

論 文

ノズルから噴出する絶縁液体の帯電に及ぼす電極間隔の影響

梅 津 勇*, 浅 野 和 俊*

(1982年11月30日受理)

Effects of the Electrode Separation on Electrification
of Polar Liquid Ejected from a Nozzle

I. UMETSU* and K. ASANO*

(Received November 30, 1982)

An experimental investigation of electrification of polar liquid ejected from a nozzle is described. The effects of conductivity are examined with the low conductivity liquid (silicone fluid) by adding small amount of *n*-butylalcohol and with the high conductivity liquid (deionized water) of about 10^{-5} S/m. When the high conductivity liquid is used, the distance between receiver and a nozzle has remarkably effected on the streaming current. The polarity of the current is reversed about at 2-6 cm of separation. From the experimental data of the relation between the distance where the polarity is reversed and the distance where the jet is split into droplets, it turned out that both distances are mutually dependent. Thus, it is concluded that the separation dependence of jet electrification is due to the droplet formation and the space charges on the droplets between the jet head and the receiver influence the electrification. In the case of lower conductivity liquid of 10^{-8} S/m, the streaming current doesn't depend greatly on the separation distance.

1. ま え が き

液体の帯電は、バルク状の液体中の帯電と液体微粒子の帯電の二つに大別される¹⁾。その両者の性質は非常に異なるものであるが、いずれにしろ、帯電の問題は本質的には電荷の発生および電荷の緩和の問題の発明にあるといえる。現在までこれらの問題についての研究は、現象の解明ばかりでなく工学的応用の面からも盛んに行なわれている。たとえば、バルク状の液体の場合には、パイプ、フィルタでの流動帯電の問題として石油化学²⁻⁴⁾、大容量電力用変圧器などの分野で研究されており^{5,6)}、また、液体微粒子の場合には、大型タンカの洗浄における噴霧帯電の問題⁷⁾、また応用面ではインクジェットプリンタ⁸⁾などで研究されている。

筆者らも、従来からおもにシリコーン油を用い、実用のものと似た構造の孔径数ミクロンのマイクロフィルタでの帯電現象についてフィルタの幾何学的形状、液体の導電率、時間特性などの面から検討してきた^{9,10)}。そのなかでフィルタの材質、構造が同じならば、フィルタの

細孔1個の帯電への平均的寄与は同じであることや、流動初期の過渡特性が定常特性に影響を及ぼしていることなどを明らかにしてきた。しかし、導電率がきわめて低い液体を試料とするこれら一連の研究では、ノズル先端とレシーバ間距離は流動電流に影響を及ぼさないが、極性液体のような導電率の高い液体の場合には、流動電流の極性が反転するなどのレシーバの位置の影響が顕著に観察され、その一部はすでに報告してきた¹¹⁾。

細管を用いた流動帯電の測定は、古くから行なわれておらず、よく使用される装置は図1に示すようなものである¹²⁾。しかし、われわれが見いたしたこの現象は、いままで行なわれてきた図1のような測定方法で測定されたデータを再検討する必要の可能性を示唆するものである。

このような意味も含め、どのような条件のもとで、このような現象が生ずるかについて種々の導電率の液体を用いて検討を行なった。その実験結果について報告する。

2. 実 験 方 法

2.1 試 料

試料として極性液体のなかでも、フィルタや装置に悪

* 山形大学工学部電気工学科 (992 米沢市城南 4-3-16)

Department of Electrical Engineering, Faculty
of Engineering, Yamagata University, 3-16,
Jonan 4-chome, Yonezawa, 992 Japan

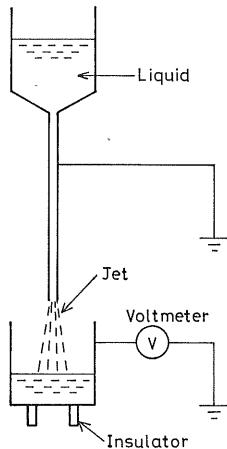


図 1 流動帶電測定装置

Fig. 1 Experimental apparatus of streaming electrification.

影響を及ぼさないという条件を具備するイオン交換水(導電率が約 10^{-5} S/m), *n*-ブチルアルコール(導電率が 5.5×10^{-5} S/m)を用いた。また、流動電流のノズル先端とレシーバ間距離依存性に及ぼす液体の導電率の影響を検討する実験では、上記の条件のほかに導電率を広い範囲で変化できる*n*-ブチルアルコール含有シリコーン油も用いた。シリコーン油に溶解した*n*-ブチルアルコールの空間的分布の均一性などの詳しい検討は、先に報告した¹³⁾。

混入方法は、シリコーン油に*n*-ブチルアルコールを添加し、その試料をガラス容器に封入し超音波で十分攪拌する。これらの導電率の測定は、電極に同軸円筒型(東亜電波 SME-35 型)を用い、キャパシタンスプリッジ(General Radio 社 1615A)によって $\tan \delta$ を測定し、その値から導電率を求める交流法で行なった。

なお、試料は不純物除去のため、後述するSM型フィルタ(表1参照)で前処理してから用いた。

2.2 実験装置

実験装置およびフィルタホールダの略図をそれぞれ、図2(a), (b)に示す。おもな構成は、リザーバ、フィルタホールダ、ノズル、レシーバからなり、それらはファラデーケージのなかに入れ静電遮蔽されている。また、レシーバとノズル間の電界強度ができるだけ距離との線形な関係をもつようにアルミニウム板をおいた。リザーバは内容積 6.4×10^{-4} m³の黄銅製円筒形であり、上部には試料注入、圧力印加用取付け口がある。圧力印加は窒素ガスを用いて行なった。圧力の測定は、共和電業の電気式圧力計 TMP-13A-5A で測定した。リザーバ

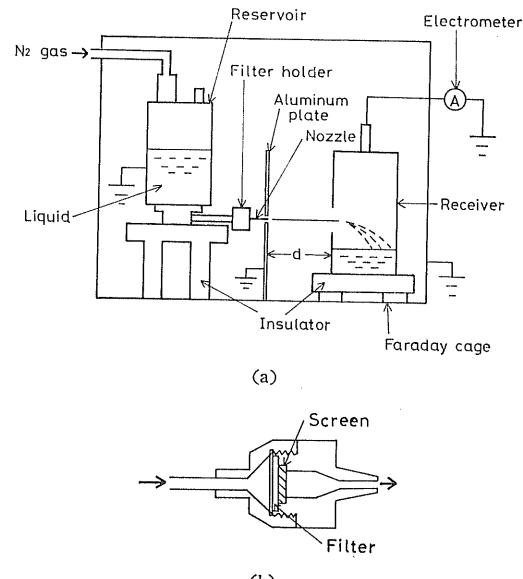


図 2 実験装置 (a), フィルタホールダ形状 (b)

Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus (a), and filter holder configuration (b).

とフィルタホールダは、長さ 26 cm、内径 2 mm のステンレス製パイプで連結している。フィルタホールダは、ステンレス製で図に示すように内部には、フィルタ支持のためのステンレス製スクリーンがある。

用いたフィルタは、日本ミリポア社のメンプランフィルタであるがそれらのフィルタの諸特性量を表1に示す。これらのフィルタは、非常に均一であり約 80% の高い孔容積をもち、厚さは約 150 μm である。材質は純粹で生物学的に不活性なセルロースの混合エステルであり、希酸、希アルカリ、芳香族、脂肪族炭化水素に安定、また非極性溶媒にも安定である。しかし、ケトン、強酸、強アルカリには不適である。なお、これらのフィルタは、実験ごとに新しいものを使用した。

ノズルには、内径 350 μm のステンレス注射針を用いた。レシーバは直方体でアルミニウム板に対向する面に一辺 1 cm の正方形の穴をあけ、ノズルからの液体をう

表 1 ミリポアフィルタの諸特性

Table 1 Characteristics of Millipore filters.

| Type | Mean pore diameter (μm) | Particle limit of filtration (μm) | Porosity (%) |
|------|----------------------------|---|-----------------|
| RA | 1.2 | 1.5 | 82 |
| SM | 5.0 | 6.2 | 84 |
| SC | 8.0 | 9.4 | 74 |

けるようにしている。実験を行なう前にこれらの装置は、*n*-ヘプタン、アセトン、エチルアルコールで洗い、その後十分に乾燥させ、リザーバ、パイプ、ノズル等は試料で共洗いを行なった。

以下に実験の手順を述べる。まず、リザーバに試料を入れ、リザーバ内液体の安定、および注入に伴う発電荷の除去のため、短絡静置する。その後、ノズル先端をアルミニウム板の孔（直径 2 mm）に入れ、板面と一致するように設置する。次にノズル先端とリザーバ間距離が 0 cm になるようにする。この場合、ノズルとリザーバは絶縁されていて、その電位差は低く電位勾配による導電電流はないよう工夫されている。リザーバの位置を調整し窒素ガスで圧力を印加し、ノズルより噴出し、リザーバに収集する。このとき、リザーバに接続した Keithley Electrometer 600B で過渡状態をすこし定められた電流値を測定する。これら一連の測定は、ノズルとリザーバ間距離が 10 cm になるまで続ける。なお、流量は流出時間をトップウォッチで測って求める。

ノズル先端からの液滴形成距離は、写真撮影により求めることができると、ストロボの点滅を用いて肉眼で観察した結果と一致したので肉眼によって測定することにする。

3. 実験結果

3.1 流動電流のノズル先端とリザーバ間距離依存性 シリコーン油のような導電率の低い液体のフィルタに

おける流動電流を測定する場合、その値はリザーバの位置によって影響されない¹¹⁾。しかし、イオン交換水のような導電率の高い液体の場合、流動電流はリザーバの位置により顕著な影響をうける。

図 3 は、試料にイオン交換水を用いて流動電流とノズル先端-リザーバ間距離 d の関係を流量をパラメータとしてフィルタごとに、また、フィルタがない場合についてそれぞれ示したものである。図において流動電流は、途中で極性が反転するので絶対値を示している。結果より、電流は d が小さいとき、正の極性で d とともに減少し、ある距離で負の極性に反転し、さらに d の増加とともに増大するのがわかる。また、電流はフィルタの有無、種類によって著しい変化はないことがわかる。

このような現象は、ほかの極性液体の場合も同様であり *n*-ブチルアルコールの場合を示すと図 4 のようになる。図は、SC 型フィルタを用いたときとフィルタを用いないときの結果を示している。なお、以下では便宜上、電流の極性が反転する距離を電流極性反転距離 d_R と呼ぶことにする。

図 5 は、試料にイオン交換水、フィルタに SM 型を用いたときの d_R と流量の関係を示したものである。結果より、流量 U が約 $0.5 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ までは、流量の増加とともに d_R は増大するが $0.5 \sim 0.6 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ で急激に d_R は小さくなり、それ以後、 U の増加とともに徐々に増大するなど電流極性反転距離 d_R は流量に依存していることがわかる。

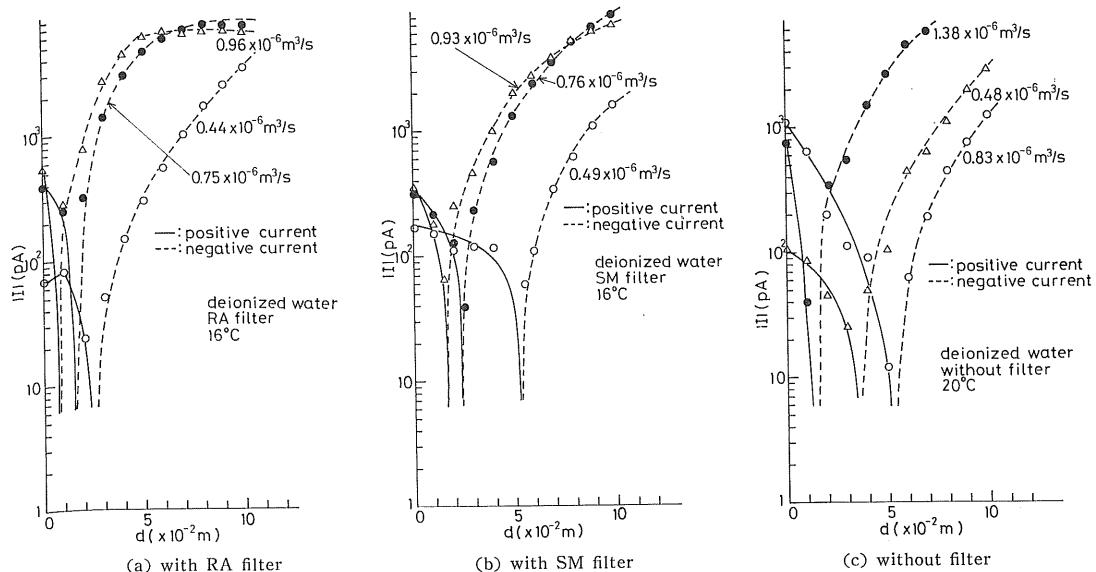
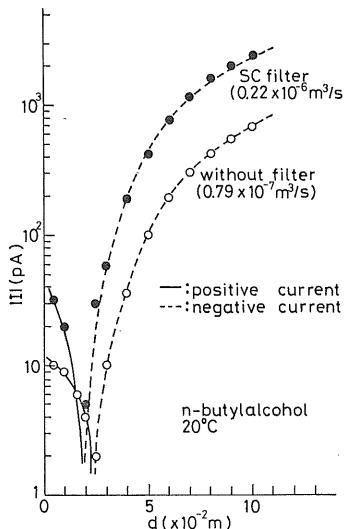
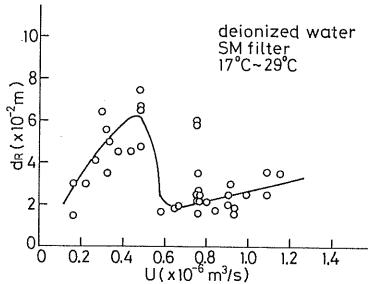


図 3 流動電流の d 依存性

Fig. 3 Dependence of streaming current on d .

図 4 流動電流の d 依存性Fig. 4 Dependence of streaming current on d .図 5 d_R の U 依存性Fig. 5 Dependence of d_R on U .

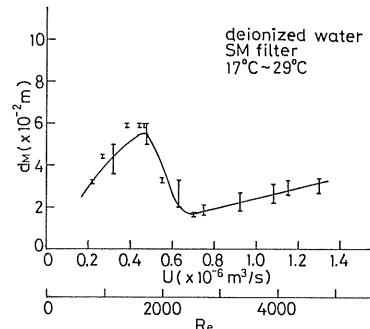
3.2 ジェットの液滴分裂位置と流量の関係

一般に水道水の分裂にみられるように、ノズルあるいは各種の気化器から液体が噴出するときに液滴が形成される。図6は、図2の装置で試料にイオン交換水、フィルタにSM型を用いて液体を噴出させたとき、ストロボを点滅させ、肉眼で観察した液滴形成距離 d_M と流量 U の関係を示したものである。また、図には、ノズル内液体のレイノルズ数 Re を次式より求めて同時に示している。

$$Re = v \cdot d_n / \nu \quad (1)$$

ただし、 v ：平均流速、 d_n ：ノズル内径、 ν ：動粘性係数。

この結果より、 U の増加とともに d_M は増大するが、約 $0.5 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ でピーク値を示し、それから急激に減少し、約 $0.7 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 付近で d_M は小さくなり、それ以後 U の増加とともに徐々に増大していることがわ

図 6 d_M の U と Re 依存性Fig. 6 Dependence of d_M on U and Re .

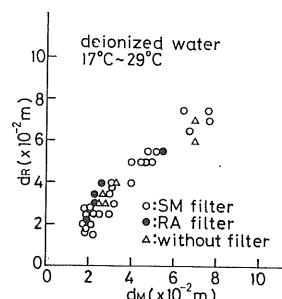
かる。これより、液滴形成距離は流量に依存しているといえる。

3.3 電流極性反転に及ぼす液滴の影響

前述したように、電流極性反転距離 d_R 、液滴形成距離 d_M ともに流量に大きく依存している。また、図5、図6の二つの曲線を比較すると形状がよく似ている。これらを整理して相関をとって示したのが図7である。図には、SM型、RA型フィルタを使用したとき、フィルタを使用しないときの結果をまとめて示している。 d_R は、 d_M にフィルタの種類、有無にかかわらず密接に対応していることがわかる。このことから、流動電流のノズル先端-レシバ間距離依存性は、ジェットの分裂に起因しているといえる。

3.4 分裂帶電特性に及ぼす導電率の影響

導電率によってこの現象がどのように影響されるかを調べるために、動粘性係数 $5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ のシリコーン油に n -ブチルアルコールを微量混入し、広範囲の導電率の試料を作り、その試料を用いて流動電流 I と導電率 σ_{AC} の関係を示すと図8のようになる。この図に示されているように、 σ_{AC} が 10^{-12} S/m から増加すると I は正極性で増加し、 10^{-11} S/m 付近でピーク値を示す。その後、 σ_{AC} とともに減少し、 σ_{AC} が約 $2 \sim 4 \times 10^{-9} \text{ S/m}$

図 7 d_R と d_M の関係Fig. 7 Relation between d_R and d_M .

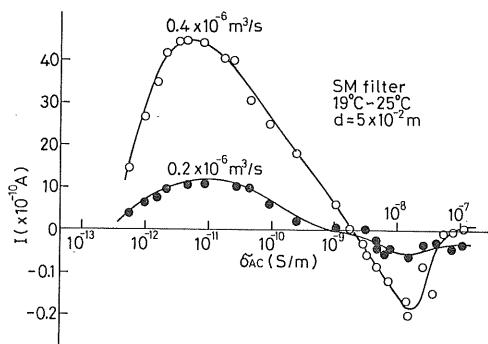


図 8 導電率と流動電流の関係

Fig. 8 Relation between conductivity and streaming current.

付近でゼロとなり、さらに σ_{AC} の増加につれて負極性の電流が流れ、 10^{-8} S/m 付近でピークを示している。しかし、負極性の電流は、正極性の電流と比べて 2 桟程度小さい値である。

実験結果によれば、流動電流のノズル先端-レシーバ間距離依存性の出現は、 $10^{-9} \sim 10^{-8} \text{ S/m}$ 付近の高い導電率の試料から起こる。しかし、 σ_{AC} が 10^{-8} S/m 程度になると、流量などの条件により極性の反転が起きたり、起きなかつたりし、また、そのノズル先端-レシーバ間距離依存性が顕著に出現しないこともあった。図 9 は、そのなかでも代表的な例を示したもので RA 型フィルタ、 σ_{AC} が $1.5 \times 10^{-8} \text{ S/m}$ の試料を用い、流量をパラメータとしたときの結果を示している。電流は距離の増加とともに増大し、 d が 8 cm くらいで飽和している。この結果は、先のイオン交換水、 n -ブチルアルコールのときの結果とは異なっているのがわかる。

次に 3.2 節と同様な方法で σ_{AC} が 10^{-8} S/m 程度を示す試料の液滴形成距離 d_M と流量 U およびノズル内液体のレイノルズ数 Re の関係を求めると図 10 のよう

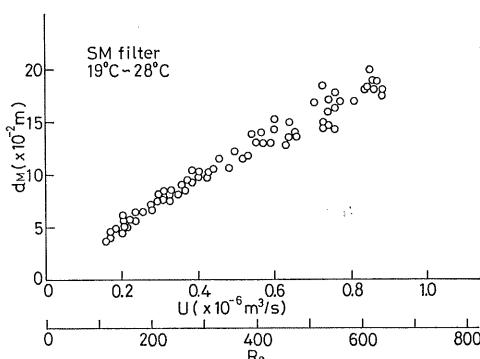
図 10 d_M の U と Re 依存性

Fig. 10 Dependence of d_M on U and Re .

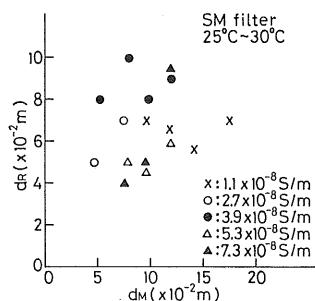
図 11 d_R と d_M の関係

Fig. 11 Relation between d_R and d_M .

になる。結果から U の増加とともに d_M は、単調に増大しているのがわかる。このような結果は、イオン交換水の場合とは著しく異なることを示している。また、図 11 は、 σ_{AC} が 10^{-8} S/m オーダーの試料を用いて流動電流を測定した場合の d_R と d_M の関係を σ_{AC} をパラメータとして示したものである。結果からわかるように、 d_R と d_M には密接な関係はみられない。

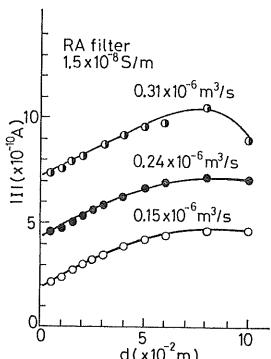
図 9 流動電流の d 依存性

Fig. 9 Dependence of streaming current on d .

4. 考察

4.1 噴出液体の分裂機構

図 3、図 4 に示したように、電極間隔が極性液体の帶電特性に大きな影響を及ぼしている。この現象は、パイプ、フィルタなどにおける流動帶電によって生じる現象とは考えにくい。もし、フィルタでの流動帶電に基づくものであると仮定すると、図 3(c) や図 4 の結果を説明することはできない。また、この現象は液体の導電率が 10^{-5} S/m 付近で顕著に起こり、約 10^{-9} S/m 以下では起こらない現象である。結局、流動帶電以外の別の機構が関与していると考えなければならない。

これらの現象の説明は、最終的には電荷発生、電荷緩

和の機構および電界の解析によってなされると考えられる。そこでわれわれは、電極間の液体の流動状態、すなわち噴出液体の分裂の状態を観測し、それらが測定電流にどのように影響を及ぼすかの定性的な説明をこころみる。

一般にノズルなどから液体が噴出する場合、液柱は本質的には不安定であって、ほんのわずかな表面形状の変化も増幅され液滴が形成される。この問題は、ジェットの不安定現象として Rayleigh をはじめとして古くから流体力学の分野で研究され、その液滴の直径 D は次式で与えられている¹⁾。

$$D = 1.89 D_j \left\{ 1 + \frac{3\mu}{(T\rho D_j g_c)^{1/2}} \right\}^{1/6} \quad (2)$$

ただし、 D_j ：液柱の直径、 T ：表面張力、 ρ ：液体の密度、 μ ：粘度。

また、鈴木ら¹⁴⁾は、孔径 50~100 μm の単孔ノズルを用いて、液体燃料の微粒化について報告しているが、その中で噴出状態を 4 種類のパターンに分類している。すなわち、ノズルより噴出した液体は最初平滑流であるが、しだいに振動が成長し振動流となった後、分裂して連続液滴流となり、さらに液滴が互いに合体する合体液滴流になるといっている。

また、松井ら¹⁵⁾は、単孔ノズルによる円筒状液柱の分裂機構およびそれらに及ぼす周囲媒体の影響の報告の中で、流速の増加とともに平滑流、縦振動波状流、横振動波状流と変化ていき、周囲空気流は、形態の変化を促進する働きをすることを明らかにしている。また、液体のノズルからの分裂距離とノズル内液体のレイノルズ数との関係より、分裂距離は次のように変化することを明らかにしている。

- (1) 平滑流域において流速の増加とともに大きくなり、極大値をむかえる。
- (2) さらに流速を上げると波状流との遷移域になり減少する。
- (3) ノズル内の流れが乱流になると、液柱は波状流を示し再び流速とともに大きくなる。

これらの報告を参考にして、3.2 節で述べた単孔ノズルからの噴出液体の分裂過程を考えると、まったく同様な現象であることが理解できる。図 6 より、 d_M はレイノルズ数 Re の増加とともに大きくなり、約 1,900 で極大値となる。さらにレイノルズ数が大きくなると急激に減少し、約 2,100 付近で小さくなり、それ以後、レイノルズ数の増加とともに徐々に増大している。これらのこととは、松井らの結果と同じもので、液体の分裂はレイノルズ数が約 1,900 までは平滑流域、1,900 から 2,100

においては平滑流と波状流の遷移域、さらに 2,100 以上では波状流に分類できると考えられる。これらの変化は、噴出液体の層流、遷移域および乱流の特徴を示している。

これに対して、図 10 で示した結果では、レイノルズ数はたかだか 700 くらいで層流の範囲だけを示している結果といえる。この範囲は、図 6 の平滑流域に相当するもので、レイノルズ数の増加とともに単調に増大していることは簡単に理解できる。このように同一流量でも粘性が違えばレイノルズ数は違っており、液体の流れの状態を同一に考えることはできない。

また、図 6 と図 10 のレイノルズ数 0~700 の範囲において、同一レイノルズ数で d_M を比較してみると、図 6 の場合より図 10 の場合のほうが大きい値を示している。たとえば、レイノルズ数 600 で比較すると図 6 では d_M は約 2.5 cm、図 10 では約 18 cm になっている。このことは、表面張力、動粘性係数等の液体の性質が、液滴分裂に影響を及ぼしていると考えられる。

4.2 電流の距離依存性に及ぼす液体の分裂効果

結果から明らかなように、電流が電極間隔によって正から負の極性に急激に反転する現象は、液体の分裂、すなわち、液滴の形成に基づくものであることを示唆している。ノズルを用いた噴出および分裂による液体の帶電現象に関する報告は、あまり発表されていない。電極間の距離の影響に関しては、川崎¹⁶⁾と梅津ら¹⁷⁾の報告にみられる程度である。川崎の報告は、水、可燃性液体、ガスなどの噴霧状の液滴の帶電特性に関するもので、ノズル-電極間の距離依存性はみられるが、われわれのような極性反転をしている現象は、みられない。また、分裂液滴と帶電現象との相関関係についての詳細な検討もされていない。

電流の電極間距離による変化のメカニズムを考える場合、実験結果から明らかなように分裂液滴が大きく影響しているので、電極間のジェット、液滴の発生電荷量や緩和状態の推論を行なう必要がある。

一般に電荷の発生は界面の問題であり、バルク状の液体の場合と微粒子形成の場合ではその様子が異なる。バルク状の場合にはとくに導電率によって異なる¹⁾。すなわち、バルク状の液体の場合、導電率が大きい極性液体では緩和も早く電荷の蓄積は起らざるに、導電率の小さい液体でのみ液体内部の蓄積が起こる。

これに対し、液体が気体中に微粒子状に分散する場合は、電荷の緩和過程は微粒子間に存在する気体の導電率によって左右され、液体の導電率自体は電荷の緩和過程には寄与しない。このように、同じ液体の帶電といってもバルク状の場合と微粒化の場合では、本質的な相違が

ある。

図3の実験結果をもとに、分裂による帶電機構を模式的に示すと図12(a)のようになる。ノズル先端とレシーバ間距離 d を変化させてレシーバにおける電流を測定したものが図3の結果であるが、 $d < d_R$ 以下で電流が正であるということは、ジェットは正に帶電していることを意味している。次に $d > d_R$ の状態で電流が負であることは、微粒子は負に帶電していることを意味している。すなわち、ジェットが分裂して微粒化する時点で負に帶電するものと考えられる。

Lenardらによると、液体が機械的に分裂するとその液滴の正味の電荷は負になる¹²。しかし、川崎の報告¹³によると液滴の大きさによって違い、大きな液滴は正の電荷をもったものが多く、小さな液滴は逆に負の電荷をもったものが多いといわれている。いずれにしろ、微粒子の帶電極性は種々の条件によって決定される。

この分裂帶電の機構を考える前に緩和時間について少し考察してみる。実際に実験に用いたイオン交換水(導電率が約 10^{-5} S/m)の電気的緩和時間を次式より求めみると $71 \mu\text{s}$ となる。

$$\tau = \epsilon_0 \epsilon_r / \sigma \quad (3)$$

ただし、 ϵ_r : 比誘電率、 ϵ_0 : 真空の誘電率、 σ : 導電率。

また、図6の実験結果より液滴形成時間は、次の式から求められる¹⁴。

$$T_b = L_b / V_L \quad (4)$$

ただし、 L_b : ノズルからの分裂距離、 T_b : ジェットが分裂するまでの時間、 V_L : ジェットの速度。

この値は、数 ms~数十 ms となり、電気的緩和時間の方が液滴形成時間よりはるかに小さい。すなわち、電荷の緩和過程よりも電荷発生機構がはるかに大きな役割を果たしているものと思われる。

もともどって、3.1節で示した結果を $d < d_R$, $d > d_R$ に分けて考察する。 $d < d_R$ の場合、電極間の液体の

状態はジェットのみで液滴は存在しない。 d がゼロに近い場合は、ジェットそのものによる電流を示している。電流の極性反転の点は、微粒化の行なわれている点、すなわち、分裂帶電の起こっている点であることが、図7の結果から示されている。

この帶電機構を考える場合、次の二つの疑問が生ずる。

- (1) $d < d_R$ でなぜ電流が d の増加に伴い減少するのか
- (2) $d > d_R$ でなぜ電流が d の増加に伴い増大するのか

これらの疑問に対しての解答は、今後の研究課題であるが次のような推論が考えられる。図12(a)においてレシーバの位置、すなわち d が非常にゼロに近い状態での電流値は、ノズルを液体が流動することによる流動帶電と考えられる。ところが $d < d_R$ ではあるが、ある程度 d が大きい場合は、ジェット内の電荷による空間電荷が電界を形成する。その様子を模式的に描くと図12(b)のようになる。すなわち、図のノズル先端では、正の電荷が流出するのをおさえるような負の電界が働く。このことから、 d が長くなる、すなわち、空間電荷の量が大きくなるにつれて、この電荷流出を抑止する力が大きく、結果として電流値が減少するものと考えることができる。

(2)に関しては、この空間電荷による作用がさら複雑なものとなる。図12(c)にその様相をモデル化して示してある。すなわち、空間電荷によるノズル先端への影響は、全電荷によるものであるから図12(b)の場合よりも小さい負の電界と考えられる。しかし、この空間電荷の微粒化点への作用も考えなくてはならない。図に示している場合は、微粒化点では正の電界である。ジェットの状態を一定として d を大きくしていくば、図12(c)の負の電荷による影響がますます増大するから、微粒化点での電界の強さはますます増大する方向にある。反対にノズル先端での抑止力は減少する傾向にある。実験結果から判断すれば、微粒化点における電界の増大が電流の増

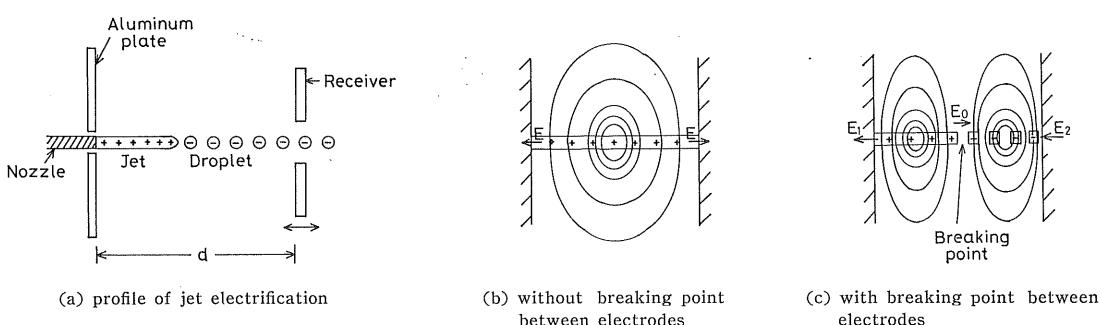


図 12 噴出液体の帶電モデル
Fig. 12 Electrification model of ejected jet.

大をもたらしているものと考えられる。しかし、これらの推論は、もう少し検討してから結論づける必要がある。

次に導電率が 10^{-8} S/m を示す *n*-ブチルアルコール含有シリコーン油の場合、 d_R と d_M には相関関係はない。これは、分裂による液滴に発生する電荷量が、導電率の高い液体の場合の液滴よりも電気的緩和時間が大きいので小さくなっていることによるものと考えられる。
(3) 式より ϵ_r を 2.9 として（この値は、20°C のときの数%混入試料の実測値である）、電気的緩和時間を探ると約 2.6 ms となる。また、図 10 の実験結果を用い、(4) 式に基づいて液滴形成時間を求めてみると、約数 ms 程度になり液滴形成時間と電気的緩和時間は同程度となり、液滴上の電荷量にこの液滴形成時間が大きな影響を及ぼしている。それゆえ、条件によっては、電流の極性反転は起きない現象や、反転しても d_R と d_M には相関関係はないことを示している。

導電率が 10^{-12} S/m 程度の低い液体では、電流に及ぼす電極間距離の影響はないことは先に報告したが¹¹⁾、このことは上記の考察に基づくと、電気的緩和時間が大きいので分裂した液滴には電荷はほとんど発生せず、測定電流は、流動帶電による電流だけに起因するからであると考えられる。

以上の結果より、単孔ノズルを用いて絶縁液体の静電気現象を検討する場合、常に液体の導電率、電極間距離などの影響を考慮に入れる必要があると思われる。また、ノズルを用いた流動帶電に関する今までの報告を、このような観点から再検討する必要があると思われる。

5. 結 論

単孔ノズルを用いて、導電率の高い液体の帶電特性に及ぼす電極間距離の影響について検討を行なった。得られたおもな結果を以下に要約する。

- (1) 導電率の高い液体の場合の帶電特性は、電極間距離に依存する。この現象は、液体の分裂に起因しており、帶電電流の極性反転位置は、液体の分裂位置に密接に関係している。
- (2) ノズル先端から液体の分裂点までを液滴形成距離とすれば、その距離は、ノズル内液体のレイノルズ数に依存し、レイノルズ数により三つの領域に分類

される。

- (3) われわれの実験に用いた液体においては、ジェットはプラスに、液滴はマイナスに帶電する。ジェットの帶電は、フィルタ等での流動帶電に基づくものであるが、液滴の帶電を含めた帶電特性の電極間距離依存性は、電極間に存在する空間電荷によるものと考えられる。

上述の現象の理論的解析は、今後の研究課題である。

終りに、実験に協力していただいた北浦涉君、伏見善一君、小崎進君に感謝の意を表する。また、試料としてのシリコーン油を提供くださったトーレ・シリコーン株式会社に厚くお礼申し上げる。

参 考 文 献

- 1) 静電気学会編：静電気ハンドブック，p. 101, 104, 112, オーム社（1981）
- 2) J. Gavis and J.P. Wagner: Chem. Eng. Sci., 23 (1968) 381
- 3) 浅野和俊：静電気学会誌，2 (1978) 150
- 4) J.T. Leonard and W.A. Affens: Inst. Phys. Conf. Ser., No. 48 (1973) 55
- 5) 本多正己、池田正己、大久保仁：静電気学会誌，3 (1979) 258
- 6) 田村良平、渡邊次男、宮本晃男、山田直也：同上，3 (1979) 266
- 7) A.W. Bright, 増田閃一：電気学会雑誌，94 (1974) 506
- 8) 浅野和俊：静電気学会誌，4 (1980) 238
- 9) 北浦涉、梅津勇、浅野和俊：昭和55年電気関係学会東北支部大会，p. 26, 電気学会（1980）
- 10) 梅津勇、浅野和俊：静電気学会講演論文集'81, p. 107 (1981)
- 11) 梅津勇、北浦涉、浅野和俊：同上, p. 120 (1981)
- 12) A. Klinkenberg and J.L. Minne: *Electrostatics in the Petroleum Industry*, p. 166, Elsevier, Amsterdam (1958)
- 13) 梅津勇、菅井敏幸、浅野和俊：静電気学会誌, 7 (1983) 55
- 14) 鈴木次郎、下田久則、児玉久：第10回「液体の微粒化に関する講演会」講演論文集, p. 53 (1982)
- 15) 松井一史、永長真、徳岡直静、佐藤豪：第7回「液体の微粒化に関する講演会」講演論文集, p. 19 (1979)
- 16) 川崎正士：可燃性液体の静電気による災害防止に関する総合研究報告書, p. 47, 科学技術庁研究調整局 (1976)
- 17) 梅津実、齊藤与四郎、東猛、荷福正治：同上, p. 88 (1976)
- 18) 川崎弘司：電気試験所研究報告, 506号, p. 1 (1950)