

論 文

シリコーン油の電気伝導特性に及ぼす不純物の影響

梅 津 勇*, 菅 井 敏 幸*, 浅 野 和 俊*

(1982年7月12日受理)

On the Effect of Dissolved Impurities on Electric Conduction Phenomena in Silicone Fluid

I. UMETSU,* T. SUGAI* and K. ASANO*

(Received July 12, 1982)

It is well known that the dissolved impurities in dielectric fluid have a great influence on the electric conduction. And the reproducibility of conductivity measurement is related to the uniformity of impurity dispersed in fluid. In order to characterize the dissolution or dispersion of impurities in silicone fluid (dimethylsiloxanes), time variation of AC conductivity by stationary period is examined by adding small amount of *n*-butylalcohol. Furthermore, the effect of impurity on the AC conductivity and dielectric constant is also discussed by varying *n*-butylalcohol content. In the case of ionic impurities, the AC conductivity varies with amount of impurities and is independent of frequency. From the experimental data which are obtained from the relation between *n*-butylalcohol content and the peak phenomena in repetitive step voltage method when the polarity is reversed, it turns out that the peak current increases and the current after peak current seems to approach rapidly a certain value according to increase of impurity. Since the apparent mobility of the charge carrier which is estimated from this peak doesn't depend greatly on amount of impurities, the increase of conduction current might be due to the increase of charge carriers.

1. まえがき

絶縁液体の電気伝導に関する研究は、純度の高い試料の使用、測定技術の高度化など、実験上の改善により測定値の再現性の点で向上し、変位電流を除く導電電流の大部分は液体中に含有している不純物に依存していることが明らかとなっている¹⁻³⁾。しかし、実際には絶縁液体中の不純物は極微量であるので化学的分析は困難な場合が多い。そのため、自然に含有している不純物と導電現象との関係を実験的に確認している報告は少なく、逆に外部から化学構造の明らかな不純物を意図的に添加することにより導電現象を解明している研究が多い⁴⁻⁷⁾。なかでも、シリコーン油に関しては、土田ら^{2,6)}と下川ら⁵⁾の報告に見られる程度である。しかし、再現性に大きな影響を及ぼすと考えられる不純物の液体中に存在する状態をも考慮して検討している報告はみあたらないようである。

筆者らは前報で不純物伝導の一つとして、シリコーン油の交流導電率に及ぼす水分の影響をその分散の状態を確認しながら検討してきた⁸⁾。それから得た結果は、低粘度油の場合、ppm オーダの含有率でも低水分領域と高水分領域により、その影響に大きな相違があることや、さらに水分含有率と水滴の含有状態との関係などについてであった。

本報告は、不純物としてシリコーン油に比較的溶解しやすい *n*-ブチルアルコールを用いて、混入不純物の油中の溶解状態の問題を誘電特性の面から検討し、さらに交流導電率、比誘電率および電圧極性反転法におけるピーク現象などに及ぼす不純物効果について検討したものである。

2. 実験方法

2.1 試 料

ベースとなる試料は、動粘性係数 $10 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ のシリコーン油（ポリジメチルシロキサン）を主として用いた。シリコーン油は鉱油と比べて構造上の性質から吸湿性が強い。そして水分含有率が約 160 ppm 以上では、 $\tan\delta$ 、交流導電率などに大きな影響を及ぼすことが明ら

* 山形大学工学部電気工学科 (992 米沢市城南 4-3-16)
Department of Electrical Engineering, Faculty
of Engineering, Yamagata University, 3-16,
Jonan 4-chome, Yonezawa, 992 Japan

かとなっている⁸⁾。本実験では、脱ガスすることにより約 50 ppm 程度の水分を含む試料を用いたが、この値は水分の影響を無視できる程度の値である。なお、試料の水分測定は、脱水溶剤 PE を用いてカール・フィッシャー法（三亜化成式 MS 型）で行なった。

ジェット燃料や灯油のような石油系絶縁液体の場合は、帯電防止剤 ASA-3 を少量、添加することにより導電率が大きく変化することは知られているが⁹⁾、シリコーン油の場合、溶解する溶剤も限定され、また、少量、添加するだけで導電率が大きく変化するような不純物を見いだすことは困難である。

筆者らは、シリコーン油に溶解する *n*-ヘプタン、*n*-ドデカン、ベンゼン、*n*-ブチルアルコールなどの種々の液体を数%程度添加して、溶解あるいは分散の状態に関する問題や少量添加による導電率の変化について検討を行なった。その結果、よく溶解し、なおかつ導電率の変化の大きい*n*-ブチルアルコールをおもに不純物として用いた。また、逆にシリコーン油に不溶のエチルアルコールを用いて分散させた場合の実験も行なった。

添加方法としては、脱ガスしたシリコーン油に不純物を加え、その試料をただちにガラス容器に封入し、超音波で十分攪拌するようにした。その後、混入試料を注射器によりテストセルに封入した。なお、これらの不純物の量は体積パーセントで示している。

2.2 誘電率および交流導電率の測定

絶縁液体の電気的特性に及ぼす混入不純物の影響は、絶縁液体内の損失という考え方に基づく誘電率といわゆる直流電圧印加した場合の導電特性の両面で検討される必要がある。前者は絶縁液体の絶縁性能の尺度としてよく使用され、後者は移動するキャリアとその生成源および輸送現象の解明に使用されるなど両者ともに絶縁液体の電気物性の研究では必要不可欠なものであるからである。

測定電極は同軸円筒型（東亜電波 SME-35 型）で、電極間隔は 1 mm、幾何学的静電容量は 37 pF である。これに試料 20 ml を注入した後、ファラデーケージに入れ静電遮蔽を行ない、静電容量、 $\tan\delta$ をキャパシタンスプリッジ（General Radio 社 1615 A）によって測定した。このプリッジによる導電率の直接測定も可能であるが、 $\tan\delta$ を測定し、その値から導電率を求めるほうがより低い値まで測定可能があるのでこの方法を採用した。なお、このプリッジでは容量で $10^{-17} \sim 10^{-6}$ F、 $\tan\delta$ で $10^{-6} \sim 1$ の範囲を直読、測定可能である。

2.3 電圧極性反転法におけるピーク現象の測定

電極ホルダにセットされた測定電極は、図 1 に示すようにガード電極を設けた真鍮製平行円板（主電極の直径

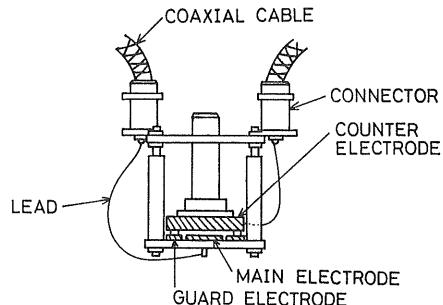


図 1 測定電極形状

Fig. 1 Electrode configuration.

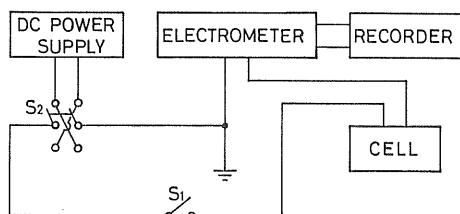


図 2 測定回路

Fig. 2 Measuring circuit.

2 cm) で、その電極間のスペーサには絶縁性のよいテフロンの薄板を用い数百 μm のギャップ長になるようにする。電極間距離は、電極面積がわかっているので電極の幾何学的静電容量を測定することによって算出できる。図 2 は電流波形観測用の測定装置の概略図を示している。

試料を入れた電極に直流電圧を印加し、極性反転はスイッチ S_2 により適宜行ない、そのとき流れる電流は微小電流計（Keithley Electrometer 600 B）で測定し、その時間変化は記録計で記録する。

筆者らは、先に電流のピーク現象は単純なものではなく電圧印加の回数により変化し、ある回数経た後には定常的反復現象となり、また極性反転周期に依存することを明らかにしてきた¹⁰⁾。それらのことをふまえて、電圧極性反転周期 (t_{int}) は 5 分に設定し、定常的ピーク現象を扱うものとする。

3. 実験結果および考察

3.1 誘電率および交流導電率に及ぼす放置時間効果

絶縁液体に不純物を添加し、その電気伝導について検討する場合、留意しなければならないことは、一連の実験中、液体内の不純物濃度の空間的分布の均一性がどうかということである。同一量の不純物が添加されているとしても、空間分布が不均一な試料の場合、実験結果の再現性の低下をまねくからである。

通常、溶解という現象は肉眼で観察したり、暗室におけるチンドル現象の観察により行なわれているが、その液体が2相に分かれる場合、液中に浮遊している物質がみられる場合、あるいは完全に混合して一つの相になる場合などの様相から溶解しているかどうかの判断がなされている¹¹⁾。しかし、水分、n-ブチルアルコールなどの液体不純物を含有させたシリコーン油についてそれぞれ上記の観察を行なってみたが、エマルジョンのような相の分離した状態あるいは浮遊状態をみるとめることができなかつたので、均一に分散あるいは溶解していると考えられる。

水分の分散の均一性に関しては、先に筆者らは水分のシリコーン油内への拡散時定数以上の長時間にわたって吸水あるいは脱水を行なつたり、その検証として容器の上部、下部の水分含有率をカールフィッシャー法で確認するなどして検討している⁸⁾。しかし、不純物の種類、量および不純物の大きさなどにより、均一性の検証は困難であることが多い。

誘電的緩和現象の機構の理論は、Debye理論のほかに物質の不均質構造に基づく場合の Maxwell-Wagner-Sillars の理論があるが、不純物が同一種類、同一量であっても、その誘電損失は分散した不純物粒子の集合状態や形によっておおいに異なることが明らかとなつていて¹²⁾。このようなことから、誘電特性が時間経過に依存しなければ内部の不純物分布は均一になつてゐる考え方、これらの特性が均一性の検証の一方法として採用可能と考えられる。以下、ここでは均一性の問題を比誘電率 ϵ_r 、交流導電率 σ_{AC} の放置時間効果、温度の影響の面から検討する。

表1は動粘度 $10 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ のシリコーン油に n-ブチルアルコールを 10% 添加したときの放置時間に対する ϵ_r 、 σ_{AC} を示したものである。これらの結果より、この程度の添加量の場合、放置時間が 10 時間経ても ϵ_r はほとんど変化しない。また、 σ_{AC} はわずかに単調増加している。

次に、溶解しない不純物としてエチルアルコール 0.2% を動粘度 $5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ のシリコーン油に添加した場合の σ_{AC} の変化を示すと表2のようになる。この結果より、n-ブチルアルコール添加の場合と違つて、添加量が少なくともエチルアルコールを添加した場合は、 σ_{AC} の放置時間依存性は顕著であることがわかる。その他、動粘度 $5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ のシリコーン油に不純物として n-ヘプタン、n-ドデカン、トリクロロエチレン、ベンゼンなど数%添加して実験を行なつてみたが、 σ_{AC} がたかだか 1~2 析上昇するだけであり、そのなかには放置時間によって変化するものもある。

表1 放置時間による ϵ_r 、 σ_{AC} の変化Table 1 Deviation of ϵ_r and σ_{AC} with stationary period.

Stationary period (h)	ϵ_r	σ_{AC} (pS/m)
0	2.995	517
2	2.993	542
6	2.996	615
10	2.993	656

表2 放置時間による σ_{AC} の変化Table 2 Deviation of σ_{AC} with stationary period.

Stationary period (min)	σ_{AC} (pS/m)
5	13.9
30	13.1
60	12.4
120	55.6

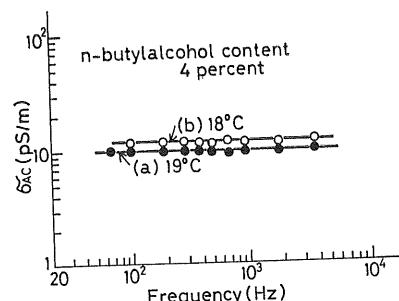


図3 交流導電率の周波数依存性

Fig. 3 Dependence of AC conductivity on frequency.

このように、不純物の種類によって ϵ_r 、 σ_{AC} が放置時間、温度などの影響をうける場合とうけない場合がある。一般に液体中のイオン、分子や微粒子は常にブラウン運動的な無秩序運動をしているが、n-ブチルアルコール添加の場合のように溶解状態では平衡状態に早く達する。それに対してエチルアルコールのように分散の場合には、平衡状態に達するのに時間がかかると考えられる。

図3は、温度を変化させた場合の溶解あるいは分散の変化の様子を調べるために、動粘度 $10 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ のシリコーン油に n-ブチルアルコール 4% を添加した試料を 19°C のとき (a) から -18°C まで降温させ、その後 33°C に上昇させ、さらに 18°C (b) に下げたときの σ_{AC} の値を示したものである。結果より、熱履歴を与えた後に元の示したものである。結果より、熱履歴を与えた後に元の温度に戻しても σ_{AC} はほぼ同じ値を示していることがわかる。また、n-ブチルアルコール 1.5% を添加した

場合、同様にして室温から 60°C にあげ、その後、室温に戻す実験でも σ_{AC} の変化はみられなかった。

以上より、*n*-ブチルアルコールを不純物として添加した場合、再現性、安定性がよく高い導電率を示すことなどから、後述する電圧極性反転法の不純物効果の検討に不純物として*n*-ブチルアルコールを用いることにした。

3.2 ϵ_r , σ_{AC} に及ぼす不純物量の影響

図4、図5は動粘度 $10 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ のシリコーン油に*n*-ブチルアルコールを不純物として添加したときの周波数 1 kHz における比誘電率 ϵ_r 、交流導電率 σ_{AC} と*n*-ブチルアルコール含有量の関係をそれぞれ示したものである。これらの結果より少量の*n*-ブチルアルコールの添加によって σ_{AC} は大きく変化し、また、 σ_{AC} , ϵ_r ともにこの実験の範囲、すなわち、約 10% 程度以下の*n*-ブチルアルコール含有量においては、含有量の増加とともに直線的に増大することがわかる。しかし、これらの直線を*n*-ブチルアルコール 100% に外挿して、公表されている*n*-ブチルアルコールの値と比較してみると著しく相違している。このことから、この実験より大きい濃度領域では単純な関係がないことがわかる。

また、図6は、 σ_{AC} の周波数依存性を*n*-ブチルアルコール含有量をパラメータとして両対数紙に示したものである。この図に示されているように、この範囲の周波数においては σ_{AC} の周波数による変化はみられない。これらの結果は先に報告した水分の場合⁸⁾とは違った結果を示している。比較のために水分の場合の結果を要約すると次のようになる。

- (1) 低粘度油の交流導電率は、水分含有率約 150 ppm (低水分領域) まではあまり水分の影響をうけないが、高水分領域では顕著に影響をうける。
- (2) 低水分領域では周波数に依存しないでほぼ一定であるが、高水分領域では周波数の増加とともに増大する。

水分の場合のこのような結果については、筆者らは σ_{AC} の周波数依存性 f^κ の指數 κ と水分含有率との関係より説明してきた。

このように、不純物によって内部の状態は異なることは予想できるが、シリコーン油に*n*-ブチルアルコールが溶解している状態は、水分の混入している場合と違って鎖状イオンになっている⁶⁾。それに対して水分の場合は、シリコーン油の連続相に水分の液相が分散している一種の W/O 型のエマルジョンを形成している⁸⁾。

一般に、 $\tan\delta$ が周波数に正確に反比例していることは、イオンの導電損失に起因しており^{4,13)}、その場合、 $\tan\delta$ の測定値から求めた交流導電率 σ_{AC} の周波数依存性は、周波数によって変化しないでその傾きはゼロであ

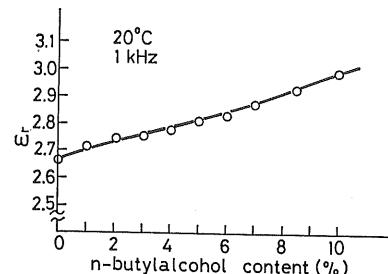


図4 比誘電率と*n*-ブチルアルコール含有量の関係

Fig. 4 Relation between dielectric constant and *n*-butylalcohol content.

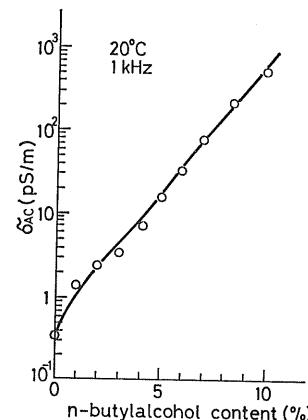


図5 交流導電率の*n*-ブチルアルコール含有量依存性

Fig. 5 Dependence of AC conductivity on *n*-butyl-alcohol content.

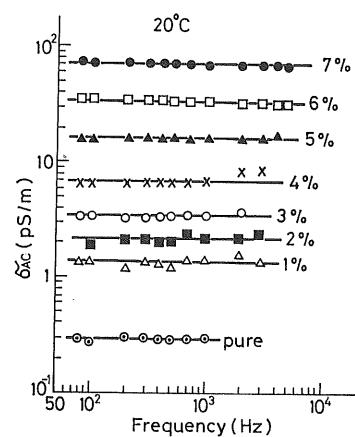


図6 種々の*n*-ブチルアルコール含有量における交流導電率と周波数の関係

Fig. 6 Relation between AC conductivity and frequency for various *n*-butylalcohol content.

ると考えられる。Bartnikas は、油浸紙ケーブルの誘電損失の周波数依存性を調べて、損失のメカニズムは油の分子構造による双極子配向損失より不純物イオンによる導電性損失が主であるとしている¹⁴⁾。そのなかでイオンの移動度、緩和時間、 $\tan\delta$ のピークなどの関係についても述べ、イオン濃度を求める式を導出しているが、測定周波数範囲では $\tan\delta$ のピークが出現しないことやイオンの電荷がわからないことから、実際にイオン濃度を求ることは困難であるとしている。このような考え方と図6の *n*-ブチルアルコールの添加量が増えても、 σ_{AC} の周波数依存性の傾きはゼロであるという結果から、導電機構を担っているのはイオンであると考えられる。しかし、この測定範囲の周波数においては、イオン濃度の情報を得ることは困難である。

3.3 ピーク現象に及ぼす不純物量および温度の影響

前項では不純物として *n*-ブチルアルコールを用い、比誘電率、交流導電率に及ぼす不純物効果について述べたが、以下では電圧極性反転法におけるピーク現象に及ぼす不純物効果について検討する。

ピーク現象は、平行平板電極であっても正と負側で必ずしも対称にはならないので¹⁰⁾、以下ピーク現象は対電極の極性が正の場合だけを扱うこととする。図7は定常的反復電流の時間特性を *n*-ブチルアルコール含有量をパラメータとして示したものである。これらの結果は、ギャップ長が 290 μm 、電界強度 130 kV/m、液温 57°C の場合である。なお、図において $t=0$ での瞬時充電電流は省略しており、また、電流変化の少ない約 16 秒以

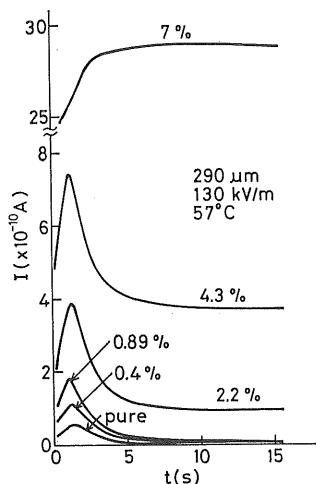


図 7 種々の *n*-ブチルアルコール含有量における電流の時間特性

Fig. 7 Time dependence of current wave form under various *n*-butylalcohol content.

上の結果も省略してある。

n-ブチルアルコール含有量の増加とともに電流は大きくなり、ピーク出現後、早く一定値に落ちる傾向を示している。しかし、数%以上の含有量になるとピーク現象は出現しない。これらの不純物含有量によるピーク値の変化は、含有量とともに空間電荷効果が強まりピーク値は大きくなるが、さらに含有量が多くなると拡散による効果が大きくなり、ピーク現象は出現しなくなると考えられる。

図8、図9は、電流ピーク値 I_p および I_p の出現時間 t_p の温度依存性を *n*-ブチルアルコール含有量をパラメータとしてそれぞれ片対数に示したものである。図より明らかなように、 I_p は *n*-ブチルアルコール含有量が多くなると増大し、 I_p の温度依存性の傾きは含有量とともに小さくなり、 t_p は *n*-ブチルアルコール含有量によつてあまり大きく変化しない。

先に筆者らはピーク現象に及ぼす温度、電界および電極間距離の影響について調べ、バルク中のキャリアが電圧印加とともに電極前面にスイープアウトされ、ピーク現象をひきおこす空間電荷を形成することや、空間電荷の増大が見掛けの移動度の増加に関与していることなどについて報告した¹⁰⁾。

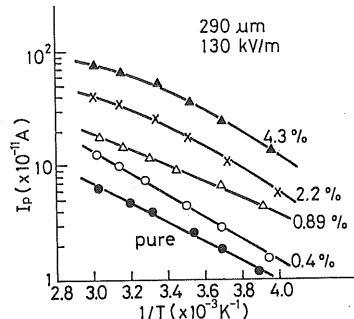


図 8 I_p の温度依存性
Fig. 8 Dependence of I_p on temperature.

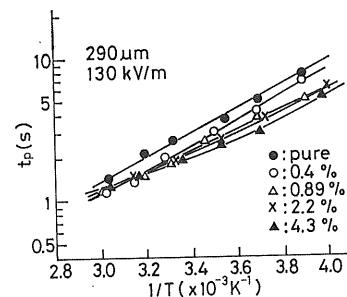


図 9 t_p の温度依存性
Fig. 9 Dependence of t_p on temperature.

いま、*n*-ブチルアルコール添加した場合のピーク現象を図10に示すようなA、B二つの領域からなる単純なモデルで考えた場合、A領域に寄与するのは電極前面に形成された空間電荷であり、B領域は再結合、解離などによるイオンの平衡状態に基づくものである。鐘ヶ江らは誘電率の大きな液体、あるいは双極子モーメントの大きな添加物がある量以上混入していれば解離定数は大きくなり、平衡漏れ電流は早く観察されることを指摘している¹⁵⁾。*n*-ブチルアルコールの誘電率は、17.8であるので図7でB領域が含有量とともに早く出現する結果は、この説を支持するものと考えられる。平衡漏れ電流領域とみなされる5分における電流値の温度依存性を*n*-ブチルアルコール含有量をパラメータとして求め、その活性化エネルギーを求める表3のようになる。これらの値は、*n*-ブチルアルコール含有量の増加にともない小さくなる傾向を示しており、すでにシリコーン油の薄膜で発表されているもの¹⁶⁾に近いものである。

また、一般にピーク出現時間 t_p より見掛けの移動度は求められているが、 t_p が含有量によってほとんど変化していないことは、見掛けの移動度 μ がほとんど変化しないことを示している。このことを見掛けの移動度をもとに考えてみる。図11は、図9の t_p を用いて見掛けの移動度 μ と $1/T$ の関係を*n*-ブチルアルコール含有量をパラメータとして示したものである。この図より、 $\mu-1/T$ の関係は直線であらわすことができ、 μ は*n*-ブチルアルコール含有量にはほとんど影響をうけないことがわかる。低温領域で若干の違いがみられるにすぎない。また、含有量の増加とともに傾きは小さくなっている。含有量ごとに見掛けの移動度の活性化エネルギーを求める表4のようになる。これらの値は*n*-ブチルアルコール含有量が増加するにつれて小さくなっている。シリコーン油の薄膜に各種不純物を添加した場合については、0.13~0.14 eVの値がすでに得られているが⁶⁾、表4の結果もそれに近い値を示している。ピーク現象をもとに得られる見掛けの移動度やその活性化エネルギーが、*n*-ブチルアルコール含有量によって少し変化していることは、異種のキャリアが生成したためというより、電極前面に蓄積された空間電荷の分布が若干変化するためと考えられる。

一般に、絶縁液体中の電流密度 j はキャリアの密度、電荷および移動度をそれぞれ n_i 、 e_i 、 μ_i 、印加電界を E とすると

$$j = \sum_i n_i \cdot e_i \cdot \mu_i \cdot E$$

とあらわされ、理論的には液体中の電気伝導は、キャリアの数と移動度について考えればよい。図7の結果のよ

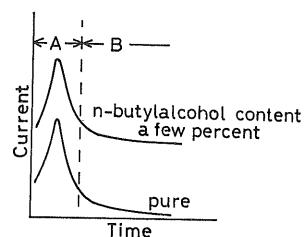


図10 電圧極性反転における電流のモデル

Fig. 10 Current model in repetitive step voltage method.

表3 *n*-ブチルアルコール含有量と導電電流の活性化エネルギーの関係

Table 3 Relation between *n*-butylalcohol content and activation energy of conduction current.

<i>n</i> -Butylalcohol content (%)	Activation energy (eV)
0	0.351
0.4	0.332
0.89	0.270
2.2	0.269
4.3	0.233

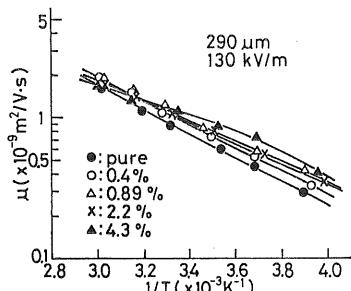


図11 種々の*n*-ブチルアルコール含有量における μ と $1/T$ の関係

Fig. 11 Relation between μ and $1/T$ for various *n*-butylalcohol content.

表4 *n*-ブチルアルコール含有量と移動度の活性化エネルギーの関係

Table 4 Relation between *n*-butylalcohol content and activation energy of mobility.

<i>n</i> -Butylalcohol content (%)	Activation energy (eV)
0	0.165
0.4	0.154
0.89	0.150
2.2	0.137
4.3	0.107

うに、*n*-ブチルアルコール含有量によって電流が増加していることは、見掛けの移動度が*n*-ブチルアルコール含有量によってほとんど変わらないことから考えて、キャリア数の増加によることを示している。

各種不純物混入の場合の移動度に関しては Yasufuku らの発表があり、そのなかで $\mu-1/T$ 特性の傾きは不純物により異なることが指摘されているが⁴⁾、筆者らが行った単一の不純物の添加量を変化した実験でも、その傾きは図 11 に示すように含有量の増加とともに小さくなっている。これらの結果から、絶縁液体の電気伝導に及ぼす不純物の影響は、不純物の量、すなわちキャリア数の増加が主になっていると考えられる。

4. む す び

不純物のシリコーン油中における溶解あるいは分散の状態について誘電特性の面から検討し、さらに交流導電率、比誘電率および電圧極性反転法におけるピーク現象に及ぼす不純物の影響について検討を行なった。本研究で得られたおもな結果を以下に要約する。

- (1) 絶縁液体の電気伝導現象の不純物効果の解明において必要なことは、不純物が液体内に均一に溶解あるいは分散しているかどうかということである。その場合の検証の一方法として、単純な方法であるが誘電特性の放置時間による変化を調べることが有効である。
- (2) 不純物が*n*-ブチルアルコールのようなイオンの場合の交流導電率は、水素結合を有する水分の場合とは異なり、不純物量に比例し周波数に依存しない。すなわち、含まれる不純物によって周波数依存性が異なる。
- (3) 電圧極性反転法におけるピーク現象は、不純物含有量の増加にともない大きくなり、ピーク出現後、早く一定値に落ち着き、ある量以上になるとピーク現象は出現しない。また、ピーク出現時間は含有量にあまり依存しない。この早く一定値に落ち着く現象は不純物の解離定数が大きいことを示している。

(4) 見掛けの移動度やその活性化エネルギーは空間電荷の分布の若干の影響はあるものの、不純物量によってほとんど変化しない。その結果、不純物量の増加による導電電流の増大はキャリア数の増加によるものと考えられる。

絶縁液体の電気伝導に及ぼす不純物の影響は、不純物が気体、固体、液体それぞれの場合で異なり、またその化学的、物理的性質によても異なるので、今後これらの点に関しても検討していくつもりである。

終りに試料としてシリコーン油を提供くださったトーレ・シリコーン株式会社に厚くお礼申し上げる。

参考文献

- 1) R. Guizonnier: J. Electrochem. Soc., 108 (1961) 519
- 2) 土田縫夫, 上田 実: 電気学会論文誌A, 99 (1979) 535
- 3) Z. Krasucki: Inst. Phys. Conf. Ser., 27 (1975) Chap. 1
- 4) S. Yasufuku, T. Umemura and T. Tanii: IEEE Trans. Elect. Insul., EI-14 (1979) 28
- 5) 下川博文, 大橋朝夫, 上田 実: 電気学会論文誌A, 101 (1981) 45
- 6) 土田縫夫, 上田 実: 電気学会絶縁材料・高電圧合同研究会資料 EIM-82-49, HV-82-10 (1982) 73
- 7) 梅津 勇, 下川博文, 大橋朝夫, 上田 実: 昭和 55 年電気関係学会東海支部大会, p. 124, 電気学会 (1980)
- 8) 梅津 勇, 浅野和俊: 静電気学会誌, 6 (1982) 173
- 9) J.T. Leonard and H.W. Carhart: NRL Report 7415, Naval Research Lab., Washington, D.C. (1972)
- 10) 梅津 勇, 浅野和俊: 静電気学会誌, 6 (1982) 378
- 11) 日本化学会編: 新実験化学講座 基本操作 [1], p. 223, 丸善 (1978)
- 12) 岡 小天, 中田 修: 固体誘電体論, p. 97, 岩波書店 (1966)
- 13) R. Bartinikas: IEEE Trans. Elect. Insul., EI-9 (1974) 57
- 14) R. Bartinikas: IEEE Trans. Elect. Insul., EI-5 (1970) 112
- 15) 鐘ヶ江裕三, 宮本晃男: 電気学会論文誌A, 95 (1975) 372
- 16) H. Shimokawa, A. Ohashi and M. Ueda: J. Electrostat., 12 (1982) 179