

論 文

パイプ中の液体流速と電荷分布について (I)

渡辺 茂男*, 伊藤 正一*

(1979年8月13日受理)

On the Relationship between Liquid Velocity and Charge Distribution in a Pipe (I)

S. WATANABE* and M. ITOH*

(Received August 13, 1979)

The streaming current has generally been measured by following two different methods. (1) Current measurement with an ammeter connected to the receiving tank. (2) Estimation of charge density in a pipe line. This paper reports on the experimental result obtained by the latter method. This experiment has been made with 50 cm long and 2.54 cm diameter copper pipe for kerosene. The potentials in different positions along the radial direction of the pipe were measured with a movable spherical probe. True value of the potential of charged liquid in the pipe line has been determined from the inclination of the $V-J$ characteristic curves obtained by the probe method, where J is the current flow through the high resistance connected to the probe and V is the probe potential given by the product of the high resistance and the current. The charge density of charged liquid in the pipe line can be calculated from true value of the potential and electrostatic field by Poisson's equation. It was found from this experiment that charge distribution in the pipe line was proportional to the liquid velocity distribution. In case of slow flow velocity, charge distribution in the pipe line is uniform one. In case of fast flow velocity, charge distribution in the pipe line is nonuniform.

1. まえがき

液体燃料、絶縁油、食用油および有機溶剤等を使用する工場、工事現場ではこれら液体の輸送中に発生する静電気のため、作業能率の低下は大きな問題となっている。この静電気は液体とパイプ界面に生じた電気二重層の一方の電荷が液体とともに受器に運ばれ、液体の蒸発によって生じた可燃性の蒸気の存在している場合には、液体と受器等との間に生じる火花で着火し、火災や爆発の事故を引き起こすことが知られている。

静電気の事故を防ぐには、液体の導電率を増し、発生した電荷を速やかに緩和するためシェル研究所で開発された除電剤 ASA-3 等を用いる方法と、液体の持っている電荷量を測定し、液体の流量調節により受器に蓄積される電荷量をコントロールする方法がある。前者の方法は石油系の液体に限られているようであり、後者の方

法は、これまで正確な電荷量を測定することは困難な場合が多く、工場では経験的にパイプ内部の流速を決めているようである。

液体の流速と帶電量については Hampel¹⁾によると流速の 1 乗に比例、Bustin²⁾によると流速の 1.75 乗に比例、および筆者らの実験では流速の 0.5~2.0 乗に比例³⁾するという報告がある。このため西ドイツ化学工業協会⁴⁾では静電気災害防止のため、パイプの径ごとに流速の最大値を決め安全対策を行なっている場合もみうけられる。

筆者らは静電気災害を防止することおよび液体輸送速度の増加と作業能率を向上させるため、種々の実験から電荷量、流動電流等簡単に測定できる方法を考案した。その装置と実験結果を以下に報告する。

2. 実験装置

実験装置は直径 40 cm、高さ 40 cm の上部タンク、これと同形同容量の下部タンク、探極を挿入する内径 2.54 cm、長さ 50 cm の銅パイプ、液体を輸送するポンプおよびそれぞれを連結する塩化ビニルパイプから成り立っている。実験装置の概略を図 1 に示す。

* 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

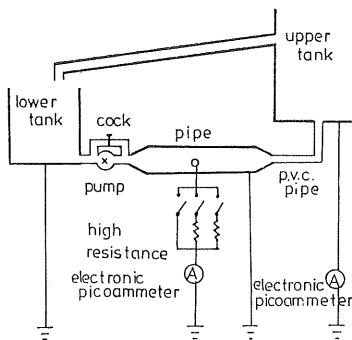


図 1 実験装置の概略
Fig. 1 Schematic picture of apparatus.

2.1 電極

探極として直径 5 mm および 2.4 mm の鋼球を用いた。この鋼球はきぬ針 2 号の先端にはんだ付けされ、針は外径 1.0 mm、内径 0.5 mm のテフロンチューブで覆われている。この鋼球は円柱状のテフロンブロックによって銅パイプと絶縁されている。テフロンブロックは 5 mm 厚のポリエチレン板とボルト、ナットで銅パイプに固定されている。電極付近の概略を図 2 に示す。

電極と銅パイプ間の絶縁抵抗は直流 90 V を印加したとき約 $10^{15} \Omega$ の値を示し、絶縁性液体を入れ銅パイプ内部を満たした状態のとき約 $10^{14} \Omega$ の値を示した。

2.2 パイプ

電極を挿入する銅パイプは内径 2.54 cm、長さ 50 cm のもので、端から 25 cm のところに直径 5 mm の穴を開けた。塩化ビニルパイプと銅パイプとは径が異なるため、拡大角 20° のテーパ状の銅パイプで結ばれている。これは液体の流れを滑らかにする効果も兼ねている。この銅パイプは実験中大地と結ばれている。

2.3 測定器

流動電流と電極からの電流測定にはタケダ理研製微少電流計 TR-8641 を 2 台、東亜電波製記録計 EPR-3T およびビクトリーン社製既知高抵抗 2 種を用いた。

2.4 ポンプおよびバイパス装置

ポンプはギヤ型のものを用い、液体を循環帶電させた。このポンプは毎分最大 30,000 ml の液体を輸送することができる。バイパス装置はポンプの入口と出口をパイプで結び、コックの開閉によって流速を変えた。

流速の測定は実験のたびごとに 1,000 ml ビーカを用い、満たされる時間をストップウォッチで測り、パイプ断面積から液体の平均流速を求めた。

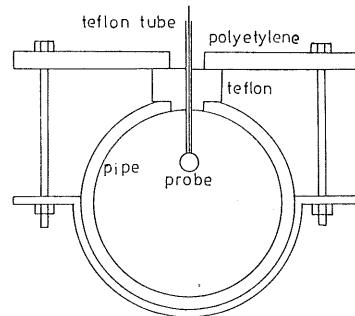


図 2 電極の概略
Fig. 2 Schematic picture of probe.

3. 実験方法および結果

3.1 実験方法

一定の流速で液体を循環流动带電させる。このときパイプ内部に挿入された球電極からある値の電流が流れる。この電流を既知高抵抗 ($1 \times 10^{12} \Omega$, $4.5 \times 10^{13} \Omega$) を通して微少電流計に接続した。球電極の電位は既知高抵抗の値と、これを通して漏れる電流との積から得られる。

パイプ内部に挿入された球電極はパイプ内部径方向の任意な場所に置くことができ、その場所の球電極の示す電位を測定できる。

同様の方法でバイパスコックの開閉の度合を変え、流速を変化させ、パイプ径方向の任意な場所に置かれた電極電位を測定した。

流動電流は上部タンクに微少電流計を接続し、値を読み取った。

3.2 実験結果

3.2.1 パイプ内部の真の電位について

タンク内部の真の電位を測定する一方法として、探極を用いる測定法⁵⁾が知られている。パイプ内部の真の電位測定にこの方法を用いた。

この測定法による実験結果を検討した結果、次のようなことがいえる。

- (1) 電極の径の異なる鋼球を用い、パイプ内部の液体の持つ真の電位を推定したところ、ほぼ同じ値を示すこと。
- (2) 流動電流から得られる体積電荷密度と液体の持つ真の電位および静電界の解法から計算される体積電荷密度はほぼ一致すること。

これらの結果は後述するが、比較的良い一致をみる。このことから探極法はパイプ内部液体の持つ電位の測定および体積電荷密度の測定に用いることができると判断した。

3.2.2 電極の径と真の電位について

上部タンクで観測される流動電流の一定のとき、径の異なる電極を用いると、パイプ径方向の同じ場所に電極を設置しても、それぞれ電極の示す電位および電極を通して流れる電流の値は異なった値を示す⁵⁾ことが知られている。今回の実験では使用した銅パイプの径と球電極製作成上の点から直径 5 mm と 2.4 mm の電極を用いた。これら 2 種類の電極を用いた結果は、すでに報告されている傾向⁵⁾と一致し、電極から流れる電流のない場合の電極電位は同じ値を示す。また図 3 に示すように直線の傾きは電極の径に反比例していることが認められる。

3.2.3 パイプ中心の電極電位と平均流速について

パイプ内部の任意な場所に挿入された電極電位は、液体の平均流速を変えると異なった値として測定される。電極の直径 5 mm の場合、パイプの内部に電極を設置し、液体の平均流速を変えると図 4 の結果が得られる。この値は電極に $1 \times 10^{12} \Omega$ の抵抗を接続したときに得られた電極電位である。

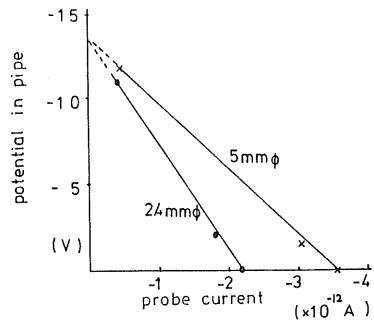


図 3 パイプ中の電位と電極電流の関係
Fig. 3 Corelation between potential and probe current.

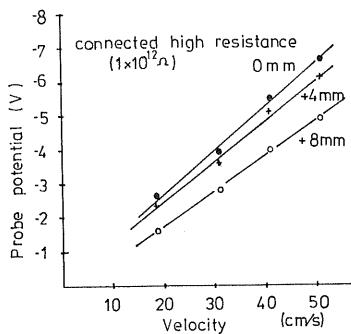


図 4 電極電位と流速の関係
Fig. 4 Corelation between probe potential and velocity.

この実験ではポンプの輸送能力が小さく、平均流速を最大約 50 cm/s 程度までしか変えることができなかつた。

3.2.4 パイプ径方向の電極電位と平均流速について

パイプ内部に挿入された球電極は径方向に移動することができ、任意の場所に固定することができるので、液体の流速を一定に保ち、径方向任意の場所の電極電位を求めるところ 5 になる。ここで使用した電極の直径は 5 mm で、図中ではパイプの中心に電極を設置した場合をゼロ、電極をパイプの中心から上部に設置した場合を正、パイプの中心から下部に設置した場合を負で示す。同様の実験を液体の平均流速を変えて行なった。

パイプ径方向各場所の電極電位とその場所の真の電位の関係を図 6 に示す。図中 V_0 はパイプ内部各場所の真

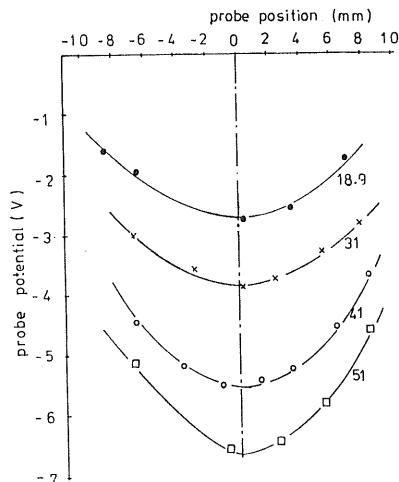


図 5 電極の位置と電極電位の関係
Fig. 5 Corelation between probe potential and probe position.

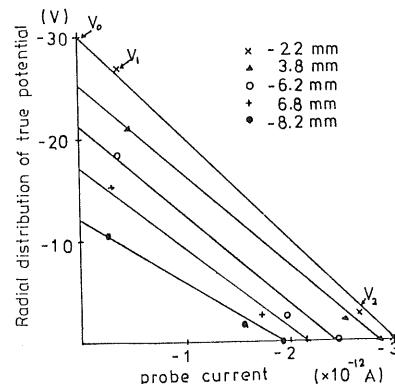


図 6 各場所の電位と電極電流 (流速 18.9 cm/s)
Fig. 6 Corelation between potential (18.9 cm/s) and probe current.

の電位を示す。 V_1 は電極に $4.5 \times 10^{13} \Omega$ の抵抗を接続したときの電位を示す。 V_2 は電極に $1 \times 10^{12} \Omega$ の抵抗を接続したときの電位を示す。

4. 考 察

4.1 流動電流と電極から流れる電流について

流動電流 I はパイプの断面積 S 、液体の平均流速 \bar{v} および体積電荷密度 σ で表わすと、

$$I = S \bar{v} \sigma \quad (1)$$

になることが知られている。

電極に $1 \times 10^{12} \Omega$ の抵抗を接続し、その抵抗を通して流れる電極電流 I_p との間には

$$I = n I_p \quad (n > 1) \quad (2)$$

の関係にあることが実験で確かめられた。流速 18.9 cm/s の場合、 n は $4 \times 10^2 \sim 6 \times 10^2$ の値を示した。

(1)式に既知高抵抗の値 R を乗ずると

$$V_p = (S \bar{v} \sigma) / n \quad (3)$$

を導くことができる。ここで V_p は電極電位 $I_p R$ の値である。

この実験ではパイプ断面積と既知高抵抗の値は定数として扱うことができるので、体積電荷密度を一定の値を持つと仮定すれば、電極電位は液体の平均流速に比例することになる。

4.2 電荷密度の測定値と計算値の比較

パイプ中心の真の電位が求められるので、静電界の解法を用いて電荷量を求めることができる。

この実験は軸対称を持つ電荷分布の例と考えられるので、電荷が一様に分布しているものとすると、

$$V_0 = - \int_a^r E dr = - \int_a^r Q r^2 / (2\pi\epsilon r a^2) dr \quad (4)$$

の式が利用できる。ここで a はパイプ半径、 r はパイプ中心から任意な場所までの距離、 Q は単位長さ当たりの電荷量、 V_0 はパイプ内部の真の電位である。

(4)式を積分すると

$$V_0 = Q \{1 - (r/a)^2\} / (4\pi\epsilon) \quad (5)$$

が導かれる。

液体の平均流速が 18.9 cm/s の場合、パイプ中心の真の電位は -31 V であるから、(5)式から単位長さ当たりの電荷量は $-7.24 \times 10^{-9} \text{ C}$ を得、体積電荷密度は $-2.86 \times 10^{-5} \text{ C/m}^3$ となる。

一方、上部タンクで測定した流動電流は $-0.99 \times 10^{-9} \text{ A}$ であるから、(1)式を用いると体積電荷密度は $-1.03 \times 10^{-5} \text{ C/m}^3$ となり、オーダは等しいが完全には一致しない。この原因の一つは流動電流と電極電位の測定場所

が異なるため、電荷の緩和現象が起こっていると考えれば理解することはできる。

4.3 電極電位の測定値と計算値の比較

流動電流は Rutger⁶⁾ の説によるとパイプ内部いたるところで電荷密度が一定とすれば(1)式で示され、一方、流動電流は平均流速の2乗に比例して発生するといわれている⁷⁾ので、流動電流を電荷密度で表わすと、パイプ断面積が同じ場合には $\sigma \propto \bar{v}$ という関係式が導かれる。このことは図4の結果と一致している。

パイプ内部各場所の真の電位は図6と同様の方法で求められ、これと(5)式から得られた電極電位を比較することができる。一例として平均流速 18.9 cm/s と 51 cm/s の比較結果を図7に示す。

結果は流速 18.9 cm/s のときは測定結果と計算結果の差は小さく、 51 cm/s のときはかなり大きい。 18.9 cm/s のときは差が小さいことから電荷はパイプ内部いたるところで一様に分布しているものと思われる、 51 cm/s のときは差が大きいことからパイプ内部いたるところで一様に分布しているとするには問題がある。

この原因の一つは液体の流れの状態による影響と思われる。これをレイノルズ数からみると流速 18.9 cm/s のとき、 $2,670$ でほぼ液体の流れは層流と考えられる。一方、流速 51 cm/s のときレイノルズ数は $7,200$ で液体の流れは乱流と考えられる。これらのことから電極電位と流体の諸法則との関係を検討する。

4.4 電極電位と流体の諸法則との関係

液体の流れが層流の場合には Hagen-Poiseuille の法則⁸⁾、乱流の場合には Blasius の式から導かれる乱流速度分布の $1/7$ 乗法則⁹⁾によって任意な場所の流速が求め

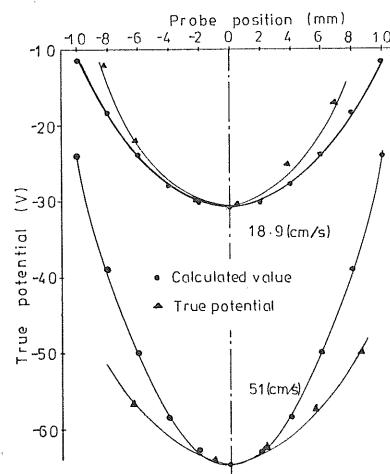


図 7 真の電位と計算結果の関係

Fig. 7 Correlation between true potential and calculated value.

られる。ここではこれらの法則と電極電位の対応について検討する。

パイプの中心流速(v_{max})は、液体の流れが層流および乱流の場合に次式で示される。

$$v_{max} = 2\delta^3 \quad \text{層流} \quad (6)$$

$$v_{max} = (m+1)(m+2)\delta^{2/3} \quad \text{乱流} \quad (7)$$

ここで m は定数 $1/7$ である。

パイプ径中心の真の電位を V_{max} 、電極の置かれた場所の電位を V_p とすると、 V_{max} と V_p の間には何らかの関係が存在している。ここでは比例関係にあるものと仮定すると、

$$V_p/V_{max} = v_p/v_{max} \quad (8)$$

を導くことができる。ここで v_p は電極の置かれた場所の液体の流速である。

v_p は層流の場合、Hagen-Poiseuille の法則を用いると、

$$v_p = 2\delta(1 - r^2/a^2)^{3/2} \quad (9)$$

で表わされる。ここで r はパイプ中心から電極までの距離、 a はパイプ半径である。

一方、乱流の場合 v_p は乱流速度分布 $1/7$ 乗法則から

$$v_p = v_{max}(y/a)^{1/7} \quad (10)$$

として表わされる。ここで y はパイプ壁から電極までの距離である。

(6), (8), (9)式および(7), (8), (10)式から

$$V_p = \{1 - (r/a)^2\} V_{max} \quad \text{層流} \quad (11)$$

$$V_p = (y/a)^{1/7} V_{max} \quad \text{乱流} \quad (12)$$

を導くことができる。

(11)式および(12)式を用いると図7の結果は図8になる。図中▲印は測定値を示し、×印は乱流速度分布 $1/7$ 乗法則から計算した値、●印は Hagen-Poiseuille の法則から計算した値を示す。

図8から液体の流速が 18.9 cm/s のときは Hagen-Poiseuille の法則とほぼ一致すること、流速 51 cm/s のときは乱流速度分布 $1/7$ 乗法則に近い値となるが一致しないのがわかる。この原因の一つは、筆者らは(7)式で m の値に $1/7$ を用いたためであるが、Nikuradse⁹⁾によるとレイノルズ数 $10,000 \sim 12,000$ の範囲で m の値は $1/7$ 、それ以下は $1/6$ と報告している。筆者らの実験ではレイノルズ数は $7,200$ であるから $1/6$ を適用する方がよく、計算結果はもっと測定値に近づくことが図8からわかる。

電極の沈降帶電現象についてはすでに報告されている¹⁰⁾が、この実験では流速および電極の径も小さく、無視できるものと考えられる。液体の粘性については、流

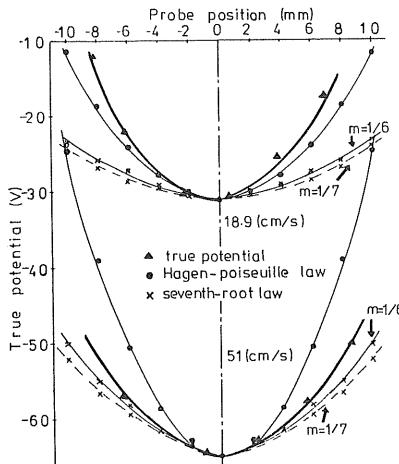


図 8 真の電位と Hagen-Poiseuille の法則および乱流速度分布 $1/7$ 乗法則との関係

Fig. 8 Corelation between true potential and Hagen-Poiseuille or seventh-root law.

速と流量の間には粘性の項が含まれない¹⁰⁾ので、異なる粘性の液体でもこの測定法は利用できる。

5. あとがき

パイプ内部の電荷密度は液体の流れが層流の場合、パイプ内部いたるところで一様に分布していることを示しているが、乱流の場合には一様分布と異なる値を示した。このことはパイプ内部の電荷分布の状態が液体の流れの影響を受けていることを示していると思われる。この傾向は粘性、誘電率および抵抗率の異なる軽油（実験に用いた液体は燈油）でも得られた。

電極を挿入した場所のパイプ形状は直管である。現在パイプ形状の異なる曲管の実験を行なっているので、その結果は次回に検討する。

これまで液体燃料、絶縁油および有機溶剤を使用する工場等では、静電気災害を防止する方法として経験的に液体輸送速度の制限が行なわれていた。この輸送速度を上げることができれば作業の能率はいちだんと増すことになる。この実験は流动電流、パイプ内部の電位、電荷密度および流速等も求められるので、より厳密な安全輸送速度を決めるための指針になるものと思われる。

最後に終始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、大橋朝夫助教授ならびに北村尚武助手に深く感謝申し上げる。

参考文献

- 1) B. Hampel and H. Luther: Chem.-Ing.-Tech.,

- 5 (1957), 323.
- 2) W.M. Bustin: *37th Annual Meeting of API* (1957).
- 3) 渡辺茂男, 大橋朝夫, 伊藤正一, 上田 実: 昭和 53 年 電気学会東海支部大会, p. 306, 電気学会 (1978).
- 4) 労働省: 労働省産業安全研究所技術指針 (1978).
- 5) 伊藤正一, 渡辺茂男, 上田 実: 電気学会論文誌 A, 5 (1973), 175.
- 6) A.J. Rutger, M. DeSmet and G. DeMoyer: *Trans. Faraday Soc.*, 53, 3 (1957), 393.
- 7) 浅野和俊: 静電気学会誌, 1, 1 (1977), 58.
- 8) 生井武夫: 流れの力学, p. 85, コロナ社 (1974).
- 9) 富田幸雄: 流体力学序説, p. 235, 養賢堂 (1978).
- 10) 渡辺茂男, 伊藤正一, 上田 実: 静電気学会講演論文集 '78, p. 38, 静電気学会 (1978).