アマルガム封入電球形蛍光ランプの水銀の振舞い

正会員 伊藤 秀徳* 正会員 依藤 孝**
正会員 尾岸 和久* 専門会員 井上 昭浩*

Mercury Behaviors in a Compact Fluorescent Lamp With Amalgam

Hidenori Itō (Member), Takashi Yorifuji (Member),
Kazuhisa Ogishi (Member) and Akihiro Inouye (Fellow Member)
(Toshiba Corp.)

ABSTRACT

Some mercury behaviors in a compact fluorescent lamp with amalgam have been analyzed. The discharge tube is doubly folded. The main amalgam is contained in an exhaust tube and auxiliary amalgams are near the electrodes.

The results are as follow.

- (1) The amount of In coating on the auxiliary amalgam flag influences luminous build-up characteristics of the lamp.
- (2) After switching the lamp off, its mercury vapor diffuses from main amalgam to auxiliary amalgams.
- (3) The mercury weight in auxiliary amalgam increases in proportion to the square root of T (T; total time lapse after switching off).
- (4) The lamps mercury vapor pressure becomes minimum around forty cinutes after switching the lamp off.

1. 緒 言

近年、電球ソケットにそのまま装着できる電球形蛍光ランプが開発され、さらに性能向上のための検討が盛んである²⁾。一般に、電球形蛍光ランプは、発光管を点灯回路と一体化して電球口金付きのケースに収容している。この構造のランプは発光管の温度が一般の蛍光ランプより著しく上昇し、効率の低下が大きくなる³⁾。そのため発光管の効率向上のための種々の工夫が講じられているが、その一つとしてアマルガムを使う方法がある²⁾。これは、アマルガムによって管内の水銀蒸気圧を制御する方法であり、発光管の温度が高温となっても高い効率を得ることが可能である。

このアマルガム封入ランプは、アマルガムの温度が上昇するのに時間を要するため、始動後の光束立ち上がりが遅くなるという欠点がある²⁾。これは定常点灯時の水銀蒸気圧を制御するアマルガム（主アマルガム）のほかに、始動直後に必要な水銀蒸気圧を補う補助アマルガムを電極近傍に設けることで改善される⁴⁾⁵⁾。

アマルガム封入電球形蛍光ランプは、一般の水銀だけのランプに比べて点灯直後の光束の変化が複雑である。したがって点灯直後の水銀の挙動を左右し、光束の立ち上がりに影響する補助アマルガムの特性を明らかにする必要がある。

2. アマルガム封入電球形蛍光ランプの構成

実験に用いたランプの全体構造を 図 1 に示す。安定器はプラスチックのボックスに収容し、発光管と安定器とは熱交換を少なくした構造としている。グローブの材質はポリカーボネイトであり、その外径は 110 mmφ、発光管の外径は 17.5 mm、発光管全長は 330 mm である。発光管内壁には蛍光体を塗布し、始動用希ガスとしてアルゴン（479 Pa）を封入している。電極近傍の構造を 図 2 に拡大して示す。主アマルガムを片側の排気管内に、補助アマルガムを両方の電極に固定している。ランプ定格点灯時の発光管入力電力は 12.5 W、発光管電流は 0.27 A である。

主アマルガムは、点灯安定時の管内の水銀蒸気圧を制御するのであり、その満たすべき条件としては、第 1 に定常点灯時のアマルガム温度で光出力が最大となる最適水銀蒸気圧を示すこと、

図 1 アマルガム封入電球形蛍光ランプの全体構造図

* ㈱東芝光源開発研究部 ** ㈱東芝照明技術部
〒237 横浜須賀野船越町 1-201-1
201-1 Funakoshicho 1 chome, Yokosuka, Kanagawa 237 Japan
本論文内容は、昭和60年3月の照明学会全国大会で発表したものである。

図2 アマルガム封入電球形蛍光ランプの電極部構造

第2にできるだけ広い温度範囲にわたって、水銀蒸気圧の変化を制御することが必要である。本実験に使用した主アマルガムは上記2条件を考慮して Bi-In-Hg 系アマルガムを採用した。定常点灯時のアマルガムの動作温度は80~90°Cであり、主アマルガムの封入量は約70 mgである。主アマルガム中の含有水銀量がランプ特性および水銀消費によるランプ寿命を左右するため⁶⁾、それを保証するに十分な水銀量(約3 mg)を含んでいる。図3にこのランプの周囲温度特性を示す。主アマルガムの効果により水銀だけを封入したランプに比べて、広い温度範囲にわたって安定した光出力を得ることができる。

図3 アマルガム封入電球形蛍光ランプの周囲温度特性

3. 補助アマルガム機能

3.1 光束立ち上がり特性の改善

アマルガム封入ランプは、水銀蒸気圧が純水銀の蒸気圧より低いという特性を利用しているため⁵⁾、ランプ点灯後、定常状態に安定するまでの光束の立ち上がりが遅くなる。このような始動時の光束の立ち上がりを改善するために、定常点灯時の水銀蒸気圧を制御する主アマルガムのほかに、始動時に必要な水銀蒸気圧を補う補助のアマルガムを用いる必要がある⁴⁾⁵⁾。

図4にアマルガム封入電球形蛍光ランプの光束立ち上がり特性を示す。補助アマルガムのないランプの光束立ち上がりは、主アマルガム設置部分の温度上昇に対応している。それゆえ、光束の安定時間は20分以上を要する。一方、補助アマルガムを用いたランプは、補助アマルガムとして基体金属の表面に In-Hg を付着して用いている。基体金属にはモリブデン箔(大きさ2.5×6.5 mm, 厚み30 μ)を用いた。このランプは、始動直後補助アマルガムの温度が急速に上昇するため水銀が放出され、点灯後30秒で

図4 アマルガム封入電球形蛍光ランプの光束立ち上がり模式図

80%以上の光束を得、1分以内に100%の光束を得る。その後管内の水銀は、主アマルガムへ吸着されることにより若干光束が減少するが、主アマルガムの温度上昇とともに再び光束が上昇する。したがって点灯初期の2~3分間は補助アマルガムの動作領域であり、それ以降は主アマルガムの動作領域である。

3.2 補助アマルガムの条件

図5に補助アマルガムとして In-Hg を用い、基体金属としてモリブデン箔(大きさ2.5×6.5 mm, 厚み30 μ)を用いて、基体金属上の In 付着量と光束立ち上がり特性を調べた結果を示す。In は電気めっき法で付着させた。ランプ構造は図1に示すとおりのものである。主アマルガムと補助アマルガムの距離は25 mmとし、補助アマルガムと電極(フィラメント)間の距離は2.5 mmとした。ランプは測定前に電源電圧100 Vで1時間点灯し、消灯状態で10時間放置した。点灯時のランプ周囲温度は25°Cで電源電圧100 Vを印加し、点灯30秒後の光束の安定時の光束に対する比を調べた。その結果、補助アマルガムに使用する In 量の最適値が存在し、その値は本実験の場合、一つの補助アマルガムあたり1 mgであることが判明した。これは次のように説明できる。

図5 補助アマルガムの In 付着量と光束立ち上がり

すなわち、In 付着量が適正值より少なくなると相対的に In-Hg の Hg 比率が増大し、同一温度における主、補助アマルガムの蒸気圧差が小さくなる。消灯時の浮遊水銀は蒸気圧の最小の場所へ集まるが、主、補助アマルガムの蒸気圧差が小さくなると相対的に補助アマルガムへ吸着される水銀量が少なくなり、光束の立ち上がりが悪くなる。一方 In 付着量が適正值より多くなると相対的に In-Hg の Hg 比率が減少し、蒸気圧が高温下でも低くなる。

この場合、ランプを点灯すると補助アマルガムはフィラメントの熱により加熱され、補助アマルガム中の水銀が放出されるが、蒸気圧が低いため水銀放出量が少なく、光束立ち上がりが悪くなる。このような理由で In 量の最適値が存在することになる。

図 6 補助アマルガムの基体金属と光束立ち上がり(I)
発光管外径 17.5 mm, 管長 330 mm, 封入ガス: Ar 479 Pa グローブ径 110 mm, 発光管入力電力 12.5 W

図 6 に補助アマルガムの基体金属を変えた場合の光束立ち上りを示す。ランプ構造は図 1 と同一であり、発光管は外径 17.5 mm, 管全長 330 mm であり、管内に始動用希ガスとしてアルゴン (479 Pa) を封入している。補助アマルガムは In-Hg を使用し、一つの補助アマルガムあたりの In 付着量は約 1.0 mg である。主アマルガムは Bi-In-Hg (70 mg) を用いている。主、補助アマルガムの設置位置は図 2 と同一である。基体金属にはモリブデン箔 (大きさ 2.5×6.5 mm, 厚み 30 μ) とニッケル板 (大きさ 2.5×6.5 mm, 厚み 100 μ) を用いた。なお基体金属の面積を一定としている。材質により厚みが変わっているのは、その材質の強度、加工性を考えて、厚みを選択したためである。ランプは測定前に 1 時間以上定常点灯し、消灯状態で 10 時間放置した。点灯 30 秒後では、モリブデン箔を用いた発光管はニッケル板のものより約 2.9 倍、1 分後では約 2.0 倍の光束立ち上りを示している。この光束立ち上りの差は基体金属の熱容量の差で、次のように説明される。すなわち、基体金属の温度上昇は(1)式で示される。

$$\Delta T = \frac{Q}{mC_p} \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 ΔT は基体金属の温度上昇 ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$)、 Q は基体金属へ与えられる熱量 ($\text{kcal}\cdot\text{s}^{-1}$)、 m は基体金属の質量 (g)、 C_p は基体金属の比熱 ($\text{cal}\cdot\text{g}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$) である。基体金属へ与えられる熱量はフィラメントからの加熱であり常に一定とすると、基体金属の温度上昇は、その熱容量に反比例する。本実験の試料で熱容量の逆数の値を比較すると、モリブデン箔はニッケル板の約 5.0 倍となり、点灯初期の両者の立ち上がり所要時間比 2.9 倍より少し大きい、比較的近い値を示している。すなわち、基体金属の選定にあたっては熱容量、すなわち比熱と質量のできるだけ小さいものを選定することが望ましい。

図 7 に補助アマルガムの点滅特性を示す。ランプ条件は図 6 と同一である。電極部の構造も図 2 と同一であり、補助アマルガムは両方の電極に固定している。試験は定格電圧 100 V で行ない、ランプ点滅サイクルは 30 秒点灯、30 秒消灯で行なった。ラン

図 7 補助アマルガムの基体金属と光束立ち上がり(II)

プ点灯方向は口金上向き状態であり、点滅試験中のランプ周囲温度は 20~23 $^{\circ}\text{C}$ であった。特性評価時点は、点滅試験前 2,000 回、および 5,000 回点滅後の 3 種類とした。各々点滅試験後、ランプ周囲温度 25 $^{\circ}\text{C}$ で 1 時間点灯し、消灯状態で 10 時間放置した後、ランプ周囲温度 25 $^{\circ}\text{C}$ で点灯し、始動後 30 秒時点の光束立ち上りを比較した。基体金属には、モリブデン箔 (大きさ 2.5×6.5 mm, 厚み 30 μ), ニッケル板 (大きさ 2.5×6.5 mm, 厚み 100 μ), ステンレス板 (大きさ 2.5×6.5 mm, 厚み 150 μ) を使用した。一つの基体金属あたりの In 付着量は約 1.0 mg である。この場合も、図 6 と同様に点滅前の光束立ち上りの差は、基体金属の熱容量の差で説明できる。各々の基体金属の熱容量は、モリブデン箔 0.31 ($\text{cal}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$)、ニッケル板 1.53 ($\text{cal}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$)、ステンレス板 2.30 ($\text{cal}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$) である。点滅前の光束立ち上がりは、基体金属の熱容量の逆数の値の順、すなわちモリブデン箔、ニッケル板、ステンレス板の順に速い。点滅後の光束立ち上がり特性の劣化は、モリブデン箔使用の場合 5,000 回点滅後で約 5%、ニッケル板使用の場合は約 8% である。一方、点滅試験前後における安定時全光束は平均約 5% の低下である。点滅劣化には、蛍光体の劣化、電極エミッタの飛散、そして補助アマルガムインジウムの飛散などが考えられる。これらの分離評価は困難である。しかしながら、光束立ち上りの劣化が 5% 程度であることから補助アマルガム機能の低下は少ないと判断できる。ニッケル板使用の場合、モリブデン箔使用の場合に比較し劣化が若干大きい理由としては、次の要因も挙げることができる。

すなわち、インジウムとニッケルが合金を形成する可能性を有することである。ランプ点灯中、補助アマルガムはフィラメントの加熱により高温にさらされる。特にニッケルの場合、高温になると表面層の In の一部が合金 In-Ni を形成し⁷⁾、表面層に必要な In の最適値からはずれてくるためと推測される。

したがって上記を考慮すると、ランプ始動中や点灯中の高温雰囲気でも In とほとんど合金を作らない材質を選定する必要がある。モリブデンは、高温雰囲気でも安定であり、比熱も小さくかつ箔状に加工したものが容易に入手できることから、基体金属としてはすぐれた材質であるといえる。

4. 消灯後放置時間と水銀蒸気圧

4.1 消灯後の管内水銀量の変化

ランプ消灯後の管内の浮遊水銀蒸気は、蒸気圧の低いアマルガムへ吸着される。本実験では消灯後経過時間に対する管内各部の

水銀量の変化を測定した。ランプ構造および電極部の構造は図1および図2と同一である。ランプ発光管の外径は17.5 mm、管全長は330 mmであり、管内に始動用希ガスとしてAr (479 Pa)を封入している。ランプの発光管入力12.5 W、発光管電流は0.27 Aである。ランプは周囲温度25℃で4時間連続点灯した。試験電圧は100 Vであり、点灯方向は口金上向きである。したがって点灯中の主、補助アマルガムの位置関係は、主アマルガムが補助アマルガムの上方約25 mmの位置にある。点灯後周囲温度20～25℃で口金上向き方向のまま消灯放置した。消灯放置時間は10分、30分、60分（1時間）、240分（4時間）、3,900分（65時間）の5種類とした。管内の水銀量の測定は、各々のランプを破壊し、主、補助アマルガム部分とその他の部分に3分割して水銀を回収しジチゾン吸光光度法で分析した。

図8 消灯時の主、補助アマルガム中の水銀量の変化（相対値）

図8に消灯後経過時間に対する管内の各部の水銀量変化を相対値で示す。水銀量相対値は管内の総水銀量に対する比率（％）で示す。消灯後、時間経過とともに主アマルガムの水銀量は減少し、補助アマルガムの水銀量は増加する⁹⁾。

図9 消灯時の主、補助アマルガムへの吸着水銀量の変化

図9には補助アマルガムへ吸着される水銀量および主、補助アマルガム以外の管内水銀量の消灯後の時間による変化を示す。これによると主、補助アマルガム以外の管内の水銀量はほとんど一定の傾向を示している。図8より消灯後、少なくとも3,900分（65時間）までは主、補助アマルガム間で水銀の移動が行なわれていることがわかる。

さて図9から補助アマルガムへ吸着される水銀量は、次の実験式で示される。

$$M = 6.3\sqrt{T} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 M は補助アマルガムへ吸着される水銀量（ μg ）、 T は消灯後の経過時間（分）を表わす。

4.2 消灯時の管内水銀蒸気圧の変化

次に消灯時の主、補助アマルガムの水銀濃度が管内の水銀蒸気圧に及ぼす影響を調べた。消灯時の管内の水銀は、主、補助アマルガムへ吸着され、消灯時間とともにその水銀濃度は変化し、管内の水銀蒸気圧を左右する。そこで消灯時の両者の変化を対応させてみる。

図10 消灯時管内水銀蒸気圧の測定系

管内の水銀蒸気圧変化は、図10に示す測定系で測定できる。試験用発光管は、蛍光体を塗布しない透明な石英製バルブを用いた。発光管の外径は17.5 mm、管全長は330 mmであり、管内にAr (479 Pa)を封入している。ランプ構造および電極部の構造は図1および図2と同一である。補助アマルガムとしてIn-Hgを用いた。補助アマルガムの基体金属はモリブデン箔（大きさ $2.5 \times 6.5 \text{ mm}$ 、厚み 30μ ）を用い、Inの付着量は約1.0 mgである。主アマルガムとしてBi-In-Hgを約70 mg封入している。主、補助アマルガムの位置関係は、図5～図9の場合と同一である。グローブには、紫外放射を透過するための石英窓を光路に設けている。上記構造のランプを、測定前に25℃雰囲気中に4時間口金上向きで点灯した。点灯安定時の発光管入力電力は12.5 W、発光管電流は0.27 Aである。ランプ消灯後、殺菌ランプを紫外光源とし水銀共鳴線253.7 nmを発光管に照射し、その透過光の強度を測定することにより、消灯後の管内の水銀蒸気圧変化を相対値として求めた。ランプ消灯後のランプ周囲温度は25℃、口金上向き状態で放置した。ランプ消灯中の入射光の強度と透過光の強度には(3)式が成立する⁹⁾。

図11 管内水銀蒸気圧の変化

$$\log \frac{I_{out}}{I_{in}} = -\alpha N \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 I_{in} は入射光の強度、 I_{out} は透過光の強度、 α は定数、 N は水銀原子の密度を表わす。入射光と透過光の強度比を求めれば、水銀原子の濃度すなわち水銀蒸気圧の相対値が求まる。消灯後の時間に対する相対水銀蒸気圧の変化を図 11 に示す。同図には、前実験 (4.1) で得られた主、補助アマルガムの水銀濃度の変化も対比して示す。管内の水銀蒸気圧は、消灯後時間とともに減少し最低値を示した後上昇している。一方、主アマルガムの水銀濃度は消灯時間とともに減少し、補助アマルガムのそれは増加している。消灯後の管内水銀蒸気圧は、主、補助アマルガムの温度と水銀濃度に左右されていると考えられ、両者を対比すると少なくとも管内水銀蒸気圧が最低値を示すまでは、主アマルガムが関与し、最低値を示した後の水銀蒸気圧は、補助アマルガムが関与していると推察される。

5. ま と め

アマルガム封入電球形蛍光ランプは、光束立ち上がり改善用としての補助アマルガムを必要とする。本論文では補助アマルガムに必要な特性を求め、水銀の移動とそれに基づく管内水銀蒸気圧変化を求めた。その結果、まず基体金属の材質、補助アマルガムの付着量によって光束立ち上がり性能が左右されることがわかった。基体金属としては、熱容量が小さく高温でも安定である材質が望ましい。補助アマルガムに In-Hg を用いる場合、面積一定 (約 16 mm²) の条件では、一つの補助アマルガムあたりの In 付着量 1.0 mg 前後に最適値が存在する。

補助アマルガムへ吸着される水銀量は、消灯後経過時間の平方根に比例して増加しており、主アマルガムから補助アマルガムへ

水銀が移動していることが判明した。消灯時における管内の水銀蒸気圧は主、補助アマルガムの水銀濃度の変化に対応し、消灯時間40分前後で最低値を示す。水銀蒸気圧が最低値を示すまでは、主アマルガムが管内の水銀蒸気圧を左右し、最低値を示した後のそれは補助アマルガムが左右している。

参 考 文 献

- (1) 亀井, 林, 長田, 池田, 高野: 電球形蛍光ランプ「ネオボール」, 東芝レビュー 35-8 (昭55) 679~681
- (2) 伊藤, 林, 佐藤, 長田: ネオボールの効率向上, 東芝レビュー 39-11 (昭59) 995~998
- (3) 花田, 亀井, 江原, 長田, 小田, 高野: 新しい電球形蛍光ランプネオボール, 東芝レビュー 37-2 (昭57) 96~100
- (4) Bouwknecht, A.: Compact Fluorescent Lamps, J. Illum. Engng. Soc. 11-4 (1982) 204
- (5) Bloem, J., Bouwknecht, A. and Wesselink, G. A.: Some New Mercury Alloys for Use in Fluorescent Lamps, J. Illum. Engng. Soc. 6-3 (1977) 141
- (6) 広田泰輔: 蛍光ランプへの水銀合金の応用, 照学誌 68-2 (昭59) 77~82
- (7) Hansen, M.: Constitution of Binary Alloys, Metallurgy and Metallurgical Engineering Series, Mc GRAW-HILL BOOK COMPANY, NEW YORK (1958)
- (8) 小野, 松野, 村山: 分離内管方式電球形蛍光ランプの光束立ち上がり特性, 照学誌 68-10 (昭59) 524~527
- (9) 武内次夫, 鈴木正己: 原子吸光分光分析, 南江堂 (昭53)

(受付1985年4月11日)