低気圧インパルス放電によるアーク 開始時間と陰極表面の影響

正員 大坪 昌久 (宮崎大)

正員 山住 薫 (日新ハイボルテージ)

正員 竹内 公人 (九州電力)

正員 賛田 寛 (宮崎大)

Arc Occurrence Time and Influence of Cathode Surface by Impulse Discharges at Low Pressure in Air

Masahisa Otsubo, Member (Miyazaki University), Kaoru Yamasumi, Member (Nissin High Voltage Co., Ltd.), Kimito Takeuchi, Member (Kyushu Electric Power Co., Inc.), Hiroshi Nieda, Member (Miyazaki University)

The time interval from voltage application to the arc occurrence in the impulse discharge process of a positive point to plane configuration having a protrusion on the plane was measured in air at low pressure. The time was compared with one in the configuration without protrusion under the same conditions. Simultaneously with the measurements of the time, the luminous phenomena of the discharge processes were examined by an image converter camera and a still camera.

Furthermore, before and after the frequent discharges, the surface condition of the protrusion exposed to the impulse discharges was observed by an electron probe microanalyser, and the binding energy of Cu-2p_{3/2} at the protrusion surface was investigated by means of a x-ray photoelectron spectroscope.

The main results are as follows: (1) The time till arc occurrence in the configuration with protrusion as compared with one in the configuration without protrusion is larger for low applied voltages and smaller for high applied voltages. (2) As the number of times of the discharge is increased, the time till arc occurrence is later and finally both of the time and the length of the discharge channel become roughly constant. (3) The surfaces of protrusion and plane are oxidized by frequent impulse discharges. Consequently, the change of cathode spot position occurs.

キーワード：インパルス放電，アーク放電，グロー放電，表面分析，酸化，二次電子像，特性X線像

1. ま え が き

気体の放電電圧は、陰極材料の違いや放電空間の不純物の影響を受け、更に汚損や酸化などによる陰極表面状態の効果で、一般に、不安定になることがわかっている⁽¹⁾⁽²⁾。また、コンディショニング効果⁽³⁾では、小勢力の放電を繰返すことにより火花電圧が上昇し、やがて一定値に落ち着くことが知られている。

このような放電電圧の不安定性や上昇の原因を明らかにするために、陰極表面状態の効果に着目した研究が行われている。その例として、放電電圧の変化を、陰極表面の仕事関数と結び付けたもの⁽⁴⁾⁽⁵⁾や、電極表面の吸着物との関係で調べたものがある⁽¹⁾⁽²⁾。ほかにも、インパルス破壊に伴って生じる陰極表面の酸化膜と破壊のフラッシュオーバー率との関係が調べられている⁽⁶⁾。これらの、放電特性に影響するパラメータの解

明とそれらの放電特性に対する効果についての研究は、機器の機能や絶縁を確保するうえで重要であるにもかかわらず、十分に行われているとはいえない。

そこで著者らは、低気圧空气中で針対突起付き平板に雷インパルス電圧を繰返し印加して、繰返し放電による陰極表面とギャップの放電特性の各変化を調べた。電極が針対突起付き平板の場合、アーク放電路は、針対突起間で始まり、放電回数の増加と共に針対平板間に移動した。そこで、この放電特性の変化を、ギャップの長さが等しい正針対平板のものと比べた。突起電極は、繰返し放電によって変化した陰極表面の観測・分析用の試料として利用することができた。

その結果、比較的低い印加電圧領域での正針対突起付き平板電極系のアーク開始までの時間は、突起があっても、正針対平板電極系のものより長くなり、アーク出現のための印加電圧は高くなることがわかった。これに対し、比較的高い印加電圧領域では、高い電界を形成し得る突起が平板にあるので、初期のアーク開始までの時間は正針対平板電極系のものより短かった。しかし、放電を繰返した後のアーク開始までの時間は、突起の特性が現れにくくなって、次第に長くなることがわかった。アーク開始時間が放電回数の増加と共に長くなるのは、陰極の表面状態が放電を繰返すことによって変化（酸化）するからである。このことは、電子線マイクロアナライザと X 線光電子分光装置による観測から明らかとなった。

なお、著者らは、アーク開始時間が放電回数の増加と共に長くなり、放電電圧が高くなる現象は針対平板についても明らかにし、一部を報告している⁽⁷⁾。

以下、これらについて報告する。

2. 実験の装置と方法

電極系の正針としては、先端を半球状に仕上げた $\phi 1$ mm、長さ 30 mm のタングステン棒を、棒状補助電極の先に取り付けて用いた。陰極としては、周囲を丸めた $\phi 150$ mm の銅平板、 $\phi 100$ mm の黄銅平板を用いた。正針対突起付き平板の場合、この平板の中央に、先端を半球状に仕上げた $\phi 2$ mm の銅または黄銅製突起を設け、突起の高さ (h) は 10 mm または 5 mm とした。正針と平板、正針と突起先端間のギャップの長さ (d) は等しくし、 $d=60$ mm または 80 mm とした。

突起電極は、まずエメリー紙、金属研磨剤（ピカール）で研磨し、アルミナ (Al_2O_3 、粒子径 0.3μ) でその表面を鏡面状に仕上げた後、アセトンに浸した清浄な布で拭いた。この突起電極は、更にトリクロール

図 1 実験回路と装置

Fig. 1. Experimental circuit and apparatus.

エチレンと蒸留水で、または蒸留水のみでそれぞれ 10 分間の超音波洗浄を行い、約 10^{-2} Torr の空气中に 1 時間放置して乾燥した後、実験に供した。平板電極も必要に応じて上記の研磨・洗浄処理を行った。

供試気体は、シリカゲルを通して乾燥した室内空気、電極系を設置したパイレックスガラスシリンダ内に充てんし、その圧力 (P) は 8 Torr 一定とした。

図 1 に実験回路と装置を示す。印加電圧 (V_a) は放電しないときに針端に現れる電圧で、 $1/300\mu\text{s}$ の正極性雷インパルスである。印加電圧の波尾をこのように長くすることによって、グロー、アークの出現と放電特性の解析を容易にすることができた。放電時の電圧 (V)、電流 (I) は、デジタルメモリーで観測し、マイクロコンピュータに記憶してデータの解析などに用いた。ここで、電圧印加後アークが開始するまでの時間（アーク開始時間、 T_a ）と放電回数 (N) との関係調べた。

また V 、 I の観測と同時に、放電の発光過程をイメージインテンシファイヤ (II) 付きのイメージコンバータカメラ (ICC) で観測した。更に、放電回数に対するアーク放電路の変化を静止写真で観測した。

突起電極の表面は、放電の前後に電子線マイクロアナライザ (EPMA) で観測し、まず二次電子像 (SEI) の観測から電極表面の放電こん跡の分布を明らかにした。次に、特性 X 線スペクトルの観測から放電こんとその周囲に含まれる元素を調べ、各元素の特性 X 線像からその元素の分布を明らかにした。更に、銅製突起電極の表面を、放電の前後に X 線光電子分光装置 (XPS) で観測し⁽⁸⁾、放電によってできた表面物質を調べた。

アーク開始時間特性の実験は主に陰極として銅製突

起付き平板を用い、 $d=60\text{ mm}$ 、 $h=10\text{ mm}$ として行った。黄銅製突起付き平板は主に陰極の酸化特性をより明らかにするために用い、その場合、 $d=80\text{ mm}$ 、 $h=5\text{ mm}$ とした。

3. 実験結果

〈3・1〉 アーク開始時間特性 図2に、正針対突起付き平板電極系と正針対平板電極系の、アーク開始時間特性を示す。突起と平板の材質は銅で $h=10\text{ mm}$ の場合である。同図で、正針対突起付き平板電極系のアーク開始時間 (T_a) (その分布と平均を $\circ$ - $\circ$ で図示) は、針対平板のもの ($-\Delta$ で図示) に比べ、 V_a が高い領域 (以下、高 V_a) では短く、 V_a が低い領域 (以下、低 V_a) では逆に長い。ここで、両電極系の V_a - T_a 曲線は、それぞれ、同一の V_a による $N=100$ 回の繰返し放電を各 V_a について行い、この実験を5回繰返して得た、各 V_a の $N=1\sim 10$ 回における平均 T_a 値から求めた。従って、図中の $\circ$ 、 Δ 印による値は、50個のデータから求めた T_a の平均値である。100回の繰返し放電による T_a 値は、いずれの場合も、 N の増加に対して上昇、飽和の傾向を示した。 $N=1\sim 10$ 回の T_a 値はこの上昇過程の初期の値である。従って、これらの平均で示した図2の V_a - T_a 曲線は、初期上昇過程における、 N の増加に対する T_a の平均的特性を示している。 $N=1\sim 10$ 回の放電については、 T_a のほか以下に述べる特性を調べ、それらを N を更に増加させた場合のものと比較・検討した。なお、第2章で述べたように、各100回の繰返し放電を行う前に電極処理を行っている。

図中の (a) 点と (b) 点における放電過程の流し写真、こま写真と電圧、電流波形のオシログラムを図3に示す。図2の低 V_a による (a) 点では、放電路の放電相は、まず、陽光柱が拡散した拡散グロー (DGP)⁽⁹⁾ から、次に、図3(a)のこま写真(1)に示す

図2 アーク開始時間の電圧特性
Fig. 2. Characteristics of arc occurrence time to applied voltage.

ように陽光柱が収縮部(CPC)と拡散部(DPC)からなる移行グロー⁽⁹⁾ になる。その後、移行グロー中のフレデー暗部(FDS)が消失しかつ、DPCがCPCに変わって、図3(a)のこま写真(3)に示すように、移行グローから収縮グロー(主に収縮した陽光柱と負グローからなるグロー放電)⁽⁹⁾ に移行する。この段階では、ギャップはほぼ収縮した陽光柱で橋絡されるが、突起部分と平板上には拡散した負グロー(NG)が残る。放電回数を増加させると、陰極近傍のこの拡散した放電によって突起先端の電界が緩和されかつ電極表面が変化(酸化)され得るので、突起先端部には、放電路をアークにする陰極点は形成されにくくなる。従って、アークへの移行はCPCが突起先端から更に平板まで伸びて、そこに陰極点を形成した段階で行われる。すなわち、低 V_a では放電路が伸びて実質上、気圧とギャッ

(a) 陰極点が突起根元に形成される場合

(b) 陰極点が突起先端に形成される場合

図3 フラッシュオーバー過程の流し撮り、こま撮り写真と V 、 I 波形
Fig. 3. Streak, framing photographs and V , I wave forms of flashover process.

プの長さの積 $P \cdot d$ が大となった状態でアークが発生するので、正針対突起付き平板電極系の T_a は、図2のように正針対平板電極系のものより長くなる。この場合の T_a 値は $d=70 \text{ mm}$, $h=0 \text{ mm}$ の正針対平板のものとはほぼ等しいことを別に確認した。

これに対し、(b)点では、高 V_a によって平板側のNGの領域が小さくなり、突起先端の電界が高くなる。そこで、図3(b)に見られるように、CPCが正針側から平板側へ進む過程で平板上の突起先端にも別のCPCが現れ、ギャップ中間に向かって進む。このギャップ中間へ進むCPCによって、正針と突起間の放電路の収縮が促進され、放電路と陰極の加熱も進むことが考えられる。更に高 V_a によって突起先端の電界が高くなるので、 N が約20回以下では陰極点は突起先端にできることが多く、アークへの移行も早くなる。高 V_a では、このような理由で、正針対突起付き平板電極系の T_a は正針対平板電極系のものより短くなることがわかった。

図2の●印による値は、正針対突起付き平板電極系の、突起を研磨・洗浄した後に同一 V_a で繰返し放電を90回行ってから求めた、91~100回目の T_a の5回分の実験値の平均である。この値は○印のものより長くなっており、多数回の放電で突起の陰極機能が抑制されて T_a が長くなることがわかった。この場合、陰極としての突起は銅製であり、その表面は放電回数が増加すると茶褐色に変化する。突起が多数の放電こん跡を含むこの変色領域でおおわれると、陰極点は突起に形成されず突起の根元あるいは平板上に形成されるようになる。すなわち、 $P \cdot d$ が実質上大となった効果が現れるようになるので、このように T_a は長くなるものと考えられる。なお、陰極表面の変化については、〈3・4〉節のEPMAによる観測と〈4・2〉節のXPSによる分析で詳しく述べる。

〈3・2〉 放電回数とアーク開始時間 図4は同一 V_a による、インパルス放電の放電回数に対するアーク開始時間特性 (N - T_a 特性) を示したものである。同図からわかるように、 T_a は、 N が10回程度まではほぼ $1 \sim 4 \mu\text{s}$ と短く、 N の増加と共に長くなり、20回以後では $6 \mu\text{s}$ 程度となって安定した。

これに対応して、陰極点は初め突起先端部に形成され、 N の増加と共に突起側面へ移動し、 T_a が N の増加でほぼ飽和して一定値に落ち着いた段階では、突起の根元付近に形成された。更に、本実験で行った以上に N を増加させると、あるいは V_a を低くすると、陰極点は突起の根元を離れて平板上に形成されることを、別に確かめた。いずれの場合も、アーク放電路は

図4 放電回数に対するアーク開始時間の変化
 Fig. 4. Change of arc occurrence times with discharge numbers.

図5 放電路タイプのモデル
 Fig. 5. Model of discharge channel types.

正針と陰極点間に現れ、この放電路つまり見掛けのギャップの長さは N の増加と共に長くなった。これらのことは、〈3・1〉節で述べた N の増加でアーク放電路が長くなり、 T_a が長くなり得ることを更に実証している。

従って、 N の増加による放電路のタイプは、図5に示すように、ほぼA, B, C, Dの4種にモデル化することができる。放電路のタイプは、図4の説明で述べたように、 N の増加と共に $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D$ と変化するが、Dタイプは安定して出現しない。なお、低過電圧印加での放電路タイプは、Dタイプが出現するようになった後、アークが出現せずにグローで終る放電路タイプに変化することを別に確かめた。

印加電圧を変えた場合の、 N - T_a 特性と放電路タイプを図6に示す。図中の表は、各 V_a で出現する放電路タイプをまとめたもので、2.2 kV, 4 kV では $A \rightarrow B \rightarrow C$ 、2.7 kV では $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D$ となることを示

図 6 アーク開始時間と放電路タイプ
Fig. 6. The relation of arc occurrence times and discharge types.

している。 N - T_a 特性は、 T_a が低 V_a で長く高 V_a で短く、高 V_a になるほどアークの形成が容易となって T_a が短くなることを示している。また同図では、 V_a を変えても、放電は A タイプで始まって T_a は短く、その後 N の増加によって、 T_a は長くなり放電路タイプも変わっている。このことは、放電は初め高電界を形成する突起と針電極間で起こるが、放電を繰返すと、突起の表面が変化しその効果、すなわち表面酸化による放電の抑制によって T_a が長くなり、陰極点も移動して放電路タイプが変化することを示している。

なお、 $N=100$ 回の本実験範囲では、 T_a は N の増加によってほぼ飽和し、放電路タイプもほぼ一定となるが、これは主に電極の形状と配置によって放電の広がり限定されることによる。B タイプの放電路は T_a が飽和する以前にはわずかに出現するだけであるが、これは、陰極点の形成箇所が突起側面であり、そこでは陰極点の形成が困難となるからである。また、 T_a がほぼ飽和した段階で、初めと同じく A タイプや B タイプが出現して放電路タイプが不安定になるのは、繰返し放電によって突起のみならず平板表面までが変化して突起先端の高電界効果が再び現れやすくなるからであろう。

ここで問題になるのは、放電の繰返しによって放電しにくくなりアーク長が伸びることであり、原因として電極表面の放電による変化（酸化）とその効果が考えられる。このことについては、EPMA と XPS を

図 7 アーク開始までのエネルギーの電圧特性
Fig. 7. Characteristics of energy till arc occurrence to applied voltages.

用いた表面の観測・分析によって述べる。

〈3・3〉 アーク開始までの注入エネルギー 図7は、図2の正針対突起付き平板電極系について求めたアーク開始までの注入エネルギー (W_a) を、 $N=1\sim 10$ 回と $N=91\sim 100$ 回における平均値の分布とその各平均について示したものである。同図で W_a は、 $N=91\sim 100$ 回では $N=1\sim 10$ 回の約2倍程度になっている。 W_a が N の増加と共に増加する理由としては、放電を繰返したことによる電極表面の変化の効果が考えられる。すなわち、繰返し放電によって電極表面が酸化された結果、放電が抑制され、放電領域が広がり、陰極点の形成が困難となってグロー継続時間が長くなるので、エネルギーの積分値としての W_a が増加することが考えられる。また、 V_a 上昇による W_a の増加から、 V_a が高くなるほど電極表面の酸化が進むことが考えられる。

同図で最小の W_a を示す V_a は、図2の○印と△印で示した二つの曲線の交差点の V_a にほぼ一致する。 V_a - W_a 特性は、この V_a を境として二つの種類に分けられる。一つは図3(a)に示したタイプの放電によるもので、 V_a の低下で T_a が長くなり W_a が上昇する。もう一つは図3(b)に示したタイプの放電によるもので、 V_a の上昇で T_a が短くなるが W_a が上昇する。前者では、低 V_a であるほど、アーク開始前のグロー期間が長くなって酸化よりも低 V_a の効果が現れ、後者では高 V_a ほど酸化が進んで著しい酸化効果が現れ、このように W_a が増加することが考えられる。

図 8 銅の SEI と Cu, O の特性 X 線像
Fig. 8. SEI of copper and characteristic X-ray images of Cu, O.

〈3・4〉 EPMA による陰極表面の観測 SEI からは変色(酸化)領域と放電こんの形状がわかり、特性 X 線像からはその X 線を放射する元素の分布がわかる。そこで、まず銅製突起付き平板の突起の表面を SEI と Cu-K α 、O-K α の特性 X 線像で調べた。それぞれの視野は茶褐色に変色した部分の同一箇所とした。図 8 は高 V_a による放電を 100 回繰返した後に求めた。

(a)図の SEI から、加熱、イオン衝撃などによるものと思われる溶融、衝撃、飛散、たい積の後が認められる。これらのこん跡は、未放電の突起では観測されず、放電によって変色したところほど多く観測されることから、繰返し放電による放電こんである。(b)図は Cu-K α の特性 X 線像である。突起が銅製であるので、この図から突起上の放電による Cu 分布の変化を詳しく知ることはできない。しかし、同図上の X 線像は放電こんでやや暗いことから、Cu は放電こん表面ではやや低濃度となることが認められる。これに対し、O-K α の特性 X 線像は、(c)図に示したように、放電こんの突出部で明るく、衝撃による凹部で暗くそして残りの視野領域ではほぼ一様に分布した。像の明暗は表面形状などにも影響される⁽¹⁰⁾ので、それがそのまま元素の分布には結びつかない。しかし、放電こん表面では Cu 濃度がやや低下するので、酸素は放電によって突起表面に広く分布し放電こん突出部にはかなり含まれるようになることが認められる。

一方、陰極点が形成される前後の突起付近の気体温

図 9 黄銅の SEI と Pb の特性 X 線像
Fig. 9. SEI of brass and characteristic X-ray image of Pb.

度は Cu の融点 (1,083°C) 以上となる⁽¹¹⁾ので、陰極点形成前後の陰極表面は、成分である銅の溶融や著しい酸化が起こり得る状態にある。また、突起付き平板は、アーク発生前のグローの期間、図 3 に示したように負グローでおおわれていて、そこでは放電が行われている。

これらの観測結果から、銅製の突起付き平板表面はグローとアークからなるインパルス放電によって酸化され、特に放電こんの突出部は強く酸化されることがわかった。従って、放電を繰返すことによって酸化度が増し、酸化領域が広がり、その結果、放電によって陰極表面があるにもかかわらず陰極点が移動して、放電特性が変わるようになることが考えられる。なお、この場合、酸素は吸着酸素や酸化銅の形で分布するものと考えられる。そこで、放電による酸化銅の生成を XPS で調べた。その結果は 4・2 節で述べる。

本実験では、陰極における放電こん生成と酸化の特性をより明らかにするために、黄銅製突起付き平板の突起表面も EPMA で観測した。その結果を次に述べる。

この場合、黄銅中には、Cu と Zn は 6:4 の割合で、Pb は 1.8~3.7% の含有率で含まれる。Pb の融点は、主成分の Cu や Zn のものに比べて低く、327°C⁽¹²⁾である。SEI と特性 X 線像は、放電こんが多くて白く変色したところを視野とし、 $V_a=4$ kV, $N=50$ 回で求めた。 $d=80$ mm, $h=5$ mm としたが、この場合も、正針対黄銅製突起付き平板の V_a - T_a 曲線は図 2 の場合と同じく、正針対黄銅製平板の V_a - T_a 曲線と交差し、その高 V_a 領域では N の増加によって T_a は長くなる⁽⁸⁾。また、ギャップ間に形成される放電は、4 kV と高 V_a であるので、短いグロー期間

図 10 グロー放電後の黄銅の SEI と Pb, O の特性 X 線像

Fig. 10. SEI of brass and characteristic X-ray images of Pb, O after glow discharges.

を経てアークへ移行するインパルス放電である。

このときの SEI と Pb-M α の特性 X 線像を図 9 に示す。この場合の放電こんの規模は、 $V_a=4$ kV による図 9(a) と $V_a=5$ kV による図 8(a) における放電こんの比較からわかるように、銅製突起のものより大きくなり得る。これは黄銅製突起の場合、柔らかくて融点の低い Pb が含まれており、これが早めに融出されて長い期間放電の影響を受けやすい状態にあるからであろう。この Pb は、図 9(a), (b) の対比からわかるように、そのほとんどが放電こん表面に現れる。これに対し、特性 X 線像の観測から、突起の主成分であり、融点が高い Cu (融点: 1,083°C) と Zn (融点: 419°C) は銅製突起の場合と同じく視野領域には広く分布するが、放電こんではやや低濃度になることが認められた。酸素も、銅製突起の場合と同じく、視野領域ではほぼ一様に分布するが、放電こんではかなり含まれるようになることが観測された。

この観測から、陰極が黄銅製の場合も、グローとアークからなるインパルス放電によって陰極表面は広く酸化されることがわかった。また、陰極に低融点の Pb が含まれるので、放電こんは銅製の場合より大きくなり、放電こんは主に酸化鉛によっておおわれることや残りの表面は酸化銅、酸化亜鉛などでおおわれることが考えられる。この場合、酸化銅と酸化亜鉛の分布にも、主に融点の違いから、相違が考えられる。

図 10 は、図 9 の場合と同じギャップ条件で、 $V_a=2.1$ kV と V_a を低くしてアークの発生を防ぎ、放電相の進展をグローまでとしたインパルス放電のものである。放電過程に現れるグローは拡散グロー (DGP)⁽⁹⁾ で電流の波高値は約 1 A と小さいが、その継続時間は数百 μ s とかなり長い。SEI と特性 X 線像は、 $N=100$ 回と放電回数を増やした後に、放電こんが顕著に現れるところを視野として求めた。

図 10(a) の SEI から、インパルスグロー放電による放電こんは比較的大きく、しかしそれは $1\sim 2\mu$ m 以下の小規模な形状変化の集団がほぼ円形に拡散・分布したものであることがわかった。Pb は、(b) 図の Pb-M α の特性 X 線像からわかるように、図 9 に示したインパルスグローアーク放電による場合と同様各形状変化とその集団からなる各放電こんに対応して融出・分布した。従って、陰極が融点の高い銅の場合、インパルスグロー放電によって形状変化が生じて、各形状変化は小さくなることが考えられる。また、グローにアークが続くインパルス放電による場合、このような小規模集団からなる放電こんは確認できなかった。従って、グローに続くアークは、グローによる小規模集団からなる放電こんの上に図 9 に見られるような規模の大きい放電こんを作ることが考えられる。しかし、放電を繰返すことによって酸化が進むので、放電を繰返した場合の放電こんは移動するようになり、放電路と T_a が次第に長くなることが考えられる。

酸素については図 10(c) のような特性 X 線像が得られた。その分布は、視野の全面に広がるが、(a), (b) 図のものとは一致してほぼ放電こん上に濃く現れた。一方、Cu と Zn の分布はこの場合も視野全面に広がるのみであった。これらのことから、インパルスグローによっても酸化が行われ、酸素は、吸着酸素、酸化銅、酸化亜鉛の形で陰極表面に分布し得、酸化鉛として放電こん表面に著しく分布し得ることが考えられる。 T_a やアーク長が長くなり、 W_a が増加する原因として、このような酸化物の形成と広がりが挙げられるであろう。

4. 検討・考察

<4・1> アーク開始時間とコンディショニング

<3・2> 節で述べたように、 T_a 値は放電回数の増加と共に大きくなり、一定値に落着く傾向がある。その理由として、まず陰極点の移動で放電路が長くなって実質の過電圧率が低下するので T_a 値が大となる、あるいはアーク開始電圧が上昇することが考えられる。この場合、 T_a が一定値に落着く傾向は、実質の $P\cdot d$ が

図 11 放電による銅の光電子スペクトルの変化

Fig. 11. Change of photoelectron spectra of copper by exposing impulse discharges.

電極の形状や配置などに制約されてあまり長くなり得ないからであろう。従って、繰返し行われる放電はあたかもコンディショニング⁽³⁾としての予備放電の役目を果たすことになる。

一方、放電回数が増加すると放電こん数が増えて陰極の突起と平板の各表面は荒れる。それにもかかわらず陰極点が突起の先端付近から移動する理由としては、SEIや特性X線像による観測から、放電こんが形成された部分ほど、そして放電回数が増加するほど酸化が進むことを挙げた。実際に、放電こんが形成され、変色した突起付き陰極では T_0 値が大となることも示した。これらについては、放電こんを形成している物質に誘電体特性があるかどうかを別途調べる必要がある。しかし、酸化によって放電電圧が上がることは知られている⁽⁶⁾ので、本研究ではまずEPMAによる観測から酸化物の生成があり得ることを確認した。

なお、本実験では、陽極の効果にはふれていない。この場合、陽極は、タングステン製でその融点は高く(3,382°C)、外観的に損傷は少なく、別の実験で放電特性に与える影響はほとんどないことを確かめたので、本論文では陰極の効果のみで述べている。

〈4・2〉 XPSによる表面酸化の確認 図11は、銅製突起の表面をXPSで観測したものである。同図の実線で示した未放電試料のスペクトル分布で、純銅の2p_{3/2}のスペクトルは結合エネルギー(E_b)が933 eVでピークを示す。破線で示した放電後のスペクトル分布ではこのピーク値が相対的に低下し、わずかながらピークシフトが生じているほか、約935 eVにCuO⁽¹³⁾に相当する新たなスペクトルピークが形成さ

れている。これは、 $N=50$ 回の放電で突起表面が著しく酸化されたので、純銅スペクトルの低下と酸化物によるケミカルシフトが観測されたことを示す。この酸化物については、945 eV付近にもスペクトルピークが観測される⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾ことや実験結果で述べたように放電抑制の働きをすることから、主にCuO⁽¹⁵⁾と考えられる。なお、932.7 eVにピークを示すCu₂Oの生成による影響も考えられる。このほか、Pb-4f_{7/2}, 5/2の光電子スペクトルが高エネルギー側へ、O-1sの光電子スペクトルが低エネルギー側へシフトすることから、Pbの酸化物の生成が確認された⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾。

突起付き平板の場合の陰極点は、放電回数が少ない間はまず電界の高い突起先端部に多く形成されるが、放電回数が増えるるとこのように酸化物が生成され、それは絶縁物⁽¹⁵⁾として突起先端付近の放電を抑制し得るので、突起先端部から離れたところに形成されるようになる。すなわち、放電路が変化し実質の P_d が大となってこの効果が現れ、アーク開始時間の増加などがもたらされることになる。

5. む す び

低気圧空気中の雷インパルス放電で、正針対突起付き平板電極のアーク開始時間特性を調べ、正針対平板電極のものと比較した。更に突起電極の表面状態を電子線マイクロアナライザとX線光電子分光装置で観測し、表面状態とアーク開始時間などとの関係を調べた。

主な結果は次のとおりである。

(1) 正針対突起付き平板電極系のアーク開始時間は、正針対平板系のものに比べ印加電圧が低い領域では長く、印加電圧が高い領域では短い。

(2) 印加電圧が高い領域でのアーク開始時間は放電回数と共に長くなり、一定値に落着く傾向がある。

(3) 印加電圧が高い場合、アーク開始時間は短く、陰極点は突起先端付近に形成されるが、放電回数の増加と共にアーク開始時間は長くなり、陰極点は突起根元付近に移動し、更に平板上に移動してアーク放電路が長くなる。

(4) 突起表面にできる放電こんは、放電回数と共に増加し、アークを含む放電では形状変化の著しい個々の放電こんの集中した形のものとなり、グローまでしか進展しない放電では形状変化の小規模な放電こんの集合した円形拡散形のものとなる。

(5) 放電を繰返すことによって、陰極表面には絶縁物としての酸化物が形成され、それが突起先端部の

著となり、陰極点は突起先端部を避けて形成されるようになるので、実質の放電路が長くなりアーク開始時間が長くなる。

最後に、電子線マイクロアナライザとX線光電子分光装置による観測に便宜を図っていただいた宮崎県工業試験場 富山幸子技師、武蔵工業大学 光井英雄教授、磯野一助手〔現在、日本精密工業(株)〕に感謝の意を表します。また、実験に御協力いただいた卒業研究生諸君に感謝いたします。

(平成2年6月24日受付、同2年8月28日再受付)

文 献

- (1) 磯野・杉野・曾禰・光井：「陰極表面付着物の気中直流破壊に及ぼす影響」，電学論 A, 103, 625 (昭58-11)
- (2) 磯野・杉野・曾禰・光井：「陰極 (アルミニウム，鉄，金) 表面付着物の気中直流破壊に及ぼす影響」，同上 A, 105, 9 (昭60-1)
- (3) 電気学会：放電ハンドブック改訂新版，p. 215 (昭59) オーム社
- (4) 中村・森：「タウンゼント放電域の火花電圧に及ぼす陰極表面状態の影響〔1〕」，電学論 A, 92, 357 (昭47-7)
- (5) 佐伯・中村・森：「タウンゼント放電域の火花電圧に及ぼす陰極表面状態の影響〔2〕」，同上 A, 94, 411 (昭49-10)
- (6) 杉野・曾禰・鳥山・光井：「大気中インパルス破壊に伴う電極表面の履歴及び履歴の放電特性に与える影響」，同上 A, 100, 617 (昭55-11)
- (7) 大坪・竹内・池尻・賛田：「低気圧空気中のインパルス放電と陰極表面状態の影響」，電気学会放電研究，ED-88-69 (昭63)
- (8) 大坪・山住・中原・賛田・布施：「低気圧インパルス放電におけるアーク開始時間と電極表面状態」，宮崎大学工学部研究報告，30, 93 (昭59)
- (9) 賛田・大坪・芝・赤崎：「低気圧空気中における正針インパルスフラッシュオーバーとその特性」，電学論 A, 104, 585 (昭59-10)
- (10) 内山・渡辺・紀本：X線マイクロアナライザ，p. 72; 90 (昭54) 日刊工業新聞社
- (11) 辻・大坪・賛田・福山：「インパルス放電路の気体温度算定と検討」，宮崎大学工学部研究報告，34, 53 (昭63)
- (12) 玉虫，他編：理化学辞典，p. 966 (昭46) 岩波書店
- (13) 日本化学会：電子分光，p. 106; 223 (昭52) 学会出版センター
- (14) 染野・安盛：表面分析，p. 279; 298 (昭54) 講談社
- (15) 田部・清山・笛木：金属酸化物と複合酸化物，p. 423 (昭55) 講談社
- (16) 山住・大坪・永野・賛田：「低気圧空気中のインパルス放電に用いた陰極表面の分析」，宮崎大学工学部研究報告，31, 103 (昭60)
- (17) 山住・大坪・永野・賛田・磯野・光井：「低気圧空気中のインパルス放電による突起表面の変化」，昭59 電気関係学会九州支部連大，p. 228

大坪 昌久 (正員)

昭和22年1月10日生。44年3月宮崎大学工学部電気工学科卒業。45年3月同大学工学専攻科(電気工学専攻)修了。同年4月宮崎大学工学部電気工学科助手，現在に至る。主として，高電圧現象の研究に従事。

山住 薫 (正員)

昭和35年6月2日生。59年3月宮崎大学大学院工学専攻科(電気工学専攻)修了。同年4月日新電機(株)入社，その後，日新ハイボルテージ(株)に出向，現在に至る。主として，高電圧現象の研究に従事。

竹内 公人 (正員)

昭和39年9月7日生。平成元年3月宮崎大学大学院工学専攻科(電気工学専攻)修了。同年4月九州電力(株)入社，現在に至る。主として，高電圧現象の研究に従事。

賛田 寛 (正員)

昭和2年7月10日生。23年3月明治工業専門学校電気科卒業。36年7月九州工業大学第二部電気工学科助手。38年4月宮崎大学工学部電気工学科助手，43年6月同助教授，61年1月同教授，現在に至る。工学博士。主として，高電圧現象の研究に従事。