UDC 621.643.033: 537.241
665.5

論 文

53-B 70

石油の流動帯電電荷の緩和パイプ中に おける緩和特性

正 員 北 村 尚 武 (名 大)

正 員 上 田 實 (名 大)

1. ま え が き

石油製品をパイプラインで輸送するとき、流動帯電により静電気災害を引起すことは古くから知られている。筆者らは静電気災害の原因となる流動帯電した油中の静電荷を取除き、受けタンク内油面電位の安全な値まで下げる目的で本研究を始めた。

石油に限らず、絶縁材料を輸送する際の静電気災障害を防止する手段として次の項目が挙げられる。

(1) 製品に各種帯電防止剤 (ASA) を適量混入し製品の導電率を上げ、電気的時定数を下げる。

(2) 帯電した製品に逆極性の電荷を与えるか、針電極などを用いて自己放電で除電する。

(3) 発生電荷量は製品の輸送速度に依存するので輸送速度を下げる。

以上のことは石油輸送に関して、今まで多くの研究者によって研究されてきた。次に各項目について述べる。

(1) について、例えば Klinkenberg⁽¹⁾, Lonard⁽²⁾, Gibson⁽³⁾ 氏らによって実験がなされ良い結果を得ている。しかし、石油から ASA を取除き本来の質の良い製品にできない欠点がある。また、純度の良い石油に ASA を混入すると ASA がイオン源になる場合がある⁽⁴⁾。

(2) について、Ginsburgh 氏⁽⁵⁾が避雷針の原理を応用し “Static Charge Reducer” と名付けたパイプを開発した。また Jacobs 氏⁽⁶⁾も同様に, “Neutralizer” と名付けたパイプで実験を行なっている。しかし、彼らの研究は流体力学的観点にて考察していない。また、木村氏⁽⁷⁾は金属摩擦電子放出現象⁽⁸⁾を利用し油中で電子放出を行ない、正に帯電した石油中の電荷を中和するのに効果があると発表している。し

かし装置の耐久性と負に帯電したときなどに問題がある。

(3) について大滝氏⁽⁹⁾は、帯電状態を監視する目的で流体抵抗の少ない形状の内径を大きくした三種類のパイプをパイプ途中にそう入し実験をした。実験方法は自然流下式が用いられた。この実験法は従来基礎的研究に広く用いたが、Schön⁽¹⁰⁾, Klinkenberg⁽¹⁾, Bright⁽¹¹⁾ 氏らの指摘するように、静電気帯電現象は実験装置の規模により実験結果に相当な差を生ずる。よって輸送現場に適合する実験が必要である。

筆者らの研究は(3)に該当するものであり、単に金属パイプの内径と管路長を各種変え試作した緩和パイプ(筆者らは今後この名称と呼ぶことにし、本論文では以後 RP と略記する)を用い、石油輸送現場に近い実験方法で、流動帯電している油中の静電荷緩和効果を実験を主体に調べた。実験から緩和率 100% が得られる可能性があり、緩和率の管径、管路長および拡大損失水頭などに対する依存性が理解でき、より緩和効果のある RP の設計に役立つ資料が得られた。

2. 実験装置および実験方法

〈2・1〉 実験装置 実験系の概略を第 1 図に示す。また供試 RP の断面図を第 2 図に示す(以後、図示のよう RP 内径を D および管路長を L で表示する)。

本実験装置の特徴は次のとおりである。

(1) 電荷消去タンクをフィルタ容器手前に設置し大部分の静電荷発生はフィルタ部のみとした。RP へ流入する流動電流はフィルタ部のみで発生させるため、フィルタ以前(ポンプ、流量計およびパイプ中)で発生した電荷を消去し、データの再現性を得る目的で筆者らが考案、製作したのが電荷消去タンクである。その構造は、180mmφ×500mm の黄銅製円筒で、油を底部まで導き徐々に上昇する間に静電荷を消去し、上部からテフロンパイプで絶縁されたフィルタ容器へ流入させる。

(2) 油温制御のため冷却部を 2 ヲ所に設置した。

Static Charge Diminution of Flowing Petroleum in a Relaxation Pipe. By Naotake Kitamura, Member & Minoru Ueda, Member (Faculty of Electrical engineering, Nagoya University)
北村尚武: 正員, 名古屋大学工学部電気学科
上田 實: 正員, 名古屋大学工学部電気学科

第 1 図 実験系の略図

Fig. 1. Schematic diagram of the experimental system.

第 2 図 供試緩和パイプの断面図

Fig. 2. Sectional diagram of a relaxation pipe used for the experiment.

ポンプおよびパイプ中で油の粘性損失で発熱し油温上昇があるため、予備タンクおよび電荷消去タンク中に銅パイプをらせん状にそう入して、水道水の水量を温度計を見ながらじゃ口を手動で調節し油温制御をした。油温測定はポンプに至るパイプ（内径 38mm の耐油ゴム製）内に感温部を置き外部でメータを見る方法と、受けタンク（300mmφ×450mm のステンレス鋼製）内にテフロンで絶縁したアルコール温度計とによった。

(3) データは、ペンレコーダの記録紙から読取った。第 1 図で、フィルタ容器接地電流 (I_f)、RP 接地電流 (I_r) および受けタンク接地電流 (I_i) の各電流を同時に読む必要性と、各電流が定常状態にあるかどうか監視の必要性から、エレクトロメータの指示とペンレコーダの記録を常にチェックし実験終了後、記録紙からデータをすべて読取った。

(4) 約 80l の試料油を最大 1,600l/h の流量で輸送するため、ポンプを大形のものにした。大量の試料油を用いるので、油温を規定の値 (28°C 一定) にするのにかなり長時間（室温により違うが約 1~2 時間）

油を循環しなければならないが、全測定中油温は $28 \pm 0.5^\circ\text{C}$ の範囲で安定した。使用ポンプは寺田ポンプ製のセルプラポンプ PH-1 形（渦巻ポンプで水量 0.12 m³/min の時揚程 36m）である。

静電荷発生機構は本論文の主題でないので詳しく述べないが、本実験に使用したフィルタはすべてトキコ製品 HG-17 タイプオイルフィルタである。筆者らは以前に、各種フィルタの帯電傾向を研究し発表しているが⁽¹²⁾⁽¹³⁾、本実験では燈油は負に、軽油は正に帯電した。また、フィルタをフィルタ容器に入れず RP を所定の場所に設置せず塩ビパイプのみで受けタンクに接続した場合 I_i は $10^{-11} \sim 10^{-10}$ A のオーダーであり、フィルタをそう入した場合（実験値参照）の 2~3 けた小さい値であった。このことは、使用した塩ビパイプの材質については論じなくても、フィルタ内で測定流動電流がすべて発生しているものと考えてよい。第 2 図に示すような形状の供試 RP は D が 38.9, 58.7 および 82(85.3)mm で、 L は 10, 20, 30, 40 および 50cm の 15 種類である。 D が 85.3mm の RP は購入の都合上 L が 10, 20 および 30cm の RP に使用した。材質は黄銅で、実験前に円筒内面を金属みがきで丁寧にみがいた後アセトンで十分洗浄し、直ちに円筒両端をはんだ付けて実験に供した。

〈2・2〉 実験方法 実験に入る前に試料油の特性を測った。油の抵抗測定には銅の円板電極（直径 40 mm）を平行ギャップ長 1mm に設置した容器を静電シールド箱中に置いたものを使った。測定電圧は電池から直流電圧で 50 ないし 300V を印加し漏れ電流をエレクトロメータで測定し、電圧に対する漏れ電流の値をグラフ上に取り直線の傾きから抵抗率を求めた。次に、キャノンフェンスケ細管粘度計で油の動粘性係数を測定した。実測した油の諸特性を第 1 表に示す。

実験の手順は上述の供試 RP 洗浄処理後、RP をテフロンで絶縁した所定の台上に設置し、次に試料油約 80l を予備タンクに注入後ポンプを駆動し、第 1 図の油流動系で油温、 I_r , I_r および I_i がそれぞれ定常値になるまで循環させた後、測定を開始した。

まず、油の流量を流量計で観察し、200l/h 間隔で 1,600l/h までバルブ調節で変化させたとき、各 RP につき I_r , I_r および I_i の変化を求めた。どの RP の場合も 200~1,600l/h の範囲で測定した理由は、フィルタ内を通過する油の平均流速を一定の範囲とし、すべての RP 内に持込まれる電荷量 (I_f) の値を一定の範囲内に納め良い再現性を得るためである。ここで注意することは、長時間油を循環するため試料油の吸湿、酸化および芳香族炭化水素の気化などによる試料油の

第 1 表 実験に使用した燈油と軽油の諸特性

Table 1. Characters of kerosene and light oil used for the experiment.

	燈 油	軽 油
抵抗率 ($\Omega\cdot\text{m}$)	1.8×10^{11} (30°C)	6.9×10^{11} (18°C)
比誘電率 (100 kHz)	2.3 (23°C)	2.3 (23°C)
時定数 (s)	3.5	14.0
動粘度 (cst)	1.3 (31°C)	3.8 (29°C)
比重	0.79 (27.5°C)	0.85 (29°C)

注: 有効数字 2 けた

経時変化であると思われる。しかし I_f の変動率は、 $\pm 30\%$ 以内であった。この程度の変動率ならば良い再現性を示したと考える。

流量の最大値は実験装置、特に受けタンクの容量で制限され、1,600 l/h から上は無理であった。流量計は東京流機 KK 製のフロート式で、目盛は軽油、燈油用 (液温 30°C) に特別注文作成したものを使用した。

軽油は比較する目的で実験をしたので、本論文ではあまり議論しないことを断っておく。

3. 実験結果

〈3.1〉 流量変化と各部所接地電流の関係 流量を変えたときの各接地電流 (I_f , I_r 及び I_t) の一例を第 3 図に示す。ここで (a) 図は燈油で負に帯電しており、(b) 図は軽油で正に帯電している。同図は RP 寸法が $D=85.3\text{mm}$, $L=10\text{cm}$ の例であるが、ほかのすべての RP についても傾向は全く同じであった。図から $|I_f| = |I_r + I_t|$ の電流連続則が成立つとしてもよいと思われるが、正確には常に $|I_f| \geq |I_r + I_t|$ であった。この理由は、油と共に電荷が受けタンクから

第 3 図 流量に対する各部所接地電流 (I_f , I_r および I_t) の例Fig. 3. Examples of currents (I_f , I_r and I_t) from each position to the earth against volume flow rate. 第 4 図 各 RP 内平均流速 ($\bar{V}$) に対する燈油と軽油の緩和特性Fig. 4. Characteristics of relaxation of kerosene and light oil against mean velocity ($\bar{V}$) in each RP.

予備タンクへ空気を自然落下するとき、少し持ち出していると考えられる。(a) 図、(b) 図で特に違う点は燈油の場合、流量増加に伴い I_r の値が飽和する傾向にあるが、軽油には見られない。このことは、後述の〈4.1〉節および〈4.4〉節で詳しく述べる。

〈3.2〉 RP 内平均流速と緩和率の関係 第 4 図

は RP 内で電荷の緩和される割合 (筆者らの言う緩和率、以後 (1) 式の如く α で表示する) を縦軸に、また油の流量を RP 断面積で割って求めた RP 内平均流速 (以後 $\bar{V}$ で表示) を横軸に取って示した。

$$\alpha = I_r / (I_r + I_t) \approx |I_r / I_f| \quad \dots\dots\dots (1)$$

この図は $L=20\text{cm}$ の RP で、パラメータに油の種類と D を示した。軽油は参考に記入したのであるが、図からわかることは $\bar{V}$ 増加に伴う α の変化が燈油と対照的なことである。このことは〈4.4〉節で詳述する。

4. 実験結果の検討

〈4.1〉 RP 管壁からの発生電流密度について

Schön 氏ら⁽¹⁴⁾の流動電流 (I_s) を表示する一般的理論式がある。それを (2) 式で示す。

$$I_s = \pi D \bar{V} \tau i_a (1 - e^{-x/\bar{V}\tau}) + I_0 e^{-x/\bar{V}\tau} \dots (2)$$

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 : 電気二重層形成時に管壁面から油中に向かう発生電流密度 (A/m^2), I_0 : 管に入る前に油中に既に発生している流動電流 (A), x : 管路長 (m)

(2) 式に対する実験的考察を多くの研究者が行っている。以下に三者の論文を引用する。

(1) (2) 式の基礎になった論文と言われる、Hampel 氏ら⁽¹⁵⁾は、パイプ材質に白金 ($D=1.5\text{mm}$, $L=0.25\text{m}$) を用い N_2 ガスの圧送により n-ヘプタン

とエタノールの混合により導電率 $5 \times 10^{-16} \sim 8 \times 10^{-11}$ S/m の試料液体を 3.8 m/s の流速で実験を行なった。

(2) Bustin 氏⁽¹⁶⁾は、パイプ材質にステンレス鋼 ($D=6$ mm, $L=0.3 \sim 21$ m) を用い、ポンプで JP-4 (抵抗率 $1.1 \times 10^{11} \Omega \cdot \text{m}$) を $3 \sim 12$ m/s の流速範囲で実験を行なった。この実験結果から流動電流と管路長の関係を求めた結果、Schön 氏の式と良い一致を見た。

(3) 有本氏⁽¹⁷⁾は、パイプ材質に塩化ビニール ($D=4 \sim 25$ mm, $L=1 \sim 100$ m) を用いポンプで軽油 (導電率 3×10^{-11} S/m) を $0.1 \sim 0.9$ m/s の流速範囲で実験を行なった。Schön 氏の式の τ の値が流動電流と静止時で相当違い、 τ の値を考慮したとき、実験結果と(2)式が良い一致をみたと報告している。

以上のように各研究者により、実験条件に相違はあるが、(2)式の有用性は認められる。あらかじめ断っておくが、(2)式は内径 D がどこまでも変わらない直線状パイプ中を仮定し、流体の流れに拡大および縮小のない流れのとき発生する流動電流を示している。筆者らの使用した RP の形状に適用する場合、うず、よどみなどの影響があり難点があると思うが、流動電流を示すにパイプ内の電流発生および消失の物理的関係が明確なため、筆者らは(2)式を利用し i_a (A/m²) を求める。ここで、(2)式を筆者らの用いた記号で書換え(2)'式とする。

$$I_t = \pi D \bar{V} \tau i_a (1 - e^{-L/\bar{V}\tau}) + I_f e^{-L/\bar{V}\tau} \dots (2)'$$

本実験では $I_r = -(I_t - I_f)$ を測定したので、(2)'式から次式が得られる。

$$I_r/I_f = (1 - e^{-L/\bar{V}\tau}) (1 - \pi D \bar{V} \tau i_a/I_f) \dots (3)$$

ここで実験から、 $\alpha \equiv |I_r/I_f|$ を求めたので(3)式を変形し、

$$i_a = I_f (1 - \alpha / (1 - e^{-L/\bar{V}\tau})) / \pi D \bar{V} \tau \dots (4)$$

となる。(4)式に I_f , α , L , D , $\bar{V}$ および τ などの実験値を代入し、 i_a を求めた一例を燈油について第5図(a)に両対数目盛で示す。(b)図は参考のためそのときの I_f を示す。横軸はどちらも $\bar{V}$ である。(a)図によれば $\bar{V}$ の増加に伴い i_a も増加するが、ある一定 $\bar{V}$ から i_a の変化する直線の傾きが変わっている。その $\bar{V}$ の値は同じ D なら L を変えてもほぼ同じ値を示す。その $\bar{V}$ を V_0 と名付ける。しかし、軽油においては実験した $\bar{V}$ の範囲内には V_0 はなかった⁽¹⁸⁾。

ここで、 i_a の符号について考える。燈油の場合は正で、電流は大地から管壁を通り油中に向かう。軽油は負で、電流は油中から大地へ向かう。流速 $\bar{V}$ に対する燈油の場合の i_a について RP 寸法の極端に違う二

燈油の各 RP 内平均流速 ($\bar{V}$) に対する発生電流密度 (i_a) の変化

燈油の各 RP 内平均流速 ($\bar{V}$) に対するフィルタ容器接地電流 (I_f) の例

第 5 図

Fig. 5.

第 6 図 $\bar{V}-i_a$ および $\bar{V}-I_f$ 特性の例 (小さい寸法の RP の場合)

Fig. 6. Examples of $\bar{V}-i_a$ and $\bar{V}-I_f$ characteristics (at small size of RP).

例を第6図と第7図に示す。両図の(a)図は(4)式から求めた i_a である。(b)図の i_w は i_a と比較するた

第 7 図 $\bar{V}-i_a$ および $\bar{V}-i_w$ 特性の例
(大きい寸法の RP の場合)

Fig. 7. Examples of $\bar{V}-i_a$ and $\bar{V}-i_w$ characteristics (at large size of RP).

第 8 図 RP 内径 (D) に対する V_0 および V_0' の特性

Fig. 8. Characteristic of V_0 and V_0' against RP inner diameter (D).

め、(5)式で求めた管壁面から大地に至る電流密度であり、 i_w の電流方向は I_r と同じである。筆者らは I_w を実測パイプ壁電流密度とする。

$$i_w = I_r / S \quad (\text{A/m}^2) \quad (5)$$

ここで、 S はRPの黄銅部分総内面積 (m^2)である。 i_w の値も流速 V_0' を境に $\bar{V}$ に対する直線の傾きが減少する。

V_0 および V_0' と D の関係を両対数目盛で第8図(a),(b)に示す。両図で $V_0 \propto V_0' \propto D^{2.2}$ の関係にあることがわかる。また第6図、第7図において V_0' より V_0 の点が顕著に現われるのは、緩和項の α と $e^{-L/V\tau}$ が重ね合せ、拡大部のうず、よどみ等の影響と考えられる。ここで、電荷担体をイオンと考えると、イオン電流密度は(6)式で与えられる。

$$i = \sum Z_i e N_i \mu_i E \quad (\text{A/m}^2) \quad (6)$$

ここで、 Z_i : イオン価、 e : 電気素量(C),

N_i : イオン個数密度 ($1/\text{m}^3$), μ_i : イオンの移動度 ($\text{m}^2/\text{v}\cdot\text{s}$), E : 電界強度 (V/m)

いま、 i_w は(6)式の i によって与えられると考えるとき、流速と共に変化する項は N_i と E である。 μ_i は管壁面近傍では流速の影響を受けず、一般に言われる $10^{-8}(\text{m}^2/\text{v}\cdot\text{s})$ のオーダーで一定と考える。ここで、 Q を油の流量 (m^3/s)として、 $\sum Z_i e N_i \propto I_r / Q$ と考える、また E はポアソン式(7)式によって定まるものとする。

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

ここで、 ϵ : 油の誘電率 (F/m), ρ : 電荷密度
 $= \sum Z_i e N_i \quad (\text{C/m}^3)$

第5図(b)の $I_r \propto \bar{V}^2$ の関係から、(6)式の電界 E はほぼ流速に比例して定まり、第6図(b)、第7図(b)に示すよう V_0' 以前の $\bar{V}$ に対する i_w の傾きと I_r の傾きがほぼ等しいことが理解できると思う。しかし $\bar{V}$ が V_0' を超えると管内の流体の流動状態(管壁方向の流速分布)が変化し、電界を弱める働きがあり i_w の直線の傾きは減少するものと考えられる。

<4.2> D と V_0 および V_0' の関係に関する流体力学的検討 管内の流動状態を示す量として、以前からレイノルズ数(以後略して Re と表示)が使用されてきた。 Re は力学的意味(すなわち流体の慣性力と粘性力の比を表示)において明白であるが、管の形状および壁面の粗さなどにより流動状態を正しく示す数値ではない。しかし流動状態を知る目安になるので以後 Re を導入する。

実験を行なった $\bar{V}$ に対する Re を第9図に示す。パラメータは粘性の違いによる燈油と軽油および D である。図中の臨界レイノルズ数 $Re=2,300$ は一般に層流から乱流になる境界値である。軽油は Re がほ

第 9 図 実験を行なった流速範囲の
 $\bar{V}-Re$ 特性

Fig. 9. $\bar{V}-Re$ characteristics in flow velocity range of the experiment.

は2,300以下であり、流速が V_0 および V_0' にあたる値に達していないと考えられる。以下に D と V_0 の関係を次元解析的に三点考察する。

(1) 第10図(a)は流体力学という渦度(ω) $\equiv \text{rot } v$ が $1/\sqrt{\text{Re}}$ の因子で表示される⁽¹⁹⁾ので D に対する各 V_0 時の $1/\sqrt{\text{Re}}$ を両対数目盛で示した。直線の傾きが $1/\sqrt{\text{Re}} \propto D^{0.55}$ となり、 $\text{Re} = DV_0/\nu$ (ν : 油の動粘性係数 (ストークス)) として $V_0 \propto D^{-2.1}$ を得る。この結果は前述の $V_0 \propto D^{-2.2}$ の実験結果に誤差範囲内で良い一致をしている。

(2) Cooper⁽²⁰⁾, Klinkenberg⁽²¹⁾氏らによれば、電気二重層の厚さ δ_e は(8)式で与えられる。

いま、(8)式に実験値を代入し、 δ_e を計算すると第10図(b)になる。

$$\delta_e = \sqrt{A_e \tau} \quad (\text{m}) \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 $A_e = 0.009 DV_0 \text{Re}^{-1/6} = 0.009 (DV_0)^{5/6} \mu^{1/6}$; 渦拡散係数, $\tau = \varepsilon \rho = 3.5 \text{ s}$ (ε : 油の誘電率, ρ : 静止時の油の抵抗率); 燈油の静止時の電氣的緩和時定数, ν : 動粘性係数

(b)図から $\delta_e \propto D^{-0.45}$ の関係が得られ、(8)式の ν および τ を定数とし、(8)式から $\delta_e (DV_0)^{5/12}$ を得る。以上のことから $V_0 \propto D^{-2.08}$ になる。第10図(a), (b)の相互関係から $V_0 \propto D^{-2.2}$ の実験結果は当然考えられる。また、電気二重層表面電荷がほぼ同じ値(D が異なっても同じ流量のとき)を取ると考えると、 δ_e が大きくなるほど、すなわち D が小さいほど管壁方向電界強度が弱められる割合は V_0 を境として大きくなる。このことは第5図(a)に見られるように D が小さいほど発生電流密度が減少する割合が大きくなり、緩和される電荷量は少なくなるものと考えられる。

(3) 流体が細い管から太い管へ拡大流入し、再び細い管へ収縮流出するとき、ほとんどの損失は拡大損失水頭で表示できる⁽²²⁾。水の場合の拡大損失水頭を与える式を(9)式に示す。

$$\Delta h = (\gamma \bar{V}_2^2 / 2g) (A_2 / A_1 - 1)^2 \quad \dots\dots\dots (9)$$

第10図 各内径(D)の V_0 時の $D-1/\sqrt{\text{Re}}$ および $D-\delta_e$ 特性

Fig. 10. D - Re and D - δ_e characteristics at V_0 of each inner diameter of RP.

第2表 各管径と V_0 および V_0' 時の拡大損失水頭(Δh)の関係

Table 2. Relation of each diameter and enlargement loss of head (Δh) at V_0 and V_0' .

D	V_0 のとき	V_0' のとき
3.89	9.63	11.09
5.87	11.87	13.75
8.20	10.96	12.50
8.53	10.63	12.29

単位: cm

ここで、 Δh : 拡大損失水頭 (m), γ : 拡大損失係数 (無名数), $\bar{V}_2$: 太い管内平均流速 (m/s), A_1 : 細い管断面積 (m^2), A_2 : 太い管断面積 (m^2), g : 重力の加速度 (m/s^2)

(9)式は $A_1 \bar{V}_1 = A_2 \bar{V}_2$ で表示される連続の条件と単位時間に入る運動量 ($\text{m/g} \times A_1 \bar{V}_1^2$) と、出る運動量 ($\text{m/g} \times A_2 \bar{V}_2^2$) の差が圧力差に等しいことから理論的に導かれた式である。また、(9)式中の γ は実験値と合せる係数で、開口角 180° の場合 $\gamma \approx 1$ で実験結果によく合うという⁽²²⁾。

いま(9)式に実験をしたRP寸法と V_0 および V_0' を代入し Δh を求めると第2表のように各RPともほぼ一定の値を示した。(9)式を変形して V_0 と D_2 の関係を求める。

$$V_0 = \sqrt{2g \Delta h / \gamma} r_1^2 \times 1 / (r_2^2 - r_1^2) \quad \dots\dots (10)$$

ここで、 r_1, r_2 は A_1, A_2 の半径、 $r_1 = 7 \text{ mm}$ 一定である。実験したRPの r_2^2 / r_1^2 は9.8~37であるから、 $r_2^2 \gg r_1^2$ と考え、 $\gamma \approx 1$ とすると(10)式は次式になる。

$$V_0 \approx \sqrt{2g \Delta h} r_1^2 / r_2^2 = \beta D_2^{-2} \quad \dots\dots\dots (11)$$

$\beta = \sqrt{2g \Delta h} D_1^2$ を定数と考える。(11)式の示す事実は拡大損失でRP内の流動状態が決まるならば $V_0 \propto D_2^{-2}$ の関数にあり、第5図(a)に示すとおり L が変わっても D が同じならば V_0 はほぼ同じ値を取ることと一致する。

以上、(1)~(3)項で考察したとおり、第8図(a)(b)の $V_0 \propto V_0' \propto D^{-2.2}$ という関係は流体力学的に妥当であると筆者らは考える。しかし、厳密な流速分布はレーザなどを使用し実測する必要がある、現在準備中である。

〈4.3〉 $\bar{V}/V_0$ に対する緩和率の関係 D の違うRPの緩和率を比較する場合、〈4.1〉節、〈4.2〉節で述べたように、 V_0 と D とは一定の関係にあるため $\bar{V}/V_0$ を求めて考察する(実験した流速範囲で全RPとも

第 11 図 $\bar{V}/V_0$ に対する緩和率 (α) の変化

Fig. 11. Variation of relaxation factor (α) against $\bar{V}/V_0$.

$\bar{V}/V_0 = 0.21 \sim 2.0$ であった)。一例を両対数目盛で第 11 図に示す。

(a) 図は L が 50 cm の RP でパラメータを D で示した。また、(b) 図は D が 82.0 (85.3) mm の RP で L をパラメータで示した。(a) 図を見ると D の増加と共に α は増加している。また α の $\bar{V}/V_0$ に対する変化にもある流速を境として傾きに変化がある。ほかの L の違う RP も同様であった。本来ならば $\bar{V}/V_0 = 1$ のところで変化するはずが、すべて $\bar{V}/V_0 < 1$ にある。これは α の値は実験値を用いたのに対し、 V_0 は前述の (4) 式から求めた i_s の $\bar{V}$ に対する変化から求めたことによると考える。もう一つ考えられることは、(4) 式の τ の値は静止油の抵抗率から求めた点で、流動帯電油中の導電率は静止油中の導電率と相違していると、Schön⁽²³⁾、伊藤⁽²⁴⁾、有本⁽¹⁷⁾ 氏らは指摘しているので、(4) 式に用いた τ は実験中の油の示す τ と少し違うように思われる。

次に (b) 図を見ると α は L にあまり依存していない。特に L が 30 cm 以上では α の値はほとんど同じようである。このことは第 12 図 (a), (b) を見るとよくわかる。同図は $\bar{V}/V_0$ をパラメータに、横軸に L を、縦軸に α の平均値を示した。また L の増加と共に α が増加し飽和する傾向を示している。

第 13 図 (a), (b) は $\bar{V}/V_0$ をパラメータに、横軸

第 12 図 L に対する緩和特性 ($\bar{V}/V_0$ をパラメータにしたとき)

Fig. 12. Characteristics of relaxation against pipe length L (with parameter of $\bar{V}/V_0$).

第 13 図 D に対する緩和特性 ($\bar{V}/V_0$ をパラメータにしたとき)

Fig. 13. Characteristics of relaxation against pipe diameter D (with parameter of $\bar{V}/V_0$).

に D/D_1 を、縦軸に α の平均値を示した。同図は D/D_1 の増加と共に α はほぼ比例して増加している。

以上のことから、緩和率を上げるに効率の良いのは D/D_1 を大きくすることで、 L を特に大きくする必要はない。また V_0 を実測できれば RP 設計に役立つと思う。

〈4・4〉 油の粘性が緩和率に与える影響 燈油と軽油の特性の違いを動粘度に着目して考察する。

Cooper⁽²⁰⁾、Klinkenberg⁽²¹⁾ 氏は層流時および乱流時の油中流動電流を与える次の二式を求めた。この二式は摩擦応力係数および Re を導入し、電気二重層の理論に基づき Poiseuille の法則と Blasius の実験で求めた。

$$\text{層流の場合 } i_s = -8\bar{V}\pi\epsilon\zeta \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$\text{乱流の場合 } i_s' = -0.04Re^{3/4}\bar{V}'\pi\epsilon\zeta \quad \dots\dots\dots (13)$$

ここで、 i_s, i_s' : 流動電流 (A), $\bar{V}, \bar{V}'$: RP 内平均流速 (m/s), π : 円周率, Re : レイノルズ数, ζ : 電気二重層の界面動電位 (V), ϵ : 油の誘電率 (F/m)

いま、同じ油で流速のみ違った場合の i_s/i_s を求めると $0.005 \text{Re}^{4/2} \bar{V}/\bar{V}$ となる。これは油の流れが乱流の場合 ($\text{Re} > 2,300$)、流動電流が層流のときの $0.005 \text{Re}^{3/4} \bar{V}/\bar{V}$ 倍に増加することを示している。筆者らの試作した RP は管内平均流速で Re を示し層流、乱流の区別をすることは困難である。すなわち、うずの発生およびよどみなどがあり常に乱流状態である。しかし、乱流の度合の Re 大小によりある程度評価できると考える。第9図によれば、燈油と軽油の Re の違いはただ動粘度の違いで、同一流速で燈油の Re が軽油より約3倍程大きくなっている。

平均流速は流量を RP 断面積で割って求めた。ゆえに単位時間内に RP 中に存在する燈油と軽油の体積は等しいとし、 $\bar{V}/\bar{V} \approx 1$ と考える。しかし、管壁方向の速度分布は粘性の違いにより変化し、粘性の影響が緩和率に現われる。いま、燈油が軽油より $0.005 \text{Re}^{3/4}$ 倍 RP 内で流動電流が多く発生し、軽油の α より $1/0.005 \text{Re}^{3/4}$ 倍に減少したと仮定試算すると、第4図の $\times$ 印で示す破線になり燈油の緩和特性に良い一致を見る。このことから、粘性の緩和率に与える影響が説明できる。(13)式は $2 \times 10^3 < \text{Re} < 10^5$ の範囲で実験値と良い一致をしたといわれている。これは石油系絶縁油では層流で約 150mV 、乱流で約 $2,000 \text{mV}$ といわれているが⁽²¹⁾実測していないので ζ/ζ' は考慮しなかったが、もし燈油の乱流の程度が大きき ζ' が約 $2,000 \text{mV}$ で、軽油が乱流の程度が小さき ζ が約 150mV であるとすれば、燈油の α は約 $1/13$ 程度小さくなり第4図に示した $\times$ 印より相当小さくなると考えられる。RP 内の ζ は燈油、軽油共ほぼ等しい値と思われる。

5. む す び

石油製品をパイプラインで輸送するとき発生する静電気災害を防止する手段として、各種 RP を試作し、実験を主体に基礎研究を行なった。

実験結果から明らかになったことを以下に述べる。

(1) 〈4.1〉節、〈4.2〉節で述べたように、RP 管壁面の電流密度変化がうず度、うず拡散係数および拡大損失水頭など、流体力学の諸因子に依存している。特に拡大損失水頭の影響が大きいので、RP 設計時に拡大損失係数を小さくし、 V_0 にあたる流速が存在しないような形状にする必要がある。

(2) 〈4.3〉節で述べたように、緩和率は L の増加に伴い指数関数的に増加し、飽和する傾向にある。また D の増加に対しては比例的に増加する傾向にある。よって RP を設計するとき、緩和効果を良くするには L を必要以上に大きくせず D を大きくすべき

である。

(3) 〈4.4〉節で述べたように、石油の粘性の違いが緩和特性に与える影響が大きいため RP 設計時に各石油の粘性を考慮し、常に層流状態 ($\text{Re} < 2,300$) になるよう配慮することが緩和効果を良くするために大変重要である。

(4) 石油製品の輸送量 (単位時間あたり) を落さず、単に RP の内径を大きくし受けタンク手前において平均流速を単に下げるのみで十分静電荷の除去ができる。今回実験に使用した形状の RP で、燈油を試料油として緩和率 100% が $D: 82 \text{mm}$, $L: 50 \text{cm}$ の RP により、 $\bar{V} = 0.01 \text{m/s}$ のところで得られた。

(5) 今まで静電気に関する実験は再現性に乏しいといわれていたが、温度制御と電荷消去タンクの設置により再現性が十分得られた。

(6) 今後、理論的解析をする場合、Schön, Kröme 氏ら⁽¹⁰⁾の指摘しているように、流体の流れの状態が定常状態のとき油中の空間電荷分布および電位分布は静止していると考え解析することが可能であり、筆者らの実験方法は大きい有効である。また、乱流時における流速分布について、ランダウ氏ら⁽¹⁹⁾の述べているように、粘性流体においても波動理論を考慮し解析する必要があると考える。

流体力学の基礎について適切な助言をいただいた、本学航空学科助手 小田切文治氏に感謝する。

(昭和51年7月6日受付、同52年5月4日再受付)

文 献

- (1) A. Klinkenberg, et al.: Electrostatic in the Petroleum Industry (1958)
- (2) J. T. Lonard, et al.: U.S. Naval Research Laboratory Report 6952 (1969)
- (3) N. Gibson, et al.: J. Phys. D (Appl. Phys.) 563 (1970)
- (4) 田島・児玉: 第20回静電気研究発表会講演要旨集 71 (昭 50)
- (5) I. Ginsburgh: J. Colloid and Interface Science 32, 3, 424 (1970)
- (6) R. B. Jacobs, et al.: Petrol. Industries 19, 9 (1967)
- (7) 木村, 他: 第1回安全工学国内シンポジウム講演予稿集 64 (昭 45)
- (8) 北村: 電学誌 86, 176 (昭 41-6)
- (9) 大滝: 高分子 10, 363 (昭 36)
- (10) G. Schön, et al.: Static Electrification Con. 11, 138 (1971)
- (11) A. W. Bright, et al.: J. Phys. D (Appl. Phys.) 6, 966 (1973)
- (12) 北村・上田: 第17回静電気研究発表会講演要旨集 35 (昭 47)
- (13) 北村・上田: 昭49電気学会全大 960
- (14) 高分子学会編: 静電気ハンドブック 89 (昭 42) 地人書館
- (15) B. Hampel, et al.: Chemie Ing. Techn. 29, 5, 323 (1957)
- (16) W. M. Bustin, et al.: Proc. A. P. I 37, III, 30 (1957)
- (17) 有本: 長岡工業高等専門学校研究紀要 6, 4, 161 (昭 45)
- (18) 北村・上田: 第20回静電気研究発表会講演要旨集 p. 11 (昭 40)
- (19) ランダウ・リフシッツ著 (竹内 均訳): 流体力学 1 166 (昭 45) 東京図書刊
- (20) W. F. Cooper: British J. Appl. Phys. 4, 2, 11 (1953)
- (21) A. Klinkenberg: Proc. of the 4th World Petro. Cong. Section VII 5, 253 (1955)
- (22) 山田, 他: 流体力学 123 (昭 42) 朝倉書店
- (23) G. Schön & S. Masuda: J. Phys. D (Appl. Phys.) 2, 115 (1969)
- (24) 伊藤・上田: 昭38電気四学会東海支連大 29