

論 文

空气中正針対平板ギャップにおけるダスト層に
起因した破壊電圧の異常降下

細川辰三*, 三好保憲**

(1978年2月6日受理)

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

T. HOSOKAWA* and Y. MIYOSHI**

(Received February 6, 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 series miniature gap was also investigated. The mechanism of the breakdown process in the gap due to the dust layer was able to be explained by investigating current-voltage and breakdown characteristics. The result is as follows: when the paper layer was attached to the cathode surface, the formation of the glow corona was difficult and the corona consisted of many streamer pulses appeared, and the streamer seems to play an important role for the transition to the spark, and then for the abnormal drop of the breakdown voltage. The breakdown characteristics in the gap due to the dust layer were similar to those of the positive point-to-plane gap with the series miniature gap, and its mechanism was explained by the theory of the streamer breakdown. Namely, the positive ions produced near the tip of the needle electrode move towards the cathode, and the electrical field intensity of the dust layer increases owing to the positive ion accumulation, and the streamer produced by breakdown in the dust layer propagated to the cathode electrode, and at last, it was led to the spark as a complete breakdown in the gap.

1. まえがき

工場媒煙における媒煙処理の一つとして、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装置が用いられ効力を發揮している。

電気集じんには、一般に負極性コロナ放電（以後負コロナと記す）が利用されているが、負コロナは正極性コ

ロナ（以後正コロナと記す）に比べてコロナ放電の安定性は優れているが電流容量が小さく、かつコロナに伴ってオゾンの発生が多いなどの欠点がある。他方、正コロナの利用は、負コロナに比べて電流容量が大きく、かつオゾンの発生が少ないなどの利点はあるが、最大の障害は媒煙のように炭酸ガスなどの不純物を多量に含有した空気中では、バーストパルス放電域でストリーマコロナが発生しやすく、グロークロナの定在が困難となることである¹⁾。このように、正コロナの電気集じん装置への利用は、集じん効率の向上とオゾン障害の除去が期待されるが、その実現には媒煙中におけるグロークロナの定在の問題を解決しなければならない。この問題についてはすでに増田ら²⁾によって検討され、もし正コロナを電

* 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

気集じん装置に利用することができれば、その集じん効率を高めるとともに装置の小型化が期待されると報告されている。

筆者らは、放電機構研究の立場から電気集じん装置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、先の報告³⁾と同様な方法で空気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、平板側にダスト層が付着すると、グローコロナの定在が困難となってコロナはパルスを形成し、針先付近でストリーマが発生しやすくなつて火花電圧が低下することが明らかになった。またこの破壊特性は、等価的には微小ギャップを直列に接続した針対平板ギャップ（以後 MSG と記す）、すなわち一種の補助電極付き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つた⁴⁾。

本報告はこれらの結果をまとめたもので、空気中正針対平板ギャップにおいて平板側に多孔質の紙を付着させた場合に生ずる火花電圧の低下と、これと類似な特性をもつ MSG の破壊特性について述べる。さらにこれらの結果を比較しながら、ダスト層に起因した火花電圧の異常降下の破壊機構について検討する。

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は、前報³⁾図1のようである。針先電極は先端が半球形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。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（ロゴウスキイ形電極）を用いた。なお、本研究においても前報³⁾同様、 r は実用の寸法を考慮してとくにことわらない限り 0.2 cm とし、平板へ付着させた紙は多孔質であればその種類には無関係なのでたんに

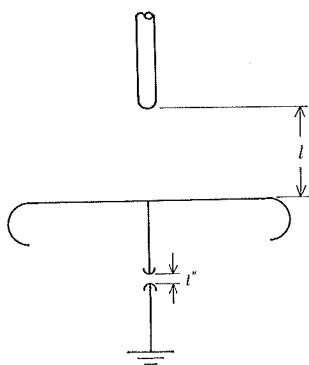


図 1 微小ギャップ付き針対平板ギャップの電極構造
Fig. 1 Electrode structure of the positive point-to-plane gap with the miniature gap.

紙と記す。

次に、これと類似な破壊特性をもつ MSG の構造図を図 1 に示す。図 1 において、針対平板ギャップへ直列に接続した微小ギャップは、直径が 0.2 cm で先端が半球形の黄銅製円柱電極 2 本を対向させたもので、そのギャップの長さを l'' とした。

なお、実験は大気圧室内空気中で行なつた。

3. 実験結果

3.1 ダスト層に起因した火花電圧の低下

空気中正針対平板ギャップにおいて、印加電圧を上昇させるとまずバーストパルス⁵⁻⁷⁾（以後 BP と記す）が観測される。このバーストパルスは、後続を伴わない 1 次パルスと後続を伴つた 2 次パルスに分けられるが、一般にその発光は微弱で肉眼で観察することはできない。

また、供試ギャップのようなギャップ条件では、BP の出現から 200~300V の電圧上昇でストリーマコロナ（以後 SP と記す）が観測される。SP は、一般に波形の立上り、減衰が非常に速く、その波高値は同じ測定条件で BP のほぼ 10^3 倍にも達する線状コロナで⁷⁻¹⁰⁾、かつ進展速度、継続時間が異なる 1 次と 2 次ストリーマから成り立っている^{11,12)}。

印加電圧を上昇させると SP の発生頻度は減少し、コロナ平均電流 I_c が $0.5 \sim 1 \mu\text{A}$ （ギャップ条件によって遷移する電流がいくぶん異なる）に達するとグローコロナ（以後 GC と記す）へ遷移する。GC は Hermstein

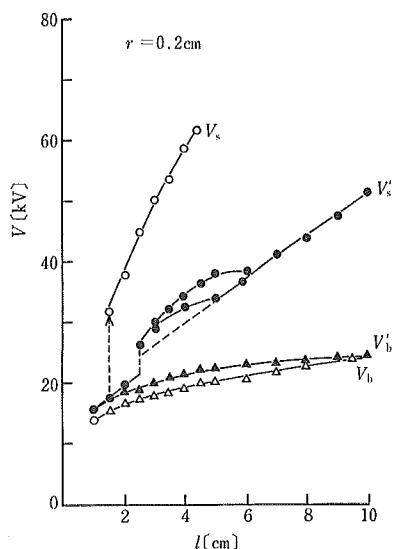


図 2 臨界破壊電圧とギャップの長さの関係
Fig. 2 Critical spark-breakdown voltage vs. gap length.

glow corona とも呼ばれ¹³⁾、外見上は直流特性の観を呈しているが実際にはパルスが連続した脈動特性で^{5,7,14)}、電流密度は中心部が大で周辺部で減少している。

図2は、正針対平板ギャップにおけるBPおよび火花開始電圧とギャップの長さの関係を平板側に紙を付着させた場合とさせない場合について比較したものである。

平板側に紙を付着させると、付着させない場合に比べて、BP開始電圧 V_b' はいくぶん上昇する程度で特性に顕著な変化は認められないが、GCには顕著な変化が現われる。すなわち、紙を付着させると針先端にGCは定在せず、観測されたコロナの波形はすべてBPかそれに類似なパルスで、その発生は印加電圧の上昇とともに活発となり発光も肉眼で観察できる。

コロナ平均電流 I_c を増して数十 μA に達すると、紙の表面上のところどころに点状の発光が観測されはじめた。この発光は、紙表面と平板電極間が絶縁破壊を起こしたことによる間欠的発光で、初めは弱く発光点も少ないと、 I_c を増すと発光の強さおよび発光点はともに増す。さらに I_c を増すと、針先端から平板側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し、その火花電圧 V_s' は紙がない場合の火花電圧 V_s のほぼ $1/2$ 倍程度まで低下した。なお、供試実験範囲内では、低下の割合は l の増大とともに増したが、 V_s' はSPを経る破壊 ($l > 6 \text{ cm}$) では l にほぼ比例し、 $l < 6 \text{ cm}$ では不整を伴った。しかし、不整を伴う場合でも、その最低値は $l > 6 \text{ cm}$ の V_s' の延長線上にいた。

このように、放電ギャップの平板側にダストを模擬して紙を付着させるとギャップの火花電圧が著しく低下するが、この特性をさらに詳しく調べた結果を図3、図4に示す。

図3は、BPおよび火花開始電圧 V_b' 、 V_s' と紙の厚さ t' の関係を $l=5 \text{ cm}$ と 8 cm について示している。正針対平板ギャップにおいては、 V_b' には紙の厚さの影響が現われず、 l が等しければ t' に関係なくいすれもほぼ等しい値を示した。しかし、 V_s' には影響が現われ、供試実験範囲内ではいずれのギャップにおいても $t' > 0.02 \text{ cm}$ で顕著な低下を示したが、 t' の影響は顕著には現われなかった。

図4は紙の厚さを一定に保ち ($t'=0.2 \text{ cm}$)、BPおよび火花の開始電圧 V_b' 、 V_s' と針先端半径 r の関係を l をパラメータとして表わしている。図において r を増すと、 V_b' はいくぶん飽和の傾向を示しながらほぼ r に比例して上昇したが、 V_s' は逆に減少の傾向を示した。

3.2 微小ギャップ付き針対平板ギャップの破壊特性

針対平板ギャップの平板側に紙を付着させると火花電

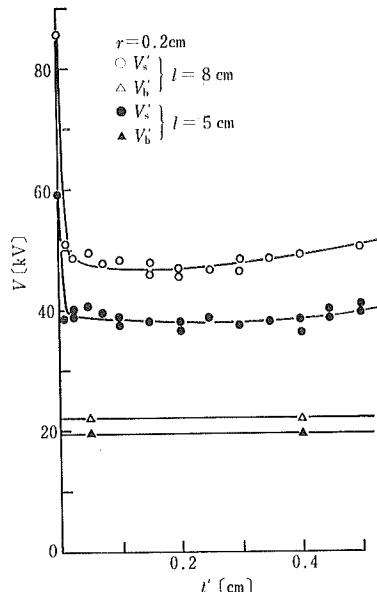


図3 臨界破壊電圧と紙の厚さの関係

Fig. 3 Critical spark-breakdown voltage vs. paper thickness.

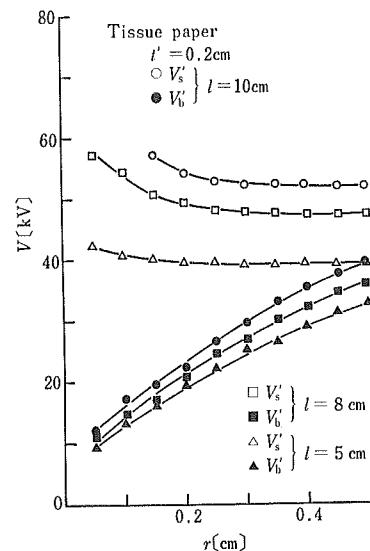


図4 臨界破壊電圧と針先端半径の関係

Fig. 4 Critical spark-breakdown voltage vs. point radius.

圧が著しく低下するが、これと等価的な破壊特性をもつMSGの破壊特性について述べる。

図5、6はMSGの破壊特性を示したもので、比較のために平板側に紙を付着させた場合の特性も付記した。

図5は、MSGのSPおよび火花開始電圧 V_p'' 、 V_s'' と微小ギャップの長さ l'' との関係で、比較のために紙を

付着させた場合の破壊電圧も実線 ($l=8\text{ cm}$) および点線 ($l=5\text{ cm}$) で示した。なお、紙を付着させた場合の横軸は、紙の厚さ t' である。また、MSGにおいては、BP観測されず、コロナははじめからSPであった。図より、コロナ開始電圧は、紙を付着させた場合 (V_b') も紙の厚さにほとんど無関係にほぼ一定であるが、MSGでは

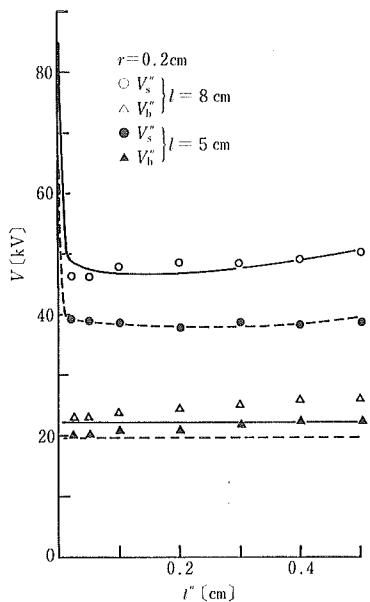


図 5 微小ギャップの長さと火花電圧の関係

Fig. 5 Breakdown voltage vs. gap length in the miniature gap.

は微小ギャップの長さに比例して上昇した。しかし、 V_s'' では両者に顕著な差異が認められず、ほぼ等しい値を示した。これはあとでも述べるように、コロナの開始には微少ギャップの影響が現われ異なる特性を示すが、火花破壊は同じ破壊機構で説明されることを意味している。

図 6 は MSG の SP および火花開始電圧 V_p'' 、 V_s'' と針先端半径 r の関係を示したもので、(a) は $l=5\text{ cm}$ 、(b) は $l=8\text{ cm}$ 、(c) は $l=10\text{ cm}$ の場合をそれぞれ示している。なお比較のため、平板側に紙を付着させた場合の特性も付記した。

MSG のコロナ開始電圧は、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上昇したが、火花電圧は $r \leq 0.2\text{ cm}$ では r の増加に対していくぶん減少の傾向を示した程度で r による顕著な変化は認められなかった。

3.3 電流-電圧特性

針對平板ギャップにおいて、平板側に紙を付着させたか、あるいは微小ギャップを付加するとギャップの火花電圧が著しく低下するが、そのような場合、電流-電圧特性にどのような変化が生ずるかについて検討する。

図 7 は同じ電極配置で、平板側に紙を付着させたり、あるいは微小ギャップを付加すると電流-電圧特性にどのような変化が現われるかについて示した一例で、(a) は $l=5\text{ cm}$ 、(b) は $l=8\text{ cm}$ の場合についてそれぞれ示している。図から、ギャップに紙を付着させるかあるいは微

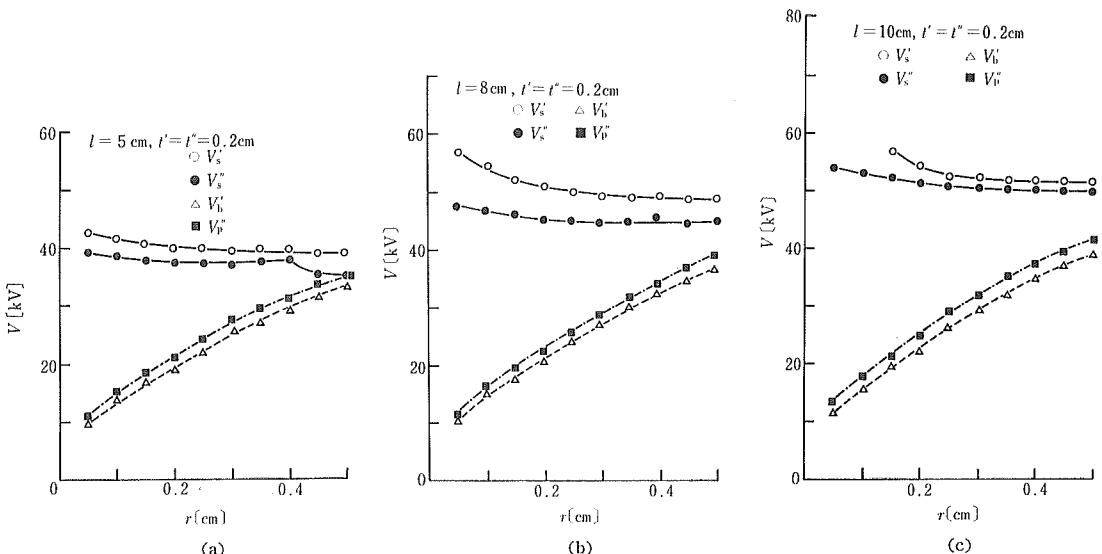


図 6 MSG の破壊電圧と針先端半径の関係 (ダスト層に起因した破壊電圧の比較)

Fig. 6 Relation between the spark-breakdown voltage in the gap with the miniature gap and the point radius (Comparison with the breakdown voltage due to the dust layer).

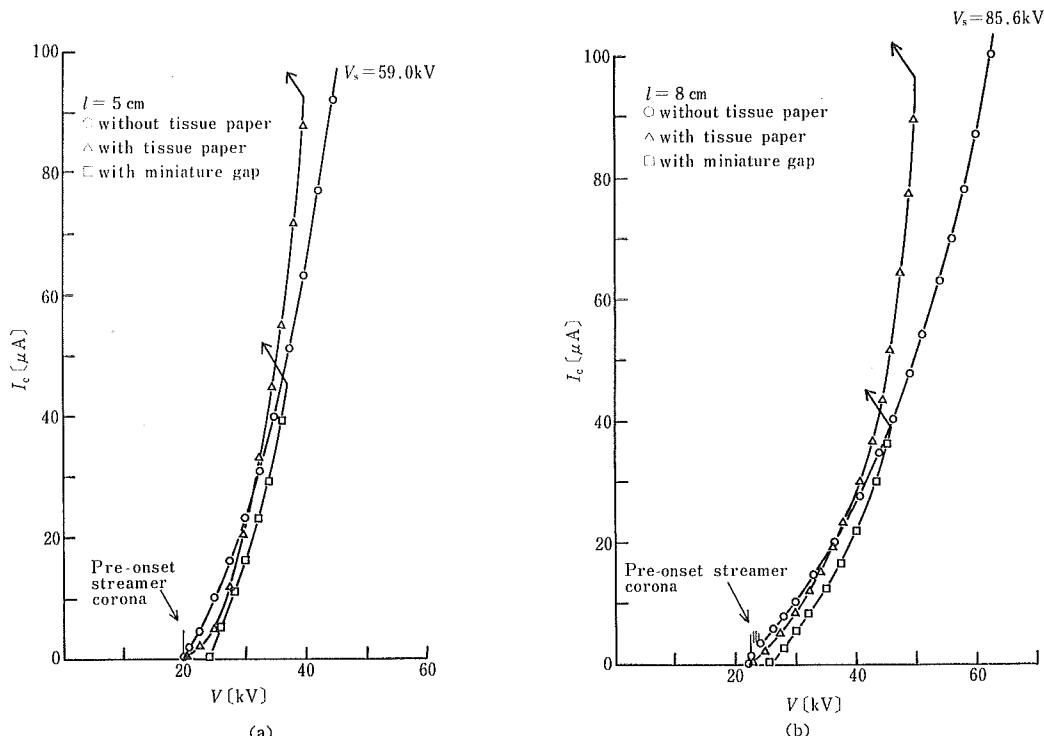
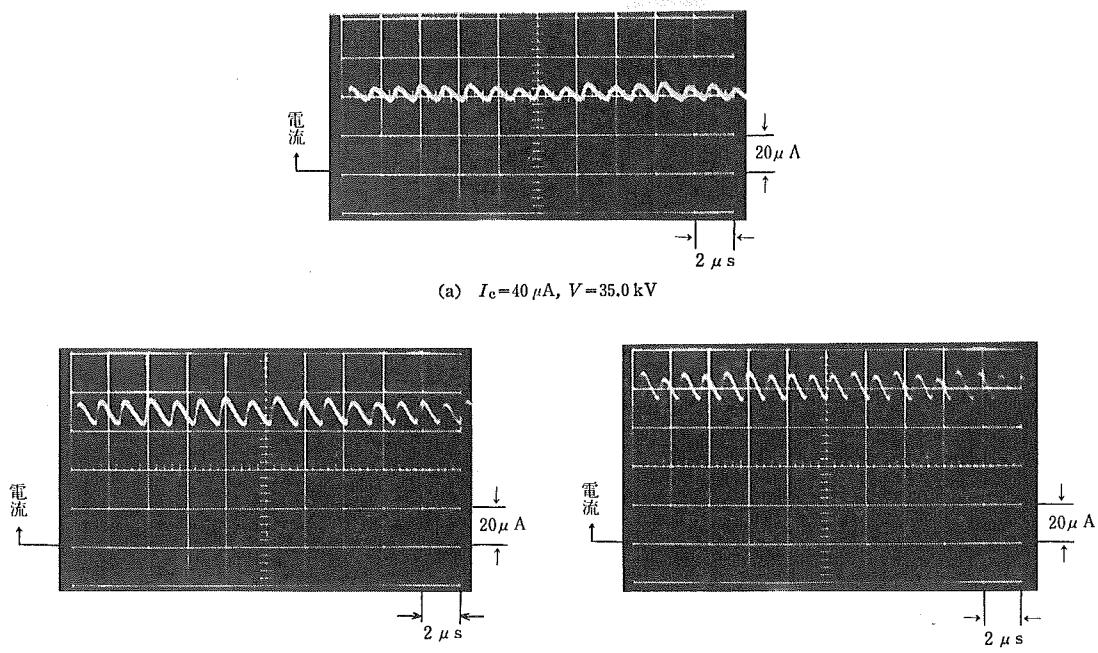


図 7 種々のギャップ条件における電流-電圧特性

Fig. 7 Current-voltage characteristics for the various gap conditions.

図 8 グロー・コロナの典型的なオシログラム ($r=0.2 \text{ cm}$, $l=5 \text{ cm}$)
Fig. 8 Typical oscillograms of the glow corona.

小ギャップを付加すると、針対平板ギャップに比べて一般にコロナ開始電圧はいくぶん上昇し、かつ印加電圧 V が低いコロナのはじめではコロナ平均電流 I_c は小である。 V を上昇させると I_c も増すが、紙を付着させた場合にはその増加が最も顕著でその値がほぼ $100 \mu\text{A}$ に達したのち火花へ遷移している。他方 MSG では、 I_c がほぼ $40 \mu\text{A}$ で針対平板ギャップの特性に近づき、その後火花へ遷移している。なお、針対平板ギャップでは、BP 放電域で電子状の SP⁷⁻¹⁰⁾ が観測され、これが発生すると微小電流計の指針が変動して I_c に不整が現われた。図中矢印はそれを示している。また MSG では、電圧計の指示が変動して電圧の測定が困難であった。

3.4 コロナの波形解析

針対平板ギャップの平板側に紙を付着させると、あるいは微小ギャップを付加すると火花電圧は著しく低下するが、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生ずるかについて検討する。

図 8~10 はその一例で、 $l=5 \text{ cm}$ のギャップで観測されたコロナの波形の変化を示している。図 8 は針対平板ギャップにおける電流オシログラムで、一般にコロナは GC で脈動波形を形成している^{7,14)}。しかし、平板側に紙を付着させると図 9 のように I_c が μA を超過しても脈動特性は定在しがたく、観測された波形は(a)~(c)のように直流分に重畠した波高値、発生頻度とともに不規則な

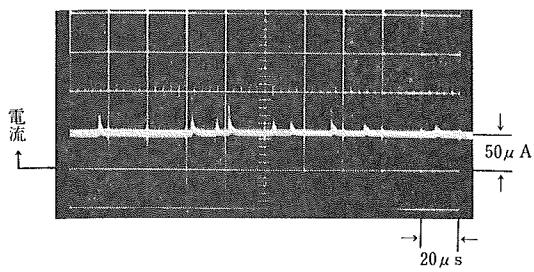
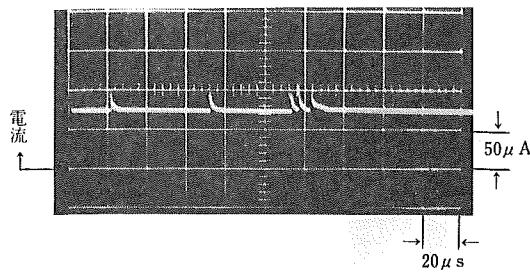
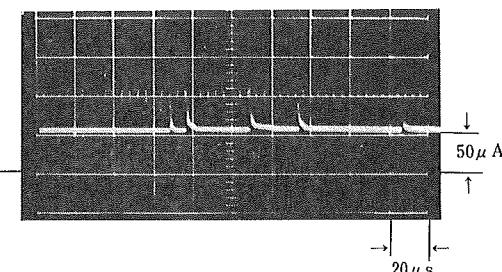
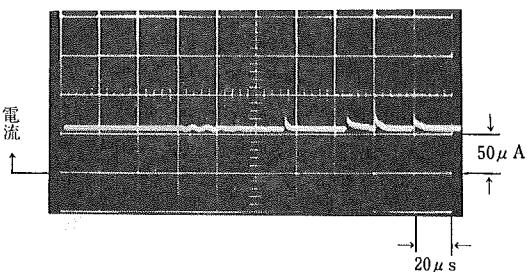
(a) $I_c=50 \mu\text{A}, V=34.4 \text{ kV}$ (c) $I_c=80 \mu\text{A}, V=37.0 \text{ kV}$ (b) $I_c=60 \mu\text{A}, V=35.5 \text{ kV}$ (d) $I_c=60 \mu\text{A}, V=35.5 \text{ kV}$

図 9 平板上に紙を付着させた正針対平板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 ($r=0.2 \text{ cm}, l=5 \text{ cm}, t'=0.2 \text{ cm}$)

Fig. 9 Typical oscillograms of the corona pulses observed in the positive point-to-plane gap with the paper layer on the plane.

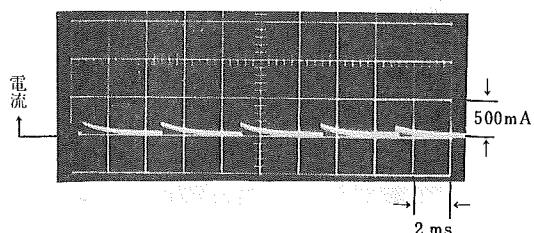
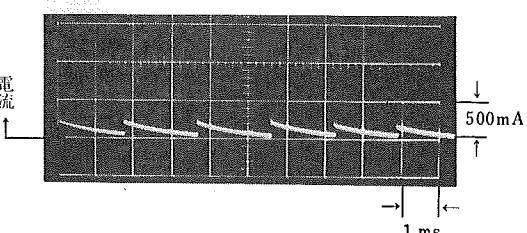
(a) $I_c=15 \mu\text{A}, V \approx 30.0 \text{ kV}$ (b) $I_c=40 \mu\text{A}, V \approx 36.0 \text{ kV}$

図 10 MSG で観測されたコロナパルスの典型的なオシログラム ($r=0.2 \text{ cm}, l=5 \text{ cm}, t''=0.2 \text{ cm}$)

Fig. 10 Typical oscillograms of the corona pulses observed in the gap with the miniature gap.

パルス波形が主であった。しかし、このような場合でも、(d)に示すようにときどき脈動波形が観測されたが、その発生頻度は小さく、かつ継続時間も短く不安定であった。図10はMSG($t''=0.2\text{cm}$)の場合で、このギャップでもコロナの波形は図9と同様直流分に重畠したパルスを形成しているが、この場合のパルスは比較的規則的であった。

4. 考 察

空気中針對平板ギャップにダスト層を模擬した紙を平板側に付着させるとギャップの火花電圧が著しく低下し、その低下特性は等価的には補助電極付きトリガトロンギャップ⁴⁾あるいはMSGの破壊機構で説明できる。ここでは、その破壊機構のモデルとして構造が最も簡単でかつ破壊特性が類似しているMSGの破壊機構について考察し、さらにこれを基にダスト層に起因したギャップの破壊電圧の低下の機構について検討する。

4.1 MSG の破壊

空気中針對平板ギャップで、ギャップに直列あるいは並列に微小ギャップを付加するとギャップの火花電圧が著しく低下することはすでに酒井ら¹⁵⁾によって詳しく調べられ、その破壊機構は次のように考えられる。

MSGに電圧を印加すると、主ギャップ(付加した微小ギャップと区別するために、ここでは以後放電ギャップを主ギャップと呼ぶ)と微小ギャップの電圧は、印加電圧が低いとそれぞれの静電容量に反比例して分圧する。印加電圧を上昇すると両ギャップの電圧も上昇するが、両ギャップが破壊条件を満たすとまず微小ギャップが破壊する¹⁵⁾。微小ギャップが破壊するとその分担電圧が低下し、同時に主ギャップの印加電圧が急上昇して針先端にコロナの発生を促す。この場合針先端では電界が急上昇するからそこではストリーマが発生しやすく¹⁶⁻¹⁸⁾、図5に示したように、MSGにおけるコロナははじめからSPであったのもこのためと解釈される。またこの場合、微小ギャップへのエネルギーの供給は放電ギャップのコロナ電流で行なうが、コロナ電流では微小ギャップの放電を長時間持続させることは困難で、放電は間欠的となる。かくして、主ギャップにおいてもGCの定在は困難で放電は間欠的なSPを形成し、針先端に発生したストリーマが全路破壊まで進展して火花電圧が低下するものと考えられる。

4.2 ダスト層に起因したギャップの破壊

針對平板ギャップの平板側にダストを模擬して紙を付着させたギャップの放電モデルは図11のようである。その破壊特性は等価的には紙の代わりに微小ギャップでおき換えたものに等しい。以下、紙に起因した火花電圧の低下特性とMSGの破壊特性を対比させながら、ダスト層に

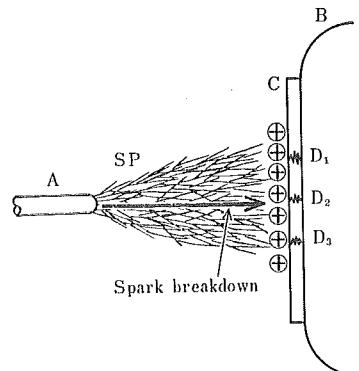


図 11 ダスト層に起因した正針對平板ギャップの破壊機構の図説

Fig. 11 Scheme for the explanation of the breakdown mechanism due to the dust layer in the positive point-to-plane gap.

起因した火花電圧の低下の機構について考察する。

針對平板ギャップにおいて、紙を平板に付着させると紙は一種の平行平板ギャップを形成する。この場合、紙を付着させてもギャップの静電界は著しく乱されないから、図2に示したように、コロナ開始電圧には紙の影響がほとんど現われない。

印加電圧を上昇させて針電極Aの先端にコロナが発生すると、それに起因して発生した正イオン \oplus は陰極Bに向かって移動し紙表面Cに付着して紙内部の電界を強める。紙内部の電界が強まり破壊の条件を満たすと紙が破壊する(D_1, D_2, D_3, \dots)が、この場合エネルギーの供給はコロナ電流であるから、紙内部での放電を長時間持続させることはできず放電は間欠的となる。他方、紙内部での放電が間欠的となると、MSGの場合と同様針先端にはGCは定在せずコロナは間欠的となってSP(SP)が発生しやすくなる。かくして、針先端で発生したストリーマはギャップの破壊の条件を満たすと矢印(spark)で示したように全路破壊まで進展して火花電圧が低下するものと考えられる。なお、図9と図10では、同じコロナ電流でありながら観測されたパルスの出現頻度に差異が認められるが、これは紙内と微小ギャップでの微小放電数の相違に起因している。

このように、ダスト層に起因した火花電圧の低下は、ダスト層の微小放電が針先端にSPが定在することを困難にし、逆にストリーマの発生を促進させることに起因しているから、この破壊は逆電離現象によるものとは考えられない。しかし、その原因が陰極平板側のダスト層であることには変わりない。したがって、実際問題として、正コロナを電気集じん装置に利用するには、針先にGCを定在させることが何よりも重要な課題と考えられる。

5. 結 言

空気中正針対平板ギャップにおいて、平板側に付着したダストに起因した火花電圧の低下特性について述べた。さらに、これと等価な破壊特性をもつ MSG の破壊特性を述べ、両者を比較しながら集じんダスト層に起因した火花電圧の低下の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) 針対平板ギャップで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かつたが火花電圧には顕著な効果が現われる。

(2) MSG の破壊特性は、平板側に紙を付着させたときに起きる破壊特性と類似している。

(3) 針対平板ギャップで平板側に紙を付着させると針先端に GC の定在が困難となり、観測されたコロナ波形は直流分に重畠したパルス波形を形成する。

(4) 針対平板ギャップにおいて、平板側に付着した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 MSG の破壊機構で説明される。その原因是、ダスト層の微小放電が針先端に GC が定在することを困難にし、逆にストリーマの発生を促進させることに起因している。

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）に感謝する。

参 考 文 献

- 1) 細川辰三, 岩間紀男, 三好保憲: 電気学会論文誌 A, 95 (1975), 269.
- 2) 増田閃一, 新岡正樹: 電気学会論文誌 B, 95 (1975), 423.
- 3) 細川辰三, 三好保憲: 静電気学会誌, 2, 2 (1978), 133.
- 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講演論文集, 912 (1975).
- 5) W.H. Bandel: Phys. Rev., 84 (1951), 92.
- 6) M.R. Amin: J. Appl. Phys., 25 (1954), 210.
- 7) 細川辰三, 三好保憲: 電気学会論文誌 A, 93 (1973), 420.
- 8) 本多侃士: 理化学研究所彙報, 8 (1929), 467.
- 9) 本多侃士: 理化学研究所彙報, 10 (1931), 5.
- 10) M.R. Amin: J. Appl. Phys., 25 (1954), 358.
- 11) G.G. Hudson and L.B. Loeb: Phys. Rev., 123 (1961), 29.
- 12) 生田信皓, 牛田富之, 石黒美種: 電気学会雑誌, 90 (1970), 1816.
- 13) W. Hermstein: Arch. Elektrotech., 45 (1960), 209.
- 14) 細川辰三, 石原準一郎, 西阪公一, 三好保憲: 電気学会論文誌 A, 96 (1976), 9.
- 15) 酒井長武, 三好保憲: 電気学会雑誌, 78 (1958), 223.
- 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: J. Appl. Phys., 11 (1940), 459.