屋内スポーツ施設における視環境評価（その2）：
グレア評価実験EVALUATION OF VISUAL ENVIRONMENT IN GYMNASIUMS (PART 2) :
EXPERIMENT OF GLARE EVALUATION篠原 奈緒子^{*1}, 岩田 利枝^{*2}, 望月 悦子^{*3}, 谷口 智子^{*4}Naoko SHINOHARA, Toshie IWATA, Etsuko MOCHIZUKI
and Tomoko TANIGUCHI

To evaluate glare felt during sports, subjective experiments were carried out in eleven gymnasiums (six with LED lighting and five with HID lighting). The subjects looked at a badminton shuttlecock in front of the lighting, assuming that he/she was playing badminton.

Result of multiple regression analysis showed that the average luminance of light emitting part, solid angle of light emitting part and average luminance of background part are effective for glare prediction. In order to reduce glare, area with higher than 10,000 cd/m² should be decreased.

Keywords : LED, Sports lighting, Glare, Subjective experiment, Luminance distribution

LED, スポーツ照明, グレア, 被験者実験, 輝度分布

1. はじめに

照明のLED化が加速し、スポーツ照明のLED化も進んでいる。LED照明器具には、本論文その1¹⁾で述べたように、発光面積が小さい、指向性が強いなどの特徴があり、スポーツ施設におけるグレアの発生が懸念される。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ており、本論文はその1¹⁾とその2から成る。本論文その1では、従来照明器具(HID)とLED照明器具の屋内スポーツ施設での実測による視環境把握を行った。その結果、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)に比べて有意に高く、LED照明器具の高い発光部内輝度がグレアに影響する可能性が考えられた。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内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も言われている^{2),3)}など。本論文その2では、競技中に発生する照明器具によるグレアに影響する因子を抽出する。

スポーツ照明に関しては、JIS Z 9127:2011^{4),注1)}に、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2)}に定められている。グレア制限値はGR^{5),注3)}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⁴⁾。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。このため、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。

上述の通りGRでは現在スポーツ照明で発生しているグレアの評価は難しいと考えられるが、照明器具が直接視野に入る場合のスポーツ照明のグレアに関連する研究はいくつかみられる。硬式野球を想定した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^{6),7)}、視対象となるボールの見え方を評価している。この研究では、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おり、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

¹⁾ ㈱日建設計 博士(工学)²⁾ 東海大学 博士(工学)³⁾ 千葉工業大学創造工学部建築学科 教授・博士(工学)⁴⁾ ㈱久米設計 博士(工学)

Nikken Sekkei Ltd., Dr.Eng.

Tokai University, Dr.Eng.

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Creative Engineering,

Chiba Institute of Technology, Dr.Eng.

Kume Sekkei Co., Ltd., Dr.Eng.

いない。田代ら⁸⁾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ている。山田ら⁹⁾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¹⁰⁾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 の実験室で実験は行われているが、天井高が 10m を超える屋内スポーツ施設もある。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。

スポーツ照明以外においても照明器具を直視した場合の研究はいくつかみられ、いずれも照明の LED 化で発光部内輝度が不均一になったことに着目している。田代ら¹¹⁾は、同じ平均輝度（実験では 58.2cd/m^2 を使用）であれば均一光源に比べて不均一光源が明るく知覚されることを示している。森¹²⁾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¹³⁾は、森の実験¹²⁾よりも出力の高い 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、平均輝度よりも最大輝度のほうが被験者の照明器具によるグレア評価との相関が高く、直視グレアの予測には最大輝度を考慮する必要があることを示している。

照明器具を直視しない場合についても、照明器具の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 UGR^{14), 注 4)}が用いられ、JIS Z 9110:2010¹⁵⁾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 照明器具によるグレア評価への適用の可否の議論がされている^{16)~18)}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^{19)~21)}。CIE では、発光部内輝度が不均一な照明器具によるグレア評価には 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²²⁾。

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。屋内スポーツ施設に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、前述の通り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ている。本論文その 1¹⁾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、輝度分布を実測した。本論文その 2 では、その 1¹⁾で照度、輝度分布を実測した

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、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グレア評価実験を行った。競技中に発生する照明器具によるグレアに影響する因子を抽出した結果を論じる。

2. 実験方法

2. 1 実験概要

スポーツ競技中の視野に入る照明器具による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。本実験は、「東海大学『人を対象とする研究』に関する倫理委員会」の承認（承認番号 15112）および千葉工業大学『人を対象とする研究倫理審査』の承認（承認番号 2015-02-02）を得て行った。

実験を行った施設と被験者の概要を Table1 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 5)}。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。床面平均照度および照度均斉度は、本論文その 1¹⁾で JIS Z 9127:2011⁴⁾の「屋内運動場」の方法^{注 6)}に従い測定（KONICA MINOLTA CL-200）した、各施設半面の床面照度分布^{注 7)}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⁴⁾に基づき、本論文その 1¹⁾で分類した^{注 8)}（以降、競技区分と記す）。施設 H、E 以外の施設には窓が設置されていたが、遮光カーテン（黒）により遮光した。

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。

2. 2 被験者実験

2. 2. 1 実験条件および手順

実験は、Fig.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見えるように、被験者、シャトル、照明器具の位置関係を設定した。競技中は視線が動くため、天井を見上げる際の仰角が固定されず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。競技エリア内の一番端にある照明器具がシャトルの背景となるように設定し、被験者の評価位置を変えて仰角を設定して実験した。

被験者の視線上に各仰角の照明器具が配置されるように被験者の位置を調整した。観客席のある大規模な施設（施設 M、To、T、H、

Table1 Outline of subjective experiments 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	
Surface color	Ceiling	Cream	Cream	Gray	Gray	White	White	White	White	White	White	White	
	Wall	Upper	White	Light brown*1	Beige*1	White	White	White	White	White	Cream	White	White
		Lower	Brown*1	ditto	ditto	Brown*1	Light brown*1	Brown*1	Light brown*1	Light brown*1	ditto	ditto	Brown*1
	Floor*1,2	Light brown	Beige	Beige	Beige	Light brown	Light brown	Light brown	Light brown	Light brown	Beige	Light brown	Beige
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 ⁴⁾		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	
Uniformity*3		0.64	0.82	0.51	0.73	0.62	0.48	0.73	0.66	0.64	0.70	0.22	
Number of luminaire		198	84	96	80 (LED) / 26 (HID)	24	28 / 14	80	80 / 20	220	35	52	
Power of luminaire*4		82.6W× 4	373W	254W	181W / 700W	6.9W×6	98W / 72W	260W	1,000W / 660W	415W	430W	250W	
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	

*1 Wood-based finishing

*2 Glossy surface finish

*3 Uniformity : minimum / average

*4 Provided by architectural design documents

E)においては、評価するシャトルの背景にある照明器具の先にも照明器具が設置されている（施設 T 以外は、観客席エリアには競技エリア内と同じ照明器が設置されている。施設 T は、観客席用の照明器具の光源は HID で、競技エリア内とは異なる照明器具が設置されている）。本研究は、スポーツ競技中の視野に入る照明器具によるグレアを対象としており、競技中に実験条件（Fig.1）のようにシャトルの背景に照明器具が視野に入るのは一瞬と考えている。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²³⁾とされており、この範囲には評価するシャトルの背景にある照明器具以外は含まれないため、周辺の照明器具によるグレアへの影響はないと判断した。

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。視標近傍の背景は、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。内装壁面の反射率は、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。シャトルがある場合でも照明器具の発光部はシャトルに対して十分に大きいため、照明器具の発光部はシャトル越しに確認できた。

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”

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.1 Experimental setup

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した後に、④アンケートに回答した。アンケートの内容を Table2 に示す。Table2 中の各評価カテゴリーに与え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）、シャトル有り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によるグレア（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視環境として許容できるか（許容

Table2 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

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(Table2中のA～C)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(Table2中のD～F)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視標が見えやすく照明器具による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。

2. 2. 2 測定

被験者によるグレア評価と注視している視野内の輝度分布との関係を検討するため、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.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、視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。

輝度分布測定システムの概要と測定時の設定をTable3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9)}、照明器具の正確な発光部内輝度の測定が難しい²⁴⁾。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、本論文その1¹⁾で用いた狭角タイプのレンズを用いた。本測定で用いたレンズの画角は28.5度で、人間が瞬時に情報を受容できる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)を装着する場合と装着しない場合とで測定した。一条件につきシャッタースピード6段階(1/4,000、1/1,000、1/250、1/60、1/15、1/4)で、NDフィ

Table3 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

ルター装着有無の計12枚撮影し、それらの写真の階調値から輝度を算出した。12枚の写真から算出した輝度を合成して輝度分布データを取得^{注10)}し、解析に用いた。

3. 実験結果

3. 1 グレア評価結果

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%、照明器具によるグレアが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%、照明器具によるグレアが6%であった。多くの条件で正規性は確認されなかったため、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。

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と未経験者とで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によるグレア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。

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。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の両方で確認した。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に示す。中央値を用いた場合は、シャトル有りの照明器具による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による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によるグレアとシャトル

Table4 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

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。

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による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、視環境の許容度を総合評価と考え、これに最も影響する評価項目の抽出を試みた。各項目の評価結果のうち、シャトル有りの照明器具によるグレアとシャトルの見やすさの相関係数が 0.7 程度で中程度から高い相関があったため、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による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による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 Table5 に示す。シャトル無しの照明器具によるグレアが視環境の許容度に最も影響していた。判別率の中率は、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。

Table5 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
***: 0.1% significant

3. 1. 4 仰角、競技区分、光源種類とグレア評価

本研究では、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ているが、本実験結果ではシャトル無しの照明器具によるグレアが視環境の許容度に最も影響していた。バドミントン競技中の視線はシャトルを追うため、実際にはシャトル有りの場合に起こるグレアも光環境の許容度に影響すると考えられる。11 施設の仰角 3 条件の照明器具によるグレア評価について、シャトルの有無の差の検討をウィルコクソンの符号順位と検定により行った。その結果、有意な差は認められなかった。シャトル有りの照明器具によるグレアとシャトル無しの照明器具によるグレアは相関が高く有意差も見られなかったため、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によるグレアを対象に、評価結果を述べる。

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によるグレア評価の結果を、施設別、仰角別に Fig.2 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。本論文その 1¹⁾では、全条件で GR 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 9127:2011⁴⁾による競技区分や光源種類 (LED と HID) ではグレア評価に差がないように見える。本論文その 1¹⁾では、視野内輝度分布は仰角間および競技区分間で、発光部内輝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と検定を用いた。結果を Table6 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くほど有意にグレア評価が高かった。仰角 60 度と 80 度の間でグレア評価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。全被験者評価を用いた仰角別のウィルコクソン

Fig.2 Evaluation of glare from luminaire (The focus is on the luminaire)

Table6 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 ***

*: 5% significant
**: 1% significant
***: 0.1% significant

の符号順位と検定の結果も Table6 中に示した。仰角 40 度と 60 度、40 度と 80 度、60 度と 80 度の間の全てで、仰角が大きい方がグレア評価は有意 (0.1%) に高かった。

競技区分による差の検討には、全被験者評価を用いたウィルコクソンの符号順位と検定を用いた。Table7 に結果を示す。競技区分 I と II の間にはグレア評価に有意な差は認められなかったが、競技区分 I と III、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は有意に高かった。

光源種類 (LED と HID) による差の検討には、2 標本コルモゴロフ=スミルノフ検定を用いた。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。

Table7 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

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による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、本論文その 1¹⁾と同様に、1,000cd/m²以上の部分を発光部とした。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.3 に示す。施設 Ho 以外は仰角が大きいほど発光部内平均輝度は高かった。発

光部内平均輝度の仰角による差の検討のため、一元配置分散分析を行った。結果を Table8 に示す。仰角が大きいほど 1,000cd/m²以上の発光部内平均輝度は有意 (1%) に高かった。本論文その 1¹⁾で測定した視野内輝度、発光部内輝度も、本結果と同様に仰角が大きいほど輝度は有意に高かった。

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 Table8 に示した。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 HID 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。

被験者の照明器具によるグレア評価では、シャトルの有無間で有意な差は認められなかったが、シャトル有りの場合の被験者の視野内輝度分布測定では、シャトルにより照明器具の一部が隠れるため、T 検定によりシャトルの有無間で発光部内平均輝度に差がないかを確認した。その結果、シャトル無しの場合の方が有りの場合よりも発光部内平均輝度は有意 (0.1%) に低かった。

Table8 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

4. グレアに影響する因子の抽出

本研究で扱うグレアは、スポーツ競技中の視野に直接照明器具が入ることによって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。

グレアに影響する因子の抽出のため、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 14),25),26)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、光源立体角、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 1,000cd/m²以上の部分の平均輝度)、発光部(発光部と定義した輝度 1,000cd/m²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。屋内施設に一般的に適用される不快グレア評価指標の 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²²⁾が、本研究における被験者によるグレア評価では、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 の輝度分布画像では、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不快グレア評価指標 UGR'²²⁾(式(1)、(2)より求められる)も算出し、変数に加えた。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、ヒトの目で

Fig.3 Average luminance of light emitting part with higher than 1,000 cd/m² at each elevation angle

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²⁷⁾が、石垣らのスポーツ選手の視力に関する調査²⁸⁾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 1)}。

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

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

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平均輝度 (cd/m²)
 ω_{eff} : 有効な発光部として抽出した部分の立体角 (sr)

発光部内平均輝度は、「3.2 被験者の視野内輝度分布測定結果」では 1,000cd/m² 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 cd/m² 以上の輝度と 10,000cd/m² 以上の輝度の 2 条件を設定した。100,000 cd/m² 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 100,000cd/m² 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によるグレア評価値（各施設、各仰角の被験者評価中央値）とした。Table9 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による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ない。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（10,000cd/m² 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による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。シャトル無しの照明器具によるグレア評価値を目的変数として、Table9 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 K ）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。

Table10 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、

Table9 Variables of 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 Tls (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]

Table10 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

*** : 0.1% significant

10,000cd/m² 以上の平均輝度の値は Table9 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。

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ったと考えられる。Table10 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。

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

G : グレア (1 : 気にならない～5 : 耐えられない)
 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とした場合の不均一性係数

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。本論文その1¹⁾では、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。視野内輝度分布の測定結果より算出したGRは、いずれの施設も20以下と低かった。本論文その2²⁾では、本論文その1¹⁾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によるグレアに影響する因子を抽出した。

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以上の部分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、グレアに影響する因子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 UGR³⁾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事が明らかとなった。

謝辞

本研究は、照明学会「LED スポーツ照明の直視グレアに関する研究調査委員会」の活動の一部であり、また、平成27年度科学研究費補助金(基盤研究(B)、課題番号15H04087)の助成を受けた。記して感謝の意を表す。本実測にご尽力いただいた増田大地さん、南澤勇輝さん、斎藤駿介さん、二見賢さん、阪上恵理さん、新谷菜摘さん(以上、当時東海大学岩田研究室)及び秋山翼さん、松本大介さん、小幡信輔さん、伊藤雄翼さん(以上、当時千葉工業大学望月研究室)に深く感謝の意を表す。

注

- 注1) 本研究ではJIS Z 9127:2011を参照して研究を進めたが、その後改正され、JIS Z 9127:2020²⁹⁾に置き換えられている。
 注2) 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3) GRの算出式

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

L_{vt} : 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4) UGRの算出式

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

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5) 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 9127:2011⁴⁾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为目标に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6) 「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。

$$E = \left(\frac{1}{4n} \right) \left(\sum_{i=1}^4 (E_{田} i) + 2 \times \sum_{i=1}^0 (E \Delta i) + 4 \times \sum_{i=1}^p (E \circ i) \right)$$

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

注7) 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8) JIS運動競技区分は設計段階で定められるが、事前にJIS運動競技区分を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9) 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10) 画像データからの輝度の算出は古くから一般的に広く使われている方法^{例えば 30)}を用い、シャッタースピードが異なる画像の信号値から輝度値への変換は、著者らが開発したプログラムを利用した。必要な輝度範囲および測定精度を確保するように³¹⁾白色LEDを用いてキャリブレーションを行った。

注11) 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

- Naoko Shinohara et al: Field Measurements of Illuminance and Luminance Distribution -Evaluation of visual environment in gymnasiums part 1-, Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ), Vol.85, No.778, pp.943-952, 2020.12 (in Japanese) 篠原奈緒子他: 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
- L. M. Geerdinck, et al: Discomfort glare perception of non-uniform light sources in an office setting, Journal of Environmental Psychology, Vol.39 pp.5-13, 2014
- Y Yang et al.: Assessing glare. Part 1: Comparing uniform and non-uniform LED luminaires, Lighting Research and Technology, Vol.49, Iss.2, pp.195-210, 2015
- JIS Z 9127:2011 Recommendation for sports lighting, Japanese Industrial Standards Committee, 2011 (in Japanese) JIS Z 9127:2011, スポーツ照明基準, 日本規格協会, 2011
- The Illuminating Engineering Institute of Japan ed.: lighting handbook, ohmsha, 2003 (in Japanese) 照明学会編: 照明ハンドブック, オーム社, 2003
- Higashi, H., et al: The Effect of high Luminance on Disappearance of Balls in Stadiums, Journal of the Illuminating Engineering Institute of Japan, Vol.100, No.6, pp.234-237, 2016 (in Japanese) 東洋邦他: 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
- 7) Reports of study investigative committee for glare from LED sports lighting, The Illuminating Engineering Institute of Japan, JIER-125, 2016 (in Japanese)
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
- 8) Tomonori Tashiro, et al: Effect of Direct Glare of LED Floodlight on Human Visual Function, Proceedings of the 49th Annual Conference of the Illumination Engineering Institute of Japan, 6-02, 2016 (in Japanese)
田代知範他: 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
- 9) Tetsuji Yamada, et al: Effect of Direct Glare of LED Floodlight on Human Visual Function-Effect of light-emitting surface luminance on sports competition-, Proceedings of the 50th Annual Conference of the Illumination Engineering Institute of Japan, 6-22, 2017 (in Japanese)
山田哲司他: 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
- 10) Takeshi TANAKA, et al: Sports lighting of an arena using LED, and an installation example, Bulletin research of Hiroshima Institute of Technology, Vol.51, pp.231-241, 2017 (in Japanese)
田中武他: 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
- 11) Tomonori Tashiro, et al: Brightness Evaluation for White LED Light Sources with Different Packaging Density, Journal of the Illuminating Engineering Institute of Japan, Vol.101, No.10, pp.469-473, 2017 (in Japanese)
田代知範他: 実装密度が異なる白色 LED 光源の明るさ評価, 照明学会誌, 第 101 巻, 第 10 号, pp.469-473, 2017
- 12) Mori, T.: Discomfort glare evaluation of the uneven luminance section in outdoor lighting, Proceedings of the 44th Annual Conference of the Illumination Engineering Institute of Japan, p.82, 2011 (in Japanese)
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
- 13) Iwasaki, H., et al: Consideration for glare from high-power light fixture, Kansai-section Joint Convention of institutes of Electrical Engineering, p.360, 2014 (in Japanese)
岩崎浩暁他: 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
- 14) Discomfort glare in interior lighting, CIE 117:1995
- 15) JIS Z 9110:2010 General rules of recommended lighting levels, Japanese Industrial Standards Committee, 2010 (in Japanese)
JIS Z 9110:2010, 照明基準総則, 日本規格協会, 2010
- 16) H Cai and T Chung: Evaluating discomfort glare from non-uniform electric light sources, Lighting Research and Technology, Vol.45, Iss.3, pp.267-294, 2013
- 17) Gertjan H. Scheir, et al: 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
- 18) 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
- 19) KASAHARA, T., et al: Discomfort Glare Caused by White LED Light Sources, Journal of Light and Visual Environment Vol.30, No.2, pp.49-57, 2006
- 20) HIGASHI, H., et al: 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
- 21) 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
- 22) Discomfort Caused by Glare from Luminaires with a Non-Uniform Source Luminance, CIE 232:2019
- 23) Hatada, T.: Artificial Reality with Visual Effects, Journal of the Japan Society of Precision Engineering, Vol.57, No.8, pp.1330-1334, 1991 (in Japanese)
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
- 24) Slominski S.: Identifying problems with luminaire luminance measurements for discomfort glare analysis, Lighting Research and Technology, Vol.48, pp.573-588, 2016
- 25) Guth S.K.: A method for the evaluation of discomfort glare. Illuminating Engineering, Vol.57, pp.351-364, 1963
- 26) Einhorn, H.D.: Discomfort glare: a formula to bridge differences, Lighting Research and Technology, Vol.11, No.2, pp.90-94, 1979
- 27) Tetsuji Yamada, Eiichiro Momma: Joint Experiment Results of the Visibility Evaluation by the Imaging Photometry, Proceedings of the 49th Annual Conference of the Illumination Engineering Institute of Japan, 11-04, 2016 (in Japanese)
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
- 28) Hisao Ishigaki, et al: The Research on the Actual Condition of Visual Acuity and Collection in Sports Players, Aichi Institute of Technology Research Report, Vol.39B, pp.121-129, 2004 (in Japanese)
石垣尚男他: 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
- 29) JIS Z 9127:2020 Recommendation for sports lighting, Japanese Industrial Standards Committee, 2020 (in Japanese)
JIS Z 9127:2020, スポーツ照明基準, 日本規格協会, 2020
- 30) Toshie Iwata, Shiro Tsukami: Technique to apply CCD camera to measurement of visual environment, Journal of the Illuminating Engineering Institute of Japan, Vol.81, No.3, pp.246-249, 1996 (in Japanese)
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, 1996
- 31) Naoko Shinohara et al: Pilot Study on Measurement of Luminance Distribution in LED Floodlights, Journal of the Illuminating Engineering Institute of Japan, Vol.105, pp.12-22, 2021 (in Japanese)
篠原奈緒子他: 高天井用 LED 照明器具の輝度分布測定に関する基礎研究, 照明学会誌, 第 105 巻, pp.12-22, 2021

EVALUATION OF VISUAL ENVIRONMENT IN GYMNASIUMS (PART 2) : EXPERIMENT OF GLARE EVALUATION

Naoko SHINOHARA ^{*1}, *Toshie IWATA* ^{*2}, *Etsuko MOCHIZUKI* ^{*3}
and Tomoko TANIGUCHI ^{*4}

^{*1} Nikken Sekkei Ltd., Dr.Eng.

^{*2} Tokai University, Dr.Eng.

^{*3} Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Creative Engineering, Chiba Institute of Technology, Dr.Eng.

^{*4} Kume Sekkei Co., Ltd., Dr.Eng.

LED lighting technology has been advancing quite rapidly and it has been used in sports facilities. LED lighting has characteristics such as a small light emitting part and high directionality, which may cause glare. JIS recommendation for sports lighting does not provide the recommended value for glare in gymnasiums. In Part 1 of this paper, measurements of illuminance and luminance distribution were carried out in eleven gymnasiums (six with LED lighting and five with HID lighting). In this paper (Part 2), subjective experiments were carried out in eleven gymnasiums described in Part 1. The variables that affect glare were extracted based on the subjective experiments

The subjects looked at a badminton shuttlecock in front of the lighting, assuming that he/she was playing badminton. The position of the subject and the shuttlecock were arranged so that the subject's eyes, the shuttlecock and the luminaire were in a straight line. Subjects evaluated visibility of a visual target, glare from luminaire, acceptability of the visual environment for playing badminton and so on. At the same time, measurement of luminance distribution in subject's visual field was carried out.

From the result of the subjective experiments, it was identified that glare from luminaire (the subject's eyes focused on the luminaire) mostly influences acceptability of the visual environment. The results showed that glare evaluation increased as the elevation angle of the subject's sight increased and the average horizontal illuminance increased. The area with higher than 1,000 cd/m² of luminance is defined as the light emitting part in this study and the average luminance of the light emitting part increased as the elevation angle of the subject's sight increased.

Multiple regression analysis was performed to extract the variables that determine the evaluation of glare. The glare evaluation was taken as the objective variable. While the explanation variables are the average luminance of the light emitting part, the solid angle of the light emitting part, the background luminance, UGR and UGR'. The result of multiple regression analysis showed that the average luminance of the light emitting part with higher than 10,000 cd/m², the solid angle of an area with higher than 10,000 cd/m² and the average luminance of the background with lower than 1,000 cd/m² are effective valuables to predict glare evaluation. It was suggested that the average luminance of light emitting part with higher than 10,000 cd/m² should be decreased to reduce glare.

(2020 年 11 月 10 日原稿受理, 2021 年 5 月 6 日採用決定)