



道路政策の質の向上に資する技術研究開発
成 果 報 告 レ ポ ー ト
No. 28-7

研究テーマ

市街地におけるプロビーム道路照明
についての研究開発

研究代表者：北海道大学大学院教授	萩原 亨
共同研究者：横浜国立大学大学院教授	岡嶋 克典
秋田大学教授	浜岡 秀勝
岩崎電気（株）課長	江湖 俊介
照明学会・専門会員	小林 正自

令和元年7月

新道路技術会議

目 次

研究概要（様式 3）	1
第 1 章 はじめに	3
1. 1 夜間の横断歩行者事故の特徴（平成 28 年度研究）	3
1. 2 既存の道路照明の課題（平成 28 年度研究）	4
1. 3 プロビーム配光を持った道路照明の開発	5
第 2 章 道路照明とその関連技術の最新技術開発動向に関する調査	8
2. 1 はじめに.....	8
2. 2 第 96 回 TRB 年次学術講演会（2017 年）	8
2. 3 第 97 回 TRB 年次学術講演会（2018 年）	9
2. 4 第 98 回 TRB 年次学術講演会（2019 年）	10
2. 5 まとめ	11
第 3 章 プロビーム配光を持った道路灯の試作と視認性評価	12
3. 1 はじめに.....	12
3. 2 研究手法.....	12
3. 3 結果.....	15
3. 4 試作プロビーム照明を改善した新たなプロビーム照明の配光検討	17
3. 5 まとめ	19
第 4 章 プロビーム配光の検討	20
4. 1 はじめに.....	20
4. 2 研究手法.....	20
4. 3 テストコースでの視環境計測と視認性評価実験	21
4. 4 映像を用いた横断歩行者発見に関する評価検討	24
4. 5 まとめ	27
第 5 章 プロトタイププロビーム灯の開発	29
5. 1 プロビーム配光の道路灯の検討	29
5. 2 プロトタイプの開発.....	31
5. 3 プロビーム道路灯プロトタイプの社会実装に向けた検討	34
5. 4 まとめ	37
第 6 章 まとめ	39

**「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」(平成28年度採択)
研究概要**

番号	研究課題名	研究代表者
No.28-7	市街地におけるプロビーム道路照明についての研究開発	北海道大学 教授 萩原 亨

市街地における道路上の横断歩行者を「明」で見せる道路照明を実現するため、理想のプロビーム配光の決定とそれを具体化する灯具の実現を研究目的とし、歩道を含めた道路全体を均一に明るくする配光とする一方、反対側からの車両や歩行者などにまぶしさを感じさせない配光となるプロビーム道路照明を研究開発する。

1. 研究の背景・目的

本研究では、道路照明基準を満たすプロビーム配光を持つ道路灯の具体化検討から、まぶしさを抑制しつつ道路空間全体の鉛直面照度を高くするプロトタイプを開発した。プロトタイプを設置する道路環境は、横断歩行者事故分析で得られた結果を踏まえて、市街地における両側に歩道のある往復2車線道路とした。世界的に、市街地におけるプロビーム配光の道路灯はこれまで検討された調査研究はなく、プロビーム配光のメリットを活かしデメリットを最小限にする灯具を一から開発する必要があった。

2. 研究内容

世界的に、市街地におけるプロビーム配光の道路灯はこれまで検討された調査研究はなく、プロビーム配光のメリットを活かしデメリットを最小限にする灯具を一から開発する必要があった。そこで、本研究では市街地に設置可能なプロトタイプを開発すべく、段階的な技術検討をステップを踏みながら3年間に渡り行った。平成28年度にプロビーム配光の道路灯のメリットに関する効果検証を行い、平成29年度には平成28年度の成果をベースにプロビーム配光の道路灯の光学的目標仕様とそれを実現するための光学設計を検討した。平成30年度の最終年には供用中の道路に設置可能となるプロビーム配光を持つプロトタイプ道路を制作した。

3. 研究成果

プロトタイプの光学系は、平成29年度に開発した灯具と同様、特性の異なる3種類のレンズ(ビーム角：狭角8°、中角16°、広角28°)を用いることとし、これらのレンズを使用して配光がこれまでに検討してきたプロビームの理想的な配光案に近似するよう光学シミュレーションを利用して光学設計を行った。プロトタイプを構成するユニット数とユニット個々の照射角(以降、エイミング角という)は、光学シミュレーションを繰り返し行うことで明らかにした。プロトタイプは、8ユニットで構成した。設計したプロトタイプの光学性能は、道路照明施設設置基準・同解説の性能指標を満足することを確認した。試作したプロトタイプの灯具の外寸と写真を、図1に示す。

テスト走路にプロトタイプを設置することから、道路空間の鉛直面照度を均質に高めることができ、ドライバから見たときの左右からの横断歩行者を早期に発見できることを明らかにした。図2にデジタルカメラの画像を用いた模擬歩行者の輝度分布を示す。図中に示した鉛直面照度(高さ0.8m)の数値は3.2~38.6 lxとなった。過去の主観評価結果と鉛直面照度の結果を踏まえると路側帯(右)に置いた視対象以外は「やや見えにくい」以上の視認性評価となると言えた。ただし、路側帯(右)など、対向車線側の鉛直面照度が低く、配光の改良の余地が残った。

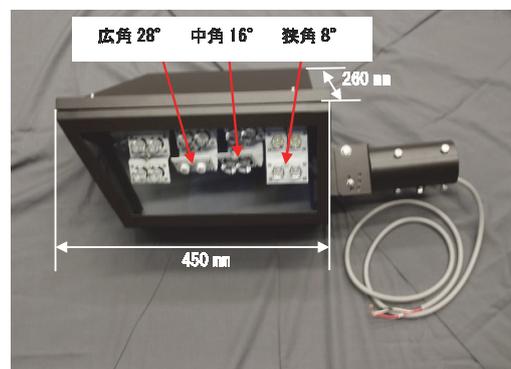
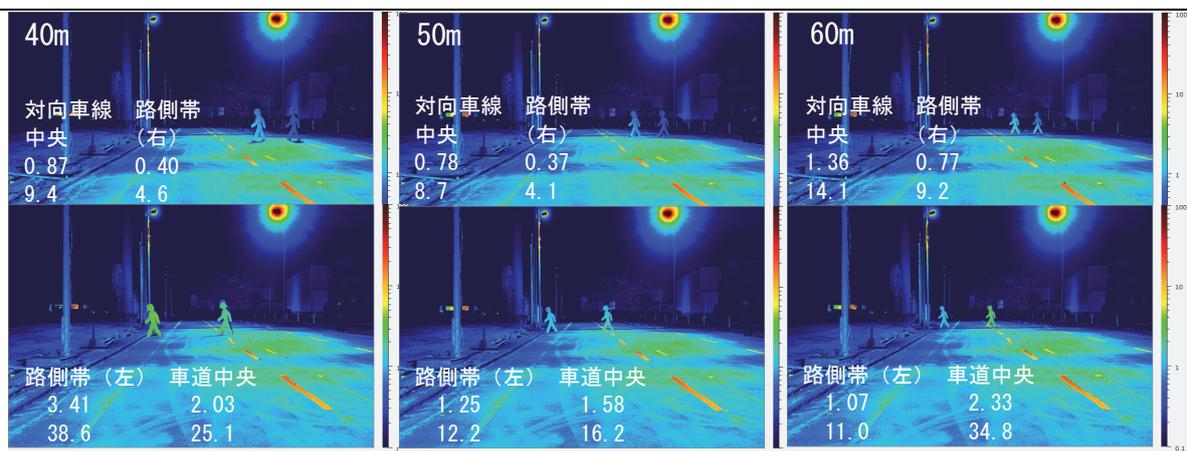


図1 プロトタイプの外観とサイズ



注1：路面輝度画像のスケールは0.1～100(cd/m²)(青色のとき暗く、赤色のとき明るい)

注2：上段：輝度(cd/m²)、下段：鉛直面照度 (lx) (高さ0.8m)

図2 デジタルカメラの画像を用いた模擬歩行者の輝度分布

4. 主な発表論文

- 1) 草竹 大輝, 萩原 亨, 浜岡 秀勝, 江湖 俊介, 轟 麻起子, 岡嶋 克典, 小林 正自: 街路におけるプロビーム道路照明の視認性評価に関する基礎的研究、交通工学論文集、2017年 3 巻 2 号 A_84-A_91.
- 2) 萩原 亨, 草竹 大輝, 浜岡 秀勝, 江湖 俊介, 轟 麻起子, 岡嶋 克典, 小林 正自: 市街地におけるプロビーム道路照明の配光に関する研究開発、交通工学論文集、2018年 4 巻 3 号 A_10-A_17.
- 3) 萩原 亨, 浜岡 秀勝, 江湖 俊介, 岡嶋 克典, 小林 正自: テストコースにおけるプロビーム道路照明の視認性に関する研究、交通工学論文集、2019 年 5 巻 2 号 p. A_134-A_141.
- 4) Hagiwara, T., Kusatake, D., Kouko, S., Todoroki, M., Hamaoka, H., Okajima, K., Kobayashi, S., Fundamental Visibility Assessment for Pro-beam Road Lighting, Transportation Research Board 97th Annual Meeting, 2018.1.
- 5) Hagiwara, T., Kouko, S., Hamaoka, H., Okajima, K., Kobayashi, S., Visibility Assessment of Pro-beam Road Lights at a Test Track, Transportation Research Board 98th Annual Meeting, 2019.1.

5. 今後の展望

本研究ではプロビーム配光を持った道路灯のプロトタイプを開発し、その性能をテスト走路上で検証し、有効性を明らかにした。この灯具を市街地の横断歩行者事故が多い区間あるいは夜間の乱横断が多い区間に設置し、鉛直面照度を高めた効果を検証する必要がある。

また、横断歩行者対策以外において期待される箇所として、交差点がある。交差点に進入する車両から見たときの鉛直面照度が高くなる。横断歩道およびその周辺における歩行者との事故の抑制に加え、追突事故などの車両間で発生する事故の抑制に貢献できる。ただし、本研究では交差点の形状にマッチした配光は検討されていない。交差点に合わせたプロビーム配光を持った道路灯具設計が今後必要となる。

6. 道路政策の質の向上への寄与

プロビーム道路灯を街路に設置することにより、夜間において昼間に近い視環境を提供できるようになる。このため、街路の夜間に多くなるドライバの右からの横断歩行者事故、追突事故、交差点における歩行者事故などの減少に貢献することを期待できる。また、道路空間全体が明るくなることから、街路周辺のネオンの影響を受け難くなり、安定した視環境を確保できる。自転車および歩行者が街路を安心して利用できるようになる。

7. ホームページ等

なし

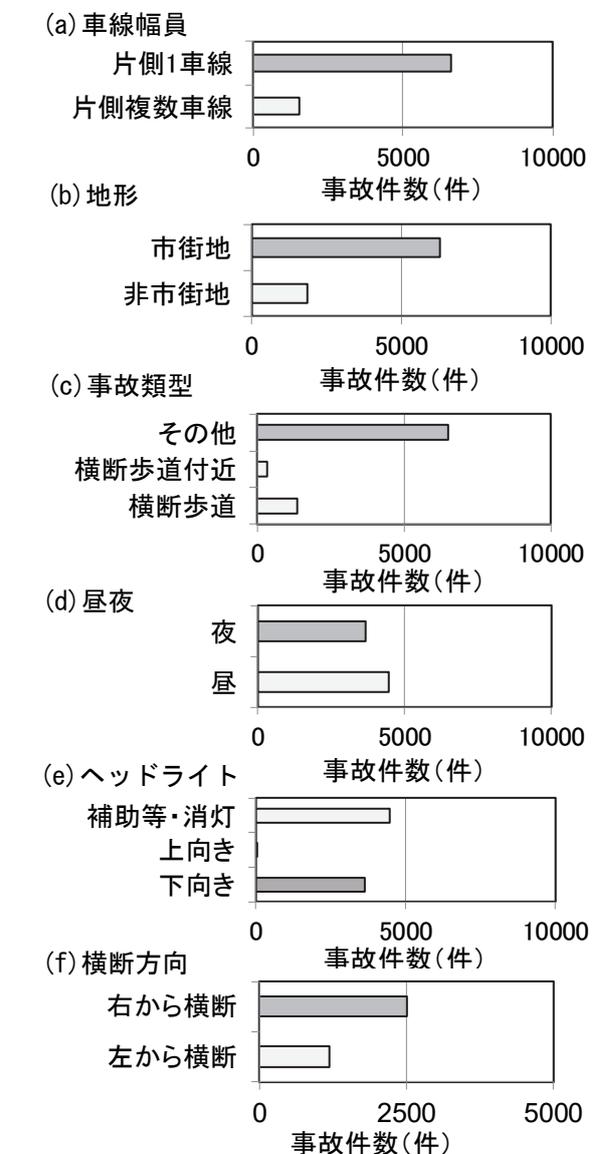
第1章 はじめに

1.1 夜間の横断歩行者事故の特徴（平成28年度研究）

本研究では、横断歩行者事故の特徴を深く知るために、事故データを平成28年度にイタルダから購入した。事故データの期間は、平成25年～平成27年の3年間で、歩行者横断中の事故を対象としている。歩行者横断中の事故にも様々な形態が考えられるため、ここでは、事故原票のなかで4項目（道路形状、信号機、中央分離帯施設等、当事者種別）を限定し、9項目（年次、第二当事者年齢、車道幅員、地形、路線、事故類型、昼夜、ヘッドライト点灯状況、危険認知速度）の組合せに関して、歩行者の進行方向（8水準）のデータ集計を依頼することにした。これらの内容で集計依頼した結果、合計8,152件の事故データからなる集計結果を得ることができた。これから、得られた集計結果について、その特徴を明らかにする。

(1) 単純集計

調査した3年間の歩行者事故減少率は、全国の交通事故減少率とほぼ同様であった。第二当事者の年齢から、高齢者と子供が歩行者事故になりやすいことがわかった。図1-1に示すように車道幅員から、往復二車線道路において、歩行者事故が多く発生していた。地形から、市街地にて歩行者事故が多く発生していた。道路延長を考慮した結果、一般国道、主要地方道において歩行者事故が多く発生していた。事故類型から、横断歩道以外の場所での横断による歩行者事故が明らかに多かった。ドライバからみると想定しない横断場所であり、その発見が遅れやすくなる。



(注) (f)は夜間の事故(3,689件)の集計

図1-1 交通事故件数

(2) 夜間の特徴

図1-1に示すように昼夜別から、歩行者事故の半数以上が昼間時の事故であった。しかし、横断する歩行者数は、明らかに昼間時の横断が多い。横断者数を基準とすると、薄暮時・夜間時での事故危険性が高くなる。ヘッドライトが下向きの際の歩行者事故が圧倒的に多かった(補助灯・消灯が多いのは、昼間の事故が入っているため)。ヘッドライトが下向きの際、ドライバの視認範囲は、40mほどとなる。

(3) 横断歩行者の進行方向

歩行者の横断方向に着目し歩行者事故を分析した。歩行者がドライバからみて左から横断したか(歩行者からみて横断の前半)、それとも右から横断したか(歩行者からみて横断の後半)の基準にて分類した。図1-1に示すように夜間の事故件数でみた結果、左から横断する場合は1,182件、右から横断する場合は2,507件であった。図示していないが、歩行者の年齢層が高くなるにつれ、右からの横断割合(横断後半の割合)が上昇した。高齢者は、一度横断を判断した後は、接近車両に対する確認行動をとらない状況が多くみられ、このような右からの横断による歩行者事故につながりやすいと考えられる。

(4) 夜間の視環境と横断歩行者事故の文献

公益社団法人・交通事故総合分析センターでも同様に横断歩行者の死亡事故発生状況の特徴について分析している。イタルダフォーメーションNo.83は、昼間では自動車から見て「右から左への横断」と「左から右への横断」の割合はほぼ同等であったのに対し、夜間は「右から左への横断」の割合が多くなり全体の約70%を占めていることを明らかにした1)。イタルダインプォメーションNo.94は、夜間における歩行者事故が運転者の発見の遅れであることを指摘した2)。イタルダインプォメーションNo.87は、高齢歩行者の夜間における道路横断方向に着目し、そのときの道路横断方向と歩行者事故の関係を分析した。高齢歩行者の死者238人を横断前半・後半別で分類したところ、高齢歩行者は横断の後半に、歩行者側から見て左側から走行して来た車に衝突されるケースが71.8%となることを示した3)。また、石川も夜間の横断歩行者死亡事故の70%がドライバから見て右からの横断者との事故であることを示した4)。ドライバが横断歩行者を見落としていること、衝

突時の減速が非常に小さいことなどを指摘している。

平成28年度に実施した筆者らの事故分析では夜間の視環境の条件が入っていない。そこで、鈴木ら5)は、2014年に東京都と茨城県で発生した53件の夜間歩行者死亡事故地点における明るさの傾向について分析した結果を参考とした。鈴木らは、市街地では周囲の道路照明や街路灯、店舗照明等により車道上も比較的明るい地点が多く、約7割の地点において水平面照度が2.1lx~46lxの範囲内であることを示した。また、約8割の事故発生地点において、前後35mの範囲内にて、水平面照度が10lxを越える照明が1箇所以上設置されていたこと、半数以上の地点では事故発生地点の前後35mの範囲内に連続的に設置されていたことを示した。

(5) 夜間における横断歩行者事故のまとめ

夜間の視環境を改善すべき道路条件・設置環境は、事故の発生から考えて、往復2車線の国道・地方道(主要幹線)で、規制速度が40h/kmあるいは50h/kmかつ横断歩行者が多い箇所となった。なお、それらの箇所は当然市街地であり、その視環境は、既存の照明がすでにあり道路周辺が広告や建物などから漏れ光で明るい状況となる。このような道路条件・設置環境で、横断歩道でないところをドライバから見て右から横断する横断者による事故を防ぐ必要があることが分かった。

1.2 既存の道路照明の課題(平成28年度研究)

一般に道路照明に使用されている道路灯の配光は、道路灯を中心に左右対称に明るさが分布している(以下、対称配光)6)。対称配光の道路灯(以下、対称照明)は、路面を明るくすることで路上の視対象を「影(暗)」として見せる(以下、シルエット視)。しかし、照明ポールと対象物の位置関係により視対象が「明」となる場合もある。この対称照明による道路上の視対象物の見えが一定とならない課題は、実際の道路での検証・テスト走路での実験・光学シミュレーションによる検証などにより指摘されている7,8,9)。

これに対し、ヘッドライトと光の方向が協調することに配慮した車両の進行方向を照射するプロビーム配光の道路灯が提案されている10)。プロビーム配光の道路灯(以下、プロビーム照明)は、路上の対象物を「明」として見せ

る（以下、逆シルエット視）。また、照明ポールと視対象との位置関係に左右され難く視対象の見えが「明」のみで一定となる10）。これらのことから、夜間における道路上の横断者の発見が早まり、横断歩行者事故の軽減に資すると考えられる。

近年は、道路縦断方向に対して非対称の配光性能（カウンタービーム照明／プロビーム照明）を有する照明器具が、一部のトンネルで採用されている（図1-2）。プロビーム照明は、先行車の背面輝度を増加させ、視認性を改善することから、先行車が常に存在するような、交通量の多いトンネルに適した照明方式とされている。しかし、トンネルにおけるプロビーム照明は、灯具の設置間隔が狭く対面交通の市街地に適した照明要件を満たしてはいない。

市街地におけるプロビーム照明はグレアによる対向車線のドライバの視認性低下が懸念される。プロビーム照明のメリットを活かしデメリットを低減する照明器具の配光の探求とそれを実現する灯具の開発が重要となる。草竹らは、既存の灯具を組み合わせた簡易プロビーム照明を製作し、プロビーム照明による道路上の対象物の視認性を評価する実験を行い、道路上の視対象が安定して見えることを実証した11）。しかしながら、視認性評価時の路面が若干の湿潤であったこと、またプロビーム照明が片側配置でありグレアの影響を評価できなかったことなどから、プロビーム照明に関する知見が十分に得られているとはいえない。



プロビーム照明点灯時



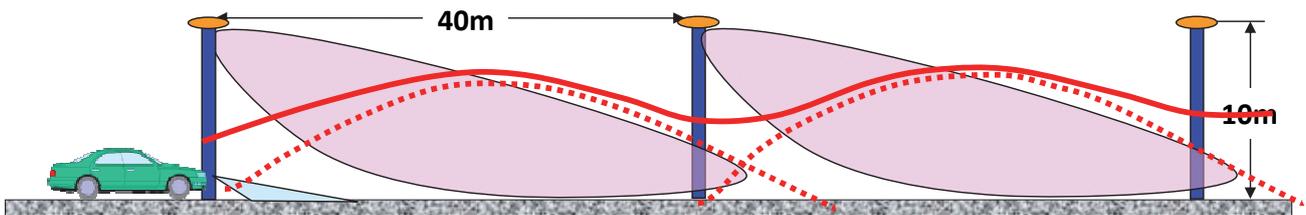
プロビーム照明消灯時

図1-2 トンネルにおけるプロビーム照明

1.3 プロビーム配光を持った道路照明の開発

事故分析から車両がヘッドライトをハイビームにして走行できない市街地で、走行車線と対向車線を含めた道路空間全体を明るくして道路上の視対象をその背景より明るく見せる視環境の提供が横断歩行者の視認性を高め事故軽減に寄与すると言える。視対象を背景より明るく見せることは、ヘッドライトの見え方と協調するメリットもある。プロビーム道路灯はこのような視環境を実現する方法の一つであり、車両の進行方向に光を発する道路照明である。プロビーム道路灯は、図1-3のように車両の進行方向に向かう光を発する。ヘッドライトと同様に視対象を背景よりも明るくすることでドライバは道路上の視対象を視認する。

(A) プロビーム照明の鉛直面照度分布（赤の実線）



(b) 対称照明の鉛直面照度分布（赤の実線）

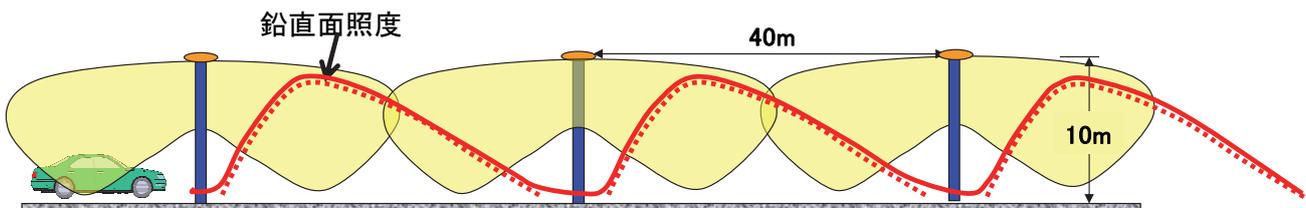
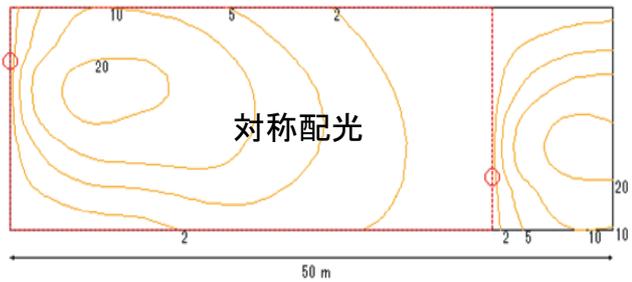


図 1-3 プロビーム照明と対称照明の鉛直面照度の変化

鉛直面照度分布



鉛直面照度分布

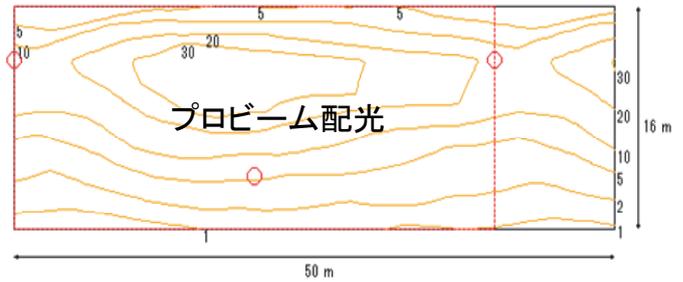


図 1-4 対称配光とプロビーム配光の鉛直面照度分布 (シミュレーション、高さ : 0.8m)



図 1-5 対称配光とプロビーム配光のときの道路上の歩行者の見え方 (シミュレーション)

著者らは、プロビーム配光の道路灯を提案し、その鉛直面照度分布 (高さ0.8m) を求めた¹¹⁾。このプロビーム配光の道路灯において鉛直面照度分布は、道路のどの断面であってもほぼ同じレベルであり、自転車線のみならず対向車線側の鉛直面照度も高くなった。しかし、プロビーム配光の道路灯には、対向車線の車両や歩道の歩行者がまぶしさを感じるデメリットが懸念される。このため、対向車のドライバーや歩行者がまぶしさを感じないように、配光を細かく制御する具体的な灯具を開発する必要がある。

プロビーム照明は、図1-3のように自動車の進行方向に向かう光を発することから、前方の視対象の視認性を高める効果を持っている。市街地の往復2車線道路で、横断歩行者の視認性改善となるかについて対称照明と比較し検討した結果を図1-3、図1-4、図1-5に示す。図1-3(A)は、プロビーム照明 (理想配光) の光の方向とそれによる進行方向の鉛直面照度の分布となっている。鉛直面照度の分布は、道路のどの断面であってもほぼ同じレベルとなっている。

一方、図1-3(B)は、対称照明の配光と鉛直面照度分布を示す。対称照明は、照明柱の上にある灯具から左右に光を発し、路面の水平面照度を高くかつ均一とし、路面上の対象物の視認性を高めるものとなっている。しかし、図1-3(B)、

図1-4から分かるように、鉛直面照度は不均一であり、照明ポール付近は低くなる。図1-5の前方歩行者のシミュレーション映像で、歩行者が明るくなったり暗くなったりしている。

そこで、筆者らは、プロビーム照明の配光をベースに道路照明基準を満たすプロビーム配光を持つ道路灯の実現を目指した。本報告では、3年間の技術研究開発の成果を報告する。

参考文献

- 1)自動車と歩行者の事故 “危ない！ 右から歩行者が横断！”，イタルダ・インフォメーション No.83, 2010.5.
- 2) 歩行者死亡事故は 自動車直進中に多く発生特集～運転者の早期危険認知が死亡事故を防ぐ～、イタルダ・インフォメーション No.94, 2012.4.
- 3) 夜間の高齢者死亡事故、イタルダ・インフォメーション No.87, 2011.2.
- 4) 石川敏弘、歩行者事故の特徴分析、第13回 交通事故・調査分析研究発表会、公益社団法人交通事故総合分析センター、平成22年。
- 5) 鈴木崇、若杉貴志、加藤昌彦、藤田浩一：夜間歩行者事故発生地点における明るさの傾向、自動車技術会論文集、Vol.48, No.4, pp.897-902, 2017.
- 6) 道路照明施設設置基準・同解説 (平成19年改訂版)、日本道路協会, 2007.10.
- 7) Bacelar, A.: The contribution of vehicle lights in urban and peripheral urban environments, Lighting research technology, Vol.36, No.1, pp.69-78 (2003).
- 8) Erias, A. et al.: The contribution of vehicle headlights to

visibility of targets in road lighting environments, International Reviews of Electrical Engineering, Vol.3, No.1, (2008).

- 9) Peter R. Boyce: Lighting for Driving, Roads, Vehicles, Signs, and Signals, CRC Press (2008).
- 10) Hagiwara, T., et al.: Visibility assessment of pro-beam road lighting on the road, ITS-2183, ITS WORLD CONGRESS (2015).
- 11) 草竹ら: 街路におけるプロビーム道路照明の視認性評価に関する基礎的研究、交通工学論文集、 Vol. 3 (2017) No. 2 p. A_84-A_91.

第2章 道路照明とその関連技術の最新技術開発動向に関する調査

2.1 はじめに

プロビーム照明の研究開発において、道路照明とその関連技術の最新技術開発動向を調査・収集し、当該開発に取り込むことが有益となる。同時にその背景となる夜間道路交通環境についても十分に調査・収集し、理解しておくことも重要である。そこで、米国交通輸送調査委員会（Transportation Research Board；以下TRBと略す）の2017年、2018年、2019年の年次学術講演会に参加し、上記調査を実施した。TRBの年次学術講演会（Annual Meeting）は全米の連邦、地方の政府機関の代表をはじめ全世界から1万人以上の技術者・研究者が集まる。そして約3,000の研究発表、常設委員会および多数の小委員会の会議が実施されるなど、道路・交通専門家の情報交換の場としては世界最大規模である。

2.2 第96回 TRB 年次学術講演会（2017年）

①米国における歩行者死亡事故件数は夜間が72%と高い。

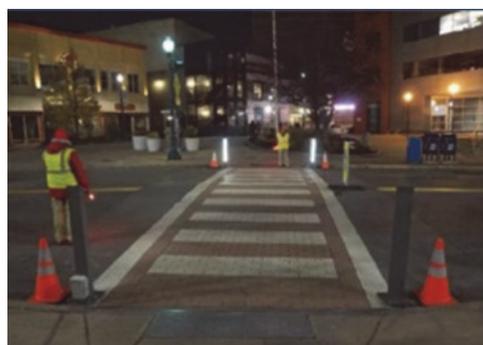
②夜間歩行者事故対策として人間工学面からの事故発生状況と事故原因調査の必要性が報告され、NCHRP報告書600が紹介された。

「NCHRP報告書600：道路システムのHuman Factors Guideline」は道路設計者や交通技術者が新しい道路の設計や既存の道路の改善に使用するために開発した一連の設計ガイドラインであり、夜間の視認性や歩行者の安全性に関連する複数のガイドラインを含んでいることが紹介された。プロビーム研究の安全性評価チェックガイドとして利用を検討したい。

(a) 照明例



(b) 横断歩道両岸への照明支柱設置例



(c) Roundaboutへの試験設置例



図2-1 Midblock横断歩道への新型照明装置の試験設置例

③道路照明に関して、以下が報告された。

- ・ポールマウント式照明器具を使用する従来の道路照明アプローチは、横断歩道を使用しているときに歩行者を見えるようにするのに最適ではない。

- ・対策としてBollard-level crosswalk lighting（ボラードレベルの横断歩道照明）が歩行者の視認性を向上させ、横断歩道歩行の安全性を向上させる新型道路照明装置として紹介された。

④Visibility Committeeでは現在道路照明およびヘッドライト照明下で実施されている照度および輝度ベースの視認性評価方法による視認性評価値と現場における目視評価値との間には差異が存在すると指摘され、RVP（Relative Visual Performance）モデルの活用が議論されていた。

⑤車載カメラで走行車線および路上物体を検知する技術、これをマシンビジョンという。このマシンビジョン等をベースにした衝突事故防止装置や各種運転支援装置が実用化されている。そして自動走行システムも一部実用化が始まっている。道路照明を含む各種道路施設と標示を改善し、前述のマシンビジョンによる走行レーンの検出と走路形状の検出、そして路上物体の存否とその位置の検出精度が向上すれば、より安全で信頼性の高い自動運転技術の実用化に貢献できると共に、人の目にも見やすい交通視環境の実現に貢献できる。これについて、"Enhancing the Roadway Physical Infrastructure for Advanced Vehicle Technologies: Case Study in Pavement Markings for Machine Vision and Road Map Toward Better Understanding"のセッションにて議論された。

⑥その他、路面照度と安全性、霧発生時等の低視界環境下での視認性が追従走行に与える影響、道路工事作業区間の作業用照明灯などがグレアと運転行動に与える影響と対策案などが報告された。

2.3 第97回 TRB 年次学術講演会（2018年）

歩行者行動と交通事故分析に関する多くの研究発表があった。歩行者事故発生個所について、ミッドブロックの横断歩道に関する研究が多く、そこへのドライバーの運転行動に関する研究も多くみられた。道路構造は日本と異なり、郊外の多車線での事故が多く着目されていたが、視環境が悪化すると歩行者事故が多くなる点は類似していた。以下に個々の研究の概要を記す。

- ・主に、ミッドブロック横断歩道における歩行者衝突回避のために運転者の回避パターンの調査と、運転シミュレータを用いた歩行者衝突予測モデルを開発した。実験結果に基づいて、横断歩行者回避時のドライバーの減速率と横断歩道までの距離をまとめ、車両の歩行者衝突時のドライバーの回避パターンを明らかにした。

- ・非信号ミッドブロック横断歩道での、近接車両の車間時間による歩行者の横断速度と、歩行者のUターンや通路変更などの行動特性を調査した。信号無しミッドブロック横断歩道8ヶ所にてビデオ調査を2～3時間実施した。AVSビデオエディタソフトウェアを使用してデータを収集した。その結果、信号無し横断歩道の位置における横断速度の変化は車両のタイムラグ、歩行者の性別、年齢、道路中央待所の存在によって有意に影響されることが明らかになった。

- ・歩行者需要モデル（MoPED）を適用した歩行者衝突危険度を測定する方法を記述する。MoPEDモデルのアウトプットは、歩行者解析ゾーン（PAZ）レベル（400m×400m）における歩行者リスク尺度である。歩行者リスク尺度結果を使用して、歩行者の安全を推定し、対策必要ゾーンまたは施設を特定することができるようになった。

- ・主に大都市圏外の州道に焦点を当て、歩行者や自転車に関わる重大事故の危険要因を特定することを目的とした。歩行者のモデルでは、年齢、車種、移動、光条件、道路分類、交通制御装置、掲示された速度制限、晴天時の歩行者および濡れた路面の位置は統計的に有意であった。自転車衝突では夜間において年齢、衝突場所、車両運動およびアルコール中毒が統計的に有意であることを示した。

- ・歩行者死亡事故のプロファイルを分析した。死亡事故は、視環境がプアなとき、低照度条件下の早春または晩秋に発生する可能性が最も高く、湿潤道路や凍結道路条件下で多く発生していた。

- ・交通信号機設置個所と比較して、非設置個所を横断する歩行者はより危険な状況に直面する。本研究では、非信号制御、stop/yield信号制御、および信号制御箇所における歩行者事故の重傷度に対する様々な寄与因子を調査比較した。

- ・ミンガン州では、都市や郊外の多車線道路およびミッドブロック横断歩道にて歩行者優先を実施するドライバー割合は対策によって15%から70%に増加したことが確認された。各場所

で収集された速度データは、歩行者が横断歩道にいない時の走行速度に対して、存在している時には平均で4~5マイルの減少を示した。横断歩道の前方5,10,20,30および50ftに表示を配置すると同様に効果的で、運転手は横断歩道よりかはるか先で歩行者優先するようになった。

・多車線道路では、車両の歩行者優先開始位置距離を長くすると、重大多重衝突事故を引き起こす視界不良問題を緩和し、歩行者の死亡事故の可能性を低減することができた。

2.4 第98回TRB年次学術講演会(2019年)

2019年第98回TRB(Transportation Research Board: 米国交通輸送調査委員会)年次総会に参加し、最新の道路照明とその関連技術に関する研究開発動向調査を実施した。調査課題・課題は下記の4項であった。

①道路照明を中心に夜間の視認性や最新の研究開発動向の調査

②交通信号機に関する最新の研究動向の調査

③区画線など路面標示と道路標識に関する最新の研究動向の調査

④交通事故に関わる道路利用者(歩行者、運転者、自転車)行動に関する調査

(1) 道路照明を中心に夜間の視認性や最新の研究開発動向の調査結果

・都市道路区間に沿った街路照明の均一性に関するMatched Case-Control安全性研究

夜間道路での事故発生に対する街路照明均一性の影響は、既往研究では十分には理解されていない。本研究では、夜間衝突リスクと街路照明の均一性との関係を調べた。フロリダの道路区間300+センターマイルの照度データを2012年から2014年に掛けて収集し、4年間の夜間事故と照合させた。統計モデルにより、照度標準偏差が大きくなると、衝突修正係数(CMF; crash modification factor)が高くなった。

・交差点の照明デザインが運転者の視認性とグレアに与える影響

交差点照明デザインレベルでのアプローチでは、交差点内を照明すると夜間運転者の視性能を向上することが示されている。若年運転者(18~35歳)と高齢運転者(65歳以上)の計24人が参加した実験を行った結果、交差点内を照らす照明デザインは、視対象視認性と交差点視認性を最高レベルとなり、グレアは最低レベルと評価された。交差点内照明は、視認性を増加

させ、眩しさを低減させる効果があった。

(2) 交通信号機に関する最新の研究動向の調査結果

将来のCAV(Connected Automated Vehicle)車両環境下における事故防止、交通流改善、そしてエコ運転に対応したスマート信号制御システムに関する研究が発表されていた。今後、交通信号機はCAV車両と路車間通信により繋がり、上記スマート信号制御以外にも道路利用者に交通の安全と利便性向上機能が付与されて行くことが推測される。

(3) 区画線など路面標示と道路標識に関する最新の研究動向の調査結果

自動運転AV(Automated Vehicle)車両の実用化が進む中で、夜間、道路上の区画線や路面標示、そして道路標識認識性能の向上が求められている。この要望に対応するために、区画線の再帰反射性能の向上が求められており、その改質と性能確認が進められていた。以下の1件が具体的な論文の概要である。

・車線逸脱警報(LDW; lane-departure warning)や車線維持支援(LKA; lane-keeping assistance)などに関する最も一般的な要求は、路面標示を常に良好状態に維持することである。路面標示品質とMV検出性能との関係性を評価する現在進行中調査の結果が示された。MV検出で高信頼度を維持するためには、路面と進行方向路面標示の輝度対比を適切レベルとする必要があり、路面標示のMV検出の信頼性は、グレア光源(太陽/対向車)および水により悪影響を受けることが明らかとなった。

また、交通標識を自発光式とし、その光源に発光ダイオードLEDを採用しようとする動きが見られた。さらに、交通標識をAV車両の前方監視センサであるLiDARで認識しようとする試みも見られた。

(4) 交通事故に関わる道路利用者(歩行者、運転者、自転車)行動に関する調査結果

ドライバ行動に関しては、歩行者と運転者のコミュニケーションを認識するアルゴリズムの研究が見られた。以下が具体的な研究の概要となる。

・車両と歩行者との間の相互作用を記述するためにビデオをコード化した。本コーディングでは、ドライバが歩行者と意思疎通するために、横断歩道の前での短時間の停止行動に着目し

た。それを車両が加速し始めてから横断歩道に到着するまでの時間から評価した。そのような調査結果から、車両の運動学および空間的な合図が、他の道路利用者に運転者の意図を知らせる手段となることを明らかにした。

また、歩行者行動に関しては、危険な交差点における歩行者存在リスクの測定、横断歩道における歩行者衝突予測などの研究が多く見られた。その中で、日本から、事故を減らす新しい対策が発表された。

・日本では、歩行者死亡事故のほぼ70%が夜間に発生するため、夜間における車両と歩行者間の事故削減は非常に重要である。これらの深刻な事故を減らす1つの方法は、運転者に注意を促すために夜間の路面標示の視認性を改善することである。近年、歩行者存在時に非制御横断歩道を明るく強調する横断歩道警報システムCAS (Crosswalk Alert Systems) が実用化されている。本稿では、非制御横断歩道で歩行者横断待機時に路面にピクトグラムや文字を投影する路面投影システムRSP (road surface projection system) によるCASの有効性を検証することを目的とした。その結果、横方向に並列のパターン文字と、瞬時に分かりやすい絵文字の視認性が高く、前方への注意力が強いことが分かった。

2.5 まとめ

2017年から2019年の3年間TRB年次総会に参加し、道路照明、信号・標識、路面標示などの道路付属施設に関する最新の研究開発動向の調査を実施してきた。また、当該プロビームの技術開発内容について研究発表を実施してきた。

道路照明については2017年の年次総会においてMidblock横断歩道照明が紹介された。この照明方式は、歩道側に低位置で設置した照明装置で、横断歩道上の横断歩行者を暗い背景の中から明るく浮かび上がらせる照明方式である。この方式は歩行者の視認性を向上させる一つの有効な照明方式と言える。また、3年間に渡り夜間のミッドブロック横断歩道での事故軽減の論文が多数みられ、米国において夜間の横断歩行者事故を軽減する努力が継続してなされていることが明らかとなった。さらに、2019年の発表論文では、不均一な照明区間での事故率が高くなることが指摘された。一方、自動運転AV (Automated Vehicle) 車両の実用化が進む

中で、夜間、走路上の区画線や路面標示、そして道路標識認識性能の向上が求められている。

本研究で開発しているプロビーム照明は、ヘッドライトと同じく進行方向のみにビームを照射し、歩行者を明るく浮かび上がらせ、同時に、区画線や路面標示、そして道路標識を直接照明する方式である。また、照明区間の鉛直面照度はほぼ均一である。プロビーム照明は、横断歩行者の視認性を高めることから事故軽減に寄与できることが期待でき、加えて、AV車両の実用化が進む中でそのマシビジョンでの区画線や道路標識の認識性能を高める方式であり、今後、更に注目を集めると思われる。

第3章 プロビーム配光を持った道路灯の試作と視認性評価

3.1 はじめに

市街地におけるプロビーム配光を持った灯具はこれまでになく、前述のようなメリットを活かせるよう、またデメリットを最小限にするような灯具を一から開発する必要がある。そこで、本委託研究ではプロビーム照明として開発すべき配光設計の要件を明らかにするため平成28年度に光学シミュレーションと主観評価実験を行った。

①既存の灯具を組み合わせによりこの理想配光に近い灯具を設計する。このとき、光学シミュレーションを繰り返し行い、理想配光に近い灯具となるよう工夫する。

②①で作成した灯具を用いて、テストコースで主観評価実験を行う。路面輝度・鉛直面照度・まぶしさ評価を行い、光学シミュレーションの結果を検証する。

③これらの結果を踏まえ、プロビーム照明として開発すべき灯具設計の条件を整理し、視認性向上効果を分析する。

本研究は、道路上の視対象に関して広範囲において安定した視認性をドライバに提供でき、かつグレアを抑えるプロビーム照明の配光を探ることを目的とする。具体的には、萩原らが示した理想プロビーム配光に近いプロビーム配光の専用道路灯を試作し1)、視対象に関する実験参加者による視認性評価（静的条件）と光学計測をテスト走路で実施する。また、テスト走路における実験結果と光学シミュレーションを用い、プロビーム照明として望ましい照明の配光を探る。

3.2. 研究手法

(1) テスト走路と実験参加者

(株)つくばイワサキのテストコースに、試作したプロビーム配光の道路灯と一般的な道路灯（対称照明）を設置し、視認性評価と光学測定を行った。対称照明の配光は左右対称であり、車線全体の水平面照度を高くかつ均一になるように工夫されている。試作プロビーム照明の配光は自車線前方に向けたものとなり、鉛直面照度を高くし道路上の対象物の視認性を高めることを目指している。

テストコースの照明区間長は100m弱である。横断面は、車道2車線（片側1車線）と歩道から構成され、車道と歩道の各幅員はともに3.5m、その間に設けた路肩は0.5mとした。図3-1に示すように実験用灯具を照明柱P1～P6に3灯ずつの向合せ配列で設置した（図3-2）。なお、テスト走路にある既存支柱を用いたため、灯具間隔は30mと35m（配光は32mで設計）となった。

視認性評価実験には、両眼視力0.7以上を有する（矯正視力可）16名（宇都宮大学の大学生と大学院生、平均年齢：22.2歳、標準偏差：0.83歳）が参加した。なお、視認性評価開始前に、

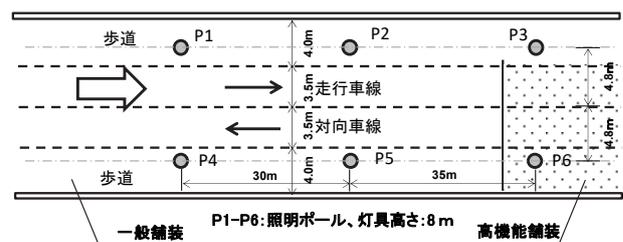


図3-1 テストコースにおける灯具などの配置

実験参加者に対して実験実施者から口頭および書面にて実験の役割・危険性・緊急時の対応・参加者の権利・プライバシー保護などについて説明した。説明終了後、実験参加者の全員が同意書に署名した。また、北海道大学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、実験内容・安全性・倫理などについて実験実施前に承認を受けた。

(2) 試作プロビーム配光と対称照明の道路灯

萩原らは、光学シミュレーションを用いて対面2車線道路（幅員3.5m）、灯高8m、灯具間隔32m（灯高の4倍）を想定し、対向車のドライバーに与えるグレアを小さくしかつドライバーが歩行者などの路上の対象物を発見しやすくするプロビーム照明の配光を提案している¹⁾。本研究では、試作プロビーム照明の灯具は、広角配光のLEDランプ2個、中角配光のLEDランプ3個、中角配光のLEDランプ+ハニカムルーバー3個から構成され、ランプ個々に鉛直方向と水平方向の取付角度を最適化して、萩原らの理想配光に近似させた（図3-3）。試作プロビーム照明と対称照明の光学特性に関する数値を表3-1に示す（道路照明施設設置基準・同解説にある道路照明の設置基準を満足(平成19年) 2)）。図3-4は光学シミュレーションによる試作プロビーム照明と対称照明の鉛直面照度分布（高さ：0.8m）の分布を示している。

(3) 光学測定（ヘッドライト消灯）

試作プロビーム照明による道路区間の光学特性を明らかにすることを目的に、図3-1のP2～P3区間における路面の水平面照度・鉛直面照度を計測した。また、実験参加者が視認性を評価する場所と同じ位置で、視対象（ダミー人形）の輝度と鉛直面照度（高さ0.8m）を計測した。

図3-1のP2～P3区間における試作プロビーム照明と対称照明における水平面照度（データ数：40）と高さ0.8mの鉛直面照度（データ数：32）を計測した。試作プロビーム照明のP2～P3区間における平均水平面照度は18.6 lxとなり、対称照明の28.6 lxに比べ低くなった。また、平均鉛直面照度は19.1 lxとなり、対称照明の13.9 lxより高くなった。図3-5(A)は、試作プロビーム照明下の縦断方向5m間隔、横断方向1.75m間隔の計40点における計測と光学シミュレーションによる水平面照度を示している。同様に図3-5(B)は、縦断方向5m間隔、横断方向1.75m間隔の計32点における計測と光学シミュレーションによる鉛直面照度（高さ：0.8m）を示している。試作プロビーム照明下の水平面照度および鉛直面照度の計測値と光学シミュレーションによる予測値の決定係数はどちらも0.95以上であった（図-6）。



図3-2 テストコースの全景

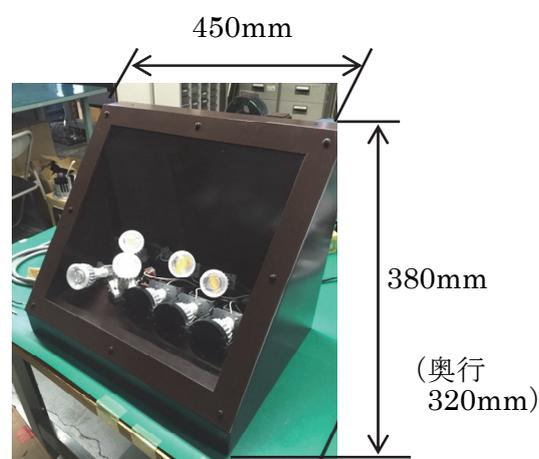
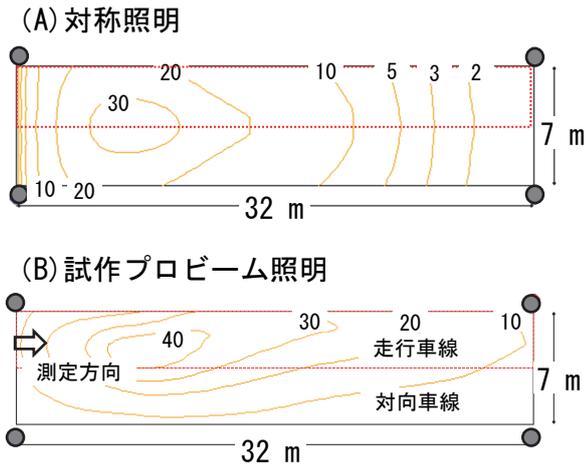


図3-3 試作プロビーム照明の灯具のサイズ

表3-1 対称照明と試作プロビーム照明の光学特性

	対称照明	試作プロビーム照明
輝度		
平均値輝度 [cd/m ²]	1.83	2.41
総合均斉度	0.74	0.30
車線軸均斉度	0.66	0.71
TI値 [%]	7.60	8.10
鉛直面照度		
平均照度 [lx]	12.90	24.50
最大照度 [lx]	35.50	46.80
最小照度 [lx]	0.84	7.00
均斉度 (min/ave)	0.06	0.29

ンによる鉛直面照度（高さ：0.8m）を示している。試作プロビーム照明下の水平面照度および鉛直面照度の計測値と光学シミュレーションによる予測値の決定係数はどちらも0.95以上であった（図-6）。



注：図中の数字：lx, ●：照明ポール：灯高8m
図3-4 光学シミュレーションによる鉛直面照度分布

(A) 水平面照度 (lx)

●								●	路肩
14.4	16.9	15.4	15.4	12.0	11.6	10.6	14.6		
15.4	16.9	14.9	15.0	13.0	11.7	11.6	13.4		
○								○	走行車線
31.2	32.7	29.1	20.5	16.2	19.3	19.4	30.5		
32.9	34.0	28.2	19.3	16.9	20.8	21.4	30.3		
○								○	車道中央
36.6	32.1	29.7	18.4	18.8	29.8	29.8	34.7		
40.7	33.9	30.4	19.1	18.9	29.7	32.6	38.3		
○								○	対向車線
28.9	23.0	22.0	17.2	19.5	26.4	34.1	26.5		
31.9	22.3	21.2	17.0	19.1	27.4	32.4	29.7		
○								○	路肩
14.7	12.8	12.9	13.0	15.7	17.1	18.7	12.2		
14.3	12.2	12.0	13.1	14.8	14.2	15.4	12.5		
○								○	歩道
4.0	5.0	6.1	7.7	7.4	4.8	4.4	1.2		
5.3	4.9	5.4	6.2	6.1	4.3	3.9	4.2		
	5m								

(B) 区間の鉛直面照度 (lx)

●	P2							P3	路肩
11.4	18.6	29.6	32.1	28.7	21.1	13.2	9.31		
10.1	18.3	27.9	31.4	27.3	18.3	10.9	6.60		
○								○	走行車線
13.6	34.7	45.5	33.5	26.6	19.7	13.1	11.9		
10.9	34.4	43.3	33.8	26.6	19.3	11.8	7.01		
○								○	車道中央
12.2	28.6	38.2	23.9	17.3	13.8	10.5	11.5		
8.28	28.6	37.0	24.6	17.7	13.7	9.17	6.13		
○								○	対向車線
8.45	17.3	19.8	13.6	9.90	8.20	7.24	9.00		
5.54	15.4	19.1	14.2	10.1	8.06	6.40	4.84		
●	P5							P6	
	5m								

図3-5 P2-P3区間の鉛直面照度 (lx) の光学計測値 (黒字) と光学シミュレーションによる予測値 (灰色字) の比較

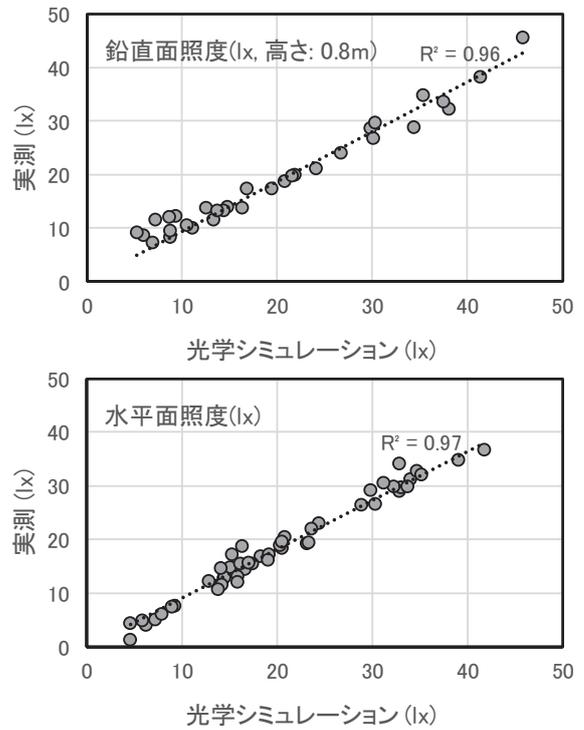


図3-6 光学シミュレーションと実測による水平面照度と鉛直面照度の関係

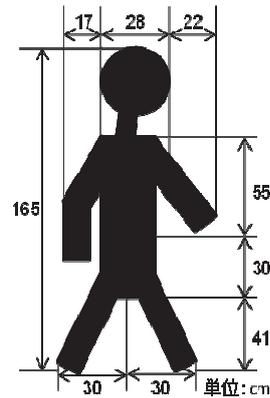


図3-7 ダミー人形のサイズ

(4) 視対象 (ダミー人形)

視対象 (以下、ダミー人形 (図3-7)) は、プラスチック段ボールを歩行者が横断しているときのポーズを模した人型 (横向き) に切り抜き、鏡面反射率の低い灰色 ($\rho \approx 23\%$) のラシヤ紙を貼ったものとした。

ダミー人形の設置位置は、VA地点とVB地点の各々において12か所 (前方視距：4条件、横断方向のダミー人形位置：3条件) とした (図3-8)。前方視距は、ヘッドライト (ロービーム) の照射範囲内である車両から30m地点、照射範囲境界付近の40m地点、照射範囲外の50mおよび60m地点の4か所とした。各々の前方視距において、道路横断面方向に3カ所にダミー人形を設置した。横断者の経路を網羅できるように、路側帯 (左)・車道中央・対向車線中央とした。

(5) 視認性評価とグレア評価

本研究で実験参加者は、試作プロビーム照明によって照明された視環境と対称照明によって照明された視環境の各々において道路上の視対象の視認性とグレアを評価した。実験参加者とその視対象とした歩行者を模した人形は静止状態とした。実験参加者は、ヘッドライト（ロービーム）を点灯した車両内から視対象となる人形を見て、視対象を視認できた場合のみ図3-9に示す視認性評価スケールに○をした。一方、実験参加者は、静止した車両内から図3-10に示すスケールを用いてグレアを評価した。グレア評価時には実験参加者が灯具を直視しないよう60m前方に置かれた人形（視対象）の足元に視線を固定するよう指示した。これは車両内から見て、概ね1度の俯角となる。

(6) 実験手順

実験参加者は、集合後に実験実施側から視認性評価とグレア評価の内容について説明を受けた。このとき卓上で視認性評価の方法、グレア評価の方法について詳しく説明を受けた。説明後、前述したように同意書に署名し体験走行に参加した。署名後、各グループの最初の2名がVA地点で、ロービームが点灯している車両（運転席と助手席）に乗り、30～60m前方に提示される視対象12条件の視認性を評価した。各視対象を視認する時間は約3秒とした。なお、観測時間のコントロールは、視対象方向の視界を遮蔽している暗幕を開閉することで行った。視認性評価時において、12か所の設置個所に人形をランダムに提示した。2名に実験参加者別にカウンターバランスを考慮し、人形の提示順を定めた。視認性評価終了後、グレア評価実験を行った。その後、実験車両をVB地点に移動し、同様のプロセスを繰り返した。試作プロビーム照明条件と対称照明条件で2日間（夜間）にわたって実施した。

3.3. 結果

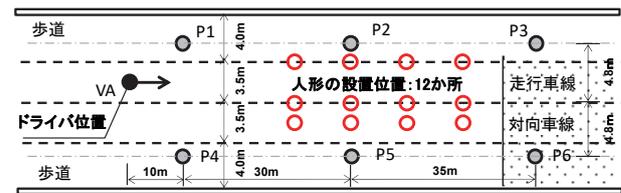
(1) 視認性評価の結果

①VA地点の視認性評価結果

表3-2(A)は、VAからの30mから60mの前方視距別・横断位置別の視認性評価値の平均値と標準偏差を示している（データ数：32）。30mから60mまでの前方視距別の結果を以下にまとめる。

・30mでは、両照明とも視認性評価値はほぼ4.0

(A) VA地点：12か所のダミー人形の設置位置



(B) VB地点：12か所のダミー人形の設置位置

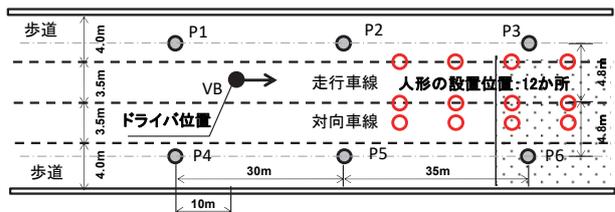


図3-8 車両位置とダミー人形の設置位置

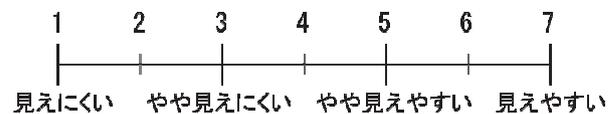


図3-9 視認性評価のスケール



図3-10 グレア評価のスケール

より高かった。対向車線中央 (t-value:4.24, df:15, $p<0.05$) において対称照明の視認性評価値は試作プロビーム照明のそれに比べ有意に高かった。

・40mでは、両照明とも視認性評価値は4.0以下であった。車道中央 (t-value:-3.00, df:15, $p<0.05$) において試作プロビーム照明の視認性評価値は対称照明のそれに比べ有意に高かった。

・50mでは、両照明とも視認性評価値は4.0以上であった。車道中央 (t-value:2.18, df:15, $p<0.05$) と対向車線中央 (t-value:5.74, df:15, $p<0.05$) において対称照明の視認性評価値は試作プロビーム照明のそれに比べ有意に高かった。

・60mでは、路側帯（左）と車道中央において試作プロビーム照明での視認性評価値は4.0以上であった。路側帯（左） (t-value:-4.41, df:15, $p<0.05$) において試作プロビーム照明での視認性評価値は対称照明より有意に高かった。

対称照明は、前方視距によって視認性評価値が高い場合と低い場合があった。前方視距30mと

50mで高く、40m (P2付近) と60mで低かった。試作プロビーム照明も同様の傾向が見られたが、前方視距による視認性評価の変化は対称照明より小さく、安定していた。ただし、対向車線中央における視認性評価値が対称照明より低くなる場合が多かった。

②VB地点の視認性評価結果

表3-2(B)は、VB地点からの前方視距別・横断位置別の視認性評価の平均値と標準偏差を示している(データ数: 32)。30mから60mまでの結果を以下にまとめる。

・30mでは、両照明とも視認性評価値は4.0以上であった。対向車線中央(t-value:4.03, df:15, $p<0.05$)において対称照明の視認性評価値は試作プロビーム照明のそれに比べ有意に高かった。

・40mでは、路側帯(左)と車道中央において試作プロビーム照明の視認性評価値は4.0以上であった。路側帯(左)(t-value:-6.67, df:15, $p<0.05$)における試作プロビーム照明の視認性評価値は対称照明のそれに比べ有意に高かった。

・50mでは、両照明とも視認性評価値は4.0以下であった。3地点の横断方向において(路側帯(左) t-value:-3.89, df:15, $p<0.05$, 車道中央 t-value:-6.83, df:15, $p<0.05$, 対向車線中央 t-value:-6.10, df:15, $p<0.05$)、試作プロビーム照明の視認性評価値は対称照明のそれに比べ有意に高かった。

・60mでは、試作プロビーム照明の対向車線中央を除いて、視認性評価値は4.0以上であった。3地点の横断方向において(路側帯(左) t-value: 2.57, df:15, $p<0.05$, 車道中央 t-value: 2.82, df:15, $p<0.05$, 対向車線中央 t-value: 6.85, df:15, $p<0.05$)、対称照明の視認性評価値は試作プロビーム照明のそれに比べ有意に高かった。

VA地点からの評価と同様に、対称照明は前方視距により視認性評価値が高い場合と低い場合が存在した。特に、前方視距30mと60mの対称照明における視認性評価値は高いが、40m(P3付近)と50m(P3付近)の視認性評価値は低く、照明ポールと歩行者位置との関係が視認性に大きく影響した。試作プロビーム照明も同様の傾向が見られたが、前方視距による視認性評価値の変化は対称照明より小さく、安定していた。一方、対向車線中央における視認性評価値は対称照明より低くなる場合が多かった。

表3-2 照明別・車両地点別の人形の視認性評価平均値と標準偏差

(A) VA地点							
試作プロビーム照明							
平均値(N: 16)				標準偏差			
前方視距(m)	路側帯(左)	車道中央	対向車線中央	距離(m)	路側帯(左)	車道中央	対向車線中央
30	6.44	5.25	3.88	30	0.79	1.25	1.22
40	4.19	4.06	2.13	40	1.18	1.09	0.86
50	6.13	5.94	4.19	50	1.17	1.03	1.42
60	6.00	4.50	2.63	60	0.94	1.12	1.11
対称照明							
平均値(N: 16)				標準偏差			
前方視距(m)	路側帯(左)	車道中央	対向車線中央	距離(m)	路側帯(左)	車道中央	対向車線中央
30	5.75	5.38	5.38	30	1.15	1.11	1.36
40	3.63	2.94	2.50	40	0.99	1.09	1.12
50	5.63	6.56	6.25	50	0.60	0.61	0.75
60	3.88	3.88	3.25	60	1.49	1.41	1.25
(B) VB地点							
試作プロビーム照明							
平均値(N: 16)				標準偏差			
前方視距(m)	路側帯(左)	車道中央	対向車線中央	距離(m)	路側帯(左)	車道中央	対向車線中央
30	5.94	6.44	4.31	30	1.09	0.86	1.10
40	5.81	4.75	3.50	40	0.95	0.97	1.06
50	3.94	3.25	2.06	50	1.14	1.09	0.75
60	4.50	5.31	3.31	60	1.32	0.98	1.26
対称照明							
平均値(N: 16)				標準偏差			
前方視距(m)	路側帯(左)	車道中央	対向車線中央	距離(m)	路側帯(左)	車道中央	対向車線中央
30	5.50	6.00	5.63	30	0.94	1.00	1.17
40	3.75	4.13	3.75	40	1.09	1.05	1.03
50	2.06	1.27	1.20	50	1.43	0.44	0.54
60	5.38	6.06	6.13	60	0.99	0.90	0.86

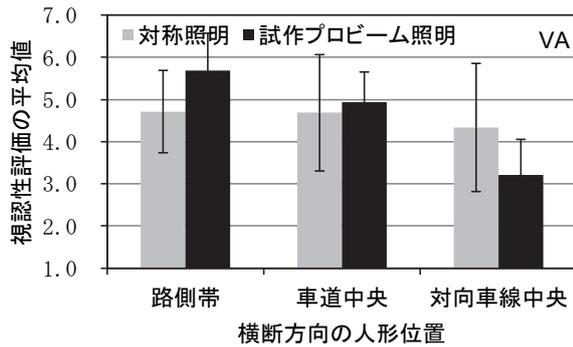
(2) 4種類の前方視距における視認性変動

車両前方の視認性評価値とその変化を知るため、横断位置を同一とし30mから60mまでの視認性評価値の平均値(データ数: 4)とその標準偏差を求めた。図3-11は、両車両地点(VA, VB)における30mから60mの各々の前方視距の視認性評価結果を示している。両車両地点(VA, VB)に関わりなく、試作プロビーム照明における路側帯と車道中央の視認性評価値は、対称照明のそれよりも高かった。一方、対向車線中央は、対称照明による視認性評価値の方が試作プロビーム照明のそれよりも高かった。両車両地点(VA, VB)の4種類の前方視距による試作プロビーム照明による標準偏差は、いずれの横断位置においても対称照明より小さかった。

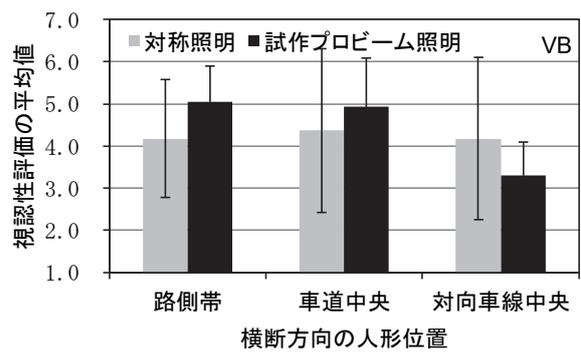
(3) 車内からのグレア評価の結果

図3-12は車内からのグレア評価結果を示している。両車両地点(VA, VB)で対称照明に比べ試作プロビーム照明の方がグレア評価値の平均値は高かった。

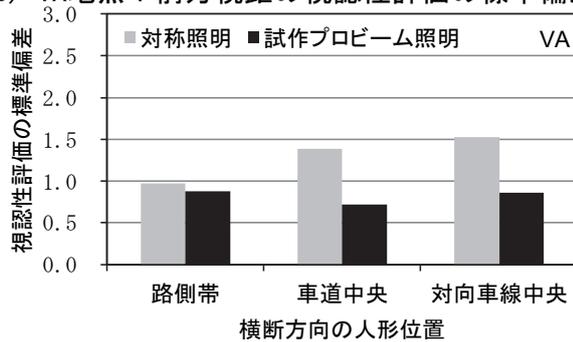
(A) VA地点：前方視距の視認性評価の平均値



(B) VB地点：前方視距の視認性評価の平均値



(C) VA地点：前方視距の視認性評価の標準偏差



(D) VB地点：前方視距の視認性評価の標準偏差

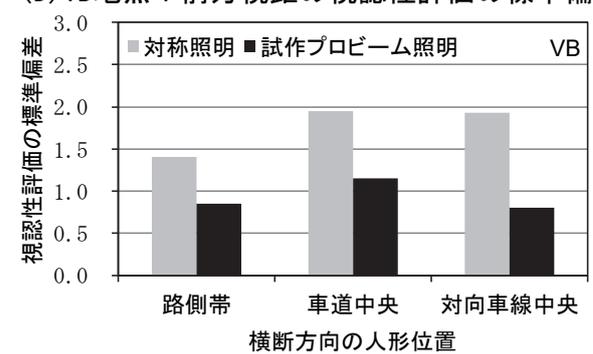


図3-11 30m から 60m における 4 種類の前方視距における視認性評価の平均値と標準偏差

(4) ダミー人形の鉛直面照度（ヘッドライト点灯）と視認性評価値の関係

視認性評価時の環境（ヘッドライトを点灯）にて、両車両地点（VA, VB）から見たときの12か所のダミー人形の鉛直面照度を計測した結果を表3-3に示す。なお、鉛直面照度は腰（高さ：0.8m）の位置で計測した。図3-13は、実験参加者による両車両地点（VA, VB）別の人形設置位置別の視認性評価値の平均値（表3-2）と視対象の鉛直面照度（ヘッドライト点灯，高さ0.8m，表3-3）の関係を示している。試作プロビーム照明と対称照明の各々の近似曲線を示す。両照明とも視認性評価と鉛直面照度に高い相関を示した。同じ鉛直面照度のとき、対称照明の方が試作プロビーム照明より若干高い視認性評価値が得られた。この原因は、試作プロビームのグレア（光膜輝度）が対称照明のそれより高く、その影響が表れたものと考えられる。本実験での照明環境条件下に限られるが、視対象の鉛直面照度を与えることで視認性評価値を推定できることを示唆している。

3.4 試作プロビーム照明を改善した新たなプロビーム照明の配光検討

(1) 試作プロビームの課題

プロビーム照明を試作し、視認性評価を行っ

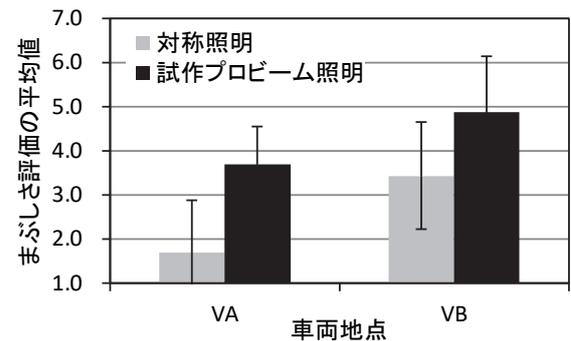


図3-12 車内からのグレア評価結果

表3-3 照明別・車両地点別の視認性評価地点におけるダミー人形の鉛直面照度の計測値

試作プロビーム照明				対称照明		
車両地点: VA	鉛直面照度 (lx)			鉛直面照度 (lx)		
前方視距 (m)	路側帯 (左)	車道中央	対向車線中央	路側帯 (左)	車道中央	対向車線中央
30m	52.2	20.4	10.9	12.0	10.3	9.4
40m	20.0	14.3	10.3	1.9	1.7	1.6
50m	34.5	42.2	21.6	20.1	31.3	26.4
60m	32.2	18.8	10.8	7.6	10.0	9.2
車両地点: VB				鉛直面照度 (lx)		
前方視距 (m)	路側帯 (左)	車道中央	対向車線中央	路側帯 (左)	車道中央	対向車線中央
30m	44.5	37.8	21.4	27.9	32.1	27.6
40m	33.6	18.5	10.5	10.0	12.6	11.3
50m	15.0	11.1	7.6	2.6	2.5	2.4
60m	19.3	27.2	15.3	26.9	43.0	35.1

た。評価結果より試作プロビーム照明は対称照明における道路移動空間における歩行者視認性評価の変動を抑制可能とするメリットを示せた。一方、試作プロビーム照明は、対称照明より、対向車線中央の視認性が低かった。グレアを抑制しつつ、対向車線側の鉛直面照度を高くするために更なるプロビーム照明の配光の改善が必要と言えた。そこで、**図3-13**を用いて鉛直面照度を与えたときの道路上の視対象における主観的視認性評価を考慮し、プロビーム照明の配光の検討を試みた。

(2) 2種類のプロビーム照明配光提案

試作プロビーム照明の配光をベースにプロビーム配光の検討を試みた。照明使用地域を市街地とし、市街地における前方の視対象の視認性を確保すべき範囲を最初に考えた。市街地の走行速度を50 (km/h)としたとき、ドライバが横断歩行者を発見する時間を3秒前から5秒前としたとき、41.7(m)から69.4(m)となる3)。また、道路構造令では設計速度50(km/h)のときの制動停止視距は55(m)となっている。一方、ヘッドライト（ロービーム）の照射範囲は40m程度であり、この範囲をカバーできない。そこで、一般的な市街地の道路を想定したとき、ヘッドライト（ロービーム）点灯を踏まえ30mから60m前方の視対象の視認性をプロビーム照明で確保すべきと考えた。

次に30mから60mエリアで提供すべき視環境を本研究で実施した実験環境の道路で考える。**図3-13**の鉛直面照度と視認性評価から、走行車線に隣接する箇所を含むエリアの鉛直面照度が10 lx程度以上となることで、**図3-9**に示す「やや見えにくい」以上の視認性評価を得ることができる。以上から、前方視距60mまでの走行車線とその近傍で鉛直面照度が10lx以上となることを目標にプロビーム照明の配光設計を行った。

走行車線および対向車線のほとんどのエリアで鉛直面照度が10 lx近辺となることを目標とし、**図3-14**を求めた。広範囲にわたるエリアで鉛直面照度を可能な限り均一かつ高くするため、灯具の近傍から遠方まで光が届くようにすることが必要となる。具体的なプロビーム灯具の検討ステップを以下に記述する。

①設計条件の設定

- 道路の横断設計：幅員3.5mの2車線道路，路肩0.5m，歩道幅員4m

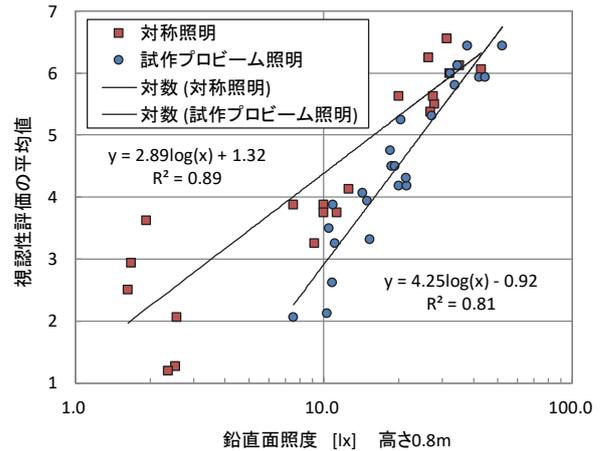
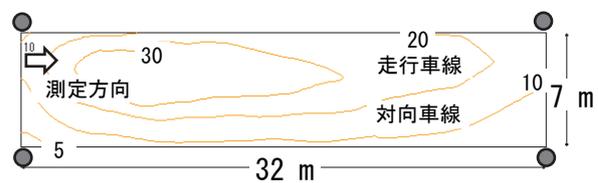


図3-13 鉛直面照度と視認性の評価結果との関係

(A案) 視認性が高い配光案



(B案) グレア感が低い配光案

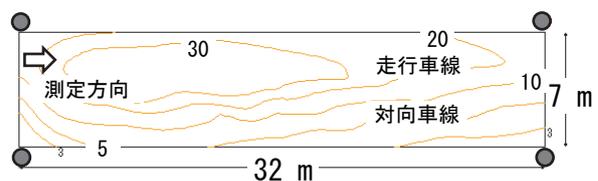


図3-14 実験結果を踏まえたプロビーム照明の配光案

表3-4 3つのプロビーム照明の特性比較

	試作プロビーム照明	A案	B案
輝度			
平均値輝度 [cd/m ²]	2.41	1.82	1.56
総合均斉度	0.30	0.45	0.42
車線軸均斉度	0.71	0.56	0.49
TI値 [%]	8.10	11.40	6.00
鉛直面照度			
平均照度 [lx]	24.50	26.00	26.30
最大照度 [lx]	46.80	50.50	46.10
最小照度 [lx]	7.00	8.50	6.60
均斉度 (min/ave)	0.29	0.32	0.25

- テストコース (**図3-1**, **図3-2**) における灯具の設置条件：灯高: 8 m，灯具設置間隔: 32m，向合せ配置

- 視環境の条件：走行車線の鉛直面照度 (h=0.8m) : 20-25 [lx]，平均路面輝度: 1 (cd/m²) 以上，TI値: 10(%)以下

②LED灯具の選定

入手可能な、狭角・中角・広角タイプのLEDランプ灯具を選定した。

③LED灯具の照射角の決定

試作灯具は、②で選定したランプ（3種類の配光）を複数個用いて①で設定した視環境が得られるよう、繰り返しランプ個々の照射角（鉛直方向と水平方向）を検討し最適化した。具体的には、道路上の0.8mの高さに計算ポイント（縦断方向・横断方向ともに0.25mピッチ）を仮想し、各ポイントの鉛直面照度を計算する。各々の計算ポイントごとに、各LEDランプの照射角を決めて、その光度値を光軸からの離角から求め、照射距離との関係から鉛直面照度を計算する。最後に全LEDランプの結果を積算し各ポイントの鉛直面照度を求める。

④配光案の作成

②と③を繰り返し、目標とした鉛直面照度となるよう、LEDランプの照射角と組み合わせを変え、まぶしさと視認性（鉛直面照度）のバランスを考慮した図3-14に示す2案を作成した。

図3-14のA案は鉛直面照度を高めとした歩行者の発見など道路上の視対象の視認性を重視したものとなる。図3-14のB案は鉛直面照度は低めであるがグレアの低い配光案である。これらの配光案を表4に整理する。A案は走行車線と対向車線上ともに鉛直面照度が高くヘッドライトが届かない広範囲における道路上の歩行者を発見しやすい配光となっている。ただし、TI値が11.4%であり、グレアを感じやすい。次に、B案は走行車線上の平均鉛直面照度を25(lx)確保しつつ、必要な均斉度が得られ、かつグレアも感じ難い。高い視認性を提供する配光になっている。

3.5 まとめ

本研究では、試作プロビーム照明を開発し、テスト走路における実験参加者による視認性評価と光学特性の計測を行った。それらの結果を踏まえ光学シミュレーションを使うことから、具体的なプロビーム照明の配光を提案した。実験参加者16名による静止状態の視認性評価から、車両の進行方向の視認性変動が試作プロビーム照明は対称照明より低いことが分かった。一方、路側帯（左）と車道中央の視認性評価は対称照明より高いが、対向車線中の視認性評価は低かった。また、試作プロビーム照明のTI値は8.1%であり、道路照明の設置基準が推奨

しているTI値15%以下を満たしていたが、実験参加者によるグレア評価は全ての条件下で対称照明に比べ試作プロビーム照明の方が高かった。

そこで、プロビーム照明としてTI値を低く抑えつつ対向車線中央付近の視認性を高くする配光を本研究の結果を使って検討した。テストコースにおける照度の計測結果と光学シミュレーションによる予測結果は十分近かったこと、テストコースにおける視認性評価と視対象の鉛直面照度および輝度の間には高い相関があったことを利用した。光学シミュレーションを用いて対向車線上の歩行者の視認性を高くし、かつグレアを抑えた実道路に設置可能なプロビーム照明の配光を2つ提案した。視認性は高いがグレアも高くなる案とグレア感を抑止し視認性を本研究の試行プロビーム照明より高くする2つの配光案を得ることができた。グレアの影響による視認性低下を抑制し、視認性をどこまで向上できるかは、これらの2案をベースとすることで、実現できると考えられる。

本研究の成果から、新たに検討を始めた市街地におけるプロビーム照明のメリットを活かす配光をかなり絞り込むことができた。今後は、動的な状況での視認性を加味しつつ、これら複数提案したプロビーム照明の視認性評価を行い、実用化を目指したプロビーム照明の開発を行っていく必要がある。

参考文献

- 1) Hagiwara, T., et al.: Visibility assessment of pro-beam road lighting on the road, ITS-2183, ITS WORLD CONGRESS (2015).
- 2) 道路照明施設設置基準・同解説（平成19年改訂版）、日本道路協会, 2007.10.
- 3) 萩原ら：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 43(5), 1123-1129, 2012.

第4章 プロビーム配光の検討

4.1 はじめに

平成29年度に（株）つくばイワサキの道路照明用のテストコースでプロビーム照明の視認性評価実験を行い、プロビーム照明のメリットおよびデメリットに配慮した以下に示す2種類のプロビーム灯の配光（以下に示す）を提案した1).

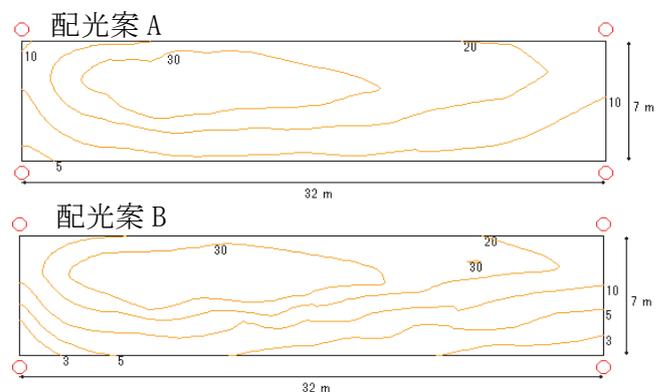
- ・まぶしさをやや感じて対向車線を含めた道路空間全体の鉛直面照度を高くした配光（以降、配光案A）
- ・まぶしさを抑制しつつ対向車線の鉛直面照度を十分な視認性となるレベルとした配光（以降、配光案B）

本研究は、これら2種類の配光案を実現した灯具を試作し、プロビーム道路灯の視認性について総合的に評価することを目的とする。具体的には、テストコースにおける静止状態での視認性評価とまぶしさ評価を行った。また、テストコースで走行車両の前方の道路を横断する歩行者を撮影した映像を用いて、プロビーム道路灯の条件下での横断歩行者の発見に関する評価を行った。加えて、2種類の配光を比較し、実際の市街地において道路灯として使う場合のプロビーム道路灯の配光について若干の検討を行った。

4.2 研究手法

(1) プロビーム道路灯の鉛直面照度分布

2種類のプロビーム道路灯の配光案Aおよび配光案Bの設計鉛直面照度分布（高さ：0.8m）を図4-1に示す。配光案Aは、道路空間全体の鉛直面照度を高く設定している。対向車線方向の



（注）図中の数値は鉛直面照度(lx)

図4-1 プロビーム道路灯の配光案Aと配光案Bの設計鉛直面照度分布（lx、高さ：0.8m）



図4-2 12ユニット構成の試作プロビーム道路灯の外観

鉛直面照度が高くなることから対向車線のドライバーがややまぶしさを感じる可能性がある。一方、配光案Bは道路空間全体の鉛直面照度を均質にする中で対向車線方向の鉛直面照度をやや低く設定している。このため、配光案Aに比べ対向車線のドライバーが感じるまぶしさは抑えられる。

(2) プロビーム道路灯の試作

配光案A・Bを実現するプロビーム道路灯の試作を行った。これまでのプロビーム道路灯の開発過程を踏まえ、最初にLEDモジュールとレンズの組み合わせによるビーム角が 8° (狭角), 16° (中角), 28° (広角) の特性を持つ3種類のLEDランプを作成した。これらのLEDランプ4個を1ユニットとし灯具の中に組み込むことにした (図4-2)。照明設計ソフトを利用して光学シミュレーションを実施し、2種類の配光案A・B別にユニットの数と組み合わせおよび各々のユニットのエイミング角を明らかにした。これらのプロセスを経て作成した試作プロビーム道路灯は、12ユニットで構成され、ユニットごとに照射角が異なるセッティングとなった。スイッチで2つの配光案の点灯を切り替える。なお、試作した配光案A・Bのプロビーム道路灯は、道路照明施設設置基準・同解説にある性能指標を満足(平成19年)している2)。

4.3 テストコースでの視環境計測と視認性評価実験

(1) テストコース

図4-3にテストコースの平面図を示す。歩道がある2車線道路となっている。車道と歩道の各幅員は3.5m, その間に設けた路肩は0.5mとした。試作プロビーム道路灯を照明柱P1~P6に3灯ずつの向合せ配列 (高さ: 8m, オーバーハング: 0.7m) で設置した。ただし、灯具間隔は、テストコースの既存の照明ポールを使ったためP1とP2およびP4とP5の間隔が30m, P2とP3およびP5とP6の間隔がと35m (配光の設計は32m) となった。

(2) 実験参加者

実験参加者は免許証を持っている両眼視力0.7以上を有する (矯正視力可) 20代前半の男女16名 (男性14名, 女性2名) とした。実験時の待ち時間を短くするため、前半8名と後半8名の2グループに分け、実験を実施した。前半8名は、配光案A, 配光案Bのプロビーム道路灯の順で視認性評価を行った。後半8名は、配光案B, 配光案Aの順とした。各グループの実験時間は、3時間程度となった。

各々のグループの実験参加者に対し、実験実施者から口頭および書面にて実験の役割・危険性・緊急時の対応・参加者の権利・プライバシー保護などについて説明した。説明終了後、実

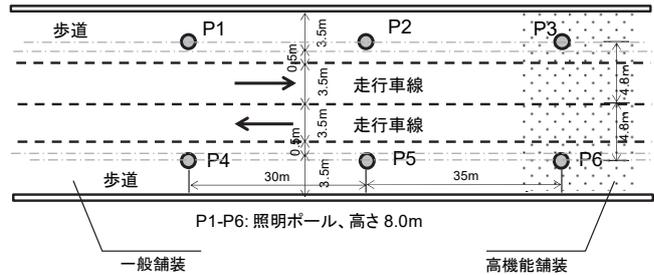


図4-3 テストコースの平面図

表4-1 実験環境の明るさ (実測値)

配光案	車線	平均鉛直面照度 [lx]
配光案A	走行車線	22.3
	対向車線	25.8
配光案B	走行車線	20.3
	対向車線	16.6

験参加者全員が実験の同意書に署名した。また、北海道大学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、実験内容・安全性・倫理などについて実験実施前に承認を受けた。

(3) 鉛直面照度

照明ポールP2と照明ポールP3の35m区間において、路面の水平面照度と高さ0.8m (腰の位置) の鉛直面照度を測定した。照度測定箇所は、道路横断方向に1車線あたり3点 (1.75m間隔) とし、道路縦断方向は8点 (5m間隔) とした。この時、ヘッドライトは点灯していない。各々の車線における24点の測定結果を平均した値を表4-1に示す。走行車線の平均鉛直面照度は、配光案Aの方が配光案Bより2lx程度高く、対向車線のそれは9lx程度高くなった。配光案Aが対向車線の鉛直面照度を高くする配光を採用したこと、配光案Bがまぶしさを考慮し対向車線の鉛直面照度を抑え気味としたことが影響した結果といえる。

(4) 模擬歩行者の位置

プロビーム灯で照明されている空間全体の視認性分布を検証する。このため、実験車両の位置を走行車線上の2箇所 (VA地点とVB地点) とし、評価対象となる模擬歩行者の位置を各々の車両位置に合わせ道路空間全体をカバーする12箇所とした (図4-4)。プラスチック段ボールを人型 (横向き) に切り抜き、その前面に鏡面反射率の低い灰色 ($\rho \approx 23\%$) のラシャ紙を

貼ったものを模擬歩行者として視認性評価に用いた。

実験車両の実験参加者からの前方視距は、VA地点のときヘッドライトの照射範囲境界付近といわれる40m、および照射範囲外となる60m、70mとした。VB地点のときは、前方視距を40m、50m、60mとした。横断方向はドライバから見て左から路側帯（左）、車道中央、対向車線中央、路側帯（右）の4箇所に模擬歩行者を設置した（図4-4）。VA地点とVB地点において前方視距と横断方向を組み合わせた12箇所に模擬歩行者を1体ずつランダムに提示した。

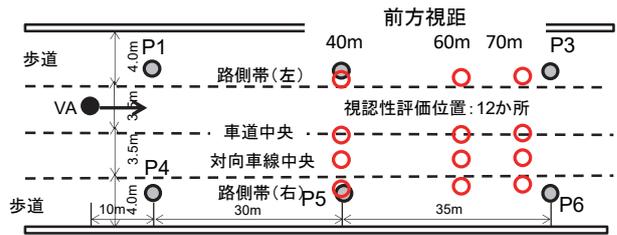
(5) 視認性評価とまぶしさ評価

車内からの視認性評価の指標として図5(A)の7段階スケールを用いた。「見えにくい」から「見えやすい」の7段階とし、解析時には1から7の数値を割り振って分析した。ドライバと歩道の歩行者に与えるまぶしさ評価には、図5(B)に示す9段階スケールを用いた。ドライバのまぶしさ評価は、車内の実験参加者が車線中央の60m前方に置かれた模擬歩行者の足元に視線を向けた状態（俯角約1度、運転を模擬した状態）で行った。このときロービームは点灯している。また、歩道における歩行者としてのまぶしさ評価は、歩道を歩いている状況を模擬するため、灯具との迎角が10度から30度となる図4(B)に示す5地点に実験参加者が静止で立った状態で行った。まぶしさ評価のとき、実験参加者にはP6から前方5mの視線軸上の模擬歩行者に視線を向けるよう指示した。

(6) 評価手順

前半グループの実験参加者は、最初に配光案Aのプロビーム道路灯で視認性実験を行った。8名を4組に分けた。実験車両（VA地点）に最初の1組が運転席と助手席に乗車し、前方視距と横断位置を組み合わせた12箇所にランダムに提示される模擬歩行者の視認性を評価した。車内の実験参加者による前方観察時間は、約3秒とした。観測時間のコントロールは、視対象方向の視界を遮蔽している暗幕を開閉することで行った。視認性評価がすべて終了した後、車線中央60m前方に置かれた模擬歩行者の足元を観測し、その時のまぶしさ評価を行った。これらの評価を、残りの3組6名の順に実施した。その後、実験車両をVB地点に移動し、VB地点で同様の視認性評価とまぶしさ評価を4組8名が順に実施した。なお、歩道における歩行者と

(A) 車両位置VA



(B) 車両位置VB

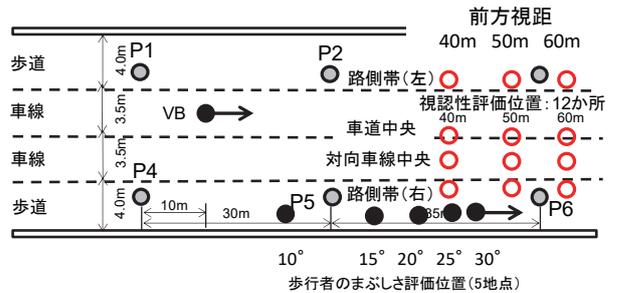
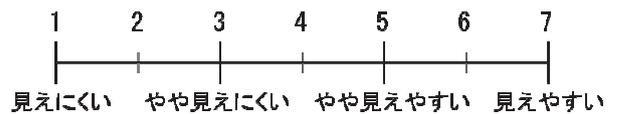


図4-4 車両位置と模擬歩行者位置

(A) 視認性評価



(B) まぶしさ評価



図4-5 視認性評価とまぶしさ評価で用いたスケール

してのまぶしさ評価は、VB地点で視認性評価を実施しているときに並行して行った。

ここで、配光案Bのプロビーム道路灯に変更し、VB地点、VA地点の順で同様の手順で視認性評価およびまぶしさ評価実験を行った。前半8名の実験参加者が全部の評価を終了した後、後半8名の実験参加者が配光案B、配光案Aのプロビーム道路灯の順でVA地点、VB地点で視認性評価とまぶしさ評価、歩道における歩行者としてのまぶしさ評価を行った。

(7) 模擬歩行者の鉛直面照度計測結果

視認性評価実験で用いた模擬歩行者の鉛直面照度を測定した。鉛直面照度は路面から0.8m（腰）の高さを測定した。表4-2に示すように、配光案Aのとき左右の路側帯以外の模擬歩行者の鉛直面照度はいずれの前方視距においても

20lx以上となった。配光案Bのとき、車道中央の鉛直面照度はおおむね20lx以上となったが、まぶしさに配慮したため対向車線中央の鉛直面照度は10lx台、路側帯（右）は10lx以下となった。

VA地点とVB地点に車両を置いたときのドライバ位置からのTI値（Threshold Increment Value）を等価光幕輝度から算出した。ドライバ位置から前方を見たときのTI値は、VA地点とVB地点の車両位置にかかわらず配光案Aにおいて約6%、配光案Bにおいて約2.5%となった。また、歩道においてまぶしさ評価と関連する等価光幕輝度を測定し、輝度分布から歩道部の平均路面輝度を抽出しTI値を算出した。配光案Aは、迎角が15°でTI値が最大となる17%となった。一方、配光案Bでは、順応レベルを歩道部の平均輝度としたためTI値は12~24%、迎角15°から25°の範囲で20%前後となり、配光案Aより高くなった。

(8) 視認性評価の結果

表4-3の上段は、VA地点における12箇所の視認性評価結果の平均値と標準偏差を示している。平均値から、両配光案とも左右の路側帯を除いて道路空間全体で7段階評価の4.0以上となるケースが多かった。配光案Aと配光案Bとも前方視距が変化しても視認性評価の変化は小さく安定していた。その中で、路側帯（左）における視認性評価は配光案Bの方が配光案Aより高くなった。一方、路側帯（右）における視認性評価は配光案Aの方が配光案Bより高くなった。路側帯（右）における配光案Bの視認性評価は、3つの前方視距とも2.0以下となった。

表4-3の下段は、VB地点における12箇所の視認性評価結果の平均値と標準偏差を示している。VA地点と同様、左右の路側帯を除いて両配光案とも道路空間全体で7段階評価の平均値が4.0以上となるケースが多かった。配光案Aにおいて各々の横断方向位置における前方視距による横断視認性評価の変化は小さかった。路側帯（右）における視認性評価は配光案Aの方が配光案Bより高くなる場合が多かった。また、配光案Bでは、路側帯（右）における前方視距による視認性評価の変化が大きくなった。VA地点と同様、路側帯（左）における視認性評価は配光案Bの方が配光案Aより高くなった。

なお、視認性評価値の平均値と模擬歩行者の鉛直面照度の両者は高い相関（配光案A・Bにおける決定係数は0.91と0.80）を示した。著者ら

表4-2 模擬歩行者の鉛直面照度

			路側帯 (左)	車道中 央	対向車 線中央	路側帯 (右)
VA	40m	配光案A	6.9	21.0	20.8	18.3
		配光案B	6.0	17.2	11.2	4.9
	60m	配光案A	17.5	36.2	29.8	19.4
		配光案B	20.1	25.1	12.9	6.4
	70m	配光案A	10.3	26.2	25.3	22.0
		配光案B	10.0	20.8	13.4	6.2
VB	40m	配光案A	17.5	36.2	29.8	19.4
		配光案B	20.1	25.1	12.9	6.4
	50m	配光案A	10.3	26.2	25.3	22.0
		配光案B	10.0	20.8	13.4	6.2
	60m	配光案A	10.4	31.9	34.4	18.6
		配光案B	9.2	29.7	29.0	13.3

(注)表中の数値の単位はlx

表4-3 12地点の視認性評価の平均値と標準偏差

			路側帯 (左)	車道中 央	対向車 線中央	路側帯 (右)
VA	40m	配光案A	2.63 (1.45)	5.50 (1.46)	5.00 (1.32)	4.06 (1.44)
		配光案B	3.31 (1.54)	5.88 (1.02)	4.13 (1.5)	1.80 (1.01)
	60m	配光案A	4.63 (1.45)	5.94 (1.46)	4.63 (1.32)	3.75 (1.44)
		配光案B	5.56 (.89)	6.19 (.83)	4.13 (1.75)	1.69 (.79)
	70m	配光案A	2.81 (1.47)	4.94 (1.34)	4.56 (1.36)	4.00 (1.46)
		配光案B	3.38 (1.2)	5.19 (1.17)	3.94 (1.57)	1.63 (.81)
VB	40m	配光案A	4.81 (1.17)	6.31 (.79)	6.13 (.89)	4.19 (1.28)
		配光案B	6.00 (.97)	6.56 (.73)	4.38 (1.2)	2.88 (1.5)
	50m	配光案A	2.88 (1.41)	5.19 (1.05)	5.19 (.91)	4.81 (1.17)
		配光案B	3.94 (1.44)	5.81 (.91)	4.44 (1.03)	2.06 (1.29)
	60m	配光案A	3.00 (1.51)	5.94 (1.00)	5.50 (.89)	3.63 (1.36)
		配光案B	3.44 (1.36)	6.44 (.89)	5.75 (1.29)	3.94 (1.06)

(注1)表中の()内の数値は標準偏差
(注2)各条件のデータ数は全て16

による平成28年度の結果と同様，鉛直面照度を示すことで視認性評価を推定できる結果を得ることができた2). このとき，同じ鉛直面照度のとき，配光案Bのプロビーム道路灯の方が配光案Aよりもやや高い視認性評価となった。

(9) まぶしさ評価の結果

図4-6は，VA地点とVB地点の車内からの16名の実験参加者によるドライバとしてのまぶしさ評価の平均値と標準偏差を示している。VB地点における配光案Aのまぶしさ評価が最も高くなった。このまぶしさ評価は”ややまぶしい”と”まぶしい”の中間的なレベルとなった。これ以外の3つの評価は，”ややまぶしい”あるいはそれ以下のレベルとなった。TI値と同様，VA地点とVB地点とも配光案Aのまぶしさ評価の平均値は配光案Bより高くなった($t=1.89$, $df=15$, $p<0.10$)。また，VB地点において，配光案Aのまぶしさ評価が配光案Bより有意($t=3.74$, $df=15$, $p<0.01$)に高い結果となった。

図4-7は，配光案Aと配光案Bにおける実験参加者16名による歩行者としてのまぶしさ評価結果を示している。両案とも仰角10°からプロビーム道路灯のポールに近づくにつれまぶしさ評価の平均値は上がり仰角20°でピークとなり，仰角30°に近づくにつれ下がった。ピークの際の配光案Aと配光案Bのまぶしさ評価は，全ての位置で”ややまぶしい”と”まぶしい”の中央程度となった。また，TI値と同様に配光案Bのまぶしさ評価の平均値は配光案Aより若干高くなった。背景となる歩道部の輝度が配光案Bで低いことが影響していたものと考えられる。

4.4 映像を用いた横断歩行者発見に関する評価検討

(1) 目的

静止実験の結果からプロビーム道路灯により横断歩行者の視認性が道路空間全体で高くかつ安定していることが明らかとなった。これらの結果は，夜間における前方の横断歩行者の発見が容易なることを示唆している。しかし，運転時のドライバから見て，横断歩行者の発見が容易となるかどうかの検証はなされていない。プロビーム道路灯条件で，ドライバが横断歩行者を発見したときの横断歩行者位置を知る必要がある。実車で計測することが望ましいが，安全面から難しい。そこで，車内から前方を横断する歩行者を撮影した映像を用い，ドラ

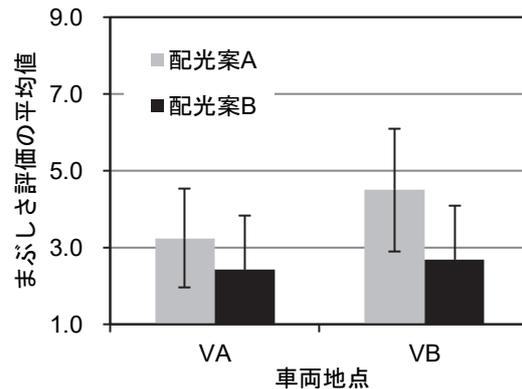


図4-6 ドライバとしてのまぶしさ評価

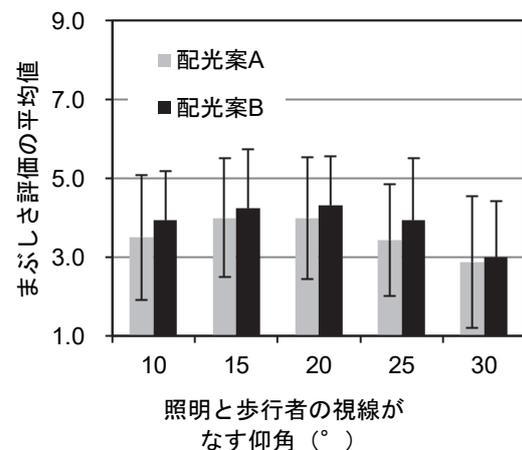


図4-7 歩行者としてのまぶしさ評価

イバが横断歩行者を発見したときの横断歩行者位置を計測する室内実験を行った。

(2) 実験参加者

実験参加者は運転免許を保有する両眼視力0.7以上を有する（矯正視力可）20代の男女30名とした。実験開始前に，実験参加者に対して実験実施者から口頭および書面にて実験の役割・手順と評価方法・危険性・緊急時の対応・参加者の権利・プライバシー保護などについて説明した。このとき，横断歩行者を発見したときの操作について，サンプル映像を用いて何度か練習した。説明終了後，実験参加者の全員が同意書に署名した。また，北海道大学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，実験内容・安全性・倫理などについて実験実施前に承認を受けた。

(3) 撮影区間と横断歩行位置

図4-8に撮影区間の歩行者が横断する位置と撮影車の走行車線と進行方向などを示す。A地点が撮影車のスタート地点，C地点が撮影車の

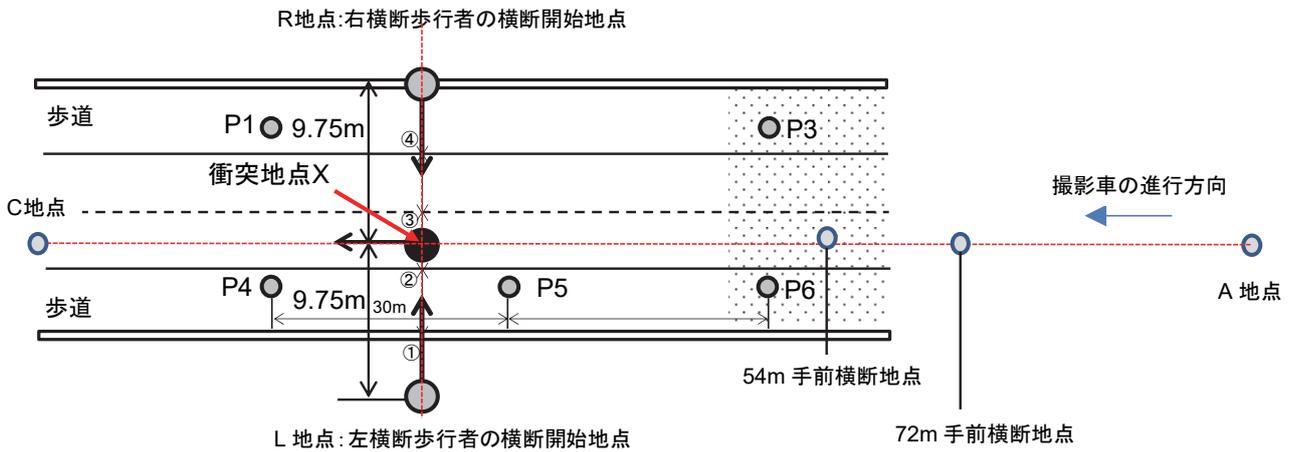


図 4-8 撮影車と横断歩行者の配置

停止地点，それを結ぶ区間を約20km/hの速度で撮影車は走行した．その間の衝突地点Xは，撮影車の軌跡と横断歩行者の軌跡が交差する交差点を示している．R地点とL地点は，左右からの横断歩行者の歩行開始点である．そこから衝突地点Xを越えるところまで横断歩行者は一定の速度で歩行する．横断開始は，撮影車が72m手前横断地点にきたとき，54m手前横断地点にきたときのいずれかとなる．

図8のA地点からC地点までの車線で撮影車内のドライバーの目の位置に近い箇所に小型デジタルビデオカメラ（SONY，HDR-AS300）設置した．走行する車内から前方を横断する歩行者を撮影した．撮影毎の録画時間は，約40秒であった．撮影時，A地点からスタートした撮影車は20km/hまですばやく加速し，衝突地点Xの72m手前地点の10m程度前からC地点までほぼ20km/hの定速で走行した．

(4) 横断歩行者の横断開始タイミング

横断歩行者は，静止実験で用いた模擬歩行者に近い反射率となる灰色のスエットを着用した．横断歩行者の歩行速度は，阿久津らによる研究から1.3 m/secを目標とした3)．この歩行速度を撮影時に実現するため，複数回練習した．図8に示すように，横断開始地点は衝突地点Xから左あるいは右に9.75m離れた地点となる．横断歩行者が衝突地点に近いところから横断を開始すると撮影開始前から車載の小型デジタルカメラにその姿が写り込んでしまう．そのため車線中央から離れた地点から横断開始することとした．右からの横断歩行者は，歩行開始地点Rから約3sec後に対向車線に入り，約8sec後に衝突地点Xに至る．一方，左からの横断歩行者はL地点から歩行を開始し，約3sec後に実験道路の左歩道に入り，約8sec後に衝突地点Xに至る．

横断歩行者の発見位置について，車両の位置の影響はほとんどなく照明による光環境の影響を強く受けることを示すため，横断歩行者が歩行を開始するタイミングとして，車両が衝突地点Xの手前72mを通過したとき（以降，72m手前横断）と手前54mを通過したとき（以降，54m手前横断）の2種類を用意した．72m手前横断の条件では，衝突地点Xに横断歩行者が来たとき車両は約30m手前に来ている．54m手前横断の条件では，衝突地点Xに横断歩行者が来たとき車両はその約10m手前に来ている．

(5) 撮影条件

視環境条件としてプロビーム道路灯の配光案Aの点灯，配光案Bの点灯，プロビーム道路灯非点灯（ヘッドライトのみ点灯）の3条件を設定した．いずれの場合も車両のヘッドライトをロービームで点灯させた．撮影条件は，歩行者の横断開始タイミングが2種類（54m手前横断と72m手前横断），横断歩行者の横断方向2種類（左からと右から），視環境条件3種類を組み合わせた12条件で撮影を行った．

(6) 実験参加者による横断歩行者発見地点の計測

映像を用いた横断歩行者の発見地点の計測を北海道大学土木工学研究棟の実験室にて行った．発見地点の計測と同時に発見した際に感じた横断歩行者と衝突する危険性に関する主観評価を行った．図4-9は，その評価に用いた7段階のスケールである．

消灯した室内にて，実験参加者が横断歩行者を発見したときのタイミングを計測した．スクリーン，プロジェクタ，椅子，机，PC，ドライバーモニタリングセンサ（オムロン株）を設置した．ドライバーモニタリングセンサは，実験参加者がドライバーと同じように進行方向の道路を

見ており、無理に左右の横断歩行者を探すことをしていないことを確認するために用いた。撮影したビデオカメラ映像の画角と同じ視野角58.7°でスクリーンに映るように実験参加者の位置とプロジェクタを調節した。実験参加者の横に机を設置し、実験担当者が操作するPCとマウスを配置した。実験参加者は、再生されている映像を見て横断している歩行者を発見したときマウスをクリックし映像を止めた。そのときの映像の時刻(30Hz)から実験参加者が前方の横断歩行者を発見したときの横断歩行者の位置を求めた。映像再生ソフトとしてWindowsムービーメーカー(マイクロソフト製)を用いた。

(7) ドライバが発見したときの横断歩行者位置

1) 実験手順

映像における歩行者横断位置の学習を回避するため、各実験参加者が行う実験回数を減らした。30名の実験参加者を72m手前横断に15名を、54m手前横断に15名をランダムに割り振った。このため各実験参加者は6種類の映像(視環境3種類×横断方向2種類)を見て、発見時刻の計測とそのときの衝突危険性評価を行った。横断方向と視環境の組み合わせは、カウンターバランスを考慮しランダムとなるようにした。

2) 横断歩行者位置の計測

左からの横断歩行者については図8の①点、②点、X点、③点を通過したときの時刻を映像から求めた。同様に、右からの歩行者については図8の②点、X点、③点、④点の通過時刻を映像から求めた。これらのデータから各々の映像における横断歩行者速度を求めた。実験参加者が横断歩行者を発見した時刻から、横断歩行者が衝突地点Xに至るまでの時間を求め、この時間に歩行速度を乗じて横断歩行者位置を求めた。

3) ドライバが発見したときの横断歩行者位置

図4-10に72m手前横断のときある実験参加者が右からの横断を配光案Aで発見したときの映像の静止画とヘッドライトのみで発見したときの映像の静止画を示す。ヘッドライトのみでは、センターライン手前の横断歩行者の足がようやく見える一方、配光案Aでは横断歩行者全体を容易に見える結果となった。

図4-11は、衝突地点Xを原点とし、実験参加者が横断歩行者を発見したときの平均横断歩行者位置を示している。衝突地点Xの位置0mか

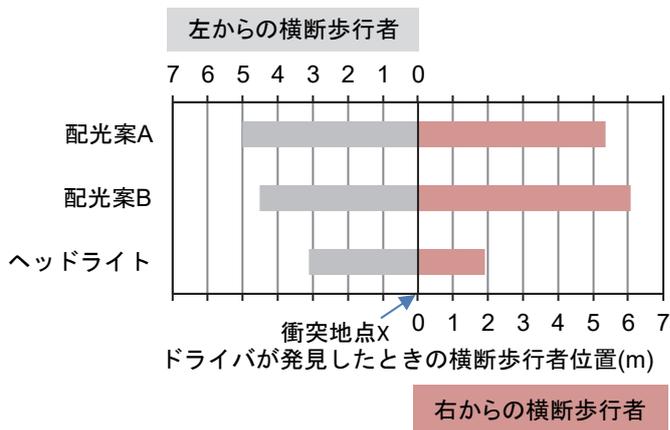


図4-9 横断歩行者と衝突する危険性に関する主観評価スケール



図4-10 右から横断してくる横断歩行者の静止画

(A) 72m手前横断



(B) 54m手前横断

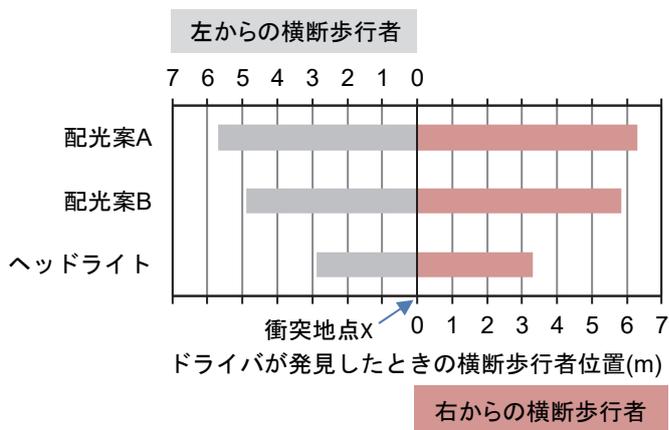


図4-11 実験参加者が発見したときの平均横断歩行者位置 (N=15)

ら左右に遠いほど、数値が大きくなる。右歩道と車道路肩の境界から衝突地点Xまでの距離は5.75mであり、左歩道と車道路肩の境界から衝突地点Xまでの距離は2.25mとなる。

両配光のプロビーム道路灯で72m手前横断のとき、実験参加者が発見したときの平均横断歩行者位置(N=15)は衝突地点Xから左で4.5mから5m、右で5mから6mとなった(図4-11(A))。左歩道上の横断歩行者、右車線の路肩付近の横断歩行者をドライバが発見できる結果となった。ヘッドライトにおける発見距離は、左右とも衝突地点Xから約2mから3mの距離となった。図4-10に示した例のように、自車線付近に横断歩行者が差し掛かった箇所でも横断歩行者を実験参加者が発見した結果となった。

両配光のプロビーム道路灯で54m手前横断のとき、ドライバが発見したときの平均横断歩行者位置(N=15)を図12(B)に示す。72m手前横断と同様に配光案Aと配光案Bとも、ドライバが発見したときの横断歩行者位置は衝突視点から左で約5m、右で約6mとなった。ヘッドライトの場合の横断歩行者位置は、左右とも衝突地点Xから約3mとなった。

4) 横断歩行者との衝突危険性に関する主観評価結果

両配光のプロビーム道路灯において、72m手前横断および54m手前横断の両条件で、横断歩行者位置が自車線から遠いことから、図12に示すようにすべてのケースでドライバによる横断歩行者との衝突危険性評価は低くなった。一方、ヘッドライトのみのとき、72m手前横断と54m手前横断のときの危険性評価には大きな差が出た。54m手前横断では歩行者の位置が車両から近く、衝突危険性評価値は高くなった。72m手前横断では、車両から衝突地点Xまでの距離が遠く、それほど高い衝突危険性評価にはならなかったものと考えられる。

4.5 まとめ

著者らが平成28年度に提案した配光案A・Bを実現したプロビーム道路灯を試作し、テストコースにおいて静止状態の視認性評価と映像による横断歩行者の発見に関する計測を行った。その結果、配光案A・Bとも、対向車線を含めた道路空間全体の視認性が高く、車内からの映像を用いた動的な状況下で左右からの横断歩行者の発見が容易となることが明らかとなった。特に、プロビーム道路灯とすることから

夜間の横断歩行者事故が多いとされている右からの横断歩行者の視認性を高くすることを実現できた。

本研究では、視認性を重視した配光案Aと視認性を多少犠牲としまぶしさを抑えた配光案Bの両プロビーム道路灯を評価した。配光案Bは配光案Aよりも対向車線の横断歩行者が視認性が低くなったが、配光案Bのまぶしさは配光案Aより低くなった。また、車内からの映像を用いた横断歩行者発見位置は、両配光でほとんど差異はなかった。これらの理由に加え、まぶしさの感覚は人により差異が大きく、歩道の利用が多い市街地では抑え気味とする方が妥当と考えられる。以上から、まぶしさを抑えつつ対向車線の鉛直面照度を5lx程度高くした配光案Bをベースとした配光が、市街地に設置するプロビーム道路灯の配光として望ましいと言えた。

本研究の知見に基づきプロビーム道路灯を市街地に設置し、テストコースでは現れない様々な条件で検証を行いプロビーム道路灯の市街地におけるメリットとデメリットを明らかにし、メリットを活かせる街路用の灯具として改善を加えていく必要がある。このとき、プロビーム道路灯の照明区間に入るときおよび照明区間から出るときの視認性の変化を抑制する仕組みの検討、カーブや勾配など道路線形がプロビーム道路灯の視認性およびまぶしさに与える影響、対向車のヘッドライトが歩行者の視認性に与える影響、年齢差による視覚特性による影響などの検証が具体的に必要となる。

参考文献

- 1) 萩原ら：市街地におけるプロビーム道路照明の配光に関する研究開発、交通工学論文集、Vol. 4, No. 3, pp.10-17, 2018.
- 2) 道路照明施設設置基準・同解説（平成19年改訂版）、日本道路協会、2007.
- 3) 阿久津邦男：歩行中の運動生理、国際交通安全学会誌、Vol3, No4, pp.269-278, 1977.

第5章 プロトタイププロビーム灯の開発

5.1 プロビーム配光の道路灯の検討

市街地におけるプロビーム配光の道路灯はこれまで検討された調査研究はなく、プロビーム配光のメリットを活かしデメリットを最小にする灯具を一から開発する必要がある。そこで、本研究では市街地に設置可能なプロトタイプを開発すべく、段階的な技術検討を行った。平成28年度にプロビーム配光の道路灯のメリットに関する効果検証を行った。平成29年度には、平成28年度の成果をベースにプロビーム配光の道路灯の光学的目標仕様とそれを実現するための光学設計を検討した。

(1) プロビーム配光の道路灯の効果

平成28年度、既存の道路照明灯具を用いて最初のプロビーム配光の試作道路灯を開発しテスト走路で実験参加者による主観評価実験と光学計測を行った（3章参照）。テスト走路の環境の制約から、灯具の高さ8m、灯具間隔30m・35m、向合せ配列とした。プロビーム道路灯は、従来の対称配光の道路灯（以下、対称照明）と異なり2車線であっても車両の走行方向別に灯具が必要となる。

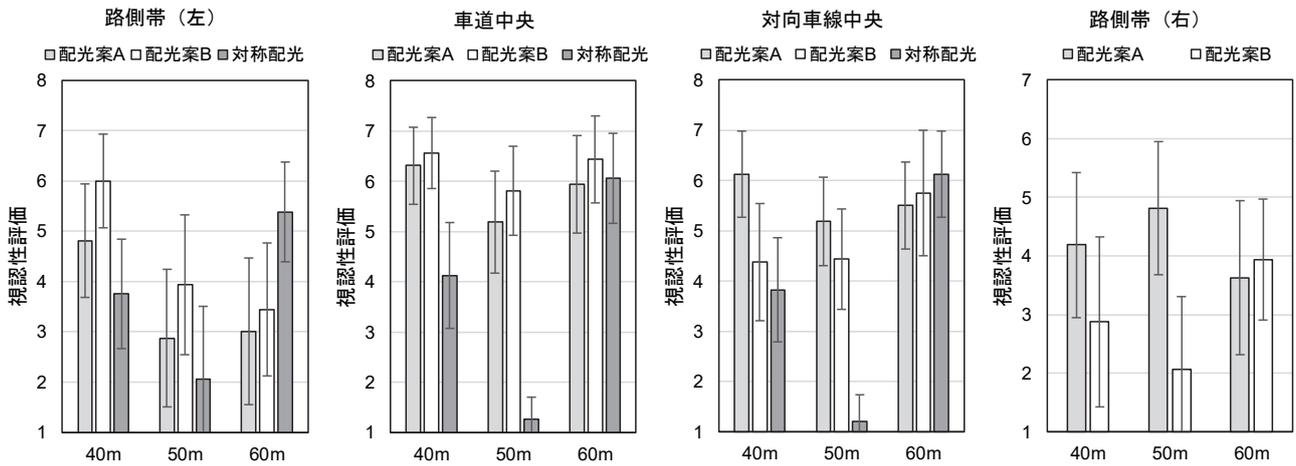
平成28年度のテスト走路での実験の結果、プロビーム道路灯は対称照明より車両の進行方向の視認性変動は小さく安定していた。一方、路側帯（左）と車道中央の視認性評価は対称照明より高いが、対向車線中の視認性評価は低かった。また、プロビーム道路灯のTI値は8.1%であり、道路照明の設置基準が推奨しているTI値15%以下を満たしていたが、実験参加者によるグレア評価は全ての条件下で対称照明に比べプロビーム道路灯の方が高かった。以上から、プロビーム配光のメリットは期待通りであっ

たが、対向車線での視認性を高くし、まぶしさを低減することなどの課題が明らかとなった。

(2) 試作プロビーム道路灯の配光設計と光学設計

平成28年度の課題をクリアすべく、平成29年度において光学シミュレーションを用いてプロビーム配光の道路灯の配光設計と光学設計を行い、プロビーム配光専用の試作灯具を作成した（4章参照）。テスト走路の照明エリアで鉛直面照度を可能な限り均一かつ高く（0.8m高さの鉛直面照度を8lx以上）するため、灯具の近傍から遠方まで光が届くようにすることが必要となる。また、同時にまぶしさを低減（TI値：15%以下）することも求められる。なお、プロビーム道路灯であったとしても、道路照明施設設置基準・同解説にある性能指標を満足（平成19年）することは必要となる。

平成29年度の試作プロビーム道路灯は、LEDモジュールとレンズの組み合わせによるビーム角が8°（狭角）、16°（中角）、28°（広角）の特性を持つ3種類のLEDランプを複数個用いて、前述の視環境を満たすよう、繰り返しランプ個々の照射角（鉛直方向と水平方向）を検討し最適化した。具体的には、道路上の0.8mの高さに計算ポイント（縦断方向・横断方向ともに0.25mピッチ）を仮想し、各ポイントの鉛直面照度を計算した。各々の計算ポイントごとに、各LEDランプの照射角を決めて、その光度値を光軸からの離角を求め、照射距離との関係から鉛直面照度を計算した。最後に全LEDランプの結果を積算し各ポイントの鉛直面照度を求めた。このとき、道路照明施設設置基準の性能指標を満たすことも考慮した。



平成29年度は、プロビーム道路灯のメリットおよびデメリットに配慮した配光案A（対向車線の鉛直面照度を高くした案）と配光案B（対向車線のまぶしさ抑制案）の2案を最終案とした。両者の配光を実現可能な試作プロビーム道路照明灯は、12個の光源ユニットから構成され、ユニットごとに照射角が異なるセッティングとなった。

(3) 試作プロビーム道路灯の視認性およびまぶしさについて

1) 視認性評価

平成29年度に開発した試作プロビーム配光の道路灯（配光案Aと配光案B）を用いて主観評価実験と光学特性計測を行った。車両位置は2地点（以降、VA地点、VB地点）、各々の車両地点で前方視距と横断方向を組み合わせた地点12箇所模擬歩行者を置いた。図5-1に、VB地点における12箇所の視認性評価結果の平均値と標準偏差を示した。平成28年度に実施した対称照明の主観評価の結果を示した。

VA地点を含めて主観評価の平均値から、配光案Bの右の路側帯を除いて道路空間全体で7段階評価の3.0以上となった。配光案Aと配光案Bとも前方視距が変化しても視認性評価の変化は小さく安定していた。その中で、路側帯（左）における視認性評価は4.0以上となり、歩道上の歩行者を視認できる結果となった。路側帯（右）における視認性評価は配光案Aの方が配光案Bより高くなった。また、対称照明の視認性評価は、試作した2種類のプロビーム道路照明と同等の箇所がある一方、照明ポール付近（50m）の視認性評価が非常に低くなった。配光案A、配光案B、対称配光の各々の配光の特徴を反映した視認性評価となったことがわかる。

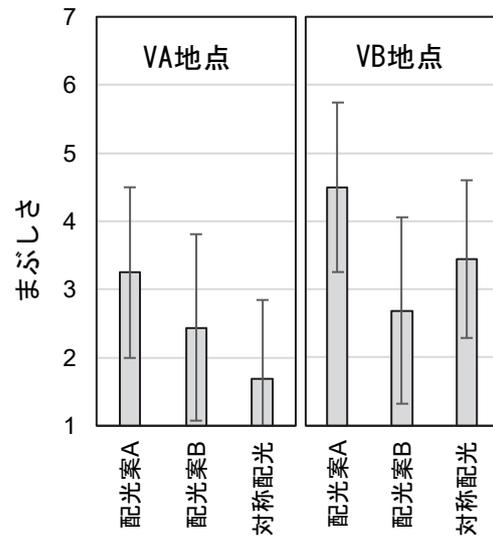


図5-2 車内のドライバーとしてのまぶしさ評価結果

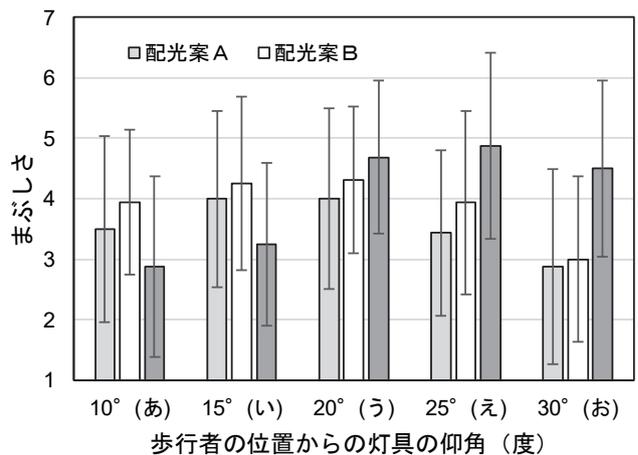


図5-3 歩行者としてのまぶしさ評価結果

次に、主観評価と同じ箇所で鉛直面照度（高さ0.8m）を計測した。鉛直面照度と主観評価は高い相関を示した。鉛直面照度を与えることで

視認性評価値を推定できることが分かった。また、同じ鉛直面照度のとき、配光案Bのプロビーム照明の方が配光案Aよりもやや高い視認性評価となった。配光案Aのまぶしさ評価が高いことが視認性評価の低下に影響しているものと考えられる。

2) まぶしさ評価（対向車のドライバと歩行者）

図5-2と図5-3に実験参加者による平成28年度（対称照明）と平成29年度（試作プロビーム道路灯）に実施した車内からのまぶしさ評価結果を示す。ドライバと歩道の歩行者に与えるまぶしさ評価には、9段階スケール（1:まぶしくない、5:まぶしい、9:耐え難い）を用いた。また、歩道における歩行者としてのまぶしさ評価は、歩道を歩いている状況を模擬するため、灯具との迎角が10度から30度となる5地点に実験参加者が静止で立った状態で行った。一方、VB地点において、有意にはならなかったが、配光案Bのまぶしさ評価は対称配光より低くなった。

図5-2は、VA地点とVB地点におけるドライバとしてのまぶしさ評価の平均値と標準偏差を示している。VB地点における配光案Aのまぶしさ評価が最も高くなった。配光案Bのまぶしさ評価は、有意ではないが配光案Aより低くなった。また、配光案A・配光案B・対称配光における実験参加者16名による歩行者としてのまぶしさ評価結果から、配光案A・配光案Bともピークのまぶしさ評価は、対称配光のピークよりも低くなった。

図5-3は、配光案A・配光案B・対称配光における歩行者としてのまぶしさ評価結果を示している。プロビームの両案とも仰角10°からプロビーム道路灯のポールに近づくにつれまぶしさ評価の平均値は上がり仰角20°でピークとなり、仰角30°に近づくにつれ下がった。ピークのときの配光案Aと配光案Bのまぶしさ評価は、全ての位置で”ややまぶしい”と”まぶしい”の中央程度となった。配光案A・配光案Bともピークのまぶしさ評価は、対称配光のピークよりも低くなった。また、配光案Bのまぶしさ評価の平均値は配光案Aより若干高くなった。背景となる歩道部の輝度が配光案Bで低いことが影響していたものと考えられる。

5.2 プロトタイプの開発

(1) プロトタイプの目標配光

平成29年度は、配光特性の異なる2種類のプ

ロビーム道路灯（配光案A・B）を試作した。その結果、ほとんどの模擬歩行者の視認性は両案ともに視認性評価（見難い：1，見やすい：7，7段階）においてその中間値となる4以上の評価となり、対向車線の鉛直面照度を抑え気味とした配光案Bのまぶしさが従来照明（対称配光）と同程度となった。また、同じ鉛直面照度（車道上0.8m）のとき、配光案Bの方が配光案Aよりもやや高い視認性が得られ、まぶしさが視認性評価の低下に影響していることが示唆された。これらを加味し、道路上の広範囲で横断歩行者の視認性を高めつつまぶしさを抑制する市街地向けプロビーム道路照明の目標配光（以降、配光案C）を再設計した。道路照明によるまぶしさの感覚は人により差異が大きく、歩道の利用が多い市街地ではまぶしさを抑え気味とする配光案Bに近い配光をプロトタイプの目標配光とした。

(2) プロトタイプの光学設計

プロトタイプの光学系は、平成29年度に開発した灯具と同様、特性の異なる3種類のレンズ（ビーム角：狭角8°，中角16°，広角28°）を用いることとし、これらのレンズを使用して配光が配光案Cに近似するよう光学シミュレーションを利用して光学設計を行った。配光案Cを実現するプロトタイプの光学設計では、灯具組立て時の施工性に配慮し、各レンズとも2個を1ユニットとする構成とした。配光案Cを実現するプロトタイプを構成するユニット数とユニット個々の照射角（以降、エイミング角という）は、光学シミュレーションを繰り返し行うことで明らかにした。プロトタイプは、9ユニットで構成した。各々のユニットの角度（平面図）を図5-4に示す。設計したプロトタイプの光学性能は、道路照明施設設置基準・同解説の性能指標を満足することを確認した(表5-1)。

(3) プロトタイプの道路設置条件

本研究ではテスト走路での実験を想定してきたことから、道路灯の設置位置を灯高8m，取付間隔32m（灯高の4倍），オーバーハング（以降、Oh：車道端部と灯具との水平距離）-0.7mでプロビーム道路灯の開発を進めてきた。しかし、実際の街路は、テスト走路の条件とは異なる。プロトタイプの光学設計による配光が、道路灯の標準的な設置条件（灯高：8mまたは10m， $-1 \leq Oh \leq 0$ m）において利用できるかを光学シミュレーションで検討した。

灯具設置時の道路横断方向に対する灯具の取付角度（鉛直角）と光束量をパラメータとして、光学特性値を求めた。表2に示すように、灯具の取付角度を3°間隔に調整できる機構を設けた条件を与えた光学シミュレーションからプロトタイプの光学設計による配光がプロビーム灯として必要十分な視認性（鉛直面照度，TI値）を得ることが明らかになった。

(4) プロトタイプの試作

標準的な道路設置で配光案Cがプロビーム道路灯として光学特性を満足することから、配光案Cをプロビーム道路灯のプロトタイプとして試作した。試作したプロトタイプの灯具の外寸と写真を、図5-5に示す。また、プロビーム配光では、ドライバ方向（灯具の背面）への意図的な照射はないが、灯具が発光することによりドライバへの光学的誘導効果が得られることを期待して、背面にフロストガラスを採用し器具内の散乱光がドライバから見えるよう工夫した。

(5) プロトタイプをテスト走路に設置したときの視認性とまぶしさの計測結果

1) テスト走路でのプロトタイプの光学特性計測結果

テスト走路に配光案Cで設定されたプロトタイプを設置し、平成30年11月に乾燥路面で光学特性計測（照度の測定）を行った。計測結果から、配光案Cに近似した鉛直面照度および水平面照度を得られるかどうかについて検討した。また、光学特性計測の結果と光学シミュレーションによる光学特性を比較し、光学シミュレーションの推定レベルを明らかにした。

プロトタイプの灯具をテスト走路に設置し、路面の水平面照度および鉛直面照度（高さ0.8m）分布を測定した。分布を知るため、P1-P2で囲まれた30m区間（以降、P1-P2区間）とP2-P3で囲まれた35m区間（以降、P2-P3区間）において、道路横断方向は1車線あたり3点（1.75m間隔）、道路縦断方向は5m間隔で路面の水平面照度と高さ0.8mの鉛直面照度を計測した。各々の地点における計測値と設計時の配光案Cの比を求めたところ、全ての点で比は0.9から1.1の間となった。テスト走路における計測結果から、配光案Cに近似したプロトタイプにより鉛直面照度および水平面照度を得ることが明らかとなった。

赤：狭角 8°、緑：中角 16°、青：広角 28°

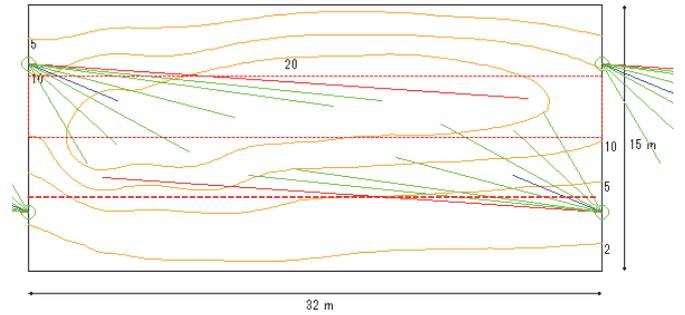


図5-4 光学設計による配光案Cの鉛直面照度分布（高さ0.8m）

表5-1 道路照明施設設置基準との比較

項目	基準	配光案C
平均路面輝度 (cd/m ²)	1.0	1.7
総合均斉度	0.4 以上	0.4
車線軸均斉度	0.5 以上	0.5
視機能低下グレア (TI値)	15% 以下	6.9%
歩道の路面平均照度 (lx)	5.0	5.4
歩道の照度均斉度	0.2	0.3

表5-2 プロトタイプの汎用性の検討

No.	灯高 [m]	オーバー ハング (Oh) [m]	光束 [lm]	灯具 取付角 [°]	走行 車線	対向 車線	TI値 [%]
					Ev0.8 [lx]	Ev0.8 [lx]	
1	8	-1.0	3,900	12	25.6	14	7.9
2	8	-0.7	3,900	9	26.0	13.1	7.2
3	8	-0.5	3,900	6	26.2	11.6	6.5
4	8	0.0	3,900	3	26.5	11.7	6.5
5	10	-1.0	5,700	6	24.9	14.6	8.3
6	10	-0.5	5,700	3	25.2	14.3	8.0
7	10	0.0	5,700	0	25.4	14.1	8.3

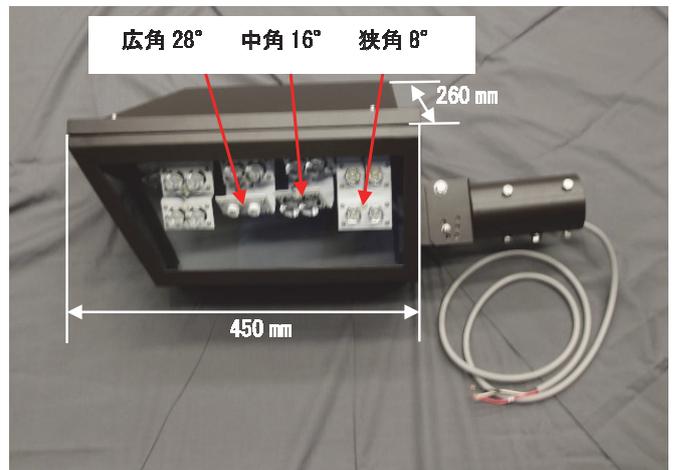


図5-5 プロトタイプ（プロビーム道路灯）の外観とサイズ

図5-6にP1-P2区間の設計時の配光案Cと実測による鉛直面照度分布を示す。両者とも光学設計時の配光案Cとほぼ同じ分布となった。テスト走路にプロトタイプの灯具を設置し光学特性を計測した結果は、光学シミュレーションによる設計時の光学特性とほぼ近い数値となったと言える。光学シミュレーションによるプロトタイプ配光の道路灯設計は有効と言えた。

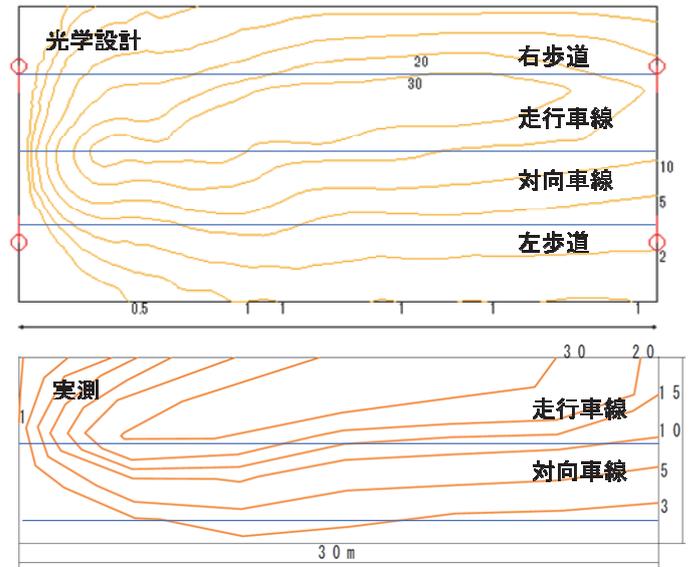


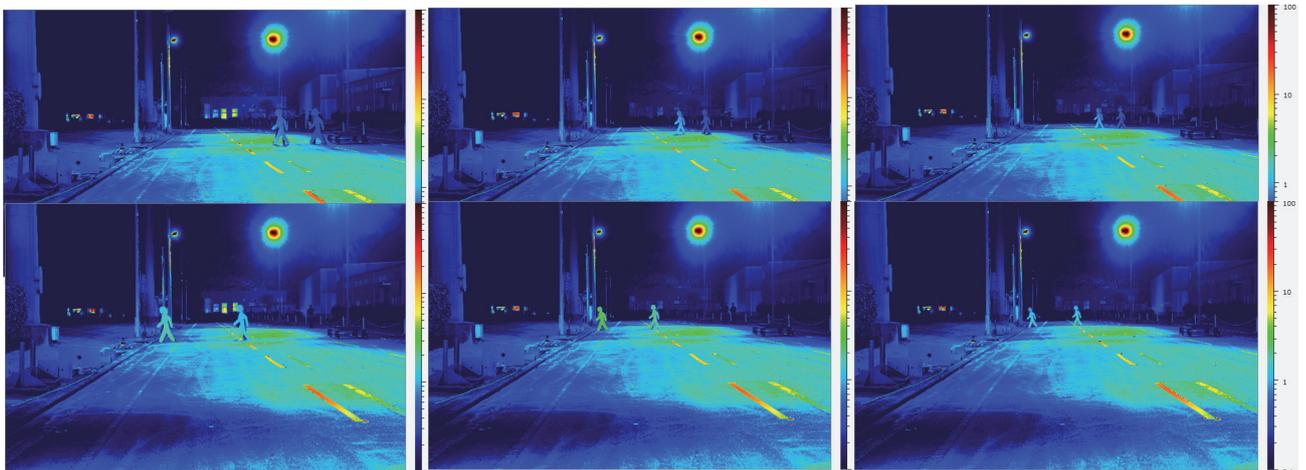
図5-6 プロトタイプの光学設計と実測による鉛直面照度分布（高さ0.8m）

2) まぶしさの結果

① ドライバのまぶしさ評価

プロトタイプのみぶしさを評価するために、平成29年度と同じ地点において等価光幕輝度と眼前照度を測定し、TI値を求めた。走行車線では、車線軸上のP1の前後10m地点において測定した。ドライバーが走行車線の平均路面輝度に順応しているときのVA地点、VB地点のTI値は10.7%、9.3%であった。対向車線の平均路面輝

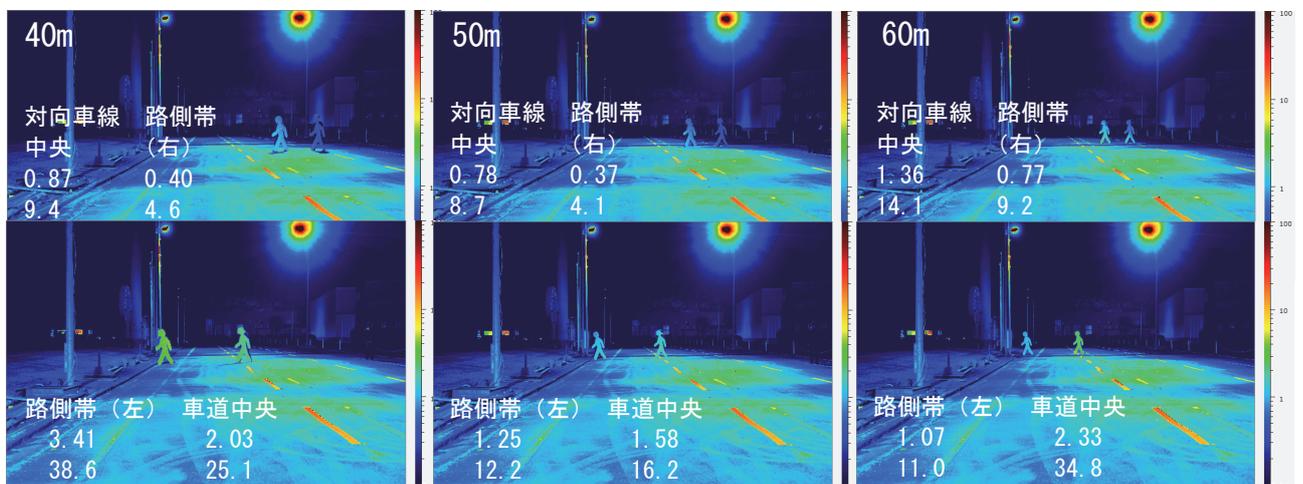
車両位置：VA



注1：輝度画像のスケールは0.1~100 (cd/m²) (青色のとき暗く、赤色のとき明るい)、注2：上段：輝度 (cd/m²)、下段：鉛直面照度 (lx)

図5-7 デジタルカメラの画像を用いた模擬歩行者の輝度分布（VA地点（車内）からの撮影

車両位置：VB



注1：輝度画像のスケールは0.1~100 (cd/m²) (青色のとき暗く、赤色のとき明るい)、注2：上段：輝度 (cd/m²)、下段：鉛直面照度 (lx)

図5-8 デジタルカメラの画像を用いた模擬歩行者の輝度分布（VB地点（車内）からの撮影

度に順応しているときは、それぞれ7.6%、7.3%であった。これらのTI値は、光学シミュレーションで予測していた値とほぼ同じであった。また、平成28年度の試作プロビーム照明の配光案Bとほぼ同じであった。

②歩行者のまぶした評価

プロトタイプのみぶしさを評価するために、平成29年度と同じ5ヵ所で等価光幕輝度と眼前照度を測定し、TI値を求めた。歩行者のTI値は、図4の「あ(10°)・い(15°)・う(20°)・え(25°)・お(30°)」の順に23.1%・21.0%・22.8%・35.9%・19.7%となった。平成29年度の試作プロビーム道路灯のTI値(12.5~24.0%)よりも高い値となった。テストコースの路面が汚れていたなどのために平成29年度よりも平均路面輝度が低くなったことが影響した。ただし、実際に市街地に設置したときには、道路周辺の明るさがあり、歩道におけるプロトタイプのTI値は低くなることが予想される。なお、CIE115:2010 2nd Editionでは歩行者空間のTI上限値を交通量等の条件に応じてクラス分けし20~35%以下という値を推奨している1)。

3) 模擬横断歩行者の鉛直面照度分布(高さ0.8m)と輝度分布

図5-7と図5-8に車両がVA地点とVB地点としたときのデジタルカメラの画像を用いた模擬歩行者の輝度分布を示す2, 3)。これらの図中に示した鉛直面照度(高さ0.8m)の数値は3.2~38.6 lxとなった。鉛直面照度は、図8に示す平成29年度の試作プロビーム道路灯の配光案Bに近い評価となった。主観評価結果と鉛直面照度の結果を踏まえると路側帯(右)に置いた視対象以外は「やや見えにくい」以上の視認性評価となると言えた。ただし、路側帯(右)など、対向車線側の鉛直面照度が若干低く、改良の余地が残った。

4) 道路照明施設設置基準・同解説の性能指標

照度計測、輝度計測、TI値の計測から、道路照明施設設置基準・同解説の性能指標に対応する計測結果を表5-3に示す。プロトタイプの灯具により計測した道路空間の光学特性は、道路照明施設設置基準・同解説の性能指標を満足していた。

表5-3 道路照明施設設置基準との比較

項目	基準	配光案C	実測
平均路面輝度(cd/m ²)	1.0	1.7	1.6
総合均斉度	0.4以上	0.4	0.7
車線軸均斉度	0.5以上	0.5	0.7
視機能低下グレア	15%以下	6.90%	8.30%
歩道の路面平均照度(lx)	5.0	5.4	NA
歩道の照度均斉度	0.2	0.3	0.5

※平均路面輝度は画像測光より。総合均斉度と車線軸均斉度は水平面照度より算出

5.4 プロビーム道路灯プロトタイプの社会実装に向けた検討

(1) 縦断勾配の影響

道路構造令では、第4種普通道路(都市部、その他の道路)、設計速度50km/hの縦断勾配を6%以下とするよう記載されている4)。そこで、プロトタイプ(プロビーム配光の道路照明)が縦断勾配6%に適応できるかについて光学シミュレーションを用いて検討した。具体的には、開発したプロビーム道路灯(プロトタイプ、灯具高さ:10m、灯具間隔:40m、オーバーハング:-0.7m)鉛直面照度分布を求め、縦断勾配の影響を検討した。また、勾配があっても、灯具は水平に設置するものとした。ただし、鉛直面照度と水平面照度は光学シミュレーションで推定できるが、勾配があるときの路面の反射率の標準値がなく、輝度分布を推定できない。勾配があるときTI値を求めることができない。このため、鉛直面照度からまぶしさを推測した。

図5-9(A)(勾配0%)は、光学シミュレーションによる勾配0%における鉛直面照度分布(高さ0.8m)を示している。上り勾配を大きくするにしたがって配光案Cの平均水平面照度ならびに平均鉛直面照度は少しずつ低下した。図5-9(B)は、上り勾配6%のときの鉛直面照度分布(h=0.8m)を示している。上り勾配6%のときの走行車線の平均水平面照度は約5%(26.1 lx → 24.7 lx)、高さ0.8mの平均鉛直面照度は約20%(25.6 lx → 20.4 lx)低下した。ただし、「やや見えにくい」レベルで歩行者を視認できる8 lx(鉛直面照度、図5参照)が確保できているエリアに大きな差異はなかった。上り勾配と同様、下り勾配が大きくなるにしたがって配光案Cの平均水平面照度や平均鉛直面照度は若干変化した。図5-9(C)は、下り勾配6%のときの鉛直面照度

分布 (h=0.8m) を示している。対向車線側に鉛直照度の高いエリアが広がっており、まぶしさが高くなる懸念がある。なお、平均照度が低下する割合は、勾配が無いときと比較して、平均水平照度は約6% (26.1 lx → 24.5 lx)、平均鉛直照度は約10% (25.6 lx → 23.0 lx) であり、上り勾配よりも変化量が少ない結果となった。

(2) 曲線半径の影響

縦断勾配の検討と同様、設計速度50km/hとして対面通行2車線道路を想定し、曲線半径の影響を検討した。道路構造令では、設計速度50km/h の場合、最小の曲線半径はR=100mとしている(4)。なお、電気通信施設設計要領 平成29年版(5)には、曲線部において直線部と同等の照明性能を確保するための手法として、灯具間隔の補正係数が紹介されている。本検討においても、これを適用した。ここでは、曲線半径700m・300m・100mの道路区間に配光案Cの灯具を設置するとして、光学シミュレーションを実施した。なお、灯具の設置向きは、外側線の垂線方向に向けて設置することを基本としたが、曲線半径に応じて道路形状と配光形状(光軸の方向)が一致するように配慮し、光学シミュレーションでは水平方向の取付角度を調整した。

R=700mとR=100mの高さ0.8mの鉛直照度分布を図5-10(A)と図5-10(B)に示す。曲線半径700mの鉛直照度分布は、図5-9(A)に示した直線道路と近い結果となった。100mの場合は、灯具間隔を28m (=40m×0.7) とし、道路線形と光軸方向を最適化した。灯具間隔が短くなったことなどが影響し、対向車線の高さ0.8mの鉛直照度が2倍になった。まぶしさについては、曲線部の道路の輝度分布を光学シミュレーションで再現できないため鉛直照度の値から推測すると、対向車線の鉛直照度が高くまぶしくなることが懸念された。曲線半径が小さい場合、まぶしさについてフィールドで検証することが望ましい。

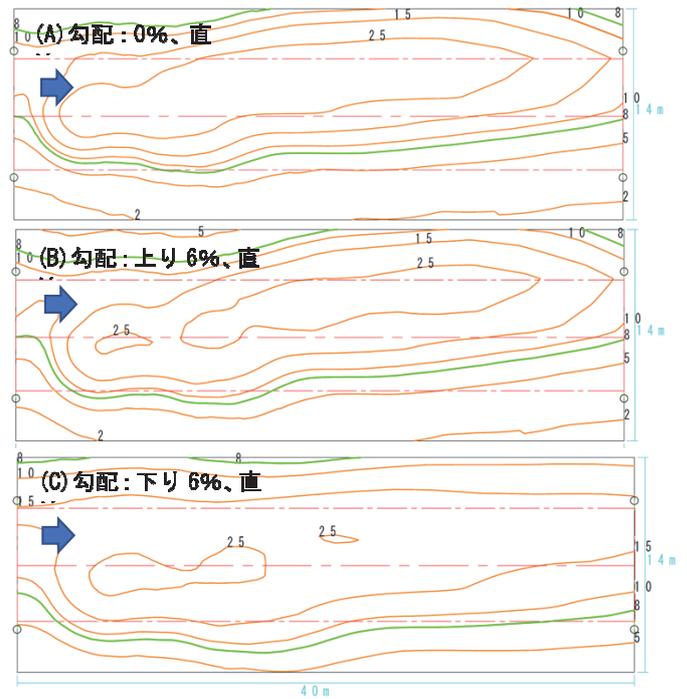


図5-9 勾配を考慮したときの鉛直照度分布 (プロトタイプ、光学シミュレーションによる計算結果、灯具間隔40m)

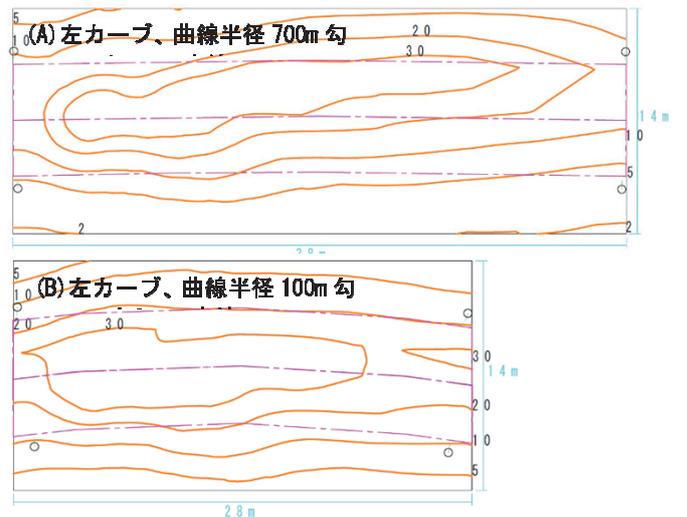


図5-10 曲線を考慮したときの鉛直照度分布 (プロトタイプ、光学シミュレーションによる計算結果、灯具間隔は曲線半径に応じて設定)

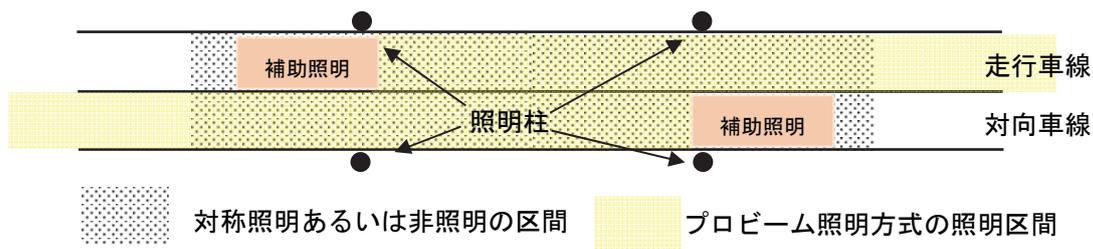


図 5-11 サービスイン、サービスアウト時の照明

(3) プロビーム照明と従来照明の接続

非照明区間あるいは対称照明区間からプロビーム照明区間に車両が進入する場合（以下、サービスイン、図5-11）や、プロビーム照明区間から非照明区間あるいは対称照明区間に進入する場合（以下、サービスアウト、図5-11）の試験を実施した。その結果、プロビーム照明方式のサービスイン時の器具直下は、対称照明方式よりも照度が低く視認性が劣ることが分かった。このためプロビーム照明区間への円滑な進入を可能にするには、補助照明（これまでの対称照明と同じ灯具）の設置を検討することが有効と思われる。一方、サービスアウト時は対称照明方式よりもプロビーム照明方式の方が遠くまで光が届き視認性が良いことを確認した。この傾向はプロビーム照明の照明範囲が、対称照明と比較し前進方向にシフトするためである。ドライバにとって急激な照度変化は順応速度の遅い暗順応時には問題となるが、緩やかに鉛直面照度が低下していくプロビーム照明のサービスアウトは好ましい変化といえる。

(4) 省エネルギー性について

ドライバは、通常の照明区間（対称配光）で横断歩行者をシルエットで視認する。一方、プロビーム配光の道路照明では、ドライバは背景よりも明るい状況、逆シルエット視で横断歩行者を視認する。両者の目指す視環境が異なる条件ではあるが、施工後の経済性について比較した。表5-4に両者の消費エネルギーを示す。ただし、消費電力と固有エネルギー消費効率は、LEDチップの性能に依存するので参考値とする。

対面通行2車線道路を照明する場合、対称配光は一般に片側配列だが、プロビーム配光では向合せ配列もしくは千鳥配列で灯具を設置する必要がある。このため、市街地における任意区間をプロビーム配光で照明するには、対称配光の2倍の灯具数を設置する必要がある。しかし、プロビーム配光の光源光束は、対称配光の49%であり必要光束は同程度となる。したがって、2車線道路にプロビーム配光を採用すると、消費電力が同じにもかかわらず、ドライバからの横断歩行者の視認性が高めることが可能となる。また、片側2車線の往復4車線道路の場合は、対称配光も走行方向別に灯具を設置することになる。プロビーム配光とすることで、消費電力をほぼ半分にできる。

表5-4 対象配光とプロビーム配光の道路灯の消費エネルギーの比較

照明方式	プロビーム配光	対称配光
灯具型式	プロタイプ	KCE100-2 ※2
光源光束	5,700 lm	11,600 lm
消費電力 ※1	51.0 W (100V)	85.3 W (100V)
固有エネルギー消費効率	112 lm/W	135.9 lm/W

※1 対称配光は初期光束補正機能付きのため、消費電力は最大値を示す

※2 KCE100-2は建電協型式であり「一般国道1.0cd/m² 2車線」に適合する灯具

(5) 路面湿潤のときの視認性

車内から前方を横断する歩行者の映像を用い、路面湿潤のときに実験参加者が横断する歩行者をどこで発見するかを計測する室内実験を行った。視環境条件としてプロビーム照明と対称照明を湿潤路面で点灯させている場合を設定した。いずれの場合も車両のヘッドライトをロービームで点灯させた。対称照明のとき、鉛直面照度分布の影響を考慮し、鉛直面照度が低いところ（対称照明：見難い）と鉛直面照度が高いところ（対称照明：見やすい）の2条件を設定した。以上から、視環境が3種類、横断方向2種類（左右）を組み合わせた12条件で撮影を行った。

図5-12は、衝突地点を原点とし、路面湿潤時において実験参加者が横断歩行者を発見したときの平均横断歩行者位置を示している。

- ・プロビーム照明のとき、右からの歩行者の発見位置は衝突地点から右で5.5mとなった。対称照明のとき、見やすい条件で5m、見難い条件で4mとなった。

- ・プロビーム照明のとき、左からの横断歩行者の発見距離は4.5mとなった。対称照明（見やすい）のとき6.5m、対称照明（見難い）のとき6m弱となった。

路面が湿潤となっても、プロビーム照明の横断歩行者発見距離は、対称照明と比較して十分な安全なレベルであった。

(6) 仮想道路照明空間における視認性評価実験の有効性

夜間の交通安全を考えるうえで、実際の道路照明環境での評価実験は必要不可欠ではあるが、様々な条件を設定するのは設計と費用の点から困難であり、また安全面からも問題が多い。

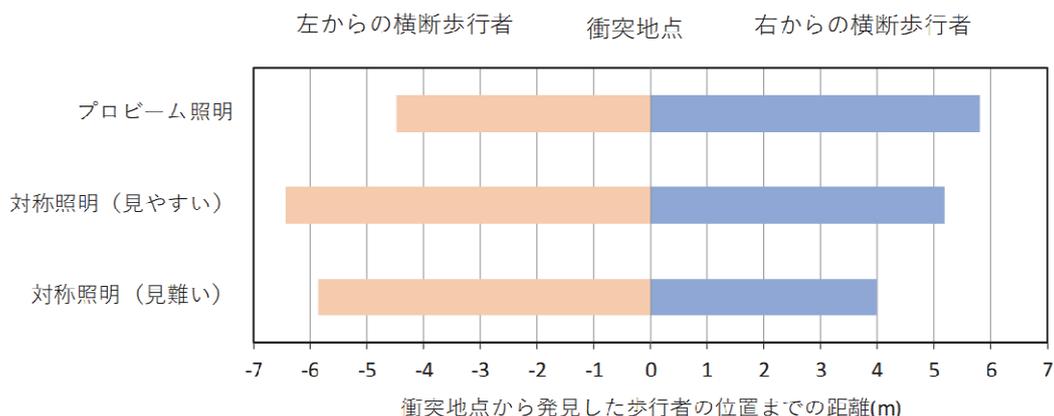


図 5-12 実験参加者が横断歩行者を発見したときの衝突地点からの断歩行者位置

そこで今回、仮想現実感 (Virtual Reality) 技術を導入し、実環境の道路照明条件を忠実に仮想空間内に再現して同様の手順で実験を行うことで、実空間と仮想空間で実験結果が定量的に一致することを検証した。

道路サンプルの双方向分光反射率(BRDF)を暗室内で測定した (図5-13)。角度条件は θ_v が $60 \sim 82.5(\text{deg})$ 、 θ_l が $-60 \sim 60(\text{deg})$ の範囲の計70条件とし、これらの角度条件を道路サンプルと光源を動かして設定した。図5-14に測定結果を示す。縦軸の視感反射率は道路領域の平均輝度を光源の輝度($120\text{cd}/\text{m}^2$)で除算して求めた。仮想空間はUnreal Engine 4 (Epic Games製) で構築した。今回は測定した値を角度ごとに直接指定し、それらを補間することで全立体角における視感反射率を得ることができる。

実空間での実験を仮想空間内で再現するために、照明条件2条件(プロビーム照明・対称照明)の下、ターゲットを12か所に設置し、その見えやすさを7段階評価した。各条件の道路画像は暗室内で大型モニタ上に3秒間呈示された。図5-15は、プロビーム照明下でのターゲットの位置ごとの評価実験の結果の平均値を仮想空間と実空間で比較したものである。実験参加者が両実験間で異なるにもかかわらず、両実験の結果は定量的にも類似($R=0.90$)しており、今回の仮想空間内での評価実験を行うことで、実空間の視認性を精度よく検討できることを示唆している。

5.5 まとめ

プロビーム配光を持つ道路灯の具体化検討から、まぶしさを抑制しつつ道路空間全体の鉛直面照度を高くするプロトタイプを開発した。テスト走路を想定してプロトタイプを開発したが、通常の灯具高さ10m、灯具間隔40mであ

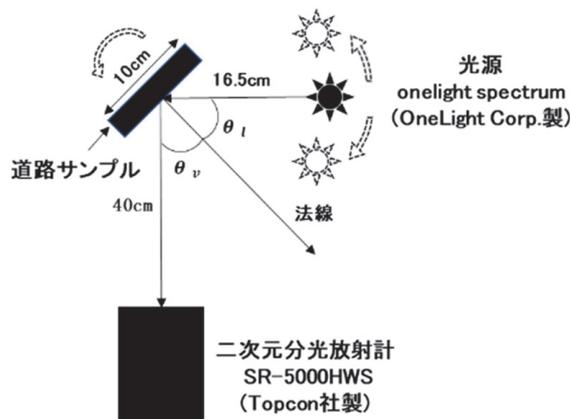


図5-13 道路サンプルを使った反射率の測定

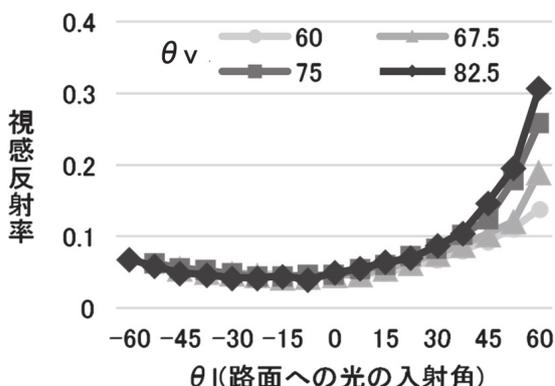


図5-14 視感反射率の計測結果

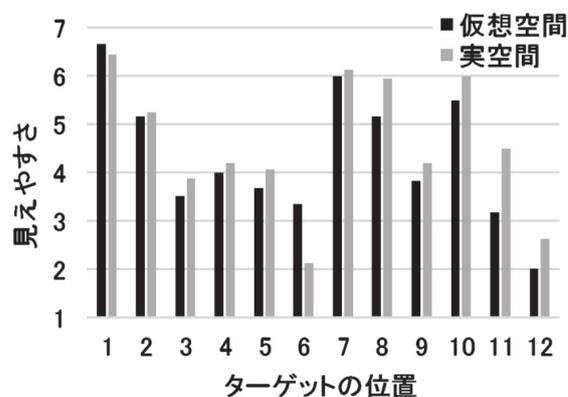


図5-15 実空間とVR空間での見えやすさ評価結果の比較

っても運用可能であることが明らかとなった。テスト走路にプロトタイプを設置することから、道路空間の鉛直面照度を均質に高めることができ、ドライバから見たときの左右からの横断歩行者を早期に発見できることを見込めた。ただし、ドライバのTI値を低く抑えられたが、歩道における歩行者のTI値が高く、配光の修正を行うべきと言えた。

また、プロトタイプの開発過程において光学シミュレーションによる光学特性結果とテスト走路に設置した灯具による光学特性結果がほぼ一致することが明らかとなり、光学シミュレーションを使うことで様々なプロビーム配光を検討できることが示せた。このため、光学シミュレーションを用いて社会実装に向けた検討を多々行った。縦断勾配およびカーブがプロビーム道路灯の視認性およびまぶしさに与える影響を検討した。光学シミュレーションを用いてプロビーム配光の道路照明（プロトタイプ、配光C、灯具間隔40m）を縦断勾配がある道路（上り勾配6%と下り勾配6%までの範囲）に採用しても、勾配がないときと同様に横断歩行者を視認しやすいレベルの鉛直面照度を得た。ただし、下り勾配が大きな場合はまぶしさが高まる懸念があった。一方、曲線半径が100mとなったとき、対向車線の高さ0.8mの鉛直面照度が2倍になった。対向車線の鉛直面照度が高くまぶしくなることが懸念された。縦断勾配が下りとなるとき、曲線半径が小さいとき、まぶしさについてフィールドで検証することが望ましいと言えた。

参考文献

- 1) LIGHTING OF ROADS FOR MOTOR AND PEDESTRIAN TRAFFIC, CIE 115 2nd Edition, 2010, The International Commission on Illumination (CIE).
- 2) 江湖俊介, 山田哲司: 道路照明におけるデジタル測光の可能性, 平成 23 年度照明学会全国大会, No.5-21, p.119 (2011).
- 3) Yamada T, Kohko S.: Glare evaluation system using imaging photometry, Proceedings of CIE Centenary Conference, pp.627-633 (2013).
- 4) 道路構造令の解説と運用、公益社団法人・日本道路協会、平成 27 年 6 月。
- 5) 電気通信施設設計要領（電気編）、国土交通省・大臣官房・技術調査課・電気通信室、平成 29 年 3 月。

第6章 まとめ

プロビーム方式による道路灯の目的は、夜間における横断歩行者事故を低減することにある。それ以外にも、自動車の進行方向を明るくすることには多くのメリットがある。それらのためには、道路空間の鉛直面照度を高める必要がある。鉛直面照度が均質に高いことから、道路空間全体が明るくなり、ドライバから見たときの左右からの横断歩行者を早期に発見でき、夜間の横断歩行者事故を低減できる効果を見込める。情報収集（TRB）から、夜間事故に及ぼす街路照度影響の調査結果が報告された。

一方、このようなプロビーム照明の設計要件を満たすためのプロビーム配光を本研究では明らかにしてきている。平成29年度に静止状態の視認性評価と映像による横断歩行者の発見時間計測を行った結果、配光案A・Bとも、平成28年度の試作灯具と比較して対向車線を含めた道路空間全体の視認性が高く、右からのみでなく左からの横断歩行者の発見時間を高めることを明らかにできた。また、映像による実験から、配光案A・Bとも横断歩行者が歩道にいるときから発見でき、歩行者事故の低減に十分効果的となることを明らかにした。さらに、平成28年度と平成29年度の静止実験の結果から、前方視距30mから60mで安定した視認性を提供するには、自車線中央・中央・右車線中央で10lxから20lx程度の鉛直面照度が必要となることを明らかにした。

これらから得られた知見を勘案して所要配光の見直しを行った。配光案Bの配光は、配光案Aよりもまぶしさは軽減されているが、静止実験での視認性が対向車線において配光案Aより低い結果となった。以上から、配光案Bのグレアレベルを多少緩和し、対向車線の鉛直面照度を高めた配光案Cを提案した。平成30年度の

調査でC案をベースに灯具を設計し、通常道路照明として設置可能な灯具のプロトタイプを試作した。プロトタイプは、およそ5,500 (lm)の器具光束を有し、照明器具を灯高8mに向合せ配置したとき、道路空間全体の平均鉛直面照度は27.3(lx)、最小値10.2(lx)となった。

平成28年度、平成29年度、平成30年度の成果から、まぶしさを抑制しつつ道路空間全体の鉛直面照度を高くする灯具を開発できた。歩道を含めた道路空間全体の横断歩行者の視認性が対称照明より格段に高くなった。平成30年度は、市街地の道路で設置可能なプロビーム配光を持った灯具を開発すると同時に、5章に記述したように、社会実装に向けた検討を多々行った。道路線形の影響を検討し、カーブや勾配など道路線形がプロビーム道路灯の視認性およびまぶしさに与える影響を検討した。また、VR技術を用いて仮想空間内での評価実験を行うことで、実空間の視認性を擬似的に精度よく評価できることを示すこともできた。今後はVRによって、静的及び動的条件下における視認性評価実験を実施し、様々な条件下での最適照明設計を効率的に行える。

本研究では、夜間における横断歩行者事故の抑制を目的にプロビーム照明を検討した。一方、車両の進行方向に光を発するプロビーム配光の道路照明を利用するメリットは、他にも多々ある。

①夜間における自転車（灯火が貧弱）の車道走行を支援できる。自転車は、前方が暗い車道を走行することに恐怖感を持っている。プロビームにより前方の道路空間が明るくなり、安心して走行できる。また、自転車の背後が明るくなり、ドライバからの被視認性も向上する。

②トンネル照明ではプロビームによる照明が

実際に設置され、速度の安定や追突事故の減少などに貢献している。市街地の道路および交差点にプロビーム道路灯を設置することから、車両間の追突事故の減少および交差点における歩行者事故の減少に貢献できる。

③道路空間全体が明るくなることから、街路周辺のネオンの影響を受け難くなり、安定した視環境を確保できる。また、防犯効果も見込め、歩行者が安心して街路を利用できるようになる。車道のみでなく歩道部分を照明でき、歩道照明が不要となる。また、歩道上の歩行者が明るくなることで、横断しようとする前の状況をドライバは認知できる。

④ヘッドライトは前方の対象物を周辺よりも明るく見える方式（逆シルエット視）であり、プロビーム照明とすることでヘッドライトとの相乗効果を得れる。車両の前方が「明」となり、その範囲も拡大することから、車載カメラセンサがその性能を発揮しやすくなる。

⑤路面標示や標識は反射塗料内に再帰反射性（硝子ビーズ）が入っており、進行方向の光が再帰反射しそれらの視認性が高くなる。

本研究ではプロビーム配光を持った道路灯のプロトタイプを開発し、その性能をテスト走

路で検証し、有効性を明らかにした。この灯具を市街地の横断歩行者事故が多い区間あるいは夜間の乱横断が多い区間に設置し、鉛直面照度を高めた効果を検証する必要がある。このとき、プロトタイプの設置により不十分となった性能の修正と同時にプロビーム配光のデメリットを解消するための新たな技術開発が今後の課題となる。

また、プロビーム道路照明の効果が、横断歩行者対策以外において最も期待される箇所として、交差点がある。交差点周辺にプロビーム道路照明を設置することから、ドライバの進行方向となる交差点手前から交差点内および交差後の横断歩道付近までの広範囲における鉛直面照度が高くなる。車両と横断歩道およびその周辺における歩行者との事故の抑制に加え、右左折車の減速による追突事故などの車両間で発生する事故の抑制に貢献できる可能性がある。本研究では交差点の形状にマッチした配光まで検討していない。様々な交差点の形状に合わせたプロビーム配光を持った道路灯具設計が今後の展望となる。

以上