

論 文

緩和パイプによる流動帯電石油中の静電荷緩和特性

緩和パイプの開口角と油温の影響

北村 尚武*, 上田 実*

(1977年11月28日受理)

Static Charge Diminution in a Relaxation Pipe

Influence of Enlargement Angle of Relaxation Pipe and Oil Temperature

N. KITAMURA* and M. UEDA*

(Received November 28, 1977)

The static charge in petroleum generated in transmission pipe is very hazardous and has to be reduced before the oil is poured into a storage tank. It is known that a relaxation pipe is effective for this purpose. In our experimental set-up, a filter to generate static charge was set just before a relaxation pipe, and streaming current at the head of the pipe (I_r), current from the pipe to earth (I_e) and current from the receiving tank to earth (I_t) (nearly equal to the streaming current at the end of the pipe) were measured in a steady state. The effect of the pipe was evaluated by the relaxation factor ($\alpha = |I_e/I_r| \times 100\%$). Enlargement angles used in this experiment were 30°, 60°, 120° and 180°. Oil temperatures used in this experiment were varied from 20 to 30°C. For kerosene, the results obtained were as follows. (1) α increased when the enlargement angle decreased from 180° to 30° at the same pipe length and the same velocity. (2) From the measured value of α at 180° the value of α at 30° can be estimated using the dependence upon the enlargement loss of head (Δh), and estimated value agrees with the experimental value at 30°. (3) α decreased when the oil temperature increased from 20°C to 30°C at the same pipe length, enlargement angle and velocity of oil. (4) When the temperature varied from 20°C to 30°C and oil viscosity varied, the influence of dynamical change of fluid on the value of α was larger than the change of electrical conductivity.

1. はじめに

絶縁油をパイプラインで輸送する工程は石油工業に限らず多くの工業分野(たとえば, 変圧器の冷却としてトランス油の送油, 航空機への燃料補給等)において重要な工程である。その際, 流動帯電による障災害は無視できない。ここで, 現在までに輸送パイプ内で静電荷を除去方法として避雷針の原理を応用し I. Ginburgh¹⁾ は "Static Charge Reducer" および R.B. Jacobs²⁾ は

"Neutralizer" とそれぞれ名づけたパイプを用いて実験を行なっている。しかし, 彼らは流体力学的観点において考察していない。また H. Krämer ら³⁾ は実規模パイプラインにおいて受けタンクに至る各パイプ区間での静電荷の緩和特性を測定している。

筆者らは以前から石油輸送時の静電気災害防止の手段として, 緩和パイプ (relaxation pipe, 以後本論文では RP と略記) を受けタンク手前に設置し受けタンク内に輸送される石油中の静電荷を減少させ, 安全な作業(検尺およびサンプリング等)ができることを目的として研究してきた^{4,5)}。

現在までに明らかになったことを要約すると次の4項目である。

* 名古屋大学工学部電気工学教室 (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

- (1) RP 管壁面の電流密度変化が渦度、渦拡散係数および拡大損失水頭等の流体力学的諸因子に依存している。
- (2) RP 内で静電荷が緩和される割合 (緩和率 α) は管路長の増加とともに増加し飽和する傾向にある。また、管径の増加に対して比例的に増加する。
- (3) 石油の粘性の違いが緩和特性に与える影響が大きい。
- (4) たんに緩和パイプ内径を大きくし、石油の緩和パイプ内平均流速を減じるのみで、石油中の静電荷を 100% 緩和できる実験結果を得た。

今回は上記(1)および(3)の項目についてさらに詳しい実験を行なった。すなわち項目(1)については、RP 内の石油の流動状態を制御する目的で RP 入口および出口の開口角を種々変えたとき、拡大損失係数と緩和率の関係を求めた。次に項目(3)については油温を変化したときの石油の動粘性係数および導電率の変化が緩和特性に与える影響について実験を主体に調べたので報告する。

2. 実験装置および実験方法

2.1 実験装置

実験系の概略を図1に示す。また供試 RP の断面図を図2に示す (以後本論文では図に示すように RP 内径を D 、管路長を L および開口角の入口角度を θ 、出口角度を θ' で表示する)。

- | | |
|--------------|--------------------|
| RP: 供試緩和パイプ | I_f : フィルタ容器接地電流 |
| FV: フィルタ容器 | I_r : 緩和パイプ接地電流 |
| EM: エレクトロメータ | I_t : 受けタンク接地電流 |
| PR: ペンレコーダ | |

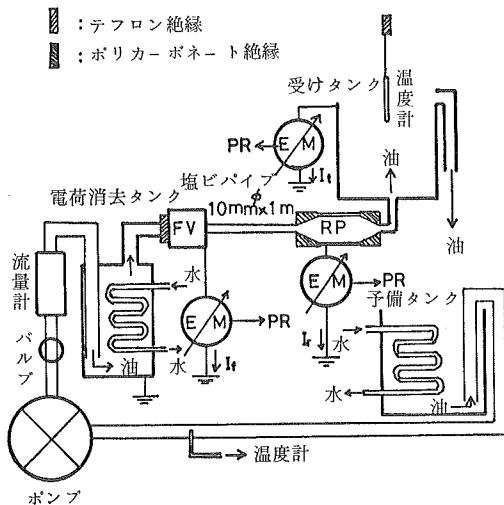


図1 実験装置の概略図
Fig. 1 Schematic diagram of the experimental system.

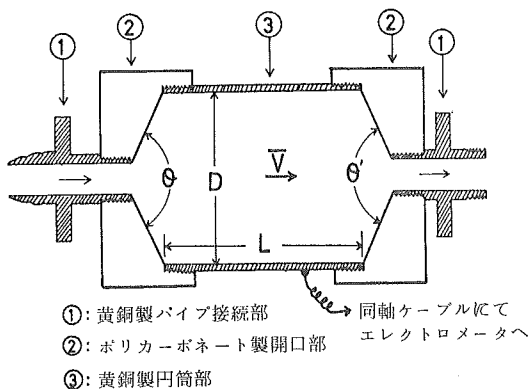


図2 RP の断面図
Fig. 2 Sectional diagram of a relaxation pipe used for the experiment.

本実験装置の特徴を以下に述べる。

- (1) 電荷消去タンクをフィルタ容器手前に設置し、静電荷発生はフィルタ部のみとした。電荷消去タンクは黄銅製で $180\text{ mm}\phi \times 0.5\text{ m}$ の円筒で、石油のタンク内部最大上昇速度 ($1,600$ リッター/時 (以後 [l/h] で表示) のとき) 0.018 m/s に設定し、十分除電されるよう考慮した。
- (2) 油温制御の冷却部を予備タンクと電荷消去タンクの2か所に設けた。油温測定は予備タンクからポンプにいたる内径 38 mm の耐油ゴム製ホース内に感温部を置き外部でメータにより見る方法と受けタンク ($300\text{ mm}\phi \times 0.5\text{ m}$ ステンレス製) 上部にテフロンで絶縁した水銀温度計を受けタンク中に吊るして見る方法と2点測定で行なった。
- (3) データはすべてペンレコーダの記録紙から読み取った。この理由は図1に示した I_f , I_r および I_t が定常値になっていることを確認するためと同時刻にそれら接地電流を読む必要があるためである。
- (4) 約 80 l の試料油を最大 $1,600\text{ l/h}$ の流量で輸送するため大型ポンプ (寺田ポンプ製セルフラポンプ RH-1 型, 水量 $0.12\text{ m}^3/\text{min}$ のとき揚程 36 m) を使用した。流量計は東京流機製のプロト式で目盛は軽油、燈油用 (油温 30°C) に注文作成した。

供試 RP は図2のような形状をしており、本実験には導電部は D が 58.7 および 82 mm で L が $0.1, 0.2, 0.3$ および 0.4 m の黄銅製円筒部で製作され、拡大部および収縮部は開口角 θ および θ' がそれぞれ $30^\circ, 60^\circ, 120^\circ$ および 180° をもつようポリカーボネート材料を加工し、内部が見えるよう透明に磨かれており、導電性が無視できるようにし流れの制御のみに重点をおいた。

使用したエレクトロメータはタケダ研製 TR-8651,

TR-8641 およびケイスレー社製 610C である。またペンレコーダは渡辺測器製 SR652 2 ペンサーボコーダである。

2.2 実験方法

実験にはいる前に試料油（丸善石油(株)製燈油）の諸特性を測定した。表1は各特性の平均値を示した。測定方法を以下に述べる。

- (1) 抵抗率測定：抵抗測定容器は銅の円板電極（直径 40 mm）を平行にギャップ長 1 mm に設定し、静電シールド箱のなかに置く。測定電圧は電池から直流電圧で 100 ないし 500 V を印加する。そのときの漏れ電流をエレクトロメータで測定し、レコーダの指示が定常値になった値を読み、電圧に対する漏れ電流の値をグラフ上に描きその直線の傾きから抵抗を求め、次に電極面積/ギャップ長=1.26 m を乗じて抵抗率を $\Omega \cdot m$ の値で求めた。
- (2) 動粘性係数測定：キャノンフェンスケ細管粘度計で測定を行なった。単位はセンチストークス（略して cSt と表示）で求めた。
- (3) 含水量測定：カールフィッシャー水分滴定器で測定し、含水量を ppm の単位で求めた。
- (4) 比重測定：含水量測定に必要なため石油比重測定用の比重計で測定した。

以上4項目の測定を行なったのち、実験にはいる。まず RP の導電部を金属磨きでいいいに磨いたあと、アセトンで十分洗浄する。次に拡大部および収縮部を導電部のねじに合わせ、ねじ込んで接合する。その際、燈油が漏れないように、あらかじめテフロンシールドテープを黄銅円筒のねじ上に巻いておき、ポリカーボネート製開口部をねじ込む。

RP をテフロンにて絶縁した受けタンク底部の所定の台の上に設置する。予備タンクに約 80 l の燈油を注入し、ポンプを駆動し図1の流動系を、 I_f , I_r , I_b および油温がそれぞれ定常値になるまで、循環させたあと測定を開始した。まず油の流量を流量計で観察し、200 l/h 間隔で 1,600 l/h までバルブ調節で流量を変化させたとき、各 RP について I_f , I_r および I_b の変化をペンレコーダ

表1 燈油の諸特性 (油温 28°C)
Table 1 Properties of kerosene

導電率	[pS/m]	2.7
比誘電率		2.3
動粘性係数	[cSt]	1.45
含水量	[ppm]	145
比重		0.79

に記録した。どの RP の場合も 200~1,600 l/h の範囲で測定した理由は、すべての RP 内に持ち込まれる電荷量 (I_b) の値がほぼ一定の範囲内 (I_b の値は常に $2.5 \sim 76.0 \times 10^{-9} A$ の範囲であった) に納め、よい再現性を得るためである。なお最大流量は受けタンクの容量で制限される。また RP 手前の塩ビパイプ設置の I_f に与える影響は、フィルタ容器にフィルタを入れないで $I_f + I_b$ の値を測定した場合フィルタをセットしたときの $I_f + I_b$ の値より 2 桁以上小さかったことと以下に述べるよう $I_f + I_b + I_b = 0$ の電流連続則が成立つことにより、無視してよいと考えている。

温度特性を測定する方法はポンプおよびパイプ内での燈油の粘性損失による発熱を利用して水道水の蛇口を手動で制御し、水道水の水量変化により冷却することにより一定油温（変動 $\pm 0.5^\circ C$ 以内）にした。しかし広範囲の油温変化が得られない欠点がある。今回の油温の測定範囲は $20 \sim 30^\circ C$ であった。

ポンプ駆動輸送方式を採用したのは作業現場に近い方法で実験した場合、より信頼性のあるデータを得ることができるためである。ポンプ駆動部以外は実験装置全体を黄銅製金網で囲い静電シールドを施してある。

3. 実験結果

3.1 RP 内平均流速と緩和率の関係

RP の寸法の極端な2例を示す。図3と図4は RP 内

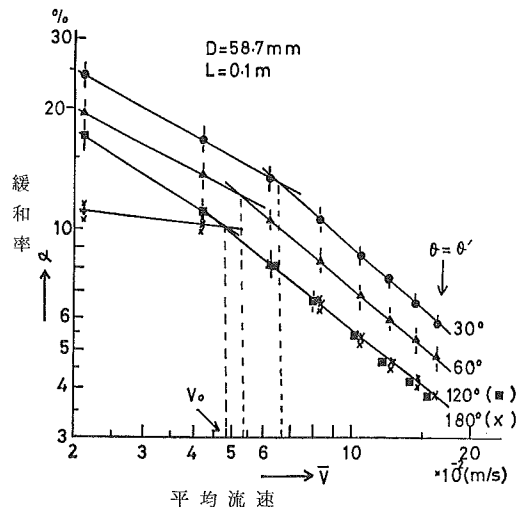


図3 RP 内平均流速 (\bar{V}) に対する緩和特性 (開口角 θ の影響, RP 寸法, $D=58.1 \text{ mm}$, $L=0.1 \text{ m}$)

Fig. 3 Characteristic of relaxation rate against mean velocity of kerosene (\bar{V}) in RP ($D=58.7 \text{ mm}$, $L=0.1 \text{ m}$) with variation of enlargement angle θ .

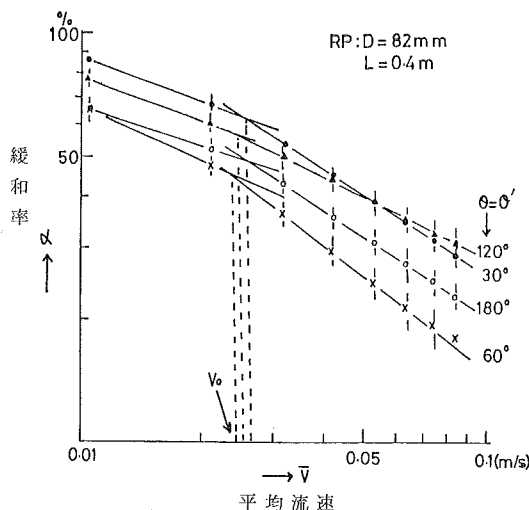


図4 RP内平均流速(\bar{V})に対する緩和特性(開口角 θ の影響, RP寸法, $D=82\text{ mm}$, $L=0.4\text{ m}$)
 Fig. 4 Characteristic of relaxation rate against mean velocity of kerosene (\bar{V}) in RP ($D=82\text{ mm}$, $L=0.4\text{ m}$) with variation of enlargement angle θ .

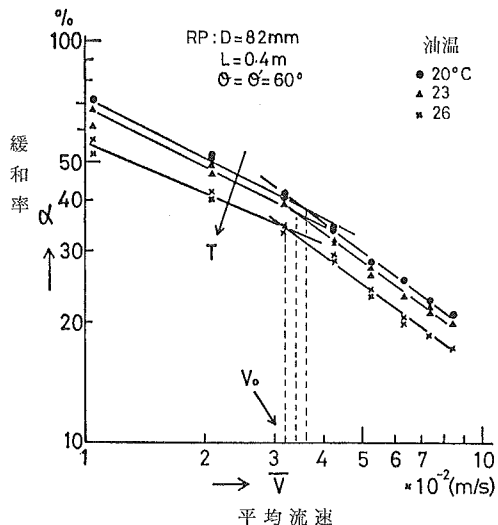


図5 RP内平均流速(\bar{V})に対する緩和特性(油温の影響, RP寸法, $D=82\text{ mm}$, $L=0.4\text{ m}$, $\theta=60^\circ$)
 Fig. 5 Characteristic of relaxation rate α against mean velocity of kerosene (\bar{V}) in RP ($D=82\text{ mm}$, $L=0.4\text{ m}$ and $\theta=60^\circ$) with variation of oil temperature.

で電荷の緩和される割合(筆者らのいう緩和率 $\alpha = |I_r / I_t| \times 100\%$ で表示する)を縦軸に、油の流量をRP断面積で割って求めたRP内平均流速(以後 \bar{V} で表示)を横軸に両対数目盛で示し、パラメータは開口角(以後 θ , θ' で表示)である。なお全測定中、油温は $28 \pm 0.5^\circ\text{C}$ に制御されている。ある流速 V_0 において α の値に変化が見られる。 V_0 については文献⁴⁾において流体力学的諸因子によって定まることを証明した。 α と θ , θ' および L との関係は後述の4.2の項で述べる。ただし、 I_t , I_r および I_b と \bar{V} の関係のグラフは紙面のつごうで省略するが、 $I_t + I_r + I_b = 0$ の電流連続則が常に成り立っている。しかし、細かい数値では $|I_t| \geq |I_r + I_b|$ になっている。その理由は受けタンク内で電荷が全部緩和されずに油とともに受けタンクから予備タンク中に至るものと考えている。燈油は負に帯電しており I_t は正で、 I_r および I_b は負の電流を示した。使用したフィルタはトキコ製品HG-17タイプオイルフィルタであり前述の帯電極性は燈油とフィルタ材によって定まるものと考えている。

3.2 油温の変化に対する緩和率の変化

図5にはパラメータを油温に取り、図4と同じく \bar{V} 変化に対する α の変化を両対数目盛で示した。RP: $58.7\text{ mm}\phi \times 0.4\text{ m}$, $\theta = \theta' = 30^\circ$ について同様な実験を行なったが傾向はまったく同じなので図は省略する。図5から油温上昇により緩和率は下がる傾向がわかる。 V_0 の値も油温が上昇すると \bar{V} の小さい方向に移動する。詳しく

くは4.3項で述べる。

4. 実験結果の検討

4.1 RP管壁面電流密度と θ の関係

筆者らは文献⁴⁾において G. Schön らの流動電流(I_s)を表わす式(1)のなかで用いられている i_a (管壁から油中へ向かう電流密度、(1)'式にて計算した)の値と(2)式から求めた実測管壁電流密度 i_w との比較をした。ここで(1)'式は(1)式中の I_s を I_t , I_0 を I_r および $I_r = -(I_t - I_r)$ とし、 $\alpha = |I_r / I_t|$ とおき、(1)式を変形すると求まる*1。

$$I_s = \pi D \bar{V} \tau i_a (1 - e^{-L/\bar{V}\tau}) + I_0 e^{-L/\bar{V}\tau} \quad (1)$$

$$i_a = I_r \{1 - \alpha / (1 - e^{-L/\bar{V}\tau})\} / \pi D \bar{V} \tau \quad (1)'$$

ここで

D : 管内径 [m]

\bar{V} : 管内平均流速 [m/s]

τ : 油の電気的時定数 [s]

i_a : 電気2重層形成時に壁面から油中に向かう発生電流密度 [A/m²]

I_0 : 管にはいる前にすでに発生している流動電流 (I_r に相当) [A]

L : 管路長 [m]

α : 緩和率 ≤ 1

*1 (1)'式中の α の値は%で表わされていないので注意する必要がある。

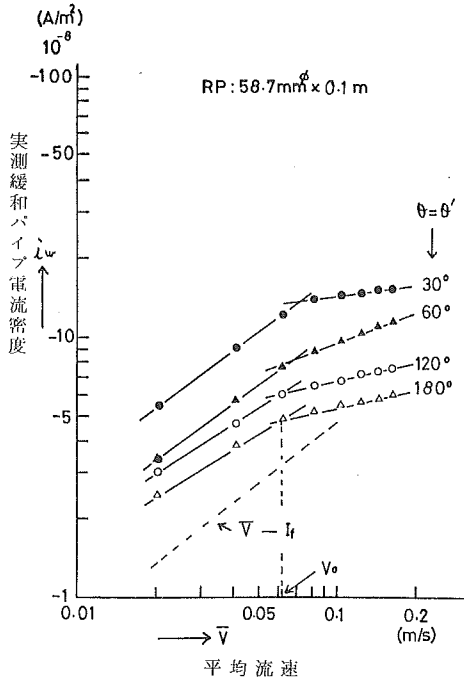


図6 PP内平均流速 \bar{V} に対する実測 RP 壁面電流密度 i_w , θ の影響
 Fig. 6 Relation of measured current density on RP's wall i_w against \bar{V} with variation of θ .

$$i_w = I_r / S \quad [\text{A/m}^2] \quad (2)$$

ここで

S : RP 導体部内壁総面積 $[\text{m}^2]$

文献⁴⁾で述べたように、 i_a と平均流速の関係は流体の流れに拡大部^{*2}の渦の発生および淀みが強く働いており、 i_a と i_w の値の傾向に差が表われるものと考察した。本論文では(2)式の i_w (管壁方向電界に依存して定まる)を用いて検討する。 i_w を計算した結果の一例を図6に示す。パラメータは θ で示した。 i_w は次の(3)式のイオン伝導式によって与えられるものとする。

$$i = \sum e_1 n_1 \mu_1 E = \sigma E \quad [\text{A/m}^2] \quad (3)$$

ここで

- e_1 : イオンの電気量 $[\text{C}]$
- n_1 : イオン数密度 $[\text{個}/\text{m}^3]$
- μ_1 : イオン移動度 $[\text{m}^2/\text{V}\cdot\text{s}]$
- E : 電界 $[\text{V}/\text{m}]$
- σ : 導電率 $[\text{S}/\text{m}]$

(3)式の E を管壁方向電界と考えるとポアソン式により電荷密度に依存して定まる。いま RP 内への持込み電

荷量は I_r によって定まると考えられるので、図6中の破線で示した $V-I_r$ の傾きと比較してみる。 $\theta=30^\circ$ (今回の実験はすべて $\theta=\theta'$ で行なっていることをあらかじめ断っておく) の場合はよく合っているようである。しかし θ が増加すると傾きが破線より小さくなっていく傾向にあり、 i_w の値も小さくなっていく。また、 V_0 以上の流速については θ によらず渦および剝離の発生が多くなり管壁方向電界強度による電荷のドリフト量が減少する傾向を示すものと思われる。管路長が長くなると θ に対する依存度が一様ではなくなる。これはある距離(助走距離)^{*3}以上流体が管入口から進むと一様な流速分布になるためと考えられている。しかし、計算するとかなり大きな助走距離になるため定性的には理解できるが定量的にはレーザ等を用いて流速分布を実測しないと結論はでない。

4.2 緩和率に与える θ の影響

θ に対する緩和率 α の変化を図7(a), (b)および図8(a), (b)にパラメータを流量で示した。両図(a)と(b)は管路長の違いを示している。 α の変化は θ に相当依存するものと当初予想したが管路長により α の傾向は相当違っていた。まず図7(a)は θ の増加とともに α が減少していく傾向にある。この傾向は当初予想していた。しかし図7(b)は θ に関係なく α はほぼ一定の値を示している。この理由は4.1項で述べたように管壁方向への電界による電荷のドリフト量が L の長い場合、 θ に依存せず一樣になるものと考えられる。しかし図8(a), (b)は様子が異なり(a)図は $\theta=60^\circ$ および 120° 付近で α の値は逆に大きくなる。この傾向は $L=0.2\text{m}$ の場合も同様であった。(b)図は θ に依存しているようである。この傾向は $L=0.3\text{m}$ の場合も同様であった(このような傾向を当初予想していた)。

いま、Gibson ら⁷⁾のいう細い管から太い管に流体が流入したときの拡大損失係数(実験値)について(4)式により考察する。

$$\Delta h = (\gamma \bar{V}_2^2 / 2g) \times (A_2 / A_1 - 1)^2 \quad (4)$$

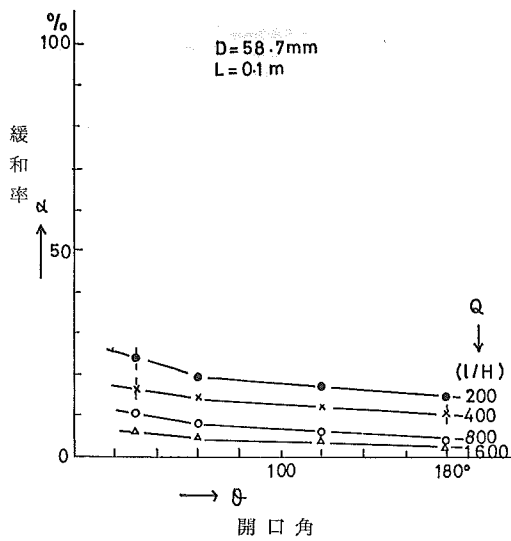
ここで

- Δh : 拡大損失水頭 $[\text{m}]$
- γ : 拡大損失係数 [無名数]
- \bar{V}_2 : 太い管内平均流速 $[\text{m}/\text{s}]$
- A_1, A_2 : それぞれ細い管と太い管の断面積 $[\text{m}^2]$
- g : 動力の加速度 $[\text{m}^2/\text{s}^2]$

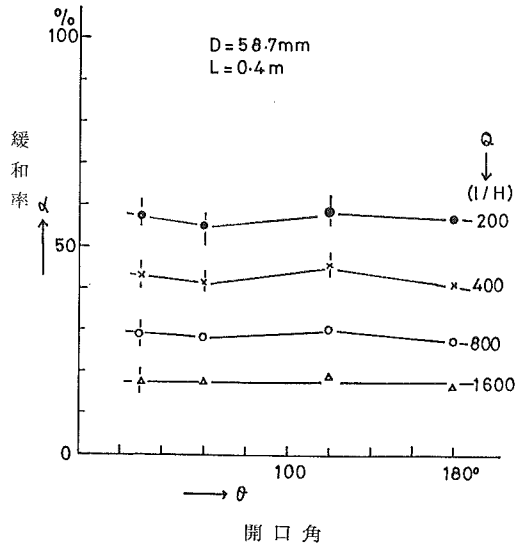
(4)式によれば Δh は γ に依存している。図9に θ に対する γ の変化を示す。液体は水を使用している。仮に図

*2 文献⁴⁾で実験に使用した RP はすべて開口角が 180° のもので、RP 全体(開口部、円管部ともに)を黄銅製の導体部で製作した。

*3 助走距離 L_0 は層流で $L_0 = 0.13 r Re$, 乱流は $L_0 = (50 \sim 80) r$ で与えられる⁶⁾。 r はパイプ半径を示す。



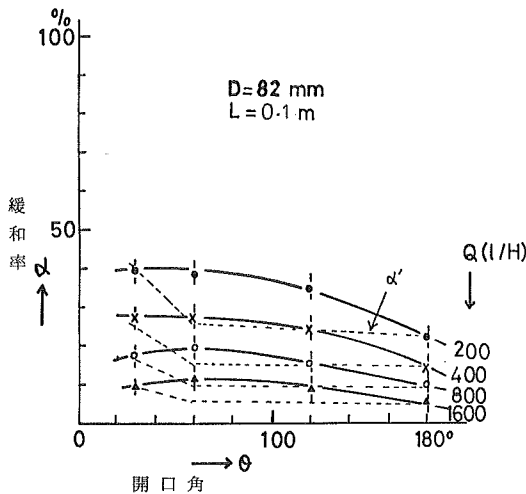
(a) RP size, $D=58.7\text{ mm}$, $L=0.1\text{ m}$, $S_2/S_1=9.8$.



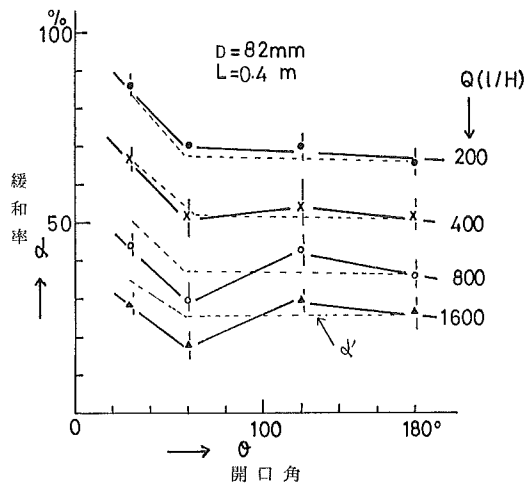
(b) RP size, $D=58.7\text{ mm}$, $L=0.4\text{ m}$, $S_2/S_1=9.8$.

図7 開口角 θ に対する緩和率 α 特性 (流量変化のとき)

Fig. 7 Characteristic of relaxation rate α against enlargement angle θ with variation of flow rate Q of kerosene.



(a) RP size, $D=82\text{ mm}$, $L=0.1\text{ m}$, $S_2/S_1=34.3$.



(b) RP size, $D=82\text{ mm}$, $L=0.4\text{ m}$, $S_2/S_1=34.3$.

図8 開口角 θ に対する緩和率 α 特性 (流量変化のとき)

Fig. 8 Characteristic of relaxation rate α against enlargement angle θ with variation of flow rate Q of kerosene. Value of α' is roughly estimated from value of α at coefficient of enlargement loss.

9の $S_2/S_1=9$ の場合の γ の値により考察してみる。 $\theta=180^\circ$ から 80° 付近までは約 1.04 で $\theta=60^\circ$ から 30° になると γ は 1.02 および 0.62 と下がってくる。 α' を (5) 式のようにして求めてみる。

$$\alpha' = \alpha_{180^\circ} \cdot \gamma_{180^\circ} / \gamma_\theta \quad (5)$$

すなわち $\theta=180^\circ$ のときの拡大損失が各 θ のときの流れの乱れにより緩和される電荷の割合をいかに変化さ

せるかをみた。図8(a)および(b)に破線で示したものが、 γ が変化したとき各 θ で管内の流体の乱れが減少し電荷の管壁方向ドリフトが減少せずに、 α' の値が θ の減少につれて増加している様子を示した。図8(b)の α は α' の傾向にかなりよい一致を見るが同(a)図では 60° および 120° 付近で合わない。このことは水と油の比重および粘性の相違によるものと考えられないだろう

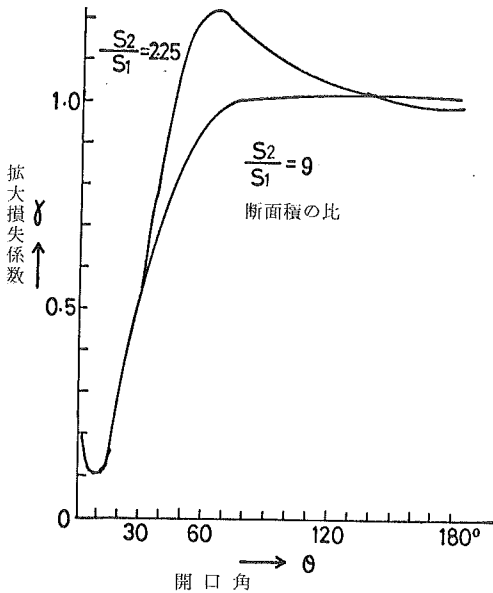


図9 開口角 θ と拡大損失係数 γ との関係
 Fig. 9 Relation of coefficient of enlargement loss (γ) against enlargement angle θ .

か。燈油において比重は 0.79 倍小さく、粘性が 1.6 倍大きい流れ方向の単位質量（燈油の）当りの慣性力は 0.79/1.6 倍だけ小さくなり、乱流になる度合いが小さく S_2/S_1 の大きな場合 L の小さいときとくに 60° および 120° 付近で現われるものと考えられないだろうか。以上の考え方は仮定の多くはいつていることで断定はできない。

ここで RP の寸法について述べる。開口部入口の直径は $D_1=14\text{ mm}$ 一定であるから、 $D=58.7\text{ mm}$ では $S_2/S_1=17.7$ また $D=82\text{ mm}$ では $S_2/S_1=34.3$ である。図 9 の γ 値は当初開口角の影響を予想した資料であることを断わっておく。実際には流速分布の様子を精密に測定をする必要がある。

4.3 油温変化が緩和率に与える影響

図 5 によれば油温の上昇に伴い緩和率は下がる傾向にあり、 V_0 の値も流速の遅い方向に移動していく傾向にある。このことは当初予想したとおり粘性低下に伴い管壁に到る電荷を減少させるべき渦および剝離のある発生頻度になる流速が減少していることに一致している。図 5 は $D=82\text{ mm}$, $L=0.4\text{ m}$, $\theta=60^\circ$ の RP の例である。ここで $D=58.7\text{ mm}$, $L=0.4\text{ m}$, $\theta=30^\circ$ の例を図 10 に示す。同図は横軸に絶対温度の逆数を取り、縦軸に α を対数で示した。図 11 は同様に図 5 を書き換えたものである。両図ともパラメータは油の流量である。図 10 の場合は 28°C , 30°C と油温が上昇した場合 α の値はほぼ一定の値を示した。しかし、図 11 と比較すると油温

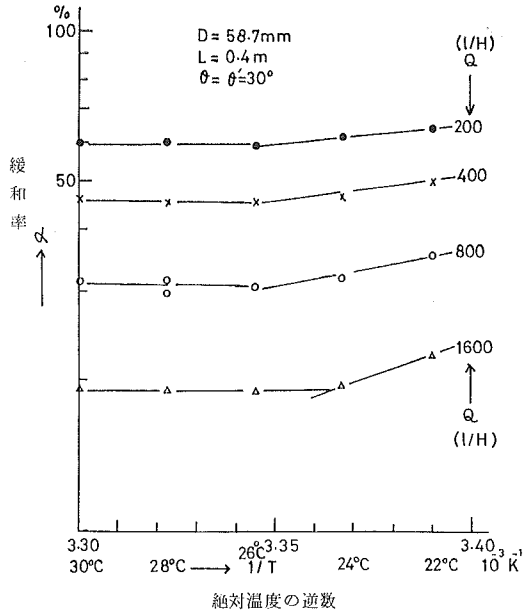


図 10 絶対温度の逆数に対する緩和率 α 特性 (RP 寸法, $D=58.7\text{ mm}$, $L=0.4\text{ m}$, $\theta=30^\circ$)
 Fig. 10 Characteristic of relaxation rate α against reciprocal of absolute temperature of kerosene, at RP size, $D=58.7\text{ mm}$, $L=0.4\text{ m}$, $\theta=30^\circ$

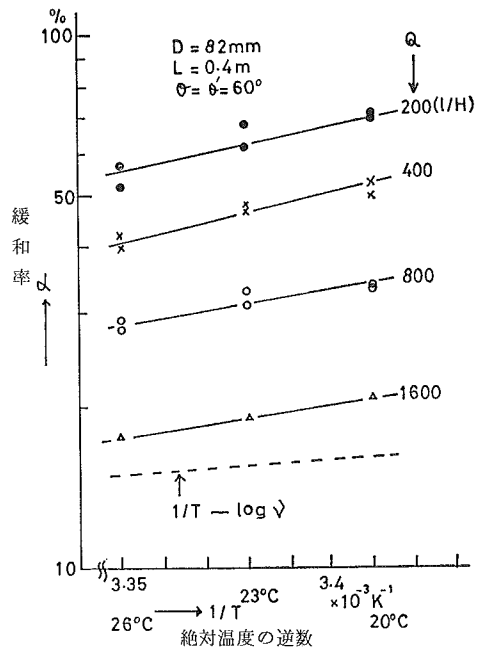


図 11 絶対温度の逆数に対する緩和率 α 特性 (RP 寸法, $D=82\text{ mm}$, $L=0.4\text{ m}$, $\theta=60^\circ$)
 Fig. 11 Characteristic of relaxation rate α against reciprocal of absolute temperature of kerosene, at RP size, $D=82\text{ mm}$, $L=0.4\text{ m}$, $\theta=60^\circ$.

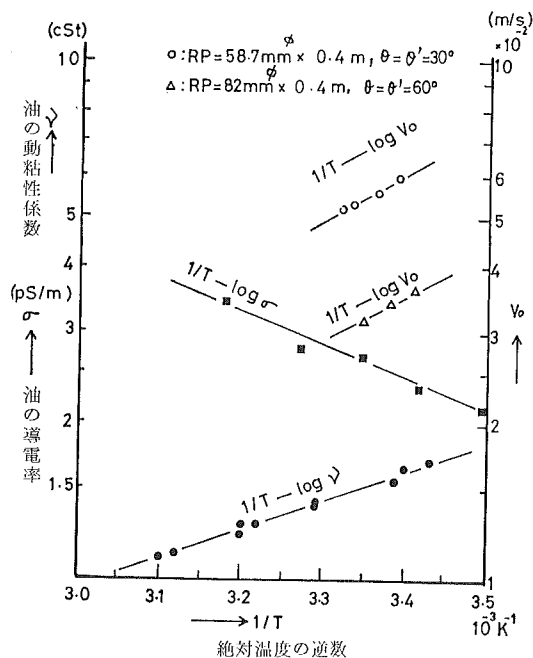


図 12 絶対温度の逆数と燈油の動粘性係数 ν 、導電率 σ および V_0 との関係

Fig. 12 Relation of kinematic viscosity ν , conductivity σ of kerosene and V_0 against reciprocal of absolute temperature.

が 26°C までは α の値が $1/T$ に対して対数的に減少する傾向が見られる。以下に 2 項目について考察する。

4.3.1 図 5 に見られる V_0 の温度依存性について

図 12 に $1/T$ に対する油の動粘性係数 ν 、油の導電率 σ および V_0 をそれぞれ対数目盛で縦軸に示した。同図から $D=58.7\text{ mm}$ の場合も V_0 が $D=82\text{ mm}$ の場合と同様な変化を示し、 $1/T - \log \nu$ の傾きとはほぼ一致している。このことは流体力学でよく用いられる相似則を使ったレイノルズ数 $Re (= D\bar{V}/\nu)$ を考慮すれば当然考えられる。すなわち、管内の流体の流れの状態を示す一つの目安として Re を用いて評価する場合、 Re が同じ値を示す場合は管内の流れの乱れの状態は等しいものと考えられる。図 12 の V_0 と ν の値を用いて Re を試算してみると $D=58.7\text{ mm}$ の場合 $Re=2,100$ 、 $D=82\text{ mm}$ の場合 $Re=1,700 \sim 1,800$ とそれぞれほぼ一定の範囲になっている。以上のことから油温の変化に伴って燈油の粘性変化とともに RP 内の流動状態が変化するが、ある流動状態 (一定の乱れの割合) になったとき管壁方向へ到る電荷の流れを弱める働きを燈油の流れがもつと考えられる。

4.3.2 管壁面電流密度の温度依存性について

図 13 と図 14 は (2) 式から求めた実測緩和パイプ壁

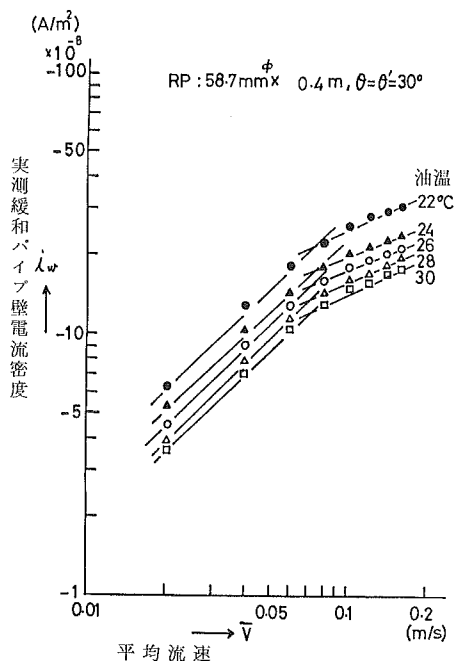


図 13 油温変化時の \bar{V} に対する実測 RP 壁面電流 i_w (RP 寸法, $D=58.7\text{ mm}$, $L=0.4\text{ m}$, $\theta=30^\circ$)

Fig. 13 Measured current density on RP wall i_w against \bar{V} with variation of oil temperature. (RP size, $D=58.7\text{ mm}$, $L=0.4\text{ m}$, $\theta=30^\circ$)

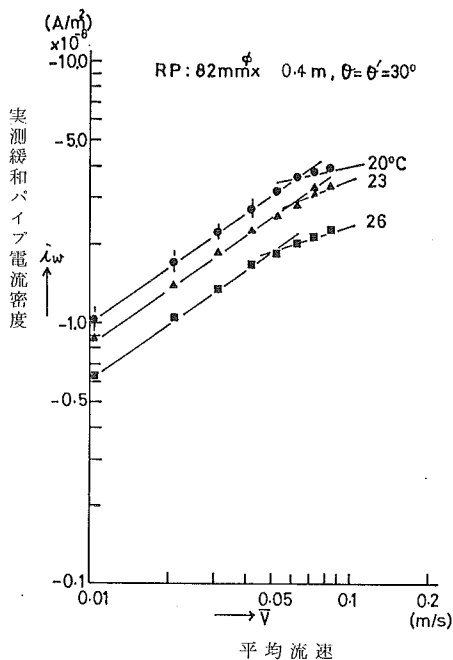


図 14 油温変化時の \bar{V} に対する実測 RP 壁面電流密度 i_w RP 寸法 ($D=82\text{ mm}$, $L=0.4\text{ m}$, $\theta=60^\circ$)

Fig. 14 Measured current density on RP wall i_w against \bar{V} with variation of oil temperature. (RP size, $D=82\text{ mm}$, $L=0.4\text{ m}$, $\theta=60^\circ$)

電流密度 i_w を \bar{V} に対して両対数目盛にプロットしたものである。両図とも油温上昇に伴って i_w は \bar{V} に対してほぼ一定の傾きを持って一様に減少していることがわかる。

油温の変化に伴って、油の動粘性係数 ν と導電率 σ が規則的に変化することは誘電体液体について Walden 則⁹⁾として知られている。Walden 則は(6)式で示される。

$$\mu_1 \cdot \eta = \text{一定} \quad (6)$$

ここで

μ_1 : イオン移動度 [m²/V·s]

η : 液体の粘度 [ポアーズ]

(6)式は筆者らの実測した σ と ν とには厳密には一致しない。すなわち σ は(3)式で示されるように $\sum e_1 n_1 \mu_1$ で示され、 ν は「 η /油の比重」として示されるからである。しかし、 σ の測定は静電シールドされた恒温槽内に抵抗測定容器を入れ一定油温で放置し、電池から直流電圧を印加して漏れ電流が一定値になった値を求めることによる。すなわち各油温において $\sum e_1 n_1$ が一定に供給されているときの σ を求めたものと考えれば、油温に対する μ_1 の変化を求めたことになる。 η と ν については燈油の比重を 20°C から 30°C まで実測した値は 0.786

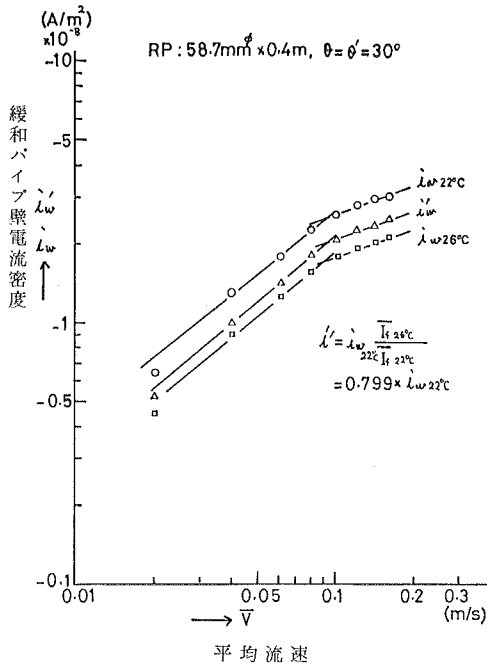


図 15 油温上昇による I_f の減少に伴う i_w の減少 (RP 寸法, $D=58.7$ mm, $L=0.4$ m, $\theta=30^\circ$)

Fig. 15 Diminished i_w by influence of decreased I_f , when the oil temperature rises. (RP size, $D=58.7$ mm, $L=0.4$ m, $\theta=30^\circ$)

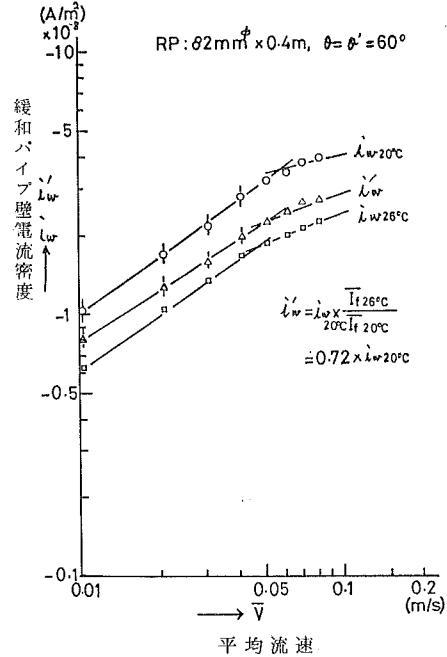


図 16 油温上昇による I_f の減少に伴う i_w の減少 (RP 寸法, $D=82$ mm, $L=0.4$ m, $\theta=60^\circ$)

Fig. 16 Diminished i_w by influence of decreased I_f , when the oil temperature rises. (RP size, $D=82$ mm, $L=0.4$ m, $\theta=60^\circ$)

~0.792 であり 0.79 一定と考え $\eta \propto \nu$ としてよいと考えた。図 12 の $1/T - \log \nu$ の傾きと $1/T - \log \sigma$ の傾きを比較すると前者が 0.35 で後者が -0.4 であるからおおむね Walden 則が成り立つ。以上述べたことはイオン伝導と液体の粘性との間に一定の関係があることで、液体の流れの状態を表わすときの粘性と区別して考える必要がある。

いま、 $D=57.8$ mm の RP の場合は図 13 の油温 22°C と 26°C のときの i_w を図 15 に $i_{w22^\circ\text{C}}$ および $i_{w26^\circ\text{C}}$ で示し、 $D=82$ mm の RP の場合は図 14 の油温 20°C と 26°C のときの i_w を図 16 に $i_{w20^\circ\text{C}}$ および $i_{w26^\circ\text{C}}$ で示した。 i_w はイオン伝導の(3)式によって与えられると考えると図 6 に見られるように V_0 までは $i_w \propto I_f$ と考えられる。

ここで $i_w = \sum e_1 n_1 \mu_1 E$ のなかで E はポアソン式(7)によって与えられる。

$$\text{div } \epsilon E = \rho \quad (7)$$

ここで

ϵ : 油の誘電率 [F/m]

ρ : 電荷密度 [C/m³]

いま、燈油の流量を Q [m³/s] とすると $\sum e_1 n_1 \propto I_f / Q$ と考えると流速 \bar{V} に対する i_w と I_f は比例して定まると

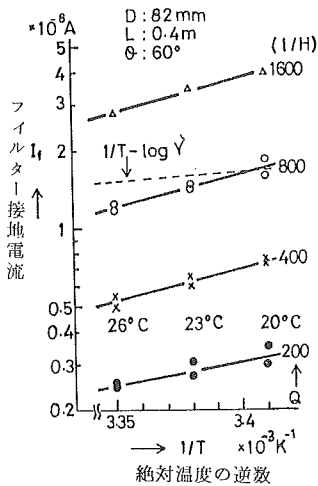


図 17 油温の絶対温度の逆数と I_f の関係 (RP 寸法, $D=82\text{ mm}$, $L=0.4\text{ m}$, $\theta=60^\circ$)

Fig. 17 Relation of I_f against reciprocal of absolute temperature of oil. (RP size, $D=82\text{ mm}$, $L=0.4\text{ m}$, $\theta=60^\circ$)

考えてよい。 I_f の油温に対する変化を図 17 に $D=82\text{ mm}$ の例を片対数で示す。 $D=58.7\text{ mm}$ の場合も同様な傾向を示した。図 15 および図 16 に示した i_w' の意味は油温が上昇したとき I_f が減少すると i_w がどの程度減少するかを示している。図 15 中の $\bar{I}_{f26^\circ\text{C}}$ および $\bar{I}_{f22^\circ\text{C}}$ はそれぞれの油温のときに \bar{V} に対して発生する I_f の平均値を示す。 $\bar{I}_{f26^\circ\text{C}}/\bar{I}_{f22^\circ\text{C}}=0.80$ は I_f が 26°C のとき 22°C より 0.8 に減少したことを示している。 $i_w'=0.8 \times i_{w22^\circ\text{C}}$ はそれを示している。同様に図 16 に $i_w'=0.72 \times i_{w20^\circ\text{C}}$ で示した。しかし、両図とも $i_{w26^\circ\text{C}}$ の値はそれぞれ i_w' 以下であった。ここで考えられることは燈油の粘性変化による流体力学的諸因子の変化が $i_{w26^\circ\text{C}}$ の値を i_w' より小さくしているものと考えられる。いま仮に Re の変化をみても $\bar{V}=0.05\text{ m/s}$ のとき $D=82\text{ mm}$ の 26°C で 2,700, 20°C で 2,500 であり、 $D=58.7\text{ mm}$ の 26°C で 2,000, 22°C で 1,900 であった。よって前者が Re は 1.05 倍増加し、後者は 1.03 倍増加していることになる。流体力学の影響は Re のみで評価はできないが、 Re の増加分はあまりにも少なすぎるように見える。ほかに乱流渦および剝離現象等により管軸方向下流に運ばれる電荷の影響も考慮しなければならない。

5. ま と め

除電効果のよい最適な緩和パイプを設計する場合に要

求される事項はたいへん多いに思われる。まず緩和パイプの幾何学的寸法 (管径, 管路長および拡大・収縮角等), 次に石油の性質 (導電率, 粘性およびそれらの温度特性) および流体力学的諸因子 (渦拡散係数, 渦度, Re および拡大損失係数に伴う統計的速度分布等) などが影響しあっている。今回は幾何学的要素として拡大・収縮角の影響, そして石油の性質として温度特性の影響を実験により調べた。以下に今回行なった実験結果からわかったことを述べる。

(1) 4.1 項で述べたように管壁面電流密度の開口角に対する依存性は管路長の短い RP で著しいが、管路長が長くなると開口角の影響はあまり現われていない。定性的には流体の流れが定常流になるための助走距離が必要なことで説明できるが、実験した RP の管路長より助走距離は相当大きな値と考えられるため助走距離と管壁面電流密度の関係は説明できなかった。

(2) 4.2 項で述べたように、開口角の緩和率に与える影響については拡大損失係数によって緩和率を補正した場合、管径によって違いますが、よく合う管路長のあることがわかった。すなわち管路長により開口角の緩和率に対する依存性が違っている。

(3) 4.3 項で述べたように、燈油の温度変化に対する緩和率の変化は著しいものがあつた。すなわち、管壁面電流密度の変化から考えると燈油の導電率の変化より粘性変化による流体力学的諸因子の変化がたいへん大きく寄与しているような実験結果を得た。

なお、当研究は昭和52年度文部省科学研究補助金 (奨励研究 A) の補助を得て行なったものである。

参 考 文 献

- 1) I. Ginsburgh: J. Colloid Interface Sci., **32**, 3 (1970), 424.
- 2) R.B. Jacobs *et al.*: Pet. Ind., **19**, 9 (1967). (N. Gibson: Static Electrification 1971 Conference Series No.11, p.82, The Institute of Physics, 参照)
- 3) H. Krämer und G. Schön: PTB-Bericht PTB-W-6 (1976).
- 4) 北村尚武, 上田 実: 電気学会論文誌 B, **98**, 7 (1978).
- 5) 北村尚武, 上田 実: 第21回静電気研究発表会講演要旨集, p.31 (1976).
- 6) 高分子学会編: 静電気ハンドブック, p.90, 地人書館 (1967).
- 7) 西山哲男: 流体力学(II), p.101, 日刊工業新聞社(1971).
- 8) 電気学会編: 誘電体現象論, p.247 (1973).