

帯状ガイドライト反射光の 視認性評価に関する研究

佐藤 嘉哉¹・萩原 亨²・国村 昌生³・高木 一誠³

¹学生会員 北海道大学大学院 工学院 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)
E-mail: sakaji_h@eis.hokudai.ac.jp

²正会員 北海道大学大学院 工学研究院 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)
E-mail: hagiwara@eng.hokudai.ac.jp

³正会員 積水樹脂株式会社 (〒520-2596 滋賀県蒲生郡竜王町731-1)

夜間、ドライバが道路線形の認知をしやすいするために、帯状ガイドライトが開発された。帯状ガイドライトは、道路の端に設置した高さ3.5mのポールから緑色の線状の光を道路に照射する道路付属物である。本研究では、帯状ガイドライトによる道路の視認性を評価するために、再現性の高い輝度画像位置特定システムを構築した。その上で、それを用いて帯状ガイドライト反射光の視認性を検証した。その結果、帯状ガイドライトが道路の視認性を高めることが分かった。また、実験参加者に静的条件で帯状ガイドライト反射光を視認してもらい、その視認性を評価した。その結果、視認距離が100m以上になった際に色、見やすさの点で帯状ガイドライトの視認性向上効果が大きいことが分かった。2つの研究により、帯状ガイドライトが道路の視線誘導効果を高めることが明らかとなった。本研究では、乾燥路面でしか実験を行っていないため、今後、湿潤・積雪路面での視認性を評価する必要がある。

Key Words : Guide-Light, Visibility, Visual-Guidance, Contrast

1. はじめに

夜間の道路、特に積雪地においては区画線が雪によって覆われてしまうことで道路線形認知が困難である。そのため反射型視線誘導標や自発光式視線誘導灯が視線誘導の役割を担っている。しかし、それらは路肩の外または中央分離帯に設置されるためどこが道路の端かがわかりづらく、また、点でしか示せないため道路線形認知が困難という欠点がある。そこで、路面に直接、車道外側線の位置を線状に示す帯状ガイドライトが開発された。これまでの帯状ガイドライトに関する研究として、国村らは道路の輝度分布を計測しそこから輝度コントラストや視野角を算出し、視認性を評価した¹⁾。また、萩原らはドライビングシミュレーター (DS) を用いて、帯状ガイドライトがドライバのメンタルワークロードと線形誘導性に与える影響について明らかにした²⁾。

しかし、国村らの研究では、帯状ガイドライト反射光を視認する3次元道路空間の位置関係を明確に把握できていなく、帯状ガイドライトの反射光の輝度計測手法にあいまいさが残った。また、輝度計測はされたが、帯状ガイドライトの反射光が距離によってドライバにどの

ように視認されるのかが明らかになっていない。

そこで、本研究では、静的条件で車内から帯状ガイドライト反射光および車道外側線の輝度を車内から計測するシステムの構築を試みる。この計測システムを用いて乾燥路面における帯状ガイドライトの輝度特性を明らかにする。また、帯状ガイドライトの有無や視認距離などの違いによってドライバによる車道外側線の見え方がどのように変化するのか、ドライバによる視認性と輝度特性との関係についても検討する。

2. 輝度画像位置特定システムの開発

帯状ガイドライト反射光の輝度コントラスト値や範囲の長さを算出するために、輝度を二次元的に計測できる機器を用いている。その機器によって計測した輝度画像中のどこに帯状ガイドライト反射光が出現するかを特定するために、シミュレーションによって帯状ガイドライト反射光の位置を求めるシステム (輝度画像位置特定システム) を構築した。帯状ガイドライト反射光の位置を割り出すために道路上にLED視標を置いた。

(1) 帯状ガイドライトの照明方式

帯状ガイドライトにより生成される路面の線状反射光は道路区画線に類似した形状となり、ドライバに視線誘導効果をもたらす。灯具は、LED と特殊レンズを組み合わせている。図1は帯状ガイドライトの照明方式と反射光の照度分布を示している。灯具は30° 後方に向けたプロビームタイプとなっている。

(2) 輝度計測機器

輝度計測機器は HI-LAND 社の ELF-ROAD を用いた。これは輝度を二次元的に計測できる機器である。表 1 に輝度計測機器の仕様を示す。

表-1 輝度計測機器の仕様

ELF-LOADの仕様

機器仕様	カメラ	CCDカメラ
	センサーサイズ	1/4インチ
	画素数	640×480ピクセル
	波長感度	視感度補正フィルタ
	レンズ	12.5-50.0mmズームレンズ
測定仕様	範囲	0.20~12,000(cd/m ²)
	精度	±3%以内
	再現性	±1%以内

(3) 輝度画像位置特定シミュレーション

最初に、カメラの位置・向き・焦点距離から対象物が輝度計測画像のどの位置に映るのかを計算するシステムを作成した。次に、帯状ガイドライト反射光・LED視標が輝度計測画像のどこに映るかをシミュレーションし、2次元画像上に表示した。帯状ガイドライト反射光の範囲は図2の実験場図の橙色の部分、幅0.2m×長さ10.5mと設定した。図3は84m離れた場所から正面を見たときのシミュレーションによる2次元画像である。黄色の範囲が帯状ガイドライト反射光で、赤色の点がLED視標の位置である。また、図3中の番号は図2のLED視標の位置に対応している。

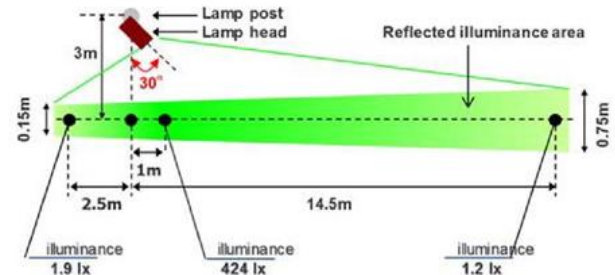


図-1 帯状ガイドライトの照明方式

(4) 帯状ガイドライト反射光範囲の特定

輝度撮影後、輝度画像中のLED視標の位置から帯状ガイドライト反射光の範囲を求められるようにした。具体的な手順は次の通りである。

① 輝度画像の中から特に輝度が高く、またシミュレーション中のLED視標の位置に近い点を探すことで、実際の輝度画像中のLED視標の位置とそのLED視標がシミュレーション中のどのLED視標であるのかを求めた。

② 図2におけるX=0m, Y=2.2mの位置を帯状ガイドライト中心点（以後、中心点）とする。特定したLED視標の中で、中心点の横断面上にあるものの位置から中心点が輝度画像中のどの位置にあるのかを求めた。焦点距離やカメラの向きによって映るLED視標は異なるが、横断面上に2つ以上のLED視標が写っていれば中心点の場所を特定できる。例えば、図5では帯状ガイドライト中心点の左右1mの位置のLED視標が写っているため、帯状ガイドライト中心点はそれらのちょうど中間点となる。

③ 実際の中心点とシミュレーションの中心点のずれの分だけシミュレーションの帯状ガイドライト反射光範囲を動かすことでシミュレーションと実際の輝度画像のズレを補正し、帯状ガイドライト反射光範囲を特定した。図4はその結果である。黒枠で囲まれた部分が帯状ガイ

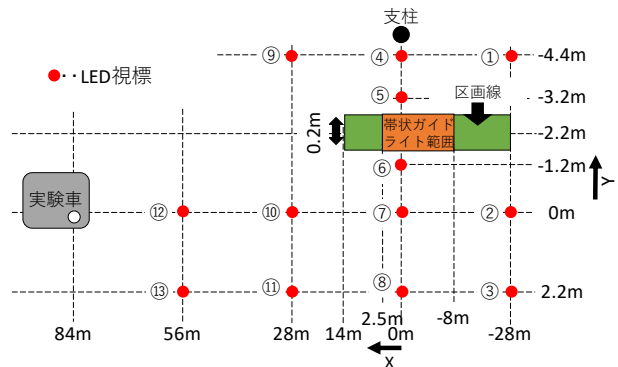


図-2 実験場図

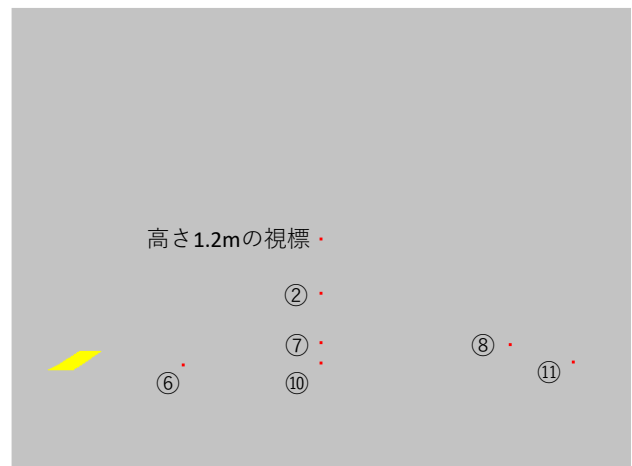


図-3 輝度画像位置特定シミュレーション結果

ドライトの範囲となっている。範囲内に含まれる輝度値の平均値を平均輝度値とした。

3. 輝度計測実験

(1) 輝度計測を行ったテスト走路

図2は輝度計測を行ったテスト走路を示している。実験車両はトヨタ・プリウス（NHW20）を用いた。車両の位置は幅員3.5mの車線の中央を車両が走行することを想定し、このような配置とした。ELF-ROADのカメラを実験車両の運転席のヘッドレストの位置（高さ1.2m）に設置した。車道外側線の位置（図2の緑色部分）に路面標示材貼付式テープとしてCVテープ（スリーエムジャパン製）を貼り付けた。このテープは路面標示用塗料3種1号と同等の反射輝度値350 mcd/lx・m²を有している。計測路面は乾燥路面で行った。路面には0.5%以下の縦断勾配があったため、実験道路の路面を水準測量し、高低差をシミュレーションに組み込むことで実際の輝度画像との差異が少なくなるようにした。

(2) 带状ガイドライトおよびLED視標の設置

带状ガイドライト灯具は車道外側線から横断方向におよそ3m離れた場所に設置した。車道外側線と带状ガイドライト反射光の最も照度の高い箇所を車道外側線の中央になるように灯具の向きを調整した。灯具の高さは3.5mである。解析の際に带状ガイドライト反射光の位置が特定できるよう、図2の赤点位置にLED光源で作製した視標を置いた。LED視標は車道外側線と実験車両の距離2.2mと最短計測距離28mを基準とした座標に置いた。それに加え、带状ガイドライト反射光の位置を特定しやすくするために、带状ガイドライト中心点の左右1.0mの位置にも置いた。また、カメラの向きを正面に向けるための視標として、X=-28m, Y=0m, 高さ1.2mの位置にも三脚に載せたLED視標を置いた。

(3) 計測条件

a) カメラの向き

カメラの向きによる輝度値の違いを検証するためにカメラの視野の中心を正面にしたものと带状ガイドライトの中心点にしたもので行った。正面の向きでは、前述した三脚上の高さ1.2mのLED視標に中心を合わせた。带状ガイドライトの向きでは、带状ガイドライトの左右1mの位置にLED視標を置き、それらのちょうど中間点にカメラの中心を合わせた。

b) 計測距離

ELF-ROADと带状ガイドライト支柱位置の距離（計測距離）は28m・56m・84m・112mの4種類とした。計測距離によってカメラの焦点距離（ズーム倍率）を変え、帯

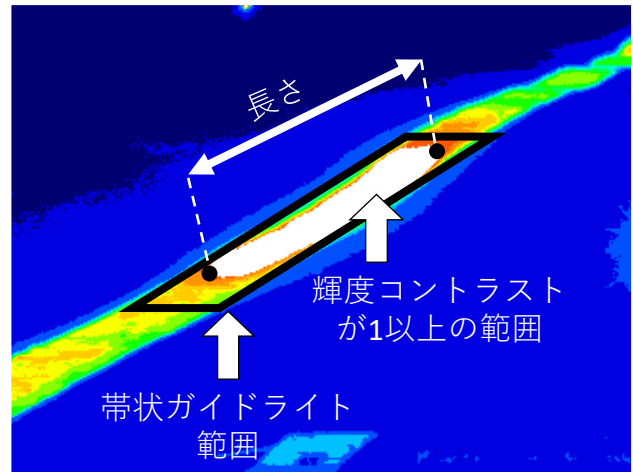


図4 带状ガイドライト反射光の範囲と長さ

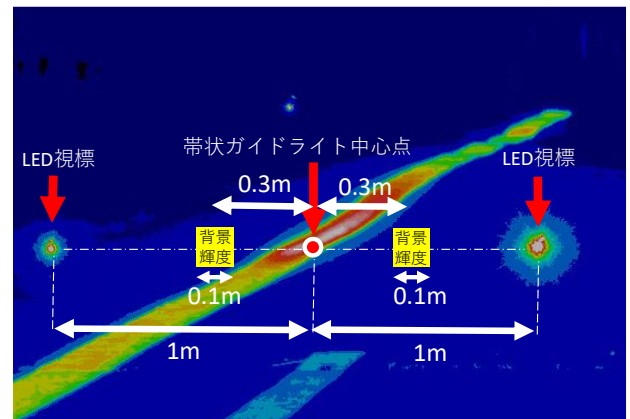


図5 背景輝度の範囲

表-2 ヘッドライト照度

輝度計測距離 (m)	照度計測高さ (m)	照度 (lx)			
		ロービーム		ハイビーム	
		1日目	2日目	1日目	2日目
28	0	78.0	78.6	84.0	83.0
	0.6	4.2	4.1	144.3	144.0
	1.2	1.9	2.0	135.1	136.7
56	0	77.9	76.7	83.3	81.0
	0.6	7.1	7.1	145.2	143.5
	1.2	1.9	1.9	139.9	141.9
84	0	95.8	93.4	106.5	104.1
	0.6	4.5	4.0	155.7	154.2
	1.2	2.0	1.7	111.4	112.2
112	0	94.9	82.7	102.1	103.1
	0.6	5.9	3.0	155.0	148.2
	1.2	2.1	2.0	116.5	108.6

ヘッドライトとの計測地点の距離はいずれも28m

状ガイドライトの輝度になるべく細かく計測できるようにした。

c) ヘッドライト

ヘッドライトはロービームとハイビームと消灯の3条件で行った。带状ガイドライトは点灯と消灯の2条件で行った。また、ヘッドライトの性能は車両ごとに異なり、またわずかな車両の向きの違いで変わってしまう恐れがあるため、実験車両を動かすたびに28m離れた正面の場所における、高さ0m, 0.6m, 1.2mでの鉛直面照度を計測した。表2はその結果である。

(4) 評価指標

a) 輝度コントラスト計測

輝度コントラストは以下の式で表される。

$$Contrast = \frac{|L_t - L_b|}{L_b} \quad (1)$$

視対象輝度 : $L_t(\text{cd}/\text{m}^2)$, 背景輝度 : $L_b(\text{cd}/\text{m}^2)$

Blackwell(1946)は順応輝度と対象物の大きさ(視野角)から視認可能な下限の限界コントラストを示した³⁾。それによると、視野角3.6分における限界コントラストはどの順応輝度においても0.3以下であった。そこで、本研究では輝度コントラストは1.0以上あると十分視認可能であると設定した。輝度コントラストを求めるために背景輝度を求めた。背景輝度は带状ガイドライトの中心点から左右に0.3m離れた位置を中心とした、一辺の長さが0.1mの正方形の中のピクセルの輝度の平均とした(図5)。带状ガイドライト反射光計測システムで求めた平均輝度値を視対象輝度とし、コントラストの計算を行った。

b) 带状ガイドライト反射光の長さ計測

図4の白く塗りつぶされた部分は輝度コントラストが1以上の範囲であるが、その範囲の中で最も右上のピクセルと最も左下のピクセルを結んだ長さを带状ガイドライトの長さとした。範囲を前述の带状ガイドライト範囲の中に限定したことによってヘッドライトの再帰反射光が長さに反映されることを最小限に抑えた。

(5) 輝度計測手順

車の位置を合わせるために、路面上における実験車両のタイヤの位置にマーキングをし、そこにタイヤを合わせることで、カメラの位置が位置に合うようにした。車の位置を合わせたら、ヘッドライト・カメラの向き・带状ガイドライトの点灯消灯を組み合わせた全条件で計測を行った。各条件で一度に3回ずつ計測を行った。別日に同じ条件で再び計測を行い、計6回計測を行った。解析結果は6回の計測値から算出した結果を平均したものとなっている。

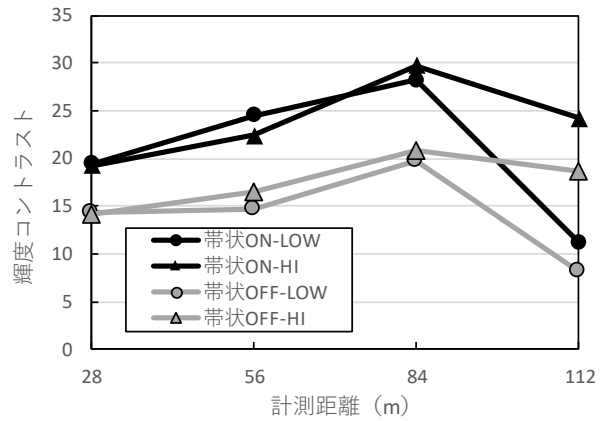


図-6 平均輝度コントラスト

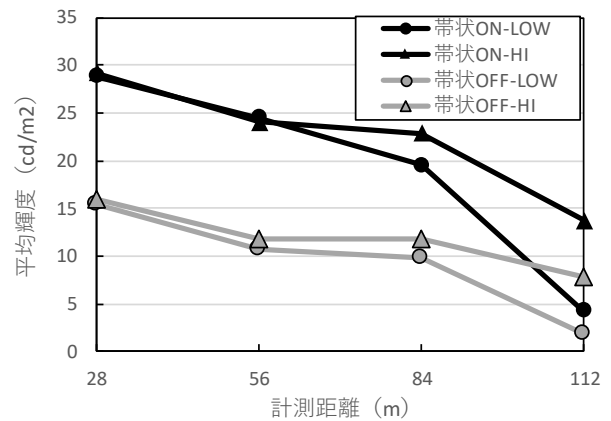


図-7 平均輝度

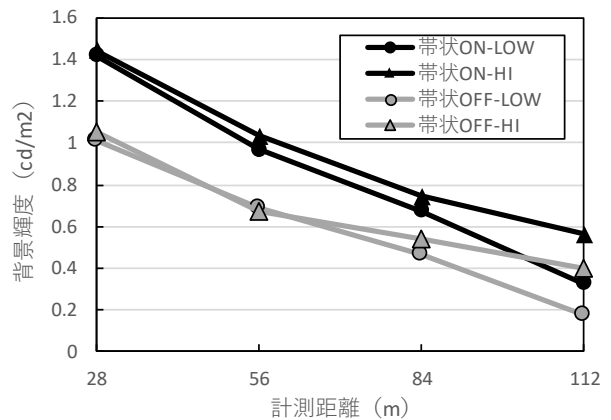


図-8 背景輝度

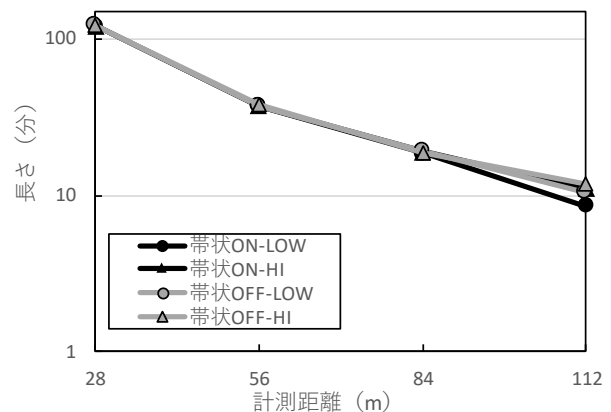


図-9 長さ

(6) 結果

夜間、ヘッドライトが消灯することはないと考え、ヘッドライト消灯を除いた値で解析を行った。図 6~9 はカメラ向きを正面にしたときの、平均輝度コントラスト、平均輝度値、背景輝度値である。全ての条件において、計測距離が長くなるにしたがって平均輝度・背景輝度ともに低下した。平均輝度コントラストおよび平均輝度について、同じヘッドライトの向きでは全ての計測距離において带状ガイドライト消灯よりも点灯の方が値が高くなった。平均輝度コントラストについて、視認距離が 112m になるとロービームはハイビームに比べて大きく値が低下した。全ての輝度計測条件において、平均輝度コントラストが 1 を超えており、また長さが 3.6 分を超えていた。したがって、全ての条件において带状ガイドライトおよび車道外側線は十分視認可能であると言える。

平均輝度値と平均輝度コントラストについて带状ガイドライトの有無・計測距離・ヘッドライトの向きを3要因とする分散分析を行った。平均輝度値について、ヘッドライト消灯よりも点灯が有意に高くなった ($F(1,86)=192.56, p<0.001$)。ヘッドライトの向きについてロービームよりもハイビームが有意に高くなった ($F(1,86)=16.52, p<0.001$)。計測距離も有意になった ($F(3,86)=81.25, p<0.001$)。平均輝度コントラストについて、带状ガイドライト消灯よりも点灯が有意に高くなった ($F(1,86)=27.13, p<0.001$)。ヘッドライトの向きについてロービームよりもハイビームが有意に高くなった ($F(1,86)=6.95, p<0.001$)。計測距離も有意になった ($F(3,86)=394.8, p<0.001$)。このことから带状ガイドライトはドライバの視認性の向上に効果があると言える。

4. 主観評価実験

(1) 実験参加者

北海道大学大学院工学系ヒトを対象とする研究倫理審査委員会に実験内容の審査を依頼し、実験の承認を受けた。また、実験前にインフォームドコンセントを実施し、実験に参加した全員が同意書にサインした。実験は2017年6月に行った。実験参加者は14名で全員20~25歳であった。全員が運転免許を所有しており、実験時には眼鏡などを含め両目視力0.7以上であることを確認した。

(2) 実験条件

実験条件として、計測距離 (28m・56m・84m・112m)、带状ガイドライトの点灯消灯、および車両のヘッドライト (ハイビーム・ロービーム) の3条件を組み合わせて視認評価を行った。

表-3 質問項目と回答形式

質問番号	質問文		回答形式
	带状ガイドライトが点灯の場合	带状ガイドライトが消灯の場合	
質問 1	带状ガイドライトの反射光が見えたかを判定してください。	区画線の反射光が見えたかを判定してください。	「見えたor見えない」の二択回答
質問 2	带状ガイドライトの反射光の見え方について評価してください。	区画線の反射光の見え方について評価してください。	「見やすい~見にくい」の7段階評価スケール
質問 3	带状ガイドライトの反射光の色はどのように見えたかについて評価してください。	区画線の反射光の色はどのように見えたかについて評価してください。	「緑色~白色」の7段階評価スケール
質問 4	带状ガイドライトの反射光の形状はどのように見えたかについて評価してください。	区画線の反射光の形状はどのように見えたかについて評価してください。	「線~点」の7段階評価スケール

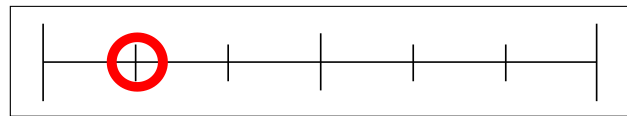


図-10 評価スケール

(3) 評価シート

実験参加者は表 3 の 4 つの質問に回答することで視認性を評価した。回答形式は質問ごとに異なっており、質問 1 は二択回答で、質問 2~4 は図 10 のような 7 段階評価スケールを用いた。また、带状ガイドライトの点灯・消灯で評価する対象が異なるため、質問文を一部条件によって異なるものとした。

(4) 実験手順

実験参加者は実験前に、年齢、運転経歴、視力などの個人属性を事前アンケートに記入した。14 名の実験参加者を 2 名ずつ 7 つのグループに分けた。2 名はそれぞれ実験車両の運転席と助手席に乗り、視認・評価をした。一つの計測距離につきグループごとに順番に 1 回ずつ乗車をした。計測距離は 28m, 84m, 112m, 56m の順で行った。带状ガイドライトの点灯消灯とヘッドライトの条件を組み合わせた 4 種類の条件をランダムに割り振り、1 回の乗車につきその 4 種類の条件で 4 回視認をした。実験参加者は 4 回の乗車を行い、計 16 回視認を行った。視認の前には実験車両のフロントガラスに暗幕をかけ、視認するまで前方が見えないようにした。視認の際には暗幕を 3 秒間だけ取り除き、実験参加者は 3 秒間で視認をした。視認の後、評価シートに記入をした。

(5) 結果

図 11 は質問 1 において带状ガイドライト反射光または区画線が「見えた」と回答した人の割合である。図

12~14 は質問 2~4 における評価値の平均値である。各評価値について、距離別で実験参加者をランダム変数とし、带状ガイドライトの点灯消灯・ヘッドライトの向きを 2 要因とする分散分析を行った。以下に各質問別の結果を示す。

a) 带状ガイドライト反射光および区画線が見えたかについて (質問 1)

視認距離 112m・带状ガイドライト消灯・ロービームの条件を除いて全ての視認距離において带状ガイドライト反射光や区画線を視認できた。

b) 見やすさの評価 (質問 2)

視認距離 28m では評価値 1 以上の差で带状ガイドライト点灯よりも消灯の方が見やすいという結果になった。その一方で視認距離 112m では評価値 1 以上の差で带状ガイドライト消灯のよりも点灯の方が見やすいという結果になった。分散分析の結果、視認距離 28m・56m では带状ガイドライト点灯よりも消灯の方が有意に見やすいという結果になった (28m: $F(1,36)=23.68, p<0.01$, 56m: $F(1,40)=4.299, p<0.05$)。視認距離 84m・112m では带状ガイドライト消灯よりも点灯の方が有意に見やすいという結果になった (84m: $F(1,40)=12.89, p<0.01$, 112m: $F(1,39)=41.44, p<0.01$)。また視認距離 112m ではロービームよりもハイビームの方が評価値が有意に見やすいという結果になった ($F(1,39)=6.588, p<0.05$)。視認距離が短いと带状ガイドライト消灯の方が区画線を見やすいが、視認距離が長いと带状ガイドライト点灯の方が見やすいということが言える。

c) 色の評価 (質問 3)

どの視認距離においても带状ガイドライト点灯時の平均評価値は 5 以上で、視認距離が長くなるにしたがって評価値は低下しなかった。視認距離が長くなっても短い視認距離と同様に带状ガイドライト反射光は緑色に見え、少なくとも視認距離 112m までは色による視線誘導効果が低下することはないと言える。

d) 形状の評価 (質問 4)

視認距離 28m では評価値 0.5 以上の差で带状ガイドライト点灯よりも消灯の方が線にみえるという結果になった。視認距離 84・112m では带状ガイドライト点灯よりも消灯の方が線にみえるという結果になった。分散分析の結果、視認距離 28m・56m では带状ガイドライト点灯よりも消灯の方が有意に線に見えるという結果になった (28m: $F(1,36)=15.52, p<0.01$, 56m: $F(1,40)=2.90, p<0.1$)。視認距離 112m では带状ガイドライト消灯よりも点灯の方が有意に線に見えるという結果になった ($F(1,39)=8.38, p<0.01$)。視認距離が短いと带状ガイドライト消灯の方が線に見えるが、視認距離が長いと带状ガイドライト点灯の方が線に見えるということが分かった。

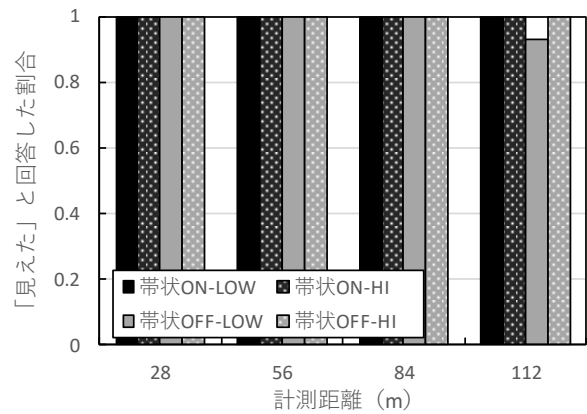


図-11 带状ガイドライト反射光または区画線が見えたと回答した人の割合 (質問 1)

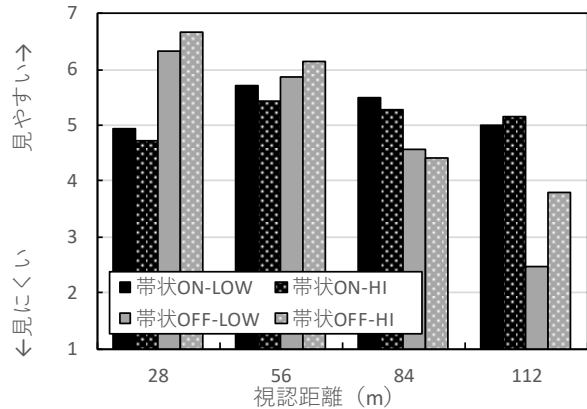


図-12 見やすさの評価 (質問 2)

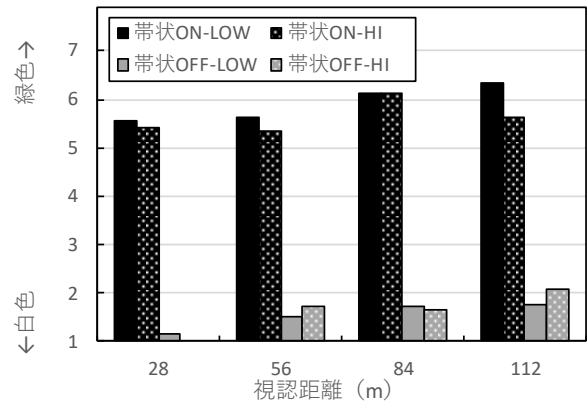


図-13 色の評価 (質問 3)

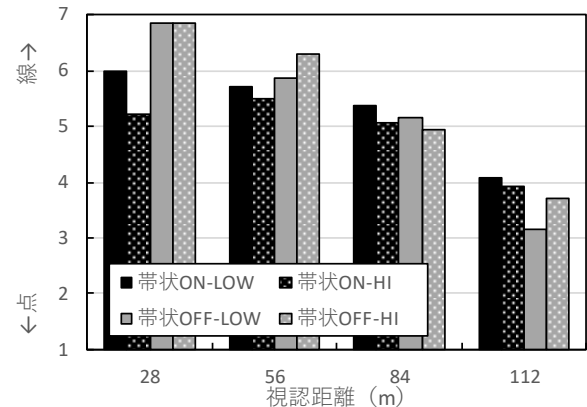


図-14 形状の評価 (質問 4)

5. 考察とまとめ

帯状ガイドライト反射光および車道外側線の輝度計測システムの構築をした。具体的にはカメラの位置と向き、および道路上に置いた LED 視標の位置から輝度画像位置特定システムを構築した。その結果、画像を用いた輝度解析が容易になり、また再現性の高い計測ができるようになった。

構築した輝度計測システムを用いて帯状ガイドライト反射光の輝度コントラストや輝度を解析し、視認性を検証した。その結果、全ての輝度計測条件において輝度コントラストが限界コントラスト以上であり、車道外側線や帯状ガイドライト反射光を視認可能であることが分かった。全ての計測距離において、帯状ガイドライトがある方が輝度コントラストや平均輝度が高かった。したがって帯状ガイドライトがある方が車道外側線を視認しやすいことが分かった。

次に実験参加者が帯状ガイドライト反射光および区画線を視認し、それらがどう見えたかを評価した。その結果、見やすさについて 84m・112m 離れた場所において帯状ガイドライト点灯の方が有意に見やすいという結果となった。これは、帯状ガイドライト消灯の条件においてヘッドライトの光が 84m 以遠ではあまり届かないために見にくくなってしまったと考えられる。色について、帯状ガイドライト反射光は 112m 離れていても緑色に見えた。また、形状について 112m 離れた場所では帯状ガ

イドライト消灯よりも点灯の方が有意に線状にも見えたという結果となった。これも見やすさと同様、112m ではヘッドライトが届いていないためと考えられる。

2つの実験から、帯状ガイドライトが区画線のみの場合と比べて道路の視認性を高めることが明らかとなった。萩原らは、3秒から5秒程度の前方からの情報をドライバは読み取ることが多いことを明らかにしている⁴⁾。100km/hの速度で5秒先は、140m程度となる。100m以上においても視認しやすい帯状ガイドライトは、ドライバの道路線形認知を容易にすると考えられる。今後、湿潤・積雪路面でも同様の実験を行うことでそれらの環境での視認性を評価する必要がある。

参考文献

- 1) 国村, 他: 帯状ガイドライトにより照射される線状反射光の視認性評価, 交通工学論文集 Vol.3, No.2, p.B_36-B_42, 2017.
- 2) 萩原, 他: 帯状ガイドライトの設置条件がドライバのワークロードと線形誘導性に与える影響について, 交通工学論文集 Vol.3, No.4, p.B_11-B_18, 2017.
- 3) H.R.Blackwell: Contrast Thresholds of the Human Eye, J.Opt.soc.Am., Vol36, No11, p624-632, 1946.
- 4) 萩原, 浜岡: ドライバの予見行動に関する研究のレビュー, 自動車技術会論文集, Vol.43, No.5, p.1123-1129, 2012.

(?????? 受付)

Study on Visibility Evaluation of Guide-Light Delineation Systems Reflected Light

Hiroya SATO, Toru HAGIWARA, Masao KUNIMURA and Issei TAKAGI

Guide-light delineation systems are designed to assume the role of pavement markings at night. These are road apperage that irradiates a green linear light from the pole of 3.5m in height installed at the end of the road.

In this research, in order to evaluate the visibility of the road irradiated by a Guide-light delineation systems, we have made a highly reproducible luminance image location system. Then, we used it to verify the visibility of a Guide-light delineation systems. As a result, it was found that a Guide-light delineation systems increase the visibility of the road. We asked experiment participants to visually recognize a Guide-light delineation systems under static conditions and evaluate their visibility. As a result, it was found that the visibility increasing effect of a Guide-light delineation systems are large in view of color and easy to see when the visual distance becomes 100 m or more. Two studies have revealed that a Guide-light delineation systems enhance the gaze guidance effect of the road. In this research, since we are conducting experiments only on dry road surface, it is necessary to evaluate the visibility on wet or snowy road surface from now on.