

高効率コンパクト形蛍光灯ダウンライト

High-Efficiency Downlight with Compact Fluorescent Lamp

中辻 光彦* ・ 松原 敏夫* ・ 笹川 知宏** ・ 小寺 隆介** ・ 飯田 史朗*** ・ 杉本 浩***
Mitsuhiko Nakatsuji Toshio Matsubara Tomohiro Sasakawa Ryusuke Kotera Shiro Iida Hiroshi Sugimoto

非住宅向けダウンライトにおいて、最冷点位置が発光管の先端中央部にある「コンパクトスパイラル蛍光灯」を採用し、反射鏡からの反射光が当りにくい器具構造とすることによって最冷点温度を低減するとともに、実使用時の器具内温度条件で出力光束比が最大となる特性を見だし、反射率 98 % の銀蒸着反射鏡と併せて器具効率 68 % を達成した。これにより、従来の 100 W 白熱灯ダウンライト（埋込穴径 125 mm）と同等の明るさで 76 % の電力削減を実現し、埋込穴径 100 mm に取り付け可能な小型で高効率なコンパクト形蛍光灯ダウンライトを開発した。

また、インバータ周波数と無負荷共振周波数がほぼ等しくなるように設定し、昇圧チョップ回路を有するインバータブロックの開発により、W（ワット）フリー、V（ボルト）フリーを実現した。さらに、このブロックはランプ電圧をモニタすることでランプ寿命末期のランプ異常を検出し、インバータブロックの発振を停止させることで器具の安全性を高めている。

In the field of non-residential downlights, a fixture efficiency of 68 % has been achieved by adopting a compact spiral fluorescent lamp with its coolest point located at the center tip of the lamp, reducing the coolest point temperature by designing a structure to reduce exposure to the reflected beam from the reflector, designing the lamp to produce the maximum light flux rate at the temperature inside the fixture during actual use, and combining with a silver-sputtered reflector delivering a 98 % reflection rate. The developed fluorescent downlight has achieved a 76 % reduction in power consumption compared with a conventional 100 W incandescent light (built-in hole diameter 125 mm) of comparable illuminance, and its compactness enables installation in a 100 mm diameter hole.

The developed inverter block with a step-up chopper circuit designed with an inverter frequency approximately identical to the no-load resonance frequency can operate without wattage or voltage restrictions. In addition, this block ensures the safety of the fixture by monitoring the lamp voltage for detecting the end-of-life condition of the lamp and stopping the inverter oscillation.

1. ま え が き

2005 年 2 月の京都議定書の発効により、温室効果ガス排出量の大幅な削減目標が定められ、2006 年 4 月にはその目標達成を目指して省エネルギー法が改正施行された。これにより、建物のエネルギー消費のなかで高い割合を占める照明設備に関しても、エネルギー消費量の削減が求められている。

このように、省エネルギーの観点から埋込型照明器具においても白熱灯から蛍光灯への切替が進み、コンパクト形

蛍光灯ダウンライトが普及してきている。しかし、一般的に蛍光ランプは白熱電球に比べて光源サイズが大きい照明器具も大きくなり、小型化が要求される空間演出用の照明器具には、現在でも小口径の白熱電球用やハロゲン電球用の白熱灯ダウンライトが多く使用されている。そこで、白熱灯と同等サイズの小型で高効率な蛍光灯ダウンライトの開発が強く望まれているが、その実現のためには小型サイズでの高効率化と温度上昇の低減が課題となる。

筆者らは、松下電器産業株式会社と共同開発した「コンパクトスパイラル蛍光灯」と、銀蒸着膜の形成技術で反射

* 照明事業本部 ナショップ・調光システム事業部 Nashop & Lighting Control System Division, Lighting Manufacturing Business Unit

** 照明事業本部 照明基幹デバイス総合部 Lighting Devices Development & Manufacturing Division, Lighting Manufacturing Business Unit

*** 松下電器産業株式会社 照明社 Matsushita Electric Industrial Co., Ltd Lighting Company

率 98 %を達成する銀蒸着反射鏡の開発により、埋込穴径 100 mmで業界最高効率を実現するとともに、3種類の異なるワット数ランプおよび電源電圧 100～242 Vに対応できる高効率なコンパクト形蛍光灯ダウンライトを開発したので以下に述べる（図 1）。

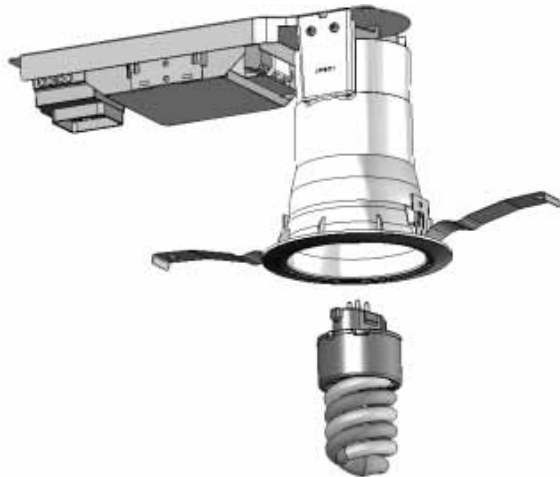


図 1 高効率コンパクト形蛍光灯ダウンライト

2. 目標仕様と課題

2.1 目標仕様

100 W 反射形投光電球を使用した白熱灯ダウンライトと同等以上の明るさ、サイズ、省エネルギー性能等の目標仕様を表 1 のとおり設定した。

白熱灯ダウンライトと同等の光束を出力するためには、20 W「コンパクトスパイラル蛍光灯」使用時に 68 %以上の器具効率を達成する必要がある。

表 1 目標仕様

	目標値	白熱灯 ダウンライト
ランプ種類	「コンパクトスパイラル 蛍光灯」	反射形投光電球
埋込穴径 (mm)	100	125
適合ランプ	20 W, 15 W, 11 W 3種類	100 W
ランプ光束 (lm)	1500, 1100, 800 (20 W) (15 W) (11 W)	1200
電源電圧 (V)	100～242	100
消費電力 (W) (システム)	25以下 (20 W使用時)	100
器具効率 (%)	68以上 (20 W使用時)	85 (100 W使用時)
器具外光束 (lm) (ランプ×器具光束)	1020以上 (20 W使用時)	1020 (100 W使用時)

2.2 課題

目標の器具サイズと明るさを達成するには以下の二つの課題がある。

(1) 高効率化

100 W 白熱灯ダウンライトと同等の明るさを埋込穴径 100 mmで実現するためには小型化と高効率化を両立させなければならない。

一般的に蛍光灯は、発光管内の水銀蒸気圧が周囲温度によって変化することにより発光効率が変り出力光束が変化する。また、水銀蒸気圧は発光管の管壁のもっとも低温となる箇所（以下、最冷点位置と記す）の温度（以下、最冷点温度と記す）に依存する。

従来の埋込穴径 100 mm の 6 本管形コンパクト形蛍光灯（以下、FHT と記す）では、器具へ組み込んだときは周囲温度が高くなることから最冷点温度も 64 ℃と高くなる。図 2 に FHT の最冷点温度と光束の関係を示す。

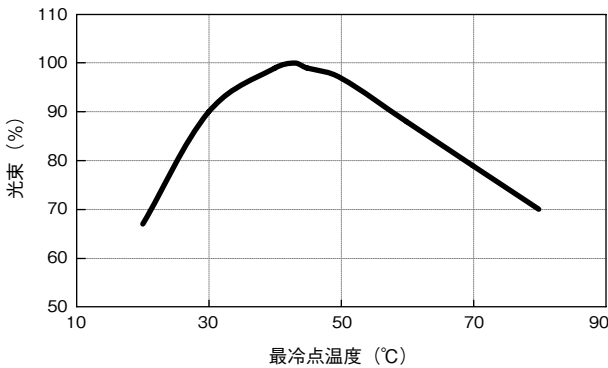


図 2 FHT の温度特性

FHT では最冷点温度が 64 ℃になると、定格光束の約 80 %の出力となり、反射鏡での反射損失も含めると器具効率の実測値は 55 %に低下する。したがって、目標である 68 %以上の器具効率を得るためには、小型器具内部の周囲温度が高くなる条件でも出力光束比が高くなる温度特性を有する蛍光灯の開発が必要となる。

(2) 温度上昇への対応

器具を小型化すると蛍光灯口金樹脂部の温度が急激に上昇することが予想され、樹脂の熱的劣化や溶融による口金部の変形や変色が懸念される。したがって、これらを防止するためには口金部の温度低減が必要となる。とくにランプ寿命末期に発生する電極の発熱による口金内部の温度上昇に耐える蛍光灯、ソケット、照明器具部材の耐熱性強化と、急激な蛍光灯の昇温を未然に防止する新たなインバータブロックの開発が必要になる。

これらの課題を解決するために、小型と高効率を実現する新形状の発光管を備えた蛍光灯、高反射率反射鏡、省エネルギーと高い安全性を実現するインバータブロックとソケットを新たに開発したので、以下にその詳細を述べる。

3. 高効率蛍光ランプ

小型で高効率な 11 W、15 W、20 W の 3 種類のコンパクト形蛍光ランプを実現するにあたり、スパイラル形発光管を採用した「コンパクトスパイラル蛍光灯」を松下電器産業株式会社と共同開発した。

3.1 ランプの特徴

「コンパクトスパイラル蛍光灯」の構成とその特徴を以下に示す。

- (1) スパイラル形発光管の採用と、電極部を口金の内部に配置することによって小型化と高効率化を両立。
- (2) 最冷点位置を発光管中心に配置することによる器具へ組み込んだときの最冷点温度上昇の低減。
- (3) 器具へ組み込んだときの周囲温度が高温側へ移行することを考慮した最大発光効率の実現。

(1) については、従来の 4 本管形コンパクト形蛍光ランプ（以下、FDL と記す）や FHT とは異なるスパイラル形状の発光管を採用し、放電距離を 400 mm と FDL の約 1.8 倍、FHT の約 1.5 倍に長くすることで発光面積を大きくして高効率化を達成している。また、電極の位置を口金の外側から内側に配置した管径 8.5 mm の細形発光管の採用により、従来の FDL に対し約 46 %、FHT に対し約 11 % の小型化を実現している（表 2）。

表2 発光管形状比較

発光管形状	FDL	FHT	スパイラル形
外観			
光束 (lm)	800	800	800
発光管電力 (W)	13	12	11
全長 (mm)	83	71	63
外径 (mm)	43	36	36
放電距離 (mm)	220	270	400

(2) については、従来の FHT の最冷点位置は発光管の先端側にあり、発光管先端側面部に反射光が当たるため最冷点温度は 64 °C である。一方、「コンパクトスパイラル蛍光灯」は最冷点位置を発光管先端中央にすることで、器具の反射鏡から反射光の影響を受けにくい構造としているため、器具へ組み込んだときの最冷点温度は 53 °C であり、従来品と比較して 11 °C 低減が可能である（図 3、図 4）。

(3) については、JIS C7618-2 片口金蛍光ランプ性能規定により周囲温度 25 °C の特性が定格特性として定められている。したがって、一般的にランプ性能はその定格特性

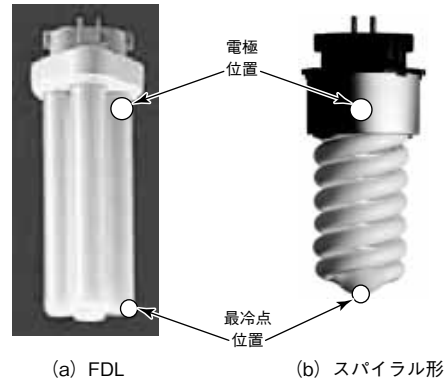


図3 電極位置，最冷点位置比較

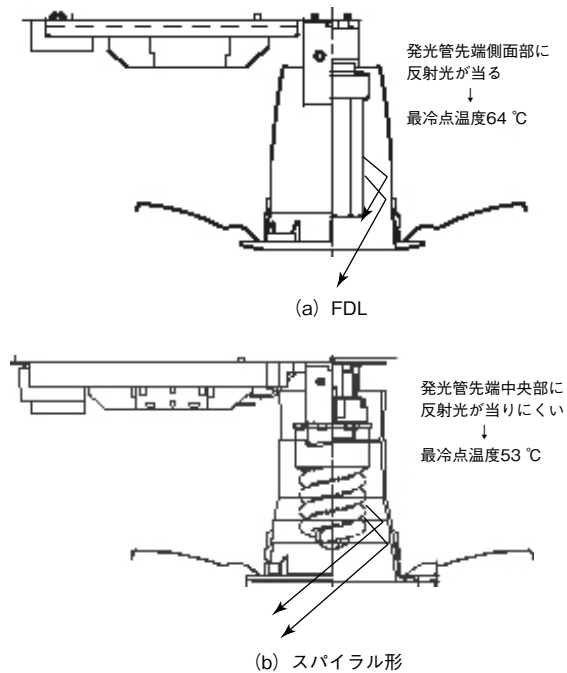


図4 器具内部における最冷点温度比較

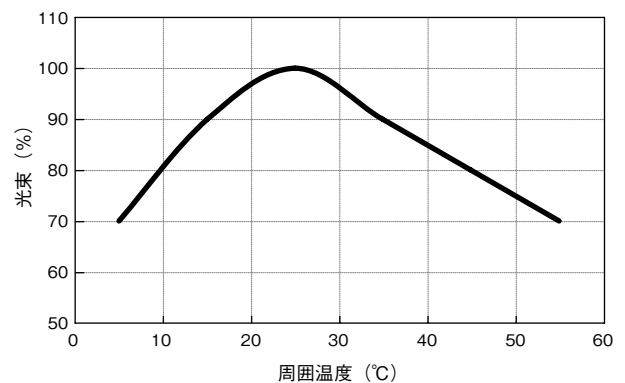


図5 従来蛍光ランプの周囲温度特性

値を最大とするために、周囲温度が 25 °C で最大出力光束となるように設計されている（図 5）。一方、実使用状態の器具内ではランプの周囲温度が 30 ～ 40 °C まで上昇することから、結果的に出力光束が低下する。このため、小型

の照明器具で使用することを考慮すると、ランプの周囲温度が高温となる条件下でも出力光束比が低下しない温度特性を有する蛍光ランプが必要となる。

出力最大時の周囲温度が 25℃、30℃、40℃となる温度特性を有する 3 種類の蛍光ランプとアルミニウム反射鏡で器具効率を測定した結果を図 6 に示す。これより、30℃仕様で器具効率が最大となることが確認できる。一方、25℃仕様の場合は周囲温度が高い器具内では大きく光束が低下することから器具効率が低い結果となっている。また、40℃仕様の場合は周囲温度が高い器具内でも光出力は大きくなるが、ランプ電力も上昇することでさらに周囲温度が上昇するため器具効率は大幅には上昇しない結果となっている。したがって、30℃仕様の場合は器具内で最高効率を達成可能な最適温度特性と判断し、周囲温度 30℃で最大出力光束となる発光管形状を採用する。しかし、この場合でも器具効率は 49% が限界であり、目標達成のためにはさらに反射鏡の光学特性と反射率の向上を実現しなければならない。

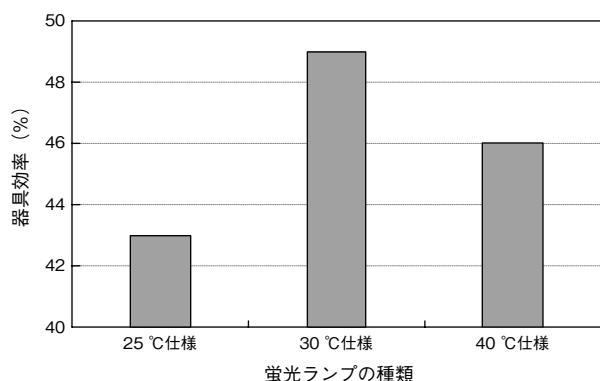


図6 器具効率比較

3.2 ランプの寿命末期温度上昇

従来の FDL や FHT の電極は口金の外側にあるが、「コンパクトスパイラル蛍光灯」では電極位置を口金内部とされているため、ランプ寿命末期時の電子放射物質（以下、エミッタと記す）が消耗して電極が異常過熱することによる口金樹脂の軟化、あるいは溶融に対する配慮が必要となる。そこで、ホルダ部には熱伝導率が高く局所的な温度上昇を緩和することができるアルミニウム材料を採用し、口金部には高い耐熱性を有する PPS 樹脂を採用している（図 7）。

さらに、インバータブロックにランプ寿命末期の異常を検知してランプの点灯を停止する回路を導入することで口金樹脂の溶融を回避している。この検知回路の内容は 5 章で説明する。

4. 高効率反射鏡

4.1 光学特性の最適化

光むらがなく均一に下面を照射することとランプから出

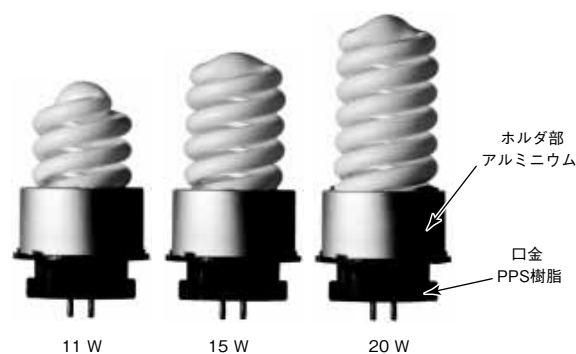


図7 「コンパクトスパイラル蛍光灯」

た光が反射鏡に反射してランプの最冷点部に照射されないように最冷点温度の上昇を抑制することによって、器具効率が最大となるような光学制御を行う。なお、器具取付高さが 2.5～3 m、取付間隔が約 2 m の条件で床面の照度均斉度を高めるため、照射角度が 20～30°で最大光度となるランプ光束配分が可能な反射鏡形状としている。

図 8 にこの配光データを示す。

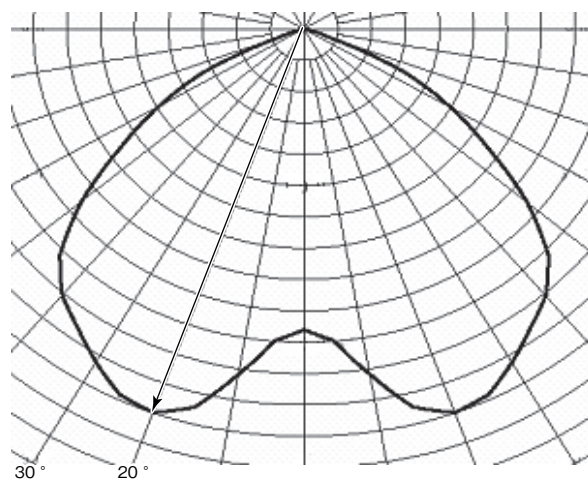


図8 配光測定データ

4.2 高効率銀蒸着反射鏡

反射鏡の反射率を高めるため、基材の PBT 樹脂を前述の光学制御を施した反射鏡形状に成形する。その基材の反射面にアンダーコート（下塗塗装）を施し、その上に高純度の銀蒸着膜を形成した後、トップコート（上塗塗装）を施す（図 9）。

その結果、98%の反射率を達成して従来のアルミニウム反射鏡では限界にあった器具効率 55% を目標値である 68% まで向上させ、約 1.2 倍の明るさを実現している（図 10）。

5. インバータブロック

開発した「コンパクトスパイラル蛍光灯」用インバータブロックの主な目標性能を以下に示す。

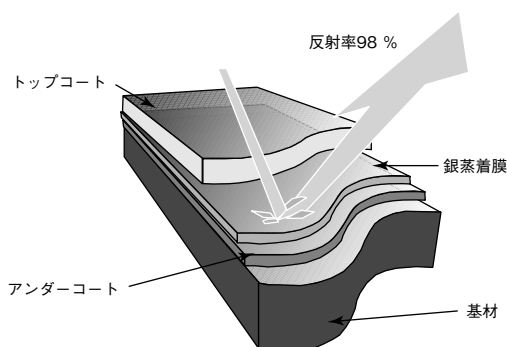


図9 銀蒸着反射鏡

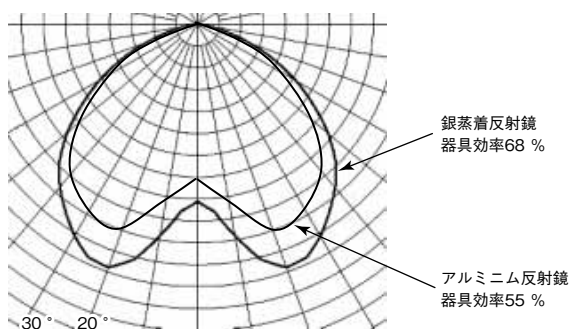


図10 配光測定比較データ

- (1) 11 W, 15 W, 20 W「コンパクトスパイラル蛍光灯」を定格点灯させる W（ワット）フリー機能付き。
- (2) 定格入力電圧 100 ～ 242 V に対応できる V（ボルト）フリー機能付き。
- (3) 20 W「コンパクトスパイラル蛍光灯」点灯時の消費電力は 25 W 以下。
- (4) ランプ寿命末期時は確実に異常を検出し、不安全モードを回避。

5.1 基本回路構成

図11に開発したインバータブロックの基本回路構成を

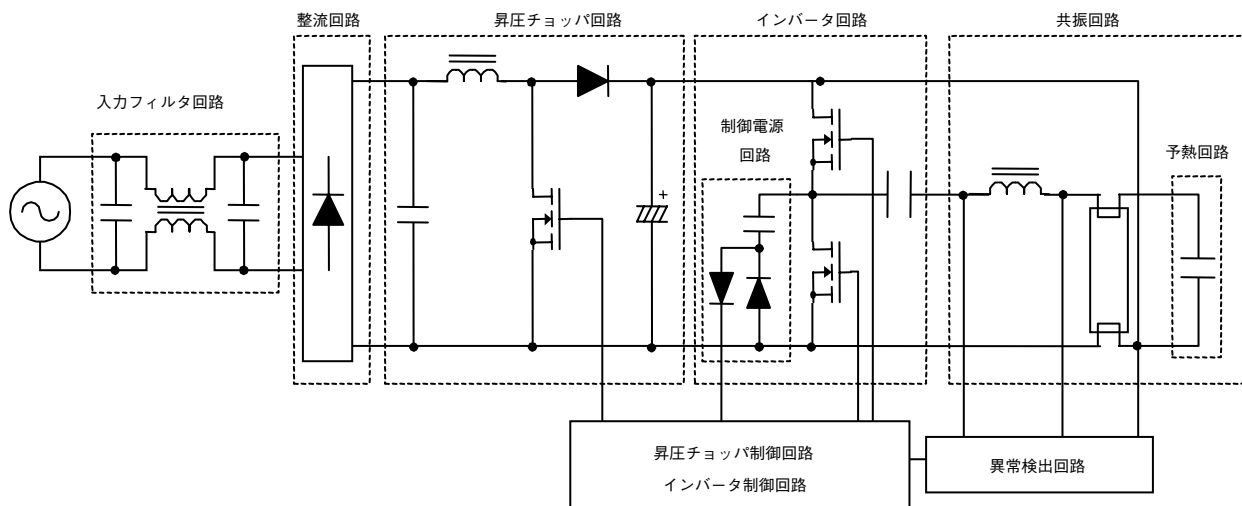


図11 基本回路構成

示す。インバータ回路はハーフブリッジ構成で、制御電源はスナバコンデンサを介して制御回路に供給する方式を、予熱回路はフィラメントを介して共振電流を流すコンデンサ予熱方式を採用することにより小型化に配慮している。また、予熱回路を含む共振回路に定電流特性をもたせることにより、ランプ定格寿命を満足し、消費電力が最小となる W フリーを実現している。さらに、V フリーを実現するために昇圧チョップ回路を採用している。異常検出回路はランプ電圧をモニタすることで、ランプ寿命末期のランプ異常を検出し、インバータブロックの発振を停止させる。

5.2 Wフリー・Vフリー機能

11 W, 15 W, 20 W「コンパクトスパイラル蛍光灯」のいずれのランプが装着されても定格出力で点灯する機能をもたせるために、ランプの種類を判別しておおののランプに対応して出力を可変するのではなく、それぞれのランプの定格ランプ電流が同じであることを利用し、共振回路に定電流特性をもたせることで W フリーを実現している。

図12の共振回路において、ランプ電流 I_R は式(1)で表される。

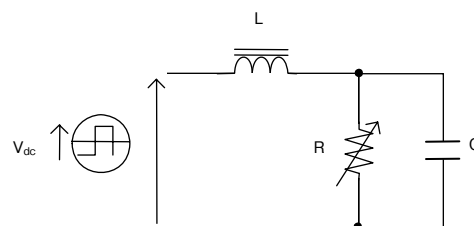


図12 共振回路

$$I_R = \frac{1}{R(1 - \omega^2 LC) + j\omega L} \cdot \frac{V_{dc}}{2} \quad (1)$$

$$\therefore f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad I_R = \frac{1}{j\omega L} \cdot \frac{V_{dc}}{2}$$

ここで、 R は蛍光ランプの等価抵抗、 L はインダクタ、 ω は角速度、 C はコンデンサ容量、 V_{dc} はインバータ電源電圧、 f_0 は無負荷共振周波数を表す。

したがって、インバータ周波数が無負荷共振周波数 f_0 近傍にあるときは、 I_R は R に依存せず、インバータ周波数、 L 、および V_{dc} によって決まる。

開発品はインバータ周波数と無負荷共振周波数がほぼ等しくなるように設計されている。さらに、昇圧チョッパ回路を採用することにより、入力電圧が 100 V、200 V、242 V のいずれが入力されても、またランプも 11 W、15 W、20 W のいずれが装着されてもインバータに供給される電圧 V_{dc} は一定となり、V フリー・W フリーを実現している。

「コンパクトスパイラル蛍光灯」は定格ランプ電流が低く、共振回路に流れる共振電流が少ない。したがって、制御電源確保のため、スナバコンデンサの容量を大きくする必要があるが、インバータスイッチにスナバコンデンサの充放電電流が流れ、スイッチの発熱や故障の原因となる。そこで開発したインバータブロックは共振回路の f_0 とインバータ周波数を約 110 kHz の比較的高い周波数にすることで、スナバコンデンサ容量が小さくても制御回路に十分な電源を供給可能としている。

ランプ寿命に関しては、以下の 2 点に配慮している。

- (1) フィラメント先行予熱時はランプ両端に印加される電圧を抑え、電子の放出に十分な予熱電流を供給する。
- (2) 点灯時は予熱過剰によるエミッタの蒸発と予熱不足によるスパッタを回避し、適切な電極温度とする。

開発品ではいずれのランプを装着しても、定格寿命 10000 時間を満足し、消費電力も最小となる。

各ランプ使用時の消費電力の測定値を表 3 に示す。20 W ランプ使用時の消費電力は 24 W となり、白熱電球 100 W と比較して 76 % の電力削減を達成している。

表 3 各ランプでの消費電力

ランプW数	消費電力 (W)
20 W	24
15 W	19
11 W	16

5.3 寿命末期安全性への対応

「コンパクトスパイラル蛍光灯」は、小口径器具に適合させるためランプフィラメントが口金内部に存在していることから、ランプ寿命末期時にフィラメント付近の急激な温度上昇による口金樹脂の溶融やランプの落下が懸念される。したがって、ランプ寿命末期のランプ異常を検出するために以下の三つの回路を盛り込んである。

- (1) ランプ DC 電圧検出回路

- (2) ランプ AC 電圧検出回路

- (3) フィラメント断線検出回路

(1) はランプ寿命末期時にフィラメント片側のエミッタが消耗することにより生じるランプ電圧の非対称モードを検出するものである。片側のエミッタが消耗すると、電子放射能力が低下するため、ランプ電圧が正負非対称になる。このランプ電圧の非対称により発生する DC 電圧を検出し、インバータブロックの発振を停止する。

(2) は主にガラス管や封止部のクラックによるリーク（発光管内に空気が入り込む状態）等が原因で、ランプ電圧が対称的に大きくなるモードを検出するものである。このランプ AC 電圧を検出し、インバータブロックの発振を停止する。

(3) はフィラメントの断線やフィラメントコイルのかしめ不良による断線、あるいは器具のランプ線接続不良などを検出し、インバータブロックの発振を停止する。

6. ソケットの開発

6.1 専用口金・受金の選定

11 W、15 W、20 W「コンパクトスパイラル蛍光灯」は、前述の専用インバータブロックとの組合せで動作するため、既存のコンパクト形蛍光ランプ（図 13）と互換性のない専用の口金・受金の選定が必要となる。

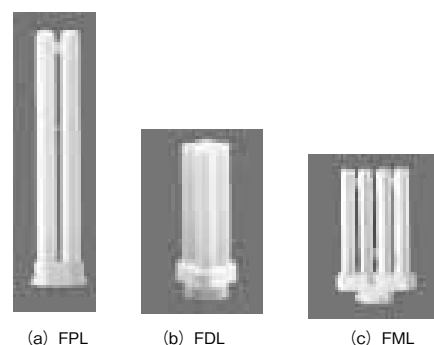


図 13 既存のコンパクト形蛍光灯

そこで、JIS C7709-1（電球類の口金・受金及びそれらのゲージ並びに互換性・安全性）に規定されている口金・受金のなかから、既存のコンパクト形蛍光ランプに使用されていない回転式の着脱方式として GX10q-5 の口金を選択している。表 4 に GX10q 型口金の種類と既存のコンパクト形蛍光ランプに使用されている口金を一覧として示す。

FPL は 2 本管形蛍光ランプ、FDL は 4 本管形蛍光ランプ、FML は並列 4 本管形蛍光ランプの略語である。なお、GX10q とは口金・受金の基本形状を表し、末尾の数字は誤使用防止キーの種類を示す。

表4 市場のランプのGX10q口金使用状況

口金	ランプ
GX10q-1	FPL4, FPL6, FPL9, FDL9, FML9
GX10q-2	FPL13, FDL13, FML13
GX10q-3	FDL18, FML18
GX10q-4	FDL27, FML27
GX10q-5	使用なし
GX10q-6	FML36

6.2 ランプ着脱操作方式の設定

現行のFDL用ソケット（GX10q-1～GX10q-4受金）のランプ着脱操作方式は、ランプをソケットに挿入し、向かって右方向に回転させ、口金の突起部がソケットのランプ固定ばねに固定されて装着完了となる（図14、図15）。

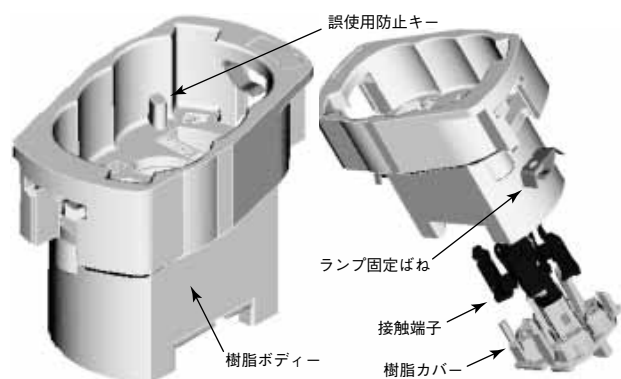


図14 現行FDL用ソケットの構造

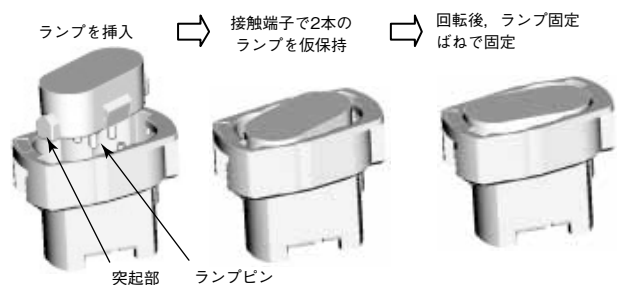


図15 現行FDL用ソケットの操作方式

この着脱方式では、ランプを回転させながら挿入する際、回転途中で機械的保持が不確実な状態でもランプ固定ばねの作用によりその位置で保持される場合があり、この状態でも電源を入るとランプは正常に点灯するが、使用中の外的衝撃によりランプが落下するなどの危険性がある。

一方、新ソケットでは、ランプ保持ばねを設けることで、確実に機械的保持がされたあとでしか電気的な接触が得られない構造としている（図16、図17）。ランプ保持ばねと樹脂ボディーにより形成される隙間をランプ口金の突起部よりも狭くすることにより（図18 寸法B）、ランプをソケットに挿入した時点で口金の突起部がランプ保持ばねにより確実に保持され、ランプ固定ばねによって所定の回転

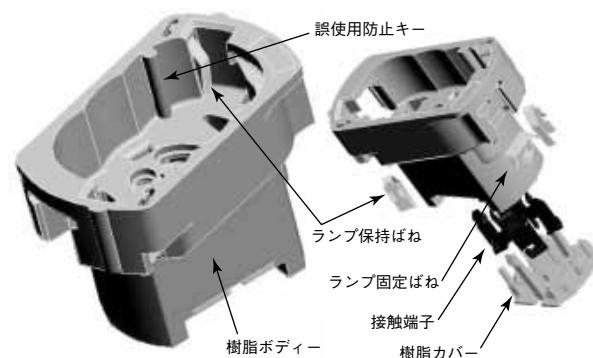


図16 新ソケットの構造



図17 新ソケットの操作方式

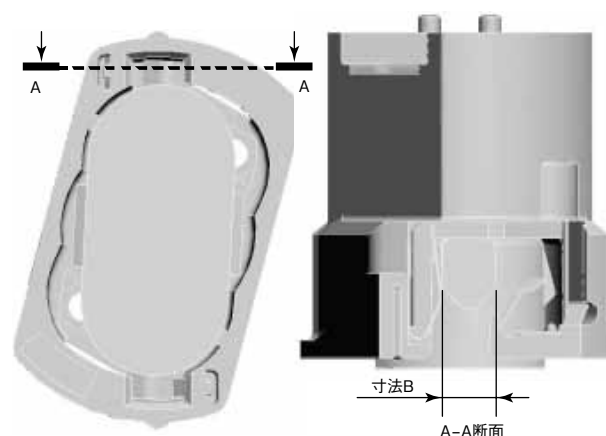


図18 ランプ保持ばねの動作

位置に固定される。

6.3 ランプ寿命末期時安全性の確保

新ソケットに要求される耐熱性は、通常使用時に140℃、ランプ寿命末期の温度上昇時には170℃であることが実験により確認された。したがって、難燃グレードV0のPET樹脂を選定することにより、安全性を確保している。

7. あとがき

非住宅向けダウンライトにおいて、最冷点位置が発光管の先端中央部にある「コンパクトスパイラル蛍光灯」を採用し、反射鏡からの反射光が当たりにくい構造とすることによって最冷点温度を低減するとともに、実使用時の器具内温度条件で出力光束比が最大となる特性を見いだし反射率98%の銀蒸着反射鏡と併せて器具効率68%を達成した。

これにより、従来の白熱灯 100 W（埋込穴径 125 mm）と同等の明るさで 76 % の電力削減を実現し、埋込穴径 100 mm に取り付け可能な小型で高効率なコンパクト形蛍光灯ダウンライトを開発した。

また、インバータ周波数と無負荷共振周波数がほぼ等しくなるように設定し、昇圧チョッパ回路を有するインバータブロックの開発により、W（ワット）フリー、V（ボルト）フリーを実現した。さらに、このブロックはランプ電圧をモニタすることでランプ寿命末期のランプ異常を検出し、インバータの発振を停止させることで器具の安全性を高めている。

開発したダウンライトを使用すると、年間 3000 時間点灯の条件では 100 W 白熱灯ダウンライトと比較して、1 台あたり約 95 kg の CO₂ が削減可能となる。今後、照明設備における CO₂ 削減に大きく貢献することが期待できる。

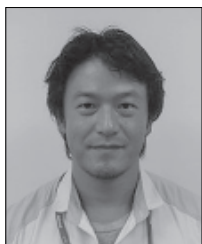
*参考文献

- 1) 渡辺 加津己, 青木 慎一, 野口 晋治: 高効率反射鏡, 松下電工技報, No. 68, p. 19-25 (1999)

◆執筆者紹介



中辻 光彦
ナショップ・調光
システム事業部



松原 敏夫
ナショップ・調光
システム事業部
一級建築士



笹川 知宏
照明基幹デバイス総合部



小寺 隆介
照明基幹デバイス総合部



飯田 史朗
松下電器産業株式会社
照明社



杉本 浩
松下電器産業株式会社
照明社