

第8回／「つくるⅠ（キャリア形成Ⅰ）」（12月10日）報告 －「フラットパネルディスプレイ用液晶材料の開発」－

理工学部同窓会連携講座「キャリア形成教育科目(つくるⅠ)」の第8回目にあたる12月10日は、「フラットパネルディスプレイ用液晶材料の開発」というテーマで、メルク株式会社 パフォーマンスマテリアルズディスプレイマテリアルズ事業本部液晶テクニカルセンター研究開発チーム2マネージャーの一ノ瀬秀男氏(1985年物理学専攻博士前期課程卒)が講義を行った。講義の主な内容を以下の通り報告する。



写真(一ノ瀬秀男氏)

●液晶材料と液晶ディスプレイの基礎

私は1985年に大学院前期課程を卒業して日本電気に入社した。大学までは液晶との関わりはなかった。就職して液晶を用いた開発を行う部門に配属されたことが、液晶との出会いとなった。日本電気ではTFT駆動液晶ディスプレイの開発にも携わったが、主に生産技術面での関わりだった。開発よりも仕事がしたいと思い、先に転職していた日本電気時代の上司の後を追って、91年に私もメルクに転職した。その後、幸せなことにずっと液晶に携わる仕事ができている。日本液晶学会の理事を務めたこともあり、学会誌の編集などの仕事も経験した。

メルクという会社について少し紹介しよう。歴史は古く、1686年にできた会社だ。約350年にわたり医薬品および化学品の材料提供を行ってきた。最近では買収を積極的に行っている。2007年には医薬品企業のSerono、2011年には超純水装置を取り扱うMillipore、2014年には英特殊化学品メーカーのAZエレクトロニックマテリアルズを買収した。変化し続けている企業だ。2014年にはシグマアルドリ

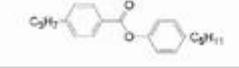
ッチの買収についても合意している。最近になってようやく独占禁止法などの課題をクリアでき、事業統合への動きが始まっている。日本法人は 1968 年に設立されている。いくつかのグループ企業から構成されており、ハイテク用途の機能性材料の製造販売、ライフサイエンス系の装置や製品の提供を行っている。

最初に、液晶材料とディスプレイの基礎について説明しよう。液晶材料は 1888 年に Friedrich Reinitzer が発見した。メルクは 1904 年に研究目的用の液晶材料の販売を始めている。1968 年に米 RCA から表示装置の材料として使えるのではないかと提案を受けて、ネマティック液晶の研究開発を本格化させた。

物質を低温から高温へと過熱すると、固体から液体そして気体へと変化する。物質の三態は中学校の理科でも習ったと思う。ところがある特殊な材料では、液体と固体の間に中間の状態が存在する。これが液晶だ。通常のディスプレイ用液晶材料は、室温では白濁した液晶だが、温めると透明な液体になる。材料によって相転移の温度は変わり、室温で固体のもの、液晶のもの、液体のものがある。

液晶材料は中心部にベンゼン環やシクロヘキサン環の骨格があり、その両末端に末端基と呼ばれるアルキル基やアルコキシ基などが結びついた棒状の分子構造となっている。そのため、物性値が短軸方向と長軸方向で異なる性質（異方性）を持っている（図 1）。

液晶化合物の具体例

略記号	分子構造	相転移温度[°C]
BCH-5		C 96 N 219 I
CCH-S01		C 12 SB 29 N 37 I
6CB		C 15 N 29 I
ME35		C 14 N 20 I

骨格

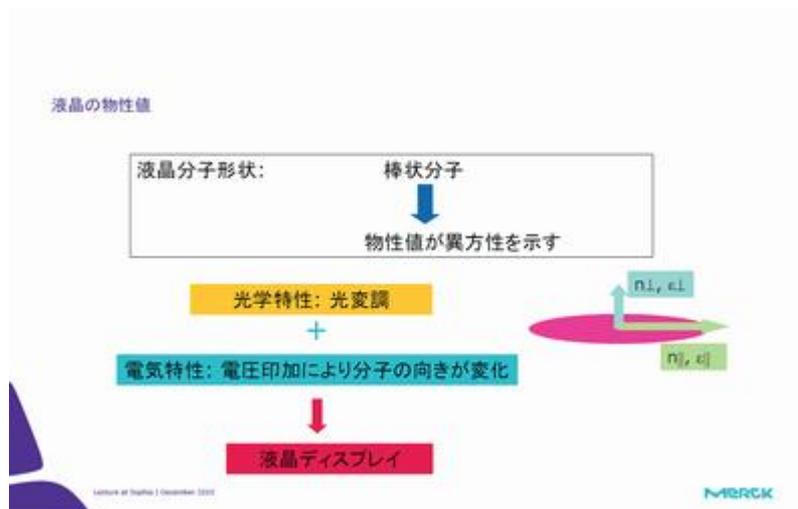
末端基

LECTURE OF DISPLAY 1 October 2008

MERCK

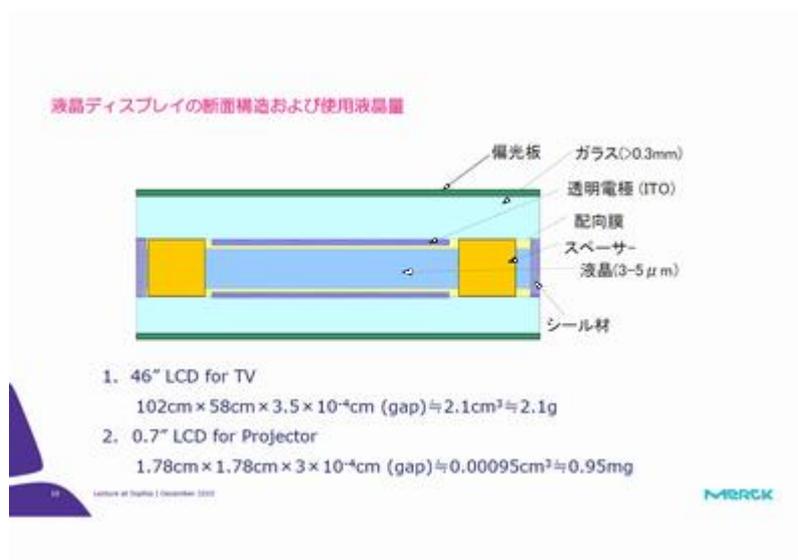
（図 1: 液晶化合物の具体例）

分子の方向によって光学的な性質（屈折率）が異なるため、これを利用して光を通したりさえぎったりする光変調を行うことができる。電気的な特性も方向で異なるため、電圧をかけることで分子の向きが変化する。こうした特性を利用することで、ディスプレイの材料とすることができるわけだ（図 2）。



(図 2: 液晶の物性値)

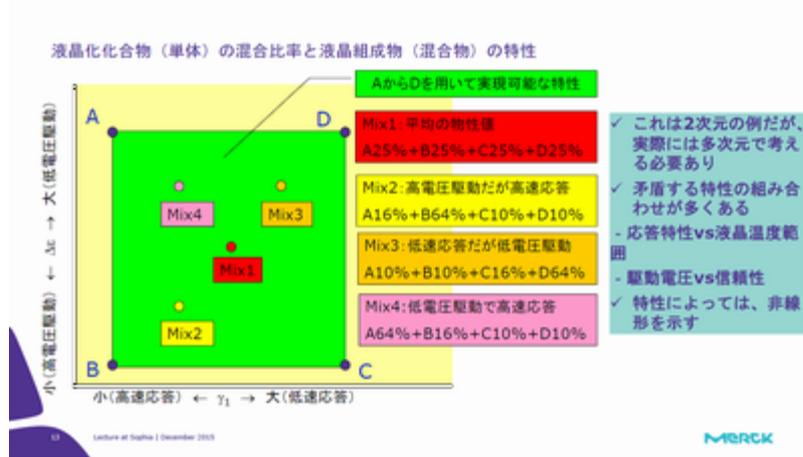
液晶材料そのものは光らないので、液晶素子を作るためにはバックライトが必要となる。電圧をかけていない状態でバックライトの光を通すように棒状分子を規則的に配列させる。一方、電圧をかけると棒状分子の配列方向が変わり光をさえぎるようになる。この素子を集積して、カラーフィルターなどをつけることでディスプレイとなる。液晶ディスプレイの構造は、図 3 のようになっている。偏光板、0.3 mm 程度のガラス、液晶分子を一定方向に配列させるための配向膜、電圧をかけるための透明電極 (ITO: Indium Tin Oxide 酸化インジウムスズ) で、3~5 μm の液晶を挟んだサンドイッチ構造となっている。46 インチのテレビでは 2 グラム程度の液晶を使う。0.7 インチの液晶プロジェクターでは 1 mg 程度しか使用しない。



(図 3: 液晶ディスプレイの構造)

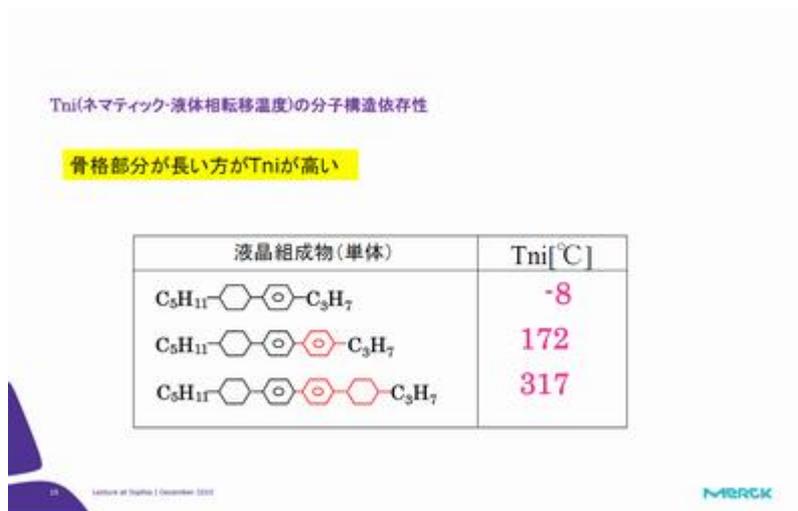
- 液晶ディスプレイの開発要望と液晶材料の関係

身の回りに液晶ディスプレイを使った製品は数多くある。製品の特性に応じて低電圧駆動、高速応答、高輝度、高信頼性といった様々な要望に応える必要がある。使用したい温度の範囲で、液晶相を示す材料を使う必要もある。そのために、異なる特性を持った液晶材料を混合することが必要となる。液晶混合物の開発設計では、10種類以上の液晶単体を混合する。図4の事例では駆動電圧と応答速度の2次元で考えた場合の事例だが、実際には多次元で考える必要がある。応答特性と液晶温度範囲、駆動電圧と信頼性といった矛盾する特性の組み合わせも多くあり、特性によっては非線形の示す場合もあるので、設計にはある程度の経験が必要となる。



(図4: 液晶化合物の混合事例)

例えば動作温度の条件を考えてみよう。テレビは動作温度範囲を-20℃から50℃で設計する必要がある。動作温度範囲よりも20℃程度高い温度でも液晶相を保つことが材料の条件となるため、液晶相の温度範囲が-20℃から70℃の材料を使う必要がある。スマートフォンでは-30℃から80℃、カーナビなどの車載システムでは-40℃から100℃の液晶相温度範囲の材料を使う必要がある。図5のように分子構造的には骨格部分が長いと、液体相移転温度が高くなる。テレビでは図5の上の材料が多く混合され、カーナビでは図5の下の4つ環が連なった材料が、多く混合されるということになる。



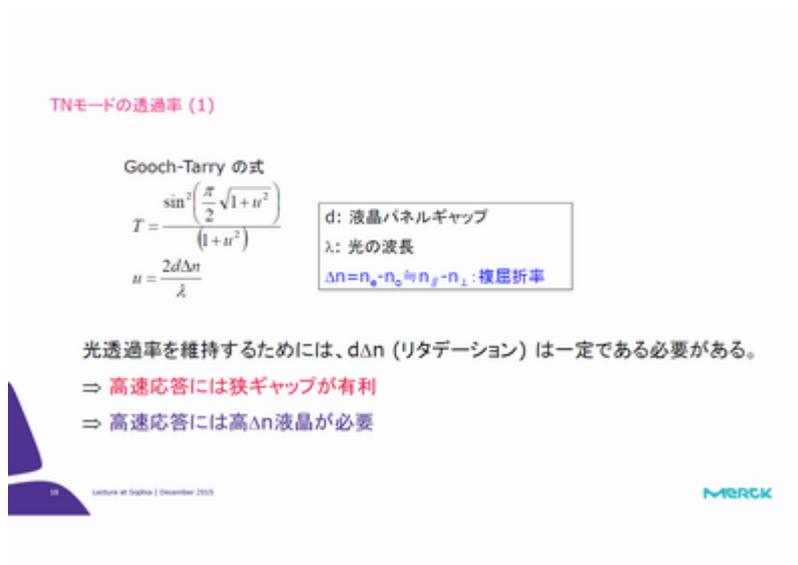
(図 5: 分子構造と相転移温度)

ここからは、液晶の応答時間と明るさの関係について説明しよう。ノートPCへのカラーディスプレイの採用は、1990年代から始まっている。95年頃にはモニターに使われるようになり、2000年頃からはテレビでも使われるようになった。テレビは動画表示をしなければならないので、高速応答が必要だ。同時に、10年程度の長期信頼性も必要とされる。液晶パネルの応答時間は、図6の式で示される。



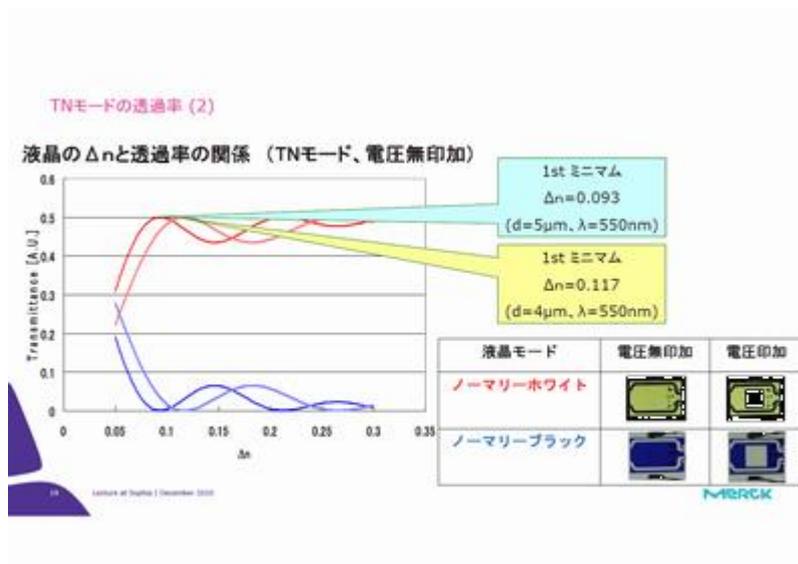
(図 6: 液晶パネルの応答時間)

高速化は液晶材料の回転粘性係数を低くし、弾性定数を高くすることで実現できる。パネルギャップ(液晶層の厚さ)は2乗で効いてくるため、薄くすればするほど高速化が可能となるが限界もある。式の中に複屈折率が出てくるが、その理由は TN モードを例にすると図の Gooch-Tarry の式で説明される(図7)。光透過率を維持するために、複屈折率と液晶ギャップの積が一定である必要がある。つまり、高速応答には狭ギャップが有利であり、高い複屈折率の液晶が必要となる。



(図 7: Gooch-Tarry の式)

図8は、液晶の透過率と複屈折率の関係を示したグラフだ。なるべく明るいディスプレイを作りたいと、メーカーは考える。5 μm の液晶層では、0.093の複屈折率が必要となる。より高速にするために4 μm の液晶層でパネルを作ると、透過率を維持するために、液晶材料の複屈折率を0.117にする必要がある。複屈折率は骨格のベンゼン環が多いほど大きくなり、末端基はシアノ基、フッ素基、塩素基の順で大きくなる(図9)。



(図 8: 液晶の透過率と複屈折率の関係)

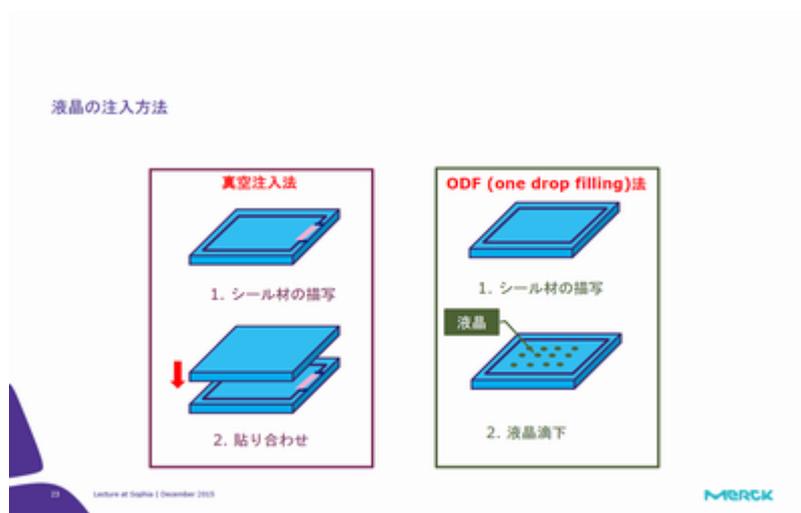


(図 9: 複屈折率の分子構造依存性)

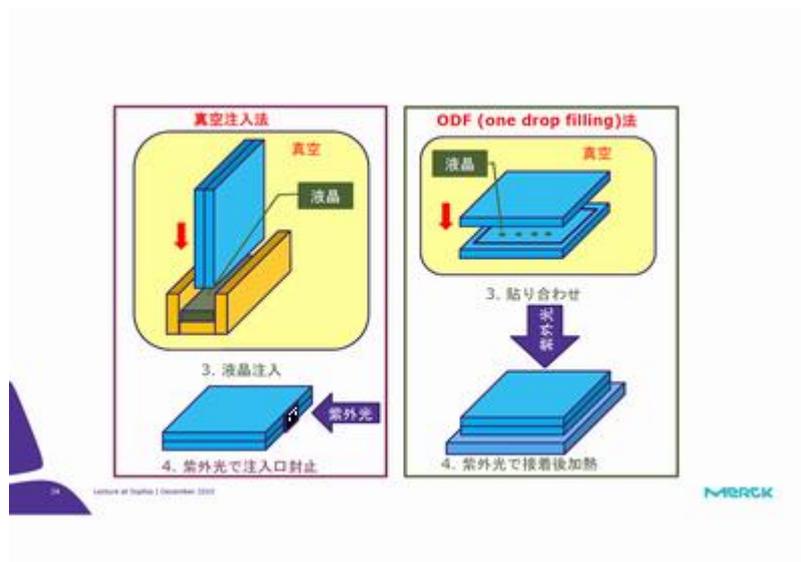
様々なメーカーの要望に沿って、液晶材料は設計開発される。液晶組成物(混合物)の設計に必要な知見は、液晶化合物の特性、液晶デバイスの特性、それに競合他社の特許、化学物質の法規制を遵守するための毒性物質に対する知見が必要だ。その上で液晶デバイスの製造工程を知っていることも重要だ。

液晶パネルへの液晶の注入方法は 2 種類の方法がある。真空注入法とODF(one drop filling)法の 2 種類だ。真空注入法は、2 枚のパネルを貼り合わせる際に、液晶が入るための口を残してシール材で密閉し、真空状態で注入口を液晶に浸漬して、毛細管現象でパネル内部全域に液晶材料を充填させる方法だ。液晶注入後に、紫外光で注入口を封止する。

2000 年頃から使われ始めたODF法では、一方のパネルにシール材を付与した後、真空状態で他方のパネルを貼り合わせる前に、いずれか一方のパネル上に、液晶材料を滴下する。その後、貼り合わせ紫外光でシール材を硬化させる。この方法によりテレビで使用されるような大型のパネルが製造できるようになった(図 10、11)。

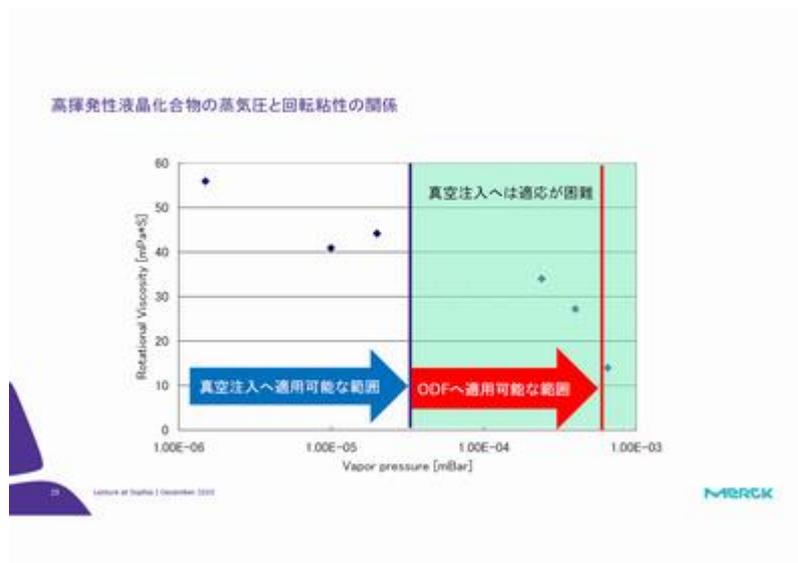


(図 10: 液晶デバイスの製造工程)



(図 11: 液晶デバイスの製造工程)

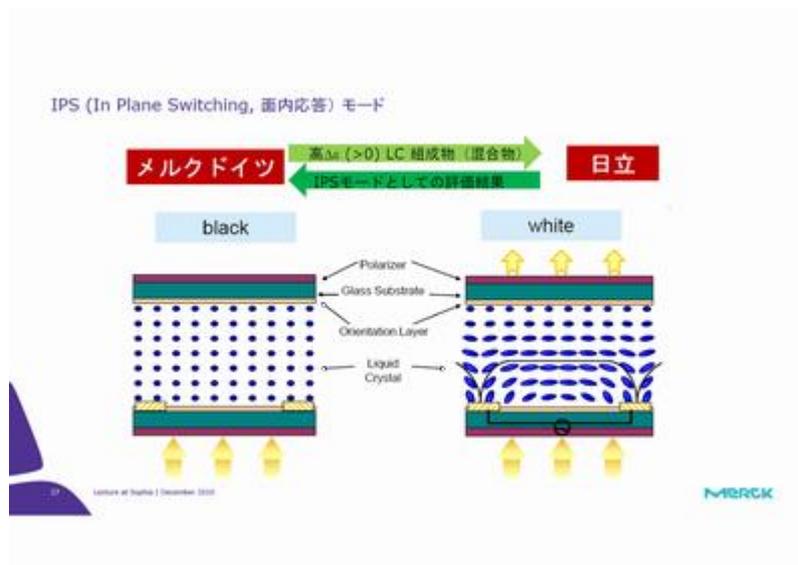
いずれの方法でも、液晶材料をパネルに注入する際に真空状態となるため、蒸気圧が低い化合物は揮発してしまう。揮発が少ない材料を使用すると粘性が大きくなる。蒸気圧と回転粘性の関係から適用できる材料の範囲が決まってくる(図 12)。材料が長時間真空にさらされる真空注入法では、粘性が大きな材料しか使えなかった。ODF法が開発されて粘性の小さな材料が使えるようになった。



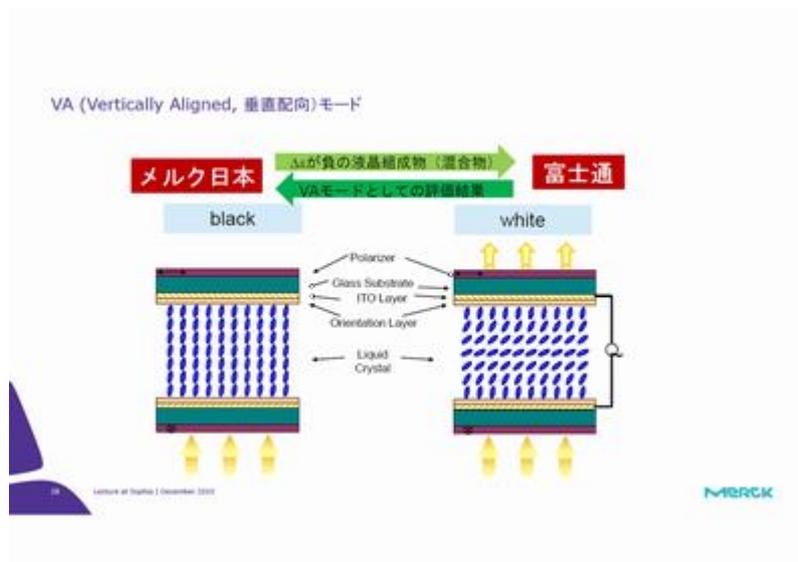
(図 12: 蒸気圧と回転粘性の関係)

●液晶ディスプレイ開発の歴史と液晶材料の寄与

1995年頃になると液晶パネルがノートPCに採用され、モニターにも使われるようになり、大型化が検討されるようになった。こうしたニーズに応じて、広い視野角をもち、どの位置で見ても色の変化がほとんどない新規液晶モードの提案がなされた。IPS (In Plane Switching: 面内応答) モードと(図 13)、VA (Vertical Aligned: 垂直配向) モード(図 14)という2つのモードだ。IPS モードは日立製作所、VA モードは富士通が開発を行った。どちらのモードも、メルクが液晶材料を提供した。日立の IPS モード用材料はメルクのドイツ本社が協力した。富士通の VA モード用材料は、私が中心となって日本のメルクが協力した。IPS モードでは、片側についた電極でスイッチングする。液晶が基板に対して垂直にならないので、高視野角となる。VA 方式では誘電率異方性が負の液晶材料を使用し、液晶分子の長軸が基板に対して垂直になるような配列を行っている。

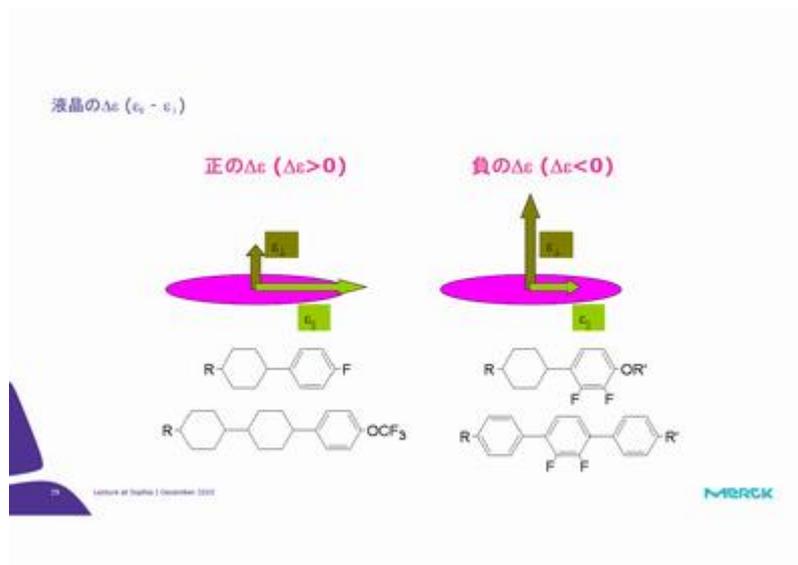


(図 13: IPS モード)



(図 14: VA モード)

長軸方向の誘電率と短軸方向の誘電率が違う場合を誘電率異方性があるという。長軸方向の誘電率が大きい場合を「誘電率異方性が正」といい、短軸方向の誘電率が大きい場合を「誘電率異方性が負」という(図 15)。この誘電率異方性の符号の違いは液晶分子の構造に依存している。誘電率異方性が正の材料では、長軸方向の末端に極性基と呼ばれるフッ素や OCF₃ がついている。一方、負の材料では短軸方向の水素をフッ素に置換することで、短軸方向の誘電率を大きくして誘電率異方性を負にしている。結果として二つの提案に対して、図 16 のような液晶材料が開発された。



(図 15: 液晶の誘電率異方性)

1995年頃
IPSまたはVA用液晶の開発

液晶モード	要求特性	液晶材料
IPS	高 $\Delta\epsilon$	<chem>R-C6H4-C6H2(F)2-C6H4-R'</chem>
	比較的低い Δn	<chem>R-C6H4-C6H4-OCF3</chem>
VA	負の $\Delta\epsilon$	<chem>R-C6H4-C6H2(F)2-OR'</chem>
	適切な Δn	<chem>R-C6H4-C6H2(F)2-C6H4-R'</chem>

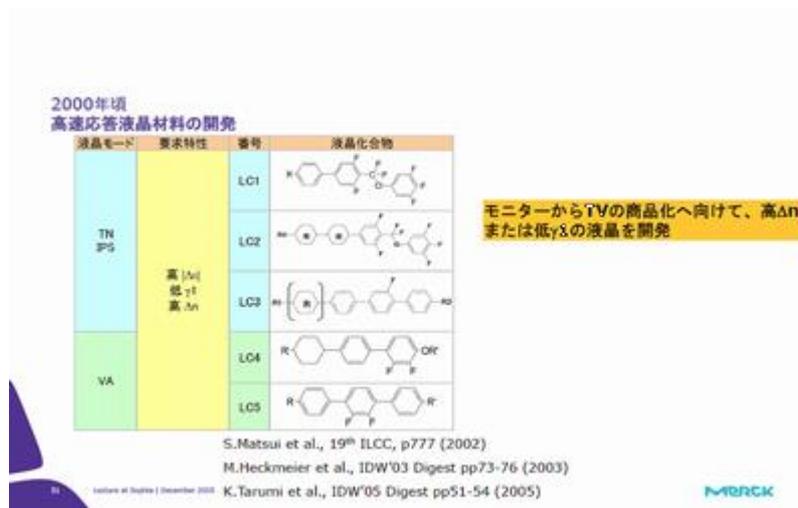
液晶ディスプレイがモニターとして認知される。⇒ 省スペース。モニターに向かって仕事を行う。

M. Bremer et al., AM-LCD 95 Digest pp105-108 (1995)

80 Lecture et Synthèse 2 Décembre 2008 MERCK

(図 16: IPS および VA 用液晶の開発)

2000年頃になると、液晶テレビの商品化に向けて、高速応答の材料の開発が求められた。骨格の中にOCF2という結合を持たせる、フッ素の置換を右端の環ではなくて真ん中の環で行うなどの改良を行いながら、テレビ用液晶の開発を行った(図 17)。



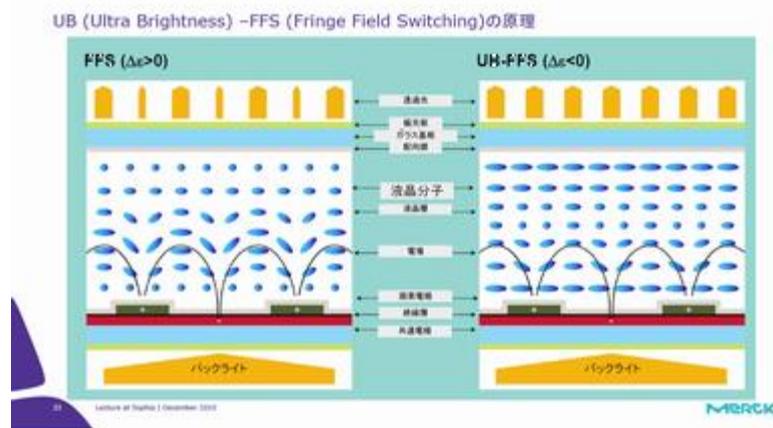
(図 17: 高速応答用液晶材料の開発)

スマートフォン向けの液晶材料の開発も、この頃からスタートしている。アップルの iPhone が、FFS (Fringe Field Switching) を使い始めたのが 2005 年だ。ある程度視野角が広くて、高速で動くということが、採用の理由だった。昨年発売された iPhone6 では、UB-FFS (Ultra Brightness-FFS) が採用され、液晶材料が 180 度変わった(図 18)。誘電率異方性が、正の材料から負の材料に変更された。それによって光透過率が上がり、バッテリーの持ちが良くなった。この理論は 2000 年頃から言われていたが、使える材料がなかった。昨年になってようやく製品化されたということだ。



(図 18: スマホ向け液晶材料の開発)

図 19 では、正の材料と負の材料の違いを示している。FFS では電場がどうしても歪むので、正の $\Delta\epsilon$ を持つ液晶分子は基板に対して立ち上がる。このため、光の透過率が上がらない。それに対して負の材料では電圧が歪んでも、あまり分子が立ち上がらないため、高透過率を維持できる。アップルに追従するように、他のメーカーもこの方式を採用し始めている。



(図 19: UB-FFS の原理)

液晶パネルの生産は日本のメーカーから始まったが、韓国が追随し、台湾がそれに続き、最近では中国が台頭してきている。私のような仕事をするメルクの人材が、各国に赴任してメーカーと仕事をしている。メルクの中ではドイツ本社が中心となって、各国開発者のネットワークを作っている(図 20)。情報交換を行って、少しでも良い液晶材料を作ろうということだ。英語でコミュニケーションを図るため、仕事には英語が必須だ。また各国に赴任する際には、現地の言葉もできた方が良い。日本から中国へ赴任したメンバーは、英語に加えて中国語も一生懸命勉強している。地域ごとに生活習慣や仕事の進め方も異なる。例えば、ドイツでは全く残業をしない。宗教など異文化への理解も必要となる。



(図 20: 研究開発のネットワーク)

●LC2021: 新たな可能性を切り開く、近未来の液晶応用

ここからは液晶のディスプレイ以外の新規応用の探索について話をしよう。メルクでは LC2021 というプロジェクトの中で、6年後の液晶応用について2つの分野で6つのテーマを掲げている(図 21)。2つの分野とは、将来のディスプレイに関わる分野と、光およびデータの制御に関わる分野だ。ディスプレイ分野では、未使用時には透明状態となる透過ディスプレイ、軽量で割れない形状フリーのディスプレイ、そして完全な三次元表示を実現するホログラフィーの3つがテーマとなっている。光およびデータの制御に関わる分野では、省エネのために光を制御する液晶ウインドウ、機械部品を使わずに光路を制御する光路制御デバイス、そしてちょっと意外かもしれないが液晶をアンテナとして利用し、高速データを受信しようというスマートアンテナの3テーマだ。



(図 21:LC2021)

最後に私のキャリアについて、少しだけ振り返ろう。NEC時代は研究員として仕事を始めた。この時代に私は、液晶材料が最終的なデバイスの特性を決定づけるということを認識できた。実際にその後メルクに移り、様々なモードに対応する材料を開発することができて、今までなかった商品を世に送り出すことに携われた。液晶組成物の可能性を、今も実感できている。メルクでは研究員からマネージャーへとキャリアを進めた。メルクはあくまでも素材メーカーである。共同開発を行う際に最終製品を開発する顧客企業が、何を考えているのかを理解することの重要性を学んだ。また、日々の研究開発の中で、パネルメーカーやフィルムメーカーなど他の会社の方々や大学の研究者と、情報交換ができる人的ネットワークを築けたことが、自分にとっては大きな財産だと感じている。

[広報委員: 戸井精一郎(1984 電々卒)記]