

論 文

ネマティック液晶に流れる電流の液晶層厚依存性

間 多 均^{*1}, 田 中 厚 也*, 中 山 武 泰*

(1998年6月10日受理)

Liquid Crystal Layer Thickness Dependence of Current
Flowing in Nematic Liquid CrystalHitoshi MADA^{*1}, Atsuya TANAKA* and Takeyasu NAKAYAMA*

(Received June 10, 1998)

Voltage-current characteristic was measured for 4-pentyl-4'-cyanobiphenyl in nematic phase. The results show the characteristic appeared in ordinal dielectrics. Both for the ohmic and childic region in voltage-current characteristic, liquid crystal layer thickness dependence of current was also measured. The current proportional to the square of thickness for thinner region below 10 μm . This result were analysed by double layer model of dielectrics. The theoretical and experimental results shows good agreement.

1. 序 論

ネマティック液晶は、ディスプレイデバイスとして広く用いられている。解像度やコントラストを上げるためにアクティブマトリクス駆動が利用されている。この駆動方法によると、液晶に直流のバイアス電圧が印加されてしまう。直流バイアス電圧が存在すると、液晶中に含まれるわずかの不純物イオンがドリフトし、界面で電気二重層を形成する。そのため、液晶にかかる有効電圧を変えてしまうので表示品質が損なわれる。それを防ぐために、液晶中の不純物イオンの振る舞いを明らかにする必要がある。現在までかなり解明が進んできた¹⁻⁶⁾が、完全な解明には至っていない。

一方、液体誘電体の電気伝導については固体の誘電体に比べて理解が進んでいない。液晶の電気伝導を調べることは誘電体の電気物性を理解するためにも必要となる。本論文では、ネマティック液晶の直流電気伝導の振る舞いについて検討した。

2. 実験および結果

実験で用いた液晶は、市販のネマティック液晶4-ペンチル-4'-シアノビフェニル(5CB)で、正の誘電異方性を有している。測定電極はガードリング付きの3端子構造で、表

面抵抗は $34 \Omega/\square$ のITO電極を用いた。有効面積は $8.3 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ である。電極表面そのままである場合と、および電極面にポリイミドを塗布した表面、の2種類の試料に対し、液晶を均一にホモジニアス配向させるためにラビング処理を施した。液晶の配向膜であるポリイミド層の厚さは約80 nmである。液晶層の厚さはテフロンまたはポリエチレンテレフタレート製のスペーサーで制御し、5 μm から 50 μm まで8種類の試料を用意した。電圧の印加は低周波発振器を用い、周波数0.0005 Hzの矩形波を利用した。つまり電圧印加後、1,000秒の電流を定常電流と見なしして測定を行った。

第一の実験は、上記2種類の配向表面を用い、それぞれ液晶層厚12.5 μm の試料に対して電圧電流特性を測定した。図1が測定結果である。両者とも低電圧領域ではオーム則を示し、高電圧側でチャイルド則を示した。次に、それぞれの試料でオーム則、チャイルド則領域となる印加電圧0.3 Vと1.4 Vにおいて液晶層の厚さを変化させて電流を測定した。ポリイミド配向層の試料の液晶層厚依存性を図2に、電極のみの試料の結果を図3に示す。ポリイミド配向層のある試料では10 μm にピークを持つ山形の特性が得られた。層が厚い領域では厚さに逆比例し、薄い領域では厚さの2乗に比例した。一方、電極のみの試料では液晶層厚によらず一定の電流値となった。通常の誘電体において、電流は試料の厚さに逆比例するはずであり、この実験結果はかなり特異な振る舞いをしていることを示している。

3. 考 察

この研究は、液晶の電気伝導を調べるのが目的である。しかし現実には液晶を配向させなければならず、配向膜の

キーワード：液晶、電流、電気二重層、イオン、多層誘電体

* 帝京大学理工学部 (320-8551 宇都宮市豊郷台 1-1)
School of Science and Technology, Teikyo University,
Tohosatodai, Utsunomiya 320-8551, Japan

¹ mada@ees.teikyo-u.ac.jp

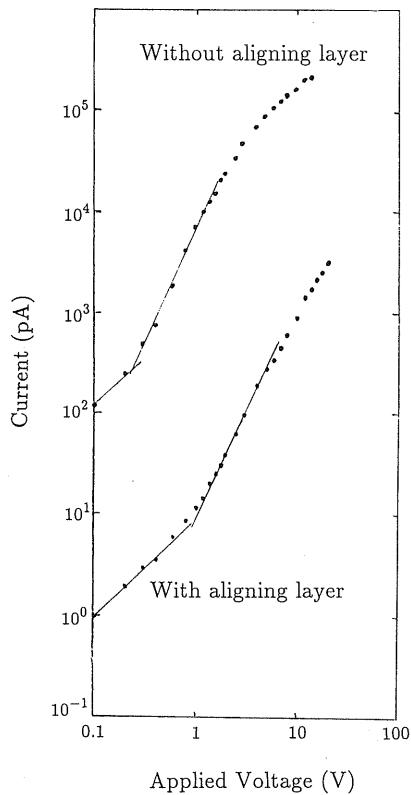


図 1 電圧電流特性
Fig. 1 Voltage-current characteristics.

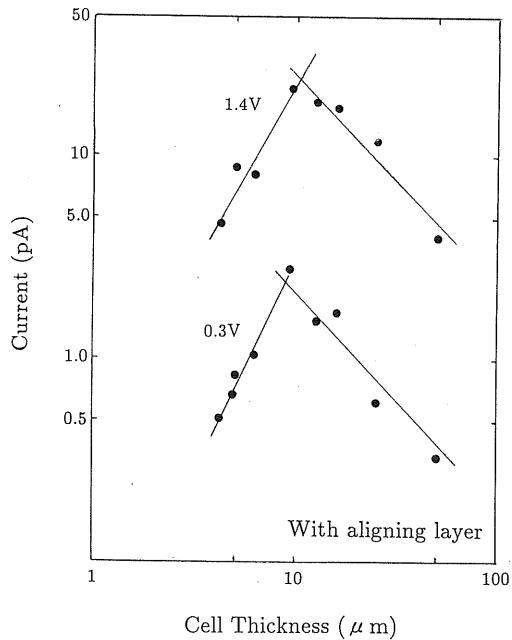


図 2 ポリイミド配向膜のある試料における電流の層厚依存性
Fig. 2 Layer thickness dependence of current for the cell with polyimide aligning layer.

特性も同時に測定してしまうことになる。このことは電極のみの場合にも当てはまり、液晶中に含まれる不純物イオンがドリフトし界面に電気二重層を形成する⁷⁾。そのため、

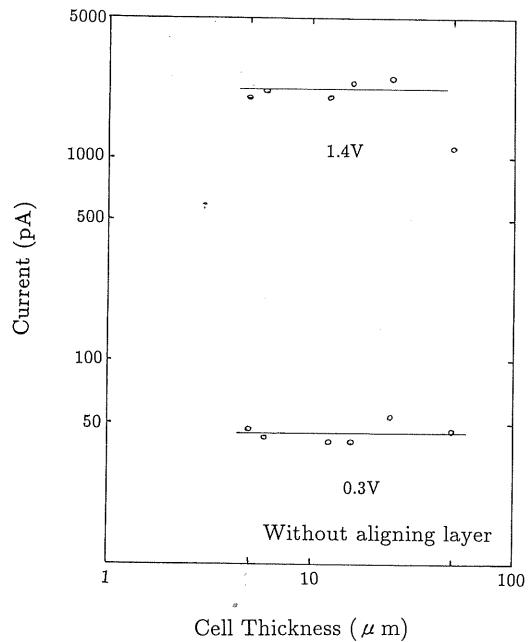


図 3 電極のみの試料における電流の層厚依存性
Fig. 3 Layer thickness dependence of current for the cell no alignment layer.

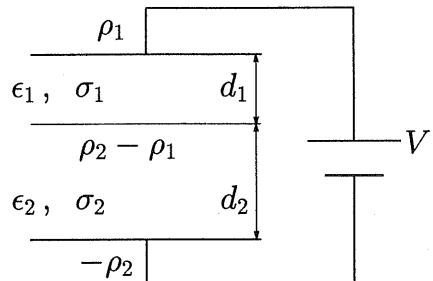


図 4 理論計算のための誘電体二重層モデル
Fig. 4 Double dielectric layer model used in the calculation.

界面には液晶とは異なる層が形成され、この効果を考慮しなければならない。実験結果の図 2, 3 を説明するために、測定に用いた液晶試料を図 4 に示したような等価回路で表現する。二層の誘電体は、片方が液晶層で、もう片方は両電極の配向層を合成した層を意味している。誘電率を ϵ 、導電率を σ 、面電荷密度を ρ 、層厚を d とおく。簡単のため、それぞれの層内ではすべての物理量は一定であると仮定する。また、誘電率と導電率は分散がなく、電圧（電界）依存性もないと仮定する。

以上の仮定の下で電流密度を i として、電流連続の条件から次の式が成立する。

$$i = \sigma_1 \frac{\rho_1}{\epsilon_1} + \frac{d\rho_1}{dt} = \sigma_2 \frac{\rho_2}{\epsilon_2} + \frac{d\rho_2}{dt} \quad (1)$$

それぞれ第 1 項が伝導電流で、第 2 項は変位電流である。また、印加電圧を V とすると

$$\frac{\rho_1}{\epsilon_1} d_1 + \frac{\rho_2}{\epsilon_2} d_2 = V \quad (2)$$

も成立しなければならない。印加電圧 V は時間 $t=0$ で印加され、一定電圧であるため、 $t>0$ では $dV/dt=0$ となる。

式(1)と(2)から ρ_2 を消去して

$$\frac{d\rho_1}{dt} + \frac{1}{\tau} \rho_1 = \frac{\epsilon_1 \sigma_2}{\epsilon_1 d_2 + \epsilon_2 d_1} V \quad (3)$$

が得られる。ただし、 τ は緩和時間で

$$\tau = \frac{\epsilon_1 d_2 + \epsilon_2 d_1}{\sigma_1 d_2 + \sigma_2 d_1} \quad (4)$$

である。

式(3)を ρ_1 について解くと、 K を定数として次式が得られる。

$$\rho_1 = \frac{\epsilon_1 \sigma_2}{\sigma_1 d_2 + \sigma_2 d_1} V + K \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (5)$$

時間 $t=0$ で二層間、つまり液晶の界面に電荷は存在しないので試料の静電容量は二層の静電容量の直列合成 C となる。したがって、定数 K は $\rho_1 = CV$ から求めることができる。以上のことから解 ρ_1 は

$$\rho_1 = \frac{\epsilon_1 \sigma_2}{\sigma_1 d_2 + \sigma_2 d_1} V + \left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1 d_2 + \epsilon_2 d_1} - \frac{\sigma_2}{\sigma_1 d_2 + \sigma_2 d_1} \right) \times \epsilon_1 V \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (6)$$

となる。上式を式(1)に代入して最終的に電流は次のように得られる。

$$i = \frac{\sigma_1 \sigma_2}{\sigma_1 d_2 + \sigma_2 d_1} V + \frac{(\epsilon_2 \sigma_1 - \epsilon_1 \sigma_2)^2 d_1 d_2}{(\epsilon_1 d_2 + \epsilon_2 d_1)^2 (\sigma_1 d_2 + \sigma_2 d_1)} \times V \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (7)$$

第1項は漏れ電流（定常電流）を表し、第2項は吸収電流（変位電流）を表す。誘電率の分散がなく周波数によらず一定値と仮定したために吸収電流の時間依存性が指数関数となっている。実際の試料では低周波領域に誘電率の分散がある^{8,9)}ため指数関数とはならないが、近似的には指数関数と見なすことにする。

このモデルを実際の液晶試料に当てはめ、層1を液晶、層2を配向層とする。配向層のない場合の層2は表面の電気二重層を考える。実際の各層の厚さと導電率から $d_2 \ll d_1$ 、 $\sigma_2 \ll \sigma_1$ として

$$\epsilon_1 d_2 + \epsilon_2 d_1 \sim \epsilon_2 d_1 \quad (8)$$

$$\sigma_1 d_2 + \sigma_2 d_1 \sim \sigma_1 d_2 \quad (9)$$

のような近似をする。式(7)は次のように簡単化される。

$$i = \frac{\sigma_2}{d_2} V + \frac{\sigma_1}{d_1} V \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (10)$$

緩和時間も簡単化され、

$$\tau = \frac{\epsilon_2 d_1}{\sigma_1 d_2} \quad (11)$$

となる。

表1 計算で用いた物理量の値

Table 1 Physical values used in the calculations.

Layer	Thickness (m)	Dielectric constant (F/m)	Conductivity (S/m)
Liquid crystal	-	$6 \times \epsilon_0$	1.7×10^{-12}
Alignment	16×10^{-8}	$3 \times \epsilon_0$	1.0×10^{-17}
Double layer	6×10^{-9}	$1 \times \epsilon_0$	1.0×10^{-13}

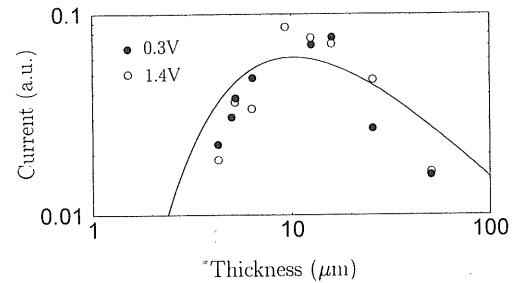


図5 理論計算と実験値の比較

Fig. 5 Comparison of calculated result with experimental data.

この結果、漏れ電流は配向層の特性のみで決定され、液晶層の影響がなくなることがわかった。したがって、液晶層の厚さによって電流は変化しないことが明らかとなつた。次に、吸収電流の振幅成分は液晶層の厚さに逆比例し、緩和時間が配向層の静電容量と液晶層の抵抗値で決定されることがわかる。したがって、これが厚さ依存性の存在する原因であることが判明した。各層の具体的な数値として表1の値を用いると実験値とよく合う。図5は配向層がある場合の計算結果を示している。実験と定性的によい一致を示している。

4. まとめ

一定の電圧を印加し、電圧印加1,000秒後のネマティック液晶に流れる電流を測定した。電圧電流特性は低電圧側でオーム則を示し、高電圧側でチャイルド則を示した。それぞれの領域における印加電圧で液晶層の厚さによる電流の変化を測定した。その結果、10 μmを境に、厚い領域では厚さに逆比例した電流が流れ、薄い領域では厚さの2乗に比例した電流となった。この結果を説明するために、液晶試料を配向層（電気二重層）も含めて二層誘電体として電流の計算を行った。適当な近似のもとで、定常電流成分は配向層（電気二重層）の導電率と厚さによって決定され、吸収電流成分が液晶層の導電率と厚さによって決定されることがわかった。とくに、液晶層が薄い場合は緩和時間の影響が大きいことが明らかとなつた。

本研究では電流に対するイオンの影響を考慮に入れてい

ない。定常電流領域では、界面の電気二重層による有効印加電圧の低下以外に影響はないと考えられるが、吸収電流の領域においてはイオンの影響を考慮しなければならない。今後、より詳細な検討をする必要がある。

本研究に関し、有益な議論をしていただいた液晶応用物性懇話会のみなさまに深謝いたします。

参考文献

- 1) H. Naito, M. Okuda and A. Sugimura : Phys. Rev. A, **44** (1991) R3434
- 2) A. Sugimura : J. Appl. Phys., **70** (1991) 5355
- 3) H. Naito, K. Yoshino and M. Okuda : J. Appl. Phys., **73** (1993) 1119
- 4) 間多 均, 西河 輝 : 静電気学会誌, **18** (1994) 299
- 5) H. Mada and H. Yamada : Jpn. J. Appl. Phys., **33** (1994) 5886
- 6) H. Mada and M. Ryūzaki : Jpn. J. Appl. Phys., **34** (1995) L1134
- 7) H. Mada and A. Nishikawa : Jpn. J. Appl. Phys., **32** (1993) L1009
- 8) J. Nakanowatari and K. Ono : Jpn. J. Appl. Phys., **35** (1996) L111
- 9) H. Mada, S. Ohnoya, H. Endoh and H. Fukuro : Jpn. J. Appl. Phys., **35** (1996) L1114