

# フレキシブルディスプレイの研究・開発動向

栗田泰市郎

■

次世代のディスプレイとして、薄くて軽く、柔軟で丸めることもできるフレキシブル有機EL（Electroluminescence：電界発光）ディスプレイが注目されている。当所では、スーパーハイビジョン（Super Hi-Vision：SHV）にふさわしいディスプレイとして、丸めて家庭に搬入可能な、フレキシブルで大画面のシート型有機ELディスプレイの実現を目指して研究開発を進めている。本稿では、その技術概要と研究開発動向について紹介する。

## 1. はじめに

ディスプレイはテレビ放送になくてはならないものである。どのような番組制作や伝送路を経たとしても、最終的に視聴者はディスプレイを通してテレビ放送を視聴する。このため、ディスプレイ技術の進歩はテレビ放送の進歩になくてはならないものである。テレビの歴史を振り返ればすぐ分かるように、アナログテレビ放送はブラウン管テレビとともに、デジタル・ハイビジョン放送はプラズマディスプレイや液晶ディスプレイなどの薄型テレビとともに発展してきた<sup>1)</sup>。

今、次世代のテレビ放送として、8K（横方向に約8,000画素）の超高精細テレビ、スーパーハイビジョン（SHV）がまさに実用化に向けて進みつつある。そこでは、また新たなディスプレイが求められるのは当然のことである。SHVには小画面から大画面までさまざまな楽しみ方があると考えられているが<sup>2)</sup>、SHVの特長はやはり大画面で一番発揮されると考えられる。しかし、例えば100型（型はディスプレイのサイズの単位で、画面の対角線の長さをインチで表した値）程度以上の平面状のディスプレイを家庭に搬入するのは容易ではない。このサイズになると、かなり重くなることに加えて、通路や玄関の寸法の制限から、家庭への搬入が困難と考えられる。

一方、ディスプレイ技術の分野では、従来の薄型ディスプレイのように堅いガラス基板の上に作製するディスプレイではなく、フィルム状のプラスチック基板の上に作製するフレキシブルディスプレイ、特にフレキシブル有機ELディスプレイが、ディスプレイの新たな進化の方向性として注目されている。そして、その研究開発が世界的に盛んに進められている<sup>3)~9)</sup>。このディスプレイであれば、薄くて軽く、また柔らかくて丸めることもできるので、家庭に導入しやすい大画面ディスプレイの実現も可能である。

当所では、SHVにふさわしいディスプレイとして、家庭に搬入可能な大画面のフレキシブルディスプレイ、すなわちSHV用シート型ディスプレイの実現を目指して研究開発

1表 フレキシブルディスプレイの利用におけるメリット

分類	利用において期待されるメリット	
共通	薄い。軽い。柔らかくて曲げられる。	
小～中画面	薄く、軽いので、持ち運びに便利。 曲げられるのでポケット等に入れやすい。 曲面を持つ機器に貼り付けられる（デザイン性向上）。 腕に巻いたり、衣服に貼り付けられる（ウェアラブル）。 15～25型 <sup>※</sup> 程度の画面を、雑誌感覚で見ることができる（1図(a)参照）。	
大画面 (シート型)	曲率半径：大	曲面の壁などに貼り付けられる（利用範囲拡大）。 凹面に表示することで、見やすくなるとともに、臨場感・没入感が向上する（1図(b)参照）。
	曲率半径：40cm程度以下	上記のメリットに加え、100型程度以上の大型ディスプレイを、丸めて家庭に搬入可能。
	曲率半径：数cm程度以下	上記のメリットに加え、観視しないときはロール状に巻き取ることにより、設置スペースを有効利用可能。

※ 「型」はディスプレイの画面サイズの単位。画面の対角線の長さをインチで表した値。



(a) 手軽にグラビア雑誌感覚で



(b) 家庭で大画面を（シート型）

1図 SHV（スーパーハイビジョン）におけるフレキシブルディスプレイの利用イメージ

を進めている。本稿では、フレキシブルディスプレイの利用イメージについて述べた後、フレキシブル有機ELディスプレイやその要素技術の概要と研究開発動向、SHV用シート型ディスプレイの実現に向けた当所のアプローチについて紹介する。

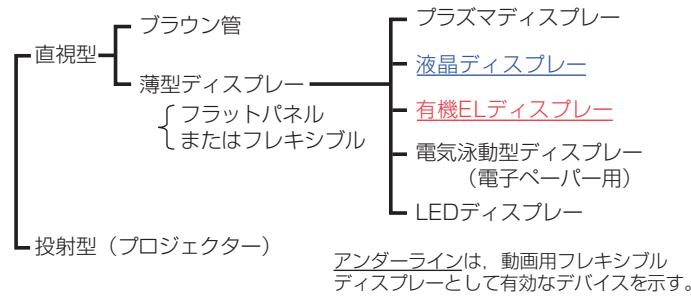
## 2. フレキシブルディスプレイの利用イメージ

フレキシブルディスプレイの特長は（1）薄くて軽いことと、（2）柔らかくて曲げられることにある。これらの特長を生かして、画面サイズや曲率半径ごとに、その利用において1表のようなメリットが期待できる。

フレキシブルディスプレイを小型の携帯機器に用いた場合は、薄くて軽い上、曲げられるので衣服のポケット等に入れやすい、などの持ち運びの利便性が向上する。また、曲面を持つ機器のケースにも貼り付けられるので、機器のデザイン性の向上も期待できる。さらに、より柔軟性に富んだフレキシブルディスプレイであれば、腕時計のように腕に巻く、あるいは衣服に貼り付ける等のいわゆるウェアラブルディスプレイとしてのさまざまな応用も考えられる。

また、もう少し大きなサイズの、例えば15～25型程度の軽くて柔軟なフレキシブルディスプレイであれば、雑誌を見るような感覚でテレビを見られると期待できる。特にSHVであれば、このようなサイズにおいて、フルカラー商業印刷の解像度とされる350 ppi (pixels per inch: 1インチ当たりの画素数) 以上の高い解像度を確保できるので、1図(a)のように、まさにグラビア雑誌を広げるような感覚で手軽に高精細な映像を楽しむことができる。20型はA4版雑誌の見開きの大きさにほぼ相当する。

一方、100型程度以上の大画面のシート型ディスプレイであれば、曲率半径の大きい多



2図 主なディスプレイデバイス

少曲がる程度のディスプレイでも、曲面の壁に貼り付けられることなどにより、ディスプレイの利用範囲の拡大が期待できる。また、1図 (b) のように凹面に表示することで、見やすさや臨場感・没入感の向上が期待できる。これは、特にSHV映像の観視において大きく期待できる。

このとき、曲率半径40cm程度以下の柔軟性を確保できればメリットはさらに大きくなる。この場合、ディスプレイを丸めれば直径80cm程度以下となり、階段やエレベーター、一般家庭の玄関を通過して100型程度以上の大型ディスプレイを家庭に搬入できるようになる。フレキシブルでない平面のディスプレイでは、このような通路からの搬入は70型程度が限界のようである。SHV放送の高い臨場感を家庭で本格的に味わうには、このような柔軟性のあるシート型ディスプレイの実現が強く望まれる。

さらに柔軟性が増し、曲率半径数cm程度以下のシート型ディスプレイを実現できれば、映像を観視しないときはカーテンのようにロール状に巻き取るなどによって、設置スペースの有効利用が可能となり、大画面映像のさらなる普及促進が期待できる。

以上のように、フレキシブルディスプレイ、特に大画面のシート型ディスプレイは大きな魅力と可能性を秘めている。

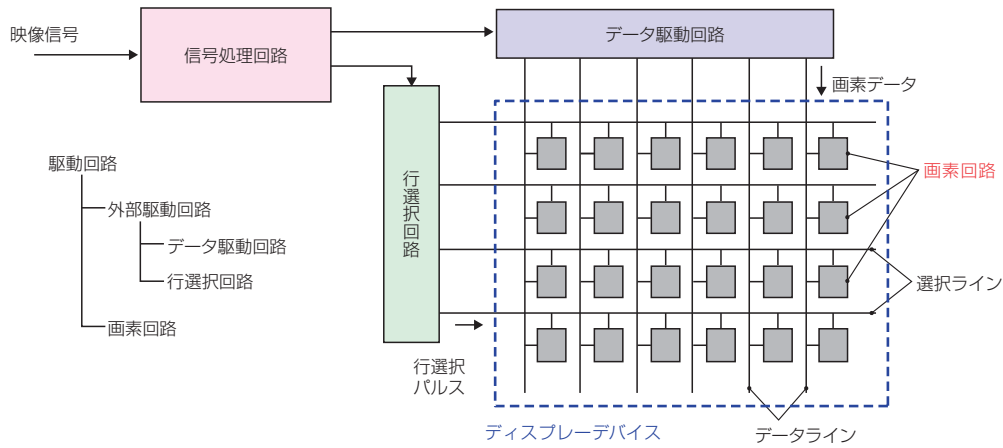
### 3. フレキシブル有機ELディスプレイの概要

#### 3.1 フレキシブル有機ELディスプレイの位置づけ

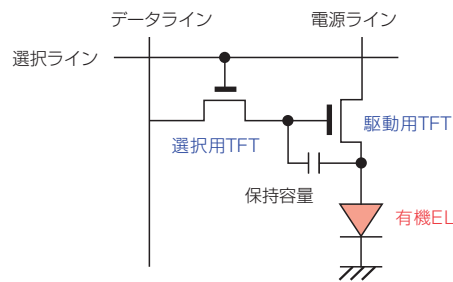
フレキシブルディスプレイはどのようなデバイスを使えば実現可能であろうか。2図は主なディスプレイデバイスの分類である。直視型の薄型ディスプレイは、通常はガラス基板上に作製するので、平面状のフラットパネルディスプレイである。しかし、それをフィルム状の柔軟なプラスチック基板の上に作製できればフレキシブルディスプレイとなる。薄型ディスプレイには何種類かのデバイスがあるが、プラスチック基板上に作製可能か、応答速度の点で動画を表示可能か、必要な精細度を確保できるかなどの観点から、動画用フレキシブルディスプレイとして有効なデバイスは、液晶ディスプレイと有機ELディスプレイにほぼ限られる。

ガラス基板の液晶ディスプレイは、現在、他のデバイスに比べて圧倒的な生産量を有している。このため、フレキシブル液晶ディスプレイは、その実現にあたって既存の製造技術・設備を利用しやすいことや、また、物性的に長期間の信頼性・安定性を確保しやすいという長所がある。しかし、液体状の液晶材料を保持するために2枚の基板が必要なことや、液晶は自ら発光しないためバックライトが必要なことがあり、薄型化、柔軟化には限界があると考えられている。

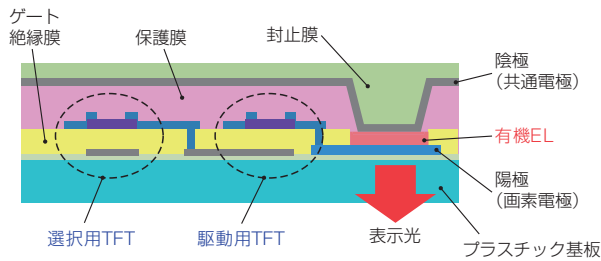
一方、有機ELは有機材料による固体の自発光デバイスである。薄い有機膜の積層構造であるとともに、バックライトが不要なため、柔軟化、薄型化に適している。このため、



(a) 全体構成



(b) 画素回路



(c) 断面構造 (例)

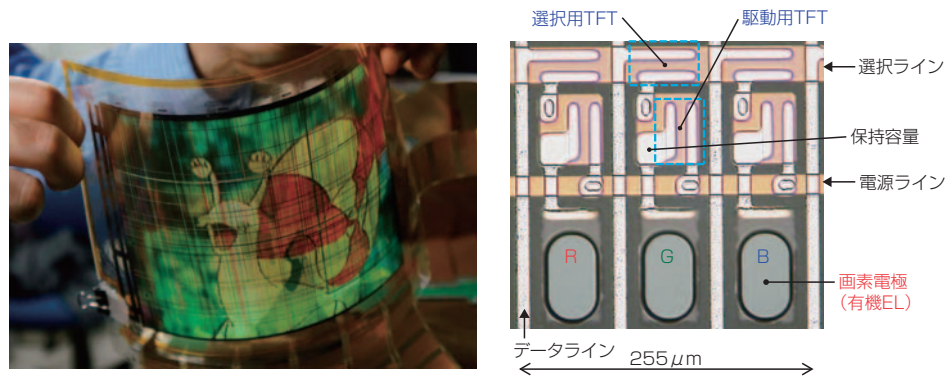
3図 フレキシブル有機ELディスプレイの構成・構造

現在ではフレキシブル有機ELディスプレイの研究開発が世界的に活発に進められている。しかし、寿命や量産性など、まだまだ課題は多い。

### 3.2 フレキシブル有機ELディスプレイの構成と構造

3図 (a) にフレキシブル有機ELディスプレイの全体構成を示す。この構成は薄型ディスプレイ全般に共通のものである。表示する映像の情報は、さまざまな信号処理を経たのち、データ駆動回路および行選択回路からなる外部駆動回路を通して画面部分すなわちディスプレイデバイスに加えられる。デバイス内には縦横に多数の選択ライン、データラインと呼ばれる配線が走っている。それらおのおのの交点に各画素の駆動・表示を行う画素回路が接続しており、全体として画素回路のアレー(配列)を構成している。

有機ELディスプレイの基本的な画素回路を3図 (b) に示す。有機ELは電流が流れることで発光するが、電流は一方方向にしか流れないため、有機EL発光素子は回路的にダイオードで表わされる。このため有機ELディスプレイはOLED (Organic Light Emitting Diode)ディスプレイ、略してOLEDとも呼ばれる。また、高精細な有機ELディスプレイの実現には、画素内に作製したTFT(Thin Film Transistor：薄膜トランジスター)で有機



(a) 映像表示の状況 (b) 画素拡大写真  
4図 当所におけるフレキシブル有機ELディスプレイの試作例<sup>10)</sup>

ELを駆動することが必要である。TFTによる駆動はアクティブマトリクス駆動と呼ばれ、TFT駆動の有機ELディスプレイはAM-OLED(Active-Matrix OLED)とも呼ばれる。

有機ELにおいては、画素回路内に選択用TFTと駆動用TFTの最低2つのTFTが必要である。選択用TFTのスイッチング動作により保持容量（コンデンサー）に画素データを取り込み、その電圧に応じて駆動用TFTにより有機ELに電流を流す。すなわち、駆動用TFTはアナログ増幅素子と同様な動作をしている。選択用TFTだけで駆動できる液晶ディスプレイと比較すると、有機ELディスプレイにはより高度なTFT技術が必要になる。この基本回路は、2つのTFTと1つのコンデンサーを有しているため、2T1C回路とも呼ばれる。

3図(c)は有機ELディスプレイにおける画素の断面構造の例である。一般に、まず選択用TFT、駆動用TFTをプラスチック基板上に作製する。駆動用TFTの電極のひとつは有機ELの陽極となる面積の広い画素電極に接続している。画素電極上に有機ELの発光素子を作製し、有機ELとTFT保護膜上に有機ELの陰極を作製して、その上に封止膜を形成する。陰極は他の画素と共通な電極である。また、陽極はITO（酸化インジウムスズ）などの透明な電極材料を用いる。有機ELで発光した光は陽極、プラスチック基板を透過してディスプレイの表示光となる。

4図は当所における最近の試作例<sup>10)</sup>である。4図(b)のように、3つの画素回路がそれぞれR（赤）、G（緑）、B（青）で発光することでカラー表示を行う。

#### 4. フレキシブル有機ELディスプレイの要素技術の概要と動向

フレキシブル有機ELディスプレイの実現にはさまざまな要素技術が必要である<sup>3)~9)</sup>。主要要素技術と関連するキーワードを2表に示す。本章では、当所での研究も含めてこれらの概要を述べる。詳細については、本特集号の関連する解説および報告も参照されたい。

##### 4.1 有機EL材料

有機EL発光素子は、発光層を中心に正孔の注入層<sup>\*1</sup>や輸送層<sup>\*2</sup>、電子の注入層や輸送層などを積層した多層の有機膜を、陽極と陰極で挟んだ構造になっている。膜厚は合計でも0.2μm程度以下の極めて薄い膜である。高性能な有機EL発光素子を実現するためには、それぞれの層について最適な材料を選択または開発する必要がある。特に発光層は、電気エネルギーの供給をスムーズにするために、発光材料であるゲスト材料をホスト材料に低濃度で分散させており、R、G、Bそれぞれについて最適なゲスト材料とホスト材料を選択または開発することが必要である。

\*1 電荷のキャリアー（正孔、電子）を電極（陽極、陰極）から有機EL内に注入しやすくするために設けられる有機層。

\*2 電荷のキャリアーを発光層へスムーズに導くために設けられる有機層。

2表 フレキシブル有機ELディスプレイの要素技術

分類	有機EL材料	有機EL素子構造	画素内駆動素子 (TFT)	基板材料・作製技術
要素技術・キーワード	<ul style="list-style-type: none"> <li>・材料の分類</li> <li>発光層(ゲスト, ホスト) (R, G, B)</li> <li>正孔注入層・輸送層</li> <li>電子注入層・輸送層</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・カラー化方法</li> <li>1) RGB塗り分け</li> <li>2) 白色+CF(カラーフィルター, RGB/WRGB)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・半導体による分類</li> <li>1) 非晶質シリコン(a-Si)</li> <li>2) 低温多結晶シリコン(LTPS)</li> <li>3) 酸化物(IGZO等)</li> <li>4) 有機半導体</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・基板材料</li> <li>1) プラスチック</li> <li>2) 薄板ガラス</li> <li>3) 金属箔</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>・発光メカニズム</li> <li>1) 蛍光</li> <li>2) リン光</li> <li>3) 熱活性遅延蛍光</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・エミッション(光放射)の型式</li> <li>1) ボトムエミッション型</li> <li>2) トップエミッション型</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・作製プロセス・材料</li> <li>プロセス温度</li> <li>ゲート絶縁膜, 保護膜</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・その他の部材</li> <li>配線材料</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>・特性</li> <li>輝度</li> <li>発光スペクトル</li> <li>駆動電圧・電流</li> <li>発光効率(内部・外部量子効率)</li> <li>信頼性・寿命(大気安定性など)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・色純度改善技術</li> <li>マイクロキャピティ(微小共振器) 構造</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・特性</li> <li>(キャリアー) 移動度</li> <li>オン・オフ電流</li> <li>しきい値電圧</li> <li>寄生容量</li> <li>画面内均一性</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・作製法</li> <li>1) 直接法                             <ul style="list-style-type: none"> <li>a) 貼り合せ・剥離</li> <li>b) 塗布形成・剥離</li> </ul> </li> <li>2) 転写法</li> <li>3) ロールツーロール法</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>・長寿命化技術</li> <li>封止, バリア層</li> <li>大気安定な逆構造(iOLED)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・回路技術</li> <li>ばらつき補正技術</li> <li>画素回路</li> <li>外部駆動回路</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・作製プロセス技術</li> <li>1) 蒸着技術</li> <li>2) 印刷(塗布)技術</li> </ul>

注) 表中で数字付きの項目は、いずれかを選択して使用する。

また、発光層の材料は発光のメカニズムに深く関わっている。発光メカニズムには蛍光<sup>\*3</sup>とリン光<sup>\*4</sup>がある。蛍光は材料の開発・実用化が進んでいるが、発光効率に直接つながる内部量子効率（有機ELに注入された電荷に対して得られる光子の割合）は25%が上限とされている。これに対し、リン光は100%の内部量子効率を実現可能であり、リン光材料は省電力型の有機ELの実現に適した材料として期待されている。しかし現状では、寿命などの点でさらなる性能改善が求められており、特に青色リン光材料の開発が遅れている。現在、リン光材料の研究開発が世界的に進められている。当所では、新たなホスト材料（発光材料を分散させてエネルギーを受け渡すための材料）を用いることにより、省電力・長寿命なリン光有機EL素子の開発に成功している<sup>11)</sup>。

また、最近では、リン光より安価な材料でリン光並みの高効率を実現できる発光メカニズムとして、熱活性遅延蛍光<sup>12)</sup> <sup>\*5</sup>と呼ばれるメカニズムとその材料が注目を浴びており、今後の動向に関心が寄せられている。

有機ELに関わる重要な特性パラメーターとして、輝度、発光スペクトル、駆動に要する電圧・電流、発光効率、寿命などがある。発光効率には前記の内部量子効率に加え、外部量子効率がある。これは、内部量子効率に光の取り出し効率を加味した値である。また、有機ELにおいては、信頼性や寿命の確保が大きな課題である。

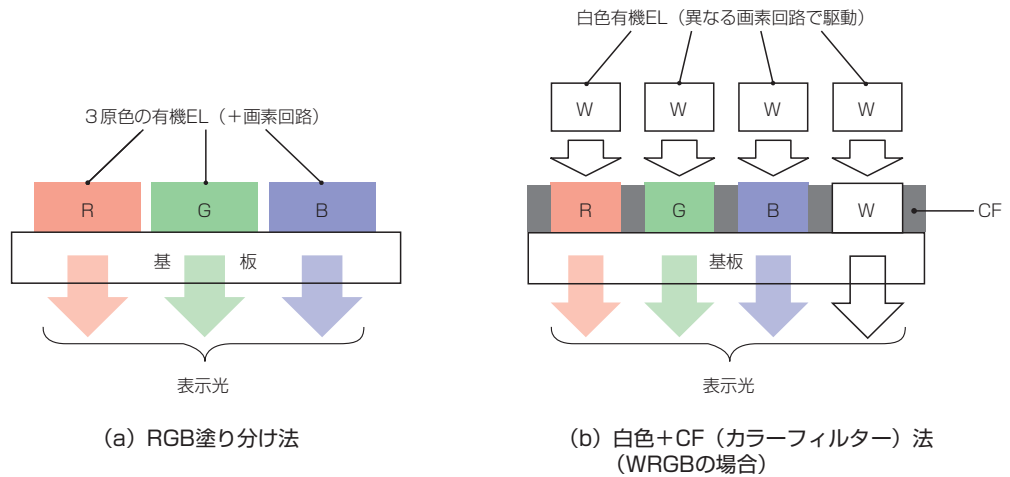
#### 4.2 有機EL素子構造

有機ELの素子構造に関する要素技術としては、まずカラー化の方法がある。4図 (b) に示した例では3つの画素回路上にそれぞれR, G, Bの有機EL素子を作製しているが、このような方法はRGB塗り分け法と呼ばれる。この構造を模式的に示すと5図 (a) のようになる。これに対し、5図 (b) に示す白色+CF (Color Filter: カラーフィルター) 法と呼ばれる方法がある。この方法では、すべての画素回路上に白色 (W) の有機EL素子を作製する。それらに位置合わせをしてカラーフィルターを配置することでカラー表示を実現する。このとき、カラーフィルターはRGBの3原色でもよいが、図のように、より高い輝度・コントラストを得やすいWRGBのカラーフィルターを用いること

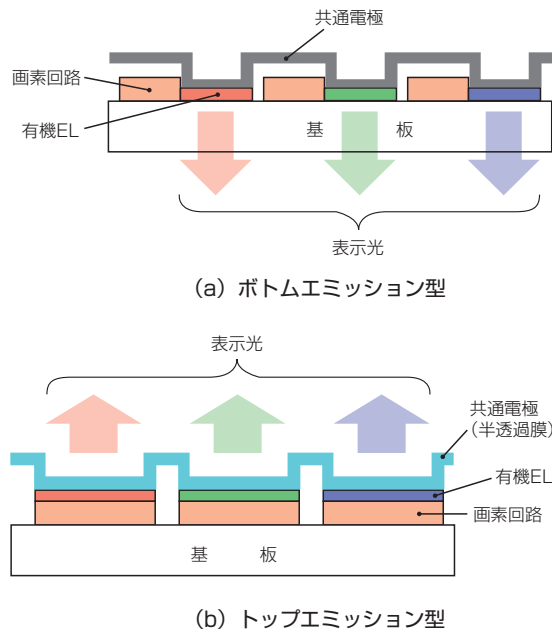
\*3  
発光層内で正孔と電子が再結合すると有機分子のエネルギーが励起された状態になる。この状態は、電子のスピン向きにより一重項励起と呼ばれる状態と三重項励起と呼ばれる状態に分かれる（詳細は本特集号の解説「有機ELの研究動向」の2章を参照）。一重項励起状態からの発光を蛍光と呼ぶ。

\*4  
三重項励起状態からの発光。

\*5  
一重項励起状態と三重項励起状態のエネルギーレベルの差を非常に小さくし、三重項励起状態から一重項励起状態への高効率なエネルギー移動を可能にすることで得られる蛍光。



5図 有機ELディスプレイのカラー化方法



6図 有機ELディスプレイのエミッション型式

が近年多くなっている。WRGBでは1つの画素に4つの画素回路が必要である。RGB塗り分け法による作製には有機ELの高精度な塗り分け技術が必要となるが、白色+CF法ではカラーフィルターにより光の利用効率が低下するため、省電力化にはRGB塗り分け法が有利と考えられる。

エミッション (光放射) の型式も重要な選択肢である。3図 (c) に示した例は、基板底部に向けて光が放射されるためボトムエミッション型と呼ばれる。この構造を模式的に示すと6図 (a) のようになる。ボトムエミッション型では、画素回路と有機ELを平面的に配置するため、発光の開口率 (画素面積に対する発光面積の割合) を高くできず、輝度を上げにくいという短所がある。これに対し、6図 (b) に示すように、共通電極に半透過膜を用いて基板上部に向けて光を放射するトップエミッション型がある。トップエミッション型では、画素回路と有機ELを上下に配置するため開口率を高くできる。このため、トップエミッション型の採用が増えつつある。

なお、トップエミッション型では、有機EL素子の陽極・陰極間の厚みをRGBで変えることにより、発光波長に対する共振作用を利用して色純度や効率の改善を図るマイクロ

キャビティー（微小共振器）構造を併用することが多い。

次に、前節でも触れたが、有機ELにおいては信頼性や寿命の確保が大きな課題である。これは、有機EL材料の一部が酸素や水に弱いためである。大気は水蒸気を含んでおり、長寿命化のためには、有機ELを水蒸気などの侵入から保護する封止は重要な技術である。特に、プラスチック基板はガラス基板よりも水蒸気透過率が高いため、フレキシブルディスプレイでは問題はより切実である。

水蒸気の侵入を防ぐために、一般に有機EL素子の陽極と陰極の外側にバリア層を設けるが、現状では、水蒸気透過率の十分低いバリア層は、高コストであるとともに大面積のフィルム基板上に作製することは困難である。そこで当所では、水分や酸素の影響を受けにくい新たな電子注入層材料を開発し、それを用いて通常とは陽極と陰極の位置を逆にした逆構造の有機ELであるiOLED（inverted OLED）を開発した<sup>13</sup>。iOLEDでは良好な大気安定性が得られている。

### 4.3 画素内駆動素子（TFT）

TFTは半導体の種類によって分類される。現在、液晶テレビなど中型以上のディスプレイで用いられているのはほとんどが非晶質シリコンによるTFT、a-Si（Amorphous Silicon）TFTである。半導体の性能は、正孔や電子の移動のしやすさ、すなわち電荷のキャリアの移動度で表される。移動度が高いことは、より小面積のTFTでもより多くの電流を流せることを表す。その単位は $\text{cm}^2/\text{Vs}$ である。一般に半導体の結晶性が高いほど移動度も大きい。a-Siは大型ディスプレイを低コストで作製できるという大きな長所があるが、非晶質であるため移動度は $1\text{ cm}^2/\text{Vs}$ どまりであり、ディスプレイの高精細化には限界がある。

低温多結晶シリコンによるTFT、LTPS（Low Temperature Poly-Silicon）TFTは、移動度が $100\text{ cm}^2/\text{Vs}$ 以上と高く、小型のディスプレイには多く使用されている。しかし作製技術に課題があり、大型のディスプレイは実現困難とされている。

近年注目されているのが酸化物半導体によるTFTである。酸化物半導体には多くの種類があるが、実用化に向けて開発が進められているのは多くがインジウム－ガリウム－亜鉛の酸化物（InGaZnO）によるTFTであり、通称IGZOと呼ばれている。IGZOは $10\sim 30\text{ cm}^2/\text{Vs}$ 程度の高い移動度を実現可能で、かつ大型ディスプレイの量産にも適性があるため、現在、これを用いたディスプレイの開発が世界的に活発に行われており、一部ではすでに実用化も始まっている。 $10\sim 20\text{ cm}^2/\text{Vs}$ 程度の移動度があればSHVディスプレイの実現も可能と考えられる。

有機半導体によるTFTは、作製技術や性能・信頼性にまだ課題があるが、柔軟性に富んだ半導体材料もあり、将来の超柔軟なフレキシブルディスプレイ用のTFTとして期待されている。当所でもその研究を進めている<sup>14</sup>。

これらのTFTを選択する上で重要なパラメーターに、作製プロセスの温度がある。一般にプロセス温度が高いほど移動度や安定性などのTFTの性能は高くなる。しかし、ガラス基板に比べてプラスチック基板の融点は低く、 $300^\circ\text{C}$ を超えるプロセス温度ではプラスチック基板上に直接TFTを作製することは困難である。これがフレキシブルディスプレイ作製におけるひとつの大きな課題になっている。もし $200^\circ\text{C}$ 以下でTFTを作製できれば、使用できるプラスチック基板材料の選択肢が広がり、より柔軟な材料も使用可能となる。前記のLTPSは $300^\circ\text{C}$ を超えるプロセス温度が必要である。これに対し、酸化物半導体TFTは $300^\circ\text{C}$ 以下の温度でも作製が可能であり、大画面フレキシブルディスプレイ用TFTとしても期待されている。ただし、酸化物半導体TFTの場合でもプロセス温



度が高い方が良好な性能を得やすく、基板の選択肢との間にトレードオフがある。

このほか、TFTの性能や信頼性に影響する重要な材料として、ゲート絶縁膜や保護膜がある。また、TFTの重要な特性パラメーターとして、前記の移動度のほかに、オン・オフのドレイン電流値、ドレイン電流が流れ始めるゲート電圧の値、すなわちしきい値電圧、ゲートとソース・ドレイン間の寄生容量、などがある。

SHV用など、ディスプレイの高精細化、高フレームレート化には、移動度の増大とともに寄生容量を小さくすることが重要である。当所では、寄生容量の小さい高性能な酸化物TFTの実現に向けて研究を進めている<sup>15)</sup>。

もうひとつ、有機ELディスプレイ用TFTにとって重要な性能に、移動度、しきい値電圧等の特性の画面内均一性がある。3図(b)で説明したように、有機EL画素回路の駆動用TFTはアナログ素子として動作している。このため、TFTの特性が画面内で均一でないと、それがそのまま輝度や色などの表示の均一性に影響する。現状のTFTでは十分な均一性が得られず、何らかのばらつき補正技術が用いられることが多い。その方法は、画素回路内で補正する方法と、外部駆動回路を含めて補正する方法に大別される。本来は前者が望ましいが、そのためには5T1C回路<sup>16)</sup>などTFTの数を増やした画素回路が必要となり、より高度なTFT技術が求められる。

外部駆動回路については、3図(a)ではディスプレイデバイスの外部に置いているが、LTPSによる小型のディスプレイではこれをガラス基板内に作製したのもも実用化されており、ディスプレイの小型・軽量化に貢献している。柔軟なフレキシブルディスプレイを実現するためには、画素回路アレーとの接続の問題から、データ駆動回路と行選択回路の少なくともどちらかはプラスチック基板内に作製することが望ましい。そのためには、より高性能なTFTをプラスチック基板上に作製する技術が必要になる。

#### 4.4 基板材料・作製技術

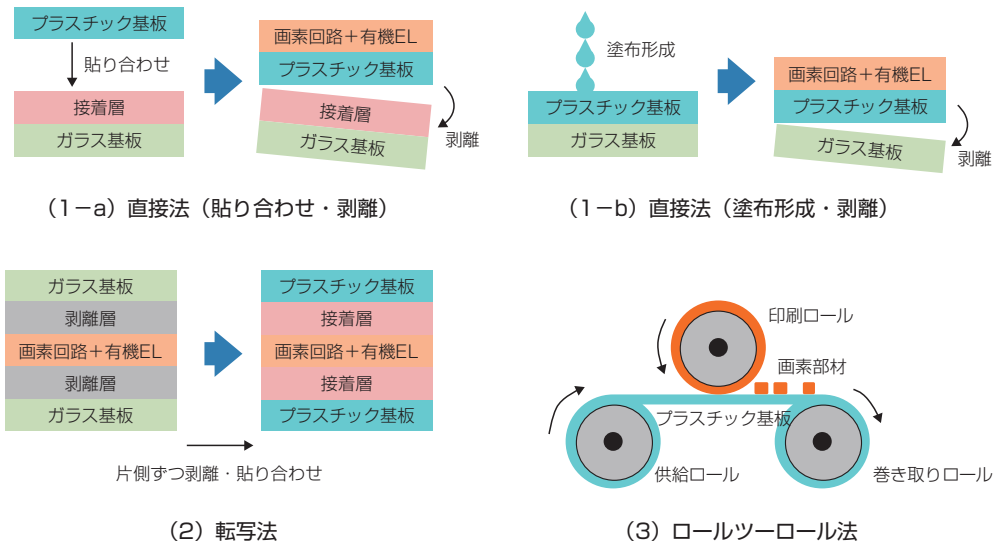
基板材料として各種のプラスチック材料が検討されているが、高い光透過率、低い線膨張率、表面平坦性、耐熱性、耐溶剤性、水蒸気バリア性など多くの性能が要求される。代表的な材料はPEN（ポリエチレンナフタレート）などであるが、すべての要求を満たすものはまだ存在しない。当所では、PEN基板による試作<sup>10)</sup>と並行して、超フレキシブル化が可能で、かつ300℃程度の耐熱性がある高性能なTFTの作製に有利な、塗布形成のポリイミド基板を用いた試作も行っている<sup>17)</sup>。

このほか、基板材料として厚さ0.2mm前後の薄いガラス板が用いられる場合もある。この場合、耐衝撃性の改善のために、プラスチック基板を貼り合わせて使用する。高性能なTFTの作製には有利であるが、柔軟性が課題である。また、ステンレス等の金属箔を基板に使用する試みも一時いくつか見られたが、最近ではあまり見られない。

その他の部材として、データライン、選択ライン等の配線材料も重要である。SHV用などの高速・高精細な画素回路アレーを駆動するには低抵抗な配線材料が必要であり、一般的なアルミに代えて、近年は銅による配線も導入されつつある。

次に、フレキシブルディスプレイの作製方法には、7図に示す方法がある。直接法は、プラスチック基板上にTFTを含む画素回路と有機ELを直接形成する方法である。7図(1-a)は、作製時の変形（湾曲、膨張、収縮等）の低減のために、支持母体としてのガラス基板上にプラスチック基板を貼り合わせ、その上に画素回路、有機TFTを作製したのちガラス基板を剥離する方法であり、各種のプラスチック基板材料を使用できる。

一方、7図(1-b)は前記のポリイミド等をガラス基板上に塗布形成して用いる方法であり、厚さ20μm程度の非常に薄いフレキシブルディスプレイの作製も可能である<sup>17)</sup>。



7図 フレキシブルディスプレイの作製方法

7図（2）は転写法と呼ばれる方法で、ガラス基板上に画素回路と有機ELを作製したのち、もう1枚のガラス基板を貼り合わせ、片側ずつガラス基板の剥離・プラスチック基板の貼り合わせを行う方法である<sup>18)</sup>。画素回路はガラス基板上に作製するので高温プロセスを使用でき、高性能な画素回路を作製できる。

ディスプレイの作製プロセスでは数多くの工程を経るが、現在は、成膜技術として、材料を真空中で加熱等により蒸発させ基板上に付着させる蒸着技術が基本となっている。これは、直接法、転写法いずれにも共通である。これらの技術は、真空の製造装置やクリーンルームなど高価な製造設備と、その運用のための大きなエネルギーが必要であり、コスト上昇の一因になっている。

これに対し、液状の材料を常温常圧中で基板に塗布して画素の部材をパターン形成する技術、すなわち印刷技術でディスプレイを作製できれば、大がかりな製造設備を必要とせず、低コスト化、量産化、大面積化に有利と考えられる。しかし、各方面で研究が進められているものの、ディスプレイ用の高精度な印刷技術はまだ確立されていない。もしこれが確立されれば、さらに進んだ技術として、柔軟なプラスチック基板を巻き取りながら連続的に加工してディスプレイを作製する7図（3）のロールツーロール法の確立も期待できる。この方法は、低コスト化、量産化、大面積化にさらに有利と考えられ、将来のひとつの理想的なフレキシブルディスプレイ作製法として期待されている。

## 5. フレキシブルディスプレイの開発動向

現在、ガラス基板のハイビジョンディスプレイはすでに技術的に成熟しており、その次の方向性として、4K、8Kの超高精細ディスプレイや、湾曲またはフレキシブルなディスプレイの開発が盛んになっている。

近年、新たなディスプレイの初公開は、毎年1月にアメリカで開催されるCES（Consumer Electronics Show）で行われることが多いが、今年のCESでは多数の高精細な大型湾曲ディスプレイが展示され注目を浴びた。主なものを3表に示す。湾曲ディスプレイには有機ELも液晶もあるが、3表では有機ELのみを取り上げた。いずれにおいても基板にはガラスが用いられていると推測され、曲率半径は大きな値にとどまっている。やはり、プラスチック基板による大型ディスプレイの開発が望まれる。

3表 大型湾曲ディスプレイの最近の主な開発例

開発機関	サムソン	LG	パナソニック
発表時期	2014年1月	2014年1月	2014年1月
画面サイズ (型)	85	77	55
画素数	3,840×2,160	3,840×2,160	3,840×2,160
精細度	52ppi*	57ppi	80ppi
表示素子	有機EL	有機EL	有機EL
基板材料	薄板ガラス	(未公表)	(未公表)
曲率	可変	可変	固定 (凹面と凸面)
曲率半径	4.2m	6m	2m

\*pixels per inch : 1 インチ当たりの画素数。

4表 フレキシブル有機ELディスプレイの最近の開発例 (6型以下)

開発機関	SEL (半導体エネルギー研究所)・シャープ	パナソニック・imec他	LG
発表時期	2013年5月	2013年5月	2013年10月
画面サイズ (型)	3.4 <sup>18)</sup>	4.0 <sup>19)</sup>	6
画素数	540×940	224×224	1,280×720
精細度	326ppi	80ppi	248ppi
カラー化方法	白色+CF	RGB塗り分け	(未公表)
エミッション型式	トップ	トップ	(未公表)
TFT	CAAC-IGZO	IGZO	(未公表)
基板材料	プラスチック (詳細未公表)	PEN	ポリイミド (塗布型)
曲率半径	5mm	10mm	700mm
備考	曲率半径5mm以下の連続曲げ試験で10万回以上の耐性を確認 <sup>18)</sup>		本ディスプレイを搭載したスマートフォンを2013年11月より発売

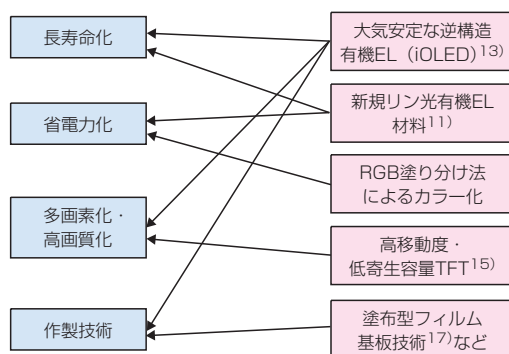
プラスチック基板によるフレキシブルディスプレイの開発も近年加速している。それらは携帯電話用などへの応用を目指した6型程度以下の小型のものと、ある程度の大型化を指向した8型程度以上のものに分けられる。

4表は小型のフレキシブル有機ELディスプレイの最近の開発例である。4表の3.4型<sup>18)</sup>と4.0型<sup>19)</sup>はいずれもトップエミッション型であり、TFTにはいずれもIGZOを用いている。ただし3.4型はCAAC (C-Axis Aligned Crystalline) -IGZOと呼ばれる結晶性を有するIGZOである (一般のIGZOは非晶質)。そのためか、326ppiという高い精細度を実現している。カラー化法については、3.4型が白色+CF法、4.0型がRGB塗り分け法と対応が分かれている。これらはいずれも曲率半径10mm以下を実現しているとのことであり、小型の試作品であれば、柔軟性に優れたディスプレイもすでに作製されている。6.0型のは最近スマートフォンに搭載され製品化されたとのことであるが、技術的詳細はまだ公表されていない部分もある。また、曲率半径は700mmと大きな値である。

5表は、8型以上のプラスチック基板を用いたフレキシブルディスプレイの最近の開発例である。このクラスでは曲率半径を明示した発表はまだ見当たらない。カラー化方法、エミッション型式については対応が分かれている。TFTはいずれもIGZOもしくはCAAC-IGZOである。当所による8型のもの<sup>10)</sup>は、低いプロセス温度と、R、Gの有機ELに高効率、長寿命な独自のリン光材料を使用していることが特徴である。9.9型のもの<sup>20)</sup>はトップエミッション型である。10.2型のもの<sup>21)</sup>は、基板材料に塗布型のポリイミドを用いていることが特徴である。13.5型のもの<sup>22)</sup>は、作製法に転写法を用いているため高

5表 フレキシブル有機ELディスプレイの最近の開発例（8型以上）

開発機関	NHK技研	ソニー	東芝	SEL（半導体エネルギー研究所）・シャープ	ASU（アリゾナ州立大）・陸軍研究所
発表時期	2013年5月	2012年6月	2013年5月	2013年5月	2013年5月
画面サイズ（型）	8.0 <sup>10)</sup>	9.9 <sup>20)</sup>	10.2 <sup>21)</sup>	13.5 <sup>22)</sup>	14.7 <sup>23)</sup>
画素数	640×480	960×540	1,920×1,200	3,840×2,140	960×720
精細度	100ppi	111ppi	223ppi	326ppi	81ppi
有機EL材料	リン光、蛍光	（未公表）	（未公表）	リン光、蛍光	全てリン光
カラー化方法	RGB塗り分け	白色+CF	白色+CF	白色+CF	RGB塗り分け
エミッション型式	ボトム	トップ	ボトム	トップ	ボトム
TFT	IGZO	IGZO	IGZO	CAAC-IGZO	IGZO
画素回路構成	2T1C	2T1C	2T1C	5T1C	2T1C
基板材料	PEN	プラスチック（詳細未公表）	透明ポリイミド（塗布型）	プラスチック（詳細未公表）	PEN
作製法	直接法	直接法	直接法	転写法	直接法
プロセス温度	最大190℃	（未公表）	最大300℃	300℃以上	最大200℃



8図 SHV用シート型ディスプレイ実現への課題と取組み

温プロセスを使用でき、CAAC-IGZO TFTにより、326 ppiという高い精細度と5 T 1 C画素回路によるばらつき補正回路の内蔵を実現している。14.7型のもの<sup>23)</sup>は、精細度は低いが発現時点で最大のサイズを実現している。また、RGBすべての有機ELにリン光材料を用いているが、Bについては、駆動電圧が高く、発光色の色度も望ましい青色よりやや緑色方向にずれているため、まだ開発中とのことである。

以上のように、フレキシブルディスプレイの開発は世界的に活発に研究開発が進められているが、特にプラスチック基板を用いた大型のものはまだ開発途上にある。

## 6. SHV用シート型ディスプレイ実現への課題と取り組み

当所では、家庭に搬入可能なSHV用シート型ディスプレイの実現を目指して研究を進めているが、4章で述べたように課題は多い。主な課題に対する当所の主な取組みを8図に示す。

最重要課題の1つである、プラスチック基板の大型ディスプレイにおける長寿命化に関しては、4.2節で述べた大気安定な逆構造有機EL、iOLED<sup>13)</sup>の効果に期待しており、これに関する研究開発を外部と連携して進めている。iOLEDであれば簡易な封止でもよい可能性があり、作製法簡素化への寄与も期待できる。加えてiOLEDは、n型半導体である酸化物TFTによる画素回路との相性が良く、高画質化への寄与も期待できる。

また、大型のディスプレイでは、省エネの観点からも省電力化はより重要である。4.1

節で述べた新たなホスト材料を用いた新規リン光材料<sup>11)</sup>は、長寿命化と省電力化の双方に貢献できると期待される。すでに赤、緑の材料は開発済みであり、現在、青の材料を開発中である。また、4.2節で述べたように、カラー化法としてはRGB塗り分け法の方が省電力化を期待できるため、この方法を中心に研究を進めている。

SHVディスプレイに必要な多画素駆動や高画質化には、4.3節で述べたようにTFTの移動度の増大と寄生容量の低減が重要であり、高移動度・低寄生容量のTFTの構造・作製法<sup>15)</sup>の開発を中心に、高移動度の新規半導体材料の開発も含めて研究を進めている。

ディスプレイ作製技術に関しては、柔軟な大型ディスプレイの作製にはやはり直接法が有利と考えられ、4.4節で述べた塗布型フィルム基板技術などを研究しているほか、将来の低コスト化に向けて、印刷による作製技術も研究している。

これらの研究開発を進めることで、SHV用シート型ディスプレイをぜひ実現したい。

## 7. おわりに

ディスプレイの世界では、昔から壁掛けテレビと紙のように薄くて柔らかいディスプレイが夢だったと聞いている。壁掛けテレビは、プラズマディスプレイや液晶ディスプレイによってハイビジョンテレビとしてすでに実現した。次はフレキシブルテレビの番である。まだまだ課題は多いが、薄くて柔らかい大画面のシート型スーパーハイビジョンディスプレイの実現に向けて、研究開発を進めていきたい。

---

## 参考文献

- 1) 栗田：“情報ディスプレイ概要,” 映像情報メディア工学大事典技術編, オーム社, pp.32-40 (2010)
- 2) M. Sugawara, M. Emoto, K. Masaoka, Y. Nishida and Y. Shishikui：“SUPER Hi-VISION for the Next Generation Television,” ITE Trans. on MTA, Vol.1, No.1, pp.27-33 (2013)
- 3) NHK技研R&D：動画用フレキシブルディスプレイ特集号, No.120 (2010)
- 4) 時任ほか：“特集有機ELパネルの最新開発動向,” 映情学誌, Vol.67, No.12, pp.13-39 (2013)
- 5) 藤掛：“フレキシブルディスプレイの基礎,” 映情学誌, Vol.67, No.12, pp.40-45 (2013)
- 6) 野澤：“有機EL, 新天地へ進め,” 日経エレクトロニクス, 2013年6月24日号, pp.27-49 (2013)
- 7) 竹居, 田中：“薄型・軽量から貼り付け可能へ, 樹脂基板対応の開発が加速,” 日経エレクトロニクス, 2013年7月22日号, pp.36-42 (2013)
- 8) 平形, 瀬尾：“高精細有機ELディスプレイの開発,” OPTRONICS, No.12, pp.33-39 (2013)
- 9) 清水, 深川：“フレキシブル有機ELディスプレイ,” OPTRONICS, No.12, pp.40-44 (2013)
- 10) 武井, 中嶋, 中田, 本村, 辻, 深川, 清水, 藤崎, 山本, 栗田：“大画面シート型テレビを目指したフレキシブル有機ELディスプレイ,” 映情学年次大, 16-5 (2013)
- 11) H. Fukagawa, T. Shimizu, Y. Kiribayashi, Y. Osada, T. Kamada, T. Yamamoto, N. Shimizu and T. Kurita：“Molecular Design of Hole-Transporting Material for Efficient and Stable Green Phosphorescent Organic Light-Emitting Diodes,” Appl. Phys. Lett., Vol.103, 143306 (2013)

- 12) H. Uoyama, K. Goushi, K. Shizu, H. Nomura and C. Adachi : “Highly Efficient Organic Light-Emitting Diodes from Delayed Fluorescence,” Nature, Vol.492, pp.234–238 (2012)
- 13) H. Fukagawa, K. Morii, Y. Arimoto, M. Nakata, Y. Nakajima, T. Shimizu and T. Yamamoto : “Highly Efficient Inverted OLED with Air-Stable Electron Injection Layer,” SID 2013 DIGEST, P-140L, pp.1466–1469 (2013)
- 14) Y. Fujisaki, H. Ito, Y. Nakajima, M. Nakata, H. Tsuji, T. Yamamoto, H. Furue, T. Kurita and N. Shimizu : “Direct Patterning of Solution-Processed Organic Thin-Film Transistor by Selective Control of Solution Wettability of Polymer Gate Dielectric,” Appl. Phys. Lett., Vol.102, 153305 (2013)
- 15) M. Nakata, H. Tsuji, Y. Fujisaki, H. Sato, Y. Nakajima, T. Takei, T. Yamamoto and T. Kurita : “Fabrication Method for Self-Aligned Bottom-Gate Oxide Thin-Film Transistors by Utilizing Backside Excimer-Laser Irradiation through Substrate,” Appl. Phys. Lett., Vol.103, 142111 (2013)
- 16) T. Tanabe, S. Amano, H. Miyake, A. Suzuki, R. Komatsu, J. Koyama, S. Yamazaki, K. Okazaki, M. Katayama, H. Matsukizono, Y. Kanzaki and T. Matsuo : “New Threshold Voltage Compensation Pixel Circuits in 13.5-inch Quad Full High Definition OLED Display of Crystalline In-Ga-Zn-Oxide FETs,” SID 2012 DIGEST, 9.2, pp.88–91 (2012)
- 17) 本村, 中嶋, 中田, 武井, 山本, 栗田, 清水 : “極薄ポリイミドフィルムに形成したフレキシブル有機ELディスプレイ,” 信学論, Vol.J97-C, No.2, pp.61–68 (2014)
- 18) A. Chida, K. Hatano, T. Inoue, N. Senda, T. Sakuishi, H. Ikeda, S. Seo, Y. Hirakata, S. Yamazaki, S. Yasumoto, M. Sato, Y. Yasuda, S. Okazaki, W. Nakamura and S. Mitsui : “3.4-inch Flexible High-Resolution Full-Color Top-Emitting AMOLED Display,” SID 2013 DIGEST, 18.2L, pp.196–198 (2013)
- 19) Y. Fukui, M. Shibata, Y. Tanaka, K. Okamoto, K. Morita, K. Otake, A. K. Tripathi, B. v. d. Putten, J.-L. v. d. Steen, K. Tempelaars, L. v. Leuken, F. Li, I. Yakimets, G. Gelinck, K. Myny, S. Smout, M. Willegems, S. Schols, S. Steudel, J. Genoe and P. Heremans : “Full Color Flexible Top-Emission AMOLED Display on Polyethylene Naphthalate(PEN)Foil with Metal Oxide TFTs Backplane,” SID 2013 DIGEST, 18.4L, pp.203–206 (2013)
- 20) M. Noda, K. Teramoto, E. Fukumoto, T. Fukuda, K. Shimokawa, T. Saito, T. Tanikawa, M. Suzuki, G. Izumi, S. Kumon, T. Arai, T. Kamei, M. Kodate, S. No, T. Sasaoka and K. Nomoto : “Oxide TFTs and Color Filter Array Technology for Flexible Top-Emission White OLED Display,” SID 2012 DIGEST, 74.1 L, pp.998–1001 (2012)
- 21) N. Saito, T. Ueda, K. Miura, S. Nakano, T. Sakano, Y. Maeda, H. Yamaguchi and I. Amemiya : “10.2-inch WUXGA Flexible AMOLED Display Driven by Amorphous Oxide TFTs on Plastic Substrate,” SID 2013 DIGEST, 70.1L, pp.443–446 (2013)
- 22) T. Aoyama, R. Komatsu, R. Nakazato, N. Ohno, Y. Jinbo, S. Eguchi, A. Chida, S. Kawashima, Y. Hirakata, S. Yamazaki, M. Ohno, J. Yanaka, S. Obana, K. Yamamoto, Y. Yasuda, S. Okazaki, W. Nakamura and S. Mitsui : “13.5-inch Quadra-FHD Flexible AMOLED with Crystalline Oxide FET,” AM-FFPD '13, 6-2, pp.223–226 (2013)
- 23) B. O'Brien, Y. K. Lee, M. Marrs, J. Smith, M. Strnad, E. Forsythe and D. Morton : “14.7” Active Matrix PHOLED Displays on Temporary Bonded PEN Substrates with Low Temperature IGZO TFTs,” SID 2013 DIGEST, 70.2L, pp.447–450 (2013)



くりたたいちろう  
栗田 泰市郎

1980年入局。長野放送局を経て、1982年から放送技術研究所において、テレビ方式、映像信号処理、プラズマディスプレイ、ディスプレイの動画表示画質、フレキシブルディスプレイなどの研究開発に従事。現在、放送技術研究所新機能デバイス研究部研究主幹。博士（工学）。