大学^{↑↑}発の 次世代ディスプレイ研究

大画面薄型テレビのパネル製造技術が成熟していく中で、今後のディスプレイ技術の発展には、長期的視点に立った先進的な大学研究が必要とされています。装置産業の典型であるディスプレイ分野の研究開発において、大学の研究環境とリソースは企業に比べて制約を受けざるをえませんが、卓越した発想・アイデアや機能性材料・デバイスの開拓により、新たなディスプレイのパラダイムを構築することも可能です。それには、今後の情報化社会において、「どんな電子ディスプレイが求められるのか」、「技術的にはどこまでできるのか」など、研究のニーズ・シーズを見極めながら考えていくことが重要です。

そこで本小特集では、ディスプレイ分野の基盤研究を先導する大学の取組みにフォーカスしました。最初に、これまでの開発事例として、大学研究が大きく貢献してきた液晶ディスプレイの発展経緯と将来の方向性について、ご解説いただきました。それに続いて、次世代のディスプレイ技術に繋がるさまざまな研究トピックをご紹介します。限られた紙面ではありますが、充実した内容の解説記事をご執筆いただきました著者の方々に深く感謝申し上げます。

なお本小特集の企画は、青木孝文編集理事、長石道博編集幹事と私が担当いたしました。

編集幹事 藤掛英夫

1. ディ스플레이技術と大学研究

(正会員)内田 龍男[†]

キーワード ● ディ스플레이, 液晶, カラー液晶ディスプレイ, 高品位液晶ディスプレイ

1. 液晶研究の序章

世は情報化社会に向かって確実に進んでおり, その情報も画像を中心としてエレクトロニクスが進化しようとしている。

約40年ほど前, 筆者が液晶の研究を始めた頃, 情報社会がこれほど発展していこうとは予想もしなかった。半導体の急成長の時期であり, 半導体に興味をもち, その研究をしたいと思って卒業研究の研究室を選んだ。当時の日本のエレクトロニクスの草分けである和田正信教授の研究室である。しかし, 和田教授は半導体の将来について, コンシューマエレクトロニクスの立場から複雑な演算を処理する小型のシステムの実現を予測し, それに伴って小型の表示器が必要になるであろうと予想しておられた。このような表示器では半導体と相性の良い低電圧, 低電流, 薄型, 軽量の特性が必要であり, そのためにエレクトロルミネッセンスやフォトリソミック材料など新しい表示用材料を模索していた。そのころHeilmeyer¹⁾によって液晶ディスプレイ(LCD)の可能性が示され, 和田教授はこれが正に求めている材料であることを感じて直ちに研究をスタートさせた。その翌年から筆者は大学院1年生としてこの研究に携わるようになった。

半導体の研究室で, 液晶の研究を行うのは文献やノウハウ, 材料, 装置のどれをとっても難儀なことであった。何より当時は液晶材料が入手できなかったため, 有機化学合成の勉強から始めなければならなかった。せっかく合成するのなら, 最新の室温液晶(MBBA)を合成しようと考えたが, この合成には高温高压を要するかなり厄介なFriedel-Crafts反応を行わなければならなかった。実験器具集めから始めて, 半年ほどかけてようやく合成を終えたが, この間, 化学と電子工学の概念や定義の違いを知り, 驚くとともに工学はまだ発展途上の学問であることを強く認識した。その代表的な一つが液晶の純度の問題である。当時

の有機物の純度は, 電子材料で要求される純度と比べて3~4桁も低い状態で, 有機化学の教授の意見をうかがっても筆者が求める高純度化は基本的に無理であるとのことであった。そこで, 自分でやるしかないと考えて, 可能な精製方法を次々と試み, 最終的にいくつかの方法を組合せることで目的の高純度化を達成することができた。

ようやく液晶の合成と精製が終わった時, すでに1年が経過していた。次に何をすべきかを模索しているうちに, 当時の表示モードの主流であった動的散乱モード(DSMモード)では液晶の表面配向の問題がほとんど議論されていないことに気付いた。そして, 均一に配向を制御しないと電気光学的特性の再現性が得られないこと, 均一配向であっても液晶を基板表面に平行に配向させたセルと垂直に配向させたセルでは電気光学特性に大幅な違いが現れること, 後者の方がコントラストなどの点でディスプレイに適していることなどを明らかにした²⁾³⁾。

この研究結果から, 将来の高品位LCDでは液晶分子の表面配向制御が極めて重要になることを予測し, ガラス基板に対する液晶の配向機構⁴⁾⁵⁾や配向状態の測定^{6)~9)}, 配向制御¹⁰⁾¹¹⁾などを主要な研究テーマとしたが, この研究は現在も続いている。これらの研究の詳細は他誌¹²⁾に記したのでここでは割愛する。一方, この配向制御を応用して, 新しい液晶表示モードの検討や表示特性の改善がもう一つの重要なテーマになった。本論文ではこの液晶表示モードを中心に, 大学として進めてきた研究と今後について述べる。

2. 高性能LCDの研究

前述のように, 初期の頃はもっぱら液晶材料の高純度化や液晶の分子配向の研究を行ったが, この時期, 液晶が何者かがまだよくわからない状態であった。また, DSMモードに続く捩れネマティックモード(TNモード)などの表示方式では, 分子の配向制御が不可欠となってきた。このため, 大学の基礎研究が会社からも重要視され, 学会やワークショップで産学の研究者の情報交換が活発に行われた。また, 学会では, 化学, 物理, 電子工学の研究者の交流や意見交換が密接に行われた。学会活動, 異分野融合, 産学連携と, 今日求められていることが盛んにしかも自発的に

[†] 東北大学 大学院 工学研究科 電子工学専攻

"Display Technology and Academic Research on Displays" by Tatsuo Uchida (Department of Electronic Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University, Miyagi)

行われた点で、液晶は新しい科学技術の発展の代表的な姿を示していたといえることができる。

液晶の研究開発の進展とともに、1980年前後から数字表示のLCDが電卓に広く用いられるようになった。次いで、1行～数行の文字表示へと進化し、やがて走査線が数百本のパソコン用モノクロディスプレイが試作されるようになった。この頃になると、企業では沢山の人達が研究開発に携わるようになり、大学とは桁違いの大きな研究費が注ぎ込まれるようになっていった。これに対して、大学の、特に電子工学の人間が、少ない予算と少ない人員で同じ分野の研究を進めていくことに意味があるのか否か疑問を感じ始めた。

純粋な基礎研究に徹する道もあったが、工学部で研究するのなら、応用面でも社会をリードするような研究を行いたいという思いがあり、研究をどのように進めるべきか悶々と考える日々が続いた。そして最後に、どんなに困難でも、5～10年先に不可欠となるような目標を設定して、挑戦し続けることを決心した。

この時期に決めた目標が、液晶ディスプレイのカラー化であった。白黒の液晶ディスプレイのコントラストや解像度が向上していく状況から、さらに本格的なディスプレイに成長させるためには、フルカラー化が絶対に必要であろうと考えたためである。

2.1 カラー化

(1) ゲストホスト方式

カラー化の最初の段階で液晶に二色性色素を添加するゲストホスト方式の研究を始めた。そして高いカラーコントラストを得るための分子配向の制御¹³⁾、良好な二色性色素の設計と合成^{14)～16)}、偏光子不要の明るい二層型ゲストホスト方式^{13) 17)}の考案と試作などを行った。これによって一時自動車用ディスプレイやコピー機等に実用化された。しかし、基本的には単色表示であったこと、マルチプレックス特性が充分でなかったこと、明るさとコントラストを両立させることができなかったことなどの理由でその後の普及に至っていない。ただし、明るさ最優先の用途にはまだ可能性が残されていると考えている。

(2) マイクロカラーフィルタ方式

続いてフルカラー化の実現を目指して研究を開始した。当初、いろいろな方式を検討したが、早い時期にフルカラー化には3原色を用いる混色方式が有効であろうと考えた。そして、混色方式には減法混色方式と加法混色方式があるが、液晶が非発光体であることから減法混色方式しかないであろうと考えて、シアン、マゼンタ、イエローのゲストホストセルを3枚積層する方式を追求することにした¹⁷⁾。しかし、斜めから見たときの3層の画素ずれの問題から高解像度化は無理であることがわかった。そこで再び振り出しに戻って検討し直し、最終的にマイクロカラーフィルタを液晶セル内に設ける加法混色方式(図1)に到達した^{18) 19)}。

この方式は、物理的なスペクトルの合成が起こるのではないので着想までに時間がかかってしまったが、3色のカラー画素サイズを目の解像度以下にすることによって実効的な混色が行われ、非発光体でも加法混色の原理が成り立つことになる。ただし、この方式はカラーフィルタや偏光子の吸収により、平均透過率は5～10%とかなり低くなるためにバックライトを設けなければならない。このために、当初、LCDの低電力の特長が失われると強い批判を頂いた。しかし筆者らはこの方式しかないという結論を得ていたため、このことを説明してご理解を頂いた。その後、この方式がカラー化の主流となって急速に普及し、現在ノートパソコンや液晶テレビに広く用いられている。

なお、このような経験から、ご指摘頂いた上述の問題をいつの日か克服しようと決意し、その後以下のようなフィールドシーケンシャル方式や反射型LCDの実現に結びつくことになった。

(3) フィールドシーケンシャルカラーLCD

前項で述べたように、カラーフィルタ方式では透過率が著しく低くなるために、いつかこのカラーフィルタを取り除きたいと考えていた。その方法の一つが、図2に示すようなフィールドシーケンシャルカラー液晶ディスプレイ(FS-LCD)である。これには従来の液晶ディスプレイの数十倍の速い応答速度が必要であるが、幸い広視野角用に設計・開発した後述のOCB方式がこの特性を満足した。これによって、従来のカラーフィルタ方式と比べて、3倍の高解像度化と約4倍の明るさが達成できる²⁰⁾。現在、この方式特有のカラーブレイクアップの問題が指摘されているが、その解決の目処も立ってきており、本格的な実用化を目指している。

2.2 超低電力反射型フルカラーLCD

低電力化の極限は、バックライトを取り除いた反射型カラーLCDである。ペーパーホワイトを実現するために、光の利用効率を極限まで高めることを目指して、理論と実験の両面から研究を進めた^{21)～23)}。特に、拡散反射光をある角度範囲内に収束させることによって、明るさを大幅に改善できることを実証した。具体的には、表面にミクロな形状を形成した拡散反射板方式²⁴⁾や、拡散特性を精密に制御した前方散乱フィルム方式を考案するとともに、位相差フィルムによる3次元の光学補償を行った^{25) 26)}。これによって、50以上のコントラストと1～10msの高速応答性を有する明るい反射型LCDを実現した。これらは、PDA、携帯ゲーム機、携帯電話などに実用されている。

2.3 広視野角・高速化

広視野角を実現するために、ベンド配向セル(π セル)に2軸性位相差フィルムを付けて3次元の光学補償を行うとともに、中間調表示を可能とするバイアス駆動法を考案した²⁷⁾。また、この液晶セルは液晶のフロー効果によって通常の液晶セルより10～30倍ほど速い応答速度を有することがわか

図1 マイクロカラーフィルタ方式によるカラー液晶ディスプレイ

図2 フィールドシーケンシャル方式

った²⁸⁾。これをOptically Compensated Bend (OCB) 方式と名付けた。動画特性の優れた液晶テレビや低温動作に強いLCDとして実用が進められている。また、前述のFS-LCDを目指して開発を進めている。

2.4 大型高品位プロジェクションディスプレイ

近年、ディスプレイがますます大型化しているが、対角サイズLに対して、部品材料コストは面積に比例するので L^2 となり、製造装置のコストは、体積に比例すると考えると L^3 になる。したがって、画面サイズが大きくなるとコストは急激に上昇していくことになる。この問題を解決するには、小さいディスプレイの画像を光学的に拡大するプロジェクションディスプレイが望ましいと考えている。ただし、この方式では、解像度の低下、上下視野角の不足、外光によるコントラストの低下などの問題が指摘されて、特にリアプロジェクションディスプレイは、この1、2年で市場が急激に縮小してしまった。しかし、前述の問題を解決すれば、依然として大型ディスプレイでの優位性は保たれていると考えられる。なお、前述の問題点は主としてスクリーンに起因するものであると考えて、筆者らは、図3の

図3 拡散光制御技術(DLC技術)によるスクリーンの設計

図4 フロント・プロジェクションディスプレイ

ような拡散光制御(DLC)に関する研究を行っている。これは、2.2節の反射型LCDの拡散反射板に端を発するのであるが、拡散角やその方向、均一性などを制御しようとするものである。まだ一部研究途上であるが、図4のように明るい環境でもコントラストが低下しないフロントプロジェクションディスプレイ²⁹⁾、デジタル電子白板、大型3Dディスプレイなどへの応用を検討している。

3. ディスプレイ研究の将来

これまで、筆者らの研究を例として大学におけるディスプレイ研究の経緯を紹介してきたが、他の大学の研究も同様な経緯をたどってこられたものと考えている。大学等で新しい芽を生み出し、海のものとも山のものともつかないものを、企業の方々が育て上げ、実用化まで発展させたものも少なくない。筆者が経験する限り、多くの新しい製品は芽が出てから実用化まで10年ほどかかっており、企業の方々の努力は大変なものである。

ただ最近は、ディスプレイ技術の進化としては急激な立ち上がりを過ぎて、なだらかな領域にさしかかってきている。

表1 情報通信の変遷

装 置	年 代	情 報
電 話	1880年頃～	音 声
(テレビ)	1920年代～ 本格的普及:1960年代～	(動画:一方向)
FAX	1890年頃～ 本格的普及:1980年代～	文 章 静止画
インターネット	1970年代～ 本格的普及:1990年代～	文 章 アイコン(絵文字) 静止画
ヴィジュアル・ コミュニケーション (動画像通信)	X年～	動 画

このために性能よりも価格が優先されるような傾向が強くなってきている。この理由の一つは、主な市場がテレビに絞られているためである。さらに用途を広げて、例えば医学や高臨場感を必要とする分野に行けば、もっと高度なディスプレイが要求され、ディスプレイの付加価値が高まるはずである。これによって筆者の主張している高級品から普及品まで、大きい価格差と幅広い品揃えが可能となる。そして、普及品では量産によって利潤をあげ、高級品では量は得られないが、高付加価値で利潤を得ることになる。これによって、高級品には、新しい高度技術を注入し続けることができる。また、これらの高度技術が、ある程度普及してコストダウンが可能になった段階で、順次中級品、普及品に移行させ、さらに最終段階では、開発途上国に技術移転させていくことが可能となる。

ところで、冒頭で述べたように、通信とエレクトロニクスでは、確実に画像が中心的役割を演じていくものと予想される。この点は、現状のメモリー、通信容量、半導体の性能の進歩を見ると、画像を除いては考えられないと言われていることから裏付けられる。

通信の観点からこれまでの歴史を見ると、表1のように、まず1880年代に電話が普及し、音声通信が可能となった。次いで1980年代にFAXが普及して文章や静止画の通信が可能となり、1990年代のインターネットの普及により文章、アイコン、静止画、限られた動画像などの伝送が可能となった。そしていずれの日にか、ワープロで文章を自由に作成・編集するのと同様な感覚で、動画像を作成・編集して通信に用いることができるようになるのではないかと予想される。なお、かなり早い時期の1960年代にテレビ技術が普及し始めているが、これは通信としては一方通行である。動画送信という極めて高度な技術が発達したが、これは一方通行という点でシステムが比較的容易であったために可能となったものである。このために関連技術の突出した進歩が見られており、ディスプレイはその代表といっても良い。

いずれにしても、画像がエレクトロニクスの中心を占め、さらにそれが先端産業の主役を担っていくものと考えられ

る。このためには日本がこのキーデバイスを失ってはならない。むしろ、世界に突出したディスプレイ技術とその関連材料を保有する特長を生かして、その進化を滞らせることなく、産官学が連携して発展させ続ける必要がある。関係各位のご努力とご尽力を大いに期待するところである。

(2009年8月25日受付)

〔文 献〕

- 1) G.H. Heilmeyer, L.A. Zanon and L.A. Borton: Proc. IEEE, **56**, p.1162 (1968)
- 2) 内田, 和田, 信学論誌, **56-C**, p.28 (1973)
- 3) Y. Ishii, T. Uchida and M. Wada: IEEE Trans. Elec. Devices, ED-25, p.323 (1978)
- 4) K. Ishikawa, T. Uchida and M. Wada: Mol. Cryst. Liq. Cryst., **60**, p.37 (1980)
- 5) T. Uchida, M. Ohgawara and Y. Shibata: Mol. Cryst. Liq. Cryst., **98**, p.149 (1983)
- 6) T. Uchida, M. Hirano, H. Sakai: Liquid Crystals, **5**, 1127 (1989)
- 7) Y. Sato, K. Sato, T. Uchida: Japan. J. Appl. Phys., **31**, L579 (1992)
- 8) T. Oshima, T. Miyashita and T. Uchida: Digest of AM-LCD '99, LC-3 (1999)
- 9) L. Xuan, T. Tohyama, T. Miyashita and T. Uchida: J. Appl. Phys., **96**, p.1953 (2004)
- 10) E.S. Lee, P. Vetter, T. Miyashita, T. Uchida, M. Kano, M. Abe and K. Sugawara: Japan. J. Appl. Phys., **32**, L1436 (1993)
- 11) E.S. Lee, P. Vetter, T. Miyashita and T. Uchida: Japan. J. Appl. Phys., **32**, L1339 (1993)
- 12) 内田: 液晶, **5**, p.2001 (2001)
- 13) T. Uchida and M. Wada: Mol. Cryst. Liq. Cryst., **63**, p.19 (1981)
- 14) T. Uchida, C. Shishido, H. Seki and M. Wada: Mol. Cryst. Liq. Cryst., **39** (1977) 39.
- 15) H. Seki, T. Uchida and Y. Shibata: Mol. Cryst. Liq. Cryst., **138**, p.349 (1986)
- 16) W.S. Park and T. Uchida: Liq. Cryst., **5**, p.1405 (1989)
- 17) T. Uchida, H. Seki, C. Shishido and M. Wada: Proc. SID, **22**, p.41 (1981)
- 18) T. Uchida: Proc. European Display Res. Conf., p.39 (1981)
- 19) T. Uchida, S. Yamamoto and Y. Shibata: IEEE Trans. ED-30, p.503 (1983)
- 20) T. Uchida, K. Saitoh, T. Miyashita and M. Suzuki: Conf. Record of the International Display Research Conf., p.37 (1997)
- 21) T. Uchida, T. Katagishi, M. Onodera and Y. Shibata: Trans. IEEE, ED-33, p.1207 (1986)
- 22) K. Tadokoro, T. Koizumi and T. Uchida: Proc. SID, **29**, p.151 (1988)
- 23) T. Koizumi and T. Uchida: Proc. SID, **29**, p.157 (1988)
- 24) N. Sugiura and T. Uchida: Digest of AM-LCD, p.92 (1994)
- 25) T. Ishinabe, T. Miyashita and T. Uchida: SID Symp. Digest, p.774 (1998)
- 26) T. Uchida and T. Ishinabe: MRS Bulletin p.876 (Edited by Y.Kuo and K. Suzuki, USA), (2002)
- 27) T. Miyashita and T. Uchida: IEICE Trans. Electronics, E79E-C, p.1076 (1996)
- 28) S. Onda, T. Miyashita and T. Uchida: Molecular Crystals and Liquid Crystals, **331**, p.383 (1999)
- 29) B. Katagiri, T. Miyashita, T. Ishinabe and T. Uchida: J. SID, **11**, p.585 (2003) ほか

うちだ たつお
内田 龍男 1975年、東北大学大学院工学研究科博士課程修了。同年、東北大学工学部電子工学科助手。液晶の物性およびディスプレイ等の研究に従事。1989年、同大学教授。2006年、同大学工学研究科長・工学部長。当学会業績賞、SID Jan Rajchman Prize, Slottow-Owaki Prize等受賞。工学博士。当学会フェロー認定会員。