

フラットパネルディスプレイ概論(4) 電子ペーパー

Introduction to Flat Panel Display (4) Electronic Paper

Ukai Display Device Institute 代表 工学博士 鵜飼 育弘
YASUHIRO UKAI Ph.D.

Ukai Display Device Institute

1. はじめに

電子書籍市場では、動画カラー表示が可能なTFT-LCDを搭載した端末と、静止画モノクロ表示の電子ペーパー端末が話題になっている。ここでは、電子ペーパーの種類を概説し、この中で実用化されているデバイスについて詳述する。また、電子ペーパーの技術課題としてのカラー化およびフレキシブル化についても述べる。

2. 電子ペーパーの種類

電子ペーパーの定義は明確ではないが、紙とディスプレイの長所を両立したデバイスを目指すもので商品化と研究開発が活発に行われている。紙のような感覚で利用できる、柔らかい素材の極薄のディスプレイがターゲットである。紙のような10分の数ミリ程度の厚さで、データの表示や消去が何回も繰り返し行える未来のデバイスが考えられている。

蛍光灯や太陽光などの光を反射させて画面を表示する反射型の電子ペーパーは、バックライトを用いたTFT-LCDと比べ、直射日光下でも画面が見やすい。画面内容を変化させる時にだけ電力を消費するため消費電力も小さく、電源を切っても表示を維持でき、しかも軽いなどの特長をもつ。

図1に代表的な電子ペーパーの方式を示す。電気泳動ディスプレイ(EPD: Electrophoretic Display)では、図2に示すように1粒子型(図2(a))と2粒子型(図2(b))が実用化されている。1粒子型は、元松下電器の太田氏が開発した当時の構造で、電極に挟まれた着色溶液の中に1種類の

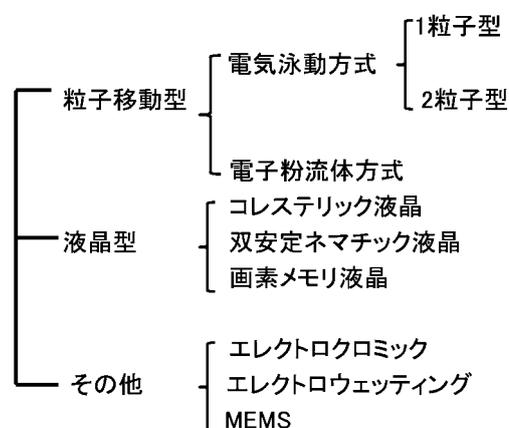


図1 電子ペーパーの方式

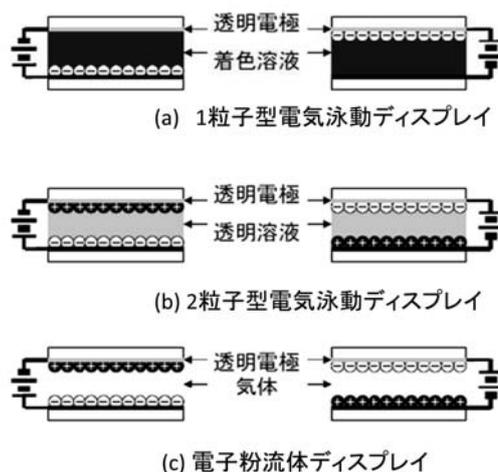


図2 粒子移動型ディスプレイの構造と動作原理

電荷を帯びた着色粒子が分散している。ここで電極に電圧を加えると、荷電粒子はその極性と電界方向によって溶液の中を電気泳動し、溶液色と粒子色が表示できる。実用化は米SiPixが、ギャップを保ち粒子の偏りを防ぐ壁を印刷技術で基板の上に作製し、ロール・ツー・ロール(R2R)

で製造している。2粒子型は米E Inkが実用化しているが、開発したのはCopyteleである。EPDは粒子が液体中を泳動するが、電子粉流体(図2(c))は溶液を用いないで気体を用いており、ブリジストンが商品化している。これらの方式を称して粒子移動型ディスプレイと呼ばれている。

コレステリック液晶(Ch-LC : Cholesteric Liquid Crystal)は、液晶ディスプレイとして広く用いられているネマチック液晶と異なり、メモリ性を有することで電子ペーパー用として商品化されている。コレステリック液晶とはネマチック液晶の中でねじれ構造を持ち、光の波長レベルの短いねじれピッチを持つ液晶の呼び名である。その極端に短いねじれピッチにより、初期の配向状態を安定化すると、その配向状態に駆動電圧によるヒステリシスを持つため、電圧を印加しなくてもある配向状態を保つことができる。また、ねじれ構造により円偏光を反射するブラッグ反射特性を持っている。このため、ねじれピッチを可視光の波長程度にすることで特定の色を反射する特性反射が利用でき、偏光板を用いなくても高いコントラストを持つカラー表示が可能となる。電子ペーパーへの応用は後述する。

双安定ネマチック液晶(Bistable Nematics LCD)は、仏Nemopticsが開発した。このデバイスの構造は、ネマチック液晶を $2\mu\text{m}$ より薄い厚みで基板に挟み、上部基板は一般的なポリアミド配向層を有するが、下部基板には特殊な配向層を設けている。この特殊な配向層により、液晶の方向が電界に関わらず保持され、電界を印加すると液晶全体が捩れた構造となり、光を散乱して白色表示となる。また、画素メモリ液晶(Pixel Memory LCD)は、反射型LCDの各画素にメモリを搭載して画像を保持することで低消費電力を実現している。

エレクトロクロミック・ディスプレイ(ECD : Electrochromic Display)は、エレクトロクロイズムの原理を用いるディスプレイである。エレクトロクロイズムとは、電気化学的な酸化還元によって引き起こされる物質の色調、色彩の可逆的な変化であり、この変化は酸化還元に伴う物質の電子状態変化に起因する。多色発色の可能性、低電圧駆動、メモリ性などの特長が示されている。

エレクトロウェットティング(Electrowetting : 電気濡れ効果)は、液体を封止し、それを移動させることにより表示するディスプレイ方式でオランダLiquavistaが開発を進めている。このデバイスは図3に示すように、基板上に反射膜と透明電極、フッ素樹脂層を積層し、その上にカラー油膜層と水

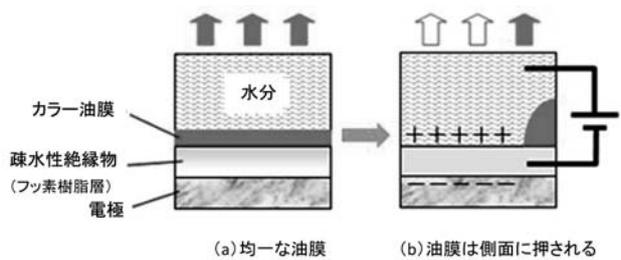


図3 エレクトロウェットティングの構造と動作原理

分を封止した構造を採る。平衡状態では通常、カラー油膜層は水分とフッ素樹脂層の間で連続した膜を形成する(図3(a))。この状態が系のエネルギー状態の中で最も低いレベルに対応することによる。通常の画素サイズでは、表面張力は重力の大きさの1000倍を超える。その結果、油膜はすべての方向で安定する。電極に電圧を印加し、絶縁層の上で電位差を生じるようにすれば、水分は動いて疎水性表面に接触し、系のエネルギーレベルは低下する。その結果、カラー油膜も移動する(図3(b))。

油膜が側面方向にどこまで移動するかは、静電力と表面張力の間のバランスによって決まる。画素が十分小さく人の目で光応答が平均化される場合、上方向から見たときの光学特性は、色の付いたオフ状態と透明のオン状態の間で連続的に切り替えることができる。この方式は、カラー油膜層を除いて本質的に透明である。したがってこの方式は、透過型、反射型、半透過型ディスプレイとして用いることができる。これにより、2色表示を実現する。さらに、C(シアン)、M(マゼンダ)、Y(イエロー)のそれぞれに着色した油を積層してフルカラー表示を実現できる。但し、メモリ性もしくは双安定性は有していない。

MEMS(Micro-Electro Mechanical Systems : 微小電気機械素子)方式のディスプレイは、米Qualcommが商品化した。このデバイスは、見る角度によって蝶の羽の色が変わる原理を応用した反射型のディスプレイである。MEMS技術を使い、光を反射させる波長を干渉させることで発色させている。具体的には、R(赤)、G(緑)、B(青)のピクセルあたりの空気層の厚さを電圧で変えることで、光の反射をコントロールしている。外光を反射させて発色するのでバックライトが不要となり、消費電力を抑えられるのが大きな特長である。

図1に示したデバイス中から、現在実用化されている代表的な粒子移動型とコレステリック液晶による電子ペーパー

の構造と動作原理を説明する。

3. 実用化されている電子ペーパー

3.1 マイクロカプセル型EPDを用いた電子ペーパー

マイクロカプセル型EPDの表示原理を図4に示す。負に帯電した黒色微粒子と正に帯電した白色微粒子が透明の溶液内に混在している。この溶液が、透明有機膜の球状カプセルに閉じ込められ、さらに平面電極の間に挟まれている。画像の書き換え時には、外部から両電極間に電界を与え、黒色と白色の微粒子の浮沈を制御する。図では背面板の電極に正の電位、前面板の電極に負の電位を与えると、白色が浮き上がり、逆ならば黒色が浮き上がる。透明電極を持つ前面板側から浮き上がった微粒子の色が見えることになる。

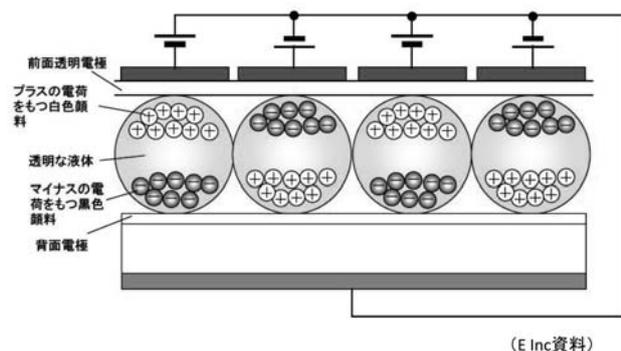


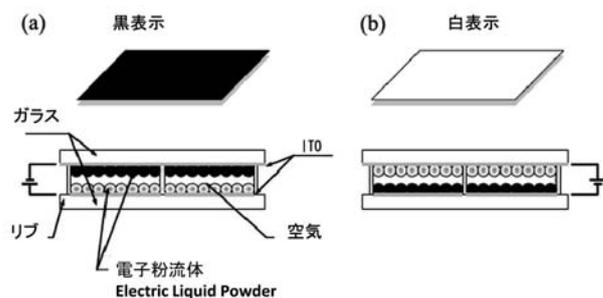
図4 マイクロカプセル型電気泳動方式の表示原理 (E Inc資料)

その特長は、以下に示す通りである。①紙と同じく反射型の表示で、180度近い視野角、新聞紙より高いコントラスト、暗い室内や直射日光の室外など照明条件に左右されない視認性を持つ。②一度表示された画像の保持には基本的に電力が不要なので、一般的な読む用途においては、通常の反射型LCDに比べて1/10程度の電力消費となる。③ガラス基板でなく樹脂基材の前面板を用い、偏光板が不要なシンプルな構成であるため、LCDの約半分の薄さと軽さのパネル表示部を実現する。

TFT-EPDの実用化は、2004年に市販された電子ペーパーである。これは、6型SVGA(800×600)のa-Si TFTアレイ上にマイクロカプセル製EPDを貼り合わせたものである。

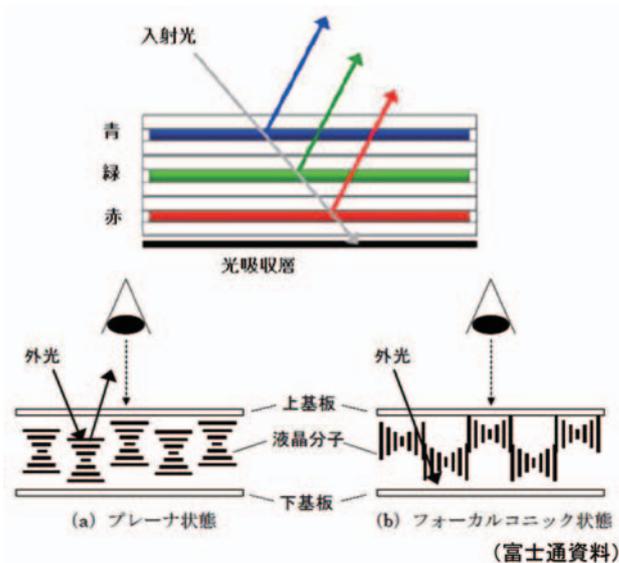
3.2 電子粉流体を用いた電子ペーパー

図5に電子粉流体を用いた電子ペーパーの表示原理を示す。パターニングされた透明電極の間に2種類の電



(ブリジストン資料)

図5 電子粉流体を用いた電子ペーパーの表示原理



(富士通資料)

図6 コレステリック液晶を用いたカラー電子ペーパーの表示原理

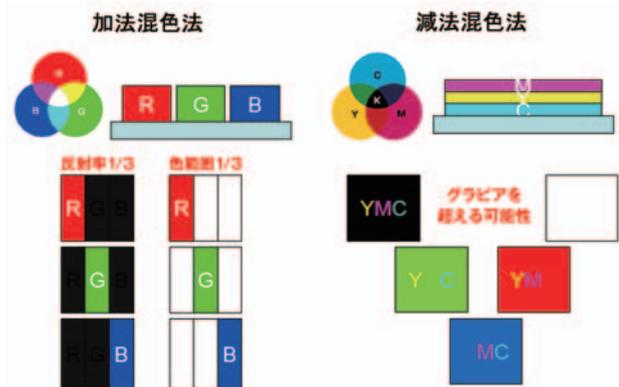


図7 カラー表示方式

子粉流体が封入されている。一方は黒色で正に帯電するように材料設計がなされており、もう片方は白色で負に帯電するように設計がなされている。基板間のギャップを保持するためにリブが配置されており、これによりセルが形成されている。

いま、上部電極を負となるように電極間に電圧を掛ければ、相対的に正に帯電している黒粒子が引き寄せられ図5(a)のように黒表示ができる。逆に、上部電極を正となるように電圧を印加すれば、図5(b)のように粒子が反対側に移動し、今度は白表示となる。このデバイスの応答時間は0.2msとLCDに比べて早く、しかも粒子が飛翔する電圧には明確なしきい値を有し、これによりTFTを用いないパッシブ駆動が適用できる。粒子は自身の帯電に起因する鏡像力により電極に付着し続けることが可能で、表示を保持するための電圧供給を必要としない。さらに、表示は粒子の色そのものを見ることから視野角依存性は殆どなく、また紙のような白さを再現できる。

3.3 コレステリック液晶方式カラー電子ペーパー

図6に示すようにカラー電子ペーパーの断面は、赤・緑・青の液晶層の他に透明フィルム、透明電極、電極、封止剤、光吸収層から構成されている。このデバイスには、液晶材料としてコレステリック液晶を用いている。コレステリック液晶は、特定の波長(光)のみを反射する性質がある。太陽光や蛍光灯の光が液晶に入ってくると、赤色、緑色、青色の決められた波長を反射し、フルカラーを表示できる。全ての色を反射する場合、光の3原色で私達の目には白に見え、反射しない場合は一番下の層の光吸収層の黒が見える。

コレステリック液晶は、双安定性(メモリ性)を備えており、液晶に印加する電界強度の調整により特定の波長の光を反射するプレーナ状態、光を透過するフォーカルコニック状態、またはそれらの中間的な状態をとることができる。一旦プレーナ状態、フォーカルコニック状態、またはそれらの中間的な状態になると、電圧無印加状態においても安定してその状態を維持できる。このメモリ性により、書換え時のみ電力を必要とする超低消費電力を実現している。また、一度表示したものに対し、表示中は電圧をかけないので、画面がちらついたりすることがなく、目が疲れにくい。従来の液晶に必要な、偏光板、反射板、カラー・フィルタ、バックライトがなくなり、薄くて軽く、明るい液晶が実現した。

4. 電子ペーパーのカラー化とフレキシブル化

紙の読みやすさや扱いやすさと比べ、現状のフラットディスプレイとしての代表的なTFT-LCDで文章を読む際

の不便さを考えると、表1に示すような課題が明確になる。現状は、ステージ1のレベルをクリア出来るところに来ている。しかし、ガラス基板を用いたものは壊れやすい点が課題である。ステージ2のカラー化も進展しているもののまだ改善の余地が大いにある。残る大きな課題はフレキシブル化であるが、この技術を完成させるには材料・プロセス・生産等の技術革新を三位一体で進める必要がある。

表1 電子ペーパー機能の進展と課題

<p>ステージ1</p> <ul style="list-style-type: none"> ・読みやすい…高コントラスト、読みやすい表示方式 ・疲れにくい ・気楽に読める…薄型、軽量、壊れにくい、早い立ち上がり ・持ち歩ける ・電源不安なし…メモリ型～超低消費電力、反射型表示 <p>ステージ2</p> <ul style="list-style-type: none"> ・カラー表示…高視認性の反射型カラー表示 ・タッチパネル機能…表示性を劣化させない手書き入力 ・曲げ・巻き取り…表示・駆動基板のフレキシブル化
--

4.1 カラー化

カラー表示法としては、図7に示すように加法混色法と減法混色法が知られている。加法混色法は、R、G、Bの3原色を平面上に微細に配置し、網膜上で色彩の混合を行うものである。この方法は、CRTやLCDおよびPDPなど多くのフラットディスプレイに用いられている。一方、減法混色法は、白色光の光源から吸収効果により不要な可視光スペクトルを取り除いて、所望の光スペクトルを得る方法である。そのため、C、M、Yの3原色から構成される。この方式は、カラー印刷で用いられているもので、ディスプレイに適用するにはC、M、Yの3原色の素子を積層して用いる。1画素で3色の組み合わせによるフルカラーが可能となる。この場合、減法混色は加法混色に比べて原理的に3倍の明るさを実現できる。しかし、デバイスの構造は、積層構造が必要なことから複雑となることや、斜め方向からの視差により画素間の混色が問題となる。

図8に表示媒体のコントラストと反射率の関係を示す。電子ペーパーのカラー化には、ここで述べたカラー・フィルタを用いる方法や、コレステリック液晶のようにR、G、Bを積層する方法等が実用化されている。カラー・フィルタに、R、G、Bに加えてW(白)のサブピクセルを設けることで、白状態の反射率を22~25%まで改善できる。しかし、図から

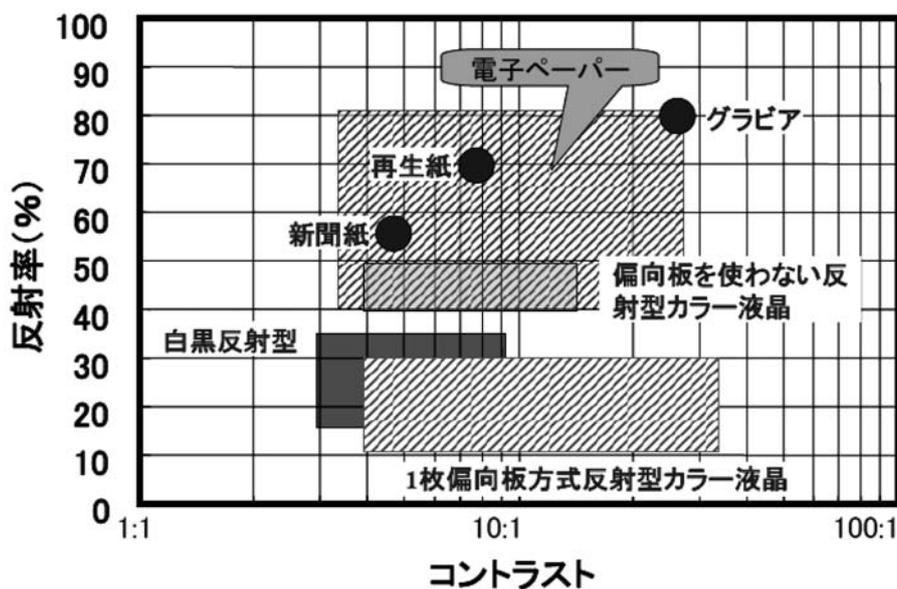


図8 表示媒体のコントラストと反射率の関係

分かるように、カラー・フィルタで実現した白表示はカラー・フィルタを使わないモノクロの白表示よりも必ず反射率が低下する。

電子ペーパーによるカラー表示のターゲットは、印刷物であるグラビア印刷のコントラスト比30:1及び反射率80%である。

4.2 フレキシブル化

昨年に発売予定だった有機半導体駆動のフレキシブル電子ペーパーは残念ながら日の目を見ない状態となった。しかし、各社の開発に拍車が掛っており実用化は目前に差し掛かっている。

最近、TFT-LCDを用いた電子書籍端末も市場に出ている。これらの表示は、透過型であり長時間の読書には『ざらつき感』による目の疲労や機器の重さの課題がある。電子ペーパーは、基本的に反射型であり、限りなく印刷物に近い表示(背景が白で完全拡散反射)であることから目の疲労が少ない。

私の見解では、電子ペーパーのフレキシブル化とフレキシブルディスプレイは異なるもので、あくまでも電子ペーパーは「紙の代替」を目指すべきと考える。そもそも、ディスプレイはコンテンツをいかに忠実に再現し、人に感動を与えられるかが重要である。一方、電子ペーパーは、コンテンツそのものが重要で、デバイスには感動を与える役目は存在しない。ただ、紙における現在の印刷技術は、触

感、質感、光沢など感覚的な領域まで表現する能力を持っており、電子ペーパーがこの領域に達するのはかなり先のことになりそうである。なお、このデバイス実現にあたっては、フレキシブル性を念頭に置けば必ずと用いられる材料は、有機材料に集約されるであろう。

なお、フレキシブルディスプレイは、次回で取り上げる予定である。

5. おわりに

「カラー動画表示が可能な透過型TFT-LCDを用いた端末が、モノクロ静止画表示の電子ペーパー端末を駆逐する」との話聞く。しかし、カラーグラビア雑誌をスクロールしてみたい人は部屋の中で液晶端末を使い、小説など書籍を持ちいつでもどこでも読みたい読書家は電子ペーパーを使うことを薦めたい。

昨年末に市販された電子ペーパー端末を購入し、実際に使っているが、目の疲労には明らかに差異があることが分かった。また、ここでは述べなかったが、電子ペーパーにとって入力デバイスの選択も重要であり、目的に応じたタッチパネルとディスプレイの組み合わせを十分検討する必要がある。