

白色 LED が一般照明用光源として 本格普及するには

田 口 常 正

Research and Development of White LEDs towards Real Promotion in General Lighting Applications

Tsunemasa TAGUCHI

In order to understand the recent trends on research and development of white light-emitting diode (LED) technologies towards general lighting applications, we will describe both the basic properties on the LED light source technology that is based on blue or near UV LED and phosphor combination system. It is here pointed out that high luminous flux and high color rendering ($Ra > 90$) white LED light source capable of producing over 1000 lm should be developed within a couple of years. To further promote and accelerate the white LED lighting technologies, not only the newly advanced technologies in packaging process, but also the standardization and new business model are desired.

Key words: white LED, lighting application, semiconductor, phosphor, new business model

平成 19 年、内閣府の第 72 回総合科学技術会議において、最も注目されている科学技術として、再生医療の発展に大きく貢献できる「人工多能性幹細胞」と、次世代のあかりとして期待される「白色 LED 照明」が紹介された¹⁻³⁾。

白色 LED 照明技術は、白熱電球、蛍光ランプ、高圧放電ランプ (HID) を代替可能とする次世代省エネルギー型固体照明光源として期待されている。この 10 年間で、日本の技術を基に一般照明光源への応用を目指し、“見る”あかりから“照らす”あかりとして、世界各国で学術的・産業的な規模で研究が進められている¹⁾。

現在、世界各国の照明メーカーは、固体照明光源・器具開発に力を削っており、2010 年以降、すべての電球、蛍光ランプ類のおよそ 10% が LED 照明に置き換わると予想されている。さらに、最近、国内大手照明メーカーから、2010 年中に白熱電球の生産を中止して順次電球型蛍光ランプに置き換え、将来は LED 照明電球の生産に切り替えると発表があった⁴⁾。LED 照明の普及による省エネルギー（年間電力量削減効果）は 2030 年で約 20% の 200 億 kWh と予測されている。白色 LED 照明の省エネルギー

効果に加えて、LED 照明は、国民一人一人が手軽に省エネルギー化に取り組むことを可能とし、ひいては地球環境の保護に貢献できるということを実感させてくれることにも大きな意義がある。今後、LED 照明を購入するだけで、あらゆる人が地球温暖化防止、地球環境の保護に貢献していける可能性を秘めている^{1,4-6)}。

“照らす”を主体とする映像と照明は文化であるため、国や地域によって考え方が異なる。しかし、省エネルギーと環境保全に関しては、世界中のコンセンサスが一致している。

本論文では、白色 LED 照明技術の最新動向を概観し、海外の研究開発動向と比較しながら、国際競争力とビジネスモデルについて論述する。今後、一般照明用光源として本格的に普及するためには、何が必要とされているかについてもふれる。

1. 白色 LED 照明の特徴と最新技術

白色 LED は 1997 年ごろに登場し、半導体照明または固体照明という新しい研究分野における発光素子である

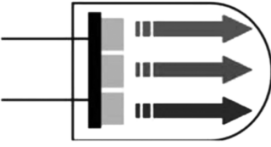
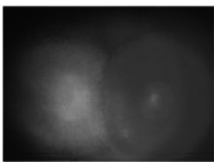
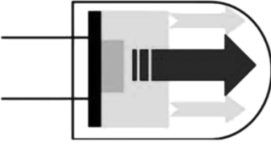
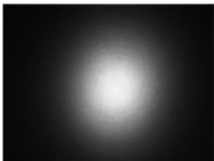
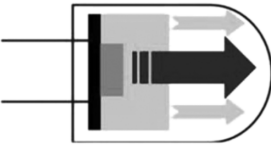
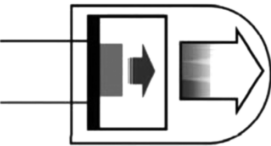
白色 LED の構造	照射面パターン	特徴 (発光効率:K, 平均演色評価数:Ra)
 (a)		マルチチップ ・3 色の LED からの配光が異なる ・可視スペクトルに欠落部分がある ・照明用光源として不適 ・K~30 lm/W ・Ra~40
 (b)-1		ワンチップタイプ ・青色 LED+黄色蛍光体による擬似白色 ・均一な配光は得られない ・照明用光源として不完全 ・K>100 lm/W ・Ra~85
 (b)-2		ワンチップタイプ ・青色 LED+黄色・赤蛍光体 又は 緑色・赤色 蛍光体による白色 ・青色 LED の特性に左右される ・短波長(420 nm 以下)の光がない ・照明光源と適格 ・K>40 lm/W ・Ra>95
 (c)		ワンチップタイプ ・近紫外 LED+赤・緑・青色蛍光体による白色 ・高演色で均一な配光が得られる ・照明用光源として最適 ・可視光全域にわたって連続スペクトルに近い 発光を示す ・K>80 lm/W ・Ra>98

図1 RGB 有色 LED による白色 LED (a), 青色 LED 擬似白色 (b)-1, (b)-2, 近紫外 LED RGB 蛍光体白色 LED (c) の構造と, それぞれの特徴。(巻頭カラー口絵参照)

が, 現在普及している白色光源は半導体 LED 励起光源と蛍光体との組み合わせによって成り立っている^{6,7)}。

現在, LED を用いて白色光を実現する方法は, 図1に示すようにおもに2つある⁶⁾。1つは, 図1(a)に示すように3種類のLED(赤色(R), 緑色(G), 青色(B))を組み合わせて白色光を発生させる方法, もう1つは, 図1(b)と(c)にそれぞれ示すように $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 系青色LEDまたは近紫外LEDと蛍光体を組み合わせた混合光で白色を表現する方法である。RGB3色LEDを用いた場合だと, 図1(a)に示されているように白色光を発生させるためには, 各色LEDの発光強度のバランスを取る個々の電源回路を必要とする。また, それぞれの配光特性が異なるので, 照射面で不均一な色混合が現れて照明光としては不適格である。

図1(b)-1に示す砲弾型白色LED(Blue/YAG黄色蛍光体方式)は, すでに商品化(液晶バックライト(BLU), イルミネーション, 壁面ディスプレイ等)されている。この方式では人間の目には青色光と黄色光で白色光(擬似白

色)に見えるが, いくつか問題点がある。青色と黄色は補色の関係になるため, 色相分離効果, 強い色度の温度, 電流依存性を示し, 緑や赤色成分が不足しているので演色性に乏しいという問題がある。青色と黄色の色相分離は照射面に生じる。これらの欠点を改善したものが, 図1(b)-2に示す青色LEDによって黄色と赤色蛍光体または緑色と赤色蛍光体を発光させる方法である。

光源には高品質な光が求められる。なぜなら, われわれは物体を見ると, 反射光を見ているからである。光源のスペクトルは物体の表面に作用し, この現象を演色とよんでいる。光源が白熱電球や太陽光のスペクトルに近いものでなければ, 物体の色は普段と異なる色に見える。図1(c)に近紫外励起の蛍光体発光方式の白色LEDの構造と特徴を示す。

近紫外励起の白色LEDの発光原理は, 近紫外光が蛍光体中でフォトルミネセンス過程により可視光に変換されるという点において3波長蛍光ランプに類似している。この技術は図1(b)のBlue/YAG方式より高品質な白色光を

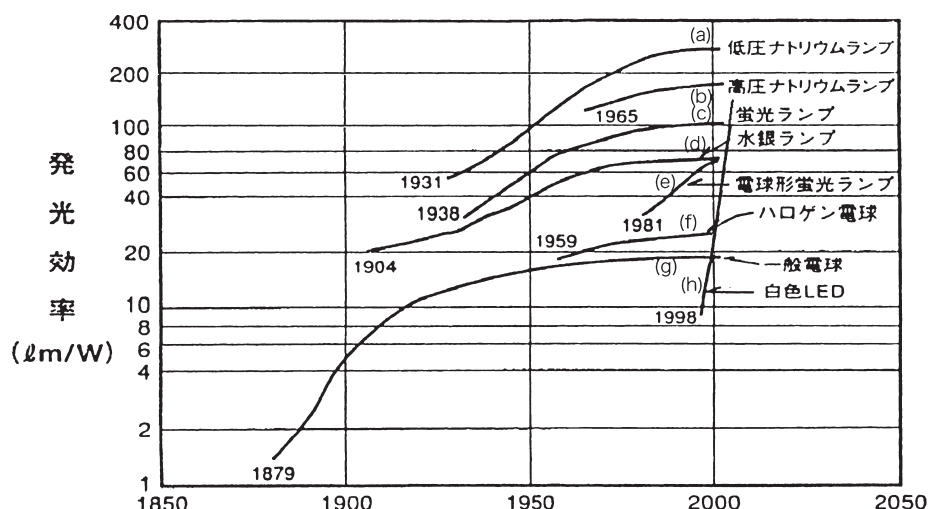


図2 照明用光源の発光効率の推移。(a) 低圧ナトリウムランプ、(b) 高圧ナトリウムランプ、(c) 蛍光ランプ、(d) 水銀ランプ、(e) 電球形蛍光ランプ、(f) ハロゲン電球、(g) 一般電球、(h) 白色LED。

得られる。これらの2方式の蛍光体変換型白色LEDは、白色発生の原理が物理的に異なる。Blue/YAG方式では、青色LEDから出る鋭い青色光は白色を構成する必要不可欠な要素であり、温度や駆動電流に強く影響される。一方、図1(c)のように、近紫外光は白色光を直接発生する成分ではないため、十分な色混合特性や均一の配光分布が得られる。

現在、近紫外LEDを用いることにより、“暖かい”色から“冷たい”色までの白色光を蛍光体で作ることができる。近紫外励起方式の白色光は、可視光全域(380~780 nm)にわたって、白熱電球に近い連続スペクトルの発光であり、特に、蛍光ランプに含まれている405 nm前後の紫色成分が含まれるのが特徴である。

図2は照明用光源の発光効率の推移を示している。それぞれの光源の実用化年代が記されているが、電球形蛍光ランプ以外は、ここ数10年間で発光効率の飛躍的な伸びはみられない。一方、1997年に誕生した白色LEDはわずか数年で発光効率が約10倍になっている。光源開発と新光源の登場は、効率向上の歴史であり、21世紀に入り、これまでの白熱電球と放電灯による発光と異なる固体照明光源のシステム開発が進んでいる⁸⁾。

2. LEDチップ構造と実装方式の動向

LED光源の効率(wallplug efficiency: η_{wp})は以下の式に示す3つのファクターの積によって表される⁹⁻¹¹⁾。

$$\eta_{wp} = \eta_v \cdot \eta_i \cdot \eta_{ext}$$

ここで、 η_{wp} は入力対光出力効率、 η_v は電圧効率、 η_i は

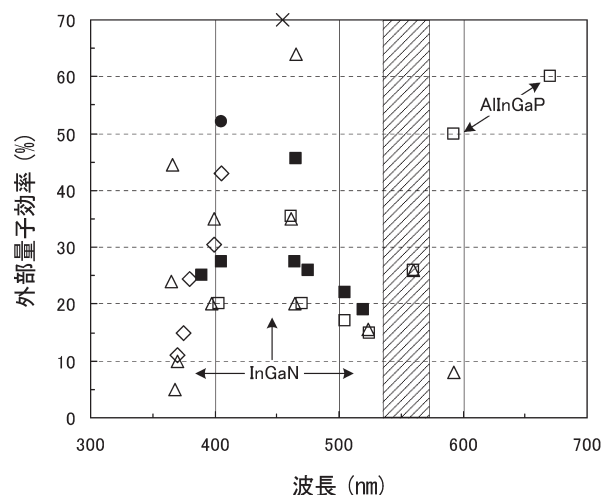


図3 AlInGaPおよびInGaN半導体をベースとした近紫外、可視光LEDの外部量子効率(η_e)の最高値と報告値(未発表データも含む)⁹⁾。×:オスラム、△:日亜化学工業(株)、□:フィリップスルミレド、■:クリー、●:山口大・三菱電線工業(株)・三菱化学(株)。

内部量子効率、 η_{ext} は光の外部とり出し効率である。

一般的に使われる外部量子効率 η_e は $\eta_i \cdot \eta_{ext}$ で表される。図3にAlInGaP、InGaN系LEDの各可視光波長における外部量子効率の報告値(未発表を含む)を示す¹²⁻¹⁴⁾。550 nmの純緑色領域(図の斜線の領域)を除けば、ほとんどの可視光波長領域において、 η_e は50%を超えている^{6,7)}。図3の点線に挟まれた範囲(530~560 nm)はグリーン・ギャップとよばれている¹²⁾。

図4(a)~(g)に、現在、製品化されているInGaN/GaN MQW青色または近紫外(紫外)LEDチップの構造を示す。チップは、おもに蛍光体の励起に使用されるので、高

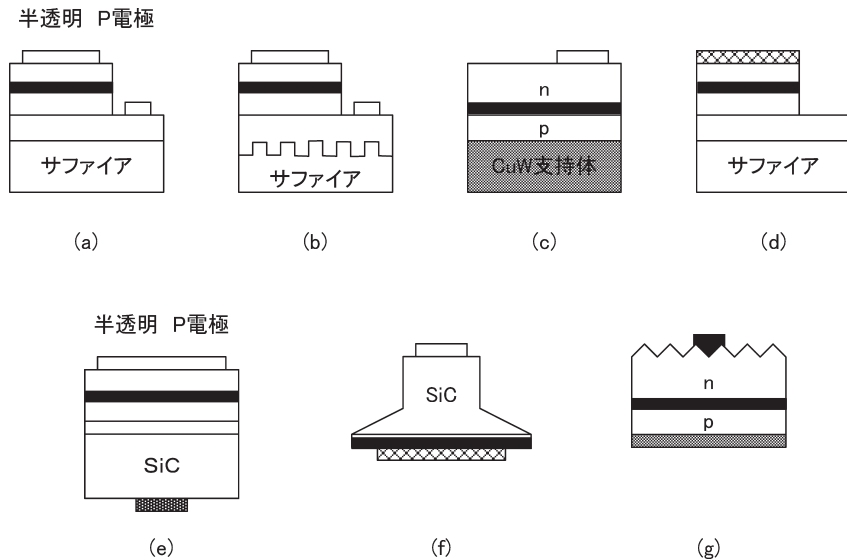


図4 蛍光体励起用として用いられる GaN 系半導体チップの構造（標準品としてサイズが $350\ \mu\text{m}^2$ 角と高出力用として $1\ \text{mm}^2$ 角がある，太い黒線は MQW 活性層を示す）。

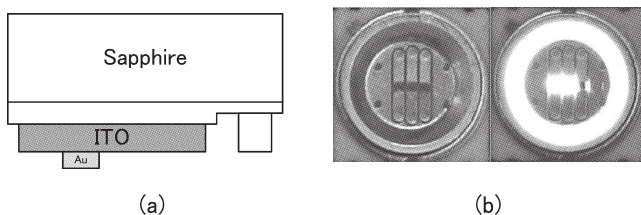


図5 (a) ITO 膜を有するフリップ・チップ LED, (b) フリップチップ LED をセラミックス基板に実装した例（左図： $350\ \mu\text{m}^2$ チップ 3 個，右図：点灯例）。

出力特性が要求される。したがって，大電流（1 A 以上）を通電できるチップが白色 LED 照明に適していると考えられる。図4に示したさまざまなチップ（サイズ $1\ \text{mm}^2$ ）を用い，放熱対策を行って使用することが求められる。最も標準的なチップ（a）は，サファイア基板の上に成長し，p 側と n 側電極に2本のワイヤーを取りつける方式である。（b）は，光取り出し効果を向上させるために加工基板を用いる方式で，現在主流となっている。（c）は，基板をとりはずし，反射金属と金属放熱板をはりつけたもの，（d）と（g）はさらに光取り出しを上げる目的でフォトリソグラフィ等を用いたものである。（e）と（f）は SiC 基板を使用したものである。この場合は，電極からのワイヤーは1本で済む。

図5（a）と（b）は，図4（b）のチップを用いて，フリップ・チップというチップを反転させ，サファイア基板から光を取り出す方式であり，（b）はチップを直接的セラミックス基板上に実装した一例を示す。チップの活性層から放射される後方からの光は，パッケージ基板で反射される。

一方，横側から放射される光は反射板（ダム）で反射されることにより，全体の光取り出し効果を上げることができる。図4に示したチップ（a），（b）と比較して，フリップチップにすることにより，光出力は約1.5倍以上になる⁹⁾。最近では，高出力用チップとして，サイズが $1\ \text{mm}^2$ 角のもの，およびサファイア基板をレーザー光で強制的にリフト・オフし，さらに表にテクスチャー構造（g）を設けた薄膜構造で使用する割合が増えている。実装方式はオスラム，Philips-Lumileds により開発されている¹⁾。薄膜型チップの実際の構造は，2002 年，Zheng と田口⁹⁾によって高効率チップの理論的モデルが提案され，その構造に近いと考えられている。

照明用白色 LED では，光源あたり 1000 lm 以上の高光束を取り出すことが必須である。最近，チップの構造がさまざまな工夫されている。

近年，LED チップの発光特性の改善が進んでおり，光の外部取り出し効率は再吸収，内部反射などのため 30% が限界であったが，すでに図3で述べたように，可視光全域で外部量子効率 50% を超える値が得られている。また，照明用光源として，重要な光束，照度，配光特性を評価する手法も進んでいる¹⁵⁾。将来， η_e は理論限界に近い 80% まで達成可能とされている。

LED や LD（半導体レーザー）などの発光素子は，欠陥が多数あると発光キラー中心となってしまう，発光効率の低下につながり，実用化の障害となる。GaN をベースにした InGaN/GaN QW LED には， $10^8 \sim 10^{10}\ \text{cm}^{-2}$ 程度の非発光中心の密度が含まれている。商品化されている

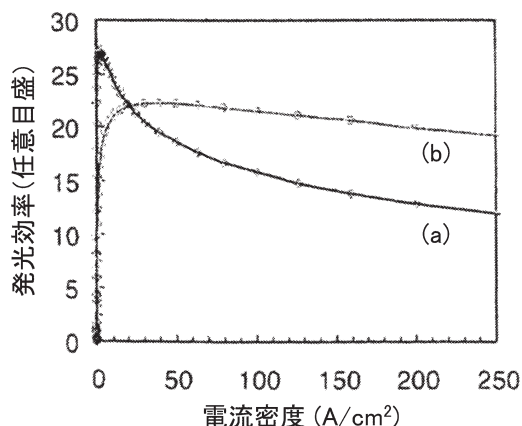


図6 電流密度対発光効率の特性：従来のチップ (a) と新しいエピタキシャル成長によるチップ (b)。

GaAs系のLEDでは約 10^3 cm^{-2} 程度あり、欠陥密度が増加するとほとんど発光しなくなる。その限界は約 10^7 cm^{-2} といわれている。InGaN半導体を用いたLEDでは、これ以上の欠陥が含まれているにもかかわらず、高効率で発光する。原因はまだ解明されていない。したがって、発光メカニズムの解明には、点欠陥を含めた不純物、格子欠陥、構造欠陥（転位、ボイド等）の解明が不可欠である。そこで、活性層の内部量子効率（internal quantum efficiency: IQE）を評価することが最重要課題となる¹⁾。最近、GaN単結晶基板が供給されるようになってきたので、ホモエピタキシャル成長した高効率青色～紫外LEDが作製されると期待されている。

図6に電流密度対発光効率の特性の概略を示す。チップに高電流を流すことによって、高い光束を得る必要があるが、図3に示したこれまでのチップの特性は、電流を増加するにつれて急激に発光効率が減少する傾向にある¹⁾。これを図6(a)に示す。“droop”（たれ）現象とよばれる。原因としては、発熱によるものではなく、活性層中で発生するAuger再結合過程、Vピッチとよばれる貫通転位等による非発光中心が支配的になっていると考えられている¹⁾。

最近、図6(b)のように、新しいエピタキシャル成長技術により、活性層中の欠陥を低減させ、さらに電極を点状または線状にすることによって、この現象を制御することが可能であることが報告されている¹⁾。

3. 本格的普及のための課題

3.1 ビジネスモデルとロード・マップ

市場の成長は、携帯電話から、車載用LEDヘッドランプ、大型LCDバックライト（BLU）、特殊照明用途へと新しい応用製品にシフトしているため、新しいマーケティング戦略が必要となる。台湾ではLCDベンダーがLED

チップ、照明メーカーのサポート体制を作り、国を挙げての取り組みが注目される。日本の一部のLEDメーカーは、LCD BLUは時期尚早と取り組みが遅かったことが敗因しており、LCD BLUを牽引できていないと考えられている。

図7に発光効率（lm/W）の向上による用途拡大の例を示す。コストは年々安くなっており、市販品は2010年で10円以下と予測されている²⁾。

国内の白色LED照明市場は、2015年に600億円の規模になると予測されており、国内大手照明企業においては、総合効率60 lm/W以上の製品器具を目指した開発とその応用展開を模索している²⁾。しかしながら、一般照明への適用は、まだハードルが高く、1000 lmの光束を超えた時期から普及が始まるものと考えられている。照明学会「白色LED照明特別委員会」が作成した、一般照明への技術促進・普及に関するロードマップを図8に示す³⁾。光束とは光源から放射される光の放射束のことで、人間の目が感じる可視光（380～780 nm）領域を含む。単位はルーメン（lumen: lm）で表す。¥/lmの意味は、例えば白熱電球（100 W）の光束が約1000 lmとすると、電球1個の価格が100円なら、この値は0.1となる。蛍光灯（40 W）の場合は、この値が約1となる。したがって、¥/lm値が少なくとも1以上になってはじめて、電球、蛍光灯の代替が可能となる。

3.2 国際競争力と標準化対策

科学技術振興機構の「研究開発戦略センター」による国際競争力比較¹⁶⁾によると、日本は高い産業技術力を持っており、基盤技術である窒化物半導体や蛍光体の研究は世界的にも高い水準にあるが、「照明」という観点からは、産官学の研究体制が整っていないことが指摘されている。産業技術力としては欧州が最高水準にあるが、最近、台湾、韓国、中国が急速に高い競争力をつけてきている²⁾。

白色LED照明研究は新しく、将来、一般照明システムへの代替には多くの学術的・産業的課題を解決していかなければならない。そのためには、半導体工学、照明工学、光環境・システム工学および照明デザインの異分野の融合研究が必要不可欠である。近年、白色LED単体デバイスの発光効率が150 lm/Wを超え、平均演色評価数95以上の高性能白色LED光源が開発されている。さらに、蛍光体・樹脂・放熱基板等材料分野の研究も活発に行われるようになり、実装・プロセス技術に係る後工程が高度化してきている。

しかしながら、依然として日本の大学は窒化物半導体研究が活発である。一方、照明メーカーはひたすら光源・器

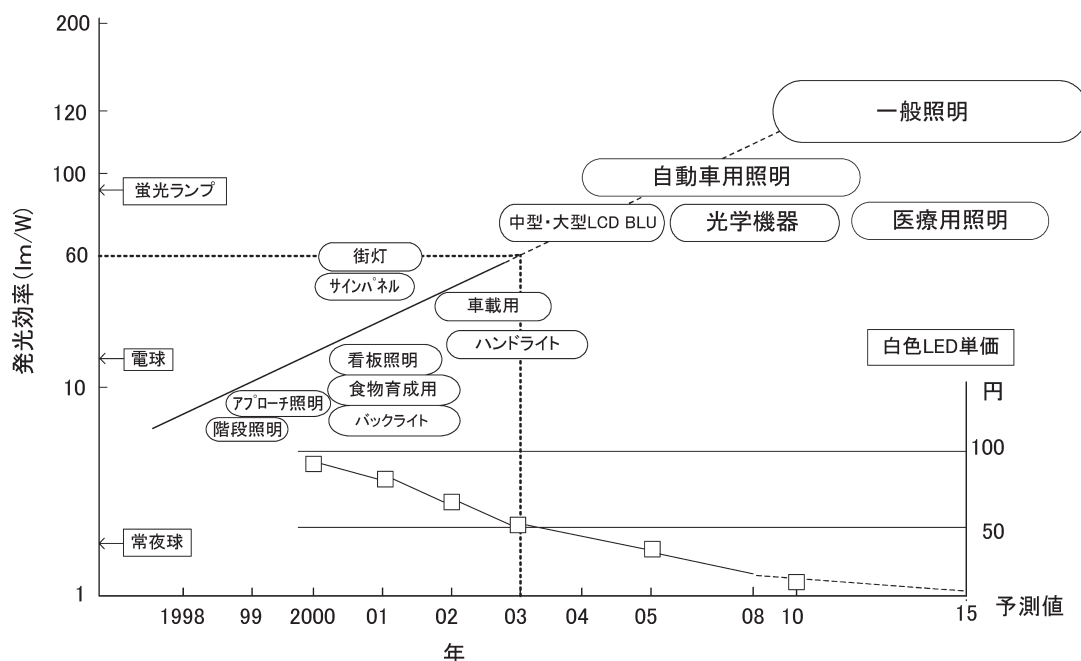


図7 年代順にみた有色，白色LED照明光源の応用例と製品および価格の将来予測。

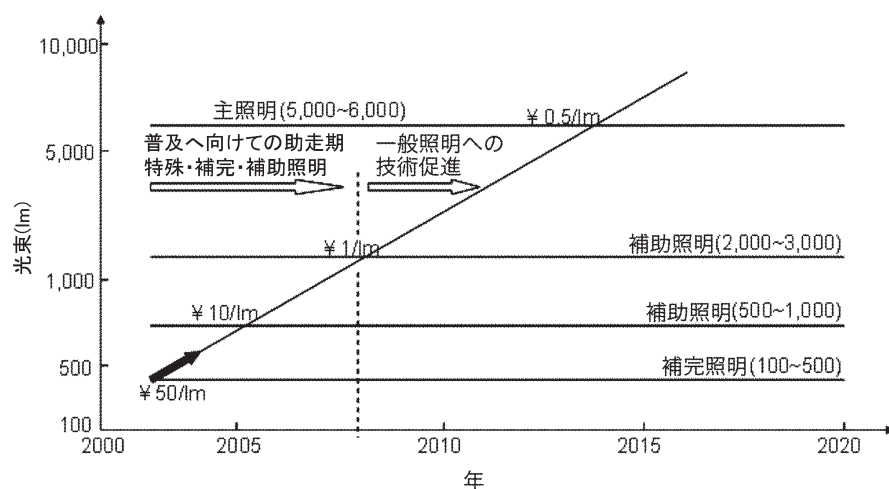


図8 光束値と一般照明，主照明への技術促進に向けたロードマップ。

具開発を行っているのが現状である。産学連携の研究をみても，材料・デバイスの研究と光学機器と一般照明への応用研究に大きなギャップがある。現在は，発光効率の向上が製品化に結びついており，白色光の質を議論するところまできていない。新しい実装技術と材料（蛍光体，樹脂，封止剤等）によってがらりと変化する研究開発分野であり，まだ未成熟である。

さらに，これまで半導体産業で日本が経験してきたように，国際競争力の観点からみると，日本のLED技術をキャッチアップしてきた台湾，韓国の企業によるコスト低下が，研究開発に直接大きな影響を及ぼしはじめている。今後，日本が一般照明市場で世界制覇を狙うためには，標準

化に関する取り組みを強化しなければならない¹⁶⁾。

日本にはLED，照明メーカーが多いにもかかわらず，情報がブラックボックス化してとまらない。世界的にみると，台湾，韓国，中国を中心に，日本の材料メーカーのバックアップを受けて，非常に高い国際競争力をつけている。それを支援する欧米の照明メーカーの組織力で，固体照明の標準化が欧州を中心に行われる可能性がある。

これまでエレクトロニクス産業界では，研究開発への投資が生み出すテクノロジーイノベーションがわが国の国際競争力を支え，国富を高めてきた。しかし，世界経済のグローバル化が進んだ現在では，わが国の半導体デバイス産業は国際競争力を失っている。これまですり合わせと匠の

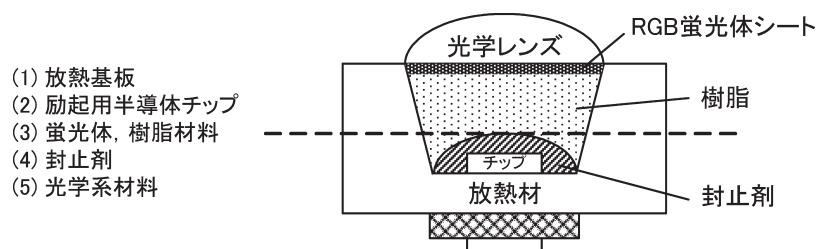


図9 (1)～(5)の各種部材を含む白色LEDの構造。

技と知財で勝ち残ってきた構図が、大量普及と高い利益率の同時実現により崩れてきた、と東大ものづくりセンターの小川は指摘している¹⁷⁾。一方、デバイスを支える材料では、わが国は圧倒的シェア（70%）を誇り、典型的なすり合わせ型のプロセス技術で製造される白色LEDの基盤材料（図9）では、高い競争力をもっていると考えられる¹⁷⁾。

今後、LEDベンダーは、幅広いマーケットのニーズに対応して、後工程企業との連携を強めねばならないであろう。2004年以降、白色LEDの取引価格は下落し、2015年以降は5円を切るといわれている。これは、台湾のLCDパネルベンダーがLEDベンダーへの出資を行い、両者の関係を強め国益につながるような仕組みづくりを始めたためである²⁾。今後、わが国がとるべき白色LED照明技術イノベーションとは何であるかを考えることが、企業にとって重要課題である。

白色LEDの研究開発課題は、発光効率改善のためめぬ努力と自然光を目指した質の高い色再現性、および新しい実装・製造方法の開発、新たな材料の模索である。

わが国が他国の追随を許さずに世界トップの白色LED照明技術を維持するためには、産官学の連携による研究開発力の強化と、戦略的知財の保護・活用が不可欠であり、企業独自の国際的に通用するLED照明光源・器具の標準化が緊急の課題といえる。

本論文に記載したデータの一部は、文部科学省“知的クラスター創成事業（白色LEDの医療応用）”（2003～2008年度）において得られたものである。関係各位に感謝申し上げます。

文 献

- 1) *Proceedings of the 1st International Conference on White LEDs and Solid State Lighting*, Nov., Tokyo (2007).
- 2) 藤井 智, 田口常正: “白色LED照明技術の展望と市場動向”, 光技術コンタクト, **461** (2008) 5-9.
- 3) T. Taguchi: “Present status of white lighting technologies in Japan,” *J. Light & Vis. Env.*, **27** (2003) 131-139.
- 4) 田口常正: “発光ダイオードの開発動向”, 電気評論, 9月号 (2002) 26-32.
- 5) 田口常正: “白色LED照明技術による“21世紀のあかり”国家プロジェクト”, 電子情報通信学会論文誌C, **J84-C** (2001) 1040-1049.
- 6) 田口常正: “白色LED照明による省エネルギー技術の現状と将来展望”, 電気学会誌, **127** (2007) 226-229.
- 7) 日本学術振興会光電相互変換第125委員会編: “発光と受光の物理と応用” (培風館, 2008) pp. 277-300.
- 8) 田口常正: “白色LEDによる21世紀のあかり”, 照明学会誌, **85** (2001) 496-501.
- 9) P. Bharracharya: *Semiconductor Optoelectronics Devices* (Prentice-Hall, New York, 1994).
- 10) J. Singh: *Semiconductor Optoelectronics* (McGraw-Hill, 1995) p. 462.
- 11) S. Nakamura and G. Fasol: *The Blue Laser Diode* (Springer, 1997).
- 12) 田口常正: “進化するLED”, トランジスタ技術, 2007年10月号, 93-98.
- 13) T. Taguchi: “Overview, Present status and future prospect of system and design in white LED lighting technologies,” *Proc. SPIE*, **5530** (2004) 7-16.
- 14) H. Sakuta, N. Nakamura, T. Miyachi, T. Fukui, H. Ishikawa, K. Sugi, H. Yoshioka, K. Kamon, H. Hayashi, Y. Uchida, S. Kurai and T. Taguchi: “Near-ultraviolet LED of the external quantum efficiency over 45% and its application to high-color rendering phosphor conversion white LEDs,” *J. Light Visual Environ.*, **32** (2008) 39-42.
- 15) R. S. Zheng and T. Taguchi: “Optical design of large area GaN-based LEDs,” *Proc. SPIE*, **4996** (2003) 154-162.
- 16) 科学技術振興機構: 科学技術・研究開発の国際比較2008年版 (2008).
- 17) K. Ogawa, J. Shintaku and T. Yoshimoto: “Architecture-based analysis of competitive advantage between Japanese and Catch-up Country's Firm and Introduction of New Global Alliance,” *Ann. Business Administrative Sci.*, **4**, No. 3 (2005) 21-38. <http://www.gbrc.jp/GBRC.files/journal/abas/ABAS4-3.html>

(2008年10月6日受理)