

視票の提示位置がプルキンエ効果に及ぼす影響

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2013-02-26 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 中川, 慶子, 明石, 行生, 有松, 孝之, 京藤, 伸弘, NAKAGAWA, Keiko, AKASHI, Yukio, ARIMATSU, Takayuki, KYOTO, Nibuhiro メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10098/7286

視票の提示位置がプルキンエ効果に及ぼす影響

非会員 中川慶子 (福井大学) 専門会員 明石行生 (福井大学)
 正会員 有松孝之 (株式会社 GS ユアサ) 正会員 京藤伸弘 (株式会社 GS ユアサ)

Effects of Target Positions on Purkinje Effect

Non Member Keiko Nakagawa (University of Fukui), Fellow Member Yukio Akashi (University of Fukui)
 Member Takayuki Arimatsu (GS Yuasa International Ltd.) and Member Nobuhiro Kyoto (GS Yuasa International Ltd.)

ABSTRACT

The International Commission on Illumination (CIE) approved a compensated mesopic photometry system (MES2) to bridge between $V(\lambda)$ and $V'(\lambda)$. However, before the system is applied to real road lighting applications, several problems need to be solved. Among them, we investigated the effects of target positions on the Purkinje phenomenon and therefore on the current mesopic photometry system. We conducted two experiments by using a high-pressure sodium (HPS) lamp and three ceramic metal halide (CMH) lamps. The experimental results showed that there were small variations in the Purkinje effect depending on target positions. Such experimental results seemed to reflect retinal density distributions of cones and rods. Practically, however, mesopic luminances obtained from the CIE mesopic photometry system (MES2) were correlated to reaction times to targets presented at eccentricity angles between 5° and 15°. The experimental results also suggested that a glare source appeared to exaggerate differences in reaction time for peripheral target detections between HPS and CMH illuminations, and therefore that the use of lamps with higher S/P ratios improved drivers' visual performance more than the mesopic photometry predicts.

KEYWORDS : Mesopic vision, cone, rod, photometry systems, reaction time, target position, glare

1. はじめに

夜間道路の運転時に体験する薄明視の明るさレベル (以降, 薄明視レベルとよぶ) において, ヒトの目は, 明所視の明るさレベル (明所視レベルとよぶ) より短波長放射に対する感度が高い。これは, 古くからプルキンエ効果として知られている¹⁾¹⁰⁾。プルキンエ効果は, 薄明視レベルでは錐体に加えてそれより感度のピークが短波長側にある桿体が同時に働くことが原因である。

周知のように, 現行の明所視の測光システムは, 上述したような薄明視レベルの桿体の働きを考慮していない。そのため, 薄明視レベルにおいて, 短波長の放射が多いランプが明るさ知覚に及ぼす効果を過小評価する。例えば, 夜間道路において, 短波長放射が多いメタルハライドランプで照明した空間と長波長放射が多い高圧ナトリウムランプで照明した空間とを比較する時, 空間内の道路面および障害物などの視票の表面の照度 (輝度) が同一であっても, メタルハライドランプで照明した空間の方が明るく見える。また, 高圧ナトリウムランプで照明した視票よりメタルハライドランプで照明した視票の方が検出しやすい。そこで, 国際照明委員会 (CIE) は, 2002 年, 視票の検出などの視作業性に基づいて, 錐体の感度に桿体の感度を加えた薄明視の測光システムを構築することを目的として, 技術委員会 TC1-58 を設立した。

TC1-58 は, Unified System of Photometry (USP)⁸⁾と Mesopic Optimization of Visual Efficiency System (MOVE)⁹⁾の二つのモ

デルについて討議した。前者の USP は, 色チャンネルの働きを除外し, 輝度チャンネルだけの働きを抽出するために, 輝度コントラストの高い視票に対する反応時間を従属変数としている。後者の MOVE は, より広範囲な視作業にも適用するように, 輝度コントラストの高い視票から低い視票までを対象とし, 視票に対する反応時間に加えて視票の増分域も従属変数とした。このため, MOVE には, 輝度チャンネルだけでなく色チャンネルの働きも反映されている。建設的な討議の末, 2010 年, TC1-58 は, USP と MOVE の両者を折衷したモデル (MES2) を推奨モデルとして提案した¹⁰⁾。

しかし, 上述した 3 種類の薄明視の測光システム (以降, 薄明視測光システムとよぶ) を実際の夜間道路の照明環境に適用する前に解決しなければならない課題がある。それらの課題の一つに, 視票の提示位置がプルキンエ効果に及ぼす影響が不明であることが挙げられる。これは, 薄明視測光システムが偏心角 (視野中心から隔たった角度) 15 度の位置に視票を提示した実験結果に基づくことに起因する。網膜上の錐体と桿体の密度は均一ではないため⁴⁾, 薄明視測光システムは, 厳密には偏心角 15 度以外の視野位置に提示された視票には適用できないはずである。つまり, 桿体が無く錐体だけが存在する中心視には, 薄明視測光システムではなく, 現行の明所視測光システムを適用するべきである。また, 周辺視であっても錐体の密度は, 視野中心から偏心角 5 度まで離れる間, 急激に

低下する。反対に桿体の密度は、視野中心から離れるにしたがって高まり、偏心角 10 度～20 度で最大となり、その外側では低下する。例えば、薄明視測光システムを偏心角 15 度以外の視票に適用した場合、それを照明する光源の分光特性によっては、測定した薄明視輝度とヒトがその視票を検出するのに要する反応時間に対応しないと予測できる。このことについて調べるため、今回、種々の分光分布の照明条件の下で、周辺視野の 3 つの位置に提示した視票に対する被験者の反応時間を調べる実験を行った（実験 1）。

また、夜間道路において運転者が自動車を走らせている時、運転者は車体をレーンの間に維持する中心視の作業をしながら、路面上の障害物や道路を横断する小動物などの周辺視野の視票を検出できるように注意を配分しなければならない。対向車のヘッドライトなどのグレア光源が周辺視野に存在すると、それは運転者の視票検出の反応時間を長くする。その視票が見えるか見えないかの閾値に視票輝度が達すると、視票に対する反応時間は、薄明視測定システムに基づく薄明視輝度に対応しないように見える場合がある。例えば、高圧ナトリウムランプとメタルハライドランプのそれぞれのランプによって同じ明所視輝度で照明された視票に対する反応時間を比べる場合、メタルハライドランプは、高圧ナトリウムランプより短波長放射を多く含むため、メタルハライドランプの照明下で視票の検出時間が短くなる。この時、両ランプ間での反応時間の差異は、薄明視測光システムで予測できる差異よりも大きくなる可能性がある。一般に、閾値近傍においては、視票輝度の僅かな変化が反応時間の大きな変化を生じさせる。この場合、あたかも、両ランプの下で反応時間の差異が大きくなったように見える。このようなグレア光源の存在によって生じる薄明視測光システムを実環境に適用した時に生じる問題について調べるため、今回、実験 1 と同様の実験条件と手順を用いて、周辺視野にグレア光源を提示した時に視票検出の反応時間を調べる実験を行った（実験 2）。

さらに、今回の実験において、一般に使用されている高圧ナトリウムランプと 3 種類のメタルハライドランプを実験用光源として用いることにより、薄明視測光システムを用いて測定した薄明視輝度は実際の視作業性に良好に対応するかどうか、また、薄明視測光システムに基づいてランプの分光分布を選定すれば効率の良い道路照明が設計できるかどうかを調べることを意図した。

2. 視票位置がプルキンエ効果に及ぼす影響に関する実験（実験 1）

今回、視票を提示する視野位置（偏心角）によるプルキンエ現象への影響、つまり、薄明視レベルにおける桿体の寄与が視票の提示位置によってどのように変動するか、を調べる実験を行った。従属変数（指標）として、視票に対する被験者の反応時間を用いた。実験では、光源の分光分布と視票輝度が異なる実験条件下で視野の中心と周辺に 7 つの視票を提示し、それらの視票に対する被験者の反応時間を調べた。

2.1 実験装置

実験は、幅 5 m、奥行 4 m、高さ 2.7 m の実験室で行った。この実験室の天井と壁は無彩色に塗装され、天井と壁の反射率は、それぞれ 86% と 65% であった。天井と壁の分光反射率を測定した結果、それぞれの分光反射率は可視光の波長域で均一であるため、反射光の分光特性に影響しないことを確認した。なお、床面と机・本棚を暗幕で覆った。実験中、室内に日光が入らないように日没後に実験を行い、日没後も街灯の光が窓から入らないように窓を遮光カーテン（サンゲツ CK8371）で覆った。

この実験室に、視票提示装置、スイッチ、コンピュータ、照明装置から構成される実験装置を設置した。図 1 に実験装置の概略図を示す。視票提示装置は、7 個の視票を埋め込んだ 900 mm×1200 mm の黒色スチレンボード（反射率 5%）とした。この視票提示装置を高さ 0.7 m の机の上に設置した。7 つの視票は、ボードの中心と中心から左右に 5 度、10 度、20 度の偏心角の位置に埋め込んだ。なお、実験は、両眼視で行ったため、いずれの視票も両眼とも盲点に入って見えなくなることはない。別の機会（授業中の演習）に、全被験者の右目の盲点の位置を調べたが、いずれも偏心角 10 度と 20 度近傍には位置しなかった。各視票は、表と裏をそれぞれ黒（同 4%）と白（同 80%）で塗装した、直径 13 mm（視角 0.75 度）、厚さ 0.4 mm の円盤であった。この円盤は、磁気を帯び、2 つの電磁石を利用した磁気表示器に組み込まれている。一つ目の電磁石の端子間に電圧をかけることにより、円盤を瞬時に黒から白に裏返し、二つ目の電磁石の端子間に電圧をかけることにより、円盤を瞬時に白から黒に戻した。この磁気表示器をデジタル信号出力インターフェース（ナショナルインストルメンツ社製 NI-9421）を介してコンピュータに接続した。ボード中心の被験者の固視点を示すため、そこから上下に 30 mm 離れた位置にそれぞれ直径 10 mm の白色点を記した。スイッチは、被験者が視票を検出した時に信号を送るための押しボタン式のスイッチである。このスイッチを、デジタル信号入力インターフェース（同 NI-9472）を介してコンピュータに接続した。コンピュータには計測制御ソフトウェア LabVIEW8.6（ナショナルインストルメンツ社）をインストールした。このソフトウェアを用いて、予めプログラムを作成・記憶しておくことにより、視票の提示とスイッチからの受信が可能である。このプログラムにより、視票が提示されてから被験者がスイッチを押すまでの時間を反応時間として計測・記録した。この反応時間を視作業性の指標（従属変数）として用いた。なお、実験中、被験者の目がボードから 1 m 離れたところに位置するように顎台で顔の位置を固定した。

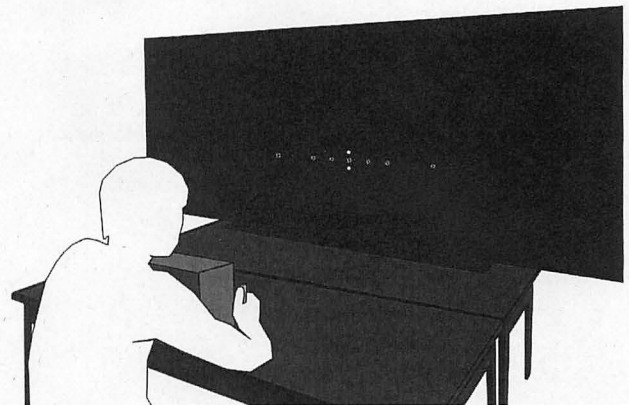


図 1 実験装置の概略図

Fig. 1 View of experimental setup.

2.2 実験用ランプおよび照明器具

実験では、道路照明に多く用いられている高圧ナトリウムランプ（GS ユアサ製 NHT110・LS、以降 HPS と呼ぶ）とセラミックメタルハライドランプ（以降 CMH と呼ぶ）を用いた。CMH には、3000 K（GS ユアサ製 CMT150L-LW/BH）、3500 K（同 CMT110LR-WW/BH）、4000 K（同 CMT150LE-W/BH）の 3 種

類の色温度のランプを用いた（以降、それぞれ、CMH3000, CMH3500, CMH4000と呼ぶ）。図2にこれらのランプの分光分布を示す。図2に示すように、短波長放射エネルギーは、HPSよりもCMHの方が高く、さらにCMHの中では、CMH3000, CMH3500, CMH4000と色温度の上昇とともに増す。HPS, CMH3000, CMH3500, CMH4000の明所視輝度（photopic luminance）に対する暗所視輝度（scotopic luminance）の比（以降S/P比と呼ぶ）は、それぞれ、0.53, 1.25, 1.34, 1.79であった。これらのランプを投光用照明器具（品番CMH-347809）に入れて点灯した。これらのランプの出力は、この実験室で前述の実験条件を実現するには高すぎたため、黒色アルミ板で照明器具の開口部を小さくするとともに黒色のアルミメッシュをフィルターとして用いて減光した。照明器具から出てくる光の分光分布を測定した結果、これらの黒色アルミ板と黒色アルミメッシュを介してもランプの分光特性は変わらないことを確認した。

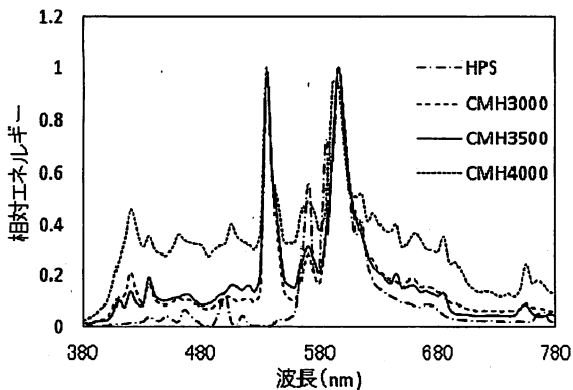


図2 実験用ランプの分光分布

Fig. 2 Spectral power distribution employed in the experiment.

2.3 実験条件

独立変数として、ランプの分光分布、視票の輝度、視票の位置を変化させた。表1に実験条件を示す。なお、実験中は、視票面の鉛直面照度を指標として測定することにより実験条件を設定した。表1中の視票輝度は、視票照度から算出した反射率80%の視票の白色面の輝度である。視票提示の繰り返し回数は、各条件下で8回とした。

表1 実験条件

Table 1 Experimental conditions employed in Experiment 1.

独立変数	水準
ランプの分光分布	HPS, CMH3000, CMH3500, CMH4000
視票輝度[cd/m ²] (視票照度[lx])	0.036 (0.14), 0.36 (1.4), 3.6 (14)
偏心角[度]*	-20, -10, -5, 0, 5, 10, 20

*偏心角は、視野中央を0度として、左方向をマイナス、右方向をプラスで表わす。

2.4 実験手順

インフォームドコンセントに同意した福井大学の学生15名（平均年齢23歳、男性8名、女性7名）が、被験者として実験に参加した。被験者は、一人当たり672回（4ランプ×3視票輝度×7視野

位置×8回繰り返し）の刺激提示に対して反応した。4つのランプの提示順序は、15名の被験者の間でできるだけ偏りのないようにした。ただし、実験に用いたランプは、再点灯および安定にそれぞれ少なくとも15分間を要した。被験者一人あたりの実験時間を短縮するために、実験中全てのランプは常に点灯し、実験に使わないランプは、室外に置いた。さらに、ランプ交換の回数を少なくするため、一旦室内に移動したランプに対して3つの視票輝度の条件と7つの偏心角の条件を全て提示してから次のランプに交換した。また、この時、ランプの提示順序は、全ての被験者に対してできるだけ偏りのないようにし、視票輝度と偏心角の条件は、ランダムな順序で提示した。実験は、条件設定の時間を含めて、被験者一人当たり約2時間を要した。つぎに実験手順を記す。

- ① 実験に先立ち、実験者は、実験室に視票輝度0.36 cd/m²の実験条件を練習用に設定した。実験者は、被験者を実験室に案内し、視票提示装置の前の椅子に座らせた。被験者に実験手順を説明し、特に、実験中は常に視野中央を固視すること、中心以外の視票は、中心視で見るとはならず周辺視で検出することを強調した。
- ② 順応終了後、実験者は被験者に30回視票を提示し、練習をさせた。被験者は、実験室に入室してから練習終了までの約10分間、実験室の明るさに順応したことになる。被験者の練習が終了した後、実験者は、実験用の照明条件を設定した。その間、被験者は、実験室の中で待機した。実験条件設定後、被験者は、実験条件の明るさに5分間順応した。
- ③ 実験者は、コンピュータのプログラムを開始することにより実験を始めた。コンピュータは、7つの視票をそれぞれ8回ずつ（計56回）ランダムな順序で提示した。被験者は、視票の1つが白く変わったことを検出するや否や手元のスイッチを押した。被験者がスイッチを押すと視票は白から黒に戻った。コンピュータは、視票を提示してから被験者がスイッチを押すまでの時間を被験者の反応時間として記録した。なお、各視票は、2秒間提示した。視票が提示されている2秒間に被験者が視票を検出できなかった場合は、検出ミスとした。数秒間のインターバルの後、コンピュータは、次の視票を提示した。コンピュータは、視票提示のインターバルを2~8秒の間で乱数を用いて決めた。コンピュータは、視票を56回提示した後、被験者の反応時間を記録してプログラムを終了した。
- ④ 実験者は、③を残りの2視票輝度条件に対して繰り返した。
- ⑤ 実験者は、③~④を残りの3つのランプの条件について繰り返し、当被験者に対する実験を終了した。各被験者は、実験を終了するまで約2時間を要した。
- ⑥ 実験者は、①~⑤を15名の被験者について繰り返した。

2.5 実験結果

全ての反応時間を用いて統計解析をすると検出ミスが欠損データになるため、まず、被験者、ランプ、視票輝度、視野位置ごとに反応時間の平均値を求めた。次に、その平均値を用いて、ランプ、視票輝度、視野位置を変数とする3元配置の分散分析を行った。解析の結果、ランプ、視票輝度、視野位置の主効果があり、輝度と偏心角との組み合わせの間に交互作用があることがわかった。これらの主効果および交互作用について、図3a~図3cに各条件の反応時間の平均値と標準誤差を示す。さらに、各図において、水準間に有意な差があるかどうかを調べるために、t検定（一対の標本による平均の検定）を行った。図3a~図3cとt検定の結果から、次のことが明らかになった。

- ① ランプの主効果：図 3a では、4 つのランプの反応時間の差異は小さいが、HPS、CMH3000、CMH3500、CMH4000 の順に視票に対する反応時間は短くなっていくことがわかる。この順番は、実験に使用したランプを S/P 比の小さいものから並べた順番である。これについて、t 検定（両側）を行った結果、HPS と CMH3500 との間 ($p < 0.05$)、HPS と CMH4000 との間 ($p < 0.001$)、CMH3000 と CMH4000 との間 ($p < 0.05$)、で、視票に対する反応時間に有意差があるが、その他の 2 つのランプの組み合わせについては、有意差はなかった。
- ② 視票輝度の主効果：図 3b と t 検定の結果、 3.6 cd/m^2 と 0.36 cd/m^2 との間、 0.36 cd/m^2 と 0.036 cd/m^2 との間について視票に対する反応時間に有意差があることから、視票照度が 3.6 cd/m^2 、 0.36 cd/m^2 、 0.036 cd/m^2 と低くなるに従って、反応時間は増加することがわかった。
- ③ 偏心角の主効果：図 3b から、偏心角により反応時間が異なることがわかる。隣り合う偏心角間で t 検定（両側）を行った結果、 -20 度と -10 度との間、 -5 度と 0 度との間、 10 度と 20 度との間に有意差（全て $p < 0.001$ ）があった。このことから、左右方向に偏心角 20 度の時に反応時間が最大になっていることがわかる。
- ④ 視票輝度と偏心角との交互作用：図 3c から、視票輝度毎に、偏心角による反応時間の差異の特徴が異なることがわかる。各視票輝度について、隣り合う偏心角間で t 検定（両側）を行った結果、視票輝度 0.036 cd/m^2 では、偏心角 -20 度と -10 度との間 ($p < 0.001$)、偏心角 -10 度と -5 度との間 ($p < 0.01$)、偏心角 5 度と 10 度との間 ($p < 0.05$)、偏心角 10 度と 20 度との間 ($p < 0.001$) に有意差があることがわかった。このことから、左右両方向ともに偏心角 10 度において視票に対する反応時間が短く、偏心角 20 度において視票に対する反応時間が長いことがわかった。視票輝度 0.036 cd/m^2 については、偏心角 10 度で反応時間が最短であると言える。視票輝度 0.36 cd/m^2 では、偏心角 -20 度と -10 度との間 ($p < 0.001$)、偏心角 -5 度と 0 度との間 ($p < 0.001$)、偏心角 0 度と 5 度との間 ($p < 0.001$)、偏心角 10 度と 20 度との間 ($p < 0.001$) に有意差があった。このことから、視票輝度 0.36 cd/m^2 では、視野中心の反応時間が最も短く、左右両方向に偏心角 20 度の反応時間が最も長いと考えられる。視票輝度 3.6 cd/m^2 では、偏心角 -20 度と -10 度との間 ($p < 0.001$)、偏心角 10 度と 20 度との間 ($p < 0.001$) に有意差があった。このことから、視票輝度 3.6 cd/m^2 では、視野中心から左右両方向に 10 度程度までの反応時間は変わらないこと、偏心角 20 度において反応時間が最も長いことがわかった。

今回の目的の一つである、市場で広く使用されているランプ間の反応時間の差異については、図 3c より、視票輝度が高い時はランプ間で反応時間の差異が無いが、視票輝度が低い時はランプ間で反応時間の差異が大きくなるように見える。これについて詳細に調べるために、各視票輝度において異なる 6 対のランプ間の反応時間について t 検定を行った結果、最低の視票輝度 0.036 cd/m^2 に関しては、HPS と CMH3500 との間、HPS と CMH4000 との間で有意差 ($p < 0.05$) が見られた。このことから、低い輝度レベルでは、ランプの S/P 比が低いほど、視票に対する反応時間が長くなることがわかった。このため、薄明視レベルにおける短波長放射の有効性が確認できた。一方、視票輝度 0.36 cd/m^2 と 3.6 cd/m^2 では、分光分布が反応時間に及ぼす影響は確認できなかった。

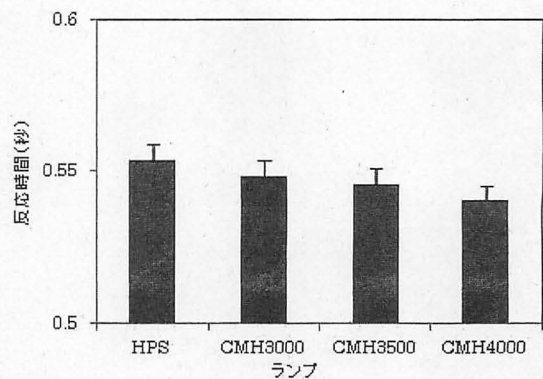


図 3a ランプの主効果

Fig. 3a Main factor of lamp.

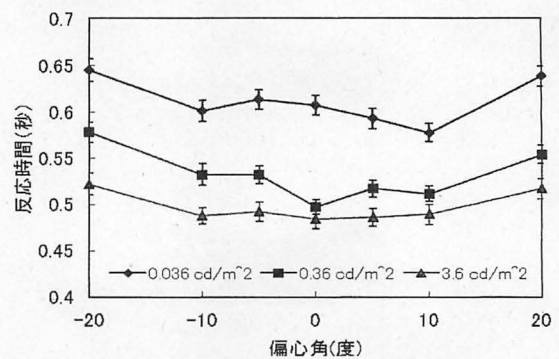


図 3b 視票照度と偏心角との交互作用

Fig. 3b Interaction between target illuminance and eccentricity angle.

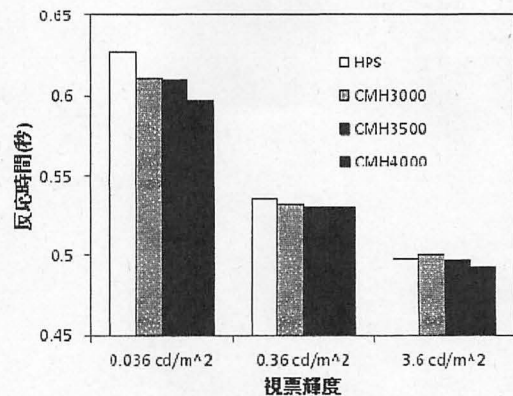


図 3c 視票照度ごとのランプ間の反応時間の比較

Fig. 3c Reaction time for each of target illuminance and lamp conditions.

3. グレア光源が視票検出の反応時間に及ぼす影響に関する実験 (実験2)

今回、グレア光源が周辺視野に提示した視票の検出時間にどのような影響を及ぼすか、また、その影響は薄明視測光システムを実環境に適用する際にどのような問題を生じるかを調べる実験を行った。この実験において用いた実験装置と実験手順は、先に報告した視票位置に関する実験1と同様であるが、周辺視野にグレア光源を加え、高圧ナトリウムランプ (HPS) と 3500K のセラミックメタルハライドランプ (CMH3500) を光源とした点が異なる。

3.1 実験装置

実験には、前述の視野位置の実験と同じ実験装置を使用した。異なる点は、対向車のヘッドランプを想定したグレア光源をパーティションに埋め込んだ点である。グレア光源として、被験者から見て視野中心から右5度の視票から2度下の位置に、視野角で縦1度、横2度の横長の長方形の乳白アクリル板を埋め込んだ。アクリル板の背後には、3Wの白色LED (6500K) を設置した。被験者の眼には、アクリル板を透過・拡散したLEDからの光が到達した。

3.2 実験条件

実験では、ランプの種類 (分光分布)、グレア光源の有無、視票の位置を独立変数とした。表2に実験条件を示す。ランプには、前述の実験で使用した4つのランプからHPSとCMH3500の2つを選んだ。なお、HPSは、4つのランプの内、S/P比の値が最小であり、CMH3500は、先の実験に用いた3つのセラミックメタルハライドランプの内、S/P比が真ん中のランプであった。グレア光源は、直流電源を用いて点灯/消灯制御し、点灯時には被験者の目の位置における鉛直面照度が0.1 lxになるように調光制御した。視票は、先の実験と同じ位置に提示した。この実験では、先の実験で用いた3種類の視票輝度の内、最も低い視票輝度0.036 cd/m²を用いた。各条件下における視票提示の繰り返し回数は8回とした。

表2 実験2の実験条件

Table 2 Experimental conditions employed in Experiment 2.

独立変数	水準
光源の種類	CMH3500, HPS
グレアの有無	あり, なし
偏心角[度]*	-20, -10, -5, 0, 5, 10, 20

*偏心角は、視野中央を0度として、左方向をマイナス、右方向をプラスで表わす。

3.3 実験手順

被験者として福井大学学生 (21~25歳) 17名を雇用了。実験は、第3章の視野位置に関する実験と同じ手順で行った。また、第3章の実験と同様に被験者の反応時間を従属変数として用いた。光源の種類とグレアの有無に関する実験条件の提示順序については、できるだけ被験者間で偏りが無いように配慮した。視票の偏心角は、乱数表を用いてランダムな順序で提示した。

3.4 実験結果

実験では、グレア光源が視票の視認性を低下させたために、被験者は、2秒間提示されている視票を検出できない場合があった。このため、各条件における8回の視票提示のうち、被験者が視票を検出した時の反応時間だけを集めて平均した。本実験には、ランプの種類、グレアの有無、偏心角の3つの独立変数を用いたので、それぞれの独立変数の主効果と独立変数間の交互作用を調べるために、3元配置の分散分析を行った。その結果、全ての主効果と交互作用

に有意差があった。つまり、ランプ ($p<0.001$)、グレア ($p<0.001$)、偏心角 ($p<0.001$) について主効果があり、ランプとグレアとの間 ($P<0.001$)、ランプと偏心角との間 ($p<0.05$)、グレアと偏心角との間 ($p<0.001$)、ランプとグレアと偏心角との間 ($p<0.05$) に交互作用があった。

これらの主効果と交互作用について、図4a~図4eに各条件の反応時間の平均値と標準偏差を示す。さらに、各図において、水準間に有意な差があるかどうかを調べるために、t検定 (一对の標本による平均の検定) を行った。図4a~図4eとt検定の結果から、次のことが明らかになった。

- ① ランプの主効果: 図4aから、CMH3500の照明下よりHPSの照明下の方が、反応時間が長いことがわかった ($p<0.001$)。
- ② 偏心角の主効果: 図4bまたは図4dから、視野中心の視票に対する反応時間が最も短いことがわかった ($p<0.001$)。また、偏心角-20度と20度との間 ($p<0.001$)、偏心角-10度と10度との間 ($p<0.001$)、偏心角-5度と5度との間 ($p<0.001$) の反応時間に有意差があったことから、右側の視野の視票に対する反応時間は、左側より長いことがわかった。
- ③ グレア光源の主効果: 図4cから、グレア光源が無いときよりあるときの方が反応時間は長いことがわかった ($p<0.001$)。
- ④ グレア光源と偏心角の交互作用: 図4bから、グレア光源が提示されていない場合は、偏心角-20度と20度、-10度と10度、-5度と5度のいずれの間でも有意差がなく、左右の視票に対して同様の反応時間が得られた。一方、グレア光源が提示された場合は、偏心角-20度と20度、-10度と10度、-5度と5度のいずれの間でも有意差があり、視野の右側の視票に対する反応時間は、左側より長いことがわかった。
- ⑤ ランプと偏心角の交互作用: 図4dから、HPSの照明下では、偏心角-20度と20度 ($p<0.01$)、-10度と10度 ($p<0.001$)、-5度と5度 ($p<0.01$) のそれぞれの間で有意差があったため、視野の右側に提示された視票に対する反応時間の方が左側より短いことがわかった。CMH3500の照明下でも、偏心角-20度と20度 ($p<0.05$)、-10度と10度 ($p<0.05$)、-5度と5度 ($p<0.01$) のそれぞれの間で有意差があったため、視野の右側に提示された視票に対する反応時間の方が左側より短いと言える。
- ⑥ グレア光源とランプの交互作用: 図4dから、グレア光源が提示されていない場合は、HPSとCMH3500との間に視票に対する反応時間の有意差がないことがわかった。この結果は、実験1の結果に反したが、その原因は不明である。グレア光源が提示されている場合は、HPSとCMH3500との間に視票に対する反応時間の有意差があった。このため、グレア光源がある場合に限り、HPSの照明下で視票に対する反応時間は、CMH3500のそれより長いことがわかった。
- ⑦ グレア光源とランプと偏心角の交互作用: 図4eから、グレア光源が提示されていない場合、ランプの種類に関わらず、偏心角-20度と20度、-10度と10度、-5度と5度のいずれの間でも有意差がないことがわかった。一方、グレア光源が提示されている場合、HPS照明下では、偏心角-20度と20度、-10度と10度、-5度と5度のいずれの間でも有意差 ($p<0.001$) があつた。また、CMH3500照明下においても、偏心角-20度と20度 ($p<0.01$)、-10度と10度 ($p<0.05$)、-5度と5度 ($p<0.001$) のいずれの間でも有意差があつた。このことから、グレア光源が無ければ、視野の右側と左側に提示した視票に対する反応時間に差異はないことが確認できた。一方、グレア光源を視野の

右側に提示した時、いずれのランプにしても、視野の右側の視票に対する反応時間は、左側のそれより長いことがわかった。ただし、HPSの照明下の方がCMH3500の照明下より有意確率が小さいことから、左右の視票間における反応時間の差異が大きいと言える。

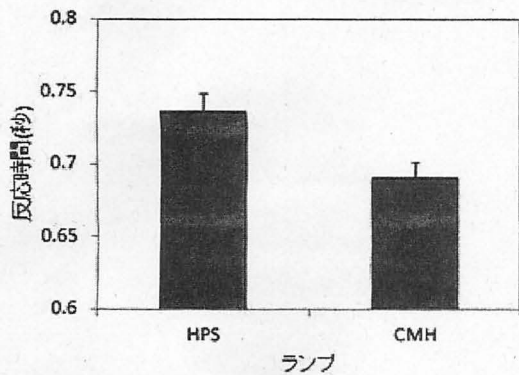


図 4a ランプの主効果

Fig. 4a Main factor of lamp.

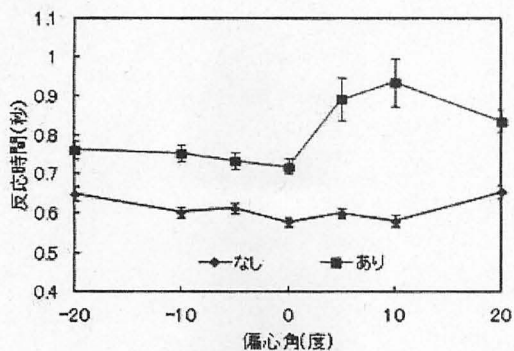


図 4b グレア光源と偏心率の交互作用

Fig. 4b Interaction between glare source and eccentricity angle.

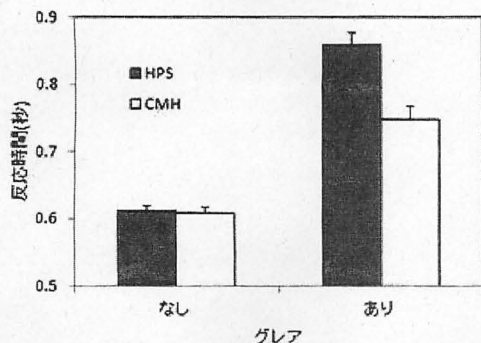


図 4c ランプとグレア光源の有無の交互作用

Fig. 4c Interaction between lamp and glare source.

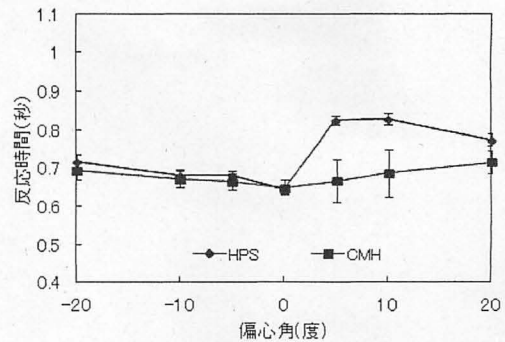


図 4d グレア光源の有無とランプの交互作用

Fig. 4d Interaction between glare source and lamp.

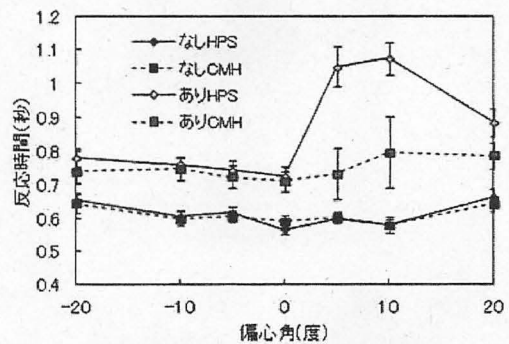


図 4e グレア光源の有無とランプと偏心率の交互作用

Fig. 4e Interaction among glare source, lamp, and eccentricity angle.

4. 考察

4.1 視票の提示位置がプルキンエ効果に及ぼす影響

実験 1 の結果から、各ランプによって照明された視票に対する反応時間は、偏心率によって異なること、その傾向はランプ間で異なることが明らかになった。また、その傾向をランプ間で比較すると、長波長放射の多い (S/P 比が小さい) 高圧ナトリウムランプの照明下では、偏心率が大きくなるほど、反応時間が大きくなる傾向があるのに対して、短波長放射が多い (S/P 比が大きい) セラミックメタルハイドランプでは、偏心率 10 度あたりで反応時間が最小になる傾向があることがわかった。このような傾向は、網膜上の視細胞の分布の差異の影響であると考えられる。そもそも薄明視測光システムは、中心視ではなく周辺視に適用することを意図して開発されたものである。

今回、実験に用いた偏心率ごとに薄明視測光システムにより計算した薄明視輝度と反応時間との相関関係を調べた。ここでは、薄明視測光システムとして推奨されている MES2 を用いることにした。また、回帰分析を行う際には、Vaughan ら¹⁶⁾が輝度と反応時間との実験結果から導いた次式を用いた。

$$RT = \frac{a}{L^b} + c \quad (1)$$

RT : 反応時間 (秒)

L : 明所視輝度 (cd/m²)

a, b, c : 係数 (ただし, b=1/3)

図5にMES2によって計算した薄明視輝度と反応時間との関係と各偏心角ごとの回帰分析の結果を示す。図5の凡例に各回帰式の決定係数(R²)を示す。全ての決定係数は、0.9以上と高いことがわかった。この中で、偏心角0度の決定係数が最も低いことは、もともと薄明視測光システムが中心視のために作られたものではないことから理解できる。今回、偏心角5度の視票の決定係数が最も高く、次いで偏心角10度のそれが高いという結果が得られた。薄明視測光システムは、偏心角15度の視票に対する反応時間に基づいて構築されたため、偏心角10度の視票に対する反応時間に基づく回帰式の決定係数の方が高いと予測していた。今回の実験から予測とは異なる結果が得られたが、その理由は不明である。

上述の決定係数からは、今回の実験条件としたいずれの偏心角においても、薄明視輝度(MES2)と反応時間との間には良好な相関関係があることがわかった。しかし、各回帰曲線を求めたデータ数は多くはないため、決定係数だけでは相関の善し悪しを決めることはできない。このため、図5の各回帰曲線の形状(つまり、係数a, c)を偏心角間で比較すると、5度と10度の係数がほぼ等しく、回帰曲線が重なっていることがわかる。また、プロットしたデータと回帰曲線との関係からも、偏心角5度と10度の回帰が良好であることが確認できる。今回提示しなかった偏心角15度の回帰曲線は、偏心角5度、10度の回帰曲線と偏心角20度の回帰曲線との間に位置すると考えられる。

以上から、偏心角15度の視票に対する反応時間から導かれた薄明視測光システム(MES2)は、中心視を除く、偏心角15度以下の視野には適応できると考えられる。一方、偏心角20度の視票に対する反応時間は、他の偏心角の反応時間に比べて長く、薄明視輝度(MES2)に基づく回帰の精度が低いことがわかった。これは、偏心角20度周辺においては、MES2が適応できないことを示唆する。このことは、視野内の偏心角が大きくなるにつれて、それに対応する網膜上の錐体の密度に対する桿体の密度の比の値が増大することを反映していると考えられる。しかし、MES2が大きな偏心角の視票には適応できないことになると、MES2は実用上、不便な測光システムになってしまう。このため、偏心角20度に関する今回の実験結果が実際の道路の視環境においてどのような問題を生じるかについて、今後、20度およびそれより大きな偏心角の視票を用いた実験を行って調べる必要がある。また、今回、いずれの回帰曲線の決定係数も高かった理由は、S/P比に近い3つのセラミックメタルハライドランプを用いたことが一因と考えられる。このため、今後、より幅広いS/P比の光源を用いた実験を行い視票の提示位置がブルキンエ効果に及ぼす影響を調べる必要があると考える。

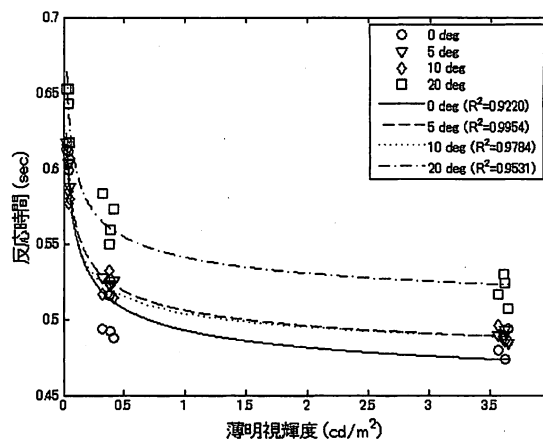


図5 薄明視輝度と各偏心角の視票に対する反応時間との相関の比較

Fig. 5 Correlations between mesopic luminances and reaction times to targets presented at different eccentricity angles.

4.2 周辺視野のグレア光源が視票に対する反応時間に及ぼす影響について

実験2では、グレア光源の提示によって、グレア光源と同じ側の視票に対する反応時間が長くなった。これは、グレア光源によって視野全体に光幕がかかって視票の輝度コントラストが低下したためであると考えられる。グレア光源による視野中心にかかる光幕の程度は、等価光幕輝度として定義されている^{17),18)}。

今回の実験では、周辺視野に視票を提示したため、中心視のための等価光幕輝度の公式を本来適用することはできない。しかし、周辺視野における輝度コントラストの低下を目安とするために、等価光幕輝度を計算することにした。その等価光幕輝度からグレア光源による輝度コントラストの変化を調べた。その結果、グレア光源が無い時には、視票の明所視輝度のコントラストは19であったのに対し、グレア光源を提示したことにより明所視輝度コントラストは0.8に低下したことがわかった。ただし、この時の輝度コントラストは、薄明視輝度ではなく、明所視輝度のコントラストである。

このように輝度コントラストが大幅に低下すれば、視票に対する反応時間は伸びるのは当然である。それより、興味があるのは、HPSとCMH3500との間において反応時間を比較した場合、グレア光源の存在により両ランプ間の反応時間の差異が大きくなる点である。このことは、視作業の輝度および輝度コントラストと視作業性との関係を参照すれば理解できる¹⁹⁾。例えば、新聞を読んでいる時、誌面に対する文字の輝度コントラストが高い場合、照度が100 lxから10 lxまで低下しても不自由なく新聞を読むことができる。しかし、輝度コントラストが低いと、照度が100 lxから10 lxまで低下すると視作業性が大きく低下する場合がある。つまり、照度と視作業性との関係を表す関数は、照度の上昇につれて視作業性が急上昇する急峻な崖の部分とその崖を登り切ったところにある。照度が上昇しても視作業性は向上しない平坦な頂上部分により構成される²⁰⁾。今回の実験では、HPSとCMHとの条件間で視票の薄明視輝度に差異があった。グレア光源が無い時には被験者の視票検出の視作業性(反応速度)は平坦な頂上部分にあるために、その薄明視輝度の差異は反応速度の顕著な差異には繋がらなかった。

それに対して、グレア光源の存在により反応速度が急峻な崖の部分に追いやられたために、同じ薄明視輝度の差異が反応速度の顕著な差異に繋がったと考えられる。これに関して、輝度コントラストの低い視票を用いた Bullough らの実験からも同様の結果が得られている^{11),12)}。また、Akashi らは、実際の道路において自動車を運転しているときの周辺視票に対する反応時間を HPS と CMH の照明下で測定した¹³⁾。両ランプの下での反応時間の差異は、薄明視測光システムによって予測できる反応時間の差異よりも大きいことを明らかにした。これは、運転者が、さまざまな視覚的・認知的な情報処理をする必要があるため、それが負荷となり、周辺視野の視票検出を閾値の視作業に押し上げたため、その負荷がランプ間の効果の相違を誇張する方向に働いたように見えたからであると考える。

上述の考察から、夜間道路において自動車を走らせている時、夜間の運転は、負荷の高い作業であるうえに、対向車の前照灯からのグレアにより、薄明視輝度の僅かの差であっても、反応速度に大きな差異を生じることがあると考えられる。このため、S/P 比の高い光源を道路照明に適用することが安全性を高めるためには重要であると言える。

5. まとめ

今回、薄明視測光システムの課題を把握するために、道路照明に広く使用されている高圧ナトリウムランプ (HPS) と 3 種類のセラミックメタルハライドランプ (CMH3000, CMH3500, CMH4000) とを用いて 2 つの実験を行った。実験 1 では、視票の視野位置がブルキンエ効果に及ぼす影響を調べることを目的として、分光分布と視票照度が種々異なる照明条件下で視野の異なる位置に提示した視票に対する被験者の反応時間を測定した。

実験の結果、ランプの S/P 比が大きくなれば、視票に対する反応時間は短くなる傾向があることがわかった。これにより、S/P 比の高いランプの薄明視レベルの照明環境における有効性は確認できた。一方、視票に対する反応時間は、偏心角によって異なり、視票照度条件に関わらず偏心角 20 度の視票に対する反応時間が最も長くなることが確認できた。しかし、その他の偏心角の視票については、視票照度によって反応時間の傾向は異なり、視票輝度が 0.036 cd/m² の時には偏心角 10 度において、視票輝度 0.36 cd/m² の時には偏心角 0 度において、最も反応時間が短かった。これによって、錐体と桿体の密度と両者のバランスの視野位置による違いが視作業性に影響を及ぼすことを確認した。

さらに、薄明視輝度と反応時間との相関関係について偏心角間で比較した。その結果、いずれの偏心角においても、相関は高いことが明らかになった。また、回帰曲線の形状 (係数) を比較した結果、偏心角 5 度と 10 度とは、ほぼ一致していることが分かった。さらに薄明視測光システム (MES2) が基づく偏心角 15 度の回帰曲線は、偏心角 5 度及び 10 度の回帰曲線に近いところに位置することが推測できたため、偏心角 5 度～15 度までの視票に対しては、現状の薄明視測光システムを適用できると結論づけられた。

実験 2 では、周辺視野に提示したグレア光源が視票に対する反応時間に及ぼす影響とさらにその影響が薄明視測光システムを実環境に適用する時の問題点について調べるために、実験 1 で用いた HPS と CMH3500 のランプを用いて、視票照度が異なる照明条件下で視野の異なる位置に提示した視票に対する被験者の反応時間を測定した。この時、視野右側の偏心角 5 度の位置にグレア光源を提示した。

実験の結果、特にグレア光源に近い視票に対する反応時間が長くなることが明らかになった。さらに、HPS と CMH3500 との間で反応時間を比較した時、グレア光源の存在が両ランプ間の反応時間の差異を広げることが明らかになった。

上述の実験結果から、ランプの明所視効率が同じ場合、S/P 比の高い光源を選ぶことにより、薄明視レベルでの周辺視野の視作業性を向上できることがわかった。このことから、薄明視測光技術を活用すれば、市販ランプの中から薄明視効率のよいランプを選定できることがわかった。さらに、ランプの分光分布を明所視効率が高く S/P 比が高い分光分布に調節することにより、夜間でも道路の安全を維持する照明用ランプの開発ができると期待できる。

また、今回の実験から、対向車の前照灯などのグレア光源の存在が、(視票の輝度コントラストを低下して、) S/P 比の違うランプ間の薄明視効率の差異を拡大することがわかった。つまり、一般道路において S/P 比の低いランプを使用すれば、対向車前照灯などのグレア光源があることにより、薄明視輝度が示す値よりも運転者をさらに危険に晒す可能性がある。このことから、道路照明において S/P 比の高いランプの使用を考慮することの重要性が明らかになった。

最後に、長時間の実験に参加していただいた被験者の方々に謝意を表します。また、本論文の初稿に対して有意義なご指導をいただいた査読者に感謝いたします。

参考文献

- (1) Palmer, DA., A system of mesopic photometry. *Nature*, 209, 276-281 (1966).
- (2) Kokoschka, S., Untersuchungen zur mesopischen Strahlungsbewertung. *Die Farbe*, 21, 39-112 (1972).
- (3) Ikeda, M., Shimozono, H., Mesopic luminous efficiency functions. *Journal of the Optical Society of America*, 71, 280-284 (1981).
- (4) Sagawa, K., Takeichi, K., Spectral luminous efficiency functions in the mesopic range. *Journal of the Optical Society of America A*, 3, 71-75 (1986).
- (5) Trezona, PW., A system of mesopic photometry. *Color Research and Application*, 16, 202-216 (1991).
- (6) Sagawa, K, Takeichi, K., System of mesopic photometry for evaluating lights in terms of comparative brightness relationships. *Journal of the Optical Society of America A*, 9, 1240-1246 (1992).
- (7) Sagawa, K, Toward a CIE supplementary system of photometry: brightness at any levels including mesopic vision, *Optical Physiol. Opt.*, 26, 240-245, (2006).
- (8) Rea, MS., Bullough, MS., Freyssinier-Nova JP, Bierman A: A proposed unified system of photometry, *Lighting Research & Technology*, 36, 2, 85-111 (2004).
- (9) Eloholma, M., Halonen, L., New model for mesopic photometry and its application to road lighting. *LEUKOS*, 2 (4), 263-293 (2006).

- (10) Commission Internationale de l'Eclairage. CIE 191: *Recommended System for Mesopic Photometry Based on Visual Performance*. Vienna: CIE (2010).
- (11) Bullough, JD., Rea, MS., Simulated driving performance and peripheral detection at mesopic and low photopic light levels. *Lighting Research & Technology*, 32, 194-198 (2000).
- (12) Bullough, JD., Rea, MS., Driving in snow: effect of headlamp color at mesopic and photopic light levels. *SAE Technical Paper Series No. 2001-01-0320*. Society of Automotive Engineers (2001).
- (13) Akashi, Y., Rea, MS., Bullough, JD., Driver decision making in response of peripheral moving targets under mesopic light levels, *Lighting Research & Technology*, 39(1), 53-67 (2007).
- (14) He, Y., Bierman, A., Rea, MS., Evaluating light source efficacy under mesopic conditions using reaction times. *Journal of Illuminating Engineering Society*, 26, 125-138 (1997).
- (15) He Y, Bierman A, Rea MS, A system of mesopic photometry. *Lighting Research & Technology*, 30, 175-181 (1998).
- (16) Vaughan, HD. Jr., Costa, LD., The functional relation of visual evoked response and reaction time to stimulus intensity, *Vision Research*, 6, 645-656 (1966).
- (17) Vos, JJ., Disability glare – a state of art report. *CIE Journal*, 3, 39-53 (1984).
- (18) Vos, JJ., Glare today in historical perspective: towards a new CIE glare observer and a new glare nomenclature, *Proceedings of the 24th session of the CIE*, Warsaw 1-1, 38-42 (1999).
- (19) Rea, MS., Quелlette, MJ., Relative visual performance—A basis for application., *Lighting Research & Technology*, 23, 135-146 (1991).
- (20) Boyce, RP., Illuminance selection based on visual performance—and other fairy stories, *Journal of IES*, 41-49 (1996).

(受付日 2011 年 11 月 2 日/採録日 2012 年 10 月 4 日)



中川慶子 (非会員)

2009 年福井大学工学部建築建設工学科卒業。
2011 年福井大学大学院工学研究科建築建設工学専攻博士前期課程修了。現在、小松ウォール工業株式会社勤務。



明石行生 (専門会員)

福井大学大学院工学研究科建築建設工学専攻博士(工学), 1985 年 東京工業大学総合理工学研究科博士前期課程修了, 同年 松下電器産業株式会社照明研究所, 1999 年 Lighting Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute, 2007 年より現所属。



有松孝之 (正会員)

株式会社 GS ユアサ
1977 年生。1999 年九州工業大学情報工学部電子情報工学科卒。同年 4 月日本電池(株)入社, 2010 年 4 月現在の社名に変更。照明ソフト設計業務に従事。



京藤伸弘 (正会員)

株式会社 GS ユアサ
1967 年生。1991 年同志社大学工学部機械第二学科卒。同年 4 月日本電池(株)入社, 2010 年 4 月現在の社名に変更。照明ソフト設計業務に従事。