

論文

一般色観察光源特性の許容度—その理論的考察

Theoretical study on the tolerance level of light sources for ordinary observation of surface colors

酒井 英樹

Hideki Sakai

大阪市立大学大学院

Osaka City University

納谷 嘉信

Yoshinobu Nayatani

大阪電気通信大学名誉教授

Osaka Electro-Communication University

Abstract

Designers and ordinary people who are interested in color design seldom use the daylight simulator D65 as a light source for ordinary observation of surface colors. Instead, they usually use a common white fluorescent lamp. Color shifts do exist under such lamps. However, for the purpose of discussing color design, it seems that some color shifts do not cause serious problems unless one misjudges the hue and the tone of a color under observation. Then, what are the acceptable ranges of the correlated color temperature (T_{cp}) and the general color rendering index (R_a) of a light source for ordinary observation of surface colors? We studied theoretically and showed that the acceptable ranges are $R_a \geq 70$ for $T_{cp} \geq 6000$ K or $R_a \geq 80$ for $T_{cp} \geq 4000$ K. Under a light source within these ranges, one can judge the hue and the tone of a color adequately. We explained the computational procedure with graphic representation of the dependence of the color shift on the correlated color temperature and the general color rendering index of a light source.

Key words; hue-tone system, correlated color temperature, color rendering index, chromatic adaptation transform, perceived lightness, degree of vividness

要 旨

デザイナーや色に関心のある一般の人が、D65などの標準の光に相当する光源を使って、色を観察することは少ない。多くの場合、一般的な白色蛍光灯を使っている。一般的な蛍光灯の下では、色ズレは避けられないだろう。しかし、それを問題視することは少ないように思われる。これは、配色デザイン等を考えることが主な目的である日常的な色彩観察では、厳密な色比較は必要とされておらず、観察している色の色相が大きく変化してしまったり、トーンを隣接する別のトーンと見間違えてしまったりさえしなければ、多少の色ズレは許容されるからだと考えられる。では、色相やトーンを正しく確認することができる光源の相関色温度 T_{cp} 、平均演色評価数 R_a の許容範囲はどの程度か。理論的な評価を行ったところ、 T_{cp} が6000 K以上で R_a が70以上、または、4000 K以上で R_a が80以上であれば、色相、トーンとも大きく崩れることはなく、日常的な色彩観察のための光源としては十分であることが判った。本報では、その評価方法の詳細を述べるとともに、相関色温度および演色性の低下による色ズレの大きさを図示する。

キーワード: 色相・トーン系, 相関色温度, 演色性, 色順応予測式, 知覚明度, 知覚クロマ

1. 序論

物体色の色比較を厳密に実施するには、照明光として、標準の光CまたはD65を実現する常用光源下で観察すべきである。その光源の選定基準も与えられている¹⁾。

しかし、現実的には、それは必ずしも容易ではない。また、日常の、色の観察では、それほどの厳密さを要しないことも多い。このため、Munsell色票や、PCCS等の色票の観察も、一般的に屋内での白色蛍光灯(その相関色温度約4000K、平均演色評価数Ra=60~80程度)下で実施され、使用目的への妥当性を評価している場合も多い。その際、観察光源と、標準の光との差を、問題視することは少ないように思われる。このことは、標準の光と観察光源間の、若干の色温度の差や演色性の変化が、一般観測に目立った違和感を与えないのではないか、という仮説に導く。

本報は、以上の議論を考慮して、つぎの3つの関連課題を明らかにすることを目的とする。

1) 日常的な色彩観察に必要な、観察光源の具備すべき特性の明確化。

上述は、単に経験的推測である。厳密な色比較を目的としない日常的な色彩観察のための光源(以下、一般色観察光源と記す)として、どの程度の色温度、演色性であれば許容されるのかについて、理論的、実験的な手段によって定量的に確かめることが必要である。即ち、標準の光と観察光源(各種色温度及び演色性を有する)の間で、どの程度の色知覚差が起こるか、許容できるかを明らかにする。本報ではまず、理論的な考察を行う。これは、色順応効果の予測が関係する。観察実験は続報で述べる。

2) 評価用サンプルの選定。

観察光源の許容度を評価するためにどのような色サンプルを用いるべきか。通常、Munsell系の基本10色相を有し $V/C = 5/10$ 一定値の色票群等を選ぶであろう。しかし、それらは、視感反射率Y値は一定でも、同一知覚明度を与えない。むしろ、標準光下で、色相によらず、等知覚明度、等知覚クロマ(等鮮やかさ度)を有するサンプル群の利用が、つぎの理由から望ましいと考える(知覚明度、知覚クロマが同一の色群は同一のトーンとなる²⁾)。評価実験を考えると、試験光源下におけるサンプル間のトーンの崩れを判断する方が、異なる色相間の比較が難しい一定Munsell明度・クロマからの色知覚偏差を評価するよりも容易であろうと思われる。これは、さらに、カラーデザインにとっ

て重要な概念であるトーンが正しく保たれる光源の相関色温度、演色性の範囲を明らかにするという、実用上、意義深い問題である。本報では、この条件を満足するサンプル群を用いた。

3) Helmholtz-Kohlrausch効果への観察光源(色温度、演色性の変化)の影響の明確化。

課題2)に関連して、Y値が一定でも、知覚明度が異なるという現象は、Helmholtz-Kohlrausch効果(以下、H-K効果と記す)として知られ、長年、現行のCIE測光・測色の基礎分野の課題として研究されてきた。その問題は、納谷等により解決され³⁾、さらにNayatani Theoretical Color Order System(以下、NT系と記す)として発展・提案された²⁾。H-K効果の研究は、全て、標準の光CまたはD65下で実施された。本研究は、各種試験光源下のH-K効果の推定に関係する。理論的には、色順応を考慮するH-K効果の予測問題である。全く新しい課題である。

2. 評価条件及び評価手法

評価に用いた色サンプル、光源、評価手法を述べる。

2.1 評価に使用した色サンプル

NT系で $[w=bk=0, C=10]$ を有する10サンプルを選定した。NT系において、その座標値[白みw, 黒みbk, クロマC]が同一なら、色相によらず、全ての色は、ほぼ同一知覚明度、同一知覚クロマを与える²⁾。それらのMunsell値を、表1の第1列に示す。それらは、サンプル間にMunsell明度で最大3.8という大きな差があるにもかかわらず、標準の光(以下、C光)の下で近似的に等知覚明度、等知覚クロマを有する。いわゆるPCCSと同じ概念の、同一トーンを有する。(文献2のFig.A-3に10サンプルの色刷りされた色相環が掲載されており、本評価サンプルが同一トーンであることを目で確かめることができる。)

ここで、トーンの定義について、従来、トーンとは、明度と彩度の複合概念であり、鮮やかさを共通要素とする色の調子である、と説明されてきた。この従来の定義では、トーンと測色値との関連が明確ではない。しかし、納谷²⁾の色の見え及び色覚に基づく研究によって、白み、黒み、色みの強さが同じ色は、色相によらず、等知覚明度、等知覚クロマとなり、それが同一トーンになることが示された。これにより、測色値との関連が明確になり、トーンを定量的に取り扱えるようになった。つまり、同一トーンとは、知覚明度、知覚

表1 等知覚明度10サンプルのMunsell値およびA光に対する計算例

評価サンプル [H V /C]	A光下におけるxyY			色順応補正後のxyY			色順応補正後のHV/C	
	[x]A	[y]A	[Y]A	[x]A(C)	[y]A(C)	[Y]A(C)	[H V /C]A(C)	
5R 4.6 /10	0.5959	0.3556	20.54	0.4934	0.3351	20.29	6.80 R	5.1 /10.6
5YR 5.9 /10	0.5714	0.4012	33.69	0.4841	0.4015	33.44	5.17 YR	6.4 /10.0
5Y 7.7 /10	0.5199	0.4492	56.94	0.4311	0.4499	56.80	4.67 Y	8.0 / 9.3
5GY 7.0 /10	0.4641	0.4939	41.95	0.3593	0.4830	42.01	6.42 GY	7.0 / 9.2
5G 5.5 /10	0.3164	0.5211	20.55	0.2002	0.4095	20.74	8.59 G	5.2 /11.6
5BG 5.3 /10	0.2487	0.4736	17.57	0.1573	0.3250	17.78	5.15 BG	4.8 /12.1
5B 4.7 /10	0.2197	0.3749	12.56	0.1519	0.2291	12.73	3.62 B	4.2 /10.0
5PB 4.2 /10	0.3057	0.3211	10.78	0.2083	0.2007	10.85	5.16 PB	3.9 / 8.1
5P 3.9 /10	0.4638	0.3095	11.74	0.3259	0.2217	11.66	9.62 P	4.0 / 9.1
5RP 4.1 /10	0.5604	0.3312	15.28	0.4306	0.2780	15.09	8.67 RP	4.5 /10.0

クロマ一定の色相群のことをさす。

なお、後の色順応予測式の計算で必要となる試験光源下における色サンプルの測色値は、上述で与えられたサンプルのMunsell 値から側垣、高浜、納谷の提案方法⁴⁾を用いて分光反射率を推定し、その推定された分光反射率から求めた。

2.2 評価に用いた光源の種類

相関色温度及び演色性の違いによる色知覚の変化(トーンの崩れへの影響)を評価するために、Munsell 系が定義されているC光を基準光とし、試験光として、D65, D50, A, および、代表的な蛍光灯12種(JIS Z 8719)を選定した。各試験光の、色温度・演色性区分、光源名、色度(x,y), 相関色温度 T_{cp} , 平均演色評価数Raを表2の1～6列に示す。

2.3 使用した色順応予測式

本研究実施には、各試験光の色度及び順応輝度の変化が、色の見えに及ぼす影響(色順応効果)を考慮する必要がある。色順応予測式として、CIECAT94の改訂版であるCIECAT94LAB(ノイズ成分 $n=0.1$, 不完全順応係数を導入している)を用いた⁵⁾。

2.4 評価手法

一般色観察光源としての妥当性の評価手法を詳述する。

Munsell値(色相, 明度, クロマ: H V/C)が定義されているC光下の色の見えを基準とする。そして、試験光源 t 光下における色の見えは、上述の色順応予測式

を用いてC光下における対応色[H V/C]t(C)として表す⁶⁾。こうすることで、異種光源間における色の見えの差を同一の光源(C光)下におけるMunsell 値の偏差として評価することができる。

以下、基準C光下においてMunsell 値[H V/C]をしめす物体色を、任意の試験光源t下で観察する場合の色の見え[H V/C]t(C)(色順応補正後)を求める計算手順をしめす。

- 1) 与えられたC光下のMunsell値[H V/C]から既述の方法⁴⁾によって、色サンプルの分光反射率を推定する。
- 2) 推定分光反射率から、任意の試験光源t下における測色値(x,y,Y)tを求める。
- 3) (x,y,Y)tから、CIECAT94LABを用いて、基準光Cへ色順応変換を行う。C光下における対応色(x,y,Y)t(C)を得る。なお、色順応変換の条件は、基準照度、試験照度とも1000lx, 順応背景は灰色($Y_0=20$, 順応輝度 63.66cd/m^2)とした。
- 4) (x,y,Y)t(C)をJIS Z 8721付表に従って[H V/C]t(C)(色順応補正後)へ変換する。

計算例として、試験光源がA光、色サンプルが[H V/C]=5.0R 4.6/10の場合の計算過程を示す。

- 1) 分光反射率の推定(計算手順1に従って算出。結果は省略。)
- 2) A光下における測色値:
(x,y,Y)A=(0.5959,0.3556,20.54)
- 3) CIECAT94LABによるC光への、色順応補正後の測色値:(x,y,Y)A(C)=(0.4934,0.3351,20.29)
- 4) 色順応補正後の対応色のMunsell値:

$$[HV/C]A(C) = 6.80R\ 5.1/10.6$$

C光下でMunsell値5.0R 4.6/10の色サンプルは、A光下で、C光下の対応色として6.80R 5.1/10.6となる。よって、A光下では、C光にくらべ色相 $\Delta H = +1.8$ 、明度 $\Delta V = +0.5$ 、クロマ $\Delta C = +0.6$ だけ偏差が生ずる。

上記の手順に従って、Munsell値から推定される分光反射率から求めた各種試験光下の10サンプルの測色値を、色順応予測式を用い、C光下へ色順応変換する。そして、C光へ変換後の測色値を、再びMunsell値で表す。こうして得られた試験光下のMunsell値(色順応補正後)は、上記の例のように当然基準C光下のMunsell値から、各属性ごとに偏差を生ずる。偏差が大きい程、その試験光は、一般色観察光源として不適切となる。

3. 計算結果

例として、試験光源A光について、表1の第2列以降に、2章で説明した計算過程を示した。他の試験光についても同様に計算を実施したがその計算過程は省略する。

代表的な試験光源について、各サンプル毎に、基準C光下におけるMunsell値(●)から、各試験光源下の色順応補正後のMunsell値(○)がどれだけ色属性偏差

を生ずるかを、図1～5に、(a)色相-クロマの偏差図、(b)色相ごとの明度偏差図として示す。その他の試験光源については、サンプル間の最大偏差のみ、表2の7～9列に示した。

4. 考察-計算結果の検討-

4.1 試験光評価基準の設定

JIS Z 8721で定められている標準色票の色の許容差は、 $V > 3.5$ 及び $C \geq 6$ の領域において、 $\Delta H = \pm 1$ 、 $\Delta V = \pm 0.1$ 、 $\Delta C = \pm 0.4$ である。これは、標準色票として、許容される限界である。

厳密な色比較では、この許容差が、要求されよう。しかし、日常遭遇する色観察では、その許容差は今少し大きく取れるであろう。暫定的に、つぎの2段階を設定した。

クラスAの試験光：各属性偏差が、 $\Delta H = \pm 3$ 、 $\Delta V = \pm 0.3$ 、 $\Delta C = \pm 1.0$ 以内。(JIS許容差の約3倍)
クラスBの試験光：各属性偏差が、 $\Delta H = \pm 6$ 、 $\Delta V = \pm 0.6$ 、 $\Delta C = \pm 2.0$ 以内。(JIS許容差の約6倍)

ここで、本研究は、トーン(知覚明度および知覚クロマが色相によらず一定であること)が、正しく保たれる照明光の相関色温度、演色性の範囲を理論的に明らか

表2 試験光のC光からの色属性偏差および色観察光源としての評価

色温度・演色性区分		光源	x	y	Tcp(K)	Ra	ΔHlmax	ΔV(R)	ΔC(R)	評価
(基準光)		C	0.3101	0.3162	6774	—	—	—	—	—
高色温度	高演色形	D65	0.3127	0.3290	6504	100	0.24	0.05	0.27	A上位
		F7	0.3129	0.3292	6500	90	1.33	0.15	1.18	
	低演色形	F1	0.3131	0.3371	6430	76	2.61	0.26	2.36	A下位
		F5	0.3138	0.3452	6350	72	2.97	0.33	2.70	
中間色温度	高演色形 (Ra≥90)	D50	0.3457	0.3585	5003	100	1.17	0.20	1.04	A上位
		F8	0.3458	0.3586	5000	95	1.17	0.21	0.99	
		F9	0.3741	0.3727	4150	90	1.64	0.53	0.86	
	高演色形 (Ra≥80)	F10	0.3458	0.3588	5000	81	3.42	0.43	2.46	A下位
		F11	0.3805	0.3769	4000	83	3.06	0.61	2.35	
	低演色形	F2	0.3721	0.3751	4230	64	4.54	0.79	2.75	B
		F6	0.3779	0.3882	4150	59	5.08	0.82	3.17	
		F3	0.4091	0.3941	3450	57	5.64	1.17	3.03	
低色温度	高演色形	A	0.4476	0.4074	2856	100	4.62	1.05	3.95	B
		F12	0.4370	0.4042	3000	83	3.74	1.06	3.32	
	低演色形	F4	0.4402	0.4031	2940	51	6.40	1.51	3.20	範囲外

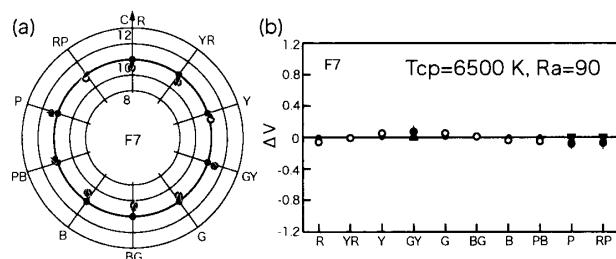


図1 高色温度・高演色形試験光F7における色属性偏差

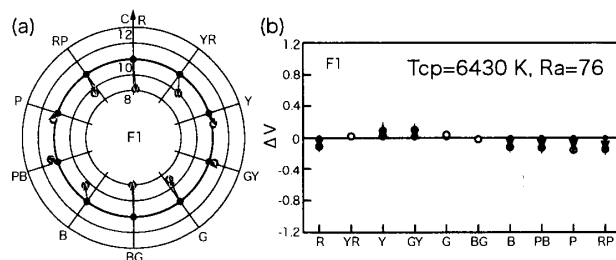


図2 高色温度・低演色形試験光F1における色属性偏差

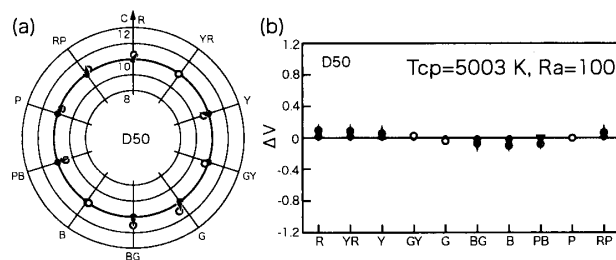


図3 中間色温度・高演色形試験光D50における色属性偏差

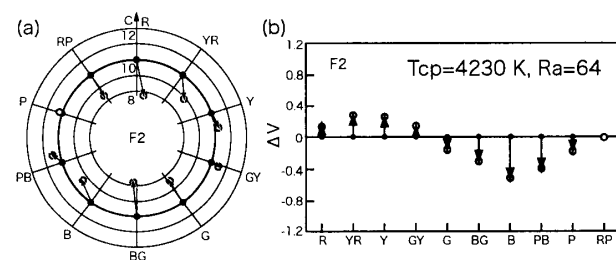


図4 中間色温度・低演色形試験光F2における色属性偏差

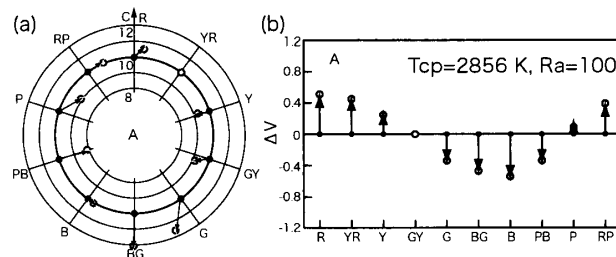


図5 低色温度・高演色形試験光Aにおける色属性偏差

にすることを目的としている。10色相サンプルのトーンの崩れは、色相環全体を観察して評価される。このため、明度とクロマに対しては、正または負の各最大偏差の範囲 $\Delta V(R)$ 、 $\Delta C(R)$ を取ることにした。これらが、色相環全体としての、各試験光下のトーンの崩れ(知覚明度一定または知覚クロマ一定条件の不成立)に対応すると考えた。色相に関しては、トーンの崩れとは無関係であるが、色相の偏差が大きくても、観察光源としては不適である。ただし、明度、クロマが量的属性であるのに対して、色相は質的属性であるため、偏差の正負は知覚的に判りにくい。そこで、色相の許容度は、範囲ではなく、最大偏差の絶対値 $|\Delta H|_{\max}$ を採用した。つぎの基準となる。

クラスAの試験光：各属性偏差が、 $|\Delta H|_{\max}=3$ 、 $\Delta V(R)=0.6$ 、 $\Delta C(R)=2.0$ 以内。(JIS許容差の約3倍)
 クラスBの試験光：各属性偏差が、 $|\Delta H|_{\max}=6$ 、 $\Delta V(R)=1.2$ 、 $\Delta C(R)=4.0$ 以内。(JIS許容差の約6倍)

クラスAは良好な一般色観察光、クラスBは許容可能な一般色観察光と考える。以上の範囲外は観察光源として不適当と考える。しかし、それらの試験光あるいは、対応する光源を、使用してはいけないということではない。

以下、色温度および演色性の区分ごとに一般色観察光としての評価を検討する。

4.2 高色温度の試験光

色温度6500K近傍で、高演色形試験光と、低演色形試験光を考える。

4.2.1 高演色形試験光：D65 ($T_{cp}=6504K$, $R_a=100$)およびF7 ($T_{cp}=6500K$, $R_a=90$)

まず、D65光について、各属性の偏差評価値は、それぞれ $|\Delta H|_{\max}=0.24$ 、 $\Delta V(R)=0.05$ 、 $\Delta C(R)=0.27$ である(表2)。これは、既述のJIS Z 8721で定められている標準色票の色の許容差よりも小さい。即ち、D65光下とC光下における色の見えの差は小さく、ほぼ一致することがわかる。D65では、期待通り色属性偏差はほとんどなく、クラスA最上位に区分される。

つぎに、高演色形蛍光灯を代表するF7下における10サンプルの色属性の偏差を図1に示す。各属性の偏差評価値は、 $|\Delta H|_{\max}=1.33$ 、 $\Delta V(R)=0.15$ 、

$\Delta C(R) = 1.18$ である。標準色票の色の許容差と同程度であり、三属性ともクラスAの要件をすべて満たす。クラスA上位を占める。

4.2.2 低演色形試験光：F1 ($T_{cp}=6430K$, $R_a=76$)

高色温度の一般型蛍光灯を代表する試験光F1の色属性の偏差を図2に示す。各属性の偏差評価値は、
 $|\Delta H|_{\max}=2.61$, $\Delta V(R)=0.26$, $\Delta C(R)=2.36$ である。F1光の相関色温度は6430 KとC光に近いが、 $R_a=76$ と平均演色評価数が低い。このため、図2(a)から判るように、半数の色サンプルについて、クロマの低下が目立つ。しかし、色相、明度の偏差の変動は小さく、演色性低下の影響はうけにくい。総合的な評価としては、クラスAをほぼ満足すると考えて良いであろう。

4.3 中間色温度の試験光

色温度4000~5000Kで、高演色形試験光と、低演色形試験光を考える。

4.3.1 高演色形試験光：D50 ($T_{cp}=5003K$, $R_a=100$) および F9 ($T_{cp}=4150K$, $R_a=90$)

まず、補助標準の光D50について、色属性の偏差を図3に示す。各属性の偏差評価値は、それぞれ
 $|\Delta H|_{\max}=1.17$, $\Delta V(R)=0.20$, $\Delta C(R)=1.04$ である。 $R_a=100$ にも拘らず、4.2.1節の高色温度蛍光灯F7と同程度の偏差である。基準C光にくらべて、色温度が5003Kと低いことが偏差が生じた原因と考えられる。しかし、三属性ともクラスAの要件をすべて満たし、クラスA上位に分類される。

つぎに、試験光F9の偏差評価値は、 $|\Delta H|_{\max}=1.64$, $\Delta V(R)=0.53$, $\Delta C(R)=0.86$ である(サンプルごとの偏差図は省略)。こちらは明度の偏差が目立ってくるが、高演色形であるため、色相、クロマの偏差は小さく、高色温度試験光と遜色ない。全ての色属性でクラスAを満足する。クラスA上位である。

4.3.2 低演色形試験光：F2 ($T_{cp}=4230K$, $R_a=64$)

中間色温度の一般蛍光灯を代表する試験光F2の色属性の偏差を図4に示す。偏差評価値は、 $|\Delta H|_{\max}=4.54$, $\Delta V(R)=0.79$, $\Delta C(R)=2.75$ である。相関色温度は4230Kと一般白色蛍光灯に対応する。これは、基準C光に比べて低く、色相と明度の偏差が目立っている。また、 $R_a=64$ という演色性の低

さから、クロマの低下が目立つ。色相、明度、クロマともクラスAの要件を満たさない。しかし、その下位に近い。一般色観察光として、良好とはいえないが許容できよう。クラスBに分類される。

4.4 低色温度の試験光

3000K近傍の試験光として、A、および、F4を取り上げる。A光は、現行の演色評価システムでは、 $R_a=100$ である。

4.4.1 高演色形試験光：A光 ($T_{cp}=2856K$, $R_a=100$)

A光下における色属性の偏差を、図5に示す。
 $|\Delta H|_{\max}=4.62$, $\Delta V(R)=1.05$, $\Delta C(R)=3.95$ である。明度、クロマの偏差範囲はともに、クラスBの下限である。トーンの同一性の観点からは、 $\Delta C(R)=3.95$ の大きい差異は、色観察用光としては許容できる限界であろう。この原因は、現行の演色評価システムと、A光とC光との大きな色温度差に起因する。クラスBの下限に位置する。

4.4.2 低演色形試験光：F4 ($T_{cp}=2940K$, $R_a=51$)

試験光F4は、一般温白色蛍光灯に対応する。各属性の偏差評価値は、 $|\Delta H|_{\max}=6.40$, $\Delta V(R)=1.51$, $\Delta C(R)=3.20$ である(サンプルごとの偏差図は省略)。クロマに関しては、低演色評価数のため、低クロマへの偏差となることで、 $\Delta C(R)=3.20$ と、A光に比べ幾らか改善されている。しかし、色相
 $|\Delta H|_{\max}=6.40$, 明度 $\Delta V(R)=1.51$ ともクラスBの許容度を超過している。いずれにせよ、色相差が最大で6.4、さらに、明度1.5、クロマ3.2の偏差範囲は、大きい。10サンプルにおけるトーン同一性の観点からは、色観察用光としては許容できないであろう。範囲外に区分される。

4.5 総合的考察

表2にその他の試験光も含めて、基準C光下のMunsell値からの色順応補正後のMunsell値の偏差評価値 $|\Delta H|_{\max}$, $\Delta V(R)$, $\Delta C(R)$, および、一般色観察光としての評価を示す。

一般色観察光としての相関色温度 T_{cp} , 平均演色評価数 R_a の要件をまとめるとつぎの通り。

クラスA (良好な一般色観察光) の要件：

$T_{cp} \geq 6000K$ で $Ra \geq 70$, $T_{cp} \geq 4000K$ で $Ra \geq 80$ 。

クラスB (許容可能な一般色観察光) の要件:

$T_{cp} \geq 3000K$ で $Ra \geq 60$ 。

4000K程度では Ra が80以上であれば、また、色温度が6000Kに近ければ、 Ra が70程度でも、良好な一般色観察光(クラスA)に入る。また、4000K位の一般白色蛍光灯($Ra=60 \sim 80$)までが、ほぼ許容出来よう(クラスB)。そして、低色温度(3000K近傍)のA光がクラスBの下限で、低色温度で Ra が60を切ると、許容範囲外となり、これらの試験光の下で色を観察した場合、トーンの崩れは大きいと考えられる。

このように、トーンが正しく保たれる照明光の相関色温度、演色性の範囲は広い。この結果は、照明光の色温度が少々低かったり、演色性が劣っていても、その照明に目が順応するために照明の影響を受けにくく、照明の質が問題になりにくいという経験的推測を裏付けるものである。本研究では、色温度、演色性の許容範囲を理論的な手段によって定量的に明確にした。

つぎに、試験光の相関色温度、演色性の変化が、それぞれ、色相、明度、クロマに与える影響をまとめておこう。表2の各試験光の計算結果について、横軸を逆数相関色温度 T_{cp}^{-1} にとって、図6に最大色相偏差の絶対値 $|\Delta H|_{\max}$ 、図7に明度偏差範囲 $\Delta V(R)$ 、図8にクロマ偏差範囲 $\Delta C(R)$ をしめす。各図中の()は試験光名を、その前の数字は平均演色評価数 Ra を表す。 $Ra \geq 80$ の高演色形光源は○で、 $Ra < 80$ の低演色形光源は△で表している。また、演色性による影響を見やすくするために、各図とも高演色形光源と低演色形光源のデータにそって灰色の実線を引いた。各逆数相関色温度において、光源の演色性に応じて偏差評価値は、この2つの実線の範囲内に収まると考えられる。

各図から、相関色温度の低下、演色性の低下に伴って、基準C光(図中の●)からの偏差が徐々に大きくなっていくのがわかる。しかし、相関色温度、演色性の影響は属性によって異なる。クロマの偏差(図8)が主に演色性の低下によって起こり、相関色温度の影響は小さいのに対して、明度の偏差(図7)は相関色温度の影響が大きく、F1光のように演色性が低くても相関色温度がC光に近ければ、偏差は小さい。一方、色相の偏差(図6)はクロマと明度の中間的な振る舞いをし、相関色温度、演色性とも少しずつ影響する。

5. H-K効果への影響

最後に、H-K効果への観察光源(相関色温度、演色性の変化)の影響を論ずる。物体色に関するH-K効果は、

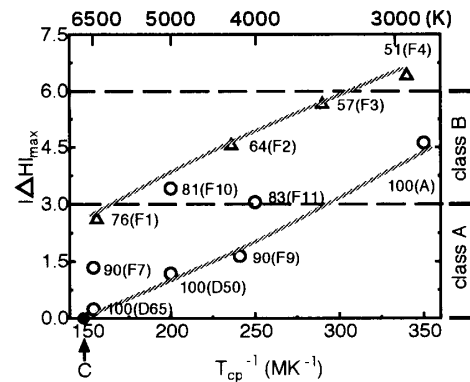


図6 色相最大偏差 $|\Delta H|_{\max}$

図中の()は試験光名を、その前の数字は平均演色評価数 Ra を表す。 $Ra \geq 80$ の高演色形光源は○で、 $Ra < 80$ の低演色形光源は△で表している。●は基準C光の値を、破線は評価基準の境界を表す。なお、図が複雑になるのを避けるため、表2に挙げた15の試験光のデータうち、F5, F6, F8, F12は表示していない。

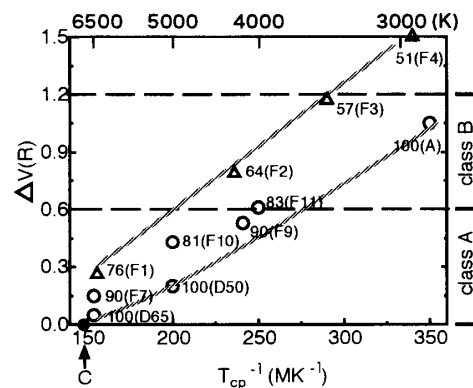


図7 明度の偏差範囲 $\Delta V(R)$ 図の説明は図6を参照のこと。

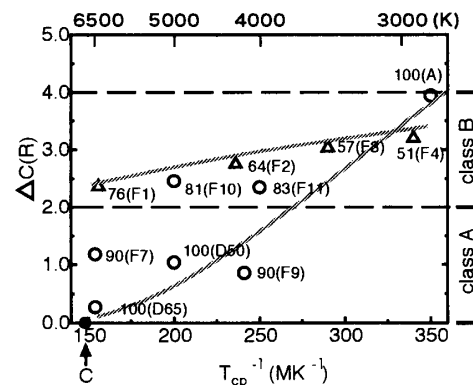


図8 クロマ偏差範囲 $\Delta C(R)$ 図の説明は図6を参照のこと。

これまですべて、標準の光CまたはD65下でのみ評価されて来ている。本研究で計算に用いた評価サンプルは、C光下において、ほぼ等知覚明度を有する。H-K効果とは、有彩色のクロマの成分が知覚明度に寄与する現象である。色相によって効果の大きさが異なるのが特徴で、黄(Y)色相で小さく、紫(P)色相で大きい。このため、本報で用いた評価サンプルでは5Y 7.7/10と5P 3.9/10とはMunsell明度差3.8の存在にもかかわらず、ほぼ等しい知覚明度を与える。

H-K効果は、知覚明度のみに関係する。本報では、各種色温度、演色性を有する試験光が、C光下のH-K効果を、ほぼ実現・代行できるかを考える。即ち、上記10サンプルの等知覚明度(C光下で成立)からの崩れ $\Delta V(R)$ を、その試験光のH-K効果への影響尺度として採用する。もし、ある試験光下で、 $\Delta V(R)$ が大きいとすれば、H-K効果に関して、その試験光は、C光の代行ができないこととなる。

以上を考慮して、各種試験光のH-K効果を、図7の $\Delta V(R)$ により全般的に考察しよう。高色温度試験光で演色性の要件が緩やかな点(明度は演色性の低下の影響を受けにくい)を除いて、基本的には一般色観察光源の要件と同じである。つぎの結論が得られる。

- 1) 基準となるC光(図中の●)とほぼ同一の色温度の場合は、D65, F7, F1の様に、演色性の高低にかかわらず、等知覚明度が近似的に成立する。H-K効果に関しC光の代行ができる。
- 2) 中間色温度5000K (200MK^{-1})の場合も、高演色光F10で、 $\Delta V(R)=0.43$ の知覚明度差範囲を有する。等知覚明度への影響はやや大きい。しかし、H-K効果に関し、C光の代行は許容できよう。
- 3) 中間色温度4000K (250MK^{-1})近傍では、クラスAとクラスBの境界領域($\Delta V(R)=0.6$ 程度)の知覚明度差範囲を生ずる。高演色性($R_a \geq 80$)のF11がC光代行の許容限界下限であろう。
- 4) それ以下の低色温度光では、 $\Delta V(R)$ の値は大きく、H-K効果に関しC光の代行は許容できない。

以上の議論は、表1第1列に挙げたMunsellクロマC=10の色相環に対する結果であるが、従来のC光下のH-K効果に対し、各種試験光源による代行の可能性について、色温度、演色性の影響の観点から論じた、初めての報告である。意義深いと考える。

6. 結論

本論文では、厳密な色比較を目的としない日常的な色彩観察のための光源(一般色観察光源)の具備すべき特性(相関色温度、演色性の許容範囲)を明らかにすることを目的として、各種光源下における色の見えの、標準の光(C光)からの色知覚偏差について、理論的な考察を行った。その結果、得られた結論を要約する。

1) 異種光源間における色知覚偏差の理論的評価方法の確立。

各種試験光下の色の見えを、色順応予測式CIECAT94LABによってMunsell値が定義されているC光下における対応色として表示する。これにより、異種光源間における色知覚差を、Munsell値の偏差として評価することが可能となる。

2) 色知覚偏差の許容範囲の設定。

日常的な色彩観察で許容することができる色知覚偏差として、クラスA(標準色票の色の許容差の約3倍以内):良好な一般色観察光の要件、クラスB(標準色票の色の許容差の約6倍以内):許容可能な一般色観察光の要件、と設定した。

3) 一般色観察光源の相関色温度 T_{cp} 、平均演色評価数 R_a の許容範囲の定量化。

この2)項の許容範囲の設定に基づき、色温度および演色性の区分ごとに一般色観察光としての評価を行った。その結果、4000K程度では R_a が80以上であれば、また、色温度が6000Kに近ければ、 R_a が70程度あれば、良好な一般色観察光(クラスA)に入る。また、4000K位の一般白色蛍光灯($R_a=60\sim 80$)までが、観察光として許容できる下限である(クラスB)。

これらの要件は、4)項に関連して、カラーデザインにとって重要な概念であるトーンが正しく保たれる観察光源の要件である。

4) 同一トーンサンプルの選定。

3)項は、C光下において同一トーン(等知覚明度、等知覚クロマ)を有するMunsell10色相の色相環サンプルについて、各種光源下におけるトーンの崩れを評価した結果である。同一トーンサンプルの選定は、観察実験を実施する上で色知覚偏差を個別に評価するよりも、10サンプル全体としてのトーンの崩れを評価する方が容易であろうという点と、カラーデザインにとって重要な概念であるトーンが正しく保たれる照明光の相関色温度、演色性の範囲を定量化するという点から、実用上意義深い。

5) H-K効果への観察光源(色温度, 演色性の変化)の影響の明確化。

H-K効果はこれまでC光またはD65光下のみで評価されてきたが, 本報では初めて観察光源の影響を明確にした。高色温度試験光で演色性の要件が緩やかな点(これは, 明度が演色性の低下の影響を受けにくいことによる)を除いて, 基本的には一般色観察光源の要件と同じである。結論3)のクラスAに分類される試験光源であれば, C光の代行ができる。いいかえると, C光下と同程度のH-K効果が期待できる。

6) 今後の課題

本報では, 理論的な予測のみ示した。その根拠となる等知覚明度, 同一トーンの定義, および, 計算に用いた色順応予測式は, すでに理論的にも実験的にも検証されたものでその有効性は信頼のおけるものと考ええる。しかし, 等知覚明度の物体色サンプルに対して色順応の効果を考慮したはじめての計算であり, その妥当性について, 実験による検証を続報で述べる予定である。

謝辞

初稿をご精査いただき, 有益なコメントをいただきました査読委員の先生方に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) JIS Z 8721:1993「色の表示方法—三属性による表示」; JIS Z 8723:2000「表面色の視感比較方法」
- 2) Y.Nayatani: Proposal of an Opponent-Colors System Based on Color-Appearance and Color-Vision Studies, Color Res. Appl.29 (2004) 135–150
- 3) Y.Nayatani: Simple Estimation Methods for the Helmholtz-Kohlrausch Effect, Color Res. Appl. 22 (1997) 385–401
- 4) 側垣博明, 高浜幸太郎, 納谷嘉信: マンセル色票の分光反射率分布の解析, 日本色彩学会誌7 (1983) 167–174
- 5) Y.Nayatani, T.Yano, K.Hashimoto and H.Sobagaki: Proposal of an Abridged Color-Appearance Model CIECAT94LAB and Its Field Trials, Color Res. Appl.24 (1999) 422–438; Y.Nayatani: Erratum for Proposal of an Abridged Color-Appearance Model of CIECAT94LAB and Its

Field Trials, Color Res. Appl.25 (2000) 294

6) 大田登: 色彩工学第2版, 東京電機大学出版局 (2001) 186–193

(投稿受付日: 2004年9月11日)

(採録決定日: 2005年2月14日)

著者紹介



さかい ひでき
酒井 英樹

1968年5月16日生

1996年早稲田大学大学院理工学研究科博士後期課程物理及応用物理学専攻修了。博士(理学)

現職、大阪市立大学大学院生活科学研究科講師。日本色彩学会、日本建築学会、照明学会、日本表面科学会、各会員。



なやたに よしのぶ
納谷 嘉信

1927年5月生

工学博士

大阪電気通信大学名誉教授

研究分野

照明工学、色彩工学、品質管理