電解質水溶液表面における沿面放電の シュリーレン法による研究

正 員 中 尾 好 隆 (室蘭工大)

正 員 宮 城 克 徳 (室蘭工大)

正 員 服 部 耐 吉 (室蘭工大)

1. ま え が き

汚損湿潤がいしのように、固体誘電体の表面に導電性皮膜が形成される場合の沿面フラッシュオーバー現象については、気中^{(1)~(3)}あるいは油中^{(4)~(7)}の沿面放電と同様に工業的重要性のため、これまで数多く報告されてきている。

しかしながら、このような導電性沿面における放電は、多くの場合複合誘電媒質中不平等電界という形態をとり、かつ汚損湿潤状態および印加電圧の波形・極性など種々の因子の影響を受ける。従って、現象自体極めて複雑となり、そのため前述のような導電性沿面におけるフラッシュオーバー破壊過程の現象論的理解についてはまだ十分把握されていない点も多い。

液体(主として、電解質水溶液)を一方の電極として液面放電を発生させることに関しては、古くは液面アークの研究⁽⁸⁾、液体表面上の衝撃コロナの分光学的研究^{(9)~(10)}あるいは雷放電^{(11)~(12)}に関連して、また最近では雷撃を受けた人体面における沿面放電⁽¹³⁾、接地抵抗の大電流低減効果⁽¹⁴⁾などとも関連して研究されてきている。

従来、汚損湿潤がいしのフラッシュオーバー現象については、過去の研究結果ドライバンド⁽¹⁵⁾の考え方から、これをモデル化した沿面を使用し、局部アーク放電の観点にたってその放電特性が種々の条件下で報告されている。沿面モデルとしては、一般に電解質水溶液表面上に針対針電極⁽¹⁶⁾あるいは針対平板電極^{(17)~(18)}を配

置したもの、細長い方形⁽¹⁹⁾や三角形⁽²⁰⁾の人工湿潤汚損帯の両端に電極を配置したものなどがある。印加電圧としては交流電圧^{(15)~(21)~(22)}、あるいはインパルス電圧^{(17)~(18)}が用いられ、いずれの場合においてもこのような導電性沿面のフラッシュオーバー電圧は著しく低下し⁽²³⁾、また交流フラッシュオーバー時においても、その最終段階はインパルス破壊の様相を呈すると考えられている⁽¹⁶⁾。

しかるに、導電性沿面のフラッシュオーバー現象の研究には、結局、インパルス電圧印加時の諸特性について検討する必要がある。そのため、フラッシュオーバー電圧に及ぼす印加電圧の波形・極性、水溶液の液厚・濃度の影響や局部放電進展特性など、これらに関する多くの研究結果が報告されている^{(17)~(18)~(24)~(28)}。しかしながら、そのフラッシュオーバー機構の解明に本質的に極めて重要なインパルス電圧印加時の沿面放電の様子を高速時間分解し、詳細に調べた報告はこれまで比較的少ない⁽²⁴⁾。

そこで、著者らは導電性沿面のインパルス破壊の進展に着目し、本論文ではまず最初にその基礎として種々の電解質水溶液表面上に配置した針対平板ギャップの最小フラッシュオーバー電圧特性について述べる。次にカラーシュリーレン法・電圧さい断法・静止カメラなどを用いて、水面上フラッシュオーバー前駆現象としてインパルス電圧印加に伴って生ずる密度変化を観測、その進展に及ぼす針端極性、水溶液の液厚・導電率および進展形状などについて考察を行なった。更に、観測系にイメージコンバータカメラを付加することによって、密度変化進展の特徴やそのコントラストの経時変化、平均進展速度および進展機構などについても考察を加えた。これらの結果の一部は既に報告^{(29)~(30)}したが、ここではその後得られた結果を含め、まとめて報

Studies of Creeping Discharge on the Surface of Electrolytic Aqueous Solution by Schlieren Method. By Yoshitaka Nakao, Member, Katsunori Miyagi, Member & Taikichi Hattori, Member (Muroran Institute of Technology).

中尾好隆: 正員, 室蘭工業大学

宮城克徳: 正員, 室蘭工業大学〔現在, (株)明電舎〕

服部耐吉: 正員, 室蘭工業大学

告する。

2. 実験装置および方法

図1はカラーシュリーレン法光学系の配置図を示す。ここでは、通常の二面对向法モノクロシュリーレン法光学系 (B, C, E はそれぞれコリメータレンズ、ピンホールスリット、ナイフエッジを示し、凹面鏡 D, D' (有効径: 150 mm, 進点距離: 1.5 m) は上下 3 m の間隔に配置されている) における C と D の間にカラーシュリーレン用分光装置 SP (コリメータレンズ 2 個と分散率可変プリズムからなる) が挿入されている。印加電圧波形は $(0.8 \times 300) \mu\text{s}$ の正および負インパルス電圧 (波高値: V_m) である。この場合、放電始動用球ギャップ (動作安定化のため重水素ランプによって紫外線照射されている) の放電光をホットセルで受け、その出力を 2 台のディレイパルス発生器に導き、それぞれマイクロフラッシュ (せん光時間: 約 $3 \mu\text{s}$) および電圧さい断用有孔球ギャップ (さい断時間: t_{ch}) をトリガした。なお、電圧さい断前約 $1 \mu\text{s}$ 以内にマイクロフラッシュが動作するように、それぞれ遅延時間が調整されている。

図2は密度変化進展の時間変化を調べるために用いたイメージコンバータカメラ ICC を含む実験回路構成図である。まず、マニュアルボタンでキセノンフラッシュ A (せん光時間: 50 および $200 \mu\text{s}$) をせん光させ、2本のライトガイド ($5\text{mm}\phi \times 5\text{m}$) によってシールドルーム内に納めたホットセルトリガユニットに導く。その後、ディレイパルス発生器を経て、それぞれインパルス電圧発生装置およびイメージコンバータカメラがトリガされる。ただし、蒸留水で $V_m = \pm 16\text{kV}$ 印加のような高速現象を撮影する場合には、現象とカメラとの同期を確実にするため、IG の放電始動球

図1 カラーシュリーレン光学系配置図

Fig. 1. Arrangement of color Schlieren optical system.

図2 実験回路構成図

Fig. 2. Schematic diagram of experimental circuit.

図3 テストセルおよび電極配置図

Fig. 3. Schematic diagram of test cell and electrode arrangement.

ギャップの放電光をホットセルトリガユニット (1) に導き、ICC をトリガした。さい断ギャップは、フラッシュオーバー時における ICC 陰極面の損傷および針電極の消耗を避けるためのものである。高速撮影に用いたフィルムはすべてポラロイドフィルム (47 形) で、各撮影結果はストレージオシロスコープ [ソニー・テクトロニクス (株) 製, 7834 形] によって同時に撮影したモニターパルス波形と比較されている。各測定値は、最低 10 個のデータを平均したものである。なお、本実験においては IG の始動球ギャップが放電した瞬間を現象の時間基準 ($t=0$) とした。

図3は電極配置を示し、水面に対して上から下へ平行光線が透過できるように、テストセルの底面にはオプティカルガラス (縦 $130 \times$ 横 $180 \times$ 厚さ 5 mm) が取付けられている。電圧印加側針電極にはタングステン線 (電解研磨後曲率半径: $50 \mu\text{m}$)、接地側平板電極には黄銅を用い、本実験では針対平板電極間距離 d は 65 mm 一定とした。なお、各試料の作成にあたり、水道水をイオン交換樹脂で処理した後、更に 2 段蒸留して得た蒸留水を基準液とした。電解質水溶液の導電率の測定には、卓上形デジタル導電率計 [電気化学計器 (株) 製, AO-6 形, 測定精度 $\pm 3\%$] を用いた。

3. 実験結果および考察

〈3・1〉 最小フラッシュオーバー電圧特性 以下の実験における基礎として、まず針対平板電極系の最小フ

表 1 各種電解質水溶液導電率 (20°C)

Table 1. Conductivity of several electrolytic aqueous solutions (20°C).

試 料	濃度 (規定度) C (N)	導電率 σ (S/cm)
KCl	1×10^{-1}	1.21×10^{-2}
	1×10^{-2}	1.36×10^{-3}
	1×10^{-3}	1.47×10^{-4}
	1×10^{-4}	1.84×10^{-5}
KI	1×10^{-1}	1.16×10^{-2}
	1×10^{-2}	1.25×10^{-3}
	1×10^{-3}	1.43×10^{-4}
	1×10^{-4}	1.57×10^{-5}
$MgCl_2$	1×10^{-1}	8.55×10^{-3}
	1×10^{-2}	1.00×10^{-3}
	1×10^{-3}	1.12×10^{-4}
	1×10^{-4}	1.31×10^{-5}
$AlCl_3$	1×10^{-1}	6.72×10^{-3}
	1×10^{-2}	9.56×10^{-4}
	1×10^{-3}	1.15×10^{-4}
	1×10^{-4}	1.30×10^{-5}
$MnCl_2$	1×10^{-1}	6.39×10^{-3}
	1×10^{-2}	9.17×10^{-4}
	1×10^{-3}	9.66×10^{-5}
	1×10^{-4}	1.15×10^{-5}
$NaHCO_3$	1×10^{-1}	6.56×10^{-3}
	1×10^{-2}	7.86×10^{-4}
	1×10^{-3}	8.30×10^{-5}
	1×10^{-4}	8.82×10^{-6}
NaCl	1×10^{-1}	4.87×10^{-3}
	1×10^{-2}	6.48×10^{-4}
	1×10^{-3}	7.32×10^{-5}
	1×10^{-4}	8.24×10^{-6}
蒸 留 水	—	2.32×10^{-6}
雨 水	—	7.20×10^{-5}
海 水	—	4.64×10^{-2}

ラッシュオーバー電圧特性について検討した。表 1 は種々の電解質水溶液の濃度 C (規定度 N) に対する導電率 σ (S/cm) の関係を示し、表中、更に基準液とした蒸留水および工学的観点から雨水・海水の導電率も示されている。これらの結果から σ は C にほぼ比例し、各水溶液の σ の値はだいたい塩化カリウム水溶液と塩化ナトリウム水溶液との間に含まれ、溶質の種類による著しい差異は見られない。

図 4 は塩化カリウム水溶液 ($\sigma=147 \mu\text{S/cm}$) について、針対水面間距離 d_0 と水面上最小フラッシュオーバー電圧 $V_{\min}$ および針-水面間気中ギャップで放電が生ずる最小火花電圧 V_0 の関係を示す。この結果、本実験条件の場合 d_0 を 5.0 mm および 10.0 mm と大にすると V_0 は $V_{\min}$ に近い値となり、更に針端極性による $V_{\min}$ の差異も明りようでなくなることが知れる。

このように、 d_0 を大にすると針端からの局部放電

塩化カリウム水溶液: $\sigma=147 \mu\text{S/cm}$

図 4 針-水面間距離 d_0 と最小フラッシュオーバー電圧 $V_{\min}$ の関係Fig. 4. Relation between point-water surface distance d_0 and minimum flashover voltage $V_{\min}$.表 2 各種電解質水溶液の導電率 σ と最小フラッシュオーバー電圧 $V_{\min}$ の比較Table 2. Comparison of conductivity σ and minimum flashover voltage $V_{\min}$ for several electrolytic aqueous solutions.

試 料	導 電 率 σ	$V_{\min}$ (kV)	
		正 針	負 針
蒸 留 水	$2.32 \mu\text{S/cm}$	17.68	—
KCl	$18.4 \mu\text{S/cm}$	12.78	15.78
KCl	$147.0 \mu\text{S/cm}$	7.70	9.56
$MnCl_2$	$147.0 \mu\text{S/cm}$	7.84	9.64
$AlCl_3$	$147.0 \mu\text{S/cm}$	7.52	9.44
NaCl	$147.0 \mu\text{S/cm}$	8.00	9.16
$MgCl_2$	$147.0 \mu\text{S/cm}$	8.00	9.76
$NaHCO_3$	$147.0 \mu\text{S/cm}$	8.48	10.66
$NaHCO_3$	$18.4 \mu\text{S/cm}$	13.52	17.40
雨 水	$72.0 \mu\text{S/cm}$	8.98	11.04
海 水	46.4 mS/cm	3.72	3.90

$h=17 \text{ mm}$, $d=65 \text{ mm}$, $d_0=0.5 \text{ mm}$

の発生に高い電圧を要し、更に針-水面間気中ギャップで火花放電が生ずれば必ず水面上針-平板間でフラッシュオーバーが生ずることとなる⁽¹⁸⁾⁽²⁶⁾。従って、本研究の目的である水面上インパルス破壊の進展過程を明らかにすることは困難となる。本研究では、以上のことおよび従来の研究結果⁽¹⁸⁾⁽²⁶⁾を考慮して d_0 を 0.5 mm 一定とした。

表 2 は種々の電解質水溶液について導電率 σ と最小フラッシュオーバー電圧 $V_{\min}$ の関係を示したものである。これらの結果から、 σ の増大と共に $V_{\min}$ は漸次減少し、電解質水溶液中放電における同様に、熱的破壊機構が関与するようになって極性効果が消失傾向にあること⁽³¹⁾⁽³²⁾、 $\sigma=18.4 \mu\text{S/cm}$ および $147 \mu\text{S/cm}$ における測定値の比較から溶質の影響は顕著に認められないことなどが知れる⁽²⁶⁾。

なお、海水については導電率が著しく大きいため、印加電圧波高値 V_m は針-水面間で放電が生ずると初期に設定した値に比べ著しく低くなり、かつ電圧が急速に減衰してさい断された様相を呈し、特異な放電音と発光を伴うなど、ほかの電解質水溶液の場合に比べ著しく放電が進展しにくく、正確なフラッシュオーバー電圧の測定は非常に困難であった⁽¹⁷⁾⁽²⁸⁾。従って、表2に示した値は針-水面間で放電したときの値を参考として示した。

以上、種々の電解質水溶液について調べた結果、本研究においては物理定数など詳しく調べられ、容易に安価に手に入ることから、従来からもしばしば用いられてきている塩化カリウム水溶液および蒸留水を取上げ、以下種々検討を行なった。

〈3・2〉 カラーシュリーレン法による密度変化進展特性 通常のモノクロシュリーレン法においては、その原理に従い、現象の発生に基づく屈折率の変化によって観測部の密度変化がその周囲に対して明暗のコントラストとして現われるが、そのシュリーレン像の内部状態を詳細に知ることは困難である。そこで、本節ではカラーシュリーレン法を導入することによって密度変化領域を色変化でとらえ、発光を伴う放電部分とこれに関連する部分とを識別することを試みた。

図5、図6は $V_m = \pm 13.8 \text{ kV}$, $t_{ch} = 5 \mu\text{s}$, $h = 10 \text{ mm}$ において蒸留水 D.W. ($\sigma = 2.32 \mu\text{S/cm}$) および塩化カリウム水溶液 ($\sigma = 147 \mu\text{S/cm}$) に対して得られた典型的な密度変化進展状態を示す。これから、密度変化領

図5 密度変化進展のカラーシュリーレン写真(1)

Fig. 5. Color Schlieren photographs of propagation of the density changes (1).

図6 密度変化進展のカラーシュリーレン写真(2)

Fig. 6. Color Schlieren photographs of propagation of the density changes (2).

域は周囲(黄色系)に対して一様のコントラストとして現われず、針端から伸びた放電の幹となる部分(黒色または濃い青色)と、これに基因してその周囲に見られる部分(青色または青白色)とが認められる。前者では水分子の解離・励起・電離が顕著で強い発光を伴い、後者では主として水-空気界面において水の気相化が進行していると考えられる。

図7は塩化カリウム水溶液に対する密度変化進展距離 l_d と液厚 h との関係を示す。

以上の結果から次のことがわかる。

(i) h の大小によって l_d が増減し、著しい液厚効果が存在する。

(ii) 密度変化の進展形状には著しい極性効果が存在する。すなわち、正針の場合樹枝状、負針の場合 σ 小において非同心円形木葉状、 σ 大において細長い木葉状を呈する。

(iii) 従来のモノクロシュリーレン像では得られにくい密度変化の内部状態を色変化で識別することができ(ここでは白黒のコントラストとして認められる)、中心の黒い部分のストリーマ状密度変化と、これを包絡する密度変化との分離が認められ、この特徴は負針において特に顕著に見られる。

〈3・3〉 イメージコンバータカメラによる密度変化進展特性 試料としては導電率の極端に異なる蒸留水 D.W. ($\sigma = 2.32 \mu\text{S/cm}$) および塩化カリウム水溶液 ($\sigma = 18.4, 147 \mu\text{S/cm}$) を使用し、前者は正負両極性、後者は主として負極性の場合について調べた。なお、各測定点は平板側に最も進展したものを直線近似し、

塩化カリウム水溶液: $\sigma = 147 \mu\text{S/cm}$, $t_{ch} = 5 \mu\text{s}$

図7 l_d-h 曲線

Fig. 7. l_d-h curves.

約 10 個のデータを平均したものである。

(1) 印加電圧の影響 図 8 は塩化カリウム水溶液および蒸留水においてインパルス電圧波高値 V_m を変化した場合、電圧印加後時間 t に対する密度変化進展距離 l_d を針端負極性についてまとめたものである。また、これらの典型的一例を図 9 に示し、(a)、(b) 図は 5×10^5 こま/秒 (露出時間/こま: 400 ns)、(c) 図は 1×10^6 こま/秒 (露出時間/こま: 200 ns) にて撮影したものである。

これらを含めた多くの結果から次のことがわかる。

(i) 電圧印加後針端にストリーマ状密度変化が出現するまでにある時間遅れが存在し、その遅れは V_m 大と共に小になる。

(ii) 密度変化出現後、電圧さい断までの平均進展距離 l_d は時間と共にほぼ直線的に増加し、その増加率は V_m を大にするほど顕著になる。

グラフ No.	試料	σ (μ S/cm)	V_m (kV)	t_{ch} (μ s)
(1)	塩化カリウム水溶液	147	-8	7.3
(2)			-10	6.6
(3)			-8	7.4
(4)		18.4	-10	6.9
(5)			-13.8	5.2
(6)			-13.8	5.3
(7)	蒸留水	2.32	-16	5.2

$h=17$ mm

図 8 密度変化進展に及ぼす印加電圧の影響(負針)

Fig. 8. Effect of applied voltage on propagation of the density changes (point polarity: negative).

(iii) 密度変化の進展状態に、その幹となるストリーマ状密度変化とそれらを包絡する密度変化が認められ、これは前節で得られたカラーシュリーレン像の特徴と同様と見られる。すなわち、電圧印加後ある時間経過してまず針端に非常にコントラストの弱いストリーマ状密度変化が出現、時間と共にそれを包絡する密度変化も見られるようになり、コントラストを強めつつ平板電極方向に進展する経時変化が認められる。

(iv) 図 9 (a) $V_m = -10.0$ kV ($t_{ch} = 6.5 \mu$ s, 4 と 5 こまの間でさい断) あるいは (c) 図 $V_m = -16.0$ kV ($t_{ch} = 4.7 \mu$ s, 6 と 7 こまの間でさい断) などにおいて見られるように、電圧さい断後密度変化の形状・大きさに変化は認められず (前者で 5~8 こま, 後者で 7~10 こま), そのコントラストのみが次第に強くなって行き、またストリーマ状密度変化とこれを包絡する密度変化がより顕著に認められる。これは電圧さい断までに生成された荷電粒子の消滅過程を示すものと考えられる。

図 10 は本実験とは若干条件が異なるが、試料として水道水 ($\sigma = 100 \mu$ S/cm 程度) を用いた場合の沿面放電を ICC にイメージインテンシファイヤを組合せて直接撮影した一例を示し ($t_{ch} = 0.7 \mu$ s, 10~11 こま間で電圧さい断), 電圧さい断後ストリーマの進展停止とその発光の消滅が認められる。このことは水中ストリーマ放電においても同様に観測されている⁽³³⁾。これに対しシュリーレン法による実験の場合、電圧さい断後の沿面状態をも観測することが可能で、これによ

図 9 密度変化進展の典型的こま撮り写真(1)(負針)

Fig. 9. Typical framing photographs of propagation of the density changes (1) (point polarity: negative).

図 10 水面上ストリーマ放電の進展(負針)

Fig. 10. Propagation of streamer discharge on the water surface (point polarity: negative).

ってさい断までの沿面放電の状態を理解することができるという点で、発光放電自身を直接撮影した場合とは著しく異なる。

(v) 電圧さい断後、ストリーマ状密度変化に沿って針端に中心を持たない多数の非同円形密度変化の出現〔図 9 (b) $V_m = -13.8$ kV における 5 こま目以降, (c) $V_m = -13.8$ kV における 6 こま目以降および $V_m = -16.0$ kV における 7 こま目以降など〕と、その経時変化が明りょうに認められる。この非同円形密度変化は、ストリーマと見られる前記ストリーマ状密度変化の進展に伴って発生するものと見られ、このことから負針の場合、密度変化の進展はステップ状を呈するものと考えられる。

(2) 導電率の影響 図 11 は導電率の異なる試料において、同じ V_m のインパルス電圧を印加した場合の密度変化進展特性を示す。導電率の相違による進展形状は図 9 (a)~(c) を比較することによって知ることができる。これらの結果から、(iii)~(v) 項の特徴のほかに次のことが知れる。

グラフ No.	試料	σ (μ S/cm)	V_m (kV)	t_{ch} (μ s)
(1)	塩化カリウム水溶液	147	-10	6.6
(2)	液	18.4		6.9
(3)		18.4	-13.8	5.0
(4)	蒸留水	2.32		5.3

$h=17$ mm

図 11 密度変化進展に及ぼす導電率の影響(負針)

Fig. 11. Effect of conductivity on propagation of the density changes (point polarity: negative).

蒸留水: $\sigma=2.32 \mu$ S/cm

グラフ No.	V_m (kV)	t_{ch} (μ s)
(1)	+13.8	4.5
(2)	-13.8	5.3
(3)	+16.0	2.0
(4)	-16.0	5.2

1×10^6 こま/秒, $h=17$ mm

図 12 密度変化進展の極性効果

Fig. 12. Polarity effect of propagation of the density changes.

(vi) 導電率 σ の大小によって密度変化の進展が著しく影響を受け、 σ 小に比べ σ 大の場合 l_d 大で時間と共にその差が大となる。

(vii) 密度変化の形状にも σ は本質的に影響を及ぼし、 σ が 18.4μ S/cm 程度に小さくなると前記同様電圧さい断後針端に中心を持たない非同円形密度変化が認められるところから、負針における密度変化はステップ状に進展するものと見られ、進展機構を考える場合、極めて重要な特徴と考えられる。

(3) 密度変化進展の極性効果と平均進展速度

以上は主として針端負極性についての結果であるが、フラッシュオーバー電圧など種々の沿面フラッシュオーバー特性と同様、密度変化の出現・進展状態に関しても著しい極性効果の存在することが既に報告されている⁽²⁴⁾。ここでは特異な進展状態を示す導電率 σ の小さい蒸留水を用いて、密度変化進展の極性効果についてより詳細に検討した。

図 12 は $V_m = \pm 13.8$ kV および $V_m = \pm 16.0$ kV における l_d - t 曲線を示す。これからストリーマ状密

図 13 密度変化進展の典型的こま撮り写真(2) (正針)

Fig. 13. Typical framing photographs of propagation of the density changes (2) (point polarity: positive).

度変化出現後、負針に比べ正針のほうが l_d^+ が著しく大で、また負針の場合と同様 V_m 大のほうが l_d^+ 大、電圧さい断後その進展は停止することが知れる。

図 13 は針端正極性における典型的な密度変化進展状態の一例を示し、撮影速度は 1×10^6 コマ/秒 (露出時間/コマ: 200 ns) である。これらを図 9 (c) と比較することによって針端極性による進展状態の特徴を知ることができる。(a) 図は 2~3 コマ間で電圧が印加され、5~6 コマ間でフラッシュオーバー、ほぼ同時に電圧がさい断された場合 ($t_{cH} = 3.1 \mu s$)、(b) 図は 1~2 コマ間で電圧が印加され、フラッシュオーバー直前の 4~5 コマ間で電圧がさい断された場合 ($t_{cH} = 2.3 \mu s$) である。

これらを含めた多くの写真を詳細に観測した結果、次のことがわかる。

(vii) 電圧さい断後密度変化の進展は停止し、その形状は負針に比べて複雑で樹枝状を呈する。

(ix) シュリーレン図形にはストリーマ状密度変化と、これを包絡する密度変化ならびにこれらのコントラストの経時変化が明りょうに認められる。

(x) 電圧さい断後時間の経過と共に密度変化領域の広がりなど変形する様子が認められる。これは (iv) 項で述べられたと同様、さい断までに生成された荷電粒子の消滅過程を示すものと考えられる。

以上の結果を含めた多数のデータから、密度変化の平均進展速度 $\bar{v}_m$ を整理したのが表 3 である。これから、 $\bar{v}_m$ は負針に比べ正針のほうが大、特に蒸留水の

表 3 密度変化の平均進展速度

Table 3. Mean velocity of the density change.

極 性	導 電 率 $\sigma (\mu S/cm)$	印加電圧波高値 $V_m (kV)$	平均進展速度 $\bar{v}_m (cm/s)$
正 針	D.W. 2.32	+16.0	1.7×10^6
		+13.8	1.1×10^6
負 針	KCl 147	-10.0	3.1×10^5
		-13.8	1.5×10^6
	D.W. 2.32	-13.8	1.7×10^5
		-16.0	2.0×10^5

場合、本実験条件では約 5~10 倍大きいこと、 V_m および σ によっても著しく影響を受けることが知れる。 $\bar{v}_m$ の針端極性および σ による差異は、フラッシュオーバー電圧の大小に対応すると考えられる。なお、これらの値は局部アークの進展に関し、従来報告されている⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾、正針で $5 \times 10^4 \sim 5 \times 10^5$ cm/s、負針で $5 \times 10^3 \sim 2 \times 10^4$ cm/s (いずれもフラッシュオーバー電圧印加時の値) より若干大きい。

4. む す び

汚損湿潤がよいような導電性を有する固体誘電体表面のフラッシュオーバー現象の基礎研究として、水面上に配置した針対平板電極系を選び、インパルス破壊進展に伴って発生する密度変化をシュリーレン法・電圧さい断法およびイメージコンバータカメラなどを用いて観測した。その結果、これまで得られていない導電性沿面における密度変化進展の種々の特徴が見いだされた。以下、得られた結果を要約すると次のとおりである。

(1) 密度変化の進展はインパルス電圧波高値 V_m 、試料の液厚 h (液厚効果) および導電率 σ の影響を受け、 $V_m \cdot h \cdot \sigma \rightarrow$ 大と共に進展距離 l_d 大となる。

(2) 密度変化の進展は針端極性によっても相違し、その平均進展速度 $\bar{v}_m$ は $\bar{v}_m^+ > \bar{v}_m^-$ である。また、その値は V_m, h, σ によっても著しく影響を受けるが、正針において約 10 倍も大となる。これは油中沿面放電の場合⁽⁷⁾の約 2 倍に比べ著しく異なる。

(3) 密度変化の進展形状に著しい極性効果が存在する。すなわち、正針の場合樹枝状、負針の場合 σ 小において非同円形木葉状、 σ 大において細長い木葉状を呈し、またそれらには幹となるストリーマ状密度変化と、これを包絡する密度変化およびこれらのコントラストの経時変化が認められ、これは負針において特に顕著に見られる。

(4) インパルス電圧さい断後の密度変化は、その

形状および大きさに変化が見られないところから、その進展は急速に停止し、そのコントラストのみが強くなる経時変化が見られ、(3)項の特徴がより顕著に認められる。

(5) 針端負極性で導電率が $\sigma = 18.4 \mu\text{S}/\text{cm}$ 程度に小になると、電圧さい断後針端に中心を持たない非同心円形木葉状密度変化が認められ、電圧さい断までのインパルス破壊はステップ状に進展するものと考えられる。

以上は、水面上フラッシュオーバーの前駆現象として、インパルス破壊の進展に伴って発生する密度変化に着目し、水面上のフラッシュオーバー機構の解明に寄与することを目的に種々検討したものである。この密度変化は、本研究とは媒質が著しく異なるが、絶縁液体中の沿面放電⁽⁴⁾あるいは絶縁液体中の放電⁽³⁴⁾⁽³⁵⁾においても観測されている。しかしその本質については、破壊機構を考える場合非常に重要であるとの立場から諸説が提案されているが⁽³⁴⁾⁽³⁵⁾、まだ明らかでない。

本研究の場合、この密度変化は水-空気界面における電子過程に基因する、主として水分子の解離・励起・電離に基づくもので、それらが混存した状態にあり、ストリーマ状密度変化はストリーマ自身に対応すると見られ、後に局部アークに転化するものと考えられる。しかし、 σ の大小によって密度変化の進展状態が著しく相違することから、 σ 大の場合当然熱破壊的機構を考慮する必要がある、今後電流の測定などに関連させて検討する予定である。

終わりに、本研究のきっかけを与えて下さいました北海道大学名誉教授 坂本三郎先生、日ごろ御指導、御べんたつを賜わる北海道大学工学部 田頭博昭教授ならびに同研究室各位、研究遂行上種々御援助いただきました本学電気工学科教官各位、実験およびデータ整理に御協力いただいた岡和喜男技官、卒論学生 石田隆洋、向 雅也の両君に対し深く感謝申し上げます。(昭和 57 年 4 月 23 日受付、同 57 年 11 月 24 日再受付)

文 献

- (1) 嶋崎・常安・赤崎:「正および負インパルス電圧印加時の沿面放電の進展過程」, 電学論 A, 99, 527 (昭 54-11)
- (2) 千葉・川島:「真空中沿面放電の進展」, 昭 56 電気学会全大(2), S. 2-1
- (3) 室岡・小山:「真空中沿面放電に及ぼす電圧および圧力効果」, 電学論 A, 101, 519 (昭 56-10)
- (4) 大垣:「変圧器油中沿面放電のシュリーレン法による観測」, 電気学会放電研資, ED-77-7 (昭 52-5)
- (5) 岸田・佐藤・鳥山:「油中沿面放電における極性効果」, 同上, ED-78-33 (昭 53-6)
- (6) 大久保・池田・本多:「油中沿面放電の進展特性」, 同上, ED-80-67 (昭 55-7)
- (7) 大久保・池田・本多:「油中沿面放電」, 昭 56 電気学会全大(2), S. 2-5
- (8) 大槻・堀越:「液面電弧遮断器」, 電学誌, 54, 385 (昭 9-5)
- (9) 鳥山・坂本:「液体表面上の衝撃コロナの研究(第 2 報)」, 同上, 5, 484 (昭 19-11-12)
- (10) S. Sakamoto: "Impulse Corona on the Surface of Water Solutions", Memoirs Fac. Eng. Hokkaido Univ., VIII, 3 (1950)
- (11) L. B. Snoddy & J. M. Beams: "Progressive Breakdown in a Conducting Liquid", Phys. Rev., 55, 879 (1939)
- (12) 篠原・円城寺:「湿面上的放電」, 電気工学論文集, 2, 23 (昭 25-6)
- (13) 鳥塚・斎藤・北川:「導電性物体に於ける沿面放電機構の研究(第 1 報)」, 電気学会放電研資, ED-77-10 (昭 52-5)
- (14) 成田・後藤:「導電性媒質表面における放電ストリーマの進展について」, 同上, ED-80-45 (昭 55-6)
- (15) R. Wilkins: "Flashover voltage of high-voltage insulators with uniform surface-pollution films", Proc. Instn Elect. Engrs, 116, 457 (1969)
- (16) 三田・竹村・近藤・大窪:「導電性沿面における閃絡現象」, 電試集報, 22, 264 (昭 33)
- (17) 赤崎・常安:「電解質水溶液表面の衝撃フラッシュオーバー機構」, 電学誌, 88, 2117 (昭 43-11)
- (18) 松尾・大重・柚木・三田:「導電性沿面の衝撃放電特性」, 同上, 89, 1727 (昭 44-9)
- (19) R. Wilkins: "Arc Propagation along an electrolyte surface", Proc. Instn Elect. Engrs, 118, 1886 (1971)
- (20) 西村・中島:「電解液面を進展する局部アーク放電の特性」, 電学論 A, 97, 77 (昭 52-2)
- (21) 中島:「電解液皮膜上に進展する電弧に就いて」, 電学論, 3, 505 (昭 17-11)
- (22) B. F. Hampton: "Flashover mechanism of polluted insulation", Proc. Instn Elect. Engrs, 111, 985 (1964)
- (23) 西・中島:「汚損碍子類の電圧時間特性の変動」, 電学誌, 61, 412 (昭 16-8)
- (24) F. D. A. Boylett & I. G. Maclean: "The propagation of electric discharges across the surface of an electrolyte", Proc. Roy. Soc. Lond. A, 324, 469 (1971)
- (25) 松尾:「局部放電の進展モデルによる電解質水溶液面の沿面フラッシュオーバー電圧の計算」, 電学論 A, 97, 623 (昭 52-12)
- (26) 赤崎・保刈:「電解質水溶液面上の衝撃フラッシュオーバー特性」, 電学誌, 82, 768 (昭 37-5)
- (27) 赤崎・常安:「電解質水溶液の衝撃沿面閃絡の機構について」, 九大工学集報, 35, 438 (昭 37-12)
- (28) 常安・赤崎:「電解質水溶液の衝撃沿面放電について」, 同上, 37, 313 (昭 40-1)
- (29) 宮城・中尾・服部:「水面上インパルス破壊の進展過程」, 電気学会放電研資, ED-82-5 (昭 57-2)
- (30) 宮城・中尾・服部:「水面上インパルス破壊進展の超高速撮影装置による観測」, 昭 57 電気学会全大, 105
- (31) 宮地:「電解質水溶液の破壊について」, 電学誌, 77, 32 (昭 32-1)
- (32) 中尾・松尾・服部:「水中放電における気泡発生ならびにその影響」, 室工大研報, 9, 343 (昭 51-12)
- (33) 中尾・柏・坂本:「水中ストリーマ放電の進展に関する研究」, 電学論 A, 97, 521 (昭 52-10)
- (34) 山下:「液体中の伝導・破壊現象の光学的観測」, 放電研究, No. 86 (昭 56-6)
- (35) 石川・山下・天野:「絶縁油における破壊前駆密度変化の経時変化」, 電学論 A, 101, 293 (昭 56-5)