

論 文

微粒化静電粉体塗装システムの開発と その粒子荷電特性

松井 満^{*1}, 高橋 正^{**}, 伊藤 孜^{***}

(2003年9月11日受付; 2004年1月23日受理)

A Development of Atomized Powder Coating System and its Charging Characteristics of Powder Particles

Mitsuru MATSUI^{*1}, Takashi TAKAHASHI^{**} and Tsutomu ITO^{***}

(Received September 11, 2003; Accepted January 23, 2004)

This paper describes a novel system of powder coating, named as atomized powder coating system, in which a newly designed powder atomizing unit, a powder mass flow rate controller and a powder conveying air flow rate controller have been installed. Generally, paint powder forms rough and large particles of agglomerate powder in the process of handling and storage, and such coarse particles cause to degrade the quality of coating film. The atomizing unit can break the agglomerate powder particles into fine pieces by a high speed sharing air flow spouted from a thin nozzle, that brings particle size distribution of the powder back to the original one given at the point of production. Atomizing the powder into discrete particles has allowed taking an accurate measurement of mass flow rate of powder, so that full automatic control of the system has been realized. Electric charging of the atomized powder particle has been extremely improved, and charge to mass ratio (Q/M) of a sample powder of an epoxy resin sprayed through a typical corona gun has been obtained as 0.35-0.15 $\mu\text{C/g}$ under spraying 50-200 grams of powder per minute.

1. はじめに

大気汚染の原因物質として, SO_x , NO_x , CO_2 , あるいは煤煙など多くの物質が指摘され, それらの発生防止と大気中への排出削減のために多大な努力が払われてきた。大気汚染原因物質の一種である揮発性炭化水素 (Volatile Organic Compound: VOC) は NO_x と共に, 低層大気中で光化学反応によって光化学オキシダントを生成し, 光化学スモッグの発生源となる。VOCは, 主として, 塗料用有機溶剤の揮散, お

よび, 自動車の排気ガスとして大気中へ排出されている。近年, 排出ガス規制強化によってエンジンの改良が進んだ結果, 自動車からの VOC 排出量は激減し, 塗装工場からの排出割合が増加傾向にあると推測され, 有機溶剤の使用削減が強く求められている¹⁾。

この対応策として, 水性塗料とともに, 粉体塗料の実ラインにおける適用もかなり進展している。特に, 粉体塗料は非塗着塗料の回収再利用が可能であり, また, 排水処理も不要なので, 省資源の立場からも粉体塗料の適用が強力に推進されている。しかし, 完全な無公害技術と言われる粉体塗装にも, 塗膜の品質改善 (特に, 膜厚不均一, 薄膜塗装, 平滑性などの美観), 塗着効率向上, 運転操作の自動制御など, 解決しなければならない問題が多い。

粉体塗装に関する近年の研究は Bailey²⁾によってまとめられているように, 塗装ガンの改良から塗料粒子の飛翔軌跡シミュレーションにいたるまで, 広範な研究が行われている。しかし, 塗膜品質に影響する重要な因子と考えられるガン吐出粉体クラウド中の粉体粒子の形状・粒径等に関する情報は得られていない。均質かつ均一膜厚で平滑な塗膜を得るために

キーワード: 粉体静電塗装, 微粒化, 粒度分布, 質量流量センサ, 電荷量対質量比

* Zao ES Lab. (989-0916 宮城県蔵王町遠刈田温泉上ノ原3-320)

Zao Electrostatic System Laboratory, 3-320, Uenohara, Tohgatta-onsen, Zao-cho, Miyagi 989-0916, Japan

** トップ工業株式会社 (350-0827 埼玉県川越市寺山167)
Top Industries, Co., 167, Terayama, Kawagoe-shi, Saitama 350-0827, Japan

*** I. P. D. 株式会社 (180-0001 東京都武蔵野市吉祥寺北町4-5-11)

I. P. D., Inc., 4-5-11, Kichijohji-kitamachi, Musashino-shi, Tokyo 180-0001, Japan

¹ matsuim@crest.ocn.ne.jp

は、粒径の揃った粒子からなる、平坦で均一な粉体付着層を被塗物上に形成させることが、最も基本的要件である。

本研究では、まず、ガンから吐出された粉体粒子の粒径に着目し、実稼働状態と同一条件下で、種々のガンと塗料粉体を使用して、ガンヘッド近傍における粉体クラウド中の粉体粒子の粒度分布を測定した。その結果、観測例すべてにおいて、粉体製造時測定の粒度分布図には存在しない粗大粒子が多量に存在することが確認された。これら粗大粒子では、荷電量不足を来たし、上記問題点の主原因となっているものと推測される。そこで、これら粗大粒子の解碎、再分散に着手した。

本論文では、粗大粒子解碎・再分散の方法（本論文では、この操作を微粒化と呼ぶ）の概略と、微粒化によって実現可能となった粉体質量流量センサを備えた塗装システム全体の構成、および、微粒化の効果を評価するために測定したガン吐出粉体粒子の Q/M 値について報告する。併せて、実稼働試験の結果を述べ、微粒化の効果を中心に報告する。微粒化装置の詳細および粉体質量流量センサの理論解析の詳細については、別に報告する。

2. ガン吐出粉体の粒度分布測定

2.1 測定方法

本研究で開発した微粒化装置および質量流量センサを用いた粉体塗装システム（微粒化粉体塗装システムと名付け、以下では、微粒化システムと呼ぶ）は独自のシステムであり、これらは在来の粉体塗装システム（以下では、在来型システムと呼ぶ）に接続して使用することも可能である。そこで、両システムの比較を容易にするため、両者を同一条件下で試験することにし、可能な限り、ホッパー、塗装ガンおよび高電圧電源は同一のもの、すなわち、在来型システムのものを使用した。いずれも商用実機である。

粉体クラウド中の粒度分布測定方法の概要を図 1 に示す。同一のホッパーにそれぞれのシステムの粉体吸引管を挿入し、インジェクタからガンへの接続は同一ホース（長さ 12m）を切り替えて、同一ガンを使用した。接続ホースの搬送時間は、通常、1 秒またはそれ以下であり、搬送中の再凝集は無視できることは別途確認した。

粒度分布測定には、オンラインレーザ粒度分析装置³⁾（日機装、乾式粒度分析計 SPR7340）を使用した。同装置のレーザビームが塗装ガンヘッドから約 50 mm の位置を通過するように配置を調整し、ガンから吐出された粉体クラウドが瞬時レーザビームを横切るように、クラウドの流路を制御した。

実験では、現場で広く使用されている標準的なコロナガン

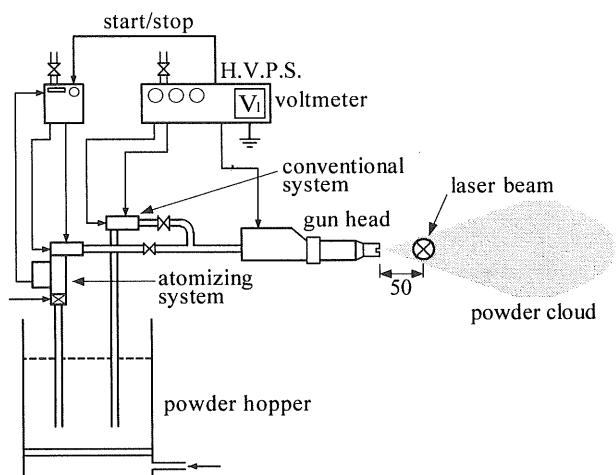


図 1 粉体クラウド中の粒度分布測定方法

Fig. 1 Experimental setup for particle size distribution measurement of powder cloud.

を選び、使用量の多い種々の粉体塗料を同一吐出量で噴霧して、飛行粉体クラウド中の粒度分布を測定した。

2.2 測定結果

測定結果の一例を図 2 に示す。同図(a)は在来型システムで得られた粉体クラウドの粒度分布、(b)は微粒化システムによるクラウドの粒度分布である。

在来型システムで行った 25 件のすべての観測例において、(a)の 100~800 μm の範囲に見られる如く、粗大粒子が重量比 10~30% 程度存在することが確認された。これらの粗大粒子は、粉体製造時測定の粒度分布図には存在しない。上述のように、インジェクタからガンまで粉体を搬送するホース中では粉体の凝集は発生しないので、粗大粒子は粉体塗料の輸送・貯蔵時のハンドリングによって凝集したものと考えられる。

本研究の微粒化システムで発生させた粉体クラウド中には、同図(b)のように、このような凝集粗大粒子は存在せず、粒度分布は粉体製造時の分布 ($d_{50}=32 \mu\text{m}$) に一致する。

ガンから被塗物に向かって飛行する塗料粉体クラウドの粒度分布については、今迄に報告は見られない。従来、塗料タンクの中で、高抵抗微粒子である粉体塗料の凝集が起きていることは知られていたが、塗料をガンに搬送する過程で必ず通過するインジェクタにおいて、高压高速空気によって解碎されるものとして、ガン吐出クラウドにおいて問題にされるることはなかった。

図 2(a)の例では、100 μm 以上の粗大粒子の平均粒径は約 400 μm となり、製造時の平均粒径の約 10 倍になっている。したがって、ガンヘッドのコロナ放電による荷電において、

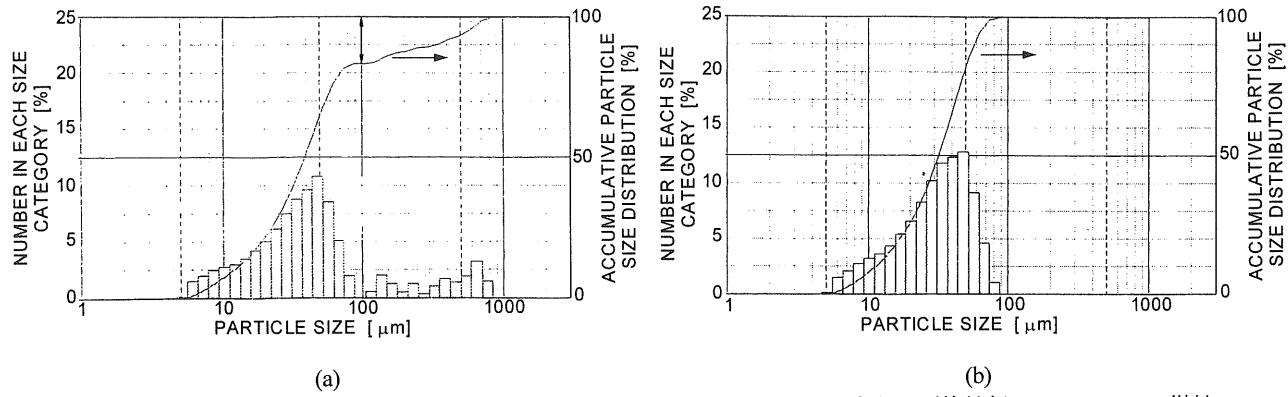


図2 ガン吐出粉体クラウド中の粒度分布曲線. (a)在来型システムによるクラウド, 平均粒径 $d_{50}=39 \mu\text{m}$, (b)微粒化システムによるクラウド, $d_{50}=32 \mu\text{m}$.

Fig. 2 Particle size distribution in the powder cloud sprayed from a gun, (a) sprayed with a conventional coating system, mean diameter of $d_{50}=39 \mu\text{m}$, (b) sprayed with the present system ($d_{50}=32 \mu\text{m}$).

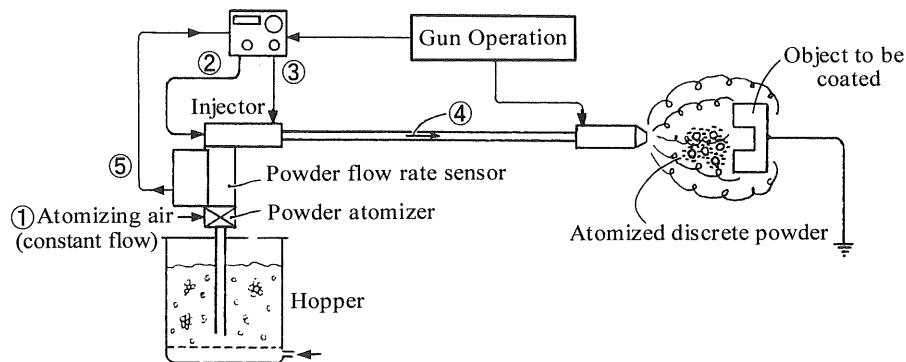


図3 微粒化粉体塗装システムの概要

Fig. 3 Schematic diagram of atomized powder coating system. ① atomizing air with constant flow rate, ② primary air flow, ③ secondary air flow, ④ conveying air flow, ⑤ mass flow rate signal.

これら粗大粒子が獲得できる電荷量は、比電荷量 Q/M に換算して、製造時の平均粒径粒子の 1/10 程度になっていることが予想される。これが、塗膜品質低下等の問題点の主原因となっているものと推測される。

3. 微粒化粉体塗装システム

3.1 システムの概要

開発した微粒化粉体塗装システムの構成を図 3 に示す。微粒化装置 (powder atomizer) および粉体質量流量センサの設置、インジェクタの制御方法が在来型システムとは大きく異なる。粉体塗料はメインエア② (primary air) によってインジェクタに吸引される。流動層ホッパーから吸い上げられた粉体は、凝集によって生じた多量の集合粗大粒子を含んでいる。そこで、微粒化装置において、薄いギャップから管軸に向かって噴出する定量高速ジェット剪断流①によって、含まれている粗大粒子が解碎・再分散され、微粒化単独粒子群となって粉体質量流量センサを通過し加速されて、インジェクタに導かれる。メインエアの流量によって粉体の吸引量、す

なわち、ガンからの吐出量が決まるので、粉体質量流量センサの出力信号⑤によってメインエア流量をフィードバック制御する。

粉体をガンから被塗物まで運搬する搬送空気④の流量は、ガンと被塗物との距離、被塗物の形状等に関係するうえ、粉体の入り込み・つき廻りだけでなく、塗膜厚分布均一化にとっても極めて重要であり、一定に保つ必要がある。そこで、粉体吸引量を制御するために生じるインジェクタのメインエアの変化を補うように、サブエア③ (secondary air) を増減させて、搬送空気流量を一定値に保つ。このような制御によって、一定搬送空気量において、粉体吐出量を搬送空気量とは独立に、かつ、広範囲に変化させることを可能とした。

3.2 粉体質量流量の自動制御

粉体質量流量センサの概要を図 4 に示す。微粒化空気流①によって微粒化された粉体粒子が、粉体加速管内で高速の空気流と同一速度まで加速された時に、粉体加速管に生じる圧力差を電子式圧力センサで電気信号に変換し、制御信号を得る。

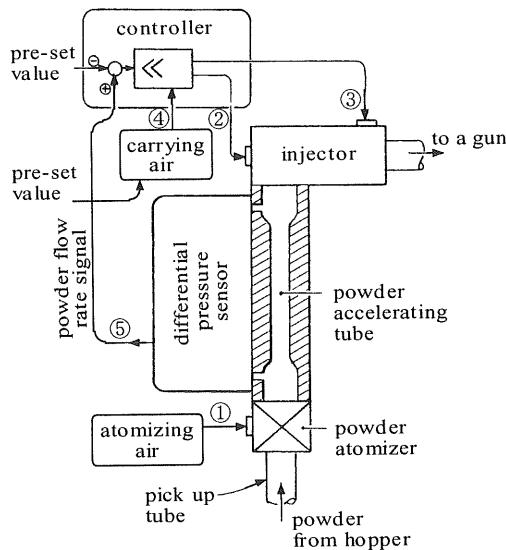


図4 粉体質量流量センサと制御の概要
Fig. 4 Injector with atomizing sensor and configuration of powder accelerating tube.

垂直に設置した質量流量計測管（すなわち、粉体加速管。以下では、計測管と略記）内には、一定流量の少量の計測空気（すなわち、微粒化空気流。粉体に伴ってホッパーから吸い上げられる流動化空気は、ごく少量なので無視できる）が流されており、インジェクタの背圧に応じて、ホッパー内の流動化した粉体が、所定量だけ吸い上げられる。このとき、計測管路の入口までは、粉体は流動化状態で、かつ、低速で上昇するので、計測管路入口における粉体の速度は実質上零とみなすことができる。この粉体が計測管出口で計測空気の流速に等しい速度まで加速されるように、計測管入口で強力な乱流により粉体を十分分散させる。さらに、粉体を含む計測空気が計測管路全長にわたって乱流を形成し、均一な加速が実現するように、設計条件が設定されている。このようにすることによって、粉体の質量流量と計測管路で発生する差圧との間に、安定な比例関係を成立させることができる。

上記の条件が満たされていれば、単位時間 Δt の間に、計測管路に入ってくる粉体は速度零とみなせるので、計測空気によって加速され、計測空気と同じ速度 V_a で計測管路を出てゆく粉体の運動エネルギー E は式(1)となる。

$$E = \frac{1}{2} m V_a^2 \quad (1)$$

ここで、 m は粉体の質量。

一方、単位時間 Δt の間に、計測管路内の気柱は $\Delta t \cdot V_a$ だけ変位し、このとき気柱に作用する力は、気柱の断面積 A と計測管路入口・出口における圧力 P_1 と P_2 の差との積 $(P_1 - P_2)$ で表される。したがって、運動エネルギーの変化量 ΔE

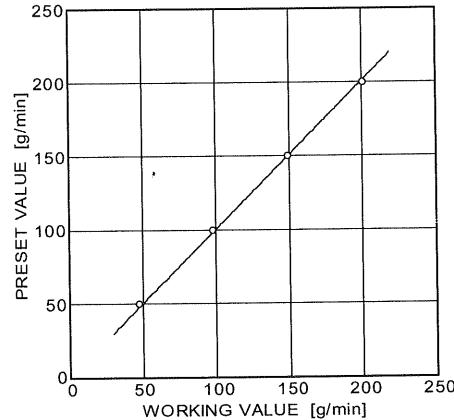


図5 粉体質量流量センサ・コントローラの制御特性
Fig. 5 Calibration of powder mass flow rate sensor and controller.

表1 塗料粉体試料の特性

Table 1 Properties of sample powders.

Sample	Base resin	Bulk density [g/cm ³]	Diameter [μm]	Coefficient <i>a</i>
1	Epoxy	0.60*	31	0.9753
2	Polyester	0.59	15	1.0007
3	Acrylic	0.42**	27	0.9960
4	Polyester	0.70	35	0.9913
5	Polyester	0.59	25	1.0087

True density: *1.65, **1.16

Mean value = 0.9944

には、次式の関係が成立する。

$$\Delta E = \frac{1}{2} m V_a^2 = A(P_1 - P_2) \Delta t V_a \quad (2)$$

(2)式を整理すると

$$\frac{m}{\Delta t} = \text{質量流量} = \frac{2A}{V_a}(P_1 - P_2) \quad (3)$$

が得られる。この関係式は、計測管路内を流れる粉体の質量流量は計測管路入口と出口の圧力差に比例することを示す。

差圧センサの出力信号⑤を設定値と比較し、その差を增幅し、インジェクタのメインエア②とサブエア③の比率を調整することによって、粉体質量流量がフィードバック・コントロールされる

3.3 粉体質量流量の制御特性

粉体質量流量センサ・コントローラの制御特性、すなわち、検量曲線を図5に示す。実験は、粉体搬送空気量を一定値に設定し、粉体供給量を所定の値に設定して装置を運転し、図3のガン接続ホース先端に帆布製バグフィルタを装着して、一定時間（1分間）に捕集される粉体量を秤量し、検量曲線を求めた。粉体供給量は塗装現場で通常運転されている供給

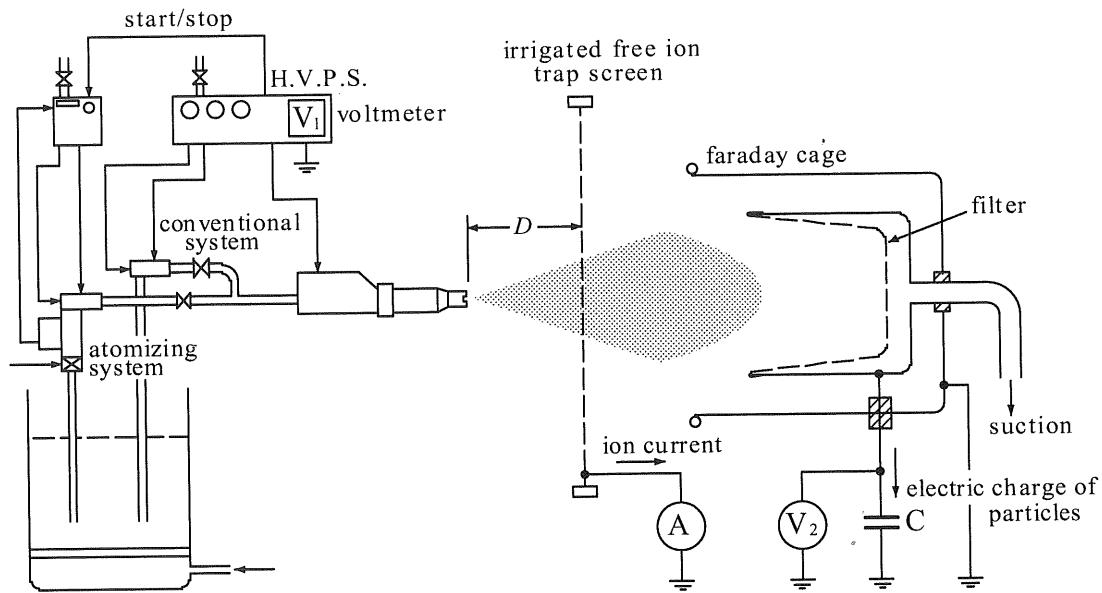
図6 ガン吐出粉体の Q/M 測定方法の概要

Fig. 6 Measurement of charge to mass ratio, Q/M , of powder particles sprayed from a gun. H.V.P.S.: High voltage power supply, A: Ammeter, V_1 : Voltmeter, V_2 : Electrometer, C: Capacitor for accumulating the charge of powder particles, $C=1.90$ or $3.81 \mu F$.

量をカバーするように変化させた。

図5の検量曲線は表1に示した物性値の異なる5種の粉体塗料の実測値を平均したものである。粉体供給量の設定値と実測値は非常によく一致していることが確認できる。表中の coefficient a は各粉体の実測値を1次式 $y = ax$ で近似した場合の比例係数 a を示す。これら5種の粉体での設定値と実測値の差異は最大2.5%であり、粉体塗装機用質量流量センサ・コントローラとして十分実用に耐えうる特性である。表中の5種を含む約30種の汎用性の高い粉体塗料で検量した結果、平均粒径が $35\mu m$ 以下であれば、検量曲線は実験誤差の範囲で一致することが確認できた。

このように、粉体を微粒化することによって、粒径、比重などの粉体特性の影響をほとんど受けない質量流量センサ・コントローラを実用化することができた。

3.4 その他の特徴

通常、粉体塗装の色替作業は煩雑であるが、本システムは構成ユニットの構造が簡単なので、分解清掃あるいは補助装置の必要もなく、極めて簡単に色替えができる、自動化可能である。

本システムは既存のすべての塗装システムと連結可能である。トリボガンを接続した場合には、吐出粉体の帶電量増加が確認できた。また、簡単な部品を付加することによって、バルク供給型ホッパーへの接続も容易である。

4. 微粒化粉体の荷電特性

4.1 測定方法

塗料粉体の帶電量は、良質な塗膜を能率よく得るために最も重要なパラメータである。被塗物表面に平坦で緻密、かつ、均一厚さの粉体層を形成させるためには、ガンから吐出された個々の粒子は一様な値に帶電し、かつ、高い値の電荷量を保持している必要がある。ガンから吐出された粉体クラウド中の粒子の帶電状態は、粉体粒子を捕集して、その電荷量対質量比 Q/M を求めることによって明らかにできる。 Q/M 値は、ガントップのコロナ荷電部分の性能だけでなく、ホッパーからガンに至る粉体供給・搬送部分を含む、塗装システムの根幹部分の性能を表す指標として重要視される。ここでは、微粒化の効果を明らかにすることを目的に、 Q/M 値の測定実験を行った。

測定方法の概要を図6に示す。同一流動層ホッパーに在来システムおよび微粒化システムの粉体吸引管を挿入し、各システムのインジェクタ出口にバルブを設けて1台のガンに接続した。ガンは代表的なコロナガンを使用した。ガンに印加するコロナ放電用高電圧電源および電圧計は在来システム付属のものを用い、実験条件を統一するように配慮した。

ガンから噴出させた粉体クラウドを捕集するために、吸引ファラデーケージを使用した。ファラデーケージの外筒は、直径300mm、深さ320mmである。内筒は、直径200mm、深

さ 200mm であり、内筒開口部は外筒開口部より 70mm 奥に位置するように調整した。また、内筒底部中央に円孔を設け、吸引のための絶縁性パイプを取り付けた。さらに、内筒には、濾布製袋を装着し、粉体の捕集および重量秤量の便を図った。

帶電粉体の捕集に伴って上昇する内筒電位を測定するために、電位計 V_2 (Keithley, 602 Electrometer を電圧計形に使用) を接続した。ファラデーケージ単独の静電容量は非常に小さいので、付加容量 C として、 $1.90\mu\text{F}$ または $3.81\mu\text{F}$ のフィルム・コンデンサを接続した。ファラデーケージの外筒は接地した。

ガンのコロナ電極から放出されるイオンの大部分は粉体に付着することなく、フリーイオンとして飛来する。フリーイオンのファラデーケージ進入を防ぐために、フリーイオン捕集用灌水格子電極^{4,5)}をファラデーケージ前方約 90mm の位置に設置した。同電極の有効面積は、幅 480mm、高さ 550 mm である。格子線に付着した帶電粉体からの逆電離を防止するために、流量 1.35 l/min で灌水した。捕集されるイオン電流を監視するために、電流計 A (Keithley, 602 Electrometer を電流計形に使用) を接続した。電流計 A および電圧計 V_2 を記録計に接続し、時間的変化を記録した。

実験は、ガンからの粉体吐出量を所定の値に設定した後、粉体を約 10 秒間噴射して電位計の指示を読みとった。その後、濾布袋を取りはずして、捕集粉体の重量を電子秤で計測し、 Q/M を算出した。

実験中の温度は 19°C (室温)、湿度は 38%RH であった。

4.2 測定結果

測定結果を図 7 に示す。使用した粉体はエポキシ樹脂系粉体塗料 (平均粒径 $D_{50}=34.3\mu\text{m}$) である。搬送空気量を 80 l/min に設定し、ガン印加電圧を 80kV とした。ガンと灌水格子電極間の距離 D を 150mm とした。

実験した粉体吐出量全域にわたって、微粒化システムの方が大きな Q/M 値を示し、特に、吐出量の多い領域で、在来システムとの間に大きな差異が認められる。 Q/M 値の差異は、凝集粗大粒子が微粒化によって単独粒子に解碎された結果、各粒子がむらなく荷電されたためと考えられる。上述のように、本実験では、両システムの実験条件を統一してあるので、この Q/M 値の増大は、微粒化機構と、微粒化粉体の質量流量を一定に保ちつつ均一濃度に分散してガンへ送り込む、制御・搬送システムによってもたらされていると見ることができる。

粉体吐出量の増加に従って、両曲線共に Q/M 値は減少する。特に、在来システムでは、急激に減少するが、微粒化システムでは、直線的に近い緩やかな減少を示している。粉体吐出

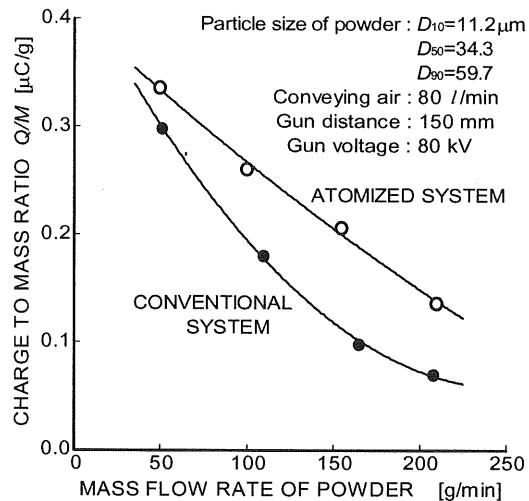


図 7 ガン吐出粉体の帯電量 (Q/M) と吐出量 (粉体質量流量) との関係

Fig. 7 Relationship between charge to mass ratio of powder particles sprayed from a corona gun and mass flow rate of powder.

量の増加は、コロナ放電電極近傍のイオン化領域内の粒子密度を増加させ、イオンと粉体粒子の衝突機会を減少させる。その結果、粒子の帯電量が減少すると考えられる。

絶縁性粒子が保持しうる限界帯電量⁶⁾は、その形状や誘電率に依存する。粒子の比誘電率を 2.7 と仮定すると、本実験に使用した粉体粒子の平均粒径と等しい粒径 $34\mu\text{m}$ の球形粒子では、限界帯電時の比電荷はおよそ $Q/M = 1.75 \mu\text{C/g}$ と推算できる。なお、粒子の密度は $1.5 \times 10^3 [\text{kg}/\text{m}^3]$ ⁷⁾ とした。吐出量 50 g/min 時に微粒化システムで得られた実験値 $Q/M = 0.34 \mu\text{C/g}$ は、限界帯電時 Q/M 値の約 20 % と見積もられる。

5. 実ライン稼働試験の結果

約 200 セットの微粒化システムを使用して、実ラインで稼働試験を行った。その結果、主な効果として、以下の事項を確認できた。

- (i) 粉体の微粒化によって、粉体の帯電量が増加した結果、塗着効率が 10~20% 向上した。
- (ii) 粉体定量供給が実現したことにより、塗料使用量の 10~20% 節減が可能になった。
- (iii) 微粒化と搬送空気制御によって、被塗物に最適な粉体クラウドを安定に形成可能となった。その結果、入り込み・つき廻り性が向上し、薄膜・膜厚均一分布塗装が実現した。また、塗膜の平滑性が増し、模様塗装における模様発現が安定化した。

6. まとめ

ガンから被塗物へ飛行する粉体クラウド中の粉体粒子の粒径分布を測定し、凝集によって生じた粗大粒子が多量に含まれていることを明らかにした。

塗料粉体をホッパーから吸い上げた直後に、これら凝集粗大粒子を解碎・再分散して個別粒子に微粒化することによって、コロナガンから噴射される粉体クラウドの帯電量 (Q/M 値) の大幅な増加が達成された。

また、微粒化によって、粉体を少量の空気流で加速可能となり、構造簡単な粉体質量流量センサを実用化できた。その結果、粉体吐出量と搬送空気量を独立に制御可能な粉体定量供給制御システムを実現できた。

これらの効果はいずれも、塗膜品質の向上および塗料使用量の削減と処理時間の短縮、すなわち、コスト削減につな

がり、総合的には、粉体塗装の適用範囲拡大を促し、VOCによる大気汚染の防止および省資源に寄与することができる。

参考文献

- 1) 安藤淳平：地球環境保全と化学技術(2)，化学経済，5月号 (1991)
- 2) A.G Bailey: J. Electrostatics, 45 (1998) 85
- 3) 粉体工学会(編)：粒子径計測技術, p.123, 日刊工業新聞社 (1994)
- 4) J.F. Hughes: *Electrostatic Powder Coating*, p.40, Research Studies Press, London (1984)
- 5) 松井 満, 藤林宏一, 伊藤 孜: 静電気学会講演論文集'02, p.135, 静電気学会 (2002)
- 6) M.M. Pauthenier, M. Moreau Hanot: J. Phys. Radium, Series 7 (1932) 590
- 7) 日本粉体塗装協同組合(編)：粉体塗装技術要覧, 改訂2版, p.21, 塗料報知新聞社 (1999)