

近紫外発光デバイスの応用

田 口 常 正

Applications of Near Ultraviolet Light-Emitting Devices

Tsunemasa TAGUCHI

Applications of near ultraviolet (n-UV) light-emitting diodes (LED) are described. In particular, it has been suggested that n-UV-based white UV LEDs are useful for medical digestive endoscope and interior lighting in hospital. Unique applications are also presented for a possibility of medical disinfection devices which can inhibit bacteria growth such as *Helicobacter pylori*.

Key words: near-UV, medical devices, lighting, LED endoscope, disinfection

可視光線の最短波長は 380 nm であるが、一部の波長 (λ) の光 (例えば, 382 nm は UV-A と定義) は紫外線の領域に入る。人間の目は 380 nm までの光色を色別することができるので、虹の七色である紫色 (藍色) まで判定することが可能である。したがって、近紫外線が可視光と紫外線の一部と重なっており、厳密な区別は難しいが、ここでは、400 nm 前後 ($380 \text{ nm} < \lambda < 410 \text{ nm}$) の可視光領域に含まれる光を扱うことにする。

これまで、発光ダイオード (light-emitting diode: LED) とレーザーダイオード (laser diode: LD) は赤外線、可視光を放出する半導体材料が決まっており、それぞれの目的に応じて発光デバイスが作製されていた。しかしながら、400 nm 前後の近紫外発光デバイスの開発に特化した研究は、これまでほとんどなかった。1998 年以降、近紫外 LED と多色蛍光体を用いて、蛍光ランプと類似の原理で高演色性照明光源を開発しようと取り組んだのは、“21 世紀のあかり”プロジェクト (1998~2003 年) である¹⁻³⁾。また、DVD 用 LD の波長である 405 nm の青紫色 LD も近紫外発光デバイスのひとつである。

本稿では、近紫外発光ダイオードの応用に関する最新研究動向と、筆者の研究室が現在取り組んでいる、文部科学省知的クラスター創成事業における近紫外 LED の医科学

の応用機器開発について紹介する。

1. 紫外・近紫外 LED 光源の応用例

紫外・近紫外 LED は、三元、四元混晶半導体である InGa_N, AlInGa_N エピタキシャル膜をサファイア、SiC, AlN 等の基板の上に有機金属気相法 (MOCVD: metal organic chemical vapor deposition) によって作製する。外部量子効率 (η_e) は 365 nm LED で約 50%, 382 nm LED で約 30%, 405~410 nm LED で約 40% 以上の値が得られており、理論的には約 70% 以上に到達するものと推定されている⁴⁾。

表 1 の①は、水銀ランプ (365 nm) を半導体紫外 LED で代替可能な応用例を示す。また、②は、380~410 nm の近紫外 LED を用いた応用例を示す。すでに、製品化されているものとしては、近紫外 LED と RGB 蛍光体 (R: 赤色, G: 緑色, B: 青色) による白色 LED 照明・表示光源、および TiO₂ と近紫外 LED を用いた光触媒作用による消臭・殺菌装置である。

2. 近紫外励起白色 LED 照明のメリット

青色 LED 励起の白色 LED は、注入電流の増加に伴い黒体軌跡 (実線の曲線) からのずれを示す偏差が非常に大

表1 紫外・近紫外 LED の応用例^{5,6)}.

LED の波長	応用製品
① 300~380 nm	<ul style="list-style-type: none"> ・紙幣識別装置 ・紫外線樹脂光源 ・エアコン・空気清浄器 ・イルミネーション, バックライト用光源 ・各種光情報センシング用光源 (蛍光分析, 表面分析, 紫外線センサー等)
② 380~410 nm	<ul style="list-style-type: none"> ・車, 冷蔵庫用 TiO₂ 消臭装置 ・RGB 白色 LED 照明光源 ・イルミネーション・バックライト用照明

表2 知的クラスター事業における医工連携プログラム⁶⁾
—白色 LED, 近紫外 (紫色) LED の医療応用例.

医療機器の種類	応用例
医療用光源システム	<ul style="list-style-type: none"> ① 外科, 歯科手術用, 処置用光源 ② 院内照明光源 (ベッドライト, トイレ, 病室, 廊下など) ③ 消臭・殺菌 (手術室)
低侵襲医療機器	<ul style="list-style-type: none"> ① 手術ナビゲーションシステム (脳外科) ② LED 内視鏡 (消化器, 大腸など) ③ 光治療器 (うつ病, 季節障害 (SAD) など)
高性能診断機器	<ul style="list-style-type: none"> ① 動脈硬化診断システム ② 血管病診断機器 ③ 細胞・情報解析システム

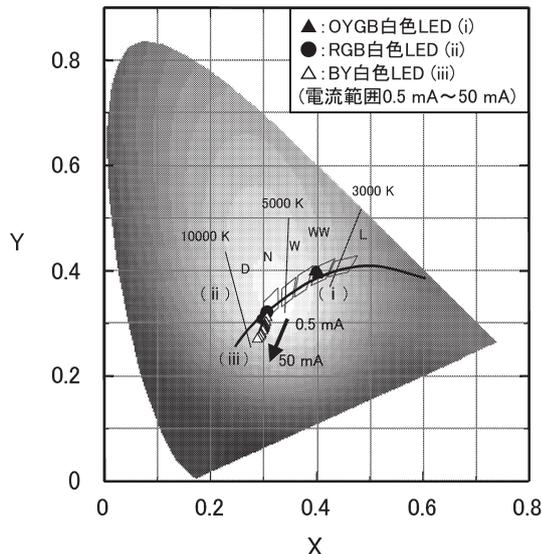


図1 3種類の白色 LED の色度の順方向電流依存性. 実線は黒体輻射の軌跡, 白色領域 (L: 電球色, WW: 温白色, W: 白色, N: 昼白色, D: 昼光色).

きい. 励起光自身が, 白色光の成分を形成しているのが原因である. また, 偏差が有彩色光とみなされない白色光領域内の変化ではあるが, 注入電流値の増加に伴い偏差がさらに増大することから, 発光色の安定した白色光を得ることが難しい²⁾.

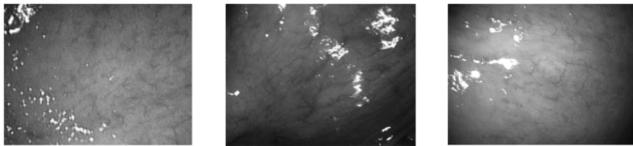
一方, 近紫外 LED 励起の白色 LED 照明の色度変化は, 等偏差線に沿って変化していることから, RGB 蛍光体の混合比により偏差を抑制することが可能と考えられる. 注入電流の増加に伴う色度変化と白色光の偏差も小さく, 発光色の安定した白色光を得られる. また発光効率も, 青色励起と同等以上であり, 注入電流依存性においては, 最もすぐれた特性を有している. 注入電流に依存した3種類の白色 LED 光源の発光色の変化を xy 色度図上に示したのが図1である. 図中, BY, RGB, OYGB は, それぞれ, 青色 LED 励起の YAG 黄色蛍光体からなる白色, 三原色白色, オレンジ, 黄色, 緑色, 青色の組み合わせの白色を示す.

3. 近紫外 LED と白色 LED 照明の医療への応用

筆者の研究室では, 2004 年から近紫外 LED と高演色性白色 LED (近紫外 LED と多色蛍光体の組み合わせ) を用いた医療機器・装置の開発を行っている⁶⁾. 山口大学医学部・大学病院と工学部による医工連携体制に基づいて, 表2に示すような応用を目指した研究を進めている. LED 照明光源を医科学の分野に応用しようとする, その安全性が十分に確認されていないと使用できない. 照明光ですら, 場合によっては, 人体に悪影響を及ぼし危険な光である. したがって, 光出力, 演色性, 光質, 色調, スペクトル分布, 配光特性等に関する照明特性は, 一般照明システムへ応用する場合より基準が高く, 医学部の倫理委員会の承認を得て, 動物実験, 臨床実験が行われ, はじめて光源・器具製品の開発に着手できる. 青色 LED による網膜傷害 (動物実験) の報告⁷⁾, 紫外線による人体への影響 (DNA の損傷) を十分認知して, 新光源開発に取り組む必要がある. 医学における LED 照明技術は, 従来のエレクトロニクスの技術の延長線上にあるのではなく, 高度な実装化技術と色彩・照明工学の融合技術が必要とされる.

3.1 高演色性白色 LED 照明システムの消化管内視鏡への応用

人間の皮膚, 粘膜, 血管等をはじめとする各種臓器はヘモグロビンの赤色に着色している. したがって, 自然光に近い, 光の三原色が含まれた平均演色評価数 ($R_1 \sim R_{15}$) の高い色再現性のよい白色光源が必要とされる. 図2は, 市販の電子内視鏡の先端に, 従来型の白色 LED (青色 LED と YAG:Ce 黄色蛍光体の組み合わせ) と近紫外 LED 励起の RGB 蛍光体による白色 LED を取り付け, 人間の口腔内粘膜を観察したものである. (a) はハロゲンランプを分光した白色光, (b) は青色 LED 励起の擬似白色 LED, (c) は近紫外 LED 励起の RGB 白色 LED によって撮影さ



(a) (b) (c)

図2 各種光源下における人間の口腔内内視鏡画像。(a) ハロゲンランプ、(b) BY 白色 LED、(c) RGB 白色 LED。

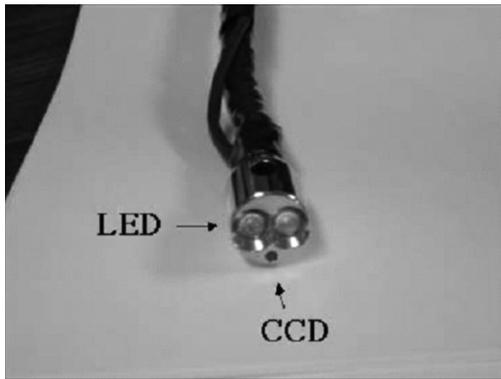


図3 開発した白色 LED 内視鏡 (消化器, 大腸用)。

れた写真である。図3に示した LED 内視鏡は、医学部第一内科、フジノンと共同で開発したものである。白色 LED の効率は、20 lm/W のものを2個取り付け、演色性は93以上である。また、平均白色評価指数（一般に、ホワイトバランスとよばれている）は約1と太陽光源に近い。カラー CCD が反射光を検出する同時方式による計測を行った。

図4は、ビーグル犬（メス）の消化器（胃内部）を LED 内視鏡にて観察した結果であり、食道、噴門および胃内壁のうっ血部も鮮明に識別でき、従来の面順次方式による撮像と遜色がないことがわかった。現在、大腸の観察も行っているが、すでに実用化に近い内視鏡が作製されている。

3.2 院内照明システム応用

病院の光環境の設計は、病院関係者のみならず患者にとっても非常に重要である。国内外の病院照明では、患者の視点に立った光環境のもとに照明設計がなされている。最も大事なことは、その光環境が患者をはじめ、医療従事者にとって不快でないこと、悪影響を与えない健康的な心を癒す光であることが要求される。したがって、非ランベルト配光をもつ局所的な照明の LED 光源が、これまでの白熱電球、蛍光灯等を代替し、健康的な病院のための照明計画ができるかどうか十分に検討する必要がある。特に、患者の肌の見え方には十分注意する必要がある。白色 LED 照明で的確な光色、相関色温度を出せるかどうかで

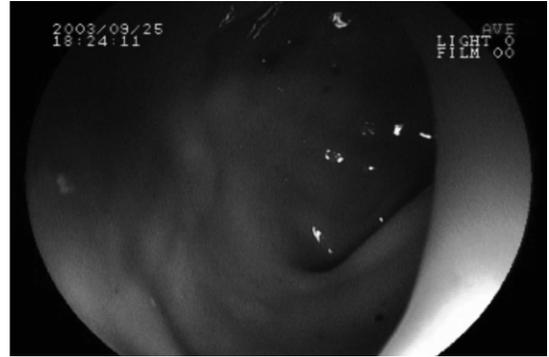


図4 ビーグル犬の胃内部（遠景～胃壁うっ血部）の画像（胃の内部における出血部分の観察例）。

ある。また、さまざまな色の光は人体に影響を及ぼしていることも知られている。目、皮膚に安全な波長と光出力、配光等に注意を払う必要がある。近年、夜間の青色 LED 照射（1 lx 程度でも）でメラトニンが抑制され、人体に影響があると報告されている。また、色温度の高い青色光で覚醒水準が上がり、自律神経機能が亢進し、体温低下がみられる等、LED の生体安全性について国際的な議論が活発化している。

以上のような観点から、鋭い青色光を含まない近紫外 LED 励起の白色 LED 照明の開発に期待がかけられている。

病院内の照明システムには、色温度が容易に可変できる光源が求められている。夏は涼しく高色温度の白色光、冬は暖かく低色温度白色光、食事時には食欲増進の赤色白色、リラックス時には森林浴のような緑白色が必要である。

図5に、近紫外 LED 励起の OYGB 白色 LED の構成図を示す⁹⁾。色度、光色を「何らかの方法」で可変制御することができれば、照射面の色調可変ができることにつながる。OYGB 分割光源が色彩を作り出せる範囲は色度座標上で広く設計でき、各 LED の光出力制御が可能になり、色域はさらに広がり、色度範囲を自由に可変することのできる光源を作り出せる⁹⁾。

また、演色性は蛍光体のブロードな発光を利用するため、可視発光のほとんどの波長を包括することができ、これまでに平均演色評価数 (R_a) が95を超えるスペクトルを生成できる。駆動回路も簡単である OYGB の蛍光は近紫外 LED のみを用いればよく、1系統の駆動回路で構成できることになる。後は、駆動回路に PWM など駆動電圧変調をかければ、発光量制御などが容易に行えるのである。この駆動回路の1系統化と発光色の分離を両立できる点で、この方式は色彩制御に対する優位性をもつ。配光

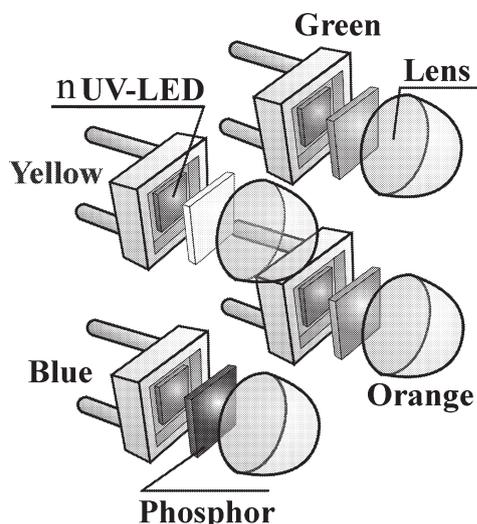


図5 近紫外LED励起蛍光体OYGB分離型白色LED.

の問題についても、3波長LEDと異なる。蛍光体を励起すると、その配光はランベルト配光に従う。このように、近紫外LED励起によるOYGB白色LEDは、有色LEDを並列に置いているのと同じように見えながら、まったく根本的な光性質を異にする光源であるといえ、色彩制御を行うのに最適な方式である。

本方式を利用して、スカイブルー、および緑白色を発光させ、光治療器、処置室用照明装置とそのシステムを作製した。

3.3 近紫外LEDによるピロリ菌の除菌効果

2005年度のノーベル生理学医学賞は、ヘリコバクター・ピロリ菌を発見したマーシャル教授とウオレン博士に対して与えられた。国内においては、ピロリ菌陽性の消化性潰瘍に対する除菌治療が保険適用となってから2年以上が経過し、臨床の現場でも、学会のガイドラインに沿った抗生剤を用いた除菌治療が広く行われるようになった¹⁰。除菌の試みとして、近紫外LEDを用いたピロリ菌に対する抗菌効果について検討した^{6,10}。

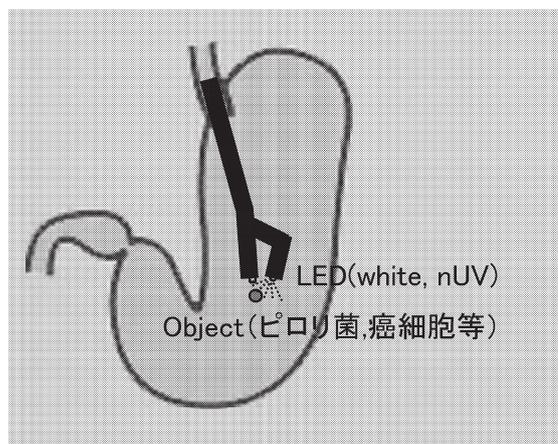


図7 白色LED内視鏡と近紫外LEDによるピロリ菌除菌装置を有する消化器内視鏡の概念図(田口による)。

2%ウマ血清加ブレンダ培地を用いて、3種類のピロリ菌(HPK5, HPKT510, NCTC11637)を微好気性下で2日間培養した。培地上の菌に対し、近紫外LED(波長約400nm)を用いて図6に示すように、5分、10分、30分、1時間および2時間照射し、培地上の菌発育状態を確認した。30分以上の近紫外LEDによる近紫外線照射により、照射部のみで菌の死滅を観測した。

近紫外LEDのピロリ菌に対する抗菌効果が認められ、新たな除菌療法への応用の可能性が示唆された。今後、図7に示すように、生体胃粘膜上皮細胞への近紫外LED照明の有害作用の有無を検討し、上部消化管内視鏡検査と併用した除菌療法を検討してゆく予定である。

これまでに、254nmおよび365nmの紫外光を体内に照射すると、体内で過酸化物質、ラジカル等が発生し、細胞に悪影響がおよぶことが懸念された。しかしながら、波長400nm程度の可視光領域に近い近紫外光を使えば、悪影響はほとんどないと推定されている。すでに、筆者らのグループは、近紫外LEDの照射により、種々の病原細菌数を感染、食中毒、病気が起こりうる閾値以下に低減させる

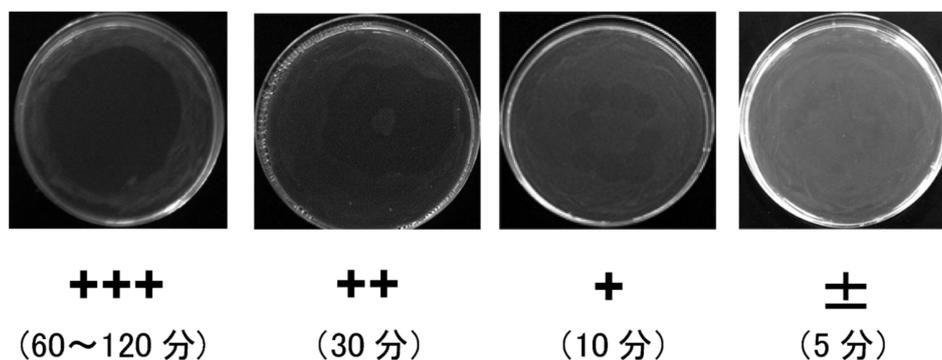


図6 ピロリ菌の近紫外LED(波長約400nm)の照射効果。

ことが可能であることを見いだしている⁹⁾。

近紫外 LED の高出力化と高集積化に関する安全な実装技術がキー・テクノロジーになり、将来、数百 mA で数 W クラスの光源が作製されると、消臭・殺菌に関する装置の開発が進み、安全性の高い医療機器の開発が行えるようになってくるものと考えられる。

これに伴って、高演色性蛍光体・樹脂材料技術の進歩により 2010 年までには、発光効率 100 lm/W で演色性 95 以上、白色指数 0.01 以下の超高性能白色 LED 照明が実現され、LED 内視鏡、腹腔鏡等の実用化、および病院・福祉・介護施設等医療機関の院内照明システムへの普及が急速に進むものと考えられる。近紫外 (400 nm 前後) LED の生体安全性を医学的に検証し、医療機器開発を進めてゆくことが重要である。

本研究は、文部科学省「知的クラスター」創成事業の一環として遂行された。成果の一部は、小橋克哉技術職員、内田裕士助手、フジノン、三菱電線工業、三菱化学、小泉産業、小糸工業および国立病院機構関門医療センター柳井秀雄医長、山口大学医学部第一内科西川潤助手、中村弘毅先生、生殖・発達・感染医科学白井睦訓教授、東慶直講師との共同研究である。関係各位に感謝する。

文 献

- 1) 田口常正：“未来のあかり，白色発光ダイオード”，日経先端技術，No. 14 (2002) 11.
- 2) 田口常正：“電球，蛍光灯に代わる白色発光ダイオード”，学術月報，**56** (2003) 925-931.
- 3) 田口常正：“高演色性白色 LED 照明用蛍光体の研究開発動向”，Mater. Stage, **5**, No. 6 (2005) 20-27.
- 4) T. Taguchi: “Overview, present status and future prospect of system and design in white LED lighting technologies,” Proc. SPIE, **5530** (2004) 7-16.
- 5) 平山秀樹：*Program Guide* (LEDEX Japan, 2005) pp. 145-162.
- 6) 「メディカル・イノベーション・クラスター」構想，平成 14，15 年度報告書（財団法人やまぐち産業振興財団，平成 15，16 年 4 月）.
- 7) 大谷義彦：“LED 光源の生体安全性規格化 WG 報告”，日本照明委員会誌，**21**, No. 2 (2004) 62-63.
- 8) 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，**89** (2005) 245-257.
- 9) 内田裕士，田口常正，木島直人：“光源，固体発光素子モジュール，蛍光体モジュール，配光素子モジュール，照明装置および画像表示装置，並びに光源の調光方法”，特願 2005-36688 (2005 年 2 月 14 日).
- 10) 中村弘毅，竹内信次，柳井秀雄，小橋克哉，田口常正，沖田極：“近紫外 LED 照明を用いた新規 H.B. ピロリ除菌法の基礎的検討”，第 10 回日本ヘリコバクター学会，東京 (7 月 1・2 日，2004).

(2006 年 1 月 10 日受理)