

# 調光型無電極蛍光ランプの研究

岡本 太志\*

## Electrodeless Fluorescent Lamp with Dimming Capabilities

Futoshi Okamoto\*

### Abstract

An electrodeless fluorescent lamps was developed which is dimmable to 5%. Smooth dimming was achieved by rapid duty cycling in the lamp's 13.56MHz RF power. Flicker-free illumination at all power levels was achieved by simply modulating the duty ratio thanks to the lamp's nearly instantaneous power-cycle response when driven at 13.56MHz. Electrodeless fluorescent lamps feature an extremely long life since they do not suffer from electrode wear, and rapid power switching response without the delays associated with electrode warm-up and cooling. The high luminous intensity, rapid power switching response and dimming capabilities provide versatility for illuminated signs and decorative illumination use.

Keywords : electrodeless fluorescent lamps, dimming, inverter circuit

### 1. はじめに

現在、照明用光源として白熱電球、蛍光ランプ、HIDランプ (High Intensity Discharge lamp) があるがそれぞれ一長一短がある。

小型で安価な光源である白熱電球は効率が低く、また寿命も短い。この欠点を改善した蛍光ランプは、白熱電球に比べランプサイズが大きく、また点滅の繰返しには適していない。HIDランプは小型、高効率であるが、点滅や調光に関しては蛍光ランプ以上に問題をもつ。

このような従来の光源に替わる新世代の光源として提案されたものに無電極ランプがある<sup>(1)~(3)</sup>。無電極ランプは放電管内部に電極を持たないため、原理的に長寿命が期待できる。また、電極予熱の必要がなく、瞬時始動、瞬時再始動が可能となり、点滅応答性に優れている。

無電極蛍光ランプ点灯回路における出力制御、すなわち調光を行う一手法として間欠発振を用いた方法があり、自励式点灯回路で報告されている<sup>(4)</sup>。点灯周波数にISMバンドである13.56MHzを使用し、一定周波数動作となる他励式においては、この手法を含め調光例は報告されていない。

そこで本論文では、間欠発振方式を用いた調光可

能な他励式点灯回路において回路動作の考察及び調光実験を行い、良好な調光を得るための諸条件について検討を行った。

### 2. 無電極蛍光ランプ点灯回路

#### 2. 1 無電極蛍光ランプの等価回路

無電極蛍光ランプは、誘導コイルに高周波高電圧を印加することにより始動し、始動開始後は等価的にはほぼ純抵抗とみなすことが出来る。誘導コイルとランプ中の放電路との結合係数を  $k$ 、放電路の抵抗、すなわちプラズマ抵抗を  $R_p$ 、誘導コイルの巻数を  $n$  とすると、図1 (a) の無電極蛍光ランプと誘導コイルは、 $n:1$  の空心トランスに  $R_p$  なる抵抗が接続された図1 (b) で等価的に表され、これを変形して図1 (c) のように表すことが出来る<sup>(5)</sup>。

更に、 $k \neq 1$  のときには図1 (d) に示すように、インピーダンス  $Z_L$  は等価抵抗  $R_e$  と等価インダクタ  $L_e$  を並列接続したものに変換することができ、誘導コイルを含む無電極蛍光ランプの点灯中の等価回路は、抵抗とインダクタを並列接続したものとなる<sup>(4)</sup>。

#### 2. 2 点灯回路構成と回路動作

図2は、他励式E級増幅回路による点灯回路である。

電源とスイッチ素子間にインダクタ $L_p$ 、出力端には整合回路、図1 (d) の無電極蛍光ランプの等価回路が接続される。この回路の大きな特徴は、整合回路の定数を適切に設定することにより、スイッチ素子両端電圧の値が0になると同時にその傾きも0となり、それからスイッチ素子 $Q_1$ に電流が流れ始めるゼロ電圧スイッチ動作ができることである。これにより、理想的にはスイッチ素子でスイッチング損失が発生せず、高効率が達成できる<sup>(6)</sup>。

図3に動作波形を示す。 $Q_1$ の導通期間によって、a, b, cのように図示している。各々の導通期間は $a > b > c$ の関係にある。

導通期間a, b, cにおける出力電圧 $V_o$ 、ドレイン・ソース間電圧 $V_{DC}$ 、ドレイン電流 $I_D$ を図示している。bモードは最適E級動作である。この場合、スイッチ素子 $Q_1$ のドレイン・ソース間電圧 $V_{DC}$ は、ターンオン付近でこう配 $dV_{DS}/dt = 0$ に近づき、 $V_{DC} = 0$ となった時刻でスイッチ素子 $Q_1$ がターンオンされる。スイッチ素子 $Q_1$ はゼロで電圧、ゼロ電流スイッチングになる。

aモードは、bモードよりスイッチ素子 $Q_1$ の導通期間を長くした準E級動作であり、スイッチ素子 $Q_1$ が導通すると、コンデンサ $C_1$ よりスイッチ素子 $Q_1$ に突入電流が流れるためスイッチング損失が大きくなる。cモードは、bモードよりスイッチ素子 $Q_1$ の導通期間を短くした準E級動作であり、スイッチ素子 $Q_1$ に印加される電圧が高くなる。

無電極蛍光ランプの出力電力を変えるために、周波数を変えることやスイッチ素子のデューティを変えることが考えられるが、10数MHzの周波数でのスイッチ素子のスイッチング特性から困難である。当然、最適E級動作を維持しながら出力電力を変えることは容易でない。

筆者は、図3のaモード、cモードの動作でなく、発振停止と最適E級動作であるbモードの繰り返しにより、回路は高効率動作となる間欠発振による調光方式を提案する。

### 3. 無電極蛍光ランプ調光回路

#### 3. 1 調光方式の比較

一般蛍光ランプのインバータ式点灯回路による調光手段には、種々の方式がある。表1に示すような直流電圧振幅制御、スイッチ素子の周波数制御及びデューティ制御などである。一般のインバータ式点灯回路のスイッチング周波数は、数十kHzであるので、前記各種の制御が可能である。しかしながら無電極蛍光ランプ点灯回路では、ISMバンドである13.56MHzの周波数を使用している。無電極蛍光ランプの調光手段を考えると、雑音対策の観点及び

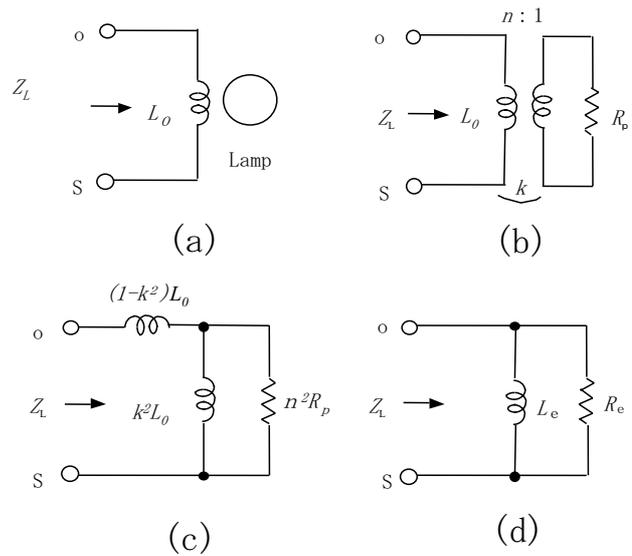


図1 点灯時における誘導コイルと無電極蛍光ランプの等価回路

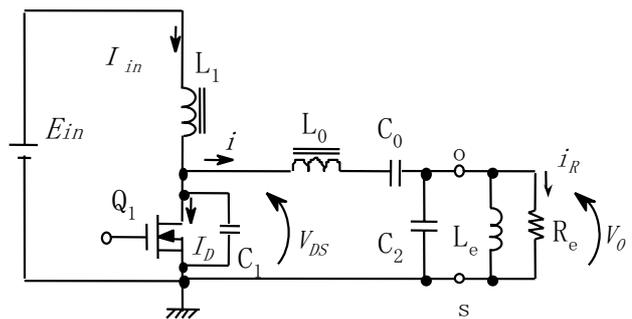


図2 他励式E級増幅回路

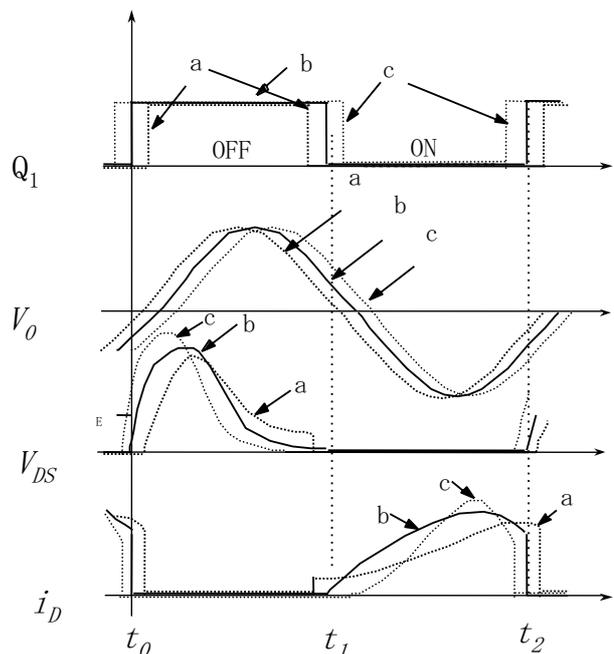


図3 他励式E級増幅回路における理想動作波形

最適動作条件から周波数は固定することが前提となる。

この場合、スイッチ素子の周波数制御、オン時間比 (またはデューティ比) 制御は、スイッチ素子のスイッチング応答スピードの点から図3で述べた最適動作に設計することは困難となる。また直流電圧振幅制御は調光下限を小さくできない。

表1 調光方式の比較

| Dimming method.                 | Principle of dimming | Continuous dimming              | EMI | Total evaluation |
|---------------------------------|----------------------|---------------------------------|-----|------------------|
| DC Voltage control              |                      | ×<br>not lower limit of dimming | ○   | ×                |
| Frequency control               |                      | △                               | ×   | ×                |
| switch element duty control     |                      | △                               | ○   | △                |
| intermittent oscillator control |                      | ○                               | ○   | ○                |

### 3. 2 ランプの点滅応答性の比較

図4は電源を印加した後の蛍光ランプ、白熱電球、無電極蛍光ランプの光出力の立ち上がり特性の比較を示す。無電極蛍光ランプは電極がないために、他の光源に比べて点滅応答性に優れている。これによりランプ電力を簡欠的に供給して、ランプ電力の可変が可能となる。

筆者は、無電極蛍光ランプの早い点滅応答性に着目してランプ電力を間欠的に供給し、その発振期間を変化させることで、ランプ電力可変とする方法を採用した。

### 3. 3 調光回路

図5に調光型無電極蛍光ランプ点灯回路のブロック図を示す。スイッチ素子 $Q_2$ によって、発振回路、駆動回路の信号を間欠的に断続させて主回路へ供給する。例えば、スイッチ素子 $Q_2$ がオンすると駆動回路の信号は短絡され主回路へ供給できなくなる。スイッチ素子 $Q_2$ は、調光制御回路によって制御される。スイッチ素子 $Q_2$ の間欠動作に関係なく、発振回路は連続発振しているの、スイッチ素子 $Q_2$ が不導通になると主回路にスピーディに発振回路、駆動回路の出力電圧を伝達できる。

図6に具体的な調光型無電極蛍光ランプ点灯回路

を示す。フォトカプラによって調光制御信号と点灯回路は絶縁されている。調光制御信号が供給されない場合は全点灯となる。

図7に調光時における各部理想動作波形を示す。

発振回路は、無電極蛍光ランプを放電発光させることに適した高周波信号を得るように構成され、 $V_{OSC}$ に示すような高周波電圧を出力する。調光制御信号の出力発生期間 ( $t_{on}$ ) と停止期間 ( $t_{off}$ ) をほぼ一定の周期 ( $T_S$ ) にて制御できるように構成され、 $V_{sig}$ に示すような調光制御信号にて駆動回路部を制御する。調光制御信号が 'Highレベル' のときスイッチ素子 $Q_2$ はオンし、前期E級増幅回路は発振停止する。逆に 'Lowレベル' のときスイッチ素子 $Q_2$ はオフし、前期E級増幅回路は発振する。したがって、調光制御信号、調光制御回路にて駆動回路部の動作を継続制御することで、 $V_{coil}$ に示すような高周波電圧波形を時分割し、この断続した出力を誘導コイルに供給する。ここで調光比は次のように定義する。

$$\text{調光比} = (\text{調光時照度}) / (\text{最大照度}) \times 100 [\%]$$

ここで最大照度とは、全点灯時における照度である。また、調光比の下限、すなわち調光下限を用いて調光範囲の広さを表すこととする。調光制御信号のオン時間比 $D_{on}$  ( $t_{on}/T_S$ ) あるいはオフ時間比 $D_{off}$  ( $t_{off}/T_S$ ) を自由設定することにより、光出力を自由に調整できる。例えば、オン時間比 $D_{on}$ を大きく、オフ時間比 $D_{off}$ を小さくすると放電発光されない期間が長くなり、減光 (調光) される。すなわち調光比は小さ

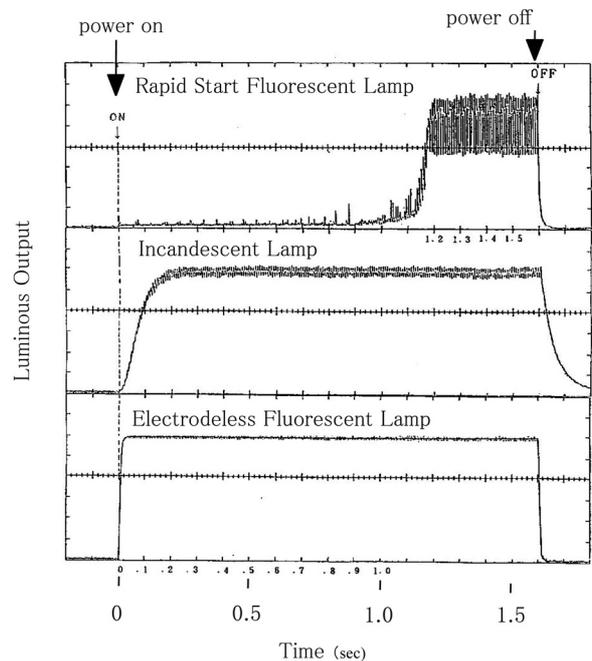


図4 各光源における光出力の応答性

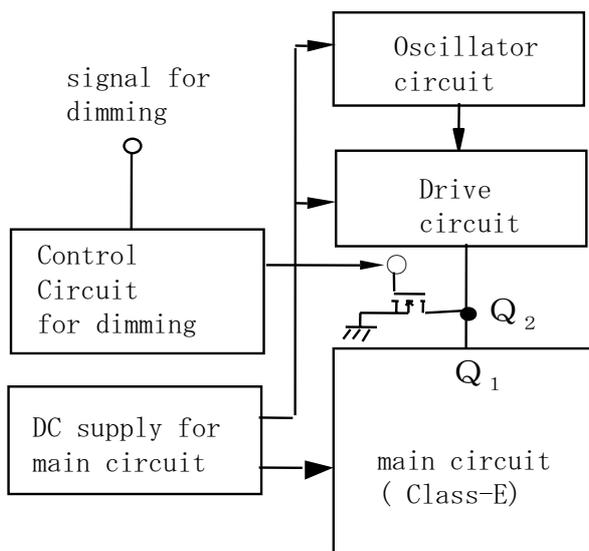


図5 調光型無電極蛍光ランプ点灯回路のブロック図

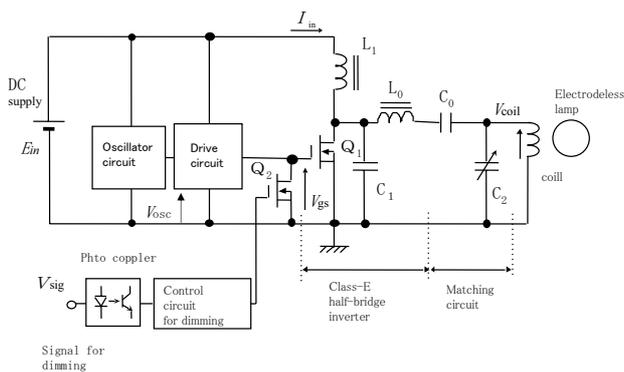


図6 調光型無電極蛍光ランプ点灯回路

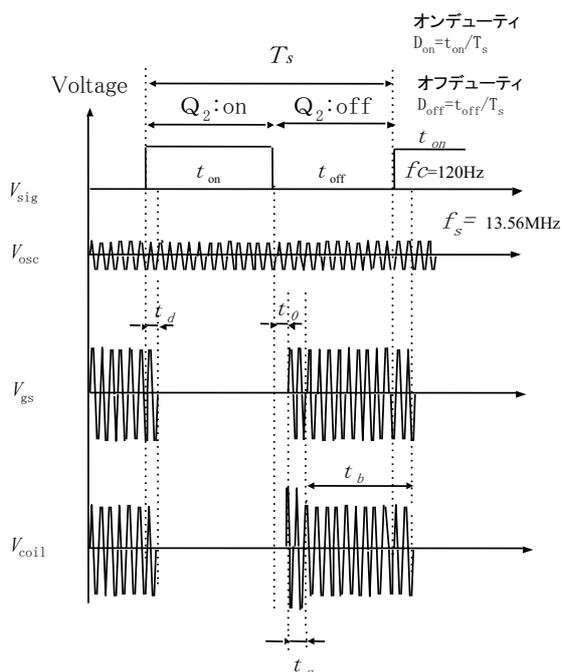


図7 調光時における各部理想動作波形

くなる。安定点灯が可能で調光下限となる  $D_{off}$  の限界値を  $D_{off-min}$  とする。

#### 4. 良好な調光を得るための技術的要件

##### 4. 1 間欠発振周波数の選択

図7の誘導コイルに電圧が印加される期間  $T = t_s + t_b$  (調光制御信号の期間  $t_{off}$  にほぼ等しい) を小さくしていくと、放電が不安定となる。

この不安定な領域は間欠発振制御の周波数とは無関係にほぼ一定である。

誘導コイルに電圧が印加される期間  $T$  と周波数  $f_c$  とすると、安定点灯が可能な調光下限となるオフ時間比  $D_{off-min}$  は式 (1) で表される。

$$D_{off-min} \approx f_c \times T \times 100 \text{ [\%]} \quad (1)$$

ここで、オフ時間比  $D_{off}$  ( $t_{off}/T_s$ ) とオン時間比  $D_{on}$  ( $t_{on}/T_s$ ) とは、 $D_{off} = D_{on}$  の関係にある。調光制御信号の周波数  $f_c$  と安定点灯が可能な調光下限となるオフ時間比  $D_{off-min}$  の関係を示すと、図8のようになる。

このため調光制御信号の周波数を低く選ぶことにより調光下限を小さく設定することが可能となる。

一方、調光制御信号の周波数が低いと、光出力は、この周波数と同期して間欠となるのでフリッカが問題となる。筆者は、間欠発振周期は、目で見てフリッカを感じないという点、及び安定した調光が可能という点より120Hzとした。

##### 4. 2 無負荷電圧の設定

図6に示す整合回路のコンデンサ  $C_2$  を変化させて誘導コイルに印加されるランプ始動時無負荷電圧  $V_{0-coil}$  (0 - ピーク値、以下同様) をランプ安定時及びゼロ電圧スイッチングが可能な範囲で変化させ、調光実験を行った結果を図9に示す。

図9より、無負荷電圧が500Vを境に、それ以下になると急激に調光下限が上昇し、調光範囲が狭くなるが、それ以上の無負荷電圧において調光下限に変化はないことがわかる。つまり500V以上の無負荷電圧があれば調光範囲に差がないことがわかる。

##### 4. 3 調光制御回路の応答性

調光範囲は、調光制御回路の応答性に依存する。調光制御回路の応答性に影響を与える因子として次の三つが上げられる。

- (1) 起動遅れ時間  $t_0$ : 発振開始信号入力後、実際に発振が開始するまでの期間
- (2) 停止遅れ時間  $t_d$ : 発振停止信号入力後、実際に発振が停止するまでの期間
- (3) 再点弧時間  $t_s$ : 発振開始後、アーク放電に移行する前のグロー放電期間

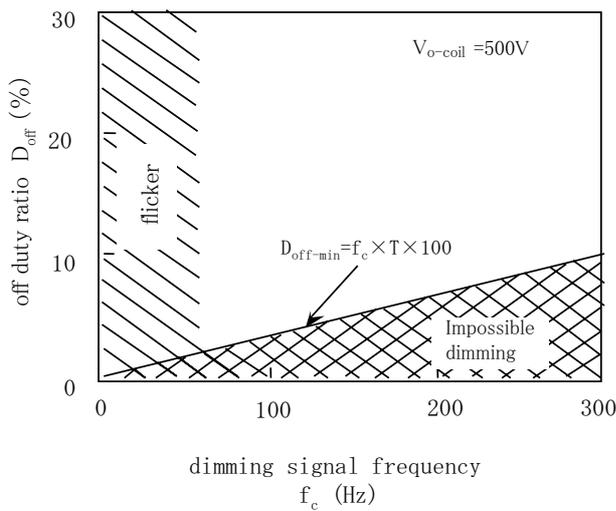


図8 調光制御信号の周波数とオフ時間比 $D_{off}$ の関係

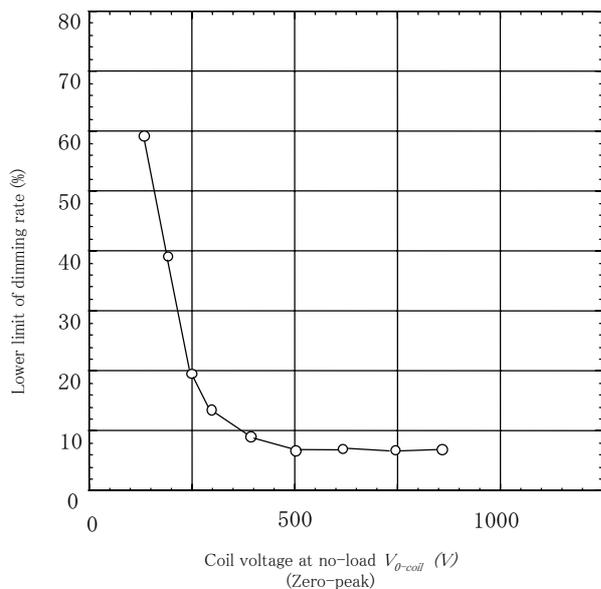


図9 無負荷電圧と調光下限の関係

各時間のうち、起動遅れ時間 $t_0$ 、停止遅れ時間 $t_d$ は調光制御回路の応答性に直接依存する値である。また再点弧時間 $t_s$ は再点灯のしづらさを示す値である。これらの値を用いて調光可能な範囲の上限と下限を考察する。また $t_b$ はアーク放電の期間を示している。

調光制御信号の周期を $T_s$ とすると、調光時における最大点灯期間は、調光時における最大点灯期間は、調光制御信号の周期 $T_s$ から起動遅れ時間 $t_0$ と停止遅れ時間 $t_d$ を引いた時間で表されるために、調光上限は式(2)により示すことができる。

$$\text{調光上限} = [T_s - (t_0 + t_d)] / T_s \times 100 \quad (2)$$

また、再点弧時間 $T_s$ は、調光時における点灯期間にも依存し、発振停止(消灯)期間の短い調光上限付近では十分短く無視できる。図6に示すように他励式点灯回路で、しかも、発振回路は常に動作しており駆動回路の出力を継続している本方式では、上記 $t_0$ 、 $t_d$ は無視できる。今回の実験では調光上限はほぼ100%となる。

一方、調光下限は、最小点灯期間を表す停止遅れ時間 $t_d$ に依存するとともに、再点弧時間 $t_s$ と相関関係があるため、任意の係数 $\alpha$ を乗じて式(3)で表されると考えられる。

$$\text{調光下限} = [t_d + \alpha t_s] / T_s \times 100 \quad (3)$$

ここで、 $t_d$ は無視できるので式(3)は式(4)で表される。

$$\text{調光下限} = \alpha t_s / T_s \times 100 \quad (4)$$

調光下限については $t_s$ との相関が大きい。

### 5. 調光特性

図10は再点弧時間 $t_s$ とフリッカが確認できるまでの調光制御信号のデューティの限界値を示す。フリッカが確認できるまでのデューティを絞り、調光の限界を調べたところ、再点弧時間が小さいほど、調光下限を小さくできることがわかった。図10は周囲温度25℃での値である。

図11は再点弧時間 $t_s = 0.170\text{ms}$ とした場合のデューティを可変したときの調光特性を示す。5~100%の調光が可能となった。

また応用事例として、カラー無電極蛍光ランプ赤

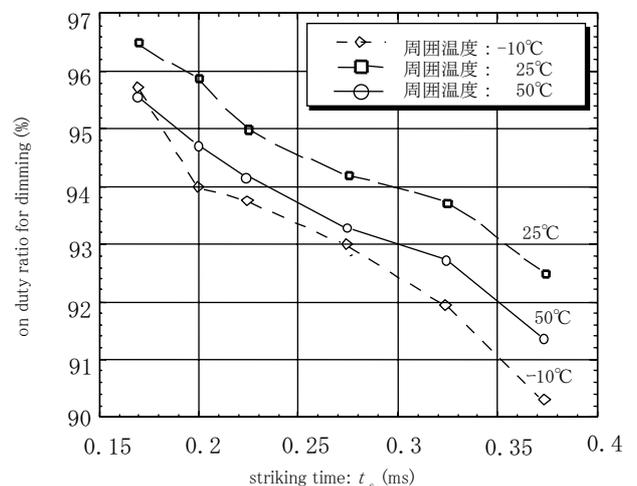


図10 再点弧時間とフリッカ発生限界となる調光制御信号のオン時間比 $D_{on}$ の関係

(R), 緑 (G), 青 (B) の3種類を用いた調色照明システムへの応用例がある。赤 (R), 緑 (G), 青 (B) のランプ光量を決められた割合で混合し, 任意の色温度を高精度に再現することができる。

色温度, 照度のきめ細やかな連続変化が可能となり, 例えば, 橋脚などのイルミネーションほか多種多様な用途に応用展開が期待できる。

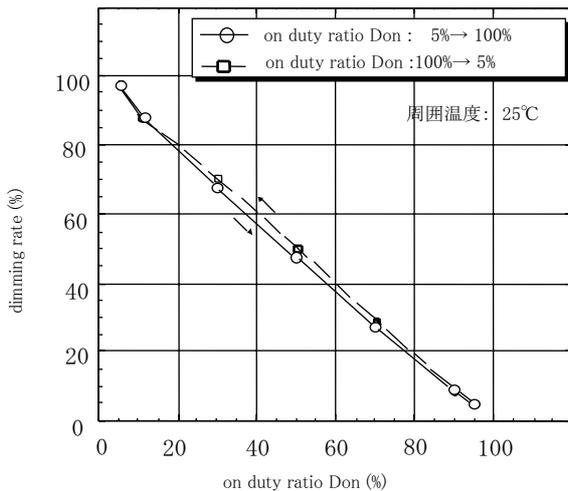


図11 調光制御信号のオン時間比 $D_{on}$ と調光比の関係

## 6. むすび

無電極蛍光ランプの調光方法は, 使用する周波数が13.56MHz (ISMバンド) の高周波数であるのでスイッチ素子のスイッチング制御が困難である点, E級増幅回路の最適条件の繰り返しでスイッチング損失が小さい点, およびランプの点滅応答性が速い点により, ランプ電力を間欠的に供給する間欠発振方式が適している。この場合, 無負荷電圧, 祭点弧時間が重要であることが明らかになった。

無電極蛍光ランプは長寿命により, メンテナンスが困難な場所への用途に適している。更に調光機能を付加することにより省電力となり, 用途拡大が図れることが期待できる。

## 参考文献

- (1) 四宮雅樹, 岡本太志, “無電極蛍光ランプ『エバーライト』”, 松下電工技報, no47, pp.3-7, 1994.
- (2) 四宮雅樹, 小林耕一, 東川雅弘, 谷河孝一郎, 松浦潤, 明星 稔, “無電極蛍光ランプ”平成2年度照学全大, p.8, 1990.
- (3) M. Sinomiya, K. Kobayashi, M. Higashikawa, S. Ukegawa, and J. Matsuura, “DEVELOPMENT OF

THE ELECTRODELESS FLUORESCENT LAMP” IES Annual Conference, 20-1, pp.44, 1990.

- (4) 湯之上則宏, 原田和郎, 石原好之, 戸高敏之, 岡本太志, “自励式無電極ランプ点灯回路の動作解析”, 照学誌, vol.83-8A, pp.561-569, 1999.
- (5) 四宮雅樹, 東方 真, 川口元一, “無電極蛍光ランプの等価回路モデル”, 1992照学東京支部大, pp.92-95, 1992.
- (6) 熊谷祐二, 岡本城戸大志太志, “無電極ランプ点灯装置”, 松下電工技報, vol.54, pp.10-14, 1996.