前照灯照明光源の分光分布が視対象の明るさに与える影響

専門会員 小林 正自((株)小糸製作所), 非会員 大川正夫((株)小糸製作所), 専門会員 岡嶋 克典(横浜国立大学 大学院)

Study on Effect of Headlight Source Spectrum on Apparent Brightness of Visual Targets

Fellow Member **Shoji Kobayashi** (Koito Manufacturing Co, LTD.), Non Member **Masao Okawa** (Koito Manufacturing Co., LTD.
and Fellow Member **Katsunori Okajima** (Yokohama National University, Graduate School)

ABSTRACT

In this study, comparative experiments were conducted on the apparent brightness of visual targets illuminated by three types of headlight sources (halogen, HID, and LED), and the results were analyzed in terms of characteristics of visual perception. Those visual targets (with visual size of about 1 degree) were used on an actual road surface and a grey cotton cloth. To compare the apparent brightness under different light sources, we used the matching stimuli presented on the CRT display as a reference. The subjects adjusted the gradation of the matching stimuli until they perceived the brightness of the matching stimuli and that of the sample as equal. Under different light sources, luminance was set to 13 cd/m² for the road surface sample and 9.6 cd/m² for the grey cotton cloth. A total of 40 subjects aged between 25 and 65, including three women, participated in the experiment. Their average age was 48, and four of them wore glasses.

The results indicate that the apparent brightness of road surface differed among the light sources even at the same level of luminance. This demonstrates that the LED light source had higher brightness efficiency than the HID and halogen light sources (meaning that the same brightness can be obtained from the LED light source moreover at a lower level of luminance). Furthermore, such perception changed with observer age, the results for the grey cotton cloth were similar mostly. Instead of the spectral luminous efficiency, $V(\lambda)$, used for the present photometric system, a new spectral sensitivity, $V_k(\lambda)$, which takes account of the spectral sensitivity of the short-wave sensitive cones associated with photopic vision, was used for the analysis, and it could accurately explain the experimental results. This suggests that the apparent brightness of white light can be quantitatively compared and evaluated based on the practical effect of luminance of brightness calculated using the spectral sensitivity that takes into consideration the contribution of the short-wave sensitive cones.

KEYWORDS : headlight, spectrum distribution, apparent brightness, road surface, achromatic target

1. はじめに

前照灯の照明光源が白熱電球からハロゲン電球, 放電灯(キセノンバルブ), LED と高効率光源に進展する各段階で, 我々自動車照明技術者は路面の見かけの明るさ向上, グレアの増加を実感してきた。そして, その進展過程の中で我々は照明心理面から「同一測光量であるのに光源の分光分布の相違によりなぜ心理的なグレア量や見かけの明るさが異なるか?」という疑問を有してきた。なお, 以下, ハロゲン電球をハロゲン, 放電灯(キセノンバルブ)をHIDと略す。

上記のうちの光源の分光分布が見かけの明るさ(以下, 単に明るさと記す)に与える影響に関する研究は現在までのところ, 自動車照明分野では見あたらない。一方, グレアに関する研究は, HID登場以降, 高齢化の進展も相まって前照灯の眩しさが問題視され, 今日のLED前照灯まで盛んに研究されてきている。

Sivakらの研究¹⁾やBulloughらの研究²⁾では, 光源の分光分布が不快グレアに与える影響を研究し, 青色の影響が大であることを示した。また橋本らの研究³⁾では, 加齢に伴い不快グレアの増大を示し, 塚田らの研究⁴⁾では色温度の高いものほど不快グレアが増大することを報告している。しかしながら, これまでの所, 測光システムや色覚理論面からの検証が十分になされているとは言い難い。

照明光源の分光分布がグレアや明るさに及ぼす影響を視機能面

から検証できれば, それらの評価モデルの構築に寄与できる。また, それらから得られた知見に基づいて夜間照明の改良を実現できれば, 夜間走行の安全性並びに快適性向上に寄与できる。そこで第1ステップとして前照灯照明光源の分光分布が視対象物の明るさに与える影響の研究に着手した。

測定視対象はアスファルト路面とグレー綿生地⁵⁾の2種類を選定した。前照灯の照明光源は分光分布の異なるハロゲン, HID, LEDの3種類を選定した。被験者は20代後半から60代前半の40名を選定し, 加齢の影響も調査することとした。

明るさの測定は, マッチング刺激(CRT画面に呈示)と視対象を同時呈示し, 被験者がそれらの明るさが等価と評価した時のマッチング刺激の輝度, 即ち等価輝度(Equivalent luminance; 以下, Leq と略す)を測定する。この Leq を介して加齢の影響及び光源の分光分布の影響を解析する。

解析は先ず加齢の影響を解析し, 次に主目的である光源の分光分布の差異がそれに与える影響を解析することとした。加齢の影響の解析は, 標準比視感度曲線 $V(\lambda)$ の代替としてJIS年代別標準比視感度曲線⁵⁾を使用して検証し, 光源の分光分布の影響については新たな分光感度曲線 $V_k(\lambda)$ を立案し検証することとした。

本稿では, 2章でアスファルト路面の実験について記述し, 3章でグレー綿生地の実験について記述する。

2. アスファルト路面に対する実験（実験Ⅰ）

2.1 装置

前照灯の照明光源による明るさの差を定量的に比較するために図1に示す実験装置を製作した。

装置は、前照灯（光源）及び、路面サンプル、路面サンプルの傾きを調整するための回転台、明るさ比較のためのマッチング刺激を呈示するCRTディスプレイ、そして外光を遮光し順応輝度が調整可能な観測室からなる。なお、光源の変更は前照灯を交換することにより行なう。これを暗室（L10m×W5m×H5m）内に設置した。

図1 実験装置と配置

Fig.1 Experimental apparatus and arrangement.

(1) 路面サンプル

路面サンプルは屋外にて7年間経年使用したものを採用した。路面サンプルのサイズは300×1000mmで、観測窓正面に観測角3.5°、光源からの入射角2°、再帰反射角1.5°となるように配置した（車両前方20m、前照灯取り付け高さ0.75m、眼の高さ1.2mに相当）した。路面サンプルの輝度は各光源で達成可能な13cd/m²に設定した。観測者から見た路面サンプルの視角サイズは200′（水平方向）×40′（鉛直方向）と比較的小さな視対象であり、中心視による明るさを評価することとなる。

(2) 観測室

観測室は観測窓を設置し、観測窓から被験者が路面サンプルとCRTディスプレイを同時に見えるようにした。観測室の観測窓付近の内壁は、被験者の目を前照灯ロービーム環境の順応輝度に合わせるようにするために、白色光で1cd/m²となるように照明した。

(3) CRTディスプレイ

LG社製14インチCRT Studio Works 575Nを使用した。CRT画面には路面サンプルを模擬したそれとほぼ同一視角サイズのマッチング刺激を呈示した。これを図2に示す。

視角サイズは140′（水平方向）×35′（鉛直方向）である。マッチング刺激の輝度は被験者がキーボードを使って調整できるようにした。マッチング刺激の周囲部は前照灯ロービーム順応輝度と同一の1cd/m²に設定した。

図2 CRT上のマッチング刺激

Fig.2 Reference visual target on the CRT for matching.

(4) 輝度・色度計測器

実験時における路面サンプル、光源、CRTの輝度と色度は、トプコン社製の分光放射計SR-3Aを使用して測定した。

2.2 光源と視対象の特性および被験者

(1) 光源の特性

実験に使用した自動車前照灯の照明光源の特徴を表1に、それらの分光分布を図3に示す。

表1 照明光源の特徴

Table 1 Characteristics of the light sources.

Type of light source	Type
HID	D4S(水銀レシ電球規格品)
LED	Blue:InGaN+ Yellow phosphor
Halogen	HB3(ハロゲン電球規格品)

図3 光源の分光分布

Fig.3 Spectral distributions of the light sources.

(2) 路面の特性

観測条件下における路面の分光反射率特性を図4に、3種の照明光源下における路面色度を表2に示す。なお、この観測条件下（観測角3.5°、入射角2.0°、再帰反射角1.5°）における路面の反射率は2.5%であった。

図4 路面サンプルの分光反射率分布

Fig.4 Spectral reflectance of the road surface sample.

表2 3種の照明光源下における路面サンプルの色度

Table 2 Road surface sample chromaticity under the three types of illumination light sources.

Type of light source	xy chromaticity of the road surface
HID	x=0.3903, y=0.4067
LED	x=0.3530, y=0.3529
Halogen	x=0.4471, y=0.4129

(3) CRT ディスプレイの特性

CRT ディスプレイは電源投入後、1 時間放置して安定させた。安定後の白色光 (R=G=B) の階調－輝度特性を図 5 に示す。

図5 CRTディスプレイの階調－輝度特性

Fig.5 CRT Gradation - luminance characteristics.

マッチング刺激の輝度を 13 cd/m² に、その周辺部の輝度を 1 cd/m² に設定した時の xy 色度を表 3 に示す。

表 3 マッチング刺激の色度

Table 3 Characteristics of xy Chromaticity of Matching Stimuli.

Location	Disp. Luminance	xy chromaticity
Matching stimuli	13 cd/m ²	x=0.283, y=0.286
Surrounding area	1 cd/m ²	x=0.264, y=0.254

(4) 被験者

被験者は、年齢 25～65 才の男性 37 名、女性 3 名の計 40 名で、平均年齢は 48 才、うち眼鏡着用者は 4 名である。

2.3 実験方法

光源間の明るさの評価測定は CRT ディスプレイ上にマッチング刺激を呈示し、この刺激と所定の前照灯光源で照明された路面の明るさが等価となる刺激輝度 (等価輝度; Leq) を計測することにより行う。光源の相違が視対象の明るさに及ぼす影響は、このマッチング刺激を基準として評価する。

(1) 実験準備

前照灯照明光源と CRT ディスプレイを 1 時間エイジングする。その後、路面サンプルを輝度 13cd/m² に調整し、更に 5 分程度安定させる。

被験者を暗室に入室させ 5 分間暗順応させる。その後、被験者を観測室に入室させ、5 分間観測窓付近の内壁を観察させ前照灯ロービーム環境の順応輝度 1cd/m² に順応させる。

(2) 実験手順

実験開始前に、被験者は CRT ディスプレイに表示したマッチング刺激の最小輝度 (階調 0) と最大輝度 (階調 255) を確認する。

被験者は、路面サンプルの明るさがマッチング刺激の明るさと同となるようマッチング刺激の階調を調整する。実験者はその時の階調値を記録する。記録された階調データは図 5 の階調－輝度特性データを使用して輝度値に変換する。この輝度値を該当する路面サンプルの明るさに対する評価値、即ち等価輝度 (Leq) とする。

上記の手順にて前照灯 (光源) を交換し、 Leq の測定を繰り返す。3 種の光源の評価完了後、被験者を交代させ実験を繰り返す。なお、各光源に対する被験者の Leq 測定回数は 1 回である。

2.4 結果

図 6 に全被験者の等価輝度 (Leq) の測定結果を示す。

図6 各照明光源下における等価輝度 Leq の測定結果

Fig.6 Measured equivalent luminance (Leq) under the different light sources.

図の横軸は被験者の年齢を、縦軸は等価輝度 Leq を、図中の記号は照明光源の種別を表し、□は LED を、△は HID を、●はハロゲンの結果を示している。各光源とも被験者によるバラツキが大きい結果となっている。なお、図中の直線は、各光源に対して求めた Leq の年齢に対する回帰直線である。

表 4 に Leq の全被験者に対する平均値、その標準偏差 σ 、比率、回帰直線の決定係数 R^2 とその傾きを示す。なお、ここで $Ratio$ (比率) とは HID の Leq 平均値を 1 として正規化した時の LED、ハロゲンの Leq の値である。

表 4 各照明光源下における等価輝度 Leq 実験結果

Table 4 Experimental results of Leq under the different light sources.

Light source	Leq (cd/m ²)	σ	$Ratio^{*1}$	R^2	Inclination
HID	22.09	19.29	1.00	0.016	0.225
LED	30.35	20.51	1.37	0.000	- 0.002
Halogen	18.95	17.79	0.86	0.076	0.455

※ 1 ; $Ratio = (\text{所定光源の平均 } Leq) / (\text{HID の平均 } Leq)$

上記の結果より、HID を 1 に正規化した時の LED の明るさは HID に対して 1.37 倍と高いが、ハロゲンは逆に HID に対して 0.86 倍と低い。これは照明光源の分光分布の相違の影響が考えられる。また、ハロゲンと HID には加齢の影響が見受けられる。LED はハロゲンと HID と比較して被験者年齢層全般に渡って明るさが高いと評価している。

表 5 に、照明光源間の平均値の差の検定結果を示す。HID×LED の p 値は 0.0671 で 5% に近いが、HID×Halogen の p 値は 0.4525 で有意差なし、LED×Halogen の p 値は 0.0096 と 1% 有意であった。

表 5 各照明光源間の等価輝度 Leq の平均値の差検定結果

Table 5 Verification results of the differences in Leq average value among the different light sources.

	Dispersion	p -Value	Verification
HID vs. LED	1366.80	0.0671	$p > 0.05$
HID vs. Halogen	196.27	0.4525	-----
LED vs. Halogen	2598.97	0.0096	$p < 0.01$

表 6 に各照明光源下における等価輝度 Leq の平均値の結果, 三刺激値 (X, Y, Z) として色温度の測定結果をまとめた。

表 6 各照明光源下における等価輝度 Leq の平均値,
三刺激値 (X, Y, Z) と色温度

Table 6 Leq , tri-stimulus values (X, Y, Z)
and color temperature of each light sources.

Light source	Leq (cd/m^2)	Tri-stimulus values			Color temp.
		X	Y	Z	
HID	22.09	12.47	13.00	6.49	4242
LED	30.35	13.01	13.00	10.83	5293
Halogen	18.95	14.08	13.00	4.41	3092

被験者全員の等価輝度 Leq の平均値と三刺激値 (X, Y, Z), 色温度との関係を図 7 から図 10 に示す。

図 7 三刺激値 X と等価輝度 Leq の平均値との関係

Fig.7 Correlation between the mean Leq and the tri-stimulus value's X of each light sources.

図 8 三刺激値 Y と等価輝度 Leq の平均値との関係

Fig.8 Correlation between the mean Leq and the tri-stimulus value's Y of each light sources.

図 9 三刺激値 Z と等価輝度 Leq の平均値との関係

Fig.9 Correlation between the mean Leq and the tri-stimulus value's Z of each light sources.

図 10 色温度と等価輝度 Leq の平均値との関係

Fig.10 Correlation between the mean Leq and the color temperature (K) of each light sources.

これらの結果より等価輝度 Leq は三刺激値の Z 並びに色温度との相関が強いと言える (図 9, 図 10 参照)。

Z は 3 種ある眼の視細胞の中でも短波長にตอบสนองする S 錐体の反応である。また色温度は短波長光成分の増加と共に上昇する。これらのことより今回の路面に対する明るさは光源の分光成分, 中でも短波長光即ち青色光成分の影響を受けることを示唆している。そこで加齢の影響並びに S 錐体の反応を考慮した明るさに関わる比視感度曲線の検討を実施した。

2.5 解析

(1) 加齢が明るさに与える影響の解析

加齢に伴う視覚特性の変化には, 眼球光学系と神経系の変化によるものがある。特に加齢に伴う眼球光学系の水晶体, 角膜の分光吸収率の変化は広く研究されており, 日本人の年代別標準比視感度は, 日本工業規格 JIS S0031 に掲載されている⁵⁾。

この年代別比視感度を図 11 に示す。横軸は波長 (nm), 縦軸は対数で表した視感効率である。なお, 図中の太線は標準比視感度曲線 $V(\lambda)$ を表す。加齢とともに 500nm 以下の短波長光の視感効率が低下するのが特徴的である。

図 11 日本人の年代別標準比視感度⁵⁾

Fig.11 Standard spectral luminous efficiency of Japanese people by age⁵⁾.

そこで今回の実験に用いた路面サンプル並びに各前照灯照明光源の下で加齢の影響がどのように現れるかをこの年代別比視感度を活用して検討することとした。

式 (1) は現在の CIE1931 表色系の測光量計算式である。この式において $Km=683 (lm/w)$, $S(\lambda)$ に実験に用いた光源の分光放射エネルギー分布を, $\rho(\lambda)$ に路面サンプルの分光反射率分布を, $V(\lambda)$

に年代別比視感度を代入し、 L を Leq として計算し、解析を実施した。

$$L = Km \int_{380}^{780} S(\lambda) \cdot \rho(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \quad (1)$$

各光源に対する年齢別 Leq の計算結果を図12に、その結果を回帰直線に当てはめた時の傾き(Inclination)と決定係数 R^2 を表7に示す。なお、表7は実験結果の傾きと決定係数も併せて示した。

図12 各照明光源に対する年齢別 Leq の変化(計算結果)
Fig.12 Changes in Leq with aging for each light sources.

表7 実験結果と加齢計算結果の回帰曲線係数の比較

Table 7 Comparison between the calculated results of aging and the experimental results.

Light source	Calculated results of aging		Experimental results	
	Inclination	R^2	Inclination	R^2
HID	0.001	0.122	0.225	0.016
LED	-0.001	0.104	-0.002	0.000
Halogen	0.008	0.969	0.455	0.076

ハロゲンに関しては加齢変化の影響が著しいが、HIDとLEDに関してはそれほど顕著ではないという結果が得られた。

加齢効果(傾き)の計算結果と実験結果の全体的な傾向は一致している。従って、今回の結果における年齢による違いは相対的に分光視感度の加齢変化で定性的に説明できると言える。しかし、高齢者でハロゲンが他の光源に比べて等価輝度 Leq が高い計算結果となっており、実験値と異なる。そこで、光源間の Leq の差の原因を検討するために、 S 錐体を考慮した比視感度曲線を立案し、各光源間の明るさ(等価輝度)の相違に関する原因解析を行なった。

(2) S 錐体を考慮した明るさに関わる比視感度曲線の検討

現在のCIE1931表色系の測光システムでは、測光量計算式(1)で用いる標準比視感度、すなわちCIE $V(\lambda)$ は S 錐体が輝度に寄与しないという前提で求められている^{9) 7)}。

しかし、実験から得られた結果は S 錐体の感度領域である短波長成分が明るさに寄与していることを示唆していることから、明るさに対応する新たな分光視感度を $V_k(\lambda)$ と記すこととし、 $V_k(\lambda)$ を式(2)のように定義した。

$$V_k(\lambda) = K \cdot G_S(\lambda) + V(\lambda) \quad (2)$$

ここで $G_S(\lambda)$ は S 錐体の分光感度、 K は S 錐体の感度 $G_S(\lambda)$ が寄与する割合を決定する係数である。なお、 S 錐体の分光感度 $G_S(\lambda)$ はSmith & Pokorny⁷⁾のデータを採用した。

今回の実験結果に最も適合する値を求めた結果、 $K=1.49$ が得られた。そこで、 $G_S(\lambda)$ 、 $V(\lambda)$ 、及び K を1.49に設定した時の $V_k(\lambda)$ を図13に、計算結果を表8に示す。標準比視感度曲線 $V(\lambda)$ に対して、 $V_k(\lambda)$ は短波長側の感度を高めた形状となっている。

図13 測光システムにおける分光視感度 $V_k(\lambda)$ の提案
Fig.13 $V_k(\lambda)$ for our proposed photometry system.

表8 Leq の実験値と $V_k(\lambda)$ による Leq 計算値

Table 8 Leq experimental values and Leq values based on $V_k(\lambda)$.

Type of light source	Leq	$V_k(\lambda)$
	experimental value	$K=1.49$
HID	22.09	22.67
LED	30.35	29.15
Halogen	18.95	19.57

前記の如く設定した $V_k(\lambda)$ に加齢効果を考慮できるようにするために式(2)を更に改良した。これを式(3)に示す。

$$V_{kage}(\lambda) = K \cdot G_S(\lambda) + V_{age}(\lambda) \quad (3)$$

ここで $V_{age}(\lambda)$ は前述のJIS S0031の年代別比視感度における年代別比視感度である。 $V_{kage}(\lambda)$ はその年代に対応した分光視感度である。

式(3)の $V_{age}(\lambda)$ を式(1)の $V(\lambda)$ に代入し、30代、40代、50代、そして60代の各年齢別の Leq を各光源に対して求めた(K は1.49)。結果を表9に示す。 Leq をLEDの計算結果で正規化したグラフを図14に示す。

表9 実験結果の Leq と $V_k(\lambda)$ による Leq 計算値の比較

Table 9 Comparison between the calculated results of aging and the experimental results.

Light source	Calculated results of aging		Experimental results	
	Inclination	R^2	Inclination	R^2
HID	-0.448	0.929	0.225	0.016
LED	-0.492	0.954	-0.002	0.000
Halogen	-0.207	0.935	0.455	0.076

図 14 加齢を考慮した $V_k(\lambda)$ による Leq 正規化計算値 (LED=1)
Fig.14 Changes in Leq with aging based on $V_k(\lambda)$.

図 14 の回帰直線群は図 6 のそれとよく似ている。また、 $V_k(\lambda)$ によって加齢変化も精度よく説明できることから、今回提案した $V_k(\lambda)$ を用いた明るさ評価法は妥当性が高いといえる。

3. グレー綿生地に対する実験(実験Ⅱ)

実験配置と実験方法は実験Ⅰと同一で視対象のみグレー綿生地に変更した。グレー綿布地は路面サンプル上に敷いた。その表示輝度は実験Ⅰと同じく各光源で達成可能な 9.6 cd/m^2 に設定した。被験者は実験Ⅰの 40 名にて実施した。

3.1 グレー綿生地の反射特性

観測条件下におけるグレー綿生地の分光反射率を図 15 に、各照明光源下における色度を表 10 に示す。

路面サンプルは 400nm 以下で反射率が増加する特性であったが(図 4 参照)、グレー綿生地は 680nm 以上で反射率が増加する。

図 15 グレー綿生地の分光反射率
Fig.15 Spectral reflectance of the grey cotton close.

表 10 各照明光源下におけるグレー綿生地の色度

Table 10 Grey cotton close chromaticity
under the three types of illumination light sources.

Type of light source	xy chromaticity
HID	$x=0.3677, y=0.3924$
LED	$x=0.3265, y=0.3384$
Halogen	$x=0.4262, y=0.4055$

3.2 結果

図 16 に全被験者の等価輝度 Leq の測定結果を、表 11 に Leq の平均値、標準偏差 σ 、比率、回帰直線の決定係数 R^2 と傾きを示す。なお、図中の座標とシンボルは図 6 と同一である。

図 16 各照明光源下におけるグレー綿生地の等価輝度 Leq の測定結果
Fig.16 Measured equivalent luminance (Leq) of the grey cotton close under the different light sources.

表 11 各照明光源下におけるグレー綿生地 Leq の実験結果

Table 11 Experimental results of Leq
of the grey cotton close under the different light sources.

Light source	Leq (cd/m^2)	σ	Ratio	R^2	Inclination
HID	10.58	11.91	1	0.0069	0.0934
LED	13.92	14.25	1.32	0.0017	0.0557
Halogen	9.34	9.80	0.91	0.0387	0.1836

3 種類の光源に対する Leq の平均値の比率 (Ratio) は、実験Ⅰの路面サンプルの実験結果 1, 1.37, 0.86 に対して 1, 1.32, 0.91 即ち LED>HID>Halogen で実験Ⅰの結果と同傾向である。次に、実験Ⅰで見られたハロゲン、HID 各光源の加齢効果は 1/2 程度に弱まっている(表 4, 表 11 参照)。なお、 Leq の標準偏差 σ は実験Ⅰの約 1/2 程度に低下している。

表 12 に光源間の平均値の差の検定結果を示す。何れ光源間の $p>0.05$ で 5% 有意とはならなかったが、平均値の差の傾向は実験Ⅰと同じで、ハロゲンと LED 間の差が最も大きい結果となった。

表 12 各照明光源間の等価輝度 Leq の平均値の差検定結果

Table 12 Verification results of the differences in Leq average value among the different light sources.

	Dispersion	p-Value	Verification
HID vs. LED	223.11	0.2587	-----
HID vs. Halogen	30.60	0.6148	-----
LED vs. Halogen	418.98	0.0991	-----

表 13 に各照明光源下における三刺激値 (X, Y, Z)、色温度と実験結果の等価輝度 Leq の全平均値を示す。

表 13 各照明光源下における等価輝度 Leq の全平均値、三刺激値 (X, Y, Z) と色温度

Table 13 Leq , tri-stimulus values (X, Y, Z) and color temperature of each light sources.

Light source	Leq (cd/m^2)	Tri-stimulus values			Color temp.
		X	Y	Z	
HID	10.58	9.00	9.60	5.87	4242
LED	13.92	9.64	9.60	10.18	5293
Halogen	9.34	10.06	9.60	3.98	3092

等価輝度 Leq の全平均値と三刺激値 (X, Y, Z), 色温度との関係を図 17 から図 20 に示す。 Leq は実験 I の路面サンプル実験と同じく三刺激値の Z との相関が強い。一方, 色温度との相関は実験 I の結果に比べやや弱まっている。

実験 I の解析と同様に S 錐体の感度を考慮した式 (2) の分光視感度 $V_K(\lambda)$ の係数 K を求めた。結果を表 14 に示す。

グレー綿生地の実験結果に最も適合する K 値は 0.627 であった。路面サンプルの $K=1.49$ に比べ低い値となっている。路面サンプルは短波長側で反射率が上昇しているが, グレー綿生地は長波長側で上昇している。この視対象の分光反射特性が係数 K に影響を与えたと思われる。

図 17 三刺激値 X と等価輝度 Leq の平均値との関係
Fig.17 Correlation between the mean Leq and the spectral tri-stimulus value's X of each light sources.

図 18 三刺激値 Y と等価輝度 Leq の平均値との関係
Fig.18 Correlation between the mean Leq and the spectral tri-stimulus value's Y of each light sources.

図 19 三刺激値 Z と等価輝度 Leq の平均値との関係
Fig.19 Correlation between the mean Leq and the spectral tri-stimulus value's Z of each light sources.

図 20 色温度と等価輝度 Leq の平均値との関係
Fig.20 Correlation between the mean Leq and the color temperature (K) of each light sources.

表 14 Leq の実験値と $V_K(\lambda)$ による Leq 計算値
Table 14 Leq experimental values and Leq values based on $V_K(\lambda)$.

Type of light source	Leq experimental value	$V_K(\lambda)$
		$K=0.627$
HID	10.58	9.86
LED	13.92	12.04
Halogen	9.34	8.94

4. まとめ

本研究では前照灯の照明光源の分光分布が視対象の明るさに及ぼす影響を調査した。照明光源はハロゲン, HID, LED の白色系光源 3 種類, 評価視対象は路面サンプル (実験 I) とグレー綿生地 (実験 II) の無彩色系の 2 種類を選定した。視対象の視角サイズは $200'$ (水平方向) $\times$ $40'$ (鉛直方向) と比較的小さな視対象であり, 中心視の明るさを評価した。

実験は視対象とマッチング刺激を直接比較させ, 明るさに関する等価輝度 (Leq) を測定することにより行い, 視対象の明るさに対する影響は Leq の測定結果を測光システムの面から解析した。

(1) 明るさの実験結果

路面サンプル (実験 I) に対する LED 光源の明るさは, HID の 1.37 倍, ハロゲンの 1.60 倍であった。LED とハロゲン間における平均値の差は 5% 有意であった。グレー綿生地 (実験 II) に対する LED 光源の明るさは HID の 1.32 倍, ハロゲンの 1.49 倍であった。LED 照明光源による視対象の明るさはグレー綿生地より路面サンプルにおいて明るさを向上させた。

消費電力の観点から見ると, LED 光源は HID の消費電力よりも $0.75 (= 1/1.35)$ 倍の電力で HID 相当の“明るさ”を得ることが出来ることから, LED 光源は明るい光源であると共に, 省電力で環境にもやさしい優れた光源であると言える。

(2) 照明光源による明るさ相違に関する解析結果

路面サンプル及びグレー綿生地における光源間の明るさの相違原因を等価輝度 (Leq) と三刺激値 (X, Y, Z) 並びに色温度の面から解析した。

その結果, 明るさの指標である等価輝度 Leq は路面サンプルでは三刺激値 Z と色温度に対して相関が強いという結果となった。一方, グレー綿生地に対しては三刺激値 X, Y との相関が高いという結果であった。

(3) 測光システム面からの解析結果

Leq が三刺激値 X との相関が高いという結果から、 Leq に対応した測光システムとして S 錐体の分光感度も考慮した分光視感度 $V_k(\lambda)$ を導入した式 (2) を用いて実験結果を解析した。

各実験結果を定量的に精度よく説明できる K 値は、路面サンプルで 1.49、グレー綿生地では 0.627 であった。これは視対象の分光反射特性により K 値を修正する必要性を示唆している。

(4) 明るさの加齢効果について

路面の明るさ (実験 I) についてはハロゲンと HID については加齢効果が見られた。これについては $V_k(\lambda)$ に JIS S0031 の年代別視感度における年齢の違いによる比を乗じて年齢別の等価輝度 Leq を算出することにより加齢変化を良く説明できることができることを示した。一方、グレー綿生地 (実験 II) についてはハロゲン、HID の加齢効果は路面のそれに比べて 1/2 以下と弱くなった。これについては視対象の分光反射率分布の影響が考えられる。

5. 今後の課題

明るさは中心視が最重要であるが、有効視野の明るさ、そして周辺視も含めた存在空間の明るさについても今後研究を進める必要がある。

また、実験に使用した路面サンプルとグレー綿生地の何れの視対象も表面色は無彩色系である。交通案内標識の有彩色についても研究を進める必要があるとともに視対象の分光反射率の影響についても更に解析する必要がある。

照明光源の分光分布が視対象の明るさに与える影響については、1960 年代に白色蛍光灯から三波長型蛍光灯に進展する際に「同一輝度でも明るさが異なる (B/L 効果)」ことが指摘され、1980 年代に CIE (国際照明委員会) はもとより国内でも数多くの研究成果の報告がなされた⁸⁾⁻¹¹⁾。中でも照明学会の研究調査委員会では測光システムの面からの詳細な研究もなされた¹²⁾。そこでは 4 つの測光システムが提案され評価されている¹³⁾⁻¹⁶⁾。今後の研究において、4 測光システムの適用も検討したい。

今後とも自動車用照明機器の研究において視覚の科学面と人間工学分野からの実験と研究を進め、交通安全・快適性向上に寄与していきたいと考えている。

参考文献

- (1) Sivak, M., Schoettle, B., et al.: LED Headlamps glare and color rendering, UMTRI-2003-39 (2003).
- (2) Bullough, J. D., et al.: An investigation of headlamp glare, intensity, spectrum & size, DOT HS 809672 (2003).
- (3) 橋本 博, 野口 昌弘, 平尾 保, 元木 正典: 高齢者に及ぼす LED 前照灯の眩しさに関する検討, 平成 19 年 11 月, 自動車技術会論文集, 38-6 (2007).
- (4) 塚田由紀, 豊福芳典, 森田和元, 鈴木喜代司, 井手勝幸: 白色 LED の色温度によるグレアの変化, H19 照学大全, p. 193 (2007 JIS S0031).
- (5) 高齢者・障害者配慮設計指針—視覚表示物—年代別相対輝度の求め方及び光の評価方法 (2004).
- (6) 色彩学会編・新編色彩科学ハンドブック【第 2 版】: pp. 397-400 (1998).
- (7) Smith, V. C. and Pokorny, J.: Spectral sensitivity of the foveal cone photopigments between 400 and 500nm, Vision Research, 15, pp. 161-171 (1975).
- (8) CIE TC1.4: Light as a true visual quantity: Principles of measurement, CIE Pub. No. 41, CIE Central Bureau (1978).
- (9) 延々 幸夫, 金谷末子, 猪原誠: 3波長域発光形蛍光ランプの照明特性, 照学誌, 63-5, pp. 260-271 (1979).
- (10) 淵田隆義ほか: 3波長帯系蛍光ランプの照明効果, 照学誌, 65-10, pp. 56-63 (1981).
- (11) 納谷嘉信, 橋本健次郎: 高演色性蛍光ランプの照明下での明るさ, 照学誌, 67-6, pp. 34-39 (1983).
- (12) 照明学会・明るさ計量化研究調査委員会: 明るさ測光システムの検討—明るさの計量化研究調査委員会報告書, JIER-018, 平成 2 年 8 月, pp. 1-17 (1990).
- (13) Guth, S. L. and Lodge, H. R.: Heterochromatic additivity foveal spectral sensitivity, and new color model, J. Opt. Am. 63 pp. 450-462 (1973).
- (14) Yaguchi, H. and Ikeda, M.: Subadditivity and super additivity in heterochromatic brightness matching, Vision Res. 23, pp. 1711-1718 (1983).
- (15) Ware, C. and Cowan, W.: Specification of heterochromatic brightness matches: A conversion factor for calculating luminances of stimuli that are equal in brightness; NRC Publication, No. 26055, National Research Council of Canada (1983).
- (16) Nakano, Y., Ikeda, M. and Kaiser, P. K.: Contributions of the opponent mechanisms to brightness and nonlinear model, Vision Res. 28, pp. 799-810 (1988).

(受付日 2009 年 7 月 13 日 / 採録日 2010 年 3 月 8 日)

小林 正自 (専門会員)

㈱小糸製作所

〒424-8764 静岡県静岡市清水区北脇 500
1953 年生まれ。1975 年東海大学工学部工学工学科卒業。同年から同所に勤務。自動車照明機器の基礎研究に従事。自動車技術会、交通工学会等各会員。

大川 正夫 (非会員)

㈱小糸製作所

〒424-8764 静岡県静岡市清水区北脇 500
1966 年生まれ。1984 年静岡県立島田工業高等学校卒業。同年、㈱小糸製作所に勤務。自動車用前照灯、標識灯性能評価及び照明機器技術開発に従事。

岡嶋 克典 (専門会員)

横浜国立大学大学院環境情報研究院

〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-7
1990 年東京工業大学大学院総合理工学研究科博士課程修了工学博士。同年から防衛大学校に勤務。2004 年から現所属。日本視覚学会、日本色彩学会、日本光学会等各会員。