論　　文

トンネル照明と自動車前照灯の融合時における路上視対象物の視認性評価に関する研究

正会員　平川　恵士（西日本高速道路㈱）　専門会員　唐澤　宜典（パナソニック㈱）
非会員　吉田　幸信（大阪大学）

Visibility Evaluation of Obstacles on Road Surface in Consideration of Vehicle Headlamps and Tunnel Lighting Based on Total Revealing Power

Member **Satoshi Hirakawa** (West Nippon Expressway Co.Ltd), Fellow Member **Yoshinori Karasawa** (Panasonic Co. Ltd)
and Non Member **Yukinobu Yoshida** (Osaka–University)

ABSTRACT

Under the current lighting standard, a vehicle's headlamps are not taken into consideration in the visibility evaluation for obstacles on the surface of a road based on the tunnel lighting.

In this paper, we quantitatively evaluate the visibility for obstacles based on the total power revealing properties, while considering a vehicle's headlamps and the tunnel lighting. As a result, in the case of a symmetric lighting system, the visibility of obstacles on the road based on the headlamps and tunnel lighting decreased at a point in vertical illuminance that was lower for a higher average road surface luminance. In contrast, a pro-beam lighting system showed that the obstacle visibility scarcely changed even if the headlamps were added, and that it is the effective in the terms of coordination of tunnel lighting and headlamps.

KEYWORDS : tunnel lighting, lighting system, pro-beam lighting, vehicle headlamps, total revealing power, critical reflection factor

1．緒言

トンネル照明は，運転者が道路上の障害物，先行車両の存否，道路幅員，道路線形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る．視環境を確保するための照明要件として性能指標[1]が規定され，道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，視対象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．現在のトンネル照明の路上視対象物の視認性は，シルエット視を原則とする評価方法であり，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．

トンネル照明の視認性をシルエット視と逆シルエット視で評価する指標にトータルリビーリングパワー[2]（以下，TRP）があり，いくつかの研究[3)–6)]がある．しかしながら，これらの研究には前照灯の影響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ことから，トンネル照明と前照灯との照明協調の観点より，前照灯とトンネル照明の融合時における視認性評価を行い，安定した視認性が確保できる照明設備を構築する必要があるといえる．

本稿では，高速道路のトンネル照明を対象に，前照灯融合時における路上視対象物の視認性を TRP に基づき評価する．はじめに① TRP を算出するための路上物体を視認し得る限界の反射率（以下，「限界反射率」）を導出する．次に②実際のトンネルで前照灯の光学測定を行い，③シミュレーションにより照明方式に対し，トンネル照明単独と前照灯が加わった複合環境における視認性との比較を行う．さらに，④現地試験により，対称照明方式とプロビーム照明方式による前照灯の影響を評価する．

本論文の一部は平成25年度の照明学会・全国大会で発表した．平川恵士，早川正昭，唐澤宜典，岡田晃夫，舟木剛，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視認性評価．

2．トンネル照明と自動車前照灯の基準と課題

2.1　現行のトンネル照明基準

トンネル照明の照明方式は，対称照明方式と非対称照明方式に分類され，さらに非対称照明方式は，道路縦断方向の配光から交通方向に対向する配光をもつカウンタービーム照明方式と交通方向に配光をもつプロビーム照明方式に分類される．現在のトンネル照明基準では，路面輝度の確保と壁面輝度を含めた視環境の観点から対称照明方式が原則とされている．

対称照明方式を基本としたトンネル照明の性能指標として，平均路面輝度，輝度均斉度，視機能低下グレア及び誘導性が規定されている．平均路面輝度は，運転者の視点から見た路面の平均輝度であり，設計速度，煤煙透過率に応じて設定される．輝度均斉度は，輝度分布の均一性（以下，輝度ムラ）を表すものであり，総合均斉度と車線軸均斉度がある．総合均斉度（U_o）は，平均路面輝度（L_r）に対する最小部分輝度（L_{min}）で表され，路面上の視対象物の視認性に影響する．車線軸均斉度は，各車線の中心線に沿った最小部分輝度（L_{min}）を最大部分輝度（L_{max}）で除した値で，路面の輝度ムラが運転者の不快感に影響する程度を表す．グレアは，見え方の低下や疲労を生ずる原因となる光のまぶしさであり，不快感を与える不快グレアと，視対象物の視認性を低下させる視機能低下グレアがある．誘導性は，トンネル照明の効果により，運転者に道路の線形を明示するものである．

これら性能指標のうち，視対象物の視認性に影響するのは，平均路面輝度，総合均斉度及び視機能低下グレアであり，これらを基礎として視対象物の視認性が評価されてきた．しかしながら，道路・トンネル照明により視対象物が，シルエット視または逆シ

ルエット視のいずれの方法で視認されるかは，視対象物の存在する地点における鉛直面照度と背景輝度，および視対象物の反射率によって決まるため，これまでの性能指標では不均一な輝度分布をもつ路面における視認性を定量的に評価することができないという問題があった．

2.2 自動車前照灯の基準

道路運送車両法保安基準[7]によれば，自動車の前面には前照灯（走行ビーム及びすれ違いビーム）を設置することとされ，その性能として，走行ビームは，夜間に前方100m の距離にある交通上の障害物を確認できる性能を有すること，すれ違いビームは，夜間に前方40mの距離にある交通上の障害物を確認できる性能を有することが規定されている．

これまで前照灯による視認性への影響については，①自動車の速度と安全停止距離の関係から，前照灯の安全確認の限界が約75km/h である，②取付位置の制約上，道路線形の変化に対して前照灯の照明効果には幾何学的な限界がある，③前照灯は障害物が存在しないときに，その視覚情報を得難い，などの理由によりトンネル照明の視認性評価に考慮されていない．このような背景から，トンネル照明における障害物の視認性は，シルエット視を前提とした照明設備の性能指標が満足すれば確保できるとされてきた．

しかしながら，①トンネル内においては，走行するすべての車両に前照灯の点灯が義務付けられていること，②昨今の前照灯に用いる光源の技術革新が著しいこと，からトンネル照明と前照灯が同時に点灯された状態での，路上障害物の視認性評価が必要であると言える．

2.3 路上物体の反射率分布

視認の対象となる路上物体の反射率は，歩行者の衣服の反射率の調査データ[8](Smith, 1938,（以下，スミスカーブ)）が標準的に採用されてきた（図1）．スミスカーブは，反射率20％以下の物体の存在確率が90％を占めており，反射率20％以下の物体が視認できる環境であれば，自動車の走行に障害となる障害物を概ね９割が視認できることになる．したがって，シルエット視が主体となる照明の方が効率的に多くの物体を視認できることから，現行基準ではシルエット視を前提に路面輝度やその均斉度などが規定されてきた．

しかしながら，高速道路においては，休憩施設を除き歩行者の存在は稀有であることから，路上物体（落下物）の反射率に関する調査が実施され[9](以下，NEXCO カーブ)，図1に示すように，反射率20％以下の物体の累積存在確率は65％程度であり，スミスカーブと比べると，反射率20％以上の物体が相対的に多く含まれていることが明らかにされた．高速道路においては，路上物体の視認性評価に逆シルエット視も考慮する必要性が示唆されている[10]．

以下，本研究では，高速道路トンネルを対象とするため，その視認性評価に用いる路上の物体の反射率分布の累積存在確率は，NEXCO カーブを用いて検討する．

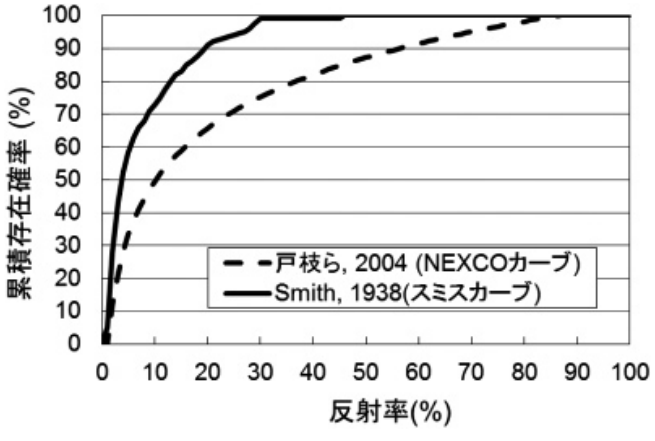


図1 累積存在確率
Fig.1 Relationship between reflectance and cumulative existence probability of obstacles on the road.

3．自動車前照灯を考慮した視認性評価指標

3.1 トンネル照明の総視認率（TRP：Total Revealing Power）

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 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 RP_{rs} の値の和が TRP である．

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

TRP（％）は，図2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．

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

ρ_s：対象物をシルエット視で視認し得るための限界の反射率（％）

ρ_{rs}：対象物を逆シルエット視で視認し得るための限界の反射率（％）

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[6]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．

$$F(\rho) = 23.6 \ln(\rho) - 5.2 \quad \cdots\cdots(3)$$

3.2 前照灯を考慮した路上視対象物の限界反射率

式(2)より，TRP は，限界反射率が決まれば一意に求まるため，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が求まれば，その状況下における視認性を評価できる．そこで自動車の前照灯を考慮したシルエット視での限界反射率：ρ_s 及び逆シルエット視での限界反射率：ρ_{rs} を導出する．

まず，トンネル照明灯及び自動車の前照灯は独立した光源であるため，路上視対象物の背景輝度 L_b，空間の等価光幕輝度 L_{eq} 及び鉛直面照度 E_v は，それぞれ式(4), (5)及び(6)で表すことができる．

背景輝度（cd/m^2）：$L_b = L_{bi} + L_{bv}$ ……(4)

等価光幕輝度（cd/m^2）：$L_{eq} = L_{eqi} + L_{eqv}$ ……(5)

視対象物の鉛直面照度（lx）：$E_v = E_{vi} + E_{vv}$ ……(6)

なお，

L_{bi} ：トンネル照明灯による路面輝度（cd/m^2）

L_{bv} ：自動車前照灯による路面輝度（cd/m^2）

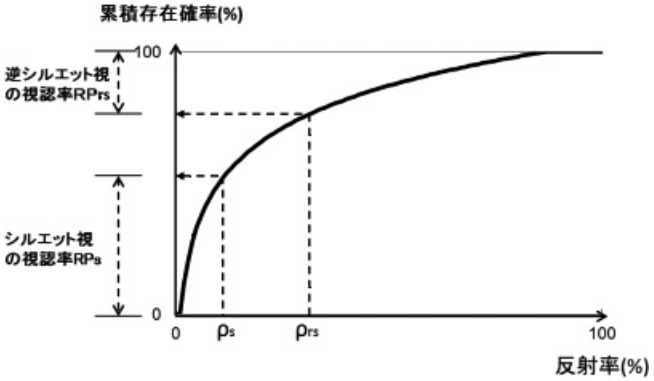


図2 路上障害物の反射率とリビーリングパワー
Fig.2 Critical reflection factor and Revealing Power.

（＝ E_{vv} /K（K：輝度係数[11]））（cd/m^2）

L_{eqi} ：トンネル照明灯による等価光幕輝度（cd/m^2）

L_{eqv} ：自動車前照灯による等価光幕輝度（cd/m^2）

E_{vi} ：トンネル照明灯による視対象物（地上高さ0.1m）の鉛直面照度（lx）

E_{vv} ：自動車前照灯による視対象物（地上高さ0.1m）の鉛直面照度（lx）

視対象物の反射率をρとし，その受光面を均等拡散面とすると，運転者から見た視対象物の輝度L_oは，対象物の受光面に入射する鉛直面照度E_vを用いて，式(7)で表される．

$$L_o = \rho \times (E_{vi} + E_{vv}) / \pi \quad \cdots\cdots(7)$$

ある順応状態における路上視対象物を視認するための輝度差弁別閾[12]（ΔL_{min}）は，中心窩順応輝度（L_{af}(cd/m^2)）（本稿では，平均路面輝度L_r(cd/m^2)とする）による輝度差弁別閾(cd/m^2)（ΔL_{min1}）及び背景輝度及び等価光幕輝度による輝度差弁別閾(cd/m^2)（ΔL_{min2}）から算出される．（式(8)）

$$\Delta L_{min} = \alpha \times (\Delta L_{min1} + \Delta L_{min2}) \quad \cdots\cdots(8)$$

ここで，背景と視対象物の輝度差ΔL（＝$|L_b - L_o|$）がΔL_{min}となるときの視標の輝度L_oは，式(9)及び(10)となる．

$$L_o = L_b - \Delta L_{min}$$（ただし，$L_b > L_o$：シルエット視）$\cdots\cdots(9)$

$$L_o = L_b + \Delta L_{min}$$（ただし，$L_o > L_b$：逆シルエット視）$\cdots\cdots(10)$

したがって，式(7)及び(9)，(10)より，車両の前照灯を考慮したシルエット視での限界反射率ρ_s，及び逆シルエット視での限界反射率ρ_{rs}は，式(11)及び(12)となる．

$$\rho_s = \pi \times ((L_{bi} + L_{bv}) - \Delta L_{min}) / (E_{vi} + E_{vv}) \quad \cdots\cdots(11)$$

$$\rho_{rs} = \pi \times ((L_{bi} + L_{bv}) + \Delta L_{min}) / (E_{vi} + E_{vv}) \quad \cdots\cdots(12)$$

なお，本研究では式(8)中のΔL_{min1}及びΔL_{min2}を式(13)及び式(14)より算出する[13]．

$$\log \Delta L_{min1} = 0.089 \times \log(L_{af})^2 + 0.13 \times \log(L_{af}) - 0.69 \quad \cdots\cdots(13)$$

$$\log \Delta L_{min2} = \log(L_{eq} + L_b) - 0.77 \quad \cdots\cdots(14)$$

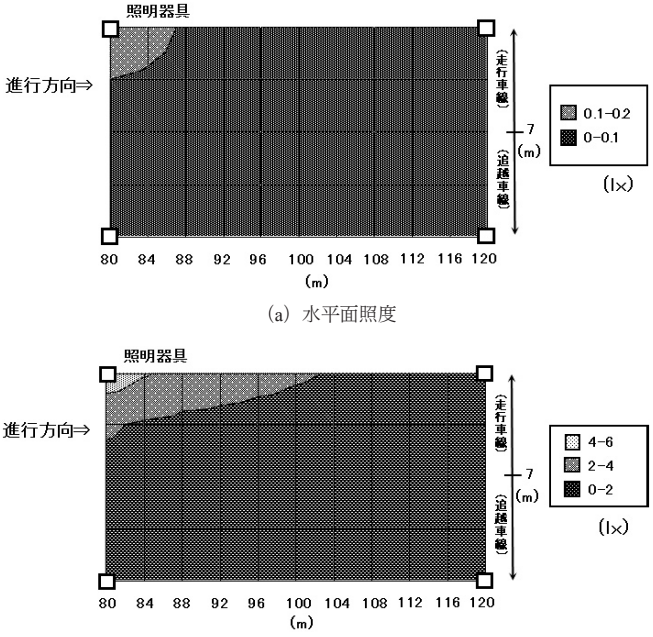
ここで式(13)及び式(14)には道路照明環境での評価のため，フィールドファクター（以下，FF）として，$FF_{_Road} = 3$が考慮されている．FFとは，対象物を視認し得る背景と対象物の輝度差の所要値において，路上対象物の存在を予期している場合と予期していない場合との所要値の比である[14]．道路とトンネルでは，ドライバーの視環境や，対象物の視認性に関わる条件が異なるため，FFを設定する必要がある[15]．本稿では，トンネル照明を対象とするため，既往研究[16][17]を考慮し，$FF_{_Tunnel} = 6$とする．（したがって，式(8)中の$\alpha = 2$とし，以下における輝度差弁別閾の算出時も同様とする）．

4．自動車前照灯の光学特性

高速自動車道（道路規格：第1種第3級，設計速度80km/h）のトンネル（延長：694 m，２車線断面，道路幅員７m：路面：アスファルト舗装）において，前照灯の光学特性を測定した．測定対象車両は，プリウス（型式:DAA-NHW20，光源:ハロゲン（純正品））とし，測定パターンは，走行ビーム及びすれ違いビームとした．照度測定は，車両を測定位置より後方の走行車線中央に配置し，トンネル照明を消灯した状態で，車両の前方80mから120m区間において道路縦断方向５m間隔，横断方向1.75m間隔で水平面照度及び車両の進行方向の鉛直面照度（以下，鉛直面照度）を測定した．

4.1　すれ違いビームの光学特性

すれ違いビームの光学特性の測定結果を図３に示す．図３より，



(a) 水平面照度

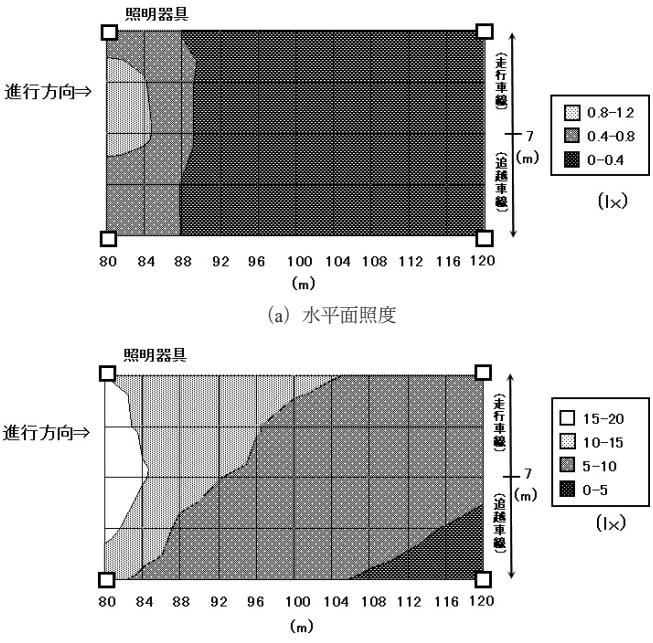
(b) 鉛直面照度

図３　照度分布（すれ違いビーム）
Fig.3　Distribution of illuminance（low-beam headlamps).

すれ違いビームによる水平面照度は，前方80m地点で灯具直下近傍を除き概ね0.1 lx以下であり，鉛直面照度は，80m～100m走行車線路肩側の一部を除き概ね２ lx以下となる．前方100m地点では，水平面照度及び鉛直面照度ともにほぼゼロとなる．したがって，高速走行領域では，式11及び式12に示した視対象物の限界反射率への影響が少ないため，すれ違いビームによる視距または制動停止距離前方の視対象物の視認性はほとんど期待できないと推察される．

4.2　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４に示す．図４より水平面照度は，80m付近では走行車線で１lx程度であり90m以遠は0.4 lx以下であった．鉛直面照度は，走行車線及び追越車線ともに80m付近で15～20 lx程度，90m付近で走行車線側は約15 lx，追



(a) 水平面照度

(b) 鉛直面照度

図４　照度分布（走行ビーム）
Fig.4　Distribution of illuminance（high-beam headlamps).

越車線側は10 lx 以下，100m 付近では走行，追越車線ともに10 lx 程度であった．このことから走行ビームの場合，路上視対象物は，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，鉛直面照度が走行車線と追越車線で異なることから，トンネル照明との融合時における路上視対象物の視認性も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．

以下の前照灯融合時における視認性検討では走行ビームの光学特性を用いることとする．

5．対称照明方式のトンネル照明に対する前照灯の影響

トンネル基本照明は，一般に野外の明るさと時刻・交通量に応じて路面輝度を調光して運用する．具体的には，設計速度に対する平均路面輝度（定格値）に対して，昼間を１として，夜間はその1/2，深夜は1/4程度に調光する（例えば設計速度が80km/h のトンネルの場合，昼間は4.5cd/m^2，夜間において2.25 cd/m^2，深夜は，1.125cd/m^{2}となる）．そこで，対称照明方式のトンネル照明について，平均路面輝度に対するトンネル照明単独時と前照灯融合時の視認性について評価する．

5.1　対称照明方式トンネル照明の光学特性

対称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（蛍光灯：図５），灯具配置：向い合わせ，路面反射特性：CIE　C_2（アスファルト），灯具高さ5.0m，灯具間隔10.0m，平均路面輝度1.125 cd/m^{2}及び4.5cd/m^{2}のときの光学特性（水平面照度，鉛直面照度）を図６に示す．(4.5cd/m^{2}の場合のみ)を示す．(図５の A 断面及び B 断面は，それぞれ灯具発光面を路面に対して平行にしたときの，道路横断方向及び縦断方向の配光特性を示す．)

図６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．一方，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1/3スパン前方で最大となることがわかる．

5.2　対称照明方式の TRP

図７及び図８に平均路面輝度が1.125cd/m^2，及び4.5 cd/m^{2}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６から逐点法[1]により算出する．また，観測地点から各評価地点までの距離は80m 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1.125cd/m^{2}及び4.5cd/m^{2}でそれぞれ算出する．

図７(a)及び図８(a)より，トンネル照明単独による TRP は，照明灯具近傍で高くなる傾向が見られる．一方，同図(b)より前照灯が加わることで，TRP は灯具近傍で同図(a)と比較して低下

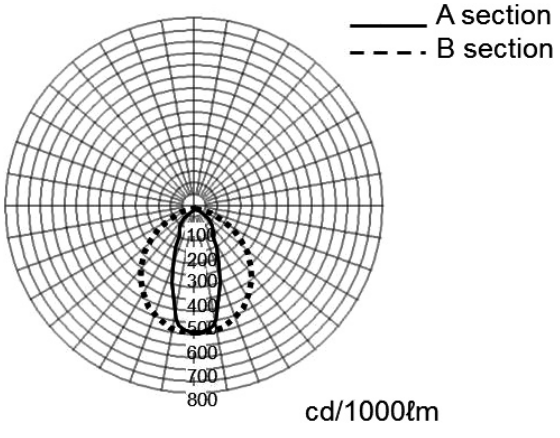
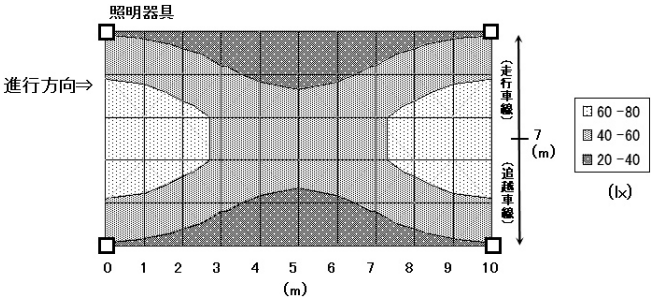
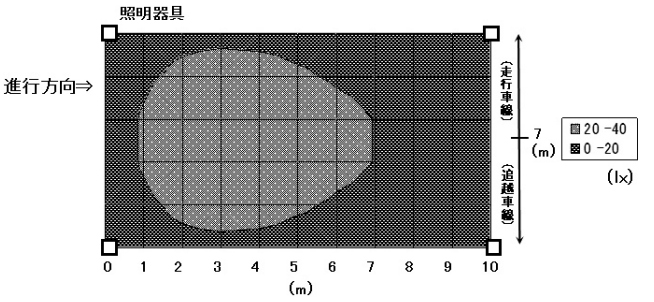


図５　配光曲線（対称照明方式）
Fig.5　Luminous intensity distribution (Symmetric lighting).

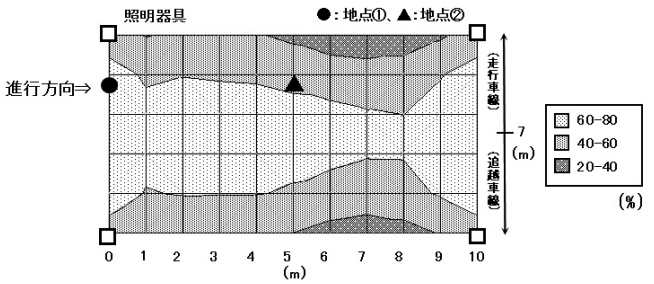


(a) 水平面照度

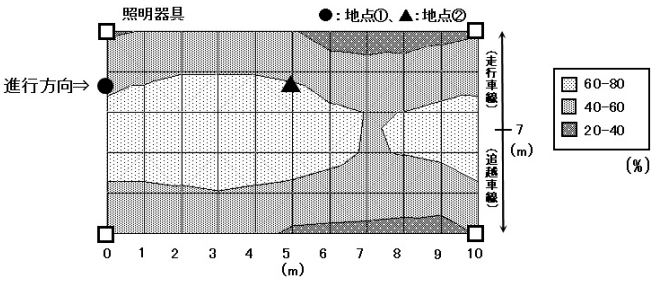


(b) 鉛直面照度

図６　照度分布（対称照明方式）
Fig.6　Illuminance of Tunnel lighting (Symmetric lighting).



(a) トンネル照明単独



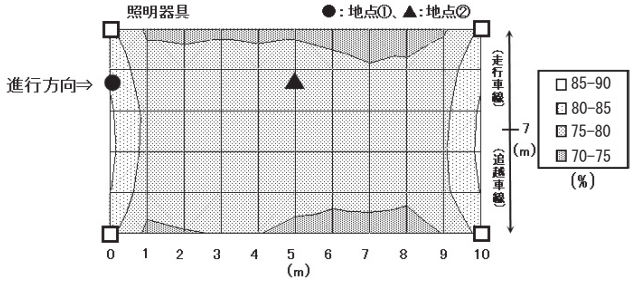
(b) 前照灯融合時

図７　TRP の分布（1.125cd/m^2）
Fig.7　Distribution of TRP (1.125cd/m^2).

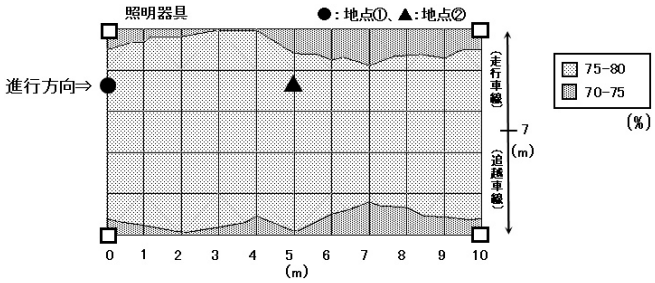
することがわかった．また，平均路面輝度が高い場合，前照灯の有無に関わらず TRP は灯具スパン内で概ね一様となるのに対し，平均路面輝度が低い場合，TRP は道路車線中央の灯具位置付近で高く，進行方向の手前灯具から2/3スパン前方付近（図７の６～８m の位置）で低くなることがわかった．

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，前照灯が加わることによりトンネル照明のみの場合と比較して平均路面輝度が4.5cd/m^{2}場合は１％以内の低下，平均路面輝度が1.125 cd/m^{2}場合は２％程度の低下となり，灯具１スパン内の平均的な視認性は前照灯融合時においても大きく変化しないことがわかる．

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/m^{2}に変化させたときの 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が支配的であることがわかる．また，前照灯融



(a) トンネル照明単独

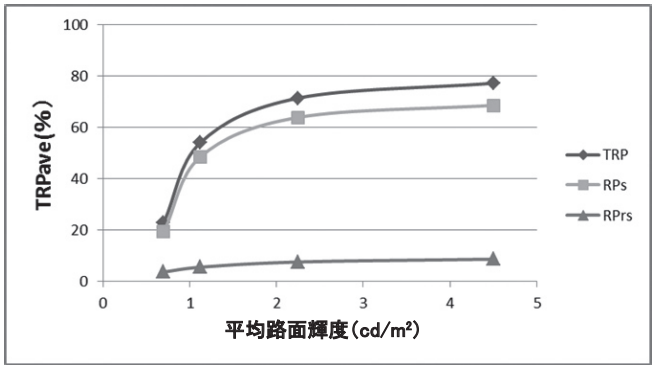


(b) 前照灯融合時

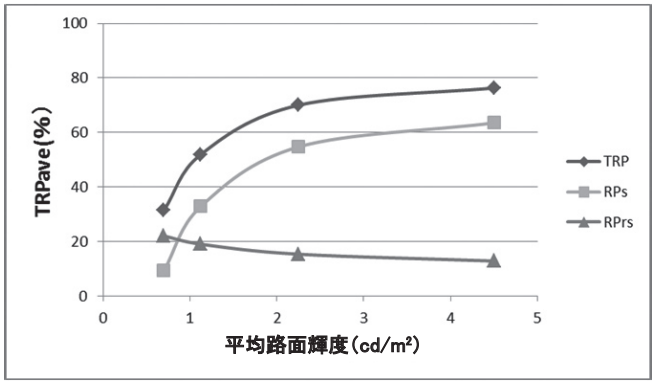
図8　TRP の分布（4.5cd/ ㎡）
Fig.8　Distribution of TRP（4.5cd/m^2）.

表1　TRP の基本統計量（対称照明方式）
Table 1　Fundamental statistics of TRP（Symmetric lighting）.

平均路面輝度	1.125cd/m^2		4.5cd/m^2	
	前照灯無	前照灯有	前照灯無	前照灯有
平均	54.0	51.9	77.1	76.3
標準偏差	12.8	13.0	3.0	2.0
分散	163.1	169.0	9.2	3.8
最小	22.8	24.0	72.3	72.9
最大	75.2	66.9	86.2	79.5



(a) トンネル照明のみ



(b) 前照灯融合時

図9　平均路面輝度と TRP$_{ave}$（対称照明方式）
Fig.9　Relationship between road surface luminance and TRP$_{ave}$ (Symmetric lighting).

表2　光学特性と TRP（対称照明方式）
Table 2　Illumination and TRP（Symmetric lighting）.

平均路面輝度	前照灯	位置	Ev (lx)	Lb (cd/m²)	Leq (cd/m²)	⊿Lmin (cd/m²)	ρs (%)	ρrs (%)	RPs (%)	RPrs (%)	TRP (%)
1.125cd/m²	無	①	4.2	1.11	0.109	0.814	22.0	100.0	68.0	0.0	68.0
		②	10.8	1.13	0.109	0.821	9.0	57.0	47.0	9.7	56.8
	有	①	14.7	1.11	0.109	0.814	7.0	43.0	41.1	16.3	57.5
		②	20.7	1.13	0.109	0.821	5.0	30.0	33.2	24.8	58.0
4.5cd/m²	無	①	17.0	4.45	0.438	2.061	44.0	100.0	84.2	0.0	84.2
		②	43.3	4.53	0.438	2.089	18.0	48.0	63.3	13.8	77.0
	有	①	26.8	4.45	0.438	2.061	28.0	76.0	73.6	3.0	76.6
		②	53.2	4.53	0.438	2.089	14.0	39.0	57.4	18.6	76.0

合時は，平均路面輝度が低くなるほど，逆シルエット視の割合が増加し，平均路面輝度0.8cd/m^{2}以下で逆シルエット視が支配的となることがわかった．

図7及び図8中に示した地点“①及び②”の光学特性及びρs, ρrs を表2に示す．同表からトンネル照明単独の場合，地点①は②に比べて，平均路面輝度が高く，鉛直面照度が低いことがわかる．式(11)及び式(12)より，路面輝度が変化しない状態で鉛直面照度が高まると，前照灯融合時において，分子は一定のまま分母のみが増加するため，トンネル照明単独時の限界反射率（シルエット視: ρs’，逆シルエット視: ρrs’）と前照灯融合時の限界反射率（シルエット視：ρs’’，逆シルエット視：ρrs’’）は，はそれぞれρs’’ ＜ρs’，ρrs’’ ＜ρrs’ となる．一方，地点②は，地点①に比べて鉛直照度が高く，路面輝度が低いため，トンネル照明単独のρs は，地点①のそれよりも低い値となっている．また，地点②は地点①に比べ，前照灯融合時においてもρs，ρrs の変化が小さいため，TRP の RPs と RPrs の割合の変化が少なくなっている．

以上より，対称照明方式の灯具1スパン内の TRP$_{ave}$ は，前照灯融合時においても変化せず，平均路面輝度に依存することがわかった．TRP は鉛直面照度が低く背景路面輝度が低い場合，主たる視認方法はシルエット視となり，路面輝度に依存すること，鉛直面照度が高く路面輝度が低い場合，主たる視認方法は逆シルエット視となることがわかった．このことから，鉛直面照度が高い配光をもつトンネル照明の場合は前照灯による限界反射率の変化が少なることが推察される．また，平均路面輝度が低い環境下においては，平均路面輝度が高い場合と比べ前照灯による限界反射率の変化が大きくなることから，前照灯の影響について留意する必要があるといえる．

6．プロビーム照明方式に対する前照灯の影響

5．の検討から，対称照明方式の TRP$_{ave}$ は，平均路面輝度が低い場合，前照灯による限界反射率の変化が大きいこと，またトンネル照明単独で鉛直面照度が高い地点では，前照灯による視認性への影響を受けにくいことが示唆された．そこで，光を車の進行方向に照射する照明配光の特徴を有するプロビーム照明方式を対象に前照灯融合時の視対象物の視認性評価を行う．

6.1　プロビーム照明方式の光学特性

2車線断面のトンネル（一方交通，道路幅員7 m），灯具配光（プロビーム配光：図10），灯具配置：向い合わせ，路面反射特性：CIE　C$_2$（アスファルト），灯具高さ5.0m，灯具間隔10.0m において，平均路面輝度：1.125 cd/m^{2}及び4.5cd/m^{2}のときのトンネル照明の光学特性（水平面照度，鉛直面照度）を図11（4.5cd/m^{2}の場合のみ記載）に示す．図11より，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．

6.2　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12，図13及び表3に示す．図12及び図13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変化が少なく，平均路面輝度1.125/m^{2}のとき，道

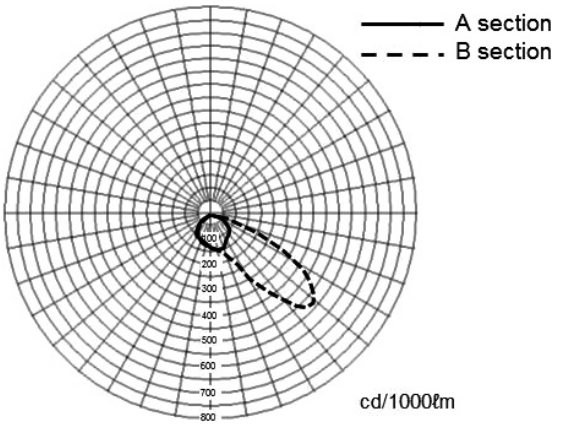
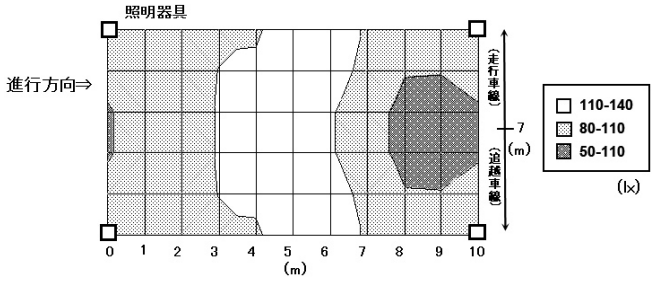
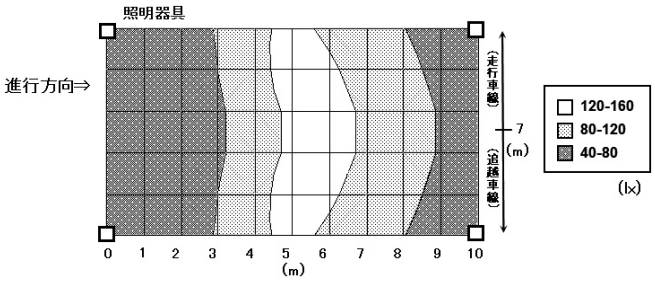


図10　配光曲線（プロビーム照明方式）
Fig.10　Luminous intensity distribution (Pro-beam lighting).

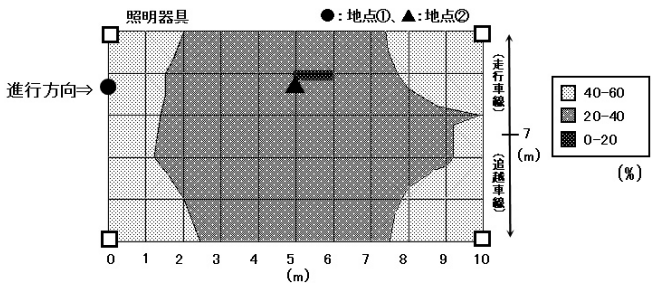


(a) 水平面照度

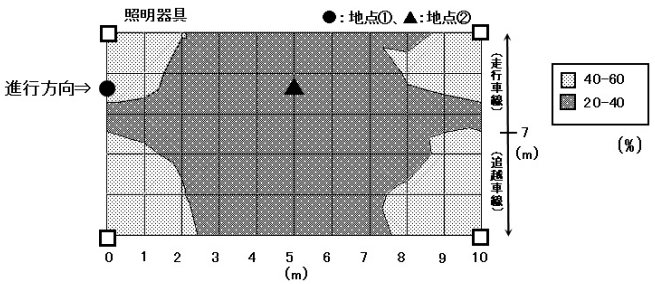


(b) 鉛直面照度

図11　照度分布（プロビーム照明方式）
Fig.11　Distribution of illuminance (Pro-beam lighting).

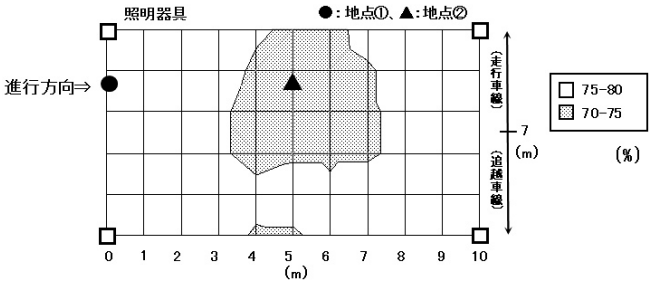


(a) トンネル照明単独

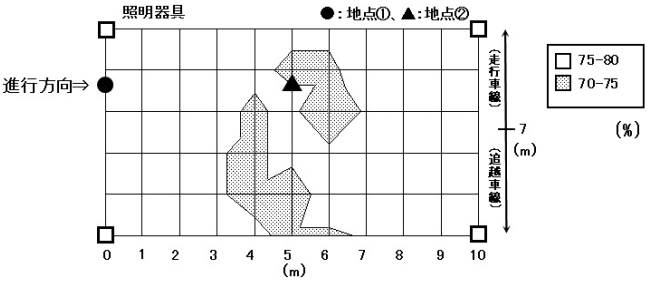


(b) 前照灯融合時

図12　TRP の分布（プロビーム照明方式，1.125cd/m^2）
Fig.12　Distribution of TRP (Pro-beam lighting, 1.125cd/m^2).



(a) トンネル照明単独



(b) 前照灯融合時

図13　TRP の分布（プロビーム照明方式，4.5cd/m^2）
Fig.13　Distribution of TRP (Pro-beam lighting, 4.5cd/m^2).

路中央の灯具付近で TRP が変化していることがわかる．また，**表３**より，前照灯融合時の TRP_{ave} は，平均路面輝度に関わらず，トンネル照明単独の場合と比較して1％以内の微増であり，路上視対象物の灯具１スパン内の平均的な視認性には影響しないことがわかる．**図14**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 TRP_{ave} は，前照灯の有無によらず路面輝度に依存すること，平均路面輝度が高くなるにつれて収束することがわかる．また TRP_{ave} の内訳として，トンネル照明単独で平均路面輝度が１cd/m^{2}以上の場合は，シルエット視が支配的となっている．また前照灯融合時では平均路面輝度が1.6 cd/m^{2}以下で逆シルエット視が支配的となった．

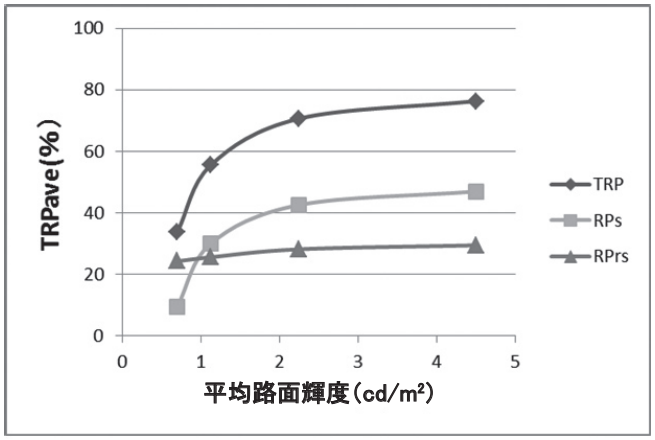
以下，この理由について考察する．**表４**に，**図12**及び**図13**中の“①，②”の地点における，光学特性及びこれらより算出した限界反射率と TPR の内訳を示す．

同表から，トンネル照明単独で地点①はシルエット式が支配的であり，前照灯融合時では，シルエット視及び逆シルエット視の限界反射率が低下することで逆シルエット視の割合が高くなっている．一方で，地点②は，地点①に比べて鉛直面照度が高く，背景路面輝度が低いため ρs，ρrs ともに低くなる．このためトンネル照明単独で逆シルエット視が支配的となっており，前照灯融合時にも ρs，ρrs の変化が小さく RPrs が微増する結果となっている．また地点①及び②において，対称照明方式（**表２**）と比較すると，トンネル照明単独時及び前照灯融合時に関わらず，プロビーム照明方式が ρs，ρrs ともに低い値であり，かつ前照灯融合時の変化が少ないことがわかる．

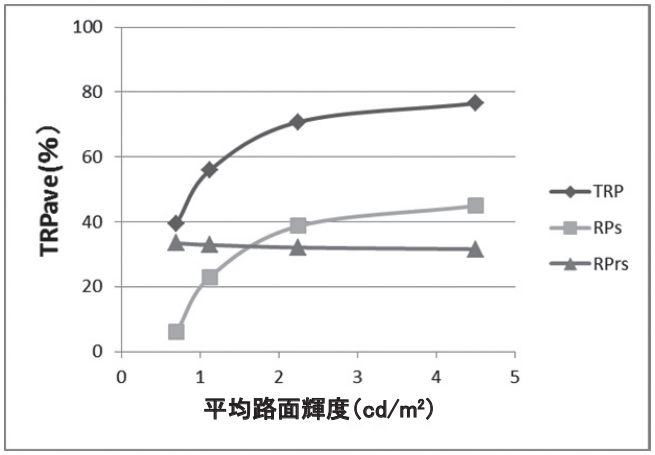
以上より，プロビーム照明方式は運転者に対して安定した路上視対象物の視認性が確保できると考えられる．

表３　基本統計量（プロビーム照明方式）
Table 3　Fundamental statistics of TRP (Pro-beam lighting).

平均路面輝度	1.125cd/m²		4.5cd/m²	
	前照灯無	前照灯有	前照灯無	前照灯有
平均	55.3	55.9	76.3	76.5
標準偏差	7.3	6.7	1.8	1.7
分散	53.5	44.6	3.2	2.8
最小	39.5	41.0	72.4	69.6
最大	64.8	65.1	78.8	78.5



(a) トンネル照明のみ



(b) 前照灯融合時

図14 平均路面輝度と TRP_{ave}（プロビーム照明方式）
Fig.14 Relationship between road surface luminance and TRP (Pro-beam lighting).

表4 光学特性と TRP（プロビーム照明方式）
Table 4 Illumination and TRP (Pro-beam lighting).

平均路面輝度	前照灯	位置	Ev (lx)	Lb (cd/m²)	Leq (cd/m²)	⊿Lmin (cd/m²)	ρs (%)	ρrs (%)	RPs (%)	RPrs (%)	TRP (%)
1.125cd/m²	無	①	14.0	1.29	0.103	0.874	10.0	49.0	49.5	13.3	62.8
		②	32.0	0.86	0.103	0.730	1.0	16.0	0.0	39.5	39.5
	有	①	24.0	1.29	0.103	0.874	6.0	29.0	37.5	25.6	63.1
		②	42.0	0.87	0.103	0.730	1.0	12.0	0.0	46.2	46.2
4.5cd/m²	無	①	55.0	5.17	0.412	2.295	16.0	42.0	60.5	16.9	77.4
		②	129.0	3.47	0.412	1.718	4.0	13.0	28.0	44.4	72.4
	有	①	65.0	5.17	0.412	2.295	14.0	36.0	57.4	20.5	77.9
		②	139.0	3.47	0.412	1.718	4.0	12.0	28.0	46.2	74.3

7. 実トンネルにおける視認性評価試験

前章までの検討から，TRP_{ave} は照明方式に係らず前照灯融合時において変化しないことを示した．一方で各地点の TRP は．平均路面輝度が低い場合，対称照明方式は前照灯の有無によって限界反射率が大きく変化することで TRP の内訳も大きく変化するが，プロビーム照明はその変化が少ないことが示された．そこで，第１種第３級の高速道路トンネル（延長：694m，２車線断面，対面交通，道路幅員７m）において，**表５**に示す環境下での各照明方式に対する前照灯融合時の視認性を光学測定と主観による視標の見え方試験により評価する．光学測定は，**表６**に示す項目とし，主観評価は20歳代から50歳代男性16名の被験者によるアンケート方式により，反射率が５％，10%，20%及び30%の４種類の視標の見え方を，「全く見えない」（１点）～「見える」（３点）～「非常によく見える」（５点）までの５段階で評価する．

表5 照明条件
Table 5 Lighting conditions.

	平均路面輝度（実測値：cd/m²）	光源	灯具配列	灯具高さ (m)	灯具間隔 (m)	灯具角度 (°)	舗装種別
対称照明方式	0.85	蛍光灯(50W-2灯)	向き合せ	4.8	11.4	水平面：90 鉛直面：43	アスファルト
プロビーム照明方式	0.97	セラミックメタルハライド(35W)	向き合せ	4.8	20.0	水平面：15 鉛直面：82	アスファルト

表6 光学測定
Table 6 Measurement conditions of illumination and luminance.

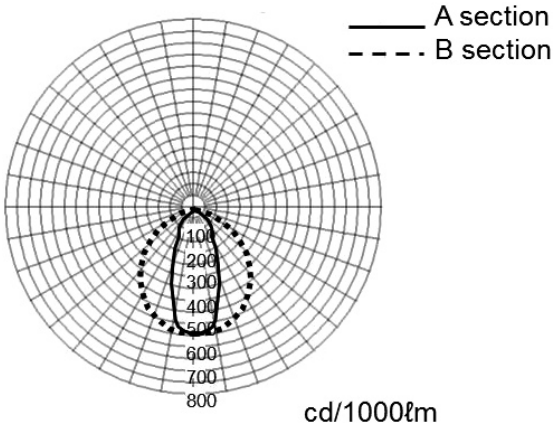
測定項目	機器名	製造者名	型式	測定箇所（灯具1スパンあたり）
水平面照度 鉛直面照度	照度計	YOKOGAWA	51003	25点（縦断5点，横断5点） （鉛直面照度：路上0.1mの位置）
路面輝度	デジタル輝度分布計測器	パナソニック	–	観測地点より、高さ1.5m、俯角1°で灯具1スパン内一括測定
等価光幕輝度	スポット輝度計 ＋グレアレンズ	トプコン（輝度計）	BM5	観測地点より、高さ1.5m、俯角1°走行車線軸の灯具直下および灯具間位置

7.1 トンネル照明方式の光学特性

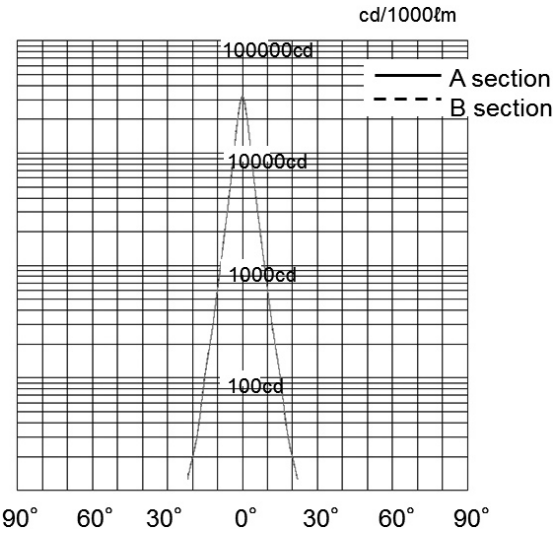
表１の条件で灯具配光（対称照明方式：**図15(a)**，プロビーム照明方式：**図15(b)**），路面反射特性：CIE C_2（アスファルト）における光学測定結果（水平面照度及び鉛直面照度）を**図16**及び**図17**に示す．

照明方式に対する**図16**及び**図17**中の“①”の各地点における，光学測定結果（鉛直面照度，路面輝度及び等価光幕輝度）とそれらより算出した輝度差弁別閾，限界反射率及び TRP を**表７**に示す．

また同表には現地測定結果から算出した評価地点の限界反射率

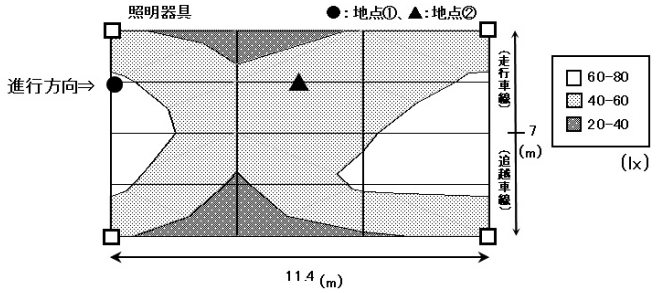


(a) 対称照明方式（蛍光灯）

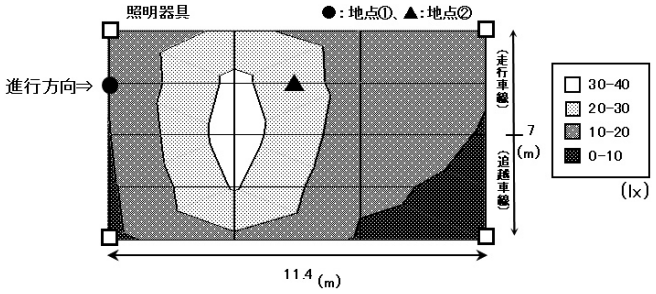


(b) プロビーム照明方式（セラミックハライドランプ）

図15 配光曲線
Fig.15 Luminous intensity distribution.

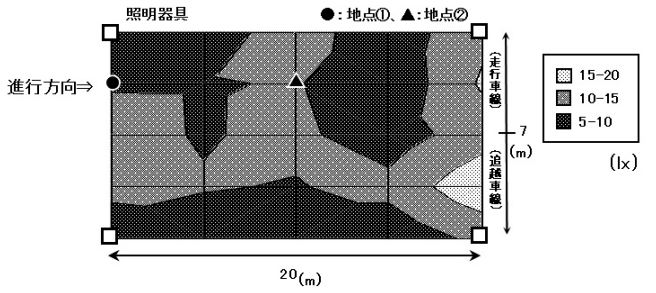


(a) 水平面照度

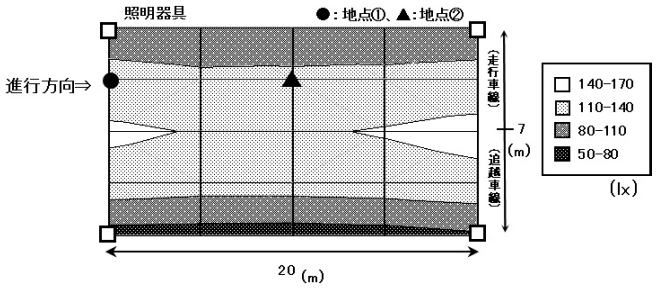


(b) 鉛直面照度

図16　光学特性（対称照明方式）
Fig.16　Distribution of illumination (Symmetric lighting).



(a) 水平面照度



(b) 鉛直面照度

図17　光学特性（プロビーム照明方式）
Fig.17　Distribution of illumination (Pro-beam lighting).

表7　照明方式に対する照明特性（現地試験）
Table 7　Illuminance measurements for lighting system.

照明方式	前照灯	視標位置	Ev (lx)	Lb (cd/m²)	Leq (cd/m²)	⊿Lmin (cd/m²)	ρs (%)	ρrs (%)	RPs (%)	RPrs (%)	TRP (%)
対称照明	無	①	11.4	0.80	0.090	0.385	11.0	33.0	51.7	22.5	74.3
	有	①	33.6	0.80	0.090	0.385	4.00	11.0	28.0	48.3	76.3
プロビーム照明	無	①	92.6	0.82	0.090	0.355	2.0	4.0	11.8	72.0	83.8
	有	①	111.2	0.82	0.090	0.355	1.0	3.0	0.0	78.7	78.7

ρs，ρrs より算出した RPs，RPrs 及び TRP を示す．同表から前照灯の有無による TRP の変化は，照明方式による増減はあるものの６％以内となっている．また TRP の内訳について，対称照明方式は，両地点共にトンネル照明単独 RPs の割合が高く，前照灯が加わることで，RPs の割合が低下し RPrs の割合が高くなることがわかる．一方で，プロビーム照明方式は，前照灯の有無に関わらず，RPrs の比率が高く，逆シルエット視が主たる視認方法となっている．これは，トンネル照明単独の場合でρs が１～２％，ρrs が３～４％と，両者ともに非常に低い値であることから説明できる．

7.2　被験者による視標の視認性評価

図18に視認性評価試験の状況を示す（図18(a)及び図18(b)中の左半分は照明のみ，右半分は前照灯融合時を示す）．

それぞれの照明方式に対する，図16及び図17の“①”で示した地点の前照灯の有無による視標の見え方の評価結果を図19及び図20に示す．図19及び図20より，評価の全般的な傾向として，対称照明方式は前照灯を点灯することで反射率によって評価が大きく変化するのに対し，プロビーム照明方式は反射率によらず前照灯の有無で評価がほとんど変化しないことがわかる．

図19及び図20に示す評価値を反射率ごとに平均化操作した結果を表８に示す．図16及び図17中の視標位置“①”の視対象物の視認性について，表７と表８の結果を比較すると，まず対称照明方式について，トンネル照明単独の場合，ρs とρrs は，それぞれ11％及び33％である．これは，シルエット視で視認し得る限界の反射率が11％，逆シルエット視で視認し得る限界の反射率が33％であり，反射率20％及び30％の視標が視認できないことを示す．主観評価において，反射率5％の視標は概ね“３”（見える）となるのに対し，20％及び30％の視標は“１～２”（全く見えない～見えにくい），となっている．また前照灯融合時は，ρs が４％，ρrs が12％であるため，５％及び10％の視標は視認できないと推測されることに対し，主観評価では反射率５％の視標“１～２”（全く見えない～見にくい），反射率20％及び30％の視標“４”（よく見える）となっている．プロビーム照明方式についても，限界反射率と主観評価の結果について同様に説明できる．このことから前照灯を考慮した限界反射率から想定される視認性と主観評価による視認性とは概ね整合が取れており，平均路面輝度が低い場

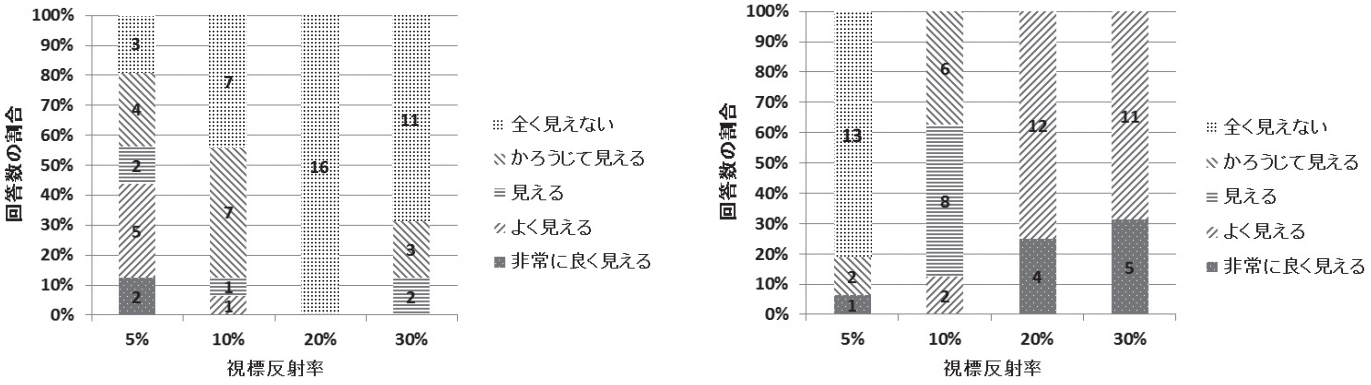


(a) 対称照明方式



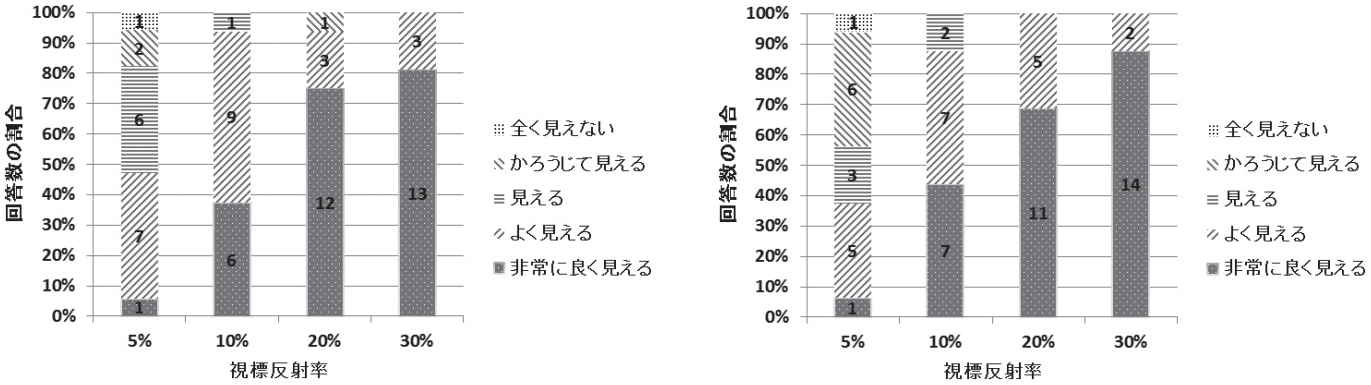
(b) プロビーム照明方式

図18　視標の見え方試験状況（左：トンネル照明単独，右：前照灯融合時）
Fig.18　Tunnel lighting installation for the test (left: Tunnel lighting, right: Tunnel lighting and Headlamps).



(a) トンネル照明単独　　(b) 前照灯融合時

図19　視標の見え方（対称照明方式）
Fig.19　Questionnaire of visibility evaluation (Symmetric lighting).



(a) トンネル照明単独　　(b) 前照灯融合時

図20　視標の見え方（プロビーム照明方式）
Fig.20　Questionnaire of visibility evaluation (Pro-beam lighting).

表8　主観評価結果（平均値）
Table 8　Average values of the subjective evaluation.

照明方式	前照灯	評価地点	視標反射率			
			5%	10%	20%	30%
対称照明方式	無	①	2.9	1.8	1.0	1.4
	有	①	1.4	2.8	4.3	4.3
プロビーム照明方式	無	①	3.5	4.3	4.6	4.8
	有	①	2.9	4.3	4.7	4.9

合，対称照明方式は前照灯の有無によって視認できる反射率の範囲の変化が大きいこと，プロビーム照明はその変化が少ないことが示されたといえる．

シミュレーション及び現地試験から，対称照明方式，プロビーム照明方式ともに路上視対象物の TRP_{ave} は前照灯融合時においてほとんど変化しないこと，また平均路面輝度に対してほぼ同値であることがわかった．このことから，両方式の前照灯融合時の路上視対象物の視認性はほぼ同等であると評価できる．しかしながら，走行中の運転者から見た，ある1地点の視認性を考えた場合，対称照明方式の場合，前照灯によって視認できる視対象物の反射率の範囲が変化するため，変化した範囲の視対象物の視認方法はシルエット視から逆シルエット視へ変化することになる．これに対し，プロビーム照明方式の場合は前照灯の有無よって視認方法が変化しない．このことは，照明方式について前照灯を考慮した TRP_{ave} が同等であれば，トンネル照明と前照灯の照明協調の観点からはプロビーム照明方式が望ましいといえる．

8．結言

これまでトンネル照明における視対象物の視認性評価は，トンネル照明及び自動車の前照灯による総合的な評価によらず，それぞれ別の基準により実施されてきた．そこで，本研究では，TRPに基づき，トンネル照明と前照灯との融合時における視対象物の視認性の定量的な評価を行った．

その結果，灯具1スパン内のTRPの平均（TRP_{ave}）による評価より，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を明らかにした．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視対象物の視認性への影響が少なく，トンネル照明と前照灯の照明協調の観点から有効な照明方式であることを示した．

本研究の結果は，これまで評価されてこなかった照明方式及び前照灯融合時の視認性に関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られる．

なお，本研究では路上の視対象物のみに着目した視認性評価を対象に行ったため，トンネル照明の性能要件である誘導性やトンネル壁面の明るさ感などの走行環境については考慮していない．今後の実用に向けた課題として，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する必要があると考えている．

参考文献

(1) 道路照明施設設置基準・同解説，㈳日本道路協会（2007）．
(2) Waldram, J.M.：The revealing power of street lighting installations. Trans. Illum. Eng. Soc.（London），173–186，（1938）．
(3) Harris, A.J. and Christie, M. A.：The revealing power of street

lighting installations and its calculation, Trans. Illum. Eng. Soc.（London）, 19, pp.120–128（1951）.
⑷ Narisada, K., Karasawa, Y. and Shirao K.：Design Parameters of road lighting and revealing power: Proceedings of the CIE, 25th Session.San Diego, Vienna: CIE（2003）.
⑸ Karasawa, Y. and Narisada, K.：New Method of Road Lighting Design, Proceeding of CIE Session in Beijing（2007）.
⑹ 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，照学誌，97–5（2013）.
⑺ 道路運送車両の保安基準（国土交通省）.
⑻ Smith, F.C.：Reflection factors and revealing power, Trans. Illum. Eng. Soc.（London）, 3, pp.196–206（1938）.
⑼ 戸枝ら：高速道路照明設計に用いる限界対象物（第二報），H15照学全大，p.67（2002）.
⑽ 岡田，加賀，伊東，坂本：トンネル照明における総視認率の検討，照学誌，90，pp.495–503（2006）.
⑾ 小松，小林，八木：路面・レーンマークの反射特性について，照学全大，p.159（1998）.
⑿ Narisada,K. and Yoshimura,Y.：Adaptation luminance of driver's eyes at the Entrance of Tunnel−−−an Objective Measuring Method, Transactions of the 3rd International Symposium of Road Lighting Effectiveness, Karlsruhe, on 5–6, July, 56–73（1977）.
⒀ 唐沢ら；照明器具の取付間隔が道路照明施設の視認性に及ぼす影響，照学全大（2000）.
⒁ Narisada, K.：Perception under Road Lighting Conditions with Complex Surroundings, J.Light & Vis Env.19–12（1995）.
⒂ Narisada, K.：Perception in complex field under road lighting conditions,Light.Res.&Tech.,21,4,171–179（1989）.
⒃ Roper, V.J. and Howard, E. A.：Seeing with Motor Car Headlamps.Transactions of the Illuminating Engineering Society, 33⑸, 417–438（1938）.
⒄ 坂本ら：自動車トンネル内の光幕現象と視認性，National Technical Report，38–6，pp.87–88（1992）.

（受付日2014年３月４日／採録日2014年５月８日）



平川　恵士（正会員）

1972年生．1996年３月徳島大学大学院電気電子工学専攻修了.
現在，大阪大学大学院工学研究科 NEXCO 西日本 高速道路学共同研究講座研究員として研究開発業務に従事.



唐澤　宜典（専門会員）

1968年生．1992年３月東北大学理学部物理学科卒．同年４月松下電工㈱（現パナソニック㈱）に入社．現在，屋外照明に関する設計，提案および屋外照明器具の研究開発に従事．日本照明委員会会員.



吉田　幸信

1951年生．1975年３月熊本大学工学部資源開発工学科卒業.
日本道路公団，西日本高速道路㈱を経て，現在，大阪大学大学院工学研究科 NEXCO 西日本 高速道路学共同研究講座 特任教授，2009年 博士（工学）.