

自動車前照灯を考慮したトンネル照明の視認性評価に関する研究



研究ノート

平川 恵士*

Visibility evaluation of Tunnel lighting in consideration of Vehicle headlamps

Key Words : Tunnel lighting, Total revealing power, Visibility, Vehicle headlamp

1. はじめに

トンネル照明は、運転者が道路上の障害物または歩行者、車両の存否、道路幅員、道路線形、構造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ことを目的として設置され、照明要件として性能指標^[1]が規定されている。このうち路上の障害物の視認性に影響するのが、平均路面輝度・輝度均斉度・視機能低下グレアである。

トンネル照明による道路上の障害物の視認方法には、シルエット視と逆シルエット視がある。ここで、シルエット視とは、障害物を背景より暗い状態で視認させる方法であり、反射率の低い視対象物に適している。逆シルエット視とは、視対象物を背景より明るい状態で視認させる方法であり、反射率の高い視対象物に適している。

これまでトンネル照明による路上障害物の視認性は、シルエット視を原則として評価されてきたため、現在のトンネル照明では、自動車前照灯（以下、前照灯）による逆シルエット視が考慮されていない。前照灯の性能は、配光技術の向上と光源の高出力化により飛躍的に向上し、今後もLEDなどの採用によりさらに向上することが予測されるが、従来照明基準ではその評価が困難であった。本稿は、シルエット視と逆シルエット視の両方を考慮する新たな照明理論（総視認率（Total Revealing Power）^{[2]-[4]}（以

下、TRP）に基づき、前照灯を考慮したトンネル照明の視対象物の視認性を検討した研究成果について紹介する。

2. 自動車前照灯とトンネル照明灯融合時の視認性評価

トンネル照明におけるTRPは、路上のある地点に“存在する可能性のある”対象物に対する、“見える”対象物の割合（%）を表す。そして、任意の地点における背景の路面輝度よりも対象物の輝度が低い“シルエット視”における視認率（以下、 RP_s ）の値と、背景の路面輝度よりも対象物の輝度が高い“逆シルエット視”における視認率（以下、 RP_{rs} ）の値の和がTRP（%）である。

$$TRP = RP_s + RP_{rs} \cdots (1)$$

TRPは、図1に示すとおり路上の物体の反射率 ρ の累積存在確率を表す累積関数 $F(\rho)$ を用いて、式(2)で求められる。

$$TRP = F(\rho_s) + \{100 - F(\rho_{rs})\} \cdots (2)$$

ρ_s : 対象物をシルエット視で視認し得るための限界反射率（%）

ρ_{rs} : 対象物を逆シルエット視で視認し得るための限界反射率（%）

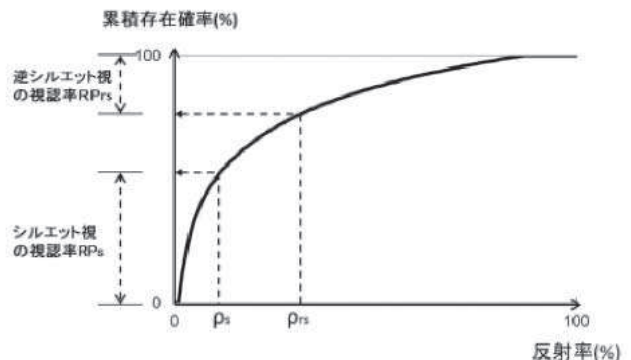


図1 限界反射率と視認率



* Satoshi HIRAKAWA

1972年2月生
徳島大学大学院工学研究科 電気電子工学専攻修了（1996年）
現在、西日本高速道路株式会社 工学研究科 NEXCO西日本高速道路学共同研究講座 招へい研究員 電気
TEL : 06-6879-4866
FAX : 06-6879-4866
E-mail : s.hirakawa.ab@w-nexco.co.jp

本稿では、高速道路のトンネル照明を対象とするため、路上の物体の累積関数は、戸枝ら^[5]により算出された式(3)を用いて各地点のTRPを算出し、灯具1スパン内におけるTRPの分布から視認性を評価する。

$$F(\rho) = 23.6 \ln(\rho) - 5.2 \cdot \dots \cdot (3)$$

式(3)より、TRPは、限界反射率が決まれば一意に求まる。そこで、前照灯とトンネル照明の融合時の視認性は、トンネル照明と前照灯が融合した状態における対象物の限界反射率を求めれば評価できると考え、シルエット視及び逆シルエット視で視認するための視対象物の限界反射率(ρ_s 及び ρ_{rs})を、背景輝度 L_b (cd/m^2)、輝度差弁別閾(視覚が辛うじて識別できる対象物と背景との輝度差) ΔL_{min} (cd/m^2)、トンネル照明の鉛直照度 $E_v(lx)$ 、前照灯の鉛直照度 $E_{v_HL}(lx)$ より式(4)及び式(5)を算出した。

$$\rho_s = 100 \cdot \pi \cdot (L_b - \Delta L_{min}) / (E_v + E_{v_HL}) \cdot \dots \cdot (4)$$

$$\rho_{rs} = 100 \cdot \pi \cdot (L_b + \Delta L_{min}) / (E_v + E_{v_HL}) \cdot \dots \cdot (5)$$

本稿では、式(3)、(4)及び(5)から路面上の各地点のTRPを算出し視認性を評価する。

3. 自動車前照灯及びトンネル照明灯の光学特性

トンネル照明以外で道路上の障害物を視認させる装置が前照灯である。前照灯には、走行用前照灯(以下、走行ビーム)とすれ違い用前照灯(以下、すれ違いビーム)があり、夜間の交通上の障害物を確認

できる性能を有すること^[6]が求められている。前照灯は、道路・トンネル照明に比べ低い位置から自動車の進行方向に照射するため、水平照度よりも鉛直照度が高くなる。そのため前照灯による視認方法は、視対象物の輝度が背景輝度より高くなることから、一般的に逆シルエット視となる。高速走行領域においては、すれ違いビームは、トンネル照明への視認性の影響が少ないと考えられるため、以降におけるトンネル照明と前照灯を組み合わせた視認性評価は、走行ビームを対象に評価する。なお、本稿で述べている対象物の視認とは、1辺20cmの平面体を「検出」できることを指す。

3.1 走行ビームの光学特性

走行ビームの光学特性の測定結果を図2に示す。同図より水平照度は、40m付近では走行車線で1lx程度であり90m以遠は0.4lx以下であった。鉛直照度は、80m付近で、走行車線20~40lx程度、追越車線20lx以下、90m付近で走行車線側約15lx、追越車線側10lx以下、120m付近で走行、追越車線ともに10lx程度であった。100m付近において、水平照度が1lx以下であることから、路面輝度はほぼゼロとなるのに対し、鉛直照度が10lx程度あるため、走行ビームの場合、路上対象物は、逆シルエット視で、ある程度視認できることが推測される。また、鉛直照度が走行車線と追越車線と異なることから、トンネル照明との融合時における路上対象物の視認性は、車両が走行する車線と隣接車線で異なることが予想される。

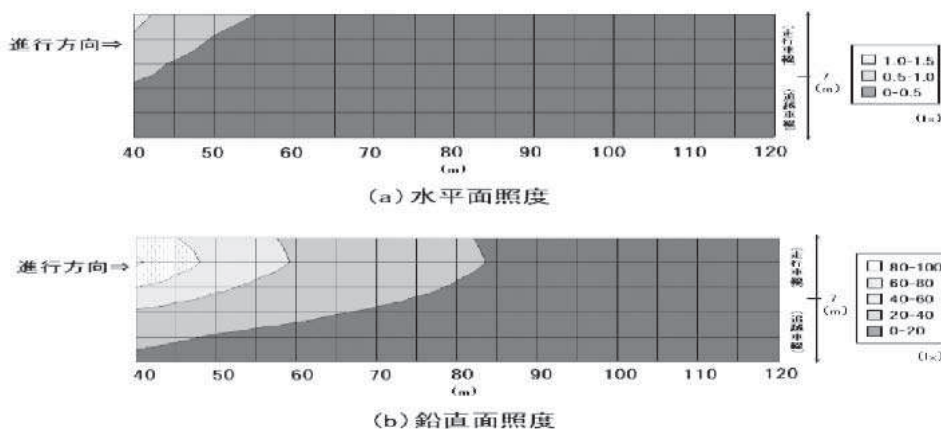


図2 照度分布 (走行ビーム)

3.2 トンネル照明灯の光学特性

対称照明方式及びプロビーム照明方式のトンネル照明について、照明条件を2車線断面のトンネル（一方交通、道路幅員7m）、灯具配光（対称照明方式：図3、プロビーム照明方式：図5）、灯具配置：向合せ、路面反射特性：CIE C₂（アスファルト）、灯具高さ5.0m、灯具間隔10.0m、平均路面輝度4.5cd/m²のときの光学特性（水平面照度、鉛直面照度）を図4及び図6に示す。（図3及び図5のA断面及びB断面は、道路横断方向及び縦断方向の配光特性を示す。）

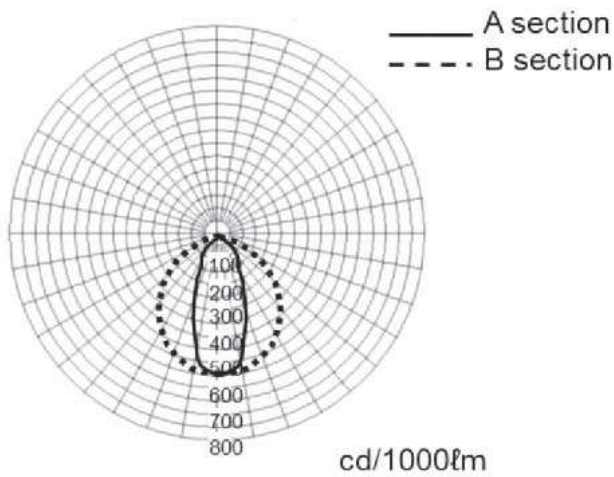


図3 配光曲線（対称照明方式）

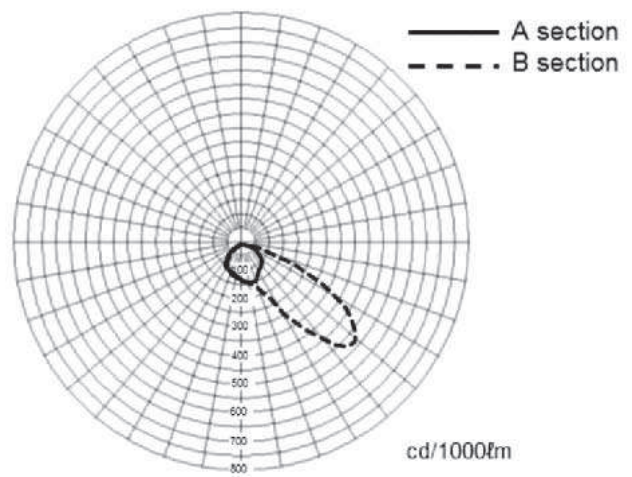


図5 配光曲線（プロビーム照明方式）

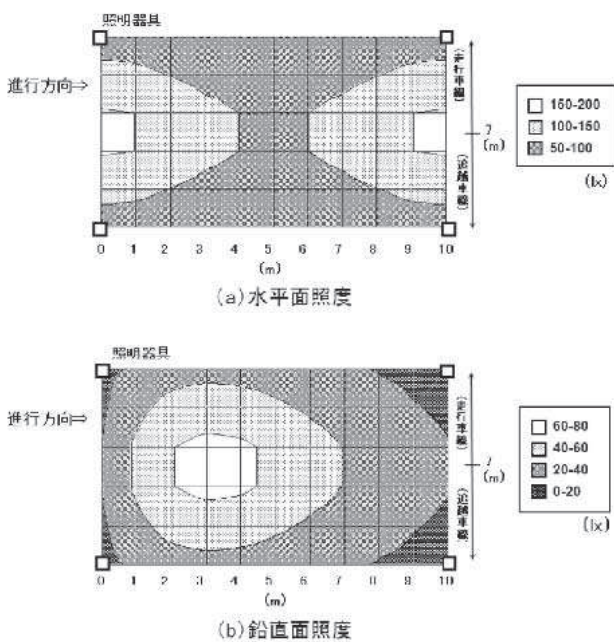


図4 照度分布（対称照明方式）

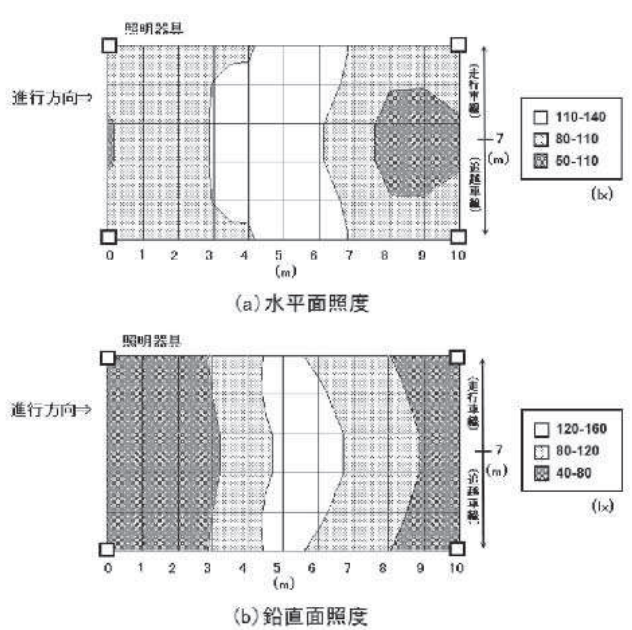


図6 照度分布（プロビーム照明方式）

図4より、対称照明方式の光学特性の特徴として、水平面照度は縦断方向灯具位置の車線中央付近が最大となり、灯具間中央付近で最小となる。また鉛直面照度は、灯具の直下及び路肩で最小となり、進行方向の手前の灯具から約1/3 スパン前方で最大となることからわかる。

一方、図6より、プロビーム照明方式は、水平面照度及び鉛直面照度ともに灯具間中央付近で高くなっている。また灯具1スパン内において、対称照明方式に比べ、鉛直面照度が路面輝度に対して高い照明特性となっていることがわかる。

4. 総視認率 (TRP) による視認性評価

4.1 対称照明方式のTRP

図7に平均路面輝度が1.1 cd/m²、及び4.5 cd/m²のときの照明灯具1スパン内のTRPを示す。なお、背景輝度は図4から逐点法¹⁾により算出した。なお、観測距離は100mとし、等価光幕輝度は、トンネル照明設置条件下において平均路面輝度1.1 cd/m²及び4.5 cd/m²でそれぞれ算出した。また前照灯の光学特性は、走行ビームを用いた。

図7より、トンネル照明単独によるTRPは、照明灯具近傍で高く、照明器具近傍を除く車線の縦断方向において一様となる。走行ビームが加わる(同図(b))ことで、TRPは灯具近傍で同図(a)と比較して低下し、道路縦断方向で一様となることがわかる。また、平均路面輝度が4.5 cd/m²の場合、前照灯の有無に関わらずTRPは灯具スパン内で概ね一様となるのに対し、平均路面輝度が1.1 cd/m²の低い場合、TRPは道路車線中央の灯具位置付近で高く、進行方向の手前灯具から2/3スパン前方付近(図7

の6~8mの位置)で低くなるのがわかる。

表1に各地点のTRPの基本統計量を示す。同表から、灯具1スパン内TRPの平均値(以下、TRP_{ave})は、平均路面輝度により大きく異なることがわかる。走行ビームによるTRP_{ave}の変化は、約1ポイント以内の変化であった。また、走行ビームが加わることでTRPの分散が小さくなる傾向が見られ、かつTRPの最大値と最小値の間隔が狭まっている。このことから、1スパン内で照度分布があるトンネル照明に対し、前照灯は、照度が観測距離だけ離れた地点で一定となるため、トンネル照明単独時の照度分布により生じるTRPの分布のムラを改善する効果があると考えられる。

次に、照明設置条件は一定とし、平均路面輝度を0.7~4.5 cd/m²の範囲で変化させたときのTRP_{ave}を図9に示す。同図より、対称照明方式の場合、トンネル照明単独のTRP_{ave}は、平均路面輝度に依存し、シルエット視による視認率RP_sが支配的であることがわかる。また、前照灯融合時は、逆シルエット視

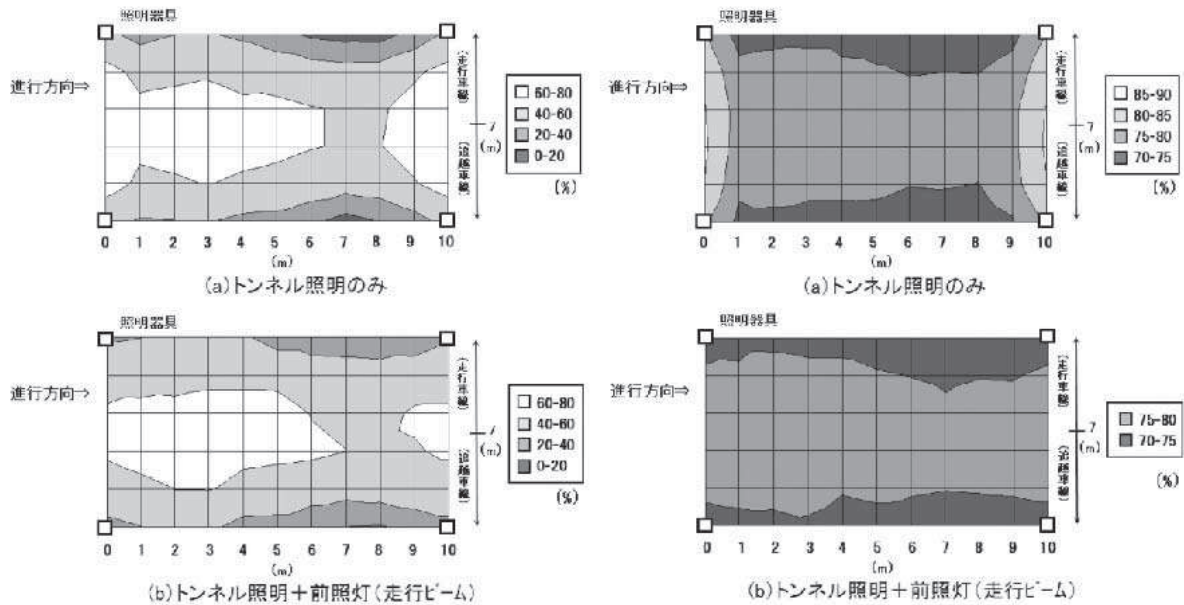
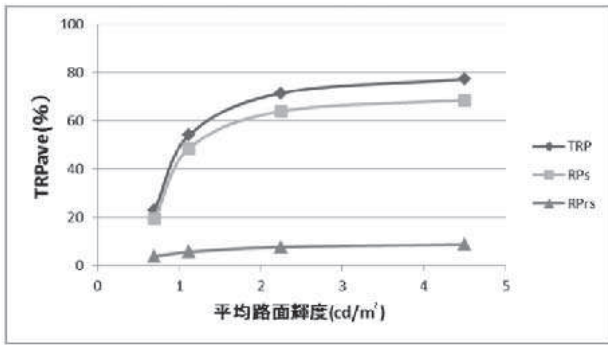


図7 TRPの分布(対称照明方式)

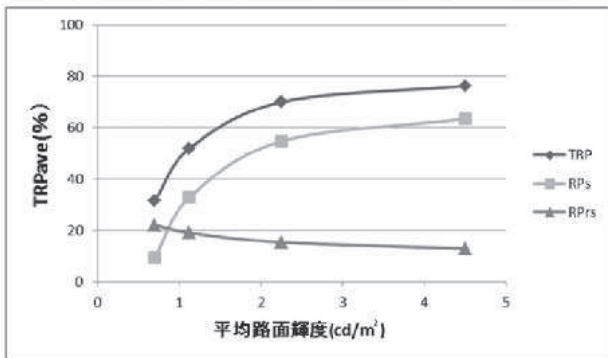
表1 TRPの基本統計量(対称照明方式)

平均路面輝度	1.1cd/m ²		4.5cd/m ²	
	前照灯無	前照灯有	前照灯無	前照灯有
平均	50.4	49.9	76.3	75.2
標準偏差	15.8	13.2	3.2	2.1
分散	250.4	175.4	10.1	4.3
最小	11.8	18.0	71.2	71.3
最大	73.6	65.1	85.7	78.0

による視認率RP_{rs}の割合が増加し、平均路面輝度0.8 cd/m²以下で逆シルエット視による視認率RP_{rs}が支配的となることがわかった。さらに、トンネル照明のTRPと前照灯のTRPとの間に加法性はなく、シルエット視による視認率RP_sと逆シルエット視の視認率RP_{rs}の比率が変わるのみであることがわかった。



(a)トンネル照明のみ



(b)トンネル照明+前照灯(ハイビーム)

図8 平均路面輝度とTRPave (対称照明方式)

4.2 プロビーム照明方式のTRP

プロビーム照明方式のTRPの分布及び各地点のTRPの基本統計量をそれぞれ図9及び表2に示す。図9よりプロビーム照明方式は対称照明方式に比べ、前照灯の有無に係らず灯具直下付近のTRPの変化が少なく、平均路面輝度1.1cd/m²のとき、道路中央の灯具付近が変化していることがわかる。また、表2より、対称照明方式と同様に、TRP_{ave}は平均路面輝度により大きく異なることがわかる。TRP_{ave}の変化は、約1ポイント以内の変化であった。TRPの分散、最大値、最小値からも変化が少なく、路上対象物の灯具1スパン内の平均的な視認性にはほとんど影響しないことがわかる。図10にプロビーム照明方式の平均路面輝度に対するTRP_{ave}を示す。同図より、プロビーム照明方式の場合、トンネル照明のみの場合と前照灯が加わった場合のシルエット視の視認率RPsと逆シルエット視の視認率RPrsの比率の変化が対称照明方式よりも少ないことがわかる。これは、図5及び図6に示したとおり、プロビーム照明は前照灯と同様、道路軸方向前方に主たる配光を有し、主たる視認方法が逆シルエット視となるためである。

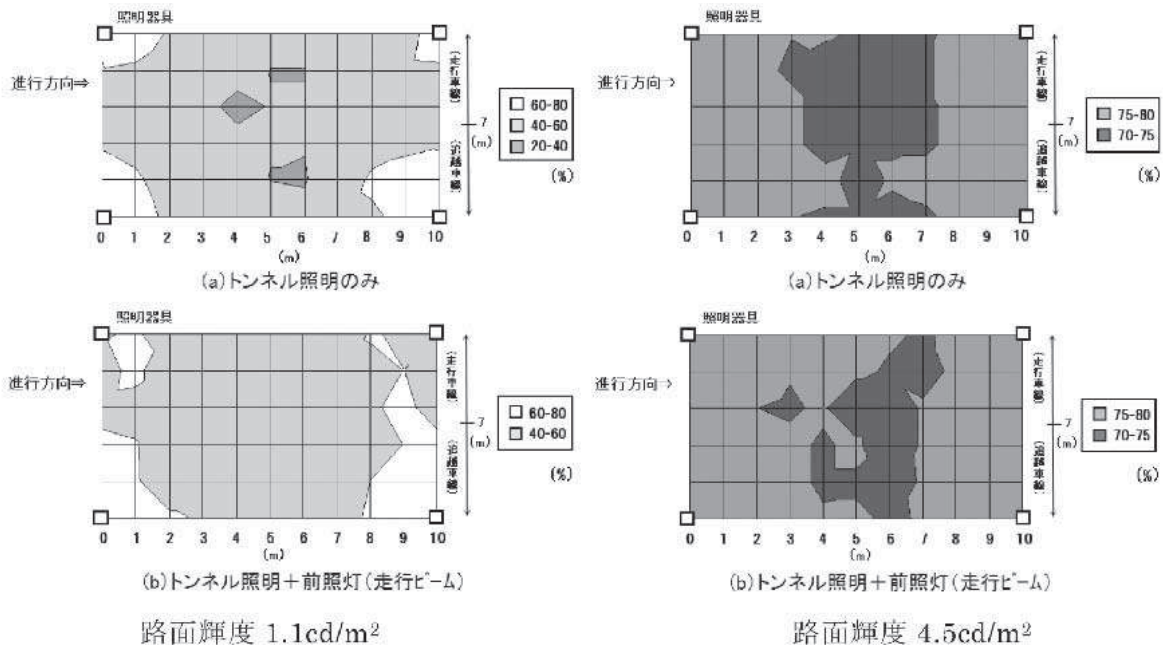
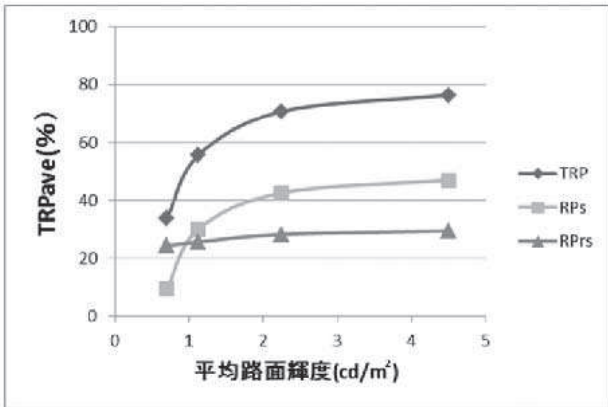


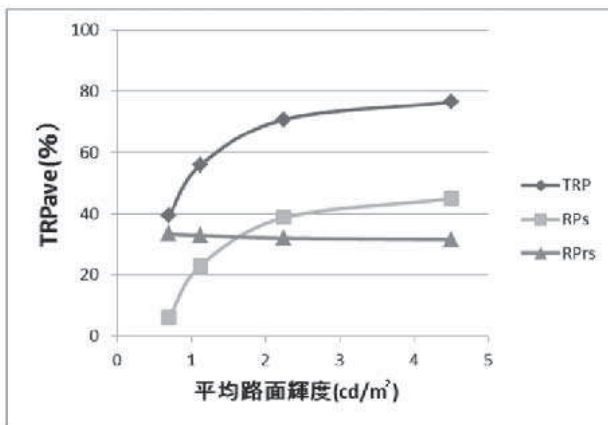
図9 TRPの分布 (プロビーム配光)

表2 基本統計量 (プロビーム照明方式)

平均路面輝度	1.1cd/m ²		4.5cd/m ²	
	前照灯無	前照灯有	前照灯無	前照灯有
平均	53.2	54.2	75.6	75.8
標準偏差	7.7	6.2	1.6	1.9
分散	58.7	38.3	2.5	3.5
最小	34.3	42.6	72.4	69.6
最大	62.3	64.1	77.8	78.3



(a)トンネル照明のみ



(b)トンネル照明+前照灯(ハロファン)

図10 平均路面輝度とTRPave (プロビーム照明方式)

また、プロビーム照明方式の灯具1スパン内のTRPaveは、前照灯融合時においてもほとんど変化せず、平均路面輝度に依存することがわかった。

5. おわりに

本稿では、総視認率TRPに基づく、トンネル照明と前照灯との融合時における対象物の視認性の定

量的な評価手法について紹介した。本手法を用いて灯具1スパン内のTRPの平均値 (TRP_{ave}) による評価を行った結果、照明方式、平均路面輝度に関わらず、前照灯の有無によって視認性はほとんど変化しないこと、TRP_{ave}は平均路面輝度に依存し、かつ、平均路面輝度が高いほどシルエット視が支配的であり前照灯の影響を受けにくいことなどを明らかにした。また、対称照明方式の場合、平均路面輝度が低いほど前照灯による逆シルエット視の割合が高まることを示した。一方、プロビーム照明方式は、前照灯融合時における対象物の視認性への影響が少ないことを示唆した。

本研究の成果は、これまで評価が困難であったトンネル照明方式に対する視認性や前照灯との融合時の視認性に対する定量的な評価を可能とするものであり、交通安全施設としてのトンネル照明の路上視対象物の視認性評価手法として有用であると考えている。今後は実用化に向けた走行環境の要素を組み合わせた総合的な視環境評価についても検討していきたい。

<参考文献>

- 1) 道路照明施設設置基準・同解説, 2007 (社)日本道路協会
- 2) Waldram, J.M., The revealing power of street lighting installations. Trans. Illum. Eng. Soc. (London), 173-186, 1938
- 3) Narisada K, Karasawa Y, Shirao K. Design, Parameters of road lighting and revealing power: Proceedings of the CIE, 25th Session. San Diego, Vienna: CIE, 2003.
- 4) 平川, 唐澤, 舟木, 吉田; トンネル照明の視認性評価指標に関する検討, 照明学会誌 Vol.97, No.5, 平25
- 5) 戸枝ら: 高速道路照明設計に用いる限界対象物 (第二報), 平成15年度照明学会全国大会, p67, 2002
- 6) 道路運送車両の保安基準 (国土交通省)