

論 文

空气中正針対平板ギャップにおけるダスト層に  
起因した火花電圧の異常降下〔II〕

トリガトロンギャップの破壊過程における火花遅れと発光特性

細川辰三\*, 関谷昌久\*\*, 三好保憲\*\*

(1978年6月12日受付)

Abnormal Drop of the Breakdown Voltage due to the Dust Layer in  
Positive Point-to-Plane Gap in Air

Time lag and Light Characteristics under the Breakdown Process  
in the Trigatron Gap

T. HOSOKAWA\*, Y. SEKIYA\*\* and Y. MIYOSHI\*\*

(Received June 12, 1978)

The abnormal drop of the breakdown voltage due to the dust layer on the plane electrode of the positive point-to-plane gap in air was investigated. The breakdown process in the positive point-to-plane gap with a trigger electrode was also investigated. The trigger effects in the trigatron gap were independent of the peak value of the trigger pulse and the electrical polarity of the trigger electrode. And the electrons or the negative ions produced by the trigger played an important role in the breakdown. The time lags of the spark in the trigatron gap were divided into two parts. One of them was larger than several ten micro seconds, which was provided by the transit time of the negative ion in the gap, and the other was less than several micro seconds, which was provided by that of the electron. The pre-breakdown phenomenon of the trigatron gap was observed by the image converter camera. It was proved that the mechanism of the breakdown process in the gap with the dust layer was explained by that of the breakdown in the trigatron gap from this experiment.

1. まえがき

電気集じんに正針コロナの利用が可能かどうかについてその基礎的資料を得る目的で、空气中正針対平板ギャップの平板側にダスト層が蓄積した場合に生ずる火花電圧の異常降下について検討した。その結果、平板側にダスト層を付着させると、コロナの開始付近（バーストパ

ルス放電域）で針先端にストリーマが発生しやすくなり、そのために火花電圧が低下することを先に明らかにした<sup>1)</sup>。

このように、平板側にダスト層が付着した場合に生ずる火花電圧の低下は針先端に発生するストリーマに起因するので、正針コロナを電気集じんに利用するためにはまずストリーマの発生機構を解明し、その発生を抑制しなければならない。

これらの観点から、筆者らは前報<sup>1)</sup>に引き続いて、空气中正針対平板ギャップで平板側に付着したダスト層に起因する火花電圧の異常降下について、正針コロナの特性を支配する初期電子供給の観点から、電気的および光学的手法を用いて検討した。その結果、破壊に寄与する

\* 名古屋工業大学電気工学科(466 名古屋市昭和区御器所町)  
Department of Electrical Engineering, Nagoya Institute of Technology, Gokiso, Showa-ku, Nagoya 466, Japan

\*\* 大同工業大学電気工学科(457 名古屋市南区大同町)  
Department of Electrical Engineering, Daido Institute of Technology, Daido, Minami-ku, Nagoya 457, Japan

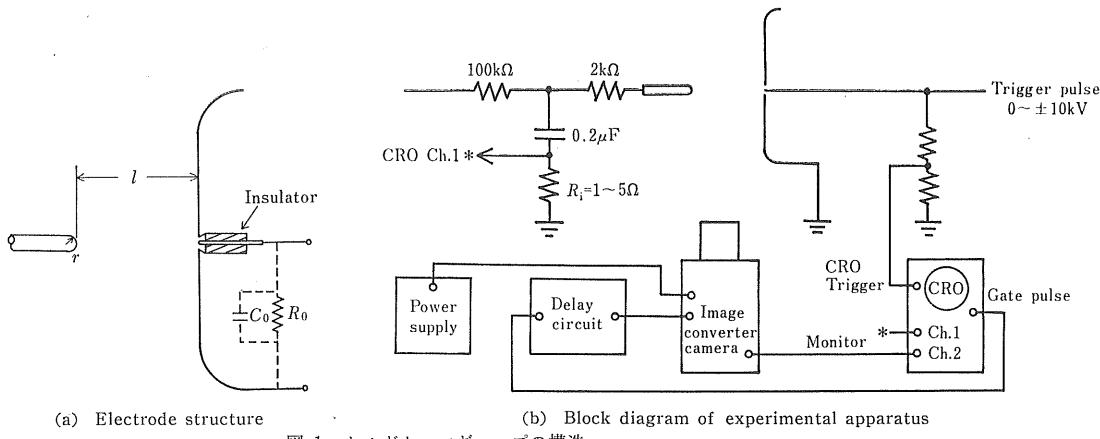


図 1 トリガトロンギャップの構造  
Fig. 1 Electrode structure of the trigatron gap.

初期電子は陰極側のダスト層の破壊によって供給されるもので、その破壊モデルは平板側に補助電極を付けたトリガトロンギャップの破壊機構で説明されることが明らかになった。

本報告はこれらの結果をまとめたもので、ダスト層に起因した火花電圧の異常降下と類似した特性をもつトリガトロンギャップの破壊特性を述べ、さらにダスト層に起因した火花電圧の異常降下に重要な役割を演ずる初期電子供給とストリーマの形成機構をトリガトロンギャップの破壊特性から説明する。

## 2. 実験装置および実験方法

ダスト層を模擬した実験装置および実験方法は、前報<sup>2)</sup>図1と同じである。

次に、これと類似した破壊特性をもつ補助電極付きトリガトロンギャップの構造と実験装置をそれぞれ図1(a)および(b)に示す。(a)においては、平板側の中心に直径0.3cmの円形の穴があり、これにトリガー用第3電極(先端が半球形で直径0.2cmの黄銅製円柱電極で、以後トリガー電極と記す)が挿入されている。(b)においては、主ギャップに直流火花電圧より低い直流電圧を印加しておく。次に、トリガー電極にインパルス電圧を印加してトリガーギャップに火花放電を起こせると、この放電は主ギャップの全路破壊を誘発する。この場合、トリガーギャップにインパルス電圧を印加したことによるトリガー効果は、あとでも述べるように、インパルス電圧の電気的極性、波高値の高さにはあまり依存しなかったので、本実験ではこれに波高値が+6kV、時定数40μsのCR減衰波を用いた。なお、トリガー電極と平板電極間の絶縁抵抗 $R_0$ および静電容量 $C_0$ はそれぞれ $4 \times 10^{10}\Omega$ および $2 \times 10^{-12}F$ である。

さらに、破壊の進展過程はSTLイメージコンバータカメラ(以後カメラと記す)で観測した。この場合、カメラの始動は遅延回路を経たトリガーパルス(カメラの始動は火花の時間遅れに応じて遅らせる必要があり、その場合は遅延回路を用いてカメラを所用時間だけ遅らせるが、本報告では遅延時間をゼロに調節した。しかし、実際には接続ケーブルの伝送特性で遅延回路の出力パルスはトリガーパルスからほぼ0.3μs遅れている)によって行った。

実験はすべて室内空气中で行なった。

## 3. 実験結果

空気中正針對平板ギャップの平板側にダスト層が蓄積すると、ギャップの火花電圧が低下し、その破壊特性は針對平板ギャップに微小ギャップを直列に接続した一種の補助電極付きトリガトロンギャップ、あるいは平板側に補助電極を付けたトリガトロンギャップの破壊特性で説明される<sup>1)</sup>。ここでは、その破壊機構を解明するため、トリガトロンギャップのトリガー電極にインパルス電圧を印加した場合の破壊特性について述べる。

### 3.1 トリガー効果

図1において、主ギャップに直流火花電圧より低い直流電圧を印加し、トリガー電極にインパルス電圧(以後トリガーパルスと記す)を印加してトリガーギャップを火花放電させると、この火花放電すなわちトリガーは主ギャップの破壊を誘発する。この場合、トリガーによる主ギャップの最低火花電圧 $V_{ST}$ は同じ実験条件でも不整を伴った。図2はトリガーを20回行なった場合の火花確率<sup>3)</sup> $P$ と印加電圧 $V$ の関係を示した一例(針先端半径 $r=2.0\text{ cm}$ 、ギャップの長さ $l=3\text{ cm}$ )で、このギャップの火花電圧の不整幅は1kVであった。このよう

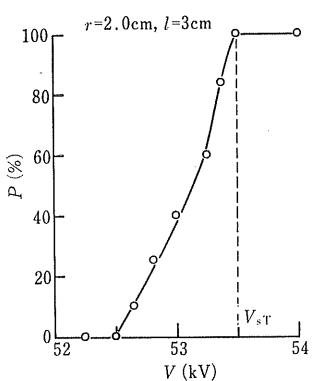


図 2 トリガトロンギャップにおける破壊電圧のパーセント放電率

Fig. 2 Percentage breakdown voltage in the trigatron gap.

に、トリガトロンギャップの最低火花電圧は不整を伴うので、本研究では火花確率 100% の最低値をそのギャップの最低火花電圧  $V_{ST}$  とした。なお図 2 は、供試実験範囲内では不整が最も大きかった場合の一例で、この実験条件より  $l$  を増しても、あるいは  $r$  を減じても不整範囲は減少したので、実用的見地 ( $r=0.2\sim0.3$  cm で  $l=5\sim10$  cm) では不整範囲はさらに小さく、 $V_{ST}$  に比べて無視できるほど僅少と考えてさしつかえない。

また、一般にトリガーエネルギーによる火花遅れの測定にはトリガーエネルギーをあまり大きくすることは好ましくない。したがって本研究では、トリガーパルスとしてトリガーエネルギーが十分にあり、かつ火花遅れの測定に影響を及ぼさない程度の時定数をもったパルスを選んだ。

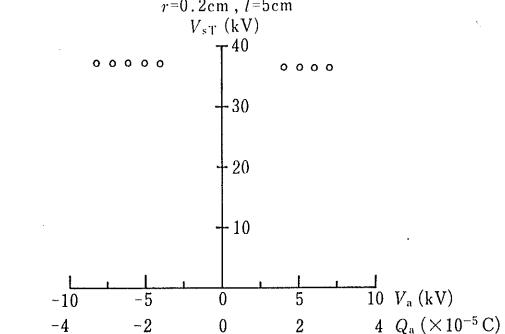


図 3 トリガトロンギャップにおけるトリガーエフェクト

Fig. 3 Trigger effect in the trigatron gap.

図 3 は本研究で用いた CR 減衰波のトリガーパルスの特性で、パルスの波高値  $V_a$  (電気量  $Q_a$ ) と主ギャップ ( $r=0.2$  cm,  $l=5$  cm) の最低火花電圧  $V_{ST}$  の関係を示している。図から明らかなように、供試範囲内では、トリガーエフェクトはトリガーパルスの大きさおよび極性にはあまり依存しなかった。これらのことから、本研究ではトリガーパルスとして波高値 +6 kV の CR 減衰波 (CR = 40 μs) を用いた。

### 3.2 破壊電圧

図 4 は  $l=5$  cm(a), 8 cm(b), 10 cm(c) のギャップの長さにおけるバーストパルス、ストリーマコロナ、グローロコロナ<sup>1,5-7)</sup> および火花の各開始電圧  $V_b$ ,  $V_p$ ,  $V_g$  および  $V_s$  と針先端半径  $r$  の関係を、平板側に紙を付着させた場合とトリガーアクションさせた場合について比較したものである。図から、 $V_b$ ,  $V_p$  は紙を付着させた場合のほう

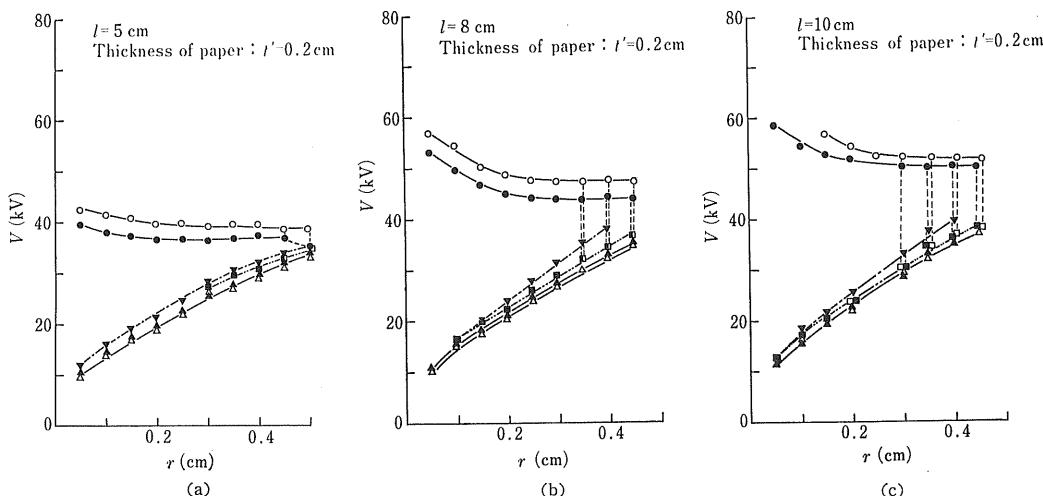


図 4 破壊電圧と針先端半径の関係 (○:  $V_s'$ , □:  $V_p'$ , △:  $V_b'$ , ●:  $V_{ST}$ , ▽:  $V_{gT}$ , ■:  $V_{pT}$ , ▲:  $V_{bT}$ , Trigger pulse: +6 kV)

Fig. 4 Relation between the breakdown voltage and the point radius.

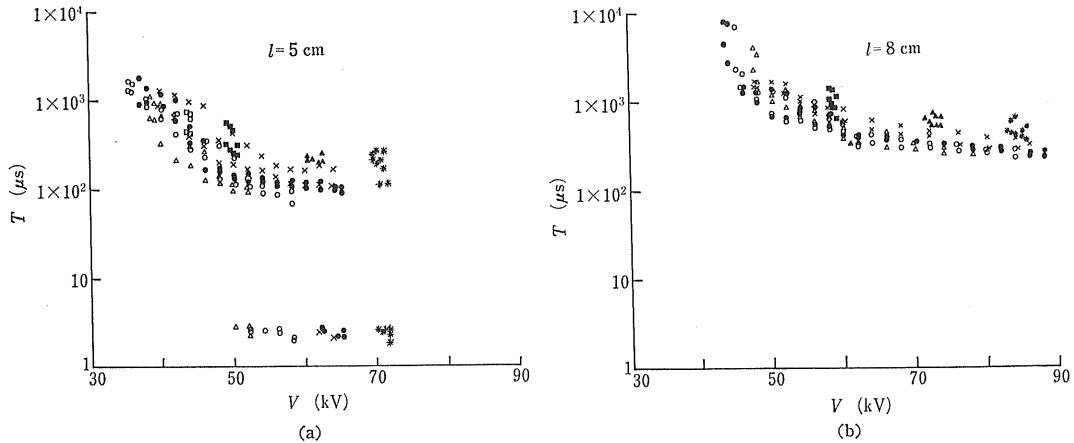


図 5 トリガトロンギャップにおける火花の時間遅れ特性 ( $\triangle : r=0.1\text{cm}$ ,  $\circ : r=0.2\text{cm}$ ,  $\bullet : r=0.3\text{cm}$ ,  $\times : r=0.4\text{cm}$ ,  $\square : r=0.8\text{cm}$ ,  $\blacksquare : r=1.0\text{cm}$ ,  $\blacktriangle : r=1.5\text{cm}$ ,  $\ast : r=2.0\text{cm}$ )

Fig. 5 Time lag characteristics of the spark in the trigatron gap.

がいくぶん低いが ( $V_b' < V_{bT}$ ,  $V_p' < V_{pT}$ ), いずれのギャップにおいてもいくぶん飽和の傾向を示しながら  $r$  にほぼ比例して増加している。また、ストリーマコロナはトリガトロンギャップにおいて発生しやすく、供試実験範囲内では  $l=5\text{ cm}$  のとき  $r \geq 0.3\text{ cm}$  で,  $l=8\text{ cm}$  のとき  $r \geq 0.1\text{ cm}$  で,  $l=10\text{ cm}$  のとき  $r \geq 0.05\text{ cm}$  でそれぞれ観測され、この場合ストリーマコロナはグローローナへ遷移するとともに消滅した。他方、紙を付着させた場合、ストリーマコロナは  $l=5\text{ cm}$  のとき  $r \geq 0.5\text{ cm}$  で,  $l=8\text{ cm}$  のとき  $r \geq 0.35\text{ cm}$  で,  $l=10\text{ cm}$  のとき  $r \geq 0.2\text{ cm}$  で観測され、しかも一度発生すると火花まで観測された。

次に、 $V_s$  は一般にトリガトロンギャップのほうが紙を付着させた場合より  $2\sim 5\text{ kV}$  低かったが、いずれのギャップ条件においても  $r$  が増すと低下する傾向を示した。

### 3.3 火花遅れ特性

トリガトロンギャップにおける火花破壊では、トリガーから破壊までに時間遅れ（以後、火花遅れと記す）がある。火花遅れは一般に形成遅れと統計遅れの和として観測されるが、この特性からギャップの破壊機構が推定できる。

図 5 は、火花遅れ  $T$  と印加電圧  $V$  の関係を  $r$  をパラメータとして表わしたものので、(a) は  $l=5\text{ cm}$ , (b) は  $l=8\text{ cm}$  の結果をそれぞれ示している。なお、火花遅れは同じ実験条件でも実験ごとに異なる値を示したので、図には同じ印加電圧で測定した 5 回の測定値の最小値と最大値が示してある。

このように、トリガトロンギャップの火花遅れは実験ごとに不整を伴うのでその最小値を火花形成遅れと考え

れば、形成遅れは印加電圧の上昇に対してほぼ指数関数的な減少特性を示している。またこれらの特性は、数十  $\mu\text{s}$  以上の長い特性域 (図 5 (a)) では  $70\text{ }\mu\text{s}$  以上、(b) では  $210\text{ }\mu\text{s}$  以上) と数  $\mu\text{s}$  以下の短い特性域 ((a) で  $3\text{ }\mu\text{s}$  以下) に分けられ<sup>8)</sup>、一般に  $V$  が低いと、つまり  $V_{sT}$  附近では前者のみが観測されたが、 $V$  が上昇すると後者も観測されはじめ、両者が混在した。しかし、両者の出現のしかたは統計現象で規則性は認められなかつた。なおギャップ条件によっては、火花直前で後者のみとなった場合もあった。

### 3.4 電子および負イオンのギャップ走行時間

トリガー機構を検討するために、電子および負イオンのギャップ走行時間を計算し、計算結果と火花遅れとを比較した。ここで電界計算は伊佐の方法<sup>9)</sup>を採用して供試ギャップにおける電極軸上の電界を計算した。

陰極（平板）を出発した電子のギャップ走行時間  $T_e$  は次式で求められる。

$$T_e = - \int_0^l \frac{1}{v_e} dx \quad (\text{s}) \quad (1)$$

ただし、 $v_e$  は電子の移動速度で Raether の実験式<sup>10)</sup>  $v_e = 1.25 \times 10^7 \sqrt{(E/P)/40} \text{ cm/s}$  を用いた。

次に、陰極（平板）を出発した負イオンのギャップ走行時間  $T_-$  は次式で求められる。

$$T_- = - \int_l^0 \frac{1}{v_-} dx \quad (\text{s}) \quad (2)$$

ただし、 $v_-$  は負イオンの移動速度で  $v_- = \mu_- E$  で示され、 $\mu_- = 2.11 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ <sup>11)</sup> とした。

図 6 は、実用的寸法も考慮して  $r=0.2\text{ cm}$  で  $l=5, 8\text{ cm}$  における  $T_e$  (実線で  $T_{es}$ ,  $T_{eg}$ ),  $T_-$  (点線で  $T_{-5}$ ,  $T_{-8}$ ) を上記電界計算と(1)および(2)式から求めた結果を

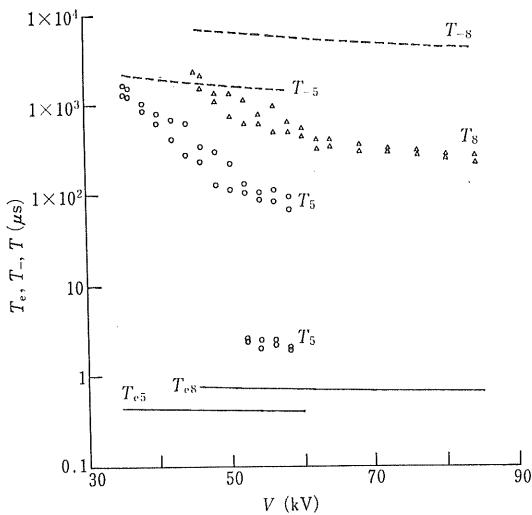


図 6 計算による電子および負イオンのギャップ走行時間と火花遅れの関係

Fig. 6 Comparison of the transit times of the electron and the negative ion by calculation with the time lag of the spark.

示している。また図には、比較のために図5における  $r=0.2\text{ cm}$  の火花遅れ ( $T_5, T_8$ ) も付加した。

これらの計算結果と実験結果を比較すると、いずれのギャップにおいても長い火花遅れには負イオンの走行時間が、短い火花遅れには電子の走行時間がそれぞれ対応しているが、前者では計算値が、後者では実験値がいくぶん大きくなっている。

### 3.5 破壊過程の電流波形

トリガトロンギャップの火花遅れは、前にも述べたように、一般に数十  $\mu\text{s}$  以上と数  $\mu\text{s}$  以下の特性域に分けられるが、ここではそのような場合破壊過程にどのような差異が生ずるかについて検討する。

図7、8はその典型的な例で、図7は  $r=0.3\text{ cm}$ ,  $l=3\text{ cm}$  で、図8は  $r=0.2\text{ cm}$ ,  $l=5\text{ cm}$  で観測された破壊過程の電流波形をそれぞれ示している。なお、火花遅れは長い遅れと短い遅れが混在したので、そのいずれであっても測定できるようにオシロスコープの上側波形と下側波形の掃引時間はそれぞれに適したものを探用した。

図7は長い火花遅れと短い火花遅れが混在したギャップ条件における破壊過程で、(a), (c)が長い火花遅れの場合、(b)が短い場合をそれぞれ示している。(a), (b)から、トリガトロンギャップにおいては、火花遅れの長短に関係なく火花への遷移過程で複数個の前駆パルスが観測され、かつ前駆パルスはステップ状<sup>12)</sup>(図中矢印)に進展していることがわかる((a)では掃引時間が遅い( $20\text{ }\mu\text{s}/\text{div}$ )ため個々のパルスは判別できない)。

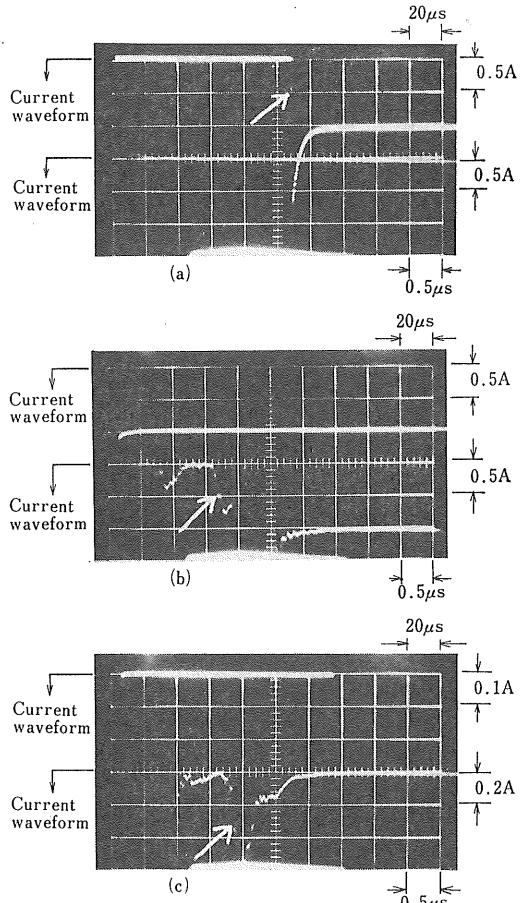


図7 トリガトロンギャップにおける破壊過程の典型的なオシログラム

Fig. 7 Typical oscilloscopes of the breakdown process in the trigatron gap.

また、破壊過程は統計現象で、前駆パルスの進展は不規則で実験ごとに異なる波形が観測された。(c)は長い火花遅れで破壊しているが、電圧印加後  $0.75\sim 2\text{ }\mu\text{s}$  のあいだに前駆パルスが観測された場合で、数多くの実験のうち1回だけ得られた珍しい波形である。これは(b)と同様な破壊過程で進展したが、途中で破壊の進展が抑制されたことを意味している。

図8は、主ギャップの印加電圧が静的破壊電圧に近く火花遅れが短い場合の破壊過程で、この場合も前駆パルスはステップ状(図中矢印)に進展し、かつ(a), (b)のように不規則で、実験ごとに異なる波形が観測された。

### 3.6 イメージコンバータカメラによる破壊過程の観測

カメラによる供試ギャップの破壊過程の観測結果の典型的な一例を図9に示す。これらの図において、(i)は

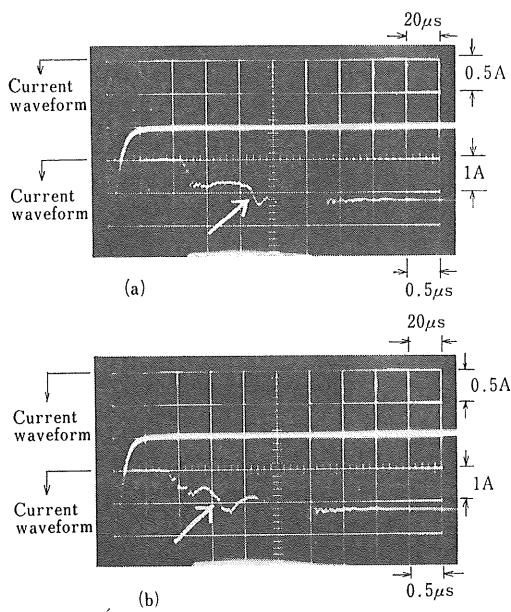


図 8 トリガトロンギャップにおける破壊過程の典型的なオシログラム

Fig. 8 Typical oscilloscopes of the breakdown process in the trigatron gap.

破壊過程の流し撮り写真、(iii)はそのオシロスコープの観測結果を示しているが、(i)では破壊の前駆現象の光量不足から、前駆現象の観測が不鮮明であったのでそのスケッチを(ii)に示した。また(iii)で下側の波形はカメラの動作を示すモニタ波形で、S点はカメラの観測開始時点を示している。

供試トリガトロンギャップの破壊は、(i)、(ii)から明らかなように、破壊の直前に針先から平板に向かう前駆現象が観測され、その先端が平板側に達すると、これとほとんど同時に全路破壊に遷移している。この場合前駆現象の進展には不整を伴い(a)、(b)に示したように実験ごとに異なる進展を示したが、いずれの場合も電流波形から明らかなようにステップ状に進展<sup>12)</sup>している。また、多くの実験結果から、その平均速度はほぼ  $2 \times 10^7$  cm/s であった。

なお全路破壊に起因した発光は、図 9 から明らかなように、ジグザグしているが、これは火花経路、つまり前駆現象の進展が不整を伴いジグザグしていることに起因している<sup>12)</sup>。

#### 4. 考察

##### 4.1 トリガー効果

空気中正対平板形トリガトロンギャップにおいて、平板側をトリガーさせると図 4 に示したように主ギャップ

の火花電圧が低下するが、トリガー効果は図 3 に示したように、トリガーパルスの大きさ、電気的極性にはあまり依存しなかった。これはトリガーによって発生したプラズマあるいはその後の高温気体 (hot gas)<sup>3,13,14)</sup> より、むしろトリガーによって発生した電子あるいは負イオンが対電極の針先側に駆動され、針先端でストリーマを形成するのに重要な役割を演じていることを意味している。つまり、不平等電界ギャップにおけるトリガー効果は、トリガーが全路破壊に直接寄与するものではなく、トリガーによって発生した電子あるいは負イオンが対電極の針先側に駆動されることによって針先端にストリーマの形成を可能にし、このストリーマが平板側に進展して破壊を完成させるものと解釈される。

##### 4.2 トリガトロンギャップの火花遅れと破壊機構

トリガトロンギャップにおける火花遅れ特性は図 5 に示したように数十 μs 以上の長い遅れと、数 μs 以下の短い遅れに大別され、それらは図 6 に示したように、前者には負イオンのギャップ走行時間が、後者には電子のギャップ走行時間がそれぞれ対応した。また、その破壊過程には前駆パルスが観測され、かつ前駆パルスはステップ状に進展した。

これらのことから、トリガトロンギャップにおける主ギャップの破壊機構は次のように考えられる。

トリガーによって陰極平板側にプラズマを発生させると、前述したように、多量の電子と正イオンが発生するが、正イオンはそのまま平板に向かい、電子は主ギャップの電界で陽極(針先)に向かって駆動される。しかし、この場合主ギャップの印加電界は静的破壊電界より 1/3 程度低いことから、陽極へ向かう電子の大部分は途中で空気中の酸素分子に付着して負イオンを形成し、駆動速度を落とすものと考えられる。このように、陰極を出発した電子は途中負イオンに変わるが、針先端付近に近づくと静電界が再び強まるから、電子は負イオンから分離して電子なだれ(以後“なだれ”と記す)に成長する。

他方、トリガーによって発生したプラズマは、2~3 μs 後には高温気体に変わり膨張しながら平板前面に噴出する。この高温気体は、内部の  $E/N$  ( $E$ : 電界,  $N$ : 分子密度) が高く電離しやすい状態になっているから<sup>14)</sup>、その噴出は陰極における  $\gamma_p$ (光子による 2 次電子放出),  $\gamma_1$ (正イオンによる 2 次電子放出) 両作用による 2 次電子の供給を可能にするとともに陽極側の電界を強め、針先端におけるなだれの成長を助長する。

かくして、針先端におけるなだれの成長はいっそう活発化し、それに伴って発生する正イオンの空間電荷効果もなだれの成長をさらに強め、針先付近には高電界が発生してストリーマの形成条件<sup>15,16)</sup>が満たされたとそこで

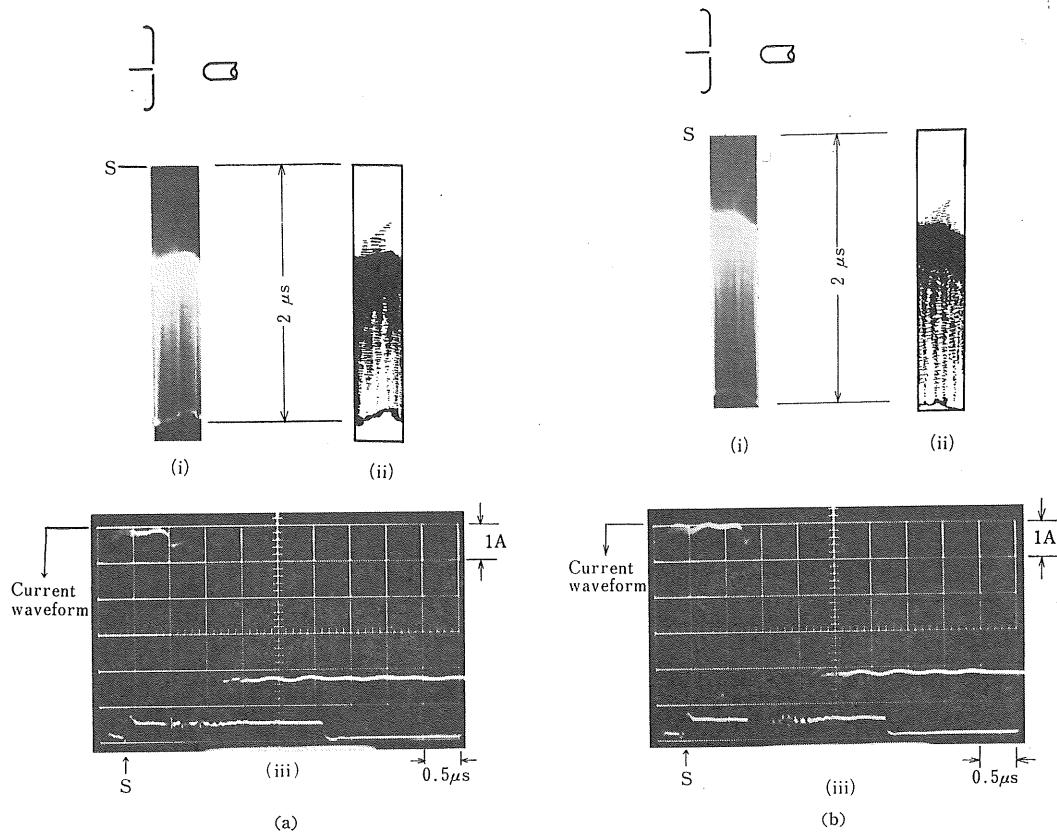


図 9 イメージコンバータカメラで観測したトリガトロンギャップの破壊過程の典型的な写真  
( $V=42kV$ ,  $V_{ST}=32.5kV$ ,  $V_s=46.5kV$ ,  $r=0.3cm$ ,  $l=3cm$ )

Fig. 9 Typical photographs of the breakdown process in the trigatron gap observed by image converter camera.

ストリーマが発生し、次節で述べるように、これが陰極に向かって進展し、ギャップの全路破壊を誘発するものと解釈される。

また、印加電圧が上昇して静的破壊に近づくと、陰極を出発した電子は途中電子付着を起こすことなく陽極に達することが可能となる。したがって、このような場合の火花遅れは、ストリーマの形成および進展速度を無視すれば電子のギャップ走行時間程度で足りることになる。

以上、トリガトロンギャップの破壊機構について初期電子供給の観点から検討したが、図6から明らかなように、実験結果と計算結果にかなりの差異が現われ、長い火花遅れでは計算値が、短い遅れでは実験値がそれぞれ大きく現われた。しかし、これは前者が負イオンの走行を平板陰極から針先陽極までと仮定したうえでの結論で、実際には陰極付近と陽極付近は電子と考えられるから、これを考慮すれば計算値はもっと減少して実験値に近づくものと思われる。また、印加電圧が上昇するに従って計算値と実験値の差が大きくなっているが、これも印加

電圧が高いほど、ギャップにおける負イオン形成の寿命が短くなるものと考えられ、これを考慮すれば実験結果と計算結果は矛盾していない。

他方、短い火花遅れでは計算値のほうが小さくなっている。これは、計算値にストリーマの形成時間と進展時間を考慮しなかったために生じた差異で、実際には図7、8に示したようにストリーマはステップ状に進展しており、これを考慮すれば火花遅れは電子のギャップ走行時間よりかなり遅くなることが理解される。

#### 4.3 イメージコンバータカメラによる破壊過程の観測

カメラによるトリガトロンギャップの破壊過程の典型的な一例を図9に示した。これらの結果から、供試トリガトロンギャップの破壊には、破壊直前に針先端から平板陰極側へ向かう前駆現象が観測され、これが破壊に重要な役割を演じていることが明らかになった。またその破壊機構は、前報<sup>11</sup>で提案した破壊モデルで説明されることが確認された。

他方、一般に空気中正針対平板ギャップにおいてグロ

一放電<sup>17)</sup>を経ない破壊では、ストリーマの形成に重要な役割を演ずる針先付近の電界が重要で、この電界がストリーマの形成を可能にすれば、そこで発生したストリーマは平板陰極側へ向かって進展し、さらに火花破壊へ遷移するものと解釈される。

これらのことから、供試トリガトロンギャップおよびダスト層に起因した不平等電界ギャップの破壊にはストリーマの形成条件を満たすために針先端付近の電界の急上昇が必要で、この電界上昇に前者ではトリガーによって発生した高温気体が、後者では平板側に蓄積したダスト層が寄与している。

またこの場合、ストリーマの進展はステップ状に進展しているが、その平均速度はほぼ  $2 \times 10^7 \text{ cm/s}$  で、この値は諸氏の観測結果<sup>6, 18, 19)</sup>ともほぼ等しい。さらに、図9の前駆現象は、発光量などから長ギャップ放電で起るストリーマに統くりーダ<sup>20)</sup>とも考えられるが、本実験ではギャップの長さ ( $l=3 \text{ cm}$ ) から考えてストリーマと解釈するのが妥当のように思われる。

#### 4.4 ダスト層に起因した火花電圧の低下

前節において、空気中正針対平板ギャップの平板側にダスト層が付着した場合に生ずる火花電圧の低下と類似した特性をもつ補助電極付きトリガトロンギャップの特性を述べ、その破壊機構について検討した。ここでは、これらの結果を基に、ダスト層に起因した火花電圧の低下の機構について初期電子供給の観点から検討する。

空気中正針対平板ギャップにおいて、平板側にダスト層が蓄積すると、コロナに伴って発生した正イオンがダスト層の表面に付着し、ダスト層内部の電界を強める。ダスト層内部の電界が強まり破壊の条件を満たすとダスト層が破壊しプラズマが発生する。このプラズマは多量の電子と正イオンを発生し、これらの荷電粒子はトリガトロンギャップの場合と同様、それぞれ平板と針先に向かって駆動されるが、印加電圧が低いと電子は途中で負イオンを形成する。さらに、この負イオンは針先に近づくと電子分離を起こし、その電子はなだれに成長する。

他方、ダスト層が破壊すると、ダスト層表面の正電荷が中和し陰極平板と同電位になるから、針先端も含めてギャップの電界がわずかではあるが急上昇し、このため針先端で成長したなだれはストリーマに進展しやすくなる。かくして、針先端で発生したストリーマは陰極に向かって進展し、全路破壊を誘発させるものと考えられる。なお、集じん装置のようにダスト層が幅をもって横に広がっている場合には、このような部分放電がダスト層の各所で起り<sup>21)</sup>、そのいざれかが全路破壊に進展するが、全路破壊への進展は統計的要素を含むから実際の破壊はもっと複雑なものと思われる。

#### 5. 結 言

空気中正針対平板ギャップの平板側にダスト層が付着した場合に起る火花電圧の低下を模擬したトリガトロンギャップの特性を述べ、その破壊機構について検討した。さらにこれらの結果をもとに、ダスト層に起因した火花電圧の低下について初期電子供給の観点から検討した。得られた結果を要約すると次のようである。

- (1) トリガトロンギャップのトリガー効果は、実験範囲内ではトリガーパルスの大きさ、電気的極性にはあまり依存しなかった。
- (2) トリガトロンギャップにおける最低火花電圧は統計的不整を伴う。
- (3) トリガトロンギャップの火花遅れは、数十  $\mu\text{s}$  以上と数  $\mu\text{s}$  以下に大別され、前者には負イオンのギャップ走行時間が、後者には電子のギャップ走行時間が対応し、それぞれの遅れに重要な役割を演じている。
- (4) トリガトロンギャップにおいては、陽極針先端から陰極平板に向かう破壊の前駆現象が観測され、破壊以前駆現象が重要な役割を演じている。また、この前駆現象はストリーマと考えられ、その進展はステップ状で平均速度はほぼ  $2 \times 10^7 \text{ cm/s}$  であった。
- (5) トリガトロンギャップならびにダスト層に起因した不平等電界ギャップの破壊にはストリーマの形成条件を満たすために針先端付近の電界の急上昇が必要で、この電界上昇に前者ではトリガーによって発生した高温気体が、後者では平板側に蓄積したダスト層の破壊が寄与している。
- (6) ダスト層に起因した火花電圧の低下の機構は、等価的にはトリガトロンギャップの破壊機構で説明される。

終りに、使用したカメラは名古屋大学プラズマ研究所から共同利用で利用させていただいたものである。お世話をいただいた宮原昭教授に厚くお礼申し上げる。

#### 参 考 文 献

- 1) 細川辰三、三好保憲: 静電気学会誌, 2, 5 (1978), 323.
- 2) 細川辰三、三好保憲: 静電気学会誌, 2, 2 (1978), 133.
- 3) A.M. Sletten and T.J. Lewis: Proc. Inst. Electr. Eng., 104 (1957), 54.
- 4) B.C. Papadias: J. Phys., D, 3 (1970), 1497.
- 5) M.R. Amin: J. Appl. Phys., 25 (1954), 210.
- 6) M.R. Amin: J. Appl. Phys., 25 (1954), 358.
- 7) 細川辰三、三好保憲: 電気学会論文誌 A, 93 (1973), 420.
- 8) G. Baldo and M. Rea: Br. J. Appl. Phys. Ser., 2, 1 (1968), 1501.
- 9) 伊佐 弘: 電気学会雑誌, 91 (1971), 1730.
- 10) H. Raether: Z. Phys., 117 (1941), 375.

- 11) 本多侃士: 気体放電現象, p. 24, 電機大出版 (1964).
- 12) 細川辰三, 三好保憲: 放電研究会資料, ED-72-16 (1972).
- 13) G. Baldo, S. Martellucci and M. Rea: J. Phys., D, 2 (1969), 1472.
- 14) 粕本明昌, 細川辰三, 三好保憲: 電気学会論文誌 A, 93 (1969), 199.
- 15) L.B. Loeb and J. M. Meek: J. Appl. Phys., 11 (1940), 459.
- 16) 川橋 憲, 中野 庄, 細川辰三, 三好保憲: 電気学会論文誌 A, 96 (1976), 158.
- 17) 細川辰三, 岩間紀男, 三好保憲: 電気学会論文誌 A, 95 (1975), 269.
- 18) G.G. Hudson and L.B. Loeb: Phys. Rev., 123 (1961), 29.
- 19) 生田信皓, 牛田富之, 石黒美穂: 電気学会雑誌, 90(1970), 1816.
- 20) 原田達哉: 電気学会雑誌, 83 (1963), 449.
- 21) S. Masuda: Inst. Phys. Conf. Ser., 27, Chapt. 3 (1975), 154.