

論 文

液体誘電体の電気伝導に及ぼす界面活性剤の影響

下川 博文*, 大橋 朝夫**

(1987年2月24日受理)

Effects of Surfactant on Electrical Conduction in Dielectric Liquid

H. SHIMOKAWA* and A. OHASHI**

(Received February 24, 1987)

The ion mobility for various dielectrics has been calculated by some investigators from the peak time of the transient current after a polarity reversal or after a step voltage application. Recently we have clarified that these peak phenomena are caused by space charge effect due to the unbalance of positive and negative ionic densities. This paper presents the experimental condition where either positive or negative ions exists excessively in silicone liquid. It is found that, for a solution containing ionic surfactant (Aerosol OT) the unbalance of positive and negative ionic densities already develops before a voltage application, and for Carboxylic Acids the unbalance develops after a voltage application.

1. まえがき

高度に純化されているもの以外の通常の絶縁液体の電気伝導は、液体中に偶存するイオンによるものが支配的であると考えられている。筆者らは不純物イオンが伝導を支配している場合に対して、正弦波電圧印加時の誘電特性¹⁾と電気伝導²⁾、初期電圧印加時³⁾、電圧極性反転時⁴⁾および短絡時⁵⁾の過渡電気伝導の数値解析した結果を報告してきた。これらの報告のなかで、試料中の正負イオンの数にアンバランスがあると、過渡電気伝導特性や誘電特性に特異な現象が現われることを見いだした。つまり液体が帶電していると、初期電圧印加時や極性反転時の過渡電流波形および短絡時の放電電流波形にピークが発生すること、さらに $\tan \delta$ の印加電圧依存性に極大値が存在することがわかった。従来、別々に扱われてきたこれらの現象は、正負イオンの数のアンバランスにより過剰に存在するイオンの空間電荷効果に起因することが明らかになってきた。

そこで次に液体中の正負イオンの数のバランスがいつ崩れるのか、実験条件依存性はどうか、また流動帶電や

接触帶電との関係はどうか、などが興味の対象として浮かび上がってくる。

本報告は絶縁液体中に界面活性剤のような性質をもつ不純物を混入したときの、過渡電気伝導特性の実験結果について報告したものである。いつ、どのような実験条件下で、液体中の正負イオンの数のバランスが崩れるのかを調べることを目的としている。界面活性剤は帶電防止剤などとして液体誘電体中に混入されることがあり、流動帶電現象などとの関連として、その電気伝導機構を調べることは重要な意味をもつものと思われる。水溶性の界面活性剤の性質については從来からよく調べられている⁶⁾が、油溶性の界面活性剤の性質、とくに電気的特性についてはあまり研究されていないのが現状である。

2. 実験方法

動粘性係数 1 cSt のシリコーン油を蒸留したのち液体試料として供した。シリコーン油に界面活性剤を適量混入し、1 日以上放置したのち dry air あるいは wet air 中で測定を行なった。Dry air はシリカゲルを、wet air は水を測定系に設置することにより実現した。測定はすべて室温で行なった。電極は 2 枚のスライドガラス上に金属 (Al や Cr など) を真空蒸着したのち、重ね合させてつくる微小ギャップ蒸着電極を用いた¹⁾。電極間のギャップ長は数 μm から 10 数 μm であり、電極面積は $2 \times 2 \text{ mm}^2$ である。

使用した過渡電流測定回路を図 1 に示す。試料を流れ導電電流の抵抗 R での電圧降下を高速直流増幅器で約

* 幾徳工業大学電気工学科 (243-02 厚木市下荻野 1030)
Department of Electrical Engineering, Ikutoku Institute of Technology, 1030, Shimoogino, Atsugi, 243-02 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, Yagusa-cho, Toyoda, 470-03 Japan

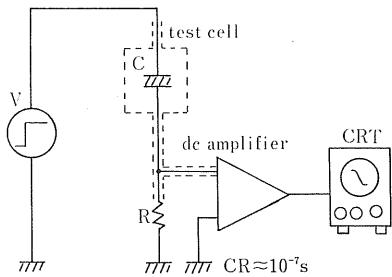


図 1 測定系

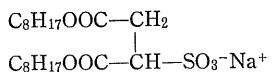
Fig. 1 Schematic diagram of measuring apparatus.

200 倍に増幅して観測する。この測定系では 10^{-10} A 以上の電流を観測することができる。なお、印加電圧の立ち上り時間は回路系の時定数 CR よりも十分に小さくする必要がある。

図 1 の測定回路を使って、試料間に電圧極性反転電圧および初期電圧を印加後の過渡電流を測定した。極性反転前の電圧の大きさは反転後の電圧と同じである。極性反転後の過渡電流の大きさに比べて、反転直前の電流が十分小さくなるように反転前電圧印加時間を大きくした。初期電圧印加の場合には、以前の測定の影響を除くために電圧印加前に電極間を十分長時間（10 分間以上）短絡した。

3. 陰イオン性界面活性剤に関する実験結果

陰イオン性界面活性剤として Aerosol OT (本論文では以後略して AOT と記すことにする) を使用した。界面活性剤は親水基と疎水基を有するが、その疎水基が二つ以上に分枝しているものは油のような非水系の液体にも容易に溶解する。AOT は



の構造をもつためシリコーン油中によく溶ける。

ここでは電圧極性反転後の電流波形の特性について述べる。

3.1 Dry air 中での結果

Dry air に調整した恒温槽中にテストセルを 1 日以上放置したのち実験を行なった。1 日程度放置した場合、シリコーン油中の水分含有量は 10~20 ppm 程度に減少する。

図 2 は AOT を 300 ppm ほど混入した試料の電圧極性反転後の電流波形の一例を示したものである。同図より電流波形に明確なピークが現われることがわかる。印加電圧が高くなるほどピーク時間 t_{\max} は小さくなり、電流ピーク値 i_{\max} は大きくなる。また印加電圧が 1.5 V 以下の低い値のときには、電流波形にはピーク時間を持つ

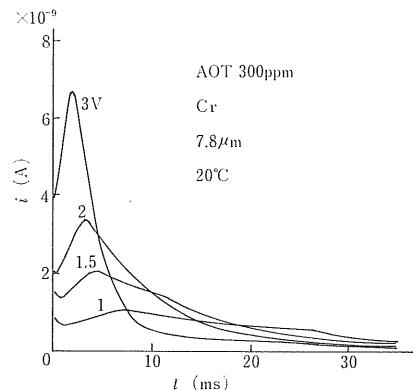
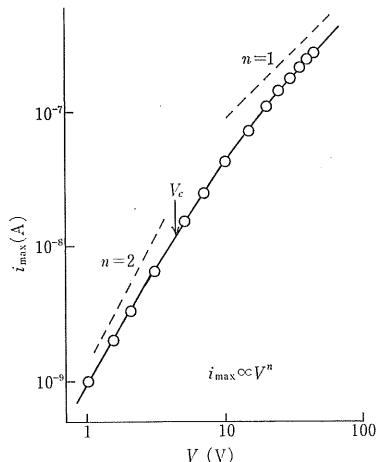


図 2 AOT を 300 ppm 含む試料の過渡電流の測定例

Fig. 2 A typical example of measurement of transient current (AOT 300 ppm).

図 3 図 2 より求めた電流ピーク値 i_{\max} の電圧依存性Fig. 3 Voltage dependence of peak current i_{\max} .

いたのち平坦部が現われることがわかる。

図 3 は図 2 から求めた i_{\max} の電圧依存性を両対数紙にプロットしたものである。同図より低電圧側では 2 乗則に近く、高電圧側ではオーム則が成立することがわかる。図 2 の電流波形を時間に関して積分することにより、キャリヤの密度 n_0 を求めることができる。よく知られているように、誘電体に直流電圧を印加すると、過渡電流が流れた後、もれ電流が長時間流れ続ける。このもれ電流はきわめてゆっくりと減少し続けることが多いが、その大きさは通常過渡電流のピーク値に比べて十分に小さい。 n_0 の算出にあたっては、過渡電流に比べて変化が十分に小さくなった時点でのもれ電流成分は除いた。図 4 はこのようにして求めたキャリヤ密度 n_0 の電圧依存性である。同図より n_0 は印加電圧にあまり依存しないこ

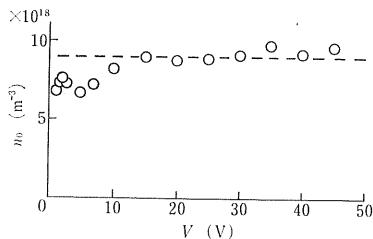


図 4 図 2 より求めたキャリヤ密度 n_0 の電圧依存性
Fig. 4 Voltage dependence of carrier density n_0 .

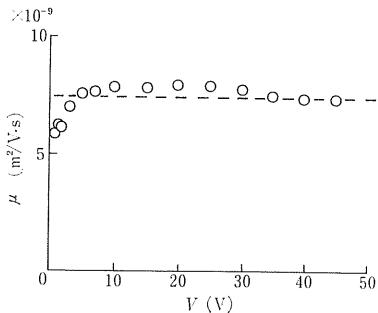


図 5 図 2 より求めた見かけの移動度 μ の電圧依存性
Fig. 5 Voltage dependence of apparent carrier mobility μ .

とがわかる。図 5 には図 2 の t_{\max} より求まるキャリヤのみかけの移動度 μ の電圧依存性を示す。みかけの移動度 μ は次式で計算される。

$$\mu = l^2 / V \cdot t_{\max} \quad (1)$$

ここで、 l は電極間距離、 V は印加電圧である。 μ の値は $7.5 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{Vs}$ 程度であり、印加電圧にあまり依存しないことがわかる。

3.2 水分の効果

液体中の水分含有量の効果を調べるために、試料を dry air 中に 3 日間放置したのち、相対湿度 100% の霧潤気中に設置した。その後、電圧極性反転電圧を随時印加して電流波形を測定した。また、同時に液体中の水分含有量をカールフィッシャー法で測定した。

図 6 は AOT を 300 ppm ほど含む試料の電流波形の経時変化を、10 分間から 95 時間にわたって観測した結果を示したものである。図中の電流波形に付いているパラメータは、試料を wet air 中に設置後の経過時間を示している。なお、印加電圧は 10 V である。同図より、wet air 中に設置したのち数時間までは電流波形は単純なピークをもち、そのピーク値 i_{\max} は設置後の時間の経過とともに増加することがわかる。約 6 時間を過ぎると i_{\max} は減少し始め、それとともに電流波形に平坦部が見られるようになる。またピーク時間 t_{\max} は小さくなる。さらに時間が経過すると、 i_{\max} は減少し、ピーク

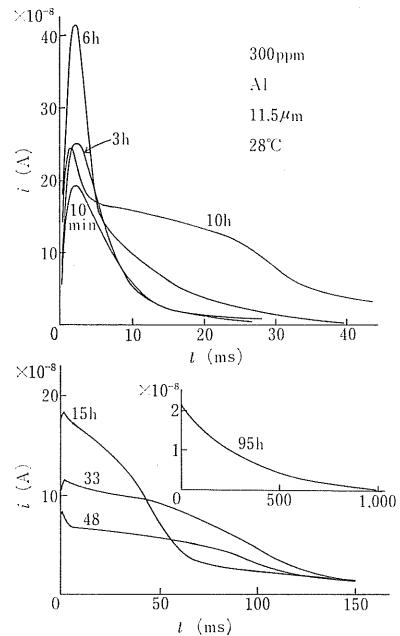


図 6 過渡電流への水分の効果
Fig. 6 Effects of moisture on transient current.

はしだいに目立たなくなる。95 時間後にはピークは消滅し、電流は単調に減少する。

図 7 は、図 6 の結果より求めたキャリヤ密度 n_0 と見かけのキャリヤ移動度 μ の経時変化を示したものである。同図には、同時に測定した試料液体中の水分含有量の経時変化も示してある。経過時間が数時間までは、 μ と n_0 の値に変化はほとんど見られない。それ以後には時間の経過とともに μ と n_0 は増加し、10 数時間後ほぼ一定値になることがわかる。また、試料中の水分含有量も同様な経時変化を示すことがわかる。

これらのことから、試料液体中のキャリヤの量と性質と水分含有量には密接な関係があることが示唆される。また、液体中に多量の水分が溶解すると、電圧極性反転

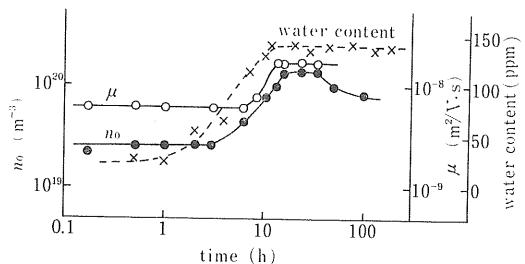


図 7 移動度 μ とキャリヤ密度 n_0 および水分含有量の経時変化

Fig. 7 Variation of μ , n_0 and water content with the lapse of time.

後の電流のピーク発生が抑えられることがわかる。

4. カルボン酸に関する実験結果

カルボキシル基を親水基-COOH としてもち、アルキル基 C_nH_{2n+1} を疎水基としてもつ各種のカルボン酸も界面活性剤と同様な性質をもつ。とくに親水基と疎水基の適当なバランスのとれたものは、非水系の液体中に容易に溶解することができる。

カルボン酸にはラウリン酸やミリスチン酸などの飽和脂肪酸と、オレイン酸やリノレン酸などの不飽和脂肪酸がある。飽和脂肪酸は高温でシリコーン油に溶解するが、不飽和脂肪酸は室温においても容易に溶解する。ここでは電圧極性反転後の電気伝導の結果について述べる。

4.1 Dry air 中での結果

図 8 はオレイン酸 $CH_3(CH_2)_7CH=CH_3(CH_2)_7COOH$ を 850 ppm ほど含む試料の電流波形の一例を示したものである。電流波形に明確なピークがあることがわかる。図 9 と図 10 は、それぞれ図 8 から求めた i_{\max} と n_0 の電圧依存性である。両図より、 i_{\max} と n_0 は次式の電圧依存性をもつことがわかる。

$$i_{\max} \propto V^{2.5} \quad (2)$$

$$n_0 \propto V^{0.9} \quad (3)$$

印加電圧が増加するとキャリヤ密度が増すことから、電界解離による新たなキャリヤの発生が起こっていることが示唆される。

図 11 は図 8 の t_{\max} から(1)式を用いて求めた見か

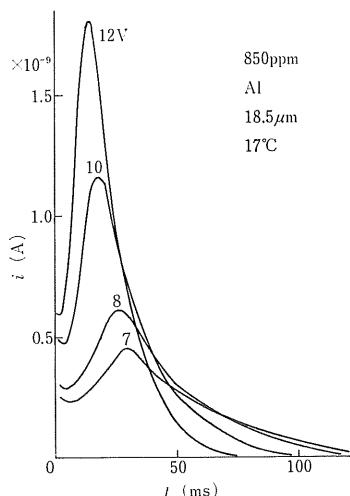


図 8 オレイン酸を 850 ppm 含有する試料の過渡電流波形の電圧依存性

Fig. 8 Voltage dependence of transient current wave form (Oleic acid 850 ppm).

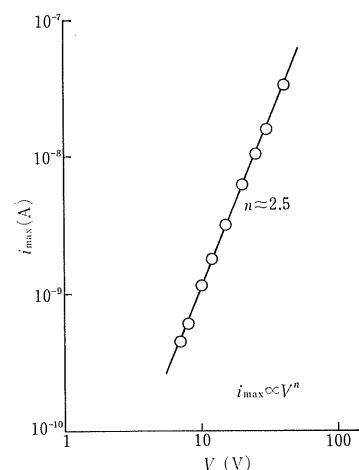


図 9 図 8 の結果より求めた i_{\max} の電圧依存性

Fig. 9 Voltage dependence of i_{\max} (Oleic acid).

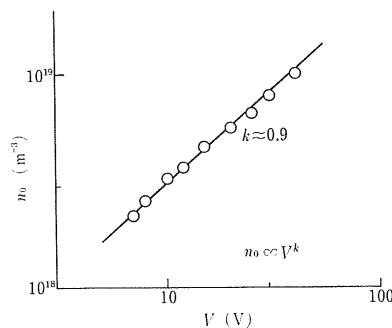


図 10 図 8 の結果より求めた n_0 の電圧依存性

Fig. 10 Voltage dependence of n_0 (Oleic acid).

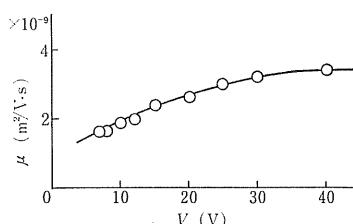


図 11 図 8 の結果より求めた μ の電圧依存性

Fig. 11 Voltage dependence of μ (Oleic acid).

けの移動度 μ の電圧依存性である。AOT の場合とは違って、電圧の上昇とともに μ の増加が見られることがわかる。

他のカルボン酸においてもオレイン酸の場合と同様な結果が得られ、親水基の大きさの違いによる差はあまりはっきりしなかった。

4.2 水分の効果

図 12 はオレイン酸を 400 ppm ほど含む試料を wet

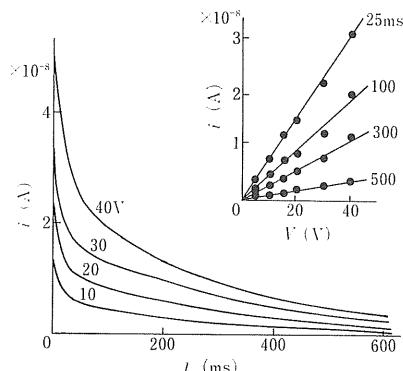


図 12 オレイン酸を 400 ppm 含む試料の過渡電流 (水分含有量 123 ppm)

Fig. 12 Transient current in sample liquid with 400 ppm Oleic acid. Water content was 123 ppm.

air 中に 1 日放置した場合の電圧極性反転後の電流波形の測定例である。水分含有量は 123 ppm である。ピークは現われず、電流は単調に減少することがわかる。同図には、時間 t をパラメータとしたときの電流の電圧依存性も示してある。 $t=$ 一定においてオーム則が成り立つことがわかる。電流の減少過程は、印加電界によるキャリヤの電極へのスイープアウトの過程であると思われる。

他のカルボン酸を混入した場合にも水分を多量に含む場合には、電圧極性反転後の電流波形にピークは見られなかつた。

このように、AOT の場合と同じように、カルボン酸を含有するシリコーン油中の水分はピーク発生を抑える効果をもつことがわかる。

5. 考 察

4 章では次のことがわかった。

(1) 各種界面活性剤を含むシリコーン油では dry air 中で電圧極性反転後の電流波形にピークが生じる。

(2) シリコーン油中に含まれる水分はそのピーク発生を抑制する。

次に、以前に報告した⁴⁾ 数値計算の結果を述べた後、いつ正負イオンの数のバランスが崩れ液体が帶電するようになるのか、界面活性剤の溶解状態、電極金属の影響について以下に考察する。

5.1 数値計算の結果

過渡電気伝導の理論計算あるいは数値計算に関しては多数の報告がある⁷⁻¹¹⁾。それらのほとんどは過渡空間電荷制限伝導(いわゆる過渡 SCLC)に関するものであり、一方の電極から電荷が注入されるとして計算されたもの

である。本論文での印加電界は高い場合でも $5 \times 10^6 \text{ V/m}$ 程度である。また、 $1 \times 10^5 \text{ V/m}$ 以下低電界においても電流波形にピークが見られる。これらのことから電流ピーク発生の原因は電極からの電荷の注入による過渡 SCLC であるとは考えにくい。著者らの以前の報告⁴⁾は、電圧印加前に何らかの原因で電極間の正負イオンの数にアンバランスが生じていると仮定した場合の計算例について述べたものである。電圧極性反転直前には、反転前の電圧の大きさに応じてキャリヤが電極間に分布した状態にある。なお、キャリヤの数は印加電圧によらず一定と仮定している。詳しいことは文献 4) を参照されたい。

著者らの数値計算の結果を以下にまとめる。

(1) 正負イオンの数に 1 割ほどのアンバランスがあると、電流にピークが発生する。

AOT やカルボン酸を含む場合には、極性反転時に正負イオンの数がアンバランスになっていると思われる。

(2) $t_{\max} \approx 1/V$

AOT では上式が成り立つが、カルボン酸では成り立たない。

(3) 低電圧側では $i_{\max} \propto V^2$ 、高電圧側では $i_{\max} \propto V$ 、つまり低電圧側においては電流は過剰なキャリヤによる空間電荷制限をうける。

水分をほとんど含まない場合、AOT では数値計算の結果と一致するが、カルボン酸の場合には一致しない。カルボン酸を含む試料では、印加電圧の上昇とともにキャリヤの数が増加する。

(4) 電極間の静電容量を充電するに要する電荷量 CV よりも、過剰なキャリヤの電荷量のほうが大きいときには、電流波形に平坦部が現われる。

AOT の場合のみ平坦部が現われた。

(5) 過剰キャリヤの電荷量と CV の値が等しくなるときの印加電圧の値 V_e はオーム則と二乗則の間にくる。

AOT の場合、図 3 に示したように境界の電圧 V_e はオーム則と二乗則の間にくる。

正負イオンの数にアンバランスがあり液体が帶電している場合には、初期電圧印加後の電流波形にもピークが現れることが数値計算の結果からわかっている⁸⁾。

5.2 Aerosol OT の場合

図 13 は AOT を 40 ppm ほど含む試料に 20 V の初期電圧を印加した場合の電流波形の一例である。電流波形に明確なピークが見られる。このことから AOT を含むシリコーン油では、電圧を印加する以前にすでに正負イオンの数のバランスが崩れて帶電していると考えられる。このことは電圧印加前に AOT 分子と電極金属との間で電荷のやり取りがあることを意味する。AOT は界面活性剤であるので、その活性剤分子の一部が電圧印加

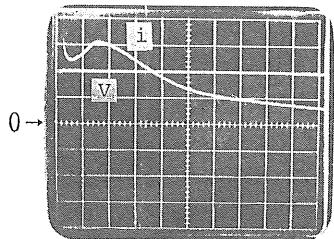


図 13 AOT を 40 ppm 含む試料に初期電圧を印加したときの過渡電流

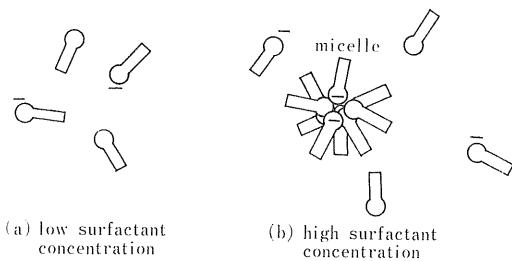
Fig. 13 Transient current after a step voltage application (AOT 40 ppm).

前に電極-液体界面に吸着していると考えられる。それゆえ、電荷のやり取りの可能性は十分に考えられる。

非水系の液体に溶け込んだ活性剤分子は水系の場合とは異なり、イオン性の活性剤であってもほとんど解離していないという報告がある^{12,13)}。図 6 の AOT を 300 ppm 含む場合のデータで考えると、水分含有量が小さいときには活性剤分子は 1,500 個に 1 個が、十分に水分を含むときには 250 個に 1 個が解離している計算になる。つまり、シリコーン油に溶解している活性剤分子の中のごく一部が解離し、伝導を支配していることがわかる。キャリヤの移動度の値が液体中の水分量に依存することも含めて考えると、シリコーン油中の AOT 分子の溶解状態は液中水分量に大きく依存することがわかる。

ところで、図 14 にモデル的に示したように界面活性剤が液体中に多量に含有するようになると、ミセルと呼ばれる活性剤分子の集合体をつくるようになるといわれている^{12,13)}。非水系の液体では、ミセルは疎水基を外に出して内には親水基が集まるような構造、いわゆる逆形ミセルを構成している。その親水性になった内部には水分子を取り込むことができる。図 15 には AOT 含有量と飽和水分含有量との関係を示した。100 ppm 以上の AOT 含有量で飽和水分含有量が直線的に増加していることがわかる。この値に相当する界面活性剤含有量はミセル形成臨界濃度 (critical micelle concentration, 略して CMC) と呼ばれており、これ以上の濃度で液体中にミセルが形成されると考えられている。シリコーン油中の AOT の場合には、 $CMC \approx 100 \text{ ppm}$ である。図 15 中の b/a は可溶化能と呼ばれており、10.4 mol/mol 程度の値である。これは活性剤分子 1 個に 10 個程度の水分子が関与していることを示している。

液体中のキャリヤとしては、活性剤イオンおよび小さな対イオンである Na^+ が考えられる。AOT 含有量が 100 ppm 以上のときには、ミセルを形成する活性剤分子の一部が解離して大きなミセルイオンとして動いている。



(a) low surfactant concentration

(b) high surfactant concentration

図 14 ミセルの形成

Fig. 14 Formation of micelle.

と考えられる。3.2 節で述べたように、キャリヤの移動度や密度が水分含有量に大きく依存することから、ミセルを形成する活性剤分子がどの程度の割合で解離しているかは液体中の水分含有量に大きく依存していると考えられる。シリコーン油の電気伝導に及ぼす水分の影響については、Hakim ら¹⁴⁾と梅津ら¹⁵⁾の報告がある。Hakim らは油中水分が直流導電率に顕著な影響を与えることを報告している。また、梅津らはシリコーン油中の水分の分散状態について詳しく考察しており、1 cSt から 10 cSt の低粘度油の交流導電率は水分含有量が約 150 ppm まではあまり水分の影響を受けないことを報告している。これらの報告は界面活性剤のような不純物を含まない純粋な試料についての実験結果であり、イオン種をプロトンあるいは水酸イオンに求めている。本実験の測定系では、界面活性剤を含まない場合には、十分に水分を含有するときでさえ電流を検出できなかった。このことから、本実験ではイオン種を界面活性剤分子に求めることは妥当であることがわかる。

図 14 のミセル形成のモデル図からもわかるように、活性剤を含むシリコーン油中には大きなイオンと小さなイオンが存在する。また小さな対イオンである Na^+ もある。図 16 には AOT を 400 ppm ほど含む試料に初期電圧を印加したときの過渡電流波形の一例を示した。二つのピークが現われていることから、少なくとも 2 種

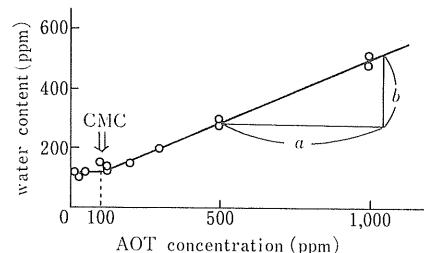


図 15 シリコーン油中の AOT 濃度と水分含有量の関係

Fig. 15 Relation between AOT concentration and water content in silicone liquid.

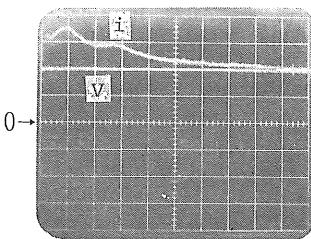


図 16 AOT を 400 ppm 含む試料に初期電圧を印加したときの過渡電流

Fig. 16 Transient current after a step voltage application (AOT 400 ppm).

類のキャリヤが存在すると考えられる。

AOT をシリコーン油中に含有させてその過渡電気伝導を測定していると、ピークが一つのときもあり、二つのときもある。その再現性に悩むことがある。液体中のキャリヤは微量な水分や、電極表面の性状に微妙に影響されると考えられ、さらに詳細な実験が必要である。

5.3 カルボン酸の場合

各種のカルボン酸を含むシリコーン油においては、電圧極性反転時の電流波形にピークが見られることから、極性反転時に正負イオンの数がアンバランスになっていると考えられる。しかしながら、キャリヤの数が一定と仮定したときの数値計算の結果と i_{\max} の電圧依存性の点において、その傾向が一致しない。これは図 10 に示したようにキャリヤの数が電圧の上昇とともに増加することに原因するものと思われる。図 11 に示したように、キャリヤの見かけの移動度が印加電圧の上昇とともに大きくなるが、この原因はよくわからない。キャリアの数の増加と結びつけて考える必要があるようと思われる。図 17 はオレイン酸を 400 ppm ほど含有する試料に初期電圧を印加した場合の電流波形の写真である。同図より電流にピークは見られず単調に減少していることがわかる。他のカルボン酸においても dry, wet を問わず、初期電圧印加時の電流波形にピークは見られなかった。

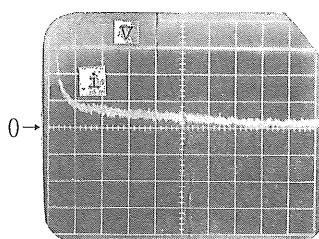


図 17 オレイン酸を 400 ppm 含有する試料の初期電圧印加後の過渡電流

Fig. 17 Transient current after a step voltage application (Oleic acid 400 ppm).

以上のことから、カルボン酸を含むシリコーン油では電圧極性反転時に正負キャリヤの数にアンバランスが生じていること、そしてそのアンバランスは極性反転前の電圧に原因することがわかる。つまり、まず極性反転前の電圧印加によって正負イオンはそれぞれ電極にスイープされる。そしてそこでの電荷の失い方が正負イオンで異なるために、電圧極性反転時には液体が帶電するようになると考えられる。

5.4 電極金属の影響

電極材料として Al と Cr を使って電極金属の影響を調べてみたところ、AOT を試料として用いた場合にわずかに違いが見られた。みかけの移動度 μ の値は Cr のほうが大きいこと、また Cr の場合のほうが電流波形は長く尾を引くことがわかった。電荷の受け渡しには金属-液体界面の性質が大きく影響すると思われる所以、今後さらに詳細な実験が必要である。

6. ま と め

以上述べたことをまとめると、

- 1) 陰イオン性界面活性剤である AOT を含む試料では、電圧印加前に既に正負イオンの数がアンバランスになっており、液体は帶電状態にある。
- 2) 各種のカルボン酸を含む場合には、電圧印加後に電極において正負イオンの数のバランスが崩れて液体は帶電するようになる。
- 3) 液体中の水分はこれらの帶電を抑える効果をもつ。

今後は、活性剤分子の金属-液体界面でのふるまいを明らかにすることが課題である。さらに、流動帶電や接触帶電との関係についても検討を進めるつもりである。

終りに、長年にわたってご指導いただきました元豊田工業大学教授・故上田實先生に感謝の意を表します。

考 参 文 献

- 1) 下川博夫、大橋朝夫、上田 實：電学論 A, 101 (1981) 45
- 2) 同上：電気学会全国大会, p. 231 (1982)
- 3) 同上：電学論 A, 105 (1985) 17
- 4) 同上：同上, 103 (1983) 197
- 5) 同上：第 14 回電気絶縁材料シンポジウム (1981) 65
- 6) たとえば、北原文雄、玉井康勝、早野茂夫、原 一郎編：界面活性剤、講談社 (1979)
- 7) A. Many and G. Rakavy : Phys. Rev., 126 (1962) 1980
- 8) M.A. Lampert and P. Mark : Current Injection in Solids, p. 116, Academic Press, New York (1970)
- 9) M. Zahn and S.C. Pao : J. Electrostatics, 1

- (1973) 235
- 10) M. Zahn and S.C. Pao : *ibid.*, 1 (1973) 249
- 11) M. Zahn, C.F. Tsang and S.C. Pao : *J. Appl. Phys.*, 45 (1974) 2432
- 12) 黒岩茂隆 : 表面, 4 (1966) 269
- 13) 今野紀二郎 : 石油学会誌, 105 (1972) 271
- 14) R.M. Hakim, R.G. Oliver and H. St-Onge : *IEEE Trans. Electr. Insul.*, EI-12 (1977) 360
- 15) 梅津 勇, 浅野和俊 : 静電気学会誌, 6 (1982) 173