

## 論 文

## 静電粉体塗装における逆電離の放電様態について

増田 閃一\*, 水野 彰\*

(1977年7月2日受理)

## Mode of Back Discharge in Electrostatic Powder Coating

S. MASUDA\* and A. MIZUNO\*

(Received July 2, 1977)

The mode of back discharge is observed for extremely high resistivity powders encountered in electrostatic powder coating. The light emission is observed using an image intensifier tube coupled with a microscope. The process of crater formation is also studied. Under the condition of negligibly small ionic current (about  $10^{-12} \text{ A/cm}^2$ ), the light emission of back discharge becomes pulsive, and moves randomly along the surface as long as powder feed is continued. In this case, craters are formed, and the back discharge results in a limiting thickness. The value of limiting thickness becomes larger than 0.3 mm. Under the condition of large ionic current (larger than about  $10^{-8} \text{ A/cm}^2$ ), a general-glow type back discharge occurs, the whole surface glowing uniformly and no glow spot being visually detected. In this case, the thickness of the layer can continue to grow even under back discharge until a certain thickness is reached. The general glow consists of many small glow points distributing with the distance almost equal to the particle diameter.

レータが形成される過程を明らかにした。

## 1. はじめに

静電粉体塗装においては通常見掛抵抗率のきわめて高い( $10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$ 以上)パウダを使用するため、逆電離開始条件に膜厚の効果が現われるようになる<sup>1,2)</sup>。これは層内の空間電荷による電界が支配的となるためで、層内電界分布は平等でなく、層と電極との境界面で最大となる。そしてこの値が絶縁破壊値を超すと逆電離が発生する。この場合逆電離の放電様態は塗着層の仕上りに大きな影響を及ぼすものと考えられる。そこで被塗着電極の一部に導電性ガラス電極を用い<sup>3)</sup>、層の両面の逆電離発光をイメージインテンシファイアを用いて調べ、さらにイメージインテンシファイアを顕微鏡と組み合わせて逆電離点の詳細な観測を行なった。また逆電離様態による層表面の仕上り状態の相違を調べ、さらに逆電離によってク

## 2. 実験装置

試料用パウダとして、見掛け抵抗率  $\rho_d = 2 \times 10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$ 、見掛け誘電率  $\epsilon_s = 2.5$  のエポキシ樹脂パウダを用いた。その粒径は 0.01~0.05 mm の範囲である。図 1(a)は層の両面の発光を同時に観測するための装置で、接地平板電極中心の主電極は導電性ガラス(直径 3 cm)からなる。また外部電界を平等電界とし、かつその値を制御するためにグリッド電極が挿入されている。Ting, Hughes らと同様に<sup>3)</sup>、反射鏡を用いて塗着層表面および裏面の発光をイメージインテンシファイア(EMI, type 9912, 最高ゲイン約  $10^6$  倍)によって同時に観測した。図 1(b)は裏面の発光を顕微鏡を用いて調べるための装置である。イメージインテンシファイアを組み合わせることにより鮮明な像を得ることができる。

実験はすべて恒温恒湿室内(温度 20°C, 相対湿度 60%)において大気圧下で行なった。

\* 東京大学工学部電気工学科(113 東京都文京区本郷 7-3-1)  
Department of Electrical Engineering, Faculty  
of Engineering, University of Tokyo, 7-3-1,  
Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113, Japan

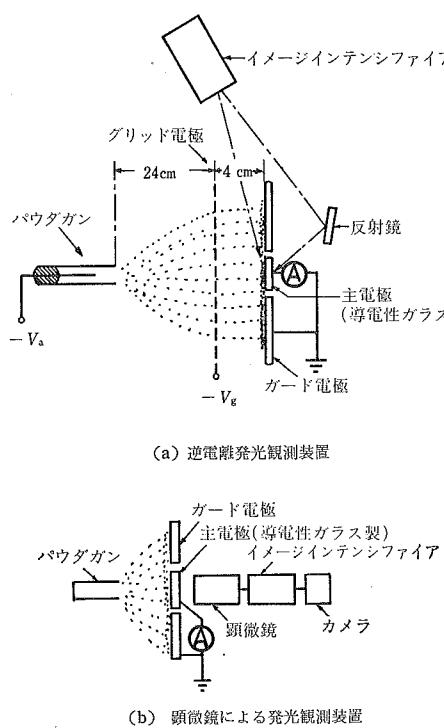


Fig. 1 Experimental apparatus for the observation of back discharge.

### 3. 逆電離放電様態の観測

#### 3.1 コロナ電流密度がきわめて小さい場合

コロナ電流密度  $i_1$  が  $10^{-12} \text{ A/cm}^2$  程度以下では限界膜厚  $X_0^{(1)}$  はかなり大きくなり（本実験条件下では  $X_0 > 0.3 \text{ mm}$ ），逆電離により破壊点からパウダ粒子が放出さ

れクレータが形成される。図 2 (a) は  $i_1 = 10^{-12} \text{ A/cm}^2$  とし、パウダを供給しつつ次々と逆電離を発生させたときのイメージインテンシファイアによる写真で（露出時間：5秒），このときの膜厚は約 0.5 mm である。逆電離は別々の点で発生し、それら各点においてクレータが形成される。図 2 (b) は層表面から見たクレータの写真である。このときの逆電離の発光はパルス的であり持続時間が短く、パウダの供給を続ける限り次々と発生する。この場合の逆電離発光強度は裏面のほうが大きい。これは正コロナを用いても同様である。パウダの供給を止めると逆電離の発生も止むが、このときグリッド電圧を上げて十分な外部電界を与えるか、またはある程度コロナ電流を供給すると再び逆電離が現われ、各破壊点で安定した連続的発光を伴うグロー・モードの逆電離<sup>4,5)</sup>となる。なおコロナ電流密度  $10^{-12} \sim 10^{-8} \text{ A/cm}^2$  程度の範囲では安定なグロー・モードの逆電離は維持されず、粉体層のパルス的破壊による単発的逆電離となるが、パウダの供給がなくても次々とクレータが発生する。なお  $i_1 \leq 10^{-12} \text{ A/cm}^2$  では膜厚が 0.3 mm 以下では逆電離の発生は見られなかった。

#### 3.2 コロナ電流密度の大きい場合

コロナ電流密度を大きくすると逆電離は膜厚 0.25 mm 以下においても発生し始める。しかしその発光強度はきわめて小さく、肉眼では観察できない。これをイメージインテンシファイアで観測すると、面全体が一様に微弱な発光をしており、とくに強く発光する点は存在しないことが判明した。これを“全面グロー状逆電離”と呼ぶことにする。図 3 (a) は  $i_1 = 5 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$  においてパウダを供給し続けて発生させた逆電離の写真である（イメージインテンシファイア使用、露出時間：2秒）。このと

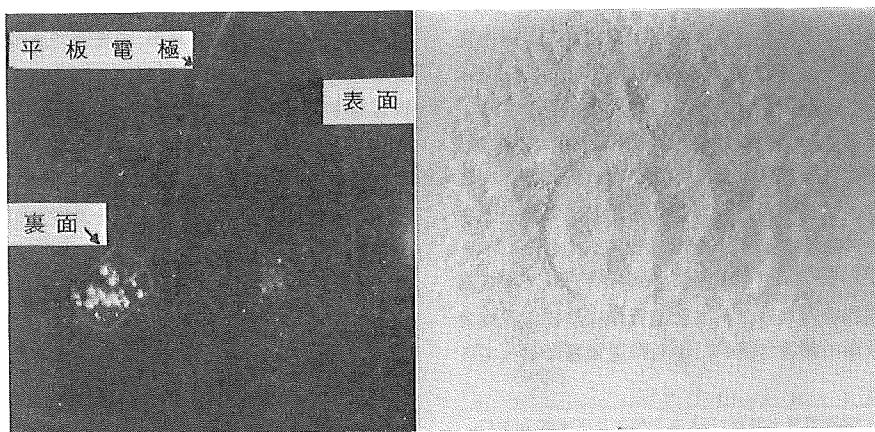
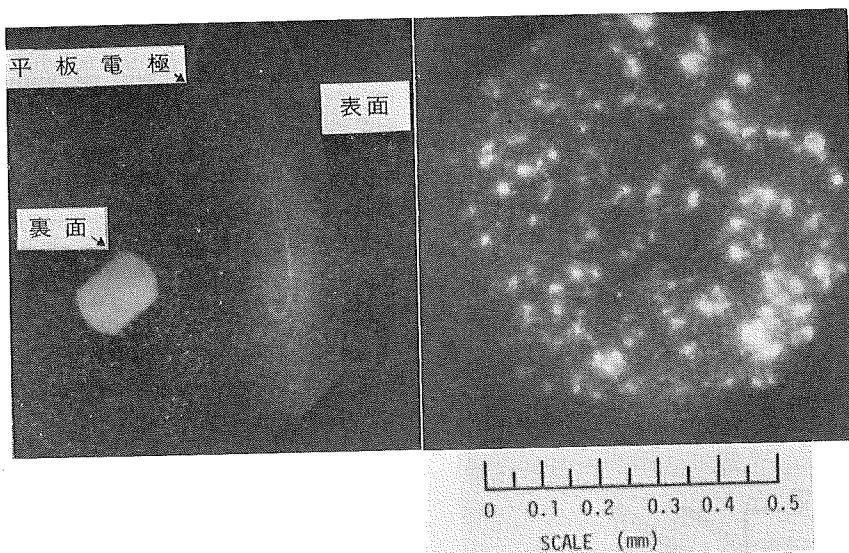
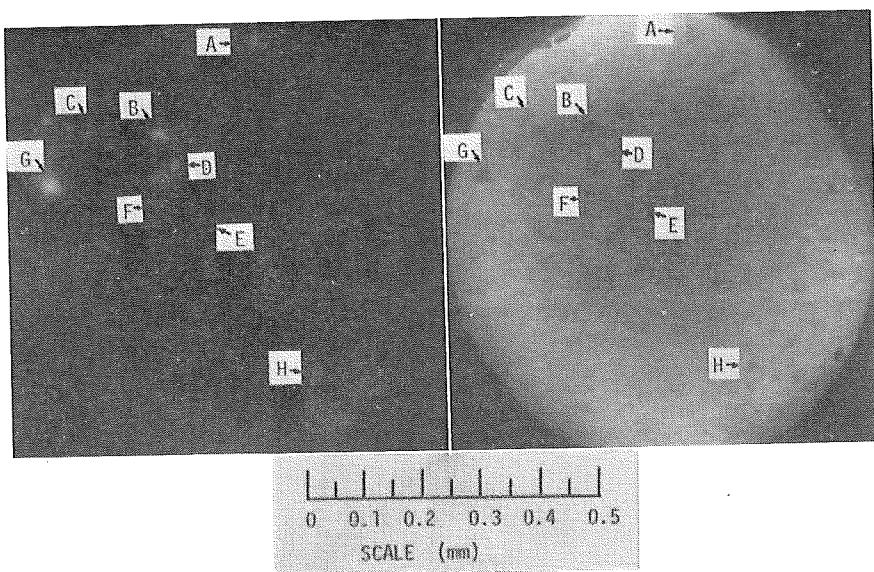


図 2 コロナ電流がきわめて小さい場合の逆電離とクレータ ( $i_1 = 10^{-12} \text{ A/cm}^2$ )  
Fig. 2 Back discharge and craters at very low ionic current. ( $i_1 = 10^{-12} \text{ A/cm}^2$ )



(a) イメージインテンシファイアによる発光の写真 (裏面)

(b) 発光の顕微鏡写真 (裏面)

図 3 コロナ電流が大きい場合の逆電離 ( $i_t = 5 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ )Fig. 3 Back discharge at high current density. ( $i_t = 5 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ )

(a) グロー発光点 (裏面)

(b) ポイド (裏面)

図 4 全面グロー状逆電離の顕微鏡写真

Fig. 4 Microscopic observation of general glow.

きの膜厚は約 0.15 mm である。この逆電離においても発光強度は裏面のほうが大きいが、正コロナを用いると同程度の電流値のもとでは表面の発光強度のほうが大きくなることが認められた。しかしコロナの極性にはかかわらず、粉体層にはクレータの発生が肉眼では認められなかった。

### 3.3 顕微鏡による発光観測

全面グロー状逆電離を顕微鏡を用いてさらに詳しく調

べた。コロナ電流密度が  $5 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$  の場合、電極面がパウダによりカバーされると(膜厚 0.05 mm 程度)逆電離が発生し始める。図 3 (b)はその層裏面からの顕微鏡写真(露出時間: 3 秒)である。この観測結果から、全面グロー状逆電離の発光はパウダ粒径と同程度離れた多数の発光点から成っていることが判明した。またパウダ供給中はこれらの点は不規則に動き回り(このとき堆積層内に形成された小さなポイドも動き回る)、パウダ

の供給を停止すると発光点は静止する。しかしながら、この場合には逆電離が発生していても、パウダはある膜厚(約 0.25 mm)まで堆積を続けることが判明した。すなわち、この場合には限界膜厚は逆電離開始時の膜厚と一致せず、これよりも大きい値をとる。この理由についてはあとに考察する。膜厚 0.1 mm 以上においてコロナ電流を流した状態でパウダの供給を止めると、発光点の動きが止まり特定の点のみが発光するようになる。図 4 はこの状態での発光およびボイドの発生場所の比較写真であり、ボイドにおいて発光が起こっている様子を示している。

図 5 は層内の絶縁破壊路を観測するための装置である。図 6 はそのイメージインテンシファイアにより得ら

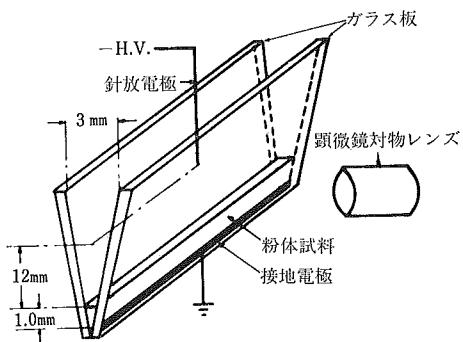


図 5 絶縁破壊路観測用実験装置

Fig. 5 Experimental apparatus for observation of breakdown channels inside the powder layer.

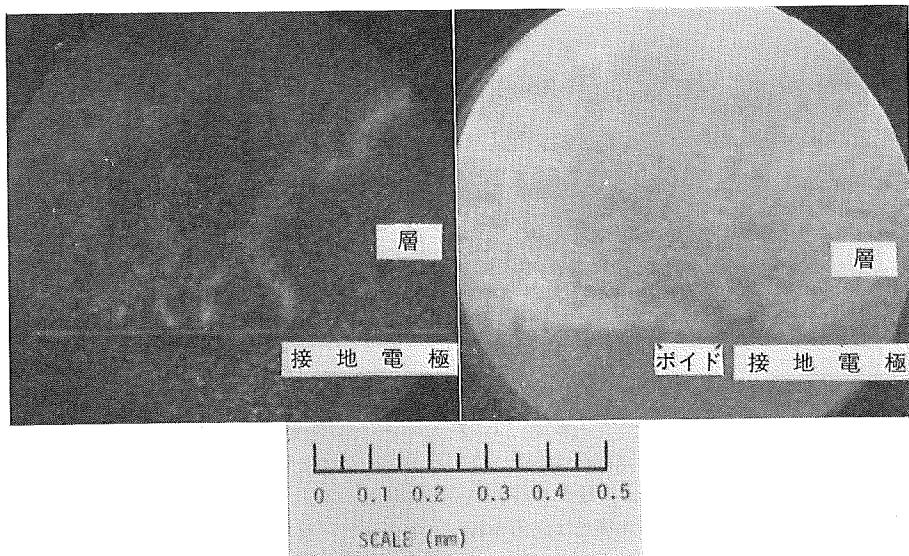
れた観測結果で、同図(a)は破壊路の層内進展状況、(b)はそのときの層断面の様子を示す写真である。これらの写真は、電極と層の境界面に存在するボイドで発光が始発しており、そこから層内に破壊路が進展している様子を示している。

#### 4. 層の表面状態とクレータの形成

##### 4.1 表面状態の顕微鏡観測

全面グロー状逆電離が発生したときの層表面状態の変化は肉眼では認められない。そこで顕微鏡を用いて表面を観測した。図 7(a)および(b)は、逆電離が起らなかった場合および全面グロー状逆電離が発生した場合の層表面の顕微鏡写真で、このときの膜厚は 0.2 mm である。同図(b)は、この逆電離が発生したあとには最大パウダ粒径と同程度の直径をもった非常に小さなクレータが発生していることを示している。これを“マイクロクレータ”と呼ぶことにする。本実験条件のもとではこのマイクロクレータは膜厚 0.1~0.25 mm において発生した。膜厚 0.1 mm 以下では、膜厚が粒径に近いため相対的に表面が不連続となり、マイクロクレータの存在は検知できなくなる。一方膜厚が 0.25 mm 以上となるためにはコロナ電流はきわめて小さい値でなければならず、このときは 3.1 で述べたような大きいクレータが発生する。

図 8 は膜厚 0.5 mm でのクレータの顕微鏡写真である。このクレータの底には粒径の大きなパウダがいくつも、ゆるく重なりあって残されているのが見られる。



(a) 層内の絶縁破壊路

(b) 層内のボイド

図 6 絶縁破壊路および層断面の顕微鏡写真

Fig. 6 Microscopic observation of breakdown channels inside the powder layer.

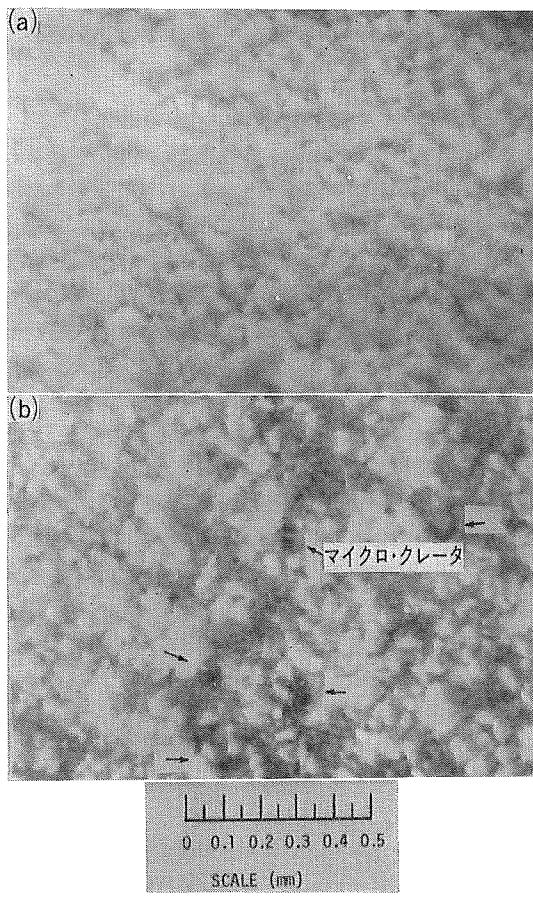


図 7 マイクロクレータの顕微鏡写真  
(a) 逆電離発生前  
(b) 全面グロー状逆電離発生後

Fig. 7 Microscopic observation of Micro-Craters.

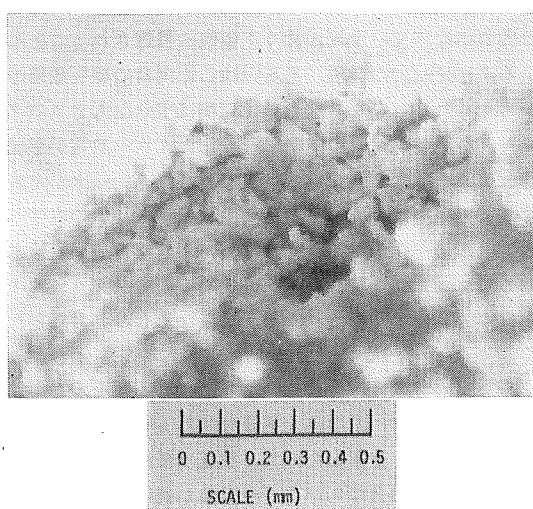


図 8 クレータの顕微鏡写真  
Fig. 8 Microscopic observation of normal craters.

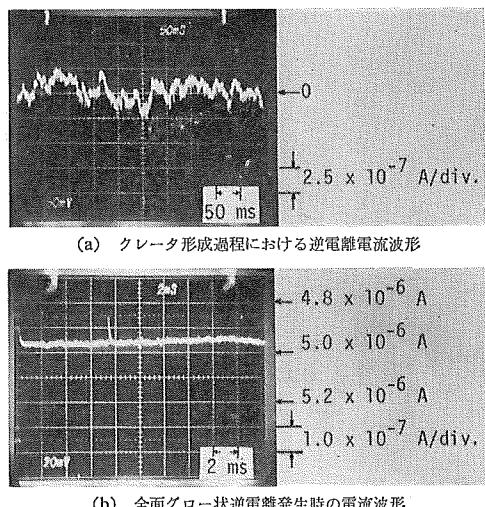


図 9 逆電離電流波形  
Fig. 9 Current wave form of back discharge.

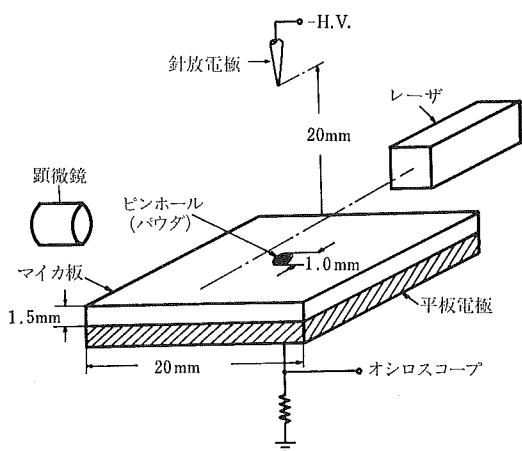
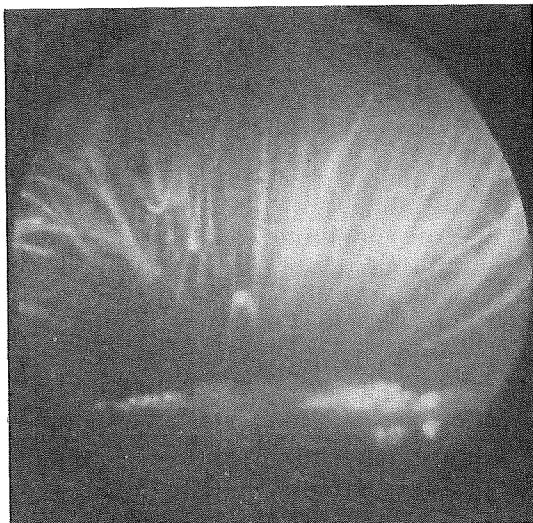


図 10 パウダ粒子放出観測用実験装置  
Fig. 10 Experimental apparatus for observation of powder ejection.

#### 4.2 クレータの形成過程

図 9 (a) はコロナ電流密度がきわめて小さい場合の逆電離の電流波形である。測定時の膜厚は 0.5 mm で、クレータが発生し続いている状態である。このとき逆電離電流はパルス状であり、しかもその波高値はパウダ供給開始前のコロナ電流密度 ( $10^{-12} \text{ A/cm}^2$ ) あるいはパウダによって運ばれる電流密度 ( $10^{-9} \text{ A/cm}^2$ ) に比べてかなり大きい。図 9 (b) はコロナ電流密度が  $7 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$  のときに発生する全面グロー状逆電離の電流波形であり、パウダの供給を止め、多数の安定な発光点 (マイクロクレータ) が存在している状態で測定したものである。この場合には逆電離電流波形は直流成分のみである。こ



(a) パウダ粒子放出状況

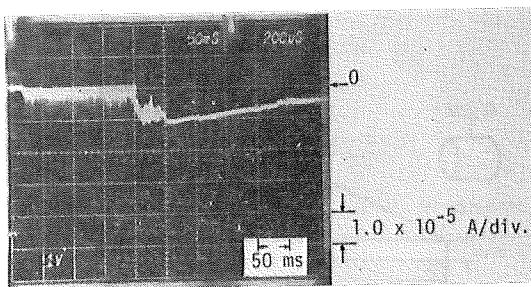


図 11 クレータ形成過程の写真とそのときの電流波形  
Fig. 11 Observation of crater formation.

のことは、各破壊点での逆電離がグロー・モード<sup>4)</sup>であることを示している。

次にクレータの形成過程を調べる実験を行なった。図 10 に示すように、直径 1.0 mm のピンホールを持った厚さ 1.5 mm のマイカ板を平板電極上に置き、エポキシ樹脂パウダをピンホールにつめて針電極に負直流高電圧を加えると、ピンホールで逆電離が開始する。この瞬間図 11(a)顕微鏡写真に示すように、パウダ粒子が空間に放出される。こうしてピンホール内にクレータが形成されると粒子の放出は止まる。図 11(b) はこの過程における逆電離電流波形を示す。逆電離開始直後のパウダが放出されつつある間の電流はパルス的であり、くり返し絶縁破壊が起こる。しかしクレータが形成され、パウダ粒子の放出が止まると、直流成分をもつた安定なオンセッタグロー・モード<sup>4~7)</sup>の逆電離に移行することが判明し

た。

## 5. 考 察

### 5.1 全面グロー状逆電離でのパウダの堆積

前述のように、全面グロー状逆電離が発生していくもある一定の膜厚(限界膜厚)となるまでパウダの堆積が続く。この理由は次のように考えられる。

この場合、逆電離開始時の膜厚は非常に小さく、層内の絶縁破壊路の長さが短いので、ここで起る電子なだれの規模は限られる。したがって逆電離によって層の上面に作られる正極性イオン層のイオン密度および厚みは小さいものと考えられる<sup>6,7)</sup>。このため外部領域からこの正イオン層に入ってくる負に帶電した粉体粒子はここで十分には正極性に荷電されず、その侵入時の運動量のため反発されないままに層表面に到達でき、堆積を続けることができるであろう。しかし膜厚がさらに成長すると十分なイオン密度および厚みをもつた正極性イオン層が形成されるようになり、正イオン層に突入したパウダ粒子は急速に正に荷電され、逆向きのクーロン力によって制動、反発されるようになる。したがってそれ以上は堆積できなくなるであろう。この時点の膜厚が、全面グロー状逆電離が発生する電流密度の比較的大きい場合の限界膜厚となるものと考えられる。

### 5.2 クレータの形成機構について

図 11 の結果より、クレータの形成メカニズムを次のように考えることができる。層の絶縁破壊はその開始初期においてはパルス状のくり返し破壊となり、このとき 4.2 で述べたように破壊点からパウダ粒子が外部に放出される。この理由としては絶縁破壊路近傍の空気がくり返し局部的に熱膨張することによる機械的作用、もしくは破壊路近傍でパウダが強く正極性に荷電されることによるクーロン力の作用、あるいはこの両者の協同効果等が考えられる。パルス性の絶縁破壊は十分な大きさのクレータが発生し、その内部に安定したグロー放電が形成されるようになるまで続く。このようなクレータが完成すると、そのなかでは破壊路におけるキャリアの内壁への拡散による損失が減少するため、十分な電流が供給される限り陽光柱が持続され、直流的で安定なグロー・モードの逆電離が維持されうるものと考えられる。

一方コロナ電流がきわめて小さい場合には安定な陽光柱は維持できず、単発的な絶縁破壊によりパウダを放出し、表面電荷を中和したのち、放電は消滅するものと思われる。この場合にもパウダの供給が続けられれば、新しく形成される粉体層の空間電荷電界によって次々と別の点で絶縁破壊が起こり、発光点が面全体を動きまわる

ものと考えられる。

## 6. 結 論

抵抗率  $10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$  以上の粉体塗装用パウダ試料を用いて負コロナのもとで逆電離の放電様態を観測した結果、次の結論が得られた。

(1) コロナ電流密度がきわめて小さい場合（約  $10^{-12} \text{ A/cm}^2$  以下）限界膜厚の値は大きくなる（0.3 mm 以上）、そして逆電離により大きなクレータが形成される。パウダ供給を続けるとパルス的発光を伴って次々と多数の点でクレータが生じ、膜厚の成長は止まる。

(2) コロナ電流密度が十分大きい場合（約  $10^{-8} \text{ A/cm}^2$  以上）には限界膜厚は小さく、その値は電流値によらず 0.25 mm の程度となる。このとき粉体層表面全体が一様な微弱発光を呈する逆電離が限界膜厚以下で発生しあらわす。これは多数の非常に小さな発光点から成る。

ており、粒径と同程度の直径のマイクロクレータが層内に形成される。

(3) 負コロナを用いる限り、逆電離の発光強度は層と電極との境界面のほうが層表面より大きい。

## 参 考 文 献

- 1) 増田閃一、水野 彰、阿久津顯右：静電気学会誌、1, 3 (1977), 186.
- 2) J. D. Bassett, R. P. Corbett and J. Cross: Inst. Phys. Conf. Ser., 27 (1975), 221.
- 3) Y.-C. Ting, J. F. Hughes: Proc. of 3rd International Congress on Static Electricity, 27-A, Grenoble, April (1977).
- 4) S. Masuda, A. Mizuno and K. Akutsu: J. Electrostat., 3, 1 (1978).
- 5) 増田閃一、水野 彰、阿久津顯右：静電気学会誌投稿中。
- 6) S. Masuda and A. Mizuno: J. Electrostat., to be published.
- 7) 増田閃一、水野 彰：静電気学会誌投稿中。