電解質水溶液面における局部放電の進展に伴う衝撃波と密度変化の観測

正員 竹之内修 (航空大)

正員 山下敬彦 (長崎大)

正員 藤島友之 (長崎大)

正員 松尾寿夫 (長崎大)

Observation of Shock Waves and Density Changes Generated by a Local Discharge Propagating on an Electrolytic Solution

Osamu Takenouchi, Member (Civil Aviation College)

Takahiko Yamashita, Member, Tomoyuki Fujishima, Member, Hisao Matsuo, Member (Nagasaki University)

In this paper, we observed a local discharge propagation on an electrolytic solution surface, which simulates the surface of wet polluted insulators, under an impulse voltage. Resistivity of the electrolytic solution was changed in the range of $85 \Omega \cdot \text{cm} \sim 3 \text{ k} \Omega \cdot \text{cm}$. To examine a local discharge propagation, we used a Schlieren technique. A ray of light from a spark light source was transmitted to an electrode system.

As a result, we found shock waves and density changes. Shock waves were generated from tip parts of a local discharge. Velocity of the shock wave generated from a discharge during the local discharge propagation was about Mach 1.1. From a measurement of Mach angle, a local discharge propagation velocity was obtained. That velocity at starting point of the propagation was in the range of Mach 2.5 $\sim$ 4.7 for $85 \Omega \cdot \text{cm}$ of the resistivity of the electrolytic solution, Mach 3.5 $\sim$ 5.4 for $600 \Omega \cdot \text{cm}$, Mach 4.3 $\sim$ 5.7 for $3 \text{ k} \Omega \cdot \text{cm}$ respectively.

キーワード：汚損浴面放電，電解質水溶液，シュリーレン法，衝撃波

1. まえがき

近年電力需要の増大に伴い送電電力が増大し、送電電圧は飛躍的に高くなっている。それにしたがって、送電系統のがいしの汚損が益々重大な問題となり、汚損がいし表面での放電進展のメカニズムの解明が重要となっている。

そこで著者は、インパルス電圧印加のもとで、汚損湿潤したがいし表面を模擬した電解質水溶液面に発生する局部放電の種々の特性を調べてきた^{(1)～(4)}。今回は、シュリーレン法を用いて、局部放電の進展の際に発生する衝撃波と密度変化を観測した。これまでにシュリーレン法によって局部放電を観測した研究は数少ない^{(5)～(7)}。文献(5)では、局部放電進展時の液面を観測し、局部放電の周囲には水の動揺が生じていて、その水の動揺は局部放電の先端では小さく、水の動揺によって液面にできるくぼみに沿って局部放電は進展するなど述べている。文献(6)、(7)では、シュリーレン法にイメージコンバータカメラを付加することによって、局部放電進展時に生じる密度変化進展の特徴やコントラストの時間的変化、密度変化の平均進展速度などについて調べている。このように、溶液面を局部放電が進展する時に発生する衝撃波とその進展状態およびこの衝撃波と局部放電との関係について詳細に調べた報告は見当たらない。

本論文では、電解質水溶液の抵抗率を $85 \Omega \cdot \text{cm} \sim 3 \text{ k} \Omega \cdot \text{cm}$ の範囲で変えて、放電路側面からシュリーレン像の撮影を行い、局部放電の進展状態を調べた。その結果、電解質水溶液の単位長あたりの抵抗が $17 \sim 600 \Omega / \text{cm}$ の場合に、局部放電進展によってその周囲の空間に発生する衝撃波と放電路の密度変化を観測することができた。さらに、衝撃波の進展速度から局部放電の進展速度を求め、また衝撃波の波源を調べ、局部放電進展時の状態について考察した。

2. 実験装置と実験方法

図1に本研究で使用した電極系を示す。電解質水溶液として塩化カリウム水溶液を用いた。この溶液を、長さ20cm、幅5cm、深さ1cmのベークライト製の容器に、液面が表面張力で盛り上がる約1.1cmの深さまで入れた。電極には直径1mmの針電極(タングステン製)と厚さ2mmの平板電極(銅製)を図に示すように配置し、針電極と平板電極間の距離を10cm、針電極先端と水溶液面間の距離を1mmとした。平板電極は 5Ω の電流検出抵抗を通して接地した。針電極に $2/80 \mu \text{s}$ の正極性雷インパルス電圧を印加し、局部放電を発生させた。溶液の抵抗率 ρ は抵抗率計(HEC-110, DKK)で測定し、その値を $85 \Omega \cdot \text{cm}$ から $3 \text{ k} \Omega \cdot \text{cm}$ まで変化させた。この抵抗率の変化はがいしの汚損の程度に対応する。

各抵抗率の場合の印加電圧を表1に示す。印加電圧は、

図1 電極系

Fig. 1. An electrode system.

表1 各抵抗率の場合の印加電圧

Table 1. Applied voltage for each resistivity of electrolyte.

抵抗率 ρ ($\Omega \cdot \text{cm}$)	50%フラッシュオーバー電圧 V_{50} (kV)	印加電圧 V_a (kV)	V_a / V_{50} (%)
85	6.7	5.8	86.6
600	10.5	9.2	87.6
1,000	11.8	11.0	93.2
3,000	15.1	14.0	92.7

針-平板電極間がフラッシュオーバーしないように50%フラッシュオーバー電圧 V_{50} の85~95%とした。針-平板電極間がフラッシュオーバーすると、その強い光がシュリーレン像に重なって記録され、シュリーレン像が観測できなくなる。これを避けるため、このように V_{50} よりも少し低い電圧を印加した。したがって、観測の対象とした局部放電は、針-平板電極間の中央付近まで進展し衰退する。

図2に本実験で使用したシュリーレン光学系を上方から見た概略図を示す。シュリーレン法は二つの凹面鏡を用いる二面对向法である。光源には放電の発光を利用したスパーク光源（閃光時間 $2 \mu\text{s}$ 、溝尻光学工業）を用いた。光源から発生した光は、コンデンサレンズ、ピンホールを通過して凹面鏡に入射する。2つの凹面鏡（有効径25cm、焦点距離2.5m）の間（距離約8m）では光が平行光線となるように調整した。光は、溶液面と平行に、針-平板電極方向に直角に入射するようにした。電極系を通過した光を凹面鏡、全反射ミラーでカメラへ導き、途中の集光部にナイフエッジ

図2 実験装置の概略

Fig. 2. A schematic diagram of a Schlieren optical system.

エッジを用いることで、電極系に現れる密度変化の観測を行った。密度変化はカメラで記録し、ネガフィルム（ネオパン400、フジフィルム）上に保存した。スパーク光源の動作開始時間はデジタルディレイ装置（RE-70A、西日本電子）を用いて変化させ、放電開始後の任意の時間でのシュリーレン像を記録した。ネガフィルムに保存されたシュリーレン像は、フィルムスキャナー（coolscan、ニコン）でデジタル画像（白黒256階調）として取り出し、パーソナルコンピュータ（PC9801、NEC）で画像処理を行い必要な情報を抽出した。

3. 実験結果と検討

<3.1> 局部放電による空間の密度変化 図3(a)~(d)に溶液の抵抗率 $\rho = 600 \Omega \cdot \text{cm}$ として得られるシュリーレン像を示す。電圧印加からスパーク光源が発光するまでの時間（以下、観測時刻） t_s を変化させた放電を並べて示している。図3(a)~(d)で観測した局部放電はいずれも針電極先端からおよそ5cm程度進展し衰退する。これらのシュリーレン像中には、水溶液面上に白く現れる局

 図3 電解質水溶液面上を進展する局部放電のシュリーレン像 ($\rho = 600 \Omega \cdot \text{cm}$)

Fig. 3. Schlieren photographs of a local discharge propagating on an electrolytic solution surface.

部放電路上の密度変化を示す像（以下、放電路上の密度変化領域）と局部放電の弱い発光が記録された。局部放電の発光が弱いためシュリーレン像には放電路上の密度変化領域が明確に観測された。放電路上の密度変化領域は、 t_s の経過、すなわち局部放電の進展とともに平板電極方向へ広がっている。図3において、放電路上の密度変化領域は、(a)では拡がり続けている状態にあり、(b)～(d)では拡がり停止した状態にある。

一方、図3の水溶液面上方の空間に円弧状の密度変化領域が観測されている。後に示すように、その進展速度が音速を超えること、および局部放電が音速の数倍で進展していることから、針－平板電極間を進展する局部放電により発生した衝撃波である。この衝撃波は時間の経過とともに進展して行き、放電路上の密度変化領域のように拡がり停止することはない。

<3.2> 局部放電による衝撃波 図4に図3(c)を拡大したものを示す。放電路上の密度変化領域を調べると、幾つかの区切り目が存在する。同図では放電路上の密度変化領域にA、Bで示す2つの区切り目が観測されている。このような区切り目は溶液の抵抗率 $\rho = 85 \sim 3k \Omega \cdot \text{cm}$ の範囲で観測された。また、同図は、フィルムスキャナーで読みとった画像に濃度補正を行って衝撃波を抽出してある。さらに衝撃波面に点(・)を付けその形状を表示している。このシュリーレン像では、四つの円弧からなる衝撃波を観測できた。針電極に近い衝撃波から第1波、第2波、第3波、第4波とする。ここで、衝撃波が放射状に広がっていることから、点(・)の分布よりその衝撃波の発生源（以下、波源）を調べた。波源は各測定点までの距離が等しくなるように最小2乗法により求めた。図には波源－衝撃波間の距離を示している。

放電路上の密度変化領域はA、Bの区切り目により3つの領域（針電極の周囲にできる白く示された小さな領域と水溶液面上を横方向に広がる白く示された2つの領域）に分けられる。この分けられた領域の区切り目部に第2波、第3波の波源が、放電路上の密度変化領域の最先端部に第4波の波源があることがわかった。

次に、針－液面間に発生する放電で生じる図4の第1波のような衝撃波について、観測時刻 t_s とその進展距離（針－液面間の中央を原点とする）の関係を各抵抗率の場合に

図4 衝撃波とその波源 ($\rho = 600 \Omega \cdot \text{cm}$)
Fig. 4. Shock waves and the shock wave sources.

図5 衝撃波の進展特性
Fig. 5. Propagation characteristics of shock waves.

ついて調べた。その結果を図5に示す。この図の直線の傾きは衝撃波の進展速度を表す。観測した時間範囲 (20～130 μs) では衝撃波の進展速度は溶液の抵抗率に依存せずほぼ一定となっている。最小2乗法を用いて直線の傾きからその進展速度を求めた結果、約 389 m/s となりこれは音速 (25℃で 347m/s) の約 1.1 倍となる。

<3.3> 衝撃波の波源と放電路との関係 次に、シュリーレン像の撮影と同時に局部放電の静止写真を撮影し、密度変化と放電路との対応を検討した。静止写真は水溶液面の直上約 70cm の位置から撮影した。図6は溶液の抵抗率 $\rho \approx 85 \Omega \cdot \text{cm}$ の場合のシュリーレン像と静止写真を比較している。図6では衝撃波を明確に撮影するためにナイフ

図6 シュリーレン像と静止写真との比較
Fig. 6. Comparison between a Schlieren photograph and a still photograph.

エッジを調整したため、放電路上の密度変化領域を図4で示したような鮮明な像として得ることができなかった。この場合、静止写真より局部放電が針電極先端から3つの方向に進展していることが分かる。空間に生じている衝撃波の波源を前節の方法で求めると、それぞれシュリーレン像中のA, B, C, Dの位置になり、これは局部放電の先端付近（静止写真中のA, B, C, D）となった。このことから、衝撃波の波源は針電極から進展する局部放電の先端にあることがわかった。また、図6で、AからDに伸びる局部放電の先端付近で、放電路が2つに分かれている（D, Eの方向）が、枝分かれて生じた放電の先端（Eの箇所）から発生する衝撃波は観測されなかった。他のシュリーレン像と静止写真との比較においても同様な結果を得ている。すなわち、衝撃波は針一液面間に形成される放電が、平板電極方向へ進展して行く場合にのみ観測され、放電が途中で枝分かれする場合には、枝分れて生じた放電からは観測されなかった。一般に衝撃波は、物体が音速以上で進展する場合や急速な加熱等が空間に密度変化の不連続面を形成する場合に観測される。このことから、図6のEの方向に伸びる局部放電のように、針電極を出発点とせず、枝分かれてして衰退する局部放電の内部では衝撃波を発生するような急速な加熱は生じていないと考えられる。

＜3.4＞ 衝撃波より求めた局部放電の進展速度 空気中を音速以上で局部放電が進展すると、図7に示すような衝撃波が形成される。このとき、衝撃波面と局部放電の進行方向とが作る角度 μ をマッハ角という。このマッハ角 μ に関して衝撃波の速度を a 、放電の進展速度を u とすると

$$\sin \mu = a/u \cdots \cdots (1)$$

なる関係がある⁽⁸⁾。これを本実験で得られたシュリーレン像に適用し、局部放電の進展速度を算定した。この方法は、光電子増倍管を使用した方法⁽⁴⁾に比べ、局部放電が平板電極へ進展する間の進展速度の変化を連続的に調べられ、局部放電がどこで進展を停止しても、停止直前までの放電の進展速度を調べることができる。図8(a)にその算定方法

を示す。放電はシュリーレン像と同時に撮影した静止写真の中から、平板電極方向へほぼ真っ直ぐに進展しているものを選んだ。図8(a)に示すように、衝撃波面に点(・)を付け、この点を多項式で近似し、その傾きを任意の箇所求めてマッハ角を算定した。

局部放電の進展速度を調べるに当たって衝撃波の進展速度を求めておく必要がある。そこで、局部放電の進展中に生じる衝撃波の進展速度を算定した。図8(a)(b)にその算定方法を示す。観測時刻 t_s を変えて、シュリーレン像と同時に撮影した静止写真の中から、進展長がほぼ等しく、またその静止写真に対応する電流波形がほぼ同じであるシュリーレン像を選択した。選択の基準とした電流波形を図9に示す。このようにして選択された静止写真から得られる局部放電の進展距離と進展時間の関係はその静止写真に対応するどのシュリーレン像でもほぼ同じと考えられる。そこで、針電極からある一定の距離の放電路上の点から衝撃波面までの距離 r_a を各観測時刻 t_s の場合について測定した。図8(a)(b)は抵抗率 $\rho = 600 \Omega \cdot \text{cm}$ の場合である。図(a)と(b)との観測時刻の差 t_n は $10.8 \mu\text{s}$ で、この時間内の衝撃波進展距離 Δr_a は 0.4 cm であることがわかる。

このようにして各抵抗率の場合について観測されたシュリーレン像から、衝撃波進展距離 Δr_a と観測時刻の差 t_n との関係を調べた結果を図10に示す。いずれの抵抗率の場合も針電極から2～3 cm離れた放電路上の任意の点から発生する衝撃波の進展について調べたものである。この場合、衝撃波の進展速度は溶液の抵抗率に依存せずほぼ一定となっている。最小2乗法で引いた直線の傾きから衝撃波の

図7 マッハ角
 Fig. 7. Mach angle.

(a) $t_s = 69.2 \mu\text{s}$, $\rho = 600 \Omega \cdot \text{cm}$

(b) $t_s = 80.0 \mu\text{s}$, $\rho = 600 \Omega \cdot \text{cm}$

図8 マッハ角および衝撃波進展速度の算定方法
 Fig. 8. Measurement of Mach angles and shock wave velocity on the Schlieren photograph.

図9 電流波形

Fig. 9. Current waveforms.

図10 衝撃波の進展速度の算定方法

Fig. 10. Measurement of shock wave velocity.

進展速度を求めると約380m/sとなる。これは音速の約1.1倍に相当する。放電路上の他の点からの衝撃波の進展速度についても調べたが、その進展速度も同様に音速の約1.1倍となった。したがって、(1)式の a を音速の1.1倍として局部放電の進展速度の算定を行った。

このようにして求めた結果を図11に示す。図11は、抵抗率 ρ が85 $\Omega\cdot\text{cm}$ の4つのシュリーレン像から得られたものである。横軸はそれぞれのシュリーレン像において局部放電が進展を停止するときの局部放電の長さを100%として表している。縦軸は局部放電の進展速度をマッハ数(ここでは気温25℃での音速に対する局部放電の進展速度の比)で表している。記号(○△□●)はマッハ角 μ を求めた箇所任意に選んでいる。局部放電の進展開始直後と進

図11 局部放電の進展速度 ($\rho = 85 \Omega \cdot \text{cm}$)

Fig. 11. Velocity of a local discharge.

図12 マッハ角より求めた局部放電の進展速度

Fig. 12. Velocity of local discharges estimated from Mach angles.

展停止直前では速度が大きく変化し、進展途中では速度はほぼ一様に減少している。

図12に溶液の抵抗率 ρ を85 $\Omega\cdot\text{cm}$ 、600 $\Omega\cdot\text{cm}$ 、3k $\Omega\cdot\text{cm}$ と変えて調べた局部放電の進展速度を示す。各抵抗率の場合について4つのシュリーレン像について調べ、これより得られた各位置での進展速度の上限値と下限値を示している。局部放電の進展速度は進展開始直後が最も速く、また、 ρ が大きいほど速くなっている。局部放電の進展開始直後のマッハ数は、 ρ が85 $\Omega\cdot\text{cm}$ 、600 $\Omega\cdot\text{cm}$ 、3k $\Omega\cdot\text{cm}$ の場合、それぞれ、2.4~4.6、3.3~5.4、4.3~5.7となっている。針-平板電極間をフラッシュオーバーする電圧を印加した場合、局部放電の進展速度は ρ が大きいほど速くなる⁽¹⁾が、本実験の結果から、局部放電がフラッシュオーバーしない場合においても、局部放電の進展速度は ρ が大きいほど速くなる傾向は同じであることがわかった。また、局部放電が進展を停止する箇所付近につれてその進展速度も減少している。

4. むすび

汚損湿潤がいし表面を模擬した電解質水溶液面に、インパルス電圧印加によって進展する局部放電について、電解

質水溶液の抵抗率を $85 \Omega \cdot \text{cm} \sim 3 \text{ k} \Omega \cdot \text{cm}$ の範囲で変えて、放電路側面からシュリーレン像の撮影を行い、局部放電の進展状態を調べ局部放電進展によってその周囲の空間に発生する衝撃波と放電路の密度変化を観測し、局部放電進展時の状態について調べた。

本研究で得られた結果を要約すると以下のようになる。

(1) 密度変化を側面より観測したシュリーレン像から、空間に衝撃波が、放電路上に局部放電がつくる密度変化領域が観測された。放電路上の密度変化領域には、針電極から進展するいくつかの局部放電の先端に相当する区切り目が観測され、水溶液面上方の空間には、針-液面間の放電で形成される円弧状の衝撃波と、局部放電の進展中に形成される衝撃波面が観測された。これらは溶液の抵抗率の違い ($\rho = 85 \Omega \cdot \text{cm} \sim 3 \text{ k} \Omega \cdot \text{cm}$) に関わらず観測された。

(2) 衝撃波の波源は、針-液面間の放電から局部放電が進展するとき、その局部放電の先端にあった。

(3) 局部放電の進展途中に枝分れで生じた放電からは衝撃波は観測されなかった。

(4) 溶液の抵抗率が大いほど針電極から進展を開始する時の局部放電の進展速度は速く、 $85 \Omega \cdot \text{cm}$, $600 \Omega \cdot \text{cm}$, $3 \text{ k} \Omega \cdot \text{cm}$ で、それぞれマッハ 2.4~4.6, 3.3~5.4, 4.3~5.7 となった。

シュリーレン法を用いて局部放電の進展時に生ずる衝撃波と密度変化について観測および考察を行ったが、局部放電進展のメカニズム解明のためにさらに明らかにしなければならぬ点が残されている。放電路の周囲に形成されるストリーマ状の密度変化領域の微細構造⁽⁹⁾や衝撃波の発生と電解質水溶液の抵抗率との関係などである。今後、研究を進めてこれらの点を明らかにし、汚損沿面放電のモデル化のための基礎資料としたい。

終わりに、本研究を遂行するにあたって、ご協力・ご助言を頂いた熊本工業大学 賛田寛教授、宮崎大学工学部 本田親久教授、大坪昌久助教授、宮崎公立大学 金子正光助教授、長崎大学工学部 山口和彦技官に感謝する。

(平成 8 年 2 月 22 日受付, 平成 8 年 5 月 28 日再受付)

文 献

- (1) T. Yamashita, H. Matsuo, H. Fujiyama, T. Oshige: "Relationship between Photo-Emission and Propagation Velocity of Local Discharge on Electrolytic Surfaces", IEEE Trans. Elect. Insul., **EI-22**, 811 (1987)
- (2) 山下・池田・松尾:「電解質水溶液面に進展する局部放電のスペクトル特性」, 静電気学会誌, **15**, 42 (平 3)
- (3) 山下・竹之内・松尾:「インパルス電圧印加のもとで低気圧空気中の導電性沿面に進展する局部放電の気体温度」, 電学論 A, **114**, 315 (平 6-4)
- (4) T. Fujishima, O. Takenouchi, A. Fujimoto, T. Yamashita, H. Matsuo: "The Relation between the Photo-Emission

Intensity and the Propagation Velocity of a Local Discharge on an Electrolytic Solution at Low Pressure Air", 9th International Symposium on High Voltage Engineering, Austria, Paper No.3213 (1995)

- (5) 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)
- (6) 中尾・宮城・服部:「電解質水溶液面における沿面放電のシュリーレン法による研究」, 電学論 A, **104**, 115 (昭 59-3)
- (7) 中尾・加藤・伊藤・酒井・竹田・田頭・松山:「人工雨を用いた水面上インパルス破壊進展に及ぼす導電率および pH の影響」, 電学論 A, **113**, 372 (平 5-5)
- (8) 比良二郎・瀧澤英一:「流体力学の基礎と演習」, (昭 46) 廣川書店
- (9) 竹之内・大坪・本田・藤島・山下・松尾:「電解質水溶液面を進展する局部放電路近傍に現れる密度変化と衝撃波」, 電気学会全国大会, No. 153 (平 8)

竹之内 修

(正員) 1966 年 12 月 15 日生。1991 年 3 月宮崎大学大学院工学研究科修士課程電気工学専攻修了。同年 4 月長崎大学工学部電気情報工学科助手。1993 年 4 月航空大学校助手, 1995 年 4 月同講師。1994 年長崎大学大学院海洋生産科学研究科博士課程海洋資源学専攻入学, 現在に至る。主として, 高電圧現象の研究に従事。静電気学会会員。

山下 敬彦

(正員) 1957 年 9 月 21 日生。1980 年 3 月九州大学工学部電気工学科卒業。1985 年 3 月同大学院総合理工学研究科博士課程修了。同年 4 月長崎大学工学部電気工学科助手。1987 年 5 月同助教授, 現在に至る。工学博士。主として高電圧工学, 放電現象に関する研究に従事。静電気学会会員。

藤島 友之

(正員) 1966 年 6 月 15 日生。平成 6 年 3 月熊本大学大学院自然科学研究科博士課程修了。同年 4 月長崎大学工学部電気情報工学科助手, 現在に至る。主として放電現象, および, レーザアブレーション法に関する研究に従事。博士 (工学)。応用物理学会会員。

松尾 寿夫

(正員) 1941 年 3 月 15 日生。1963 年 3 月九州工業大学電気工学科卒業。1964 年 4 月同大学電気工学科助手。1969 年 4 月長崎大学工学部電気工学科講師, 1981 年 10 月同教授, 現在に至る。工学博士。主として, 汚損沿面放電の研究に従事。照明学会会員。