

水の帯電測定法に関する一検討

下 川 博 文

A Study on Measuring Method for Electrification of Water

Hirofumi SHIMOKAWA

Abstract

There are a number of reports that the streaming or spray electrification of the liquid ejected from a nozzle has been experimentally investigated. Recently, it has been found that the position or shape of receiver has remarkably effected on the streaming current of polar liquid. But the mechanism has not yet been clarified.

In this paper, it becomes clear that the phenomenon is caused by the induction charging of charged fog 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帯電は流動帯電と呼ばれている。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、帯電の極性が反転してしまうことすら起こる。このように液体の帯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。

流動帯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¹⁾。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。

帯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²⁾。しかし、添加量を多くしないと帯電量を抑えることができず、中途半端な添加量では逆に帯電量が増加してしまう^{3,4)}。また、活

性剤を多量に加えると液体はもはや絶縁液体といえないほど導電率が大きくなる。したがって、導電率の広い範囲にわたって流動帯電現象を説明する理論の確立が必要になっている。

通常実験室レベルで液体の帯電特性を研究する場合、図1に示すような形状の測定装置が簡便な方法として使われる²⁾。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。しかし多くの研究論文の中でレシーバの形状、ノ

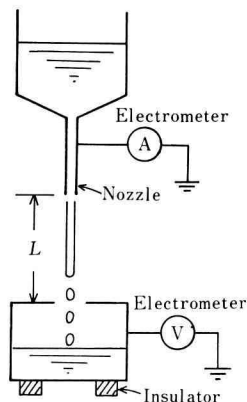


Fig. 1. Measurement of streaming electrification.

平成2年9月28日受理

* 電気工学科

ズルとレシーバ間の距離など測定装置の大きさ、形状、配置についての考察はほとんどなされていない。

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帯電に関する報告が最近いくつか見られる。渡辺等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、流動帯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⁵⁾。また渡辺等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⁶⁾。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。

長南等は各種液体の流動電流の流速依存性を詳細に測定し、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⁷⁾。また界面活性剤を添加した液体では流速の増加にともない帯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⁸⁾。彼等も測定装置、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等が始めてである^{9~12)}。彼等是有極性液体では噴出する液体の帯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^{-10} S/cm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、帯電の極性が反転する。彼等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。彼等が注目したのはノズルとレシーバ間の距離 L だけであるが、 L の値によっては帯電の極性が反転してしまうことがあることから、測定系の配置に依存しない流動電流の測定法の確立が必要になっている。さらに、流動帯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ものと思われる。

本報告では水、特に高純水を試料として流動帯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配置に依存する原因はノズルからの噴出時に発生する帯電霧の誘導帯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ための改良した方法を提案する。本報告は抵抗率が $2\text{ M}\Omega\text{cm}$ 程度の高純水を試料として、その流動電流に及ぼす要因について検討したものである。試料の純度及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。ノズルは内径0.4 mm、長さ95 mmである。下のレシーバはファラデーカップを構成している。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 とし、上蓋の穴は円状で直径を D とする。 L は3~40 cm、 D は1~11 cmの範囲で変化させた。流速は0.3~3.2 m/secである。高流速が必要な場合には N_2 ガスにより、低流速の場合には空気圧によりタンクの上部から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 $7\text{ k}\Omega\text{cm}$ 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 $2\text{ M}\Omega\text{cm}$ 程度の純水をつくる。

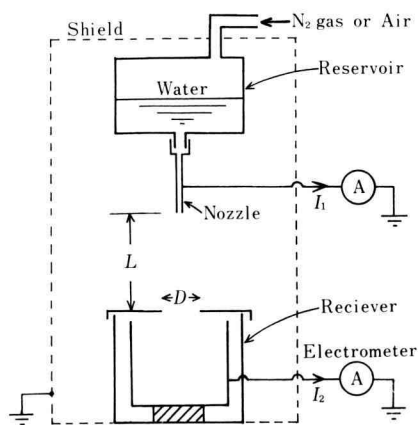


Fig. 2. Schematic diagram of experimental apparatus.

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 $18.3 \text{ M}\Omega\text{cm}$ 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 $2 \text{ M}\Omega\text{cm}$ 程度であった。

電流はノズルの発生電流 I_1 とファラデーカップに流れ込む電流 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 $t=0 \text{ sec}$ の水を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, $L=3 \text{ cm}$ のときは数秒経つと I_1 は負に反転する。 $L=10 \text{ cm}$ の場合には電流は減少するものの正にとどまり, 30 sec 程経過すると一定値になる。さらに $L=30 \text{ cm}$ になると再び I_1 は負に反転するようになる。 30 sec 程度経過後の電流の変動は, 電流が反転する場合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により帯電の極性が反転することがあることは梅津等の報告と一致してい

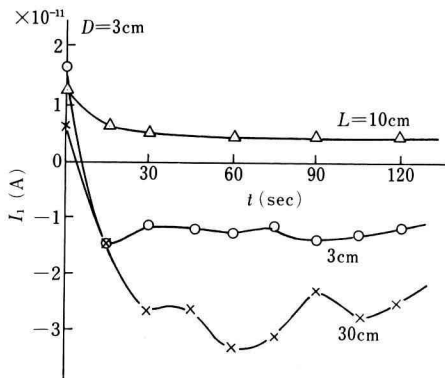


Fig. 3. Time dependence of streaming current I_1 with L as a parameter.

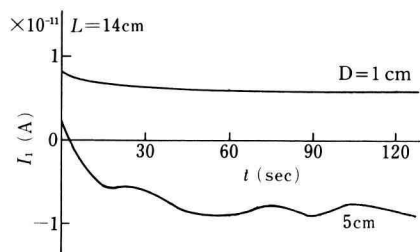


Fig. 4. Time dependence of streaming current I_1 with D as a parameter.

る⁹⁻¹²⁾。

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。 $D=1 \text{ cm}$ の場合に 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。 $D=5 \text{ cm}$ の場合には時間の経過とともに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が流されるため, 流出する液体が帯電するようになるという電気二重層理論では説明できそうもない。他の要因により強く支配されていることが示唆される。

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。梅津等は水柱の長さや帯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⁹⁻¹²⁾。つまり L の値が水柱の長さよ

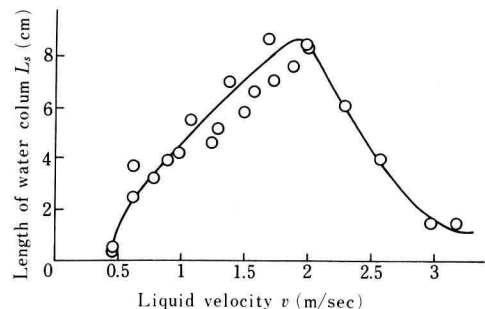


Fig. 5. Relation between length of water column (L_s) and liquid velocity.

り大きくなると帯電の極性が反転することを見だし、反転する距離と帯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_s 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_s は流速に比例して大きくなるが、ある流速で最大値をもち、そののち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_s が最大になる場合に相当し、 L_s の値は約 8 cm である。したがって、図3において $L=3 \text{ cm}$ 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。 $L=10 \text{ cm}$ の場合にはレシーバの上蓋の上方 2 cm のところで水柱が分裂していることになる。また、 $L=30 \text{ cm}$ ではレシーバから 20 cm 以上上方で水滴に分裂し落下していることになる。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ーになっていることが示唆される。

4. 帯電霧の存在

図3、図4の結果にはなんらかの誘導帯電が関係しているものと思われる。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¹³⁾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。分裂するときに霧状の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確認することは出来なかった。霧が存在する可能性のある場所は図6に示すようにノズルとレシーバ間の空間、

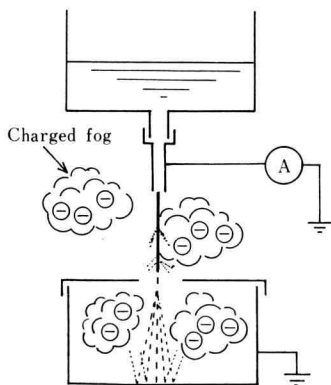


Fig. 6. Model of charged fog.

およびレシーバの中の空間である。水の噴出により負の帯電霧が形成されるとすると、流れ始めは霧が存在しないため図2に示すように I_1 は正になる。十分な量の負の帯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、レシーバの中の帯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_s 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帯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帯電霧の誘導により、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帯電霧の量は噴出する水の帯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、レシーバ内の帯電霧の誘導に原因するものと考えることができる。

このように帯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。

そこで、次に帯電霧の存在を示唆するいくつかの実験結果を示す。

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7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 程度の風を送ったときの I_1 の時間変化を示す。流速は 1.8 m/

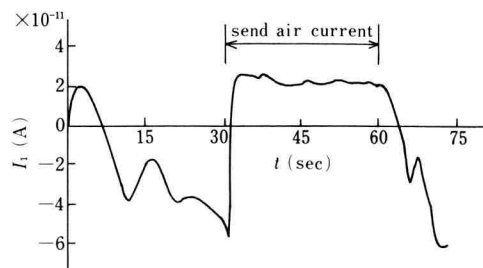


Fig. 7. Effects of air current of an electric fun on streaming current I_1 .

sec であり, $L=30$ cm, $D=3$ cm である。 $t=0$ sec は水を流し始める時間である。 $t=30$ 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。このことから帯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ことが示唆される。

4.2 帯電霧のファラデーカップによる吸引

負の帯電霧が存在するとすると, ノズルとレシーバ間の空気の帯電量をファラデーカップで測定することができるはずである。図8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カップである。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 cm/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9である。 $t=15$ sec においてノズルより水を噴出し, $t=60$ sec で噴出を停止し

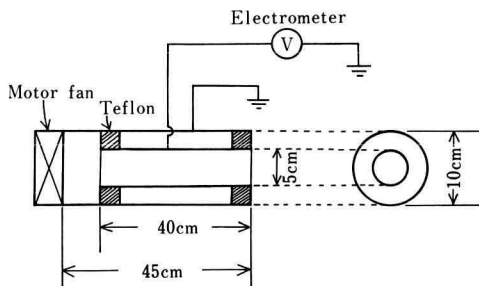


Fig. 8. Drawing Faraday cup.

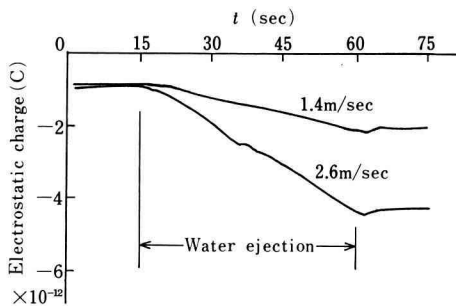


Fig. 9. A typical example of electrostatic charge of fog.

た。流速は1.8 m/sec, $L=30$ cm, $D=3$ cm である。水を噴出したのち数秒後吸引式ファラデーカップ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。水の噴出を停止すると, 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出中にはノズルとレシーバ間に負電荷が発生していることが示唆される。

4.3 I_1 , I_2 と電流の連続

図10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示唆している。霧の発生電流 I_3 は雰囲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て, $I_3 > 0$ 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11に示すように, 水柱から11 cmの距離に 2×2 cm²の銅板を置きそこに誘起される電流を測定した。

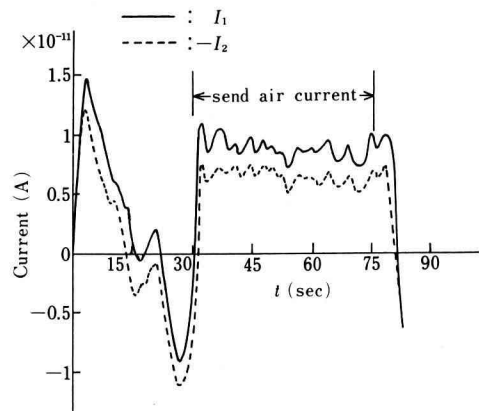


Fig. 10. Comparison between I_1 and $-I_2$.

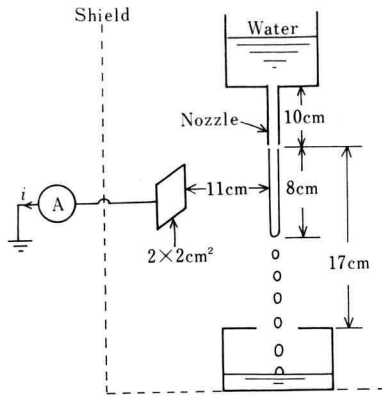


Fig. 11. Measuring apparatus of induction current.

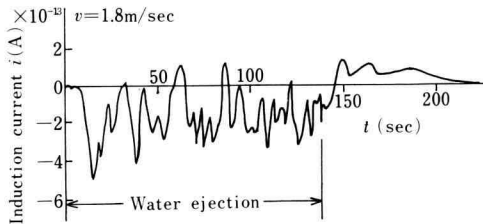


Fig. 12. A typical example of time dependence of induction current.

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 12 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 、 $L=17 \text{ cm}$ 、 $D=3 \text{ cm}$ である。流し初めて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。正に振れることもあるが、ほとんど負側に振れ負電荷による誘導を受けていることを示している。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考えられる。

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 13 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 14

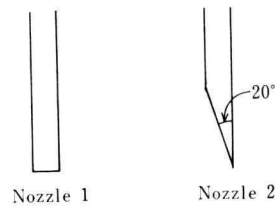
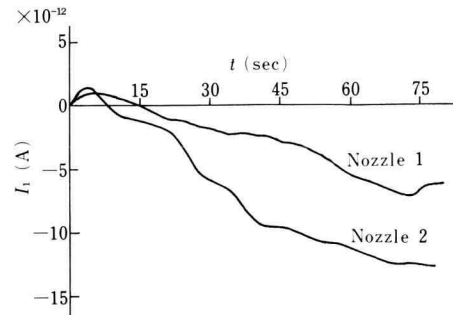


Fig. 13. Configurations of nozzle 1 and 2.

Fig. 14. Time dependence of streaming current I_1 for nozzle 1 and 2.

である。 $L=30 \text{ cm}$ 、 $D=3 \text{ cm}$ 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ことが示唆される。

5. 帯電霧の影響を除去した流動電流の測定法

前章で述べた 5 つの測定結果より帯電霧の存在が強く示唆される。したがって、帯電霧の誘導帯電が存在する限り通常の測定法では正しく流動電流を測定することができない。図 15 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 が 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 n は有極性液体では $1.5 \sim 4$ 程度と 1 より大きく、測定者によりまちまちである。

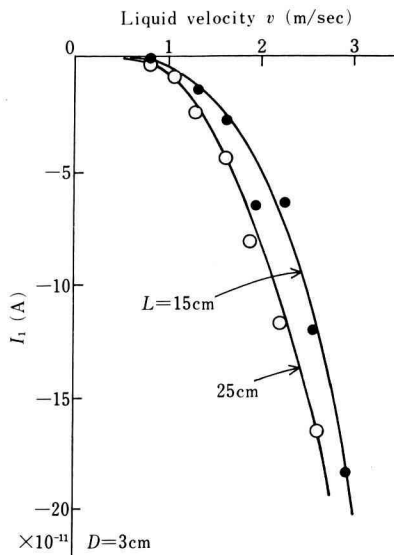


Fig. 15. Liquid velocity dependence of streaming current I_1 (no air current)

図 16 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 15 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。これは帯電霧による誘導の影響が残っていることを示すものと思われる。また送風により水柱から帯電霧が新たに発生する可能性も考えられる。したがって、送風しながらの測定では正しく流動電流を測定することは困難であると考えられる。

なお、図 16 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。長南等も指摘しているように^{7,8)}、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、水など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 17 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

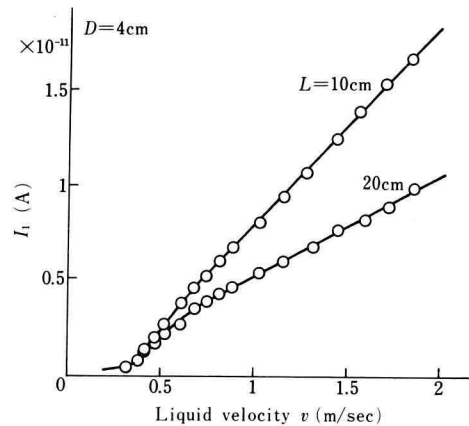


Fig. 16. Liquid velocity dependence of streaming current I_1 (air current)

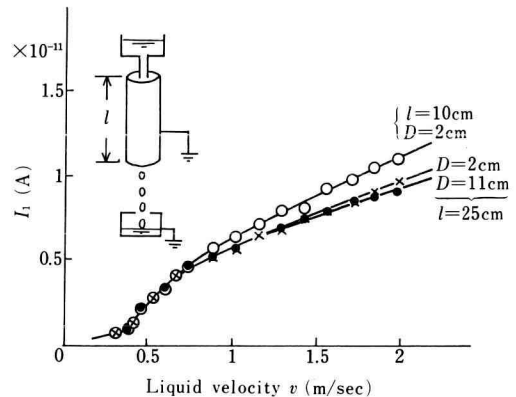


Fig. 17. Liquid velocity dependence of streaming current I_1 (shield of water column)

端と同じ高さに設置した。ここで用いた I_1 も水を流し始めてから数十秒後の値である。円筒の径を適当に選ぶことにより発生する帯電霧はすぐにアースされてしまい、誘導帯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 17 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 16 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、小さくなると分裂した水滴が円筒の内壁に付着することである。円筒の径を大きくするとレシーバの位置と形状の影響が認められた。この円筒によりシールドする測定法はさらに検討を要するが、有力な方法であると思われる。

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) 水の噴出時に負の帯電霧が発生していることを示唆する次の5つの結果が得られた。
 - 1) ノズルとレシーバ間に送風すると帯電の極性は反転する。
 - 2) ノズルとレシーバ間の空気は負に帯電している。
 - 3) 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。
 - 4) 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。
 - 5) 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、通常の方法では帯電霧の誘導帯電のため流動電流を測定することは帯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。

7. 今 後 の 課 題

今後は

- (1) 帯電霧の発生量と流速あるいはノズルの形状との関係など霧の発生状態に関する詳細な測定を行う。
- (2) 帯電霧の発生と水の純度の関係を調べる。
- (3) 他の有極性液体および絶縁性液体の帯電特性の検討を行う。
- (4) 流動電流の測定を確立する。

等を課題として研究を進める予定である。

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て行われたものである。ここに感謝の意を表す。

文 献

- 1) 鈴木:「石油と静電気—この相いれない仲」Quality, No. 40, p. 2 (1984)
- 2) A. Klinkenberg *et al.*: "Electrostatics in the Petroleum Industry" p. 57, Elsevier (1958)
- 3) J.T. Leonard and H.W. Carhart: "Effect of Conductivity on Charge Generation in Hydrocarbon Fuels Flowing through Fiber Glass Filters" J. Colloid and Interface Science, Vol. 32, No. 3, p. 383 (1970)
- 4) 彦坂, 大橋, 家田:「界面活性剤を添加した絶縁材料の流動帯電現象」電気学会縁材料研究会 EIM-87-78, p. 29 (1987)
- 5) 渡辺, 伊藤, 大橋, 上田:「有極性液体(n-アルコール)の流動帯電に及ぼす液体自身の性質について」電学論 A, 103-6, p. 315 (1983)
- 6) 渡辺, 大橋, 伊藤:「各種液体の細管流動帯電(I)」静電気学会誌, Vol. 4, No. 2, p. 109 (1980)
- 7) J. Chonan, A. Ohashi and M. Ueda: "Charge Storage, Charge Transport and Electrostatics with their Application" Elsevier Publishing Co., p. 55 (1979)
- 8) 長南:「液体の液体の流動帯電現象に関する研究」名古屋大学修士学位論文 (1979)
- 9) 梅津, 浅野:「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」静電気学会誌, Vol. 7, No. 4, p. 264 (1983)
- 10) 梅津, 浅野:「液体の噴出帯電に及ぼす導電率の効果」静電気学会講演論文集, p. 170 (1984)
- 11) 梅津, 浅野:「ノズルから噴出する各種液体の帯電」静電気学会講演論文集, p. 375 (1986)
- 12) 梅津, 浅野:「ノズルから噴出する各種液体の帯電(第2報)」静電気学会講演論文集, p. 229 (1987)
- 13) 静電気学会編:「静電気ハンドブック」p. 104, オーム社 (1981)