

高周波専用蛍光ランプの電極スポット位置に関するシミュレーション

植月唯夫 三宅秀明

Simulation as for Position of Electrode spot of Fluorescent Lamp for High Frequency Operation

Tadao Uetsuki and Hideaki Miyake

It is very useful for thinking the lamp life to grasp the spot position of the electrode filament of the fluorescent lamp. In this research, the spot position on the electrode of the fluorescent lamp was grasped by regarding the electrode as the electric circuit, which consisted of the resistance and inductance. The calculated result showed the following two things. Firstly, the spot position at cathode cycle moves as the lighting time increases. Secondly the spot position at the anode cycle does not move as much as at the cathode cycle.

Key words fluorescent, lamp life, electrode spot

1. 緒 言

蛍光ランプの電子放出する場所（エミッションポイント）が点灯時間と共にどのように変化するかは、蛍光ランプの信頼性、特に寿命評価（予測）に関する信頼性を高めることを目的として、1950～1960年代にかけて多くの研究がなされた^{1)～4)}。これらの研究対象はグロースタータを利用した商用周波数点灯のランプに対するものであった。以下、この商用周波数点灯のランプをFLタイプと呼ぶ。

現在の蛍光ランプシステムの多くはインバータを利用した高周波点灯システムであり、これらのために設計されたランプをHFタイプと呼ぶことにする。HFタイプはFLタイプとは以下の2点で異なっている。

(1) 点灯周波数が異なるため、電極近傍の陽極サイクル時と陰極サイクル時とで電極近傍のプラズマ状態が異なり、電極へのエネルギー注入機構が異なる可能性がある。つまり電極温度などに差がある。そのため、従来のFLタイプの電極（ダブルコイル）ではなく、高周波点灯の

ために設計された電極（トリプルコイル）が使用されている。ダブルコイルとトリプルコイルの形状の違いを図1に示す。

(2) FLタイプは点灯中に電極を流れる電流は放電電流だけであり、それに即した電極設計がされている。一方、高周波点灯システムでは放電電流と同時に電極加熱のための循環電流を流す設計になっており、この循環電流の位相が放電電流と異なっている。

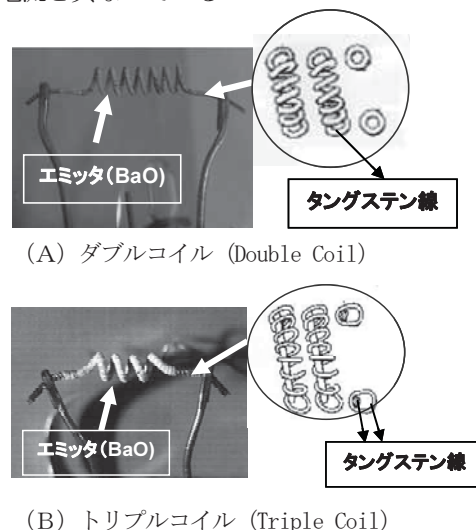


図1 FLタイプの電極 (A) HFタイプの電極 (B)

Fig.1 (A) Double filament coil for FL-type
(B) Triple filament coil for HF-type

このようにHFタイプとFLタイプでは、点灯条件が異なる。そのため従来のFLタイプに対する研究結果が現在の点灯システムであるHFタイプのランプに適用できないという問題点があった。そのため、高周波点灯時の電極からの電子放出の状況がどう変化するか、渡辺⁵⁾や御園⁶⁾、植月等^{7)~9)}によって研究なされてきた。そしてそれらの研究によって、ランプの電極や電極近傍プラズマの状況に関する物理的な違いが明確になった。しかしながら、それらは物理的な現象の解明であって、実際にどのように応用するかについては未検討である。たとえば、インバータの種類に関しても数多く存在し、その各々に対して上述した2つが物理的にどのように影響を受けるかを調べるのは非常に困難な状況である。本研究では、現在主流となっているインバータ点灯システムでのランプ寿命の評価を行うことを最終目的として、現行の点灯システムでエミッションポイントを把握できるかどうかの検討を行ったので報告する。

2. 実 験

2.1 点灯装置および測定結果

点灯実験に用いたランプ点灯システムの回路図の一部(概略図)を図2に示す。そして各電流(ランプ電流と図2のa端子、b端子の電流)波形とa b端子間のフィラメント電圧波形を図3に示す。

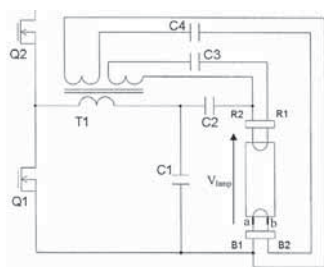


図2 ランプ点灯システムの回路図の一部
Fig.2 Part of the lamp operating system

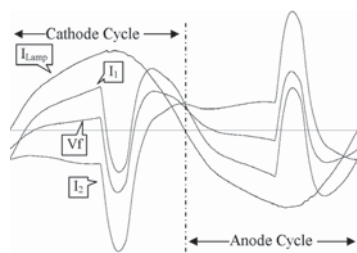


図3 各電流波形とフィラメント電圧波形
Fig.3 Measured wave-form

使用したインバータは「Hf 蛍光灯電子安定器: National FZ32192970」であり、蛍光灯ランプは「TOSHIBA FHF32EX-N」である。図3のデータは未点灯(新品)のランプを定格点灯した場合の波形である。

2.2 電極の発光状態の観察

上述したインバータ点灯システムで点灯させ、点灯時のフィラメントの発光状態を観察した。そして電極にスポット(輝点)ができていることを観察した(図4参照)。その発光状態より電極のある一点(輝点に相当する部分)に放電電流が流れ込む、あるいはそこから流れ出すと考えた。

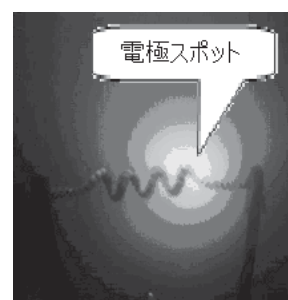


図4 電極近傍の発光状態
Fig.4 Discharge near the electrode

3. シミュレーション方法

3.1 電極の等価回路モデル

フィラメント形状は図1に示されるようにコイル形状をしており、そのためインダクタンス成分が存在している(これを寄生インダクタンスと呼ぶことにする)と考える。その回路を図5に示す。図4で示された結果から、放電電流が電極のある一点に流れ込む(あるいは流れ出す)と考えた。そこで放電電流は、図5中に示すようにフィラメントコイルのある一点(電極スポットと呼ぶ)から流れ出し、かつその点に流れ込むと考えた。

図5中に示している R_1 、 L_1 はそれぞれバラスト端子①から電極スポット位置まで抵抗、インダクタンスである。これはバラスト端子①に接続されているランプ端子(この場合はa端子)から電極スポットまでの距離(l_1)に比例する。同様に R_2 、 L_2 はバラスト端子②から電極スポットまでの抵抗、インダクタンスであり、これはバラスト端子②に接続されたランプ端子(この場合はb端子)から電極スポットまでの長さ(l_2)に比例する。

フィラメント全体のインダクタンスを L ，抵抗値を R とすると， R_1 ， L_1 ， R_2 ， L_2 はそれぞれ以下の式で表される．

$$R_1 = \frac{\ell_1}{\ell} R, \quad R_2 = \frac{\ell_2}{\ell} R$$

$$\therefore R_1 = k_1 R, \quad R_2 = k_2 R \quad \cdots \cdots (1)$$

$$L_1 = \frac{\ell_1}{\ell} L, \quad L_2 = \frac{\ell_2}{\ell} L$$

$$\therefore L_1 = k_1 L, \quad L_2 = k_2 L \quad \cdots \cdots (2)$$

ここで， ℓ はフィラメントコイル全体の長さであり， $\ell = \ell_1 + \ell_2$ である．また， $k_1 + k_2 = 1$ である． R ， L はフィラメントコイル全体の抵抗値とインダクタンスである．

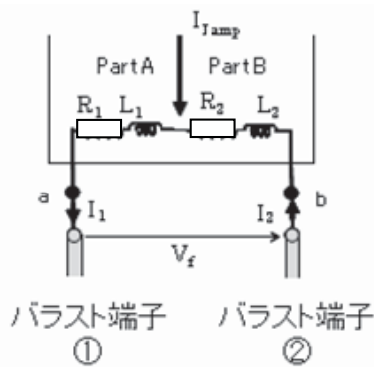


図5 電極フィラメントの等価回路
Fig.5 Equivalent circuit of the filament

3.2 電極スポットの位置の求め方

式(1)，式(2)の関係を用いて図5の等価回路に基づいて計算した a-b 端子間の電圧を $V_{f-cal}(t)$ とすると，それは次式で表される．

$$V_{f-cal}(t) = R_1 I_1(t) + L_1 \frac{d}{dt} I_1(t) + R_2 I_2(t) + L_2 \frac{d}{dt} I_2(t)$$

$$\begin{aligned} V_{f-cal}(t) &= \left\{ k_1 I_1(t) + (1 - k_1) I_2(t) \right\} R \\ &+ \left\{ k_1 \frac{d}{dt} I_1(t) + (1 - k_1) \frac{d}{dt} I_2(t) \right\} L \quad \cdots (3) \end{aligned}$$

式(3)中の $I_1(t)$ ， $I_2(t)$ は，図3に示されるような，実際の測定値の瞬時値を用いる．

実際の測定値である $V_f(t)$ と式(3)で求められた $V_{f-cal}(t)$ との誤差が最も少なくなるような k_1 ，

R ， L を求めることで，電極スポットの位置を把握する．

誤差の求め方は，式(4)で示すように計算値と実測値の差の2乗の一周期積分とした．この $\delta(k_1, R, L)$ が最小となる， k_1 ， R ， L を求め，そこから電極スポットの位置を推測する．

$$\delta(R, k_1, L) = \int_0^T (V_f(t) - V_{f-cal}(t))^2 dt \quad \cdots \cdots (4)$$

3.3 計算手順

計算全体のアルゴリズムを図6に示し，その後各部分について詳細に説明する．

まず，データの読み込みに関して述べる．計算は一周期分のデータを読み込み，それを図6に示す計算手順に従って計算し，電極スポットの位置を求める．従って，一周期のデータ数が計算結果の精度に影響を及ぼす．この測定ではサンプリング速度は 40 Ms/s （本実験で用いたインバータでは，一周期 800 ポイントに相当）で行った．ここで一周期の決定の仕方であるが，図3に示すランプ電流を例にとって説明する．ランプ電流のデータ値を計測し始めて，始めて負から正に変化した時点を陰極サイクルの始まり（つまり一周期の始まり）とし，次に正から負に変化した時点を陽極サイクルの始まりとした．そして再び負から正に変化した時点を二周期目の始まりとした．

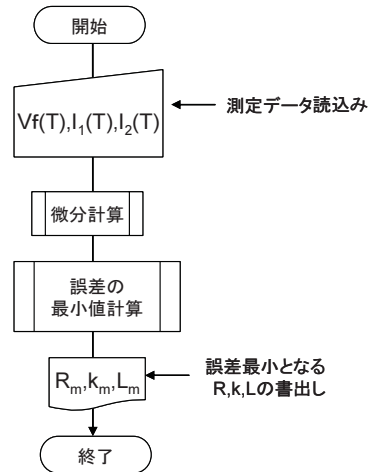


図6 計算全体のアルゴリズム

Fig.6 Algorithm for the calculation

(1) 微分計算

式(3)に示される電流の微分係数の求め方であるが，これは求める点（時間を $t = T_m$ とする）とその前後のポイント（ $t = T_{m-1}$ ， $t = T_{m+1}$ ）の3点での近似直線の傾きを用いた．従って，一周期が始まるポイントの一つ前のポイントから二周期目が始まった最初のポイントまでのデータ（合計

で802ポイント)を取り込んでいる。

(2) 誤差の最小値の計算

まず R を $2 \sim 17 \Omega$ とし、 L を $0 \sim 1 \mu\text{H}$ とした。

誤差の最小値計算のアルゴリズムを図7に示す。

誤差の求め方に関しては次の式を用いた。

$$\delta(R, k_l, L) = \sum_{m=1}^{800} (V_f(T_m) - V_{f\text{-cal}}(T_m))^2 \Delta t$$

$$\Delta t = 2.5 \times 10^{-8}$$

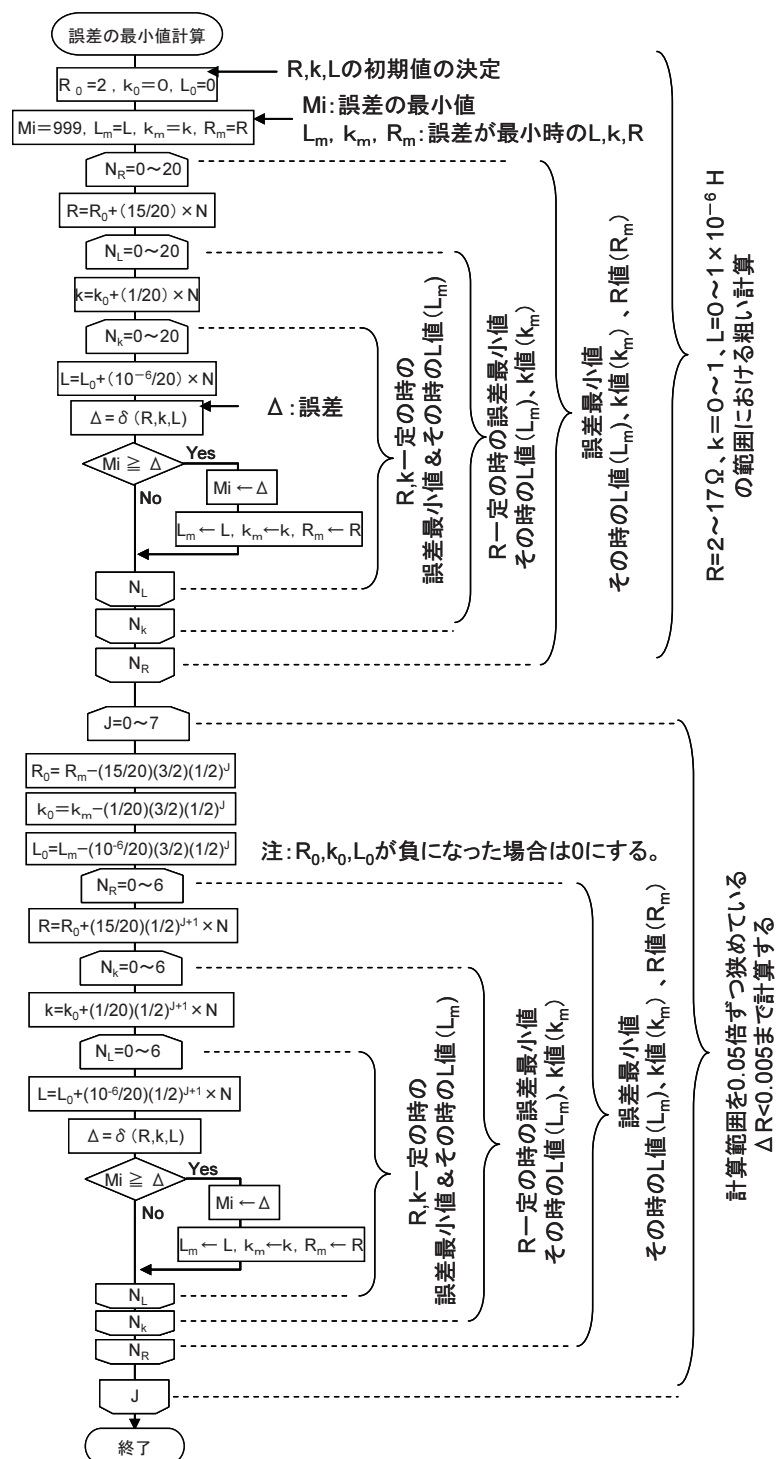


図7 誤差計算のアルゴリズム

Fig.7 Algorithm to get the difference between the calculation and measurement results

4. 結 果

ランプを定常点灯し、その波形を測定し、上述の計算方法により R_1 , R_2 を求めた. 測定波形と、計算によって求められた波形を図 8 に示す. 非常によく一致しているのが確認できる.

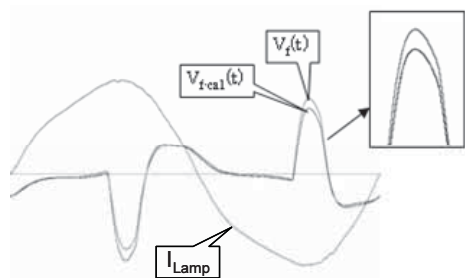


図 8 測定波形と計算による波形

Fig.8 Measured and calculated wave-forms

電極スポットの位置を計算するためのフィラメント電流・電圧の測定に於いて、バラストへのランプの接続の仕方が 2 通り考えられる. したがって電極の端子 (a 端子, b 端子) とバラストの出力端子 (バラスト端子①, ②) の接続が図 9(a) (b) に示すような 2 通りについて実験を行った.

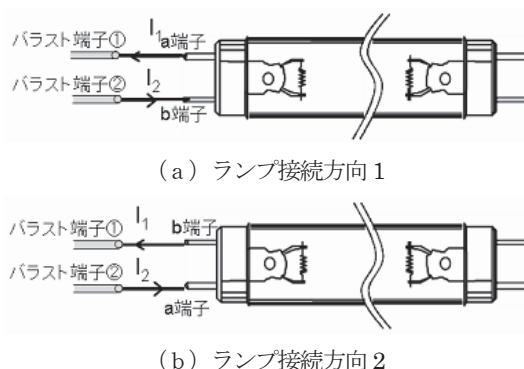


図 9 バラストへのランプ接続方向

Fig.9 How to connect the lamp to the ballast

その計算結果を図 10, 図 11 に示す.

図 10 は新品ランプの R_1 , R_2 の計算結果である. この結果から、新品ランプではバラストへの接続端子 (則ち a 端子と b 端子) を入れ替えても R_1 , R_2 の値はさほど変化しないことがわかる. これはランプの端子を入れ替えても電極スポットの位置がさほど変化していないことを示していると考えられる.

図 11 に数千時間点灯のランプの計算結果を示す. 新品のランプと比較すると, R_1 , R_2 の大小の関係が異なっていることが確認できる. これは点灯時間によって電極スポットの位置が変化して

いることを示していると考えられる.

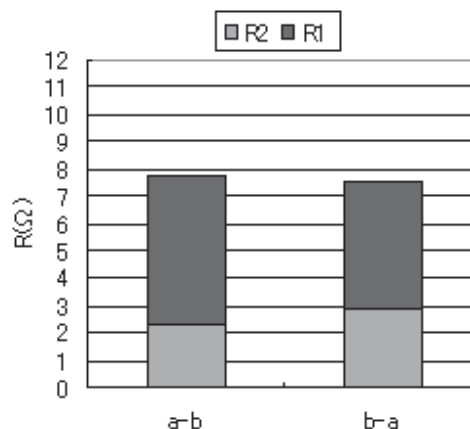


図 10 新品ランプのスポット位置の計算結果

Fig.10 Calculation results of the spot position for a new lamp

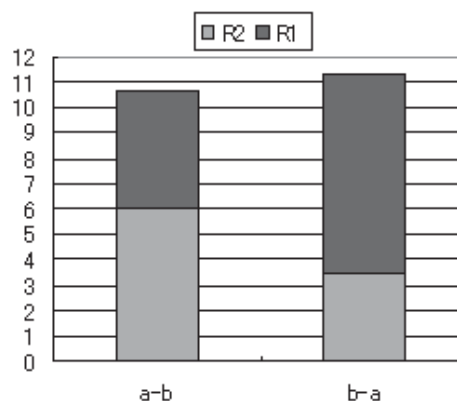


図 11 数千時間点灯のランプのスポット位置計算結果
Fig.11 Calculation results of the spot position for the lamp used for a few thousand hours

5. 考 察

5.1 寄生インダクタンス値と抵抗値の妥当性

寄生インダクタンスを考慮に入れず, 図 12 に示すようにフィラメントコイルを抵抗だけで計算した結果, 図 13 に示すように位相にずれが生じた.

実際に L C R メーター (HIOKI 3532-50LCR HITEATER, 日置電機株式会社製) でフィラメントの L 値を測定した結果は約 $0.4 \mu\text{H}$ であり, 今回の計算結果から求めた L 値は約 $0.3 \mu\text{H}$ であった. これより, 寄生インダクタンスが存在すると見なすのは妥当であると考えられる.

また, 計算結果で得られた抵抗値は約 10 数 Ω であった. これは点灯時の放電電流 (0.4A) と同じ値の電流をランプのフィラメントに加熱電流とし

て流した場合の抵抗値（このときのフィラメント端子電圧は約 4.5V であり，抵抗値は約 11Ω となる）に近い値であり，「実際の点灯では加熱電流と放電電流が同時にフィラメントに流れること」「電極スポット部分の温度がイオン衝撃による加熱で高くなっていること」の2点を考慮すると妥当な値であると考えている。

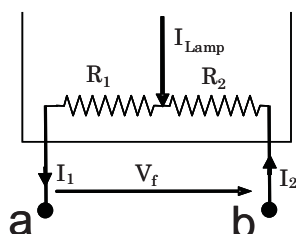


図 12 フィラメントを抵抗だけとした等価回路
Fig.12 Equivalent circuit of the filament when thinking of the filament as resistance

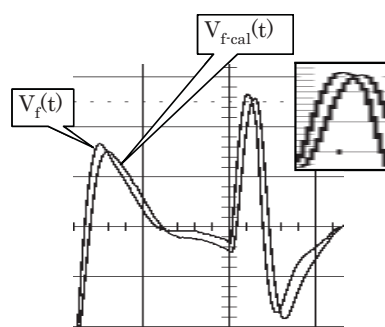


図 13 V_f の測定波形とフィラントを抵抗として計算した波形

Fig.13 Measurement and Calculated waveforms of the filament voltages when thinking of the filament as resistance

5.2 抵抗値より求まる電極スポットの位置について

まず新品のランプについて考える。図 10 の計算結果（新品ランプ）に関しての電極スポットの位置は図 14 に示すようになっていいると考えられる。新ランプはエミッタが豊富に存在しているために，ランプの a - b 端子とバラスト端子との接続を逆にしても，電極スポットの位置は変化しない（図 14(a), (b)）。

次に長時間点灯ランプ（点灯時間は数千時間）について考える。これはエミッタが減っているため，ランプ端子（a - b）とバラスト端子との接続を逆にすると電極スポットの位置は変化すると考えられる。この変化の仕方を図 11 の結果より推測すると，図 15 に示すように電極スポットの位置

が変化していると考えられる。

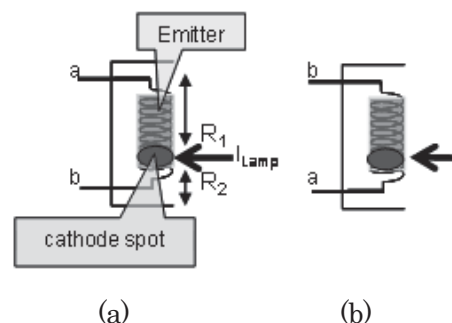


図 14 新品ランプのスポットの様子
(新品ランプ)

Fig.14 States of the filament (a new lamp)

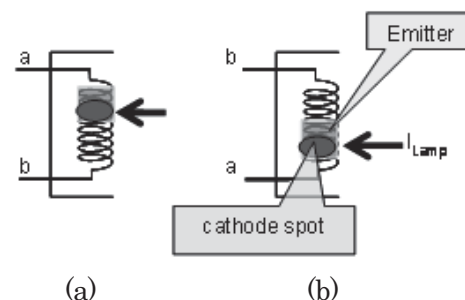


図 15 長時間点灯ランプでのスポットの様子
Fig.15 States of the filament (a used lamp)

6. 結 論

本研究では，現在主流となっているインバータ点灯システムでのランプ寿命の評価を行うことを最終目的として，現行の代表的な点灯システムで電極スポットの位置を把握できるかどうかの検討を行った。

ランプの電極フィラメントを抵抗とインダクタンスからなる回路（等価回路と呼ぶ）と見なし，ランプ電流が流入（あるいは流出）する点（スポット）の前後でフィラメントを流れる電流が I_1 から I_2 に変わると考える（ I_1, I_2 は測定可能）。そして I_1, I_2 がフィラメントの等価回路を流れることにより計算される電圧 $V_f(I_1, I_2)$ が，フィラメントの電圧波形 V_f （測定値）と等しくなるような等価回路を求めることで，電極スポットの位置を求めることが可能であることを確認した。

参 考 文 献

- 1) 中村純之助:「蛍光放電管の寿命の推定」, 照学誌, 第 37 卷, 第 10 号, pp. 347-355 (1953)
- 2) 中村純之助:「蛍光放電管の寿命に関する研究」, 日立評論, 第 40 卷, 第 6 号, pp. 85-89 (1958)
- 3) 福本努他:「蛍光ランプの寿命に関する諸因子」, 日立評論, 別冊 17 号, pp. 21-26 (1958)
- 4) 木崎泰作:「けい光放電管の黒化に関する実験的研究」, 照学誌, 第 42 卷, 第 11 号, pp. 14-21 (1958)
- 5) Yoshio Watanabe et al, “Cathode Fall Characteristics of Fluorescent Lamps under High-Frequency operation”, Jpn. J. Apply. Phys. Vol. 32, pp. 3593-3600 (1993)
- 6) Katsuhide Misono et al, “Effect of Operating Frequency of Fluorescent Lamp on Barium Sputtering from Electrode”, J. Light&Vis. Env. Vol. 25, No. 2, pp. 1-9 (2001)
- 7) Tadao Uetsuki et al, “Dependence on the operation Frequency of Negative Glow”, J. Light&Vis. Env. Vol. 23, No. 1, pp. 10-19 (2000)
- 8) 植月唯夫他:「低圧放電の高周波点灯に於ける希ガスの陰極降下電圧に及ぼす影響」, 照学誌, 第 83 卷, 第 11 号, pp. 827-838 (1999)
- 9) 植月唯夫他:「電極加熱が蛍光ランプのクレストファクターと陰極降下電圧の關係に及ぼす影響」, 照学誌, 第 84 卷, 第 8A 号, pp. 480-485 (2000)

