

論 文

管壁から流動液体中へ向かって発生する電流密度と パイプ径の関係について

渡辺茂男*, 伊藤正一*

(1979年5月11日受理)

On the Relation between the Current Density and the Pipe Diameter

S. WATANABE* and M. ITOH*

(Received May 11, 1979)

Some experiments with kerosene and various copper pipes were carried out in order to obtain the relation between the current density from the pipe wall into the streaming petroleum and the pipe diameter. The current density J_a was calculated from the current generated at pipes of different length using Schön's equation. The relation $\pi d_p J_a \propto |k| V^{0.75}$ is deduced from Schön's & Bustin's equation, where d_p is the pipe diameter, V is average flowing velocity of kerosene in pipes and $|k|$ is the factor determined by pipe diameter and fuel-pipe interface. In this experiment pipes of various diameter were used, and the average velocity in the different diameters must be different each other. So we must be some corrections on the data of J_a for the evaluation of the relation between J_a and d_p . We already get the J_a varies with the equation $J_a \propto V^{0.75}$. The result shows that $J_a \propto V^{0.75}$ and $|k|$ is proportional to d_p . Using those results, the relation between J_a and d_p can be obtained. Another way to show $|k|$ includes that d_p is to check the validity of $dS/dr \propto |k|/d_p^2$, where dS/dr is the gradient of charge density in the direction of pipe radius. The conclusion are as follows. (1) $dS/dr = 1/d_p$. (2) $|k|$ was confirmed to include d_p . (3) J_a is independent of d_p .

1. まえがき

石油のような絶縁性のよい液体がパイプ中を流れると帶電することはよく知られている。このとき発生した電荷は液体とともに受器にもちこまれ、器物等とのあいだに火花を生じ、液体に引火して大きな事故を起こす原因となる。事故を防止する一つの方法として、ASA-3 等の帶電防止剤を混入し、発生した電荷を速やかに緩和する手法も利用されているが¹⁾、電荷の発生場所や発生原因を調べ、対策をほどこすことも重要なと思われる。

流動によって発生する電流、すなわち流動電流については Schön²⁾ らの式がパイプ径、流速、液体の抵抗率およびパイプの長さとの関係を表わす式として比較的多くの人々に支持されている。この式はよく知られているように、パイプ壁から液体中へ流入する電流密度と液体中からパイプ壁へ漏れる電流密度との平衡によって定まる

として導かれたもので、Klinkenberg ら³⁾によると、パイプ壁から液体中へ発生流入する電流密度はパイプの長さ方向に対して定まった関係をもつとされ、また Hampel ら⁴⁾によると液体の導電率に比例すると報告されている。

筆者らの実験では液体の導電率とパイプ壁から発生する電流密度は比例していて、Hampel らの結果と一致することが確かめられた。また筆者らはこれまで実験開始前の液体の導電率と、実験後すなわち流動により帶電した液体の導電率の違いをしばしば報告したが⁵⁾、もし Hampel らの報告のように、パイプ壁から液体中へ発生流入する電流密度が導電率に比例するならば、これまで用いられている実験開始前の導電率ではなく、流動によって帶電したときの導電率を用いなければならないと考える。また流動で帶電した度合により導電率の変わることから、パイプ壁から発生流入する電流密度は、当然パイプの長さの影響を受けるものと思われる。

そこで筆者らは帶電した液体の内部に入れられた二つの球導体間に直流電圧を加え、電極間を流れる電流から流動帶電時の導電率を求め、これを Schön らの式に代入し、パイプ壁から液体中へ発生流入する電流密度 J_a

* 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

を求めた。その結果、 J_a はパイプ長さが増せば増加し、一定値に近づく傾向を示した。またさらに Bustin⁶⁾ の式を用いると、パイプ径と J_a およびパイプ径方向の電荷密度の勾配とパイプ径の関係が得られ、実験結果とよく一致することが確認されたので、以上のことについて報告する。

2. 実験装置

実験装置は一定量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流動電流、液体の抵抗率、流速を測定する下部タンクから成り立っている。装置の概略を図1に示す。

2.1 タンク

上部タンクは直径 30 cm の鉄製円筒形タンクで、下部は液体の流れを滑らかにするため拡大角 45° に加工されている。下部タンクは直径 15 cm、容量 2l の鉄製円筒形タンクおよび直径 30 cm の鉄製円筒形タンクから成り立っている。パイプ内部の平均流速は、下部タンク 2l の満たされる時間から求めた。また抵抗率はこのタンクに直径 10 mm ϕ の鋼球 2 個を用いたギャップ長 5 mm の電極で、一方の球電極に直流電圧 500 V を印加し、もう一方の球電極に微小電流計 A₄ を接続し、電極間を流れる電流の一定値になったときの値から求めた。

使用電極は小球のため、電極のあいだは不平等電界となる。この場合、イオン移動度の電界依存性を考慮しなければならず、この点を確かめるため電極電圧を直流 100~1,000 V まで変え、電極間を流れる電流を測定した。結果は、印加した電圧と電極のあいだを流れる電流のあいだに比例関係が存在し、これからイオン移動度の電界依存性について今回の実験では無視できると思われる。

2.2 パイプ

使用したパイプは市販されている銅製のもので、内径 3, 6 および 10 mm ϕ 、長さ 0.5, 1.0, 1.5 および 2.0 m の 4 組、計 12 種である。パイプ内部の洗浄は、石油→ベンジン→アルコール→蒸留水→10%塩酸→蒸留水→アルコール→熱風乾燥の手順で行ない、常にパイプ外面にさび、ごみがないように注意した。

2.3 測定器

微小電流の測定には、タケダ理研製微小電流計 TR-8641、川口電機製振動容量微小電位計 MMA II-17 を、抵抗測定の直流電源としては川口電機製高精度直流電源 Model V-703 を、また電極間の静電容量測定には米国 ECD 社製デジタルキャパシタスメータを用いた。

2.4 電極

抵抗測定に用いた電極は直径 10 mm ϕ の鋼球 2 個で、

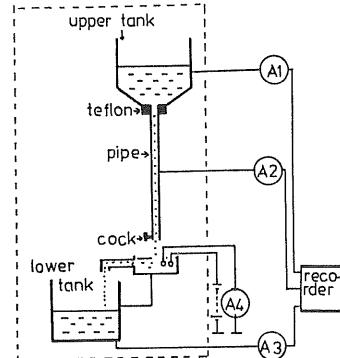


図 1 実験装置略図

Fig. 1 Schematic picture of apparatus.

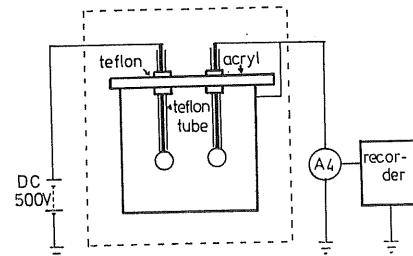


図 2 抵抗測定

Fig. 2 Resistivity measurement cell.

それぞれテフロンチューブで覆われた銅線の先端にハンダづけされている。この銅線はテフロンとアクリル板で支持されている。球電極の一方とタンク壁は図2に示すように結ばれ、タンクはテフロン棒で大地と絶縁されている。

2.5 試料

実験に用いた液体は市販の燈油で、実験開始前の抵抗率 $10^{12} \Omega \cdot \text{m}$ オーダ、含水量 152 ppm、動粘性係数 20°C で 2 cSt および比誘電率 2.1 であった。

3. 実験方法および結果

実験は燈油約 10l を上部タンクに、抵抗測定用の燈油 2l を下部タンクに入れ約 30 分静置する。これは燈油輸送中に生じた電荷を大地へ逃がす目的と、タンク内部液体の流動を静止させるためである。この後、下部タンクに挿入した電極に直流を加え、まず下部タンク内の油の抵抗率を測定する。その後、下部タンク内の燈油 2l および抵抗測定電極を取り除く。つぎにパイプ下部に取り付けられたコックを開き、燈油を上部タンクからパイプを通して下部タンクへと流下させる。このとき上部タンク、パイプおよび下部タンクに接続された電流計の値を記録計で記録する。流下終了後、再び抵抗測定電極を入

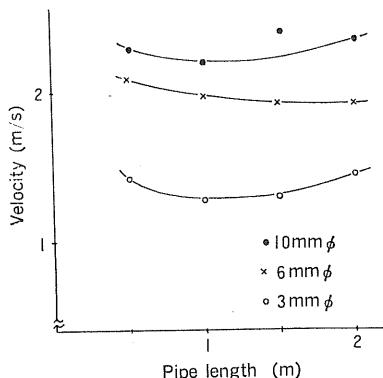


図 3 パイプ長さと流速の関係

Fig. 3 Correlation between liquid velocity and pipe length.

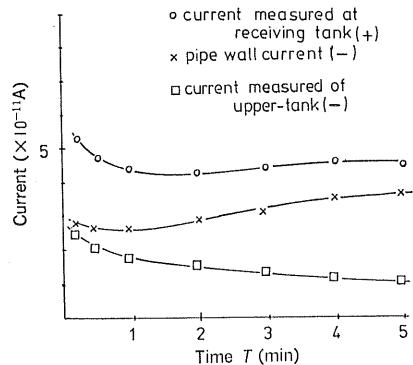


図 4 パイプ(銅 6 mmφ, 長さ 1.0 m)の電流と時間の関係

Fig. 4 Time dependence of current.

れ、電極に直流電圧を印加し、電極間を流れる電流の一
定値になった値から抵抗率を求めた。

この操作をパイプの長さおよび径を変え、12種類の銅
パイプについて行なった。

各種パイプ径に対し、パイプ長さとパイプ内部の平均
流速の関係を図3に示す。図4は6 mmφ、長さ1.0 m
のパイプを使用した場合の各場所で観測された電流と時
間の関係を示す。また図5~7に6 mmφのパイプ各長
さに対する上部タンク壁電流、パイプ壁の電流および受
器壁電流の時間依存性を示す。

4. 考 察

パイプ壁から液体中へ発生流入する電流密度 J_a の値
は、上部タンクおよび下部タンクに接続された電流計の
読み各 I_0 , I_s と、Schön らの式

$$I_s = \pi d_p \tau V J_a \{1 - \exp(-z/V\tau)\} + I_0 \exp(-z/V\tau) \quad (1)$$

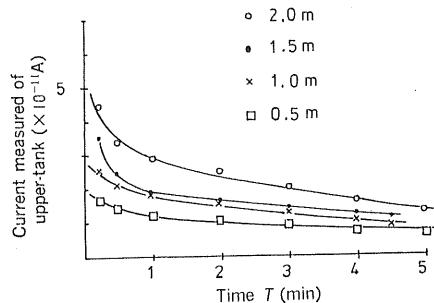


図 5 パイプ入口(上部タンク)の電流と時間の関係

Fig. 5 Time dependence of current measured in upper-tank.

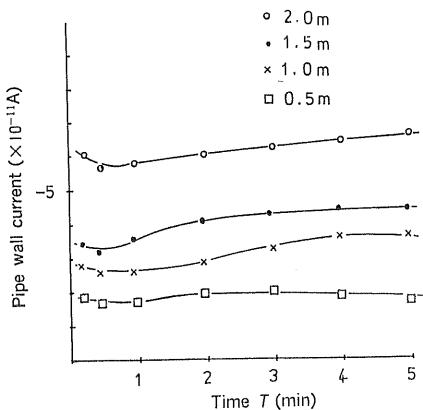


図 6 パイプ電流と時間の関係

Fig. 6 Time dependence of pipe wall current.

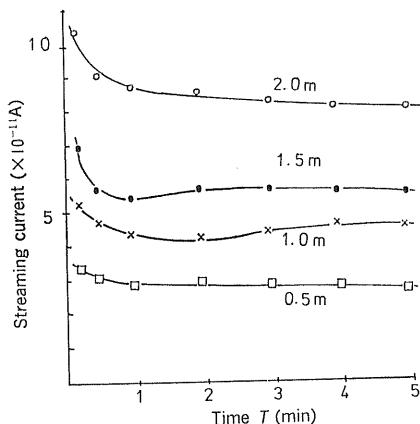


図 7 流動電流と時間の関係

Fig. 7 Time dependence of streaming current.

から算出した。(1)式は、Hampel ら⁴⁾によると、パイプ
内部液体の流れが乱流のとき得られる流動電流の値を示
している。ここで d_p はパイプの直径、 v はパイプ内部
の平均流速、 τ は帶電液体の放電の時定数 $\epsilon\rho$ である。

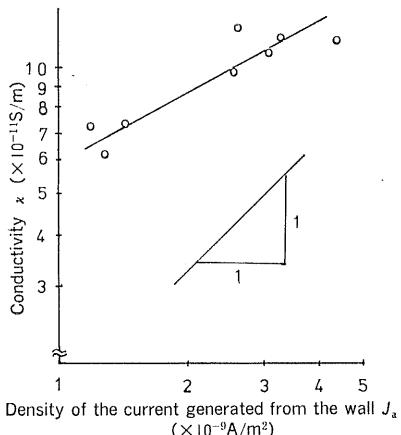


図 8 導電率とパイプ壁から発生する電流密度

Fig. 8 Correlation between conductivity and density of the current generated from the wall.

ρ の値は流動実験後すなわち燈油が帶電したときの抵抗率を用いた。この値は二つの球電極間を流れる電流から得られる抵抗と電極間の静電容量との積を ϵ で割って得られる。なお ϵ は誘電率である。 I_0 は上部タンクで発生する電流、 z はパイプ長さである。

測定された導電率とパイプ壁から発生する電流密度 J_a の関係を求めるとき図 8 になり、これまで報告されている Hampel らの結果と一致している。流動電流から求められる J_a の値は、パイプの長さが 2 m 付近で一定値に近づく傾向を示している。

一方、Bustin⁶⁾ は液体の流れが乱流のとき、流動電流 I_S を

$$I_S = |k| \tau V^{1.75} \{1 - \exp(-z/V\tau)\} + I_0 \exp(-z/V\tau) \quad (2)$$

で表わしており、 $|k|$ はパイプの径や材質によって定まる定数である。ここで(1)式と(2)式は乱流で得られる流動電流の式であるから、仮に等しいとすると、

$$\pi d_p J_a = |k| V^{0.75} \quad (3)$$

なる関係式が得られる。

実験結果を J_a と V で整理すると、 J_a は V の 0.69 乗に比例することがわかる。これを V の 0.75 乗と仮定すれば d_p の項が $|k|$ の内に含まれていることになる。

図 9 に J_a と V の結果を示す。パイプ径方向の電荷の密度勾配 dS/dr は $J_a = \Delta e dS/dr$ で示される。ここで Δe はうず拡散係数³⁾で $0.009 d_p V Re^{-1/6}$, Re はレイノルズ数である。これを(3)式に代入すると、電荷の密度勾配 dS/dr は

$$dS/dr = |k| V^{-0.25} / \pi d_p^2 Re^{-1/6} \quad (4)$$

となる。 Re は $d_p V / \eta$ であるから、 dS/dr は流速およ

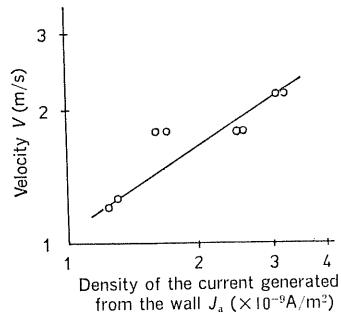


図 9 流速とパイプ壁から発生する電流密度の関係

Fig. 9 Correlation between liquid velocity and density of the current generated from the wall.

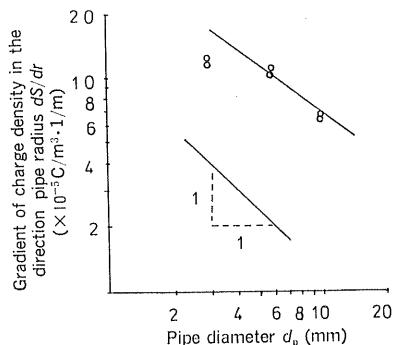


図 10 径方向の電荷密度勾配とパイプ径の関係

Fig. 10 Correlation between gradient of charge density in the direction pipe radius and pipe diameter.

び粘性にほとんど依存しない。

図 9 の結果では、 $|k|$ の内部に d_p が含まれているので、 dS/dr の値は d_p に反比例することになる。 dS/dr と d_p の関係を図示すると図 10 になり、 $dS/dr \propto 1/d_p$ の結果が得られる。このことから $|k|$ の内部に d_p の含まれていることは確実と思われる。

J_a とパイプ径については、今回のような重力落下の場合に、異なる径のパイプ中を同一流速で落下させることはできないので、前述の実験結果 $J_a \propto V^{0.75}$ を用いて、異なる径を同一流速で流下させた場合に得られる J_a の値を求めた。これに用いた補正是

$$J_1/J_2 = (V_1/V_2)^{0.75} \quad (5)$$

である。ここで J_1 は異なる径で得たパイプ壁から発生する電流密度をパイプ径 6 mm ϕ の値に換算した値、 J_2 は異なる径で得られた J_a の値、 V_1 は基準の流速で、今回はパイプ 6 mm ϕ の流速、 V_2 は異なる径で得られた流速である。

(5) 式の補正を行なうと図 11 の破線が得られる。図中

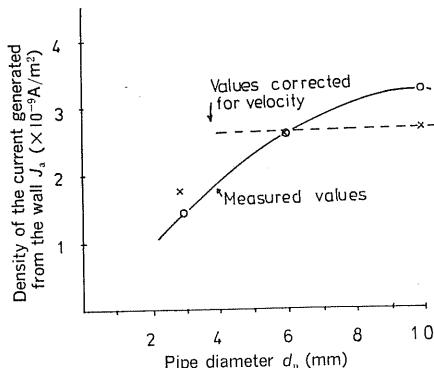


図 11 パイプ壁から発生する電流密度とパイプ径の関係
Fig. 11 Correlation between density of the current generated from the wall and pipe diameter.

実線は測定値を示す。パイプ径 $3\text{ mm}\phi$ の補正值がパイプ径 6 および $10\text{ mm}\phi$ にくらべてばらつく。この原因について現在明確なことはわからないが、レイノルズ数はパイプ径 $3\text{ mm}\phi$ の場合 2,500 付近にあり、液体の流れは層流から乱流への遷移区間で、この影響とも考えられる。

5. ま と め

液体を自然に流下させる実験で得られる結果を要約すると次のようになる。

- (1) 銅のパイプ壁から生じる電流密度はほぼ流速の 0.7 乗に比例して生じる。
- (2) 同じ液体でも帶電の度合により導電率が異なり、 J_a はこの導電率に比例している。
- (3) 同一流速で径の異なるパイプ中を流下させたとき

に生じる J_a は一定値を示し、パイプ径には依存しない。

- (4) パイプ径方向の電荷の密度勾配はパイプ径と反比例している。

6. む す び

Schön らの式で、 J_a はパイプ径、長さ、流速等種々の要因に無関係の定数として導き出されたものであるが、今回の実験範囲内では、パイプの長さおよび流速に関係している結果を得た。 J_a を流速、パイプ長さ等に影響を受けない定数として扱うには何らかの補正を必要とする。どのような補正をすればよいのか今後の研究によって明らかにしたい。

終りに、本研究を進めるにあたり終始ご指導をいただいた名古屋大学工学部電気工学科上田実教授、大橋朝夫助教授、北村尚武助手に厚くお礼申し上げる。

参 考 文 献

- 1) J.T. Leonard and H.W. Carhart : J. Colloid Interface Sci., 32, 3 (1970), 383.
- 2) G. Schön : Erdöl u. Kohle, im Druck.
- 3) A. Klinkenberg and J.L. van der Minne : *Electrostatics in the Petroleum Industry*, Elsevier Publishing Co. (1958).
- 4) B. Hampel and H. Luther : Chem.-Ing.-Tech., 29, 5 (1957), 323.
- 5) 伊藤正一、渡辺茂男、上田 実：電気学会論文誌 A, 5 (1973), 1.
- 6) W.M. Bustin : 37th Annual Meeting of the American Petroleum Industry in Chicago, Nov. (1957).