異なる照明光下における白色知覚に関する検討

正会員 太田 亜紀子 (日立物流ソフトウェア株式会社)

専門会員 金谷 末子 (金沢工業大学)

専門会員 阿山 みよし (宇都宮大学)

正会員 向 健二 (松下電器産業株式会社)

Perceived Whiteness under Different Lighting Conditions

Member Akiko Oota (Hitachi Distribution Software Corporation), Fellow Member Sueko Kanaya (Kanazawa Institute of Technology), Fellow Member Miyoshi Ayama (Utsunomiya University), and Member Kenji Mukai (Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.)

ABSTRACT

Many white and/or nearly white objects are in our living and working areas, such as documents written on white paper, white curtains, white clothes, and white walls and furniture. The perceived whiteness of these objects is important to the impression of lighting in these areas. To investigate the perceived whiteness in living areas, a series of experiments were conducted using four different fluorescent lamps in three different environmental conditions.

It was found that the areas of perceived whiteness in the living areas were larger than the areas of perceived whiteness under achromatic conditions. Based on the results of these results, a perceived whiteness index is proposed for these experimental conditions.

KEYWORDS : whiteness area, fluorescent lamp, color temperature, achromatic room, living room

1. はじめに

白紙や白布などの蛍光性を有する白い物体色をより白く見せるための評価、白さの度合いを定量的に評価する方法や白色知覚に関する研究は、1930年代から現在に至るまで数多く行われており、既に、CIE 白色度式や JISZ8715 が制定されている¹⁾²⁾³⁾。白色度表示方法研究委員会 (日本色彩学会) では D_{65} 用蛍光ランプを照明用光源とし、白紙や白布を対象に多数の専門家による視感評価実験を行い、CIE が勧告している CIE 白色度式の適用制限内の試料に対しては、CIE 白色度が知覚的白さとほぼ対応することを明らかにしている⁴⁾。

鈴木らは、光源色の白色度の定量化、相関色温度 6500K 近傍の数種類の昼光色蛍光ランプを用いた主観評価実験に基づく光源色の白色度式の提案、相関色温度 5000K の色評価用高演色性蛍光ランプの照明光下で写真用カラーペーパーを観察し、その知覚的白さの定量化などを提案している⁵⁾⁶⁾⁷⁾。

いっぽう、わが国では居住空間の主光源として蛍光ランプが広く普及している。近年、照明メーカー各社から数多くの蛍光ランプが市販されるようになり、居住空間でも相関色温度が異なる多種の蛍光ランプが用いられるようになってきている。また、現代建築における居住空間の内装色は、従来の伝統的な日本建築のそれに比べて各面の反射率が高くなる傾向にあり、内装材や物体色などに白色または白色に近似した色が数多く用いられるようになってきている。これらの色の見え方は、使用する光源の分光特性、周辺環境などにより異なる。

また、室内にある白い物体が黄ばんで見えると、室内を暗く感じるなど、白色または白色に近似した色の見えは、空間の明るさ知覚にも影響すると考えられる。このため、使用する光源によって内装色などに用いられる白色または白色に近似した色の白色知覚がどのように変化するかを明らかにすることは、居住空間における光源や内装材の選定をする上で重要であると考えられる。

片山らは、各種照明光のもとでの白色サンプルの白さを評価し、照明光の分光組成が白色物体の知覚白色度に及ぼす影響を明らかにしている⁸⁾⁹⁾。赤津らの先行研究では、居住空間に存在する白色あるいは白色に近似した 12 種類の色票を用いて白色感に関する実験を行い、相関色温度が低くなるにつれて白色感が低下する色票と上昇する色票に分類されることを明らかにした¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾¹³⁾。江田らは、電球色及び昼光色蛍光灯照明下における知覚的白色領域について検討した¹⁴⁾。しかし、これまでに白色または白色に近似した色に関する評価指標は明らかにされていない。

そこで、本報では、居住空間における白色知覚を明らかにすることを目的として、種々の照明光のもとでの白色または白色に近似した色票を用いて白色知覚の実験を行い、実験結果を基に、白色知覚の定量化について試みることにした。

2. 各種照明光のもとでの白色知覚に関する実験

ほぼ全色相にわたる高明度 ($V=9.0 \sim 9.25$)、低彩度 ($C=0.5 \sim 1.5$) の 81 枚と N9.0, N9.25, N9.5 を含む 84 枚の色票を分光特性の異なる蛍光ランプを用いて照明し、これらの色票の白色知覚

が光源の分光特性によってどのように変化するかを、無彩色背景条件（実験1）および有彩色背景条件（実験2）のもとでそれぞれ実験した。

2.1 実験1：無彩色背景下における白色知覚に関する実験 — 狭帯域発光形蛍光ランプと広帯域発光形蛍光ランプによる白色知覚の比較

わが国で狭帯域発光形蛍光ランプである3波長域発光形蛍光ランプが開発されて20有余年、現在では、住宅をはじめ、様々な居住空間で広く普及してきた。狭帯域発光形蛍光ランプは、従来の広帯域発光形蛍光ランプに比較して透き通ったような清潔感のある色の見えや、白紙や陶磁器の白さを際立たせる特徴のある蛍光ランプであるが、定量的な検討は行われてこなかった。

2.1.1 実験条件

実験には、相関色温度3000Kと6700Kの狭帯域発光形蛍光ランプと相関色温度3000Kと6500Kの広帯域発光形蛍光ランプの4種類を用いた。提示色票は、マンセルバリューが9.25ではほぼ全色相にわたるC=0.5~1.5の色票33枚、マンセルバリューが9.0ではほぼ全色相にわたるC=0.5~1.5の色票48枚と、N9.5, N9.25, N9.0の色票、計84枚を用いた。図1に実験に用いた色票のHV/Cを示す。

図1 実験に用いた提示色票のHV/C

Fig.1 The 84 munsell color sheets used in the experiment.

実験室は予備順応ブースと観察ブースに分け、両ブース共、幅1.5m、奥行き1.8m、天井高さ1.8mで、内部の壁面はN8の布貼りとし、ブース中央にN5のテーブルクロスをかけたテーブルを配置した。テーブル面の水平面照度は500lxに設定した。観察ブースには上記の4種類の蛍光ランプを、予備順応ブースにはR, G, Bの単色蛍光体を塗布した蛍光ランプを取り付けた。両ブースの天井には乳白色拡散パネルを用いて天井全面を光天井とした。被験者は若年齢者5名とした。

2.1.2 実験手順

実験に先立ち、被験者が観察ブースの照明光の色温度を察知できないように、ランダムに設定した色光の予備順応ブースに被験者を入室させ、約10分間色順応させた。10分間の色順応の後、被験者を観察ブースに移動させ、観察ブースで約5分間予備順応させた。その後、テーブル脇に置いた箱から84枚の色票を無作為に

図2 実験状況

Fig.2 Experimental set-up in which an observer is observing a colour sheet on the table.

1枚ずつ取出してテーブルの上に置き、「白と感じる色票」か「白と感しない色票」かのいずれかに分類させた。図2に実験状況を示す。実験の繰り返し回数は、各被験者共、5回とした。

2.1.3 実験結果

図3に相関色温度3000Kの狭帯域発光形蛍光ランプと広帯域発光形蛍光ランプの実験結果を示す。横軸は提示色票の色相、縦軸は抽出回数を示す。図3に示すように、狭帯域発光形蛍光ランプの照明光のほうが広帯域発光形蛍光ランプの照明光に比べて白色と評価する色票数が多く、度数の検定であるt検定（5%有意水準）を行なった結果、有意差があることが明らかになった。色相別にみると、PB系とB系の色相を多く抽出した。図4に相関色温度6500Kの狭帯域発光形蛍光ランプと広帯域発光形蛍光ランプの実験結果を示す。図4から、狭帯域発光形蛍光ランプと広帯域発光形蛍光ランプの照明光のもとでの白色として抽出した色票は、広帯域発光形蛍光ランプのほうが多かった。度数の検定であるt検定を行なった結果、有意差があることが明らかになった。また、抽出した色相は、3000Kと同様に、PB系、B系の色相が他の色相に比べて多かった。また、N系の色相が多く抽出された。相関色温度の違いによる抽出色相を比較すると、3000KではPB系とB系の色相を集中的に抽出しているのに対して、6500KではR系、YR系の色相も抽出しており、6500Kの場合は、抽出する色相の範囲が広がっていることが明らかとなった。

図3 実験結果（相関色温度3000Kの場合）

Fig.3 Whiteness evaluation values of the 84 munsell color sheets in the achromatic room under the narrow bands fluorescent lamps, (of which correlated colour temperatures is 3000K) and the broad band fluorescent lamps.

図4 実験結果（相関色温度6500Kの場合）

Fig.4 Whiteness evaluation values of the 84 munsell color sheets in the achromatic room under the narrow bands fluorescent lamps, (of which correlated colour temperatures is 6500K) and the broad band fluorescent lamps.

2.2 実験2：実空間における有彩色背景下での白色知覚

実際の居住空間では、複雑で不均一な有彩色背景で白色あるいは白色に近似した色彩を見ている。そこで、実験2では、実際の居住空間の環境下で、相関色温度の異なる狭帯域発光形蛍光ランプで照明した白色あるいは白色に近似した色票の白色知覚

について評価した。

2.2.1 実験条件

実験には、白色を基調色とした内装のリビング空間（約 17m²）と和室（約 10m²）を実験に用いた。照明器具は各室共、天井中央に乳白グローブ付直付け照明器具を取り付けた。光源の種類は、相関色温度 3000K、6700K の 3 波長域発光形蛍光ランプとした。テーブル面の水平面照度は 500lx に設定した。実験 1 では、単一の無彩色背景として N5 の背景を用いたが、実験 2 では、複雑で不均一な有彩色背景を用いた。有彩色背景には、住宅メーカー数社のモデルハウスの資料から住宅内装色としてモダンなリビングルームと和

(a) リビング空間

(b) 和室

(c) リビング背景シート

(d) 和室背景シート

図5 リビング空間と和室、背景として用いた有彩色背景シートの色度値
Fig.5 Chromaticities of colour chips under different fluorescent lamps in living areas and Japanese style living areas were plotted on the CIE1976L*a*b* chromaticity diagram.

室を選定し、それぞれの写真を 315 チップにモザイク処理してカラー印刷した。各チップの分光反射率を測定し、それぞれの有彩色背景の色度座標を算出した。図 5(a) (b) (c) (d) に、リビング空間と和室、および背景として用いた 2 種類の有彩色背景の各チップの CIE1976L*a*b* 表色系の a*b* 座標の値を示す。また、図 6 に実験状況を示す。被験者は実験 1 と同一の若年齢者 5 名とした。

(a) リビング空間

(b) 和室

図6 実験状況

Fig.6 A typical experimental scene.

2.2.2 実験手順

被験者をリビング空間または和室に入室させ、約 10 分間色順応させた。その後の実験手順は、実験 1 と同様であった。繰り返し回数は 5 回とした。

2.2.3 実験結果

図 7 に相関色温度 3000K の蛍光ランプ照明光のもとでのリビング空間と和室の実験結果を示す。横軸は色票の種類を色相別に示し、縦軸は抽出回数を示す。リビング空間での抽出回数と和室での抽出回数の結果を度数の検定である t 検定（5% 有意水準）した結果、有意差があることが明らかになった。色相別にみると、PB 系と P 系と N 系の色相が多く抽出された。

図7 実験結果（相関色温度 3000K の場合）

Fig.7 Whiteness evaluation values of the 84 munsell color sheets in the Living room and Japanese room under the fluorescent lamp with the correlated color temperature of 3000K.

図8 実験結果（相関色温度 6700K の場合）

Fig.8 Whiteness evaluation values of the 84 munsell color sheets in the Living room and Japanese room under the fluorescent lamp with the correlated color temperature of 6700K.

図8に相関色温度6700Kの蛍光灯照明光のもとでのリビング空間と和室の実験結果を示す。同様に、両者の度数の検定であるt検定を行なった結果、有意差があることが明らかになった。

3. 実験結果の比較

無彩色背景で行った実験1の結果と有彩色背景で行なった実験2の結果を比較した。図9、図10に実験結果を示す。相関色温度3000Kの場合、無彩色背景、有彩色背景共に、PB系、P系、N系の色相を多く抽出した。抽出色相の種類は、無彩色背景に比べて有彩色背景の方が多くなった。度数の検定であるt検定の結果、リビング空間と無彩色背景間には有意差はないが、和室とリビング空間および和室と無彩色背景間には有意差があることが分かった。

相関色温度6700Kの場合は無彩色背景、有彩色背景共に、PB系P系N系R系の色相を多く抽出している。度数の検定であるt検定の結果、リビング空間と無彩色背景間には有意差はないが、和室とリビング空間および和室と無彩色背景間には有意差があることが分かった。

図9 実験結果の比較(相関色温度3000Kの場合)

Fig.9 Whiteness evaluation values of the 84 munsell color sheets in the achromatic room and Living room and Japanese room under the fluorescent lamp with the correlated color temperature of 3000K.

図10 実験結果の比較(相関色温度6700Kの場合)

Fig.10 Whiteness evaluation values of the 84 munsell color sheets in the achromatic room and Living room and Japanese room under the fluorescent lamp with the correlated color temperature of 6700K.

4. 実験結果と色知覚属性値との対応

前述したように、1986年にCIE白色度指数が勧告され、これを基

にJIS8715が制定された。また、種々の照明光のもとでの物体色の見えを予測する色の見えモデルについては、多くの研究が行なわれ、CIEでは1997年にCIECAM97sが提案され、色知覚属性値が定められている。そこで、今回行なった実験結果と、白色度指数およびCIECAM97sで定められている色知覚属性値との対応について検討した。

図11(a)に実験1の相関色温度3000Kの場合の抽出回数と白色度指数の対応関係を、図11(b)に実験1の相関色温度6500Kの場合の抽出回数と白色度指数の対応関係をそれぞれ示す。図11(a)(b)に示すように、抽出回数と白色度指数との間の相関係数は相関色温度3000Kの場合は0.60、相関色温度6500Kの場合は0.30となり、いずれも相関性が低いことが分かった。

図11 無彩色背景の場合の抽出回数と白色度指数との対応

Fig.11 Correction between the experimental result and CIE whiteness index W in the achromatic room.

前述したように、向らは赤津らの主観評価実験結果を基にCIECAM97sの色知覚属性の一つであるクロマCとの対応について検討し、クロマCと主観評価結果との間には、相関係数-0.93の高い負の相関があることを明らかにしている。赤津らの主観評価実験では7種類の色票に限られているが、今回の実験では、ほぼ全色相にわたる84枚の白色または白色に近似した色票を用いている。そこで、今回の実験結果とクロマCとの対応関係について検討した。

図12(a)(b)に相関色温度3000Kと相関色温度6500Kでの無彩色背景の抽出回数とクロマCとの対応を示す。図12(a)(b)に示すように、相関色温度3000Kの場合の相関係数は-0.85、相関色温度6500Kの場合は-0.60となった。

図12 無彩色背景の場合の抽出回数とCIECAM97s Cとの対応

Fig.12 Correction between the experimental result and the modified CIECAM97s chroma C in the achromatic room.

また、表 1 に、実験 1 と実験 2 の白色の抽出回数と色知覚属性値の相関係数を示す。表 1 に示すように、抽出回数とクロマ C の相関係数は、向らが示した相関係数よりは低い、両者間には負の相関があることが分かった。また、a, b で表される中心座標からの距離との相関係数は、-0.57~-0.78 であることが分かった。

表 1 主観評価結果と色知覚属性値の相関係数

Table 1 Correction between the experimental result and the CIE whiteness index W, the modified CIECAM97s C,s,a,b in the achromatic room.

		無彩色背景		リビング空間		和室	
		3000K	6500K	3000K	6700K	3000K	6700K
白色度指数	W	0.60	0.30	0.54	0.47	0.68	0.35
	クロマ C	-0.85	-0.60	-0.57	-0.68	-0.74	-0.78
	飽和度 s	-0.84	-0.60	-0.60	-0.66	-0.76	-0.77
	ab で表される中心座標からの距離	-0.78	-0.64	-0.57	-0.76	-0.74	-0.77

5. 白色知覚の定量化への試み

5.1 白の許容率と等白色許容率軌跡の算出

実験 1 と実験 2 では、84 枚の色票をそれぞれの照明条件のもとで観察し、「白と感じる色票」または「白と感じない色票」に分類させた。言い換えれば、提示される色票を白として許容できるか否かを判定させたことになる。

既述したように、鈴木らは CIE1976L*a*b* 表色系の a*b* 座標上で第 3 象限と第 4 象限に分布する 44 枚の写真用カラーペーパーを色評価用高演色性蛍光灯（相関色温度 5000K）で照明し、それらの心理的白さを求めた実験から白色度式を提案している。一方、本実験で用いた提示色票の測色値は第 1 象限から第 4 象限までの広範囲に分布する色票を用いている。

居住空間における白色知覚について検討することを目的とした本研究では、全色相にわたる高明度、低彩度の色票を用いて一般照明で使用されている相関色温度が異なる蛍光灯を用いて実験を行った。したがって、使用光源や提示色票が異なる鈴木らの結果と直接比較することはできないが、白色領域にどのような差異があるかを検討することとした。

実験 1 と実験 2 の実験結果に対して統計的に有意な水準であるとみなされる許容率を有意水準 5% として χ^2 分布を用いて算出した。まず、実験 1 の結果について χ^2 分布で求めた各照明条件の結果を、明らかに白として許容されるのは 72% 以上の確率のもの、明らかに白ではないと判断されるのは 28% 以下の確率のもの、どちらでもないと判断されるのは 28%~72% の確率の 3 グループに分類した。図 13(a) (b) に相関色温度 3000K, 6500K（いずれも狭帯域発光形蛍光灯）の各色票の白の許容率の分布を CIE1976L*a*b* 表色系 a*b* 座標上に示す。ここで、●印は白としての許容率が 72% 以上、▲印は白としての許容率が 28%~72%、×印は白としての許容率が 28% 以下の色票を示す。

次に、白の許容率から等白色許容率の軌跡を求めた。中心座標は各照明条件のもとで「白」と「どちらでもない」と許容された色票の平均値とした。長軸は各色票の測色値 a*b* 値を用いて主成分分析を行い、固有値と固有ベクトルを求め、第 1 主成分を算出した。第 1 主成分から傾斜角を求め、中心座標を通る直線を求め、これを長軸とした。短軸は、長軸と垂直に交わり、中心座標を通る直線とした。等白色許容率軌跡は、以下に示す楕円（2 次曲線）の式を用いて算出した。楕円の式には求める定数 b, c, d があり、この

(a) 相関色温度 3000K

(b) 相関色温度 6500K

図 13 各色票の白の許容率の分布

Fig.13 The distribution of permissible rate to the perceptual whiteness in the achromatic room under the fluorescent lamp with the correlated color temperature of 3000K.

定数を決定させるために通る点を 3 点設定した。通る点 3 点は、長軸座標が最大で短軸座標が最小の点を 1 点とし、その点を中心 O' に関して対称にした点、または、長軸に関して線対称な点を 1 点とした。また、他の 1 点は短軸座標が最大で長軸座標が最小の点を 1 点とした。図 14(a) (b) に相関色温度 3000K, 6500K（狭帯域発光形蛍光灯）の等白色許容率軌跡を示す。

楕円の式 $b(a^* - a_0^*)^2 + c(b^* - b_0^*)^2 + 2db(a^* - a_0^*)(b^* - b_0^*) - e$

ここで, b, c, d : 求める定数

a_0^*, b_0^* : 中心座標

e : 中心座標からの距離が最小の a^*, b^* 値の L^* 値

図 14 等白色許容率軌跡

Fig.14 The Locus of the equal perceptual whiteness rate in the achromatic room.

次に, 実験 2 についても同様の手順で分析した. 図 15(a) (b)に 相関色温度 3000K (狭帯域発光形蛍光灯) の照明光のもとでの リビング空間と和室での白の許容率を, 図 16(a) (b)に相関色温度 6700K (狭帯域発光形蛍光灯) の照明光のもとでのリビング空間と和室での白の許容率をそれぞれ CIE1976L*a*b*表色系の a^*b^* 座標上に示す.

実験 1 の場合と同様の手順で, 図 15(a) (b), 図 16(a) (b)に示した白の許容率から等白色許容率軌跡を求めた. 図 17(a) (b)に相関色温度 3000K の照明光のもとでのリビング空間と和室の等白色許容率軌跡を, 図 18(a) (b)に相関色温度 6700K の照明光のもとでのリビング空間と和室の等白色許容率軌跡をそれぞれ示す.

図 14(a) (b), 図 17(a) (b), 図 18(a) (b)に示したように, 相関色温度 3000K と相関色温度 6700K の各照明条件下の等白色許容率軌跡は, ほぼ楕円形状となる. また, これらの等白色許容率軌跡の中心座標値を比較すると, 無彩色背景の相関色温度 3000K の場合を除いて, 中心座標は第 1 象限で a^* 値が 1 から 3, b^* 値が 1 から 3 の範囲に布置されることが明らかになった.

鈴木らの実験では, 白としての許容率が高い色の範囲は a^* 値が -1 から 1, b^* 値が -4 から -7 の領域にあり, 青方向にずれた領域であったのに対して, 本実験による白としての許容率が高い領域は, PB 方向から Y 方向まで b^* 軸方向に広い範囲となっている. 楕円で表示した等白色許容率軌跡の領域は, 相関色温度 3000K の照明条件に比べて相関色温度 6700K の照明条件の方が大きくなり, また, 無彩色背景条件に比べて, 実空間における有彩色背景条件の方が白色領域が大きくなることが明らかになった.

(a) リビング空間

(b) 和室

図 15 相関色温度 3000K の場合の各色票の白の許容率

Fig.15 The distribution of rate of permissible rate to the perceptual whiteness in the Living room and Japanese room under the fluorescent lamp with the correlated color temperature of 3000K.

(a) リビング空間

(b) 和室

図 16 相関色温度 6700K の場合の各色票の白の許容率

Fig.16 The distribution of rate of permissible rate to the perceptual whiteness in the Living room and Japanese room under the fluorescent lamp with the correlated color temperature of 6700K.

(a) リビング空間

(b) 和室

図 17 相関色温度 3000K の場合の等白色許容率軌跡

Fig.17 The Locus of the equal perceptual whiteness rate in the Living room and Japanese room under the fluorescent lamp with the correlated color temperature of 3000K.

(a) リビング空間

(b) 和室

図 18 相関色温度 6700K の場合の等白色許容率軌跡

Fig.18 The Locus of the equal perceptual whiteness rate in the Living room and Japanese room under the fluorescent lamp with the correlated color temperature of 6700K.

5.2 白色知覚の定量化の試み

前述したように、[白]と[どちらでもない]として評価された色票の色度座標から導いた等白色許容率軌跡の形状は、楕円で表されることが分かった。また、色知覚属性値と主観評価結果との対応について検討した結果、クロマCおよびa, bで表される中心座標からの距離がそれぞれ対応することが明らかになった。そこで、「白色知覚は、色みの強さに対応するクロマと色みの方向に関係する」と仮定して白色知覚の定量化を試みた。CIE1976L*a*b*表色系のa*, b*座標のa*, b*でも明らかなように、色度座標の原点からの距離が離れる色度ほど色みが強くなる。クロマCが低くなれば、色みの強さが弱まり、白色と知覚される割合が高くなることが実験から明らかになった。また、色みの方向は知覚される色相を表わし、色相の違いによって白色知覚が異なることが今回の実験でも明らかになった。

そこで、まず、5.1で述べた各実験条件での[白]または[どちらでもない]と評価された色票のa*b*値と中心座標との距離rとクロマCとの対応について検討した。その結果、両者間の相関係数はきわめて高いことが分かった。全ての条件下でもクロマCと距離rとの相関が0.80以上であることから、中心座標からの距離rによって色みの強さをあらわすこととした。距離rが大きい値になれば、その照

明光下での白色知覚領域が大きくなるを意味しており、5.1で述べた等白色軌跡に囲まれた楕円の面積で推定することができる。楕円の面積 S は、(1)式で表される。

$$S = \frac{\alpha}{2} \times \frac{\beta}{2} \times \pi \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 α : 等白色許容率軌跡の長軸
 β : 等白色許容率軌跡の短軸

(1)式の α (長軸)と β (短軸)は、等白色許容率軌跡の式を用いて求めた定数である。

各実験条件で白またはどちらでもないと抽出された色票の密度を観察すると、(1)式から導出した各条件の楕円の面積 S がほぼ同じであっても、図19に示すように抽出される色票の密度が異なることが分かった。そこで、白色知覚の抽出率 a を導出し、(2)式に示すような楕円体の体積を C とした。

(a) 無彩色背景 (b) リビング空間 (c) 和室

図19 各色票の白の許容率と抽出回数のグラフ (相関色温度 6700K)

視点 $[a^*, b^*, \text{抽出回数}] = [5, -5, 2]$

Fig.19 The distribution of density of Perceptual whiteness in the different environmental condition under the fluorescent lamp with the correlated color temperature of 6700K.

$$C = \frac{1}{2} \times \frac{4}{3} \times \frac{\alpha}{2} \times \frac{\beta}{2} \times a \times \pi \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 a : $\frac{\text{実験結果 (抽出回数)}}{\text{等白色許容率軌跡の中心 } O \text{ から各 } a^*, b^* \text{ 値までの距離}}$ の平均値

(2)式の抽出率 a は、図15(a)(b)、図17(a)(b)、図18(a)(b)に示した相関色温度3000Kと相関色温度6700Kの各照明条件下の等白色許容率軌跡の内の中心座標 O から、[白]と[どちらでもない]と選ばれた色票の色度座標までの距離を r として、各色票の r の逆数と抽出回数の積を算出し平均値を a とした。

次に、色みの方向について検討する。白色と知覚される色みの方向は、実験条件によって異なっている。図3、図4、図7、図8に示した狭帯域発光形蛍光灯の実験結果より、相関色温度3000Kでは、いずれの実験空間でも3PB系の色相を白色と多く知覚し、相関色温度6700Kでは、10PB系の色相を白色と多く知覚した。このように、相関色温度の上昇により白色と知覚する色相に推移が見られたことを明らかにした。そして、図15、図17、図18に示したように、相関色温度や背景条件によって等白色軌跡の長軸方向の傾斜角度が異なる。したがって、傾斜角度を色みの方向に対応させることとした。さらに、図19に示すように、等白色許容率軌跡を囲む楕円面積が等しくても、抽出される色票の密度が異なるので、抽出率を考慮して定量化することとした。

そこで、(2)式に色みの方向を表す傾斜角度の変化を加えて楕円体の体積 C を算出し、これを白色知覚指数 Perceptual Whiteness

Index (PWI) とした。

$$\text{白色知覚指数 (PWI)} = \frac{1}{2} \times \frac{4}{3} \times \frac{\alpha}{2} \times \frac{\beta}{2} \times \sin \theta \times a \times \pi \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $1/2$: 楕円体の体積の上半分

(3)式の θ は、等白色許容率軌跡の長軸の傾斜角度を表わし、メトリック色相角を用いて設定した。

$$\theta = H_{ab}^{\circ} = \tan^{-1} \left(\frac{b^*}{a^*} \right) \times \frac{180}{\pi}$$

(3)式に示すように、白色知覚指数 Perceptual Whiteness Index (PWI) は、白色知覚領域から導出した楕円の面積 S 、色みの方向を表す傾斜角度 θ 、抽出率 a から構成されている。表2に各実験条件下での白色知覚指数を、また主観評価値と白色知覚指数との対応は図20に示す。図20に示すように、相関係数0.80で高い相関関係を得ることができた。なお、図9で示したように、無彩色背景下での相関色温度3000Kの場合は、他の実験条件に比べて抽出回数が少なくなった。特に、R, YR, Y系の色票の抽出回数が少なくなっており、結果として図20に示すように白色知覚指数が小さくなった。以上のことから、本実験条件の範囲内で白色知覚の定量化の妥当性を見出すことができた。

図20 主観評価結果値と白色知覚指数 (PWI) との対応

Fig.20 Relationship between the experimental results and the Perceptual Whiteness Index.

表2 係数 α , β , a , θ と白色知覚指数 (PWI), 主観評価結果値と白色知覚指数 (PWI) の相関係数

Table 2 Correction of the experimental result and Perceptual Whiteness Index.

実験空間		相關色 温度	α (長軸)	β (短軸)	a (抽出率)	θ (色相角)	PW I
無彩色背景		3000K	3. 33	3. 36	9. 29	0. 40	87. 09
		6500K	4. 90	2. 77	10. 75	0. 96	293. 63
有彩色 背景	リビング 空間	3000K	4. 67	2. 64	9. 84	0. 92	233. 44
		6700K	5. 14	2. 25	10. 33	0. 94	235. 76
	和室	3000K	6. 52	2. 59	11. 22	0. 89	353. 43
		6700K	6. 15	2. 93	7. 47	0. 96	270. 13
相關係数							0. 80

6. おわりに

無彩色背景および実空間を想定した有彩色背景条件下で、相関色温度の異なる蛍光灯を用いた白色あるいは近似白色の白色知覚を検討した。その結果、1)相関色温度3000Kの無彩色背景条件では、狭帯域発光形蛍光灯のほうが広帯域発光形蛍光灯よりも白と判断する色票の抽出率は高い。2)相関色温度6500Kの無彩色背景条件では、広帯域発光形蛍光灯のほうが狭帯域発光

形蛍光ランプよりも白と判断する色票の抽出率は高い。3)実空間における有彩色背景条件では、無彩色背景条件よりも白と判断する色票の抽出回数が多い。4)実験結果を基に白の許容率を算出し、楕円形状で表される等白色許容率軌跡を導出した。5)今回の実験で得た白色知覚領域から導出した楕円の面積 S 、色みの方向を傾斜角度 θ 、抽出率 a から、白色知覚指数 Perceptual Whiteness Index (PWI) を導出した。6) 白色知覚指数 Perceptual Whiteness Index (PWI) と今回の実験で得た主観評価値との間に高い相関を得た。

今回の実験では、表2に示したように、照明光による影響と背景による影響はそれぞれの係数に含まれているが、個々の影響を分離してない。背景による色対比効果の影響についてはさらに検討する必要がある。また、白色知覚と明るさ知覚との関連性や加齢による白色知覚の影響など、今後の課題として取り組んでいきたい。

参考文献

- (1) JISZ8715(1991): 白色度—表示方法。
- (2) 内田洋子: CIE 白色度式についての一考察, 色学誌, 14-12, pp. 106-113 (1990)。
- (3) 内田洋子: 蛍光増白試料の視感判定と白色度評価に関する研究, pp. 97-119 (1994)。
- (4) 馬場護郎: 白さの定量的評価, 光学, 10-1, pp. 11-17 (1981)。
- (5) 鈴木恒男: 知覚的白さの許容度に基づく白色度, 色学誌, 14-2, pp. 114-121 (1990)。
- (6) 鈴木恒男, 淵田隆義, 小松原仁, 坂田勝亮: 光源色での白色度の研究, 照学誌, 77-2, pp. 9-12 (1993)。
- (7) 鈴木恒男, 知覚的白さの定量化に関する試み, 色学誌, 23-3, pp. 168-175 (1999)。
- (8) 片山一郎, 飯山真正, 栢見和考: 照明光の分光組成が知覚白色度に与える影響, 照学誌, 85-5, pp. 338-345 (2001)。
- (9) 片山一郎, 栢見和考, 青木務: Chromatic Strength と知覚白色度の関係, 照学誌, 86-5, pp. 286-291 (2002)。
- (10) M. Ayama, T. Akatsu, E. Toriumi, K. Mukai and S. Kanaya: Whiteness Perception under Different Types of Fluorescent Lamps, Color Res. Appl. 28, pp. 96-102 (2003)。
- (11) 館祐二, 金谷末子, 阿山みよし, 向健二: 種々の照明光下における白色領域に関する検討, 第 32 回照明学会全国大会予稿集 (1999)。
- (12) 館祐二, 金谷末子, 阿山みよし, 向健二: 有彩色背景下における白色感に関する検討, 第 34 回照明学会全国大会予稿集 (2001)。
- (13) S. Kanaya, M. Ayama, L. Halonen, M. Eloholma and K. Mukai: A comparative study of whiteness perception in Japan and Finland, International Lighting Congress 2001 Proceeding, pp. 427-432 (2001)。
- (14) 江田哲也, 阿山みよし, 金谷末子, 向健二: 電球色及び昼光色蛍光灯照明下における知覚的白色領域, 照学誌, 89-2, pp. 91-99 (2005)。

(受付日 2005 年 2 月 25 日/採録日 2005 年 6 月 3 日)

太田 亜紀子 (正会員)
日立物流ソフトウェア株式会社
〒140-0013
東京都品川区南大井 6-26-1
1980 年生まれ。2003 年 3 月金沢工業大学工学部経営工学科卒業, 2005 年 3 月金沢工業大学大学院工学研究科博士課程前期システム設計工学専攻修了。同年 4 月日立物流ソフトウェア株式会社に入社。照明学会会員。

金谷 末子 (専門会員)
金沢工業大学
環境・建築学部建築都市デザイン学科
〒921-8812
石川県石川郡野々市町扇が丘 7-1
1939 年生まれ。1962 年同志社大学工学部電気工学科卒業。同年松下電器産業株式会社に入社, 照明研究所に配属。1998 年金沢工業大学教授。博士(工学)。現在, 同大学 環境・建築学部建築都市デザイン学科で光環境の評価, 加齢と光環境, 景観照明等の研究と教育に従事。照明学会理事(1995-1997), 日本照明委員会副会長(2003-), 1998 年照明学会賞, 2003 年 CIE Award 受賞。照明学会, 日本照明委員会, 日本建築学会, 日本色彩学会, 日本人間工学会, 日本視覚学会 各会員。

阿山 みよし (専門会員)
宇都宮大学大学院工学研究科
情報制御システム科学専攻
〒321-0904
栃木県宇都宮市陽東 7-1-2
1954 年生まれ。1983 年東京工業大学大学院総合理工学研究科物理情報工学専攻博士課程修了。宇都宮大学工学部助教授を経て現在大学院工学研究科教授。工学博士。視覚情報処理, 色彩科学, 視聴覚相互作用, 自動車運転者の視覚認知特性の研究と教育に従事。照明学会, 日本照明委員会, 日本視覚学会, 応用物理学会, 日本光学会, 日本色彩学会, 映像情報メディア学会 各会員。

向 健二 (正会員)
松下電器産業株式会社 照明社
〒569-1143
大阪府高槻市幸町 1-1
1967 年生まれ。1992 年 3 月大阪大学大学院工学研究科建築工学専攻博士前期課程修了。同年 4 月松下電器産業株式会社に入社。現在, 照明社 LED 事業化推進グループにおいて照明用白色 LED モジュールの開発に従事。照明学会, 日本照明委員会, 日本建築学会 各会員。