

8.3 白色 LED の医療応用

8.3.1 はじめに

近年の窒化物半導体系の可視短波長発光ダイオード (LED: light emitting diode) の高効率化はめざましいものがある。それをういた白色 LED 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 の効率は、市販のもので 20 lm/W、実験室レベルのトップデータで 50 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 (100lm/W 程度) 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¹⁾。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²⁾。こうした中、白色 LED の応用分野を開拓するためには、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、ギブニイメージング社や株式会社アールエフで開発された製品は、カプセル型の医療診断装置³⁻⁶⁾であり、このカプセル先端に白色 LED と CMOS (complementary metal oxide semiconductor) あるいは CCD (charge coupled device) 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。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や外部からのマイクロ波電力供給によって駆動可能である点 (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。

一方、白色 LED は外科手術用の術屋照明にも応用されようとしている。すなわち、キセノンランプやメタルハライドランプを用いた通常の照明装置では、無影灯という名前が付いているにもかかわらず、外科医の頭が照明を遮り、術屋を視認しにくいことが多い。京都大学と京都府立医科大学のグループは、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⁷⁻¹³⁾。

ここでは、各種白色 LED の特徴について述べたあと、その医療応用としてカプセル内視鏡システムと手術用ゴーグルライトの現状と課題について概説する。

8.3.2 各種白色 LED の特徴

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 8.3.1 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るが、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 を組み合わせて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¹⁴⁾。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 [$(Y_{1-x}Gd_x)_3(Al_{1-y}Ga_y)_5O_{12}:Ce^{3+}$] 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^{15,16)}。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。

表 8.3.1 白色 LED の実現方式と特徴

方式	構造・材料	長所	短所
[方式-1] 青色 LED + 緑色 LED + 赤色 LED	青色 LED : InGaN 系 緑色 LED : InGaN 系 赤色 LED : AlGaAs 系 AlGaInP 系	<ul style="list-style-type: none"> 高発光効率(現状で 40lm/W 以上) 表示色(相関色温度)を自由に変更可 	<ul style="list-style-type: none"> 各 LED に対して電源回路が必要 面内で均一に混色することが必要 演色性が必ずしも良くない
[方式-2] 青～近紫外 LED+蛍光体	青色 LED : InGaN 系 蛍光体 : YAG 蛍光体塗布	<ul style="list-style-type: none"> 低コスト 電源回路の構成が簡単 ZnCdSe 系と比較して堅牢で、高電流駆動が可能 	<ul style="list-style-type: none"> 蛍光体のスペクトル強度の弱い緑色や赤色の特殊演色性が良くない
	青色 LED : ZnCdSe 系 蛍光体 : ZnSe 基板	<ul style="list-style-type: none"> 低コスト 電源回路の構成が簡単 動作電圧 (2.7V) が InGaN 系(3.5V)に比べて小さい 	<ul style="list-style-type: none"> 現状デバイス寿命 (8000h) が短い 演色性が悪い
	紫～近紫外 LED 蛍光体 : 青色, 緑色, 赤色	<ul style="list-style-type: none"> 表示色(相関色温度)を自由に変更可 	<ul style="list-style-type: none"> 演色性が必ずしも良くない 赤色の蛍光体の効率が良くないため、色温度の低い白色光の効率が落ちる
[方式-3] 紫外 LED + 蛍光体	紫外 LED : AlGaIn 系 or ZnS 系 or ZnO 系 蛍光体 : 蛍光灯で開発された材料 (ハロリン酸塩 等)	<ul style="list-style-type: none"> 現状の蛍光灯 (Hg⁺: 254nm 励起) に使用している広範な種類の蛍光体を使用できるので演色性に配慮可能 	<ul style="list-style-type: none"> プラスチック等パッケージの光劣化 高効率紫外 LED 開発の可能性は未知数

8.3.3 カプセル内視鏡システム

イスラエルのギブンイメージング社は、2000年5月世界で初めてカプセル内視鏡の概念を発表するとともに試作装置を用いて人体の胃や小腸の撮影に成功した^{3,4)}。この成果は、「ミクロの決死圏」に代表される近未来医療用マイクロマシンの登場を予感させるもので、ニュースとして大きく取り上げられた。この装置は、直径 11mm、長さ 27mm の錠剤サイズのカプセルカメラ (商品名 : M2A) であり、その動力源として内蔵バッテリーを用い、白色 LED で体内を照明し 19 万画素の CMOS 撮像デバイスを用いて 2 枚/秒のコマ送り条件で約 6 時間の動作時間を達成している。カプセルの平均滞在時間は胃で 80 分 (17~280 分)、小腸で 90 分 (45~140 分) であるので、これらの撮影には適用可能であるが、飲み込んで排泄されるまでの平均時間は 24 時間 (10~45 時間) であるので、大腸まで届くために電池が切れてしまう。また、ピント調節機構やカプセルの姿勢制御機能がない。このため、近接撮影の条件となり、撮影場所を体内の蠕動運動に委ねるので撮影したい場所の微調整ができない。しかも、万が一体内にカプセルが残留してリークしてしまった場合、電池内の化学物質が人体に与える影響が心配されている。

これに対して、日本の株式会社アールエフでは、超小型カプセルカメラ (商品名 : NORIKA) の電力供給をマイクロ波技術によって行い、ピント調整や姿勢制御を外部操縦するシステムを開発した^{5,6)}。その内部構造を図 8.3.1 に示す。カメラは直径 9mm、長さ 23mm のピル型で、カメラと LED 照明部分には、透明樹脂が用いられている。CCD (41 万画素、30 枚/秒の動画撮影が可能) へのピント調整は、CCD 部のポールピース (永久磁石) とレンズ部のボイスコイル (電磁石) との間の斥力・引力制御によって行う。このレンズの周囲には 4 個の LED が設置されている。すなわち、CCD の左右に白色 LED を配置させ、それぞれの LED の明るさを個々に変えることで影を作り、前記のピント調整機構と組み合わせることで単眼 CCD でも立体的映像を作り出せるようにしてある。また、CCD の上下には用途に応じて近赤外 LED (約 950~1100nm、透過像撮影可能) や他の波長の LED を配置するようになっている。中央右よりの側面に姿勢制御ローターコイルが 3 つ、さらに電力受磁コイルが巻かれている。中央の空間部にはバルブをつけたタンク (フリースペース) が置かれており、用途に応じて治療用の薬液を格納したり、生検

のための超小型のハサミやメスを内蔵させることが検討されている。このタンクには安定した電力を蓄えるための蓄電コンデンサーが接しており、一番右側にはマイクロ波送信部が位置している。

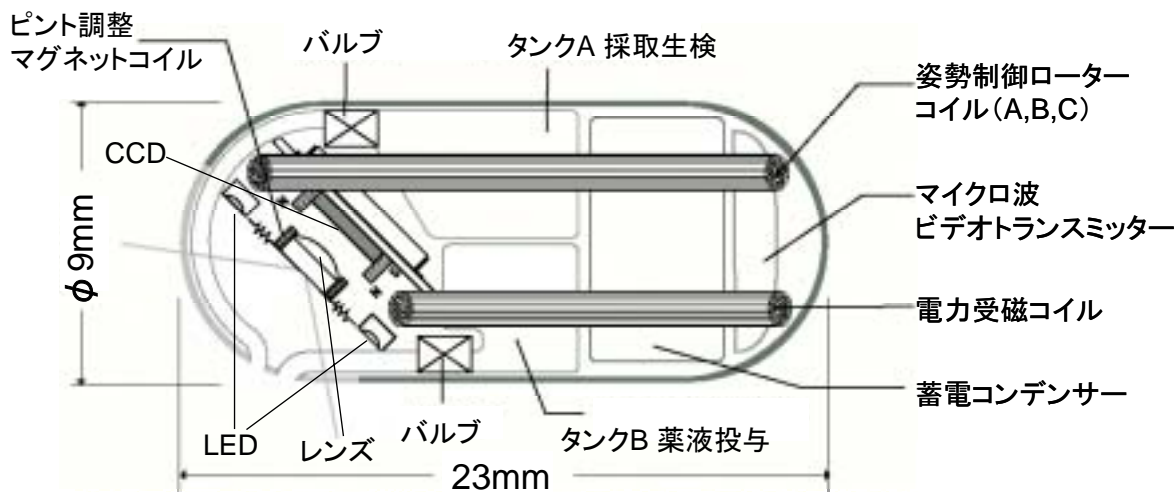


図 8.3.1 株式会社アールエフ製のカプセル型内視鏡 NORIKA の内部構造

8.3.4 手術用ゴーグルライト

先に述べた外科手術における照明の問題を解決するために、ゴーグルの両端にコンパクトな白色 LED を張り付けたタイプの照明装置が試作された⁷⁻¹²⁾。この手術用ゴーグルライトには、図 8.3.2 に示すように、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 25 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。

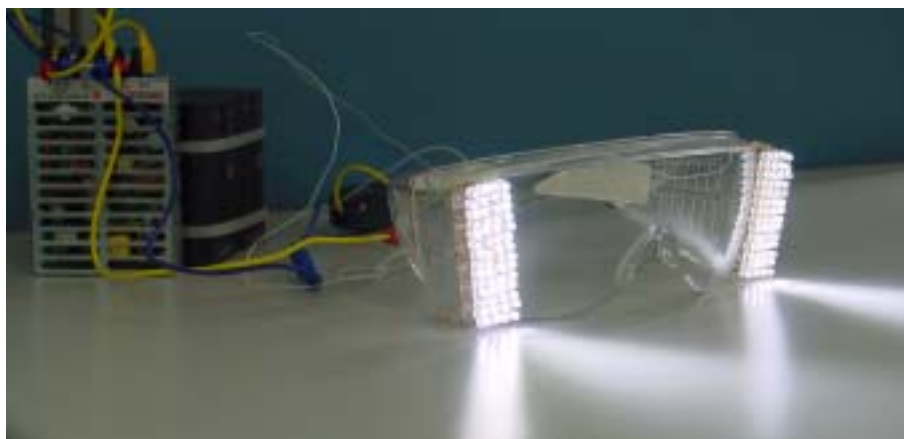


図 8.3.2 白色 LED を用いた手術用ゴーグルライト

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 8.3.3 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



図 8.3.3 世界初の LED を用いた外科手術

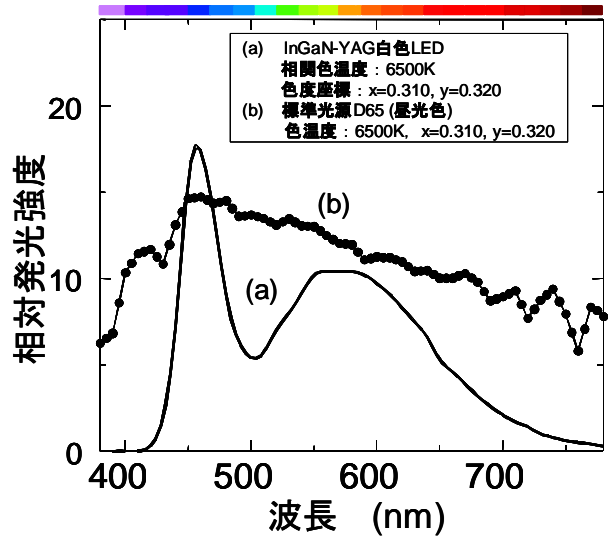
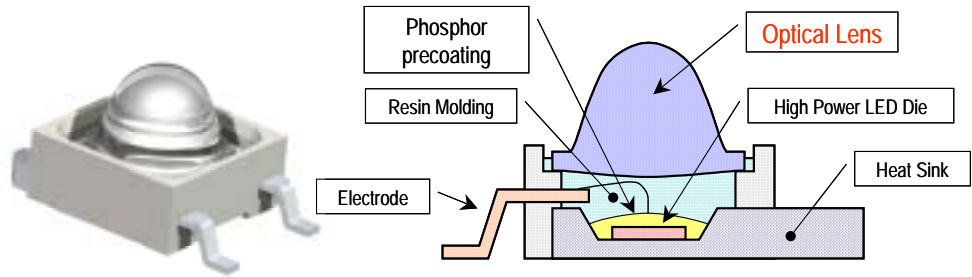


図 8.3.4 白色発光体の分光放射スペクトル，
(a) InGaN-YAG 白色 LED と (b) 標準光源 D_{65} の特性

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。

白色 LED を用いた外科手術では、通常の光源を用いた場合と比較して動脈と静脈の演色性について課題が明らかとなった¹¹⁾。すなわち、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 8.3.4(a)に InGaN-YAG 系白色 LED の分光放射特性を示している。スペクトルは、InGaN 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 8.3.4(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_g) 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 (600~780 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。近年、青色に光吸収帯を持ち赤色域で効率よく発光する蛍光体が開発されつつあり^{17,18)}、近い将来、これら演色性の問題も改善されるものと期待されている。

試作された手術用のゴーグルライトに用いられた白色 LED は、チップサイズが $350 \mu\text{m}$ スクエアであり定格駆動で約 1.81m 程度の光束である。したがってパワー照明の用途のためには、チップサイズを大きくして LED に流せる電流値を大きくするとともに、発熱による温度消光を押さえるための放熱パッケージを開発する必要がある。これを受けて、LumiLeds lighting¹⁹⁾や日亜化学工業²⁰⁾では、高出力タイプの白色 LED が開発されている。図 8.3.5 に、日亜化学で開発された高出力白色 LED (商品名: NCCx002E) の構造と基本特性を示している。チップサイズとして 1mm スクエアが用いられており、350mA の定格駆動時に 231m の光束を実現している。このような大電流駆動ができるようになったのは、銅の大型放熱板を組み込むことによって熱抵抗を大幅に低減することに成功したた



- Package Size : 6mm × 11.2mm × 7.2mm
- LED Chip Size : 1mm square
- Life Estimate : 50,000 hours
- Power Dissipation : ~1.3W
- Heat Resistance : < 8°C/W

図 8.3.5 日亜化学工業製の高出力白色 LED（商品名：NCCx002E）の外観図，内部構造および基本特性



図 8.3.6 試作されたパワー白色 LED モジュール



図 8.3.7 パワー白色 LED モジュールを用いた第 2 世代のゴーグルライト

めである。ごく最近，このタイプの白色 LED8 個を高熱伝導性 AlN セラミックスにリフロー接合させ，さらにこのセラミック基板の裏面に Al 製の放熱フィンとマイクロファンを設けることでパワー白色 LED モジュール（図 8.3.6）を作製し，これを LED ゴーグルの両端に取り付け第 2 世代のゴーグルライトを試作（図 8.3.7）した¹³⁾。この装置からは，約 450lm の光束が得られるので 15cm 各程度の術屋に集光すれば，単体のゴーグルライトで 2 万 lx (lx=lm/m²) の外科手術における厚生省の照度基準を達成することができる。

8.3.5 おわりに

医療照明用の白色 LED は，現状では，一般用途として開発された素子を流用することで用いられているが，将来は，オーダーメイドの照明光源としてのポテンシャルを秘めている。すなわち，病変部や微小ガン組織を正常部位と見分けて視認するために有効となる光スペクトルの構成・配光性をデータベース化し，これら用件を短波長 LED と種々の蛍光体との集積化技術を用いて達成することが重要なアプローチとなるであろう。また，白色 LED の高出力化は，発光効率の向上と放熱パッケージの開発によってさらに発展するものと予想される。

参考文献

- (1) 田口常正：“白色発光ダイオード (LED) 開発と照明光源への応用,” 光学, 30, 11 (2001) 741.
- (2) 日経エレクトロニクス：“1社独占が崩れ 競争時代に入った白色LED,” 816, 2月25日号 (2002) 61.
- (3) G. Iddan, G. Meron, A. Glukhovsky and P. Swain: “Wireless capsule endoscopy,” Nature, 405 (2000) 417.
- (4) <http://www.givenimaging.com/>
- (5) NORIKA プロジェクトチーム プロジェクト 21：“カプセル型内視鏡「NORIKA」システム,” 日本放射線技術学会雑誌, 58, 8 (2002) 985.
- (6) <http://www.rfnorika.com/>
- (7) J. Shimada, Y. Kawakami and Sg. Fujita: “Medical lighting composed of LEDs arrays for surgical operation,” Proceedings of SPIE, 4278, (2001) 165.
- (8) LED News: “White LEDs Debut in Operating Theatre,” Compound Semiconductor 7(2) March, (2001) 12.
(<http://www.compoundsemiconductor.net/7-2Final/LED%20News.htm>)
- (9) News article, Opto & Laser Europe, 82 March, (2001) 5.
- (10) J. Shimada, Y. Kawakami and Sg. Fujita: “Surgical operation using lighting goggle composed of white-LEDs arrays,” Proceedings of SPIE, 4445, (2001) 13.
- (11) Y. Kawakami, J. Shimada and Sg. Fujita: “Fabrication of LED lighting goggle for surgical operation and approach toward high color rendering performance,” Proceedings of SPIE, 4445, (2001) 156.
- (12) 川上養一, 島田順一, 藤田茂夫: “白色発光素子を用いた外科手術用照明ゴーグルの開発,” 応用物理, 71, 11 (2002) 1381.
- (13) J. Shimada, Y. Kawakami and Sg. Fujita: “Development of lighting goggle with power white LED modules,” to be presented at Photonic West 2003.
- (14) A. Zukauskas, F. Ivananskas, R. Vaicekauskas, M.S. Shur and R. Gaska: “Optimization of multichip white solid-state lighting source with four or more LEDs,” Proceedings of SPIE, 4445, (2001) 148.
- (15) 向井孝志, 中村修二: “白色および紫外LED,” 応用物理, 68, 2 (1999) 152.
- (16) 板東完治, 楠瀬健: “照明光源をめざした GaN 系発光ダイオード,” 応用物理, 71, 12 (2002) 1518.
- (17) M. Yamada, T. Naitou, K. Izuno, H. Tamaki, Y. Murazaki, M. Kameshima and T. Mukai: “Red-enhanced white-light-emitting diode using a new red phosphor,” Jpn. J. Appl. Phys. 42, 2 (2003) L20.
- (18) 日亜化学工業: “照明用電球色 LED の開発について,”
<http://www.nichia.co.jp/jp/info/news/new20021112.html>
- (19) 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: “High-power AlGaInN flip-chip light-emitting diodes,” Appl. Phys. Lett. 78, 22 (2001) 3379.
- (20) 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/jp/info/news/new20020304.html>