

## 論 文

### 静電粉体塗装の特性に関する研究（第1報）

逆電離による塗面欠陥発生に関する報告

高 橋 朗\*, 高瀬 公宥\*\*, 加 固 博 敬\*\*, 小 林 信 夫\*\*

(1980年2月18日受理)

### On the Characteristics of Electrostatic Powder Coating (Part 1)

Surface Defects Caused by Back Discharge

A. TAKAHASHI,\* K. TAKASE,\*\* H. KAKO\*\* and N. KOBAYASHI\*\*

(Received February 18, 1980)

In the electrostatic powder spray coating using corona discharge, surface defects called "craters" are often observed on the coating surface. The authors made a series of research to clarify the electrical phenomena between the electrostatic powder spray gun and the grounded substrate during powder spraying, and obtained the following results on the conditions of the crater formation. (1) The formation of "craters" caused by back discharge occurs when both powder layer thickness and integrated current density exceed a certain value. (2) Only a few percent of corona ions is used for charging powder particles. The rest ions which were not attached to the powder particles are reach directly to the grounded substrate. And the unattached ions cause "craters." (3) It was confirmed that, when the back discharge occurs, the charge of the powder particles is eliminated and powder particles are not attached to the coating surface.

#### 1. まえがき

粉体塗装法は、

- (1) 溶剤を用いないため作業環境が良い、
- (2) 1回塗りで厚膜塗装が可能である、
- (3) 回収粉体を再利用することにより、高効率塗装が可能である、

などの特徴を持っており、注目される塗装法の一つである。粉体塗装法は、比較的塗膜厚の均一化がはかりやすい溶剤型塗料のスプレー塗装法に比べてその均一化には種々の工夫が要求される。帶電した粉体塗料をガンから噴出させて塗装する静電粉体スプレー法は、比較的大型の被塗物にも塗膜厚さを均一にかつ効率良く塗装できるとされ、自動車のボディ塗装にも実用化されている例が見受けられる<sup>1)</sup>。しかし、大物部品として将来性のある静電粉体スプレー法にも、

- (1) 塗装条件によっては、クレータ状の塗面欠陥が発生しやすい、

(2) 限界膜厚が存在し、それ以上の膜厚は塗装困難である、

(3) 大物被塗物でも、得られる塗着効率は70%程度であり、回収粉体が使えない場合、省資源型塗装法とはいえなくなる、

- (4) 凹部のつきまわり性が悪い、
- (5) 色替えが容易でない、

などの技術的な問題を有しており<sup>2-5)</sup>、上述の数々の利点があるにもかかわらず実用化が進まない原因となっている。以上の問題点はいずれも静電気現象が深くかかわっており、これらの問題点を解決するためには、粉体塗装時のガンおよび被塗物の電気的挙動を十分把握する必要がある。そこで、筆者らは静電粉体スプレー法に関する問題点を整理し、この問題点の依るところについて実験的検討を行なうこととした。ここではこのうち、塗装時のガンおよび被塗物の電気的挙動とクレータ状塗面欠陥の発生条件に関する検討結果を報告する。

#### 2. 実験装置および実験方法

図1に実験に用いた装置の概略を、図2に供試ガンの構造を示す。粉体塗料供給装置は、現状では一般的なエゼクタタイプのものである。また、実験に用いたガンは市販されているA, B, Cの3種である。実験は無風状

\*,\*\* トヨタ自動車工業株式会社 (471 豊田市トヨタ町1)  
Toyota Motor Co., Ltd., 1, Toyota-cho, Toyota  
471, Japan

\* 第2生産技術部 Body Production Engineering  
Department, \*\* 生産技術開発部 Manufacturing  
Development Department

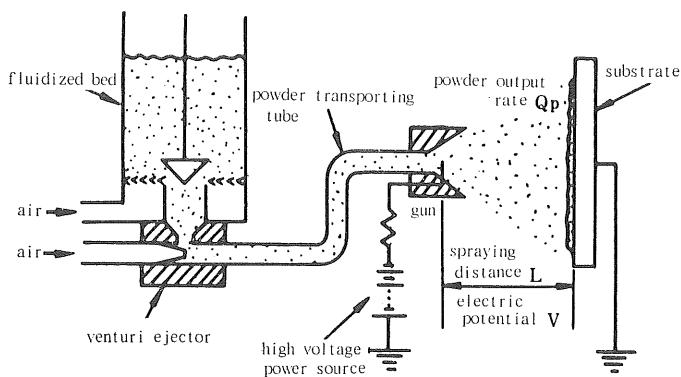


図1 供試塗装装置の概略図

Fig. 1 Experimental apparatus of electrostatic powder coating.

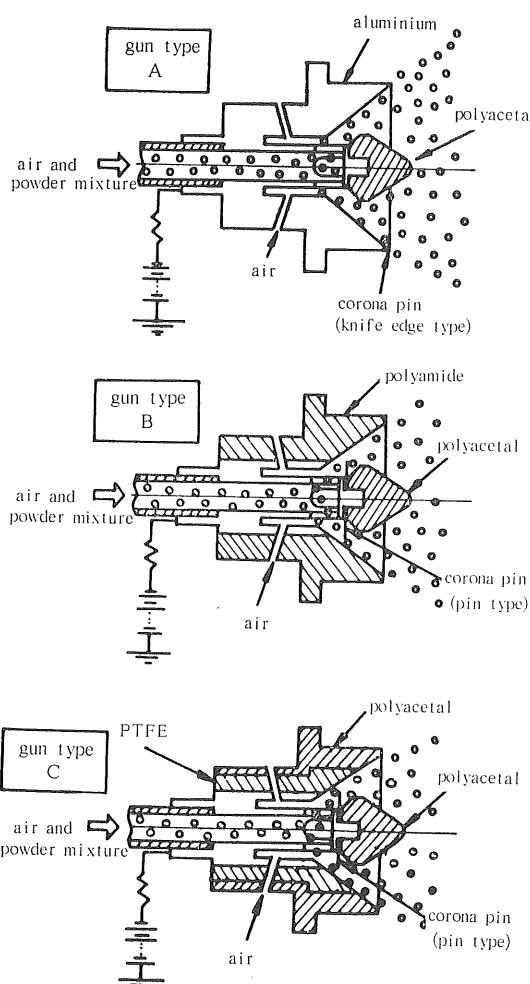


図2 供試ガソの構造

Fig. 2 Structure of spray guns used for the present experiment.

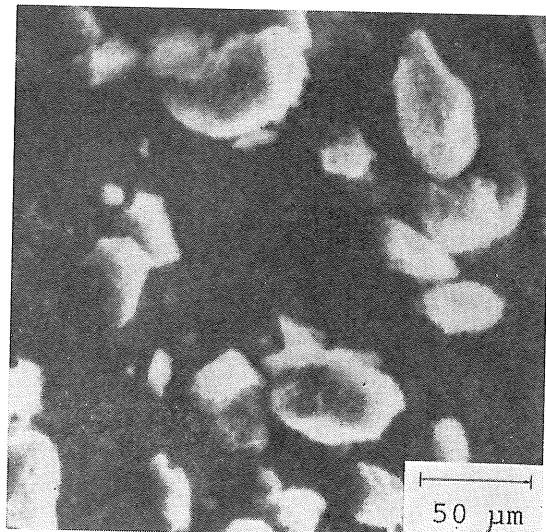


図3 使用粉体の電顕写真

Fig. 3 Electron photomicrograph of tested epoxy powders.

態の下で、ガンおよび被塗物とも固定して行なった。図3はこの実験に使用したエポキシ系粉体の形状を示す。この粉体の大きさは $0\sim100\text{ }\mu\text{m}$ であり、抵抗率は約 $10^{16}\text{ }\Omega\cdot\text{cm}$ 、比誘電率は約4である。

### 2.1 塗装中の全電流および局所電流測定法

被塗物に流れる電流および付着量の分布を調べるために、被塗物を49個の細片より構成した。図4に実験に使用した被塗物の全体形状の正面図を示す。図5には、直流アンプと電磁オシロを用いた個々の細片に流れる電流(以下、局所電流と呼ぶ)の測定法の概略を示す。ここで、49の局所電流の和、つまり被塗物全体に流れる電流(以下、全電流と呼ぶ)の測定は、振動容量型微小電流電位計で行なった。なお、測定装置の検定は実験ごと

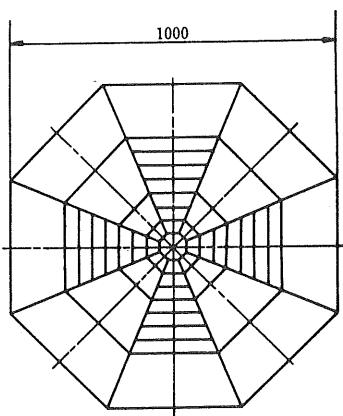


図 4 細分割被塗物の正面図

Fig. 4 Front view of segmented substrate.

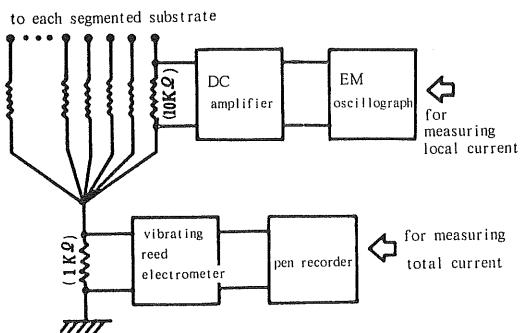


図 5 局所電流の測定法

Fig. 5 Arrangement of measuring apparatus for local current measurement.

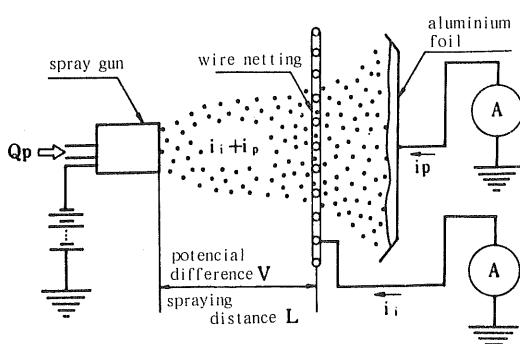


図 6 粉体帶電量の測定法

Fig. 6 Apparatus for measuring charge per unit mass.

に行ない、その結果、(局所電流の和/全電流値)=0.97~1.03 であった。

## 2.2 帯電量測定法

ガソ-被塗物間に流れる電流は、イオンによる電流と

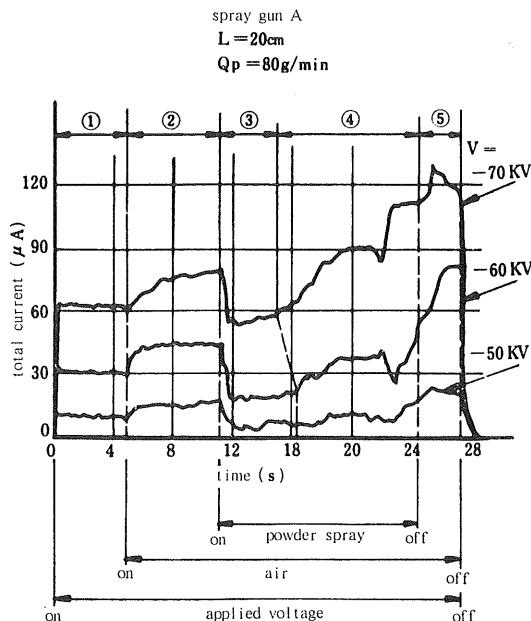


図 7 全電流の時間的変化

Fig. 7 Total current as a function of time.

荷電粉体の移動による電流の和と考えられる<sup>6)</sup>。図6はこの2種類の電流を分離し、荷電粉体の帯電量を測定するために用いた実験装置の概略図である。ここで、金網は菱形目（目の面積 125 mm<sup>2</sup>）のエキスパンドメタルであり、大きさは 1,000×1,000 mm である。また、アルミフォイルは厚さ 0.1 mm、大きさ 1,000×1,000 mm である。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 電流の時間的变化

図7にガソA使用の場合の、印加電圧をパラメータとした全電流の時間的変化例を示す。図8は、被塗物上で欠陥が発生した場所とそうでない場所における電流の時間的変化例を示す。図9には、塗布中に被塗物付着粉体の表面に発生したクレータ状塗面欠陥の例を示す。図7より、印加電圧つまり印加電界が変わると電流値も大幅に変わるが、電流の変化パターンはほとんど同じ傾向で推移することがわかる。塗装中の電流変化は、ガソ-被塗物間の空間状態に密接に結びついて起きている。その意味するところを図7に示す領域に分けて考察すれば以下のようであると考えられる。

①領域：無風条件下の安定したコロナ放電域。

②領域：エアがイオンを吹き飛ばすことにより、空間電荷が除去されるためのコロナ放電電流増幅域。

③領域：イオンに比べ速度の遅い粉体（速度比は 100

対1程度と考えられている)が帶電することにより形成されると考えられる大きな空間電荷雲による空間電荷制限電流域(コロナクエンチング域)。

④領域:印加電圧により次の特徴的な現象がみられる領域。

- (1) 図7中で、塗布中に電流の漸増現象がない印加電圧50kVの場合、図9に示す塗面欠陥は現われない。一方、電流漸増現象のある

60, 70kVの場合、塗面欠陥が被塗物上のどこかに必ず現われている。

(2) 図8に示す局所電流の変化で、電流漸増現象は塗面欠陥発生部分のみに現われている。このことから、電流漸増現象はクレータ状塗面欠陥の発生原因とされている「逆電離」による電流が流れるためと考えられる。

⑤領域:被塗物に粉体が付着していることを除いて②領域同一条件であるので、②領域電流レベルを越える分は逆電離電流と考えられる。

Cross <sup>ら</sup>は暗視スコープによる観察で、クレータ発

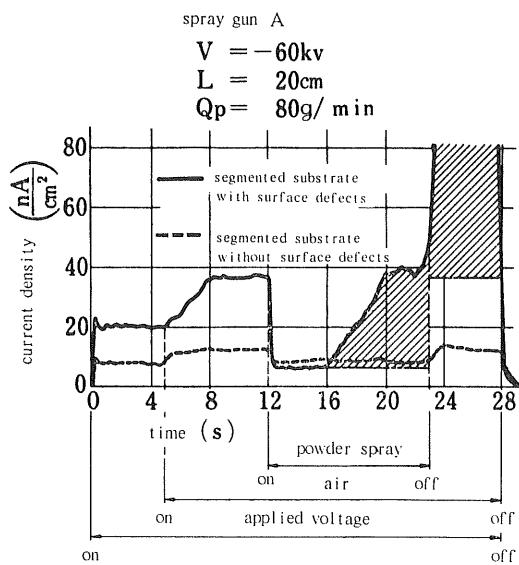


図8 局所電流の時間的変化

Fig. 8 Local current as a function of time.

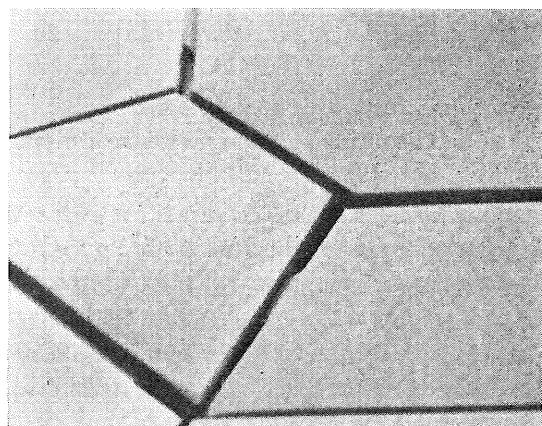


図9 クレータ状の塗面欠陥の近接写真

Fig. 9 Optical photograph showing surface defects called "craters."

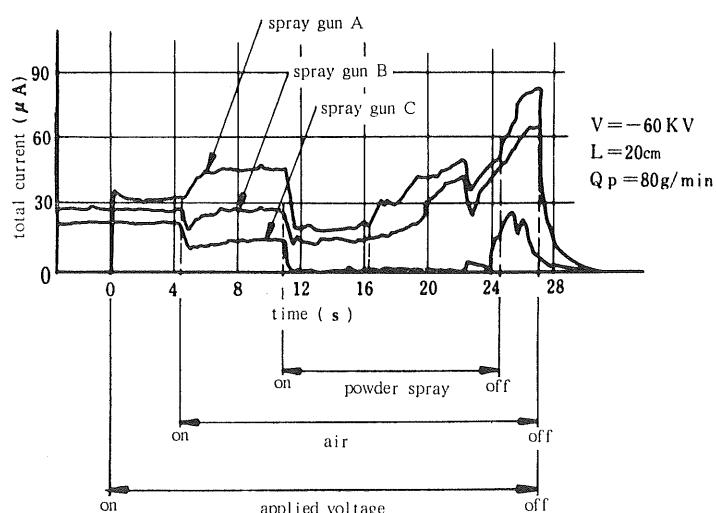


図10 全電流の時間的変化のガンによる差

Fig. 10 Total current as a function of time in gun A, B and C.

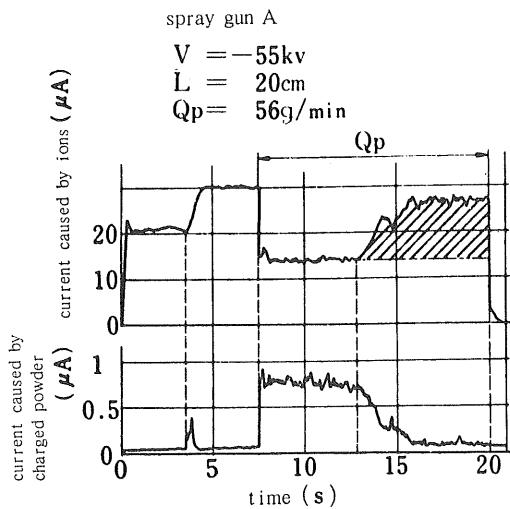


図 11 イオン電流および荷電粉体による電流

Fig. 11 Current caused by ions and charged powder as a function of time.

生部に輝点状の発光が見られることから、クレータの発生は被塗物上の粉体粒子層で絶縁破壊が起こり、逆電離が発生することによるとしている。著者らも同様な観察でこれを確認している。図 10 に全電流の時間的変化のガン電極形状、ガン構成材質(図2参照)による差を示す。同図より、ガン電極形状、ガン構成材質の相違により全電流値に大きな差が生じることがわかる。とくに、ガンBおよびガンCの間には電極形状の差ではなく(まったく同一のコロナ電極を用いて実験を行なった)、ガン構成材質のみに差があるだけであるにもかかわらず電流の変化パターンさえも変わっていることがわかる。これより、ガン構成材質はガンの電気的挙動にきわめて重要な役割を担っていると推察できる。

### 3.2 自己膜厚制限 (self limiting) 現象

図 11 は、2.2 項で説明した方法で測定したイオン電流および粉体による電流の時間的変化例である。同図で、上図は金網に流れるイオン電流  $i_i$ (粉体による電流も含まれるが、その量は  $1/15$  以下であるためここでは無視した) であり、下図はアルミフォイルに流れる粉体による  $i_p$ (アルミフォイルに付着する粉体量は全吐出量の  $50\sim60\%$  であるので、測定電流  $i_p$  は粉体全体による電流の  $50\sim60\%$  と予想される) である。この図より、粉体が吐き出されると帶電した粉体による電流  $i_p$  が流れ、同時にイオン電流  $i_i$  が減少することがわかる。これは 3.1 項に述べたように、帶電した粉体がガン-被塗物間に空間電荷雲を形成することによるコロナクエンチング現象である。この状態は、図の例では 5.5 秒ほど安定して続くが、それを越えると金網にハッティング部で

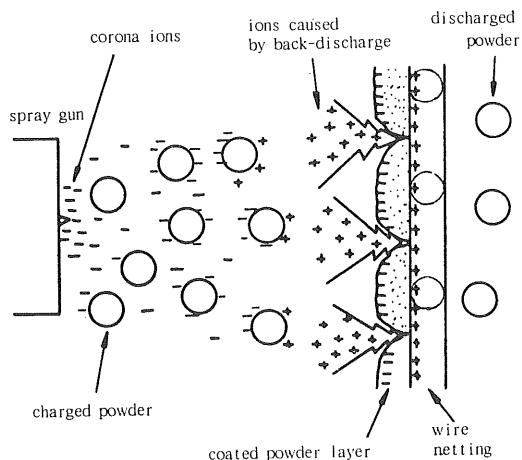


図 12 逆電離による粉体除電の模式図

Fig. 12 Schematic representation of discharge of charged powders caused by back-discharge.

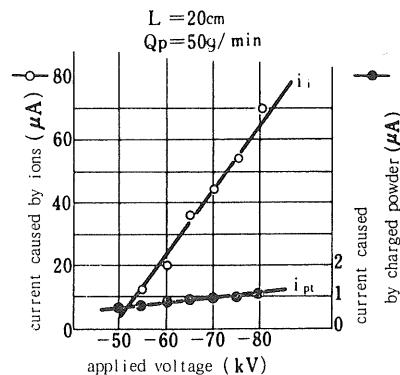


図 13 ガン印加電圧とイオン電流および荷電粉体との関係

Fig. 13 Effect of applied voltage on  $i_i$  and  $i_{pt}$ .

示す異常電流が流れはじめ、同時にアルミフォイルには電流がほとんど流れなくなるのがわかる。図 12 は以上の現象を模式的に説明した図である。ここに示すように、金あみに付着した粉体層(全吐出し量の  $10\%$  程度が金網に付着する)で逆電離が起こり、マイナスに帯電していた粉体粒子がプラスの逆電離イオンによって除電されるために、粉体による電流  $i_p$  が激減すると考えられる。この実験結果は、静電粉体スプレイ塗装法で一般に知られている自己膜厚制限現象(ある一定膜厚以上は粉体が被塗物に付着しなくなる現象)を裏づけているといえる。

### 3.3 粉体の帶電量

#### 3.3.1 イオン電流と粉体による電流の比

図 13 に、ガン A で印加電圧を変えた場合のイオン電流  $i_i$  と吐出し粉体全体による電流  $i_{pt}$  の変化を示す

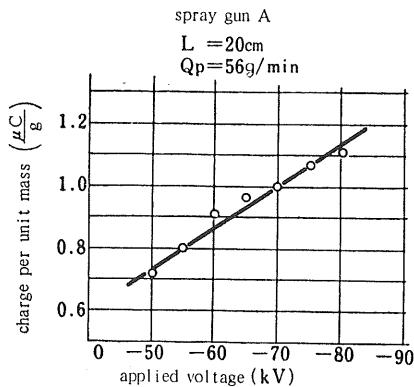


図 14 ガン印加電圧と粉体帶電量の関係

Fig. 14 Effect of applied voltage on charge per unit mass.

( $i_t$ ,  $i_{pt}$  とも逆電離が発生しない状態の値である). ここで,  $i_{pt}$  は以下のようにして求めた値である.

$$i_{pt} = \frac{\text{アルミフォイルに流れた電流 } (\mu\text{A})}{\text{付着速度(付着量/吐出し時間)} (\text{g}/\text{min}) \times \text{吐出し量 } (\text{g}/\text{min})}$$

図 13 より, 通常使用される印加電圧範囲 60~90 kV では, 粉体の帶電に利用される電流分は放電電流の 4.3~1.3% ときわめて小さく, コロナ放電で発生するイオンの大部分は“自由”イオンのまま被塗物に達していることがわかる.

### 3.3.2 粉体の帶電量と印加電界の関係

図 14 に, ガン A における印加電圧と粉体帶電量の関係を示す. ここで, 粉体の帶電量は粉体による電流の積分値 ( $\int i_p dt$ ) をアルミフォイルに付着した粉体重量で除して求めた値である. この図より, 粉体の帶電量は印加電圧つまり印加電界に比例して増えることがわかる. しかし, イオン電流は粉体の帶電に直接的に関係しないことが図 13 よりわかる. というのは, イオン電流が増えても粉体による電流はほとんど増えないからである.

### 3.4 クレータ状塗面欠陥の発生条件

3.1 項より, クレータ状塗面欠陥の発生は逆電離によること, および逆電離により異常電流が流れることが明らかとなった. このことを利用して, クレータの発生条件について考察を試みる. 図 15 は, 49 個の細片に流れる局所電流の変化曲線(図 8 に例示)をもとに, 粉体塗装中の各時間ごとに求めた被塗物全体にわたる等電流密度線図である. 図中 e 図は全電流の時間的変化を示し, a, b, c, d 図は e 図に示した各時間ごとの等電流密度分布を示している. また, 図 16 は図 15 と同一条件下で得られた付着量の分布とクレータ状塗面欠陥の発生領域を示したものである. 図 15 より, e 図のハッティング部で示す逆電離電流は, クレータ状塗面欠陥発生領域で

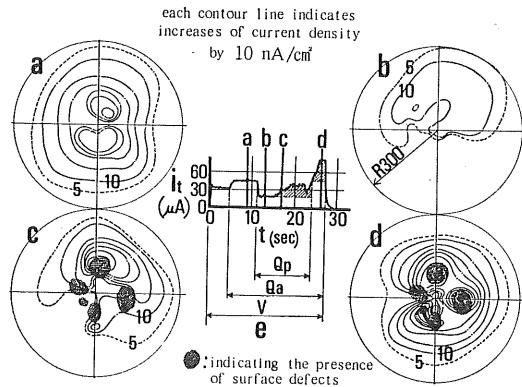


図 15 被塗物電流密度分布の時間的変化

Fig. 15 Distribution of current density as a function of time.

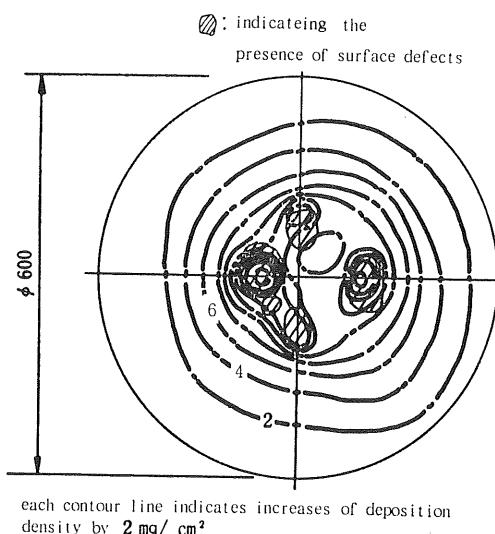


図 16 粉体付着密度の分布

Fig. 16 Distribution of deposited powder density.

流れる様子が良くわかる. また, 逆電離開始時刻は場所によってまちまちであり, c 図段階では中心点上方領域のみが逆電離していることがわかる.

逆電離の発生条件については, 近年増田らが理論を発表している<sup>8)</sup>. 図 17 に, この理論の一次元モデルを示す. ここで,  $i_t$ : イオン電流,  $i_p$ : 荷電粉体による電流,  $E_e$ : 外部電界強度,  $\epsilon_a$ : 層のみかけ誘電率,  $E_{dx}$ : 層内電界強度, である. 増田らはこの一次元モデルで層内電界強度を求め, その最大電界強度  $E_{max}$  が層の絶縁破壊電界強度  $E_{ds}$  を越えたとき逆電離が起こるとし, 抵抗がきわめて高い粉体に対して次式の逆電離発生条件式を得ている.

$$E_{\max} = E_e + \frac{1}{\epsilon_d} \int_0^{t_0} i_0(t) dt \leq E_{ds} \quad (1)$$

ただし、 $i_0(t) = i_i(t) + i_p(t)$ 、 $t_0$ ：逆電離が発生するまでの時間、である。

(1)式は、外部電界強度すなわち印加電界が一定の場合、逆電離の発生条件は塗布層に流入する電荷量のみで決まり、塗膜厚は関係しないことを示している。なお、実験の結果を理論にあてはめて概算すると、流入電荷量による層内最大電界強度は

$$\frac{1}{\epsilon_d} \int_0^{t_0} i_0(t) dt \geq 2 \times 10^5 \text{ (V/cm)}$$

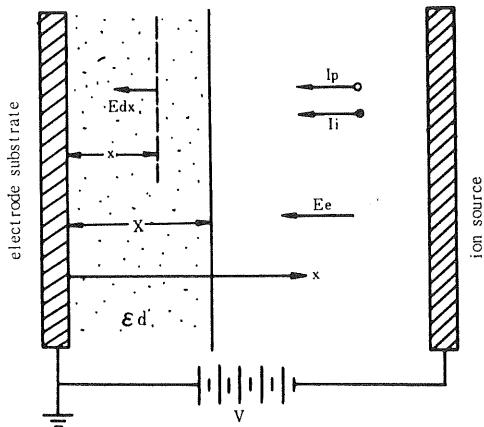


図 17 粉体付着過程の一次元モデル

Fig. 17 One-dimensional model of powder deposition process.

となり、これは外部電界強度(平均印加電界強度) $E_d = 3 \times 10^3 \text{ V/cm}$ の2桁上の値となる。したがって、実際に(1)式中の $E_e$ は無視して、上記表現から「外部電界強度一定」の条件をはずしても良いと考えられる。

ここで、上記理論とこの実験結果を比較する。理論によれば、被塗物上で塗布中電流密度が大なる領域ほどクレータ状塗面欠陥は発生しやすいことになる。このことを図 15 でいえば、逆電離が発生するまでの塗布中電流が大きな領域、つまり b 図の水平中心線上方領域がもっともクレータ状塗面欠陥の発生しやすい領域であるということである。しかし実際にはクレータの発生した領域はこの領域のごく一部であり、逆電離理論とクレータに関する観察結果が完全に一致していないことがわかる。

一方、粉体付着量分布を示す図 16 をみると、塗面欠陥発生域は高付着密度領域(高膜厚領域)にきわめて良く一致しており、低付着密度領域(低膜厚領域)では塗面欠陥がまったく発生していないことがわかる。これらのことから、塗面欠陥の発生条件には流入電荷量のほかに、塗膜厚さも強く関係していると考えられる。そこで、塗面欠陥の発生の有無を塗膜厚と塗布層への流入電荷量の両方で整理してみることにした。図 18 にその結果を示す。

この図で、縦軸の流入電荷量は図 8 に例示した局所電流変化曲線より、塗布開始以後の電流を図上で積分して求めたものであり、横軸の焼付け後の膜厚は同じ局所部分の単位面積当りの粉体付着重量から計算によって求めたものである。また、各打点は前述の電流特性の異なる

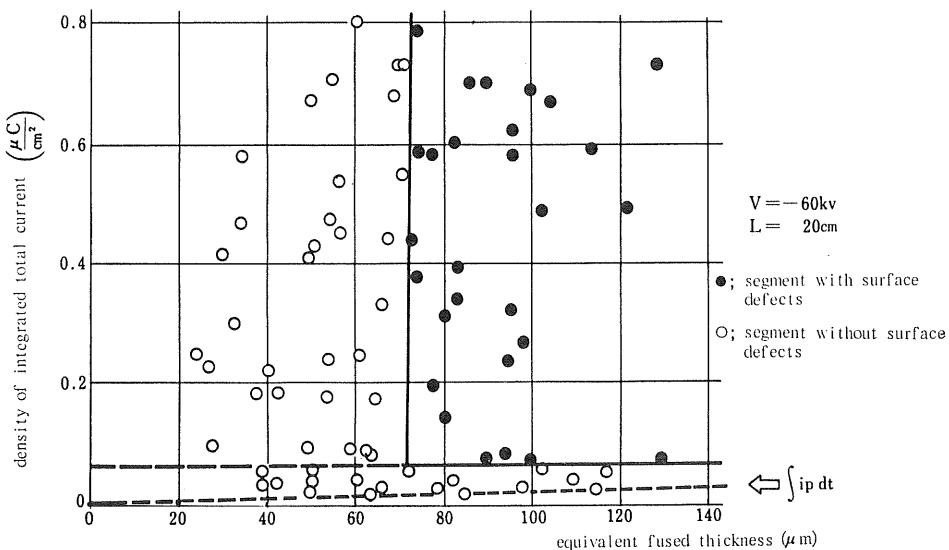


図 18 クレータ状塗面欠陥の発生条件

Fig. 18 Occuring condition of surface defects called "crater."

三つのガンを用いて、粉体吐出し量および塗布時間を種々変えることにより、得られた被塗物各部分のデータをプロットしたものである。黒丸および白丸はクレータ状塗面欠陥の発生の有無を示す。この図をみると、クレータ状塗面欠陥は塗膜厚（約 73 μm 以上）と塗布層への流入電荷量（約 0.065 μC/cm<sup>2</sup> 以上）の 2 条件が満たされたとき起こり、低膜厚域（約 73 μm 以下）では大きな電流を流しても塗面欠陥が発生しないことがわかる。

以上の実験観察事実は、クレータの発生に関して、逆電離理論が高膜厚領域では適用できるものの、低膜厚領域では適用できないことを示している。この原因については、最近増田らが導電性ガラスを用いて付着粉体層表面から逆電離現象を観察した結果を報告しており、かなり詳しいことが明らかにされている。この報告によれば、「低膜厚でも電流密度が大であれば、逆電離は発生する。しかし、この場合の逆電離による発光は微弱であり、目視できるクレータは認められず、顕微鏡でみてはじめて粉体粒径程度の穴があいていることがわかった」ということである。筆者らの観察結果が逆電離理論と完全に一致しなかったのは、逆電離が必ずしも目視できるクレータに結びつかないためといえる。

なお、塗布層への流入電荷量の内訳は粉体のもつ電荷と“自由”イオンであるが、通常のコロナ放電を利用したガンでは 3.3.1 項よりわかるように“自由”イオンのほうが圧倒的に多い。図 18 に、ガン A の場合の荷電粉体による塗布層への流入電荷量 ( $\int i_p dt$ ) を破線で示すが、これより“自由”イオンがクレータ状塗面欠陥を引き起こす原因となっていることが容易にわかる。したがって、高膜厚まで塗面欠陥を発生することなく静電塗装するためには、イオン電流をできるだけ流さないようにすれば良いことがわかる。

#### 4. む す び

この実験によって得られた結果をまとめると、以下のようになる。

- (1) ガン-被塗物間に流れる電流は、その空間状態によって大幅に異なる。この原因は空間電荷密度が異なるためと考えられる。
- (2) コロナ放電電流のうち、粉体の帶電に利用される電流分は数%であり、ほとんどは“自由”イオンのまま被塗物に達する。なお、コロナ放電電流の大小は粉体の帶電にほとんど関係しない。
- (3) クレータ状塗面欠陥の発生原因は塗布層での逆電離によるが、これによってガン-被塗物間には異常電流が流れる。この異常電流はガンで発生するイオンとは逆極性のイオンによるため、吐出し粉体は除電され、いわゆる self limiting 現象の原因となることが確認された。
- (4) クレータ状塗面欠陥の発生条件は、塗膜厚と塗布層への流入電荷量がそれぞれある一定値以上になることである。一定膜厚以上では流入電荷量がクレータを引き起こす原因となっているが、その内訳は(3)よりイオン電流によるものが大部分であるため、クレータ発生の実質的な原因是イオン電流である。一方、一定膜厚以下では電流はクレータ発生の原因とはならない。

#### 参 考 文 献

- 1) M. Mealey : Am. Mach., 118, 9 (1974), 43.
- 2) J.A. Cross : Ind. Finish. Surf. Coat., 27, 322 (1975), 4.
- 3) A. Golovoy : J. Paint Technol., 15, 580 (1973), 42.
- 4) 土生英司：実務表面技術，6月号（1977），276。
- 5) W.V. Souheng : Polym.-Plast. Technol. Eng., 7, 2 (1976), 206.
- 6) G.D. Cheever : J. Appl. Polym. Sci., 19 (1975), 147.
- 7) J.A. Cross and J.D. Bassett : Bull. Inst. Met. Finish., 52 (1974), 112.
- 8) 増田閃一：第2回粉体塗装会議予稿集，3, 3 (1977), 101.