

論 文

逆電離の火花電圧測定

増田 閃一*, 水野 彰*

(1977年8月8日受理)

Flashover Measurements of Back Discharge

S. MASUDA* and A. MIZUNO*

(Received August 8, 1977)

The mode change and flashover voltage of back discharge under different gaseous conditions were studied with a special attention to the effects of dust layer thickness and alkaline components contained in dust. It was found that back discharge takes either streamer or steady-glow mode depending upon gas mean free path. These modes have their own characteristic flashover voltage as a function of gas mean free path, where its value for the former mode is much lower than that for the latter. Thickness of the dust layer and existence of the alkaline components also govern the initiation of streamer so that the flashover voltage is largely affected by these factors.

1. はじめに

逆電離とは集じん電極上に堆積した高抵抗ダスト層の絶縁破壊に起因して集じん極側から発生する異常放電である¹⁾。逆電離の放電様態およびその効果は用いるコロナ放電の極性により大きく異なっている²⁾。本論文では工業用電気集じん装置で一般に使用されている負コロナ放電を用いた場合の逆電離を対象とする。この場合には逆電離の発生とともに火花電圧が正常時の約1/2に低下し、荷電効率も大幅に低下する。逆電離はダスト層内の電界強度がその破壊電界強度を越えると開始し、コロナ電流密度がきわめて小さいときは絶縁破壊が不規則にくり返して発生する。コロナ電流密度が 10^{-8} A/cm^2 程度以上となると逆電離は微弱ではあるが連続的な点状発光を伴うオンセットグロー・モードとなる。このときの電流波形は負コロナ特有のトリニティルパルスが直流成分に重畠したものである。コロナ電流密度がさらに増し、 10^{-7} A/cm^2 程度以上となると、絶縁破壊点から空間あ

るいは表面蓄積電荷に向かってストリーマが発生し、さらに電圧を上げ電流密度を上昇させると火花閃絡に移行する。この場合いったんある電圧でストリーマが消え、直流成分のみから成る強い連続的発光を伴う逆電離となって、これが電圧を上げ火花閃絡に至るまで続く場合もある。前者を“ストリーマ・モード”，後者を“定常グロー・モード”と呼ぶことにする。

ガスの平均自由行程が大きい場合には、ある電圧を境としてストリーマ・モードから定常グロー・モードへと移行する。このモード変化は可逆的であり、その特性は平均自由行程のみならずダスト層の厚みおよびダストの化学組成によっても影響を受ける。ダスト層の厚みが小さい場合には逆電離はストリーマ・モードとはならず、火花電圧は高くなる。またダストがアルカリ金属を含んでいる場合にはストリーマ・モードとなりやすく、火花電圧は低くなる。そこで以下にガスの平均自由行程、ダストの厚み、ダストに含まれるアルカリ金属が逆電離放電様態、火花電圧におよぼす効果を報告する。

2. 実験装置

ガスの平均自由行程が逆電離発生時の火花電圧および放電様態に与える影響を、常温で気圧 P を変化させ、また大気圧下で温度 T を変化させることによって調べた。

* 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

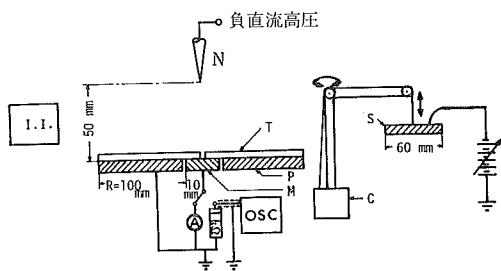


図 1 火花電圧測定用実験装置 (N: 针放電極, T: 試料, P: 平板電極, M: 測定電極, C: クレーン模型, S: 抵抗率測定用電極, I.I.: イメージインテンシファイア)

Fig. 1 Electrode system for measuring flashover voltage of back discharge.

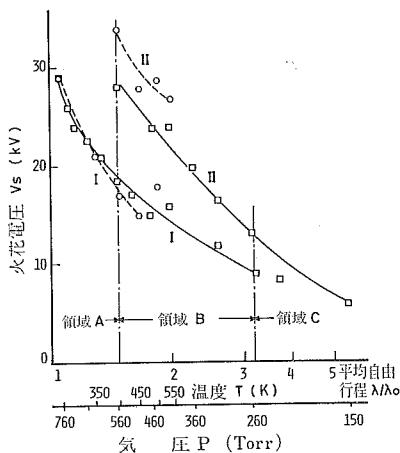


図 2 逆電離発生下の火花電圧と温度および気圧との関係

- I : ストリーマ・モード
- 領域 A : 火花閃絡
- 領域 B : 火花頻発またはストリーマ橋絡
- II : 定常グロー・モード
- 領域 B : 火花閃絡
- 領域 C : 火花閃絡

Fig. 2 Flashover voltage vs. temperature and pressure.

図 1 に示す針対平板電極系を恒温槽あるいは真空槽内で使用した。電極間隔は 50 mm である。ダスト層を模擬するため、直径 0.5 mm のピンホールをあけたマイカ板 (厚さ 0.45 mm), ティッシュペーパおよび種々の化学組成の粉体試薬を平板電極上に置いた。層の抵抗率 ρ_d は重要なパラメータであるので実験を行なうごとに測定した。真空槽中で試料を乾燥させたため、平板電極をヒーターで加熱しつつ 1 Torr まで排気し、乾燥空気を入れた。この方法により測定中の ρ_d をほぼ一定に保つことができた。乾燥のしかたにより ρ_d が異なるため、図 1 に示す装置により、実験開始直前に平行平板を主電

極に対向して置いて ρ_d を測定し、実験中は遠隔操作によりそれを取り除いた。恒温槽中では ρ_d 測定用に平行平板で試料をはさんだ電極系を別に用い、平衡状態に達したあとに ρ_d の測定を行なった。逆電離の微弱な発光を観察し、放電様態を調べるためにイメージインテンシファイア (EMI, type 9912) を使用した。

3. 平均自由行程の影響

試料としてピンホールをあけた厚さ 0.45 mm のマイカ板を用いた。この場合の逆電離発生時の火花電圧 V_s と λ_0 で正規化した平均自由行程 λ/λ_0 との関係を図 2 に示す。ただし λ_0 は 0°C , 1 気圧での平均自由行程である。実線は室温 (20°C)において気圧 P を変化させて測定した結果であり、点線は大気圧 (760 Torr) において温度 T を変化させて測定した結果である。これらの結果、 λ/λ_0 の値が等しければ T あるいは P を変えて測定した逆電離発生下の火花電圧 V_s は互いによく一致しており、 $V_s - \lambda/\lambda_0$ 曲線には曲線 I および II で示す 2 種類が存在することが判明した。曲線 I の下側ではオンセットグロー・モードに続いてストリーマ・モードの逆電離が発生するが、曲線 II の下側では逆電離は定常グロー・モードとなる。また曲線 I と II の存在する λ/λ_0 の範囲は異なっているので、図 2 に示すように λ/λ_0 に関して逆電離のモード変化の異なる三つの領域 A, B, C が存在する。

領域 A では印加電圧の上昇に伴い、逆電離はオンセットグロー・モードからストリーマ・モードに移行し、曲線 I において火花閃絡が発生する。領域 C ではオンセットグロー・モードから定常グロー・モードへと移行し、曲線 II において火花閃絡となるまでストリーマは発生しない。領域 B は A と C の遷移領域で、図 3 にこの領域での逆電離モードの印加電圧に対する変化状況を示す。ピンホールで発生した逆電離はまず最初にオンセットグロー・モードとなり (図 3 a), 印加電圧の上昇によりストリーマ・モードに移行する (図 3 b)。そして曲線 I においてストリーマが両電極間を橋絡する。このとき、不規則な火花の頻発が起こる場合がある (図 3 c)。この火花頻発は領域 B の範囲内において λ/λ_0 が小さいほうが発生しやすい。印加電圧が曲線 I をわずかに越えるとストリーマは突然消滅し、定常グロー・モードとなる (図 3 d)。そしてこのモードが曲線 II において火花閃絡が発生するまで続く。

次に領域 B での逆電離下の電圧-電流特性と、これに及ぼす電源の出力インピーダンスの影響を調べた。電圧 V は電極間電圧、電流 I は主電極 (面積 3.14 cm^2) で測定した値であり、これらを X-Y レコーダにより記録

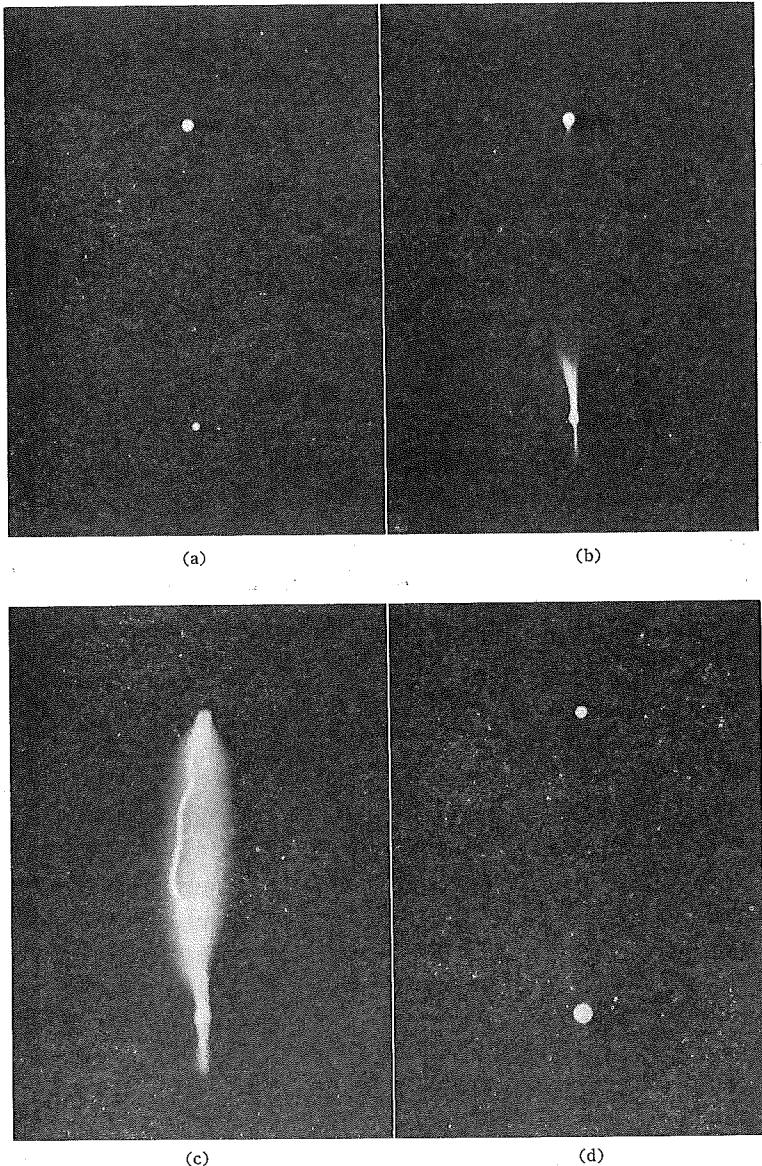


図 3 電圧上昇に伴う領域Bでの逆電離モードの変化

- (a) $V=12\text{ kV}$ (オンセットグロー)
- (b) $V=14\text{ kV}$ (空間ストリーマ: 曲線Iの下)
- (c) $V=16\text{ kV}$ (間けつ火花: 曲線Iの上)
- (d) $V=22\text{ kV}$ (定常グロー: 曲線IとIIの間)

Fig. 3 Transition of back discharge mode in region B.
($T=450\text{ K}$, mica plate with a pinhole)

した。X-Y レコーダの応答周波数は約 2 Hz であり、 V および I の値はこの機械的慣性により平均化されている。電源の出力側にとくに外部インピーダンスを接続しないときの $V-I$ 特性を図 4(a) に示す。使用した電源の出力インピーダンスは約 $15\text{ M}\Omega$ である。このとき、点 Aにおいてビンホールでのオンセットグローから空間ス

トリーマが発生し始める。そして印加電圧の上昇に伴いストリーマが電極間を橋絡し、点 B から C へと移行する。さらに電圧が上昇すると空間ストリーマの発光強度が増し、電流 I が増加するが、電圧 V はほぼ一定値を保つ(曲線 (ii))。点 D の付近では I および V の変動が大きくなり、火花頻発が起こるようになる。しかし電源電圧

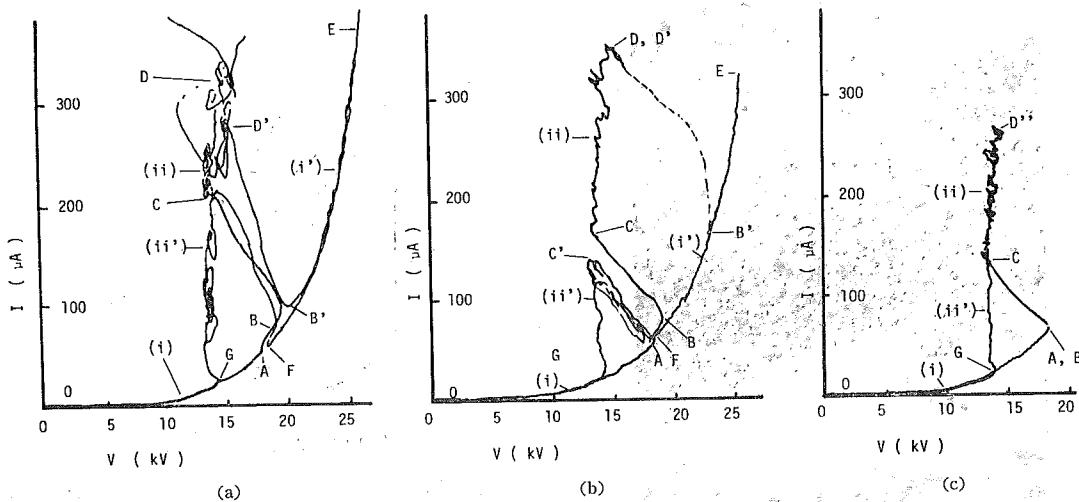


図 4 電源の出力インピーダンスを変えて測定した電圧-電流特性

(a) $R=0$, (b) $R=27 \text{ M}\Omega$, (c) $R=55 \text{ M}\Omega$

Fig. 4 Voltage-current characteristics with different output impedance.

が点Dでの値よりわずかに高くなると、ストリーマ・モードから定常グロー・モードへの移行が起こり、 V - I 曲線は点D'から点B'へと移行する。これらの点D'およびB'はそれぞれ点DおよびBとほぼ一致している。定常グロー・モードへ移行したあとは、 V - I 特性は火花閃絡が発生するまで曲線(i)の延長である曲線(i')上を辿る。次に電圧を下げていくと V - I 特性は曲線(ii')に従って点E-B'を通り、点Fにおいて定常グロー・モードからストリーマ・モードへの移行が起こる。これに伴って V - I 曲線は点Cへと移行する。さらに電圧を下げると曲線(ii')に従って点Gまで電流が減少し、この点で再びオンセットグロー・モードとなる。そしてさらに曲線(i)に沿って電流が減少する。したがって領域Bにおける逆電離の V - I 特性は異なる二つの曲線(i)-(i')および(ii)-(ii')から成ることがわかる。前者はグロー・モードに対応し、後者はストリーマ・モードに対応している。曲線(i)-(i')はさらに、オンセットグロー・モードに対応する曲線(i)と定常グロー・モードに対応する曲線(i')に分けることができる。

以上のような V - I 特性あるいは逆電離モードの変化は図4(b)および(c)に示すように、電源に直列に外部インピーダンスRを接続し電源出力インピーダンスを増してやると、これにより大きな影響を受ける。図4(b)では $R=27 \text{ M}\Omega$ であり、この場合には点BとB'および点CとC'とは離れている。また点FからC'への移行は不安定であるが、曲線(ii')で示されるストリーマ・モードでの電圧、電流値は変動が少ない。図4(c)は $R=55 \text{ M}\Omega$ と電源出力インピーダンスが大きめで大き

い場合である。この場合には電源電圧をその最大値50 kVとしても(点D'に対応)火花頻発およびストリーマ・モードから定常グロー・モードへの移行は起こらない。そして電圧を下げていくと V - I 特性は曲線(ii')から(ii')を辿って変化する。

領域Bにおける逆電離電流波形を図5に示す。オンセットグロー・モードでは直流成分にトリニティルパルスが重畠しており(図5a)、ストリーマ・モードでは不規則で波高値の大きいパルスが発生する(図5b)。しかし定常グロー・モードの電流波形は無パルス性であり、直流成分のみから成っている(図5c)。この場合にはトリニティルパルスも観測されない。このことは定常グロー・モードにおける負コロナ放電極の放電機構がオンセットグロー・モードの場合とは異なっていることを示している。

4. ダスト層の厚みの影響

ダスト層の厚みが火花電圧におよぼす影響を、直径0.5 mmのピンホールをあけたマイカ板(厚さ $t=115, 60, 47 \mu\text{m}$)、およびティッシュペーパーを用いて調べた。ティッシュペーパーの場合には重ねる枚数を変えて得られる3種類の厚さの試料について試験した。マイカ板の抵抗率は $10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$ 以上であり、ティッシュペーパーの抵抗率は $10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ である。図6および図7はこれらの試料を用いて逆電離発生下の火花電圧 V_s を気圧 P を変えて測定した結果であり、横軸は図2と同じスケールにしてある。

図6は上記マイカ板を用いた結果で、厚み t が小さく

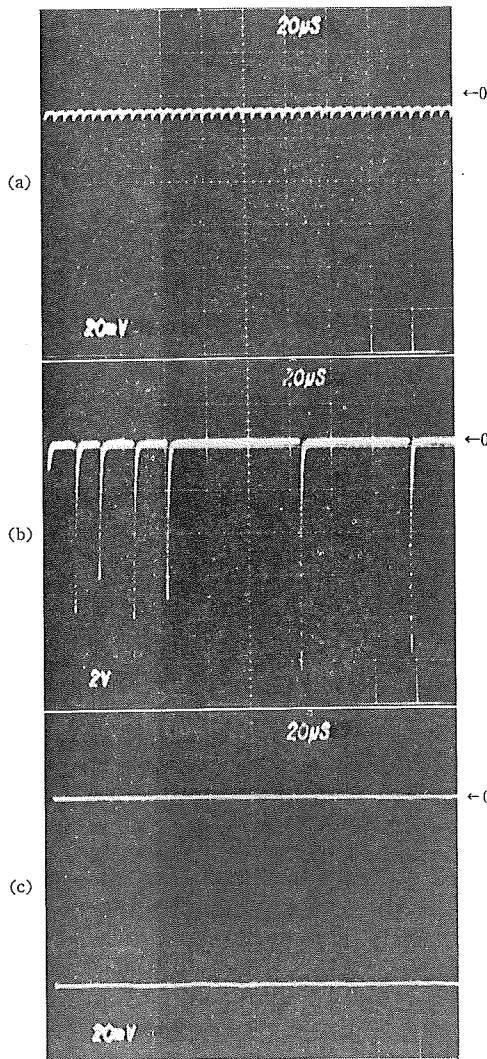


図 5 領域 B における逆電離の電流波形
 (a) オンセットグロー・モード (トライアングルパルス)
 $(V=12 \text{ kV}, I=2.5 \mu\text{A}, 20 \mu\text{A}/\text{div.}, 20 \mu\text{s}/\text{div.})$
 (b) ストリーマ・モード
 $(V=14 \text{ kV}, 2 \text{ mA}/\text{div.}, 20 \mu\text{s}/\text{div.})$
 (c) 定常グロー・モード
 $(V=18 \text{ kV}, I=85 \mu\text{A}, 20 \mu\text{A}/\text{div.}, 20 \mu\text{s}/\text{div.})$

Fig. 5 Current wave form of back discharge in region B.
 $(P=360 \text{ Torr, mica plate with a pinhole})$

なるにしたがって領域 B と C との境界の気圧 P_{bc} が高気圧側 (平均自由行程の小さい側) へ移行することがわかる。 $t=47 \mu\text{m}$ では P_{bc} の値が測定範囲 760 Torr を越えて左側に移行する。したがって測定圧力範囲内ではストリーマが発生せず、 V_s は曲線 3 (上側の曲線のみ) で与えられる。この曲線 3 は図 2 における曲線 II とよく一致する。また重なる領域は異なっているが、曲線 1, 2

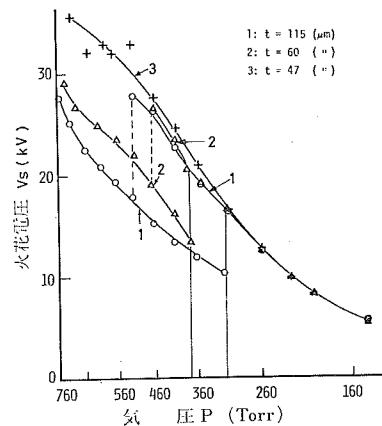


図 6 層の厚みの火花電圧-気圧特性に対する効果 (試料:
 ピンホール付きマイカ板)

Fig. 6 Effect of layer thickness on P - V_s characteristics (1). (Mica plate with a pinhole)

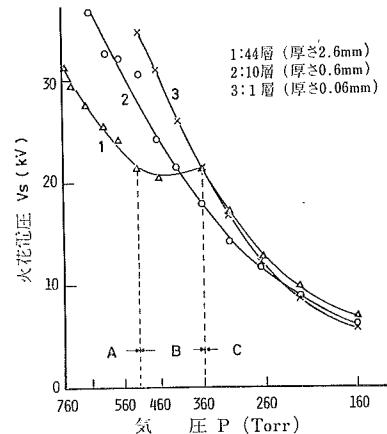


図 7 層の厚みの火花電圧-気圧特性に対する効果 (試料:
 ティッシュペーパー)

Fig. 7 Effect of layer thickness on P - V_s characteristics (2). (Tissue paper)

も図 2 の曲線 I および II とよく一致している。

図 7 はティッシュペーパーを用いた結果である。ティッシュペーパーでは $t=2.6 \text{ mm}$ の場合、多数の点で逆電離が発生し、まず中央部分が定常グロー・モードとなる。そして印加電圧の上昇とともに定常グロー・モードの範囲が周辺部へと広がっていきついに火花閃絡に至るが、火花閃絡自体は周辺部から進展したストリーマによって引き起こされる。 $t=2.6 \text{ mm}$ での V_s (図 7 曲線 1) が領域 B において曲線 I と II (図 2) の中間の値となるのはこの理由によるものと思われる。 $t=0.6 \text{ mm}$ および 0.06 mm では定常グロー・モードから火花閃絡に移行するため、それぞれの曲線 2 および 3 は図 6 の曲線 3 ならびに図 2 の曲線 II と一致する。以上の結果より、層の厚みが

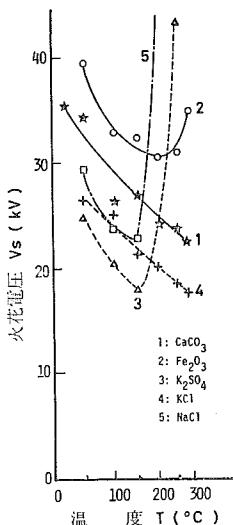


図 8 試薬粉体を試料としたときの火花電圧-温度特性
Fig. 8 Effect of temperature on flashover voltage.
(Atmospheric pressure)

小さくなると P_{bc} が高気圧側へ移動し、定常グロー・モードから火花閃絡が発生するため火花電圧が上昇するという一般的の傾向が明らかとなった。

5. ダストの化学組成の影響

電気集じん装置では、気圧および電極間隔とともに大きいため、通常の運転状態で逆電離が起こるときは一般にストリーマが火花閃絡の原因となる。ストリーマの進展機構にはガスの光電離が主役を演ずる。したがってダスト層中あるいは放電空間に電離電圧の低いアルカリ金属が存在する場合にはストリーマが発生しやすくなり、火花電圧が低下する可能性がある。たとえば鉄鉱焼結炉用電気集じん装置においては、排ガス中に数パーセント程度のアルカリ金属塩、とくにカリウム塩が含まれておらず、その含有量が増加するほど集じん率が大幅に低下する事実が知られている。そこで針對平板電極を用い(電極間隔 50 mm)，平板電極上に表 1 に示す金属塩ないし金属酸化物の試薬粉体を厚さ 2.0 mm の層としておき、逆電離を発生させて火花電圧を測定した。実験は恒温槽あるいは真空槽内で行なった。

温度 T を変えて大気圧下で測定した各粉体の火花電圧 V_s と、それぞれの抵抗率 ρ_d を図 8 より図 9 に示す。図 8 の横軸目盛は図 2 と同じにとってある。図 8 の曲線 2, 3, 5 に見られる温度增加に伴う V_s の急激な上昇は、温度增加によって ρ_d が低下し逆電離が消滅したためである(図 9 参照)。図 8 の曲線 1, 2 は図 2 の曲線 II とほぼ一致し、曲線 3, 4, 5 は曲線 I とほぼ一

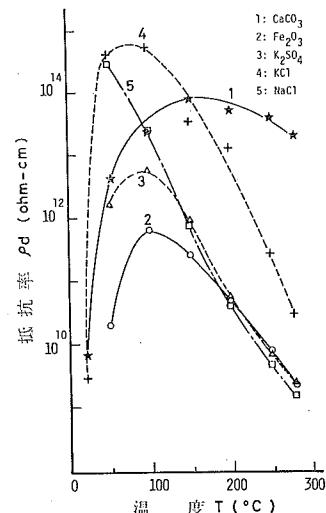


図 9 試薬粉体抵抗率の温度特性
Fig. 9 Apparent dust resistivity vs. temperature.

致している。 CaCO_3 および Fe_2O_3 (曲線 1 および 2) の場合には逆電離が発生すると絶縁破壊点から粒子が放出され、円錐形のクレータが形成される傾向がある。その結果、定常グロー・モードへ移行するため V_s が高くなる。これに対し、 K_2SO_4 , KCl および NaCl (曲線 3, 4, 5) では、ストリーマ・モードから火花閃絡に移行する。その結果 V_s が低くなる。

図 10 は気圧 P を変えて常温で V_s を測定した結果の一例で、横軸の目盛は図 2 と同じにしてある。乾燥空気を使用して ρ_d の値を広い気圧範囲にわたってほぼ一定に保った。種々の試薬を用いて実験した結果、逆電離発生下の V_s 曲線は同図における I, II および III の 3 種類に分類できることが判明した。このうち曲線 I, II は図 2 の曲線 I, II に一致し、曲線 III は図 7 の曲線 1 に一致する。曲線 III に属するものは絶縁破壊点でとくにピンホールが形成されやすい性質を持った試料である。

V_s 曲線をもとにした粉体の分類を表 1 に示す。アルカリ金属塩は曲線 I をとするグループ I に、それ以外の粉体は曲線 II をとするグループ II に、またとくにピンホールの形成されやすい粉体は曲線 III をとするグループ III に属する。アルカリ金属塩が存在する場合には、実験した温度、圧力および層の厚みの範囲内ではストリーマ・モードから火花閃絡が発生し、曲線 II (図 2) が存在しない。この理由は領域 A と B の境界の気圧 P_{ab} が低気圧側へ移動するためと考えられる。これに対しグループ II では領域 B と C の境界の気圧 P_{bc} が高気圧側へ移動するため曲線 II (図 2) のみをとるものと考えられる。グループ III が曲線 III をとする理由は図 7 の曲線 1 について述

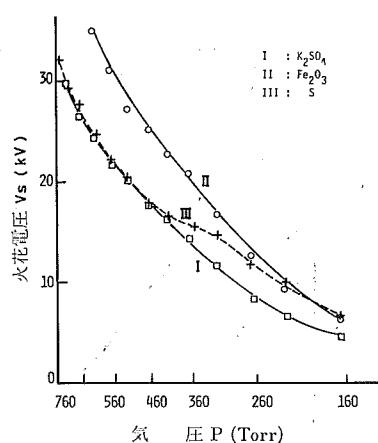


図 10 アルカリ金属化合物の火花電圧-気圧特性に及ぼす影響

Fig. 10 Effect of alkaline compound on flashover voltage. ($T=20^{\circ}\text{C}$)

表 1 火花電圧特性による分類表
Table 1 Classification of dust.

| I | II | III |
|---|--------------------------------|------------------|
| KMnO ₄ | CaCO ₃ | Mica plate |
| K ₂ SO ₄ | Fe ₂ O ₃ | Sulphur |
| Sr(NO ₃) ₂ | Al ₂ O ₃ | SiO ₂ |
| (NH ₄) ₂ SO ₄ | Cr ₂ O ₃ | |
| NaNO ₃ | MgO | |
| NaCl | | |

べた理由と同じである。

次にアルカリ金属が逆電離下の $V-I$ 特性に与える影響を、ピンホール（直径 0.5 mm）を 1 個有する 0.2 mm 厚のマイカ板を用いて調べた。マイカ板の表面に K₂SO₄ の 10% 水溶液を塗布し、乾燥させて試料とした。図 11 (a) および (b) は K₂SO₄ を塗った場合と塗らない場合の $V-I$ 特性の比較である。電極間電圧 V と主電極電流 I は $X-Y$ レコーダーを用いて記録した。また測定は気圧 $P=360$ Torr において行なった。図 11 (a) は図 4 (a) と同様の特性であるが、K₂SO₄ を塗布した場合には図 11 (b) のようにストリーマ・モードになりやすく、火花頻発が起こり、火花頻発直後に過渡的に定常グロー・モードの特性を示すものの、安定には定常グロー・モードへ移行しなくなる。

6. 考 察

6.1 逆電離放電機構に関する定性的考察

絶縁破壊点付近の領域に生ずるオンセットグロー・モードおよび定常グロー・モードの逆電離はその電流に直流成分が含まれている。両モードの電流の大きさおよび電流波形における差異を考慮すると、両者はそれぞれ図 12 (a) (b) に示すような構造を持ったグロー放電であろうと考えられる。これらグロー放電の特徴は、放電を維持するための電子供給源となる負電極が放電域に存在しないことである。しかしながらなんらかの電子供給源がグロー点 G の近傍（図中 S で示す）に存在しているはずであり、それはこの場合放電極から供給された負イオンが S において電子を放出することによるものと考えられ

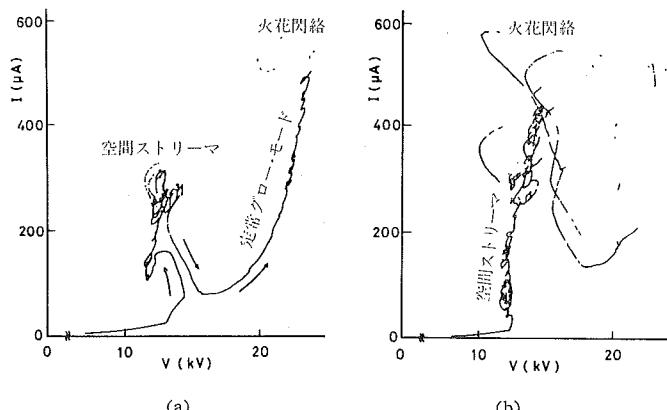


図 11 K₂SO₄ 塗膜が逆電離発生下の電圧-電流特性に及ぼす効果（試料：ピンホール付きマイカ板、0.2 mm 厚、 $P=360$ Torr、 $T=20^{\circ}\text{C}$ ）
(a) マイカ板、(b) K₂SO₄ 塗布したマイカ板

Fig. 11 Voltage-current curves with and without K₂SO₄ film on the surface of mica plate with a pinhole.
(Thickness : 0.2 mm, $P=360$ Torr, $T=20^{\circ}\text{C}$)

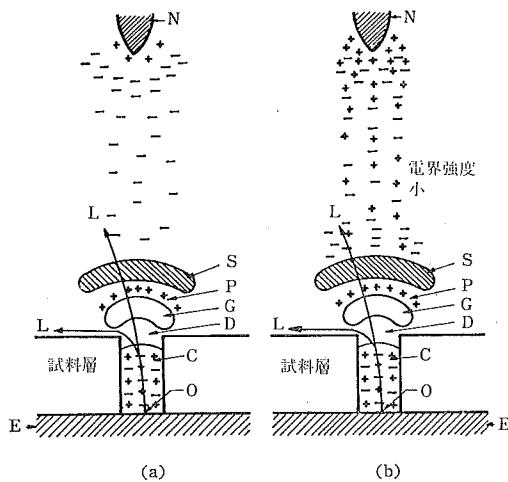


図 12 オンセットグローおよび定常グロー・モードの逆電離放電機構の模式図 (S : 負イオンからの電子放出域, P : 正イオン空間電荷層, G : 負グロー, D : 暗部, C : 陽光柱, N : 针電極, E : 平板電極)
(a) オンセットグロー・モード (トリチルパルス)
(b) 定常グロー・モード

Fig. 12 Schematic representation of back discharge in the glow modes.

る。負イオンからの電子放出が起こるために外部電界と気圧の比 E/P が少なくとも $20 \text{ V/cm} \cdot \text{Torr}$ 程度でなければならないことが知られている⁴⁾。この電界は密度の高い正イオン空間電荷によってのみ作られるものと考えられ、この正イオン集積部は電子放出の行なわれる部分 S の下方 P で示す部分に存在するものと考えられる。負イオンから放出された電子は正イオンによって作られる空間電荷電界により強く加速され、P の下方 G で中性分子を電離するものと考えられる。この電離域 G は通常のグロー放電の負グローに対応し、ここから豊富な正イオンが負ダーカースペースに対応する部分 P へと供給されるものと思われる⁵⁾。

平均自由行程 λ の小さい領域 A (図 2) では単位長あたりの電子と中性分子の衝突回数が大きく、生成されたプラズマの拡散損失は小さくなるものと考えられる。したがって正イオン空間電荷密度はストリーマ生成条件⁶⁾

$$\int_0^L (\alpha - \eta) dl = K \quad K = 10 \sim 20 \quad (1)$$

を満たす程度に大きくなりうる。ここで α は電離係数、 η は電子の中性分子への付着係数である。積分路は原点 0 (平板電極上) から絶縁破壊路中を通り、電界に沿って $\alpha = \eta$ となる点 L に至る路程をとる。ストリーマは絶縁破壊点近傍の電界分布によってガス空間を放電極方向へ、あるいは沿面方向への進展する。そして印加電圧の

上昇によりついに閉鎖しアーケーへと移行するが、これは領域 A では拡散による損失が小さくストリーマ中のプラズマ密度が高くなりうるためであろうと考えられる。

領域 B (図 2) では λ が大きくなり、ストリーマ中のプラズマ密度は領域 A の場合ほど高くなることができない。したがってストリーマが両電極を橋絡した状態、さらには火花発生を起こす状態においても、電源のインピーダンスが十分大きければ強力なアーケー閉鎖に移行することができない。この領域ではストリーマが両電極を橋絡した状態において定常グロー・モードへの移行が起こる。この橋絡状態においてはストリーマにより多量の正負イオンが生成されており、したがって針電極近傍には強力な正イオン空間電荷電界が形成され、 γ 作用 (正イオンの衝突による電子放出作用) による電子放出が助長されるものと考えられる。また放電極近傍の負イオン空間電荷の効果は正イオン空間電荷により相殺されるので、このためトリチルパルスは消滅し連続的な電子放出が起こるものと考えられる。かくして多量の負イオンが無パルス性負コロナにより供給されるようになる。これと同時に S の近傍に負イオンのシースが形成され、絶縁破壊点からの正イオン生成を助長するようになる。このようにして多量の正および負イオンが生成するため放電空間の電界強度が弱められ、ストリーマが維持されなくなるものと考えられる。これがストリーマ・モードから定常グロー・モードへ移行する理由と考えられる。なおこの領域では強力な火花閉鎖は印加電圧が十分大きい場合に定常グロー・モードから発生する。

領域 C (図 2) では λ がさらに大きくなり、衝突回数が減り、プラズマの拡散損失が増すため、ストリーマ生成条件 (1) 式は満たされなくなるものと考えられる。この場合にも印加電圧の上昇に伴い放電極近傍の正イオン密度が上昇するため γ 作用による電子放出が増し、電流の直流成分が増加する。そして正イオンシース空間電荷により負イオン空間電荷の作用が打ち消されるとトリチルパルスは完全に消滅し、オンセットグロー・モードから定常グロー・モードへと、ストリーマが発生することなく移行する。この領域においても印加電圧を十分高くすると定常グロー・モードからストリーマが発生し火花閉鎖となる。

図 2 における曲線 I, II の 2 種類の火花電圧曲線が ρ_d の大きく異なる他の試料における火花電圧曲線を代表していることは、いったん逆電離が開始したあとは火花電圧は逆電離のモード、したがってガスの条件 (種類と λ) のみにより決定され、 ρ_d の影響はまったく受けないことを示している。

6.2 層の厚みおよびダスト成分の電離電圧の影響

ストリーマ生成条件(1)式の積分路の主要な部分は絶縁破壊点の内部と考えられ、したがって気圧 P と層の厚み t の積によりストリーマ生成条件が成立するか否かが定まるものと思われる。これから領域BとCの境界の気圧 P_{bc} は t が小さくなるほど高気圧側へ移動するという実験結果を説明することができる。図6においてマイカ板を用いた場合の $(P_{bc} \times t)$ の値は、 $t=115\text{ }\mu\text{m}$ で35.7 Torr·mm, $t=60\text{ }\mu\text{m}$ で22.8 Torr·mmであり、 $t=47\text{ }\mu\text{m}$ では $P=760\text{ Torr}$ においてもストリーマは発生しなかった。このことはストリーマ生成条件が $(P \times t)$ が20 Torr·mm程度以下になると満たされなくなることを示しているものと思われる。

ストリーマ生成条件における α の実効的な値は、ダストが電離電圧の低いアルカリ金属等を含んでいいる場合には大きくなるものと考えられる。この場合には領域BおよびCが存在せず、領域AとBの境界の気圧 P_{ab} が低気圧側に移動し、火花電圧曲線はIのみとなっている。このことは絶縁破壊路中に放出されたアルカリ金属分子の存在によりストリーマ生成条件が容易に満たされるようになることを示しているものと思われる。このとき、破壊点から空間に放出されたこれらの分子により空間でのストリーマの進展が助長される効果もあるものと考えられる。

7. 結論

以上逆電離発生時の火花電圧および放電様態の研究により以下の結論が得られた。

(1) 逆電離にはガスの平均自由行程に関し、電圧上昇に伴うモードの変化を異にする三つの領域が存在する。そして λ が等しければ、気圧 P あるいは温度 T が異なっても逆電離の特性は等しくなる。 λ の小さな領域Aでは

逆電離はストリーマ・モードとなるが、 λ の大きな領域Cでは定常グロー・モードをとる。 λ の中間領域Bでは電圧の上昇に伴ってストリーマ・モードから定常グロー・モードへの移行が起こる。

(2) 逆電離発生時の火花電圧は λ およびモードにより決定され、2種類の火花曲線が存在する。そのうち低いほうはストリーマ・モードでの火花電圧であり(曲線I), 高いほうは定常グロー・モードでの火花電圧である(曲線II)。

(3) ダスト層の厚みが非常に小さい場合にはストリーマ・モードは発生せず、火花電圧は高くなる。

(4) ダストがアルカリ金属を含む場合には、ストリーマ・モードから火花閃絡が発生するため火花電圧は低くなる。

謝辞：逆電離の放電機構に関して、大同工業大学の三好保憲先生に有益なご討論をいただいた。また本研究は文部省科学研究費(特定研究(1) No. 011914)の補助により行なわれたものである。なお実験の一部は卒論生、下田隆二君が担当した。筆者らはこれらに対して深甚の謝意を表す次第である。

参考文献

- 1) H.J. White : *Industrial Electrostatic Precipitation*, p. 319, Addison-Wesley Publishing Co., (1963).
- 2) S. Masuda : Inst. Phys. Conf. Ser., 27 (1975), 154.
- 3) 増田閃一, 水野 彰: 静電気学会誌投稿中。
- 4) Q. Vuhuu and R.P. Cosma : IEEE Trans., PAS 88 (1969), 1462.
- 5) J.D. Cobine : *Gaseous Conductors*, p. 213, Dover Publications Inc. (1958).
- 6) T. Takuma : CRIEPI Technical Report, No. 69015 (1969).