

論 文

進行波電界による絶縁性液体の電気流体力学的 ポンピング作用

小田 徹^{*1,2}, 青山道夫^{*3}, 金沢誠司^{*1}
大久保利一^{*1}, 野本幸治^{*1}, 足立宣良^{*4}

(1997年5月28日受理)

Electrohydrodynamic Pumping Effect by Traveling Electric Field in Dielectric Liquid

Toru ODA,^{*1,2} Michio AOYAMA,^{*3} Seiji KANAZAWA,^{*1} Toshikazu OHKUBO,^{*1}
Yukiharu NOMOTO^{*1} and Takayoshi ADACHI^{*4}

(Received May 28, 1997)

Electrohydrodynamic (EHD) pumping force on liquid can be controlled by a non-uniform traveling electric field. In this paper, an acrylic U type pipe electrode is used to produce three phase traveling electric field with three group spiral winding wires. The acrylic U type electrode is placed inside a vinyl chloride U type circular tube, which is filled with dielectric liquid such as kerosene or transformer oil. A three phase AC power is applied to the wire electrodes with peak voltage of 1-10 kV and frequency of 5-100 Hz respectively. Thus, the non-uniform traveling electric field can be produced inside the tube. Liquid displacement caused by the electric field is defined as its difference from the steady state liquid level. Test results indicate that the displacement is significantly dependent on the amplitude and the frequency of applied voltage. A simplified model for the displacement or the pressure difference has been proposed based on three basic hypotheses. The Navier-Stokes equation can be easily solved with the model. In relation with the dependence of the displacement on the exciting frequency, amplitude of voltage and liquid conductivity, the theoretical results are in good agreement with the experimental tests. EHD pumping effect in three phase traveling electric field can be demonstrated by using experiments and theoretics.

1. はじめに

液体中に存在する自由電荷や分極電荷と外部印加電界との相互作用を取り扱う分野は、電気流体力学 (Electrohydrodynamics, 略語: EHD) と定義されている。歴史的にも古くから知られており、電気浸透現象、電気泳動や流動電位などの電気運動学的現象も、EHD効果の研究領域に入る¹⁾。近年、このEHD効果と理解される現象の範囲も拡大

され、流れ場と電界とが共存している場におけるマクロ帶電粒子の挙動もEHDの研究対象とされている²⁾。しかし、もともとEHD効果は、液体に電気力学的な作用で、攪拌、混合、移動等の力学現象が発生することである。その本質は、Feliciの解説¹⁰⁾にもあるように、液体中の電荷に作用する電気泳動力であろう。

本論文は、絶縁性液体内部に発生するEHD現象として

キーワード：電気流体力学的效果、交流不平等進行波電界、ポンピング作用

*1 大分大学工学部電気電子工学科 (870-1192 大分市旦野原700)

Department of Electrical and Electronic Engineering, Faculty of Engineering, Oita University, 700 Dannoharu, Oita 870-1192, Japan

*2 現勤務先：西日本工業大学電気工学科 (800-0394 福岡県京都郡苅田町新津1633)

Department of Electrical Engineering, Nishinippon Institute of Technology, 1633 Aratsu, Kanda-machi, Miyako-gun, Fukuoka 800-0394, Japan

*3 西日本工業大学電気工学科 (800-0394 福岡市京都郡苅田町新津1633)

Department of Electrical Engineering, Nishinippon Institute of Technology, 1633 Aratsu, Kanda-machi, Miyako-gun, Fukuoka 800-0394, Japan

*4 大分県庁職業能力開発課工科短期大学校設置準備室 (870-8501 大分市大手町3-1-1)

Section of Job Ability Development, Oita Prefectural Office, 3-1-1 Ohte-machi, Oita 870-8501, Japan

の液体ポンピング作用を対象とした。これは、灯油のような絶縁性液体中に、3相交流による進行波電界を作成させ誘導電荷との相互作用で、液体に対して重力に対抗する揚力を電気的に与えるものである。

空気のような粘性流体中に、形成された交流不平等電界(単相交流定波電界と多相交流進行波電界)によるマクロ帶電粒子の電気力学的制御に関しては、筆者らによって一連の研究がなされている⁶⁻⁹⁾。本研究は、この交流不平等電界の特異性を絶縁性液体中で展開した、いわゆる電界カーテンによるEHD効果である。

本研究と類似の先行研究は、Melcherらの論文³⁻⁵⁾がある。先行論文との相異点は、物理的に妥当と思われる2,3の仮定のもとに、EHDポンピング作用に対する進行波電界の周波数特性を理論的に明確にした点にある。これによって、筆者らの実験と合わせMelcherらの実験を含め、EHDポンピング作用の各種パラメータ依存性を、初等的ではあるが、ある程度明らかにできた。

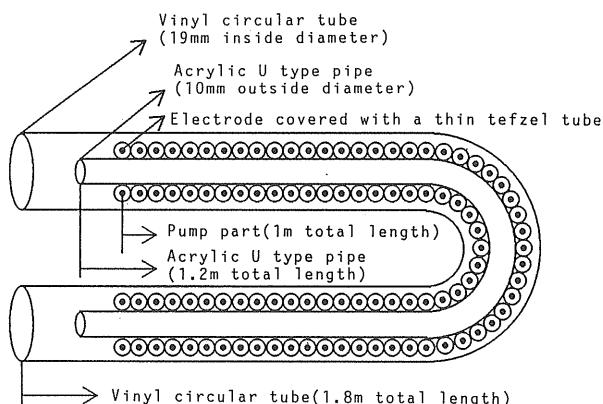


図1 EHDポンプ素子
Fig. 1 EHD pump element.

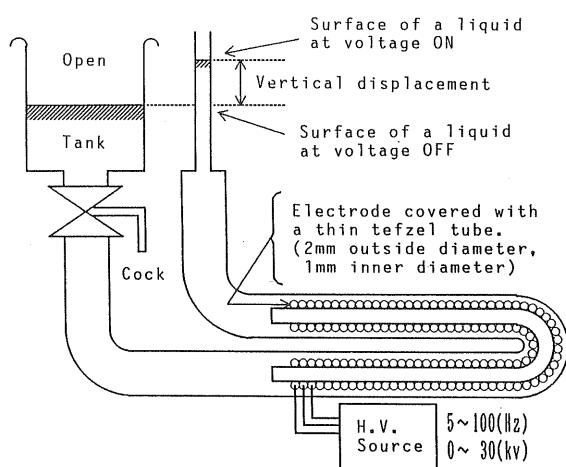


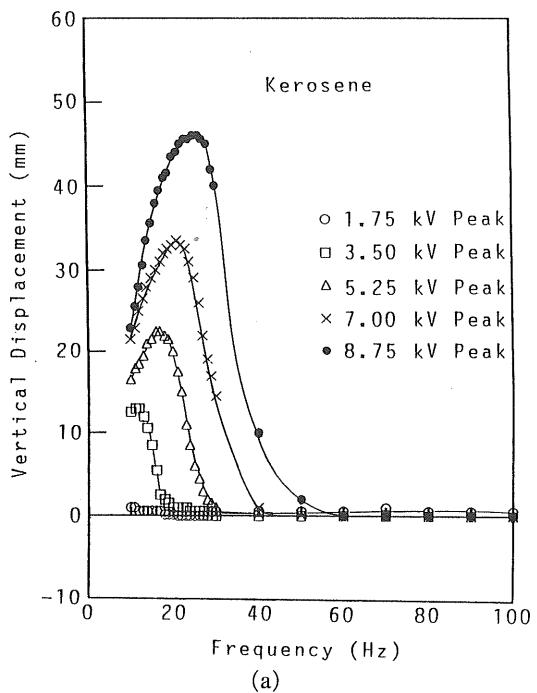
図2 実験装置の概略
Fig. 2 Outline of apparatus.

2. 進行波電界によるEHDポンピング作用を示す実験

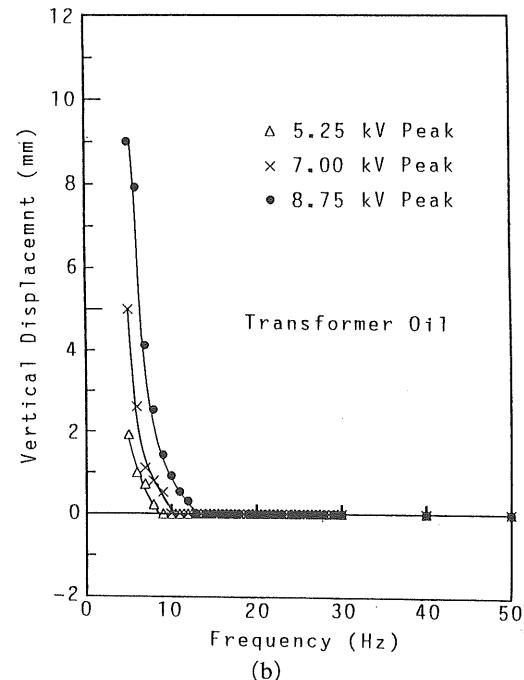
通常機械的なポンプは回転する可動部インペラーが必ず存在する。しかし、EHD効果を利用したポンプには、このような可動部が全くないのが特徴である。ここでは、EHDポンプの揚程特性の実験結果を示す。

2.1 3相進行波電界によるEHDポンピング作用¹¹⁻¹⁷⁾

筆者らが実験に使用したEHDポンプ素子の概略を図1



(a)



(b)

図3 垂直変位の周波数への依存性 (順方向)

(a) 灯油, (b) トランス油。

Fig. 3 The vertical displacement as a function of frequency (Forward pumping).

(a) Kerosene, (b) Transformer oil.

に示す。これは、直径 2 mm のテフロン被覆電線（芯線直径 1 mm）3 本を、直径 10 mm のアクリル製 U 字管に螺旋状に密着巻し、それを内径 19 mm の塩化ビニル管内に装着してある。なお、素子電極部の実効的な長さは約 1 m である。これが図 2 に示すレイアウトで絶縁性液体（灯油）用タンク（直径 450 mm）と揚程（ヘッド）を計測する液面変位計（内径 5 mm のアクリル管）へと接続されている。

また、EHD 素子駆動用電源は、周波数可変型 3 相高圧電

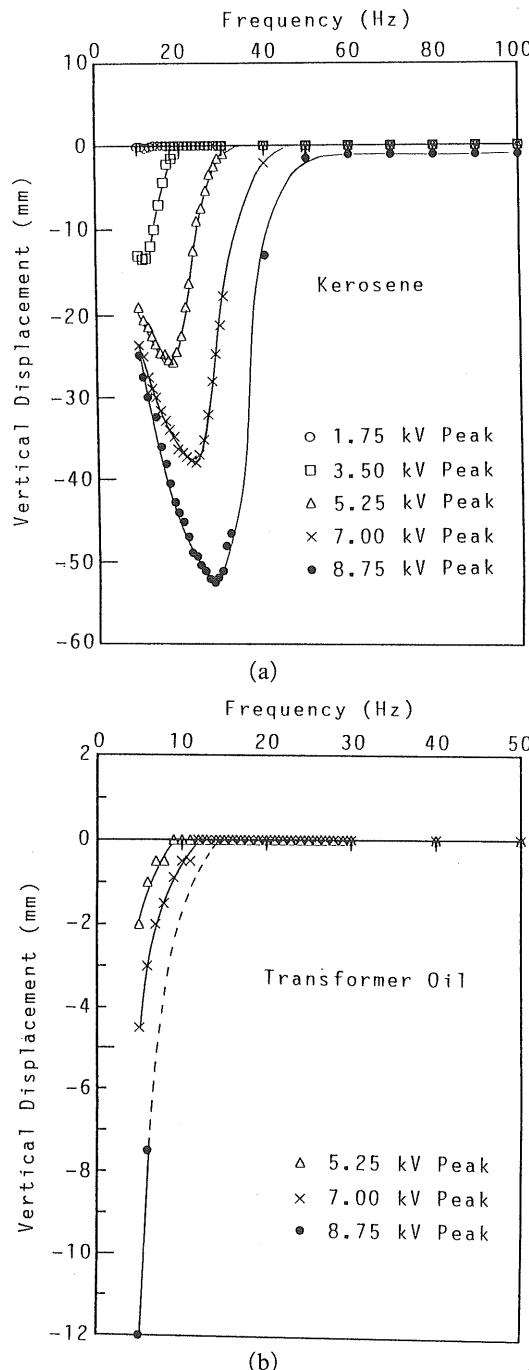


図 4 垂直変位の周波数への依存性（逆方向）
(a) 灯油, (b) トランス油。
Fig. 4 The vertical displacement as a function of frequency (Reverse pumping).
(a) Kerosene, (b) Transformer oil.

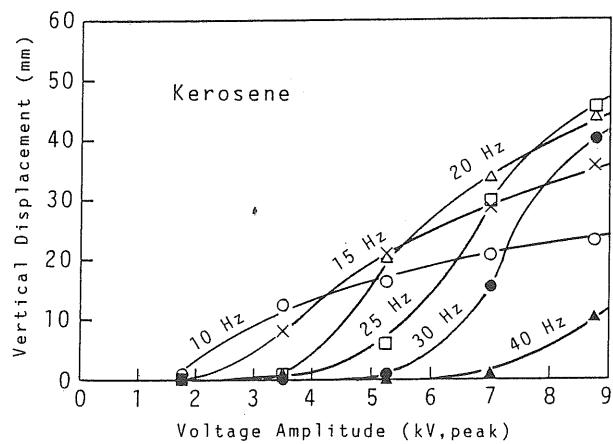


図 5 垂直変位の印加電圧への依存性
Fig. 5 The vertical displacement as a function of applied voltage.

源 ($f=5\sim100\text{ Hz}$, $V=0\sim30\text{ kV}$: 線間波高値) を使用した。

実験に使用した液体は市販の灯油（比誘電率 $\epsilon_m=3$, 導電率 $\sigma_m=5\times10^{-14}\text{ S/m}$ ）と変圧器油（比誘電率 $\epsilon_m=2.2$, 導電率 $\sigma_m=2\times10^{-11}\text{ S/m}$ ）である。

図 3(a), (b) は、電圧とともに計測部の平衡液面が上昇する方向に進行波電界を印加する、いわゆる順方向特性である。また、図 4(a), (b) は逆に平衡液面が下降する方向に進行波電界を印加した、逆方向特性である。パラメータは印加電圧波高値（線間電圧）を示す。灯油の場合、順逆方向ともにある特定の周波数に対して、最大の液面変位を示す。変圧器油に対しても同様の特性が得られるはずであるが、電源装置の性能上 5 Hz 以下の 3 相電圧を発生させることができないので、本実験では、灯油の場合のような特性は確認されていない。

図 5 は、周波数を一定に保った場合の、順方向揚程の電圧特性である。これも理論的な推測では各周波数に対して、最大揚程を示す電圧が存在すると思われたが、5 Hz 以下の 3 相電圧を発生できないことと、EHD ポンプ素子内で絶縁破壊を起こさないで安定に印加できる電圧の制限上、このことを実験的に確認はされていない。

2.2 6 相進行波電界による EHD ポンピング作用⁵⁾

Melcher らは、同様な実験装置を使用して、6 相電圧での EHD 効果を、フレオンを使用して行っている。筆者らの素子との差異は、図 6 に示すように液体を導入する管の外側に 6 本の絶縁電線を螺旋状に巻き付けて、外壁を通して液体に進行波電界を印加している点にある。この EHD ポンプ素子の全長は 10 m、素子の内径（液体が充填されている部分）は、1/4 インチ (6.35 mm) である。図 7～図 10 は、文献 5) の引用であるが、筆者らの実験との比較のために 1 m 当りに換算してある。フレオンの場合、電圧を一定に保ち周波数を変えると、図 7 に示す順方向ポンピング

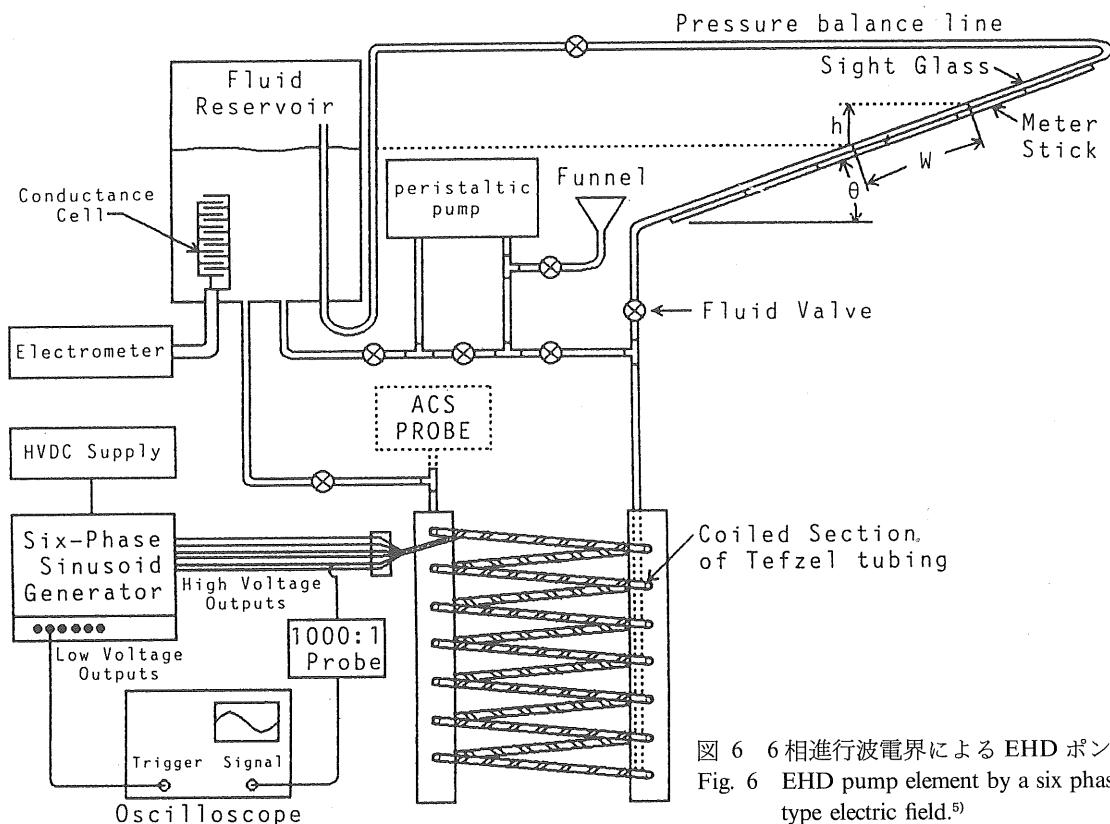
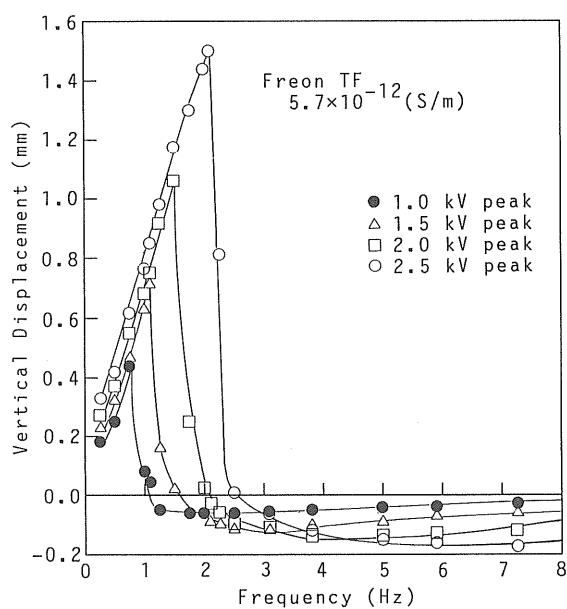
図 6 6 相進行波電界による EHD ポンプ素子⁵⁾Fig. 6 EHD pump element by a six phase traveling wave type electric field.⁵⁾図 7 垂直変位の周波数への依存性⁵⁾

Fig. 7 The vertical displacement as a function of frequency.⁵⁾

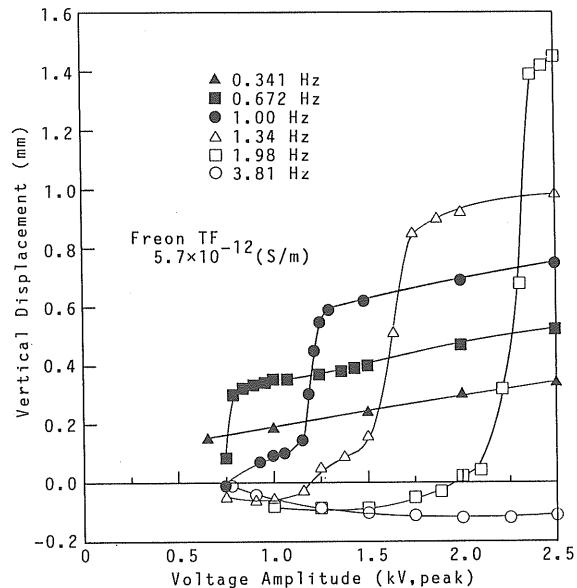
図 8 垂直変位の印加電圧への依存性⁵⁾

Fig. 8 The vertical displacement as a function of applied voltage.⁵⁾

があらわれる。図 8 は、周波数をパラメータとした電圧特性である。また、印加電圧を一定に保ち添加物(帶電防止剤)で導電率を変化させた場合の、ポンピング作用の周波数特性を図 9 に示す。さらに、液体中のイオンの挙動を考慮して、揚程との関係を導電率でまとめると図 10 のようになつ

ている。すなわち、液体中のイオンの緩和時間 τ_e と公称移動時間 τ_m の比が、同程度になるときに最大揚程が発生している。Melcher らは、イオンの挙動に関する詳細な解析を行っているが、これらの特異な EHD ポンピング作用を説明しうる理論には至っていない。

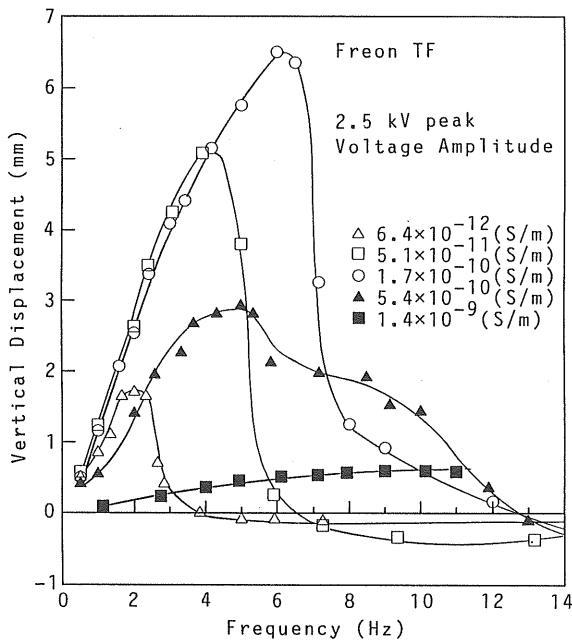


図 9 導電率に対する垂直変位の周波数への依存性⁵⁾
Fig. 9 The vertical displacement as a function of frequency for various conductivities.⁵⁾

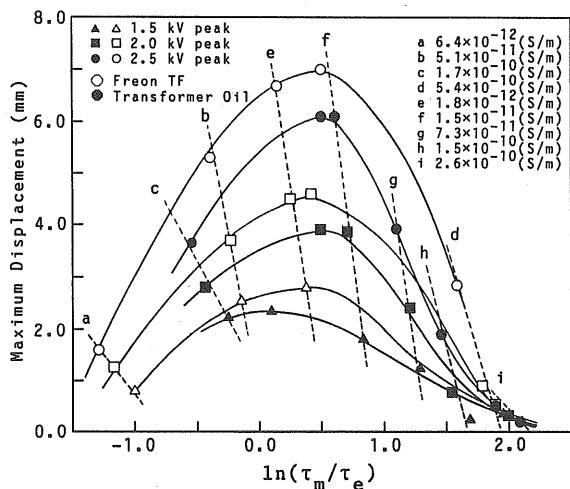


図 10 導電率に対するイオンの最大変位の緩和時間 τ_e と公称移動時間 τ_m との比 $\ln(\tau_m/\tau_e)$ への依存性⁵⁾

Fig. 10 Maximum fluid displacement versus the ratio of the relaxation time τ_e to the nominal migration time τ_m for ions to cross the channel shows maximum pumping occurs when the relaxation time and migration time are comparable.⁵⁾

3. 進行波電界による EHD ポンピング作用の理論的取扱い方 (第ゼロ近似)

3.1 EHD 効果の一般論

EHD 効果が発生するためには、液体中に不均一な電荷分布の存在が必要となる¹⁰⁾。この結論は次のように導かれている。

EHD 効果の本質は電気泳動力 Fv であり、その結果生ず

る液体内部の圧力 P が議論の対象である。この二つの量の間には次の関係が成り立つ。

$$Fv = \nabla P \quad [N/m^3] \quad (1)$$

ただし、

$$Fv = q_v E \quad (2)$$

q_v : 液体中の体積電荷密度 $[C/m^3]$, E : 液体中の電界 $[V/m]$, ∇ : 演算子 grad

液体が平衡静止状態を保つためには、次の関係が必要となる。

$$\nabla \times Fv = \nabla \times (\nabla P) = 0 \quad (3)$$

さらに、(3)式は(2)式の関係より

$$\nabla \times Fv = (\nabla q_v) \times E + q_v (\nabla \times E) = 0 \quad (4)$$

となる。

ここで、静電界の性質 ($\text{rot } E = 0$) を考慮すると、

$$\nabla \times Fv = (\nabla q_v) \times E \quad (5)$$

となり、液体中の電荷分布が空間的に不均一であれば、(5)式の右辺は、消失せず液体内部に圧力が発生する。すなわち、

$$\nabla q_v \neq 0 \quad (6)$$

(6)式が、EHD 効果が現れる必要条件となる。

3.2 液体の運動方程式

電気泳動力 Fv と重力 Fg が作用している液体の運動方程式は、次のナビエ・ストークスの式で与えられる。

$$\rho_m (\partial V / \partial t + V \cdot \nabla V) = -\langle Fv \rangle + Fg - \nabla P + \mu_m \nabla^2 V \quad (7)$$

ここで、 ρ_m : 液体の密度 $[kg/m^3]$, μ_m : 液体の粘性係数 $[Ns/m^2]$, V : 液体の運動速度 $[m/s]$, P : 液体の圧力 $[N/m^2]$, $\langle Fv \rangle$: 時間平均電気泳動力 $[N/m^3]$

電気泳動力 Fv は時間的に変動する交流電界によって発生するので、この場合は瞬時値ではなく一周期 T の時間平均値をとる必要がある。すなわち、

$$\langle Fv \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T Fv dt \quad (8)$$

さらに、定常流を仮定すると、 $\partial V / \partial t = 0$ より運動方程式は、

$$\rho_m (V \cdot \nabla V) = \langle Fv \rangle + Fg - \nabla P + \mu_m \nabla^2 V \quad (9)$$

となる。

3.3 進行波電界による EHD 現象解析モデル

図 1 あるいは、図 6 に示す実際の EHD ポンプ素子内の液体に(9)式を適用し、精密に論することは次の段階に譲り、ここでは、実験的に得られた現象の本質を記述できる単純化されたモデルと物理的に見て妥当と思われる 2, 3 の仮定を述べる。

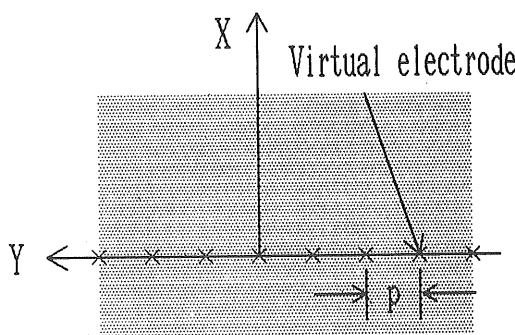


図 11 進行波電界を形成する仮想線電極列
Fig. 11 Virtual line electrode pattern to form a traveling wave type non-uniform electric field.

(仮定 1)

絶縁性液体中には、(10)式で表せる電位分布を与える、仮想的な無限長線電極列の存在を仮定する。

$$\phi(x, y, t) = V_0 \cdot \exp(-\alpha|x|) \cdot \cos(\alpha y - \omega t) \quad (10)$$

ただし、 $\alpha = 2\pi/(3p)$ [m⁻¹]、 V_0 ：相電圧波高値 [V]、 ω ：電源角周波数 [rad/s]、 p ：電極列ピッチ [m]、 t ：時間 [s]

また、液体中には次の平面進行波電界が形成される。

$$\begin{aligned} Ex &= -\partial\phi/\partial x \\ &= \alpha V_0 \cdot \exp(-\alpha|x|) \cdot \cos(\alpha y - \omega t) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} Ey &= -\partial\phi/\partial y \\ &= \alpha V_0 \cdot \exp(-\alpha|x|) \cdot \sin(\alpha y - \omega t) \end{aligned} \quad (12)$$

(仮定 2)

この進行波電界を形成する仮想線電極列の $x=0$ 面より、電位 $\phi(x, y, t)$ に比例した空間的に不均一な電荷密度が、比誘電率 ϵ_m の液体中に誘導される。

$$q_v = \beta \sigma_i \quad [\text{C/m}^3] \quad (13)$$

ただし、 σ_i は、図 11 の $x-y$ 平面に対して垂直方向 z -方向の単位長当たりの誘導線電荷密度で次式で与えられる。

$$q_v = 4\pi\epsilon_0\epsilon_m V_0 \cdot \exp(-\alpha|x|) \cdot \cos(\alpha y - \omega t - \varphi) \quad [\text{C/m}] \quad (14)$$

ここで、 φ は誘導線電荷と電極電位との位相差で、次式で表し、

$$\varphi = \tau_m \omega \quad (15)$$

τ_m は、イオンの電極間移動時間で次式で計算する。

$$\tau_m = p / (b\alpha V_0) \quad (16)$$

ここで、 b ：イオン移動度 [m²/V·s]

また、 β は、デバイ長 L_D と電極ピッチ p の関数で、面積の逆数のディメンジョンを持つ次式で与える。

$$\beta = (1/L_D^2) \exp(-p/L_D) \quad (17)$$

$$L_D = \sqrt{\epsilon_0\epsilon_m D/\sigma_m} \quad [\text{m}] \quad (18)$$

ここで、 D ：液体の拡散係数 [m²/s]、 σ_m ：液体の導電率 [S/m]

このように β は、誘導線電荷密度を、空間的な体積電荷密度に変換する係数でデバイ長と電極ピッチで補正を加えたものである。

(仮定 3)

電気泳動力の時間平均はこの誘導線電荷密度と電界より直ちに求められるが、イオン運動の周波数応答性を考慮し、電極間のイオン移動時間 τ_m と電源角周波数 ω の積で決まる次の周波数減衰係数 γ を導入する。

$$\langle \mathbf{F}_v \rangle = \gamma \cdot \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{F}_v dt \quad (19)$$

$$\gamma = \exp(-\eta\omega\tau_m/2\pi) \quad (20)$$

ただし、 η ：任意定常数（通常 2~6 程度）

3.4 EHD ポンピング特性の定式化

以上の仮定のもとに、電気泳動力の時間平均値の x -、 y -成分を求めるとき次のように表される。

$$\begin{aligned} \langle F_x \rangle_x &= 2\pi\epsilon_0\epsilon_m\alpha \cdot \beta \cdot \gamma V_0^2 \\ &\cdot \exp(-2\alpha|x|) \cos \varphi \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \langle F_y \rangle_y &= 2\pi\epsilon_0\epsilon_m\alpha \cdot \beta \cdot \gamma V_0^2 \\ &\cdot \exp(-2\alpha|x|) \sin \varphi \end{aligned} \quad (22)$$

ここで、重力加速度 g の方向を図 11 の x -軸の負の方向にとり、(9)式を x -、 y -成分で表現すると、

$$\begin{aligned} \rho_m V_x \cdot \partial V_x / \partial x \\ = \langle F_y \rangle_x - \rho_m g - \partial P / \partial x + \mu_m \nabla^2 V_x \end{aligned} \quad (23)$$

$$\rho_m V_y \cdot \partial V_y / \partial y = \langle F_y \rangle_y - \partial P / \partial y + \mu_m \nabla^2 V_y \quad (24)$$

さらに、定常的平衡状態 ($V_x = V_y = 0$) で、電気泳動力と重力とのバランスを考えると(23)、(24)式は次のように簡略化される。

$$\partial P / \partial x = \langle F_y \rangle_x - \rho_m g \quad (25)$$

$$\partial P / \partial y = \langle F_y \rangle_y \quad (26)$$

ここでは、 x -成分が興味の対象であり(25)式に(21)式を代入し積分すると圧力 P に関する次式が得られる。

$$\begin{aligned} P &= -(\pi\epsilon_0\epsilon_m\beta\gamma \cdot V_0^2 \cos \varphi) \\ &\cdot \exp(-2\alpha|x|) - \rho_m g x \end{aligned} \quad (27)$$

さらに、積分定数を省略し、仮想電極面 ($x=0$) での圧力を $(-\rho_m g)$ で規格化すると、揚程 (m-単位) に関する次式となる。

$$P_{0x} = \pi\epsilon_0\epsilon_m\beta\gamma \cdot V_0^2 \cos \varphi / \rho_m g \quad (28)$$

この式の φ 、 β 、 γ にそれぞれ(15)、(17)、(20)式を代入すると、電気泳動力によって発生する圧力上昇 (揚程) を液体の各種物性値、電極定数、駆動電源の条件と結び付けることができる。

$$\begin{aligned} P_{0x} &= \pi\epsilon_0\epsilon_m \left\{ \frac{1}{L_D^2} \cdot \exp(-p/L_D) \right\} \\ &\cdot \exp(-\eta\omega\tau_m/2\pi) V_0^2 \cos \varphi / \rho_m g \end{aligned} \quad (29)$$

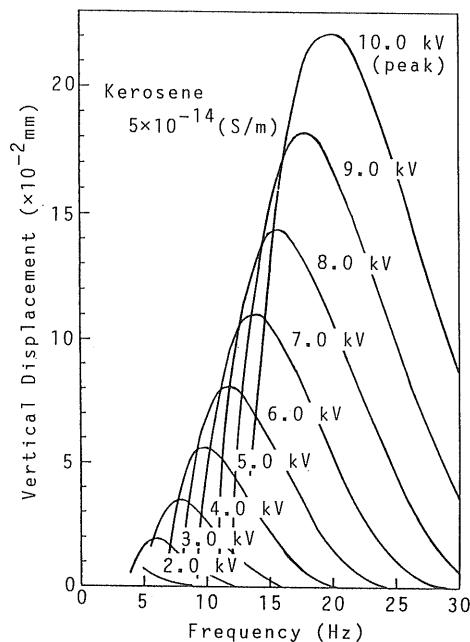


図 12 垂直変位の周波数への依存性 (順方向)
Fig. 12 The vertical displacement as a function of frequency.

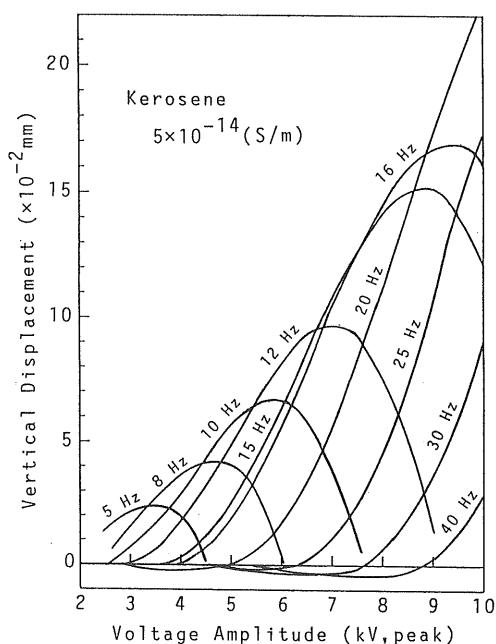


図 13 垂直変位の印加電圧への依存性
Fig. 13 The vertical displacement as a function of applied voltage.

4. EHD 特性の数値計算結果と実験との比較

ここで、絶縁性液体として灯油の次のような物性値を用いて、(29)式より EHD 特性を具体的に求める。

比誘電率: $\epsilon_m = 3$ [−], イオン移動度: $b = 1 \times 10^{-8}$ [$\text{m}^2/\text{V}\cdot\text{s}$], 密度: $\rho_m = 900$ [kg/m^3], 導電率: $\sigma_m = 5 \times 10^{-14}$ [S/m], 拡散係数: $D = 7 \times 10^{-10}$ [m^2/s], その他: $\eta = 6$ [−]

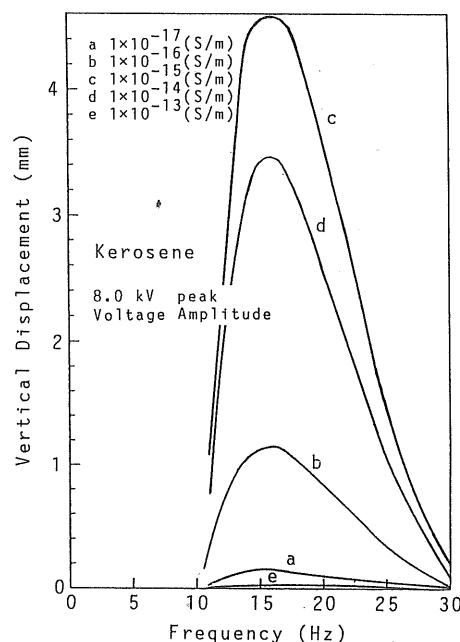


図 14 導電率に対する垂直変位の周波数への依存性
Fig. 14 The vertical displacement as a function of frequency for various conductivities.⁵⁾

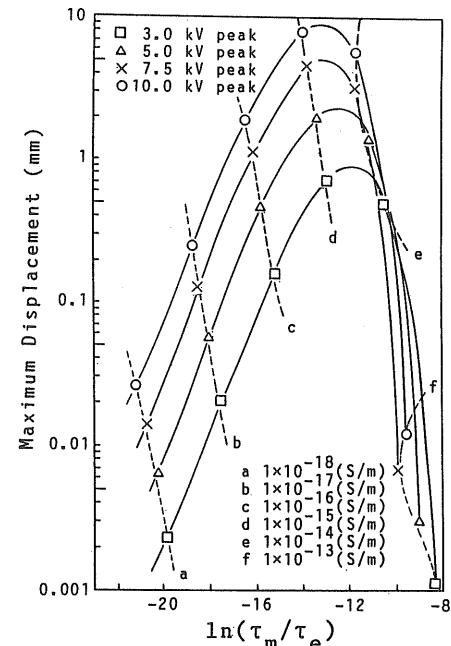


図 15 導電率に対するイオンの最大変位の緩和時間 τ_e と公称移動時間 τ_m との比 $\ln(\tau_m/\tau_e)$ への依存性
Fig. 15 Maximum fluid displacement versus the ratio of the relaxation time τ_e to the nominal migration time τ_m for ions to cross the channel shows maximum pumping occurs when the relaxation time and migration time are comparable.

4.1 揚程の周波数および印加電圧依存性

図 12 に、印加電圧 (相電圧波高値) をパラメータとした周波数特性を、図 13 に周波数をパラメータとした電圧特性を示す。これらは、計算モデルが非常に単純化され、ま

た実験的あるいは、物性論的に検証されていない仮定を、含むために得られた数値の大きさを議論できる段階ではないが、実験で得られた図3(a)、図5の特徴をよく表している。また、Melcherらの実験(図7、図8)の特徴とも一致している。

4.2 揚程に対する導電率の影響

灯油での実験は行っていないが、帶電防止剤のような添加剤を混入し導電率を制御した場合を想定した特性計算である。

導電率 σ_m を $10^{-17} \sim 10^{-13}$ [S/m] の範囲で計算した結果を図14に示す。これは、Melcherらが実験的に指摘しているように、導電率が極端に低くともまた高くとも、EHD揚程は低くなっている。これは、おそらくデバイ長の影響と思われる(図9参照)。

4.3 イオン緩和時間 τ_e とイオン移動時間 τ_m の比が最大揚程に与える影響

液体のイオン緩和時間 τ_e は、次式で与えられる。

$$\tau_e = \epsilon_0 \epsilon_m / \sigma_m \quad (30)$$

また、イオン移動時間 τ_m は、(16)式で定義した量である。この両者の比の対数 $\ln(\tau_m/\tau_e)$ と、最大揚程の関係を図15に示す。灯油で、この関係の実験データはないが、Melcherの実験(図10)と比較すると、その特徴を表している。ただMelcherらの実験では、 $\ln(\tau_m/\tau_e)=0.5$ 、すなわち、 τ_e 、 τ_m が同程度の時に最大揚程が得られている。しかし、計算では、 $\ln(\tau_m/\tau_e)=-12$ であり、これは、解析モデルと導入した仮定の単純さにあると思われる。

5. まとめ

進行波電界を利用した液体のEHD効果は、非常に多くの物理的パラメータに支配されており、厳密な取扱いは困難である。ここで、引用したMelcherらの報告⁵⁾では、かなり厳密な理論展開がなされているが、周波数特性や導電率の実験結果を十分説明できるまでには至っていない。

しかし、本論文で示したように、モデルを単純化し2、3の物理的見て妥当と思われる仮定を導入することで、ナビエ・ストークスの方程式を基本として、EHD効果の各種

パラメータ依存性を明らかにすることができた。しかし、非常に単純化されたモデルであり、電荷の再結合、減衰やイオン対流、拡散等の伝導機構などの重要な因子は、まったく考慮されていない。これらの因子が考慮された、より厳密な取扱いは、今後に残された課題である。

最後に、1996年の電気学会研究会¹⁶⁾において、たいへん有益なご助言をいただきました九州大学工学部 原雅則教授に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 渡辺 彰: 静電気ハンドブック, 静電気学会編, p. 305, オーム社 (1981)
- 2) 増田閃一, 松本陽一: 電気学会論文誌A, 94-A (1974) 515
- 3) R.M. Ehrich and J.R. Melcher: Phys. Fluids, 25 (1982) 1785
- 4) M.S. Firebaugh and J.R. Melcher: Phys. Fluids, 10 (1967) 1178
- 5) A.P. Washabugh, M. Zahn and J.R. Melcher: 88CH2565-0/88, IEEE, p. 1563 (1988)
- 6) S. Masuda, K. Fujibayashi and K. Ishida: Staub-Reinhaltung der Luft, 1 (1970) 449
- 7) 増田閃一, 藤林宏一, 石田謙吾, 稲葉裕俊: 電気学会論文誌B, 97-B (1972) 9
- 8) 青山道夫, 増田閃一: 電気学会論文誌B, 97-B (1977) 456
- 9) 青山道夫, 増田閃一: 静電気学会誌, 2 (1977) 123
- 10) N.J. Felici: J. Electrostat., 4 (1977/1978) 119
- 11) 小田 徹, 青山道夫, 萩原正明, 池上雄二: 電気学会全国大会講演論文集 [6], p. 209, 電気学会 (1991)
- 12) 小田 徹, 青山道夫, 萩原正明, 池上雄二: 静電気学会講演論文集 '91, p. 45, 静電気学会 (1991)
- 13) 青山道夫, 小田 徹, 萩原正明, 池上雄二: 電気学会全国大会講演論文集 [6], p. 154, 電気学会 (1992)
- 14) 青山道夫, 小田 徹, 萩原正明, 池上雄二: 静電気学会講演論文集 '92, p. 329, 静電気学会 (1992)
- 15) T. Oda, M. Aoyama and T. Adachi: The 6th Asian Conference on Electrical Discharge, p. 59, Oita (1993)
- 16) 小田 徹, 青山道夫, 大久保利一, 野本幸治, 足立宜良: 電気学会研究会資料, 放電, 誘電・絶縁材料合同研究会, p. 97, 電気学会 (1996)
- 17) T. Oda, M. Aoyama, T. Ohkubo, Y. Nomoto and T. Adachi: IEEE Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Vol. II, p. 662, San Francisco (1996)

論 文

液晶ディスプレイのガラス基板帶電と静電破壊

保 坂 靖 夫*, 原 田 望**

(1997年7月7日受理)

Electrostatic Destruction of Liquid Crystal Display

Yasuo HOSAKA* and Nozomu HARADA**

(Received July 7, 1997)

Electronic parts are charged by tribo-electricity on manufacturing lines, and various modes of electrostatic destruction occur. Especially, during the manufacturing process of a liquid crystal display (LCD), LCD glass substrate with a large area is charged with a large tribo-electric charge; consequently, electrostatic destruction or deterioration (ESD) occurs on LCD glass substrates. For an array process, thin film transistors (TFT) and wiring lines on the glass substrates are destroyed by a spark discharge of this charge. This destruction occurs often at the pattern edge of the glass substrate due to the edge effect of the electric field. Different forms of ESD occur in a cell process whereby an LCD is assembled by pouring a liquid crystal into the gap between an array glass and a color filter glass. This paper demonstrates that tribo-electricity charge is generated by the air evacuation of an evacuation stage, and that the various forms of ESD occur at different values of charge density. These forms of ESD include spark discharge destruction, S-line or G-line deterioration and wrong signal phenomena.

1. はじめに

電子部品を量産する際、製造ラインで搬送された電子部品は搬送手段や処理工序で異なる材質などと接触し、摩擦帶電による静電気を生ずる。ことに、液晶ディスプレイ (LCD) に使用するガラス基板は、シリコンウェハより大面积で絶縁性が高く静電気が発生しやすいため、大量の静電気による静電破壊が歩留まりを大きく左右する。この帶電したガラス基板が周辺支持体などと接触すると、火花放電による薄膜配線の断線や TFT 素子の破壊、さらに組み上がった液晶セルの駆動時にライン状の画像欠陥による静電劣化や、画像ちらつきを起こすシグナル異常が生ずる。

本論文では、LCD 製造ラインで多用される吸引ステージやクリーンルーム内の気流で起こる気流帶電に着目し、ガラス基板上に TFT 素子を形成するアレイプロセスの気流帶電と静電破壊との関係、さらにセルプロセスの検査工

キーワード：気流帶電、静電破壊、S 線・G 線劣化、シグナル異常、液晶ディスプレイ

* (株)東芝研究開発センター情報・通信システム研究所
研究第四担当 (210 川崎市幸区小向東芝町 1)

Toshiba Corporation, R & D Center, Communication and Information Research Lab., 1, Komukai Toshiba-cho,
Saiwai-ku, Kawasaki 210, Japan

** (株)東芝液晶開発センター (235 横浜市磯子区新杉田町 8)

Toshiba Corporation, LCD R & D Center, 8, Shinsugita-cho, Isogo-ku, Yokohama 235, Japan

程で起こる帶電量と静電劣化との関係を明らかにした。これらの関係から、種々の静電破壊 (ESD) を生ずる臨界帶電量を明らかにした。

2. 液晶ディスプレイのガラス基板に生ずる帶電

液晶ディスプレイ (LCD) の製造は、ガラス基板上に液晶駆動用の TFT (thin film transistor) 素子を設けるアレイプロセスと、アレイ基板とフィルタ透明電極基板を貼り合わせて液晶を注入し液晶セルを組み上げるセルプロセスからなる。ここではガラス基板背面がアースポテンシャルとなり電界や電位解析が容易で、かつ火花放電が頻繁に観測されるガラス基板固定用の吸引ステージで生ずる静電破壊に着目した。解析の結果、製造プロセス上で見落とされがちな吸引ステージのガラス基板吸着時に起こる気流帶電やクリーンルーム内の気流帶電が帶電の一要因であり、さらに今回使用した LCD ガラス基板 (コーニング 7059) の静電荷は次の工程に達するまで残留し、ガラス基板面の粗さによっても帶電量が変化することが明らかになった。

2.1 吸引ステージで起こる帶電

図 1 に示すように、LCD 基板 4 枚分に相当する 46 cm × 38 cm の大きさの厚さ 1 mm のガラス基板を吸引ステージの金属支持ピン上に搬送アームで搬送し、金属支持ピンが下降すると同時に吸引ステージの吸引孔 (2 mm ϕ) から空気を 60 cm \cdot H₂O の吸引圧力で高速吸引し、ガラス基板を