

論 文

メッシュスクリーンをもつ石油タンク中の電荷緩和

藤井 求*, 田辺 孝一*, 美寺 久光**

渡辺 茂男***, 大橋 朝夫***

(1987年12月1日受理)

Relaxation of Static Charge in Oil Tank with Mesh Screen

M. FUJII,* K. TANABE,* H. MITERA,** S. WATANABE***

and A. OHASHI***

(Received December 1, 1987)

When a mesh screen is fixed at the oil inlet for the purpose of discharging the model tank, the potential in it, particularly on the oil surface, remarkably decreases. The main reasons for this are that (1) the charge of the flowing oil is neutralized to some extent through the screen and (2) the velocity of the flowing oil is controlled by the screen. The effect of (2) is studied in this paper not only from a theoretical but also from an experimental point of view, beginning from the premise that the charge distribution decreases exponentially from the tank bottom up to the oil surface. As an experiment, when a mesh screen is fixed, the measured value of relaxation current along the cylindrical tank wall decreases exponentially from the tank bottom up to the oil surface. This experimental result agrees with the theoretical result mentioned above. The measured value of relaxation current on the tank bottom also agrees with the theory. Consequently, it can be concluded that (a) the oil velocity in the tank is controlled by the mesh screen, (b) therefore the oil velocity along the axis of the tank is reduced, and (c) as a result, the oil surface potential is decreased as well. Further, it has also been made clear that the charge in the oil decreases exponentially from the tank bottom up to the oil surface and that the relaxation charge along the cylindrical tank wall is considerably influenced by the distribution of oil flowing velocity in the tank.

1. まえがき

石油のような絶縁性液体（以下、油と略称する）をフィルタや管路を通して移送するとき、静電気帶電する現象は流動帶電現象としてよく知られている。強く帯電した油が石油タンクに蓄積されると、タンクの蒸気空間中で油面とタンク壁などの間の電界が上昇し、これによる火花放電が引き金となって爆発や火災が発生することがある。給油中の石油タンクの油中電荷分布を正しく知る

ことや、タンク壁からの電荷緩和の過程を知ることは、こうした災障害を防止するうえで重要である。給油中の石油タンクの油中電位や油面電位を減少させるために、現在油中に界面活性剤を混入し^{1,2)}て油の導電率を増加させることにより油中の電荷緩和を促進したり、送油速度を制限³⁾することによって、帯電量を抑制する方法などが実施されている。

ところで筆者らは、石油タンクの油流入口に金属メッシュスクリーン（以下、スクリーンと略記）を取り付けることによって油中電位と油面電位を減少させうるのではないかと考え、小形のモデルタンクを用いて実験を実施し、良好な結果を得てきた^{4,5)}。スクリーンの設置により、油中電位と油面電位が著しく減少するのは、(1)スクリーンがタンクに流入する油中の電荷をある程度中和する効果があること、および(2)スクリーンがタンク中の油流速を平均化する作用があること、と考えられる⁶⁾。

本論文では、まず前報と同様に、給油中のモデルタンク（以下、テストタンクと呼ぶ）の油中電位分布をスクリーンがあるときとないときについてそれぞれ測定した。次に、タンク底面およびとくにタンク側壁への油中

* 福井工業大学電気工学科 (910 福井市学園 3-6-1)

Department of Electrical Engineering, Fukui Institute of Technology, 6-1, Gakuen 3-chome, Fukui, 910 Japan

** 新潟大学工学部電気工学科 (950-21 新潟市五十嵐 2 の町 8050)

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Niigata University, 8050, Ninnomachi, Igarashi, Niigata, 950-21 Japan

*** 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, Yakusa-machi, Toyoda, 470-03 Japan

電荷の緩和がタンク底からの高さの関数としてどのような形で行なわれるか、スクリーンがあるときとないときについてそれぞれ実験的ならびに理論的に検討した。さらに、タンク壁への電荷緩和と、タンク中の油流の状態との関係について検討を加えた。これらの検討により、テストタンク中では、油中電荷は底面から油面に向かって指数関数的に減少するような分布をしていることがわかった。また、スクリーンを取り付けた場合は、タンク側壁への緩和電流が底から油面に向かって指数関数的に減少するため油面電位が著しく減少することがわかった。以下にこれらの成果を詳しく報告する。

2. 測定装置と実験方法

図1に測定装置の概要を示す。テストタンクは、高さ39 cm、内径39 cmの円筒形タンク(塩化ビニル製)であり、その内壁には緩和電流を測定するために幅23 mm、厚み0.25 mmのステンレス製帯をタンク底から2 mm間隔で14枚貼り付けてある。帶電油から各導体への緩和電流はタンク外部に取り付けられた端子に電流計を接続することにより知ることができる。タンク底はドーナツ形金属円板である。したがって、このタンクはタンク側壁が互いに絶縁された14個のドーナツ形円筒を積み重ねたタンクとみなすことができる。送油ポンプを始動し、送油を開始するとともに油面が上昇し、一定の高さまで達すると油が溢れるが、できるだけ均一に溢れるようにテストタンクには直径が3.1 cmの溢流孔をタンク底から34.25 cmの高さのところに10個設けてある。この孔から溢れた油は受皿に入り、さらに、溢流パイプを通して補助タンクに回収される。補助タンクに回収された油はポンプによってフィルタ、パイプを通して再びテストタンクへと循環送油される。補助タンクと溢流パイプとは互いに絶縁されている。テストタンクへの送油は油中電荷密度分布がタンク中で、できるだけ軸対称となるよう底部流入方式を用いた。テストタンクへの油流入速度を低減するために、直径10 cmのボーン状拡散筒をタンク流入口に取り付けた。送油ポンプは0~100 l/minの流量可変のものであり、フィルタには5 μm程度の微粒子を限度としてろ過できるフィルタエレメント(ろ材はセルロース)を用いた。送油パイプは内径が2.54 cmの金属パイプとし、スクリーンはステンレス製100メッシュの10 cmφ×6 cmの一面開放円筒状で、拡散筒出口を覆うように取り付けた。タンク、ポンプ、フィルタ、パイプ、拡散筒およびスクリーンはそれぞれテフロンによって電気的に絶縁されている。

油中電位の測定には球探極法を採用した^{7,8)}。すなわ

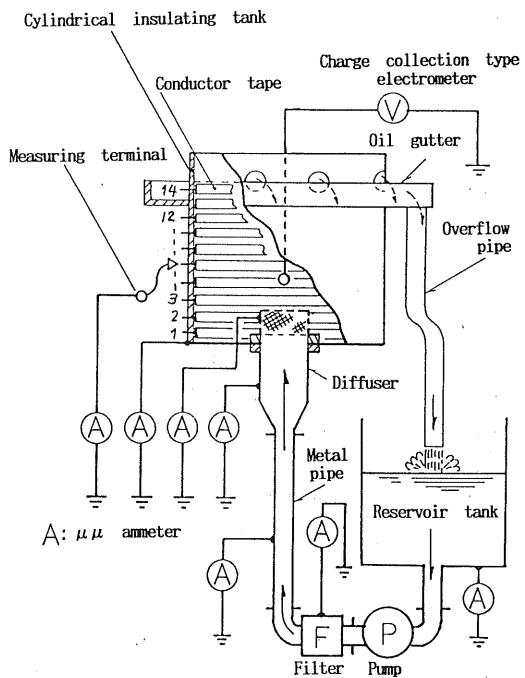


図1 測定装置の概要

Fig. 1 Schematic diagram of the oil pumping system, and a method for measurement of potential and ground current.

ち、PE絶縁電線の一端に15 mmφの球探極を接続し帶電油中に挿入し、その他端を大地から絶縁された金属板(30×30 cm)に導入して探極電位を集電式電位計によつて測定する方法を採用した。油中電位が定常状態に達した後に球探極をテストタンク軸上において底から5 cmずつ上昇させ、軸上の油中電位分布をスクリーンがある場合がない場合についてそれぞれ測定する。一方、タンク壁における緩和電流および送油系各部の漏れ電流はそれぞれ微小電流計(東亜電波製、測定精度±3%)を用いて測定する。とくに、タンク側壁における緩和電流の測定は、測定端子1番から14番までおののおのスイッチを切り換えることによって測定した。たとえば5番における緩和電流の測定では、端子5番に微小電流計を接続し他の端子は一点にまとめて接地した。油中電位と緩和電流はそれぞれ同時に測定される。なお、実験に使用した油はディーゼル軽油で、その静止導電率Kおよび油の比誘電率ε_rの測定値はそれぞれ27.5°CにおいてK=2.67 pS/m, ε_r=2.11であった。

3. 実験結果

3.1 テストタンクを含む送油系各部漏れ電流

補助タンクにあらかじめ100 l程度の試料油を入れて

おき、送油ポンプによってフィルタ、パイプおよび拡散筒を通して油をテストタンクに給油する。テストタンクの油面が上昇し底から 32.7 cm まで達すると、油は溢流孔から溢れ受皿にたまり溢流パイプを通して補助タンクへ回収され、再びテストタンクへと送られる。給油開始後 30 分程度で、テストタンク中では油中電荷密度分布が時間的にも空間的にも一定の状態すなわち定常状態となる。いま、送油流量がたとえば 40 l/min 一定であれば、パイプ中の平均流速は 1.36 m/s で、拡散筒中では 8.5 cm/s と低減されて油はテストタンクに給油される。このテストタンクは底部流入方式でさらに油の溢流孔がタンク上部に 10 個設けてあることから油中の電荷密度はタンク軸に対してほぼ対称分布すると考えてよいであろう。

表 1 は、送油流量が 40 l/min の循環送油によって油中電位が定常状態となった後に送油系各部およびテストタンク壁からの漏れ電流を同時測定した結果の一例である。表 1 から、テストタンクからの漏れ電流 I_{T1} (タンクの側壁および底面への緩和電流の和)、拡散筒漏れ電流 I_D 、スクリーン漏れ電流 I_S 、パイプ漏れ電流 I_P および補助タンク漏れ電流 I_{T2} の合計は、フィルタからの漏れ電流 I_F とは絶対値がほぼ等しく符号反対である。このことは、電荷の発生源は主にフィルタ部分でありこれが他の各部で緩和し、漏れ電流として観測されていることを意味している。フィルタ部分で帶電した油中電荷のうち、パイプ部分および拡散筒へ緩和した残りの電荷がスクリーンとテストタンクに流入するはずで、この流入電荷のうちのおよそ 50% がスクリーンにおいて中和されていることが表 1 からわかる。

3.2 テストタンク軸上の油中電位分布

図 1 の測定装置において、送油流量 40 l/min (以下の実験における送油流量は 40 l/min 一定とする) で、油中電位が定常状態に達した後、探極をタンク軸上の底から 5 cm ずつ油面に向かって移動させ、それぞれの探極位置 (球探極の先端位置) における油中電位をスクリーンがあるときとないときについて測定した。図 2 の○印 (スクリーンなし) と●印 (100 メッシュスクリーン) はその測定結果の一例である。スクリーンがあるときは、ないときに比べて油中電位、油面電位ともに低く、かつ、油中電位のピーク位置はタンク底 (この場合はスクリーン面) に近づく傾向にあり、これは、前報⁶⁾と同様な結果となった。いま、テストタンクの油中電荷密度分布が油の流れの方向に対して図 3 で示すように指数関数的に減少すると仮定し、(1)式で表わすことができるとする⁹⁾。

$$q = q_0 \exp(-z/R) \quad (1)$$

表 1 送油系各部の漏れ電流

Table 1 Ground current of each part of the oil pumping system with a 100 mesh screen.

$I_P (\times 10^{-9} A)$	31
$I_D (\times 10^{-9} A)$	31
$I_S (\times 10^{-9} A)$	34
$I_{T1} (\times 10^{-9} A)$	26.7
$I_{T2} (\times 10^{-9} A)$	3
$I_F (\times 10^{-9} A)$	-128

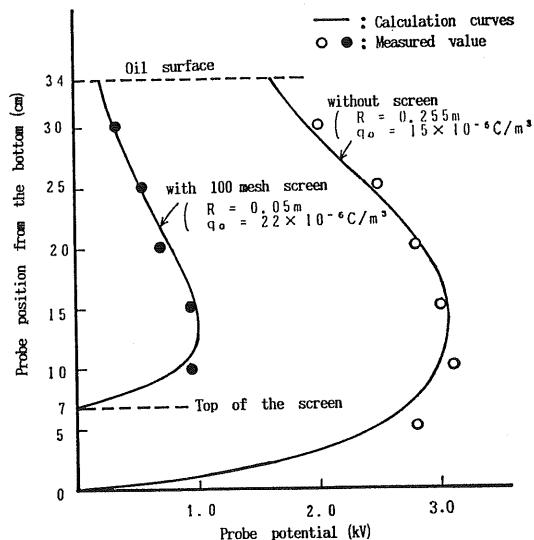


図 2 スクリーン有無によるタンク軸上の油中電位分布の計算値と実測値

Fig. 2 Measured values and potential distribution calculated along the axis in the test tank with or without mesh screen.

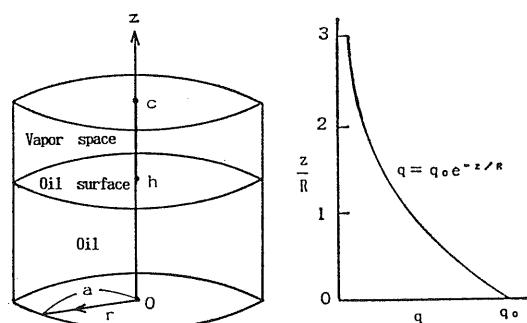


図 3 テストタンク油中の電荷密度分布のモデル

Fig. 3 Model for the distribution of charge density in the test tank.

ただし、 q_0 ：タンク底における油中電荷密度、 R ：緩和長 ($R = v\tau$)、 v ：タンク軸上の油流速、 τ ：油の緩和時

定数 ($\tau = \varepsilon_0 \varepsilon_r / K$), ε_0 : 真空の誘電率, ε_r : 油の比誘電率, K : 油の導電率, である。

(1)式に基づいて図1に示すような蒸気空間をもつ円筒形テストタンク全体を接地されたタンクとみなし, その油中電位分布を示す式をポアソンの式を解いて求めるとき式が得られる¹⁰⁾.

$$V_0(r, z) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 q_0 a^2}{\varepsilon_0 \varepsilon_r \alpha_n (\alpha_n^2 - a^2/R^2) J_1(\alpha_n)} \times \left[\left(\exp(-z/R) + \frac{a}{R \alpha_n} \sinh \left(\frac{\alpha_n}{a} z \right) - \cosh \left(\frac{\alpha_n}{a} z \right) \right) + \sinh \left(\frac{\alpha_n}{a} z \right) \times \left\{ - \left(\exp(-h/R) + \frac{a}{R \alpha_n} \sinh P_2 - \cosh P_2 \right) \cosh P_1 + \varepsilon_r \sinh P_1 \times \left(\frac{a}{R \alpha_n} \exp(-h/R) - \frac{a}{R \alpha_n} \times \cosh P_2 + \sinh P_2 \right) \right\} / (\sinh P_2 \cosh P_1 + \varepsilon_r \sinh P_1 \cosh P_2) \right] J_0 \left(\frac{\alpha_n}{a} r \right) \quad (2)$$

ここで, $P_1 = (\alpha_n/a)(c-h)$, $P_2 = (\alpha_n/a)h$

$J_1(\alpha_n)$: 1次, 第1種のベッセル関数

$J_0\{(\alpha_n/a)r\}$: 零次, 第1種のベッセル関数

$\alpha_n: J_0(\alpha) = 0$ の正根で小さい順から $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ とする。

a : タンク半径

c : タンク高さ

h : タンク中の油面の高さ

z : タンク軸上におけるタンク底からの任意の距離

図2の2本の実線は(2)式から計算した理論曲線である。ただし、実測値と最も合うように q_0 と R の値を選んである。すなわち、スクリーンがない場合は $q_0 = 15 \times 10^{-6} \text{ C/m}^3$, $R = 0.255 \text{ m}$ であり、スクリーンがある場合は $q_0 = 22 \times 10^{-6} \text{ C/m}^3$, $R = 0.05 \text{ m}$ である。スクリーンがない場合の q_0 の値がスクリーンがある場合の q_0 の値より小さくなっているが、この原因について、タンク内の油流の径方向成分を考慮せず、ここでは、径方向に無関係な電荷密度分布のモデルを採用したためと思われる。

3.3 テストタンク側壁への緩和電流

テストタンク側壁の導体帯へ緩和する電流は、測定端子1番から14番までそれぞれスイッチを切り換えることによって測定する。図4の○印は、スクリーンがないときのタンク側壁への緩和電流(底面への緩和電流は含まれない)を示し、横軸に電流端子番号および導体帯のタ

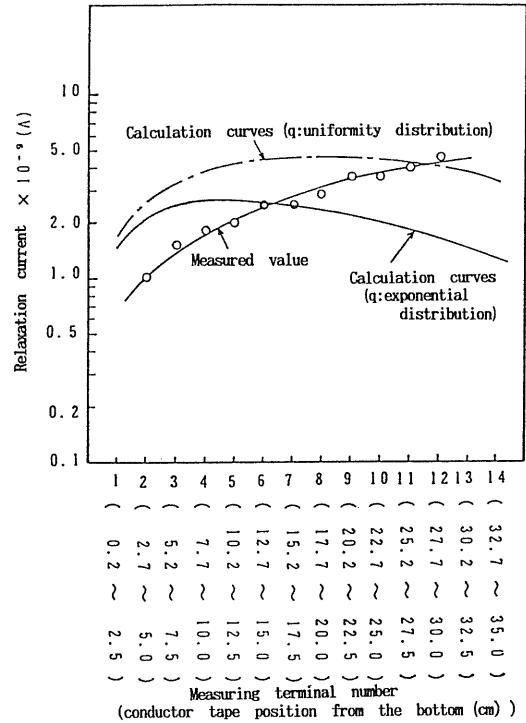


図4 タンク側壁への緩和電流の実測値と計算値(スクリーンなし)

Fig. 4 Measured values and relaxation current calculated along the cylindrical tank wall without a mesh screen.

ンク底からの高さを、縦軸には緩和電流の値を対数目盛でとてある。実測値は導体帯のタンク底からの高さが高くなるにつれて徐々に増加する傾向にあり、これは油面に近いほど電荷緩和が大きいことを意味している。また、端子1番から14番までの緩和電流の合計は $39.3 \times 10^{-9} \text{ A}$ であった。一方、スクリーンを取り付けた場合は、タンク側壁への緩和電流は図5の○印で示すように、タンク底(この場合はスクリーン面)から油面に向かってほぼ指數関数的に減少し、かつ、スクリーンがないときに比べて油中電荷の緩和がタンクの上部へいくほど小さくなっている。また、この場合の側壁への緩和電流の合計は $16.5 \times 10^{-9} \text{ A}$ であった。なお、スクリーンを取り付けたときは、スクリーン面はタンク底から7cmの高さにあるので、計算ではこの高さを零電位面としている。このために、緩和電流の測定は端子4番(底から7.7cmの位置)から行なった。

3.4 テストタンク底面への緩和電流

3.1節で述べたように、テストタンクに流入する流動電流のうち、およそ50%がスクリーンで中和され、残りの50%がテストタンクの底面と側面へと緩和

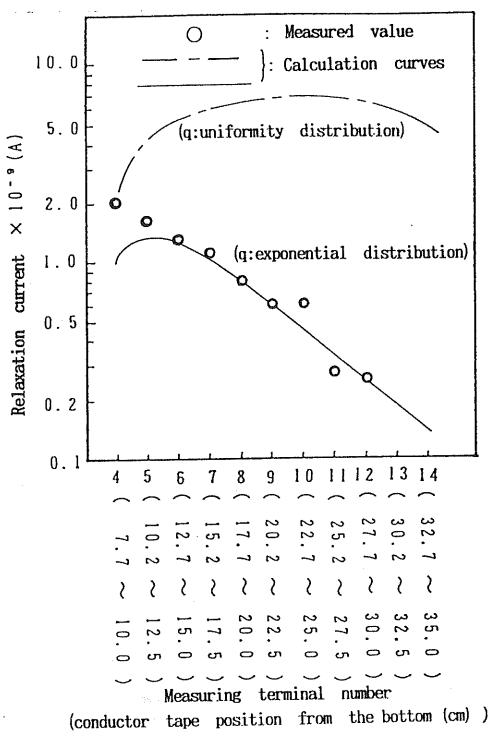


図 5 タンク側壁への緩和電流の実測値と計算値 (100 メッシュスクリーン)

Fig. 5 Measured values and relaxation current calculated along the cylindrical tank wall with a 100 mesh screen.

される。タンク底面における緩和電流の実測値は、スクリーンがあるときが 10.2×10^{-9} A、スクリーンがないときが 12.3×10^{-9} A であった。これら実験結果の解析は次の考察の項で述べる。

4. 考察

4.1 テストタンク側壁への電荷緩和

実験結果 3.2 節で述べたように、テストタンク中の軸上電位分布の実測値はタンク油中の中心位置で最大値をとらない。これは、油中電荷分布が一様でないことを意味する。そこで、油中電荷が仮りに指数分布をするとして油中電位を求めたのが(2)式である。(2)式を用いて、タンクの半径方向の電界 E_r を求めると(3)式となる。

$$E_r = -\frac{\partial V_0(r, z)}{\partial r} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 q_0 a}{\epsilon_0 \epsilon_r (\alpha_n^2 - a^2/R^2) J_1(\alpha_n)} \times \left[\left\{ \exp(-z/R) + \frac{a}{R \alpha_n} \sinh \left(\frac{\alpha_n}{a} z \right) \right\} - \cosh \left(\frac{\alpha_n}{a} z \right) \right] + \sinh \left(\frac{\alpha_n}{a} z \right)$$

$$\begin{aligned} & \times \left\{ - \left(\exp(-h/R) + \frac{a}{R \alpha_n} \sinh P_2 - \cosh P_2 \right) \right. \\ & \times \cosh P_1 + \epsilon_r \sinh P_1 \left(\frac{a}{R \alpha_n} \exp(-h/R) \right. \\ & \left. - \frac{a}{R \alpha_n} \cosh P_2 + \sinh P_2 \right) \left. \right\} \\ & \left. \left| \frac{(\sinh P_2 \cosh P_1 + \epsilon_r \sinh P_1 \cosh P_2)}{J_1 \left(\frac{\alpha_n}{a} r \right)} \right| \right\} \quad (3) \end{aligned}$$

タンク側壁への緩和電流 I_r は(3)式で $r=a$ とおき、油の導電率 K が一定とすると、(4)式のようになる。

$$\begin{aligned} I_r = K \int_{z_1}^{z_2} 2 \pi a E_r dz = & \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4 \pi q_0 a^2 K}{\epsilon_0 \epsilon_r (\alpha_n^2 - a^2/R^2)} \\ & \times \left[\left(\exp(-z/R)/(-1/R) + \frac{a^2}{R \alpha_n^2} \right. \right. \\ & \times \cosh \left(\frac{\alpha_n}{a} z \right) - \frac{a}{\alpha_n} \sinh \left(\frac{\alpha_n}{a} z \right) \left. \right) + \frac{a}{\alpha_n} \\ & \times \cosh \left(\frac{\alpha_n}{a} z \right) \left\{ - \left(\exp(-h/R) + \frac{a}{R \alpha_n} \right. \right. \\ & \times \sinh P_2 - \cosh P_2 \left. \right) \cosh P_1 + \epsilon_r \sinh P_1 \\ & \left. \left. \times \left(\frac{a}{R \alpha_n} \exp(-h/R) - \frac{a}{R \alpha_n} \cosh P_2 \right. \right. \right. \\ & \left. \left. \left. + \sinh P_2 \right) \right\} \left| \frac{(\sinh P_2 \cosh P_1 + \epsilon_r \sinh P_1)}{\cosh P_2} \right| \right] \Big|_{z_1}^{z_2} \quad (4) \end{aligned}$$

ただし、 $z_1 \sim z_2$ はタンク側壁におけるそれぞれの導体帯の底からの高さである。したがって、 $z=z_1$ から $z=z_2$ までの緩和電流は

$$\begin{aligned} I_r = & \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4 \pi q_0 a^2 K}{\epsilon_0 \epsilon_r (\alpha_n^2 - a^2/R^2)} \left[\left(-R \exp(-z_2/R) \right. \right. \\ & + \frac{a^2}{R \alpha_n^2} \cosh \left(\frac{\alpha_n}{a} z_2 \right) - \frac{a}{\alpha_n} \sinh \left(\frac{\alpha_n}{a} z_2 \right) \\ & + R \exp(-z_1/R) - \frac{a^2}{R \alpha_n^2} \cosh \left(\frac{\alpha_n}{a} z_1 \right) \\ & + \frac{a}{\alpha_n} \sinh \left(\frac{\alpha_n}{a} z_1 \right) \left. \right) + \left(\frac{a}{\alpha_n} \cosh \left(\frac{\alpha_n}{a} z_2 \right) \right. \\ & - \frac{a}{\alpha_n} \cosh \left(\frac{\alpha_n}{a} z_1 \right) \left. \right) \left\{ - \left(\exp(-h/R) \right. \right. \\ & + \frac{a}{R \alpha_n} \sinh P_2 - \cosh P_2 \left. \right) \cosh P_1 \\ & + \epsilon_r \sinh P_1 \left(\frac{a}{R \alpha_n} \exp(-h/R) \right. \\ & \left. \left. - \frac{a}{R \alpha_n} \cosh P_2 + \sinh P_2 \right) \right\} \\ & \left. \left| \frac{(\sinh P_2 \cosh P_1 + \epsilon_r \sinh P_1 \cosh P_2)}{\cosh P_2} \right| \right\} \quad (5) \end{aligned}$$

となる。ただし、油が帶電してもその導電率は変わらないとした。

図4の実線は、スクリーンのない場合における14個の導体帯への緩和電流を(5)式を用いて求めた理論曲線である。ただし、計算に使用した値は $a=19.25\text{ cm}$, $h=34\text{ cm}$, $c=39\text{ cm}$, $\epsilon_r=2.11$, $K=2.67\text{ pS/m}$ である。また、 R および q_0 の値は先に電位分布の計算から得られた値すなわち、 $R=0.255\text{ m}$, $q_0=15\times 10^{-6}\text{ C/m}^3$ を採用した。なお、同図中には参考のため、電荷分布が一様な場合の各導体帯への緩和電流の計算値を一点鎖線で示しておいた。図4からわかるように、実測曲線と計算曲線との傾向が少し異なっている。すなわち、タンク側壁への緩和電流の計算値（指數分布の場合）は、タンク底からの高さが上昇するにつれて増加し、7.7~10cmの位置でピーク値をもち、その後は徐々に減少している。これに対し実測値では、タンクの高さとともに緩和電流の値が徐々に増加する傾向を示している。このように、実測値と計算値との曲線の傾向が異なること、特に、比較的タンクの上部ほど両者の差が大きくなる原因については今のところ不明であるが、タンク内、とくに油面付近の流速分布の影響によるものではないかと考えている。

本研究では使用したテストタンクは円筒形で、かつ、その油流速は比較的低流速であるために、タンク中の流速を流速計で実測するのは一般に困難である。そこで、タンク中の油流の状態を調べるために、この円筒形テストタンクを軸方向で切断したような図6で示す方形タンクを製作した⁶⁾。この方形タンクは $40\times 40\times 1.5\text{ cm}$ の大きさの透明アクリル板製で、その容量は円筒形テストタンクの約1/20である。補助タンクの試料油（ディーゼル軽油）中にあらかじめ粒径がおよそ $30\mu\text{m}$ の金属粉末を混入しておき、ポンプによって流量計を通してアクリル製タンクに 2 l/min で循環送油する（以下、油流

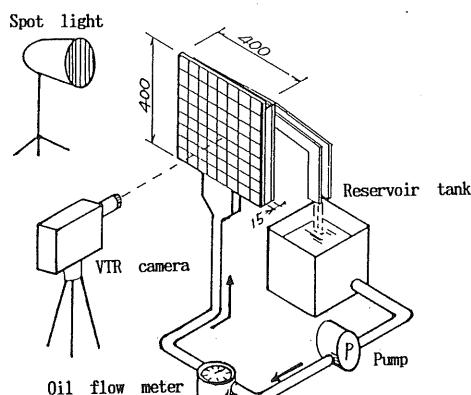


図6 油流速測定方法の概略

Fig. 6 Schematic diagram of the measuring method for the oil velocity in the tank.

速観測の実験における流量は 2 l/min 一定とする）。油中に少量混入される金属粉末の粒径は小さいが暗室中、ライトで光を照射すると粒子が光を反射するために、一つ一つがある程度大きな粒となって見えて、タンク中で油の流れる様子がよく観測された。

図7はスクリーンがないとき、タンク中を粒子が油とともに運動する様子をTVカメラで撮ったものを再生しながら図に描いたものである。画面をよく観察すると、スクリーンがないときはタンクの軸上では、油はタンク底部流入口から油面に向かって速い速度で流れる。タンクの上方軸から離れたところでは、油が対流的に流れる（逆向きの流れが存在する）部分があることがわかった。また、タンク底部側壁付近では油の流れがないところもあることがはっきりと観測できた。

このように、比較的タンクの上部では軸付近からタンクの側壁方向に対流的に流れる油流によって、軸付近の電荷が油とともにタンク壁近くに移動する。その結果、側壁への緩和電流の値がタンク上方へ行くほど増加し、図4で示すような実測結果となったものと考えられる。一方、図4の実線で示す緩和電流の計算曲線では、タンク内で油流が底から油面に向かって層流的に流れると仮定している。したがって、このような油流の状態の違いが実測値と計算値との間の傾向の相違となって現われたものと考えられる。しかし、緩和電流の値そのものには大きな差は認められない。

図8はタンク流入口にメッシュスクリーンを設置したときのタンク中の油流の状態を図7と同様に図示したものである。同図(a)は20メッシュ、(b)は100メッシュスクリーンを用いた場合のものである。スクリーンがあるときは、油流はスクリーンを通過する際スクリーンによって分散・平均化されて流れ、スクリーンを少し越えたところでタンク中を層流的に流れるようになる。そしてメッシュが細かいほどその傾向が顕著となり、油流が平

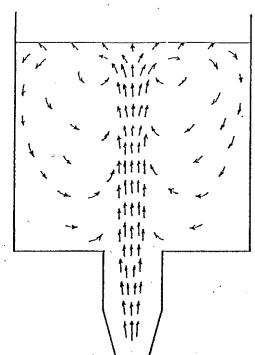
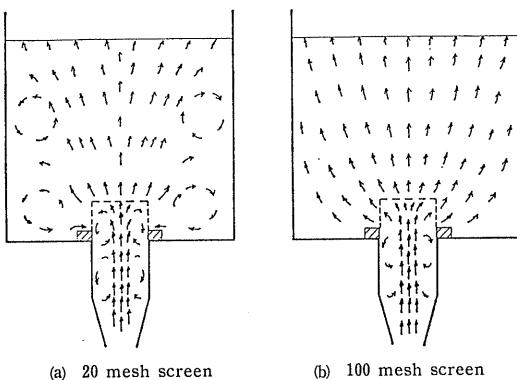


図7 タンク内の油流の状態（スクリーンなし）

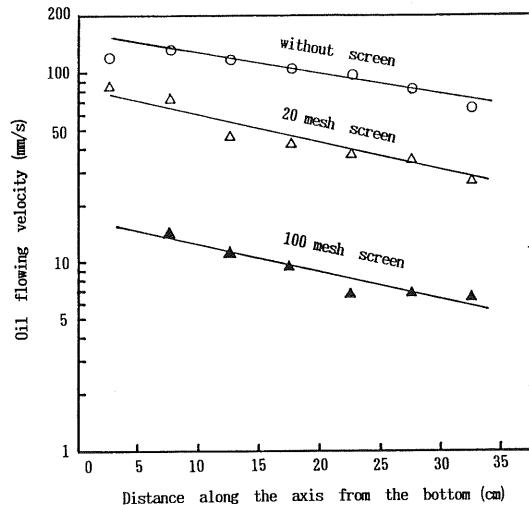
Fig. 7 State of oil flowing without mesh screen.

図 8 タンク内の油流の状態（スクリーンあり）
Fig. 8 State of oil flowing with a mesh screen.

均化されることによって軸上の油流速の減速される様子がよく観測された。方形タンク中の軸上の油流速をスクリーンがあるときとないときでそれぞれTVカメラの画像から測定した結果の一例を図9に示す。

ところで、このようにして方形タンクを用いて測定された油流速の値を円筒形タンク中の流速に換算することは困難であるから、ここでは一応、方形タンクにおける測定値で円筒形テストタンク内流速を推定することにする。いま、100メッシュスクリーンを用いて図1で示す40l容量の円筒形テストタンクに流量40l/min一定で循環送油しているときのタンク中の油流の状態が、図6で示す方形タンクに流量2l/min一定で循環送油しているときの油流の状態と同じであると仮定する。すなわち、テストタンク中の油流の状態が図8(b)のようであるとする。このときのタンク側壁への緩和電流を測定した結果が図5の○印で示されている。同図実線は(5)式に基づく計算曲線であり、計算に使用したRおよびq₀の値は図2で示した電位分布の計算から得られた値 R=0.05m, q₀=22×10⁻⁶C/m³をそれぞれ用いた。なお、図5中的一点鎖線は電荷密度 q₀(C/m³)がタンク中で一様分布している場合に相当する。

図5から、タンク側壁への緩和電流は実測値、計算曲線いずれにおいてもタンク底部（この場合はスクリーン面）からタンク上部に向かってほぼ指數関数的に減少していることがわかる。そして実測値と計算値とはかなりよい一致を示した。ただし、スクリーン面から少し上部（測定端子4~5番）で計算値と実測値が相違している原因については、この付近の油流の影響によるものと思われる。すなわち、計算ではスクリーン面を零電位面とし、この位置から油中電荷密度が指數分布するとしているのに対して、実験ではスクリーン側面から流出する油がこの付近に向かって流れ込むため、この付近での緩和

図 9 タンク軸上の油流速
Fig. 9 The oil flowing velocity along the axis in the tank.

電流の値が計算値より大きくなっているものと解釈できる。いずれにせよ、スクリーンを用いたときは、タンク側壁への緩和電流の実測値と計算値とはその傾向および値ともによい一致を示した。

4.2 テストタンク底面への緩和電流

図1で示すような蒸気空間をもつ円筒形テストタンクにおいて、油とともにタンクに流入する電荷は表1のデータからも明らかのように、油がテストタンクに流入して溢流孔から溢れるまでにほとんどタンク内で緩和してしまう。すなわち、流入電荷の一部はタンク底面へ緩和し、他の残りがタンク側壁へ緩和することになる。前項では、テストタンク側壁への電荷緩和について考察した。ここではまず、テストタンク底面への緩和電流の理論式を導出し、実測値と比較検討してみる。タンク底面(z=0)における電界を E_z=0 とし、これを(2)式から求めると、

$$\begin{aligned}
 E_{z=0} = & -\left. \frac{\partial V_0(r, z)}{\partial z} \right|_{z=0} \\
 = & \sum_{n=1}^{\infty} \frac{-2 q a^2 J_0((\alpha_n/a)r)}{\epsilon_0 \epsilon_r \alpha_n (\alpha_n^2 - a^2/R^2) J_1(\alpha_n)} \\
 & \times [(\alpha_n/aP) \{-(\exp(-h/R) + (a/R\alpha_n) \\
 & \times \sinh P_2 - \cosh P_2) \cosh P_1 + \epsilon_r \sinh P_1 \\
 & \times ((a/R\alpha_n) \exp(-h/R) - (a/R\alpha_n) \\
 & \times \cosh P_2 + \sinh P_2)\}] \quad (6)
 \end{aligned}$$

ここで、P=sinh P₂ cosh P₁+ε_r sinh P₁ cosh P₂ である。

したがって、タンク底面への緩和電流 I_z は油の導電率を K 一定として

表 2 タンク底面への緩和電流の実測値と計算値

Table 2 Measured and calculated values of relaxation current on the test tank bottom.

Screen	Relaxation current	
	Measured value ($\times 10^{-9}$ A)	Calculated value ($\times 10^{-9}$ A)
without screen	12.3	11.77
100 mesh screen	10.2	9.1

$$\begin{aligned}
 I_z &= K \int_0^a 2\pi r (-E_{z=0}) dr \\
 &= 2\pi K \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^a \frac{2q_0 a^2 r J_0\{(\alpha_n/a)r\}}{\epsilon_0 \epsilon_r \alpha_n (\alpha_n^2 - a^2/R^2) J_1(\alpha_n)} \\
 &\quad \times [(\alpha_n/aP) \{-\exp(-h/R) + (a/R\alpha_n) \\
 &\quad \times \sinh P_2 - \cosh P_2\} \cosh P_1 + \epsilon_r \sinh P_1 \\
 &\quad \times ((a/R\alpha_n) \exp(-h/R) - (a/R\alpha_n) \\
 &\quad \times \cosh P_2 + \sinh P_2)] dr \quad (7)
 \end{aligned}$$

(7)式で、 $\int_0^a r J_0\left(\frac{\alpha_n}{a} r\right) dr = \frac{a^2}{\alpha_n} J_1(\alpha_n)$ の関係式を用いると、

$$\begin{aligned}
 I_z &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4\pi q_0 K a^3}{\epsilon_0 \epsilon_r \alpha_n (\alpha_n^2 - a^2/R^2)} \\
 &\quad \times [(1/P) \{-\exp(-h/R) + (a/R\alpha_n) \sinh P_2 \\
 &\quad - \cosh P_2\} \cosh P_1 + \epsilon_r \sinh P_1 ((a/R\alpha_n) \\
 &\quad \times \exp(-h/R) - (a/R\alpha_n) \cosh P_2 + \sinh P_2)] \quad (8)
 \end{aligned}$$

(8)式は、半径が a (m) のタンク底面から緩和する電流を表わしている。(8)式を用いて、スクリーンがあるときとないときのタンク底面(油流入口の面積は差引いた)への緩和電流を計算した値と、実測した値を比較したのが表2である。表2からわかるように両者の値はよく一致している。

5. む　す　び

給油中の石油タンクの油流入口に金属メッシュスクリーンを取り付けると、これががない場合に比べて油中電位、とくに油面電位が著しく減少する。ここでは、テストタンク側壁およびタンク底面への電荷緩和について実験と理論の両面から検討した。その結果、スクリーンを取り付けたときは、タンク油中の電荷がタンク底からの高さについて指数関数的に減少するような緩和をすることがわかった。また、タンク油中の電荷緩和は、タンク中の油の流れの状態に強く影響されることが油流の観測によって明らかとなった。

さらに、タンク側壁および底面での緩和電流の実測値は、タンク油中の電荷密度分布が油の流れの方向に対して指数関数的に減少すると仮定して得られた理論値と非常によく一致することがわかった。なお、今回は導電率を一定として解析してきたが、帯電すると油の導電率が変化するという報告もあるので、今後はその点を加味して解析してみたい。

次に、油中に気泡が多量に混入されるような場合は気泡は帯電し、気泡が油中電位や油面電位に影響を与えることが予想される。本研究の場合、気泡は送油ポンプからある程度混入されるものと考えられるがテストタンクの油面に泡などは認められないことから、気泡の影響についてはこの場合考慮する必要がないものと思われる。また、タンク上蓋に電界計を設置してタンク径方向の油面電位を実測した結果では、スクリーンの有無にかかわらず油面の中心が高電位でタンク壁に向かうにつれて減少し、ほぼ軸対称分布をしている。そして、スクリーンがあるときはこれがないときに比べて著しく減少している。これらのことから、メッシュスクリーンを用いたときはこれがないときに比べて油面電荷も著しく減少しているものと考えられる。

最後に、本研究の内容の詳細にわたって数々の有益なご教示をいただいた名古屋大学工学部教授工学博士田正之先生に厚く感謝申し上げます。また、本研究の実験に協力された福井工業大学工学部の卒研生諸君に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 児玉 勉, 田畠泰幸: 静電気学会講演論文集 '77, p. 12 (1977)
- 2) J.T. Leonard and H.W. Carahart: J. Colloid Interface Sci., 32 (1970) 383
- 3) 静電気学会編: 静電気ハンドブック, pp. 801, 829, オーム社 (1981)
- 4) K. Tottori and M. Fujii: J. Electrostatics, 12 (1982) 405
- 5) M. Fujii, H. Mitera, A. Ohashi and K. Tottori: IEEE Trans. Electr. Insul., EI-20 (1985) 443
- 6) 藤井 求, 田辺孝一, 美寺久光, 大橋朝夫: 電気学会論文誌A, 106 (1986) 573
- 7) 美寺久光, 鳥取孝太郎: 電気学会誌, 89 (1969) 1970
- 8) 伊藤正一, 上田 実: 電気学会誌, 90 (1970) 1539
- 9) A. Klinkenberg and J.L. Van der Minne: *Electrostatics in the Petroleum Industry*, p. 100, Elsevier (1958)
- 10) 美寺久光, 八島英之: 静電気学会講演論文集 '82, p. 195 (1982)