大気中インパルス破壊に伴う電極表面の履歴および履歴の放電特性に与える影響

正員 杉 野 道 幸 (武蔵工大)

正員 曾 禰 元 隆 (武蔵工大)

名誉員 鳥 山 四 男 (武蔵工大)

正員 光 井 英 雄 (武蔵工大)

1. ま え が き

電極表面状態が放電現象に影響することは、既に多くの論文により指摘されている⁽¹⁾。通常使用される電極表面がほこりや経年変化に伴う物理的・化学的変質を受けることは周知の事実である。ほこりに対する研究としては、水分・塩分・油膜などの表面吸着が挙げられよう。また、経年変化に関しては酸素吸着、表面の荒れなどが報告されている。

前者の研究では、電極表面の吸着水分が暗流の増加⁽²⁾、破壊遅れ時間の減少を招くこと⁽³⁾、導電性突起物や水滴などの表面付着が周囲電界を局部的に強め、コロナ放電の発生を促進する現象⁽⁴⁾が報告されている。そのほか、これら現象の原因を究明するため、電極表面上突起の周囲電界とコロナ放電開始に関する研究が進められている⁽⁵⁾⁽⁶⁾。後者の経年変化に関する研究は比較的古くから行なわれている。鈴木氏⁽⁷⁾は、大気中に放置された電極のインパルス破壊電圧値は、当初は低い、火花せん絡回数の増加と共に上昇すると報告している。

更に、経年変化のうち放電発生に伴う電極表面状態の変化は、放電特性に影響を及ぼすことが報告されて

いる。例えば、沢氏ら⁽⁸⁾によれば、大気中極短ギャップの遅れは破壊後の放電形態がグローかアークかによって著しく影響を受けるとしている。このように、極短ギャップに限らず放電発生が電極表面に与える履歴作用については報告されているが、具体的な表面状態に関する報告はほとんど見られない。

そこで、著者らは大気中における火花放電が電極表面に与える履歴作用を、表面状態および表面生成物の二点から究明した。更に、履歴を受けた電極が放電特性に及ぼす影響についても窒素中で詳細に検討した。履歴作用の究明は走査形電子顕微鏡およびX線マイクロアナライザによって行なった。この結果、陽極側には突起状酸化物、陰極側では層状酸化物が生成されることがわかった。

更に電極酸化の放電特性に及ぼす影響を観察した結果、酸化膜の効果は一義的なものでなく、酸化初期において初期電子が放出されやすく、その結果50%破壊電圧の低下などを招くが、酸化が進展するとこの傾向とは逆になることがわかった。

このように、電極表面の履歴および履歴がもたらす放電への影響は、ともに酸化現象が介在していることが判明したので報告する。

2. 実験装置および方法

<2.1> インパルス破壊の電極履歴作用の検討

使用した装置を第1図に示す。実験容器は内径150mm、高さ80mmの塩化ビニル製で、上下部を厚み10mmのアクリル板で密封したものである。この容器内の気体を一定条件にするためバルブが付けられて

Conditioning of Electrode Surface with Impulse Flash Over in Air and its Influence on Discharge Characteristics. By Michiyuki Sugino, Member, Mototaka Sone, Member, Yotsuo Toriyama, Honorary member & Hideo Mitsui, Member (Department of Electrical Engineering, Musashi Institute of Technology).

杉野道幸：正員、武蔵工業大学大学院工学研究科
曾禰元隆：正員、武蔵工業大学電気工学科
鳥山四男：名誉員、武蔵工業大学電気工学科
光井英雄：正員、武蔵工業大学電気工学科

第1図 実験装置

Fig. 1. Experimental apparatus.

いる。電極系は、銅の曲率半径 5 mm の半球棒電極対 $20\text{ mm} \phi$ のステンレス鋼平板電極で、ギャップ 12 mm とした。棒電極側には $1 \times 40\text{ μs}$ 標準波インパルスを印加し、平板電極側を接地した。また平板電極上にはインパルス破壊に伴う電極表面の物理的・化学的変化の観察を容易にする目的から、銅はくをセットした。これは、後述する X線マイクロアナライザや電子顕微鏡での観察をしやすいようにしたものである。銅はくは $20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$, 厚さ 0.1 mm である。なお、銅はくはピカールで研磨し、ベンジン中で 10 分間超音波洗浄を行なったものを用いた。この銅はくとステンレス鋼平板電極の接着には、導電塗料（導電性樹脂材料ドータイト）を用いた。

上記の装置を用いて以下の実験を行なった。まず、インパルス破壊に伴う表面の物理的・化学的変化を調べるため、実験容器に湿度約 60% の空気を大気圧まで導入し、 100% フラッシュオーバー電圧を 30 s 間隔で所定回数だけ印加した。印加電圧は 35 kV とした。所定回数を印加後、銅はくを平板電極から取り外し、X線マイクロアナライザ（以下、XMA と略記）により銅はく表面の劣化中心部 ($60\text{ μm} \times 60\text{ μm}$) を点分析した。試料数は 3 個とした。分析の結果は酸化が主で、このほか窒素化合物は見られなかった。酸化の定量のみについて検討を行なった。定量には、標準試料である SiO_2 (酸素重量比 53.25%) の酸素カウント数と銅はく表面の劣化部のカウント数の比により、重量比を酸化量として $\%$ で示した。また表面状態の観察は、酸化量測定部分を走査形電子顕微鏡（以下、SEM と

略記）により行なった。

このように破壊に伴う電極表面の変質を酸化量として代表し、印加電圧の正・負極性ならびに印加回数について検討を加えた。印加回数は 660 回を限界とした。

〈2・2〉 履歴を受けた電極の放電特性に及ぼす影響の検討 次に、電極表面の履歴が放電特性に及ぼす影響について検討を行なった。装置は第1図と同様のものを使用した。以下、その方法について述べる。

まず、非酸化の銅はくと半球棒電極を第1図の実験装置に取り付け、前節の方法で 500 回インパルス破壊させ、半球棒電極を履歴を受けた電極として検討に使用した。この後、平板電極側の銅はくを新しい銅はくに交換して、窒素 760 Torr のふんい気中で各印加電圧に対する放電率特性 ($V-N$ 特性) を測定した。窒素中で行なった理由は、測定中に電極表面の酸化進行を防止するためである。窒素導入には、容器内を真空ポンプで 30 分間排気し、その後コールドトラップした（液体窒素冷却）窒素ガスを 760 Torr まで導入した。

$V-N$ 特性を得るには、所定電圧を 30 s 間隔で 50 回印加し、また印加電圧は $2 \sim 3\text{ kV}$ ずつ昇圧した。なお各電圧設定ごとに、上述のように履歴を与えた電極と交換し、放電率が 100% になるまで測定を続けた。また、履歴を与えていない電極の $V-N$ 特性も同様に、各電圧設定ごとに電極を取り替え窒素中で測定した。

3. 実験結果および検討

〈3・1〉 インパルス破壊による電極表面の変質

インパルス破壊により電極表面が受ける履歴を具体化するため、破壊に伴う表面の変化を SEM による写

第2図 200回破壊後の電極表面状態(300倍)

Fig. 2. Electrode surface condition after 200 times flash over ($\times 300$).

真として第2図に示した。同図は破壊回数 200 回経過後の陽極・陰極の表面状態を示したものである。(a) 図に未破壊の表面を示したが、表面はほとんど荒れていなかった。また、表面生成物の存在は XMA の表面分析からはほとんど認められなかった。これに対して、(b) 図から破壊後の陽極表面には微小な突起物が多数生成しているのがわかる。この突起部分を XMA で分析した結果、酸化量は約 7% を示した。このことは、陽極表面における微小突起物 (直径約 $1\sim 2\mu\text{m}$) がインパルス破壊に伴い生成した酸化物であると考えられる。なお、突起部分以外での酸化量は未破壊時と同量であり、酸化物の生成は認められなかった。酸化物以外の生成物として窒素化合物が考えられるため、これについて XMA による分析を行なったが、その存在は確認されなかった。また、(c) 図より破壊後の陰極表面には薄い皮膜状の部分が存在しており、陽極表面に見られる突起状の部分は存在しないことがわかる。この皮膜状部分の酸化量は約 13% であり、皮膜状でない部分の酸化量は確認されなかった。すなわち、皮膜状の部分が酸化生成物と考えられる。窒素化合物は陽極同様に確認されなかった。

以上のことから、200 回インパルス破壊後、陽極・陰極ともに酸化物の生成が確認され、その酸化形態は極性により相違することが認められた。このような電極表面の受ける履歴は、破壊回数の増加に伴って進展することが予想される。そこで、破壊回数を増加させた場合の表面変化を検討した。陽極側の 300 回および 500 回破壊終了後の表面状態を、それぞれ第3図(a)、(b)に示す。同図と第2図(b)に示した表面状態と比較すると、破壊回数の増加に伴い突起物の量が増加しており、突起物自体の直径が大きくなっているのがわかる。また、200 回破壊後の表面には見られなかったが、写真中央部に放電時の熱により突起物が溶解したと思われる部分が存在する。

これらの箇所を酸化量について測定した結果を第4図に示す。測定箇所は突起状・溶解状の二つの部分に

第3図 破壊回数に伴う陽極表面状態の変化(300倍)

Fig. 3. Changes of surface condition on the anode with flash over numbers ($\times 300$).

第4図 陽極における破壊回数と酸化量の関係

Fig. 4. Relation between flash over numbers and degree of oxidation on the anode.

第5図 破壊回数に伴う陰極表面状態の変化(1,000倍)

Fig. 5. Changes of surface condition on the cathode with flash over numbers ($\times 1,000$).

ついて行なった。同図より、破壊回数の増加に伴い酸化量が増加することがわかった。また、溶解状の部分も同様であるが、その酸化量は突起部に比べて小さい。この理由は、金属の溶解により酸化生成物が蒸発したと思われる。

次に陰極表面状態について述べる。酸化皮膜の破壊回数に対する変化を第5図に示す。なお、第5図(a)は第2図(c)の中心部分を1,000倍に拡大したものである。また、300, 500, 660 回破壊後の表面写真をそれぞれ(b)~(d)図に示す。(a)図より、一度生成した酸化膜の上に更に酸化膜が生成しているのがわかる。すなわち、酸化膜が層状に生成していると言える。また、(b)~(d)図に示した酸化膜部分を比較すると、破壊回数の増加に伴い酸化膜が徐々に多層化する傾向を有することがわかる。このことから、層状の酸化膜の生成は陰極側の受ける履歴の特徴と言える。

第 6 図 陰極における破壊回数と酸化量の関係

Fig. 6. Relation between flash over numbers and degree of oxidation on the cathode.

第 6 図に酸化層の酸化量と破壊回数に関する特性を示す。図中には、酸化膜部分と酸化膜の存在しない部分の酸化量を示してある。この結果、酸化膜部分の酸化量は破壊回数 500 回まで回数と共に約 23% まで増加しているが、660 回では逆に減少している。また、酸化膜の存在しない部分では 500 回まで酸化量も少なくほとんど変化が見られないが、660 回では約 8% と多少増加している。このように、酸化膜部分の酸化量は 660 回で減少するが、表面を全体的に見るとやはり増加の傾向にある。

以上、述べてきたインパルス破壊による電極表面への履歴作用をまとめる。履歴作用は極性により異なるが、電極表面の酸化であることが判明した。陽極側の酸化は、破壊回数と共に突起物の量および直径が増大し、それに伴い酸化量も増加する。陰極側の酸化は、破壊回数に伴い酸化層が多層化し、それに伴ってやはり酸化量も増加することがわかった。このように、陽極と陰極の酸化形態には顕著な相違が見られ、陽極の方が陰極表面に比べて荒れが激しい。また、酸化量では陰極が陽極の約 2 倍になることが明確となった。

印加電圧の極性によって酸化量に差が現われた理由については次の点が考えられる。すなわち、極性による火花発生時の電極表面温度の差、破壊時の電流の差、酸化現象における正・負イオンの挙動の差などである。特に、正・負酸素イオンによる酸化機構において、酸化が酸素負イオンにより行なわれるという事実⁽⁹⁾から考えると、印加電圧の極性による酸化量の差

が出現した事実をより説明しやすいであろう。このほかの機構の差は、酸化機構の問題（例えば、電流の大小と酸化量の多少の相関が必ずしもあるとは言えない）に帰着し、今後化学面での検討を要する。

〈3・2〉 放電特性に及ぼす電極表面の履歴の影響

前節において、インパルス破壊が電極表面に与える履歴作用としては、陽極側では突起状酸化物、陰極側では層状酸化膜の生成が判明した。このように、電極表面は破壊（火花せん絡）が生じると、荒れと酸化という履歴を受けることになる。このように、大気中において電極表面に酸化物が火花放電の履歴として生成することが判明したので、本節では大気中放電現象をはあくするにあたり、酸化という電極履歴が一つの要因として配慮されるものか検討を行なった。

(1) 放電現象における電極の履歴の影響 (N_2 中)

検討にあたっては、酸化物の放電特性に及ぼす影響を詳細に観察する必要がある。具体的方法としては、人為的に酸化物を電極表面に生成させ、その影響をみた。ただし、大気中で酸化物の影響を観察した場合には、前節で述べたように火花放電に伴い酸化進展が憂慮される。そこで、窒素中で放電特性を測定した。これは、空気中の酸素分子による酸化作用を取り除くためであり、人為的に作成した酸化電極の影響のみを調べた。

第 7 図に陰極側が履歴を受けている場合の $V-N$ 特性を示した。また同図中には、陰極側の履歴の影響を見るため履歴のない電極での $V-N$ 特性も示してある。同図より、履歴のない電極の $V-N$ 特性が放電開始電圧 25kV、また約 40kV で放電率 100% に達するのに対し、履歴を受けている電極では放電開始電圧 40

第 7 図 インパルス破壊による陰極側履歴の $V-N$ 特性に及ぼす影響 (N_2 中)

Fig. 7. Influence of the cathode conditioned by impulse flash over on $V-N$ characteristics. (in N_2).

第 8 図 インパルス破壊による陽極側履歴の V-N 特性に及ぼす影響 (N₂ 中)

Fig. 8. Influence of the anode conditioned by impulse flash over on V-N characteristics (in N₂).

kV また約 46kV で放電率が 100% に達することがわかる。また、特性の傾き(ばらつき)が履歴のない電極に比較して急しゅんになっていることも特徴の一つである。

次に、陽極側に履歴があるときの V-N 特性を第 8 図に示す。同図より、履歴のない電極では放電開始電圧が 20kV であり、32.5kV で放電率 100% に達している。また、履歴のある電極の場合も同様な開始電圧であり、放電率 100% の電圧も 33kV と履歴のない電極のときに比べて 0.5kV 上昇したに過ぎない。このように陽極側の履歴の影響は、50% 破壊電圧が数 kV 上昇し、特性の傾きもわずかに急しゅん化する傾向を有するが、陰極側の履歴の影響に比較して顕著ではない。

なお、履歴を受けていない電極の特性が第 7 図と第 8 図で一致しない理由は、半球棒電極側の電圧極性が異なるための極性効果と考えられる。

電極表面の履歴が放電特性に影響を与える要因としては、〈3・1〉節の表面観察結果からわかるように、陽極側で顕著な表面の凹凸および陰極側特有の層状酸化膜が考えられる。そこで、このような物理的あるいは化学的な履歴のどちらが放電特性の変動に対し主要因となるのかを検討した。表面の凹凸では、第 3 図からもわかるように陽極側が著しい。(b)図では表面中心に約 35mmφ の溶解状突起物が存在する。これに対し、第 5 図の陰極表面には、酸化膜が層状に存在するだけで陽極表面のような激しい凹凸は見られない。

このように、電極表面の履歴のうち凹凸が放電特性に影響を与える主要因であるならば、それは陽極側の履歴効果に反映されるはずである。しかし、第 8 図で

第 9 図 大気中 V-N 特性に及ぼす累積破壊回数の影響

Fig. 9. Influence of accumulated flash over numbers on V-N characteristics in air.

は陽極側に履歴があっても V-N 特性にはさほど変動が現われていないことがわかる。これに対して、第 7 図では凹凸が陽極側の履歴に比べ著しくない陰極側に履歴効果が現われている。このことから、電極表面の放電特性への履歴効果として、表面の凹凸が重要な因子であるとは考えられない。それゆえ、放電特性の変動としては陰極側特有の酸化膜が要因と考えられる。

(2) 電極履歴による大気中放電特性の経時変化の一考察 前項の結果、酸化物の生成という電極酸化が放電現象に介在することが判明した。そこで、大気中での実器を想定して、大気中の火花破壊による電極の酸化が、大気中放電特性に及ぼす影響を観察してみた。履歴効果としては、前項で陰極側の層状酸化物が重要視されたので、陰極側の酸化の影響をみた。

この検討方法としては、第 1 図の装置を用いて大気中で電極を交換せずに、連続的に V-N 特性を測定した。それゆえ、インパルス破壊回数の増加に伴い電極表面は徐々に履歴を受けてゆくため、履歴の増加と共に V-N 特性への影響を具体的に調べるができる。この結果を第 9 図に示す。同図の特性のパラメータは、1 本の特性を測定するまでの累積破壊回数である。放電率が 100% に達したのち、電極を交換せずにそのまま放電率 0% の電圧より再び特性を測定した。

第 10 図 50% 破壊電圧と累積破壊回数の関係

Fig. 10. Relation between 50% breakdown voltage and accumulated flash over numbers.

これらの手順を繰返し、合計 10 本の特性を測定した。同図より、累積破壊回数の増加に伴い $V-N$ 特性に変動が見られる。累積回数 300 回までは特性が左側（低電圧側）に移行している。特性の傾きは 143 回までの最初の特性に比べ急しゅん化している。更に、累積回数が増加すると、いままでの傾向とは逆に右側（高電圧側）に移行しており、約 500 回以上では最初の特性より右側に特性が移行している。50% 破壊電圧についてみれば、測定範囲内では約 25 kV 変動していることになる。

そこで、層状酸化膜が放電特性に及ぼす影響を具体化した。陰極の層状酸化膜はインパルス破壊回数の増加と共に酸化量が増加するため、第 9 図の $V-N$ 特性の変動は酸化の進行に起因すると考えられる。それゆえ、酸化の進行と放電特性の関係をみるため、同図より 50% 破壊電圧（以後、50% V_{BD} と略記）の累積破壊回数特性を求めた。この結果を第 10 図に示した。最初の $V-N$ 特性の 50% V_{BD} は 45 kV であるが、累積回数が増加すると 50% V_{BD} は一度 36 kV まで低下している。しかし、累積回数が 493, 603 回と増加すると 50% V_{BD} は上昇してくることがわかる。第 6 図の陰極側におけるインパルス破壊回数と酸化量の関係では、回数と共に酸化量の増加が確認されている。同図中、酸化量は破壊回数 500 回まで一様に増加するのに対し、第 10 図の 307 回で一度 50% V_{BD} が低下することから、陰極酸化膜の放電への影響が一様なものとは断定できない。すなわち、破壊回数の増加に伴い酸化膜の荒れや不均一性および内部気体の組成変化が考えられる。それゆえ、第 9 図の大気中放電特性の変化を陰極側の酸化膜の効果として考えることは危険であり、あくまでも大気中放電特性の変動に関する一要因とし

てとらえるべきであろう。

〈3・3〉 放電現象における酸化電極の挙動 〈3・1〉

節で述べたように、電極表面は放電にさらされたり、空气中に放置されている場合酸化する。そこで、電極表面の酸化が放電現象にどのような効果をもつのか、前節(1)項の放電ふんい気と同じ理由で窒素中において検討を加えた。検討方法としては、荒れや不均一性のない酸化膜を電極表面に作成し、 $V-N$ 特性の測定における各電圧設定ごとに酸化処理電極と内部気体を交換した。そして、このような条件下で酸化膜の放電現象に与える影響を検討した。

電極表面に一樣に酸化膜を生成させる装置を第 11 図に示した。この装置は、放電に伴う活性化されたふんい気中に電極を暴露させることにより、電極表面に酸化膜を生成させるものである。酸化量の調整は暴露時間とした。また、放電源は直流正極性で 10 kV とした。セル内のふんい気は、真空処理を 30 分間行なった後、酸素 150 Torr、窒素 610 Torr を導入し、その後セル内に前もって準備した水分管を割り、相対湿度 60% とした。

$V-N$ 特性を得るための電極は、直径 20 mm の銅電極である。電極は酸化処理する前にピカールで十分研磨し、ベンジンで 10 分間超音波洗浄した。 $V-N$ 特性を測定するのには、第 1 図と同様の容器を用い、電極ギャップは 5 mm とした。ふんい気は $V-N$ 特性の測定中に電極表面の酸化進行を防止するため、空気ではなく窒素ガスを用いた。また、インパルス破壊回数の増加に伴い酸化電極の酸化膜がはくりすることを考慮

第 11 図 電極酸化処理装置

Fig. 11. Apparatus for electrode oxidation.

第 12 図 酸化電極の V-N 特性に及ぼす効果 (N_2 中)

Fig. 12. Effects of oxidized electrode on V-N characteristics (in N_2).

し、条件を合わせるため一定電圧にて 100 回電圧印加をするごとに同一の酸化処理した電極を用いた。非酸化電極についても同様に、同一条件の新しい電極に交換した。

電極酸化量をパラメータとした窒素ガス中における V-N 特性の結果を第 12 図に示した。同図には電極が非酸化、酸化 15, 30, 120 分のそれぞれの V-N 特性を示した。同図より、V-N 特性の放電開始電圧(放電率が 5~10%)では、非酸化、酸化 15, 30 分の電極で約 30kV とほぼ一致しているが、120 分酸化の電極だけがやや高い電圧となっていることがわかる。また、放電率 90% の電圧は非酸化で 55kV、15 分酸化電極で 45kV、30 分酸化電極で 35kV であり、酸化量の増加に伴い低下していることがわかる。これに対し、酸化がより進行した 120 分酸化電極では特性が高電圧側に移行してくる。この現象は、前述した第 10 図の結果と一致している。すなわち、酸化膜の影響は、電極表面の酸化度が進行するに連れて一度破壊電圧が低下し、その後再び上昇してくる傾向にある。

酸化膜の放電特性への影響をより具体的に示したものが第 13 図である。同図の縦軸は、第 12 図の 50% 破壊電圧と V-N 特性の傾き、すなわちばらつきであり、横軸は酸化量である。始めに傾きについて述べると、電極を非酸化から酸化 30 分まで酸化することにより、V-N 特性の傾きは 3.4%/kV から 20%/kV まで増加している。一方、120 分酸化になると

第 13 図 電極酸化量と第 12 図の特性の傾きおよび 50% 破壊電圧の関係

Fig. 13. Degree of oxidation vs. slope of characteristics in Fig. 12 and 50% breakdown voltage.

13.4%/kV と傾きが 30 分酸化に比べて減少する。このように電極酸化量の増加に伴い V-N 特性の傾きは増加し、酸化 30 分で極大値を有することがわかる。すなわち、放電のばらつきは酸化 30 分で極小になるわけである。同様なことが 50% V_{BD} についても言える。50% V_{BD} は非酸化、15 分酸化そして 30 分酸化では、それぞれ 40, 36, 34kV と低下している。50% V_{BD} においてもやはり 30 分酸化で 34kV と最小値を示し、120 分酸化になると 37kV に増加する。従って、第 13 図より酸化膜の進行は放電のばらつきの縮小化および 50% V_{BD} の低下を招くが、更に進行するとばらつきの増大、50% V_{BD} の上昇につながる。このように酸化膜は、酸化の進行に対して一様な効果を有さないことがわかる。

更に、酸化膜の挙動を検討するため放電遅れ時間を測定した。第 14 図は遅れ時間の分布をラウエプロットで表示したものである。遅れ時間はさきの第 12 図の V-N 特性と並行してオシロスコープで測定した。横軸は遅れ時間を示し、縦軸は N_0 回 (本実験では、 $N_0=100$ 回) 電圧印加したとき、遅れ $\tau(\mu s)$ 以上であった回数を N_τ とし、 N_τ/N_0 の対数で表示してある。設定電圧は 50% V_{BD} の約 105~110% であり、図中括弧内に示した。

非酸化電極では、1 μs より短い遅れ時間と長い遅れ時間で屈曲した特性である。これに対して 15, 30 分酸化電極では直線的な特性を示している。これは、いずれの電極においても形成遅れ時間は 1 μs と同じであるが、統計的遅れ時間が非酸化電極に比較して 15, 30 分酸化電極の順に短縮していることである。しかし、120 分酸化電極になると再び統計的遅れ時間が長くなり、20 μs の長い時間が生じていることがわかる。こ

第 14 図 酸化電極の破壊遅れ時間に及ぼす効果 (N_2 中)

Fig. 14. Effects of oxidized electrode on time lag (in N_2).

のように、遅れ時間についても 30 分酸化電極が一番短い統計的遅れ時間を有しており、30 分酸化で特性の変曲点が存在する。

一般に、統計的遅れ時間は放電開始時に存在する初期電子量を代表すると考えられている⁽¹⁰⁾。また、実験的にも電極ギャップへ紫外線照射を行なうと統計的遅れ時間は減少することが報告されている⁽¹¹⁾。従って、電極酸化が存在すると初期電子が放出されやすくなるために、遅れ時間特性も 30 分酸化で変曲点となっており、このことは第 13 図の 50% V_{BD} および特性の傾きの変曲点と一致している。更に、30 分酸化までは統計的遅れ時間が短縮する傾向と、第 13 図の 50% V_{BD} の低下および特性の傾きの上昇が一致する。すなわち、電極酸化によって初期電子が放出されやすくなるために遅れ時間が短縮化され、 $V-N$ 特性の傾きを急しゅん化させると言える。しかし、120 分酸化になると初期電子が放出されにくくなり、50% V_{BD} の上昇に見られるように放電発生が困難になるであろう。なお、初期電子は電極表面の性質のほか、外部から照射される光などによる発生が考えられるが、第 12 図、第 13 図の特性の測定は実験室内で行なったもので、特別な紫外線照射や直射日光を受けない所で実施したことを付記する。

このように、放電現象における電極酸化の挙動は初期電子生成に関連していると考えられ、この点について、今後詳しく検討する必要がある、現在検討している。従って、この点は改めて別稿の機会に報告する予定でいる。

5. む す び

大気中におけるインパルス破壊が電極表面に与える履歴作用を表面状態および表面生成物の二点から究明した結果、次の事項が明確となった。

(1) インパルス破壊下の電極表面は極性により形態の異なる酸化物が生成し、その酸化量は放電回数に伴い増加する。

(2) 陽極側には突起状酸化物、陰極側では層状酸化物が生成する。表面の凹凸といった物理的変化は陽極側が激しいが、酸化量では陰極側が陽極側の約 2 倍の値を示した。

また、履歴を受けた電極が放電に与える影響は、上述のように極性により表面状態が異なるため、陽極・陰極に分けて窒素中において検討した。その結果、

(3) 表面の凹凸が激しい陽極側には変動が現われず、酸化膜を有する陰極側に変動が現われた。

従って、履歴を受けた電極の放電に及ぼす影響は、陰極側の酸化膜が関与するため、酸化膜の挙動を詳細に検討した結果、

(4) 酸化膜の効果は一義的なものでなく、酸化初期では 50 % 破壊電圧の低下、放電遅れ時間の減少を招くが、酸化が進行するとこの傾向とは逆になった。

このように、電極表面の履歴および履歴がもたらす放電への影響は、前者、後者ともに酸化現象が介在しているため、大気中放電特性を変化させる要因として電極表面の酸化物の重要性を考慮すべきであろう。

終りに、本研究に際して援助いただいた本学高電圧研究室卒業生である片岡 力、渡辺 明両君ならびに電子顕微鏡室 吉田 明氏に感謝の意を表します。また電極酸化現象を金属酸化の立場から討論して下さった高電圧研究室研究生 緒方 梨氏に感謝いたします。

(昭和 54 年 11 月 5 日受付、同 55 年 7 月 7 日再受付)

文 献

- (1) 例えば、放電ハンドブック、p. 201 (昭 50)
- (2) 御所：「水分添加による気中コロナ暗流の異常増加」、電学論 A, **94**, 354 (昭 49-8)
- (3) 御所：「水分添加による気中ギャップ破壊遅れの異常減少」、同上 A, **94**, 397 (昭 49-9)
- (4) 沢田：電学誌, **87**, 811 (昭 42-4)
- (5) 角田・荒井：同上, **84**, 1430 (昭 39-9)
- (6) 荒井：同上, **88**, 2089 (昭 43-11)
- (7) 鈴木・中村・三上：同上, **57**, 261 (昭 12-4)
- (8) 沢・海老沢・宮地：「大気中極短ギャップにおける破壊遅れの時間」、電学論 A, **99**, 227 (昭 54-5)
- (9) 岡本・井上：「腐食と飯食」、日本化学会編産業化学シリーズ, p. 21 (昭 46-10)
- (10) 鳥山・堺・稲田・室岡：高電圧工学, p. 81 (昭 43) コロナ社
- (11) 鳥山・堺・稲田・室岡：同上, p. 82 (昭 43) コロナ社