けい光ランプの最適分光分布の設計†

正 会 員 淵 田 隆 義*

秋 山 順 悦*

専 門 会 員 杉 山 春 夫*

1. ま え が き

けい光ランプにおいて、高効率、高演色を達成するためには、けい光体の量子効率や工程劣化の改善など発光物質の高効率化だけではなく、ランプの放射パワーを視覚特性を考慮して有効に制御することが必要である。

分光パワーの最適化を行なう方法としては、固有技術的な予測による分光パワーの設計、およびランプの試作-評価を繰り返すことで、目標に到達していく方法があるが、予測のあいまいさと試作-評価に要する労力の点から、最適分光分布の設計という面では大きな進展は期待できない。その点を解決する手段として、電子計算機を利用し、光源の分光パワーをシミュレートする方法が盛んに行なわれ、分光特性の最適設計が飛躍的に進歩した。

Ivey¹⁾ はルミネセンス光源について、最高効率を与える理論的分光特性を求めた。しかし、このときの最適化には、放電ランプとしての可視水銀輝線や光源の演色性についての考慮がなされていない。森ら²⁾ は可視水銀輝線を含めた形で最適化を行ない 450~460 nm, 530~550 nm, 590~610 nm の各 3 波長域にバンド幅の狭いけい光体を組み合わせて高効率、高演色が可能となることを求めた。Einhorn³⁾ らは白色光源として波長範囲を 440~660 nm 付近に制限することで、 R_a (平均演色評価数) の大きな減少を伴わないで効率を著しく改善できることを見出した。Koedam and Opstelten⁴⁾⁵⁾ は、3 本のスペクトルラインを様々に組み合わせることにより 455~485 nm, 525~560 nm, 595~620 nm の 3 波長域のスペクトル線で高い R_a が得られることを求めた。Walter⁶⁾ は、2 成分混合のけい光ランプについて最適化を行なった。Thornton and Haft⁷⁾⁸⁾ は 3 成分混合の場合について行ない、およそ 450 nm, 540 nm, 610 nm

の 3 波長を最適波長として求めた。

その他の最適化としては、実際の光源の分光パワーに任意な操作 (計算上のエネルギーの追加、削除) を行ないランプの性能改善を求めたものなどがある^{9)~11)}。

このように適当な分光パワーを数種類組み合わせ、その中から優れた特性のものを選ぶという方法でも、妥当性のあるシミュレートモデルと、十分な固有技術知識があれば、ランプとしてはほぼ望ましい分光分布を得ることはできる。しかし、真の最適な分光特性を求めることはできない¹²⁾。なぜなら、組み合わせる成分の数、各々のピーク波長、バンド幅などをあらかじめ規定した上での最適化は、あくまでその制約条件で定まる部分集合の中における最適化にすぎず、ローカルな形の最適値を求めていることになるからである。この点を解決するにはランプ光色や諸特性値から逆に最適な分光分布を組み立てるという方法を取らざるを得ない。Walter¹²⁾ は以上の考えから R_a 、光色それに放射パワーを制約条件とし、ランプの全光束値を目的関数とした形式の非線形数理計画問題として扱い、絶対的な最適化を試みた。

その結果、最適波長として 460 nm, 530 nm, 580 nm, 620 nm の 4 波長を求めた。この種の最適化手法を応用したものとして、Ohta¹³⁾¹⁴⁾ は線形計画法により物体色に所定の三刺激値を与える分光分布を求めた。

以上のように光源の最適分光分布の設計法としては、

- (1) 直接的方法**：成分の分光分布に制約を加える。
 - (2) 絶対的方法：成分の分光分布に制約を加えない。
- の二とおりがあり、現在では(1)の方法により 3 バンド方式として望ましい波長域がほぼ定まった状態にある。

しかし著者らは、以上述べた様々な最適化に対し、その制約条件のあり方やモデルの妥当性の点においてまだ問題があると考え、(1)の方法ではモデルの再検討と分光分布に対する制約をゆるめた形で、(2)の方法ではモデルの再検討と、非線形数理計画法のアルゴリズムを変えた場合について新たに検討を加えた。

† Designing of Optimal Spectral Distribution for Fluorescent Lamp

* 東京芝浦電気株式会社 研究所

Takayoshi Fuchida, Junetsu Akiyama, Haruo Sugiyama

** 試行錯誤的な方法。

2. 直接的方法による3バンド方式の再検討*

けい光ランプ (40 W, 32 mm 管) をシミュレートするモデルは, 実効量子効率と可視水銀輝線を考慮し次式に従った¹⁵⁾.

$$F(\lambda) = \sum_{i=1}^n a_i Q_i \bar{P}_i(\lambda) \cdot \int r(\lambda) \lambda d\lambda / \int \bar{P}_i(\lambda) \lambda d\lambda + \sum_{j=1}^4 P_{Hg}(\ell) \dots \dots \dots (1)$$

ここで, $F(\lambda)$: ランプの分光エネルギー分布, a_i : 混合比率 ($\sum a_i = 1$), Q_i : けい光体 i の実効量子効率, $\bar{P}_i(\lambda)$: けい光体 i の相対分光分布, $r(\lambda)$: 紫外励起エネルギー, P_{Hg} : 可視水銀輝線, λ : 380 nm—(10 nm)—760 nm.

可視水銀輝線は一定のけい光ランプの条件では, いずれも励起エネルギーに比例すると考えてよいので

$$P_{Hg}(\ell) = C_i R \dots \dots \dots (2)$$

ただし, $R = \int r \lambda d\lambda$ R : 全励起エネルギー

となる. シミュレートモデルの精度は式(1), (2)の各係数値に依存している. 著者らは25種類の試作ランプから各係数値を算出し, 特にけい光ランプ用として十分に完成されたけい光体 (表 1 の*印) の平均値をモデルに採用した. その際, 可視吸収のけい光体は除いた. また $\bar{P}_i(\lambda)$ は, 文献(1)の式(1)に従った中心波長に対して非対称形状の分布で, 現実のけい光体に近似しているものである.

表 1 試作ランプの Q, C_e 値 (一部)

No.	phosphor	Q	C_{405}	C_{436}	C_{546}	C_{578}
* 1	C. H. P 3700 K	0.717	0.0094	0.0216	0.0117	0.0035
* 2	C. H. P 4100 K	0.749	0.0091	0.0218	0.0114	0.0033
* 3	C. H. P 4700 K	0.765	0.0094	0.0219	0.0115	0.0033
* 4	C. H. P 4200 K	0.774	0.0090	0.0211	0.0114	0.0034
* 5	C. H. P 5100 K	0.772	0.0088	0.0211	0.0111	0.0030
* 6	C. H. P 6500 K	0.778	0.0094	0.0220	0.0113	0.0031
* 7	S. H. P 5000 K	0.739	0.0082	0.0202	0.0103	0.0031
8	Zn ₂ SiO ₄ /Mn	0.711	0.0085	0.0186	0.0101	0.0031
* 9	MgWO ₄	0.717	0.0086	0.0211	0.0105	0.0029
10	MgO·MgF ₂ ·GeO ₂ /Mn	0.728	0.0037	0.0104	0.0111	0.0029
*11	(SrMgBa) ₃ (PO ₄) ₂ /Sn	0.862	0.0094	0.0220	0.0120	0.0031
12	Y ₂ O ₃ /Eu	1.00	0.0106	0.0250	0.0124	0.0049
	平 均 値	0.77	0.0090	0.0212	0.0112	0.0032

C. H. P.....calcium halophosphate

S. H. P.....strontium halophosphate

2.1 検 討 1

3成分のピーク波長を各々 440~500 nm, 530~580 nm, 590~630 nm の3波長域に選び, 各成分の半値幅が 10~80 nm までの組み合わせについて組織的な計算を行ないランプ特性値の変化を求めた.

図 1, 図 2 は光色が 4200 K の場合の3成分組み合わせと, R_a の関係を2種類の第2成分について示すも

図 1 3成分組み合わせ
第2成分のピーク波長 530 nm
半値幅 (80, 50, 10)

図 2 3成分組み合わせ
第2成分のピーク波長 570 nm
半値幅 (80, 50, 10)

のであり, 第3成分 (赤色域) はほぼピーク波長が 600~610 nm で高い R_a が得られるが, 第1成分 (青色域) の最適波長は, 第2成分 (緑色域) のピーク波長が 530 nm から 570 nm に変化するに従い, 440 nm から 490 nm へと長波長側へシフトする傾向がある. このことは3バンド方式の青色域成分の最適波長が, 従来の 450~460 nm よりもさらに長波長側に広いことを意味する.

2.2 検 討 2

この事実は, 近年開発された3バンド方式けい光ランプ^{16)~18)}の分光分布を細かく検討することからも明らかになる. このランプの分光分布は, 図 3 に示すように確かに理想波長域に分光パワーが, 効率的に集中した分

* 昭和53年度全国大会で発表したものである.

図3 3バンド方式けい光ランプ

布形状となっているが、完全に集中したものではなく他の波長域にも複数箇所分散した形状となっている。この分散した分光パワーは、主に希土類緑色けい光体の三つの副発光に起因している(図4)。それを a_1 (ピーク波長 490 nm), a_2 (585 nm), a_3 (625 nm) とすれば、3バンド方式の最適波長から考慮して、これら a_1 , a_2 , a_3 は無効なものであると推察される。

図4 希土類緑色けい光体の副発光(モデル化)

そこで、次の方法により各副発光の効果を検討した。その場合、発光色は各色温度で一定である。

- (1) 各副発光を削除した場合の特性値の変化
- (2) 各副発光のピーク波長を変化させた場合の特性値の変化

図5は削除した場合の効率と R_a の変化を示す。各色温度において、長波長側の副発光 a_2 , a_3 を削除した場合には、ランプの効率および R_a はほとんど変化しないが、短波長側の副発光 a_1 を削除すると、効率の変化に比して R_a の変化が大きくおよそ85から77以下に低下する。

図6は、 a_1 の分光的な形状を変えずにそのピーク波長を440 nm から520 nm まで変化させた場合のランプ効率と R_a の変化を示している。 a_1 のピーク波長が490~500 nm のとき R_a が最大となる。440 nm のとき $R_a=70$, 効率 86.5 lm/W, 490 nm のとき $R_a=85$, 効率 81 lm/W であり、効率で6%の減少に比して R_a で

図5 副発光の削除による変化

 図6 a_1 のピーク波長による変化

15%上昇となり a_1 の演色改善効果が明確である。

2.2 検 討 3

さらに従来の3バンド方式に上記 a_1 のピーク波長の位置に分光パワーを付加した場合(図7)の限界を検討した。

図7 3バンド方式に対する付加エネルギー

図8に付加量に対するランプ効率と R_a の変化を示す。付加量に対し効率は単調に減少するが、 R_a は付加量13%付近で最大となり、最適な付加量が存在することが明らかである。

2.4 検 討 4

以上の検討から、従来の3バンド方式の最適波長域は

図 8 付 加 限 界

ローカルな最適値であり、さらに第 4 成分としてピーク波長が 490 nm 付近の分光パワーを付加した“4 バンド方式”も、演色性改善の面で有効な方式であることが明らかになった。ただし、この方式も前述した理由によりローカルな最適値であることも明らかである。ピーク波長 490 nm 付近の分光エネルギーの効果をより有効に利用する方法として、3 バンド方式の第 1 成分（青色域）をこのエネルギーで置換することが考えられる。

図 9 ブロードバンドでの組み合わせ

図 9 は特に有効に利用できる場合を示し、第 3 成分のピーク波長を 610 nm、半値幅を 12 nm にし、第 1、第 2 成分の半値幅をそれぞれ 75 nm、100 nm としたときの R_a と効率の変化を示している。これよりピーク波長 480~490 nm の分光エネルギーは、ピーク波長 550~580 nm のかなり広帯域の分光パワーを組み合わせても高効率、高演色となる可能性がある。図 10 はこの方法による分光分布の一例であり、第 1 成分がピーク波長 490 nm、半値幅 80 nm、第 2 成分、第 3 成分が、それぞれ 560 nm~(100 nm)、610 nm~(12 nm) のもので発光色 4200 K、 R_a 84.2、全光束 3234 lm と予測される。

図 10 応 用 例

この方法による高効率、高演色ランプを実現する一例として、第 1 成分に E_{2+} 付活珪酸ストロンチウムけい光体、第 2 成分として Sb, Mn 付活ハロりん酸ストロンチウムけい光体、第 3 成分として E_{3+} 付活イットリウムオキシドけい光体を用いて発光色 4200 K、偏差 0.005 uv、 R_a 88、効率 81.5 lm/W を達成したものがある¹⁹⁾。

3. 絶対的方法による最適分光分布の検討

最適分光分布を求める手法として、非線形数値計画法を利用する方法が考えられるが、現在のところ非線形問題に対しては、最良といえるアルゴリズムが判明していない段階であり、最適分光分布設計のようにローカル・ミニマムが多数存在すると思われる問題に対しては、適用するアルゴリズムによって、求まる最適点が異なる危険が予想される。したがってアルゴリズムを変えることにより、モデルの最適解の信頼性を確認することが望ましいと考え、Walter の設定したものとほぼ同様の目的関数、制約条件のもとで、5 種類のアルゴリズムにより最適解を求めた。

非線形数値計画問題として次の目的関数、制約条件を設定した。

$$\text{目的関数: } \Phi = K_m \int V(\lambda) \cdot F(\lambda) d\lambda + \varphi_{Hg} \dots\dots\dots(3)$$

ただし、 K_m : 最大視感度、 $V(\lambda)$: 標準比視感度、 $F(\lambda)$: 式(1)による分光分布*、 φ_{Hg} : 可視水銀輝線の全光束。

$$\text{制約条件 I: } \int P(\lambda) \cdot \lambda d\lambda = Q \int r(\lambda) \cdot \lambda d\lambda \dots\dots\dots(4)$$

$$\text{制約条件 II: } [A] \cdot [y] \leq [B] \dots\dots\dots(5)$$

ただし、 x, y はランプ光色の色度、 $[A]$ 、 $[B]$ は光色を決定する係数列。

$$\text{制約条件 III: } R_a \geq \alpha$$

$$\text{制約条件 IV: } R_i \geq \beta_i \quad (i=1, \dots, 15)$$

適用したアルゴリズムは次の 5 種類である。各アルゴリズムの詳細内容は専門書にゆずる^{20)~23)}。

* 400 nm~(10 nm)~700 nm.

- (1) SUMT-I (Sequential Unconstrained Minimization Technique I)
- (2) SUMT-II (Sequential Unconstrained Minimization Technique II)
- (3) GRG (Generalized Reduced Gradient)
- (4) FLT (Flexible Tolerance)
- (5) DFM (Differential Equation Method)

ランプ光色は、JIS Z9112 の“けい光ランプの色度区分”に従った。ここでは結果の一部分だけを示す。光色は白色、 $R_a \geq 95$ 、制約条件IVを加えない場合、各アルゴリズムによる解析の結果は、ほとんど同一の最適解に収束した。このとき全光束値は3,145 lm、 R_a 95.0、色温度 4100 K + 0.005 uv であった。

図 11 非線形計画法による最適解 (H_g ラインは除く) の例

図 11 にこの最適解の相対分光分布を示す。この最適解においても、前述の直接的方法で求めた最適波長 490 nm に分光パワーが存在している点は興味深い。全体的には 460~490 nm, 520~530 nm, 570~580 nm, 610~620 nm の 4 バンドに区分できる。しかしこの 490 nm の最適波長は Walter の求めた最適解では全く現われておらず、直ちにその信頼性について断定することはできない。なぜなら、非線形数値計画においても解析上の手続き（初期値、収束トレランスなどの設定）によっては、ローカルミニマムに収束する危険があり、真の最適解を求めるためには、さらに注意深い最適化の中から確認することが必要である。

4. あとがき

以上、主にけい光ランプの最適分光分布設計に関して 2 種類の異なる方法に分け、これまでの研究経過と著者らの行なった検討について述べたが、ここで示した最適化とはあくまで光源特性の中の R_a （または R_i ）と効率という 2 面だけに着目したものであるので、光源の総合的効果を考慮した真の意味の“最適分光分布”であると決して断言できないことを常に注意すべきである。

謝 辞

本報告をまとめるにあたりランプ試作の面でご協力いただいた東京芝浦電気㈱照明技術部のかたがた、また非線形数値計画法に関してご助力いただいた同社総合研究所機械計算室の大江茂幸氏、および終始多大なるご教示をいただいた同社電気技術研究所の森礼於氏に深謝いたします。

参 考 文 献

- (1) Ivey, H. F.: J. Opt. Soc. Am. **53** (1963) 1185
- (2) 森ほか：東京芝浦電気㈱中央研究所 研究報告第 563 号 (昭 39) (非公開)
- (3) Einhorn, H. D. et al: Illum. Engng. **62** (1967) 154
- (4) Koedam, M. et al: Lighting Res. Tech. **3** (1971) 205
- (5) Koedam, M. et al: J. Illum. Engng. Soc. **1** (1972) 285
- (6) Walter, W.: Appl. Optics **10** (1971) 1108
- (7) Haft, H. H. et al: J. Illum. Engng. Soc. **2** (1972) 29
- (8) Thornton, W. A.: J. Illum. Engng. Soc. **4** (1974) 48
- (9) Opstelten, J. J.: J. Electrochemical Soc. **120** (1973) 1400
- (10) Soules, T. F.: J. Electrochemical Soc. **121** (1974) 407
- (11) 岩間ほか：照学誌 **60** (昭 50) 41
- (12) Walter, W.: J. Illum. Engng. Soc. **7** (1978) 66
- (13) Ohta, N. et al: J. Opt. Soc. Am. **65** (1975) 1354
- (14) Ohta, N. et al: J. Opt. Soc. Am. **66** (1976) 269
- (15) Ivey, H. F.: J. Opt. Soc. Am. **62** (1972) 814
- (16) Velstegen, J. M. P. J. et al: J. Illum. Engng. Soc. **4** (1975) 90
- (17) 神谷ほか：照学全大 53 予稿集 p. 12
- (18) 相田ほか：照学全大 54 予稿集 p. 4
- (19) 昆布谷ほか：照学全大 53 予稿集 p. 9
- (20) Lasdon, L. S. et al: “GRG User's Guide”, Technical Memoranda CIS-75-01 and CIS-75-02
- (21) 関根：岩波講座 基礎工学 5 “数値計画法 II”
- (22) TOSBAC システム 600/700 NMPS 6 非線形数値計画システム解説書
- (23) Fiacco, A. V. et al: “Nonlinear Programming—S. U. M. T.”, John Wiley and Sons, Inc. (1968)

(受付 1979 年 3 月 8 日)