(ZnO/金属) 複合電極を有する微小ギャップの インパルス放電特性

正員 中山 博 史 (姫路工業大学)
正員 小野田 光 宣 (姫路工業大学)
正員 天 川 清 士 (姫路工業大学)
正員 住 野 安 弘 (松下電工)

Breakdown Characteristics of Small Air Gap with Ceramics Composite Electrodes
Hiroshi Nakayama, Member, Mitsuyoshi Onoda, Member, Kiyoshi Amakawa, Member (Himeji
Insutitute of Technology), Yasuhiro Sumino, Member (Matsushita Electric Works, Ltd.)

The paper describes the discharge phenomena of a small air gap with ceramics composite-plane electrodes under pulse voltages. The discharge voltage decreases with increasing projection distance of ceramics from a comb-shaped metal electrode. Even if the projection distance is zero, the discharge voltage is lower than that of comb-shaped metal electrode. This shows that the discharge is extremely sensitive to the local high field caused by a triple junction. The surface discharge on ceramics occurs after the gap discharge, and it always initiates at the negative side irrespective of the polarity of the applied pulse voltage. These anomalous discharge characteristics are discussed on the basis of the experimental results.

キーワード: (ZnO/金属) 複合電極, 局部放電, パルス放電

1. まえがき

通信機器の周波数帯域は中波から極超短波まで広がっている。この周波数帯域に影響を与えるものに、自動車のディストリビュータの放電によって生じる雑音がある。すなわち、放電電流がディストリビュータの電極間を急激に流れる際に、高周波の妨害電波を発生する。CISPR(国際無線障害特別委員会)⁽¹⁾は30~1000MHzの周波数を規制対象にし、その許容値を準尖頭値で34~45dBとしている。このような観点から、自動車の点火系統から発生する電波雑音の一層の低減が要請されている。

点火回路系のプラグやディストリビュータから発生するパルス性雑音の防止方法の主なものに、ギャップと直列に抵抗を挿入することによる⁽²⁾⁽³⁾高周波電流の抑制、あるいは金属電極のシリコン処理による放電電圧の低電圧化などがある。また、最近のものとして、堤らによるセラミックス電極を用いた電波雑音抑制の研究⁽⁴⁾⁽⁵⁾などがある。

ところで、実用化されているディストリビュータの放電電圧は、大きくばらつくことがあり、そのため電極間に過電圧がかかり、異常に大きい雑音を生じるときがある。この原因となるものに初期電子供給の時間遅れが挙げられる。そこで、本研究では電子放出の容易なZnO系セラミックを

使い、金属電極と組み合わせることにした。このような電極構成では、局部コロナを介した放電となる。金属電極間におけるコロナの特性については、細川ら⁽⁶⁾⁽⁷⁾によって空气中、あるいは(窒素/酸素)混合気体でよく調べられている。しかし、微小ギャップにおけるインパルス電圧によるコロナと放電電圧の関係⁽⁸⁾は、十分に解明されたとはいえない。特に、セラミックスを用いた電極を有するギャップの放電機構については未だ不明なところが多い。

筆者らは、このような観点から微小ギャップの放電電圧に着目して、櫛型金属電極 および (ZnOセラミックス円板 / 櫛型金属) 複合電極 (以下、複合電極という) など種々の電極を用いてパルス電圧による放電電圧-時間特性を測定した。その結果、本報告では複合電極を有するギャップにおいて、放電電圧の低下および特異な放電形態のあることがわかったので⁽⁹⁾、それらについて報告する。

2. 試料および実験方法

実験に使用した電極の一方は櫛型金属電極単独あるいは複合電極で、他方は平板金属電極である。複合電極を構成するセラミックスはZnO系の円板で、その半径が16mm、厚さが0.5mmである。また、厚さ1mmの櫛型電極先端には幅22mmにわたって9ヶの鋸状の刃があり、材質は平板電極と

図1 電極構成
Fig. 1. Electrode configuration.

同様に黄銅製である。Zn0円板上に櫛型金属電極を配置した複合電極の構成および櫛型電極中央部の拡大写真を図1に示す。金属平板電極から櫛型金属電極中央の刃の先端およびZn0円板の先端までの距離を可変とし、それぞれG、Lとした。大気圧空気中において方形波パルス電圧をギャップに印加し、高電圧プローブ(HV-930、岩崎通信機)およびオシロスコープ(DS-6026、岩崎通信機)を用いて、放電に至るまでの時間および放電電圧を測定した。方形波パルス電圧の波頭長(雷インパルス電圧波形の表示法による規約波頭長を指す)を変えるために、ギャップと並列に高周波用コンデンサを挿入した。なお、パルス電圧の印加間隔は、前課電による残留電荷の影響をさけるために30秒以上とした。

3. 実験結果および検討

〈3.1〉櫛型—平板電極ギャップにおける放電電圧—時間特性
櫛型電極を用いた場合のインパルス電圧による微小ギャップの放電電圧と放電に至るまでの時間、いわゆるV-t特性を調べた。図2(a)、(b)はそれぞれ正極性、負極性のインパルス放電時の結果である。図中の破線は印加電圧(波高値 $V_p=20\text{kV}$)の波頭部の波形を、○印は放電電圧の実測値を示す。ここで、このようなインパルス電圧の波形を採用したのは、一般にディストリビュータには波頭長が約 $10\mu\text{s}$ で、波高値が約 20kV のインパルス電圧が用いられていることを考慮したためである。印加するインパルス電圧の波頭長が 1.5 から 4 、 $10\mu\text{s}$ へと長くなるにつれて、放電電圧がわずかに低下している。なお、櫛型電極の極性によって放電電圧に差があり、負極性の放電電圧が正極性のそれに比べて明らかに低い値を示している。

〈3.2〉複合—平板電極ギャップにおける放電特性

複合電極の場合の正極性および負極性のパルス放電のV-t特性を図3(a)、(b)に示す。この場合、 $L=1\text{mm}$ 、 $G=1\text{mm}$ である。すなわち、櫛型金属電極の背後にZn0円板を添わせると、正極性においては放電電圧のばらつきは大きい、櫛型電極単独に比べて低い値も現れ、負極性ではばらつきも小さく明らかに放電電圧が低くなった。

図2 櫛型金属電極における放電のV-t特性
Fig. 2. V-t characteristics of small air gap under comb-shaped metal electrode.

図3 複合電極における放電のV-t特性
Fig. 3. V-t characteristics of small air gap under composite electrode.

なお、この場合の放電は櫛型電極の先端とZn0板の界面付近から発生し、対向した平板電極に達している。

図4に櫛型金属電極から平板電極までの距離Gを 1mm 一定に保って、Zn0円板から平板電極までの距離Lを 0.5mm 、 1mm と変化させたときの放電電圧の変化を示す。ここで、測定された放電電圧値の重なりを避けるため、横軸の位置を

図4 ZnO円板—平板電極間の距離Lと放電電圧の関係

Fig. 4. Relationship between discharge voltage and length L.

図5 櫛型電極—平板電極間の距離Gと放電電圧の関係

Fig. 5. Relationship between discharge voltage and length G.

わずかにずらして表示した。また、 ∞ は櫛型電極のみを意味する。ZnO円板を櫛型金属電極に添え、その先端をそろえると、放電電圧のバラツキが小さくなり、負極性の放電電圧が約1.5kV低くなる。またLを短くし、ZnO円板を櫛型電極から0.5mm突き出すと、櫛型電極と平板電極間の放電電圧が約2kV低下する。しかし、Lを1.5mmと長くしてZnO円板を櫛型金属電極先端から0.5mm引上げると、櫛型金属電極単独のときの放電電圧とほぼ同一になり、ZnO円板の効果がないことがわかる。いずれのギャップにおいても、負極性の放電電圧が正極性のそれに比べて低く、両者の差は最大でほぼ3kVとなっている。

ZnO円板を櫛型金属電極に添えると、放電電圧が低下する原因について考察する。本実験のような不平等な電界においては、局部的な高電界部で生じるコロナの影響が大きいものと考えられる。すなわち、複合電極の場合、ZnO円板と櫛型金属電極の接触部が問題である。誘電率の異なる二種類の誘電体と金属電極の三者が集まったところは三重点効果で、電界の特異性を生じることについては、古くはM. Halleckの研究があり⁽¹⁰⁾、最近では宅間のもの⁽¹¹⁾がある。円筒型固体支持絶縁物が円環状の金属電極を支持している場合の接触部近傍の金属電極表面電界⁽¹¹⁾は、絶縁物の誘電率が増大すると、異常に上昇する。一例として、比誘電率が8の場合の電界は、それが2のときに比べてほぼ一桁高い値になる。実際の電界は金属電極先端の曲率半径にも依存するが、本実験で用いたZnOの比誘電率は約8と大きいので、異常な電界が生じることは確かである。このように櫛型金属とZnO円板および大気圧空気の接する微小領域に局部コロナが発生し、放電に必要な初期電子を供給して

いるものと考えられる。

電子を固体から引き出すときの仕事関数⁽¹²⁾はCu, Zn, Agなどの金属で約4~5eVと大きい。しかし、金属電極のそれに比べてZnOセラミックスの仕事関数は小さいことから、電子放出も容易である。このことを裏付けるためにZnOの代わりに比誘電率が約6のガラス板を用いて複合電極を作り、放電電圧を測定した。その結果、波頭長10 μ s、波高値 $V_p=20$ kVのインパルス電圧に対して $L=1$ mm、 $G=1$ mmの場合、正極性の平均値で約8kV、負極性のそれは約6.5kVとなった。従って、ZnOを用いた複合電極においては、ZnOから電界放出と光電子放出が容易なことが、放電を開始するための初期電子供給の時間遅れを小さくし、放電電圧の低下をもたらしたものと考えられる。

図5にLを1mm一定として、波頭長10 μ s、波高値20kVのパルス電圧を用いて得られた放電電圧のG依存性を示す。正極性の場合、放電電圧のバラツキは大きい、平均値でほぼ8kV一定である。しかし、負極性の場合、Gが10mm以上になると、約2kV高くなっている。この場合、ZnO円板から平板までの距離Lが1mmに固定されていることから、Gが大きくなると、エアギャップと直列に挿入されたZnOの抵抗が大きくなる。それ故、放電電圧が低い負極性において、ZnO沿面距離の影響がでて、放電開始後の電流急増が抑えられ、放電の完了までに時間遅れを生じる。その結果、パルス電圧の波頭部での破壊においては、放電電圧の上昇を招くものと考えられる。

〈3.3〉複合—平板電極ギャップにおける放電の特異性 $L=1$ mmを一定に保って、種々の大きさのGに対するギャップ放電時のZnO円板上の沿面放電を図6(a), (b)

図6 ギャップの放電および ZnO上の沿面放電
Fig. 6. Discharge between ZnO and plane electrode, and ZnO surface discharge from comb-shaped electrode.

(a) $L=1\text{mm}$, $G=7\text{mm}$ (b) $L=1\text{mm}$, $G=15\text{mm}$

に示す。図の下部に円形に写っているのは、上部の ZnO円板が平板金属電極に反射したもので、平板電極の位置はそれらのほぼ中央である。この場合、印加パルス電圧の波高値は -20kV である。すなわち、複合電極—平板金属電極間に過電圧がかかった状態で、ギャップの放電と沿面放電が同時に現れているように見えるが、沿面放電はなぜか櫛型電極からのみ生じている。

次に、複合電極—平板電極間にかかる過電圧を大きく変化させて、ZnO円板の沿面放電とギャップの放電様相を調べた。その結果を図7の(a), (b)に示す。(a)図はパルス電圧の波高値を -6kV にしたときのもので、ZnO円板と平板電極間および櫛型電極から ZnO表面に放電がみられる。(a')図に複合電極の櫛型金属電極と平板金属電極間の電圧波形を示す。ギャップの放電瞬時に電極間電圧が急激に低下することなく、その後、時間と共にわずかに低下するが、 3kV 程度の電圧が維持されている。(b), (b')図は、 -10kV と印加電圧を高くしたときのものである。(b)図の場合、ギャップの放電と共に ZnO表面にもよく伸びた沿面放電が生じ、いずれも発光強度が増している。このとき、(b')図に見られるように、放電瞬時の急激な電圧低下とそれに続くゆるやかな低下がある。このような電圧変化から考えて、ZnO面の沿面放電はギャップにかかる過電圧が大きいときに現れるといえる。

次に正極性の結果を図8に示す。(a)図は印加電圧が 6kV のときのもので、このときギャップのみが放電している。また電圧は放電瞬時に約 3kV 低下し、その後、ほぼ一定の電圧となっている。(b), (b')図は 10kV と印加電圧を上げた場合で、ギャップが放電し、その放電点の ZnO円板の端から、ZnO円板の表面を櫛型電極に向かって沿面放電が生じている。しかし、(b')図の電圧波形は放電瞬時の電圧低下が約 3kV と、負極性と同様な電極間電圧の時間変化を示

図7 ギャップの放電および沿面放電特性に及ぼす過電圧の影響（負極性）

Fig. 7 Effect of overvoltage on the gap discharge and ZnO surface discharge.

(negative, $L=1\text{mm}$, $G=11\text{mm}$)

(a), (a'): $V_p = -6\text{kV}$, $5\mu\text{s/div}$, -2kV/div

(b), (b'): $V_p = -10\text{kV}$, $10\mu\text{s/div}$, -2kV/div

図8 ギャップの放電および沿面放電特性に及ぼす過電圧の影響（正極性）

Fig. 8 Effect of overvoltage on gap discharge and ZnO surface discharge.

(positive, $L=1\text{mm}$, $G=11\text{mm}$)

(a), (a'): $V_p = 6\text{kV}$, $5\mu\text{s/div}$, 2kV/div

(b), (b'): $V_p = 10\text{kV}$, $10\mu\text{s/div}$, 2kV/div

す。このように ZnO円板があると、放電時のその非直線性抵抗特性のために電極間電圧の降下および高周波振動が抑制されている。

印加電圧が大きいときに ZnO円板の表面に生じる放電は、複合電極が負極性のときに櫛型電極から発生するのに対し、正極性のときは、櫛型電極から全く放電が現れず、ギャップの放電がそのまま進展する。このように ZnO円板の沿面放電には顕著な極性効果が現れることが明らかになった。この沿面放電の発生は、ZnO円板の体積抵抗率が約 $6 \times 10^8 \Omega \text{cm}$ であり、その値が大きいことにもよると思われる。いずれにしても、沿面放電が発生する場所は、ZnO円板の負極性側といえる。湯本ら⁽¹³⁾によると、絶縁物沿面でストリーマが進展しやすいのは、ストリーマが絶縁物から光電子放出を引き起こすためであるとしている。このことと関連して、エアギャップの放電に起因した ZnOセラミックスからの光電子放出が負極側で発生し、沿面放電が起きる。一度沿面放電が発生すると、そのときの発光で ZnO表面の負極端から後続の光電子が放出される。このように ZnO円板上の沿面放電が印加パルス電圧の負極端から進展するのは、印加電界が関与していることを暗示し、ZnOからの電子放出にショットキー効果が作用しているためと考えられる。

今後、ZnO円板を用いたディストリビュータを実用化するに当たって、このような過電圧印加によって ZnO沿面に発生する放電にその体積抵抗が如何に関与し、それらが雑音にどのように影響するか等について定量的な検討が必要である。

4. まとめ

櫛型一平板電極あるいは複合一平板電極を用いて、 μs パルス電圧による大気圧微小ギャップの放電特性を調べた結果、次のことがわかった。

- (1) 櫛型一平板電極間のギャップのインパルス電圧印加時の放電電圧には極性効果があり、櫛型金属電極が負極性のときの放電電圧が正極性に比べて低い。
- (2) 複合一平板電極において、櫛型金属電極から平板金属電極までの距離 G を 1mm 一定にして ZnO円板から平板までの距離 L を 1mm にした場合、櫛型金属電極単独に比べて負極性の放電電圧が低下し、しかも、そのばらつきが小さくなる。更に L だけを短くすると、いずれの極性においても放電電圧が低下する。すなわち、ZnO円板が櫛型金属電極から突き出るほど、放電電圧が低下する。
- (3) 複合一平板電極において、 L に比べて G が大きい場合、複合電極と平板金属電極間のギャップにかかる過電圧が小さいときの放電は、ギャップ間のみであるが、過電圧が大きくなると、ZnO円板の表面に沿面放電が生じる。この沿面放電の様相は印加電圧の極性によって異なる。すなわち、正極性のとき、放電したギャップに面した ZnO円板の端から沿面放電が進展する。しかし、負極性の場合は沿面放電が櫛型金属電極から ZnO円板の面に沿って進展する。言い

換えると、ギャップと直列になった ZnO円板の沿面に生じる放電の起点の極性は常に負である。

最後に、本研究にいろいろとご援助をいただいた三菱電機(株)姫路製作所所長濱野 勲氏、同所部長上田 敦氏並びに大橋 豊氏に深謝いたします。

(平成 6 年 6 月 30 日受付, 同 6 年 12 月 26 日再受付)

文 献

- (1) 清水編：電磁波の吸収と遮断，日経技術図書，p. 586 (1989)。
- (2) 藤原・雨宮：「自動車点火雑音の金属しゃへいギャップによる軽減機構」電学論，98-C，345 (1978)
- (3) 藤原・雨宮：「広間けきプラグにおける点火雑音発生機構」電学論，89-C，17 (1979)
- (4) 堤・小野・藤井・長江・粕谷：「セラミックス抵抗体放電電極の電波雑音抑制効果」電学論，110-A，153 (1990)
- (5) 堤・小野・藤井・桧垣・石井：「微小ギャップ放電からの電波雑音の抑制」電学論，110-B，850 (1990)
- (6) 細川・近藤・三好：「空气中負性コロナの前駆現象」電学誌，89，1823 (1969)
- (7) 細川・三好：「空气中正針コロナとその前駆パルス」電学論，93-A，420 (1973)
- (8) 中山・小野田・黒田・天川：「針一平板ギャップにおける電氣的負性ガスの絶縁破壊特性」電学論，110-A，420 (1990)
- (9) 中山・小野田・住野・天川・大橋・上田・濱野：「大気中における複合電極を有した微小ギャップの破壊特性」電気学会放電研究会 ED-91-27 (1991)
- (10) 電気学会編：放電ハンドブック，オーム社，p. 329 (1958)
- (11) 宅間：「複合誘電体における電界集中」静電学誌，14，40 (1990)
- (12) 電気学会編：放電ハンドブック，オーム社，p. 25 (1974)
- (13) 湯本・堺：「絶縁材料からの光電子放出と放電進展」電学論，109-A，1 (1989)

中山 博史 (正員) 1943年 3月14日生。40年 3月姫路工業大学電気工学科卒業。40年 4月同大学電気工学教室助手，講師，助教授を経て，平成 3年同大学教授，現在に至る。工学博士。電気材料学，電力系統工学を担当。主として，気体および固体誘電体の絶縁破壊に関する研究に従事。電気学会，応用物理学会，高分子学会会員。

小野田 光宣（正員）1951年8月19日生。52年 3月姫路工業大学大学院工学研究科修士課程修了。54年 4月同大学電気工学教室助手を経て、平成 3年同大学助教授、現在に至る。工学博士。高電界現象論を担当。94年4月より1年間ペンシルバニア大学客員研究員、主として、導電性高分子の電気物性に関する研究に従事。電気学会、電子情報通信学会会員。

住野 安弘（正員）1966年 1月 3日生。平成元年 3月姫路工業大学電気工学科卒業。平成元年 3月同大学大学院工学研究科修士課程電気電子工学専攻修了。平成元年 4月松下電工㈱入社。配機開発研究所メカトロニクス研究室。電気学会会員。

天川 清士（正員）1930年 7月11日生。28年 3月姫路工業大学電気工学科卒業。以後、同大学電気工学教室助手、講師、助教授を経て、昭和53年同大学教授、現在に至る。工学博士。電磁変換工学、物性論を担当。主として、固体誘電体の電気物性に関する研究に従事。電気学会、応用物理学会、高分子学会会員。静電気学会、IEEE会員。