色変換方式による有機 EL ディスプレイ

桜井　建弥（さくらい　けんや）

1　まえがき

液晶を主体にした FPD（Flat Panel Display）はパソコン用モニタなどのキラーアプリケーションを創出し，大きな発展を遂げてきた。さらなるマルチメディアおよび携帯機器の発展に伴って，より薄く軽く，低消費電力で，どこでも誰でも，美しい画像で，より多くの情報が得られる次世代ディスプレイデバイスへの期待がますます高まっている。その中で最も注目されているのが有機 EL（Electro-luminescence）である。液晶と違って，自発光型超薄膜固体デバイスで，広視野角，薄い，高速動画対応可能などの特徴を有している（**表１**参照）。

大手電機メーカーはもちろん，FPD メーカーなど多くの参入メーカーがその技術開発にしのぎを削っている。その世界市場規模は 2005 年に数千億円，そして 2010 年には１兆円規模と予測されている。すでに車載用，携帯電話用のモノカラー，エリアカラーなどの量産供給は開始されているが，フルカラー有機 EL の量産化は大きく出遅れている。この原因は，これまでフルカラー化技術の主流である三色（RGB：Red，Green，Blue）塗り分け法の欠点である低歩留り，品質問題の顕在化および競合する液晶ディスプレイの急速な高性能化によるものと考えられる。高いポテンシャルを有する有機 EL が次世代のディスプレイデバイスとして，拡大するには超えねばならない高いバリアが存在する。それは高輝度（高発光効率）化，寿命問題，そして低歩留り，品質問題の大幅な改善である。

富士電機は特徴ある色変換（CCM：Color Conversion Materials）法によるフルカラー化技術を選択し，その課題をブレークスルーし，次世代有機 EL のフルカラー化を加速することを目的に研究開発を推進してきた。その主な技術と得られた結果を他の方法と比較して述べ，そして高いポテンシャルを有する CCM 法の将来の技術戦略へ言及する。

表１　有機EL（OLED）と液晶（LCD）の比較

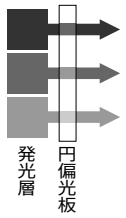
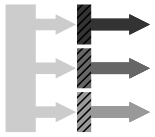
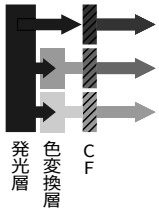
比較項目	OLED	LCD
薄型，軽量	◎	△
コントラスト	◎	○
輝度	○	○
高速応答	◎	△
視野角	◎	○
消費電力	○	○
部品点数	◎	△
コスト	○	○

有機ELの場合はポテンシャル

2　フルカラー化技術の課題

大きく分けて三つの技術がある，三色（RGB）塗り分け法，白色＋ CF（Color Filter）法，そして CCM 法である。それらの比較を**表２**に示す。RGB 方式は RGB 三種の発光材料をシャドーマスクを使用し蒸着する。真空内のメカニカル搬送，調整機構が重要で，歩留り，生産性の点に課題がある。一方，白色＋ CF 法は白色光を CF でカットし，三原色を発光する方式である。本方式はマスク蒸着を必要とせず，比較的簡単な有機製膜法が適用可能であり，

表２　有機ELフルカラー化技術の比較

	三色塗り分け法	白色発光＋CF法	色変換法（CCM）
原理			
長所	高発光効率の可能性（材料バランス悪，円偏光板ロス大）	有機発光層形成が単純（歩留り，品質優位）	単色有機層の単純工程（歩留り，品質優位）
短所	○大面積困難 ○高精細度困難 ○塗り分け法難易度高い（歩留り，品質低下）	○低い発光効率（白色光の低効率）	○CCM，CF工程数多い

桜井　建弥

パワー半導体，アモルファス太陽電池，有機 EL の研究開発に従事。現在，(株)富士電機総合研究所有機 EL 開発部長。工学博士。

歩留り，生産性で優位と考えられる。しかし，白色光成分の RGB のバランスがよく，高い効率が必要であり，この高効率の実現および色度の安定性に課題を残している。CCM 方式も単純な有機製膜法が適用可能で，歩留り，品質の点で優位である。しかし，CCM の工程が増えること，原理的にエネルギー変換を介することによる低い効率を解決できるかが大きな問題と考えられてきた。

富士電機はこの課題をディスプレイデバイスの原点から見直し，解決し，その CCM 方式のポテンシャルの高さを実証してきた。次の章でその主な技術を紹介する。

3　有機 EL のフルカラー化を加速する色変換技術

3.1　従来の色変換技術

色変換するコンセプトは以前からある，有機 EL に適用しフルカラーを実現しようとしたのは，出光興産(株)である。そのほかの数社も考えは保有していたと思われるが，具体的な研究開発には着手していなかったと思われる。ここで，CCM 有機 EL の発光機構を**図 1** に示す。青色 EL をバックライトとして発光させ，その光を色変換層に導入し，赤，緑 CCM 層で波長変換させ，赤色，緑色を発光させる。青色は変換させる必要はなく CF 層のみ通過して外部発光する。CF の役割は色度調整とコントラスト改善にある。つまり，EL 発光色はモノカラーでよく，これを波長変換する機能を別な層に演じさせて三原色を作っている。以前の CCM 方式有機 EL の性能は発光効率が R で 1cd/A 以下，コントラスト比 45：1（500 lx 下）と低く，液晶はもとより，RGB 方式の性能に比して大きな後れをとっていた。

3.2　ディスプレイデバイスとしての評価

ディスプレイデバイスとしては高輝度（高発光効率）と見栄えのよさ（高コントラスト）の両立が不可欠である。この観点から，主流である RGB 方式と CCM 方式の評価を試みた。**図 2** はコントラストと発光効率の間にシビアなトレードオフ関係が存在することを示している。RGB 方式ではコントラストを改善するために円偏光フィルタを搭載せざるを得ない，そしてこれは輝度を半分以下に低減させる。つまり，原理的に高効率であるとされた RGB 方式ではあるが，効率を大きく犠牲にして，見栄えを確保せざるを得ないのである。さらに，RGB 方式ではそれぞれの発光材料の寿命低下率が大きく異なっており，色ずれが起こりやすい。何らかのソフトウェア的な対応策が不可欠である。CCM 方式のデバイス構造，特徴から考えて，このトレードオフ関係を大きくブレークできると考え挑戦してきた。また，輝度半減寿命においても，従来の三色塗り分け方式の PM（Passive Matrix）駆動寿命は 2,000 ～ 3,000 h 程度であり，大幅な改善を目標に推進した。

3.3　高発光効率化と長寿命化技術

輝度と半減寿命には強い関係があり，より高輝度では寿命は大幅に低減する。したがって，より高効率化を実現し，低い電流でも高い輝度を得ることは重要である。加えて，輝度劣化の原因を明確にし対策を打つことが不可欠である。まず発光効率と輝度劣化のメカニズムを明確にすることを目的として研究開発を推進した。

3.3.1　発光効率と輝度半減メカニズム

有機 EL の発光メカニズムは半導体接合のそれとは大きく異なっている。半導体接合では電子，正孔の再結合時のエネルギーがフォトンを放出する。一方，有機 EL では両キャリヤの再結合はランジェバン再結合に支配され，そのエネルギーが励起子を生成し，それが基底状態に緩和するときのエネルギーがフォトンを放出する。高い発光効率を実現するために，発光層（ホスト）にゲストと呼ぶ蛍光色

図 1　CCM 有機 EL の発光原理

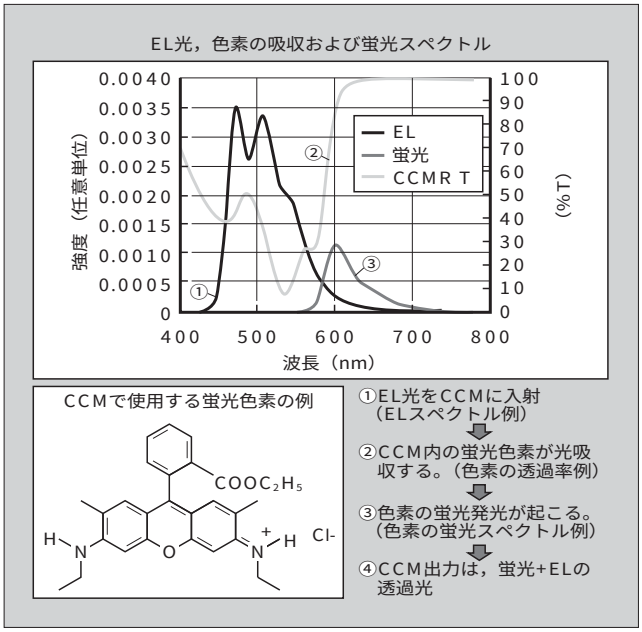
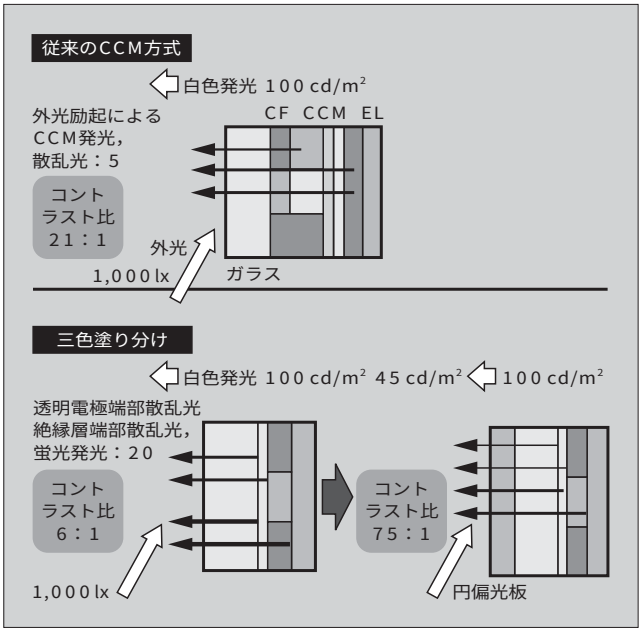


図 2　コントラスト（視認性）比較



素をドーピングすることが行われている。この系における発光機構を単純化して**図 3** に示す[(1)]。両電極から有機膜中に両キャリヤが注入，輸送され，再結合し，励起子生成が起こり，そして励起子緩和が起こる。これが発光機構である。電流のうちのある割合が電子正孔対として再結合に寄与する。さらにその再結合の一部が励起子生成に使われる。このとき量子スピン統計の要請によって，一重項と三重項励起子の発生割合が 1：3 に決定される。これまでの有機 EL では一重項励起子しか利用できなかったが，さらに高い発光効率を得るために三重項励起子を利用する技術が注目を集めている。したがって，内部発光量子効率 η_i は電子ー正孔の注入バランスファクター $\boldsymbol{\gamma}$，再結合による発光性励起子生成効率 β，一重項励起子からの量子効率 ϕ とすると η_i は次式で表される。

$$\eta_i = \boldsymbol{\gamma}\beta\phi$$

これに外部取出し効率を掛ければ，最終的な外部発光効率を得ることができる。

富士電機の有機 EL の発光効率，寿命が決定される機構を探るために，先述の理論から出発し，劣化メカニズムの理解とどこに改善のポイントが存在するのか？　を目的に幾つかのモデル実験を実施した。例えば，流すキャリヤを電子のみ，または正孔のみを可能とするモデル構造を作成し，移動するキャリヤ種，電流密度，電極材料，デバイス層構造，有機材料などによる発光効率および輝度半減寿命について多くの知見を得た。ここにその一端を紹介する。**図 4** にデバイス構造と輝度半減寿命の関連を示す。陽極を透明電極で構成する有機 EL 構造では，電子注入，電子輸送の性能が寿命や効率に与える影響が非常に大きいことが明確になった。そのほかにも，電気的・光学的測定や電気化学的評価方法によって，劣化しやすい有機材料の特定，その不純物量との関係などを明らかにしてきた。

3.3.2　輝度半減寿命の改善

これらの知見による高性能のための具体的策を実施し実現してきた。ポイントは，

(1)　キャリヤバランスの改善：各有機膜の移動度および厚さの最適化と各電極製法の改善によって実現

(2)　電子輸送層の改善

(3)　電流発光効率の改善

(4)　有機製膜，封止工程の水分量，ガス量の低減

(5)　無機絶縁材料の適用

(6)　CF，CCM 材料内蔵水分量の低減

(7)　ガスバリア膜の改善

などによって大幅に半減寿命が改善された。

3.3.3　発光効率の改善

先述の調査分析から，従来の CCM 有機 EL の課題は，

(1)　キャリヤバランスが悪いことによる効率低下

(2)　発光スペクトル不適

(3)　高電流（高輝度）時の効率低下

が重要であることが判明した。**図 5** にバランスファクターの概念を示す。**3.3.1** 項でも述べたように，キャリヤバランスファクターは効率はもとより，寿命に与える影響も非常に大きい。可能な限り理想状態 1 に近づけることが肝要である。それには電子・正孔の注入，輸送および再結合領域へのキャリヤ閉じ込めなどが重要である。具体的には電子，正孔注入効率改善，有機膜の移動度と厚さの最適化，

図３　発光メカニズム

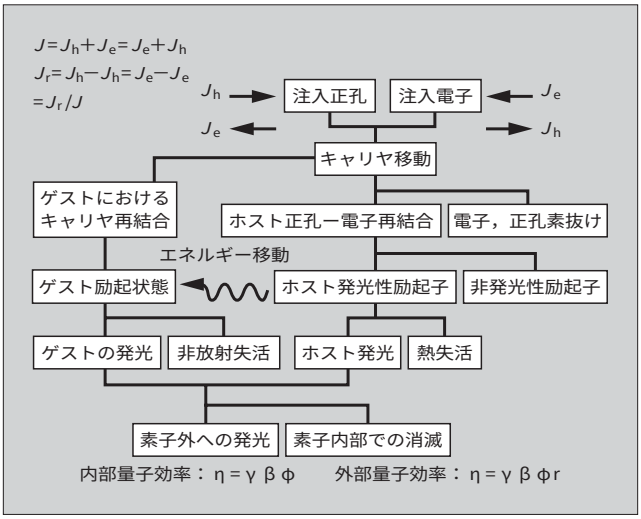


図４　有機 EL デバイス構造と寿命の関係

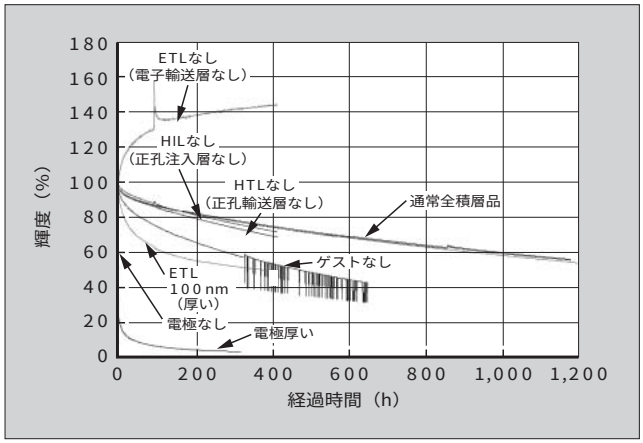


図５　電流バランスファクター

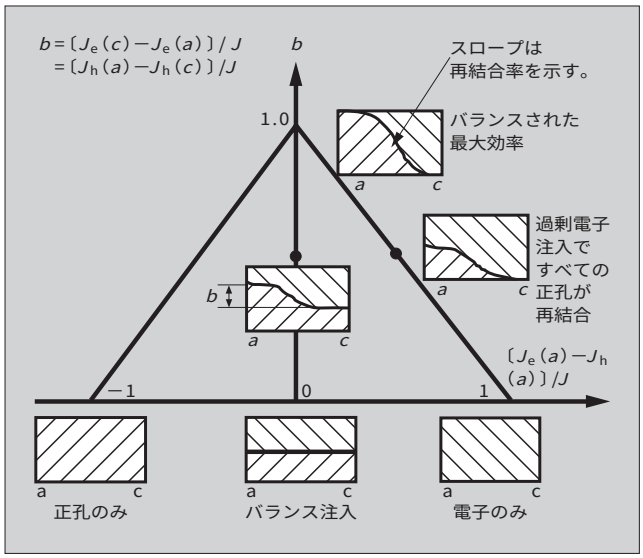
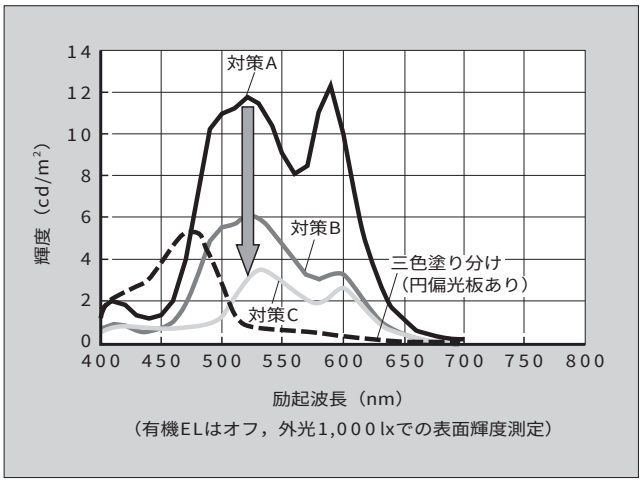


図６　暗時パネル表面輝度の改善



有機膜のバンドエンジニアリングなどが肝要である。これらを統合してデバイス設計することで高効率・長寿命有機 EL が実現された。

加えて，CCM 方式では EL 発光と CCM，CF の波長変換スペクトルの最適化が重要である。RGB 方式が有機発光材料からの EL 光だけによって決まるのと大きく異なる。つまり，CCM 方式は機能分離（EL 発光，色変換と色度調整）されており，それぞれの最高機能を複合することによって，高性能化が実現できるのである。従来適用されていた純青色 EL 発光である必要はまったくなく，CCM の変換効率，スペクトルに合わせた EL 光が望ましい。結果として青緑スペクトルに近い EL 発光の適用でさらなる高効率化を実現した。

3.3.4　コントラストの改善

円偏光フィルタなしでコントラスト比を向上させるためのポイントは何か評価分析した。CCM 方式における主な課題は，

(1)　外光による CCM 材料の蛍光発光

(2)　CF の散乱，画素エッジ部の散乱光

によることが判明した。また，同時に輝度の改善も不可欠である。具体的には CCM 有機 EL に最適な CF のスペクトルを実現，CF の散乱光および画素エッジ部の散乱を低減した。また，ブラックマトリックスと画素面積の最適化も実現した。これらの技術によって円偏光フィルタ付きの RGB 方式と比較して，円偏光フィルタなしの CCM 有機 EL で同等以下の暗時表面輝度を実現した。この結果を**図６**に示す。

3.3.5　得られた結果と他社比較

表３に RGB の発光効率の比較を示す。最先端を走っていると目される競合のそれ（すべて RGB 方式）と比較した。条件はコントラスト比が少なくも 1,000 lx 照射，100 cd/m² 発光で 100：1 以上での状態を想定して比較してある。なぜなら，コントラスト比の規定なしに，ディスプレイデバイスとしての効率を比較することはできないからである。総合的に CCM 方式の効率が上回っていることが明確である。将来，性能の見積りにおいても CCM の高いポテンシャルが示される。

表３　主な競合との発光効率の比較

会　社	R	G	B
A社（2002）（蛍光）	1.7 cd/A（0.62，0.38）	7.3 cd/A（0.28，0.67）	1.7 cd/A（0.14，0.12）
B社（2002）（蛍光）	0.9 cd/A（0.65，0.34）	4.5 cd/A（0.28，0.67）	1.1cd/A（0.17，0.17）
C社（2002）（蛍光）	2.3 cd/A（0.6，0.38）	5.8 cd/A（0.3，0.65）	2.1cd/A（0.14，0.16）
C社（見積り値）（R，G：りん光，B：蛍光）	[2.5 cd/A]（0.65，0.35）	[9.9 cd/A]（0.27，0.62）	[2.5 cd/A]（0.14，0.16）
富士電機 CCM方式（2002）（蛍光）	2.1cd/A（0.64，0.34）	8.1cd/A（0.23，0.66）	2.1cd/A（0.13，0.13）
CCM方式-II（見積り値）（りん光，高効率 CCM）	[3.0 cd/A]（0.64，0.34）	[12 cd/A]（0.23，0.66）	[3.0 cd/A]（0.13，0.13）

発光効率：円偏光板付きRGB法
すべてのデバイスは100：1以上（1,000 lx，100 cd/m²）

図７　フルカラー有機 EL の PM 駆動試験

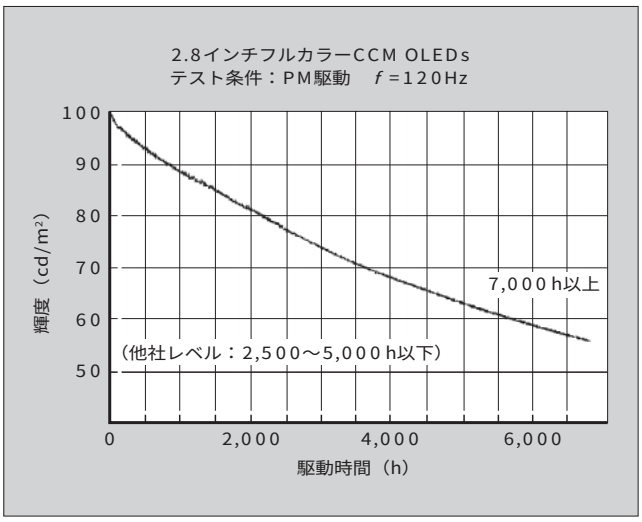


図７にフルカラー PM 駆動寿命試験（全面白色点灯）における輝度低下曲線を示す。半減時間はおよそ 7,000 h 以上であり，競合のそれ（RGB 方式）を大きく引き離している。CCM 方式の輝度劣化の主体は EL 発光の輝度劣化であり，CCM の変換効率の変化は少ない。

4　CCM 有機 EL のさらなる高性能化に向けて

CCM 方式は機能分離デバイスであり，それぞれの機能を単独に高性能化させ，総合的に性能向上につなげることが可能である。つまり，性能向上に向けて技術的選択肢が多いといえる。**図８**に見られるように，CCM の変換効率，EL 光の効率を向上させ，大幅な高輝度化の実現に向けて技術革新を推進している。CCM 方式の高効率，安定な色バランスの特徴を生かして，PM 駆動の応用拡大を考えている。PM 駆動で 130 ppi（ピクセル/インチ）が実現可能になれば，低コストフルカラー有機 EL の適用分野が広が

図８　CCM 有機 EL の性能向上

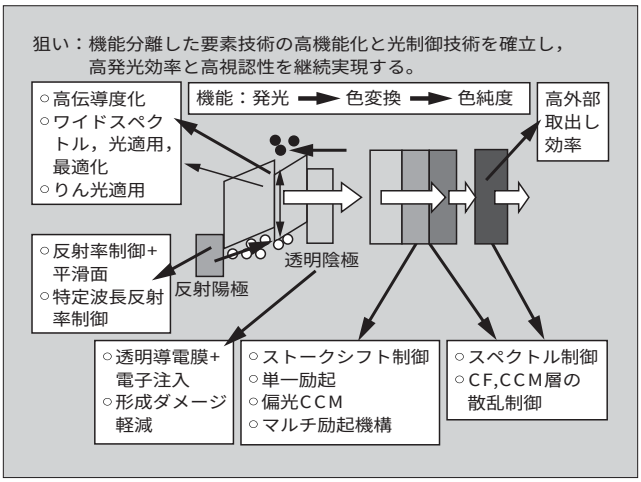
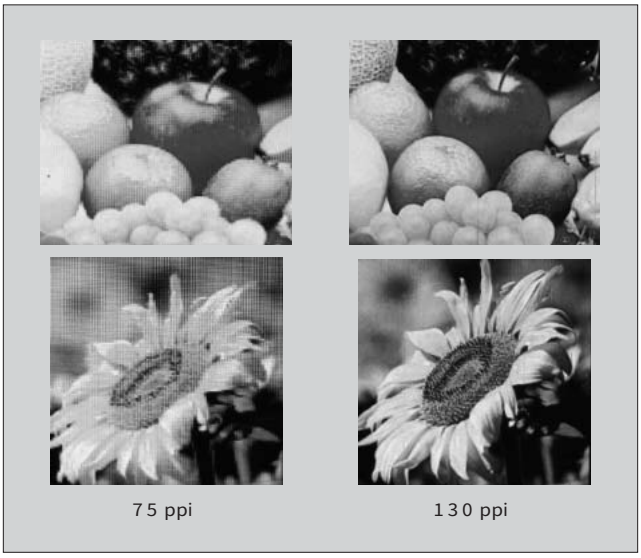


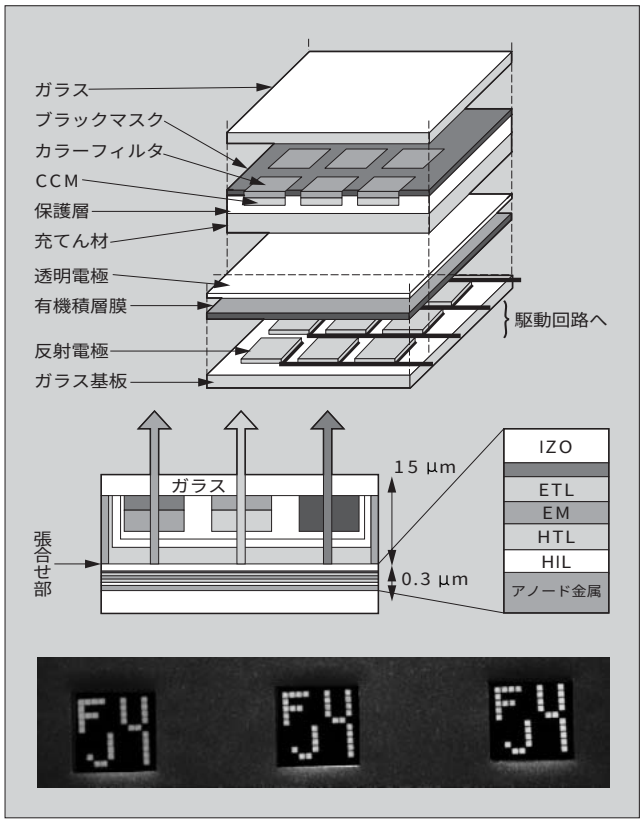
図９　75 ppi と 130 ppi CCM-PM 駆動有機 EL 画像の比較



るものと期待している。**図９**に高精細度 130 ppi CCM－PM 駆動有機 EL の画像写真を示す。3.1 インチ 130 ppi PM 駆動有機 EL は革新的なプロセス開発によって実現された。有機 EL 層膜以外の材料はすべて無機膜で形成された。これは大幅な信頼性向上実現のためであり，特に高温駆動寿命を大幅に改善する。さらには，多層配線技術が駆使され，CCM 専用駆動 IC の適用などによって低コスト PM 駆動有機 EL を実現することが可能となった。高効率 CCM 有機 EL 技術と一体化させるとき，さらなる PM 駆動有機 EL の応用拡大が期待される。

CCM 方式で AM 駆動を実現するのは，CCM-TOP-Em（トップエミッション）AM 有機 EL 構造であると考えている。CCM 基板と TFT 基板上に形成された有機 EL とが別なラインで製作され，後に一体化される。これは CCM 基板封止型 AM-CCM 有機 EL 構造といえる。この構造は AM 駆動 CCM 有機 EL を実現可能とし，さらに CCM 基板製作を容易にし，また大きな開口率，高い CCM 変換効率など，性能を大幅に改善できる構造である。**図10**は TOP-Em-CCM 有機 EL 構造とキャラクタ表示させた画面

図10　TOP-Em-CCM 有機 EL 構造とキャラクター表示画面



写真である。輝度はおよそ緑色：500 cd/m^2，青色：300 cd/m^2，赤色：200 cd/m^2 である。高輝度，大画面フルカラー AM ー有機 EL 実現へ向けて高いポテンシャルを有する技術と期待される。

5　白色光＋ CF 法との比較

最近のフルカラー化動向として，白色光＋ CF 法の適用がある。フルカラー化の有力技術の一つとして以前から検討されていたものであり，今後の動向を見るうえで性能比較することは重要である。ここでは白色光＋ CF 法と CCM 法の比較結果を紹介する。白色光＋ CF 法の原理は単純で，白色光スペクトルを CF でカットし，三原色を発光させるのである。したがって，白色光スペクトル分布の形および CF のスペクトル分布が重要となることは容易に推察できる。白色光を得るに次の二つの方法がある。

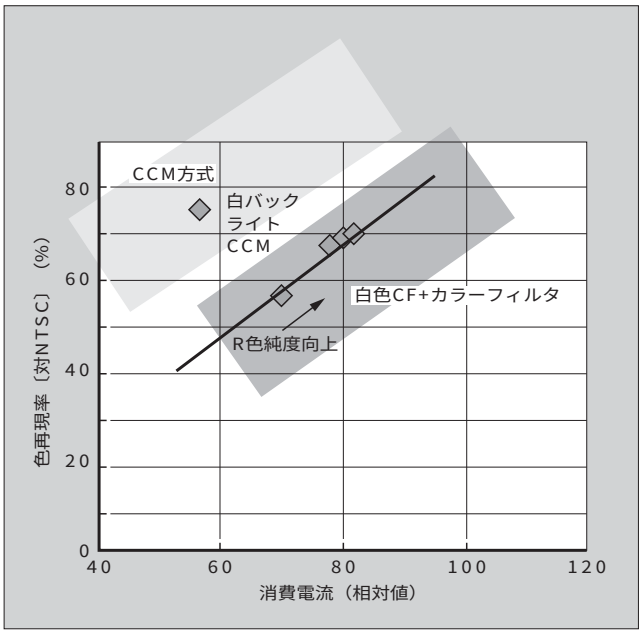
(1)　異なる波長の発光層を積層

(2)　単層の発光層に複数の発光色素を分散

(1)は低分子系で検討されており，3 波長，２波長積層タイプがある。(2)の方法は高分子系で主に検討されている。積層タイプでは電流値によって（輝度によって）キャリヤバランスが変化し，発光スペクトルが変化する，または寿命試験において色バランスが比較的簡単に変化してしまうことが課題である。

積層タイプの白色光の効率をバランスよく向上させることは困難である。半減時間 2,000 h 程度の信頼性を有する白色光を用いて，白色光＋ CF 法と CCM 法の比較を試み

図 11　色再現性のパネル消費電流依存性



た。結果を**図11**に示す。白色光＋ CF 法は色再現性と効率の間に強いトレードオフ関係が存在する。つまり，美しい，高輝度フルカラー画面を作りだすことは困難であると考えられる。現在の白色光レベルとすれば，エリアカラー，マルチカラー画像に最適な方法といえる。一方，CCM 方式は高性能画像用ディスプレイデバイスに適した方法といえる。白色光＋ CF 法の発光効率は R：1.2 cd/A，G：3.5 cd/A，B：0.6 cd/A 程度，NTSC 比 50 %程度と推定される[(2)]。120 cd/m^2 全面点灯時の AM 駆動輝度半減時間は 3,000 h と発表[(2)]している。一方，CCM 方式では，R：2.0cd/A，G：11 cd/A，B：2.0 cd/A，NTSC 比 65 ～ 75 %程度である。その輝度半減時間は同条件において，2 ～ 3 万時間と推定される。白色光＋ CF 法と CCM 方式そして RGB 三色塗り分け方式はそれぞれの特徴を生かしてすみ分けていく可能性がある。

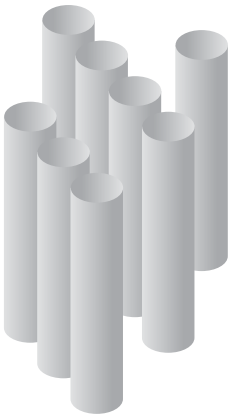
6　あとがき

有機 EL のフルカラー化の足取りが鈍っている〔KDDI（株）発表：カラー有機 EL 採用時期尚早，低い歩留りにより〕。その中でフルカラー化技術の基礎的なところからの見直しが始まっているように見える[(2)]。CCM 方式の高いポテンシャルを早期に実現し，有機 EL のフルカラー化加速の一助になれば幸いである。革新的な CCM-TOP-Em 有機 EL がそれを可能にするものと信じている。先端的な張合せ技術，TOP-Em デバイス構造，反射電極作成技術，光取出し効率，マイクロキャビティ制御や有機半導体デバイスシミュレーション技術などのコア技術開発によって実現していく所存である。次世代ディスプレイデバイスとして期待されるフルカラー有機 EL の大きな進展に貢献することが富士電機の願いである。

参考文献

(1)　筒井哲夫．有機 EL 素子の動作機構．有機 EL 材料とディスプレイ．城戸淳二監修，シーエムシー，2001. p.27.

(2)　「嵐の中の船出，有機 EL，三洋電機の勝算」．NIKKEI MICRODEVICES. 2003-4, p.54.



e-Front runners

＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。