ハロゲン電球内のガス挙動†

正 会 員 林 宣彦* 専 門 会 員 弓 削 洋二* 藤 森 康朝**

1. は じ め に

白熱電球は、誕生以来すでに 100 年以上の歴史があるが今日もなお種々の研究、改良がなされている。その中でも 1959 年に登場したハロゲン電球は、その優れた機能、コンパクトな形状から使用される分野が年々増加し、近年では、一般照明用、複写機用、自動車用、光学機器用など幅広く応用され、一般電球に置き替わる勢いである。

ハロゲン電球の石英ガラス、あるいは硬質ガラス管内で生じる諸現象については、数多くの熱力学的、熱化学的または反応論的な立場からの研究があり、今日もなお精力的に続けられている。高温における各種封入ハロゲン物質の反応など、コンピュータシミュレーションを使用して数多くの成果が得られているが、密閉される高压化されたガスの挙動についての研究は数少なく、完全に把握するには至っていない。

この問題の一つの解決法として、Fitzgerald¹⁾ らがレーザを利用したマッハツェンダ干渉計を使用して、ガス封入電球の内部状態を観測する方法を提案し、ホログラフィ撮影で得られた干渉縞と温度場との関係について考察を行なった。また同様な方法を用いてランプ内部の熱、および分子移動について Dan²⁾ や Fisher³⁾ らが実験、理論的考察を行なっている。しかしこれらは封入ガス圧が 1 気圧以下の大型ランプ、または実験用セットの中での現象を取り扱った基礎実験にとどまっている。また点灯直後の過渡状態を実時間ホログラフィ干渉によって 2,000 こま/秒で高速度カメラに撮影し、解析した例も報告されている⁴⁾。

実際の高圧封入がなされたハロゲン電球への応用は、本田、石崎⁵⁾ や平尾⁶⁾ らによってなされ、実際のハロゲン電球の定格点灯時のガス密度の時間変化が測定された。これに対し石崎、藤森らは点灯直後の温度、ガス密度の変化に注目し、点灯直後にはガス圧力の上昇は無視できるという仮定を実験的に実証し、さらにこれらを応用した非破壊式の圧力計を 発表している⁷⁾⁸⁾。一方、弓削らはハロゲン電球の構成物であるコイル、アンカー、封入ガスおよび封入ガス圧が、ランプ内熱分布に与える影響を実験的に観察

し、適正な形状を持つランプを提供する試みを行なっている⁹⁾。

本資料は、かかるレーザホログラフィを用いたランプ測定方法の基本的な考え方および応用例をまとめ、今後のランプ開発の一助となるように、その内容について解説するものである。

2. 理 論

一般にガスの屈折率は、絶対温度 T (K)、圧力 P (気圧) を用いて

$$n(x,t)=1+K_0\frac{P(x,t)}{T(x,t)}\cdots\cdots\cdots(1)$$

と表わされる。ここで K_0 はガスの種類およびレーザの波長に依存する定数で、波長が 6328 Å の HeNe レーザの場合、アルゴンガスで 7.8×10^{-2} (K/気圧)、クリプトンガスでは 11.7×10^{-2} (K/気圧) である。またランプ点灯時は圧力および温度は、場所および時間によって変化するもので屈折率も場所および時間の関数となる。

干渉計やホログラフィ干渉計では、屈折率の視線方向の積分値の変化を、干渉縞次数として測定することができる。すなわちこの干渉縞次数を m とすると、

$$m=\int_l\frac{1}{\lambda}[n_0-n(x,t)]dl\cdots\cdots\cdots(2)$$

で表わされる。ここで n_0 はランプ点灯前のランプ内ガスの屈折率、 l はランプ内光路長であり、 λ は干渉計に用いられた光の波長である。

(2)式に(1)式を代入すると、干渉縞次数 m は、

$$m=\int_l\frac{K_0}{\lambda_0}\left[\frac{P_0}{T_0}-\frac{P(x,t)}{T(x,t)}\right]dl\cdots\cdots\cdots(3)$$

となる。ここで P_0 、 T_0 はランプ点灯前の封入圧力およびランプ内温度である。

すなわち、ホログラフィによって観察される縞次数は、視線方向の圧力と温度の関数として表わされるわけである。ここで、 x をフィラメント近傍にとると圧力 $P(x,t)$ と温度 $T(x,t)$ は、図 1 のように変化することが実験的に確認されている⁸⁾。

すなわち、圧力の上昇する割合は温度の上昇する割合に比べて小さく密度、すなわち屈折率への影響は温度の変化

† Gas Behavior in Tungsten Halogen Lamps
 * ㈱東芝照明事業部 Nobuhiko Hayashi, Yooji Yuge
 ** ㈱東芝 生産技術研究所 Yasutomo Fujimori

図1 ランプ点灯直後の温度・圧力の変化

が支配的であると仮定できる。この仮定を代入すると(3)式は、

$$m = \frac{K_0 P_0}{\lambda T_0} \int_0^l \left(1 - \frac{T_0(x, t)}{T(x, t)} \right) dl \quad \dots\dots\dots(4)$$

のように表わせる。また(4)式は次のように表わすこともできる。

$$m = \frac{K_0 P_0}{\lambda T_0} \left(1 - \frac{T_0}{T} \int_0^l \frac{1}{T(x, t)} dl \right) \quad \dots\dots\dots(5)$$

すなわち、縞次数 m により視線方向の平均的な温度

$$\bar{T} = \left(\frac{1}{l} \int_0^l \frac{1}{T(x, t)} dl \right)^{-1} \quad \dots\dots\dots(6)$$

を求めることができる。つまり縞次数を測定することにより温度場を可視化することができるわけである。

次に、(4)式または(5)式において封入圧力と縞次数が比例関係にあることに注目する。同一形状で同じフィラメント温度をもつランプの封入圧力 P_0 は、決められた場所における縞次数に一定の比例定数を掛けることにより得られることを示している。この比例定数を求めるために(5)式の積分方向における温度分布をフィラメント温度 T_1 に等しい、つまり $T(x, t) = T_1$ と仮定すると(5)式は

$$m = \frac{K_0 l}{\lambda T_0} \left(1 - \frac{T_0}{T_1} \right) P_0 \quad \dots\dots\dots(7)$$

となる。実際には $T_0 \ll T(x, t) < T_1$ であるので

$$m = \eta \frac{K_0 l}{\lambda T_0} \left(1 - \frac{T_0}{T_1} \right) P_0 \quad \dots\dots\dots(8)$$

と近似できる。ここで η は $0 < \eta < 1$ の範囲にある比例定数で同一形状のランプでは同一の値をとると考えられる。ハロゲン電球では、この η は $0.6 \sim 0.8$ の狭い範囲であると考えられるが、正確には実験により求めたほうがよい。

さらにランプ内のガス温度分布を推定して、(8)式の η がほぼ一定の値をとる条件と、縞次数の読み取り条件をさらに詳しく解析した結果、次のような条件が必要であることがわかっている。

(1) レーザ光が通るランプ内光路のほとんど至るところで、ガス温度が上昇しているようにレーザ光路を選べば、多少のランプ内温度分布があっても η はほとんど変動しない。

(2) ランプ点灯後、内圧がほとんど上昇しないうちに干渉縞次数に最大値が現われるなら、そのときの次数を m とする。

これは、内圧はランプ全体として上昇する一方、温度上昇はフィラメント近傍で起こるランプに対していえることであり、ハロゲン電球は上記の条件を満足しており十分な精度が期待されるわけである。

3. ホログラフィ干渉法による測定

ランプ点灯時の屈折率分布の変化をパターン的に測定するため、定格点灯したランプにホログラフィ二重露光干渉法を適用する。

3.1 ホログラフィ干渉システム

ホログラフィ二重露光法では、点灯前と点灯後のランプ像を二重にホログラムに記録し同時に再生するもので、(2)式で表わされるような屈折率の変化の空間分布を可視化することができる。定格点灯しているハロゲン電球を、ホログラムに安定して撮影するために、従来のホログラフィ干渉システムに、次の特徴をつけ加えたシステムが用いられた。

(1) 高輝度のハロゲン電球の自発光が、ホログラム感光剤をかぶせないように、レーザの波長域だけを通す狭帯域フィルタ、および直進光だけを選択する空間フィルタを持つイメージホログラム系を用いた。

(2) ランプ像を縮小結像し、像の分解能が許す限りホログラム寸法を小さくして、ホログラム上での単位面積あたりのレーザ照射量を増加させることにより、ホログラム撮影時間をレーザ出力 200 mW で 60 ms までに減少した。

(3) システムの撮影手順を、マイクロコンピュータで制御することにより露光条件の設定などが容易になり、暗室作業下の撮影時のミスを低減するとともに、条件の再現性が確保できた。

(4) ホログラムを再生して得られる干渉縞の重なったランプ像をズーム機構の付いたTVカメラで写し、モニタ上に再生することにより像の拡大、縮小、コントラストの補

図2 ランプ内の屈折率分布を撮影するホログラフィシステム

正などが簡単に行なえ、かつレーザ光による目の損傷の危険性もない。

このような特徴を折り込み、図2に示すようなホログラフィ干渉システムを構成した。水冷アルゴンレーザ（東芝製LAI-107）からのレーザ光は、コリメータにより25倍に拡大され、半透鏡によって参照光と物体光に分けられる。参照光は直接ホログラム乾板を照射する一方で、物体光は拡散板を照射する。拡散板からの散乱光は拡散板後方のランプを照射し、このランプ像が二つのレンズによってホログラム上に縮小結像される。二つのレンズの間には干渉フィルタと空間フィルタを兼ねたものが置かれている。撮影はレーザのオンオフとランプ像のオンオフを二つのソレノイドシャッターを用いて行なっている。

3.2 撮影結果

上記のシステムを用いて、種々のハロゲン電球について撮影を行なった。

3.2.1 複写機用ハロゲン電球

乾式複写機露光用ハロゲン電球は、図3に示すように発光部が分散した両口金形のハロゲン電球の一種である。封入圧を変化させた試験サンプルについて、管径6mmのものを図4に、8mmのものを図5に示す。

図3 複写機用ハロゲン電球

図4 複写機用ハロゲン電球での撮影例
(管径6mm) (a) 6.1 atm
(b) 3.4 atm (c) 0.4 atm

撮影条件は点灯前と点灯後1.5秒との二重露光で、一つの干渉縞は、近似的に等温線を表わしていると考えてよいが、絶対値は内圧および光路長によって決定される。しかしフィラメントの温度は等しいので、相対的な温度分布は干渉縞の分布から推定することができる。

たとえば、図4と図5を比較すると管径の細い図4のほうが対流が少ないので、フィラメント近傍に熱がたまりやすい。また、フィラメントの長手方向では、フィラメント

図5 複写機用ハロゲン電球での撮影例
(管径8mm) (a) 3.8 atm
(b) 2.4 atm (c) 1.1 atm

寸法程度にしか熱の広がりがなくことがわかる。

3.2.2 自動車用ハロゲン電球

自動車の前照灯用ハロゲン電球の撮影結果例を図6に

図6 自動車前照灯用ハロゲン電球での撮影例 (a) 上側フィラメント点灯 (b) 下側フィラメント点灯後0.2秒

図7 自動車前照灯用ハロゲン電球での撮影例フィラメント部拡大(下側フィラメント点灯, 点灯後1.5秒)

示す。このタイプのランプには2本のフィラメントがはいっており、それぞれのフィラメントを点灯した場合を(a)、(b)で示している。撮影条件はいずれも点灯後0.2秒のものである。この種のランプでは内径が大きいため熱伝導による対流が生じやすく、上部の管壁へ熱が伝わっている様子がよく観察される。

図7には、点灯後1.5秒での撮影結果のフィラメント部分の拡大写真を示す。フィラメント近傍に温度の急こう配層が観察され、ラングミュア層の存在が示されている。

3.2.3 投光用ハロゲン電球

両口金形の投光用ハロゲン電球は、最初に実用化された典型的なランプであり、多くの研究、実験がこの種のランプについてなされている。筆者らもホログラフィ干渉法により温度分布を可視化し、現在までの結果を確認するとともにランプの最適設計への適用を行なっている⁹⁾。

図8 投光用ハロゲン電球での撮影例(封入ガスAr)
(a) 1 atm (b) atm

図8は(a)に封入ガス圧1気圧の場合、(b)に封入ガス圧3気圧の場合の干渉縞のようすを示す。これらの写真からもフィラメントの上側の干渉縞が、フィラメントと平行に走り、管径方向での温度分布が安定していることがわかる。

また、そこでの縞次数も封入圧力に依存していることが

図9 投光用ハロゲン電球の管端部付近の温度分布 (a) アンカーの外側にフィラメントがある場合 (b) アンカーの外側にフィラメントがない場合

示される。一方、アンカーと呼ばれる支持リングによりフィラメント間は熱的に分離されていることもわかり、アンカー位置による管端付近の温度状態の違いを図9に示す。この部分の温度状態は非常に複雑であり、(a)の場合には封止部側に高温領域が流れ出しているのに対し、(b)の場合ではアンカーで熱遮へい効果が生じ、封止部側の温度上昇が抑制されていることがわかる。またこの構造でランプ効率が約2%上昇することも確かめられている。

4. レーザ干渉計による封入圧力測定

ホログラフィ干渉法によりランプ内部状態を知り、ランプ設計に反映させることは、前述の方法を用いてかなり簡便に行なえるようになった。しかしこれはやはり暗室作業を必要とし、また干渉縞の読み取りやホログラム撮影の時間やコストを考えると、まだ研究室の領域を出るものではない。

さて、筆者らは(8)式で内部圧力の上昇を無視できる点灯初期においては、干渉縞次数が封入圧力に比例することを示しており、これを応用し現場で使用できる封入圧力を測定するレーザ干渉計を開発している。

これは、ホログラフィ干渉計で得られる情報が三次元の立体像を投影した二次元の情報であるのに対し、ホログラフィ法で決められた一点の干渉縞の時間変化を読み取るもので乾板や暗室は必要としない。一般にランプのように外形が円柱状の場合に干渉計を使用することは、ランプバルブの光学ひずみが、内部ひずみにまざり合ってしまうためにあまり用いられない。しかし一点だけの情報であればレーザを絞込みばバルブのひずみを無視できるのである。

4.1 干渉計の構成

図10に干渉計の構成を示す。基本的にはレーザを使ったマッハツェンダ形干渉計であるが、凸レンズを用いてランプ内で光束が0.1mm以下となるように絞っているところに特徴がある。ランプを通過した物体光は参照光と再びハーフミラーでいっしょになる。ランプを通過した光はランプバルブにより凹レンズ効果を受けるので、波面がわず

図10 レーザ干渉計による封入圧測定装置

かではあるが乱れ様には干渉しない。このためピンホールで、干渉縞の1/4縞以内とみられる干渉光の領域だけを選び、光電子増倍管で検出している。光電子増倍管の前には狭帯域の干渉フィルタを置き、レーザ光だけを選択してランプの自発光のかぶりを除いている。信号は増幅器などを通り、ランプ点灯のタイミングと同期をとって、オシロスコープまたはメモリーに入れられる。

4.2 測定結果

図11に測定した出力例を示す。ここでの供試ランプは一般投光用ハロゲン電球で、封入ガスは窒素とアルゴンの混合ガスである。ホログラフィ干渉法によりこの種のランプの測定位置(レーザの光路)は、水平なフィラメントのすぐ上の部分であり、ランプの視線方向の内径は8mmである。これより(8)式は、

$$P_0 \approx 0.55 m \dots\dots\dots (9)$$

(a)

(b)

(c)

図11 干渉計による封入圧信号

- (a) 破壊法による封入圧 1.9 atm $m=3.4$
- (b) 破壊法による封入圧 2.7 atm $m=4.8$
- (c) 破壊法による封入圧 6.6 atm $m=12.0$

図12 レーザ干渉計による圧力測定値と破壊法による値との比較

と表現できる。図の波形の繰り返しの回数が干渉縞次数 m である。点灯して約0.1秒で干渉縞次数が最大となっている。縞次数 m としてはこの最大値をとる。

実際に封入圧を1~6気圧程度まで変化させたランプを試作し、レーザ干渉計による測定値と、従来の破壊法による測定値と比較した結果を図12に示す。この結果、幅広い範囲にわたり ± 0.2 気圧程度の誤差で封入圧力を測定できることが実証されている。

5. ま と め

レーザを用いたホログラフィ干渉システムにより、ハロゲン電球内の温度分布を観察し、今まで理論的に考察されていた事象を可視化し確認することができた。またこの方法により、ランプ内温度分布をランプ設計に反映させる試みも行なわれている。

さらに点灯直後は(圧力/温度)の変化が温度変化にほぼ支配されていることを利用し、非破壊式の封入圧力測定装置が考案され、十分実用に供し得る精度であることが確認されている。これはランプを破壊することなしに封入圧力を手軽に測定できるので、今後、ランプ開発、製造における品質管理などを一層きめこまかく行なえ、ハロゲン電球の信頼性をさらに大きく向上させるであろう。

参 考 文 献

- (1) Fitzgerald, J., Hörster, H.: The Temperature Distribution in Gas-filled Incandescent Lamps, Philips Tech. Rev. 32-6/7/8 (1971) 206~209
- (2) Dan, H. B. B.: Numerical Calculation of Radial Transport of Mass and Heat as applied to Incandescent Lamps, Light. Res. Technol. 9 (1977) 107~111
- (3) Fisher, E., Fitzgerald, J.: Heat and Mass Transport in Cylindrical Gas-filled Incandescent Lamps, J. Appl. Phys. 45-7 (1974) 2895~2902
- (4) 植村: High Speed Real Time Holographic Interferometer, SPIE 97 (1976) 88~92
- (5) 本田, 石崎, 藤森, 平尾: レーザホログラフィの電球設計への応用, 照学全大(昭56) 20
- (6) 平尾, 山本, 藤森: レーザホログラフィによるハロゲンランプの測定, 照学全大(昭56) 104
- (7) 藤森, 石崎, 林: ハロゲンランプの温度, 圧力特性, 日本精機学会春大(昭58) 835
- (8) 石崎, 林, 藤森: ホログラフィによる電球内ガス挙動の解析, 照学全大(昭58) 1
- (9) 弓削, 林, 藤森: ホログラフィによるハロゲンランプ最適設計 照学東京支部大(昭57) 1
- (10) 藤森, 石崎, 林: ホログラフィを応用したランプ封入圧の非破壊測定, 光学技術コンタクト 20-12 (1982) 37~44
- (11) 藤森, 小松, 石崎: ハロゲンランプの封入圧測定装置, 東芝レビュー 37-6 (昭57) 525~528

(受付1986年4月23日)