

水銀の有無が熱陰極放電灯と冷陰極放電灯に及ぼす影響に関する研究

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

Influence of Mercury on the Characteristics of Hot Cathode Lamps and Cold Cathode Lamps

Fellow Member Tadao Uetsuki (Tsuyama National College of Technology), Non-Member Takuma Ohira (Tsuyama National College of Technology), Member Yuuji Takeda (Harison Toshiba Lighting Corp.) and Fellow Member Osamu Fukumasa (Yamaguchi University)

ABSTRACT

Discharge lamps that have electrodes are classified into two categories, hot cathode lamps (HCLs) and cold cathode lamps (CCLs). We investigated the relationship between the presence of Hg, the kinds of rare gases present, and the cathode fall voltage (CFV) of both CCLs and HCLs. The results show mainly two points. One is the difference in the CFV characteristics, that is, CCLs' CFV is positive, while HCLs' is negative. This is because the emission mechanism of CCLs, due to the gamma effect, differs from that of HCLs due to the Schottky effect. The other main point is the influence of Hg on the CFV. The CFV of CCLs increases when Hg is present because of the difference between γ -coefficients for Ne^+ and Hg^{2+} due to the energy potentials. The CFV of HCL also increases when Hg is present because of the difference between the cathode temperatures in an Ar discharge and an Ar-Hg discharge.

KEYWORDS : fluorescent lamp, lamp life, emission point

1. 緒言

一般の有電極低圧放電灯は、電極からの電子放出機構の違いにより、熱陰極放電灯 (HCL) と冷陰極放電灯 (CCL) に分類されている。前者の代表は照明用の蛍光灯であり、後者の代表は液晶テレビなどのバックライトに使用されている冷陰極蛍光放電ランプである。それぞれのランプに関する電子放出機構に関する研究や電極近傍の負グローおよびシースに関する研究は今までに幾つか報告されている^{1)~3)}。しかしながら、寿命末期に重要となる Hg の有無がエミッション特性に大きな影響を及ぼす陰極降下電圧 (以下 CFV と記す) に及ぼす影響について、HCL と CCL の間でどう異なるかを比較した研究は今までに報告されていない。

本研究では、Hg の有無が放電特性 (放電電流が変化したときのランプ電圧、CFV、陽光柱電界の変化) にどう影響を及ぼすかを HCL と CCL について調べ、両者の間でそれらがどう異なるかを調べ考察したので報告する。

2. 実験

2.1 HCL の仕様と実験

まず HCL のランプ仕様について述べる。ランプ管径は 25.5 mm、ランプ長は 588.5 mm (FHF16 と同じ、電極間距離 515 mm) で、電極 (エミッタの塗布されたタングステンフィラメント) はランプ電流定格値が 255mA と 425mA の 2 定格 (FHF16 と同じ) ものを使用した。封入ガスは「Ar300Pa と Hg 蒸気」と「Ar300Pa」の 2 種類のものを用意した。HCL に関しては、「Ar300Pa と Hg 蒸気」と「Ar300Pa」

の両方に対して、以下に示す同様の実験を行った。

- (1) 電極加熱無しの放電電流とランプ電圧、CFV の関係
- (2) 電極加熱温度に対する上記 (1) の特性の依存性

点灯回路としては一般に市販されている安定器 (松下電工製 FZ32172970、点灯周波数 50kHz) と調光器 (松下電工製 NQ21575-322) を使用した。ただし、市販の安定器は電極加熱回路を有しているため、上記 (1) の実験に関しては、**図 1** に示すような接続 (図中の S は OFF) を行い測定用のランプに電極加熱電流が流れないようにした。上記 (2) の実験には **図 1** に示す直流電源を接続 (図中の S を ON) して電極加熱を行った。

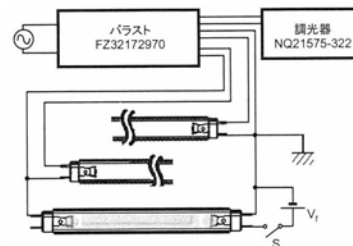


図 1 HCL 点灯回路
Fig.1 HCL operating circuit.

CFV の測定は、**図 2** に示すように、ランプの陰極近傍に 3 mm 幅で 0.01 mm の銅箔を巻き付け、それに 10pF のコンデンサを 5 個直列に接続して行った。測定の詳細は植月⁴⁾ や武田⁵⁾ の示す測定方法によっている。

本測定には、100 時間程度点灯させたランプを使用した。また、ランプの電気特性は、周囲温度 25℃において、1 時間以上ランプを点灯させて安定させた後に測定した。

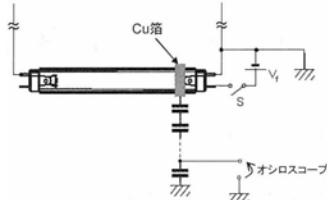


図2 陰極降下電圧測定回路
Fig.2 CFV measuring circuit.

2.2 CCL の仕様と実験

CCLのランプ仕様を示す。ランプ管径は4 mm、ランプ長は110 mm (電極間距離90 mm)とした。電極は表面積16.52 mm²の板形状(1.4 × 5.9 × 0.1 mm)とし、材料としてNi、Moの2種類を用いた。封入ガスは「Ne (8kPa) と Hg 蒸気」と「Ne (8kPa)」の2種類のものを用意した。

CCLに関しては「Ne (8kPa) と Hg 蒸気」と「Ne (8kPa)」の両方に対して、ランプ電圧、陽光柱電界、CFVを測定した。その点灯回路は商品として使用されているものを用いた。その模式図を図3に示す。点灯周波数は35kHzでコンデンサ容量は12pFである。この回路での電流変化は基本的に電源電圧を変化させることで行った。CFVの測定方法は、基本的にHCLの場合と同様である。

本測定には、50 時間程度点灯させたランプを使用した。また、ランプの電気特性は、周囲温度 25℃において、10 分程度ランプを点灯させた後に測定した。

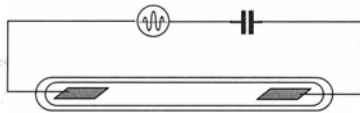


図3 CCL 点灯回路
Fig.3 CCL operating circuit.

3. 結果および考察

3.1 HCL に関する実験結果と考察

3.1.1 HCL の実験結果

図4はランプ電圧(実効値)と放電電流(実効値)の関係を示し、図5はCFV(ピーク値)と放電電流(実効値)の関係を示す。また、Hg無のランプのCFVの波形を図6に示し、Hgを有するランプのCFVの波形を図7に示す。

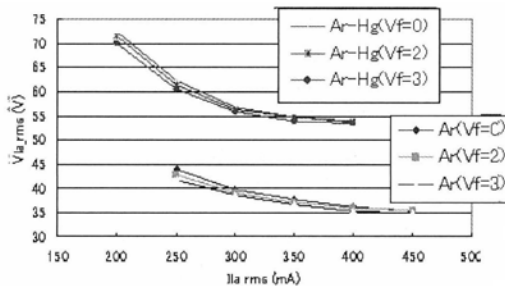


図4 ランプ電圧(実効値) vs ランプ電流(実効値)
Fig.4 V_{la,rms} vs I_{la,rms}.

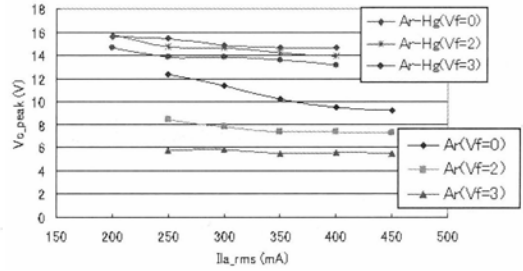


図5 陰極降下電圧(ピーク値) vs ランプ電流(実効値)
Fig.5 CFV_{peak} vs I_{la,rms}.

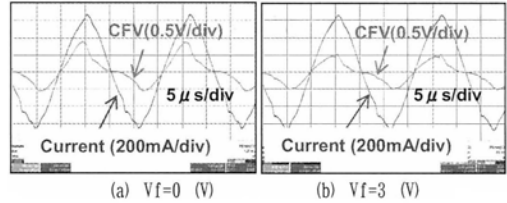


図6 Ar 放電の陰極降下電圧波形 (I_{la,rms}=400mA)
Fig.6 CFV's wave-forms of the Ar discharge.

(a) Vf=0 (V), I_{la,rms}=400 (mA).
(b) Vf=3 (V), I_{la,rms}=400 (mA).

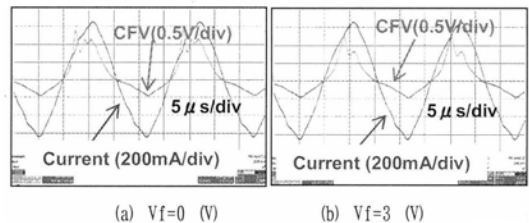


図7 Ar-Hg 放電の陰極降下電圧波形
(I_{la,rms}=400mA)

Fig.7 CFV's wave-forms of the Ar-Hg discharge.

(a) Vf=0 (V), I_{la,rms}=400 (mA).
(b) Vf=3 (V), I_{la,rms}=400 (mA).

図4から次のことが分かる。

- (I) ランプ電圧はHgが存在する方が高い。
- (II) Hgの有無にかかわらず、電流が増加するとランプ電圧は低下する。
- (III) 電極を加熱すると、若干ではあるがランプ電圧は減少する。

図5から次のことが分かる。

- (IV) Hgの有無にかかわらず、電流が増加するとCFVのピーク値は低下する。
- (V) 電極を加熱するとCFVのピーク値は低くなる。
- (VI) CFVのピーク値はHgが存在する方が高い。

図6、図7から次のことが分かる。

- (VII) Hg有のCFV波形は振動しているが、Hg無のCFV波形は振動していない。

3.1.2 HCL の実験結果に対する考察

HCLの実験により得られた結果について考察する。

- (I) ランプ電圧はHgが存在する方が高い理由
ランプ電圧は電極降下電圧と陽光柱部の電圧を加えたものに相

当する。蛍光ランプの場合、電極降下電圧は非常に小さいため、ランプ電圧のほとんどは陽光柱部分の電圧（陽光柱電界×長さ）と考えられる。そのため、陽光柱の電気特性について考察する。陽光柱への入力（ランプ電流×ランプ電圧）はランプ内部で電離・発光・弾性衝突ロス（熱）に消費される。Hgがあると、電離・発光に関してはHgが寄与し、弾性衝突ロスに関してはArが寄与する。まず電離に関してのロスはHgのある場合はペニング効果が期待できること、Hgが無い場合もArの電離には準安定原子が寄与することなどを考えればほど大きな差はない、と考えることが出来る。次に、放射に対して考察する。Hgが存在すると254nmの放出にエネルギーが使用される。一般の蛍光ランプでは入力の60%が紫外線出力使われると報告されている⁶⁾。Hgがない場合はこのような大量の光放出が存在しない。事実発光輝度は2桁程度低いものである。このことから、Hgが存在する場合には存在しない場合に比べて放射ロスが多いことがわかる。

以上をまとめると、Hgがある場合はHgの無い場合に比べて、発光に消費されるエネルギーだけ供給してやる必要があるため、Hgを有するランプの電圧がHgの無いランプに比べて高くなっている、と考えられる。

(II) 電流が増加するとランプ電圧は低下する理由

前項(I)で述べたように、ランプ電圧の変化は陽光柱電界の変化であると考え、陽光柱の電気特性について考察する。一般に陽光柱は負抵抗を有する。その理由を以下に示す。

$$J = \sigma E = e n \mu E \dots\dots(1)$$

式(1)はオームの法則を示した式であり、 e 、 μ は電子電荷、移動度であり、 J 、 n 、 E は電流密度、電子密度、電界である。固体は e 、 n 、 μ （則ち σ ）が一定であるため、電流密度と電界強度は比例する。したがって抵抗は正の一定値となる。しかし、気体放電の場合は n が変数である。つまり気体が電離することで電子密度を増加させることが容易である。したがって電流密度が上昇したとき、電界が上昇するよりも電子密度を上昇させることで対応する。電子密度が増加すると、第二種の衝突を介した累積電離が発生するため、低電界でも電離が可能となる。したがって負抵抗を示すと考えられる。

(III) 電極を加熱するとランプ電圧は減少する理由

電極温度に陽光柱の特性は影響を受けない。ランプ電圧は陽光柱部分の電圧とCFVを加えたものであるから、電極を加熱した場合にランプ電圧が低下するのはCFVが低下するからだと考えられる。これに関しては、次項(IV)で考察する。

(IV) Hgの有無にかかわらず、電流が増加するとCFVのピーク値は低下する理由

この現象も(IV)で起きた現象と同じ原因であると考えられる。式(2)において、 I_a が増加すると電極加熱電力 W が増加するため、式(3)に示される電極温度 T が増加する。その結果、 E （すなわち V_c ）が低下しても同じ電流を供給できる。

(V) 電極を加熱するとCFVのピーク値は低くなる理由

HCLからの電子放出は、正確にはショットキー放出である（式(3)参照）が、基本的には熱電子放出であり電極温度が大きな影響を及ぼす。そして、外部回路で要求されている放電電流を供給するために必要な電極温度を維持するための加熱エネルギー W は式(2)で表される。

$$W = (I_a^2 R_{fp} + I_f^2 R_f) + I_a V_c \cos \phi \dots\dots(2)$$

ここで I_a は放電電流の実効値、 I_f は外部電源 V_f から供給される電

流の実効値、 R_{fp} 、 R_f は I_a 、 I_f が流れているフィラメント部分の抵抗値、 V_c はCFVの実効値、 $\cos \phi$ は放電電流とCFVとの間の力率である。

上述したショットキー効果によるHCLの電子放出機構は高温の電極表面に電界が存在しており、式(3)で表される。

$$J = AT^2 \exp\left(-\frac{e\phi}{kT}\right) \exp\left(\frac{e}{kT} \sqrt{\frac{e}{4\pi\epsilon_0}} \sqrt{E}\right) \dots(3)$$

$$= J_{th} \exp\left(\frac{e}{kT} \sqrt{\frac{e}{4\pi\epsilon_0}} \sqrt{E}\right)$$

ここで、 e 、 ϕ 、 k 、 ϵ_0 は電子電荷、仕事関数、ボルツマン定数、真空の誘電率であり、 J 、 T 、 E 、 J_{th} はそれぞれ電流密度、電極温度、陰極降下電界、熱電子放出電流密度である。

HCLの電極から放出される電流密度 J は、式(3)に示されるように、電極温度 T と電極表面の電界（陰極降下電界） E に依存している。放電電流を供給するときに、電極温度が上昇すると熱電子電流密度 J_{th} が増加するため陰極降下電界 E が小さくてよい。それに加えて、放電電流は $J \times S$ （ J は電流密度、 S は電子放出面積）であり、外部電源により電極加熱すると電子放出面積が増加しさらに低い陰極降下電界で要求される放電電流を供給できる。このような現象により、電極を外部電源により加熱するとCFVが低下すると考える。

(VI) CFVのピーク値はHgが存在する方が高い理由

図8は、 $V_f=0$ （図1のSをOFF）の場合の電極近傍の状況を示した写真である。この写真より、Ar放電の電極は赤熱しているが、Ar+Hg放電の電極はさほど赤熱していないのが分かる。つまりAr放電では電極温度が高く、Ar+Hg放電では電極温度が低いことが分かる。そのため、式(3)から分かるように、Ar放電では J_{th} が十分に大きいことによりCFVは小さくても J が供給できる。しかしAr+Hg放電では電極温度が十分でないために、 J_{th} だけでは J を十分に供給できず、CFVが上昇するものと考えられる。

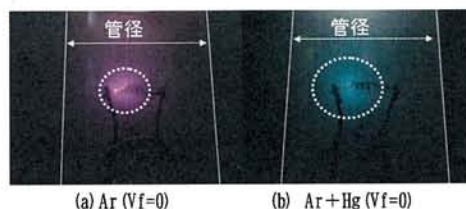


図8 ArとAr+Hg放電の負グロー（ $I_a=400\text{mA}$ ）
Fig.8 Negative glow of the discharge (400 mA).
(a) Ar discharge ($V_f=0$). (b) Ar-Hg discharge ($V_f=0$).

同じ放電電流なのに、この温度差がどうして発生するかを考察してみた。電極ではイオンが電極で電荷の交換をして中性原子になる。このイオン化エネルギーが電極に注入されると考えると熱になる。ArはHgの約1.5倍のエネルギーがあるため、これが熱になるとArの場合の方が電極温度が上昇すると考えられる。

またプラズマの広がり具合の違による熱伝導の違いも考えられる。図8で2つの負グローの大きさを比較するとArのものはAr+Hgに比べて広がっていないことが分かる。負グローが管壁に熱を伝達する媒体であると考え、負グローの広がりが小さいことは電極から管壁まで熱が伝わりにくい（つまり熱抵抗が大きい）ことになる。この熱伝導の状態を等価回路で表したのが図9

である。この図から分かるように、熱抵抗 R が大きくなると電極の温度（熱流×熱抵抗） IR は大きくなる。図中の C は熱容量であり、定常的な温度は過渡的な変化に寄与する値であるが、定常的な温度には寄与しない。このように、電極から管壁への熱伝導の違いが温度の違いの一因とも考えられる。

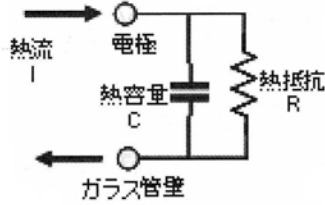


図9 熱伝導の等価回路

Fig. 9 Equivalent circuit for the conduction of heat.

(VII) Hg 有の波形は振動するが、Hg 無の波形は振動しない理由 Hg を有したランプの CFV の立ち上がりが Hg 無しの場合よりも急峻であり振動している。これは再点弧しているように見える。以下にこのランププラズマの拡散による消滅時間 τ を求めてみた。消滅時間 τ は式 (4) で与えられる。

$$\tau = \frac{l}{v_i} = \frac{A^2}{D_a} = \left(\frac{R}{2.405}\right)^2 \frac{l}{D_a} = \left(\frac{R}{2.405}\right)^2 \frac{e}{kT_e} \frac{l}{\mu_i} \dots (4)$$

ここで A , D_a , μ_i はそれぞれ特性拡散長、両極性拡散係数、イオンの移動度である。このランプの $R=1.28$ [cm] として、プラズマ (Ar300Pa, Ar300Pa+Hg) の寿命を計算した結果を表 1 に示す。この計算に用いたイオンの移動度は放電ハンドブックの値を用いた¹¹⁾。

表 1 各ランプにおけるプラズマの寿命
Table 1 Lifetime of the plasma for each lamp.

	μ_i (m ² /V s)	τ (s)
Ar300Pa+Hg (Hg ⁺ in Ar)	6.19×10^{-2}	$4.48 \times 10^{-4} \frac{kT_e}{e}$
Ar300Pa (Ar ⁺ in Ar)	5.47×10^{-2}	$5.08 \times 10^{-4} \frac{kT_e}{e}$

このランププラズマの電子温度は 1 eV 程度であると考えられるため、どちらのランプにおいてもプラズマの寿命 τ は数百 μ s である。ランプ点灯周波数が 50kHz であることより電力は数十 μ s 毎に供給されているため、点灯中はプラズマが消滅前に電力供給がなされる。そのためプラズマは消滅することはない。

このことから図 7 で見られる振動は再点弧によるものではない。この波形の立ち上がり部分を拡大したものを図 10 に示す。この図から、電流が小さいときの CFV は小さく、ある時間がたった後で急に上昇し始めている。電流が小さいときの CFV は小さいのは、式(3)で示される J_{th} が J とほぼ等しいくらいに大きく、CFV が存在しなくても十分に J を供給できるからだと思える。しかし、電流が大きくなると熱電子電流だけでは足りなくなり、急激に CFV が上昇する。振動は急激に加速された電子によって生じたイオンの動きによるものであるとみなされる⁷⁾。

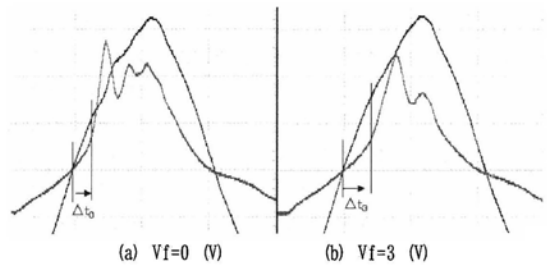


図 10 Ar-Hg 放電の陰極降下電圧波形の拡大図 ($I_{la_rms}=400$ mA)
Fig.10 Enlarged CFV's wave-forms of the Ar-Hg discharge ($I_{la_rms}=400$ mA).
(a) Vf=0 (V). (b) Vf=3 (V).

3.2 CCL に関する実験結果と考察

3.2.1 CCL の実験結果

図 11 は、陽光柱電界（ピーク値）と放電電流（実効値）の関係を示し（陽光柱電界は電極が変わっても大きな差はなかった）、図 12、図 13 は、それぞれ Ni 電極、および Mo 電極に関する CFV（ピーク値）と放電電流（実効値）の関係を示す。Ni 電極の CFV の波形を図 14 に示し、Mo 電極の CFV の波形を図 15 に示す。図中にゼロクロス部分の拡大図を載せている。また、図 16、図 17 はそれぞれ Ni 電極、および Mo 電極に関するランプ電圧（ピーク）と放電電流（実効値）の関係を示す。

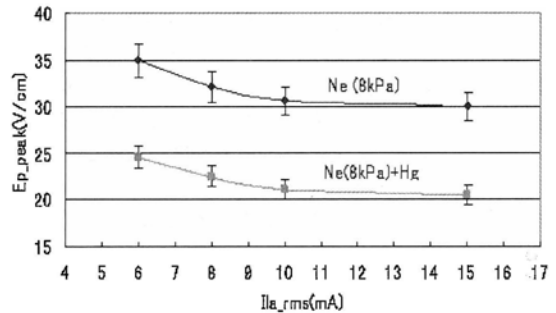


図 11 CCL 陽光柱電界ピーク値 vs ランプ電流
Fig.11 Peak of the electric field intensity vs I_{la_rms} .

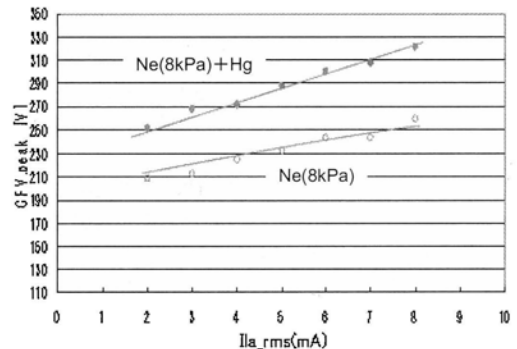


図 12 CCL の CFV vs ランプ電流 (Ni 電極)
Fig.12 CCL's CFV_peak vs I_{la_rms} (Ni-electrode).

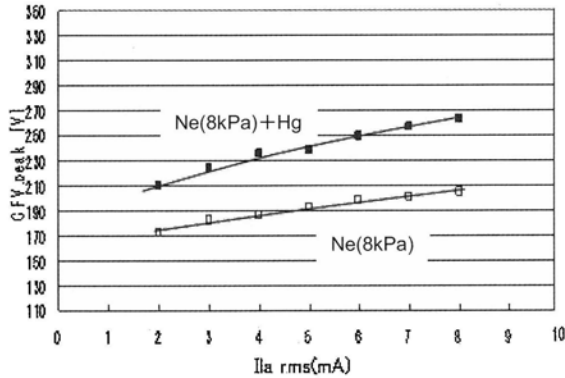
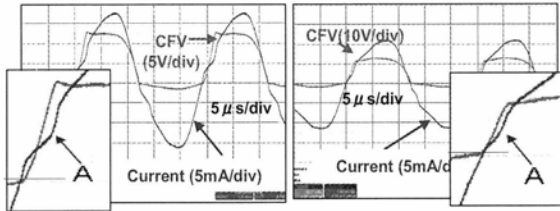
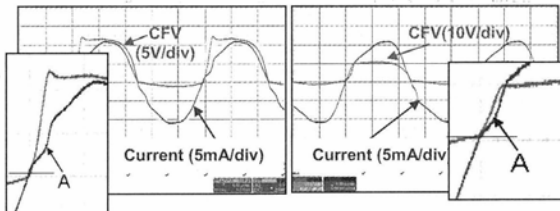


図 13 CCL の CFV vs ランプ電流 (Mo 電極)
Fig.13 CCL's CFV_peak vs Ila_rms (Mo-electrode).



(a) Ne (8kPa) + Hg (8mA) (b) Ne (8kPa) (8mA)
図 14 CCL の CFV 波形とランプ電流波形 (Ni 電極)
Fig.14 Waveforms of the CFV and Ila_ (Ni-electrode).
(a) Ne (8kPa) + Hg (8mA) . (b) Ne (8kPa) (8mA) .



(a) Ne (8kPa) + Hg (8mA) (b) Ne (8kPa) (8mA)
図 15 CCL の CFV 波形とランプ電流波形 (Mo 電極)
Fig.15 Waveforms of the CFV and Ila_ (Mo-electrode).
(a) Ne (8kPa) + Hg (8mA) . (b) Ne (8kPa) (8mA) .

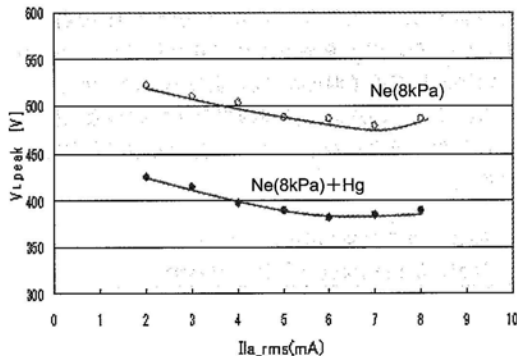


図 16 CCL のランプ電圧 vs ランプ電流 (Ni 電極)
Fig.16 CCL's VLa_peak vs Ila_rms (Ni-electrode).

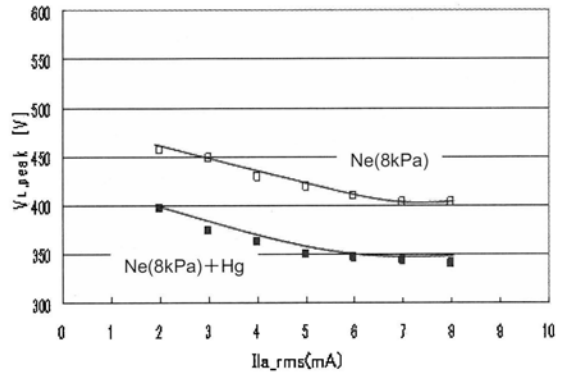


図 17 CCL ランプ電圧 vs ランプ電流 (Mo 電極)
Fig.17 CCL's VLa_peak vs Ila_rms (Mo-electrode).

図 11 から次のことが分かる。

- (i) 陽光柱電界は Hg が無い方が Hg のあるものに比べて高い。
- (ii) 陽光柱電界は放電電流が増加すると低下する。

図 12, 図 13 から次のことが分かる。

- (iii) Ni 電極, Mo 電極ともに, 最初は電流が増加するにつれて CFV のピーク値は高くなる。
- (iv) Ni 電極の CFV のピーク値は Mo 電極のものに比べて高い。
- (v) Ni 電極, Mo 電極ともに, CFV のピーク値は Hg が有る方が Hg の無いものに比べて高い。

図 14, 図 15 から次のことが分かる。

- (vi) 電流が陰極サイクルの最初の時点 (図中の A 点) で急上昇しており, その時に陰極降下電圧が大きく変化している。これは A 点までの間は放電電流が流れておらず, A 点でプラズマが出来た (再点弧した) と考えられる。プラズマが生成されるまでの間に測定されている電流は, プラズマを流れる電流ではなく, 電界の変化によって生じる変位電流である。これに関しては, 次節で考察する。

- (vii) Hg 有りの場合の再点弧時の電圧が Hg のない場合より高い。(Hg 有りの場合の再点弧時はピーク電圧であるが, Hg 無しの場合のピーク電圧は再点弧時ではない。しかし上述 (v) より, ピーク電圧を比較すると Hg が有る方が高いことよりこのことが分かる。) 再点弧時以外の電圧を比較した場合は, Hg 有りと無しの間の特徴的な違いはなかった。

図 16, 図 17 から次のことが分かる。

- (viii) Ni 電極, Mo 電極ともに, ランプ電圧は Hg が無い方が Hg の有るものに比べて高い。
- (ix) Ni 電極, Mo 電極ともに, 最初は電流が増加するにつれてランプ電圧は低下するが, 電流が大きくなると上昇し始める。
- (x) Ni 電極のランプ電圧が Mo 電極のものに比べて高い。

3.2.2 CCL の実験結果に対する考察

CCL の実験により得られた結果について考察する。

- (i) Hg が無い方が Hg の有るものより陽光柱電界が高い理由
希ガスとして封入されているガスは, 一般の蛍光ランプでは Ar であるが, このランプは Ne である。3.1.2 (I) で述べたが, 希ガスが Ar の場合 (一般蛍光ランプ) は, 入力 (ランプ電流 × ランプ電圧) の大部分が Hg からの紫外線放射に使用される

ため、それが無くなるとランプ入力が少なくなる。しかし、希ガスがNeの場合は、Arの場合と比べて幾つかの点で異なっている。まず、電離ロスに関してだが、NeとHgのエネルギーレベルが大きく異なっているため、ペニング効果の影響が小さくなる。そのためNe+Hgでは(Hg原子の数が少ないため準安定原子同士の累積電離が起こりにくいと考えられることから)10.43[V]が必要で、Neでは16.6[V](準安定状態のエネルギー)が必要である。したがってHgがない場合は、電離ロスは約1.5倍となる。次に、Arの場合と比べて拡散ロスや電離ロスも大きくなっていることである。また、放射ロスに関して、Neのみの発光はNe発光が非常に強く、輝度としてはHg有りで蛍光体のある場合の輝度とほとんど差がない。この様に電離ロスや拡散ロスの違いから、Ar+Hgの場合と異なり陽光柱電界が電流と共に増加したと考えられる。

(ii) 陽光柱電界は放電電流が増加すると低下する理由
 陽光柱電界が電流の増加と共に減少するのは、基本的には3.1.2(II)で述べた理由と全く同じである。

(iii) Ni電極, Mo電極ともに、最初は電流が増加するにつれてCFVは高くなる理由
 CCLの電子放出は γ 効果によるものである。 γ 効果による電子放出については既に武田等によって報告されている⁹⁾。簡単に整理すると、式(5)、式(6)に示されるChild-Langmuirの式、イオン電流密度 J_i と電子電流密度 J_e の関係式から、陰極降下電圧 V_c と放電電流密度 J および γ 値との関係式(7)が求まる。

$$J_i = \frac{4\epsilon_0}{9} \left(\frac{2e}{M_i} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{V_c^{\frac{3}{2}}}{d^2} \dots\dots\dots(5)$$

$$J = J_i + J_e = (1 + \gamma) \times J_i \dots\dots\dots(6)$$

$$V_c = \left(J \frac{1}{1 + \gamma} \frac{9}{4\epsilon_0} \left(\frac{2e}{M_i} \right)^{-\frac{1}{2}} d^2 \right)^{\frac{2}{3}} \dots\dots\dots(7)$$

$$= \left(\frac{I}{S} \frac{1}{1 + \gamma} \frac{9}{4\epsilon_0} \left(\frac{2e}{M_i} \right)^{-\frac{1}{2}} d^2 \right)^{\frac{2}{3}}$$

ここで、 V_c はCFVであり、 J は放電電流密度、 I は放電電流、 S は電子放出面積、 M_i はイオンの質量数、 d はシース厚である。電極の発光状態は武田らが報告したように、この範囲の電流値ではほぼ電極全体に広がっている⁹⁾。つまり、ピーク値付近での電極からの電子放出面積は電極面積と考えてよく、その面積は電流が変化しても同じである。したがって、関係式(7)より、電流 I が増加するとCFVは増加することが分かる。

(iv) (v) CFVがMo電極よりNi電極の方が高く、かつHgがある方が高い理由

式(7)より γ 係数の値が大きい方が陰極降下電圧の値が低いことが分かる。 γ 係数に関する報告は既に武田等によって報告されている⁹⁾。それを整理すると γ 係数は式(8)によって示される⁹⁾。それによって得られたNiとMoの値を表2に示す。表2でHg²⁺の γ 係数を用いているのは(すなわち電極近傍プラズマ中での γ 放出に寄与するHgイオンはHg²⁺であるとみなしたのは)以下の2つの理由による。

- ① γ 放出は、 $3\phi < E_i < 2(E_F + \phi)$ の条件下でのみ起こることより、Hg+は γ 放出をおこすことが出来ないこと。
- ② Ne-HgのCCLでは電極近傍の管壁および電極表面からHg0が検出されたこと。

$$\gamma \approx \frac{0.2(0.8E_i - 2\phi)}{E_F} \dots\dots\dots(8)$$

ここで、 E_i , E_F , ϕ は、それぞれ衝突するイオンのポテンシャルエネルギー、電極金属のフェルミレベル¹⁰⁾、電極金属の仕事関数を意味している。Hg²⁺($E_i=18.76V$)、Ne+($E_i=21.57V$)についての計算結果を表2に示す。表2から、Ni電極とMo電極ではNi電極の γ 係数が小さいためCFVはMo電極に比べて高く、Hg有りの γ 係数が小さいためCFVがHg無しの場合に比べて高いのが理解できる。

ただし、今回は文献に基づいてHg²⁺のみが γ 放出すると考えたが、実際にはHg⁺も電子放出に寄与していることは十分に考えられるため、Hg⁺の影響も今後は調べていく必要がある、と考えられている。

表2 Ni, Moの仕事関数および γ 係数
 Table 2 Work function and γ -coefficient of Nickel and Molybdenum.

金属材料	Ni	Mo
$E_F(eV)$	11.76	12.18
$\phi(eV)$	4.61	4.15
$\gamma(Hg^{2+})$	0.098	0.110
$\gamma(Ne^+)$	0.137	0.147

(vi) 放電が毎サイクル再点弧していると考えられる理由
 3.1.2(VII)で述べた様に、プラズマの寿命 τ は式(4)で示される。この式で $R=0.15cm$ 、「Ne(8kPa)とHg蒸気」と「Ne(8kPa)」のイオン移動度を代入し、電子温度として約2eV⁹⁾を代入して計算した結果を表3に示す。ここで用いたイオンの移動度は放電ハンドブックの値を用いた¹¹⁾。

本ランプは点灯周波数が35kHzであることより数十 μs 毎に電力供給されている。表3の結果と比較すると、プラズマの消滅とほぼ同等の時間で電力供給されており、プラズマが毎サイクル消滅しているとは考えにくい。ただ電子温度として用いた2eVの値は、Ar-Hg放電中での値である。今回は希ガスにNeを用いている。弾性ロスは質量比に反比例することより、Neの場合はArに比べて約2倍に増加する。また希ガスがNeの場合はArの場合より拡散ロスが大きい。その損失を補うために陽光柱の軸方向電界が大きくなり、結果として電子温度が2eVよりもかなり大きくなっていると考えられる。そのため、実際のプラズマの寿命は表3に示される値よりかなり小さくなっており、毎サイクル消滅していると考えられる。

表3 プラズマの寿命
 Table 3 Lifetime of the plasma.

封入ガス	イオン	μ_i (m^2/Vs)	τ (s)
Ne	Ne ⁺	5.32×10^{-3}	3.68×10^{-5}
Ne	Hg ⁺	7.54×10^{-3}	2.59×10^{-5}

(vii) 再点弧時の電圧がHg有りの場合が無い場合より高い理由
 ランプ再点弧時の電圧はランプ始動電圧とみなすことが出来

る。始動は次式 (9) で与えられる条件が満たされる時に起こると考えられる。

$$\gamma (\exp(\alpha d) - 1) = 1 \quad \dots\dots(9)$$

一方、 α 係数は次式 (10) で近似できる¹⁰⁾。

$$\frac{\alpha}{p} = C \exp(-D \frac{p}{E}) \quad \dots\dots(10)$$

ここで絶縁破壊が起きるときの電圧を V_s とすると、 $V_s = E \times d$ が成立することからとすると次式が成り立つ。ここで p, d, C, D の単位は Torr, cm, 1/(Torr cm), V/(Torr cm) である。

$$V_s = \frac{D p d}{\log_e \frac{C p d}{\log_e (\frac{1}{\gamma} + 1)}}$$

この式に $pd=540 (=60 \times 9)$ とし、表 2 の γ 値および、Ne の $(C, D) = (4, 100)$, Ne+Hg の $(C, D) = (20, 370)$ ¹⁰⁾ を代入した結果を表 4 に示す。

実際の始動電圧は表 4 に示されるほど高くはないが定性的には実験値と一致している。絶対値に 2 桁以上差があることの原因は 2 つ考えられる。一つは、計算された値は平等電界中での破壊電圧であり、実際は不平等電界中であることである。平等電界と不平等電界では一般に 1 桁以上違いがあることはよく知られている。他の一つは、絶縁破壊直前の電極間の状況の違いである。計算された値は、絶縁破壊前には電子-イオン対はほとんど存在しない条件での値であり、本実験は再点弧であることより空間には電子-イオン対が残存している状況である。電子-イオン対が残存していると絶縁破壊電圧は大きく低下することはよく知られている。このように理論式から求めた値と実験結果とは、その環境の違いにより絶対値にさがあるものの、定性的には一致した。このことより、再点弧電圧の違いは、 γ 係数と α 係数が影響した結果であると考えることができる。

表 4 始動電圧 V_s の計算値
Table 4 Calculation of starting voltage.

	Ni	Mo
Ne	7.79(kV)	7.76(kV)
Ne+Hg	23.8(kV)	23.6(kV)

(viii) (ix) Ni 電極, Mo 電極ともに、ランプ電圧は Hg が無い方が Hg の有るものに比べて高く、電流が大きくなるとランプ電圧が上昇し始める理由

ランプ電圧は陰極降下電圧と陽光柱部の電圧を加えたものに相当する。陽光柱部は Hg 無しのもの電圧が高く、陰極降下部は Hg 有りのものが高い。その和として、結果的に Hg の無しのランプ電圧が高くなったものと考えられる。電流が大きくなるとランプ電圧が上昇し始めるのは、陽光柱電界の変化が小さくなり陰極降下電圧の増加割合が増えたためであると考えることができる。

(x) Ni 電極のランプ電圧が Mo 電極のものに比べて高い。

これは陰極降下電圧の差がそのままランプ電圧に表れた結果であると考えることができる。

4. 結論

本研究で、寿命末期に非常に重要である、Hg の有無が放電特性(放電電流が変化したときの CFV, 陽光柱電界の変化)にどう影響を

及ぼすかを HCL と CCL について調べ、以下のことを確認した。

- (1) Hg の有無は陽光柱電界と放電電流の関係に影響を及ぼさず、HCL と CCL ともに、陽光柱電界は放電電流が増加すると低下する。
- (2) Hg の有無は CFV と放電電流の関係に影響を及ぼさない。CFV は HCL では放電電流の増加とともに低下し、CCL では放電電流の増加とともに上昇する。
- (3) Hg の有無は CFV の値に影響を与える。HCL と CCL ともに、Hg が無い場合はある場合に比べて CFV が低下する。HCL では電極近傍の温度が上昇するためであり、CCL では Hg イオン (Hg^{2+}) と Ne イオン (Ne^+) のポテンシャルエネルギーの違いによる γ 係数値の違いが原因である。

上述の (1) は一般に知られていることの確認であり、(2) はすでに武田によって報告されている⁵⁾。(3) については過去報告されたことがなく、寿命末期に Hg が無くなった状態を想定する上で非常に有益な情報が得られた、と考えられる。HCL に関しては、Hg が無くなった場合は電極温度が上昇することから、口金や器具に熱的な問題が起きないように考慮する必要があることがわかった。CCL に関しては、Hg が無くなった場合は CFV が低下することより、バラストの設計によっては放電電流が増加する可能性がある。放電電流が増加しすぎると、状況によってはアーク放電状態へ移行する可能性もある。アーク放電に移行すると電力がランプに入りすぎて、熱的な問題が発生する。このようなことが起きないようにバラスト設計が必要であることがわかる。

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 巻 9 号, 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 巻 5 号, p.376 (1991).
- (4) 植月 ほか: 電極加熱が蛍光ランプのクレストファクターに及ぼす影響, 照学誌, 84-8A, pp.480-485 (2000).
- (5) 武田 ほか: 冷陰極ランプの陰極降下電圧と電極材料に関する研究, 照学誌, 91-11, pp.700-704 (2007).
- (6) W.ELENBAAS: LIGHT SOURCE, THE MACMILLIAN PRESS LTD., p.106 (1972).
- (7) 植月ほか: 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).
- (8) L. M. Kishinevsky: Estimation of Electron Potential Emission Yield Dependence on Metal and Ion Parameters, Radiation Effects, 19, pp.23-27 (1973).
- (9) M.Goto and T.Arai: Hg Particle Densities and Electron Temperature for Various Ar Pressure in Narrow Mercury Lamp, Proceedings of the Ninth International symposium on the Science & Technology of Light Sources, pp.147-148 (2001).
- (10) 田頭博明: 励起ならびに電離, 放電ハンドブック, 鳥山四男, 電気学会, pp.23-26 (1974).
- (11) 土手敏彦: 荷電粒子の運動, 放電ハンドブック, 鳥山四男, 電気学会, p.52 (1974).
- (12) C. キッテル (宇野ほか訳): 固体物理入門 上 (第 7 版), 丸善, p.165 (1979).

(受付日 2008 年 6 月 2 日 / 採録日 2008 年 9 月 24 日)



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，同大学院修士課程修了後，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，

津山工業高等専門学校電気電子工学科に教授として赴任。現在に至る。博士(工学)。照明学会，電気学会，プラズマエレクトロニクス分科会会員



大平 琢磨 (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

1987年生まれ。2007年津山工業高等専門学校電気電子工学卒業後，同校の専攻科(電子・情報システム工学専攻)へ入学，現在に至る。



武田 雄士 (正会員)

ハリソン東芝ライティング株式会社
〒794-8510 愛媛県今治市旭町 5-2-1

1971年生まれ。1996年3月愛媛大学大学院電気電子工学専攻卒，同年4月ハリソン電機株式会社(現ハリソン東芝ライティン

グ株式会社)に入社。現在に至る。照明学会員。



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丁目 16-1

1946年生まれ。1973年3月京都大学大学院理工学研究科(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月同助教授をへて，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。