

冷陰極ランプの陰極降下電圧と電極材料に関する研究

正会員 武田 雄士 (ハリソン東芝ライティング株式会社) 非会員 北本 良太 (津山工業高等専門学校)
 専門会員 植月 唯夫 (津山工業高等専門学校) 専門会員 福政 修 (山口大学)

The Study on the Relation between the Cathode Fall Voltage and the Electrode Material of the CCL

Member Yuji Takeda (Harison Toshiba Lighting Corp.),

Non member Ryota Kitamoto (Tsuyama National College of Technology),

Fellow member Tadao Uetsuki (Tsuyama National College of Technology) and

Fellow member Osamu Fukumasa (Yamaguchi University)

ABSTRACT

To improve the efficiency of the cold cathode lamp (CCL), it is important to select the optimum electrode material to reducing the cathode fall voltage (CFV). Furthermore, it is necessary to understand the relationship between the electrode material and the CFV. Considering the above, we measured the CCL's CFV with an indirect CFV measurement method using a hot cathode fluorescent lamp. By observing the negative glow of the electrode, we investigated the relationship between the CFV and the negative glow condition. The results showed that there is a relationship between the CCL's CFV and the γ coefficient of the electrode. Moreover, they make it clear that there is a relation between the CFV and the negative glow condition of each electrode material. We conclude that the CFV measurement method is useful for estimating the performance of a CCL's electrode.

KEYWORDS : CCL, electrode, cathode fall voltage, negative glow

1. はじめに

近年、市場が急激に広がっている液晶ディスプレイは、液晶の背面に配置されたバックライトの光を用いて画面を発光させる。バックライトとして直径2~4mm程度の冷陰極ランプ(CCL)が広く用いられている。現在、液晶ディスプレイはさらなる低消費電力化が進められており、液晶ディスプレイ消費電力の大きな割合を占めるCCLに対しても低消費電力化(高効率化)が望まれている。CCL低消費電力化の方法として、電極構造の最適化による陰極降下電圧(CFV)の低減があげられる。CCL電極周辺の放電現象に関しては、過去に野畑が負グローについて研究し¹⁾、陰極降下領域に関しては真瀬²⁾や土手³⁾がシース領域の理論的な研究を行っている。またCCLホローカソード内のフォトン役割についての研究がChaudahri⁴⁾により報告されている。しかしながら、電極材料に関しては、ホローカソード形状電極の材料をNiからMoに変更することでCCL全体での効率が改善される⁵⁾ことが報告されているのみで、電極材料とCFVとの関係についての詳細な検討はいまだなされていない。これは、CCLのCFVを容易に測定する方法が確立されていないことが要因の1つである。

そこで今回、熱陰極蛍光ランプ(HCFL)用に考案されたCFV測定法⁶⁾⁷⁾を用いてCCLのCFV測定を試み、さらに、CFVと電

極材料との関係について調べたので報告する。

2. CCLの構造

図1にCCLの構造を示す。CCLはガラス管と電極からなる。ガラス管内には希ガスと水銀が封入されており、ガラス管内表面には紫外線を受けて可視光を発する蛍光体が塗布されている。電極は金属板にリード線を取り付けたもので、ガラス管の両端に配置される。CCL点灯回路は、出力端子の一方(高電圧側)から数百~千数百V、数十kHzの交流電圧が出力され、出力端子の他方(低電圧側)は接地される。点灯回路からリード線を介して両電極間に電圧が加えられると、電極間を数mAの放電電流が流れてグロー放電が生じ、CCL内に封入された水銀が紫外光を放射する。この紫外光が蛍光体で可視光に変換されてCCLから放射され、液晶ディスプレイのバックライト光として利用される。

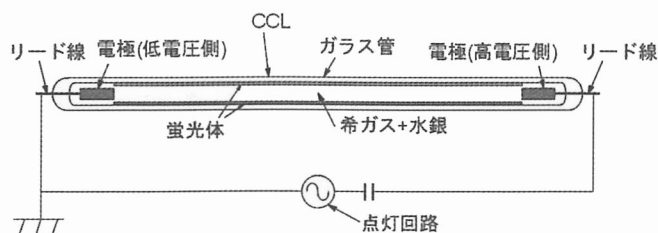


図1 CCLの構造

Fig.1 The structure of the CCL.

本論文の一部は平成17年度照明学会全国大会で北本良太が発表した。

今回の実験に用いた CCL の外径は 4 mm, 内径は 3 mm, 全長は 110mm である。一般の CCL の場合, 陰極降下電圧を上げずにより多くの電流を取るためにホロー形状の電極が使用されており, 希ガスは Ne と Ar があわせて封入されているが, 今回は, 負グローの発光状態を観察しやすいよう, 板形状の電極 (幅 1.7mm, 長さ 5.2mm, 厚み 0.1mm) を用い, 希ガスは Ne のみを封入した。電極材料は, 放電灯の電極材料として広く用いられている, ニッケル (Ni), モリブデン (Mo), タングステン (W) の 3 種類を選んだ。

3. CCL の陰極降下電圧測定方法

以下に, 今回行った CCL の CFV 測定方法を示す。

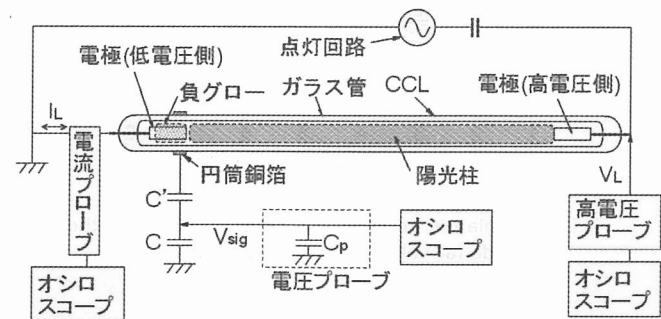
3.1 陰極降下電圧の測定方法

図 2(a) は CFV 測定回路を示す。低電圧側の CCL 電極部ガラス管表面には, 円筒銅箔が巻き付けられ, コンデンサー C, C' が接続される。C と C' の間には電圧プローブ (内部静電容量: C_p) が接続され, V_{sig} が測定される。高電圧側の CCL リード線には高電圧プローブが接続され, ランプ電圧 (V_L) が測定される。また, CCL 低電圧側には電流プローブが配置され, ランプ電流 (I_L) が観測される。

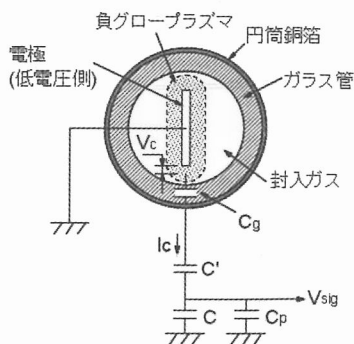
図 2(b) は円筒銅箔を巻きつけた電極部の断面を示す。電極 (低電圧側) は陰極として動作中である。C_g は円筒銅箔内表面とプラズマの間の静電容量を表す。陰極表面には負グロープラズマが現れ, CFV の値 V_c は, 負グローのプラズマ電位に等しい。

図 2(c) は, 図 2(b) の等価回路である。

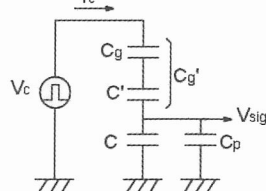
V_c は, C および C' を適した値に選ぶことで以下のように与えられる⁸⁾。



(a) 陰極降下電圧測定回路
(a) The cathode fall voltage measurement circuit



(b) 電極 (低電圧側) 部断面
(b) The cross section at the electrode (low voltage side)



(c) 等価回路
(c) The equivalent circuit

図 2 陰極降下電圧測定方法
Fig.2 The method of measuring the cathode fall voltage.

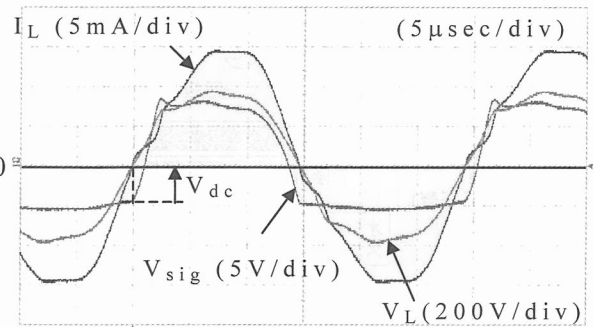


図 3 オシロスコープ上で観測される V_{sig}, I_L および V_L の波形と V_{dc} の値
Fig.3 The waveforms of the V_{sig}, the I_L and the V_L and the value of the V_{dc}.

$$V_C = \frac{C_g' + C + C_p}{C_g'} (V_{sig} + V_{dc}) \dots \dots \dots (1)$$

$$\left(C_g' = \frac{C_g C'}{C_g + C'} \right)$$

なお, V_{dc} はコンデンサーによってカットされた V_{sig} の直流成分である。

図 3 は, 本測定回路にてオシロスコープ上で観測された V_{sig}, I_L, V_L の波形を示す。V_{dc} の値は, I_L = 0 のときの |V_{sig}| に等しい。ここで,

$$\frac{C_g' + C + C_p}{C_g'} = \alpha \dots \dots \dots (2)$$

とおくと, (1)式は次式で表される。

$$V_C = \alpha \times (V_{sig} + V_{dc}) \dots \dots \dots (3)$$

(3)式に α, V_{sig}, V_{dc} の値を代入することで V_c の値が得られる。α の値の求め方を以下に示す。

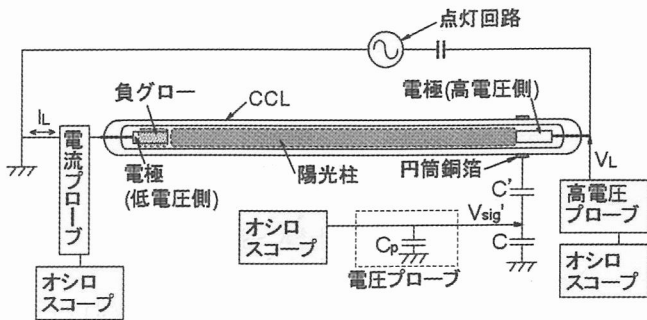
3.2 α の求め方

図 4(a) は, α の値を求める際の測定回路を示す。高電圧側の電極部ガラス管表面に円筒銅箔が巻き付けられ, コンデンサー C, C' が接続される。C と C' の間には電圧プローブ (内部静電容量: C_p) が接続され, V_{sig} が測定される。高電圧側の CCL リード線には高電圧プローブが接続され, V_L が測定される。また, CCL 低電圧側には電流プローブが配置され, I_L が観測される。

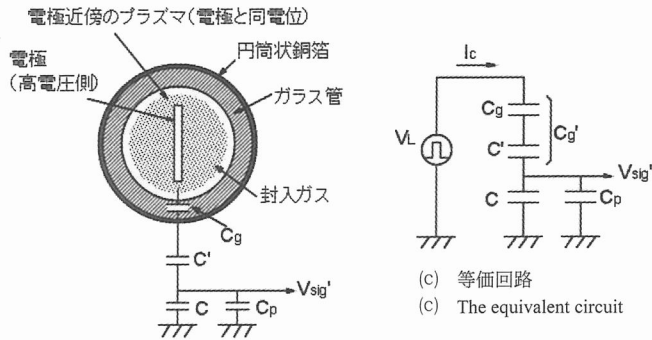
図 4(b) は円筒銅箔を巻きつけた部分の断面を示す。電極 (高電圧側) は陽極として動作中である。C_g は円筒銅箔内表面とプラズマの間の静電容量を表す。陽極近傍プラズマの GND. に対する電位差は, V_L に等しい。

図 4(c) は, 図 4(b) の等価回路である。

図 4(b), 図 4(c) において, プラズマ電位は電極電位に等しいと見なせることより, 次式が成り立つ。



(a) α の測定回路
(a) The α measurement circuit



(b) 電極 (高電圧側) 部断面
(b) The cross section at the electrode (high voltage side)

図4 α の測定方法
Fig.4 The method of measuring the value of the α .

$$V_L = \frac{C_g' + C + C_p}{C_g'} V_{sig'} \quad (4)$$

$$\left(C_g' = \frac{C_g C'}{C_g + C'} \right)$$

$$\alpha = \frac{V_L}{V_{sig'}} \quad (5)$$

(5)式に V_L , $V_{sig'}$ の値を代入することで α の値を求められる。
なお、測定に用いた円筒銅箔は厚さ0.1mm、幅3mmである。
 C' は10pFのコンデンサーを4個、直列に接続したものを、
 C は10pFのコンデンサーを1個用いた。 C , C' の値はHCLFの
CFVを測定する際のものよりも容量の小さいものである。得ら
れた α の値は約21である。

4. 実験結果

以下に、電極材料ごとのCFVおよび V_L を測定した結果を示す。さらに、電極表面の負グロー発光状態を観察した結果も示す。なお、 I_L は2mAから8mAまで変化させた。

4.1 電極材料ごとの陰極降下電圧とランプ電圧

図5は、電極材料ごとの I_L とCFVの関係を示す。CFVの値は I_L の高低に関わらず、W電極が最も低く、Ni電極が最も高い。また、電流の増加に対するCFVの増加の傾きに注目すると、Mo電極、W電極の場合、ランプ電流を2mAから8mAまで増やす

のに比例してCFVは一様に増加する。これに対して、Ni電極の場合、電流の増加に対するCFV増加の割合は、低電流(2~4mA)時は非常に小さいのに対し、高電流(4~8mA)時は大きくなっている。

図6は、電極材料ごとの I_L と V_L の関係を示す。 V_L の値は、 I_L の高低に関わらず、W電極が最も低く、Ni電極が最も高い。これは、CFVと同じ傾向である。

4.2 電極材料ごとの負グロー発光状態

図7に、各電極材料における電極表面の負グロー発光状態を示す。2mAから8mAの範囲において、Mo電極、W電極では、負グローは電極表面全体に広がったままである。これに対して、Ni電極では、4mA以下になると、電流を下げるに従って負グローが狭くなることが確認された。

5. 考察

5.1 電極材料ごとの陰極降下電圧とランプ電圧

5.1.1 陰極降下電圧とランプ電圧の関係

図5と図6の比較より、CFVの低い電極材料を用いたCCLは、 V_L も低くなることから分かる。 V_L はCFVと陽光柱両端電位差(V_p)

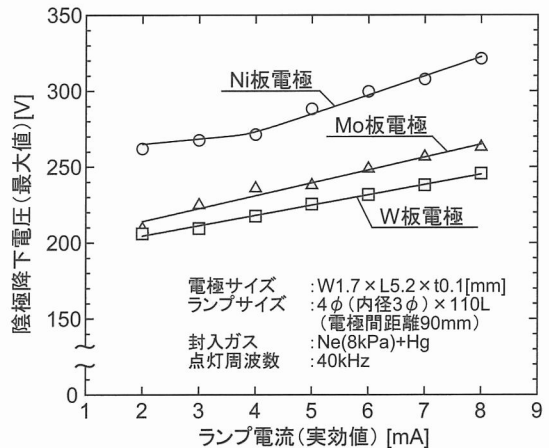


図5 電極材料ごとのランプ電流と陰極降下電圧の関係
Fig.5 The relation between the lamp current and the cathode fall voltage of each electrode material.

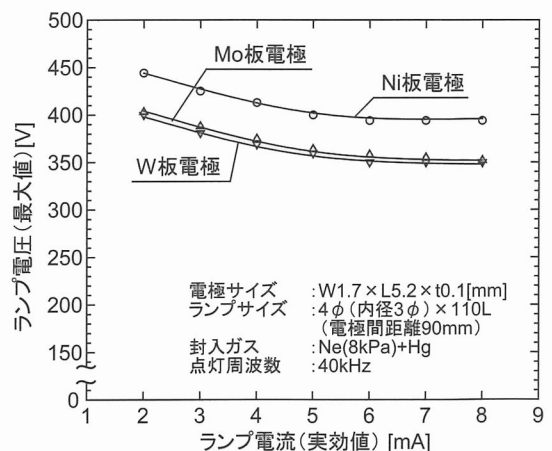


図6 電極材料ごとのランプ電流とランプ電圧の関係
Fig.6 The relation between the lamp current and the lamp voltage of each electrode material.

ランプ電流 (実効値)	Ni板電極表面	Mo板電極表面	W板電極表面
2mA			
4mA			
6mA			
8mA			

図7 各電極材料における電極表面の負グロー（橙色）発光状態
Fig.7 The negative glow (orange-colored) on the electrode of each electrode material.

の和である。V_pは電極材料に影響されないで、CFVが高いほどV_Lが高くなる。このため、CFVの最も高いNi電極CCLのV_Lが最も高く、CFVの最も低いW電極CCLのV_Lが最も低くなったものと考えられる。

5.1.2 電極材料と陰極降下電圧の関係

図5より、Ni電極、Mo電極、W電極のCFVは、Ni電極が最も高く、W電極が最も低いことが分かる。

表1に、電極材料ごとの仕事関数(φ)⁹⁾およびγ係数を示す。γ係数は文献値が見つからなかったため、L. M Kishinevsky¹⁰⁾によって示された次式

$$\gamma = \frac{0.2(0.8E_i - 2\phi)}{E_F} \dots\dots\dots(6)$$

(E_i: イオンの電離電圧, E_F: 金属のフェルミ準位)

を用いて、Hgイオンによるγ係数を求めた値を示す。

表1より、CFVはφよりもγに関連性の高いことが分かる。すなわち、ポテンシャル放出が、電極からの電子放出機構の主要因であると考えられる。このとき、電極表面での電子電流密度J_eとイオン電流密度J_iの関係は、次式で与えられる。

$$J_e = \gamma \times J_i \dots\dots\dots(7)$$

表1 電極材料ごとの仕事関数およびγ係数
Table1 Work function and γ coefficient of each electrode material.

金属材料	Ni	Mo	W
仕事関数 φ (eV)	4.61	4.15	4.52
γ係数 (Hg ²⁺)	0.098	0.11	0.13
CFV	高	中	低

ここで、陰極降下領域では電子が無衝突である²⁾とすると、陰極降下領域内の全ての場所で、電流密度Jは次式で与えられる。

$$J = J_i + J_e = (1 + \gamma) \times J_i \dots\dots\dots(8)$$

さらに、Child-Langmuir lawより、イオン電流密度J_iと陰極降下電圧V_cの関係は、次式で与えられる¹¹⁾。

$$J_i = \frac{4\epsilon_0}{9} \left(\frac{2e}{M_i} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{V_c^{\frac{3}{2}}}{d^2} \dots\dots\dots(9)$$

ここで、M_iはイオンの質量数、dはシース厚である。(8)式と(9)式より次の関係が得られる。

$$V_c = \left(J \frac{1}{1 + \gamma} \frac{9}{4\epsilon_0} \left(\frac{2e}{M_i} \right)^{\frac{1}{2}} d^2 \right)^{\frac{2}{3}} \dots\dots\dots(10)$$

(10)式より、γの値が大きいくほど、V_cが小さくなることが明らかである。

5.2 陰極降下電圧と負グロー発光状態の関係

Ni電極の場合、図7より、ランプ電流が4mA以下では、ランプ電流の増加にあわせて負グローが広がるが、4mAを超えると負グローは電極全体を覆うことが分かる。図5より、ランプ電流が4mAを超えると、ランプ電流に対するCFVの増加の割合が大きくなる。これらの結果から、本仕様のNi電極CCLの場合、4mA以下では正規グロー放電、4mA以上では異常グロー放電の状態にあると考えられる。

これに対して、Mo電極、W電極の場合、図7より、負グローは常に電極表面全体を覆っていることが分かる。また、図5より、CFVはランプ電流が高くなるにつれて一様に増加している。この結果から、本仕様のMo電極CCLおよびW電極CCLは4mA以下でも異常グロー放電の状態であると考えられる。ただし、Mo電極およびW電極のCFVは高電流(8mA)でもNi電極のCFVより低く、点灯中のスパッタリングによる電極消耗はNi電極よりも少ないと考えられる。以上の結果から、今回評価した電極材料の中では、W電極の性能が最も良いと考えられる。

6. まとめ

今回、HCFLのCFV測定法を用いてCCLのCFV測定を試みることにより、CCLのCFVと電極材料のγ係数との関係を明確にすることができた。さらに、電極表面の負グローを観察することにより、電極材料ごとにランプ電流増減に伴うCFVおよび負グロー発光状態の変化に違いのあることが明らかとなった。今回用いたCFV測定方法は、CCLの電極性能を評価するうえで非常に有効であると考えられる。

参考文献

- (1) 野畑：グロー放電の負グローについて，電学論，81-869, p.155 (1961).
- (2) 真瀬ほか：冷陰極放電における陰極降下理論の見直し，電学論 A, 111-9, p.383 (1991).
- (3) 土手ほか：局所的平衡場におけるグロー放電の陰極シース内の電界，電学論 A, 111-5, p.376 (1991).
- (4) R.M.Chaudahri, et al. : Role of photons in the glow discharge in hollow cylindrical cathodes, INT. J. ELECTRONICS, Vol.62, No.5, pp.679-683 (1987).
- (5) 菅原ほか：冷陰極蛍光ランプの高効率・長寿命化，H13照学全大，p.57 (2001).
- (6) Tadao Uetsuki, et al. : Dependence on the Operating Frequency of Cathode Fall Voltage, Proceedings of the International Symposium on the Science & Technology of Light Source, pp.360-361 (1985).
- (7) Tadao Uetsuki, et al. : Effect of the Cathode Heating on Relation between Crest Factor and Cathode Fall Voltage, J. Illum. Engng. Jpn., 84-8A, pp.480-485 (2000).
- (8) Tadao Uetsuki, et al. : Study on the relationship of the emission performance of the fluorescent lamp to the lighting time, Proceedings of the 5th Lux Pacifica, pp.29-32 (2005).
- (9) ベェ・エス・フォメンコ：電子放出特性便覧，日ソ通信社 (1972).
- (10) L. M. Kishinevsky : Estimation of Electron Potential Emission Yield Dependence on Metal and Ion Parameters, Radiation Effects, 19, pp.23-27 (1973).
- (11) 相川：電子現象，朝倉書店，p.135 (1967).

(受付日2006年12月18日 / 採録日2007年7月26日)



武田 雄士 (正会員)

ハリソン東芝ライティング(株)
〒794-8510 愛媛県今治市旭町5-2-1
1971年生。1996年3月愛媛大学大学院電気電子工学専攻卒，同年4月ハリソン電機(株) (現ハリソン東芝ライティング(株))に入社。現在に至る。

照明学会会員。



北本 良太 (非会員)

津山工業高等専門学校電気電子工学科
〒708-8509 岡山県津山市沼624-1
1984年生。2005年津山工業高等専門学校電気工学卒業後，同校の専攻科(電子・情報システム工学専攻)へ入学，2007年3月卒業。



植月 唯夫 (専門会員)

津山工業高等専門学校電気電子工学科
〒708-8509 岡山県津山市沼624-1
1955年生。静岡大学電気工学科卒，同大学院修士課程終了後，松下電工(株)に勤務し，照明用光源の研究開発に従事。2002年4月に津山工業高等専門学校電気工学科の教授として赴任，現在に至る。博士(工学)。所属学会は照明学会，電気学会。



福政 修 (専門会員)

山口大学大学院理工学研究科
〒755-8611 宇部市常盤台2-16-1
1946年生。1973年3月京都大学大学院工学研究科(博士課程)学修，同年4月京都大学工学部助手，1982年4月山口大学工学部講師，1983年4月同助教授を経て，1988年11月山口大学工学部教授，2006年4月同大学大学院理工学研究科教授，現在に至る。工学博士。電気学会，プラズマ・核融合学会，応用物理学会，日本物理学会，電子情報通信学会，電気設備学会会員。