けい光放電灯の演色性の評価*

正会員 東

堯**

正会員 森

礼 於**

An Appraisal of the Color Rendering Properties of Fluorescent Lamps.

By Takashi Azuma (member) and Leo Mori (member)
(Tokyo-Shibaura Electric Company Limited.)

For all the plausible attempts of the investigators in evaluating the color rendering properties of fluorescent lamps on the bases of colorimetric specifications, it is as yet undeniable that they are to be found mistaken in neglecting the variable of luminance, and apparent luminance changes of objects by light sources, we believe, are very important factors determining the practical acceptability of the light sources. So the authors propose a new method of appraising these properties dealing with the distances between color points of defined 20 color papers under the sample light and of those under the standard light in a 3-dimensional metric color space. Munsell renotation system is adopted as the metric color space, and the interrelation of the steps of the three attributes is assumed to be $0.1V=0.4C\approx 1H$ (at $C=6$). In one of the three methods adopted to calculate the color distances, chromaticity differences of the light sources are compensable by appropriate parallel displacement of the color solid; and it is concluded that this method gives the most reasonable measure of the color rendering properties of lamps for each color of objects.

It is apparent from the results that the considerable color distortion occurs in colors in the neighbourhood of red under the standard type lamps while the defects are markedly reduced by the de luxe type lamps and a mixed light of fluorescent lamps and incandescent lamps. The arithmetical mean of these distances of color displacements, which gives a single merit figure of the over all color rendition by a lamp, leads to the general conclusion that the de luxe white fluorescent lamp is superior not only to the standard white fluorescent lamp but also to the special de luxe white fluorescent lamp which applies a kind of deep red phosphor.

1. は し が き

各種のけい光灯についてその演色性の良し悪しを色差的に表わした結果を前論文¹⁾において報告したが、その後同様な方法によって演色性を判断する論文が欧米でも相次いで発表されている²⁾。この問題の最近の研究の一つの方向として演色性の良さを数字や点数で表わそうとする傾向がある。点数にする方法としては、

- 適当な分割波長帯の分光測光値による³⁾。
- 色物を試料光源で照明した時の色刺激と、同じものの規準光源による色刺激とのずれをもとにする⁴⁾。
- 異性等色 (metameric) の色対を試料光源で照明した時の色の差から求める⁵⁾。

の三つに分類される。このうち (a) は別としても、(b)

(c) いずれも今までの文献では光源による色度ずれのみを扱って明度のずれを考慮していない。しかし実際にけい光灯の演色性が云々される場合のことを考えると、例えば普通の昼光色けい光灯で赤い色が悪く見えるという時は彩度が低くなるのと同時に明度が小さく感じられることが非常に大きな要素になっていることがわかる。

そこでわれわれは明度まで考慮した前論文の結果 (分類としては前記 (b) に属する) をもとにして演色性を表わす数値を算出することを試みた。これによって一つには我々に馴染み深いわが国のけい光灯についてのデータをそろえるのと同時に、明度まで計算に入れた演色性評価の一つの方法を提案したいと思う。また在来の演色性の評価方法はともすれば一つの点数にあらわすことに力を入れすぎたきらいがあるが、こゝではいろいろな色物に対するけい光灯の演色性の良し悪しを表にして示し、

* 一部を応物講演会 11 (昭28—11) に報告、完成した形で三学会連大 (昭29—5) に報告。

** 東京芝浦電気株式会社マツダ研究所

第1図 昼光色および天然昼光色けい光灯の分光エネルギー分布

第2図 各種の白色けい光灯および混光の分光エネルギー分布

併わせてその平均値を記して、いわばけい光灯の演色性に関する点数の通信簿を作成する。

2. 試料としたけい光灯

ここで試料として取上げたけい光灯の分光エネルギー分布を第1図および第2図に示す。昼光色系のけい光灯である昼光色および天然昼光色けい光灯は前論文に掲げたものと同一であって、色ずれの計算も前論文の結果をそのまま用いている。

白色系のけい光灯としては白色および天然白色けい光灯の他に深赤色けい光体を使用した特殊品および昼光色けい光灯と白熱電球の混光を入れ合計4種について調べた。この内白色灯および混光は前論文に示したものと全く同一である。ただし後者については分光エネルギー曲線は図示しなかった。天然白色灯は前論文のものとほぼ同等であるが、その後若干改良されたので、新しい分光分布を使って測色計算を更新した。しかし色ずれの方向等は前のものとほとんど差がないので色ずれを示す図(前論文の第14, 15図に相当するもの)は改めて示さない。次に特殊品としたものは Jerome, Judd⁵⁾ や Barr, Clark, Hessler⁴⁾ が Special de luxe cool white としてあげたけい光灯と同等なものである。

3. 演色性を表す数値の計算の基礎

上に述べたようにここでは演色性の良否を表す数値として、一般の色物の代表となるような色紙を演色性が理想的であると考えられる規準光源で照明した時と、けい光灯で照明した時との精神物理的な色(色度と明度)のずれ量を用いる。この場合の規準光源としては昼光色系のけい光灯に対しては C.I.E. の C 光源を、白色系のけい光灯に対しては 4500°K 黒体放射を用いる。また計算に用いた色紙の分光反射率は前論文に図示した通りで純色とうすい色各10色相合計20色をとっている。この色ずれを明度色度を含めてすべての方向に感覚的に等歩度である色立体(metric 色空間)の中の長さで表わすのであるが、その色立体としては改良マンセル系(C光源で照明した場合)を採用する。マンセルの各属性の段階の関係は色々な数字がとられているが、ここでは、Newhall⁶⁾ が各属性の単位として用いた。

$$0.1V = 0.4C = 1H \quad (C=6 \text{ で}) \quad (1)$$

の関係をとりこれを色ずれ量の単位とする。この関係は Nickerson⁷⁾ が大きな色差に対して

$$1V = 2C = 3H \quad (C=5 \text{ で}) \quad (2)$$

としたものと、Bellamy, Newhall⁸⁾ が小さな色差に対して

$$1V = 8C = 22H \quad (C=6 \text{ で}) \quad (3)$$

としたものの中間に入り、Godlove⁹⁾ の最近の実験の平均も V と C の関係について

$$1V = 4.3C \approx 4C \quad (4)$$

となっていることから見て正当なものと思われる。

実際に色ずれの長さを計算するにあたっては、式(1)の中の V と C の関係だけをとり、 H , V , C を円錐座標の変数と考えた場合と、式(1)の関係が C の如何に拘らず成立つ H , V , C の直交座標と考えた場合の2通りについて行った。ある色紙の規準光源による改良マンセル値を H_s , V_s , C_s とし、試料けい光灯による値を H_p ,

第1表 各種けい光灯による色紙の色ずれ量

標準光源	星光色灯		白色灯				
	C 光源		4500°K 黒体				
	けい光灯	a 星光色	b 天然星光色	A 白色	B 天然白色	C 特殊品	D 星光色けい光灯 +白熱電球
色紙	赤	13.9 13.2 13.4 ↓ ←	4.1 3.8 3.6 ↓ ←	10.7 11.1 10.7 ↓ ←	5.0 4.9 ↓ ←	2.7 1.8 1.4	2.1 3.8 2.1 ↓ ←
	黄	7.5 7.1 4.5 ↑	2.6 2.0 1.2	2.9 3.5 1.8 ↑	2.0 2.1	1.9 3.0 1.4	1.5 1.8 1.4
	緑	2.1 2.5 1.3	2.2 1.1 2.2	3.4 3.2 3.1 ↓	3.0 2.7	3.6 4.7 3.3 →	1.8 1.8 1.7
	青	5.3 5.8 3.7 ↓	3.0 3.5 2.6 ↓	6.9 6.4 7.9 ↓	3.6 4.2 ↓	3.6 4.3 4.0 ↓	6.4 3.2 6.8 ↓
	紫	5.8 5.3 3.7 ↓	3.3 3.5 3.2 ↓	7.8 8.1 5.9 ↓	4.7 3.7 ↓	8.2 7.1 8.1 ↓	2.4 3.0 2.1
	うす赤	6.3 5.8 6.2 ↓ ←	2.0 2.0 2.0	4.3 5.0 3.8 ↓ ←	1.8 1.6	1.2 0.9 0.9	1.0 1.8 0.8
	うす黄	6.2 5.5 6.3 ↓	3.7 3.3 4.0 ↓	2.0 2.5 1.4	1.7 1.0	1.5 1.2 1.3	1.4 0.9 1.1
	うす緑	1.9 2.9 1.7	1.9 0.9 1.6	5.4 3.4 5.3 ↓ ←	1.8 2.0	1.6 1.5 1.6	3.3 2.8 3.2
	うす青	4.6 4.9 3.5 ↓	3.1 2.9 3.3	9.3 8.4 12.0 ↓	2.9 3.7	2.1 6.2 2.1 ↓	5.4 4.3 7.2 ↓
	うす紫	5.0 4.2 2.6 ↓	2.5 2.0 2.1	5.9 5.9 5.1 ↓	3.1 2.8 →	8.0 6.9 8.0 →	5.7 5.1 5.6 ↓
平均		4.8 ₆ 4.7 ₂ 4.4 ₉	2.8 ₄ 2.4 ₈ 2.4 ₈	5.8 ₆ 5.7 ₅ 5.7 ₀	2.9 ₆ 2.8 ₇	3.4 ₄ 3.8 ₆ 3.2 ₁	3.1 ₁ 2.8 ₅ 3.2 ₀
中間色相	黄赤	8.0 8.6 4.7 ↓	4.1 4.6 3.6 ↓	6.4 7.2 3.3 ↓	2.3 1.2	1.8 1.8 1.8	3.2 2.6 3.1
	黄緑	2.6 2.9 3.2	1.9 0.9 1.8	4.1 4.5 3.1 ↓	2.4 2.2	3.7 5.1 3.7 ↓	1.4 0.8 0.9
	青緑	3.4 4.1 3.2 ↓	3.0 1.8 2.2	6.1 5.2 6.0 ↓	2.5 2.5	4.8 3.8 4.3 ↓	4.2 3.2 4.1 ↓
	青紫	7.8 7.6 7.8 →	6.8 8.0 6.9 →	10.3 10.0 10.2 →	4.6 4.1 →	6.7 5.9 6.5 →	5.0 5.1 0.8 ↑
	赤紫	8.6 7.8 7.0 ↓	3.5 4.2 3.2 ↓	7.5 7.4 5.7 ↓	5.7 5.3 ↓	7.5 6.0 7.0 ↓	3.0 2.7 2.7
	うす黄赤	6.0 5.1 4.3 ↓	1.3 1.1 1.9	1.8 3.6 1.2 ↓	0.9 0.3	2.5 1.1 1.7	2.7 2.4 2.2
	うす黄緑	2.9 2.8 3.2	1.8 1.4 2.7	1.7 2.1 1.6	1.4 1.8	2.6 3.5 2.6 ↓	0.8 0.0 0.7
	うす青緑	2.5 3.3 2.5 ↓	1.5 1.0 1.3	6.9 5.8 6.7 ↓	1.6 1.3	2.9 1.8 3.2	3.8 4.4 3.8 ↓
	うす青紫	2.5 2.5 2.9	1.7 2.7 1.8	6.7 5.5 6.7 →	2.4 2.6	8.0 6.6 8.7 →	3.6 4.4 3.7 ↑
	うす赤紫	4.9 4.3 4.4 ↓	1.6 2.4 1.5	3.9 3.6 2.8 ↓	2.2 1.7	5.4 4.4 4.4 ↓	1.7 2.0 1.3
平均		5.0 ₂ 4.9 ₀ 4.2 ₂	2.7 ₂ 2.8 ₁ 2.6 ₉	5.5 ₂ 5.4 ₉ 4.7 ₆	2.6 ₀ 2.3 ₀	4.5 ₉ 4.0 ₀ 4.3 ₉	2.5 ₂ 2.7 ₆ 2.3 ₃
全平均		4.9 ₄ 4.8 ₁ 4.3 ₆	2.7 ₂ 2.6 ₅ 2.5 ₉	5.6 ₉ 5.6 ₂ 5.3 ₂	2.7 ₂ 2.5 ₉	4.0 ₂ 3.9 ₃ 3.8 ₀	2.7 ₇ 2.8 ₁ 2.7 ₇

V_F, C_F とすると、色ずれの長さ D は前者の場合は円錐座標中での距離であって、

$$L^2 = 100(V_F - V_S)^2 + \frac{1}{0.16} \left\{ C_F^2 + C_S^2 - 2C_F C_S \cos \frac{2\pi(H_F - H_S)}{100} \right\} \quad (5)$$

で算出される。また後者の場合は簡単に

$$D^2 = (H_F - H_S)^2 + 100(V_F - V_S)^2 + \frac{1}{0.16} (C_F - C_S)^2 \quad (6)$$

から得られる。式 (6) はクロマによって色相の判別域があまり変っていないという Bellamy, Newhall⁸⁾ の実験結果等を考慮したものであって、無彩軸が一つの平面に広がってしまうので、低彩度の物体色に適用すると大きな誤りの起ることは自明であるけれども、本研究のようにすべての色の彩度がある程度以上大きな場合 ($C > 4$) には心理判定と合う結果が得られるのではないかと考えたものである。一方式 (5) は Godlove⁹⁾ が用いたのと同じもので、常識的な色立体模型として無難であるが、色相が彩度に比例して荷重されるために、この研究での純色の色相変化が多少過大に評価されるのではないかということが慮られる。

前記のように規準光源を定めてそれによる色紙の色相明度、彩度を規準として色ずれをはかったことは、光源の色による色順応の影響を計算の中に入れることを目的としたものである。しかし実際には試料に用いたけい光灯は第2図のBで示した天然白色けい光灯の他は規準光源と色度が完全には一致していない。このため、機械的に式(5)、(6)で色ずれ量 D を計算すると、僅かではあるが色順応によって実際には補正される筈の色ずれまで含んだ数値が得られることになる。そこでこの僅かな光源の色度変化を補正することを考えた。観察者の眼が $V=5$ の無彩色に順応していると考えて、光源の色度 x, y を $V=5$ で改良マンセル値に換算して、これを色立体の等バリュー断面に記し(前論文 第14図)、次に試料光源によるこの無彩点が規準光源の無彩点に重なるように試料光源による全色票の点を平行移動でずらせる。このずらせた結果の点を色順応を考へに入れた時の色紙のその光源によるマンセル値をあらわすものとして、これを式(5)に入れて色ずれ量を求める。式(6)に相当する場合は前に述べたように、無彩に近い部分の図が著しく広がるために同じ方法で色順応の補正をすることは不合理と思われるので補正した値は求めなかった。

4. 計算結果

結局一つの色紙について一つの光源による色ずれ量として次の3通りの計算がなされた。

(a) $1V=4C$ の関係を用い H, V, C を円錐座標の変

数と考へて色ずれの長さを求めたもの〔式(5)〕

(b) 上と同じ計算を色順応の影響を補正して行ったもの

(c) $0.1V=0.4C=1H$ の関係を用い H, V, C を直交座標と考へて色ずれの長さを求めたもの〔式(6)〕

こゝで天然白色けい光灯の場合だけは用いた光源の色度が規準光源のものと一致しているので、(a)と(b)とは完全に一致する。また長さの単位はいずれの場合にも0.1Vとする。

第1表にこの結果を総合して示す。数字のうち普通活字のものは(a)の方法で、ゴシック活字は(b)の方法で、またイタリック活字は(c)の方法で得られたものである。

10色相20色の色紙を便宜上赤、黄、緑、青、紫、の5主色相とその間に入る中間色相とに分けて各についてのずれ量 D の平均と全体に対する平均を記してある。各色に対するずれ量 D はベクトル量であって表記の数字はその絶対値だけを表わすので、その方向を示す目安として色ずれの主要な属性を記号で示している。すなわち、上向の矢は試料光源による明度の上昇を、下向の矢は明度の下降を表わし、右向と左向の矢はそれぞれ彩度の上りと下りとを示し、右回り(時計方向)の回転矢は色相の $R \rightarrow Y \rightarrow G \rightarrow \dots$ 方向のずれを、左回りの回転矢はその逆方向のずれを意味している。

5. 考 察

こゝには(a)、(b)、(c)三つの方法による計算結果を示したが、このうち光源の色度ずれが補正されているという意味で(b)の方法が最も合理的なものと考えられる。(c)は色立体のとりかたが異なっているものであるが、光源の色度補正が行いがたいので、(c)と(a)を比較したらよい。これらの結果をしらべるとほとんど差がないので、いずれの方法が勝れているか判定し難いが、こゝでは(b)の方法によるものを主として考えよう。

普通型のけい光灯の演色性は赤に最大の欠点があつてこれが天然色型ではよく改善されていることがこの結果からもよく判る。色ずれの大きな他の部分は青紫にあつてこれも実際観察を注意して行へば、このずれのあることが見出される。しかしこの色ずれが赤の場合ほど問題にされないのは赤の色ずれが彩度の低下と明度の減少とであるのに対して、こゝでは彩度の増大であるためではないかと思われる。この意味から Barr 等⁹⁾が行つたように彩度低下の方向へのずれは大きく負点を加えるような平均方法をとる方がよいかもしれない。

表中の平均値はすべての色紙についての色ずれ量を平均したものであって、これが全般にわたる演色性の良否

を表わすものと考え、天然色型の優れていることは明白である。白色灯のうちで深赤色けい光体を用いた特殊品の演色性は赤近辺の色(赤、黄赤、赤紫、うす赤)については一段と優れているけれども、平均値ではかえって天然白色に劣っている。これはけい光体の発光効率が低下するために全光束のうちで水銀の線スペクトルの占める比率が大きくなって、青紫部における演色性の欠点(他)のけい光灯よりも大きくなるためであろう。昼光色けい光灯(40W)と白熱電球(100V100W)の1:1の混光*は天然白色灯と同等または若干上回った演色性をもっていることも判る。

ただし、この平均値は特定な目的にけい光灯を用いる場合の演色性の良否の判断の尺度として常に適しているとは限らない。例えば外科手術の照明のように血液の色が正常に見えることが第1に要求される場合は、この色のずれ量を一般の平均よりも重く見るべきであろう。このように目的に応じて判断の基礎を変えるべきであるので従来の唯一つの演色性点数よりもここに示したいわゆる通信簿形式が役立つものと思う。

次に一般に演色性を比較するのに、ここに述べたように20色の測色結果が必要であるか、あるいはこの数を減らしうるかを考える。第1表は便宜上10色ずつに分けた平均と全平均とを示しているが、全平均に対する10色平均の差のパーセントをしらべて各3種の計算法について

その絶対値の平均をとると(a)では6.2%、(b)では3.4%、(c)では10.2%となる。方法から予期されるように光源色度の補正された(b)の方法の偏差が一番小さく、補正のない(a)、(c)の方法では大きい。(b)の方法で最も大きい偏差を示しているのは天然白色で、値は6.5%である。これから考えれば、単にずれ量の平均値を求めるためには5主色相の純色とうすい色の合計10色のみについて測色計算を行えば一応実用的な値が得られることが結論される。

本研究を行うにあたって、マツダ研究所研究部長原田常雄博士から御援助をうけ、東京工業大学尾本教授から御教示をいただいた。深く感謝する次第である。

(29—2—10 受付)

文 献

- (1) 東、森：照学誌 **36**—8 (昭27) 266.
- (2) 森：照学誌 **37**—10 (昭28) 371.
- (3) W. Harrison ; Light & Lighting **44** (1951) 148.
- (4) A. C. Barr, C. N. Clark, J. Hessler : Illum. Eng. **47** (1952) 649.
- (5) C. W. Jerome, D. B. Judd : Illum. Eng. **48** (1953) 259.
- (6) S. M. Newhall : J. O. S. A. **30** (1940) 617.
- (7) D. Nickerson : J. O. S. A. **21** (1931) 650.
- (8) B. R. Bellamy, S. M. Newhall : J. O. S. A. **32** (1942) 465.
- (9) I. H. Godlove : J. O. S. A. **41** (1951) 760.

* 昼光色けい光灯 20Wと白熱電球 100V40Wの1:1の混光もほぼ同等な効果がある。