液体誘電体薄膜の $10^{-5} \sim 10^{-1}$ s 領域の 電気伝導

正 員 下 川 博 文 (名古屋大)

正 員 大 橋 朝 夫 (名古屋大)

正 員 上 田 実 (名古屋大)

1. ま え が き

一般に、液体誘電体にステップ電圧を印加したときに流れる電流は時間の経過と共に減少し、やがてほぼ一定の値に達することは古くから知られている⁽¹⁾⁽²⁾。従来、この時間と共に減衰する電流は吸収電流、一定値に達したときの電流は平衡漏れ電流と呼ばれている。平衡漏れ電流に関する研究は多数報告されているが、吸収電流に注目した研究は少なく、電流の減衰機構はまだ十分に解明されていないのが現状である。考えられる電流減衰機構としては、まず第一に液体分子の配向分極に基づくものである。この配向分極は液体誘電体では $10^{-8} \sim 10^{-9}$ s の時間領域の現象であり、通常の電流測定では観測困難である。他の機構としては、電圧印加により伝導に寄与する要因が除かれる現象、いわゆる電氣的純化 (Electrical purification) が考えられる。Adamczewski 氏は、電流の減衰は主として次の過程に関係することを述べている⁽¹⁾。

- (1) 液体中の電解質不純物の除去
 - (2) 液体中の気ほう、あるいは電極表面に吸着した気ほうの消滅
 - (3) 液体中に偶存する電荷 (自由電子またはイオン) の除去
- もし、電氣的純化がこれらの過程に関係するとすれば、

電圧印加により電流の減衰の原因そのものがバルク液体から除去されてしまい、そのような液体に再び同じ電圧を印加しても、もはや前と同じ電流は観測されないであろう。つまり、電流の時間特性は再現性の乏しいものとなるであろう。また、充電電流が放電電流に等しくない結果 (非線形) が得られるものと思われる。従って、もし電流の時間特性に再現性と線形性が見られるならば、電流の減衰は他の過程によって起きていると考えなければならない。

液体誘電体の導電電流の時間特性に関するこれまでの報告は、ほとんどすべて 1 s 以上の時間領域における測定結果に関するものである^{(2)~(4)}。電極間に電圧が印加されると電極前面に空間電荷が次第に形成されるが⁽⁵⁾⁽⁶⁾、電圧印加後 1 s 以上の時間領域における測定では電圧印加によって生じた空間電荷の影響を避けることはできない。ゆえに、液体本来の性質を知るには 1 s 以下の時間領域での測定も重要であると思われる。

本論文は以上の点を考慮し、液体誘電体薄膜の電気伝導を $10^{-5} \sim 10^{-1}$ s の時間領域で測定し、導電電流の減衰過程の機構に関する知見を得ようとしたものである。実験には数 μm の厚さの液体薄膜を用いたが、液体を薄膜状にすると高電界が容易に得られる利点がある。本論文では 500 kV/cm 以下の電界における結果を示したが、破壊電界近くの高電界伝導特性については次の機会に報告する。

なお、油浸紙の絶縁性能の研究に関連して、さきに液体誘電体薄膜の誘電特性について報告したが⁽⁷⁾⁽⁸⁾、液体誘電体薄膜の電気伝導特性を解明することも意義

Electrical Conduction in Dielectric Liquid Films in Time Range $10^{-5} \sim 10^{-1}$ s. By Hirofumi Shimokawa, Member, Asao Ohashi, Member & Minoru Ueda, Member (Faculty of Engineering, Nagoya University).
下川博文: 正員, 名古屋大学工学部
大橋朝夫: 正員, 名古屋大学工学部
上田 実: 正員, 名古屋大学工学部

のあることと思う。

2. 実験方法

実験に使用した電極と電極ホルダは前報と同じものである⁽⁷⁾⁽⁸⁾。電極は金属を真空蒸着した大小2枚のスライドガラスを重ね合わせるにより構成されており、数 μm のギャップ長を持つ平行平板構造を成している。後で第1表に述べるように、 $10^{-5}\sim 10^{-1}\text{s}$ 領域の電気伝導は電極材料に依存しないが、本論文の結果はすべて電極材料としてAlを用いたものである。液体試料は動粘性係数1cSt, 10cSt および 100cSt のシリコン油（信越化学工業製）を主として用いた。

得られた結果が、シリコン油固有の性質であるのか、または液体誘電体共通の性質であるのかを調べるために、適宜 *n*-heptane, *n*-heptadecane も試料として用いた。シリコン油は鉱油などに比べて、吸湿性が強く、長時間大気中に放置しておいたものは百数十ppmの水分を含んでいるが、 10^{-2}Torr で2~3時間脱ガスすると水分含有率は10ppm程度に低下する。本実験では10ppm程度の水分を含む比較的純粋な試料を主として用いたが、水分の効果を調べる目的で水分含有率を10~170ppmの範囲でコントロールした試料も適宜使用した。なお、水分の効果以外の測定はすべて乾燥空気中で行なった。

1s以下の短時間領域の導電電流の測定回路を第1図に示す。電流の測定は第1図中の検出抵抗 R の電位降下を高速直流増幅器で増幅し、その出力をCRTに描かせ、それを写真撮影することによって行なった。測定回路の時定数(CR)は 10^{-7}s 程度の値である。よって、 10^{-5}s 以上の時間領域においては回路の瞬時充電電流は導電電流に比べて十分小さく無視することができる。直流増幅器は市販の高速用OPアンプ(Operational amplifier: NEC製 $\mu\text{PC}159\text{A}$)を用いて製作した。その入力インピーダンスは数百M Ω であ

第1図 測定系 ($R=1\sim 100\text{k}\Omega$)

Fig. 1. Schematic diagram of measuring apparatus ($R=1\sim 100\text{k}\Omega$).

第2図 印加電圧波形と電流波形

Fig. 2. Examples of applied voltage wave form and current wave form.

り、最小の電流検出感度は約 10^{-9}A である。また、立上り時間は $2\times 10^{-7}\text{s}$ である。印加ステップ電圧はパルス発生器より供給した。パルス発生器の立上り時間は約 $2\times 10^{-6}\text{s}$ であり、 10^{-5}s 以上の時間領域の測定に対しては十分小さいので、立上り時間の影響は無視することができる。

第2図に印加電圧の波形と導電電流の波形の測定例の写真を示す。なお、1回測定するごとに放電電流が充電電流に比べて十分小さくなるまで電極間を短絡した。このとき放電電流と充電電流は等しく、また再現性も良好であった。

3. 実験結果

〈3.1〉 10cStのシリコン油における導電電流

第3図は10cStのシリコン油を用いたときの60kV/cmの電界における導電電流の時間特性を温度をパラメータとして両対数グラフにプロットしたものである。同図には1s以上の時間領域における測定値もプロットしてある。ギャップ長は $5.1\mu\text{m}$ である。

第3図の時間特性は見かけ上第4図に示すような四

第3図 導電電流の時間特性

Fig. 3. Time dependence of conduction currents.

第4図 導電電流の時間特性の模式図

Fig. 4. Typification of time dependence of conduction currents.

つの時間領域(1)~(4)に分けることができる。同図より、ステップ電圧印加後の時間 t における導電電流 i は次式で表わされる。

$$i = A t^{-n} \quad (1)$$

ここで、 A : 定数,
 $n (0 \leq n \leq 1)$ は時間と温度に依存する。

第4図より次のことがわかる。一定温度では(1)の領域における n は、(2)の領域における n よりも大きい。また、(1)と(2)の両領域において n は試料の温度が高くなるほど減少する。(3)と(4)の領域における n は温度にほとんど依存しない。電流が一定になる時間〔(3)と(4)の領域の境の時間〕は高温になるほど短時間側へ移行する。なお、第3図の 126°C, 141°C および 156°C の曲線からわかるように、高温においては一定値に達したのち電流は再び減少する。これは空間電荷の形成と関係しているように思えるが、詳しいことは不明である。

第5図は第3図から求めた電圧印加初期の導電電流の温度依存性のアレニウスプロットである。同図よ

第5図 導電電流の温度依存性

Fig. 5. Temperature dependence of conduction currents.

第6図 U_i の時間依存性

Fig. 6. Time dependence of U_i .

り、ある温度範囲で電流は見かけの活性化エネルギー U_i を使って次式のように表わされることがわかる。

$$\left. \begin{aligned} i &= i_0 \exp(-U_i/kT) \\ U_i &= U_i(t, T) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここで、 i_0 : 定数、 T : 絶対温度、 k : ボルツマン定数

第5図より、 U_i は時間と温度の両方に依存することがわかる。

第6図には、第5図より求まる U_i の時間依存性を 70°C 以下と 120°C 以上の二つの場合について示す。なお、同図には 180kV/cm における結果も示してある。この図より電圧印加直後の U_i は非常に小さく、その後時間の経過と共に増加し、やがて一定値に至ることがわかる。つまり、導電電流の時間特性は見かけの活性化エネルギーが時間に依存する領域と、依存せず一定値をとる領域に分けることができる。二つの領域の境界の時間は 120°C 以上の温度領域では約 3×10^{-3} s であり、70°C 以下では約 1 s である。この境界の時間は温度の上昇と共に短時間側へ移行する。

また第3図と第6図を比較対照すれば、この境界の時間は(1)式の n が温度に依存する領域〔第4図の(1)と(2)〕と、依存しない領域〔第4図の(3)と(4)〕の境界の時間に相当することがわかる。つまり、見かけの活性化エネルギーの時間依存性から判断すると、領域(1)と(2)および領域(3)と(4)は同一と見てよいことがわかる。よって第4図に示したように、今後領域(1)と(2)を合わせて領域(I)、領域(3)と(4)を合わせて領域(II)と称することにする。なお、これらの特性は 60kV/cm と 180kV/cm の二つの電界で本質的な違いは見られない。

領域(I)と(II)では、 U_i のほかに既に報告したようにギャップ長依存性や電極材料依存性などにおいて差異が認められた⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。それらをまとめると第1表のようになる。この表からわかるように、シリコン油薄膜の電気伝導はバルク支配形伝導に続き、時間の

第 1 表 領域(I)と(II)の特徴
Table 1. Properties of regions (I) and (II).

	短時間側〔領域(I)〕	長時間側〔領域(II)〕
$i = At^{-n} (0 \leq n \leq 1)$	n は温度上昇と共に減少	n は温度に依存しない
U_i の時間依存性	時間と共に増加	なし
ギャップ長依存性	ギャップ長と共に増加	あまりなし
電極材料依存性	なし	あり
オーム則が成り立つ範囲	$< 500 \text{ kV/cm}$	$< 100 \text{ kV/cm}$
線形性	あり	あり
再現性	あり	あり

経過と共に電極支配形伝導へと移行していく。

本論文では領域(I)の伝導について更に詳しく述べる。

〈3・2〉 その他の試料における導電電流 100cSt のシリコン油薄膜の電圧印加初期の伝導が時間に依存する活性化エネルギーを持つことがわかったが、この特性がその他の絶縁性の液体誘電体にも見られるかどうかを調べてみた。

第 7 図は 180 kV/cm の電界における 100cSt のシリコン油の導電電流の時間特性を示したものである。同図より、伝導の見かけの活性化エネルギー U_i の時間依存性を求めたのが第 8 図である。この図からわかるように、100cSt のシリコン油においても電圧印加初期の伝導は時間に依存する活性化エネルギーを持ち、10cSt の場合と本質的な違いは見られない。また、1cSt のシリコン油でも同様な結果が得られた。

次に、第 9 図に n -heptadecane の導電電流の時間特性を示す。また第 10 図の実線は第 9 図より求めた

第 7 図 100cSt のシリコン油の導電電流の時間特性

Fig. 7. Time dependence of conduction currents for 100cSt silicone liquid.

U_i の時間依存性である。このように、 n -heptadecane においても電圧印加初期の伝導は見かけの活性化エネルギーが時間に依存する。更に、 n -heptane でも同様な結果が得られ、第 10 図の点線はその U_i の時間依

第 8 図 100cSt のシリコン油の U_i の時間依存性

Fig. 8. Time dependence of U_i for 100cSt silicone liquid.

第 9 図 n -heptadecane の導電電流の時間特性

Fig. 9. Time dependence of conduction currents for n -heptadecane.

第 10 図 n -heptadecane と n -heptane の U_i の時間依存性

Fig. 10. Time dependence of U_i for n -heptadecane and n -heptane.

第 11 図 導電電流の液中水分量依存性
Fig. 11. Water content dependence of conduction currents.

存性である。

以上のことから、一般に絶縁性の液体誘電体薄膜の電圧印加初期の伝導は、時間に依存する見かけの活性化エネルギーを持つとしてよさそうである。

〈3・3〉 ふんい気効果 10cSt のシリコン油を約 3 時間脱ガスしてから O_2 または N_2 ふんい気中に 2 日間放置したのち測定した電流値は、脱ガス直後の値とはほぼ同じであった。すなわち、 O_2 や N_2 はシリコン油薄膜の電気伝導特性には影響しないことがわかった。

一方、同じ試料を調湿したデンケータ中に放置し、油中水分含有率を種々変えてその導電電流を測定したところ、第 11 図のような結果が得られた。同図の結果は、各水分含有率について 1 週間ほど放置した後測定したものである。この図からわかるように、約 100 ppm までは導電電流は水分含有率にほとんど依存せず、100 ppm 以上では水分含有率の増加に伴って導電電流は増大する。

4. 考 察

以上の結果から、絶縁性の液体誘電体薄膜の電圧印加初期の導電電流の減衰は、液体のバルク中に偶存するイオンが電極へスワイプアウトされることによって生じる電気的純化により起こっているとは考え難い。イオン伝導であるとする、伝導の見かけの活性化エネルギーは時間に依存せず一定であると思われるからである。つまり、電圧印加初期の伝導は電子性の伝導であると考えられる。

次に、この導電電流の減衰過程について検討する。

伝導の見かけの活性化エネルギーが時間に依存する結果は、電圧印加後まず擬自由なキャリア（活性化エネルギー小）が伝導に支配的に寄与し、時間の経過と共に次第に深くトラップされたキャリア（活性化エネルギー大）の寄与が相対的に大きくなっていくことを暗示している。このような、いろいろなエネルギーレベルにあるキャリア（電子または正孔）の供給源が問題である。二重結合を持つ不飽和および芳香族炭化水素系液体では π 電子を有するため、そのホッピングによる電子的な伝導が生じると言われている⁽⁴⁾。それに対し、実験に用いた試料は二重結合を有しないので、それ自体がキャリアの直接の供給源になっているとは考えられない。また、シリコン油の場合では〈3・3〉節で述べたことから、100 ppm 以下の水分含有率の試料では液中の水分がキャリアの存在に直接関与していないと考えられる。また、 O_2 や N_2 もキャリアの存在に関与していないと考えられる。更に第 1 表に示したように、500 kV/cm の高電界までオーム則が成り立つことから、電極からの電子のショットキー放出や電界放出が起こっているとは考えられない。

一般に金属と誘電体が接触すると、両者の間の電気化学ポテンシャルの違いにより、液体中に電子が注入されると言われている（正孔の注入も考えられるが電子の場合で考える）⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。そこで、以下に電圧印加初期の伝導に寄与するキャリアは金属-液体の接触により注入された電子だと仮定すると、導電電流の減衰過程が定性的に良く説明できることを示す。

第 12 図に示すように、仕事関数 ϕ なる金属と電子親和力 χ なる誘電体を接触させる場合を考える。金属中の電子が誘電体の伝導帯に移るためには、 $\phi - \chi$ なる仕事を必要とする。電子移動の機構は真空中に電子がしみ出す機構と同じで、トンネル効果によってポテンシャル障壁を通るか、熱エネルギーによって障壁を

第 12 図 金属と誘電体の接触
Fig. 12. Contact between metal and dielectrics.

第 13 図 電子のエネルギーレベル (a) と伝導のモデル図 (b)

Fig. 13. Energy levels of electron (a) and models of conduction (b).

越えるかのいずれかである⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。試料の厚さが電荷の平均的注入深さ(デバイ長または特性長)に比べて十分大きい場合には、注入電子は誘電体中の金属表面に電子ふんい気 (Electron atmosphere) として存在する⁽¹²⁾。つまり、金属-液体界面の近傍で過剰電子 (Excess electron) として存在する。この注入電荷分布のデバイ長は、ボルツマン分布則とポアソンの式を使って容易に計算することができる⁽¹¹⁾。さて、試料の厚さがデバイ長に比べられるほど薄くなると、相対的に過剰電子は誘電体試料のバルク中にも存在するようになると思われる。

ところで、液体中の過剰電子の物理的状態に対するモデルが次の二つの場合について報告されている。すなわち、

- (1) 擬自由な電子^{(15)~(17)}
(Quasi-free electron)
- (2) トラップされた電子^{(18)~(20)}
(Trapped electron)

液体中で局時的、局所的に形成される第 13 図 (a) に示すようなエネルギー帯の伝導帯にある電子が擬自由な電子と呼ばれている。希ガス液体、液体メタン、テトラメチルシランおよびネオペンタンなどで擬自由な電子による伝導が報告されている^{(21)~(24)}。一方、局在準位にトラップされた電子は局在準位間のホッピングにより移動する。液体エタン、液体ブタン、*n*-ヘキサンおよび *n*-ペンタンなどではトラップ電子による伝導が報告されている^{(18)(20)~(22)(25)}。擬自由な電子は局時的、局所的に形成される伝導帯を局在準位にトラップされるまで移動すると考えられる。一方、非常に深くトラップされた電子は固体のように一定の場所に固定されておらず、トラップ状態で電界方向に負イオンとして移動すると考えられる。

さて、液体誘電体中に接触注入された電子は、外部電界が加わっていない熱平衡状態下では自由電子として存在するのではなく、第 13 図 (b) に示すように種々な準位にトラップされていると考えられる。液体分

子や不純物分子、あるいはそれらの分子の集団からの電子の離脱が熱活性により起こると仮定すると、トラップ電子の平均緩和時間 τ (寿命) は次式で与えられる。

$$\tau = \frac{1}{\nu} \exp(H/kT) \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 ν : 離脱周波数 (Escape frequency),
 H : 第 13 図 (b) に示したトラップのポテンシャル障壁の高さ

(3) 式は、浅くトラップされた電子は緩和時間が小さいので電圧印加初期の伝導に寄与し、深くトラップされた電子は緩和時間が大きく、従って電圧印加後期の伝導に支配的に寄与することを示唆している。ゆえに、種々な遷移が存在する場合には伝導の見かけの活性化エネルギーは電圧印加後時間の経過と共に増大する。

このように考えれば、〈3・1〉、〈3・2〉節で述べた伝導の見かけの活性化エネルギーの時間依存性は定性的に良く理解することができる。結局、電圧印加初期の電流の減衰過程は、電極金属から液体中へ接触注入された過剰電子の除去によって起こる電氣的純化の過程であると考えられる。

〈3・1〉節で述べたように、伝導の見かけの活性化エネルギーは長時間側において時間に対してフラットな特性を示す。このことは、これより深いトラップ準位が非常に少ないことを示唆している。そのために長時間側においては、電極からの電子注入が誘電を支配するようになると思われる。

電圧印加によって接触注入電子が電極にスweepアウトされると、金属と液体の電気化学ポテンシャルを等しくする方向に、新たに金属から液体中に電子が注入されると考えられるが、この注入過程の速度が問題

第 14 図 導電電流と短絡時間の関係

Fig. 14. Relation between conduction current and short-circuit time.

第 15 図 H の時間依存性Fig. 15. Time dependence of H .

である。金属-液体界面の電子が取り去られても、すぐに金属からそれと等量の電子が注入されるとすると電流は減衰しないことになる。そこで、電極間の短絡時間と導電電流の関係を測定した結果を第 14 図に示す。同図よりわかるように、電流は約 10s 以上短絡すると短絡時間に依存しなくなる。このことから、電極から新たに電子が注入され、再分布する過程は秒単位の時間を要する過程であることがわかる。よって、電圧印加初期においては電極からの新たな電荷の注入の影響は小さいと考えられる。導電電流と短絡時間との関連は接触注入の過程を知るうえで興味ある情報を与えてくれると思われるが、本論文ではこれ以上触れない。

(3)式中の ν が温度に依存しないと仮定すれば、 τ は試料温度が上昇すれば減少する。これは、伝導の見かけの活性化エネルギーの時間依存性の曲線が試料温度上昇により短時間側に移行することを意味する。(3)式中の H の時間依存性を計算してみる。(3)式の τ は電圧印加後の時間 t とおおよそ等しいと考えて良いと思われるので⁽²⁶⁾, H は

$$H = kT \ln(\nu t) \dots \dots \dots (4)$$

で与えられる。液体の ν がわからないが、固体の場合を参考にして仮に $\nu = 10^{11} \text{ s}^{-1}$ とすると⁽²⁶⁾, H の時間依存性は第 15 図のようになる。この図の結果は第 6 図、第 8 図および第 10 図の実験結果と定性的に良く一致する。しかし、活性化エネルギーの時間変化は実験結果のほうが激しいようである。液体中の過剰電子のトラップ状態については、今後更に研究を進める必要がある。

なお、通常電流が測定されている 1s 以上の時間領域において、伝導の見かけの活性化エネルギーが高温になると大きくなる (第 6 図) この原因は不明である。

5. む す び

数 μm の厚さをもつ液体誘電体薄膜の電気伝導を $10^{-8} \sim 10^{-1} \text{ s}$ の短時間領域において測定し、その結果から電流減衰機構の検討を行なった。本研究で得られた主な結果を以下に要約する。

(1) 導電電流は $i \propto t^{-n}$ の時間依存性を示し、 n は時間と温度に依存した。

(2) 電圧印加初期の伝導の見かけの活性化エネルギーは電圧印加後の時間に依存し、時間と共に増加することがわかった。このことはシリコン油 (1cSt, 10cSt, 100cSt), n -heptane, n -heptadecane で確かめられた。この特性は電圧印加後期の伝導 (見かけの活性化エネルギーは一定) と対照的である。

(3) 電圧印加初期の伝導は接触注入された電子の熱活性ホッピング伝導であると考え、(2)項の特性は比較的良く説明できた。そして、電流減衰の過程は接触注入電荷の除去によって起こる電氣的純化の過程であることがわかった。

(4) 電圧を印加していない状態の液体誘電体中に擬自由なキャリア (電子または正孔) の存在が考えられ、これらのキャリアは電圧印加直後の伝導に支配的に関与することがわかった。

(5) シリコン油中の水分は約 100ppm 以上の含有率で、電圧印加初期の電気伝導特性に著しく悪影響を与えることがわかった。

なお、以上の結果が一般に液体の導電率測定に用いられている 1~10mm の厚さの試料に対して当てはまるかどうかは明らかでない。今後、更に実験を進めるつもりである。

最後に、本論文をまとめるにあたり有意義な御討論をいただいた、名古屋大学工学部助手 土田縫夫氏に謝意を表します。 (昭和 55 年 5 月 17 日 受付)

文 献

- (1) I. Adamczewski: Ionization, Conductivity and Breakdown in Dielectric Liquids (1969) Taylor and Francis, London
- (2) D.W. Swan: "A Review of Recent Investigations into Electrical Conduction and Breakdown of Dielectric Liquids", *Brit. J. Appl. Phys.*, 13, 208 (1962)
- (3) P. Prabhakara Rao & G.R. Govinda Raju: "Natural Conduction in Nitrobenzene at Electric Fields of 50-50,000 Vcm⁻¹", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 3, 341 (1970)
- (4) E.O. Forster: "Electric Conductance in Liquid Hydrocarbons", *IEEE Trans. Elect. Insulation*, EI-2, 10 (1967)
- (5) E.O. Forster: "Electric Conductance in Liquid Hydrocarbons. I: Benzene", *J. Chem. Phys.*, 37, 1021 (1962)
- (6) E.O. Forster: "Electric Conductance in Liquid Hydrocarbons. II: Methyl-Substituted Benzenes", *ibid.*, 40, 86 (1964)

- (7) 大橋・上田:「シリコン油薄膜の誘電特性」, 電学論A, 97, 213 (昭 52-4)
- (8) 下川・大橋・上田:「液体誘電体薄膜の $\tan \delta$ の電圧依存性」, 電学論A, 101, 45 (昭 56-1)
- (9) 下川・大橋・上田:「シリコン油における接触注入電荷と電気伝導について」, 電気学会放電絶縁材料合同研査 ED-78-44, EIM-78-45 (昭 53)
- (10) H. Shimokawa, A. Ohashi & M. Ueda: "Conduction Currents in Silicone Liquid Films", *J. Electrostatics*, 7, 187 (1979)
- (11) N.F. Mott & R.W. Gurney: Electronic Processes in Ionic Crystals, 2nd edn., p.168 (1948) Oxford University Press, London
- (12) M.J. Morant: "Equilibrium Space Charge at the Contact of a Metal and a Pure Highly Insulating Liquid and Its Influence on High-Field Conductivity", *J. Electrochem. Soc.* 107, 671 (1960)
- (13) 日本化学会編: 界面の電気化学, p. 20 (昭 50) 東京大学出版
- (14) 葛西:「帯電基礎論の現状と将来」, 静電気学会誌, 1, 46 (昭 52-1)
- (15) M.H. Choen & J. Lekner: "Theory of Hot Electrons in Gases, Liquids and Solids", *Phys. Rev.*, 158, 305 (1967)
- (16) J. Lekner: "Motion of Electrons in Liquid Argon", *ibid.*, 158, 130 (1967)
- (17) H.T. Davis, L.D. Schmidt & R.M. Minday: "Kinetic Theory of Excess Electrons in Polyatomic Gases, Liquids and Solids", *ibid.*, A3, 1027 (1971)
- (18) R.M. Minday, L.D. Schmidt & H.T. Davis: "Excess Electrons in Liquid Hydrocarbons", *J. Chem. Phys.*, 54, 3112 (1971)
- (19) R.M. Minday, L.D. Schmidt & H.T. Davis: "Mobility of Excess Electrons in Liquid Hydrocarbon Mixtures", *J. Phys. Chem.*, 76, 442 (1972)
- (20) W.F. Schmidt, G. Bakale & U. Sowada: "Excess Electrons and Positive Charge Carriers in Liquid Ethane", *J. Chem. Phys.*, 61, 5275 (1974)
- (21) 吉野・U. Sowada & W.F. Schmidt: 「絶縁性液体中の高電界電子伝導」, 電学論A, 97, 355 (昭 52-7)
- (22) W.F. Schmidt & A.O. Allen: "Mobility of Electrons in Dielectric Liquids", *J. Chem. Phys.*, 52, 4788 (1970)
- (23) G. Bakale, W. Taichert & W.F. Schmidt: "Electron Transport in Mixtures of Liquid Methane and Ethane", *ibid.*, 63, 4470 (1975)
- (24) G. Bakale & W.F. Schmidt: "Excess Electrons and Positive Charge Carriers in Liquid Methane. I", *Z. Naturforsch.*, 28a, 511 (1973)
- (25) W. Döldissen, G. Bakale & W.F. Schmidt: "Excess Electron Mobility in Liquid Ethane as a Function of Temperature between -50°C and $+26^{\circ}\text{C}$ ", *J. Electrostatics*, 7, 247 (1979)
- (26) J.R. Hanscomb & Y. Kaahwa: "High-Field Transient Conduction in PET in the Microsecond-Millisecond Time Range", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 11, 725 (1978)