

解説

液晶ディスプレイ技術の産業的発展と背景

谷 千 束

NEC 研究開発グループ 〒216 川崎市宮前区宮崎 4-1-1

(1995 年 4 月 3 日受理)

Progress and Background in Technologies and Industries of
Liquid Crystal Displays

Chizuka TANI

Research and Development Group, NEC, 4-1-1, Miyazaki, Miyamae-ku, Kawasaki 216

1. まえがき—LCD は今や情報化産業の
スーパースター

約四半世紀前、米国で生まれ当初エキゾチックとも呼ばれた液晶ディスプレイ (LCD) は、今や日本産業の世界的スーパースターに成長した。その生産高は昨年度約 5500 億円で 35%/年以上の驚異の伸び率を示し、諸外国を後目に世界の 90%以上を占有する。さらに、21 世紀初めには情報ハードウェア産業の花形として数兆円の市場が予測され、日本のメーカーは近年合計 1000 億円/年規模以上の投資を行っている。

何故 LCD がここまで発展し今後もいっそう期待されるのか、何故ディスプレイ応用以前の基礎的研究では遅れていた日本が LCD 王国になりえたのか？ 本稿ではこの問に対し、筆者なりの視点および関連分析データを基にして、LCD の発展推移を振り返りながら考察した内容について述べる。したがって、LCD の詳しい原理や技術については他書に譲って¹⁾、ここでは詳しく触れないことをご了承いただきたい。

2. LCD の誕生物語と技術革新の大河ドラマ

約 100 年前にオーストリアの植物学者によって発見された物質の新しい状態“液晶”は、その後主にヨーロッパを舞台に基礎的物性研究が行われたが、1960 年頃から工業的応用調査研究が米国のウエスティングハウス、RCA といった企業で開始された。

2.1 最初の動作モード DSM の誕生と RCA の悲劇
フラットディスプレイ技術としては先輩格の EL の研

究も行っていた RCA では、ネマチック型液晶の電界による分子配向効果を調べていく中で、1964 年に表示への応用可能性をもった 2 種類の電気光学効果を見出したのである。その研究者はハイルマイアー、見出された電気光学効果は DSM (動的光散乱モード) と GH (ゲストホスト) 効果と名づけられた。このあたりの事情はハイルマイアーが後に出した回顧論文に詳しい²⁾。

図 1 の写真は、この論文に掲載された当時の彼と DSM 型の試作品 (固定表示) である。この頃日本の電子技術者はほとんど液晶のことすら知らなかったのである。RCA は 1968 年に記者会見を行って DSM 型 LCD の開発について発表し、世界に“液晶ショック”とでもいえる衝撃を与えたのである。当時の液晶化合物の液晶相温度域は室温よりはるかに高く、室温で動作する液晶材料の開発が最大の急務であったが、早くも約 1 年後には独ヘキスト社が有名な最初の室温液晶化合物 MBBA の合成に成功している。しかし、RCA 自身は、その後 LCD の事業化に対しては消極的となり、そのためハイルマイアーをはじめ液晶研究者達は RCA を離れて行くことになった。おそらく、RCA は当時の LCD が CRT (cathode ray tube) 代替にはあまりにも性能不足だったことだけで判断し、LCD の事業化を図らなかったものと思われる。

RCA 社自体も、その後 15 年ほどして姿を消すことになるのだが、何かしら栄枯盛衰因縁を感じさせる。

2.2 TN モードの発明と液晶化合物の一大革新

DSM 型の動作原理は、液晶中を流れる電流によって引き起こされる乱流に基づく光散乱タイプで、そのため

動作寿命, 消費電力などの点で必ずしも十分ではなかった。

そこへ, 1971年に欧米から画期的な新動作モード

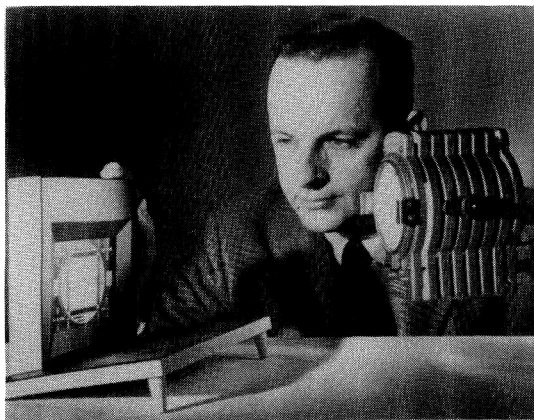


図1 ハイルマイヤーと初期の DSM-LCD 試作品

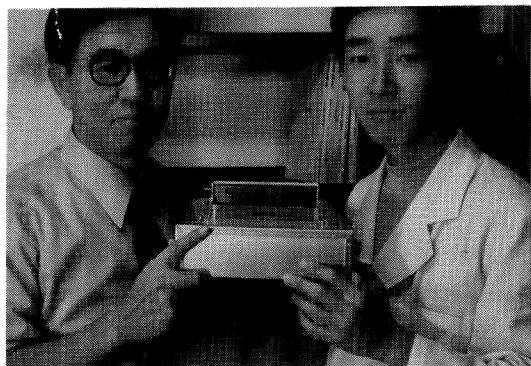


図2 小林氏と初期の TN-LCD 試作品

TN (twisted nematic) 型が発表された³⁾。その中のロシュ社のヘルフリッヒは前述した理由でRCAをスピアウトした一人である。TN型は, 原理的に電流を必要とせず, 電界による液晶の分子配向変化(90°ねじれ配列→電界平行配列)に基づく旋光効果を利用する。パネルの前後に直線偏光板を必要とするが, DSM型より低い1~3Vの駆動電圧, 桁違いに小さな消費電力といった特長は, やはり当時立ち上がり始めた低消費電力のCMOS-LSIとの相性が非常に良く, TN型の発表は世界中の注目を集めた。

また, 液晶材料面でも, 1973年に英国のグレイらによって従来の常識を覆す大きな革新が起こった。それまでの液晶化合物は, MBBAのように2つのベンゼン環の間にシッフ塩基のような中央基を有する構造が主流であったが(中央基をもつことが液晶になる条件のひとつとも考えられていた), 彼らは中央基をもたないビフェニール系化合物が非常に安定なTN用の液晶になることを示したのである。これを機会にTN型はDSM型をたちまち駆逐し, LCDの主役に躍り出たのである。日本でも, この頃から当時理研の小林(現東京農工大)らの先行的研究もトリガーとなって⁴⁾(図2参照), TN型の開発が活発になってくる。

2.3 液晶技術革新の大河の流れ

現在の製品化されているLCDは, TN型液晶を一体に組み込んだTFT(薄膜トランジスター)マトリクスアレイで駆動するアクティブマトリクス(AM)方式と, ねじれ配列角をTNより大きくして複屈折効果を利用するSTN(super twisted nematic)方式の2種類に大別される(AMを用いないドットマトリクス表示

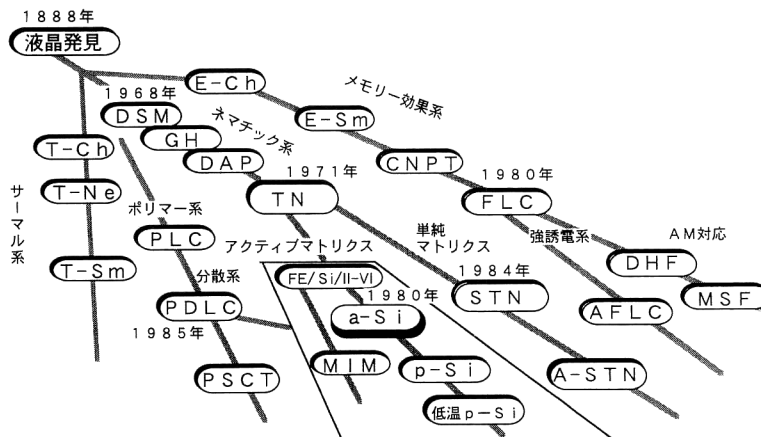


図3 液晶ディスプレイ技術革新の大河

方式は一般に単純マトリクスと呼ばれる)。しかし、DSM が提唱されてからここに至るまでには、実に多くの新しい動作方式、原理への革新提案が世界中でなされてきたし、現在も上記二大方式を越えるための挑戦が行われている。図3はこのような液晶の技術革新の大河の流れを示す。幹流はネマチック液晶系で、DSM、TN、STN、AM/TN と川辺の大地に工業の花を咲かせ続けている。支流には、コレステリック液晶やスメクチック液晶のメモリー効果系、高分子液晶や高分子分散液晶のポリマー系、電界の他に熱励起効果も併用するサーマル系などの流れがある。なお、現在においても毎年のように注目すべき新しい芽が提案されており、液晶の大河はさらに雄大に流れていくようである。

3. 工業的発展

LCD の工業化はほとんど日本を舞台に発展してきた。

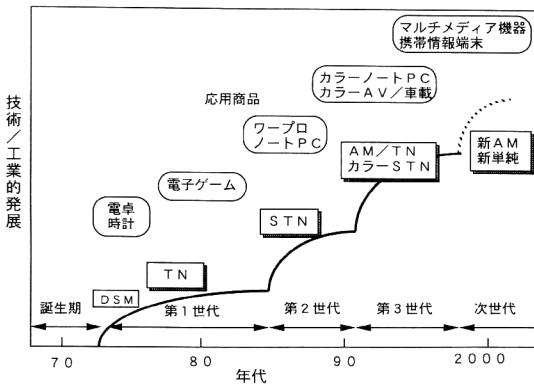


図4 LCDの世代発展と応用市場

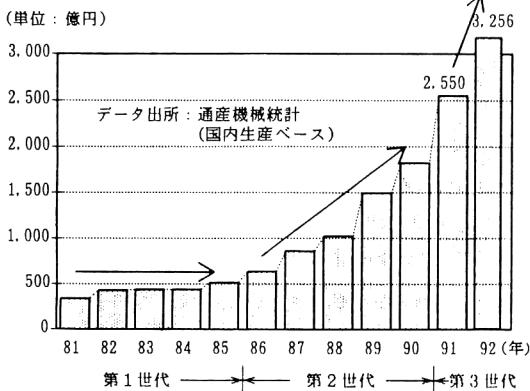


図5 LCDの生産量推移 (日本電子機械工業会 1993年調査研究報告書より)

その推移の概略を図4に示す。

これまでの工業的発展は時代的に大別して、TNを中心とする第1世代、モノクロSTNの単純マトリクス方式を中心とする第2世代、そして現在のAM/TN (一般に TFT-LCDともいう) およびカラーSTNが主役となっている第3世代に分けられる。世代の進展に伴って生産量は図5のように大きく増大してきている。これは図4に示すように世代ごとにLCDならではの新情報関連市場が拡大してきたためである。いいかえるならば、LCDの技術革新が情報化社会の進展の中のパーソナルな情報産業を創造してきたといえる。一方、第1世代は図6からもわかるように、半導体分野のMOS-LSIの誕生、成長期にもほぼ一致しており、LSIにとってLCD製品は格好の応用市場であった。LCDのドラマチックな目覚ましい工業的発展は、このようなニーズとシーズのタイムリーにして幸運な二重の出会いに連続的に恵まれた背景に因る。

3.1 第1世代-TNと電卓・デジタル腕時計

米国からの液晶ショック飛来に対し、日本企業、特に時計メーカー、電卓メーカーの反応は素早かった。1973年にはDSM、TN型LCDを用いた電卓、デジタル腕時計が量産され、製品が市場に登場する。図7は初めて量産化されたDSM液晶電卓で、低消費電力の

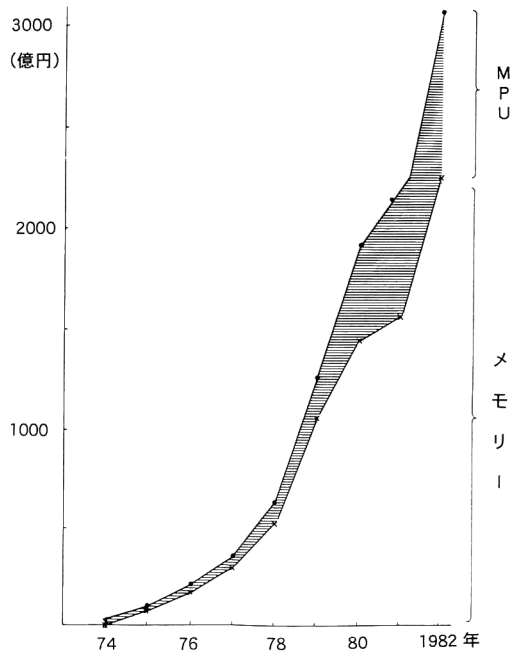


図6 LSIの生産立上り推移 (1983年電子工業年鑑より)

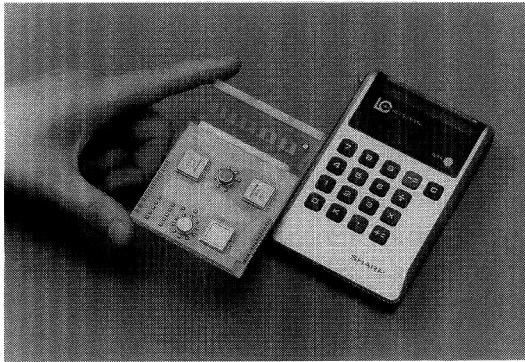


図7 DSM型を用いた初の量産液晶電卓（シャープ提供）

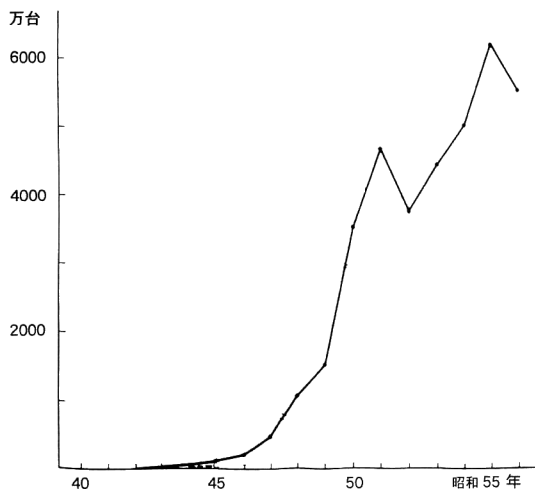


図8 電卓生産推移 (1983年電子工業年鑑より)

CMOS-LSIを3個搭載している。この電卓はすぐ続いてやってきたTN型に押されて2年程度で生産中止となる。その後、多くの企業が参入しTNの全盛時代を迎えるが、図8はその最大の市場背景である電卓の生産推移を示す。電卓はそれまで日本で発明された蛍光表示管を主に使用し、わが国得意の成長分野であったが、当時の低消費電力化、薄型化ニーズにLCDは申し分なく適合して、さらに電卓市場を伸展させたことがわかる。電卓市場は1980年過ぎ頃から飽和傾向となるが、ちょうどこの頃からTN-LCDを利用した電子ゲームが爆発的に登場し、引続きLCDの市場を牽引拡大したのである。

他方、米国でも70年代初めに大手電機メーカーなどが挙ってLCDの研究開発に参入したが、腕時計や電卓などスモール電子機器には関心が薄く、TV表示への可

能性追及などに重点が置かれていた。当時の米国はまだ大きいことこそ良いことだ指向文化の最中だったし、一般市民も受光型のLCDより黒地に赤く光る自発光型のLED (light emitting display) の方を好むと当時いわれていた。このような当時の米国の風土・文化が、LCDの最初の重要な工業化ステップを踏み損ねた背景になっていると考えられる。

3.2 第2世代—STNとパーソナルワープロ

上記のように、TN-LCDは新市場を開拓してディスプレイとしての確固たる地位を確立するが、表示機能としては数字のような簡単なセグメント表示（パターン分割表示）にほぼ限定され、自由な表示が可能な本格的なドットマトリクス表示にまでは至らなかった。その理由は、TN型液晶の電位差変化に対する電気光学特性の変化の仕方が緩慢なことに起因し、マトリクス走査本数がせいぜい50本程度止まりだったことにある。この限界を打破したのが、1984年にスイスのBBC社から発表されたSTN方式である⁵⁾。走査本数120本表示のデモをみた当時の日本人から、“まるで発光型のEL (electroluminescent) ディスプレイと見間違ふほど”とレポートされるほど従来のTN型に比べ高コントラストのドットマトリクス文字表示が実現されたのである。日本はまたもすかさずSTNに飛びつき、翌年にはSTN型の実用化に成功する。STN-LCDは、図9に示す当時日本で立ち上がり始めたパーソナルワープロニーズにフィットしたため、生産量を再び急速に伸ばしLCD第2世代を築くのである。一方欧米では、タイプライターが普及していたためにワードプロセッサ単体

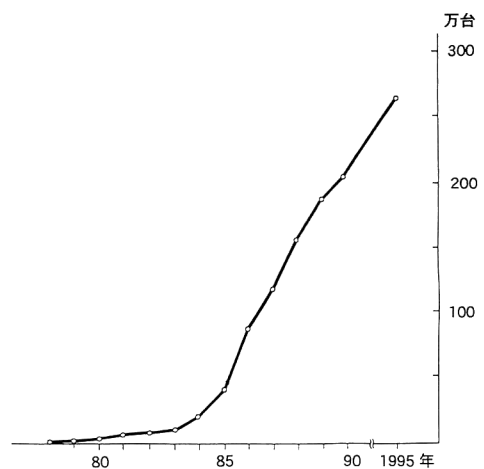


図9 ワープロの生産推移, 85年以降は予測 (1986年電子工業年鑑より)



図10 モノクロ STN 型を用いた初期の液晶ワープロ (NEC)

機器市場ニーズは弱く、いいかえれば積極的な STN-LCD ニーズがなく、結局またも LCD 産業の興隆には繋がりなかった。

図10は第2世代初期のモノクロ STN を用いたワープロの一例である。初期の STN-LCD は、着色画面、コントラスト、応答速度などにおいて必ずしもみやすくはなく、液晶材料、パネル設計、製造技術改良などによる性能改善および2層構造あるいは光学補償板方式などによる白黒表示実現が図られた。このような改善が進み、STN-LCD はパソコン(PC)レベル(640×400~480ドット)の表示も可能になり、パソコン普及の流れの中で当時ニーズが高まってきた携帯、ノート PC の実現に寄与することになる。

3.3 第3世代(現在)ーカラー表示とノート PC

コンピューター情報社会のパーソナル化が急伸展するとともに、パソコン情報のカラー化も急速に進んだ(図11)。

このニーズは当然ノート PC にも及び、カラー表示を可能とする第3世代の新たな LCD が望まれた。この要求に応えたのが AM-LCD である。カラー AM-LCD は、液晶画素ごとに TFT のようなスイッチング素子を配した AM 基板と R, G, B カラーフィルター基板で TN 液晶を挟んだものである。前述した液晶のしきい値特性の不十分さをスイッチング素子が補うことにより、大容量のドットマトリクス表示を可能にする。AM-LCD 概念の提案は古く、TN 液晶と同じ1971年に、RCA のレクナーらによって AM 駆動方式の基本的な考え方が提案されている⁶⁾。その後、図12に示すように、AM 素子として強誘電体や II-VI 族 TFT などを用いる方式も一部で研究されたが、実用化を目指す本格的な集中開発が行われ始めたのは、1980 年のアモルファスシリコン

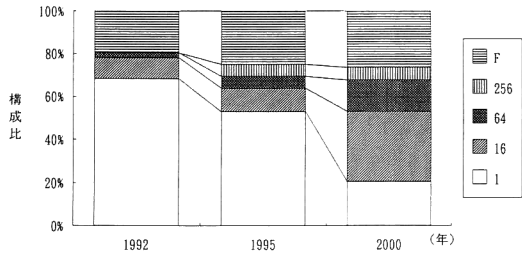


図11 デ스플레이のカラー化ニーズ推移：表示色数構成、F はフルカラー (日本電子機械工業会 1993 年調査研究報告書より)

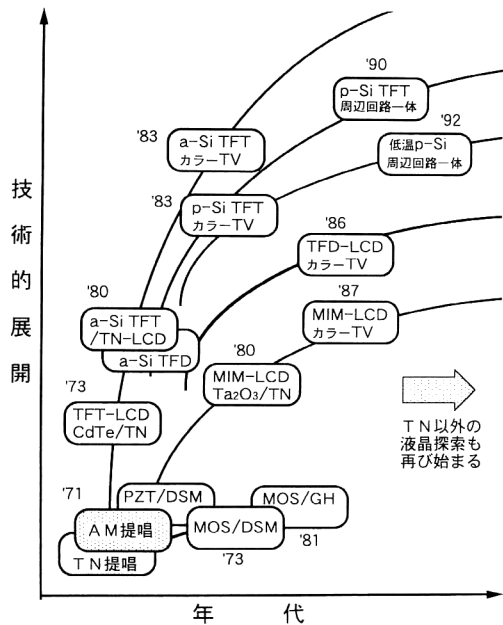


図12 アクティブマトリクス LCD 技術開発の推移

(a-Si) TFT 応用の発表からである⁷⁾。他に、ダイオード型 (TFD; thin film diode, MIM; metal insulator metal など) やポリシリコン (p-Si) TFT も実用的技術として開発が進められている。

TFT を用いる AM-LCD は、2~3 インチ程度の小型カラー TV 応用のものが 80 年代後半に各社から製品化されたが、本格的な大型市場となるのは 1990 年以降の 10 インチクラスカラーパネルの携帯・ノート PC 搭載からである。a-Si TFT-LCD 搭載の最近のカラーノート PC では、VGA (IBM の定めたビデオ画像の画素数の規格：横 640×縦 480 画素) 対応、コントラスト 100 : 1, 1670 万色 (256 階調) の表示が可能になった。TFT-LCD の最大の課題はコストで、本格普及には現在 10 万

円程度 (10 インチクラス) の価格を5万円程度にまで下げる必要がある。

このため、日本のメーカーは第1期の10インチクラス2面取りの生産ラインに加え、さらに大型投資を行って第2期の同4面取りラインを増設し稼働を始めている。

一方、STN型も液晶材料、プロセス、駆動方法の改良により、応答速度はまだ遅いがカラー表示の性能は次第に向上して、昨年後半からカラーノートPCへの採用が始まった。最近のパソコン価格破壊の市場要求が、性能的にはTFT型に劣るものの、価格がTFT型の約半分のカラーSTN型を呼び込んだ形である。さらに、新駆動方式の採用によりある程度動画対応可能なカラーSTNも近く製品化されそうである。それまでカラー分野を独占し急成長していたAM-LCD陣営にとってはショックである。第2期ラインの稼働とともに部品材料の低コスト化を進め、さらにより生産性が高く高精細大型パネルにも対応する第3期ラインの検討も始めている。また、AM-LCDの中ではTFTに比べ構造、プロセスが簡単で比較的低コストのMIMのようなダイオード型の製品化も一部では行われているが、性能・価格が中途半端なためかPC市場の主流にはなり得ていない。

ノートPC市場のカラー表示を最大主題とする第3世代の現時点は、このようにAM-LCDとカラーSTNの激突状態に入ったが、1~5インチサイズのAV機器やカーナビゲーション、TV分野では、動画が可能なAM-LCDが多く使われている。特に、高密度実装が要求されるビデオカメラのビューファインダーやプロジェクターライトバルブには、周辺回路も一体に作り込める高性能のp-Si TFT型が参入してきた。

3.4 次世代—マルチメディア市場：LCD軍団の挑戦

次世代のビッグニーズはいうまでもなく、産業構造、社会自体の変革の可能性をも内包するマルチメディア情報システム化潮流への対応である⁸⁾。ディスプレイに与える主要課題は、カラー動画対応に加え、印刷・フィルムメディアレベルの超高精細化およびグループ観衆対応の超広視野化や超高画質化、そして個人購入可能レベルのCRT並超低価格化であろう。また、将来大規模市場が予想される携帯情報端末対応も重要である。

このような従来ディスプレイの機能、性能を越える次世代マルチメディア大市場に向けて、新デバイスも含む各種ディスプレイ技術開発の競合が活発に展開されている⁹⁾。しかし、フラット大画面化を除き、やはりLCD軍団が挑戦の先頭を走っている。超高精細化に対して

は、TFT/TN-LCDでEWS (engineering work station) やHDTV (high density TV) に対応できる~16インチ、130万画素レベルが製品化され、大きさでは最大21インチレベルが試作されている。印刷・フィルムメディアとの十分な互換性のためには、1000万画素級の解像度をターゲットにすべきであろう⁸⁾。広視野化に関しては、AM/TN方式での液晶配向分割法やランダム配向法など、またAM方式でTN以外の新しい液晶との組合せでは高分子分散光散乱型(PDLC)や新強誘電性液晶型などが開発中で、 $\pm 40 \sim 60^\circ$ 程度にまで改善されてきている。しかし、十分にホーム・グループユースに対応するにはCRT並の超広視野が必要と思われる。また、いっそうの低価格化に対して、AM方式では第3期製造ラインの高生産性化やTFT自体の構造・プロセス見直しなどの検討がなされている。

一方、基本的にAM方式より安く作れる単純マトリクス方式では、STN型の限界を越える可能性をもつも



図13 反強誘電性液晶を用いた6インチフルカラーLCD試作品 (日本電装提供)

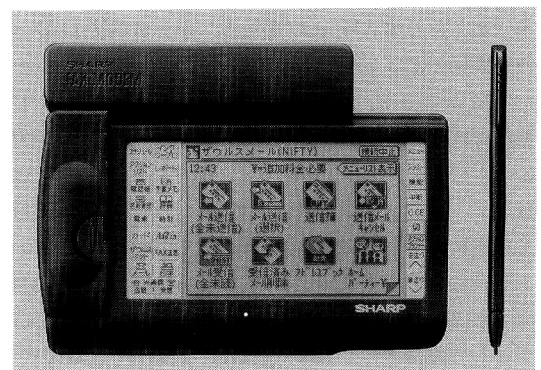


図14 モノクロ反射型STNを用いた液晶携帯情報ツール (シャープ提供)

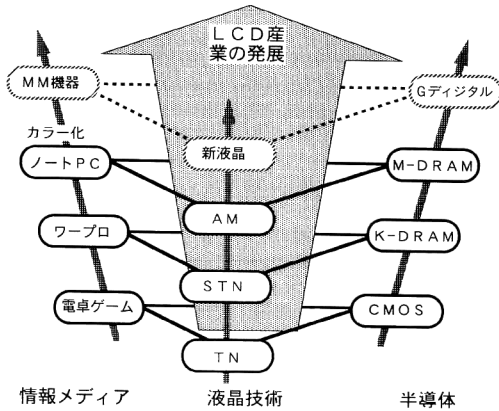


図15 LCD産業のトライアングル構造発展

のとして1988年に日本で見出された反強誘電性液晶が注目される¹⁰⁾。図13はその試作品であるが、フルカラー、動画が可能で視野角も $> \pm 60^\circ$ と広い。携帯情報端末応用では、電池動作時間の点でバックライトを用いない反射型が望まれる。モノクロ表示ではSTN反射型のものが製品化されているが(図14)、紙メディアと比べると表示明度は十分ではない。光ロスが大きい偏光板は用いず、またカラー表示も可能な新しい動作方式・原理の開発・研究が活発に行われている。ただし、基礎的な発明・研究は相変わらず欧米の方に多い。

4. わが国のLCD工業発展の背景のまとめ

以上のようにLCDの工業的発展の一方の背景には、情報化社会における新市場との連続的な創造的出会いがあった。この新市場連続形成には、半導体LSIにおけるCMOSからk(キロ)オーダーDRAM→M(メガ)オーダーDRAMへの発展がもう一つの重要な背景条件であった。情報メディア市場・液晶技術・半導体の三者が位相を合わせて連带的に世代発展してきた様子を図15にまとめて示す。

図16は、ディスプレイに関する国際会議SIDシンポジウム(毎年米国で開催)におけるLCDに関する研究発表件数の推移を示す。最初の発表は1970年米国からで、日本は2年も遅れる(前記小林らの1件)。

日本からは、その後増加の一途を辿るが、一方米国からは70年代前半一時増加した後逆に減少傾向となり、1980年には件数において日米逆転するのである。驚くことにこの米国の減少傾向は10年以上も続く。米国でいかにLCDが重要視されていなかったかが歴然とわかる。

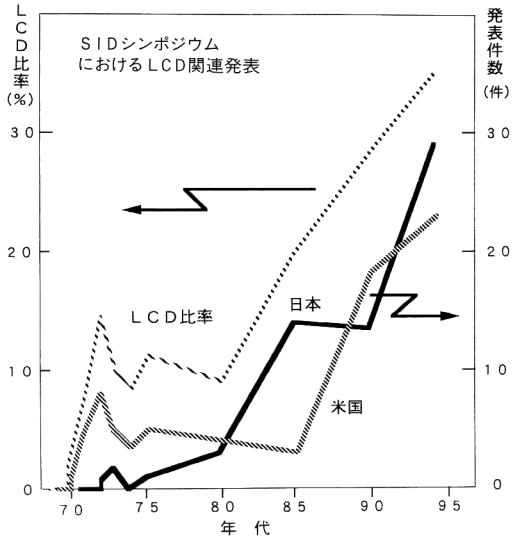


図16 国際会議SIDにおけるLCD関連発表件数推移(75年までは毎年プロット、以降は5年ごとプロット)

第3世代のAM-LCDが世に登場し、日本がその事業化特化のため一時発表停滞する80年代後半になって、やっと米国もLCDの重要性を再認識し発表件数も急上昇してくるのである。しかし、そのときにはすでに日米間の技術・工業力には圧倒的な差が生じており、慌てた米国は1991年に輸入製品にダンピング課税を懸けるがこれは直ぐに撤廃された。さらに1993年には官民共同体USDCを設立し巻き返しを図ろうとしているが、周辺産業までも含めた総合力を早急に立ち上げるのは容易ではない。

この現在の欧米との技術力の差は、一言でいえば日本が第1世代、第2世代そして第3世代と段階的に応用商品、市場および周辺産業を創出・育成しながら総合力を蓄積してきたことにある。

LCD技術は、液晶という当初極めて取り扱いにくいと考えられた材料を用いている。それを機能材料として使いこなすためには材料・パネル技術、電気的駆動技術、偏光板やカラーフィルターといった周辺部材技術と幅広い分野の技術を必要とする。また、製品の品質を高め低コスト化を図る製造工程上の技術も重要となる。早くからLCDの可能性に着目し、製品化に至るまでの幅広い分野の技術上の問題点を一つ一つ世界に先駆けて解決してきたLCD技術力が総合力の基盤にあることはいうまでもない。

さらに市場が大きく飛躍するであろう本格的な次世代

マルチメディア時代に対しても、市場ニーズと革新技術の先行的洞察を間違えぬ限り、わが国の優位は続くものと期待される。

文 献

- 1) 小林駿介編：カラー液晶ディスプレイ (産業図書, 1990).
- 2) G. H. Heilmeyer: "Liquid crystal displays: an experiment in interdisciplinary research that worked," IEEE Trans. Electron Devices, **ED-23** (1976) 780.
- 3) M. Schadt and W. Helfrich: "Voltage-dependant optical activity of a twisted nematic liquid crystal," Appl. Phys. Lett., **18** (1971) 127.
- 4) S. Kobayasi and F. Takeuchi: "Multicolor field-effect display devices with twisted nematic liquid crystals," *Digest of SID Symposium* (1973) p. 40.
- 5) T. J. Scheffer and J. Nehring: "A new, highly multiplexable liquid crystal display," Appl. Phys. Lett., **45** (1984) 1021.
- 6) B. J. Lechner, F. J. Marlowe, E. O. Nester and J. Tults: "Liquid crystal matrix displays," Proc. IEEE, **59** (1971) 1566.
- 7) 金子節夫, 谷 千束: "アクティブマトリクス LCD の技術動向", 照明学会誌, **78** (1994) 5.
- 8) 谷 千束: "情報メディア文明と次世代ディスプレイ", ディスプレイ アンド イメージング, **3** (1994) 133.
- 9) 谷 千束: "フルカラーフラットディスプレイの技術動向", 電子情報通信学会誌, **78** (1995) 457.
- 10) A. D. L. Chandani, E. Gorecka, Y. Ouchi, H. Takezoe and A. Fukuda: "Antiferroelectric chiral smectic phases responsible for the tristable switching in MHPOBC," Jpn. J. Appl. Phys., **28** (1989) L1265.