

論 文

静電粉体塗装の特性に関する研究（第3報）

摩擦帶電ガンの開発に関する報告

高瀬公宥*, 加固博敬*, 小林信夫*

(1981年1月30日受付)

On the Characteristics of Electrostatic Powder Coating (Part 3)

Development of Tribo-Charging Powder Gun

K. TAKASE,* H. KAKO* and N. KOBAYASHI*

(Received January 30, 1981)

A new type of tribo-charging method for the electrostatic powder spray coating has been developed. The gun, having a tribo-charging nozzle lined with a very thin polytetrafluoroethylene (PTFE) film, enables powders to be charged to a high level to keep the high deposition efficiency and eliminate the defects on the coated surface. Use of vortex-generators and application of high voltage to the gun have also proved to lead to the increase of the deposition efficiency with no increase of surface defects. Such high deposition efficiency as 95% brought by this gun can be compared with that as about 80% by a conventional corona gun.

1. はじめに

前報^{1,2)}においては、静電粉体塗装における塗着効率と粉体帶電量の関係、粉体塗着面の逆電離現象と塗面への流入電荷密度の関係等に関する研究結果を報告した。その中において、現在の粉体塗装方式では、コロナイオンを粉体の帶電に利用する、いわゆるコロナガンを用いた場合においても、粉体粒子の塗装装置各部との摩擦による帶電は無視できないということを明らかにした。

そして、これが塗布される粉体の最終的な帶電量に大きな影響を及ぼしており、その結果、塗装装置を作るに当たっては、粉体と塗装装置の材料固有の性質にかかる帶電列上の位置関係は重要な問題であることも推測できるに至った。一方、塗面品質を確保するうえでは、塗装欠陥を誘起する塗膜面上での逆電離を防ぐことは大切なことであるが、そのためには、逆電離の発生原因となるイオン流を極力少なくする必要がある。

これらの結果から筆者らは、良好な表面品質を得る粉体法としてこの摩擦帶電現象に注目し、帶電過程でイオン流の発生がまったくなく逆電離対策に有利な摩擦帶電

型の塗装ガンの開発を試みた。この開発においては、種々の問題があったなかで、粉体に連続して安定的に高いレベルで帶電させる技術を開発することが最も困難な問題であった。そこで、本報では、この問題解決のために摩擦帶電機構を解析し、その結果から実用的な粉体塗装用の摩擦帶電ガンを開発した経過を報告する。

なお、ここで開発された摩擦帶電ガンは、自動車用部品の塗装ラインで使用されはじめており、従来まで使用されていたコロナイオンを利用したコロナ帶電ガンに比べ、高い品質と塗着効率を得ている。

2. 流路摩擦による帶電

コロナイオンを利用してしたガソ(以下コロナガンと略す)を使用して、粉体塗装を行なうとき、ガソへの印加電流の極性を変えると、塗着効率が大きく変化することがある。図1は、前報で報告した3種のガソにそれぞれ正負の印加電圧を加えた場合の塗着効率を示したものである。A, Bタイプのガソでは、印加電圧の差は小さいが、Cタイプでは30%程度の差があり、決して無視できるような差ではない。

そこで図2において、それぞれのガソのタイプと極性の違いによる帶電量の差を求めた。図から、ポリテトラフルオロエチレン(PTFE)製ガソCでは印加電圧の極性変化による粉体帶電量が著しく変化していることがわかる。

* トヨタ自動車工業株式会社生産技術開発部(471 豊田市トヨタ町1)

Production Engineering Development Department, Toyota Motor Co., Ltd., 1, Toyota-cho, Toyota, 471 Japan

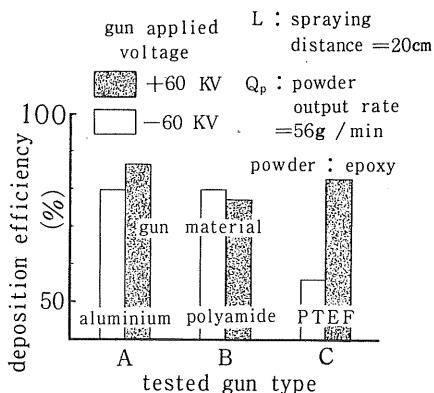


図1 ガン印加電圧の極性を変換した場合に生じる塗着効率の変化の3ガンにおける差

Fig. 1 Difference of deposition efficiency among 3 types of guns.

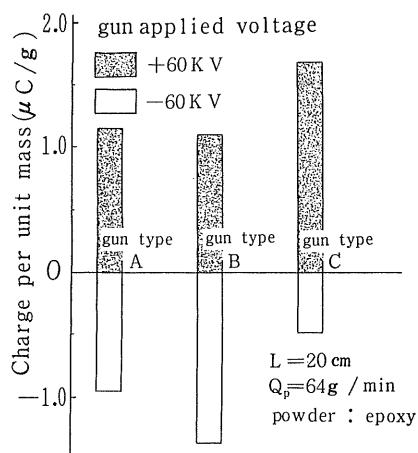


図2 印加電圧の極性を変換したことによる粉体帯電量の変化の3ガンにおける差

Fig. 2 Difference of charge per unit mass caused by the change of polarity of gun applied voltage among 3 types of guns.

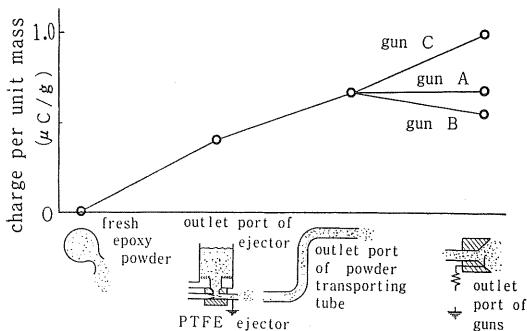


図3 塗装装置各部における粉体の摩擦帶電量

Fig. 3 Change of charge per unit mass of powder caused by tribo-charging in a coating equipment.

一方、前報²⁾で報告したように、一般には粉体帶電量が0.8 μC/g以下になると、塗着効率が急激に低下することがわかっているので、ガンCにおける印加電圧の極性が負の場合、塗着効率が著しく低下した原因はこの帶電量の低下によるものと考えて差しつかえない。また、さらに、この帶電量の変化の原因を詳しく調べるために、実験に用いた粉体塗装装置の粉体流路の各部における帶電量の変化を調べた。結果を図3に示す。

この結果より粉体は主としてエゼクタおよびガンC部、ついで粉体搬送ホースにおいて正の値に帶電されていることがわかる。これは、供試粉体とエゼクタおよびガンCの共通の材質であるPTFE樹脂との帶電列上の位置関係を考慮すると説明がつけられる。つまり、帶電列上PTFEは最負位に位置し供試エポキシ系粉体は上位正側に位置するためこの二つの部分で強力な摩擦帶電が行なわれていると考えられる。したがって、ガンCでは粉体はガン出口部すでに十分高い正の帶電量を有しており、ガンが発生するコロナイオンの極性と粉体の摩擦帶電の極性が一致した場合とそうでない場合では、粉体の帶電量に大きな差が生じることになる。この結果、塗着効率に印加電圧の極性の変化により差が生じたと考えられる。このことはいい換えれば図2および3は粉体と摩擦部の材質の帶電列上の差により、1 μC/g程度の帶電量を粉体に与えることができるこことを示しているといえる。そこでこのような摩擦帶電を積極的に利用すれば、前報で報告した高い塗着効率を得るに十分な粉体の帶電量、すなわち、1.6 μC/g以上を粉体とガン壁面の摩擦により与える可能性があることが予想された。

3. 帯電方法の開発

静電粉体塗装に用いられる粉体スプレイガンには

- 1) ガン部に生じる粉体の付着、脱落により、塗面品質の低下を引き起さないこと、
- 2) 逆電離による塗面欠陥を発生させないこと、つまりガンより直接塗面に到着するイオン量ができる限り少ないこと、
- 3) 塗布した粉体が被塗物搬送過程に受ける振動等の外力により被塗表面より剥離しないこと、
- 4) 高い塗着効率を得られること、つまり、1.6 μC/g以上の高い帶電量を粉体に与えられること、

の4条件が要求されている。

この4条件のうち、1)はガンの形状によるところが多い問題であり、また、2)は摩擦により粉体を帶電させる場合はイオン流の発生がないと考えられるので問題とならない。さらに3)も前報で報告したように塗着効率上必要な帶電量が得られれば、同時に十分な付着力が生ず

るため、問題にならない。したがって、摩擦帶電ガソの開発に当たっては、4)を達成することが最も重要な問題である。

3.1 摩擦方法の決定

粉体を摩擦帶電させるには、粉体粒子を他の物質と何らかの方法で摩擦させる必要がある。しかし、粉体塗装に使用される粉体は未反応樹脂を主成分とすることが多いため、機械的な攪拌を行なうと、粉体粒子が固まり、塗面品質を著しく阻害する場合がある。一方、一般の粉体塗装装置では、粉体粒子は空気に混合され、空気との混合流としてガソへ供給されることが多い。

そこで開発する摩擦帶電ガソは、粉体粒子と摩擦材の擦過は、空気と粉体粒子の混合流がノズルを通過する際に生じるノズル内壁と粉体粒子との高速摩擦を利用するにした。

3.2 テストガソによる予備調査

図4にテストガソの構造を示す。テストガソにおける粉体とのおもな擦過部位であるノズル材質は、実用化の対象となる塗装工程で使用される粉体の材質がエポキシ系およびナイロン系粉体であることを考慮して、帯電列上有利と思われるPTFE樹脂とした。またPTFE樹脂は、粉体用ガソとして有害な粉体粒子の付着の防止に対し効果があることも実用化上都合のよい材料である。なお、本報告の実験に使用したPTFE樹脂の絶縁破壊抵抗は約45kV/mmである。

図5にテストガソによる粉体の帶電量の粉体塗布時間に対する粉体帶電量の変化の調査結果を示す。図5より、テストガソの場合、粉体の帶電量は粉体塗布直後は高い値を示すが、塗布時間の経過とともに急激に低下し、高い粉体帶電量を連續して維持できないことがわかる。したがってこのテストガソでは何らかの工夫を施さないと、連続して安定的に高いレベルで粉体を帶電させられないことがわかった。

3.3 連続高レベル帶電

摩擦による粉体の帶電量が、図5に示したように時間の経過とともに低下する原因を次のように推定した。摩擦帶電現象では、常に同量の正負の電荷が生じるので、粉体が帶電した電荷量に等しく逆極性の電荷量が摩擦材であるノズル内壁に発生している。ここで用いたテストガソでは、構造上ノズル内壁に発生する負の電荷の逃げ道がないため、粉体塗布時間の経過とともにノズル内壁面の電荷量が上昇し、これとともに新しい粉体を摩擦帶電させる能力をノズル内壁面は失っていく。

以上の推定を確かめるために、図6に示す構造の金属性のノズルを有する改良型ガソIを試作した。改良型ガソIではノズルが導体でできているため、粉体粒子との

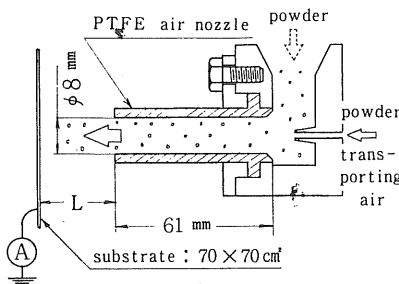


図4 試験用ガソ

Fig. 4 Test gun.

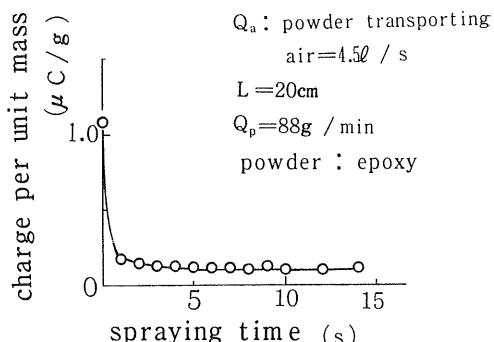


図5 連続吐出時の粉体帶電量の変化

Fig. 5 Decrease of charge per unit mass as a function of spraying time.

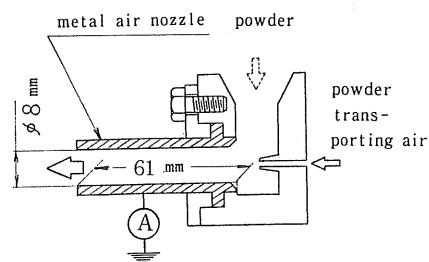


図6 改良型試験ガソ I

Fig. 6 Modified gun I.

摩擦により発生する電荷が大地へ自由に移動することができるとして考えられる。

図7に金属ノズルを使用した改良型ガソIにおける粉体帶電量の塗布時間に対する変化の測定結果を示す。図7より金属ノズルを使用した場合は塗布時間の経過による粉体帶電量の低下がないことがわかる。この結果から前記推定はほぼ正しいといえる。

金属性ノズルでは、得られる粉体の帶電量がきわめて小さい。一方絶縁材であるPTFE樹脂では連続して高い粉体帶電量を得ることが困難である。このジレンマを解決する方法として、接地した金属ノズル内壁をPTFE

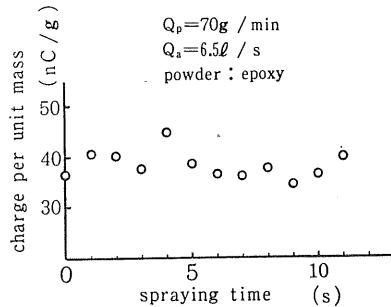


図 7 改良型試験ガン I における粉体帶電量の変化
Fig. 7 Charge per unit mass as a function of spraying time.

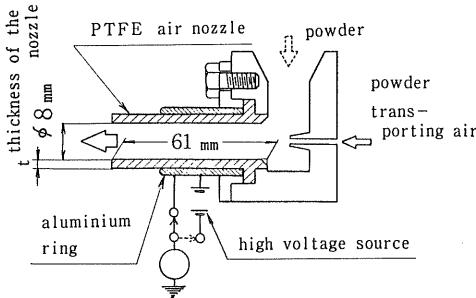


図 8 改良型試験ガン II
Fig. 8 Modified gun II.

樹脂でライニングし、ライニング層の厚さを薄くすることにより、ライニング内壁面と金属面間の電気抵抗を下げる試みた。

図 8 に、この考え方を確かめるために試作した改良型ガン II の構造を示す。改良型ガン II では、PTFE 樹脂製ノズルは接地された金属製円筒内に圧入されている。

図 9 に改良型ガン II において PTFE ノズルの厚さを変化させた場合に得られる粉体の摩擦帶電量の測定結果を示す。また、図 10 には PTFE 樹脂製ノズルの厚さを極薄とした場合の粉体帶電量と粉体塗布経過時間の関係を示す。

図 9 および図 10 より高絶縁樹脂である PTFE 製のノズルを使用してもノズルの厚さが十分薄ければ高塗着効率を得るに十分な帶電量を連続して粉体に与えられることがわかった。また、摩擦材である PTFE 製ノズルの厚さを十分に薄くすることは、摩擦材表面とアースされた金属との間の電気抵抗を下げる所以である。ノズル部材である高抵抗樹脂 PTFE 内に導電性微粒子を混入することは、摩擦材の厚さを薄くすることと同じ効果を得ることができると考えられる。

図 11 は PTFE 樹脂に導電性粒子(カーボン微粒子)を混入(30 wt%)して樹脂の電気抵抗を低下させること

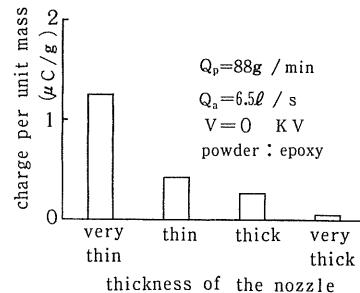


図 9 粉体帶電量と PTFE ノズル壁の厚さの関係
Fig. 9 Charge per unit mass vs. thickness of the nozzle.

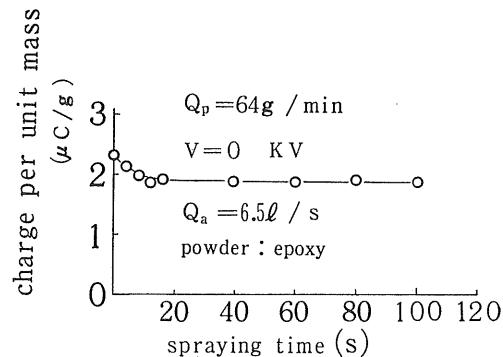


図 10 連続吐出時の粉体帶電量の変化
Fig. 10 Charge per unit mass as a function of spraying time.

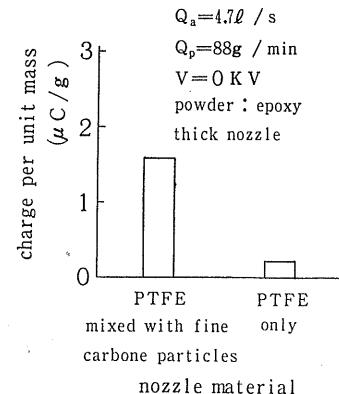


図 11 PTFE への炭素粒子混入による粉体帶電量の増加
Fig. 11 Effects of mixture of carbon particles to charge per unit mass.

(約 1/30 になる)が連続して得られる粉体帶電量に与える効果を改良型ガン II で調査した結果である。図 11 からも PTFE 樹脂ノズルの壁厚を薄くした場合と同様に、ノズル部材の電気抵抗を低下させ、蓄積される電荷を大地へ逃がすことは、粉体を連続して高いレベルで摩擦帶

電を帯びるうえで有効であることがわかる。

4. 電荷の流出

3.に示したように粉体を連続して帯電させるためには、粉体粒子との摩擦により発生、蓄積される摩擦材表面の電荷を速やかに逃がすことが必要である。また、この目的を達成させる手段としては、接地された金属リングに圧入される絶縁樹脂製ノズルの壁厚を薄くする、あるいは、樹脂内に導電性微粒子を混入することが有効な方法であるとわかった。

このノズル内壁上に蓄積される電荷を逃がす方法において、電荷がノズル内壁より大地へ移動するメカニズムは、

- 1) ノズル内壁を通しての、微小な局部的放電により、間欠的に移動する、
 - 2) ノズル内壁の抵抗により決まる微小な連続的な電流の形で移動する、
- のいずれかであると考えられる。この点を明らかにするために、改良型ガソIIのノズル内壁面に蓄積される電荷の放電特性を変化させた場合の、粉体の帶電量の変化を調査した。

図12にノズル内壁の放電特性を変化させ、これに対応して得られる粉体帶電量の関係を示す。テスト1は、ノズルが圧入される接地金属リングの内面をペーパラップし、内面を平滑にすることによりノズル内壁面と金属リング間の放電電圧を高くした場合のテストである。テスト2は、テスト1とは逆に接地金属リング内面の面粗さをJIS 25Z程度とし、ノズル内壁面と金属リング間の放電電圧を低くした場合のテストである。また、テスト3は金属リングは用いずに、接地したピン状放電電極をノズル内に挿入し、ピン電極とノズル内壁面との放電を容易にした場合のテストである。

図12に示すようにノズル内壁面に蓄積された電荷が放電により大地への移動が容易になるととともに、粉体の帶電量が増加していることがわかる。このことから絶縁材製のノズル内壁に蓄積された電荷は大地へ移動するに際しては最初の予想どおり間欠的な放電によっていると考えて間違いないと思われる。

5. 帯電量増加法

前項においては粉体粒子を連続して摩擦帶電させる方法とその機構を明らかにした。この結果を有効に生かし、さらに粉体帶電量を大にする方法についての検討結果を報告する。

5.1 ガンへの電圧印加の効果

絶縁材製摩擦部材表面の電荷は微小な間欠的放電の繰

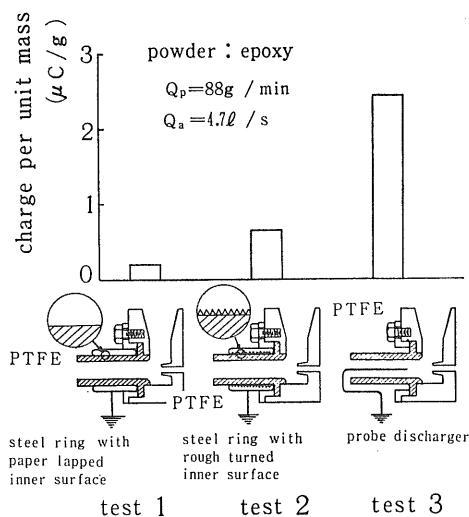


図12 ノズル内壁面上の電荷の放電特性と粉体帶電量

Fig. 12 Charge per unit mass vs. discharge characteristics of the nozzle.

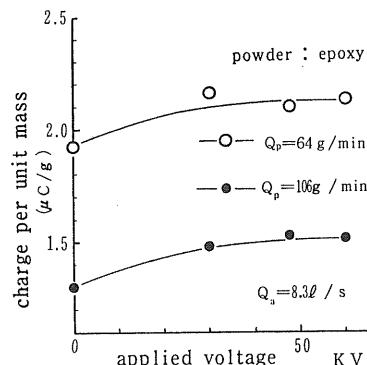


図13 ガン印加電圧の粉体帶電量への効果

Fig. 13 Charge per unit mass as a function of gun applied voltage.

返しにより移動すると推定されるに至ったので、放電を促進させるために樹脂製ノズルの圧入される金属リング部に高電圧を加えることは、ノズル内壁上の電荷の移動を容易にする方法として有効であると考えられる。図13はこの効果の調査結果である。

図13より摩擦帶電の場合でも、ガンへの電圧印加が粉体の帶電量の増加につながることがわかる。このことは粉体塗装用のガンの塗着効率とガン印加電圧の関係としては望ましいものといえる。つまり、前報に報告したように静電粉体塗装において塗着効率を向上させるためには、一定値以上の粉体帶電量とガンと被塗物間に一定値以上の電界が必要であり^{1,2)}、ガンへの電圧印加がコロナイオンの発生に直接的には結びつかない摩擦帶電ガン

では、過剰なコロナイオンによる表面欠陥の発生を心配することなく、効率向上のためにガスへ電圧を印加できるからである。

5.2 ボルテックスジェネレータの効果

摩擦帶電ガスでは粉体粒子とガス摩擦部材との擦過により粉体粒子が帶電するのであるから、粉体粒子と摩擦材の擦過機会と擦過速度を増加させることは粉体帶電量を増加させるうえで有効であると考えられる。

図14は擦過速度の効果を調べるために粉体搬送用空気量¹¹⁾を変化させ、粉体粒子のノズル擦過速度を変化させた場合の粉体帶電量の変化を調査した結果である。図14より、一般にいわれているように粉体帶電量は粉体粒子と摩擦材との擦過速度の増加とともに増加することがわかる。

図15に粉体粒子と摩擦材の擦過機会を増加させることによる粉体帶電量への影響を調査する目的で製作した、摩擦帶電ノズル入口部にボルテックスジェネレータを設けた改良型ガスIIIの構造を示す。なお、同図に使用したボルテックスジェネレータの構造も合わせて示した。

図16に改良型ガスIIIによるボルテックスジェネレータの粉体帶電量への効果の調査結果を示す。図16よりボルテックスジェネレータの使用により帶電量を約30%増加させられること、および、ボルテックスジェネレータは粉体搬送用空気量を増加させることなく粉体帶電量を増加させる手段として有効であることがわかった。

6. 摩擦帶電ガスの実用化

以上の結果をまとめ、粉体摩擦部をPTFE樹脂製の薄肉円筒のエアノズルとして、設計開発した実用摩擦帶電ガスの構造を図17に示す。図17に示す構造の摩擦帶電ガス(エアノズル型摩擦帶電ガス)には特有の問題として

- 1) 粉体帶電量を増加させるためには、粉体搬送用空気量を増加させる必要がある。一方、過剰の粉体搬送用空気量は静電粉体塗装では塗着効率低下の原因になる¹¹⁾。したがって、エアノズル型摩擦帶電ガスでは塗着効率の最適値を確保するうえで、粉体搬送用空気量に最適値が存在するであろうこと。
- 2) エアノズル型摩擦帶電ガスでは粉体の帶電量は粉体粒子と摩擦部材であるエアノズル内壁面との擦過機会の影響を受ける。したがって、エアノズル型摩擦帶電ガスでは、粉体の流量が多量になると粉体粒子がノズル内壁面を擦過する機会が減少し、粉体帶電量が減少すると考えられる。つまり、ガスのサイズにより粉体塗布速度の最適値が存在すると考えら

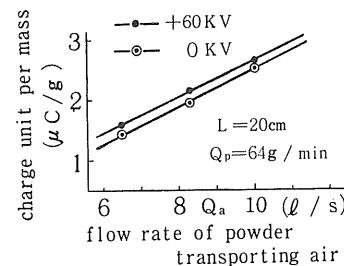


図14 粉体帶電量への粉体搬送空気量の効果

Fig. 14 Charge per unit mass as a function of flow rate of powder transporting air.

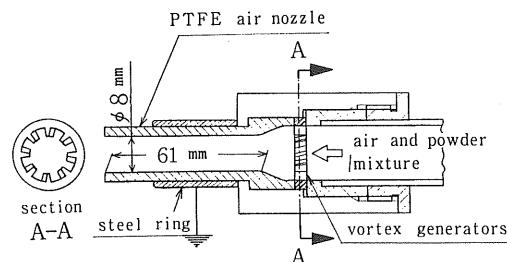


図15 ボルテックスジェネレータと改良型試作ガスIII

Fig. 15 Modified gun III.

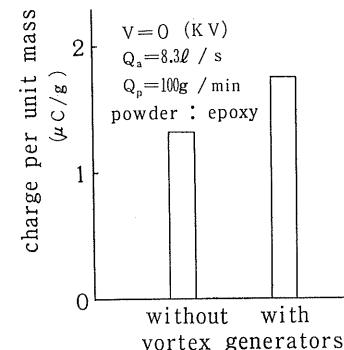


図16 粉体帶電量へのボルテックスジェネレータの効果

Fig. 16 Charge per unit mass with and without vortex-generators.

れる。

の2点が予想された。開発した実用摩擦帶電ガスについて、上記1)の問題点について調査した結果を図18に、2)の問題点に関する調査結果を図19に示す。

図18および19より予想した問題がエアノズル型摩擦帶電ガスには存在することがわかった。しかし、問題2)は必要とする粉体塗布速度に合わせてガスのサイズを決めれば解決できると予想される問題である。また、問題1)は粉体搬送用空気量の増加なしに粉体帶電量の増加が達成できるボルテックスジェネレータの有効な利用

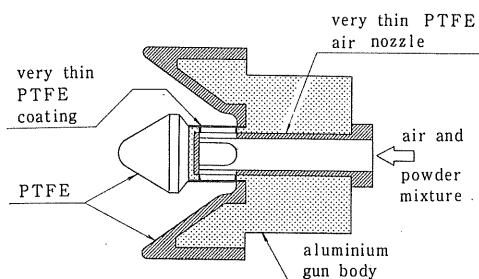


図17 開発された摩擦帶電ガソの構造

Fig. 17 Sectional view of a developed tribo-charging gun for practical use.

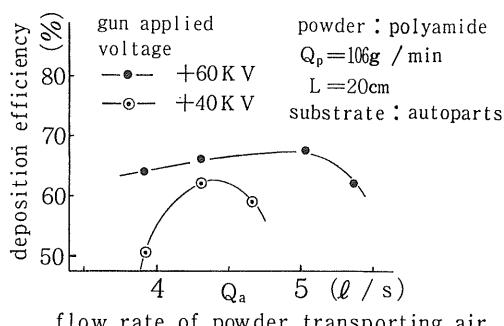


図18 摩擦帶電ガソの粉体搬送空気量に対する塗着効率の関係

Fig. 18 Optimum flow rate of powder transporting air of the developed gun.

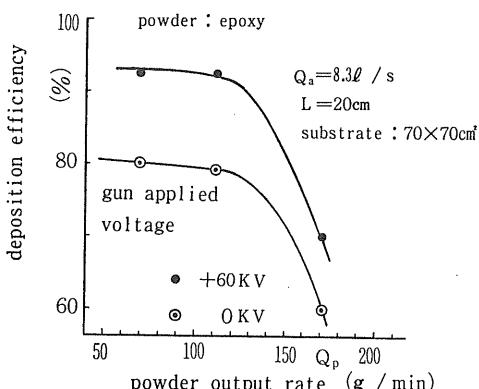


図19 摩擦帶電ガソの粉体吐出量に対する塗着効率の関係

Fig. 19 Deposition efficiency as a function of powder output rate.

により解決できる問題である。

したがって、通常のコロナガソに比べて使用最適範囲に多少の制限を受けるであろうと思われるが、問題1)および2)はエアノズル型摩擦帶電ガソの実用上の制限にはなりえないと思われる。事実、図19は粉体搬送用空気量が図18に示す最適値より多い条件であるにもかかわらず、塗着効率は90%を越し、筆者らの考えを裏づけている。本ガソの場合、 $70 \times 70\text{cm}^2$ の平板被塗物に対しては、粉体吐出量と粉体搬送用空気量を最適化することにより塗着効率は95%を越え、図1に示した最も実用性の高いコロナガソBの80%に比べ十分高い値を得ている。

7. 結論

粉体塗装における粉体の帯電方法として摩擦帶電を利用する塗装ガソの検討を行ない、その結果、次の結論を得た。

- 1) 粉体の帯電法として、粉体粒子と帶電列上離れた位置にある材料を摩擦材として使用し、粉体を摩擦帶電させることは有効な方法である。
- 2) 粉体粒子を連続して高レベルに摩擦帶電させるには、摩擦材表面に蓄積される電荷を速やかに逃がすことが必要である。
- 3) 絶縁材表面に蓄積される電荷は接地導体との間に積極的に微小放電をさせることにより大地へ逃がすことができる。そして、そのためには絶縁材の厚さを薄くすることや絶縁材内に導電性微粒子を混入させることが有効である。
- 4) 粉体の摩擦帶電量をさらに増加させる方法としては、摩擦材の摩擦部背面に電圧を印加する方法、および粉体粒子との摩擦材の擦過機会を増す手段であるボルテックスジェネレータの設置等がある。

今後、開発実用化に成功したエアノズル型摩擦帶電ガソがより有効に使用されるために、粉体材料の静電気的特性に関する研究を関係各位の方々に希望するとともに、本研究に対して、終始適切なご指導をくださった東京大学増田閃一教授にあらためて深甚の謝意を表させていただきます。

参考文献

- 1) 高橋 朗, 高瀬公宥, 加固博敬, 小林信夫: 静電気学会誌, 4 (1980) 160
- 2) 高橋 朗, 高瀬公宥, 加固博敬, 小林信夫: 同上, 4 (1980) 168