

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 21 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2013～2016

課題番号：25420607

研究課題名（和文）高効率で安全な道路照明を設計する薄明視輝度計測ツールの開発

研究課題名（英文）Development of a mesopic luminance measurement system to design efficient and safe roadway lighting

研究代表者

明石 行生（Yukio, Akashi）

福井大学・学術研究院工学系部門・教授

研究者番号：10456436

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,000,000円

研究成果の概要（和文）：平成25年度～平成27年度にかけて、国際照明委員会（CIE）の薄明視測光システムを実環境で使えるようにするために、（1）国際的課題である順応輝度を定義した。特にヒトの眼は、視野の局所的な部分の輝度に順応していることを明らかにした。（2）薄明視測光システムを全視野に対応できるように修正することにより、全視野対応型薄明視測光システムを開発した。（3）（1）と（2）に基づいてカメラにより取得した輝度画像から薄明視輝度の分布を算出する画像解析システムを構築した。

研究成果の概要（英文）：In order to apply CIE mesopic photometry to practical road lighting, we conducted the following research. (1) We defined adaptation luminance in the whole visual field. Especially, we found that eyes of human beings were adapted to local luminance. (2) We improved the current CIE mesopic photometry so that we can apply it to the whole visual field. (3) We developed an image processing system for mesopic photometry which can calculate mesopic luminance distributions based on luminance maps taken by cameras.

研究分野：建築環境工学

キーワード：薄明視 視野 道路照明

1. 研究開始当初の背景

夜間道路の運転時に体験する薄暗い明るさレベル（以降、薄明視レベルとよぶ）において、ヒトの目は、昼間の明るさレベル（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、古くからブルキンエ現象として知られている^{1)~3)}。この現象は、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する。

しかし、現行の明所視輝度・照度を測る測光システムは、明所視レベルの錐体の働きのみを反映し、上述の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（メタルハライドランプ、LED など）が明るさ知覚に及ぼす効果を過小評価する。この問題解決のために、国際照明委員会（CIE とよぶ）は、2010 年、視標検出などの視作業性に基づき、錐体の感度に桿体の感度を加えた CIE 薄明視測光システムを構築し、国際標準として推奨した³⁾。このシステムは、目が順応する明所視輝度（順応輝度とよぶ）と光源の分光特性とを変数として薄明視輝度を算出するものであり、夜間道路の安全性と照明施設の効率を高めることが期待できる。しかし、この薄明視測光システムを実際の夜間道路の照明環境に適用するためには、次の 3 つの課題がある。

- (1) 順応輝度の定義が不明確である。CIE 薄明視測光システムの計算には、順応輝度の入力が必要である。簡便のために、視野中心を含む 10 度または 20 度視野の平均輝度を順応輝度として定義する考え方もある。しかし、実用的には、運転時には周辺視野に出現する車の走行に危険を及ぼす障害物の検出が必要であるため、周辺の視標のために順応輝度を定義する必要がある。
- (2) CIE 薄明視測光システムの適応範囲が明確でない。特に、CIE 薄明視測光システムは視野のどの範囲に適用できるかは明らかにされていない。これは、このシステムが偏心角（視野中心から隔たった角度）15 度の位置に視標を提示した実験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、CIE 薄明視測光システムは、偏心角 15 度以外の視野位置に提示された視標には適用できない。錐体だけが存在する中心視には、現行の明所視測光システムを適用すべきである。また、桿体の密度は、視野中心でゼロであり、視野中心から周辺に離れるに従って高まり、偏心角 10 度~20 度で最大となり、その外側では低下する。そのため、全ての周辺視野には適用できないはずである。
- (3) CIE 薄明視測光システムを活用するためのガイドラインが整備されていない。

2. 研究の目的

前述の課題を受けて、本研究は、次の 3 項目を目的とした。

- (1) 「順応輝度は、視標近傍の局所的な背景輝度により定義できる」との仮説を立て、視標の検出の反応時間を指標として用いて、視標の背景の輝度分布を種々変化させた、統制条件下で実験を行い、その実験データに基づいて仮説を実証する。
- (2) (1) の仮説が立証されたとしても、視野内に高輝度のグレア光源が存在する場合、その光が眼球内で散乱して運転者の視野内に光幕が生じる。そのため、運転者の順応輝度は、視標近傍の背景輝度と光幕輝度とを合計したものになる。今回、光幕輝度分布関数を実験により求める。
- (3) 被験者の視線を固定し、より多くの位置に提示した視標に対する反応時間を測定する実験を行い、その実験データに基づいて、CIE 薄明視測光システムが適応できない視野範囲を明確にするとともに、その視野範囲にも対応できるように CIE 薄明視測光システムを改善することにより、新たに全視野対応型・薄明視測光システムを構築する。
- (4) (1)~(3) に基づいて、撮影した輝度画像から薄明視輝度分布を算出するアルゴリズムを開発し、エネルギー効率又は安全性の高い道路照明を設計・評価する薄明視輝度分布計測ツールを構築する。

3. 研究の方法

- (1) 順応輝度を定義するために、視標の背景輝度を種々変化させた条件下で被験者が視標を検出する反応時間を測る実験を行う。実験結果から、視標近傍の局所的輝度のいずれが順応輝度の決定要因であることを実証する。
- (2) これまで周辺視野に存在するグレア光源が中心視に生じる光幕輝度については定義されているが、今回必要であるはずの周辺視に生じる光幕輝度については定義されていない。そのため今回、グレア光源が周辺視野に生じる光幕輝度の分布を新たな実験により求める。
- (3) CIE 薄明視測光システムが適用できる視野範囲を明らかにするために、光源の分光分布と視標の提示位置を種々変化させた条件下で、被験者が視標を検出する反応時間を測定する。実験結果から、CIE システムが適用できない視野範囲を明らかにし、その範囲にも適用できるよう CIE システムを改良し、全視野対応型・薄明視測光システムを開発する。
- (4) (2) の全視野対応型・薄明視測光システムに基づき、画像解析技術を駆使して、新たに薄明視輝度の分布を算出する薄明視輝度分布計測ツールを開発する。

4. 研究成果

4.1 順応領域の定義のための実験

順応輝度の定義のために、ヒトの眼の順応を決める背景領域について、内田らは、種々の背景輝度分布の条件下で視標検出に必要な輝度対比弁別閾を求める実験を行った。その輝度対比弁別閾を解析した結果、視票近傍の部分的な背景輝度がその視票の順応輝度を決定しているという仮説を立てた²⁾。今回、この仮説を検証するために、視野内の一部分を局部的に照明し、眼の順応状態を変化させた条件下で、視票を検出する反応時間を求める実験を行った。

実験概要

実験は暗室内において視票検出実験を行った。実験装置は視票装置、スイッチ、照明器具、コンピュータより構成した。図1に視票提示装置の正面図を示す。視票提示装置は黒色のスチレンボード上に視票を埋め込んだもので、視票は視野中心から左右5, 10, 15, 20度(合計9個)の位置に埋め込んだ。照明器具は2種類の器具からなり、視票提示装置全体を均一に照明する拡散ライトと視野内に半径7度の輝度の高い領域(以下、高輝度領域と呼ぶ)を作り出すためのスポットライトからなる。スイッチは被験者が視票を検出したことを知らせる信号を送る。コンピュータは視票の提示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。

実験では視野中心に高輝度領域を提示した「高輝度領域有」の条件と、高輝度領域を提示せずに視票を提示する「高輝度領域無」の条件とを用いた。両者を比較することで高輝度領域が与えた順応輝度が各視票の検出速度に及ぼす影響が調べられると考えた。

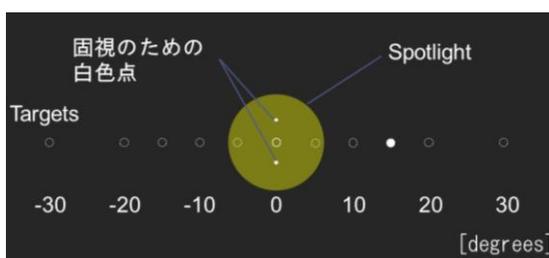


図1 視票提示装置 (正面図)

実験結果

実験結果を図2に示す。この実験条件は、S/P比: 1.6、背景輝度: 0.01 cd/m²、スポット輝度: 0.2 cd/m²である。被験者12名の反応時間の平均値を示したものである。実験より中心視野に高輝度領域を提示した場合、中心視野内の視標に対して反応時間が遅くなる傾向が見られたが、他の全ての偏心角において高輝度領域が無い条件とほぼ同様の反応時間が得られることがわかった。今回の被験者12名の実験結果は、内田らの局所順応仮説を支持した。

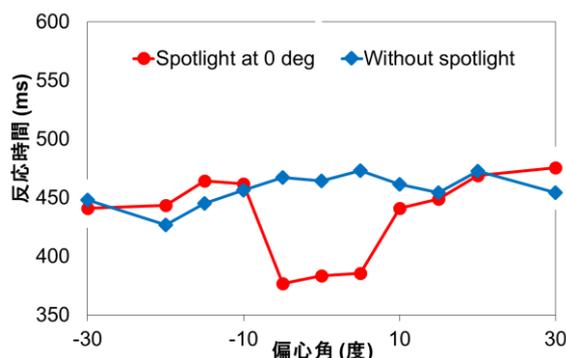


図2 実験結果

4.2 周辺視野の光幕輝度を求める実験

視野内のグレア光源が同じ視野内に呈示された視票に生じる光幕輝度は、その視票に対する順応輝度から背景輝度を引いた輝度の値として計算できる。一方、順応輝度は視認実験により求められる。そのため今回、視野内にグレア光源が存在する時の順応輝度を求めるために、グレア光源なしの実験とグレア光源ありの実験を行った。グレア光源なしの実験では被験者をグレア光源のない均一な背景輝度に順応させて実験を行い、グレア光源ありの実験ではグレア光源の影響を含めた視野に順応させて実験を行った。2つの実験は、視野に呈示した視票を検出できる最小の視票輝度を測定し、その背景輝度に対する視票輝度のコントラスト閾値を輝度差弁別閾値とし求めることが目的であった。グレア光源のない条件下で求めた輝度差弁別閾値と背景輝度(つまり順応輝度)との関係は、グレア光源のあるときの順応輝度を算出するデータベースとなる。このデータベースとグレア光源がある時の視票の輝度差弁別閾値とを比較することで、グレア光源がある時の順応輝度を求めることができる。求めた順応輝度から背景輝度を引いた値がグレア実験時の光幕輝度となる。

図3にディスプレイ、LED光源、マウス、コンピュータから構成される実験装置を示す。ディスプレイは、被験者の目から65cmの位置に設置し、そこに背景(49度×29度)、視票(直径1度)、注視点(直径0.1度)を呈示した。注視点は視野の中央とした。LED光源(直径1.3度)はグレア光源として視野内に光幕を発生させるために用い、注視点より右側8度に設置した。マウスは被験者が視票を検出できたかどうかを合図させるために使用した。

実験条件は視票位置、背景輝度、グレア光源による顔面照度を独立変数とし、輝度弁別閾値を従属変数とした。視票の呈示位置は注視点より左側10度、20度、30度の位置に設定した。グレア光源なしの実験では0.2 cd/m²、2.0 cd/m²の順応(背景)輝度で各視票における輝度差弁別閾値を求めた。この結果から各視票の輝度差弁別閾値に対する順応(背景)輝度の関係を1次式として求めた。この1次式がデータベー

スとなる。グレア光源ありの実験では 0.2 cd/m² の背景輝度のみで実験を行い、グレア光源による顔面照度を 0.7 lx, 5.4 lx の 2 条件に設定した。条件ごとに各視票における輝度差弁別閾値を求めた。



図 3 実験装置

実験結果

図 4 に視票に対して生じた光幕輝度の被験者 5 名の平均値を示す。顔面照度 0.7 lx の条件下では、グレア光源から離れるにつれて光幕輝度が低くなる傾向が見られた。Stiles-Crawford³⁾ の実験と同様の傾向が得られたが、今回の光幕輝度は Stiles-Crawford のモデルより高い値になることがわかった。

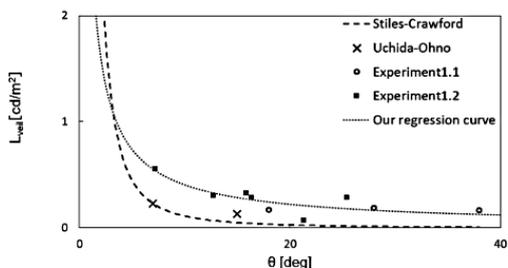


図 4 今回得られた光幕輝度関数と既往研究のそれとの比較

図 4 に基づいて解析した結果、式(1)を提案する。

$$L_v = \frac{4}{\theta} E_n \quad (1)$$

ここで、 L_v は光幕輝度、 θ はグレア光源と視標との角度、 E_n は目の位置での照度である。

4.3 CIE 薄明視測光技術を全視野に適用できるように修正するための実験

薄明視輝度を定義するためには視作業点の偏心角に応じて計算式の係数を変化する必要があると推測した。そこで本研究では He らの実験をもとに、周辺視野の異なる偏心角に対して視票検出実験を行い、背景輝度、光源の種類を変化させた時に、分光特性の違いによる視作業性低下の程度を偏心角ごとに検証した。

視票検出実験

実験は本学内の暗室で行った。実験装置は、視票提示装置、照明装置、コンピュータ、スイッチにより構成した。視票提示装置は黒のスチレンボード(反射率 5%)に、右眼の視野中心から鼻側に偏心角 5 度、10 度、15 度、25 度(合計 4 個)の位置に視票を埋め込んだ。各視票は、表と裏をそれぞれ黒(反射率 4%)と白(反射率 40%)で塗装された円盤を持つ磁気表示器である。また、被験者の視野中心(偏心角 0 度)には 7 セグメントディスプレイを埋め込んだ。ディスプレイには約 1 秒ごとにランダムな一桁の整数を表示し、被験者は数字を注視する視作業を行いながら周辺視野での視票検出を行った。照明装置は視野全体に一樣な明るさを与えるために拡散ライトを用い、光源には白色 LED と橙色 LED を用いた。光源の S/P 比はそれぞれ 1.7, 0.2 である。スイッチは被験者が視票を検出した時に信号を送るものであり視票提示装置とスイッチはコンピュータに接続されている。このコンピュータは視票の提示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測定・記録した。表 1 に実験条件をまとめて示す。

表 1 実験条件

独立変数	水準
光源	白色 LED, 橙色 LED
視票提示位置 (偏心角)[度]	5, 10, 15, 25
背景輝度(視票輝度*) [cd/m ²]	0.01 (0.09), 0.1 (0.9), 1 (9), 2 (18)

*いずれの提示位置についても視票輝度は同一であった。

実験結果

実験結果より、視票位置 5 度よりも視票位置 25 度の方が背景輝度低下につれて光源間の反応時間の差が大きくなる傾向が見られた。このことから、薄明視レベルでの視作業性低下の程度は偏心角によって異なることがわかった。解析の結果、偏心角が 25 度以上の視野については、薄明視輝度測光システムの修正が必要であることを明らかにした。同時に周辺視野の偏心角 10 度～15 度の範囲では CIE 薄明視輝度測光システムが有効であることを明らかにした。

薄明視輝度測光システムの修正

以下に MES2 を用いた薄明視輝度を求めるためのアルゴリズムを(2)式と(3)式に示す。

$$L_{mes,n} = \frac{m_{(n-1)}L_p + (1 - m_{(n-1)})L_s V'(\lambda_0)}{m_{(n-1)} + (1 - m_{(n-1)})V'(\lambda_0)} \quad (2)$$

$$m_n = a + b \log_{10}(L_{mes,n}) \quad \text{for } 0 < m_n \leq 1 \quad (3)$$

ここで、 n : 反復計算の繰り返し回数

m_n : n 回目の反復計算したときの錐体の寄与率

L_{mes} : 薄明視輝度 (cd/m²)

($L_{mes} \leq 0.005 \text{ cd/m}^2$ の場合 $L_{mes} = L_s$, $m=0$)

($5 \text{ cd/m}^2 \leq L_{mes}$ の場合 $L_{mes} = L_p$, $m=1$)

L_p : 明所視輝度 (cd/m^2)

L_s : 暗所視輝度 (cd/m^2)

a, b : 寄与率 m の係数 ($a = 0.7670$, $b = 0.3334$)

$V'(\lambda_0)$: $\lambda_0=555\text{nm}$ での暗所視分光絶対感度 ($683/1699=0.402$)

今回、先に偏心角 25 度の実験結果から考察したように、薄明視レベルの上限を 10 cd/m^2 に変更して係数 a と係数 b を求めた。

その結果、 $(a, b)=(0.697, 0.303)$ が求められた。そのため、前述の(3)式をつぎの(4)式のように修正した。

$$m_n = 0.697 + 0.303 \log_{10}(L_{mes,n}) \quad (4)$$

for $0 < m_n \leq 1$

4.4 全視野対応型薄明視測光ツールの開発

以上の研究成果に基づいて、全視野対応型薄明視測光ツールを開発した。このツールのアルゴリズムは次の通りである。

- ①明所視輝度の取得：写真による輝度測光により、明所視輝度の分布を取得する。
- ②順応輝度の計算：明所視輝度の画像から光幕輝度を計算する。また、明所視画像の各画素の輝度と光幕輝度を加算して順応輝度を決定する。
- ③薄明視輝度分布の計算：順応輝度（明所視）分布から薄明視輝度の分布を求める。画素毎に薄明視輝度を計算する。

<参考文献>

- (1) Rea, MS., Bullough, MS., Freyssinier-Nova JP, Bierman A, *Lighting Research & Technology*, 36, 2, 85-111, 2004.
- (2) Eloholma, M., Halonen, L., New model for mesopic photometry and its application to road lighting. *LEUKOS*, 2, 4, 263-293, 2006.
- (3) Commission Internationale de l'Eclairage. CIE 191: *Recommended System for Mesopic Photometry Based on Visual Performance*. Vienna: CIE, 2010.
- (4) 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).
- (5) 中川慶子、明石行生、有松孝之、京藤伸弘、視標位置がプルキンエ効果に及ぼす影響、*照明学会誌*, 96 (11) 752-760, 2012.
- (6) Commission Internationale de l'Eclairage. CIE 191: *Recommended System for Mesopic Photometry Based on Visual Performance*. Vienna: CIE.
- (7) Uchida T., Ohno Y. An experimental

approach to a definition of the mesopic adaptation field: Proceedings of CIE 2012, Hangzhou, China, 71-76, 2012.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

(1) Nie DongXing, 森本喬太、明石行生、CIE 薄明視測光システムを全視野に適用させるための薄明視輝度計算式の修正、*日本建築学会環境系論文集*, 82, 732, 113-119, 2017 (査読有)

(2) T Uchida, M Ayama, Y Akashi, N Hara, T Kitano, Y Kodaira, and K Sakai, Adaptation luminance simulation for CIE mesopic photometry system implementation, *Lighting Research & Technology*, 48(1) 14-25, 2016 (査読有)

[学会発表] (計 5 件)

(1) Norifumi Terai, Kazushi Iwamoto, Yukio Akashi, Influence of veiling luminance caused by a peripheral glare source on extra-foveal vision, *Proceedings of LS15*, 25-28, 2016

(2) Xingqi Liu, Takashi Fujita, Yukio Akashi, Kenta Yamamoto, The effect of disability glare caused by high luminance street luminaires on oncoming pedestrian detections, *Proceedings of LS15*, 363-366, 2016

(3) Nie DongXing, 森本喬太、明石行生、視野の位置によるプルキンエ現象の差異、*照明学会第 48 回全国大会*、2015

(4) 岩本和士、明石行生、周辺視野のグレア光源が周辺視野に生じる光幕、*照明学会第 48 回全国大会*、2015

(5) Yukio Akashi, Morimoto Kyota, A practical tool to evaluate mesopic luminance distributions for night-time roadways based on the CIE mesopic photometry, *Proceedings of 28th CIE Session 2015*, 1(2) 1036-1042, 2015

[図書] (計 1 件)

(1) 今井正次、櫻井康宏編著；明石行生 [ほか] 著；設計力を育てる建築計画 100 選、共立出版 2015 年(9784320077164)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://illumination-tutorial.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

・明石行生 (AKASHI, Yukio)
福井大学・学術研究院工学系部門・教授
研究者番号：10456436