

論 文

水の帶電測定法に関する一検討

下川 博文*

(1991年1月25日受理)

A Study on Measuring Method for Electrification of Water

H. SHIMOKAWA*

(Received January 25, 1991)

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 has remarkably effected on the streaming current of polar liquid. The mechanism, however, has not yet been clarified. The purpose of this paper is to investigate the factor influencing the streaming electrification of high purity water in detail. It is found that the shape of receiver as well as its position has noteworthyly effected on the streaming current of water. It becomes clear that this phenomenon is attributed to the induction charging by charged fog generated as the water is ejected from a nozzle. Furthermore the improved method of the measurement for the streaming electrification of water is proposed.

1. はじめに

固体表面を液体が流れたときの摩擦によって起こる静電気帶電は流動帶電と呼ばれている。この現象は古くからよく知られており、多くの人によって研究されてきたにもかかわらず、いまだにはっきりした理論が確立されていない。また、測定者、測定法によってばらつきが大きく、同一の測定者が注意深く同じように測定しても測定日によって結果が異なることがある。極端な場合、帶電の極性が反転してしまうことすら起こる。このように液体の帶電度を評価する方法が確立されているとはいえないのが現状である。

流動帶電はあらゆる液体と固体との間で生じる。特に問題となるのは低導電率の液体や固体の場合で、電荷の緩和時間が長くなり電荷が蓄積されて、電界強度が危険な値に達することがある。ときには火花放電を起こし爆発事故につながることもある。

帶電量を抑える方法として、絶縁液体中にイオン性界面活性剤を添加して液体の導電率を上げ、電荷の緩和を促進する方法が考えられた¹⁾。しかし、添加量を多くし

ないと帶電量を抑えることができず、中途半端な添加量では逆に帶電量が増加してしまう^{2,3)}。また、活性剤を大量に加えると液体はもはや絶縁液体とはいえないほど導電率が大きくなる。導電率の広い範囲にわたって流動帶電現象を説明する理論は確立されていない。

通常実験室レベルで液体の帶電特性を研究する場合、図1に示すような流下式の測定装置が簡便な方法として使われる¹⁾。金属細管から発生する電流および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。この二つの電流値は符号が反対で大きさは等しく、いわゆる電流連続則が成り立っていると考えられている。しかしこの研究論文の中でレシーバの形状、ノズルとレシーバ間の距離など測定装置の大きさ、形状、配置に関して考察したものはあまり多くない。

有極性液体、あるいは絶縁液体に界面活性剤を添加した場合の流動帶電に関する報告が最近いくつか見られる。渡辺らはアルコール類の流動電流を図1と同様の装置を使って詳細に測定し、流動帶電量は溶媒である液体の分子パラコールとの関係で考える必要のあることを主張している⁴⁾。また、渡辺らは流動電流とパイプ長との関係についても報告しており、あるパイプ長で流動電流は最大値をもつことを指摘している⁵⁾。しかしながら、測定装置の配置、形状および測定法に関して詳しく述べてはいない。

長南らは各種液体の流動電流の流速依存性を詳細に測

キーワード：流動電流の測定法、純水、帶電霧の発生、誘導帶電、レナード効果

* 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

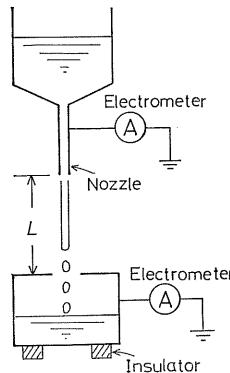


図 1 流下式の流動電流測定装置

Fig. 1 Measurement of streaming electrification.

定し、流動電流は流速の n 乗に比例し、 n は液体の導電率が増加するほど大きくなることを報告している⁶⁾。また界面活性剤を添加した絶縁液体では、流速の増加にともない帶電の極性が負から正に反転することがあることを指摘している⁷⁾。彼らも測定装置、測定方法について詳しく記述していない。

筆者の知る限り流動電流と測定系の関係について調べたのは梅津、浅野らが最初である⁸⁻¹⁰⁾。彼らは有極性液体の帶電はノズルとレシーバ間の距離（図 1 中では L に相当する）に依存することを報告している。特に液体の導電率が 10^{-8} S/m のオーダより大きくなると L の値に顕著に依存するようになり、帶電の極性が反転する。彼らはノズルから噴出する液体の分裂状態に注目して論じているが、この現象の原因を明らかにしたとはいえないようである。測定系の形状により帶電の極性が反転することから、流動帶電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。

本報告では水、特に純水を試料として流動帶電現象に影響する要因について調べた。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、ノズルからの噴出時に発生する帶電霧の誘導帶電に起因することを明らかにした。このことを支持するいくつかの証拠を示し、さらに流動電流を測定する方法について考察した。

本報告は抵抗率が $20 \text{ k}\Omega\text{m}$ 程度の純水を試料としたが、試料液体の純度および種類の影響については稿を改めて報告する。

2. 実験方法

実験装置の概略を図 2 に示す。水のリザーバタンクは直径 10 cm 、長さ 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

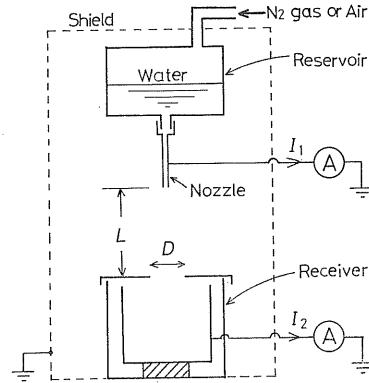


図 2 測定装置の概略図

Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus.

縁されている。ノズルはステンレス製の注射針を加工したもので、通常は針先を直角にカットしてある。針先の影響を調べる場合にはカットの角度を変化させた。ノズルの大きさは内径 0.4 mm 、外径 0.7 mm 、長さ 95 mm である。レシーバはファラデーケージを構成している。大きさは外側が直径 14 cm 、高さ 20 cm の円筒で、内側は直径 10 cm 、高さ 15 cm の円筒である。材質はアルミニウムである。内側の円筒容器はテフロンによりアースから絶縁されている。シールドは底辺が $50 \times 50 \text{ cm}^2$ で高さが 1 m の直方体で、アングルの骨組みに真ちゅう製の金網 (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。

図 2 のノズルとレシーバの上蓋との間の距離を L とする。上蓋の穴の形状は円で、その直径を D とする。 L は $3 \sim 40 \text{ cm}$ 、 D は $1 \sim 11 \text{ cm}$ の範囲で変化させた。流速は $0.3 \sim 3.2 \text{ m/sec}$ である。高流速が必要な場合にはタンクの上部から N_2 ガスにより、低流速の場合には空気圧により加圧して水を噴出させた。

使用した水は次のように製造した。

- (1) 抵抗率が $0.07 \text{ k}\Omega\text{m}$ 程度の水道水を前処理フィルタによりイオン交換する。
- (2) その後 1 段蒸留することにより $20 \text{ k}\Omega\text{m}$ 程度の純水をつくる。
- (3) 最後に超純水製造装置 (ミリポア製、ミリ Q ラボ) により最高 $183 \text{ k}\Omega\text{m}$ の超純水を製水する。

水タンクの中に注入する際に発生する電荷を除くために、水を注入後約 1 時間ほど放置したのち測定を行った。そのとき試料水の抵抗率は $20 \text{ k}\Omega\text{m}$ 程度であった。

電流はノズルの発生電流 I_1 とファラデーケージに流れ込む電流 I_2 を測定した。使用した機器はアドバンテ

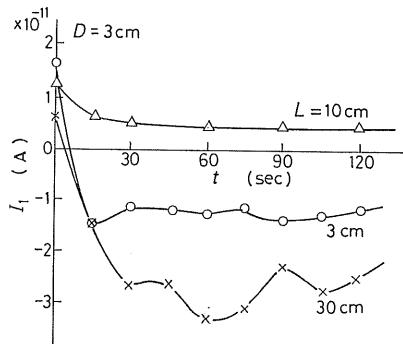
図3 流動電流 I_1 の時間変化の L 依存性

Fig. 3 Time dependence of streaming current I_1 with L as a parameter.

スト製のエレクトロメータ (TR8401 と TR8651) である。

3. 結 果

図3はノズルでの発生電流 I_1 の時間変化をノズルとレシーバ間の距離 L をパラメータとして示したものである。図中 $t=0$ sec は水の噴出を開始した時間を示している。流速は 1.8 m/sec で、上蓋の穴の直径 D は 3 cm の場合である。同図よりわかるように流し始めは I_1 は正である。これは当初水は負に帯電していることを示している。時間の経過とともに I_1 は L の値に顕著に依存するようになり、正にも負にもなることがわかる。つまり、 $L=3$ cm のときは数秒経つと I_1 は負に反転する。 $L=10$ cm の場合には電流は減少するものの正にとどまり、30 sec ほど経過すると一定値になる。さらに $L=30$ cm になると再び I_1 は負に反転するようになる。電流が反転する場合には 30 sec 程度経過後の電流の変動は反転しない場合に比べて大きいことがわかる。

ノズルとレシーバ間の距離が変化することがあることは、梅津、浅野らの報告と一致している⁸⁻¹⁰。

図4は流動電流 I_1 の時間変化を、レシーバの上蓋の直径 D をパラメータとして示したものである。流速は 1.8 m/sec, L の値は 14 cm である。流し始めは I_1 は正である。 $D=1$ cm の場合には I_1 は時間の経過とともに減少するが、30 sec 程度経過すると正のまま一定値になることがわかる。 $D=5$ cm の場合には時間の経過にともない電流は負に反転する。また 30 sec 経過後の電流値の変動は大きい。

このように通常流動電流として測定される I_1 はレシーバの位置あるいは形状に顕著に依存する。この現象は、ノズルの内壁に形成される電気二重層の一方の電荷

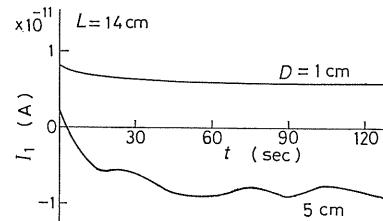
図4 流動電流 I_1 の時間変化の D 依存性

Fig. 4 Time dependence of streaming current I_1 with D as a parameter.

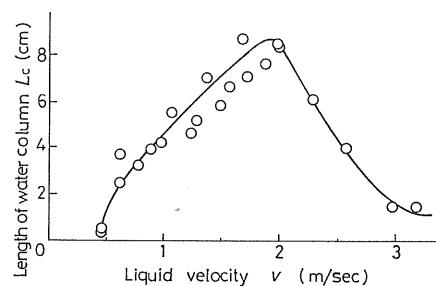
図5 水柱の長さ (L_c) の流速依存性

Fig. 5 Relation between length of water column (L_c) and liquid velocity.

が流されるため、流出する液体が帶電するようになると、いう従来の電気二重層理論では説明できそうもない。

試料水はリザーバタンクに加える圧力がある値より大きくなるとノズルから水柱状に噴出し、そのあと水滴に分裂しながら落下する。梅津、浅野らは水柱の長さと帶電の極性が反転する L の値に密接な関係があることを見いだしている⁸⁻¹⁰。つまり L の値が水柱の長さより大きくなると帶電の極性が反転することを見いだし、反転する距離と帶電状態についての詳細な結果を報告している。

図5は水柱の長さ L_c の流速依存性の測定結果を示したものである。低流速域では L_c は流速に比例して大きくなるが、ある流速で最大値に達し、その後小さくなることがわかる。図3、図4の実験条件である流速 1.8 m/sec は L_c が最大になる場合に相当し、 L_c の値は約 8 cm である。したがって、図3において $L=3$ cm の場合にはレシーバの中に水柱が 5 cm ほど入っていることになる。 $L=10$ cm の場合にはレシーバの中蓋の上方 2 cm のところで水柱が分裂することになる。また、 $L=30$ cm ではレシーバから 20 cm 以上上方で水滴に分裂し落下することになる。これらのことから、流動電流を測定する際にはノズルから噴出する水柱がどのような条件に置かれているかが重要なファクタになって

いることが示唆される。

4. 帯電霧の存在を示すいくつかの証拠

図3、図4の結果にはなんらかの誘導帶電が関係しているものと思われる。ところで水が霧状になると細かいものは負に帯電することはレナード効果¹¹⁾として知られている。ノズルより噴出した柱状の水は途中で不安定になり分裂し、水滴となってレシーバに達する。水滴に分裂するときに霧状のさらに細かい水滴が発生している可能性がある。また、水滴がレシーバの底に衝突するときに霧が発生する可能性がある。この霧の存在は視覚では確認することはできなかった。霧が存在する可能性のある場所はノズルとレシーバ間の空間、およびレシーバの中の空間である。水の噴出により負の帶電霧が形成されると仮定すると、流れ始めは霧が存在しないので、図3に示すように I_1 は正になる。十分な量の負の帶電霧が形成されるようになると、静電誘導によりノズルから正電荷が噴出する。したがって I_1 は負になることになる。

L が小さくして水柱がレシーバの中に入っている場合には、レシーバの中の帶電霧の誘導を強く受けるため、図3の $L=3\text{ cm}$ の場合のように水を流してしばらくすると電流 I_1 は正から負に反転すると考えられる。 L が水柱の長さ L_0 より大きくなると、水柱がレシーバの中に入らないためレシーバ内の帶電霧の影響を受けない。しかしながら、 L がかなり大きいとき、ノズルとレシーバ間に存在する帶電霧の誘導により、図3の $L=30\text{ cm}$ の場合のように電流 I_1 は負に反転するようになると考えることができる。 L が中ぐらいのとき、ノズルとレシーバ間の空間が小さいため、帶電霧の量は噴出する水の帶電の極性を反転させるほど多くないものと考えられる。

同様に、図4に示したように L を一定にしてレシーバの上蓋の直径を大きくしていくと I_1 の極性が反転するのは、レシーバ内の帶電霧の誘導に原因するものと考えることができる。

このように帶電霧の存在を仮定すると、図3、図4の結果をうまく説明することができそうである。

霧の存在を直接証明するためにレシーバの近くにろ紙を置きその重さの変化の測定を試みたが、 0.1 mg の精度で変化はみられなかった。

以下に述べる結果は帶電霧の存在により発生する影響を微少電流あるいは微少電圧の形で検出したものである。

4.1 風の影響

形成された霧を除けば I_1 は再び正に反転するはずである。これを示すのが図6の結果である。測定装置のシールドの外から扇風機により 1.5 m/sec 程度の風を送っ

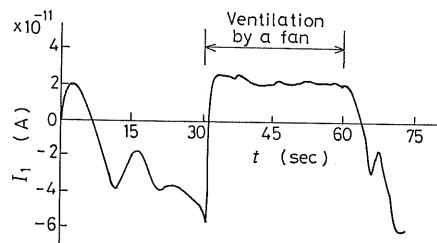


図6 流動電流 I_1 に及ぼす送風の効果

Fig. 6 Effects of ventilation by an electric fan on streaming current I_1 .

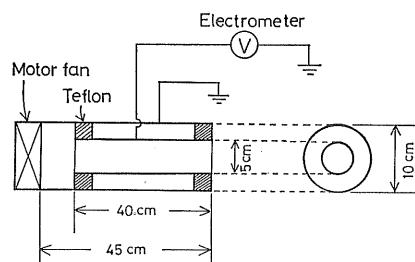


図7 吸引式ファラデーケージの概略図

Fig. 7 Schematic diagram of drawing faraday cage.

たときの I_1 の時間変化を示す。流速は 1.8 m/sec であり、 $L=30\text{ cm}$ 、 $D=3\text{ cm}$ である。 $t=0\text{ sec}$ は水を流し始める時間である。 $t=30\text{ sec}$ で送風を開始し、 60 sec で風を止めた。送風を開始すると瞬時に I_1 は正に反転し、風を止めると電流は徐々に減少し再び負になることがわかる。このことから帶電霧は送風により除かれ、送風を止めると再び形成され始めるものと考えられる。

4.2 帯電霧のファラデーケージによる吸引

負の帶電霧が存在するとすると、ノズルとレシーバ間の空気の帶電量をファラデーケージで測定することができるはずである。図7は使用した外径 10 cm 、内径 5 cm 、長さ 45 cm の吸引式のファラデーケージである。空気はモータファンにより吸引する。吸引する風速は吸口において約 0.5 m/sec である。モータファン側の内側の円筒の出口には吸引した電荷を逃がさないように金属製の網が貼ってある。吸引した電荷はエレクトロメータで測定した。ノズルとレシーバ間の空気を吸引したときの測定例が図8である。 $t=15\text{ sec}$ においてノズルより水を噴出し、 $t=60\text{ sec}$ で噴出を停止した。流速は 1.8 m/sec 、 $L=30\text{ cm}$ 、 $D=3\text{ cm}$ である。水を噴出したのち数秒後、吸引式ファラデーケージは負電荷を計測し始めていることがわかる。また、吸引した電荷の量は流速が大きくなるほど増加する。水の噴出を停止してから数秒後、負電荷の増加はストップする。このことから水を噴

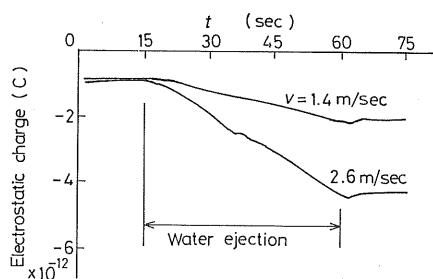


図8 帯電霧の測定例

Fig. 8 A typical example of electrostatic charge of fog.

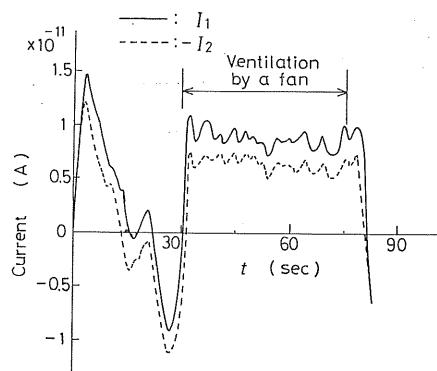
図9 I_1 と I_2 の比較

Fig. 9 Comparison between I_1 and I_2 .

出中にノズルとレシーバ間に負電荷が発生しているものと考えられる。

4.3 I_1 と $-I_2$ の比較

図9は I_1 と $-I_2$ の時間変化を同じグラフに示したものである。 $t=0$ secで流し始め、30 secで送風し、75 secで送風を止めた。流速は1.4 m/sec, $L=20$ cm, $D=3$ cmである。同図より I_1 が正のとき

$$|I_1| > |I_2| \quad (1)$$

であり、 I_1 が負のとき

$$|I_1| < |I_2| \quad (2)$$

である。すなわち電流連続の関係が成り立っていない。これは第三の電流が存在することを意味している。霧の発生電流 I_3 は霧団気中からノズルに向かう方向を正とすると、負の霧が発生していると仮定しているので、 $I_3 > 0$ となる。したがって、

$$I_2 = I_3 - I_1 \quad (3)$$

なので、(1)式と(2)式の関係が理解できる。

4.4 帯電霧による誘導電流の測定

図10に示すように、水柱から水平11 cmの距離に面積 $2 \times 2 \text{ cm}^2$ の金属板を置き、それに誘起される電流

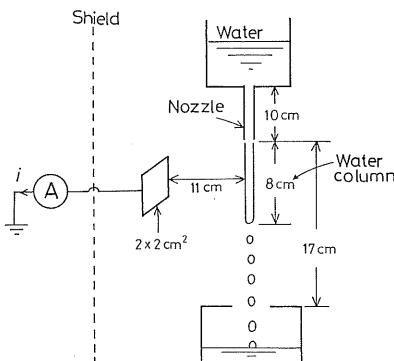


図10 誘導帶電の測定装置

Fig. 10 Measuring apparatus of induction current.

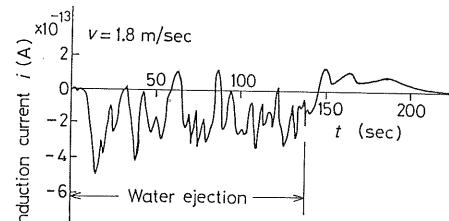


図11 誘導電流の時間依存性の測定例

Fig. 11 A typical example of time dependence of induction current.

を測定した。負の帯電霧が発生しているとすると、図中の電流計は負に振れるはずである。図11は $t=0$ secで水を流したときに測定される誘導電流の時間変化を示したものである。流速は1.8 m/sec, $L=17$ cm, $D=3$ cmである。流し始めしばらくすると電流計は負に振れ、数秒間の周期で振動を繰り返す。正に振れることがあるが、ほとんど負側に振れることから負電荷による誘導を受けているものと考えられる。140 secで水を止めると、電流はゆっくりと正に向い、その後徐々に減少することがわかる。これは帯電霧が徐々に消滅していることを示しているものと思われる。

4.5 ノズル先端の形状の影響

ノズルの形状により帯電霧の発生電荷量が変化することが考えられる。図12に2種類のノズルを示す。ノズル1は4.4節までの測定に使用したものであり、ノズル2は先端を 20° にカットしたものである。この2つのノズルを使って、 $t=0$ secで流速1.8 m/secの水を流したときの電流 I_1 の時間変化を示したのが図13である。 $L=30$ cm, $D=3$ cmである。同図よりノズル2の方が速く負に反転すること、および反転後の電流値はノズル1の場合より大きいことがわかる。このことから先端を 20° にカットしたノズルの方が帯電霧が多く発生するも

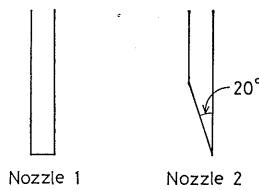
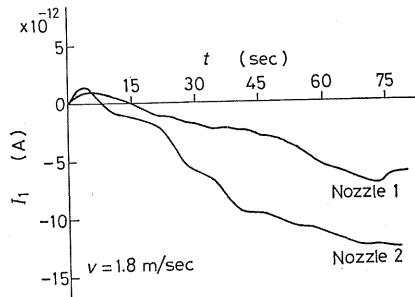
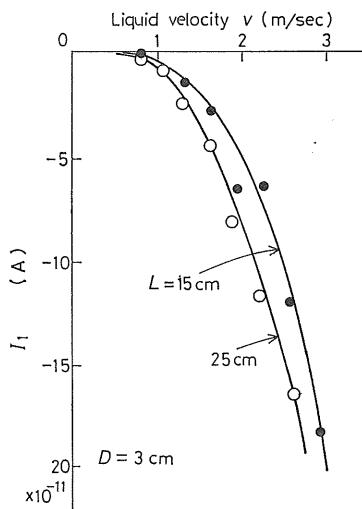


図 12 ノズル 1 とノズル 2 の先端の形状

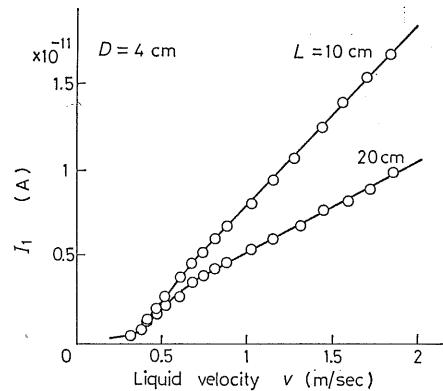
Fig. 12 Configurations of nozzle 1 and 2.

図 13 流動電流 I_1 の時間依存性に及ぼすノズル形状の影響
Fig. 13 Time dependence of streaming current I_1 for nozzle 1 and 2.図 14 流動電流 I_1 の流速依存性(送風しないとき)Fig. 14 Liquid velocity dependence of streaming current I_1 (no ventilation by an electric fan).

のと思われる。

5. 流動電流の測定法の検討

前章で述べた 5 つの測定結果より、水の噴出に伴い帶電霧が発生すると結論してよさそうである。したがって、帶電霧の静電誘導が存在する限り、通常の測定法で

図 15 流動電流 I_1 の流速依存性(送風したとき)Fig. 15 Liquid velocity dependence of streaming current I_1 (ventilation by an electric fan).

は正しく流動電流を測定することができない。図 14 は通常の方法で測定した流動電流 I_1 の流速依存性である。上蓋の穴の直径 D は 3 cm であり、 $L=15$ cm と 25 cm の場合を示した。 I_1 の値は水を流し始めてから数十秒経過後の値である。 I_1 は負である。

$$I_1 \propto v^n \quad (4)$$

とすると、 n は L の値にかかわらず約 3 であった。ここで、 v は流速の大きさである。過去の報告によると、有極性液体では n の値は 1.5~4 程度と 1 より大きく、測定者によりまちまちである⁴⁻⁷⁾。

図 15 は送風しながら測定した流動電流 I_1 の流速依存性を、 L をパラメータとして示したものである。風の流速は 1.5 m/sec であり、 $D=4$ cm である。図 14 と同様に I_1 の値は水を流し始めてから数十秒後の値である。高流速領域では I_1 は流速の 1 乗に比例していることがわかる。また I_1 は正である。しかしながら I_1 は L の値に強く依存する。この原因ははっきりしないが、帶電霧による誘導の影響が残っていることが一因だと思われる。また送風により水柱から帶電霧が新たに発生する可能性も考えられる。このように、送風によって流動電流の極性は測定できるものの、その大きさを正しく測定することは困難である。

なお、図 15 では 0.6 m/sec 以下の低流速域では I_1 の流速依存性が複雑に変化していることがわかる。これは 0.4 m/sec から 0.6 m/sec の領域ではノズルから噴出する水が滴流から連続流に変化していることに起因しているものと考えられる。長南らも指摘しているように^{6,7)}、高導電率の液体においては滴流のときノズルから落下するまでに液滴の電荷が緩和する。したがって、水のような導電率の大きな液体の流動電流を問題にする場合には、連続流における流速依存性を測定する必要がある。

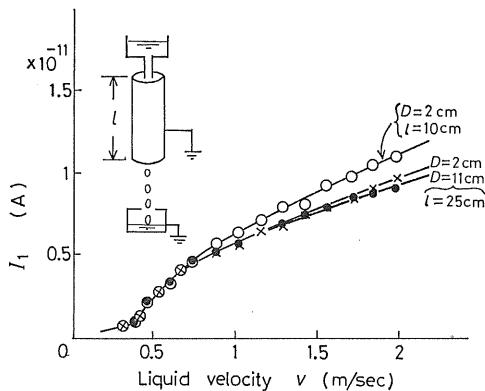


図 16 流動電流 I_1 の流速依存性（水柱をシールドしたとき）

Fig. 16 Liquid velocity dependence of streaming currents I_1 (shield of water column).

ある。

図 16 は同図中に示すように内径 20 mm のアースされた金属性の円筒で水柱をシールドしながら測定した I_1 の流速依存性である。この円筒は上端をノズルの先端と同じ高さに設置した。ここで用いた I_1 の値も水を流し始めてから数秒後の値である。円筒の径を適当に選ぶことにより発生する帶電霧はすぐにアースされてしまい、誘導帶電はほとんど起きないことが期待できる。円筒の長さ $l=10$ cm で $D=2$ cm の場合と、 $l=25$ cm で D が 2 cm と 11 cm の場合を示した。レシーバの位置と形状に I_1 の値はほとんど影響されないことがわかる。図 5 に示したように水柱の長さには最大値があり、本測定の場合最大 8 cm であった。したがって、図 16 の測定では水の分裂点は円筒内に完全に入っていることになる。 I_1 の流速依存性は図 15 のときと同じように高流速側で流速の 1 乗に比例している。

この方法の問題点は、霧の誘導をなくすには円筒の径は小さいほうがよいが、小さくすると分裂した水滴が円筒の内壁に付着することである。また、水柱にアースした金属性の円筒を近づけることで他の不都合な要因が生じる可能性を検討する必要がある。いずれにしても、帶電霧の誘導帶電を除かない限り流動電流を正しく測定することができないことは明らかである。

6. ま と め

水の流動電流が測定系の配置と形状に依存する原因について調べた。その結果得られたことを以下にまとめて示す。

(1) 水の噴出時に負の帶電霧が発生していることを示

唆する 5 つの結果が得られた。

- (i) ノズルとレシーバ間に送風すると帶電の極性は反転する。
- (ii) ノズルとレシーバ間の空気は負に帶電している。
- (iii) ノズルの発生電流とレシーバで測定される電流間に電流連続則が成り立っていない。
- (iv) ノズルとレシーバ間に設置した電極に負の誘導電流が観測される。
- (v) 流動電流の時間変化はノズル先端の形状に依存する。

(2) したがって、従来の流下式の測定法では帶電霧の誘導帶電のため流動電流を測定することは帶電の極性をも含めて困難である。

(3) 帯電霧の静電誘導を除くには、水柱を金属製の円筒によりシールドすると有効であることを示した。

(4) (3)の方法で高純水の流動電流を測定したところ、連続流の領域では流動電流は流速の 1 乗に比例した。

今後、次の二項目が大きな課題として残っている。一つは、水以外の液体において帶電霧が発生しているかを調べる。もう一つは、有極性液体の流動電流を正しく測定する方法を明らかにする、ことである。

終わりに、本研究は昭和 63 年度から 2 年間文部省科学研究費一般研究(C)の補助金の交付を受け行われたものである。ここに感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) A. Klinkenberg and J.L. van der Minne: *Electrostatics in the Petroleum Industry*, p. 57, Elsevier, Amsterdam (1958)
- 2) J.T. Leonard and H.W. Carhart: *J. Colloid Interface Sci.*, **32** (1970) 383
- 3) 彦坂知行, 大橋朝夫, 家田正之: 電気学会絶縁材料研究会 EIM-87-78, p. 29 (1987)
- 4) 渡辺茂男, 伊藤正一, 大橋朝夫, 上田 實: 電学論 A, **103** (1983) 315
- 5) 渡辺茂男, 大橋朝夫, 伊藤正一: 静電気学会誌, **4** (1980) 109
- 6) J. Chonan, A. Ohashi and M. Ueda: *Charge Storage, Charge Transport and Electrostatics with Their Application*, p. 55, Elsevier Publishing Co., Japan (1979)
- 7) 長南功男: 「液体の流動帶電現象に関する研究」名古屋大学修士学位論文 (1979)
- 8) 梅津 勇, 浅野和俊: 静電気学会誌, **7** (1983) 264
- 9) 梅津 勇, 浅野和俊: 静電気学会誌, **9** (1984) 170
- 10) K. Asano, I. Umetsu and A. Watanabe: *IEEE Trans. Ind. Appl.*, **26** (1990) 24
- 11) 静電気学会編: 静電気ハンドブック, p. 104, オーム社 (1981)