

線形計画法を用いた分光放射分布の解析

小林 富士男* 尾関 孝史* 筒本 和広**

Analysis of Spectral Power Distributions by Means of Linear Programming

Fujio KOBAYASHI Takashi OZEKI Kazuhiro TSUTSUMOTO

ABSTRACT

An analysis has been carried out to explore the optimum spectral power distributions (SPD's) with respect to the 40-watt fluorescent lamps. Numerical calculations have been done by computer and the perturbation method using the linear programming was adopted as the computer programming. The aim of the analysis was to determine the optimum SPD which enables the total luminous flux of lamp maximum under the constraints of given chromaticity and color rendering indices (CRI's). It was noticeable that four monochromatic components having 470, 530, 580 and 620nm of wavelengths are primarily important in order to obtain higher efficacy and CRI and other two monochromatic components of 460 and 520nm are secondarily important.

キーワード：分光放射束，蛍光灯，解析，数理計画法，線形計画法

Keywords : spectral power distribution, fluorescent lamp, analysis, mathematical programming, linear programming

1. まえがき

蛍光ランプの効率，光色および演色性は，分光放射束分布によって決定される。所定の色度領域で効率が高く同時に演色性が優れている最適な分光放射分布の実現は，最適な発光物質の選択とその量子効率の向上など，蛍光ランプの物理的，化学的諸特性の改善を計るとともに，分光放射束分布を視覚の諸特性を考慮に入れて有効に制御して達成される。

従来，蛍光ランプの最適な分光放射束分布は，固有技術に基づく予測によって計算され，試作と評価を繰り返して効率と演色性が改善されてきた。しかし，このよう

な方法では，適確な予測が困難であることや，試作と評価の繰り返しの多い作業を必要とすることなどから，最近では蛍光ランプの分光放射束分布の解析や設計に電子計算機が利用されている。電子計算機を用いて所定の光色と演色性についての制約条件を満足して，効率を最大にする最適な分光放射束分布を解析する方法としては，次の二通りが考えられる。

(1) 発光物質の発光特性を考慮に入れて，組み合わせる発光成分のピーク波長，および波長幅などを制約条件として解析する方法。

(2) 蛍光ランプの放射束，光色および演色性について制約し，分光放射束分布の形状については，全く制約しな

* 情報処理工学科

** 環境情報学科

いで解析する方法。

現在、方法 (1) によって一般の蛍光ランプの分光放射束分布や、3 波長域発光形蛍光ランプの最適分光放射束分布が設計されている。

(2) のような問題は、数学的には条件付き極値問題であることから数理計画法を利用することが有効である。

蛍光ランプの放射束、光色および演色評価数を制約条件とし、目的関数である全光束が最大になる最適分光放射束分布を求める場合には、光色や演色評価数についての制約式が非線形であることから、一般に非線形計画法 (NLP) が適用される。

NLP による蛍光ランプの最適分光放射束分布の解析については、Walter と淵田らの報告がある^[1, 2]。

Walter は、WW, W, CW, D の 4 種類の蛍光ランプについて上記の目的関数と制約式を設定して、最適分光放射束分布を解析した結果、 $R_a \geq 90$ または $R_a \geq 95$ という条件を満足して、全光束が最大になる分光放射束分布の基本的な波長成分は 460, 530, 580, 620nm の 4 個であるとした。しかし、求められた分光放射束分布には、これら 4 個の波長成分以外にも分光放射が出現していて、実際にこれらの 4 個の波長成分だけで $R_a \geq 90$ または

$R_a \geq 95$ を満足することができるかどうかについては、確認されていない。また、Walter は最適解が存在する超平面はかなり平らな面であり、同一の光束と演色評価数を満足する分光放射束分布は唯一でないことを指摘している。

淵田らは、このように局所解が多数存在すると思われる問題については、適用するアルゴリズムによって求まる最適解が異なる危険が予想されるとして、5 種類の NLP アルゴリズムによって Walter が設定したものと、ほぼ同様の目的関数と制約式を用いて最適解を求めた。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、Walter の結果には全く現れていない 490nm に分光放射束が出現したと報告している。

そこで、筆者らはこれらの相違点について検討することと、さらに詳細に最適分光放射束分布の波長成分、光束、光色および演色評価数などの特徴を明らかにするために、JIS Z9112「蛍光ランプの色度区分」で指定されている全色度領域で最適分光放射束分布を解析した。

解析に当たっては、局所解が存在する領域をできるだけ小さくして最適解への収束を確実にするために、光色についての制約は色度領域ではなく色度座標にするほうが良いと考える。この場合に光色についての制約式は線形になる。しかし、標本点は逆に非常に多くなる。したがって、各標本点 (色度座標) の最適分光放射束分布を

求める計算時間を短くする必要がある。そのために、演色評価数について、非線形の制約式を、線形計画法 (LP) が適用できるように変形して、LP を繰り返し適用して最適解へ収束するようにした。LP は NLP において必須の勾配ベクトル計算を必要としないため、LP の反復回数が少ないときには NLP に比べて計算時間を短縮できることが期待される。

本論文では、最適化のアルゴリズムと 40W の蛍光ランプについて求めた最適分光放射束分布の諸特性について検討している。

2. 目的関数と制約式

(1) 全光束を最大にする目的関数

可視波長域 400~700nm を波長幅 10nm の 31 個の波長成分に分割した。

$$\phi = K_m \Delta\lambda \sum_{j=1}^{31} V_j P_j + \phi_{Hg} \quad (1)$$

ただし、

$$\phi_{Hg} = \sum_{l=1}^4 C_l (r_1 + r_2)$$

(水銀輝線の比率は一定として、便宜的に本式を採用した。)

ϕ : 全光束 (lm), K_m : 最大視感度 (lm/W), $\Delta\lambda$: 波長幅 (10nm), V_j : 標準比視感度, P_j : 蛍光体の分光放射束 (W/10nm), ϕ_{Hg} : 水銀輝線の全光束 (lm), C_i : 変換効率 (lm/W), r_1 および r_2 : 紫外励起放射束 (W)

ここで、 C_1 (405nm), C_2 (436nm), C_3 (546nm), C_4 (578nm) は、それぞれ 0.0090, 0.0212, 0.0112, 0.0032lm/W の値を採用している^[2]。また、 r_1 (185nm), r_2 (253.7nm) は、それぞれ 3.49, 21.3W の値を採用している^[1]。

(2) 放射束についての制約式

$$\Delta\lambda \sum_{j=1}^{31} \lambda_j P_j = \sum_{k=1}^2 \lambda_k r_k q_k \quad (2)$$

ただし、 λ_j : 分光放射束の波長 (nm), λ_k : 紫外励起放

射束の波長 (nm), q_k : 量子効率である. ここで, q_k の値としては q_1 (185nm) = q_2 (253.7nm) = 0.77 を採用している [2].

(3) 光色についての制約式

所定の色度座標を満足するように制約した.

(4) 演色評価数についての制約式

$$R_i \geq R_c (i=1 \sim 8) \quad (3)$$

ただし, R_i は平均演色評価数計算用の試験色 (i) の演色評価数, R_c は定数である.

なお, 平均演色評価数 R_a についての制約

$$R_a = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 R_i \geq R_c (i=1 \sim 8) \quad (4)$$

を基本的に採用しなかったのは, 仮に R_a が高い値であっても特定の R_i が低い値になることを避け, R_i のばらつきを小さくするためである. しかし, 式 (4) の制約についても数例を計算して式 (3) の制約の結果と比較した. ただし, 特殊演色評価数 $R_i (i=9 \sim 15)$ については制約しなかった (これ以降においては, R_i の添え字 i は断りがないうとき, $i=1 \sim 8$ である).

ここで, 著者らが設定した制約条件と Walter が設定した制約条件の相違を述べる. 主な違いは光色と演色評価数の制約条件である. 著者らは光色を色度座標に制約し, 演色評価数は CIE (第1版) - JIS の方法で計算した. 一方, Walter は光色を ANSI による MacAdam 弁別長円に制約し, 演色評価数は CIE (第2版) の方法で計算した. また, 著者らは蛍光体の量子効率を 0.77 としたが, Walter は 1 としている. 水銀輝線の全光束も若干異なっている.

3. LPを繰り返し適用する最適化のアルゴリズム

R_i は次式から求められる (CIE (第1版) では, R_i は明度指数を入れて計算するようになっているが, 本文の計算方法でも, ほぼ等しい結果が得られるので, 本方法によった.).

$$\left. \begin{aligned} \Delta U_i &= (u_{ki} - u_k) - (u_{oi} - u_o) \\ \Delta V_i &= (v_{ki} - v_k) - (v_{oi} - v_o) \\ \Delta E_i &= 800 (\Delta U_i^2 + \Delta V_i^2)^{\frac{1}{2}} \\ R_i &= 100 - 4.6 \Delta E_i \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ただし,

u_{ki}, v_{ki} : 試料光源による試験色 (i) の UCS 色度座標

u_{oi}, v_{oi} : 基準光源による試験色 (i) の UCS 色度座標

u_k, v_k : 試料光源の UCS 色度座標

u_o, v_o : 基準光源の UCS 色度座標

式 (3) の制約式から ΔE_i についての制約式を求めれば,

$$\Delta E_i \leq \Delta E_c = \frac{100 - R_c}{4.6} \quad (6)$$

となる.

手順 1

$$|\Delta U_i| \leq \Delta E_c, \quad |\Delta V_i| \leq \Delta E_c \quad (7)$$

の制約下で所定の色度座標 (u_k, v_k) を満足して, 全光束が最大になる分光放射束分布を LP によって計算する.

一般に, 全光速の増加に対して演色評価数は減少する関係があるから, 求められた分光放射束分布について $\Delta U_i, \Delta V_i, \Delta E_i$ を計算して, それらの値をそれぞれ $\Delta U_i', \Delta V_i', \Delta E_i'$ とすれば式 (7) の制約によって $\Delta U_i', \Delta V_i'$ の中で少なくとも一つ以上は ΔE_c に等しい値になり,

$$\Delta E_c < \Delta E_m' < \sqrt{2} \Delta E_c \quad (8)$$

ただし, $\Delta E_m'$ は $\Delta E_i'$ 中の最大値であって制約式 (6) は満足されない.

手順 2

$$\left. \begin{aligned} & \text{if } |\Delta U_i'| \geq |\Delta V_i'| \\ & \text{then } |\Delta U_i'| = |\Delta V_i'| \leq |\Delta U_i'| \frac{\Delta E_c}{\Delta E_i'} \\ & \text{if } |\Delta U_i'| < |\Delta V_i'| \\ & \text{then } |\Delta U_i'| = |\Delta V_i'| \leq |\Delta V_i'| \frac{\Delta E_c}{\Delta E_i'} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

の制約下で所定の色度座標(u_k, v_k)を満足して, 全光束が最大になる分光放射分布を LP によって計算する.

求められた分光放射束分布について $\Delta U_i, \Delta V_i, \Delta E_i$ を計算して, それらの値をそれぞれ $\Delta U_i', \Delta V_i', \Delta E_i'$ とすれば, これらの間には,

$$\left. \begin{aligned} & \text{if } |\Delta U_i'| \geq |\Delta V_i'| \\ & \text{then } \Delta E_i' \leq 800 \sqrt{\left(\Delta U_i' \frac{\Delta E_c}{\Delta E_i'}\right)^2 + \left(\Delta U_i' \frac{\Delta E_c}{\Delta E_i'}\right)^2}, \\ & \text{if } |\Delta U_i'| < |\Delta V_i'| \\ & \text{then } \Delta E_i' \leq 800 \sqrt{\left(\Delta V_i' \frac{\Delta E_c}{\Delta E_i'}\right)^2 + \left(\Delta V_i' \frac{\Delta E_c}{\Delta E_i'}\right)^2} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

の関係が成立する. さらに $\Delta E_i' = \Delta E_c$ であれば, 一般に, $\Delta U_i'$ と $\Delta V_i'$ との間には比例関係が成立するから,

$$\left. \begin{aligned} & \text{if } |\Delta U_i'| \geq |\Delta V_i'| \\ & \text{then } \Delta E_i' \leq 800 \sqrt{\left(\Delta U_i' \frac{\Delta E_c}{\Delta E_i'}\right)^2 + \left(\Delta V_i' \frac{\Delta E_c}{\Delta E_i'}\right)^2} \\ & \leq 800 \sqrt{\left(\Delta U_i' \frac{\Delta E_c}{\Delta E_i'}\right)^2 + \left(\Delta U_i' \frac{\Delta E_c}{\Delta E_i'}\right)^2}, \\ & \text{if } |\Delta U_i'| < |\Delta V_i'| \\ & \text{then } \Delta E_i' \leq 800 \sqrt{\left(\Delta U_i' \frac{\Delta E_c}{\Delta E_i'}\right)^2 + \left(\Delta V_i' \frac{\Delta E_c}{\Delta E_i'}\right)^2} \\ & \leq 800 \sqrt{\left(\Delta V_i' \frac{\Delta E_c}{\Delta E_i'}\right)^2 + \left(\Delta V_i' \frac{\Delta E_c}{\Delta E_i'}\right)^2} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

ただし, $800 \sqrt{\left(\Delta U_i' \frac{\Delta E_c}{\Delta E_i'}\right)^2 + \left(\Delta V_i' \frac{\Delta E_c}{\Delta E_i'}\right)^2} = \Delta E_c$ の関係が成り立つ.

手順 1 を実行の結果, 式 (11) が成立する程度に ΔE_i 中の最大値 $\Delta E_m'$ が $\Delta E_m' = \Delta E_c$ であれば, 手順 2 の実行によって, 次の条件が満足される.

$$\Delta E_i' \leq \Delta E_c + \varepsilon \quad (12)$$

ただし, ε は十分に小さい正数である.

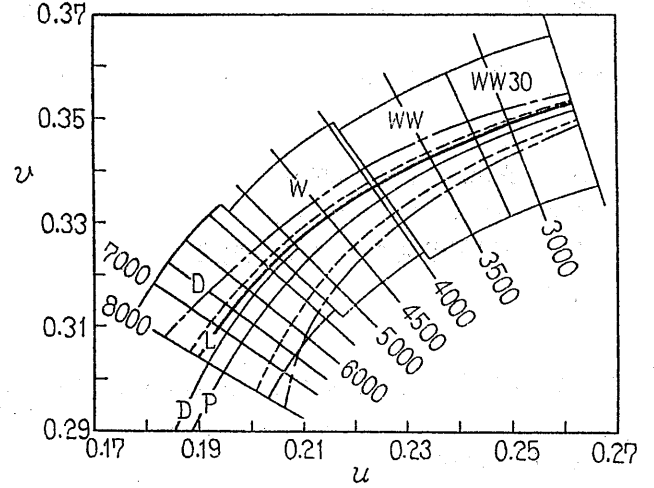


図 1 $R_i \geq 90, R_i \geq 95$ を満足する分光放射束分布が存在する色度領域 (それぞれ一点破線と破線の内側) と, $R_i \geq 95$ を満足して等色温度で全光束が最大になる分光放射束分布の色度軌跡 L (ただし, $i=1 \sim 8$)
Fig. 1 Chromaticity domain and trajectory I.

全光束の増加に対して演色評価数は一般に減少することから, 少なくとも一つ以上の $\Delta E_i'$ は,

$$\Delta E_i' = \Delta E_c + \varepsilon \quad (13)$$

である. したがって, このときの分光放射束分布が制約式 (6) を満足して, 全光束が最大になる最適分光放射束分布である.

手順 1 と手順 2 の実行によって式 (12) が満足されないときは, さらに, 手順 2 だけを反復すれば収束する.

実際に実行すれば, $\varepsilon = 10^{-4} \Delta E_c$ のとき, 手順 2 を 2 ~ 10 回反復すれば収束する.

4. 分光放射束分布の最適化

はじめに, 可視波長域 400 ~ 700nm を波長幅 10nm で分割した 31 個の波長成分の分光放射束分布について最適化を試みた. 検討の対象とした色度領域は, JIS Z9112 「蛍光ランプの色度区分」に示されている温白色 30 (WW30), 温白色 (WW), 白色 (W), 昼光色 (D) の色度区分に限定した.

4. 1 色度領域と全光束

図 1 に $R_i \geq 90, R_i \geq 95$ を満足する分光放射束分布が存在する色度領域を示す. その色度領域は黒体軌跡 P を中心に等色温度線の緑 (+) 側と紫 (-) 側の両方向へ

ほぼ対象の範囲に広がっている。その幅は色温度が高くなるに従って広がっている。当然のことながら、演色評価数についての制約条件が厳しくなるに従って、その制約条件を満足する分光放射束分布が存在しうる色度領域は狭くなる。軌跡Lは $R_i \geq 95$ を満足する色度領域で等色温度で全光束が最大になる分光放射束分布の色度軌跡である。軌跡Lは領域の緑側境界に近いところにある。

図2は $R_i \geq 95$ を満足して、等色温度で全光束が最大になる分光放射束分布の全光束の色温度に対する特性である。これは図1の軌跡L上に、色度座標がある分光放射束分布の全光束の特性である。色温度5300~5400Kの間が不連続であるのは、5300K以下では黒体放射を基準光源とし、5400K以上ではCIE合成昼光を基準光源にしたことによる（これ以降のグラフで色温度のその位置における不連続は全てこのためである）。全光束はWW30, WWの低色温度域で大きく、WからDへと色温度が高くなるに従って小さくなる。その最大値は3300~3500Kの色温度域で約3480lmであり、効率は約87である。

図3はUCS色度図で $R_i \geq 95$ を満足する色度領域内で黒体軌跡からの偏差(uv)に対する全光束の特性を3500, 4500, 6500Kの3例について示している。全光束は色度が紫側境界から緑側境界に向かって等色温度線上を移動するに従って増加し、その値は緑側境界の直前で最大になる。また、全光束は境界に極めて近いところでは色度が境界に近づくに従って急減する。

4. 2 分光放射束分布

図4は $R_i \geq 95$ を満足して、等色温度で全光束が最大になる分光放射束の色温度に対する特性である。JIS Z9112「蛍光ランプの色度区分」で指定された全区分域内で、 $R_i \geq 95$ を満足して等色温度で全光束が最大になる分光放射束分布の特徴として、図4から次の点が見いだされる。

(1) 分光放射束分布の波長域は、460~620nmである(ただし、水銀輝線は除く)。

(2) 470, 530, 580, 620nmの4個の波長成分が基本的な波長成分であり、460, 520nmの2個の波長成分が二次的な波長成分である。

(1)の特徴はWalterの結果と一致している。(2)の特徴について、Walterは $R_i \geq 90, R_i \geq 95$ の計算結果に対する総合的判断から、460, 530, 580, 620nmの4個の波長成分を基本波長としているが、著者らにおいても

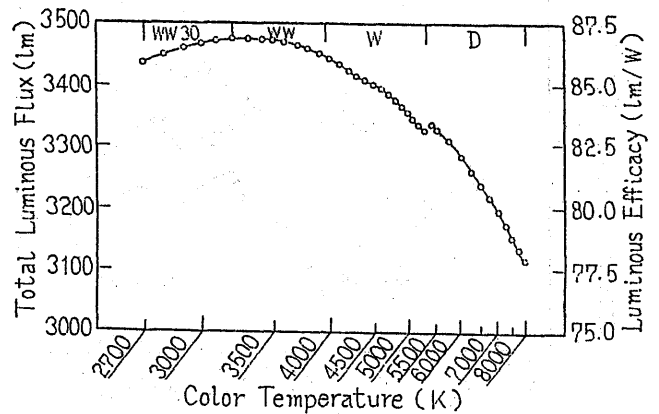


図2 等色温度で $R_i \geq 95 (i=1 \sim 8)$ を満足する最大全光束の色温度に対する特性

Fig. 2 Total luminous flux versus color temperature I.

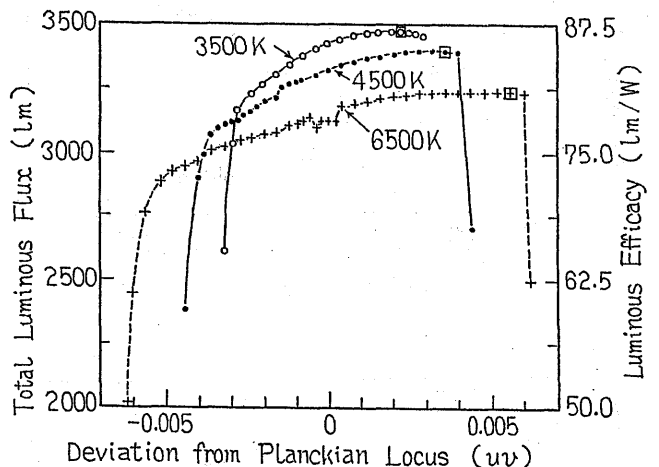


図3 黒体軌跡からの偏差と全光束(ただし、 $R_i \geq 95$, □印は最大値)

Fig.3 Total luminous flux versus deviation from Planckian locus.

$R_i \geq 90$ の制約下では、Walterの結果と同様に、全色温度域で460nmの放射束が470nmの放射束よりも大きいという結果であった。

著者らとWalterとでは、制約条件に前述のような相違があるにもかかわらず、両者の最適分光放射束分布の特徴は良く一致している。なお、紫外励起放射束、量子効率、水銀輝線の放射束は管径の違いなどによって若干異なるので、それぞれの異なった値に対する最適分光放射束分布について比較検討した。その結果、相対分光分布は異なるが、放射束が出現した波長成分に違いはなかつ

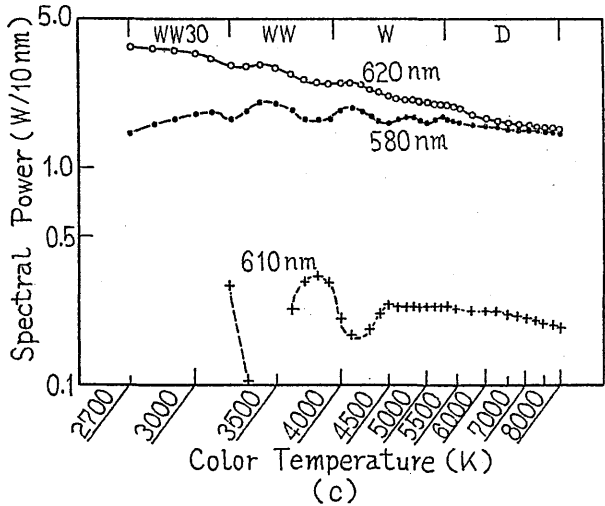
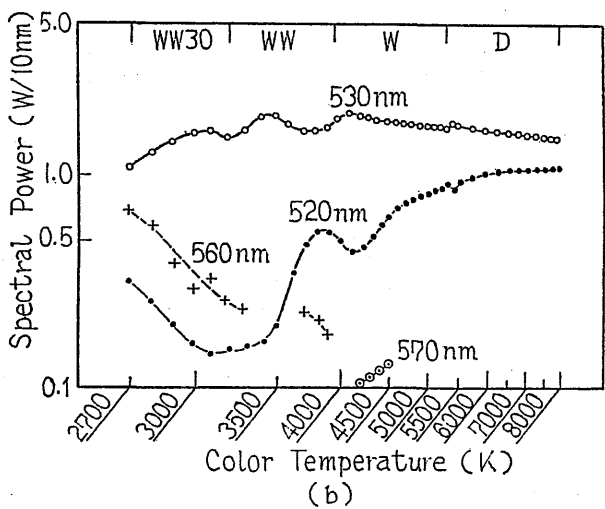
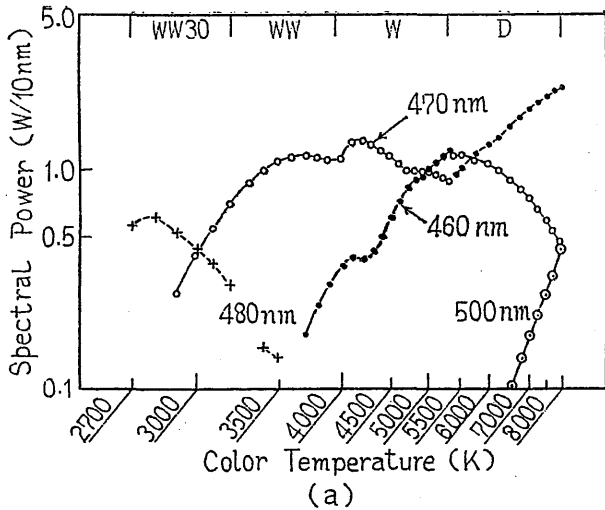


図4 $R_i \geq 95 (i=1 \sim 8)$ を満足して等色温度で全光束が最大になる分光放射束の色温度に対する特性 (ただし、水銀輝線は除く)

Fig.4 Spectral power versus color temperature I.

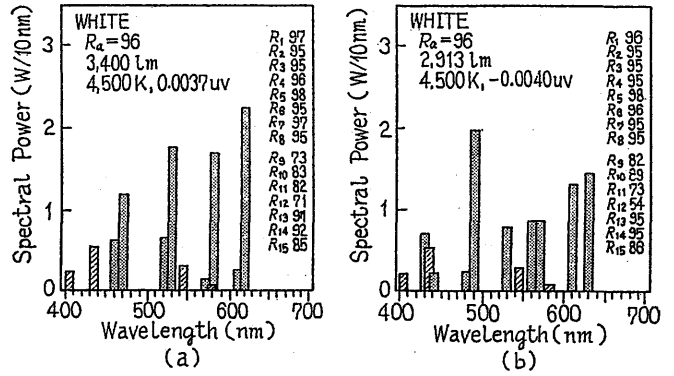


図5 4500K で $R_i \geq 95 (i=1 \sim 8)$ を満足する分光放射束分布 (ただし、ハッチバンドは水銀輝線)
Fig.5 Spectral power versus wavelength I.

た。

次に図2と図4について考察すると、全光束が最大値またはそれに近い値である3300~3500Kの色温度域では、波長成分の数が最小の6個 (ただし、水銀輝線は除く。以下同様) であり、他の色温度域ではこれより多い。

また、Walterの結果には、 $R_i \geq R_c$ あるいは $R_d \geq R_c$ の制

約条件で R_c が 95, 90, …… , 50 と小さくなるに従って全光束は大きくなるが、波長成分の数は減少する特徴がある。これらのことから次の結論が得られる。

蛍光灯の紫外励起放射束を蛍光体で可視波長域の分光放射束に変換するときは、できるだけ波長成分の数を少なくして特定の波長成分に放射束を集中することにより、所定の演色評価数を満足して効率を高くすることができる。波長成分の数を増すことによって演色評価数は高くなるが効率は低下する。

図5 (a) は、4500K で $R_i \geq 95$ を満足して全光束が最大になる分光放射束分布である。黒体軌跡からの偏差は 0.0037 uv である。同図 (b) は 4500K, -0.0040 uv で $R_i \geq 95$ を満足して全光束が最大になる分光放射束分布

である。全光束を比較すると、(a)は(b)に比べて487lm, 約14%高い。分光放射束分布を比較すると、(a)では波長成分の数が8個で波長域460~620nmに分布している。

(b)ではその数が9個で波長域430~630nmに分布している。また、(a)は(b)に比べて全放射束に対する視感度が高い波長域の放射束の割合が多い。

このように演色評価数に対する同一制約条件の下では、等色温度の分光放射束分布の中で、全光束が最大になる分光放射束分布は波長成分の数が最小で、全放射束に対

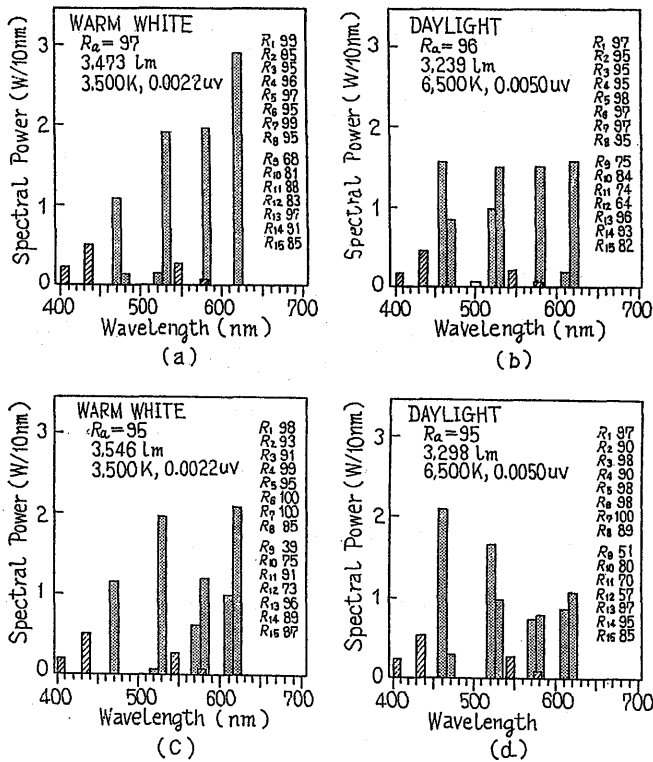


図 6 演色評価数の制約条件が $R_i \geq 95 (i=1 \sim 8)$ ((a),

(b)) と, $R_a \geq 95$ ((c), (d)) である分光放射束分布 (ただし, ハッチバンドは水銀輝線)

Fig. 6 Spectral power versus wavelength II.

して視感度が高い波長域の分光放射束の割合が高い. 等色温度で全光束が最大になる分光放射束分布の色度が緑側の境界付近であるのは, 視感度が最大である 555nm の波長成分が黄緑であることによる (図 3 参照).

図 6 に $R_i \geq 95$ を満足して, 等色温度で全光束が最大になる代表的な分光放射束分布を示す ((a), (b)). 次に, (a) および (b) の分光放射束分布の色度座標と同一色度座標で, $R_a \geq 95$ を満足して, 全光束が最大になる分光放射束分布をそれぞれ (c) と (d) に示す.

$R_a \geq 95$ の制約下の分光放射束分布の波長域は,

$R_i \geq 95$ と同じ 460~620nm であり, 波長成分の数も 3500, 6500K のそれぞれで等しい. ただし, その分光放射束分布は, $R_i \geq 95$ に比べて 580, 620nm の分光放射束は弱く, 代わりに 570, 610nm の分光放射束が強く現れている点が異なる. 一方, 演色評価数について比較す

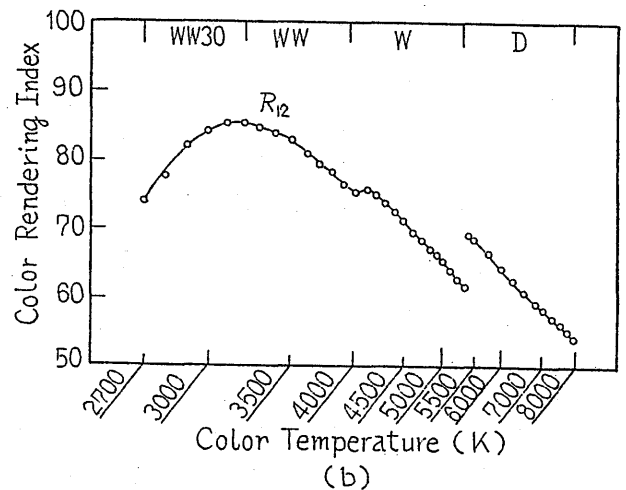
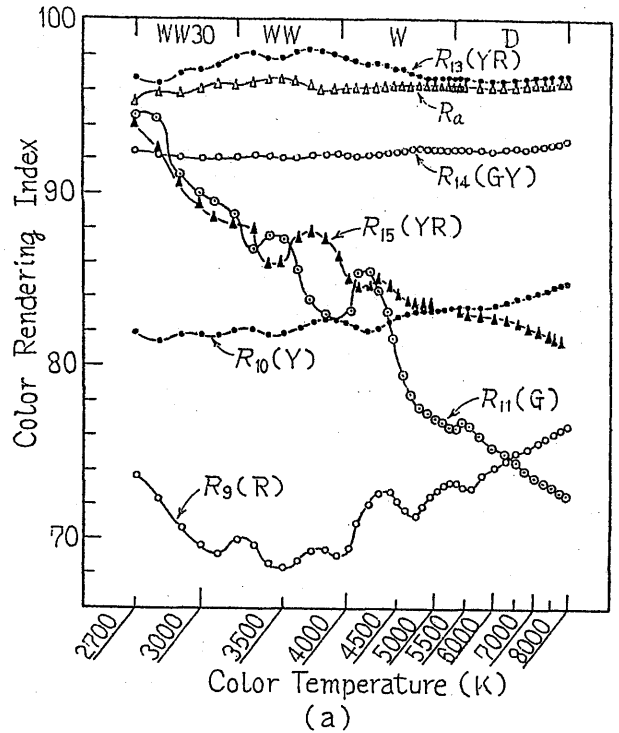


図 7 $R_i \geq 95 (i=1 \sim 8)$ を満足して等色温度で全光束が最大になる分光放射束分布の $R_i (i=9 \sim 15)$ の色温度に対する特性

Fig. 7 Color rendering index versus color temperature I.

れば, $R_i \geq 95$ のほうが $R_a \geq 95$ に比べて特殊演色評価数 $R_i (i=9 \sim 15)$ についても, 各評価数のばらつきが少ない. したがって, 分光放射束分布, 全光束, 演色評価数につ

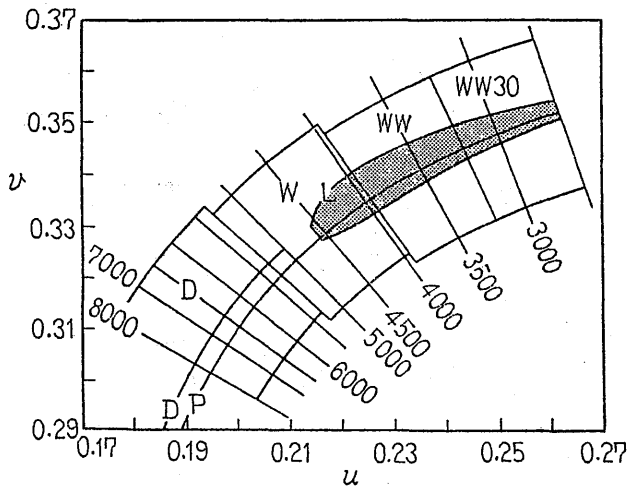


図8 470, 530, 580, 620nmの4波長で $R_i \geq 90$ ($i=1$

~8)を満足する分光放射束がある色度領域(斜線部分)

と最適分光パワーを与える色度軌跡L

Fig. 8 Chromaticity domain and trajectory II.

いて総合的に判定するならば、 $R_i \geq 95$ の制約下の最適分光放射束分布のほうが、 $R_i \geq 95$ の制約下の最適分光放射束分布よりも優れているといえる。

なお、淵田らが指摘した490nmの分光放射束は、 $R_i \geq 95$ を満足して、等色温度で全光束が最大になる分光放射束分布では2700Kに弱く出現したが、それ以外の色温度では現れなかった。ただし、 $R_i \geq 95$ を満足する色度領域で黒体軌跡から紫側に色度座標がある分光放射束分布に490nmの分光放射束が現れた。また、黒体軌跡から紫側へ偏差が大きくなるに従ってその分光放射束は強く現れた(図5参照)。

4. 3 特殊演色評価数

特殊演色評価数 R_i ($i=9 \sim 15$)については制約しなかったため、各評価数のばらつきが大きい。

図7は $R_i \geq 95$ を満足して、等色温度で全光束が最大になる分光放射束分布(図4参照)の R_i ($i=9 \sim 15$)の色温度に対する特性である。色温度2700~8000Kの全域で、 R_{13} (YR)は95よりも高く、 R_{14} (GY)は92~93、 R_{10}

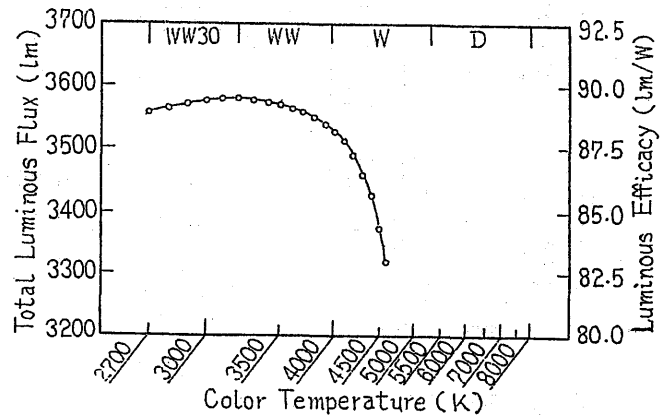


図9 470, 530, 580, 620nmの4波長で $R_i \geq 90$ ($i=1$

~8)を満足する最大全光束の色温度に対する特性

Fig. 9 Total luminous flux versus color temperature II.

(Y)は82~83と比較的一定している。 R_{11} (G)、 R_{15} (YR)は2700Kで最も高くともに94であるが、これよりも色温度が高くなるに従って減少する。 R_{12} (PB)は3200K付近が最高の85であり、高色温度域での減少が著しい。また、 R_9 (R)はWWの区分域で最低の68であるが、この区分域外では色温度の変化に対して高くなる。

図2と図7について考察すれば、 $R_i \geq 95$ を満足して等色温度で全光束が最大になる分光放射束分布は、色温度で全光束が最大になる分光放射束分布は、色温度が低いWW30の区分域で効率がよく、同時に特殊演色評価数も全体的に高い値である。

5. 特定の波長成分の分光放射束分布の最適化

可視波長域400~700nmを波長幅10nmで分割した31個の波長成分の分光放射束分布の最適化の結果、 $R_i \geq 95$ を満足して、等色温度で全光束が最大になる分光放射束分布の基本的な波長成分は470, 530, 580, 620nmであることを明らかにした。そこで、この章ではこれら4個の波長成分(波長幅10nm)について改めて最適化を実行した結果について検討する。

5. 1 色度領域と全光束

図8は $R_i \geq 90$ を満足する色度領域である。その領域は色温度2700~4600Kで黒体軌跡Pを含み、やや緑側に

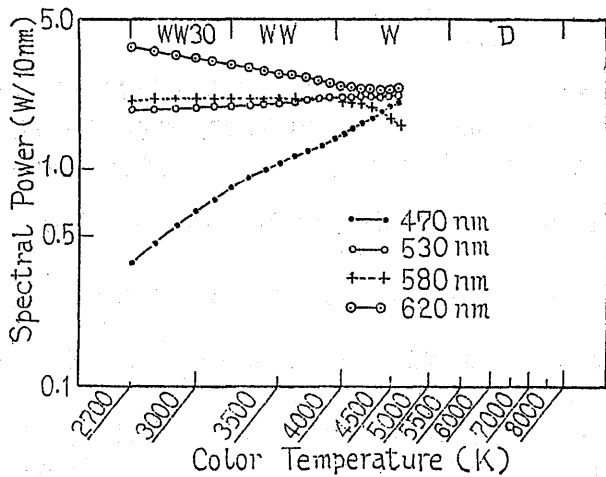


図 10 470, 530, 580, 620nm の 4 波長で $R_i \geq 90$ ($i=1$ ~ 8) を満足して、等色温度で全光束が最大になる分光放射束の色温度に対する特性

Fig. 10 Spectral power versus color temperature II.

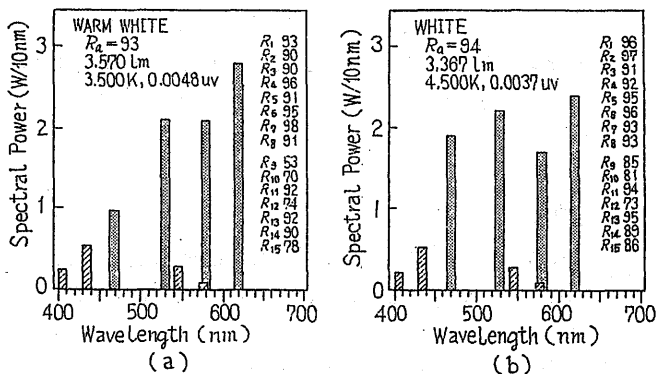


図 11 470, 530, 580, 620nm の 4 波長で $R_i \geq 90$ ($i=1$ ~ 8) を満足して、全光束が最大になる分光放射束分布 (ただし、ハッチバンドは水銀輝線)

Fig. 11 Spectral power versus wavelength III.

偏っている。等色温度で全光束が最大になる分光放射束分布の色度軌跡 L はこの領域の緑側境界にある。

ここで、上記の 4 個の波長成分で $R_i \geq 95$ を満足する色度領域は存在しなかった。 $R_i \geq 95$ を満足するためには上記の波長成分に 460nm の波長成分を加えた最少 5 個の波長成分が必要であり、さらに広い色度領域を期待するためには、520nm の波長成分も加えた 6 個の波長成分が必

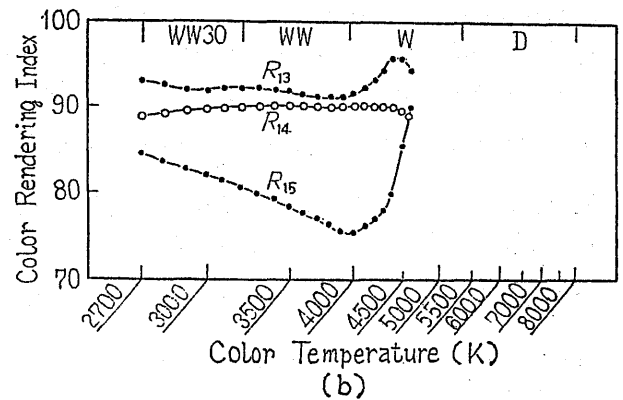
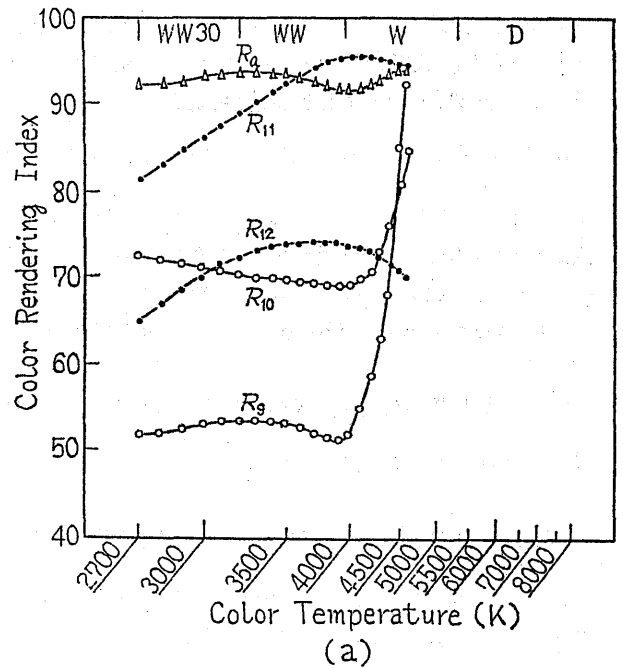


図 12 470, 530, 580, 620nm の 4 波長で $R_i \geq 90$ ($i=1$ ~ 8) を満足して、等色温度で全光束が最大になる分光放射束分布の R_i ($i=9 \sim 15$) の色温度に対する特性

Fig. 12 Color rendering index versus color temperature II.

要である。また、 $R_i \geq 90$ を満足するためには最少 4 個の波長成分が必要であり、上記の 4 個の波長成分の組み合わせだけがこの制約条件を満足できる。さらに、これと異なった 4 個の波長成分で $R_i \geq 90$ を満足する組み合わせを見出すことはできなかった。

図 9 は、図 8 の軌跡 L に対応する等色温度線上の最大全光束の色温度に対する特性である。全光束は WW30,

WWの低色温度域ではおおむね一定した $3565 \pm 15\text{lm}$ であり、Wの領域で色温度が高くなると急減する。

5. 2 分光放射束分布と演色評価数

図10は $R_i \geq 90$ を満足して、等色温度で全光束が最大になる分光放射束分布の色温度に対する特性である。波長が短い470nmの分光放射束は色温度が高くなるに従って増加し、長波長の620nmの分光放射束は逆に減少する。中間波長の530, 580nmの分光放射束は大体一致している。

図11は代表的な分光放射束分布の例である。図12は R_9 の $R_i (i=9-15)$ 色温度に対する特性である。

R_9, R_{10}, R_{15} は全光束が急減するWの領域で著しく向上している。これらは図10から580nmの分光放射束が、Wの領域でわずかに減少していることに起因していると推測する。

図6(a)と図11(a)の分光放射束分布を比較すると、両者の違いは図6(a)の分光放射束分布に480, 520nmの分光放射束が弱く出現している。これだけで、全光束、 R_9, R_i は図に示すような違いがある。また、図5(a)と図11(b)の分光放射束分布を比較する。後者は前者に比べて波長成分の数が半分の4個であるにもかかわらず、全光束と R_9 はそれぞれ約1%と2低い、 $R_9 \sim R_{15}$ はそれぞれ+12, -2, +12, +2, -2, -3, +1でむしろ向上している。

このように最適化によって選択された分光放射束分布は、全光束や演色評価数の向上に、最も効果がある波長成分の分光放射束分布であるため、各分光放射束のわずかな変化に対して全光束や演色評価数が大きく変わる。

6. むすび

40Wの蛍光灯を対象に、可視波長域400~700nmを波長幅10nmで分割した31個の波長成分の分光放射束分布について、全光束を最大にする目的関数と放射束、

色度座標および平均演色評価数計算用の試験色(i)の演色評価数 $R_i (i=1-8)$ についての制約式から成る連立方

程式に、線形計画法を繰り返し適用して、最適分光放射束分布を解析して次の結論を得た。

(1) 紫外励起放射束を蛍光体によって可視波長域の分光放射束に変換するときは、できるだけ波長成分の数を少なくして選択された特定の波長成分に放射束を集中して、所定の光色と演色評価数を満足して効率を高くすることができる。

(2) 効率が高く、同時に平均演色評価数計算用8試験色の演色評価数を全て90または95以上にする高演色性の蛍光灯の分光放射束分布の波長成分としては470, 530, 580, 620nmの4個が基本的な波長成分であり、460, 520nmの2個が二次的な波長成分である。

将来、上記の特定波長成分に発光のピークがある十分に狭帯域で量子効率が高い蛍光体が開発されるならば、蛍光灯の効率と演色性はさらに向上することが期待できる。

参考文献

- (1) W. Walter : Optimum Lamp Spectra, Journal of Illuminating Engineering Society 7, pp.66-73 (1978).
- (2) 淵田 隆義, 秋山 順悦, 杉山 春夫: けい光ランプの最適分光分布の設計, 照明学会雑誌, 63, pp. 247-251 (1979).