

n-アルコールの細管中での流動帯電について

伊藤正一・渡辺茂男

The Streaming Electrification of n-Alcohols Flowing through a Capillary

Masakazu ITO and Shigeo WATANABE

At the interface between the metal and the solution which contains some dissociative impurities, the electric double layer builds up. Inside of the solution this layer consists of the adhesion layer and the diffuse layer. In general, the adhesion layer is called Stern layer. The distance from just outside of Stern layer where the potential is $E\phi$ to the location where the potential $V(x)$ is $1/e$ of $E\phi$ called the thickness λ of the electric double layer. Where e is the logarithmic base. $\lambda = \sqrt{\epsilon kT/2(ze)^2 \cdot n_0}$ (m). Where ϵ is the permittivity of the solution, k is the Boltzmann constant, T is the absolute temperature of the solution, ze is the charge and n_0 is the concentration of the dissociated ions. But no one used this equation because of the difficulty of the determination of n_0 and calculated λ by the equation of $\sqrt{\Delta m \cdot \tau}$ approximately.

Where Δm is the ionic diffusibility and τ is the relaxation time constant of the solution.

Authors determined n_0 by the new method and calculated the correct value on n-alcohol. Furthermore authors clarified the respective roles of the solute and the solvent in the solution which have an effect on the streaming electrification of the solution.

1. まえがき

個体と個体あるいは個体と液体の接触面は界面と呼ばれている。このような異なる二つの相が界面を作るとき、この付近にある原子、分子またはイオンにかかる力はどれも異方性を持ち一つの相の内部に向かって働く力と他の相に向かって働くものとは異なる。その結果、界面を含む或る領域内で特定の成分の過剰または不足が生ずる。ただし、ここで述べている力はクーロン力や力学的な力だけを指しているのではなくて、熱力学的な力も含めすべての力を指す。界面付近の粒子に加わるこのような力の釣合によって平衡状態が生ずるのであるが、力の種類によって、ある粒子が界面を横切って他の相に移動することもあり、また界面に集積するだけの場合もある。

最近、重要視されている半導体素子は固体と個体との界面を持つ典型的な例である。

普通、界面は一定の温度と圧力のもとでは Gibbs の自由エネルギーを最小にする条件でその平衡状態が定まる。このエネルギーはエンタルピー項とエントロピー項とからなるが、上記の界面は化学結合力の違いに基づく力と格子定数の差違（転位構造）とによりエンタルピー項が、そして電子や正孔の拡散に伴いエントロピー項に変化を生ずる。したがって、界面に生ずる電位差は電子や正孔による。

以上の機構はすでに明らかにされ、今日のエレクトロニクスの隆盛に貢献している。

一方、金属と液体、特に電解液との界面では化学反応が伴い、最終的に界面の電位差を決定するのは金属中の電子と溶液中のイオンである。ただし、ここでいう金属は非分極性電極と呼ばれるものである。この現象の応用例の代表的なものは電池である。

界面に関する問題は興味に富み、重要なものと考えられるが、以上述べた界面の電位差を知るのにまず用いられるのは, Poisson の式である。ただし、前者については、式中の位置座標の替わりにその位置にある電子のエネルギーを用いるのが普通である。

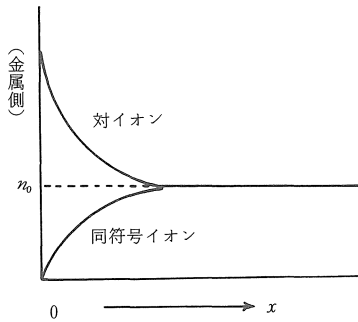
ところで、今世紀の中頃より石油産業の発展に伴い、金属と石油の界面に生ずる電位差と石油の流動との複合作用による動電現象のため不測の事故が屢々発生している。この問題については多くの人が研究を続け、何がしかの成果は得ているものの未だ十分とは言えない。これらは19世紀の中頃になされた Helmholtz¹⁾や Smoluchowski²⁾などによる電解液についての界面動電現象の知見を基礎としている。純粋な石油系液体（導電率 10^{-14} S/m 以下）は固体壁に沿って流動しても帯電しないといわれている。しかし僅かな電解質不純物あるいは有極性液体を混入すると、その導電率が増し顕著に帯電が生ずる。したがって、Helmholtz らの実験研究の結果を基礎

とすることは或る程度止むを得ないにしても、これを、金属と石油の界面に応用するには多少その補正は必要であろう。

筆者らは構造の明らかな n-アルコールの系列を試料として、上記先人らの知見を参考にして、固体と上記の試料との界面動電現象について実験を行なっているが、その一部をここに報告する。しかし、その前に界面電気二重層についての章を設けてその概要を説明して置く。

2. 金属と静止液体との界面電気二重層²⁾

金属と静止液体の界面では、液体中の同符号の一方のイオンだけが金属に吸着して固着層を作る^(注1)。一方、これに対して等量の反対符号イオンが界面付近の液体側に存在することになる。これを、Helmholtz¹⁾らは電気二重層と名付けた。彼らはこの二重層を分子の大きさ程度の間隔をもつ平行板コンデンサと類推した。しかし Gouy と Chapman³⁾は液体側のイオン(対イオン)は拡散層を形成していると考えた。これを第1図に略図で示しておく。



第1図 拡散二重層

Fig. 1 Diffuse double layer.

2.1 電気二重層の数式的表現

金属と液体の界面から液体のバルクに向かって x 軸を取る。界面から十分に離れたバルクの中の電位(沖合電位)を電位の基準に取ることにすれば、ここでの正負両イオンの濃度は等しい筈である。いまこれを n_0 (ions/m³) とする。次に電位 $V(x)$ の点の正、負イオンの密度をそれぞれ $n_+(x)$, $n_-(x)$ とすれば、Boltzmann の分布則を考え、

$$n_+(x) = n_0 \exp(-zeV(x)/kT) \quad (1)$$

$$n_-(x) = n_0 \exp(zeV(x)/kT) \quad (2)$$

と書くことができる(第1図参照)。ここで、 z はイオン価で正負の両イオンとも同じ値にとる。

電荷密度は

$$\rho(x) = ze[n_+(x) - n_-(x)] \\ = -2ze n_0 \sinh(zeV(x)/kT) \quad (\text{C/m}^3) \quad (3)$$

$zeV(x)/kT \ll 1$ とすれば、(Debye-Hückel 近似)。

$$\rho(x) \approx -\frac{2(ze)^2 n_0}{kT} V(x) \quad (\text{C/m}^3) \quad (4)$$

となる。

これを Poisson の式に代入すれば、

$$\frac{d^2V(x)}{dx^2} = \frac{2(ze)^2 n_0}{\epsilon kT} \cdot V(x) \quad (5)$$

が得られる。ここで

$$\lambda = \left(\frac{\epsilon kT}{2(ze)^2 n_0} \right)^{1/2} \quad (\text{m}) \quad (6)$$

とおけば

$$V(x) = \text{Const} \cdot \exp(-x/\lambda) \quad (\text{V}) \quad (7)$$

$x=0$ で $V(x) = E\phi$ とおけば^(注2)

$$V(x) = E\phi \cdot \exp(-x/\lambda) \quad (\text{V}) \quad (8)$$

(8)式は拡散二重層内の電位を与えるもので、金属と絶縁体、あるいは金属と半導体との界面に適用される式と全く同形である。

ここで、(6)式で与えられる λ は(8)式に見られるように電位 $V(x)$ が $E\phi$ の $1/e$ になる点までの距離をあらわし、一般に電気二重層の厚さとよばれている。ただし、 e は自然対数の底である。

3. 実験

3.1 実験の目的

電気二重層の厚さは前章に示した(6)式で与えられる。これによれば、二重層の厚さは kT という明瞭な物理量とイオンの密度とで決定される。しかし安易な近似式でこの値を定めている事例がある⁴⁾。それで、この近似が許されるかどうかという問題と固着層生成について主たる役割を果しているのは溶液中の溶媒なのか、または溶質であるのかを明らかにしたい。後者の問題については最近行われた実験、例えば Goodfellow ら⁵⁾や Koszman ら⁶⁾の実験結果を眺めても、この点に全く触れていないのが実状である。この問題を究明すれば、界面動電現象の機構が明らかになるであろう。

3.2 実験の方法

半径0.1mm、長さ5 cm のステンレススチール細管中を試料液体を垂直に流下させて帯電させる。帯電の程度は流動により生ずる流動電流を測定して定めた。発生する流動電流、したがって試料液体の帯電量は、細管中の流速に比例している。ただし、この実験では窒素ガス圧により細管中の液体流速を1~10[m/s]の間で変えた。レイノルズ数より考えれば、この流れのモードは明らかに層流域にあったと言える。乱流域では、帯電量と液体流速とは単純な比例関係に無いことはよく知られている。

(注1) 固着層を Stern 層と呼ぶ場合がある。しかし Grahame はこの層を内部 Helmholtz 層と外部 Helmholtz 層とに分けて取扱った。そして、その外側に拡散層があると考えた。これらを含めて拡散二重層と呼ばれている。

(注2) $x=0$ の点で $V(x) = E\phi$ としたが、正しくは、 $E\phi$ は Stern 層の液体側の端面の値を取るべきである。 $x=0$ の点の電位と $E\phi$ との差を χ 電位差ともよぶ。

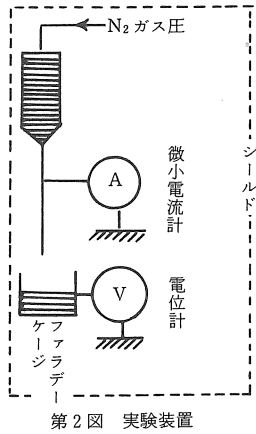
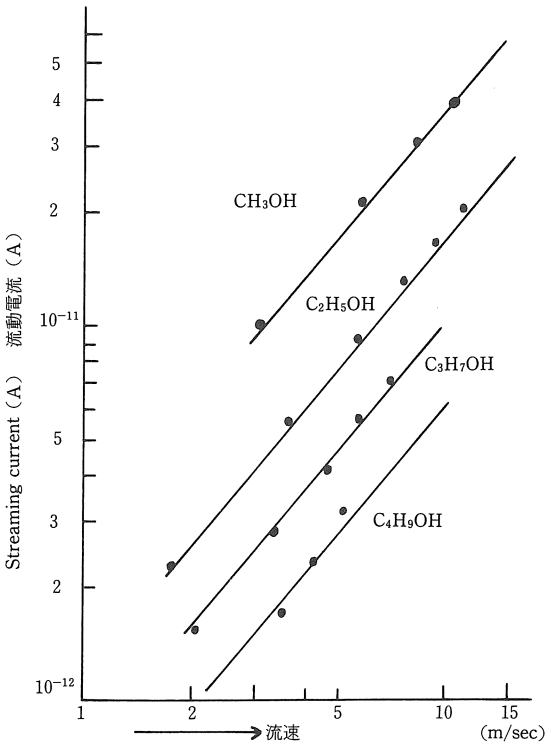


Fig. 2 Schema of apparatus.



第3図 流動電流と細管内流速との関係

Fig. 3 Streaming current vs liquids velocity in a capillary.

る⁴⁾。

ここで実験装置の概略および得られた実験結果の一部を第2図と第3図に示しておく。

3.3 実験試料

n-アルコールの系列に属する、メチル、エチル、プロピルおよびブチルアルコールの4種類の液体を試料とした。これらは、いずれも市販の試薬一級品を用いた。しかしながら、これらの試料中にはそれぞれ、蟻酸、酢酸、プロピオン酸および酪酸などの共有結合をもつ一塩基性

カルボン酸を最大0.004%程度含有し、微量ではあるがアンモニアなどの弱アルカリ性不純物も含んでいる。また含有水分の量は最大0.5%程度である。ここで試料液体のJISで定められた品位を第1表に示しておく。

第1表 JISに定められた試薬アルコールの品位
Tab. 1 Quality of reagent alcohols by JIS.

試料 不純物	メチル アルコール	エチル アルコール	プロピル アルコール	ブチル アルコール
水分	最大 0.3%	最大 0.4%	最大 0.3%	最大 0.3%
酸	ギ 酸 0.004%	酢 酸 0.002%	プロピオン酸 0.004%	酪 酸 0.004%
アルカリ	NH ₃ 0.005%	NH ₃ 0.0007%	—	—

(注) 上記はすべて試薬1級品である。

3.4 実験結果の整理

この章のはじめに述べた目的を明らかにするには、それぞれの試料液体のζ電位を求めておかなければならない。何故ならば、エタノール中の酢酸とアンモニアの解離定数は解っているが他のカルボン酸の溶媒中での解離定数の記録が無いからである。ζ電位はHelmholtzとSmoluchowskiの式¹⁾によって算出できる。これを第2表に示す。

第2表 n-アルコールのζ電位
Tab. 2 ζ potentials in n-alcohols.

	流動電流※ (10 ⁻¹² A)	ζ電位 (mV)	分子量 (M)	分子パラコル (分子容)(P)
メチルアルコール	650	13.3	32	93.2
エチルアルコール	255	8.4	46	132.2
プロピルアルコール	150	6.5	60	171.2
ブチルアルコール	57	1.1	74	210.2

※ 流速2 m/secのときの値である。

$$\zeta = I / (P.S. \epsilon / \eta) \quad (V) \quad (9)$$

ここでIは流動電流(A) εは液体の誘電率(F/m) ηは粘性係数(N. sec/m²)そしてP.Sはパイプ両端間の圧力差(N)である。ただしSはパイプ断面積である。

一般に、拡散電気二重層において、固着層と流動層との境をすべり面(Slipping plane)と呼んでいる。しかし、その位置は具体的に何処かについては判然とした見解は無いが、その電位をζ電位と呼ぶ。普通流体力学では、固着層は非常に薄いと教えている。したがって筆者らは、このすべり面はStern層の外側に接して位置しているものと考えている。そこで、電気二重層の厚さλの位置の電位はStern層の外側に接した位置の電位Eφの1/eの値になる。ここでEφの値は上記の考えによりζとなる。

次に液体の沖合の電荷密度n₀e(C/m³)は、主としてこ

の溶液に含まれている解離性溶質の解離イオンによって定まると理解すべきであろう。

一例として、エタノール中の含有酢酸をとれば、これは $\text{CH}_3\text{COOH} \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{CH}_3\text{COO}^-$ のように解離しエタノール中での解離常数は $4.8 \times 10^{-11} (\text{mol/l})$ である⁷⁾。したがって、エタノール中の含有酢酸0.002% (第1表参照)の解離により生ずる水素イオン濃度 $[\text{H}^+]$ は $1.2 \times 10^{-7} (\text{Kmol/m}^3)$ になる。含有水分0.4%は酢酸ならびにアンモニアの解離常数には影響を与えぬと考えられる⁷⁾。ところでアルコールも水素結合をもつ分子であるので分子含合などの影響は多少あるものと考えられるが、この程度は無視できる。次に含有アンモニアも水中では NH_3 の形で溶けている弱アルカリで、その僅かな一部が電離する。しかし、エタノール中ではその電(解)離常数は $3.98 \times 10^{-11} (\text{mol/l})$ であるので酢酸の解離イオンに対してその電離イオンは無視できる。それで、上記の n_0e は酢酸イオンの密度と近似する。

1 (Kmol) のイオンは $96.5 \times 10^6 (\text{C})$ に相当するので、上記の酢酸イオンの密度は $11.6 (\text{C/m}^3)$ になる。以上を第2章(6)式に代入して、エタノールのステンレススチール界面に生ずる電気二重層の厚さを求めてみれば

$$\lambda = 1.55 \times 10^{-7} \quad (\text{m}) \quad (10)$$

となる。すなわち 1550 \AA である。

メタノール中の蟻酸、プロパノール中のプロピオン酸およびブタノール中の酪酸の解離常数は今のところ水中での値は記してあるもの⁷⁾、いずれの文献を見てもこれについて記しては無い。

したがって、(10)式の結果とそれぞれの液体試料の(8)式で示す特性から作図によってそれぞれの液体の電気二重層の厚さを求めれば第3表が得られる。いずれの液体に

第3表 n-アルコールの電気二重層の厚さ

Tab. 3 The thickness of the electric double layer in n-alcohols.

$\lambda, \text{e} \& \text{k}$ n-アルコール	$\lambda = (\epsilon k T / 2(z e)^2 \cdot n_0)^{1/2}$ により算定した値, (m)	$\lambda = \sqrt{\Delta m \cdot \tau}$ により 算定した値 (m)	比誘電率	導電率 (S/m)
メタノール	1.50×10^{-7}	1.93×10^{-6}	33	1.5×10^{-7}
エタノール	1.55×10^{-7}	1.74×10^{-6}	25	1.4×10^{-7}
プロパノール	1.60×10^{-7}	2.62×10^{-6}	20.1	5×10^{-8}
ブタノール	1.65×10^{-7}	—	17.8	—

注) Δm はいずれも $1.9 \times 10^{-9} (\text{m}^2/\text{sec})$ とする。

についても殆んど差は無く僅かに分子量の大きい液体の電気二重層の厚さが、分子量の小さい液体のそれに比らべ厚い。第3表はエタノールを除き、他の液体の二重層の厚さは作図によって求めたのであるが、いずれもほぼ正しい値を得ている。これから逆に未知のカルボン酸の溶媒中の解離常数が決定できるが、基礎データに近似値を用いているので、これらは正攻法によって測定した値と

(注3) ζ の算式から求めた導電率の値を用いても双方の計算値は一致しない。

対比して確かめて置く必要がある。ところで、Klinkenberg らは分子の拡散係数 Δm と液体の緩和時定数 τ とから $\lambda = \sqrt{\Delta m \cdot \tau}$ なる式を用いて二重層の厚さを略算している⁴⁾。

Δm は Stokes の定理から導かれるもので、コロイド化学の面などでは有用かも知れない。

一例として、ここで用いた資料について、この式で算出した λ の値を第3表に併記して置く⁹⁾。第3表には試料の比誘電率および導電率も参考のため掲載して置いた。一般に導電率の決定(測定)は非常に難しい。以前は絶縁性に富む液体については直流電圧を印加して充分時間が経過して電流値が一定になった後に導電率の値を算定したものである。しかし最近はこのような測定を行なうと depletion 現象が起るためゼロ時間法、すなわち電圧を印加した瞬間の電流値(外挿法により求める)を用いて液体導電率は算定すべきであるなどの意見もある¹⁰⁾。一体導電率の測定は何を目的として行なうものであるかについて、このような意見を聞く疑問が湧いてくる。そもそも電気工学の面ではある液体を十分精製したとどこまで導電率を下げる事が出来るのかということ、すなわち液体の真の物性を知る目的で測定する場合もあるが、電気二重層の厚さを計算する場合、素直な状態で導電率の値を得ることが必要である。何故ならば、電気浸透とか流動電位の発生については液体の導電率のみがこれを支配しているのではなくて、液体の粘性、誘電率、あるいは液体に加わる圧力、または電界など多数の要素との関連の上で上記の現象は定まるのである。そしてこれらの要素間にはその条件のもとで定まる一定の関係で全部が結ばれている。したがって本実験の場合導電率は ζ 電位算定に用いた Helmholtz と Smol-

uchowski の式によって求めるのが妥当である^(注3)。第3表に併記した $\sqrt{\Delta m \cdot \tau}$ の算定には渡辺の測定した導電率⁹⁾を使用した⁹⁾が、この値は十分精製した試料について得た値であり(10^{-7} S/m のオーダー)、普通では得られない値である。結果は表の示す通り一致しない。 $\lambda = (\epsilon k T / 2(z e)^2 \cdot n_0)^{1/2}$ で算定した値に $\lambda = \sqrt{\Delta m \cdot \tau}$ で算定した値が一致するのは導電率は少なくとも $10^{-5} \sim 10^{-6} (\text{S/m})$

のオーダーでなければそのようにはならない。それもオーダーだけの話である。この原因は Δm にどの液体についても同じ値を採用していることであろうが、そもそも $\sqrt{\Delta m \cdot \tau}$ はコロイド化学の面などで用いられるべきもので、分子の拡散係数と移動度の値は電解質水溶液中と炭化水素系の液体中とは可成りの相違があることを考えれば、たとえ双方の計算値が一致したからといっ

て(このようなことは起り得ない。), 物理的意味が付けられない点において納得出来ない。

繰返して言うが Δm は単に分子の拡散を示す係数であり, 移動度はイオンの運動を示す係数である。

$\sqrt{\Delta m \cdot \tau}$ については付録で補足する。

3.5 界面吸着について

次に重要な問題は界面吸着の問題である。これまでは界面電気現象について溶媒中の溶質が含有している解離性の弱酸(一塩基性カルボン酸)を主役として考えてきた。しかしながら, n-アルコールも極性をもつ炭化水素系の液体であり個々の分子はモーメントを持っている。

そこで, Stern 層を一種の平行板コンデンサとみなし, $E\phi$ あるいは χ 電位差を生じている主体を探索してみることとする。まず界面への吸着は溶媒である n-アルコールが主としてその役割を担うものと考えてみる。恐らく界面に対してアルコールは液体が流れていなければその分子軸を垂直にして吸着するであろう。

この実験ではステンレススチールパイプは電流計を通して接地してあるので $E\phi$ したがって ξ 電位は χ 電位差に等しい値と考えられる。

この仮想コンデンサはその間隔を Stern 層の厚さと考えたので, 一分子の径すなわち \AA のオーダーにあるものと考えられるので, このコンデンサの単位面積あたりについて

$$\chi = \rho t / \epsilon \quad (V) \quad (11)$$

の関係が得られる。ここで $\rho = ze\theta / A_0$, n-アルコールの吸着を考えているので $z=1$, e は電荷の素量 θ は被覆率そして A_0 は吸着断面積である。ただし t は Stern 層の厚さ, そして ϵ は誘電率である。(11)式によって算定した結果は χ 電位差を主として n-アルコールの吸着によって定まると考えると甚だ不都合な結果が生ずる⁸⁾。

すなわち, ξ 電位はその定義より考え, 界面動電位であって液体が流れている時の値である。とすれば n-アルコールは流動時その分子軸を金属壁に平行にして吸着する筈である。何故ならば流れの剪断力が Stern 層に働らくからである。

したがって, n-アルコールの分子は界面に対してはファンデル・ワールス力, お互の分子同士は上記の力とクーロン力とによって結合し, 液体中には電位を生じないであろう。そしてその間に狭まって僅かな溶質中の解離イオンが吸着し χ 電位差を形成しているものと考えざるを得ない。

ところで, すでに述べたように分子量の小さい液体程 ξ 電位は高く, その間には一定の関係があるやに見受けられる。

このことは, 界面への解離イオンの吸着は溶媒である

n-アルコールの分子量(あるいは分子容と言った方が適当であるかも知れない。)に制御されて不完全単分子膜吸着をすると考えざるを得ない。

4. 結 言

固体と液体との界面動電現象について筆者らの行った実験の一部について報告したものである。

この論文のもつオリジナルな点は従来固-液界面に生ずる電気二重層の厚さを kT なる明瞭な物理量と液体中のイオン密度から決定したことである。従来は導電率を主体として考えられた近似法によって算定され, この様な試みはなされていなかった。このことは溶液中の解離イオンの算定が基礎データの無いため難しかったことによるものと筆者らは考えている。

次に, 界面動電現象に関係する液相について, 溶液中の溶媒と溶質の役割を明らかにしたことである。

これらの結果によれば, 従来液体の流動帯電はこれを液体導電率の関数として眺めて来たことが¹⁰⁾いかに不合理なものであるかに大方の研究者は気付かれたことと考える。

なお, 話が遡るが第1図に示したように拡散二重層内では界面に近づくにつれ対イオンは増し同符号のイオンは減少している。したがって, 界面近くになる程液体バルク中では符号の異なる電荷の不均衡が甚しい。ここでパイプの軸方向に液体が流れれば当然一種の携帯電流が生ずる。これがいわゆる流動電流と呼ばれているもので, 大型電力用変圧器のコイルのオイルダクト中で break down を生じさせたのも, この電流の仕業である。

本実験では, 正極性の電流が生じているので対イオンは正イオンであると考えられる。界面に関する問題は非常に多く, 未解決の分野が数多く残されている。これらは目下鋭意追求中である。機会が与えられれば続編を報告するつもりである。

終りに本研究について多大の御激励と便宜を計らって頂いている本学後藤淳学長, 竹松英夫副学長ならびに電気工学科幹事宮地巖教授に紙面をかりて謝意を表す。また筆者らの研究グループの落合鎮康講師(主として固-液界面分極の研究担当)からきたんの無い意見を頂いた。氏の好意を多とするものである。

引用文献

- 1) 駒形作次: 界面電気化学概要, 109 (昭和44)
- 2) 日本化学会編: 化学総説, No. 7 (1975)
- 3) 北原文雄, 渡辺昌: 界面電気現象, 共立出版 (昭和47)
- 4) A. Klinkenberg & Van der Minne: Electrostatics

in the Pet. Industry, Elsevier (1958)

- 5) H. D. Goodfellow & W. F. Graydon : Dependence of Elect. Stat. Currents on Fluid Properties, Can. J. Chem. Eng. Vol.46, 342 (1968)
- 6) I. Koszman & J. Gavis : Development of Charge in low Conductivity liquids Flowing past Surface, Chem. Eng. Science Vol.17, 1013 (1962)
- 7) 日本化学会 : 化学便覧基礎編II, 丸善 (1975)
- 8) 渡辺茂男 : 博士論文 (名古屋大学大学院) (1983)
- 9) 渡辺彰外 : 静電気の基礎, 丸善. 637 (1975)
- 10) 浅野和俊 : 静電気による石油燃料爆発に関するの欧米での研究状況, 静電気学会誌 1. 58 (1977)

付録 分子の拡散係数 Δm について⁴⁾

Klinkenberg らは(6)式を Stokes の定理を用いて大へんに簡単化している。いま、液体の動粘度を ν (St) とすれば、分子の拡散係数 Δm は

$$\Delta m = \frac{kT}{6\pi\nu a} \quad (\text{m}^2/\text{sec}) \quad (\text{付. 1})$$

ここで k はボルツマン常数, そして a は分子の半径とする。Stokes の定理によれば液体中の分子(イオン)の

ドリフトの速度は

$$v = \frac{zeE}{6\pi\nu a} \quad (\text{m/sec}) \quad (\text{付. 2})$$

となる。ここで E は電界 (V/m) である。したがって分子(イオン)の移動度 b は

$$b = v/E \quad (\text{m}^2/\text{V,sec}) \quad (\text{付. 3})$$

電気二重層は液体バルク中の導電率と同じ値を持つものと仮定すれば、導電率 k は

$$k = 2nzeb = 2CzbF \quad (\text{S/m}) \quad (\text{付. 4})$$

となる。ここで C は解離イオンのモル濃度 (Kmol/m^3), そして F はファラデー常数 [$96.5 \times 10^6 (\text{C/Kmol})$] である。

液体の誘電率を ϵ (F/m) とすれば、この液体の緩和時定数は

$$\tau = \epsilon/k \quad (\text{sec}) \quad (\text{付. 5})$$

これと本文第2章(6)式により

$$\lambda = \sqrt{\Delta m \cdot \tau} \quad (\text{m}) \quad (\text{付. 6})$$

が導かれる。

Klinkenberg ら⁴⁾は Δm を $1.9 \times 10^{-9} (\text{m}^2/\text{sec})$ として計算している。

(受理 昭和58年1月16日)