電圧-時間特性からみた汚損沿面放電特性の検討

横浜国立大学
東 洋 大 学

西 村 誠 介
中 島 好 忠

1. ま え が き

電力系統の高電圧化と高信頼性の要求から、系統絶縁の耐汚損対策は重大な問題として国内的にも国際的にも各種委員会で精力的な研究が進められている。耐汚損性能良好ながいしの設計、汚損試験法の妥当性、合理的な保守方法を検討するうえで、汚損沿面放電の本性を的確にはあくしておくことは有効かつ必要である。

これまでに汚損沿面放電の機構についてはいくつかの研究があり、大きく分けて次の二つとなる。一つは、50% フラッシュオーバー値程度の比較的低い電圧印加時にみられるようなフラッシュオーバーまでの発生・消滅を繰り返す局部アークの進展機構の説明である。著者の一人中島⁽¹⁾は汚損液皮膜温度の上昇に着目し、沸点に達したときの突発変化としてアーク伸長を考えた。富永⁽²⁾、瀬田氏⁽³⁾は局部アーク先端の皮膜通路部分はジュール熱により 100°C 近くになると気泡や乾燥帯を生じ、この部分に電圧がかかり、絶縁破壊して局部アークが伸びるといういわゆる通路の熱変形先導の考え方により計算値と実験値との対応をとっている。もう一つはインパルス電圧のような極めて高電圧を印加した場合のもので、赤崎氏⁽⁴⁾は誘電体沿面にする Toepler 理論の拡張を試みている。Boylett 氏ら⁽⁵⁾は、水溶液面に生ずる放電は空气中金属電極間の放電とは異なった特性をもつことを示唆し、高電圧印

加時にはリヒテンベルク図と類似のものになると報告している。しかし印加電圧を低い値から漸次高めてゆくと局部アークの進展速度は加速され、これに反し通路の熱変形の程度が軽減し、さらに印加電圧の極性によってアーク進展現象に差があることも実験的に知られており、上述各氏の検討範囲の間にもう一つの領域があることも考えられる。

本論文では、塩水皮膜上に形成されるアークスポット（アーク電極点）には不明な点が多いのでその解明の一端として、印加電圧を低い値から十分な過電圧にまで、変化させたときの汚損沿面放電進展機構の変遷を幅広くはあくすることを目指して実験検討を行なった。

なお、ここにいうアーク進展の現象は、汚損がいのフラッシュオーバーのさい、乾燥帯を橋絡した局部アークが、印加電圧の大半が加わっている湿潤帯上を伸びる現象と本質的に対応しており、汚損フラッシュオーバー過程中で最も重要な意味をもつものである。

2. 実験の方法

塩水皮膜上にアークを発生・進展させるため、第1図のような形状に裁断した新聞紙に所定濃度の食塩水

第1図 三角形漏れ通路

Fig. 1. Narrow tapering strip of leakage path.

Study of the Leakage Discharge Mechanisms on Polluted Surfaces Based on the V-t Characteristics. By S. NISHIMURA, Member (Department of Electrical Engineering, Yokohama National University) & Y. NAKAJIMA, Member (Department of Engineering, ToyO University).

西村誠介: 正員, 横浜国立大学工学部電気工学科
中島好忠: 正員, 東洋大学工学部

(10~0.1%) を含浸させ、これを水平なガラス板上にのせ金属電極を配して供試漏れ通路とした。漏れ通路を三角形（正しくは台形であるが、筆者らのこれまでの通称⁽¹⁾に従いがいここでも三角形通路と呼ぶことにする）とした主な理由は、アークの進展方向を常に一定に限るためである。この通路に電圧を印加すると通路上の頂点側電極に近いところほど、漏れ電流の密度は大きく、したがって通路皮膜に注入される電力密度も大となり、局部アークは必ず頂点側電極のきわに発生し、電力密度の小さい底辺側電極のほうへ向って進展する。すなわち、ここで三角形通路を用いることはあたかもコロナ放電の研究で同心円筒間げきや針対平板間げきが使用されるのと同じ理由である。また、通路の頂点側の一端に幅 5mm の切れ目を設けたのは、電極間に矩形波電圧を印加したとき、局部アークの進展時間を電圧印加からフラッシュオーバーまでの時間と一致させるためである。もし、切れ目を付けなければ電圧印加後、電流密度が最大の頂点側電極きわの通路部が漏れ電流の発熱作用で沸点に達し、水分の蒸発・飛散によりここに細かい切れ目ができるのを待って初めて局部アークが発生する。すなわち、電圧印加からフラッシュオーバーまでの間には局部アークの進展時間 t_d に先だって、通路の一端に細かい切れ目を生ずるまでの時間 t_i が含まれることとなり、両者を弁別する作業が必要となる。しかし、あらかじめ切れ目を付けておくと、電圧印加と同時にこの部分に局部アークが発生し上述の時間 t_i を 0 とすることができ、アーク進展時間 t_d のみを容易に測定することが可能となる。

試験回路は第 2 図に示したとおりで、あらかじめ充電したコンデンサにより試料通路の電極間に矩形波電圧を印加して、通路上を進展しフラッシュオーバーにいたるアークの写真観察や $V-t$ 特性を調べ、放電特性を検討する。なお、放電進展中に電源電圧が目だった減衰をしないよう電源コンデンサの容量を極力大きくするよう心がけた（減衰の程度は第 3 図のオシログラムを参照）。

第 2 図 実験回路

Fig. 2. Experimental circuit.

進展中のアークの様相は試料の横方向から回転カメラで流し写真として撮影し、これと同時に印加電圧、放電電流の波形をシンクロスコープで観察することとした。回転カメラは収光レンズ後方に置いた円周 28 cm の回転円筒に印画紙を巻き付け、数百~数千 rpm の速度でモータ駆動する仕組みになっている。さらに放電進展の途中で印加電圧を球間げきでさい断し、放電を中止させたときの放電の経路、先端の様相を観るために、試料直上にシャッター開放の暗函カメラを設け静止写真の撮影も行なった。

3. 塩水皮膜上のアークの写真観察

第 3 図 (a), (b) に三角形〔第 1 図 (a)〕漏れ通路上を進展するアークの流し写真の一例を示す。以下説明簡単化のため正極性電極から発生進展するアークを正アーク、負極性からのものを負アークと呼ぶ。(a) は正アーク、(b) は負アークの進展状況で、同一印加電圧値に対しては一般に正アークのほうが進展速度が大きく、この写真では約 4 倍となっている。また、紙通路上を進展する正アークでは陽光柱の中に輝度の強弱を伴い、その程度は印加電圧を低くするほど著しい。この輝度の強弱は紙通路から発生する分解ガスの不均一さによると見受けられ、さらに発展すると紙の燃焼につながるようである。負アークでは輝度の強弱は現われにくく、アークスポット近くの通路部分に供給されるエネルギー密度に極性差があることを示唆している。(c)~(f) は放電進展の途中で、印加電圧をさい断して放電の経路・先端の様相を観察したものの一例である。(c), (d) に見られるように、常に正アークは先端が先鋭、負アークはアーク柱が太く真直に進む傾向があり、それぞれ正負アークのスポットの形状や大きさに差異があることを物語っている。過電圧を印加した場合が (e), (f) で、その特徴がよく見えるように特に平等幅通路を用いたが、正アークには多数の樹枝状の分岐があり、負アークは通路いっぱいに広がった中から細く先鋭な先端が一本伸びているのが見られる。(g), (h) は不足電圧印加のため放電が途中で自然消滅するときの状況を、三角形通路について流し写真として撮影したもので、正アークは陽光柱の輝度が低くなった後もアークスポットは、なお残存しているが負アークは逆にアークスポットから先に消滅しておりスポットが放電の維持に果たす役割の違いを暗示している。

4. 印加電圧-進展時間特性

〈4.1〉 $V-t$ 特性 限られた電源電圧のもとで不

第 3 図 アーク進展状況の写真

第 4 図 印加電圧とアーク進展時間の関係

Fig. 4. $V-t$ curves for tapering strips.

足電圧から十分な過電圧印加まで広範囲の現象を見るため、第 1 図(b)に示した短かい三角形通路を用いて印加電圧とフラッシュオーバーまでに要した時間（以下、進展時間と呼ぶ）の関係を調べることとする。塩水濃度の変化による現象の推移も検討できるように濃度 10 ~ 0.1% 塩水及び 0.01% 相当の水道水を供試し、通路の初期抵抗は濃度に反比例するよう塩水の含浸量を調整した。印加電圧の正・負両極性について得られた $V-t$ 特性を第 4 図に示す。特性は両対数方眼紙の上で右下りの直線となり、直線の傾きは塩水濃度の増大とともに急しゅんになっている。

次に印加電圧の極性差についてみると、塩水濃度、印加電圧値を等しくしたときの進展時間は一般に正極性のほうが負極性よりも短かく、流し写真でも見たように、進展速度に明らかな極性効果があることがわかる。しかし、印加電圧を極度に高く（60kV 程度）すると、塩水濃度による進展時間の差は小さくなり、極性による差も判然としなくなる。一方、印加電圧を低くするとアーク進展に伴う通路の熱変形（水分の蒸発・飛散など）が目立ち、進展速度は低下し、ついにはアークは伸長を停止し消滅する。したがって、 $V-t$ 曲線には終点がある。50%フラッシュオーバー値を終点の電圧値としてそのときの進展時間を求めると第 4 図中点線で結んだ曲線となり、両極性とも濃度 0.1~0.3% 付近で最長の進展時間を示し、400ms にも達する。濃度 0.1% 以上の範囲では 50% フラッシュオーバー値は

濃度の 1/5 乗に反比例した結果が得られた。

本実験の範囲では、負極性については $V-t$ 特性は大略 $t \propto V^{-n}$ ($n > 0$) の関係式にまとめられるが、正極性ではおよそ数百 μ s を境として n の値が変わり、折線特性となっている。これは実験上避けられない通路の変形によるものと考えられる。

〈4.2〉 アークスポットの特異性 上述の $V-t$ 特性及び局部アークの観察写真を参照しながら、塩水皮膜上の漏れ放電の機構について推論と考察を試みる。

放電が通路途中まで進展してきた状態を考えると、残余通路部分の電流はいうまでもなく溶液中のイオン Na^+ , Cl^- の移動によっておりこれらイオンは水溶液中では一般に水和状態にある。他方放電部は過渡的なアーク放電に類すると見受けられ、電流形成の基となる電子が、塩水皮膜と放電の接続部すなわちアークスポットにおいていかなる機構のもとで受容されているかを解明するのが問題点である。というのは、金属や炭素などの導体上に生ずるアークスポットと比べて種々異なった特性を持っていると思われるからである。たとえば、正アークの場合、陰極点ができる塩水皮膜はその沸点が 100°C（もし陰極点近くは気圧が高くなっているとしても数百度以上に及ぶことはなからう）であるため、通常炭素電極などについていわれる熱電子放出機構は考えられない。

印加電圧を変えてもアークスポット本来の機能は変わらないまでも、低電圧印加時には漏れ通路の発熱・

作用で水分の蒸発・水溶液の飛散あるいは塩水の電気分解による解離ガスの発生が放電の進展機構に密接な関連をもっと推察されるが、極めて高電圧印加時には直接水溶液表面からのイオン放出⁽⁶⁾や電子の電界放出も可能となり放電機構には明らかな推移がみられる。アークスポットの特性の詳細な検討は後続の論文に譲るとして、ここでは極力広範囲に現象をカバーすることに心がけ巨視的な検討を行なう。

〈4・3〉 放電の機構について フラッシュオーバー直後の通路をみると、印加電圧が低いほど通路の一端に設けた切れ目から対極に向かって、より広範囲に乾燥や塩水飛散などの通路の熱変形が激しく温度上昇も大きい。また、流し写真でみたようにアークスポットは水蒸気ならびに新聞紙からの分解ガスの発生を併いながら進展する。さらに印加電圧の極性の正負にかかわらず陽光柱は黄赤色を呈し分光分析によると Na の D 線群が認められ、スポット及びその周辺から塩水の飛沫が放電の中へ巻き込まれていると見られる。

以上の諸点を総合して低電圧印加時の放電進展機構を次のように考える。すなわち、漏れ電流により塩水皮膜温度が上昇する。特に、電流線の集中が著しいスポット直前は注入される電力密度が大きいため短時間で皮膜は沸点に達し、皮膜の内部からも急激な蒸発・塩水の飛散が行なわれあたかも液体フューズ熔断のときのようにこの部分がアークとなる。スポット周辺には水蒸気、分解ガス、塩水の飛沫が多量にあり、これらの熱あるいは衝突電離により放電に必要な電流が供給され、アークは進展し、フラッシュオーバーにいたる。換言すれば皮膜に注入される熱エネルギーがアーク進展・維持に大きく寄与しているという意味でこの分野を熱的進展の機構と呼ぶことができる。極性による進展速度の差は皮膜上に形成されるアークスポットの形状の違いに起因すると考えられる。写真観察では明らかに、正アークは負アークに比べて先端が先鋭で、スポット直前に供給される電力密度が大きいことがうかがえよう。

次に印加電圧を極度に高く（約 60kV）した場合、進展時間は塩水濃度、極性による差が判然としなくなる。これほど高電圧でなくても、進展時間が短くなればなるほど、通路上の一点に着目したときそこに注入される熱エネルギーは減少し皮膜溶液の沸騰は考え難くなる。もしこの領域でも低電圧印加の場合と同様熱的機構が保たれているとして、後述〈5・3〉節の step-by-step 法で、皮膜への注入エネルギー一定、すなわち皮膜の温度上昇一定のときの V-t 曲線を計算すると、大略 1/2 の傾きとなる。しかるに実験結果

はこれよりも小さい傾きとなっており、放電機構が変化していることを示唆している。アークスポット直前は電流の集中により皮膜直上に強電界が生じている。放電進展には熱エネルギーよりもむしろスポット周辺の強電界が関与するという意味でこの領域は電界的進展機構と名づける。

最後に、熱的領域と電界的領域との中間の領域について検討を試みる。印加電圧を高めるに伴い放電電流も増大し進展速度は著しく加速される。しかしフラッシュオーバー後に見られる通路の熱変形の程度はかえって軽減され、温度上昇も小さくなる。また、写真観察からは電圧の増加につれ放電先端が先鋭化し、スポット直前の電界強度が増大するようすがうかがえる。これらの所見を総合すると、印加電圧上昇に伴いスポット直前の電界強度が大となるにつれ、皮膜中の熱エネルギーによって放出される水蒸気や分解ガスが少量でもアークの維持・進展に必要な電流を得ることができるようになると推察される。アークスポット近くの放電の中に初期電子供給と増殖電離の効果を考えると、あたかも水蒸気や分解ガス発生熱的現象は前者に、電界強度の増大は後者に大きく関与して、その両者が相補的な関係をもって放電の進展に作用しているという印象を受ける。したがって、この領域のアーク進展機構を本論文では熱電的と呼ぶこととする。

以上 V-t 特性を基して放電や通路の様相を観察しながら、塩水皮膜上の放電を大きく三つの領域に分けそれぞれ熱的、電界的進展機構と名づけたが、もとより各領域間に明確な境界はない。

〈4・4〉 50% フラッシュオーバー値について 第4図に示した 50% フラッシュオーバー電圧とそのときの進展時間との関係について考える。この領域では放電進展は熱的機構によっている。したがって、放電が持続進展できるか否かは、通路の熱変形の進み方いかんによる。ここで放電現象のほうからアーク消滅の条件を調べる目的で、第1図(a)の寸法の試料について、放電の流し写真と電流オシログラムから、アークが進展を停止し消滅する直前の電流値を求め、アークの長さとの関係を示したものが第5図である。印加電圧、極性を変化しても結果は一本の曲線となり、この電流値より小さくなるとアークが消滅することを意味し、放電の維持には臨界電流値が存在するよう見受けられる。すなわち、残余通路の熱変形による抵抗値の増大のため放電が消滅するか、放電伸長により残余通路を短縮して持続進展するかは臨界電流値との関係で決まる。

さて、塩水濃度を大として通路の抵抗値を低くすると皮膜に注入される電力密度は著しく増大し通路の熱

第1図(a)の試料を使用, ただし電極間けきを 21.5cm とした

第5図 放電の臨界電流

Fig. 5. Critical current of discharge.

変形は促進され, 第4図のように0.1%から濃度が大きくなるにつれ時間が短縮されてゆく。他方, 濃度を0.1%より減少しても50%フラッシュオーバー値に対する時間はやはり短くなっているが, これは放電機構の変遷によると考えられる。濃度が0.1%以下になると50%フラッシュオーバー値付近の電圧印加時でも陽光柱の色は黄赤色からしだいに青白味を帯び空気中のストリーマ放電と似たものとなり, 通路の熱変形も激減する。すなわち, 濃度の低下とともに, 放電進展機構が熱的から電界的なものへと推移してゆくと解釈される。

5. 局部アーク進展速度の熱的検討

〈5・1〉 局部アークの速度分布 放電の流し写真でアーク先端の軌跡から進展速度が伸びるに従って加速されている。印加電圧が比較的低くフラッシュオーバーまでの時間が約1ms程度以上の場合には, 流し写真から通路上各点でのアーク進展速度を読み取ることができる。しかしフラッシュオーバーまでの時間が短くなると, 流し写真の撮影部が短くなり正確な測定が困難となる。そこでアーク進展方向と直角に1mmφの銅線を通路上に密着して置き探針(P)とし, 1M Ω ~数百k Ω の高抵抗分圧器に接続する。アーク進展に伴うPの電位変化をシンクロスコープで観察し, Pの位置にアークが達するまでの時間を読み取る。進展するアークスポット近くには強電界が集中しており, アークが金属探針Pに到達すると, Pの電位は不連続変化する。Pの位置を変えて, その点までアークが進展してくるに要する時間を求めたのが第6図である。

同一条件下でも測定のために結果はかなりの範囲にばらつくが, はば平均的に一本の曲線に回帰できそうである。確認の意味で流し写真から求めた結果と比較するとばらっきの範囲内で合致している(第6図)。片対数方眼紙上に画いたアークの長さと言展時間の関係

—: 流し写真による実測線, (3)式によって引いた線 3% 食塩水を新聞紙に含浸, 試料: 第1図(b)

第6図 アークの長さと言展時間の関係

Fig. 6. Characteristics of arc development.

曲線は, 印加電圧が異なっても極めて類似の形をしている。特に塩水濃度0.1~10%, フラッシュオーバー時間が10 μ s以上の範囲ではただ時間的に平行移動したように見える。電圧が印加され放電が進展を始めた当初電流は小さく, アークスポット近くへ集中する電界も弱い。進展速度は遅く熱的進展機構を示す。アークが長ずるに従い先端の電界強度も増大し熱電的機構の様相を帯び, 進展は加速される。さらに伸びると短くなった残余通路に印加電圧の大半が加わり電界的進展機構を経てフラッシュオーバーとなる。すなわち, 一つの放電進展に伴っても放電の様相は熱的なものからしだいに電界的なものへと変化している。しかし, フラッシュオーバーまでの時間が10 μ s以下となるような高電圧印加の場合には, 第6図の特性曲線は先の場合に比べていくらか変形している。アークが通路一端の切れ目から1~2cm伸びるまでにフラッシュオーバー時間のほとんどを費やし, 残りの通路は瞬時に電界的機構により進展することが見取られる。

〈5・2〉 通路の温度上昇とアークの進展 印加電圧低くアークの進展が熱的機構によっている場合を考える。アークスポット直前の通路皮膜は沸騰状態にある。この部分の電流密度がいくらであるかはスポットの形状が明解にされない限り算定できない。しかし, ここからわずかに離れると電流線は急に広がり通路幅一ぱいに及んでいるであろう。いま, 電流線が通路幅一ぱいに広がった場所の皮膜温度が100 $^{\circ}$ Cを保っていると仮定する。この場所からスポットまでの部分は注入されるエネルギーによって潜熱が供給され蒸発や塩水の飛散が行なわれていると考える。すなわち, アークスポットは皮膜温度が100 $^{\circ}$ Cに上昇した場所のすぐ近くにあり, この温度上昇に先導されて進む。したがって, 逆に皮膜温度が100 $^{\circ}$ Cに上昇する場所の移動からアーク進展のようすがうかがえることとなる。この考え方に関連して筆者の一人中島は, 以前, アーク電

圧を零として皮膜温度が 100°C になる場所の移動速度 S を (1) 式で表わしている。

$$S = \frac{V^2}{2(E_{100} - E_n) \rho l_0 (\ln l/l_0)^2} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 V : 印加電圧、 ρ : 塩水の固有抵抗 (温度によらず一定とする)、 $E_n (= 4.2 n \text{ joule/cm}^3)$ 、 E_{100} はそれぞれ $n^\circ\text{C}$ 、100°C に対応する皮膜のエネルギー密度、 l_0 : 三角形通路の頂点から E_{100} の場所までの距離、 l : 頂点から測った通路の全長

$S = dl_0/dt$ であるから、一定電圧の下でアークが l_0' まで進展するに要する時間は (1) 式から

$$dt = 2(E_{100} - E_n)(\rho/V^2) l_0 (\ln l - \ln l_0)^2 dl_0 \dots \dots \dots (2)$$

ここで

$$\int l_0 (\ln l_0)^m dl_0 = (l_0^2/2) (\ln l_0)^m - (m/2) \int l_0 (\ln l_0)^{m-1} dl_0$$

なる関係式を利用して (2) 式を積分し、 $l = 12.7 \text{ cm}$ 、 $t = 0$ で $l_0' = 3.5 \text{ cm}$ とすると、

$$t = 2(E_{100} - E_n)(\rho/V^2) \{ (\ln l_0')^2 - 6.08 (\ln l_0') + 9.50 \} l_0'^2 / 2 - 20.9 \} \dots \dots \dots (3)$$

となる。3% 塩水通路の正極性での 50% フラッシュオーバー値 $V = 5 \text{ kV}$ について上式からフラッシュオーバー時間を算出すると ($\rho = 7 \Omega\text{-cm}$ 、 $l_0' = 12.7 \text{ cm}$ 、 $n = 20^\circ\text{C}$ 、 $E_{20} = 84 \text{ joule/cm}^3$ 、 $E_{100} = 420 \text{ joule/cm}^3$)、 $t = 3 \text{ ms}$ となり実測値 8ms より短い。この差は (1) 式を導くさいにアーク電圧と熱損失を無視したこともあるが、さらに簡単のため塩水の固有抵抗を温度によらず一定として液体状態での最低値 (100°C 時の値) を用いたことが大きな原因と考えられる。後述のように ρ を温度とともに変化させ、step-by-step 法で算出した結果は、正極性については実験値とよく一致する。

(3) 式の計算値は実験値と比べて時間的なずれはあるが、特性曲線の形は非常によく似ていることが注目される。つまり (3) 式の時間を適当に定数 (k) 倍すればそのまま、塩水 1~10% でフラッシュオーバー時間が 10 μs 以上の場合の実験結果の平均的な回復曲線として用いることができる。第 6 図の曲線は実はこのようにして画いたものであるがフラッシュオーバー時間 10 μs ~ 数 ms までの広範囲にわたって適合している。 k の値は印加電圧の上昇とともに減少する。一例として 3% 正極性の場合印加電圧各 5、10、15 kV に対してそれ

ぞれ $k = 2.7$ 、0.27、0.13 となる。ここで k の厳密な物理的意味は吟味できないが、(3) 式の右辺を k 倍することは同式の $(E_{100} - E_n)$ を $k(E_{100} - E_n)$ に置換するものである。 E_n は室温に対する皮膜のエネルギー密度で一定とすれば、 k が減少することは (3) 式で E_{100} が減少することと同義である。つまり印加電圧が高くなると、アーク進展機構が熱的なものからしだいに熱電的なものへ推移するのに対応して、皮膜エネルギー密度が 100°C 相当にならなくても進展可能となることを物語るかに見受けられる。しかし、フラッシュオーバー時間が 10 μs 以下になると、特性曲線の形が変わり、熱の見地から導いた (2) 式に適合しなくなるのは、放電進展が極めて電界の機構を帯びてくることを示すものと解される。

〈5・3〉 アーク進展に対する臨界温度 印加電圧

が低い場合には、アークの進展は通路皮膜温度 100°C となる点の動きとして、熱的に扱ってよいものと思う。印加電圧が高くなった場合にも同様に皮膜温度上昇の伝搬に放電の進展を対応させようとするれば、皮膜温度は沸点でなくこれよりも低い温度の伝搬を考えなければならない。ここで、 T_c を熱的にみたアーク進展のための臨界温度と呼ぶことすると、臨界温度は印加電圧の上昇に伴って低減する。臨界温度の低減は、放電の進展機構が純粋に熱的なものから、電界の効果も帯びた熱電的なものへの移行を示す指標の一つと見ることができよう。

さて、第 4 図の $V-t$ 特性を参照しつつ印加電圧、塩水濃度の変化によって臨界温度がいかに変化してゆっくかを調べることにする。皮膜温度上昇の計算にあては (1) 式の場合と同様にスポット直前で電流線が通路幅一ぱいに広がった点に着目し、かつこの点から対極までの残余通路に全印加電圧が加わるものとして計算の簡単化をはかる。なお、濃度 $N\%$ の塩水の固有抵抗 ρ は (4) 式のように温度 T により変化するが、その効果は step-by-step 法で考慮に加えることにする。

$$\rho = (3/N) \times 28.9 (1 - 7.58 \times 10^{-3} T) (\Omega\text{-cm}) \dots \dots \dots (4)$$

前節に述べたように、印加電圧が一定であってもアーク進展開始直後は熱的機構が強く、進展するにつれて熱電の様相を帯びてくる。したがって、厳密には臨界温度はアーク伸長とともに低下するはずであるが、ここでは $V-t$ 特性のうえで放電機構の変遷を概観することを目的とするため計算の単純化を優先させ、場所のいかににかかわらず格一的な臨界温度という意味で印加電圧によって変わるものとした。すなわち、あ

第7図 放電進展の臨界温度

Fig. 7. Critical temperature of leakage path.

る印加電圧の下での臨界温度の想定値を T_c' とし、皮膜温度が T_c' に達した点までアークが伸びると考え、アークが対極に達するまでの所要時間 t_f' を求める。しかし、初めに想定する T_c' の値の高低に応じて t_f' は長短変化する。そこで逆に、 t_f' が実測のフラッシュオーバー時間と一致するような値 T_c を探し、これを当該印加電圧に対する臨界温度とする。

臨界温度の想定値 T_c' を変化させ、それに対応する t_f' を電子計算機を用い step-by-step 法で計算した結果を図示したもの一例が第7図である。実測のフラッシュオーバー時間と一致する点を図中 ○、● 印で示してある。これらの点に対応する T_c' が当該条件下での臨界温度 T_c となる。正極性では塩水濃度 1, 3, 10%ともフラッシュオーバー電圧のときのみ、100°C の臨界温度でフラッシュオーバー時間は実測値とよく一致し、印加電圧の上昇に対しては直ちに T_c を低減させねばならない。しかし負極性では塩水濃度 1~10% の各場合とも 50% フラッシュオーバー値とその約2倍の電圧の間の広い区間にわたって臨界温度として 100°C を採用しなければならない結果となっている。計算にさいし、供給された電氣的エネルギーがすべて皮膜の温度上昇に寄与するとして熱損失を無視した大づかみな考察とはいえ、正極性アークの進展は 100°C の温度に束縛されることが少く、負アークの伸びは 100°C までの温度上昇を必要とする電圧範囲があり、 $V-t$ 特性上で熱的と見られる分野が広いと解釈され、正・負極性による特性差の一端を示すもののようである。さらに、印加電圧を増大するにつれ臨界温度が低下して常温（皮膜の初期温度で 20°C）に近づくことは正・負いずれの極性でも同様である。特にフラッシュオーバー時間が 10 μ s 以下の場合には T_c はほとんど常温に等しくなり、放電進展には熱的效果よりも電界的效果が優勢となること

を示しているものと解釈される。

6. むすび

汚損がいし類のフラッシュオーバー現象において最も重要な意味をもつ、汚損沿面に発生・進展する局部アークの本性を理解する一つの方法として、放電の様相の写真観察と、印加電圧を広範に変えたときのアーク進展の時間特性とから、汚損沿面放電の進展機構の推移を調べてきた。その結果、金属や炭素電極間に生ずるアーク放電に対しいわれる電界放出や熱電子放出の理論をそのまま、電解液面上に一方の電極をもつ汚損沿面アークに適用して、放電現象の全てを説明することは不可能と思われることを指摘した。汚損沿面放電の機構は印加電圧の低・高に従って通路の熱的現象を著しく伴うものから、しだいに、電界現象的なものへと変遷することを示し、それぞれの現象の特徴によって、熱的、熱電的、電界的進展機構と三つに分類して放電特性をはあくすることを提案した次第である。

次に局部アーク進展特性を通路の温度上昇に関連づけて考察を行ない、その結果、負極性アークではアーク進展が熱的に束縛を受ける電圧範囲が広く、他方正極性ではその範囲が狭いことがわかった。しかしいずれの極性においても、印加電圧をより高くするとアーク進展特性は熱的なものからしだいに電界的様相を帯びてくることを示唆している。

熱的分野では通路変形が著しいため、アーク進展特性を計算により求めることはできないが、他の分野では算定可能の見通しで、そのためには現象の熱的要因と電界的要因の定量的な測定を行なうことが必要で今後の研究課題としたい。

終わりに、本研究の実験・計算の面から協力いただいた、尾崎忠義、小柳瑛二、安藤健一、下川原直明の各氏に謝意を表する。

(昭和49年2月4日受付, 同49年8月5日再受付)

文 献

- (1) 中島: 電学誌 3, 505 (昭 17-11)
- (2) 富永: 電学誌 88, 2310 (昭 43-12)
- (3) 瀬田, 他: 電研レポート 148 (昭 39)
- (4) 赤崎, 他: 電学誌 88, 2117 (昭 43-12)
- (5) F. D. A. Boylett, et al.: Proc. Roy. Soc. 324, A, 1559 (1971)
- (6) J. K. Bragg, et al.: J. Appl. Phys. 25, 3, 382 (1954)