光色の違いがグレア感の評価と許容度に与える影響に関する研究

正会員 謝 明燁 (東京大学) 正会員 宗方 淳 (東京大学) 正会員 平手 小太郎 (東京大学)

Research on the Effect of Colored Lights on Evaluation and Range of Discomfort Glare

Member Mingyeh Hsieh (the University of Tokyo), Member Jun Munakata (the University of Tokyo)
and Member Kotaroh Hirate (the University of Tokyo)

ABSTRACT

Previous research showed that colored light affects Landolt C test performance, and increasing the relative contribution of short-wavelength (blue) light will reduce pupil size and increase visual acuity. However, whether the evaluation of discomfort glare differs when the color of light differs is unknown. The aim of this research is to investigate the effect of colored lights on the evaluation and range of discomfort glare.

Among the nine colored lights we selected, at the same luminance level, blue light causes the most discomfort glare, and green light causes the least discomfort glare. The order of discomfort glare is approximately blue, white, red or yellow, and green. We also found that a subject's evaluation of discomfort glare becomes more intense when color temperature is increased. In addition, after comparing our result with Helmholtz-Kohlrausch phenomenon, we found that people's range of discomfort glare under each colored light were different. Our study shows that the color of light affects the evaluation of discomfort glare. Therefore, using colored lights as a technique to reduce the level of discomfort glare is possible.

KEYWORDS : color, glare, luminance, color temperature, latitude, brightness

1. はじめに

近年照明技術の発展に伴いさまざまなカラーLEDが開発されてきた。低発熱、省電力、長寿命、小体積という特徴があり、これらの省エネルギー性というメリットを考えると、今後、建築用照明光源として多く使用されていくものと予想される。各色LEDの組み合わせにより光色を構成するという考え方によって、それぞれの光量の制御により、光色の種類を無限に作ることが可能である。主に白色や電球色から構成されていた従来の照明の世界が、多様な光の世界へと大きく変化する可能性が高く、今後、照明環境において、光色の問題は従来以上に大きな要因になるものと考えられる。

光色の効果については、まずBermanら¹⁾は、ピンクと青緑の蛍光灯の室内空間でランドルト環判別作業の正確さについて比較し、青緑蛍光灯の場合、被験者のランドルト環の判別の正確さは有意に高かったとしている。その理由としては、光色の違いにより瞳孔径も変化し、瞳孔径が小さくなるとランドルト環判別の正確さは高くなるとしている。また、Mojtabaら²⁾は、色温度3500Kと7500Kの蛍光灯を用い、紙面の文字を読む能力について考察し、7500Kの場合に可読性が高いことを示している。また、青色・緑色・高温度の光がメラトニンホルモン分泌の減少に対しては促進的に働き、昼間の活動に向けた支援作用をもたらす³⁾ことも報告されている。これまでの光色に関するさまざまな研究結果によると、快適性、作業効率、健康性と省エネルギー性などの目標を考え

ると、光色の効果の応用展開が期待される。

一方、ヘルムホルツ-コールラウシュ効果 (Helmholtz-Kohlrausch Phenomenon, 以下H-K効果)によると、同じ輝度レベルの条件下で、有彩色が無彩色より明るく見え、青と赤の色が彩度の増大とともに色が明るく見えるということである。よって、光色という因子を活かし明るさ感を向上することが可能となるが、一方明るさ感の増加とともにグレア感も増加する可能性も高くなると考えられる。これまで、グレア感の評価について、Guthら⁴⁾、Hopkinsonら⁵⁾、Bodmannら⁷⁾、国際照明委員会などがグレア感評価式を提案している。ただ各評価式の実験条件は異なるものの、グレア感の影響因子に関する検討では、主に光源輝度レベル、背景輝度レベル、光源の立体角、位置などの因子に限られており、光色についての検討は少ないのが現状である。

よって、本研究で、光色の違いという因子がグレア感の評価に与える影響を考察したいと考えている。快適な照明環境を目指すという観点から、多様化すると思われる照明環境に対する感じ方の違いを把握するためには、まず人間の各光色に対するグレア感の違いについて検討する必要があると考えられる。また、光色の違いによる明るさ感とグレア感の結果を比較することにより、人間の各光色に対するグレア感の許容度の違いを明らかにすることが可能となる。このように、光色とグレア感の対応関係を見出

すことにより、将来的に、光色という因子を活用し、不快グレアを制御するという目標を実現することは可能であると考えられる。

光色とグレアの対応関係について、Berman ら⁸⁾は、“青みの白” (Cool White) と“青緑” (Greenish Blue) の蛍光ランプを検討対象として、不快グレアの主観申告と不快グレアによる顔面筋電位の変化という評価指標を用い、光色の違いによる不快グレアについて考察した。しかし、それ以外の光色に対する検討は行われなかった。また、矢野ら⁹⁾は、若年齢者と高齢者を対象として、中心視 2° 視野の条件で、光源の色温度 (3100K~6800K) と不快グレアの許容限界輝度との関係を検討した。しかし、検討された光色は完全放射体軌跡内の光色に限られており、完全放射体軌跡から外れた光色に対する検討は行われなかった。一方、中心視 2° 視野の場合、中心窩に存在する黄斑色素は 500nm 以下の短波長領域の視感効率に影響を与えるが、視野が 10° に広がっていくとこのような影響がなくなると考えられる¹⁰⁾。また、中心視 2° 視野以外の部分は明るさの知覚にも寄与しているため、日常の経験に近い実験条件を考えると、より広い視野の実験条件で検討する必要があると考えられる。

これから光色の種類の多様化、また、窓面のような大きい視野のグレアという環境を考え、本研究では、比較的広い視野の条件を用い、光色の違いがグレア感に与える影響を考察する。

2. 実験計画

2.1 実験概要

図1のように、1つの光源箱を設け、箱の内部をつや消し白色ペイントで仕上げた。光源は6つの36Wコンパクト型昼白色蛍光ランプによる均一な光源で、面積は 36×36cm² (視野 27.5°、立体角 0.23sr) とし、中心の高さ 124cm、被験者との距離 75cm、の位置に配置した。光源輝度レベルの測定については、中心部 (測点 A) と周辺部 (測点 B,C,D,E) の5測点の平均値を光源の輝度レベルとする。光源の均一さについて、5測点の輝度平均値を 100 とすると、光源中心部 (測点 A) の輝度レベルは約 115 であり、周辺部 (測点 B,C,D,E) はそれぞれ約 98, 97, 94, 95 であった (図1)。実験条件によって、光源に色補正用や色温度変換用のゼラチンフィルターをかけて、提示する光源の色を変え、またトレシングペーパーを用い光源の輝度レベルをコントロールする (図1)。提示する光源の色は、フィルターを通した透過光であり、完全放射体軌跡から外れた赤、黄、緑、青および色温度 2500K, 3300K, 4200K, 6500K, 14000K の計 9 条件とした (表1, 図4)。調光装置は提示する光源に接続した。

図1 実験装置
Fig.1 Experimental apparatus.

図2 グレア感の評価尺度
Fig.2 Categories of evaluation on discomfort glare.

図3 実験の流れ
Fig.3 Experimental steps.

表1 提示した光源の色

Table 1 Specifications of used colored lights.

光源の色	光源の色温度	調光できる輝度範囲 (cd/m ²)	CIE 1931 xyz 表色系	
			x	y
赤	—	1030~7910	0.553	0.360
黄	—	890~6610	0.463	0.491
緑	—	1000~7340	0.249	0.565
青	—	550~4070	0.175	0.199
—	2500K	1090~8250	0.471	0.403
—	3300K	890~6640	0.422	0.401
—	4200K	1000~7560	0.376	0.388
—	6500K	880~6600	0.308	0.342
—	14000K	740~5500	0.255	0.287

* 赤・黄・緑・青の場合、日本コーパン社の色補正用ゼラチンフィルター(ウルトラカラー:37,44,59,78号色)とトレシングペーパーを用いた。2500K・3300K・6500K・14000Kの場合、日本コーパン社の色温度変換用ゼラチンフィルター(ウルトラカラー:A5,A2,B3,B6)とトレシングペーパーを用いた。4200Kの場合、トレシングペーパーのみを用いた。

図4 CIE 1931 xy色度図に提示光源の色の分布
Fig.4 Chromaticity diagram of each sample.

表2 光源の色と被験者によるグレア感の二元配置分散分析

Table 2 Summary of ANOVA of colored lights and subjects.

要因	自由度	平方和	F 値	P 値
光源の色	8	0.5925	6.3781	<0.0001**
被験者	7	1.3455	16.5530	<0.0001**
光源の色×被験者	56	0.6171	0.9490	0.5778
誤差	72	0.8361		

「**」:1%有意

表3 光源の色によるグレア感の多重比較結果

Table 3 Multiple comparisons of colored lights on evaluation of discomfort glare.

	赤	黄	緑	青	2500K	3300K	4200K	6500K	14000K
赤									
黄	×				×	×	×	×	×
緑	×	×			×	×	○	○	○
青	○	○	○		○	○	×	×	×
2500K	×	×	×	○		×	×	×	×
3300K	×	×	×	○	×		×	×	×
4200K	×	×	○	×	×	×		×	×
6500K	×	×	○	×	×	×	×		×
14000K	×	×	○	×	×	×	×	×	

「○」: 両条件 5%有意差あり, 「×」: 両条件 5%有意差なし

各色の光源の調光できる輝度レベルの範囲は表1に示している。実験は東京大学工学部 1 号館建築学専攻の簡易半無響室内で行った。被験者は 20 代学生 8 人 (女性 4 人, 男性 4 人) である。室内照明による輝度分布という因子の影響を避けるため, また光源輝度と背景輝度のコントラストを増加し光源提示装置をグレア光源として機能させるために, 実験中は室内の照明を消灯した (室内照度 0 lx)。一方, 順応輝度や順応室の輝度分布という因子の影響を排除し, 実験条件を単純化するために, 実験教示後, 被験者に 10 分間の暗順応をさせた後実験を始めた (図 3)。また, 各試行の間に, 3 分間の暗順応をさせた。

2.2 評価方法

課題教示の際, 図 2 に示すグレア感評価カテゴリー11)を被験者に説明し, 各試行毎の実験条件の光源に対し, なるべく短い時間内で「非常にまぶしいと感じはじめ」というカテゴリーにふさわしい明るさに調光するように被験者に教示した。試行間の暗順応を 3 分間, また調光の際には時間の制限は設けなかった。試行間の暗順応時間で十分に暗順応が進行しないまま, 次の試行に進んでしまう可能性があるが, 試行間の順応時間が統一されており, 光色という条件もランダムに提示したので, 実験中の順応状態が条件間の結果に与える影響は大きくないと考えた。また, 本研究で提示した光源の輝度レベルは数百 cd/m^2 以上であり, この程度の輝度レベルでは試行間の暗順応が完全に終わらなくても, 試行間の結果に与える影響は大きくないと考えた。各実験条件では, 被験者に調光させる直前に提示した光源輝度レベルはその条件の中で調光範囲内の最低輝度レベルに固定した。各色のゼラチンフィルターの光透過率が大きく異なり, 各色光の調光範囲と最低輝度レベル (提示した輝度レベル) を完全に一致させるのは難しく, 本実験では, 各色光の最低輝度レベルをできるだけ近くなるように調整した。各試行では, 被験者に上昇系列のみ 2 回ずつ調整させた。1 回目の各試行の実験条件はランダムに配置し, 全実験条件を 1 回に行ってから, 2 回目は 1 回目と同じ提示順番で行わせた (図 3)。

3. 実験結果

3.1 分散分析による検討

矢野ら⁹⁾によると, 光源の光色による不快グレアは, 光色に影響されるが, 光源の分光分布に影響されないで, 本研究では, 光源の分光分布という因子を不問にし, 9 光色の違いがグレア感に与える影響について検討した。グレア感の評価では, 「非常にまぶしいと感じはじめ」程度の輝度レベルに対し, 光源の色と被験者を因子とした二元配置分散分析を行った。結果として, 光源の色の主効果と被験者の主効果は有意 (1%有意水準) であり, 光源の色と被験者の交互作用は有意 (5%有意水準) ではなかった (表 2)。9 条件

図5 光源の色の違いによるグレア感
Fig. 5 Evaluation of discomfort glare of each sample.

図6 光源の色の xy 座標によるグレア感の回帰木
Fig. 6 Regression tree of each sample.

のグレア感の結果は図5に示している。図5のY軸は提示光源に対し、非常にまぶしいと感じ始める時の輝度レベル (cd/m^2) の対数値を表す。Y軸の値の高い光色は、グレア感が低く、Y軸の値の低い光色に比べるとまぶしいと感じさせにくいことを意味する。図5によると、緑のY軸の値が最も高く、青が最も低く、他の7条件は緑と青の間に位置するので、同じ輝度レベルの基準下で、緑が用いた9条件の中で、最もグレア感の低い光色であり、青が最もグレア感の高い光色である傾向が示された。各光色の平均輝度レベルを見ると、青が 1870cd/m^2 の輝度レベルを超えると、非常にまぶしいと感じ始めるが、緑が 3290cd/m^2 の輝度レベルを超えてから、同じまぶしさの度合いを感じ始めることが明らかになった。

9条件の中で、条件間のグレア感において有意差があるかどうかを確認するために、光源の色を対象とした多重比較(TukeyのHSD検定)を行った(表3)。図5によると、緑はグレア感が最も低いが、表3の多重比較の結果を見ると、緑は赤、黄、2500K、3300Kの条件との間に5%有意差がない傾向が示された。また、青はグレア感が最も高いが、4200K、6500K、14000Kの条件との間に5%有意差がない傾向が見られた。一方、色温度の影響について、図5の2500K、3300K、4200K、6500K、14000Kなどの5条件の結果だけを見ると、色温度が高ければ、グレア感が増加するという傾向が示唆されたが、表3によって、この5条件の条件間では5%有意差が見られなかった。

3.2 回帰木による検討

本研究で用いた9条件の光源によるグレア感の特性を考察する、モデルを作成するために、回帰木というデータマイニング手法を用いた。回帰木はデータベース中の、ある注目する属性に関する重要な知識を、木構造によるルールの組合せで表現したものである¹²⁾。光源の色とグレア感の対応関係を知るために、用いた9条件のCIE 1931 xy 色度図の x と y 座標値を説明変数とし、「非常にまぶしいと感じ始める」輝度レベル (cd/m^2) の対数値を目的変数とした。回帰木の分岐の基準については、平方和、すなわち分岐によって生じる誤差平方和の変化が基準となる。誤差平方和を最小にするような平均があてはめられる。その結果、図6のように、ある色に対し、まずは y 座標値が0.36より大きいかどうかを基準として2つのグループに分ける。 y が0.36より小さい場合、第2段階としては、 x 座標値が0.255より大きいかどうかを基準として改めて2つのグループに分ける。このように繰り返し、最後9つのグループに分けるまで続ける。図6の右側がグレア感の低い光色であり、左側がグレア感の高い光色である。これにより、緑が9条件の中で最もまぶしくなく見える傾向、青が最もまぶしく見える傾向が分かった。

一方、この回帰木により、9条件を4つのグループに大きく分けることができた(表4)。①グループ1は緑であり、4グループの中でもっともグレア感が低いグループ。②グループ2は3300K、黄、2500K、赤、4200Kであり、グレア感はグループ1より高い。③グループ3は6500Kと14000Kであり、グレア感は3番目である。④グループ4は青であり、グレア感は4グループの中で最も高い。などが明らかになった。

4. 考察

「3.2 回帰木による検討」の結果を xy 色度図の上で表現したものを図7に示す。グレア感の程度によって分けられた4つのグループは xy 色度図上で重なっていない4つの範囲に分布していることにより、光源の色がグレア感に影響を及ぼす傾向があると考えられる。各グループを見ると、グループ1は xy 色度図の緑色の領域に

表4 各グループの内容
Table 4 Contents of each group.

グループ	光源の色	グレア感
グループ1	緑	低
グループ2	3300K, 黄, 2500K, 赤, 4200K	中
グループ3	6500K, 14000K	高
グループ4	青	最高

図7 CIE 1931 xy 色度図に光源の色によるグレア感の分類
Fig. 7 Chromaticity diagram of each group.

図8 ヘルムホルツ-コールラウシュ効果とグレア感
Fig. 8 Relationship between Helmholtz-Kohlrausch phenomenon and glare.

分布している。グループ2は赤色、黄色、黄みの白の領域に位置している。グループ3は白色と青みの白の領域に分布している。グループ4は青色の領域に位置している。この結果によって、グレア感は大まかに緑色、黄色、赤色、白色、青色という順番で増加する傾向が分かった。Bermanら⁸⁾によると、“青みの白”より、“青緑”という光色による不快グレアが低いという結果が示された。Bermanらの研究で用いられた“青緑”という光源のピー

ク波長は505nm(緑色)であるので、本研究の結果と一致している。また、色温度とグレア感について、グループ2と3の結果によって、色温度が上がると、グレア感も増加するという傾向も示唆された。この色温度の影響は矢野ら⁹⁾の実験結果と一致している。

一方、彩度の高い色は、輝度値から予測されるものよりも明るく見え、同一輝度値で考えると無彩色より有彩色のほうが明るいという前述したH-K効果が知られているが、この現象は青色、紫色、赤色に強くあらわれ、黄色では劣るということが示されている。また、Ayamaら¹³⁾も同様な結果を報告している。明るさ感とグレア感は、常に光源の輝度レベルの増加に伴い増加する関係にあるので、両者の間に高度な相関が存在していると考えられる。H-K効果と本研究の結果を合わせて表現したものを図8⁴⁾に示す。色度図上の曲線は同じレベルの明るさ感の色を意味している。図により、黄色の領域ではH-K効果が小さく、青色、紫色、赤色の領域ではH-K効果が大きいということが示されている。すなわち、黄色では明るさ感が低い、青色、紫色、赤色では明るさ感が高いということが示されている。一方、本研究によるグレア感の分類結果とH-K効果に基づく明るさ感の結果を比較すると、明るさ感は、“青”、“赤”、“緑”、“14000K・6500K”、“4200K・2500K・黄・3300K”、という順であるが、グレア感は、“青”、“6500K・14000K”、“4200K・赤・2500K・黄・3300K”、“緑”、という順である。本研究で用いた9つの光色の中で、赤と緑の光色以外、明るさ感の高い光色はグレア感も高い、また光色の違いによる明るさ感とグレア感の間に相関性が高いという傾向が示された。また、明るさ感が高いが、グレア感が低いという不一致の傾向が赤と緑の両方で見られたが、表3の条件間の有意差の結果を見ると、緑の場合だけ、明るさ感とグレア感の不一致の傾向が明らかにされた。すなわち、緑の光は明るく見えるが、まぶしく感じにくいという特性があり、人間は緑色の光に対するグレア感の許容度が高いという可能性が存在していることが示唆された。

5. まとめ

本研究では、光色がグレア感に及ぼす影響について検討した。結果として、光源の色がグレア感に有意な差(5%有意水準)をもたらしたことが示された。青は用いた9条件の中で、他の8条件よりまぶしく見える光色であり、グレア感が最も高い光色である。また、緑は9条件の中で、最もまぶしくなく見える光色であり、グレア感が最も低い光色である。回帰木の分類結果によると、9条件を大きく分けると、グレア感の順番は、青色、白色、赤色、黄色、緑色となる傾向が示された。また、人間の緑色の光に対するグレア感の許容度が高いという傾向も示唆された。

Bermanら¹⁾は、短波長(青色)の光を増加すれば、瞳孔径は縮小し、視力は向上するという結論を得ており、このような結果を応用し、同じ視力を確保した上で、空間の照度レベルを減少し、省エネルギーという目標を実現することは可能である¹⁵⁾としている。しかし、本研究によると、青色は最も不快グレアになりやすい光色なので、青色の光を増加するに伴う不快グレアの増加に対する検討が重要な課題になると考えられる。また、緑色は黄色や白色より明るさ感が高い色であるし、最も不快グレアになりにくい光色であるので、明るさ感の向上とグレア感の制御を両立する効果があると考えられる。快適性、作業性、人間の生理、心理への影響などを検討した上で、緑色の光を活用することが、将来的に不快グレアの一つの制御手法になる可能性がある。

謝辞

本研究は第13回照明学会研究・教育助成の補助を受けて行われたものである。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- (1) S.M. Berman, G. Fein, D.L. Jewett, F. Ashford: Luminance-controlled pupil size affects landolt C task performance, *Journal of the Illuminating Engineering Society*, Vol.22, No.2, pp.150-165 (1993).
- (2) Mojtaba Navvab: Visual acuity depends on the color temperature of the surround lighting, *Journal of the Illuminating Engineering Society*, Vol.31, No.1, pp.70-84 (2002).
- (3) Morita T. and Tokura H.: The influence of different wavelengths of light on human biological rhythms, *Applied Human Science*, Vol.17, No.3, pp.91-96 (1998).
- (4) Luckiesh, M. and Guth, S. K.: Brightness in visual field at borderline between comfort and discomfort (BCD), *Illuminating Engineering*, 44-11, 650 (1949).
- (5) Hopkinson, R. G. and Bradley, R. C.: A study of glare from very large sources, *Illuminating Engineering*, 55, 288 (1960).
- (6) Petherbridge, P. and Hopkinson, R. G.: Discomfort glare and the lighting of buildings, *Trans. Illuminating Engineering Society*, 15, 39 (1950).
- (7) Arndt, W., Bodmann, H. W. and Muck, E.: Blendung durch einzelne lichtquellen in sehfeld, *Lichttechnik*, 11-1, 22, (1959).
- (8) S. M. Berman, M. A. Bullimore, I. L. Bailey and R. J. Jacobs: The influence of spectral composition on discomfort glare for large size sources, *Journal of the Illuminating Engineering Society*, Vol.25, No.1, pp.34-41 (1996).
- (9) 矢野正,金谷末子,市川一夫: 高齢者の不快グレアー光色との関係一, 照明学会誌, Vol.77, No.6, pp.296-303 (1993).
- (10) 日本視覚学会編: 視覚情報処理ハンドブック, 朝倉書店 (2000).
- (11) 田淵義彦, 中村肇, 筒井亨, 西村政信, 佐土根範次: 視野中心の光源と視野周辺の光源による不快グレアの比較, 照明学会誌, Vol.75, No.2, pp.9-15 (1991).
- (12) 福田剛志, 森本康彦, 徳山豪: データマイニング, 共立出版株式会社 (2001).
- (13) M. Ayama, M. Ikeda: Brightness-to-luminance ratio of colored light in the entire chromaticity diagram, *COLOR research and application*, Vol.23, No.5, pp.274-287 (1998).
- (14) Nayatani, Y., Sobagaki, H. and Hashimoto, K.: Existence of two kinds of representations for the Helmholtz-Kohlrausch effect. II. The models, *COLOR research and application*, Vol.19, pp.262-272 (1994).
- (15) S.M. Berman: Energy efficiency consequences of scotopic sensitivity, *Journal of the Illuminating Engineering Society*, Vol.21, No.1, pp.3-14 (1992).

(受付日2005年2月21日/採録日2005年7月1日)

謝 明燁 (正会員)

東京大学大学院工学系研究科建築学専攻
〒113-8656 東京都文京区本郷 7 丁目 3-1
1976 年生まれ. 1999 年台湾国立成功大学大学院工学系研究科建築学専攻修士課程終了. 現在, 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻博士課程在学中. 日本建築学会, 照明学会, 各会員.

宗方 淳 (正会員)

東京大学大学院工学系研究科建築学専攻
〒113-8656 東京都文京区本郷 7 丁目 3-1
1967 年生まれ. 1996 年東京大学大学院工学系研究科建築学専攻博士課程修了. 博士(工学). 現在東京大学大学院工学系研究科助手.

平手 小太郎 (正会員)

東京大学大学院工学系研究科建築学専攻
〒113-8656 東京都文京区本郷 7 丁目 3-1
1954 年生まれ. 1984 年東京大学大学院工学系研究科建築学専門課程博士課程修了. 東京大学助手を経て, 現在同大学助教授. 工学博士. 専門は視環境評価, 環境心理生理. 照明学会, 日本建築学会, 日本都市計画学会, 日本色彩学会, 日本音響学会, 空気調和・衛生工学会, 人間-環境学会, 日本行動計量学会, 各会員.