

【2】液晶の基礎とディスプレイ応用

2-1. 液晶の基礎

2-1-a) 液晶とは？

液晶(Liquid Crystal)は、液体(Liquid)と結晶(Crystal)の中間状態であり、液体の特徴である流動性と、結晶の特徴である秩序性を兼ね備えている(図1)。液晶には結晶と同様の秩序性があるため、光学的性質・電気的性質など各種物性に異方性がある。また、液体と同様に流動性があるため、電場などの外場によって容易にスイッチングさせることができる。これらの性質を表示装置に利用したものが液晶ディスプレイである。

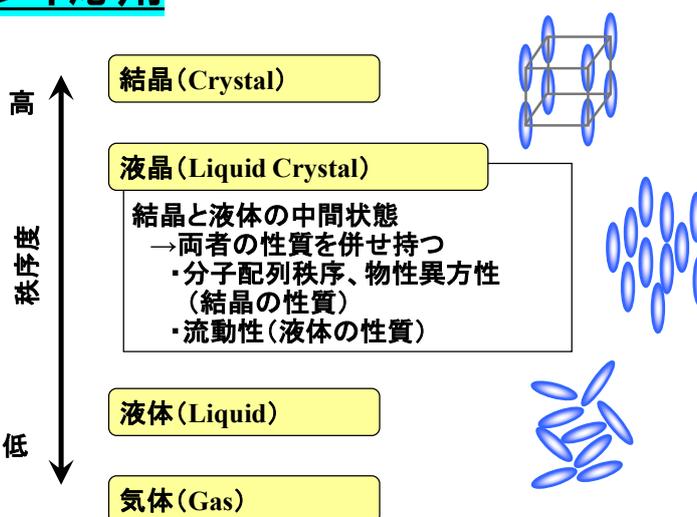


図1. 液晶とは

2-1-b) 液晶の分子配列

液晶にはいろいろな種類のものがあるが、液晶ディスプレイに通常用いられる棒状低分子サーモトロピック液晶を用いて、分子レベルで見たときの液晶の特徴を図1で説明する。

結晶では図1(a)のように、分子は規則的に配列している。逆に、液体では、図1(e)のように分子の配列に規則性がない。液晶相にはいろいろなタイプのものがあるが、図1では、液晶の代表格であるネマティック相(図1(d))、スメクティックA相(図1(c))、スメクティックC相(図1(b))について紹介する。

図1(d)のネマティック相では、分子の位置には規則性がないが、分子長軸の平均方向がそろっている。図1(c)のスメクティックA相では、分子は層構造をとって配列しており、分子長軸の平均方向は層に垂直になっている。図1(b)のスメクティックC相では、分子は層構造をとって配列し、分子長軸の平均方向は層に対して傾いている。秩序度は、ネマティック相、スメクティックA相、スメクティックC相の順に高くなる。スメクティック相は、通常、ネマティック相より低温側で発現する液晶相であり、層構造を有している点の特徴である。スメクティック液晶はさらに層内での分子配列から多数の種類に分類されるが、ディスプレイ応用を考える場合には、粘度、応答速度、配向制御性などの観点から、秩序度の比較的低いスメクティックA相およびスメクティックC相が中心となる。

液晶材料には、光学活性を有する材料があり、この場合、液晶分子配列に螺旋構造が発生する場合がある。図2に、ネマティック液晶材料が光学活性を有する場合の分子配列を描いている。このような液晶相は、キラルネマティック相あるいはコレステリック相と呼ばれる。複屈折を生じない方向の軸である光軸(Optical axis)に垂直な平面上では分子長軸は特定の平均方向を向いているが、この平均方向がねじれた状態となっている。

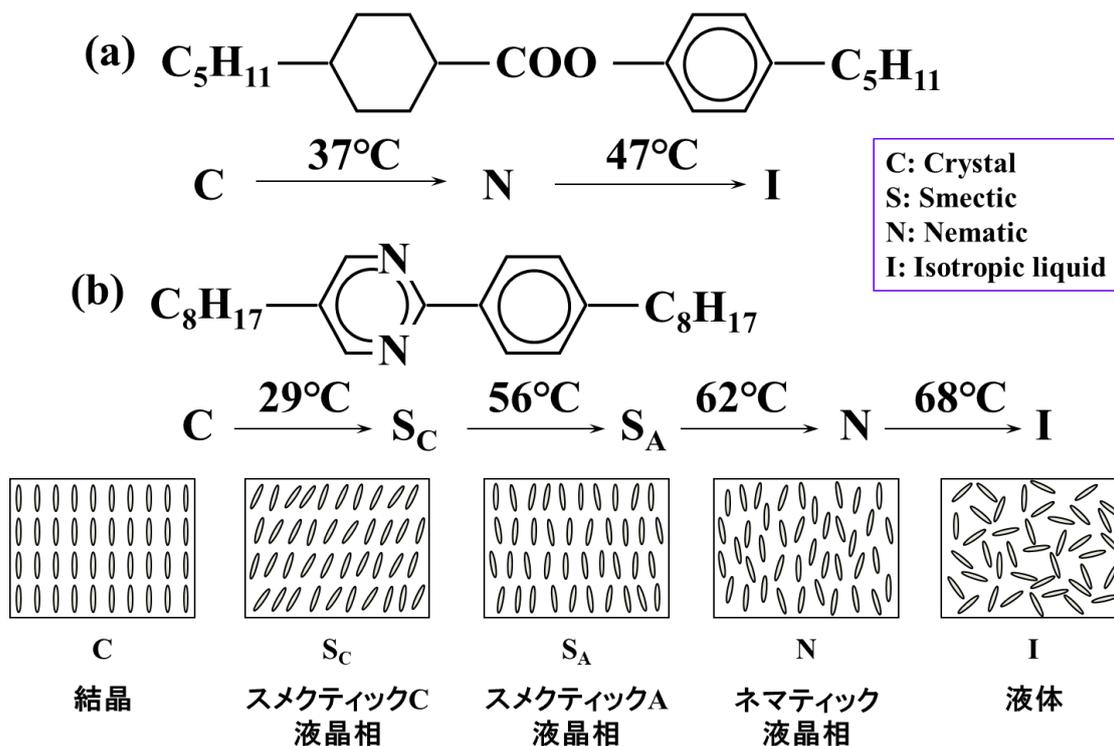


図 1. 結晶、液晶、液体の分子配列

コレステリック液晶相: Cholesteric Liquid Crystal

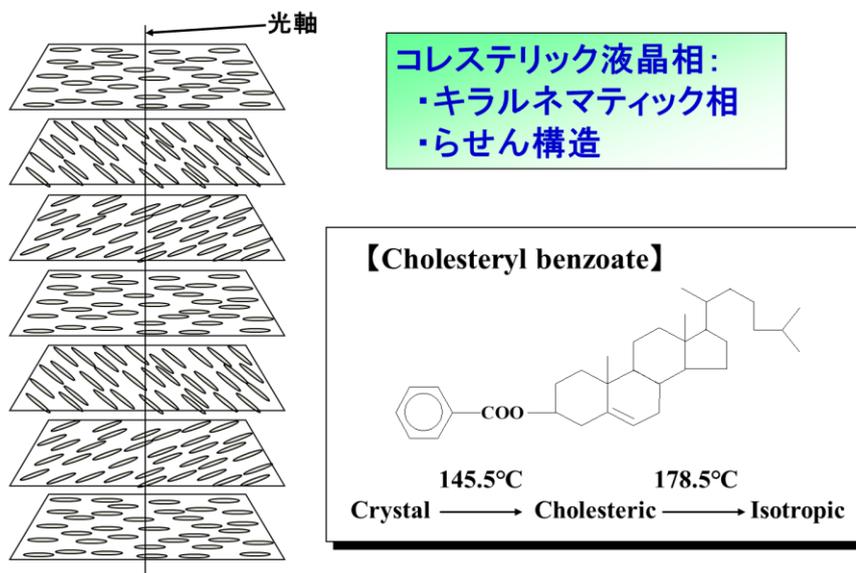


図2. コレステリック液晶の分子配列

2-1-c) 液晶の発見と初期の研究

液晶は19世紀の終わりに発見された。

1888年、オーストリアの植物学者ライニツァ(F. Reinitzer)は、コレステロールの安息香酸エステル(図1)の結晶を加熱したとき、145.5°Cで融解して白濁した粘ちような液体となり、さらに加熱すると178.5°Cで透明液体になることを発見した[1]。

1889年、ドイツの物理学者レーマン(O. Lehmann)は、この145.5°Cと178.5°Cの間に生じた状態が偏光顕微鏡のもとで複屈折(光学的異方性)を持つことを見出し、この状態を、“Flissende Krystalle (液晶)”と名づけた[2]。

これが「液晶」の発見とされている。

20世紀に入り、1922年にフランスのG. Friedelは、液晶を3つのタイプに分類し、それらに、ネマティック(nematic)、スメクティック(smectic)、コレステリック(cholesteric)と命名している[3]。ネマティックという名はギリシャ語で糸状を意味する言葉であり、ネマティック液晶を偏光顕微鏡で観察したとき糸状のパターンが見られることに由来している。スメクティックという名はギリシャ語で粘土を意味する言葉であり、スメクティック液晶が通常粘土のような粘っこい独特な偏光顕微鏡パターンを示すことに由来している。一方、コレステリックという名は、コレステリック相を示す化合物の多くがコレステロール誘導体であることに由来している。

[1] F. Reinitzer, Monatshefte für Chemie, 9, 421 (1888).

[2] O. Lehmann, Z. Physik. Chem., 4, 462 (1889).

[3] G. Friedel, Ann. Physique, 18, 273 (1922).

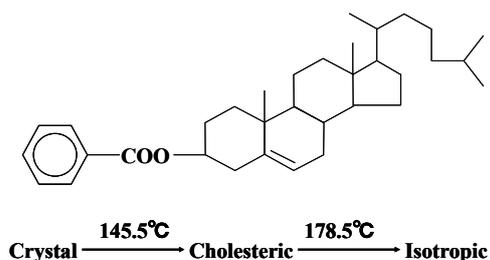
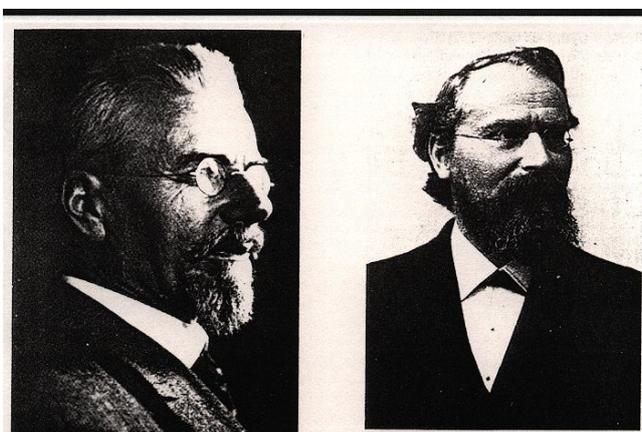


図1. 19世紀の終わりに発見された最初の液晶化合物(コレステロールの安息香酸エステル)



Friedr. Reinitzer (1857-1927) Otto Lehmann (1855-1922)

2-1-d) 液晶ディスプレイ開発の歴史

液晶の研究の歴史を表1にまとめた。

液晶をディスプレイに応用する研究は、1950年代後半に始まっている。1958年、Fergasonのグループが液晶の応用に関する研究プロジェクトを開始し、1960年代に入ってディスプレイ応用を目指した研究が本格化した。1963年に、RCAのWilliamsがネマティック液晶の電気光学効果を発見[1]、1968年にRCAのHeilmairがDSMモードを発明している[2]。この頃から日本でも液晶をディスプレイに応用する研究が本格的に立ち上ってくる。1971年に、TNモードがHofmann-La RocheのShadtらによって発明され[3]、1973年に、シャープがDSM-LCDを用いた電卓(図1)を、また、セイコーエプソンがTN-LCDを用いた腕時計を製品化している。

初期の液晶ディスプレイは文字やキャラクターを表示する単純なものだったが、その後、より複雑な表示を行うためのマトリクス型ディスプレイの開発が盛んになった。まず、TNモードを用いたパッシブ駆動液晶ディスプレイが1970年代に開発され、商品化された。TNモードは表示容量に限界があったが、1984年にSTNが発明され[4]、大容量化への道が開かれた。1986年に、STNを用いたワープロが発売されている。STNには白黒表示ができないという欠点があったが、DTSN方式によって解決され、1987年にDSTNを用いたワープロが発売されている。

現在主流となっているアクティブマトリクス駆動LCDの提案、研究は早くも1970年に始まっている。1970年、Lechnerらがアクティブマトリクス方式を提案しており[5]、さらに、1979年～1980年にかけて水素化アモルファスシリコン(a-Si)を半導体膜として用いたTFT(Thin Film Transistor)方式[6,7]が提案され、その後a-Si-TFTを用いたアクティブマトリクスLCDの研究開発が活発化した。

アクティブ駆動のフルカラーLCDとしては、セイコーエプソンが開発した多結晶シリコンを用いたp-Si-TFTフルカラーLCDが最初であり、1983年に発表されている[8]。一方、アモルファスシリコンを用いたa-Si-TFTフルカラーLCDとしては、1986年に松下が最初の製品を出している。a-Si-TFT液晶ディスプレイは、1988年に当時世界最大サイズの14型がシャープより試作され、その後、液晶ディスプレイの主流技術として発展を続ける。2005年には65型液晶ディスプレイが商品化され、2007年には108型が試作されている。一方、p-Si-TFTを用いた液晶ディスプレイは、プロジェクター用ディスプレイや携帯電話用高精細液晶ディスプレイとして市場拡大している。

新しいタイプの液晶もつぎつぎに発見、研究開発されてきた。1975年に強誘電性液晶[10]が発見され、1980年にN. A. Clark & S. T. Lagerwallが表面安定化強誘電性液晶[11]を発明、1985年にはFergasonがPDLC[12]を発表、1989年には福田、竹添らにより反強誘電性液晶が発見されている[13]。また1992年にはP. G. De. GennesがDSMの理論でノーベル物理学賞を受賞している。

- [1] R. Williams, *J. Chem. Phys.*, **39**, 384 (1963).
- [2] G. H. Heilmair, L. A. Zanoni and L. A. Barton, *Appl. Phys. Lett.*, **13** (1968) 46; *Proc. IEEE.*, **56**, 1162 (1968).
- [3] M. Schadt and W. Helfrich, *Appl. Phys. Lett.*, **18**, 127 (1971).
- [4] T. L. Scheffer and J. Nehring, *Appl. Phys. Lett.*, **45** (1984) 1021.
- [5] B. J. Lechner, F. J. Marlow, E. O. Nester, J. Tulst, *J. Proc. IEEE*, **59**, 1566 (1971).
- [6] P. G. Le Comber, W. E. Spear, A. Ghaith, *Electron Lett.*, **15**, 179 (1979).
- [7] A. L. Snell, K. D. Mackenzie, W. E. Spear, P. G. Le Comber, A. J. Hughes, *ESS-DERC Europhysics Conf.*, **99** (1980).
- [8] S. Morozumi, *SID '83 Digest*, 156 (1983).
- [9] T. Shinomiya, M. Kawabata, N. Nagae, Y. Izumi, K. Fujimori, S. Fujiwara, M. Shiota, Y. Ishii, F. Funada, *SID 97 Digest*, 497 (1997).
- [10] R. B. Meyer, L. Liebert, L. Strzelecki and P. Keller, *J. Phys. (France) Lett.*, **36**, 69 (1975).
- [11] N. A. Clark and S. T. Lagerwall, *Appl. Phys. Lett.*, **36**, 899 (1980).
- [12] J. L. Fergason, *SID '85 Digest*, 68 (1985).
- [13] A. D. L. Chandani, E. Gorecka, Y. Ouchi, H. Takezoe and A. Fukuda, *Jpn. J. Appl. Phys.* **28**, 1265 (1989).

表1. 液晶研究の歴史

年	できごと
1888	F. Reinitzer が液晶を発見
1889	O. Lehmann が液晶(Flissende Krystalle)と命名
1922	G. Friedel が、液晶をスメクティック液晶、ネマティック液晶、コレステリック液晶に分類
1958	J. L. Fergason のグループによる液晶応用プロジェクト
1963	RCA の R. Williams によるネマティック液晶の電気光学効果の発見
1968	RCA の G. H. Heilmair による DSM モードの発明
1971	Hofmann-La Roche の M. Shadt らによる TN モードの発明
1971	B. J. Lechner によるアクティブマトリクス駆動法の提案
1973	DSM-LCD を用いた世界初の液晶電卓(シャープ)
1973	TN-LCD を用いた世界初の液晶腕時計(セイコー)
1975	R. B. Meyer らによる強誘電性液晶の発見
1980	N. A. Clark と S. T. Lagerwall による表面安定化強誘電性液晶(SSFLC)の発明
1983	世界初のフルカラー液晶テレビ試作品(セイコー・エプソン)
1985	J. L. Fergason による高分子分散型液晶(PDLC)の発明
1986	世界初の a-Si-TFT-LCD 製品化(松下)
1986	STN 搭載ワードプロセッサ製品化
1987	DSTN 白黒ディスプレイの製品化
1988	世界初の14型フルカラーTFT-LCD 試作品(シャープ)
1989	福田、竹添らによる反強誘電性液晶(AFLC)の発見
1991	P. G. De. Gennes が DSM の理論でノーベル賞を受賞
1996	世界初の 40 型フルカラーTFT-LCD 試作品(シャープ)
2000	世界初の 28 型液晶テレビ製品化(シャープ)
2005	世界初の 65 型液晶テレビ製品化(シャープ)
2007	世界初の 108 型液晶テレビ開発(シャープ)

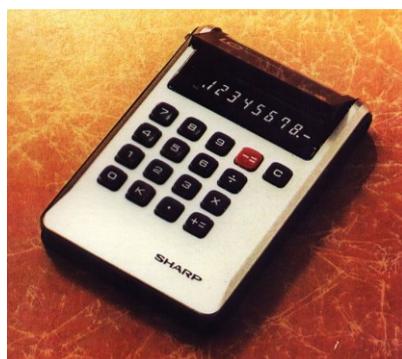


図1. 1973年にシャープが発売した液晶電卓
(シャープ HP より)



図2. 108型液晶テレビ
(<http://www.sharp.co.jp/corporate/news/070108-a.html>)

2-1-e) 液晶の分類

液晶にはいろいろなタイプのものがあり、液晶相の発現形態、分子構造などによって分類される。液晶の分類を図1に示す。

液晶は、液晶相の発現形態によって、サーモトロピック (Thermotropic) 液晶とリオトロピック (Lyotropic) に分類される。サーモトロピック液晶は、ある特定温度範囲で液晶相が発現する液晶である。リオトロピック液晶は、水などの溶媒と混合することで液晶相が発現する液晶である。

液晶は、分子の形状によって棒状構造 (Rod-like) の化合物と円盤状 (Discotic) の化合物とに分けられる。また、分子の長さによる分類もあり、低分子液晶と高分子液晶とに分類される。

液晶ディスプレイに用いる液晶は、通常、棒状構造を有する低分子サーモトロピック液晶である。

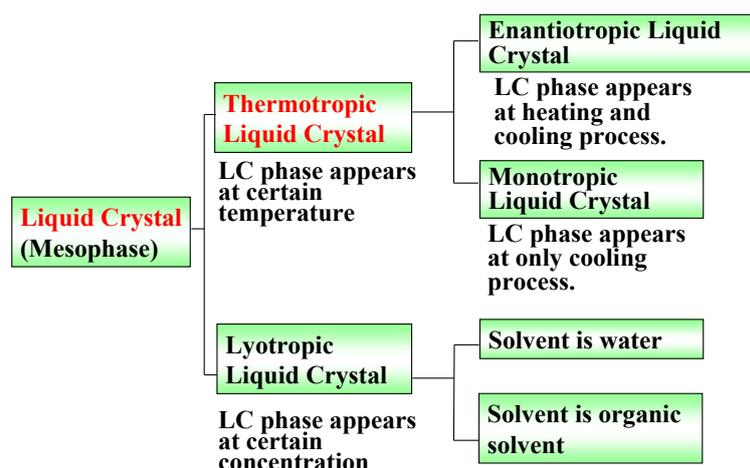


図1. 液晶の分類

＜リオトロピック液晶＞

液晶には、水などの溶媒と混合することで液晶相を示すものがあり、これを「リオトロピック液晶」と呼ぶ。リオトロピック液晶は、分子内に親水性の部分と疎水性の部分とを併せ持つ両親媒性分子である。例えば、ステアリン酸ナトリウム ($\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_{16}-\text{COONa}$) は、疎水性の長鎖炭化水素鎖部分 $\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_{16}$ と親水性のカルボン酸塩 $-\text{COONa}$ の部分からなっており、濃厚な水溶液の中で液晶相を示す。

リオトロピック液晶の応用としては、リオトロピック液晶から紡糸することによって強靱な繊維を得るケブラー繊維 (デュボン社製) が有名である。ケブラー繊維は軽くて強いことが特徴で、飛行機やヘルメットなどに使われている。

また、リオトロピック液晶は生体との関連からも注目される。リオトロピック液晶は、生体組織の中に豊富に存在している。構造を保つことのできない液体やフレキシビリティのない結晶では、一つ一つの分子に比べて途方もなく大きな生態構造の構築や生命活動に必要な運動性の確保ができなためと思われる。

リオトロピック液晶はスキンケア化粧品へも利用されている。液晶スキンケア化粧品は皮膚の角質層の構造に似た層状液晶構造をしている。層状液晶構造化粧品はたくさんの水を取り込んでおり、皮膚へ水分を補給し、かつ皮膚からの水分の蒸発を抑える役割を果たしている。

<ディスコティック液晶>

液晶相を示すのは棒状分子のみではない。円盤状の分子も液晶相を示す。これをディスコティック液晶 (Discotic Liquid Crystal) と言う[1]。ディスコティック液晶は大きくネマティック相とカラムナー相に分けられる。いくつかのタイプのディスコティック液晶相を図1に示す。

ディスコティック液晶を表示素子に直接応用する研究[2]も行われているが、ディスコティック液晶はむしろ視野角拡大フィルム[3,4]として有用である。これは、図2に示すように、光学的に負の一軸性化合物を、配向角度が厚み方向で連続的に変化するように配列させたフィルムを用いる方法である。このような光学補償フィルムは、支持体上に設けた配向膜とその上に負の一軸性化合物であるディスコティック液晶化合物をハイブリッド配向させた光学異方性層から構成される。このような視野角拡大フィルムに用いられるディスコティック液晶化合物の例を図3に示す。

- [1] S. Chandrasekhar, B. K. Sadashiba and K. A. Suresh, Pramana, **9**, 471 (1977).
- [2] S. Chandrasekhar, S. Krishna Prasad, G. G. Nair, D. S. Shankar Rao, S. Kumar and M. Manickam, Proc. Euro Display '99 Late-news papers, **9** (1999).
- [3] 伊藤宏之, 第1回JALCSテーマ講演会「次世代LCD技術の展望」, 25 (1996).
- [4] H. Mori, Y. Itoh, Y. Nishiura, T. Nakamura and Y. Shinagawa, Proc. IDW'96. 189 (1996).

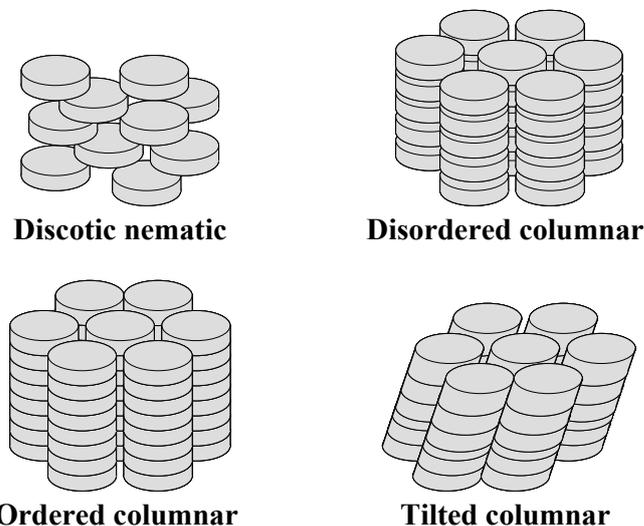


図1. ディスコティック液晶相

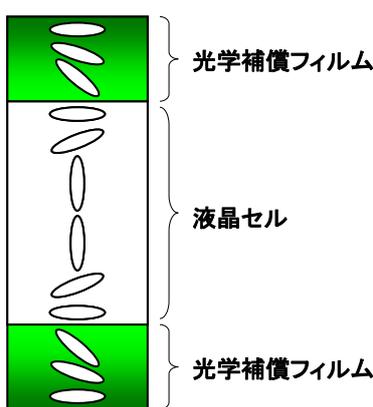


図2. ディスコティック液晶を用いた視野角拡大フィルム

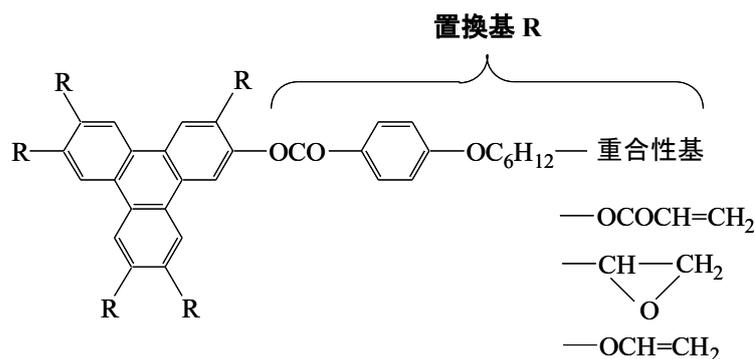
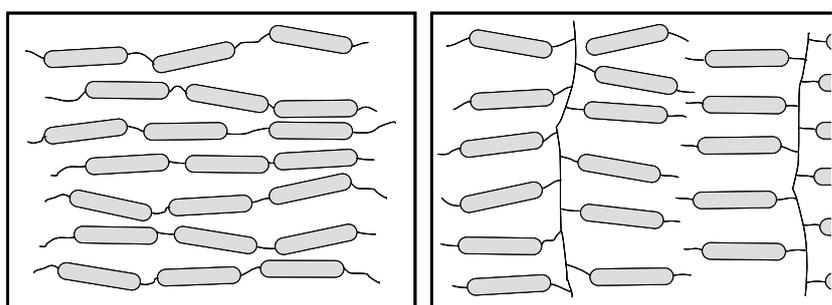


図3. 視野角拡大フィルムに用いるディスコティック液晶化合物の例

<高分子液晶>

高分子で液晶相を示すものを高分子液晶と言う。高分子液晶にも、サーモトロピック液晶とリオトロピック液晶がある。また、高分子液晶は主鎖型と側鎖型に分けられる(図1)。



(a) 主鎖型高分子液晶

(b) 側鎖型高分子液晶

図1. 主鎖型高分子液晶と側鎖型高分子液晶

2-1-f) 液晶化合物と相転移

図1に、液晶ディスプレイで通常用いられる棒状低分子サーモトロピック液晶化合物(1.1.2 参照)の例を示す。それぞれの化合物が特定の温度範囲で液晶相を示す。例えば図1の化合物(d)は、低温では結晶であるが、温度を上昇させてゆくと29°C以上でスメクティックC液晶相、56°C以上でスメクティックA液晶相、62°C以上でネマティック液晶相になる。さらに温度を上げて68°C以上になるともはや液晶相は示さず、液体状態となる。

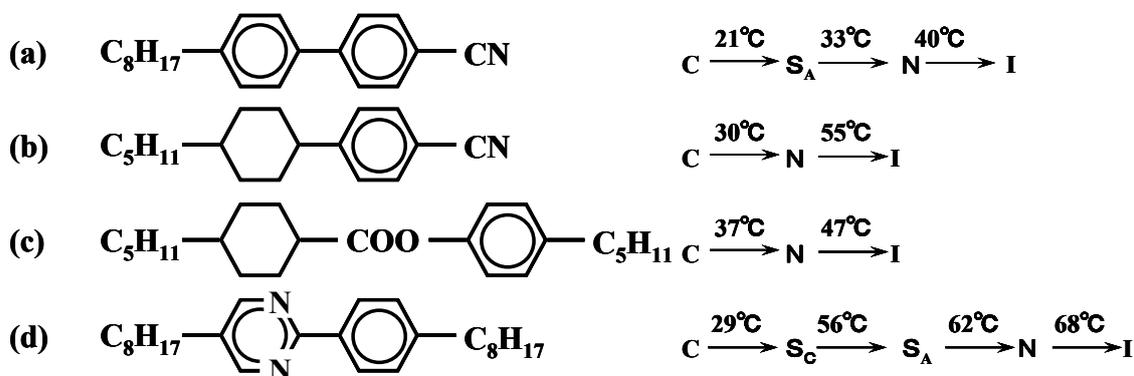


図1. 液晶化合物の例

<エナンチオトロピック(Enantiotropic)液晶とモノトロピック(Monotropic)液晶>

一定の温度範囲で液晶相を示すものを「サーモトロピック(Thermotropic)液晶」と呼ぶ。

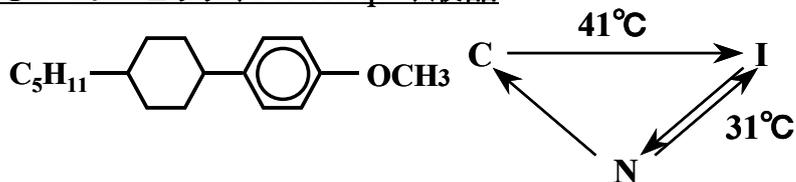
サーモトロピック液晶は、その相転移挙動によって、エナンチオトロピック(Enantiotropic)液晶とモノトロピック(Monotropic)液晶とに分けられる。それぞれの例を図1に示す。エナンチオトロピック液晶は、昇温時にも降温時にも液晶相を発現する。一方、昇温時には液晶相を発現せず、降温時のみ過冷却現象によって液晶相を発現する液晶をモノトロピック液晶と言う。

液晶ディスプレイにはエナンチオトロピック液晶を用いる。

●エナンチオトロピック(Enantiotropic)液晶



●モノトロピック(Monotropic)液晶



C : 結晶 S_C : スメクティックC相
I : 液体 S_A : スメクティックA相
N : ネマティック相

図1. エナンチオトロピック液晶とモノトロピック液晶

2-1-g) 液晶の観察

液晶の観察には、通常、偏光顕微鏡を用いる。偏光顕微鏡は、通常の顕微鏡に2枚の偏光板を組み合わせたものである。

液晶材料をスライドガラスとカバーガラスの間に挟み、温度をかけて偏光顕微鏡で観察することにより、液晶材料の転移温度測定や相の同定を行うことができる。偏光顕微鏡を用いて液晶材料を見ると、テクスチャー(texture)と呼ばれるたいへん美しい模様が観察され、このテクスチャーのタイプによって、液晶の種類を識別することが可能である。図1に液晶のテクスチャーの一例をしめす。

また、液晶素子を偏光顕微鏡で観察することにより、配向状態や欠陥の発生などを観察することもできる。図2に液晶デバイスの配向欠陥の一例を示す。

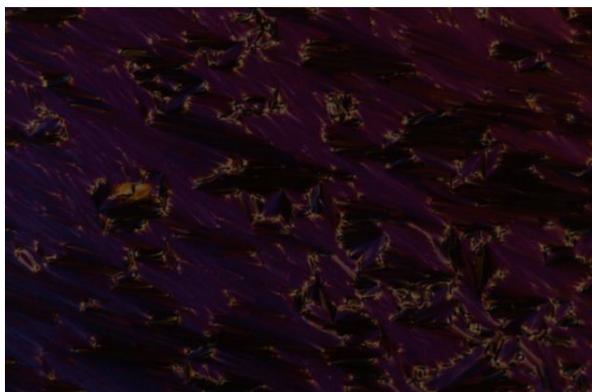


図1. 偏光顕微鏡による液晶材料の観察例

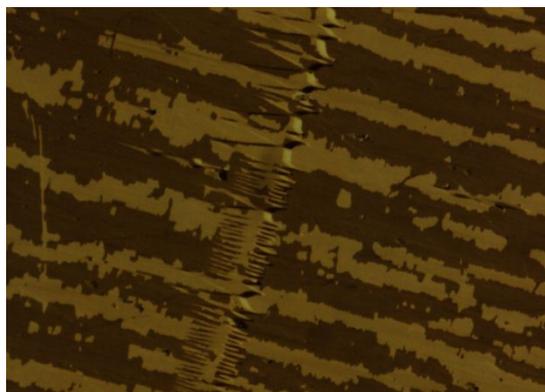


図2. 偏光顕微鏡による配向欠陥の観察例
(強誘電性液晶デバイスのジグザグ欠陥)