

霧中における輝度コントラスト及び発光色が視線誘導灯の視認性に与える影響について

Effects of Luminous Contrast and Color on Visibility of Illuminated Delineator in Fog

萩原 亨*、小野寺 雄輝**、中西 真史***

by HAGIWARA Toru, ONODERA Yuki, NAKANISHI Masashi

1. はじめに

霧中の灯器の視認性は、霧が多発する道路区間における道路交通施設を検討するとき重要である。満田ら¹⁾は、霧中（人工霧）における視線誘導灯の光学的諸元及び周囲の明るさが視認性に及ぼす影響を被験者の主観的な評価から検討した。視認可能な光度が霧の透過率別に示され、昼間において非常に高い光度が必要となることを示した。さらに、設置距離を延ばしたときの必要光度を角膜照度から求めた。一方、松本ら²⁾は、天然霧中における車両の後部灯器の視認性について被験者の主観的な評価と灯器の輝度から検討した。灯器の視認性は、霧による減衰を考慮した光源輝度の対数に比例すること、灯器周辺に発生する光膜が視認性に与える影響が大きくなること、観測距離による視角の影響が小さいことを見出した。これらの研究から、灯器の輝度と周囲の明るさが、霧中の道路交通施設の視認性を決めていることが分かる。しかし、霧中で視線誘導灯が見えるか見えないかについて明確な基準をこれらの研究では示していない。Adrian³⁾は、限界コントラストを考えたモデルを作成することで、道路上の視覚対象物の視認性を判定できることを見出した。

本研究は、霧中においても限界コントラストが視線誘導灯の視認性を判定する基準となり得ると仮定し、

1. 被験者が視線誘導灯を見えたときと判定したときの透過率と視認限界透過率（限界コントラスト）との比較
 2. 視線誘導灯の色（橙色と青色）が主観的な評価に与える影響
- について実験から検討した。霧中の視認性が輝度コ

ントラストの限界値によって表わせることが分かり、霧中で効果的な発光色が分かると、霧の状況に合せた視線誘導灯を理論的に設計することが可能となる。

2. 手法

(1) 霧発生装置

実験は、建設省土木研究所屋内標識実験施設で96年9月23日から9月27日までの5日間実施した。図1に示した実験施設は、奥行き30(m)・幅10(m)・高さ10(m)であり、人工霧を発生することができる。実物の視線誘導灯を用いた霧中における視認性実験が可能となっている。透過率は、波長900(nm)の赤外線が基線長（測定距離10(m)）で減衰されるエネルギーから求めた。本報告における透過率表示は、すべて距離25(m)に換算した透過率である。透過率は、0(%)から80(%)まで設定できる。人工霧の平均粒径は、105(μ m)であった。自然霧の平均粒径よりも大きい。粒径は、光の散乱に影響を与える。人工霧は粒径が大きく、自然霧に比べて光の散乱現象に違いが見られる。

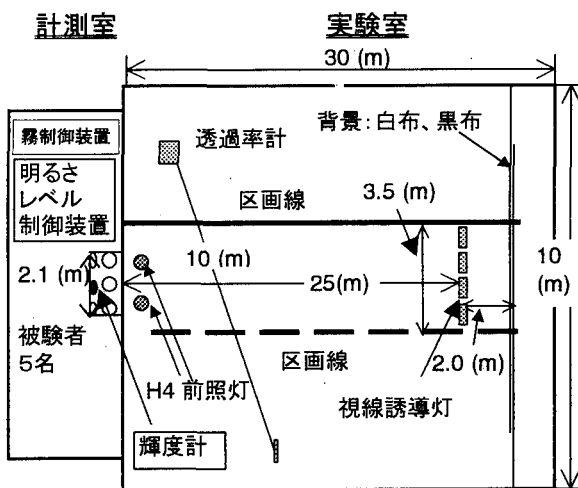


図1 人工霧発生施設と実験器機の配置

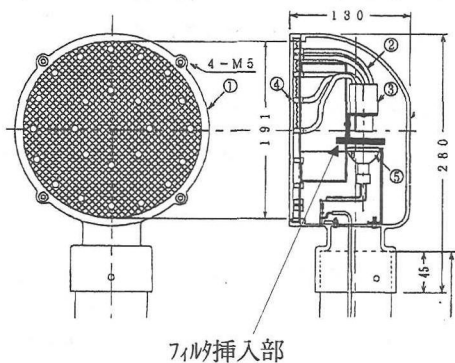
キーワード：交通安全、交通情報

*正員、工博、北海道大学大学院・都市環境工学専攻、助教授

**正員、北海道大学大学院・都市環境工学専攻、技官

***学生員、北海道大学大学院・都市環境工学専攻

(〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目、TEL 011-706-6214、FAX 011-726-2296、E-mail:hagiwara@eng.hokudai.ac.jp)



- ①筐体
②多成分ガラスファイバ
③入射口 (直径: 14.7mm)
④出射口 (直径: 3mm)
⑤ハロゲンランプ (20W)

図2 実験に用いたファイバ式視線誘導灯

(2) 背景と実験室照度

背景幕は、計測室から 25(m)離れた視線誘導灯の 2(m)後方に設置した。夜間を想定した条件のとき、照明は全て消灯 (0 lx) した。このとき、黒色の背景幕を用いた。夕方の明るさを想定した条件のとき、実験室の路面照度が 2000(lx)となるよう照明を調節した。このとき、背景幕は白色とした。また、全ての実験においてヘッドライトをロービームで点灯した。

(3) 被験者

被験者は、図1の計測室から自動車のフロントウインドを模擬したガラス窓を通して視線誘導灯を観測した。座席は、実験毎に変えた。被験者は視力 1.0 以上の 5 名 (女性 2 名、男性 3 名) であり、平均年齢は 26 歳であった。視機能は、コントラストチャート (Vistec-6500) を用いて測定した。コントラストチャートによる検査は、コントラストが低い場合から高い場合までの視力と言える。一般の視力は、コントラストが高い場合のみを評価した値である。5 名とも正常なコントラスト感度範囲となっていた。

(4) 視線誘導灯

本研究では、図2に示す光ファイバを使った視線誘導灯を用いた。視線誘導灯は、被験者から 25(m)離れた正面に設置した。模擬道路の中央に 4 個設置した。設置高さは、1.2(m)であった。視線誘導灯は、黒く塗られた直径 20(cm)の円板に 24 本の光ファイバが取り付けられている。入射径 $\phi 14.7(\text{mm})$ ・出射

表1 視線誘導灯の明るさレベルと輝度

		全面		出射口
床面照度		0 lx	2000 lx	0 lx
		輝度 (cd/m^2)	輝度 (cd/m^2)	輝度 (cd/m^2)
明るさの レベル	L1	0.061		94
	L2	0.96		301
	L3	4.5	19	1040
	L4	16	31	3610
	L5	33	78	8560
	L6		160	34700
	L7		320	74400

表2 視線誘導灯にフィルタを加えたときの XY 色度
床面照度: 2000 lx

フィルタ		フィルタ無		橙色		青色	
色度座標 (CIE)		X 座標	Y 座標	X 座標	Y 座標	X 座標	Y 座標
明るさの レベル	L3	0.48	0.41	0.50	0.39	0.39	0.44
	L4	0.51	0.41	0.57	0.37	0.33	0.46
	L5	0.52	0.42	0.61	0.36	0.28	0.47
	L6	0.52	0.42	0.63	0.36	0.25	0.45
	L7	0.51	0.42	0.63	0.36	0.24	0.44

表3 実験内容と実験回数

床面照度: 0 lx

		明るさ変化側 明るさレベル (L1~L5)		
		フィルタ無	橙色	青色
明るさ レベル	明るさ固定側 フィルタ無	4*+4**	2	2
	橙色	2		2
	青色	2	2	

床面照度: 2000 lx

		明るさ変化側 明るさレベル (L3~L7)		
		フィルタ無	橙色	青色
明るさ レベル	明るさ固定側 フィルタ無	4*+4**	2	2
	橙色	2		2
	青色	2	2	

* 発見に関する実験

** 輝度測定のための実験

注意: 表中の数字は実験回数

径 $\phi 3(\text{mm})$ ・分岐数 24 であった。視線誘導灯の光源には、12(V)-20(W)ハロゲンを用いた。光ファイバより出射される光は、出射角約 $60(\text{deg})$ の広がりを持っていた。座席の違い及び視線誘導灯の設置位置が視認性に与える影響は小さかった。

光ファイバの代表的な素材には、石英・多成分ガラス・プラスチックなどがある。視線誘導灯には、

多成分ガラスファイバを用いている。多成分ガラスファイバは、従来の道路交通標識で用いられてきたプラスチックファイバよりも透過率が高い。また、耐熱性が高いため、ハロゲン電球のような発熱しやすい光源を使うことができる。

(5) 視線誘導灯の視認性と輝度コントラスト

視認性とは、視覚対象物の存在または形状の見えやさの程度を示している。視覚が対象物を知覚できるかどうかは、その対象物の輝度とその直接周辺(背景)の輝度(背景輝度)との間に視覚で識別できる以上の十分なコントラストがあるかどうかによって決まる。コントラストは、(1)式のような輝度比として表わされる。

$$C = \frac{L_t - L_0}{L_0} \quad (1)$$

C: コントラスト

L_t (cd/m²): 対象物の輝度

L_0 (cd/m²): 背景輝度

輝度は、人間から見たときの対象物の明るさを示す指標である。人間の視覚が識別できる最小の輝度差は限界コントラストとして表される。限界コントラストは、背景が均一な状況において視覚対象物が識別できる限界の輝度と背景輝度の比から定義される。Blackwell⁴⁾は、 $10^2 \sim 10^{-6}$ (footlamberts) の順応輝度に対して視角 3.60、9.68、18.2、55.2、121.0 (分) の対象物を用いて視認性を調査した。視感度のよい被験者を用いて 45 万回に及ぶ実験から、視認性が 50% となるときのコントラストを限界コントラストとた。Blackwell⁴⁾の限界コントラストは、信頼性の高い数値として視認性を検討するときのリファレンスと考えられている。

(6) 視線誘導灯の明るさと輝度測定

視線誘導灯の輝度は、計測室から測定した。輝度計は、被験者の座席の間に設置した。高さは、被験者の視線位置に合せた。視野角は、0.25(deg)とした。輝度計の測定視野面は、視線誘導灯の全面よりやや小さく面積となっていた。ファイバ式視線誘導灯の全面は、均一な輝度となっていない。一般に、不均一な輝度を正確に測定することは難しいとされている。しかし、霧が濃くなると散乱によって視線誘導灯全面が比較的均一な明るさを示すようになる。霧が発生している状況では、輝度の均一性がある程度保たれると考え輝度測定を実施した。

視線誘導灯の明るさは、L1 から L7 の 7 段階とした。表 1 は、設定した明るさレベル別の視線誘導灯全面とファイバの出射口の輝度を示している。レベルが 1 段階高くなると、ファイバ・出射口輝度は 3 倍となるよう調整した。7 段階の明るさレベルは、電圧を調整することから実現した。電圧調節には、スライダックを用いた。一方、発光色は、ガラスフィルタを用いて実現した。表 2 は、3 種類の視線誘導灯の xy 色度座標値 (CIE) を示している。ハロゲンランプの色温度のため、フィルタ無の視線誘導灯であっても若干橙色となっていた。

(7) 実験内容と繰り返し回数

表 3 は、本研究の実験内容と実験回数を示している。独立変数は、霧による透過率と実験室の床面照度と視線誘導灯の輝度と色である。従属変数は、被験者の主観的視認性と視線誘導灯の輝度である。フィルタのない視線誘導灯を用いて、主観的視認性実験と輝度測定実験を実施した(実験 1)。また、色の比較については主観的視認性実験のみを実施した(実験 2)。

実験 1: 視線誘導灯の明るさを表 2 に示す L3・L5・L7 に固定し、視線誘導灯の輝度測定と被験者による発見率を測定した。一部の実験において両者の測定を同時に実施した。

実験 2: 視線誘導灯の明るさを L3 と L5 に固定し、2 種類の色を組み合わせ、被験者の主観的評価を行った。色の違いが視認性に与える影響を調査した。色は、カラーフィルタを用いて橙・青とした。フィルタを装着しても明るさのレベルがほぼ同じ輝度となるよう各々の視線誘導灯を調整した。

(8) 実験手順

実験開始前に、霧発生装置を作動させ、透過率が 0(%) になる状態まで霧を発生させた。次に、霧発生装置を停止させ、透過率が上昇するのを待つ。実験は、透過率が、0(%) から 20(%) まで上昇するとき、任意の透過率において実施した。実験に慣れるため、実験 1 及び実験 2 の前に、数回の予備実験を実施した。

実験 1: 透過率が 20(%) になるまで、5 回前後の実験を実施した。被験者は、実験者の合図に従って実験室に設置した視線誘導灯を約 2 秒間注視した。被験者は、灯器が見えたかどうか、を判定した。

(A) 床面照度: 0 lx

(B) 床面照度: 2000 lx

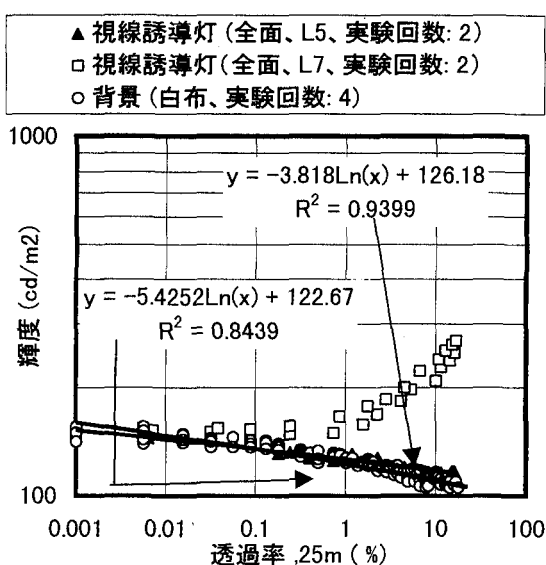
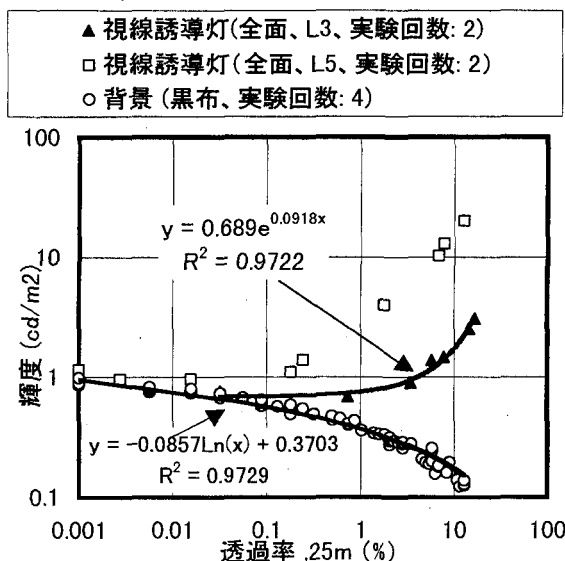


図3 透過率と視線誘導灯輝度

実験2: 透過率が20(%)になるまで、5セット前後の実験を実施した。1セットの実験では、6回の主観的評価を実施した。被験者は、実験者の合図に従って実験室に設置した2器の視線誘導灯を約2秒間注視した。被験者は、どちらの灯器が見やすいかを判定した。一方の視線誘導灯の明るさは固定し、他方の視線誘導灯は6回の評価毎に明るさをランダムに変えた。変動の明るさ範囲は、固定レベルから±2の5段階とした。

3. 実験結果

(1) 視線誘導灯の測定輝度

図3は、床面照度が0(lx)と2000(lx)における透過率と誘導灯輝度及び背景輝度との関係である。透過率は距離25mのときの値である。透過率が小さくなるにしたがって、視線誘導灯と背景輝度の差が小さくなった。0(lx)のとき、L3は透過率0.1%で、L5は透過率0.01%でほぼ背景輝度と同じとなった。2000(lx)のとき、L5は透過率0.5%で、L7は透過率0.05%でほぼ背景輝度と同じとなった。一方、背景輝度は、ヘッドライト・誘導灯・照明灯による光が、霧で散乱するため透過率が小さくなると高くなった。

(2) 主観的評価による誘導灯の発見率

図4は、透過率と視線誘導灯の発見率との関係である。床面照度0(lx)のとき被験者は、L3の視線誘導灯が発見できるかどうかを判定した。透過率

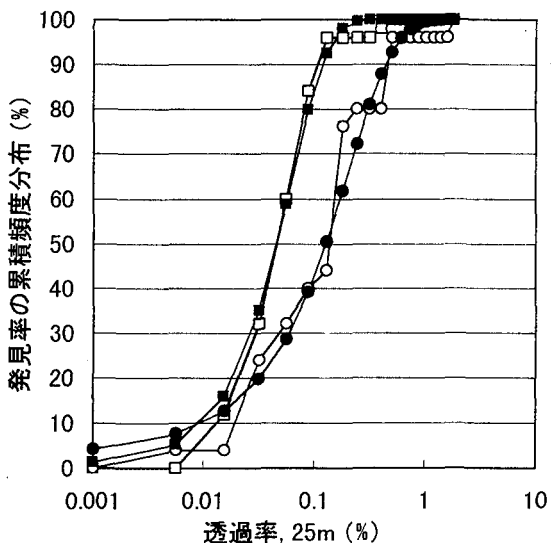
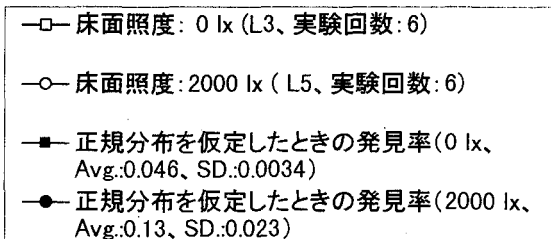


図4 透過率と視線誘導灯の発見率の関係

(A) 床面照度: 0 lx

(B) 床面照度: 2000 lx

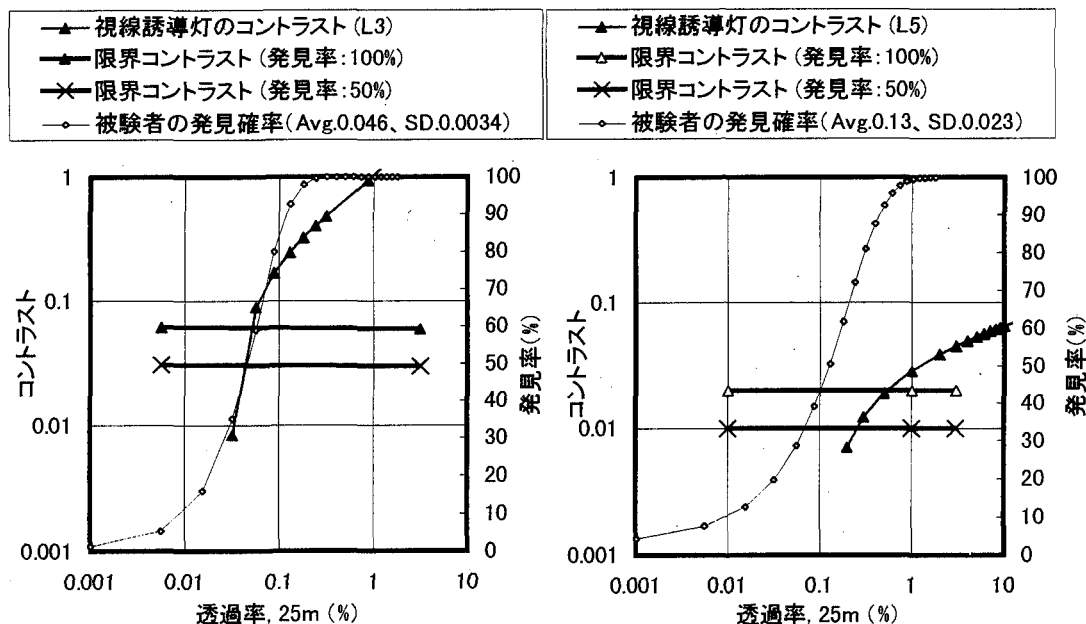


図5 透過率と視線誘導灯輝度のコントラスト

0.1(%)において発見率が、ほぼ 100(%)となった。一方、床面照度 2000(1x)のとき被験者は、L5 の視線誘導灯が発見できるかどうかを判定した。透過率が 1(%)において、発見率がほぼ 100(%)となった。ここで、発見率の確率分布モデルとして正規分布を適用した。図 4 の黒点を結んだ曲線は、正規分布としたときの発見率である。カイ二乗検定を行ったところ、有意水準 5(%)で妥当なモデルであった。

(3) 主観的な発見率と輝度コントラスト

図 5 は、透過率と視線誘導灯のコントラストの関係、透過率と限界コントラストの関係、及び透過率と発見率の関係を床面照度別に示した結果である。視線誘導灯のコントラストは、図 3 の視線誘導灯の輝度と背景輝度から求めた。限界コントラストは、背景輝度と視線誘導灯全面の視角を Blackwell⁴⁾の実験結果に入力し求めた。視線誘導灯の発見率は、図 4 で求めた正規分布から求めた。

図 5 (A)は、床面照度 0(1x)において明るさ L3 の視線誘導灯を用いた場合を示している。透過率が 1(%)より低くなると、視線誘導灯コントラストは急激に下降することが分かる。測定された視線誘導灯

コントラストが発見率 100(%)の限界コントラストと交差する透過率は、0.05(%)であった。被験者の発見率が 100(%)となる透過率は、0.2(%)であった。一方、測定された視線誘導灯コントラストが発見率 50(%)の限界コントラストと交差する透過率は、0.04(%)であった。被験者の発見率が 50(%)となる透過率は、0.04(%)であった。

図 5 (B)は、床面照度 2000(1x)において明るさ L5 の視線誘導灯を用いた場合を示している。視線誘導灯のコントラストが発見率 100(%)の限界コントラストと交差する透過率は、0.5(%)であった。被験者の発見率が 100(%)になる透過率は、1.0(%)であった。一方、視線誘導灯のコントラストが、発見率 50(%)の限界コントラストと交差する透過率は 0.2(%)であった。被験者の発見率が 50(%)となる透過率は、0.13(%)であった。

50(%)発見率における主観的評価による透過率と測定コントラストと限界コントラストが交差する透過率は、近い値を示した。しかし、100(%)発見率は、主観的評価による透過率が限界コントラストによる透過率よりかなり大きくなった。主観的評価の発見

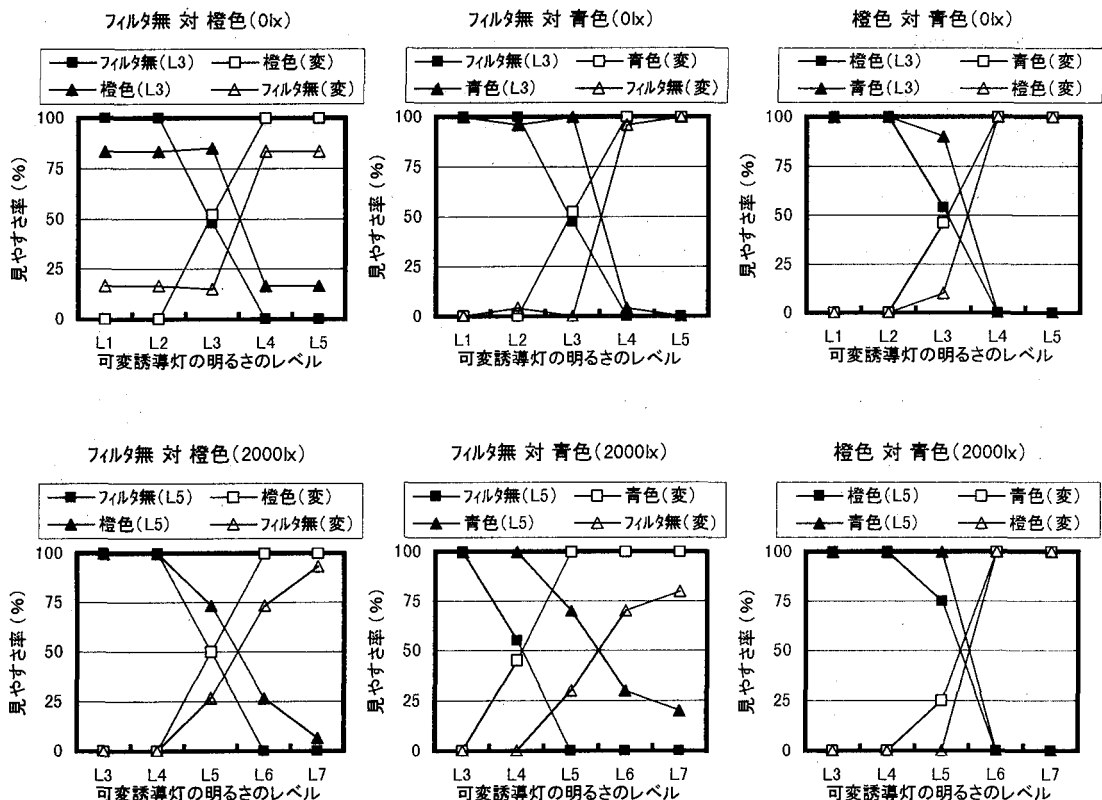


図6 視線誘導灯の発色が見やすさに与える影響

率の分布が、Blackwell の実験⁴⁾における発見率の分布よりも広がっていたためと言える。バラツキの原因として、被験者間の視感度差、観測室における視認位置による見やすさの違い、霧の生成状況の差異などが挙げられる。

(4) 発光色の違いが視認性に与える影響

図6は、発光色と輝度が異なる2組みの視線誘導灯のどちらが見やすいかを主観的に評価した結果である。上段が0(1x)の場合、下段が2000(1x)の場合である。主観的評価は、透過率0(%)から20(%)へ上昇する間に5セットから6セット実施した。透過率による評価の違いは、何れの場合においても見られなかった。そこで、図6の見やすさ率は、5から6種類の透過率で評価された結果を合せた。

床面照度0(1x)におけるフィルタ無と橙色との比較を例として結果を示す。橙色の明るさを固定し、フィルタ無の明るさを変動とし実験を行った。次に、橙色を変動としフィルタ無を固定とし実験を行った。前者の実験において固定側と変動側の見やすさ率が

交差したときの変動側明るさレベルはL3であった。固定側よりも変動側の明るさレベルが明るいとき変動側の見やすさ率は100(%)、固定側が明るいときには固定側の見やすさ率は100(%)となった。明るさレベルがL3のとき、変動側と固定側の見やすさ率は50%となった。後者の実験において見やすさ率が交差する変動側の明るさレベルは、L3/L4であった。L3/L4はその中間を意味するものとする。固定側あるいは変動側の明るさレベルが明るいときの見やすさ率は、80(%)となった。1名の被験者が、暗い方が見やすいとする意見から、明るい側の見やすさが100(%)とならなかった。

床面照度0(1x)における変動側と固定側の見やすさ率が交差する変動側の明るさレベルをまとめる。フィルタ無と橙色の組み合わせのときL3とL3/L4、フィルタ無と青色のときL3とL3/L4、橙色と青色のときL3とL3/L4となった。床面照度2000(1x)においても同様に、見やすさ率がクロスする変動側の明るさレベルをまとめる。フィルタ無と橙色の組み合わせのときL5とL5/L6、フィルタ無と青色のときL4

とL5/L6、青色と橙色のときL5とL5/L6となった。フィルタ無と青色の組み合わせのとき、青色の方がフィルタ無よりも「見やすく」判定された。

路面照度が2000(lx)のフィルタ無と青色の場合を除いて、フィルタ無・橙色・青色の違いが見やすさに与えた影響は、明るさレベルにして1より小さかった。本実験では、明るさレベルが1段階高くなることは、輝度が約3倍となることに相当する。発光色を橙色あるいは青色にすることから視線誘導灯の視認性を大幅に向上させること、すなわち発光色によって輝度を3倍にするほどの効果を得ることはできないと言えた。ただし、フィルタ無はまったくの無色ではなく、色温度によって霧自体の色とは異なっていたことに注意する必要がある。霧と全く同じ色が発光色であった場合は、視認性は大幅に低下することが予期され、何らかの発光色は必要である。また、色の違いにより周辺視に与える誘目性への影響は大きく、色の効果として考慮すべきである。

4. まとめと今後の課題

人工の霧中において、視線誘導灯の視認性に関する実験を行った。実験では、霧中における灯器の輝度コントラストが視機能の限界コントラスト値に近いかどうか、発光色が視認性に与える影響はどの程度かについて検討した。発光色として全く霧と同色の場合は、実験で考慮していない。発光色がある視線誘導灯間の比較であることに注意する必要がある。50(%)発見率の場合、主観的評価による透過率と測定コントラストと限界コントラストが交差する透過率は、非常に近い値となった。しかし、100(%)発見率は、両者に違いがあった。100(%)発見率における違いは、主観的評価のバラツキが大きかったことに原因があった。実験毎の条件に若干の違いがあったと思われる。一方、発光色を橙色あるいは青色とする視認性への効果は実験で設定した約3倍の輝度差による効果よりも大きくなかった。以上から、本研究の範囲内に限られるが、発光色に違いがあったとしても視認性に与える影響には限度があり、限界コントラストが視認性を示す評価基準になり得ることを確認できたと言えよう。

これらの結果は、人工霧であること、1種類の視線誘導灯のみであり、汎用的と言えるかどうかは疑問が残る。今後は、自然の霧中において、限界コントラストが被験者の代替となるかどうかを検証する必要がある。また、視線誘導灯の輝度を高くすることは決して視認性の向上に直結しないので注意すべ

きである。明るい視線誘導灯は、高輝度の光膜を発生する恐れがある。光膜によって、背景輝度も高くなりコントラストの改善に繋がらない。視線誘導灯の背後にあるすべての視対象の視認性が失われる可能性すらある。明るさを重視する一方で、視線誘導灯は光膜現象を抑えることに十分配慮される必要がある。

最後になりますが、本研究の実施に多大な協力をいただいたモリテックス(株)、吾妻システムズ(株)、(株)ロードセンターの関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 満田、他；霧中用視線誘導灯の視認性、建設省土木研究所土木技術資料 27-12、1985
- 2) 松本、他；霧中における後部灯火の視認性について、交通安全公害研究報告、No. 3、1975
- 3) Werner Adrian; Visibility of Targets, Transportation Research Record 1247, TRB, pp. 39-45, 1989
- 4) Blackwell, H. R. ; Contrast Thresholds of the Human Eye. Journal of the Optical Society of America, Volume 36, No. 11, 1946