

総 説

LED照明の高効率化の概況

Review of Efficient Improvement for LED Lighting

石田 真^{*1}，山口 寿夫^{*2}

1. はじめに

近年，炎（第1のあかり）・白熱電球（第2のあかり）・蛍光灯（第3のあかり）に続き，LED（Light Emitting Diode）を始めとする固体光源が“第4のあかり”として，技術開発およびビジネスの両面から強く脚光を浴びている。

豊田合成として，GaN系LED（青色LED）を事業化してから，早くも15年の月日が経過した。青色LEDの誕生および実用化というイノベーション（技術革新）が，地球上に新たなる白色光を生み出すことになった。豊田合成の事業化当初と比較して現状は，明るさは10倍，コストは1/10以下となり，信号機・携帯バックライト・ノートパソコン・テレビのバックライトを始めとした様々な用途に対して世界中で想像以上のスピードで急激に普及し，メジャーな工業部品の一つとして認知されつつある（図-1参照）。軽量・小型・割れ難くさや，長寿命および環境負荷物質を含有していないという側面も，LED光源が普及する際のうれしさとして見逃せないポイントでもある。

近年普及が進みつつあるLED照明は，LED光源として最後で最大のアプリケーションと称されており，現在特に注目を浴びている半導体光源である。現在の世界的な地球環境保護と省エネの流れに載り，我々が手にした“LED”という革命的な技術が，従来の“あかり”に取って代わる，まさに絶好のビジネスチャンスに遭遇しようとしている。

本総説では，LED照明のメリットおよび適用事例を紹介した上で，同じ固体照明である有機ELの

技術動向紹介も交えながら，LED照明の技術開発の取り組み事例について概論を説明したい。本技報では詳細として，チップ・パッケージおよびその生産技術開発動向についても，特集として報告する。

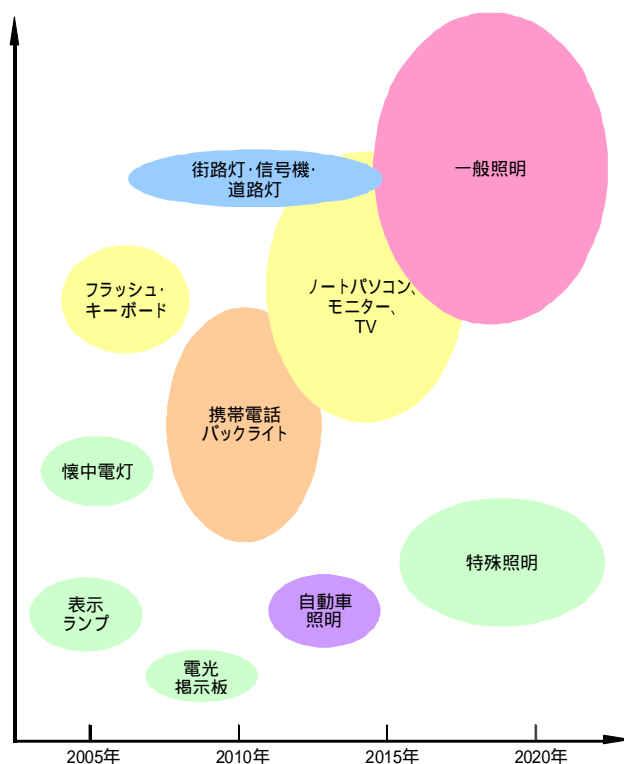


図 - 1 LED光源の普及拡大
LED光源の普及が広がり，液晶バックライト用途の需要が大きく伸びた。今後は照明用途での普及拡大が見込まれる。

*1 Makoto Ishida オプトE事業部 第2技術部

*2 Hisao Yamaguchi オプトE事業部 開発部

2．LED化による省電力化インパクト

日本における照明の年間電力消費量は、家庭部門が382億kWh（家庭用電力消費量の13%）、業務部門が891億kWh（業務用電力消費量の33%）、

表 - 1 現在使用されている電球・ランプの
個数および電力使用量（推計）[1]

日本における照明による年間の電力消費量は合計1,506億kWhで、総電力消費量の16%を占めている。

	家庭部門	業務部門	産業部門	合計
蛍光灯	4.6 億個	4.2 億個	1.5 億個	10.3 億個
電球型蛍光灯	1.5 億個	0.6 億個	-	2.1 億個
白熱灯	2.5 億個	0.8 億個	-	3.4 億個
HID (水銀灯など)	-	0.1 億個	0.1 億個	0.2 億個
合計	8.7 億個	5.8 億個	1.6 億個	16.0 億個
電力消費量	382 億 kWh	891 億 kWh	233 億 kWh	1,506 億 kWh

産業部門が233億kWh（産業用電力消費量の6%）、合計1,506億kWhで、総電力消費量の16%を占めている（表 - 1 参照）。仮に日本全体の白熱灯、蛍光灯およびHID（高輝度放電）ランプを、全てLED照明に置き換えた場合、年間照明用電力消費量の61%にあたる922億kWhの電力消費量を削減できると試算されている（図 - 2 参照）。これは、日本の総電力消費量の約9%に相当する。なお、LED照明による省電力ポテンシャル922億kWhは、原子力発電所13基（1,300万kW）に相当するとの試算もある[1]。

一方で照明のLED化によるメリットは、使用電力量の削減だけでなく、寿命も4万時間程度と長いこと交換費用の節減にも効果がある。LED照明への期待は、国内外限らず今後ますます強くなっていくものと予想される。

3．照明向けLED

LEDは従来からあるあかりと比較しても、赤外線領域などの熱的放出をしておらず、効率の高い光源である。例えば、代表的な白色LEDは、青色LEDと黄色の蛍光体を組み合わせたものであり、赤外成分での発光がない。LED光源は普及が拡大しており、近年ではノートパソコンやテレビの液晶バックライト用途の需要が大きく伸びた。今後は照明用途での普及拡大が見込まれる。

白色LEDの発光方式としては、

青色LEDと黄色蛍光体の組合せ（高演色を狙って2種類以上の蛍光体を組合せる場合もある）

高演色を狙った、発光波長が400nm程度の短波長LEDと複数の蛍光体の組合せ

赤色単色・緑色単色・青色単色の3つのLEDの組み合わせ

が挙げられるが、現状最も効率が高く、最も普及しているものは青色LEDをベースとした白色LEDであり、現在も各社が特に開発注力している領域である。

LEDを使った照明器具の効率も近年高くなってきており、更に改善させる余地は大きい。照明器具としての発光効率は、優れた製品では既に90lm/Wを凌駕しており（図 - 3 参照）、昨今の普及に寄与している。ハロゲン電球や白熱電球の発光効率と比較すれば、既に明確な差をつけて凌駕しており、直管形蛍光灯やメタルハライドランプと

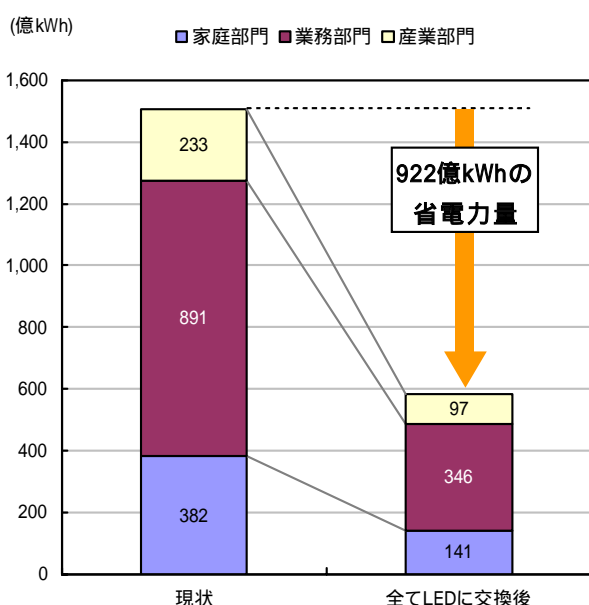


図 - 2 LED照明に全て置き換えた時の
最大省電力ポテンシャル [1]

日本全体のランプを、全てLED照明に置き換えた場合、年間照明用電力消費量の61%にあたる922億kWhの電力消費量を削減できる。

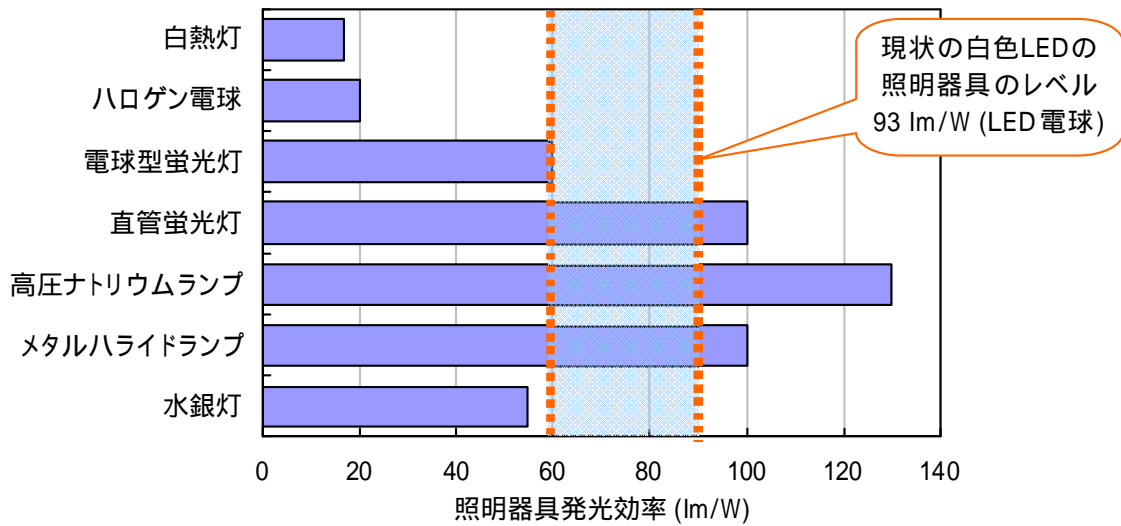


図 - 3 各種光源の発光効率
現状の白色LEDを用いた照明器具は、90 lm/Wを超える水準にまで効率が向上した

既存光源とLEDの位置付け

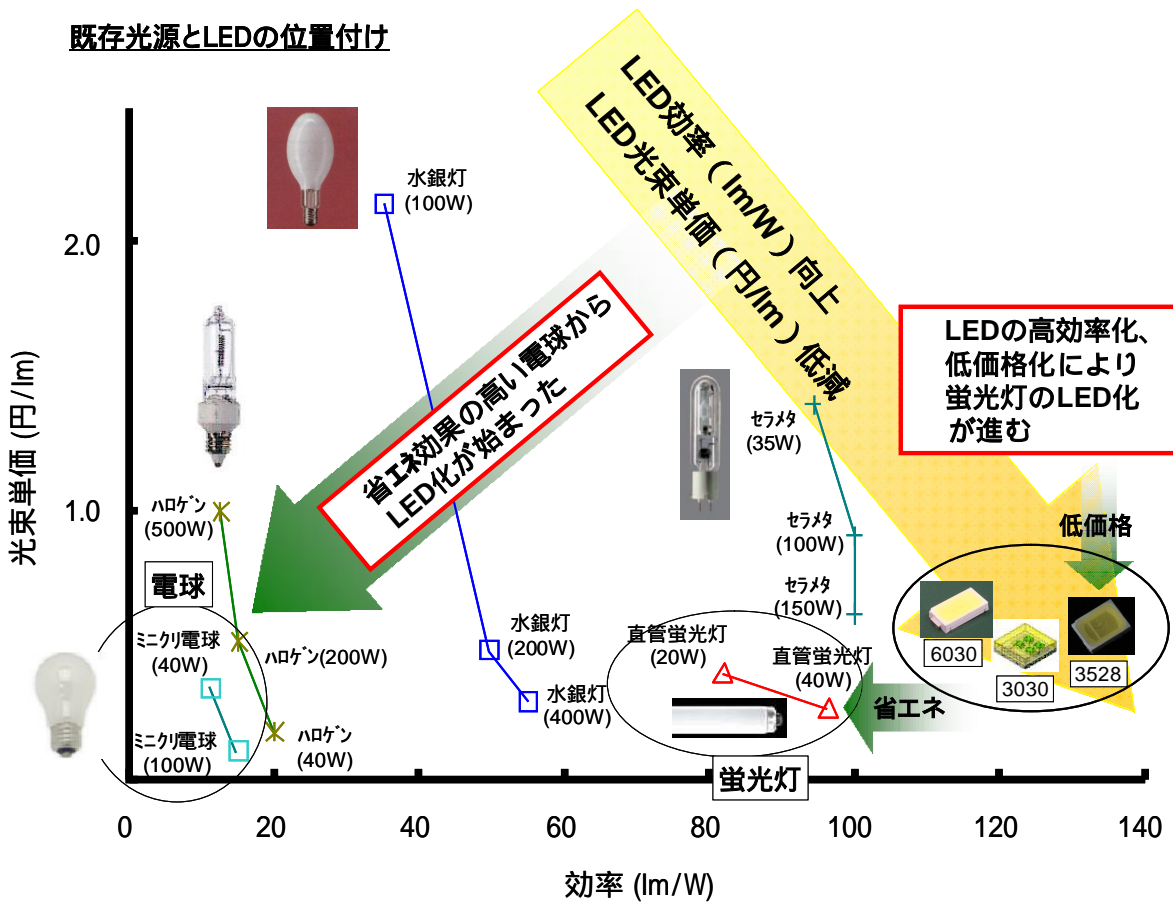


図 - 4 既存照明光源の位置づけとLED化 (効率と光束単価)
LEDの効率向上とコスト (光束単価, 円/lm) 低減により、電球から始まったLED化の波が、蛍光灯にも訪れつつある。

いった発光効率の高い光源にもLEDは到達しつつある。

電球・蛍光灯などの既存光源とLED光源について、効率とコストを踏まえた位置づけを図 - 4 に示す。効率面で最も低い電球が、昨今の環境問題・法令・各国の諸政策の後押しも受けつつ、他光源と比較していち早くLED照明への置換えが始まった。LED電球の普及と拡大は、その後の急激な低コスト化も相まって、現在も加速している。比較的明るさを必要としない領域のハロゲン球においてもLED電球と同様に置換えが始まっているが、市場規模自体は比較的小さい。次にLED化の波が訪れつつある光源領域は蛍光灯である。蛍光灯自身は既に高い効率を持ってはいるものの、水銀を使用していること、LEDと比較して交換頻度

が高いことから、電源や口金形状などの規格や保証の面で議論の余地を残しつつも、置換えが起こりつつある。最後に、水銀灯やセラミックメタルハライドランプに代表されるHID (High Intensity Discharged lamp) が残るが、電球や蛍光灯以上に小さな面積から大光束を得る必要があり、各社様々なアプローチを試みているところである。いずれの分野においても、更なる高効率化・低コスト化により、LED化の領域は広がっていくものと期待する。

別視点として、大光束光源領域における、光源サイズと光束を踏まえた位置づけを図 - 5 に示す。横軸を光源サイズであらわしており、左側が小型光源（点光源）、右側が大型光源（面光源）の位置づけとなる。左側の点光源の領域においては、前述のHIDやヘッドランプ向けの光源が位置づけ

既存光源とLEDの位置付け

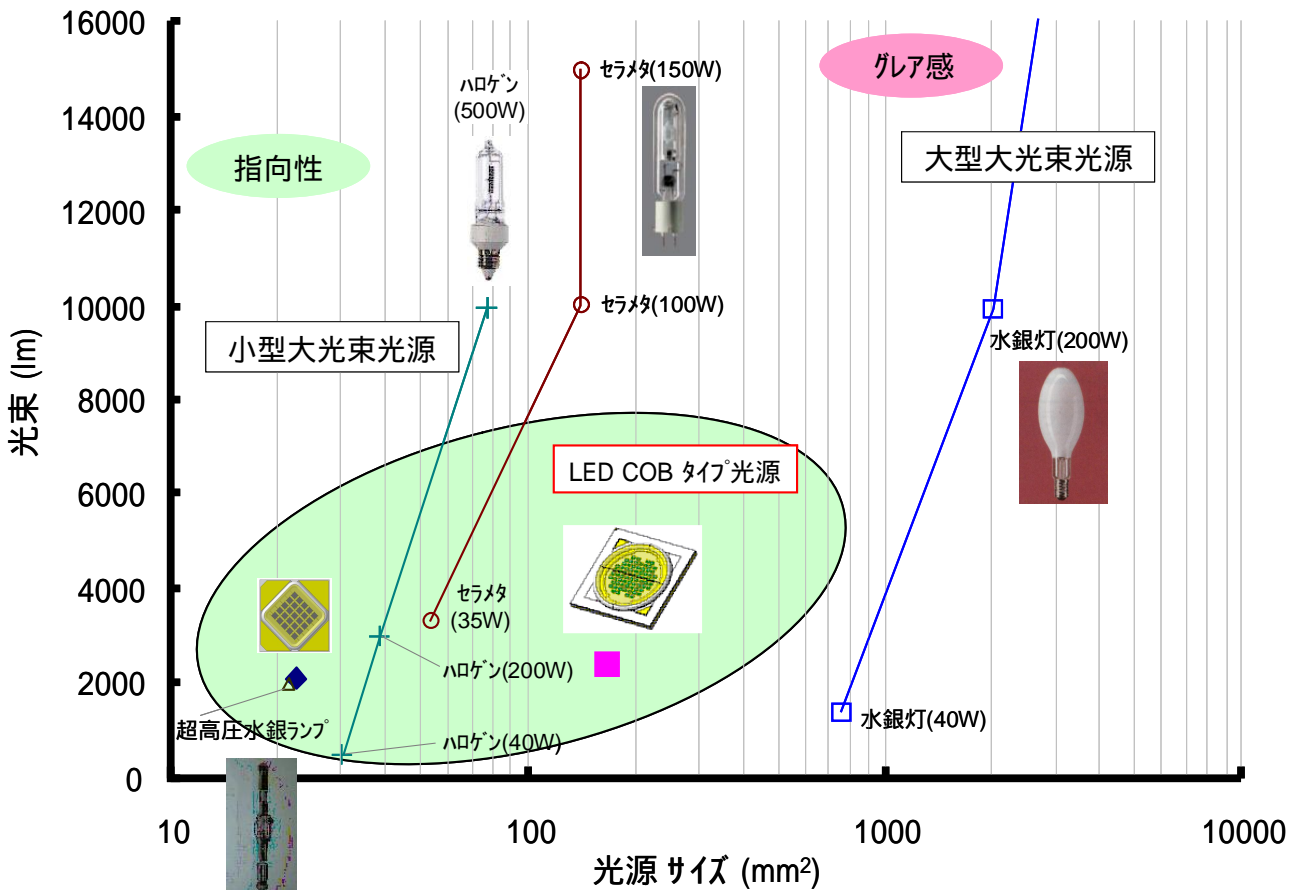


図 - 5 既存照明光源の位置づけとLED化（光源サイズと光束）
点光源から面光源まで、各種既存光源が持つ光源サイズに対して、LEDは使用個数を変更することで、同レベルの位置づけのものを柔軟に提案することができる。

られる。

図 - 5 右側のLEDの面状光源という、LED信号灯（砲弾タイプLEDパッケージを複数並べている）の粒々感を真っ先にイメージしてしまう方も多いためか、LEDは一般論として、短絡的に点光源の代表として否定的に位置づけられることが多々ある。しかし器具・灯具として使用する場合は、光束・配光の制御や導光板・拡散板を使用するなど、まぶしさ（グレア感）や粒々感に配慮する処方が既に提案がされており、LED蛍光灯やシーリングライトを始めとするLED面光源器具も市場には出回りつつある。また、LEDはその実装個数を可変させることで、目標とする光束を自由に設計できるという利点もあり、使用するLEDパッケージが普及し汎用性を増すことで、面光源の領域においても、LEDが活躍する場がますます増えていくと考えている。

LEDパッケージとしての製品カテゴリについては、豊田合成は投入電力に応じて小電力側からレギュラーサイズ（0.1W程度）、中電流サイズ（0.5W程度）、大電流サイズ（1W以上）という三つに区分をしている（表 - 2）。

白色LEDの開発において、最終製品を意識する

ことも重要である。電球なのか、それともダウンライトなのか、もしくはオフィス等のベース照明や看板照明なのか、用途、経済性、環境性能、顧客ニーズを踏まえてチップ開発やパッケージ開発をしていくのが基本的な進め方になる。開発の中で念頭に置かねばならないことは、製品のカテゴリとコスト・パフォーマンスである。

製品カテゴリが異なると、構成材料も大きく変わる。好例がパッケージ材料である。レギュラーパッケージは多くの場合、樹脂材料が使われている。一方で大電流になるに従い、無機材料に変化する。無機材料を使用する大きな理由の一つに耐熱性がある。大電流領域になるほど発熱量が大きくなり、パッケージの耐熱性の重要度が増すので無機材料を用いることが必要になる。一般的に樹脂材料は、セラミックスといった無機材料よりもコストは安い。樹脂材料の耐熱性があと10以上上がれば、樹脂材料を活用できる製品範囲は大きく広がると考えている。

パッケージ材料と共に大電流になるほど放熱設計の重要度が増す。投入電力が1W以上となる状況を考えると、材料選択だけでなく放熱設計での工夫が信頼性確保を左右する。

表 - 2 製品タイプごとの特徴と課題

発光効率や光束の改善，インシヤルコストの低減，これらと信頼性確保を両立することなどが課題となる。

	投入電力	効率	光束	灯具への実装性			信頼性	
				面状光源	線状光源	小型光源 (点光源)	パッケージ材料	放熱設計
レギュラー	0.1W ~					~ x	樹脂材料	
中電流	0.5W		~					
大電流	1W > 1W						無機材料	高放熱設計

個別の技術としては、LEDチップの効率改善や効率向上につながるパッケージ技術の進展、LEDを組合せてモジュール化する技術の改良、低コスト化など、LEDに用いる各技術でブレークスルーが起こることで、様々な照明LEDの普及が加速されていくものと考えられる。

4. 大光束 照明向けLED

照明用LEDパッケージとして最近様々な用途に普及が進んでいる1W級の大光束パッケージについて、豊田合成の製品・開発品の紹介も含めて触れておきたい。

光源のコスト・パフォーマンスとしては、1lm(ルーメン：光束)を得るためのコストを目安として、光束単価(円/lm)を用いる。光束単価は、特に照明用途で非常に重要な目安であり、白色LEDの開発として、如何に発光効率が高く、かつ安いものを作ることが求められる。0.5円/lmの領域に達すると既存光源と光束単価が同等となり、かつ効率も優れるということになる。こうなると蛍光灯やHIDなども次々にLEDへと切替っていると考


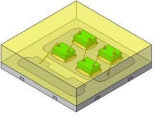
えられる。

1W級の大光束LEDパッケージは、大きくわけて2通りの達成手段がある(表-3)。一つ目は1mmサイズ程度の大電流対応チップを通常1個実装したパッケージ、二つ目は数百μmサイズの小電流から中電流対応チップを複数個実装したパッケージである。構成が大きく異なる両者ではあるが、投入電力と効率を比較すると、ほぼ同レベルである(図-6参照)。

大電流対応チップを搭載する前者のパッケージの特徴は、セラミックスなどの無機物を多用することで、耐熱性・耐久性を重視した設計を目指している。チップも大電流仕様であり、2W以上の更なる大電力投入・大光束化にも耐えうるものとなる。ハロゲンランプ・HIDランプ・ヘッドランプなどの、小サイズと大光束の両立が必要とされる市場領域での拡大が見込まれる。

一方の複数チップ搭載する後者のパッケージは、樹脂を使用することが特徴で、無機パッケージと比較して1~2割程度の低コストで、大光束となることがうれしさになる。また、電球や蛍光灯などの照明器具は100VなどのAC電源から、電源回路を用いて整流・変圧させて、LEDパッケージへ電力投入させている。LEDに投入する電圧が、AC

表-3 大光束パッケージの比較
豊田合成の製品・開発品の事例。同程度の光束(100lm以上)のパッケージながら、異なる設計アプローチと用途を目指した。

	ラージパッケージ	マルチパッケージ
チップ搭載数	1個	4個(例)
パッケージ外観		
IF (mA)	350 mA	90 mA
VF (V)	3.1 V	11.8 V
投入電力 (W)	1 W	1 W

* 数値は参考値

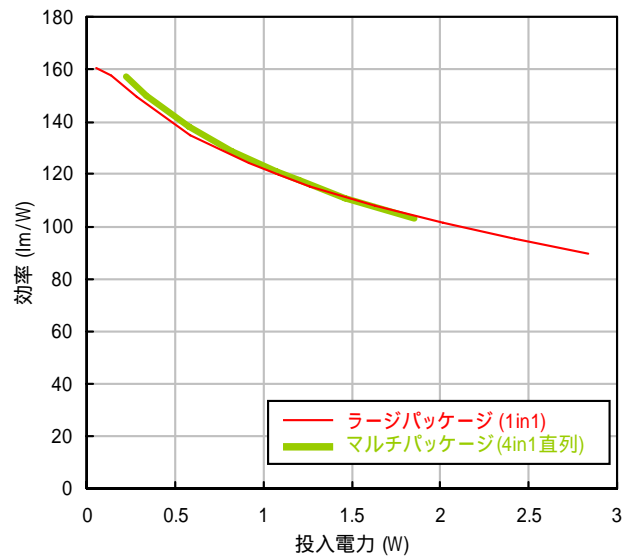


図-6 大光束パッケージの効率
豊田合成の製品・開発品の事例。投入電力に対する効率は、ラージパッケージとマルチパッケージ(4in1)で同レベルである。

電源に近い高電圧である程，変圧ロス・変換ロスが少なく，電源回路を効率的に活用できる．複数チップを直列実装したパッケージでは順方向電圧(VF)が高くなるため，ラージパッケージ(チップ1個搭載)よりも，最終製品では電源の効率的な活用に向いているという一面もある．

5．発光効率 190 lm/W 達成

パソコン液晶バックライト光源として使用されているサイドビューパッケージは現在の豊田合成のLED事業の柱であるが，その高効率と長寿命を特徴とすることにより，画面表現の繊細さ，鮮やかさ，長いバッテリー駆動に貢献して，着実なビジネス拡大を進めている．効率改善および長寿命設計においては，SQC・QCなどの手法に加え，ロバスト設計，材料技術力を駆使することで，顧客要求に応えている(図-7)．

サイドビューパッケージで培った高効率化技術・長寿命化技術をベースに照明用パッケージも技術開発が進んでおり，例えば3.5 x 2.8 mmサイズのパッケージにおいては，その発光効率も190

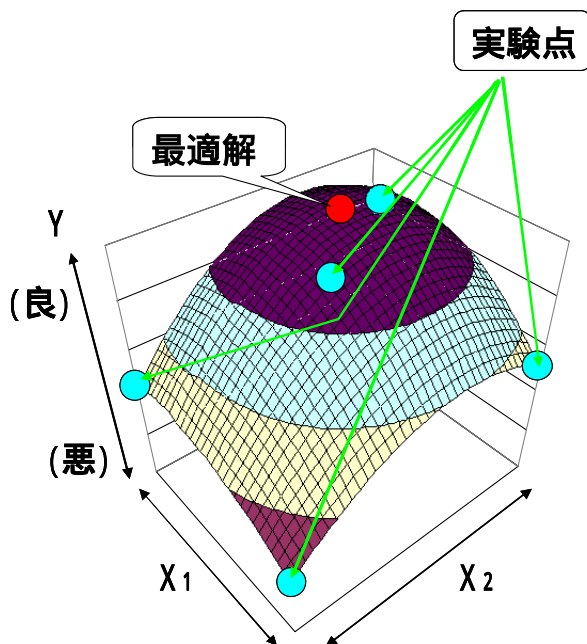


図 - 7 SQC手法の例
 応答局面解析を用いて，高効率化と長寿命を両立させるパッケージ形状の最適化を図る．

lm/Wを達成するものも現れており，実用領域においても170 lm/Wの実力を持つ．既存光源を凌駕する発光効率により，今後ますますLEDの普及が加速するものと期待する．

6．固体照明としての有機EL

有機ELの技術動向についても，LEDと同じ固体照明に分類されるという立場から，一部触れておきたい．

電極から注入された電荷を有機材料内で再結合させることにより発光させる有機ELの誕生は，1960年代に遡る．1980年代での真空蒸着および高効率材料の採用，1990年代での新規材料開発(多色化・高効率化)や素子構造の改善(多層構造・光学設計など)が図られることにより，現在の基本構造が確立された．

ディスプレイ分野としては，1995年頃から動きが活発となり，封止技術，画素パターンニング技術，駆動回路，量産装置などの具体的な製品化技術が蓄積され，近年の携帯電話やスマートフォンの画面として採用が拡大しつつある有機ELディスプレイとして花開くことになる．液晶ディスプレイと比較して遅れを取っていた大画面化や高精細化についても，着実に技術開発が進められ，課題を克服しつつあり，テレビやタブレット製品向けにも有機ELディスプレイの発売を翌年以降に計画しているメーカーもある．液晶がメインプレーヤーであるディスプレイ市場の位置づけには大きな変化

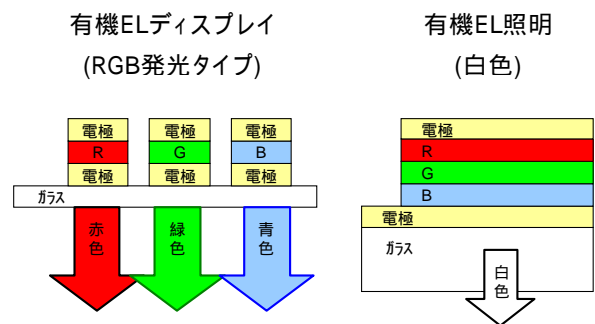


図 - 8 有機ELの模式図

ディスプレイおよび照明用途の有機EL構造の模式図．ディスプレイでは一般的に画素毎にRGBの各色の素子を配置する．照明では，ディスプレイの素子と比較して大きな面積の白色素子を形成する．

はないものの、有機ELは着実にその用途を拡大し、その存在感を徐々に増しつつある。

照明分野としては、2009年以降に一部のメーカーからサンプルが開始され、量産製品としては2011年に国内数社から出荷発表がなされたことが記憶に新しく、ディスプレイ分野と比較して10年程の遅れはあるものの、少しずつではあるが立ち上がりを見せている。ディスプレイが200～500 cd/m²程度の輝度で成立するのに対し、照明用途では1000～5000 cd/m²程度の輝度が必要とされる。有機ELにおいては、単純に電流密度を上昇させて輝度向上を目指すことは、長寿命化との両立の面で難しさを伴う。また、1 mm以下の素子形成をおこなう有機ELディスプレイとは異なり、面光源を特徴とする有機EL照明は数cmの素子が必要であり、ITO製膜技術を始めとして電極や封止の形成に課題を残している。照明用途における輝度と信頼性の両立に対しての技術的なブレークスルーとして、素子の多層化やマルチ化（直列配置）が提案・検討されている。

現時点では発光効率・コストの両面でLEDが先行してはいるものの、デザイン性や・単一面光源をメリットとする有機ELは今後とも固体照明のひとつとして、大きく期待されているものと考えられる。

有機ELはLEDと同様、電球や蛍光灯などの既存光源では使用する環境負荷物質を含んでいないという側面も持ち、LEDと同様に省エネだけでなく環境側面からも期待されている光源である。以上から、二者択一でLEDか有機ELのどちらかが生き残る、勝ち残るというものではなく、用途に応じて両者が共存していくであろう。

7. 最後に

以上に示してきたように、LED照明の普及は、我々が抱えている省エネ、CO₂排出抑制に貢献できると考えられる。特に効率・コストの面で、同じ固体照明である有機ELと技術的に切磋琢磨しつつ、我々はLEDチップ・パッケージおよびモジュールの更なる効率改善の技術開発に邁進すると共に、最終製品にマッチングするLEDパッケージを製品化することで、より環境に優しい社会の実現にむけて、LED照明を更に幅広く普及させて貢献していきたい。

【参考文献】

- [1] LED照明の省電力ポテンシャル、財団法人日本エネルギー経済研究所 ホームページ掲載資料、(2011年5月)