

帯電液体内における探極電位の測定について

鳥 取 孝 太 郎

On Probe Potential Measurement in Charged Liquid

Kotaro TOTTORI

The author carried out a test on an oil tank in which oil was circulated by pumping in an adequate experimental-scale. The static electrification in the charged oil was observed by insertion of an electrical probe into the oil tank. From the results of observation of this fundamental experiment, this method should be recognized theoretically and experimentally.

Furthermore, the author studied the effect of the charge at the oil surface and its existence on this oil tank under air injection in the pipe line during pumping. The probe potential distribution on the central axis of the same oil tank was measured by the above method, while calculation of potential distribution in the same tank partly filled with charged liquid was made by solving both Laplace's equation and Poisson's equation. From these results of the charged liquid with forced injection of air bubbles which rise to the oil surface, it became clear that surface charge density is negative and space charge density is positive, and, the density of both charges increases fairly well by increasing the amount of air bubbles.

1. ま え き が

昭和41年9月、第1回北陸科学技術振興会議の第4テーマで、筆者は産業都市の災害防止対策に関する一提言を行った。産業災害に関連する公害の原因は生産施設における研究内容の盲点にあるとし、それら公害の防止対策の研究配慮を要望した。その頃、静電気が原因とみられる粉塵爆発、油タンク爆発という潜在災害がしばしば発生していた。たとえば近く勝山市某ガソリンスタンドの地下タンクの発火火災事件（昭35，5月）、高岡市某製鉄工場の鉄粉製造中の粉塵爆発による死傷事件（昭32，5月）、新潟地震直後の原油貯蔵大型タンクの爆発（昭39，6月）があり、筆者はそれらの調査研究に関係する機会があった。その結果、国の内外とも静電現象に関するこれらの基礎的研究は不充分であることに気がついたので、筆者は上記のような提言をするにいたった直接の動機であった。

このように現象論的研究の比較的立ちおくれしている粉塵、液体の帯電現象に関し、筆者は一応絶縁性液体（以下油と呼ぶ）による油タンクの帯電に関する基礎的研究からスタートした。本報告はこの研究過程を記述するものである。記述中、留意されたいのは油中探極そう入による電位測定方式の提唱、気ほう混入による油タンクの帯電姿態、とくに油面電荷に関する実験的、理論的解析などである。（以下本文の理論式は MKS 単位系）

2. 液体の帯電機構とその災害¹⁾

液体の静電気発生機構については古くヘルムホルツ（1879）の電気二重層説に始まる。すなわち固体と液体との静止境界面において電荷分離の現象があり、固体面ではその面に吸着される電荷によって固着層を形成する。対応する液体では異符号の電荷で、その境界面から隔てるにつれ、その電荷密度は減少し、いわゆる拡散層を形成する。このように2層とも静止の帯電状態を模型的に図1の左側の図で示す。この状態では各層の電荷は釣合いの状態にあって、しかも両電荷の同時吸着はない。

そこでいずれか1層が移動すると図1の右側の図で示すように電荷の分離が液体中に生ずる。ところで液が絶縁性の高い油である場合、同図(a)はその流送中の模型で、流速が比較的高いと乱流状

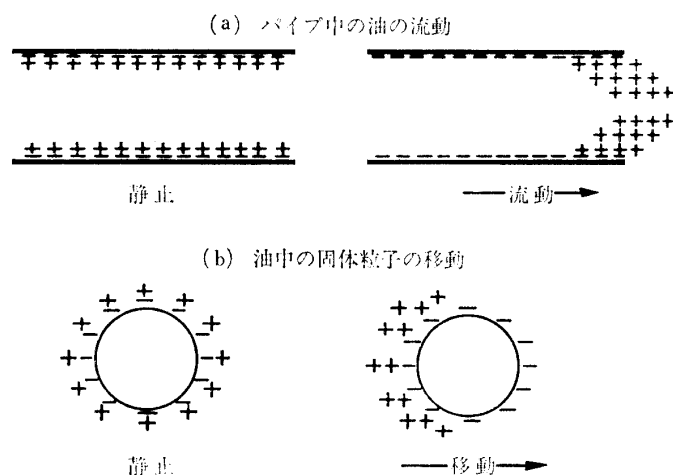


図1 電気二重層による電荷分離の模型

態となるため、電荷はいわゆる流動電流（streaming current）の状態で油とともに流送されるはずである。また対応する固着層の電荷はパイプ壁が接地した導体であれば大地と中和消滅する。しかし絶縁物であれば帯電し、場合によっては電氣的永久分極（electret）となる。つぎに同図(b)は静止油中を粒子が移動する場合の模型で、たとえばかきまぜまたは流入停止後などにおける粒子の移動または沈降現象で発生する帯電で、いわゆる沈降電位（settling potential）として取り扱われ、

古くドルン効果(1880)として知られる現象である。

流動電流は主としてポンプ部分とパイプ部分とで発生する。流動電流を I とし、実験的に次のように与えている。²⁾

$$I = KTv^{1.75} \left(1 - e^{-L/Tv} \right) + I_0 e^{-L/Tv} \quad (1)$$

ただし、 K はパイプ材質、径などによって決まる定数、 v は流速、 L はパイプの長さ、 $T = \varepsilon\rho$ で油の放電の時定数と言われ、(ε は誘電率、 ρ は固有抵抗)、 I_0 はパイプ入口における電流(ポンプ部分での発生電流)、 e は自然対数の底である。

(1) 式の第1項はパイプライン中で生ずる電流の値を示し、パイプの長さが Tv に比べて充分に大きいと、ほぼ一定となることを示す。第2項はポンプ部分で発生する電流はパイプの長さが増すにつれて減少することを示す。次章で示す図4の実験例として 2.5 cmφ のビニールパイプ中を一定流速 1.7 m/s で軽油を流した場合のパイプ長さと流動電流の関係は図2で示される。図の傾向はポンプ部分での電荷発生量がパイプ部分での発生量に比べて相当多いことを示す。

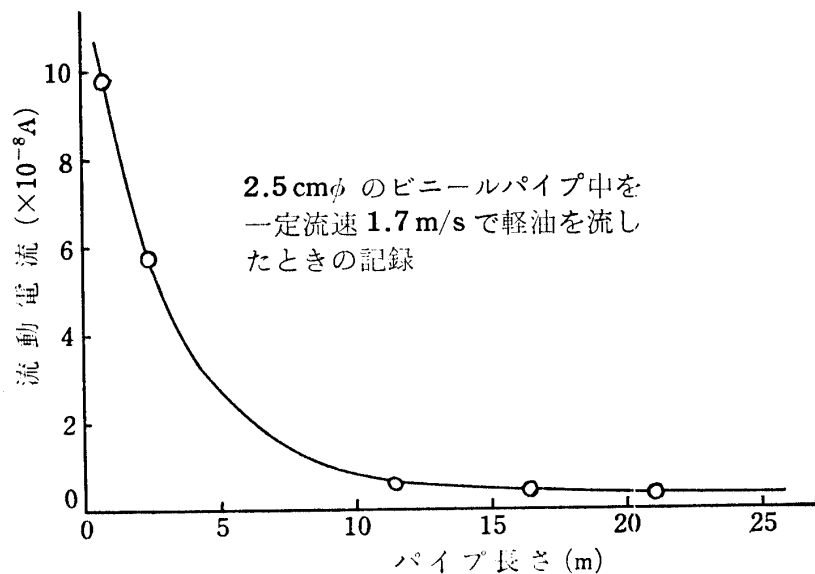


図2 流動電流とパイプ長との関係

つぎに沈降電位現象は油タンク内で発生しうる帯電現象である。たとえば油中でコロイド状に分布する微粒子が自然に沈降する場合、発生する電界強度 E は理論的に次式で示されている。

$$E = -\frac{2}{3} \cdot \varepsilon\rho \cdot \frac{Xg\Delta s\zeta}{\alpha\eta} \quad (2)$$

$$\text{ただし } \alpha = 1 + \frac{2X}{\rho\eta} \left\{ \frac{\varepsilon\rho\zeta}{a} \right\}^2$$

この式を用いてガソリン中に水がコロイド状態にある場合、水滴の直径を 100μ とする水滴群の

自然沈降による電界強度の値は

ϵ : 油の誘電率 $= 8.855 \times 10^{-12} \times 2 \text{ F/m}$

ρ : 油の固有抵抗 $= 10^{12} \Omega\text{m}$

X : 容積分散率 $= 0.05$

g : 重力加速度 $= 10 \text{ m/sec}^2$

Δ_s : 密度差 $= 300 \text{ kg/m}^3$

ζ : 界面電位 $= 0.025 \text{ V}$

η : 油の動粘度 $= 5 \times 10^{-4} \text{ kg/m sec (=0.5 centipoise)}$

a : 水滴の半径 $= 50 \mu$

として、 $\alpha = 1.016$, $E = -90 \text{ kV/m}$ で示される。したがって、混合などで、油中粒子の強い分散には危険な電界強度もありうる。

さらにまた微粒子の沈降とは反対にその浮昇、たとえば油のろ過、かくはん、流送の場合、気ほうの混入が多い。気ほうは当然浮昇するのでこれら気ほうの帯電に及ぼす影響については筆者らが実験研究したので章を改めて述べる。

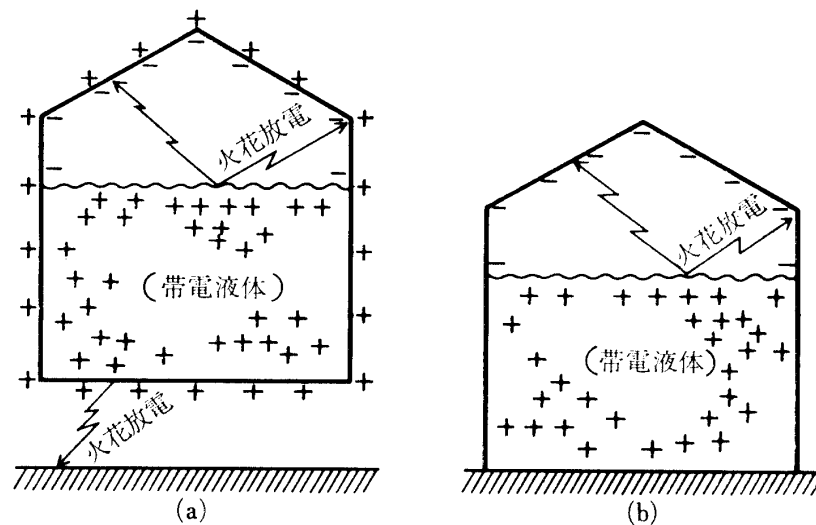


図3 帯電液体による火花放電の模型

とにかく上記した流動電流、沈降電位などに関する帯電現象は、結果的に油タンク内では空間電荷 (space charge) として存在するはずである。したがってこのように帯電する油タンクで、火花放電の発生しうる可能性を模型的に図3で示す。同図(a)は油タンクが絶縁されている場合で、この状態は航空機の燃料油タンク、タンクローリーなどで、石油類を移送する場合に該当する。この状態における火花放電の発生面は油面および大地に近いタンクの外側面とがある。また同図(b)は油タンクが接地されている場合で、この状態における火花放電の発生源は油面である。油タンクの爆発災害の事例の多くは図(b)のようなベークスペース (vapour space) 中の火花放電による。

一般に物体を帯電的にみると、金属のような導体が帯電すると、その表面にのみ電荷が存在す

る。これは表面電荷 (surface charge) といって、接地すれば全表面電荷は無くなる。また帯電した油のような液体では空間電荷の状態にあるが、油面よりの火花放電の起りうることから推定して油面の表面電荷も無視できない。筆者らは帯電液体の表面電荷の存在を理論的に、実験的にも一応確認し得たので、後章で述べる。

なおこのような静電気の災害防止にはその実態を測定管理する必要がある。なにぶん油タンク爆発の重要な引がねとなる爆発性混合ガスの最小着火エネルギーは数 mJ 程度であり、また空気中で生じる最小火花電圧も 330 V 程度である。静電気災害防止を対象とする静電気はこのように微小エネルギーであるが、電位は比較的高いのが特徴である。ところで近来技術革新時代に伴うエレクトロニクスによって、現場向きの精度の高い、しかも連続的測定も容易な微小電流計 (チョッパー型, 振動容量型), 電位計 (回転セクター型, 集電式) などの計器類が現われ、従来静電気は抽象論的研究であったが、現象論的研究へと進みつつある。

3. 油中探極による電位の測定

タンク内の帯電液体の蓄積電荷の量は前記した流動電流, 沈降電位の諸現象で必然的に定まる。そこで帯電液体の空間電荷密度 ρ とその点における電位 V の関係はポアソンの方程式 $\nabla^2 V = -\rho/\epsilon$ で支配される。したがってこの電位の値を測定すると、一応その場所の電荷密度が求められるはずである。

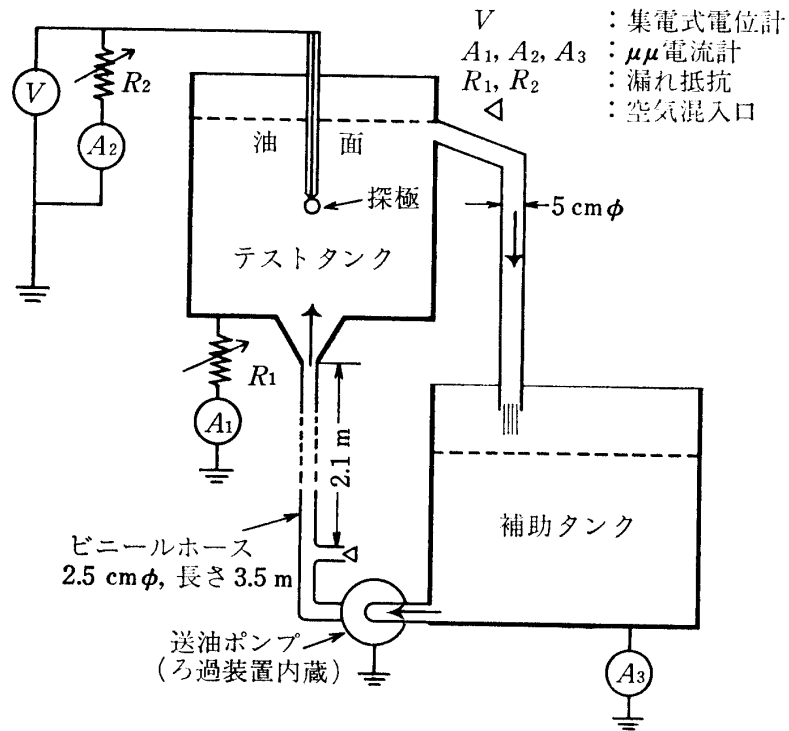
この油中電位を測定するため、油中に球探極をそう入する方式を用いる。球探極の位置は自由に可変ができ、球以外の導線部分は絶縁被覆する。また測定に使用する油タンク (以下テストタンクと呼ぶ) では、液体の体積および電荷密度が一樣となるよう、循環送油方式とし、油の流入, 流出口には特別の工夫を払っている。

試料油としては引火爆発の危険性を考慮して、可燃性ガスを発生しない変圧器油または軽油を用いた。ただし筆者はすでに変圧器油, 軽油またはガソリンにつきろ過の有無, 流速または油温の変化を与えて、それらの帯電の大きさ, 傾向が殆んど同じであることを確かめている。^{3), 4)}

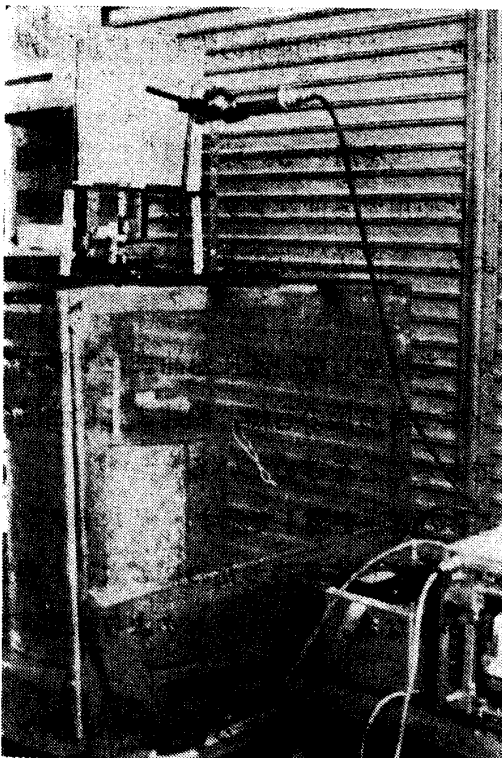
3.1 実験装置 上述の目的を配慮した実験装置と測定系の概要を図 4 で示す。テストタンクは円筒形鉄板製で、一応 40 cm ϕ ×40 cm の大きさである。油の循環を受持つため同じ大きさ程度の補助タンクと流動電荷を発生させるポンプとパイプラインからなる。テストタンクより補助タンクへの送油は自然流下による。(同図(a), (b), (c)参照)

テストタンクはその底部中央にホーン状の流入口があり、油面を一定とするため、補助タンクへの流出口としてその下底より 35 cm の上部側面に 5 cm ϕ の溢流パイプを設ける。

パイプは内径 2.5 cm, 長さ 3.5 m のビニール管を使用する。ポンプは 5 μ ろ過装置を内蔵するガソリン計量用の時計式ポンプ (同図(c) 参照) を用いて油を循環送油する。このポンプは毎分 50 l 程度の油を流送することができるので、パイプ中の流速は最大 1.7 m/s である。パイプの長さからみて、このポンプは主要な静電気の発生源である。



(a) 実験装置と測定系



(b) シールドされたテストタンクと探極電位測定系



(c) 送油ポンプ (東京機器工業(株)寄贈)

図4 実験装置と測定系の概要

なおこの装置の電氣的考察の便宜上、油タンクと油中探極との電氣的等価回路を図5に示し、関係諸量も併示する。

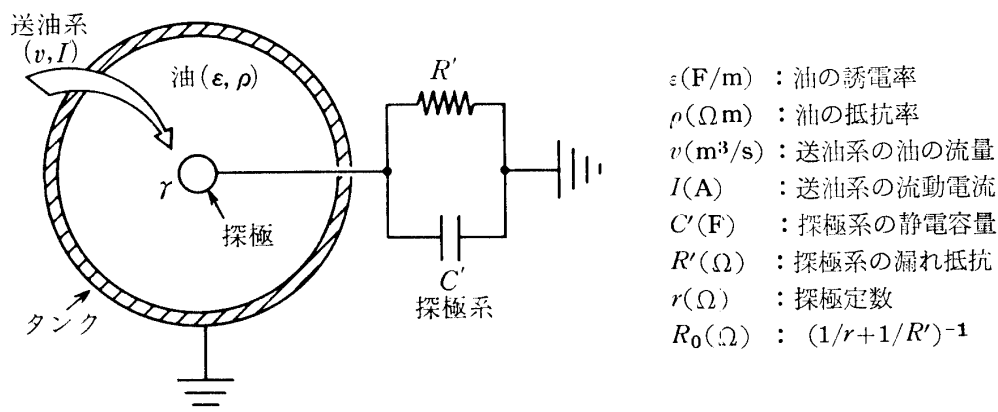


図5 送油系（タンク接地）と探極系の等価図

一般に、送油中の油タンクにおける油中探極の電位に関しては、送油しても油面が不変である場合と送油によって油面が上昇する場合の二つがある。油中探極に関し、前者は油面との相対的位置が一定であり、後者は油面との相対的位置が変化する。■本論では基礎的実験研究が対象であるから、一応前者の油面を一定とする循環送油方式を用いた。なお図5の送油系の I は(1)式で示す流動電流である。

3.2 油タンク系の帯電 まづシールド完全な絶縁した油タンクについて、その大地に対する漏れ抵抗を R 、静電容量を C とする。簡単のためタンク容器を導体とし、流入する油はタンク内では次章で述べる実験結果から電荷の発生がない。なお循環送油方式であるから、運ばれた電荷の一部は溢流する油とともに流出するであろうが、漏えいする大部分の電荷は漏れ電流であろう。とにかく電荷の蓄積にも一定の限度すなわち一定の値、定常状態になるはずである。

そこでタンクに流入する流動電流を I とし、この流動電流による t 時刻における油内に蓄積される電荷 q は次式で示される。

$$q = q_{\infty} \left(1 - e^{-t/\varepsilon \rho} \right) \quad (3)$$

ただし定常状態 $t = \infty$ では $q = \varepsilon \rho I \equiv q_{\infty}$ となる。

(3) 式は t 時刻における油タンク中の電荷 q の蓄積過程で、タンク内の油中では空間電荷として存在することを示す。また(3)式は接地の有無に関係がない。

なお絶縁した油タンクの電位 v 、全電荷 q は次式で示される。

$$v = IR \left(1 - e^{-t/CR} \right) \quad (4)$$

$$q = CRI \left(1 - e^{-t/CR} \right) \quad (5)$$

となり、タンクの時定数 CR にしたがって油タンクの電位は上昇する。

つぎに、油の流入停止による油タンクについても、同様にして求める。流入停止直後の油中の全電荷を $q_0 = \varepsilon \rho I$ とすると

$$q = q_0 e^{-t/\varepsilon \rho} = \varepsilon \rho I e^{-t/\varepsilon \rho} \quad (6)$$

で示される。(6)式は t 時刻におけるタンク中に残留する電荷 q の減衰過程を示す。(6)式も(3)式と同様にタンク接地の有無に関係はない。

絶縁したタンクについても、

$$v = q_0 / C e^{-t/CR}, \quad (7)$$

$$q = q_0 e^{-t/CR} \quad (8)$$

となり、タンクの時定数 CR にしたがって油タンクの電位は減衰する。

3.3 油中探極について 帯電している油の誘電率を ε とすると、静電気学的には油中の任意の点の電界 E はその点の電荷密度 ρ で定まることは $\rho = \varepsilon \operatorname{div} E$ で明らかである。ところが本実験のような循環送油方式によって帯電する油の場合、油中のある点で、絶えず一定量の電荷量が供給され続けて全体の電位分布が定常状態に達していると、この点から周囲のタンク壁に向って絶えず一定の電流 i が流れる。この量は流入する量に等しく、かつタンクから大地への漏れ電流もまたこれに等しい。したがってこの一点 P とタン壁との電位差 Δv は

$$\Delta v = \int_P^{\text{壁}} E ds = \int_P^{\text{壁}} i \rho ds \quad (9)$$

で、 i および油の抵抗率 ρ が一定ならば E は一定であり、 Δv も一定である。すると、循環給油による定常状態における帯電した油では電位分布は定まるはずで、この電位を探極電位 v' に対し、真の電位 v (静電的に定まる電位) と呼ぶことにする。

つぎにこのような状態にある油タンク中に測定用探極を入れた場合、探極系が完全に絶縁されていると、当然探極はその位置の真の電位を示すはずである。しかし完全絶縁はありえないので大地に対しわずかでも漏れ抵抗 R' を通じ漏れ電流 i が流れる。もちろん i は過渡状態では R' のほかに大地との静電容量 C' で決まる。したがって油中探極の電位 v' は真の電位よりもある程度低くなるはずであり、それらの電位差 Δv に比例した電流 i が探極に向って流れ込むものと考えられる。したがって $\Delta v = ri$ とし、 r は比例定数で、探極係数と呼ぶ。すると接地タンクでは $v = \Delta v$ 、またタンク壁の電位 v'' とする絶縁タンクでは $v = \Delta v + v''$ となり、いずれも

$$\Delta v = v - v' = ri \quad (10)$$

なる関係が理論的に成立する。

なお油中の真の電位 v は一義的に油タンク内の全電荷量 q に比例するはずであり、その比例定

数を p とすれば

$$v = \Delta v = pq \quad (11)$$

で示される。ただし p は探極の位置で定まる定数で、静電気学における電位係数的内容のものである。簡単な場合たとえば半径 a の球形タンクに充たされた帯電する油の油中中心の p は

$$p = 1/8\pi\epsilon a \quad (12)$$

で示される。

3.4 帯電する油タンクの過渡状態 絶縁タンクの場合は⁶⁾ 割愛して接地タンクの場合について述べる。図5の等価回路について、いま油面一定として油タンクに帯電した油が流入する場合、 t 時刻における探極へ流れ込む電流を i 、探極系に蓄積される電荷を q' 、大地への漏れ電流を i' 、探極をそう入する前のその点の電位を v 、探極の電位を v' 全電荷量を (3) 式の関係から $q = \epsilon\rho I \times (1 - e^{-t/\epsilon\rho})$ とし、さらに (10) 式、(11) 式を用いると

$$\left. \begin{aligned} dq'/dt &= i - i', & q' &= C'v', & v' &= i'R' \\ v - v' &= ri, & v &= pq \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

の関係諸式から次式が求められる。

$$v' = v'_\infty \left\{ 1 + \frac{1}{\frac{1}{C'R_0} - \frac{1}{\epsilon\rho}} \left(\frac{e^{-t/C'R_0}}{\epsilon\rho} - \frac{e^{-t/\epsilon\rho}}{C'R_0} \right) \right\} \quad (14)$$

ただし R_0 は $1/R_0 = 1/r + 1/R'$ とする。 v'_∞ は $t \rightarrow \infty$ すなわち定常状態における $v' = v'_\infty = p\epsilon\rho R_0 I/r$ で、その場合の探極位置の探極電位を示す。

そこで循環送油による接地油タンク中における探極の電位の時間的上昇傾向を無次元化して、 $\epsilon\rho = 10$ の場合を図6で示す。ただし $\psi_1 = v'/v'_\infty$ で、油および探極系の時定数 $\epsilon\rho$ および $C'R_0$ の関数として表わされる。

つぎに油の流入を停止した場合についても油面一定の場合として (13) 式の関係諸式から求められる。ただし $v = pq$ 式の q を (6) 式 $q = \epsilon\rho I e^{-t/\epsilon\rho}$ とする。この結果、探極電位は

$$v' = v_\infty \left\{ \frac{1}{C'r \left(\frac{1}{C'R_0} - \frac{1}{\epsilon\rho} \right)} \left(e^{-t/\epsilon\rho} - e^{-t/C'R_0} \right) + e^{-t/C'R_0} \right\} \quad (15)$$

で示される。ただし $v_\infty = p\epsilon\rho I$ とおく。

この場合の油タンク中の探極電位の減衰傾向も無次元化、 $\psi_2 = v'/v_\infty$ として $\epsilon\rho = 10$ の場合を図7で示す。

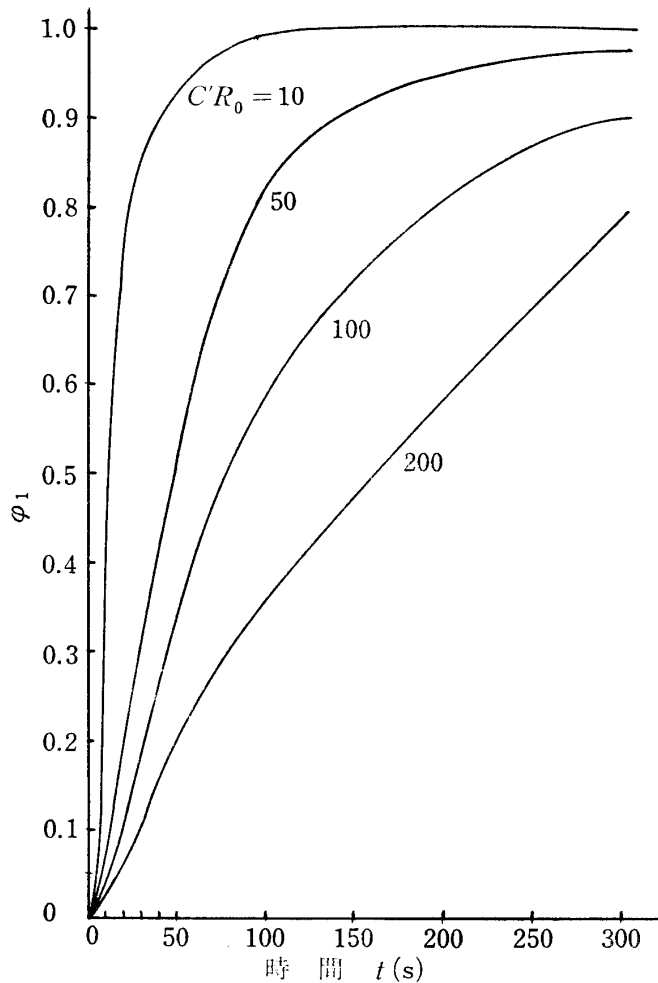


図6 $\varepsilon\rho=10$ である油中探極の ϕ_1 経時曲線

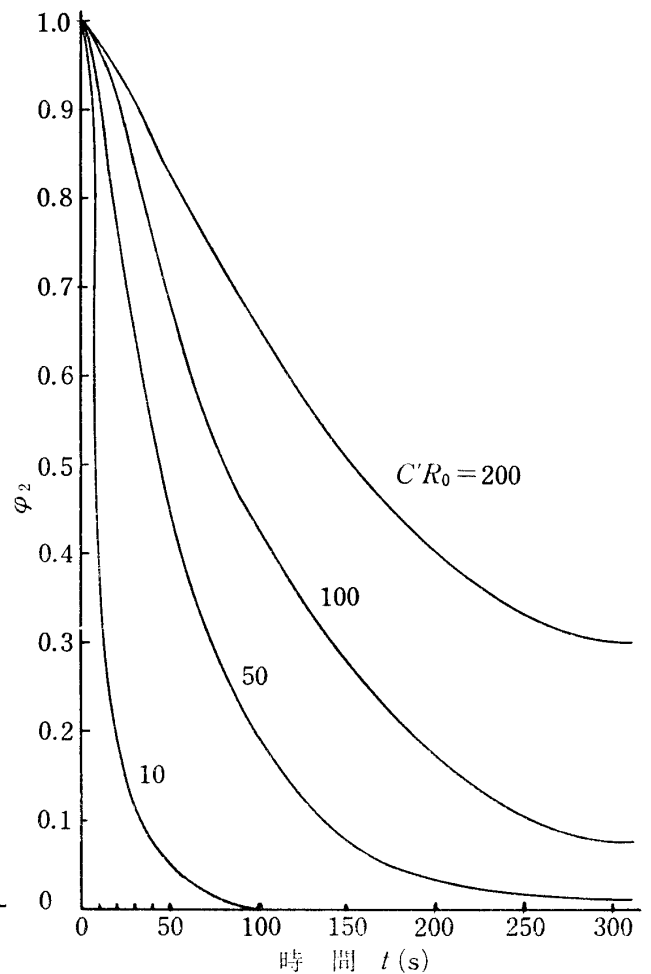


図7 $\varepsilon\rho=10$ である油中探極の ϕ_2 経時曲線

3.5 測定結果と考察 油面を一定とする油タンクについて、以上一応の理論的考察を試みたが、これを裏づけるため図4で実施したテストタンク油中の探極電位の測定（同図(b)参照）に関する解析を試みる。使用する球探極は $10\text{ mm}\phi\sim 45\text{ mm}\phi$ である。

まず使用する油は軽油で、球探極は $24\text{ mm}\phi$ と $45\text{ mm}\phi$ でしかも油中中心に位置する場合の循環送油による過渡から定常状態にいたる探極電位を図8で例示する。同図(a)は $24\text{ mm}\phi$ 球、(b)は $45\text{ mm}\phi$ 球の場合で、図の曲線群の測定順序は○印中の数字で示す。ただし図(b)に併載した D 曲線は探極系の漏れ抵抗 R' を求めるための放電特性曲線で、テストタンクの油を除いた状態で $45\text{ mm}\phi$ 球探極に直流 $1,000\text{ V}$ を印加した場合である。

a) テストタンクに関する電気的諸量 使用する軽油の抵抗率 ρ は $4.6\times 10^{12}\ \Omega\text{m}$ 、比誘電率 ε_s は2.3と測定される。すると軽油の時定数 $\varepsilon\rho=\varepsilon_0\varepsilon_s\rho\approx 0.94\text{ s}$ となる。

探極系の対地静電容量 C' はいづれも $46\times 10^{-12}\text{ F}$ と測定される。そこで図(b)の D の放電特性曲線の時定数 $C'R'$ は 270 s 程度を示すので、漏れ抵抗 R' は $5.8\times 10^{12}\ \Omega$ となる。

つぎに比例定数 p は(12)式から近似的に求める。テストタンクの油面の高さは約 35 cm で、探極が油中中心に位置する円筒形タンクを半径 22 cm の同容積の球形タンクとみなすと、近

帯電液体内における探極電位の測定について

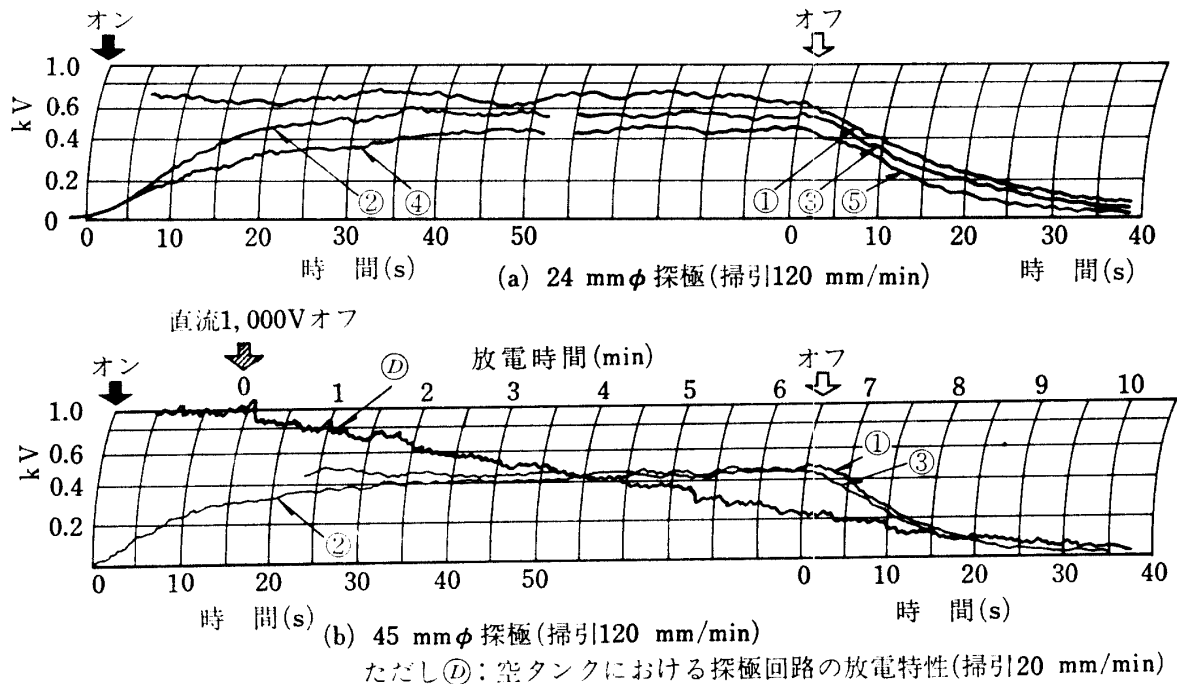


図8 接地タンクにおける探極電位の過渡状態

似的に ρ は $8.9 \times 10^9 \text{ F}^{-1}$ と求められる。

また探極係数 r 帯電した油の中にある探極に流れ込む電流 i については、探極電位を v' 、その位置する点の真の電位を v とすると、(10) 式で示したように $v-v'=ri$ である。探極係数 r を実験的に求めるため図4の循環送油装置において、まづテストタンクを電氣的に定常状態にする。そこで探極が油中中心にある探極系支持物の漏れ抵抗 R' を可変絶縁抵抗 R_2 (テフロン系の表面漏れ抵抗を利用) として変化させ、探極電位 v' (集電式電位計 V') および対応する漏れ電流 i (μA 電流計 A_2) を測定する。これら測定した電圧対電流の関係は図9のように直線的傾向となる。図示の各直線を延長してみると、漏れ電流零の軸上の一点で交さる現象が認められる。この事実は理論上仮定した(10) 式 $v-v'=ri$ の妥当なることが証明される。すなわち交差点が真の電位で、各直線のこう配が探極係数である。同図ではこの交差点は600Vで真の電位 v を示し、探極係数 r は 24 mmφ 球で $3.9 \times 10^{11} \Omega$ 、45 mmφ 球で $1.8 \times 10^{11} \Omega$ 程度の値となる。

なお、上記の図9は接地タンクの場合であるが、絶縁状態が異なる場合すなわち図4の R_1 を適当に変化した場合も、図10で示す²⁾。図中、水平に引かれた破線はそれぞれの絶縁状態の場合のタンク壁での電位を示す。また次章で述べる空気混入による同じテストタンク中の気ほう浮昇による帯電状態について、同様の実験を試みると、図11の測定結果が得られる。ともかく、探極の大小、形状に関係なく、探極系の絶縁状態 R' がテフロン系のような高級絶縁機料であれば、探極電位は真の電位に近似することは以下述べる測定結果でも明らかである。

b) 定常状態の探極電位 a) でテストタンクに関する電氣的諸量を明らかにしたので、再び図8の定常状態の場合について関係諸量を求める。

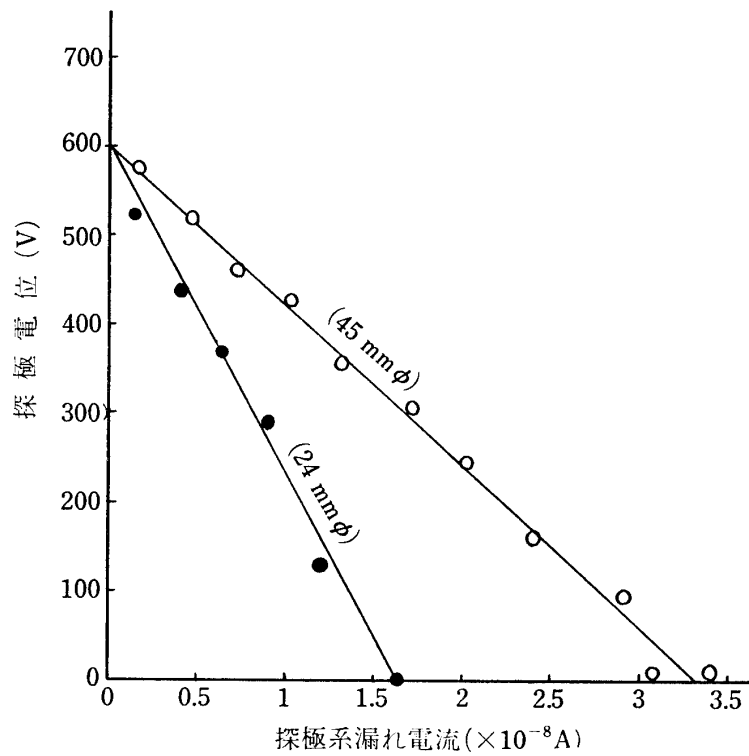


図9 接地タンクの探極系の電位と漏れ電流

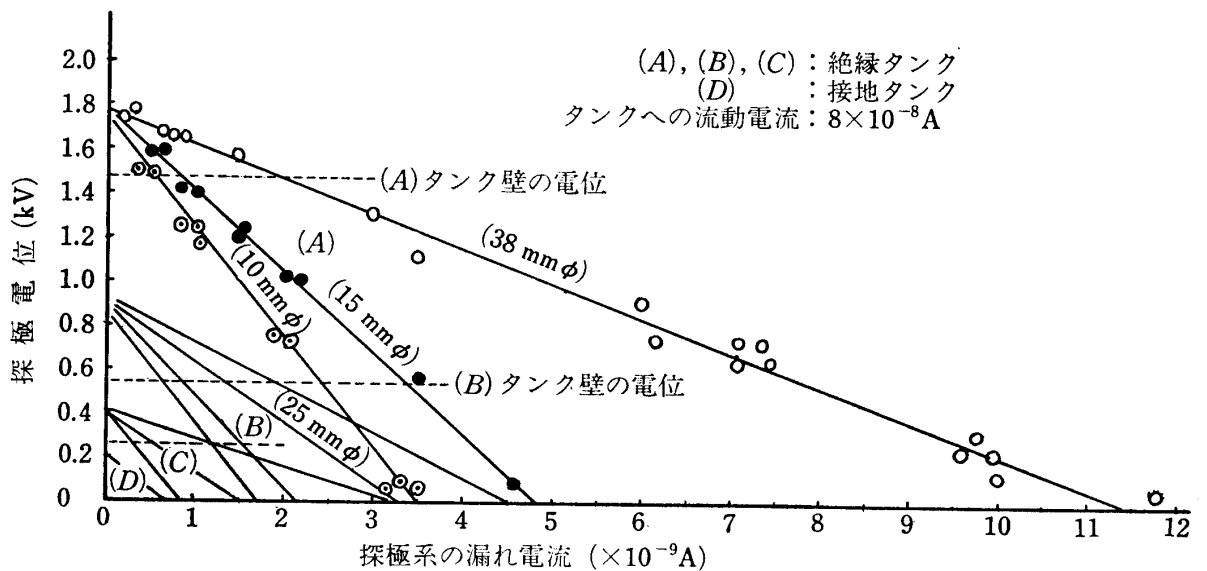


図10 絶縁タンクの探極系の電位と漏れ電流

同図の各曲線の定常状態では、探極の電位およびタンクの接地電流は近似的に 24 mm ϕ 球の場合①では、700 V, $9 \times 10^{-8} \text{ A}$ 、②、③では 550 V, $8 \times 10^{-8} \text{ A}$ 、④、⑤では 450 V, $7 \times 10^{-8} \text{ A}$ と測定される。また、45 mm ϕ 球の場合①では 460 V, $7 \times 10^{-8} \text{ A}$ 、②、③では 430 V, $6 \times 10^{-8} \text{ A}$ と近似的に求められる。

なお、探極系の漏れ電流を一応無視するとしても、テストタンクの油面上部で電荷の一部は溢流する油とともに流出するが、定常状態ではテストタンクへの流動電流 I はテストタンクおよび補

助タンクの接地電流を I_1 ($R_1 = 0$, $\mu\mu$ 電流計 A_1) および I_2 ($\mu\mu$ 電流計 A_3) とすると, 電流の連続性により, $I = I_1 + I_2$ の関係にある。図4の測定例では I_1 として 8×10^{-8} A である場合, I_2 は 6×10^{-10} A で示される²⁾。すると $I = I_1$ すなわち図4の実験系ではテストタンクの接地電流で求められる。

したがって, 上記の上昇過程(14)式の $t \rightarrow \infty$ では $v'_\infty = p\varepsilon\rho R_0 I / r$, その減衰過程(15)式の $t \rightarrow 0$ では $v_\infty = p\varepsilon\rho I$ であるから, v'_∞, v_∞ は上記 a), b) の関係諸量を用いて一応計算される。

ともかく, 図8についてこれら探極電位の計算値と対応する測定値との比較を一括して表1で示すが, 両者の値はかなりよく近似する。

c) 過渡状態について 同しく図8の送油開始または停止した場合の過渡状態における測定記録曲線群に対し, 上昇過程では(14)式, 減衰過程では(15)式により前記と同様の関係諸量で計算した計算曲線群と比較してみると図12で示される。ただし, 上昇過程は v'/v'_∞ , 減衰過程は v'/v_∞ と無次元化して比較する。

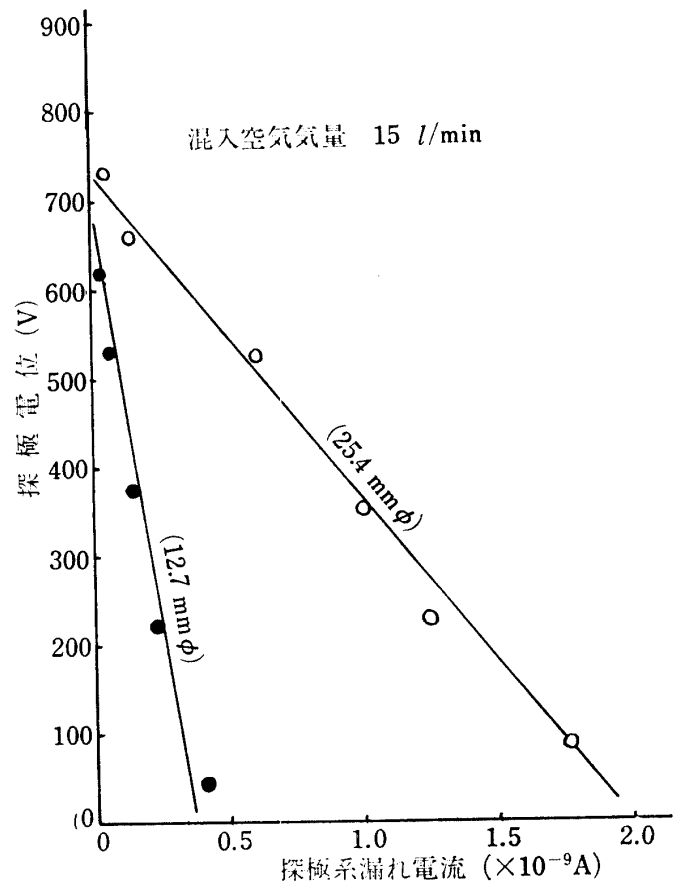


図11 気ほう混入する接地タンクの探極系の電位と漏れ電流

表1 探極電位の測定値と計算値の比較

探 極 種 別		24 mmφ 球			45 mmφ 球		備 考
電位曲線測定順位		①	②~③	④~⑤	①	②~③	
接地電流測定値 ($\times 10^{-8}$ A)		9	8	7	7	6	$\varepsilon\rho : 0.94 \text{ s}$ $p : 8.9 \times 10^9 \text{ F}^{-1}$ 24 mmφ球 $r : 3.9 \times 10^{11} \Omega$ $R_0 : 3.65 \times 10^{11} \Omega$ 45 mmφ球 $r : 1.8 \times 10^{11} \Omega$ $R_0 : 1.75 \times 10^{11} \Omega$
探極電位 (V)	測 定 値	700	550	450	460	430	
	計算値						
	v_∞	753	669	586	586	502	
	v'_∞	705	626	548	570	488	

同図の比較曲線群において, 図では 24 mmφ 球 (太線) および 45 mmφ 球 (細線) の場合を一括比較する。図(a)はそれらの上昇過程, 図(b)はそれらの減衰過程における場合で, 図中の実線は測定曲線, 鎖線は計算曲線である。いずれも測定曲線と対応する計算曲線とはかなり近似する。

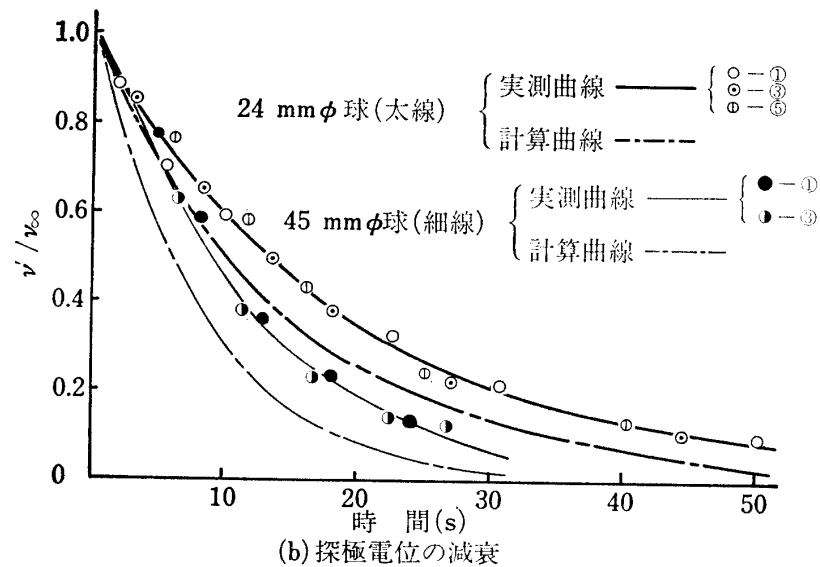
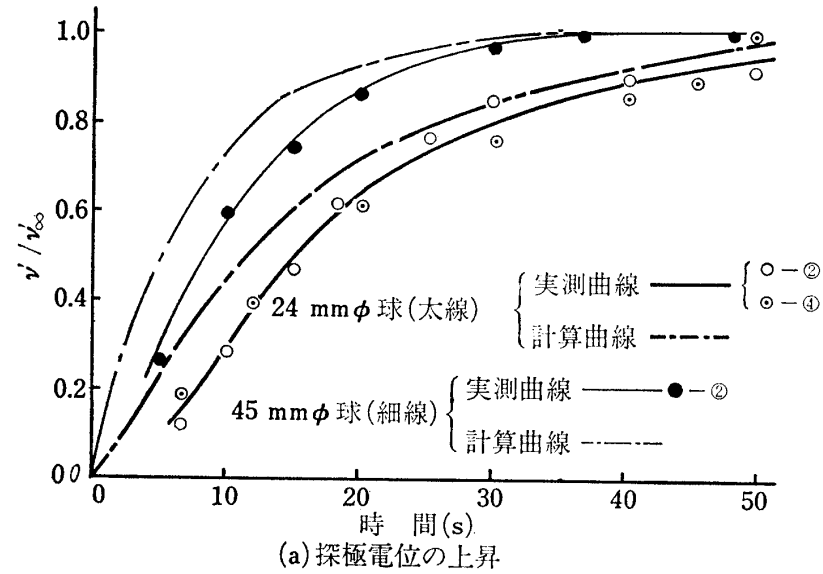


図12 探極電位の過渡状態

3.5 結果の検討 以上油面の高さ一定とした接地タンクの場合の油中探極電位について、送油を開始して定常状態にいたる過程および送油停止による減衰する過程を測定した結果と理論的に求めた計算結果との比較でかなり近似する結論を得た。絶縁タンクの場合は割愛したが、同様のかなり近似する結果が得られるので、上記の理論式および関係仮定的考察は一応の妥当性を示すものである。したがって帯電液体中の静電的状態を知る上に、油中に適当な小導体球をそう入する油中探極によってその点の電位を測定する方式は有力なる手がかりを与える。本実験では探極系の絶縁材料としてテフロン系のような最高級のものを使用するので、探極電位はその点の真の電位を示すものと一応みなしうる。この測定方式の応用例として、次章では気ほう混入による油タンクの帯電状態について述べる。

4. 気ほう浮昇による油タンク内の電位⁸⁾

図4の循環送油方式で、軽油を用いた円筒形テストタンク（40 cmφ×40 cm）内各部の電位分布を油中探極方式で測定を試みた結果の一例を図13で示す。同図では、テストタンクをパラフィン板で絶縁し、タンク底面より 5 cm 毎の電位分布を探極を移動して求めたものである。各曲線を眺めると、タンク中心軸に対し、探極が油面に近づくにしたがって左右非対称の傾向が著しい。これは

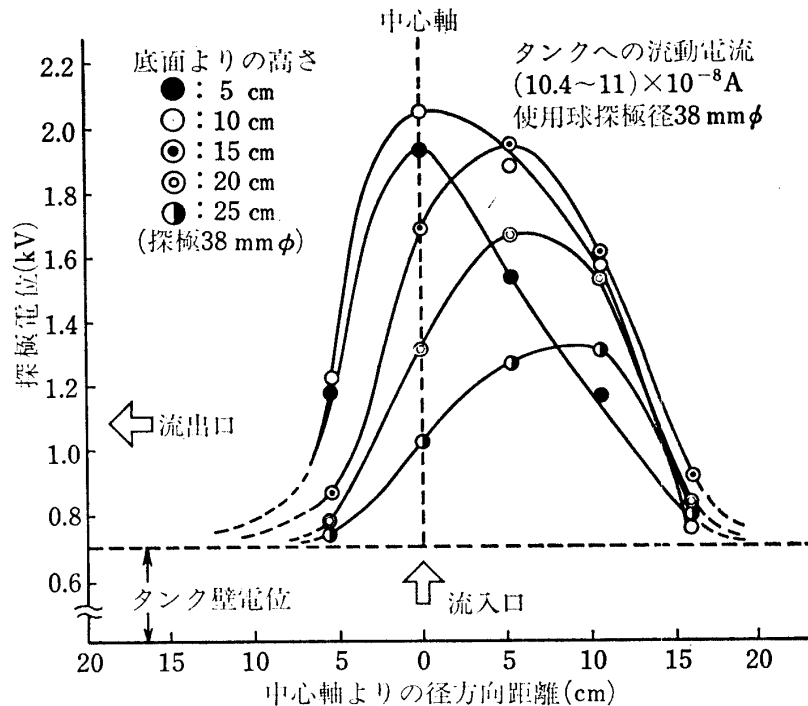


図13 タンク内電位の径方向分布

油の流出口が1箇所だけのため、流出口のある側の電荷密度が反対側に対していくらか小さくなっているものと推定されている²⁾。しかしテストタンクの中心軸近傍の油中電位が最高の値となることが認められるので、循環送油中に空気を混入した際の帯電現象について、油中の電位分布の実測は一応タンクの中心軸上での探極移動によって求める。

さて、図4の循環送油中のテストタンクの底部中央のビニールパイプ端より 2.1 m の位置でそう入したT型継手にビニールパイプを接続して空気混入口とする。空気は空気圧縮機、水分除去用の乾燥塔2段、空気量測定用ガスメーターを経て循環油中に混入される。このようにパイプを通して油、空気を混合流送すると、タンク中では気ほうとなって油面に向かって浮昇し、油面ではあわの状態で残留する。

そこで、空気混入量を増加するに従い、油面電荷密度および油中電荷密度の増加する傾向があり、これら電荷密度の符号については油面のそれは負であり、油中のそれは前章でも測定しているように正であることが認められる。これらの実測結果にもとづいて、一応解析的にテストタンクの油面および油中の電荷密度を求めたいきさつを以下述べる。

なお、以下記載する探極電位の一連の実測値群の測定時間は数時間もかかる。その測定時間中、テストタンク内の帯電状態は一応定常であるべきである。ところが、気ほうを混入する図4の実験スケールにおいて、探極電位の経時過程を測定するとピーク現象の生ずる傾向が著しい。すなわち、送油を開始すると、前章で述べたように探極電位は漸増するが、ピーク時点に達するのに数分～30分かかり、この時点から探極電位は漸減し、2～5時間後ようやく定常の状態となる。したがって、探極電位の一連の実測値群は、空気を混入して循環送油を開始して2～5時間という長時間経過後の定常状態となったところで測定を始めた値である。

4.1 混入空気量と探極電位 上記したように循環送油中のテストタンクの底部中央にパイプを通して油、空気を混合流送した場合の実測結果を図14で示す。同図は混入空気量と探極電位との関係をタンク中心軸上で測定した結果の一例である。図では横軸に探極電位をとり、縦軸に探極のタンク底からの高さをとってある。

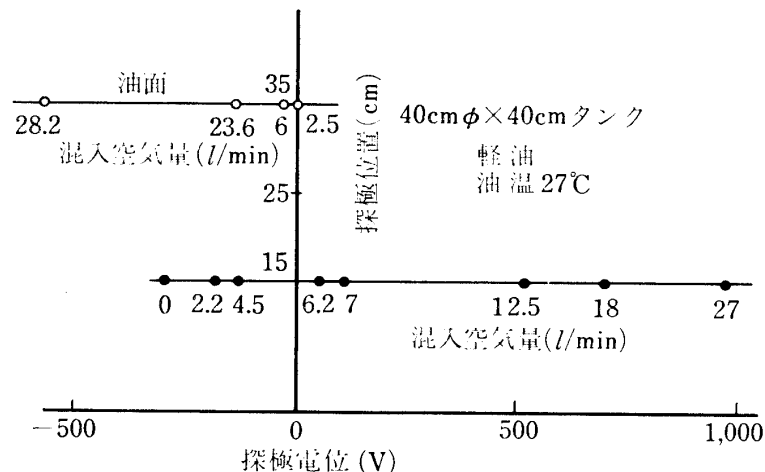


図14 混入空気量と探極電位

同図で探極をタンクの底から 15 cm の位置に固定し、混入空気量を 0 l/min から 27 l/min まですべて増加すると、探極電位は負から正に反転するとともに増加する特異な現象が観測される。しかし、探極位置が油面すなわちタンク底から 35 cm のときは探極電位が負の絶対値で増加している。

試料油は軽油の場合であるが、変圧器油でも探極電位は混入空気量の増加とともに同様の傾向を示す。気ほうの混入によって油面が負の電位を示す事実はあわが負の電荷を伴うものと推定できる。

4.2 油面電荷の測定 空気混入による循環送油時のテストタンク中の真の電荷密度および油面電荷密度を実測することは、理論的解析上必要ではあるがきわめて困難である。しかし、一応循環送油中のタンク油面での帯電油あるいはあわのもつ電荷密度を、相対的の値ではあるが下記の方法で測定する。

混入空気量が少ないときはタンク 油面中央部の気ほうを含んだ 帯電油のもつ 電荷密度を 測定する。混入空気量が多量となると油面中央もあわの層でおおわれるため、そのあわのもつ電荷密度の測定およびあわの層を形成していない部分の気ほうを含んだ帯電油のもつ電荷密度を測定する。

測定装置の概略は図15で示すようにファラデーケージと振動容量電位計からなる。帯電油をタンク油面からファラデーケージへ採取する方法は、できるだけ油面近くに存在する帯電体の電荷密度

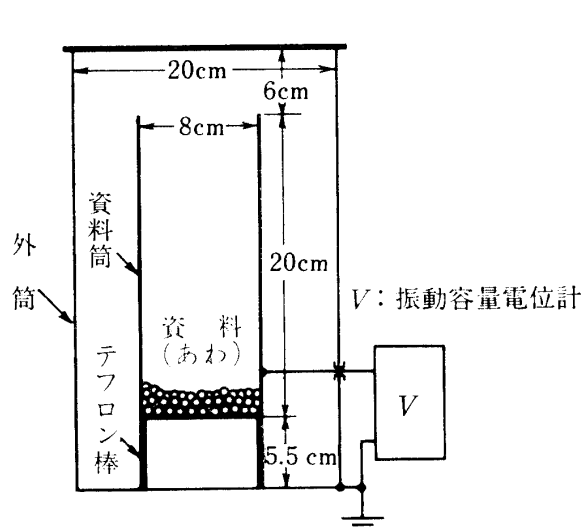


図15 ファラデーケージ

を測定するため、銅製の底の浅いひしゃくを長さ 45 cm の絶縁棒（テフロン系）の先に付ける。このひしゃくで油面の帯電油あるいはあわだけを採取してファラデーケージに入れる。ただしひしゃくの採取量は油だけでは約 130 cc 程度の小量であり、採取終了までの所要時間はほぼ一定となるよう操作する。

図16はこのような測定法で求めた実験

結果の一例である。図では混入空気量を横軸に、帯電面 1 cc あたりの電気量 (pC) を縦軸にとっており、図中の・印は3回の測定値の最大、最小値を示し、○、×印は平均値を示す。同図で混入空気量 0 l/min は油の電荷の符号は一定しない。また、混入空気量の増加とともに負の油面電荷の増加していることは明らかである。さらに混入空気量が 20 l/min となると、油面中央部のあわの電荷も中央部以外で一部分あわの層でおおわれていない油のもつ電荷とともに負電荷であることが認められる。なお、測定器を含む測定系の静電容量は 92 pF である。

4.3 空気混入による円筒形油タンク中の電位の解析 図4の実験装置で、パイプを通し油、空気を混合して循環送油する場合、テストタンク中で負電荷を伴った気ほうは油面に浮昇しながら一部

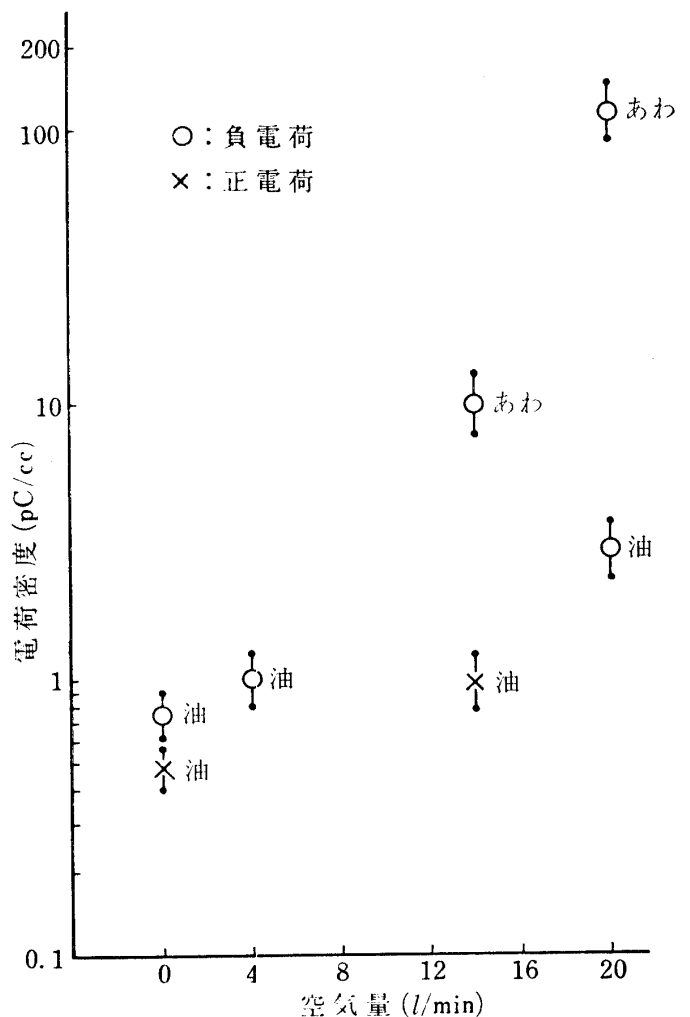
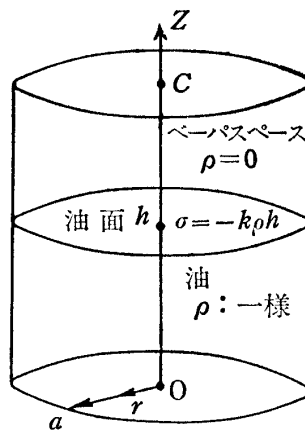


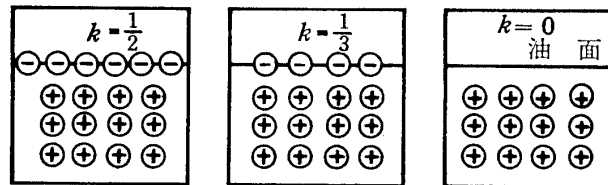
図16 あわおよび油の電荷密度

は正の電荷と再結合するであろうが、油面ではあわの状態しかも負の帯電状態で残留していることは上記の実測で明らかである。しかし一部の電荷はタンクから漏れ、あるいは補助タンクへ流出するのであるから、これらの洩れ電荷と流入電荷とが平衡を保つ定常状態を想定することは、実験の場合と同様である。

いま図17(a)で示す円筒形タンクにおいて、その油中の電荷分布は一様で、そのモデルを同図(b)のように仮定する。すなわち、油中の電荷分布は一様でベールスペース中では電荷は存在しないとし、油中の電荷密度 ρ [C/m³] と電位 V [V]、液体の誘電率 ϵ [F/m] とすれば、



(a) テストタンク中の電荷密度分布



(b) 電荷密度分布モデル図

図17 タンクの形状と電荷分布モデル図

油中ではポアソンの方程式

$$\nabla^2 V = -\rho/\epsilon \quad (16)$$

ベールスペース中ではラプラスの方程式

$$\nabla^2 V = 0 \quad (17)$$

(16) 式および (17) 式を円筒座標で表わし、電位分布が軸対称と仮定すれば

$$\nabla^2 V(r, z) = \frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{\partial V}{r \partial r} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = \begin{cases} -\rho/\epsilon & (0 < z < h) \\ 0 & (h < z < c) \end{cases} \quad (18)$$

テストタンクを金属製ふた付タンクで、接地する場合

$$V(a, z) = V(r, c) = V(r, 0) = 0 \quad (19)$$

油面では混入空気量によって、あわの量、あわの層の厚みおよびその分布状態が異なるが、解析を簡単にするため油面に一様に電荷が面分布するものと仮定する。そこで面密度を σ [C/m²], 油面の上側, 下側での電束密度をそれぞれ D_v [C/m²], D_0 [C/m²] とすれば

$$D_v - D_0 = \sigma \quad (20)$$

そこで (19) 式の境界条件と (20) 式の界面条件および界面での電位の連続なることを考慮して (18) 式を数学的に解く。

(i) $z > h$ において

$$V(r, z) = R(r)Z(z)$$

とおくと (18) 式のラプラスの式は

$$\frac{1}{R} \frac{d^2 R}{dr^2} + \frac{1}{rR} \frac{dR}{dr} + \frac{1}{Z} \frac{d^2 Z}{dz^2} = 0 \quad (21)$$

そこで

$$\frac{1}{Z} \frac{d^2 Z}{dz^2} = \lambda \quad (22)$$

とおくと (21) 式は

$$\frac{d^2 R}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR}{dr} + \lambda R = 0 \quad (23)$$

(23) 式の一般解は 0 次の第 1 種, 第 2 種のベッセル関数で表わすと (以下の c_k は定数)

$$R(r) = c_1 J_0(\sqrt{\lambda} r) + c_2 Y_0(\sqrt{\lambda} r)$$

$r = 0$ で $R(0)$ が有限であるためには $c_2 = 0$, よって上式は

$$R(r) = c_1 J_0(\sqrt{\lambda} r)$$

(19) 式より $R(a) = 0$ であるから

$$0 = J_0(\sqrt{\lambda} a)$$

いま $J_0(\alpha) = 0$ の正根を小さい順から $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n, \dots$ とおくと

$$\alpha_n = \sqrt{\lambda} a$$

したがって

$$R(r) = c_1 J_0(\alpha_n r/a) \quad (24)$$

ところで (22) 式の一般解は, $\frac{d^2 Z}{dz^2} - \lambda Z = \frac{d^2 Z}{dz^2} - \frac{\alpha_n^2}{a^2} Z = 0$ であるから

$$Z(z) = c_3 \sinh \{ \alpha_n (z + c_4) / a \}$$

(19) 式より $Z(c) = 0$

$$Z(z) = c_5 \sinh \{ \alpha_n (c - z) / a \} \quad (25)$$

(24), (25) 式から

$$V(r, z) = \sum_{n=1}^{\infty} c_n \sinh \left\{ \alpha_n (c - z) / a \right\} J_0 \left(\alpha_n r / a \right) \quad (26)$$

上式はバーパススペース中の任意の点 (r, z) の電位を示す。ただし、定数 c_n は油面の界面での条件で求められる。

(ii) $z < h$ において

$$V_0(r, z) = \sum_{n=1}^{\infty} Z_n(z) J_0(\alpha_n r / a) \quad (27)$$

とおくと (18) 式のポアソンの式は

$$\sum_{n=1}^{\infty} \left\{ Z_n J_0''(\alpha_n r / a) (\alpha_n / a)^2 + Z_n J_0'(\alpha_n r / a) \alpha_n / a r + Z_n''(z) J_0(\alpha_n r / a) \right\} = -\rho / \varepsilon$$

上式の左辺は

$$J_0'(P) = -J_1(P), \quad J_1'(P) = J_0(P) - (1/P)J_1(P), \quad J_0''(P) = -J_1'(P)$$

の関係式を用い、右辺は、ベッセル展開によって

$$1 = \sum_{n=1}^{\infty} 2 J_0(\alpha_n r / a) / \alpha_n J_1(\alpha_n)$$

であるから

$$Z_n''(z) - \alpha_n^2 Z_n(z) / a^2 = -2\rho / \left\{ \varepsilon \alpha_n J_1(\alpha_n) \right\}$$

ただし、 J_1 : 一次、第1種のベッセル関数

上式の一般解は

$$Z_n(z) = D_n \sinh(\alpha_n z / a) + E_n \cosh(\alpha_n z / a) + 2a^2 \rho / \varepsilon \alpha_n^3 J_1(\alpha_n)$$

ここで、 D_n, E_n : 定数

(19) 式より $Z_n(0) = 0$ を満たす解は

$$Z_n(z) = D_n \sinh(\alpha_n z / a) + 2\rho a^2 \left\{ 1 - \cosh(\alpha_n z / a) \right\} / \left\{ \varepsilon \alpha_n^3 J_1(\alpha_n) \right\} \quad (28)$$

(28) 式を (27) 式に代入すると

帯電液体内における探極電位の測定について

$$V_0(r, z) = \sum_{n=1}^{\infty} \left[D_n \sinh(\alpha_n z/a) + 2\rho a^2 / \left\{ 1 - \cosh(\alpha_n z/a) \right\} / \left\{ \varepsilon_0 \alpha_n^3 J_1(\alpha_n) \right\} \right] J_0(\alpha_n r/a) \quad (29)$$

上式の定数 D_n を求めるに、(26) 式の c_n と同様で、(20) 式と油面すなわち界面での電位の連続性の条件より決定できる。すなわち

$$\begin{aligned} D_n &= 2a^2 (\alpha_n \sigma \sinh P_1/a + \rho \sinh P_2 \sinh P_1 \\ &\quad - \rho \cosh P_1/\varepsilon_s + \rho \cosh P_2 \cosh P_1/\varepsilon_s) / \{ \varepsilon_0 \alpha_n^3 J_1(\alpha_n) \\ &\quad \times (\sinh P_2 \cosh P_1 + \varepsilon_s \cosh P_2 \sinh P_1) \} \\ c_n &= 2a^2 (\alpha_n \sigma \sinh P_2/a + \rho \cosh P_2 \\ &\quad - \rho) / \{ \varepsilon_0 \alpha_n^3 J_1(\alpha_n) (\sinh P_2 \cosh P_1 + \varepsilon_s \cosh P_2 \sinh P_1) \} \end{aligned}$$

ここで

$$P_1 = \alpha_n (c - h)/a$$

$$P_2 = \alpha_n h/a$$

$$\varepsilon_s = \varepsilon/\varepsilon_0$$

ε_0 : 真空の誘電率

ε_s : 油の比誘電率

h : タンク底より油面までの高さ

さて、さらに油中の電荷密度 ρ と油面の表面密度 σ との関係を次式のように仮定する。

$$\sigma = -\kappa \rho h \quad (30)$$

ここで、 κ は油面の全電荷量と油中の全電荷量との比を示し、負号は図 4 の本実験で判明したように、あわが負の電荷を伴う事実による。

そこで上記の D_n , c_n の式に (30) 式を代入し、 $z < h$ すなわち油中の電位 V_0 の (29) 式は

$$\begin{aligned} V_0(r, z) &= \frac{a^2 \rho}{\varepsilon_0} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \left[\frac{-\kappa P_2 \sinh P_1 + \sinh P_2 \sinh P_1}{\sinh P_2 \cosh P_1} * \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \frac{1}{\varepsilon_s} \cosh P_1 + \frac{1}{\varepsilon_s} \cosh P_1 \cosh P_2 \right] \frac{\sinh\left(\frac{\alpha_n}{a} z\right)}{+ \varepsilon_s \cosh P_2 \sinh P_1} \right\} \\ &\quad + \frac{1}{\varepsilon_s} \left\{ 1 - \cosh\left(\frac{\alpha_n}{a} z\right) \right\} \frac{2J_0\left(\frac{\alpha_n}{a} r\right)}{\alpha_n^3 J_1(\alpha_n)} \end{aligned} \quad (31)$$

上式は、油中の任意の点 (r, z) の電位を示す。そこで $V_0(r, z)$ を無次元化して次式で与えられる。

$$\begin{aligned}
 \frac{\varepsilon_0 V_0(r, z)}{a^2 \rho} = & \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \left[\frac{-\kappa P_2 \sinh P_1 + \sinh P_2 \sinh P_1}{\sinh P_2 \cosh P_1} * \right. \right. \\
 & \left. \left. - \frac{1}{\varepsilon_s} \cosh P_1 + \frac{1}{\varepsilon_s} \cosh P_1 \cosh P_2 \right. \right. \\
 & \left. \left. * \frac{1}{\varepsilon_s \cosh P_2 \sinh P_1} \sinh \left(\frac{\alpha_n}{a} z \right) \right] \right\} \\
 & + \frac{1}{\varepsilon_s} \left\{ 1 - \cosh \left(\frac{\alpha_n}{a} z \right) \right\} \times \frac{2J_0 \left(\frac{\alpha_n}{a} r \right)}{\alpha_n^3 J_1(\alpha_n)} \quad (32)
 \end{aligned}$$

(32) 式は円筒形タンク油中の任意の点における電位を示すものである。同式から、 ε_s , h/a , c/a , κ が一定の場合、一般に円筒形タンクでは油中の任意の点の電位はタンクの半径の2乗と油中電荷密度の相乗積に比例することを示す。

図18に 40 cmφ×40 cm タンクの中心軸の電位を (32) 式で計算した結果の一例を示す。図で横軸には V_0 に $\varepsilon_0/a^2\rho$ をかけた無次元量を取り、縦軸には探極の底からの距離とタンク半径の比 z/a をとってある。同図を眺めると、油中で気ほうが浮昇する場合、油中電位の反転現象、油面電荷の負性が認められるので、考察が一応の妥当性を示すものと言えよう。

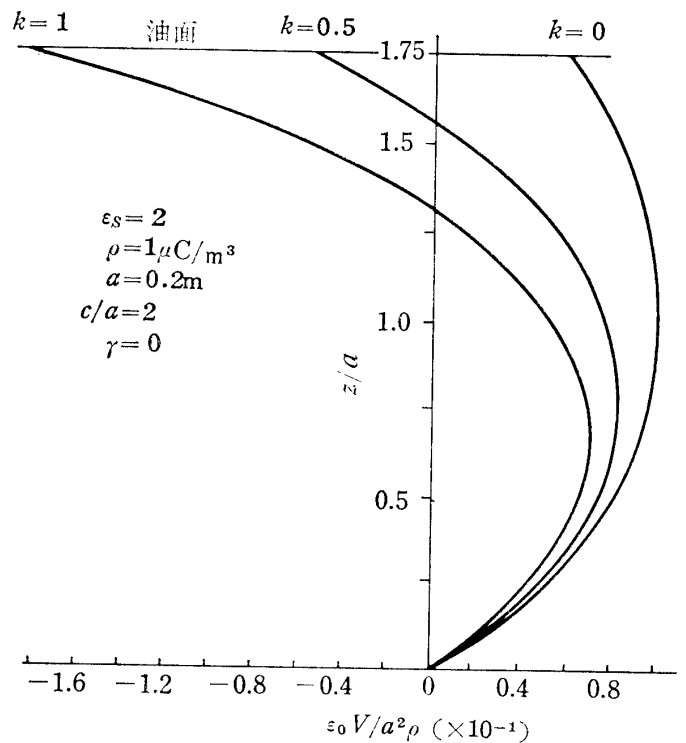


図18 モデルタンク中心軸上での電位分布

4.4 実験結果と油面電荷密度 上記した(32)式による計算結果に基づいた電位曲線と油中電位分布を実測した電位曲

線との比較をタンク中心軸上の値で以下例示する。ただし資料油は変圧器油で、かなり経過した古い油（油Oと略称）と比較的新しい油（油Nと略称）を用いた。両者の特性の相違は主として全酸価（KOH/G）で、油Oは0.016、油Nは0.004である。またテストタンクとして従来の 40 cmφ×40 cm のほかに 60 cmφ×60 cm を用いる。循環給油中のタンク底から油面までの高さは、前者では既述したように 35 cm、後者では 52 cm となる。もちろん、実験装置は図4と同様で、しかもタンクはいづれも接地した場合である。

4.4.1 実験結果と計算結果 60 cmφ×60 cm タンクで、まず油Oを資料油として混入空気量と探極電位分布の関係を図19に示す。同図では混入空気量をおのおの一定に保ち、タンク中心軸で探極

位置を変化して油中電位分布を実測した値は○で 0 l/min, □で 10 l/min, △で 20 l/min, ×で 30 l/minの空気混入量の記号で示す。また, 同図で示すそれぞれの実線は (32) 式の計算結果に基づいた曲線である。これらの計算曲線の示す油面電荷密度 σ , 油中電荷密度 ρ の計算値は図中に記入する。ただし油の比誘電率 ϵ_s は空気混入量のいずれの場合についても2とした(以下の計算値についても同様の値)。

つぎに, 図20は同じテストタンクで, 油 N を資料油とした場合である。油中電位の実測値は, □で 10 l/min, △で 20 l/min, ×で 30 l/min の空気混入量の記号で示す。計算値の実線は図19と同様に図中に記入されているそれぞれの σ , ρ の値に対応する計算曲線である。

さらに, 図21はテストタンクとして 40 cmφ×40 cm タンクを用い, 油Oを資料油とした場合である。油中電位の実測値は, 同じく○で 0 l/min, □で 10 l/min, △で 20 l/min, ×で 30 l/min の空気混入量の記号で示す。計算値の実線は上記の場合と同様図中に記入されているめいめいの σ , ρ の値に対応する計算曲線である。

ともかく, 上記の各図をながめると計算曲線と対応する実測値群

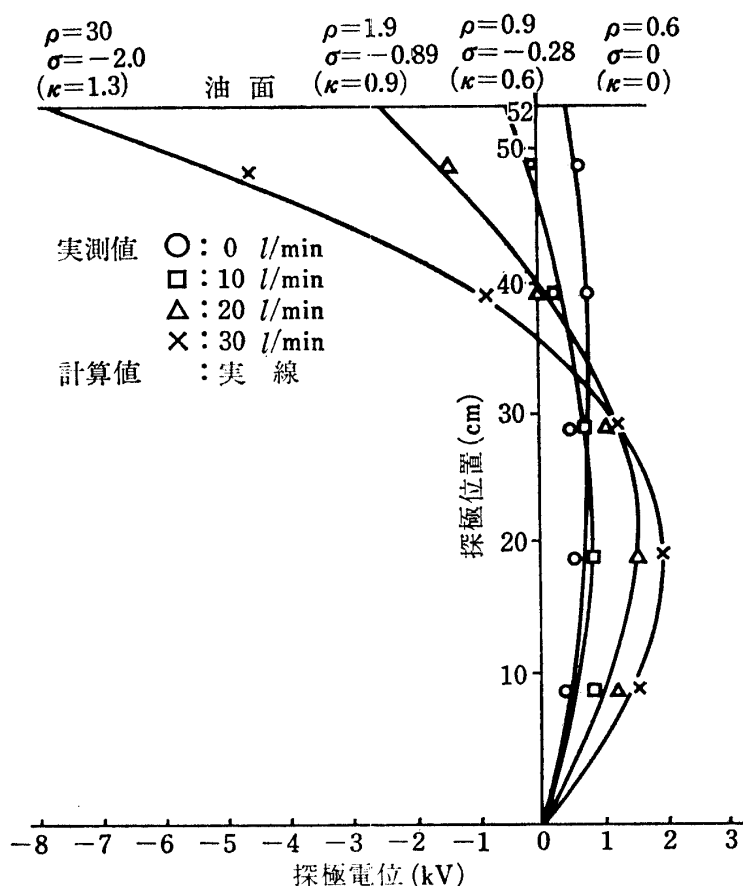


図19 油Oによる探極電位分布 (60cmφ×60cmタンク)

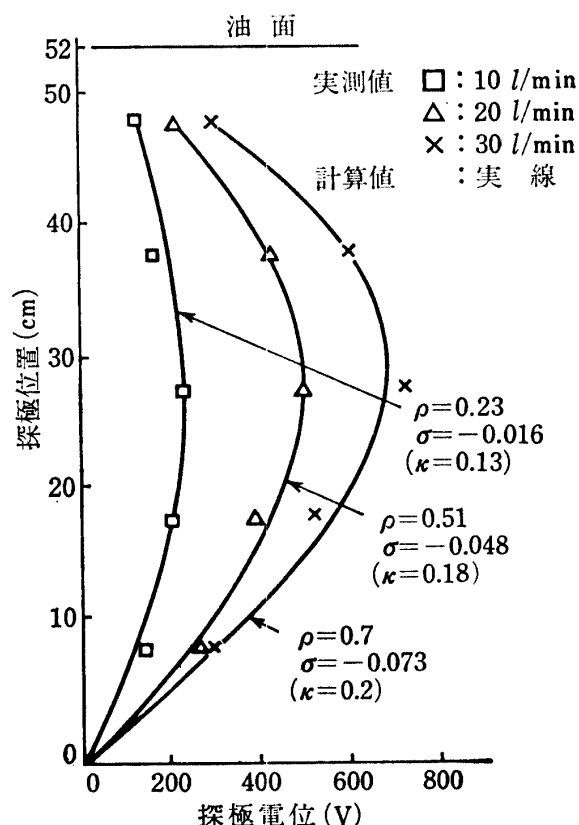


図20 油Nによる探極電位分布 (60cmφ×60cmタンク)

とはほとんど近似している。この
 事実は前節まで記述した解析の適
 切なことを示すものである。

4.4.2 結果の考察 図19, 図20
 の $60\text{ cm}\phi \times 60\text{ cm}$ タンクの実験か
 ら試料油として油O, 油N を使
 用するいずれの場合も, 混入空気
 量の増加とともに油面電荷密度 σ ,
 油中電荷密度 ρ ととも増すこと
 がわかる。また油Oを使用した場
 合は油N を使用した場合に比べ,
 同一空気量に対して油面電荷密度
 σ も油中電荷密度 ρ もかなり大
 きいことは, これらの図示から明
 らかである。この原因は油Oと油
 Nの全酸価がかなり相違している
 ことによるものであろう。

また, 図21の $40\text{ cm}\phi \times 40\text{ cm}$ タンクの実験は油Oを使用した場合で, 同じく σ, ρ は増加の傾向
 にあることはタンクの大きさが異なっても変わらない。

なお, いずれのタンクにおいても, 空気を混入しない場合は負の油面電荷がほとんど存在しない
 ことが認められる。また $40\text{ cm}\phi \times 40\text{ cm}$ タンクの場合には $60\text{ cm}\phi \times 60\text{ cm}$ タンクの場合に比べ,
 油中電荷密度は混入空気量の増加するにつれて油量比にはほぼ逆比例している。油面電荷密度に関し
 ては, 同一混入空気量に対して $60\text{ cm}\phi \times 60\text{ cm}$ タンクの場合は多少薄められる傾向がある。

最後に, 図4の実験装置において正および負の発生する場所としては送油系統中で空気混入箇所
 がポンプ側に近いビニールパイプ中にあるので, 主としてビニールパイプ内で発生し (鉄パイプを
 使用しても同様な傾向), 電動式計量機に内蔵するろ過装置以後のパイプ中に発生原因があるとみ
 られ, 混入空気の帯電に及ぼす影響は一巡してろ過紙まで達しないことが認められる。また, 空気
 混入箇所をタンク底部として, 上記ビニールパイプ中央の場合とそれらの α, ρ の計算値と比べ
 と, 10% 以下であることから巨視的には電荷の発生はタンク中でなく, ほとんど送油パイプ中で
 発生していることを示しているものと考えられる。

一般にパイプ中で生ずる流動電流は (1) 式で示すように流速に大きく依存する。ところが, 本
 実験では空気混入量の増加するに従い, 油量は実験の範囲で毎分数リットル程度減少していること
 から考えると, それだけ油タンク中の帯電量は減少するはずである。しかるに本実験のように, 空
 気混入により油面の負電荷および油中の正電荷の両者とも増加している。この機構については, 一

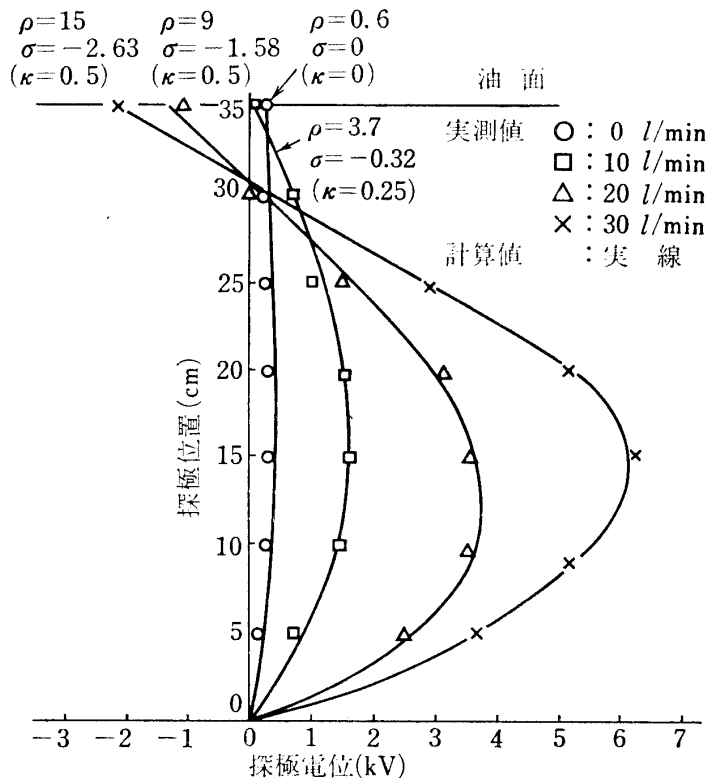


図21 油Oによる探極電位分布 ($40\text{ cm}\phi \times 40\text{ cm}$ タンク)

図1(b)の場合から類推してドルン効果的現象として説明できないでもないが、その物理的内容についてはまだ明らかではない。

ともかく、気体を用いたかくはん操作工程などにおける油タンクでは、油面にあるあわの存在する場所およびあわの集積が部分的に生ずると、局部的に油面電位、油面電界がかなり高くなる可能性があり、必ずしも本章における油面上の中心電位あるいは電界が最大になるとは限らない。図3で示すように静電気による油タンクの爆発が油面とその内壁との間に生ずる火花放電が原因とされていることからみて、防災上油面電荷の存在の有無はじゅうぶんに考慮すべきである。

5. む す び

とかく、現象論的に立ちおくれている帯電液体の姿態の研究について、適当な循環送油装置をもつモデルタンクによって、その油中に探極をそう入して探極電位の測定を試みた。これらの実験的観測に対する理論的解析の結果、一応油中探極による電位測定方式の妥当であることが認められるであろう。

さらに、循環送油中で混入空気量の油タンク中の帯電に及ぼす影響についての実験に基づき、一応円筒形油タンクの電位分布について、油面電荷を考慮しラプラスおよびポアソンの両方程式による解析を行なった。これらの測定、計算の結果、気ほうの浮昇する油タンクでは負の油面電荷の存在が明らかであり、また空気を混入することは油面電荷ならびに油中電荷量にも大きく変化を与えることも判明される。ともかく静電気による油タンクの爆発がそのベーパースペース内に生ずる火花放電が原因とされていることからみて、防災上油面電荷の有無をじゅうぶんに考慮すべきである。

ところで、名著として筆者らも採用している教科書「電気磁気学」において「電荷が空間に分布して存在しているということはきわめて稀で、ポアソンの方程式による必要のある場合は少なく、普通はラプラスの方程式でよいことが多い」という一節がある。これは述べられている対象に関する一般的表現であろうが、上記のように少なくとも絶縁性液体に関する帯電現象を対象とする場合はこのような表現はなりたないことが認められる。

終わりにあたり、かつて筆者は名古屋大学工学部電気工学科上田研究室（教授 上田実氏）において液体帯電に関する現象論的研究中、本文中の循環送油方式のテストタンク実験装置が試作したもので、感銘深いものがある。実は富山での100回記念絶縁材料研究講演会（昭35，5月）で、筆者の油の帯電に関する講演について有益なる質問をいただいたのが、同研究室に参加することのできたありがたい因縁となったのである。

文 献

- 1) 鳥取：石油学会誌 **9**, 11 (昭42)
- 2) 伊藤・上田：電気学会誌 **90**, 8 (昭45)
- 3) 鳥取：富大工紀要 **11** (昭35)
- 4) 鳥取：富大工紀要 **12** (昭36)
- 5) 鳥取：電気学会誌 **83**, 4 (昭38)
- 6) 鳥取：新大工研究報告 **24** (昭40)
- 7) 鳥取：電気学会誌 **86**, 8 (昭41)
- 8) 美寺・鳥取：電気学会誌 **89**, 10 (昭44)

(著者 電気工学科 昭和46年1月11日受理)