

論 文

塩塵汚損沿面放電現象に及ぼす電解液の性状と種類の影響

西村 誠 介*

(1989年2月10日受理)

Influence of Properties and Kinds of Electrolyte on Arc across Polluted Insulator Surface

S. NISHIMURA*

(Received February 10, 1989)

It is mentioned that partial arc discharges on polluted insulator surfaces vary widely in features and behaviors according to properties and kinds of pollutant slurries. In the first part, influence of a viscosity of pollution layer is photographically examined. When a viscosity increases with addition of a binding agent such as methylcellulose (M.C.) or dextrin, a tip of arc tends to branch off filamentally, and a propagation of an arc is disturbed by a thermal effect of pollution layer. In the next part, various kinds of electrolytic solution (acids, alkalies and salts) are tested. A leakage path coated with an acid or alkali solution offers a higher 50% flashover voltage, and NaCl solution gives the lowest one. Finally, a phenomenon of "channelling damage" of insulator surface (glass plate) due to an electrode action of a partial arc an electrolytic solution is experimentally investigated. The degree of occurrence of channelling damage depends on kinds of electrolyte. It appears that salt contained NO_3^- ion causes the most severe damage to a glass plate.

1. まえがき

外部絶縁の塩塵害において最も一般的で、かつ耐電圧的に苛酷なのは臨海地帯での急速汚損である。このため多くの商用人工汚損試験では、汚損物を模擬する電解質として食塩が採用されている。しかし、汚損状況は各地域ごとに異なり、汚損源に大きく依存する。地域の特殊性に着目して汚損実態を忠実に再現するために、食塩以外の各種塩類、酸、アルカリを供試したり¹⁾、さらには汚損層に粘性を付与して碍子表面への付着力を増強するために、メチルセルロース（以下、M.C. と略記）やデキストリン等の粘性付与剤を食塩水に混入する方法等が試みられている²⁾。これらの汚損層の試験技術的検討や耐電圧特性の異同については既に幾つかの報告³⁾はあるが、汚損層を構成する電解液の性質や種類が液面上の放電現象や絶縁物表面に及ぼす影響などに関する報告は少ない。

キーワード：沿面放電、局部アーク、塩塵汚損、電解物質、チャネリング

* 横浜国立大学工学部電子情報工学科 (240 横浜市保土ヶ谷区常盤台 156)

Division of Electrical and Computer Engineering,
Yokohama National University, 156 Tokiwadai,
Hodogaya-ku, Yokohama, 240 Japan

ここでは、まず汚損層の高粘性化を意図して食塩水に添加物を混入した場合を採り挙げ、局部アークの外観や伸展の様相に顕著な変化が生ずることを写真観察に基づいて指摘する。次いで、電解質として食塩以外の各種塩類、酸、アルカリを供試した場合を検討する。電解質の種類によっては、50% フラッシュオーバ電圧値に差異が現れるだけでなく、電解液皮膜面上に形成される放電電極点（陰極点あるいは陽極点）が、その直下の絶縁物（ガラス板）表面にトランкиング状の損傷を生ずることがある⁴⁾。これらの状況⁵⁾について実験的に調査した結果を報告する。

2. 粘性付与剤を添加した食塩水の放電への影響

電解液として食塩水を用いる場合でも、これに高粘性化物質を混入すると沿面放電の様相に変化が生ずる。その状況を写真観察を基に調査する。

2.1 高粘性化食塩水

塵埃の激しい地域では厚く強固な汚損層が絶縁物表面に付着する。また、工業汚損物の種類によっては湿潤時に高粘性を呈するものもある。このような場合を模擬したり、試料作成の再現性を高めるため、汚損液として食塩水に M.C. やデキストリン等の粘性付与剤を混入した

ものを用いる人工汚損試験法がある²⁾。例えば、ドイツや東欧提案のメチルセルロース法(以下M.C.法と略記)では、食塩水1l当たり、M.C.を30g、炭酸カルシウムを25g混入した糊状の汚損液を供試する。このような高粘性の汚損液は碍子の耐電圧値にも影響を及ぼす。M.C.法規定の汚損液を0.05mm厚さに付着させた碍子の耐電圧は、同一塩分付着密度の等価霧中法(我が国独自の人工汚損試験法で、食塩水にとのこを40g/lの割合で混入した汚損液を使用、とのこの混入による粘性変化はない)試験結果に比べて約25%高い値を示すことが確認されている³⁾。

表1は6%食塩水にM.C.を混入したときの粘性係数 η である。M.C.法規定の汚損液は食塩水単独の場合の1,230倍もの高粘性を呈し、液中のイオン移動度の低下も著しい。M.C.の混入により、汚損液の固有抵抗は食塩水のそれに比べて約47%上昇することが測定された。

2.2 局部アーク伸展の様相

M.C.の混入により高粘性化した食塩水皮膜の沿面に発生する局部アークの様相変化を調査する。

M.C.法汚損液皮膜と食塩水単独皮膜とで沿面局部アーク伸展の各状況を、流し写真と静止写真により観察する。図1(a)(b)の大きな三角形状ガラス平板にM.C.汚損液または食塩水を一定量均一に塗布したものを供試通路とする。この供試通路に図2の回路を用いて直流電圧

表1 粘性係数 η

Table 1 Coefficient of viscosity η .

Amount of M.C. (g/l)	η (c.P.)	Ratio to 6% salt water
30	1490	1230
20	498	410
10	221	182
5	32	24

Measured at 13°C

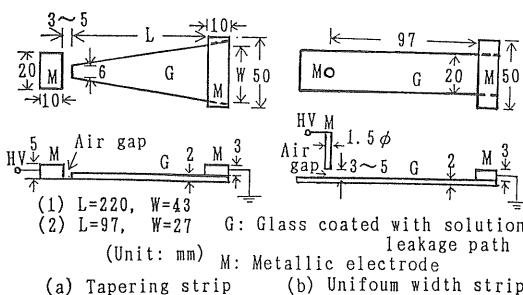


図1 供試漏れ通路

Fig. 1 Dimension of leakage path.

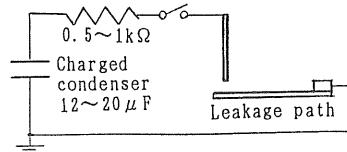


図2 実験回路

Fig. 2 Circuit.

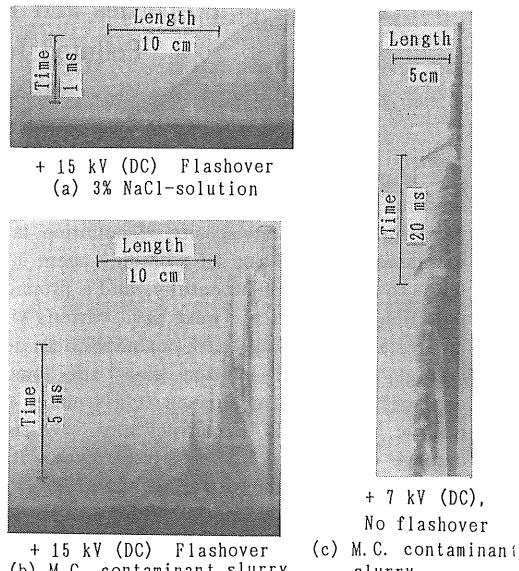


図3 局部アーク伸展状況(流し写真)

Fig. 3 Propagation of partial arc on leakage path.
(Streak pictures)

を印加する。汚損層の厚さ(約0.1mm)と初期漏れ抵抗(20kΩ, 20°C)をほぼ同一に揃えるため、供試するM.C.汚損液と食塩水とでは塩分濃度は異なっている。

図3は流し写真的例である。これらから次の諸点が指摘できる。

(1) フラッシュオーバー過程において、食塩水ではアーク長の増加に伴い伸展速度が滑らかに変化している(図3(a))が、M.C.汚損層では放電伸展速度の変化が極めて不連続で、停滯・伸展を繰り返す(図3(b))。元来、伸展速度の変化は伸展機構の推移を示唆し、食塩水では速度の増加に対応して、伸展機構が熱的なものから次第に電界的なものへと連続的に移行する⁶⁾。M.C.汚損層の場合には伸展機構の移行が円滑に進み難い様子が、放電先端の軌跡の乱れに現われている。この原因是、漏れ電流や局部アークに伴う発熱による通路の熱的変形が激化するためと見受けられる。すなわち、高粘性のため液層内部からの水蒸気発生時に汚損層の著しい飛散を伴うこと、および、汚損層中のイオン移動度低下により、ア-

ク電極点近傍の通路皮膜中の電流密度は減少し、アーチ維持・伸展に必要な電流を広い範囲から求めるようになること等が考えられる。

(2) M.C. 汚損層上の局部アーチ先端には細い放電が伸展・消滅を幾度も繰り返している(図3(c))。イオン移動度が低下した汚損層では一箇所から十分な電荷が得られないため、アーチ先端は電位傾度の大きい細い線条状の放電に分岐するのであらう。放電先端の分岐現象は、M.C. の代わりにデキストリンを食塩水に混入して高粘性化した場合にも明瞭に認められる。その例が図4の静止写真である。

(3) 上記二つの所見は印加電圧の正負にかかわらず認められるが、その程度には歴然とした極性効果がある。正極性電圧印加、すなわち、汚損皮膜面上の放電電極点が陰極点となる場合の方が著しい。

以上を要約すると、電解液は食塩水であっても添加物を入れて汚損液を高粘性化すると、その沿面の放電、特に電極点近傍に変化が生じ、伸展現象は熱的様相の強いものへと変貌してしまう。このことは、人工汚損試験法の妥当性の検討や選定に当たっては、単に耐電圧値の異同だけでなく、当該地域の汚損実態に即した放電の様相や挙動が有効に再現されるか否かという放電現象的な面からの吟味も欠かせないことを意味する。

2.3 食塩水での試験への適用

M.C. の混入量を減少して汚損液の粘性係数を低減すると、放電先端の構造や伸展の様相は次第に食塩水単独の場合に近づく。食塩汚損が対象の場合でも、放電に顕著な変化をきたさない範囲で汚損液の粘性を高めると、試料作成の再現性向上という試験技術面での利点となる。

写真観察の結果、放電先端の分岐現象や通路の熱的変形が異常に進まない限界のM.C.混入量は5g/l程度、すなわち粘性係数でいえば数十c.P.程度であることが判明した。

一様厚さの食塩水皮膜を容易に編成するという人工汚損試験実施上の要請から、粘性化とは別に、表面活性剤を添加する提案もある²⁾。この場合には高粘性化とは逆に、汚損層の乾燥帯生成が抑制され、漏れ電流を増大さ

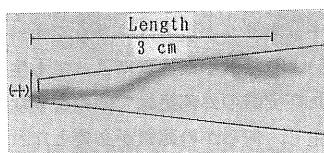


図4 デキストリン汚損液面上の放電（静止写真）

Fig. 7 Tip of partial arc on dextrin contaminant layer. (Still picture)

せる傾向を示す。

3. 電解液種類が耐電圧値に及ぼす影響

汚損物質として食塩以外の各種電解質を用いた場合、耐電圧値にどのような変化が生ずるかを調査する。

3.1 供試水溶液

供試する電解質として、種々の酸・アルカリ、および工業汚損環境下で付着が想定される各種塩類を探り挙げる。電解質以外の添加、すなわちM.C.等の混入は行なわない。

各種水溶液の導電率は、3%の食塩水のそれ50mS/cm(25°C)とほぼ同一値に揃えた。供試する水溶液の種類と濃度は表2に示す。各水溶液を注射器で定量し、図1(a)(2)に示した小さな三角形状のすりガラス平板に約0.03mmの厚さで塗布して漏れ通路とする。等価塩分付着密度は約0.1mg/cm²である。

3.2 三角形通路の50% フラッシュオーバ電圧値

上記通路に図2の回路で直流電圧を印加し、補間法により50% フラッシュオーバ電圧を求める。得られた結果を各種水溶液について示したのが、表2および図5である。

この結果から、等価塩分付着密度を同一に揃えても、50% フラッシュオーバ電圧は電解質物質の種類によって大きく異なることがわかる。50% フラッシュオーバ電圧は、大把みにみて、酸、アルカリで高く、次いでアルカリ土類金属の塩類、アルカリ金属の塩類の順で、食塩において最低となっている。この傾向は既に報告されているモデル碍子の交流に対する結果と概ね合致する⁷⁾。塩類については、陰イオンよりも陽イオンの種類による差が大きい。

50% フラッシュオーバ電圧を変化させる要因としては、局部アーチの電圧、伸展特性、さらには漏れ通路の熱的現象が重要である。液面上に形成されるアーチ電極点の降下電圧は液中イオンの濃度、イオンの水和エネルギー、電離電圧の大小等に依存するであろうし、また伸展特性は液面上電極点の構造や陽光柱導電度およびその時定数にも関連する。通路の熱的現象には液面上電極点近傍の電流密度が影響を及ぼす。したがって、汚損沿面耐電圧値の電解液種類依存性を放電現象的に解明するためには、電解液の種類により液面上電極点の特性がいかに変化するかを知ることが重要な鍵となる。

4. 電解液種類が液皮膜直下の絶縁物に及ぼす影響

ここでは、フラッシュオーバ現象から離れ、電解液沿面の放電電極点が直下の絶縁物表面に与える損傷現象を扱う。

表 2 供試電解液

Table 2 Electrolytic solutions.

Electrolyte	C Wt (%)	50% F.O.V. (kV)		Stand. dev. σ (%)	
		(+)	(-)	(+)	(-)
HCl	0.51	8.58	8.55	4.68	6.81
HNO ₃	1.06	8.22	8.34	6.81	8.63
NaOH	0.76	7.72	7.32	6.74	7.51
CuSO ₄	14.9	—	—	—	—
CaCl ₂	3.29	7.20	7.42	6.39	7.01
Ca(NO ₃) ₂	4.67	7.23	6.90	9.82	4.06
MgSO ₄	11.1	7.39	7.44	6.46	10.5
MgCl ₂	3.09	7.02	7.48	7.98	5.61
Mg(NO ₃) ₂	4.69	6.58	7.34	10.9	8.72
NaNO ₃	4.54	6.24	5.88	3.53	9.52
NaCl	3.00	5.64	5.34	8.16	4.68
KCl	2.82	5.56	5.76	4.14	9.14

C : Concentration of solution (%), Conductivity of solution : 50 mS/cm (25°C), σ : Standard deviation of F.O.V. (%),
Equivalent salt (NaCl) deposit density (ESDD) : 0.1 mg/cm²

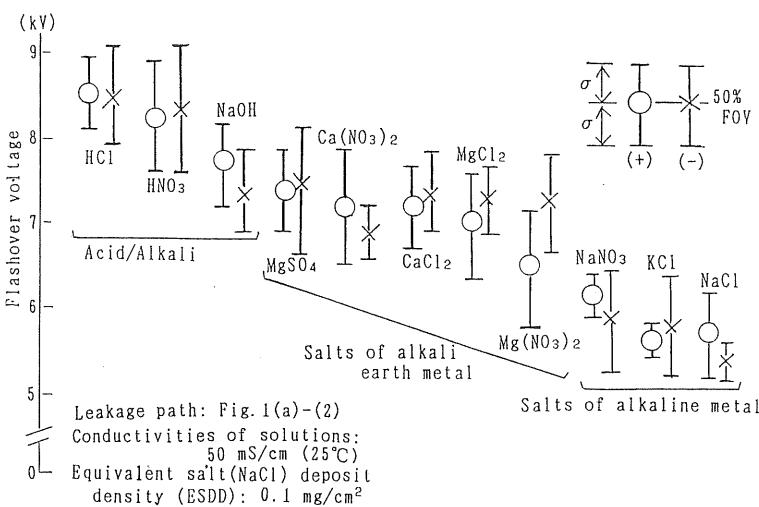


図 5 各種電解液でのフランシオーバ電圧 (直流)

Fig. 5 Flashover voltage of leakage path coated with various electrolytic solution. (DC voltage)

4.1 チャネリング現象

電解質の種類によっては、耐電圧値の差異のみならず、放電直下の絶縁物(ガラス)表面にトラッキング現象の傷を生じる⁴⁾。これは有機物絶縁材料のトラッキング現象に相当するが、絶縁物がガラスや磁器などの無機物の場合には導電性炭素の析出を伴わないので、ここでは「チャネリング」と呼び特に区別する。

チャネリングはフランシオーバ後の大電流によるものではなく、沿面放電の電極点が電解液層を乾燥させながらゆっくりと移動するとき、図6のように電解液と絶縁物

との境界部に、熱的あるいは電気化学的反応によって生ずる。特に、直流電圧印加のもとで顕著で、絶縁物の表面劣化や機械的破壊に直接つながるおそれがある。

一般に、チャネリング現象はフランシオーバには直接結び付かないような微小な放電によても生ずる。したがって、一たび実際の外部絶縁でこのようなチャネリングの問題が生じ、何らかの処置が必要となれば、その対策はフランシオーバに対する過絶縁方式とは基本的に異なるものでなければならない。

外部絶縁の汚損問題としては、これまで専ら、耐電圧

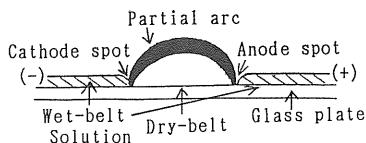


図6 漏れ通路上の乾燥帯、湿潤帯と局部アーカー

Fig. 6 Dry-belt, wet-belt and small partial arc on leakage path.

値の低下現象に大きな関心が注がれ、必ずしもこのようないくつかの現象による現象にまでは検討が至らなかった一面がある。ここでは、チャネリング現象の概要とその発生に対する電解質種類の依存性について実験的調査の結果を報告する。

4.2 実験方法

図1(a)または(b)の形状の通路に、50% フラッショーバー電圧値あるいはそれ以下の直流電圧を1回印加し、チャネリング発生の有無、および発生する場合にはその形態・程度を観察する。ここで、低い電圧を印加するのは、局部アーカー電極点とその直下の絶縁物表面との間の相互作用を大きくするためである。高電圧印加では、放電電流は大きいが伸展速度も大きくなり、絶縁物に及ぼす熱的影響は却って小さくなる。

漏れ通路両端の電極は、大部分の実験では銅板や銅線を用いたが、電極材料の影響を調べるために亜鉛電極も供

表3 チャネリング発生に対する電解質の依存性状況

Table 3 Dependency of kinds of electrolyte on channelling damage.

Electrolyte	Type of channelling damage			
	Type I	Type II	Type III	Type IV
HCl	—	—	—	—
HNO ₃	—	—	—	—
NaOH	—	—	—	—
MgSO ₄	○	—	—	△
CuSO ₄	○	—	○	—
CaCl ₂	○	—	○	○
MgCl ₂	○	—	○	○
Mg(NO ₃) ₂	○	○	○	○
Ca(NO ₃) ₂	○	○	○	○
NaNO ₃	○	◎	○	△
NaCl	—	—	—	—
KCl	—	—	—	—

◎ : Occurred heavily

○ : Occurred

△ : Occurred in the case of Zn-electrodes

Metallic electrodes : Cu or Zn

Conductivities of solutions : 50 mS/cm (25°C)

Equivalent salt (NaCl) deposit density (ESDD) : 0.1 mg/cm²

試した。

ここで絶縁物として供試した並ガラスは、実際の電気絶縁には必ずしも多用されていないが、一般の碍子用磁器に比べ、チャネリング現象が現れやすく、かつ発生するチャネリングの形態が多様で、電解質依存性が顕著であるという特徴がある。したがって、チャネリングの現象的検討には好都合と考え、これを試料として採用した。

4.3 チャネリングの発生状況

電解質の種類によって、チャネリングの形態、程度、および発生の難易に差異がみられる。得られた結果の概要が表3で、観察写真の例が図7である。

(1) チャネリングの形態

観察されたチャネリングの形態は目視判別により、次の4タイプに分類される。

タイプ1：網目状、ないしは分岐の多い樹枝状に広がる傷。顕微鏡では微細な亀裂のように見える（図7(a), (b)）。チャネリングが発生する場合にはほとんどの電

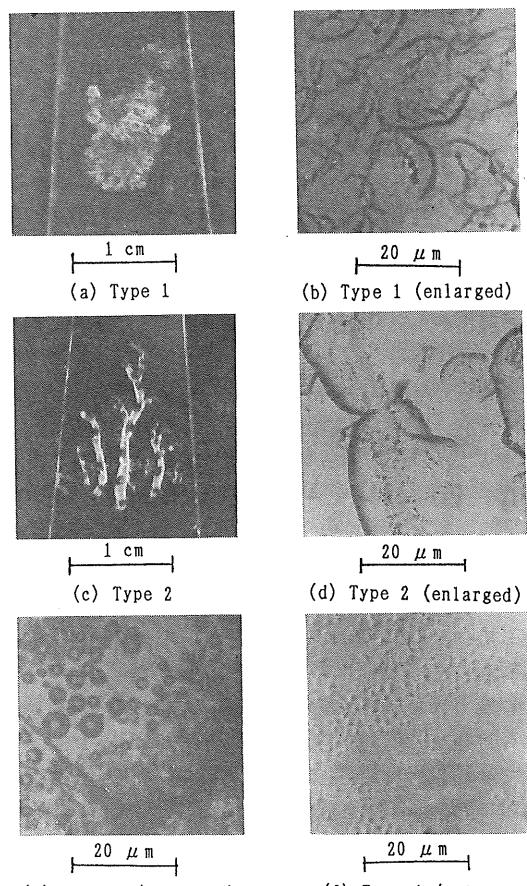


図7 ガラス表面のチャネリングの形態

Fig. 7 Pictures of channelling damages of glass surface.

解液でこのタイプの傷が共通に見られる。

タイプ2：深く太くえぐったような樹枝状の傷(図7(c), (d))で、特に NO_3^- イオンを含む場合によく現われる。

タイプ3：ガラスの部分的溶融を思わせる球状の傷(図7(e))で、特に Ca^{2+} , Mg^{2+} イオンを含む場合にタイプ1と共存することが多い。

タイプ4：焼けただれ、あるいは放電による生成物が蒸着したような、広がりをもった傷(図7(f))。特にフランシオーバーした場合に顕著である。

(2) 電解液種類の影響

いずれのタイプの傷の発生においても、電解液種類の依存性が顕著である。酸、アルカリ、 NaCl , KCl の各水溶液では、いかなるタイプのチャネリングも発生が認められなかつた。しかし、 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$, NaNO_3 , CaCl_2 , MgCl_2 , CuSO_4 では塩の種類に応じて、それぞれ特徴のあるチャネリングが容易に発生する。また、 MgSO_4 でも時として軽度のタイプ1や4の傷を生じることがあるが、上記六つの塩類と比べると、程度・難易度共に軽微である。

(3) 電極材料の影響

電極材料を銅から亜鉛に変更した場合には、新たに、 NaNO_3 でタイプ4, MgSO_4 でタイプ3の傷の発生がそれぞれ確認された。概して、銅電極を用いた場合よりも亜鉛電極を用いた方がチャネリングが発生しやすく、また損傷の程度もやや大きいように見受けられる。特にタイプ4の傷が生ずる場合が多くなる。

(4) 極性効果

矩形状通路における針電極直下に限った観察から、チャネリング発生は針電極を正極性とした場合の方が活発であることがわかつた。すなわち、液面上の放電電極点が陰極点となる場合である。しかし針電極が負極性、すなわち液面上の陽極点においてもチャネリングは発生する。この極性差は、放電部への電子供給という陰極点本来の機能と、陰極点の方が高電流密度であること等が関連しているものと思われる。また、傷のタイプや程度にも極性によって幾分の差異があるようである。

4.4 チャネリングの発生機構

今回の調査範囲では、陰イオンとして NO_3^- を含む塩類で極めて容易に強度のチャネリングが発生しやすく、また Mg^{2+} , Ca^{2+} を含む場合には液面上の電極点温度が高くなる傾向があるとの印象を受けた。しかし、他方硝酸(HNO_3)ではいかなるタイプのチャネリングも発生していないので、単独の特定イオンの存在のみでは律しきれず、現象の複雑さを感じる。

発生機構には液面上の電極点とその近傍の熱的、化学

的反応、誘電的各要因があろうが、現段階では理論立て説明するのは難しい。今後、電極点構造や電流密度に対する電解液種類の依存性、高温高電界下での過渡的な電気化学反応あるいは、熱化学的反応過程等についての検討が必要であろう。

5. まとめ

電解液沿面に生ずる放電現象はその様相や挙動が、水溶液の粘性や電解質の種類によって変化する。これが汚損碍子の耐電圧特性や絶縁物の損傷発生などに直接関連することを実験的に指摘した。その要点は次のようである。

(1) 電解質は食塩であってもこれに添加物を混入して高粘性化すると、沿面局部アーカーに変貌がみられ、その先端は伸展と消滅を繰り返す微細な線条状に分岐する。また、ジュール発熱による水蒸気発生に伴い通路皮膜の飛散が激化して放電伸展は熱的様相の強いものとなる。

(2) 電解質種類によって、汚損漏れ通路のフランシオーバ電圧値に差が生ずる。50% フランシオーバ電圧は、酸、アルカリ類において高く、次いでアルカリ土類金属の塩類、アルカリ金属の塩類の順で、食塩が最低となる。塩類については、陰イオンよりも陽イオンの種類による差が大きいようである。

(3) 電解液種類によっては沿面放電の電極点の移動に伴って、その直下の絶縁物(ガラス板)表面にチャネリング現象が発生する。チャネリングによって生ずる傷を形態的に四つのタイプに分類し、電解液種類の依存性を明らかにすると共に、極性および電極材料の影響があることを指摘した。

以上の諸結果は、各地の汚損実態に適合した外部絶縁のあり方や人工汚損試験法を、放電現象的な観点から吟味するときの一つの判断材料となろう。また、各種の静電気現象において、放電と電解液との相互関係を検討する際の手懸りにもなるであろう。

本研究の取り纏めにご鞭撻いただいた横浜国立大学芹沢康夫先生、実験にご協力いただいた同尾崎忠義氏に感謝する。

参考文献

- 電気学会：がいし, p. 200, 電気学会 (1983)
- 電気学会：高電圧試験ハンドブック, p. 275, 電気学会 (1983)
- Y. Nakajima and S. Nishimura : CIGRE SC33-WG04, 33-70 (WG04) 14 (1970)
- 西村誠介：電気学会論文誌A, 108 (1988) 609
- 西村誠介, 尾崎忠義：静電気学会学術講演会論文集, 14aA2, p. 275, 静電気学会 (1987)
- 西村誠介, 中島好忠：電気学会論文誌B, 95 (1975) 57
- 新井 昇, 下田 修：電力中研報告, No. 74047 (1974)