

豊田合成 LED 開発の歩み

下野信治^{*1}, 奥野浩司^{*1}

History of Toyota Gosei LED Development

Shinji Shimono^{*1}, Koji Okuno^{*1}

1. はじめに

現在、我々の生活に深く浸透し、今後も省エネ対策の柱として必要不可欠となっている青色発光ダイオード（青色LED）は20世紀中には実現しないと言われていた。赤崎先生（現 名城大学終身教授 / 名古屋大学特別教授・名誉教授）天野先生（現 名古屋大学大学院教授）による窒化ガリウム（GaN）系化合物半導体を用いた青色LEDの発明は、科学者だけでなく市場経済に至るまで大きな衝撃と影響を及ぼしている。両先生の偉業を称え、ノーベル物理学賞受賞に至ったことは、両先生のご指導の元、世界に先駆けて青色LEDを開発・量産化したパイオニア企業としての豊田合成の誇りである。

本総説では、豊田合成が青色LEDの量産化を成功するまでの開発の歩みを赤崎先生、天野先生との出会いと共に紹介する。後半では、量産化以降のLEDの技術開発の取り組み事例について製品を交えながら概論を説明する。

本技報では、本総説の後に論文として、「LED製品開発の現状と最新動向」、「LEDチップ開発の最新動向」、および「生産技術開発動向」につい

てさらに詳しい技術内容を特集として報告する。

2. 豊田合成の青色LED開発の歴史

豊田合成は、ゴム・樹脂を中心とする自動車部品メーカーとして1949年に設立した。1980年代、豊田合成は自動車部品に次ぐ脱ゴム、脱樹脂での事業を模索していた。自動車部品の付加価値向上に繋がる発光応用製品としてLEDに着眼し、1984年より開発に取り組んでいた。開発当初は、当時から存在していた赤色や緑色LEDを用い、面発光LEDイルミネーションや車載用として、トップマークやフォークリフト向けに電圧残存計の開発を手掛けた。赤崎先生との出会いは1985年、当時の技術企画室の室員が聴講した先生の講演会であった。その場で赤崎先生は高性能な青色LEDやレーザーダイオードの材料である窒化ガリウム系化合物半導体に関するご自身の研究について話された。聴講した豊田合成の担当者は、青色LEDは重要であると考え、当時の社長の根本正夫氏を通じて赤崎先生にアプローチし、先生との共同研究が実現した。

一方、ほぼ同時期に新技術開発事業団（現 科学技術振興機構（JST））が赤崎先生の技術に注

表-1 豊田合成と赤崎先生・天野先生とそのグループの青色LED開発の歩み

年	豊田合成	赤崎先生, 天野先生とそのグループ
1980		フリップチップGaN MIS型青色LEDの開発 MOVPEによるGaNの成長開始
1984	LED応用製品の開発	
1985	赤崎先生との出会い, 共同開発の申し入れ	低温AlN/バッファ層による高品質GaN単結晶の実現
1986	赤崎研究室との青色LEDの共同研究開発スタート	
1987	新技術開発事業団との産学官連携スタート「GaN青色発光ダイオードの製造技術」 SiH ₄ を用いたGaNのn型伝導度の制御	
1989		Mg添加高品質GaNへの電子線照射によるp型伝導の発見 pn接合型青色LEDの実現
1991	MIS型高輝度青色LEDの開発 (新技術開発事業団の成功認定 効率1.2%)	量子サイズ効果を示すGaN/AlGaIn多層ヘテロ構造
1992		高効率青色LEDの実現(効率1.5%)
1995	高輝度青色LEDの量産化(2cd)	高出力AlGaIn/GaNダブルヘテロ構造紫外LEDの実現
1996	発光層にMQW構造を用いた 高輝度青色LED, 緑色LEDの開発	最短波長レーザーダイオードの実現

*1 オプトE事業部 オプトE要素技術開発部

目し、「委託開発（独創的シーズ展開事業）」による事業化の話が進んでいた。折しも豊田合成が赤崎先生と共同研究を行っており、事業化を熱望しているとの話から、開発実施企業として豊田合成および既に先生と関係があった豊田中央研究所が選定され、1986年より産学官連携によるプロジェクト名「GaN 青色発光ダイオードの製造技術」（期間 1987～1990年、代表発明者 赤崎先生、開発費用 5.5 億円、開発目標 30mcd@10mA）がスタートした。赤崎先生は最終的に豊田合成を選んだ理由は「熱意」であったと自書の中で紹介している¹⁾。

豊田合成は、試作棟（春日工場）の3階に設置したクリーンルームを開発場所とし、結晶成長から電極形成、素子化による LED チップ作製設備、さらに砲弾型のランプ作製可能な設備を設置した。しかしながら、当時の豊田合成には、GaN どころか、半導体の研究者・技術者は在籍せず、設備設置の間、結晶成長技術は名古屋大学の赤崎先生の研究室で、結晶成長後のプロセス技術は豊田中央研究所の化合物半導体研究室で初歩から学んだ。その後、大学院博士課程であった天野先生が p 型化の研究で豊田合成の技術センターにオートバイで連日通われたのが天野先生と豊田合成の関係の始まりとなった。

豊田合成は、のちの章で紹介する赤崎先生が成し遂げたブレークスルー技術について、赤崎先生、天野先生、豊田中央研究所の定期的なご指導のもと開発を進め、プロジェクトスタートから3年半後の1991年、当時としては世界最高輝度（50mcd@10mA）の青色 LED の開発に成功し、新技術事業団の成功認定を受けた。その後は、他のブレークスルー技術に改良を重ね、1995年には、実用レベルの明るさを持つ青色 LED（2cd）の量産を実現し、自動車部品とは異なる新事業の大きな一歩を踏み出した。なお、赤崎先生、天野先生には現在も豊田合成のアドバイザーとしてご指導を頂いている。そして、これまでに15名の両先生の研究室の卒業・修了生が豊田合成に入社

し、豊田合成からも社会人ドクターとしてエンジニアを派遣するなど人的交流が続いている。

3. ブレークスルー技術

青色 LED の実現により、従来から存在した赤色、緑色 LED と合わせて光の三原色を実現した。高輝度青色 LED と赤色、緑色 LED、もしくは緑から赤色領域を発光する蛍光体を組み合わせることにより白色光源が実現し、液晶バックライトの光源から照明まで用途が広がった。青色 LED が実現して以来、その応用製品は爆発的な普及が進んでいる。その理由は長寿命、低消費電力、速い応答速度、高い色純度といった LED の特長が挙げられる。本章では (1) LED の発光メカニズム、(2) 青色 LED の材料である GaN について説明し、**図-1**に示す赤崎先生、天野先生と豊田合成らによって実現した GaN 系青色 LED 実現のための数あるブレークスルー技術のうち今日の青色 LED の礎となった技術 (3) 低温堆積 AlN バッファ層、(4) p 型 GaN 層の実現、について述べる。

3-1. LED の発光メカニズム

初めに、LED の発光メカニズムについて説明する。Light Emitting Diodes (LED) は、電流を流すことにより発光する半導体素子である (**図-1**)。1907年にRoundによって発見されたSiCに電圧を加えた時の発光現象が起源とされる²⁾。発光原理はエレクトロルミネッセンス効果を利用している。これは半導体のpn接合部に注入された電子と正孔が再結合する時、半導体のバンドギャップ E_g (禁制帯幅) に相当するエネルギーを光として放出することで発光するものである。LED が発する波長 λ の制御は次式で表されるようにバンドギャップ E_g によって決まる。

$$\text{発光波長 } \lambda \text{ [nm]} = 1240 / E_g \text{ [eV]}$$

このバンドギャップ E_g は半導体材料固有の値であることから、発光波長は半導体材料によって

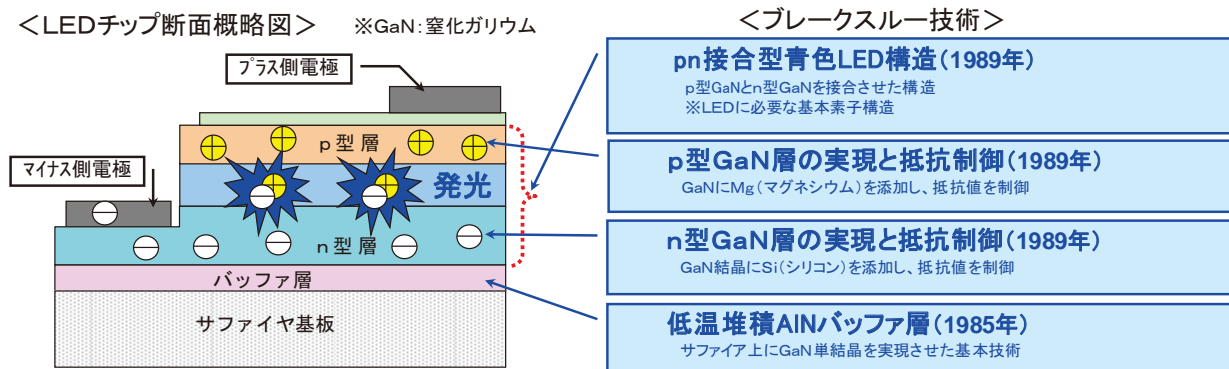


図-1 LED 構造とブレークスルー技術

決まる。従って LED の開発は半導体材料の選択とその開発を意味する。

3-2. 窒化ガリウム (GaN)

青色 (波長~450nm) の光を発光させる高輝度 LED の実現のために、2.3~2.8eV のバンドギャップを持つ直接遷移型の半導体の開発が必要となる。

上記条件を満たす材料として、当時、GaN (Ⅲ族窒化物)³⁾、ZnSe (Ⅱ族カルコゲナイト)⁴⁾ が挙げられた。ZnSe は、GaN に比べて低温での成長が可能で、やわらかいため加工し易く、n 型・p 型の電気伝導の制御も容易である。そのため、多くの研究者は ZnSe を選択した。しかし、取扱がし易い反面、素子寿命が短いなど実用化への課題が山積していた。一方、GaN は多くの結晶の中でも最も作製 (結晶成長) が困難とされた。GaN は窒素の蒸気圧が高いことからバルク結晶の作製が非常に難しく (※現在では可能となっている⁵⁾)、また結合力が強く格子定数が小さいことから格子整合する適当なヘテロ基板が存在しない。すなわち GaN は、他の材料に比べ非常に硬くて、作りにくい材料である。しかし逆説的に最も安定な材料であり、良質な結晶が得られれば高い信頼性のデバイスが実現できる。赤崎先生はこのことに着眼し、先見性から GaN の材料としての有望性を見抜かれた。今日の青色 LED の発展の礎は、まさに材料の選択とその開発にあると実感させられる。

3-3. 低温堆積 AlN バッファ層

材料としての GaN のポテンシャルは、3-2 項で説明したとおり非常に高いものである。従って、如何にして高品質の GaN 結晶層を実現させるかが研究開発の鍵であった。本章では、高品質 GaN 単結晶を実現させたブレークスルー技術、低温堆積 AlN バッファ層について説明する。今日において、本技術は大きな格子定数差を持つ半導体どうしのヘテロ接合をエピタキシャル成長により得る手法のスタンダードとなっている。

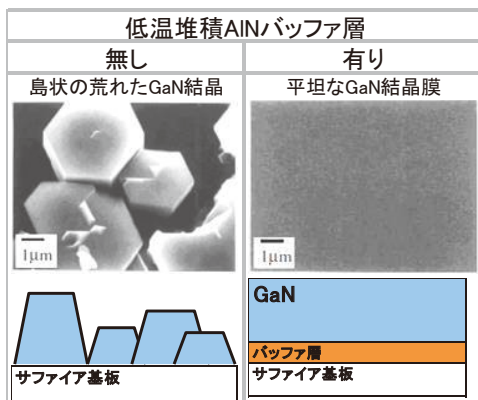


図-2 高品質 GaN 成長技術 (低温堆積 AlN バッファ層)

一般的に高品質な結晶を得るためには、格子整合する基板を用いることが原則である。それは、基板と結晶層の格子定数が異なると成長層には圧縮又は引張歪が生じ、蓄積された弾性歪エネルギーを開放するため、転位などの結晶欠陥を発生させ、結晶層の品質を低下させるからである。従って、AlGaAs や ZnSe などの結晶はそれらのバルク基板、又は格子定数差の小さいヘテロ (異種) 基板を用いて結晶成長が行われる。

3-2 項で説明したように GaN には格子定数の近い適当なヘテロ基板が存在しない。現在 GaN 成長用基板として一般的に使用されているサファイア基板との格子定数のズレは約 16% にもなる。その結果、歪の緩和は数原子層で発生し、図-2 に示すようにサファイア基板上に“直接” GaN 層を成長させた場合は良質な結晶層を得られない⁶⁾。従って、サファイア基板上に良質な GaN 層を得るためには、基板との歪を緩和し、基板との界面に発生する欠陥を閉じ込める工夫が必要となる。これを実現させた技術が低温堆積 AlN バッファ層である⁷⁾。その具体的な成長メカニズムを図-3 に模式的に示す。サファイア基板上に低温で AlN 結晶層を堆積させることによって、高密度の核形成とその核を起点とした結晶粒成長が起きる⁸⁾。この高密度の AlN 結晶粒層は多結晶構造であることから結晶品質が非常に低いが、基板と結晶層との格子定数差に起因する結晶欠陥を基板界面に閉じ込めると共に、効果的に歪を緩和させる⁹⁾。この AlN 結晶粒は GaN 層成長温度までの昇温中に再結晶化 (固相成長) が進む。高温で成長する GaN 層は、歪が緩和した高密度の AlN 結晶粒を成長核として成長することができる。こうして得られた GaN 薄膜は、結晶学的、光学的、電気特性的にも高輝度 LED を実現させるための要素をすべて満たしている。このようにして実現した高品質 GaN 単結晶が、次に説明する結晶層の p 型化¹⁰⁾、電気特性の制御¹¹⁾ といった LED 基本構造に必要な不可欠な技術を成功へと導いた。

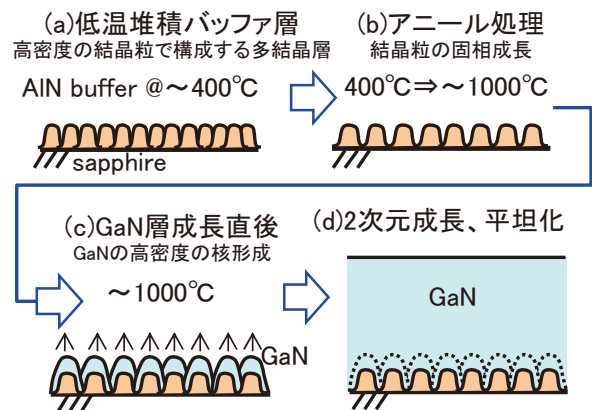


図-3 低温堆積 AlN バッファ層の成長メカニズム

3-4. p型 GaN 層の実現

高輝度 LED を実現させるためには、pn 接合が必要である。3-1 項で説明したように、LED は電子と正孔が pn 接合の領域で結合することによって発光するため、n 型、p 型の伝導性の制御が非常に重要である。n 型については、1989 年に n 型不純物として Si をドーピングすることにより実現した¹¹⁾。これはドーピングした Si 濃度に比例して電気伝導を制御することができる。一方、p 型については n 型のようにはいかなかった。大きなバンドギャップを有する半導体になるほど、電気伝導の制御が困難になり、GaN 層の p 型化においては特に顕著であった。これを打破した技術は 2 つある。

1 つ目は p 型不純物材料としてマグネシウム (Mg) を選択したことである。従来、p 型 GaN の不純物として亜鉛 (Zn) が用いられていた。p 型結晶を得るためには、ドーピングされた不純物原子が活性化する必要があり、活性化するためのエネルギーが高い場合、p 型結晶は得られない。Zn は GaN 結晶において活性化エネルギーが高く、p 型化が困難な材料であった。天野先生が p 型化の研究の中で、Mg の方が Zn よりも活性化エネルギーが小さいことに気づいたことが GaN 結晶層の p 型化の実現に近づく契機となった。ここでも材料の選択が如何に重要であるのかを再認識させられる。

2 つ目に重要な技術は、電子線照射による Mg ドープ GaN 層の p 型化である¹⁰⁾。Mg は GaN 層の p 型不純物の材料として高いポテンシャルを秘めていたが、Mg ドープ GaN 層は依然として高抵抗であった。天野先生は研究の中で電子線照射をすると Mg に関与する青色発光の強度が増加し、照射後の Mg ドープ GaN 層が p 型化することを発見した。この発見がブレークスルーとなり、p 型 GaN 層の実現に至った。これは、GaN 層中の Mg 原子に結合した水素が p 型化を阻害していた要因で、熱的に水素を脱離することにより低抵抗 p 型伝導が実現することが後に解明された (図-4)。

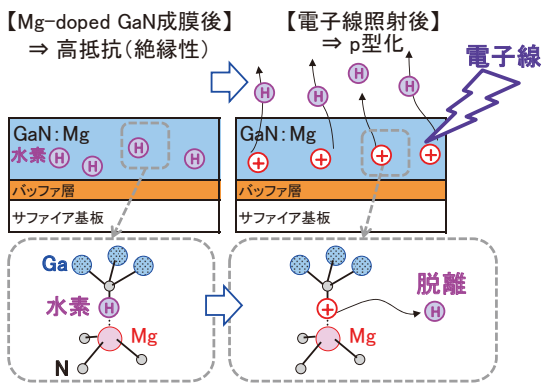


図-4 GaN 層の p 型化のメカニズム

低温 AlN バッファ層による高品質 GaN の実現、n 型、p 型伝導性の制御の実現により、高輝度 LED の基本構造として必要不可欠な pn 接合が実現した¹⁰⁾。これらの成功および発明がのちの LED 高出力化のトリガーとなり、高輝度 LED に必要不可欠な技術が次々と発明され、今日の LED の発展と繋がっている。次章では、青色 LED 量産化以降の青色 LED 製品の発展について述べる。

4. 青色 LED 実用化 (表示装置)

青色 LED の量産化以降、優れた省エネ性能、寿命が長いといった理由から環境にやさしい光源として LED の応用分野が広がった。まずは、インジケータやサイン等の表示器として、赤色 LED や黄色 LED での実績がある砲弾型 LED への応用である (図-5 (a))。青色 LED が実用化されるといち早くこれに搭載された。砲弾型 LED ランプは、図-5(b)に示すように、LED チップ、リードフレーム、ワイヤ、レンズで構成される。使用される材料は、これまでの赤色、緑色よりも短波長での耐久性が求められるようになったため、改良された材料を採用し信頼性を確保している。また、砲弾型 LED ランプはレンズ設計による配光制御が容易であり、用途に応じた形状のものがラインナップされている。本章では、砲弾型 LED の代表使用例を紹介する。

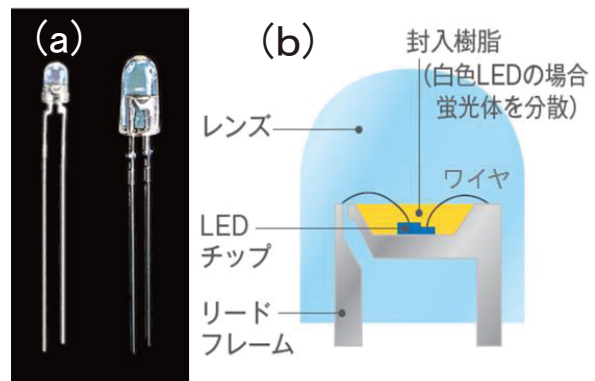


図-5 (a) 砲弾型 LED ランプの写真 (b) 砲弾型 LED ランプの構造

4-1. ディスプレイ用途

青色 LED が実現した最も大きい効果は、従来から存在する赤、緑色 LED を加えて「光の三原色」が揃い、あらゆる色を表現することが可能になったことである (図-6)。これを応用し砲弾型 LED を用いて実現した象徴的な製品は、スタジアムや商業施設などの公共施設に設置されている図-7のような大型フルカラーディスプレイであろう。赤 (R)、緑 (G)、青 (B) -LED を 1

光の三原色



図-6 光の三原色



図-7 大型フルカラーディスプレイ

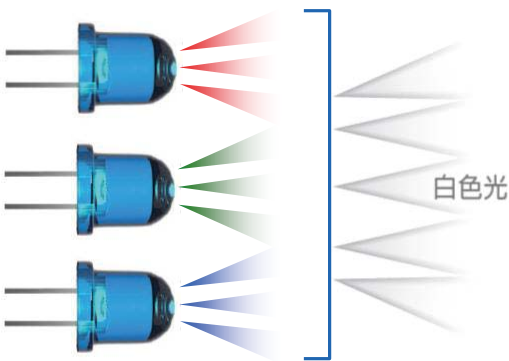


図-8 R, G, B-LED による混色白色光

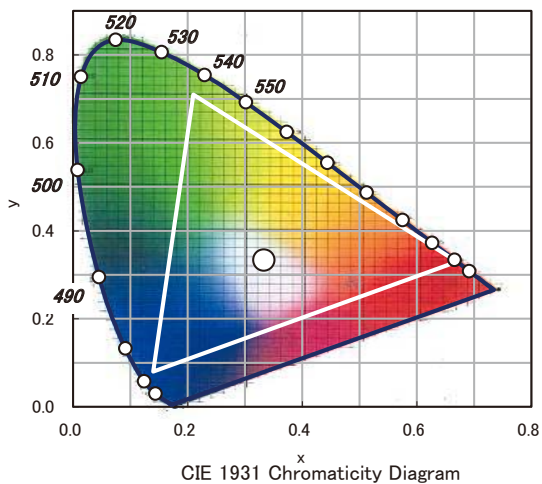


図-9 色度図

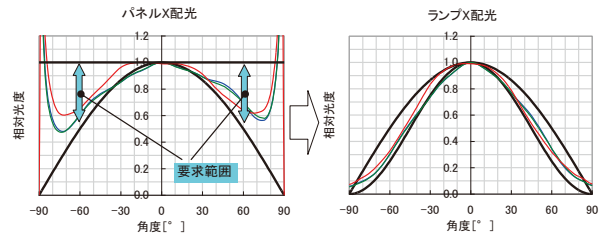


図-10 パネル要求配光特性

組の画素として構成する (図-8)。図-9の色度図から示されるように、RGB 各々の LED 出力を調整しカラーバランスを変化させることで、フルカラーで映像を表示することができる。図-7のような大型ディスプレイには砲弾型 LED ランプがおおよそ 2~3 百万個使用されている。

屋外用ディスプレイで重要なことは、明るい空の下でも多くの人々が画像を認識できることである。そのためには、白色面輝度 $5000\text{cd}/\text{m}^2$ のパネルが必要とされる。これに対して LED の輝度を向上させ対応してきた。青色 LED の輝度は量産化以降急速に向上しており、大型ディスプレイの普及を牽引している。また、パネルには視認性が必要な範囲にのみ輝度が求められる。左右 60° 範囲での観覧を想定しているため、LED ランプの配光は、図-10 右グラフを狙い調整されている (図-10)。一方、上下方向の視認性は広くなくてよい。そのため、レンズがオーバル形状の砲弾型 LED ランプが採用されている。このように、搭載される砲弾型 LED ランプはパネル要求に対応した設計となっている。ディスプレイ用途においては、LED は人が直接見るもののため、配光のばらつきがパネルを見る角度によって斑やムラ、色味が異なるといったクレームを防止するため、量産における LED ランプの配光に安定化が重要である。

4-2. 信号用途

青色 LED 実現の恩恵を我々の日常生活の中で実感できるデバイスが図-11 に示す信号機である。信号機の青色の発光色はドミナント波長が



図-11 LED 信号機

500～520nm であり、緑色に近い青色に設定されている。これは、色弱者（赤緑色覚異常や青黄色覚異常）への配慮とされており、GaN系LEDで対応可能な発光色である。信号機にLEDを応用することで、低消費電力であり省エネに貢献できること、長寿命であり電球の交換頻度を減らせること、灯具にリフレクタを持たないため、朝日や夕日の入射によって生じる疑似点灯（ファントム現象）が無いこと、といったメリットがある。また誤認防止のため、横方向からの視認性を制限するため、LEDランプの配光を半値角23°まで絞り最適化している。こうしたメリットが認められ、全国の信号器はLEDに置き換わりつつあり、普及率は37.9%に達している（平成25年、警察庁調べ）。また、CIE（国際照明委員会）の定める交通信号の緑色の発光色範囲へも対応が可能となり、欧州向けに採用も拡大している。

LEDの量産化が実現した当時は世界で最高性能を誇る青色LEDであったが、LEDの普及に必要な性能には到達しておらず性能改善が急務であった。その後の絶え間ない開発・製品化により、現在の青色LED性能は開発当初に比べて、明るさ13倍、駆動電圧20%下げる改善、電力効率に至っては商品化当初の15倍である約76%にも達している。青色LEDは、表示系用途の普及により人々に広く認知されるようになり、現在では省エネ対策の有力なツールとして照明分野へ急速な拡大が続いている。次項では、我々の生活を明るく照らすための必要不可欠なツールである照明用途に関する白色LEDについて紹介する。

5. 名実ともに第4世代の明かりへ

光の三原色の実現により、LEDの応用製品として最も期待されるアプリケーションが照明である。人類を照らしてきた光は、「ろうそく」にはじまり、「電球」、「蛍光灯」と世代が変わってきた（図-12）。現在においては、LEDは第4世代の光として確実な地位を築いている。他の世代と異なり、LEDは電気を直接光に変換できることが最大の特徴である。その効率の高さからLED照明の普及は発電時のCO₂の排出量削減に直結する。そのため、LED照明は環境問題・エネルギー問題を解決する答えの1つとして近年ますます注目を集めている。

GaN系青色LEDを用いて白色光を実現させる方法は、図-13に示すように主に3つある。1つ目は第3項で説明したR、G、B-LEDによる混合白色光である。2つ目は、GaN系紫外LEDを用いてLEDの放射する紫外光によりR、G、Bの蛍光体を励起・発光させる方式である。どちら

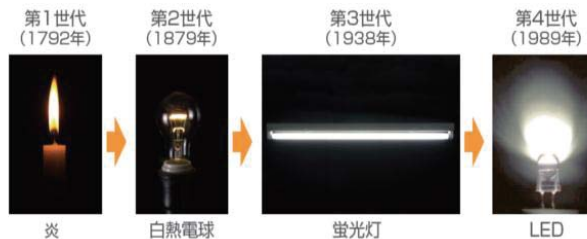


図-12 明かりの進化

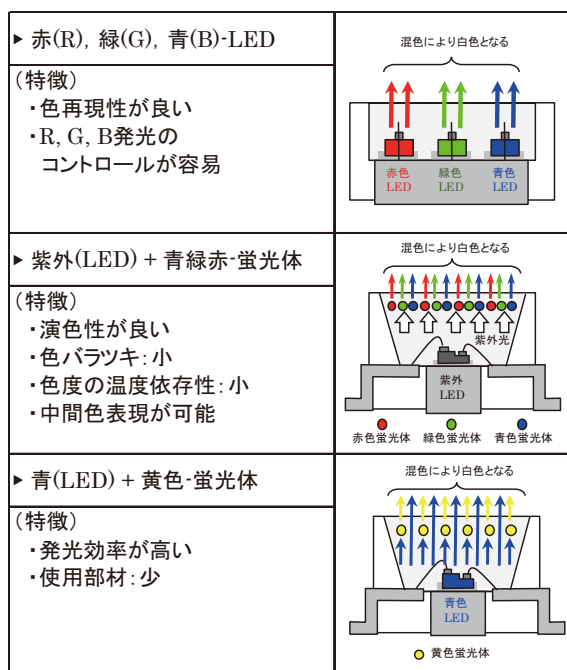


図-13 白色LEDの方式

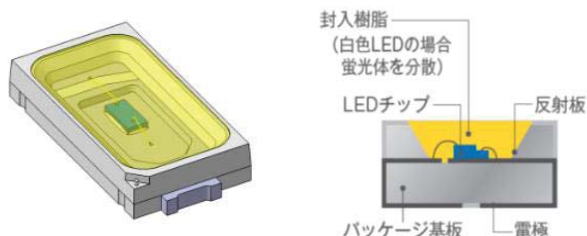


図-14 表面実装型LEDパッケージ

の方式も光の三原色を実現することから、演色性・色再現性が良いといったメリットがある反面、コストや効率に課題がある。3つ目の方式はGaN系青色LEDと黄色蛍光体材料との組合せによる擬似白色光である^{12, 13)}。先の2つの方式と比較すると演色性は劣るが、現在この方式が照明用LEDとして最も実用・量産化されている。その理由として、高効率であること、青色LEDと蛍光体の組合せのみで簡単に白色光を実現できることから低コストであることが挙げられる。LED照明の普及にはコスト低減が必須であるため、現在においては最も主流な方式となっている。また、照明タイプの白色LEDパッケージは砲弾型ではなく、図-14に示すような表面実装型LEDパッケージが広く用いられている。これはLEDチップ

プを直接基板に接着できるので薄型化しやすく設置スペースなどの制約が少なくなるためである。

黄色蛍光体と組合せた GaN 系白色 LED (以後、単に白色 LED と述べる) は、先ず液晶のバックライトとして普及が進んだ。ベースとなる青色 LED の高光度化が進むにつれて白熱電球、蛍光灯の置き換えが可能となり、現在では 200lm/W に迫る発光効率を持つ白色 LED の製品化も現実味を帯びてきている¹⁴⁾。

白色 LED の普及に伴い、市場では顧客製品にあわせた白色 LED パッケージのラインナップの充実が進んだ。本章では、照明用途での事例を 2 つ挙げる。

5-1. 蛍光灯型 LED 照明

図-15 は、従来の蛍光灯と同様の筒型形状の中に、5mm 程度の大きさの白色 LED が 100 ~ 200 個並んでいる蛍光灯型 LED 照明になる。LED の特徴である省エネ効果により、オフィスや工場の電気代削減に貢献することができる。豊田合成およびトヨタグループ各社において、それぞれ 7 万本以上の蛍光灯型 LED 照明の設置・活用が進んでいる (図-16)。最新のモデルでは、

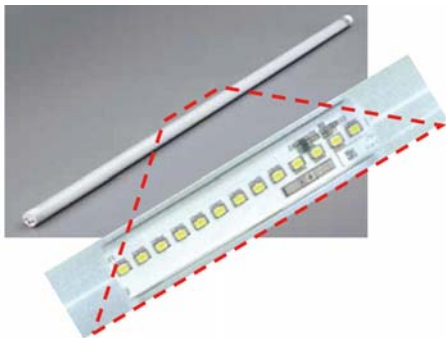


図-15 蛍光灯型 LED 照明

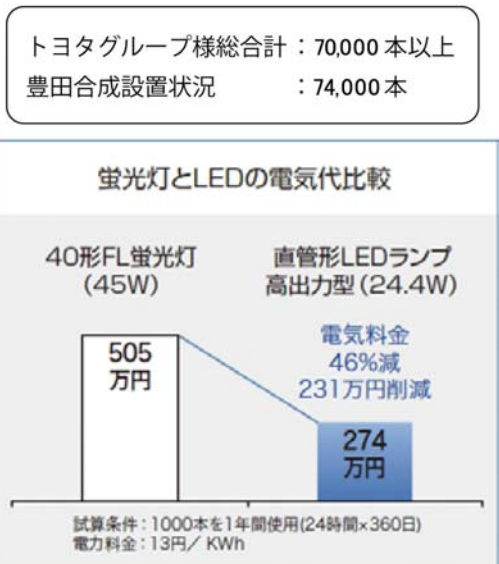


図-16 蛍光灯と LED 照明の電気代比較

表-2 蛍光灯と LED 照明の性能比較

	蛍光灯	LEDランプ*	最新モデル
器具光束	3,000 lm	2,300 lm	2,300 lm
器具効率	67 lm/W	94 lm/W	147 lm/W
インシャル回収年数	—	3年	2年
点灯制御	調光制御	不可	非搭載
	調色制御	不可	非搭載

※蛍光体同等以上の照度を達成

従来の LED ランプと比較して 1.5 倍の効率改善を達成し、更なる省エネに貢献できる製品となっている (表-2)。また LED ならではの特長として、色や明るさを任意に調光できる機能を搭載することも可能となっている。

5-2. 高天井 LED 照明

図-17 は、工場や体育館の天井に設置する高天井 LED 照明で、豊田合成北九州工場での実証事例である。1つの基板の上に、50個~100個のチップを搭載した COB (Chip On Board) 光源を使っている。

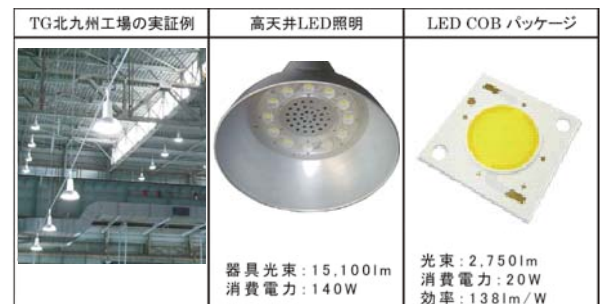


図-17 高天井 LED 照明の方式と性能

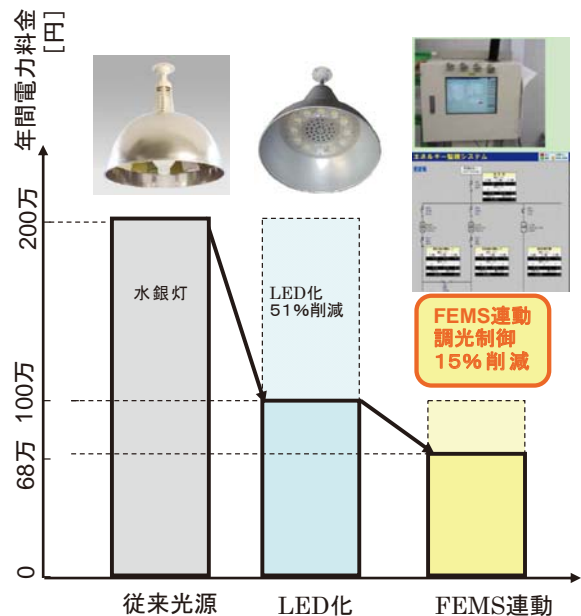


図-18 水銀灯と高天井 LED 照明の比較

器具に COB を複数個搭載することにより、水銀ランプ同等の大光量を確保できるレベルまで LED の性能が向上している。

この事例では、LED 化により従来の水銀灯比較で約半分の省エネを実現した (図-18)。また LED ならではの長所である「電源に連動し瞬時に ON/OFF を制御できる」ことを活用して、外光の強さなどにより点灯制御をする FEMS (Factory Energy Management System) と連動させ、さらに 15% の省エネ化が可能となり、トータルで 1/3 まで電気代を削減できる。また長寿命であるという長所から、高所でのメンテナンス回数を削減できるメリットもあり、豊田合成各工場でも導入を進めトヨタグループ各社での導入についても積極的に検討を進めている。さらに近年の LED 効率の改善により、ギラツキ低減のための拡散板を用いても従来光源より高効率を維持できる。そのため図-19 のように、V リーグの公式試合にも使用可能な体育館用 LED 照明への活用について豊田合成の体育館に設置し実証をしながら、各種体育館へ設置活動を推進している。



図-19 高天井 LED 照明の設置例

6. おわりに

本総説では、青色 LED の開発から量産化までにおける開発の経緯と事業化までの歩み、そして量産化以降の青色 LED 製品の発展について述べた。

青色 LED の開発から量産化までの道のりには多くの困難があったが、必ず成し遂げるという熱意と信念を持って進めてきた。青色 LED の事業化を通して、赤崎先生、天野先生、豊田中央研究所ならびにご指導ご協力して頂いた関係者の皆様には改めて感謝の意を表します。

LED は、優れた省エネ性能、寿命が長いといっ

た理由から環境にやさしい光源として今後ますます普及が進んでいきます。我々が青色 LED の事業化を通して学んできたことを、今後の LED チップ、パッケージのさらなる技術改善と事業拡大に継続して活かすと共に、世界に先駆けて青色 LED の開発・量産化に成功したパイオニア企業としての誇りを持って LED による社会貢献を進めていきたい。

参考文献

- 1) 産学官連携ジャーナル vol.7 No.4 2011
- 2) H. J. Round : Electrical World 49 (1907) 309
- 3) W. C. Johnson, J. B. Parsons, and M. C. Crew : J. Phys. Chem. 36 (1932) 2651
- 4) S. Myhajlenko, J. L. Batstone, H. J. Hutchinson and J. W. Steeds : J. Phys. (c) 17 (1984) 6477
- 5) H. Amano : Jpn. J. Appl. Phys. 52 (2013) 050001
- 6) I. Akasaki, H. Amano, Y. Koide, K. Hiramatsu and N. Sawaki : J. Cryst. Growth 98 (1989) 209
- 7) H. Amano, N. Sawaki, I. Akasaki, and Y. Toyoda : Appl. Phys. Lett. 48 (1986) 353
- 8) K. Hiramatsu, S. Itoh, H. Amano, I. Akasaki : J. Cryst. Growth 115 (1991) 628
- 9) T. Kehagias, P. Komninou, G. Nouet, P. Ruterana and T. Karakostas : Phys. Rev. B 64 (2001) 195329
- 10) H. Amano, M. Kito, K. Hiramatsu and I. Akasaki : Jpn. J. Appl. Phys. 28 (1989) L2112
- 11) K. Koide, H. Kato, M. Sassa, S. Yamasaki, K. Manabe, M. Hashimoto, H. Amano, K. Hiramatsu and I. Akasaki : J. Cryst. Growth 115 (1991) 639
- 12) K. Bando, K. Sakano, Y. Noguchi and Y. Shimizu : J. Light & Vis. Env. 22 (1998) 2
- 13) M. Koike, N. Shibata, H. Kato and Y. Takahashi : IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 8 (2002) 271
- 14) R. Haitz and J. Y. Tsao : Phys. Stat. Sol. (a) 208 (2011) 17

著 者



下野信治



奥野浩司