

論 文

各種液体の細管流動帶電 (I)

渡辺茂男*, 大橋朝夫**, 伊藤正一*

(1979年8月30日受理)

Capillary Electrification of Various Liquids (I)

S. WATANABE,* A. OHASHI** and M. ITOH*

(Received August 30, 1979)

It is well known that good insulating liquid is electrified when it flows through a pipe. An electric current observed in this case is called streaming current. This current were related to the pipe length, liquid velocity, liquid conductivity and pipe diameter. In order to obtain information concerning the relationship between the streaming current and pipe length and the streaming current and liquid velocity, the measurement has been made two experiment. Pipe length; Liquid examined were kerosene and propylalcohol. The experiment using stainless steel pipes of 0.2 mm inside diameter, 1, 2, 4, 4.5, 5, 6, 7, 10 and 20 cm length were carried out. Liquid velocity; Liquid examined were ethylalcohol, propylalcohol, aceton, toluen, o-dichlorobenzene, and kerosene. The experiment using stainless steel pipes of 0.2 mm inside diameter, 5 cm length was carried out. Liquid velocity in the pipe varried with the pressure of N₂ gass (0-3 kg/cm²). The measured current from the pipe to the ground was equal (opposite sign) to the charging rate of the receiving tank. Pipe length; It was found that the experimental results were not agreed with the Bustin's and Hampel's theory. In this paper auther investigated difference of study and the Bustin's and Hampel's theory. Liquid velocity; The streaming current I was related to the liquid velocity v by the equation $I \propto v^n$.

1. まえがき

絶縁性のよい液体をパイプで輸送するとき流動電流の発生することはよく知られている。この流動電流は Hampel ら¹⁾および Bustin²⁾ の研究によればパイプ長の影響を受け、液体の性質、パイプの材質、流れの状態およびパイプ半径等が同じ場合にはパイプ長が増すとともに増大し、ある一定値に近づく。流動帶電の実験では Bustin のように液体輸送方法としてポンプを用いることが多く、この部分で発生する電流の影響を無視することはできない。

今回筆者らが実験に用いた液体の輸送方法は、Hampel らと同様の方法であるが、使用したパイプ直径は電

気二重層の厚さ³⁾に近い 0.2 mm ϕ で、Hampel らの使用したパイプ直径の約 1/8 の細さであること。このため今回の実験では電気二重層の流動電流に与える影響を無視することはできない。また実験に使用した液体の種類およびパイプ長の数について顕著な相違がみられる。とくに流動電流のパイプ長依存性実験では、Hampel らおよび Bustin の報告と異なる結果を得た。この原因の解明と抵抗率の異なる 6 種類の液体について、帶電量と流速依存性の実験結果を発表する。

2. 実験装置

実験装置は一定量（最大 140 cc）の液体を貯える上部タンク、おもに流動電流を発生させるパイプおよび発生した電荷量を測定する Faraday cage (以下 FC と記す) から成り立っている。実験装置の概略を図 1 に示す。

2.1 上部タンク

上部タンクは直径 1 in, 長さ 28.5 cm の銅パイプ製で、タンク上部は市販の塩化ビニールパイプで窒素ガスの封入された高圧ボンベと接続されている。タンクの下部は液体の流れを滑らかにするため、拡大角 60° に加工

* 愛知工業大学電気工学科 (470-03 豊田市八草町八千草 1247)

Department of Electrical Engineering, Aichi Institute of Technology, 1247, Yachigusa, Yagusa-cho, Toyoda 470-03, Japan

** 名古屋大学工学部電気工学科 (464 名古屋市千種区不老町)

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464, Japan

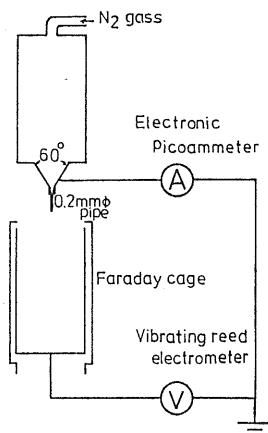


図 1 実験装置

Fig. 1 Schematic picture of apparatus.

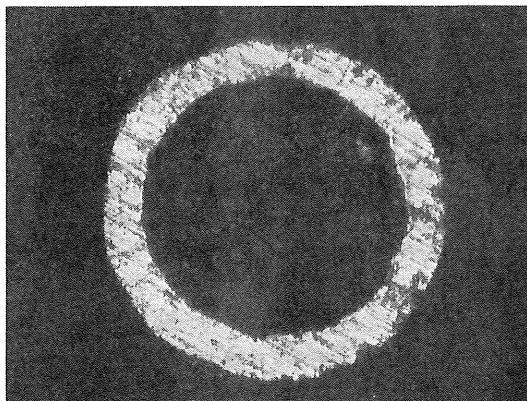


写真 1 顕微鏡写真

Photo. 1 Microphotograph.

されている。

2.2 パイプ

使用したパイプは、トップ製のステンレス注射針で、内径 $0.2 \text{ mm}\phi$ 、長さ 1, 2, 4, 4.5, 5, 6, 7, 10 および 20 cm の 9 種類で、先端は直角に切断されている。パイプ先端を金属顕微鏡で見た様子を写真 1 に示す。この写真から、パイプ先端の切断面の変形、バリ等の影響は無視できるものと考えられる。この点を実験で確認するため、パイプ長 5 cm の注射針 5 本を取り出し液体の流速実験を行なったところ、注射針おのとの差はほとんど認められなかった。

パイプ内部の洗浄はベンジン→アルコール→蒸溜水→アルコール→熱風乾燥の手順で行なった。

2.3 測定器

微少電流の測定にはタケダ理研製微少電流計 TR-

8641、電荷量の測定にはタケダ理研製振動容量型微少電流電位計 TR-84M と Faraday cage TR-8031 を、抵抗率の測定には、直流電源として川口電機製高精度直流電源 Model V-703 を、液体電極としてタケダ理研製液体抵抗測定用試料容器 TR-44 を用いた。

2.4 試 料

実験に用いた液体はエチルアルコール ($9.1 \times 10^4 \Omega \cdot \text{m}$, 比誘電率 25.8), プロピルアルコール ($8.0 \times 10^4 \Omega \cdot \text{m}$, 比誘電率 20.1), アセトン ($4.8 \times 10^6 \Omega \cdot \text{m}$, 比誘電率 21.5), トルエン ($1.0 \times 10^9 \Omega \cdot \text{m}$, 比誘電率 2.4), オージクロルベンゼン ($1.4 \times 10^7 \Omega \cdot \text{m}$, 比誘電率 9.9) および燈油 (抵抗率 7.9×10^8 , $3.2 \times 10^{10} \Omega \cdot \text{m}$, 比誘電率 2.1) である。

3. 実験方法および結果

実験は次の順序で 3 種類の実験を行なった。まず帶電量の流速依存性実験を行ない、続いて流動電流のパイプ長依存性実験および流速測定実験を行なった。

流速依存性実験およびパイプ長依存性実験では、上部タンクに 80 cc の液体を入れ、約 30 分間静置する。これは液体を上部タンクに注入する際に発生した電荷を大地へ逃がす目的と、タンク内部での液体流動を静止させるためである。このあとに窒素ボンベのバルブを開き、液体を加圧し流下させる。このときパイプおよび FC に接続された微少電流計および振動容量型微少電流電位計の値を記録計で記録する。パイプに接続された微少電流計の値が一定値におちついたあとは窒素ガスの圧力を 0.5 kg/cm^2 ずつ増し実験を行なった。電流計の値が一定値におちつく時間とパイプ長とのあいだには密接な関

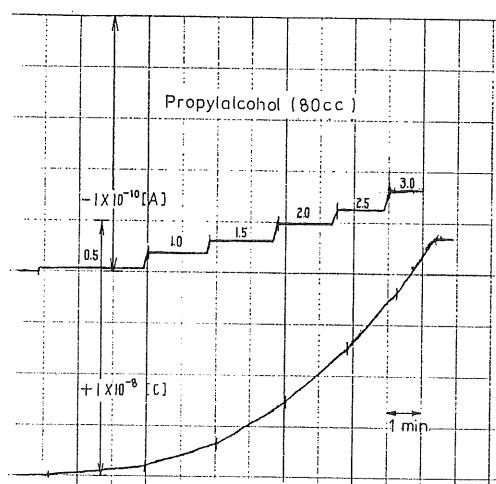


図 2 実験結果

Fig. 2 Experimental result.

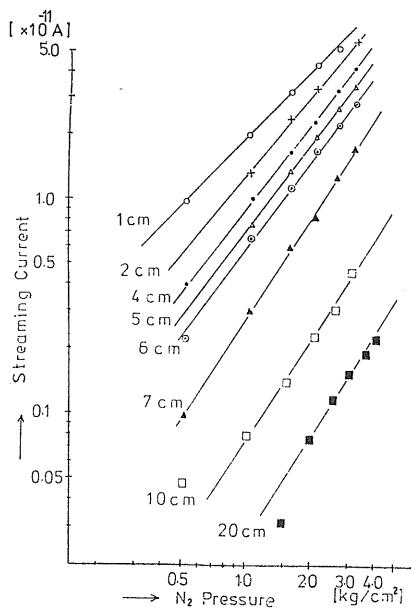


図 3 流動電流と窒素ガス圧との関係

Fig. 3 Relationship between streaming current and N_2 pressure.

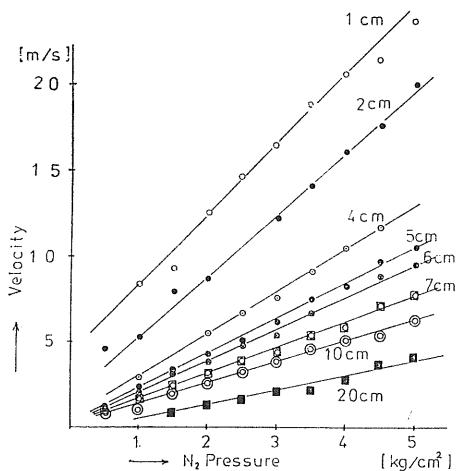


図 5 流速と窒素ガス圧の関係

Fig. 5 Relationship between velocity and N_2 pressure.

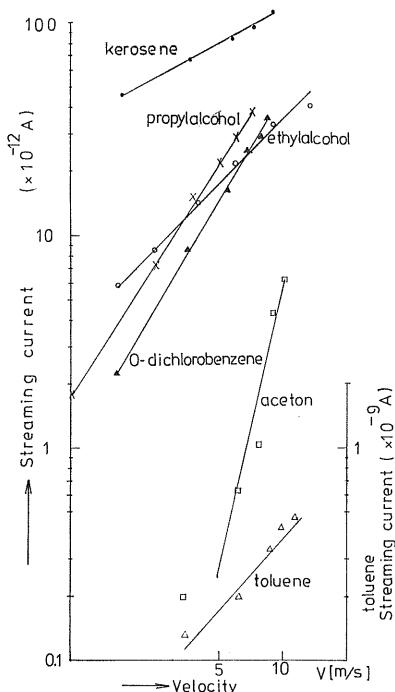


図 4 流動電流と平均流速の関係

Fig. 4 Relationship between velocity and streaming current.

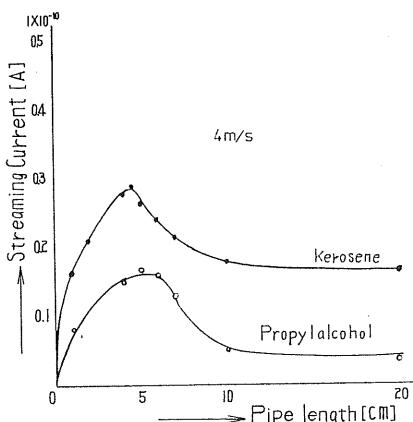


図 6 流動電流とパイプ長さの関係

Fig. 6 Relationship between streaming current and pipe length.

係は認められない。

パイプ長 5 cm で、液体がプロピルアルコールの場合に得られた帶電電荷量および流動電流の結果（窒素ガスの圧力を変え、電荷量と電流の測定）を図 2 に示す。

この操作をパイプ依存性実験では、各長さのパイプと燈油およびプロピルアルコールについて行なった。その結果を図 3 に示す。流速依存性実験では、パイプ長 5 cm で、エチルアルコール、プロピルアルコール、アセトン、トルエン、o-ジクロルベンゼンおよび燈油それぞれおのおのについて行なった。その結果の一例を図 4 に示す。

流速測定実験では、前述の実験装置を用い、上部タンクに 20 cc の液体を入れ、下部にはメスシリングを置き、

窒素ガスを加え、各圧力ごとに流出時間をストップウォッチで測定し、この時間と液体の量およびパイプ断面積から求めた。この操作を各液体および各パイプ長について実験を行なった。その結果を図5に示す。

図3と図5からおのおのパイプ長内部を液体が4m/sで流動するとき発生する流動電流を求める結果は図6の結果になる。

4. 考 察

4.1 帯電量の流速依存性について

各液体の平均流速 \bar{v} と流動電流 I の関係は、図4から $I \propto \bar{v}^n$ に比例していることがわかる。このときの n の値は液体の種類により 0.5~4.5 となっている。これを抵抗率で分類すると $10^{10}\Omega\cdot\text{m}$ より高い抵抗率をもった液体は上述した n の値が 1 以下に、 $10^{10}\Omega\cdot\text{m}$ より低い抵抗率をもった液体では n の値が 1 以上になる。この傾向は Klinkenberg³⁾ の結果 $10^{10}\Omega\cdot\text{m}$ 附近に流動電流の発生量が最大になるという報告と密接な関係にあるようである。

使用した液体の比誘電率、粘性と帯電量、流速依存性とも顕著な傾向はみられない。

4.2 流動電流のパイプ長依存性について

Hampelら¹⁾およびBustin²⁾の報告では、流動電流の最大値に近づくパイプ長は液体の平均流速 \bar{v} と緩和時間 τ の積によって決まるとしているが、今回の実験結果ではパイプ長 5 cm 附近で流動電流は最大値を示し、パイプがそれ以上長くなると流動電流は減少し、Hampelらの報告とは一致しない。筆者らはこの原因を図7で一点鎖線(I)および破線(IIb), 一点鎖線(IIa)を加え合わせる2種の形で考える。

図7で、流動電流は(I)の形をとるものとする。この場合、電流の発生はパイプ部分で、電荷は液体とともにFCに蓄積される。図2の結果を合わせて考えると、FCで測定される電荷量は約 $9.4 \times 10^{-9}\text{C}$ であり、FCの静電容量は約 20 pF、このため FC は約 470 V の電位になる。この電位で FC から上部タンクへ流下している液体を通して電流が流れ、再結合により電流は減少するともできる。上部タンクの注射針から FCまでの距離を約 10 cm とすると、流下している液体の断面積をパイプの径と同じとするならば、上部タンクとFC間の抵抗は、プロピルアルコールの場合の抵抗率 $7.8 \times 10^4\Omega\cdot\text{m}$ であるから $2.5 \times 10^{11}\Omega$ となる。この抵抗の両端に 470 V の電位が加わっているのであるから、注射針と FC のあいだで $1.9 \times 10^{-9}\text{A}$ の電流が流下液体と反対向きに流れることになる。

この電流による影響があるか調べるために、パイプ長

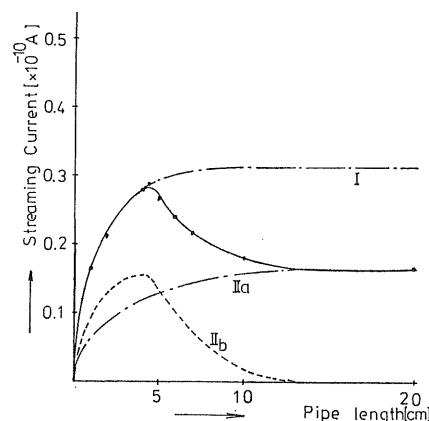


図7 流動電流の説明

Fig. 7 Explanation of the streaming current.

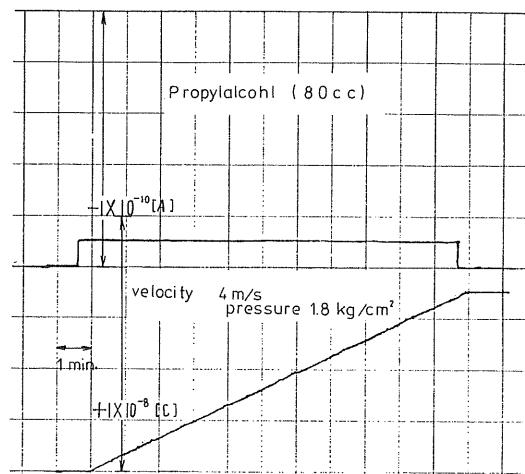


図8 実験結果

Fig. 8 Experimental result.

5 cm でプロピルアルコールを用い流速 4 m/s の実験を行なった。その結果を図8に示す。結果は FC に蓄積される電荷量の飽和現象および流動電流値の変動は認められないものと思われる。したがって図7中の一点鎖線(I)の形で筆者らの実験結果を説明することはできない。

図7中の一点鎖線(IIa), 破線(IIb)の合わせたものと考えると、この場合、液体の流れの状態はパイプ入口からただちに層流(または乱流)の速度分布になるのではなく、ある長さを流れる間にしだいに一定の速度分布に移るので、この部分、いわゆる助走距離内で発生する流動電流(IIb)と Hampel らの理論に従って発生する部分(IIa)に分けられる。

流動電流の最大値は液体の流速と緩和時間の積で決まる。発生する電荷量は平均流速に比例すること、および液体の流れが乱流の場合には層流に比べ電荷発生量の多いこと³⁾等を考慮すると、助走距離の部分で発生する電流の多いことは理解できよう。

以上のことから、助走距離、緩和長、およびパイプ径の変化等について検討を行なう。

4.3 緩和長について

緩和長 $\nu\tau$ は流速 4 m/s の場合、プロピルアルコールで 5.6×10^{-5} m となり、実験結果と一致しない。燈油の場合には 6×10^{-2} m となり流動電流の最大値を示すパイプ長とほぼ一致する。

4.4 液体の流れの状態について

助走距離については液体の流れが層流の場合は Bousinesse の理論式 $L_0 = 0.13 r Re^{4/5}$ で表わされることが知られている。ここで Re はレイノルズ数である。この場合プロピルアルコールは 4.6×10^{-3} m、燈油は 7.1×10^{-3} m となりいずれも実験結果の説明には不十分である。

乱流に対しては種々の実験式が求められている。ここで Nikuradse の式 $L_0 = (50 \sim 80)r^{4/5}$ を用いると、プロピルアルコール、燈油とも $5 \sim 8 \times 10^{-3}$ m となり、実験結果の説明には不十分である。

4.5 パイプ断面積の変化について

今回の実験装置では、液体は上部タンクからいきなり非常に細いパイプ中へ流入の状況にあり、このような場合には流体力学的な損失水頭、損失係数⁵⁾等を考慮しなければならない。

パイプの断面積が大きなものから小さなものに変わると、図 9 に示すような流れの断面はさらに収縮することが知られている。図中 x_1 、 x_2 点に検査面をとり、運動量保存則を適用すれば、

$$\rho A_x u_x^2 - \rho A_2 u_2^2 = A_2 P_2 - A_x P_x - (A_2 - A_x) P_x' \quad (1)$$

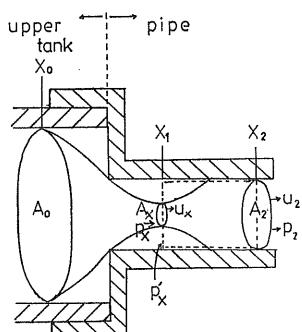


図 9 上部タンク、パイプ図解

Fig. 9 Schematic diagram of upper tank and pipe.

が成立立つ。

ここで ρ は液体の密度、 A_x および A_2 はパイプの断面積、 P_x 、 P_2 および P_x' は圧力、 u_x および u_2 は液体の平均流速である。

ここで $P_x \neq P_x'$ とすれば (1) 式は

$$-\rho(A_2 u_2^2 - A_x u_x^2) = A_2(P_2 - P_x) \quad (2)$$

となる。流体の連続の式を適用すると

$$A_x u_x = A_2 u_2 \quad (3)$$

となる。(3) 式を (2) 式に代入すると

$$P_x - P_2 = \rho u_2(u_2 - u_x) \quad (4)$$

となる。

ベルヌーイの定理を用いると

$$(1/2)\rho u_x^2 + P_x = (1/2)\rho u_2^2 + P_2 + e \quad (5)$$

となる。ここで e は液体が上部タンクから FC に流れたときに液体の失ったエネルギーの密度すなわち損失水頭である。

(4)、(5) 式から

$$e = (1/2)\rho(u_x - u_2)^2 \quad (6)$$

となる。

(6) 式を (3) 式に代入すれば

$$e = (1/2)\rho u_2^2 \{(A_2/A_x) - 1\}^2 \quad (7)$$

となる。

損失係数 ζ は

$$\zeta = e / \{(1/2)\rho u_2^2\} \quad (8)$$

で示されるので、 $\zeta = \{(A_2/A_x) - 1\}^2$ となる。

損失係数 ζ については、Weisbach⁶⁾ が実験的に求めている。この結果を用いると、 A_2 は注射針の内径 0.2 mm、 A_0 の内径は 2 cm であるから、 A_2/A_0 の値は 0.01 となる。ここで A_0 は図 9 の x_0 点のパイプ断面積である。

A_2/A_x の値は実験で 1.67 となるので、(3) 式から

$$u_2 = u_x / 1.67 \quad (9)$$

が得られる。

筆者らの実験⁷⁾によると、流動電流 I とパイプ内部の液体の平均流速 \bar{v} のあいだには次の関係が存在している。

$$I \propto \bar{v}^n \quad (10)$$

n の値は燈油の抵抗率 $10^8 \Omega \cdot \text{m}$ 付近で 2.0、プロピルアルコールでは 1.59⁷⁾ という結果を考慮し、図 5 の結果の I_{\max}/I_{20} の値を (9) 式から得られた u_2 を用いて I_{\max}/I_{20} を求めると (11) 式になる。

$$I_{\max}/I_{20} \propto (1.67 u_2)^n / u_2^n \quad (11)$$

ここで I_{20} はパイプ長 20 cm で得られた流動電流の値を示し、 I_{\max} は図 6 中の最大流動電流の値を示す。

I_{\max}/I_{20} の値は図 6 から燈油で 1.75、プロピルアルコールで 3.55 が得られ、(11) 式から燈油とプロピルアル

ルコールの I_{max}/I_{20} を求めると、燈油で 2.8、プロピルアルコールでは 2.26 となり両者はほぼ実験結果と一致した値になる。

5. あとがき

この種の実験では、流動中に液温が上昇し、抵抗率の変化を無視することはできない。このため水銀温度計を上部タンク液体中および FC の液体中へ入れ測定したが、著しい変化は認められなかった。

細管流動帶電では、これまでの理論で説明できないことが多くみられ、今回の実験も同様である。

この実験では、絶縁性液体を輸送するパイプの径変化が、より多量の電荷発生の原因となることを示している。したがって絶縁性液体を扱う工場等では、パイプの径の変化を極力さけることが静電気対策のうえで重要なポイントになるものと思われる。

最後にこの実験を進めるにあたり、有益なご助言をいただいた名古屋大学工学部電気学科上田実教授ならびに愛知工業大学機械工学科神元五郎教授に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) B. Hampel and H. Luther : Chem.-Ing.-Tech., 29, 5 (1957), 323.
- 2) W.M. Bustin : 37th Annual Meeting of the American Petroleum Industry in Chicago (1957).
- 3) A. Klinkenberg and J.L. van der Minne : *Electrostatics in the Petroleum Industry*, Elsevier, Amsterdam (1958).
- 4) 高分子学会：静電気ハンドブック (1967).
- 5) 竹中利夫、浦田瑛二：水力学例題演習、コロナ社 (1972).
- 6) 比良二郎、瀧澤英一：流体力学の基礎と演習、廣川書店 (1976).
- 7) 渡辺茂男、横井文雄、大橋朝夫、伊藤正一、上田 実：静電気学会講演論文集 '78, p. 38 (1978).