

# わが国初の白熱電球から、蛍光灯、LED照明へと 先導する照明技術

From Development of Japan's First Incandescent and Fluorescent Lamps to LED Lighting as Leading Lighting Technology

安田 丈夫 大川 秀樹

■ YASUDA Takeo ■ OHKAWA Hideki

東芝発祥の一つである白熱舎を興した藤岡市助は、竹を材料としたカーボンフィラメントを採用し、わが国初の白熱電球を1890年8月12日に完成させた。このカーボンフィラメントの構造を、非破壊ラマン散乱分光で解析した結果、乱層グラファイト構造を示しており、当時では困難と思われる不活性雰囲気中1,000℃以上の焼成技術で実現されたことが確認できた。

1940年には東京芝浦電気(株)(当時)で開発中の蛍光灯が、法隆寺金堂壁画模写用の照明として採用された。石油ショックを契機に1980年に登場した電球形蛍光灯は省エネ製品の象徴として約30年間改良を続けた。更に東芝ライテック(株)は、実用的な一般照明用LED(発光ダイオード)器具を他社に先駆けて2007年に市場投入した。今後は、発光効率が高く省エネ効果の高いLED照明が普及するとともに、調光・調色制御技術の開発がますます重要となる。

Ichisuke Fujioka, the founder of a company called Hakunetsu-sha that was one of the forerunners of Toshiba, succeeded in developing Japan's first incandescent lamp on August 12, 1890, using carbon filament made from bamboo. A century later, Toshiba investigated the structure of the carbon filament used in this epoch-making lamp by means of nondestructive Raman scattering spectroscopy and confirmed that the filament had been fabricated by a baking process at a temperature exceeding 1,000°C, which had been believed to be difficult at that time.

In 1940, Japan's first fluorescent lamps under development by Toshiba were applied to the lighting for a project to reproduce the murals at Horyuji Temple. Subsequently, as a result of the petroleum shortages following the oil crisis in the 1970s, attention was increasingly focused on energy conservation. We launched a lineup of integrated compact fluorescent lamps on the lighting market in 1980 as representative energy-saving products, and have been continuously improving the performance of such lamps over the past three decades. Recently, with the rapid dissemination of light-emitting diode (LED) lighting, we have been actively focusing on the development of not only environmentally conscious products with higher luminous efficacy, but also dimming and color control technologies for LED lighting.

## 1 まえがき

光源開発の歴史を振り返ると、白熱電球のようにフィラメントに電流を流し加熱によって得られる熱放射を利用するものや、蛍光灯のように気体放電中プラズマの励起原子からの紫外線を蛍光体で可視光変換するものなど、その発光原理は様々である。いずれも、いかにして入力電気エネルギーを効率よく光出力エネルギーに変換するかといった課題を解決することに取り組んできた。これは、次世代光源として期待されている有機EL (Electroluminescence) でもまったく同様である。

東芝ライテック(株)(1989年に分社)が実用的な一般照明用LED器具を他社に先駆けて2007年に市場投入してから<sup>(1)</sup>、早5年以上の年月が経っている。LED光源の基本は、励起源であるLED素子への電流の注入にあり、電子と正孔の再結合による青色のELとその青色光を励起源とした蛍光体による広範なフォトルミネッセンスとを利用したものである。

発光効率の向上とともに適切な製品寿命を確保するという工業的側面からは、適切な材料の選定とプロセスの開発が必須である。また、白熱電球の開発の当初から、光源と照明器具のインタフェースとして口金とソケットが重要な役割を果たし

てきた。現在のカタログに見られる電球形LEDランプのE26やE17口金のEは、エジソンのEに由来している。石油ショックによる省エネ要求を契機に1980年に誕生した電球形蛍光灯は、点灯回路を内蔵し、白熱電球のE口金を採用することで、配線工事をせずにそのまま白熱電球用の器具に取り付けることが可能になった。電球形LEDランプもまた同様である。

ここでは、これらの観点で白熱電球から蛍光灯、LED照明までの照明技術の歴史と特徴について述べる。

## 2 白熱電球—東芝1号機

### 2.1 白熱電球の歴史<sup>(2)</sup>

わが国における最初のカーボンフィラメント白熱電球12個が完成したのは、1890年(明治23年)8月12日のこととされている。竹から作成するカーボンフィラメントは任意の長さや太さにできないため、その後綿糸に変更された。1906年以降の生産高を見ると、1913年にカーボンフィラメント白熱電球は4,490千個であり、タングステンフィラメント白熱電球は3,157千個となっている。1917年には、カーボンフィラメント白熱電球はタングステンフィラメント白熱電球のわずか4%の生産高となり、この年

にはカーボンフィラメント白熱電球の生産が終了した。

1909年にラングミュアによって不活性ガス入り白熱電球の効率改善効果が高いことが発表されるとともに、General Electric Company (以下、GE社と略記)による窒素封入白熱電球の製造が始まった。東京電気(株)(1899年白熱舎から改称)も1915年に100 V100 Wのガス封入白熱電球を商品化した。更に、この効率改善に伴う輝度増大によって生ずるまぶしさを低減する目的で、ガラスバルブ内面に拡散性を持たせた艶消し電球、及びフィラメントの加熱効率を高める二重コイルを発明した。これらの技術が搭載された白熱電球の登場は1936年(昭和11年)のことであった。

## 2.2 カーボンフィラメントの構造<sup>(3)</sup>

当時のカーボンフィラメント(図1)の構造を、透明ガラスバルブを破壊せずに評価できる可視光励起によるラマン散乱分光で検証した。アルゴンイオンレーザー光(波長514.5 nm)をカーボンフィラメントに照射して得たラマン散乱スペクトル(強度分布)を図2に示す。比較のため、実際に竹を窒素ガス中で1,000℃で焼成して得たカーボンフィラメント、ガラス状カーボン、及びヘリウム(He)ガス中でカーボン電極をアーク放電して、陰極電極上に析出したカーボン堆積物のスペクトルも示す。

グラファイトは、 $sp^2$ 結合すなわちカーボン原子どうしが二重結合した六角形のハニカム構造のグラフェン層が積み重なった構造である。グラファイト構造の場合、ラマン散乱スペクトルの $1,585\text{ cm}^{-1}$ 近傍に現れるGバンドと呼ばれるピークに加えて、 $2,700\text{ cm}^{-1}$ 近傍にG'バンドと呼ばれるピークが現れるのが特徴である。一方、欠陥によりグラファイトの構造が乱れると、 $1,350\text{ cm}^{-1}$ 近傍にDバンドと呼ばれるピークが現れる。

藤岡電球のカーボンフィラメントではG'バンドが確認された。竹を1,000℃で焼成したカーボンにはG'バンドが見られていない。このことから、藤岡電球のカーボンフィラメントが、当時の技術では困難と思われる不活性雰囲気中1,000℃以上の雰囲気制御した焼成技術で実現されたことが確認できた。



図1. カーボンフィラメントの白熱電球 — 評価に用いた藤岡電球はフィラメントの構造から1890年代に製作されたものと推測される(東芝ライテック(株)保管)。

Incandescent lamp with bamboo-based carbon filament

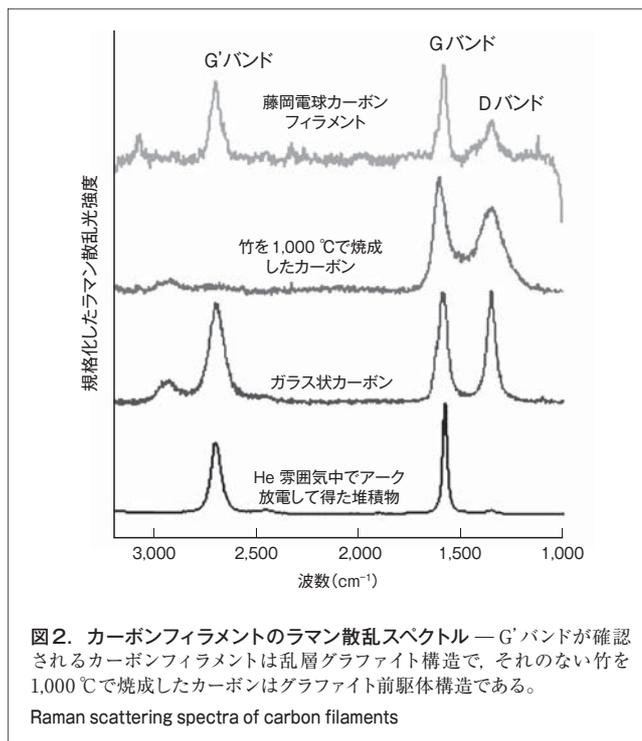


図2. カーボンフィラメントのラマン散乱スペクトル — G'バンドが確認されるカーボンフィラメントは乱層グラファイト構造で、それのない竹を1,000℃で焼成したカーボンはグラファイト前駆体構造である。

Raman scattering spectra of carbon filaments

## 2.3 白熱電球の発光

カーボンやタングステンフィラメントは電流を流すことによってジュール加熱されるため、これによって自由電子の運動エネルギーと、カーボンやタングステン格子振動エネルギーが増加する。自由電子が結晶格子の振動で散乱されるときに、電磁波(光)が放出される。温度に応じた発光波長のスペクトルは、プランクの法則によって決定される。白熱電球の発光スペクトルは、水銀ランプや蛍光ランプに見られるような特定の波長にピークがあるのではなく、波長に対して連続的なスペクトルを示すことが特徴である。

ある光源で照らされた場合のものの色の見えは、演色性の指標で評価される。基準となる光源(黒体放射)と試験する光源によって試験色を照明したときに生ずる色差を評価する。白熱電球のスペクトルは、黒体放射光源に近いので、白熱電球は長い間、物の色の見えについては高い評価を得てきた。しかし、蛍光ランプによる物の色の見えは、白熱電球とは異なったことから、演色性の評価指標が生じた。

## 3 蛍光ランプ — 第2世代

### 3.1 蛍光ランプ改善の概略<sup>(4)</sup>

仕事関数を低下させ電子放出を容易にするため、電極に酸化物を塗布した熱陰極を採用した蛍光ランプは、1938年にGE社のインマンらによって実用化された。わが国では、1940年の紀元2600年記念事業として行われた法隆寺金堂壁画模写用の照明として、東京芝浦電気(株)(1939年に(株)芝浦製作所

と東京電気(株)が合併が開発していた蛍光灯<sup>(注1)</sup>が用いられた。当時模写を行った和田英作画伯は、「白い柔らかい明るい光に映し出された壁画の芸術境にしばし陶酔し、われを忘れるばかりであった」と伝えている。

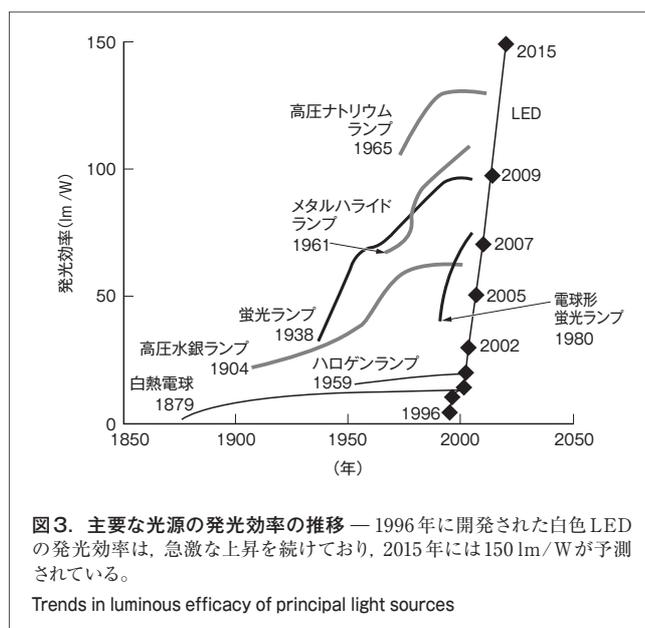
蛍光灯の発光色は、ガラス管内壁に塗布された蛍光体の種類によって決まる。1950頃～70年代末までの間は、発光効率の高いハロリン酸系蛍光体が主に用いられていたが、このランプのスペクトルは赤色成分が不足していたため、2.3節で述べたように被照射体の色の再現性が劣ることが問題となり、国際照明委員会(CIE)では演色評価という新しい評価指数を導入した。平均演色評価数Raは、黒体放射や昼光を基準の100として、減点法で色の忠実性を評価する指標である。減点の度合として温白色のハロリン酸蛍光灯の値が50程度となることをめどに減点の係数が決められた。

1980年代に入り、希土類蛍光体を用いた狭帯域発光形の3波長形蛍光灯が実用化された。このランプは、ハロリン酸蛍光灯と比べて、発光効率と演色評価数が高く、また高負荷条件でも寿命中の劣化が少ないという利点を持っていた。これらの利点により蛍光灯の細管化や継続的な小形化が可能になり、東京芝浦電気(株)は世界初<sup>(注2)</sup>のボール形状電球形蛍光灯を商品化した。

### 3.2 蛍光灯の終幕とLEDの台頭

電球形蛍光灯の技術開発は、省エネ光源として約30年間改良の努力がなされ、照明光源としてハード的にもソフト的にも最高レベルに至った<sup>(5)</sup>。しかしその後、新光源LEDの登場によって蛍光灯も主役の座を明け渡すことになった。

主要な光源の発光効率の推移を図3に示す。白色LEDは登場から20年足らずで既存の全ての光源を旧時代の産物に



変えてしまった感がある。白色LEDは、2000年代初頭から次世代光源として注目されてきたが、性能だけでなくコストを考慮したうえで実際の市場で受け入れられたのは、2007年以降のことである。

白熱電球、電球形蛍光灯、及び電球形LEDランプの比較を表1に示す。これら3種類のランプは、異なる発光原理によるものであるが、市場では同じ用途で使われる光源である。電球形LEDランプは、主要な特性である発光効率や寿命で他の光源を圧倒し、今後も表中の性能が年々向上していくことが予想される。残された課題は、単位光束(ルーメン)当たりの価格(表中の値は店頭実勢価格より算出)だけであり、既に

表1. 白熱電球、電球形蛍光灯、及び電球形LEDランプの比較  
Comparison of incandescent, integrated compact fluorescent, and LED lamps

ランプの種類	 白熱電球	 電球形蛍光灯	 電球形LEDランプ
単位光束当たりの価格 (円/lm)	0.1 ~ 0.2	0.5 ~ 1	2 ~ 5
発光効率 (lm/W)	10 ~ 20	50 ~ 80	50 ~ 118
寿命 (h)	1,000 ~ 2,000	6,000 ~ 12,000	20,000 ~ 40,000
鉛直方向配光角	300°	260°	130 ~ 300°
調光の容易さ	容易	比較的困難	比較的容易
色の種類	色温度 2,800 K	任意	任意
平均演色評価数	通常は99以上	80程度	70 ~ 90
周囲温度特性	発光効率の温度依存性は微少	低温、高温ともに発光効率が低下	高温で発光効率が低下
光束立ち上がり特性	0.1 s程度	数分	電源起動時間に依存、数ms程度

(注1) 後に製作された複製ランプの測定値では相関色温度6,500 K、平均演色評価数Ra94。

(注2) 1980年7月時点、当社調べ。

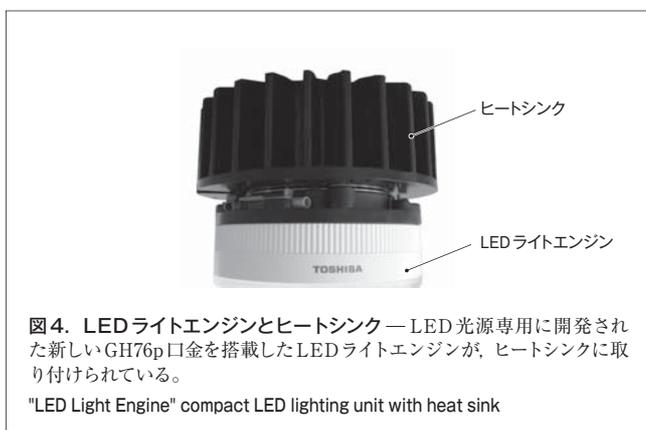
各社のコスト競争が激化している。

## 4 LED照明—第3世代

光源の効率、電力1W当たりの光束で表され、理論的な限界値は、ロスがまったくなく人の目の感度をもっとも高い555 nmの波長の光に変換した場合の683 lm/Wである。しかし、照明用光源には単色光ではなく多くのスペクトルを含んだ白色光が求められるので、理論限界は330 lm/W程度となる。現在の青色光で蛍光体を励起発光させる方式では、励起光よりも発光が長波長にずれるストークスシフトロスのため、270 lm/W程度とされている。白色LED製品の発光効率トップ値は200 lm/Wに近づきつつあり、照明器具として電源ロスや光学ロスを含めても150 lm/W以上の製品が可能になった。放電プラズマを利用した光源は、主に金属蒸気原子発光を利用しており、始動や調光の制御が難しく、発光効率の大幅な向上も見込まれないため、一般照明用のほぼ全ての光源や器具がLEDに置き換わっていくと考えられる。

電球形LEDランプが従来ソケットに取り付けられる光源の代表であるが、必ずしもLEDの特長を最大限に生かした形態の光源とは言い難い。LEDは高温下で発光効率が低下するため、光源部の熱を直接ヒートシンクに逃がすことが望まれる。このような背景を元に、LED専用の新しいGH76p口金とソケットシステムを開発した<sup>6)</sup>。この口金を搭載したLEDライトエンジンをヒートシンクに取り付けたようすを図4に示す。この口金とソケットシステムが持つ機能には、従来の機械的・電気的接合に加えて、熱的な接合も含まれている。現在、Zhagaコンソーシアムという団体で、LED用の口金とソケットの仕様が議論されており、IEC (国際電気標準会議) 規格への移行を準備している。

LED照明は省エネを実現するだけでなく、制御の容易性という観点から、調光や調色機能を提供できる。複数色のLEDチップを搭載し、電球色から昼光色まで可変色となる照明器具は、日本の住宅用シーリングでは既に当たり前の機能となっ



ており、今後は店舗やオフィスなどにも普及が進んでいくと思われる。照明の光色は心理的な効果によって選択されるだけでなく、人の一日のリズム(サーカディアンリズム)といった生理的な効果にも影響を及ぼす。これは、波長の短い青色光を多く含んだ光のほうが、眠けを誘うメラトニンというホルモンが脳の松果体から分泌されるのを抑制するという作用に基づく。

## 5 あとがき

東芝発祥の一つである白熱舎を興した藤岡市助らによって開発された、歴史的資産であるカーボンフィラメント電球のカーボン状態を非破壊ラマン分光によって解析し、フィラメントは当時の技術レベルでは困難と思われる1,000℃以上の高温環境下で焼成されたことがわかった。

このような技術開発を積み重ねることで、蛍光ランプの時代を経て、今ではLED光源が発光効率や寿命、制御性で他の従来光源を上回っている。今後も更に省エネ性能の向上が見込まれる一方、可変色制御LED器具など、人の心理や生理に適したLED照明を開発していくことが求められている。

## 文献

- (1) Shimizu, K. "Development of High-Efficiency LED Downlight". 1st International Conference on White LEDs and Solid State Lighting. Tokyo, 2007-11. Illuminating Engineering Institute of Japan. p.213-216.
- (2) 本城 巖. わが国における白熱電球の発達. 東芝レビュー. 4, 4, 1950, p.25-30.
- (3) Ohkawa, H. "Raman Scattering Spectroscopy for Historical Incandescent Lamps with a Carbon Filament, Hg-Free HID lamps and OLEDs". Proceedings of the 13th International Symposium on the Science and Technology of Lighting. Troy, NY, USA, 2012-06. Rensselaer Polytechnic Institute's Lighting Research Center. p.111-116.
- (4) 原田常雄 他. 蛍光ランプ実用化50年特集. 照明学会誌. 72, 5, 1988, p.231-278.
- (5) 安田丈夫. "電球形蛍光ランプ". 電気学会研究会資料 電気学会顕彰「でんきの礎」における民生関連対象の技術史及び技術史一般. 東京, 2012-01, 電気学会 電気技術史研究会. p.19-23.
- (6) Yasuda, T. et al. "A Series of Flat Shaped LED light Engines with a Heat-Transfer Solution". Proceedings of the 13th International Symposium on the Science and Technology of Lighting. Troy, NY, USA, 2012-06, Rensselaer Polytechnic Institute's Lighting Research Center. p.261-262.



安田 丈夫 YASUDA Takeo, D.Eng.

東芝ライテック(株) 技術本部 研究開発センター長, 博士(工学)。LED照明の制御, 器具, 光源の研究・開発に従事。照明学会専門会員。  
Toshiba Lighting & Technology Corp.



大川 秀樹 OHKAWA Hideki, D.Sc.

東芝ライテック(株) 技術本部 研究開発センター, 理博。LED照明用光源の研究・開発に従事。照明学会, 応用物理学会, 電気化学会会員。  
Toshiba Lighting & Technology Corp.