

特集 「LEDの可能性と課題」

LED照明の発光原理

Luminescence properties in LED Lighting

田口 常正

Tunemasa Taguchi

山口大学 大学院 理工学研究科

Graduate School of Science and Engineering, Yamaguchi University

1. はじめに

発光ダイオード (Light-emitting diode : 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る。今日、製品化されているLEDはGaAlAs (赤色)、AlInGaP (黄橙色)、InGaN (青、緑色)、AlInGaP (紫外) 等のIII-V族混晶半導体 (3元、4元) 材料を用いて作製されている。現在の照明用LEDは、その機能が表示 (見る光、誘導する光) から照明 (照らす光) に変わり、従来の白熱電球、蛍光灯と同じ様な照明特性を有する固体光源・器具に変貌しつつある。

表1は、現在、製品化されている可視光、白色、近紫外、紫外LEDの特徴を示す。可視光の波長領域は380~780nmである。

本稿では、LEDの発光の原理とLED照明による白色光の特徴について述べる。

2. LEDの構造と配光特性

表1で述べたLEDの構造を具体的に図1 (a)、(b) に示す。砲弾型、表面実装型でも様々な型のLED構造が採用されているが、図1に示す様に基本的に配光分布を制御するため、光学設計がなされている。特に、砲弾型LEDは形状によって配光分布が異なり、図

示した様に光軸に対して (θ 、 ϕ) 対称性を有する。そのため発光波長 λ のLEDの発光強度分布を表す下記の放射光度関数 ($I_R(\theta, \phi, \lambda)$) が必要となる。

$$I_R(\theta, \phi, \lambda) = I_{R0} \cos^n(\theta) \times e^{-\frac{1}{2\sigma^2} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_p} \right)^2} \quad (1)$$

ここで I_{R0} は発光強度、 n は配光指数、 σ は発光スペクトルをガウス分布と仮定したときに生じる偏差、 λ_p は発光ピーク位置である。

また、表示用LEDと異なり、物体等対象物を照らす場合は、照度 (I_x) が必要であり、有色、白色LED照明光源の場合は、逆2束の法則が次の様に記述される。

$$E_{\perp} = \frac{I(\theta, \phi)}{r^2} \cos \theta \quad (2)$$

ここで、 $E_{\perp}$ は垂直成分の照度、 r は光源と物体の距離、 $I(\theta, \phi)$ は光度である。

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

$$\eta_{wp} = \eta_v \cdot \eta_i \cdot \eta_{ext} \quad (3)$$

ここで、 η_{wp} は入力対出力効率、 η_v は電圧効率、 η_i は内部量子効率、 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。また発光効率は、各波長によって人間の目

表1 製品化されている各種LEDの特性

色	素材	発光波長(nm)	光度(cd)	外部量子効率(%)	発光効率(lm/W)
赤	GaAlAs	660	2	30	20
黄	AlInGaP	610~650	10	50	96
橙	AlInGaP	595	2.6	> 20	60
緑	InGaP	520	12	> 20	40
青	InGaP	450~475	> 2.5	> 40	20
近紫外	InGaP	382~400		> 40	
紫外	AlInGaP	360~371		> 40	
擬似白色	InGaP 青+黄色蛍光体	465, 560	> 10		> 100
三波長白色	近紫外+RGB 蛍光体	465, 530, 612~640	> 5		> 30

の感度が異なるので、比視感度係数 k を上式へかけることによって得られる。単位は lm/W である η_e は、青色および近紫外LEDの η_e は、40%以上を超え、理論値は70%以上と予想されている。図2は、可視光LEDの外部量子効率(η_e)の最大値を示している。

3. 白色LED照明の発光

現在LEDを用いて白色光を実現する方法は図3に示す様に主に2つある。一つは図3(a)に示す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、もう一つは図3(b)と(c)に、それぞれ示す $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 系青色LED又は近紫外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3(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。

現在、砲弾型白色LED(Blue/YAG方式)として、すでに商品化(液晶バックライト、イルミネーション、壁面ディスプレイ等)されているものが図3(b)である。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、強い色温度の変化、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。

光源には高品質な光が求められる。なぜなら我々が物体を見ると、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、この現象を演色と呼んでいる。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。近紫外域において、効率の高い蛍光体や耐久性の良い封止材料を見つけ出すことができれば、より高演色の高い発光効率の白色光が得られる。図3(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ッ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3(b)のBlue/YAG方式より高品質な白色光を得られる。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

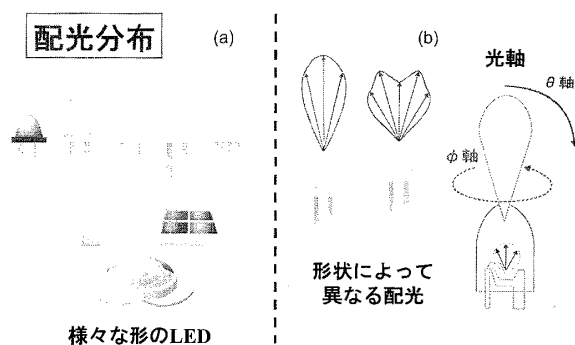


図1 各種LEDの構造(a)とその配光分布(b)

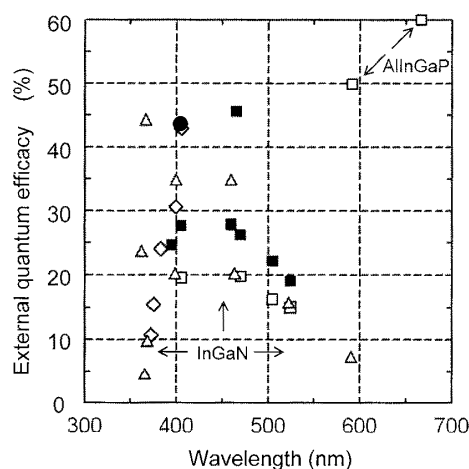


図2 AllInGaP、InGaN半導体とベースとした可視光LEDの外部量子効率(η_e) (△:日亜化学㈱、□:フィリップスルミレッド、■:クリー社、●:山口大・三菱電線工業)

白色LEDの構造	照射面パターン	特徴 (発光効率:K, 演色評価数:Ra)
(a) マルチチップタイプ 3色のLEDを制御 (複雑な駆動回路が必要) 均一な配光は得られない 照明用光源として不適 K $\approx$ 30lm/W Ra $\sim$ 40		
(b) 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 $\geq$ 100lm/W Ra $\sim$ 85		
(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 K $\geq$ 40lm/W Ra $>$ 96		

図3 RGB有色LEDによる白色LED(a)、青色LED擬似白色(b)と近紫外LED RGB蛍光体白色(c)の構造と特徴

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3(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。

図4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、ここ数十年間で発光効率の飛躍的な伸びは見られない。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。現在、Blue/YAG方式において実験室レベルで100lm/W以上、そして近紫外励起方式において、色温度を変化させることにより60～120lm/Wを超えており、高圧ナトリウムランプのそれ(140lm/W)

に近づいている。

この10年間で、年代と共に高出力タイプの白色LEDが登場し、それに伴って実装化技術も新しくなっている。表2に示す様に、砲弾型LEDは指向性の強い光を放射するのに適している。表面実装型LEDは放熱対策に優れ、高出力化が可能であり、高電流を流すことにより高光束(数10lm以上)を取り出すことができる。さらに、基板の上に数十個のLEDマルチ・チップを搭載し、コンパクトなLED集積化光源を作製することも可能であり、1Klmの高光束LED光源を作製することができる。また、LED単素子で数100 lmを取り出すことが可能となっている。

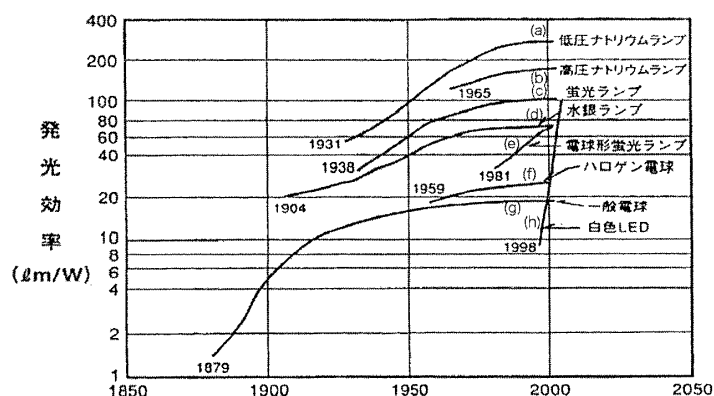
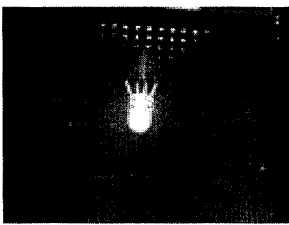
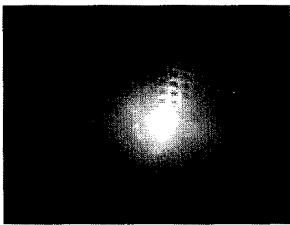
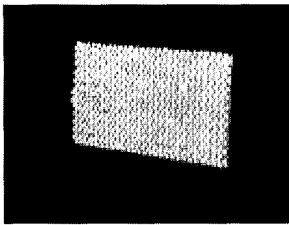


図4 照明用光源の発光効率の推移：(a) 低圧ナトリウムランプ、(b) 高圧ナトリウムランプ、(c) 蛍光ランプ、(d) 水銀ランプ、(e) 電球形蛍光ランプ、(f) ハロゲンランプ、(g) 一般電球、(h) 白色LED

表2 典型的なLEDの種類と特徴

年代	1963～1993 年	2000～2010 年以降		2002～2010 年以降
型	砲弾型 LED	表面実装型 LED		集積型 LED
構造	 ディスクリット部品	 高光束・高出力型		 コンパクトな多点光源型 (ハイブリッド化)
特徴	・エポキシ樹脂レンズによる (3 mmφ/5 mmφサイズ) ・20～30 mA にて光束は 1 ～2 lm	・最適熱対策 ・70 mA で約 4 lm 以上の 光束	・十分な熱対策 ・400 mA 以上で 20 lm 以上の光束 ・数ワット級の出力可能	・十分な熱対策 ・1 A 以上で 100 lm 以上の 光束、多点光源により klm 可能 ・光学系が必要 ・チップをランプに置き換える ことも可能 ・カスタム化可能

4. 高演色性照明特性

高演色性の照明特性を得るために、蛍光体の混合は重要である。平均演色評価数 (general color rendering index: Ra) と $R_1 \sim R_{15}$ を用いて照明光源に求められる特性を簡単に評価することができる。 $R_9 \sim R_{15}$ は、特殊演色評価数と呼ばれる。

最近、色温度の低い暖か味のある温白色LED (30~40lm/W, Ra=96 ($R_9=95$, $R_{15}=98$)) が開発され、図5と図6に示す様に内視鏡光源への応用、美術品の照明応用への展開が計られている。

5. まとめ

表3は、2010年までに白色LED照明システムが普及すると考えられる応用分野の将来予測に対する期待度と現状および課題を示す。

青色LEDと蛍光体を用いた擬似白色LEDは、既に様々な分野 (表示・装飾用) に応用されている。しかしながら、蛍光ランプと同程度の発光特性を有する白色LED照明光源の開発と一般照明器具への応用に関する研究は高度な材料開発と実装プロセスが兼ね備わらないと加速しないと考えられている。

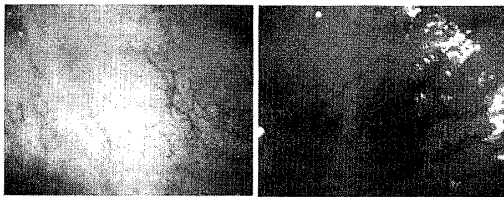


図5 口腔内のCCD画像 (左側: 開発したLED、右側: 市販の白色LED)

参考文献

- 1) T.Taguchi: "Present Status of White Lighting Technologies in Japan", J.Light&Vis. Env., Vol. 27, No. 3, pp.131-139 (2003).
- 2) 田口常正: "白色LED照明システム技術の応用と将来展望" (監修 田口常正), シーエムシー出版 (2003年6月).
- 3) 田口常正: "白色LEDによる21世紀のあかり", 照学誌, 85-7, pp. 273-276 (2001).
- 4) S.Nakamura and G. Fasol: "The blue laser diode", (Springer, 1997).
- 5) 内田裕士, 田口常正: "放射強度分布関数を用いた分離型蛍光式白色発光ダイオード多点光源による直射照明下での照明特性の理論的考察", 照明学会誌, 第89巻, 59号, pp. 245-256 (2005).

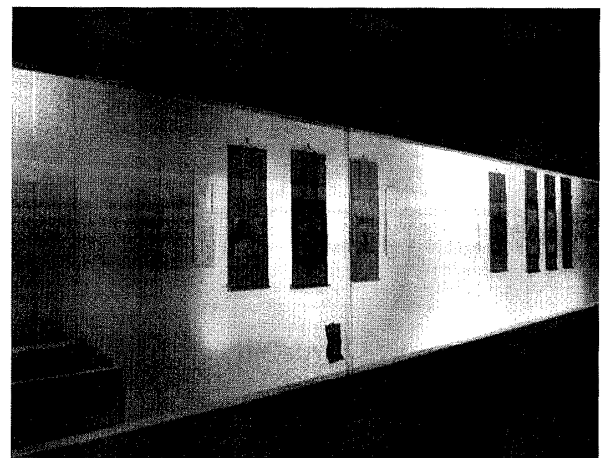


図6 雪舟展における白色LED照明 (左側3幅: 白色LED照明、右側4幅: 従来のトリプルA蛍光ランプ)

表3 LED照明の応用に対する将来予測

	期待されるLED照明の用途	将来の予測期待度	課題と特徴等
1	一般照明	○	効率向上、演色性改善、単位電力の増大
2	道路照明	○	効率向上、配光改良
3	タスク照明	◎	効率向上、演色性向上
4	アクセント照明	○	照度が低い、ディスプレイに近い
5	(劇場の)階段灯	○	必要照度が低い
6	フラッシュライト	○	ディスプレイに近い
7	誘導灯	○	ディスプレイに近い
8	交通信号灯	◎	現在既に普及しつつある
9	自動車電装用	◎	低電圧でLEDの適合性大
10	自動車前照灯	○	単位電力の増大、配光改良
11	大型液晶バックライト	○	ディスプレイに近い

◎:大 ○:中