

RGB 蛍光体を用いた RGB-LED の開発

Development of RGB-LEDs using RGB-Phosphors

梅 津 陽 介*
Umetsu Yousuke

概要 車室内の間接照明としてRGB-LEDが普及しているが、RGBチップの発光をそのまま使うため、RGB単色および中間色の色ばらつきが大きい。今回、RGBの蛍光体を用いてこれらの色ばらつきを抑制した。また、温度特性や大電流領域での明るさ低下を改善し、ハイパワー化にも対応できるRGB-LEDを開発したので紹介する。

1. まえがき

LED (Light Emitting Diode) は照明やディスプレイをはじめ、我々の生活空間に幅広く普及し、LEDによる光を目にしない日はない。近年、自動車用のRGB-LEDが普及している。車室内の雰囲気演出する照明が主流だが、自動運転のレベルに合わせたLEDが車内外でも必要とされる。図1にライトガイドを用いたRGB照明の例を示す。

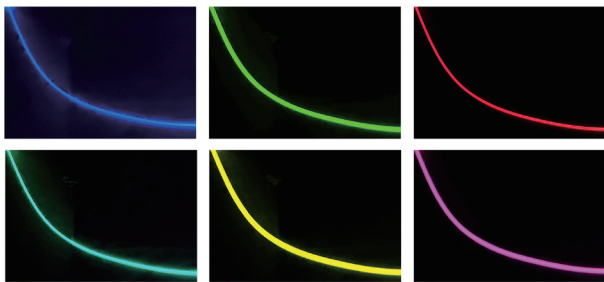


図1. RGB-LEDによる演出の例

白色LEDは、InGaNの青色チップと黄色蛍光体や赤色蛍光体を用いて白色に発光している。一方、RGB-LEDはAlGaInPの赤色チップとInGaNの青色チップ、緑色チップを使用するのが主流である（チップ方式と呼ぶ）。一方で、蛍光体変換（Phosphor converted : PC）を用いたアンバー色LED¹⁾や赤色LED²⁾は実用化されているが、同一パッケージで蛍光体によりRGB発光す

るLEDでは例がない。

今回はRGB全て蛍光体を用いた（蛍光体方式と呼ぶ）RGB-LEDを検討し、次の3つの課題を解決した。

- ① RGBチップの色ばらつきが大きい（現状では色ばらつきを抑えるためにソフトウェア上で微かな調整をしている）。
- ② 温度変化による色変化が大きい（温度変化に対してもソフトウェア上で調整している）。
- ③ 昼間でも視認できるハイパワー化の要求がある。

2. チップと蛍光体の波長ばらつき

チップはウエハプロセスで作られるが、構成元素の組成比率や膜厚の不均一さによって、電気特性、光出力、発光波長がばらついてしまう。そのため、ダイスされたチップを一個一個測定し、ランク分けして使われている。ウエハ面内のチップにおける波長ばらつきを波長別にランク分けした概念図を図2(a)に示す。

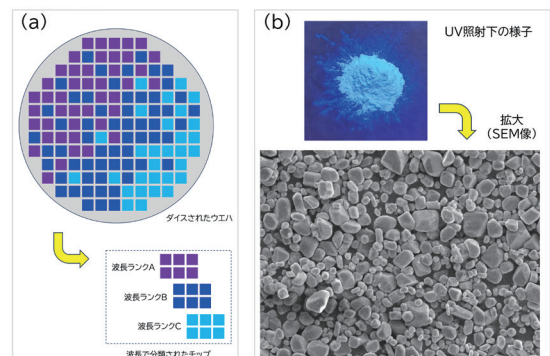


図2. (a) チップの波長ランク分け概念図と、(b) 蛍光体の写真

* 技術開発本部ハワーテハイス開発統括部
オプト技術部 LED 開発課

例として、青色チップの波長ばらつきの発生分布を図3(a)に示す。一般的な青色LEDは波長のばらつき幅が10nmを超え、2.5nm幅でランク分けされている。

一方、図2(b)に示すように蛍光体は5~20 μm 程度の粉末の集まりで、数百g程度の原材料を容器(るつぼ)に入れて焼成する。焼成後は複数のるつぼから取り出された蛍光体を粉砕、洗浄、粒径調整、混合工程などを経て製品化される。混合工程を経ることで、特性が多少異なる粉末も均一化される。そのため、ロット全体としての波長ばらつきは極めて小さい。

一例として、液晶バックライトに使われた冷陰極管(Cold Cathode Fluorescent Lamp: CCFL)で使用された青色蛍光体BaMgAl₁₀O₁₇:Eu²⁺の波長ばらつきを図3(b)に示す。青色チップと比較するため2.5nm幅でグラフを描いたが、実際は467.0~467.5nmの分布幅0.5nmに収まり、蛍光体の波長ばらつきはチップと比べて極めて狭いことがわかる。

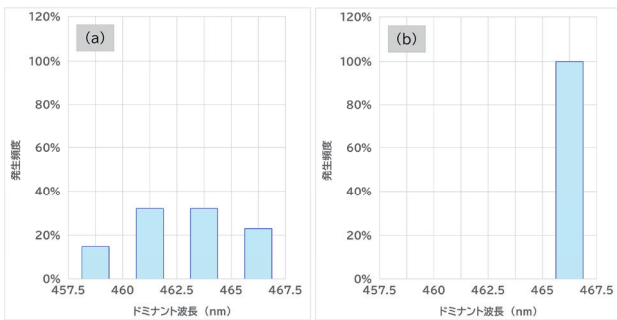


図3. (a) 青色チップと (b) 青色蛍光体の波長ばらつき

3. 単色の色度ばらつき低減

チップ方式では蛍光体を使う必要はなく、透明なシリコン樹脂等で封止するだけで良い。しかし、蛍光体方式ではRGBそれぞれ異なる蛍光体を使う必要がある。チップ方式では封止する樹脂で色度ばらつきを変えることはできないが、蛍光体方式では蛍光体の量で色度ばらつきを抑えることができる。以降、蛍光体方式をRGB各色に分けて説明する。

3.1. 蛍光体方式赤色(PC-Red) LED

シリコン樹脂と赤色蛍光体(Sr,Ca)AlSiN₅:Eu²⁺を混錬した蛍光体樹脂を青色チップに実装した。蛍光体の混合量を変えたときの発光スペクトルを図4に示す。チップからの青色光は赤色蛍光体により吸収されるため、

- ①蛍光体が多くなると青色発光は減少する。
- ②蛍光体は青色光を吸収して赤色に波長変換するため、

蛍光体が多くなると赤色発光は強くなる

- ③蛍光体がある量を超えると赤色発光は低下に転ずる。いわゆる濃度消光である。
- ④さらに蛍光体が多くなると、自らの発光(特に短波長側)を吸収し、長波長に発光すること(再吸収励起過程)によって発光波長は長波長にシフトする。

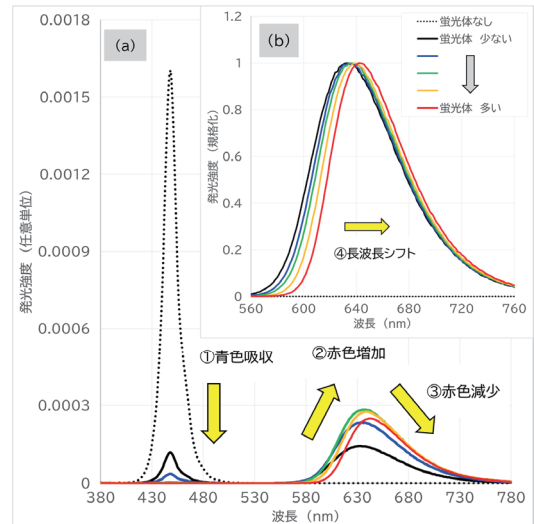


図4. (a) 青色チップに赤色蛍光体を実装した発光スペクトル
(b) 赤色の発光ピークで規格化した発光スペクトル

これらの現象によって、CIE色度座標上では青色から赤色方向に色度が動き、色が再現できる範囲を示す外枠に近くなるとその外枠に沿うような動きをする(図5(a))。蛍光体の量によってPC-Red LEDの色度は変わるが、蛍光体の量を均一にすることで色度ばらつきを抑えることができる。

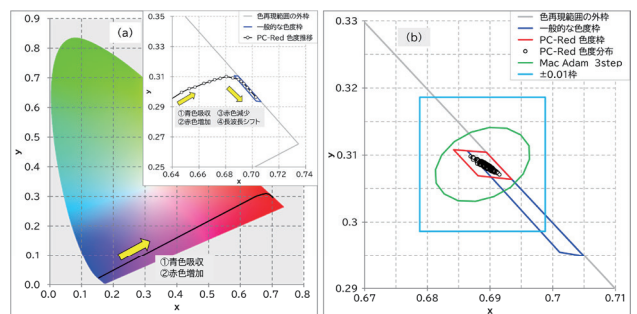


図5. (a) 蛍光体の量を変えたときのPC-Redの色度推移と、
(b) 色度発生分布

図5(b)に開発目標である色度 ± 0.01 枠と、人間の目視で色の違いが分りにくいMac Adam楕円の3ステップと、PC-Red LEDの色度分布を示す。この色度分布はMac Adam楕円3ステップに収まることが分かる。この

色度分布が収まるようにPC-Redの色度枠（赤線）を決めた。赤色LEDの一般的な色度枠は波長で9nmの幅であるのに対して、PC-Redの色度枠は波長3nm幅にすることが可能であり、波長ばらつきは3分の1に抑えることができる。

3.2. 蛍光体方式緑色 (PC-Green) LED

シリコン樹脂と緑色蛍光体Ca₈Mg(SiO₄)₄Cl₂:Eu²⁺を混練した蛍光体樹脂を青色チップに実装した発光スペクトルを図6に示す。

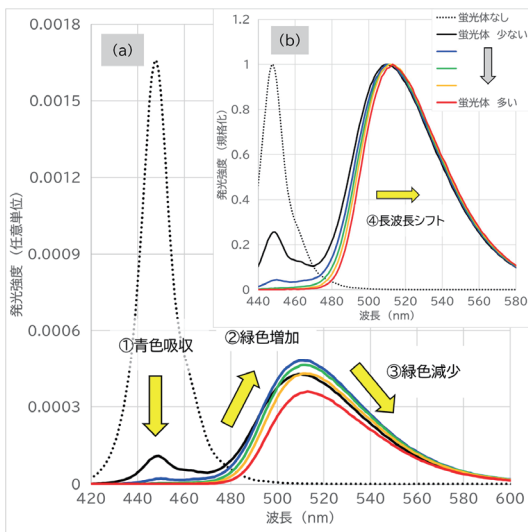


図6. (a) 青色チップに緑色蛍光体を実装した発光スペクトル
(b) 緑色の発光ピーク強度で規格化した発光スペクトル

PC-Redと同様に以下の現象が起きる。

- ① 蛍光体が多くなると青色発光は減少する。
- ② 蛍光体が多くなると緑色発光は強くなる。
- ③ ある量を超えると緑色発光は低下する。
- ④ さらに蛍光体が多くなると発光は長波長シフトする。

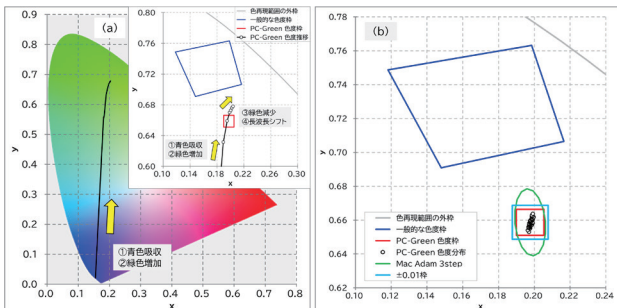


図7. (a) 蛍光体の量を変えたときのPC-Greenの色度推移と、
(b) 色度発生分布

図7(a)に示すように色度座標上では青色から緑色方向に色度が動く。使用した緑色蛍光体の発光半値幅が広

いため、緑チップと比べると色が再現できる範囲の外側に近いところまで色度は動かない。蛍光体の量が多くなると色度の動きは小さくなるのがわかり、蛍光体の量を均一にすることで、色度のばらつきを抑えることができる(図7(b))。

PC-Greenの色度分布はPC-Redと同様に色度±0.01枠とMac Adam楕円3ステップ内に収まる。この色度分布が収まるようにPC-Greenの色度枠（赤線）を決めた。緑色LEDの一般的な色度枠は波長15nmの幅であるのに対して、PC-Greenの色度枠は3nm幅にすることが可能であり、波長ばらつきは5分の1に抑えることができる。

3.3. 蛍光体方式青色 (PC-Blue) LED

青色チップと青色蛍光体を組み合わせた例は少ない。チップの色ばらつきを抑えようがないという考え方が強いが、一方で青色蛍光体を用いて青色チップの色ばらつきを抑える技術が知られている³⁾。

シリコン樹脂と青色蛍光体Sr₃MgSi₂O₈:Eu²⁺を混練した蛍光体樹脂を青色チップに実装した発光スペクトルを図8に示す。青色チップと青色蛍光体の発光スペクトルが重なっているが、PC-RedやPC-Greenと同様に以下の現象が起きている。

- ① 蛍光体が多くなるとチップの青色発光は減少する。
- ② 蛍光体が多くなると蛍光体の青色発光は強くなる。
- ③ ある量を超えると蛍光体の青色発光は低下する。
- ④ さらに蛍光体が多くなると発光は長波長シフトする。

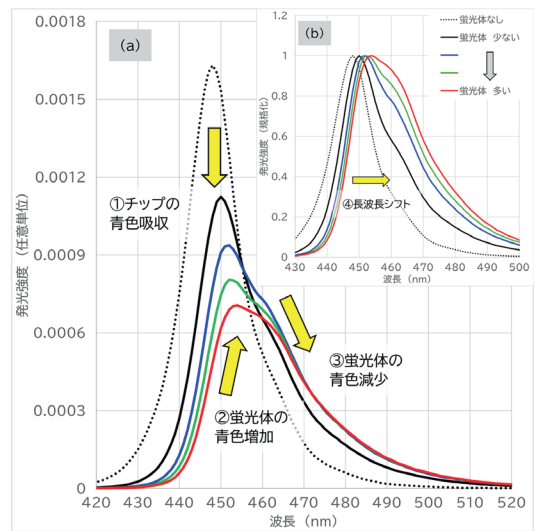


図8. (a) 青色チップに青色蛍光体を実装した発光スペクトル
(b) 青色の発光ピーク強度で規格化した発光スペクトル

色度座標上では青色領域で直線的に動き(図9(a))、蛍光体の量を均一にすることで色度のばらつきを抑える

ことができる (図9 (b))。

PC-Blueの色度分布も色度±0.01枠とMac Adam楕円3ステップ内に収まるが、赤色領域や緑色領域に比べて青色領域はMac Adam楕円が小さい(表1)。そのため、PC-Blueの色度枠はMac Adam楕円3ステップよりもやや大きい色度枠(赤線)とした。

青色LEDの一般的な色度枠は波長10nmの幅であるが、PC-Blueの色度枠は2nm幅にすることが可能であり、波長ばらつきは5分の1に抑えることができる。

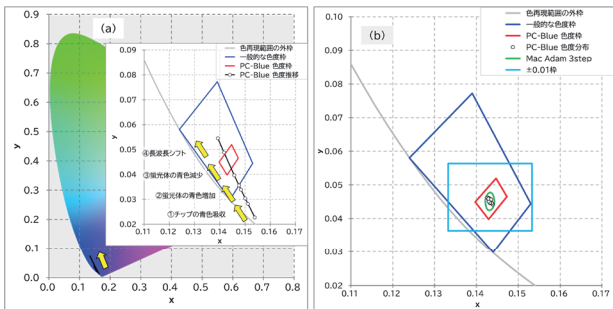


図9. (a) 蛍光体の量を変えたときのPC-Blueの色度推移と、(b) 色度発生分布

表1. PC RGB-LEDのMac Adam楕円3ステップの色度幅

	x	y
赤色領域	0.015	0.011
緑色領域	0.017	0.040
青色領域	0.002	0.005

4. 色再現範囲の拡大

RGB-LEDの色ばらつきを抑えるためチップの発生分布の内側で基準色を作る方式が用いられている⁴⁾。具体的には、RGB単色の色度ばらつきの上下限の組合せで得られる三角形を色再現範囲とし、その三角形の頂点を基準点とする。緑色を例にとると、青LEDと赤LEDを微弱に発光させることで緑色の基準色(基準点)を演出する。

一般的なRGBチップ方式は波長4~5nm刻みでランク分けされている。そのため、複数ランクの組合せ毎に微弱に発光させる量を変える必要があり、ソフトウェア上での設定をランク毎に変えなければならない手間が課題であった。

しかし、これまでの結果から蛍光体方式では、RGB単色において開発目標である±0.01枠と人間が目視で色の違いが分りにくいMac Adam楕円3ステップ内に収まる。そのため、RGBそれぞれを単ランクで、しかも基

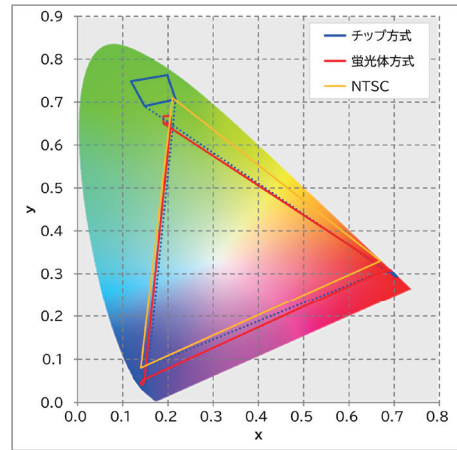


図10. 色再現範囲の比較

準点として使用することが可能である。

前述のように求められる三角形の面積を、色再現範囲として良く用いられるディスプレイのNTSC規格と比較した。チップ方式はNTSC比で83.4%、蛍光体方式は95.1%であり蛍光体方式は色再現範囲を広くすることができる(図10)。

5. 白色の色度ばらつき低減

RGB-LEDは、RGBの発光強度を調整して白色や青緑色、黄色、アンバー色などの中間色を演出する。RGBのチップの色度ばらつきをソフトウェア上で調整しない場合、RGBの出力比率は固定され、チップの色度ばらつきによって中間色の色がばらついてしまう。図11は出力比率を固定したときにRGB単色の色度ばらつきがどのくらい白色の色度に影響するかをシミュレーションした結果である。

図11(a)はチップ方式であり、RGBの色度枠(図5(b)、図7(b)、図9(b)の青線)の4点の組合せで得られる4×4×4=64個の色度座標である。図11(b)は蛍光体方式であり、同様に色度枠(図5(b)、図7(b)、図9(b)の赤線)の4点の組合せで得られる64個の色度座標である。

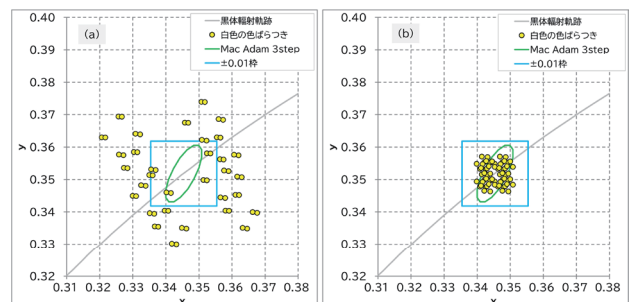


図11. 白色の色度ばらつき (a) チップ方式, (b) 蛍光体方式

蛍光体方式の白色の色度ばらつきが小さいことは明らかであり、±0.01枠にも十分に収まる。Mac Adam楕円3ステップからは少し外れてしまう組合せがあるが、これは前述した図9 (b) のPC-Blueの色度枠（赤線）が、Mac Adam楕円3ステップの外側に余裕をもって設定したためと考える。PC-Blueの色度枠（赤線）をMac Adam楕円3ステップの内側にできれば、中間色の色度ばらつきもMac Adam楕円3ステップ内に収まると考えられる。

PC-Blueの色度枠（赤線）を小さくするには、材料側の改善（青色蛍光体の組成調整や粒度分布の調整など）と蛍光体樹脂の量を均一に実装する製造技術側の改善が挙げられるが、両者ともに改善の余地は十分にあると考えている。

6. 温度変化による色度変化

LEDチップはその組成によって温度特性がほぼ決まる。特に赤色チップは温度特性が悪く、温度上昇とともに発光強度が低下する。さらに、発光波長が長波長にシフトし、視感度の低い（暗い）深い赤色発光に変化するために明るさは大きく低下してしまう⁵⁾。

一方のPC-Redは温度特性の良い青色チップと赤色蛍光体を使用しているため明るさの低下は赤チップより優れる（図12）。

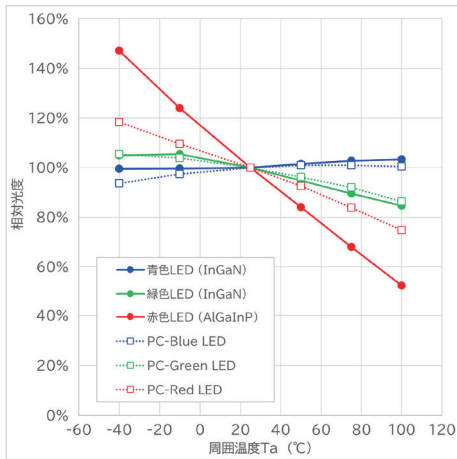


図12. チップ方式と蛍光体方式の温度特性

蛍光体は賦活剤濃度を減らすことで温度特性を改善することが可能であるが⁶⁾、賦活剤濃度を減らすと青色光の吸収が低下してしまう。青色光が吸収しきれないと色純度の高い緑色、赤色が出せない。そのため、青色光を吸収する機能を顔料やカラーフィルター（カラーレジスト材）と分担することで、温度特性を改善できる可能性がある。

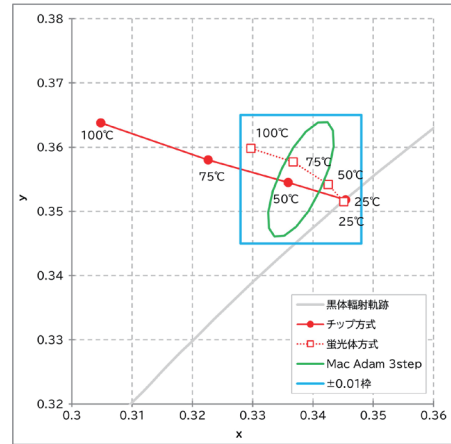


図13. 温度変化による色度変化

図13にチップ方式と蛍光体方式で白色を演出した際の温度変化による色度変化を示す。蛍光体方式は25°Cから100°Cの温度上昇でも±0.01枠内に収まるが、チップ方式はその2倍以上の色度変化があり、見た目でも色変化がわかる（図14）。

周囲温度 Ta	25°C	50°C	75°C	100°C
チップ方式				
蛍光体方式				

図14. 温度上昇によるRGB-LEDの発光色変化の様子（拡散板を介した発光を写真撮影）

7. ハイパワー化への対応

車室内の間接照明は、夜間では綺麗な演出が可能であるが昼間では視認しにくい。また、昼間の走行時に自転車の存在を周囲に知らせる昼間点灯（Daytime Running Light : DRL）が欧州で義務化されている。日本では義務化されていないが、自動運転が普及するにつれ周囲へのアピールは重要になる。そこでRGB-LEDのハイパワー化が今後必要になると考えて検討をおこなった。

LEDのハイパワー化は、大電流に対応できるようにチップのサイズアップが最もシンプルなアプローチである。電流を上げたときの明るさの変化を図15に示す。

青色チップは電流増大に伴い短波長へ発光がシフトする。視感度の低い（暗い）青色発光に変化するため明るさは低下する。しかし、今回使用したRGBの蛍光体は励起波長である青色の波長が短波長になるほど発光強度

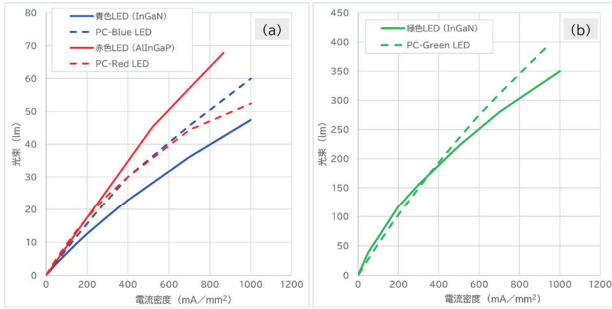


図 15. 電流密度と光束の関係 (a) 青と赤, (b) 緑
(印加時間は 10msec で発熱の影響を抑えた)

は増大する。そのため、PC-Blue と PC-Green は青色チップと比べて明るさ低下が小さく、ハイパワー LED に向いている技術である。

一方の PC-Red は赤チップに比べると 25℃ での明るさは低いが、温度上昇によって明るさが大きく低下するため 100℃ では PC-Red の方が明るくなる (表 2)。ハイパワー LED は発熱量が大きく、高温動作を強いられるため、高温で明るさが低下しにくい蛍光体方式は有利である。

表 2. 温度上昇による赤色 LED の明るさ (印加時間 10msec)

周囲温度 T_a	25℃	100℃
赤色 LED (AlGaInP)	64lm	33lm
PC-Red LED	47lm	35lm

8. 製品構想

蛍光体方式は RGB それぞれに蛍光体樹脂層が必要であり、PC-Red を点灯させた際に PC-Green や PC-Blue の蛍光体が発光しないように、各蛍光体を遮蔽する必要がある。

LED 製品としては、1つのパッケージに3つの部屋がある表面実装 (Surface Mount Device: SMD) タイプと、基板に直接チップを実装する COB (Chip on Board) タイプが挙げられる (図 16)。

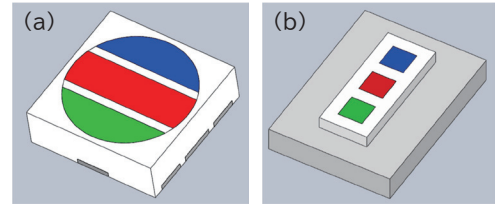


図 16. (a) SMD タイプ, (b) COB タイプ

前述のハイパワー RGB を実現しようとする場合、放熱性に優れる COB タイプが有力である。また、COB は必要な明るさに応じてチップ数を変えることや、電気回路を搭載してモジュール化することも可能である。

9. まとめ

RGB の蛍光体を用いた RGB-LED を開発した。RGB 単色の色度ばらつきはチップ方式に対して劇的に抑えられ、白色などの中間色の色度ばらつきも抑制できる。また、温度変化による色度変化も小さく、ソフトウェアでの色調整が不要な RGB-LED として期待できる。

今回は上記蛍光体を例にして述べてきたが、蛍光体を変えることによって色度ばらつきや温度特性、発光波長を変えることが可能であり、顧客要求に合わせた RGB-LED を提供することが可能である。

また、ハイパワー要求に対しても蛍光体方式は大電流かつ高温駆動でも明るさの低下が起きにくい。蛍光体や COB でのカスタマイズは当社が大事にする「かゆい所に手が届く」製品になると確信する。

10. 引用文献

- 1) 日本国 特開 2023-145094 号
- 2) 日本国 特願 2024-056800 号
- 3) 日本国 特開 2017-152522 号
- 4) 杉浦他：豊田合成技報, Vol.61, p.37-39 (2019)
- 5) 梅津：サンケン技報, Vol.56, p.4-01-p.4-06 (2024)
- 6) Y. Umetsu, S. Okamoto, and H. Yamamoto, J. Electrochem. Soc. 155 (2008) J193.