

ランプ寿命推定法を用いた長寿命蛍光ランプの開発

Long-Life Fluorescent Lamps Designed by Lamp-Life Estimation Method

真鍋 由雄

Yoshio Manabe

森 利雄

Toshio Mori

岡崎 祐輔

Yusuke Okazaki

甲斐 誠

Makoto Kai

山形 幸彦

Yukihiko Yamagata

要 旨

ランプ寿命が10 000時間を超える長寿命蛍光ランプの開発では、ランプ寿命を推定する方法は、従来 数千時間が必要であった。筆者らは、電極に塗布されている電子放出材料の消耗がランプ寿命の主要因であることに注目し、レーザ誘起蛍光法を用いて電極付近のバリウム原子密度を測定し、電子放出材料の消耗量を算出した。バリウム原子密度測定から、点灯当初であってもランプ寿命を推定する方法を開発した。このランプ寿命推定法を用いて、高周波電子安定器専用の高効率長寿命蛍光ランプである丸形、直形蛍光ランプを開発した。

Abstract

In the design for long-life fluorescent lamps (FLs) with lamp lives of 10 000 hours and over, the conventional estimation method has required burning the FLs for several thousand hours. As the operating lives of fluorescent lamps are determined principally by the loss of the emission materials coated on their electrodes, we applied a laser-induced fluorescence technique to measure the barium atom density in the vicinity of the electrodes and calculated the loss rate of the FL's emission materials. We developed a lamp-life estimation method at initial burning time by barium atom density measurement. We then developed long-life, high-efficiency high-frequency-operation circular and straight fluorescent lamps designed using this lamp-life estimation method.

1. はじめに

地球温暖化の影響が顕著になり世界的に環境意識が高まってきているが、日本の家庭でのエネルギー消費は増加し続けている。家庭での電力消費のうち、照明分野は全体の約16%を占め、エアコン、冷蔵庫に匹敵し、照明分野における「省エネルギー」の必要性が高まっている。

現在、住宅用照明の光源としては、高効率の高周波インバータ電子安定器を用いた点灯方式の蛍光ランプの普及がかなり進んでおり、最近では、新光源であるLED (Light Emitting Diode) を用いた照明が普及し始めている。しかし、家庭では既存の銅鉄安定器を用いた照明器具のスタータ形丸形蛍光ランプが依然多く使用されている。ただし、このスタータ形丸形蛍光ランプは電子安定器を用いた照明器具でも使用できるので、このランプでの「省エネルギー」も図られている。

一方、工場、オフィス、店舗における照明では、効率は低いが安価なラピッド形蛍光ランプが依然使用されている。また、電子安定器と電子安定器専用蛍光ランプを使った照明システムが発売され普及しつつある。

今回、当社は電子安定器専用の15 000時間を超える長寿命であり高効率の丸形と直管蛍光ランプを開発した。これらの開発により、蛍光ランプの長寿命化による「省エネルギー化」を図るとともに、「省資源化」を実現した。

具体的には、住宅用照明では、電子安定器使用時に約5

%の電力消費を低減させ、ランプ寿命15 000時間の丸形蛍光ランプを開発した。工場・オフィス照明分野では、従来多く使用されているラピッド形蛍光ランプより2倍以上明るく、ランプ寿命が1.5倍の18 000時間の直管蛍光ランプを開発した。とくに、この直管蛍光ランプは、長寿命化、光束改善によってラピッド形蛍光ランプに比べて敷設本数を半減し、交換費用を1/3に削減できた。

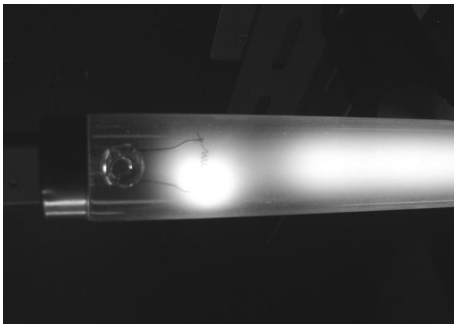
蛍光ランプは、電子放出材料(エミッタ材料)を塗布した電極、蛍光体を塗布したガラスバルブおよび不活性ガスによって構成されている。蛍光ランプの寿命は、点灯時間によって電極からエミッタ材料が消耗することが主要因である。このエミッタ材料の消耗率が測定できれば、ランプ寿命が推定できる。しかし、従来のランプ寿命の推定方法は、実点灯試験において直接点灯になるまでの時間を測定するか、ランプ点灯によるエミッタ材料の消耗に伴う電極全体の熱容量変化を測定する方法により行われてきた¹⁾。そこでは、熱容量変化を測定する方法でも10 000時間を超える長寿命ランプの場合、ランプ寿命を決定するのに数千時間必要であった。

筆者らは、エミッタ材料の消耗を非接触で定量的に計測する方法と、エミッタ材料の消耗の主要因となる電極温度を測定する方法を開発した。この方法を用いることで、初期点灯であってもランプ寿命を推定することを可能になった。エミッタ材料の消耗を定量的に計測する方法としてレーザ誘起蛍光(LIF: Laser Induced

Fluorescence) 法²⁾⁻⁴⁾を用い、蒸発するエミッタ材料を構成する原子密度を計測し消耗率を求めた。また、熱放射スペクトル法⁵⁾を用いて電極温度を測定し、エミッタ材料の消耗と電極温度の関係を明らかにした。

2. レーザ誘起蛍光法と熱放射スペクトル法の原理

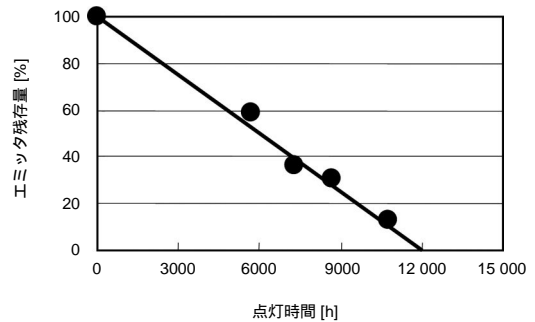
蛍光ランプは、ガラス放電管、放電管内面に塗布された蛍光体、電極、水銀、不活性ガスなどによって構成されている。電極はタングステンのコイルにエミッタ材料が塗布されている。エミッタ材料は、酸化バリウム、酸化ストロンチウム、酸化カルシウムなどの混合物である。蛍光ランプの発光は、エミッタ材料から熱電子を放出して低い電圧で放電を維持し、水銀から放出される254 nmの紫外線で蛍光体を励起し、蛍光体からの可視発光を放出するように設計されている。第1図に示すように、コイルは放電時に大きな輝点を生じ、コイル上に塗布されたエミッタ材料は、コイルに流れる電流による電極温度の上昇とともに熱せられる。これにより熱電子が放出されるが、エミッタ材料自身も消耗される。この消耗が、ランプ寿命を決定する主要因になっている。



第1図 点灯中の透明ガラスランプ

Fig. 1 Photograph of clear glass lamp under discharge operation

第2図に、電子安定器専用直管蛍光ランプ(45 W点灯)の熱容量変化の測定によるランプ寿命推定の結果を示す。横軸は点灯時間、縦軸はエミッタ材料を含む電極全体の熱容量を点灯初期における電極全体の熱量で割った比率、すなわちエミッタ材料の残存量である。電子安定器専用直管蛍光ランプは45 W点灯で、点灯時間とともにエミッタ材料が消耗し、残存量がなくなる点灯時間であるランプ寿命は12 000時間であった。また、第2図を見てわかるように点灯時間とエミッタ材料の残存量との関係はほぼ直線近似で表現でき、同じ点灯条件であれば単位時間当たりのエミッタ材料の消耗量は一定とわかる。この傾向は他の銅鉄安定器における蛍光ランプでも同じであった。



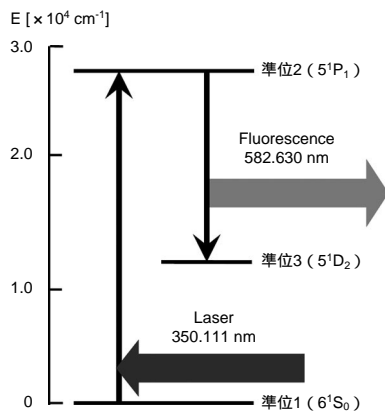
第2図 エミッタ残存量と点灯時間との関係

Fig. 2 Relationship between burring time and emitter remainder

この電極の熱容量測定によるランプ寿命の推定方法は、実点灯試験方法に比べて短い時間でランプ寿命を推定できる。しかし、エミッタ材料の塗布量がmg程度なので、塗布量誤差などを考慮すると有効な測定数値を得るためには数千時間の点灯が必要であった¹⁾。したがって、点灯初期でのエミッタ材料の消耗量を測定することで、蛍光ランプの寿命推定できる方法が要望されていた。

2.1 レーザ誘起蛍光法による粒子密度の計測

同点灯条件であればエミッタ材料の消耗が一定となるので、飛散する原子を個数オーダーで測定でき、かつ点灯しながら非接触で測定できるレーザ計測法に注目した。レーザ光は単色性の良さから、原子や分子を特定の準位へ励起させることができるので、エミッタ材料から分解・蒸発するバリウム、ストロンチウム、カルシウムなどの原子を上位準位へと励起し、上位準位から下位準位へと遷移する際に放出される蛍光(検出光)を検出する。この分光法は一般にLIF法と呼ばれる^{2), 3)}。励起光波長、検出光波長が可視光付近にあれば、点灯中の実際の蛍光ランプでの測定システムを、安価かつ容易に構成できる。さらに、励起光波長と検出光波長が違う遷移を選択することでS/Nの高い測定が可能になる。エミッタ材料を構成する元素の中で上記条件が満たされるのはバリウム(Ba)であった。第3図に、BaにおけるLIF法の概念図を示す。電磁波の吸収・放射を伴う原子の準位間遷移には軌道量子数の変化量 $\Delta l = \pm 1$ が許容される選択則がある。この選択則より、準位1(6^1S_0)状態から許容遷移の準位2(5^1P_1)状態へ励起する。準位2状態からの許容遷移は、準位1と準位3(5^1D_2)への遷移があり、本測定の場合、準位2から準位3の蛍光として計測する。基底準位(6^1S_0)を対象準位としたとき入射レーザの波長は350.111 nmとなり、計測する蛍光の波長は582.630 nmである。蛍光ランプにおけるBa粒子測定構成は、点灯中の電極付近にレーザを入射しBa粒子を励起させ、励起されたBa粒子から放出さ



第3図 Ba原子LIF測定スキーム

Fig. 3 Energy level diagram of Ba for pumping and detection used LIF measurements

れる観測体積中の蛍光を有効立体角 Ω とした光学系で検出する。Ba原子の基底準位 (6^1S_0) (準位1) から励起準位 (5^1P_1) (準位2), 準位2から選択遷移する準位3 (5^1D_2) へのアインシュタインA係数をそれぞれ A_{21} , A_{23} とし, 励起前の基底準位 (6^1S_0) の密度を $n_1(0)$, 観測体積を V とすると, 測定される光子数 N_p は,

$$N_p = n_1(0) V \eta \frac{A_{23}}{A_{21} + A_{23}} \frac{\Delta\Omega}{4\pi} \dots\dots\dots (1)$$

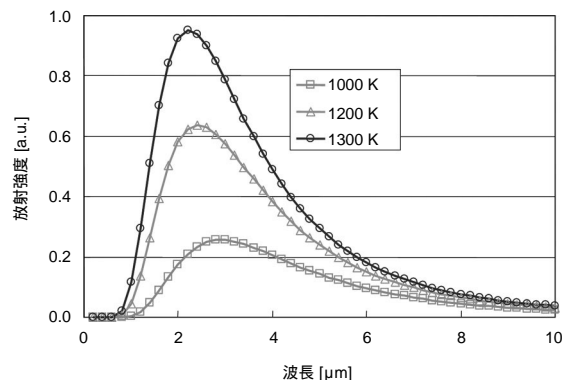
と表現される。ここで, パラメータ η は, 準位2へのレーザによる励起される割合を示すものである。

LIF測定における主構成はレーザと受光系があり, レーザの要求性能は, スペクトル幅がBa原子のドブラー幅より広く, レーザパルスがBaの準位2 (5^1P_1) の緩和時間 (約14 ns) より短く, 1パルス数mJ以上, であり, 10 HzパルスYAGレーザ励起色素レーザは要求性能を満足した。受光系は波長分解能が数10 pm程度の分光器を有する光電子増倍装置で構成した。ホローカソード放電などを用いて, 既知の基底状態の密度 $n_1(0)$ と蛍光の光子数を計測することで測定系全体を校正し, 蛍光ランプからのBa原子の粒子数を定量的に算出できる。以上の構成で本測定系は時間分解能0.2 μ s, 空間分解能0.05 \times 0.2 \times 2 mm³となり, 電子安定器 (~100 kHz : 10 μ s), 銅鉄安定器 (60 Hz : 16.6 ms) のBa粒子測定であれば十分な時間分解で測定できる。また, 蛍光ランプの一般的なコイルの長さは約10 mm, 輝点直径は1 mm程度なので十分な空間分解能を得ることができる。

2.2 熱放射スペクトル法による温度計測の原理

点灯中の蛍光ランプにおけるエミッタ材料を含むコイルは1000 K以上の高温であり, 電磁放射線を放出する。その放射線の分布はプランク分布で表され, 第4図に1000 Kから1300 Kの電磁放射線の理想曲線を示す。熱された物体から放出される分光放射発散度 $I(\lambda, T)$ は, (2) 式で与えられる。点灯中におけるコイル表面温度は, 複数の測定波長におけるコイル表面から放出された放射線の光強度を計測し, 得られたスペクトル形状を (2) 式で示された理想曲線でフィッティングすることで算定した。受光系は, 波長分解能が数10 pm程度の分光器, エミッタ温度が800 K以上なので750 nm ~ 830 nmの可視域から近赤外領域に波長感度がある光電子増倍管, 積算機能付電圧器によって構成した。ただし, スペクトル形状から表面温度を計測するため, 測定系全体での波長ごとの絶対感度校正が必須であり, 温度補償ランプを使用して校正した。以上の校正で得られた測定系では, 800 K以上で ± 30 K程度の測定精度, 空間分解能は0.3 \times 2 mm²となり, コイルの輝点直径は1 mm程度なので十分な空間分解能である。また, 受光系機器の時間分解能は1 msなので, 銅鉄安定器 (60 Hz : 16.6 ms) の場合時間変化を十分追跡できる。電子安定器の周波数は100 kHz程度であるが, コイルの熱時定数を考慮するとコイル表面温度の時間変化が電子安定器の周波数に追従していないので, 電子安定器による点灯の場合コイル表面温度の測定は1 msと考えるとこの時間分解での測定値を用いた。

また, 点灯中の蛍光ランプは不活性ガスや水銀からの



第4図 放射強度の波長特性 (1000, 1200, 1300 K)

Fig. 4 Emission spectra as function of 1000, 1200, and 1300 K

$$I(\lambda, T) = \epsilon(\lambda, T) \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(\frac{hc}{\lambda kT}) - 1} \dots\dots\dots (2)$$

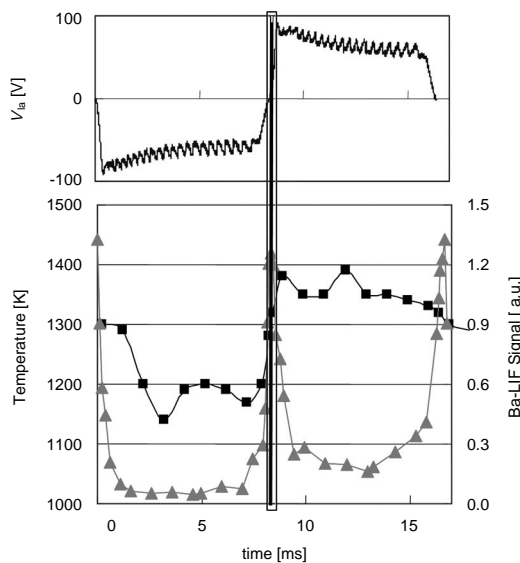
ここで, h : プランク定数, c : 光速,
 k : ボルツマン定数, $I(\lambda, T)$: 分光放射率

原子線発光があり、これらの発光の影響を除くことは重要である。さらにエミッタ材料を含むコイルにおいて、コイルは金属のタングステンであり、エミッタ材料は酸化物のため各材料の分光放射率が大きく違う。このため、従来の熱放射スペクトル測定ではコイルとエミッタ材料上の表面温度は大きく違っていた。本測定方法では測定波長を選択して測定できるので、不活性ガスや水銀からの原子線発光を除外でき、測定点がタングステン、酸化物のエミッタ材料であっても、多点計測で分光放射率に関係なく、波長および温度依存性に影響されることなくコイル表面温度を算定できる^{4),5)}。

3. ランプ寿命推定と長寿命蛍光ランプへの応用

3.1 ランプ寿命とコイル温度測定

点灯時の蛍光ランプにおけるLIF法で得られたBa粒子密度と熱放射スペクトル法で算出した温度計測の測定結果を、第5図に示す。蛍光ランプは20形直管を用い、銅鉄安定器で点灯した。コイルの表面付近のBa粒子密度とコイル温度の時間分解測定結果は、商用周波数（60 Hz）の1周期分を示す。Ba原子の粒子密度（第5図下図中の印）は、ランプ電圧の極性交替時に多く、負極時より正極時にBa原子は多く放出された。コイルの表面温度（第5図下図中の印）は、正極時の温度が負極時より150 K高い値を示した。電極への電子流入は正極時に起きるので、この電子加熱でBa原子の放出が多くなる。一方、負極時は熱電子放出による電子冷却効果でコイル温度が低下しBa



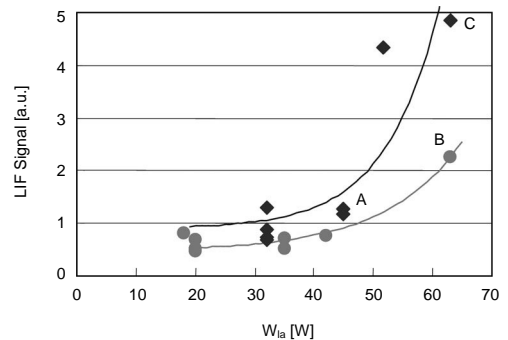
第5図 ランプ電圧 (V_a)、コイル表面温度、Ba原子LIF信号の時間変化
Fig. 5 Temporal distribution of Ba-LIF signal intensity, filament surface temperature, and lamp voltage (V_a) waveform

放出が減少したと考えられる³⁾⁻⁶⁾。また、極性交替時のBa放出量の増加は、銅鉄安定器を用いた点灯の特徴で、電子安定器では観測されず、この現象の説明は、コイル周辺の荷電粒子の応答と安定器の周波数との関係と考えられる。以上の結果から、Ba放出量の積分値を基に単位時間当たりのエミッタ材料の消耗量を算出でき、ランプ寿命を推定できる。また、Baの消耗量はコイル表面温度に影響されるので、熱放射スペクトル法を用いて蛍光ランプのコイルを設計する手段となることがわかった。

3.2 長寿命蛍光ランプへの応用

当社は、電子安定器と高効率蛍光ランプによる照明システムによって「省エネルギー化」を図るために、電子安定器専用の長寿命高効率の丸形と直管蛍光ランプを開発した。この開発においてランプ効率と寿命改善のために、LIF法によるBa粒子測定とコイル表面温度測定を用いて、ランプ寿命を設計した。

直管蛍光ランプの開発では、光束改善のために、従来の直管蛍光ランプの投入電力を45 Wから63 Wに増加させた。従来ランプのコイルの場合、電力増加でコイル温度の上昇がありランプ寿命が短くなる可能性があった。このために投入電力を増加してもコイル温度が上昇しない新コイルを設計した。この新コイルにおけるランプ寿命の設計をするために、LIF法によるBa粒子測定方法を用いて、従来コイルと新コイルにおけるBa消耗量を求め、ランプ寿命を予測した。第6図に、LIF法を用いて、従来コイル（図中○）と新コイル（図中◇）で作製した直管蛍光ランプにおけるBa放出量を測定した結果を示す。横軸は投入電力、縦軸はBa原子のLIF信号強度である。従来コイルの場合、通常点灯時（45 W）のLIF信号強度はA点であり、63 Wの場合C点まで増加した。この結果から従

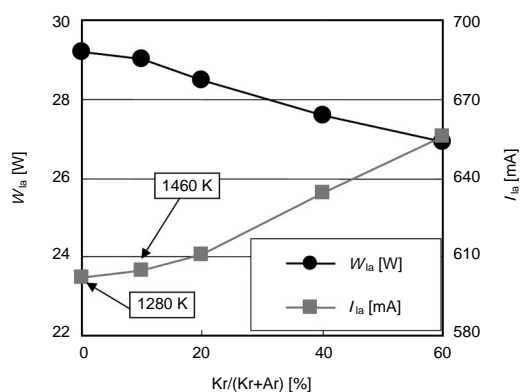


第6図 63形Hf専用ランプのBa-LIF信号の電力依存性
（○：従来コイル，◇：新コイル）

Fig. 6 Power dependency of Ba-LIF signal intensity for 63 W - Hf operated fluorescent lamp
（○：conventional type coil, ◇：new type coil）

来コイルで63 Wの電力で点灯すると、LIF信号強度比から、約4倍のエミッタ材料の塗布量が必要であり、さらに1.5倍のランプ寿命の増加でエミッタ材料の塗布量が現行の6倍以上となり実現不可能な値になった。一方、新コイルの場合63 Wの電力で点灯してもB点であり、ランプ寿命を考慮してもエミッタ材料の塗布量は現行の2.5倍程度になった。以上のような測定結果を使って高効率長寿命直管蛍光ランプのランプ寿命を設計した⁷⁾。

住宅用照明の丸形蛍光ランプの開発では、電子安定器と銅鉄安定器ともに使用でき、電子安定器使用時に約5%の消費電力の低減するために、従来ランプの不活性ガスとして使っていたアルゴン (Ar) にクリプトン (Kr) を添加した。KrガスはArガスに比べて全電離断面積が大きいので、このランプを銅鉄安定器で使用すると放電電流が増加することでエミッタ材料の消耗が増加し、ランプ寿命が短くなる懸念があった。KrとArとの混合比を変えた丸形蛍光ランプを作製し、銅鉄安定器点灯時のコイル表面温度を熱放射スペクトル法で測定した。その結果を、第7図に示す。Kr混合比を増加させるとランプ電流は増加し、ランプ電力は減少した。一方、コイル表面温度は上昇しKr混合比10%で1460 K (図中指示) に達した。この値はArガス100%の従来ランプに比べて200 K上昇した。LIF測定でもKr混合比の増加でエミッタ材料の消耗が増加した。これらの結果からKr混合比は10%以下とし、そのほかのランプ特性を考慮してKr添加量を決定した⁸⁾。



第7図 種々のKr混合比における丸形蛍光ランプのランプ電力 (W_{la})、電流 (I_{la}) 特性

Fig. 7 Electrical properties (W_{la} , I_{la}) for circular fluorescent lamp fabricated as function of Kr / (Kr + Ar) ratio under Cu-Fe ballast operation

4. まとめ

当社では、電子安定器専用の高効率で15 000時間を超える長寿命蛍光ランプを提供することで、「省エネルギー化」を図るとともに「省資源化」を実現した。10 000時間を超える長寿命蛍光ランプの開発の場合、ランプ寿命を評価するのに数千時間の実点灯試験することで確認してきた。このランプ寿命の評価方法として、筆者らは簡易でかつ非接触の計測方法であるレーザ誘起蛍光法に注目し、蛍光ランプのエミッタ材料に含まれるバリウムの消耗率とランプ寿命との関係を検討し、エミッタ材料から放出されるBa原子をプローブとして用いたランプ寿命推定法を開発した。また、同時にコイル電極の表面温度を熱放射スペクトル法で推定した。これらの測定方法を併用することによって、点灯初期でランプ寿命を決定できるようにした。

以上のように、蛍光ランプの電極に塗布されたエミッタ材料の消耗率を測定することにより、筆者らは蛍光ランプの製品性能の1つであるランプ寿命を予測する技術を構築した。

参考文献

- 1) J. W. F. Dorleijin, et al. : Standardization of the static resistance of fluorescent lamp cathodes and new data for preheating IEEE Ind. App's Conf. Record, 37-1, p.673 (2002).
- 2) A. K. Bhattachaya : Measurement of barium loss from a fluorescent lamp electrode by laser-induced fluorescence. J. Appl. Phys. 95, p.4595 (1989).
- 3) A. Samir, et al. : Study on temporal and spatial distributions of Ba atoms in fluorescent lamp discharge using laser-induced fluorescence. Jpn. J. Appl. Phys. 45, p.8109 (2006).
- 4) Y. Manabe, et al. : Characterization of Ba atom emission from fluorescent lamp filament by laser-induced fluorescence technique. Proceed. of the 11th Int. Symp. On the Science and Technology of Light sources, CP005, pp.45-46 (2007).
- 5) 山形幸彦 他 : 熱放射スペクトル測定による蛍光ランプ電極の温度計測とエミッター粒子の放出特性 () 2009年秋季第70回応用物理学学会学術講演会 9p-E-8 (2009).
- 6) J. Waymouth : Electric Discharge Lamps. p.91 (MIT Press, Cambridge, MA, 1971).
- 7) 真鍋由雄 他 : 環境配慮型Hf蛍光ランプの開発 平成19年度 (第40回) 照明学会全国大会講演会 光源・回路・放電現象 -8 (2007).
- 8) 岡崎祐輔 他 : 省電力環形蛍光ランプの開発 平成21年度 (第42回) 照明学会全国大会講演会 光源・回路・放電現象 -11 (2009).

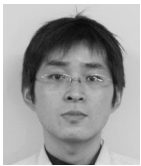
著者紹介



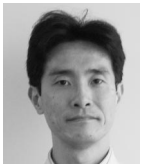
真鍋由雄 Yoshio Manabe
ライティング社 照明システムR&Dセンター
Lighting Systems R&D Center, Lighting Company
工学博士



森 利雄 Toshio Mori
ライティング社 照明システムR&Dセンター
Lighting Systems R&D Center, Lighting Company



岡崎祐輔 Yusuke Okazaki
ライティング社 照明事業ビジネスユニット
Lighting Business Unit, Lighting Company



甲斐 誠 Makoto Kai
ライティング社 照明システムR&Dセンター
Lighting Systems R&D Center, Lighting Company



山形幸彦 Yukihiko Yamagata
九州大学大学院 総合理工学研究院
Department of Engineering Sciences and Materials,
Kyushu University
工学博士