

# 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

Optimization of basic lighting for improving the visibility of fallen objects in  
expressway tunnel.

愛媛大学	大草 光司	Koji OHKUSA	
愛媛大学	重松 大樹	Daiki SHIGEMATSU	
愛媛大学, 西日本高速道路 エンジニアリング 四国	三宅 賢二	Kenji MIYAKE	
愛媛大学	池田 善久	Yoshihisa IKEDA	
愛媛大学	神野 雅文	Masafumi JINNO	Member

## Abstract

To improve visibility of fallen objects in expressway tunnel, we optimized the ratio of the horizontal to the vertical illuminances based on subject experiments using a model tunnel. To increase surface luminance contrast between an object and road surface, the vertical illuminance was increased. In the case of the luminance contrast was higher than 1.32, the objects whose reflectivity is over 10 % were recognized by all the research subjects. On the other hand, increase in the horizontal illuminance did not affect the surface luminance contrast and did not improve the visibility. In conclusion, the surface luminance contrast is the most important index to evaluate the visibility under the reverse silhouette view and enhancement of the vertical illuminance is an effective way to improve the visibility which is necessary to the safe traffic environment.

**Keywords:** Tunnel lighting, Visibility, Expressway, Vertical illuminance, Horizontal illuminance

## 1. 緒言

交通事故の死者数は、昭和 45 年に過去最高の 16,765 人を記録してから減少傾向が見られ、平成 8 年に 10,000 人を下回った。平成 8 年以降も続けて減少傾向にあり、平成 28 年には 3,904 人となり、昭和 45 年の時と比較すると約 77% の減少を実現した[1]。これは道路交通環境の整備、安全運転の確保、車両の安全性の確保等、交通安全に基づく諸対策の推進によって改善されたと考えられる。しかし、現在も年間約 4,000 人が交通事故によって亡くなっており、これからも交通安全に関する対策を発展させる必要がある。平成 26 年度の道路種類別の交通事故発生件数は、一般国道が 136,095 件、高速道路が 5,340 件のうち、死亡事故数は一般国道が 1,153 件、高速道路

が 139 件となっている。

交通事故の発生件数は一般国道の方が遥かに多いが、事故による死亡率は高速道路の方が約 2.7 倍多いことが示されている[2]。また、首都高速道路湾岸線で行われた調査によると、トンネル部の事故率は明かり部に比べておよそ 11 件/億台高くなっている[3]。以上のことから、一般道と比べ高速道路での事故は死亡率が高く、高速道路トンネル内は明かり部と比べ事故率が高いことから、安全性向上の為にはトンネル内の視認性を確保できる照明方式の開発が最重要であると言える。

トンネル内の照明方式は、設計速度、交通方式、交通量、トンネル断面形状などを考慮して選定されている。トンネル照明においては、路面輝度を確保するとともに壁面輝度も含めた視環境を考慮する必要があり、道路横軸に対して対称な配光の対称照明方式が広く採用されている[4]。近年では、先行車に

連絡先: 神野 雅文  
〒790-8577 松山市文京町 3 番 愛媛大学  
E-mail: mjin@mayu.ee.chime-u.ac.jp

対し安定した視認性が得られるプロビーム照明や、入口照明に適しているカウンタービーム照明といった、非対称照明も導入され始めている。路上障害物や先行車の視認には、背景の路面輝度よりも低い輝度で障害物を視認するシルエット視と、背景である路面よりも高い輝度で障害物を視認する逆シルエット視の2種類の方法がある(図1)。先行車の視認性を評価した研究は過去にも報告されている[5][6][7]。一方、シルエット視と逆シルエット視の両方を考慮した路上障害物の視認性評価指標として、総視認率: Total Revealing Power (以下、TRP)[8]があり、TRPに基づいた研究が岡田らや平川らによって報告されている [9][10]。TRPはシルエット視と逆シルエット視のどちらで視認したかの区別なく定量化しているため、路上障害物の反射率によっては、路上障害物ごとの見え方について判断できないという欠点がある。

本研究では、アスファルト路面において反射率10%以上の全ての落下物を視認可能な照明条件を検討する。アスファルト路面は路面輝度が低いため、アスファルト上にある反射率の高い落下物は逆シルエット視となり、反射率の低い指標はシルエット視となる。反射率の低い指標も逆シルエット視となる照明環境とすることで、シルエット視から逆シルエット視に変化する間の、背景路面と指標の明るさが重なる視認出来ない状態を無くすことを目指す。現在用いられているプロビーム照明は、車両進行方向に45度傾けて点灯しているものが多い。本研究では、プロビーム角を45度以外に60度、70度、80度と変えることで、鉛直面照度と視認性の関係を明らかにし、アスファルト路面において反射率10%以上の全ての落下物を視認可能な照明条件を決定する。

## 2. 実験方法

### 2.1 実験装置

実験に用いたトンネル模型の概略図を図2に示す。トンネル模型を用いることにより、実物のトンネルでは実現が困難な、点灯方式やプロビーム角の変更など複数の点灯条件による比較を行った。

縮尺は1/24で、アスファルトを模した路面を有している。またトンネル壁面には内装板を模した同縮尺の白色パネルを設置している。トンネル内の基本

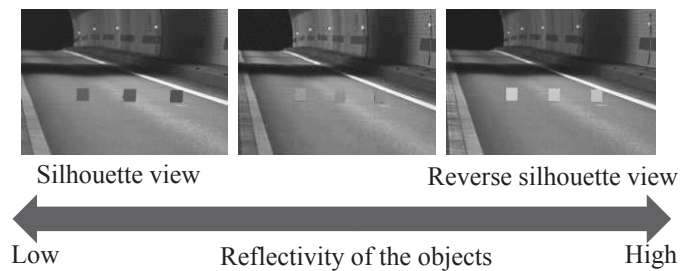


Fig.1 Relationship between negative or positive contrast viewing and visibility.

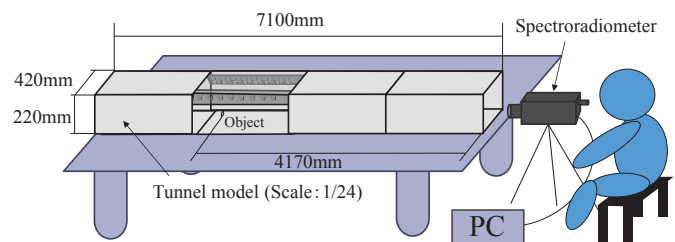


Fig.2 Schematic structure of the visibility evaluation with 1/24 scale tunnel model.

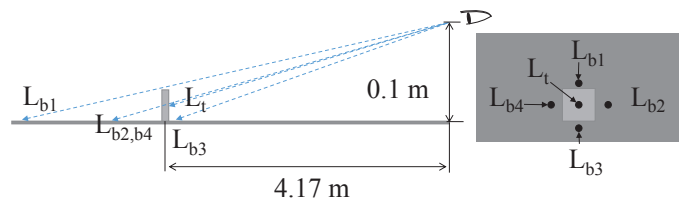


Fig.3 Luminance of target and background location on the pavement.

Reflectivity	Pics
10%	
20%	
30%	

Fig.4 Objects and reflectivity (Size: 0.8×0.8cm).

照明部の路面輝度は設計速度により基準値が決まっており、設計速度 100 km/h のとき 9.0 cd/m<sup>2</sup> である[4]。ただし、交通量が少なく透過率が高い場合には平均路面輝度を低減できる。トンネル一本当たりの交通量が1日当たり1万台未満の場合は基本照明の路面輝度を1/2まで低下させても良い[4]。本実験で用い

る平均路面輝度の値は、100 km/h 走行時に必要な路面輝度の 1/2 である 4.5 cd/m<sup>2</sup>とした。

## 2.2 照明条件

鉛直面照度を変化させる為、対称照明とプロビーム照明の比率を 100 : 100、75 : 25、50 : 50、25 : 75、0 : 100 と変化させた。また、プロビーム照明の角度は、基準となる 45 度に加えて、60 度、70 度、80 度の 4 種類で行った。水平面照度は、路面輝度の設定基準値 4.5 cd/m<sup>2</sup>に対し、トンネル照明におけるアスファルトの平均照度換算係数 18 lx/cd/m<sup>2</sup>より換算し、81.0 lx とした。水平面照度の基準測定点は、観察および輝度観察箇所のトンネル入口から 4.17 m (1/1 スケールで 100 m)、左側壁面から 21 cm (1/1 スケールで 5.0 m) とした。

測定に用いる指標は、実際の道路において視認すべき最小サイズである 20cm×20cm を基準として指標サイズを決定した。これより、トンネル模型の縮尺に合わせ 0.8×0.8cm を本実験での指標サイズとする。指標は実際の距離で 100m となる被験者から 4.17m の位置に設置した(図 3)。指標の種類は反射率が 10%、20%、30%の 3 通りとする(図 4)。上記の条件で 5 名の被験者(22~23 歳の成人男性)による主観評価を行った。評価方法は「よく見えた」場合 4 点、「見えた」場合 3 点、「見えにくい」場合 2 点、「見えない」場合 1 点として、5 人の平均により数値化した。また、定量的に視認性を評価するため光学測定を行った。光学測定は分光放射計(TOPCON : SR3)を用いた。図 3 に示すように指標の中心輝度  $L_t$  と、指標の周り四方の背景輝度  $L_{b1}$ 、 $L_{b2}$ 、 $L_{b3}$ 、 $L_{b4}$  の、計 5 点の輝度を測定した。測定した輝度は、次式

$$\text{輝度比 } C = L_t / \{(L_{b1} + L_{b2} + L_{b3} + L_{b4}) / 4\}$$

より算出し、被験者による視認性の絶対評価結果と比較することで、被験者が指標を視認可能な輝度比のしきい値を求めた。

## 3. 実験結果

### 3.1 落下物指標の視認に必要な輝度比

実験結果を図 5 に示す。輝度比が 1 に近い部分では視認性が低下し、1 より小さくなる、あるいは 1

より大きくなるほど視認性が高いことが分かる。すべての被験者が「見えにくい」と回答した評価点 2 点は、被験者が指標を認識出来た下限値であり、2 点より低い評価の場合は、その輝度比では「見えない」被験者がいることを示している。

プロビーム角 60 度、プロビーム比率 25%、指標反射率 20%時の輝度比 1.32 より輝度比が高い場合、評価点が 2 点以上になっている。すなわち輝度比 1.32 以上の場合、指標は逆シルエット視によって視認出来ることが分かる。また、プロビーム角 80 度のプロビーム比率 25%反射率 10%指標の輝度比 0.73 より低い輝度比でも評価点が 2 点以上になっている。すなわち輝度比 0.73 以下の場合、指標はシルエット視によって視認出来ることが分かる。以上より、すべての被験者が指標を逆シルエット視で視認できる輝度比は 1.32 以上となった。

図 6 に、プロビーム角 80 度時の指標の写真を示す。図より、逆シルエット視において、プロビーム比率が高いほど輝度比が上昇し視認性が向上していることが分かる。プロビーム比率 100 %時に 20 %指標、30 %指標ともに評価点は最も高い 4 点となっている。しかし、この時の 10 %指標は逆シルエット視となって視認可能な輝度比 1.32 以上を満たしておらず、評価点は 1.8 点であった。アスファルト路面では、すべての指標を視認するためには逆シルエット視である必要があるが、本実験ではすべての被験者が 10% 指標を視認できる条件はなかったため、今後さらなる照明方式の検討を行う必要がある。

### 3.2 水平面照度と輝度比の関係

次に、従来の対称照明のみの場合と、今回最も視認性が良い条件であったプロビーム比率 100 %でプロビーム角 80 度の場合において、水平面照度を変化させた場合の輝度比の変化を評価した。対称照明のみの場合の水平面照度、輝度比、消費電力、指標の写真を図 7 に、プロビームのみの場合を図 8 に示す。図 7 より対称照明のみの場合、水平面照度の変化に関係なく、指標と背景路面の輝度比はほぼ一定となっていることが確認できる。水平面照度が基準値の倍の 164.3 lx の場合においても、20 %指標と背景路面との輝度比は 1.14 であり、この時の消費電力は 1.38 W であった。対称照明のみの場合、シルエット

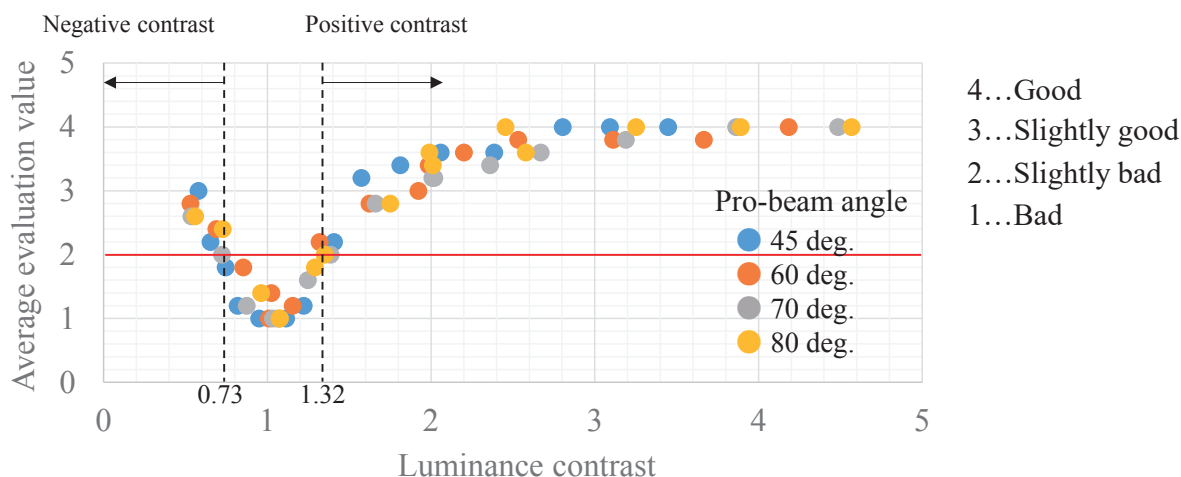


Fig.5 Visibility evaluation results

Reflectivity of objects	Pro-beam 0%		Pro-beam 25%		Pro-beam 50%		Pro-beam 75%		Pro-beam 100%	
30%	E.V.	L.C.								
	3.6	1.99	3.6	2.58	4.0	3.25	4.0	3.89	4.0	4.57
20%										
	1.0	1.08	2.0	1.35	2.8	1.75	3.4	2.01	4.0	2.45
10%										
	2.6	0.59	2.4	0.73	1.4	0.96	1.0	1.07	1.8	1.29

E.V. Evaluation value  
L.C. Luminance contrast

Fig.6 Measurement result of luminance contrast, evaluation value of visibility, and pictures.

(Pro-beam angle: 80 deg.)

視と逆シルエット視の間の視認できない反射率の指標が存在するため、水平面照度を高くしても安全性は確保出来ないことが分かる。一方プロビーム比率100%でプロビーム角80度の場合、水平面照度が高くなるにつれて輝度比が僅かに高くなっている。消費電力が1.38 W のとき10%指標と背景路面との輝度比は1.29であり、水平面照度は84.2 lxであった。

以上の結果より、水平面照度の変化に対して輝度比の変化は僅かであり、落下物に対する視認性に殆ど影響が無いことが確認された。

#### 4. 考察

本研究結果より、指標輝度と背景路面の輝度比と視認性評価を比較することで、視認性を得るためのしきい値を得た。しかし、照明条件として必要な鉛直面照度は、路面反射率で変わる可能性がある。アスファルト路面の反射率は、舗装初期が最も低く、汚れが進むと灰色がかかる為、本実験時よりも高い鉛直面照度が必要となると考えられる。

被験者全員が落下物指標を視認可能であった輝度比1.32の条件と、視認出来ない被験者が存在した輝度比1.29の条件について、その差は0.03であった。

Reflectivity of objects	Input power 0.48 W	Input power 0.58 W	Input power 0.69 W	Input power 1.01 W	Input power 1.38 W
30%	L.C. 1.97	2.01	2.06	2.13	2.14
20%	1.04	1.06	1.11	1.13	1.14
10%	0.54	0.55	0.58	0.56	0.56
	Horizontal illuminance 55.3 lx	Horizontal illuminance 68.3 lx	Horizontal illuminance 81.4 lx	Horizontal illuminance 120.2 lx	Horizontal illuminance 164.3 lx

L.C. Luminance contrast

**Fig.7 Measurement result of luminance contrast and pictures.  
(Symmetric beam)**

Reflectivity of objects	Input power 0.88 W	Input power 1.08 W	Input power 1.28 W	Input power 1.38 W	Input power 1.71 W
30%	L.C. 4.42	4.56	4.57	4.74	4.83
20%	2.36	2.44	2.45	2.49	2.53
10%	1.19	1.23	1.29	1.29	1.32
	Horizontal illuminance 54.4 lx	Horizontal illuminance 67.3 lx	Horizontal illuminance 81.1 lx	Horizontal illuminance 84.2 lx	Horizontal illuminance 104.9 lx

L.C. Luminance contrast

**Fig.8 Measurement result of luminance contrast and pictures.  
(Pro-beam angle: 80 deg.)**

人間の目のダイナミックレンジは 1:100 と言われており、0.03 という輝度比の違いは認識できるレベルであることが分かる。しかし、ダイナミックレンジの下限が路面輝度または落下物指標輝度となる一方で、上限値は視界に入る全ての対象物の最大輝度となるため、ドライバーが前方の路面を注視していなければ、輝度比 1.32 付近の落下物は、見落とす可能性が高いギリギリの値であると考えられる。実際に本実験で用いたトンネル模型は、内装用パネルを模

した同縮尺の白板を有しており、その明るさが本結果に影響を与えた可能性がある。視認性を高める手法として、トンネル壁面の輝度を路面輝度に近づけ、ドライバーの視野に極端に明るい対象物が無い視環境を作ること、より効果的に視認性が上がる可能性が高い。今後は、本結果をもとに、内装パネルの有無や、灯具からドライバーに向かう直接光などの影響が視認性に与える影響について、検証を進める。

## 5. まとめ

本研究は、高速道路トンネル照明における対称照明とプロビーム照明の照明比率とプロビーム照明の角度を変更し、指標輝度と背景路面輝度との輝度比と被験者による視認性の絶対評価と比較することで、被験者が視認可能な輝度比のしきい値を求めた。その結果、アスファルト路面において、逆シルエット視で視認可能となる輝度比は1.32以上であることが分かった。実験結果で最も視認性が良い照明条件は、水平面照度 81 lx の場合、プロビーム角 80 度でプロビーム比率 100 %点灯時に視認性が最も良く、そのときの輝度比は 1.29 であった。また、水平面照度を変化させた場合、プロビーム角およびプロビーム比率が一定の場合は、輝度比は殆ど変化しないことが確認された。この為、ドライバーに対して安全な視環境を構築するためには、水平面照度を高くすることは有効では無く、鉛直面照度を高くして、落下物と背景路面輝度の輝度比が 1.32 以上となるように設計することが必要である。

## 参考文献

- [1] 公益財団法人 交通事故総合分析センター “平成 28 年中の交通事故発生状況” (2017)
- [2] 警察庁交通局: “平成 26 年中の交通事故の発生状況” , (2015)
- [3] 後藤秀典, 田中淳, 赤羽弘和, 割田博: “都市高速道路のトンネル区間を対象とした事故分析” , 交通工学研究発表会論文報告集 25, pp.49-52(2005)
- [4] 社団法人日本道路協会: “道路照明施設設置基準・同解説” ,改訂版第1刷、日本道路協会、東京、2007、pp13、14、64
- [5] 武内徹二、清水正則、宮川勝海、小林浩之: “トンネル入口部における先行車の視認性(その 1)- ブライトネスと視認性-” 平成 7 年度照明学会全国大会(1995)
- [6] 山中彦、坂本正悦、宮川勝海、小林浩之: “トンネル入口部における先行車の視認性(その 2)- 視認性の改善に関する検討-” 平成 7 年度照明学会全国大会(1995)
- [7] 唐沢宣典、坂本正悦、早川正昭、鈴木靖亀、手嶋英之: “トンネル照明下における先行車の視認性” 平成 14 年度照明学会 35 回全国大会(2002)
- [8] J. M. Waldram: “The Revealing Power of Street Lighting Installations” , Trans. Illum. Eng. Soc. (London), 173-186(1938)
- [9] 岡田晃夫、加賀啓記、伊藤勇人、坂本正悦: “トンネル照明下における先行車の視認性” 照明学会誌、第 90 巻、第 8A 号、pp495-503(2006)
- [10] 平川恵士、唐沢宣典、吉田幸信: “トンネル照明と自動車前照灯の融合時における路上障害物の視認性価に関する研究” 照明学会誌、第 8A 号、pp352-361(2014)