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関係に及ぼす影響

正会員 植 月 唯 夫 正会員 田 口 典 幸 正会員 野 田 渉
(松下電工株式会社)

Effect of Cathode Heating on Relation between Crest Factor and Cathode Fall Voltage

Member Tadao Uetsuki, Member Noriyuki Taguchi and

Member Wataru Noda (Matsushita Electric Works, Ltd.)

ABSTRACT

The operating life of a fluorescent lamp is determined by the life of its cathode, which depends on how quickly the cathode loses its oxide coating. There are two mechanisms, vaporizing and sputtering, in this process. The sputtering is affected by the current crest factor (CCF) because the electron current is determined by the cathode temperature and the electric field of the cathode fall :

$$I_e \propto T^2 \exp(-e\phi/kT) \exp(0.4\sqrt{E}/T).$$

When CCF is high, the cathode temperature cannot follow variations in the current because of thermal inertia. As a result, the cathode fall voltage (CFV) increases in order to supply the flow of peak electron current, which leads to heavy sputtering. The equation for electron current also shows that CFV can be reduced by heating the cathode auxiliarily if CCF is high. Examination of the relations among CCF, CFV, and the cathode temperature measured by the indirect method showed that

- (1) The peak CFV increases as the CCF becomes higher when the cathode is not heated.
- (2) The peak CFV can be reduced by heating the cathode if the CFV is high.
- (3) The heating power needed to reduce the CFV is small enough for the practical circuit.

KEYWORDS : crest factor, cathode fall voltage, cathode heating

1. 序論

照明用光源の主流である蛍光ランプは、近年省エネルギーを目的として高周波点灯が主流になってきている。その状況の中で蛍光ランプ寿命という観点から、クレストファクターという概念が点灯装置の設計上規定されている¹⁾。蛍光ランプの寿命には光束の維持率がある値以下になるまでの時間によって規定されるものと、点灯しなくなる（以下不点と呼ぶ）までの時間で規定されるものと2つが存在し、定格寿命はどちらか短い方と規定されている。クレストファクターは後者の不点寿命に関する情報を与えると考えることができる。

ランプの不点寿命は電極に塗布されているエミッタと呼ばれる物質がなくなったときに発生する。エミッタの消耗の仕方は熱に因る蒸発とイオン衝撃による飛散（以下スパッタと呼ぶ）の2つが存在する。そしてランプの電極は、さほどクレストファクターが大きくない場合を想定して、定格寿命(数千時間～1万数千時間)の間にエミッタが無くなってしまわないように設計されている。

Waymouth はエミッタの消耗過程について、一般的には点灯中は蒸発が主要因であり、始動時にはスパッタによるものが主要因であると述べている²⁾。御園は高周波点灯になると輝点温度が低下しているにもかかわらず、陰極サイクルでバリウムイオンの発光が増加することから、高周波点灯ではスパッタに因る消耗が主流であると述べている³⁾。クレストファクターはこのスパッタの割合が妥当かどうか（スパッタに因る短寿命が発生しないよう）を判断するための情報になる。

この基本的な概念について以下に説明する。放電電流はイオン電流と電子電流の和であり、その内の電子電流は以下の式で表わされる。

$$I_e = I_{th} \exp\left\{ \frac{(e/kT)\sqrt{eE}}{4\pi\epsilon_0} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここで $I_{th} = S A T^2 \exp(-e\phi/kT)$ は零電界熱電子電流であり、 S , A , T , e , ϕ , k , ϵ_0 , E は各々、電極表面積、材料で決定される定数、陰極温度、電子電荷、仕事関数、ボルツマン定数、真空中の誘電率、陰極降下部の電界強度である。(1)式はショットキー効果として知られている。

このように電極温度が低いと放電電流を供給するために陰極降下電圧を上昇させて電子電流を増加させる必要が生じるためスパッ

本発表は1998年のLS:8 (Greifswald, Germany) で植月唯夫が発表した。

タが増加し、極端な場合は短寿命になる。御園は小電流の蛍光ランプでは陰極降下電圧が14Vを超えるとスパッタにより短寿命になると報告している⁴⁾。御園は放電電流が大きくなると電子放出による冷却が増加する傾向にあると報告していることより、温度と陰極降下電圧の関係は変化すると考える。しかしスパッタそのものは入射するイオンのエネルギーに影響されることより、陰極降下そのものは14Vを判断基準として問題ないとする。クレストファクターが大きいということは電流の実効値に比べてピーク値が高いということであり、そのピーク電流を供給するために（電極温度は追従できないため）陰極降下電圧が上昇することで賄わなければならない。つまり陰極降下電圧のピークが上昇する。そのためクレストファクターが大きくなりすぎると、スパッタに因る短寿命が発生する。

以上がクレストファクターがスパッタに因る短寿命を判断するための情報となる理由である。この説明からもわかるように、実際に短寿命を引き起こすのは陰極降下電圧であり、クレストファクターそのものではない。たとえば別電源で電極を加熱して電極温度を上昇させれば、加熱していない場合に比べて(1)式からわかるように、同じクレストファクターでも陰極降下電圧のピーク値は低下し寿命に悪影響を及ぼさない。

本論文は高周波点灯に於て、クレストファクターが陰極降下電圧に及ぼす影響、および電極加熱がクレストファクターと陰極降下電圧の関係に及ぼす影響を2つの方法（以下、直接法^{5)~8)}と間接法⁹⁾と呼ぶ）で調べることを目的としている。それぞれの実験に用いた電極はその定格値（実験に用いた電流値）で寿命が確認されたものを用いた。

2. 実験および結果

(1) 直接測定法による高周波点灯時の陰極降下電圧の測定

図1に本実験に使用した負グローランプを示す。ランプ管径は35mmで封入ガスはAr/Hgで400Pa/0.8Paである。図2は本実験の点灯回路を示す。点灯周波数は50kHzである。インピーダンスZは無誘導抵抗100Ωを用いた。ランプ電流の実効値は使用した電極の定格値である0.21Aとした。

電極を加熱しない場合（図2のSWを開）の測定結果を図3に

図1 陰極降下電圧を調べるために使用したランプ
(Ar/Hg: 400Pa/0.8Pa)

Fig. 1 Structure of the lamp used for the measurement of the cathode fall voltage.

図2 直接法による陰極降下電圧の測定回路

Fig. 2 Circuit for the measurement of the cathode fall voltage by the direct method.

図3 直接法で測定した電流、電圧、Ar スペクトル波形(図2のSW: OPEN)
Fig. 3 Wave form of the current, voltage and Ar spectrum measured by the direct method. ("SW" is open in Fig. 2).

示す。この図の上から順に、ランプ電流、ランプ電圧、Ar スペクトル(811.5nm)である。スペクトルを測定した場所は片側電極近傍であり、この図のデータ波形からもわかるように、その電極が陽極サイクルの場合にはAr スペクトルは観察されない。この結果は高周波点灯では、低周波点灯時に発生しない⁵⁾¹⁰⁾ランプ電圧に振動が発生することを示す。またこの振動は電氣的に絶縁された分光器によりAr スペクトル(811.5nm)を測定した結果からも同様に観察される。この結果から高周波点灯に於ける負グローランプ電圧の振動はノイズではなく陰極降下電圧の振動を示すと考えられる⁵⁾。このことはAr スペクトル(811.5nm)の4p [5/2]₂,あるいは4p [5/2]₃の励起準位が約13Vであり、そのスペクトルの立上り時の電圧が約13Vであることから説明できる。

次に電極を加熱した場合（図2のSWを閉）の測定結果を図4に示す。このときの電極加熱電流は0.25Aである。この結果から電極を加熱すれば陰極降下電圧のピーク値は低下し、振動も消滅することがわかる。

(2) 間接測定法⁹⁾による高周波点灯時の陰極降下電圧の測定

図5に50kHz点灯時の蛍光ランプの陰極降下電圧を間接的に測定する回路を示す。使用したランプは管径が25.5mm、長さ588.5mmの市販の高周波点灯専用蛍光ランプである(Ar/Hgが300Pa/0.8Pa)。放電電流は0.4Aとした。まず図5(a)に示すようにアルミホイルを接地側から遠い電極近傍に巻きつける。アルミホイ

$I_f=0.25A$

図4 直接法で測定した電流、電圧波形 (図2のSW : CLOSE, $I_f=0.25A$)
Fig.4 Wave form of the current and voltage measured by the direct method.
("SW" is closed in Fig.2, and $I_f=0.25A$).

(a)

(b)

図5 間接法による陰極降下電圧の測定回路
(a)ランプ電圧波形と信号波形が一致するよう調整
(b)(a)で設定したR, Cの定数で陰極降下電圧の測定

Fig.5 Circuit for the measurement of the cathode fall voltage by the indirect method.

- Determining of R and C to adjust V_{sig} on the electrode area to the lamp voltage.
- Measuring the cathode fall voltage by moving Al-foil to another electrode area.

ルの幅は10mmである。そしてアルミホイルにつないだ積分回路からの信号がランプ電圧波形と等しくなるように積分回路定数 (抵抗と容量) を決定する。その値は $1\text{ k}\Omega$ と 100pF であった。次に図5(b)に示すように接地側の電極近傍にアルミホイルを移動させて測定した。

まず電極加熱のない状態 (図5のSWが開) で測定した電圧波形と、それと同時に測定したArスペクトル (811.5nm) の時間変化を図6に示す。この変化は負グローランプの実験から得られた

ランプ電圧の変化と同じである。

次に電極加熱した状態 (図5のSW閉) で測定した電圧波形を図7に示す。この結果も同様に直接法で測定した結果と同じように振動が観測されなくなっている。ここには示していないがさらに電極加熱電圧を上昇させると図4と同じようにきれいな正弦波となる。なお図5のSWが開の場合もSWが閉で電極が加熱されている場合も流れる放電電流は同じであり、その電流波形は図7に示した。

- (1)と(2)の結果から直接的に陰極降下電圧を測定する方法と間接的に測定する方法に差がないことが確認できた。そこで次に間接法を用いてクレストファクターと陰極降下電圧の関係を調べる。
- (3) 高周波点灯時の蛍光ランプの陰極降下電圧とクレストファクターと温度の関係

実際のランプの陰極降下電圧は間接的な方法で測定可能なことが前節で確認できた。そこでクレストファクターと陰極降下電圧の関係を測定するために図8に示すような点灯回路 (間接法) でランプを点灯した。使用したランプは点灯装置の都合上、ランプ長が295mmのものでその他は上述したものと同一 (Ar / Hg が $300\text{ Pa} / 0.8\text{ Pa}$, 使用電極の定格値が $0.4A$) である。図9は図8のSWが開の状態での点灯電流波形と陰極降下電圧の時間変化を示したものである。図9の(a)(b)(c)は順に電流のクレストファクターが1.4, 1.8, 2.1の場合の結果を示している。この結果よりクレストファクターが高くなると陰極降下電圧のピーク値が上昇しているのがわかる。(a)(b)(c)の各列の上から順に放電電流波形の包絡線、接地側の電極付近の間接法により測定された電圧波形の包絡線、その電極近傍の電圧波形中で図中のCathode fallと示された部分がピークになる箇所を拡大した波形、である。

陰極降下電圧 (5 V/div)

図6 間接法で測定した陰極降下電圧波形とArスペクトル波形 (図5(b)のSW : OPEN)

Fig.6 Wave form of the voltage and Ar spectrum measured by the indirect method. ("SW" is open in Fig.5 (b)).

図7 間接法で測定した放電電流波形と陰極降下電圧波形 (図5(b)のSW : OPEN, $V_f=4\text{ V}$)

Fig.7 Wave form of the current and the cathode fall voltage measured by the indirect method. ("SW" is closed in Fig.5 (b), and $V_f=4\text{ V}$).

図8 クレストファクターと陰極降下電圧の関係を測定する回路

Fig.8 Circuit for the measurement of the relation between the crest factor and the cathode fall voltage.

次に電極を加熱することにより陰極降下電圧がどのようなになるかを調べるために、図8のSWが閉 ($V_f=4V$) の状態でランプを点灯した。図10にその場合のクレストファクターを変化させたときの点灯電流波形と陰極降下電圧の時間変化を示す。この測定結果から、電極を加熱させることによりクレストファクターが大きくなっても陰極降下電圧のピークを低下させることがわかる。各波形の上からの順番は図9と同じである。

図8の点灯回路で電極加熱の有無(SWの閉、開)をパラメータと取り、クレストファクターと陰極降下電圧のピーク値の関係を図11に示す。

3. 結果のまとめ及び考察

(A) 実験(1)(2)より、直接法と間接法のどちらでも Ar-Hg 低圧放電の高周波点灯時の陰極降下電圧の時間的変化が測定でき、両者に差がないことが確認できた。そして陰極降下電圧のピーク値が電極を加熱すると低下することが確認できた。

これは電極温度が上昇することで(1)式で示された熱電子電流 I_{th} が増加し、同じ電子電流 I_e を供給するための陰極降下部の電界

図9 図8 (SW 開) での測定結果

上から順に放電電流波形包絡線、陰極降下電圧波形包絡線、陰極降下電圧ピークの波形

左から順にクレストファクターが(a)1.4, (b)1.8, (c)2.1

Fig.9 Wave form of the lamp current and the cathode fall voltage measured by the indirect method. ("SW" is open in Fig.8)

From the upper, the envelopes of the current and the cathode fall voltage wave form, and the wave form of the cathode fall voltage at the peak time.

From the left, (a) CCF=1.4, (b) CCF=1.8, (c) CCF=2.1

図10 図8 (SW 閉 : $V_f = 4$ V) での測定結果
上から順に放電電流波形包絡線, 陰極降下電圧波形包絡線, 陰極降下電圧ピークの波形
左から順にクレストファクターが(a)1.4, (b)1.8, (c)2.1

Fig.10 Wave form of the lamp current and the cathode fall voltage measured by the indirect method. ("SW" is closed in Fig.8, $V_f = 4$ V)
From the upper, the envelopes of the current and the cathode fall voltage wave form, and the wave form of the cathode fall voltage at the peak time.
From the left, (a) CCF=1.4, (b) CCF=1.8, (c) CCF=2.1

図11 クレストファクターと陰極降下電圧ピーク値の関係
Fig.11 Crest factor vs. Peak value of the cathode fall voltage.

Eを小さくすることができる。その結果陰極降下電圧が低くなる、と考えられる。

また電極加熱の陰極降下電圧へ与える影響としてピーク値の低下の他に振動の消滅があるが、これについてはイオン電流を考慮に入れることで説明できることが報告されている⁵⁾。

(B) クレストファクターと陰極降下電圧の関係を間接法で測定し、高周波点灯時に放電電流の実効値が同じであってもクレストファクターが高くなると陰極降下電圧のピーク値が上昇することが確認できた。

これは序論で述べたように電流のピーク値に電極温度が追従できないため陰極降下電圧を上昇させる事で電子電流を供給しようとしていることを示す¹⁰⁾。

(C) クレストファクターが高い場合でも電極を外部電源で加熱することにより、陰極降下電圧のピーク値を低下させることができる¹⁰⁾。これは(1)式において温度 T を上昇させると電界 E が低くてもよいことを実験的に示したものと考える。

ここでの実験結果は以下の3つの事を示している。

(1) クレストファクターが大きくなると陰極を加熱しない場合

は、陰極降下電圧のピークの値は御園が短寿命の可能性がある
と述べた14Vを超える値にある場合もあり短寿命になる可
能性があることを示す。ただしこれは常に14Vを超えているの
ではなくそのピークの瞬間だけであり、これが14Vを超えても寿
命が悪くなるとはいえない。ただ14V以下なら全く問題がない
という事はできる。

- (2) 電極を外部的に加熱することで、クレストファクターが2.1を
超えた場合でも陰極降下電圧を14V以下に低く抑えることが
可能であることを示している。
- (3) その場合の電極加熱は4V程度であり、これは現在使用され
ているバラストで用いられている範囲⁽¹⁾であり、実用上問題の
ない範囲であることが確認できた。

4. 結論

Ar-Hg低圧放電の陰極降下電圧の時間的な変化がクレストファ
クターによってどのように異なるかを以下の2つの方法で調べ
た。一つは負グローランプの電気特性を測定する直接法であり、
他の一つは陽光柱を有するランプの陰極降下部の電位をアルミホ
イル帯により測定する間接法である。そしてその2つの方法に矛
盾がないことを確認すると共に、以下の結果を得た。

正弦波での点灯周波数が低周波から高周波に変わると陰極降下
電圧のピークが上昇し、かつ振動が発生する。これは陽極サイク
ルでの電極加熱がなくなるための電極温度の低下とイオン電流の
動きを考慮することで説明できる。

また高周波点灯でクレストファクターが大きくなると陰極降下
電圧のピーク値が上昇するが、電極を外部的に加熱することでそ
のピーク値を問題ない領域まで低下させることが可能なことがわ
かった。しかもその加熱に必要な入力実用上問題のない範囲で
あることが確認できた。

最後に本研究を進めるにあたり励起衝突断面積等に関してのデ
ータ及びアドバイスを戴いた気体エレクトロニクス研究所の林真
博士に感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) JIS C 8117.
- (2) J. F. Waymouth: ELECTRIC DISCHARGE LAMPS,
M. I. T. Press, pp.102-109 (1971).
- (3) 御園, 神藤, J. T. Verdeyn: 蛍光ランプの点灯周波数が電
極からのバリウムスパッタリングに及ぼす影響, 照学誌,
83-11, p.819 (1999).
- (4) 御園: 小電流熱陰極蛍光ランプの陰極降下電圧, 照学誌,
75-6, p.296 (1991).
- (5) 植月, 田口, 野田: 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, 83-11, pp.827-
838 (1999).

- (6) 植月, 田口: 負グローの周波数依存性についての研究, 照
学誌, 81-8A, pp.628-637 (1997).
- (7) 植月, 田口: 負グローランプのプラズマ特性についての研
究, 照学誌, 80-8A, pp.532-539 (1996).
- (8) M. J. Druyvesteyn: Der Niedervoltbogen, Zeit Phys. 64,
p.781 (1930).
- (9) 和田, 東方: 蛍光ランプの軸方向管内電圧の間接測定法,
松下電工技報, No.29, pp.19-22 (1984).
- (10) T. Uetsuki, N. Taguchi and W. Noda: Dependence on
the Operating Frequency of Cathode Fall Voltage, LS-8,
No.L08 (Greifswald, Germany, 1998).
- (11) JIS C 8108.

(受付日2000年1月24日/採録日2000年4月13日)

植月 唯夫 (正会員)

松下電工(株), 電材分社, 照明 R&D センター,
光源グループ。

田口 典幸 (正会員)

松下電工株式会社, 制御機器分社, 制御・車
載技術開発研究所

1961年生まれ。1987年, 京都大学工学研究
科電子工学修士課程修了。松下電工株式会
社に入社し, 新蛍光ランプの研究開発及び蛍
光ランププラズマ物性の研究に従事し, 現在は大気圧プラズマ洗浄
装置の研究・開発に従事。

野田 渉 (正会員)

松下電工株式会社, 電材分社, 照明 R&D セ
ンター, 光源グループ

1969年生まれ。1994年, 三重大学大学院教
育学研究科技術教育終了。松下電工株式会
社に入社し, 蛍光ランプの研究開発に従事。