

## 論 文

## 有極性液体の帶電測定法の検討

下川 博文\*  
(1994年6月7日受理)

## A Study on Measuring Method for Electrification of Polar Liquid

Hirofumi SHIMOKAWA\*  
(Received June 7, 1994)

There are a number of reports on the streaming or spray electrification of the liquid ejected from a nozzle based on experimental investigation. In recent work by Umetsu and Asano et al., it has been found that the position of receiver remarkably affects on the streaming current of polar liquid. Author clarified that, in case of water, this phenomenon is attributed to the induction charging by charged fog generated as the water is ejected from a nozzle. The purpose of this paper is to investigate the factor influencing the streaming electrification of other polar liquid (ethanol, butanol, octanol and methanol). It is found that the charged fog is little or not produced as the sample liquid is ejected from a nozzle. It is considered that the streaming electrification of the polar liquid is related to the image force due to the charged drops of liquid.

## 1. はじめに

通常実験室レベルで液体の帶電度を評価する場合、流下式の測定装置が簡便な方法としてよく使われる<sup>1)</sup>。これは金属細管中を通った液体を先端から噴出させ、レシーバで受けるものである。このとき金属細管から発生する電流、あるいはレシーバに流入する電流がエレクトロメータで測定される。

梅津らはこのような装置を使って測定される電流は、ノズルとレシーバ間の距離（本報告ではこの距離を $L$ と記すことにする）に依存する場合があることを報告している<sup>2-4)</sup>。彼らは、特に有極性液体の流動電流はこの $L$ の値に顕著に依存し、帶電の極性が反転する場合があることを示した。

流動電流の値が金属細管の構造あるいはノズル出口の構造以外に、測定系の形状や配置に大きく依存することから、その発生機構と測定方法を根本的に検討する必要があるものと思われる。さらに、流動帶電現象に関する多くの報告の再検討が必要になっている。

筆者は前報<sup>5)</sup>において、水を試料として流動帶電現象に影響する要因について検討した。そして流動電流が測

定系の形状や配置に依存する原因是、ノズルからの水の噴出時に発生する帶電霧の静電誘導に起因することを明らかにした。つまり測定系内の帶電霧の総量はノズルとレシーバ間の空間の大きさに依存するため、測定される電流が周囲の状況に大きく影響を受けるものと考えられる。

他の有極性液体において水の場合と同様に帶電霧が発生し、流動電流の測定に影響を与えているかどうか興味のあるところである。本研究は有極性液体として各種アルコール類および水を取り上げ、帶電霧発生の有無と、流動電流の測定はどのように行えばよいかを明らかにすることを目的とした。その結果、水以外の液体では帶電霧の発生はほとんどみられないことがわかった。しかしながら、測定される流動電流の値は測定系の形状に依存した。本報告では、流動電流の測定に影響する新しい要因について提案する。

## 2. 実験方法

本実験で用いた測定装置の概略図を図1に示す。液体のリザーバタンクは直径10 cm、高さ15 cmの円筒でステンレス製である。このタンクはテフロン(PTFE)を使ってアースから絶縁されている。ノズルは注射針の先端を直角にカットしたもので、内径0.4 mm、長さ95 mmである。レシーバはステンレス製の容器で、直径10 cm、高さ15 cmの円筒であり接地されている。レシーバの上蓋の穴の形状は円で、その直径は5 cmである。

キーワード：極性液体、流動電流、帶電測定法、帶電霧、影像電荷

\* 神奈川工科大学電気工学科 (243-02 厚木市下荻野 1030)  
Department of Electrical Engineering, Kanagawa Institute of Technology, 1030, Shimoogino, Atsugi, 243-02 Japan

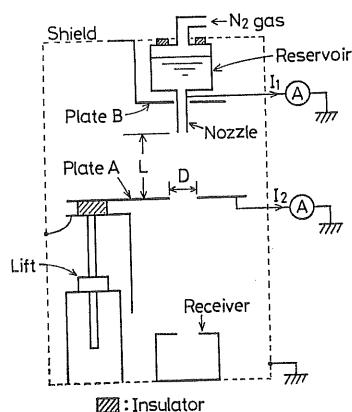


図 1 測定装置の概略図

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

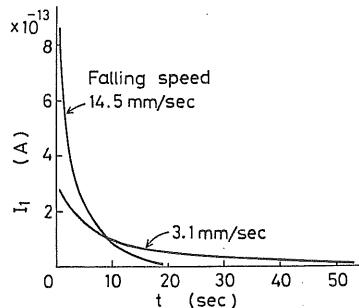


図 2 試料液体を噴出しないときのプレート A の降下速度の影響

Fig. 2 Effects of falling speed of a plate A on  $I_1$  (no ejection).

ノズルの先端とレシーバの上蓋の距離は 50 cm である。シールドは底辺が  $70 \times 70 \text{ cm}^2$  で高さが 130 cm の直方体で、アングルの骨組みに黄銅製の金網 (25 メッシュ) を張り付けたものである。水のタンクおよびレシーバはシールド内のほぼ中央に設置した。

前報<sup>5)</sup>で述べた水の場合の測定装置と異なる点は二つある。一つは、レシーバの上蓋とは別に図 1 に示すようなアースされたプレート A を設け、独立に動くようにしたことである。このことによりレシーバの位置に関係なく、ノズルとプレート A 間の空間の大きさを調整することができる。ノズルの先端とプレート A との距離 L は、昇降装置を使って -7 cm から 30 cm まで連続的に変化させることができる。この昇降装置の速度は 0~22.4 mm/s の範囲で調整可能である。プレート A の大きさは  $20 \times 20 \text{ cm}^2$  で、中央に円形の穴が開いている。その穴の直径 D は 2~11 cm の範囲で変化させた。二つ目はリザーバタンクの近くに接地されたプレート B を付けたこと

である。プレート B のリザーバタンク下部の部分の大きさは  $16 \times 16 \text{ cm}^2$  で、直径 2 mm の穴が開いている。プレート B はリザーバタンクから 5 mm 下に設置されている。ノズルで発生する流动電流  $I_1$  は、プレート B とリザーバタンクのすき間を通じてエレクトロメータで測定される。

流动電流  $I_1$  の測定に使用したエレクトロメータ (アドバンテスト製 TR8411) は電流測定の場合に入力に数  $100 \mu\text{V}$  程度の電圧が発生している。図 2 はノズルから液体を噴出せず、かつプレート B を付けない状態で、プレート A を降下させた場合のノズルで観測される電流  $I_1$  の時間的変化を示したものである。降下速度が 14.5 mm/s と 3.1 mm/s の場合を示した。液体を噴出していないにもかかわらず  $10^{-13}\text{A}$  オーダの電流が検出される。また、降下速度が大きくなると初期の電流値は大きく、電流の減衰は速いことがわかる。接続したプレート B を図 1 のように設置すると電流は 1 衍以上小さくなつた。このときの値は噴出時の測定電流に比べるとほぼ零とみなしてよいものである。これらの結果から、図 2 の電流はエレクトロメータの発生電圧によるノズル-プレート A 間の静電容量の充放電电流であることがわかる。

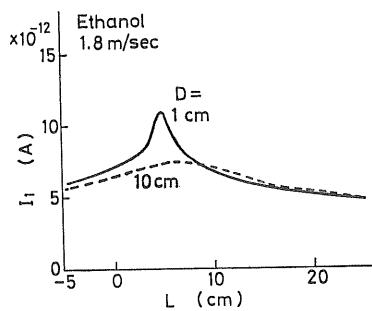
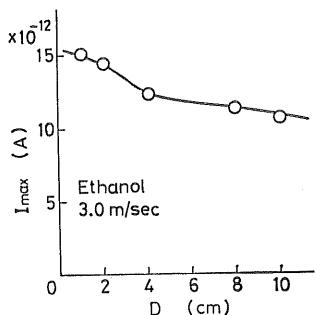
試料液体は主にエタノール ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ) で、その他にブチルアルコール ( $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_2\text{CH}_2\text{OH}$ )、オクチルアルコール ( $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_6\text{CH}_2\text{OH}$ ) およびメタノール ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) を用いた。すべて試薬特級である。また比較のために精製時に  $183 \text{ k}\Omega\cdot\text{m}$  で、使用時数  $10 \text{ k}\Omega\cdot\text{m}$  の導電率をもつ純水も使用した。

試料液体はリザーバタンクの上部から  $\text{N}_2$  ガス圧を加えてノズルから噴出させた。液体の流速は 0~5 m/s である。タンクに液体を注入する際に発生する電荷を除くために、1 時間ほど放置してから測定を行った。

### 3. エタノールでの測定結果

エタノールを速度 1.8 m/s で噴出したのち、ノズルの先端とプレート A 間の距離 L を -5 cm から 25 cm まで変えたときの流动電流  $I_1$  の変化の様子を図 3 に示す。降下速度は 10 mm/s であり、プレート A の穴の直径 D が 1 cm と 10 cm の場合を示した。同図から、L の増加とともに  $I_1$  は増加するが、 $L=4\sim6\text{cm}$  付近でピークに達し、その後減少することがわかる。また  $L=25\text{cm}$  付近で  $I_1$  の減少率は小さくなるが、一定にはなっていない。さらに、プレート A の穴の大きさが小さい場合の方が L に対する  $I_1$  の変化が激しいこと、および  $L > 10\text{cm}$  の領域では D による違いはみられないことがわかる。

なお、プレート A の降下速度は最大 22.4 mm/s まで

図 3 エタノールの流動電流  $I_1$  の  $L$  依存性Fig. 3  $L$  dependence of streaming current  $I_1$  for ethanol.図 4 エタノールの流動電流  $I_1$  の  $D$  依存性Fig. 4  $D$  dependence of streaming current  $I_1$  for ethanol.

流動電流の測定値に影響しなかった。そこで本報告では降下速度を  $10 \text{ mm/s}$  一定とした。また、断らない限り試料液体はエタノールである。

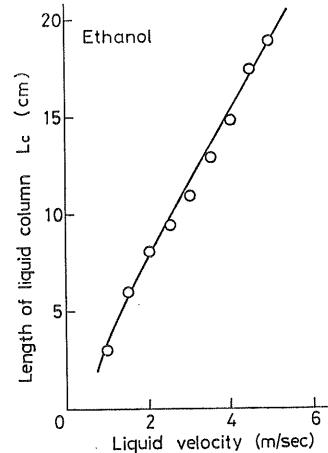
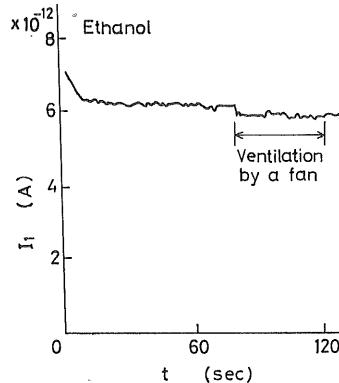
図 4 は  $L$  の値を変化させたときに得られる流動電流の最大値  $I_{\max}$  の  $D$  依存性を示したものである。流速が  $3.0 \text{ m/s}$  の場合を示した。同図から、電流の最大値は  $D$  が大きくなると単調に減少することがわかる。

このように図 1 の装置で測定される流動電流  $I_1$  はノズル先端とプレート A 間の距離  $L$ 、およびプレート A の穴の直径  $D$  に顕著に依存する。つまり  $I_1$  はノズル周辺の空間の状況に影響されることがわかる。

図 5 はノズルから噴出するエタノール柱の長さ  $L_c$  の流速依存性である。同図から  $1 \sim 5 \text{ m/s}$  の範囲で  $L_c$  は流速にはほぼ比例することがわかる。図 3 の測定条件では  $L_c$  は約  $5 \text{ cm}$  である。この値は図 3 で  $I_1$  が最大値を示す  $L$  の値におよそ一致する。つまり、エタノール柱の先端がアースされたプレート A に一番近くなったときに  $I_1$  は最大値をとることを示している。

#### 4. 帯電霧の影響

試料液体が水の場合、噴出時に発生する帯電霧が流動

図 5 液柱の長さ  $L_c$  の流速依存性Fig. 5 Relation between length of ethanol column  $L_c$  and liquid velocity.図 6 流動電流  $I_1$  に及ぼす送風の効果Fig. 6 Effects of ventilation by an electric fan on streaming current  $I_1$ .

電流の測定値に大きな影響を及ぼす<sup>5)</sup>。図 3、図 4 の結果が水の場合と同じように帯電霧の影響である可能性がある。そこで測定系内の帯電霧の検出を試みた。

#### 4.1 ノズルとレシーバ間の帯電霧の存在

水の場合、測定中にノズル周辺に  $1 \text{ m/s}$  程度の風を送ると電流の極性が反転する。これは帯電霧が風で吹き飛ばされ、静電誘導が起こらなくなることが原因である。図 6 はノズルとプレート A 間に  $1.5 \text{ m/s}$  の風を送ったときの、流動電流の時間変化の様子を示したものである。時間  $t=0 \text{ s}$  で液体を噴出させ、 $75 \text{ s}$  から  $120 \text{ s}$  の間送風した。液体の噴出速度は  $1.8 \text{ m/s}$  で、 $L=20 \text{ cm}$ 、 $D=5 \text{ cm}$  である。同図から、噴出後の電流は水の場合とは違って変化が激しくないこと、および送風の影響はほとんどみられないことがわかる。

また前報<sup>5)</sup>で用いた吸引式のファラデーケージを使っ

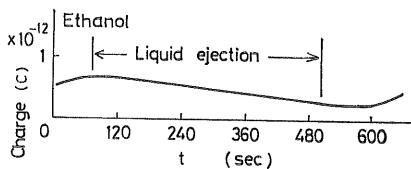


図 7 レシーバ中の電荷の計測

Fig. 7 Measurement of electrostatic charge inside of a receiver.

て、ノズルとレシーバ間の霧団気中の電荷の測定を試みたが、噴出速度が $0\sim 5\text{ m/s}$ の範囲で検出できなかった。さらに、 $2\times 2\text{ cm}^2$  の金属板をエタノール柱から $11\text{ cm}$  のところに設置し、帶電霧の発生量の変化から生じる誘導電流の測定を試みたが、同様の速度範囲で検出できなかった。以上の結果から、エタノールをノズルから噴出させたとき、ノズルとレシーバ間の空間には流動電流の測定に影響するほどの帶電霧は発生していないと考えられる。

ブチルアルコール、オクチルアルコールおよびメタノールにおいても帶電霧は測定系内で検出できなかった。

#### 4.2 レシーバ内の帶電霧とその影響

噴出した液体はレシーバの底面に衝突後回収される。その衝突時に帶電霧が発生している可能性がある。図7はレシーバ内の霧団気中の電荷を調べたものである。液体の噴出速度は $1.8\text{ m/s}$ である。使用した吸引式のファラデーケージは内径 $1\text{ cm}$ 、外径 $2\text{ cm}$ 、長さ $15\text{ cm}$ であり、吸引速度は約 $0.5\text{ m/s}$ である。まず液体を噴出しない状態において、 $t=0\text{ s}$ でレシーバ内の空気の吸引を開始する。図7から、このとき正電荷を検出していることがわかる。これはエレクトロメータのドリフトに起因するものと考えられる。 $t=70\text{ s}$ で液体を噴出させると、数秒後負電荷の検出を開始する。 $t=500\text{ s}$ で液体の噴出を停止するとしばらくは負電荷を検出し続けるが、停止後約 $100\text{ s}$ で噴出前と同量の正電荷を検出する。この正電荷は測定データとしては零点のずれとして扱えばよい。したがって、これらの正負の傾きの差がレシーバ内の帶電霧の発生電流を示している。図7の場合の発生電流は $3.3\times 10^{-15}\text{ A}$ である。この値は水を噴出したときにノズル周辺で検出される帶電霧の発生電流の値に比べて1桁以上小さい<sup>⑥</sup>。レシーバ内に発生した帶電霧が流動電流に与える影響は次のようにして調べた。

使用した測定装置は図1の装置中のプレートAを取り外したものである。ノズル先端とレシーバの上蓋との距離を $L'$ 、レシーバの上蓋の穴の直径を $D'$ とする。まずノズルの先端を上蓋の水平面に一致するように設定し、液体を噴出する。数秒後レシーバを速度 $10\text{ mm/s}$ で降下させ、そのときの流動電流 $I_1$ を測定する。図8は流

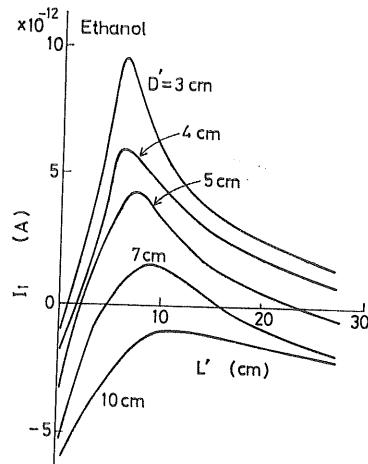
図 8 プレートAがないときの流動電流 $I_1$ の $L'$ 依存性

Fig. 8  $L'$  dependence of streaming current  $I_1$  as a plate A is removed.

動電流の $L'$ 依存性を $D'$ をパラメータとして示したものである。噴出速度は $1.8\text{ m/s}$ である。このときの液柱の長さ $L_G$ は約 $5\text{ cm}$ であるので、 $L'$ が $0\sim 5\text{ cm}$ の範囲では液柱の先端はレシーバ内に存在する。同図から図3の場合と同様に電流は $L'$ に対してピークをもつことがわかる。図3の場合との大きな違いは流動電流の極性が負になることがあることである。 $L'$ が小さく液柱の先端がレシーバ内に入っているとき流動電流は負になる。また $D'$ が $10\text{ cm}$ のときには測定される電流はすべて負になることがわかる。このようにレシーバの形状と液柱の先端の位置によっては電流の極性が反転する場合がある。この現象はレシーバ内の負の帶電霧による静電誘導に起因するものと考えられる。

以上のことから、エタノールなどの有極性液体の流動電流を測定するときには液柱の先端がレシーバ内に入らないこと、およびレシーバの入り口の大きさをできるだけ小さくする必要があることが明らかになった。

#### 5. プレートAの形状および有無の影響

図4に示したように流動電流はプレートAの穴の直径 $D$ に依存する。さらに詳しくプレートAの形状の影響を調べるために、図9(a)および(b)に示す $20\times 20\text{ cm}^2$ の正方形と外径が $10\text{ cm}$ の円形のプレート2種類で比較した。どちらも $D$ は $5\text{ cm}$ である。 $L=10\text{ cm}$ 、噴出速度が $1.8\text{ m/s}$ のときの、噴出後の $I_1$ の変化を図10に示す。正方形の方が電流は2倍ほど大きくなることがわかる。つぎに図9(a)の正方形のプレートAを設置した状態でエタノールを噴出させ、電流 $I_1$ が安定値に達したところで、プレートAを瞬時に取り除いた。そのときの結果が

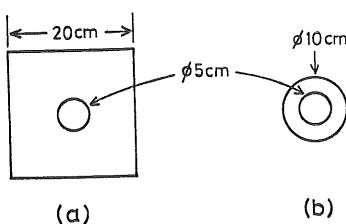


図 9 プレート A の形状  
Fig. 9 Configuration of a plate A.

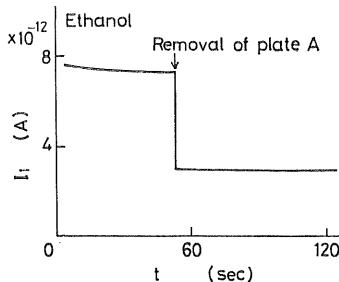


図 11 プレート A を瞬時に除去したときの流動電流  $I_1$  の時間変化  
Fig. 11 Time dependence of streaming current  $I_1$  as a plate A is instantaneously removed.

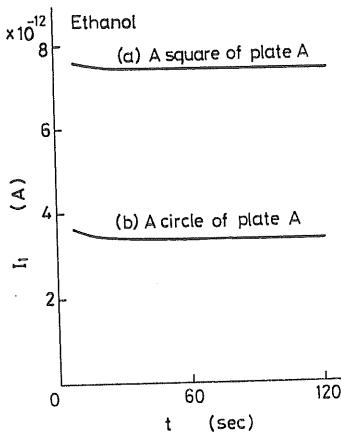


図 10 流動電流  $I_1$  に及ぼすプレート A の形状効果  
Fig. 10 Effects of configuration of a plate A on streaming current  $I_1$ .

図 11 である。プレート A を取り除くと、流動電流は  $7.4 \times 10^{-12} \text{ A}$  から  $3.0 \times 10^{-12} \text{ A}$  に瞬時に変化することがわかる。

これらの結果から流動電流の値にはプレート A の面積が関係すること、および流動帶電に影響している要因は瞬時に応答する現象であることが明らかになった。

## 6. 検 討

前章までに得られた主な結果を以下にまとめる。

(1) エタノールの流動電流  $I_1$  はノズルとプレート A 間の空間の大きさと形状に大きく依存する。

(2) この空間の大きさが瞬時に変わったときには  $I_1$  も瞬時に新しい値に変化する。

(3) ノズルとプレート A 間には帶電霧は存在しない。

そこで  $I_1$  の  $L$  依存性を説明するための新しい考え方を次に提示する。そしてそのことを支持する実験結果について示す。

### 6.1 流動電流に与える影像電荷の影響

金属と液体間に発生しノズルから流出した電荷は、液柱の先端で液滴に分かれれる。液柱中の負電荷は先端に集中して存在すると仮定すると、図 12 に示すように影像

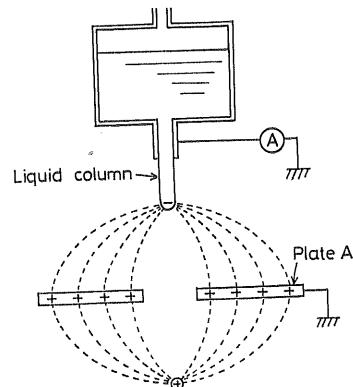


図 12 影像電荷の効果  
Fig. 12 Schematic representation for explanation of effects of image charge.

力によりプレート A 上に正電荷が誘起される。影像力  $F$  は次式で与えられる。

$$F = \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 L(L-L_0)^2} \quad (1)$$

ここで  $q$  は液柱先端の電荷量である。プレート A 上に誘起される電荷の量は  $L$  の値とプレート A の形状に依存する。 $L$  が小さいほど、またプレート A の面積が大きくなるほど誘起される正電荷は増加すると考えられる。この正電荷は液柱の負電荷に影響を及ぼすはずである。正電荷により液柱中で正負電荷の分離が促進されると考えると、観測される流動電流  $I_1$  は  $L$  の値およびプレート A の面積に依存することになる。

図 3 の場合には  $L_0=5 \text{ cm}$  であるから、 $L > 5 \text{ cm}$  の領域において影像力は  $L$  の 2 乗に反比例する。したがって、このとき  $I_1$  は  $L$  増加とともに減少する。図 3 から近似的には  $I_1$  は  $L$  の 2 乗に反比例しているように見えることがわかる。一方  $L < 5 \text{ cm}$  の領域では、 $L$  が小さくなるほど液柱の先端とプレート A の距離は大きくなる

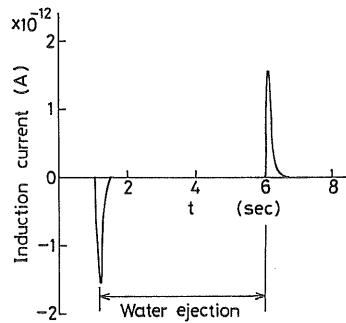
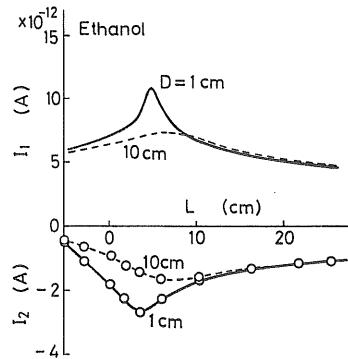


図 13 プレート A の誘導電流の測定例

Fig. 13 A typical example of induction current.

図 14  $I_1$  と  $I_2$  の  $L$  依存性 (エタノール)Fig. 14  $L$  dependence of  $I_1$  and  $I_2$  for ethanol.

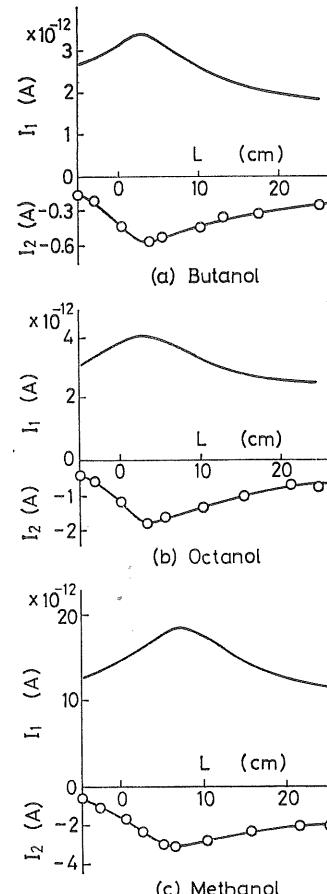
ため影像力が小さくなり、その結果電流  $I_1$  は減少する。このように考えると、 $L \approx L_c$  のとき流動電流が最大値をとることを説明することができる。また、図 3 に示したプレート A の穴の直径  $D$  が 10cm よりも 1cm のときの方が  $I_1$  の変化が大きいことも理解できる。

ここで述べた説明を支持するデータを得るために、次に示すような測定を行った。

## 6.2 流動電流とプレート A の誘導電流の関係

液体の噴出時および停止時には、プレート A とアース間に電流が流れるはずである。この誘導電流は液柱の伸びる速度に関係する。流速が 1.8 m/s のとき、長さ 5cm の液柱が形成される時間は約 28 ms である。誘導電流の測定には Keithley 製のエレクトロメータ 619 を使用した。このエレクトロメータの立ち上がり時間は 1~10 ms であるので、測定には支障がないものと思われる。

図 13 はエタノールの噴出時および停止時の誘導電流の時間変化の一例を示したものである。 $N_2$  ガスの圧力は手動でできるだけすばやく切り換えた。噴出液体の帶電極性は負なので、誘導電流の極性は噴出時には負、停止時には正になる。電流波形の積分値がプレート A に誘起される影像電荷の量になる。誘導電流は負のピーク値

図 15  $I_1$  と  $I_2$  の  $L$  依存性 (ブチルアルコール、オクチルアルコール、メタノール)Fig. 15  $L$  dependence of  $I_1$  and  $I_2$  for butanol, octanol and methanol.

$I_2$  で評価した。ピーク値の大きさは噴出時と停止時ではほぼ一致する。

図 14 は流動電流  $I_1$  と誘導電流のピーク値  $I_2$  の  $L$  依存性を対比して示したものである。流速は 1.8 m/s で、 $D$  は 1cm と 10cm の場合を示した。液柱の長さ  $L_c = 5\text{cm}$  であるので、同図から  $L \approx L_c$  のとき  $I_1$  と同様に  $I_2$  も最大値をとることがわかる。さらに  $D=1\text{cm}$  の場合の方が  $I_1$  と同様に  $I_2$  の変化の幅が大きいことがわかる。このことからプレート A に誘起される電荷の量が、測定される流動電流  $I_1$  の値と密接な関係にあることが示唆される。

図 15 はブチルアルコール、オクチルアルコールおよびメタノールについて、 $I_1$  と  $I_2$  の  $L$  依存性を示したものである。 $D=3\text{cm}$  である。エタノールの場合と同様に、三つの試料液体とも流動電流が正で、噴出時の誘導電流が負の極性をもつ。また  $I_1$  と  $I_2$  が最大値をとると

きの  $L$  の値はほぼ一致する。さらに、このときの  $L$  は液柱の長さ  $L_c$  にだいたい一致していた。

以上のことから、 $I_1$  がノズルとプレート A 間の空間の大きさと形状に依存する原因は、プレート A に誘起される影像電荷の効果であると結論してよさそうである。

図 16 は約  $20 \text{ k}\Omega\text{m}$  の水を試料液体としたときの  $I_1$  と  $I_2$  の  $L$  依存性を示したものである。 $I_1$  は測定系内に  $1.5 \text{ m/s}$  程度の風を送った場合と送らない場合の両方を示した。送風する場合に比べて送風しない場合には  $I_1$  の値が小さいこと、および  $L$  が大きくなると  $I_1$  の極性が反転することがわかる。これは水の噴出時に発生する負に帯電した霧の静電誘導に起因するものと思われる<sup>5)</sup>。送風した場合、帶電霧による影響が除かれるが、他の有極性液体と同様に影像電荷の効果が残るものと考えられる。これは、流動電流を正確に測定するには帶電霧の影響だけでなく影像電荷の影響を考えなければならないことを意味している。なお、誘導電流  $I_2$  は送風の有無には影響されなかった。これは  $I_2$  は噴出直後の測定を行っていることから当然な結果である。

したがって、前報<sup>5)</sup>で述べたアースされた金属導体を使って液柱を覆うことにより帶電霧の影響を除く方法では、流動電流の値を正確に測定することはできない。逆に影像電荷の効果が有効にならないように、測定系をできるだけ大きくすることが必要である。

## 7. ま と め

有極性液体の流動電流の値が測定系の大きさと形状に依存する原因について検討した。その結果得られた知見を以下にまとめて示す。

(1) 水の場合と違って、エタノール、ブチルアルコール、オクチルアルコールおよびメタノールでは測定系内に帶電霧の発生は認められない。

(2) ただ、レシーバ内にわずかの帶電霧が発生している。この帶電霧の影響は、液柱の先端がレシーバ内に入らないようにノズルからできるだけ離すこと、およびレシーバの入り口の径を小さくすることで除くことができる。

(3) 有極性液体では、帶電霧が発生していないときにも流動電流は測定系の大きさと形状に大きく依存する。

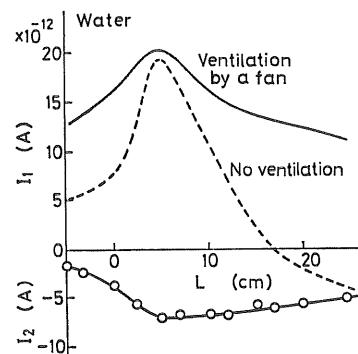


図 16  $I_1$  と  $I_2$  の  $L$  依存性（水）

Fig. 16  $L$  dependence of  $I_1$  and  $I_2$  for pure water.

(4) (3)の原因はプレート A に誘起する影像電荷の効果であると考えられる。

(5) 流下式の装置を使って流動電流の値を正確に測定するには、少なくとも次の二つのことを考慮しなくてはならない。

- (i) 測定系内に帶電霧が存在しない。
- (ii) 影像電荷の効果を除くため測定系はできるだけ大きくする。

今後、次の 3 項目が主な課題として残っている。一つは影像電荷の効果を除くには測定系をどれだけ大きくすればよいかを明らかにする。二つ目は流動電流は流速の何乗に比例しているか。三番目は試料液体の導電率と影像力の関係を明らかにする、ことである。

終わりにあたり、本研究の測定にご協力いただいた本学卒業生、樋口健一郎氏（現、日本ユニシス（株））および岩山茂樹氏（現、（株）荏原製作所）に深謝いたします。

## 参 考 文 献

- 1) A. Klinkenberg and J.L. van der Minne : *Electrostatics in the Petroleum Industry*, p. 57, Elsevier, Amsterdam (1958)
- 2) 梅津 勇、浅野和俊：静電気学会誌, 7 (1983) 264
- 3) 梅津 勇、浅野和俊：静電気学会誌, 9 (1985) 262
- 4) K. Asano, I. Umetsu and A. Watanabe : IEEE Trans. Ind. Appl., 26 (1990) 24
- 5) 下川博文：静電気学会誌, 15 (1991) 292
- 6) 下川博文：静電気学会講演論文集 '92, p. 393 (1992)