

# 白色発光ダイオードの開発と照明光源への応用

田口常正

## Development of White Light-Emitting Diodes and Its Application to Lighting Sources

Tsunemasa TAGUCHI

This article reviews the recent development of the white light-emitting diodes (LEDs), and its application to lighting source and system. Basically, there exist three methods which can generate white lights using LEDs and phosphor materials combination. The white LED which consists of blue LED and YAG:Ce<sup>3+</sup> yellow phosphor has already appeared in market place. It is however pointed out that both the luminous efficacy and color rendering (Ra) properties at higher currents (>20 mA) must be improved. A new type of white LED composed of ultraviolet LED and tri-colors (RGB) phosphor has been introduced and has been compared to the optical properties of RGB white LEDs. The UV LED-excited white LED indicates the excellent luminous properties (Ra>90) and is the most advantageous for general lighting application.

**Key words:** white LED, blue LED, ultraviolet LED, color rendering, lighting

可視光発光ダイオード (light-emitting diode: LED) は、ここ数年間で、GaP, GaN 系 III-V 族混晶化合物半導体の結晶成長・デバイス・プロセス技術および、物性評価法が飛躍的に進歩し、高効率赤色・アンバー色そして緑色・青色 LED の製品化への道が切り開かれた<sup>1-3)</sup>。LED の光放射は、基本的に半導体固有の性質によるもので、熱や放電の光ではない。したがって、LED 光源は、“cold light” とよばれ、通常の白熱電球と違って手で触っても熱くなく安全である。さらに寿命が長いので廃棄する必要も少なく、また、水銀などの有害な物質が含まれていないので、地球環境に優しい表示用および照明用光源として期待できる。

特に、窒化物系混晶化合物半導体 InGaN を用いた青色 LED が商品化されたことにより、フルカラー表示が可能となり、かつ高光度青色 LED と蛍光体 (YAG:Ce) の組み合わせを用いた白色 LED も開発され<sup>4)</sup>、次世代省エネルギー表示照明光源として脚光を浴びている。短波長の紫外領域で発光する紫外線 (UV) LED についても、最近、革新的な素子構造が開発され、外部量子効率 ( $\eta_e$ ) が 20% 以上の UV LED と 3 波長蛍光体の組み合わせによる照明用白色 LED 光源が実現された<sup>5)</sup>。

1998 年に経済産業省は現在の白熱電球、蛍光灯を上回るエネルギー効率を有する白色 LED 照明光源を実用化することを目的に、GaN 系化合物半導体を中心とする「高効率電光変換化合物半導体開発」(通称「21 世紀のあかり」) 国家プロジェクトを開始した<sup>6-8)</sup>。これを契機に、世界各国で semiconductor lighting (半導体照明) の研究が開始され、白色 LED 照明光源開発の基礎と応用研究が活発に行われている<sup>9)</sup>。

本論文では、高効率化技術の進展の著しい白色 LED 研究開発の動向と照明光源への応用および今後の技術課題について述べる。

### 1. 白色 LED の開発

LED は、半導体の p-n 接合に順方向電流を流すと発光する素子であり、光の閉じ込めと電流狭窄を行うため、通常はダブルヘテロ (DH) 接合、および量子井戸 (QW) 構造を用いる。現在、InGaN 混晶を活性 (発光) 層とした量子井戸構造で、光度 10 cd 近くの青色、緑色 LED が製品化されている。さらに、AlInGaP アンバー LED で外部量子効率 50%、発光効率 100 lm/W を超えるものが開発され

表1 白色光を発生する3方式.

方式	励起源	発光材料および蛍光体	発光原理	特性	
				K (lm/W)	Ra
ワン・チップ型	青色 LED	InGaN/YAG CdZnSe/ZnSe 結晶	青色光で蛍光体または結晶(黄色発光)を励起	15 (YAG)	>80 (YAG)
	紫色・紫外 LED	InGaN/R, G, B 等 3, 4 種類の蛍光体	蛍光ランプと同様に紫外光で蛍光体を励起	10 (2003年に80 lm/Wを目標)*	80~90
マルチ・チップ型	青色 LED 緑色 LED 黄橙色 LED 赤色 LED	InGaN, AlInGaP, AlGaAs	3または4色のLEDをひとつのパッケージに実装	20	80

\*文献9), 18).

た<sup>10)</sup>.

一般照明用として開発される白色 LED 光源は、対象物に光が照射された場合に、人間がみて不快感のない白色と良好な演色性を有していることが必要である<sup>11)</sup>。したがって、高効率化と同様に演色性は LED 光源にとって重要なファクターである。演色性は白色 LED の光源スペクトルの波長、発光帯形状から決まるので、光源の応用を考慮して、2つのファクターを満足するように設計されなければいけない。以下に、光源の発光効率と演色性について簡単に説明する<sup>11),12)</sup>。

### 1.1 光源の発光効率 (K)

エネルギー効率は入力電力 (W) を光量 (luminous flux: lm) に変換するプロセスであり luminous efficacy of radiation とよばれ  $K$  (lm/W) で表される。波長  $\lambda$  における単一波長の放射光の  $K(\lambda)$  は次式で与えられる。

$$K(\lambda) = K_m \times V(\lambda) \quad (1)$$

ここで、 $K_m = 683$  lm/W (555 nm の緑色において最大値)、 $V(\lambda)$  は各波長の発光効率。さらに、各波長のスペクトル強度分布関数を  $S(\lambda)$  とすると各波長の発光効率は次式で与えられる。

$$K(\text{lm/W}) = \frac{K_m \int S(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int S(\lambda) d\lambda} \quad (2)$$

したがって、450 nm の青色光の効率は最大で 26 lm/W になる。

### 1.2 演色評価指数 (Ra)

演色評価指数は color rendering index とよばれ、一般に Ra と表示される。この評価法は CIE (Commission International de l' Eclairage, International Commission on Illumination) で決められている。一般照明用の伝統的なランプの白色は電球色 (カラー温度, 2850 K) と昼光色 (6500 K) のプランク軌跡上 (Planckian locus) にあり、通常の

蛍光灯の色度はこの曲線上にのっていることが義務づけられている。したがって、 $Ra \geq 80$  は高品質白色 LED の必要条件であり、インテリア照明用として、そして  $Ra > 95$  は書籍の閲覧等一般照明に必要な条件である。

### 1.3 白色 LED の方式

LED を用いて発光効率 ( $K$ ) および演色性 ( $Ra \geq 80$ ) の高い白色を得るには、表1に示すように基本的に2つの方式 (ワン・チップとマルチ・チップ型) がある<sup>2)</sup>。1つは赤色・緑色・青色 (R・G・B) の3種類のLEDおよび黄橙色LEDを加えた4種類のLEDを同時に点灯させる方式であり、もう1つは青色、紫色や紫外の光を放射するLEDを励起用光源として使い、蛍光体または、ZnSe 結晶<sup>13)</sup>等を励起する方式である。前者の方式では、各LEDの駆動電圧や発光出力に違いがあり、さらに温度特性や素子寿命にも違いがあるなど実用化に向けての課題は多い。一方、後者の方式は素子が1種類ですみ、駆動回路の設計が大変容易になる。

後者2方式が実用化されている。GaN系化合物半導体の青色~紫外LEDの実用化により、表1の一部の白色LEDは、1996年から商品化されている。すなわち、(1)青色LEDで黄色発光の蛍光体を励起する方式と、(2)紫色・紫外LEDでRGB蛍光体を励起する方式である。表1には、 $K$ ,  $Ra$ の値をそれぞれの方式について記した。いずれも白色光源として適しているが、現状では、LED1個あたりの光束 (lm) は弱いので、照明用光源としては多数のLEDを配置しなければいけない。蛍光体の組み合わせにより白色光以外にさまざまな種類の発光色を出すことも可能であり、照明への応用範囲は広がる。

最近、(2)のタイプの紫色、紫外 (UV) LED励起の白色LED (UV white) の開発と実用化が国内外で活発に行われている。表2は「21世紀のあかり」計画において実現されたUVLEDの基本特性である<sup>5)</sup>。In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/GaN

表2 UV LEDの基本特性.

	試料等
基板	加工したサファイア
転位密度	$1.5 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$
ボンディング	フリップ・チップ
順方向 20 mA 時の電圧	3.4 V
光出力 (20 mA)	15.6 mW
外部量子効率 (20 mA)	24%

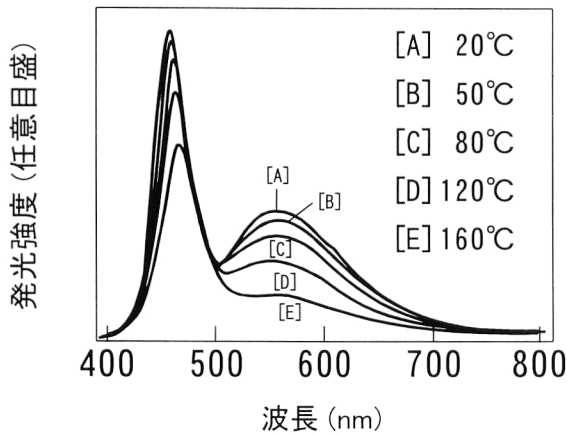


図1 白色LEDの発光スペクトルの温度依存性.

MQW ( $x=0.08$ ) 構造を有する LED チップを加工したサファイア基板の上に成長し、フリップ・チップ式で光の外部取り出し効率を上げ、20 mA, 3.4 V の順方向バイアス下にて光出力 15.6 mW, 外部量子効率 24%, 発光波長 382 nm が得られている。このタイプの LED は直流の高電流 (50 mA 以上) においても光出力が飽和せず、約 40 mW 以上の光出力が得られる。

式 (2) を用いることにより、UV LED で 3 原色蛍光体を励起して白色光を得る発光効率は次式で与えられる。

$$K_{UV\text{white}} (\text{lm/W}) = \frac{\int \lambda_0 / \lambda \cdot F_{\text{ph}}(\lambda) \cdot k(\lambda) d\lambda}{I \cdot V \cdot \int F_{\text{ph}}(\lambda) d\lambda} \cdot P \cdot \eta_{UV\text{ph}} \cdot \eta_{\text{ph}} \quad (3)$$

ここで、 $I$  と  $V$  は、それぞれ、LED の定格電流と動作電圧、 $P$  は UV LED の出力、 $\lambda_0$  は UV LED の波長、 $\eta_{\text{ph}}$  は RGB 蛍光体の効率、 $\eta_{UV\text{ph}}$  は変換効率、 $F_{\text{ph}}(\lambda)$  は蛍光体の発光スペクトル、 $k(\lambda)$  は視感度係数である。 $\eta_{UV\text{ph}}=95\%$ 、 $\eta_{\text{ph}}=90\%$  と仮定すると 30 mW の光出力の LED により発光効率 ( $K$ ) 約 100 lm/W が得られることになる<sup>9)</sup>。

表 1 に示したいずれの方式においても白色 LED 1 個あたりの光束 (lm) はたかだか 1~2 lm であり、一般照明用白色光源には多数の LED を集積化することが必要とされる。そのため、LED 照明用光源の開発には、多数の LED 集

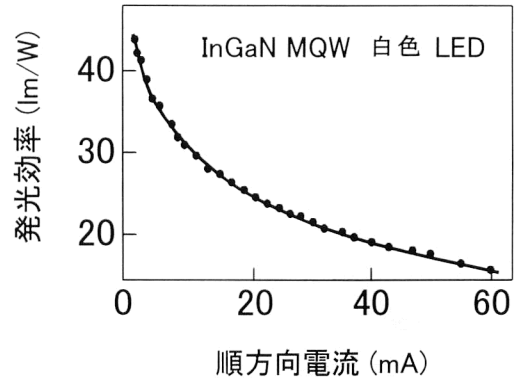


図2 白色LEDの発光効率の順方向電流依存性.

積化素子の配光分布を含めたデバイス・システムの最適設計が必要となる。そこで、LED 多点光源の配光および照度分布を理論的に計算するシミュレーションモデルが研究されている<sup>14)</sup>。

## 2. 白色LEDの特徴

### 2.1 青色LEDとYAG蛍光体による白色LED

図1は砲弾型白色LED (10 cd 級) の発光スペクトルの温度依存性 (20~160°C) を示す。LED は多重量子井戸構造から成り立っている。室温における 465 nm のピークは青色LEDからのものである。555 nm の黄色の発光は 150 nm のブロードな発光帯幅をもち YAG:Ce<sup>3+</sup> イオン (5d → 4f 遷移) からのものである。YAG:Ce<sup>3+</sup> の発光の励起帯は 460 nm に位置している。温度が上昇すると、465 nm の発光ピークは長波長へシフトする。これは、InGaN 半導体の禁止帯幅の温度変化と同じである。一方、555 nm の黄色帯はほとんどシフトしない。しかしながら、発光強度は急激に減少してゆく。この原因は、温度上昇につれて青色LEDの青色発光ピークが長波長でシフトしたことにより、YAG:Ce の励起帯の共鳴位置が順々にずれて発光強度が減少したものと推定される。したがって、白色LEDの発光特性は温度に強く依存し、特に 50°C 以上では急激に黄色発光が弱くなり白色の演色性が悪くなり、色度が大きくなり<sup>15)</sup>。

図2は白色LEDの発光効率の順方向バイアス依存性を示す。白色光は約  $9 \times 10^{-2}$  mA から観測される。1 mA における発光効率は約 45 lm/W と非常に高い。しかしながら、10, 20 mA においてはそれぞれ 27, 23 lm/W となる。このような高い発光効率は青色LED自身の高い内部量子効率および低電流における高い注入効率によっていると考えられており、通常の赤色 AlGaAs, 黄色 AlInGaP LED と異なっている。しかしながら詳しい物理メカニズムはわかつ

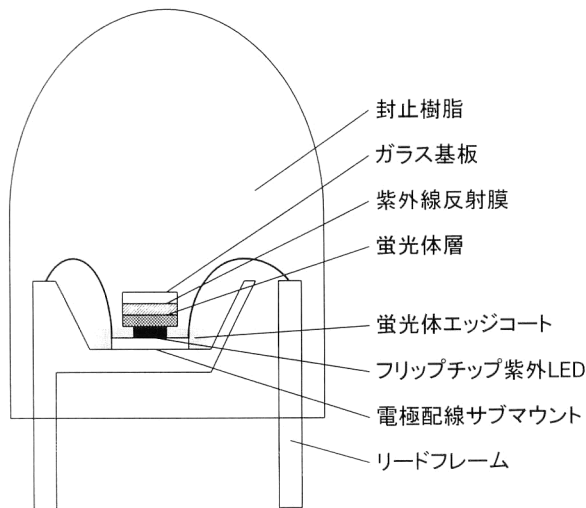


図3 UV LEDとRGB蛍光体の組み合わせによる白色LED光源の概念図(スタンレー電気の原田氏のご好意による)。

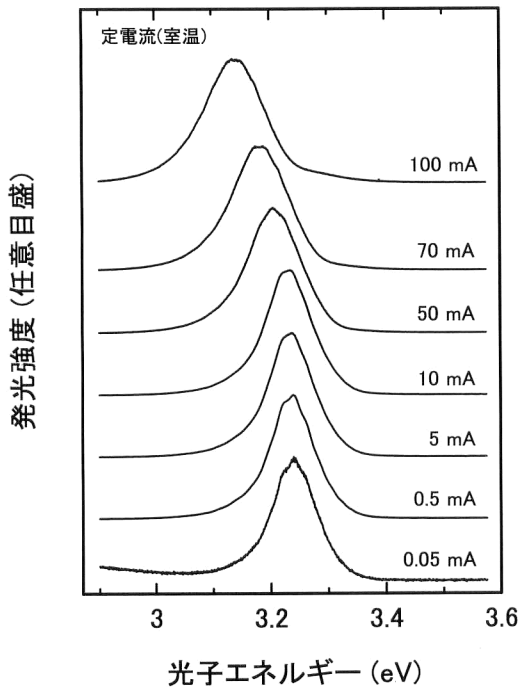


図4 UV LEDの室温における発光スペクトルの電流依存性(0.05~100 mA)。

ていない<sup>16)</sup>。また、青色LEDは直流の高電流(>50 mA)を流せないで、白色光の出力に限界がある。

## 2.2 UV LEDとRGB蛍光体による白色LED

図3に試作した白色LEDの構造を示す。紫外LEDチップは1章で述べたように、InGaN系LED(発光波長382 nm)で、電極として高反射率金属電極を形成し、チップを反転させてサファイア基板から光を取り出すフリップ・チップ構造である。蛍光体をあらかじめ紫外LED発光波長励起で白色になるように混合したものを、紫外線反射膜を

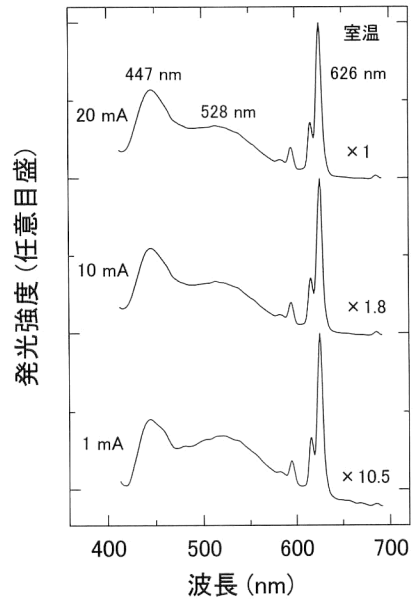


図5 RGB蛍光体白色LEDの発光スペクトルの順方向電流依存性。

形成したガラス基板に塗布形成し、微細化したものを紫外LEDチップ上部に接合した。同時に紫外LEDチップ側面からの紫外光を可視光変換させる目的でエッジコートした。紫外LEDチップ上部に接合する蛍光体層の膜厚、紫外線反射膜のありなし、紫外LEDチップ側面の蛍光体エッジコートのありなしについて白色LEDランプ発光特性を測定した。この組み合わせは蛍光ランプと同じである。

図4は室温における注入型発光スペクトルの電流注入依存性である。10 mAで発光波長382 nm(3.24 eV)、半値幅100 nmで電流の増加とともに短波長側にシフトし、発光はブロードになる。100 mAで低エネルギー側3.14 eV(394 nm)に移動する。

図5は励起源としてUV LEDを用いて赤色( $Y_2O_3S:Eu^{3+}$ )、緑色( $ZnS:Cu,Al$ )、青色( $(Sr,Ca,Ba,Mg)_{10}(PO_4)_6Cl_2:Eu^{2+}$ )蛍光体を混合させた白色蛍光体の発光スペクトルの注入電流依存性である<sup>14)</sup>。ピーク位置はそれぞれ626, 528, 447 nmに存在する<sup>17)</sup>。電流が増加しても発光スペクトルの顕著な変化はみられず、それぞれの発光強度は電流の増加とともに線形に増加してゆく傾向がみられた。このときの白色LEDの発光効率は約10 lm/W、平均演色指数RaはRGB蛍光体の量を最適に選ぶことにより、83~90であった。

図6はUV励起の白色LEDと青色励起の白色LEDにおける色度の注入電流依存性を示す。1 mAから150 mAに電流が増加するにつれて青色LEDとYAGの組み合わせは、青色が相対的に強まり、白色LEDの色度変化が顕著におこるが、UV励起白色LEDはほとんど変化しない。

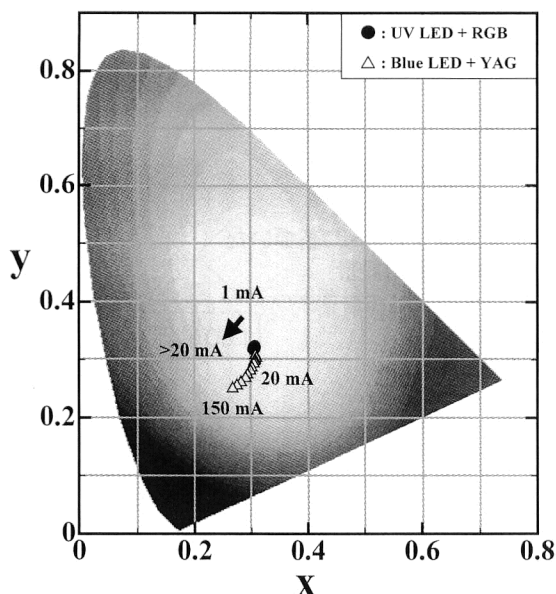


図6 2種類の白色LEDの色度の電流注入依存性。

RGB 蛍光体を励起する方式の白色LED照明光源は、蛍光体の組み合わせにより、 $Ra > 90$ の高演色性の白色光を出すことが可能であり、室内における一般照明への応用範囲は広がる<sup>17,18)</sup>。

### 2.3 RGB LEDによる白色LED

最もシンプルな組み合わせであるが、なかなか高性能の白色LEDが登場していない。すでに述べたが、最大の理由は、RGB 3色を発光する半導体材料が異なっているためである。駆動回路が煩雑で、例えば、赤色LEDの駆動電圧は1.8Vであるが、他の青・緑は3.5Vとなっている。発光波長は図7に示すように、640, 525, 470 nmに位置し、それぞれの半値幅がきわめて狭く、照明用白色LEDとしては問題点が多い。コストも2000~4000円と非常に高価である。一方、米国では、2色のLED(青緑色LED: 500 nmとアンバーLED: 612 nm)による補色関係の擬似白色LED(BCW: binary complementary white)の開発も進んでいるが、 $Ra$ がきわめて低く実用化が困難である<sup>19)</sup>。

今後、化合物半導体結晶成長技術とLEDのコストダウンが進むと、最も理想的な白色LED光源を作製できる可能性はある。例えば、459.7 nm, 542.4 nm, 607.3 nmのRGB LEDを組み合わせると $Ra = 80$ ,  $K = 400$  lm/Wとなるので、各LEDの外部量子効率を20%と仮定しても $K = 80$  lm/Wとなり、十分な光源特性が得られる。

### 3. 白色LED照明光源とその応用

1997年に白色LEDが市場に投入されたのは液晶のバックライトとしてであったが、発光効率の向上とともに、最

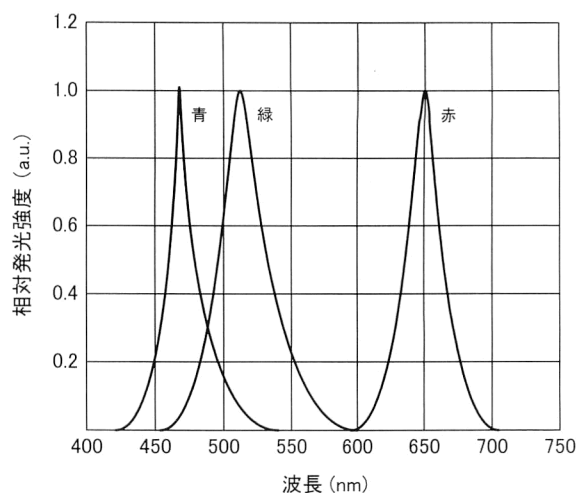


図7 市販のRGB 3原色LEDの典型的な発光スペクトル(20 mA)。

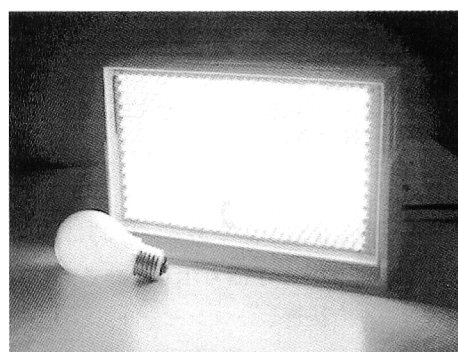


図8 砲弾型白色LEDを700個集めた多点光源。

近では街路照明、自動車の走行支援システム用照明、スポットライト、サインボードおよび防災照明機器として誘導灯等に应用されている<sup>20)</sup>。

筆者の研究室では、発光効率20 lm/W(定格電流20 mAのとき)のInGaN白色LEDを用いて集積型光源(太陽電池式省エネルギー街灯、サインパネル、洗面用照明等)を製品化している<sup>9,21)</sup>。図8は、約700個の白色LEDを集積したLED照明光源であり、光源の照度は発光面で約23000 lx, 発光面から30 cmのところでは約10000 lx以上、全光量は約1400 lmであった。発光面積と得られた照度、またその消費電力により、総合発光効率は29.4 lm/Wである。

この白色LED照明光源は点光源の集まりであり、個々にレンズをもっている従来にない光源であると考えられる。そこで、LED光源は点光源の集まりと考え、それらを2次元に配列したときの照度分布のシミュレーションに関する研究が行われている<sup>14,21)</sup>。

図9は1998年から年代順にみた白色LED光源の発光効率の推移とこれまでに製品化された光源の応用例、およ

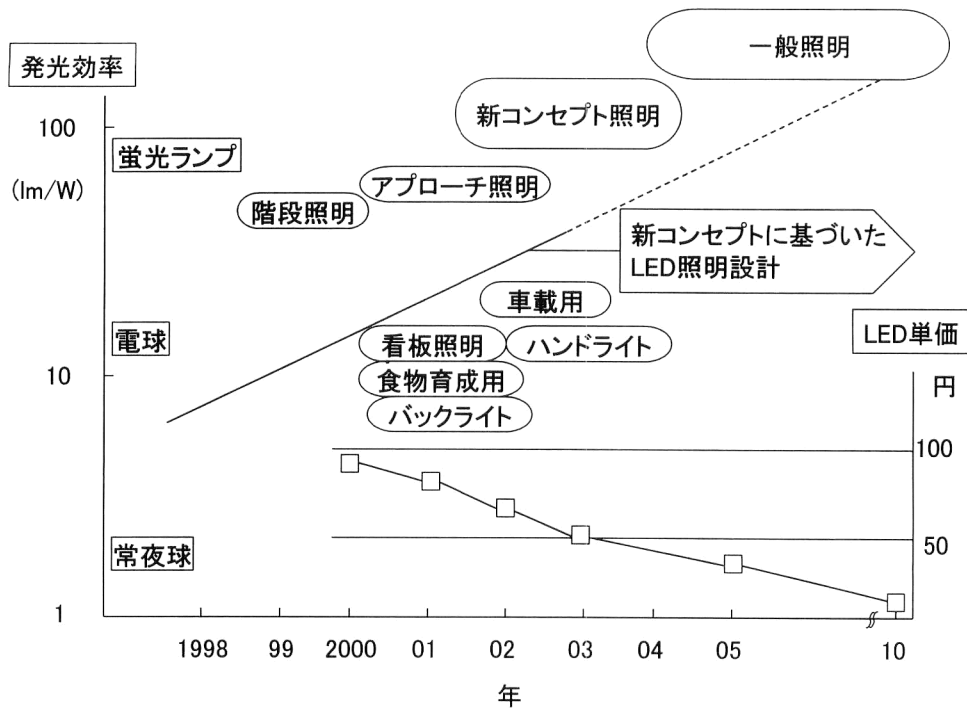


図9 年代順にみた白色LED光源の応用例と製品および価格の将来予測（三菱電機照明の石井氏のご好意による）。

び2010年までの製品化の予測である。同時に白色LED1個のコストの低減に関する予測も示している。これまでの応用例を踏まえて、今後新しいコンセプトの下に白色LED照明光源の作製が行われ、一般照明用白色LEDが実用化されてゆくものと思われる。

現在、商品化されている砲弾型白色LED光源は補色関係を利用した擬似白色であり、青色と黄色の色ギャップを生じ、色彩学的見地からすると人間にストレスを与える色の組み合わせである。さらに、高い演色性 ( $R_a > 90$ ) が得られない、高電流になると色度のずれを生じる、温度特性が悪いなど、将来一般照明用白色LED光源として利用するためには解決されなければならない多くの課題をかかえている。しかしながら、多数個組み合わせた簡単な多点光源白色LED装置が試作されており、本論文で述べたさまざまな応用に供されている。LEDによる照明用白色光の「質」に関する要求はCIEの基準に基づいて決定されるものであり、3波長蛍光灯と同じく演色性の高い「質」のよい均一照度の白色光が必要とされる。その意味でもUVLEDとRGB蛍光体による組み合わせは、蛍光灯に類似の発光特性を有しており、今後の技術革新によってはこれが主流になるものと思われる。アメリカでは、光出力がワットクラスの白色LEDの開発および、UVLEDとRGB蛍光体の組み合わせによる高性能白色LEDの実用化に向けた取

り組みが、半導体LED企業と照明企業のジョイントベンチャー企業において積極的に開始されている。

一般照明用白色LED光源に期待される目標値は、2010年までに発光効率100 lm/W以上、単位光束25 lm以上、コスト/lmが1円以下、寿命10万時間を達成することであり、今後、実用化研究が世界各国で凌ぎを削って行われていくものと予想される。さらに、これまでとはまったく違ったコンセプトで高出力白色LED光源が作製され、蛍光灯ランプと同じように器具がついた形でわれわれの家庭の中に入ってくるものと推測される。したがって、光源の光学設計 (design control, design flexibility) が重要であることはいうまでもない。

本論文に記載した一部はMETI/NEDO/JRCMによる「高効率電光変換化合物半導体開発（通称、21世紀のあかり）」国家プロジェクトにおいて行われた成果である。資料を提供していただきました三菱電線工業の只友氏、スタンレー電気の原田氏、加藤氏、三菱電機照明の石井氏にお礼申し上げる。共同研究を行っている日亜化学工業の小川英治社長に感謝する。原稿を整理していただいた来島さえみ秘書に感謝する。

#### 文 献

- 1) S. Nakamura and G. Fasol: *The Blue Laser Diode* (Springer, 1997).

- 2) 田口常正：“高光度 LED の技術革新と白色 LED 照明システムの展望”，*オプトロニクス*，**12** (2000) 112-119.
- 3) 田口常正：“白色発光ダイオードによる次世代照明技術”，*電子情報通信学会誌*，**8** (2001) 2000-2002.
- 4) 板東完治：“白色 LED 製品の現状”，*電球工業会報*，**429** (2000) 19-22.
- 5) K. Tadatomo, H. Okagawa, T. Tsunekawa, Y. Imada, M. Kato and T. Taguchi: “High out put power InGaN ultraviolet light-emitting diodes fabricated on the patterned substrates using metal organic vapor phase epitaxy,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, **40** (2001) L583-L585.
- 6) 財団法人金属系材料研究開発センター 21 世紀のあかり研究体：「高効率電光変換化合物半導体開発」提案書 (1997).
- 7) 田口常正：“GaN 系発光ダイオードの発光メカニズム”，*照明学会誌*，**85** (2001) 273-276.
- 8) 財団法人金属系材料研究開発センター：高効率電光変換化合物半導体開発 (21 世紀のあかり計画) 成果報告書 (2000) 226-228.
- 9) 田口常正：“白色 LED による 21 世紀のあかり”，*照明学会誌*，**85** (2001) 496-498.
- 10) 八木隆明：“高出力高効率 TIP-LED との応用”，*オプトロニクス*，**19** (2000) 133-136.
- 11) Y. Ohno: “Color issues of white LEDs,” *OIDA Workshop Report of Solid State Light Emitting Diodes for General Illumination*, Gaithersburg, USA (2001) pp. 1-9.
- 12) C. F. Jones and Y. Ohno: “Colorimetric accuracies and concerns in spectroradiometry of LEDs,” *Proc. CIE Symposium of CIE Photometry*, Budapest (1999) pp. 173-177.
- 13) 中村孝夫, 式部敏彦：“ZnSe 系白色 LED とその応用”，*オプトロニクス*，**12** (2000) 126-131.
- 14) 内田裕士, 田口常正：“多点光源照度計算法による白色 LED 照明光源の特性評価”，2000 年電気学会基礎・材料・共通部内大会講演論文集 (2000) pp. 188-193.
- 15) 田村哲志, 瀬戸本龍海, 田口常正：“InGaN 系半導体白色 LED を用いた照明用光源の基礎特性”，*電気学会論文誌 A*，**120** (2000) 244-249.
- 16) Y. Uchida, T. Setomoto, T. Taguchi, Y. Nakagawa and K. Miyazaki: “Characteristics of high-efficiency InGaN-based white LED lighting,” *SPIE Display Technol.* **4079** (2000) 120-123.
- 17) K. Murakami, T. Taguchi and M. Yoshino: “White illumination characteristics of ZnS-based phosphor material excited by InGaN-based ultraviolet light-emitting diodes,” *SPIE Display Technol.* **4073** (2000) 112-118.
- 18) T. Taguchi: “The 21st century lighting project based on LED and phosphor systems,” *Proc. of Int. Display Workshop (IDW '00)* (2000) pp. 817-820.
- 19) M. Meyer: “LEDs lighting,” *Compd. Semicond.*, **6** (2000) 6-12.
- 20) 松下信夫：“照明器具および機器”，*照明年報*，**85** (2001) 666-671.
- 21) 瀬戸本龍海, 内田裕士, 田口常正：“白色 LED 光源を用いた省エネルギー型太陽電池街灯の開発と照度特性の評価”，*照明学会論文誌*，**85** (2001) 577-584.

(2001 年 8 月 27 日受理)