

東海大学大学院令和2年度博士論文

LED照明への移行に伴う視環境変化と
照明計画手法の検証

指導 岩田利枝 教授

東海大学大学院総合理工学研究科

総合理工学専攻

篠原奈緒子

LED 照明への移行に伴う視環境変化と照明計画手法の検証

目次

第1章 序論	・・・1
1.1 研究の背景	・・・2
1.2 LED 照明器具に関する研究	・・・3
1.3 本論文の目的	・・・5
1.4 本論文の構成	・・・5
参考文献	・・・7
第2章 照明器具の輝度分布測定システムの精度の確認	・・・9
2.1 はじめに	・・・10
2.2 照明器具の輝度分布測定の現状	・・・11
2.3 画像測光システムの性能確認	・・・13
2.3.1 システム性能の確認方法	・・・13
2.3.2 各システムの MTF 特性	・・・17
2.4 照明器具の輝度分布測定	・・・24
2.4.1 測定方法	・・・24
2.4.2 解析方針	・・・25
2.4.3 測定結果	・・・26
2.4.3.1 輝度分布画像	・・・26
2.4.3.2 平均輝度	・・・28
2.4.3.3 最大輝度	・・・29
2.4.3.4 輝度値の出現範囲と頻度	・・・30
2.4.3.5 考察	・・・33
2.5 まとめ	・・・34
参考文献	・・・35
第3章 屋内スポーツ施設の視環境の現状把握	・・・37
3.1 はじめに	・・・38
3.2 関連の基準および先行研究	・・・38
3.2.1 光源の輝度測定について	・・・38
3.2.2 スポーツ照明のグレア	・・・39
3.3 屋内スポーツ施設の測定項目と測定器	・・・40

3.3.1	スポーツ照明基準	・・・40
3.3.2	本研究の測定項目	・・・40
3.3.3	輝度分布測定に用いるカメラ	・・・40
3.3.3.1	輝度分布測定に際して考慮すべきカメラの特性	・・・40
3.3.3.2	本研究で輝度分布測定に使用する画像測光システムの仕様	・・・43
3.4	屋内スポーツ施設の視環境計測	・・・43
3.4.1	施設概要	・・・43
3.4.2	測定方法	・・・45
3.4.3	測定結果	・・・49
3.4.3.1	照度	・・・49
3.4.3.2	視野内輝度分布	・・・51
3.4.3.2.1	GRの検証	・・・51
3.4.3.2.2	視野内輝度分布画像の輝度値	・・・52
3.4.3.3	発光部内輝度分布	・・・54
3.5	まとめ	・・・56
	参考文献	・・・59
第4章	スポーツ照明グレアの検証	・・・60
4.1	はじめに	・・・61
4.2	実験方法	・・・62
4.2.1	実験概要	・・・62
4.2.2	被験者実験	・・・63
4.2.2.1	実験条件および手順	・・・63
4.2.2.2	測定	・・・66
4.3	実験結果	・・・67
4.3.1	グレア評価結果	・・・67
4.3.1.1	正規性の確認	・・・67
4.3.1.2	経験者と未経験者の差の確認	・・・68
4.3.1.3	総合評価に影響する評価項目の検討	・・・68
4.3.1.4	仰角、競技区分、光源種類とグレア評価	・・・69
4.3.2	被験者の視線方向の輝度分布測定結果	・・・72
4.4	グレアの影響する変数の抽出	・・・73
4.5	まとめ	・・・77
	参考文献	・・・80

第5章 LEDの特徴を用いたスポーツ照明の計画手法およびその検証	・・・82
5.1 はじめに	・・・83
5.2 照明計画の概要	・・・84
5.2.1 人工照明	・・・84
5.2.2 光ダクトによる昼光利用	・・・86
5.3 実験方法	・・・87
5.3.1 実験の実施方針	・・・87
5.3.2 視野内輝度分布測定	・・・87
5.3.3 被験者実験	・・・88
5.4 測定および実験結果	・・・92
5.4.1 視野内輝度分布	・・・92
5.4.2 被験者実験	・・・93
5.4.2.1 評価結果	・・・93
5.4.2.2 被験者の視線方向の輝度分布	・・・96
5.4.2.3 GR	・・・97
5.4.2.4 グレア予測	・・・97
5.5 まとめ	・・・99
参考文献	・・・100
第6章 スポーツ施設のLED照明計画手法のオフィスへの適用と検証	・・・101
6.1 はじめに	・・・102
6.2 フィールド実験	・・・102
6.2.1 実験概要	・・・102
6.2.2 実験手順	・・・103
6.2.3 フィールド実験の結果	・・・104
6.3 模型実験	・・・107
6.3.1 実験概要	・・・107
6.3.2 実験手順	・・・109
6.3.3 実験結果	・・・109
6.3.4 グレアと算出したUGR値との関係	・・・110
6.4 まとめ	・・・111
参考文献	・・・112
第7章 総括	・・・113

研究業績リスト
謝辞

第 1 章

序論

第 1 章 序論

1.1 研究の背景

照明器具の光源に LED 素子が用いられるようになった。従来照明器具に用いられる光源は複数あり、施設の規模に応じて使い分けていた。例えば、オフィスなどでは蛍光灯を光源とし、天井の高い大規模な施設では HID ランプを光源とするのが主流であった。しかし、LED 照明器具の場合には、複数の LED 素子を組み合わせることで照明器具を構成するため、施設規模に関係なく、どのような施設でも照明器具内の構成を変える（LED 素子の数を変える）ことで利用可能であり、施設規模に応じて光源を選択する必要はなくなった。

LED 照明器具には小型、高効率、指向性が強い、長寿命、即時点灯、制御性が高いという特徴がある。特に、高効率（LED は 150lm/W^1 に対して蛍光灯・HID は 100lm/W^1 ）、つまり省エネルギー化が望めるという点で東日本大震災を機に急速に普及した。東日本大震災では、輪番停電が必要なほどエネルギー事情がひっ迫し、照明を間引いて点灯するなどして消費エネルギーの削減に努めた²⁾。エネルギー事情から省エネルギー化の望める LED 照明器具に注目が高まり、新築のオフィスビルでは LED 照明器具の採用が急速に進み、従来照明器具からの LED 化改修も同時に進んだ。当時の急速な照明器具の LED 化は省エネルギー化が目的であった。

一方で、LED 素子には発光面積が小さい、指向性が強いなどの特徴がある。従来光源である蛍光灯は、面として発光して四方に光を放出しており、光源の背景にある反射板なども利用しながら光を放出しているため、照明器具内全体から光が放出されている。形状にもよるが、照明器具カバーや反射板などを含んだ部分が発光面積となる。HID の場合は点光源ではあるものの蛍光灯と同じように光を四方に放出しており、光源から放出された光を反射板に反射させてから放出している。光源の発光部は見えづらくなっている。発光部は、放出された光を制御する反射板を含んだ大きさとなり、概ね照明器具カバーの面積が発光面積となる。LED 素子は、その種類にもよるが小さいものでは 1mm 以下で、その小さな LED 素子を複数組み合わせることで LED 照明器具の発光部を構成しているものもある。LED 素子の光は 1 方向にしか放射されないため、四方に光を放出している従来光源とは異なり、発光部の背景となる部分には光は放出されない。LED 素子の部分とそれ以外の部分で輝度比があり、発光部をどう定義するかが難しい。発光部の抽出方法により平均輝度は異なり、極小の発光部の背景にある大きな発光しない面も含めて発光部と定義すると平均輝度は下がる。ただし、LED 素子の光の放出方向は 1 方向のため指向性が強く、視方向によっては極めて高輝度となることから、グレアの発生が懸念される。

照明用光源が LED 素子に変わったことで、グレアの発生の懸念とともにいくつかの課題が発生した。一つは、発光部が小さく、先鋭な高輝度部を持つ LED 素子で構成された照明器具の発光部輝度をどう測定すれば良いかである。LED 照明器具の輝度測定については、これまでの測定法の適用は難しいことが指摘されている³⁾。そしてもう一つは、LED 照明

器具の特徴を用いた照明環境の創出である。高効率な LED 照明器具を採用することで省エネルギー化は実現し、今後は光の質に踏み込んだ提案が求められる。特に、Human Centric Lighting (HCL、明確な定義は無いが、人間の生理、心理影響を加味した照明計画)⁴⁾への期待が近年高まっており、従来照明器具の置き換えではない、LED 照明器具の特徴を用いた照明計画手法の提案が望まれる。

1.2 LED 照明器具に関する研究

(1) LED 照明器具からのグレアに関する研究

照明器具の LED 化の普及に伴い、LED 照明器具からのグレアに関する研究が進んでいる。LED 照明器具には、発光部が小さい、指向性が強い、照明器具の発光部は複数の LED 素子で構成されるなどの特徴がある。一般的な屋内照明の分野では、照明器具の LED 化により発光部が複数の光源で構成されることもあるため、発光部が均一ではなく不均一となったことに関する研究が多くみられる。屋内施設のグレア評価は、一般的には UGR⁵⁾が用いられ、式(1)より求めることができる。日本では JIS Z 9110:2010⁶⁾で UGR の推奨値が定められている。しかし、UGR で想定している発光部輝度は発光部が均一であることを前提としているため、発光部が不均一となる LED 照明器具からのグレア評価に適用して良いかの議論がされている。UGR を対象とした不均一輝度光源に関する研究^{7), 8), 9)}では、発光部の平均輝度を用いて計算した UGR より、被験者の主観評価はより高いグレア感となることが示されている。これらを受け、CIE では UGR の計算に用いる発光部輝度について、有効輝度範囲を抽出して補正する方法を示している³⁾。有効輝度範囲は、高解像度のカメラで取得した輝度分布画像を、ヒトの目を見た時と同じように見えるようにガウシアンフィルタによりフィルタリングを行い抽出することになっている。有効な発光部として抽出した有効輝度範囲の光源輝度とその部分の立体角から式(2)より不均一性係数 K を算出し、式(3)より発光部輝度が不均一な場合の UGR' を算出できる。

$$UGR = 8 \times \log \left(\frac{0.25}{L_b} \sum \frac{L^2 \times \omega}{P^2} \right) \quad \dots \dots \dots (1)$$

L : 光源輝度 (cd/m²)
 ω : 光源の立体角 (sr)
 L_b : 背景輝度 (cd/m²)
 P : 位置指数 (ポジションインデックス)

$$K^2 = \frac{L_{eff}^2 \times \omega_{eff}}{L^2 \times \omega} \quad \dots \dots \dots (2)$$

K : 不均一性係数
 L_{eff} : 抽出した有効輝度範囲の光源輝度 (cd/m²)
 ω_{eff} : 抽出した有効輝度範囲の光源輝度の立体角 (sr)

$$UGR' = 8 \times \log \left(\frac{0.25}{L_b} \sum K^2 \frac{L^2 \times \omega}{P^2} \right) \quad \dots \dots \dots (3)$$

一方で大規模な施設に用いられる照明器具からのグレアについては、スポーツ照明の分野で研究が行われている。スポーツ照明には、JIS Z 9127:2011¹⁰⁾で、照度、照度均斉度、グレア制限値および演色性に関する推奨値が、競技種別、運動競技区分別に定められている。グレアについては屋外スポーツ施設について GR¹¹⁾を用いることが規定され、GR制限値が定められているが、屋内スポーツ施設には GR の適用は可能とされているもののグレア制限値は定められていない¹⁰⁾。屋外スポーツ施設における LED 照明器具からのグレアについては、夜間の屋外の野球場を想定し、LED 照明器具を直視した場合の研究がある^{12),13)}。照明器具の発光部輝度や呈示時間が残像継続時間や視力回復時間に影響すること¹²⁾や、競技に影響を与えはじめる照明器具の発光部輝度値が示されている¹³⁾。屋外スポーツ施設においては GR 制限値が定められているが、LED 照明器具は従来照明器具とは異なり発光部が直接見え、また指向性が強く視方向によっては極めて高輝度となることから、従来の評価指標では評価できない事象が発生していると考えられる。屋内スポーツ施設を対象とした研究では、グレアを感じる LED 照明器具の輝度や LED 照明器具の背景にある色紙の色の視認性に関する被験者実験により、直視グレア式 HGR を提案している¹⁴⁾。しかし、照明器具までの距離が 5m と低く、小規模の屋内スポーツ施設を対象としていると考えられる。なお、屋内スポーツ施設におけるグレアに関する研究では、発光部輝度の不均一性については触れていない。視点から照明器具を直視した場合に、ヒトの目の解像度では照明器具の発光部の不均一性は視認できないためと考えられる。CIE では、UGR の計算に用いる発光部輝度について、有効輝度範囲を抽出して補正する方法を示している³⁾が、ヒトの目の解像度に合わせてフィルタリングを行っている。ヒトの目の解像度で発光部輝度が不均一であることを視認できない場合には、発光部の不均一性は無視できる可能性もある。

(2) 照明器具の輝度測定法

照明器具の輝度測定については、日本照明工業会の公共施設用照明器具の規格¹⁵⁾および照明学会の技術基準¹⁶⁾に方法が示されている。いずれも平均輝度で評価するが、発光部の定義と評価する視方向が異なる。

日本照明工業会の公共施設用照明器具の規格¹⁵⁾では、照明カバーの面積と器具直下の光度から平均輝度を算出する。

照明学会の技術基準¹⁶⁾では、発光部が均一な場合と不均一な場合とで方法が異なる。発光部が均一な場合には、鉛直角 85°（仰角 5°）からのスポット輝度計による輝度測定か、あるいは、鉛直角 85° 方向の光度及び見かけの発光部面積より算出した平均輝度を用いるとされている。不均一な場合は、視角 3 分程度の解像度を持つ画像測光システムにより鉛直角 85° にて輝度分布を測定し、測定された輝度分布画像より得た最大輝度の 1/10 以上の輝度となる部分の見かけの発光部面積と鉛直角 85° の光度より平均輝度を算出する。画像測光システムを用いて測定するにも関わらず、測定値は最大輝度の 1/10 以上の輝度となる部分の見かけの発光部面積を算出するために用いており、平均輝度の算

出には測定された輝度値は用いていない。

画像測光システムについては、画像測光システムに用いるデジタルカメラの性能やキャリブレーション法などの規定はなく、各研究者、各メーカーが独自に開発している^{17)~20)}など。解像度の異なる複数の画像測光システムで LED 素子の発光部輝度を測定した場合、高い解像度のシステムで測定した方が得られる最大輝度が高く、画像測光システムの性能によって得られる輝度値が異なることが示されている²¹⁾。

1.3 本論文の目的

本論文では、照明器具の光源の LED 化で懸念されるグレアの問題の解決と LED 照明器具の特徴を用いた照明計画手法が視環境に与える影響について検証することを目的とした。LED 照明器具は、その種類にもよるが複数の LED 素子を用いて構成されるものがある。特に天井の高い大規模施設向けの LED 照明器具では、複数の LED 素子で大きな発光面を構成するため、一般照明器具に比べてグレアの発生の可能性が高い。また、大規模な施設のうちスポーツ施設については、競技中に視線が上を向き照明器具を直視する可能性が高い。よって、グレアの問題については、屋内スポーツ施設を対象として評価を行った。屋内スポーツ施設の光環境については既往の研究が少ないため現状把握を行い、その後にグレアへの影響要因を抽出した。LED 照明器具の特徴を用いた照明計画手法が視環境に与える影響については、屋内スポーツ施設において視環境評価を行った後に、オフィスに展開した場合の視環境を評価した。合わせて視環境の把握のために必要となる輝度分布測定において、画像測光システムの性能の違いが測定結果に与える影響を検証した。

1.4 本論文の構成

本論文は全 7 章で構成されている。図 1.1 に本論文の構成を示す。

第 2 章では LED 照明器具の普及により課題となっている LED 照明器具の輝度測定において、画像測光システムの性能の違いが測定結果に与える影響を検証した。画像測光システムによる輝度測定において示すべき画像測光システムの性能を検討し、性能の異なる複数の画像測光システムによって得られる LED 照明器具の輝度測定値の違いについて考察した。

第 3 章では、照明器具を直視する可能性が高く、また指向性の強い LED 素子を複数組み合わせ合わせて大面積の発光部を構成した大型の照明器具を用いる屋内スポーツ施設を対象として視環境把握を行った。LED 照明器具の施設 6 件、HID 照明器具の施設 5 件の計 11 件の屋内スポーツ施設を対象に、これまで行われていない視環境把握のため、照度分布のほかに視野内輝度分布、照明器具の発光部輝度分布の測定を行った。ここで評価する LED 照明器具の施設は、従来の照明計画手法を踏襲して設計された施設で、従来照明器具を LED 照明器具へ置換した（光源が従来光源から LED に置き換えられた）照明計画手法により照明設計された施設である。床面照度分布、競技者の視野内の輝度分布、照明器具の発光部の輝度

分布を対象に現状把握を行った結果、およびその過程で判明した輝度分布測定に関する検討事項（カメラの選定や輝度分布測定法）について説明する。

第4章では、第3章で視環境把握を行った11件の屋内スポーツ施設において、頻繁に競技中の視野に照明器具が入ると考えられるバドミントン競技を想定した現場におけるグレア評価実験を行った。競技中の視野に入る照明器具からの光によるグレアの影響要因を抽出した。

第5章では、LED照明器具の小型、長寿命という特徴を用いた多灯配置型の照明計画手法（従来とは異なる照明計画手法）により照明設計された屋内スポーツ施設について、第3章、第4章と同様の視環境評価を行った。照明器具の直視を伴うスポーツ施設において、1台当たりの照明器具の出力光束を低減した小型LED照明器具を多灯配置した照明計画手法が視環境に与える影響を検証した。

第6章では、第5章で評価した小型LED照明器具を多灯配置型の照明計画手法を、オフィスに適用した場合の視環境を評価した。従来の照明計画手法により照明設計されたオフィスと小型LED照明器具を多灯配置した照明計画手法により照明設計されたオフィスについて、現場およびモデルによる光環境計測と被験者実験を行い、小型LED照明器具を多灯配置した照明計画手法が、視環境に与える影響を検証した。

第7章において、本研究の結論を述べる。

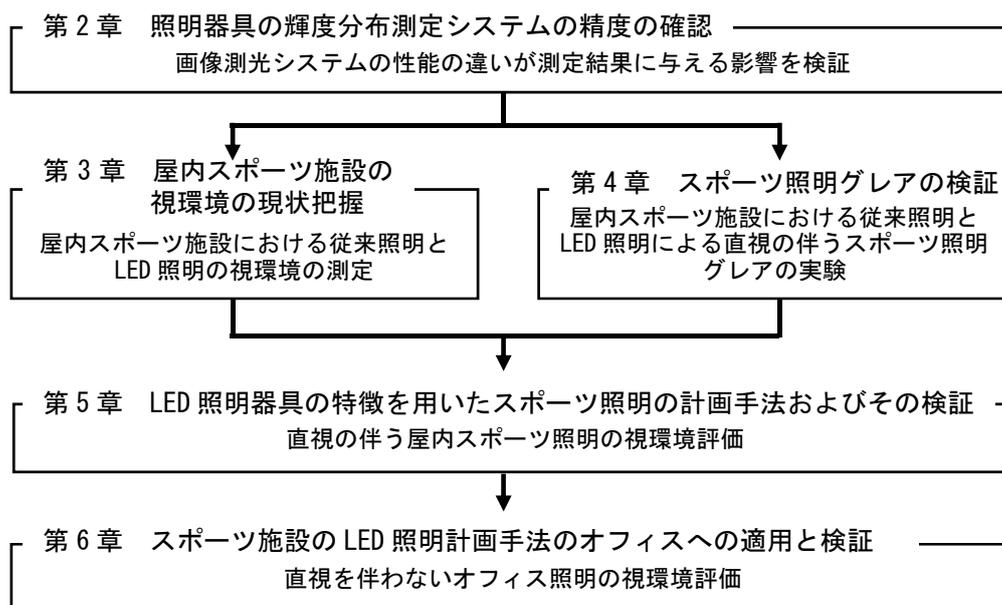


図 1.1 本論文の構成

参考文献

- 1) http://www.led.or.jp/led/led_efficiency.htm
- 2) 望月悦子, 吉澤望, 岩田利枝, 宗方淳, 平手小太郎, 明石行生: 2011年の節電対策がオフィス照明環境に与えた影響: 東日本大震災に伴うオフィスの節電照明環境の実態(その1), 日本建築学会環境系論文集, 第78巻, 第683号, pp.9-16, 2012
- 3) Discomfort Caused by Glare from Luminaires with a Non-Uniform Source Luminance, CIE 232:2019
- 4) <https://humancentriclighting.org/wp-content/uploads/2012/07/Stan-Article-SSL1.pdf>
- 5) Discomfort glare in interior lighting, CIE Technical Report, 117, 1995
- 6) JIS Z 9110:2010, 照明基準総則, 日本規格協会
- 7) Teppei KASAHARA, Daisuke AIZAWA, Takashi IRIKURA, Takayoshi MORIYAMA, Masahiro TODA, Masami IWAMOTO: Discomfort Glare Caused by White LED Light Sources, Journal of Light and Visual Environment Vol.30, No.2, pp49-57, 2006
- 8) L. M. Geerdinck, J.R. Van Gheluwe, M.C.J.M. Vissenberg: Discomfort glare perception of non-uniform light sources in an office setting, Journal of Environmental Psychology, Vol.39 pp.5-13, 2014
- 9) H. Higashi, S. Koga and T. Kotani: The Development of Evaluation for Discomfort Glare in LED Lighting of Indoor Work Place :The Effect of Luminance Distribution of Luminous Parts on Subjective Evaluation, Proceedings of CIE Centenary Conference "Towards a New Century of Light", pp.648-656, 2013
- 10) JIS Z 9127: 2011, スポーツ照明基準, 日本規格協会
- 11) 照明学会編: 照明ハンドブック, オーム社, 2003
- 12) 田代知範, 西川尚希, 山田哲司, 江湖俊介, 石川智治, 阿山みよし: LED 投光器の直視グレアが視機能に及ぼす影響, 第49回照明学会全国大会講演論文集, 6-02, 2016
- 13) 山田哲司, 江湖俊介, 西川尚希, 田代知範, 石川智治, 阿山みよし: LED 投光器の直視グレアが視機能に及ぼす影響—その2 発光面輝度が及ぼす競技への影響—, 第50回照明学会全国大会講演論文集, 6-22, 2017
- 14) 田中武, 高地正夫, 池田篤志, 葛原秀男, 松下光一, 吳浩廷, 栗栖慎也: LEDを用いたアリーナのスポーツ照明と, その設置例, 広島工業大学紀要研究編, 第51巻, pp.231-241, 2017
- 15) 日本照明工業会, 公共施設用照明器具, JIL5004-2015
- 16) 歩行者のための屋外公共照明基準, 照明学会, 照明学会・技術基準 JIES-010, 2014
- 17) <https://www.konicaminolta.jp/instruments/products/light/ca2500/index.html>
- 18) <https://www.opteema.com/en/products/lmk-imaging-photometers/>
- 19) 山田哲司, 森下大輔, 江湖俊介, 中村芳樹: 光環境評価システム「QUAPIX™」の研究開発, 建設電気技術技術集, pp.70-75, 2009

- 20) H. Yamaguchi, M. Kato, N. Hara, D. Ito, Y. Miki: Development of generic colormetry system for lighting environment by using ccd camera, Proc. Of CIE centenary conference, pp.1235-1238, 2013
- 21) Slominski S. : Identifying problems with luminaire luminance measurements for discomfort glare analysis, Lighting Res. Technol., Vol. 48, pp.573-588, 2016

第2章

照明器具の輝度分布測定システムの 精度の確認

第2章 照明器具の輝度分布測定システムの精度の確認

2.1. はじめに

照明器具の LED 化が進み、スポーツ施設においても LED 照明器具の導入が増えている。LED 照明器具は、小型、高効率、高い制御性、光源が長寿命（従来照明器具におけるランプ交換が不要）などの長所がある。一方で、発光部が小さくかつ指向性が強いいため、発光部輝度が従来照明器具に比べて高いと考えられる。また、LED 照明器具は複数の素子を組み合わせて構成しているものがあり、従来照明器具と比べ発光部輝度が不均一となる照明器具もある。照明器具の発光部平均輝度が等しい場合、発光部輝度が均一の照明器具と不均一の照明器具とでは、最大輝度は不均一の照明器具の方が高くなる。

従来、輝度測定にはスポット輝度計が用いられてきた。スポット輝度計には国際的な規定はある¹⁾が、日本国内では規定がない（照度計については JIS の基準がある²⁾）。日本国内で販売されているスポット輝度計の仕様には、測定角、測定距離、測定輝度範囲のほか、標準分光視感度曲線 $V(\lambda)$ からの外れ、確度や繰返し性について記載があり、ISO の規定¹⁾に則った記載がされているものがほとんどである。正確な輝度をスポット輝度計で測定するには、測定角に対して測定対象が十分に大きい必要がある。スポット輝度計の視野角は小さいもので 0.2° であり、これは 1m 離れた位置で直径 3mm 程度の大きさに相当する。LED 照明器具の発光部の大きさはその種類にもよるが、小さいものでは短辺方向の寸法が 1mm 以下のものもある。スポット輝度計では 1m の測定距離でも発光部輝度の測定が難しい。また、発光部が小さく指向性が強いいため、発光部輝度が測定方向によっては従来照明器具に比べて高くなると考えられる。スポット輝度計の測定可能最大輝度は、高いもので $28 \times 10^6 \text{cd/m}^2$ であるが機種が限られ、測定輝度範囲を超える可能性もある。竹下はスポット輝度計について、「従来の輝度測定はほぼ均一な輝度を測定することを前提にされており、発光部が極めて小さく鋭敏な輝度分布を持つ LED 照明器具の測定については、測定距離によって測定視野内の発光部の状況が異なるため、正確な輝度測定は難しい」と述べている³⁾。

一方で、近年はデジタルカメラによる輝度分布計測（以降、画像測光と記す）も行われている。画像測光は、アナログ画像だった 1976 年から検討されており^{4),5)}、デジタル画像となった 1994 年頃からは活発に開発報告がされている^{6)~9)}など。これらの方法を基に、画像測光システムは現在各研究者、各メーカーが独自に開発している^{10)~13)}など。撮影画像から輝度分布を算出するためのフリーソフトもある¹⁴⁾。

画像測光システムに解像度の高いデジタルカメラを用いることで小さな発光部の輝度も測定可能であり、かつ、ND フィルターを装着することで高輝度の測定が可能である。しかし、画像測光システムに用いるデジタルカメラの性能やキャリブレーション法などの規定はない。画像測光システムには、いくつかの利用上の制限があることが明確になって

いる^{15),16)}など。これらを踏まえ、測定精度に関する研究が多数行われており、利用上の制限や想定される測定誤差を理解したうえで、ある条件もしくは照明環境において利用可能である、と多くの研究者が報告している^{17)~21)}など。販売されている多くの画像測光システムの仕様をスポット輝度計と比較すると、標準分光視感度曲線 $V(\lambda)$ からの外れには触れていない。画像測光システムの仕様には、測定輝度範囲や確度もしくは精度の記載はあるが、繰返し性の記載のあるものは少なく、示される特性が異なっている。

本研究では、スポーツ施設で用いられる高天井用 LED 照明器具の発光部輝度測定において、画像測光システムの性能の違いが測定結果に与える影響検証することを目的とした。画像測光による輝度測定において示すべき画像測光システムの性能を検討し、性能の異なる複数の画像測光システムによって得られる LED 照明器具の輝度測定値の違いについて考察した。

2.2. 照明器具の輝度分布測定の実状

照明器具の発光部輝度は、日本照明工業会の公共施設用照明器具の規格²²⁾および照明学会の技術基準²³⁾に算出方法が示されている。いずれも平均輝度による評価であるが、平均輝度の算出方法、測定角および発光部の取り扱い方が異なる。

日本照明工業会の公共施設用照明器具の規格²²⁾では、照明カバーの面積と照明器具直下の光度から平均輝度を算出することとなっている。LED 照明器具の場合、小さな発光部に対して過大なカバーが装着される照明器具もあり、発光部の大きさと輝度が同じでも、照明カバーの面積により、平均輝度は異なる。

照明学会の技術基準²³⁾では、発光部輝度が均一の場合と不均一の場合とで平均輝度の算出方法を分けている。発光部輝度が均一の場合には、測定輝度（鉛直角 85° （仰角 5° ）からのスポット輝度計による測定）か、計算輝度（鉛直角 85° 方向の光度及び見かけの発光面積より算出）とされている。LED 照明器具では、照明カバー等のかけ方が器具によって異なるため見かけの発光面積の求め方を定義する必要があり、日本照明工業会の公共施設用照明器具の規格²²⁾では、発光面積の求め方を示している。照明学会の技術基準²³⁾では、見かけの発光面積の求め方に明確な定義はなく、計算輝度で評価する場合には計算の仕方によって結果が異なる可能性がある。発光部輝度が不均一の場合は、視角 3 分/pixel 程度の解像度を持つ画像測光システムにより、鉛直角 85° にて測定した最大輝度の $1/10$ 以上のエリアを見かけの発光面積として、鉛直角 85° の光度より平均輝度を算出する。画像測光により輝度分布測定を行っているが、測定輝度値は最大輝度の $1/10$ 以上のエリアを求めるために用いており、測定輝度値による平均輝度の算出はしていない。「2.1. はじめに」で述べた通り、照明器具の発光部平均輝度が等しい場合、発光部輝度が均一の照明器具と不均一の照明器具とは、不均一の照明器具の方が最大輝度は高くなる。発光部の輝度分布の取得は重要と考えられるが、測定輝度値による平均輝度の算出はしていない。発光部輝

度が不均一の場合は、正確な輝度測定が難しいためと考えられる。

いずれの方法も照明器具の発光部輝度は平均輝度で評価しているが、発光部輝度が均一の場合と不均一の場合では、上述の通り等しい平均輝度でも最大輝度が異なる。照明器具の平均輝度もしくは等価光幕輝度が等しい場合には、発光部輝度が均一の場合に比べて不均一の場合の方がグレアを感じやすく、輝度の不均一性がグレアに影響を与えていることが示されている^{24), 25)}。

画像測光システムによる LED 照明器具の輝度測定に関する研究では、Tyukuhova²⁶⁾は、精度の高い輝度測定のためのカメラの設定やキャリブレーション法などを検証しているが、さらに様々な条件下での検証が必要だと述べている。また、LED 照明器具内の LED 素子 1 つを対象とした検討結果であり、照明器具全体としての評価は調査が必要だとも述べている。Slominski は視角約 0.4 分/pixel から 2 分/pixel 程度の解像度の画像測光システムを使った実験で、LED 素子の発光部輝度は、高い解像度のシステムで測定した方が得られる最大輝度が高く、低い解像度のシステムに比べてより正確に最大輝度を取得できることを示している²⁷⁾。一方、画像測光システムに必要な解像度については、山田らは、0.2 分/pixel 前後の解像度が必要²⁸⁾と述べている。これは、視角 2 分の矩形視標を注視した場合の視認性に関する被験者実験結果より、ヒトが視対象を視認した時のコントラストと等しい結果を画像測光システムで得るには、矩形視標が 10pixel 程度あると視標のコントラストを再現できることによる。照明器具からのグレアを評価する際には照明器具の発光部輝度の情報が重要であり、ヒトが視対象を視認したときと等しい解像度の輝度分布を得られる必要があると考えられる。照明学会の技術基準²³⁾で示されている照明器具の発光部輝度算出のための測定に用いる画像測光システムの解像度は、山田ら²⁸⁾の研究結果である 0.2 分/pixel 前後の解像度より低い。照明学会の技術基準²³⁾で示されている解像度の画像測光システムを使って照明器具の発光部輝度を測定した場合は、得られる最大輝度が実際より低いと考えられ、またヒトが視対象を視認した時のコントラストと等しい結果を得るのに必要な解像度より低い解像度の測定結果となる。

前述のように、画像測光システムに用いるデジタルカメラの解像度が測定最大輝度値に影響し²⁷⁾、測定輝度値はデジタルカメラの解像度の影響を受けると考えられる。一般的にはデジタルカメラの性能は、解像度 (=画角÷画素数) で判断している。しかし岡野は、解像度だけではデジタルカメラの性能は十分に示すことができず、鮮鋭度に関する結像特性を最も表現できる MTF (Modulation Transfer Function) 特性が、デジタルカメラ全体としての性能評価が可能で画像性能表現に最適な手段と述べている²⁹⁾。MTF 特性に影響を与えるものとして、撮影レンズ系の収差、光の回折、光学ローパスフィルタ、CCD 受光部の開口、電気回路の増幅特性、デジタル補間処理、デジタルフィルタ処理等数多くの要素がある。対象物を画像上に正確に再現することで、測定された対象物の正確な輝度値が取得できる。よって、画像性能表現に最適な手段と言われる MTF 特性を把握する必要

があると考えられる。

2.3. 画像測光システムの性能確認

2.3.1. システム性能の確認方法

画像測光システムは、国内で使用されているものでも様々ある。本研究では、市販のデジタルカメラとレンズで構成されたシステムと、工業用デジタルカメラと制御用コンピューターで構成されたシステムを対象に、Table2-1 に示す計 7 種の画像測光システムについて性能を検討した。

Table2-1 Specifications of the measurement systems

System	Pixel number	View angle (deg)	Resolution (pixel/deg) / (min/pixel)	Nyquist frequency (cpd)	Measuring range of luminance (cd/m ²)	Aperture	Shutter speed (s)
A	6000×4000	28.5	211 / 0.285	105.26	10 ~ 73,000	5.6	1/4000, 1/1000, 1/250, 1/60, 1/15, 1/4
B	6000×4000	29	207 / 0.290	103.45	10 ~ 50,000	5.6	
C	6000×4000	76	79 / 0.760	39.47	6 ~ 43,000	5.6	
D	3872×2592	28.5	136 / 0.441	67.93	4 ~ 69,000	5.6	1/4000, 1/2000, 1/500, 1/60, 1/15, 1/2
E	3872×2592	76	51 / 1.177	25.47	3 ~ 71,000	5.6	
F	3648×2736	67.7	54 / 1.113	26.94	0.02 ~ 62,000	2.8, 5, 8	1/4000, 1/1000, 1/250, 1/60, 1/40, 1/10, 1/2.5, 1/2, 2, 8
G	1600×1200	26	62 / 0.975	4.26	0.2 ~ 23,500	4	1/8192, 1/4096, 1/2048, 1/1024, 1/512, 1/256, 1/128, 1/64, 1/32, 1/16, 1/8, 1/4, 1/2, 1

シャッターを押す毎にデジタルカメラの視野が動く可能性があることから、PC もしくはレリーズによりシャッターを切る（システム A、B、C、D、E、G）か、シャッターボタンを 1 度押すと自動でシャッタースピードと絞りを変更してシャッターを切り複数枚を自動撮影するシステム（システム F）を用いた。この中には同一デジタルカメラでレンズが違うもの、同一デジタルカメラ・同一レンズでズームによる画角違いも含む。システム A～F はカラー画像を取得し、システム G はモノクロ画像を取得するシステムである。システム A、B、C および F の撮像素子は CMOS で、このうちシステム A、B、C は同一のカメラを用いている。システム D と E の撮像素子は CCD で同一のカメラを用いている。よって、システム A、B、C とシステム D、E とシステム F とでそれぞれカラー画像化の処理方法が異なる。各画像測光システムのキャリブレーション条件は、システム A、B、D、E が同一で、その他は異なる。取得画像から輝度画像へは、カラー画像を取得するシステム A

～F は、全てモノクロ画像化（システム A～E は同一の方法）してからピクセル毎の諧調値より輝度値を求めて変換した。シャッターを押す毎にデジタルカメラの視野が動く可能性があることから、PC もしくはレリーズによりシャッターを切る（システム A、B、C、D、E、G）か、シャッターボタンを1度押すと自動でシャッタースピードと絞りを変更してシャッターを切り、複数枚を自動撮影するシステム（システム F）を用いた。

解像度の異なる画像測光システムを用いることで得られる輝度値が変わる可能性がある²⁷⁾が、照明器具の輝度測定結果をグレア評価などの視環境評価に用いることを考えると、ヒトが視対象を視認した時と等しい解像度の輝度分布を得られるシステムが必要と考えられる。本研究で用いた画像測光システム A と B は、山田らの実験で示された²⁸⁾ ヒトが視対象を視認した時のコントラストと等しい結果を得るために必要な解像度 0.2 分/pixel 程度のシステムである。表中に示したナイキスト周波数は、サンプリング（撮影された画像を画素の集合体に分ける）した時に再現できる最大の周波数を示しており、この周波数よりサンプリング対象の空間周波数が高い場合は、画像の再現が難しいことを意味する。

なお、画像測光システムには魚眼レンズが用いられることもあるが、この場合、例えばシステム A のようなピクセル数の多いカメラを用いた場合でも、解像度は 1.8 分/pixel と低くなるため、本測定では対象にしなかった。

「2.2. 照明器具の輝度分布測定の実状」で述べたように、画像測光システムに用いるデジタルカメラの性能評価に適した手段として、MTF 特性がある。MTF 特性は、画像性能表現の評価が行えるため、撮像素子の違いによるカラー画像化の処理の違いなどを含んだ評価が行える。MTF 特性の解析方法はいくつかある²⁹⁾が、本研究では、Fig.2-1 に示す 50 種の矩形波を持つ解像度テストチャート (USAF 195 1X EDMUND) を用いた。Fig.2-1 中にある灰色の線分および①～⑥の番号は、実際の解像度テストチャートには記されていないが、解析に用いた部分を表すために著者らが追記したものである。暗室において均一輝度の発光面（ムトーエンジニアリング社製 SLT-A4C）を背景においた解像度テストチャートを 2m 離れた位置より測定した (Fig.2-2)。発光面は電流波計（Tektronix 製、TDS5054B）によりフリッカーの無いことを確認した。解像度テストチャート (Fig.2-1) は全体で 76.2mm 角で、測定画像の中央に表示されるように設置し、収差の影響の少ない条件で撮影した。高輝度の照明器具の測定には ND フィルターの装着が必要であり、MTF 特性の解析も ND フィルターを含めての評価が適切であるが、均一な高輝度の発光面を作れなかったため、ND フィルターを装着せずに測定を行った。

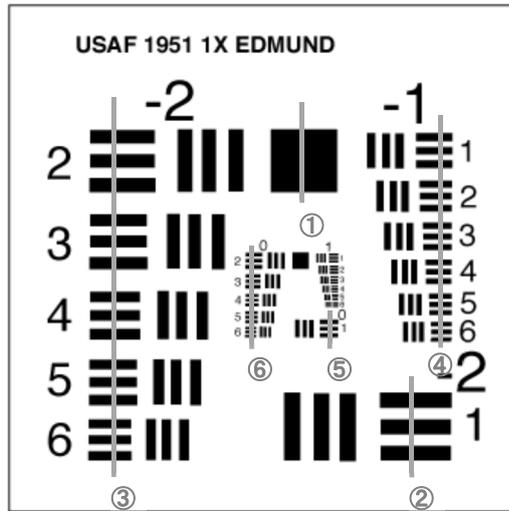


Fig. 2-1 Resolution test slide

(Along the lines 1 to 6, luminance distribution was measured)

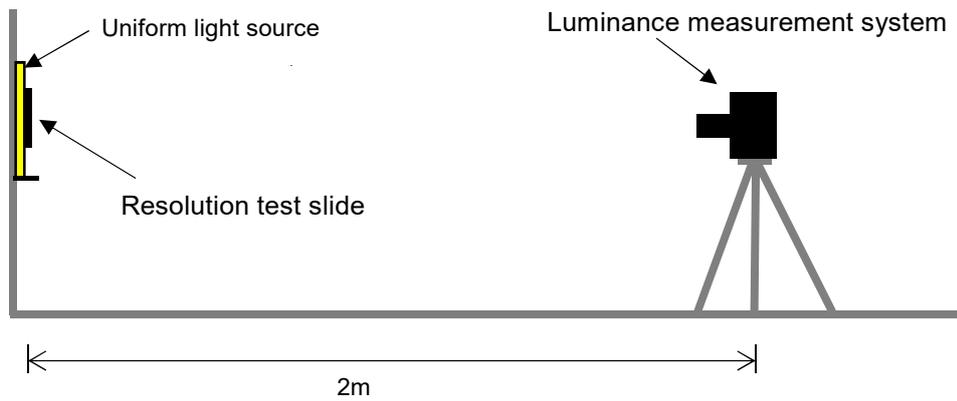


Fig. 2-2 measurement method of resolution test slide

MTF 特性は、式 (1) より空間周波数別のコントラストを算出することで示すことができる。

$$C = \frac{L_{max} - L_{min}}{L_{max} + L_{min}} \dots\dots\dots(1)$$

C : コントラスト

L_{max} : 最大輝度 (cd/m²)

L_{min} : 最小輝度 (cd/m²)

本研究では、19種類の空間周波数を用いて解析した。具体的には Fig.2-1 中①～⑥の灰色の線分部分の解像度テストチャートの輝度を用いた。解像度テストチャート (Fig.2-1) のグループ数とライン数の対応表に記載の空間周波数 (ペア/mm) と、それを 2m 離れた位置から測定した場合の空間周波数 (cpd) を Table2-2 に示す。左側に示した「位置」とあるのが Fig.2-1 中の矩形視標の位置を示すもので、数字は解像度テストチャート (Fig.2-1) に記載されているものである。例えば Table2-2 の「中央」は、解像度テストチャート (Fig.2-1) 内で数字の記載のない上部右から 2 番目にある最も大きい正方形の矩形を示し、Fig.2-1 中の①の灰色の線分部分になる。同じように Fig.2-1 の「-2」の欄の「1」は、解像度テストチャート (Fig.2-1) の右下にある 3 つの矩形を示し、Fig.2-1 中の②の灰色の線分部分を示す。Table2-2 に各画像測光システムのナイキスト周波数を示したが、これによるとシステム G (ナイキスト周波数 4.26cpd) は、Fig.2-1 に示した空間周波数 0.35cpd の矩形視標のみ画像再現が可能な性能と考えられる。システム A、B、D は Fig.2-1 に示す空間周波数 62.13cpd 以下、システム C は空間周波数 34.91cpd 以下、システム E、F は空間周波数 24.68cpd 以下の矩形視標の画像再現が可能な性能と考えられる。

Table2-2 The spatial frequency (line-pairs/ mm) of the resolution test slide (fig 1.) and the spatial frequency (cpd) measured from 2m away

P		Spatial frequency (pair/mm = cycle/mm) *	Spatial frequency at measurement distance from 2m away (cpd)
Center	① of Fig.1	0.01	0.35
-2	1	②of Fig.1	8.73
	2	③of Fig.1 (From above)	9.77
	3		11.00
	4		12.32
	5		13.86
	6		15.53
-1	1	④of Fig.1 (From above)	17.45
	2		19.58
	3		21.99
	4		24.68
	5		27.68
	6		31.10
0	1	⑤of Fig.1	34.91
	2	⑥of Fig.1 (From above)	39.10
	3		43.98
	4		49.22
	5		55.50
	6		62.13

* Although it is expressed as a pair in the resolution test chart, it is synonymous with cycle.

2.3.2. 各システムの MTF 特性

解像度テストチャート (Fig.2-1) の輝度分布測定結果 (Fig.2-3) のうち、Fig.2-1 中の①~④の灰色の線分で示した部分の解像度テストチャートの輝度を線分毎に折れ線グラフにした。代表として Fig.2-4 にシステム B、Fig.2-5 にシステム F の Fig.2-1 中の①~④の4つの灰色線分部の結果を示す。Fig.2-1 中の①の灰色の線分で示した輝度が Fig.2-4 の4つのグラフのうち「Fig.2-1 の①」とある左のグラフの輝度になる。システム B (Fig.2-4)、システム F (Fig.2-5) とともに空間周波数が高くなると最大輝度と最小輝度の差が小さくなる。

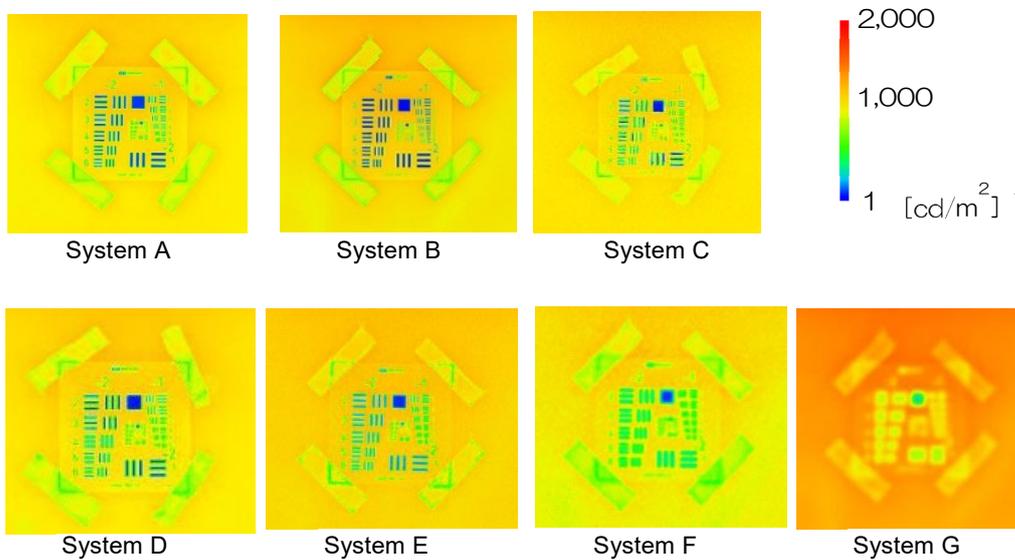


Fig.2-3 Result of luminance distribution

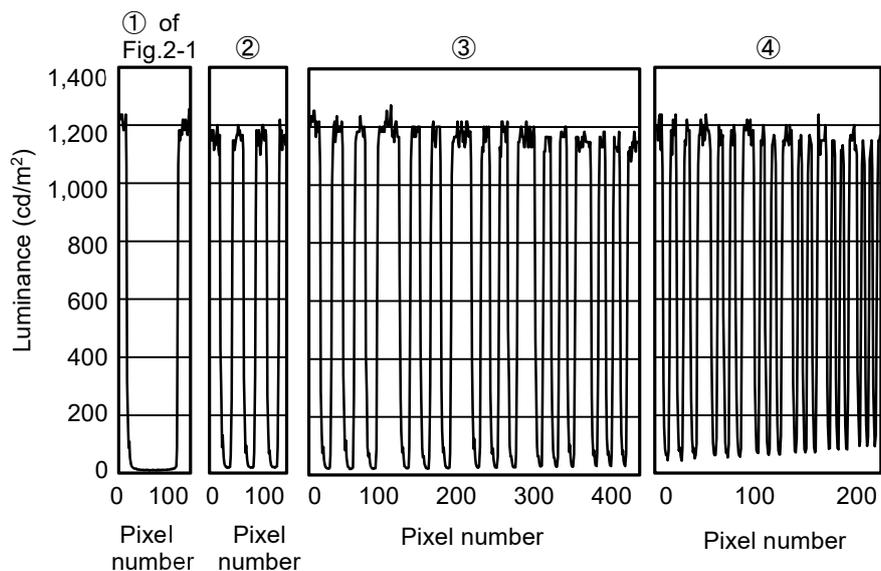


Fig. 2-4 Luminance of resolution test slide measured by system B

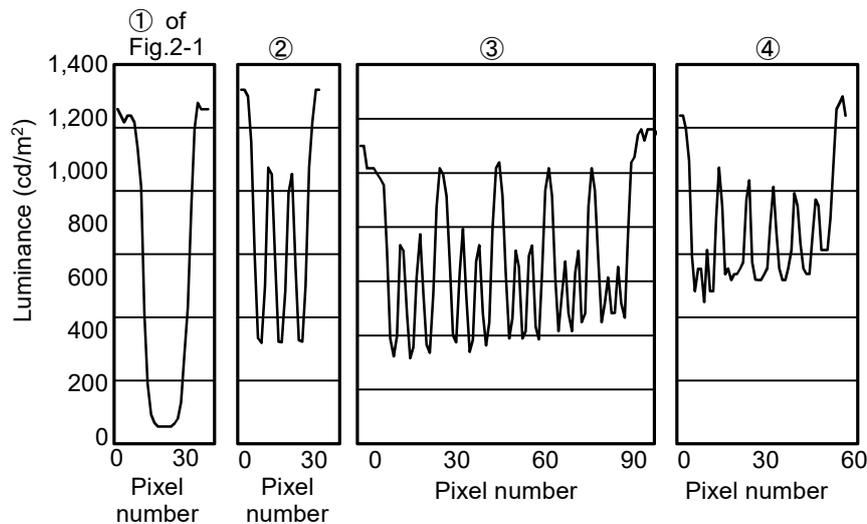


Fig. 2-5 Luminance of resolution test slide measured by system F

Fig.2-1 に示したように④の灰色の線分には 6 種の異なる空間周波数の矩形視標が含まれているので、18ヶ所の低輝度部分が現れるはずである。システム B (Fig.2-4) の④内の低輝度部分は 18ヶ所全て現れたが、システム F (Fig.2-5) の④内の低輝度部分は 18ヶ所現れていない。システム F (ナイキスト周波数 26.94cpd) は、Table2-2 に示す Fig.2-1 中の④の空間周波数 17.45~24.68cpd よりナイキスト周波数が高く画像再現の可能範囲とみられるが、矩形視標部と背景となる白色部を識別することはできなかった。

全てのシステムについて同様なグラフを作成して確認した (Fig.2-6~2.10)。システム E (ナイキスト周波数 25.47cpd) は Table2-2 に示す空間周波数 17.45~24.68cpd は画像再現の可能範囲とみられるが、矩形視標部と背景となる白色部の識別はできなかった。システム C (ナイキスト周波数 39.47cpd) は Table2-2 に示す空間周波数 34.91cpd までの再現が可能範囲とみられたが、空間周波数 62.13cpd までの矩形視標部と背景となる白色部を識別していた。システム G (ナイキスト周波数 4.26cpd) は Table2-2 に示す空間周波数 0.35cpd のみの再現が可能範囲とみられたが、空間周波数 12.32cpd までの矩形視標部と背景となる白色部を識別していた。システム A と D は、ナイキスト周波数から予想した通り、Table2-2 に示す全ての矩形視標部と背景となる白色部を識別していた。なお、本解析は縦方向の輝度分布を用いたが、横方向の解析でも同様の結果となった。

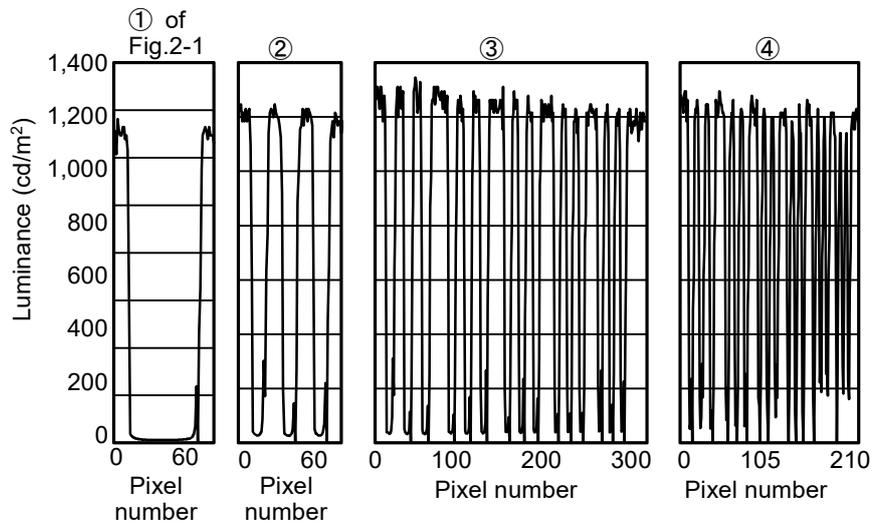


Fig. 2-6 Luminance of resolution test slide measured by system A

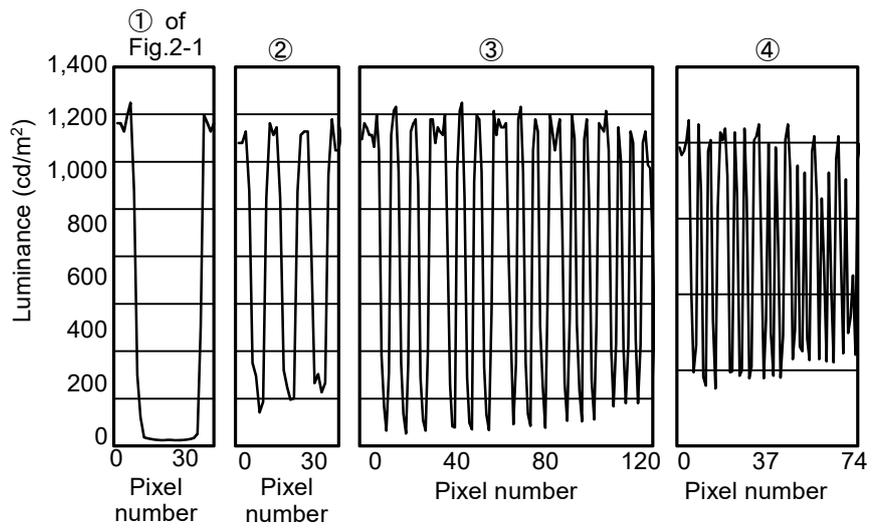


Fig. 2-7 Luminance of resolution test slide measured by system C

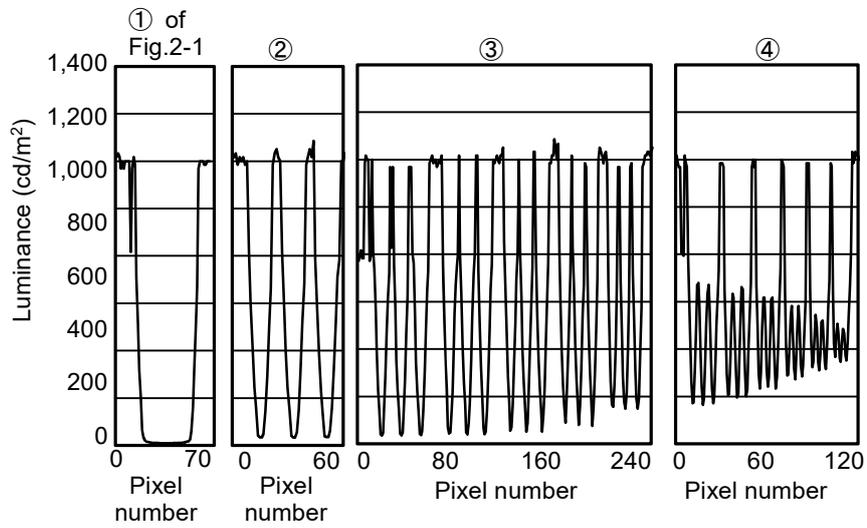


Fig. 2-8 Luminance of resolution test slide measured by system D

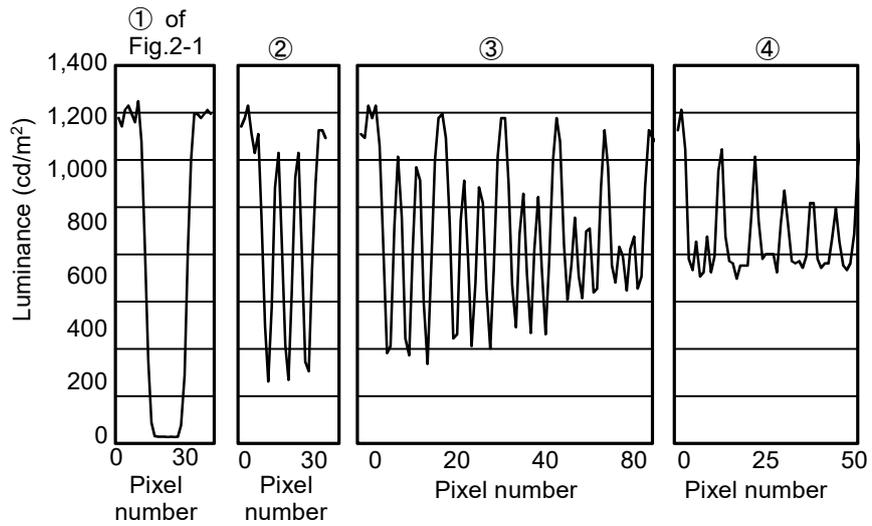


Fig. 2-9 Luminance of resolution test slide measured by system E

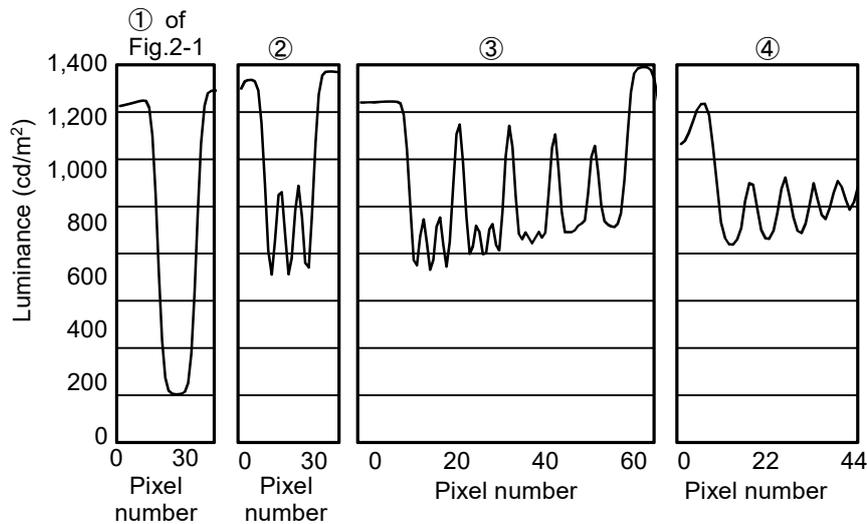


Fig. 2-10 Luminance of resolution test slide measured by system G

MTF 特性を確認するために、式 (1) を用いて空間周波数毎のコントラストを算出した。コントラスト算出用の最大輝度、最小輝度は、解像度テストチャート (Fig.2-1) の測定結果よりそれぞれ平均値を算出して求めた。Fig.2-11 にコントラスト算出用の最大輝度、最小輝度の求め方を示す。Fig.2-1 中の①の線分上の輝度は、矩形視標部上下にある背景となる白色部の輝度値を平均したものを最大輝度とした。最小輝度は矩形視標部の輝度を平均したものをを用いた。画像にする際に発生する矩形指標部と背景となる白色部の境界はエッジ効果 (輪郭を強調する現象) およびエイリアス効果 (ナイキスト周波数以上の信号が混入することで発生するノイズ、輪郭に現れるギザギザなど) の影響を受けるため、矩形視標部と背景となる白色部の境界の輝度値を確認し、エッジ効果、エイリアス効果の影響のない輝度値のエリアを選定して平均輝度を算出した。例えば解像度の低いシステム E や F では、矩形視標部とその上下にある背景となる白色部の境界から 2pixel 分離れた白色部の各 3 ピクセル分の平均値を最大輝度とし、矩形視標部の中央 5pixel 分の平均値を最小輝度とした。Fig.2-1 中の①の灰色の線分以外は、矩形指標部間の背景となる白色部の輝度各 1 点 (計 2 点) を平均したものを最大輝度、各矩形視標部の輝度各 1 点 (計 3 点) を平均したものを最小輝度とした。

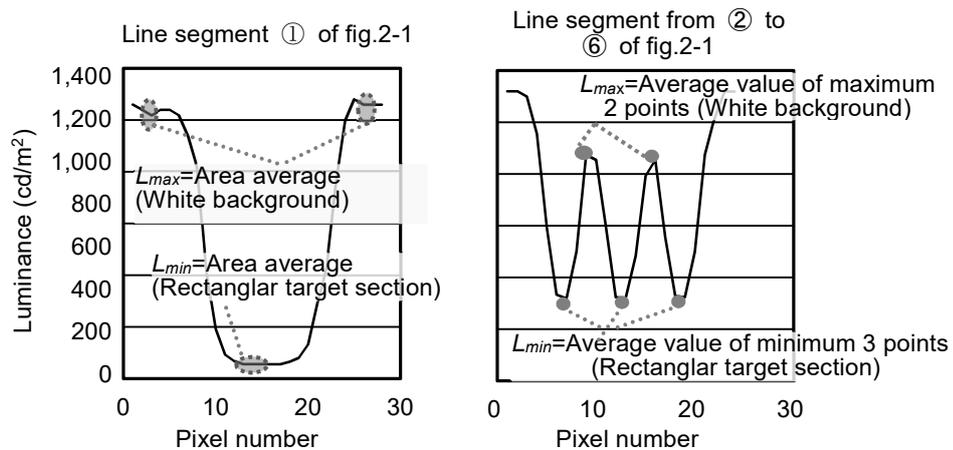


Fig. 2-11 Determination of L_{max} and L_{min} for calculating contrast

これらから、式 (1) を用いて空間周波数 40cpd までの空間周波数毎のコントラストを算出した結果を Fig.2-12 に示す。Table2-1 に示すように解像度はシステム A>B>D>C>G>F>E の順で、ナイキスト周波数はシステム A>B>D>C>F>E>G の順で高かった。概ね解像度およびナイキスト周波数が高い方が高いコントラストを保持する傾向が見られた。システム F、G は、空間周波数 0.35cpd でもコントラスト 0.9 以下で、他のシステムに比べて低かった。システム E は空間周波数 0.35cpd では 0.96 のコントラストを保持していたが、それ以降はコントラストが急激に下がった。

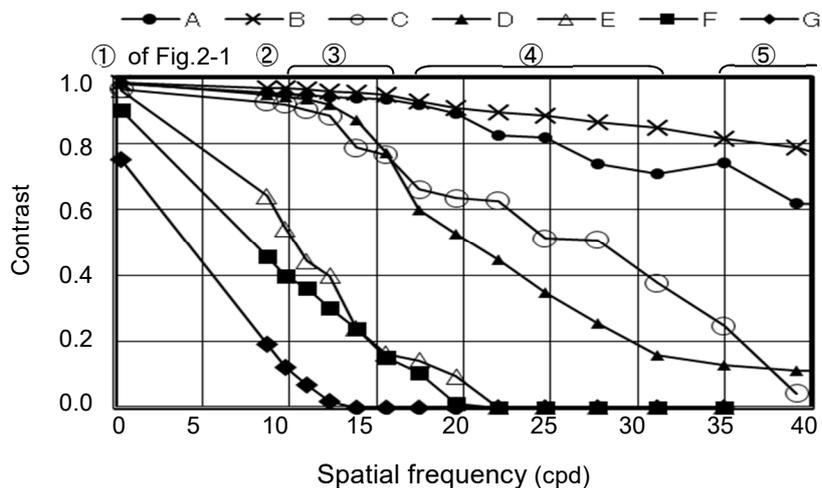


Fig. 2-12 Spatial frequency vs. contrast of each system.

使用した画像測光システムの中では高解像度のシステム A と B は、デジタルカメラは同じだが使用レンズが異なり、システム A の方が解像度、ナイキスト周波数は高い。しかし、システム A とシステム B のコントラストは空間周波数 19.58cpd 以下では等しく、空

間周波数 21.99cpd 以上でシステム B が A より高くなっている。システム C は空間周波数 12.32cpd を超えると、システム D は空間周波数 13.86cpd を超えると急激にコントラストが低下する。システム C と D ではシステム D の方が解像度、ナイキスト周波数が高いが、空間周波数 15.53cpd を超えるとシステム C の方が高いコントラストを保持していた。これらからデジタルカメラの解像度だけでは輝度測定性能を判断できず、MTF 特性の表示も必要だと言える。

各画像測光システムの解像度を考慮し、Fig.2-12 の横軸を pixel/cycle とした 25pixel/cycle までの結果を Fig.2-13 に示す。1 サイクル当たりのピクセル数が等しくても、システムによって保持できるコントラストが異なる。システム E、F、G を除いて 10pixel/cycle (矩形視標部分 5pixel) 以上があれば 0.8 以上のコントラストを保持することができ、20pixel/cycle (矩形視標部分 10pixel) 以上があればコントラスト 0.95 以上を保持していた。

今後、照明器具の輝度分布測定結果をグレア評価などの視認性評価に用いる場合は、ヒトが視対象を視認した時と等しい解像度の輝度分布を得る必要があると考えられる。山田らは、屋内照度 200lx 程度および屋外照度 15lx 程度の環境で視力 0.7 以上の被験者による実験で、ヒトが視認できる視角寸法は 2 分程度までであり、視認性評価を画像測光で行う場合には、視角 2 分程度の矩形視標のコントラストを測定できる必要があると述べている²⁸⁾。この時に必要な矩形視標のピクセル数は 10pixel で、測定されたコントラストは矩形視標の反射率及び照度より計算したコントラストに対して 0.9 以上であった。照度の他に測定対象とその背景の輝度比によっても結果は異なると推測されるが、画像測光システムで測定する際の測定対象のピクセル数 (空間周波数) とその時の画像測光システムが保持するコントラストを示すことで、測定値の信頼性を説明できると考える。本研究および山田ら²⁸⁾の結果から、最大性能としては、測定対象の最小視角は 2 分程度で、この時の測定画像上の測定対象の大きさが 10pixel 以上となり、20pixel/cycle 時のコントラストは 0.9 以上が必要と考える。

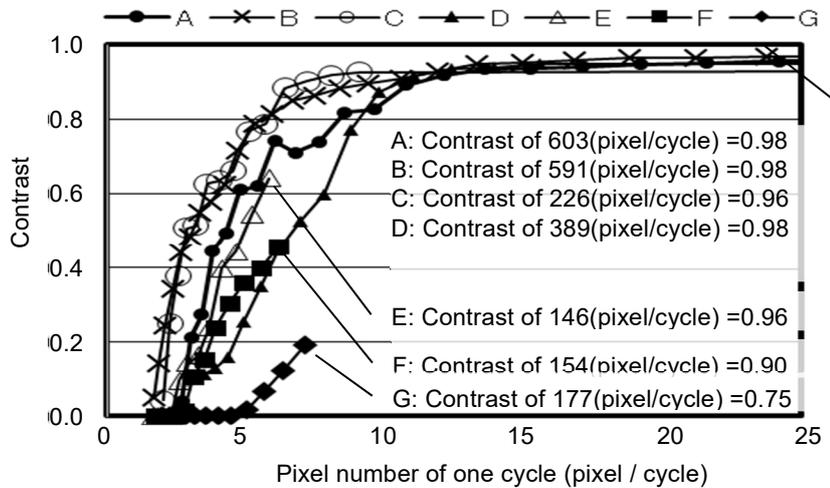


Fig. 2-13 Pixel / cycle vs. contrast of each system.

2.4. 照明器具の輝度分布測定

2.4.1. 測定方法

画像測光システム A~G のうち、同じ画角（28.5 度）で性能の異なるシステム A と D およびシステム A または D と異なるデジタルカメラとレンズの組み合わせであるシステム F と G（システム C および B はシステム A と同様のデジタルカメラ、システム E はシステム D と同様のデジタルカメラとレンズでズームによる画角違い）の 4 種を用いて、400W 相当の高天井用 LED 照明器具の中心に正対して輝度分布を測定した（Fig.2-14）。対象とした照明器具の仕様（カタログ値）を Table2-3 に示す。照明器具タイプによる差を確認するため、COB（Chip On Board）タイプ（多数の LED チップを基盤に直接実装）で鏡面による配光制御を行っている器具（i）、（ii）と、SMD（Surface Mount Device）タイプ（セラミックや樹脂などで成形したキャビティの中に LED を実装）でレンズによる配光制御を行っている器具（iii）、（iv）を用いた。暗室において照明器具を水平向きに設置し、各画像測光システムで正面から測定した。シャッターボタン押下時のカメラの視野のズレを防ぐため、「2.3.1 システム性能の確認方法」と同様に、PC もしくはレリーズによりシャッターを切る（システム A、D、G）か、シャッターボタンを 1 度押すと自動でシャッタースピードと絞りを変更してシャッターを切り複数枚を自動で撮影するシステム（システム F）を用いた。測定距離は 5m と 10m の 2 種類とした。照明器具の輝度は測定システムの測定レンジを超えるため、透過率 0.1% の ND フィルターを各システムに装着した。測定システム A、D、G には Edmund 吸収型 ND フィルター OD3.0 50mm を、システム F には KENKO PRO-ND1000 を用いた。各システムの ND フィルター装着時の輝度測定範囲を Table2-4 に示す。

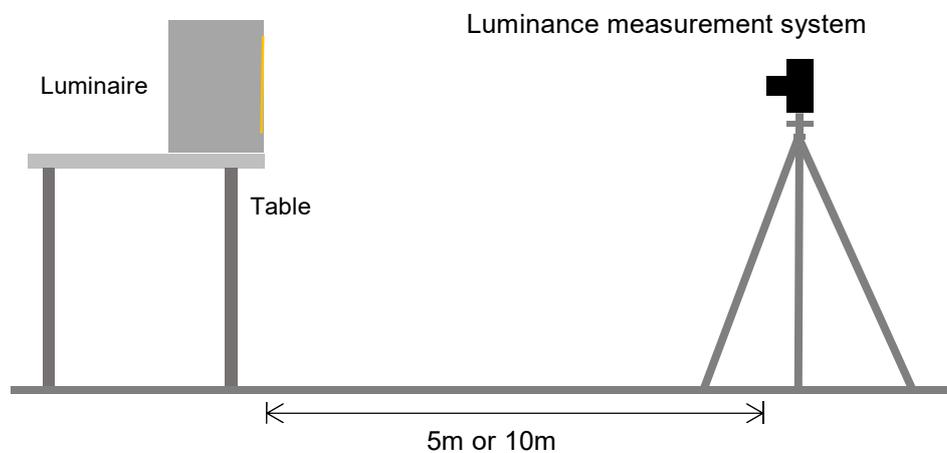


Fig.2-14 Measurement method of floodlight

Table2-3 LED floodlights used in the measurement

Luminaire of LED	(i)	(ii)	(iii)	(iv)
Type	COB	COB	SMD	SMD
Light distribution	Medium	Wide	Medium	Very wide
Power consumption (W)	200	215	188	182
Light flux (lm)	21,000	24,000	22,500	20,484
Muximum luminous intensity (cd)	20,846	12,000	17,708	16,322

Table2-4 Measurable luminance range of each system with ND filter

System	A	D	F	G
Minimum luminance (cd/m ²)	13,230	5,000	28	174
Maximum luminance (cd/m ²)	9.6×10 ⁷	8.6×10 ⁷	8.7×10 ⁷	2.0×10 ⁷

2.4.2. 解析方針

不均一な輝度分布を持つ LED 照明器具は、平均輝度だけでは照明器具の発光部の輝度の詳細を表すことができない。本研究では (1) 輝度分布画像、(2) 平均輝度、(3) 最大輝度、(4) 輝度値の出現範囲・頻度について解析し、画像測光システムの違いがこれらの結果に与える影響を考察した。

具体的には(1)では、照明器具を鮮明に撮影できるか(器具(i)、(ii)は発光部とそれ以外が明確に区別できるか、器具(iii)、(iv)は各素子が発光部として固まらず一素子毎を発光部として区別できるか)、ゴースト(強い光がレンズ内で反射して写ったもの)などの発生が無いかを確認した。(2)では、各照明器具の理論平均輝度と測定により算出された平均輝度(算術平均)との比較を行い、理論平均輝度との差や照明器具の種類やシステムによる差を確認した。(3)では、Slominskiの測定²⁷⁾で示された解像度の違いが最大輝度に与える影響を確認するため、各測定で得られる最大輝度の比較を行った。(4)では、照明器具の輝度の分布を確認するため、輝度分布画像から得られるピクセル毎の輝度よりヒストグラムを作成して検討した。

本測定では、測定距離10mにおける照明器具の発光部の視角は、小さいもので0.05°であった。システムAで測定距離5mの場合の発光部のピクセル数は21pixel、測定距離10mで10pixelとなる。システムAのMTF特性は、20 pixel/cycleで0.9以上、10 pixel/cycleで0.8以上のコントラストを保持していた。システムAの測定距離5mの測定では、共に配光データから取得できる光度と発光面積から求めた理論値と同等の輝度値を取得できると考え解析した。

ここでは、山田ら²⁸⁾の研究を参考に、システムの性能を明らかにするため、照明器具の発光部のピクセル数とそれを測定した際のシステムAのpixel/cycleにおけるコントラスト(MTF特性)を示した。一般的には空間周波数はcpdで示されるため、以降は、システムのMTF特性を述べる際にはcpdを用いて述べる。

2.4.3. 測定結果

2.4.3.1. 輝度分布画像

測定距離10mにおける画像測光システム別の照明器具の正面の輝度分布画像をFig.2-15に示す。輝度分布画像より、システムAとDは照明器具内の発光部とそれ以外の区別が明確にできるが、システムFとGは照明器具内の発光部とそれ以外の区別が難しいことがわかる。また、システムFとGはフレアが発生している。

システムDの器具(iv)の輝度分布画像は、測定距離5mでゴーストが発生していた。Fig.2-16に示すようにシャッタースピード1/2秒を含めると、発光部の存在しない画像右上に照明器具と同径の像の発生(ゴースト)が見られる。システムDのNDフィルター装着時のシャッタースピード1/2秒の輝度測定範囲は $0.5 \times 10^3 \sim 5.3 \times 10^4 \text{ cd/m}^2$ 、1/15秒の輝度測定範囲は $2.9 \times 10^4 \sim 2.6 \times 10^5 \text{ cd/m}^2$ である。ゴーストの影響の排除のため、シャッタースピード1/2秒の画像を含まない解析も検討したが、器具(iv)の前面に装着されている照明カバー部分の輝度は、シャッタースピード1/2秒の輝度測定範囲のため必要と判断し、含めて解析した。

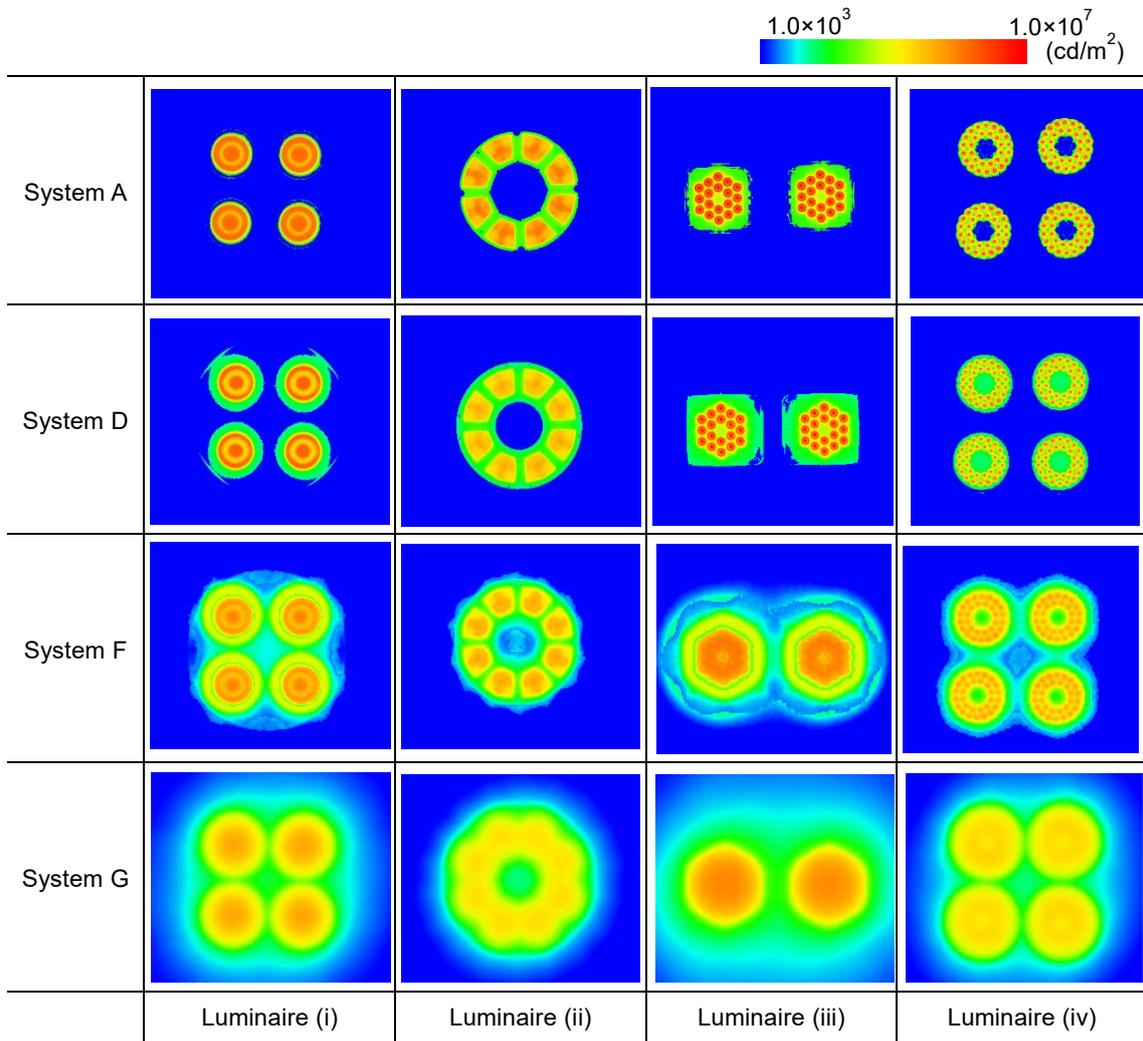


Fig.2-15 Luminance distribution measured from 10 m away

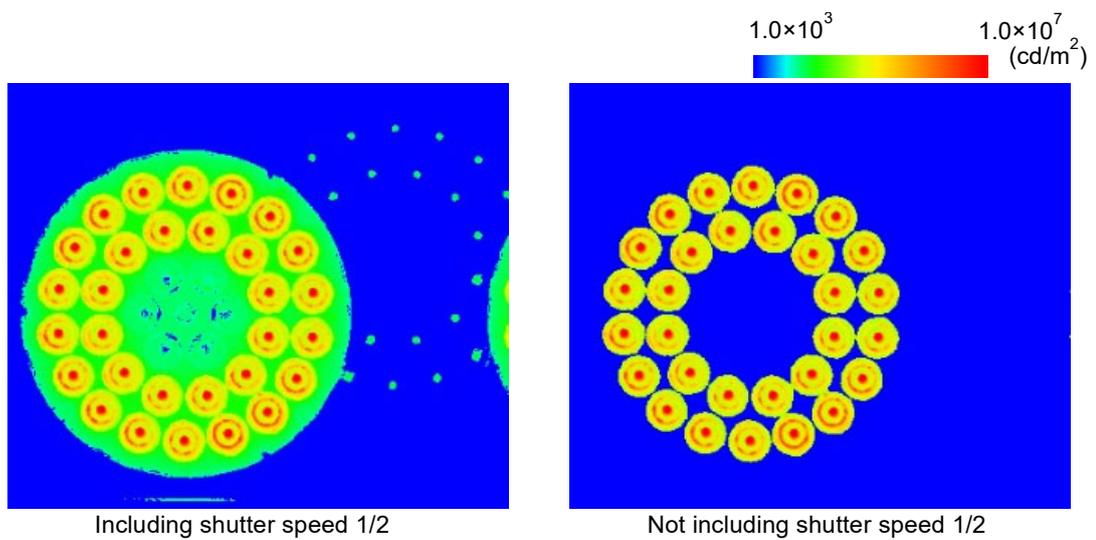


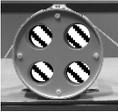
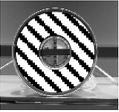
Fig. 2-16 Luminance distribution in the floodlight (iv) measured by system D from 5 m away

2.4.3.2. 平均輝度

各照明器具の発光部の理論平均輝度と画像測光システムの距離別の測定結果より得られた平均輝度（算術平均）を Table2-5 に示す。照明器具は Table2-3 と同じで、同じ順番に並べた。理論平均輝度は、配光図より得た照明器具正面方向の光度と照明器具の発光部面積より算出した。平均輝度算出のために発光部として定義したエリアを、Table2-5 中の照明器具写真内に斜線で示した。解析の結果、理論平均輝度は $0.3 \times 10^6 \sim 1.0 \times 10^6$ cd/m² 程度、測定平均輝度は $0.1 \times 10^6 \sim 1.2 \times 10^6$ cd/m² 程度であった。器具 (i) のシステム F の測定結果は、解析ソフト上のエラーで輝度分布画像への変換が行えなかった（システム F は市販の画像測光システムで、エラーの原因は抽出できなかった）ため欠測となった。また器具 (iv) のシステム A の測定結果は、撮影し損ねた画像があったため欠測となった。

Table2-5 The average luminance calculated and the average luminance and the maximum luminance measured from 5 m and 10 m away

▨ Area of light emitting part

Luminaire	(i)		(ii)		(iii)		(iv)		
Light emitting part for calculating average luminance and solid angle at measuring from 10m									
	Solid angle of light emitting part 0.22×10^{-3} sr		Solid angle of light emitting part 0.43×10^{-3} sr		Solid angle of light emitting part 0.21×10^{-3} sr		Solid angle of light emitting part 0.17×10^{-3} sr		
Theoretical average luminance (cd/m ²)	0.97×10^6		0.28×10^6		0.86×10^6		0.94×10^6		
Measured distance	5m	10m	5m	10m	5m	10m	5m	10m	
Arithmetic average luminance (cd/m ²)	System A	0.90×10^6	0.90×10^6	0.28×10^6	0.28×10^6	1.07×10^6	1.01×10^6	missing	0.65×10^6
	System D	0.59×10^6	0.80×10^6	0.17×10^6	0.15×10^6	1.00×10^6	0.92×10^6	0.50×10^6	0.43×10^6
	System F	missing	0.40×10^6	0.15×10^6	0.13×10^6	1.21×10^6	0.26×10^6	0.20×10^6	0.17×10^6
	System G	0.48×10^6	0.63×10^6	0.21×10^6	0.18×10^6	0.86×10^6	0.58×10^6	0.30×10^6	0.22×10^6
Maximum luminance (cd/m ²)	System A	1.53×10^6	1.53×10^6	1.65×10^6	1.73×10^6	15.92×10^6	15.20×10^6	missing	24.11×10^6
	System D	1.62×10^6	1.65×10^6	1.67×10^6	0.49×10^6	10.36×10^6	10.01×10^6	13.96×10^6	12.17×10^6
	System F	missing	0.80×10^6	0.56×10^6	0.47×10^6	12.44×10^6	1.08×10^6	1.19×10^6	0.55×10^6
	System G	0.96×10^6	0.69×10^6	0.56×10^6	0.26×10^6	1.58×10^6	1.23×10^6	0.57×10^6	0.30×10^6

システム F と G の測定平均輝度の多くは、システム A と D に比べて低い。輝度分布画像 (Fig.2-15) から分かるようにシステム F と G は照明器具内の発光部とそれ以外の区別が難しい。本測定で用いた発光部の視角は小さいもので 0.05° であり、この場合は視角

3分の大きさとなる。ヒトが視認できる視角寸法である2分²⁸⁾より大きいことから、発光部とそれ以外の区別ができる必要があるが、そうならなかった。これらの画像測光システム（空間周波数10cpdでコントラスト0.8以下）では、本測定で用いたLED素子が明確に視認できるような照明器具の輝度分布測定は難しいことが明らかとなった。よって、以降の解析には、システムAとDの結果を用いた。

理論平均輝度と測定による平均輝度を比較した。システムAでは器具(i)の測定距離5m、10mともに理論平均輝度との差は7%であった。器具(ii)の測定距離5m、10mでは、ともに理論平均輝度と一致した。器具(iii)では測定距離5mでは理論平均輝度との差は24%、10mでは17%、器具(iv)では測定距離10mでは31%であった。システムDでは、器具(i)の測定距離10mでは理論平均輝度との差は18%、器具(iii)の測定距離5mでは16%、10mでは6%であったが、器具(ii)と(iv)では、理論平均輝度との差は45%~55%と大きい。

理論平均輝度と測定平均輝度の差の原因の一つに、光軸を正確に捉えていないことが考えられる。今回測定したLED照明器具の中心部に発光部は無く、測定時に光軸を正しく捉えていても測定画像の中心に発光部の中心部は捉えられない。照明器具の性能を示す配光データは、照明器具の中心位置を基準にしていることから、照明器具の輝度分布を測定する場合にも照明器具の中心位置に合わせるべきと考えた。しかし、照明器具の中心部に発光部がない場合もあり、発光部中心に合わせて測定するべきかなどの課題が残った。

システムAとDの測定結果について比較した。器具(i)、(ii)のシステムAの測定平均輝度は理論平均輝度との差が10%未満であったが、システムDでは約20%~50%の差が見られた。測定距離別では、システムAでは測定距離5mと10mの差は最大5%で、測定距離10m以内であれば測定距離の影響は十分小さいと考える。しかし、システムDでは測定距離5mと10mとの差は最大で27%であった。システムAとDは共に空間周波数10cpdでコントラスト0.9以上であったが、詳しく見ると、システムAではコントラスト0.95、システムDではコントラスト0.93であった。光軸のズレの影響なども考えられるが、照明器具の視角0.05°程度（空間周波数10cpd程度）の測定の場合、空間周波数10cpdでコントラスト0.95以上のMTF特性を持つシステムを用いる必要があると判断できる。

2.4.3.3. 最大輝度

測定による照明器具の発光部の平均輝度の解析の結果、システムAでは測定距離による大きな差は見られなかった。最大輝度は、測定距離が近い方が単位立体角当たりのピクセル数が多くなり、測定距離5mは測定距離10mに比べて最大輝度が高くなると予想される²⁷⁾ため確認した。Table2-5中に最大輝度の測定結果を示す。最大輝度はデータエラーの可能性を排除するため、最大輝度の検出されたピクセル周辺の輝度を確認し、画像上2つ以上のピクセルで等しい輝度が検出されているものを本研究では最大輝度とした。

解析の結果、7条件（2種のシステム（システムAとD）×4照明器具から欠測を除く）

のうち測定距離 10m の方が 5m より高い最大輝度を示した場合が 2 条件となった。いずれも COB タイプで且つ鏡面による配光制御を行っている照明器具であり、SMD タイプの照明器具ではなかった。COB タイプで且つ鏡面による配光制御の照明器具は、SMD タイプの照明器具に比べて光軸のズレの影響が大きくなると考える。今回測定した LED 照明器具は照明器具の中心部に発光部が無いことから、測定距離が短くなることで光軸のずれが大きくなったと推測される。測定距離が短い方が高い輝度を検出した Slominski の測定²⁷⁾では、LED 素子 1 つを画像の中央となるように測定しており、光軸のずれは小さいと考えられる。

器具 (ii) は COB タイプで発光部が SMD タイプに比べて大きく、かつ前面カバーは拡散性の高いものが使用されていた。測定距離 5m と 10m で差が出ない照明器具と予想していたが、システム D の測定距離 10m の最大輝度は、測定距離 5m の 30%であった。システム D の測定距離 10m では、正確に輝度を捉えていないと考える。

器具 (iii) は、システム A と D で測定された平均輝度の差は測定距離 5m では 7%、10m では 8%であったが、最大輝度の差は測定距離 5m および 10m とともに 35%であった。平均輝度に比べて最大輝度の差が大きく、最大輝度を用いる場合には注意が必要である。例えば、照明学会の技術基準²³⁾では、発光部輝度が不均一の場合には鉛直角 85° (仰角 5°) にて測定した最大輝度の 1/10 以上のエリアを見かけの発光面積としているが、最大輝度は「視角 3 分程度の解像度」の画像測光システムにより測定することとなっている。設置高さ 3m とした場合の測定距離は 34m にもなり、用いる画像測光システムの解像度によって見かけの発光面積として抽出される範囲が異なる可能性がある。

2.4.3.4. 輝度値の出現範囲と頻度

輝度分布画像の 10^3cd/m^2 以上のピクセル毎の輝度値 (L) を、 $10^3 \leq L < 10^{3.1}$ 、 $10^{3.1} \leq L < 10^{3.2}$ 、 \dots 、 $10^{7.5} \leq L < 10^{7.6}$ の輝度範囲で区切り、輝度範囲毎のピクセル数を集計した。集計されたピクセル数と 1 ピクセル当たりの立体角から、輝度範囲毎の立体角を算出し、ヒストグラムを作成した。

COB タイプの代表として、器具 (i) のシステム A と D による測定距離 10m と 5m の 10^4cd/m^2 以上の輝度値の出現範囲・頻度を Fig.2-17、Fig.2-18 に示す。立体角は $10^4 \leq L < 10^{4.1}$ ~ $10^{7.5} \leq L < 10^{7.6}$ の輝度範囲で示す。測定距離 10m (Fig.2-17)、5m (Fig.2-18) とともにシステム A と D で検出された輝度は異なる。器具 (i) の測定距離 10m におけるシステム A と D の平均輝度と最大輝度の差は 8~12%と大きくなかったが、測定輝度の内訳は異なる。システムによりピクセル毎の測定輝度は異なることが明らかとなった。

上述の通り、同一測定距離において同一照明器具を異なるシステムで測定した場合に検出された輝度は異なった。測定距離 5m と 10m とで同一照明器具を同一システムで測定した場合に検出される輝度が異なるかを確認するため、システム A の器具 (i) の測定距離 5m と 10m の輝度範囲毎の立体角のうち最大値を 1 とした場合の輝度値の出現範囲・頻度

を Fig.2-19 に示す。検出された輝度出現頻度は、測定距離 5m と 10m で差はない。システム D でも同様の結果が得られ、器具 (i) では、同一システムであれば測定距離による輝度出現頻度に差は見られなかった。なお、測定距離 10m の輝度値の出現範囲・頻度の立体角を測定距離 5m に相当するよう 4 倍としたところ、概ね結果は一致した。

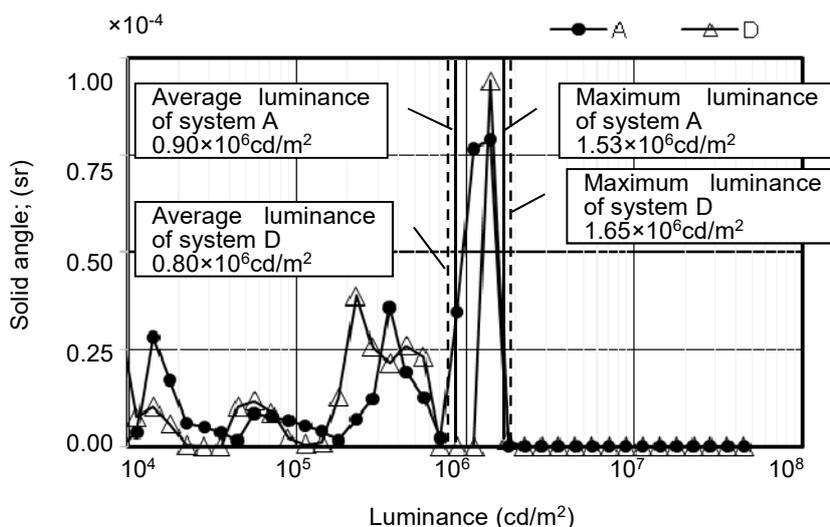


Fig.2-17 Luminance histogram in the floodlight (i) measured from 10m away

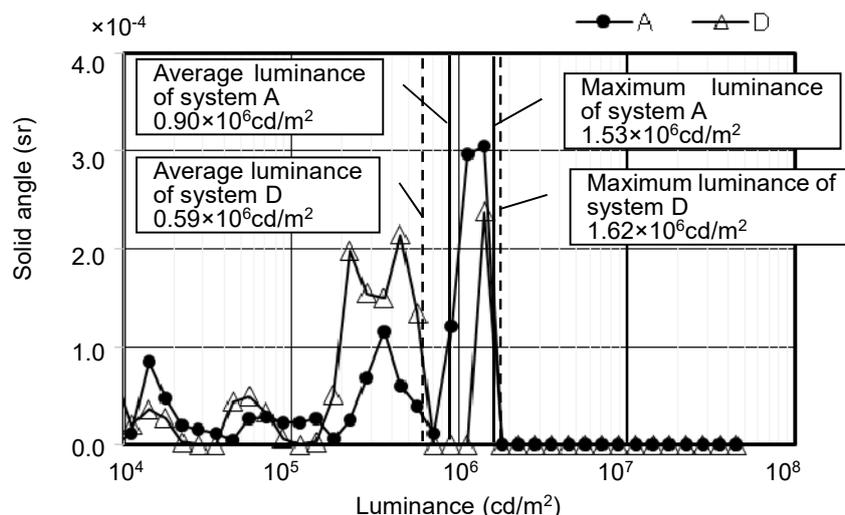


Fig. 2-18 Luminance histogram in the floodlight (i) measured from 5m away

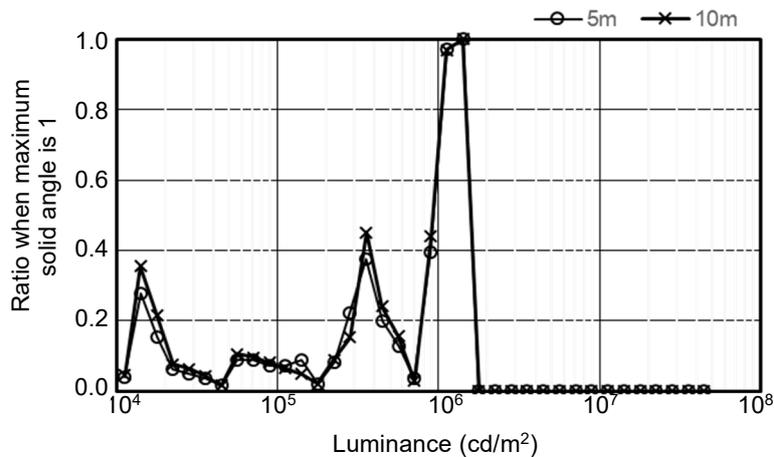


Fig. 2-19 Luminance histogram in the floodlight (i) measured by system A from 5m and 10m away

SMD タイプの代表として、器具 (iii) のシステム A と D による測定距離 10m と 5m の 10^4cd/m^2 以上の輝度値の出現範囲・頻度を Fig.2-20、Fig.2-21 に示す。測定距離 10m (Fig.2-20)、5m (Fig.2-21) ともに COB タイプの器具 (i) と同様にシステム A と D で検出された輝度が異なる。同一システムによる測定距離別の測定結果では、器具 (i) と同様に測定距離によって検出された輝度出現頻度に差は見られなかった。

輝度値の出現範囲・頻度では、画像測光システム毎に検出される輝度が異なることが明らかとなった。本測定に用いた照明器具においては、LED 照明器具のタイプ (COB と SMD) で、また、配光や前面カバーの特徴によらず同じであった。

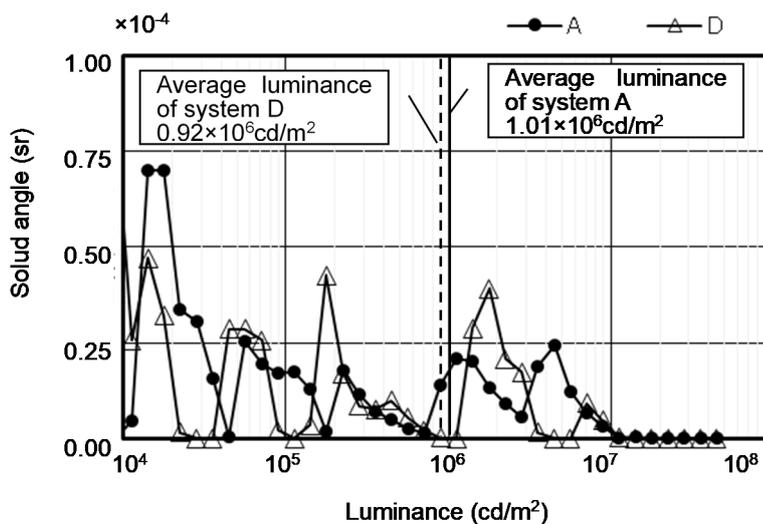


Fig. 2-20 Luminance histogram in the floodlight (iii) measured from 10m away

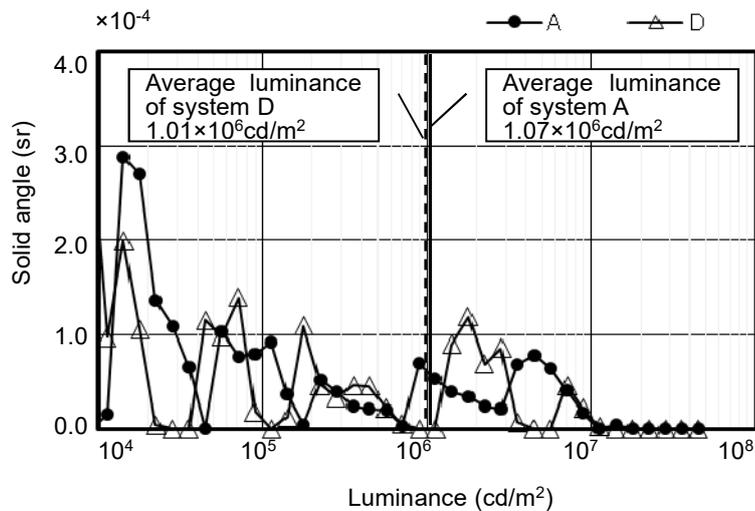


Fig. 2-21 Luminance histogram in the floodlight (iii) measured from 5m

2.4.3.5. 考察

照明器具の輝度分布測定では、測定条件を統一して測定できれば測定に用いる画像測光システムの仕様を決定しやすいが、フィールド実測においては、照明器具の大きさや設置高さは様々であり、用いる画像測光システムによって結果が異なることが懸念される。システム A のように空間周波数 10cpd でコントラスト 0.95 以上を保持する画像測光システムでは、平均輝度と最大輝度について測定距離 5m と 10m とで顕著な差は見られず、照明器具の発光部の視角が 0.05°程度（空間周波数 10cpd 程度）のフィールド実測に適用可能と考える。空間周波数 10cpd でコントラスト 0.93 のシステム D は、理論平均輝度と測定平均輝度との差が 45%以上あるものがあり、且つ照明器具によっては平均輝度と最大輝度について測定距離 5m と 10m とで差がみられた。ヒトが視認可能な照明器具の視角 0.05°程度（空間周波数 10cpd 程度）の測定の場合、空間周波数 10cpd でコントラスト 0.95 以上の MTF 特性を持つシステムを用いる必要があると判断できる。

輝度値の出現範囲・頻度を比較した結果、同じ照明器具を測定した時の平均輝度に大きな差がなくても画像測光システムによって得られるピクセル毎の輝度値が異なることから、輝度分布を詳細に把握するためには、平均輝度、輝度値の出現範囲・頻度を合わせて示す必要があると考える。

測定に用いた画像測光システムの仕様（MTF 特性など）は測定結果と共に示す必要がある。「3.2 各システムの MTF 特性」で説明した通り、測定対象のピクセル数（空間周波数）とその時の画像測光システムの保持するコントラストを示すことで、測定値の信頼性を説明できると考える。本研究では、例えば、測定対象の空間周波数が 10cpd の場合には、画像測光システムの空間周波数 10cpd の時のコントラストが 0.95 以上を保持していれば信

頼できる測定結果となると考える。

2.5. まとめ

本研究では、スポーツ施設で用いられる高天井用 LED 照明器具の発光部輝度測定を中心に、画像測光による輝度測定において示すべき画像測光システムの性能を検討し、性能の異なる複数の画像測光システムによって得られる LED 照明器具の輝度測定値の違いについて考察した。検討の結果、以下の知見を得た。

解像度 0.285 分/pixel~1.177 分/pixel の複数の画像測光システムについて、デジタルカメラの性能評価に適した手段として MTF 特性の解析を行った結果、解像度が高いほど優れた MTF 特性を保持する傾向がみられたものの一部はそうならなかった。一般的なデジタルカメラの性能判断に用いる解像度だけでは輝度測定性能を判断できず、MTF 特性の表示も必要であることが示された。画像測光システムで測定する際の測定対象のピクセル数（空間周波数）とその時の画像測光システムが保持するコントラストを示すことで、測定値の信頼性を説明できると考えた。最大性能としては、測定対象の最小視角は 2 分程度で、この時の測定画像上の測定対象の大きさが 10pixel 以上となり、20pixel/cycle 時のコントラストは 0.9 以上が必要と考える。

MTF 特性の異なる 4 種の画像測光システムを用いて測定距離 5m と 10m の 2 条件で高天井用 LED 照明器具の輝度分布測定を行った。その結果、空間周波数 10cpd でコントラスト 0.8 以下のシステムは、照明器具内の発光部とそれ以外を区別する画像は撮影できない場合があり、本測定で用いた LED 素子が明確に視認できるような照明器具の輝度分布測定は難しいことが明らかとなった。

空間周波数 10cpd でコントラスト 0.9 以上の MTF 特性を持つ画像測定システムを用いて、同一の高天井用 LED 照明器具を測定した場合に得られる平均輝度、最大輝度を比較した結果、視角 0.05°程度（空間周波数 10cpd 程度）の LED 照明器具の輝度分布測定では、空間周波数 10cpd でコントラスト 0.95 以上の MTF 特性を持つシステムを用いる必要があると判断した。また、輝度値の出現範囲・頻度を確認した結果、平均輝度に大きな差がなくても画像測光システムによって得られるピクセル毎の輝度値に差があり、輝度分布を詳細に把握するためには平均輝度、最大輝度、出現範囲・頻度を合わせて示す必要があると考えた。

測定に用いた画像測光システムの仕様（MTF 特性など）は測定結果と共に示す必要がある。本研究では、例えば、測定対象の空間周波数が 10cpd の場合には、画像測光システムの空間周波数 10cpd の時のコントラストが 0.95 以上を保持していれば信頼できる測定結果となると考えた。

参考文献

- 1) Characterization of the performance of illuminance meters and luminance meters, ISO/CIE 19476:2014
- 2) 照度計 第1部：一般計量器, JIS C1609-1: 2006
- 3) 竹下秀：青色照明光の評価：評価規格と計測上の課題, 照明学会誌, 第97巻, 第9号, pp.638-641, 2013
- 4) 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, 日本建築学会論文報告集, 第243号, pp.73-79, 1976
- 5) 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, 日本建築学会論文報告集, 第244号, pp.81-87, 1976
- 6) L. Halonen, M. Eloholma and P. Palmi : "The Lighting Environment for Low Vision Older People-Effects of Daylight, Luminance Level and Luminance Distribution", Proc. of CIE 23rd Session, pp.39-42, 1994
- 7) 海宝幸一, 松縄堅：電子カメラを用いた輝度計測手法の予備的検討, 照明学会全国大会講演論文集, pp.263-264, 1995
- 8) 岩田利枝, 塚見史郎：CCDカメラの光環境計測への応用技術, 照明学会誌, 第81巻, 第3号, pp.246-249, 1997
- 9) Mitsunaga, T. and Nayar, S.K. : Radiometric self calibration. In: IEEE conference on computer vision and pattern recognition (CVPR), Vol.1, p.374-380, 1999
- 10) <https://www.konicaminolta.jp/instruments/products/light/ca2500/index.html>
- 11) <https://www.opteema.com/en/products/lmk-imaging-photometers/>
- 12) 山田哲司, 森下大輔, 江湖俊介, 中村芳樹：光環境評価システム「QUAPIX™」の研究開発, 建設電気技術技術集, pp.70-75, 2009
- 13) H. Yamaguchi, M. Kato, N. Hara, D. Ito and Y. Miki : Development of generic colorimetry system for lighting environment by using ccd camera, Proc. Of CIE centenary conference, pp.1235-1238, 2013
- 14) <http://www.anywhere.com/>
- 15) Inanici, M. and Galvin, J. : Evaluation of high dynamic range photography as a luminance mapping technique. LBNL, 2005.
- 16) Smita Anaokar and Martin Moeck : Validation of high dynamic range imaging to luminance measurement,. Leukos, Vol.2 (2), pp.133-144, 2005
- 17) Inanici, Mehlika. : Evaluation of high dynamic range photography as a luminance data acquisition system, Lighting Res. Technol., Vol.38 (2), pp.123-134, 2006
- 18) Martin Moeck and Smita Anaokar : Illuminance analysis from high dynamic range images, LEUKOS, Vol.2 (3), pp.211-228, 2006.

- 19) Martin Moeck : Accuracy of luminance maps obtained from high dynamic range images, LEUKOS, Vol.4 (2), pp.99-112, 2007
- 20) Kyle Konis, Eleanor Lee and Robert Clear : Visual comfort analysis of innovative interior and exterior shading systems for commercial buildings using high resolution luminance images, LEUKOS, Vol.7 (3), pp.167-188, 2011.
- 21) Smita Anaokar, and Martin Moeck : Validation Of High Dynamic Range Imaging To Luminance Measurement, LEUKOS, Vol.2 (2), pp.133-144, 2013
- 22) 日本照明工業会, 公共施設用照明器具, JIL5004-2015
- 23) 歩行者のための屋外公共照明基準, 照明学会, 照明学会・技術基準 JIES-010, 2014
- 24) 森星豪 : 屋外照明における不均一な発光部の不快グレア評価, 平成 23 年度照明学会全国大会講演論文集, p.82, 2011
- 25) 阿山みよし, 田代知範, 江湖俊介, 木村能子, 石川智治 : 空間的布置の異なる白色 LED 光のグレア評価, 平成 22 年度照明学会全国大会講演論文集, p.210, 2010
- 26) Tyukhova, Yulia I. : THE ASSESSMENT OF HIGH DYNAMIC RANGE LUMINANCE MEASUREMENTS WITH LED LIGHTING, Architectural Engineering, Dissertations and Student Research, 17, 2012
- 27) Slominski S. : Identifying problems with luminaire luminance measurements for discomfort glare analysis, Lighting Res. Technol., Vol. 48, pp.573-588, 2016
- 28) 山田哲司, 門馬英一郎 : 画像測光による視認性評価に関する共同実験, 平成 28 年度照明学会全国大会講演論文集, p11-04, 2016
- 29) 岡野幸夫 : デジタルスチルカメラの MTF 解析とその測定, 日本写真学会, pp.232-240, 1997
- 30) LED スポーツ照明の直視グレアに関する研究調査委員会報告書(社)照明学会, JIER-125, 2016
- 31) 岩井彌 : スポーツ照明のグレア評価における輝度分布測定の課題, 照明学会誌, 第 102 巻, 第 4 号, pp.150-154, 2018

第3章
屋内スポーツ施設の視環境の
現状把握

第3章 屋内スポーツ施設の視環境の現状把握¹⁾

3.1. はじめに

照明器具の LED 化が加速し、スポーツ照明分野でも照明器具の LED 化が進んでいる。LED（ここでは、照明用 LED を意味し、素子やパッケージのほか、この上に装着されるレンズなどを含む）は HID に比べて小型、高効率、長寿命、即時点灯、高い制御性などの長所がある。一方で、LED には発光面積が小さい、指向性が強いなどの特徴があり、視方向によっては極めて高輝度となる。さらに、LED 照明器具は LED 素子を複数組み合わせで発光部を構成しているものがあり、この場合、発光部内輝度が不均一で大きな輝度比を持つ分布となる。例えば発光部の構成サイズが等しく同じ光量を出力している場合、発光部内が均一なときに比べて不均一なときのほうが最大輝度は高くなる。これらより、LED スポーツ照明ではグレア（ここでは不快グレア、減能グレア、直視による残像などの現象すべてを含む）の発生が懸念される。著者らが LED 改修を行った施設管理者へのヒアリングの結果では、改修前に比べてプレー中のグレアが強くなったと報告がある。田中らによるスポーツ施設における照明器具の LED 化に関する調査²⁾でも、LED 照明器具によるグレア発生の報告がある。田中ら²⁾はグレアが生じた LED 照明器具のグレア対策前後の発光部内輝度を測定し、グレア対策後の LED 照明器具の発光部内輝度を低減させている。LED 化改修前と LED 照明器具のグレア対策後の施設内の輝度分布図も示しているが、輝度値は示されておらず、施設内の輝度分布の詳細は明らかではない。

本研究は、屋内スポーツ競技中の視野に入る照明器具からの光によるグレアを低減させることを目的としている。その基礎段階として、第3章、第4章では、従来照明器具(HID)とLED照明器具の計11件の屋内スポーツ施設での実測による視環境把握と、現場での評価実験によるグレアへの影響要因の抽出についてまとめた。ここで評価するLED照明器具の施設は、従来の照明計画手法を踏襲して設計された施設で、従来照明器具をLED照明器具へ置換(光源が従来光源からLEDに置き換えられた)した照明計画の施設である。第3章では、視環境把握のために行った実測の結果について示す。既往研究では照度分布での評価が多く、競技者の視野内の輝度分布や照明器具の発光部内の輝度分布について測定を行っているのは、前述した田中ら²⁾の研究のみである。第3章では、床面照度分布、競技者の視野内の輝度分布、照明器具の発光部内の輝度分布を対象に現状把握を行った結果、およびその過程で判明した輝度分布測定に関する検討事項(カメラの選定や輝度分布測定法)について論じる。

3.2. 関連の基準および先行研究

3.2.1 光源の輝度測定について

グレアの抑制には照明器具の発光部内輝度を下げることが求められるが、発光面積が小

さい、指向性が強い、発光部内が不均一という特徴を持つ LED 照明器具の発光部の定義と輝度測定が難しい。

照明器具の輝度測定については、日本照明工業会の公共施設用照明器具の規格³⁾および照明学会の技術基準⁴⁾に方法が示されている。いずれも平均輝度で評価するが、発光部の定義と評価する視方向が異なる。日本照明工業会の公共施設用照明器具の規格では、照明カバーの面積と器具直下の光度から平均輝度を算出するが、発光部内輝度が均一か不均一かについては触れていない。照明学会の技術基準では、発光部内が均一な場合と不均一な場合とで評価方法が異なる。発光部内が均一な場合には、鉛直角 85°（仰角 5°）からのスポット輝度計による輝度測定、あるいは、鉛直角 85° 方向の光度及び見かけの発光部面積より算出した平均輝度を用いるものとされている。不均一な場合は、視角 3 分程度の解像度を持つ画像測光システム（デジタルカメラによる輝度分布測定）により鉛直角 85° にて輝度分布を測定し、測定された輝度分布画像より得た最大輝度の 1/10 以上の輝度となる部分の見かけの発光部面積と鉛直角 85° の光度より平均輝度を算出する。後者は発光部内の輝度分布を測定するにも関わらず測定で得た輝度値を評価には用いていないが、これは発光部内輝度が不均一となる照明器具の正確な輝度測定が難しいためと考えられる。いずれも視方向を固定しており、その他の視方向については言及していない。また、いずれも平均輝度で評価しているが、平均輝度が等しくても不均一の場合は最大輝度が高くなることもあるため、平均輝度のみで評価が可能なのか疑問が残る。

3.2.2 スポーツ照明のグレア

スポーツ照明の照明基準は、JIS Z 9127:2011⁵⁾で運動競技者やその関係者、観客、放送関係者などが安全、円滑および快適に運動競技や観戦または撮影するために必要な照明要件を規定している。設計及び運用のために規定できる要件として、照度、照度均斉度、グレア制限値および演色性に関する推奨値が、競技種別、運動競技区分別^{註1)}に定められている。グレアについては屋外施設についてのみ GR⁶⁾、^{註2)}を用いることが規定されているが、屋内施設には適用は可能とされているものの規定がない。屋外施設で規定されている GR は不快グレアを対象としており、視線は俯角 2 度（水平下向き 2 度）として、発光部内の等価光幕輝度と反射光の等価光幕輝度より評価する。現在、スポーツ照明の LED 化で発生しているグレアは、視野に照明器具からの光が入ることで、照明器具がまぶしくて視対象を注視できない、残像が残る、視対象の背景に照明器具が位置する場合は視対象が見えなくなるという現象であり、不快グレアとは異なる種のグレアである。これらは、照明器具が視線上にあり俯角 2 度を対象としている GR とは異なる評価が必要と考えられる。

スポーツ照明で発生しているグレアの問題に着目した既往研究はいくつか見られる。硬式野球を想定し、視対象が照明器具の近くを通る際に視対象を見失う際の輝度に関する研究では^{7),8)}、視対象となるボールの見え方を評価しており、照明器具が視対象の背景にあり視対象が見えにくくなる現象のみを取り扱っている。照明器具のグレアやグレアによる

その後の競技者への影響などについては評価していない。

3.3. 屋内スポーツ施設の光環境測定項目と測定器

3.3.1 スポーツ照明基準⁵⁾

一般原則として、運動競技者の多くは、動きながら動いている視対象を見て、素早く正確な判断を下して次の動作を行っている。したがって、照明設計においては、運動競技面ばかりではなく、その空間および背景についても考慮に入れ、照度、照度分布、陰影、グレア、光色、演色性など、運動競技種目に応じて求められる照明の量および質を満たす必要があると JIS Z 9127:2011⁵⁾では述べられている。

屋内スポーツ施設における推奨値は、照度、照度均斉度、演色性について示されており、グレアについては屋外指標の GR が適用は可能とされているもののグレア制限値は示されていない。竣工後の屋内スポーツ施設は、照度分布測定による評価が基本となるが、照明器具メーカーへのヒアリングでは GR50 以下となっているかグレア制限値の評価を行う施設もあった。また、新里ら⁹⁾は LED 化改修の照明設計基準に GR を含めている。しかし、「3.2.2 スポーツ照明のグレア」で説明した通り、現在、スポーツ照明分野における照明器具の LED 化で発生しているグレアは不快グレアとは異なる種のグレアであり、これらの評価法の検討が重要と考えられる。

3.3.2 本研究の測定項目

本研究では、屋内スポーツ施設における競技中の視野に入る照明器具からの光によるグレアを対象にしている。本研究では、照度分布測定のほかに、視野内輝度分布、照明器具の発光部内輝度分布の測定を行い、本研究で対象としているグレアの原因となる視野に入る照明器具からの光を含む輝度分布を把握し、これらの評価法を検討することにした。

視野内輝度分布は、競技中の視野に照明器具からの光が直接見える可能性の高いバドミントン競技を対象とした。コートサイド別に競技者の立ち位置を想定し、その位置における仰角別の輝度分布を測定することにした。照明器具の発光部内の輝度分布は、照明器具と競技者の位置によって異なるため、1つの照明器具に対し、測定位置を移動させることで異なる仰角の輝度分布を測定することにした。具体的な測定方法は、「3.4. 屋内スポーツ施設の視環境計測」で示す。

3.3.3. 輝度分布測定に用いるカメラ

3.3.3.1 輝度分布測定に際して考慮すべきカメラの特性

(1) 解像度

カメラの特性は、撮像素子や解像度、ISO 感度など数多くの指標で表される。

解像度（画素／度）は画素数÷画角で求められ、一般にレンズの画角が狭いと解像度は高く、画角が広いと解像度は低くなる。

LED 照明器具は発光部内輝度が不均一となることから、発光部内の最大輝度と最小輝度によって不均一さを表すことが求められるが、最大輝度、最小輝度は解像度の影響を受

けると考えられる。既往研究では、Slominski は、解像度の異なるカメラで LED 照明器具の発光部内輝度分布測定を行い、高い解像度を持つカメラで測定したほうが高い輝度値を検出することを明らかにしている¹⁰⁾。筆者らは、同一の照明器具について画角、画素数が異なる複数のカメラを用いた輝度分布測定を行い、用いるカメラによって得られる最大輝度、最小輝度が異なることを示した¹¹⁾。

(2) 画角

上述のように解像度が高いほうが詳細な測定が可能であり、照明器具の発光部内の輝度分布測定は、解像度の高いカメラでの測定が好ましいと考えられた。しかし、解像度を高くすると画角は狭くなる。本章ではスポーツ照明の視環境を把握することを目的としているため、照明器具の発光部内の輝度分布のみならず視野内の輝度分布測定も必要である。視野内輝度分布測定は、一般的には魚眼レンズを用いる。魚眼レンズは広い視野を捉えられるが、解像度が低くなり、またレンズ収差の影響で画面周辺では実際の輝度値より測定輝度値が低くなるという特徴がある。視野内輝度分布測定では画角をできるだけ広くとりたいが、輝度測定精度を保つことも求められる。市販のカメラの標準レンズの画角は概ね 30 度～70 度で、今回測定に用いる候補とした標準レンズの画角は最大で 76 度であったため、76 度の画角を用いることにした。

画角 76 度で視野のどの範囲までが含まれるかを知るために、試みとしてグレア評価で用いられるポジションインデックス (PI)¹²⁾を用いて検討を行った。PI は視点にある発光部に対する周辺にある発光部の輝度の割合を示しており、視点と周辺とで等しいグレアを感じるには周辺では何倍の輝度が必要かを表している。

候補としたカメラとレンズの組み合わせ (システム A、C) で、屋内スポーツ施設の視野内輝度分布を測定した場合の PI について検討した結果を Fig.3-1 に示す。システム A、C で撮影したそれぞれの写真の右下 1/4 の画像について、横軸に水平画角を、縦軸に垂直画角を示し、図中に PI のラインを引いた。システム A のレンズの画角は 28.5 度で、この場合は $PI < 1.5$ しか含まれず、レンズの画角を 76 度 (システム C) にした場合は $PI \leq 2.5$ となった。

本研究の視野内輝度分布測定では市販のカメラと標準レンズを用いて可能な範囲で視野を広げることを優先し、照明器具の発光部内輝度分布測定は測定輝度値を優先する方針とした。

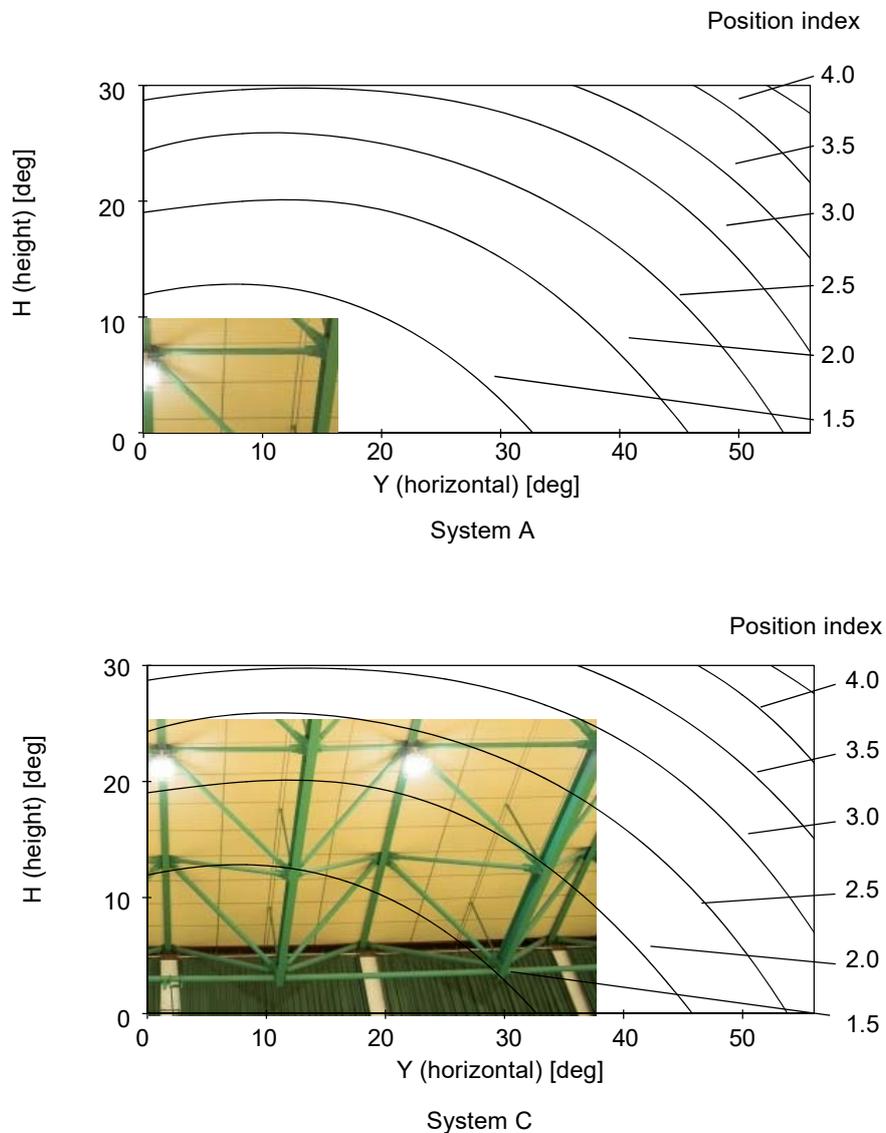


Fig.3-1 Luminance view angle and visual sensitivity represented by position index

(3) MTF 特性

画角と解像度を中心に検討してきたが、岡野は、解像度だけではカメラの性能は十分に示すことができず、鮮鋭度に関する結像特性を最も表現できる MTF (Modulation Transfer Function) 特性で、カメラ全体としての性能評価を行う必要がある¹³⁾と述べている。

本研究では、事前に様々な解像度、レンズ性能を持つ輝度分布測定カメラの MTF 特性を調査した^{注3)}。この結果、概ね解像度の高いカメラの方が MTF 特性も優れているという

傾向が示された¹⁴⁾。

3.3.3.2 本研究で輝度分布測定に使用する画像測光システムの仕様

本研究では、前述のように視野内輝度分布測定と発光部内輝度分布測定で画像測光システムを使い分けることにした。本研究で使用する画像測光システムの概要を Table3-1 に示す。同じタイプのカメラとレンズだが、システム A はズームレンズの狭角側を、システム C は広角側を用いた。MTF 特性を確認した結果 (Fig.3-2)、空間周波数 20cpd (システム A では 10 pixel/cycle、システム C では 2.5 pixel/cycle となる) におけるコントラスト維持率は、システム A は 0.9 程度、C は 0.6 程度であった。システム A は画角が狭いため、C に比べて解像度が高く、また MTF 特性も高い。本研究では、照明器具の発光部内輝度分布測定にはシステム A を、視野内輝度分布測定にはシステム C を用いる。

Table3-1 Outline of luminance distribution measurement system

System	Camera and lens	Resolution [minute / pixel]
A	NIKON D3300 NIKON AF-S DX NIKKOR18-55 (Focal length :55mm, View angle : 28.5 deg)	0.285
B	NIKON D3300 NIKON AF-S DX NIKKOR18-55 (Focal length:18mm, View angle : 76 deg)	0.760

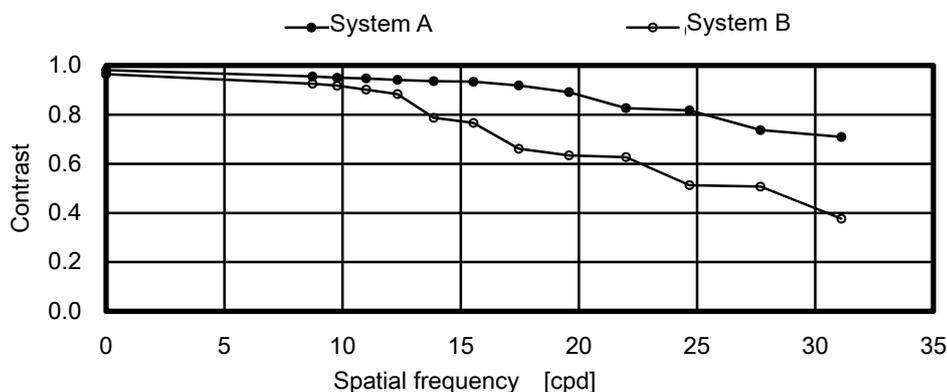


Fig.3-2 Spatial frequency vs contrast of each system

3.4. 屋内スポーツ施設の視環境計測

3.4.1 施設概要

LED スポーツ照明で懸念されるグレアの発生の実態把握を目指して、測定可能な屋内スポーツ施設を調査した。JIS Z 9127:2011⁵⁾では、3つの運動競技区分 (以下、JIS 競技区分と記す) が定められており、JIS 競技区分毎に推奨照度が定められている。LED 照明

器具と HID 照明器具のそれぞれの施設において、全ての JIS 競技区分に利用される屋内スポーツ施設の測定を目標として各施設に協力依頼した。事前に JIS 競技区分を確認することはできなかったが、LED 照明器具の施設 6 件、HID 照明器具の施設 5 件の合計 11 件の測定許可を得た^{注4)}。測定施設概要を Table3-2-1 (LED)、3-2-2 (HID) に示す。事前に入手した図面や施設案内などから、施設 M、H は JIS 競技区分 I で利用可能と考えられる公共施設、施設 T、E、Ho は JIS 競技区分 II で利用可能と考えられる公共施設、施設 To は JIS 競技区分 I で利用可能と考えられる大学の施設、施設 S は JIS 競技区分 II で利用可能と考えられる大学の施設、施設 K、O、Y、To2 は JIS 競技区分 III と考えられる小・中学校の施設であった。

施設 T は LED 照明器具のほかに HID 照明器具も設置されていたが、競技エリアには LED 照明器具が設置されていたため、LED 照明器具の施設に分類した。照明器具は施設 Y は天井埋込型器具、その他は天吊型の高天井用照明器具であった。

Table3-2-1 Outline of gymnasiums*1 (LED)

Gymnasium	M	To	K	T	O	S	
Photo							
Floor area: width x depth [m]	W:40.0 D:50.0	W:37.0 D:73.0	W:33.8 D:63.0	W:29 D:47	W:24.2 D:26.0	W:33.0 D:39.0	
Luminaire Height (Highest) [m]	16.5	13.2	15.6	14.3	11.0	7.6	
Specification of luminaire	Light source	LED	LED	LED	LED / HID	LED	LED / LED
	Power	82.6W×4	373W	254W	181W / 700W	6.9W×6	98W / 72W
	Pitch [m]	4.5 × 5.0	5.0 × 5.0	5.0 ^{*2}	5.0 × 5.0	5.0 × 5.0	2.7 × 2.7
	Total flux [lm]	6,665×4	42,800	23,750	22,800 / 59,500	2,790×6	11,300 / 5,590
	Ra	85	70	70	70 / 70	70	70 / -
CCT [K]	4,000	5,000	5,000	5,500 / 4,200	5,000	5,000 / 5,300	
Number of luminaire	198	84	96	80 / 26	24	28 / 14	

*1 Specification of luminaires are provided by architectural design documents

*2 Arranged in a quadrilateral shape

*3 Since there was no electric design document, the pitch of the lighting fixtures was estimated from the photos and the architectural design plan.

*4 Four luminaires are installed in one point.

*5 Two luminaires are installed in one point.

Table3-2-2 Outline of gymnasiums*1 (HID)

Gymnasium	Y	H	E	To2	Ho	
Photo						
Floor area: width x depth [m]	W:24.0 D:30.0	W:36.0 D:61.0	W:31.0 D:60.0	W:16.0 D:32.0	W:24.5 D:34.5	
Luminaire Height (Highest) [m]	12.7	12.9	14.3	6.4	8.1	
Specification of luminaire	Light source	HID	HID	HID	HID	HID
	Power	260W	1,000W / 660W	415W	430W	250W
	Pitch [m]	5.6 × 6.0	15.0 × 6.0 ^{*2,3}	5.8 × 5.8 ^{*3}	3.0 × 4.5 ^{*3}	7.5×4.5
	Total flux [lm]	21,500	80,000 / 90,500	14,520	36,500	20,000
	Ra	73	70 / 25	75	70	85
	CCT [K]	5,000	4,200 / 2,050	4,200	4,200	4300

*1 Specification of luminaires are provided by architectural design documents

*2 Arranged in a quadrilateral shape

*3 Since there was no electric design document, the pitch of the lighting fixtures was estimated from the photos and the architectural design plan.

*4 Four luminaires are installed in one point.

*5 Two luminaires are installed in one point.

3.4.2 測定方法

測定項目を Table3-3 に示す。

JIS Z 9127:2011⁵⁾では、照度は、「基準面の平均照度」で示すことになっている。基準面は、「運動競技面とその周囲に設ける安全領域を加えた全運動領域」と書かれている。しかし、本研究で測定した屋内スポーツ施設は、バドミントン競技専用ではなく他の屋内運動競技も行う兼用の運動場であり、JIS Z 9127:2011⁵⁾ではその場合の基準面についての明確な記述がなかったため、JIS Z 9127:2011 の付属書 B の照度測定方法にある「屋内運動場」の測定方法に従った。「屋内運動場」としての測定範囲は、壁から 2m 以内の位置に設けた隅点を含む床面全体とされている。よって、本研究では、壁から 2m の位置から 3m 間隔（一部の施設では 1m もしくは 1.5m 間隔）で測定した (Fig3-3)。屋内スポーツ施設の運動面の照明配置などが対称であることを確認の上、半面において測定した。「屋内運動場」の照明要件として、Table3-4 に本研究で対象としているバドミントン競技のほか、バスケットボールおよびバレーボールの推奨値を示す。

Table3-3 Outline of measurements

Measured Value	Measurement point	Equipment
①Illuminance distribution of floor	Interval : 3m (Half of coat)	Chroma meter : KONICA MINOLTA CL-200
②Luminance distribution of visual field	2 points of badminton coat 3 elevation angles : 0°,45°,90° (wide- angle-lens, system C)	Digital camera and lens : • system A shown in Table3- 1 (narrow angle lens) • system C shown in Table3- 1 (wide angle lens)
③Luminance distribution of light source	5 elevation angles : 30°,45°,60°,75°,90 (narrow- angle-lens, system A)	ND Filter : Edmund Absorptive ND Filter OD3.0 50mm

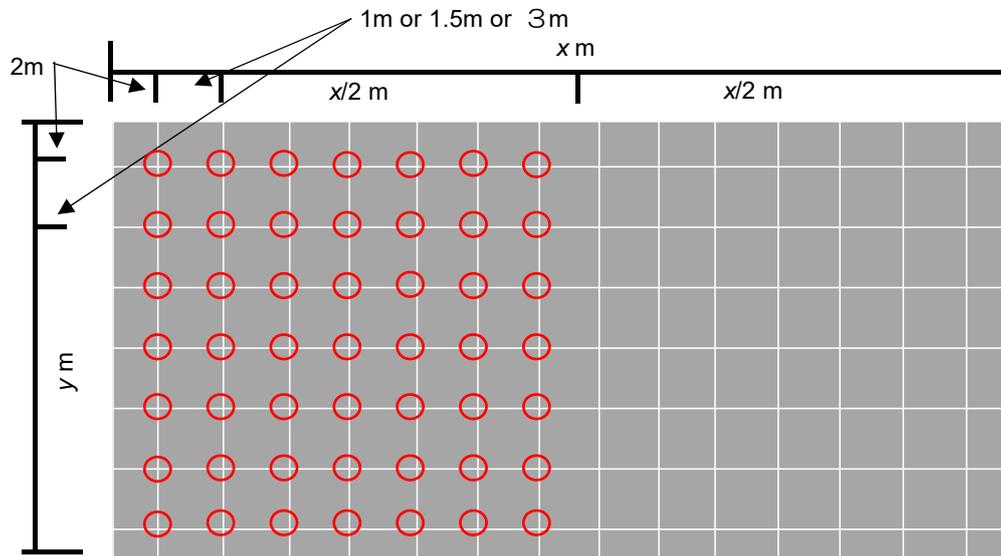


Fig.3-3 Measuring points

Table3-4 Recommendation⁵⁾

JIS classification	I	II	III
Illuminance* [lx]	750	500	300 (B,V***:200)
Uniformity**	0.7	0.6	0.5
GR	-	-	-
Ra	60	60	-

*Interval 3×3m,(B,V:4×4m) , h : Floor

**Uniformity: minimum / average

***B:Basketball, V:Volleyball

視野内輝度分布は、「3.3.3.2 本研究で輝度分布測定に使用する画像測光システムの仕様」で述べた通り、Table3-1 に示したシステム C を用いた。バドミントンコートの両サイド (A 面、B 面) の中央において、コート反対側を見るようにシステムを設置し測定した。Fig.3-4 に示すように、A 面、B 面ともに水平から見上げ 90 度までの輝度分布を把握するため、システムの位置は固定して仰角を変更して測定した。画角 76 度のレンズで測定仰角は 0 度、45 度、90 度の 3 条件とした。測定範囲を超える高輝度部が存在するため、レンズに透過率 0.1% に相当する ND フィルター (Edmund 吸収型 ND フィルター OD3.0 50mm) を装着する場合としない場合で測定した。

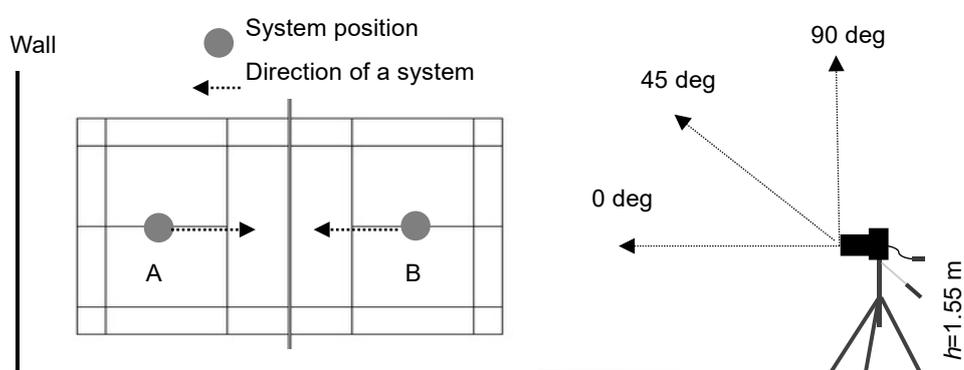


Fig.3-4 Measuring method of luminance distribution of visual field

発光部内輝度分布は、小さい立体角の輝度値が測定できるように、Table3-1 に示した解像度の高い狭角レンズ (システム A) を用いた。Fig.3-5 に示すように発光部が測定画像中心となるようにシステムを移動させて、仰角 30 度から 90 度の間を 15 度間隔 (5 条件) で測定した。発光部内輝度分布測定では、仰角が小さくなると発光部までの測定距離が長くなる。各施設における仰角別の発光部内輝度測定時のシステムの位置と照明器具までの測定距離を Table3-5 に示す。この距離と照明器具の大きさから算出した測定位置からの照明器具の視角を Table3-6 に示す。システム A の解像度は 0.29 分/pixel であり、最小視角となる照明器具 (施設 K) の仰角 30° の測定でも、発光部は 4×4pixel 分の大きさになる。視野内輝度分布測定と同様に、測定範囲を超える高輝度部が存在するため、レンズに透過率 0.1% に相当する ND フィルター (Edmund 吸収型 ND フィルター OD3.0 50mm) を装着する場合としない場合で測定した。

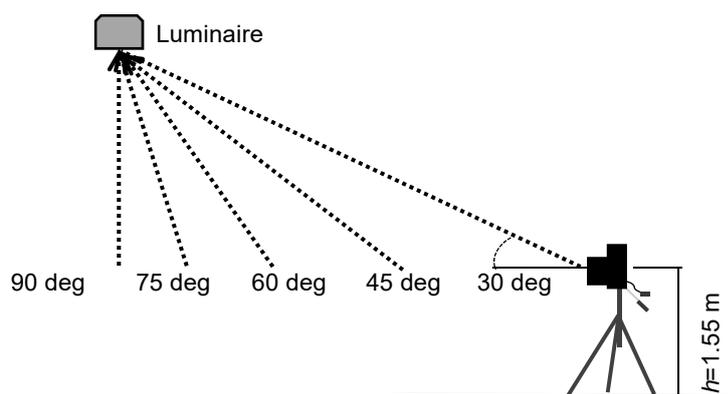


Fig.3-5 Measuring method of luminance of light-emitting area

Table3-5 Distance from measurement point to luminaire

Elevation angle [deg]	LED [m]						HID [m]				
	M	To	K	T	O	S	Y	H	E	To2	Ho
90	15.0	11.7	14.1	12.8	9.5	6.1	11.2	11.4	12.8	4.9	6.6
75	15.5	12.1	14.5	13.2	9.8	6.3	11.5	11.8	13.2	5.0	6.8
60	17.3	13.5	16.2	14.7	11.0	7.0	12.9	13.1	14.7	5.6	7.6
45	21.1	16.5	19.9	18.0	13.4	8.6	15.8	16.1	18.0	6.9	9.3
30	29.9	23.3	28.1	25.5	19.0	12.1	22.3	22.7	25.5	9.7	13.1

Table3-6 View angle of luminaire from measurement point

Elevation angle [deg]	LED [m]						HID [m]				
	M	To	K	T	O	S	Y	H	E	To2	Ho
90	55.2	164.4	36.7	76.8	37.3	117.0	196.3	151.4	107.8	269.9	141.2
75	49.7	99.5	33.1	69.3	33.6	105.5	177	136.5	97.2	243.3	127.2
60	35.8	71.7	23.8	49.9	24.2	76.0	127.6	98.4	70.1	175.4	91.7
45	19.5	39.0	13.0	27.2	13.2	41.4	69.4	53.5	38.1	95.5	49.8
30	6.9	13.8	4.6	9.6	4.7	14.6	24.6	18.9	13.5	33.8	17.6

視野内輝度分布および発光部内輝度分布の測定では、システム A および C のカメラは Table3-7 に示すように設定して撮影した。一条件につき ND フィルターの装着有無でそれぞれシャッタースピード 1/4,000~1/4 の 6 枚の計 12 枚の写真撮影し、それらの写真の階調値から輝度値を算出した。12 枚の写真から算出した輝度値を合成して輝度分布画像を作成し、解析に用いた。

Table3-7 Setting of the camera

System	View angle [deg]	Pixel number	Image format	Image device	ISO sensitivity	Aperture	Shutter speed [s]
A (shown in Table3- 1)	28.5	6,000 × 4,000	RAW	CMOS	100	5.6	1/4000, 1/1000, 1/250, 1/60, 1/15, 1/4
C (shown in Table3- 1)	76						

3.4.3 測定結果

3.4.3.1 照度

測定点、測定照度から算出した平均照度、最大照度、最小照度および照度均斉度の結果を Table3-8、Fig.3-6、3-7 に示す。平均照度の算出方法は、JIS Z 9127:2011⁵⁾の「屋内運動場」の方法^{注5)}に従った。照度均斉度は JIS Z 9127:2011⁵⁾ に示されているように平均照度、最小照度より算出した結果で示す。測定照度から算出した平均照度について、設計照度を満足しているかの確認を試みた。多くの施設で確認が取れなかった。調査の結果、施設 M は設計照度 1,000lx であった。施設 T 及び S は LED 化改修前に LED 化改修施工者による照度測定が行われており、施設 T は 960lx、施設 S は 260lx であった。設計の参考値として取得していると考えられた。施設 M 及び施設 S は設計照度もしくは LED 化改修前の測定照度を満足していたが、施設 T は LED 化改修前の測定照度より低かった。

Table3-8 Results of measured illuminance

Gymnasium	LED						HID				
	M	To	K	T	O	S	Y	H	E	To2	Ho
JIS classification (*)	I (I)	I (I)	II (I)	II (I)	III (II)	III (III)	I (I)	I (I)	II (I)	III (II)	III (III)
Number of measuring point / Interval [m]	272 / 1.5	252 / 1.5	992 / 1.0	63 / 3.0	294 / 1.0	70 / 3.0	286 / 1.0	42 / 3.0	42 / 3.0	63 / 1.5	176 / 1.5
Average illuminance [lx](*)	1,387 (1,581)	859 (1,031)	700 (831)	630 (824)	447 (519)	259 (364)	1,054 (1,187)	980 (1,481)	622 (927)	483 (566)	393 (482)
SD(*)	284 (230)	92 (63)	133 (52)	115 (49)	66 (27)	79 (29)	123 (77)	255 (63)	178 (61)	88 (89)	138 (84)
Maximum illuminance [lx](*)	1,988 (1,970)	1,141 (1,123)	914 (910)	890 (890)	564 (559)	409 (409)	1,388 (1,388)	1,584 (1,584)	1,051 (1,051)	706 (706)	590 (590)
Minimum illuminance [lx](*)	881 (1,140)	706 (866)	358 (687)	457 (669)	277 (437)	125 (310)	765 (945)	645 (1,386)	399 (835)	338 (338)	88 (313)
Uniformity** (*)	0.64 (0.72)	0.82 (0.84)	0.51 (0.83)	0.73 (0.81)	0.62 (0.84)	0.48 (0.85)	0.73 (0.80)	0.66 (0.94)	0.64 (0.90)	0.70 (0.60)	0.22 (0.65)

*Reference surface for badminton

**Uniformity: minimum / average

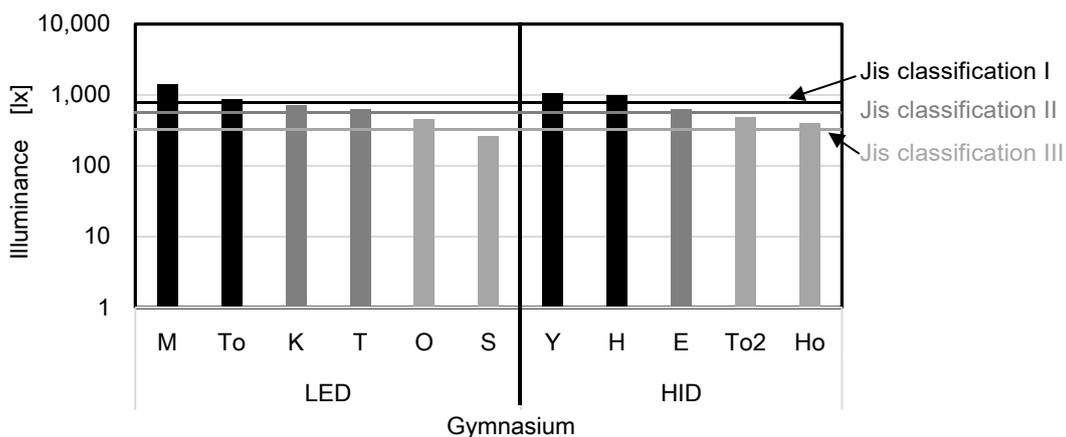


Fig.3-6 Result of average illuminance

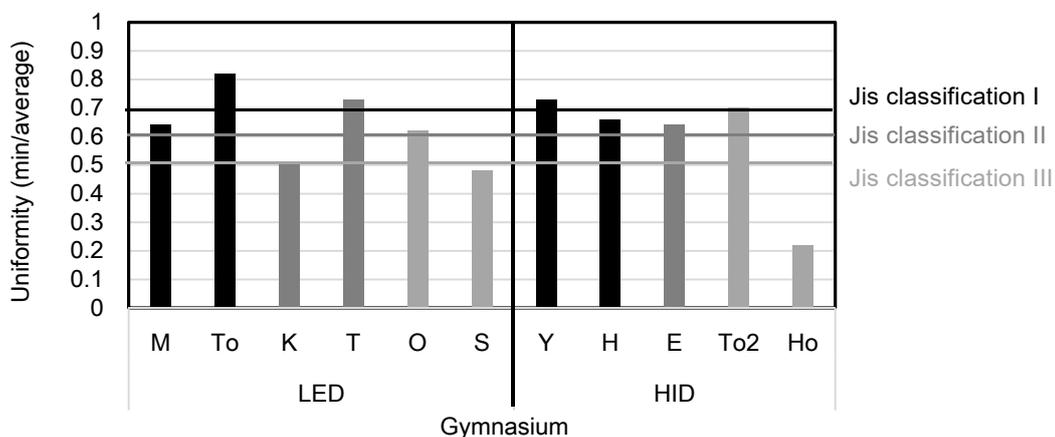


Fig.3-7 Result of uniformity

JIS 競技区分は、各スポーツ施設で行われる各競技の水準により分類され、設計段階で規定されるものである。これらが明らかな施設についてはその競技区分を示すことが適切であるが、上述の通り JIS 競技区分を判断できる設計照度を確認できたのは施設 M のみである。本研究で示した Table3-8 中の JIS 競技区分は、本研究で対象としているバドミントン競技の場合の区分で、本測定の照度測定結果が設計照度を満足していると仮定して分類した。施設 M は設計照度から判断できる JIS 競技区分と一致した。施設 To は大学の施設であるが観客席などがあり、測定照度より求めた平均照度から分類した JIS 競技区分 I の利用が想定できる施設であった。施設 Y、H、E、Ho は過去に行われたイベントを調査した結果と合わせ、測定照度より求めた平均照度から分類した JIS 競技区分で利用可能と考えられた。施設 K、Y は小・中学校の施設で、想定より高いレベルの JIS 競技区分であった。施設 O、To2 は小学校の施設であり、また施設 S は LED 化改修前に測定された

照度と本研究で測定した平均照度が一致したことから、測定した照度分布より求めた平均照度で分類した JIS 競技区分での利用が目的の施設と考えられた。JIS Z 9127:2011⁵⁾では、測定方法に書かれている「屋内運動場」の測定点とバドミントン等の屋内各競技の照明要件にある基準面の範囲が一致していない。屋内スポーツ施設半面の測定結果から照度均斉度を求めた結果、施設 11 件中 5 件（施設 M、K、S、H、Ho）でバドミントン競技における照度均斉度の推奨値を満たしていなかった。基準面の範囲の不一致が原因と考えられる。

バドミントン競技の基準面を想定して算出した平均照度、それから判断される JIS 競技区分、最大照度、最小照度について、Table3-8 中のカッコ内に示した。施設 M、K は屋内スポーツ施設内にバドミントンコート 4 面配置を、施設 To、T、O、S、Y、Ho は 2 面配置を、施設 H、E、To2 は 1 面配置を想定して基準面を設定した。平均照度の算出方法は、基準面での測定の場合の計算点及び測定点の取扱い方⁵⁾に従った。施設 H、E、To2 はバドミントンコート半面の測定結果を用い、コート反対サイドの半面が同照度と想定した。バドミントンコート半面を想定して算出した平均照度は、壁から 2m 以上内側の床面全体の平均照度より高くなった。この結果、11 件中 5 件（施設 K、T、O、E、To2）において、バドミントンコート想定照度から判断される JIS 競技区分は、全体照度から判断される区分より 1 ランク高い区分となった。また、バドミントンコート半面を想定した場合の測定結果から算出した照度均斉度は、全施設において相当する競技区分の推奨値を満足していた。

3.4.3.2 視野内輝度分布

3.4.3.2.1 GR の検証

視野内輝度分布の測定結果を用いて、GR の算出を試みた。本来であれば魚眼レンズを用いた測定による解析が必要であるが、本測定では、3.3 で説明した通り視野内輝度分布測定には水平画角 76 度（垂直画角 50.6 度）のシステム C を用いた。測定仰角は 0 度、45 度、90 度の 3 種類としたため、垂直角の測定範囲は -25.3 度～90 度である。床面は 0 度～-25.3 度の間の輝度値が -90 度まで同様と仮定し、本検証では水平画角 76 度、垂直画角 180 度（-90 度～90 度）のとして GR を算出した。

GR を算出するための等価光幕輝度は、輝度分布画像からは式 (1)、(2) より算出できる¹⁵⁾。これより GR 値を算出した結果、Table3-9 に示すようにいずれの施設も GR20 以下でありグレア制限値未満であった。LED 照明器具の JIS 競技区分Ⅲの施設 O、S は GR 値が他に比べて低いが、HID 照明器具の施設は競技区分のレベルが低くなるほど GR が高くなる。光源種類（LED と HID）の間に、また JIS 競技区分の間に有意差があるかそれぞれ T 検定を行ったが、いずれも有意差は認められなかった。

$$L_{eq} = K \times \sum \frac{L(x,y) \times \Delta\omega(x,y) \times \cos(\theta(x,y))}{\theta(x,y)^2} \dots \dots (1)$$

$$K = \frac{9.6 \times 10^{-3}}{\pi} \dots \dots \dots (2)$$

L_{eq} : 各画素の光による等価光幕輝度値 (cd/m²)
 $L(x,y)$: 各画素の輝度値 (cd/m²)
 $\Delta\omega(x,y)$: 各画素の単位立体角 (sr)
 $\theta(x,y)$: 各画素に入射する光の鉛直角 (rad)

Table3-9 GR calculated from luminance distribution

Gymnasium	LED						HID				
	M	To	K	T	O	S	Y	H	E	To2	Ho
JIS classification	I	I	II	II	III	III	I	I	II	III	III
GR	18	15	17	14	5	7	14	14	15	17	17

3.4.3.2.2 視野内輝度分布画像の輝度値

「3.1. はじめに」で述べた通り LED には発光面積が小さい、指向性が強いなどの特徴があり、視方向によっては極めて高輝度となる可能性がある。仰角別の輝度分布測定結果について、算術平均輝度と幾何平均輝度による検討を行った。施設別、仰角別、コートサイド別の算術平均輝度と幾何平均輝度を Fig.3-8 に示す。輝度の算術平均は 30~900 cd/m²、幾何平均は 4~70 cd/m² であった。

算術平均輝度、幾何平均輝度について、光源種類による差があるかを確認するため、光源種別 (LED と HID) を因子とした一元配置分散分析を行った。その結果、算術平均輝度、幾何平均輝度ともに、LED と HID の間に有意差は認められなかった。

算術平均輝度は、施設 To2 と Ho を除き仰角が大きいほど高い。一方で幾何平均輝度は、仰角 0 度よりも 90 度の方が低い施設が 11 件中 6 件あった。仰角 0 度に比べて仰角 45 度、90 度の算術平均輝度は幾何平均輝度と大きな差があり、仰角 45 度、90 度では極端な高輝度部分が存在する可能性が考えられた。

測定された画像内に極端な高輝度部分が存在する可能性が考えられたが、3.3 に示したように、最大輝度は画像測光システムに用いるカメラの解像度などの影響を受ける^{10,11)} ので、ここではパーセンタイル値での比較を試みた。施設別、仰角別、コートサイド別の高輝度からの 0.1%、0.5%、1%、50%タイル値 (中央値) を Fig.3-9 に示す。仰角 90 度では、施設 M (LED) と施設 H (HID) の 0.1%タイル値が 10⁵ cd/m² を超えていた。全体では、仰角 90 度の輝度の 0.1%タイル値が 40,000cd/m² を超える施設は、全体の 11 件中 7 件あ

った。輝度の 50%タイル値はいずれの施設、仰角でも概ね 10~100cd/m²であった。

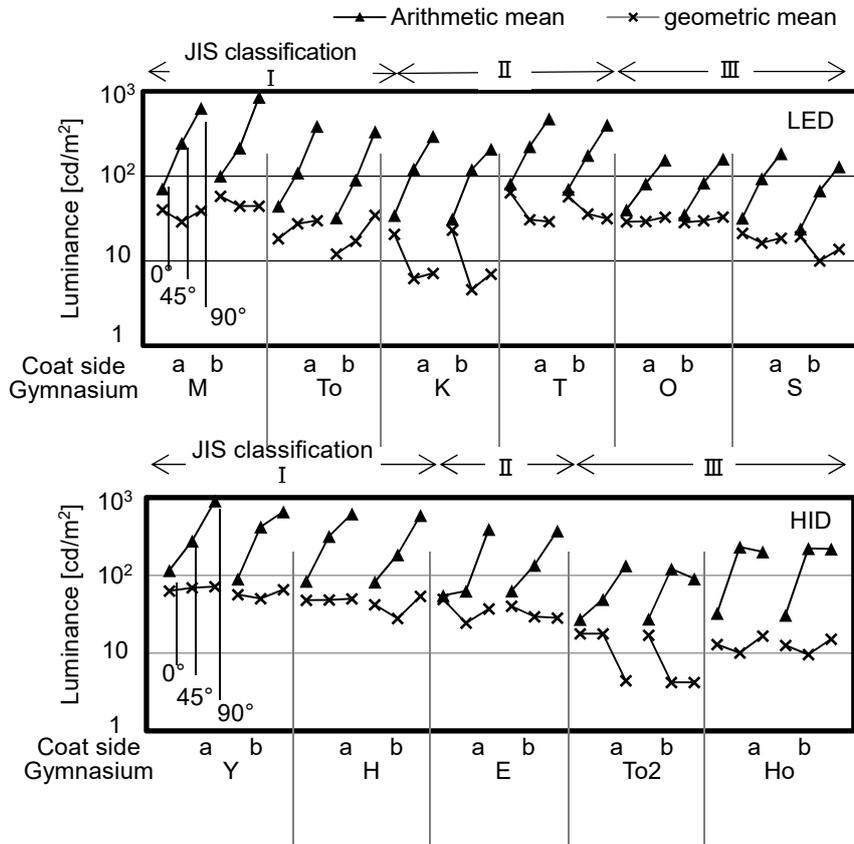


Fig.3-8 Arithmetic mean and geometric mean of luminance at each elevation angle from each coat side (gymnasiums with LED (upper) and gymnasiums with HID (lower))

一般的には仰角が大きいほど、また JIS 競技区分のレベルが高いほど輝度が高くなると考えられる。しかし、Fig.3-9 では仰角が大きいほど、また JIS 競技区分のレベルが高いほど輝度が高いと言えない結果も見られた。仰角、JIS 競技区分による輝度値の差を検討するため、仰角、JIS 競技区分をそれぞれ因子とした一元配置分散分析を行った。その結果、0.1%、0.5%、1%タイル値は、仰角の間に有意差 (1%) が認められた。50%タイル値は、仰角の間には有意差は認められなかった。JIS 競技区分の間には、全てのパーセンタイル値で有意差が認められた (0.1%タイル値、1%タイル値は 5%有意、0.5%タイル値、50%タイル値は 1%有意)。輝度の 0.1%、0.5%、1%タイル値は、仰角 90 度 > 45 度 > 0 度の順で有意に高くなった。また、輝度の 0.1%、0.5%、1%、50%タイル値は、JIS 競技区分 I > II > III の順で有意に高くなった。

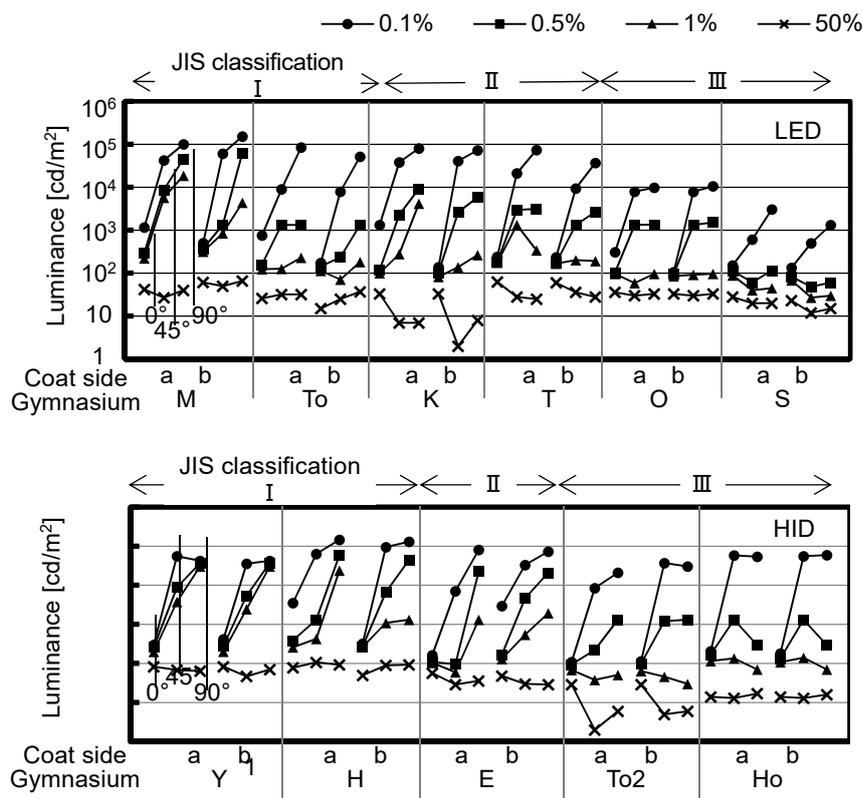


Fig.3-9 Percentile value of luminance at each elevation angle from each coat side (gymnasiums with LED (upper) and gymnasiums with HID (lower))

3.4.3.3 発光部内輝度分布

発光部内の平均輝度を算出するには、発光部を定義する必要があるが、特に発光部内の輝度が不均一な場合、発光部の定義が困難になる。ここでは、発光部は、照明器具の輝度分布測定結果のうち輝度 $1,000\text{cd/m}^2$ 以上の部分とした。Fig.3-10 に仰角別の発光部内の平均輝度 ($1,000\text{cd/m}^2$ 以上の平均輝度、図中プロットで示す) と標準偏差 (ヒゲ) を示す。

仰角 60 度以上では、すべての体育館で発光部内の平均輝度は $20,000\text{cd/m}^2$ 以上となった。LED 照明器具の施設では、施設 T と S を除き仰角が大きいほど発光部内の平均輝度は高かった。HID の施設では、施設 H と E を除き、仰角が大きいほど発光部内の平均輝度は高かった。

発光部内の平均輝度について、仰角 (90 度、 75 度、 60 度、 45 度、 30 度)、JIS 競技区分 (I、II、III)、光源種類 (LED、HID) をそれぞれ因子とした一元配置分散分析を行った。その結果、仰角によって発光部内の平均輝度は有意 (1%) に異なった。また、LED 照明器具と HID 照明器具では、LED 照明器具の方が発光部内の平均輝度は有意 (1%) に高かった。JIS 競技区分間に有意差は認められなかった。

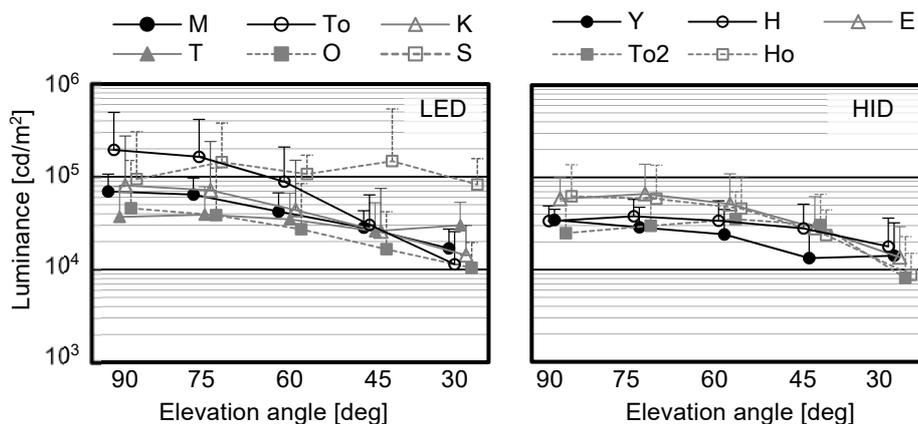


Fig.3-10 Average luminance within light source at each elevation angle (gymnasiums with LED (left side) and gymnasiums with HID (right side))

Fig.3-11 に仰角 90 度の LED 照明器具と HID 照明器具の発光部内の輝度分布画像を示す。照明器具の発光部内輝度の比較は、総光束、配光などの照明器具仕様と測定条件をそろえる必要があるが、現場実測では難しい。施設 To (LED) と H (HID) は、ともに JIS 競技区分 I での利用が想定され、規模や照明器具設置高さなどから設計条件が近いと考えられる。Table3-2 に示した通り照明器具の総光束は施設 To (LED) に対して施設 H (HID) は約 2 倍である。ただし、施設 To (LED) は 5m×5m の配置間隔で 84 台の照明器具が、施設 H (HID) は 15.0m× 6.0m の配置間隔 (15m×60m の平面への器具配置が 2 面) で 100 台^{注 6)}の照明器具が設置されており、照明器具台数に 2 倍の差はない。施設 To (LED) に比べて施設 H (HID) は広い配光の照明器具を用いていると考えられる。照明器具の総光束、配光は異なるが、JIS 競技区分が等しく平均照度が近い条件で、LED 照明器具と HID の照明器具の発光部内輝度を比較した。

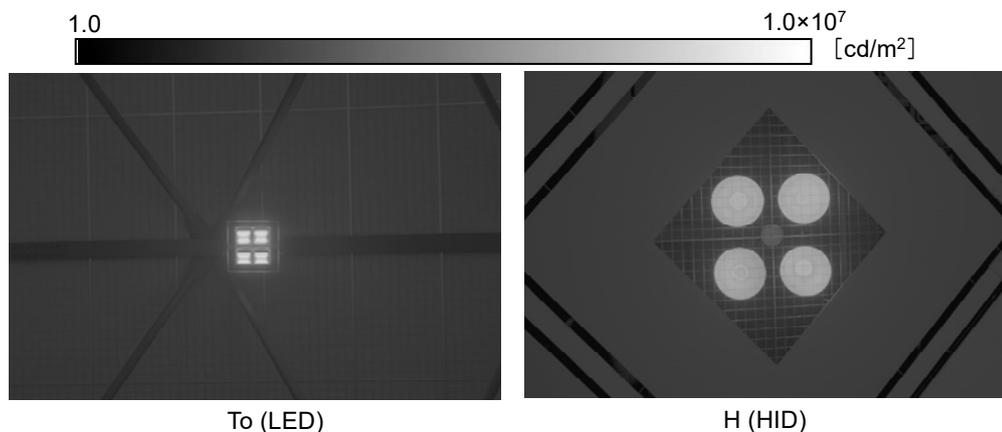


Fig.3-11 Luminance distribution of gymnasium To (left side : LED) and gymnasium H (right side : HID) at 90 deg

施設 To (LED) は 4 つのユニットを 1 台の器具に構成しているが、施設 H (HID) は 4 つの器具を纏めて 1 か所に設置している。施設 H (HID) は施設 To (LED) と比べると、1 か所あたりの発光部の面積が大きかった。発光部内の輝度は施設 To (LED) の方が施設 H (HID) より高い。施設 To (LED) と施設 H (HID) の発光部内の輝度を $10^{3.0} \sim 10^{3.1}$ 、 $10^{3.1} \sim 10^{3.2}$ 、 $10^{3.2} \sim 10^{3.3}$... のように範囲に分け、それぞれの平均輝度と、その輝度の範囲にある立体角を示したヒストグラムを Fig.3-12 に示す。Fig.3-11 の輝度分布画像からも分かるように、発光部の立体角は、施設 To (LED) より施設 H (HID) の方が大きい。施設 To (LED) は輝度 $10^5 \sim 10^6 \text{ cd/m}^2$ の部分が多く、施設 H (HID) は $10^4 \sim 10^5 \text{ cd/m}^2$ の部分が多い。施設 To (LED) は施設 H (HID) に比べて発光部の立体角は小さいが、 10^5 cd/m^2 以上の輝度となる部分の立体角は、施設 To (LED) で $4.93 \times 10^{-4} \text{ sr}$ 、施設 H (HID) で $4.88 \times 10^{-4} \text{ sr}$ であった。施設 To (LED) と施設 H (HID) は、JIS 競技区分は等しいが、照明器具の発光部内輝度分布は大きく異なり、競技者に与える照明器具の影響は、施設 To (LED) と施設 H (HID) とで異なると考えられる。

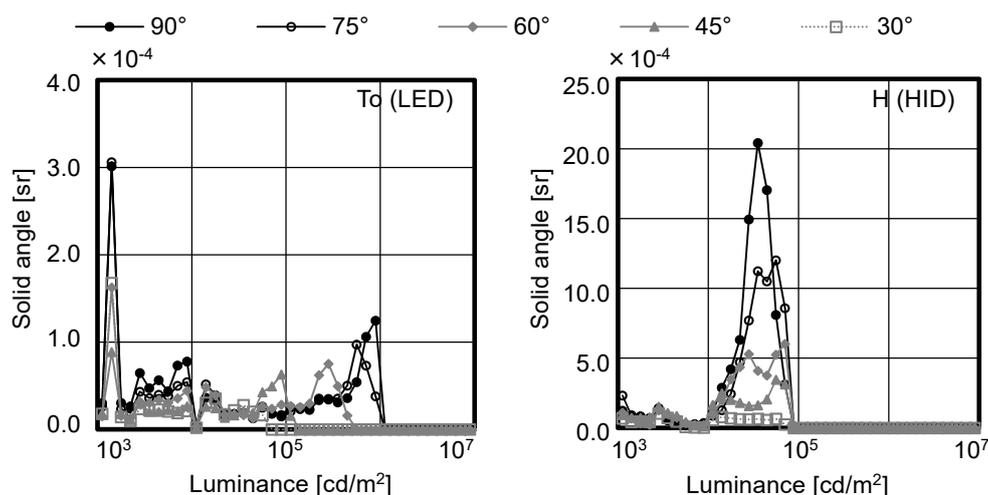


Fig.3-12 Luminance histogram of gymnasium To (left side : LED) and gymnasium H (right side : HID) at each elevation angle

3.5. まとめ

屋内スポーツ施設の視環境を把握するため、LED 照明器具の施設 6 件、HID 照明器具の施設 5 件について実測を行った。屋内スポーツ施設の照明については、一般的には床面照度、照度均斉度を評価し、加えてグレアが懸念される場合には不快グレア指標 GR を評価する場合がある。しかし、本研究では競技中の視野に入る照明器具からの光によるグレアを対象としており、GR とは異なる評価が必要と考えられる。そこで、床面照度、照度均斉度の評価に加えて、視野内の輝度分布、照明器具の発光部内の輝度分布による評価を

試みた。

本研究ではバドミントン競技を想定したが、屋内スポーツ施設の多くは特定の競技専用ではなく兼用で利用される。このため、本研究では JIS Z 9127:2011⁵⁾の「屋内運動場」の場合の方法に従い、壁から 2m 以内の位置において屋内スポーツ施設半面の照度を測定した。屋内スポーツ施設半面の測定結果から照度均斉度を求めた結果、施設 11 件中 5 件でバドミントン競技における照度均斉度の推奨値を満たしていなかった。バドミントンコートをも想定した場合の測定結果から算出した照度均斉度は、全施設において相当する JIS 競技区分の推奨値を満足していた。

輝度分布測定では、測定輝度は画像測光システムに用いるカメラの性能による影響を受けるので、評価目的に合わせて画像測光システムを使い分けた。

視野内輝度分布は、視野全体を捉えることを優先して広角レンズを用いて測定し、輝度を高い方から並べた 0.1%、0.5%、1%、50%タイル値による評価を行った。輝度の 0.1%、0.5%、1%タイル値は、仰角 90 度 > 45 度 > 0 度の順で有意に高くなった。また、輝度の 0.1%、0.5%、1%、50%タイル値は、JIS 競技区分 I > II > III の順で有意に高くなった。なお、視野内輝度分布より GR の算出を試みた結果、いずれの施設も GR20 以下であった。GR は、LED 照明器具と HID 照明器具の間および JIS 競技区分間での有意差は認められなかった。

発光部内輝度分布は、高い解像度のカメラの方が高輝度部分の輝度を捉えられるため狭角レンズを用いて測定し、輝度 1,000 cd/m² 以上を発光部として解析した。その結果、仰角によって発光部内の平均輝度は有意に異なった。また、LED 照明器具と HID 照明器具では、LED 照明器具の方が発光部内の平均輝度は有意に高かった。LED 照明器具と HID 照明器具の比較を行うため、施設の規模や照度条件などの値がほぼ等しい施設 To (LED) と施設 H (HID) を対象に検討を行った。施設 To (LED) は施設 H (HID) に比べて発光部の立体角は小さいが、10⁵ cd/m² 以上の輝度となる部分の立体角は、施設 To (LED) で 4.93×10⁻⁴ sr、施設 H (HID) で 4.88×10⁻⁴ sr であった。

視野内輝度分布の測定結果から、仰角が大きくなると、また JIS 競技区分のレベルが高くなるほどグレアの程度が大きくなると考えられた。しかし、発光部内輝度分布の測定結果からは、同じ JIS 競技区分でも発光部の大きさと輝度の範囲が施設により異なることから、同じ JIS 競技区分でも、競技者に与える照明器具の影響は施設により異なることが示唆された。

注

注1) 区分 I: 観客のいる国際、国内、地域全体又は特定地域における最高水準の運動競技会。最高水準のトレーニング。区分 II: 観客のいる地域全体又は特定地域における一般的な運動競技会。高水準のトレーニング。区分 III: 観客のいない特定地域の運動競技会、

学校体育又はレクリエーション活動。一般のトレーニング。

注2) GR の算出式

$$GR = 27 + 24 \log_{10} \left(\frac{L_{vl}}{L_{ve}^{0.9}} \right)$$

$$L_{vl} = L_{v1} + L_{v2} + \dots + L_{vn}$$

$$L_{vn} = 10 \times \frac{E_{eye}}{\theta^2}$$

$$L_{ve} = \frac{0.035 \times \rho \times E_{hav}}{\pi}$$

L_{vl} : 個々の照明器具によって生じる等価光幕輝度 (cd/m ²) の合計
L_{vn} : 個々の照明器具の光幕輝度 (cd/m ²)
E_{eye} : 観測者の視線 (俯角 2 度) に対して垂直な面の照度 (lx)
θ : 観測者の視線 (俯角 2 度) と個々の照明器具とのなす角 (°)
L_{ve} : 環境の等価光幕輝度 (cd/m ²)
ρ : 領域 (地面など) の平均反射率

注3) 詳しい調査方法は、参考文献 8) を参照されたい。

注4) 大規模の屋内スポーツ施設においては、測定点が多くなり測定に時間を要する。首都圏の屋内スポーツ施設の稼働率は高く、測定許可を得られる施設は限定される。

注5) 平均照度の算出式

$$E = \left(\frac{1}{4n} \right) (\sum_{i=1}^4 (E_{田} i) + 2 \times \sum_{i=1}^o (E_{\Delta} i) + 4 \times \sum_{i=1}^p (E_{\circ} i))$$

E : 水平面の平均照度 (lx)
 $E_{田} i$: 隅点の照度 (lx)
 $E_{\Delta} i$: 辺点の照度 (lx)
 $E_{\circ} i$: 内点の照度 (lx)
 o : 辺点の数
 p : 内点の数
 n : 分割線で囲まれたます目の数

※本研究では半面での測定のため、隅点は 4 点ではなく 2 点で計算した。

注6) Table3-2 に示した通り、1 か所につき照明器具が 2 台もしくは 4 台設置されている。

参考文献

- 1) 篠原奈緒子, 岩田利枝, 望月悦子, 谷口智子, 海宝幸一: 照度および輝度分布実測 屋内スポーツ施設における視環境評価 その1, 日本建築学会環境系論文集, 第85巻, 第778号, pp.943-952, 2020.12
- 2) 田中武, 高地正夫, 池田篤志, 葛原秀男, 松下光一, 呉浩廷, 栗栖慎也: LEDを用いたアリーナのスポーツ照明と, その設置例, 広島工業大学紀要研究編, 第51巻, pp.231-241, 2017
- 3) 公共施設用照明器具, 日本照明工業会, JIL5004-2015
- 4) 歩行者の安全・安心のための屋外照明基準, 照明学会, 照明学会・技術基準 JIES-010, 2014
- 5) JIS Z 9127:2011, スポーツ照明基準, 日本規格協会
- 6) 照明学会編: 照明ハンドブック, オーム社, 2003
- 7) 東 洋邦, 佐々木 淳, 古賀 翔大, 羽生田 有美: 高輝度発光面がボール消失現象に与える影響, 照明学会誌, 第100巻, 第6号, pp.234-237, 2016
- 8) LED スポーツ照明の直視グレアに関する研究調査委員会報告書, 照明学会, JIER-125, 2016
- 9) 新里 雅巳, 滝澤 総, 篠原 奈緒子: さいたまスーパーアリーナの現状と今後の展望, BELCA NEWS, Vol.31, No.169, pp.11-14, 2019
- 10) Slominski S.: Identifying problems with luminaire luminance measurements for discomfort glare analysis, Lighting Research and Technology, Vol.48, pp.573-588, 2016
- 11) Shinohara, Naoko., Futami, Ken., Taniguchi, Tomoko., Mochizuki, Etsuko., Iwata, Toshie.: Measurement of Luminance Distribution of LED floodlights, Proceedings of the 9th Lighting Conference of China, Japan and Korea, PT-70, 2016
- 12) M. Luckiesh, S. K. Guth: Brightness in Visual Field at Borderline Between Comfort and Discomfort (BCD), Journal of the Illuminating Engineering Society, 44-11, pp.650-670, 1949
- 13) 岡野幸夫: デジタルスチルカメラのMTF 解析とその測定, 日本写真学会, pp.232-240, 1997
- 14) 岩井彌: スポーツ照明のグレア評価における輝度分布測定の課題, 照明学会誌, 第102巻, 第4号, pp.150-154, 2018
- 15) <https://www.iwasaki.co.jp/tech-rep/technical/95/>, (accessed 2019-09-15)

第4章 スポーツ照明グレアの検証

第4章 スポーツ照明グレアの検証

4.1. はじめに

照明器具の LED 化が加速し、スポーツ照明分野における照明器具の LED 化も進んでいる。第3章で説明したように LED 照明器具の発光面積が小さい、指向性が強いなどの特徴から、スポーツ施設におけるグレアの発生が懸念される。第3章で測定した照明器具の発光部内輝度は、LED 照明器具の方が従来照明器具 (HID) に比べて有意に高かった。LED 照明器具の高い発光部輝度がグレアに影響する可能性がある。また、現在スポーツ施設に用いられる LED 照明器具の発光部は、複数の LED 素子を組み合わせて構成されており、従来照明器具に比べて発光部輝度は不均一となる。LED 照明器具の発光部内輝度の不均一性がグレアに影響すると言われている^{1),2)}など。

スポーツ照明基準 JIS Z 9127:2011³⁾ では、照度、照度均斉度、グレア制限値および演色性に関する推奨値が、競技種別、運動競技区分別^{注1)}に定められている。グレア制限値は GR^{4),注2)}を用いることになっており、屋外スポーツ施設についてのみ定められている。屋内スポーツ施設には GR の適用は可能とされているもののグレア制限値は定められていない³⁾。GR は、俯角 2 度 (水平下向き 2 度) の視線での評価であり、照明器具を直視する場合は想定していない。しかし、屋内スポーツ施設では、視線より高い位置にあるボールなどを追うことが主となる競技があり、この場合、頻繁に競技中の視野に直接照明器具が入る。俯角 2 度の視線で評価している GR とは異なる評価が必要と考えられる。

スポーツ照明のグレアに関連する研究がみられる。硬式野球を想定し、視対象が照明器具の近くを通る際に視対象を見失う場合の照明器具の輝度に関する研究では^{5),6)}、視対象となるボールの見え方を評価しており、照明器具が視対象の背景にあり視対象が見えにくくなる現象のみを取り扱っている。照明器具からの光によるグレアやその後の競技への影響などについては評価していない。田代ら⁷⁾は、野球場で LED 照明器具を直視した場合の視機能への影響に関する被験者実験で、照明器具の大きさよりも照明器具の発光部内輝度や呈示時間が残像継続時間や視力回復時間に影響することを示し、山田ら⁸⁾は、野球場での競技を想定した被験者実験で、照明器具を直視した場合に競技に影響を与えはじめる発光部内輝度値を示している。これらは夜間の屋外の野球場を想定しており、屋内スポーツ施設に用いる照明器具に比べて発光面積が大きく、背景輝度の設定が 5cd/m^2 と低い。田中ら⁹⁾は屋内スポーツ施設を対象に、グレアを感じる LED 照明器具の輝度や LED 照明器具の背景にある色紙の色の視認性に関する被験者実験を行い、直視グレア式 HGR を提案している。視点から照明器具までの距離 5m の実験室実験で、照明器具の設置高さが低い屋内スポーツ施設を対象としていると考えられる。

スポーツ照明に限らなければ、LED 照明器具からのグレアに関する研究は多数報告されている。近年では、照明器具の LED 化に伴い発光部内輝度が均一ではなく不均一とな

ったことに関する研究が多くみられる。屋内施設のグレア評価では一般的には UGR¹⁰⁾、^{注 3)} が用いられ、JIS Z 9110:2010¹¹⁾で制限値が定められている。しかし、UGR は発光部内輝度が均一であることを前提としており、発光部内輝度が不均一となる LED 照明器具のグレア評価への適用の可否の議論がされている^{12)~14)}など。発光部内輝度が不均一な照明器具を対象とした UGR に関する研究では、発光部内の平均輝度を用いて計算した UGR より実際に主観申告させた場合のグレアの程度が大きくなることが示されている^{15)~17)}。CIE では、発光部内輝度が不均一な照明器具のグレア評価には UGR の利用は適さないため、UGR の計算に用いる発光部内輝度について、有効な発光部の領域を抽出して計算する方法を示している¹⁸⁾。

照明器具を直視した場合のグレアの研究では、森¹⁹⁾は、歩行者用の街路灯を模したグレア評価実験で、発光部内輝度が不均一な照明器具の方が均一な照明器具に比べてグレアを感じやすいことを示している。また、岩崎ら²⁰⁾は、400W 相当の高出力照明器具を対象としたグレア評価実験で、全ての LED 照明器具が HID 照明器具よりグレアの程度が大きくなるわけでないが、LED 照明器具に拡散カバーを設けることでグレアを抑制できることを示している。

これらより、屋内スポーツ施設においても LED 照明器具の発光部内輝度が不均一となるために従来照明器具に比べてグレアの程度が大きくなる可能性がある。屋内スポーツ施設で用いられる従来照明器具は一つの光源で構成されているため、複数の LED 素子を組み合わせ発光部を構成している LED 照明器具のような不均一さは無いが、従来照明器具を直視した場合のグレア評価に関する研究事例はない。

本研究は、屋内スポーツ競技中の視野に入る照明器具からの光によるグレアを評価することを目的とした。第 3 章では、LED 照明器具の施設 6 件と従来照明器具 (HID) の施設 5 件の計 11 件の屋内スポーツ施設において照度、輝度分布実測を行い、仰角が大きいほど視野内輝度、発光部内輝度が高いことを示した。視野内輝度分布の測定結果を用いて算出した GR 値は、いずれの施設も 20 以下と低かった。本章では、第 3 章で照度、輝度分布実測を行った LED 照明器具の施設 6 件、従来照明器具 (HID) の施設 5 件の計 11 件の屋内スポーツ施設において、頻繁に競技中の視野に照明器具が入ると考えられるバドミントン競技を想定した現場におけるグレア評価実験を行った。競技中に発生する照明器具からのグレアに影響する変数を抽出した結果を論じる。

4.2. 実験方法

4.2.1 実験概要

スポーツ競技中の視野に入る照明器具のグレアを評価するため、バドミントン競技を行っている状況を模したグレア評価実験を実施した。実験を行った施設と被験者の概要を Table4-1 に示す。LED 照明器具の施設と HID 照明器具の施設について、実験実施許可を

得られた 11 施設を対象とした^{注4)}。施設 T は LED 照明器具と HID 照明器具の両方が設置されていたが、競技エリアには LED 照明器具が設置されていたため、LED 照明器具の施設に分類した。照明器具は、施設 Y は天井埋込型で、その他は天吊型の高天井用照明器具であった。床面平均照度は、第 3 章で JIS Z 9127:2011³⁾の「屋内運動場」の方法^{注5)}に従い、各施設半面の床面照度分布^{注6)}の測定結果 (KONICA MINOLTA CL-200) より算出した値で示す。各施設で想定される運動競技の区分は、床面平均照度より JIS Z 9127:2011 によるバドミントン競技の場合の区分³⁾に基づき第 3 章で分類した^{注7)} (以降、競技区分と記す)。被験者は大学生で、各施設 10 名以上とした。平均年齢は 21 歳前後であった。競技としてバドミントンを日頃より行っている被験者は、競技中の視野に照明器具が入る状態を頻繁に経験していると考えられ、一般の評価者とは異なる評価を行う可能性がある。そのため、バドミントン部に所属している学生を経験者とし、その他は未経験者に分類した。

競技中に発生すると考えられるグレアの問題は、“競技中の視野に照明器具が入ることによる視対象となるシャトルの視認性の低減”と、“競技中の不快感の発生”がある。実際に競技を行っている状態での評価が好ましいが、照明器具と視対象となるシャトルの位置関係を特定するのが難しいため、評価位置を固定して実験を行った。

Table4-1 Outline of subjective experiment in gymnasium

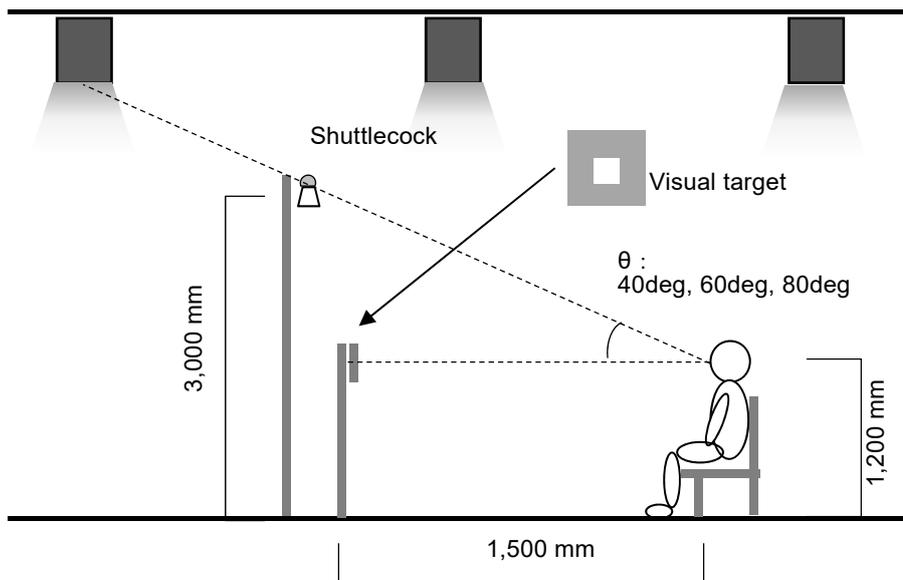
Gymnasium	M	To	K	T	O	S	Y	H	E	To2	Ho	
Light source	LED						HID					
Floor area: width x depth [m]	W:40.0 D:50.0	W:37.0 D:73.0	W:33.8 D:63.0	W:29.0 D:47.0	W:24.2 D:26.0	W:33.0 D:39.0	W:24.0 D:30.0	W:36.0 D:61.0	W:31.0 D:60.0	W:16.0 D:32.0	W:24.5 D:34.5	
Luminaire Height (Highest) [m]	16.5	13.2	15.6	14.3	11.0	7.6	12.7	12.9	14.3	6.4	8.1	
JIS Classification ³⁾	I	I	II	II	III	III	I	I	II	III	III	
Average illuminance [lx]	1,387	859	700	630	447	259	1,054	980	662	483	393	
Subject [person]	Without experience	17	9	9	9	14	9	10	10	11	18	13
	With experience	7	10	6	2	2	11	6	0	0	0	0
	Total	24	19	15	11	16	20	16	10	11	18	13
	Average age	20.8	20.8	21.7	21.7	21.8	21.8	21.1	20.3	20.5	20.0	20.6

4.2.2 被験者実験

4.2.2.1 実験条件および手順

実験は、Fig.4-1 に示すように視対象となるシャトルの背景に照明器具が入るように被

験者、シャトル、照明器具の位置関係を設定した。競技中は視線が動き固定されず、天井を見上げる際の仰角によって照明器具の見え方が変わることから、実験条件の仰角は 40 度、60 度、80 度の 3 条件を設定した。評価する照明器具を指定し、被験者の評価位置を変えて仰角を設定して実験した。視認性評価視標はバドミントンのシャトルを想定し、視線上 1.5m 先にシャトルがある場合の立体角に合わせた大きさ (0.007sr) の白色の正方形視標とした。指標近傍の背景は、各屋内スポーツ施設の内装壁面の平均的な反射率に合わせた灰色とすることにした。事前に内装壁面の反射率を確認できなかったため、背景の灰色の反射率を 11 段階で変えた (反射率 8%~74%) 視認性評価視標をあらかじめ用意し、この中から現地で測定した反射率に近いものを選定して用いた。反射率は、各施設の内装壁面の平均輝度とその施設で測定した標準白色板の輝度、標準白色板の反射率より算出した。競技中にシャトルを追う際にシャトルと照明器具が重なる場合と照明器具を直接見た場合のグレアを評価するため、シャトルの背景に照明器具が有りシャトルに焦点のある場合と、シャトルが無く照明器具に焦点がある場合の 2 条件で評価した。



Distance from evaluation point to shuttlecock or luminaire

Elevation angle [deg]	X1 [m]	X2 in each gymnasium [m]										
		LED					HID					
		M	To	K	T	O	S	Y	H	E	To2	Ho
40	4.7	23.8	18.7	22.4	20.4	15.2	10.0	17.9	18.2	20.4	8.1	10.7
60	3.5	17.7	13.9	16.6	15.1	11.3	7.4	13.3	13.5	15.1	6.0	8.0
80	3.0	15.5	12.2	14.6	13.3	10.0	6.5	11.7	11.9	13.3	5.3	7.0

Fig.4-1 Experiment setup

実験は、競技中にシャトルを追う視線を再現し、“競技中の視野に照明器具が入ることによる視対象となるシャトルの視認性の低減”と、“競技中の不快感の発生”を評価するため、次の手順で行った。被験者は指定された椅子に着席し、①1.5m 先の目線高さにある視認性評価視標を 2 秒間注視、②視線先の高さ 3m 位置に設置されたシャトル（シャトルがない場合は照明器具）を 2 秒間注視、③最初に見た視認性評価視標に視線を戻す、④アンケートに回答の順に行った。アンケートの内容を Table4-2 に示す。Table4-2 中の評価スケールに示した数字はアンケートには記載していないが、評価結果を解析する際に用いた。シャトル有無のそれぞれの条件における視認性評価視標の見やすさ（見えない～見やすいの 5 段階）、シャトル有の場合のシャトルの見やすさ（見えない～見やすいの 5 段階）、シャトル有無のそれぞれの条件における照明器具のグレア（気にならない～耐えられないの 5 段階）、競技中に提示した条件に曝露された場合にバドミントンを行う照明環境として許容できるか（許容できる、できないの 2 段階、以降は視環境の許容度と記す）について質問した。被験者はシャトルの背景に照明器具が有りシャトルに焦点がある条件で①～③を行った後、④でシャトル有りの項目に回答した。その後、シャトルが無く照明器具に焦点がある条件でもう一度①～③を行った後、④でシャトル無しの項目と視環境の許容度について回答した。これを仰角 80 度、60 度、40 度の順に繰り返した。本論文その 1¹⁾で測定した視野内輝度および発光部内輝度は、仰角が大きいほど輝度は有意に高かった。よって、仰角が大きい条件ほど指標が見えづらく照明器具からのグレアを感じやすいと考え、仰角の大きい順に評価を行った。

Table4-2 Questionnaire

Shuttle-cock	Questionnaire	Evaluation scale
Available	A: Visibility of target	1:Not visible 2:Very hard to see 3:Hard to see 4:Slightly hard to see 5:Easy to see
	B: Visibility of shuttlecock	1:Not visible 2:Very hard to see 3:Hard to see 4:Slightly hard to see 5:Easy to see
	C: Glare from luminaire	1:Unnoticeable 2:Tolerable 3:Just admissible 4:Disturbing 5:Unbearable
Not available	D: Visibility of target	1:Not visible 2:Very hard to see 3:Hard to see 4:Slightly hard to see 5:Easy to see
	E: Glare from luminaire	1:Unnoticeable 2:Tolerable 3:Just admissible 4:Disturbing 5:Unbearable
	F: Acceptability of the visual environment	1:Acceptable 2:Unacceptable



Fig.4-2 State of the experience

4.2.2.2 測定

被験者によるグレア評価値が注視している視野内の輝度分布と関係するかを検討するため、被験者の視線方向の輝度分布（以降は視野内輝度分布と記す）を測定した。Fig.4-1の位置関係で被験者の視線高さにカメラを設置し、仰角 40 度、60 度、80 度のシャトル有無の各条件において、評価対象となるシャトルまたは照明器具が画像中央に配置されるように撮影した（Fig.4-3）。

輝度分布測定に用いる測定システムの概要と測定時の設定内容を Table4-3 に示す。視野内輝度分布測定には一般的には魚眼レンズが用いられるが、この場合は解像度が低くなり^{注8)}、照明器具の正確な発光部内輝度の測定が難しい²¹⁾。視野内にある照明器具の発光部内輝度の測定を優先して、第3章で用いた狭角タイプのレンズを用いた。人間が瞬時に情報を受容できる範囲（有効視野）は、水平 30 度、垂直 20 度の楕円状範囲²²⁾とされている。本測定で用いたレンズの画角は 28.5 度で、概ね有効視野内の輝度測定が可能と判断した。測定範囲を超える高輝度部が存在するため、レンズに透過率 0.1%の ND フィルター（Edmund 吸収型 ND フィルター OD3.0 50mm）を装着する場合としない場合とで測定した。一条件につき Table4-3 に示したシャッタースピード 1/4,000, 1/2,000, 1/250, 1/60, 1/15, 1/4 の 6 枚を、ND フィルターの装着有無の計 12 枚撮影し、それらの写真の階調値から輝度値を算出した。12 枚の写真から算出した輝度値を合成して輝度分布画像を作成し、解析に用いた。

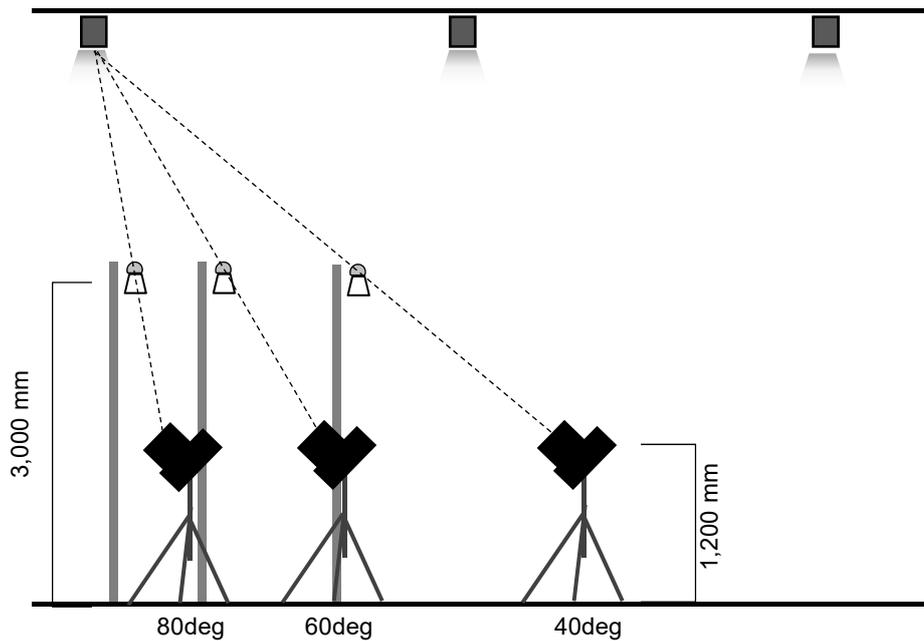


Fig.4-3 Measurement setup

Table4-3 Outline of luminance measurement system

Camera and lens	Resolution [minute / pixel]	ISO sensitivity	Aperture	Shutter speed [s]
NIKON D3300 NIKON AF-S DX NIKKOR18-55 (Focal length: 55mm, View angle: 28.5 deg)	0.285	100	5.6	1/4000, 1/1000, 1/250, 1/60, 1/15, 1/4

4.3. 実験結果

4.3.1 グレア評価結果

4.3.1.1 正規性の確認

各施設の仰角 40 度, 60 度, 80 度のシャトル有無の全 66 条件 (11 施設×仰角 3 条件×シャトル有無の 2 条件) における被験者評価結果の正規性を確認した。正規性が確認された割合は、シャトル有りの場合の 33 条件 (11 施設×仰角 3 条件) では、視認性評価視標の見やすさが 15%、シャトルの見やすさが 24%、照明器具のグレアが 6%であった。シャトル無しの場合の 33 条件(11 施設×仰角 3 条件)では、視認性評価視標の見やすさが 24%、照明器具のグレアが 6%であった。多くの条件で正規性は確認されなかった。よって本分析では、ノンパラメトリック検定を用いることとした。

4.3.1.2 経験者と未経験者の差の確認

バドミントン経験者は、競技中に頻繁にシャトルと照明器具の重なる状況を経験していると考えられ、未経験者と評価が異なる可能性がある。バドミントン経験者と未経験者として分析を分ける必要があるかを検討した。経験者と未経験者の混在する LED 照明器具の 6 施設 (M, To, K, T, O, S) と HID 照明器具の 1 施設 (Y) の経験者と未経験者の評価結果について、施設別にアンケート項目毎 (7 施設×6 項目の 42 条件) に 2 標本コルモゴロフ=スミルノフ検定を行った。その結果、施設 To のシャトル無しの照明器具のグレアについては経験者と未経験者との間で有意差 (5%) が認められたが、その他は経験者と未経験者との間で有意差は認められなかった。経験者と未経験者を区別せずに分析することにした。

4.3.1.3 総合評価に影響する評価項目の検討

本実験の各項目の評価結果の相関を調べた。各施設、各条件における被験者評価の中央値を用いた場合の相関係数と、各条件における全被験者評価値を用いた場合の相関係数を Table4-4 に示す。本実験結果では、多くの条件で正規性は確認されなかった。中央値ではデータ全体の分布が反映されないため、中央値を用いた場合と全被験者評価値を用いた場合とを確認した。中央値を用いた場合は、シャトル有りの照明器具のグレアとシャトル有りの視認性評価視標の見やすさ、シャトルの見やすさ、およびシャトル無しの視認性評価視標の見やすさとシャトル有りの照明器具のグレアについて負の相関係数が 0.7 程度と他に比べて高かった。全被験者評価値を用いた場合は、シャトル有りの照明器具のグレアとシャトルの見やすさについて負の相関係数が 0.7 程度と他に比べて高かった。いずれも中程度から高い相関であった。

Table4.4 Correlation coefficient between each evaluation

		Median value					
		A	B	C	D	E	F
All data	A		0.66	-0.72	-0.61	-0.42	0.60
	B	0.57		-0.71	-0.50	-0.35	0.49
	C	-0.55	-0.74		-0.73	0.67	-0.69
	D	0.50	0.42	-0.45		-0.69	0.65
	E	-0.37	-0.43	0.60	-0.66		-0.53
	F	0.40	0.45	-0.53	0.54	-0.58	

- A: Visibility of target (The focus is on the shuttlecock)
- B: Visibility of shuttlecock
- C: Glare from luminaire (The focus is on the shuttlecock)
- D: Visibility of target (The focus is on the luminaire)
- E: Glare from luminaire (The focus is on the luminaire)
- F: Acceptability of the visual environment

上述の通り相関関係では、被験者評価中央値、全被験者評価値ともにシャトル有りの照明器具のグレアとシャトルの見やすさで相関係数 0.7 程度の負の相関が認められた。本研究では、視環境の許容度が総合評価と考え、これに最も影響する評価項目の抽出を試みた。相関係数が 0.7 程度であったため、分析に当たっては全被験者評価値を用いて多重共線性の有無を確認した。視環境の許容度を目的変数とし、シャトル有無の各条件での視認性評価視標の見やすさ、シャトルの見やすさ、シャトル有無の各条件での照明器具のグレアを説明変数として重回帰分析を行い、VIF (Variance Inflation Factor) 値を確認した。VIF > 10 で多重共線性があると判断できるが、VIF は 1.79~2.97 であったため、多重共線性はないと判断した。

視環境の許容度を目的変数として、シャトル有無の各条件での視認性評価視標の見やすさ、シャトルの見やすさ、シャトル有無の各条件での照明器具のグレアを説明変数として判別分析を行った。分析には全被験者評価値を用い、線形結合する変数を除いた。結果を Table4-5 に示す。シャトル無しの照明器具のグレアが視環境の許容度に最も影響していた。判別の中率は、受け入れられないが 84%、受け入れられるが 78%で、全体は 80%であった。

Table4-5 Result of discriminant analysis

Explanatory variables	Discriminable coefficient	P value
A: Visibility of target (The focus is on the shuttlecock)	0.07	0.416
B: Visibility of shuttlecock	0.19	0.053
C: Glare from luminaire (The focus is on the shuttlecock)	-0.30	0.005 **
D: Visibility of target (The focus is on the luminaire)	0.37	p < 0.001 **
E: Glare from luminaire (The focus is on the luminaire)	-0.55	p < 0.001 **

** : 1% significant

4.3.1.4 仰角、競技区分、光源種類とグレア評価

視環境の許容度に最も影響していたシャトル無しの場合の照明器具のグレア評価結果を、施設別、仰角別に Fig.4-4 に示す。プロットは中央値を、ひげはそれぞれ 75% タイル値と 25% タイル値を示す。第 3 章では、全条件で GR 値は 20 以下で「あまり気にならない」という結果であったが、被験者のグレア評価は、「あまり気にならない」～「邪魔になる」でありグレアを感じている。仰角が大きくなるとグレア評価が高くなる施設が多いが、仰角による差がない施設も見られる。また、JIS Z 9127:2011³⁾による競技区分や光源種類 (LED と HID) ではグレア評価値に差がないように見える。第 3 章では、視野内輝度分布は仰角間および競技区分間で、発光部内度分布は仰角間および光源種類間で有意差が認められた。仰角間、競技区分間、光源種類間 (LED と HID) でグレア評価に有意差がな

いか確認した。

グレア評価値の各施設の仰角による差の検討には、ウィルコクソンの符号順位和検定を用いた。結果を Table4-6 に示す。仰角 40 度と 60 度では 11 施設中 6 施設で、仰角 40 度と 80 度では 11 施設中 7 施設で仰角が大きいほど有意にグレア評価値が高かった。仰角 60 度と 80 度の間でグレア評価値に有意な差が認められたのは、11 施設中 2 施設のみであった。全被験者評価値を用いた仰角別のウィルコクソンの符号順位和検定の結果も Table4-6 中に示した。仰角 40 度と 60 度、40 度と 80 度、60 度と 80 度の間で、仰角が大きい方がグレア評価値は有意（1%）に高かった。

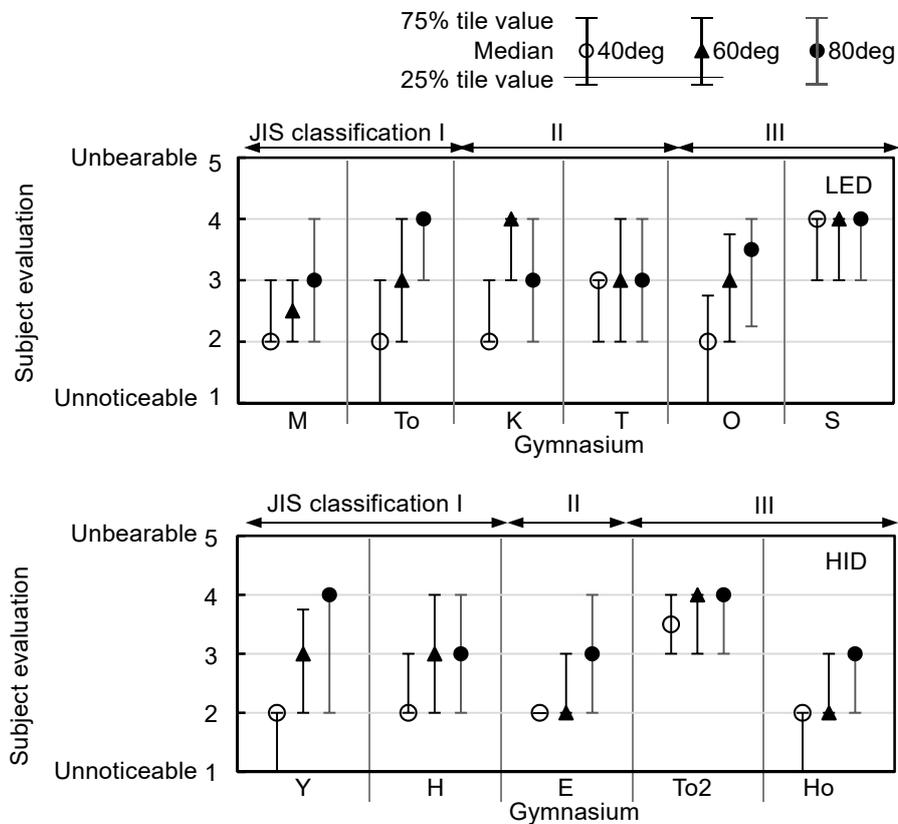


Fig.4-4 Evaluation of glare from luminaire (The focus is on the luminaire)

Table4-6 Results of mark rank sum test of wilcoxon of glare evaluation between elevation angle

Gymnasium	Elevation angle		
	40deg vs 60deg	40deg vs 80deg	60deg vs 80deg
M	0.004 **	0.001 **	0.139
To	0.176	0.011 *	0.028 *
K	0.006 **	0.067	0.214
T	0.686	0.116	0.178
O	0.002 **	0.001 **	0.093
S	0.345	0.361	0.116
Y	0.001 **	0.001 **	0.141
H	0.050 *	0.036 *	0.500
E	0.068	0.018 *	0.028 *
To2	0.463	0.345	0.593
Ho	0.012 *	0.005 **	0.161
All data	p < 0.001 **	p < 0.001 **	p < 0.001 **

競技区分による差の検討では、全被験者評価値を用いてウィルコクソンの符号順位和検定を行った。Table4-7 に結果を示す。競技区分 I と II の間にはグレア評価値に有意な差は認められなかったが、競技区分 I と III、競技区分 II と IIIの間には有意差 (5%) が確認され、高い照度が要求される競技区分の方がグレア評価値は有意に高かった。

光源種類 (LED と HID) による差の検討では、2 標本コルモゴロフ=スミルノフ検定を行った。各施設の被験者評価中央値を用いた検討および全被験者評価値を用いた検討を行った結果、いずれも光源種類間でグレア評価値に有意な差は認められなかった。

以上をまとめると、被験者は照明器具を直視した際、仰角が大きいほど、また高い照度が要求される競技区分ほどグレアを感じていたことが明らかとなった。

Table4-7 Results of mark rank sum test of wilcoxon of glare evaluation between JIS classification

Data type	JIS classification		
	I vs II	I vs III	II vs III
All data	0.853	0.019 *	0.019 *

*: 5% significant

4.3.2 被験者の視野内輝度分布測定結果

被験者実験で総合評価と考えた視環境の許容度に最も影響していたのはシャトル無し
の照明器具のグレアであったことから、シャトル無しの条件における被験者の視野内輝度
分布測定結果から、照明器具の発光部内の平均輝度を確認した。発光部内平均輝度を算出
するには発光部を定義する必要があるが、LED 照明器具の場合には発光部内輝度が不均
一となるため定義が難しい。ここでは、第 3 章と同様に、輝度分布測定結果のうち
 $1,000\text{cd/m}^2$ 以上の輝度を発光部内輝度とした。視野内にある照明器具の発光部内平均輝度
を算出した結果を Fig.4-5 に示す。施設 Ho 以外は仰角が大きいほど $1,000\text{cd/m}^2$ 以上の発
光部内平均輝度は高かった。仰角により有意差があるかを確認するため一元配置分散分析
を行った。結果を Table4-8 に示す。仰角が大きいほど $1,000\text{cd/m}^2$ 以上の発光部内平均輝度
は有意 (1%) に高かった。第 3 章でも仰角が大きいほど視野内輝度、発光部内輝度は有
意に高かった。

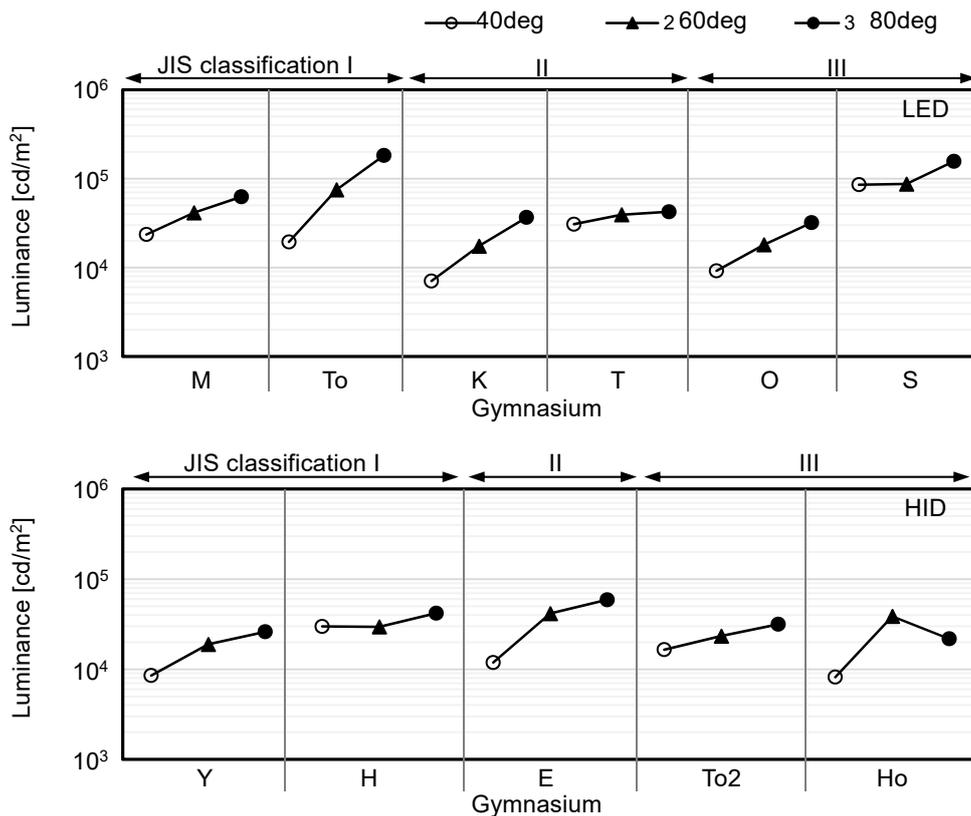


Fig.4-5 Average luminance of light emitting part with higher than $1,000\text{cd/m}^2$ at each elevation angle

Table4-8 Results of one-way analysis of variance of average luminance of light emitting part with higher than 1,000cd/m²

Content	Elevation angle	JIS classification	LED vs HID
P value	0.003 **	0.484	0.040 *

*: 5% significant, **: 1% significant

1,000cd/m²以上の発光部内平均輝度の競技区分、光源種類（LED と HID）による差についても、それぞれ一元配置分散分析により検討した。結果を Table4-8 に併記した。競技区分間では、1,000cd/m²以上の発光部内平均輝度に有意な差は認められなかった。光源種類間では、LED 照明器具の施設の方が HDI 照明器具の施設よりも 1,000cd/m²以上の発光部内平均輝度が有意（5%）に高かった。

4.4. グレアに影響する変数の抽出

本研究で扱うグレアは、スポーツ競技中に視野に直接照明器具が入ることで生じる減能グレアと競技中に不快感をもたらす不快グレアの両方が同時に起こる現象である。被験者位置で測定した 1,000cd/m²以上の発光部内平均輝度は仰角が大きいほど高く、被験者は仰角が大きいほどグレアを感じており、共通して仰角間で有意差が認められた。

グレアに影響する変数の抽出のため、被験者の視野内輝度分布測定結果からグレア評価値の予測を試みた。グレア評価値の予測に用いる変数は、不快グレア評価指標の式^{例えば 10,23,24)}を参考に検討した。不快グレア評価指標の式では、光源輝度（本研究における発光部内輝度）、背景輝度、立体角、視野平均輝度、ポジションインデックス、鉛直面照度などが用いられている。本研究では、発光部内平均輝度（発光部と定義した輝度以上の平均輝度）、発光部（発光部と定義した輝度以上の部分）の立体角、発光部内輝度の総量（発光部内平均輝度×発光部の立体角）、発光部以外の輝度を平均した背景輝度、輝度比（発光部内平均輝度÷背景輝度）を変数とした。また、屋内施設に一般的に適用されるグレア評価指標である UGR は、LED 照明器具のような発光部内輝度が不均一の場合の評価には適さないとされている¹⁸⁾が、本研究における被験者によるグレア評価結果では光源種類間（LED と HID）に有意差が認められなかったことから変数の一つに加えた。施設 To および S の輝度分布画像においては、LED 素子とそれ以外の部分を鮮明に見分けることができたことから、CIE で示している不均一な発光部の場合の発光部内輝度を補正した UGR'¹⁸⁾（式 1, 2 より求められる）の算出も試みた。UGR'の算出には有効な発光部を抽出して不均一性係数 *K*を求める必要がある。有効な発光部は、ヒトの目を見た時と同じように見えるように、高解像度で撮影した輝度分布画像をガウシアンフィルタによりフィルタリングしてから抽出することになっている。山田らは、視力 0.7 以上の被験者による実験で、ヒトが

視認できる視角寸法は 2 分程度であることを示している²⁵⁾が、石垣らのスポーツ選手の視力に関する調査²⁶⁾によれば、70%以上の選手の競技中の視力が 1.0 以上であった。ヒトの視力 1.0 として、0.285 分/pixel の画像を 1 分/pixel の画像となるように、ガウシアンフィルタによるフィルタリングを行った。有効な発光部は、本研究では、仰角 40 度の場合は 50,000cd/m² 以上、仰角 60 度の場合は 70,000 cd/ m² 以上、仰角 80 度の場合は 100,000 cd/ m² 以上とした^{注9)}。

$$UGR' = 8 \times \log \left(\frac{0.25}{L_b} \Sigma K^2 \frac{L^2 \times \omega}{P^2} \right) \quad \dots (1)$$

$$K^2 = \frac{L_{eff}^2 \times \omega_{eff}}{L^2 \times \omega} \quad \dots (2)$$

- K : 不均一性係数
- L : 発光部内平均輝度 (cd/m²)
- ω : 発光部内平均輝度の部分の立体角 (sr)
- L_b : 背景輝度 (cd/m²)
- P : 位置指数 (ポジションインデックス)
- L_{eff} : 有効な発光部として抽出した部分の光源輝度 (cd/m²)
- ω_{eff} : 有効な発光部として抽出した部分の光源輝度の立体角 (sr)

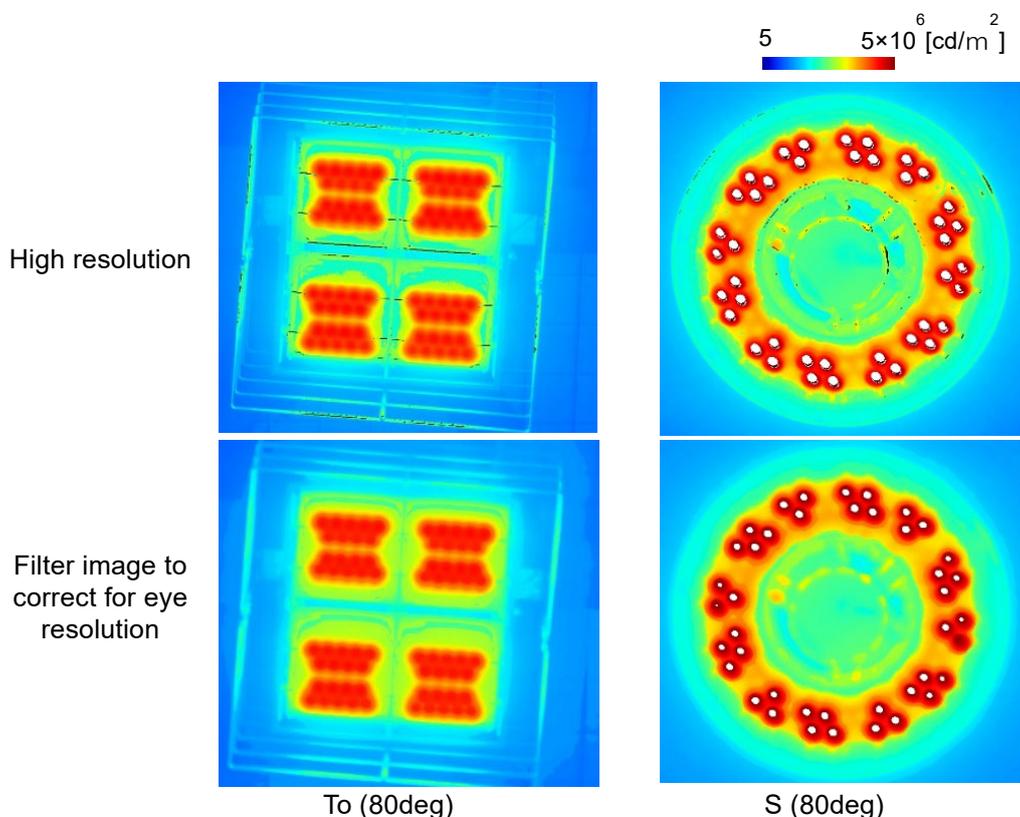


Fig.4-6 High resolution luminance image (upper) and filter image to correct for eye resolution luminance image (lower)

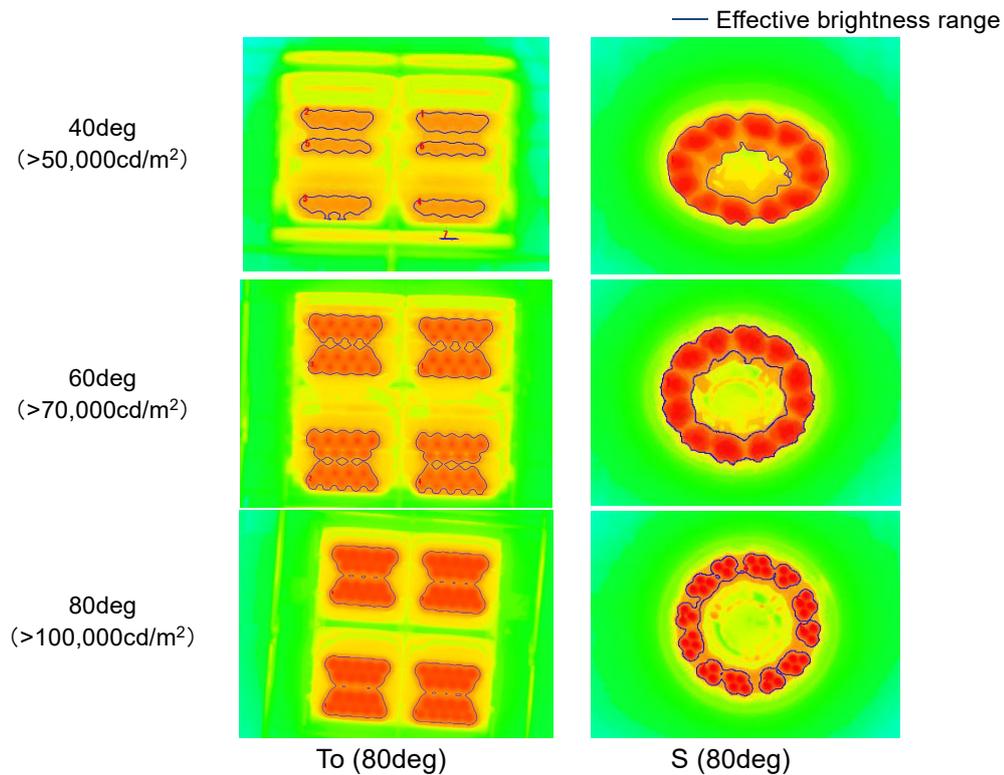


Fig.4-7 Extracted effective brightness range

発光部内平均輝度は、「4.3.2 被験者の視野内輝度分布測定結果」では $1,000\text{cd/m}^2$ 以上の輝度を発光部として取り扱ったが、発光部内輝度が不均一の場合の発光部の定義が難しいことから、 $1,000\text{cd/m}^2$ 以上の輝度と $10,000\text{cd/m}^2$ 以上の輝度の 2 条件を設定した。（ $100,000\text{cd/m}^2$ 以上の輝度も発光部内輝度とすることを検討したが、一部の施設においては $100,000\text{cd/m}^2$ 以上の輝度が存在しなかったため変数に含めなかった。）

予測する評価値は、被験者実験結果で総合評価と考えた視環境の許容度に最も影響していたシャトル無しの照明器具のグレア評価値（各施設、各仰角の被験者評価中央値）とした。Table4-9 にグレア評価値の予測に有効と考え選定した変数の中央値、25%タイル値、75%タイル値と、各変数と被験者によるシャトル無しの照明器具のグレア評価値との相関係数を示す。施設 To および S は発光部が不均一のため UGR' を求めたがそれ以外の施設は求めている。施設 To および S 以外の施設では、UGR の値を UGR' にも用いた。施設 To および S の UGR' は、6 条件（2 施設×仰角 3 条件）中 5 条件で UGR よりも高かった（ $10,000\text{cd/m}^2$ 以上の輝度を発光部内輝度とした場合の施設 To の仰角 40 度の UGR' は、UGR よりも高くならなかった）。被験者によるシャトル無しの場合の照明器具のグレア評価値と各変数との相関係数は、UGR' が高い。しかし、相関係数は 0.67 程度と中程度の相関であったことから、シャトル無しの照明器具のグレア評価値を目的変数として、Table4-

9 に示す変数群の中から UGR' の計算に用いる変数（発光部内平均輝度、発光部の立体角、背景輝度、不均一性係数）を用いて予測精度の高い変数を抽出する重回帰分析を行った。分析では線形結合する変数を除いた。

Table4-9 Variables for considered for glare evaluation

Explanatory variables			Median	25% tile value	75% tile value	Correlation coefficient between the glare evaluation value and each explanatory variable
Light source luminance	Log Ls [cd/m ²]	Ls>=10 ³	4.50	4.26	4.71	0.47
		Ls>=10 ⁴	4.67	4.57	4.83	0.54
Light source solid angle	Log ω [sr]	Ls>=10 ³	-2.68	-2.97	-2.40	0.28
		Ls>=10 ⁴	-3.01	-3.48	-2.77	0.30
Total light source luminance	Log TIs (Ls×ω)	Ls>=10 ³	1.80	1.34	2.06	0.52
		Ls>=10 ⁴	1.78	1.31	2.04	0.26
Background luminance	Log Lb [cd/m ²]	Lb<10 ³	1.46	1.07	1.66	-0.13
		Lb<10 ⁴	1.65	1.41	1.87	0.13
Contrast	Log C (Ls/Lb)	Ls>=10 ³	3.21	2.72	3.54	0.53
		Ls>=10 ⁴	3.11	2.77	3.49	0.45
Target of glare (indoor)	UGR	Ls>=10 ³	34.85	31.36	37.41	0.64
		Ls>=10 ⁴	34.11	30.83	36.73	0.60
	UGR'	Ls>=10 ³	34.85	31.36	38.02	0.67
		Ls>=10 ⁴	34.11	30.83	37.12	0.65
Uniformity correction parameter	K	Ls>=10 ³	1.00	1.00	1.00	0.42
		Ls>=10 ⁴	1.00	1.00	1.00	0.42

Ls : average luminance of light emitting part with higher than 1,000 or 10,000 cd/m² [cd/m²]

Lb : average luminance of background with lower than 1,000 or 10,000 cd/m² [cd/m²]

Table4-10 に重回帰分析の結果を示す。1,000cd/m²未満の背景輝度、10,000cd/m²以上の発光部内平均輝度、10,000cd/m²以上の部分を発光部とした場合の発光部の立体角がグレア評価値の予測に有効であった。10,000cd/m²以上の平均輝度の係数が最も大きく、かつ、10,000cd/m²以上の平均輝度の値は Table4-9 に示したように変数の中でも大きいため、特に、10,000cd/m²以上の平均輝度がグレアに与える影響が大きい。視野内の10,000cd/m²以上の輝度を低減することがグレアの程度の低下につながる事が示された。

Table4-10 Result of multiple regression analysis

Variables	Multiple correlation coefficient	Partial regression coefficient	Standard partial regression coefficient	P value
Background luminance (Log Lb [cd/m ²] (Lb<10 ³))	0.7608	-1.0438	-0.4977	0.0024 **
Light source luminance (Log Ls [cd/m ²] (Ls>=10 ⁴))		1.6665	0.6601	p < 0.001 **
Light source solid angle (Log ω [sr] (Ls>=10 ⁴))		0.7856	0.4965	0.0041 **
Uniformity correction parameter (K (Ls>=10 ⁴))		0.1362	0.2418	0.1424
Constant term		-1.3132		0.4867

Ls : average luminance of light emitting part with higher than 10,000 cd/m² [cd/m²]

Lb : average luminance of background with lower than 1,000 cd/m² [cd/m²]

** : 1% significant

導かれた予測式を式 (3) に示す。抽出された変数は、UGR'に用いる変数と等しいが、発光部となる輝度の範囲が高く、発光部以外の輝度が全て背景とはならない。照明器具を直視したときに発光部の光が眼球内で散乱して大きく見える現象があるが、光が散乱して大きく見える範囲は、発光部にも背景にも分類できなかつたと考えられる。Table4-10に示したように不均一性係数 K は予測式との相関が低く、かつ係数は 0.1 と影響は小さい。

$$G = 1.7\log Ls + 0.8\log\omega - 1.0\log Lb + 0.1K - 1.3 \quad \dots (3)$$

G : グレア (1 : 気にならない～5 : 耐えられない)

Ls : 10,000cd/m² 以上の発光部内平均輝度 [cd/m²]

ω : 10,000cd/m² 以上の輝度の部分を発光部とした場合の発光部内の立体角 [sr]

Lb : 1,000cd/m² 未満の背景の平均輝度 [cd/m²]

K : 10,000cd/m² 以上の輝度を発光部内輝度とした場合の不均一性係数

4.5. まとめ

本研究は、屋内スポーツ競技中の視野に入る照明器具からの光によるグレアを評価することを目的とした。第 3 章では、従来型の照明計画手法を踏襲 (光源を LED に置換) した LED 照明器具の施設 6 件、従来照明器具 (HID) の施設 5 件の計 11 件の屋内スポーツ施設において、視環境の現状把握を行ったが、視野内輝度分布の測定結果より算出した GR 値は、いずれの施設も 20 以下と低かつた。本章では、第 3 章で視環境把握を行った 11 件

の屋内スポーツ施設において、バドミントン競技を想定した現場におけるグレア評価実験を行い、競技中に発生する照明器具からのグレアに影響する変数を抽出した。

グレア評価実験の結果、総合評価と考えられるバドミンントンの競技中を想定した視環境の許容度に最も影響を与えているのは、照明器具を直視した場合のグレアであった。照明器具を直視した場合のグレア評価値は、仰角が大きいほど、また高い照度が要求される競技区分ほど有意に高かった。

被験者評価位置における視野内輝度分布について、1,000cd/m²以上の輝度を発光部とした発光部内平均輝度を確認した結果、仰角が大きいほど発光部内平均輝度は有意に高かった。

被験者の視野内輝度分布測定結果より得た発光部内平均輝度、発光部の立体角、背景輝度などを変数群として、グレアに影響する変数を抽出するための重回帰分析を行った。抽出された変数は、不均一な輝度分布を持つ照明器具の不快グレア評価指標 UGR'に用いる変数と等しいが、発光部となる輝度の範囲が高く、発光部以外の輝度が全て背景とはならなかった。また、不均一性係数 *K* の影響は小さかった。特に、10,000cd/m²以上の部位の平均輝度がグレアに与える影響が大きく、10,000cd/m²以上の輝度の低減がグレアの程度の低下につながるということが明らかとなった。

注

注1) 区分 I: 観客のいる国際、国内、地域全体又は特定地域における最高水準の運動競技会。最高水準のトレーニング。区分 II: 観客のいる地域全体又は特定地域における一般的な運動競技会。高水準のトレーニング。区分 III: 観客のいない特定地域の運動競技会、学校体育又はレクリエーション活動。一般のトレーニング。

注2) GR の算出式

$$GR = 27 + 24 \log_{10} \left(\frac{L_{vl}}{L_{ve}^{0.9}} \right)$$

$$L_{vl} = L_{v1} + L_{v2} + \dots + L_{vn}$$

$$L_{vn} = 10 \times \frac{E_{eye}}{\theta^2}$$

$$L_{ve} = \frac{0.035 \times \rho \times E_{hav}}{\pi}$$

L_{vl} : 個々の照明器具によって生じる等価光幕輝度 (cd/m²) の合計
 L_{vn} : 個々の照明器具の光幕輝度 (cd/m²)
 E_{eye} : 観測者の視線 (俯角 2 度) に対して垂直な面の照度 (lx)
 θ : 観測者の視線 (俯角 2 度) と個々の照明器具とのなす角 (°)
 L_{ve} : 環境の等価光幕輝度 (cd/m²)
 ρ : 領域 (地面など) の平均反射率
 E_{hav} : 全運動競技面の平均照度 (lx)

注3) UGR の算出式

$$UGR = 8 \times \log \left(\frac{0.25}{L_b} \Sigma \frac{L^2 \times \omega}{P^2} \right)$$

L : 光源輝度 (cd/m²)
 ω : 光源の立体角 (sr)
 L_b : 背景輝度 (cd/m²)
 P : 位置指数 (ポジションインデックス)

注4) 首都圏の屋内スポーツ施設は稼働率が高く、実験を実施するための許可を得られた施設は限定された。JIS Z 9127:2011³⁾では3つの運動競技区分が定められているため、それ

らを網羅することを目標に LED 照明器具の施設と HID 照明器具の施設に調査協力依頼を行ったが、事前に JIS 運動競技区分は確認できなかった。

注5) 「屋内運動場」としての測定範囲は、壁から 2m 以内の位置に設けた隅点を含む床面全体とされている。本研究では、壁から 2m の位置から 3m 間隔（一部の施設では 1m もしくは 1.5m 間隔）で測定した。平均照度の算出式は以下に示す。

$$E = \left(\frac{1}{4n}\right) (\sum_{i=1}^4 (E \text{ 田 } i) + 2 \times \sum_{i=1}^o (E \Delta i) + 4 \times \sum_{i=1}^p (E \circ i))$$

E : 水平面の平均照度 (lx)

$E \text{ 田 } i$: 隅点の照度 (lx)

$E \Delta i$: 辺点の照度 (lx)

$E \circ i$: 内点の照度 (lx)

o : 辺点の数

p : 内点の数

n : 分割線で囲まれたます目の数

注6) 屋内スポーツ施設の運動面の照明配置などが対称であることを確認した。

注7) JIS 運動競技区分は設計段階で規定されるが、JIS 運動競技区分を事前に確認することができず、手掛かりとなる設計照度を確認できたのは施設 M（設計照度 1,000lx）のみであった。運用照度が設計照度を満足していると仮定し、JIS 運動競技区分を分類した。

注8) 解像度は画素数÷画角で示される。同じ画素数であれば、画角が狭いほうが解像度は高く、画角が広いと解像度は低くなる。

注9) 有効な発光部は、高解像度のカメラで取得した輝度分布画像を、ヒトの目を見た時と同じように見えるようにガウシアンフィルタによりフィルタリングを行い、抽出することになっている。有効な発光部として抽出すべき輝度については、例は示されているものの、抽出すべき輝度値について明確には示されていない。

参考文献

- 1) L. M. Geerdinck, J.R.Van Gheluwe, M.C.J.M.Vissenberg: Discomfort glare perception of non-uniform light sources in an office setting, *Journal of Environmental Psychology*, Vol.39 pp.5-13, 2014
- 2) Y Yang, Ronnier M Luo, S-N Ma, X-Y Liu: Assessing glare. Part 1: Comparing uniform and non-uniform LED luminaires, *Lighting Research and Technology*, Vol.49, Iss.2, pp.195-210, 2015
- 3) JIS Z 9127:2011 スポーツ照明基準 日本規格協会
- 4) 照明学会編: 照明ハンドブック, オーム社, 2003
- 5) 東 洋邦, 佐々木 淳, 古賀 翔大, 羽生田 有美: 高輝度発光面がボール消失現象に与える影響, *照明学会誌* 第 100 卷 第 6 号, pp.234-237, 2016
- 6) LED スポーツ照明の直視グレアに関する研究調査委員会報告書 (社)照明学会, *JIER-125*, 2016
- 7) 田代知範, 西川尚希, 山田哲司, 江湖俊介, 石川智治, 阿山みよし: LED 投光器の直視グレアが視機能に及ぼす影響, 第 49 回照明学会全国大会講演論文集, 6-02, 2016
- 8) 山田哲司, 江湖俊介, 西川尚希, 田代知範, 石川智治, 阿山みよし: LED 投光器の直視グレアが視機能に及ぼす影響—その 2 発光面輝度が及ぼす競技への影響—, 第 50 回照明学会全国大会講演論文集, 6-22, 2017
- 9) 田中武, 高地正夫, 池田篤志, 葛原秀男, 松下光一, 呉浩廷, 栗栖慎也: LED を用いたアリーナのスポーツ照明と, その設置例, *広島工業大学紀要研究編*第 51 卷, pp231-241, 2017
- 10) Discomfort glare in interior lighting, *CIE Technical Report*, 117, 1995
- 11) JIS Z 9110:2010 照明基準総則 日本規格協会
- 12) H Cai and T Chung: Evaluating discomfort glare from non-uniform electric light sources, *Lighting Research and Technology*, Vol.45, Iss.3, pp267-294, 2013
- 13) Gertjan H.Scheir, PeterHanselaer, PeterBracke, GeertDeconinck, Wouter R.Ryckaert: Calculation of the Unified Glare Rating based on luminance maps for uniform and non-uniform light sources, *Building and Environment*, Vol.84, pp.60-67, 2015
- 14) Funke, Carsten: Extension of the Unified Glare Rating Formula for Non Uniform LED Luminaires. *Proceedings of 28th session of the CIE*, Manchester, UK, pp.1471- 1480, 2015
- 15) Teppei KASAHARA, Daisuke AIZAWA, Takashi IRIKURA, Takayoshi MORIYAMA, Masahiro TODA, Masami IWAMOTO: Discomfort Glare Caused by White LED Light Sources, *Journal of Light and Visual Environment* Vol.30, No.2, pp49-57, 2006
- 16) H. Higashi, S. Koga and T. Kotani: The Development of Evaluation for Discomfort Glare in LED Lighting of Indoor Work Place :The Effect of Luminance Distribution of Luminous Parts on Subjective Evaluation, *Proceedings of CIE Centenary Conference “Towards a*

New Century of Light”, pp.648-656, 2013

- 17) Y Yang, et al: Assessing glare. Part 2: Modifying Unified Glare Rating for uniform and non-uniform LED luminaires, *Lighting Research and Technology* Vol.49, Iss.6, pp.727-742, 2017
- 18) Discomfort Caused by Glare from Luminaires with a Non-Uniform Source Luminance, *CIE 232:2019*
- 19) 森星豪：屋外照明における不均一な発光部の不快グレア評価,第 44 回照明学会全国大会講演論文集, p.82, 2011
- 20) 岩崎浩暁, 唐澤宜典, 岩井彌：高出力型照明器具のグレアに関する考察, 平成 26 年電気関係学会関西連合大会, p.360, 2014
- 21) Slominski S.: Identifying problems with luminaire luminance measurements for discomfort glare analysis, *Lighting Res. Technol.*, Vol.48, pp.573-588, 2016
- 22) 畑田 豊彦：視覚効果による人工現実感, 精密工学会誌 57 巻, 8 号, pp.1330-1334,1991
- 23) Guth S.K.: A method for the evaluation of discomfort glare. *Illuminating Engineering*, Vol.57, pp.351-364, 1963
- 24) Einhorn, H.D.: Discomfort glare: a formula to bridge differences, *Lighting Research and Technology*, Vol.11, No.2, pp. 90-94, 1979
- 25) 山田哲司, 門馬英一郎：画像測光による視認性評価に関する共同実験,第 49 回照明学会全国大会講演論文集, 11-04, 2016
- 26) 石垣尚男, 真下一策, 重森梅樹：スポーツ選手の視力と視力矯正に関する実態調査, 平成 16 年愛知工業大学研究報告, 第 39 号 B, pp.121-129, 2004

第5章

LEDの特徴を用いたスポーツ照明の 計画手法およびその検証

第5章 LEDの特徴を用いたスポーツ照明の計画手法およびその検証

5.1. はじめに

スポーツ施設においても照明のLED化が進められ、ランプの置き換えから専用器具・設計へと移行している。不快グレア抑制のための小型LED照明器具の分散配置と昼光利用のためのハイサイドライトおよび光ダクトを設置したスポーツ施設を計画・竣工した(Photo.5-1)。

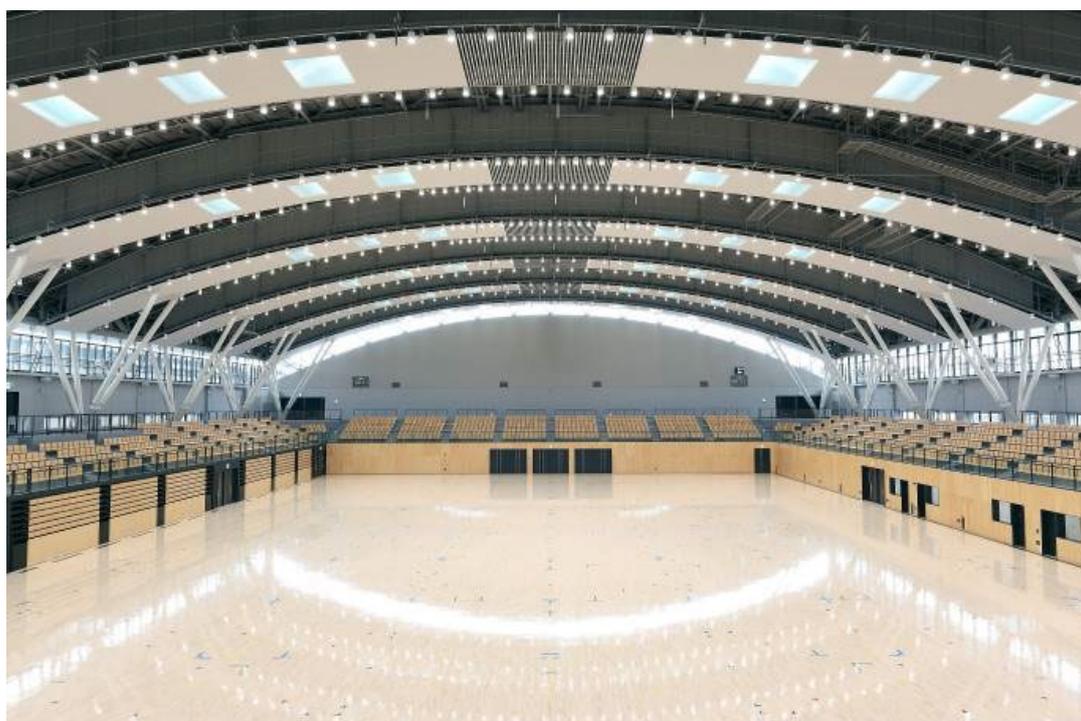


Photo.5-1 Inside of Gymnasium

スポーツ施設の照明については、スポーツ照明基準 JIS Z 9127:2011¹⁾で照度や照度均斉度、グレア制限値、演色性などに関する推奨値が定められている。多目的に利用される屋内スポーツ施設では、これを参考に設計される(利用予定の競技が明らかな場合には、その競技の基準も参照する)。

グレアに関しては、この JIS¹⁾では、GR^{2,注1)}を用いたグレア制限値が定められている。グレア制限値は、屋外スポーツ施設についてのみ推奨値が定められており、屋内スポーツ施設には適用は可能とされているが推奨値は定められていない。しかし、屋内スポーツ施設の照明のLED化では、グレアの発生の報告がある³⁾。バドミントンなどの競技では、視線が上を向いている状態が多く、頻繁に競技中の視野に直接照明器具が入る。第3章、第4章で説明したとおり、GRでは直接照明器具が視野に入る場合のグレアを評価できない

可能性がある。屋内スポーツ施設においてLED照明器具によるグレアが発生する場合は、拡散カバーを用いる等でグレア対策を行うのが一般的である^{3),4)}。

昼光利用に関しては、このJIS¹⁾では全く記述されていない。屋内スポーツ施設の昼光照明について、昼光率やグレアなどの評価基準を示したものはない。

本章では、屋内スポーツ施設でこれまでの照明計画手法と異なる小型LED照明器具を用いた小型LED照明器具分散配置型照明計画および積極的な昼光利用について、照明計画の概要を説明する。第3章、第4章と同様の視環境を定量的に把握するための輝度分布測定と、小型LED照明器具を分散配置した場合のグレアへの影響を確認する被験者実験の結果を論じる。

5.2. 照明計画の概要

5.2.1 人工照明

屋内スポーツ施設では、一般的には大型の照明器具が用いられる。従来照明器具の光源寿命は長くても15,000時間程度のため光源交換が必要で、交換手間を減らす意味でも適切な方法と考えられる。しかし、照明器具のLED化により光源寿命は40,000時間となった現在も、従来照明器具と同じ照明計画が踏襲されている。本施設では、LED照明器具の特徴である小型、長寿命、省メンテナンスを活かし、屋内スポーツ施設で用いられる従来の大型LED照明器具と較べて照明器具1台当たりの出力光束が少なく、かつ発光部面積が小さい小型の照明器具を分散配置した。

屋内スポーツ施設の照明器具のLED化で発生しているグレアは、競技中の視野に直接照明器具が入ることによる。GRとは異なる評価が必要と考えられ、第3章、第4章では、従来の大型LED照明器具を用いた施設6件、HID照明器具を用いた施設5件の計11件の屋内スポーツ施設において、視環境計測とグレア評価実験を行い、 10^4cd/m^2 以上の発光部輝度とその立体角の低減が、競技中の視野に入る照明器具からの光によるグレアの低減に有効であることを明らかにした。このことから、照明器具1台当たりの出力光束を少なくした小型LED照明器具を採用することでグレアの低減が可能と考えられる。また、発光部に構成されるLED素子が一つの小型のLED照明器具を採用することで、LED照明器具のグレアの原因とされる発光部の輝度の不均一さが低減できる。

設計照度は、スポーツの公式試合利用に対応するため $1,500\text{lx}$ とした¹⁾が、幅広い利用用途に対応するため $1,500\text{lx}$ 、 $1,000\text{lx}$ 、 500lx の3段階で設定できる。従来の照明計画を踏襲して配灯を行った場合は250Wの照明器具を160台設置することになるが、小型LED照明器具分散配置型照明計画としたことで80Wの照明器具を692台設置した。照明器具の配灯図をFig.5-1に示す。LEDの特徴である高い制御性を活かし、また、積極的な昼光利用のために、大空間で利用可能な画像センサによる自動調光システムも導入している。

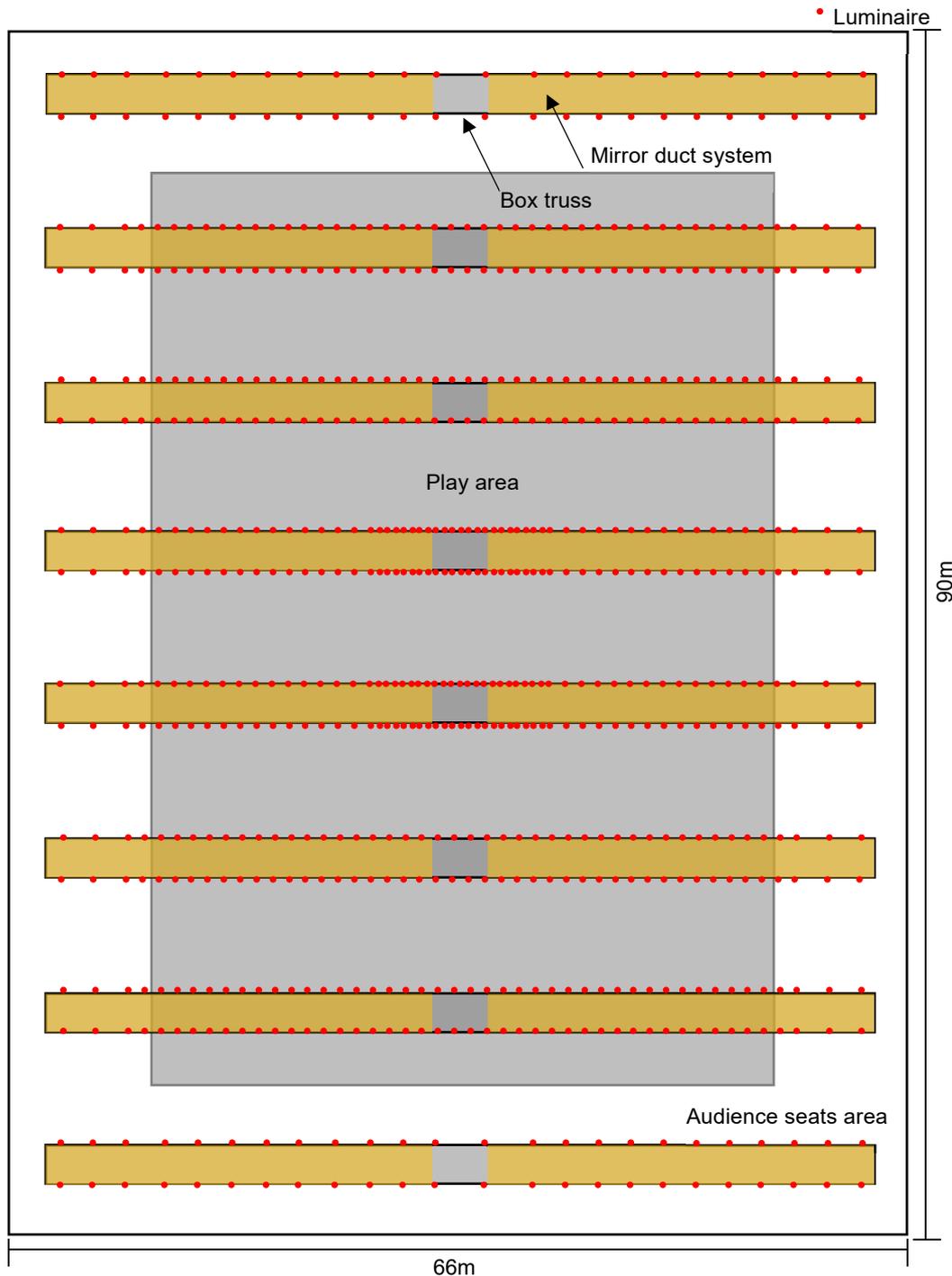


Fig.5-1 Plot plan of luminaires

照明器具数が多くなることは、施工上の手間がかかる。照明器具は、本施設の主要構造体である箱型トラスに設置されたメンテナンス歩廊下に設置した。照明器具の設置は鉄骨建方^{注2)}の前に実施し、高所作業による照明器具設置工事を不要とて施工手間を低減した。LED 照明器具は長寿命であるため初期不良等を除けばメンテナンスフリーとなるが、万

が一の故障時には、箱型トラスに設けたメンテナンス歩廊よりメンテナンスが可能である。箱型トラスは施設の主要構造体であるとともに、光ダクトや照明器具などの設置スペースでもある (Fig.5-2)。

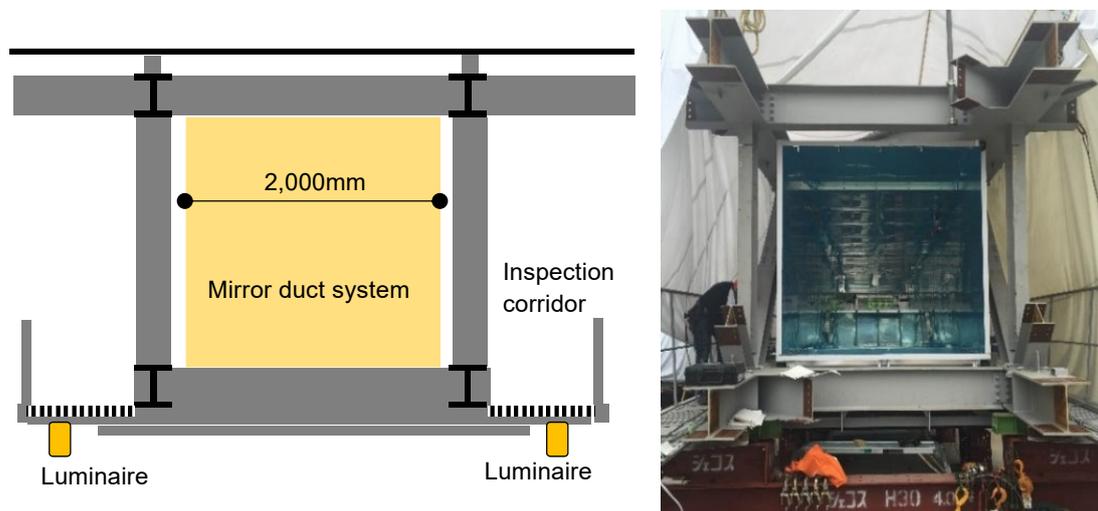


Fig.5-2 Section of the box truss

5.2.2 光ダクトによる昼光利用

大空間となる屋内スポーツ施設における昼光利用は、照明用エネルギーの削減に貢献できる。「5.1.はじめに」で述べた通り省エネルギー以外の効果もあり積極的に利用したいが、直射光は過剰な明るさとなりグレアの原因となるとともに変動の問題があり、利用には注意が必要である⁵⁾。昼光照明装置の一つに光ダクト⁶⁾がある。光ダクトは採光部より取り込んだ昼光を、高反射材を用いて昼光を反射させながら導光部にて光を運び、放光部より導光した昼光を室内に照射する⁷⁾。光ダクトの放光部を工夫することでグレアの低減は可能であるが、昼光特有の変動の問題が残る。一般的には作業性が重視されるエリアでは在室者へ不快感を与えるため好まれないが、オフィス執務室への採用事例がある⁵⁾。オフィス執務室への採用事例では、放光部にて光ダクトより導いた昼光と人工照明を混光し、急な天候変化による照度変化に対応する自動調光システムを導入している。屋内スポーツ施設においても急な天候変化による照度変化は好まれない。オフィス執務室への採用事例と同様の自動調光システムの導入により、昼光利用時の照度変動の課題を解決できると考えられる。

本施設では、急な天候変動による急激な照度変更に対応できる高天井でも利用可能な画像センサを用いた自動調光システムを導入することを前提に、ハイサイドライトに加えて光ダクトを導入した。光ダクトからの昼光による照度は、晴天時 9 時～16 時の年平均で 200lx を確保することを目標として設計された。照度 200lx は、レクリエーションレベル

での利用が可能な照度¹⁾である。伝送距離 24m の光ダクトの断面寸法は 2m 角で、南北各 8 本、計 16 本のアーチ型の光ダクトが本施設には設置されている。Fig.5-3 に本施設の断面図を示す。光ダクトの設置にはスペースの確保が課題となるが、本施設では箱型トラス内に設置することで解決した。

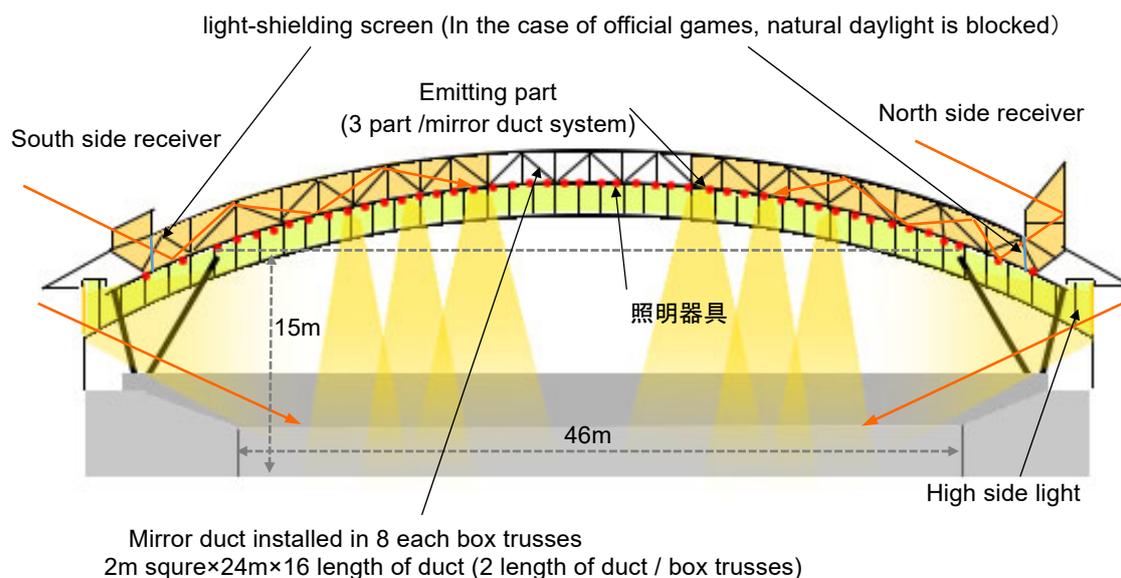


Fig.5-3 Section

5.3 実験方法

5.3.1 実験の実施方針

「5.2.1 人工照明」で述べたとおり、第 3 章、第 4 章では屋内スポーツ施設における照明器具の LED 化により懸念されるグレアの発生に対して、現状把握とグレア評価法の検討のために、11 件の屋内スポーツ施設にて光環境計測と被験者実験を行っている。本施設においても同様の評価を行う方針とした。

5.3.2 視野内輝度分布測定

施設竣工後の 2017 年 12 月 20 日に輝度分布測定を行った。公式試合利用時の人工照明のみ 1,500lx (以降「1,500lx 人工照明」と記す) の場合と、レクリエーション利用で最も多い 500lx の昼光利用による自動調光 (以降「500lx 自動調光」と記す) の場合の 2 条件を測定した。当日の天候は晴れ時々曇りで晴天ではなかったが、屋外水平面照度は 60,000lx 程度あった。

測定は第 3 章、第 4 章と同様の測定器、方法により行った。輝度分布測定概要を Table5-1 に示す。本施設では Fig.5-1 の平面上にバドミントンコート縦 4 面×左右 2 面の計 8 面

取れる。左側中央にある 1 面において、Fig.5-4 に示すようにバドミントンコートの両サイド（A 面、B 面）の中央において、コート反対側を見るように輝度分布測定カメラを設置し測定した。輝度分布測定カメラの位置は固定して、水平から見上げ 90 度までの輝度分布を把握するため、仰角を変更して（45 度間隔）測定した。測定範囲を超える高輝度部が存在するため、レンズに透過率 0.1% の ND フィルター（Edmund 吸収型 ND フィルター OD3.0 50mm）を装着する場合としない場合で測定した。

Table5-1 Outline of measurement instrument

Content	Measuring angle	Measurement instrument	
Luminance distribution of field of view	0deg	Camera : NIKON D3300	Shooting condition
	45deg	Lens : NIKON AF-S DX	Aperture : 5.6
	90deg	NIKKOR18-55 (18mm : Horizontal angle of view 76deg)	Shutter speed : 1/4000, 1/1000, 1/500, 1/60, 1/15, 1/4

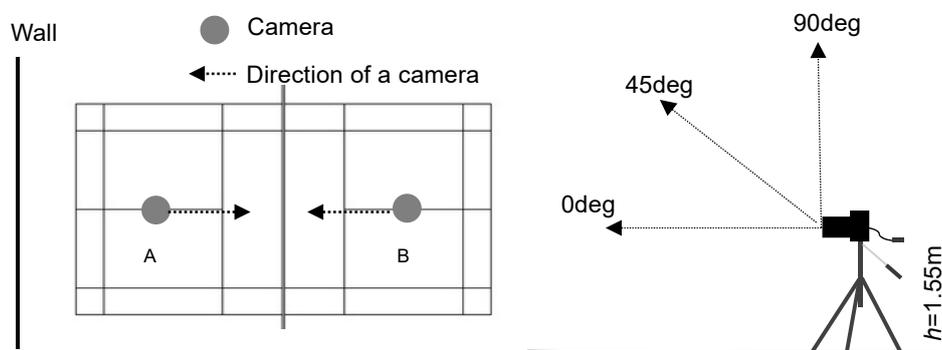


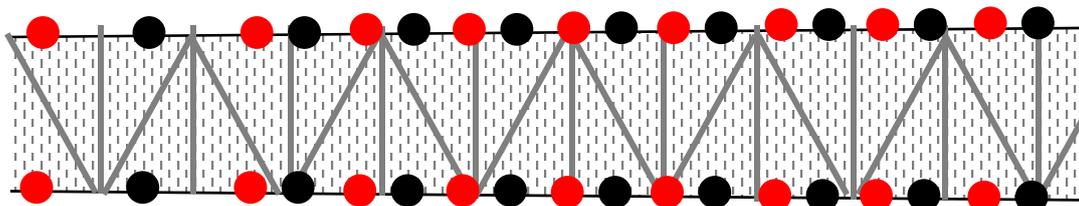
Fig.5-4 Method of luminance distribution of field of view

5.3.3 被験者実験

屋内スポーツ施設におけるグレアについては GR の適用が可能とされているもののグレア制限値は定められていない¹⁾。また、バドミントンのような視線が上を向く競技では、GR では競技中に発生するグレアは評価できないと考えられる。よって、第 4 章と同様のバドミントン競技を想定したグレア評価実験を 2017 年 5 月 9 日に行った。本施設で用いている照明器具は、照明器具 1 台当たりの出力光束が少なくかつ発光部面積が小さい。屋内スポーツ施設で用いられる一般的な照明器具に比べてグレアの程度は低いと考えられる。しかし、視野に入る照明器具の台数は、大型の LED 照明器具を用いた施設に較べて

本施設は多くなる。グレア評価実験では、同照度条件における視野に入る照明器具の台数の違いがグレアに与える影響を確認するため、照明点灯条件は 1/2 回路点灯・100%調光（以降、[1/2-100%] と記す）と全回路点灯・50%調光（以降、[全-50%] と記す）の 2 条件とした（Fig5-5）。水平面照度はいずれも 500lx である。光ダクトおよびハイサイドライトからの昼光は遮光し、第 4 章と同様に人工照明のみの光環境で評価した。被験者は 20～50 代の健康な男女計 20 名である。Fig.5-6 に実験概要を示す。

Condition1 : 1/2 luminaire are lit, 100% dimming (1/2-100%)



Condition2 : All luminaire are lit, 50% dimming (All-50%)

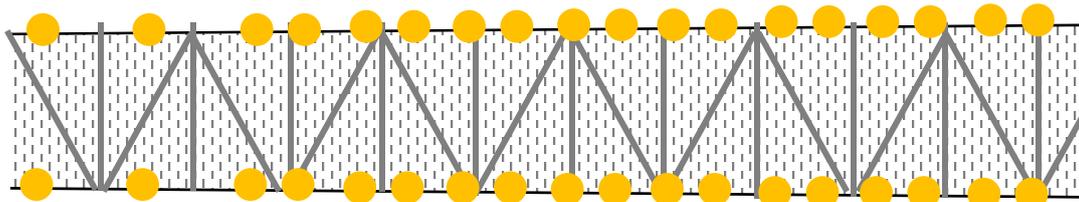


Fig.5-5 Lighting conditions

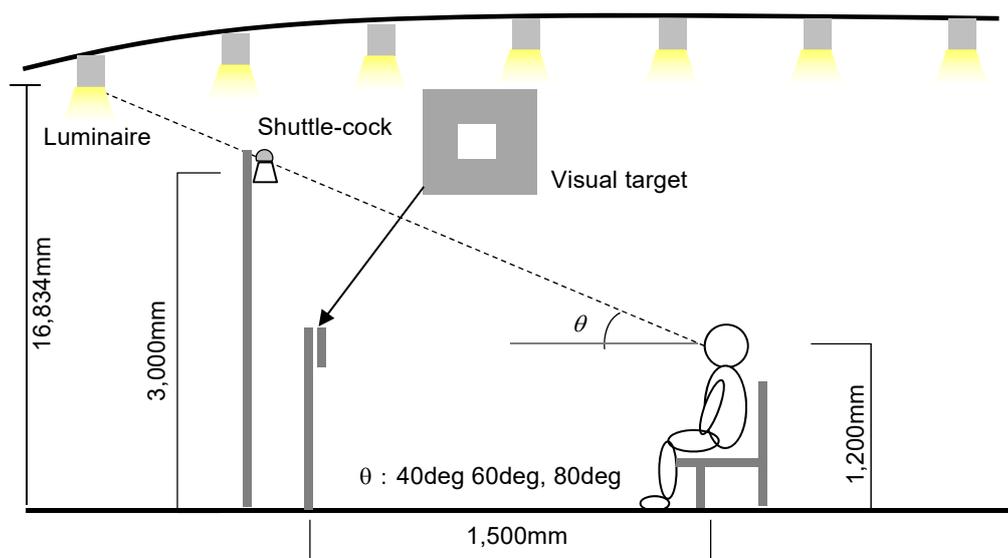


Fig.5-6 Outline of subjective experiment

実験は、バドミントン競技を想定し、競技中にシャトルを追う視線を再現するように行った。視対象となるシャトルの背景に照明器具が入るように被験者、シャトル、照明器具の位置関係を設定した。実験条件の仰角は、40度、60度、80度の3条件である。本施設では、照明器具がアーチ状に設置されているため、照明器具の設置高さが評価位置によって異なる。照明器具の距離が近いほうが発光部の立体角が大きくなりグレアに与える影響が大きくなると考えられる。競技エリア内にある照明器具のうち、最も低い位置にある照明器具を評価対象とした。実験に用いた視認性評価視標はバドミンントンのシャトルを想定し、視線上 1.5m 先にシャトルが有る場合の立体角 (0.007sr) に合わせた大きさとした。シャトルの背景は施設の内装壁面の平均の反射率に合わせた灰色とした。評価は、シャトルの背景に照明器具が有りシャトルに焦点のある場合と、シャトルが無く照明器具に焦点がある場合の2条件を実施した。

被験者は指定された椅子に着席し、Fig.5-6に示したように、1.5m先にある視認性評価指標を2秒間注視し、その後高さ3mの位置に設置されたバドミンントンのシャトルもしくは指定された照明器具を2秒間注視して、1.5m先の視認性評価指標に視線を戻し、アンケートに回答した。アンケートの内容をTable5-2に示す。被験者は、シャトルの背景に照明器具が有りシャトルに焦点がある条件で実験を行い、Table5-2のアンケートのシャトル有りの項目について回答した。その後、シャトルが無く照明器具に焦点がある条件でもう一度実験を行い、Table5-2のアンケートのシャトル無しの項目とバドミントン競技中に提示された照明環境に曝露されたときに許容できるか(以降、光環境の許容度と記す)について回答した。実験は、仰角3条件(40度、60度、80度)のシャトル有無、照明点灯条件2条件([1/2-100%]と[全-50%])の12条件を実施した。

Table5-2 Content of questionnaire

Shuttle-cock	Questionnaire	Evaluation scale
Available	A: Visibility of target	1:Not visible 2:Very hard to see 3:Hard to see 4:Slightly hard to see 5:Easy to see
	B: Visibility of shuttlecock	1:Not visible 2:Very hard to see 3:Hard to see 4:Slightly hard to see 5:Easy to see
	C: Glare from luminaire	1:Unnoticeable 2:Tolerable 3:Just admissible 4:Disturbing 5:Unbearable
Not available	D: Visibility of target	1:Not visible 2:Very hard to see 3:Hard to see 4:Slightly hard to see 5:Easy to see
	E: Glare from luminaire	1:Unnoticeable 2:Tolerable 3:Just admissible 4:Disturbing 5:Unbearable
	F: Acceptability of the lighting environment	1:Acceptable 2:Unacceptable

被験者評価位置における被験者の視線方向の輝度分布測定（第4章と同様の方法）および等価光幕輝度（第4章では実施していない）を測定した。測定概要を Table5-3 に示す。

Content	Measuring angle	Measurement instrument	
Luminance distribution of field of view	0deg 45deg 90deg	Camera : NIKON D3300 Lens : NIKON AF-S DX NIKKOR18-55 (55mm : Horizontal angle of view 28.5deg)	Shooting condition Aperture : 5.6 Shutter speed : 1/4000, 1/1000, 1/500, 1/60, 1/15, 1/4
Luminance of Equivalent curtain	0deg	Chroma Meters : TOPCON BM-5A Glare lens : Photo Research, GL-1961	

Table5-3 Outline of measurement of subjective experiment

輝度分布測定に用いるカメラとレンズは視野内輝度分布測定に用いた測定器（Table5-1）と同じであるが、ズームレンズの狭角側を用いた（第4章と同じ）。人間が瞬時に情報を受容できる範囲（有効視野）は、水平30度、垂直20度の楕円状範囲⁸⁾と言われる。被験者がシャトルもしくは照明器具を注視している際の有効視野内の輝度分布を測定できると考え、第4章で選定した。Fig.5-6に示した被験者の視線位置に輝度分布測定カメラを設置し、仰角3条件（40度、60度、80度）のシャトル有無、照明点灯条件2条件（[1/2-100%]と[全・50%]）において、評価対象となるシャトルまたは照明器具が画像中央に配置されるように撮影した。測定範囲を超える高輝度部が存在するため、レンズに透過率0.1%のNDフィルター（Edmund 吸収型NDフィルター OD3.0 50mm）を装着する場合としない場合で測定した。

屋内スポーツ施設のグレア評価で適用が可能とされているGR値は、透過光幕輝度の測定結果から式(1)、(2)より算出できる⁹⁾。GRが、本施設のグレア評価に適用できるか検討するため、照明器具を遮光した場合としない場合の被験者の視線位置における水平（仰角0度）の等価光幕輝度を測定した。

$$GR = 27 + 24 \log_{10} \left(\frac{L_{vl}}{L_{ve}^{0.9}} \right) \cdot \cdot \cdot (1)$$

$$L_{vl} = L_{ve} - L_{vnl} \quad \cdot \cdot \cdot (2)$$

L_{vl} : 個々の照明器具によって生じる等価光幕輝度 [cd/m²] の合計
 L_{ve} : 環境の等価光幕輝度 [cd/m²]
 L_{vnl} : 照明器具を除く環境の等価光幕輝度 [cd/m²]

5.4. 測定および実験結果

5.4.1 視野内輝度分布

視野内に存在する発光部の輝度を確認するため、 10^3cd/m^2 以上の輝度について、輝度範囲ごとの立体角をヒストグラムにした結果を Fig.5-7 に示す。ハイサイドライトや多数の照明器具が視野に入るサイド A の結果を示す。500lx 自動調光の場合には、ハイサイドライト及び光ダクトからの自然採光により $10^3\text{cd/m}^2\sim 10^4\text{cd/m}^2$ の輝度の立体角が 1,500lx 人工照明時に比べて大きくなる。ハイサイドライト及び光ダクトからの自然採光による床面照度は平均 400lx 程度あり、人工照明の調光率が低く、 $2.0\times 10^4\text{cd/m}^2$ 以上の輝度の立体角が小さい。仰角 90 度の場合の 10^3cd/m^2 以上の輝度の立体角は、500lx 自動調光の場合には、 $6.0\times 10^{-3}\text{sr}$ で、このうち $2.0\times 10^4\text{cd/m}^2$ 以上の輝度の立体角は $4.0\times 10^{-5}\text{sr}$ であった。1,500lx 人工照明の場合には、 10^3cd/m^2 以上の輝度の立体角は $1.0\times 10^{-3}\text{sr}$ と 500lx 自動調光時に比べて小さいが、 $2.0\times 10^4\text{cd/m}^2$ 以上の輝度の立体角は $3.0\times 10^{-4}\text{sr}$ で 500lx 自動調光時より大きい。

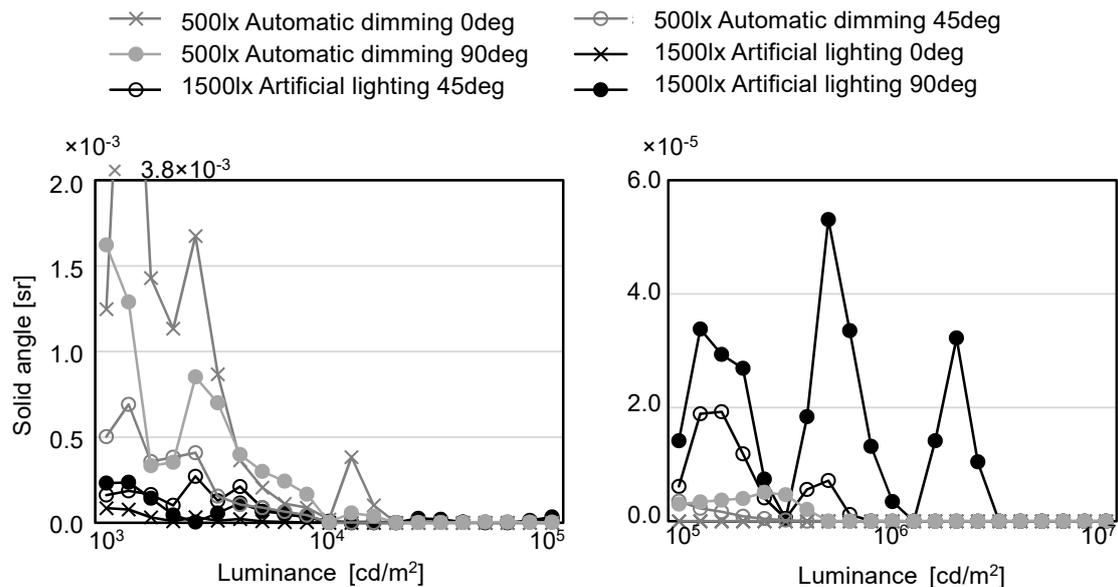


Fig.5-7 Histogram of luminance

視野内に占める輝度の範囲について、第 3 章と同様にパーセンタイル値による検討を行った結果を Fig.5-8 に示す。Fig.5-7 と同様にサイド A の結果である。輝度の高いほうから並べた 0.1%、0.5%、1%、50% タイル値を示す。500lx 自動調光の仰角 0 度では、1,500lx 人工照明に比べて 0.1%、0.5%、1% タイル値は高い。仰角 0 度ではハイサイドライトが視野に入るが照明器具は視野に入らないためと考えられる。500lx 自動調光の仰角 0 度の 0.1% タイル値は $1.4\times 10^4\text{cd/m}^2$ 、0.5% タイル値は $5.4\times 10^3\text{cd/m}^2$ であった。人工照明器具が

視野に入る仰角 90 度では、500lx 自動調光の 0.1%タイル値は 10^4cd/m^2 に満たない。既往の研究⁵⁾では輝度の 0.1%タイル値は仰角が大きいくほど高くなるが、500lx 自動調光では昼光利用により人工照明の調光率が低くなっているためそうならなかった。一方で、1,500lx 人工照明時の仰角 90 度の 0.1%タイル値は $3.9 \times 10^5\text{cd/m}^2$ と高いが、0.5%タイル値は $1.7 \times 10^3\text{cd/m}^2$ と輝度が下がる。1,500lx 人工照明時の仰角 90 度の場合には、極小さな極端な高輝度の存在が考えられた。第 3 章でも仰角 90 度の輝度の 0.1%タイル値が 10^5cd/m^2 を超えている施設があり、本施設が大型の LED 照明器具を用いた施設と較べて 0.1%タイル値が高ということではなかった。ただし、本施設では照明器具 1 台当たりの出力光束の少ない小型 LED 照明器具を採用した。視野に占める高輝度部の割合が、大型の LED 照明器具を用いた施設より小さくなると考えたがそうならなかった。本施設で用いている小型 LED 照明器具の光束数に対する発光部面積の割合は大型の LED 照明器具と同じであるため、視野内輝度分布の 0.1%タイル値は、大型の LED 照明器具を用いた施設と較べて低くはならなかったと考えられる。

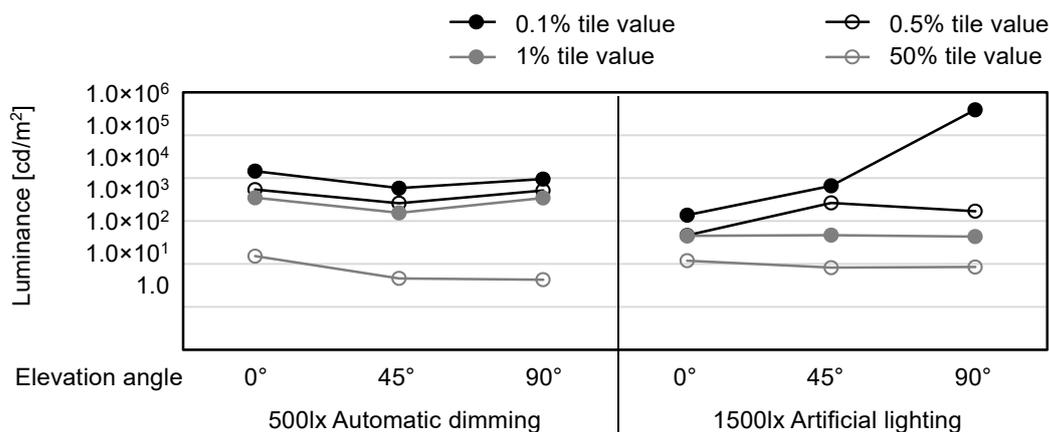


Fig.5-8 Luminance of percentile value

5.4.2 被験者実験

5.4.2.1 評価結果

被験者アンケート項目のうち、視認性評価視標の見やすさ（以降、視標の見やすさと記す）と照明器具のグレアの評価結果を Fig.5-9 に示す（プロットは平均値、ひげは標準偏差）。視標の見やすさについては、仰角が大きくなると見えづらくなるが、その程度は「ややみえにくい」程度である。照明器具のグレアは仰角が大きくなるとグレアの程度が大きくなるが、その程度は「許容できる限界」未満であった。第 4 章では、仰角 90 度の照明器具のグレアは「許容できる限界」以上であり、本施設よりグレアの程度が大きかった。

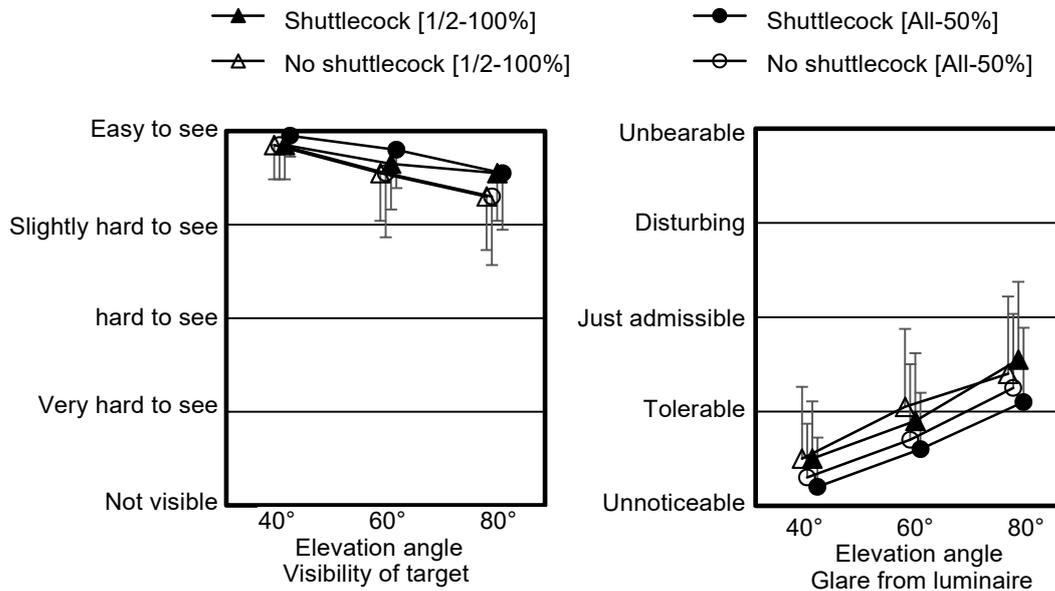


Fig.5-9 Result of questionnaire

光環境の許容度については、[1/2-100%]の仰角 60 度で 1 名が、[全-50%]の仰角 60 度と 80 度で各 1 名が「受け入れられない」と答えた以外は、すべて「受け入れられる」と回答した。

各条件の被験者評価値について、照明点灯条件間、シャトルの有無間、仰角間についてそれぞれ有意差があるか確認した。照明点灯条件間とシャトルの有無間については T 検定を、仰角間においては二元配置分散分析（点灯条件×仰角×シャトルの有無）を行った。結果を Table5-4 に示す。

照明点灯条件による差の検討では、視標の見やすさとシャトルの見やすさでは、[全-50%]と[1/2-100%]の間に有意な差は認められなかったが、照明器具のグレアでは、[全-50%]より[1/2-100%]が有意(シャトル有で 1%、シャトル無で 5%)に高かった。照明器具 1 台当たりの出力光束を少なくして照明器具数を増やした小型 LED 照明器具の分散配置は、グレアの抑制に有効であると考えられた。

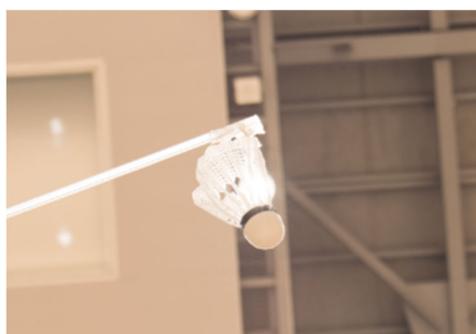
仰角による差の検討では、視標の見やすさのシャトル有りの[全-50%]を除き、仰角が大きいかほど、視標やシャトルが有意（視標の見やすさのシャトル有りの[1/2-100%]は 5%、その他は 1%）に見えづらくなり、かつ仰角が大きいかほどグレアの程度が有意（1%）に高くなる。程度は低いだが、仰角が大きいかほど視対象が見づらく、グレアを感じやすい。なお、仰角が大きいかほど、照明器具のグレアの程度が大きくなるのは、第 4 章も同じであった。

Table5-4 Analysis result

		Visibility of target	Visibility of shuttlecock	Glare from luminaire	
Lighting condition	Shuttlecock	0.1819	0.1850	P<0.001 **	
	No shuttlecock	1.0000		0.015 *	
Elevation angle	1/2-100%	Shuttlecock	0.0206 *	P<0.001 **	
		No shuttlecock	0.0094 **	P<0.001 **	
	All-50%	Shuttlecock	0.1053	0.0011 **	P<0.001 **
		No shuttlecock	0.0094 **		P<0.001 **
Presence or absence of shuttlecock		0.0010 **		0.2641	

*: 5% significant, **: 1% significant

シャトルの有無による差の検討では、シャトル無しの場合がシャトル有りの場合に比べて有意（1%）に視標が見えづらかった。本施設の照明器具は小型で、照明器具にシャトルが重なると背景になる照明器具が見えなくなる（Photo.5-2）。シャトル有りの場合は、照明器具がシャトルに重なり見えなくなるので、視対象を見失う可能性が低くなったと考えられる。一方、照明器具のグレアでは、シャトルの有無による有意差は認められなかった。照明器具が小型ではあるが視野内に多数の照明器具が入るため、注視しているシャトルの背景にある照明器具以外の周辺にある照明器具もグレアに影響したと考えられる（Fig5-10）。従来の照明計画の屋内スポーツ施設に比べて照明器具数が多く、プレー中に照明器具が視野に入る回数は増加すると考えられる。注視位置の周辺にある照明器具がプレー中の視野の邪魔になる可能性も考えられるが、照明器具のグレアは仰角 90 度で「許容できる限界」未満であり、本施設においては照明器具数の多さがグレアに影響するほどではないと考えられる。



This gymnasium [1/2-100%]



Example of gymnasium with LED Luminaire that Follow conventional lighting plan

Photo.5-2 Overlap of shuttlecock and lighting fixture at 80deg of elevation angle

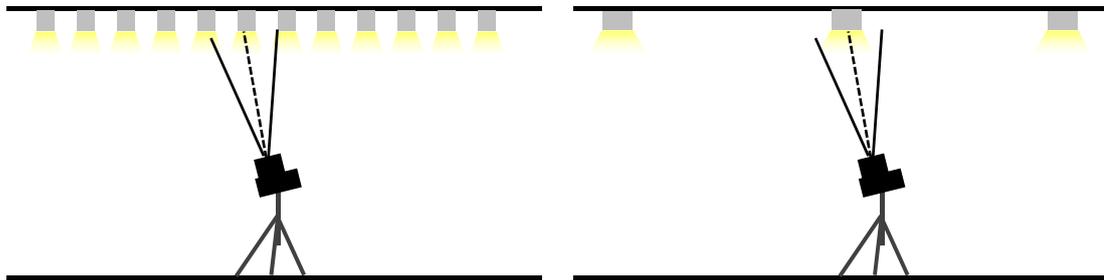


Fig.5-10 Figure of difference in the effect of the number of lighting fixtures on the field of view

5.4.2.2 被験者の視線方向の輝度分布

被験者の視線方向の輝度分布について、 10^4 cd/m^2 以上の輝度を発光部とした発光部平均輝度を算出した結果を Fig.5-11 に示す。シャトル有りの[1/2-100%]以外は、仰角が大きいほど発光部平均輝度が高い。撮影した画像を確認したところ、シャトル有りの[1/2-100%]の仰角 60° の平均輝度が高いのは、照明器具に焦点が合っていなかったことが原因であった。

発光部平均輝度について、シャトルの有無間、照明点灯条件間、仰角間で有意差があるか、それぞれ一元配置分散分析により確認した。シャトルの有無による差の検討では、有意な差は認められなかった。シャトルで照明器具が隠れるように見えるが、極小さな高輝度部がシャトルの隙間から視野内に入る可能性がある。仰角による差の検討では、仰角が大きいほど有意（5%）に発光部平均輝度が高かった。照明点灯条件による差の検討では、[全-50%]と[1/2-100%]の間に有意差は認められなかった。発光部面積が同じであれば照明器具数を増やして照明器具1台当たりの出力光束を下げることで発光部輝度が有意に低くなると考えたが、そうならなかった。シャトル無しの条件のみの発光部平均輝度を比較すると、[全-50%]の方が[1/2-100%]に比べて低い。被験者によるグレア評価では[全-50%]と[1/2-100%]の間に有意な差が認められたことから、シャトル無しの条件のみでの検討で有意な差が認められる可能性はあるが、今回は条件数が少ないため検討しなかった。

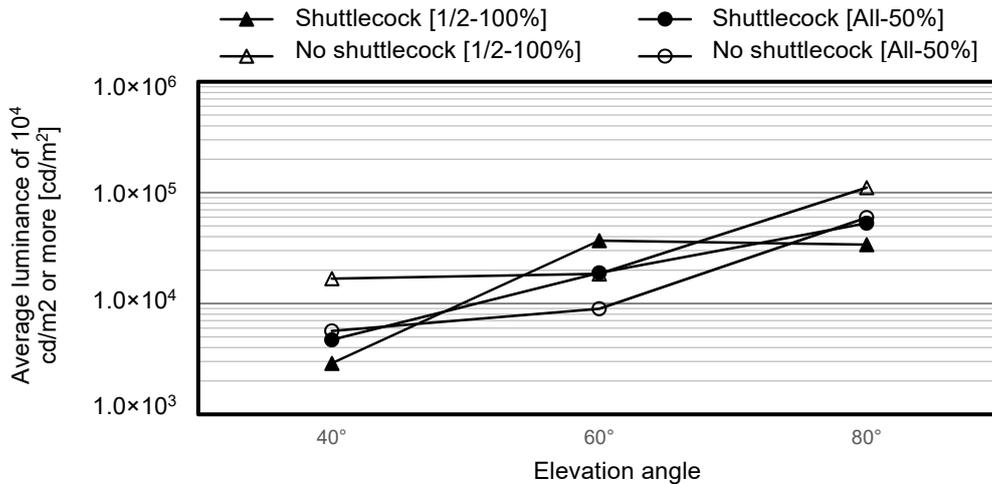


Fig.5-11 Average luminance of 10⁴ cd/m² or more

5.4.2.3 GR

GR 値とグレアの程度との関係を Table5-5 に示す¹⁾。等価光幕輝度の測定結果を用いて式 (1)、(2) より GR 値を算出した。その結果、全条件ともに 8 以下で「気にならない」であった。

Table5-5 Relationship between GR value and degree of glare

GR	Degree of glare
90	Unbearable
70	Disturbing
50	Just admissible
30	Tolerable
10	Unnoticeable

被験者による照明器具のグレア評価では、仰角が大きいほどグレアを感じており、仰角 90 度で「許容できる限界」未満であった。従来の GR による評価結果は、被験者による実際の競技中を想定したグレアの評価結果よりグレアの程度が低い。本施設においては、GR では競技中に発生すると考えられるグレアの程度は評価できないことが確認された。

5.4.2.4 グレア予測

第 4 章では、グレアへの影響要因を抽出した。その結果、10,000cd/m² 以上の輝度の低減がグレアの程度の低減に有効であることが示されたが、小型 LED 照明器具分散配置型

照明計画の本施設では、高輝度部の視野の占める割合は小さくなかった。しかし、被験者によるグレア評価値は第4章の施設に比べて低かった。発光部の立体角が小さくなったことによる効果と考えられるが、第4章でのグレア予測式を適用できるか検討した。

第4章で導かれたグレア予測式は式(3)である。この式を用いて算出したグレア予測値と被験者によるグレア評価値について検証した結果を Fig.5-12 に示す。被験者のグレア評価値に対して予測値は高い。[1/2-100%]と[全 50%]の結果を比較すると、[1/2-100%]の方が[全 50%]に比べて 10,000cd/m²以上の発光部内平均輝度およびその部分の立体角が大きく、被験者評価結果と同様にグレア予測値は高くなった。本施設は、第4章とは照明計画手法が異なり、小型 LED 照明器具分散配置型照明計画の施設である。10,000cd/m²以上の発光部内平均輝度の低減がグレアの程度の低減に有効であることは変わらないが、小型 LED 照明器具分散配置型照明計画手法のグレアは、第4章で導かれたグレア予測式では過大評価された。

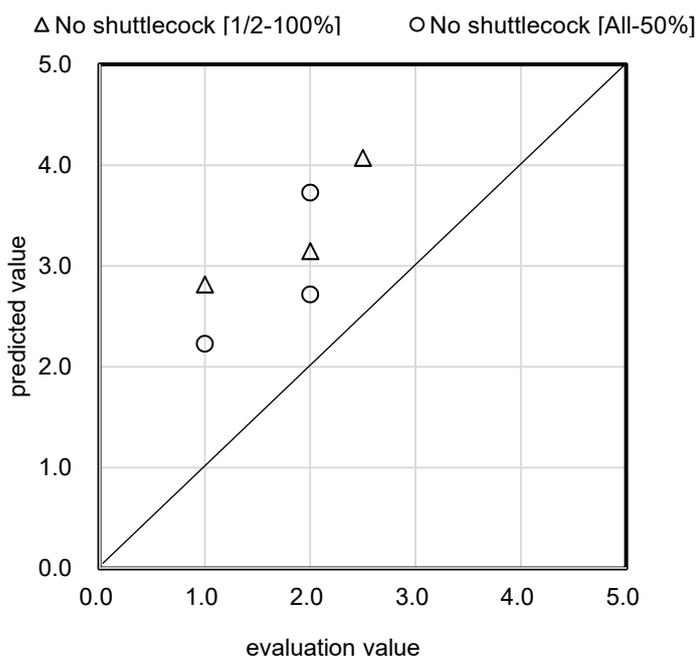


Fig.5-12 Relationship between predicted value and evaluation value

$$G = 1.7\log L_s + 0.8\log \omega - 1.0\log L_b + 0.1K - 1.3 \quad \dots (3)$$

- G : グレア (1 : 気にならない ~ 5 : 耐えきれない)
- L_s : 10,000cd/m²以上の発光部内平均輝度 [cd/m²]
- ω : 10,000cd/m²以上の輝度の部分を発光部とした場合の発光部内の立体角 [sr]
- L_b : 1,000cd/m²未満の背景の平均輝度 [cd/m²]
- K : 10,000cd/m²以上の輝度を発光部内輝度とした場合の不均一性係数

5.5. まとめ

不快グレア抑制のための小型 LED 照明器具の分散配置と昼光利用のためのハイサイドライトおよび光ダクトを設置したスポーツ施設を計画・竣工した。本施設の照明計画の概要を説明し、光環境を定量的に把握するための輝度分布測定と、小型 LED 照明器具を分散配置した場合のグレアへの影響を確認する被験者実験を行った。

視野内輝度分布は、パーセンタイル値により検討した。小型 LED 照明器具の分散配置は、照明器具 1 台当たりの出力光束が少ないが、視野に占める高輝度の割合は、大型の LED 照明器具を用いた施設に較べて小さくならなかった。本施設で用いている照明器具 1 台当たりの出力光束数に対する発光部面積の割合が、従来から用いられている大型の LED 照明器具と同じであったためと考えられる。

グレア評価実験では、小型 LED 照明器具分散配置型照明計画の本施設は、第 4 章で評価した大型の LED 照明器具を用いた施設に較べてグレアの程度が低かった。また、1/2 回路点灯・100%調光と全回路点灯・50%調光の比較では、全回路点灯・50%調光は 1/2 回路点灯・100%調光に較べて有意にグレア評価値が低く、照明器具 1 台当たりの出力光束を少なくして照明器具数を増やした小型 LED 照明器具分散配置型照明計画は、グレアの抑制に有効であると考えられた。

注

注1) GR の算出式

$$GR = 27 + 24 \log_{10} \left(\frac{L_{vl}}{L_{ve}^{0.9}} \right)$$

$$L_{vl} = L_{v1} + L_{v2} + \dots + L_{vn}$$

$$L_{vn} = 10 \times \frac{E_{eye}}{\theta^2}$$

$$L_{ve} = \frac{0.035 \times \rho \times E_{hav}}{\pi}$$

L_{vl} : 個々の照明器具によって生じる等価光幕輝度 (cd/m²) の合計
 L_{vn} : 個々の照明器具の光幕輝度 (cd/m²)
 E_{eye} : 観測者の視線 (俯角 2 度) に対して垂直な面の照度 (lx)
 θ : 観測者の視線 (俯角 2 度) と個々の照明器具とのなす角 (°)
 L_{ve} : 環境の等価光幕輝度 (cd/m²)
 ρ : 領域 (地面など) の平均反射率
 E_{hav} : 全運動競技面の平均照度 (lx)

注2) 現場において工場から運ばれてきた構材材を組み立てること。本施設では、地盤高さで箱型トラスにメンテナンス歩廊や照明器具、光ダクトなどをすべて組んでからクレーンで箱型トラスを据付した。

参考文献

- 1) JIS Z 9127:2011, スポーツ照明基準, 日本規格協会
- 2) 照明学会編: 照明ハンドブック, オーム社, 2003
- 3) 田中武, 高地正夫, 池田篤志, 葛原秀男, 松下光一, 吳浩廷, 栗栖慎也: LED を用いたアリーナのスポーツ照明と, その設置例, 広島工業大学紀要研究編, 第 51 巻, pp.231-241, 2017
- 4) 松井俊成, 岩崎浩暁, 岩井彌: スポーツ施設における照明設備, 電気設備学会誌, Vol.39, No.12, pp.852-855, 2016
- 5) 社団法人日本建築学会編: 昼光照明デザインガイドー自然光を楽しむ建築のためにー, 第 1 章 昼光照明, 技法堂出版, 2007
- 6) 社団法人日本建築学会編: 昼光照明デザインガイドー自然光を楽しむ建築のためにー, 第 3 章 昼光照明装置の構成要素, 技法堂出版, 2007
- 7) 社団法人日本建築学会編: 見る・使う・学ぶ環境建築, 第 5 章 光ダクト, オーム社, 2011
- 8) 畑田 豊彦: 視覚効果による人工現実感, 精密工学会誌, 57 巻, 8 号, pp.1330-1334, 1991
- 9) CIE Pub.112: Glare evaluation for use within outdoor Sports and area Lighting, 1994

第6章

スポーツ施設の LED 照明計画手法の オフィスへの適用と検証

第6章 スポーツ施設の LED 照明計画手法のオフィスへの適用と検証

6.1 はじめに

日本におけるオフィス照明の LED 化は急速に進んだ。LED 照明は従来の蛍光灯照明の代替品として普及し、省エネルギーだけでなく光の質の向上も期待されている。LED 照明は、指向性が強く、壁面や天井面への光の照射が少ない。壁面や天井面が暗くならないよう、直接照明と間接照明を一つの照明器具で実現する点光源タイプの小型 LED 照明器具が開発された。この照明器具は、直接照明はタスク照明として、間接照明は壁面や天井面のためのアンビエント照明となるよう設計された。この照明器具は小型のため、オフィス照明として 1000lx を確保する場合には、2m² に 7 個（533 mm 角四方に 1 個の照明器具）の照明器具の設置が必要である。本照明器具を採用する場合の照明計画手法は、第 5 章で評価したスポーツ施設と同様に小型 LED 照明器具分散配置型照明計画となる。この照明計画手法で照明設計されたオフィスは、覚醒度や作業性を向上させる可能性がある。一方で不快グレアを発生させる可能性もある。UGR は人工照明の不快グレアを評価する指標であるが、近年の研究結果では、LED 照明器具の場合の UGR 評価は、正確な予測が難しいことが示されている。

本研究の目的は、直接照明と間接照明を一つの照明器具で実現した点光源タイプの小型 LED 照明器具を用いて分散配置した小型 LED 照明器具分散配置型照明計画手法により照明設計されたオフィス（以降、点光源タイプの小型 LED 照明器具のオフィスと記す）の視環境を評価することである。輝度分布測定及び、被験者による覚醒度、明るさ感、不快グレアについての実験を行った。

6.2 フィールド実験

6.2.1 実験概要

測定と被験者実験は 2 つのオフィスで実施した。一つは点光源タイプの小型 LED 照明器具のオフィス、もう一つは蛍光灯による従来の直管型の照明器具のオフィス（以降、従来照明器具のオフィスと記す）である (Fig.6-1)。点光源タイプの小型 LED 照明器具は特殊なレンズにより光の方向を直接光と横向きの間接光に分けている。オフィスの机上面照度は、点光源タイプの小型 LED 照明器具のオフィスは 400lx、750lx、1000lx の 3 条件とし、従来照明器具のオフィスは 750lx とした。色温度は、点光源タイプの小型 LED 照明器具のオフィス、従来照明器具のオフィス共に 3500K であった。各照明条件で視野内輝度分布を測定した。被験者と照明器具の距離が評価に影響すると考え、測定位置は、壁面から 8m と 16m の 2 条件とした (Fig.6-2)。被験者は、明るさ感やグレアなどを含む評価尺度を用いて視環境を評価した。24 名の大学生が被験者として実験に参加した。



The office with the point-source-type LED lighting system



The office with the conventional light fixtures

Fig.6-1 Spaces evaluated

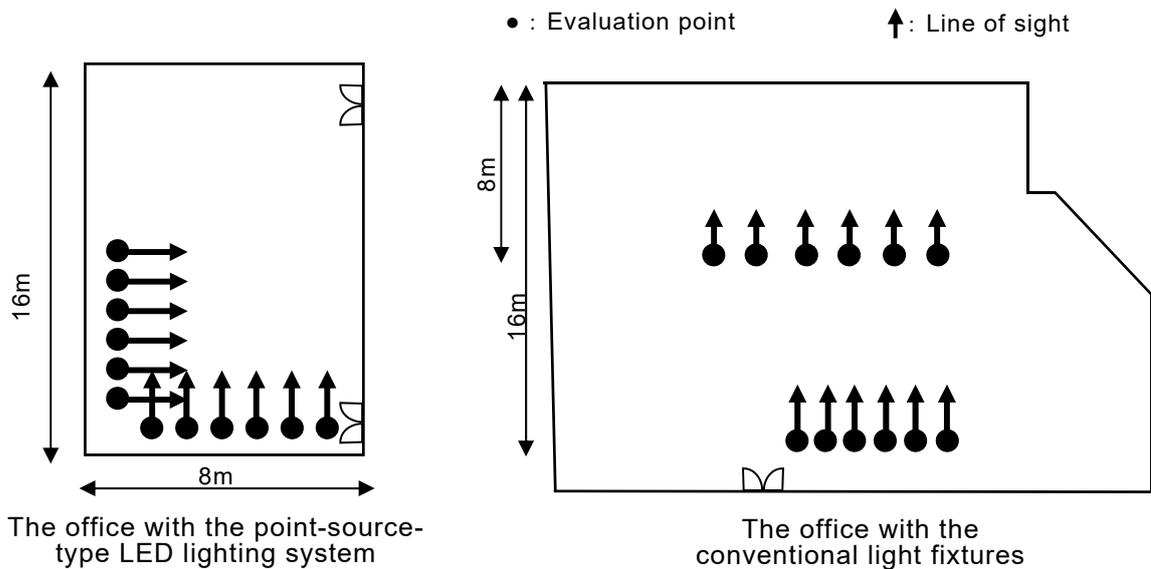


Fig.6-2 Positions of subjects

6.2.2 実験手順

被験者は執務室に入り 1 分間順応した後、5 分間のタイピング作業を行った。タイピング作業後、被験者は Table6-1 に示す 7 段階の尺度を用いて、オフィススペースの印象や作業性について評価した。15 の形容詞対を印象評価に用いた。その後、被験者は明るさ感について 13 段階の、グレアについて 8 段階のスケールを用いて評価した。同時に、水平面照度と鉛直面照度、輝度分布を測定した。測定器の概要を Tabel6-2 に示す。

Table6-1 Content of questionnaire evaluating impression and workability

Impression (7-point scales)	
•traditional – modern	•elegant – unsophisticated
•like – dislike	•luxurious – austere
•bright – dark	•warm – cool
•relaxed – tense	•uncomfortable - comfortable
•calm – restless	•ambiguous – clear
•vivid – sombre	•companionable - uncompanionable
•hard – soft	•cheerful – dreary
•simple - complicated	
workability (7-point scales)	
•ease of reading	• frustration with own shadows
•feeling of tired eyes	• visibility of VDT
•workability	• motivation
•satisfaction with lighting environment	

Table6-2 Measurement instruments

	Measuring point	Measuring instrument
Illuminance	Horizontal and vertical of subject, (1.2m high (height of sitting positions eye))	Incident color meter : KONICAMINOLTA CL-200A
Color temperature	Horizontal and vertical of subject, (1.2m high (height of sitting positions eye))	Incident color meter : KONICAMINOLTA CL-200A
Luminance distribution	6 points (1.2m high (height of sitting positions eye))	Digital camera:NIKON D3300 Lens A (fisheye): SIGMA4.5mmF2.8 EX DC CIRCULAR FISHEYE Lens B (narrow angle) :Nikon AF-S DX NIKKOR 18-55mm f/3.5-5.6G VR II ND filter (Lens B) : Edmund 50mm square 3.0 OD

6.2.3 フィールド実験の結果

Fig.6-3 に仰角別の輝度ヒストグラムを示す。従来照明器具のオフィスは、仰角が大きい方が小さい方比べて最大輝度が高くなった。しかし、点光源タイプの小型 LED 照明器具のオフィスはそうならなかった。小さい仰角の方が、大きい仰角の最大輝度に比べて高くなった。従来照明器具の最大輝度は、点光源タイプの小型 LED 照明器具の最大輝度より低かった。

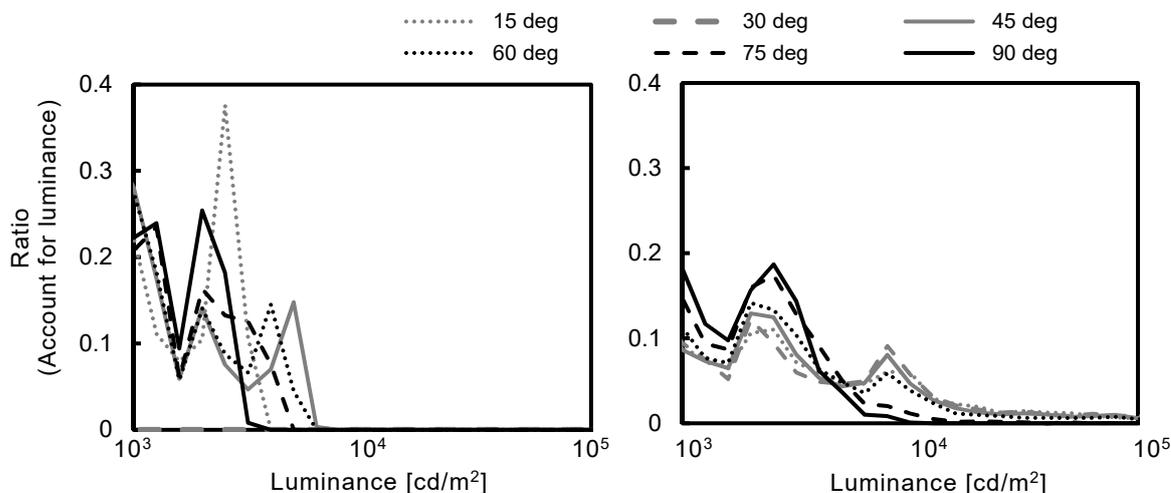


Fig.6-3 Results of luminance histogram

Fig.6-4 に被験者の印象評価の結果を示す。点光源タイプの小型 LED 照明器具のオフィスの設定照度は、400lx、750lx、1000lx の 3 条件であったが、各照度の間で有意差は認められなかった。Fig.6-4 の点光源タイプの小型 LED 照明器具のオフィスの結果は、750lx の結果である。また、測定距離間（8m と 16m）でも有意差も確認されなかった。

被験者は点光源タイプの小型 LED 照明のオフィスの方が派手と答え、従来照明器具のオフィスは地味と評価した。被験者は点光源タイプの小型 LED 照明器具のオフィスの方が、すっきりした、豪華な、上品な、はっきりしたと回答した。

Fig.6-5 に作業性に関する被験者の評価結果を示す。点光源タイプの小型 LED 照明器具のオフィスの結果は、750lx の結果である。点光源タイプの小型 LED 照明器具のオフィスは、やる気、作業性、読みやすさが向上したのに対し、従来照明器具のオフィスは、これらの要因が減少傾向であった。これらの結果より、点光源タイプの小型 LED 照明器具のオフィスの方が、従来照明器具のオフィスよりも執務に適していると考えられる。

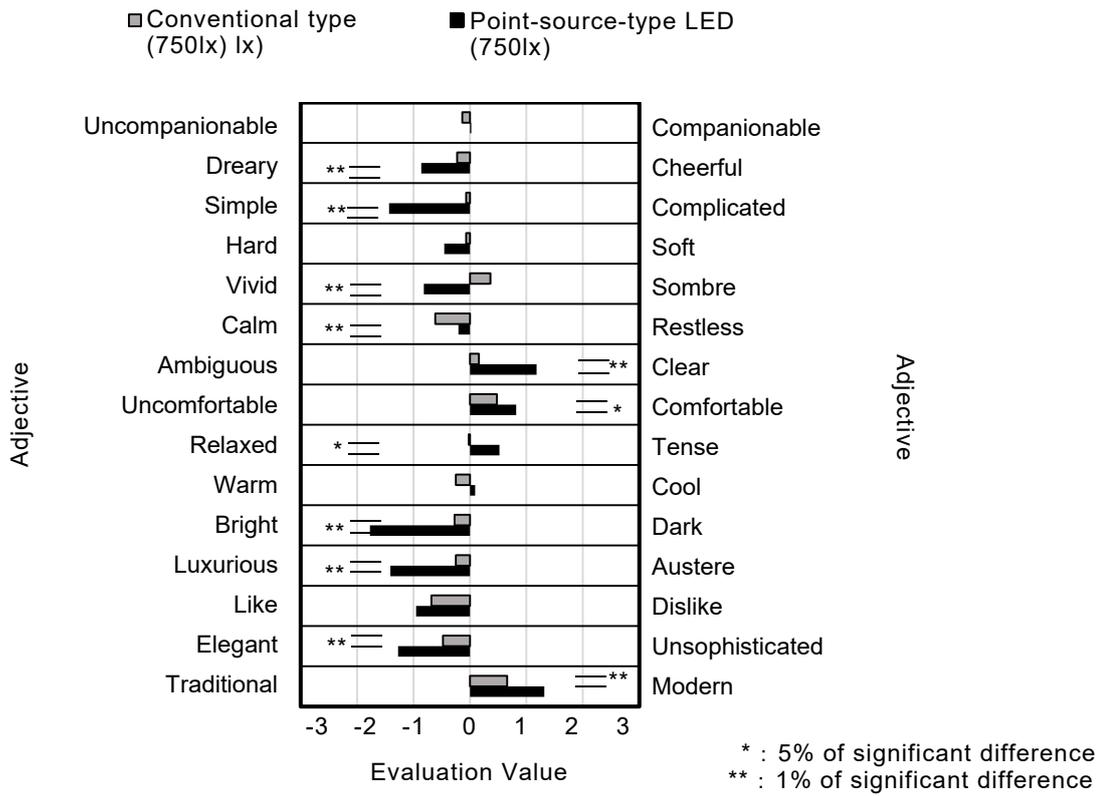


Fig.6-4 Results of the subjective impressions

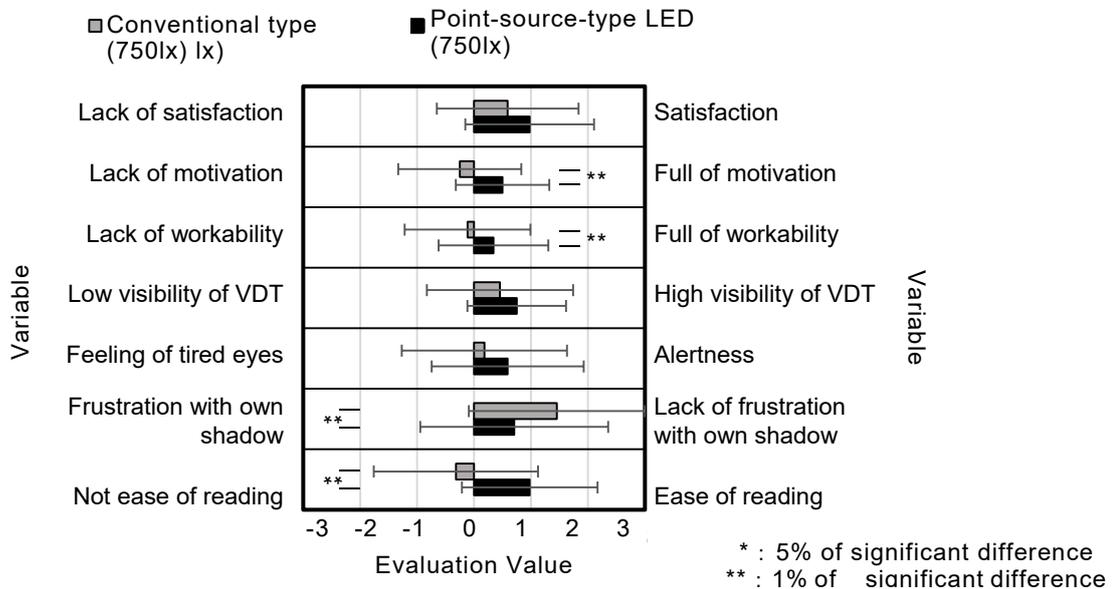


Fig.6-5 Results of the subjective impressions for workability

Fig.6-6 に視野の明るさ感の評価結果を示す。同じ 750lx で机上面が照明されているとき、点光源タイプの小型 LED 照明器具のオフィスの方が従来照明のオフィスよりも明るいと回答した。被験者は、点光源タイプ器具の小型 LED のオフィスの視環境の方が従来照明器具のオフィスの視環境よりも明るいと評価した。

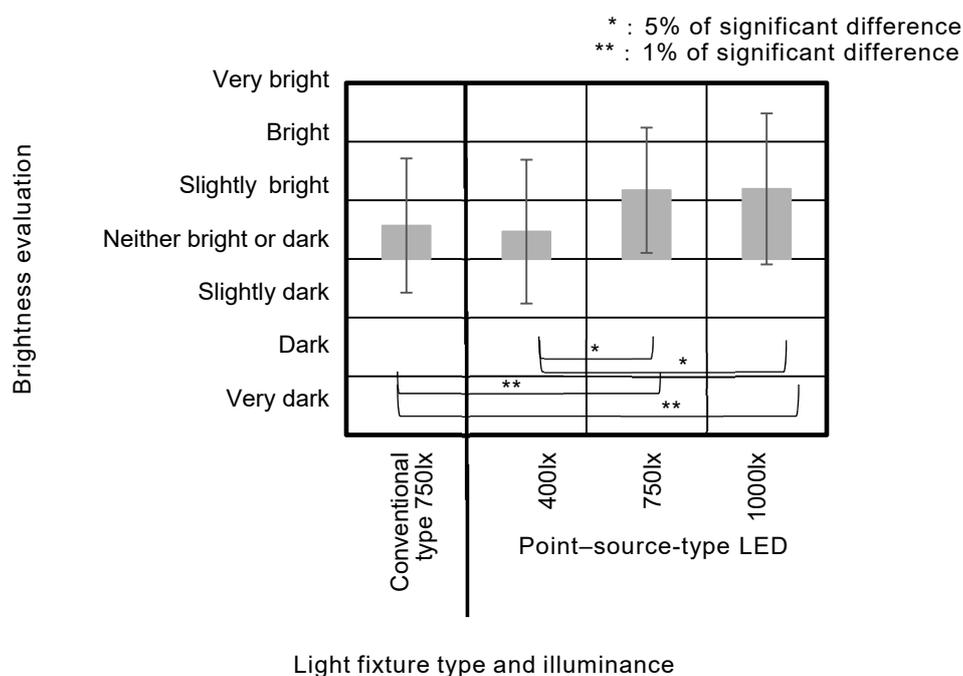


Fig.6-6 The brightness of visual field

6.3 模型実験

6.3.1 実験概要

オフィスの内装の影響を避けた評価を行うため、1/10 サイズの模型を使った被験者実験を実施した。Fig.6-7 に模型概要を示す。模型は、従来の直管型照明器具、拡散タイプの点光源器具、狭角タイプの点光源器具の 3 種類を用意した (Fig.6-8)。拡散タイプの点光源器具は従来型のダウンライト器具を模擬し、狭角の点光源照明器具はフィールド実験を行った点光源タイプの小型 LED 照明器具を模擬した (タスク照明の指向性の強さを模擬しており、横方向のアンビエント照明は再現できていない)。100m²の空間を照明するのに、直管型の従来照明器具は 30 台、拡散タイプの点光源器具は 400 台、狭角タイプの点光源器具は 350 台が必要であった。模型内の水平面照度の設定は、400lx と 750lx の 2 条件とした。色温度は 3500K であった。20 名の大学生が模型実験に参加した。

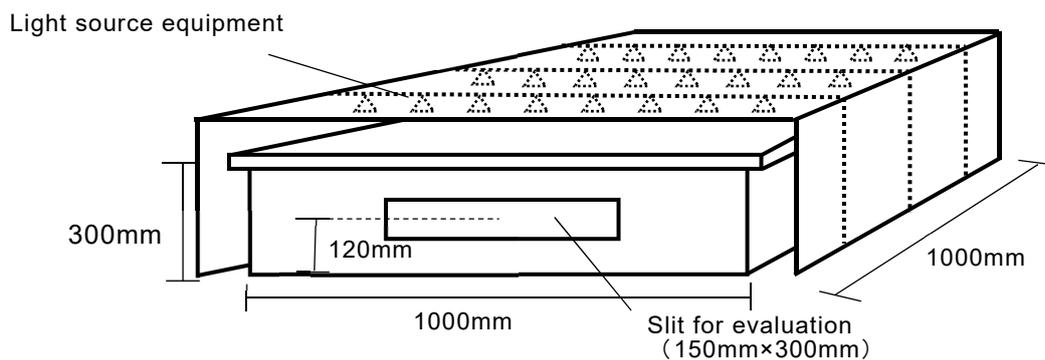


Fig.6-7 Outline of Scale model

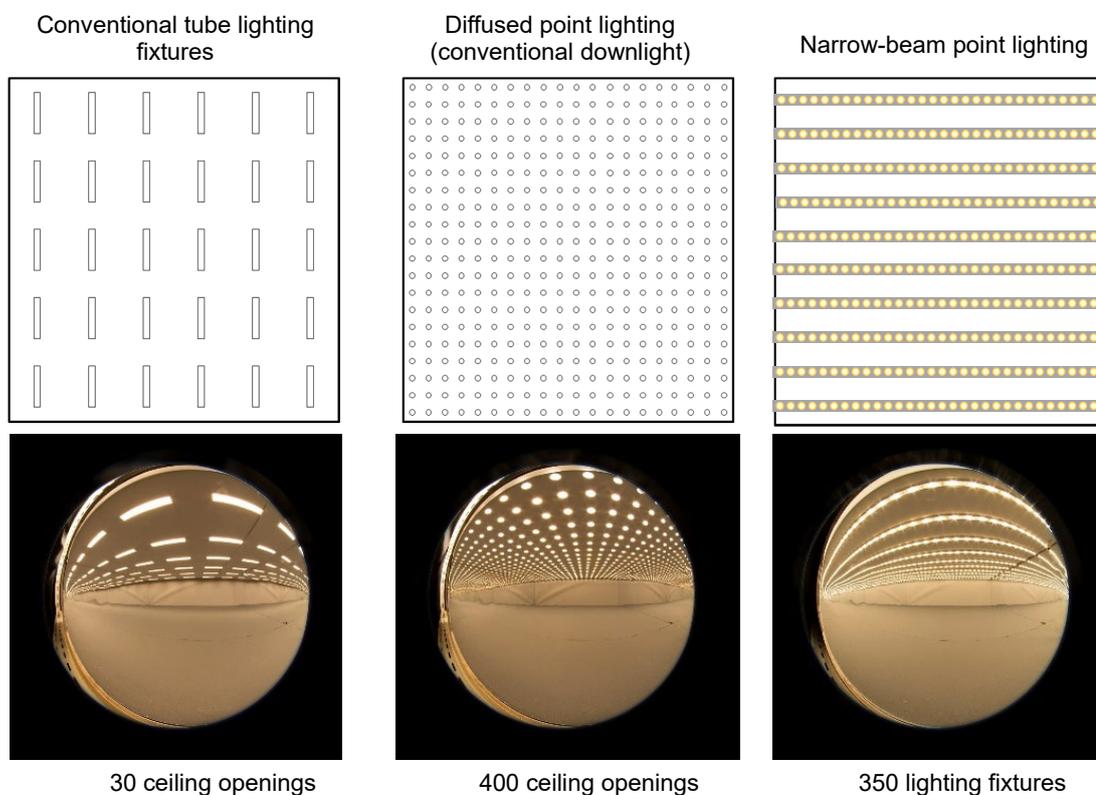


Fig.6-8 Model type

6.3.2 実験手順

被験者は暗室に入り、7分間順応した。その後、被験者は1分間模型内を覗き、7段階の尺度の指標を用いた執務室の印象評価を行った。明るさ感は13段階、グレアは9段階の尺度により評価した。評価のアンケート用紙は、フィールド実験で用いたものと同じもの (Table6-1) を利用した。

6.3.3 実験結果

Fig.6-9 に設定照度 750lx の時の被験者の印象評価結果を示す。被験者は拡散タイプの点光源器具および狭角タイプの点光源器具で照明された空間は、従来の直管型照明器具で照明された空間より明るいと評価した。被験者は拡散タイプ、狭角タイプともに点光源器具で照明された照明空間は、あたらしく派手な空間と評価した。

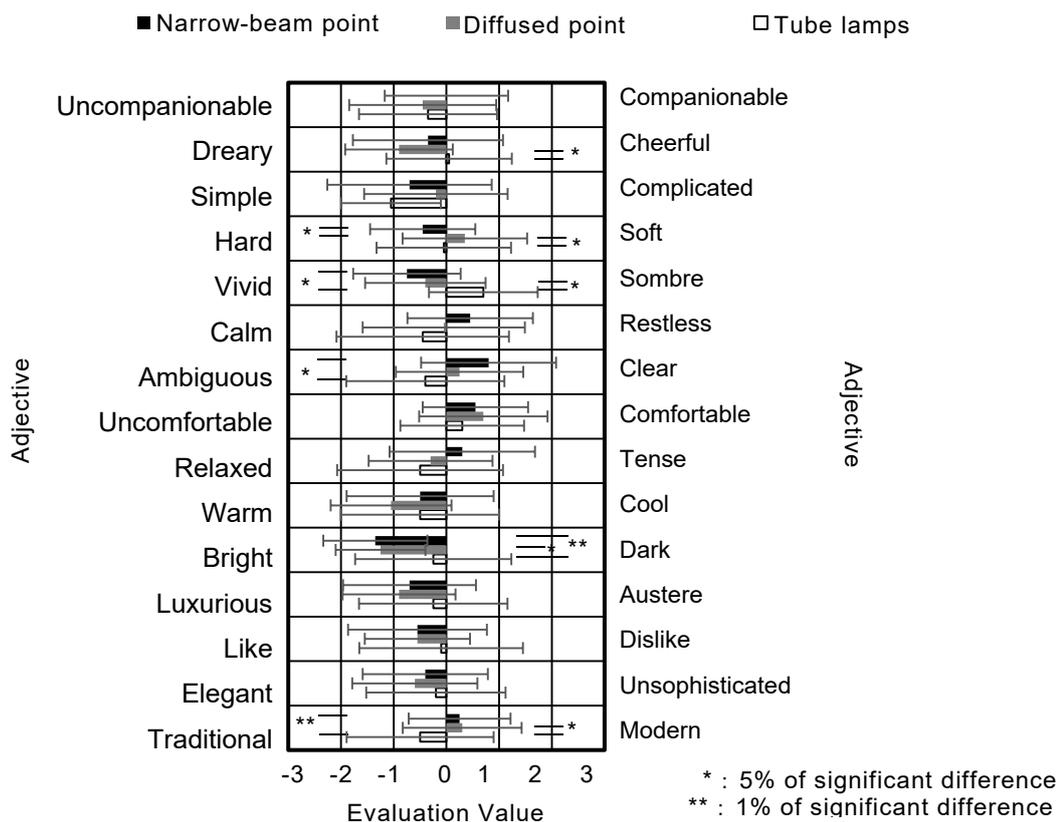


Fig.6-9 Results of the subjective impressions

Fig.6-10 に視野内の明るさ感の評価結果を示す。被験者は、設定照度 400lx、750lx ともに、拡散タイプ、狭角タイプともに点光源器具で照明された空間は、従来の直管型照明器具で照明された空間に比べて、明るいと評価した。

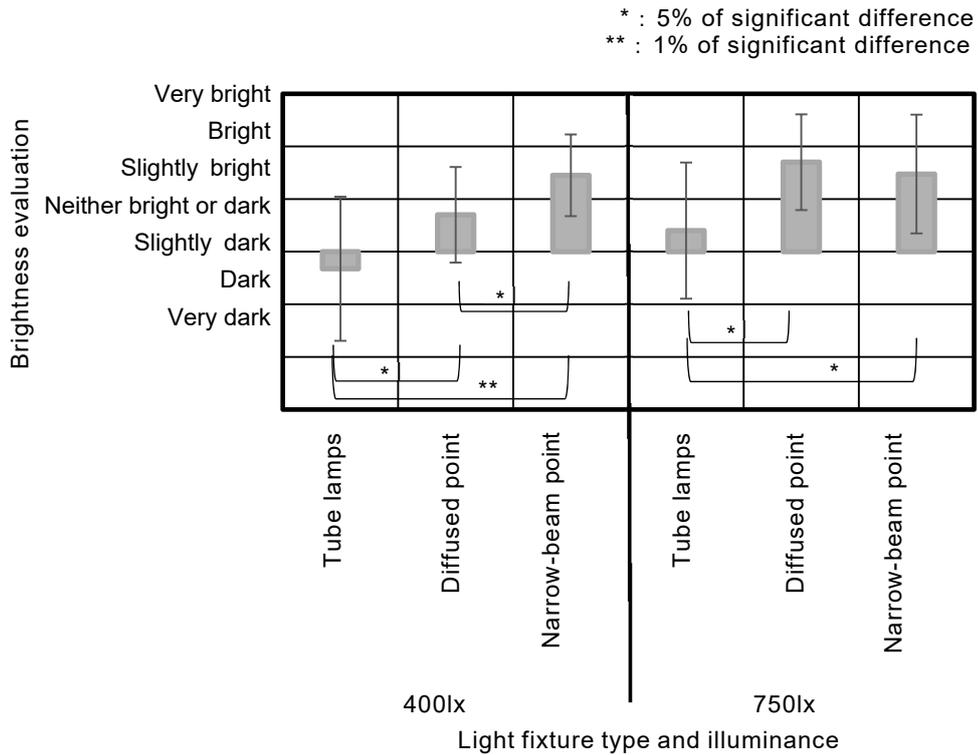


Fig.6-10 Brightness of visual field

6.3.4 グレアと算出した UGR 値との関係

UGR 値を計算するには、グレア減となる輝度と背景となる輝度の閾値の決定が必要である。閾値輝度が $500 \sim 5000 \text{cd/m}^2$ の場合、UGR 値の算出への閾値輝度の影響は小さいことが明らかとなっている¹⁾。

Fig.6-11 にグレア評価値と算出した UGR 値との関係を示す。フィールド実験では、点光源タイプの小型 LED 照明器具のオフィスの算出した UGR 値は 23 程度であった。点光源タイプの小型 LED 照明器具のオフィスの UGR 値は従来照明器具のオフィスよりも高かった。しかし、被験者によるグレア評価では、点光源タイプの小型 LED 照明器具のオフィスは「気になりはじめる」であった。模型実験では、狭角タイプの点光源器具で照明されたオフィスの UGR 値は 23 を超えていた。しかし、被験者によるグレア評価では、「きになりはじめる」程度であった。これは、UGR 値では 16 に相当する。

フィールド実験の点光源タイプの小型 LED 照明器具のオフィスおよび模型実験の狭角タイプの小型 LED 照明器具はいずれも指向性の強い点光源の照明器具で、指向性の強い点光源の照明器具で照明されたオフィス空間の UGR 値は、過大となった。

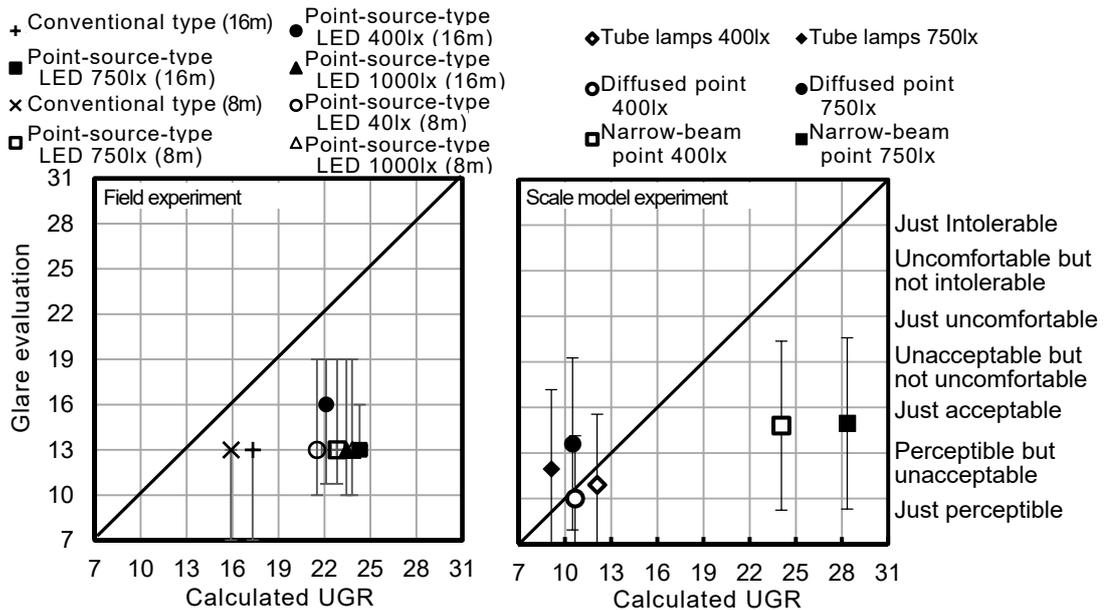


Fig.6-11 Relationship between glare evaluation and calculated UGR

6.4 まとめ

点光源タイプの小型 LED 照明器具が用いられたオフィスでは、仰角が低くなる照明器具の輝度が高かったが、一方で、従来型照明器具が用いられたオフィスでは、被験者からの位置が近い照明器具の輝度が高かった。仰角が低くなる場合に点光源タイプの小型 LED 照明器具が用いられたオフィスはグレアの程度が大きくなる可能性がある。

被験者は、同じ照度であれば、フィールド実験、模型実験ともに、点光源タイプの小型 LED 照明器具が用いられたオフィス空間の視環境は、従来照明器具が用いられたオフィス空間よりも明るいと評価した。小型 LED 照明器具分散配置型照明計画をオフィスに適用した場合、明るさ感の向上に寄与できる。

グレア評価では、フィールド実験、模型実験ともに、被験者評価結果に点光源タイプの LED 照明器具と従来照明器具とで有意差は確認されなかった。しかし、フィールド実験の点光源タイプの小型 LED 照明器具のオフィスおよび模型実験の狭角タイプの LED 照明器具はいずれも指向性の強い点光源の照明器具で、指向性の強い点光源の照明器具で照明されたオフィス空間の UGR 値は、過大となった。指向性の強い点光源タイプの LED 照明器具を用いる場合の UGR の適用は注意が必要である。

小型 LED 照明器具分散配置型照明計画手法により設計されたオフィス照明は、明るさ感を向上させ、またグレアへの影響はないことが示された。

参考文献

- 1) 岩田利枝, 谷口智子, 篠原奈緒子, 小川禄仙, 海宝幸一: 新開発反射モジュール型 LED 照明を導入したオフィス光環境の実測評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.581-582, 2016

第7章 総括

第7章 総括

本論文では、照明器具のLED化で懸念されるグレアの問題の解決とLED照明器具の特徴を用いた照明計画手法が視環境に与える影響について検証することを目的とした。

LED照明器具は、その種類にもよるが複数のLED素子を用いて構成されるものがある。特に天井の高い大規模施設向けのLED照明器具では、複数の指向性の強いLED素子で大きな発光面を構成するため、一般照明器具に比べてグレアの発生の可能性が高い。また、大規模な施設のうちスポーツ施設については、競技中に視線が上を向き照明器具を直視する可能性が高い。グレアの問題については、屋内スポーツ施設を対象として評価を行った。屋内スポーツ施設の光環境については既往の研究が少ないため現状把握を行い、その後にグレアへの影響要因を抽出した。LED照明器具の特徴を用いた照明計画手法が視環境に与える影響については、屋内スポーツ施設において視環境評価を行った後に、オフィスに展開した場合の視環境を評価した。合わせて視環境の把握のために必要となる輝度分布測定において、画像測光システムの性能の違いが測定結果に与える影響を検証した。

以下に各章で得た知見を示す。

第1章では、照明器具の光源がLED素子に変わったことで発生した課題について述べ、本論文の意義を明らかにした。また、関連する研究について整理し、本論文の位置づけを示した。本論文の目的および構成について述べた。

第2章では、LED照明器具の輝度測定について、画像測光システムに用いるデジタルカメラの性能の違いが測定結果に与える影響を明らかにした。仕様の異なる画像測光システムの性能について比較し、画像の鮮鋭度に関係する結像特性を表現するMTF (Modulation Transfer Function) 特性の調査の必要性を示した。また、性能の異なる複数の画像測光システムを用いて同一の照明器具の輝度分布を測定した結果を比較検証し、ヒトが視認できる視角0.05°程度(空間周波数10cpd程度)のLED照明器具の発光部の輝度分布測定では、空間周波数10cpdでコントラスト0.95以上の画像測光システムを用いる必要があると判断した。照明器具の輝度の詳細を把握するには、平均輝度だけではなく、輝度ヒストグラムの提示が必要であることを示した。

第3章では、照明器具を直視する可能性が高く、また指向性の強いLED素子を複数組み合わせて大面積の発光部を構成した大型の照明器具を用いる屋内スポーツ施設を対象として視環境把握を行った。LED照明器具の施設6件、HID照明器具の施設5件の計11件の屋内スポーツ施設を対象に、これまで行われてこなかった視環境把握として、照度分布のほかには視野内輝度分布、照明器具の発光部内輝度分布の測定を行った。ここで評価したLED照明器具の施設は、従来の照明計画手法を踏襲して照明設計された施設で、従来照明器具を

LED 照明器具へ置換した（光源が従来光源から LED に置き換えられた）照明計画の施設である。視野内輝度分布および発光部内輝度分布は、仰角が大きいほど輝度が有意に高くなった。視野内輝度分布では光源種別（LED 照明器具と HID 照明器具）で有意差は確認されなかったが、発光部内輝度分布は LED 照明器具のほうが HID 照明器具に比べて有意に輝度が高いことを示した。

第 4 章では、第 3 章で視環境把握を行った 11 件の屋内スポーツ施設において、グレアの影響要因を抽出するため、被験者によるグレア評価実験を行った。結果、仰角が大きいほどグレアの程度は大きくなり、また、JIS 競技区分のレベルが高いほどグレアの程度は大きくなった。光源種別（LED 照明器具と HID 照明器具）では有意な差は確認されなかった。被験者の視線方向の輝度分布画像から解析した発光部内輝度は、仰角が大きいほど輝度が高かった。グレアの影響要因を抽出するための重回帰分析を行った結果、不均一な発光部によるグレア評価式 UGR' の計算に用いる変数が抽出された。抽出された変数は、UGR' に用いる変数と等しいが、発光部となる輝度の範囲が高く、発光部以外の輝度が全て背景とはならなかった。また、不均一係数 K の係数の影響は小さかった。特に、 $10,000\text{cd/m}^2$ 以上の部分の平均輝度がグレアに与える影響が大きく、 $10,000\text{cd/m}^2$ 以上の輝度を低減させることがグレアの程度の低下につながることを明らかにした。

第 5 章では、LED 照明器具の小型、長寿命という特徴を用いた多灯配置型の照明計画手法（従来とは異なる照明計画手法、小型 LED 照明器具分散配置型照明計画と本論文では言う）により照明設計された屋内スポーツ施設において、第 3 章、第 4 章と同様の視環境計測とグレア評価実験を行った。照明器具の直視を伴うスポーツ施設において、1 台当たりの照明器具の出力光束を低減した小型 LED 照明器具を多灯配置した照明計画手法が視環境に与える影響を検証した。被験者実験では、小型 LED 照明器具分散配置照明計画は、第 4 章で評価を行った屋内スポーツ施設に比べてグレアの程度が低かった。照明器具台数がグレアに与える影響を検討するため、同照度条件において、照明点灯条件は 1/2 回路点灯・100% 調光と全回路点灯・50% 調光の結果を比較した。全回路点灯・50% 調光は、1/2 回路点灯・100% 調光に比べて有意にグレア評価値が低く、照明器具数を増やして照明器具 1 台当たりの出力光束を下げた小型 LED 照明器具分散配置照明計画は、グレアの程度の低減に有効であることを示した。

第 6 章では、第 5 章で検証した小型 LED 照明器具分散配置照明計画手法を、オフィスに適用した場合の視環境を評価した。従来の照明計画手法により照明設計されたオフィスと小型 LED 照明器具を多灯配置した照明計画手法により照明設計されたオフィスについて、光環境計測と被験者実験を実施した。小型 LED 照明器具分散配置型照明計画手法により照明設計されたオフィスは、明るさ感を向上させ、またグレアへの影響はないことを示した。

第 7 章では、本論文の結論を述べるとともに本研究における将来の展望についてまとめた。

本論文では、照明器具の LED 化で懸念されるグレアの問題の解決と LED 照明の特徴を用いた照明計画手法が視環境にあたえる影響について検証することを目的とした。

照明器具の光源が LED 素子に変わったことにより、大型施設に用いられる照明器具からのグレアの発生が懸念されるため、屋内スポーツ施設を対象に視環境の現状把握とグレアの影響要因の抽出を行った。あわせて、LED の特徴を用いた照明計画手法で照明設計された屋内スポーツ施設及びオフィスの視環境を評価した。

LED 照明器具は従来照明器具と同様の照明計画手法を用いて照明設計するのが一般的であったが、LED 照明器具の特徴を用いた照明計画手法により照明設計を行うことで、グレアの低減や明るさ感の向上に寄与するなど、付加価値の高い照明環境の提供が可能と考えられた。

本論文では、小型照明器具を用いた照明計画手法を用いて照明設計された屋内スポーツ施設およびオフィスの視環境の評価を行ったが、LED 照明器具の特徴は様々あり、照明計画手法は多岐にわたると考えられる。LED 照明器具の特徴を用いた付加価値の高い照明環境の普及に向けては、さらなる研究や評価が必要である。