

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年4月30日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560277

研究課題名（和文） 蛍光ランプの放電生成・維持機構の解明と最適制御による高効率・長寿命化

研究課題名（英文） Elucidation of the discharge generation/maintenance mechanism and development of a highly efficient and long-lived fluorescent lamp

研究代表者

山形 幸彦（YAMAGATA YUKIHIKO）

九州大学・総合理工学研究院・准教授

研究者番号：70239862

研究成果の概要（和文）：蛍光ランプのエミッター放出と電極温度分布の相関を実験的に解明した。Kr 混入により発光効率を向上出来る一方で、電極温度を最適とする電極設計がキーポイントである事を示した。また、放電電流に応じた外部加熱電流の位相と振幅の制御により、熱電子放出の増加とエミッター消耗の低減が可能な電極温度分布を達成できることを示した。さらに、シミュレーションを用いた高効率・長寿命蛍光ランプ開発の設計指標として $\eta \tau$ を提案した。

研究成果の概要（英文）：The correlation of emitter loss and electrode temperature distribution of the fluorescent lamp was elucidated experimentally. An electrode design to optimize the electrode temperature was shown to be a key issue, while luminous efficiency can be improved by Kr addition into working gas. It was also shown that the enough thermionic electron emission and the suppression of emitter loss can be achieved by controlling the amplitude and phase of an additional heating current. Furthermore, $\eta \tau$ was proposed as the useful design index of the highly efficient and long-lived fluorescent lamp.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学，電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：蛍光ランプ、省エネルギー、長寿命化、レーザー誘起蛍光法、熱放射スペクトル法、エミッター、熱陰極グロー放電、シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

(1) 日本国内における家庭の電力消費（2,000億 kWh/年）で照明が占める割合は約16%であり、総消費量（10,000億 kWh/年）では10%に及ぶ。照明器具の中でも低圧水銀蛍

光ランプ（FL）は特に普及率が高いため、僅かの効率改善も省エネに大きく貢献でき、例えば現行の直管 FL や丸管 FL で10%の効率改善により、国内で約100万 kW（大型原子力発電所1基分）もの電力を削減で

きると試算されている。また、FLは白熱電球に比べてエネルギー効率が5~6倍高い上に寿命も約10倍(約10,000時間)と長い。そのため、例えば全国の家(4678万世帯)で白熱電球6個を電球型FLに取り替えると、電力量を約90億kWh、CO₂排出量を約341万トン(家庭での排出量の約2%)削減できる。この様に省エネ・省資源に大きく寄与できるため、国内外を問わず、現行FLの効率改善や白熱電球の電球型FLへの転換が強く推進されている。

(2) 一方で、固体発光素子として白色LEDが台頭してきているが、照明器具としての発光効率はまだFLより低く、また高価格のため、本格的普及は約10年後であるとされる。また、放電回路を含むFL灯具はほぼ全家庭・事業所などに広く普及しているため、FLの需要は電球型FLの利用拡大にも牽引され、今後20年程度は更に大きくなると見積もられている。

(3) FLの電極には低仕事関数のエミッター(Ba酸化物)が塗布され、比較的低温で熱電子を放出している。十分な量の熱電子の放電空間への供給で熱陰極グロー放電となり、蛍光発光に寄与しない陰極シース電圧を約10Vと低下させ(冷陰極は約100V)、高い発光効率を実現している。また、始動前の電極予熱によりFLを低電圧で始動でき、高電圧印加によるエミッターのスパッタリングを低減している。一方、FLの不点灯寿命は始動時及び点灯時の電極からのエミッターの放出が主要因である。しかしながら、現在までその放出機構が十分に明らかにされないまま、商業ベースでのFL開発が先行してきた。また、FLの長寿命化により寿命測定に長期間を必要とし、旧来の経験的手法による開発は限界になっている。特に、電球型FLは電源回路と一体型で放電状態を比較的自由に設計できる反面、設計パラメータの多さから最適化が困難である上にさらに長時間を要する。以上に加えて、昨今の省エネ、省資源の厳しい要求からも、各種条件下でのエミッターの放出機構と放電特性を詳細に把握し、学術的見地に基づいた長寿命・高効率のランプ設計指針の提案が強く望まれている。従って、ここでは放電状態と蛍光発光の物理現象を詳細に把握した上でのシミュレーションによる最適条件探索が鍵となる。しかも、上述の理由からこれらは必要不可欠かつ急務である。

(4) 現在までにFLの電極近傍のBa原子密度計測や電極の温度分布計測を通じて、電極からのエミッター放出機構と放電モードとの関連性が議論されてきた。その結果、FLの長寿命化・高効率化には熱電子を十分に供給して放電電圧を低くし、エミッター放出を抑制する電極形状、及び放電条件の最適化が必須であることが示された。しかしながら、FLの

設計指針を示すには、熱陰極放電移行への境界条件、エミッターと熱電子の総放出量の電極温度分布による相関、放出されたエミッター及び熱電子のガス種による緩和・増殖過程の違いなど、さらに詳細なエミッター放出と電極温度計測を通じた研究が必要である事が示された。

2. 研究の目的

本課題研究は、FLの様々な放電状態におけるエミッター放出と電極温度分布を詳細に計測してそれらの関係を解明し、さらに熱電子の放出過程から放電の生成・維持に至る最適条件の探索を通じて、FLの最適設計と最適制御による高効率・長寿命化を目指したものである。それを実現するため、連続点灯時のエミッター放出と電極温度分布の相関の詳細解明、熱電子放出特性の温度依存性と熱陰極グロー放電の生成・維持条件の解明、及び点灯方式が寿命に及ぼす影響の解明を行う。これらにより、FL始動から連続点灯までの一連の放電維持条件と、エミッター放出と電極温度の時間・空間分布の相関に関して知見を得る。得られた実験結果を基に、FL電極の電子・エミッターの流出入を考慮した電極の熱分配と放電形成のシミュレーションを行い、FL電極の種類や形状がこれらの放出、放電の生成・維持に与える影響を予測し、長寿命・高効率のFL設計指針の提案ができるようにする。これらにより、FLの省エネ化(高効率)、省資源化(長寿命)の技術開発に寄与することを研究の目的とした。

3. 研究の方法

(1) レーザー誘起蛍光法によりFLのエミッター(Ba原子)の時間・空間分布密度を、熱放射スペクトル法により電極温度の時間・空間分布を計測し、連続点灯時のエミッター放出特性と電極温度分布の相関解明を目指した。主に透明直管FLを測定対象とし、図1に示す点灯回路を用いて、AC

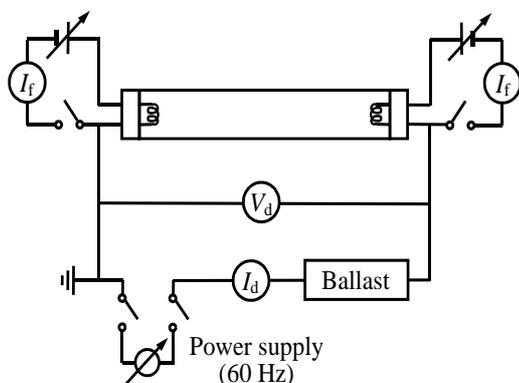


図1 フィラメント電極加熱用の外部電流源を設置した蛍光ランプ点灯回路

60 Hz, 高周波 (45 kHz) で放電を生成し, 放電電流 (I_d) とは独立に電極加熱用フィラメント電流 (I_f) 源により電極フィラメントを追加熱した. 放電条件とフィラメント電流を変化させて, 電極温度の時間・空間分布とエミッター放出特性との関連性を調査した. ガス種, ガス圧変化による電極温度や放電状態の変化は, シミュレーションに重要なパラメータとなる知見を与えるため, ガス種 (Ar, Kr 等), 及び圧力を変化させた FL や, エミッターが半分程度消失した長期間使用 FL においても同様の実験を行った.

(2) 数値計算のみによる高効率・長寿命の FL の開発における設計指針の提示を目指して, 放電内部パラメータ等を予測するシミュレーションの開発を行った. 図 2 に示すモデルを用い, DC 放電回路と独立に外部加熱電流源を付加した状況を想定し, シースを含む電極部分, 及び陽光柱部分とに分けてシミュレーションを行った. 両シミュレーション間では放電電流 I_d 及び電子密度 n_e を仲介パラメータとしてこれらを整合させる. 計算はプラズマ現象を C 言語プログラムで行い, 密度, 流れ, 熱拡散等の計算を行う汎用の熱流体解析ソフト (FLUENT 13.0) と同期させた. 陽光柱内は衝突-放射過程を行うプラズマ現象とし, 対称境界の 1/36 モデルにおいて, 各セルで Ar (Kr), Hg, 電子の密度や温度により各衝突頻度を計算した. その結果より各粒子の増減数, 生成熱, 発光量を外部プログラムにより算出し, FLUENT 上でそれらを繰り返し行った. 初期電子密度は電流等の点灯条件から計算した値を入力し, 結果として Hg 紫外線発光効率, 放電電力等を入力させた.

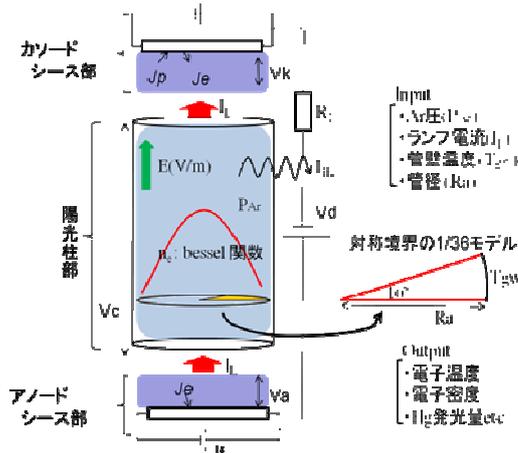


図 2 電極部分と陽光柱部分とに分けたシミュレーションモデル

4. 研究成果

(1) ガス種, 及び I_d を変化させた場合の FL の Hg 輝線 (435 nm) の発光効率を図 3 に示す.

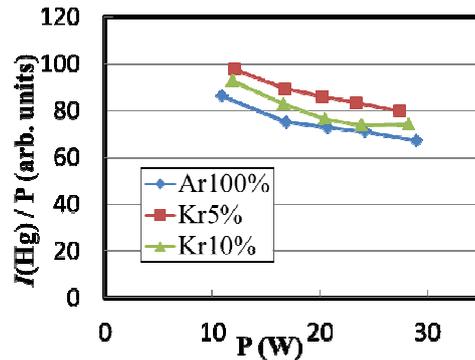


図 3 Hg 輝線 (435nm) 発光効率の放電電力, 及びガス種依存性

Ar100% に比べて Kr 混合ランプの発光効率の方が高くなっている. これは Kr が Ar より α 作用が大きく, 放電の形成・維持, 及び紫外線発光に要する電子の供給量が増加したためと考えられる. Ar より電離断面積の大きな Kr を 10% 程度まで混入すれば, Hg の発光強度に強く依存する I_d を高い値に保ったまま放電維持電圧を低減でき, 発光効率が向上する事が示された. 一方で, 図 4 に示されるように, Kr 混入によって電源接続側電極端に形成されたホットスポット温度が上昇し, それに伴ってエミッター放出量が増加した. Ar100% の FL が通常動作点近傍でエミッター放出が比較的抑制されているのは, 計測した FL のフィラメント電極が Ar100% 用に経験的に最適化されたものであるためであり, エミッター放出量を抑制して, 高効率で長寿命の FL を設計するためには, ガス種と圧力に応じた最適なフィラメント電極設計が必須であることが改めて示された.

(2) 熱電子放出によって熱陰極グロー放電を生成・維持するため, 電極温度は極めて重要なパラメータであり, またエミッター放出 (寿命) にも大きく影響する. 高効率・長寿命の FL を達成するには, なるべく低い電極温度で熱陰極グロー放電を生成・維持するのに十分な熱電子放出を行わせる必要がある. そのため, ここでは電極

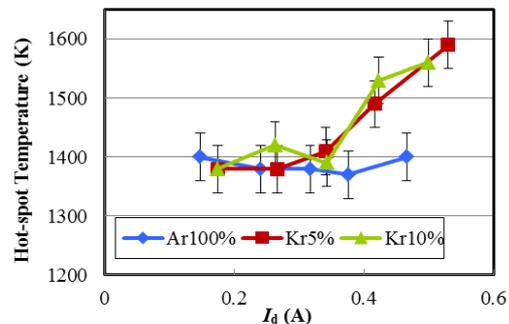


図 4 ホットスポット温度の放電電流, 及びガス種依存性

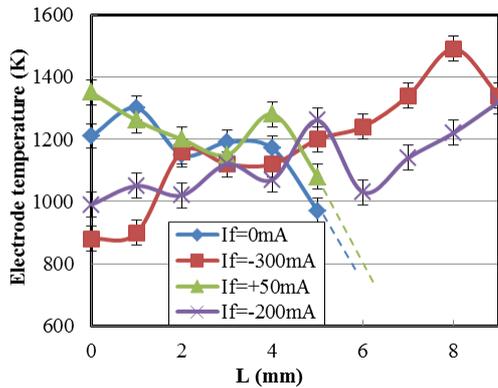


図5 外部加熱電流によるフィラメント電極の長さ L に沿った温度分布の変化

温度分布の外部加熱電流 (I_f) 依存性を調べた。図5に I_f によるフィラメント電極の長さ L に沿った温度分布の変化を示す。通常のFL動作 ($I_f=0$) では、 I_d の空間的偏在により、ホットスポット ($L=0$) を中心として、電極長さ L に沿って極端な温度勾配が生じている。一方で、電極をほぼ均一的に加熱可能な I_f を流せば、電極温度分布が制御できることが判る。特に I_f を I_d (280 mA) と逆位相とした場合 (-200mA) では、電極長に沿った電位勾配が小さくなった結果、 I_d の空間的偏在の抑制とそれに伴う電極温度分布の均一化が達成できている。これらにより、FLの高周波点灯時において、 I_d に応じて I_f の位相と大きさを制御すれば、ホットスポットの位置と温度、及び電極温度分布を制御可能で、平均温度を低く抑えて、十分な熱電子放出量を確保したままエミッター放出の低減が可能であることが示された。様々な電極コイルに対して、位相制御した I_d と I_f とでシミュレーションし、FL設計条件を見出すことの有効性が示唆された。

(3) FL管径、内壁温度、及びガス種と圧力をパラメータとして、プラズマ陽光柱部分の電子温度、電子密度、及びHg紫外線の発光強度や発光効率等を出力できるシミュレーションを開発し、その高精度化を行った。これを用いて、雰囲気ガスをAr、及びKrとし、FL放電条件を変化させた場合の発光効率を、主に放電電流、及び放電電力をパラメータとして詳細に調べた。Ar100%中におけるHg紫外線発光効率の放電電流、及び放電電力依存性は実験値と良く一致し、本シミュレーションの妥当性を示した。図6にAr100%のFLにおける寿命 τ と発光効率 η の放電電力依存性を示す。図中で τ はエミッター放出量から実験的に予測した値、 η は陽光柱シミュレーションで求めた値である。これらの値から、最適なFLの制御指数として $\eta\tau$ を提案した。 $\eta\tau$ の放電電力依存性を図7に示す。 $\eta\tau$ が最大となる放電条件はそれまで長時間をかけて経験的に開発してきた商業用FLの最適

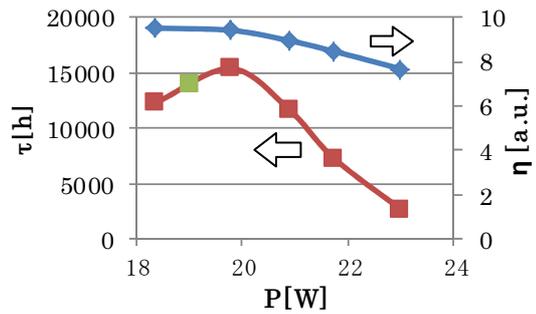


図6 FL (Ar100%) の寿命 τ と発光効率 η の放電電力依存性

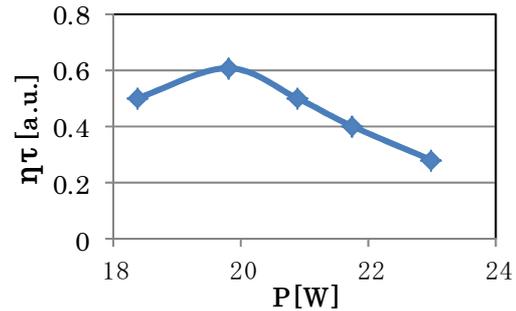


図7 FL設計指標 $\eta\tau$ の放電電力依存性

動作条件とほぼ一致しており、FLの設計指標として $\eta\tau$ を用いることの妥当性が示された。さらに、陽光柱シミュレーションと電極温度分布からエミッター消費を予測する電極シミュレーションとを放電電流を媒介パラメータとしてコンバインし、 $\eta\tau$ を設計指標としたシステムが、高効率・長寿命なFL開発に有効である事が示唆された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計6件)

- ① K. Miyashita, M. Kai, K. Kamio, Y. Yamagata, Y. Manabe, Experimental and Numerical approach to a design of highly efficient and long-lived fluorescent lamp, Proceedings of the 13th International Symposium on the Science and Technology of Lighting, (Troy, NY, USA, June 24-29, 2012), 査読有, 2012, 83-84
- ② K. Kamio, S. Naitou, Y. Yamagata, K. Uchino, K. Tomita, M. Kai, Y. Manabe, Effect of ambient gas on electrode temperature and emitter material emission in a low-pressure fluorescent lamp, Proceedings of the 12th Cross Straits Symposium (Pohang,

Korea, November 17-18), 査読無, 2010, MSP10, 65-66

- ③ Y. Yamagata, M. Kai, S. Naito, K. Kamio, Y. Manabe, K. Uchino, Gas dependency of electrode temperature and emission of emitter material in a low-pressure fluorescent lamp, Proceedings of the 12th International Symposium on the Science and Technology of Light Sources (Eindhoven, the Netherlands, July 11-16), 査読有, 2010, 527-528
- ④ I. Kobayashi, R. Bruckshaw, M. Kai, Y. Manabe, Y. Yamagata, R. Devonshire, Modeling of Emitter Loss in Fluorescent Lamps, Proceedings of the 12th International Symposium on the Science and Technology of Light Sources (Eindhoven, the Netherlands, July 11-16), 査読有, 2010, 211-212
- ⑤ 真鍋由雄, 森利雄, 岡崎祐輔, 甲斐誠, 山形幸彦, ランプ寿命推定法を用いた長寿命蛍光ランプの開発, パナソニック技報, 査読無, 2010, Vol. 52, No. 2, 2010, 44-49
- ⑥ Y. Yamagata, M. Kai, S. Naito, K. Tomita, K. Uchino, Y. Manabe, Relationship between Ba atom emission and electrode temperature in a low-pressure fluorescent lamp, Thin Solid Films, 査読有, Vol. 518, 2010, 3449-3452

[学会発表] (計9件)

- ① Y. Yamagata, M. Kai, K. Tomita, K. Uchino, Y. Manabe, Clarification of emitter loss mechanism for a design of highly efficient and long-lived fluorescent lamp, International Workshop on Plasma Science and Technology, 2013. 1. 25, Kyushu University
- ② 宮下光太郎, 神尾一貴, 山形幸彦, 甲斐誠, 真鍋由雄, 蛍光ランプの高効率・長寿命化へのアプローチ, 平成24年度(第45回)照明学会全国大会, 2012. 9. 7, 山口大学吉田キャンパス
- ③ 山形幸彦, 可視光源としての放電灯—熱陰極放電灯—, 平成24年度(第45回)照明学会全国大会, 2012. 9. 6, 山口大学吉田キャンパス
- ④ 神尾一貴, 宮下光太郎, 山形幸彦, 甲斐誠, 真鍋由雄, 蛍光ランプの電極温度分布制御によるエミッター放出の抑制, 平成23年度第64回電気関係学会九州支部連合大会, 2011. 9. 27, 佐賀大学
- ⑤ 宮下光太郎, 神尾一貴, 山形幸彦, 甲斐誠, 真鍋由雄, 長寿命蛍光ランプ開発のための電極温度シミュレーション, 平成

23年度第64回電気関係学会九州支部連合大会, 2011. 9. 27, 佐賀大学

- ⑥ 神尾一貴, 宮下光太郎, 山形幸彦, 甲斐誠, 真鍋由雄, 蛍光ランプの電極温度分布とエミッター放出の制御, 平成23年度(第44回)照明学会全国大会, 2011. 9. 16, 愛媛大学・松山大学
- ⑦ 山形幸彦, 蛍光ランプのエミッター放出特性と電極温度分布, 電極材料の電子放出特性と放電プラズマ発光特性研究調査委員会, 2011. 1. 20, (社)照明学会第1会議室
- ⑧ 内藤 奨, 神尾一貴, 山形幸彦, 富田健太郎, 内野喜一郎, 甲斐誠, 真鍋由雄, 蛍光ランプにおける電極温度とエミッター粒子放出のガス種依存性, 平成22年度第63回電気関係学会九州支部連合大会, 2010. 9. 25, 九州産業大学
- ⑨ 山形幸彦, 内藤 奨, 神尾一貴, 富田健太郎, 内野喜一郎, 甲斐誠, 真鍋由雄, 蛍光ランプの電極温度分布とエミッター放出特性 (III) —ガス種と圧力依存性—, 平成22年度(第43回)照明学会全国大会, 2010. 9. 8, 大阪市立大学

[図書] (計1件)

- ① 山形幸彦 他, (社)照明学会, 電極材料の電子放出特性と放電プラズマ発光特性研究調査報告書(4-4節蛍光ランプ電極材料の発光効率, 寿命への依存性, 総頁数110(担当8頁)), 2013

[その他]

ホームページ等

<http://www.asem.kyushu-u.ac.jp/ep/ep01/jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山形 幸彦 (YAMAGATA YUKIHIKO)
九州大学・総合理工学研究院・准教授
研究者番号: 70239862

(2) 研究分担者

無し

(3) 連携研究者

無し