

複数個のフルカラーLED 点灯回路の試作と 測光量にもとづく光学的な特性評価

松崎 洸^{*1} 大熊 良夫^{*2} 飯塚 昌之^{*3}

Fabrication of Electrical Circuit for Lighting Multi Full - Color LEDs and Estimation
of Optical Characteristics Based on Photometrical Quantity

Kouichi MATSUZAKI^{*1}, Yoshio OOKUMA^{*2} and Masayuki IIZUKA^{*3}

Recently, three types of Red/Green/Blue color LEDs (Light Emitting Diode) and white color LED have been developed and marketed. A new application technology using various types of color LEDs marked the start of an era, i.e., the 21st century, in the many fields such as displays, road and railway signaling, special lighting and backlight for LCD (Liquid Crystal Display), and so on. A simple electrical circuit for lighting a commercially available full-color LED with four terminals in place of the conventional single white color LED with two terminals is fabricated in this study. The optical characteristics and intrinsic problems of full-color LED are quantitatively discussed from the viewpoint of full-color display and LED illumination technology.

1. まえがき

発光ダイオード (Light Emitting Diode: LED) は、2 個の端子に DC 電圧を加えて、順方向の電流を流すと発光する p n 半導体素子のことである。光の三原色 (R/G/B: 赤、緑、青) で光る LED があれば、CRT (Cathode Ray Tube) や LCD (Liquid Crystal Display) の代わりにほとんど全ての可視光の色を簡単に作り出すことが可能となる。

LED に関する研究と開発の歴史は古く、1920 年代にまでさかのぼることができる。LED の技術・開発が本格化したのは、1960 年代の結晶成長および素子化に関する研究の時代を経て、1970 年代には量産化のための技術開発が行われ、赤色とオレンジ色が広く用いられるようになった。近年 (1993 年)、大変に明るい緑・青色 LED (従来の製品の 100 倍!) がわが国蛍光体メーカー「N 化学工業株式会社」によって開発・市販された⁽¹⁾。従来の赤色 LED (GaAlAs) と、緑色 LED (InGa_NGaP, AlInGaP) などの化合物半導体、青色 LED (InGa_N) の 3 色がそろ

う事でフルカラーを発光・点灯、様々な色を組み合わせる事が可能になった⁽²⁾。

LED はその小型で高い光度と、電球など既存の光源 (ランプ) と比べ、消費電力、寿命、発光効率、耐衝撃性などの面で、優れた特性を持っている。この特性を活かして、携帯電話等のバックライトをはじめ、既存の交通信号機や各種表示装置との置き換えも進みつつある。例えば、道路上では、道路情報案内板として使用したり、夕日など太陽光の反射の影響で見にくくなるが多かった既存の電球式の信号の代わりに、LED ランプの集合体で構成された信号機を採用するケースも出始めている。また、駅などでは、列車の発車案内や各種の案内表示装置、信号などへ広く利用されている⁽³⁾。

本研究の目的は、現在市販されている砲弾形のフルカラー LED (直径 $\phi = 5\text{mm}$ で半透明・乳白色) の光学的な指向特性、特に 3 種類 (R/C/B) の各発光面の光度や輝度に関する素子間での個体差によるばらつき (不均一性) の有無に着目して基礎的なデ

^{*1} 東京工芸大学工学部電子情報工学科卒業

^{*3} 東京工芸大学工学部コンピュータ応用学科教授
2005 年 8 月 17 日受理

^{*2} 東京工芸大学工学部コンピュータ応用学科助手

ータを得ることである。さらに、簡便なカラー調光や表示技法、LED照明への応用のために、測光量にもとづくデータから今後の課題や問題点を考察する。

2. LED の概要

2. 1 エレクトロルミネッセンス効果とLED

LEDは発光ダイオードと呼ばれ、半導体のpn接合部に順方向のバイアスをかけた時に発光する効果(エレクトロルミネッセンス効果)を利用した電光変換素子の一種である。白熱電球などと違って余計な熱が発生せず、低電力で高輝度の可視光が得られる。

表1はLEDの主な発光色、半導体材料、ピーク波長、pn接合構造等を比較して示す。一般的に、LEDからの発光色は用いる半導体化合物(材料)によって異なり、可視領域の光を出す表示用素子と、主に赤外領域で広く使用されている光通信用素子がある。エレクトロルミネッセンス効果に起因するピーク波長 λ は、pn接合半導体のバンドギャップ E_g [eV]に依存する。近似的に、 $\lambda = 1240/E_g$ [nm]で評価される。カラー表示用には赤、橙、黄、緑、青色などの発光素子があり、ガリウム(Ga)、インジウム(In)、アルミニウム(Al)、ヒ素(As)、リン(P)等の複数の元素から作られた化合物半導体が使用される。

表1 LEDの発光色、材料、ピーク波長、pn接合構造

色	材料	ピーク波長 [nm]	接合構造
青	InGaN	450	量子井戸
	ZnCdSe	489	ダブルヘテロ
緑	ZnTeSe	512	ダブルヘテロ
	GaP	555	ホモ
黄	AGaInP	570	ダブルヘテロ
	InGaP	590	量子井戸
赤	AlGaAs	660	ダブルヘテロ
	GaP(Zn-0)	700	ホモ
赤外	GaAs(Si)	980	ホモ
	InGaAsP	1300	量子井戸

2. 2 フルカラーLED

表2は、LEDを使用して白色を実現するための主な技法である。現在、シングルチップ方式による白色LEDが広く普及している。一方、マルチチップ方式は3種類のLEDを組み合わせて、交通信号機や種々のディスプレイ機器に使用されている。

光の3原色である赤、緑、青色のLEDを使う事により、ほとんど全ての可視光の色を作り出すことが可能になった。明るい青色LEDが無かったころは、緑と赤色LEDを組み合わせた黄、橙、赤のカラーディスプレイしか作れなかったが、高輝度青色LEDが実用化されて光の3原色が揃うことにより、フルカラー(例えば、 $R/G/B: 2^8 \times 2^8 \times 2^8 = 1677$ 万色)化が実現可能となる。

2. 3 白色LED





＜青色LEDと蛍光体を用いる方法＞

直接的に電気エネルギーが光にかわる現象をエレクトロルミネッセンス：ELというが、光が別の波長、したがって別の色にかわる現象をフォトルミネッセンス：PLという。このELとPL効果をうまく組み合わせることにより、白色LEDが実現できる。現在、青色LEDとYAG(イットリウム・アルミニウム・ガーネット)系黄色蛍光体による白色LEDが広く市販されている。蛍光体はLEDと比べればはるかに安いので、青色LEDの価格に近い白色LEDが作られる。しかも砲弾形パッケージ上に一つのLEDで白色光が得られる。通常、発光ダイオード・チップ(GaN発光層)が放射する青色光の一部は蛍光体層を透過し、残りは蛍光体に当たって黄色の光になる。この2色の光が混ざり合って白色に見える⁽⁴⁾。

＜光の三原色(3種類のLED)を用意する方法＞

原理的には、赤・緑・青(R・G・B)すべての

表2 LEDの発光色、材料、ピーク波長、pn接合構造

シングルチップ方式	青色LEDと黄色蛍光体		<ul style="list-style-type: none"> * 現在の主流方式 ・ 蛍光体の塗布状況による色のばらつき ・ 演色数Raの改善と向上 ・ 赤色蛍光体の効率が悪い ・ 寿命の改善
	紫色(近紫外)LEDとRGB蛍光体		
	R・G・Bの3色LEDによる加法混色(混光)		
マルチチップ方式	補色となる2色LEDによる加法混色(混光) <例えば、青緑色と黄色LED>		<ul style="list-style-type: none"> ・ 各々のRGB色LEDの電流値制御が必要 ・ LED色により点灯電圧が異なり、回路構成を工夫

LEDを揃えて同時に発光させれば白色光が得られる。発想は簡単だが、実際に白色光が得られるように順方向の電圧と電流コントロールするのはそれほど簡単ではない。例えば、LED独特の発光層チップ構成による指向性のために、見る方向によって発光色ムラ(均一性の相違)が生じやすい。また、それぞれ単独で発光色を測定する際、LED素子の位置決めや温度などの環境に対する変化などで、定量的に再現性のある光学特性を評価することが困難な場合もある。

3. フルカラーLEDの点灯回路と光学特性

3. 1 目的

本研究では、複数個のフルカラーLEDを光源(ランプ)として扱う場合、簡便な点灯回路を試作して、光束、光度、輝度、照度などの測光量に関する諸特性を発光面の指向性と関連させて定量的に検討・評価する。一般的に、測光量とは、光束:lm、光度:cd、輝度:cd/m²、照度:lxなどの数値データである。光源からの単位面積あたりの光度を輝度、受照面に入射する単位面積あたりの光束を照度と定義する。これらの諸量を採用して、様々な色の発光色による輝度や照度への影響、フルカラーLEDを複数個同時に点灯した時の問題点、例えば、順方向電流に起因する色ムラが起きないか、各LED素子間の点灯状況による輝度・光度への影響、さらに、白色LEDとフルカラーLED(3色LEDの同時点灯)による白色点灯時での照度や色の見え方の違いなどを測定データにより評価することを含む。これらの事項からフルカラーLEDのR/G/B端子の各々を並列に接続、4個を同時に点灯させる場合の問題点や今後の課題などを検討する。

3. 2 実験方法と結果

図1は本研究で使用する砲弾型フルカラーLEDについての端子で、アノードコモン構造である。

・安定抵抗の有無によるフルカラーLEDの電流と輝度値への影響

照明用光源(ランプ)としてフルカラーLEDを使用する場合、1つだけで単独に使う事はない。一般的には、複数個の白色LEDと併用して同時に点灯する必要がある。

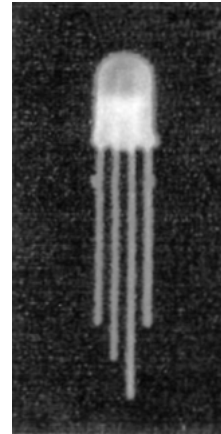


図1 フルカラーLED

(左から緑、青、コモン、赤端子)

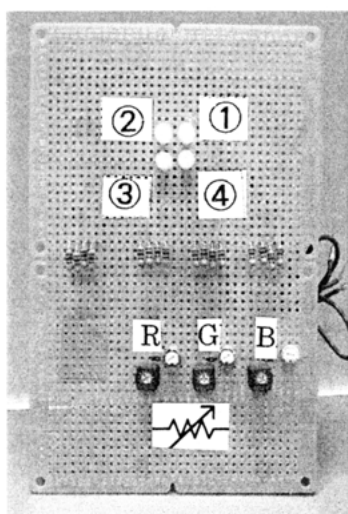
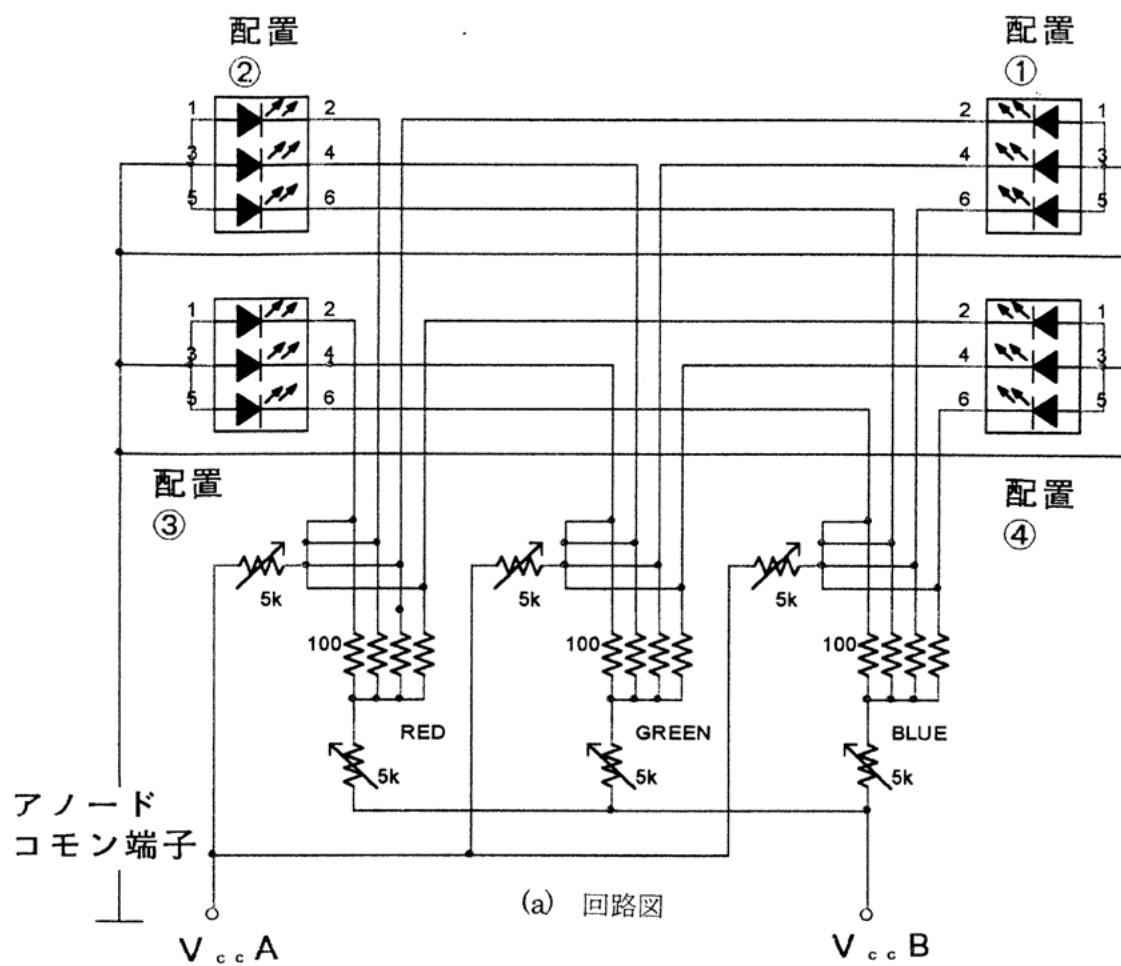
N社製 $\phi 5$ フルカラーLED : NSTM515AS
 特徴: 高光度・高光出力、フルカラー表示可能
 広視野角(80度)、
 NTSC 色度範囲をカバー

項 目	記 号	最大定格			単 位
		Blue	Green	Red	
順方向電流	I _F	30	30	50	mA

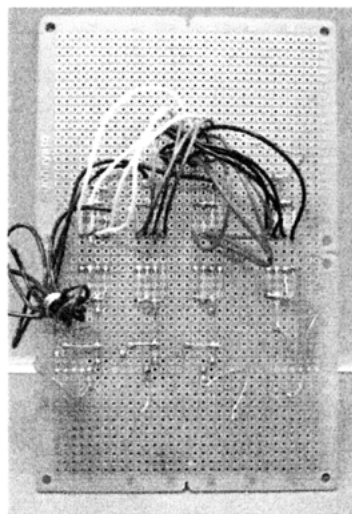
通常、LEDは2つ端子間に順方向の電流を流すことによって発光部の光度(輝度)が変化する。照明用光源として使用する場合には、受照面上の照度値が重要なファクターとなる。フルカラーLEDにはカソード端子が3本(RGB)に対して、アノードコモン端子が1本ある。各LED内のpn接合部にはわずかに異なる内部抵抗があり、発光部のばらつきや輝度ムラを制御するため、各々のRGB端子に対して一定の安定抵抗あるいは可変抵抗を入れる事で、pn接合部の内部抵抗の影響を減らす事が出来る。

<実験方法>

フルカラーLEDのR/G/B端子に一定の安定抵抗: 100 Ω (有りの場合)を直列に接続する。次に各々の3個の端子と4個のフルカラーLEDの同一カラー端子を並列に接続する。さらに可変抵抗: 5K Ω を直列に接続して、各々の4個のフルカラーLED間で全電流値の相違に起因して、発光面の光度や輝度に影響を及ぼすかを定量的に比較する。



(b) 基盤<表>



(c) 基盤<裏>

図2 4個のフルカラーLEDを同時に点灯させるための回路図と作製基盤

図2はフルカラーLEDを4つ同時に発光<点灯>させるための点灯回路図とその作製基盤である。DC5V一定で、4つのLEDを同時に点灯させる場合、(1)各々のLEDに100Ωの安定抵抗を入れない場合と、(2)100Ωの安定抵抗と1個の可変抵抗を直列に入れた場合に着目する。順方向の電流値は、各々のR/G/B端子を分流する全電流を5KΩの可変抵抗でまとめて調節する。T社製の分光放射計(SR-2)に

より、輝度および主波長を測定する。なお、安定抵抗なしの場合は V_{ccA} とアノードコモン端子を使用する。一方、安定抵抗ありの場合は V_{ccB} とアノードコモン端子を使用する。

表3は加法混色による輝度および主波長の色ムラを定量的に評価するために、4つのフルカラーLEDに配置番号：①～④<図2を参照>を付けて、輝度および主波長の測定・比較結果である。単色の時

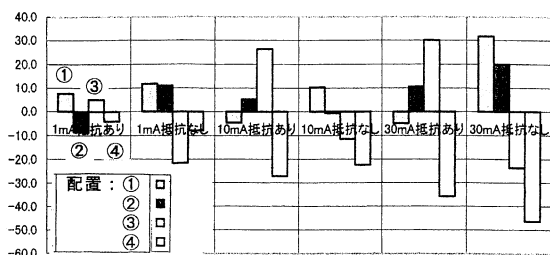
表3 加法混色によるフルカラーLEDの輝度と主波長

	色			輝度 [cd/m ²]					主波長 [nm]				
	青	赤	緑	①	②	③	④	平均値	①	②	③	④	平均値
全最低電流	0.8	0.8	0.8	測定データ ＜未確定＞					測定データ ＜未確定＞				
	色識別 困難												
3種類の電流値[mA]	30	0.8	0.6	0.57	0.80	1.53	1.01	0.98	469.7	467.1	465.4	468.7	467.7
平均値-各測定データ	青色			0.41	0.18	-0.55	-0.03		-2.00	0.64	2.35	-0.99	
ばらつき率[%]	＜ブルー＞			41.9	18.1	-56.4	-3.6		-0.4	0.1	0.5	-0.2	
同 上	0.5	0.8	30	4.63	4.35	5.38	5.15	4.88	535.6	533.0	530.3	538.0	534.2
	緑色			0.25	0.53	-0.51	-0.27		-1.39	1.18	3.96	-3.75	
	＜グリーン＞			5.2	10.8	-10.4	-5.6		-0.3	0.2	0.7	-0.7	
同 上	30	0.8	30	5.23	5.31	6.55	6.01	5.77	492.0	485.5	478.8	487.2	485.9
	青と緑			0.55	0.46	-0.77	-0.24		-6.10	0.35	7.04	-1.28	
	＜シア>			9.5	8.1	-13.4	-4.2		-1.3	0.1	1.4	-0.3	
同 上	30	30	0.6	1.66	2.20	2.51	1.78	2.04	-561.4	-565.5	438.8	-567.7	-313.9
	青と赤			0.38	-0.16	-0.47	0.26		247.49	251.54	-752.76	253.72	
	＜マゼンタ>			18.4	-7.9	-23.2	12.6		-78.8	-80.1	239.8	-80.8	
同 上	0.8	30	0.8	0.89	1.06	1.13	1.28	1.09	613.5	620.5	-495.2	618.8	339.4
	赤色			0.20	0.03	-0.04	-0.19		-274.11	-281.08	834.58	-279.39	
	＜レッド>			17.9	2.6	-3.5	-17.1		-80.8	-82.8	245.9	-82.3	
同 上	0.8	30	30	5.80	6.78	6.75	5.99	6.33	560.4	563.6	556.7	558.9	559.9
	赤と緑			0.53	-0.45	-0.42	0.34		-0.46	-3.72	3.19	0.99	
	＜イエロー>			8.4	-7.1	-6.6	5.4		-0.1	-0.7	0.6	0.2	
全最大電流	30	30	30	6.00	7.19	7.80	6.58	6.89	497.7	481.9	476.2	487.2	485.7
平均値-各測定データ	白色			0.89	-0.30	-0.91	0.31		-11.99	3.89	9.59	-1.49	
ばらつき率[%]	＜ホワイト>			13.0	-4.3	-13.2	4.6		-2.5	0.8	2.0	-0.3	

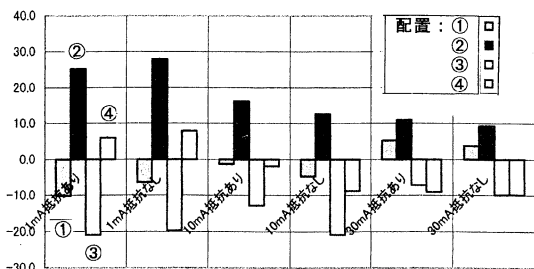
「注」 主波長：特定の無彩色刺激に相当する白色点と測定値の x,y 色度点を結んだ直線がスペクトル軌跡と交わる x,y 色度点の波長

については主要なR/G/B光に関して1, 10, 30 mA一定として測定する。複数色の場合には、指定の全電流値として最大値30 mAと最小値の数値を組み合わせるとして輝度と主波長を測定した。各々のR/G/B端子に最低の全電流0.8 mAを流した場合、発光色の識別が困難で測定データを削除した。

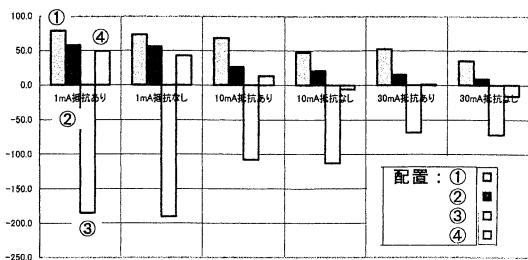
なお、輝度および主波長の測定データは、100 Ω の安定抵抗を挿入なしの場合に着目して、測定データの平均値と各々の測定データとの差、すなわちばらつき<不揃いの度合い>：(平均値-各測定値)と相対的なばらつき率：(輝度あるいは主波長/平均的な輝度あるいは主波長) $\times 100[\%]$ により比較した。



(a) 赤色LEDで点灯させた時



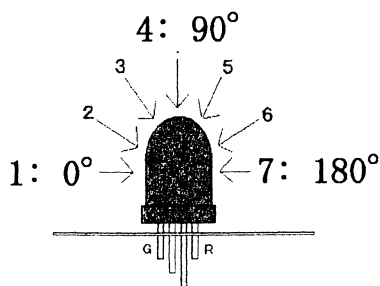
(b) 緑色LEDで点灯させた時



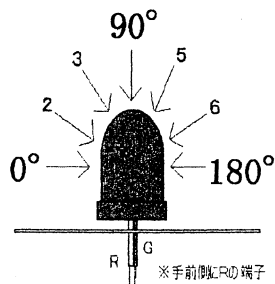
(c) 青色LEDで点灯させた時

図3 4個のフルカラーLEDを単色光で点灯時の相対的なばらつき

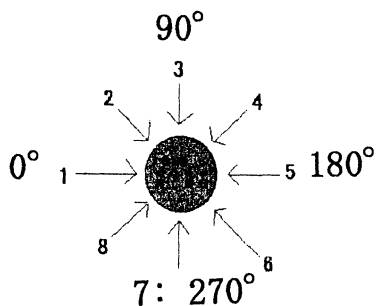
図3はフルカラーLEDを単色で点灯した場合、安定抵抗ありとなしで輝度値にもとづいて発光部の色ムラ、すなわち表3の場合と同様に、輝度データに着目して、相対的なばらつき率(全最低電流の輝度/平均的な輝度) $\times 100 [\%]$ により点灯時の特性を比較した。配置③の位置にある青色LEDのばらつき率がかなり顕著である。図1で示した同一の型番のフルカラーLEDであるが、各LEDで測定データ間に相違が認められた。ばらつき率は安定抵抗の有無や半固定形の変抵抗による全電流値の調整効果および測定試料として使用したフルカラーLED素子間の固体差の影響と推察される。



(a)LED 端子を横にした時



(b)LED 端子を縦にした時



(c)LEDを真上見た時

図4 フルカラーLEDの幾何学的な位置と測定方向<番号>

・フルカラーLEDの水平と鉛直方向の輝度特性

通常、LEDというのは白熱電球(ランプ)と比べて指向性が強いといわれている。本実験で使用したフルカラーLEDは広視野角(約80度)であった。しかし、単色のLEDならともかく、R/G/B端子からの発光色を同時に加法混合して発光するフルカラーLEDでは、さまざまな角度から見た場合でも同じように見えるのか、また受照面上の照度への影響はどのように変化するかを比較する。

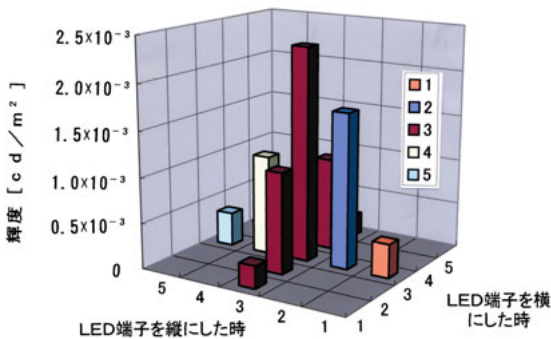


図5 フルカラーLEDを指定の方向から見た時の輝度の変化

<実験方法>

図4はフルカラーLEDの幾何学的な位置と測定方向<番号>を示す。輝度の測定は、(a)LED端子を横にした時(7方向)、(b)LED端子を縦にした時(7方向)、(c)真上から見た場合(8方向)に着目して輝度と波長スペクトルを測定する。フルカラーLEDの点灯回路は図2で示したものを使用する。なお、輝度は白色(フルカラー点灯)時にて測定をする。照度については白色、赤、緑、青色の計4色を暗室にて測定し、距離は10cm(一定)として測定する。各LEDの指定の電流値は白色(Red = 26, Green = 30, Blue = 11.5mA)、緑と青色は30mA、赤色は50mAにて行った。

図5はフルカラーLEDを上記の指定方向：図(a)と(b)を組み合わせて表示した場合の一例である。砲弾形LEDの頭頂部の輝度、すなわち横位置4と縦位置4の測定箇所が最大の輝度となっていない。LEDの発光部には対称な特性は少なく顕著なばらつきが認められ、指向性の不揃いが確認された。

図6は図4によるLEDの幾何学的な測定位置を組み合わせて、3種類のRGB波長とその分光特性を比

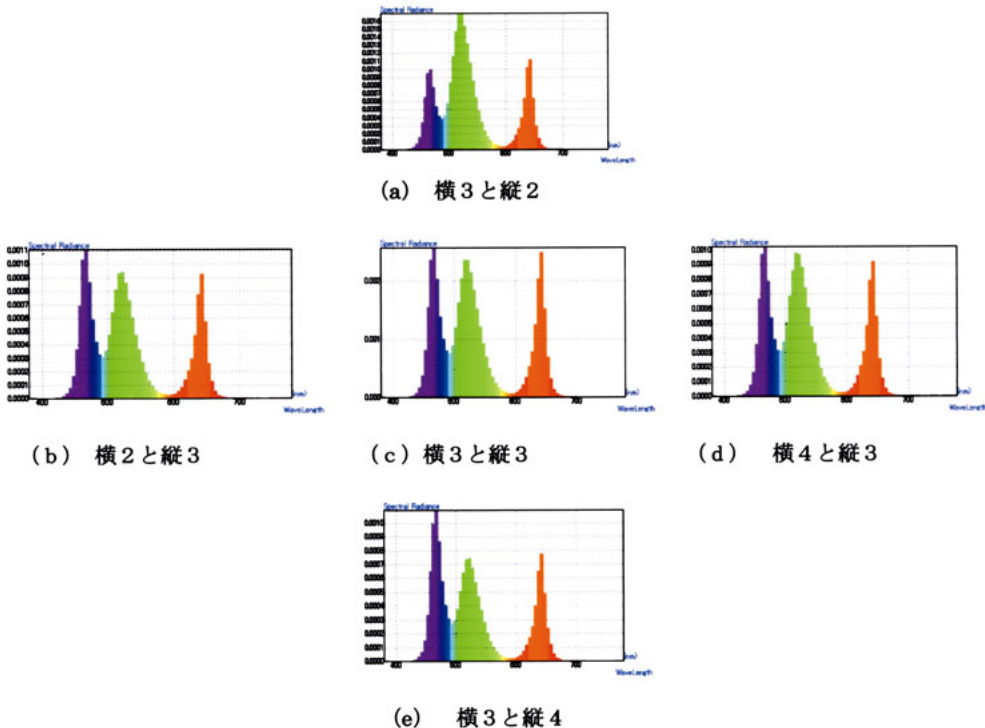


図6 LEDを指定された方向から見た時の分光分布
<LED端子を横にした時と縦にした時の組み合わせ>

較して示す。図5の場合と同様に、フルカラーLEDの発光部はかなり幾何学的な指向性がある。

なお、各々の特定データはグラフ上で、横軸は波長目盛り：nm、縦軸は分光放射輝度目盛り： $W/(sr \cdot m^2 \cdot nm)$ として表示してある。

図7はフルカラーLED点灯時の色ムラの様子である。同図(a)の場合は緑と青色で同時に点灯、同図(b)の場合は赤と緑色で同時に点灯させている。発光部の光色の相違が識別できる。

・2種類のLEDによる照度特性と白色点灯時の見え方

図2の点灯回路で示した手段・技法で、RGBの各色の電流値を適切に組み合わせて点灯すれば、原理的に全ての色を発光する事が可能である。フルカラーLEDによる白色(加法混色)と、市販されているN社製白色LED(砲弾型 $\phi = 5mm$ 、指向角度

20°)を照度特性に着目して比較する。照度や輝度はフルカラーLEDによる白色と青色LEDと黄色蛍光体を組み合わせた白色LEDで、どのような違いがあるかを視覚的な見え方の観点からも比較・検討する。

<実験方法>

図8はフルカラーLEDと白色LEDは各4つずつ同時に点灯させた場合、距離と照度の関係の測定結果である。各LEDにはおのおの指向性があるが、照度値間には大きな相違はない。

図9はフルカラーLEDと白色LEDにおける波長と相対的な分光スペクトル強度を比較して示す。なお、各々のLEDは同じ電流値でも多少とも光度が異なるため、フルカラーLEDによる白色点灯時(5V一定、 $R=26, B=11.5, G=30mA$)を基準、すなわち

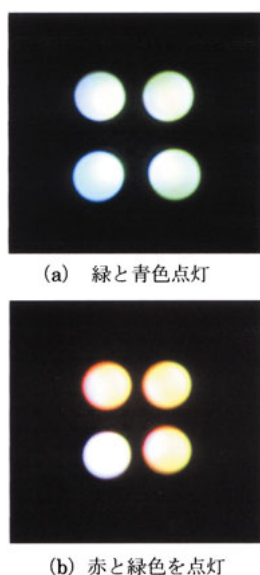


図7 フルカラーLEDの色ムラの比較

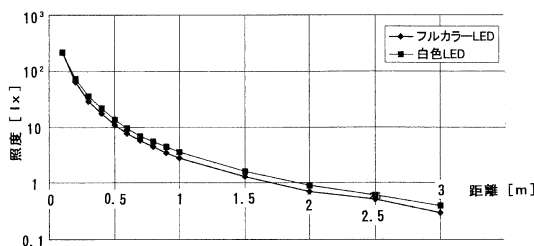


図8 フルカラーLED(白色)と白色LEDを点灯時の距離と照度変化

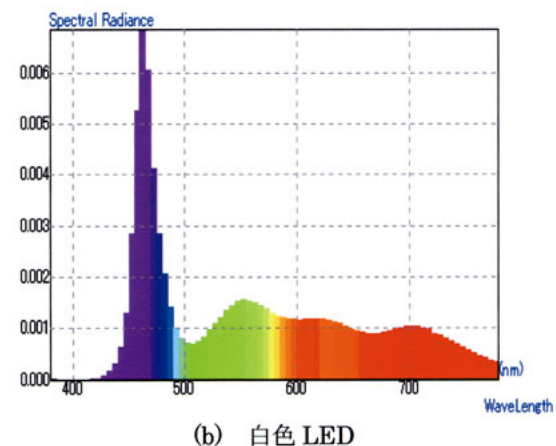
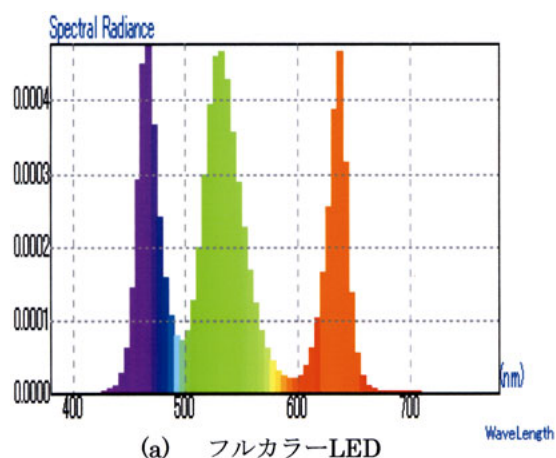


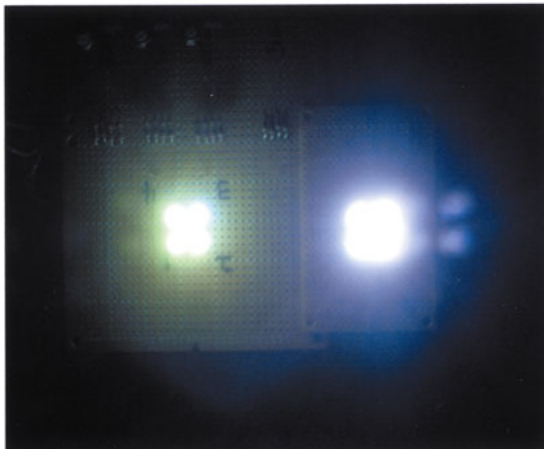
図9 フルカラーLEDと白色LEDの相対的な分光分布



(a) フルカラーLED



(b) 白色LED



(c) 両者の比較 (拡大)

図10 フルカラーLEDと白色LEDの点灯時の見え方
(紙に反射した時)

LEDからの距離10cmの位置での照度値が同じになるように、白色LEDの電流値を調整した。

図10はフルカラーLEDと白色LEDの点灯時の見え方を比較した場合である。フルカラーLEDは発光部の周辺は緑色に、一方、白色LEDでは周辺部は青色に見える。

図9(a)では、3つのピーク値は同じに表示されているが、實際上緑のスペクトルの視覚的な影響、すなわち人間の目に関する明るさ感は青と赤に比べてかなり顕著である。図9(b)では、黄色蛍光体によるルミネセンス効果に対して青色LEDのスペクトル特性が顕著なために、青色に見える。

4. 考察と今後の課題

(1) 安定抵抗の有無によるフルカラーLEDの特性と個体差によるばらつき

4つのフルカラーLEDを同時に単色で点灯させた際、各LED輝度のばらつき率を測定した結果は図3のようになった。

赤色に関しては、全てに対して個体差間で発光面輝度の大きなばらつきがある。最大で45%と大きい。しかも均一性がなく、どれもやや不安定な点灯となった。これについては測定の時の人為的な影響や測定器の設置状況が大きく関わっているのではないかと推測される。緑色に関しては、配置②の輝度がより大きく、配置③の輝度変化は小さい。電流値が大きくなるにつれてばらつき率は減少する。これらの事により、安定抵抗のある時とない時での輝度変化はわずかで、電流値が大きくなるにつれ輝度間の相違は小さくなる傾向にある。青色に関しては、どの電流値に対しても配置③のLEDは全LEDの平均輝度値を大きく下回った。これは配置③だけに青色固有の内部抵抗(pn接合)の数値に相違があり、相対的なばらつき率が大きくなった。しかし、安定抵抗の有無による相違はわずかで、緑色の場合と同様に電流値が大きくなるにつれて両者のばらつきは減っている。

フルカラーLEDを4つ同時に点灯する際には、安定抵抗(一定値: 100Ω)を挿入せずに可変抵抗で電流を調整した。表3をみてわかるように、輝度に関しては、全体的に全最低電流値(0.8mA)で青色点灯時に大きなばらつきが見られる。緑色点灯時の

時は配置②の LED が平均輝度値を大きく上回り、逆に配置③の LED 輝度は大きく下回る。複数色で点灯した場合、この傾向が大きく影響している。例えば、青+緑の場合には配置③の LED が平均輝度値を大きく平均を下回っている。青色に関与している色を除けば、他の2色はどれもばらつき率約10%未満で発光面の点灯ムラが少ない。

主波長に関して、赤および青と赤の混光<マゼンタ>の場合にマイナスの結果が出た理由は下記の通りである。主波長というのは、 $x-y$ 色度図上で特定の無彩色刺激(普通の観察条件で無彩色として知覚される色刺激)の白度点 W (白色点、white point)から測定色の色度点: x 、 y を結んだ直線が、スペクトル軌跡と交わる点の波長として定義されている。その点がスペクトル軌跡上ではなく純紫軌跡上の場合、SR-2 輝度計ではマイナスと表示される。例えば、表 3 より赤色の配置③の主波長は、 -495nm となっている。この数値は白色点とスペクトル軌跡上の 495nm の点を結んだ直線の延長(純紫軌跡上側)を示している。

(2) フルカラーLED の水平および鉛直方向の輝度と指向特性

フルカラーLED の幾何学的な端子配置に着目する。図 4 に示すように、各角度からの輝度の変化の様子に関して、LED の端子を横にした時は真上を中心に線対称の山形にほぼなった。しかし、LED の端子を縦にした時は、輝度値に相違がある。左 45° 方向(2.5 に相当する位置を指定)は輝度が大きく、右 45° 方向(5.5 に相当)は小さい。これは図 6 の波長スペクトルの様子を見てもわかるように、左 45° 方向においては緑色の輝度が大きく、また右 45° 方向は青色の輝度が大きいことに起因する。

照度に関して。ある受照面上に着目すると、やはり輝度の時の結果と同様に、LED の端子を横にした時は真上を中心にほぼ左右対称の山型になっている。しかし LED の端子を縦にした時、赤色はほぼ真上を中心に線対称になっているが白色と緑色の時は最大照度値が方向: 3~4 の間と左側になっている。逆に、青色の最大照度値は方向: 4~5 の間と右側に偏っている。白色は緑色の変化に大きく関係するので同じ結果が得られたものと推察される。

当初の予想では、LED の端子を図 4(a)にした時の

方が発光面の輝度、および受照面上での照度に変化が見られると思われたが、実際には縦方向に設置した場合であった。これは LED 本体の $p-n$ 接合とその内部構造上の配置状態の問題である。LED の測定角度を変える事で、各色が同じように一様に輝度が変わる訳ではないので、左右の角度によっても見え方に影響する事が確認された。使用した砲弾型フルカラーLED の指向特性角度は 80° となっていたが、LED を水平方向(90°)に設置して、図 4(c)で示したように 360° を等間隔に分割、すなわち 8ヶ所の測定をした。測定結果は真上から見た時の縦・横方向の時のデータが関与しており、緑色と白色の点灯の場合は方向: 3 の輝度が強く、逆に青色は反対方向: 7 の位置で輝度が強くなっている。

(3) 2 種類の LED の照度特性と発光部の見え方

照度に関して。図 7 を見てもわかるように、フルカラーLED の白色点灯時と白色 LED の照度と距離の関係は、両者とも同じように距離が離れるにつれて減少していった。しかし、若干白色 LED の方がフルカラーLED の照度より大きくなっている。これは 2 種類の LED の指向特性角度が両者間(80° と 20°)で違うので、その影響が出ている。

輝度に関して。図 8 の測定結果から、フルカラーLED と白色 LED の波長スペクトルは大きく違う。フルカラーLED は白色点灯時に、各々の全電流値を調整したので RGB 全て同じ相対的な輝度になっているのに対して、白色 LED は青色周辺部での相対的な輝度が大きく顕著である。図 9 からわかるように、実際の発光色を視覚的に比較すると白色 LED は青白い光になっている。一方、フルカラーLED の発光色は緑がかった光になっている。表 3 の結果より、緑色はある電流の組み合わせに対して輝度は低い、人間の視覚に関する波長感度、すなわち比視感度特性の影響で受照面上の照度は大きい。よって、各々の RGB 端子からの発光色が同じ輝度であっても緑色の影響が大きいために、実際に見た色も緑がかった白色になっている。

本研究では、簡単な LED 点灯回路を作製して、複数個のフルカラーLED と白色 LED に関する測光量特性についての比較とその考察を行った。しかし、実験ではフルカラーLED の場合、4 個の測定試料だけを基盤上に取り付けて測定した結果である。

フルカラーLEDの取り付け角度や位置、測定用機器の設置状況、さらに人為的なミスなども予見される。同一定格のフルカラーLEDでも、各々のpn接合とその内部構造上の問題点を含めて、再現性のある同様の結果が得られるかどうかはやや予測困難である。

発光部の不均一性(色ムラ)を解消するための一手段として、フルカラーLED端子の幾何学的な配置、さらに各LEDに安定した電流を流すためのDC電源と定電流回路、定電流ダイオードの使用などLED点灯回路設計と作製に関しても検討の余地がある。

5. まとめ

本研究では、簡単なLED点灯回路を作製して、市販されている4個のフルカラーLEDの発光面に関する輝度と指向特性の比較とその考察を行った。同一定格の砲弾形フルカラーLEDでも、各々の素子間で個体差が顕著であった。フルカラーLEDのR/G/B端子の縦・横方向と基盤取り付け配置等を含めて、カラー調光やLED照明に適用する場合には、発光部の不均一性を解消するための手段や対策が必要である。

謝 辞

測光量にもとづく専門用語や資料的な記載事項を含めた論文構成等に関して、有意義なご指摘とご提案を賜った本学工学部の2名の閲読委員に感謝申し上げます。

文 献

- (1) Shuji Nakamura, Stephen Pearton and Gerhard Fasol: "The Blue Laser Diode", Springer (2000); 照明学会編: "照明ハンドブック 第2版", オーム社, (平成15年) 奥野保男: "発光ダイオード", 産業図書, (平成5年)
- (2) 小島 彰: LED照明の今後の動向、照明学会誌、Vol.89, No.3 (2005) pp.126-129
- (3) 赤塚 美津雄: 広がるLED照明技術、OHM、No.9 (2005) pp.17-22
- (4) 田口 常正: LED照明の最新技術と展望、OHM, No.10 (2005) pp.42-47