

## 論 文

## 均質多孔質フィルタによる石油の流動帶電特性

北村尚武\*, 上田実\*\*

(1982年8月28日受付)

Streaming Electrification of Hydrocarbon Liquid through  
Microporous Media

N. KITAMURA\* and M. UEDA\*\*

(Received August 28, 1982)

An experimental investigation of electric charge generation and transport during flow of low conductivity and low dielectric constant liquids (hydrocarbons) through microporous media (filter) is described. The rate of streaming current  $I_f$ , measured as charging current in the liquid, depends upon the nominal inner area  $\sum S_p$  of the pore calculated from the nominal radius, length of pore and porosity of filters. The experimental results are shown as  $I_f \propto \sum S_p^{0.4-1.0}$  according to the parameter of the liquid (kerosene) flow rate. The relationships between the value of current density on pore wall surface  $J_p$  and the ratios of relaxation length to nominal radius of pore are shown as  $J_p \propto \exp(V\tau/r)$  for each filter used for the experiment when the kerosene sample flows through their filters. Although the relationship between the streaming current and these parameters could not be obtained from the electric double layer theory because of the complex structure of flow mechanism in the filter, an empirical correlation based upon ideas drawn from the electric double layer theory is presented. The data over a wide range of these parameters may be able to be described with this correlation.

## 1. はじめに

石油系絶縁油（以下石油と略記）の流動帶電現象において、フィルタを通過した石油の帶電量が著しく多いことは以前からよく知られている。石油化学工業における原材料の石油および航空機等への燃料のパイプ輸送時の帶電量のはほとんどがフィルタ部で発生しているとして過言ではない<sup>1-3)</sup>。現在までにフィルタによる石油の流動帶電に関する研究は Klinkenberg ら<sup>4)</sup>, Gavis ら<sup>5)</sup>, Lauer ら<sup>6)</sup>, Huber ら<sup>7)</sup>, Krämer ら<sup>2)</sup>, 梅津ら<sup>8)</sup>および筆者ら<sup>9,10)</sup>によってなされてきた。

フィルタの帶電機構はたいへん多くのファクタから成り立っている。それらのファクタをまとめると以下のようである。すなわち、

\*,\*\* 名古屋大学工学部電気学科 (464 名古屋市千種区不老町)

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464 Japan

\*\* 現在：豊田工業大学制御情報工学科 (468 名古屋市天白区久方 2-12)

Present address: Department of Control and Information, Toyota Technological Institute, 2-12, Hisakata, Tenpaku-ku, Nagoya, 468, Japan

- (1) 液体の特性（導電率、誘電率および粘性など）
- (2) 容積フィルタ特性（フィルタ内部の細孔直径、細孔長、多孔率または空隙率ともいう、ねじれ率およびフィルタ厚さなど）
- (3) フィルタ内での液体の流動状態
- (4) フィルタ内細孔壁面の導電率
- (5) フィルタ細孔壁面／液体界面の物理化学的性質  
これらのファクタをそれぞれ分析し、またそれらを総合して帶電機構を述べる必要がある。本論文においては上述のとくに(2), (3)および(4)項について実験を行ない検討したことを述べる。

今回、筆者らは油濾過用に市販されているセルロース・エステルを主材とした均質多孔質フィルタを試料として灯油を透過させた場合、フィルタの 3 定数（細孔半径、ねじれ率および多孔率）を測定し見掛けの細孔内壁面積の総和と流動帶電量との関係を求めた。実験結果から細孔内壁に吸着されるイオン量はフィルタ細孔内壁面積によって定まることがわかったので報告する。

まず、フィルタ 3 定数を求める実験方法および実験結果を述べ、次に流動帶電の実験方法、実験結果および検討を述べることとする。

## 2. フィルタ3定数の測定

### 2.1 測定法の概要

測定法は河上<sup>11)</sup> および Wyllie<sup>12)</sup> らの論文から知ることができる。筆者らはおもに河上の論文を参考にして実験を行なった。この章においては扱う数値の単位は SI 単位である。

まず、フィルタ内の流路が一定半径の円形断面をもち屈曲する同形同大の毛細管が集まっていると仮定し、液体の透過速度、最大流速およびフィルタを導電率のわかっている電解質溶液に完全に浸したときのフィルタ両面間の電気伝導度を測定する。毛細管の半径を  $r$  (cm), 長さを  $l$  (cm) および毛細管の数を  $1 \text{ cm}^2$  当り  $n$  本とすれば、Poiseuille の式を用いて次式により液体の透過量  $q$  ( $\text{cm}^3/\text{s}$ ) を得る。

$$q = n\pi r^4 P / 8 \eta l \quad (1)$$

または

$$nr^4/l = 8 \eta q / \pi P \quad (2)$$

(1)式中の  $P$  はフィルタ表面にかかる液圧  $\text{g}/\text{cm}^2$ ,  $\eta$  は液体の粘性係数  $\text{g}/\text{cm}\cdot\text{s}$  である。

導電率  $K(\text{S}/\text{cm})$  なる電解質溶液にフィルタを浸したときのフィルタ両面の電極間の電気伝導度  $L(S)$  を測定することにより次式が与えられる。

$$L = n\pi r^2 K / l \quad (3)$$

または

$$nr^2/l = L/\pi K \quad (4)$$

毛細管内の流れが層流状態にあるとき、液体が長さ  $l$  を最大流速  $u_0$  (平均流速の 2 倍) で通過する時間を  $T$

秒とすれば次式が与えられる。

$$u_0 = l/T \quad (5)$$

また  $u_0 = 2q/n\pi r^2$  として(5)式を(2)式に代入して、

$$r^2/l^2 = 4\eta/PT \quad (6)$$

(2), (4)および(6)式の右辺は既知数、左辺は未知数である。よって以上 3 種の実験を行ない、(2), (4) および(6)式から  $r$ ,  $l$  および  $n$  を計算することができる。

### 2.2 透過量の測定

実験装置の略図を図 1 に示す。装置の主体はパイレックスガラスで製作されており、可動部はシリコンゴムパイプによって接続されている。また装置は真空系を除き恒温槽内 (30°C 一定) に納められている。実験に使用したフィルタ試料は東洋漉紙機から一般工業用漉紙として市販されている油漉過用のもの 9 種類である。液体は水道水を約 1 時間 70~80°C 加熱し、冷却した後デシケータ内に入れ真空ポンプにて減圧し溶解ガスを排除したものである。

また漉紙を液体に浸漬すると膨潤し透過性が変化するため試料を約 1 時間煮沸しあらかじめ膨潤せしめ、デシケータ内に上述の水をシャーレに取り、その中に試料を浸漬し減圧して保存した。フィルタ面にかかる圧力は  $P = gh(\text{g}/\text{cm}^2)$  として求まる。 $h$  は図 1 に示すように水頭差 (cm) であり、 $g$  は重力の加速度  $980 \text{ cm}/\text{s}^2$  である。水流方向を変えるためコック 1, 4 (フィルタ内を下方向に流下) および 2, 3 (フィルタ内を上方向に上昇) を設けた。

透過量  $q$  ( $\text{cm}^3/\text{s}$ ) を求める実験は水流方向を変えそれ

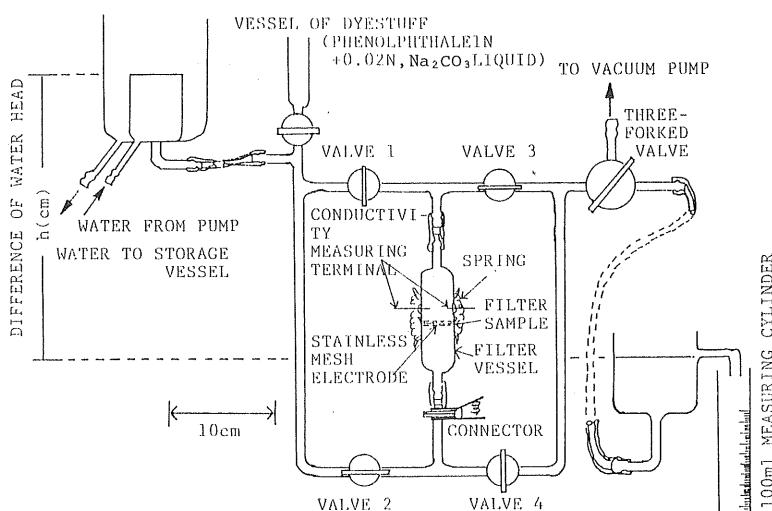


図 1 フィルタ3定数測定装置の略図

Fig. 1 Schematic diagram of apparatus for measurement of the three constants of filter.

それ水頭差を2~50 cm変化させて行ない、そのとき水がメスシリンダに100 ml集められるに必要な時間をストップウォッチで測った。実験結果を図2に示す。同図から知られるように矢印(↑↓)にてフィルタを透過する水流方向を示したが、水流方向を変えても $h$ と $q$ はほぼ誤差の範囲で比例している。このことはすべてのフィルタ試料がDarcy則を満足しているとしてよい<sup>13)</sup>。この実験でとくに注意したことはフィルタ細孔内の空気の影響を除くことである。すなわち、フィルタ容器にフィルタをセットした後、コック3のみ開き、三差コックによりフィルタ容器内を真空状態にする。次にコック3を閉じ、コック1を開きフィルタ容器内を水で満たした後実験を行なった。この操作は以下に述べる実験においてもすべて行なうこととした。

### 2.3 最大流速および電気伝導度の測定

最大流速 $u_0$ の測定は0.02 N(規定濃度)の $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , 1 lに対してフェノールフタレイン4 g+メチルアルコール100 mlにて作成した溶液を8.2 ml混入して赤色液を作り、上部容器に入れる。フィルタ容器内を水が流れている状態にしておき、上部容器下にあるコックを適当に開き赤色液を滴下せしめ、フィルタを通過する時間を目で見て直接測定して求める。赤色液の比重は水とほぼ同じ1.021(30°C)である。

電気伝導度 $L$ の測定は1 NのKCl溶液をフィルタ容器内を1分間程度上述の方法で透過させた後、フィルタ上下に設置してあるステンレス網目電極(直径25.5 mmφ)に交流(60 Hz)0.2~1 Vを印加する、そのときの電流値から $L$ を求めた。KCl溶液の導電率 $K$ は30°Cにて0.11 S/mであり、 $L$ の値は0.001~0.08 Sの範囲であった。

以上の測定により求めたフィルタ3定数を各フィルタについて示したのが表1である。表中の試料番号は市販されている商品番号である。また細孔内壁面積の総和は次式で求められる。

$$\sum S_p = 2\pi r \times l \times n \times 4.9 \quad (\text{cm}^2) \quad (7)$$

定数4.9はフィルタ直径がすべて2.5 cmであるから $\pi \times 1.25^2 = 4.9 \text{ cm}^2$ として求めたフィルタ表面積である。

### 3. 流動帶電量の測定

#### 3.1 実験装置および実験方法

実験に使用した石油は丸善石油㈱から市販されている灯油である。30°Cにおける灯油の導電率および動粘性

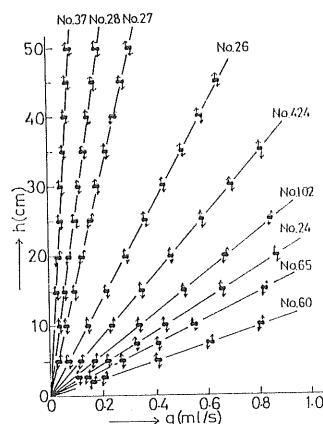


図2 水頭差に対する透過水量の関係

Fig. 2 Permeability water flow rate vs. difference of hydraulic head.

表1 フィルタの3定数

Table 1 Three constant values of filter.

Filter sample No.	Pore nominal radius ( $\mu\text{m}$ )	Pore tortuosity ( $1/d$ )	Porosity ( $n/\text{cm}^2$ )	Porosity* (%)	Filter thickness $d$ (mm)	$\sum S_p$ ( $\text{cm}^2$ )
24	1.9	1.18	$10.6 \times 10^6$	76.2	0.77	564
26	1.1	2.30	5.1	72.3	0.74	280
27	0.85	1.05	35.2	70.0	0.71	688
28	0.63	1.09	125.3	68.8	0.70	255
37	0.45	1.82	153.6	71.1	0.65	2,521
60	9.8	1.27	1.0	80.0	0.55	218
65	3.2	1.34	2.5	78.0	0.53	27
102	1.5	2.12	15.2	77.2	0.31	453
424	3.3	1.54	3.4	76.0	1.05	555

\* Marked data are offered by Toyo Roshi Co. Ltd.

係数の実測値はそれぞれ  $1.3 \text{ pS/m}$  および  $1.5 \text{ cSt}$  である。実験装置全体の略図を図3に示す。同図から知られるように油温を  $30^\circ\text{C}$  一定に保つため、油温測定は測定タンク内にテフロンにて絶縁された水銀温度計を上部から挿入して観察する方法と、予備タンク内に感温部を設置し外部でメーターにより観察する方法とを併用している。また灯油の流动に伴う粘性損失による発熱から灯油の温度上昇がある。そのため水道水による冷却部を予備タンクと除電タンクの2箇所に設置し油温制御ができるようにしている。

図4にフィルタ容器の断面図を示す。フィルタ容器の

概略を説明する。外側円筒はステンレス鋼により左右対称に作られており、図には示していないが左側端にも右側端と同様にバイレックスガラスパイプ接続部と油圧計がねじ込みで取り付けられている。内側円筒はポリプロピレンを加工したもので外側円筒の左右を絶縁するようになっている。内側円筒の中央にフィルタを設置し、フィルタの後流にステンレス網目電極が固定されており上部の同軸コネクタから同軸ケーブルにてエレクトロメータ(Keithley 社製 610 C)に接続されている。二重円筒にした理由はフィルタ設置場所にはほぼ帶電していない(正負等量の電荷が灯油中に存在している状態をいう)灯

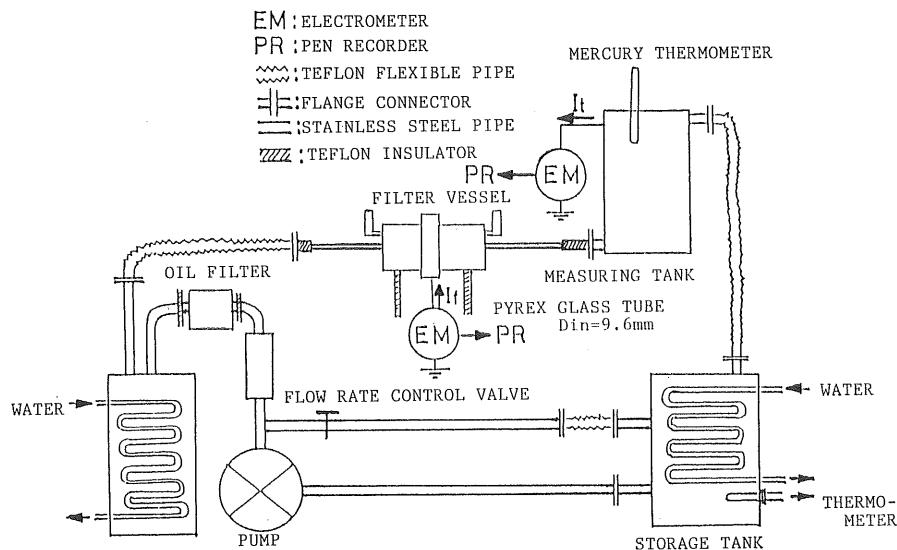


図3 フィルタによる流動帶電特性測定系の略図

Fig. 3 Schematic diagram of experimental system for measurement of streaming electrification character on filter.

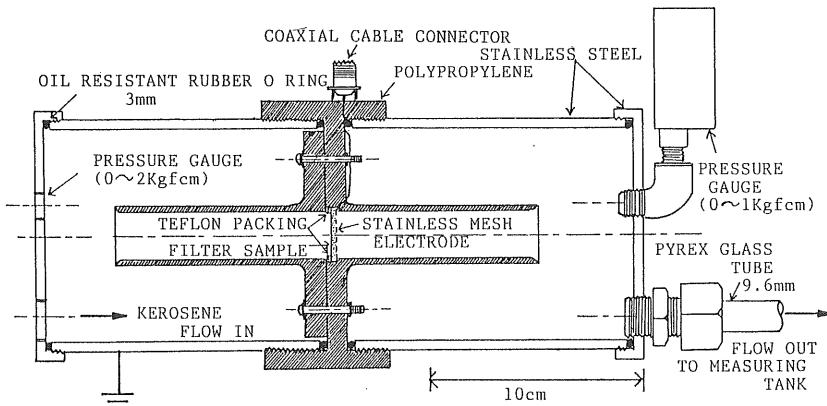


図4 フィルタ容器の透視図

Fig. 4 Sectional view of filter chamber.

油を送るため左側円筒空間での緩和効果（静電的または流体力学的）が期待できることである。すなわち、内側円筒の左入口から右方向へ帶電していない灯油が静圧により送り込まれるものと予想して筆者らが設計、製作した。また、灯油の流量と左右両側端の油圧計の圧力差が常に比例していることを確認しながら実験できるようにしてある。なお、図3に示した除電タンクについても筆者らの経験にもとづき設計、製作したものである。詳しく述べは文献3)または10)を参照されたい。

流動電流（灯油の帶電量を知る一つの要素）の測定はフィルタ容器内のステンレス網目電極から大地に至る  $I_f$  と測定タンクから大地に至る  $I_t$  の値を同時にエレクトロメータにて行なった。 $I_t$  の測定はタケダ理研製 TR 8651 を使用して行なった。両エレクトロメータの指示値は2ペンレコーダ（渡辺測器製サーボコード SR652）を使用して記録された。各流量について各  $I_f$  および  $I_t$  の値は実験終了後記録紙から読み取りデータ用紙にまとめられた。灯油の流量は流量調整バルブを手動により 2~10 l/min の範囲で変化させることができる。流量計は東京流機製ローターフローメータ FLO-PL-4 である。

実験結果の一例を図5に示す。横軸は灯油の流量で縦軸は  $I_f$  と  $I_t$  をそれぞれ平等目盛で示してある。同図から  $I_f$  と  $I_t$  は符号が反対で値がほぼ等しく、電流連続則が成立していることがわかる。すなわち、 $I_f + I_t = 0$  となっている。同様に各フィルタ試料について電流連続則がすべて満足されていた。

### 3.2 実験結果の検討

現在までの流動帶電機構に関する理論的解析の根底をなしているのは界面電気二重層理論である。このことは

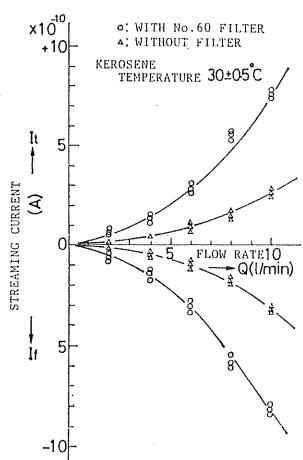


図5 流量に対する流動電流の関係

Fig. 5 An example of character of streaming current against flow rate.

ほとんどの研究者が界面電気二重層理論の応用の範囲を出ていないものと考えられる。すなわち、界面電気二重層理論を石油の流動帶電現象に適用する場合、この理論を本質的に見直す必要のあることを示唆しているものと思われる。また、フィルタを構成している細孔内の流れの状態を定量的に解析し、細孔を形成している固体壁表面へのイオン吸着プロセスを動的に解析する必要があると筆者らは考えている。よって流動帶電現象に寄与する項目として以下の4項目が考えられる。

- 1) ポアソン方程式によって定まる細孔壁方向の電界に依存するイオンの電気伝導による項。
- 2) 細孔内空隙中のイオン密度分布に伴うイオン拡散によって細孔壁へ吸着するイオン伝導による項。
- 3) 石油の導電率が小さいため、イオンが石油とともに帶流で後流に運ばれる項。すなわち、細孔内の石油の流動状態に依存している。均質多孔質フィルタ内の流動状態は平均的には後流へ移動しているが、相当な乱流状態になっていると思われるので石油分子とともに細孔壁にイオンが衝突して細孔壁へ吸着するイオン量も考えなければならないであろう。逆に細孔壁に吸着したイオンが石油分子の細孔壁へ衝突したとき持ち出されてしまう状態も考慮する必要があろう。
- 4) 上述の3項目に関係していると考えられるが、フィルタの場合、単位体積中の液体・固体の接触面積がとくに大きいためフィルタを構成している主材の表面導電率が帶電特性に大きく寄与する<sup>10)</sup>。

上述の1), 2) および 3) 項目により細孔壁に至る電流密度  $J_p$  を表わす式を示す。

$$J_p = J_+ + J_- = \sigma V \phi + D \nabla q - v q \quad (\text{A}/\text{m}^2) \quad (8)$$

ここで  $q = zF(C_+ - C_-)$  とする。 $J_+$ ,  $J_-$  は正、負イオンによる電流密度 ( $\text{A}/\text{m}^2$ ),  $\sigma$  は正、負イオンの移動度を同じとしたときの石油の導電率 ( $\text{S}/\text{m}$ ),  $\phi$  はポアソン則により定まる電位 (V),  $D$  はイオン拡散係数 ( $\text{m}^2/\text{s}$ ),  $z$  は正、負イオンの原子価が等しいとしたときの原子価,  $F$  はファラデー定数 ( $9.65 \times 10^4 \text{ C/mol}$ ),  $C_+$ ,  $C_-$  は正、負イオン密度 ( $\text{mol}/\text{m}^3$ ) および  $v$  は細孔内での灯油の平均流速 ( $\text{m}/\text{s}$ ) 等である。

#### 3.2.1 細孔内壁総面積と流動電流の関係

図6の縦軸の  $I_f$  の値は図5と同様なデータを各フィルタについて取り、フィルタをフィルタ容器にセットしたときの  $I_f$  の値からフィルタをセットしないときの  $I_f$  値を差し引いたものである。また横軸は表1に示した各フィルタの細孔内壁総面積  $\sum S_p$  である。両軸ともそれぞれ対数目盛で示してある。パラメータは灯油の流量である。同図の傾きから  $I_f \propto \sum S_p^{0.4 \sim 1.0}$  の関係が得られる。この関係は今まで定性的に述べられてきた液体・

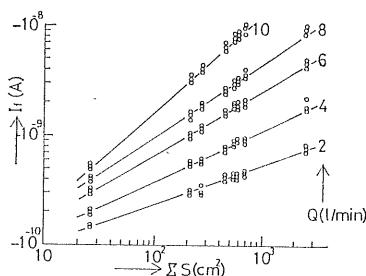
図 6 細孔内壁総面積  $\Sigma S_p$  に対する帶電量

Fig. 6 Streaming electrification rate vs. total area of inner wall of pore  $\Sigma S_p$ .

固体間の接触面積がたいへん大きいことを裏づけるものと考えられる。また流量の増加とともに傾きが大きくなっているのは、フィルタ細孔内に灯油とともに持ち込まれる単位時間当たりの正、負イオン量が増加するためであり、細孔内壁に至る単位時間当たりの負イオン量が流量の増加とともに増加することを意味している。

図 7 に筆者らの考案、製作したフィルタ細孔壁面の見掛けの導電率測定装置により測定した見掛けのフィルタ導電率  $\sigma_f$  (S/m) を示す。横軸の  $W_e$  は上部電極の荷重を g 単位で示している。測定装置および測定方法の詳細については文献 10) を参照されたい。同図で  $\sigma_f$  の値が荷重を増加させても一定値である値を筆者らはフィルタの見掛けの導電率と呼ぶことにする。 $\sigma_f$  の値は  $10^{-10}$  S/m のオーダであり灯油の導電率  $1.3 \times 10^{-12}$  S/m の値と比較したとき、細孔壁面に吸着したイオンはオーミックな電気伝導により大地に至ると考えられる。よって前項 3.2 の 4) 項で述べた吸着イオンの制限はないと思われる。またフィルタの主材がセルロース・エスチルのため水分の吸着が相当あると思われる。このことは細孔壁面導電率に大きく寄与すると考えてよい。赤外線ランプでフィルタ材を加熱したときの蒸発水分率を測定したのでその一例を図 8 に示す。横軸は赤外線ランプをスイッチ on してからの経過時間で、縦軸の  $M(t)$  は水分が蒸発して相対的に試料がどれだけ軽くなったかを示している。時間の経過に対して  $M(t)$  一定の状態が完全乾燥したことを示す。完全乾燥時の蒸発水分率が約 5% というものは文献 10) にて述べたフィルタ材が麻に相当するものである。測定方法の詳細については文献 10) を参考されたい。なお測定に使用した赤外線水分計はケット科学研究所製 FD-1B 型である。

### 3.2.2 流量と細孔壁面電流密度の関係<sup>14)</sup>

前項に述べたように  $\sigma_f$  の値が灯油の導電率  $\sigma$  に比べて 2 衡ほど大きいため、細孔壁へ至った負イオンは大地へオーム則に従って移動すると考えられる。よって(8)

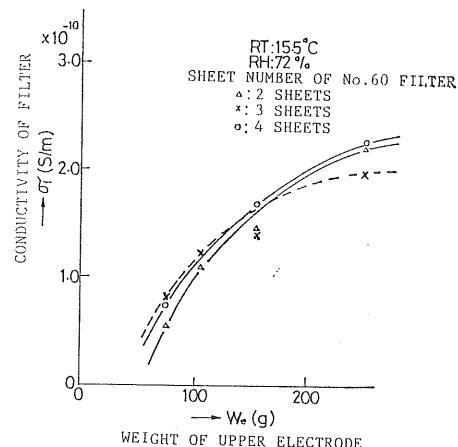
図 7 上部電極荷重  $W_e$  に対するフィルタ導電率  $\sigma_f$ 

Fig. 7 Weight of upper electrode  $W_e$  vs. conductivity of filter  $\sigma_f$ .

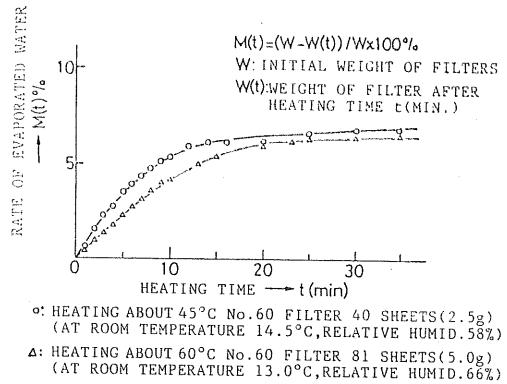


図 8 赤外線ランプによる加熱時間と蒸発水分率

Fig. 8 Heating time by infrared rays lamp vs. evaporating water rate from filter.

式は  $J_p = I_f / \Sigma S_p$  と考えてよいと思われる。

図 9 に  $J_p = I_f / \Sigma S_p$  として求めた細孔壁電流密度を縦軸に、横軸に灯油の流量を示す。同図から知られることは流量の小さい場合と大きい場合にそれぞれ特徴がある。以下にそれぞれの場合について考察する。

(1) 流量の小さい場合、フィルタ内に持ち込まれるイオン量  $C_0 = (C_+ + C_-)$  が各流量により定まるとして仮定する。この場合  $C_0$  の値が小さく、細孔壁面に至るイオン量は(8)式の  $\sigma V \phi + D V q$  に依存する割合が低く、細孔バルク内の灯油の単位体積当り細孔壁面に至るイオン量が限られ、どのフィルタについてもイオン量は一定であると仮定する。よって  $\Sigma S_p$  が大きくなればなるほど  $J_p$  の値は小さくなると考えてはどうか。

(2) 流量が大きい場合、当然単位時間にフィルタ内に

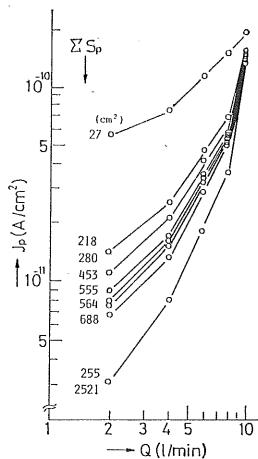
図 9 流量変化に対する細孔壁面電流密度  $J_p$  変化の関係

Fig. 9 Variation of flowrate vs. the current density on pore wall surface  $J_p$ .

持ち込まれる  $C_0$  が大きくなり  $\sigma \nabla \psi + D \nabla q$  の項が大きくなるようになる。よって細孔壁面に至るイオン量は一様に大きくなる。しかし、図 2において示した透過流量の大きい No. 60, No. 65 フィルタについては(8)式の  $-vq$  の項の寄与が大きくなり細孔壁面に至るイオン量を制限することになる。そのため  $\Sigma S_p$  に関係なく各フィルタとも  $J_p$  は一定値に近づくものと考えられる。

筆者らは灯油の帶電に寄与する電荷担体をイオンとして述べてきた。石油など絶縁液体中の電気伝導現象におけるイオン伝導に関して Walden 則がある<sup>15)</sup>。それは次式に示されるように電荷の移動度  $\mu$  ( $m^2/V \cdot s$ ) と液体の粘度  $\eta$  (ポアズ) の積が一定であることから証明される。

$$\mu \cdot \eta = \text{const.} \quad (9)$$

図 10 にその関係を示す。縦軸は灯油の導電率  $\sigma$  と動粘性係数  $\nu$  を対数目盛で示してある。横軸は絶対温度の逆数を平等目盛で示す。文献 16) で述べたように筆者らは図 10 の関係が Walden 則を与えるものと考えている。すなわち、この温度範囲での灯油の密度変化は下 4 術目が変化する程度で  $\nu$  の変化は  $\eta$  の変化と同様に考えてよい。また、導電率の測定は平行平板電極に直流電圧を印加したとき流れる電流値が一定値になったときの電流値から求めた。このことは各温度においてイオンの移動度のみ変化したものと考えられる。詳しい測定法は紙面の都合上述べられないが文献 16) を参照されたい。

### 3.2.3 透過率と $I_t$ の関係

ここで透過率  $\beta$  といいうのは図 2 における単位水頭差当りの透過流量をいうことにする。すなわち  $\beta = q/h$  で単位としては  $\text{ml}/\text{cm} \cdot \text{s}$  を使用する。文献 10) に述べた

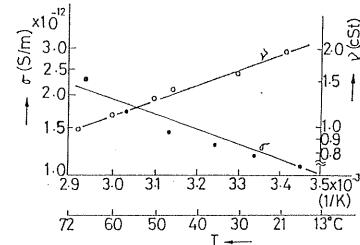


図 10 絶対温度の逆数に対する灯油の導電率と動粘性係数の関係

Fig. 10 Reciprocal of absolute temperature vs. conductivity and kinematic viscosity of kerosene.

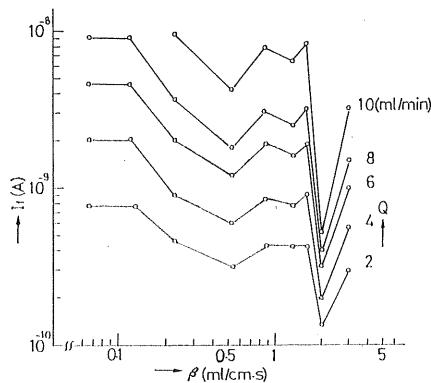


図 11 各フィルタの透過率に対する帯電量の関係

Fig. 11 Hydraulic permeability of each filter vs. streaming electrification rate of kerosene.

比透過率とは測定方法が違うため同等に評価できないが、物理的には同じ意味を表わしていると筆者らは考えている。また文献 10) で述べたフィルタ材は各種布であり不均質多孔質である。しかし比透過率に対する帯電量はポリエチレンを除いて他の 5 種類の布について  $I_t = a \exp b(1 - \beta)$  の関係を満足していた。ここで  $a, b$  は定数である。ポリエチレンの場合導電率が他の布材に比べて相当小さく  $0.56 \text{ pS/m}$  であり、実験に使用した溶剤の導電率に比べて 3 術ほど小さい。そのためポリエチレン繊維表面に至るイオン量が制限されるものと考えている。今回のフィルタ材については上述のような現象は考えにくい。

図 11 によれば透過率の増加に伴って  $I_t$  は減少していく傾向にあるが、ある一定の法則により説明することは困難のようである。このことは細孔内の灯油の流れの状態が布の場合と相当異なりよりいっそう均一な乱流状態にあるため細孔壁面へ至るイオン量は透過率より細孔壁面積に対する依存度がより大きいと考えてはどうか。

表 2 各フィルタ内の見掛けの平均流速と細孔半径

Table 2 Nominal mean velocity and pore radius in each filter sample.

	Filter No.								
	60	28	24	424	102	37	27	65	26
v (m/s)	0.22	0.43	0.57	0.60	0.62	0.70	0.86	0.90	3.8
r ( $\mu\text{m}$ )	9.8	0.63	1.9	3.3	1.5	0.45	0.85	3.2	1.1

### 3.2.4 $v\tau/r$ と $J_p$ との関係

前項の関係をもう少し詳しく考察してみる。Schön の式で用いられる  $\exp(-z/v\tau)$  のファクタはパイプ中流れにおいてよく使用され多くの研究者により議論されてきた。しかし、フィルタ内の中れにおいては  $\exp(v\tau/r)$  のファクタを用いて考察したほうが理にかなっているようである。Gavis らも論文にて詳しく述べている<sup>5)</sup>。

いま、フィルタ内での灯油の平均流速を次式から求めると。

$$v = Q / (\pi r^2 \times \text{多孔率} \times \text{フィルタ表面積}) \quad (\text{m/s}) \quad (10)$$

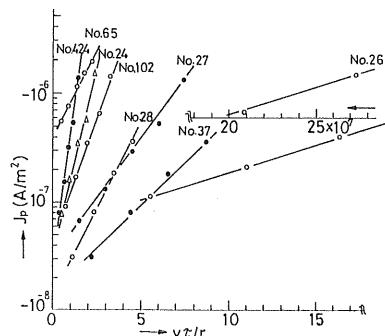
ここで  $Q$  は灯油の流量そして  $r$  は細孔半径である。 $Q=2l/\text{min}$  のときの各フィルタ内平均流速と細孔半径を表 2 に示す。

また、灯油の時定数  $\tau$  (sec) は  $30^\circ\text{C}$  のときの灯油の静止導電率  $\sigma = 1.3 \times 10^{-12} \text{ S/m}$  と比誘電率  $\epsilon_s = 2.3$  の値から求める。すなわち  $\tau = \epsilon_0 \epsilon_s / \sigma = 15.7 \text{ s}$  である。

図 12 に No. 60 フィルタを除く各フィルタをパラメータに  $v\tau/r$  に対する  $J_p$  の関係を片対数グラフに示す。No. 60 フィルタの  $v\tau/r$  の値は No. 424 フィルタよりもう 1 桁小さい値のためグラフ上に表わせなかつたが、両対数グラフに描いた曲線からは他フィルタ試料と同様  $\exp(v\tau/r)$  に比例して  $J_p$  が定まっている。図 12 において No. 26 フィルタのみ変則的な書き方になっているが直線の傾きを知るには不都合ではないと考える。 $v\tau/r$  が大きくなるのは  $v$  が大きくなることと相対的に  $r$  が小さくなることである。各フィルタの傾きを比較すると表 2 に示す流速の遅い試料ほど傾きが大きくなっている。このことは(8)式の  $-vq$  の項が  $J_p$  に与える影響を示しており、細孔壁へ至るイオン量に灯油の平均流速が細孔半径が小さくなる以上に相対的に大きく寄与しているものと考えてはどうか。このように考えると図 9 の関係もより理解できると思われる。

### 4. まとめ

市販の油濾過用フィルタの流动帶電機構について実験を主体に述べてきた。今回の実験から得られた結果は次のようである。

図 12  $v\tau/r$  に対する  $J_p$  の関係Fig. 12  $v\tau/r$  vs.  $J_p$ .

- (1) フィルタ 3 定数から求めたフィルタ細孔壁総面積と帶電量との間に  $I_f \propto \sum S_p^{0.4 \sim 1.0}$  の関係がある。
- (2) 細孔壁面電流密度  $J_p$  と灯油の流量  $Q$  との関係については流量が増加するとどのフィルタ試料においても一定の  $J_p$  値に近づく。

- (3) 各フィルタ試料の透過率  $\beta$  と帶電量  $I_f$  との間に顕著な関係は得られなかったが、全般的に  $\beta$  が増加した場合  $I_f$  は減少する傾向にある。

- (4)  $v\tau/r$  に対する  $J_p$  の関係から  $J_p = \sigma V \phi + D \nabla q - vq$  の  $-vq$  の項の  $J_p$  に与える影響の大きいことが理解できた。

今後セルロース・エステルの化学組成と吸着イオンの関係の究明、石油の導電率を変化させたときのフィルタによる帶電機構の研究およびフィルタによる帶電機構の理論的解析等を行なっていく必要がある。

最後に常日ごろ適切な助言を賜わりました愛知工業大学伊藤正一教授に深謝申し上げます。また、実験装置の一部は三菱石油株式会社からのご援助によるものです。ここに併せてお礼申し上げます。フィルタ容器の製作に当り適切な助言をいただきました本学電気系工作室技官原武志氏に感謝申し上げます。実験装置の組立ておよび実験に協力していただきました本学卒業研究生岡田英嗣氏（現在中部電力株式会社勤務）に感謝いたします。

## 参考文献

- 1) C. Bruinzel: J. Inst. Pet., **49** (1963) 125
- 2) H. Krämer und G. Schön: Teil II, PTB-Ber., Februar (1976)
- 3) 北村尚武, 上田 実: 電気学会論文誌B, **98** (1978) 571
- 4) A. Klinkenberg and J.L. von der Minne: *Electrostatic in the Petroleum Industry*, p. 156, 159, Elsevier, Amsterdam (1958)
- 5) J. Gavis and J.P. Wagner: Chem. Eng. Sci., **23** (1968) 381
- 6) J.L. Lauer and P.G. Antal: J. Colloid Interface Sci., **32** (1970) 407
- 7) P.W. Huber and A.A. Sonin: J. Colloid Interface Sci., **52** (1975) 415
- 8) 梅津 勇, 浅野和俊: 静電気学会講演論文集 '81, p. 107
- 9) 北村尚武, 上田 実: 静電気学会講演論文集 '81, p. 110 (1981)
- 10) 北村尚武, 上田 実: 電気学会論文誌B, **102** (1982) 461
- 11) 河上益夫: 日本化学会誌, 第 53 帚 (1932) 1085
- 12) M.R.I. Wyllie and M.B. Spanglen: Bull. Am. Assoc. Pet. Geol., **36** (1952) 359
- 13) バーナード・ル・メオーテ: 応用流体力学入門, 堀川清司訳, p. 89, 東京大学出版会 (1979)
- 14) 北村尚武, 上田 実: 電気学会全国大会講演論文集, p. 602 (1982)
- 15) 電気学会編: 放電ハンドブック, p. 537, オーム社 (1974)
- 16) 北村尚武, 上田 実: 静電気学会誌, **2** (1978) 258; 北村尚武, 上田 実: 静電気学会誌, **5** (1981) 114