

# 白色発光素子を用いた外科手術用照明ゴーグルの開発

川上 養一<sup>1</sup>, 島田 順一<sup>2</sup>, 藤田 茂夫<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学・工学研究科・電子物性工学専攻

〒606-8501 京都市左京区吉田本町

E-mail: kawakami@kuee.kyoto-u.ac.jp

<sup>2</sup> 京都府立医科大学・心臓血管呼吸器外科

〒602-0841 京都市上京区河原町広小路梶井町 465 番地

分類番号：6.6（ルミネッセンス），12.6（医療工学）

Medical lighting goggle composed of white LEDs  
for surgical operation

Yoichi KAWAKAMI<sup>1</sup>, Junichi SHIMADA<sup>2</sup> and Shigeo  
FUJITA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Electronic Science and Engineering, Kyoto  
University, Yoshida-Honmachi, Sakyo-ku, Kyoto 606-8501,  
Japan

<sup>2</sup>Department of General Thoracic Surgery, Kyoto Prefectural  
University of Medicine, 465 Kajii-cho, Kawaramachi-  
Hirokooji, Kamigyo-ku, Kyoto 602-0841, Japan

白色 LED を用いた外科手術照明装置

## 和文要旨

固体発光素子である白色発光ダイオード（LED）による照明革命が始まろうとしている。われわれは照明装置の新しい応用として、InGaN系青色LEDとYAG:Ce<sup>3+</sup>（Ce<sup>3+</sup>添加イットリウムアルミニウムガーネット）蛍光体からなる白色LEDをプラスチックゴーグルに取り付けたタイプの外科手術用照明装置を考案・試作し、実際の外科手術に初めて用いた。このことにより、軽く、携帯性、高演色性を満たし2万ルクスの照度を実現する照明装置として白色LEDの可能性が示された。ここでは、試作した装置の詳細と外科手術を通じて明らかとなった技術課題、そしてそれを解決するための方策について報告する。

## 英文要旨

**Fabrication of white solid-state-lighting  
goggle for surgical operation**

Yoichi KAWAKAMI, Junichi SHIMADA and Shigeo FUJITA

The evolution of solid-state-lighting is currently going to be developed due to the progress of white light emitting diodes (LEDs). We proposed and developed the new lighting equipment that is a surgical lighting goggle composed of InGaN-YAG (yttrium aluminum garnet):Ce<sup>3+</sup>-based white LEDs, by which the first operation has successfully been performed. This suggests the possibility of white LEDs as the new lighting system that satisfies light, handy and high color rendering performances with the illuminance more than 20,000 lx. We report the detail of the equipment, the problems clarified through the surgical operation and the approach to achieve the higher performance.

## キ ー ワ ー ド

**Key words :**

white light emitting diode,  
medical application,  
surgical operation,  
mobile lighting,  
power lighting,  
color rendering,  
synthesis of lighting spectra

## 1. まえがき

近年の窒化物半導体系の可視短波長発光ダイオード(LED)の性能向上(波長域の拡大,高輝度化,高効率化等)はめざましいものがある。それを用いた白色LED(light emitting diode)も開発され,従来の電球や蛍光灯をこれら固体発光素子で置き換えて行こうという照明革命が始まろうとしている。しかしながら,白色LEDの効率(定格駆動時)は,市販のもので10~20 lm/W,実験室レベルのトップデータで30 lm/W程度であり,電球の効率は凌駕しているものの,蛍光灯の効率には遠く及んでおらず,効率向上へ向けた研究が重要な課題となっている<sup>1)</sup>。しかも,1 lmあたりのコストは,旧来のガラス管タイプのランプ光源の方が圧倒的に安価であり,現状では白色LEDが一般照明に参入して行くには時期尚早の段階にあると思われる<sup>2)</sup>。

こうした中,白色LEDを新たなビジネスチャンスと位置づけ展開させるためには,LEDでなければカバーできない特殊用途であり,しかも高付加価値の領域を開拓して行くことが一つのアプローチであろう。例えば,Given Imaging Ltd(<http://www.givenimaging.com/>)で開発された製品は,カプセル型の医療診断装置<sup>3)</sup>であり,このカプセル先端に白色LEDとCMOS型の撮像デバイスが実装されている。人間がカプセルを飲み込んだあと自動的に体内の消化器を照明・撮影し,画像を電波にて体外に送信するというシステムになっており,近い将来われわれはファイバースコープの苦痛から解放されるのではないかと期待されている

る。この装置の開発コンセプトの優れている点は、(1)白色 LED は軽量・コンパクトでありボタン型電池で駆動可能である点（量高い電球を飲み込むわけには行かない）、(2)ある特定の部位だけを照明するスポット照明である点（部屋全体を照明するような一般応用では、莫大な数の LED が必要とされる）、(3)高付加価値が期待できる医療応用である点（ビジネス性）が挙げられるであろう。

最近、われわれは、白色 LED をプラスチックゴーグルに取り付けたタイプの外科手術用照明装置を考案・試作し、実際の外科手術に初めて用いた<sup>4-8)</sup>。ここでは、その装置の詳細と外科手術を通じて明らかとなった技術課題、そしてそれを解決するための方策について報告する。

## 2. 白色 LED の実現方式と特徴

LED の特徴の一つは、発光スペクトルの半値幅が狭く単色性が高い点があげられる。この特徴を利用して、表 1 の [方式 -1] に示すように赤 (R) 緑 (G) 青 (B) 色からなる LED 発光体を平面上に縦横に配列実装したフルカラー表示装置は既に広く用いられている。この場合、RGB 各色の強度比を適宜設定することにより任意の相関色温度の白色光も得ることができ、その演色性は必ずしも良好なものといえない。これは、対象物の色合いが光反射率（分光反射率）により決定されるためである。白色光のスペクトル分布が各波長の光を連続的に含み、その強度分布が完全放射体（演色性評価用基準光源）に近いものであれば、白色光の演色性は高くなり対象物を自然な色合いで認識す

ることができることになる。

各色のLEDを組み合わせることで擬似連続光の高演色性光源を実現するには5種類以上のLEDを用いることが提案されている<sup>9)</sup>。LED+蛍光体による方式と得失は、[方式-2]と[方式-3]にまとめられている。このなかで、InGaN青色LEDと蛍光体の組み合わせは、青色LEDからの発光(460nm)を用いてYAG蛍光体[( $Y_{1-x}Gd_x$ )<sub>3</sub>(Al<sub>1-y</sub>Ga<sub>y</sub>)<sub>5</sub>O<sub>12</sub>:Ce<sup>3+</sup>]を光励起し、その蛍光体からの黄色発光(570nmをピーク波長に持つブロードな発光帯)と青色との加法混色により白色光を得ようというものである<sup>10,11)</sup>。この方式は、構造がシンプルでデバイス寿命も長い。このため実際に量産化されており、携帯電話のバックライト等に用いられている。

### 3. 手術用白色LED照明装置

通常、外科手術は、キセノンランプやメタルハライドランプから構成される天井付近に設置された照明装置を用いて行われる。この装置は、無影灯と呼ばれているにもかかわらず、実際の手術現場では、外科医の頭が照明を遮り、術野を視認しにくいことが多い。しかも、患部の奥の方を水平方向から視認しなければならない術式が増えており、旧来の照明装置ではこのような問題点をカバーできない。手術中の照度は、あらゆる分野で最も高い値が要求されており、日本では厚生省から20,000 lxが義務づけられているが、これは何も障害物がない場合の手術台上の鉛直照度値であり、実際はこれよりもずっと低い値で手術が行われ

ているのが現状である。このような問題を解決するには、  
「プラスチックゴーグルの両端にコンパクトな発光体を取り付け、しかもその発光体からのビーム方向を人間の視線方向と一致するよう制御する機構を付加すれば大変便利な機能となるであろう。」というのが、この装置を開発するに至った発想である。

図 1 に、試作された LED ゴーグル装置の写真を示す。透明なプラスチックゴーグルの両端に各 56 個（総数 112 個）の白色 LED が実装されている。用いた白色 LED は、InGaN を活性層とする青色 LED の上に YAG 系の蛍光体を塗布したタイプの素子（日亜化学製 NSPW310AS）を用いた。この素子の発光効率は、定格駆動（3.5 V, 20 mA）時に約 15 lm/W であり、ビームの広がり角は 60° である。LED の駆動には、商用電源を AC / DC 変換して用いることも可能であるが、持ち運びができるよう充電可能な Li イオン電池（SONY 製、NP-F960）を用いて試作した。Li イオン電池は放電に伴って電圧が低下するため、このような場合でも LED に常に一定の電力を供給するために、DC / DC コンバーター（ETA 製、SVM-15SC12）を用いて光出力を設定した。なおこの装置はプロトタイプであり、視線入力機構は付加されていない。

実際このゴーグル装置を用いた世界初の LED 照明下の外科手術を 2000 年 9 月 11 日に京都府立与謝の海病院にて行った。図 2 は、そのときの手術の様子である。手術の内容は、慢性腎不全患者に対する内シャント造成術と呼ばれ

るものであり，腎臓透析が必要な患者が十分な血流を得るために，右上腕部の動脈と静脈をバイパスさせる手術である。手術時間は 2 時間 20 秒であった。電力供給は，すべて Li イオン電池により行い商用電源を用いていない。このことは，この装置が在宅医療や災害時医療に適していることを実証するものである。

また身につけられるポータブルタイプの照明装置として医療以外の汎用品としての応用も考えられる。例えば，警備員装着用，暗い場所での作業用，夜間スキー用，スキューバダイビング用，寝転がったの読書用等の用途が考えられる。この装置に関する発明は，関西 TLO 株式会社から特許および意匠出願を行っており，大日本スクリーン製造会社に独占実施許諾し製品化を図ることになっている。

#### 4. 白色 LED ゴーグルの光出力特性

先に述べたように外科手術では， $20,000 \text{ lx}$  ( $1 \text{ lx} = 1 \text{ lm/m}^2$ ) の照度が要求されるが， $15 \text{ cm}$  角程度の術屋（面積： $0.00225 \text{ m}^2$ ）が照明できればよいので，トータル  $450 \text{ lm}$  の光束を集光すれば良いことになる。図 3(a)に InGaN-YAG 系の白色 LED チップの電流と相対光出力を，比較のために図 3(b)に AlGaAs 系赤色 LED の特性を示している。弱電流領域では，白色 LED の電流と光出力の関係は，ほぼリニアであるが  $20 \text{ mA}$  以上でサブリニアとなり， $100 \text{ mA}$  以上で飽和する傾向になっている。しかしながら，窒化物半導体は頑丈な材料であり高電流領域での駆動が可能であるため，初期の設計では単一の LED あたり  $150 \text{ mA}$  の駆動条件で，

LEDゴーグルから約 350 lm の光束を得ることができ一つの装置でほぼ上記の照度条件を満たせるものと考えていた。しかし、実際には 14×4 個のアレイ状で白色 LED を密に実装した場合、図 3(c)に示すように単一のチップの場合よりもさらに弱電流域で飽和特性を示し、25mA / 1チップ以上の条件では電流を増やすと逆に光出力は低下する傾向となる。したがって手術では、20mA / 1チップの定格条件で駆動し、二人の外科医(執刀医：島田順一、第一助手：天池 寿)と一人の看護婦が LED ゴーグルを装着(白色 LED：112 個×3)し、さらに白色 LED 補助ランプ(240 個)を合わせた合計 576 個の LED を用いて 20,000lx の照度基準を達成した。

このように高電流領域で発光強度が飽和してしまう現象を明らかにするためにサーモビューワ( JEOL, JTG-7000 )による白色 LED パネルの熱分布特性を測定した。図 4 には、(a) 20mA / 1チップおよび(b) 45mA / 1チップの条件でのパネル状の熱分布をグレイスケールで表示している。このようにアレイ状に実装していない単一の白色 LED チップでは、20 の室温条件で 20mA の定格駆動条件では、LED 中心部は 35 程度までしか高くない。しかしながら、アレイ状に並べた場合、同一の電流条件でも、62.5 ~ 87.5 まで上昇してしまうことがわかった。しかも、(b) 45mA / 1チップの条件では、さらに高くなり 100 ~ 160 にまで到達した。

図 5 に InGaN-YAG 系白色 LED と AlGaAs 系赤色 LED

の発光強度の温度依存性を示している。白色 LED では、赤色 LED ほどではないが温度上昇とともに強度が低下する。これは、温度上昇とともに非輻射再結合過程が顕著になって行くためである。これらの結果から、白色 LED を高密度に実装したパネルでは非輻射再結合によって発生したエネルギーの放熱特性が十分ではないために、熱飽和が生じやすいことが明らかにされた。このことから、LED パッケージの熱伝導特性を高め、ヒートシンク構造を付加させることがパワー照明<sup>12,13)</sup>に必要であることが分かった。ここでは詳細は述べないが、われわれはダイヤモンド基板を用いた実装技術を提案<sup>8)</sup>している。

## 5. 白色 LED ゴーグルのスペクトル分布と演色性

先に述べた白色 LED を用いた外科手術では、図 6 の写真に示すように動脈と静脈の吻合を行う手術を行った。本来、動脈は血液に含まれるヘモグロビン（鉄錯体分子）中への酸素の過飽和度が高く鮮やかな明るい赤色で、静脈はそれと反対で暗い赤色で認識される。しかしながら、実際の手術では、動脈が赤黒く見えてしまい、動脈と静脈がやや見分けにくかった点が指摘された。これは「演色性」と呼ばれる要件であり、対象物の色合いが光反射率の波長特性（分光反射率）により生じる問題である。

図 7(a)に InGa<sub>N</sub>-YAG 系白色 LED の分光放射特性を示している。スペクトルは、InGa<sub>N</sub> 活性層からの 460nm 付近の青色発光体と YAG 蛍光体からの 580nm 付近にピークを有するブロードな発光体から形成されており、この場合、

色度座標として  $x=0.310$ ,  $y=0.320$ , 相関色温度として  $6500$  K (昼光色) が得られている。比較のために, 標準光源  $D_{65}$  (色温度:  $6504$  K,  $x=0.3127$ ,  $y=0.3290$ ) を図 7(b) に示す。 $D_{65}$  は, ある気象条件での太陽光下のスペクトルであるが, ほぼ  $6500$  K の黒体輻射に一致している。

白色 LED の平均演色評価指数 ( $R_a$ ) は  $80$  であり比較的良好である。しかしながら, 赤色 ( $R_9$ ), 緑色 ( $R_{11}$ ) および青紫色 ( $R_{12}$ ) の特殊演色評価数はそれぞれ,  $33$ ,  $63$  および  $49$  と低い値となっている。これは, 白色 LED のスペクトル強度が  $D_{65}$  と比較して弱いスペクトル領域の色に対応している。とくに医療応用では肌色から赤色域の演色性が重要であるが, 本研究で用いた白色 LED では, 赤色のスペクトル成分 ( $600 \sim 780$  nm) が不足しているために演色性に改善の余地があることが明らかとなった。

## 6. 高演色性白色 LED 実現に向けてのアプローチ

医療応用のための発光スペクトル制御としては黒体輻射に近い連続スペクトルを固体光源で実現することがまず重要な課題である。それとともに病変部を正確に認識するために, 様々な生体の色情報を分光反射率としてデータベース化し, 微妙な色合いの差をもたらしている波長域において発光スペクトルを增強させることが有効である。すなわち, 目的に応じたオーダーメイド型の高品位照明装置への重要な設計指針となる。このような事を技術的に実現するためには, 青から紫色域にて光の吸い口(吸光度)があり, 任意の波長で光るような新しい蛍光体の開発が今後ますます

す重要になるであろう。

赤色域の演色性を高めるために，われわれは，InGaN系LED基板として現在用いられている $\text{Al}_2\text{O}_3$ （サファイア）を $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}$ （チタンサファイア）や $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ （ルビー）に置き換える構造を提案<sup>8)</sup>している。前者のチタンサファイアは400～600nm域に $\text{Ti}^{3+}$ の吸収帯があり，600～1000nm域にブロードな蛍光を示す<sup>14)</sup>ので，高演色化に適した蛍光体基板となりうる。しかしながら，人間の視感度が低い領域や視感度が全くない（780nm以上）スペクトル領域を含むため，lm/Wで表した発光効率が犠牲となってしまう。一方，後者のルビーは500～620nmの緑域（ ${}^4A_2$  →  ${}^4F_2$ ）と350～450nmの紫域（ ${}^4A_2$  →  ${}^4F_1$ ）に吸収バンドがある<sup>15)</sup>ためInGaN-LEDの発光域をこれに合わせて設計しなければならない。ルビーの発光（ $E_2$  →  ${}^4A_2$ ）は，694.3 nm（半値幅：0.4 nm）と692.9 nm（半値幅：0.3 nm）の深赤領域である。

ごく最近われわれは，新しい蛍光体として大阪大学の柳田研究室（柳田 祥三，和田 雄二，長谷川 靖哉）で開発された希土類錯体を用いた新たな発光波長変換技術を提案した。希土類錯体とは， $\text{Eu}^{3+}$ や $\text{Tb}^{3+}$ 等の希土類イオンが配位子と呼ばれる有機分子によって包まれた物質であり，配位子の分子設計により希土類イオンの他分子への無輻射エネルギー遷移を抑制することで高い発光量子効率を実現できる<sup>16,17)</sup>。例えば， $\text{Eu}^{3+}$ 錯体では，最高80%の変換量子効率が達成されている。しかも化学プロセスにより大量合成

が可能であり，透明プラスチックにも分散可能である。図 8 は，青色 LED の光を  $\text{Eu}^{3+}$  錯体を分散させた樹脂が吸収して赤色蛍光を発している写真を示している。

一例として，開発された錯体を InGaN-YAG 系白色 LED と組み合わせたときのスペクトルを図 9 に示す。464nm と 530nm 付近に観測されるディップと青色発光強度の全体的な減少は， $\text{Eu}^{3+}$  の f-f 遷移に基づく励起準位への光吸収によって生じたものである。これら励起によって 610 nm 付近に  $\text{Eu}^{3+}$  からの発光帯が付加され，それに伴って白色 LED の色温度が 4000K 程度まで下げられている。現在，この技術は大阪大学のグループとの共同で関西 TLO 株式会社から特許出願されており，日垂化学工業との非独占実施契約に至り現在製品化を目指した研究が進行している。

### むすび

白色 LED を用いた外科手術用照明装置試作を通じた高品質白色 LED 実現へのアプローチについて概要を報告した。ここで述べたように医療の分野では，最高の照度と演色性が要求されている。LED をベースにした固体照明がこれら要求を満たしたとき，様々な市場に参入しうる新しい光源としての可能性も大きく拓かれるものと期待している。

サーモビューワーによる LED の放熱特性測定について協力いただいた，大阪大学の神村共住博士，森勇介助教授，佐々木孝友教授に感謝いたします。本研究のきっかけとなった医学者と工学者の出会いは，京都大学のベンチャービジネストラボラトリー(京大 VBL)にてなされたものです。京

大 VBL 施設長の松重和美教授に御礼申し上げます。

### 参考文献

- 1) 田口常正：光学，30巻，11号，pp741，(2001)。
- 2) 日経エレクトロニクス，No. 816，pp61，2002年2月25日号。
- 3) G. Iddan, G. Meron, A. Glukhovsky and P. Swain: Nature, 45, pp.417, (2000)。
- 4) J. Shimada, Y. Kawakami and Sg. Fujita: Proceedings of SPIE Vol. 4278, pp. 165-172, (2001)。
- 5) LED News: “White LEDs Debut in Operating Theatre”, Compound Semiconductor 7(2) March, pp. 12, (2001).  
(<http://www.compoundsemiconductor.net/7-2Final/LED%20News.htm>)
- 6) News article, Opto & Laser Europe, 82 March, pp. 5, (2001)。
- 7) J. Shimada, Y. Kawakami and Sg. Fujita: Proceedings of SPIE Vol. 4445, pp. 13, (2001)。
- 8) Y. Kawakami, J. Shimada and Sg. Fujita: Proceedings of SPIE Vol. 4445, pp. 156, (2001)。
- 9) A. Zukauskas, F. Ivananskas, R. Vaicekauskas, M.S. Shur and R. Gaska, Proceedings of SPIE Vol. 4445, pp. 148, (2001)。
- 10) K. Bando, K. Sakano, Y. Noguchi and Y. Shimizu: J. Light & Visual Environment, Vol. 22, No1. pp.2,

- (1998).
- 11) 向井孝志, 中村修二: 応用物理学会誌, 第 68 巻, 第 2 号, pp.152-155, (1999).
  - 12) J.J. Wierer, D.A. Steigerwald, M.R. Krames, J.J. O'Shea, M.J. Ludowise, G. Christenson, Y.C. Shen, C. Lowery, P.S. Martin, S. Subramanya, W. Götz, N.F. Gardner, R.S. Kern and S.A. Stockman: Appl. Phys. Lett. 78, pp. 3379, (2001).
  - 13) 日亜化学工業: “照明用パワーLEDの開発について”, <http://www.nichia.co.jp/powerled.htm>
  - 14) P. Alberts, E. Stark and G. Huber: J. Opt. Soc. Am. B3, pp.134, (1986).
  - 15) R.J. Collins, D.F. Nelson, A.L. Schawlow, W. Bond, C.G.B. Garrett and W. Kaiser: Phys. Rev. Lett. 5, pp. 303, (1960).
  - 16) S. Yanagida, Y. Hasegawa, K. Murakoshi, Y. Wada, N. Nakashima and T. Yamanaka: Coordination Chemistry Review, 171, pp.461, (1998).
  - 17) 長谷川靖哉: 化学と工業, 第 53 巻第 2 号, pp126 (2000).

## 著者略歴



かわかみ よういち

川上 養一

1984年大阪大学工学部電気工学科卒業，1989年同大学院工学研究科電気物性工学専攻博士課程修了，同年京都大学工学部電気工学科助手、'91～'92年ヘリオットワット大学物理学教室研究員，1997年京都大学工学研究科電子物性工学専攻助教授．専門は超短パルスレーザを用いたワイドギャップ半導体の光物性・白色LEDのための蛍光体開発や固体照明応用，工学博士



しまだ じゅんいち

島田 順一

1988年京都府立医科大学医学部卒業，1997年同大学院医学研究科博士課程修了，1999年1月京都府立与謝の海病院外科技師をへて、2002年5月より京都府立医科大学呼吸器外科助手，現在 磁場誘導式手術ナビゲーションシステムの開発・高演色性白色LEDの医療工学的検討に従事，医学博士



ふじた しげお

藤田 茂夫

1966年京都学大学工学部電気工学第二学科卒業，1969年同大学院工学研究科電気工学第二専攻博士課程中退，同年京都大学工学部電気工学第二学科助手，助教授を経て1985年より教授（現在 京都大学工学研究科電子物性工学専攻），'79～'80年ノースカロライナ州立大学電気計算機工学科研究員，専門はワイドギャップ半導体を中心とした光材料の開発と光電子物性・固体発光素子を用いた照明工学，工学博士

図説

表 1 . 白色 LED の実現方式と特徴。

図 1 白色 LED ゴーグル照明装置。

図 2 世界初の LED を用いた外科手術。

図 3 各 LED の発光強度の電流依存性。ただし，10mA のときの発光強度を 1 に規格化している。

図 4 LED パネルの熱分布。(a)20mA/chip で駆動した場合，(b)45mA/chip で駆動した場合。

図 5 LED 発光強度の温度依存性。(a)InGa<sub>n</sub>N 系白色 LED，(b)AlGaAs 系赤色 LED における特性。

図 6 InGa<sub>n</sub>N-YAG 白色 LED 照明下における内シャント造成術。

図 7 白色発光体の分光放射スペクトル。(a)InGa<sub>n</sub>N-YAG 白色 LED と (b)標準光源 D<sub>65</sub> の特性。

図 8 青色 LED 励起による Eu<sup>3+</sup>錯体分散樹脂の赤色蛍光。

図 9 InGaN-YAG 白色 LED-Eu<sup>3+</sup> 錯体による発光  
スペクトル。