

## 論 文

## 電解液面を電極とするアーク放電の特徴

西 村 誠 介\*

(1989年2月3日受理)

Features of Arc Discharge Having the Electrode-Spots  
on a Surface of Electrolytic Solution

S. NISHIMURA\*

(Received February 3, 1989)

Arc discharges vary in characteristics according to electrode materials. The present paper deals with effects of electrolytic solution as an electrode material. Features and behaviors of arcs burning between a surface of sodium chloride solution and a copper electrode are experimentally examined. Arc spots on a surface of electrolytic solution are accompanied by remarkably high voltage drops which depend on the polarity of the spots and the concentration of electrolytic solution. Dynamic characteristics of AC arcs burning on a surface of electrolytic solution are quite different from those of metallic arcs. Oscillograms of arc voltage show rectangular waves, and the time constants of arc conductance become almost ten times large. Arcs subjected to a magnetic field show many interesting behaviors such as a normal- or a reverse-driving phenomenon, a disruption or a deformation of the arc spots on a surface of solution. These phenomena may imply the nature and the mechanisms of the electrode spot formed on an electrolytic solution.

## 1. まえがき

一般に、アークの特性や様相が電極材料の種類に大きく依存することは周知のとおりである。特に、種々の金属や炭素を電極とするアークに関しては多くの研究がなされている。しかし、食塩水等の電解液を電極とし、その液面上に陰極点あるいは陽極点をもつアークについての報告は必ずしも多くはない。これまで筆者は、外部絶縁の塩塵汚損フラッショーバ過程における放電挙動のモデル化を進めてきたが、食塩水沿面に発生・伸展するアークの挙動や諸特性を、同一電流範囲の金属電極間隙中アーケのそれらで近似または代替することがとうてい容認されないような場面にしばしば遭遇した<sup>1)</sup>。これは、電解液が電極材料としてアーケに及ぼす影響が極めて大きく、かつ、独特の様相をもたらすことを示唆する。

電解液面上に電極点をもつアークの挙動と特性の的確な把握は、塩塵汚損沿面放電や海水面への雷撃現象などに限らず、電解槽内の通電・放電特性やその他各種の放

電応用など、電解液がアーク放電に直接関与する諸現象の解析にとって基本的な課題となろう。

ここでは、電解液の代表として食塩水を用い、その液面上に電極点をもつアーク放電について、電圧・電流特性や時定数等の測定、磁気駆動を施したときの放電挙動の調査を行なった。それらを通して明らかとなったこの種の放電の顕著な特徴について、現象的な面からの考察を加えつつ報告する。

## 2. 食塩水沿面直流静止アークの電圧特性

## 2.1 実験装置

食塩水沿面静止直流アーケの電圧を、図1の装置で測定する。同装置は、濃度1~10%の食塩水を一定量含浸した瀬紙を平板ガラスに乗せた放電通路Lと、同一濃度の食塩水を満した液槽Tとからなる。銅電極M<sub>1</sub>は微小気中間隙Gを隔て通路の一端に置き、他方の銅電極M<sub>2</sub>は液槽Tの底に沈めてある。直流電圧を電極M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub>間に印加すると、アーケが電極M<sub>1</sub>側から発生し、通路上を伸長する。放電の先端が液槽に達すると伸展を停止して長さlの静止アーケとなる。このときアーケ電極点の一つは銅電極M<sub>1</sub>の表面上に、他方は液槽内の食塩水面上に形成される。静止アーケとなった直後のアーケ電圧V<sub>a</sub>を、液槽の水面電極点の直下に設置した金属探針Pで測定する。探針Pは、金属部と水溶液との接触面積を

キーワード：沿面放電、アーケ放電、電極材料、電解液、磁気駆動

\* 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

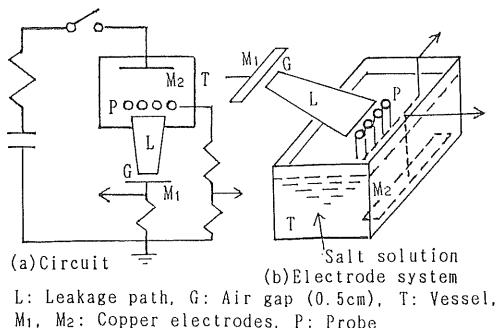


図 1 アーク電圧測定の回路と電極系

Fig. 1 Set-up for measurement of arc voltage.

小さくして現象への擾乱を少なくし、かつ電極点の動搖に備えるため、ビニル被覆の  $0.5 \text{ mm}\phi$  銅線（全外形  $2 \text{ mm}\phi$ ）を 10 本一列に並べ切り揃えたものを用い、銅線断面を液面下約 1 mm に沈めた。

## 2.2 アーク電圧とその特徴

食塩水濃度、印加電圧の極性（液面上電極点の極性）を変化させて測定したアーク電圧  $V_a$  を、電流  $i$  とアーク長  $l$  の関数として表現すると、実験を行なった電流範囲 ( $0.1 \sim 30 \text{ A}$ ) 内では式(1)が成立する。

$$V_a = 60l/i + 40l + C \quad (1)$$

ただし、 $V_a$  は食塩水沿面静止アークの電圧 (V)、 $i$  はアーク電流 (A)、 $l$  はアーク長 (cm)、 $C$  は食塩水の濃度と液面上電極点の極性により決まる定数 (V) で、その値は表 1 に示す。

ここに見られる著しい特徴は次の 3 点である。

- (a) アーク電圧  $V_a$  が極めて高い。数百～千V以上にも達する。
- (b)  $V_a$  には顕著な極性効果が存在する。液面に陰極点ができる場合の方が、陽極点の場合より約 2 倍高い。
- (c) 食塩水濃度の依存性が明瞭である。低濃度になるほど、 $V_a$  が高くなる。

アーク電圧  $V_a$  の大部分は(1)式第 3 項  $C$  の値であり、同式の形から、これは主として、陰・陽両電極点での降下電圧に起因すると考えられる。いま仮に、銅電極側の電極降下電圧が銅電極間アークの場合とほぼ同程度とすると、銅陰極で数十V、銅陽極で 10V 前後である

表 1  $C$  の値 (V)Table 1 Values of constant  $C$  (V).

Concentration of Salt Solution (%)	1	3	10
Cathode Spot	800	750	700
Anode Spot	330	300	280

から<sup>2)</sup>、数百 V 以上を示す  $C$  の値は実質的に液面上の電極点降下電圧に相当すると見るべきであろう。

ところで、常温での食塩水中の  $\text{Cl}^-$  イオンは、平均的に 4 個の水分子を伴う水和状態にあるといわれている<sup>3)</sup>。液面上の陰極点で食塩水中の  $\text{Cl}^-$  イオンから電子放出を求めるならば、大略の等価的な仕事関数は、 $\text{Cl}^-$  イオンの水和エネルギー (3.34 eV) と真空中の  $\text{Cl}^-$  イオンの電子親和力 (3.8 eV) との和 (7.14 eV) となるが、これは銅の仕事関数 (4.7 eV) より大きい。食塩水面上の陰極点降下電圧が高くなる一因と考えられる。

水溶液の沸点以下に温度が制限される液面上の陰極点では、熱電子放出機構は考え難い。また液面に対する  $\gamma$  作用 (正イオンの衝突による陰極からの二次電子放出作用) はあるとしても極めて小さい ( $\gamma = 4 \times 10^{-4}$ ) といわれている<sup>4)</sup>。したがって、液面からの電子放出としては、電界による液中イオンからの電子放出が主体と考えねばならない。このようにして放出された少数の電子が水蒸気、食塩水の分解ガスや空気分子と衝突電離作用を繰返して放電の維持に必要な電子流を増殖させる。この過程で、陰極点領域に正イオンの強大な空間電荷が形成されるであろう。これが液面上の陰極点降下電圧を著しく大きくするもう一つの原因と考えられる。

他方、液面上の陽極点降下電圧が金属電極上のそれに比べて大きいことの原因についてはまだ不明な点が多い。

## 3. 交流静止アークの電圧・電流特性

交流アークは電流の半波ごとに消弧・再発弧を繰返す。しかし、電解液沿面アークでは放電電流が数百 mA 程度以上になると、電極点消滅後も熱慣性のためアーク柱の電離ガスの一部が電流零点を越えて次半波まで残留する。この残留電離ガス中では、高温と荷電粒子の存在により低電圧でも長大な局部アークの再発弧が可能となる<sup>5)</sup>。

### 3.1 実験方法

図 1 の装置に交流電圧を加える。電圧値と通路長を適当に選定すると、残留電離ガス雰囲気を利用して毎半波一定長の食塩水沿面交流静止アークを発生させることができる。図 2 は放電の流し写真である。同図では、交流電圧の印加後第 1 ~ 6 半波までの各半波には伸展過程が含まれているが、第 7 半波以降は一定長の静止アークの状態となっている。ここに着目して電圧・電流特性を測定する。

比較のため、別途、銅電極間交流気中アークも測定する。電極は  $3 \text{ mm}\phi$ 、長さ各 8 cm の銅丸棒 2 本を、水平に対向させたものを用いる。

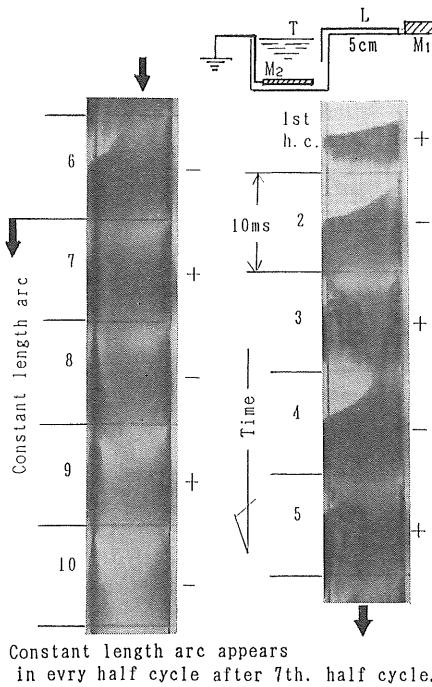


図 2 食塩水沿面交流静止アークの発生状況

Fig. 2 AC arc with constant length along surface of salt solution (Streak picture).

### 3.2 金属電極間気中アーク

図3は、銅電極間に点じた長さ  $l=0.5\text{ cm}$  の交流気中アークの電圧・電流波形の例である。半波ごとに数百Vの顕著な点弧あるいは消弧ピークが出現し、同図では画面外に振り切れている。このときの放電の流し写真では、電離ガス雲閉気が電流零点を越えて次半波まで残留するような現象は見られない。各半波内での電流波高値  $I_m$  と、同時刻の電圧値  $V$ との関係は、Alston 氏による気中銅電極間アークの実験式(2)にはほぼ一致する<sup>6)</sup>。

$$V = 63 \cdot l \cdot I_m^{-n} + 50 \quad (2)$$

ただし、 $I_m$  はアーク電流波高値 (A)、 $V$  は  $I_m$  と同時刻のアーク電圧値 (V)、 $l$  はアーク長 (cm)、 $n=1 \sim$

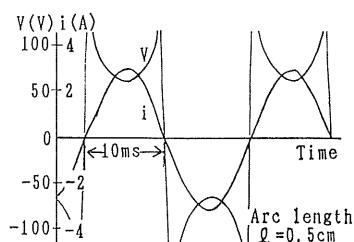


図 3 銅電極間気中アークの電圧・電流波形

Fig. 3 Oscillograms of voltage and current of metallic arc in air.

### 0.76.

図4は、図3を基にして画いた  $E-i$  曲線 ( $E$ : アーク柱単位長当たりの電圧、電極降下電圧 50V は含まず) である。双曲線  $E \cdot I_s = N_0$  ( $N_0$ : 一定値、 $I_s$ : 定常状態での電流値、ここでは電流波高値  $I_m$  を採用)を中心にはずかに履歴現象が認められる。

### 3.3 電解液沿面交流アーク

図5は濃度 3% の食塩水沿面アーカの電圧・電流波形の例で、図2の第6~10半波に対応する。図5の第2半波以降が沿面静止アーカである。銅電極間の気中アーカと比べて、次のような顕著な特徴がある。

(a) 正弦波状電流に対し、アーカ電圧は矩形波状を呈する。このように電圧の平坦な特性は、金属電極間アーカでは大電流時(約 100A 以上)に見られるが、食塩水沿面アーカではわずか数A程度の電流でも現われるのが興味深い。

(b) アーカ電圧は金属電極間アーカのそれに比べて桁違いに高く、かつ、液面上の電極点の極性に依存する。これは、2.2項でみた沿面直流アーカの場合と同一の傾向を示す。

図6は、図5から画いた  $V-i$  曲線の一例である。多数の  $V-i$  曲線から電流波高値  $I_m$  と、同時刻の電圧値  $V$ とを読み取り、その関係を吟味した結果、 $V$ 、 $I_m$  に着目すれば、沿面交流アーカに対しても直流アーカについて求めた式(1)をそのまま適用できることがわかった。

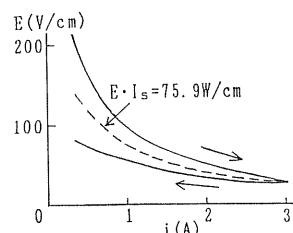
図 4 銅電極間気中アーカの  $E-i$  曲線

Fig. 4  $E-i$  curve of metallic arc in air.

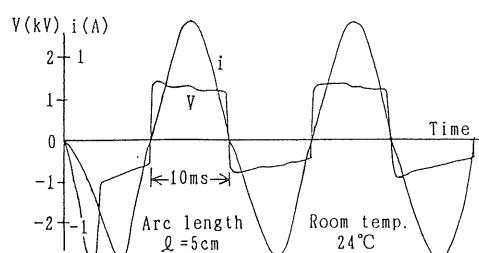


図 5 3% 食塩水沿面アーカの電圧・電流波形

Fig. 5 Oscillograms of voltage and current of arc along surface of 3% salt solution.

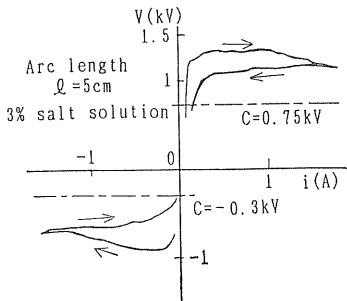
図 6 3% 食塩水沿面アーカの  $V-i$  曲線

Fig. 6  $V-i$  curve of arc along surface of salt solution.

図 6 の一点鎖線は電極降下電圧値  $C$  を示し、電圧  $V$  から  $C$  を差し引いたものがアーカ柱部分の電圧に相当する。 $V$  と  $C$  の値は食塩水濃度と液面上電極点の極性により異なるが、アーカ柱部分の電圧 ( $V-C$ ) は、濃度を 1~10% の範囲で変化させても、また極性によっても、同一電流値に対してはそれほど大きな変化は認められない。

また、図 1 の銅電極  $M_1$  をもう一つの液槽中の電極に置き換えると、陰・陽両電極点が同時に食塩水面上に形成される。このとき  $V-i$  曲線から推定した両電極点での降下電圧値の和は、図 6 の正・負各場合の  $C$  の和に近い値となることが確認された。すなわち、アーカ柱部分の電圧は図 6 の同一電流値に対する ( $V-C$ ) とほぼ同じとみられる。

#### 4. 交流静止アーカの時定数

交流アーカの動特性を記述する重要なパラメータであるアーカ柱コンダクタンスの時定数について調査する。

##### 4.1 金属電極間気中アーカ

電解液沿面アーカと比較するため、まず、より一般的な銅電極間気中アーカの時定数を求める。

時定数算定の基本式としては、図 4 の曲線の形から判断して、定常アーカ特性として  $E \cdot I_s = N_0$  の関係を想定した Mayr 式を用いる<sup>7)</sup>。

$$\frac{1}{G} \cdot \frac{dG}{dt} = \frac{1}{\theta_m} \cdot \left( \frac{Ei}{N_0} - 1 \right) \quad (3)$$

ただし、 $G$  はアーカ柱単位長当たりのコンダクタンス、 $\theta_m$  はアーカ時定数、 $N_0$  は熱損失（一定とみなす）。各半波の電流波高点での  $E \cdot i$  を  $N_0$  とおき、各半波ごとに式(3)により、 $\theta_m$  を計算する。多数の  $E \cdot i$  曲線から計算した時定数  $\theta_m$  の値の分布を示したのが図 7 である。ほとんどの計算結果が 60~500  $\mu s$  の範囲に入っている。

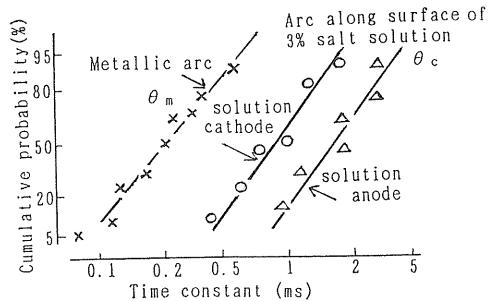


図 7 アーカ時定数算定値の分布

Fig. 7 Statistical distribution of values of time constant of arc.

#### 4.2 電解液沿面アーカ

基本式は、電圧の平坦特性に着目して、Mayr 式よりもむしろ、 $E \cdot I_s^n = N_0$  で  $n=0$  とした Cassie 式を採用するのが適当と思われる<sup>7)</sup>。

$$\frac{1}{G} \cdot \frac{dG}{dt} = \frac{1}{\theta_c} \cdot \left( \left( \frac{E}{E_s} \right)^2 - 1 \right) \quad (4)$$

ただし、 $E_s$  は定常状態での  $E$  (アーカ柱単位長当たりの電圧) の値、 $\theta_c$  はアーカ時定数。

図 6 のアーカ柱部分の電圧 ( $V-C$ ) から  $E$  を求め、電流波高点での  $E$  を  $E_s$  とみなして計算した時定数  $\theta_c$  の値の分布は、図 7 に示すように 0.5~5 ms の範囲となる。前項で求めた  $\theta_m$  より約一桁大きい。電解液沿面アーカの顕著な特徴の一つである。極性効果もわずかに認められ、液面陽極点の方が幾分大きい。ここで得られた  $\theta_c$  の値は、放電の流し写真で見られる電離ガスの残留継続時間（数 ms に及ぶ）や、Maikopar 氏が汚損フラッシュオーバ電圧算定に際して仮定した 1 ms という値<sup>8)</sup> 等とよく符合する。

#### 5. 直流アーカの磁気駆動

再び印加電圧を直流に戻す。食塩水面電極と銅電極の間に気中アーカを発生させ、これを磁界の中に置き、いわゆるアーカの磁気駆動を行なう。本章での調査は定性的な現象観察であるが、ここに現われる諸現象の特徴は、今後水溶液面上の電極点構造や機構を解明する上で多くの手懸りを提供すると考えられるので、以下にその概要を述べる。

##### 5.1 実験装置

放電電極系と駆動用コイルの概要を図 8 に示す。長さ 25 cm × 幅 5 cm × 高さ 4 cm の透明ガラス製容器内に水深 1 cm を入れた 3% 食塩水の水面と、その上方 1.3 または 2 cm の位置に水面と平行に配置した銅板電極との間に、鉛直方向の気中アーカを発生させる。水面の位

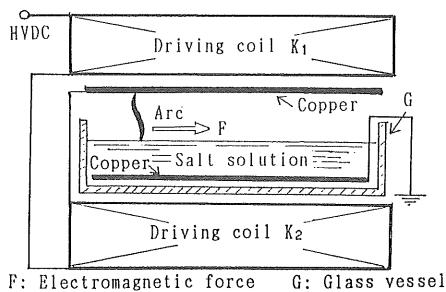


図 8 電極系と駆動コイル

Fig. 8 Electrode system and coils for magnetic driving.

置にもう 1 枚の銅板を置けば銅-銅電極 アークを点てることもできる。電極系の上下に配置した 2 個の空芯コイルに放電電流を通じ磁界（電流 20 A のとき、放電間隙中央部での磁束密度は約 20 mT）を発生させ、自励方式でアークを駆動する。このときのアーク柱と電極点の挙動を、水平横方向から流し写真で観察する。

## 5.2 駆動アークの状況

下方の放電電極を銅板または食塩水とし、この電極の極性を陰・陽それぞれ変化させて、磁気駆動を施したときのアーク挙動の流し写真的各例が図 9 である。(a)銅陰極-銅陽極、(b)銅陽極-食塩水陰極、(c)銅陰極-食塩水陽極の各場合である。これらの観察から、顕著な特徴や現象を摘記すると次のようである。

(a)では、電極面上の陰・陽両極点は共に尖鋭な点状を保ったまま、アーク柱と一緒に滑らかに電磁力 ( $F$ ) の方向に移動する。移動速度は放電電流の減衰に応じて低

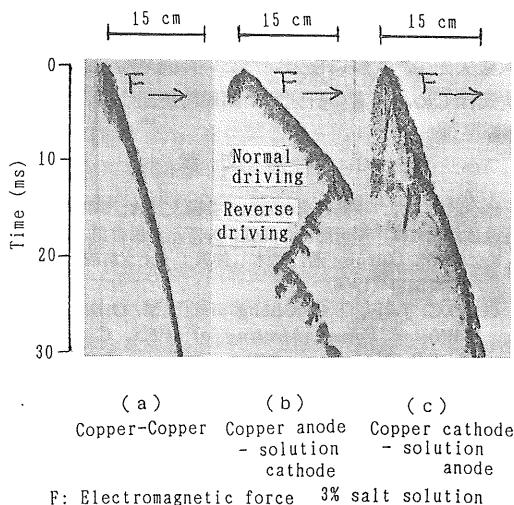


図 9 アークの駆動状況の流し写真

Fig. 9 Streak pictures of arcs during magnetic driving.

下している。

(b)でも電磁力の方向に駆動されるが、時折、液面上陰極点が二つに分裂したり、逆方向に移動する（逆駆動）現象が現れる。逆駆動の出現は、液面上の陰極点を移動させる原因が電磁力以外にも存在することを意味する。先の 2.2 節で、陰極点近傍に空間電荷に基づく強大な電界生成の可能性を述べたが、この空間電荷電界の存在の現象的裏付けの一つとして、この逆駆動現象を捉えることができる。

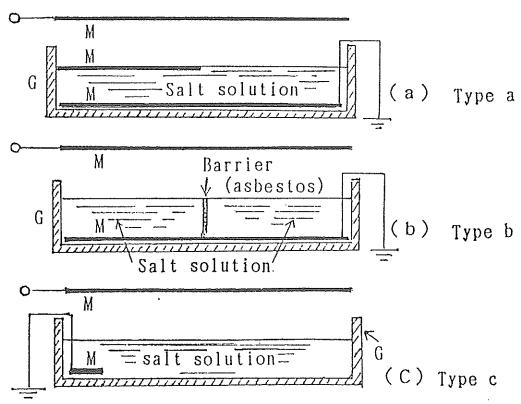
(c)では、液面電極上の陽極点は必ずしもつねに点状を保つとは限らず、拡がりを示すことがある（次項 5.3, 5.4 で更に明瞭）。逆駆動現象は液面上の陰極点の場合ほど顕著には認められない。

## 5.3 電極点の液面と金属との間での移行

図 10(a) のように、容器内の食塩水面の一部を銅板で覆い（水面と銅板は同電位）、下方の放電電極面を液面部分と銅部分とに分割する。駆動アークの陰または陽極点がこの境界を円滑に移動できるか否かを調べる。その結果、次のような所見が認められた。

(a) 陰極点は、液面から銅へは容易に移行するが、その逆方向への移行是不可能である（陰極点が銅板上にこう着）。陰極点の液面から銅への移行時には、アーク電圧は陰極点降下電圧の差に相当する分だけ不連続的に低下する。陰極点での電子放出の難易度が、金属面と電解液面とで大きく異なることを物語る。

(b) 陽極点は、いずれの方向にも移行可能である。ただし、液面から銅への方が容易。逆方向はやや困難で、液面上に移るときに陽極点は拡大する。電極点での電荷授受の難易に関し、金属面と電解液面とで陰極点の場合ほど大差はないものの、やはり電流密度には等かの制約が存在するようである。これが、液面上の陽極点降下



M: Copper electrode, G: Glass vessel

図 10 電極系

Fig. 10 Electrode systems.

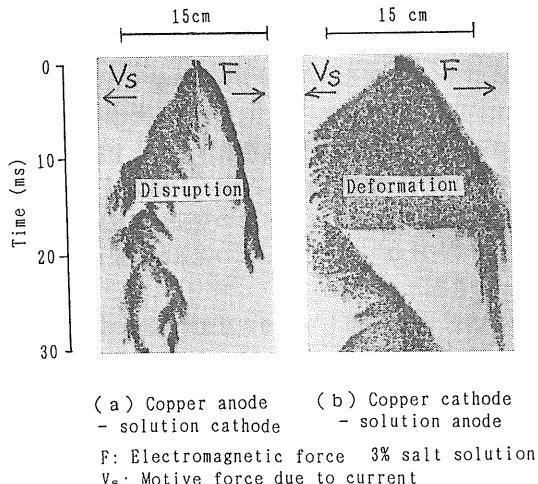


図 11 液面電極点の分裂と変形(流し写真)

Fig. 11 Disruption and deformation of arc spots on surface of salt solution (streak pictures).

電圧が高いことに関連するのであろう。

次に、濃度の異なる水溶液面間での電極点の移行についても調査した。すなわち、図 10(b) のようにガラス容器中に薄い石綿板の隔壁を設け、その両側に濃度の異なる食塩水を満たし、濃度境界での電極点の移行状況を観察した。その結果、陰極点は低濃度から高濃度への移行は容易であるが、その逆方向は困難である。陽極点は双方の移行が可能なことが確認された。

#### 5.4 液面電極点アーケーの分裂

図 10(c) のようにガラス容器内の電極を全底面に広げず、一端に偏らせてると、液中の電流流線はこの電極に向かう(または、この電極から流出する)、水面に点じた放電をこの方向(以下、簡単のため  $V_s$  方向と呼ぶ)に移動させる作用が現われる<sup>12</sup>。いま、放電電極のほぼ中央部に発生させたアーケーに対し、 $V_s$  と逆向きに電磁力を働く。この状況下でのアーケー運動の流し写真が図 11 である。次のような顕著な特徴をもつ所見が得られた。

(a) 液面が陰極の場合には、陰極点は 2 つの点状に分裂する。これに追随して銅板上の陽極点も 2 つに分裂し、アーケーは 2 本並列になり、それぞれが  $V_s$  方向と電磁力方向とに移動する。

(b) 液面が陽極の場合には、陽極点は点状を保たず液面上を左右に広がる。他方、銅板上の陰極点は直ちには 2 つに分裂せず、アーケーはあたかも幕状を呈する。液面上の陽極点は状況に応じて、その形状を大幅に変化することが確認された。

#### 6. むすび

食塩水面上に電極点をもつ直流あるいは交流アーケーについて、種々の観点からその特徴と基本的な特性を調査した。その結果を要約すると次のようである。

(1) 電極材料としての電解液の影響は、液面上の電極点のみならずアーケー柱にも及び、一般の金属電極間気中アーケーとは様相や特性を異にする点が少くないことを指摘した。

(2) 液面上の電極点は、極めて大きな降下電圧を伴うこと、およびこの降下電圧には明瞭な極性効果と水溶液濃度依存性があることを実験的に明らかにし、直流電圧下でのアーケー電圧特性の実験式を導いた。

(3) 液面上の電極点に大きな降下電圧が現われる原因として、当該電極点近傍に強大な空間電荷電界の存在が考えられることを述べた。

(4) 電解液沿面交流アーケーはアーケー柱の熱慣性が大きく、放電電流が 1 A 程度以上になるとアーケー柱の電離ガスの一部が電流零点を越えて残留し、電流波形が正弦波状でもアーケー電圧波形は矩形波状を呈するようになることを、実験的に指摘した。

(5) 電解液沿面交流アーケーのコンダクタンスの時定数は、同一電流範囲の金属電極気中アーケーのそれに比べほぼ 1 衍大きいことを、実測データに基づく算定値により示した。

(6) アーケーに磁気駆動を施し、液面上電極点の挙動はその極性(陰極点か陽極点か)により明瞭な差異があることを定性的に指摘し、液面上アーケー電極点の構造や機構解明にとって有力な手懸かりを得た。

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、実験に協力いただいた同尾崎忠義、佐藤晴夫氏はじめ、筆者の研究室の諸氏に感謝する。

#### 参考文献

- 1) 西村誠介、中島好忠: 電気学会論文誌 A, 97 (1977) 77
- 2) たとえば、福田節雄: 電弧, p. 27, 河出書房 (1948)
- 3) R.W. Gurney 著、鈴木伸訳: イオン溶液論, p. 65, 産業図書 (1966)
- 4) D.C. Jolly, T.C. Cheng and D.M. Otten: IEEE Winter Power Meeting of PES, C 74 068-3, IEEE, New York (1974)
- 5) 西村誠介: 電気学会論文誌 B, 106 (1986) 419
- 6) L.L. Alston and S. Zoledzowski: Proc. IEE, 110 (1963) 1260
- 7) 電気学会: 放電ハンドブック, p. 160, 電気学会 (1974)
- 8) S.A. Maikopar: Elektrichestvo, 2 (1965) 22