

令和 4 年 10 月 28 日現在

機関番号：16301

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13959

研究課題名（和文）高速道路トンネル照明のダイナミック制御による視認性向上と動的総視認率評価の確立

研究課題名（英文）Improvement of visibility by dynamic control of expressway tunnel lighting and establishment of total revealing power

研究代表者

池田 善久（Ikeda, Yoshihisa）

愛媛大学・理工学研究科（工学系）・准教授

研究者番号：00735318

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：高速道路トンネル照明のダイナミック制御による視認性向上と動的総視認率評価の確立するため、視認性評価用の1/24スケール高速道路トンネル模型を作製し、被験者による視認性評価を実施した。視認性評価はトンネル内100 m先にある20 cm角の指標を落下物に模して行われた。最も大きな成果は、視認性と各種光学パラメータについて多変量解析した結果、落下物指標輝度と背景路面輝度との輝度比と、水平面照度の組み合わせとなり、視認性の大部分は輝度比によって決定されることが明らかとなったことである。また輝度比が1の場合でも色度差がマクアダム楕円(3-STEP)より大きい場合は視認可能であることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

トンネル照明を含む交通照明は従来のナトリウムランプや水銀ランプからLEDへの置き換えが進んでいるが、LEDの長所および短所の理解が進まない内に導入されてしまっている。特にトンネル照明では輝度の高いLEDの導入でグレアが目立ち、路面の視認性が著しく低下したトンネルも見受けられる。本研究成果は、トンネル照明をLEDにする場合に最も重要なトンネル内の視認性に寄与する光学パラメータを明らかにしており、学術的意義は高い。また将来トンネル照明設置ガイドラインが見直される場合に、重要な知見を提供することが可能であり、社会的意義としても高い成果を得ている。

研究成果の概要（英文）：To improve visibility by dynamic control of expressway tunnel lighting and to establish dynamic total revealing power evaluation, a 1/24 scale expressway tunnel model for visibility evaluation was fabricated and visibility evaluation was conducted by subjects. Visibility evaluation was conducted using a 20 cm square indicator located 100 m away in the tunnel as a simulated fallen object. The most significant result of the multivariate analysis of visibility and various optical parameters was the combination of the luminance ratio between the luminance of the falling object and the luminance of the background road surface and the horizontal illuminance, and visibility was mostly determined by the luminance ratio. In addition, even when the luminance ratio was 1, visibility was possible when the chromaticity difference was larger than the McAdam ellipse (3-STEP).

研究分野：照明工学

キーワード：トンネル照明 LED プロビーム ダイナミック制御

### 1. 研究開始当初の背景

道路照明の中でもトンネル照明は、運転者が先行車や道路上の障害物などの視覚情報を的確に把握するための良好な視環境を提供するために設置される。トンネル内の安全を確保するため、トンネル照明には性能指標が規定されている。実際に路上落下物の視認性評価を行う際、総視認率(TRP: Total Revealing Power)を用いて評価するケースが増えてきている。

TRP は、人が認識可能な対象物の反射率を照明設備の光学特性から計算し、累積存在確率で示される。高速道路の路上落下物の累積存在確率は次式  $F(\rho)=23.6\ln(\rho)-5.2$  が NEXCO より報告されており、TRP は視覚が識別できる対象物の限界反射率  $\rho$  により決定されることが分かる。限界反射率  $\rho$  の導出は、観測者の視環境における輝度  $L$ 、照度  $E$  の計測結果より、 $\rho=R(L,E)$  によって得られる。

TRP は、取り扱う光学パラメータが輝度  $L$ 、照度  $E$  のみであり、光源の時間制御を想定した時間変数や配光制御を想定した角度変数、発光色制御を想定した波長変数などが全く考慮されていない。LED の登場により、従来の光源では実現できなかった点灯時間制御、配光角の時間制御、発光色の時間制御を含むダイナミック制御を行うことが可能となったが、これらの効果を TRP では考慮しておらず、新しい評価基準が必要である。

### 2. 研究の目的

静的評価である現行の TRP に対し、ダイナミック制御に適用可能な時間変動を考慮した動的総視認率(Dynamic Total Revealing Power: DTRP) を確立し、ダイナミック制御による視認性向上効果の機序解明が、本研究の目的である。

1/24 スケールの模型トンネルを用いて、対称照明とプロビーム照明の水平面照度比率、プロビーム照明の角度、平均路面輝度を変えた場合のトンネル内路上落下物の視認性について、被験者による主観評価を行った。更に視認性評価の得点を目的変数、トンネル内の光学的要因を説明変数として重回帰分析を行い、回帰式と視認性を決定する光学的主要因の検討を行った。

### 3. 研究の方法

(1) 実験には縮尺 1/24 の模型トンネルを用いた。内部には LED 灯具を備えており、プロビーム角を 45、60、70、80 度で変更し、対称照明に対するプロビーム照明の水平面照度の比率を 0、25、50、75、100 % と変化させた。平均路面輝度は 4 cd/m<sup>2</sup>、13 cd/m<sup>2</sup>、20 cd/m<sup>2</sup> の 3 条件とした。路面はアスファルトの色調を合わせて塗装しており、反射率は 10 % であった。平均路面輝度が上記のとき、平均水平面照度は 81 lx、280 lx、430 lx であった。落下物指標は 0.8 cm 角(実スケールで 20 mm 換算)とし、反射率が 9、25、56、69、77、90 % の 6 種類を用いた。被験者は、観測地点から 4.17 m 先(実スケールで 100 m 換算)に設置した指標を 1 秒程度観察し、「よく見えた」場合を 4 点、「少しよく見えた」場合を 3 点、「見えた」場合を 2 点、「少し見えた」場合を 1 点、「見えない」場合を 0 点として視認性を評価した。被験者は 9 人とし、その平均値を評価点とした。重回帰分析で考慮した説明変数は、トンネル内指標設置部の水平面照度、鉛直面照度、指標輝度、背景路面輝度、輝度比(指標輝度/背景路面輝度)、被験者観察位置の等価光幕輝度とし、多重共線性のある組合せは除外した。

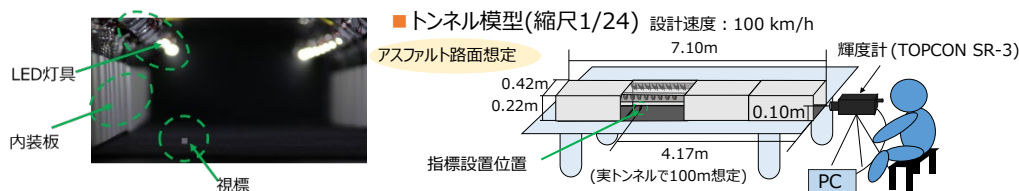


図1 トンネル模型を用いた実験の概略図と内部の写真

(2) トンネル照明のガイドライン[2]より、色温度 2500 K から 6500 K の範囲で利用することが可能である。本実験では表 1 の 4 つの組み合わせによる視認性評価を行った。LED は 5500 K、3500 K を使用した。使用した落下物指標の反射率 77 % で、落下物指標と背景路面との輝度比が 1 となる条件とした。

(3) 実験概略図を図 6 に示す。実験には縮尺 1/24 の模型トンネルを 2 本用いた。トンネル 1 は対称照明とプロビーム角 45 度の照明、トンネル 2 は対称照明とプロビーム角 70 度の照明を備えている。トンネル 2 のプロビーム照明にはコリメータレンズが取り付けられており、配光角 30 度の狭配光となっている。実験では、トンネル照明 1 は対称照明のみ点灯させ、トンネル 2 はプロビーム照明と対称照明の両方を点灯させた。プロビーム照明と対称照明の比率は、水平面照度比率で 75 対 25 とした。

トンネル内の光学特性は、水平面照度、落下物指標の鉛直面輝度、背景路面輝度を測定した。落下物の視認性は、被験者 6 人による官能評価により定量化した。トンネル 1 の対称照明のみの場合の視認性を基準に、トンネル 2 の視認性を相対評価した。評価点は、トンネル 1 と比べて良く見える場合は 4 点、見える場合は 3 点、変わらない場合は 2 点、見えにくい場合は 1 点、見えない場合は 0 点とした。

#### 4. 研究結果

(1) 各路面輝度について、視認性評価の平均得点  $V_s$  と輝度比  $RL$  の関係を図 2 に示す。図より、 $RL$  が 1 に近づくと視認性は低下する。本結果について重回帰分析を行った結果、最も相関係数が高くなる説明変数の組合せは輝度比  $RL$  と水平面照度  $L_H$  となった。

著者は、 $RL$  は刺激強度と同様にフェヒナーの法則が成り立ち、対数で視認性に影響していると考えた。そこで輝度比  $RL$  と水平面照度  $L_H$  をそれぞれ  $|\log(RL)|$  と  $\log(L_H)$  として、重回帰分析を行った結果、以下の回帰式を得た。

$$V_s = 3.14 \cdot |\log(RL)| + 1.08 \times 10^{-1} \cdot \log\left(\frac{L_H}{70.8}\right)$$

水平面照度の結果より、上記回帰式の  $L_H$  の項は  $1.45 \times 10^{(-2)}$  から  $1.95 \times 10^{(-1)}$  の範囲となる。 $L_H$  の項は  $|\log(RL)|$  の項と比べて影響が小さいことから、

$$V_s \approx 3.14 \cdot |\log(RL)|$$

とした場合の回帰直線を含め、 $V_s$  と  $|\log(RL)|$  と回帰直線の関係を図 3 に示す。図より、シルエット視と逆シルエット視ともに  $|\log(RL)|$  に比例し、ほぼ同一直線上となった。また水平面照度が高くなると、輝度比と関係なく視認性が改善するが、その効果は小さいことが分かる。

トンネル内路上落下物の視認性が  $|\log(RL)|$  に対して比例関係となったことから、視認性はほぼ  $RL$  で決まると考えられる。著者らは、プロビームの配光角や対称照明との比率を変えることで  $RL$  を変化させ、視認性が向上することや、同じ  $RL$  でもプロビームにより水平面と鉛直面の色度を変えることで視認性が向上することを見出している[1]。プロビームの最適化により  $RL$  や色度の変化を空間的に変化させることで、更に視認性を向上可能だと考えられる。

(2) 落下物指標の輝度に対する背景路面の輝度比が 1 の場合の観察結果を図 4 に示す。No.1 の条件では、水平面の色温度は 5501 K、指標の色度は  $x=0.34$ 、 $y=0.35$ 、路面の色度は  $x=0.34$ 、 $y=0.35$  であった。色度差は  $\Delta x=0.00$ 、 $\Delta y=0.00$  となり、視認は不可能であった。一方 No.2 の条件では、水平面の色温度は 5027 K、指標の色度は  $x=0.41$ 、 $y=0.39$ 、路面の色度は  $x=0.37$ 、 $y=0.37$  であった。色度差は  $\Delta x=0.04$ 、 $\Delta y=0.02$  となり、視認可能であった。

プロビーム照明と対称照明の色温度が同じ場合、落下物指標の輝度と背景路面の輝度比が 1 付近では落下物指標が背景と同化してしまい、不可視となる。一方、プロビーム照明と対称照明の色温度を変えた場合、プロビーム照明によって強く照らされる落下物指標の鉛直面と路面(水平面)の色度が異なるため、輝度比ではなく色度差によって視認可能となったと考えられる。図 5 にマクアダム楕円(3-STEP)と落下物指標および背景路面の色度の関係を示す。視認可能な色度差については、マクアダム楕円を考えた場合、標準偏差の 3 倍(3-STEP)以上で色度差を認識可能になると言われている[3]。背景路面の色度座標は落下物指標の色度座標を中心とするマクアダム楕円から離れて位置していることから、認識可能であることが確認された[4]。

(3) 評価結果を表 1 に、路面輝度と消費電力の関係を図 7 に示す。トンネル 1 の対称照明のみで水平面照度 81 lx とした場合を基準とし、相対評価を行った結果、狭配光プロビームを用いた場合、対称照明のみと比べて路面輝度が高く、視認性も良いことが確認された。同じ路面輝度に対し、トンネル 2 はトンネル 1 と比べて消費電力が低く抑えられており、狭配光プロビームを用いることで、視認性の改善と省エネルギーの両立を達成している。プロビーム角が大きい狭配光の光が路面に対し浅い角度で照射される場合、路面散乱光の中でも後方散乱の光が対称照明の場合より増加していると考えられる。その結果、狭配光プロビームを用いた場合、低い水平面照度であっても高い路面輝度が得られることにより、消費電力を抑制できたと考えられる。以上より、プロビーム用 LED に配光角 30 度のコリメータレンズを装着し、従来のプロビーム照明よりも狭配光にすることで、トンネル内の路上落下物視認性の改善と省エネルギーの両立を達成した。

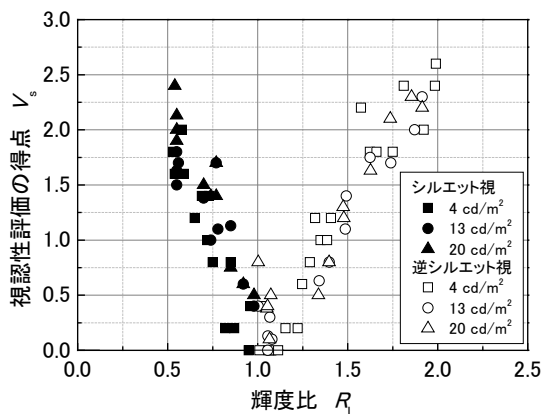


図2  $V_s$  と  $R_L$  の関係

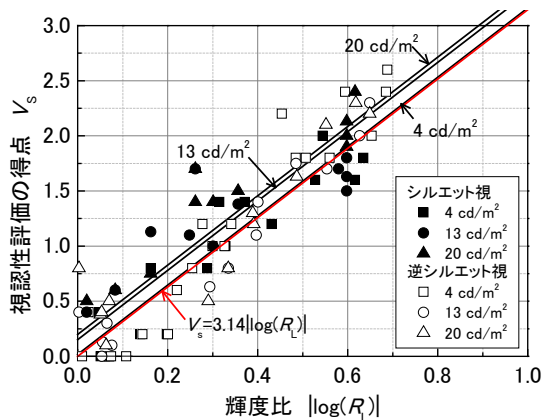
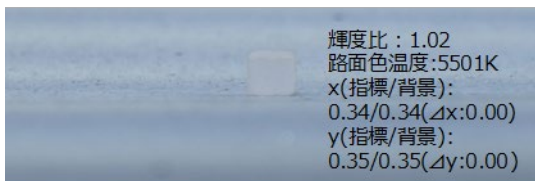
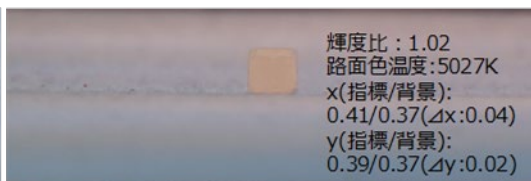


図3  $V_s$  と  $|\log(R_L)|$  の関係



(a) No. 1



(b) No. 2

図4 輝度比 1.0 時の落下物視認性の違い

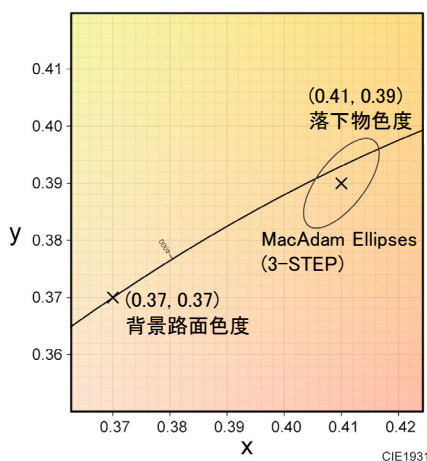


図5 CIE1931 色度座標上の落下物指標および背景路面の色度とマクアダム楕円(3-STEP)の関係

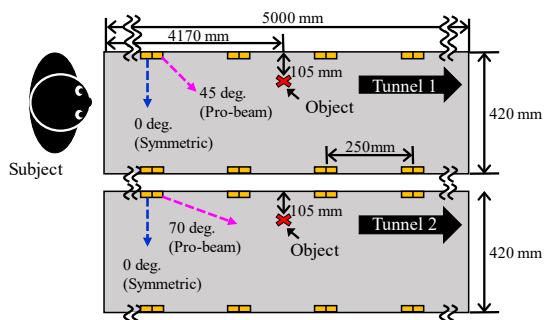


図6 トンネル模型を使った評価環境概略図

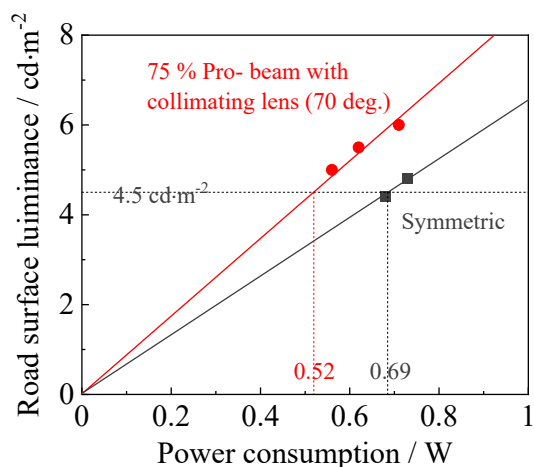


図7 路面輝度と消費電力の関係

表 1 照明条件の違いによる水平面照度、背景路面輝度、消費電力、相対視認性評価点

	対称照明(0 deg.)		狭配光プロビーム照明 (70 deg.) 75 % と対称照明 25 %		
水平面照度 / lx	75	81	55	62.5	70
背景路面輝度 / cd/m <sup>2</sup>	4.4	4.8	5.0	5.5	6.0
照度/輝度 / lx/cd/m <sup>2</sup>	17.0	16.9	11.0	11.4	11.7
消費電力 / W	0.68	0.73	0.56	0.62	0.71
電力比 / %	93	100	76	85	96
相対視認性評価点					
落下物の反射率: 9 %	-	2.0	2.6	2.8	2.6
落下物の反射率: 25 %	-	2.0	3.8	3.8	3.7
落下物の反射率: 56 %	-	2.0	3.5	3.4	3.6

<引用文献>

- [1] M. Kimura et al., Journal of Science and Technology in Lighting, 42, pp.17-21 (2019).
- [2] 国土交通省：「LED 道路・トンネル照明導入ガイドライン(案)」, (2011).
- [3] 大田登「色彩工学 第2版」東京電機大学出版局, p.117 (2001).
- [4] K. Miyake et al., Journal of Science and Technology in Lighting, 42, pp.22-28 (2019).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Ikeda Yoshihisa, Okusa Koji, Utsunomiya Shingo, Miyake Kenji, Jinno Masafumi	4. 巻 2
2. 論文標題 EFFECTIVE LIGHTING FACTORS FOR IMPROVING VISIBILITY OF FALLEN OBJECTS ON THE ROAD IN EXPRESSWAY TUNNELS	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 29th CIE SESSION 2019	6. 最初と最後の頁 1711 ~ 1719
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.25039/x46.2019.P0175	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Miyake Kenji, Ota Syunsuke, Shigematsu Daiki, Ohkusa Koji, Ikeda Yoshihisa, Jinno Masafumi	4. 巻 42
2. 論文標題 Visibility Improvement in Expressway Tunnels by Optimizing the Color Temperature and Light Distribution of the Pulse-operated LED Luminaires	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Science and Technology in Lighting	6. 最初と最後の頁 22 ~ 28
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2150/jstl.IEIJ170000620	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kimura Masayoshi, Hamada Yoshifumi, Ikeda Yoshihisa, Motomura Hideki, Jinno Masafumi	4. 巻 42
2. 論文標題 Importance of a Vector Component and the Vertical Illuminance in Road Lighting for the Obstacle Visibility of the Road	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Science and Technology in Lighting	6. 最初と最後の頁 17 ~ 21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2150/jstl.IEIJ140000551	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 池田善久, 大草光司, 三宅賢二, 木村正義, 神野雅文
2. 発表標題 視認性と省エネルギーを両立した高速道路トンネルの新しい照明手法
3. 学会等名 第18回ITSシンポジウム2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 池田善久, 大草光司, 三宅賢二, 神野雅文
2. 発表標題 トンネル内路上落下物の視認性における鉛直面照度の重要性和それを活かした省電力化
3. 学会等名 2020年度(第53回)照明学会全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 池田善久, 重松大輝, 大草光司, 三宅賢二, 木村正義, 神野雅文
2. 発表標題 照明の配光・色温度・パルス制御の最適化によるトンネル内落下物の視認性向上
3. 学会等名 第17回ITSシンポジウム2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 池田善久, 大草光司, 三宅賢二, 神野雅文
2. 発表標題 重回帰分析によるトンネル内路上落下物の視認性を決定する光学的要因の検討
3. 学会等名 2019年度(第52回)照明学会全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Ikeda, K. Okusa, D. Shigematsu, K. Miyake, M. Jinno
2. 発表標題 Improving the visibility of fallen objects in expressway tunnel by optimum luminance contrast between objects and road surface
3. 学会等名 16th International Symposium on the Science and Technology of Lighting(国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Okusa, D. Shigematsu, K. Miyake, Y. Ikeda, M. Jinno
2. 発表標題 Improvement of road-obstacle visibility by temporal control of the contrast between road-obstacle and background
3. 学会等名 16th International Symposium on the Science and Technology of Lighting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 池田善久, 大草光司, 重松大輝, 三宅賢二, 三宅賢二, 神野雅文
2. 発表標題 トンネル路上指標視認性の指標と背景路面の輝度比依存性
3. 学会等名 2018年度(第51回)照明学会全国大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大草光司, 重松大樹, 三宅賢二, 三宅賢二, 池田善久, 神野雅文
2. 発表標題 高速道路トンネル内の路上落下物視認性向上のための基本照明最適化
3. 学会等名 2018年度(第51回)照明学会全国大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件



8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------