm) を測定することにより、重量濃度が求められる。計測した散乱光量に重量濃度変

換係数 K ($\text{mg/m}^3/\text{cpm}$) を乗じることで、重量濃度 C (mg/m^3) に換算が可能である。本計測では小嶋らの報告から、変換係数を0.0098として濃度算出を行った¹⁾。相対濃度計測には、デジタル粉じん計 (LD-3B, 柴田科学, 測定範囲: 0.0010~10.00 mg/m^3) を1台用い、溶接作業を行っている地点から60cmの点に設置した。(1)と同様に7分間の計測を溶接棒ありの条件で2回、その後溶接棒なしの条件で1回試みた。

(b) 溶接ヒュームの粒度分布測定

溶接ヒュームの粒度分布の測定には、微分型電気移動測定装置 (DMA; differential mobility analyzer) を用いて、直径10~300nm範囲のヒュームの粒度分布を得た。本装置では、約10~300nm範囲の粒子の個数濃度を、約7分間かけて計測する。この為、全範囲の粒径を計測するには、約7分間を要する。分級部を流れるシースガス流量 (粒子を含まない清浄空気流量) を10L/minとし、サンプリング流量 (粒子を含む計測対象空気の流量) が1.5L/minとしてサンプリングを行った。(1)と同様に7分間の計測を溶接棒ありの条件で2回、その後溶接棒なしの条件で1回試みた。

(c) CPCとB-DMAによる個数濃度計測

凝集式粒子カウンター (CPC; Condensation Particle Counter, MODEL3025A) を用いて、直径が3~3000nm範囲の個数濃度を計測した。本CPCが計測できる個数濃度範囲は $0.01 \sim 9.99 \times 10^4 \text{ particles/cm}^3$ となっているため、計測対象のエアロゾルを希釈器 (MD19-2E) にて100倍希釈することで、検出を行った。CPCのサンプリング流量は1.5L/minと設定し、(1)と同様に7分間の計測を溶接棒ありの条件で2回、その後溶接棒なしの条件で1回試みた。

同時に、広帯域微分型電気移動測定装置 (B-DMA; Broad band differential mobility analyzer)²⁾ を用いて直径が5~100nm範囲の帯電粒子の電流値を1秒間隔で計測した。B-DMAは設定した固定の粒径範囲を分級しているため、粒度分布の変化は測定できない。この為、DMAで4回粒度分布を計測し、幾何平均から得られた粒径を用いて

平均電荷数 p_{av} を算出し、下式から B-DMA で得られた電流値 I_T を個数濃度 n_T に換算した³⁾。 Q_{dx} は B-DMA で分級するサンプリング流量を示す。

$$n_T = \frac{I_T}{eQ_{clas}p_{av}}$$

B-DMA のサンプリング流量は 1.5 L/min と設定し、(1) と同様に 7 分間の計測を溶接棒ありの条件で 2 回、その後溶接棒なしの条件で 1 回試みた。

3. 結果と考察

(1) 溶接ヒューム中ナノ粒子の粒度分布

図 1 に DMA を用いた 10~300 nm 範囲の各粒径ごと個数濃度と重量濃度を示す。ステンレス (SUS308) 母材の比重を 7.93 g/cm^3 として、個数濃度から重量濃度を算出した。この結果、粒径の個数濃度のピーク値は、溶接棒ありにおいては 12 nm であり、溶接棒なしにおいては 9 nm 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多く存在していることが分かった。重量濃度においては、溶接棒なしの全粒径での重量濃度は、溶接棒ありの場合と比較するとかなり低かった。溶接棒なしの個数濃度も溶接棒ありのそれより低い結果が得られた。これまでの報告では、ヒュームのうち大半は溶接棒からの発生で、母材からの発生はごく少量とされている⁴⁾。本研究の結果から、ナノオーダーのヒューム発生量には、溶接棒の有無が寄与している可能性が高いことも示唆された。

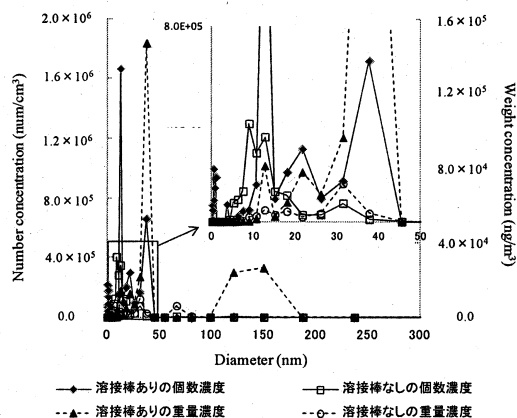


図 1 ヒュームの粒径別の個数濃度と重量濃度

(2) 溶接ヒューム中ナノ粒子の個数濃度

図 2 に CPC を用い、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。溶接直後に粒子の個数濃度が

急激に減少したことが分かった。この結果、溶接の間にナノ粒子が大量発生する可能性が示唆された。

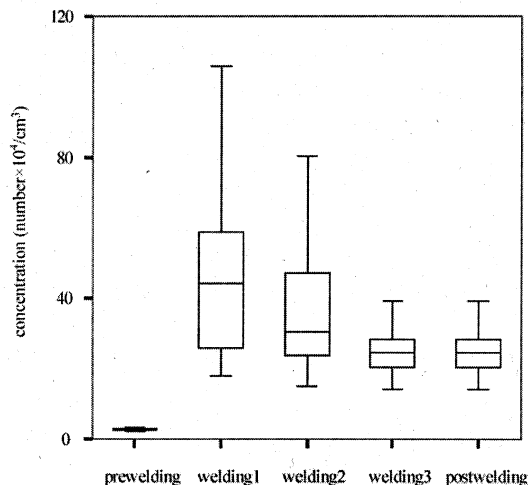


図 2 CPC による溶接中及び前後の個数濃度

(3) 溶接ヒューム中粒子の重量濃度

DMA から得られた、個数濃度がピークの粒径である 12 nm を用い、3~3000 nm の粒子径帯の重量濃度を算出した。図 3 に CPC とデジタル粉じん計により算出した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 回目の溶接よりも 2 回目の溶接の方が重量濃度が高かった。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。一方で、デジタル粉じん計は CPC のように溶接のタイミングで重量濃度がリアルタイムに変化することはなかった。この原因として、ヒュームの粒径の変化が挙げられる。

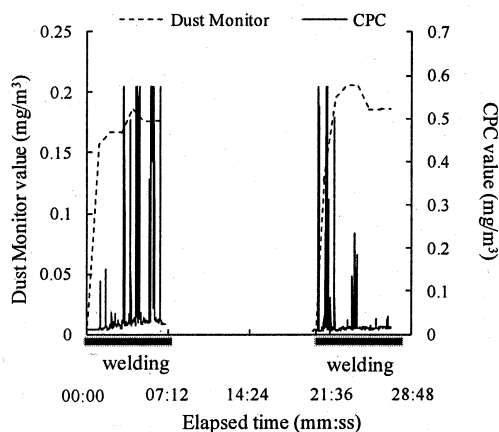


図 3 CPC とデジタル粉じん計による重量濃度の比較
ヒュームは発生直後は粒径が数 nm から数百 nm の極め

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ブロック凝集し、粒径が最大で数 μm 程度となる二次粒子が生成される⁹⁾。そのため、時間の経過とともに、一次粒子が凝集して数 μm の二次粒子が生成され、CPCが計測できる範囲を超えた可能性がある。これに伴いマイクロオーダーの二次粒子が生成された可能性があり、これらがデジタル粉じん計によって検出され、個数濃度が上昇したと考えられる。

(4) CPCとB-DMAによる個数濃度計測の比較

CPCとB-DMAによる溶接ヒューム中のナノ粒子の個数濃度を、図4に示す。図から分かるように、CPCとB-DMAで計測したヒューム中ナノ粒子の個数濃度には大きな差があった。CPCはB-DMAより計測できる粒子の粒径範囲が大きいにもかかわらず、計測した個数濃度はB-DMAより低く、 1.0×10^7 個までしか検出できなかった。CPCでは通常の粒子カウンタでは測定できない超微粒子を大きく成長させることで測定を可能にしている。凝縮成長効率の濃度依存性⁹⁾については議論がされており、粒子濃度が高い場合には凝縮性蒸気が粒子成長に大量に消費され、その結果過飽和度が低下する。また、最小可測粒径付近の粒子に対して、凝縮成長効率の低下が起こり得るとされている。

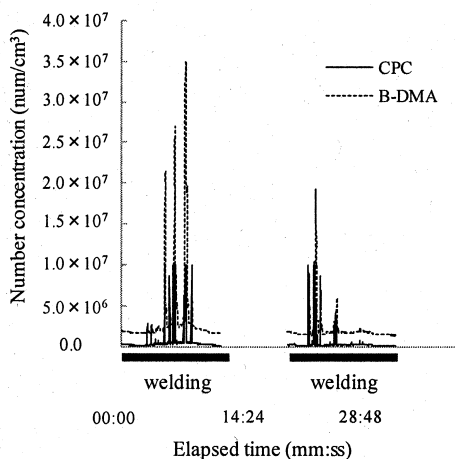


図4 CPCとB-DMAによる個数濃度の比較

4. まとめ

TIG 溶接におけるDMAを用いた粒度分布の測定結果により、粒径のピーク幅は約9~13 nm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⁷⁾。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⁸⁾。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考えられる。また、同じ溶接においても、溶接棒の有無によって、個数濃度も変化することが確認できた。CPCによる個数濃度の測定結果とB-DMAの結果を比較すると、CPCの方が計測可能な粒径の範囲が大きいにもかかわらず、CPCの方が低い値を示した。このことから、粒子の個数濃度によって最適な測定装置の選択が必要となることが示された。したがって、ヒューム発生量を最小にする溶接条件及び適切な測定装置に関して検討していく必要がある。また、CPCによる測定結果は、デジタル粉じん計の結果と比較すると、重量濃度は大きく異なった。それぞれの装置がターゲットとしている粒径が大きく異なるため、二次粒子の発生も考慮に入れた評価を行う必要がある。個数濃度や重量濃度などの評価だけでは、作業環境管理には十分と言えず、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: 本研究の調査、計測手法及び使用機器は、株式会社島津製作所 分析計測事業部 環境ビジネスユニットの支援を受けて実施されました。心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 小嶋純: 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, Vol. 51, pp. 141-143, 2009.
- 2) 奥田浩史, 河合英直, 山田裕之, 川野大輔, 木本成: 普及型非定常微粒子数濃度計測器の開発 (第1報), 自動車技術会学術講演会前刷集, No. 25-07, pp. 15-18, 2007
- 3) 木本成: コロナ放電を用いた混合型ナノ粒子エアロゾル荷電装置の開発, 大阪府立大学学位論文, 2011.
- 4) 西田隆法: 溶接ヒュームと防御対策, 溶接学会誌, Vol. 62, No. 7, pp. 528-534, 1993.
- 5) 福地信義, 田中耕平, 和泉孝作, 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, 日本船舶海洋工学会論文集 (1), pp. 85-95, 2005.
- 6) 桜井博, 佐藤佳宏, 榎原研正: 縮式粒子計数木器 (CPC) の検出効率の校正ト微分型移動度分級器 (DMA) の分級特性の評価, エアロゾル研究, Vol. 22, No. 4, pp. 310-316, 2007.
- 7) 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, 環境衛生工学研究, Vol. 24, No. 3, pp. 93-100, 2010.
- 8) Anthony T. Zimmer, Paul A. Baron: The influence of operation parameters on number-weighted aerosol size distribution generated from a gas metal arc welding process, *Journal of Aerosol Science*, Vol. 33, pp. 519-531, 2001.