

# 帯電液体中の探極電流について

伊 藤 正 一

## Study of the Probe Current in Charged Liquid

Masakazu ITO

To know the distribution of the charge density and the field distribution in charged liquid, space charge limited equation are solved by using the potential of sphere probe in liquid and probe current.

As a result, if we consider that there is the concentric ion sheath with the probe in liquid and its radius changes in proportion to the 1/2 powers of the potential difference between the probe and in liquid, the result much coincide with the experimental fact.

### 1. ま え が き

絶縁性液体のパイプ輸送によって帯電した石油タンク中に球電極を挿入すると、電極は油中電荷の附着により或電位を示し、電極より大地に漏洩電流が生ずる。

電極（以下探極と呼ぶ）の大地に対する絶縁度をかえれば探極電位は前と異った値を示し、漏洩電流の値もちがってくる。

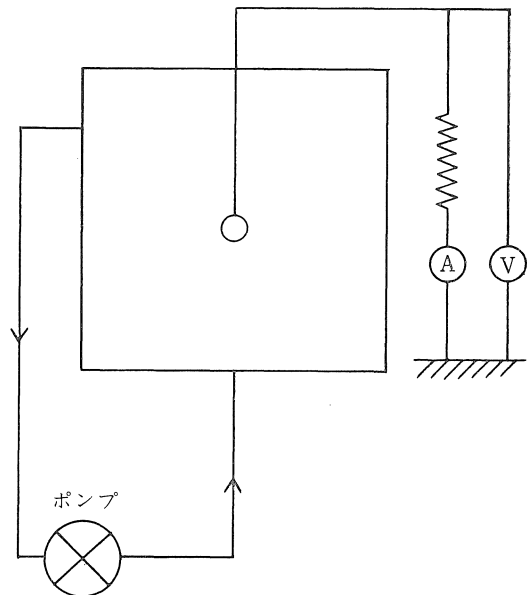
このようにして得られる電圧電流曲線は或る範囲においては直線となり、その傾斜は探極の径に反比例して定まる。又径の異なる探極を用いると同様の特性曲線が得られるが、これらを延長して電流ゼロの点の電位の値を求めると、いずれの曲線からも殆んど同じ値が得られ探極を挿入した油中の真の電位がわかる。

前報<sup>(1)</sup>においては以上の事柄から次のような考察を与えた。即ち使用した探極の径を  $r_P$ 、探極を挿入した点の油中の真の電位を  $V_B$ 、探極電位を  $V_P'$  とすると油中より  $V_B/r_P$  の電界が探極に働き、探極より油中へ  $V_P'/r_P$  の電界が働き差引  $V_B/r_P - V_P'/r_P$  だけの電界により探極電流が生ずるものと考えた。以上のことは探極電位  $V_P'$  のときの探極電流を  $I$  とすると、 $V_B/r_P - V_P'/r_P = I/4\pi r_P^2 \cdot \rho$  と表され実験結果より上記の関係で  $\rho$  を求めてみると当然のことであるがいずれの曲線から得られる値も同一で、又使用した石油の抵抗率とよく一致した。

今回は簡単な計算により探極電流と探極電位、油中の電界並びに電荷密度の分布を求めた結果を報告し内容を吟味してみたい。

### 2. 実験装置および実験結果

前報<sup>(1)</sup>と同じであるので重複をさけ装置を第1図にブロック図で示しておく。又実験結果は探極電流曲線およ

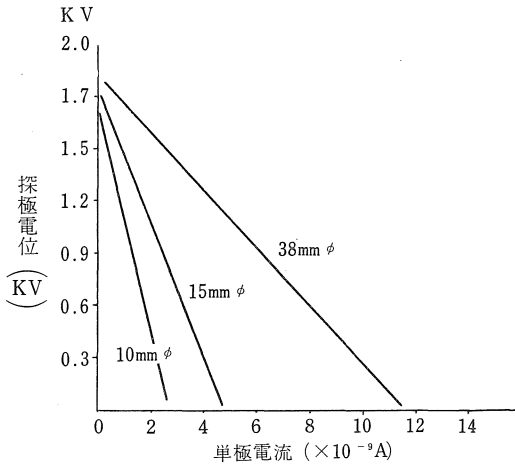


第1図 実験装置

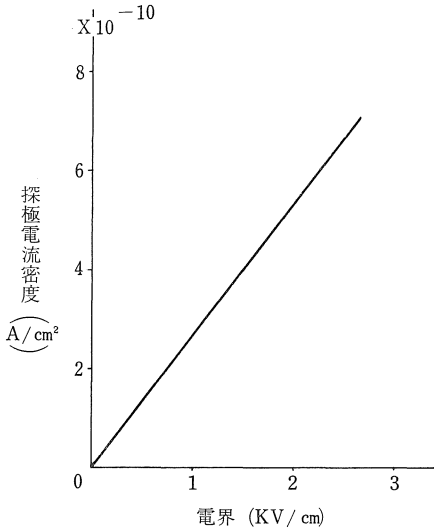
び抵抗率  $\rho$  を求めるために探極電流曲線を電界対電流密度に書きかえたものをそれぞれ第2図および第3図として再掲しておく。

### 3. 探極電流の算出

液体中より探極への電流を空間電荷伝導の形に従うものと考え、一応電荷源の位置を球探極中心より  $r_P(m)$  だけ離れた同心球面とし、球探極の電位より  $V_P(V)$  だけ高いと仮定する。今液体中の電位分布を球電極の中心を原点とし径方向に対し近似的に



第2図 探極電位—探極電流曲線



第3図 探極電流密度と探極表面との関係

$$Vr \propto r^n = V_P \left( \frac{r}{r_F} \right)^n \quad (n \leq 1) \quad ①$$

とする。これを Poisson 式に代入し電流の連続性を満足する  $n$  の値を求めてみることにする。

液体中のイオンは液体分子に多数度衝突しながら探極に向かうはずで、その速度は移動度によって定められるべきであろう。従って速度を  $v$ 、電界を  $E$ 、移動度を  $\mu$  とすると

$$v = \mu E \quad ②$$

探極よりの漏洩電流  $I$  は電荷密度を  $\sigma$  とすると

$$I = 4\pi r^2 \sigma \mu E \quad ③$$

一方 Poisson 式は電極配置の対称性より

$$\frac{1}{r^2} \frac{d(r^2 E)}{dr} = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad ④$$

ここで  $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_s$  : 使用した石油の誘電率

$$\text{①, ③, ④より } I = 4\pi \epsilon \mu \frac{V_P^2}{r_F^{2n}} \cdot n^2 (n+1) r^{2n-1} \quad ⑤$$

が得られ、電流連続性の満足されるためには、即ち  $I$  が  $r$  に無関係になるためには  $n = -\frac{1}{2}$  であればよい。

$$\text{従って } I = -\frac{3}{2} \pi \epsilon \mu \frac{V_P^2}{r_F} \quad (A) \quad ⑥$$

一方実験果より  $I \propto V_P$  の関係がある。

したがって  $r_F$  は一定でないと考えざるを得ない。

ここでまず液体中の電荷密度の分布を求めてみると

③④⑤式より

$$\sigma_r = \frac{3}{4} \epsilon \frac{V_P}{r_F^2} \left( \frac{r_F}{r} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (C/m^3) \quad ⑦$$

となる。 $r = r_F$  の所では

$$\sigma(r_F) = \frac{3}{4} \epsilon \frac{V_P}{r_F^2} \quad (C/m^3) \quad ⑧$$

となり、今若し  $r_F = V_P^{\frac{1}{2}}$  の関係があるものとすれば  $\sigma(r_F)$  は  $V_P$  に無関係な一定値となる。このことはよく考えてみれば至極当然のことである。即ちタンク中の電荷はパイプ中を石油が流動した際発生したものが油と共に持込まれたもので定常状態においては流速および温度の変化さえ与えなければ一定の値の筈である。

ここでタンク中に持込まれた電荷量を実測値から求めることにする。

今パイプを通してのタンクへの流入電流を  $I$  とすれば電荷量は  $\rho$  を石油の抵抗率として

$$\epsilon \rho I = Q [C] \quad \epsilon \rho : \text{石油の放電時定数}$$

として求める。 $\epsilon_s : 2.3$ 、 $\rho = 10^{10} [\Omega m]$ 、 $I : 10^{-8} [A]$

として約  $2 \times 10^{-9} [c]$ 、タンクは径、高さ共に  $40 [cm]$  の円筒形でこの中に一様な密度で電荷が分布しているとすると、 $\sigma = 4 \times 10^{-8} (c/m^3)$  の値となる。この値はタンクを半径  $20 [cm]$  の球形と見做し中心における油中の真の電位  $V$  とから  $V = \frac{Q}{r\epsilon} \times 9 \times 10^9$   $r$  : 半径

として求めた値とも略一致する。

ところで絶縁性液体と雖も多少の電流は通すわけで個

々の導電度  $K$  が測定される。

このことはもともと液体中にはいくらかの正負等量の電荷たん体が存在していることを意味している。この電荷たん体の密度は移動度  $\mu$  と導電度  $K$  より

$$K = \sigma \mu$$

の関係で得られることはよく知られている。

今移動度を一般に知られている値  $10^{-4} cm^2/V \cdot sec$  を使ってこの油の電荷密度を求めると約  $10^{-8} (c/m^3)$  と得られ、先に得られた値と一桁程のひらきがある。

要するに探極周辺の液体中には正負等量の電荷たん体がもともと存在しており、流動により帯電した液体をタンク中に送り込むことによりそのバランスがごく僅かではあるがくずれその差だけが  $\sigma(r_F)$  とし⑧式より得られるものと考えられる。

このような油中に探極を挿入すれば、当初探極の電位は油中より低い筈で、正イオンは探極に向い負イオンは遠ざけられるであろう。探極周辺の正イオン密度は一価のイオンとして前記より約 $10^{14}$  ions/ $m^3$  と考えられ、正イオン電流は空間電荷によって制限されるにちがいない。即ち油中探極は周辺を正イオンの鞘によって囲われこの鞘の厚さが油中の電荷密度および探極と油中の電位差によってきまると考えられるのである。

鞘への油中からのイオンの移動は熱運動の法則に支配されるものとする、 $\bar{c}$  をイオンの平均速度として

$$J = \frac{1}{4} \sigma \bar{c} \quad (A/m^2)$$

の電荷密度が得られる。これが鞘から探極まで空間電荷の制限を受けて運ばれるとすると探極電流  $I$  は又、

$$I = 4\pi r_F^2 J, \quad r_F: \text{鞘の径}$$

と表され、実験結果より  $I \propto V_P$  の関係が測定されているので

$$r_F \propto V_P^{1/2} \quad (9)$$

の成立つことがうなずける。

#### 4. 油中の電界分布

探極周辺の電界分布  $E(r)$  は

$$E(r) = \frac{1}{2} \frac{V_P}{r_F^{1/2} r^{1/2}} \quad (10)$$

として与えられる。

ここでは当初電位分布を①式の如く仮定して諸量を求めてきたのであるが、このことは探極の大きさを無視し得る程小とするか、又は考察点  $r$  を電極径よりも遙かに大の所としているわけである。従って以下の考えはまことに乱棒な近似であるが一応定性的な考え方として進めてみることにする。

今  $r \approx r_F$  なる  $r$  点の電界を⑩式より求めてみると

$$\begin{aligned} E &= \frac{1}{2} \frac{V_P}{r} = \frac{1}{2} \left( \frac{V_B - V_{P'}}{r} \right) \\ &= \frac{1}{2} \left( \frac{V_B + V_{P'}}{r} \right) - \frac{V_{P'}}{r} \end{aligned}$$

ここで  $V_B, V_{P'}$  は夫々油中の真の電位および鞘内部の  $r$  点における電位とする。

次に若し  $r$  点に探極表面が位置しているとする

$$E = \frac{1}{2} \left( \frac{V_B + V_{P'}}{r_P} \right) - \frac{V_{P'}}{r_P}$$

となり探極表面の電界は油中より球へ  $\frac{1}{2} \left( \frac{V_B + V_{P'}}{r_P} \right)$ 、球より油中に  $\frac{V_{P'}}{r_P}$  だけ働き、差引  $\frac{1}{2} \left( \frac{V_B + V_{P'}}{r_P} \right) - \left( \frac{V_{P'}}{r_P} \right)$  の電界が油中より球に働いていることになる。

前報においては上記の如く考えたわけであるがこれを  $r_P$  点においてではなく  $r \gg r_P$  点について考察すれば一応考え方としては支持されることになるであろう。

#### 5. む す び

帯電した液体中に球形探極を挿入して、液体中の電流特性、電界分布および電荷分布を求める方法について実

験結果と対照しながら特性式を導いた。

しかしながらこれはあくまで近似方法である。したがって電極近傍の模様については誤差が比較的大であることはいなめない。しかし球探極周辺における任意の  $r$  点の電界によって探極電流は決定出来、この同一電流が探極に流れてむことは当然であるので、探極附近の電位分布が決定的な影響をもつことはないと考えられる。

したがって上記特性式は鞘径が探極径に比し充分大なる範囲であれば充分といえよう。

いずれにしてもこれまででは探極電流の探極径への依存性が説明されていないのでこの点を考慮した精密な特性式を求める必要があるが、このことについては別稿で報告する。

終にのぞみ終始御激励を頂いている本学安井副学長、電気科岡本教授の諸先生に厚くお礼申し上げる。

#### 文 献

- (1) 愛工大研究報告 Vol. 1 1965