

粒子の帯電量計測システムの開発

その2 計測システムの構成と基礎実験

帯電粒子、計測法、可視化

1.はじめに

粒子（パーティクル）の挙動には、重力、気流、クーロン力等が影響し、ワークや内装部材への沈着や付着には、このうちのクーロン力が少なからず関係している。クーロン力は、ワーク等の表面電位による電界強度と粒子の帯電量とで決定される。また、粒子は一度付着するとファンデルワールス力が生じ、これらの除去には強力な気流などの外力が必要になる。このため、パーティクルの付着による汚染を防止するため、クリーンルーム等では積極的な静電気対策が行われている。しかし、帯電粒子の発生機構やその性状、帯電量は静電気対策にとって重要な情報であるにも関わらず、クリーンルーム環境下において測定評価する方法が未だ確立されていない。

そこで、本研究グループではクリーンルーム等に浮遊する低濃度の粒子を含むエアロゾルを取り込み、電界による移動速度および終末沈降速度を撮影する機構をもち、ハンドリングに優れた計測システムを開発した。本報告では、計測システムの基本原理と粒子の移動度計測に関する基礎実験について述べる。

2.帯電量計測システムの概要⁽¹⁾

本報その1で利用した微分型静電分級器（DMA: Differential Mobility Analyzer）は二重同心円筒形の円筒間に帯電粒子を含んだエアロゾルを層流状態で導入し、円筒間に電位差を持たせることで気流方向に対して垂直な電界空間を形成する構造である。DMA内における帯電粒子の軌跡は、電気移動度と気流速度で決定される。DMAはこの性質を利用し、設定した気流およびクーロン力により与えられる起動速度上に設置されたスリットから放出される粒子のみを装置外部に取り出す仕組みである。このため、電気移動度が小さい μm サイズの粒子を測定する場合は移動距離が長いために円筒長が大きくなることが課題である。また、DMAは特定のサイズ・帯電量の粒子のみを装置外部に取り出して検出するため、クリーンルーム中に存在する極低濃度の粒子の計測には適していない。

そこで、我々は低濃度の気中浮遊粒子を直接可視化することによって粒子の粒径と帯電量を計測するシステムを考案した。考案した計測システムはエアロゾル導入部及び撮影セルを基本構造とする。ここで、粒子の挙動は、レーザ光を撮影セル内に照射し粒子から発せられる散乱光をCCDカメラで撮影し、PCに記録することで測定し

(正会員) 遠藤 哲夫*

(正会員) 藤岡 友美**

(会員外) 瀬戸 章文***

(会員外) 大谷 吉生***

た。ただし、撮影セル内を気流通流状態のまま可視化を行うとDMAと同様にセルサイズの問題が考えられるため、本システムでは撮影セル内の気流を静止させる機構を追加した。また、撮影セル壁面には平板電極を設け、電圧を印加することで、セル内に終末沈降方向に平行な電界を形成する。これにより撮影セル内での帯電した粒子は、終末沈降速度と電気移動度によって挙動が決定する。ここで、粒径 D_p [m]の帯電粒子を電界強度 E [V/m]内に導入すると、クーロン力を受けて式(1)に示す電気移動度 v_{et} で逆極性の電極側へ移動する。

$$v_{et} = \frac{C_c(n_p e)E}{3\pi\mu \cdot D_p} \text{ [m/sec]}$$

ここで、 C_c はカニンガムの補正係数（気体の平均自由行程と粒径 D_p [m]から算出される定数）、 λ [Pa·s]はセル内気体の粘度、 $e=1.6 \times 10^{-19}$ [C]を表している。したがって、帯電量 n_p は電界中の移動速度 v_{et} 撮影が正確に得られれば算出できる。

3. 実験結果

図1に示す形状の撮影セルを用いて本計測システムの測定精度について実験的な検討を行った。

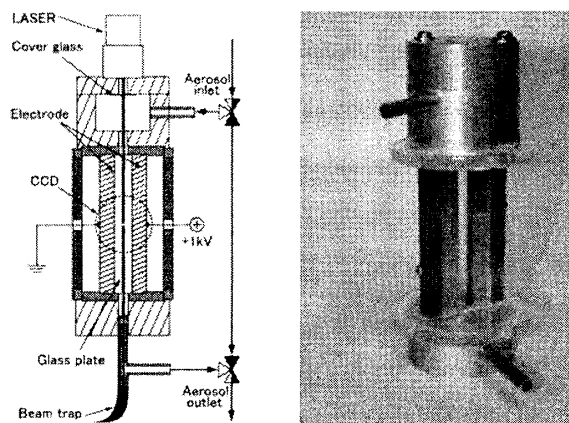


図1 実験用撮影セルの形状

① 粒径及び帯電量が既知の粒子による実験

本計測システムの基本性能を確認するため、粒径および帯電量が既知の試験粒子による実験検討を行った。試験粒子はネブライザで発生させた粒径 $0.3 \sim 1.0 \mu\text{m}$ のPSL (Polystyrene Latex) 粒子とし、 ^{241}Am で中和した後に

Development on the measurement systems of electrical charge of particles.

Vol.2 The system structure and based experiments.

Tetsuo ENDO, Tomomi FUJIOKA, Takefumi SETO and Yoshio OTANI

DMA で分級し、価数が-3～+3 価の帯電量の単分散試験粒子を作成した。この試験粒子をサンプル導入部から本システム内に導入し、粒子の移動速度を測定した。実験結果を図 2 に示す。縦軸は焦点位置での電界強度を 10^5 [V/m] に設定した場合の粒子の移動速度、横軸は移動度から算出した帯電量を表している。その結果、測定した粒子の移動度と、帯電量及び粒径を既知とし式 (1) から導出した移動速度とは概ね一致した。

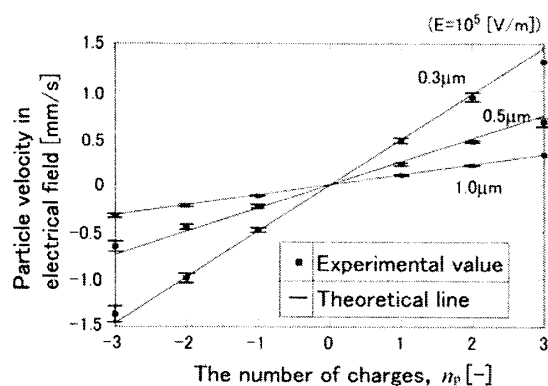


図 2 実験結果 (粒径及び帯電量: 既知)

② 粒径が既知で、帯電量が未知の粒子による実験

本計測システムの実用性を検証するため、粒径は既知であるが価数に分布をもつ粒子帯電量の計測を行った。試験粒子は、粒径: $0.3 \mu\text{m}$ 、 $0.5 \mu\text{m}$ 、 $1.0 \mu\text{m}$ の PSL 粒子とし、 ^{241}Am で中和することで平衡帯電状態とした。

実験①と同様の方法によって得られた実験結果を図 3 に示す。実験では粒径 $1 \mu\text{m}$ において最大-10 価帯電まで測定することができた。また、帯電量が既知の場合と同様に測定した粒子の移動度と帯電量及び粒径を既知とし式 (1) から導出した移動速度と概ね一致した。この結果、本計測システムは価数に分布があっても粒径が既知であれば、それぞれの粒子の帯電量を推測することができることが明らかになった。

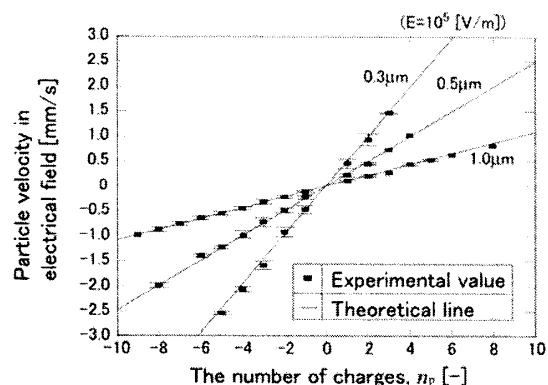


図 3 実験結果 (粒径: 既知、帯電量: 未知)

4. 粒子の帯電量計測システム

サンプル導入部、エア静止ユニット、送光レーザ、撮影セル、CCD カメラ、制御用 PC によって構成した計測システムの概観を図 4 示す。また、図 4 (c) に本システムで撮影した大気塵を示す。このように、本システムでは粒子を明瞭に可視化することが可能であり、粒径および帯電量が未知の条件においての価数分布が取得できることが明らかになっている。

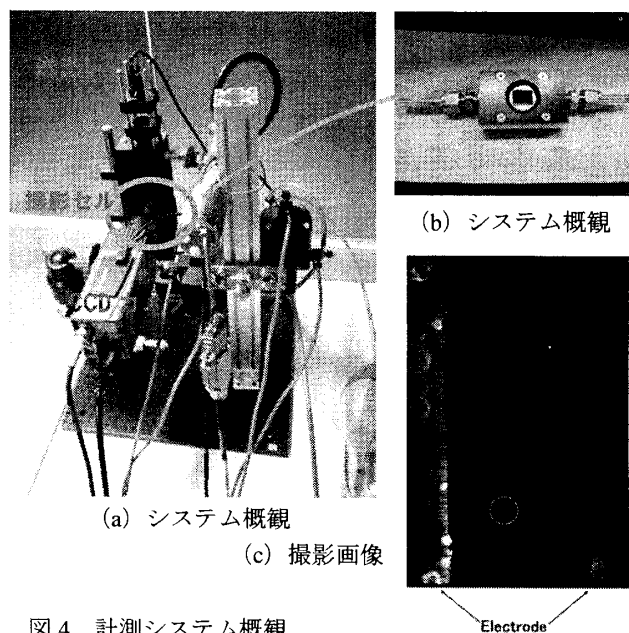


図 4 計測システム概観

5. まとめ

DMA 内の粒子の移動度を可視化することで粒子の粒径と帯電量を計測するシステムを考案した。本報では、計測システムの基本原理と粒子の移動度計測に関する基礎実験の結果を示した。実験では、 ^{241}Am で中和し、DMA で分級することで得た粒径が既知の粒子を用いて、帯電量が既知の条件と未知の条件で計測システムの性能を検証し、実験値と理論値は概ね一致した。また、実験結果に基づいて開発した機能一体型の計測システムの構成を紹介した。今後は一体型計測システムによってクリーンルーム内を浮遊する粒子の帯電量をデータベース化し、パーティクル汚染対策や挙動シミュレーションに活用していく予定である。

参考文献

- (1) 吉村、伊藤、瀬戸、大谷、遠藤、浦野: クリーンルーム内発塵粒子の粒径・帯電量同時計測装置の開発—可視化による帯電量の測定—、第 26 回エアロゾル科学・技術研究討論会、日本エアロゾル学会、2009.8.

* 大成建設 (株) 技術センター 工博

** 大成建設 (株) 技術センター

*** 金沢大学理工研究域 工博

* Technology Center, Taisei Corp., Dr. ENG

** Technology Center, Taisei Corp.,

*** Natural Science and Technology, Kanazawa University, Dr. ENG