

エレクトロスタティック・スクリーナによる 帯電流体の除電

田辺孝一・藤井 求・鳥取孝太郎

Discharging effect on charged oil flow by Electrostatic-screener

Koichi TANABE · Motomu FUJII · Kotaro TOTTORI

Two kinds of cylindrical oil tanks of 40cm ϕ ×40cm (40 ℓ) and 80cm ϕ ×100cm (400 ℓ) have been used to test the discharging effectiveness by circulating oil through various kinds of stainless steel mesh screens set at the diffuser outlet. A remarkable discharging effectiveness of more than 90% has been obtained by this method in the case of a single screen or a combined one.

A probe potential method has been used to measure the time dependent potentials in the quasi-laminar flow of circulating oil at the center of the tank. A spherical model for the test tank has been assumed to calculate the charges distributed in the tank. The total charge obtained from the streaming current has approximated that obtained by the probe potential. Considering the mechanism of the discharging effect from the movement of the ions, it seems most probable that the mechanism is composed of the ions touching the screen rather than collecting the ions by the electric field.

I まえがき

一般に油の流送系（ポンプ・フィルタ・ハイブライン等）で発生した流動電流によって油タンクは帯電状態となる。このようにして必然的に発生した静電気が油タンクなどの障災害の直接的¹⁾²⁾³⁾原因となる場合があり、障災害防止の目的でこの方面の研究結果も報告されている。

本論文では、拡散筒とメッシュスクリーンからなるエレクトロスタティック・スクリーナを油タンク（以下タンクまたはテストタンクと呼ぶ）の流入口に取付けてタンクと共に接地すると著しい除電効果のあることを述べる。

II 実験結果

(1) 40 ℓ テストタンクについて

図-1にエレクトロスタティック・スクリーナを取付けた40 ℓ テストタンク装置の概要を示す。テストタンクは金属製の円筒形で、その大きさは40cm ϕ ×40cmである。

油は5 μ mのフィルタを内蔵した送油ポンプにより、およそ40 l/minの流量で循環送油される。テストタンクの油面は、直径5cmのオーバーフローパイプにより一定に保たれタンク底面から35cmの高さとなる。直径2.5cmのPVCホース中の平均流速は、約1.36m/sである。

このテストタンクでは、帯電油の流れがタンク中で軸対称となるよう、流入口をタンク底部中央に設け、そこにホーン状の拡散筒を取付けてある。拡散筒の直径は10cmで、ホース中の平均流速が1.36m/sであるのに対し、拡散筒での平均流速は約8.5cm/sに減速される。

この場合の油の流れは準層流状態になると考えられる。テストタンク中の電位Vは図-1で示すように油中中心に置かれた直径2.5cmの球探極から集電式電位計にリードされ測定される。後述するように、この探極電位は大まかではあるが、タンク中の全電荷量に比例する。またスクリーンは100あるいは200メッシュのステンレスワイヤの円筒状である。その種類は、A：直径10cm高さ5cm、B：直径15cm高さ7.5cm、C：直径20cm高さ10cmで図-2(a)に示す。またこのスクリーンは準層流状態を乱さないように、拡散筒の流出口に取付けられ、タンクと共に接地される。このようすを図-2(b)に示す。試料油には、安全を考慮してディーゼル軽油を使用した。

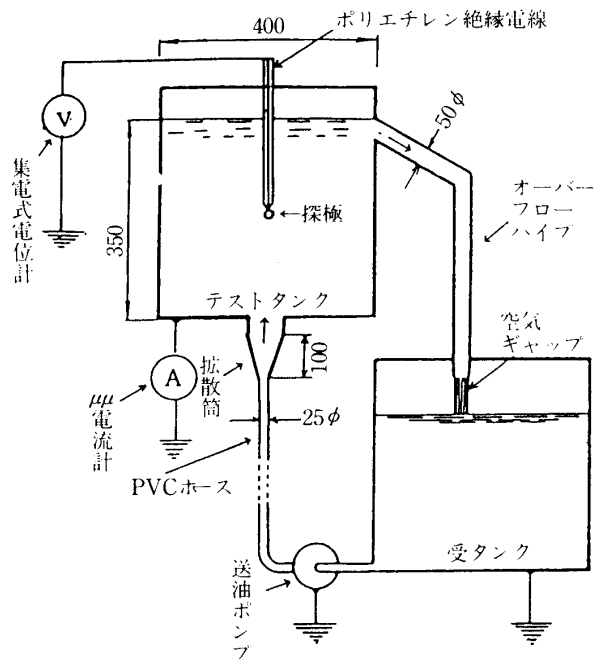


図-1 実験装置の概要
Fig. 1 Schematic diagram of oil pumping system and potential measuring method.

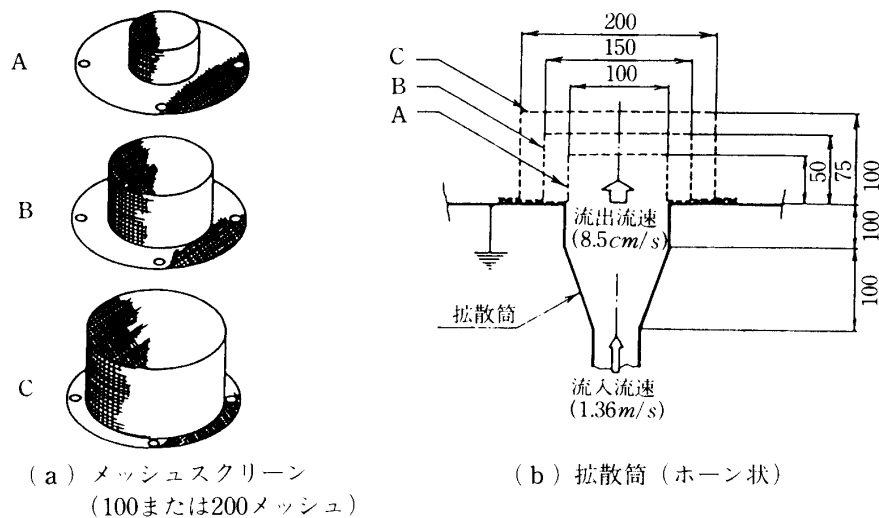
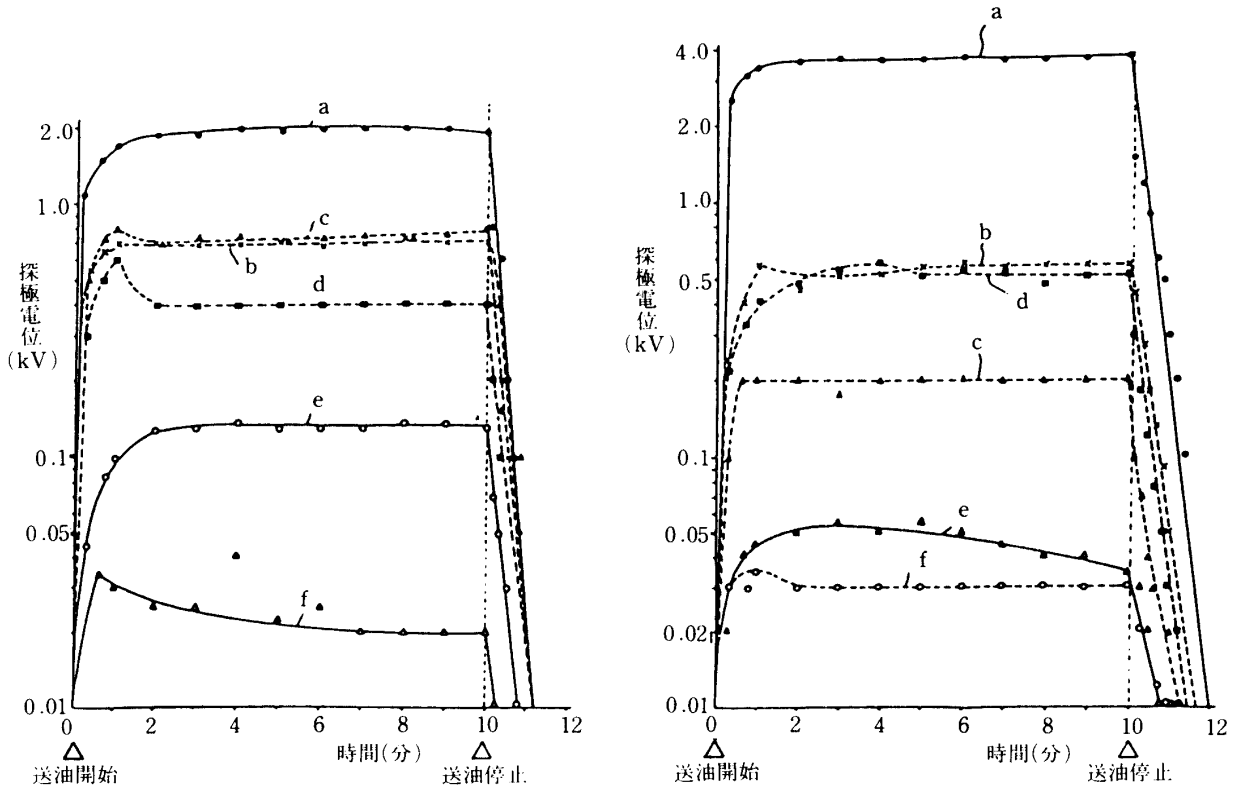


図-2 40 l テストタンクに用いる拡散筒およびメッシュスクリーン
Fig. 2 Electrostatic screener attached to diffuser for 40 l tank.

図-1 に示すようにこのテストタンクは、油の流入側ではPVCホースによって大地から絶縁され、流出側ではオーバーフローパイプと受タンク間で空気絶縁されている。

電位経時過程の一例を図-3 に示す。これらの特性曲線をみると、送油ポンプを始動してから数分後に油中電位は定常状態となる。



(a) 100メッシュスクリーンの場合

(b) 200メッシュスクリーンの場合

a : スクリーンなし c : スクリーンB e : スクリーンA&B
b : スクリーンA d : スクリーンC f : スクリーンA,B&C

図-3 メッシュスクリーンの有無による電位の経時過程

Fig 3 Potential curves during oil-pumping with or without mesh screen elements.

同図 a はスクリーンを取付けない時の油中中心の電位で、そのタンク接地電流は $48 \times 10^{-9} \text{A}$ で、スクリーンAを取付けた時の電位は b で示され、その接地電流は $95 \times 10^{-9} \text{A}$ である。

除電率は次式で算出される。

$$\text{除電率} = \frac{(V\alpha - V\beta)}{V\alpha} \times 100\%$$

ただし、 $V\alpha$: 油中中心の電位 (定常状態)

$V\beta$: スクリーンを取付けた場合の油中中心の電位 (定常状態)

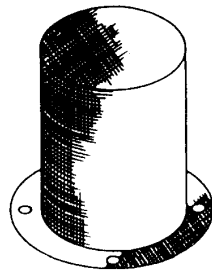
油の拡散筒内における平均流速 8.5cm/sにおける100あるいは200メッシュの除電率を表-1に示す。⁴⁾

表-1. 除電率 (40ℓテストタンク)
 Table 1. Values of discharging effectiveness
 (40ℓ test tank)

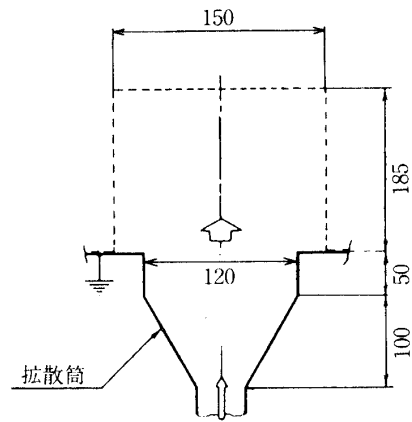
| メッシュスクリーン | 除電率 (%) | |
|-----------|---------|---------|
| | 100メッシュ | 200メッシュ |
| A | 64.3 | 84.8 |
| B | 62.6 | 94.6 |
| C | 68.9 | 85.9 |
| A&B | 93.3 | 99.2 |
| A・B&C | 99.0 | 98.8 |

(2) 400ℓテストタンクについて

油の流入流速がスクリーンの除電効果に及ぼす影響について検討するため実験装置を大型化する。すなわちテストタンクを80cmφ×100cm、拡散筒の直径を12cm、金属パイプ径を3.75cmとし、ポンプは流速可変のものを用いる。テストタンク油面はタンク底より約85cm一定の高さとなる。スクリーンは前述と同様、円筒形で図-4(a)に示すように直径15cm高さ18.5cmで、そのメッシュは100または200である。



(a) メッシュスクリーン
 (100または200メッシュ)



(b) 拡散筒(ホーン状)

図-4 400ℓテストタンクに用いる拡散筒およびメッシュスクリーン
 Fig 4 Electrostatic screener attached to diffuser for 400ℓ tank.

タンク流入流速は12cmφの拡散筒によってパイプ平均流速の約1/10に減速される。

図-5は200メッシュスクリーンの有無について、拡散筒の流速が平均で29.5cm/s一定としたタンク油中の探極電位の経時過程である。

探極電位は40ℓテストタンクと同様、送油ポンプ始動後数分で定常状態となる。流入流速29.5cm/sにおけるこの200メッシュの除電率はおよそ90%である。⁴⁾

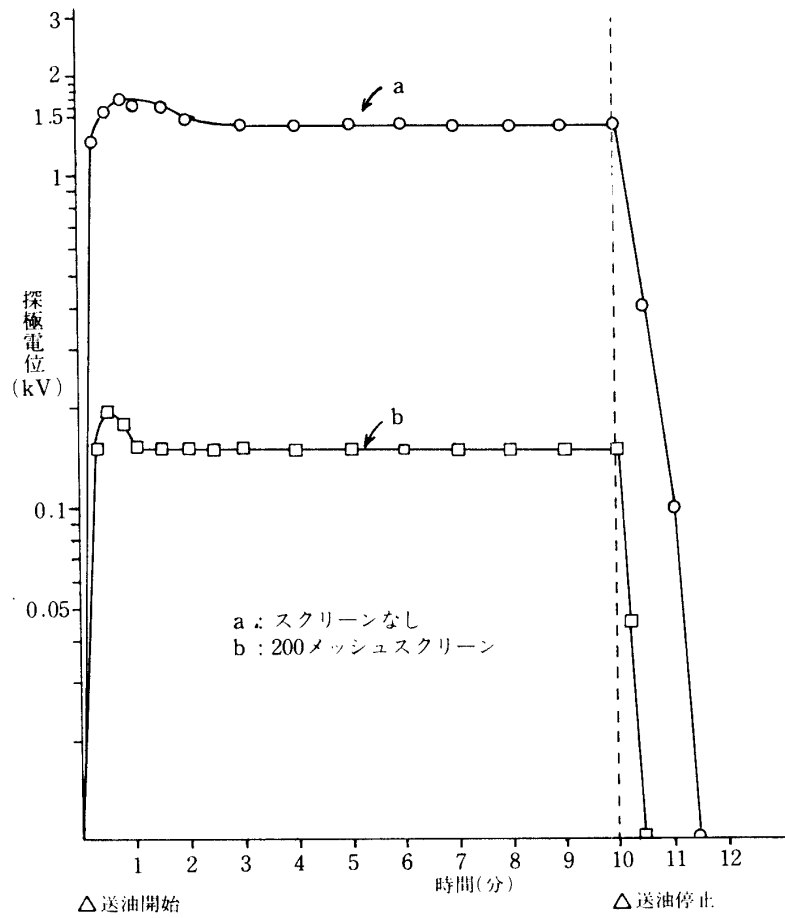


図-5 スクリーンの有無による電位経時過程(400 l タンク)
 Fig 5 Potential curves during oil-pumping with or without mesh-screen.

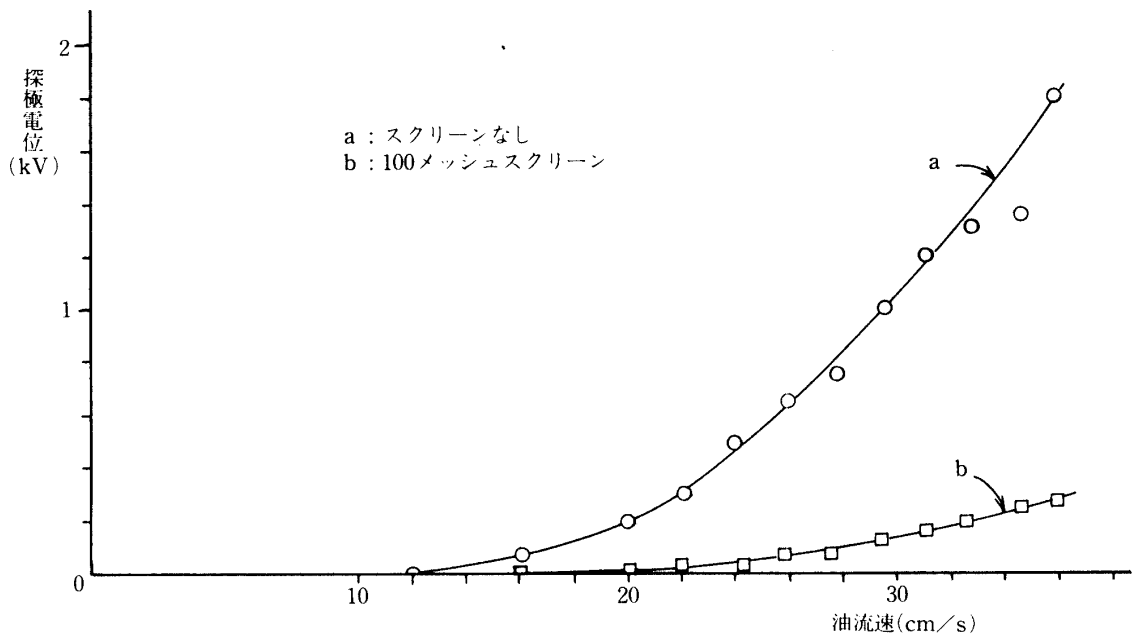


図-6 拡散筒流出流速に対する油中中心電位
 Fig 6 Relation between discharging efficiency and oil velocity at the diffuser.

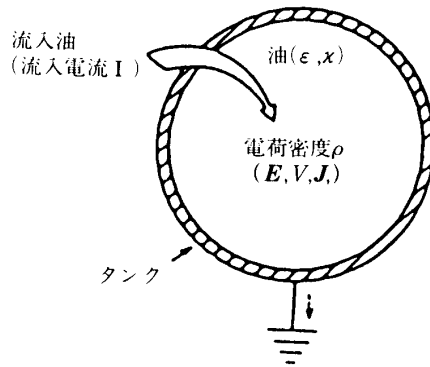
図-6は拡散筒の直径を12cmとし、100メッシュスクリーンの有無について、拡散筒の流速に対する油中中心電位の関係を示したものである。同図から求めた各流速における除電率を表-2に示す。

表-2 除電効果率 (400ℓテストタンク)
Table 2. Values of discharging effectiveness (400ℓ test tank)

| 油流速(cm/s) (拡散筒流出流速) | 除電効果率(%) (100メッシュスクリーン) |
|------------------------|----------------------------|
| 20.2 | 95 |
| 24.2 | 94 |
| 27.7 | 90 |
| 31.3 | 87 |
| 34.8 | 81 |
| 36.1 | 85 |

III 考 察

実験に用いた40ℓテストタンクを、大まかではあるが、図-7のような、これと同容量の球形タンクと考えると



- I : タンク流入口での流入電流
- I_e : タンクの接地電流
- ϵ : 油の誘電率
- x : 油の導電率
- Q : 時間 t におけるタンク内の電荷
- ρ : タンク内各部の電荷密度
- E : 電界
- V : 電位
- J : 電流密度
- a : 球タンク半径

図-7 帯電したタンクの球形モデル
Fig7 Spherical model of charged tank

$$-\frac{\partial \rho}{\partial t} = \text{div } \mathbf{J} \dots (1) \quad \text{div } \epsilon \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon} \dots (2) \quad \mathbf{J} = x \mathbf{E} \dots (3)$$

帯電状態にあるこのような球形タンクにおいて、電荷分布が一様であると仮定すれば、タンク中心で電位は最大となり、その値 V_0 は次のようになる。

$$V_0 = \frac{\rho a^2}{6\epsilon} \dots (4)$$

(4)式より全電荷 Q_0 は

$$Q_0 = 8 \pi a \epsilon V_0 \dots (5)$$

定常状態での流入電流 I から求める全電荷 Q_∞ は、

$$Q_\infty = (\epsilon/x) I \dots (6)$$

この Q_0 と Q_∞ は理論的に等しくならなければならない。これらの計算値を表-3に示す。

この場合の I 、すなわちタンク接地電流の値はスクリーンの無い場合の値で、定数には次の値を使用する。 $\epsilon_s = 2.3$, $x = 0.2 \times 10^{-12}$ S/m (超高抵抗測定装置TR-44型タケダ理研製で測定)

表-3をみると、流入電流 I から求めた Q_∞ は、探極電位から求められた Q_0 とオーダが合ってい

表-3 Q_0 と Q_∞ の計算値(半径 $a=0.2m$ の球形タンクとして)
 Table 3. Calculated values of Q_0 and Q_∞
 (40 l tank assumed to be a spherical of radius $a=0.2m$)

| 探極電位 V_0 (V) | 流入電流 I (A) | 電荷量 (計算値) | |
|-------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|
| | | Q_0 (C) | Q_∞ (C) |
| 2×10^3 | 48×10^{-9} | 2.05×10^{-7} | 0.49×10^{-7} |
| 3.8×10^3 | 95×10^{-9} | 3.89×10^{-7} | 0.97×10^{-7} |

る。これらの結果から、スクリーンを取付けない場合、タンク中で電荷密度 ρ はほぼ一様分布するとしても大きな誤りはないと考えられる。

一方 400 l 容量のような比較的大きいテストタンクでは、一様分布とならずタンク底から少し上の方でその電荷密度は最大となる。

したがって、図-5の電位曲線はタンク中心のものであって、厳密には最大値を示す点ではない。しかしこのテストタンクにおいて、メッシュスクリーンと拡散筒からなるエレクトロスタティック・スクリーナの効果について推測することは可能であろう。

図-3または表-1で示したように拡散筒に取付けられたスクリーンの効果は、定常状態における探極電位で推定することができる。

図-3と図-5の除電効果についての実験結果から、メッシュスクリーンの細目化、またはスクリーンの複合化によって除電率の向上することがわかる。

メッシュによる除電のメカニズムは、帯電流体がスクリーン近傍を流れる際、イオンとスクリーン導体との接触、またはスクリーン近傍の電界によるイオンの捕捉などによることが、一応考えられる。このことについて、流体中のイオンを力学的な面から考えてみる。

油にはそれがスクリーンを構成している導体(金属)の近傍を流れる際、ポンプで送油されタンク内に向かう力 F_1 と、油中に分布している電荷が受ける静電力 F_2 の2つの力が同時に作用する。この F_1 と F_2 の合力(ベクトル和)によって油中電荷は力を受けるものと考えられる。

まず、静電力が作用しない状態で、油がスクリーンを通過しようとする力 F_1 を考えてみる。

図-8において、スクリーン面における流速を v_1 、タンク油面における流速を v_2 、油の比重量を γ 、油の密度を σ 、タンク底よりスクリーン面までの高さを h_1 、タンク底より油面までの高さを h_2 、スクリーン面での圧力を p_1 、油面における圧力を p_2 、重力の加速度を g として、完全流体ではないが、ベルヌイの定理を適用すると、⁵⁾

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + h_1 = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + h_2 \dots \dots (7)$$

が成り立つ。油面では、 $p_2 \doteq 0$ 、 $v_2^2 \doteq 0$ とおくと、

$$p_1 = -\frac{\gamma}{2g}v_1^2 + \gamma(h_2 - h_1) \dots\dots(8)$$

ここで、 $v_1 = 8.5 \times 10^{-2} / 0.27 = 0.315 \text{ m/s}$
 (ただし0.27は100メッシュスクリーンの空間率)、 $h_1 = 0.05 \text{ m}, h_2 = 0.35 \text{ m}, \gamma = g\sigma = 8526 \text{ N/m}^3$
 (ただし、 $\sigma = 870 \text{ kg/m}^3$ とした)を代入して、 $p_1 = 2515 \text{ N/m}^2$ と求まる。

100メッシュスクリーンの1メッシュあたりの窓面積は $1.74 \times 10^{-8} \text{ m}^2$ なので、1メッシュに作用する力 F_1 は

$$F_1 = P_1 S_1 = 4.37 \times 10^{-5} \text{ N} \text{ である。}$$

つぎに、イオンが拡散筒内に静止しているとして、メッシュスクリーン導体との間に作用する静電力 F_2 を考えてみる。

スクリーンを構成する導体(直径： $0.122 \times 10^{-3} \text{ m}$)の近傍で、電荷 λ が受ける力を計算するには、スクリーン導体を接地された半径 r ($r = 0.061 \times 10^{-3} \text{ m}$)の無限長導体とみなし、それと点電荷 λ の間の静電力を計算するのが良いと考えられるが、簡単のため、スクリーン導体を接地された半径 r の導体球とみなし、それと点電荷 λ との間の力 F_2 を影像法で求めると

$$F_2 = \frac{rf\lambda^2}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r(f^2 - r^2)^2} \dots\dots(9)$$

ただし、 r ：導体の半径

f ：導体中心と点電荷の距り

λ ：1メッシュ立方の電荷量

となり、これでメッシュスクリーン近傍の静電力がおおまかではあるが計算できるはずである。ここで λ の大きさは、テストタンクに流入する電流 I_q ($I_q = I_r + I_s$)が 95 nA であるので、タンク流入口の面積を S_1 、流速を v_1 、電荷密度を ρ とすると、 $I_q = \rho v_1 S_1$ より

$$\rho = \frac{I_q}{v_1 S_1} = 3.84 \times 10^{-5} \text{ C/m}^3$$

となる。また、1メッシュを構成している導体の間隔 d は $0.132 \times 10^{-3} \text{ m}$ なので、これを1辺とする立方体中に存在する電荷 λ は、

$$\lambda = \rho v = 8.83 \times 10^{-17} \text{ C} \text{ である}$$

この λ および、 $a = 0.061 \times 10^{-3} \text{ m}$ 、 $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ 、 $\epsilon_r = 2.3$ を代入し、距り f を与えると F_2 が求まる。これを表-4に示す。

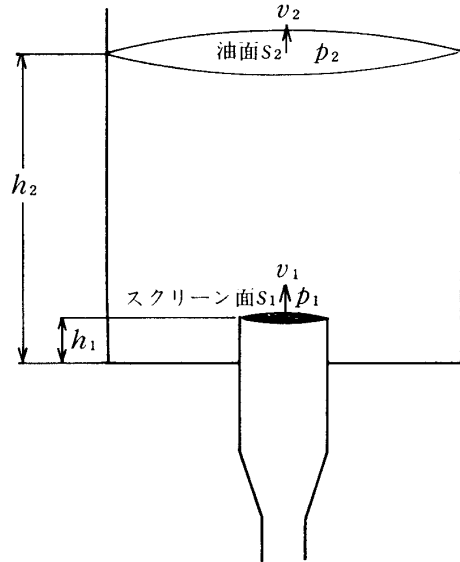


図-8 計算に用いたモデル
 Fig 8 The model tank for Calculation

表-4をみると、静電力 F_2 はたしかに、点電荷 λ がスクリーンに近づくとつれて、その大きさを増しているが、その値は、例えば $f=0.062\text{m}$ とした場合、メッシュと点電荷の接近距離は $0.001 \times 10^{-3}\text{m}$ であって、 $F_2=7.99 \times 10^{-12}\text{N}$ の大きさである。この値は前に求めた F_1 に比べると非常に小さい。

このことから、除電の機構としては、静電力によりイオンが補捉されるというよりも、メッシュスクリーンとイオンの接触によるものが大部分であろうと考えられる。

IV ま と め

以上、拡散筒とメッシュスクリーンから成る、エレクトロスタティック・スクリーナを用いて帯電する油タンクの直接的除電法について実験を試みた。その結果と若干の考察から

- 1) 準層流状態にある油の帯電電荷は細孔メッシュスクリーンによって効果的に除電される。
- 2) メッシュスクリーンによる帯電油の除電機構は、電界によるイオンの捕捉よりもスクリーン導体とイオンの接触によるものである可能性が大きい。
- 3) 1). 2)のことから、スクリーンの構造を再検討することによって、今後さらに除電効果をあげることが期待できる。

* 註 恩師 鳥取孝太郎先生(福井工業大学名誉教授)は、昭和58年11月10日、新湊市の自宅で御逝去されました。先生の御生前のあたたかい御指導に対し深く感謝申し上げますと共に、御冥福を心からお祈り申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 消防研究所：総合報告書 昭57
- 2) 鳥取・藤井：静電気学会講演論文集，'80 9aD2
- 3) 鳥取・藤井：静電気学会講演論文集，'80 9aD3
- 4) K.TOTTORI,M.FUJII:Journal of electrostatics 12(1982)405
- 5) 中山泰喜：流体の力学 養賢堂

表-4 静電力の計算値 ($r=0.061 \times 10^{-3}\text{m}$)
Table4 Calculated values of electrostatic force.

| $f \times 10^{-3}(m)$ | 接近距離 $\times 10^{-3}(m)$ | 静電力 $F_2(N)$ |
|-----------------------|-----------------------------|------------------------|
| 0.062 | 0.001 | 7.99×10^{-12} |
| 0.065 | 0.004 | 4.83×10^{-13} |
| 0.070 | 0.009 | 9.36×10^{-14} |
| 0.123 | 0.062 | 1.77×10^{-15} |
| 0.200 | 0.139 | 2.84×10^{-16} |