

# 屋外歩行者空間の不快感評価

2016年9月

江湖俊介



# 概 要

本研究の目的は、屋外歩行者空間に設置された街路灯から感じる不快グレアと測光量との関係を解析し、グレアが発生しにくい LED 街路灯を開発するための指標を得ることと、LED 街路灯が設置された歩行者空間に適応できる不快グレア評価法を提案することにある。これら 2 つの知見が得られれば、夜間の歩行者空間に良好な視環境を形成するための一翼を担うことができると考えている。

本研究は 5 章より構成される。

第 1 章「序論」では、まず初めに研究背景として、グレア評価に関する研究の歴史と、屋外環境を対象としたグレア評価の主要な基準や指針を整理する。次に、LED 照明が急速に普及しつつある現状と、LED 照明の普及により顕在化してきた屋外歩行者空間のグレア評価に対する課題について述べ、本研究の目的を示す。

第 2 章「グレア計測のためのデジタル測光」では、光計測機器メーカーから市販されている 2 次元輝度計を屋外で使用する際の課題を示し、本研究で輝度分布測定に使用した画像測光システム（写真測光法）のアルゴリズムを説明する。そして最近照明業界で問題視されている画像測光システムが抱える課題について紹介し、その対策方法について意見を述べる。最後に、グレアと密接な関係にあると考えられている等価光幕輝度を輝度分布から算出する方法を解説する。

第 3 章「歩行者空間のためのグレア評価手法」では、屋外で実施した大規模な主観評価実験について報告する。照明器具発光部の輝度分布が不均一な場合、グレアを感じやすいことが、いくつかの既往研究により指摘されている。そこで、屋外歩行者空間においても同様の傾向が見られるのかを確認し、照明器具発光部の輝度均斉度が不快グレア評価にどの程度影響したのかを定量的に示す。さらに、照明器具

発光部の輝度分布の均一性に関わらず（従来光源と LED 光源を区別することなく）屋外歩行者空間の不快感を説明できる測光量を特定する。そして、特定した測光量を用いて不快感を数値化する評価方法を提案する。

第 4 章「不快感評価式の検証」では、テスト光の一部に不快感を強く感じる LED 街路灯を採用して実施した主観評価実験について報告する。ここでは、第 3 章に示した不快感と測光量との関係や、提案した不快感評価式の汎用性を検証するとともに、配光データから不快感を予測するための方法を提案する。

第 5 章「結論」では、第 1 章から第 4 章までを総括し、不快感を定量的に評価できることの重要性と、本研究の有用性を明らかにする。また、今後の課題についても述べる。

# 目 次

第 1 章 序論 .....	1
1.1 グレア研究の歴史 .....	3
1.2 グレア評価方法 .....	4
1.2.1 グレア研究の系譜 .....	4
1.2.2 道路照明のグレア評価 .....	5
1.2.3 屋外スポーツ施設のグレア評価 .....	8
1.2.4 歩行者空間のグレア評価 .....	10
(1) 照明学会の技術規格	
(2) 国際照明委員会の技術レポート	
(3) ノルウェーの指針	
(4) 英国の指針	
1.3 本研究の背景と目的 .....	13
第 2 章 グレア計測のためのデジタル測光 .....	15
2.1 まえがき .....	17
2.2 輝度分布の測定方法 .....	17
2.3 画像測光の測定精度 .....	20
2.4 等価光幕輝度の算出方法 .....	24
2.5 まとめ .....	27

第 3 章 歩行者空間のためのグレア評価手法 .....	29
3.1 はじめに .....	31
3.2 主観評価実験 I の概要 .....	32
3.2.1 実験施設 .....	32
3.2.2 実験方法 .....	33
3.2.3 光学測定 .....	34
3.3 実験結果 .....	36
3.3.1 観測位置の影響 .....	36
3.3.2 測光量との関係 .....	42
(1) グレア評価と GR の関係	
(2) グレア評価と眼前照度の関係	
(3) グレア評価と輝度の関係	
(4) グレア評価と有効グレア輝度の関係	
3.4 不快グレア評価式の検討 .....	46
3.5 まとめ .....	49
第 4 章 グレア評価式の検証 .....	51
4.1 はじめに .....	53
4.2 主観評価実験 II の概要 .....	54
4.2.1 実験施設 .....	54
4.2.2 実験方法 .....	55
4.2.3 光学測定 .....	56
4.3 実験結果 .....	56
4.3.1 評価順序の影響 .....	56
4.3.2 観測位置の影響 .....	57

4.3.3 測光量との関係 .....	58
(1) グレア評価と等価光幕輝度や眼前照度との関係	
(2) グレア評価と GR の関係	
(3) グレア評価とテスト光発光部輝度との関係	
4.4 m_DGI の有効性 .....	67
4.5 不快グレアの予測 .....	68
4.6 まとめ .....	69
第 5 章 結論 .....	71
5.1 結論 .....	73
5.2 おわりに .....	75
参考文献 .....	77
付 表 .....	81
発表論文 .....	113
謝 辞 .....	118





# 第 1 章 序 論



## 1.1 グレア研究の歴史

物の見えづらさや不快感を生じさせる“まぶしさ”のことをグレア (glare) といい、グレアは目の機能（物体を見る能力）を生理的に損なう「減能グレア」と心理的に不快感を引き起こす「不快グレア」に大別することができる。一般に人がグレアを感じる時の視覚の状態は、視野の中に過度の輝度対比があるか、もしくは著しく高い輝度分布が存在する場合とされる。

グレアに関する研究の歴史は古く、白熱電球のフィラメントが炭素からタングステンに変わり、従来よりも強い光刺激が問題視されはじめた 1910 年代にまでさかのぼる。1926 年には Holladay によって等価光幕輝度の概念が示され<sup>1)</sup>、1949 年には Guth によって快と不快の境界輝度 (BCD 輝度 : Borderline between Comfort and Discomfort) が提案されている<sup>2)</sup>。また Guth はグレア評価の基本式も提案しており、この基本式を構成する下記の 4 つの要素は、グレアの程度を左右する説明変数として現在も支持されている。

- 光源の輝度 : 対象の輝度が高いほどグレアが著しい
- 光源の立体角 : 光源の見かけの大きさが大きいほどグレアが著しい
- 視野の平均輝度 : 目が順応している輝度が低いほどグレアが著しい
- 光源の位置 : 光源が視野の中心近くに位置するほどグレアが著しい

蛍光ランプの普及時期にあたる 1940 年代から 1960 年代にはグレアに関する研究が活発化し、1960 年代になると国際照明委員会（以下、CIE という。）のウィーン大会とワシントン大会において、当時各国が採用していた屋内グレアの評価方法が比較されている。この頃は、屋内施設を対象とした不快グレアの研究が主流であったが、道路施設における減能グレアについての検討も行われている。一方、屋外施設を対象とした不快グレアの研究は、1982 年に Han Tekelenburg が発表した投光照明された屋外スポーツ施設に関する論文<sup>3,4)</sup> が最初のもので、屋内施設と比較して後発であった。

そして LED 照明が急速に普及しつつある現在も盛んに研究されていることを考えると、光源技術の発展とグレア研究の盛り上がりには関連性があると思われる。

## 1.2 グレア評価方法

### 1.2.1 グレア研究の系譜

主要なグレア研究の系譜を図 1-1 に示す。グレア評価の基準や指針には、光環境のまぶしさの程度を数値化する方法と、照明器具の光学的特性に制限を設けてまぶしさを抑制しようとするものがある。本章では、屋外環境を対象としたグレア評価法に着目し 1.2.2 から 1.2.4 に整理する。

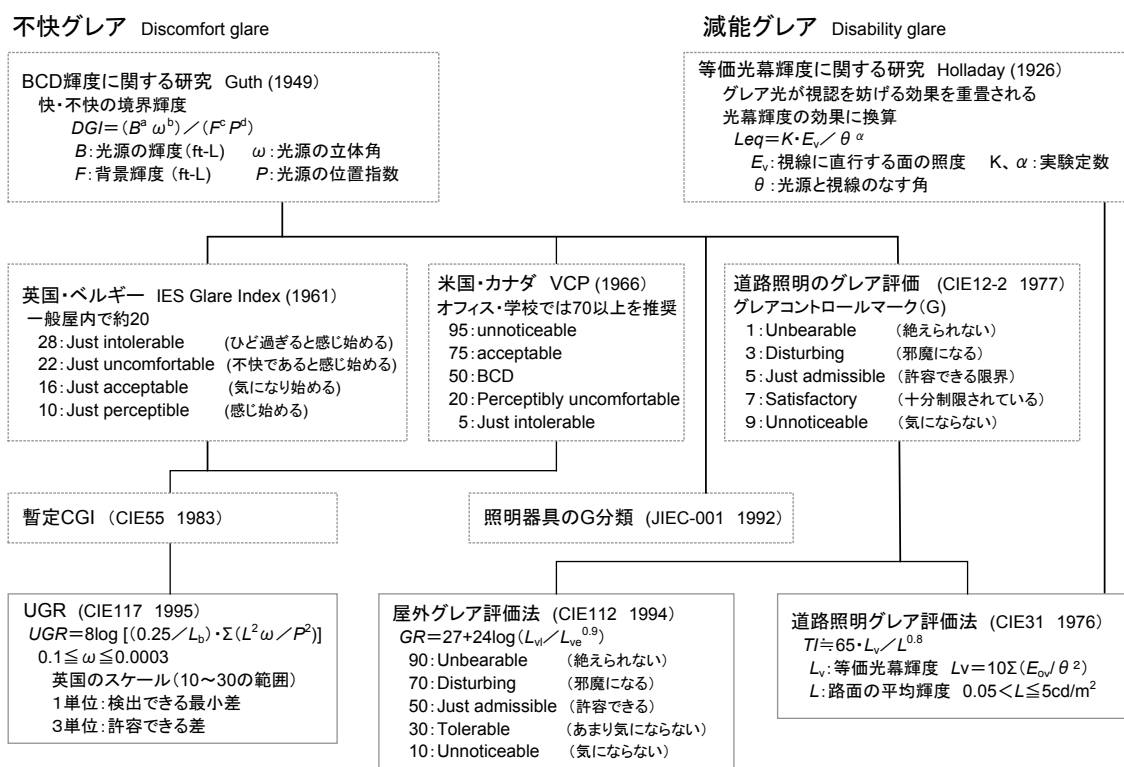


図 1-1 グレア評価の系譜

## 1.2.2 道路照明のグレア評価

日本国内の道路照明施設は、「道路照明施設設置基準・同解説」に基づき設計されている。この昭和56年版では、道路照明によって生じるグレアを不快グレアで評価するよう示しており、グレアコントロールマーク  $G$  (式 1-1) を採用している<sup>5,6)</sup>。

$$G = SLI + G_R + G_M - G_N \quad \dots \dots \dots \text{式 1-1}$$

ただし、

- $SLI$  : 灯具の配光特性および発光面積に基づく照明器具固有のグレア係数 (Specific Lantern Index)
- $G_R$  : 平均路面輝度に基づくグレア係数
- $G_M$  : 灯具の取付高さに基づくグレア係数
- $G_N$  : 道路延長 1km 当りの設置灯数に基づくグレア係数

グレアコントロールマーク  $G$  の値とグレアの程度との関係は、表 1-1 に示すような感覚尺度で表され、 $G$  の値が大きいほど不快グレアは少ないことになる。したがって、照明器具固有の  $SLI$  の値が大きいことが重要な要件となる。表 1-2 は標準的な道路照明器具の  $SLI$  を示したものである。なお、表中のカットオフ形とは、運転者に対するグレアを厳しく制限した道路灯の配光を指し、グレアを少なくする必要がある重要な道路に適応する。セミカットオフ形は、運転者に対するグレアをある程度制限した配光で、道路の周辺が比較的明るいところに適している(表 1-3 参照)。このため市街地にはセミカットオフ形の道路灯が多用されている。

一方、基準の運用面においては、グレアコントロールマークが採用されてはいるが、当時は道路照明の基準が仕様規定であったため、個々の照明設計に対して  $G$  の値が計算されることは少なかった。

表 1-1 グレアコントロールマーク G と 感覚尺度

G	感覚尺度
1	unbearable (耐えられない)
3	disturbing (じゃまになる)
5	just admissible (許容できる限界)
7	satisfactory (十分制限されている)
9	unnoticeable (気にならない)

表 1-2 SLI の標準値

グレア係数		SLI		
		12,500 lm	25,000 lm	50,000 lm
灯具配光	光源光束			
カットオフ形		5.6	4.6	3.6
セミカットオフ形		2.7	1.7	0.7

表 1-3 配光形式による光度の制限

	光度 [ cd/1,000 lm ]	
	鉛直角 90 度	鉛直角 80 度
カットオフ形	10 以下	30 以下
セミカットオフ形	30 以下	120 以下

「道路照明施設設置基準・同解説」は、平成 19 年 10 月に昭和 56 年版から改定され、その際に CIE115 との整合が図られ、道路照明のグレア評価に相対閾値増加を採用した<sup>7)</sup>。相対閾値増加は、減能グレアを評価するもので、一般に TI 値 (The value of threshold increments) と呼ばれ、式 1-2 に示すように、グレアが存在しない状態に対して、グレアが存在することによって障害物などの視認能力が低下する割合と定義されている。1995 年に発行された CIE115 によれば、TI 値が制限値以下であり、減能グレアが適切に抑制されている状態であれば、不快グレアは許容できる範囲にあるものとされている<sup>8)</sup>。なお、国内で TI 値は、高速自動車国道では 10% 以下、一般国道やトンネルでは 15% 以下を目標値として規定されている<sup>7)</sup>。

$$TI = \frac{(\Delta L_{G1} - \Delta L_0)}{\Delta L_0} \times 100 \quad [\%] \quad \dots \dots \dots \quad \text{式 1-2}$$

ただし、

$\Delta L_{G1}$  : グレアが存在するときの障害物を視認するために必要な障害物と背景路面との最小輝度差

$\Delta L_0$  : グレアが存在しないときの障害物を視認するために必要な障害物と背景路面との最小輝度差

また TI 値の計算は、路面の平均輝度を背景輝度と考えることができる場合には、式 1-3 の実験式を使用することができる。

$$TI \cong 65 \cdot L_{v1} / L_r^{0.8} \quad [\%] \quad \dots \dots \dots \quad \text{式 1-3}$$

ただし、

$L_{v1}$  : グレア光による等価光幕輝度 [cd/m<sup>2</sup>]

$L_r$  : 路面の平均輝度 [cd/m<sup>2</sup>]

適用範囲 ; 0.05 < L < 5 cd/m<sup>2</sup>

### 1.2.3 屋外スポーツ施設のグレア評価

投光照明された屋外スポーツ施設の不快グレアは、1994年にCIEがCIE112で規定した不快グレアの評価手法（GR；Glare Rating）によって求めることができる<sup>9)</sup>。GR値は、照明塔方向を俯角2度で観測した際の不快グレアの程度を、式1-4により数値化し、表1-4に示す判断基準を用いて評価するものである。JIS Z 9127 スポーツ照明基準（2011）では、グレアを考慮する必要があるスポーツの場合、競技により許容できるGRの上限値を50または55としている。

なお、式1-4は、オランダの屋外140フィールド（水平面照度50～1,500 lx）で照明塔の地際（※照明塔と地面が接するところ）を見たときのグレアを印象評価させて得られた3,000のデータから求めた実験式を変形したものである<sup>3,4)</sup>。したがってGRは屋外スポーツ施設専用の評価法といえるが、川上らは体育館などの屋内スポーツ施設においても、そのまま適応できることを明らかにしている<sup>10)</sup>。

$$GR = 27 + 24 \log(L_{vl}/L_{ve}^{0.9}) \quad \dots \dots \dots \text{式 1-4}$$

ただし、

$L_{vl}$  : グレア光による等価光幕輝度 [ cd/m<sup>2</sup> ]

$L_{ve}$  : 反射光による等価光幕輝度 [ cd/m<sup>2</sup> ]

$$L_{ve} \cong 0.035 E_h \rho / \pi$$

$E_h$  : 水平面照度 [ lx ]

$\rho$  : 反射率（例；芝の反射率は約20%）

表 1-4 GR の判断基準

GR	グレアの程度
90	Unbearable（耐えられない）
70	Disturbing（邪魔になる）
50	just admissible（許容できる限界）
30	tolerable（あまり気にならない）
10	unnoticeable（気にならない）



一般に人がグレアを感じる際には、視野の中に過度の輝度対比があるか、もしくは視野の中に著しく高い輝度分布が存在することを冒頭に記した。TI 値や GR などのグレア評価式も、式 1-3 や式 1-4 に示したように、グレア源の輝度と目が順応している輝度の比から構成されている。このため、グレア源の輝度に相当するグレア光による等価光幕輝度  $L_{vl}$  は、グレアと密接な関係にある測光量として認知されている。ここで  $L_{vl}$  は、式 1-5 に示すように照度から容易に換算することができる。このため視線方向の照度  $E_{ov}$  もグレアと密接な関係にあるといえる。

なお、 $L_{vl}$  は、眼球内散乱の程度を表すものであり、光源から目に入射する照度と、視線とグレア光のなす角度によって求まり、照度が高く、なす角が小さいほど高い値となる。

$$L_{vl} = 10 \sum (E_{ov} / \theta^2) \quad \dots \dots \dots \quad \text{式 1-5}$$

ただし、

- $E_{ov}$  : 視線方向の照度 [ lx ]
- $\theta$  : 観測者の視線とグレア光のなす角度 [ deg ]

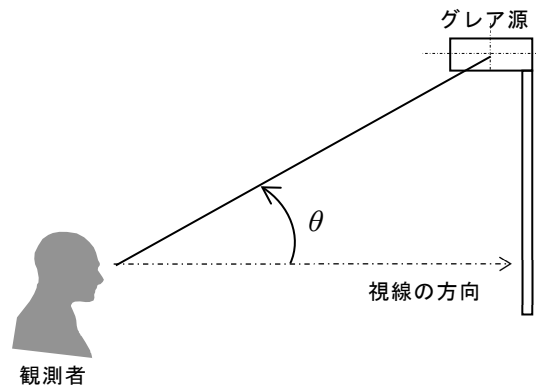


図 1-2 視線とグレア源のなす角

### 1.2.4 歩行者空間のグレア評価

適切な街路灯の輝きは、それが規則的に配置されていれば歩行導線になり、円滑な誘導の手助けになる。また、それは夜間景観の一部を構成し、街に活気を与える役割の一端を担っている。しかし、街路灯の輝きが強すぎる場合はグレアになり、歩行者に不快感を与えるとともに、空間の見通しを悪化させる原因になる。

以下に、照明器具の輝度や配光特性に対する制限値を示すことで、グレア発生のリスクが高い照明器具が市場に出回ることを抑制している国内外の指針を4つ記す。なお、歩行者空間向けのグレア評価法には、国際的に合意された基準や指針は存在しない。

#### (1) 照明学会の技術規格

照明学会が制定している技術規格 JIES-010<sup>11)</sup>は、照明器具発光部の鉛直角 85 度方向の平均輝度を 20,000 cd/m<sup>2</sup> 以下に制限している(表 1-5 参照)。平均輝度は式 1-6 により求まり、照明器具発光部分の見掛けの面積は最大輝度の 1/10 以上の輝度値を有する部分を対象に算出する。ただし CIE 31 (1976) では、照明器具発光部分の見掛けの面積を、最大輝度の 1/100 以上の輝度値を有する部分から計算する方法が紹介されており、照明学会の技術規格とは異なっている<sup>6)</sup>。

表 1-5 照明器具のグレア規制(取付高さ 10m 未満のもの)

鉛直角 85 度以上の輝度※	20,000 cd/m <sup>2</sup> 以下			
	照明器具の高さ	4.5 m 未満	4.5 m~6.0 m	6.0 m 以上
鉛直角 85 度以上の光度	2,500 cd	5,000 cd	12,000 cd	

※ 鉛直角 85 度方向の光度から推定してもよい

$$L = I_{85}/A \quad \dots \dots \dots \text{式 1-6}$$

ただし、

$L$  : 照明器具の鉛直角 85 度方向の平均輝度 [ cd/m<sup>2</sup> ]

$A$  : 照明器具発光部分 (最大輝度の 1/10 以上の部分) の見掛けの面 [ m<sup>2</sup> ]

$I_{85}$  : 照明器具の鉛直角 85 度方向の光度 [ cd ]

また、この技術規格には、CIEの技術レポートやいくつかの研究結果を引用して、不快グレアを軽減するための規制値が式1-7から求まることも紹介されている。しかし、この式から不快グレアを軽減するための規制値が求まるとすると、照明器具の立体角が小さければ高い輝度でも満足することになり、高輝度に輝く光源が裸で見えるような街路灯まで規制値を満足する場合がでてきてしまう。このようなものを排除する目的で、発光部の立体角が $10^{-4}$  sr よりも小さい場合は、鉛直角85度方向の平均輝度が $20,000 \text{ cd/m}^2$  以下に規制されている。なお、一般的なLED防犯灯の発光部の立体角は、 $10^{-4}$  sr よりも小さい。

$$L\omega^n \leq \text{規制値} \quad \dots \dots \dots \quad \text{式1-7}$$

ただし、

$L$  : 鉛直角85度方向の平均輝度 [  $\text{cd/m}^2$  ]

$\omega$  : 発光部分の立体角 [ sr ]

$n$  : 実験定数 (0.2~0.8)

## ( 2 ) 国際照明委員会の技術レポート

CIE は、照明器具の設置高さに応じて、発光部の最大輝度  $L$  と発光面の面積  $A$  からグレアを規制する方法を技術レポートにまとめている<sup>12)</sup>。

表 1-6 照明器具のグレア規制値

4.5 m 以下の取付高さでは	$LA^{0.5}$ は 4,000 を超えてはならない
4.5~6 m の取付高さでは	$LA^{0.5}$ は 5,500 を超えてはならない
6 m を超える取付高さでは	$LA^{0.5}$ は 7,000 を超えてはならない

※  $L$  : 鉛直角 85~90 度方向の最大輝度 [  $\text{cd/m}^2$  ]

※  $A$  : 鉛直角 90 度方向の発光面の面積 [  $\text{m}^2$  ]



### 1.3 本研究の背景と目的

数年前まで LED は、自身の発光を直接視認させる表示板や、比較的低出力でも設計照度を満たすことができる屋内施設での使用が主流であった。しかし LED の高効率化や低価格化が進み、かつ日本では東日本大震災以降の省エネルギー政策も追い風となって、大きな光出力が要求される公園、広場、街路、道路、トンネル、建築外構、スタジアムなどの屋外環境においても LED 光源が使用されるようになった。LED は、ろうそくやガス灯、白熱電球、蛍光灯に続く「第 4 の光」といわれ、グレアに関する研究の歴史を証明するかののように、この新光源の普及とともに、ふたたび従来よりも強い光刺激が問題視されている。

一方、夜間の屋外環境は、屋内施設よりも順応輝度が低いため、グレアを感じやすいことが知られている<sup>13)</sup>。なかでも公園や街路などの歩行者空間は、薄明視領域にあり視細胞の感度が高まっているので、人は強い光に敏感になっている。公園や街路の照明要件の一つに、「接近してくる人を 4m 手前で識別して必要に応じて防衛行動が取れること」ということがあるが<sup>14)</sup>、4m 前方の人を識別するのに必要な照度は、グレアの程度によって異なることが報告されている<sup>15)</sup>。このため、グレアによって損なわれた視認性を回復するには、顔の輝度をより高くする必要があり、グレアは経済損失ともいえる<sup>16)</sup>。

先に示したように、屋外環境のグレア評価には TI 値（道路照明）や GR（スポーツ照明）が利用されている。これらの基準は、HID ランプや蛍光灯で照明された光環境の評価を想定しており、換言すれば発光部の輝度分布がほぼ均一な照明器具によって照明された光環境を評価対象としている。1.2.4 項に示した、歩行者空間を対象とした照明器具発光部の輝度制限についても同様である。このため現在広く利用されているグレア評価手法が、微小かつ高輝度な LED モジュールが並び、発光部の輝度分布が不均一になる LED 照明器具に必ずしも適切であるとは限らない<sup>17-19)</sup>。それを裏付けるように、いくつかの既往研究は、照明器具発光部の輝度分布が不均一な場合にグレアを感じやすいことを指摘している<sup>20-26)</sup>。

先にも指摘したが歩行者空間には、不快グレアを数値化して評価する国際的に合意された指針は存在しない。このため歩行者空間の不快グレア評価に GR がしばし

ば流用されている。しかし、歩行者空間と屋外スポーツ施設では、照明手法や設計照度が異なる。GR は、水平面照度が 50~1,500 lx で照明された屋外スポーツ施設において行われた印象評価から得られた実験式であるため、薄暗い照明環境を評価することは想定していない。したがって、屋外スポーツ施設専用のグレア評価指標である GR が、屋外歩行者空間の不快グレアを評価できるとは考えにくい。

以上より、従来光源はもちろん LED 光源にも適応できる歩行者空間向けのグレア評価指標が確立できれば、人々が安全に円滑な活動をおくるのに適した屋外環境を構築するのに寄与することができる。そこで本研究は、不快グレアを感じにくい街路灯を開発するための知見を得ることと、従来光源と LED 光源とを区別することなく屋外歩行者空間の不快グレアが評価できる指標を提案することを目的とした。

## 第2章 グレア計測のためのデジタル測光





## 2.1 まえがき

第1章に示したようにグレアの程度は、対象となる照明器具発光部の平均輝度や等価光幕輝度などの輝度情報、発光部の見かけの大きさ、目が順応している輝度レベル、および対象と視線のなす角など光源と評価者との位置関係などに影響を受ける。これらの物理量は、光環境の輝度分布を画像処理することにより把握できる。本章では、まず初めに、輝度分布測定に利用した写真測光法のアルゴリズムを解説する。次に、最近問題視されている画像測光システムが抱える課題を示し、その対策方法を示唆する。そして、最後にグレアと密接な関係にあると考えられている等価光幕輝度を輝度分布から算出する方法を説明する。

## 2.2 輝度分布の測定方法

輝度分布は、光計測機器メーカーから市販されている2次元輝度計により測定することができる。しかしながらこれらの測定器は、使用できるレンズの種類が少ないため得られる輝度分布の視野角が限られ、その上、測定点数（画素数）が100万個程度なので、LED照明器具のように小さな発光部が連続する輝度情報を取得する目的には向いていない。さらに測定器の駆動には商用電源が必要なため、屋外での使用には適さないという課題がある。

本研究では、屋外歩行者空間の輝度分布を写真測光法により取得した。写真測光法とは、カメラで撮影した写真のRGB階調値を輝度値に変換する方法である。一般にデジタルカメラを利用するので、測定現場で商用電源は必要としない。デジタルカメラのダイナミックレンジは広くはないが、図2-1に示すように、露出の異なる写真を複数枚撮影してそれぞれの階調値を輝度に変換した後に合成することで、幅広い輝度情報を持った画像（ハイダイナミックレンジ画像；HDRi）を得ることができる<sup>27-31)</sup>。また近年は、デジタルカメラの性能が上がり高画素化も進んでいるため、情報量の多い輝度分布が容易に得られるようになった。

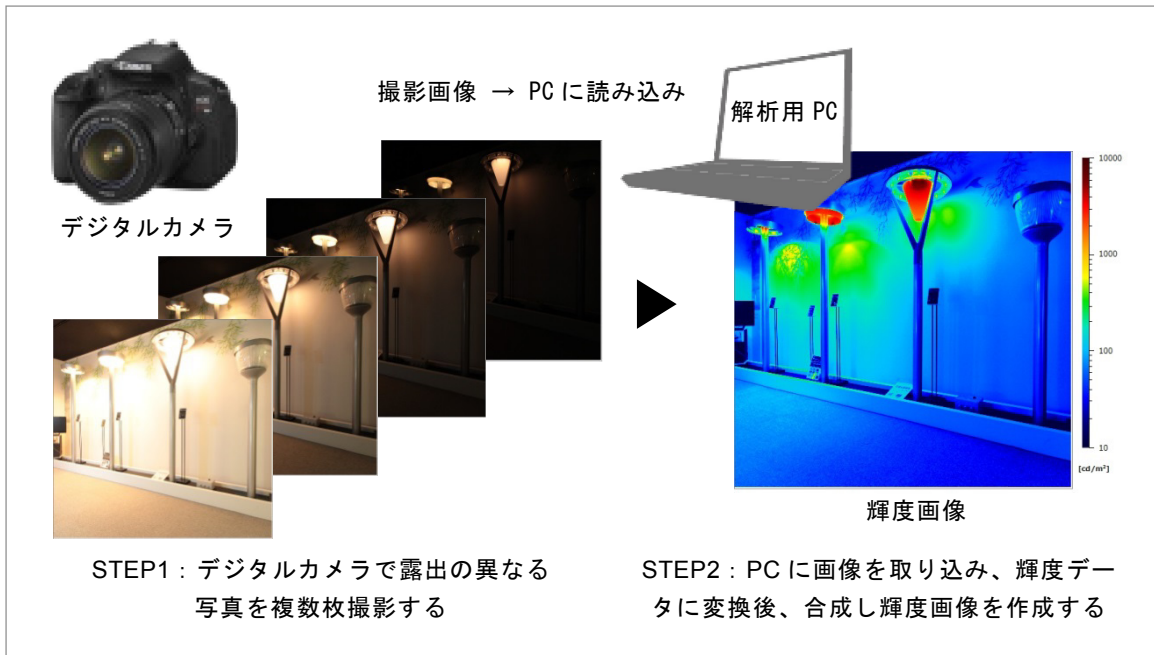


図 2-1 写真測光の概要

写真測光法による画像測光システムを構築するには、デジタルカメラで撮影した画像の階調値  $Y$  と輝度値  $L$  との関係 ( $Y$ - $L$  特性) や、使用するレンズの周辺光量の低下特性が既知である必要がある。画像は、適正露出より少ない露光量では黒くつぶれ、反対に適正露出より多い露光量では白飛びする。その間の画像として成立する範囲の特性は、フィルム写真の濃度と輝度と同様に対数軸に概ね直線で描くことができる。一般に写真測光法では、対数軸上に描かれた特性の内、直線と見なせる一部区間に回帰式を与えて利用する。本研究に使用した画像測光システムでは、階調値が 20 から 120 と 120 から 220 の範囲を異なる直線で回帰している。露出値 (EV 値 ; exposure value) ごとの  $Y$ - $L$  特性を図 2-2 に示す。なお EV 値は、ISO 感度 100 を基準にすると、露出 ( $F$  値) とシャッター速度 ( $T$ ) および ISO 感度との関係から式 2-1 に示すように定義されている。

$$EV = 2 \log_2 F - \log_2 T - \log_2 (ISO/100) \quad \dots \dots \dots \text{式 2-1}$$

デジタルカメラのラティチュード（画像として成立する範囲）は、ネガフィルムと比較して狭いことが知られているが、一つの画像から得られる輝度範囲は図 2-2 からも分かるように 1 : 30 程度である。歩行者空間のグレアを評価するには、低輝度から高輝度（数百万  $\text{cd}/\text{m}^2$ ）までの輝度情報が必要となるので、露出の異なる複数枚の画像から HDR 輝度画像を作成する必要がある。なお本研究に利用したデジタルカメラで撮影できる EV 値の上限は 21（ISO100、 $F=22$ 、 $T=1/4000$ ）であり、計測できる輝度の上限値は  $8.7 \times 10^5 \text{cd}/\text{m}^2$  である。このため、光源部などの高輝度は、レンズ前面に ND フィルターを装着した画像を撮影することで取得した。

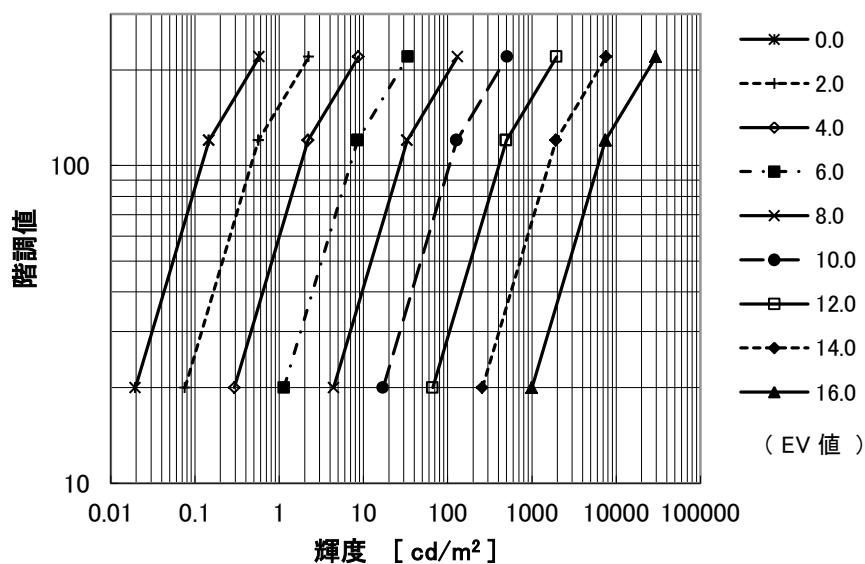


図 2-2 Y-L 特性

## 2.3 画像測光の測定精度

写真測光法に基づく画像測光システムは、アルゴリズムが比較的容易なため、数多くの研究機関や企業が開発し実用化している。しかし各画像測光システムの仕様と測定精度にはばらつきがあるため、測定精度とともに信頼性が担保されることの必要性が指摘されている。照明学会は、測定方法の標準化と測定精度の検証方法を定めるために「画像光計測による光環境と視認性評価に関する研究調査委員会」を平成26年4月に発足させた。

写真測光法で高精度な輝度分布を得るには、画素数の多い画像を使用することは優位である。しかし、測定精度に関連する画像の分解能（1画素あたりの視野角；分/pixel）は、表2-1に示すように、使用するレンズの焦点距離（または画角）と画素数との関係により変化する。画像の分解能が輝度測定に及ぼす影響の一例を図2-3に示す。この図は、点灯しているLED街路灯の輝度分布を焦点距離が10mmのレンズを使用して測定し、得られた輝度分布の画素数を表2-1に示すように3072×3072から512×512まで段階的に圧縮したときの（このとき分解能は1.19分/pixelから7.13分/pixelへと変化する）光源部付近の輝度値の変化を示したものである。最大輝度値に注目すると、分解能の変化に応じて、126,000 cd/m<sup>2</sup>から55,300 cd/m<sup>2</sup>まで低下することが分かる。

一方、松井らは、LED防犯灯の輝度を計測する際に、人間の中心窩の光受容野の大きさが6分であること（リッコの法則；Ricco law）を背景に、その2倍の分解能

表 2-1 レンズ焦点距離と画素数による分解能の関係

	画素数				
	3072×3072	1536×1536	1024×1024	768×768	512×512
50mm	0.29	0.58	0.88	1.17	1.75
17mm	0.80	1.59	2.39	3.18	4.77
10mm	1.19	2.38	3.57	4.76	7.13
5mm	3.34	6.68	10.0	13.4	20.0

単位：分/pixel

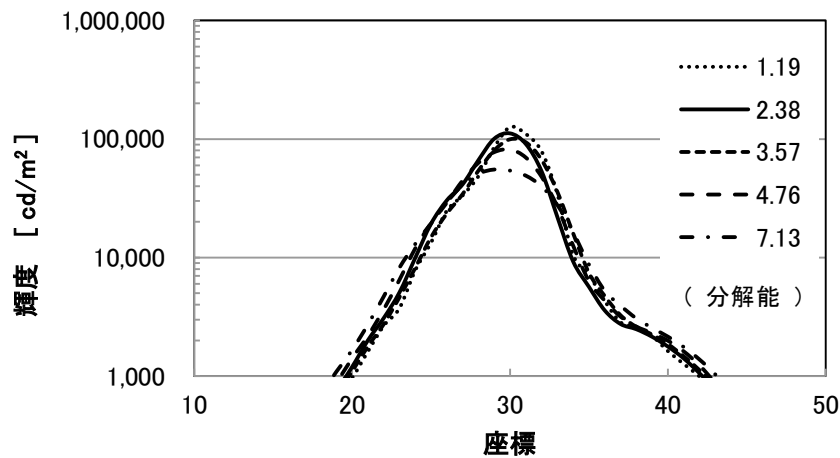


図 2-3 輝度値と分解能の関係

(3 分/pixel) を有する輝度分布を測定している<sup>32)</sup>。ちなみに視力は視角 (分) の逆数から定義されているので、3 分/pixel は視力 0.33 に相当する。街路空間利用者の分解能は、視力と目が順応している明るさには正の相関関係が成り立つことや、防犯灯が点灯している街路の順応輝度が低いことなど<sup>33)</sup>を考えると、3 分/pixel で良いとする根拠を示すことは難しい。

次に、同じ焦点距離のレンズでも、型式が異なれば撮影される画像の解像力も異なる。レンズ性能は、被写体が持つコントラストを忠実に再現できるかを空間周波数特性として示す MTF 曲線で表すことができる。したがって画像測光には MTF 特性の優れたレンズを使用したほうが良いことは明らかである。

次に、本研究に使用したレンズの MTF 特性を測定したので、その結果を示す。大小 2 種類の空間周波数と 4 種類のコントラストから構成される図 2-4 に示す矩形波チャート (A4 サイズ) を 1m の距離から 10mm レンズを使用して写真測光し (図 2-5)、矩形波の輝度コントラストを求めた (図 2-6)。各輝度コントラストはマイケルソンコントラストで定義すると 0.96、0.72、0.41、0.15 となり、この撮影条件のときの矩形波チャートの空間周波数は、大きい方が 0.94 cpd、小さい方が 1.88 cpd となる。図 2-6 より、輝度コントラストが 0.96、0.72、0.41 のときの測定誤差は比較的小さく (3.6%、9.0%、13.4%)、測定精度が高いことがわかる。しかし、輝度コントラストが低い (0.15) ときの測定誤差は 56.7%まで低下する。

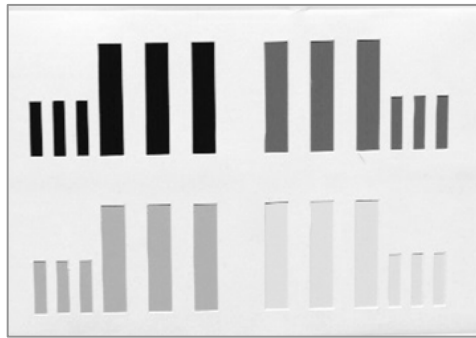


図 2-4 MTF チャート



図 2-5 測光した輝度画像

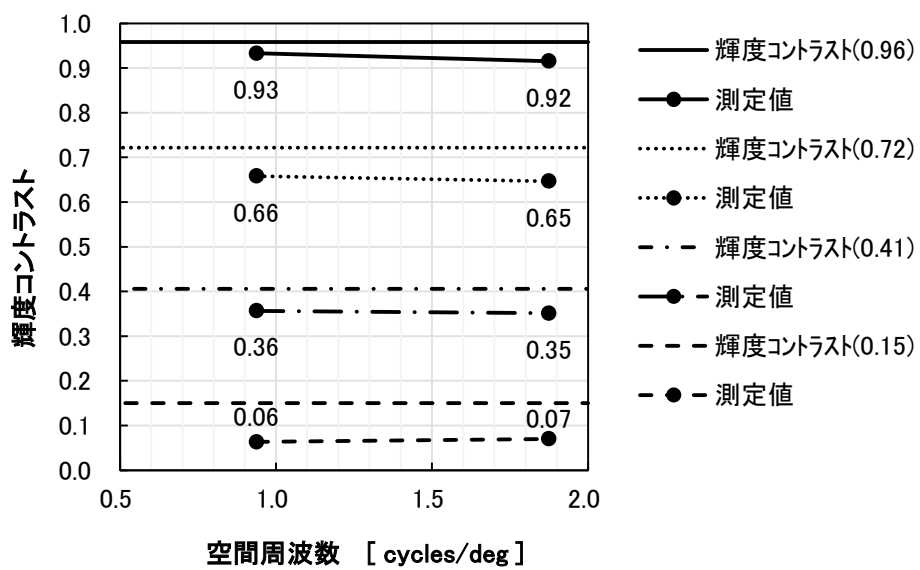


図 2-6 10mm レンズの MTF 特性

次に、測定者の撮影スキルも測定精度を左右する要因といえる。写真測光用の写真は、測定対象までの距離や測定したい輝度領域から使用するレンズを選択し、撮影する環境の明るさや使用されている光源の点灯周波数を鑑みて露出を決めて撮影する。手ぶれやピントの精度が測定精度に影響することは当然のことだが、 $F$  値（絞り）の設定も測定精度に影響を及ぼす。一般に、画像の解像力は、使用するレンズの開放  $F$  値から 2 段～3 段絞った時が最も優れていると言われている。しかし、測定環境が薄明視領域であれば開放  $F$  値付近を選択することが多く、逆に光源などの高輝度情報を得たい場合には  $F$  値を絞って撮影することが多くなる。ところが、前者は被写界深度が浅くなり、後者は被写界深度は深くなるが小絞りぼけ（※光の回折により、画質の鮮明さが失われ全体にぼけた画像になる現象）が発生し、両者とも解像力が劣った画像になる。測定者がレンズの選択や露出の設定が画像に与える影響を把握していることが重要といえる。

したがって、画像測光システムの測定結果を示す際には、測定値とともに測定精度への影響が大きい画像の分解能や、使用したカメラ機器類を示すことが最低限必要といえる。

## 2.4 等価光幕輝度の算出方法

グレアが発生すると、眼球内に光幕が発生し、視対象と背景とのコントラスト（輝度比）が小さくなるため対象物の視認性が低下する。これを減能グレアという。等価光幕輝度  $L_{eq}$ <sup>9, 34-36</sup> は、眼球内に発生する光幕と等価な作用をもつ一様な輝度と定義され、式 2-2 によって表すことができる。図 2-7 に、45 度を基準に正規化した等価光幕輝度の角特性を示す。図 2-8 は、等価光幕輝度の発生原理を説明したものである。

$$L_{eq} = \sum k \frac{L \times \Delta\omega}{(1.5 + \theta) \times \theta} \times \cos \theta \quad \dots \dots \dots \text{式 2-2}$$

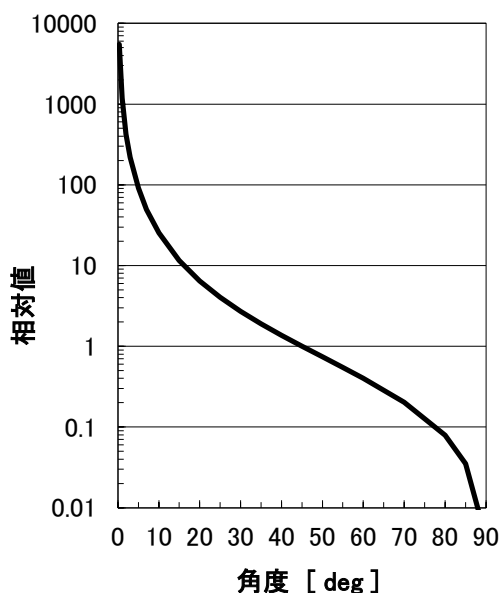


図 2-7 等価光幕輝度の角特性



図 2-8 グレア光による等価光幕輝度

等価光幕輝度の測定には、グレアレンズと呼ばれる特殊なレンズを輝度計に装着して測定する方法（図 2-9）と、輝度分布データから算出する方法がある。等価光幕輝度  $L_{eq}$  は、光源からの直接光による等価光幕輝度  $L_{vl}$  と、床や壁などからの反射光による等価光幕輝度  $L_{ve}$  に分類できる。 $L_{vl}$  は式 1-5 に示したように鉛直面照度から求めることができるが、 $L_{ve}$  は床や壁などからの反射光を考慮するため照度値のみから算出することはできない（式 1-4 参照）。





図 2-9 等価光幕輝度計

次に、写真測光法により得た輝度分布データから等価光幕輝度を算出する方法を説明する。図 2-10 は、画像と画素の位置関係を示したものである。画像の各画素からカメラ設置位置の視線方向の照度  $E_p(i, j)$  は、式 2-3 により計算することができる。

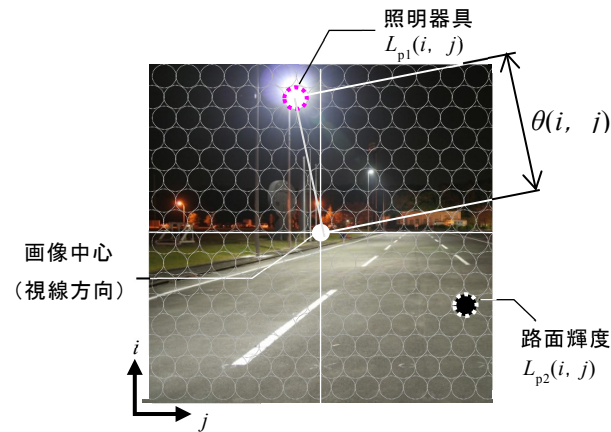


図 2-10 画像と各画素の位置関係

$$E_p(i, j) = L_p(i, j) \cdot \Delta\omega \cdot \cos \theta(i, j) \quad \dots \dots \dots \text{式 2-3}$$

$L_p(i, j)$  : 各画素  $(i, j)$  の輝度 [cd/m<sup>2</sup>]

$\Delta\omega$  : 各画素の立体角 [sr]

$\theta(i, j)$  : 画像中心と画素位置  $(i, j)$  とのなす角度 [deg]

ゆえに視線方向の照度  $E_v$  は、各画素からの輝度の総和として式 2-4 により求めることができる。したがって輝度分布データから等価光幕輝度は、式 1-5 と式 2-4 から式 2-5 により求まる。

$$E_v = \sum L_p(i, j) \cdot \Delta\omega \cdot \cos \theta(i, j) \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad \text{式 2-4}$$

$$L_{eq} = 10 \sum L_p(i, j) \cdot \Delta\omega \cdot \cos \theta(i, j) / \theta(i, j)^2 \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad \text{式 2-5}$$

一般に夜間の屋外環境では、点灯している照明器具の発光部は、それ以外の部分と比較して突出して高い輝度値を有している。輝度分布データを照明器具の発光部（グレア源）とそれ以外の部分に分離（二値化）する境界輝度  $k \text{ cd/m}^2$  を見つけることは難しくない。境界輝度  $k$  よりも高輝度な情報のみを対象に算出した  $L_{eq}$  とそれ以外の輝度情報を対象に算出した  $L_{eq}$  は、それぞれ  $L_{vi}$  と  $L_{ve}$  に読み替えることができる。また等価光幕輝度の算出には、画像中心から  $1.5^\circ < \theta < 60^\circ$  の範囲の輝度情報が必要となるため<sup>9)</sup>、画角が 120 度以上あるレンズを使用することが望ましい。ただし、夜間の街路空間では、画像中心から離れた周辺部に高い輝度情報が存在することが少ないため、10mm レンズ（画角  $67^\circ \times 67^\circ$ ）から得られる輝度情報で算出しても実用上問題になることは少ない<sup>37)</sup>。

## 2.5 まとめ

光計測機器メーカーから市販されている2次元輝度計は、画像の視野角に関するレンズの選択肢が少なく、かつ測定される輝度分布画像の分解能が低いため、本研究で求める仕様を満たさなかった。このため3章以降に示す主観評価実験では、写真測光法に基づく画像測光システムを利用して輝度分布を測定した。

本章では、初めに、写真からHDR輝度画像を生成するための方法を説明した。次に、写真測光法を説明した論文が複数発表されていることもあり、研究機関や照明メーカーなどで作成した画像測光システムが多数存在しているが、個々に仕様が異なるため測定精度が異なり問題視されていることを紹介した。この課題に対しては、測定精度に影響する要因を整理し、測定結果の信頼性を担保するために測定結果とともに測定条件を明示することの重要性を指摘した。また、画像測光により測定した輝度分布には少なからず測定誤差が含まれるので、この不確かさを十分に理解して解析などに利用することの重要性についても記した。

そして最後に、グレアと密接な関係にあると考えられている等価光幕輝度を輝度分布から算出する方法を解説した。



### 第3章 歩行者空間のためのグレア評価手法



### 3.1 はじめに

LED 街路灯は、LED モジュールが複数搭載されているため、HID や蛍光灯を光源とする街路灯よりも発光部の輝度分布が不均一になる傾向にある。1.3 節に紹介したように、いくつかの既往研究は照明器具発光部の輝度分布が不均一だとグレアを感じやすいことを指摘している。これは LED 街路灯で照明された光環境が、グレアの程度が現行の基準に照らし合わせて良好な評価が得られていたとしても不快グレアを強く感じることもあることと符合する。

第 3 章では、照明器具発光部の輝度分布がグレア評価に及ぼす影響を明らかにすることを目的に実施した主観評価実験（以下、実験 I という。）について報告する。ここでは主観評価させた不快グレアの評価結果と測光量との関係を整理し、屋外歩行者空間の不快グレアを従来光源と LED 光源とを区別することなく数値化して評価する方法を検討した。

## 3.2 主観評価実験 I の概要

### 3.2.1 実験施設

実験 I は、外乱光の少ないアスファルト舗装された工場敷地内に幅員 5m の生活道路を模した環境を作製し、筐体形状や配光特性の異なる 7 種類の街路灯を地上 4.5m に設置して実施した。

7 種類の街路灯（以下、テスト光という。）には、従来光源（HF100X、FHT57）の街路灯 2 種と LED 街路灯 5 種を用いた。テスト光の一部に従来光源を採用したのは、光源種類に左右されないグレア評価の知見を得るためである。テスト光に用いた街路灯 7 種類（Light-01 から Light-07）の諸元を表 3-1 に示す。なお、Light-03 と Light-04 は、Light-05 の外側に角特性の異なるレンズ拡散板（以下、20° 拡散板、80° 拡散板という）を装着したものである。これは発光部が比較的均一な輝度分布になるよう工夫したもので、グレア評価と照明器具発光部の輝度均斉度との関係を確認するために採用した。一方、Light-05、Light-06 と Light-07 の比較は、配光特性が等しく、かつ同程度の相関色温度なので、光束（光度）による効果を明らかにすることができる。

実験環境の明るさは、街路灯 2 台を 35m 間隔に設置することで、路面の平均水平面照度を概ね 5 lx にコントロールした。このとき実験施設に隣接する照明設備は消灯され、消灯できない街路灯は黒い布で覆われた。

表 3-1 テスト光一覧

No.	光源種類	光源光束 [ lm ]	相関色温度 [ K ]
Light-01	HID 街路灯 (HF100X)	3,900	3,900
Light-02	蛍光灯街路灯 (FHT57 形)	4,800	4,800
Light-03	Light-05 20° 拡散板付	2,100	5,100
Light-04	Light-05 80° 拡散板付	2,000	5,100
Light-05	40VA LED 街路灯 A	2,200	5,100
Light-06	Light-05 を高出力点灯	3,000	5,100
Light-07	Light-05 を低出力点灯	1,000	5,200

※ 光源光束と相関色温度は実測値を記す



### 3.2.2 実験方法

実験設備の配置状況を図 3-1 に示す。通常、不快グレア評価は、その環境を利用する人々の代表的な視線方向に対して行なわれる。実験 I では、被験者の前方に高さ 1.5m の位置に視対象（ハイチェアに座した人の顔）を設け、被験者には視対象を注視させ、その視認性とテスト光のグレアの程度を同時に評価するよう指示した。以降、この視線方向を維持して行ったグレア評価を周辺視評価という。グレア評価には図 3-2 に示す 9 段階の評価スケールを用いた。被験者は、表 3-2 に示す両眼視力 0.7 以上（矯正視力可）の 20 歳代から 60 歳代の男女 21 名とした。被験者を 21 名としたのは、個人の評価得点の平均的寄与率を 5% 以下にするためである。

主観評価は、被験者を 7 名ずつ 3 つのグループに分け、すべての被験者に評価シートを与えて行われた。また評価は、テスト光から一番遠い観測位置 A 地点から一番近い観測位置 F 地点へと順に近づきながら、実験補助員が指示するタイミングで 2 秒間視線を固定して実施された。このとき各観測位置では、テスト光の見かけの大きさ（最大輝度の 1/10 以上の輝度値を有する部分の面積）は  $0.11 \times 10^{-4}$  sr から  $6.7 \times 10^{-4}$  sr の間で変化し、テスト光の視野中心からの離角は 5 度から 40 度の範囲で変化する。

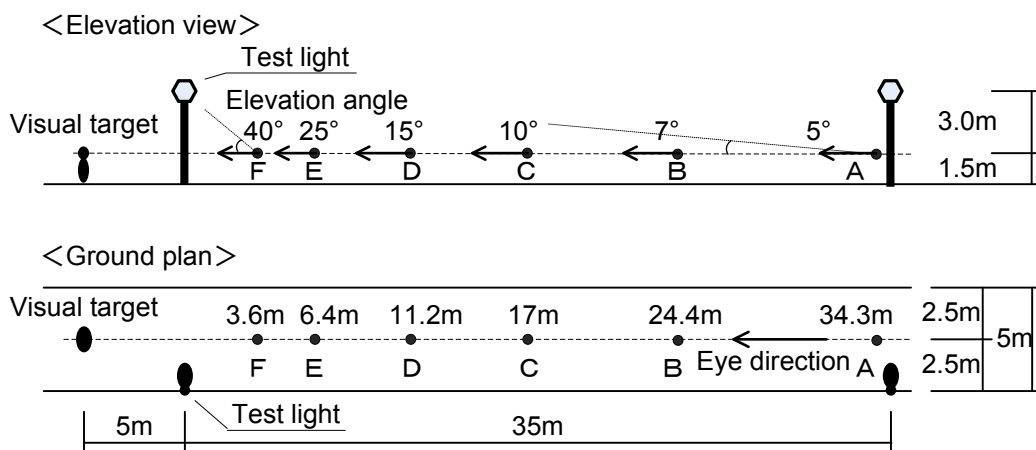


図 3-1 テスト光と被験者の位置関係

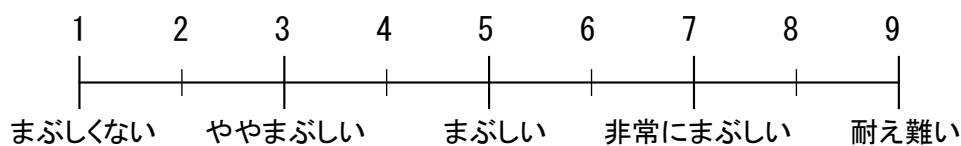


図 3-2 不快グレアの評価スケール

表 3-2 被験者の属性

	20 歳代	30 歳代	40 歳代	50 歳代	60 歳代	合計
男性	5	3	3	-	1	12
女性	6	1	-	2	-	9

一般に、グレア評価は施設利用者の代表的な視線（周辺視）において実施される。しかし、LED 照明器具が普及しだしてからは、照明器具を直視した場合のグレアが問題になるケースも散見されるようになった。このためテスト光を直視した際のグレアについても、図 3-1 に示した観測位置のうち B 地点を除く 5 カ所から評価させた。本論では、この視線からのグレア評価を中心視評価と呼ぶこととする。

主観評価実験は、評価刺激をランダムに被験者に提示する方が望ましい。しかし、本実験では限られた時間内により多くの評価データを得ることを優先し、被験者には周辺視評価と中心視評価ともに表 3-1 に示した順に (Light-01 から Light-07 へと) テスト光を提示した。

### 3.2.3 光学測定

被験者がグレアの程度を評価した際の光環境と主観評価の結果を比較するために、各観測位置において、視線方向の輝度分布と眼前照度を測定した(付表 1 参照)。輝度分布は、表 3-3 に示す仕様の画像測光システム<sup>38)</sup>を用いて測定した。測定した輝度分布の一例を図 3-3 に示す。また、輝度分布測定用に撮影した画像の代表例と輝度分布を付表 3 から付表 16 に示す。輝度分布からは、表 3-4 に示す各種データを算出し解析に利用した。なお、眼前照度は JIS C 1609-1 : 2006 一般形 AA 級照度計に準拠した照度計 (KONICA MINOLTA 製 T-10A) を用いて測定した。

表 3-3 写真測光の仕様

カメラ	Canon EOS Kiss X4
レンズ	SP AF10-24mm F/3.5-4.5 Di II (測定時 10mm)
画角	67° ×67°
画像サイズ	3072×3072 pixel
分解能	1.19 分/pixel
露出条件(低輝度)	ISO 感度 400, 絞り:F4, ND:なし T: 8 秒 1/2 秒 1/30 秒
露出条件(高輝度)	ISO 感度 100, 絞り:F22, ND:ND4 T: 1 秒 1/15 秒 1/250 秒 1/4000 秒
輝度測定範囲	0.005 ~ 3.49×10 <sup>6</sup> cd/m <sup>2</sup>

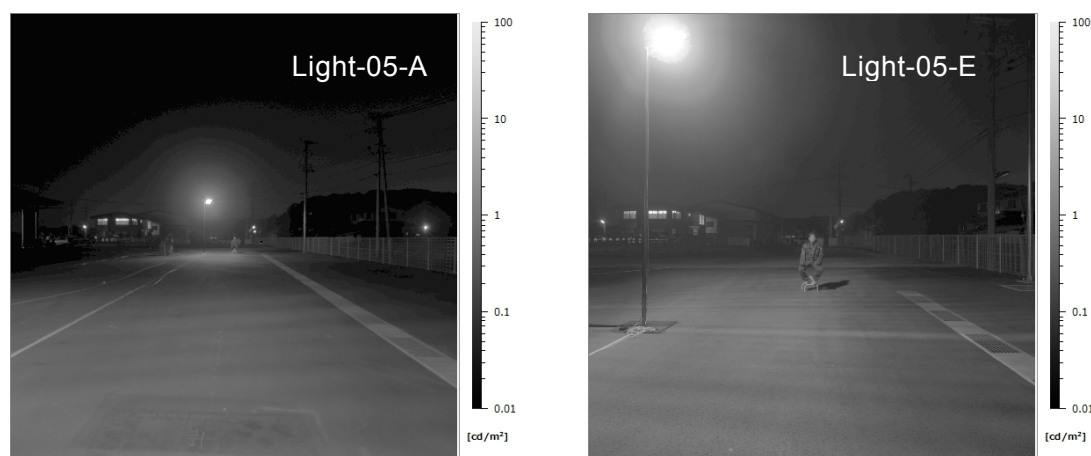


図 3-3 輝度分布の一例

表 3-4 輝度分布データから求めた値

$L_{vl}$	グレア光による等価光幕輝度 [ cd/m <sup>2</sup> ]
$L_{ve}$	反射光による等価光幕輝度 [ cd/m <sup>2</sup> ]
$L_{max}$	照明器具発光部分の最大輝度 [ cd/m <sup>2</sup> ]
$L_{ave10}$	照明器具発光部分(最大輝度の 1/10 以上の部分)の平均輝度 [ cd/m <sup>2</sup> ]
$S_{10}$	$L_{ave10}$ を算出した際の立体角 [ sr ]
$L_{ave100}$	照明器具発光部分(最大輝度の 1/100 以上の部分)の平均輝度 [ cd/m <sup>2</sup> ]
$S_{100}$	$L_{ave100}$ を算出した際の立体角 [ sr ]

### 3.3 実験結果

#### 3.3.1 観測位置の影響

被験者 21 名の評価データを比較したところ、特異な回答をした被験者が 2 名いることが分かった。1 人目は、評価軸を（9 点が「まぶしくない」と）誤解して回答したと推定でき、7 つの光源すべてで、この人の評価データと他の被験者平均との間に強い負の相関（ $r = -0.86$  から  $-0.99$ ）が見られた。もう一人は、全 42 回の評価（7 光源×6 観測位置）の内、37 回（88.1%）を「まぶしくない（1 点）」と回答し、残りの 5 回を 2 点と評価した。このようにグレアに対する感度が著しく低い被験者は、他には見られなかった。グレアに感度を持たない人のデータを解析に含めた場合、グレアを過小評価した結果が得られると判断した。したがって、この 2 名を除いた 19 名の被験者データを用いて分析することにした。

被験者 19 名の評価得点は、各評価条件（7 光源×6 観測位置）で概ね正規分布していたので、分位数もしくは平均値を用いて扱うこととした。そこで縦軸を不快グレア評価の中央値や 75%タイル値および相加平均値としたときに、観測距離の変化が不快グレア評価に与える影響を図 3-4 に描いた。図 3-4 (a) に示す評価得点の中央値を用いて描いた図は、いずれの観測位置においても縦の変化量が 2 から 3 レベルに限定されたため、テスト光ごとの評価差が分かりにくい。図 3-4 (b) に示した評価得点の 75%タイル値を用いて描いた図は、観測距離が離れた所ではテスト光間の評価差が大きく抽出されたが観測距離による変化が少なくなった。最後に、図 3-4 (c) に示した評価得点の相加平均値を用いて描いた図は、テスト光や観測距離の違いによる評価差を読み取ることができる。以上の結果より以後の解析には、グレア評価得点の相加平均値を使用することにした。

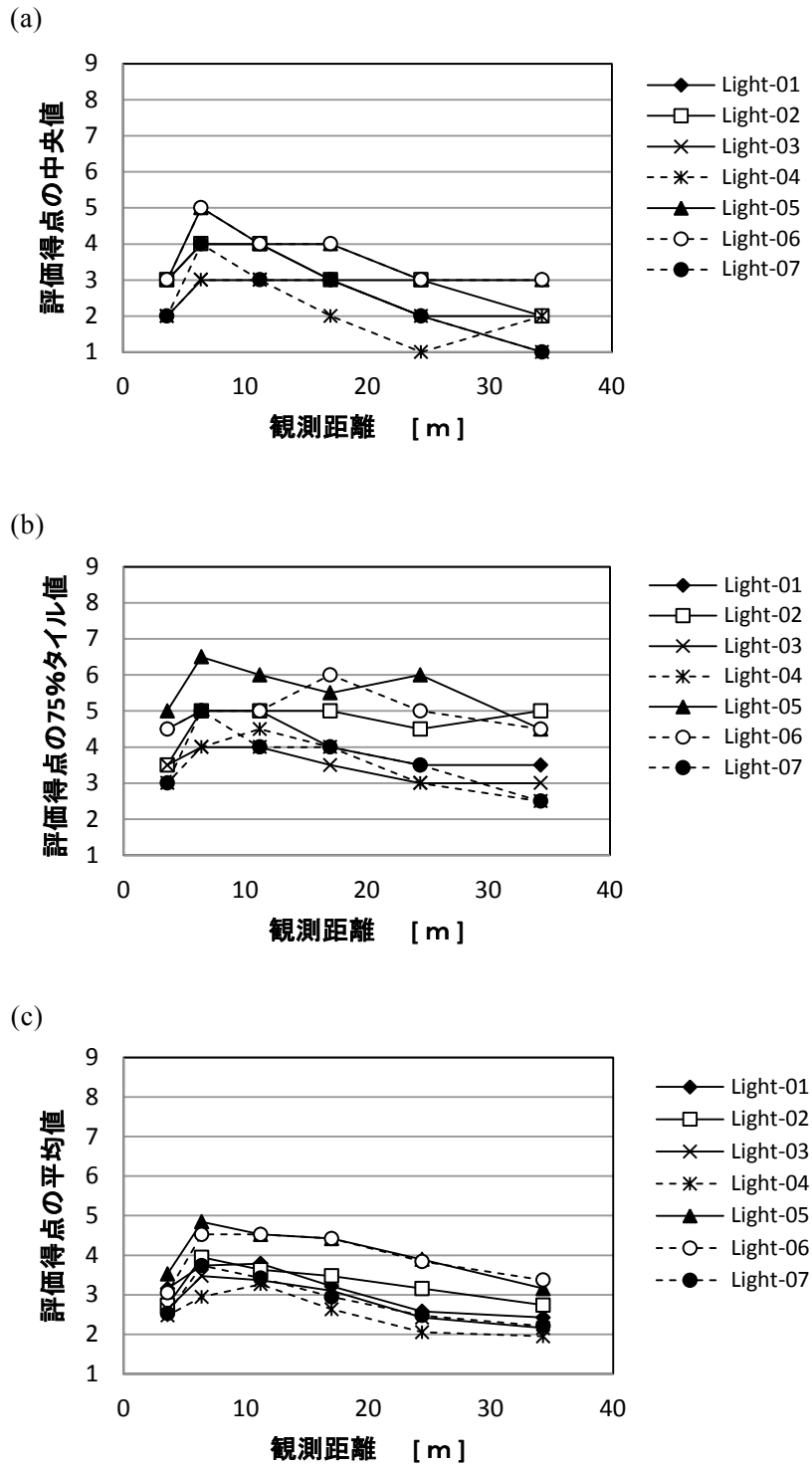


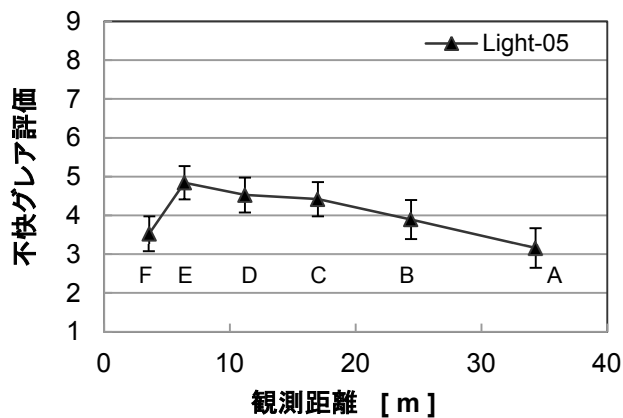
図 3-4 グレア評価と観測距離の関係

図 3-5 に、あらためて観測距離に対するグレア評価の変化を示す。図 3-5 (a) (b) は、周辺視評価と中心視評価それぞれで最も被験者間で標準誤差 (SE) が大きかったデータ (各々 Light-05 と Light-07) である。なお、他のテスト光は、周辺視と中心視ともに縦軸の値は上下するが同様の傾向であった。

図 3-5 (a) に示す周辺視による評価は、観測位置 A 地点から E 地点へと観測距離が近くなるほどグレアが増加する傾向にあるが、もっともテスト光に近い F 地点でグレアが減少している。これは被験者の視界からグレア源となるテスト光が外れたことを意味する。E 地点の評価は、多くの被験者が D 地点と同様あるいはそれ以上にグレアを強く感じると回答したが、F 地点と同じ理由でグレアを感じないとした被験者が約 30%いた。したがってグレア源は、E 地点 (仰角 25 度) と F 地点 (仰角 40 度) との間で被験者の視野から外れたことが分かる。その境界は仰角 30 度付近であったと推定できる。以後の周辺視評価の解析は、テスト光が視野の外側に位置したと判断できる F 地点と E 地点の一部のデータを除いて行うこととした。

一方、図 3-5 (b) に示す中心視によるグレア評価は、全体的に周辺視より高い評価値となり、テスト光に近づくほどまぶしいと評価されている。これは、テスト光が視野の中心に位置することに加え、テスト光の見かけの大きさが影響したと思われる。

(a) 周辺視評価の標準誤差



(b) 中心視評価の標準誤差

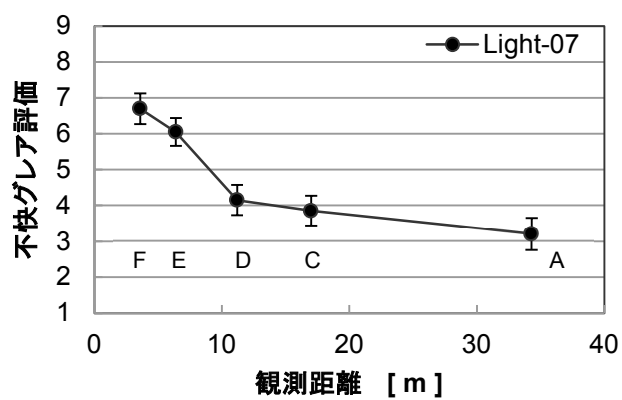


図 3-5 不快グレア評価と観測距離との関係

すべてのテスト光の周辺視評価と中心視評価の結果を図 3-6 (a) (b) に示す。図 3-6 (a) は、テスト光ごとの相違が見やすいように縦軸の最大値を 6 とした。図 3-6 (a) に示した周辺視評価では、Light-05 と Light-06 が高い（まぶしい）評価となった。このテスト光は、グローブ越しに LED モジュールが見えるという特徴を有する街路灯である。次に高い評価となったのは Light-02 (蛍光灯) である。続いて HID の Light-01、低出力 LED である Light-07、20° 拡散版を付けた Light-03 (LED) がほぼ同程度で、80° 拡散版を付加した Light-4 (LED) が最も低い（まぶしくない）評価となった。図 3-6 (b) に示した中心視評価では、Light-05 (LED) と Light-06 (LED) が最も高い評価なのは周辺視と同様だが、Light-01 (HID) と Light-02 (蛍光灯) の順位が周辺視とは逆転して Light-01 の方が高い評価となった。低出力 LED である Light-07 と 20° 拡散版を付けた Light-03 がほぼ同程度なのは周辺視と変わらない。ただし 80° 拡散版を付加した Light-04 が突出して低い結果となったのは周辺視と明確に異なっている。

結果の全体的な傾向としては、発光面の不均一性が顕著な光源はグレアが高い（まぶしい）と評価され、発光面が比較的均一な光源ほどグレア評価が低くなっており、視覚系の空間解像度の良い中心視の方がその傾向が顕著に表れている。例えば、周辺視評価での D 地点（11.2m）での結果に注目すると、Light-05 (LED) は、Light-01 (HID)、Light-02 (FL)、Light-04 (80° 拡散版 LED) より 9 段階のグレア評価スケールで約 1 (0.7~1.2) 段階まぶしいと評価されている。同じ D 地点の中心視評価では、Light-05 (LED) と Light-04 (80° 拡散版 LED) の相違は 2.45 となり、周辺視より差が顕著になった。また、周辺視評価では、いずれのテスト光とも C 地点（17m）から E 地点（6.4m）の間で不快グレアを強く感じている。したがって不快グレアを感じにくい街路灯を開発するには、この間（仰角 10 度から 30 度）の配光特性が特に重要であることが示唆されたといえよう。



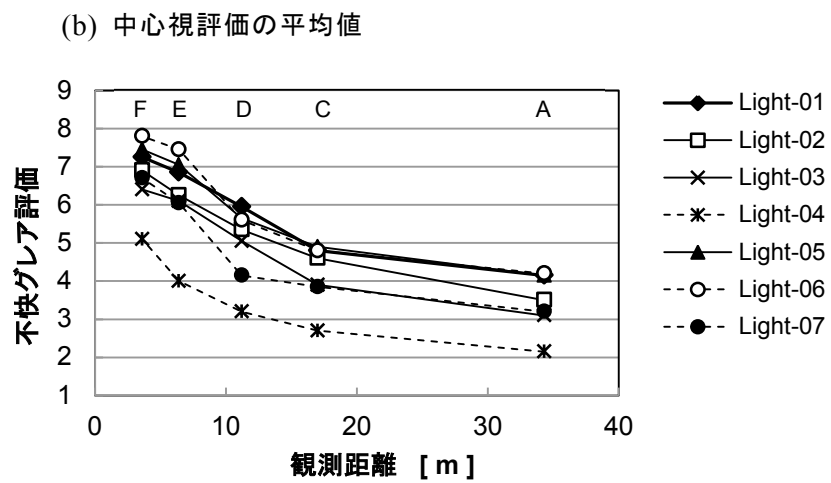
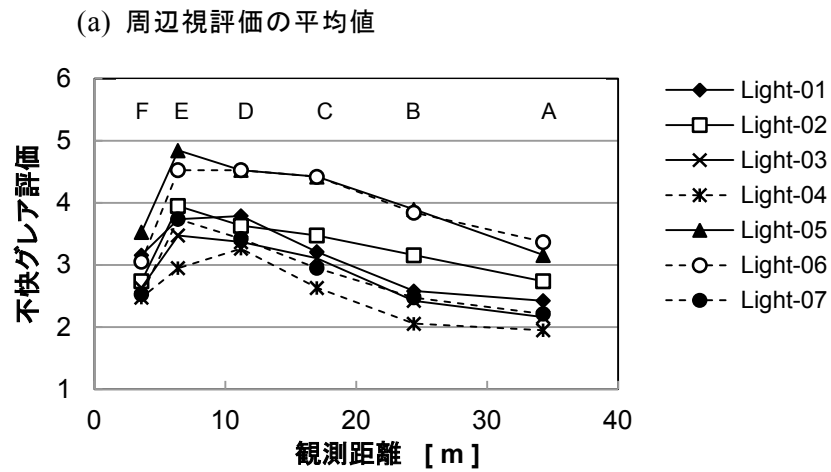


図 3-6 不快グレア評価と観測距離との関係

### 3.3.2 測光量との関係

#### (1) グレア評価と GR の関係

第2章に示した写真測光法により輝度分布を取得し、グレア光による等価光幕輝度  $L_{vl}$  と反射光による等価光幕輝度  $L_{ve}$  を  $100 \text{ cd/m}^2$  を閾値として、式 2-5 を用いて算出し、これらを式 1-4 に代入して GR 値を求めた。図 3-7 に周辺視による不快グレア評価と GR 値との関係を描いたところ、GR 値が 32 から 40 程度 (Light-05, Light-06, Light-07) と、40 から 45 程度 (Light-01, Light-02, Light-03, Light-04) の 2 グループに分かれて布置された。前者は、発光面が比較的不均一なテスト光のグループで、後者は発光面が比較的均一なテスト光のグループである。先に、歩行者空間の不快グレア評価に GR がしばしば流用されることを記述したが、この結果は GR が発光面の輝度均斉度が不均一な光源と均一な光源に共通して使うことができないことを示している。また、 $GR=40$  に着目すると、発光面が比較的不均一なテスト光のグループは、発光面が比較的均一なテスト光よりも 2.5 程度高い (まぶしい) 評価となったことが分かる。

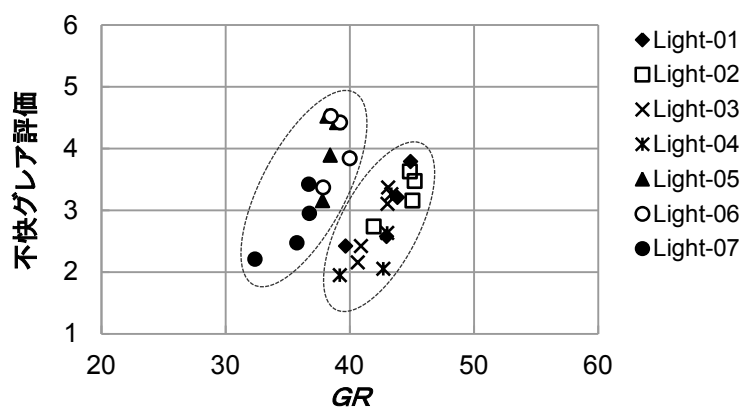


図 3-7 周辺視による不快グレア評価と GR 値との関係

( 2 ) グレア評価と眼前照度の関係

不快グレア評価と測定した眼前照度との関係を解析したところ、中心視評価には強い相関 ( $R^2=0.78$ ) が見られたが、周辺視評価の決定係数は 0.38 だった。この測定した眼前照度には、グレア光からの直射光と環境からの反射光が含まれている。しかし照明設計では直射光のみを扱うのが一般的である。そこで、式 3-1 に示す照度と輝度との関係を利用して、直射光による眼前照度を求めることとした。輝度にはテスト光発光部の平均輝度値 ( $L_{ave10}$ ) を用い、見かけの大きさには  $L_{ave10}$  を算出した際の計算対象ピクセル数から求めた立体角を使用した。図 3-8 に不快グレア評価とグレア光による眼前照度 ( $L_{ave10} \times \omega$ ) との関係を示す。図より、 $L_{ave10} \times \omega$  は、周辺視評価と中心視評価ともに不快グレアを発光面の輝度均斉度に左右されずに説明できていることが分かる。

$$\begin{aligned}
 \text{照度 } E &= \text{輝度 } L \times \text{見かけの大きさ } \omega && \dots \dots \dots \text{ 式 3-1} \\
 &= \text{cd/m}^2 \times \text{sr} \\
 &= \frac{\text{lm}}{\text{sr}} \times \frac{1}{\text{m}^2} \times \text{sr} \\
 &= \text{lm/m}^2 \\
 &= \text{lx}
 \end{aligned}$$

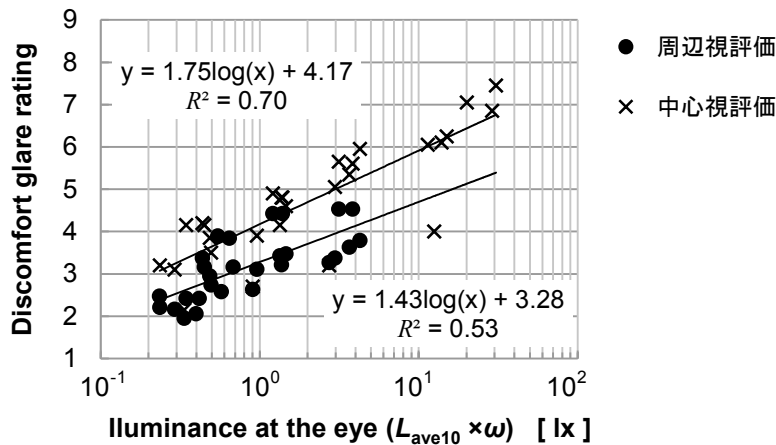


図 3-8 不快グレア評価と眼前照度との関係

### (3) グレア評価と輝度の関係

次にテスト光発光部の最大輝度値  $L_{\max}$  や平均輝度値  $L_{\text{ave}10}$  との関係を図 3-9 および図 3-10 に示す。これらより周辺視評価と中心視評価ともに、いずれの輝度値も不快グレア評価と強い正の相関関係にあることが分かる。

本項に示した図 3-7 から図 3-10 より、歩行者空間のグレア評価に流用されることが多い GR よりも、 $L_{\text{ave}10} \times \omega$  や  $L_{\max}$  または  $L_{\text{ave}10}$  の方が歩行者空間の不快グレアと強い相関にあることが分かった。相関が示唆された 3 者の決定係数を比較すると、眼前照度 ( $L_{\text{ave}10} \times \omega$ ) よりも輝度 ( $L_{\max}$  や  $L_{\text{ave}10}$ ) との間により強い相関が見られた<sup>39)</sup>。すなわち、輝度 ( $L_{\max}$  や  $L_{\text{ave}10}$ ) により照明器具発光面の輝度均斉度に関係なく不快グレアを精度よく説明できることが示唆された。

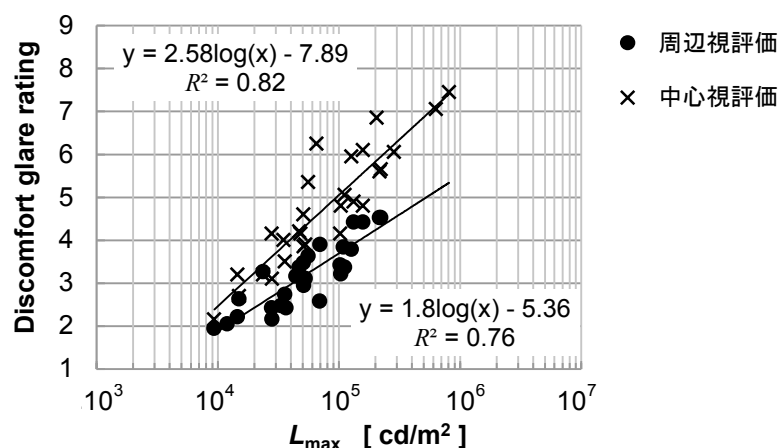


図 3-9 不快グレア評価と最大輝度値との関係

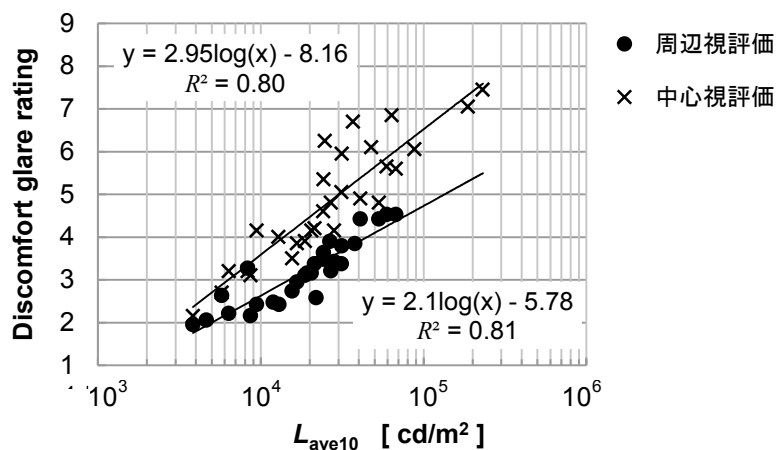


図 3-10 不快グレア評価と発光部平均輝度値との関係

#### (4) グレア評価と有効グレア輝度の関係

田代らは、暗室内に屋外環境を想定した実験ブースを作製して不快グレアを評価する主観評価実験を行い UGR 法<sup>40)</sup>の修正式 mUGR を提案している<sup>25)</sup>。この実験では、LED モジュールを 13cm 角の基盤上にマトリックス状に配置したものをテスト光とし、これを前方 3m、仰角 8.5 度の位置に設置して、光度やテスト光の輝度均斉度などを実験変数としている。この修正式 mUGR は、テスト光発光部の輝度分布を順応輝度に応じて重み付け加算する有効グレア輝度 ( $L_{\text{eff}}$ ) を使用することを特徴としている。田代らは有効グレア輝度の計算領域を、LED モジュールの外周線内と定義している。しかし、実験 I に使用したテスト光は、モジュールがライン状に並んでいるものもあり、有効グレア輝度の計算領域を指定することが難しい。そこで次の 3 通りの方法で、有効グレア輝度の算出を試みた。1 つ目の方法は有効視野内のすべての輝度分布データから有効グレア輝度 ( $L_{\text{eff\_All}}$ ) を求めるもので、2 つ目は発光部の最大輝度の 1/100 以上の輝度値を対象として算出した有効グレア輝度 ( $L_{\text{eff\_100}}$ )、3 つ目は発光部の最大輝度の 1/10 以上の輝度値を対象とした有効グレア輝度 ( $L_{\text{eff\_10}}$ ) とした。いずれの方法も解析者が計算領域を指定することなく解析できるという利点がある。これら 3 通りの有効グレア輝度は、不快グレア評価と強い正の相関関係 ( $R^2$ : 0.68、0.80、0.81) があり、輝度情報の重要性を示唆する結果が得られた。なお輝度の重要性は、Bullough JD. や菅野からも指摘している<sup>41 - 44)</sup>。図 3-11 に最も強い相関関係が示唆された不快グレア評価と  $L_{\text{eff\_10}}$  との関係を示す。

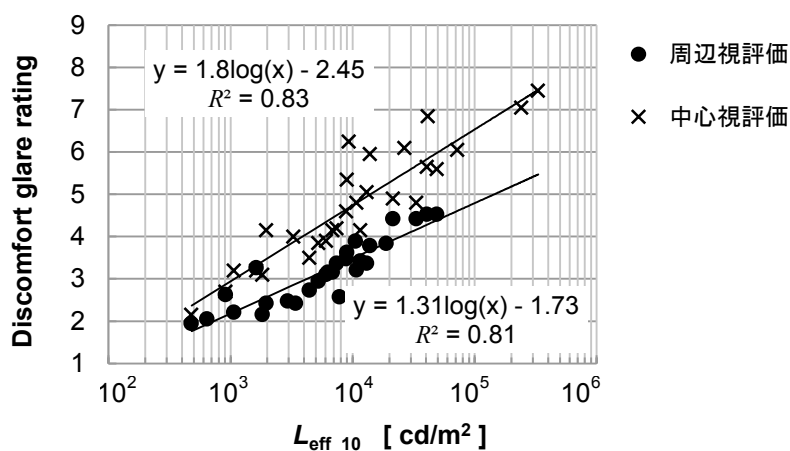


図 3-11 不快グレア評価と有効グレア輝度との関係

### 3.4 不快グレア評価式の検討

本実験は、屋外歩行者空間の不快グレアを従来光源と LED 光源とを区別することなく数値化する方法を提案することを目的としている。前世紀初頭に始まったグレア研究の創成期に、光源の輝度、光源の立体角、背景輝度、そして光源の位置が不快グレアの大小に密に関係することが示され、式 3-2 に示す DGI によって定量的に説明できることが報告されている<sup>45,46)</sup>。なお、光源の位置指数  $P$  は、周辺視における BCD 輝度と中心視における BCD 輝度の比と定義されている。

一方、3.3 節に示したようにグレア評価は、照度よりも輝度との間により強い相関関係にあることが明らかになった。本論では DGI の  $a$  から  $d$  の 4 つのべき乗を調整することで、不快グレアが説明できるかを検討した。

$$DGI = \frac{L^a \omega^b}{L_b^c P^d} \quad \dots \dots \dots \quad \text{式 3-2}$$

ただし、

$L$  : 光源の輝度 [cd/m<sup>2</sup>]                       $\omega$  : 光源の立体角  
 $L_b$  : 背景輝度 [cd/m<sup>2</sup>]                       $P$  : 光源の位置指数

DGI を構成する 4 つの変数のうち、光源の輝度  $L$  には 3.3.2 (3) に示したように不快グレアと強い正の相関関係にある  $L_{\max}$  や  $L_{\text{ave}10}$  を利用できると考えた。その一方で歩行者空間の背景輝度  $L_b$  を定義することは難しい。TI 値 (式 1-3 参照) の計算では平均路面輝度をあてているが、自動車よりも低速で移動する歩行者が路面の明るさに順応しているとは言い切れない。そこで路面の平均輝度のほか、歩行者の視線中心からの 20 度や 40 度の円形視野の平均輝度を用いて背景輝度 ( $L_b$ ) の定量化を試みたが良好な関係は見いだせなかった。このため背景輝度 ( $L_b$ ) が各観測位置において一定であったと仮定して検討を進めることにした。種々の検討の結果、式 3-3 に示すように背景輝度に応じた重み付け加算により求まる有効グレア輝度を用いて評価式を構成したところ、不快グレアを精度よく説明できることが分かった。

DGI を修正したこの評価式を  $m\_DGI$  ( Modified Discomfort Glare Index ) と名付けた。不快グレア評価と  $m\_DGI$  から算出される評価値は、図 3-12 に示すように非常に強い正の相関関係 ( $R^2=0.85$ ) を示した。

$$m\_DGI = \log \frac{Leff_{-10}^{1.5} \omega^{0.5}}{p^{0.8}} \quad \dots \dots \dots \text{式 3-3}$$

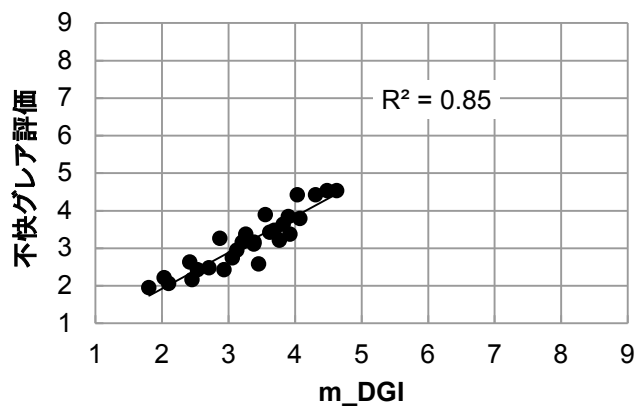


図 3-12 周辺視による不快グレア評価と提案式との関係

ここで Petherbridge や Hopkinson が提案した、DGI を発展させた BGI<sup>45)</sup> や UGR と、m\_DGI を比較する。

$$BGI = 10 \log \frac{0.45}{L_b} \sum \frac{L^{1.6} \omega^{0.8}}{P^{1.6}} \quad \dots \dots \dots \quad \text{式 3-4}$$

$$UGR = 8 \log \frac{0.25}{L_b} \sum \frac{L^2 \omega}{P^2} \quad \dots \dots \dots \quad \text{式 3-5}$$

光源の輝度  $L$  のべき指数  $a$  は、いずれも 1.5 から 2.0 であり、光源の輝度が不快グレアに強く寄与することを示している。一方、BGI と UGR の背景輝度  $L_b$  のべき指数  $c$  (いずれも 1.0) は、べき指数  $a$  (各々 1.6、2.0) よりも小さな値となっている。これは順応効果よりも光源の輝度が不快グレア評価により強く寄与するという、有効グレア輝度の考え方と符合している。光源の立体角 ( $\omega$ ) のべき指数  $b$  は、0.5、0.8、1.0 といずれも 1.0 以下の値であり、不快グレア評価への寄与の割合が小さいことを示している。最後に、光源の位置指数 ( $P$ ) のべき指数  $d$  は、BGI と UGR が 1.6 と 2.0 であるのに対し、m\_DGI は 0.8 であり傾向が異なる。BGI と UGR が視野内に占める照明器具の割合が大きくなる屋内空間の不快グレア評価式であるのに対し、m\_DGI は立体角の小さな照明器具が数個配置される街路空間を評価対象としている。べき指数  $d$  の違いは、この評価対象とするエリアの違いが表れたものと考えている。



### 3.5 まとめ

LED 照明は、高効率で長寿命など従来光源に勝る特性を有する一方で、不快グレアを感じやすいことが問題視されている。

本章では、屋外で実施した大規模な主観評価実験から照明器具発光部の輝度分布がグレア評価に及ぼす影響を明らかにした。その概要を以下に整理する。

周辺視評価では、発光面の輝度均斉度が不均一なテスト光は、比較的均一なものと比較して、9段階のグレア評価スケールで 0.7 から 1.2 程度まぶしいと評価された。これは、照明器具発光部の輝度分布が不均一だとグレアを感じやすいとする既往研究と一致する。また、被験者とテスト光の位置関係において、テスト光が概ね仰角 10 度から 30 度の範囲のときに不快グレアを強く感じ、被験者の 80% は仰角 30 度よりも近づくとグレアを感じていないことが分かった。このことは、不快グレアを感じにくい街路灯を開発するには、この間（仰角 10 度から 30 度）の配光特性が重要であると示唆している。

一方、歩行者空間の不快グレア評価にしばしば流用される GR 法については、発光面の輝度均斉度が不均一な光源と均一な光源に共通して使うことができないことを明らかにした。そして、周辺視評価と中心視評価ともに、不快グレア評価と発光面の輝度情報（例えば  $L_{\max}$  ,  $L_{\text{ave}10}$  や  $L_{\text{eff}10}$ ）との間に密接な関係があることが分かった。

次に、照明器具発光部の輝度分布が不均一な場合にグレアを感じやすいため、このような光源にも適応できるグレア評価指標が存在しないという課題に対しては、照明器具発光部の輝度分布の均一性に関わらず（従来光源と LED 光源を区別することなく）利用できる評価式  $m\_DGI$  を提案した。



## 第4章 グレア評価式の検証



## 4.1 はじめに

実験 I では、一般に防犯灯と呼ばれる 7 種類の街路灯をテスト光としたフィールド実験を実施して、不快グレアと測光量との関係を整理し、周辺視による不快グレア評価式 (m\_DGI) を提案した。しかし、この実験 I には不快グレアを強く感じるテスト光が含まれていなかった。そこで実験 I から得られた知見が、グレア強度の強い刺激に対しても有効であるかを確認するための主観評価実験 (以下、実験 II という。) を行った。

## 4.2 主観評価実験Ⅱの概要

### 4.2.1 実験施設

実験Ⅱでは、表 4-1 に示すように実験Ⅰとは異なる 7 種類の LED 街路灯 (Light-08 から Light-14) をテスト光とした。なお、Light-09, 10, 12, 13 は LED モジュールがフラットな面に下向きに配置されており、Light-08, 11, 14 は道路縦断方向に角度をつけて V 字に LED モジュールが配置されている (図 4-1 参照)。また Light-13 は反射鏡を利用して配光を制御しているが、他の評価刺激はレンズを付加して配光を制御している。

実験施設は、実験Ⅰとは異なる地域に作製したが、実験Ⅰと同様、周囲に外乱光の少ないアスファルト舗装された工場敷地内とした。そして、テスト光の配置条件などの実験環境は、可能なかぎり実験Ⅰと一致させた。

表 4-1 テスト光一覧

No.	光源種類	光源光束 [ lm ]	相関色温度 [ K ]
Light-08	40VA LED 防犯灯 B	1,940	6,700
Light-09	40VA LED 防犯灯 C	2,900	6,300
Light-10	20VA LED 防犯灯グレアカットフード付	1,480	5,000
Light-11	40VA LED 防犯灯 D	1,890	5,300
Light-12	40VA LED 防犯灯 E	2,900	4,700
Light-13	40VA LED 防犯灯 F	1,830	6,300
Light-14	40VA LED 防犯灯 G	2,050	5,300

※ 光源光束と相関色温度は実測値を記す



図 4-1 LED モジュールの配列

#### 4.2.2 実験方法

被験者には、図 4-2（図 3-1 と同じ）に示した観測位置 A 地点から F 地点の 6 か所から、実験補助員が指示するタイミングで、周辺視にてテスト光の不快グレアを評価させた。同時に、前方に設置した視対象（高さ 1.5m に置かれたマネキンの顔）の視認性についても評価させ、被験者の視線を安定させた。評価スケールは、実験 I と同じもの（図 3-2 参照）を利用した。なお実験 II では、評価順序が評価結果に与える影響の程度を確認するために、A 地点から F 地点へとテスト光に近づいていく場合に加え、F 地点から A 地点に遠ざかる場合についても評価させた。

被験者は、表 4-2 に示す 20 歳代から 40 歳代の男性 13 名と女性 3 名から構成される 16 名とし、いずれも両眼視力が 0.7 以上（矯正視力可）であった。

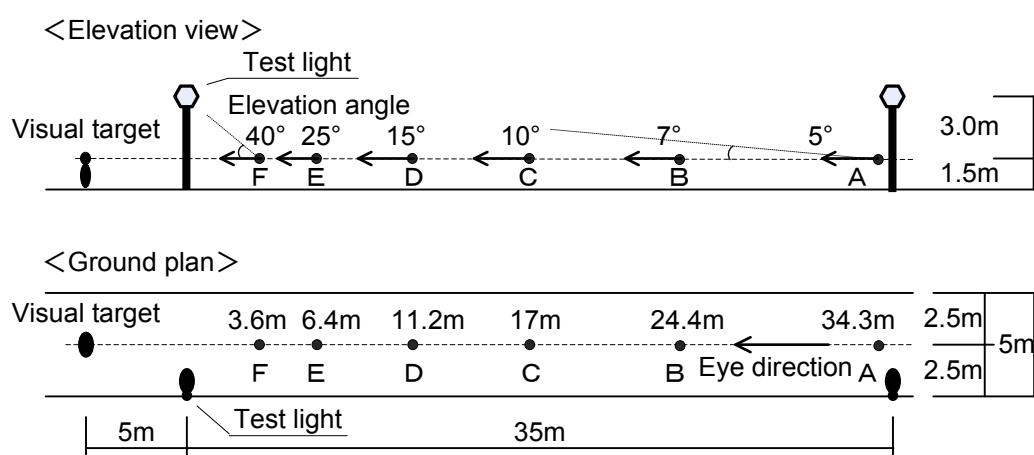


図 4-2 テスト光と被験者の位置関係

表 4-2 被験者の属性

	20 歳代	30 歳代	40 歳代	50 歳代	60 歳代	合計
男性	8	2	3	-	-	13
女性	2	0	1	-	-	3

### 4.2.3 光学測定

観測位置 A 地点から F 地点において、被験者の視線方向の輝度分布と眼前照度を測定した（付表 2 参照）。輝度分布は、実験 I と同一の写真測光法による画像測光システムを用いて測定した。輝度分布測定用に撮影した画像の代表例と輝度分布を付表 17 から付表 30 に示す。

## 4.3 実験結果

### 4.3.1 評価順序の影響

不快グレア評価を観測位置 A 地点から F 地点へとテスト光に近づきながら実施した場合と、F 地点から A 地点へと遠ざかりながら実施した場合の評価結果の一例（Light-12）を図 4-3 に示す。図には被験者 16 名の評価値の相加平均値と、A 地点から F 地点へと評価した際の標準誤差（SE）を示した。その結果、F 地点から A 地点へと遠ざかりながら回答したときの相加平均値が、近づきながら評価したときの標準誤差の範囲内に布置していることが分かる。これより評価順序が評価結果に与える影響は小さいと判断した。

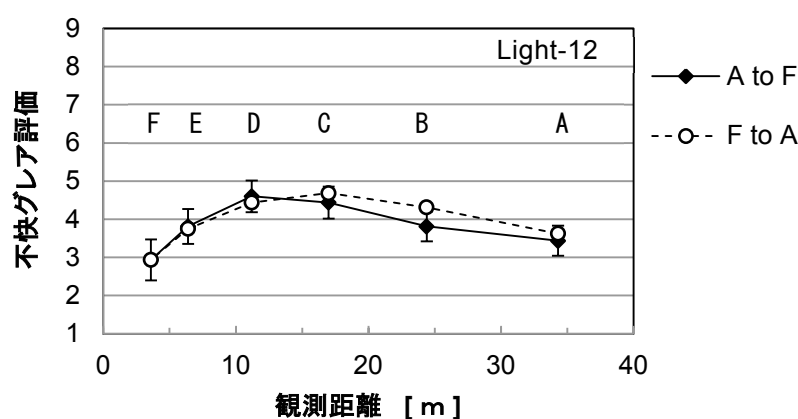


図 4-3 不快グレア評価と観測距離との関係



### 4.3.2 観測位置の影響

Light-08 から Light-14 の不快グレア評価（相加平均値）と観測距離との関係を図4-4に示す。いずれのテスト光も A 地点から D 地点は、観測距離が近くなるほどグレアが増加する傾向にあるが、もっともテスト光に近い F 地点ではグレアが減少している。E 地点の評価に着目すると、D 地点よりもグレアを強く感じると回答した被験者（17.9%）と、D 地点と同様のまぶしさを感じた被験者（69.6%）、そして D 地点よりもグレアを感じないとした被験者（12.5%）から構成されていた。すなわち、E 地点においてグレア源が視野内にあると判断した被験者は 87.5%で、グレア源が視野外にあると判断したと思われる被験者は 12.5%だった。したがって、大半の被験者は、E 地点（仰角 25 度）と F 地点（仰角 40 度）との間でグレア源が視野から外れたことが分かる。以上より、実験 I で示唆された、不快グレアを感じにくい街路灯を開発するには仰角 10 度から 30 度の配光特性が重要だとする結論を裏付ける結果が実験 II から得られた。

次に、D 地点におけるテスト光ごとの不快グレア評価の結果に着目すると、グローブ前面に拡散板が付加された（発光面の輝度分布が比較的均一な）Light-10 の評価値は 2.0 と低く、それ以外のグローブ越しに LED モジュールが見えるテスト光（評価値は 3.9～5.8）とは大きな差があった。

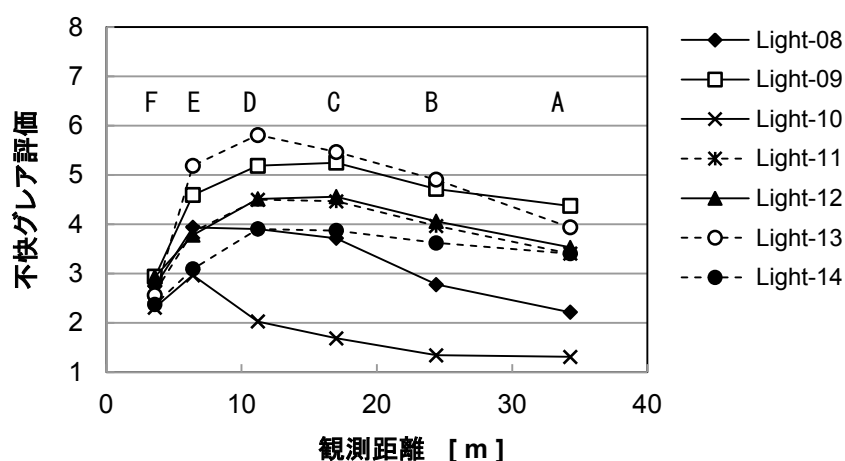


図 4-4 不快グレア評価と観測距離との関係

### 4.3.3 測光量との関係

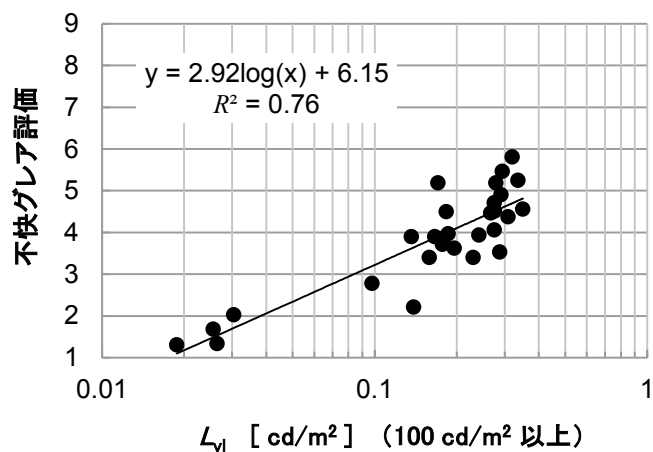
#### (1) グレア評価と等価光幕輝度や眼前照度との関係

不快グレア評価は、グレア源が視野内に入るか否かに大きく左右される。一方で、視野から外れたことにより抑えられた不快グレアと、照明器具が視野内に存在しているにもかかわらず抑制されている不快グレアは、同列には扱わずに分けて考える必要がある。そこで、テスト光が視野の外側に位置したと判断できる F 地点と、E 地点の一部のデータを除いてグレア評価と光学測定値との関係を解析した。

まず初めに、不快グレア評価とグレア光による等価光幕輝度  $L_{vl}$  や眼前照度  $E_{ov}$  との関係を図 4-5(a) と図 4-5(b) に示す。 $L_{vl}$  は、TI 値や GR を算出する際の変数の一つであることから (式 1-3 および式 1-4 参照)、一般に不快グレアと密接な関係にある測光量であると考えられている。また  $E_{ov}$  も、 $L_{vl}$  が「眼前 (視線方向の) 照度」と「観測者の視線とグレア光のなす角度」との関係から求まることから (式 1-5 参照)、不快グレアと関連するといわれている。

図 4-5(a) と図 4-5(b) の決定係数 ( $R^2 = 0.76$  と  $0.74$ ) からは、 $L_{vl}$ 、 $E_{ov}$  とともに不快グレアと強い正の相関が示唆されている。しかし、図 4-5(a) の  $0.15 \sim 0.35 \text{ cd/m}^2$  付近に布置された個々のデータに着目すると、不快グレア評価が  $3.4 \sim 5.8$  に幅を持って布置している。同様に、図 4-5(b) の  $1.0 \text{ lx}$  付近のデータも  $1.3 \sim 3.9$  の間で  $2.6$  のばらつきが確認できる。

(a) グレア光による等価光幕輝度との関係



(b) 眼前照度との関係

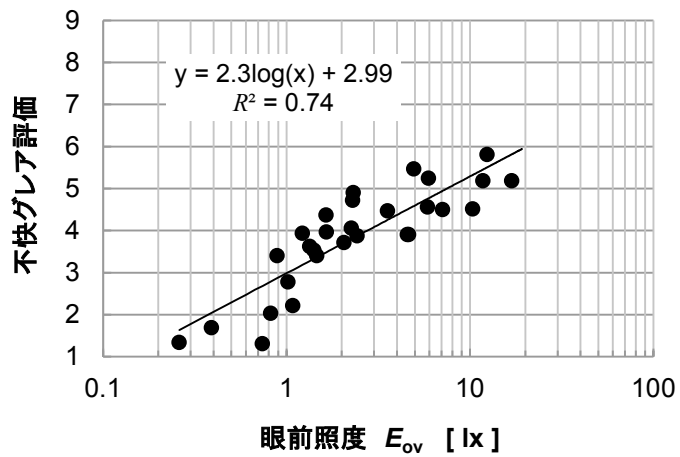


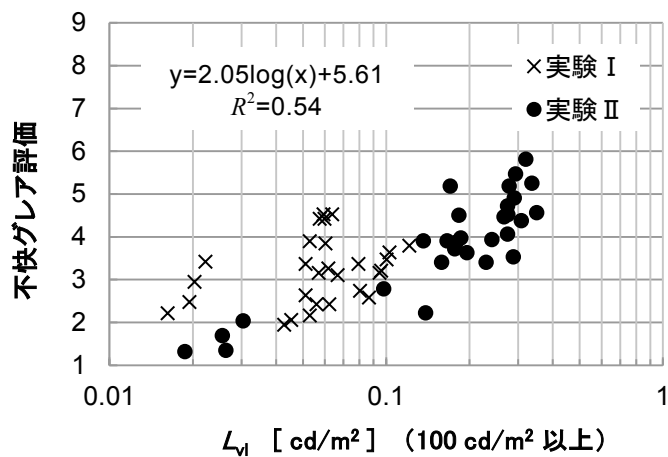
図 4-5 不快グレア評価と測定値との関係 (実験 II の結果)

次に、図 4-5(a) と図 4-5(b) に実験 I のデータを加えた布置図を図 4-6(a) と図 4-6(b) に示す。実験 I から得られた不快グレア評価値は 1.95 から 4.53 であったが、実験 II の評価データは 1.31 から 5.81 に布置している。実験 II では 1.95 よりも小さなデータが 3 つ存在し、4.53 を超えるデータが 8 つ得られている。したがって実験 I と実験 II を合わせると、広いグレア光の強度範囲に実験データが得られたことになる。

ここで図 4-5(a) と図 4-6(a) および図 4-5(b) と図 4-6(b) を比較すると、図 4-6 はデータ数が 2 倍に増え、かつデータ群の布置域が広がっているにも関わらず、 $L_{vl}$ 、 $E_{ov}$  とともに決定係数が実験 II のみよりも小さく ( $L_{vl}$  は 0.76 から 0.54 に、 $E_{ov}$  は 0.74 から 0.65 に) なった。すなわち、本実験からは不快グレア評価と等価光幕輝度や眼前照度との間に強い相関があると結論づけることはできない。

なお、図 4-6 よりも図 4-5 の相関係数が大きかったのは、データが少ないことによる選抜効果であったと思われる。したがって以降の解析には、実験 I と実験 II のデータを併記することにした。

(a) グレア光による等価光幕輝度との関係



(b) 眼前照度との関係

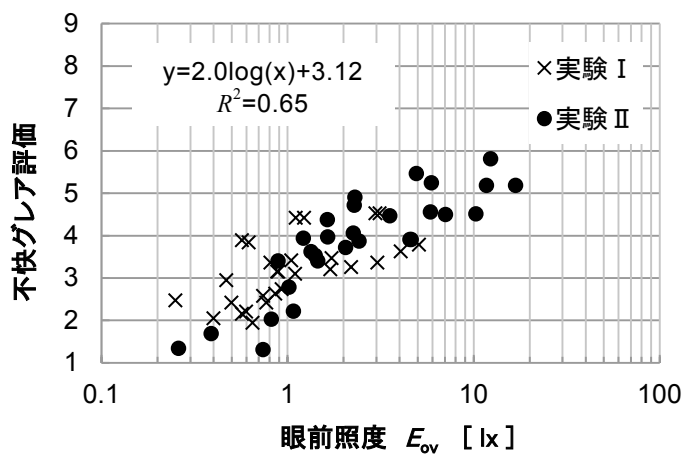


図 4-6 不快グレア評価と測定値との関係（実験 I と実験 II の結果）

## (2) グレア評価と GR の関係

歩行者空間の不快グレア評価にしばしば流用されている GR との関係を図 4-7 に描いた。実験 I と実験 II の両データを布置したところ、不快グレアが強くなるほど、GR 値も大きくなる傾向にあるがその相関は弱い（決定係数  $R^2=0.39$ ）ことが確認できる。実験 I のデータは、図 3-7 に示したように発光面の輝度分布が不均一なテスト光（図中左側の破線）と比較的均一なテスト光（図中右側の破線）に分かれて布置し、前者の方がグレアを強く感じる傾向を示した。ところが、実験 II の比較的均一なテスト光 Light-10 は、実験 I の比較的均一なテスト光と同じライン上に布置されたが、不均一なテスト光 Light-08, 09, 11~14 は、比較的均一なテスト光の右側（実験 I の結果とは逆側）に固まって布置した。この結果は、発光面の輝度分布が不均一な LED 街路灯の不快グレア評価に GR が適していないことを示唆している。

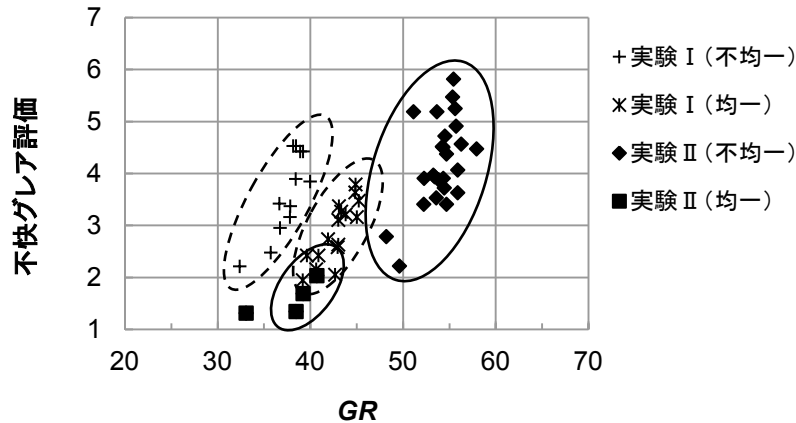


図 4-7 不快グレア評価と GR との関係

### (3) グレア評価とテスト光発光部輝度との関係

不快グレア評価とテスト光発光部の最大輝度値  $L_{\max}$  や平均輝度値  $L_{\text{ave}10}$  との関係を図示する。なお  $L_{\text{ave}10}$  は、測定した輝度分布から照明器具発光部の  $L_{\max}$  を求め、その 1/10 以上の輝度情報を持つ画素を対象に算出した平均輝度である。図より、不快グレア評価と  $L_{\max}$  および不快グレア評価と  $L_{\text{ave}10}$  は、ともに強い正の相関（それぞれ、決定係数  $R^2=0.84$ 、 $R^2=0.86$ ）があることが分かる。

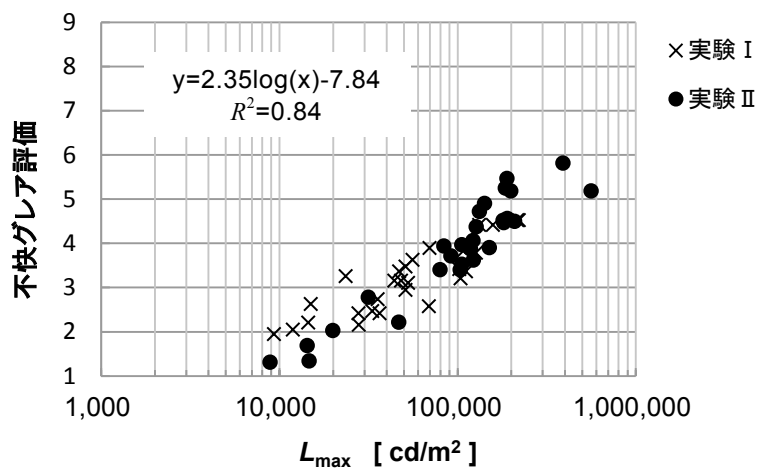


図 4-8 不快グレア評価と発光部最大輝度との関係

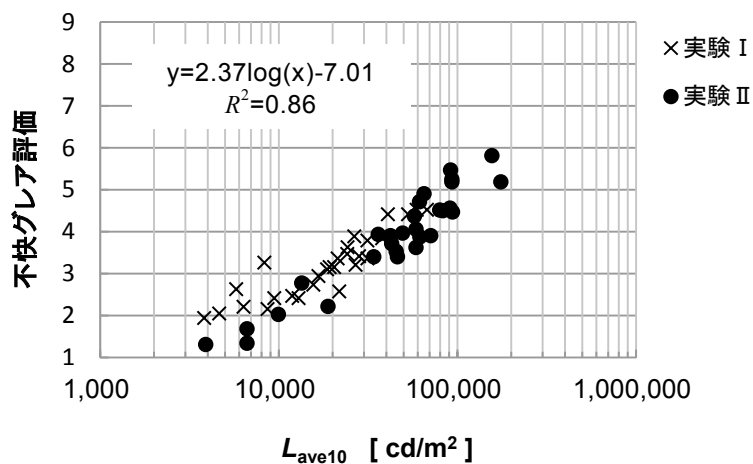


図 4-9 不快グレア評価と発光部平均輝度との関係

ところで、画像測光システムを用いて得られる輝度値は、2.3 節に述べたように分解能などの違いにより異なることが指摘されている。ここで、本実験により得られた各輝度分布の分解能を 1.19 分/pixel(画素数:3072×3072)から 3.57 分/pixel(画素数:1024×1024)に圧縮したところ、照明器具発光部の最大輝度値  $L_{\max}$  は平均で約 19%低下した。不快グレア評価と分解能が 3.57 分/pixel の輝度分布から求めた  $L_{\max}$  との関係を図 4-10 に示す。

分解能が 1.19 分/pixel の輝度分布から求めた  $L_{\max}$  の布置図(図 4-8)と図 4-10 を比較すると、両者の回帰式は同等と見なせるものだった。したがって、本実験の条件において 1.19~3.57 分/pixel の範囲では、不快グレア評価に対する分解能の影響は小さいと判断できる。

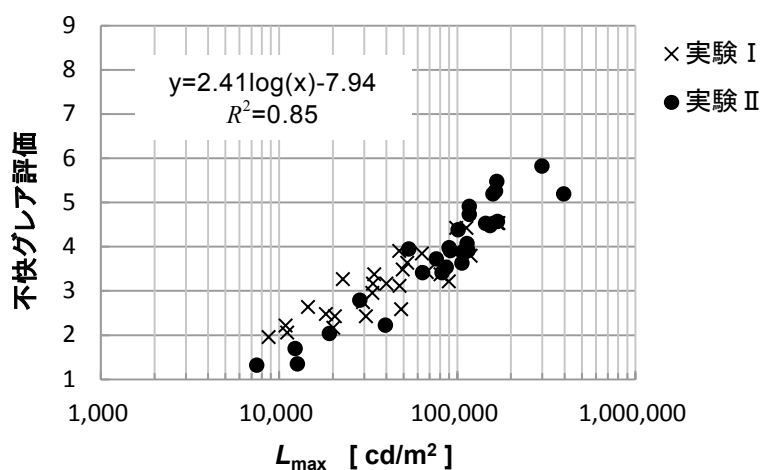


図 4-10 不快グレア評価と発光部最大輝度との関係  
(輝度画像の分解能: 3.57 分/pixel)



次に、照明学会は、前述のように、照明器具発光部の立体角が  $10^{-4}$  sr よりも小さい場合には、鉛直角 85 度方向の平均輝度を  $20,000 \text{ cd/m}^2$  以下に制限している。そこで、両実験データの中から鉛直角 85 度方向（A 地点）から評価したデータのみを抽出し、不快グレア評価とテスト光発光部の平均輝度値  $L_{\text{ave}10}$  との関係を図 4-11 に描いた。ちなみに、図示した 14 データの照明器具発光部の立体角（最大輝度の 1/10 以上の輝度値を有する画素数から求めた立体角）は、すべて  $10^{-4}$  sr よりも小さい。

この回帰式から、不快グレア評価値が 3 点（ややまぶしい；図 3-2 参照）および 5 点（まぶしい）のときの  $L_{\text{ave}10}$  の値を表 4-3 に示す。これにより鉛直角 85 度方向（A 地点）の  $20,000 \text{ cd/m}^2$  は、「ややまぶしい」と評価されたレベルであることが分かる。

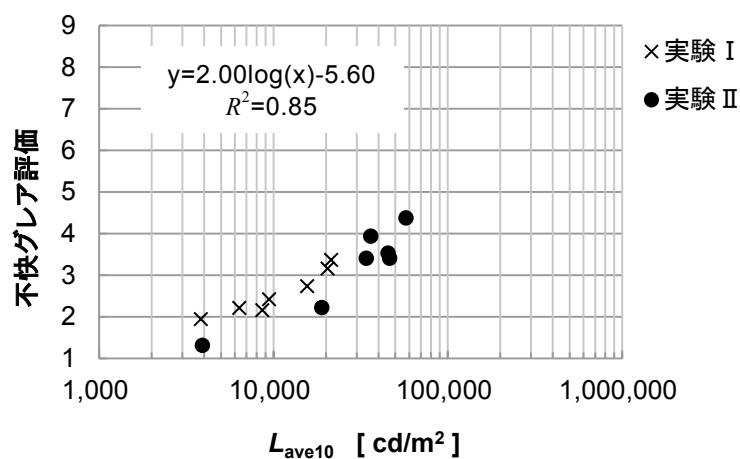


図 4-11 不快グレア評価と A 地点の発光部平均輝度との関係

表 4-3 境界輝度

	境界輝度 [cd/m <sup>2</sup> ]	
	3点(ややまぶしい)	5点(まぶしい)
発光部の平均輝度 $L_{\text{ave}10}$	20,000	200,000

図 4-12 に、不快グレア評価とテスト光発光部の輝度分布を順応輝度に応じて重み付け加算することで求まる有効グレア輝度  $L_{\text{eff}_10}$  との関係を示す。実験 I のみの結果と同様、強い相関関係が示唆された。

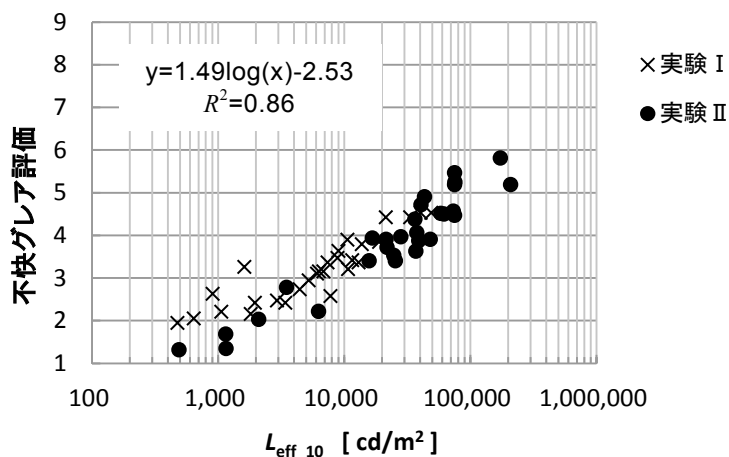


図 4-12 不快グレア評価と有効グレア輝度との関係

図 4-8, 9, 12 に示した不快グレア評価とテスト光発光部の輝度値との関係から、実験に用いた評価スケールで 3 点および 5 点のときの各測光量は表 4-4 に示す結果となる。また、不快グレアを強く感じるのは、照明器具発光部の鉛直角 85 度（仰角 5 度）方向ではなく、被験者から見てテスト光が仰角 10 度から 30 度（観測位置 C 地点から E 地点）に位置するときであることを明らかにしている。したがって、不快グレアが発生しにくい街路灯を開発するためには、仰角 10 度から 30 度の範囲においても、開発目標に応じた輝度の制限値を設定することが望ましいといえる。

表 4-4 境界輝度

	境界輝度 [ cd/m <sup>2</sup> ]	
	3点(ややまぶしい)	5点(まぶしい)
発光部の最大輝度 $L_{\text{max}}$	41,000	290,000
発光部の平均輝度 $L_{\text{ave}10}$	17,000	120,000
有効グレア輝度 $L_{\text{eff}_10}$	5,100	110,000

#### 4.4 m\_DGIの有効性

実験 I において、従来光源と LED 光源を区別することなく歩行者空間の不快グレアを評価する方法として m\_DGI (式 3-3) を提案した。m\_DGI が実験 II でも成立することを確認するために、両実験データの m\_DGI を計算し不快グレア評価との関係を下図に描いた。その結果、2 つの変数の間には、強い正の相関 ( $R^2=0.87$ ) が確認できた。すなわち m\_DGI は、グレア強度の強い刺激に対しても、従来光源と LED 光源を区別することなく歩行者空間の不快グレアを評価できるといえる。なお、近似式の傾きは 1.0 だった。

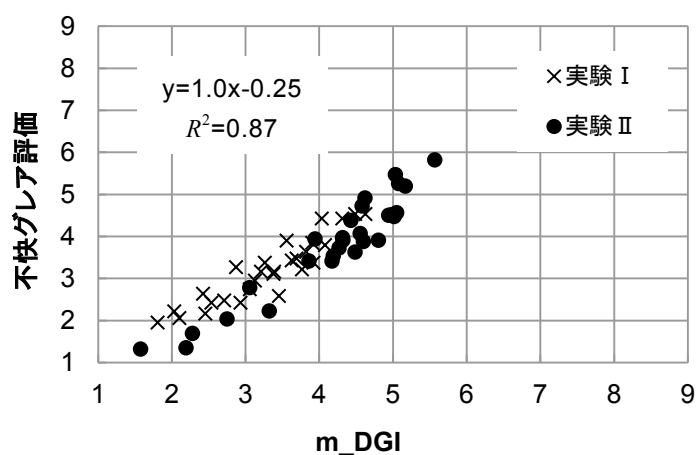


図 4-13 不快グレア評価と提案式との関係 1

## 4.5 不快グレアの予測

m\_DGI は、不快グレアを精度良く説明できているが、輝度分布データを基に算出する必要があり、配光データからは求めることができない。このため照明設計時に容易には利用できないという課題がある。一方、屋外スポーツ施設の不快グレア評価に使用される GR<sup>9)</sup> は、配光データから算出でき予測にも評価にも利用されている。そこで GR を修正することで、照明器具の発光部輝度均斉度には影響されずに歩行者空間の不快グレアを予測できるかについて検証した。修正した予測式 m\_GR (Modified Glare Rating) を式 4-1 に示し、不快グレア評価と m\_GR の相関を図 4-14 に示す。不快グレア評価と m\_GR の関係を示す決定係数  $R^2$  は、修正前(図 4-7 参照)の 0.39 から 0.52 に改善された。しかし、m\_DGI と m\_GR を比較すると、有効グレア輝度を用いる m\_DGI の方が精度よく不快グレアを説明できていることが分かる。したがって、より精度の高い評価を必要とする場合には式 3-3 に示した評価式 m\_DGI を活用し、照明設計の際にグレアの程度を予測するには汎用性に優れる m\_GR を用いることが有効であると思われる。

$$m\_GR = 4.8 + 2\log(L_{vl}/L_{ve}^{0.2}) \quad \dots \dots \dots \quad \text{式 4-1}$$

ただし、

$L_{vl}$  : グレア光による等価光幕輝度 [ cd/m<sup>2</sup> ]

$L_{ve}$  : 反射光による等価光幕輝度 [ cd/m<sup>2</sup> ]

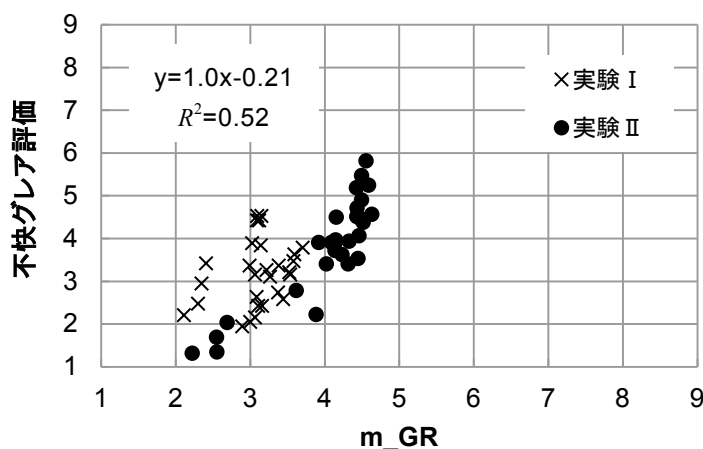


図 4-14 不快グレア評価と提案式との関係 2

## 4.6 まとめ

実験Ⅰには不快グレアを強く感じるテスト光が含まれていなかった。実験Ⅱでは不快グレアを強く感じるテスト光を含む主観評価実験を実施し、不快グレアと測光量の関係や、実験Ⅰで提案した不快グレア評価式  $m\_DGI$  の汎用性について検証した。実験結果を以下に整理する。

第一に、テスト光に近づきながら行った評価結果と、遠ざかりながら行った評価結果には有意な差は存在しなかった。すなわち、本実験では評価した順序が評価結果に与える影響は小さかったといえる。

次に、テスト光を高さ 4.5m に設置した本実験条件においては、被験者から見てテスト光が仰角 10 度から 30 度に位置するときには不快グレアを強く感じていた。この傾向は実験Ⅰからも確認している。したがって、不快グレアを感じにくい街路灯を開発するには、照明学会の技術規格の中で規制値を示している照明器具発光部の鉛直角 85 度（仰角 5 度）方向よりも、仰角 10 度から 30 度方向の光度（配光特性）が重要であるといえる。

一方、測光量との関係からは、一般に不快グレアと密接な関係にあると考えられているグレア光による等価光幕輝度  $L_{v1}$  や眼前照度  $E_{ov}$  よりも、テスト光発光部の最大輝度  $L_{max}$  や平均輝度  $L_{ave10}$  および有効グレア輝度  $L_{eff\_10}$  との間に強い相関関係にあることが分かった。すなわち被験者と街路灯の位置関係において仰角 10 度から 30 度に該当する範囲の  $L_{max}$ 、 $L_{ave10}$  および  $L_{eff\_10}$  が、それぞれ  $2.9 \times 10^5 \text{ cd/m}^2$ 、 $1.2 \times 10^5 \text{ cd/m}^2$ 、 $1.1 \times 10^5 \text{ cd/m}^2$  を超えると不快グレアの発生リスクが高まるといえる。また、発光面の輝度均斉度が不均一な照明器具は、比較的均一なものよりも不快グレアを強く感じることや、スポーツ照明の不快グレア評価法（GR）が歩行者空間の評価には適さないことを、実験Ⅰと同様に実験Ⅱでも確認した。

実験Ⅰで提案した不快グレア評価式  $m\_DGI$  については、実験Ⅱの評価データにおいても成立することが確認できたので、 $m\_DGI$  の汎用性の高さが証明できたといえる。最後に、配光データから不快グレアを予測する方法を検討し、予測式  $m\_GR$  を導出した。ただし、不快グレアとの相関は  $m\_GR$  よりも  $m\_DGI$  の方が強いため、不快グレアを評価する場合と予測する場合において使い分けることを提案した。



## 第5章 結 論





## 5.1 結論

前章までの検討によって、屋外歩行者空間における不快グレアと測光量との関係を明らかにすることができ、従来光源と LED 光源を区別することなく不快グレアを評価あるいは予測するための方法が提案できた。本研究から得られた知見は以下の通りである。

第 1 章「序論」では、まず初めにグレア評価に関する研究の歴史を光源技術の発展の歴史と関連付けて整理した。次に、グレア評価の基準や指針の系譜を図示した後に、屋外環境を対象としたグレア評価の主要な基準や指針を整理して、歩行者空間には不快グレアを評価する国際的に合意された指針が存在しないことを指摘した。そして近年 LED 照明が急速に普及しつつあるが、現在使用されているグレア評価基準が蛍光灯や HID ランプにより照明された光環境を評価することを前提としていることや、照明器具発光部の輝度分布が不均一な場合にグレアを感じやすいことが既往研究で指摘されていることを説明し、従来光源と LED 光源とを区別することなく歩行者空間の不快グレアを評価するための指標の必要性を述べた。

第 2 章「グレア計測のためのデジタル測光」では、初めに、輝度分布を画像処理することで光環境の様々な測光量を把握することができるが、光計測機器メーカーから市販されている 2 次元輝度計を本研究に使用するには課題があることを述べた。そして本研究に利用した、デジタルカメラで撮影した画像から輝度分布を生成するシステム（写真測光法）のアルゴリズムを説明した。この画像測光システムは、理論を解説した論文が多数発表されていることもあり、多くの研究機関や照明メーカーが開発している。しかし、利用するレンズや画像センサなどの仕様がそれぞれで異なるため測定精度に差があることが指摘されている。照明学会は、この課題に取り組む研究調査委員会を 2014 年に発足させている。本論文では、測定誤差に寄与する要因を整理し、画像測光システムを使用した際には測定結果に影響する仕様を明記することの重要性を述べた。そして終わりに、グレアと密接な関係にあると考えられている等価光幕輝度を輝度分布から算出する方法を解説した。

第3章「歩行者空間のためのグレア評価手法」では、従来光源の街路灯とLED光源の街路灯をテスト光とした主観評価実験（実験Ⅰ）について報告した。被験者には、視線を水平にした場合とテスト光を直視した場合のまぶしさ（グレア）を評価させた。本論文では、それぞれを周辺視評価、中心視評価と呼称している。実験の結果、周辺視評価では、発光面の輝度均斉度が不均一なテスト光が、比較的均一なものよりも9段階のグレア評価スケールで0.7から1.2程度まぶしいと評価された。また、被験者とテスト光の位置関係において、テスト光が概ね仰角10度から30度の範囲のときに不快グレアを強く感じていることから、不快グレアを感じにくい街路灯を開発するには、この間（仰角10度から30度）の配光特性が重要であると結論づけた。さらに、周辺視評価と中心視評価ともに、不快グレア評価と発光面の輝度情報（例えば  $L_{\max}$ ,  $L_{\text{ave}10}$  や  $L_{\text{eff}10}$ ）との間に密接な関係があることを明らかにした。歩行者空間には不快グレアを評価するための指針が存在しないという問題に対しては、照明器具発光部の輝度分布の均一性に関わらず（従来光源とLED光源を区別することなく）利用できる評価式  $m\_DGI$  を提案した。

第4章「グレア評価式の検証」では、実験Ⅰとは異なる環境で実施した主観評価実験（実験Ⅱ）の評価データから、不快グレアと測光量の関係や、実験Ⅰで提案した不快グレア評価式  $m\_DGI$  の汎用性について検証し報告した。例えば、実験Ⅱにおいても、実験Ⅰと同様に被験者から見てテスト光が仰角10度から30度の位置にあるときに不快グレアを強く感じていたことを示した。また、測光量との関係からは、一般に不快グレアと密接な関係にあると考えられているグレア光による等価光幕輝度  $L_{vl}$  や眼前照度  $E_{ov}$  よりも、テスト光発光部の最大輝度  $L_{\max}$  や平均輝度  $L_{\text{ave}10}$  および有効グレア輝度  $L_{\text{eff}10}$  とより強い相関があることが分かった。次に、スポーツ照明の不快グレア評価手法 GR が歩行者空間のグレア評価に流用されることがあるが、歩行者空間の評価には適さないことを明らかにした。実験Ⅰで提案した不快グレア評価式  $m\_DGI$  については、グレア強度の強い街路灯をテスト光に用いた実験Ⅱの評価データも精度よく説明できることが確認できたので、汎用性の高さが証明できたといえる。最後に、配光データから不快グレアを予測する方法を検討し、予測式  $m\_GR$  を提案した。

## 5.2 おわりに

急速に普及しつつある LED 街路灯には、発光部の輝度均斉度が低い製品が存在している。このような製品の場合、従来光源の製品と比較して、不快グレアの存在を指摘されることが多い。歩行者空間の視認性を担保するための明るさを確保する一方で、グレアを最小限にとどめることは容易ではないが、照明設計においては非常に重要な課題である。しかしながら、その要因や影響の程度について詳細に検討を行った研究は少なく、明確な不快グレアの予測を行う手法は確立されていないのが現状である。その上、歩行者空間には不快グレアを評価するための国際的に合意された指針が存在しない。

本研究では、屋外歩行者空間において不快グレアを評価させる大規模な主観評価実験を 2 回行い、5.1「結論」に示したように、不快グレアを強く感じる範囲が照明器具発光部の鉛直角 85 度（仰角 5 度）方向ではないことや、不快グレアと照明器具発光部の輝度分布から得られた情報との間に強い相関があることを明らかにした。加えて、歩行者空間の不快グレアを従来光源と LED 光源を区別することなく評価する方法（m\_DGI）と予測する方法（m\_GR）を提案した。

これらの知見は、不快グレアが発生しにくい街路灯を開発する際に役立つものと考えている。例えば、街路灯の所要配光を設計する過程においては、若干不確かではあるが、グレア光による等価光幕輝度  $L_{v1}$  や眼前照度  $E_{ov}$  を算出することで発生する不快グレアの程度を予測できる。さらに試験道路に試作した街路灯を設置して輝度分布を測定すれば、照明器具発光部の最大輝度  $L_{max}$  や平均輝度  $L_{ave10}$  および m\_DGI による不快グレア評価が可能になる。このように不快グレア評価を配光設計時と試作時の 2 回実施することにより、不快グレアの発生しにくい照明器具の開発が可能になる。

今後は、歩行者空間向けのグレア評価方法を指針化するための取り組みを進めるとともに、照明器具発光面の輝度分布をシミュレーションする技術や、視環境の輝度分布を画像測光するための研究を進めていきたいと考えている。



## 参考文献

- 1) Holladay: The Fundamentals of Glare and Visibility, J.O.S.A & R.S.I Vol12, pp.271-320 (1926).
- 2) Matthew Luckiesh, S.K.Guth: Brightnesses in Visual Field at Borderline Between Comfort and Discomfort (BCD), Illuminating Engineering, pp.650-670 (1949).
- 3) Han Tekelenburg: Evaluation of glare in sports-field lighting, International Lighting Review 1982/3, pp.68-71 (1982).
- 4) Van Vommel, W.J.M., Tekelenburg, J. and Fische, D.: A Glare Evaluation System for Outdoor Sports Lighting and its Consequences for the Design Practice, CIE 20<sup>th</sup> Session D505/1-D505/4 (1983).
- 5) 道路照明施設設置基準・同解説, 社団法人日本道路協会, 昭和 56 年 4 月
- 6) CIE: Glare and uniformity in road lighting installations, Publication CIE, No.31(TC-4.6) (1976).
- 7) 道路照明施設設置基準・同解説, 社団法人日本道路協会, 平成 19 年 10 月
- 8) CIE: Recommendations for the lighting of roads for motor and pedestrian traffic, Publication CIE, No.115 (1995).
- 9) CIE: Glare evaluation system for use within outdoor sports and area lighting, Publication CIE, No.112 (1994).
- 10) 川上幸二他: CIE 屋外施設のグレア評価方法の屋内スポーツ施設への適応性, 照学全大, pp.291-292 (1998).
- 11) 照明学会: 歩行者の安全・安心のための屋外照明基準, JIES-010 (2014).
- 12) CIE: Guide to the lighting of urban areas, Publication CIE, No.136 (2000).
- 13) ASSIST recommends: A method for estimating discomfort glare from exterior lighting systems, Volume 9, Issue 1, April (2011).
- 14) Hall,E.T.: The hidden dimension, Anchor Books, New York (1966).
- 15) J. F. Caminada, W. F. M. Van Vommel.: New lighting considerations for residential area, Internet Lighting Rev.3 (1980).
- 16) Kohko S: A Study on Affects of Veiling Luminance on Pedestrian Visibility, J.Light & Vis. Env., Vol32,No.3, pp.315-321 (2008).

- 17) Paul B M, Einhorn H D.: Discomfort glare from small light sources, *Lighting Research and Technology*, Vol.31, pp.139-143 (1999).
- 18) Cai H, Chung T.: Evaluating discomfort glare from non-uniform electric light sources, *Lighting Research and Technology*, Vol.45, pp.267-294 (2013).
- 19) Lai D et al.: Influence of light source luminance on discomfort glare from LED road luminaires, *Proceedings of CIE "Lighting Quality and Energy Efficiency"*, pp.220-227 (2014).
- 20) 高橋宏, 入倉隆: 複数の点光源による不快グレア, *照学誌*, Vol.87, No.8A, pp.584-588 (2003).
- 21) Kasahara T. et al.: Discomfort glare caused by white LED light sources, *J.Light & Vis. Env.*, Vol.30, No.2, pp.95-103 (2006).
- 22) Lee C. A study on the estimation of discomfort glare for LED luminaires, *Proceedings of the CIE 26th Session, D3*; pp.33-36 (2007).
- 23) Kohko S. et al.: Glare of LED lighting in outdoor environment, *Proceedings of CIE "Lighting Quality and Energy Efficiency"*, pp.924-929 (2014).
- 24) Wu Y. et al.: Evaluation method research on discomfort glare of LED products, *Proceedings of CIE "Lighting Quality and Energy Efficiency"*, pp.736-742 (2014).
- 25) Tashiro T, Kawanobe S, Kimura-Minoda T, Kohko S, Ishikawa T, Ayama M : Discomfort glare for white LED light sources with different spatial arrangement, *Lighting Research & Technology*, Vol.47, pp.316-337 (2015).
- 26) Yang Y. et al.: Assessing glare. Part 1: Comparing uniform and non-uniform LED luminaires, *Lighting Research & Technology*, 1477153515607396 (2015).
- 27) 中村洋: 写真測光法による輝度測定の試み, *建学大*, pp.65-66 (1971).
- 28) 中村洋: 正射影カメラによる輝度および輝度分布の測定 (その1. 写真測光法と正射影カメラ・感光材料), *建学論*, 第243号, pp.73-79 (1976).
- 29) 中村洋: 正射影カメラによる輝度および輝度分布の測定 (その2. 写真濃度の測定・較正・測定手順など), *建学論*, 第244号, pp.81-87 (1976).
- 30) 野口太郎: 写真測光法を応用した輝度分布の測定について, *建学大*, pp.139-140 (1976).

- 31) 岩田利枝他: CCDカメラの光環境計測への応用技術, 照学誌, 第81巻, 第3号, pp.246-249 (1997).
- 32) 松井俊成他: LED防犯灯のグレア規制とその評価方法, 照学全大, 9-21 (2010).
- 33) 池田紘一他: ランドルト環視標の輝度対比および順応輝度と視力との関係, 照学誌, 第67巻, 第10号, pp.527-533 (1983).
- 34) CIE: CIE COLLECTION on GLARE 2002, Publication CIE, No.146 (2002).
- 35) L.L.Holladay: The fundamentals of glare and visibility, Journal of the Optical Society of America and Review of Scientific Instruments, Vol.12, No.4, pp.271-319 (1926).
- 36) L.L.Holladay: Action of a light-source in the field of view in lowering visibility, Journal of the Optical Society of America and Review of Scientific Instruments, Vol.14, No.1, pp.1-15 (1927).
- 37) 江湖俊介他: 道路照明におけるデジタル測光の可能性, 照学全大, No.5-21, p.119 (2011).
- 38) Yamada T, Kohko S.: Glare evaluation system using imaging photometry, Proceedings of CIE Centenary Conference, pp.627-633 (2013).
- 39) Rosenhahn E, Lampen M.: New investigation of the subjective glare effect of projection type headlamps, SAE Technical Paper, 2004-01-1281, pp.205-211 (2004).
- 40) CIE: Discomfort glare in interior lighting, Publication CIE, No.117 (1995).
- 41) Bullough JD: Luminance versus luminous intensity as a metric for discomfort glare, SAE Technical Paper, 2011-01-0111 (2011).
- 42) Bullough JD, Sweater-Hickcox K: Interactions among light source luminance, Illuminance and Size on Discomfort Glare, SAE International Journal of Passenger Cars – Mechanical Systems, 2012;5, pp.199–202 (2012).
- 43) Sugano S, Nakamura Y.: Generation of discomfort glare image using wavelet transform, Proceedings of the CIE 27th Session, pp.286-293 (2011).
- 44) Nakamura Y, Fujita N: Just sufficient lighting condition under hybrid-lighting of real daylight and artificial light, Proceedings of CIE Centenary Conference, pp.276-281 (2013).

- 45) Luckiesh M, Guth SK.: Brightness in visual field at borderline between comfort and discomfort (BCD), Illuminating Engineering Society, 44, pp.650-670 (1949).
- 46) Petherbridge P, Hopkinson RG.: Discomfort glare and the lighting of buildings, Trans. Illum. Eng. Soc., London, 15, pp.31-36 (1950).



# 付 表

付表1 実験Iの測定値

Test light	Point	Observation distance	Illuminance	Luminance			Veiling luminance	
			$E_v$	$L_{max}$	$L_{ave10}$	$L_{ave100}$	$L_{vl}$	$L_{ve}$
			[ lx ]	[ $\times 10^3$ cd/m <sup>2</sup> ]			[ cd/m <sup>2</sup> ]	
Light -01	A	34.3	0.77	27.8	9.5	4.1	0.0623	0.0119
	B	24.4	0.74	69.2	21.9	9.3	0.0867	0.0120
	C	17.0	1.70	104.0	27.0	13.6	0.0959	0.0123
	D	11.2	5.10	126.8	31.5	18.7	0.1215	0.0142
	E	6.4	15.17	205.1	63.8	46.8	0.2282	0.0143
	F	3.6	18.32	-	-	-	-	-
Light -02	A	34.3	0.93	35.7	15.6	4.7	0.0806	0.0124
	B	24.4	0.88	44.3	19.3	6.6	0.0946	0.0106
	C	17.0	1.73	51.0	24.3	8.5	0.1003	0.0111
	D	11.2	4.07	55.9	24.4	9.6	0.1029	0.0119
	E	6.4	10.95	65.3	24.7	11.3	0.1096	0.0128
	F	3.6	17.22	-	-	-	-	-
Light -03	A	34.3	0.57	28.0	8.7	2.7	0.0531	0.0089
	B	24.4	0.50	36.6	13.0	3.9	0.0561	0.0092
	C	17.0	1.10	52.9	18.7	5.7	0.0669	0.0089
	D	11.2	3.05	111.7	31.4	10.6	0.0794	0.0108
	E	6.4	10.20	157.4	47.7	16.6	0.0941	0.0112
	F	3.6	16.33	-	-	-	-	-
Light -04	A	34.3	0.65	9.3	3.8	1.8	0.0428	0.0082
	B	24.4	0.40	11.9	4.6	2.3	0.0455	0.0060
	C	17.0	0.86	15.0	5.8	3.1	0.0511	0.0067
	D	11.2	2.20	23.6	8.3	4.5	0.0618	0.0079
	E	6.4	6.78	34.9	12.9	6.7	0.0746	0.0083
	F	3.6	11.51	-	-	-	-	-
Light -05	A	34.3	0.89	48.2	20.5	4.4	0.0572	0.0131
	B	24.4	0.57	69.8	26.6	6.9	0.0530	0.0113
	C	17.0	1.11	132.2	41.0	12.6	0.0576	0.0117
	D	11.2	3.13	221.5	59.4	18.2	0.0594	0.0132
	E	6.4	15.47	630.0	187.2	54.0	0.0912	0.0145
	F	3.6	14.81	-	-	-	-	-
Light -06	A	34.3	0.81	47.1	21.4	5.1	0.051	0.0115
	B	24.4	0.62	108.7	38.0	11.7	0.060	0.0110
	C	17.0	1.23	158.1	53.2	15.6	0.060	0.0119
	D	11.2	2.97	217.0	67.7	19.8	0.064	0.0138
	E	6.4	13.44	809.0	230.8	72.5	0.135	0.0178
	F	3.6	19.71	-	-	-	-	-
Light -07	A	34.3	0.60	14.5	6.4	1.5	0.0162	0.0058
	B	24.4	0.25	33.3	11.9	3.5	0.0195	0.0049
	C	17.0	0.47	51.1	16.7	5.0	0.0203	0.0047
	D	11.2	1.05	102.3	28.3	8.2	0.0223	0.0052
	E	6.4	5.10	285.5	88.0	28.7	0.0480	0.0065
	F	3.6	7.24	-	-	-	-	-

付表2 実験Ⅱの測定値

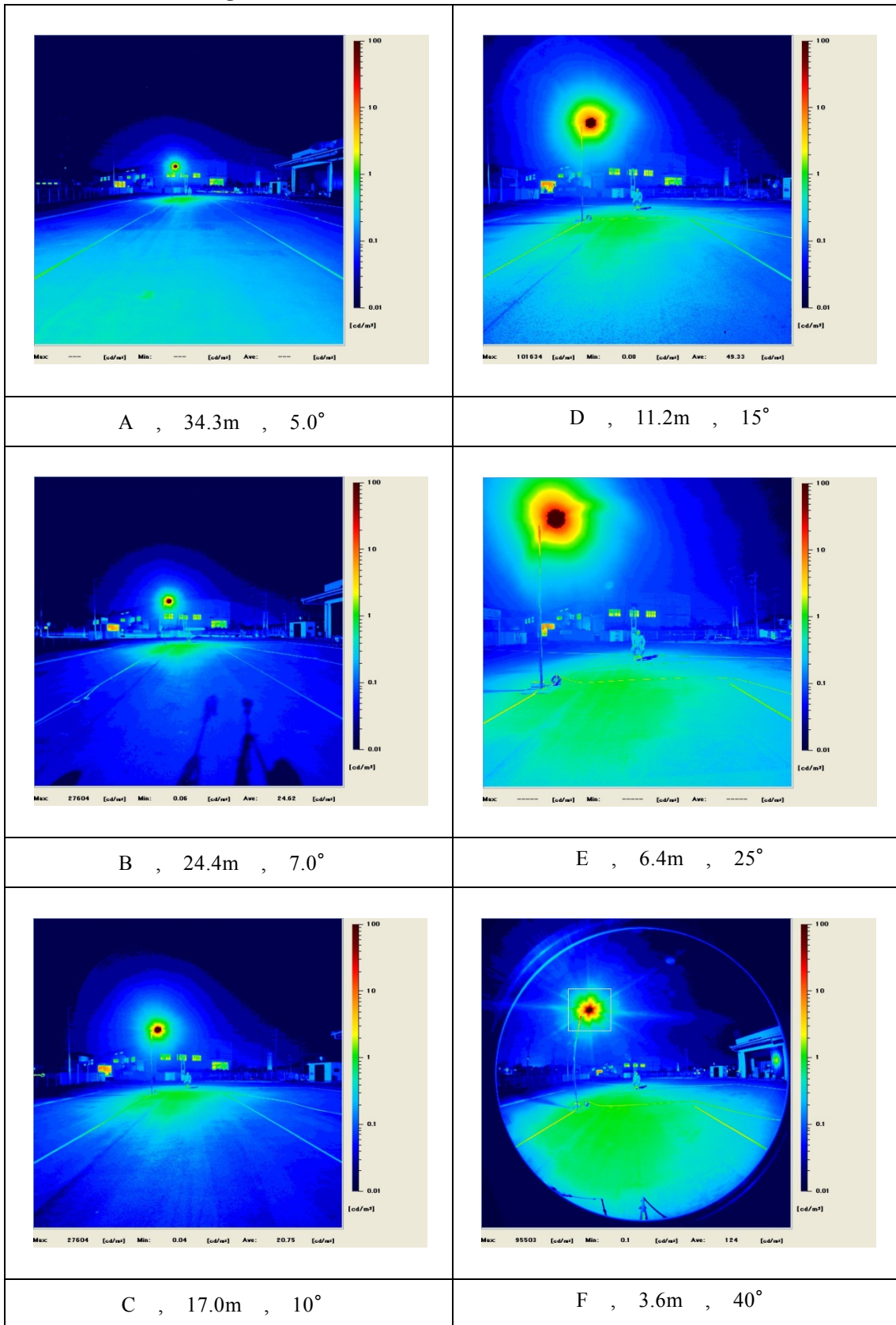
Test light	Point	Observation distance	Illuminance	Luminance			Veiling luminance	
			$E_v$	$L_{max}$	$L_{ave10}$	$L_{ave100}$	$L_{vl}$	$L_{ve}$
			[ lx ]	[ $\times 10^3$ cd/m <sup>2</sup> ]			[ cd/m <sup>2</sup> ]	
Light -08	A	34.3	1.080	46.9	19.0	7.1	0.1391	0.0100
	B	24.4	1.020	31.7	13.5	5.3	0.0979	0.0079
	C	17.0	2.060	92.2	43.0	20.9	0.1772	0.0078
	D	11.2	4.630	116.5	42.3	22.8	0.1365	0.0074
	E	6.4	10.390	198.6	54.8	33.3	0.1419	0.0073
	F	3.6	-	-	-	-	-	-
Light -09	A	34.3	1.640	127.4	57.6	22.9	0.3085	0.0141
	B	24.4	2.290	133.2	61.8	23.8	0.2745	0.0126
	C	17.0	5.940	185.7	93.6	37.7	0.3361	0.0140
	D	11.2	11.760	199.2	93.7	42.0	0.2786	0.0140
	E	6.4	17.990	350.3	90.9	40.0	0.1627	0.0121
	F	3.6	-	-	-	-	-	-
Light -10	A	34.3	0.740	8.9	3.9	1.3	0.0188	0.0063
	B	24.4	0.260	14.7	6.7	2.3	0.0264	0.0052
	C	17.0	0.390	14.4	6.7	2.7	0.0256	0.0046
	D	11.2	0.820	20.0	10.0	4.8	0.0304	0.0048
	E	6.4	6.470	378.1	111.9	36.8	0.0719	0.0062
	F	3.6	-	-	-	-	-	-
Light -11	A	34.3	1.460	103.5	46.5	21.2	0.2296	0.0101
	B	24.4	1.650	105.8	49.5	21.3	0.1861	0.0093
	C	17.0	3.560	182.3	94.4	43.9	0.2669	0.0085
	D	11.2	7.080	209.7	83.5	39.0	0.1832	0.0082
	E	6.4	12.650	572.9	126.7	42.4	0.1158	0.0070
	F	3.6	-	-	-	-	-	-
Light -12	A	34.3	1.410	105.9	45.6	18.0	0.2880	0.0147
	B	24.4	2.260	122.4	58.9	24.2	0.2747	0.0109
	C	17.0	5.880	190.9	91.4	37.2	0.3500	0.0137
	D	11.2	10.330	180.9	80.0	36.6	0.2756	0.0130
	E	6.4	19.200	359.1	86.5	39.7	0.1929	0.0118
	F	3.6	-	-	-	-	-	-
Light -13	A	34.3	1.220	84.1	36.2	13.9	0.241	0.0123
	B	24.4	2.310	141.9	65.2	24.6	0.291	0.0118
	C	17.0	4.930	190.1	91.9	34.3	0.294	0.0124
	D	11.2	12.380	391.1	156.5	66.2	0.320	0.0135
	E	6.4	16.870	563.9	175.8	74.7	0.171	0.0107
	F	3.6	-	-	-	-	-	-
Light -14	A	34.3	0.890	79.8	34.2	14.7	0.1589	0.0088
	B	24.4	1.340	123.1	58.9	28.3	0.1959	0.0075
	C	17.0	2.430	118.4	61.9	29.2	0.1793	0.0084
	D	11.2	4.560	151.2	71.2	34.4	0.1660	0.0074
	E	6.4	8.470	201.2	62.3	28.4	0.1037	0.0073
	F	3.6	-	-	-	-	-	-

付表 3 実験 I、Light-01 (写真)

	
<p>A , 34.3m , 5.0°</p>	<p>D , 11.2m , 15°</p>
	
<p>B , 24.4m , 7.0°</p>	<p>E , 6.4m , 25°</p>
	
<p>C , 17.0m , 10°</p>	<p>F , 3.6m , 40°</p>

注記) 表中の英数文字は、観測位置, 観測距離, 仰角を示す

付表4 実験I、Light-01 (輝度分布)



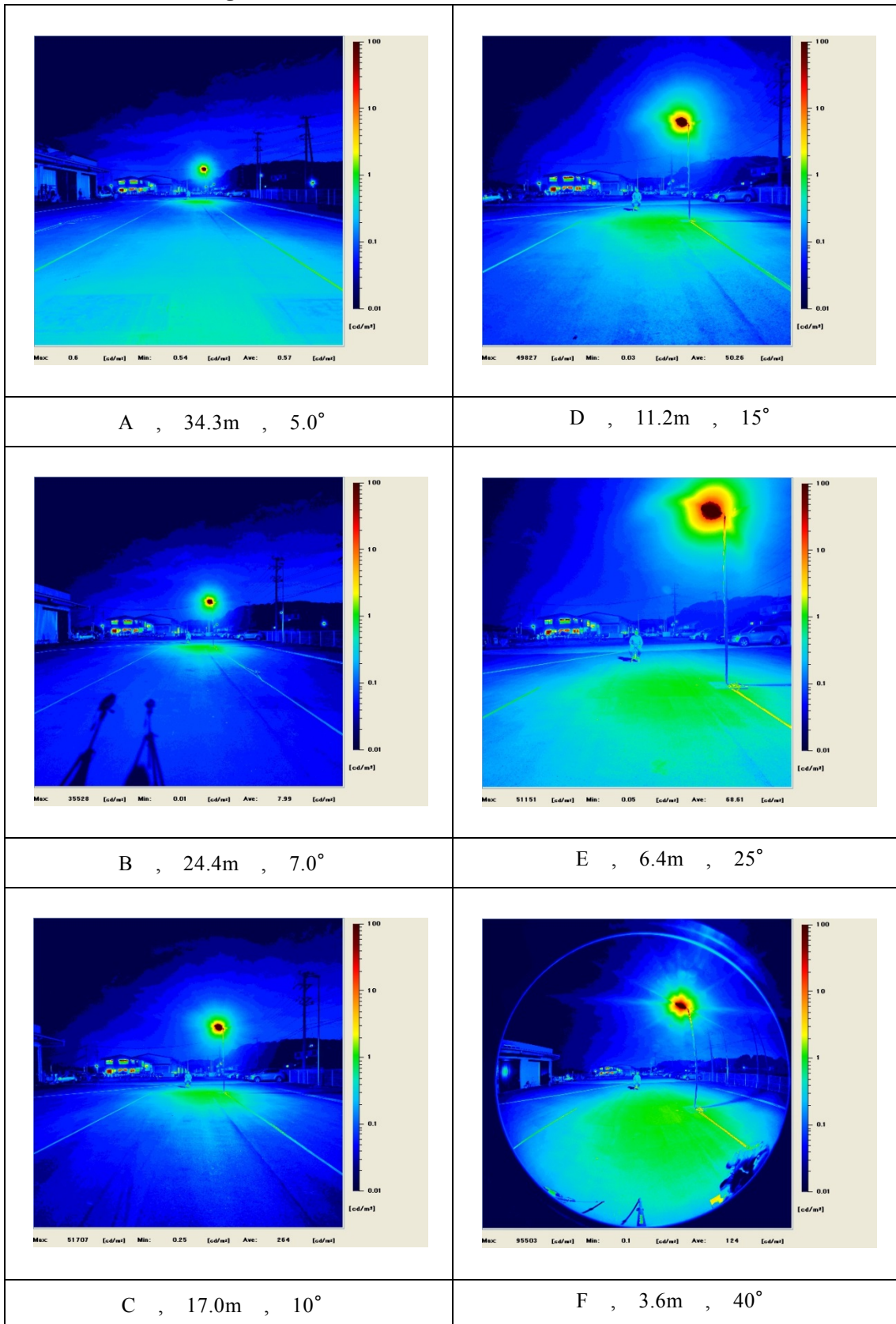
注記) 表中の英数文字は、観測位置, 観測距離, 仰角を示す

付表 5 実験 I、Light-02 (写真)

	
<p>A , 34.3m , 5.0°</p>	<p>D , 11.2m , 15°</p>
	
<p>B , 24.4m , 7.0°</p>	<p>E , 6.4m , 25°</p>
	
<p>C , 17.0m , 10°</p>	<p>F , 3.6m , 40°</p>

注記) 表中の英数文字は、観測位置, 観測距離, 仰角を示す

付表6 実験I、Light-02（輝度分布）



注記) 表中の英数文字は、観測位置、観測距離、仰角を示す

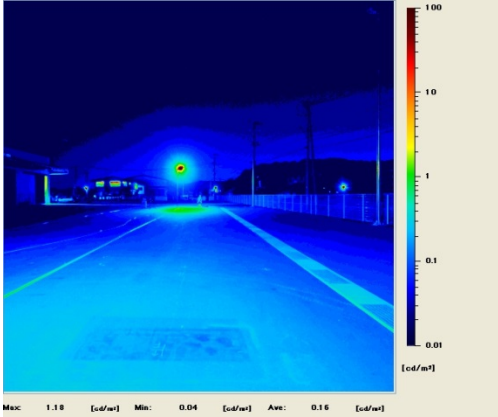
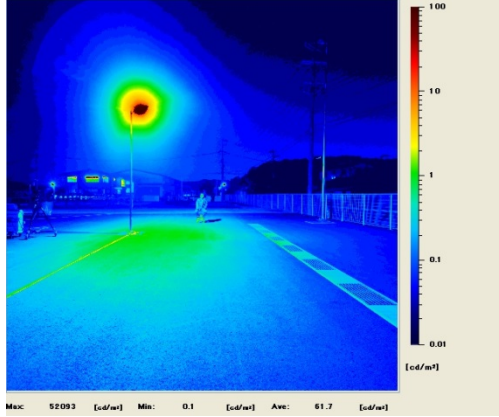
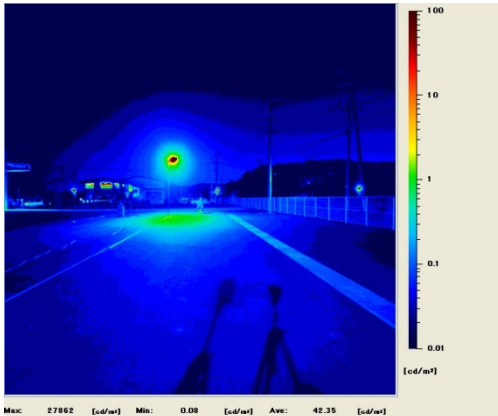
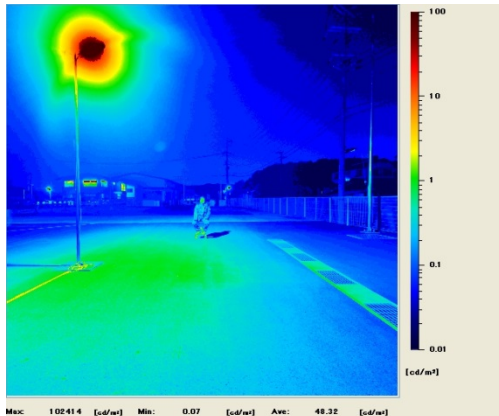
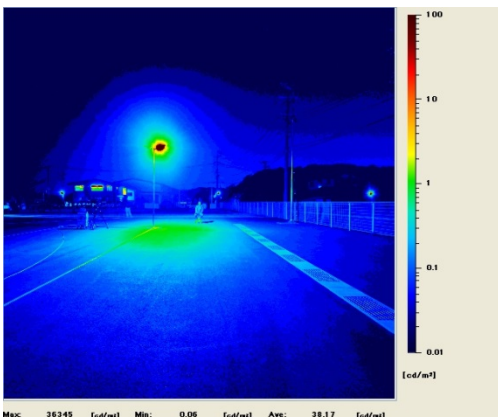
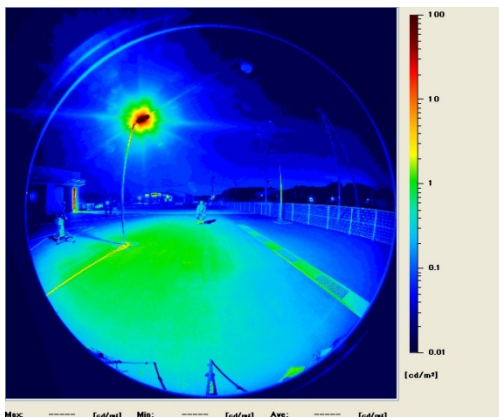
付表 7 実験 I、Light-03 (写真)

	
<p>A , 34.3m , 5.0°</p>	<p>D , 11.2m , 15°</p>
	
<p>B , 24.4m , 7.0°</p>	<p>E , 6.4m , 25°</p>
	
<p>C , 17.0m , 10°</p>	<p>F , 3.6m , 40°</p>

注記) 表中の英数文字は、観測位置, 観測距離, 仰角を示す



付表 8 実験 I、Light-03 (輝度分布)

 <p>Max: 1.18 [cd/m²] Min: 0.04 [cd/m²] Ave: 0.16 [cd/m²]</p>	 <p>Max: 52093 [cd/m²] Min: 0.1 [cd/m²] Ave: 61.7 [cd/m²]</p>
<p>A , 34.3m , 5.0°</p>	<p>D , 11.2m , 15°</p>
 <p>Max: 27862 [cd/m²] Min: 0.08 [cd/m²] Ave: 42.35 [cd/m²]</p>	 <p>Max: 102414 [cd/m²] Min: 0.07 [cd/m²] Ave: 48.32 [cd/m²]</p>
<p>B , 24.4m , 7.0°</p>	<p>E , 6.4m , 25°</p>
 <p>Max: 36345 [cd/m²] Min: 0.06 [cd/m²] Ave: 38.17 [cd/m²]</p>	 <p>Max: ----- [cd/m²] Min: ----- [cd/m²] Ave: ----- [cd/m²]</p>
<p>C , 17.0m , 10°</p>	<p>F , 3.6m , 40°</p>

注記) 表中の英数文字は、観測位置、観測距離、仰角を示す

付表 9 実験 I、Light-04 (写真)

	
<p>A , 34.3m , 5.0°</p>	<p>D , 11.2m , 15°</p>
	
<p>B , 24.4m , 7.0°</p>	<p>E , 6.4m , 25°</p>
	
<p>C , 17.0m , 10°</p>	<p>F , 3.6m , 40°</p>

注記) 表中の英数文字は、観測位置, 観測距離, 仰角を示す

付表 10 実験 I、Light-04 (輝度分布)

<p>A , 34.3m , 5.0°</p>	<p>D , 11.2m , 15°</p>
<p>B , 24.4m , 7.0°</p>	<p>E , 6.4m , 25°</p>
<p>C , 17.0m , 10°</p>	<p>F , 3.6m , 40°</p>

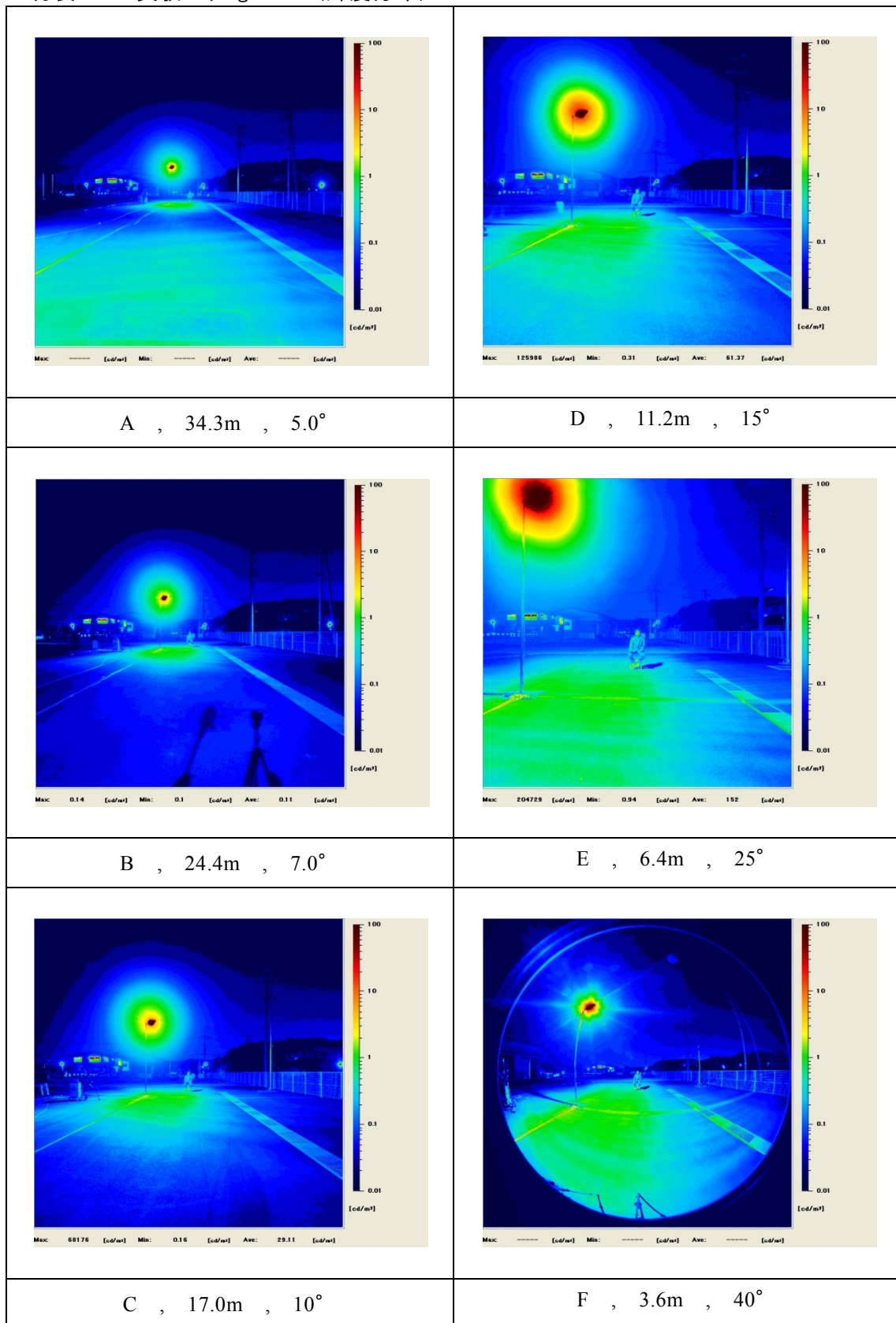
注記) 表中の英数文字は、観測位置、観測距離、仰角を示す

付表 11 実験 I、Light-05 (写真)

	
<p>A , 34.3m , 5.0°</p>	<p>D , 11.2m , 15°</p>
	
<p>B , 24.4m , 7.0°</p>	<p>E , 6.4m , 25°</p>
	
<p>C , 17.0m , 10°</p>	<p>F , 3.6m , 40°</p>

注記) 表中の英数文字は、観測位置, 観測距離, 仰角を示す

付表 12 実験 I、Light-05 (輝度分布)



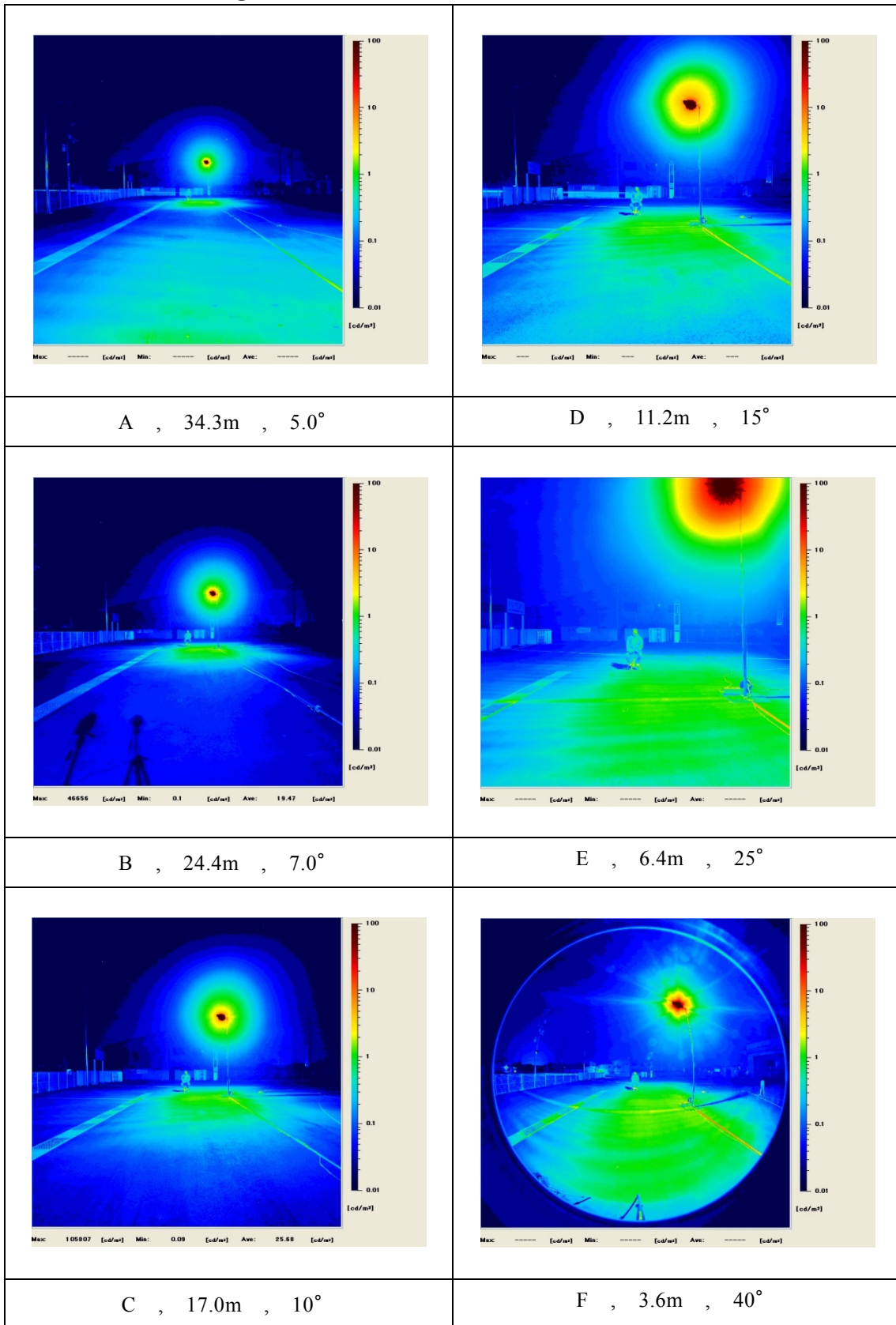
注記) 表中の英数文字は、観測位置、観測距離、仰角を示す

付表 13 実験 I、Light-06 (写真)

	
<p>A , 34.3m , 5.0°</p>	<p>D , 11.2m , 15°</p>
	
<p>B , 24.4m , 7.0°</p>	<p>E , 6.4m , 25°</p>
	
<p>C , 17.0m , 10°</p>	<p>F , 3.6m , 40°</p>

注記) 表中の英数文字は、観測位置, 観測距離, 仰角を示す

付表 14 実験 I、Light-06 (輝度分布)



注記) 表中の英数文字は、観測位置, 観測距離, 仰角を示す

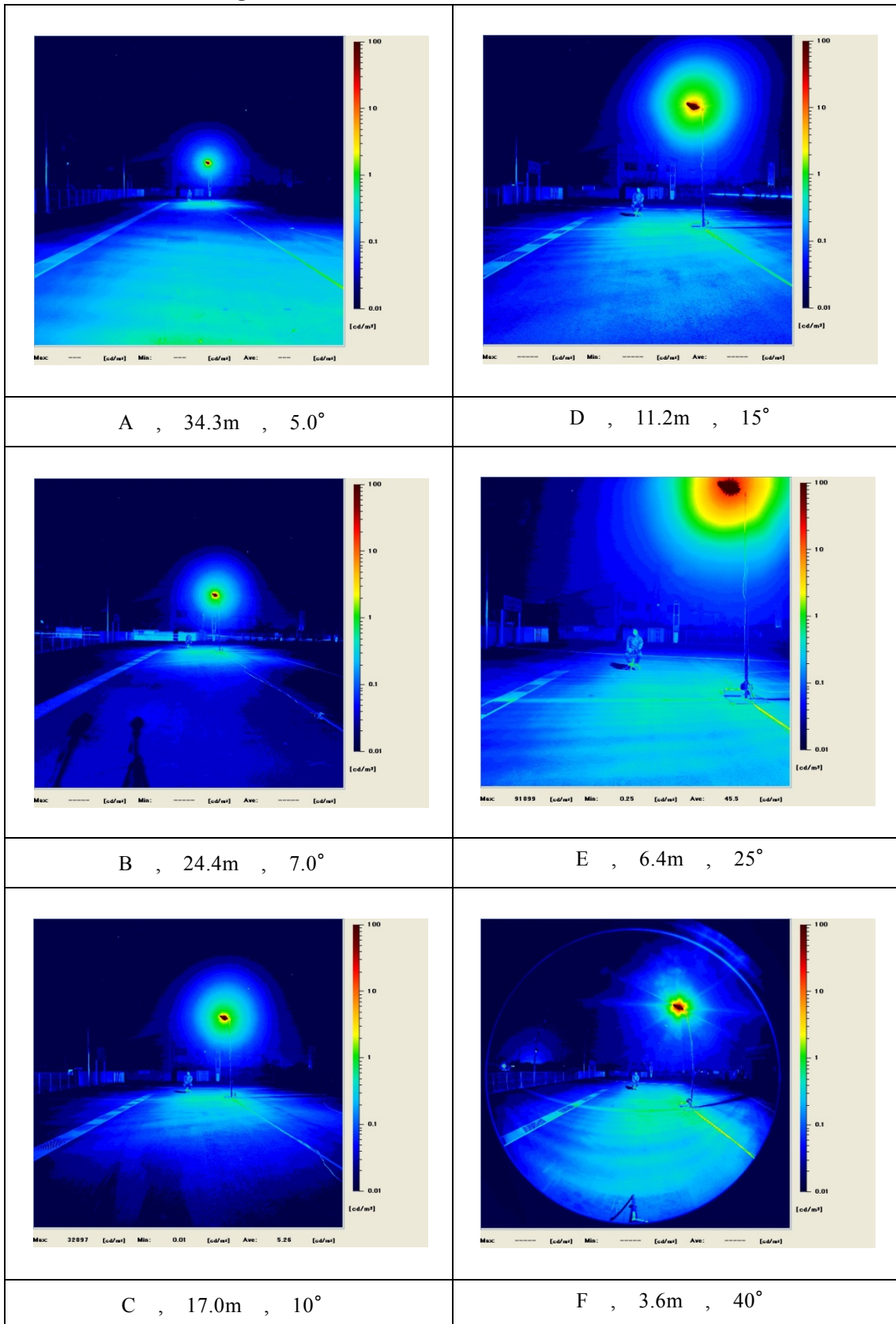
付表 15 実験 I、Light-07 (写真)

	
<p>A , 34.3m , 5.0°</p>	<p>D , 11.2m , 15°</p>
	
<p>B , 24.4m , 7.0°</p>	<p>E , 6.4m , 25°</p>
	
<p>C , 17.0m , 10°</p>	<p>F , 3.6m , 40°</p>

注記) 表中の英数文字は、観測位置, 観測距離, 仰角を示す








付表 16 実験 I、Light-07 (輝度分布)



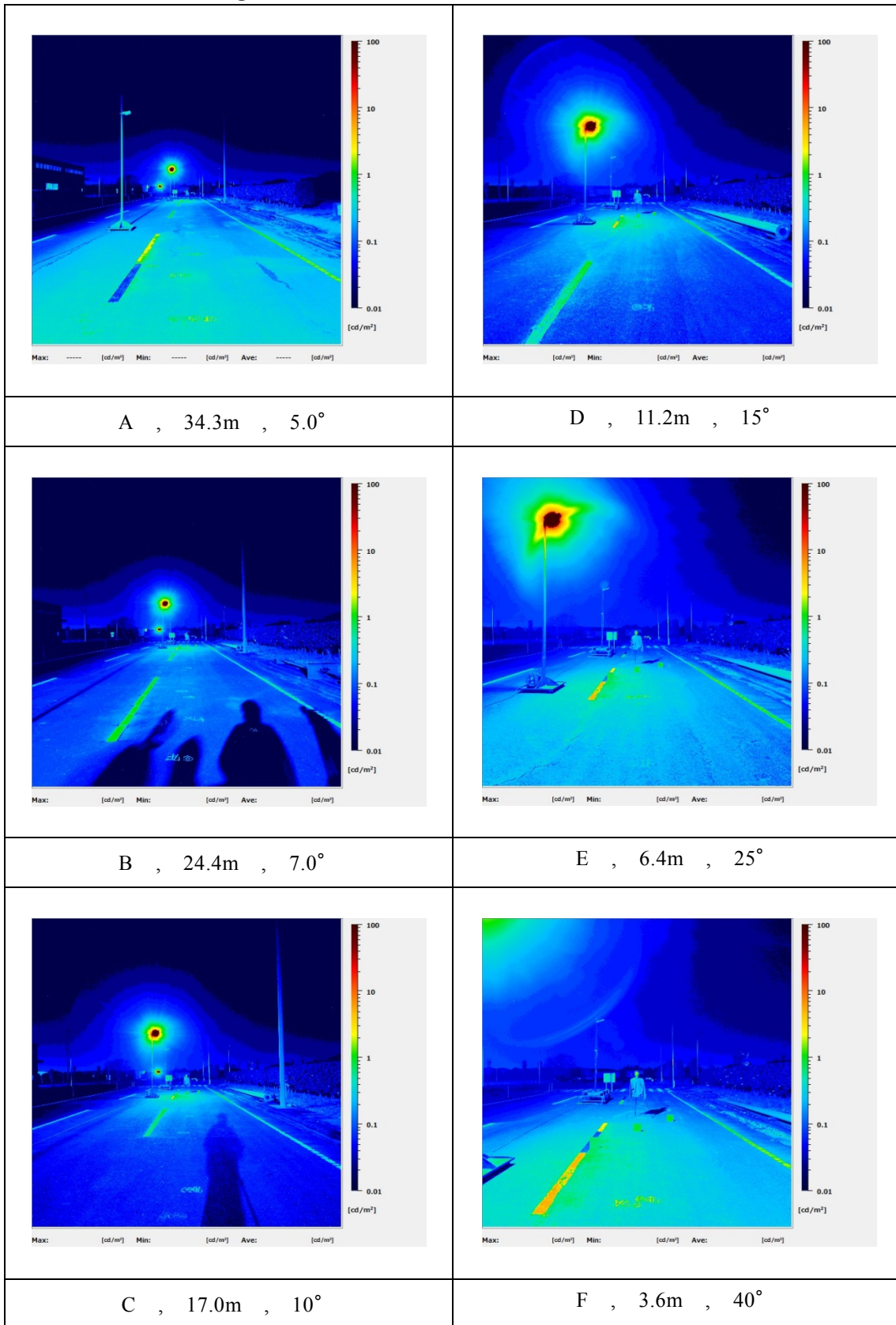
注記) 表中の英数文字は、観測位置, 観測距離, 仰角を示す

付表 17 実験Ⅱ、Light-08 (写真)

	
<p>A , 34.3m , 5.0°</p>	<p>D , 11.2m , 15°</p>
	
<p>B , 24.4m , 7.0°</p>	<p>E , 6.4m , 25°</p>
	
<p>C , 17.0m , 10°</p>	<p>F , 3.6m , 40°</p>

注記) 表中の英数文字は、観測位置, 観測距離, 仰角を示す

付表 18 実験Ⅱ、Light-08 (輝度分布)



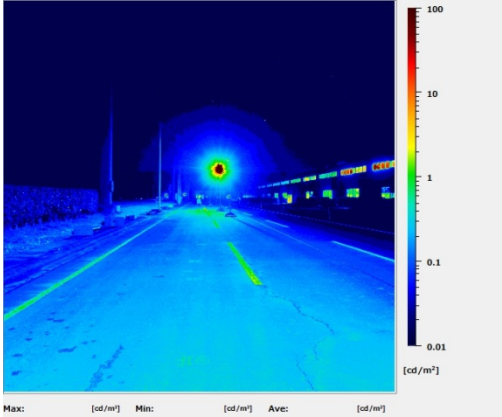
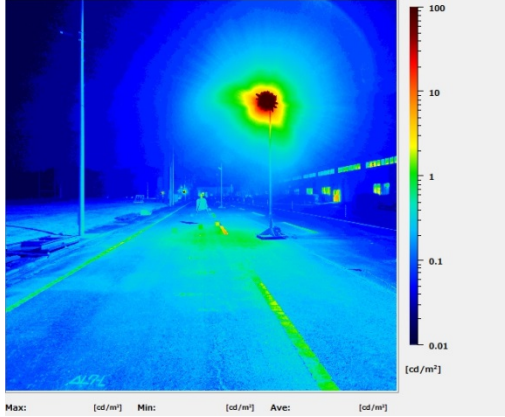
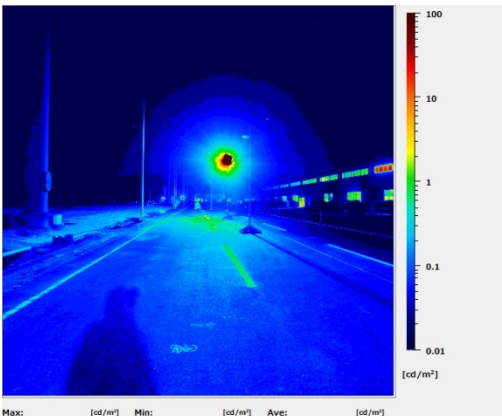
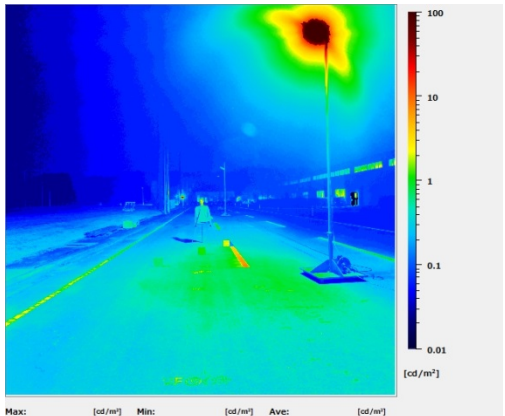
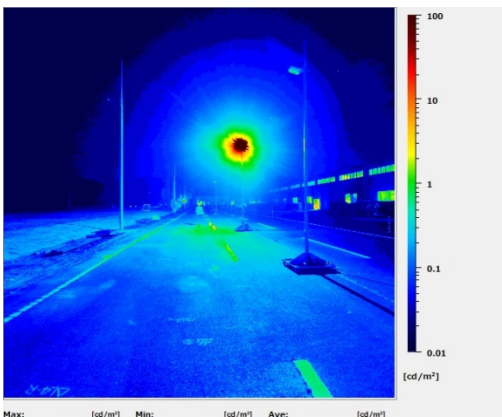
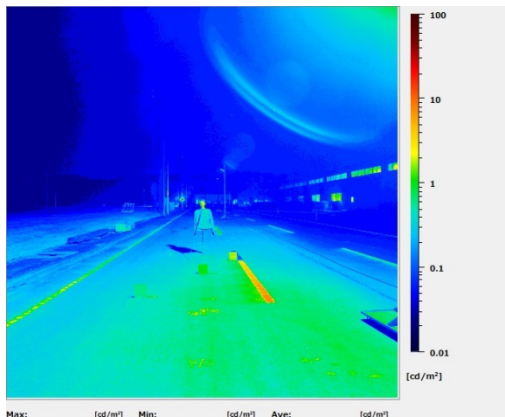
注記) 表中の英数文字は、観測位置、観測距離、仰角を示す

付表 19 実験Ⅱ、Light-09 (写真)

	
<p>A , 34.3m , 5.0°</p>	<p>D , 11.2m , 15°</p>
	
<p>B , 24.4m , 7.0°</p>	<p>E , 6.4m , 25°</p>
	
<p>C , 17.0m , 10°</p>	<p>F , 3.6m , 40°</p>

注記) 表中の英数文字は、観測位置, 観測距離, 仰角を示す

付表 20 実験Ⅱ、Light-09 (輝度分布)

 <p>Max: [cd/m²] Min: [cd/m²] Ave: [cd/m²]</p>	 <p>Max: [cd/m²] Min: [cd/m²] Ave: [cd/m²]</p>
<p>A , 34.3m , 5.0°</p>	<p>D , 11.2m , 15°</p>
 <p>Max: [cd/m²] Min: [cd/m²] Ave: [cd/m²]</p>	 <p>Max: [cd/m²] Min: [cd/m²] Ave: [cd/m²]</p>
<p>B , 24.4m , 7.0°</p>	<p>E , 6.4m , 25°</p>
 <p>Max: [cd/m²] Min: [cd/m²] Ave: [cd/m²]</p>	 <p>Max: [cd/m²] Min: [cd/m²] Ave: [cd/m²]</p>
<p>C , 17.0m , 10°</p>	<p>F , 3.6m , 40°</p>

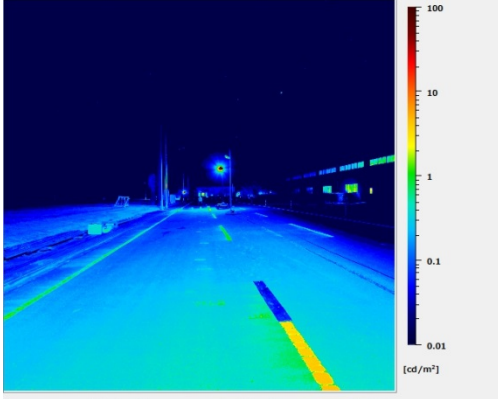
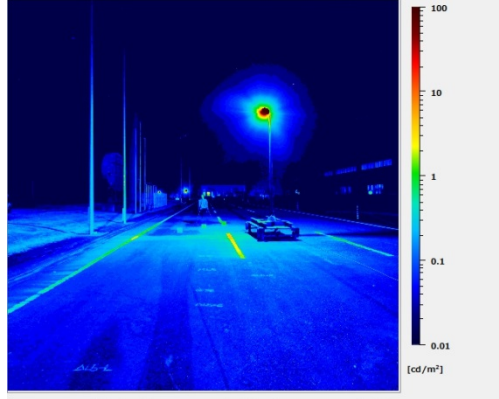
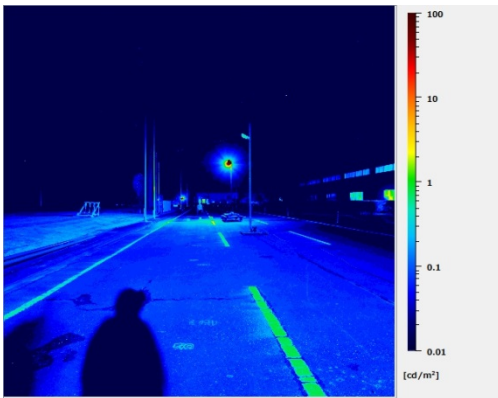
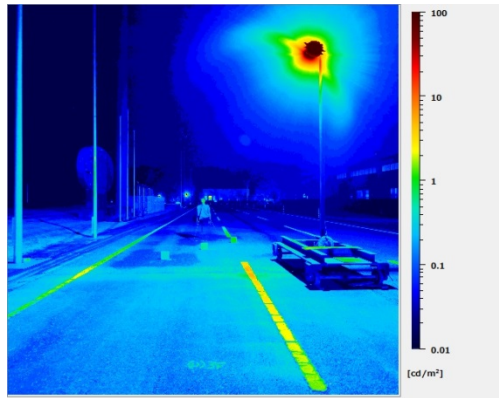
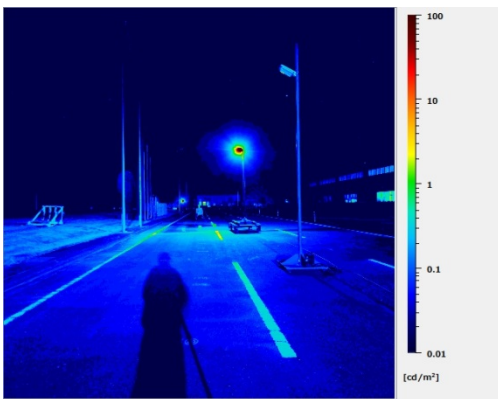
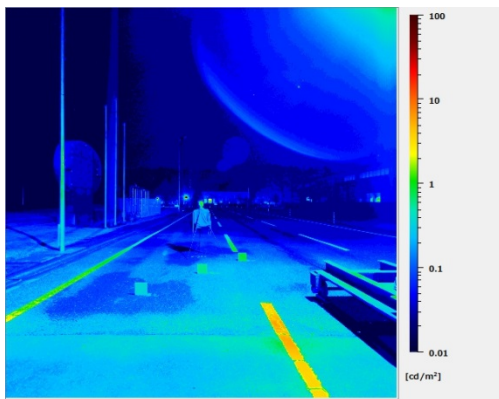
注記) 表中の英数文字は、観測位置，観測距離，仰角を示す

付表 21 実験Ⅱ、Light-10 (写真)

	
<p>A , 34.3m , 5.0°</p>	<p>D , 11.2m , 15°</p>
	
<p>B , 24.4m , 7.0°</p>	<p>E , 6.4m , 25°</p>
	
<p>C , 17.0m , 10°</p>	<p>F , 3.6m , 40°</p>





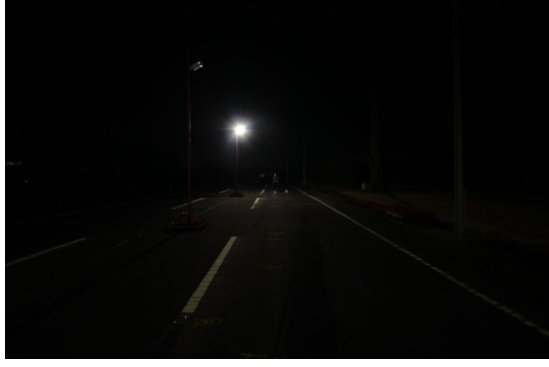
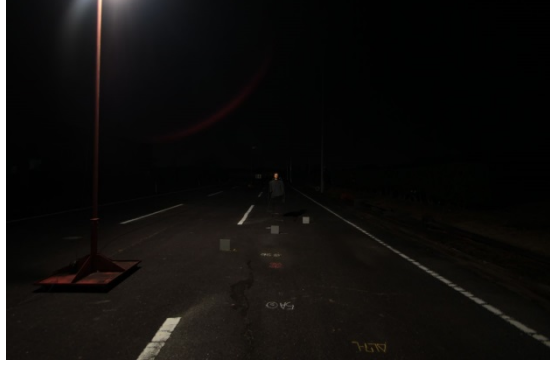
注記) 表中の英数文字は、観測位置, 観測距離, 仰角を示す

付表 22 実験Ⅱ、Light-10 (輝度分布)

 <p>Max: --- [cd/m<sup>2</sup>] Min: --- [cd/m<sup>2</sup>] Ave: --- [cd/m<sup>2</sup>]</p>	 <p>Max: [cd/m<sup>2</sup>] Min: [cd/m<sup>2</sup>] Ave: [cd/m<sup>2</sup>]</p>
<p>A , 34.3m , 5.0°</p>	<p>D , 11.2m , 15°</p>
 <p>Max: [cd/m<sup>2</sup>] Min: [cd/m<sup>2</sup>] Ave: [cd/m<sup>2</sup>]</p>	 <p>Max: [cd/m<sup>2</sup>] Min: [cd/m<sup>2</sup>] Ave: [cd/m<sup>2</sup>]</p>
<p>B , 24.4m , 7.0°</p>	<p>E , 6.4m , 25°</p>
 <p>Max: [cd/m<sup>2</sup>] Min: [cd/m<sup>2</sup>] Ave: [cd/m<sup>2</sup>]</p>	 <p>Max: [cd/m<sup>2</sup>] Min: [cd/m<sup>2</sup>] Ave: [cd/m<sup>2</sup>]</p>
<p>C , 17.0m , 10°</p>	<p>F , 3.6m , 40°</p>

注記) 表中の英数文字は、観測位置, 観測距離, 仰角を示す

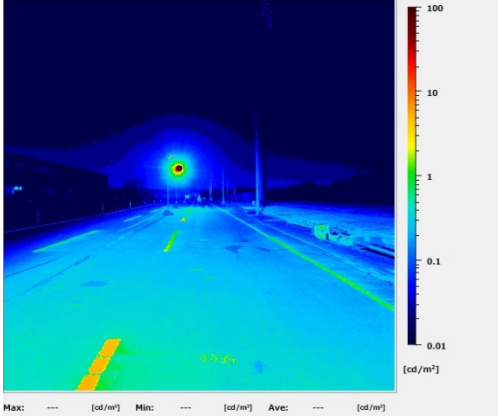
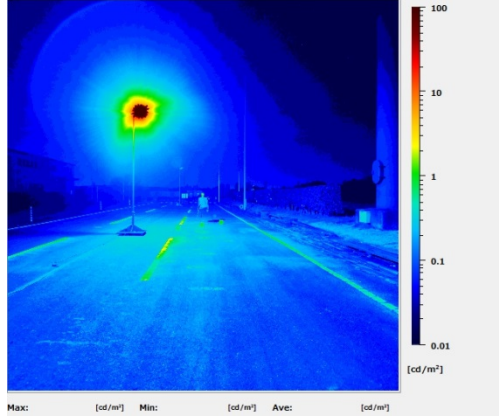
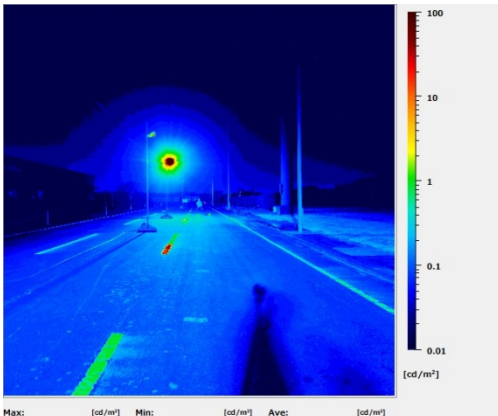
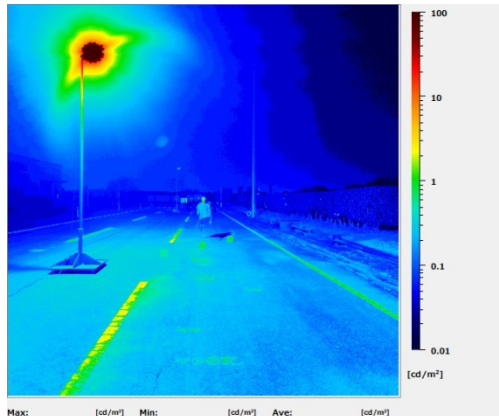
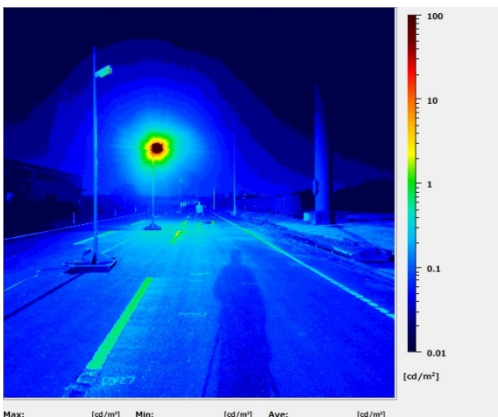
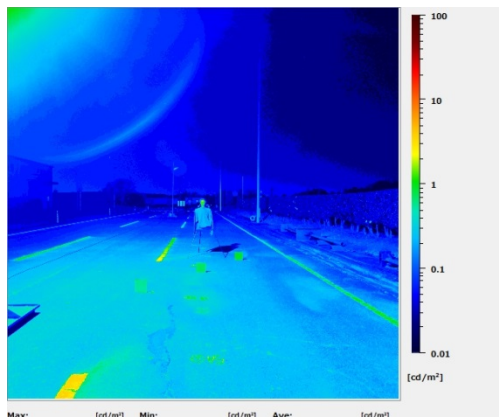
付表 23 実験Ⅱ、Light-11 (写真)

	
<p>A , 34.3m , 5.0°</p>	<p>D , 11.2m , 15°</p>
	
<p>B , 24.4m , 7.0°</p>	<p>E , 6.4m , 25°</p>
	
<p>C , 17.0m , 10°</p>	<p>F , 3.6m , 40°</p>

注記) 表中の英数文字は、観測位置, 観測距離, 仰角を示す



付表 24 実験Ⅱ、Light-11 (輝度分布)

 <p>Max: --- [cd/m<sup>2</sup>] Min: --- [cd/m<sup>2</sup>] Ave: --- [cd/m<sup>2</sup>]</p>	 <p>Max: [cd/m<sup>2</sup>] Min: [cd/m<sup>2</sup>] Ave: [cd/m<sup>2</sup>]</p>
<p>A , 34.3m , 5.0°</p>	<p>D , 11.2m , 15°</p>
 <p>Max: [cd/m<sup>2</sup>] Min: [cd/m<sup>2</sup>] Ave: [cd/m<sup>2</sup>]</p>	 <p>Max: [cd/m<sup>2</sup>] Min: [cd/m<sup>2</sup>] Ave: [cd/m<sup>2</sup>]</p>
<p>B , 24.4m , 7.0°</p>	<p>E , 6.4m , 25°</p>
 <p>Max: [cd/m<sup>2</sup>] Min: [cd/m<sup>2</sup>] Ave: [cd/m<sup>2</sup>]</p>	 <p>Max: [cd/m<sup>2</sup>] Min: [cd/m<sup>2</sup>] Ave: [cd/m<sup>2</sup>]</p>
<p>C , 17.0m , 10°</p>	<p>F , 3.6m , 40°</p>

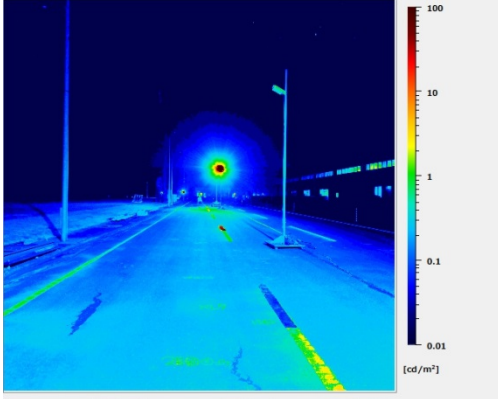
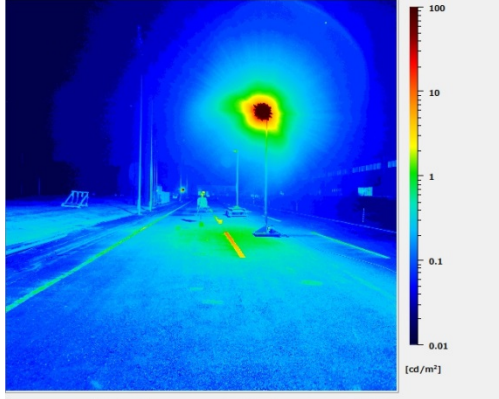
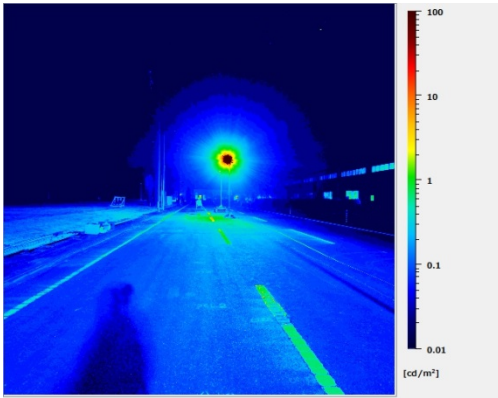
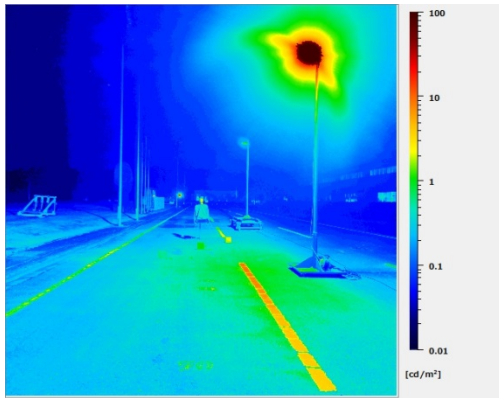
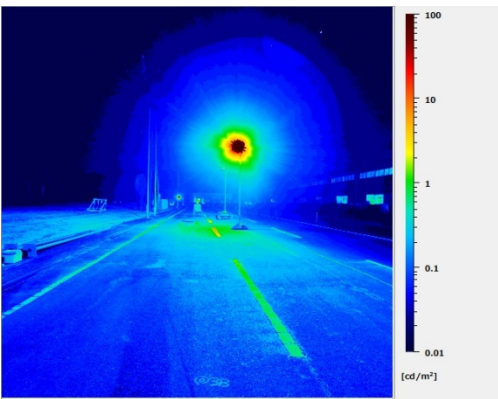
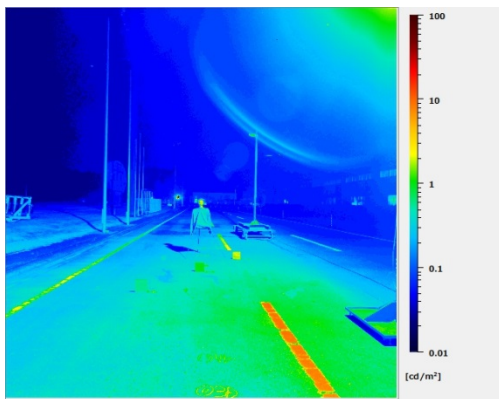
注記) 表中の英数文字は、観測位置, 観測距離, 仰角を示す

付表 25 実験Ⅱ、Light-12 (写真)

	
<p>A , 34.3m , 5.0°</p>	<p>D , 11.2m , 15°</p>
	
<p>B , 24.4m , 7.0°</p>	<p>E , 6.4m , 25°</p>
	
<p>C , 17.0m , 10°</p>	<p>F , 3.6m , 40°</p>

注記) 表中の英数文字は、観測位置, 観測距離, 仰角を示す

付表 26 実験Ⅱ、Light-12 (輝度分布)

 <p>Max: --- [cd/m²] Min: --- [cd/m²] Ave: --- [cd/m²]</p>	 <p>Max: [cd/m²] Min: [cd/m²] Ave: [cd/m²]</p>
<p>A , 34.3m , 5.0°</p>	<p>D , 11.2m , 15°</p>
 <p>Max: --- [cd/m²] Min: --- [cd/m²] Ave: --- [cd/m²]</p>	 <p>Max: [cd/m²] Min: [cd/m²] Ave: [cd/m²]</p>
<p>B , 24.4m , 7.0°</p>	<p>E , 6.4m , 25°</p>
 <p>Max: [cd/m²] Min: [cd/m²] Ave: [cd/m²]</p>	 <p>Max: [cd/m²] Min: [cd/m²] Ave: [cd/m²]</p>
<p>C , 17.0m , 10°</p>	<p>F , 3.6m , 40°</p>

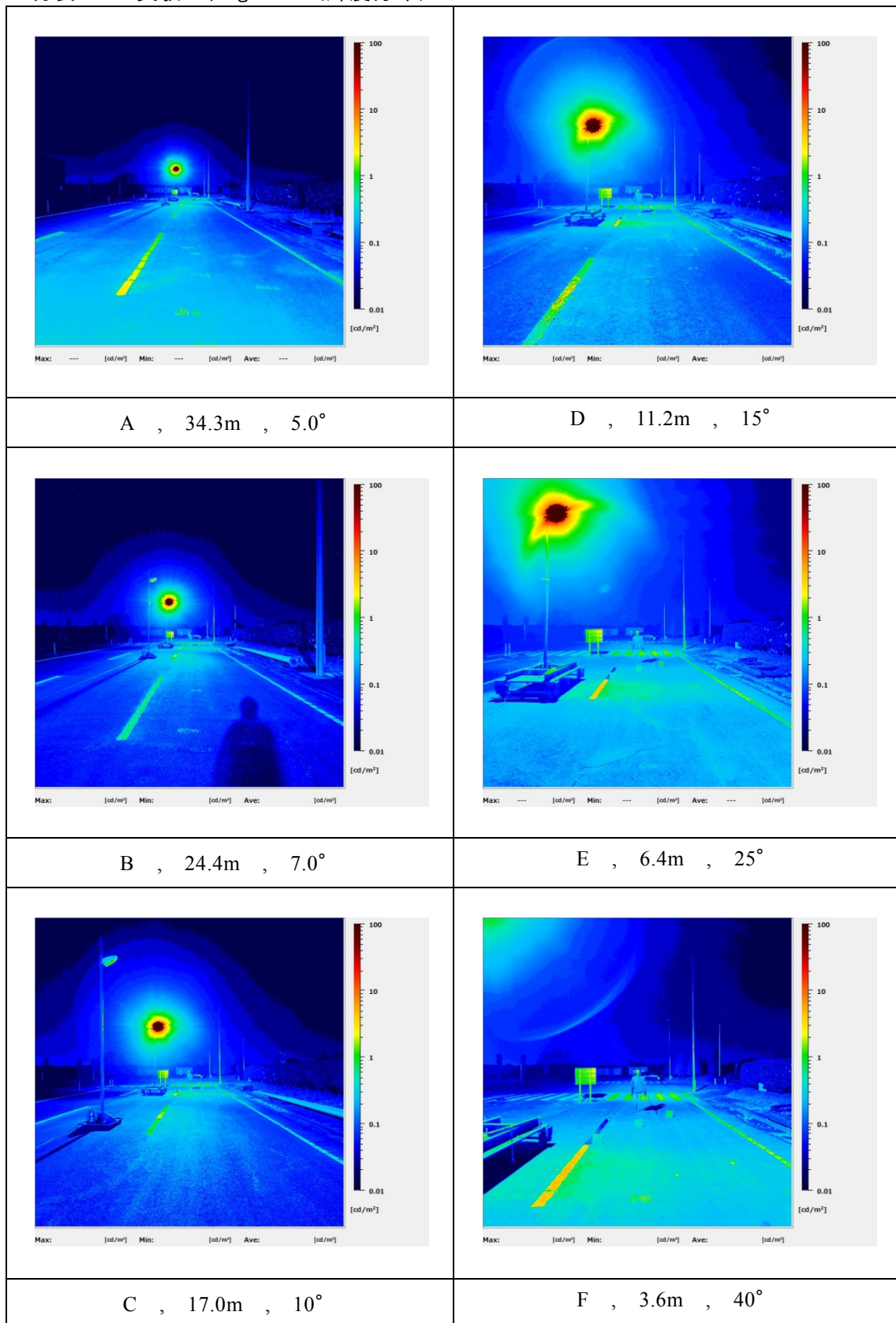
注記) 表中の英数文字は、観測位置、観測距離、仰角を示す

付表 27 実験Ⅱ、Light-13 (写真)

	
<p>A , 34.3m , 5.0°</p>	<p>D , 11.2m , 15°</p>
	
<p>B , 24.4m , 7.0°</p>	<p>E , 6.4m , 25°</p>
	
<p>C , 17.0m , 10°</p>	<p>F , 3.6m , 40°</p>







注記) 表中の英数文字は、観測位置, 観測距離, 仰角を示す

付表 28 実験Ⅱ、Light-13 (輝度分布)



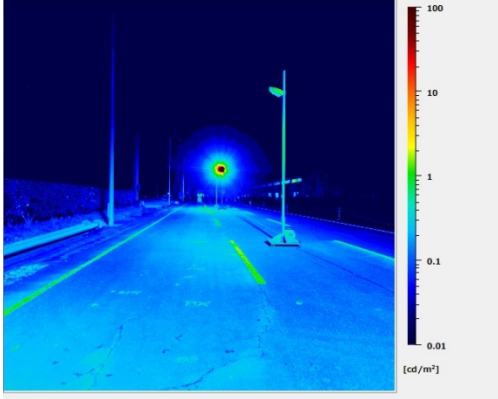
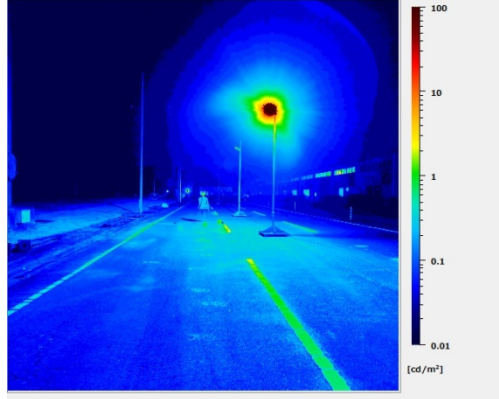
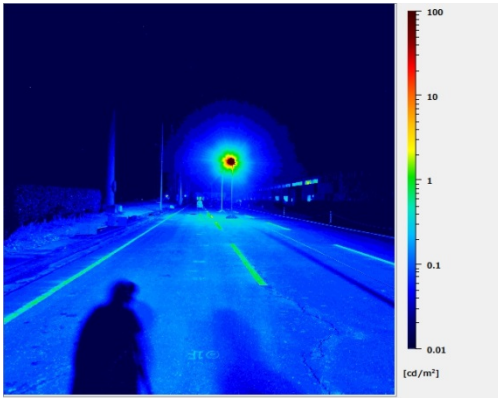
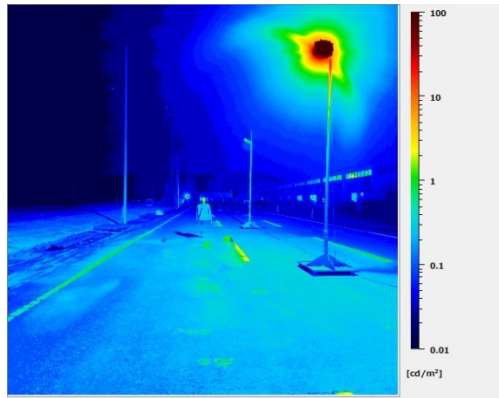
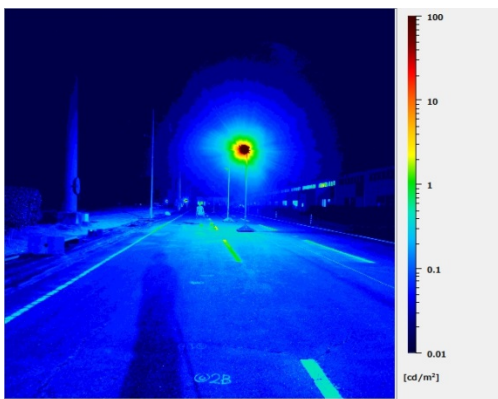
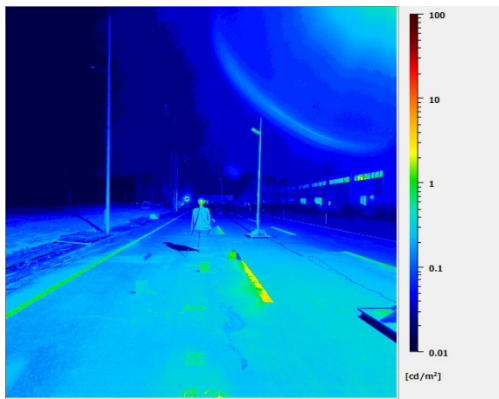
注記) 表中の英数文字は、観測位置, 観測距離, 仰角を示す

付表 29 実験Ⅱ、Light-14 (写真)

	
<p>A , 34.3m , 5.0°</p>	<p>D , 11.2m , 15°</p>
	
<p>B , 24.4m , 7.0°</p>	<p>E , 6.4m , 25°</p>
	
<p>C , 17.0m , 10°</p>	<p>F , 3.6m , 40°</p>

注記) 表中の英数文字は、観測位置, 観測距離, 仰角を示す

付表 30 実験Ⅱ、Light-14 (輝度分布)

 <p>Max: --- [cd/m²] Min: --- [cd/m²] Ave: --- [cd/m²]</p>	 <p>Max: [cd/m²] Min: [cd/m²] Ave: [cd/m²]</p>
<p>A , 34.3m , 5.0°</p>	<p>D , 11.2m , 15°</p>
 <p>Max: [cd/m²] Min: [cd/m²] Ave: [cd/m²]</p>	 <p>Max: [cd/m²] Min: [cd/m²] Ave: [cd/m²]</p>
<p>B , 24.4m , 7.0°</p>	<p>E , 6.4m , 25°</p>
 <p>Max: [cd/m²] Min: [cd/m²] Ave: [cd/m²]</p>	 <p>Max: [cd/m²] Min: [cd/m²] Ave: [cd/m²]</p>
<p>C , 17.0m , 10°</p>	<p>F , 3.6m , 40°</p>

注記) 表中の英数文字は、観測位置, 観測距離, 仰角を示す





# 発表論文

## I. 本研究に関連する論文および資料

### (学術雑誌の論文)

1. Kawakami K, Kohko S, Uozumi T. : Applicability of CIE's Glare (GR) Evaluation System for Outdoor Facilities to Indoor Sports Facilities, J.Light & Vis. Env., Vol23, No.2, pp.31-37 (1999).
2. Kohko S, Kawakami K, Nakamura Y. : A Study on Affects of Veiling Luminance on Pedestrian Visibility, J.Light & Vis. Env., Vol32, No.3, pp.315-321 (2008).
3. 江湖俊介 : 歩行者のための不快グレア評価, 照学誌, Vol.99, No.9, pp.517-520 (2015).
4. Tashiro T, Kawanobe S, Kimura T, Kohko S, Ishikawa T, Ayama M. : Discomfort glare for white LED light sources with different spatial arrangements, Lighting Research & Technology, Vol.47, pp.316-337 (2015).
5. Kohko S, Ayama M, Iwata M, Kyoto N, Toyota T. : Study on Evaluation of LED Lighting Glare in Pedestrian Zones, J.Light & Vis. Env., Vol.39, pp.15-25 (2015).
6. 江湖俊介, 阿山みよし : 歩行者空間におけるLED照明の不快グレアに関する研究, 照学誌, Vol.100, No.10, pp.449-454 (2016).

(国際会議の論文)

1. Tashiro T, Kimura T, Kohko S, Ishikawa T, Ayama M. : Evaluation of Discomfort Glare Caused by Different Light Distributions of White LEDS, CIE “Lighting Quality and Energy Efficiency”, pp.488-491, Vienna, Austria, Mar. (2010).
2. Tashiro T, Kimura T, Kohko S, Ishikawa T, Ayama M. : Discomfort Glare Evaluation to White LEDS with Different Spatial Arrangement, Proceedings of the CIE 27th Session, PP04 pp.583-588, Sun City, South Africa, Jun. (2011).
3. Ayama, Tashiro T, Kawanobe S, Kimura T, Kohko S, Ishikawa T. : Discomfort Glare of White LED Sources of Different Spatial Arrangements, Proceedings of CIE Centenary Conference „Towards a New Century of Light“, pp.119-122, Paris, France, Apr. (2013).
4. Mori T, Kohko S, Iwata M, Ayama M et al.: The Discomfort Glare Improvement Methodology of LED Street Lights, CJK Lighting Conference, Gwangju, Korea, Aug. (2013).
5. Kohko S, Ayama M, Mori T, Iwata M, et al. : Glare of LED Lighting in Outdoor Environment, CIE “Lighting Quality and Energy Efficiency”, pp.924-929, Kuala Lumpur, Malaysia, Apr. (2014).
6. Iwata M, Ayama M, Kohko S, Mori T et al. : Visibility Evaluation for Face of Person Standing Under LED Street Lighting Environment, CIE “Lighting Quality and Energy Efficiency”, pp.538-545, Kuala Lumpur, Malaysia, Apr. (2014).
7. Ayama M, Iwata M, Mori T, Iwasaki H, Kohko S et al. : Discomfort Glare of LED Street Lights with Different Correlated Color Temperatures, Proceedings of the CIE 28th Session, pp.202-208, Manchester, England, Jun. (2015).

### (口頭発表論文)

1. 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).
2. 江湖俊介 : グレアレスなLED防犯照明に向けて-周辺視によるグレア評価実験について-, 平成24年度照明学会分科会シンポジウム (2013).
3. 江湖俊介, 岩田三千子, 井上容子, 阿山みよし, 豊田敏裕, 片岡加奈恵 : 屋外LED 照明の色温度が歩行者評価に及ぼす影響 その1 不快グレアへの影響について, 日本建築学会大会, 40265, pp.571-572 (2014).
4. 江湖俊介, 阿山みよし : 歩行者のための不快グレア評価, 平成27年度照明学会全国大会, No.0607 (2015).

## II. その他の論文および資料

### (学術雑誌の論文)

1. 江湖俊介, 川上幸二 : コンピュータグラフィックスによる質感表現の研究 -Phongモデルの適用性とパラメータとの関係-, 照学誌, Vol.79, No.5, pp.204-211 (1995).
2. 江湖俊介 : コンピュータ支援による反射鏡設計, 照学誌, Vol.81, No.4, pp.322-325 (1997).
3. 川上幸二, 江湖俊介, 増田恭久 : スポーツ照明における影の評価の研究 -TV観戦の場合-, 照学誌, Vol.84, No.5, PP.267-272(2000).
4. Fukuda M, Kohko S, Uozumi T, Kawakami K. : Study on Modeling Effect of the Human Face on Monitoring Images, J.Light & Vis. Env., Vol27, No.2, pp.107-120 (2003).
5. 江湖俊介, 斎尚樹, 古川一茂, 皆川孝司 : 車と道路の照明協調システム, 照学誌, Vol.99, No.4, pp.227-230 (2015).

(国際会議の論文)

1. Kohko S, Kawakami K. : Soccer Stadium Lighting Research, Lux Pacifica97, pp.E-84-85, Nagoya, Japan, Oct. (1997).
2. Kohko S, Kawakami K, Nakamura Y. : Affects of Veiling Luminance on Pedestrian Visibility, Proceedings of the CIE 26th Session, 3C-P3, pp.D5-38-41, Beijing, china, Jul. (2007).
3. Hagiwara T, Kawai T, Kohko S, Saito T. : Effect of Vertical Illuminance on Visibility of the Pedestrian at Crosswalk Observed from Right-Turning Drivers at Night, Proceedings of the CIE 26th Session, 1C-P10, pp.D4-22-25, Beijing, china, Jul. (2007).
4. Yamada T, Kohko S. : Glare Evaluation System Using Imaging Photometry, Proceedings of CIE Centenary Conference "Towards a New Century of Light", PP039, Paris, France, Apr. (2013).
5. Iwata M, Ayama M, Kohko S, Mori T et al. : Appearance of Human Face and Atmosphere of Environment Under LED Street Lights Using Different Correlated Colour Temperature, Proceedings of the CIE 28th Session, pp.1638-1646, Manchester, England, Jun. (2015).
6. Hagiwara T, Kobayashi S, Kohko S, Hamaoka H, Visibility assessment of pro-beam road lighting on the road, 22nd ITS World Congress Bordeaux, France, ITS-2183, Bordeaux, France, Oct. (2015).

(口頭発表論文)

1. 江湖俊介, 川上幸二, 荒井和弘, 澤田章 : アトリウムの印象に関する研究 -昼夜の印象と照明との関係の考察-, 平成5年 照学全大, No.98, pp.127-128 (1993).
2. 江湖俊介, 川上幸二 : CGによる質感表現の研究 -CGと実物の差異-, 平成6年 照学全大, No.105, pp.277-278 (1994).
3. 江湖俊介, 立場川一広, 杉本典子, 石崎勝司, 魚住拓司 : サッカー場照明方式の考察, 平成7年 照学全大, No.124, pp.216-217 (1995).
4. 江湖俊介, 川上幸二, 増田恭久 : 実際の影とCGの影の関係, 平成8年 照学全大, No.98, P.192 (1996).
5. 江湖俊介, 川上幸二 : 投光器自動エーミングプログラムの開発 -サッカー場など4コーナー照明方式の場合-, 平成11年 照学全大, P-1, pp.245-246 (1999).
6. 江湖俊介, 魚住拓司, 川上幸二 : カメラ監視のための見え方事前予測の研究, 平成16年 照学全大, No.63, pp.141-142 (2004).
7. 江湖俊介, 永井渉, 舟田光志 : トンネル照明の広スパン化に関する検討, 平成17年 照学全大, No.44, pp.101-102 (2005).
8. 江湖俊介, 石倉丈士, 加藤芳隆 : 交差点施設における既設照明の実態と対策, 平成18年 照学全大, No.42, pp.99-100 (2006).
9. 江湖俊介, 川上幸二, 中村芳樹 : 歩行者の視認に与える光幕の影響, 平成19年 照学全大, No.39, pp.93-94 (2007).
10. 江湖俊介, 森下大輔, 山田哲司, 中村芳樹 : ウェーブレット解析を用いた目立ち画像生成システム, 平成21年 照学全大, No.40, p.95 (2009).

## 謝辞

本論文は、宇都宮大学 阿山みよし教授のご指導によりまとめたものです。終始親切なご指導を賜りましたことに対して深く感謝申し上げます。宇都宮大学 長谷川光司教授、大谷幸利教授、石川智治准教授、佐藤美恵准教授、そして阿山研究室の田代知範研究員には、本論文を執筆するにあたり有益な助言を賜りました。ここに厚く御礼申し上げます。

本研究の多くの部分は、岩崎電気株式会社 照明研究課において行ったものです。上司の木田喜正氏、岡本孝人氏には、この研究の機会を与えていただくとともに、業務と両立しながら研究に従事することを温かく支援していただきました。

本研究の遂行にあたっては、岩崎電気株式会社 営業技術部 照明研究課および照明部の方々には、数多くのご支援とご協力を賜りました。また、宇都宮大学博士後期課程に在籍した3年間に、たくさん応援して下さった職場の皆様に重ねて感謝いたします。

本研究の実験 I には、照明学会に組織された「屋外環境における LED 照明器具のグレアに関する研究調査委員会」において取得した実験データを使用させていただきました。この委員会を助成した JLEDS および当委員会関係者に対し、ここに記して謝意を表します。

最後に、研究が行き詰ったときの相談相手にもなってくれた妻の加代子と、心の支えになってくれた娘の咲季に感謝するとともに、これらの人々にこの論文を捧げ、深く敬意を示します。ありがとうございました。

2016年9月 江湖 俊介