

論 文

空気中負針対平板ギャップにおけるダスト層に 起因した破壊電圧の異常降下

細川辰三*, 三好保憲**

(1977年9月27日受理)

Abnormal Drop of the Breakdown Voltage Due to the Dust Layer
in Negative Point-to-Plane Gap in Air

T. HOSOKAWA* and Y. MIYOSHI**

(Received September 27, 1977)

The abnormal drop of the breakdown voltage due to the dust layer in negative point-to-plane gap in air were investigated to study the characteristics of the back discharge phenomena. The breakdown process of the trigatron gap were also investigated, and the mechanism of the back discharge was discussed by investigating breakdown characteristics. The result is as follows: when the paper layer was attached to the anode surface, the streamer pulse different from Trichel pulse was observed in the time interval of the Trichel pulses, and the streamer pulse seems to play an important role for the formation of the back discharge. The breakdown characteristics in the gap due to the back discharge were similar to those of the trigatron gap, and its mechanism was explained by the theory of the streamer breakdown. The negative ions produced near the tip of the needle electrode move towards the anode, and the electrical field intensity of the dust layer increases by negative ion accumulation, and the streamer produced through the dust layer propagated to the negative point electrode, and at last, it was led to the spark as completely breakdown in gap.

1. まえがき

近年工場ばい煙など産業廃棄物による大気汚染公害が社会問題となり、これらばい煙の処理が重要な課題となっている。ばい煙処理の一方法として、不平等電極配置におけるコロナ放電を利用した電気集じん法が用いられ効力を発揮しているが、この電気集じんには逆電離現象と呼ばれるギャップの火花電圧の異常降下現象があり、

集じん効率を低下させている^{1,2)}。したがって、電気集じんにおける逆電離現象の防止は集じん装置の効率向上の一方法と考えられる。増田らは、微小ピンホールをうがった絶縁板を接地平板電極上におき、このピンホールに生ずる微小放電によって逆電離を発生させ、その進展模様を観測して逆電離の進展過程を明確にした³⁾。

筆者らは、放電機構研究の立場から逆電離現象を解明する目的で、増田ら²⁾によって研究されている方法、すなわち針対平板電極の平板側に集じんダスト層を模擬して多孔質の紙を付着させることによって、実験室で逆電離現象を再現させその特性を調べた。さらに、平板側に補助第3極として突起電極を付けた一種のトリガトロンギャップを試作し、その破壊特性を調べた。その結果、逆電離現象の発生機構は、原則的には3針トリガー電極付きギャップの破壊特性として説明されることが明らか

* 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

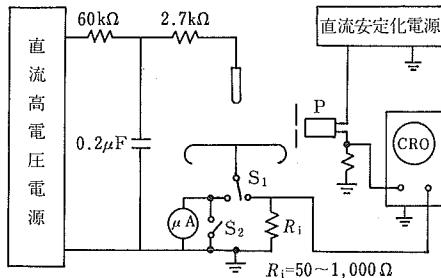


図 1 実験装置
Fig. 1 Experimental apparatus.

になった⁴⁾。

本報告は、これらの結果をまとめたもので、空気中負針對平板電極配置において、平板側に多孔質の紙を付着させた場合に起る模擬逆電離現象と、これ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について述べ、これらの結果を比較しながら逆電離現象の発生機構について検討する。

2. 実験装置および実験方法

逆電離現象を実験室で模擬的に再現させるための実験装置を図1に示す。図1において、針先電極は先端が半球状の黄銅製円柱電極で、その先端半径を針先の曲率半径 r とした。なお、負針對平板ギャップでコロナを経て全路破壊する場合の火花電圧は、ギャップの長さが数cm以下では針先の大きさにあまり依存しない^{5),6)}。したがって、本研究では実際使用されている寸法も考慮して $r=0.2\text{ cm}$ 一定とした。平板電極は、半径 6 cm の平坦部をもつ円形平板の周囲を半球状に曲げた鉄製電極を用い、ギャップの長さ $l=1\sim10\text{ cm}$ で実験を行なった。

平板側に付着させた紙は、関西紙製化粧紙および塚田製紙製化粧紙の2種を用い、1枚の厚さはそれぞれ 0.01 cm および 0.025 cm でそれらを重ね合わせることにより所用の厚さにした。またコロナ平均電流の測定あるいはコロナパルス波形の観測は、スイッチ S_1 を切り替えることによって任意に行なった。さらに、火花電圧の測定は、微小電流計の過電流による破損を防ぐためにスイッチ S_2 を閉じた状態で行なった。なお、逆電離現象による火花電圧の低下は、付着させた紙が多孔質でその絶縁抵抗率がほぼ $6\times10^9\text{ Ω}\cdot\text{cm}^{1,7)}$ 以上であれば紙の種類には無関係に紙の厚さのみに関係したので、以後本報告では使用した紙の種類についてはとくに明記せずたんに紙と記した。

図2は、図1のギャップと類似の破壊特性を持つトリガトロンギャップの構造図を示している。図2において、平板電極の中心に半径 0.15 cm の円形の穴があり、

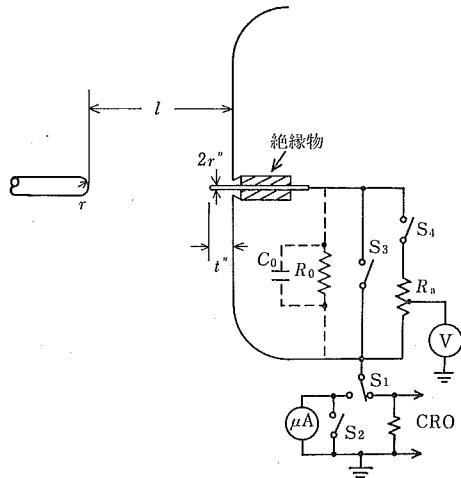


図2 トリガトロンギャップの電極構造
Fig. 2 Electrode structure of the trigatron gap.

これにトリガー用第3電極（先端が半球上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。トリガー電極は、スイッチ S_3 , S_4 を開、閉することによって開放、接地、あるいは抵抗を挿入することができる。

また、トリガー電極の電位 V_a は、 R_a の一部の電圧降下を最大目盛 10V のデジタル電圧計で測定し、この値から換算した。また、電流波形観測用検出抵抗 R_1 は伝送回路の特性から 50Ω が望ましいが、本実験のように比較的遅い単掃引（ 20 μs/div. ）では 50Ω での波形観測が困難であったので、本実験では $R_1=500\Omega$ とした。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 $4\times10^{10}\text{ Ω}$ および $2\times10^{-12}\text{ F}$ であった。

実験はすべて室内空気中で行なった。

3. 実験結果

3.1 逆電離現象による火花電圧の低下

空気中負針對平板ギャップにおいて、印加電圧 V を上昇させると、まず前駆なだれパルス⁸⁾（以後 MP と記す）が観測される。このなだれパルスは一般に微弱でしかも肉眼では観測することができない。MP の出現から V が $300\sim500\text{V}$ 上昇するとコロナ放電としてのトリニカルパルス（以後 TP と記す）が観測され、この TP は図13にそのオシログラムを示すように、規則的なパルスを形成し肉眼で観察することができる^{5),9)}。さらに V を上昇させると、TP のくり返し周波数は増大し波高値は減少するが、コロナ平均電流 I_c がほぼ 120 μA に達すると無パルス性コロナ（以後 NPC と記す）へ遷移す

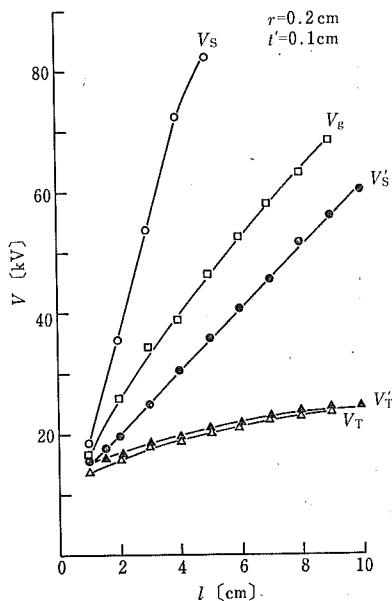


図 3 臨界破壊電圧とギャップの長さの関係

Fig. 3 Relation between the critical breakdown voltage and the gap length.

る^{5,10-15}。さらに、 V を上昇させると I_C も増大するがついにギャップは全路破壊する。

他方、紙を平板陽極側に付着させると、破壊は V の上昇に対して MP, TP の順に観測され、さらに I_C が数 $10 \mu\text{A}$ に達すると陽極平板上に付着させた紙の表面上のところどころに点状の発光が観測され始める^{1,2)}。この発光は、紙の表面と平板電極間が破壊したことによる起因した間欠的発光で、初めは弱く発光点も少ないが、 I_C の増大とともに強まり発光点も増す。さらに I_C を増すと紙表面の発光部分から針先(陰極)へ向かって伸びるストリーマ状の光条が観測されるようになってギャップは全路破壊する。

図 3 は、コロナ(TP)および火花開始電圧 $V_{T'}$, V_S' とギャップの長さ l の関係を平板陽極側に厚さ $t'=0.1 \text{ cm}$ の紙を付着させた場合としない場合について比較したものである。針対平板ギャップにおいて、紙を付着させた場合の TP 開始電圧 $V_{T'}$ は付着しない場合の TP 開始電圧 V_T よりいくぶん高い程度で両者に顕著な差異は認められなかったが、NPC および火花開始電圧には顕著な差異が認められ、紙を付着させた場合の火花電圧 V_S' は付着しない場合の火花電圧 V_S のほぼ 40% 程度まで低下した。しかも重要なことは、前者のギャップでは NPC は定在せず V_S' は後者の NPC 開始電圧 V_g 以下の電圧で TP から火花へ遷移している。またこのような場合、 V を上昇させるとまず陽極側の紙が破壊

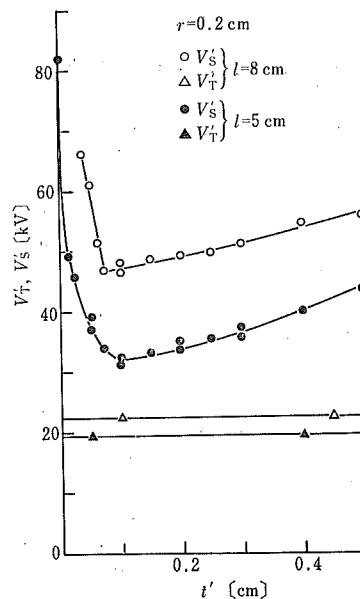


図 4 臨界破壊電圧と紙の厚さの関係

Fig. 4 Relation between the critical breakdown voltage and the paper thickness.

し、さらに紙の表面から陰極へ向かうストリーマ状の針状コロナが肉眼およびオシロスコープ(図 14)で観測されたことである。

このように、放電ギャップに紙を付着させるとギャップの火花電圧を著しく低下させることができる。この特性をさらに詳しく調べた結果を図 4, 5 に示す。

図 4 は、TP および火花の開始電圧 $V_{T'}$, V_S' と紙の厚さ t' の関係をギャップの長さ $l=5 \text{ cm}$ および 8 cm について示している。図において、負針対平板ギャップにおいては、 $V_{T'}$ には紙の厚さの影響が現われず、 l が等しければいずれもほぼ等しい値を示した。しかし、 V_S' には影響が顕著に現われ、供試範囲内($l=3 \sim 10 \text{ cm}$) ではいずれのギャップにおいても t' に対して下に凸形のV字形特性を示し、とくに $t'=0.1 \text{ cm}$ 付近では $t'=0$ の場合(紙がない場合)のほぼ 40% まで低下した。

図 5 は、紙の厚さを火花電圧の低下が最も著しい $t'=0.1 \text{ cm}$ に保ち、TP, 火花の開始電圧 $V_{T'}$, V_S' と針先曲率半径 r の関係をギャップの長さ l をパラメータとして表わしている。図において $V_{T'}$ は r の増大とともに上昇しているが、 V_S' はいくぶん上昇する傾向が見られた程度で顕著な変化は認められなかった。

3.2 トリガトロンギャップの破壊特性

逆電離現象の形成機構を解明するために、これと類似した特性をもつトリガトロンギャップの特性を調べた。

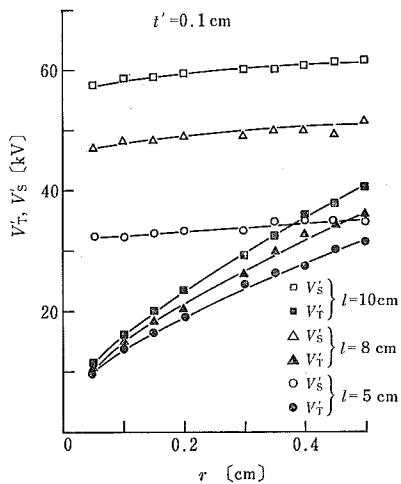


図 5 臨界破壊電圧と針先半径の関係
Fig. 5 Relation between the critical breakdown voltage and the point radius.

図 2において、 V を上昇させると、針対平板ギャップにおけると同様主ギャップの針先端に MP, 続いて TP が観測された。さらに V を上昇させて I_0 が数 $10 \mu\text{A}$ 以上に達するとトリガー電極の先端も発光し始める。この発光は間欠的で、その初めは微弱であるが I_0 の増大とともに発生頻度も増大し、ついには主ギャップは全路破壊する。なお、ギャップ条件によっては、主ギャップの全路破壊に近づくと、トリガー電極先端から針先に向かうストリーマ状の光条が出現したのち、全路破壊に遷移した場合もあった。

図 6は、針対平板ギャップにおける破壊特性をトリガーア電極（針先端半径 $r''=0.1 \text{ cm}$, 突起の長さ $t''=1.0 \text{ cm}$ の円柱電極）がある場合 (S_3, S_4 ともに開放) ない場合について比較したものである。

トリガトロンギャップにおいては、TP 開始電圧にはトリガー電極の影響はほとんど認められず、トリガー電極の有、無によってその値 V_T と V_{To}'' には変化は認められなかったが、主ギャップの火花電圧には顕著な差異が現われ、トリガー電極がある場合の火花電圧 V_{so}'' はない場合の火花電圧 V_s のほぼ 40% まで低下した。また、この電圧は、トリガー電極がない場合の NPC 開始電圧 V_g 以下で、トリガトロンギャップでも NPC は観測されなかった。なお、図 6 で V_{+o}'' はトリガー電極先端が発光し始めた電圧を示している。

図 7, 8 は、主ギャップの破壊電圧 V_s'' とトリガー電極の突起の長さ t'' との関係をトリガー電極を開放した場合と接続した場合について比較したものである。

図 7 は $l=5 \text{ cm}$ における結果で、このギャップにお

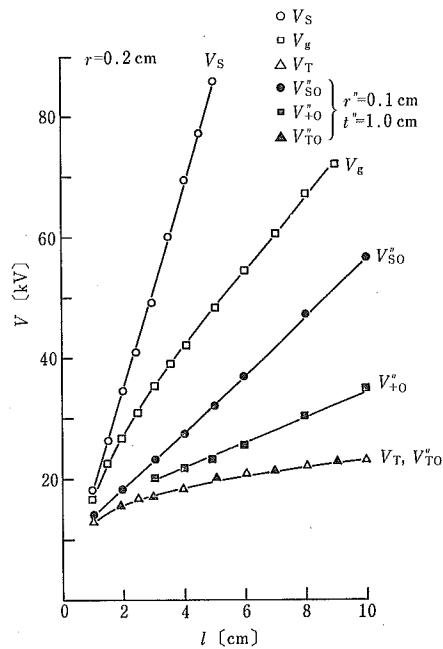


図 6 トリガトロンギャップにおける破壊電圧とギャップの長さの関係
Fig. 6 Relation between the breakdown voltage and the gap length in trigatron gap.

ける TP 開始電圧 V_T'' は S を開いても閉じても変化は認められなかった ($V_{To}''=V_{Ts}''$)。また NPC 開始電圧 V_g'' は、 t'' に対して $t'' \leq 0.2 \text{ cm}$ ではいくぶん上昇の傾向を、 $t'' > 0.3 \text{ cm}$ では減少の傾向を示したが、S の開閉による影響はほとんど認められなかった ($V_{go}'' \equiv V_{gs}''$)。

他方、 V_s'' には S の開閉の影響が現われ、とくに開放した場合 $t'' \geq 0.6 \text{ cm}$ で顕著な効果が認められた。すなわち、S を開、閉した場合の火花電圧 V_{so}'' , V_{ss}'' は、一般に t'' を増すと低下しているが、とくに V_{so}'' の低下が著しく $t'' \geq 0.6 \text{ cm}$ では V_{gs}'' より低く顕著なトリガー効果を示した。なお図より明らかのように、 $t'' \geq 0.6 \text{ cm}$ では $V_{so}'' < V_{go}''$ となって、トリガー電極を開放した場合には NPC は観測されなかった。

図 8 は $l=8 \text{ cm}$ のギャップにおける結果で、 $l=8 \text{ cm}$ においても図 7 と同様な特性を示した。

以上の結果から、トリガトロンギャップでトリガー電極を開放し、 $t'' > 0.6 \text{ cm}$ においては、火花電圧の異常低下が観測され、これは平板陽極側に紙を付着した場合に起きた模擬逆電離現象と類似している。

3.3 電流-電圧特性

針対平板ギャップにおいて、平板側に多孔質物質の紙などを付着させるとギャップの火花電圧が異常低下する

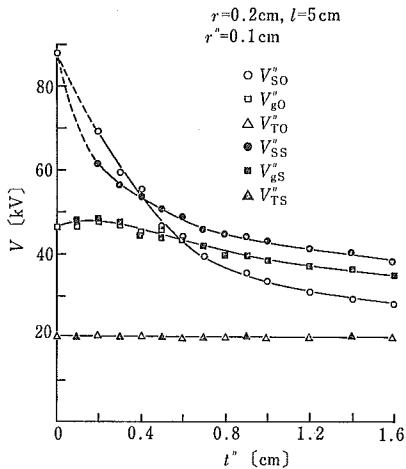


図 7 トリガトロンギャップにおける破壊電圧と突起の長さの関係

Fig. 7 Relation between the breakdown voltage and the length of trigger electrode in the trigatron gap.

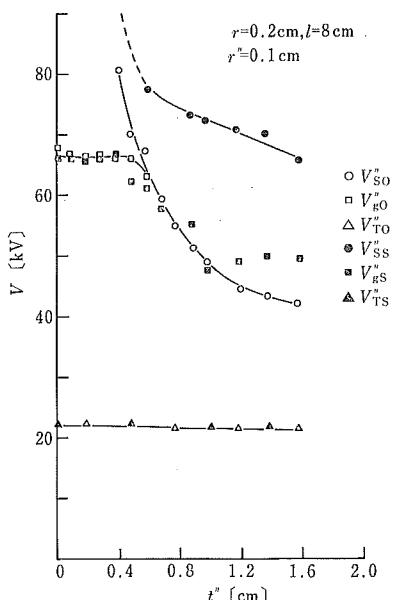


図 8 トリガトロンギャップにおける破壊電圧と突起の長さの関係

Fig. 8 Relation between the breakdown voltage and the length of trigger electrode in the trigatron gap.

いわゆる逆電離現象が現われる。また、トリガトロンギャップでトリガー電極を開放した場合にもこれと類似な特性が観測される。ここでは、これら両ギャップの電流-電圧特性がどのような関係を示すかについて検討する。

図 9 は、平板陽極側に紙を付着させた場合と付着させ

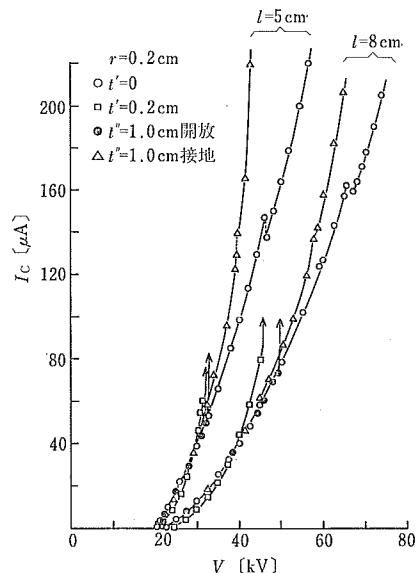


図 9 種々のギャップ条件における電流-電圧特性

Fig. 9 Current-voltage characteristics for various gap conditions.

ない場合、およびトリガー電極を開放した場合と接地した場合における電流-電圧特性を $l=5 \text{ cm}$, 8 cm について比較したものである。なお、図中矢印はその位置から火花へ遷移していることを示している。図において、紙を付着させた場合と、トリガー電極開放の場合の特性は類似しており、火花へは $l=5 \text{ cm}$ では I_c がほぼ $60 \mu\text{A}$ から、 $l=8 \text{ cm}$ ではほぼ $80 \mu\text{A}$ からそれぞれ遷移し、火花電圧も両者はほぼ等しい値を示した。

他方、トリガー電極接地の場合には、ギャップに何もない場合と、紙を付着させたかあるいはトリガー電極開放の場合のほぼ中間の特性を示し、かつ何もない場合と同様 $I_c \geq 140 \mu\text{A}$ で NPC が定在した。

以上の結果から、負針対平板ギャップにおける逆電離現象による火花電圧の異常降下は、トリガトロンギャップでトリガー電極を開放した場合の火花破壊機構で説明されることが明らかとなった。

3.4 トリガー電極の接地抵抗の影響

トリガトロンギャップでは、図 6~9 に示したようにトリガー電極の開放と接地で特性に著しい差異が認められ、主ギャップの破壊にトリガー電極の接地抵抗が重要な役割を演じていることが明らかになった。ここでは、主ギャップの破壊に及ぼす接地抵抗の影響について検討する。

図 10~12 はその一例で、図中矢印はその位置から火花へ遷移していることを示している。

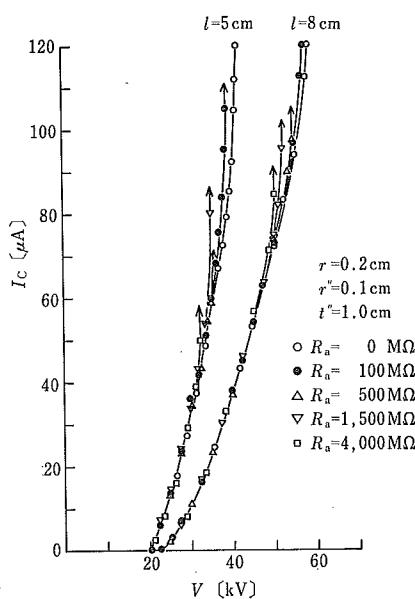


図 10 種々のトリガーリストにおける電流-電圧特性
Fig. 10 Current-voltage characteristics for various values of the trigger resistance.

図 10 は、コロナ平均電流 I_c と印加電圧 V の関係を接地抵抗 R_a をパラメータとして $l=5 \text{ cm}$, 8 cm について比較したものである。トリガートロンギャップにおいては、 R_a を減少させるとコロナの電流範囲が拡大して火花電圧も上昇したが、 I_c-V 特性には顕著な変化は認められなかった。また、 $R_a \leq 1 \times 10^8 \Omega$ ではいずれのギャップにおいてもトリガーリスト先端にグローコロナあるいは主ギャップの針先端に NPC が定在して V_s'' は急上昇した。

また、このときのトリガーリストの電位 $V_{a''}$ と主ギャップのコロナ平均電流 I_c の関係を図 11 に示した。図において、 I_c が μA 以上流れるとき $V_{a''}$ も上昇し始めるが、その極性は負（-）で、一般に R_a を増大すると $V_{a''}$ の上昇も急となっている。また、 $R_a \geq 3 \times 10^8 \Omega$ では、その値が $2.05 \sim 2.43 \text{ kV}$ に達するとトリガーリストと平板電極間に間欠的な火花放電が発生し、 $V_{a''}$ は変動し始めた。さらに I_c を増すと、間欠放電の頻度、 $V_{a''}$ の変動幅も増したが、 $V_{a''}$ の最大値には顕著な変化は認められず、飽和を示したあと、主ギャップは火花へ遷移した。しかし、 $R_a \leq 1 \times 10^8 \Omega$ では、 $V_{a''} \geq 2 \text{ kV}$ でもトリガーリストと平板電極間に間欠的な放電が発生していくうちにトリガーリスト先端にグローコロナか、あるいは主ギャップの針先に NPC が定在し、 $V_{a''}-I_c$ 特性は曲線①のように I_c に比例して増加する特性を示した。なおこの①の特性は、あとでも述べるように、 $R_a \leq 1 \times 10^8 \Omega$

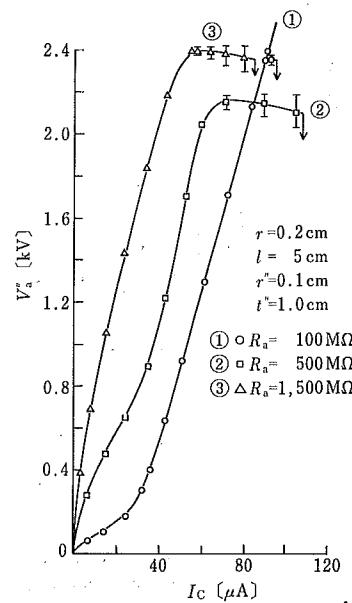


図 11 トリガーリストとコロナ電流の関係
Fig. 11 Relation between the trigger potential and the corona current.

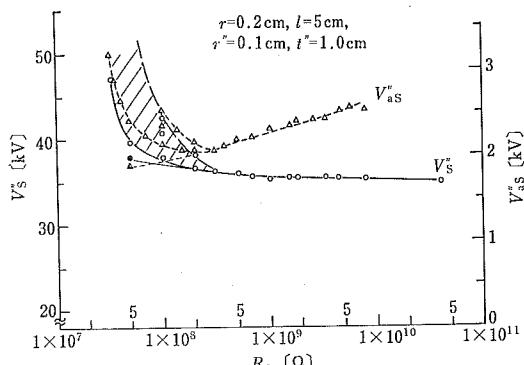


図 12 破壊電圧とトリガーリストとの関係
Fig. 12 Relation between the breakdown voltage and the trigger resistance.

では $V_{a''}$ に不整が現われたのでここでは 2 回の測定結果を重ねている。さらに重要なことは、 $R_a \geq 3 \times 10^8 \Omega$ においても、トリガーリストと平板電極間に絶縁耐力を高めトリガーリストの電位が 2 kV を超過しても両電極間に火花放電が発生しないようにすると、主ギャップの火花電圧は低下せずトリガーリスト効果は現われなかつた。

図 12 は、図 10, 11 と同じギャップにおける火花電圧 $V_{a''}$ 、火花破壊時のトリガーリストの電位 $V_{as''}$ と接地抵抗 R_a の関係を示している。図において、 $R_a \leq 4 \times 10^{10} \Omega$ では、 $V_{a''}$ は R_a の減少に対していくぶん上昇する傾向は示したが $3 \times 10^8 \Omega$ まではほぼ等しい値を示した。

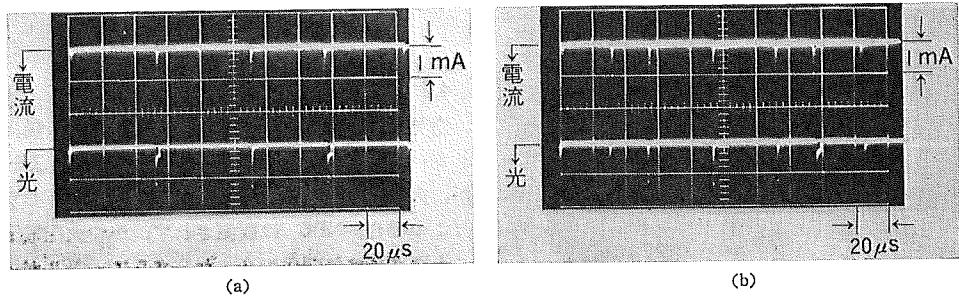


図 13 トリチエルパルスの典型的なオシログラム
(a) $I_c=60 \mu\text{A}$, $V=45.6 \text{ kV}$, (b) $I_c=100 \mu\text{A}$, $V=54.7 \text{ kV}$
Fig. 13 Typical oscillograms of the Trichel pulses.

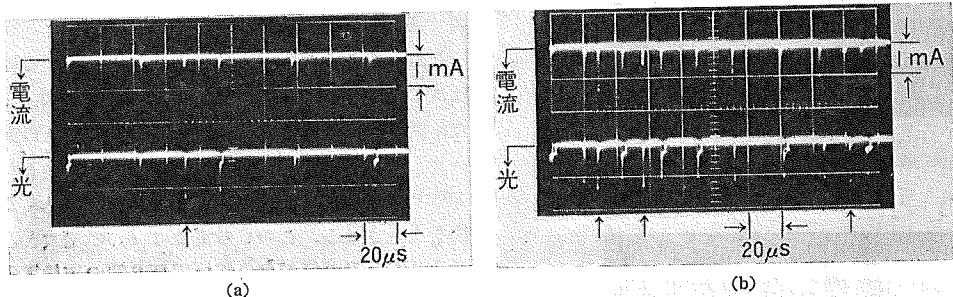


図 14 陽極表面に紙を付着させた場合に観測されたコロナパルスの典型的なオシログラム
(a) $I_c=60 \mu\text{A}$, $V=42.6 \text{ kV}$, (b) $I_c=90 \mu\text{A}$, $V=46.0 \text{ kV}$
Fig. 14 Typical oscillograms of the corona pulses observed in non-uniform field gap with the paper layer on the plane.

しかし、 R_a がさらに減少すると急に上昇し始め、かつ図中斜線で示したように $V_{s''}$ に不整が現われた。この不整は、トリガー電極先端にグローボロナが定在して間欠放電が発生しないことに起因し、間欠放電が発生するかしないかによって $V_{s''}$ は異なる値を示した。なお、 $R_a < 1 \times 10^8 \Omega$ でも、 $V_{a''}$ が 2 kV 程度に達したときトリガー電極と平板間に間欠放電が発生すれば、低い $V_{s''}$ で破壊する場合もあった。図中 $R_a = 5 \times 10^7 \Omega$ における●印はその一例で、このような場合の $V_{s''}$, $V_{as''}$ (▲印)は $R_a \geq 3 \times 10^8 \Omega$ における $V_{s''}$, $V_{as''}$ の延長線上にあった。

以上の結果から、トリガトロンギャップにおける破壊は、トリガー電極と平板電極間に火花放電が発生することによってトリガー効果が現われることを示しており、この特性はトリガー機構の解明に重要な特性と考えられる。

3.5 コロナパルスの波形解析

負針對平板ギャップに紙を付着させるとかあるいはトリガー電極を挿入すると、火花電圧が著しく低下することはすでに述べた。ここでは、そのような場合にコロナの波形にどのような変化が現われるかについて検討す

る。

図 13~16 はその一例で、 $l=8 \text{ cm}$ のギャップで観測された TP 波形の変化を示している。

図 13 は、針對平板ギャップで観測された波形で、周期、波高値にいくぶんの不整がみられるがこのギャップではほぼ典型的な TP と準定在コロナ¹⁴⁾を伴った TP 波形が混在した。しかし、このギャップの平板陽極側に紙を付着させ I_c を数 $10 \mu\text{A}$ 以上流すと、図 14 に示すように TP の時間間隔内に TP とは別種のパルス(図中矢印)が観測された。このパルスの波高値は、TP に比べて電流パルスでは小であったが、光パルスでは大であった。なお、本報告では、このパルスを以後ストリーマパルスと呼ぶ。

ストリーマパルスの波高値(統計的不整を伴うのでその最大値)および発生頻度は、その初めでは図 14 (a)に示すように小であったが、印加電圧が上昇して I_c を増すと図 14 (b)に示すように TP の波高値が減少する¹⁵⁾とともに増加した。しかも重要なことは、ストリーマパルスは、図 15 に示すように、TP 出現の直前(図 a), 直後(図 b)あるいは同時(図 c)に発生してもその波高値に変化が認められず、しかも平板側に付着させた紙

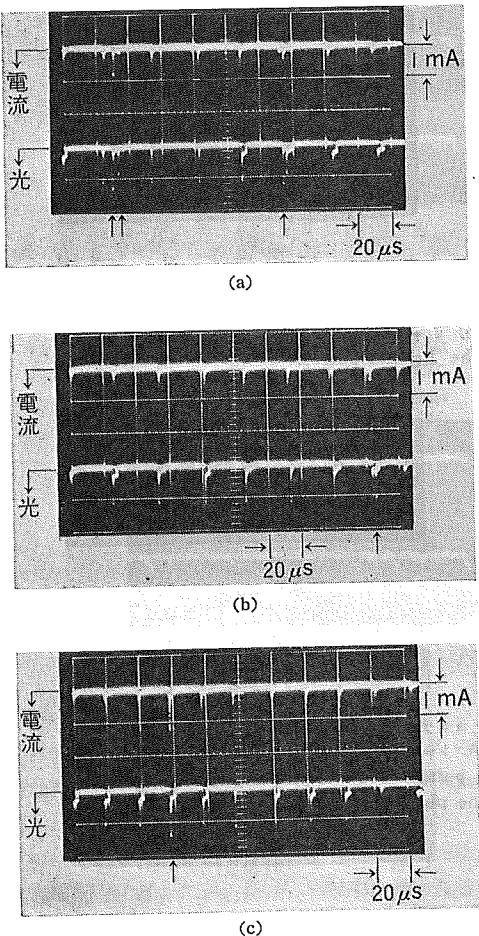


図 15 陽極表面に紙を付着させた場合に観測されたコロナパルスの典型的なオシログラム ($I_c=90 \mu\text{A}$, $V=46.0 \text{ kV}$)

Fig. 15 Typical oscilloscope traces of the corona pulses observed in non-uniform field gap with the paper layer on the plane.

の表面から針先陰極側へ向かって伸びる発光パルスに対応していた。

これは、ストリーマパルスは TP と同じ針先側から進展するものではなくて、平板側から針先に向かって進展するストリーマに起因したパルスであることを意味している。

図 16 は、図 13 のギャップにトリガーアルゴンを挿入した場合で、このギャップでも I_c が数 $10 \mu\text{A}$ 以上ではトリガーアルゴンと平板電極との破壊（トリガーアルゴン先端の破壊）に起因したパルス（図中矢印）が TP の時間間隔内に観測された。しかし、このパルスの波高値および発生頻度は、図 14 の場合に比べて小であった。

4. 考 察

4.1 トリガトロンギャップの破壊機構

空気中負針対平板ギャップにおいて、平板陽極側にトリガーアルゴンを挿入すると、コロナ開始電圧は変わらないが、火花電圧は挿入前の 40% 程度まで低下しうる。またこの場合、NPC は観測されず、かつ火花電圧は針先の大きさには無関係であった。さらに、トリガーアルゴンが現われるためには、図 6~12 に示したように、トリガーアルゴンが非接地か、接地してもその抵抗値が $3 \times 10^8 \Omega$ 以上で、かつトリガーアルゴンの電位が 2 kV 以上に達してトリガーアルゴンと平板電極間に間欠放電が発生することが必要であった。

これらのことから、トリガトロンギャップの破壊機構は次のように考えられ、その破壊モデルを図 17 に示した。図 17 において、主ギャップの針電極 A の先端にコロナ TP が発生すると、それに伴って発生した負イオン N^{10-14} NI の一部はトリガーアルゴン C に流れ込んでその電位を上昇させる。この C の電位は I_c の増大とともに上昇するが、その値が C と平板電極 B 間の破壊電圧 $V_{as''}$ に達すると両電極間は火花 D で橋絡する。この場合、C の先端付近の高電界は負から急に正に転換してストリーマの形成¹⁶⁻¹⁸を可能にし、ここで形成されたストリーマ ST は A に向かって進展し、主ギャップの全路破壊を誘発するものと考えられる。したがって、図 12 に示したように、トリガーアルゴンと平板電極間の絶縁抵抗が $1 \times 10^8 \Omega$ 以下では、両電極間の間欠放電が抑制されて C 先端の電界に急変が生ぜず、主ギャップの全路破壊電圧が上昇するものと考えられる。

なお、火花破壊時に C に蓄えられていた電荷量 $C_0 V_{as''}$ を図 12 から求めるとほぼ $5.1 \sim 5.3 \times 10^{-9} \text{ C}$ で、この値は増田ら¹¹が集じんダスト層を模擬して紙を平板側に付着させた場合に得られた値にはほぼ等しい。

4.2 逆電離現象の発生機構

負針対平板ギャップにおいて、陽極平板側に紙などの多孔質物質を付着させると、その火花電圧は図 3~5 に示したように逆電離現象によって著しく低下する。この低下特性は、トリガトロンギャップでトリガーアルゴンを開放した場合の破壊特性と類似しており、その破壊も同じ機構で説明できるものと考えられる。以後、逆電離現象の破壊機構について、トリガトロンギャップの破壊機構と対応させながら考察する。

逆電離現象の破壊モデルを図 18 に示した。図において、印加電圧を上昇させるとまず A の先端に TP が発生するが、図 3 から明らかのように、この TP 開始電圧 V_T' には平板陽極側へ付着させた紙の影響があまり現わ

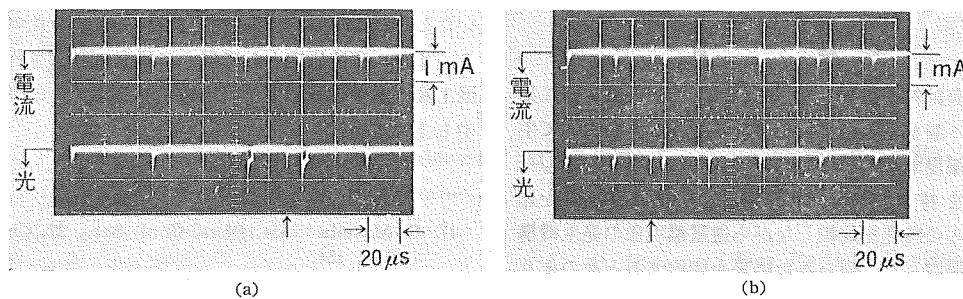


図 16 トリガトロンギャップで観測されたコロナパルスの典型的なオシログラム
 (a) $I_C=60 \mu\text{A}$, $V=45.6 \text{ kV}$, (b) $I_C=70 \mu\text{A}$, $V=48.2 \text{ kV}$

Fig. 16 Typical oscillograms of the corona pulses observed in the trigatron gap.

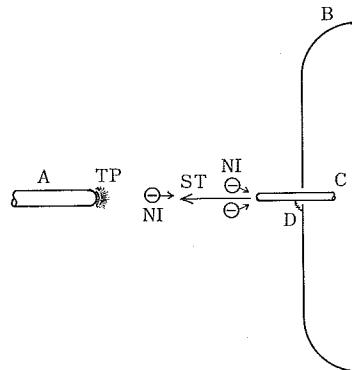


図 17 トリガトロンギャップの破壊機構の図説
 Fig. 17 Scheme for the breakdown mechanism in
 the trigatron gap.

れない。これは、陽極側へ紙を付着させても針先付近の静電界はあまり乱されないことを示している。また、TFが発生すると、それに伴って発生した負イオン NI は平板陽極側へ移動して紙 C の表面に蓄積し、表面の電位を上昇させる。しかもこの電位は、 I_C の増大とともに上昇する。

他方、紙表面の電位の上昇は、同時にCと平板電極B間の電界を強めることから、この電界が紙の破壊電界に達するとC-B間に絶縁破壊しDで橋絡する。しかし、この破壊現象は、紙表面上への電荷の蓄積と放電による消失をくり返す間欠放電で、その頻度および発生箇所は I_C の増大とともに増加する。かくして、紙表面上への蓄積電荷量がほぼ $1 \sim 2 \times 10^{-9} C$ に達すると、トリガートロンギャップにおけるトリガー電極先端の電界の急変と同様、紙の絶縁破壊により破壊点頂部がきわめて短い時間内（正イオンが移動できぬくらい）に平板電極と同電位となるため、これと残留正イオン層との間に極部的高電界が発生する¹⁶⁻¹⁸⁾。この極部的高電界の発生はストリーマの形成を可能にし、ここで形成されたストリーマSTは図15で述べたように針先陰極へ向かって伸展し、全

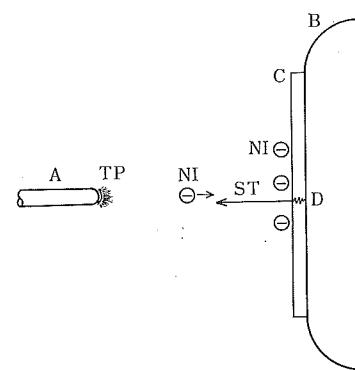


図 18 逆電離現象による不平等電界ギャップの破壊機構の
図説

Fig. 18 Scheme for the breakdown mechanism due to the back discharge in non-uniform field gap.

路破壊を誘発するものと考えられる。

したがって、平板側へ付着させた紙が多孔質でなくつたり、紙の絶縁抵抗を下げて紙の表面と平板電極間に間欠放電が発生しないようにすると、逆電離現象が発生しなかったのはこの事実を示唆しているものと考えられる。

なお、増田ら^{1,7)}によれば、逆電離現象が発生するための紙の絶縁抵抗率は $6 \times 10^9 \sim 9 \times 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ となっているが、トリガトロンギャップでは $3 \times 10^8 \Omega$ でそれらの値に比べていくぶん小さく感じられる。しかし、増田らの測定値は 20% 程度の誤差を含んでいると考えられること、および紙の厚さは 0.1 cm 程度で顕著な低下を示したことなどを考慮すれば、 $3 \times 10^8 \Omega$ は妥当な値と考えられる。

また、図 14 と図 16 ではストリーマパルスの発生頻度に顕著な差異が認められたが、これは紙平面とトリガード電極では負イオンの捕捉面積が極端に異なっていることに起因している。

5. 結 言

空気中負針対平板ギャップにおいて、平板電極側に集じんダスト層を模擬して紙を付着させることによって生ずる逆電離現象について述べた。さらに、これと類似な放電特性を持つトリガトロンギャップの破壊機構を述べ、これらの特性を比較しながら逆電離現象の発生機構について検討した。得られた結果を要約すると次のようである。

(1) 針對平板ギャップの平板側に多孔質の紙を付着させると、コロナ開始電圧にはあまり影響が現われないが、火花電圧には顕著な効果が現われる。とくに紙の厚さが0.1 cm の場合には、紙がない場合の火花電圧の40%程度まで低下する。

(2) トリガトロンギャップで、トリガー電極を開放した場合の主ギャップの破壊特性は、平板側に紙を付着させた場合に起る逆電離現象と類似している。また、この効果が現われるためには、トリガー電極が非接地か、接地してもその抵抗値が $3 \times 10^8 \Omega$ 以上で、かつトリガー電極の電位が2 kV以上に達してトリガー電極と平板電極間に間欠放電が発生することが必要である。

(3) 針對平板ギャップで平板陽極側へ紙を付着させると、TPのパルス間隔内にTPとは別種のパルスが観測され、このパルスは紙表面から針先陰極側へ向かって伸びるストリーマパルスに対応している。

(4) 針對平板ギャップにおいて、平板側に多孔質の紙を付着させることによって生ずる逆電離現象の発生機構は、トリガトロンギャップでトリガー電極を開放した場合の破壊機構で説明される。

終りに、本研究遂行にあたり種々有益な討論と助言を

いただいた 東京大学 増田閃一教授に厚くお礼申し上げる。また、卒業研究として熱心に研究に従事された名古屋工業大学学生飯田健氏（現豊田車体勤務）に厚くお礼申し上げる。

参 考 文 献

- 1) S. Masuda : Inst. Phys. Conf. Ser., 27, Chapt. 3 (1975), 154.
- 2) 増田閃一, 水野 彰: 昭和51年電気学会全国大会, 472 (1976).
- 3) S. Masuda and A. Mizuno : J. Electrostatics, 2 (1977), 375.
- 4) 増田閃一, 細川辰三, 三好保憲: 昭和50年電気学会全国大会, 911 (1970).
- 5) 酒井長武, 細川辰三, 三好保憲: 電気学会雑誌, 78 (1958), 1413.
- 6) 細川辰三, 関谷昌久, 三好保憲: 昭和50年電気関係学会四国支部連合大会, 2-12 (1970).
- 7) 増田閃一, 水野 彰: 公害対策電気技術委員会資料, No. 162 (1974).
- 8) 細川辰三, 近藤芳孝, 三好保憲: 電気学会雑誌, 89 (1969), 1823.
- 9) G.W. Trichel : Phys. Rev., 54 (1938), 1078.
- 10) M.R. Amin : J. Appl. Phys., 25 (1954), 627.
- 11) 円城寺 博, 篠原卯吉: 電気学会雑誌, 77 (1957), 895.
- 12) 牛田富之, 生田信皓, 八束充保: 電気学会雑誌, 88 (1968), 137.
- 13) T.N. Giao and J.B. Jordan : J. Appl. Phys., 41 (1970), 3991.
- 14) 細川辰三, 三好保憲: 電気学会論文誌, 96-A (1976), 365.
- 15) 細川辰三, 三好保憲: 名古屋工業大学学報, 14 (1962), 392.
- 16) J.M. Meek : Phys. Rev., 57 (1940), 722.
- 17) L.B. Loeb and J.M. Meek : J. Appl. Phys., 11 (1940), 438.
- 18) L.B. Loeb and J.M. Meek : ibid., 11 (1940), 459.