

# 段調光型無電極蛍光ランプシステム

## Step-Dimmable Electrodeless Fluorescent Lamp System

都築 佳典\* · 浦 竜介\* · 山本 正平\*  
Yoshinori Tsuzuki Ryusuke Ura Shohei Yamamoto

段調光型無電極蛍光ランプシステムの開発において、低出力まで調光可能な間欠発振方式の調光回路の採用によって、毎回の再点弧時の高い再点弧電圧がもたらすパワーカップラの誘導コイルとフェライトコアの磁束変化による振動で発生する騒音の問題を解決するため、バッファガスにクリプトンを混合して再点弧電圧を下げ、調光周波数の高調波とパワーカップラの固有振動周波数を異なるように設定するとともに、誘導コイルとフェライトコアからの振動伝播経路にダンパを設定することで、対策前に比べて18 dBの騒音低減を実現した。

さらに、封入ガス圧および水銀蒸気圧の最適化により、全点灯時 83 lm/W の高いシステム効率を達成している。

In the development of a step-dimmable electrodeless fluorescent lamp system, the operating noise level has been reduced by 18dB compared with a previous model. This was made possible by adopting a dimming circuit using the intermittent oscillation method for enabling dimming down to a low output. In order to solve the noise problem generated by the vibration of the induction coil of the power coupler and flux change in the ferrite core driven by the high ignition voltage at every re-ignition pulse, krypton has been mixed in the buffer gas for lowering the re-ignition voltage. Further, the harmonics of the dimming frequency has been set to a different value from that of the natural vibration frequency of the power coupler, and a damper has been installed in the vibration transmission path from the induction coil and ferrite core.

In addition, the optimization of the sealed gas pressure and mercury vapor pressure achieves high system efficiency of 83 lm/W at full lighting.

## 1. ま え が き

近年、グローバルでの環境負荷低減への取組みが進むなか、照明分野でも長寿命・高効率・省資源のニーズが高まっている。

無電極ランプは、電極に塗布された電子放出物質（エミッタ）の消耗や電極の断線によるランプの不点灯がないため、原理的に長寿命な光源である。また、高効率で優れた光束の立上り特性を有し、かつ瞬時再点灯が可能といった特徴があるため、次世代照明として期待されている。

当社では、出力 30 ~ 240 W、光出力 2400 ~ 22000 lm の無電極蛍光ランプを実用化して街路灯、トンネル灯、防犯灯等に広く採用されているが、調光機能をもつ一般照明用の無電極蛍光ランプシステムはまだ開発されていなかった。そこで、センサやタイマ等と組み合わせて調光するこ

とにより、さらに大幅な省エネルギーが図れる無電極蛍光ランプシステムの開発を行う。

本稿では、まず無電極ランプおよび間欠発振方式による調光方法について説明し、その技術課題である騒音低減のアプローチを各構成要素別に示すとともに実用モデルの性能についても言及する。

## 2. 段調光型無電極蛍光ランプシステム

図 1 は 135 kHz 内巻方式と呼ばれる無電極蛍光ランプシステムを示しており、これは外管バルブ（以下、バルブと記す）と口金から成るランプ、高周波電力を発生する点灯回路、高周波電力をランプに伝達するパワーカップラで構成されている。このパワーカップラは、フェライトコアとフェライトコアに巻かれた誘導コイルから成る。

点灯メカニズムは次のとおりである。

\* 照明事業本部 照明R & Dセンター Research & Development Center, Lighting Manufacturing Business Unit

まず、点灯回路からの高周波電流でランプ内部に磁界を与え、この磁界の誘導作用によって封入ガス中に放電路を形成する。

次に、放電により水銀蒸気が励起されて紫外線を放出し、この紫外線がバルブ内面に塗布された蛍光体に当って可視光に変換される。

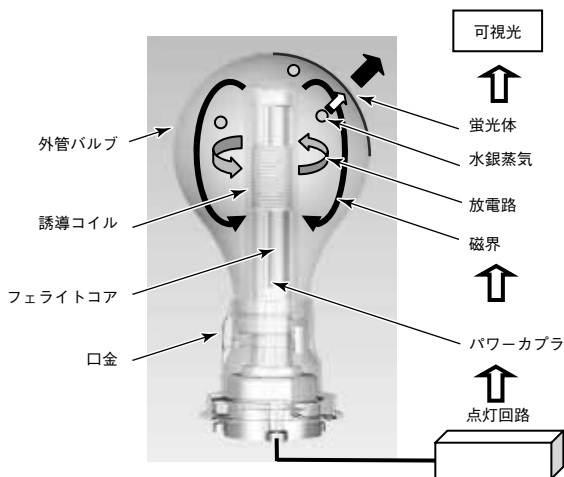


図1 無電極蛍光ランプシステムと点灯メカニズム

一般的な蛍光灯の調光方法としては、周波数調光方式や間欠調光方式が挙げられる。周波数調光方式は、点灯回路の出力電力が動作周波数によって変化することを利用し、ランプに供給する電力を制御する方式である。一方、間欠調光方式は、高速で点灯回路出力のON/OFFを繰り返してそのデューティーを変化させることでランプに入る電力を制御する方式である。

これらの二つの方式で無電極ランプを調光した場合の光出力特性を図2に示す。周波数調光方式では、パワーカプラを含むランプ入力電力が80%程度で点灯不能となる。この現象は、周波数を低くして電力を絞った場合にランプ内のプラズマ抵抗が非常に高くなり、安定点灯が困難になるためと推測される<sup>1)</sup>。一方、間欠調光方式では、ON側のデューティー比を小さくすることで光出力を平均的に減じることができるため、図のように20%程度まで調光が可能となる。

間欠調光回路は、デューティー比を変化させるために入力電力をPWM信号を用いて制御し、その信号のON期間にはランプを点灯、OFF期間には消灯させて調光する。なお、このON-OFFを繰り返す周期を調光周波数と称す。

しかし調光動作時には、間欠発振の周期ごとに、誘導コイル両端において信号ON期間の初期に図3のような高い再点弧電圧が現れる。このときパワーカプラのフェライトコアの磁束変化が急峻なために磁歪振動が生じ、これがパワーカプラ構造体に伝わって発生する騒音が実用化の大きな障害となっていた。

そこで、ランプ、パワーカプラ、および点灯回路におい

て再点弧電圧と構造の観点から騒音低減の検討を行う<sup>2), 3)</sup>。また開発にあたっては、再点弧電圧の低減とともに高効率化を図る。

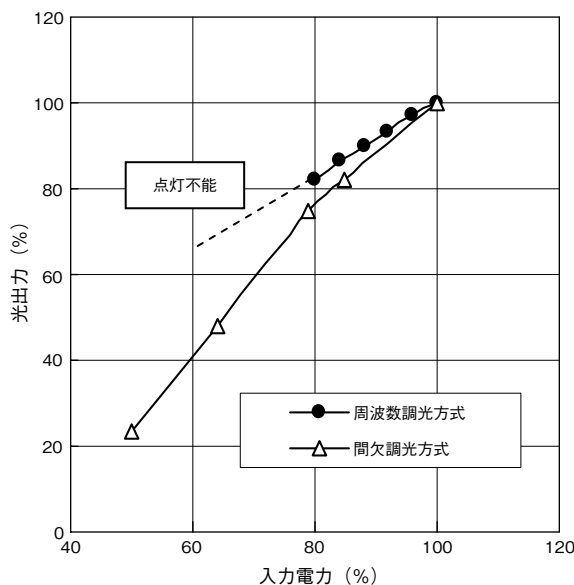


図2 光出力特性の比較  
(ランプ入力電力50Wを100%とした場合)

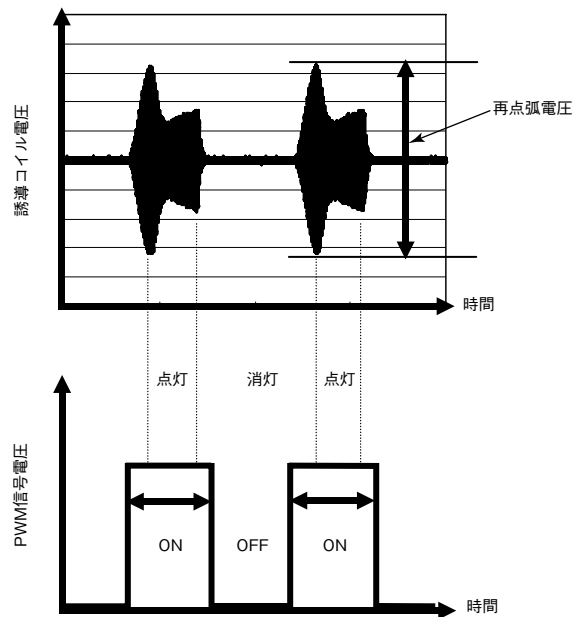


図3 PWM信号と再点弧電圧波形

### 3. ランプの開発

#### 3.1 封入ガス種とガス圧

一般の蛍光灯は、発光物質の水銀とバッファガスとしてのネオン (Ne)、アルゴン (Ar)、クリプトン (Kr) 等を封入している。

従来の無電極ランプはバッファガスにArガスを封入していたが、前述のなかでもっとも電離電圧の低いKrガスを採用すれば再点弧電圧が低下することが期待される。ガ

ス種と封入ガス圧を変えて再点弧電圧の測定を行い、その結果を図4に示す。Krガス比率を高く、ガス圧を高くするほど、再点弧電圧低下の効果が認められる。

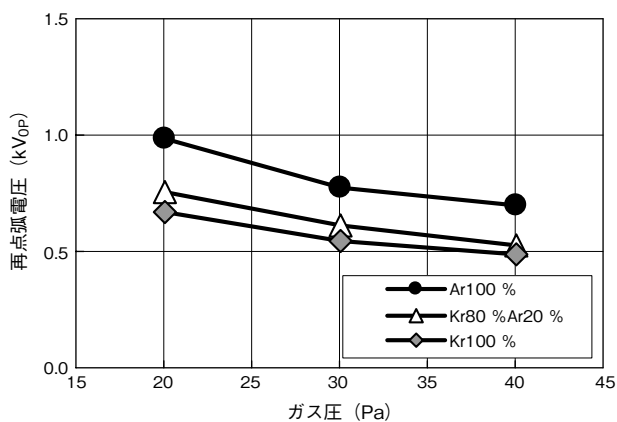


図4 ガス種と再点弧電圧

ところが効率は、図5のようにKrガス比率が100%よりもKr80%Ar20%の混合ガスのほうが良い結果となっている。

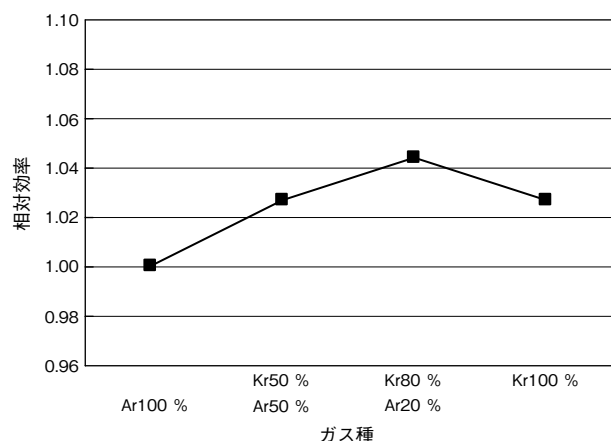


図5 ガス種と相対効率(40 Pa一定)

また効率は、ガス種とバルブ径で決まる両極性拡散による管壁での電子とイオンの再結合ロスにより変化し、最適値が存在するといわれている<sup>4)</sup>。本システムでは、Kr80%Ar20%が最適なガス種であることがわかる。

次に、Kr80%Ar20%で効率の良いガス圧の最適化を行った結果、30 Paで最大の効率を示している(図6)。これは、ガス圧の高い領域では電子の弾性衝突ロスが大きくなり、ガス圧の低い領域では前述の両極性拡散による再結合ロスが増加するため、30 Paが最適値となっているものと思われる。

そこで、ガス種がKr80%Ar20%でガス圧が30 Paの条件で試作したランプによる騒音レベルを測定する。その結果、従来の無電極ランプと比較して効率を下げることなく再点弧電圧が約10%低減し、騒音レベルは4 dBの低下

が認められる(表1)。

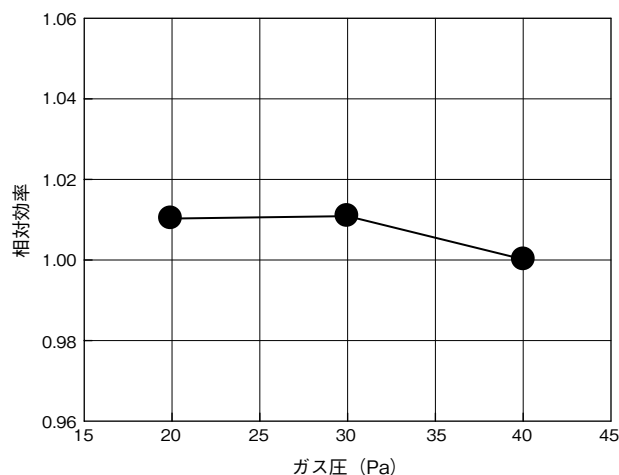


図6 ガス圧と相対効率(Kr80%Ar20%)

表1 対策前と対策後の比較

仕様	対策前	対策後
ガス種	Ar100%	Kr80%Ar20%
ガス圧 (Pa)	40	30
相対効率	1.000	1.033
再点弧電圧 (kV <sub>op</sub> )	0.726	0.606
調光周波数 (Hz)	1000	1000
騒音レベル	基準	-4.0dB

### 3.2 最冷点制御

発光物質は光束の立上り特性を重視し、水銀化合物である亜鉛水銀を採用する。しかし亜鉛水銀を使用する場合は、発光効率の観点から最冷点による水銀蒸気圧制御が必要となる。球状バルブの最冷点は点灯方向によって変化し、図7に示すようにベースダウン点灯(以下、BD点灯と記す)では口金直上部、ベースアップ点灯(以下、BU点灯と記す)ではバルブトップとなる。一般に最冷点の温度は40℃で最高効率を示すことが知られており、BD点灯は最適値(約40℃)にあるが、BU点灯は最冷点温度は40℃よりも10℃程度高い状態にある。そこで、BU点灯での最冷点温度を下げるためのアイデアとして、熱源となるプラズマから最冷点を遠ざけるためにバルブトップに突起部を設け、点灯時の最冷点温度を調べる。

突起高さを変化させたときの突起部最冷点温度および相対効率との関係を図8に示す。

突起を高くすると最冷点温度の低下とともに相対効率は上昇し、突起高さが13.5 mmのときに40℃となり効率が最大となっている。このことから、バルブトップに13.5 mmの突起を設ける。

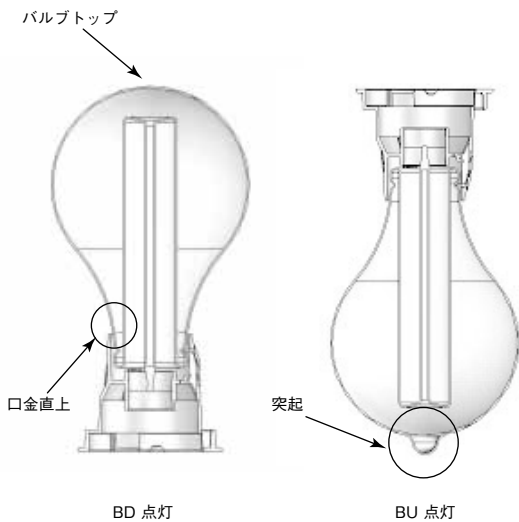


図7 最冷点制御

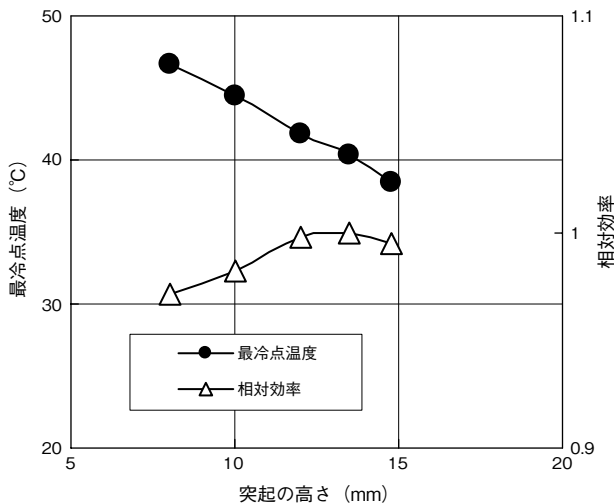
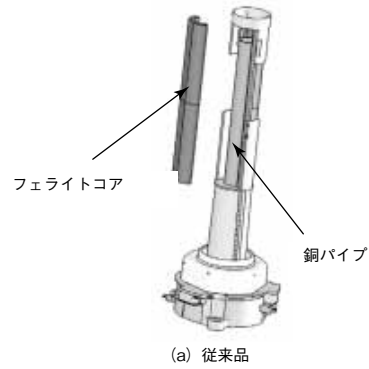


図8 最冷点温度と相対効率

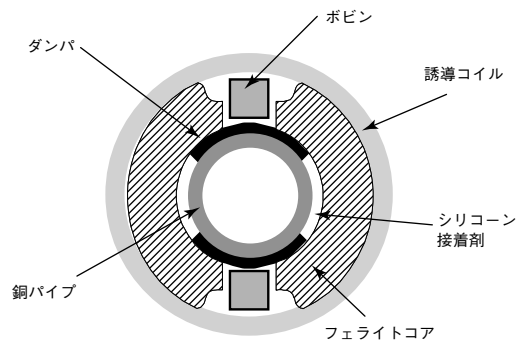
## 4. パワーカブラの開発

### 4.1 フェライトコアの振動伝播抑制

従来のパワーカブラは図9 (a) に示すように、フェライトコアが銅パイプにシリコン系接着剤で密着固定されている。これを用いて調光点灯させると、誘導コイル電圧に現れる高い再点弧電圧によりフェライトコアの磁歪振動が発生し、それがパワーカブラの構造体に伝わり、大きな騒音となる。そこで、フェライトコアから銅パイプへの振動の伝播を抑制するため、両者の間に薄板状のダンパを挿入して直接の接触を避け、空隙部にシリコン系接着剤を注入する。この構造の断面図を図9 (b) に示す。調光周波数 1000 Hz での開発品の騒音レベルは、従来品より 11.5 dB 低減している。



(a) 従来品



(b) 開発品

図9 パワーカブラの構造

### 4.2 調光周波数の適正化

調光周波数は点灯回路の部品特性などによりばらつきが生じる。そこで、調光周波数とパワーカブラの騒音レベルの関係について検討を行う。図10は、ダンパを設置したパワーカブラを用いて調光周波数を変化させたときの騒音レベルをプロットしたものである。同図から、騒音レベルが大きい周波数帯域と小さい周波数帯域が存在し、調光周波数は騒音ピークとなる  $f_1$  と  $f_2$  を含む二つの周波数帯域を除いた周波数にすることが望ましいことがわかる。

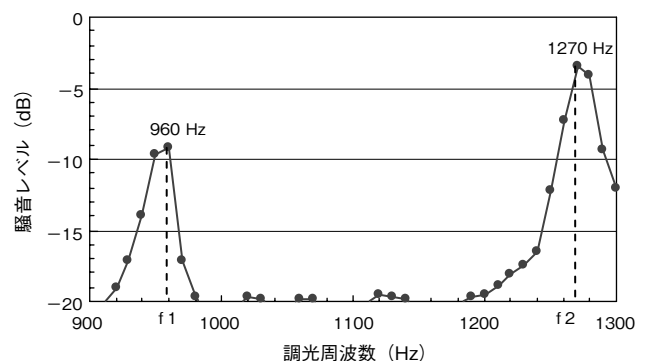


図10 騒音と調光周波数の関係

次に騒音レベルがピークとなる周波数  $f_1$  と  $f_2$  の発生原因を調べるため、パワーカブラの構造体の共振によって騒音が増幅しているのではないかと仮説を立ててその固有振動周波数を測定する。固有振動周波数は、パワーカブ

ラに加速度センサを設置してハンマでパワーカプラを打撃し、ハンマの加振信号とパワーカプラの加速度信号をFFTアナライザにより演算することによって算出する。その結果を図11に示す。

同図から、パワーカプラの1次の固有振動周波数は3900 Hzにあり、この周波数は図10におけるf1の4倍、f2の3倍に相当している。つまり、調光周波数の整数倍とパワーカプラの固有振動周波数が合致して騒音が大きくなるものと考えられる。

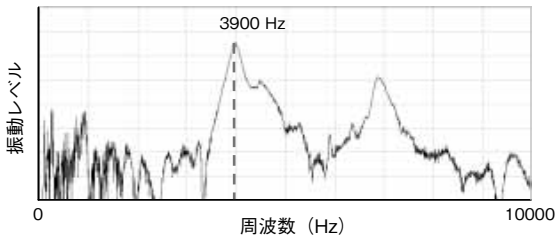


図11 パワーカプラの固有振動周波数

そこで、検証のために調光周波数をf1 (960 Hz)としてパワーカプラの騒音の周波数スペクトルを測定すると図12のようになり、3900 Hzに大きなピークが現れる。したがって、大きな騒音を防ぐためにはパワーカプラの固有振動周波数が調光周波数の高調波と合致しないように調光周波数を選択することが重要である。

これらのことから、調光周波数はf1とf2から十分離れた1100 Hzを設計値とする。

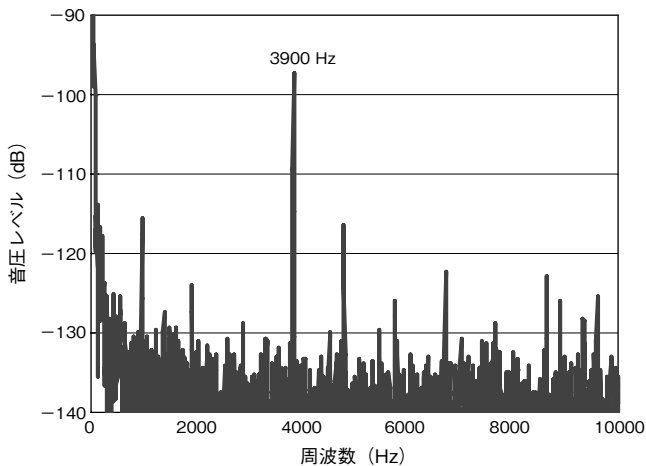


図12 騒音の周波数スペクトル (調光周波数960 Hz)

## 5. 点灯回路の開発

### 5.1 誘導コイル電圧の立上り制御

再点弧電圧をさらに低減させる手段として、誘導コイル電圧の立上り波形について検討する。そのタイミングチャートを図13に示す。なお、図に示すとおり、誘導コイル電圧がゼロから $V_r$ に達するまでの時間を立上り時間と定義する。気体の絶縁破壊は一般に印加電圧と印加時間

に依存するといわれ、印加時間が長いほど破壊電圧は低くなることが知られている。したがって、図13のゼロから $V_r$ までの立上り時間も長くなるほど電圧の時間積分値は大きくなるので、再点弧電圧の低下が期待できる。

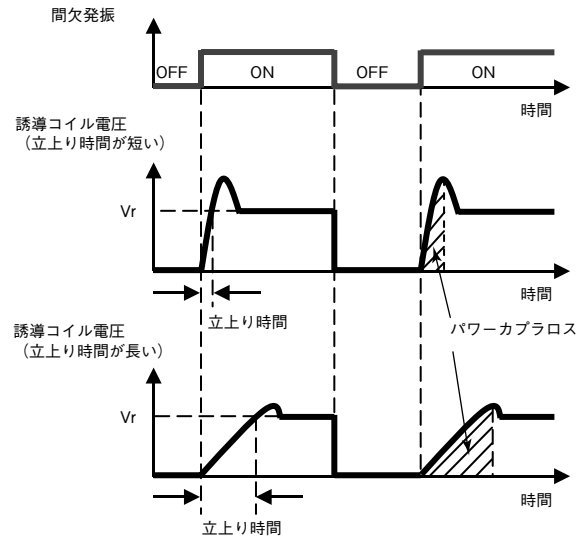
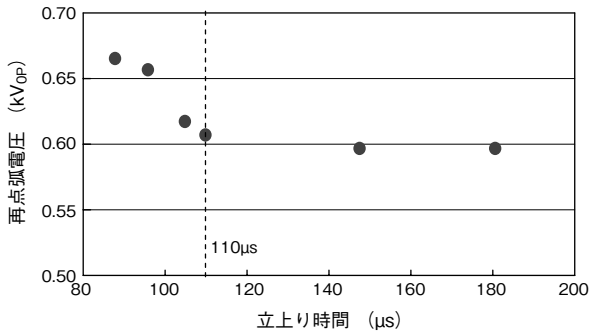


図13 タイミングチャート図

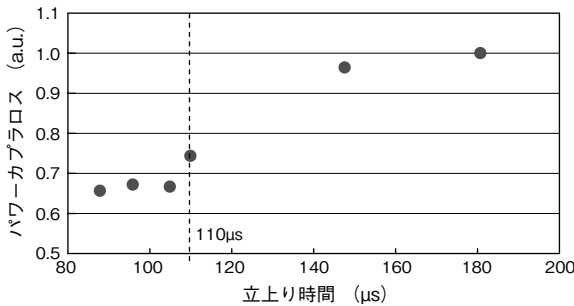
そこで、立上り時間と再点弧電圧の関係を測定してプロットしたものを図14(a)に示す。立上り時間を長くしていくと再点弧電圧を低減できる。しかし、立上り時間を140  $\mu$ s以上にしても再点弧電圧はほとんど変わらないこともわかる。

また、図13に示す斜線部は再点弧するのに必要な電圧積分値であり、この間の入力電力は発光に寄与せずパワーカプラのロスとして消費される。したがって、調光点灯時のシステム効率を向上させるためにはこのパワーカプラロスを低減する必要がある。図15のようにそのロスPを定義する。図14(b)は、立上り時間を変化させたときの誘導コイル電圧波形からパワーカプラロスを算出し、立上り時間とこのロスの関係をグラフ化したものである。同図から、立上り時間が長くなるにつれてパワーカプラロスは増加の傾向にあることがわかる。

以上のことから、立上り時間の設計値を110  $\mu$ sに設定することで、再点弧電圧とパワーカプラロスをともに低減することができ、そのときの騒音低減効果は2.5 dBである。



(a) 再点弧電圧と立上り時間の関係



(b) パワーカプラロスと立上り時間の関係

図14 立上り時間の最適化

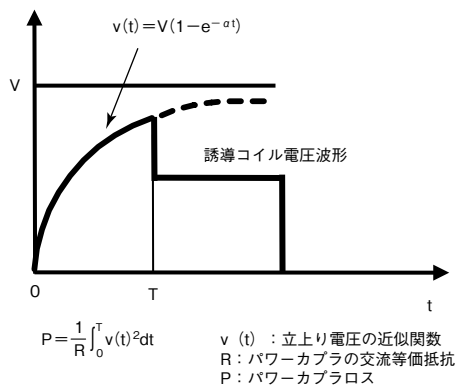


図15 パワーカプラロスPの定義

## 6. 開発品の特性

当初課題であった調光時の騒音発生が、再点弧電圧によるパワーカプラの振動が原因となっていることに着目する。各実施項目において再点弧電圧を減ずることとパワーカプラの構造を改良することにより、対策前に比べて以下のように全体として18 dBの騒音を低減でき、50%調光時にもホール、玄関、ロビーなどでの使用上問題とならないことを確認している。

- (1) ガス種とガス圧の適正化の効果：4.0 dB 低下
- (2) ダンパ設置の効果：11.5 dB 低下
- (3) 立上り時間適正化の効果：2.5 dB 低下

開発品の外観を図16に、性能を表2に示す。システム効率は全点灯時83 lm/Wとなり、50%段調光が可能となっている。段調光機能を実現することにより、たとえば人体センサと組み合わせることで、通常は調光点灯で明るさを抑え、人を検知したときには全点灯へ切り替える動作が可能となる。

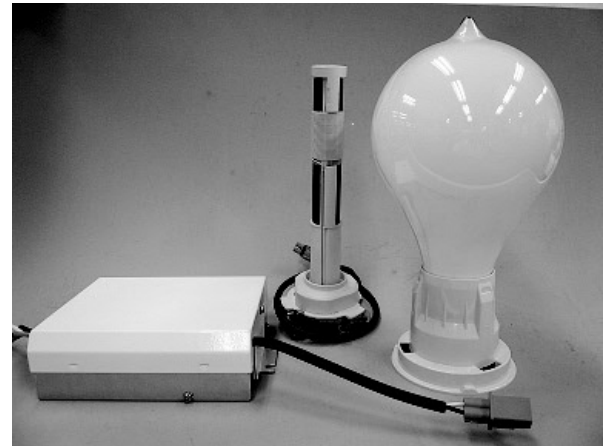


図16 段調光型無電極蛍光ランプシステム

表2 開発品の性能

仕様	全点灯	調光点灯
光束 (lm)	4550	2275
入力電力 (W)	55	32
色温度 (K)	4200	
ランプ寿命 (h)	60000 (光束維持率70%時)	

## 7. あとがき

段調光型無電極蛍光ランプシステムの開発において、低出力まで調光可能な間欠発振方式の調光回路の採用によって、毎回の再点弧時の高い再点弧電圧がもたらすパワーカプラの誘導コイルとフェライトコアの磁束変化による振動で発生する騒音の問題を解決するため、バッファガスにKrを混合して再点弧電圧を下げ、調光周波数の高調波とパワーカプラの固有振動周波数を異なるように設定するとともに、誘導コイルとフェライトコアからの振動伝播経路にダンパを設定することで、対策前に比べて18 dBの騒音低減を実現した。

さらに、封入ガス圧および水銀蒸気圧の最適化により、全点灯時83 lm/Wの高いシステム効率を達成した。

本段調光システムは、大幅な省エネルギーが期待されることから広く普及していくものと考えている。

### \*参考文献

---

- 1) 浦 竜介, 小笠原 宏, 山本 正平, 城戸 大志, 掛橋 英典: 段調光型無電極蛍光ランプシステムの開発, 平成 20 年度照明学会全国大会, No. 20, p. 58 (2008)
- 2) 都築 佳典, 松尾 茂樹: 段調光型無電極蛍光ランプ, 平成 20 年度照明学会全国大会, No. 19, p. 57 (2008)
- 3) 牧村 紳司, 中城 明, 増本 進吾, 城戸 大志: 低周波・低出力無電極ランプ点灯回路の検討, 平成 19 年度照明学会全国大会, No. 24, p. 67 (2007)
- 4) JOHN F. WAYMOUTH: ELECTRIC DISCHARGE LAMPS, The M. I.T. Press, p. 11-46 (1971)

### ◆執筆者紹介

---



都築 佳典  
照明 R & D センター



浦 竜介  
照明 R & D センター



山本 正平  
照明 R & D センター