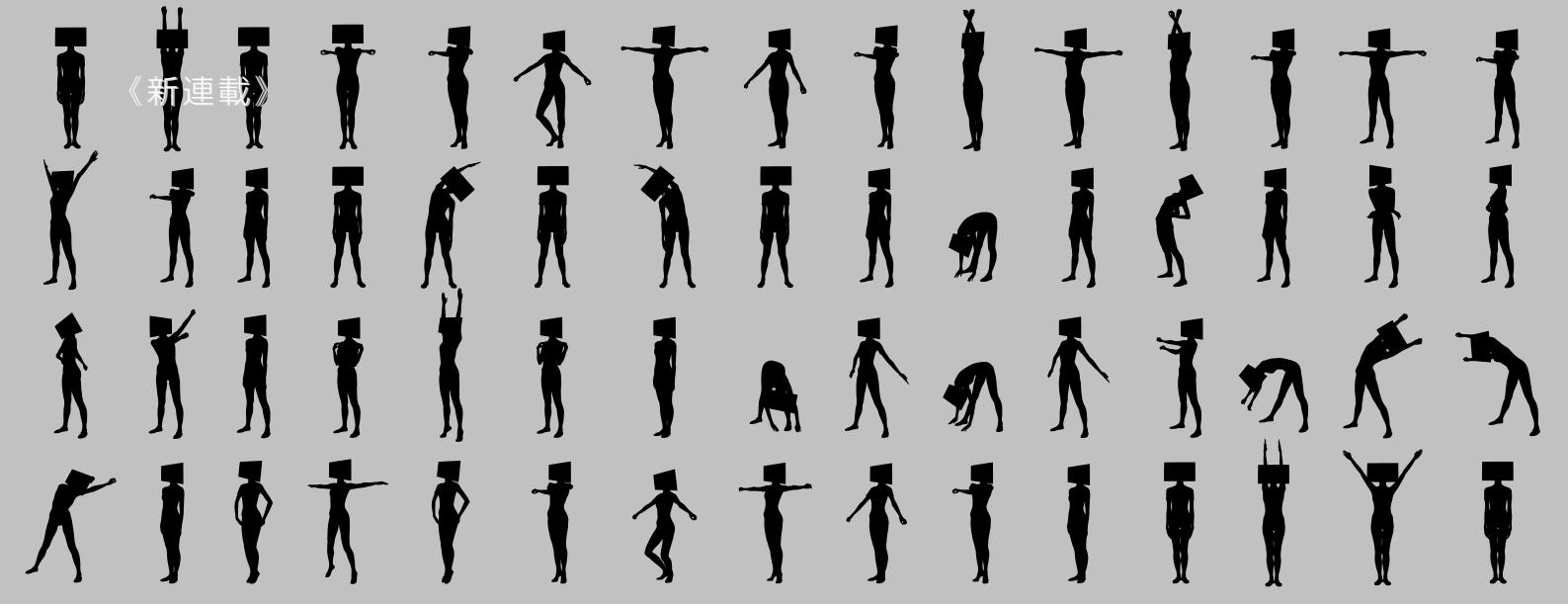
《新連載》



講座：ディスプレイの基礎［全６回］
開　講　に　あ　た　っ　て

編集幹事 高 取 憲 一

テレビ受像管の世界では，長く続いたブラウン管（CRT）の時代が，発展途上国を含めても，いよいよ終焉を迎えつつあります．これに伴い，若者にとっては，テレビ受像管という用語も死語となってしまったようです．長年の王者であったブラウン管の地位を奪ったのは，よくご存知のように，液晶ディスプレイとプラズマディスプレイに代表される薄型ディスプレイです．

薄型ディスプレイは，その初期には名前が示すとおり薄い点とそれに伴う軽い点を強みとしていました．しかし，たゆまぬ技術進展により，精細度・画素数・大きさ（大型，小型）・消費電力等に加えて，一部では色度域等でもブラウン管を上回り，視野角・コントラスト・輝度・応答速度・残像感等々でも目覚しい進展を見せています．特に液晶ディスプレイは，腕時計から携帯電話・スマートフォン・タブレット，モニタ，テレビと，身近に最も普遍的に存在しているディスプレイとなってきています．

このような薄型ディスプレイの進展を実現している技術，また今後のディスプレイを担っていく技術について，全６回の本講座でわかりやすく解説していただきます．

ディスプレイの技術もさまざまなものがあり，全６回のテーマの選定は非常に難しい所ですが，以下のようにさせて頂きました．まず，第１回と第２回では，薄型テレビの二つの柱である液晶ディスプレイとプラズマディスプレイについて解説いただきます．そして，これらを凌ぐ可能性があるとして研究開発が進められている有機ELディスプレイに関し，第３回に教えていただきます．また，第４回は，電子書籍等で利用され，低消費電力を特徴とする電子ペーパを取り上げさせて頂きます．第５回は，人への映像の見せ方を変えることで従来の平面表示と大きく異なる立体表示を実現する３Dディスプレイをわかりやすく解説いただきます．最後の第６回は，薄型ディスプレイという平面を越え，曲面や巻取り等を可能とするフレキシブルディスプレイに関し，お教えいただきます．

これら全６回の講座を通して，人の目に情報を与えるディスプレイの技術に関する基礎を身に付けていただけますと幸いです．

なお，本講座の企画は，小南裕子，本山靖　両編集幹事と八木伸行理事ならびに私が担当しました．

予定目次（全６回）

７月号	（第１回）液晶ディスプレイの基礎	木村宗弘（長岡技科大）
８月号	（第２回）プラズマディスプレイの基礎	志賀智一（電通大）
９月号	（第３回）有機ELディスプレイの基礎	三上明義（金沢工大）
10月号	（第４回）電子ペーパの基礎	面谷　信（東海大）
11月号	（第５回）３Dディスプレイの基礎	高木康博（東京農工大）
12月号	（第６回）フレキシブルディスプレイの基礎	藤掛英夫（東北大）

液晶ディスプレイの基礎

正会員 木 村 宗 弘†

１．ま え が き

数ある電子ディスプレイの中でも，液晶ディスプレイ（LCD）ほど身近な電子デバイスはないのではなかろうか．パソコンや携帯電話のディスプレイとして広く使われており，最近ではテレビ等のモニタ用途においてもブラウン管を王座から引きずり降ろしてしまった．さらにはコピー機等の操作パネルや，エアコン等の家電機器のリモコンに搭載されている表示器にもLCDは広く用いられている．最近でこそ有機ELが注目されているが，LCDは最も成功した有機電子デバイスと言っても良い．本稿ではLCDの基礎について，自らの浅学も顧みず拙い解説を試みる．

２．LCDは光のシャッタ

プラズマディスプレイ，ブラウン管，有機ELとLCDとの最も本質的な違いは，LCDは自ら発光はしないことである．このためLCDは「非発光型表示デバイス」と分類される．LCDの動作を最も単純化し説明するならば「LCDは光のシャッタ」と言えばよい．固定電話機の子機やコピー機の表示パネルには現在でも，図１のポンチ絵で示すようなマトリクス状のドットで文字を表示するLCDが使われている．このLCDの一つのドットに注目すると，「黒い点」が見えるか/見えないかの違いであることがわかる．このドットの動作は，図２に示すような「ブラインドシャッタ」に例えることができる．ブラインドが閉じていれば光が遮断されているので暗くなり，結果的に人の目には「黒」と映る．ブラインドが開いていれば光は遮られないので，人の目には「透明（もしくは白）」と映る．つまり，LCDのドット一つ一つの動作は「ブラインドシャッタの開閉」と似ており，各ドットの「光の透過量」を制御することがLCDの基本動作なのである．

LCDにおける透過光量の制御方法は，ブラインドのような光の透過エリアを絞るメカニズムとは異なり，正確に説明することは容易でない．初学者向けとして，ねじれネマティック（Twisted Nematic: TN）型LCDの基本動作に関する解説が数多く出版されている．しかし，「光が捻じれて進む」という曖昧な表現になっている説明をしばしば目にする．しかも今日，TN型LCDはもはや主流の動作モードとは言えなくなった．そこで本稿では，「屈折率」，「リタデーション」という語にも正面から立ち向かい，解説してみたい．

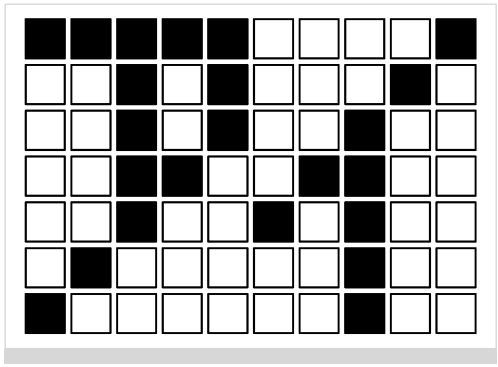


図１　単純マトリクスLCDで文字を表示するモデル
５×７個のドットでカタカナを１文字表示している．

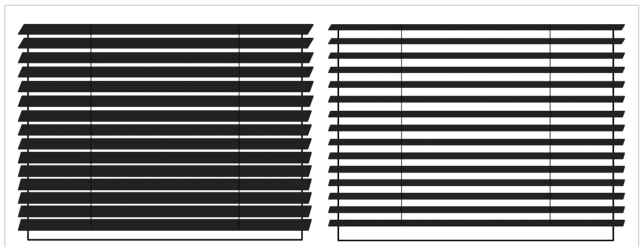


図２　LCDのドット一つ一つの動作は「ブラインドシャッタの開閉」と似ている．シャッタが閉じていれば「黒」，開いていれば「透明（もしくは白）」を表示していることになる．

３．２枚の偏光板間に配置されたセロハンテープ

最近は大きな文具店や通販で容易に手に入るようなので，是非「偏光フィルム」を入手され，以下の簡単な実験をお試

† 長岡技術科学大学　工学部　電気系
"Fundamentals of Display Technologies (1); Fundamentals of Liquid Crystal Displays" by Munehiro Kimura (Department of Electrical Engineering, Nagaoka University of Technology, Niigata)

映像情報メディア学会誌 Vol. 67, No. 7, pp. 578～583（2013）

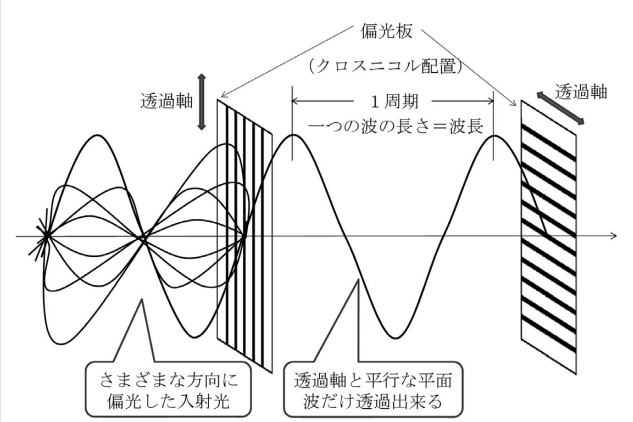
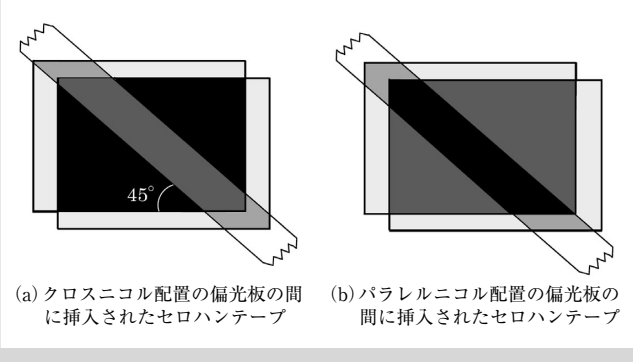


図3　偏光板を透過した平面波
偏光軸が偏光板の透過軸と直交していると光は透過できない．



(a) クロスニコル配置の偏光板の間に挿入されたセロハンテープ　(b) パラレルニコル配置の偏光板の間に挿入されたセロハンテープ

図4　2枚の偏光板の間にセロハンテープを挿入した様子

し頂きたい．2枚の偏光フィルムを用意し，それぞれの透過軸が平行となるように，偏光フィルムを重ね合わせる．透過軸は偏光フィルムに示されている．若干暗くなるものの，光は2枚のフィルムを透過する．続いて，2枚の偏光フィルムの透過軸が直交するように，偏光フィルムを重ね合わせる．光が透過できないため，フィルムは「黒く」見える．

なぜ2枚の偏光フィルムの透過軸を直交させると光が透過できないのか，考えてみる．電磁波の一種である可視光は，文字通り「波」である．図3に示すように，波の振動が平面上に沿うような光波を「平面波」または「直線偏光」という．偏光フィルムは，透過軸に平行な直線偏光のみを透過させる「フィルタ」として機能する．このため「偏光フィルタ」もしくは「偏光板」とも呼ばれる（以後本稿では偏光板と呼ぶことにする）．このため，2枚の偏光板の透過軸が直交している場合（クロスニコル配置），左側の偏光板を透過した平面波は右側の偏光板を透過できないため，「黒く」見えることも理解できよう．

ここで図4 (a) に示すように，2枚の直交する偏光板の間にセロハンテープを挿入してみる．セロハンテープが偏光板の透過軸と45°となるように挿入した時，偏光板越しに

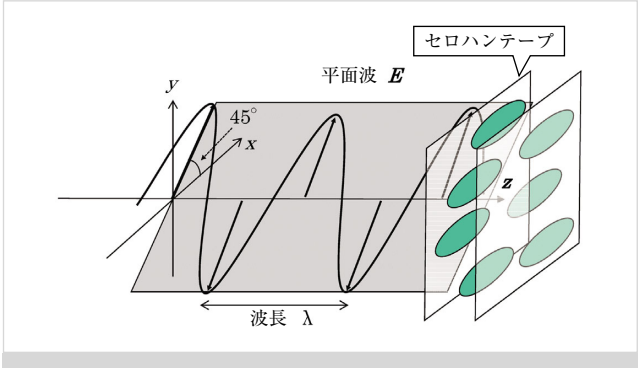


図5　セロハンテープに入射する平面波
セロハンテープの主成分であるセルロースが延伸方向に並んでいることを，便宜的に楕円で表している．

セロハンテープを見ると光が透過していることがわかる．初めて見た人にとっては不思議な現象であろう．今度は図4 (b) に示すように，2枚の偏光板の透過軸を平行に揃え（パラレルニコル配置），セロハンテープが偏光板の透過軸と45°となるように挿入する．偏光板越しにセロハンテープを見ると透明ではないことがわかる．テープが充分に厚いなら黒くなる．しかし，セロハンテープと偏光板の透過軸が平行なら，セロハンテープは透明である．この実験から，セロハンテープを偏光板間において0°～45°で回転させれば，透過光量を制御できることにすぐ気づくだろう．この現象をそのままデバイスにしたLCDが，いわゆるIPS（In-Plane Switching）と呼ばれる方式である．セロハンテープを手で動かす代わりに，液晶を電界で動かしているのである．

4．リタデーション

前章で説明した「セロハンテープが偏光板の透過軸と45°となるように挿入した状態」を深く考察してみる．偏光フィルムを透過してセロハンテープに光線が到達する様子を拡大して描いたのが図5である．光線はセロハンテープに向かって垂直入射であるとする．光線そのものは平面波である．平面波とセロハンテープの延伸方向（図5中の楕円）のなす角が45°と考える．以後の説明の便宜のため，光線の進行方向をz軸に，セロハンテープの延伸方向をx軸に，x軸およびz軸のいずれにも直交する方向をy軸にとる．こうすると「直線偏光の偏光軸はx軸と45°をなしている」と容易に記述できる．

ここで，セロハンテープの複屈折率を考える．屈折率とは，媒質中を進む光波の進行速度が遅くなる割合のことである．「水の屈折率は1.33」等ということがあるが，これは言い換えれば「水中を進む光の速度は，真空中に比べ1.33倍遅くなる」ということを意味する．水は液相であり，「等方性媒質」とも呼ばれる．これに対し液晶や結晶は「異方性媒質」と呼ばれる．セロハンテープにも異方性がある．こ

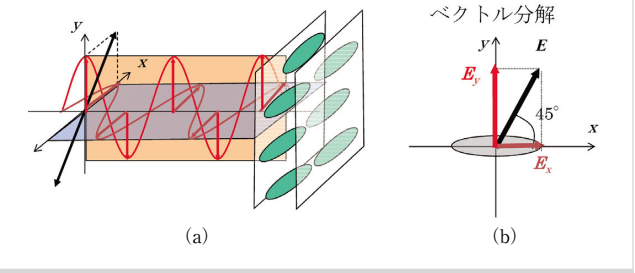


図６（a）x軸に平行な平面波（E_x）とy軸に平行な平面波（E_y）．（b）xy面上で，x軸と45°をなす入射光波EをE_xとE_yにベクトル分解した様子．

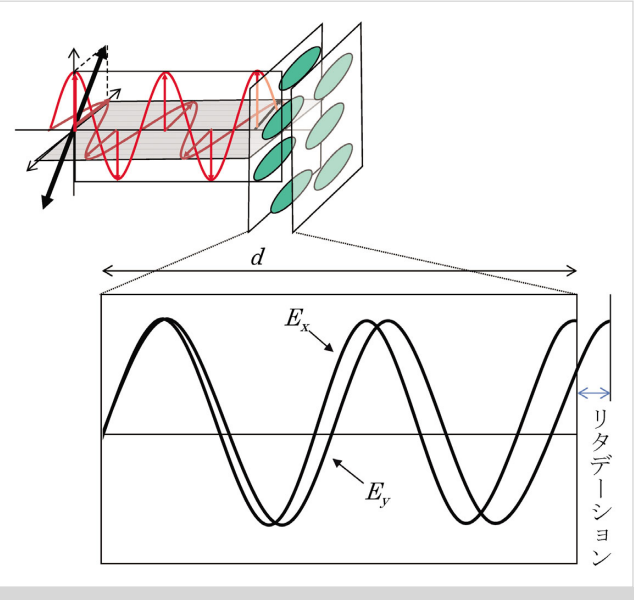


図７　セロハンテープ中を進行する光波の様子
位相のずれがわかりやすいように，E_xとE_yを縦に並べて描いた．

のため，「z軸方向に進行する光波」と言っても，「偏光軸がx軸に平行な光波」と「偏光軸がy軸に平行な光波」では光波の進行速度が異なる．表現を変えると，x軸とy軸とでは屈折率が異なる（例えば$n_{//}$および$n_{\perp}$と表す）ことを「屈折率異方性」があるといい，両者の屈折率の差を「複屈折率（$\Delta n=n_{//}-n_{\perp}$）」という．

図５の説明に戻る．x軸と45°をなした平面波がセロハンテープに入射しているのであるが，屈折率異方性と光波の伝搬についての理解を容易にするために，図６（a）に示すように『x軸に平行な平面波とy軸に平行な平面波が，同時にセロハンテープに入射した』と見なして考えてみる．代数学や電磁気学で「ベクトルの分解と合成」を学んだように，光波は電界ベクトルであり，x軸と45°をなす入射光波Eは図６（b）に示すようにE_xとE_yに分解できる．

E_xとE_yはそれぞれx軸ないしy軸に平行に振幅しながらセロハンテープ中を進行していくのだが，E_xとE_yとではz軸方向への進行速度が異なる．その様子がわかりやすいように，E_xとE_yを図７のように二つ並べて描いてみた．セロハンテープに入射した時点でのE_xとE_yのタイミング（数学的には“位相”という）は同じでも，セロハンテープ内を進む速度が違うためにE_xとE_yとでは波長が異なってしまい，セロハンテープを出た時点では位相がずれてしまっていることがわかる．この位相のずれを「位相差」またはリタデーション（Retardation）といい，次式のように表すことができる[1]．

$$\delta=\frac{2\pi\Delta nd}{\lambda}\quad(\mathrm{rad})\qquad(1)$$

ここでλは入射光の波長，dはセロハンテープの厚さ，Δnは複屈折率である．

セロハンテープから出た光（出射光）を考えるにあたっては，再びE_xとE_yについてベクトル合成し考えることにする．出射光はE_xとE_yの位相差のために，平面波であるとは限らず，一般に図８に示すようならせん状になっている．そこで，xy面に平行なスクリーンを置いて出射光Eの軌跡を描くと，楕円となる．このため，楕円偏光とも呼ばれる．楕円の形状は位相差に依存する．一例を図９に示す．

以上の考察からわかる重要なことは，セロハンテープにおけるリタデーションがπの奇数倍の時，入射偏光と出射偏光は直交している（図９上段の左端と右端）．したがって，適当なリタデーションδをもつセロハンテープを，クロス

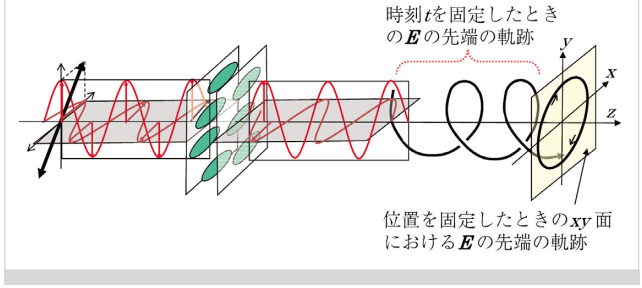


図８　セロハンテープを透過した光の伝搬の様子

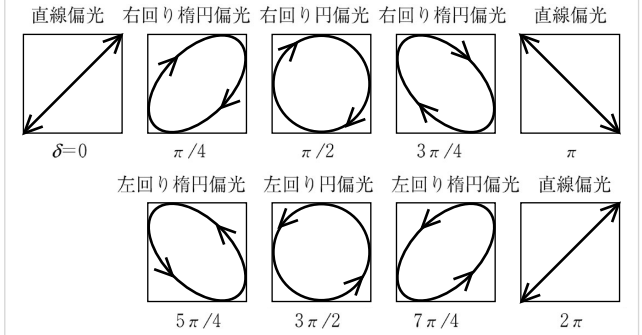


図９　さまざまな楕円偏光

ニコル配置の偏光板間に偏光板透過軸と45°をなすように挿入すると光は透過できるのである．

5．IPSモードとVAモード

前章まではセロハンテープの中を透過する光について説明した．LCDについて考える場合は，セロハンテープを液晶に置き換えて頂ければ良い．「液晶」という用語は，結晶相と液相の中間の状態（液晶相）を指したり，液晶相を発現する物質の総称として用いられる．LCDに広く用いられているのは，分子形状が棒状で長さが2nm程度の有機分子化合物で，室温付近ではネマティック液晶相となっている．ネマティック液晶相では，棒状液晶分子群はほぼ一方向に揃って配向している．複屈折率について考えてみると，分子配向と平行方向に振幅を持つ平面波に対する屈折率を$n_{//}$，分子配列と垂直方向に振幅を持つ平面波に対する屈折率を$n_{\perp}$と表すと，$\Delta n = n_{//} - n_{\perp}$となる．クロスニコル配置において，一様配向している液晶層を透過する光強度は次式で表すことができる．

$$\mathbf{I} = I_0 \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{\pi \Delta n d}{\lambda} \qquad (2)$$

ここでθは分子配向方向と偏光板の透過軸がなす角，I_0は入射光強度である．dは液晶層の厚さであるが，一般にLCDは2枚のガラス基板の間に液晶が封入された構造をとっているので，基板間のギャップ（セル厚ともいう）をdと考えればよい（図10）．

テレビモニタやスマートフォンのディスプレイとして用いられているLCDは，IPSモードやVA（Vertical Aligned）モードが多くなっている．IPSモードでは，クロスニコル配置においてセロハンテープを面内回転させたのとまったく同様のメカニズムで説明できる．すなわち，クロスニコル配置の偏光板の間に液晶を封入したサンドイッチ型のセル（図10）を配置し，液晶分子の配向方向が偏光板となす角

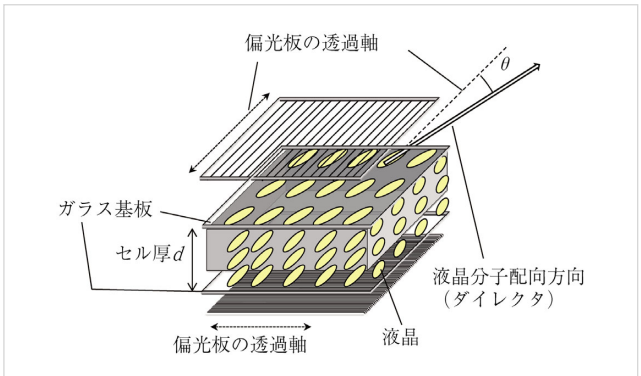


図10　サンドイッチ型とも呼ばれる一般的なLCDの構造図
IPSモードでは液晶配向方向を面内回転させる．図が複雑になるため，電界印加のための櫛歯電極は省略している．

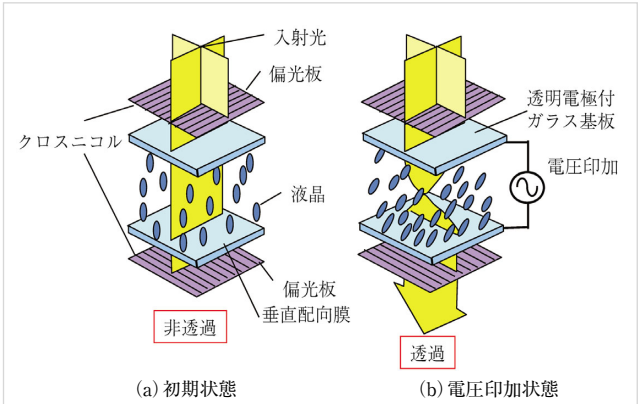
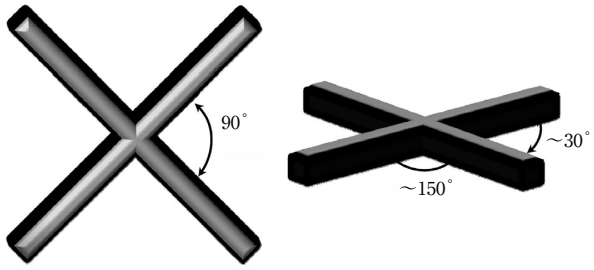


図11　VAモードのモデル図

θを変化させれば，式（2）からわかるように，透過光を連続的に制御できる．液晶を用いる理由は，液晶は異方性があるだけでなく，セロハンテープとは異なり液体のような流動性があり，分子の配向方向を容易に変化させることができる．その方法は，機械的にセロハンテープ全体を回転させるのではなく，LCDの各ドットに印加する電圧によって各ドット毎のθを変えているのである．液晶には誘電率にも異方性があり，基板に平行な方向に電界を印加することによってθを制御できる．なお，IPSモードはTNモードと比較して視野角特性が優れていると考えられている[2]．

クロスニコル配置でのLCDの透過光強度は式（2）で表せるのだが，θを固定（例えばθ=45°）しておきΔnを変化させても，透過率は制御可能である．電圧を掛けない状態（初期配向状態ともいう）での液晶分子がガラス基板と平行になるように処理を施しておく（これを水平配向処理という）．このLCDセルに電圧を徐々に印加する．ある閾値電圧を超えると液晶分子は基板に対して徐々に立ち上がりはじめ，高電圧を加えると分子配向方向は基板に対して垂直になる．このような動作をさせるLCDモードをECB（Electrically Controlled Birefringence）モードという．ここでΔnは印加電圧によって連続的に変化する*1．LCDの各種デバイスパラメータを決定する実験には一般的に用いるモードであるが，ディスプレイに使う場合は着色の問題がある．ここで，ECBモードとは逆に，初期配向として液晶配向方向が基板と垂直となるように処理し（垂直配向：Vertical Align），電圧印加により液晶分子を倒していくことでΔnを変化させても透過光変化が得られる．このモードをVAモードという[3]．VAモードは初期状態において，分子配向が基板にほぼ垂直であるため$\Delta n \fallingdotseq 0$であることから，ディスプレイにおいて重要な「黒」表示に優れると考えられている（図11）．

*1　$\Delta n(V)$は印加電圧Vの関数と言えるが，簡単な解析式で表現することは難しい．



(a) 偏光板を正面から見た場合（垂直入射に対して）は，確かに直交している

(b) 偏光板を斜め方向から観た場合（斜め入射に対して）は，透過軸は直交しているとは言えない

図12　クロスニコル配置の偏光板の透過軸

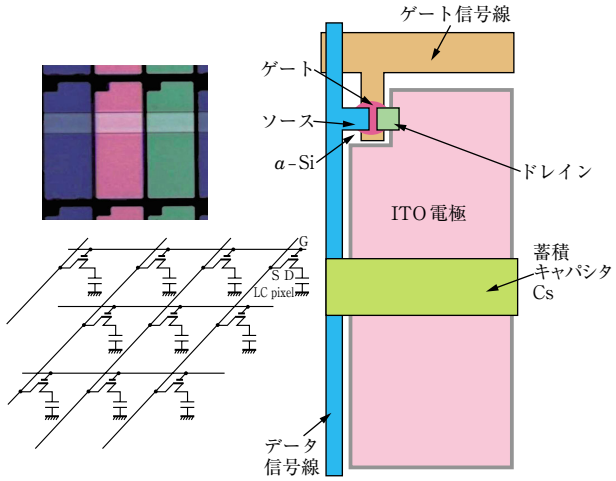


図13　アクティブマトリクス駆動の概念図
薄膜トランジスタ（Thin Film Transistor: TFT）が各画素に接続されていることからTFT-LCDと呼ばれることが多い．

6．さまざまなLCDモード[4)]

前章ではクロスニコル配置について取り上げて解説したが，偏光板をパラレルニコル配置としても透過光の制御は同様に可能である．また，液晶層に電圧を加えることによって，初期配向状態から別の配向状態に変化させれば透過光が変わる．例えば，式(2)におけるθやΔnを変化させるさまざまな方法が考えうるであろう．最近は3D表示のための高速応答性能への要望から，高分子安定化ブルー相（PSBP）[5)]や表面安定化強誘電性液晶（SSFLCD）[6)]も注目を集めている．

LCDの特長は薄型軽量であることだけでなく，消費電力が小さいことが挙げられる．日中の屋外や室内照明下であれば，LCDに差し込む光の反射率を制御することで，表示を行うことができる．LCDがデバイスとして最初に使われたのは電卓であり，LCD腕時計においては数年間電池交換が不要という製品すらある．これも非発光型デバイスならではの特長と言える．それでもTN型等のLCDモードでは，映像を保持し続けるためには電圧を印加し続けなければならないので僅かながらも電力消費はある．SSFLCDやZBD（Zenithal Bistable Display）モード[7)]等は，パルス状の書込み電圧で液晶分子配向をひとたび遷移させると，遷移後の配向状態を保持することができる．このようなメモリー型LCDは，スーパーの値札や電子書籍などの「電子ペーパ」分野への応用が期待されている．特にSSFLCモードは数十μsの高速応答性も魅力的である．3Dディスプレイや電子ペーパについては次号以降の連載をお読みいただきたい．

7．LCDの急速な進歩

LCDの短所は最近まで，コントラスト比と視野角だと言われてきた．要因はいくつかあり，詳解するには光学に関する知識が必要であるが，二つだけ概説する．

ディスプレイを大型化するとクロスニコル配置の偏光板の透過軸が「直角ではなくなる」という問題が起きる．図12は，偏光板の透過軸を棒で表したもので，図12(a)では2本の棒が直交している様子を真正面から見ている．2本の棒はそのままにして，棒に対して斜めの方向から眺めると，2本の棒のなす角度はもはや90°ではなくなっていることがわかる（図12(b)）．偏光板の透過軸についても同様である．LCDに対し斜めの方向から見た場合には，見掛け上偏光板の透過軸は図12(b)に示すのと同じく直交していないため，光が透過できてしまうのである．大面積LCDにおいては，正面から見た場合は正常でも，視線をLCDの周縁付近に向けると光漏れが起きるため，画質は著しく不均一になる．この他にも，TNモードやVAモードでは液晶分子が基板に対して傾斜する角度の非対称性が原因で，斜めからLCDを見た時にコントラストが著しく劣化する．

こうした「LCDの視野角問題」は，光学補償フィルムが開発されたことと，LCDの画素構造の改良によってほぼ解決されたと言って良い．紙数に限りがあるので詳細は他誌に譲るが，「LCDは偏光板があるから暗い」とされてきた問題も，P/S偏光分離フィルムをはじめとしたさまざまな改良によって乗り越えられてきた．

図10に示すようなサンドイッチ型LCDにおいて，上下のガラス基板上にストライプ状の透明電極を設けた駆動方式を「単純マトリクス方式」という．上側基板上に設けた透明電極をアドレス線，下側基板上に設けた透明電極をデータ線とする．アドレス線とデータ線が液晶層を挟んで重なることにより，碁盤の目のような表示形態が構成できる．アドレス線とデータ線に順次走査信号を加え，アドレス線とデータ線の間に電位差が発生した部分（選択画素）の液晶が応答する．その結果，図1のような表示が可能となる．

＊2　閾値特性が急峻なSTN（Super Twisted Nematic）モードLCDは単純マトリクス駆動でも充分なコントラストが得られるため，現在でも広く用いられている．

非常に単純な構造であるが故に，画素数が増えるとクロストーク問題が発生し，コントラストが悪くなる問題があった*2．半導体技術が進歩しアクティブマトリクス（Active Matrix: AM）駆動技術が確立されると，高画質が求められるディスプレイにはAM駆動方式LCDが普及した．AM駆動方式では，アドレス線とデータ線とが交差するところに薄膜トランジスタ（Thin Film Transistor: TFT）を配置し，LCDの各画素はTFTによって駆動される．クロストーク問題が解決されただけでなくLCDの階調表示性（γ特性）も著しく改善された．

8．むすび

LCDが発明されてから今日まで，さまざまな問題点が指摘され，限界説が出る度に，問題解決技術が生み出され乗り越えられてきた．その歴史はまさに「アキレスと亀」と呼ばれる古代ギリシャのパラドックスのようである．有機ELをはじめとしたLCDに取って代わろうとするディスプレイ技術が進歩すると，LCDもまた技術的に進歩し，LCDを追い越せそうで追い越せない．今後どのような新しいLCD技術が登場するのか，まだまだ楽しみである．

（2013年3月11日受付）

〔文　献〕

1）山口一郎：“応用光学”，応用物理学会編，オーム社（1998）
2）近藤克己：“横電界駆動による広視野角液晶ディスプレイの実現”，応用物理，65，pp.1052-1055（1996）
3）武田有広：“MVA液晶ディスプレイにおける配向制御技術”，EKISHO，3，2，pp.35-41（1999）
4）内田龍男：“液晶ディスプレイ入門―第1回：液晶の光学モード”，EKISHO，3，3，pp.195-204（1999）
5）菊池裕嗣：“3次元ナノ周期構造を有する液晶とその電気光学特性”，応用物理，73，pp. 1558-1563（2004）
6）稲葉豊，神辺純一郎：“強誘電性液晶ディスプレイ”，信学誌，78，7，pp. 676-679（1995）
7）木村宗弘，赤羽正志：“Zenithal Bistable Display（ZBD）が拓く双安定型LCDの可能性”，EKISHO，8，3，pp.166-174（2004）

木村（きむら）　宗弘（むねひろ）　1992年，東京農工大学大学院工学研究科博士前期課程修了．同年，長岡技術科学大学工学部電気系助手．液晶の界面アンカリング測定や強誘電性液晶などの諸物性の観測に取組むほか，LCDの新しいモードの研究に従事．1998年，文部科学省在外研究員（Case Western Reserve Univ.）．帰国後，2001年，同大学電気系講師．2005年，同大学同助教授．2007年，同大学准教授．博士（工学）．正会員．

2013年8月号予定目次

【ふぉーかす】 - 金沢工大　大来雄二
【追 悼 文】日下秀夫名誉会員を偲んで - フェロー　田子島一郎
【特別寄稿】平成24年度丹羽高柳賞＜功績賞＞＜業績賞＞受賞者・フェロー称号認定者からのメッセージ
- 東北大　内田龍男，パナソニック　寺西信一，東　大　相澤清晴，NHK　江上典文，NHK　栗田泰市郎，三菱電機　杉浦博明，NHK-ES　山崎順一，KDDIテクノロジー　和田正裕
【特　　集】コンピュテーショナルフォトグラフィ
1．符号化露光法と超解像 - 電通大　西　一樹
2．ライトフィールドビジョンと符号化撮像 - 九　大　長原　一
3．画像中の不要物除去のための画像インペインティング - 奈良先端大　河合紀彦
4．ディジタルカメラおよびスマートフォンにおける画像処理技術の最新動向と今後の展望
- モルフォ　平賀督基・三浦　健・猪俣哲平
5．見たいものだけを鮮明に見せるコンピュテーショナルフォトグラフィ技術 - 阪　大　向川康博
6．画像再構成のための先見情報の利用 - 千葉工大　宮田高道・中静　真
【話　　題】
NAB2013レポート - NHK　小浜昭弘・花谷俊広・石堂裕司
【講　　座】ディスプレイの基礎
（第2回）プラズマディスプレイの基礎 - 電通大　志賀智一
【映像情報メディア年報2013シリーズ】
（第8回）ヒューマンインフォメーションの研究動向
- 金沢工大　吉澤達也，防衛大　横井健司，NHK　澤畠康仁，NTT　中平　篤，九州市立大　佐藤雅之
【輝け！リケジョ（理系女子）】
（第1回）発光材料，光デバイスの研究に携わって - 静岡大　小南裕子
【知っておきたいキーワード】
（第91回）ソーシャルキュレーション - パナソニック　近藤敏志
【標準化現場ノート】
（第28回）3次元映像符号化の国際標準化 ～MVC（H.264/AVC Annex H）～ - NTT　木全英明
【メディアウォッチ】（第18回）（独）情報通信研究機構（小金井本部）取材レポート - 東京工科大　掛川芙祐
【見 聞 記】
NHK技研公開2013見聞記 - OKI　西　　敬

プラズマディスプレイの基礎

正会員 志賀智一†

1．まえがき

プラズマディスプレイ（Plasma Display Panel: PDP）は放電による発光を利用したディスプレイで，1960年代から開発が始まった．当初は放電そのものが放射する可視光（Neガスからのオレンジ発光）を利用したモノクロの文字・画像表示ディスプレイであったが，1970年頃から紫外線励起蛍光体によるカラー化が進められ，テレビとして用いられるようになり現在に至っている．比較的簡単な構造を持つため大型化がしやすく，1990年代始めごろには対角21インチが製品化され，1990年代中盤には多くのメーカから対角40インチ程度の試作品が展示され，1990年代後半には対角50インチのものが市販された．その大画面表示特性を活かし，公共の場における情報表示や見本市・展示会などで多用され，2000年代始めごろから家庭用のテレビとして広まった．当時はテレビとしてCRTが一般的であったが，プラズマテレビの登場により，フラットテレビという言葉が広く一般に浸透するようになった．その後，当初は難しいとされていたフルHD対応にも成功し，現在はそれ以上の4K，スーパーハイビジョンといった超高解像度にも対応したPDPも開発されている．また対角150インチのPDPも開発されている．本稿では，PDPの基本となる発光原理，駆動方法，発光特性などを述べる．

2．発光原理とパネル構造

2.1　放電現象

PDPは，放電による紫外線発光を励起源とした自発光型ディスプレイである．まずはじめに放電現象について説明する．放電現象を利用する最も身近な電気機器は蛍光灯であろう．蛍光灯のガラス管両端には電極があり，管内にはアルゴンガスと水銀が封入されている．電極間に高い電圧が印加されると，管内にある電子が高電界により加速され封入ガス原子と衝突する．このとき電子の持つエネルギーが充分高いと，電子とイオンの対が生成する現象である電離が起こる．この際生じたイオンも電界で加速され，負電圧が印加された電極（陰極）に衝突し2次電子を放出する．これらの電子はガス原子をさらに電離する．こうして管内の電離度が雪崩状に高くなり，電流が増加して自続放電が形成される．電離とともに励起も発生する．ある励起状態から下位のエネルギー状態に自然遷移する際に，そのエネルギー差を光（電磁波）として放射する．

放射光波長はガスの種類や励起レベルにより異なる．蛍光灯やPDPでは，紫外線を効率良く放射するガスを選択しており，その紫外線で管壁にある蛍光体を励起発光させ照明，表示に用いている．ガス原子には複数の励起レベルがあるため，さまざまな光が発生する．ディスプレイとして用いる場合，色純度を考慮すると，放電そのものが放射する可視光強度が低い方が良く，また紫外線強度が強い方が良い．ただし，蛍光体へのダメージや可視光への変換効率の点から放射紫外線の波長は長い方が良い．さらに，温度に対して安定である必要がある．これらの条件を満たすものとして，PDPではXeが用いられている．

2.2　パネル構造と発光原理

図1に，一般に用いられている3電極面放電AC型PDPのパネル構造を示す．パネルは前面ガラス基板と背面ガラス基板から構成されている．前面ガラス基板には走査電極，表示電極を一組とした表示用電極群が形成されている．これらの電極はITO透明電極とその低導電性を補うため，CuやAgから成るバス電極で構成されている．これらの電極

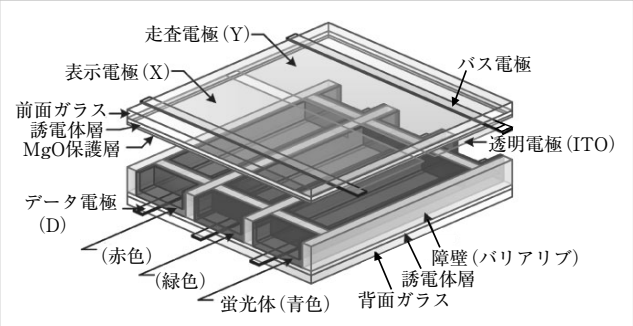


図1　AC型PDPのパネル構造

† 電気通信大学　先進理工学専攻
"Fundamentals of Display Technologies (2); Fundamentals of Plasma Display" by Tomokazu Shiga (Department of Engineering Science, The University of Electro-Communications, Tokyo)

映像情報メディア学会誌 Vol. 67, No. 8, pp. 680～685（2013）

は透明誘電体層で覆われ，さらにその上はMgO等の保護層で覆われている．保護層は，高エネルギーのイオン衝撃から誘電体を保護する役目を持つと同時に，PDPの実質的な電極として働く．このため高い2次電子放出係数を持つことが望まれる．また保護層は階調表示駆動における初期電子供給源としても重要である．

背面ガラス基板にはデータ電極が走査，表示電極と直交するように配置され，その上は誘電体で覆われている．一組の走査，表示電極とデータ電極が交差する領域が一つの放電部（放電セルと呼ばれる）となり，サブピクセル（1/3画素）を形成する．各サブピクセルを分離するためにアドレス電極間と垂直方向の画素境界の位置に隔壁（バリアリブ）が形成されており，その側面とデータ電極上に赤，緑，青の蛍光体が塗布されている．隔壁は各発光色を分離する役目を持ち，また蛍光体塗布面積増加による高輝度・高効率化にも効果的である．なお，放電による劣化を避けるため，前面基板側には蛍光体を塗布しない．

前面ガラス基板と背面ガラス基板は約0.1mmの間隔で接着され，放電空間内に紫外線放射源となるXeにNe等を加えた混合ガス（Xeが10%程度）が70kPa程度で封入されている．以上のようにシンプルな構造をしており，液晶ディスプレイ（LCD）と比べると部品点数がだいぶ少ない．なお図には示していないが，前面基板側にはコントラスト向上，近赤外線および電磁波の遮蔽，表面反射の防止などの機能を持つフィルムが用いられる．

ディスプレイの表示発光として用いられる表示放電は，前面基板の走査－表示電極間で発生する．この放電によりXeから放射される147nmの共鳴線，172nmを中心とした分子線から成る真空紫外線が背面基板側の蛍光体を励起し可視光を放射する．この光が前面基板側を通して視聴者に届く．なおXeからは823nm，828nmといった赤外線も比較的強く放射されている．

図2は，高速度ICCDカメラを用いて観測した，一つの放電セルから放射される可視から赤外の範囲の発光の推移である．上側が陰極（低電位），下側が陽極（高電位）となる期間の放電の様子を示している．放電の継続時間は200から300nsである．発光は両電極の中央部で始まる．陰極上には負グローが形成され，時間とともに放電セル中心から遠ざかるように移動する．一方，陽極側には固定した縞状の発光が観測される．ちなみに走査電極と表示電極のように同一基板上の電極間の放電を面放電，走査電極とデータ電極のように電極面が向かい合った間での放電を対向放電と呼ぶ．

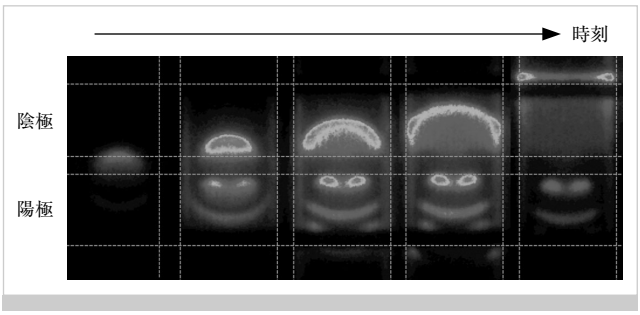


図2　セル内放電発光の進展

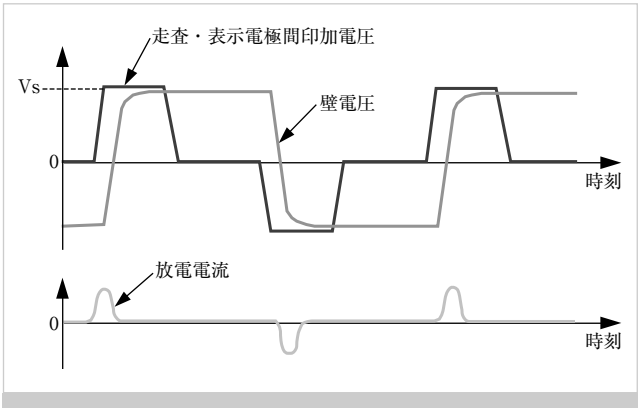


図3　走査・表示電極間電圧，放電電流波形と壁電圧

3．駆　動　方　法

3.1　基本動作

図3は点灯状態にある放電セルの走査・表示電極間印加電圧，壁電圧，および放電電流波形である．電極が誘電体および保護層で覆われているため，放電で形成された電子やイオンは電極近傍の保護層表面に蓄積する．この蓄積電荷を壁電荷という．壁電荷により誘起される電圧が壁電圧であり，放電が始まると外部から印加している電圧を打ち消すように形成される．したがって，実際に放電空間に印加される電圧（実効電極間電圧）は，走査・表示電極間に印加した電圧と壁電圧の差となる．一つの電圧パルスに注目すると，放電が成長するにつれ壁電圧が大きくなるため，実効電極間電圧はしだいに小さくなる．これに伴い放電も弱くなり，やがて停止する．このため放電電流波形は図のような形状となる．このようにAC型PDPでは，誘電体と保護層による容量が放電の電流制限素子として働く．一般に放電電流の幅は200から300nsである．

電圧パルスが終了したあとも壁電圧はそのまま残留する．次の電圧パルスによる電極間電位差は先ほどと極性が逆となり，残留している壁電圧の極性と等しくなる．走査，表示電極に印加する電圧の大きさをV_S，壁電圧の大きさをV_Wとすると，電圧パルス印加時には，(V_S+V_W)の電圧が電極間に加わることになる．なおV_WはV_Sにほぼ等しい．したがって，V_Sが放電開始電圧より低くても，(V_S+V_W)が放電開始電圧より大きければ放電を維持することができる．このことを利用し，PDP全体に放電開始電圧より低い維持電圧パルスを常に加えておき，点灯させたい放電セルのみに，一度だけ放電開始電圧よりも高い電圧パルスを加

えれば，放電セルは維持電圧パルスが印加されている限り放電が継続する．このように，いったん放電を開始した放電セルは放電し続け，非放電セルはそのまま非点灯であるといったように，放電セルがその状態を維持することをメモリー動作という．放電を停止させるには，幅の狭い電圧パルスあるいは電圧の低い電圧パルスを印加し，壁電荷を打ち消すような弱い放電を起こす．

3.2　画像表示駆動方式

PDPで画像を表示する際には一般に，① 各放電セルへの点灯・非点灯情報の書込み，② 表示放電の維持，③ 情報の消去および全セルの初期化，の三つを行う．

点灯・非点灯情報の書込みはアドレスと呼ばれ，縦・横マトリクス状に組まれた走査電極とデータ電極間に印加する電圧により情報を書込む．例えば，ある走査電極に負の走査パルス電圧を加え，点灯したい放電セルのデータ電極に正の電圧パルスを加えると，その交点にある放電セルのみが放電しそれぞれに壁電荷が蓄積する．なお，PDPではこの放電の強い非線形性があることにより，LCDや有機ELディスプレイ（OLED）のTFT（Thin Film Transistor）のようなスイッチング素子は必要ない．上記アドレス方式は，アドレス放電を行ったセルのみに壁電荷を蓄積することから，書込み方式と呼ばれる．逆にすべての放電セルに壁電荷が存在する状態から，非点灯としたい放電セルのみでアドレス放電を行い壁電荷を消去する消去アドレス方式もある．

アドレス放電により設定された壁電荷の状態は維持され，次に維持電圧パルスを印加されるとメモリー動作を行う．PDPの1電圧パルスあたりの放電は短期間で発光強度は非常に弱く，それだけではディスプレイの表示に用いることができない．これを補うためにメモリー動作を利用して表示放電を維持し，単位時間当たりの発光時間を増やして充分な輝度を確保する．表示放電の停止は消去パルス等を印加して行う．

図4は，一般的に用いられているアドレス・表示分離駆動方式（Address-, Display-period Separation Method, ADS駆動方式）において，各電極に印加する電圧波形を示している．アドレスは水平1ラインごとに行われる．まず走査電極1に走査パルスを加え，これに同期して水平1ライン分の電圧をデータ電極に加える．走査電極1のアドレス終了後，走査電圧パルスを走査電極2，走査電極3…と順次加え，それぞれの走査電圧パルスに同期した電圧パルスをデータ電極に加える（線順次走査）．全走査ラインのアドレス終了後に全維持電極と全走査電極間に維持パルスを印加すると，壁電荷が残留しているセルは表示放電が発生する．この方式とは別に，あるラインのアドレス期間に別のラインでは表示放電を行う，アドレス・表示同時駆動方式（Address While Display Method, AWD駆動方式）もある．

以上のように，PDPの駆動では壁電荷を巧みに利用するためその制御が重要である．特に，表示放電を行ったセルとそうでないセルでは壁電荷量に差が生じるため，次に安定なアドレスを行うためには直前の放電の有無によらず一定の状態にする必要がある．これを行うために，全セルに電圧パルスを印加し放電を起こして壁電荷量を初期化する（リセットと呼ばれる）．この放電は，階調が0の場合でも発生するため，その発光強度は暗所コントラストの善し悪しを決める重要な要素となる．現在のPDPでは，立上がり・立下がりが非常に遅いパルスを印加し弱い放電を形成することで，充分な暗所コントラストを得ることに成功している．

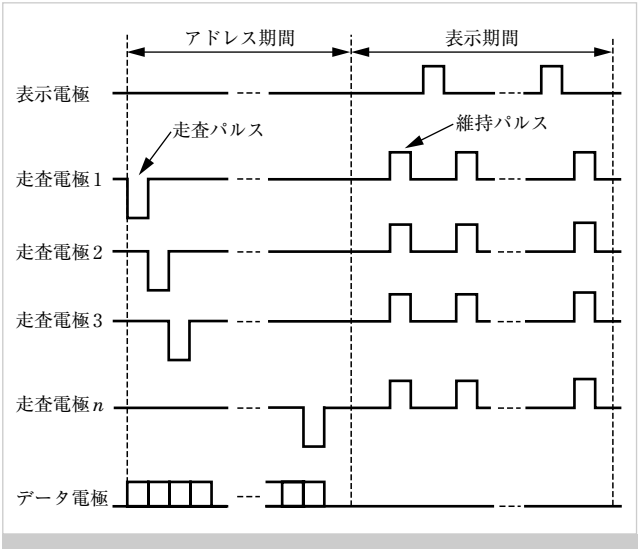


図4　アドレス・表示分離駆動方式の電圧波形

3.3　階調表示方法

前述のように放電は強い非線形性を持ち，また紫外線の自己吸収現象および励起崩壊現象により電流に対し紫外線の放射強度が飽和するため，蛍光体の発光強度も飽和する．したがって，基本的に点灯・非点灯の2値しかなく，他のディスプレイのような階調の振幅変調ができない．そこで人間の視覚の時間的加重効果を利用し，単位時間当たりの発光回数，つまり，維持パルス数により輝度を変えるパルス数変調方式を利用して階調表示を行う．例えば，8ビット256階調表示する場合，1TVフィールドを8つのサブフィールド（SF）に分け，それぞれのサブフィールドに含まれる維持パルス数の比を1:2:4:8:16:32:64:128とする．これらのサブフィールドの組合せにより256階調表示することができる．

アドレス・表示分離駆動方式を用いた8ビット256階調表示のタイミングチャートを図5に示す．なおリセット期間は省略した．アドレス期間長は，（走査パルス周期）×（走査電極数）であり，すべてのサブフィールドで等しい．この階調表示方式を用いると，動画を表示する際に動画偽輪郭と呼ばれる画質劣化が発生する場合がある．その発生

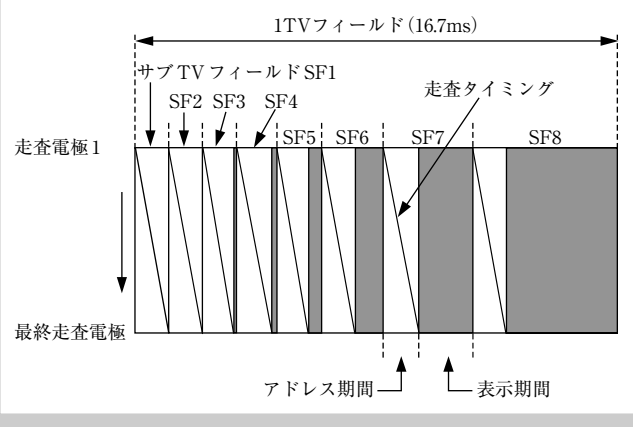


図5　アドレス・表示分離駆動方式を用いた8ビット256階調表示の駆動シーケンス

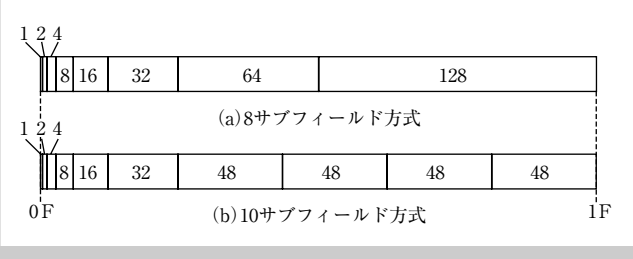


図6　サブフィールド重みの設定(発光スキーム)

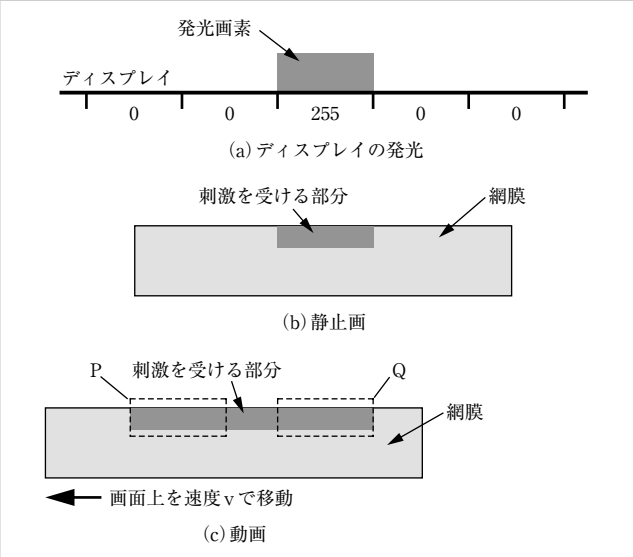


図7　ディスプレイと観測者の感じる刺激

原理を次に詳しく説明する．

3.4　動画質劣化現象

簡単のため，リセット期間およびアドレス期間の時間を0とし，図6(a)のような発光スキームで階調256を表示する場合を考える．図7は，ディスプレイと観測者を真上から見た模式図で，図7(a)は各画素の発光状態，図7(b)，図7(c)は観測者の網膜が受ける刺激の分布を示している．

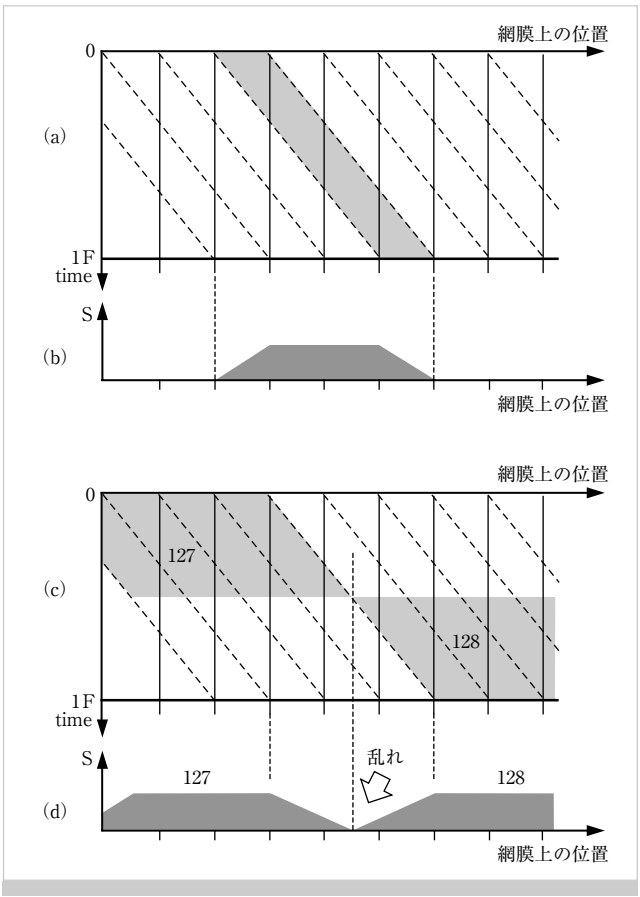


図8　階調256を表示した場合の(a)網膜上の発光軌跡と(b)刺激分布．階調127-128のパターンを表示した場合の(c)網膜上の発光軌跡と(d)刺激分布．

図7(a)のように1画素だけ時刻0から1TVフィールド間階調255で発光し，目が動かない場合(つまり静止画を見ている状態)は，図7(b)のように網膜上でも1画素幅に応じた刺激を視認する．動く物体を追うなどして視点がディスプレイ上を左側に速度v[画素/1TVフィールド]で移動したとすると，図7(c)のように，時刻0では網膜上のPの位置で刺激を感じるが，時刻1TVフィールドではQの位置で刺激を感じることになり，人間の目の残像特性により網膜上では発光の幅がv倍されて視認される．つまりぼやけが生じる．横軸を網膜に固定した座標，縦軸を時間として図7(b)の発光状態を表現すると，図8(a)のようになる(v=3とした)．このときの網膜上の刺激分布は図8(b)となる．このように画素の発光が比較的長い間継続する場合，動画表示の際にぼやけが生じる．この現象は常に表示情報を1TVフィールド間持続するLCDや，電流を抑えつつ充分な輝度を得るために，比較的長い間発光を維持するOLEDでも発生する．また，フィールドシーケンシャルカラー表示方式の色割れ現象も同じ要因で発生する．

次に，左側が階調127，右側が階調128の画像が左に3画素/1TVフィールドで動く場合を考える．図6(a)の発光スキームを用いると，各画素の発光の軌跡は図8(c)のよう

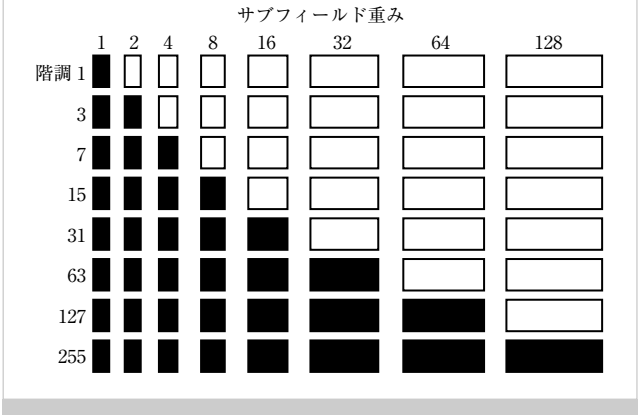


図９　前詰め階調表示方式における点灯サブフィールドと階調の関係
（黒が点灯サブフィールド）

になる．図８(d) の視認される刺激を見てわかるように，階調の異なる画素の境界に本来ないはずの暗い乱れが生じる．この画質劣化は動画偽輪郭と呼ばれ，連続した階調間で使用するサブフィールドの発光重心の差が大きいほど，動画表示の際に大きな空間的乱れとなる．上記の例では，階調127の発光重心は1TVフィールドの前から1/4にあるのに対し，階調128の発光重心は3/4にあり，最も大きな乱れが生じる．乱れの幅は像の移動速度に比例する．

低減方法としては，図６(b) のように，サブフィールド数を増やしてサブフィールド重みを小さくし，階調変化による発光重心の変化を小さくする方法が一般的に用いられる．また図９のように，1TVフィールドの始めから時間的空白を入れずに連続してサブフィールドを点灯する階調表示方法も利用されている．この場合階調数が（サブフィールド数+1）と少なくなるが，原理的に偽輪郭は発生しない．階調不足は誤差拡散やディザなどの面積階調法用いて補充する．これらの対策により，現在市販されているPDPでは画質劣化を気にならない程度まで動画偽輪郭を低減できている．

3.5　電力回収回路

PDPは容量性負荷であるため，電圧パルス印加の際に充電および放電電流が流れる．この時，スイッチング素子のオン抵抗や電極引き出し線などの抵抗において電力損を生じる．3.2節に説明したように，多数の電圧パルスを用いて駆動するため，なにも対処しないとその電力損は大きくなってしまう．一般に，この損失を低減するため，図10 (a) に示すようなパネルの浮遊容量C_P，コイルL，および抵抗Rで形成されるLRC共振回路を利用した電力回収回路が用いられる．なお，これは一方の表示電極に接続する維持パルス発生回路にあたるため，同じ回路がもう1セット必要になる．SW2, SW3および電源で構成される部分は，PDPの高圧駆動回路の基本となるスイッチング回路である．C_SはC_Pより充分大きな容量を持つコンデンサで，自動的にV/2に充電される．

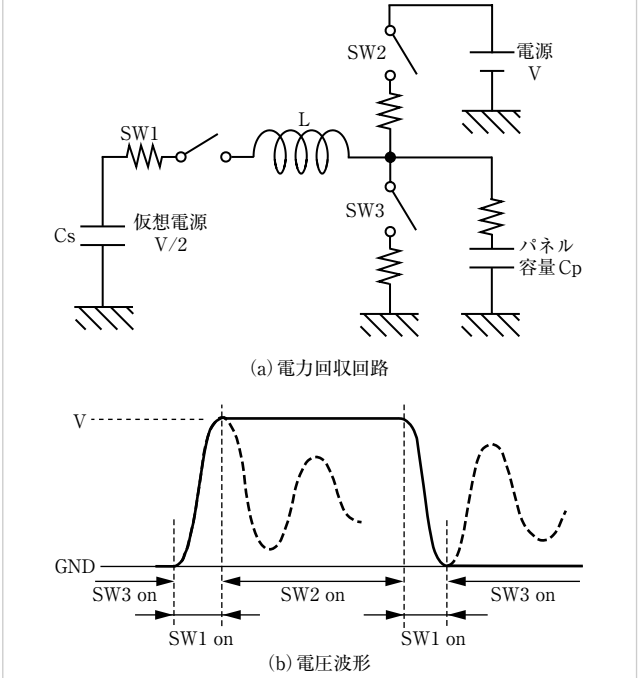


図10　電力回収の原理

図10 (b) は，この回路を使用した際の電圧波形である．まずSW1をオンにすると，波形の立ち上がりに生じる電圧の振動（リンギング）によりオーバシュートが生じ，Rが充分に小さければパネル端子電圧はV/2の2倍のVまで上昇する．そのまま放っておくと図10 (b) 中の点線で示すように電圧は振動する．しかし，電圧がピークに達したときSW1をオフ，SW2をオンにすれば出力電圧はVに保たれる．表示放電電流は電源からSW2，パネルを通る．この際に発光による電力が消費される．一定期間が経過した後，SW2をオフにしてSW1をオンにすると，再び共振回路を形成するため，CPに充電された電荷がCSに流れ込む．CP端子電圧が0となった時にSW1をオフ，SW3をオンにすると，パネルの電圧はGNDレベルに保たれる．このパルス立上げ・立下げ過程で消費される電力は，電力回収回路がない場合の数十分の1となる．

4．特　　性

4.1　表示発光特性

PDPは自発光型ディスプレイであるため視野角が左右160°以上と広く，階調数，発光色数ともに充分である．また，適切な蛍光体の選択とセル構造の工夫等によりNTSC比100%を超える色再現範囲を持つ．各蛍光体は残光特性がほぼ等しくなるように調整され，動画表示の際に色ずれが生じないような工夫が取られている．

ピーク輝度は充分なレベルにあるが，画面全体を明るく白っぽい画像で表示する際に，LCDに比べると輝度が低く

なることが多い．これは後述の電力制限機構によるものであり，家電量販店等の高輝度環境下で比較すると，その差が目立ってしまうので対策が必要である．高輝度化のためには維持パルスの繰り返し周波数を高くする方法や，発光デューティ（1TVフィールドに占める表示発光期間の割合）を高くする方法が有効で，後者にはリセット，アドレスにかかる時間を減らすことが必要である．現在では，保護層に初期電子を供給する機能を付加しアドレスの高速化を図っている．

前述のように，リセットの際にも放電による発光が伴う．このため階調0でもわずかな放電発光があり，これがいわゆる黒浮きの一要因となる．PDPがテレビとして使用された当初はリセット放電強度が強く，またその回数も多かったため暗所コントラストが低かった．しかし現在では，リセット回数低減とランプ波形の利用により低輝度化が実現し，500万対1以上と高い暗所コントラスト比を得ることに成功している．明所コントラストに関しては，塗布する蛍光体が白色であるため，周囲光の反射により低下が発生する．これを抑えるため映り込み防止のフィルタ等を利用する．ただしPDPからの発光強度も減衰するため，それを補う高輝度化が必要である．

PDPは動画表示特性が優れている．これは放電の立ち上がりスピードがマイクロ秒オーダと速く，CRTほどではないものの，1TVフィールドを占める発光期間が短く，また，残光の少ない蛍光体を利用する等の対策が行われているためである．さらに，信号処理による動画質向上方法も採用されている．この高速応答性により3D表示での優位性も示されている．

4.2　消費電力

PDPで消費される電力のうち6割程度が放電発光に使われる．しかし，PDPで用いているXe放電は，発光効率（パネルへの入力電力に対する出力光電力）が高いとは言えず，ディスプレイとして充分な輝度を確保するために消費電力が大きくなってしまう．特にPDPの画面全体に明るい画像を表示する場合に非常に消費電力が大きくなり，パネルや駆動回路への負担等が大きくなる．これを防ぐため，ある一定の電力を超えないように電力制御する．一般に表示画像に応じて維持パルスのパルス数を変えることでこれを実行する．例えば，画面全体に明るい画像を表示する時はパルス数を減じる．当然輝度は低くなるが，発光面積が大きいため視聴者にとっては大きな明るさの低下にはならない．

テレビ用のLCDが登場した頃，最大電力や定格電力で比較されたため，PDPは電力が大きいというイメージがついた．しかし上記の電力制限機構に加え，一般のテレビ放送は平均すると30～40%程度の信号が多く含まれており，PDPを含む自発光型ディスプレイは消費電力が表示画像に依存するため，通常は最大電力より低い状態で動作することが多い．

現在では封入ガスの調整，実質的な電極である保護層の変更，駆動回路の調整などにより低電力化が進み，LCDと大きな差がない程度までに改善されている．

5．む　す　び

以上，PDPについて基本となる発光原理，駆動方法，発光特性などを述べた．LCDと同様に，PDPも技術的に成熟しているように見られることが増えてきているが，現在でも新たな技術への挑戦が続いている．例えば，NHKが進めるスーパーハイビジョン用の100インチを超える直視型ディスプレイとしてPDPの研究・開発が進められ，2012年には145インチPDPが公開された．また外径1mm，長さ1m程度の放電管を並べてフィルム状としたプラズマチューブアレイ（ラフィーとも呼ばれる）は，大型で湾曲可能なディスプレイとして注目を集めている．

（2013年5月2日受付）

志賀　智一（しが　ともかず）　1999年，電気通信大学博士後期課程卒業．1999年，同大学助手．2004年，同大学助教授となり，現在，同大学准教授．主として，プラズマディスプレイや液晶ディスプレイバックライトに関する研究に従事．博士（工学）．正会員．

有機ELディスプレイの基礎

三上明義†

1．まえがき

有機EL（Electroluminescence）ディスプレイは，鮮やかな色彩表現，広いダイナミックレンジ，高速応答，広視野角，高コントラスト，低消費電力，薄型・軽量などの特徴から，高画質の次世代薄型テレビやモバイル機器への応用が期待されている．また近年では，白色発光効率の向上に伴い，面光源である特徴を生かした照明装置への応用を目指した研究・開発が並行して進められている．しかし一方では，液晶ディスプレイ，LED照明などの先行技術との差別化が難しく，またディスプレイ産業の構造的低迷に伴う低価格化の影響により，有機ELは民生機器用ディスプレイとして市場に定着しているとは言い難い．このため最近では，発光効率，輝度寿命などの基本性能の更なる改善はもとより，簡便な塗布技術による大型パネルの作製，白色カラーフィルタ方式を利用した超高精細パネルの試作，プラスチック基板を用いたフレキシブルパネルの開発など，次世代のディスプレイ技術に繋がる研究開発が活発になりつつある．

有機EL素子の進展の経緯を辿ると，この25年間に基本性能を飛躍的に高めたいくつかのブレークスルー技術が開発されている．すなわち，電極からの効率的な電荷注入技術（～1990年頃）[1]，機能分離を目的とした薄膜積層構成による励起子生成効率の改善（～1995年頃）[2]，燐光材料の開発による量子収率の改善（～2000年頃）[3]，化学ドーピング法による低電圧化技術（～2005年頃）[4]，マルチユニット構造を用いた高効率白色発光（～2010年頃）[5][6]などであり，それらの結果として，有機EL素子の内部量子効率は100%に近い値にまで改善されている[7]．しかし，これらの素子においても，外部量子効率（EQE: External Quantum Efficiency）は20～30%の範囲に留まっており，その原因として，屈折率が1.7～1.9の有機薄膜から大気への光取出し効率が20～30%と低いことが挙げられる．

本解説では，今後，情報ディスプレイ技術の分野で活躍される技術者・大学生を対象として，有機ELの基本性能，動作原理などの基礎的かつ重要な項目を中心に説明する．特に，高効率化に向けた電気的・光学的要因について詳しく述べるとともに，更なる性能改善に向けた取組みを紹介する．

2．有機EL素子の基本構造と動作・発光過程

2.1　素子構造

有機EL素子における基本的な発光原理は次のようである．陰極から注入された電子と陽極から注入された正孔が発光層内の有機分子に捕獲されて束縛励起子を形成し，この励起子の輻射再結合による放射が外部発光として観察される．したがって，基本的な素子構成は有機発光層を電極で挟んだものであり，1987年に米国コダック社により発表された素子は，図1（a）に示すように，正孔輸送層であるDiamineと電子輸送性の発光層であるAlq_3（8-hydroxyquinoline aluminum）のヘテロ構造を採用し，陽極にITO膜，陰極にMg:Ag合金を用いている[1]．この構造により，電子および正孔の注入効率が高まり，図1（b）に示すように，発光層と正孔輸送層の間に形成されたp-n接合の界面近傍で励起子が再結合することで発光する．この考えを発展させ，発光層を電子輸送層と正孔輸送層で挟んだダブルヘテロ構造を形成することで，効率よく発光層内に励起子を閉じ込めることができる．発光のエネルギーは励起子のエネルギーに等しく，発光層に用いた有機材料の禁止帯幅であるLUMO（最低空準位）とHOMO（最高被占準位）の間のエネルギー差によって1次的に決定される．さらに，電極と電荷輸送層の間に電荷注入層を設けることで効率よく電荷注入が生じ，駆動電圧が低下する．図1（c）に示した5層構造が有機EL素子の基本となっている．

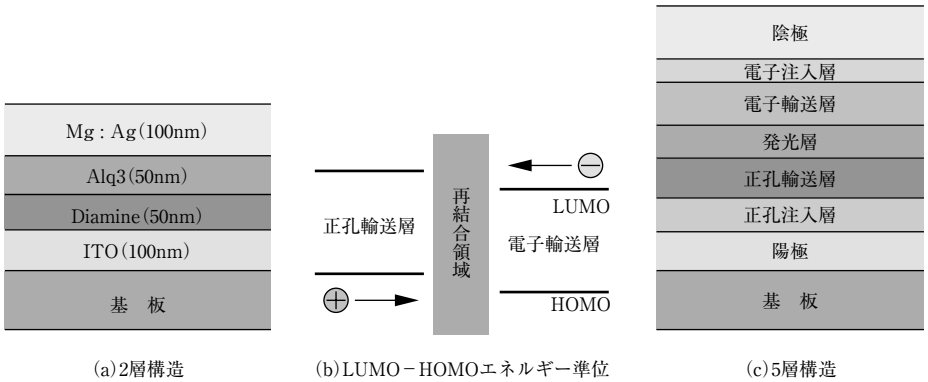
2.2　動作・発光過程

有機EL素子の動作・発光過程は，図2に示すように，①陰極および陽極からの電子および正孔の注入（電荷注入）過程，②発光層近傍における電子－正孔対生成による励起子生成過程，③励起子の輻射再結合過程，および④外部への光放出（光取出し）過程に分けられる．各過程の量子効率を，それぞれγ（電荷注入効率），η_{ex}（励起子生成効率），Φ_r（輻

† 金沢工業大学

"Fundamentals of Display Technologies (3): Introduction to Organic Light Emitting Display Devices" by Akiyoshi Mikami (Kanazawa Institute of Technology, Kanazawa)

映像情報メディア学会誌 Vol. 67, No. 9, pp. 800～805（2013）



(a)2層構造　(b)LUMO－HOMOエネルギー準位　(c)5層構造

図1　有機EL素子の基本構造とエネルギー準位

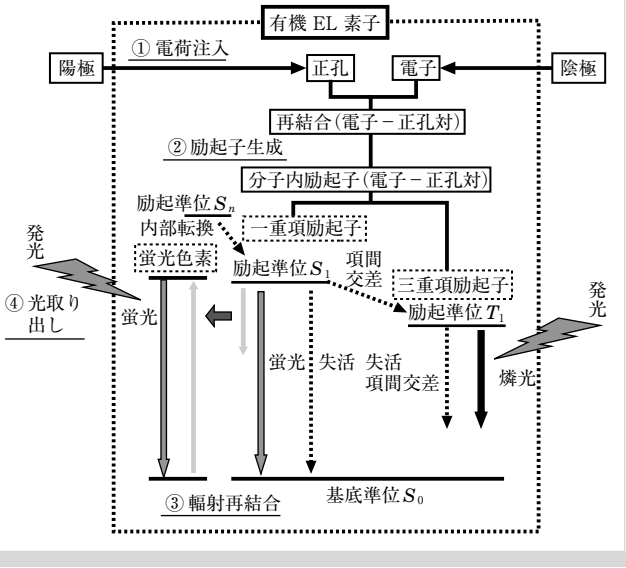


図2　有機EL素子の動作・発光過程

射再結合効率)およびη_{out}(光取出し効率)で表すと，発光の内部量子効率η_{int}および外部量子効率η_{ext}は次式で与えられる．

$$\eta_{ext}=\eta_{int}\ \ \eta_{out}=(\gamma\,\eta_{ex}\Phi_r)\,\eta_{out}$$

電荷注入効率γは，有機層のバルク伝導機構と電極からの電荷注入機構に依存し，低電界ではショットキー機構，高電界ではトンネル機構が支配的である．分子状結晶である有機層のバルク伝導機構は，原子配列の周期性に依存するバンド伝導ではなく，有機分子間に分布したLUMO準位を介してのホッピング伝導と空間電荷制限電流に支配される．したがって，電子および正孔の注入効率は電極材料の仕事関数に依存する．図1(a)に示した二層構造の陰極にMg:Ag合金膜が用いられているのは，仕事関数(～3.7eV)が低いことを利用している．さらに，発光層の両端にダブルヘテロ構造を導入することで注入された電荷が対向電極へ突き抜けることが抑制されるため，γはほぼ1に近い値が得られる．

有機分子に捕獲された電子－正孔対(束縛励起子)は，電子の軌道関数とスピン関数を考慮に入れたクーロン相互作用に基づいて，25%の確率で一重項励起子，75%の確率で三重項励起子を形成する．したがって，一重項励起子が支配的な蛍光分子では励起子生成効率は25%である．三重項状態のエネルギー準位は，分子軌道の空間的な重なりに依存する交換積分項の効果により一重項状態より低くなり，スピン禁制状態のために励起状態に存在する時間(励起寿命)が長く，このため熱失活する確率が高い．発光層母材に燐光材料を添加したゲスト－ホスト型の発光層を用いた場合，ホスト材料からデクスター機構(電子交換相互作用)により燐光材料へのエネルギー移動が生じ，その結果，三重項励起子からの発光が高い確率で生じる．三重項状態の失活過程は緩和時間の長い燐光と無輻射遷移の競合であり，スピン－軌道相互作用の強い状態では禁制が緩和され，発光確率が高くなる．イリジウム(Ir)，白金(Pt)などの原子量の大きい元素では一重項からの蛍光効率が低く，項間交差による一重項－三重項への転換が生じ易い(重原子効果)．三重項励起子の利用により，励起子生成効率η_{ex}は大きく改善されて75%が得られる．さらに，エネルギー項間交差により，一重項励起子の三重項への転換を考慮すると，η_{ex}は100%に近い値が得られる．

輻射再結合効率Φ_rは発光寿命をτ_r，非輻射再結合寿命をτ_{nr}とすれば，$\Phi_r=\tau_r/(\tau_r+\tau_{nr})$で表される．$\tau_{nr}$が大きくなる要因には結晶欠陥による失活過程が挙げられるが，有機材料では束縛エネルギーの大きなフレンケル型励起子が支配的なため，むしろ有機層や電極界面における励起子解離の影響が大きい．励起子の拡散長は，例えばAlq_3において10～20nmであり，膜厚を拡散長以上にするなど，励起子を発光層内に閉じ込める方法が効果的である．さらに，蛍光量子収率の高いゲスト材料を用いた場合，有機分子内に形成された一重項励起子のエネルギーはフェルスタ機構(双

極子間相互作用）によりゲストへ移動し，高い確率で発光する．移動確率は母体とドーパントの発光波長帯と吸収波長帯の重なり積分に依存し，ホスト－ゲスト材料の発光・吸収帯の最適化によりΦ_rはほぼ1に近くなる．以上のように，効率的な電荷注入条件，発光層への電荷の閉じ込め，燐光材料とエネルギー移動過程を利用することで，有機EL素子内部量子効率は100%に近い値が得られている[6]．

燐光材料を用いることで内部量子効率は飛躍的に高くなるが，励起三重項状態から基底状態への許容遷移が生じるにはIr，Ptなどの貴金属を用いた重原子効果が必要であり，その分子設計に制限がある．また，有機ELを高電流密度で駆動した場合，三重項間のエネルギー移動に起因する発光効率の低下が生じる（三重項－三重項消滅）などの課題がある．最近，蛍光材料の励起三重項状態から励起一重項状態へのアップコンバージョン過程を利用することにより，外部量子効率を一重項励起子の限界である5%より高くできる熱活性化型遅延蛍光材料が開発され，青色素子において最大で18%の値が報告されている[8]．

３．光取出し設計技術

有機ELは，1/4光学波長程度の積層薄膜で構成されており，図３に示すように，有機層，電極，基板などの境界面および内部で生じる多重反射，光干渉，光吸収などの光学現象に起因して，輝度，発光スペクトルおよびそれらの角度依存性が顕著に変動する．電子の波動性に基づく電子場の量子化は，光の回折限界以下である～10nm程度の空間領域で顕著に現れるが，光の波動性に基づく有機ELの光学現象は，誘電体多層膜，微小共振器構造，フォトニクス結晶などと同様，光学波長と比べて少し短い領域で生じる電磁場の量子化であり，特別な場合を除いて伝搬光の境界条件の範囲で記述できる．また，励起された有機分子の双極子放射場が金属電極と波長程度に近づく場合，近接場光を介した金属電極へのエネルギー移動が生じ，見かけ上は励起された有機分子の輻射再結合効率が低下する．すなわち，図3に示すように，有機分子からの放射エネルギーは波数ベクトル（$k=2\pi/\lambda$）の薄膜面内に平行な成分の小さい方から，伝搬波に基づく外部放射光，基板伝搬光，薄膜導波光，および非伝搬波（エバネッセント波）に起因する表面プラズモン共鳴，電子散乱および電子-正孔対生成などによりに散逸する．ここで，全放射エネルギーに対する外部放射エネルギーの比率は光取出し効率に相当する．一般に，外部放射光は光線光学に基づいて記述できる．一方，基板伝搬光は，ガラス材，保護層，吸湿層などを含めて厚さ数μｍ～数百μｍの厚膜を対象としており，非コーヒーレントな波動光学が用いられる．また，薄膜導波光は，コーヒーレントな波動光学，あるいは，フルベクトル計算を用いる電磁光学による解析が必要である．さらに，表面プラズモン共鳴や電子散乱・励起現象は，金属電子へのトンネルエネルギーを伴う近接場光学で扱われる．このように有機EL素子内部の光学現象は，光線光学から近接場光学までの広い波数範囲に及ぶことから，金属界面や有機薄膜内部で生じるナノサイズの光学現象を基板や封止材で生じるミクロサイズの光学特性とシームレスに繋ぐマルチスケール解析手法が提案されている[9]．

有機分子からの放射強度Pは，電界強度，電気双極子モーメントおよび角振動数の積に比例する．また，双極子の放射エネルギー密度の波数ベクトル依存性（パワースペクトルと呼ぶ）は，フーリエ展開を用いて電界Eを波数ベク

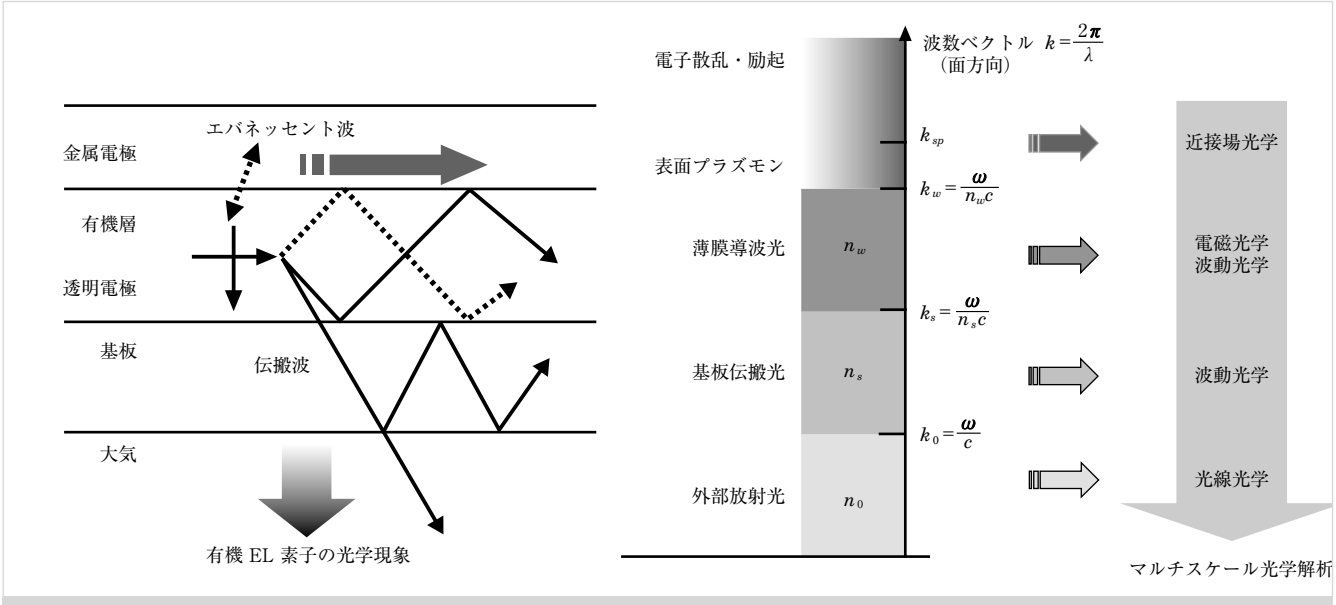


図３　有機EL素子の電気双極子放射に伴う各種の光学現象と光学理論の関係　（n:屈折率，λ:波長，c:光速，ω:振動数）

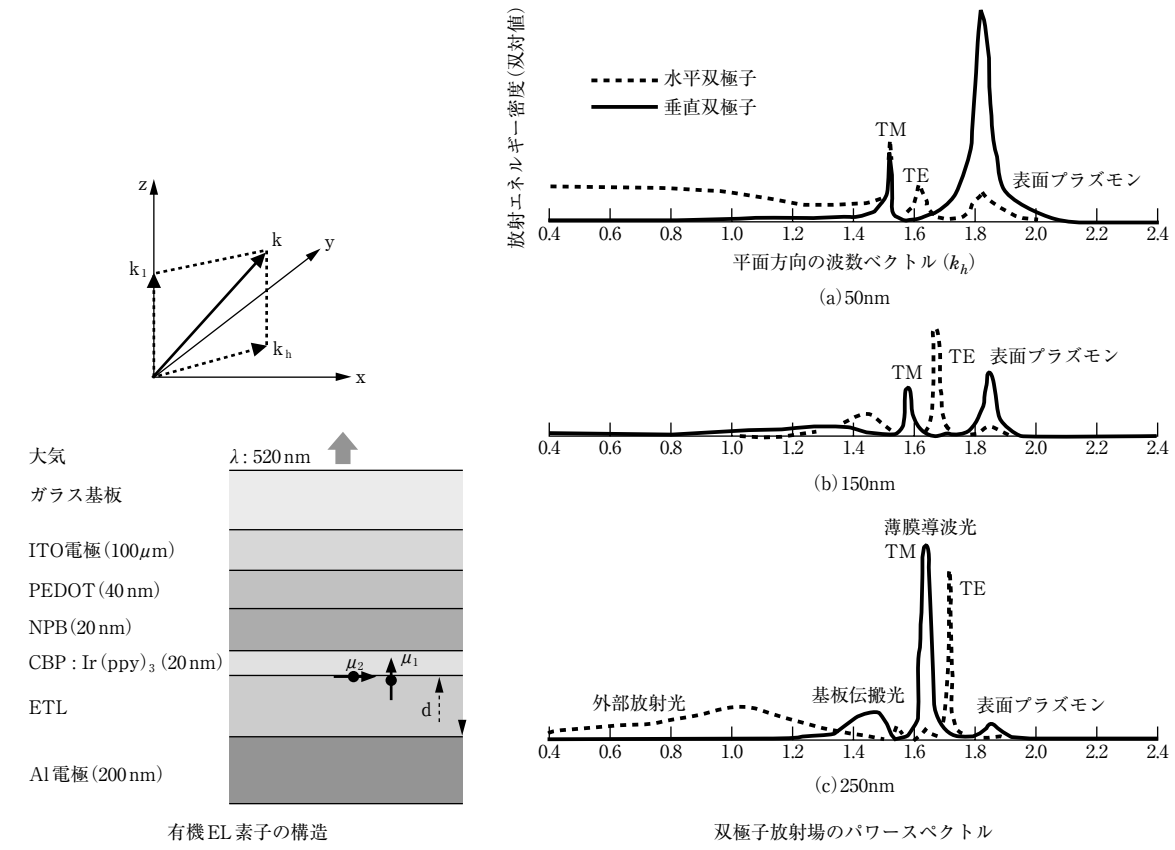


図4　水平および垂直配向の電気双極子における放射エネルギー密度の面内方向の波数ベクトル依存性（パワースペクトル）
パラメータは電気双極子－Al電極間距離D_{dm}であり，(a)50nm，(b)150nmおよび(c)250nmである．グラフの横軸は各層の屈折率に対応し，k_h<1は外部放射光，1<k_h<1.52は基板伝搬光，1.52<k_hは薄膜導波光および表面プラズモン損失の強度を示す．波源はCBPとETLの境界面に位置すると仮定している．

トルkの関数で表した平面波に分解し，フレネル理論に基づいて，金属層を含めた積層薄膜内の多重干渉効果を計算することで得られる．緑色燐光材料を用いた有機EL素子（ITO/PEDOT : PSS/NPB/CBP : Ir（ppy）$_3$/Bu-PBD/Al）*について，電子輸送層（Bu-PBD）の膜厚を50，150および250nmとしたときの水平双極子と垂直双極子のパワースペクトルを図4に示す．グラフの横軸は，面内方向の波数ベクトル（k_h）であり，大気中の波数で規格化しているため，各層の屈折率に読み替えることができる．なお，電気双極子は，NPB/CBP:Ir（ppy）$_3$界面に位置すると仮定しており，したがって，電子輸送層の膜厚はAl電極と双極子との距離D_{dm}に等しい．発光波長は520nmとし，各層の光学定数は実測値を用いた．

D_{dm}が50nmの場合，垂直双極子の放射強度は，k_h=1.82付近に強い表面プラズモンポール（SPP）が現れており，また，k_h=1.52付近には薄膜導波光に起因する弱いTM波が認められるが，外部放射光（k_h<1）はほとんど存在しない．一方，水平双極子では外部放射光および基板伝搬光（1<k_h<1.52）が支配的であり，その他k_h=1.62付近に薄膜導波光であるTE波が観察され，SPPは垂直双極子と比べて著しく弱い．すなわち，外部放射光は主として水平双極子からの伝搬光で構成されており，垂直双極子からの放射光のほとんどは表面プラズモンと結合している．図4(b)，図4(c)に見られるように，SPP強度はD_{dm}が大きくなるにつれて指数関数的に減少し，D_{dm}が250nmではほぼ消失する．それに代わって，薄膜導波光および基板伝搬光の強度が増大しており，非伝搬光から伝搬光への転換が生じている．

図5に外部放射光，基板伝搬光，薄膜導波光および表面プラズモン損失のエネルギー密度配分とD_{dm}との関係を，ランダム双極子および水平，垂直双極子の場合に分けて求めた結果を示す．外部放射光のエネルギー比（光取出し効率η_{out}）はD_{dm}に対して周期的に変動し，ランダム双極子ではD_{dm}が60nm付近で最大値25%を示す．基板伝搬光も同様な周期変動を示し，D_{dm}が60nmでは23%を占める．一方，薄膜導波光の配分比は，D_{dm}が60nm以下の領域では

＊　有機EL素子：Indium-tin-oxide（ITO）/Poly（3, 4）-ethylendioxy thiophene -polystyrenesulfonate（PEDOT:PSS）/Bis［(1-naphthyl) -N-phenyl］benzidine（NPB）/4, 4'-N, N'-dicarbazole-biphenyl doped with Ir（ppy）3（CBP:Ir（ppy）3）/2-（4-Biphenylyl）-5-（4-tert-butylphenyl-1, 3, 4-oxadiazole）（Bu-PBD）/Al.

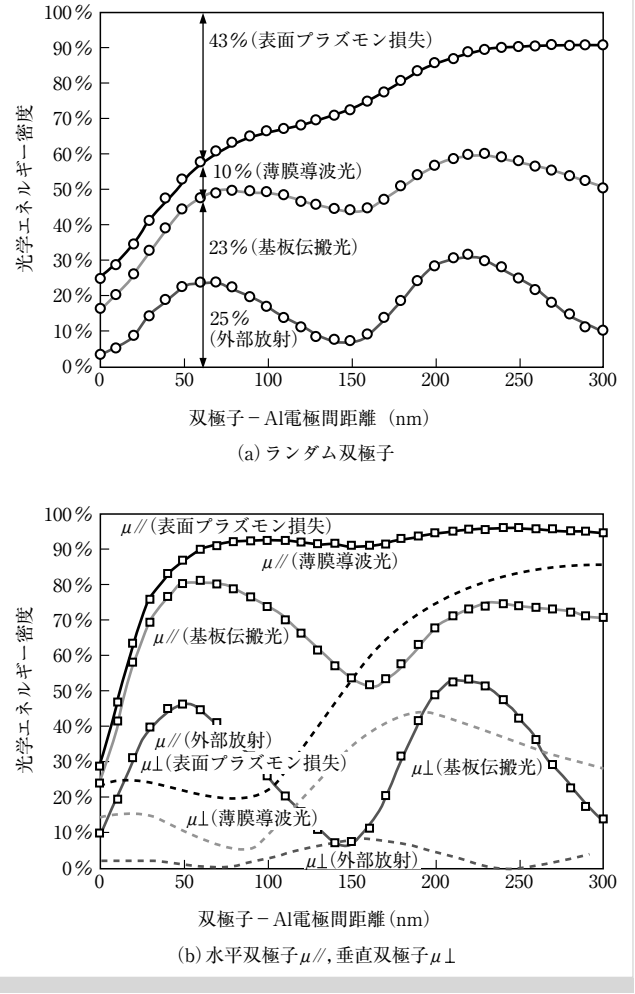


図５　光学エネルギー密度の双極子－Al電極間距離（D_{dm}）依存性
全放射エネルギーを100%として，平面波数ベクトルの小さい方から順に，外部放射光，基板伝搬光，薄膜導波光，表面プラズモン損失＋損失表面波の強度を積み重ねて描いた．(a)，(b)は双極子の配向方向が，ランダム，水平および垂直の場合に分けて示した．

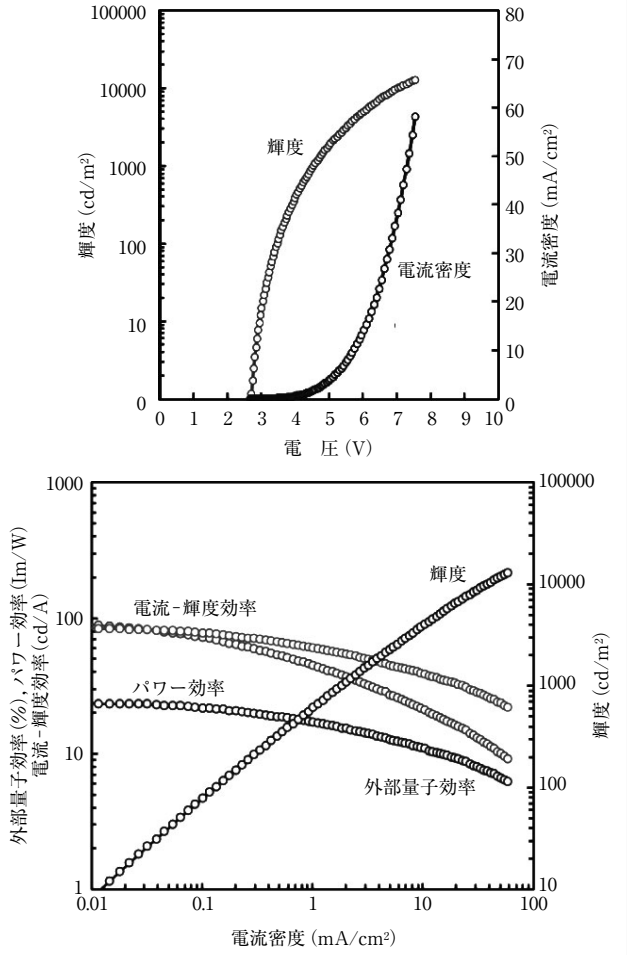


図６　燐光材料を用いた緑色有機EL素子の(a)輝度と電流密度の電圧依存性，(b)輝度，パワー効率，電流-輝度効率および外部量子効率の電流密度依存性

10%以下であり，D_{dm}がそれ以上では単調に増大する．これに対し前節で述べたように，D_{dm}が小さい領域では表面プラズモン損失が大きく，光学エネルギーの約1/2は金属電極との相互作用により消失している．しかし，表面プラズモン損失はD_{dm}の増大につれて低減し，主として薄膜導波光に転換している．これらの結果を踏まえ，図1(c)に示した緑色燐光有機EL素子を試作し，発光特性を測定した結果を図6に示す．発光のしきい値電圧2.7Vであり，輝度は電流密度にほぼ比例する．パワー効率の最大値は97lm/Wを示すが，電流密度の増大につれて三重項消滅により低下する．外部量子効率の最大値は23%であり，光学計算とほぼ合致している[10]．

光取出し効率の改善には，金属電極における表面プラズモン損失の低減，薄膜導波光の閉じ込め効果を制御できるマイクロキャビティ構造[11]の導入，発光が薄膜層から基板あるいは大気へ効率的に移動するための陽極構造の最適化などが重要である．また，光散乱効果，回折効果，フォトニック効果など，薄膜導波光の低減を目指した種々の光取出し技術が提案されている[9]．有機ELディスプレイへの応用では，こうした光学設計技術が単に発光効率の改善だけでなく，輝度の角度依存性，色再現性範囲，色調変動率などの表示要因に影響を与えるため，注意深い構造設計が行われている．

4．最近の有機ELディスプレイ技術

前章で述べた基本技術を踏まえて，用途に合わせた多種多様な有機ELディスプレイが開発されている．2007年11月，世界初の有機EL-TVがソニーから販売され，27型の試作パネルの展示とともに，有機ELが示す鮮やかな表示画像や忠実な色再現性は映像技術者を中心に広く認知されるようになった．2009年にはLG電子から15型の有機ELテレビが発売されたが，液晶に対するコストパーフォマンスの観点から一般に広く普及することはなかった．最近では，2011年にソニーから25型フルHDの有機ELディスプ

表1　有機ELディスプレイの基本仕様

対角サイズ・機種（開発元）	55型有機EL-TV（サムスン電子）	55型有機EL-TV（LGエレクトロニクス）
パネル方式	ボトム・エミッション	ボトム・エミッション
画素配置	RGB	RGBW
輝度（ピーク輝度）	150（600）cd/m^2	100（400）cd/m^2
コントラスト比	150,000 : 1	100,000 : 1
色再現性	NTSC比 124%	sRGB 120%
応答速度	10μs	20μs
発光層作製プロセス	RGB塗分方式	白色+カラーフィルタ方式
TFT用半導体材料	低温ポリシリコン（LTPS）	金属酸化物（IGZO）

レイが業務用モニタとして実用化されている．一方では，中小型モバイル向けの有機ELディスプレイがサムスン電子から販売されており，4.3型の携帯電話に始まり，現在では7.7型WQVGAが実用化され，サイズとともに解像度も大きく向上している．

高精細化技術では，2012年6月に，4K2Kの解像度をもつ13.5型のフレキシブル有機ELディスプレイを，シャープと半導体エネルギー研究所が共同開発した．白色発光とカラーフィルタを組合せたパネル構造を採用し，TFT技術に酸化物半導体を用いている．この解像度は30型クラスの8K4Kディスプレイに相当し，高精細のフレキシブル有機ELを用いた超薄型壁掛けテレビへの期待を抱かせる．

大画面化技術については，2012年1月の米国で開催されたCES（Consumer Electronics Show）において，55型フルHD仕様の有機ELテレビがサムスン電子とLGエレクトロニクスの2社から同時に発表された．両パネルの基本仕様は**表1**に示すように，パネル方式は，いずれも基板側から発光を取り出すボトム・エミッション方式を採用している．発光層の作製プロセスは，金属マスクを用いたRGB塗分け蒸着あるいは白色発光層とカラーフィルタの組合せであり，前者は低消費電力および長寿命化に有利であり，後者は作製プロセスの簡便さと高解像度に特徴がある．また，RGBW方式を採用することで発光効率を改善している．TFT用半導体材料は，低温ポリシリコン（LTPS）あるいはアモルファス金属酸化物IGZO（In-Ga-Zn-O）が用いられている．前者はキャリヤ移動度が大きいために高精細パネルにも充分な駆動能力を発揮できるものの，基板の大型化や製造コストに懸念がある．後者については，透明TFTであるためにボトム・エミッション構造において大きな開口率が得られるとともに，製造歩留りが高い．しかし，安定に得られる移動度が10～20cm^2/VsとLTPSに比べて小さいため，今後の大型高精細化への対応に不安がある．いずれにせよ，両社のパネルは将来の大型有機ELディスプレイ開発に向けた主要な技術を採用しており，今後の作製技術を予想する上で興味深い．

5．むすび

本稿では，有機EL素子の基本構造，動作・発光機構，高効率化に重要な要因を示し，最近の情報ディスプレイへの応用を紹介した．今後の技術トレンドとして，大画面化技術，4K2K対応の高精細化技術，塗布技術やプラスチック基板を用いたフレキシブル化技術が注目されており，次世代の大画面テレビおよびモバイル機器への応用として有機ELディスプレイは常にその中心的な存在になるものと予想される．このためには，発光効率の改善と低コストプロセスの開発が主要な技術課題であり，フレキシブルディスプレイや透明ディスプレイを利用した新たな用途開発も必要になる．有機EL素子は省エネルギー，省マテリアル，省スペースに適したソフトデバイスである．その実現に向けて，産官学が連携した技術開発が期待される．

（2013年6月3日受付）

〔文　献〕

1）C.W.Tang and S.A. VanSlyke: "Organic electroluminescent diodes", Appl. Phys. Lett., **51**, pp.913-915（1987）
2）J.C.Scott, S. Karg and S.A. Carter: "Bipolar charge and current distributions in organic kight-emitting diodes", J. Appl. Phys., **82**, pp.1454-1460（1997）
3）M.A. Baldo, S. Lamansky, P.E. Burrows, M.E. Thompson and S.R. Forrest: "Very high-efficiency green organic light-emitting devices based on electrophosphorescence", Appl. Phys. Lett., **75**, pp.4-6（1999）
4）A. Werner, M. Burghart, S. Murano, O. Schneider, T. Stubinger, M. Limmert and J.B. Nimoth: "White OLED Structures Using Molecularly Doped Charge Transport Layers", Digest of Tech. Paper, SID'06, 17.2, pp.1099-1102, San Francisco（2006）
5）T. Komoda, K. Yamae, V. Kittichungchit, H. Tsuji and N. Ide: "Extremely High Performance White OLEDs for Lighting", Digest of Tech. Paper, SID'12, **45**, 2, pp.610-613, Boston（2012）
6）J.J.Brown, B.W.D'Andrade, J. Esler, C. Lin, V. Adamovich, S. Xia, M.S. Weaver and R. Kwong: "102 lm/W White Phosphorescent OLED", Proc. of IDW'08, OLED1-4L, pp.143-146（2008）
7）M. Hack, M. Lu, R. Kwong, M.S. Weaver, J.J. Brown, J.A. Nichol and T.N. Jackson: "High-efficiency phosphorescent OLED technology ", Journal of Society for Information Display, **11**, 2, pp.297-301（2003）
8）H. Uoyama, K. Goushi, K. Shizu and C. Adachi: "Highly efficient organic light-emitting diodes from delayed fluorescence", Nature, **492**, pp.234-238（2012）
9）三上明義：“有機EL素子の光学解析技術と高効率化手法”，応用物理，**80**，4，pp.277-283（2011）
10）A. Mikami and T. Koyanagi: "High Efficiency 200-lm/W Green light Emitting Organic Devices Prepared on High-Index of Refraction Substrate", Digest of Technical Paper, SID'09, OLED2-60.4L, pp.907-910（2009）
11）V. Bulovic, V.B. Khalfin, G. Gu, P.E. Burrows, D.Z. Grrbuzov and S.R. Forrest: "Weak micro-cavity effects in organic light-emitting devices", Phys. Rev., **58**, 3730-3740（1998）

三上　明義（みかみ　あきよし）　1985年，大阪市立大学大学院後期博士課程修了．同年，シャープ（株）入社．中央研究所，液晶研究所主任研究員を経て，1999年，金沢工業大学教授に就任．主に有機EL素子に関する研究に従事．工学博士．

電子ペーパーの基礎

正会員 面谷　信†

1．まえがき

一般にディスプレイ技術の目標としては，カラー動画を鮮明に再現することが重視され，モノクロ静止画としての文書表示など，カラー動画性能追求のついでにできてしまうことと思われがちである．しかし，これは正しい認識であろうか？ われわれは論文をじっくり読んだり，いろいろな参照書類を基に文書作成を行う際に，文書をわざわざ印刷して読みたくなる傾向を持つ．このことを振り返ってみると，文書表示ツールとしてのディスプレイ装置は，読みやすさや扱いやすさの点で，紙を凌駕するものとはなっていないと認識せざるを得ない．

そもそもディスプレイ装置の用途としては，①映画などを「眺める」用途，②文書等を「読む」用途，の二つを独立に意識し，各々の用途において機能・性能や見やすさ・疲れにくさを目指す必要があると考えられる．これに対しテレビ用途を強く意識して進められてきたディスプレイ技術の発達過程において，前記②の文書表示用途に対する性能・機能追求は，相対的におろそかにされてきたと考えられる．電子ペーパーの概念は，おろそかにされてきた②の文書表示用途に対する性能・機能やユーザインタフェースの達成度・満足度を高めようとする方向性に対応するものである．そのような電子ペーパー技術の成果を生かした電子書籍端末は，米国において年間販売1,000万台を越える顕著な普及ペースを示し，米国ではほとんどの新刊書が電子書籍端末で読める状況にある．

ところで，紙から電子への移行には二つの構成要素があり，一つは情報保存に紙ではなく電子記憶媒体を用いること，他方は情報表示に紙ではなく電子ディスプレイを用いることである．情報保存に電子記憶媒体を用いることについては，その収容スペース効率を高める継続的努力により順調に電子化メリットを増加させてきた．一方で情報表示に電子ディスプレイを用いることについては，コンピュータ出力を紙ではなくCRT画面に表示することから始まった．そして，液晶技術の進化により，より薄型軽量の装置に大画面表示が鮮明に可能となる方向性で進化を遂げてきた．しかし，情報保存に電子記憶媒体を用いることが歓迎されることに較べると，情報表示に電子ディスプレイを用いることは，万人に歓迎されているとは言えない状況がある．これはディスプレイを見続けるのは目に良くないとか，戸外や移動中には紙の方が使いやすいという点で，紙がディスプレイに勝る部分が認識されている結果と言えるだろう．

電子ペーパー技術は，紙のような反射媒体を用いることにより周囲照度に連動した画面の明るさを提供し，また薄型軽量の可搬媒体の実現により，紙において歓迎されている属性を電子ディスプレイ上に一部実現するものである[1)～3)]．このような属性が奏功して，冒頭に述べた「書籍を電子表示媒体で読む」傾向の加速を大いに促進しつつあるということができよう．

本稿では，そのような電子ペーパー技術の発端や開発・応用動向を紹介しつつ，改めて電子化のもたらすメリットを分析的に整理してみたい．

2．電子ペーパーとは何か

電子ペーパーという言葉は実はいろいろな使い方をされており，その定義範囲も使う人によって異なるような側面を持つ．図1は電子ペーパーを概念的に捉えた場合の説明図であり，紙とディスプレイのいいとこ取りをした理想電子媒体を目指す概念として表現することができる．一方で，表1は電子ペーパーを表示技術の分類用語として捉えた場合の整理図であり，表1の中でも定義範囲に多様性がある

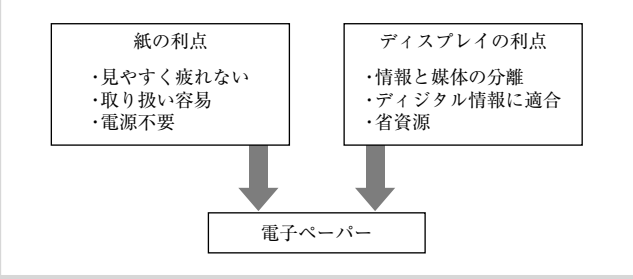


図1　電子ペーパーのコンセプト

† 東海大学　工学部光・画像工学科
"Fundamentals of Display Technologies (4); Fundamentals of Electronic Paper" by Makoto Omodani (Tokai Univercity, Hiratsuka)

表１　電子ペーパーの定義範囲の多様性

概念的名称	広義の電子ペーパ概念（広義）			
形　状	薄型・軽量　～フレキシブル			
表示技術	反射型表示技術			発光型表示技術 （バックライト型を含む）
	・表示メモリー性あり		表示メモリー性なし	
	・サーマル ・光書込みコレステリック液晶	・電気泳動 ・粉体移動 ・コレステリック液晶 ・双安定型液晶 ・エレクトロクロミック	・MEMS（光干渉変調方式） ・エレクトロウェッティング ・ポリマネットワーク液晶	・有機EL ・バックライト付き液晶
駆動方式	表示体と駆動部が分離 （リライタブルペーパー）	表示体と駆動部が一体 （ペーパーライクディスプレイ）		
	狭義の電子ペーパー技術			

表２　電子ペーパーの候補技術（駆動手段と媒体変化の組合せ）

媒体／駆動	位置・形状変化					物理・化学変化
	粒子レベル		分子レベル		形状レベル	
	移動	回転	移動	回転		
電界	電気泳動[4)～7)]， 粉体移動[9)～11)]	ツイストボール[13)14)]		液晶[8)17)18)]	エレクトロ ウェッティング[20)]	エレクトロデポジション[21)]， エレクトロクロミズム[22)]
磁界	磁気泳動	磁気ツイストボール[15)16)]				
光				液晶[19)]		フォトクロミズム
熱	磁気感熱[12)]			液晶		感熱（ロイコ染料）型[23,24)] サーモクロミズム

ことに注意すべきである．すなわち，表示技術分類用語としての電子ペーパーは，狭義では反射型で望ましくは表示メモリー性があり無電力で表示継続が可能な表示技術を示して使われる場合が多い．一方，広義には薄型軽量で，望ましくは屈曲可能なディスプレイとして，発光型の表示技術を守備範囲に含んで使われることもある．特にマスコミ等では，広義の定義範囲で使われることも多い一方で電気泳動方式＝電子ペーパーのように書かれていることも多いので注意を要する．

図1に示したコンセプトとしての電子ペーパーは，ディスプレイ技術分野ではペーパーライクディスプレイとして，プリンタ技術分野ではリライタブルペーパーとして，各々の分野での理想目標として，古くより技術者の念頭に置かれてきた概念である．電子ペーパーという言葉は，その二つの目標概念の目指すものの共通点を抽出して，両分野の共通目標として提示し直した言葉ということができる．

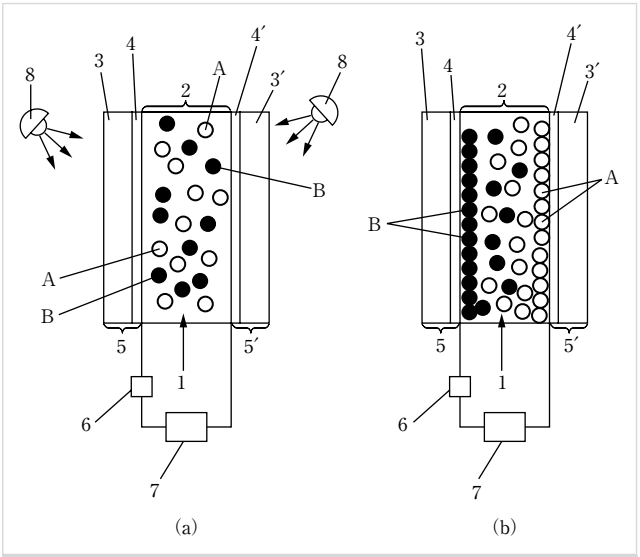


図２　電気泳動表示方式の基本特許
（特願昭44-031598（発明者：太田勲夫））

３．電子ペーパーの技術動向

本章では，電子ペーパーを前章で紹介した狭義の技術分類用語として捉えたときの開発動向について紹介する．照明環境に応じた画面明るさを提供し，薄型軽量で扱い易く壊れにくい媒体とするためには，反射型で表示メモリー性を有する方式が一般に有利である．表2は，反射型で無電力またはごく低電力で表示継続が可能な表示技術を，表示媒体の変化形態と駆動手段の組合せとして整理したものである．

表中のさまざまな表示技術の中で，現在，最も普及が進んでいるのは，電界を駆動力として粒子を移動させる電気泳動表示方式である．電気泳動表示方式の発明は，1960年代に松下電器の太田勲夫氏によるものであるが（図2），粒子

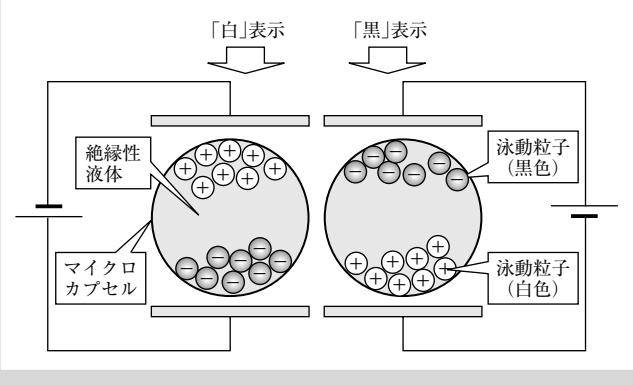


図3　マイクロカプセル型電気泳動表示の基本原理

表3　フレキシブル性のレベル分類

	達成レベル	実現メリット
↓難易度大	1)弾性あり	・薄く軽い ・落としても壊れない
	2)曲面形成可能	・曲面に表示可能
	3)曲げ戻し可能	・巻き取り可能 ・曲がる物に表示可能
	4)折り曲げ可能	・折り畳める

の凝集・沈殿の課題解決と生産性の向上についてマイクロカプセル化による解決策を示したのが，日本ではNOK（特願昭62-244679「電気泳動表示装置」：特許第2551783号），米国ではMITのメディアラボである．メディアラボはさらに図3のように，マイクロカプセル中で各々逆極性の白/黒粒子を移動させる工夫により実用性を高めた．メディアラボ発のベンチャー企業E Ink社は，この方式を2004年にソニーの電子書籍端末（リブリエ）に搭載の電気泳動表示パネルとして実用化した．この電子書籍端末自体の売れ行きは芳しくなかったが，その表示パネル技術は，アマゾン社の電子書籍端末（キンドル）等に生かされている．電気泳動表示方式は，白黒の文書表示端末としては実用的に支障ない技術レベルに達しつつあると考えられるが，一方で，カラー表示の鮮明化が課題であり，実用的なカラー表示装置の製品化が待たれている．

電気泳動表示方式が液体中で電界による微粒子の泳動を行わせる方式であるのに対し，空気中で微粒子を電界で飛翔させる粉体移動方式の開発も特に日本のメーカにより精力的に進められた．本方式は，棚札等への実用展開も進みつつあって期待されたが，事業撤退の経営判断（2012年5月）が発表され開発は中止された．

反射型・メモリー型の電子ペーパー技術として開発が進められている表示方式としては，他に双安定性のコレステリック液晶方式，エレクトロクロミック方式，およびリライタブルプリント方式としてのロイコ染料利用感熱方式などがある．これらの多種の方式は，用途によって適材適所の使い分けも想定されるものであり，今後の開発進展や製品化に期待したい．

ちなみに電子ペーパーには，紙からの連想により紙並みのフレキシブル性が期待されることが多い．フレキシブル性については，何を実現するためのフレキシブル性かという観点から，表3に示すような複数の到達レベルに分け，製品毎に真に必要な到達レベルまでを冷静に狙うことが必要と考えられる．読みやすい媒体の実現を電子ペーパー技術の最大の目的と考えるならば，フレキシブルであることは必須ではない．一方，例えば第1段階のフレキシブル性である「弾性あり」を非ガラス材料で実現することで，軽く，割れにくい電子ペーパーを実現することは，紙のように気楽に取り扱える媒体になるという点でその意義は大きいと考えられる．

4．電子ペーパーの応用動向と展望

4.1　電子書籍

電子ペーパー技術は，2004年のソニーの電子書籍端末発売をきっかけに，その後米国でのアマゾン社キンドルの好調な販売へと続いた．アップル社はアマゾン社の成功を見たことも恐らく誘因となって，電子書籍端末としても使えるiPad（液晶方式）の発売へと進んだと考えられる．結局，電子書籍端末として，電気泳動表示方式のキンドルと液晶方式のiPadのどちらが優れどちらがよく使われるのかがよく問われる．例えば米国では本好きのインテリ層は，モノクロのキンドルを好む傾向があるとも言われ，電気泳動端末が一定のユーザ層を確保している．一方，日本国内では米国とは逆順にiPadがキンドルに先行して販売された経緯もあり，iPadをはじめとするカラー液晶タブレットの人気と販売数が圧倒的な現状にあって米国とは状況が異なる．日本では，電気泳動端末のユーザ増に貢献すると期待される電子書籍市場の発展が米国より立ち後れており，電子書籍コンテンツの整備が今後どのように加速されるかによって，読書専用機としての電気泳動端末の所有意義や普及度は大いに影響されると考えられる．

4.2　業務文書

オフィス文書の電子化は，ペーパーレスのオフィスのかけ声のもとで推進機運が続く割には遅々としていると言われ続けて来た．しかし最近になって，オフィスにおける複写機やプリンタ出力はついに減り始めたようである．一般にオフィスの電子化とは，表示に関しては紙に出力せず，すべて机上のディスプレイ上で読んで済ますことと考えら

れる．しかし，そのような働き方の結果として，効率，正確さ，思考作業の質等が低下することは本当にないのかという素朴かつ重大な疑問が残る．筆者は，文書の最終チェックや複雑な課題に対する落ち着いた思考が必要な際には，積極的に紙にプリントして作業を行うのが常であるが，そのような作業をすべてディスプレイ上で行うことは現時点で得策でないと考えると同時に，半日も経たずに廃棄してしまう紙の量の多さに抵抗感も感じている．筆者の意見としては，このような「紙でなくては」という用途に紙感覚で使用できる電子表示媒体があれば，大いに歓迎される可能性があるのではないかと考えている．この「紙感覚で使用できる電子表示媒体」としては，薄型軽量で机上に紙のように水平に置いて使用でき，しかも反射型で紙に近い表示感を与える電子ペーパー端末が有力候補としてあげられる．

図4には，ソニーから試作展示（2013年5月）された薄型軽量の電子ペーパー端末試作品（A4表示，360g）を示す．例えば，このようなディスプレイを机上に常備し，これにプリンタ出力感覚で一時表示し必要作業に供するという働き方は，ペーパーレスでありながら，懸念される効率や正確性低下のデメリットを生じない可能性を大いに有すると期待できる．

ただし，未来のオフィスはどうあるべきかという根本命題は，紙からディスプレイ表示への単なる媒体置き換えで済む課題ではない．オフィスは，そこで紙の書類を前提としない業務の流れはどうあるべきかという根本部分からの考察や環境整備が伴って，はじめて効果的な電子化が進む応用分野として考えられる．そのような観点では，システム構築を含む総合的な取組みが必要な，技術者にとって手強くかつ手応えのある応用分野とも言えよう．

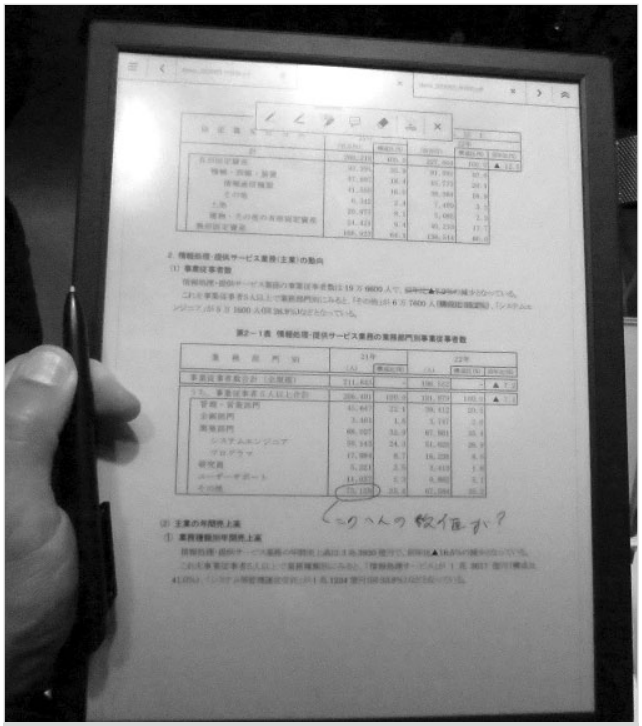


図４　A4判の電子ペーパー端末

4.3　教科書

教科書は媒体電子化の対象として話題性も市場も大きいが，慎重な進め方が必要とされる分野でもある．電子化によって省資源や持ち運びの快適性が実現されたとしても，肝心な学習効果が僅かでも減少し，例えば，学力測定の結果が低下するような事態は許容されない．従来の教科書の内容を単純に電子書籍媒体上に掲載しただけの電子教科書では，学習効果向上要素は望めず，結果的には，媒体への不慣れや僅かにでも残った扱いにくさ等による学力低下がむしろ懸念される．教科書の電子化においては，電子化によってはじめて可能になるプラスアルファの要素を掲載・搭載することで，積極的な学力向上を狙うべきであろう．例えば，発音機能付き英語教科書，実験動画付き理科教科書，名曲試聴機能付き音楽教科書等々，電子版ならではの付加機能はいろいろと工夫可能である．

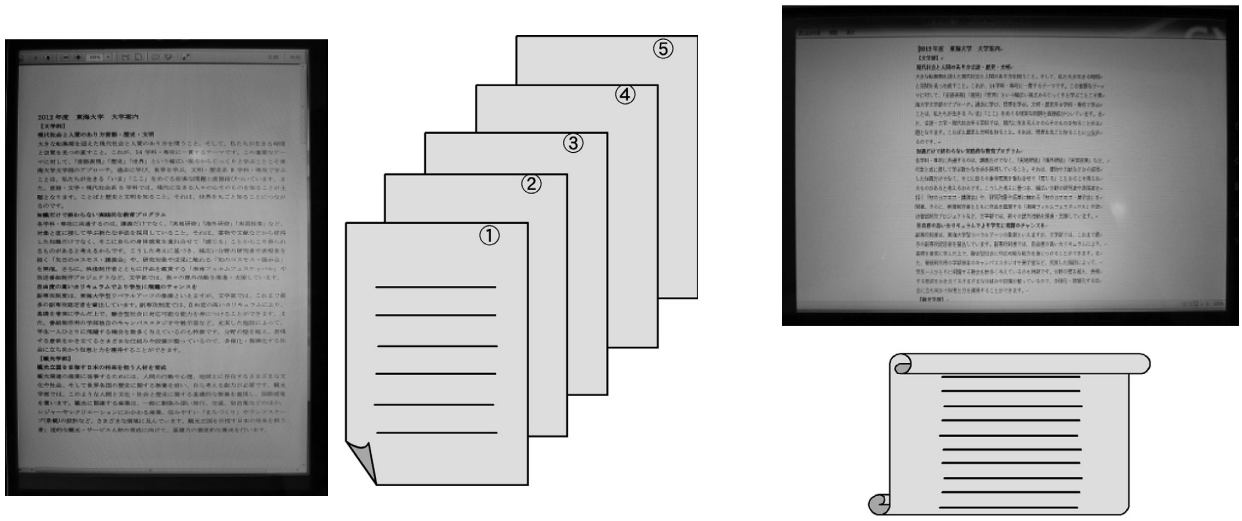
予習・復習にも便利なプログラム学習機能等，高機能の自習機能を持たせることも可能である．そのとき，ではそもそも学校とは？ 教室とは？ 授業とは？ 先生とは？ と現教育システムのあり方を再考すべき必要性に気づく．高機能な電子教科書の使用を前提とするとき，教育システム自体の役割分担を見直し，最適化し直すことが教育効果等の面で望まれることである．すなわち，電子教科書の検討は教育システム自体の再検討と併せて進めるべき大きな課題であり，真摯かつ慎重に取組む必要がある．

5．読みやすさとは？

ディスプレイや紙における読みやすさを考える際，一般的には画面コントラストや解像度等を想起しがちである．しかし，実は読みやすさとはさまざまな要素で構成されるものであり，前記のような画面の物理特性は，読みやすさの構成要素として基本ではあるが，一部に過ぎない．しかも，読む対象物の種類により，読みやすさを構成する要素の優先順位は大きく異なる．表4は，読みやすさの構成要素をごく大まかに整理したものである．読む対象の種類によって，まず読む目的が異なり，したがって読みやすいと

表４　読みやすさの要因

分　類	読む目的	読みやすさの要因
小説類	楽しむ	没頭しやすい 疲れない
教科書	吸収	理解し易い 覚えやすい
論文	理解	理解しやすい
書類	処理	理解しやすい
原稿	推敲	間違いに気づき易い，修正し易い



(a) ページ全体表示条件（ページめくり形式）　(b) 部分表示条件（スクロール形式）

図5　比較した2種類の表示条件

言われるための優先要件も異なることに注目すべきである．この表からは，ディスプレイの解像度やコントラストが仮に紙に劣らない到達度にあったとしても，読みやすさに関しては，本表で示す要件の前提要件（低次要因）を満足したに過ぎないことが示唆される．具体的には，ページ一覧性，複数ページ同時閲覧性や書込みの自由度，媒体の可搬性や自由保持性などの点で，現状の紙とディスプレイの間では違いが大きく，そのような高次要因が読みやすさの実感を大きく支配していると考えられる．読みやすさの重要要件としての疲労の大小も，単に解像度やコントラスト等画面の物理特性のみではなく，前記の多様な要素から大いに影響を受けると考えなくてはならない．

ここでは，このような視点に基づく研究の例として，画面表示形式が作業性に与える影響について，定量評価を試みた実験例について紹介する[25]．

図5に示すように，同じA4サイズの液晶ディスプレイを用い，図5 (a) 画面を縦向きにして文書をページ単位で読む条件（ページめくり形式）と，図5 (b) 横向きにしてページ区切りなしの文書全体をスクロールさせて文書の部分表示で読む条件（スクロール形式）の二つを用意した．作業課題としては，5ページ分の文書の間違い探し（間違い個数は未知で）を8人の被験者に行わせ，所要時間と間違い発見率を計測した．被験者毎に2条件の相対比を算出し平均した比較結果（図6，図7）を見ると，図5 (b) の「スクロール形式」の方で時間が約2割短縮され，正解率が約3割低下している．本結果の解釈として，スクロール形式での作業時間の短さが不充分な作業を示唆し，結果的として間違い発見率の低下を招いていると考えられる．スクロール形式では，読まなければならない文章の全体量把握が困難であり，残りどれだけ読む必要があるかの進行感も得られにくいことが，読み急ぎ傾向をもたらしていると考えることができる．

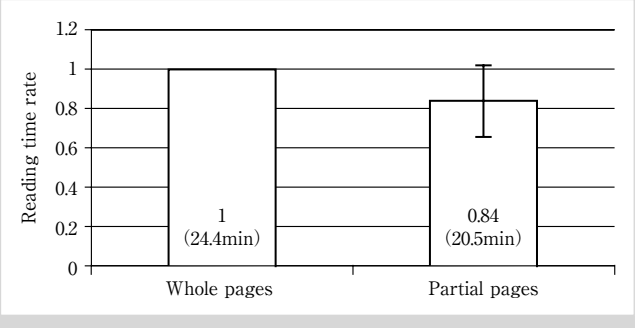


図6　作業時間（被験者平均）

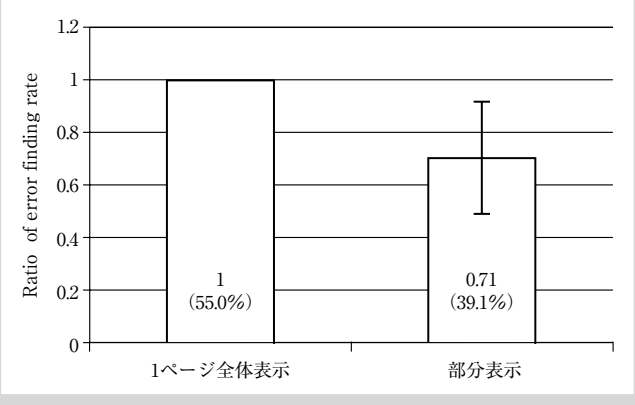


図7　間違い発見率（被験者平均）

実は，本実験の「ページめくり形式」は紙上作業を，「スクロール形式」は典型的なディスプレイ上作業条件を象徴

するものである．すなわち，本実験結果は日頃しばしば実感する「紙にプリントして作業した方が（じっくり作業し）間違いに気がつきやすい」感覚と対応している．

電気泳動表示方式などの電子ペーパー技術を利用した電子書籍端末等では，通常，前記の「ページめくり形式」が実現されており，少なくともその観点では紙並みの作業性が備えられているとも考えられる．このような作業性の実現は液晶方式のタブレット端末や，大画面ディスプレイでも可能なことであり，反射・メモリー型表示特有のメリットというわけではないが，読みやすさ実現を命題とする電子ペーパーの概念とその追求過程で得られつつある，ディスプレイ機能・性能追求の新たな価値観や切り口の産物ということもできよう．

6．む　す　び

紙から電子データへの動きを加速する技術要素としての電子ペーパー技術について，技術動向と応用動向を中心に述べると同時に，紙から電子への置き換えに関して見解を述べた[26]．

ディスプレイ技術は，歴史的には主にテレビ用技術として鮮明なカラー動画の実現を目標として進んで来たが，いよいよもう一つの有望な応用分野として，文書表示用媒体として印刷物にとって代わるという巨大マーケットを現実的な目標とすべき時期にある．これは歴史的スケールで言えば，15世紀のグーテンベルクによる活版印刷の実用化以来500年を経た紙文化が，いよいよ革命的媒体交代の時期にさしかかりつつあると考えられることと対応する．

グーテンベルク以来の印刷本への愛着は一般に強いが，グーテンベルク以前の筆写本から印刷本への移行期にも，筆写物の味わいをよしとする旧手段へのこだわりや愛着はあったに違いない．印刷活字はコンテンツ伝達の便利な一手段と割り切って考えれば，それを上回る新手段が登場したとき，ノスタルジーに浸り続けているわけにもいくまい．印刷物の担ってきた情報保存・情報輸送・情報表示のすべての機能について，近年の電子技術は，より高効率・快適な手段を提供できる段階に達しつつある．ただし，長年にわたって印刷物が積み上げ洗練させてきた読みやすさや使いやすさに電子媒体が追いつき凌駕するためには，その性能・機能・デザインの高度化について，テレビ用技術としての価値観や評価軸からの脱却も含めた格別の開発努力が必要なことは言うまでもない．

電子ペーパーというキーワードは，ある特定の表示技術分類として捉えるよりは，このように印刷物の置き換えを狙うディスプレイ技術の目標ゴールの概念として捉える方が，その意義を大きく明確に認識しやすいかもしれない．

（2013年7月8日受付）

〔文　献〕

1）面谷　信：“ディジタルペーパーのコンセプトと動向”，日本画像学会誌，128，pp.115-121（1999）
2）面谷　信：“紙への挑戦電子ペーパー”，森北出版（2003）
3）M. Omodani: "What is Electronic Paper? the Expectations", SID 2004 Digest, pp.128-131（2004）
4）太田勲夫：特公昭50-15115号公報
5）B. Comiskey, J.D. Albert, J. Jacobson: "Electrophoretic Ink: A Printable Display Material", SID 97 Digest, pp.75-76（1997）
6）E. Nakamura et al.: "Development of Electrophoretic Display Using Microcapsulated Suspension", SID 98 Digest, pp.1014-1017（1998）
7）貴志悦郎：“In-Plane型電気泳動ディスプレイ”，日本画像学会2000年度第2回技術研究会，pp.11-18（2000）
8）橋本清文：“コレステリック液晶を用いた電子ペーパー技術”，日本化学会第85春季年会講演予稿集，P597（2005）
9）Gug-Rae Jo, et al.: "New toner display device Using conductive toner and charge transport layer", is & T's NIP 15 Conference, pp.590-593（1999）
10）重廣清，山口善郎，町田義則，酒巻元彦，松永健：“絶縁性粒子を用いた摩擦耐電型トナーディスプレイ”，Japan Hardcopy 2001論文集，pp. 135-138（2001）
11）田沼逸夫：“電子粉流体を用いた電子ペーパー（QR-LPD）”，日本画像学会2004年度第3回技術研究会論文集，pp.20-23（2005）
12）真島修：“磁気感熱式電子ペーパー「サーモマグ」”，日本画像学会第2回フロンティアセミナー予稿集，pp.61-66（2004）
13）N.K. Sheridon: "The Gyricon as an Electric Paper Medium", Japan Hardcopy '98, pp.83-86（1998）
14）S. Maeda, H. Sawamoto, H. Kato, S. Hayashi, K. Gocho and M. Omodani: "Characterization of "Peas in a Pod", a Novel Idea for Electronic Paper", Proc. IDW '02, pp.1353-1356（2002）
15）代田友和，小鍛治徳雄：“ツイストボール磁気ディスプレイの検討”，Japan Hardcopy 2001論文集，pp. 127-130（2001）
16）片桐健男，吉川宏和，面谷信，大谷紀昭，河野研二：“磁性体塗布球を用いた磁気ツイストボール表示方式の検討”，Japan Hardcopy 2001 Fall Meeting論文集，pp. 44-47（2001）
17）藤沢宣：“ポリマネットワーク型液晶（PNLCD）とペーパーライクディスプレイ”，日本画像学会第1回フロンティアセミナー予稿集，pp.43-47（2002）
18）面谷信：“液晶を用いたディジタルペーパー”，液晶，5，1，pp.42-49（2001）
19）有沢宏ほか：“コレステリック液晶を用いた電子ペーパー －有機感光体による光画像書込み－”，日本画像学会Japan Hardcopy 2000論文集，pp.89-92（2000）
20）R. A. Hays et al.: "A High Brightness Colour 160 PPI Reflective Display Technology Based on Electrowetting", SID 04 Digest, pp.1412-1415（2004）
21）K. Shinozaki: "Electrodeposition Device for Paper-Like Displays", SID 2002 Digest, pp.39-41（2002）
22）小林範久：“無機・有機化合物のエレクトロミズムと書換型記録材料としての新展開”，日本画像学会誌，38，2，pp.122-127（1999）
23）堀田吉彦：“リライタブルマーキング技術の最近の動向”，電子写真学会誌，35，3，pp.148-154（1996）
24）筒井恭治：“長鎖分子がロイコ色素の発色消色を制御するリライタブルペーパーの開発”，応用物理，73，pp.1437-1441（2004）
25）稲田絢子，面谷信：“ディスプレイ上での文書処理作業の速度および正確性の評価”，2013年度画像電子学会第41回年次大会予稿集（2013）R6-4
26）日本画像学会編：電子ペーパー，東京電機大学出版（2008）

面谷　信（おもだに　まこと）　1980年，東北大学大学院機械工学第二専攻修士課程修了．同年，日本電信電話公社（現NTT）入社．横須賀電気通信研究所勤務．1997年，東海大学工学部光学工学科助教授．現在同大学光・画像工学科教授．電子ペーパーの研究に従事．工学博士（東京大学）．正会員．

立体ディスプレイの基礎

正会員 高木康博†

1．まえがき

最近では，映画館で臨場感ある立体映像を気軽に楽しめるようになり，家庭用テレビへの立体表示機能の搭載も進んでいる．これらは，立体視のために専用のメガネの装着を必要とする．立体メガネの使用を必要としない裸眼立体表示は，携帯型ゲーム機やディジタルカメラなどで用いられる小画面ディスプレイで実用化されている．今後は，大画面の裸眼立体ディスプレイの実用化が進むと考えられる．

本稿では，立体ディスプレイの基礎的な表示原理について説明する．最初に人間の立体視について説明した後，現在実用化されているメガネ式立体ディスプレイと2眼式の裸眼立体ディスプレイについて説明する．つぎに，今後実用化が進むと考えられる多眼式立体表示について説明する．最後に，将来の立体表示方式について述べる．

2．立体視

立体表示は，人間の立体視機能を利用して実現される．人間が立体を知覚する要因[1)]には，生理的要因と心理的要因がある．

生理的要因を図1に示す．輻輳は，一点を注視したときの左右の目の回転角から3角測量の原理で奥行きを知覚する．両眼視差は，左右の目の網膜像の対応点の水平ずれ量にもとづく奥行き知覚である．調節は，目のピント合わせによる奥行き知覚である．運動視差は，視点移動に伴う網膜像の変化にもとに奥行きを知覚する．輻輳と両眼視差の違いがわかりにくいが，輻輳は注視点までの絶対距離を知覚するのに対して，両眼視差は注視点からの相対距離を知覚する．生理的要因は人間が意識しなくても機能する．そのため，立体ディスプレイの研究開発では，これらの要因について考慮する必要がある点が，2次元ディスプレイの研究開発との違いである．

心理的要因としてはさまざまな要因が知られているが，代表的なものに，相対的大きさ，パースペクティブ（遠近画法的効果），遮蔽，陰影，テクスチャ勾配，ぼけ，大気透視などがある．心理的要因は，人間が経験的に獲得した後天的な立体知覚で，2次元映像に対しても機能する．高精細な2次元画像を見たときに感じる立体感は，心理的要因によるものである．心理的要因を効果的に利用することで優れたコンテンツ作成が可能になる．

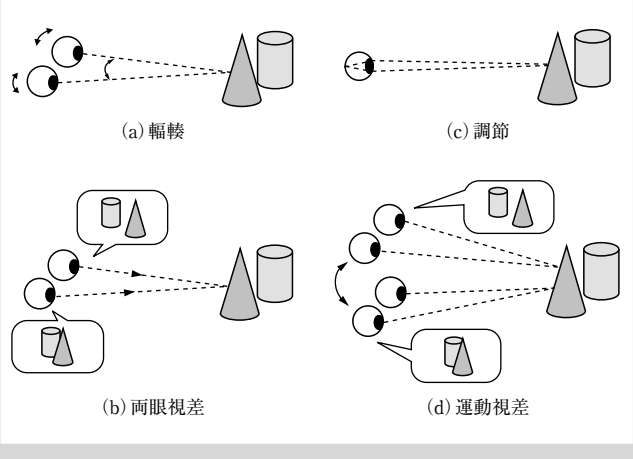


図1　立体視の生理的要因

3．メガネ式立体表示

人間は左右の目に映る画像の差をもとに，立体視の生理的要因により立体を知覚する．そこで，左右の目に対応した視差をもつ視差画像を表示することで立体表示を実現できる．これが2眼式立体表示であり，最も基本的な立体表示方式である．この場合，輻輳と両眼視差で立体視することになる．

2眼式立体表示では，左右の画像を同一のディスプレイ画面に表示して，これらを左右の目に分離して見せる必要がある．そのために，図2(a)に示すように，光学フィルタを取り付けた立体メガネを用いるのがメガネ式立体表示である．立体テレビでは，光学フィルタとして偏光フィルタ（偏光子）や液晶シャッタが用いられる．

偏光メガネを用いる方法では，ディスプレイ画面に走査

† 東京農工大学　大学院工学研究院
"Fundamentals of Display Technologies (5); Basics of Three-dimensional Displays" by Yasuhiro Takaki (Institute of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology, Tokyo)

映像情報メディア学会誌 Vol. 67, No. 11, pp. 966～971 (2013)

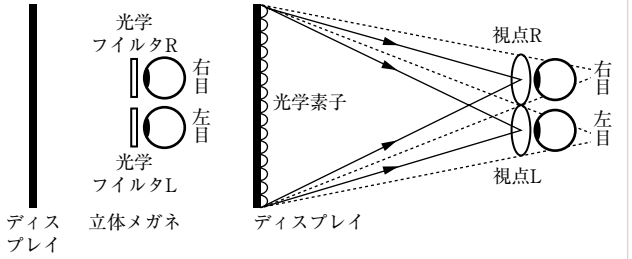


図2　2眼式立体表示

線毎に回転方向が逆の円偏光を与える波長板を張り付け，奇数と偶数の走査線で左右の画像を表示する．左右に対応する円偏光のみを通過する偏光子を取り付けた偏光メガネをかけて観察する．偏光メガネは安価であるが，立体表示の垂直解像度がもともとのディスプレイの半分に減少する．以前は，円偏光ではなく，直交する直線偏光が利用されたが，この場合は，頭の傾きにより左右の画像間にクロストークが生じる問題があった．

液晶シャッタメガネを用いる方式では，ディスプレイを高速駆動して，左右の映像を交互に時分割表示する．これに同期して，メガネに取り付けた左右の液晶シャッタを交互に開閉する．液晶シャッタメガネは高価であるが，立体表示の解像度はもともとのディスプレイと等しい．プラズマディスプレイのような面順次表示のディスプレイでは，表示画像全体が一度に切替わるため，左右の画像を2倍速で表示する．液晶ディスプレイのような線順次表示のディスプレイでは，表示画像が走査線単位で上下方向に順番に切替わるため，4倍速表示して左右の画像を2回続けて表示することで，左右の画像を分離して表示することができる．

4．裸眼立体表示

メガネ式立体表示では，光学フィルタで左右の画像を容易に分離することができる．光学フィルタを用いることのできない裸眼立体表示では，右目と左目を置いて見る視点を空間に設定することで左右の画像を分離する．図2(b)に示すように，それぞれの視点に集光する光線で，対応する右目用と左目用の画像を表示する．視点位置に目を置くと，対応する画像が見える．このように，視点を用いることで裸眼立体表示が実現できる．ただし，メガネの着用は不要になるが，観察位置に制限が生じる．

裸眼立体表示を実現する視点の形成方法にはさまざまな方法が存在する[2)]．フラットパネルディスプレイとレンチキュラレンズを組合せたレンチキュラ型の構成方法を図3に示す．レンチキュラレンズとは，1次元のレンズであるシリンドリカルレンズを水平方向に並べたものである．レンズ中心軸からピクセルまでの水平距離で，ピクセルから

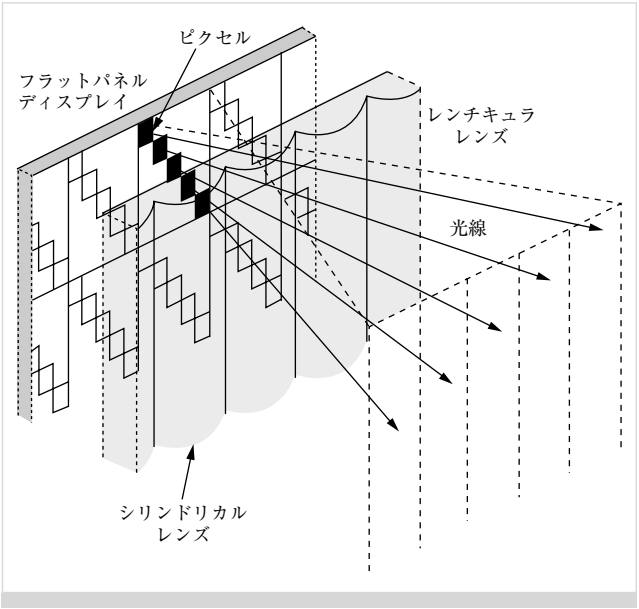


図3　レンチキュラレンズを用いた裸眼立体ディスプレイの構成方法

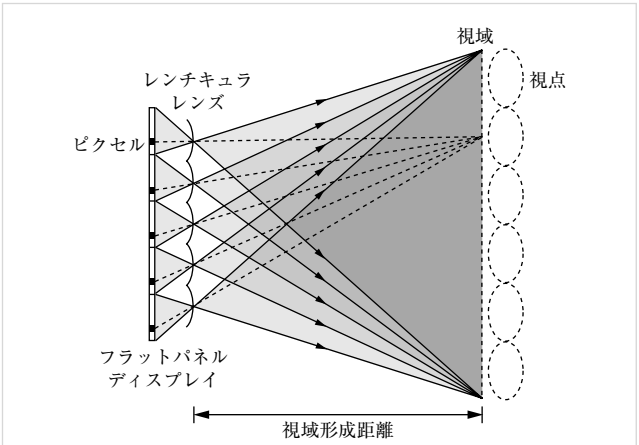


図4　裸眼立体表示の視域と視点の形成（レンチキュラ方式）

発せられた光線がレンズ通過後に進む水平方向が決まる．すなわち，水平位置が異なるピクセルから発せられる光線は，異なる水平方向に進む．

図4に水平断面図を示す．各シリンドリカルレンズは，それぞれに対応するフラットパネル上の領域を，特定の距離（視点形成距離）で互いに重なるように多重結像する．この多重結像領域が視域になる．ここで，視域上に複数の視点が並ぶと考える．同図に示すように，一つの視点からレンズ中心を通る直線を考え，各レンズを通して見えるフラットパネル上のピクセルを特定する．これらのピクセルを用いて画像を表示すると，視点からその画像が見える．したがって，各視点に異なる視差画像を表示することができる．視域に並ぶ視点数は，各レンズに対応するフラットパ

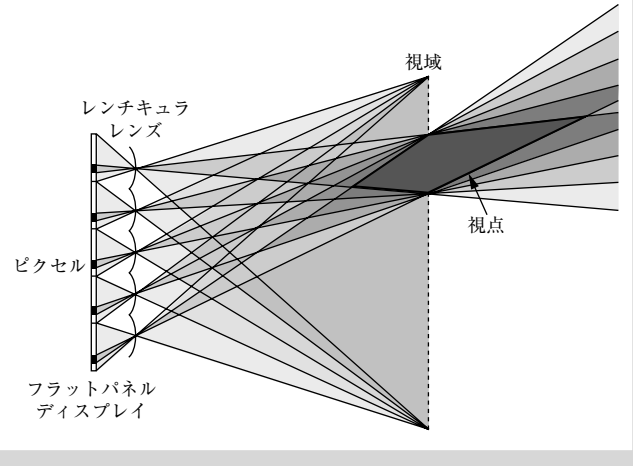


図５　裸眼立体表示の視点の形状

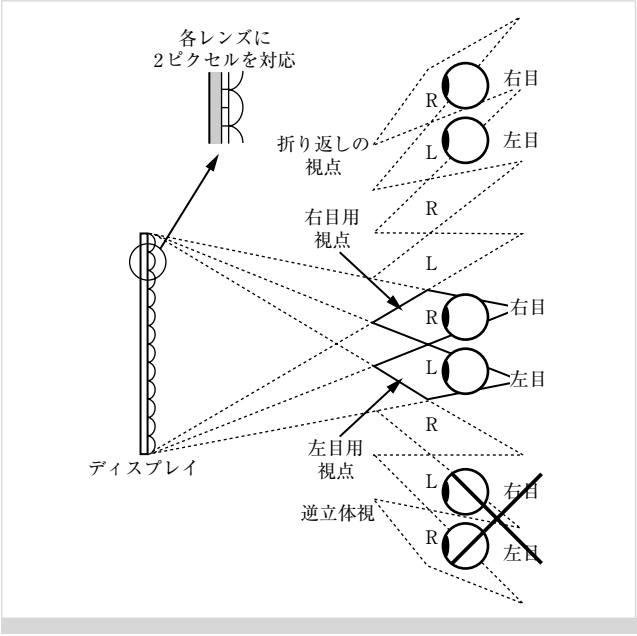


図６　２眼式の裸眼立体表示

ネル上のピクセル数により決まる．視点数を2にすると2眼式立体表示が実現でき，3以上にすると多眼式立体表示が実現できる．

つぎに，視点の空間的な形状について説明する．フラットパネル上のピクセルは幅をもつから，ピクセル内の各点から発せられて視点に向かう光線の重なりを図示すると，図5のようになる．この図からわかるように，視点は点ではなく，空間的な広がりをもつ．この広がりのなかに目を置けば，対応する視差画像を見ることができる．

５．２眼式裸眼立体表示

２眼式の裸眼立体表示では，図６に示すように，レンチキュラレンズの各レンズに2個のピクセルを対応させ，右目用と左目用の2個の視点を発生する．二つの視点位置に左右の目を置けば，メガネなしで立体像が観察できる．ただし，立体像を見ることができる観察範囲は，図5に示した視点の広がり程度に限定される．すなわち，水平方向にも奥行方向にも観察位置が限定される．

カラー表示の場合は，2個の色ピクセルを対にして用いる．そのため，RGBストライプ配列のフラットパネルディスプレイを用いる場合は，図７(a)に示すように，(RG)，(BR)，(GB)，…のように色ピクセルを対にして用いる．そのため，左右の目には各レンズが異なる色に見える．また，同図(b)に示すように，RGBストライプ配列のパネルを90°回転させて，同色の色ピクセルを対にして用いる場合もある．

フラットパネルを用いた裸眼立体ディスプレイの構成方法としては，今まで説明してきたレンチキュラレンズを用いる構成方法以外に，パララックスバリアを用いる構成方法がある．両者を図８に示す．パララックスバリアとは，同図(b)に示すように，垂直スリットを水平方向に並べたスリットアレイである．ピクセルから出た光線の水平進行

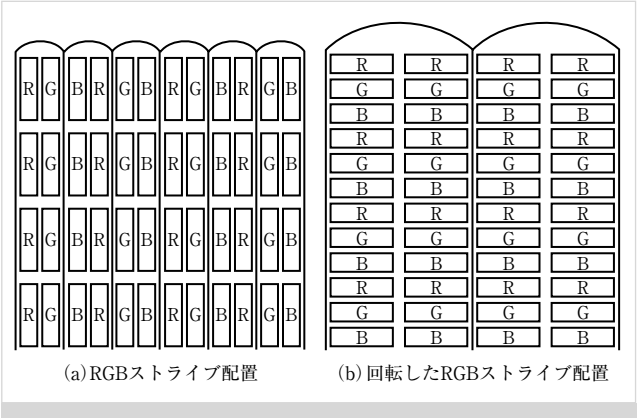
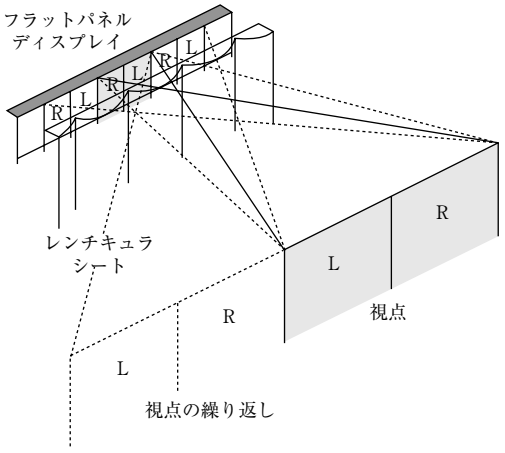


図７　２眼式の裸眼立体表示のピクセル群の構成

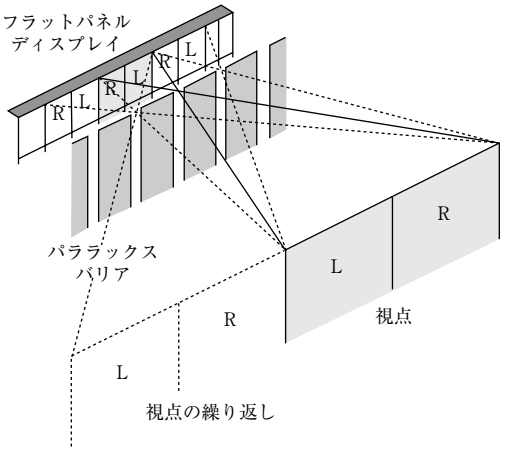
方向をスリットで制限することで，光線の水平進行方向を制御する．いずれの場合も，立体表示の解像度は，フラットパネルディスプレイの解像度の半分になる．

パララックスバリアは，リソグラフィ等で作製されるため作製が容易で作製精度も高いが，マスクで光を遮光するため光の利用効率が低い．レンチキュラレンズは，レンズを用いるため光の利用効率は高いが，樹脂で作製されることが多いため湿度や温度などの環境による形状変化が問題となる．視点への光線の集光特性は，光の偏向にレンズを用いるレンチキュラレンズの方が優れている．

図8に示すように，レンチキュラレンズを用いる場合でも，パララックスバリアを用いる場合でも，ピクセルから発せられる光線は，正面のレンズやスリット以外にも，隣接するレンズやスリットにも入射する．そのため，同図に



(a) レンチキュラ方式



(b) パララックスバリア方式

図8　フラットパネル型裸眼立体ディスプレイの構成方法

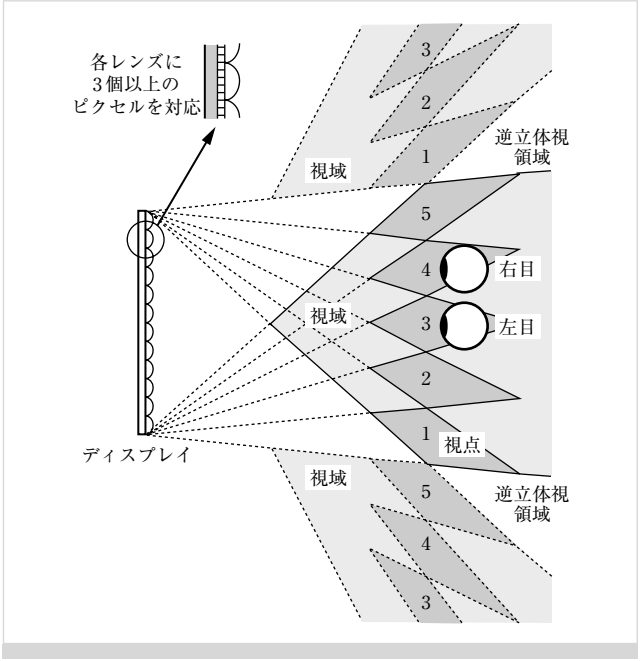


図9　多眼式立体表示

示すように，水平方向に繰り返しの視点が発生する．このことを利用すると，図6に示すように，多人数での観察が可能になる．ただし，正しい視点位置に目があるかどうかは観察者にはわからないので，左右の目を誤った視点位置に置く可能性がある．この場合，逆立体視といい，奥行きが逆になった立体像が見える．

家庭のリビングのように多人数が不特定の場所でディスプレイを観察する利用環境では，逆立体視が問題になる．極端な言い方をすれば，50%の確率で逆立体視が生じることになる．逆立体視の解決方法としては，目の位置を検出して表示画像を入れ替える方法があるが，この方法では多人数の観察には対応できない．

モバイル用途などで用いられる小画面の立体ディスプレイでは，観察者は1名であり，通常は顔の中心付近に画面を置いて見ることから，逆立体視が問題にならない場合が多い．また，図6からもわかるが，画面サイズが小さい場合には，視点の広がりは奥行方向に大きく広がり，奥行方向の観察位置の制限がかなり緩和される．そのため，携帯型ゲーム機や携帯電話などでは，2眼式裸眼立体ディスプレイが使用されることが多い．

6．多眼式立体表示

多眼式立体表示では，図9に示すように，レンチキュラレンズの各レンズに3個以上のピクセルを対応させ，3個以上の視点を空間に発生する[3]．視点間隔は，平均両眼間隔65mm（これを63mmとすることもある）以下，あるいはその半分程度にすることが多い．逆立体視は，視点の繰り返しの境界部分で生じるため，視点数が多いほど逆立体視になる確率が低下する．視点数をnとすると，逆立体視になる確率は$1/n$に低下する．このように，逆立体視になりにくく，立体視し易いのが多眼式立体表示の大きなメリットである．

多眼式立体表示では，視点数分だけ，視域が水平方向に広がる．目を水平方向に移動すると，目の位置に応じて見える視差画像が変化するので，運動視差が得られる．すなわち，輻輳と両眼視差に加えて，運動視差による立体知覚が可能になる．

多眼式立体表示では，観察範囲は，視点が並ぶ水平方向のみでなく，奥行き方向にも広がる[4]．多眼式立体表示では，視点が形成される位置以外では，目の位置に応じて複数の視差画像が網膜上で合成される．図10に，観察位置と視差画像の合成の様子を示す．例えば，Aの位置に目を置くと，視域3と4に進む光線が目に入るので，視域3と4に対応した視差画像が合成されて見える．このような視差画像の合成により，目の位置に応じた視差をもつ画像が網膜上で形成される．多眼式の場合は，視点間のクロストー

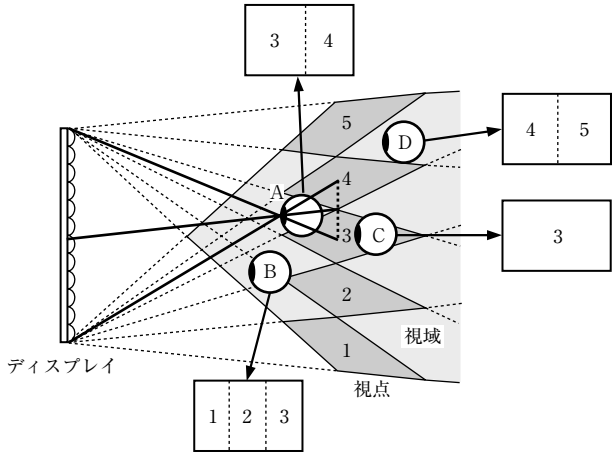


図10　多眼式立体表示での観察位置と網膜像形成

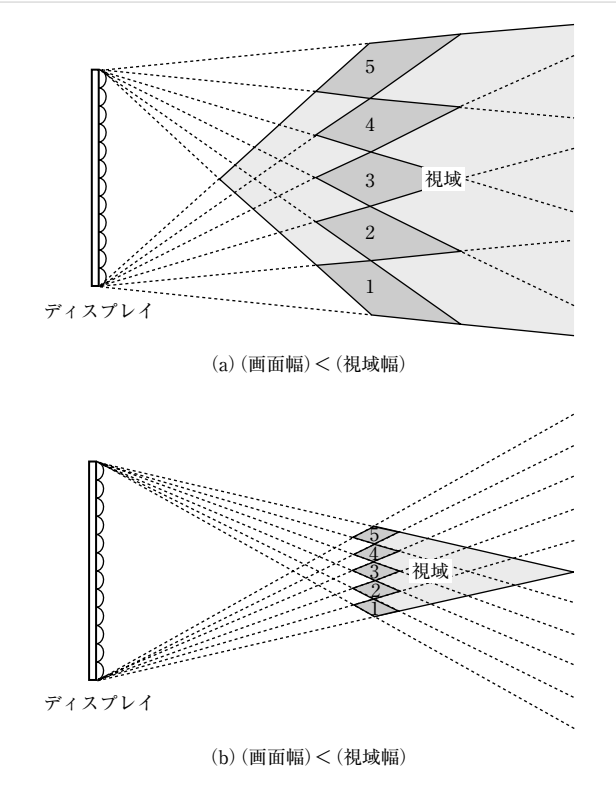


図11　多眼式立体表示での奥行方向の視域範囲

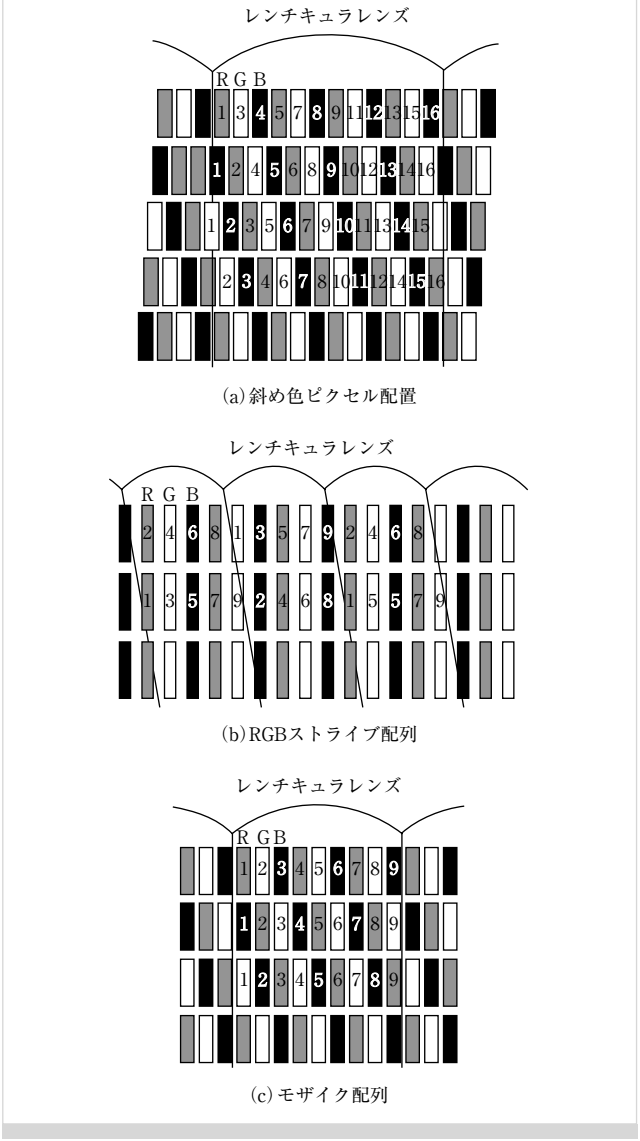


図12　多眼式立体表示と色ピクセル配置

クが比較的大きいため，合成される視差画像の境界は滑らかに接続される．

2眼式の場合と同様に，多眼式でも，画面幅と視域幅の関係で，奥行方向の視域の広がりが決まる．図11に示すように，画面幅より視域幅が大きい場合には，視域は無限遠まで広がる．逆の場合には，視域は奥行方向に制限される．そのため，視点数を増やさずに画面サイズを拡大すると，奥行方向の観察範囲が狭くなる．この場合，顔検出技術等を用いて観察者の位置を検出し，それに合わせて視域を移動させる必要がある．視域の移動は，レンチキュラレンズとピクセルの対応関係を変えることで容易に実現できる．

つぎに，フラットパネルディスプレイのピクセル配置について説明する．図12(a)に，多眼式立体表示用に開発された斜め色ピクセル配置[5]を示す．レンチキュラ方式でもパララックスバリア方式でも，ピクセルの水平位置によって光線の水平進行方向が決まる．したがって，同色の色ピクセルが異なる水平位置をもつように斜め方向に並べると，水平方向と垂直方向の画素密度のバランスが良くなる．また，従来のRGBストライプ配列のフラットパネルディスプレイを利用可能にするために，図12(b)に示すように，ピクセル配置を傾ける代わりにレンチキュラレンズやパララックスバリアを傾ける方法[6]が提案されている．また，図12(c)に示すように，色フィルタの並べ方を変える方法[7]も提案されている．

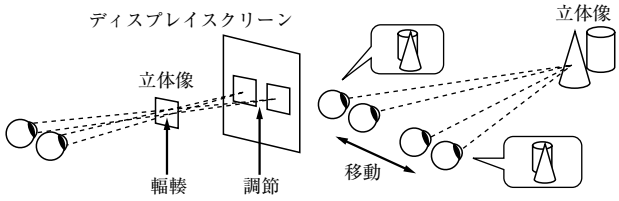


図13　現在の立体表示の課題

多眼式立体表示では，立体解像度と視点数の積がフラットパネルディスプレイの解像度になるため，両者の間にトレードオフの関係がある．視点数を増やすと立体解像度が低下する．ここで，立体解像度とは，もともとのフラットパネルディスプレイの解像度ではなく，レンチキュラレンズあるいはパララックスバリアと組合せて立体表示した際の解像度を言う．最近では，フラットパネルディスプレイの時分割表示を利用して，立体表示性能を高める方法も開発されている．

7．将来の立体表示方式

以上説明してきた2眼式や多眼式の立体表示は，立体視の生理的要因に対して，以下に示す二つの問題がある．

第一の問題点は，図13(a)に示す，調節と輻輳の不一致である．左右の目に正しい視差画像が表示されると，輻輳は正しく奥行きを知覚する．しかし，目のピントは画像を表示しているディスプレイ画面に合うため，調節は正しく機能しない．このような調節と輻輳の不一致は，実世界では生じないため，視覚疲労を引き起こすと言われている．

第二の問題点は，運動視差の欠如あるいは不完全さである．図13(b)に示すように，2眼式では運動視差は機能しない．多眼式では，視点数が少ない場合には，不連続な画像の切替わりが知覚される．人間は，自身の運動に対する網膜像変化を無意識のうちに予測しているため，このような運動視差の欠如や不完全さが違和感となり，臨場感が低下すると言われている．

以上の問題点を解決する立体表示技術として，超多眼表示や高密度指向性表示の研究が行われている[3]．

2眼式や多眼式の立体表示は，水平方向の視差しか表現できない問題点もある．すなわち，垂直方向に目を移動したときに，見え方が変わらない．水平と垂直の両方の視差を表現する立体表示方式としてインテグラルイメージング[8]の研究が進められている．

さらに，光を光線としてではなく，波面として再現する立体表示技術として電子ホログラフィー[9]の研究も進められている．

8．むすび

本稿では，人間の立体視の説明から始めて，メガネ式立体表示と裸眼立体表示の基礎について説明した．

今後は，フラットパネルディスプレイの高解像度化と低価格化が進むことを考えると，裸眼立体ディスプレイの性能向上と普及がさらに進むことが期待できる．逆に言えば，2次元ディスプレイの性能向上は限界に近づきつつあり，残された性能向上は立体化にあると考えることもできる．ただし，単純に2次元ディスプレイを立体ディスプレイに置き換えるのではなく，今後は，立体表示ならではの新しい応用や映像表現を考えることが重要になると思う．

(2013年8月26日受付)

〔文　献〕

1) 大越孝敬：“3次元画像工学”，朝倉書店（1991）
2) 高木康博：“裸眼3Dディスプレイ（講座誰にでもわかる3D第5回）”，映情学誌，65，5，p.654-659（2011）
3) 高木康博：“多眼式・超多眼式3D技術（講座誰にでもわかる3D第7回）”，映情学誌，65，7，p.933-939（2011）
4) N.A. Dodgson: "Analysis of the viewing zone of the Cambridge autostereoscopic display", Appl. Opt., 35, pp.1705-1710（1996）
5) Y. Takaki: "Multi-view 3-D display employing a flat-panel display with slanted pixel arrangement", J. Soc. Inf. Display, 18, pp.476-482（2010）
6) C. van Berkel and J.A. Clarke: "Characterization and optimization of 3D-LCD module design”, Proc. SPIE 3012, pp.179-186（1997）
7) 平山雄三：“平置型立体ディスプレイ”，光学，35，8，pp.416-422（2006）
8) J. Hong, Y. Kim, H.-J. Choi, J. Hahn, J.-H. Park, H. Kim, S.-W. Min, N. Chen and B. Lee: "Three-dimensional display technologies of recent interest: principles, status and issues［Invited］", Appl. Opt., 50, 34, pp.H87-H115（2011）
9) F. Yaras, H. Kang and L. Onural: "State of the Art in Holographic Displays: A Survey", J. Display Technol., 6, 10, pp.443-454（2010）

高木　康博（たかき　やすひろ）　1986年，早稲田大学理工学部卒業．1988年，早稲田大学大学院理工学研究科修士課程修了．1992年，同研究科博士後期課程修了．1991年，同大学助手．1994年，日本大学文理学部専任講師．1998年，同助教授．2000年，東京農工大学工学部助教授．現在，准教授．主に，立体映像技術に関する研究に従事．博士(工学)．正会員．

フレキシブルディスプレイの基礎

正会員 藤掛英夫†

1．まえがき

動画を含めた画像コンテンツは，人の感性に直結する優れた情報コンテンツである．しかし，高精細画像や動画の情報量は大きいため，これまで取り扱いには困難を伴ってきた．昨今，大容量情報のディジタル処理や通信ネットワークの著しい発達に伴って，高品位の画像を手軽に扱えるようになってきた．それにより，通信・放送・印刷分野の融合をはじめ既存の情報サービスの再構築が進展するとともに，多様なメディアサービスが創出されつつある．このように画像情報の提供・流通インフラが大きく変貌していく中で，電子ディスプレイは人と情報を繋ぐハードウェアとしてますます重要になっている．これまでにも，平板状でかさばらないフラットパネルディスプレイの出現が，情報の高度化に伴いながら電卓，デジタル時計，ノートパソコン，携帯電話，薄型テレビ，タブレット情報端末をはじめ，数々の情報機器を生み出してきた．ディスプレイがメディアサービスを変革してきたと言っても過言ではなく，今後もディスプレイの革新技術が情報化社会のライフスタイルを先導していく可能性が高い．

そのような意味で，現在のディスプレイの形態も必ずしも満足できるものでなく，課題が残されている．例えば，ガラスで構成されるフラットパネルディスプレイは，厚くて重く破損しやすい．特にパネルが大きくなると作製時および使用時における取り扱いの難しさは顕著になり，情報機器を屋内外のさまざまな環境で使用する上でも制約になる．そこで次世代のディスプレイには，以下のような機能や役割が期待されている．

(1) あらゆる生活シーンでの情報提供に役立つ（アンビエント情報サービス）
(2) 大画面の高臨場感映像をはじめ感性に迫る豊かな情報環境を提供する

このような要件を満たす次世代ディスプレイの有力候補として，軽くて薄く自由に曲げられるディスプレイが注目されている．ディスプレイのフレキシブル化は，表示部の携帯・設置・意匠の自由度を飛躍的に高め，多様な視聴形態やヒューマンインタフェースを創出する．フレキシブルディスプレイが実現されれば，その利便性から既存のフラットパネルディスプレイが置き換わることもありうる．フレキシブルディスプレイを中核とした先進的な画像デバイス技術は，今後の情報ネットワークサービスの進展とあいまって，コンシューマエレクトロニクス全般を牽引するインパクトになると期待されている．

一昔前までフレキシブルディスプレイは，電子ホログラフィとともに，近未来の映画・小説などのモチーフとされてきたが，昨今，フラットパネルディスプレイの製造技術・産業が飽和していく中で，ディスプレイ分野の国際学会で欠かせないホットなトピックになっている．従来のフラットパネルディスプレイ（液晶ディスプレイ，有機ELディスプレイ，プラズマディスプレイなど）では，表示材料・デバイスを保持するため，機械的・熱的・化学的に安定なガラス基板が用いられてきた．ガラス基板の替わりにプラスチック基板を使うことができれば，ディスプレイを柔軟化できる[1)2)]．しかし基板の柔軟化は，表示動作の基本となるデバイス構造の不安定化を招くことになり，それらの課題を構造・材料・作製技術の開発で克服するのが，大きな研究の方向性となる．そのため，安定性に優れたプラスチック基板，画素パターンの低温作製工程など，従来のディスプレイ分野にはない固有の材料・作製技術の研究が活発化している．こうした周辺分野の高まりも受けながら，現在，フレキシブルディスプレイは提案・試作フェーズを越えて，実用化を目指した信頼性・安定性確保の取組みにまでステージが進んでいる．

本稿では，技術進展が著しいフレキシブルディスプレイの特徴，用途，デバイス構造，駆動技術，材料・作製工程を解説する．

2．フレキシブルディスプレイの特質と用途展開

人と情報のインタフェースの役割を担うディスプレイ工

† 東北大学 大学院電子工学専攻
"Fundamentals of Display Technologies (Final study); Fundamentals of Flexible Displays" by Hideo Fujikake (Department of Electronic Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University, Sendai)

映像情報メディア学会誌 Vol. 67, No. 12, pp. 1048～1053 (2013)

学は，材料科学・情報科学・人間科学の融合領域を独自に開拓することで発展してきた．次世代ディスプレイとして待望されるフレキシブルディスプレイにおいても，情報コンテンツとヒューマンファクタを充分に考慮しながら用途を開拓する必要がある．

フレキシブルディスプレイは，パネル部材の変更に伴って，薄い，軽い，割れない，曲がるなどの機械的特質を備える．そのため，重くて硬いガラス基板を用いた既存の用途はもちろんのこと，これまで想定できなかった使用法への展開も見込まれ，視聴形態に大きな変革をもたらす．ディスプレイは人と情報の媒体である以上，パネルなどのハードの存在を感じさせないことが理想であり，その意味からも携帯・収納・視聴の際にかさばらない，目立たないフレキシブル化技術は，ディスプレイ発展の歴史に沿ったものと言える．

フレキシブルディスプレイの画質は，現状のフラットパネルディスプレイのレベルを維持することが望まれる．その一方，新しいディスプレイではハードの利便性の度合いが実用化の分岐点になることも少なくない．そのため，実際的な用途に即して，求められる湾曲耐性，画質のパフォーマンス，コストを考える必要がある．フレキシブルディスプレイには，前述したようにアンビエント的な情報提供と，高臨場感映像技術への貢献という二つの特徴的なミッションがあり，それぞれについて具体的な用途や目標を見定める必要がある．

2.1　アンビエントな情報提供サービスへ

フレキシブルディスプレイは，あらゆる生活空間への進出に向けて多様な視聴形態を創出する[3)]．フレキシブルディスプレイが身近なものになれば，パネルの大小に関わらず多様な生活環境に融合しながら，必要とされる情報を，的確に違和感なく提示できる．例えば，小型・中型サイズであれば，軽量化・フレキシブル化により建造物や乗り物などに自由に貼り付けたり，吊したりして使用でき，高画質の画像を含めた情報を手軽に享受できる．もちろん不要になれば，容易に取り外すこともできる．また，湾曲面を含めて生活環境の構造物に潜ませることもでき，情報提供のためのホームエレクトロニクスをトータルで構築できよう．また，湾曲面が多い移動体の車体や，コンパクト性が求められる車内では，フレキシブルディスプレイの活躍の場が多いことは言うまでもない．

曲げたり丸めたりできるディスプレイは収納性に優れるため，携帯向けにも極めて有用である．現在のタブレット端末でも，表示部をコンパクトに収納できれば利便性が高まる（駆動回路やバッテリーは，当面，別ユニットにならざるえないが，将来はフレキシブル化も視野に入れる）．また表示サイズが大きくても持ち運べるため，臨場感のある映像コンテンツを屋内外を問わず楽しめる．いわば臨場感を持ち運べるツールが初めて出現する．時計・電話・情報端末などの携帯電子機器は，情報コンテンツの高度化に伴って発展してきたが，ついに高臨場感映像を扱えるようになる．仮にA4～A3サイズの表示シートを背広のポケットに入れて持ち運べるようになれば，ビジネスや趣味のスタイルが大きく変貌する．また，携帯機器における表示サイズの拡大は，高齢化社会が進展する中で，人に優しい技術としても注目される．さらに，非常災害時の情報ライフラインの基盤技術としても威力を発揮する．

このようにフレキシブルディスプレイの用途や視聴形態は多種多様であり，従来の携帯・据え付け用途にとどまらず，貼り付け，吊り下げ，巻き取り，ウェアラブル，ラッピング[3)]など新たな使用法が生み出される．情報サービスの提供者側からの発想・提案も尽きないが，ユーザ側からも斬新な用途が次々と提案されてくると思われる．それにより，フレキシブルディスプレイは次世代情報ツールのプラットフォームに進展する可能性もある．

2.2　高臨場感映像サービスへ

フレキシブルディプレイのメリットは，画面サイズがさらに大きくなると際立つことになる．小型パネルはそもそもコンパクトなため，湾曲表示や意匠面の要望がなければ，曲げる必然性が乏しい．そのため，フレキシブルディスプレイ「ならでは」の実用的なメリットとして認識されにくく，高い製造コストとともに実用化を阻む要因になっている．それに対して大画面（約40インチ～）もしくは超大画面（約80インチ～）のシートディスプレイが軽くて丸められるようになれば，可搬性はもとより据え付けの容易さ，省スペースの点で明確なメリットになる．

例えば，テレビであれば大画面化に伴って映像の臨場感が増す．対角80インチを超える超大画面（図1）であっても軽量でフレキシブルなシート状になれば，絨毯のように丸めらるため（理想的にはポスタ），一般的な家屋の扉から，一人で搬入できて容易に据え付けできる．100インチサイズを超えても一般家庭への導入が物理的に可能となる．将来，

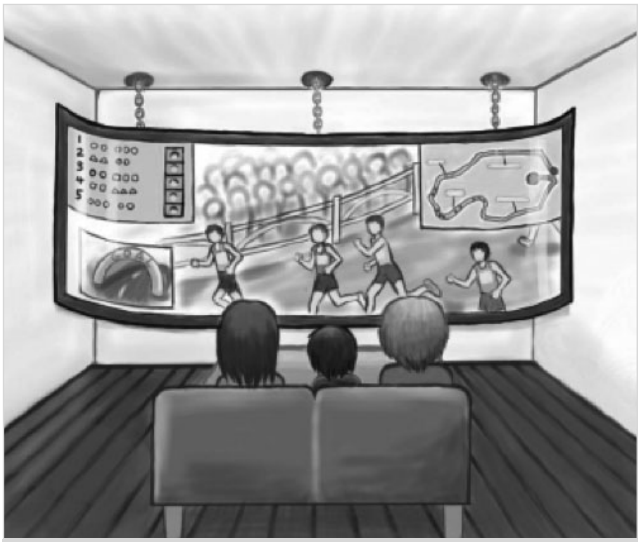


図1　フレキシブルディスプレイを用いた超大画面テレビ

直視型の超大画面ディスプレイが普及するとすれば，フレキシブルディスプレイ以外の想定は困難である．今後の超高精細放送（4Kや8K解像度）では，高臨場感を実現するために超大画面ディスプレイの実現が求められており，フレキシブルディスプレイはその推進役になると考えられる．

フレキシブルディスプレイの大画面化は，携帯性・可搬性を飛躍的に向上させるだけでなく，曲げて表示すること自体にもメリットが生まれる．視聴者を取り囲むように大画面ディスプレイを湾曲させて表示させると観視画角が拡がるため，没入感ディスプレイが手軽に実現できて臨場感が高まる．また，従来のフラットパネルディスプレイと異なり表示面までの視距離が一定でより自然な表示となるため，臨場感・実物感が向上する効果も期待できる．さらに表示面が湾曲化すれば，超大画面であっても部屋のコーナーを使えるため，日本家屋で求められる省スペース化にも役立つ．省スペース化の究極は巻き取りであり，パネルの柔軟性が向上すれば，ディスプレイ技術者の長年の夢であった超大画面ロールスクリーンテレビへの道が拓ける．

フレキシブルディプレイ技術は曲げる用途のみならず，既存のフラットパネルディスプレイ技術への波及効果が大きい．プラスチック基板によりパネルが軽量化されて耐衝撃性が向上すれば，直近の薄型テレビやタブレット端末用途への導入が一気に進展する可能性がある．フレキシブルディスプレイについては，時折，曲げる必要があるのか，湾曲以外のプラスチック基板の特徴（薄い，軽い，割れない）で充分というコメントが寄せられる．プラスチック基板を用いたデバイス技術はまだ確立されていないため，曲げる将来の用途よりは，現状パネルへの応用を先行して，産業化への足掛かりとなればと筆者は考えている．さらに将来，曲がる高画質の大画面パネルが実現されたならば，臨場感も含めフレキシブルディスプレイの視覚効果がホットな研究分野になる．インタラクティブ機能も絡めて，新しいヒューマンインタフェースが創出される可能性がある．

このようにフレキシブルディスプレイは，便利な情報提示機能とともに，場の雰囲気さえも伝える高度なヒューマンインタフェースツールに進化するものと思われる．最近のフレキシブルディスプレイ研究でも，実用化に向けた信頼性の確保とともに，大画面化技術の構築が重要テーマとして認識されつつある．表示原理，デバイス構造，材料/作製技術を含む総合的な取組みが求められる．

3．表示原理とパネル構成

フレキシブル化に向けた研究アプローチの多くは，新たな表示原理を追及するものではなく，ガラス基板をプラスチックなどの柔軟素材で置き換えることを目指すものである．ここでは，動画用のフラットパネルディスプレイの発展形態としてフレキシブルディスプレイを扱う．そのため，フレキシブル化も可能な静止画用途の電子ペーパ[4)5)]については前号の講座を参照されたい．フレキシブルディスプレイのデバイス候補としては，有機EL，液晶，分散型無機ELをはじめ種々の方式のディスプレイが提案されて試作に至っている[6)~8)]．それらの中には，プラズマディスプレイの原理に基づき，多数の放電用ガラスチューブからなるアレイを柔軟樹脂で固定して，湾曲化を可能とした開発例もある．

これらの方式は，柔軟性，作製技術，信頼性（寿命など），高解像度化・大画面化，製造コストにおいてそれぞれ一長一短があり，すべてに優る方式は現在までに開発されていない．ここでは，超柔軟化・超薄型化に有利な有機EL方式と，大面積化・高精細化に優れた液晶方式について解説する．両者のメリット・デメリットは相補的な関係にあり，今後，フレキシブルディスプレイが多様な用途に浸透していく中で，棲み分けが生まれる可能性がある．本格的な実用化フェーズを控えて，双方とも今後の進展が楽しみである．

3.1　有機EL方式

フレキシブル有機ELディスプレイの基本構造を図2に示す．表示原理は，現在進展の著しいガラス基板の有機ELディスプレイと同様である．1枚のプラスチック基板上に，発光に必要な正負の電荷を制御するため，機能の異なる有機半導体層や電極層が積層される．無機の発光ダイオードの原理を模した面発光の有機デバイスと考えてよい．その単純な薄膜積層構造で自発光が得られるため，パネルの超薄型化・超柔軟化に適している．そのため，フレキシブルディスプレイの最有力候補とされており，その代名詞になりつつある．

図2では，二つの電極層（陰極，陽極）の間に，電子輸送層，発光層，正孔輸送層が設けられ，名電極層から注入される電荷の再結合により発光層の有機色素が励起されて発光する．有機ELにおける電荷移動は2重結合の有機分子（共役π電子系）やそれらの凝集構造が担う．一般に有機半導体の電荷移動度は無機半導体に比べて低く，発光効率は発光ダイオードに比べて劣る．発光効率を高めるためには，各電極層から注入・輸送される電荷を増やすとともに，双方の電荷数をバランスさせることが重要である．そのため，各電荷に対する電極層と輸送層の間にエネルギーバリアを軽減する注入層を設けたり，発光層の後に電荷を留めて再結合を促すブロック層を設けたりすることも行われる．

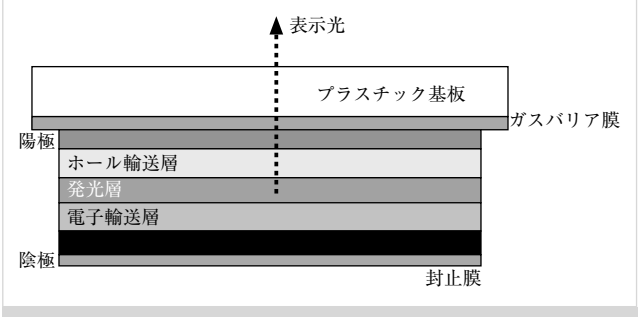


図2　有機ELを用いたフレキシブルディスプレイの基本構造

フルカラー表示のためには，3原色の発光層を塗り分ける技術が必要となる．プラスチック基板に適した低温の塗り分け技術として，金属マスクを用いた真空蒸着法の他に，溶媒を用いた印刷塗布法であるインクジェット法やノズル法などが試されている．また生産性・量産性を高めるため，白色発光の有機ELを一様に形成して，3原色をカラーフィルタで抽出するパネル構造も開発が盛んである．

プラスチック基板を用いたフレキシブル有機ELには特有の課題がある．極めて薄い有機半導体層を積層するために，プラスチック基板には高度な平坦性（ガラス基板と同等）が求められる．表面にごくわずかな突起や付着物（静電気で吸着しやすい）があると，両電極が短絡するためである．また，ガラスに比べてプラスチック基板は，有機半導体や電極を酸化して劣化させる酸素や水蒸気の侵入を防ぐガスバリア性が劣る．気体の分子オーダからみるとプラスチック基板(高分子凝集体)の緻密性は不充分なためである．そこで，プラスチック自体の分子構造を改良してガスバリア性を高めるとともに，両電極層の外側に無機/有機薄膜のガスバリア膜を設けたり，他の基板を貼り付けたりするなど，高度な封止技術が必要とされる．プラスチック基板を用いたフレキシブル有機ELを実用化するためには，動作時の輝度寿命と保存時のデバイス寿命の向上が急務である．

3.2　液晶方式

液晶を用いたフレキシブルディスプレイの表示原理も，既存のガラス基板のものと同様である．プラスチック基板を用いた構成例を図3に示す．プラスチック素材で構成された液晶パネルとフィルム状のバックライト（厚み1mm以下）が積層されることにより，バックライトからの照明光が液晶層で透過/遮断されて画像が表示される．液晶方式では，パネルを構成する2枚のプラスチック基板とバックライトで構成されるため，薄型化や柔軟化は制限されるが，これまでガラス基板で蓄積されてきた既存の製造技術・設備を転用できるため，大画面で高画質のパネルを早期に実現できる．また，光学材料として機能する液晶は励起状態を伴わず劣化がないため，長期間の信頼性・安定性を確保できる．さらに現在の液晶ディスプレイのように，バックライトや光学系の工夫によりさまざまな照明環境に適応可能となる．例えば，バックライトからの透過光だけでなく反射光も利用できる半透過型にすれば強い日光の下でも使用でき，携帯用途に有用である．

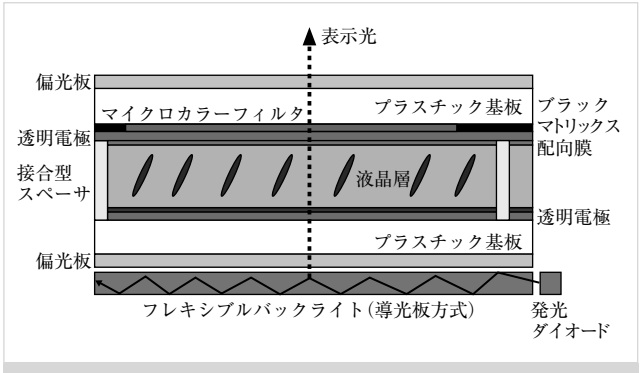


図3　液晶を用いたフレキシブルディスプレイの基本構造

フレキシブル液晶パネルでは，液晶の液体層が柱状の樹脂製スペーサを介して2枚のプラスチック基板で保持されており，液晶の分子配向が基板表面により制御されている．基板上の電極から電界が印加されると，液晶分子の配列が変化して光の位相差（偏光状態）が変化するため，照明光が偏光板を介して光変調される．液晶は液体であるため本質的に曲げ疲労や破壊を生じないが，柔軟な基板間では厚みが変動して表示が乱れる．そこで新たなスペーサ構造として，両基板を接着するスペーサ構造が提案されている．接合スペーサとして従来の工程で柱状スペーサを形成した後，もう一つの基板を光硬化や熱硬化で固定する方法である．さらに強固な接着構造を得るため，液晶中に溶解した高分子材料を紫外線のパターン露光により硬化・析出させて，基板を接合する高分子の格子壁を形成する方法も試みられている．

フレキシブルなバックライトとしては，光利用効率が高いエッジライト方式の導光板や，大面積化に適した直下照明方式が試作されている．前者は現状のプラスチック導光板の薄型化により実質的に実現されており，後者についてはフレキシブルなプリント回路基板に発光ダイオードチップを2次元的に実装することで容易に構成できる．

4．駆　動　技　術

有機ELおよび液晶を用いたフレキブルディスプレイを高精細・高コントラストに駆動するためには，既存のフラットパネルディスプレイと同様，一列の画素ごとに電圧パルスを印加してライン走査駆動を行う必要がある．そのためには，非選択時でも駆動状態を保持する薄膜トランジスタ（TFT）を一画素ごとに設けなければならず，柔軟なプラスチック基板上にTFTアレイを形成する必要がある（アクティブマトリックス駆動方式）．例えば，電流駆動の有機ELでは，1画素ごとに最低でも電圧スイッチ用と電流駆動用の二つのTFTが必要となり，電界駆動の液晶では電圧スイッチ用のTFTを一つ形成しなければならない．

TFTの半導体材料としては，既存の液晶ディスプレイで実用されている非晶質Siや多結晶Siの応用が試みられている．プラスチック基板はガラス基板に対して耐熱性が著しく劣るため，TFTを構成する高品質の半導体や絶縁膜の低温形成がパネル開発の鍵となる．

また，Si系TFTに比べて低温形成が可能で柔らかい有機半導体も魅力的である．伸縮性を持った有機半導体は曲げても剥離しにくいため，高度な柔軟化が実現されている（例えば湾曲に留まらず折り畳みも可能）．また，有機半導体は低温形成が容易なため，プラスチック基板との整合性

に優れており，将来，量産性に優れた印刷工程の導入も期待できる．有機TFTは，動作の不安定性に課題が残るものの非晶質Si以上の移動度が確認されている．

さらに昨今，プラスチック基板を用いたフレキブルディスプレイのTFTにおいて，酸化物半導体（IGZOなど）の導入が注目されている．非晶質Siに比べて1桁以上の高移動度を有して，比較的低温の真空工程（スパッタリング）で大面積かつ均一に成膜できるためである．

5．作製工程と基板選択

前述したようにフレキシブルディスプレイの課題は，ほとんどが基板の不安定性に起因する．すなわち，ボトルネックはプラスチック基板がTFTの製造技術に整合しないことにある．特に，TFTとなる電界効果トランジスタの微細なゲートチャネルを，寸法安定性の劣るプラスチック基板に高精度かつ再現よく形成するのは困難である．歩留まりを含め実用に即した作製技術がまだ確立されていないため，研究開発による挑戦と競争が続いている．

TFTを含む画素構造（電極，配線，絶縁膜，半導体，カラーフィルタ，ブラックマトリックスなど）の作製では，真空工程/塗布工程による無機/有機薄膜の成膜と，マスク露光による薄膜のパターン化（フォトリソグラフィ：有機洗浄・光洗浄，レジスト塗布・加熱焼成・剥離，紫外線暴露，有機溶剤・酸・アルカリ溶液暴露など）が何度も繰り返される．これらの工程に対して，熱的・化学的に安定なプラスチック素材は見いだされていない．それにより，途中工程で基板寸法が変化した場合，基板と光学マスクの合わせ込みが不能となり，後工程ができなくなる．そのため，プラスチック基板の耐熱性改善と，画素化工程の低温化はフレキブルディスプレイ分野で避けられない研究テーマとなっている．

フレキシブルディスプレイ用のプラスチック基板の評価項目には，表面平坦性，耐熱性（ガラス転移温度が高い），線膨張係数（温度変化時の寸法安定性），ガスバリア性，光透過率（着色や散乱がない）などがある．実際の試作には，厚みが100μm程度で寸法安定性に優れた硬質基板（ポリエチレンナフタレート，ポリエーテルサルフォン，ポリカーボネート（図4），透明ポリイミドなど）が使用される．特に有機ELでは耐熱性が高く線膨張係数の小さな基板（ポリエチレンナフタレートやポリエーテルサルフォンなど）が多用される．一方，液晶の用途では光学特性（複屈折がない）の要件も考慮されて，非延伸性の基板（ポリカーボネート，ポリエーテルサルフォンなど）が有用である．画素工程から硬質で安定な基板が求められる一方，フレキシブルパネルとしては柔軟性を確保しなければならず，その相反条件を両立させるための作製技術が求められている．現在までに開発された種々のパネル作製方法は以下の通りである．

直接法では，プラスチック基板の加工時の変形（湾曲，膨張，収縮，特に部分的な寸法変化は対処困難）を低減するため，通常，図5（a）に示されるように平坦なガラスやSi製の保持板に基板が仮接着されて，フォトリソグラフィによる画素化工程を終えた後，プラスチック基板と保持板が剥離される．

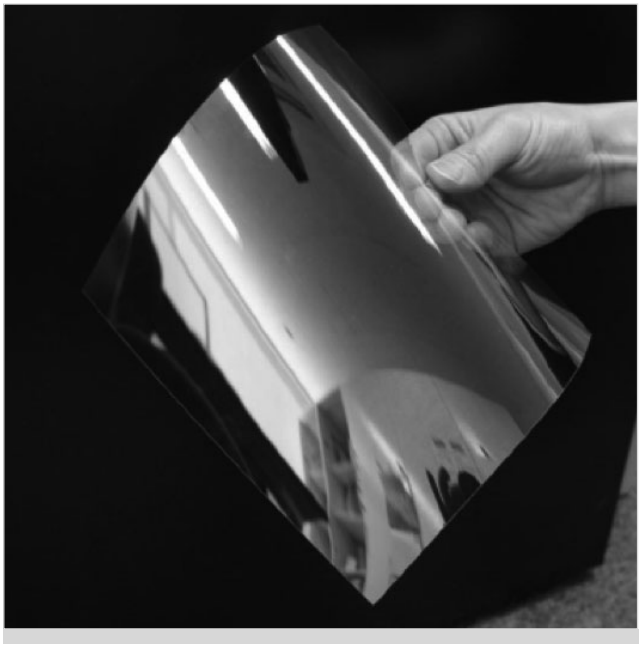


図4　フレキシブルディスプレイ用のプラスチック基板の外観

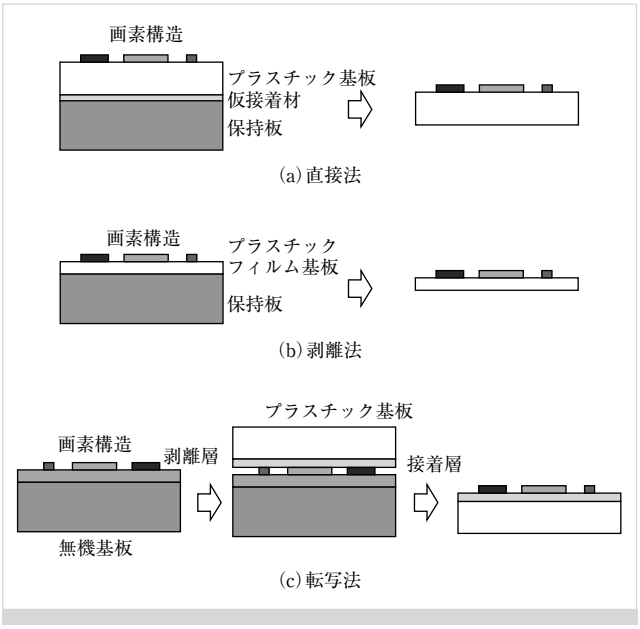


図5　さまざまなパネル作製方法

さらに寸法安定性を高めるため，極めて薄い耐熱プラスチックフィルム基板（可溶性ポリイミド，厚みは数μm以上）を保持板（ガラス基板やSi基板）に塗布形成して，画素を作製した後，基板を引き離す剥離法（図5（b））が提案されている．この方式では，保持板の高い寸法安定性が反映されるため，ガラス基板を用いた従来の画素作製工程・設備がそのまま使用できるとともに，極めて柔軟なパネルが

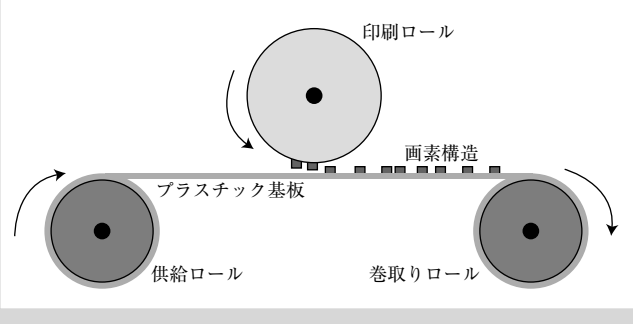


図6　印刷製法とロールツウロール法を用いた連続作製工程

実現できる．その反面，基板が薄すぎて脆弱であるため，ハンドリングや実装が問題視されている．

また，剥離層を設けたガラスやSi板上に画素構造を高温形成した後，画素構造だけを剥がし取ることにより，プラスチック基板に実装する転写法も試みられている(図5(c))．この場合，工程数が増えることに伴うコスト増加が課題とされる．

一方，微細な画素を高精度かつ低温で直接パターン形成できる印刷製法の開発が急がれている．従来の真空工程に対して，大面積化・量産化・低コスト化の面で優位性が得られる．将来，量産化に優れて環境負荷低減にも役立つ高精度印刷法が実現すれば，従来の枚葉方式でなく，プラスチック基板を巻き取りながら連続的に加工するロールツーロール製法(図6)の適用も見えてくる．その場合，特殊な硬質基板を使う必要がなくなるため，安価に量産可能な基板素材(ポリエチレンテレフタレート)の適用も期待される．

プラスチック基板のガスバリア性や寸法安定性を抜本的に克服する基板技術として，表面研磨などにより平滑化した金属箔基板があり，パネル試作に及んでいる．また柔軟性は劣るものの，耐熱性や寸法安定性が高い極薄ガラス基板での試作も活発化している．極薄ガラス基板では，既存のパネル製造設備を転用できる可能性があり，その耐衝撃性はプラスチックフィルムを貼り付けることで改善できる．また，ガラス繊維を織り込んで内包させたプラスチック基板も提案されている．このように一種類の基板だけでは，求められるすべての要件を満たすことができないため，今後，素材の複合化が活発になると予想される．

なお，フレキシブルディスプレイの実用化に際しては，用途に即して求められる湾曲耐性を充分に考慮する必要がある．せっかく購入したディスプレイが曲げすぎて壊れたということでは実用化がおぼつかない．その一方，基板・表示デバイスともに弾性変形には限界がある．そのため，湾曲状態で固定する用途は別として，ユーザが自由に曲げる用途では，ここまでは曲げても大丈夫というガード機能(それ以上は力をかけても曲げられない)が働くような構造・機構をディスプレイに組込む必要がある．その意味でも，基板の複合構造化は進展すると思われる．

6．今後の発展性

フラットパネルディスプレイの発展形態としてフレキシブルディスプレイが待望されており，情報ネットワーク社会における用途と役割を展望した．さらに，フレキシブルディスプレイの構成例として，プラスチック基板を用いた有機ELおよび液晶方式を紹介して，それらの作製に必要なTFTや作製技術を解説した．現在，フレキシブルディスプレイが試作されるに至っているが，実用化に向けてはパネル作製時ならびに使用時の信頼性を高める必要がある．また，高精細化や大画面化に向けた作製工程の開発も必要である．

フレキシブルディスプレイは，次世代産業として期待されるフレキシブルエレクトロニクス，プリンタブルエレクトロニクスの先導技術としても期待されている．その開発を推進するには，フレキシブルディスプレイ「ならでは」の実用的な用途を見定める必要がある．その際，キラーアプリを見いだすことはもとより，現状の技術レベルでも身近な用途を見つけて産業化に結びつけていく取組みが重要である．フレキシブルディスプレイの本格的な実用化に向けて着実な足がかりを望むものである．

(2013年9月4日受付)

〔文　献〕

1) 映像情報メディア学会編：“映像情報メディア工学大辞典技術”，オーム社，pp.134-139（June 2010）
2) 電気学会編：“電気工学ハンドブック第7版”，オーム社，pp.448-449（Sep. 2013）
3) “小特集：アンビエントディスプレイの最前線”，映情学誌，64，10，pp.1427-1451（Oct. 2010）
4) "Flexible Displays and Electronic Paper Issue: Flexible Displays Just around the Bend", Information Display（The Society for Information Display），21, 6, pp.10-27（June 2005）
5) 特許庁標準技術集：“電子ペーパおよびフレキシブルディスプレイ”，http://www.jpo.go.jp/shiryou/s_sonota/hyoujun_gijutsu/electronic-paper/mokuji.htm
6) “小特集：フレキシブルディスプレイの研究開発最前線”，信学誌，94，8，p.711-727（Aug. 2011）
7) “小特集：フレキシブルディスプレイの最新技術”，電気学誌，132，2，pp.72-92（Feb. 2012）
8) "Flexible Displays Issue: Flexible Displays: Just around the Bend", Information Display（The Society for Information Display），27, 2, pp.6-22（Feb. 2011）

藤掛（ふじかけ）　英夫（ひでお）　1985年，東北大学修士課程修了．同年，NHK入局．1988年，放送技術研究所に所属．2002年，同所主任研究員．2006年，東京理科大学客員教授．2012年より，東北大学教授となり，現在に至る．その間，フレキシブルディスプレイ，液晶/高分子材料，光学デバイス，有機トランジスタ，有機ELなどの研究に従事．2003年，本会技術振興賞開発賞，2003年・2009年，本会丹羽高柳賞論文賞受賞．2010年より，IDW国際会議Flexible Display Workshop Chair．2011年より，本会情報ディスプレイ研究会委員長．2012年より，IEEE Consumer Electronics Society Japan Chapter Chair．博士（工学）．正会員．