

流動電位によりパイプ中に生ずる電流について

伊 藤 正 一

The Electric Current generated in the Pipeline Flow

Masakazu ITO

The generation of charge by a petroleum flowing in a metal pipe and a insulation pipe can be studied by the measuring the electric current accompanying the flow of liquid.

Experimental works have shown that the streaming current generated in pipeline flow is proportional to 1.5~2 powers of the flowing velocity and is greater in some insulation pipes than in a metal pipe under the same flowing rate.

ま え が き

一般に石油系液体はその精製、輸送過程において必ず流動電位による電流を生じ受器を充電し、屢々災害事故を引起す。

このような電流の生ずる仕組みは、一応固体壁と液体との界面に生ずる電気二重層電荷が液体の流れの力によりはぎ取られて生ずるものと考えられているが、事実流速を増すのに従って電流値も大きくなることが観測される。

したがって固体壁に液体の接する所では、その界面の条件によるちがいはあるであろうが、どこにでもこのような電荷は生ずるわけであるけれども、系の他の部分にくらべ浄水器およびパイプ中でこのような電流の生ずる割合は圧倒的に多く、問題となる部分と考えられている。ここではパイプ部分のみについてのことがらにふれたい。

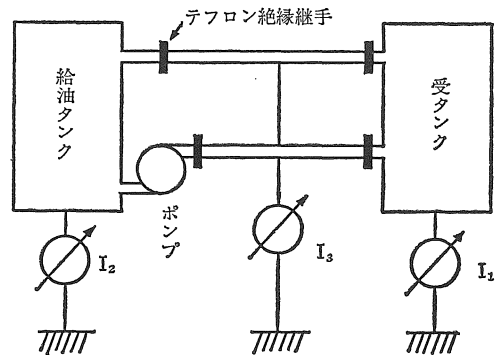
従来パイプ中において石油の流れによって生ずる電流（流動電流）の値は、金属パイプについては流れが層流域においては流速に、乱流域においては流速の1.75乗に比例してきまるといわれている⁽¹⁾。最近高分子絶縁材料によるパイプの使用される場合もかなりあることと思はれるが、これらに関するデータは余り見当たらない。

流動電流生成の基礎から考えても、界面での発生電流と固体壁を通しての漏洩電流が平衡したとき一定の流動電流が生ずることになり、電気二重層電荷が流れにすくい取られて電流が発生するとすればその反対電荷がパイプ壁を通して大池に散逸しなければ流動電流は全く生じない筈である。金属パイプは勿論、絶縁物パイプと雖も多少の導電度をもつ筈でこのような電流が絶縁物パイプ中に生ずることは一応想像できるが、実験の結果は金属

パイプのときと殆んど同じ傾向を示し又発生量は金属パイプでの値を上回るもののあるのが認められた。

実験装置および方法

第1図に示すように、テフロン材によって $10^{12}\Omega$ 程度に絶縁された2個の支持台の上に円筒形の鉄製タンク（容積15ℓ）をのせそれら並びにポンプ間をテフロン絶縁パイプ継手を介してテストパイプ（径6mm、長さ3~5m）および吐出パイプ（P.V.C.径4cm長さ30cm）で接ぎ、石油を循環させると液体は帯電し始める。受タンク



第1図 実験装置

給油タンクおよびテストパイプに各々マイクロアンペアメーターを接ぎ大池へ流れる各電流の読を夫々 I_1, I_2 および $I_3(A)$ とすると、これは各部の絶縁状態とメーターの入力抵抗値とから考えてまづ各部の漏洩電流そのものとして受取ってよからう。そこで電流の連続性より考えて、 $I_1 + I_2 = -I_3$ の關係が成立たなければならない。即ちテストパイプ中で発生した電流を I_3 とすると、パイプから大地へ反対電荷が $-I_3$ として流れ、受タンクおよび給油タンクからの漏洩電流 I_1 および I_2 の和と等しくならなければならないことである。吐出パイプの

径および長さをこのような値に選んだ理由は受タンク上部に設けた液体中の電位測定用の探極⁽²⁾を挿入する窓より循環中液体が溢れないようにしたこと、なるべくこの部分での電流発生を少くしたかったためである。

この実験における電流の観測値は大体 10^{-10} A のオーダー程度で非常に小さく外部よりの誘導作用を極めて受け易いので装置全体は金網で遮蔽されている。

次に使用した石油は丸善ツバメ印灯油でテストパイプはP.E.およびP.V.C.のものを使用し、これらと比較するため金属パイプとしてステンレススチールおよび銅を使用した。使用した灯油の一応の特性を第1表に示しておく。

第1表 実験に使用した灯油の定数

| | | |
|-----|---------------------------------|-----------------------|
| 測定値 | 水分 (PPM) | 120 |
| | 抵抗率 (Ωm) 15°C 500V | 2.24×10^{11} |
| | 誘電率 15°C, Qメーターによる | 2.3 |
| | 動粘度 (c.s.t.) 15°C | 2.4 |

絶縁物のパイプよりの電流 $-I_3$ の測定⁽³⁾はこのパイプを電解質溶液（この実験では苛性ソーダ水溶液を用いた）に浸しこの溶液中に挿入した電極を通してメーターに導いた。

石油循環用のポンプはうずまき形の一つで（イワキラボンプ）、羽根車を始め液体に接する部分はステンレスのシャフトを除き、全部ポリプロピレンで作られており、一応モーターとは絶縁されているようにしたが、この部分での発生電流は測定困難であったためこの実験での測定値の中には含まれていない。

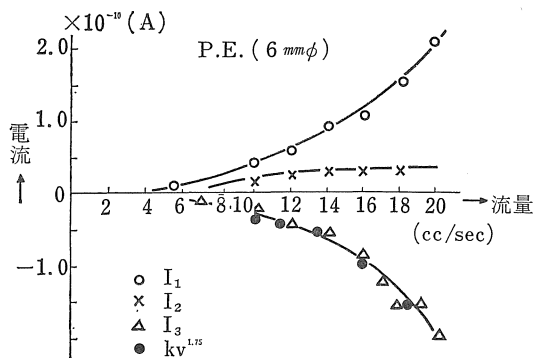
以上の組合せでポンプの回転を制御することによって循環する石油量をかえ、パイプ中の流速とそれに対応する電流の一定値に達したときの値を読取った。

実験結果

使用した絶縁物パイプと金属パイプで得られた結果は同一流速に対する発生電流の値はその材質により相違するが、流速に対する発生電流変化の傾向は非常によく似ている。

第2図はP.E.パイプを使用したときの結果を示したものである。

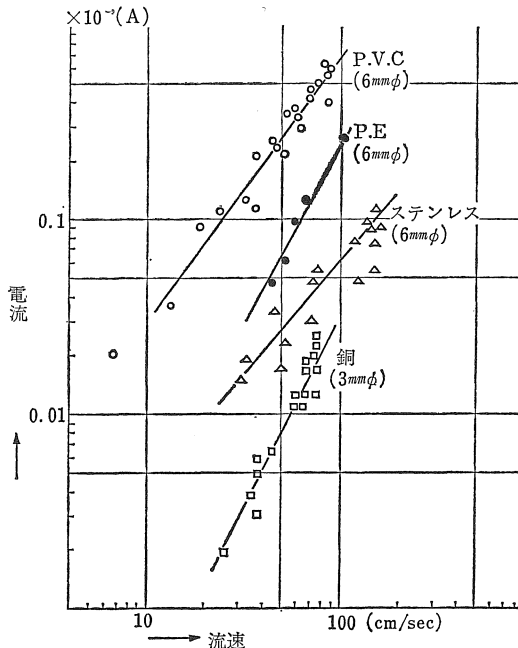
一応電流の連続性が各流速の点で成立していると考えているが、全体を通じ $I_1 + I_2$ の値に対し I_3 の値が多少小さく表れている。このことはさきに述べたようにポンプ部分での発生電流が読まれていないことが主な原因であろうと思はれる。次に I_2 の値が他に比べ非常に小さく現はれているのはこれも前記のようにテストパイプに比べ径の太い長さの短い吐出パイプを用いたので、この部分



第2図 パイプ中の流動電流(使用液体灯油温度13°C)での電流発生量が極めて少かったことと各タンク内での電流発生量も極めて少かったことを示しているものと考えたい。

各観測値が $I_1 + I_2 = -I_3$ の関係を満足していること、即ち電流の連続性が保たれているということは実験が誘導等の影響を受けないで正確に行はれているかどうかの目安として重要なことがらであるが、この点ここでは一応満足されていると考えられる。そこでパイプ内で石油の流動により発生している電流は I_3 と考えて差支えなからう。

さて今パイプ中で発生する流動電流は流速の1.75乗に比例するものとして、第2図において比例常数を流量16 cc (パイプ中の流速57 cm/sec) の点で求めて求めた計算値と I_3 の測定値とを比較してみると割合により一致を示す。



第3図 各種パイプ中に於ける流動電流 (温度11°C~13°C) 使用液体 灯油

第3図は各種のパイプについて行った実験結果を纏めて示したもので各直線の示す傾斜は流速と発生電流の関係を表しているわけで大体流速の1.5~2乗の範囲内にある。材料入手の関係でパイプ径を統一することが一部できなかったので、電流値を比較することは意味がないようであるが、それでもP.V.C.の場合は他の材料にくらべその値が相当大で、又銅では小のようである。銅を使用した際の極性は他の逆であったことは注意したい。

いづれにしても金属、絶縁物両パイプ共傾向として大差のないことは興味がある。

実験結果の考察

実験において、径6(mm)長さ3(m)のP.E.パイプで、パイプ内部の流速1(m/sec)のとき 2.4×10^{-10} [A]の電流値を観測した。

このときパイプの中の電流密度はパイプの断面積を $0.28(mm^2)$ として $8.1 \times 10^{-9}(A/m^2)$ となる。液体中の電荷の移動速度を知ることには一般には非常に難しい話であるが、ここでは流動電流の生成の機構より考えて、液体の流れの速度と同一と見做すと

$$I = QV \quad (A/m^2)$$

I: 電流密度(A/m²), Q: 電荷密度(c/m³)

V: 流速(m/sec)

の関係から、パイプ中に単位体積当りこの流速で $8.1 \times 10^{-9}(c/m^3)$ の電荷が存在すると考えられる。従ってパイプ壁においては近似的に $E = rQ/2\epsilon_0\epsilon_s(V/m)$

E: 電界(V/m) r: パイプ半径 ϵ_s : 灯油の比誘電率

の電界が径方向に存在するとして $6 \times 10^2(V/m)$ の値が得られる。パイプ電流は液体と固体との界面の電気二重層を発生源とするとすれば、そこを起点として1つの閉じた路を通して流れる筈で、従って反対電荷がパイプ壁を通して流れなければならないことになる。一応これらはパイプ全表面より一様に分布して漏洩するものとしてその密度を求めると $2.7 \times 10^{-9}(A/m^2)$ となる。

今パイプ壁に上記の電界が存在し、これに逆って電荷

が上記の電流密度で流動により液体中に引出されているとすれば、界面は電界と電流密度の比即ち $10^{11}(\Omega m)$ の抵抗率を内部にもつことになる。この値は使用した灯油の抵抗率と一致する。P.V.C.パイプについての実験によっても同一の結果が得られ、又金属パイプにも一応このやり方を適用して計算してみると矢張り使用した石油の定数と一致した抵抗率が得られる。これらの結果をまとめて第2表に示しておく。一般に流動電流の発生量は液体の抵抗率と密接な関係があるといわれ、例へばKlinkenberg氏⁽⁴⁾によれば $10^{10}(\Omega m)$ 以上の純度の液体では抵抗率の増すにつれて流動電流の生成量の減少する傾向のあることが報告されているが、界面の電荷が一定の外力(流れの剪断力)により電界に逆って液体中に引出される割合は、その液体の抵抗率に支配されることは当然で上記の事柄はこの間の事情を示す一端ともいへよう。

次に界面で発生した電流は過度的にパイプ壁を充電し大地との間に電位差を生ずることになる。この充電された電荷は壁の抵抗を通して放電し、伝導電流を形成することになり最終的にある定態値に落付く筈である。定態値即ちここでは $2.4 \times 10^{-10}(A)$ であり、この流動電流はP.E.の抵抗率を $10^{17}(\Omega m)$ として肉厚1(mm)のパイプ壁の抵抗 $10^2(\Omega)$ を通して流れ、パイプの内面と外面との間に $10^2(V)$ の電位差を生ずることになり観測値と一致する。ここで注意しなければならないことは、このような静電気発生源は定電流源であるということである。パイプ内壁の電位が上記のように上昇しても、同一液体を一定速度で流動させれば、即ち界面の状態さへ変化させなければ回路定数に無関係に一定の電流の発生することである。従ってこの状態で流速を増せばパイプ内壁の電位はそれにつれて上昇し、又パイプ壁の絶縁をいかに増しても有限の抵抗値をもつかぎり電流の定態値に達するまで電位はかぎりなく上昇し遂にはパイプ壁は絶縁破壊を引起すことになるであろう。しかし一方流速の増加につれて流動電流も増加し、それにつれて界面に働く電

第2表 各種パイプ中に於ける流動電流 (パイプ径6mm)

| パイプ材質 | P.V.C | P.E | ステンレススチール | |
|-----------------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|
| 石油 | 灯油 | 灯油 | 灯油 | ※ J P 4 |
| 流速(m/sec) | 1 | 1 | 1 | 10 |
| パイプ長(m) | 5 | 3 | 3 | 20 |
| 流動電流 (A) | 7×10^{-10} | 2.4×10^{-10} | 6.2×10^{-11} | 5.9×10^{-8} |
| 流動電流密度(A/m ²) | 2.5×10^{-5} | 9.1×10^{-9} | 2.1×10^{-9} | 2×10^{-8} |
| パイプ内電荷密度(c/m ³) | 2.5×10^{-5} | 8.1×10^{-9} | 2.1×10^{-9} | 2×10^{-4} |
| パイプ内壁面の電界(V/m) | 2×10^8 | 6×10^2 | 1.6×10^2 | 1.6×10^4 |
| パイプ壁電流密度(A/m ²) | 1.2×10^{-8} | 2.7×10^{-9} | 1×10^{-9} | 1.5×10^{-7} |
| 石油抵抗率(Ωm) (計算) | 1.7×10^{11} | 2×10^{11} | 1.6×10^{11} | 1.1×10^{11} |

*Bustin氏の実験による。

界も上昇し液体の輸送流速の極端な限度は液体の絶縁破壊を引起す電界を生ずるまでということになることも忘れてはならない。金属パイプについてはこの点のみを考えれば或は充分かも知れないが、絶縁物パイプにおいては之とあわせパイプ自身にかかる耐力も考慮に入れることが必要で、抵抗率の高い材質のパイプを使用することは、却って輸送流速の限界を引下げることになるかも知れない。又空気と雖も多少の導電度をもっているわけで、特に絶縁物パイプをうかして使用することは注意を要することと考えられる。

む す び

金属パイプおよび絶縁物パイプ中に生ずる流動電流について、実験結果より一応概略的な考察を加えたが、パイプ中の液体の流速に対する電流生成の割合は兩種パイプとも類似した傾向を示すことがわかったが、この流れの力を電気力に換算する一応の目安を示し、金属および絶縁的パイプを使用するときの輸送流速の限度を予測する一つの目安を示した。

終に卒業研究の一部として実験研究に協力された石田雄彦、沢田稔、前田昭徳の諸君に感謝申上げる。又終始試料油を提供頂いた丸善石油株式会社に対し厚くお礼申上げる。

文 献

- (1) Bustin Proc. A.P.I.D of Refining
37.(III). 24. 1957
- (2) 伊藤 昭和40 愛工大研究報告
- (3) 伊藤 昭40 電気連大
- (4) Klinkenberg: Electrostatics in the Petroleum
Industry 1958. New York,
Elsevier.