

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 30 日現在

機関番号：32644

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630265

研究課題名(和文) 昼光装置設計支援のための性能評価マトリクス指標の提案

研究課題名(英文) Proposal of matrix of indices evaluating performance of daylighting system as a design aid

研究代表者

岩田 利枝 (Iwata, Toshie)

東海大学・工学部・教授

研究者番号：80270627

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：建築物における昼光利用が推奨され、昼光装置の開発も盛んに行われている。本研究では、昼光装置の選択・設計支援のために、省エネルギー性能、視環境性能を示すわかりやすい指標を提案することを目的とした。

まず、昼光装置の分類を行い、必要と考えられる指標群を抽出した。正反射ミラーを有する昼光装置の配光の計算方法を開発し、ブラインド等の日射侵入率、可視光透過率の簡易測定を行った。省エネルギー性能を示す指標として相当発光効率と有効光束係数、視環境性能を示す指標として不快グレア抑制係数を定義し、出現頻度による気象標準条件を基に、これらの指標値を算出した。このようにマトリクス指標の大枠を示すことができた。

研究成果の概要(英文)：Daylighting in buildings is recommended and advanced daylighting systems have been developed. In order to aid architects in choosing a suitable daylighting system, several simple indices showing properties for energy-saving and visual comfort are proposed in this study. Daylighting systems are classified to identify their required properties. Distribution of daylight in systems which utilize mirror reflection can now be modelled by advanced lighting simulation algorithms. Both the visible light and heat gain of daylighting systems (interior blind and exterior blind) are measured by using a special measurement device. Equivalent luminous efficacy, the effective luminous flux coefficient, and the reduction factor of discomfort glare are newly defined. These indices for daylighting systems are measured for standard outside conditions, which are determined from the frequency of climatic conditions. A matrix of these indices is presented.

研究分野：建築環境工学

キーワード：建築光環境 昼光装置 省エネルギー 気象データ 直射日光 簡易指標

1. 研究開始当初の背景

建築物における環境配慮手法として日光利用が推奨されている。適切な導入を確保するため、日光装置（窓装置を含む）の開発も盛んに行われている。日光装置では直射日光の遮蔽と利用を同時に行っているものも多く装置の適切な選択によって、快適性向上や省エネルギーに大きな効果が見込める。しかし、さまざまな日光装置に対し、多様な評価項目があり、その上、屋外条件によって評価値そのものが変化することから、日光装置に求める性能の予測は簡単ではない。

国際的には研究開始当時、国際照明委員会（CIE）第3部会レポーターシップとして、Daylighting Systems and Products、Daylighting System Metrics が提案され活動が始まった状況だった。CIEは日照時間が短く冷房負荷の小さい地域を中心に活動しているので、日本からの提案がないと直射日光の制御・利用は配慮されないおそれもあった。

電気照明の設計にはざっくりと検討をつけるのに便利なように、ランプや器具に配光曲線、発光効率、照明率などの数値が提供されている。これらは消費電力の推定に有効な指標となっており、日光装置にもこのような簡易な指標があれば、装置の選択が容易になると考えられた。

2. 研究の目的

本研究では、日光装置の選択・設計支援に向けて、電気照明の発光効率や照明率などに相当するようなわかりやすい指標を省エネルギー性能、視環境性能などに分けて提案し、気象条件の変動に対応できる形に整備することを目的としている。

3. 研究の方法

研究全体としては、まず日光装置の分類を行い、必要と考えられる指標群の抽出を試みた(4章1節)。日光装置は多種にわたるので、採光(光の採り入れ)方法と導光(光の伝送)方法に着目して分類した。指標群については、基本特性を示すもの(熱の流入、光の透過、光の方向など)と求められる性能を示す指標(流入する熱と光のバランス、照明に有効な光束の割合、不快グレアの抑制等)に分けた。

これらの指標群について、代表的日光装置を対象に、計算方法・測定方法の開発を行った。基本特性として、正反射ミラーを有する日光装置の配光(光の方向)の計算方法を開発し(4章2節)、ブラインド等の日射侵入率(日射による熱の流入)、可視光透過率(光の透過)の簡易測定を行った(4章3節)。性能を示す指標として、相当発光効率(4章3節)、有効光束係数、不快グレア抑制係数(4章5節)を定義した。気象条件の出現頻度から求めた標準条件(4章4節)を基に、簡易測定からこれらの指標値を算出し、性能評価マトリクス指標の大枠を示した(4章5節)。

4. 研究成果

(1) 日光装置の分類と必要な指標の抽出

現在市販されている窓装置を含む日光装置の分類は、可動性や導光材料などの構造や仕組み、設置条件などの定性的なものが主体である。ここでは、日光装置がもつ特徴を省エネルギーおよび視環境性能に関してまとめ、評価指標を抽出した。

日光装置の分類の概要を表1に示す。表1中の①～④の日光装置を図1に示す。日光装置の性能を「省エネルギーに関わるもの」と「視環境に関わるもの」に大きく分けた。

日光装置の省エネルギー性能は「窓面から流入する熱」と「照明として有効な日光」によって示される。前者は建物における冷房負荷の観点から重要な項目であり、日射侵入率として計算される。後者は可視光透過率と配光から計算される。

視環境性能を示す項目には、まぶしさ抑制、眺望性、室内の明るさの均一性があり、本研究では「日光のまぶしさ抑制」に着目した。

以上をまとめて、「日射侵入率」、「可視光透過率」、「配光(光度分布)」を基本特性とし、「相当発光効率」、「有効光束係数」、「不快グレア抑制係数」を性能評価指標として定義することにした。

表1 日光装置の分類

カテゴリー	日光装置	省エネルギー性能		視環境性能	
		流入熱の遮蔽	照明として有効な光の導入	まぶしさ抑制	眺望性
直射日光伝送システム	①ヘリオスタット	◎	○	○	×
	②光ダクト	◎	○	○	×
	③光ファイバー式装置	◎	○	×	×
直射日光反射・拡散システム(外付け)	④ライトシェルフ	○	◎	○	◎
	⑤ルーバー	◎	△	○	△
直射日光拡散システム(外付け)	⑥すだれ	◎	△	○	×
直射日光反射・拡散システム(内付け)	⑦ブラインド	○	自動制御⇒◎ 手動⇒△	自動制御⇒◎ 手動⇒△	○
直射日光拡散システム(内付け)	⑧ロールスクリーン	○	○	◎	×
その他	⑨機能性ガラス	*多様な種類があるため、種類によって異なる			

◎: とても良い, ○: 良い, △: やや良い, ×: 悪い

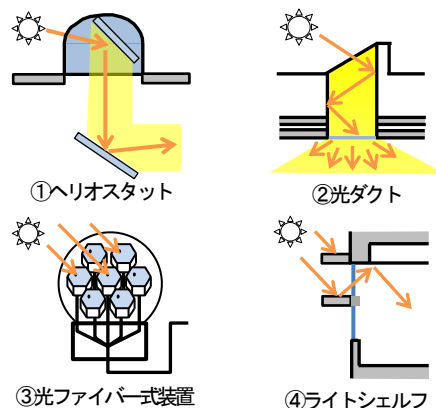


図1 日光装置の一例

(2) 正反射ミラーを有する昼光装置の配光計算方法の提案

近年の昼光装置は正反射ミラーを用いるものも数多く提案されている。光ダクトや鏡面反射素材によるブラインドなどがこれに該当する。一方で、建築空間内部の光環境を含めて評価するためには、拡散反射面による相互反射も考慮する必要がある。そこで、正反射ミラーを有する昼光装置の配光計算のため、以下の作業を行った。

- ・ 昼光装置における正反射と建築空間における拡散反射双方を考慮した計算を可能とするため、既存の光線追跡法の計算ツールと光束伝達法の計算ツールを連携させた。
- ・ 計算負荷の低減のため、採光装置の Bounding Sphere を導入した。
- ・ 正反射ミラーによる回転体の計算を容易にするため、疑似回転面形正反射面データを導入した。
- ・ 昼光装置の配光計算を行うため、疑似半球面/疑似半円柱面形建物要素データを導入した。

(2.1) 光線追跡法と光束伝達法のツール連携

光線追跡法 (Raytracing 法、以下 RT 法) は、光の流れを有限の光線で離散化して計算を行う方法で、正反射性の材料を含むシミュレーションを行う際に優れた手法である。光束伝達法 (Luminous Flux Transfer 法、以下 LFT 法) は、建築空間を有限の要素に分割して計算を行う方法で、拡散反射性の材料を含むシミュレーションに適している。昼光装置の配光計算の際には、空間全体の相互反射も考慮した計算が必要となるため、既存の RT 法の計算ツールである LFLUTE と既存の LFT 法の計算ツールである LVECS のデータフォーマットを分析し、LFLUTE の計算結果を LVECS の入力データとして変換し、LFLUTE を LVECS のプリプロセスとすることで両者を連携させることを可能とした。

(2.2) Bounding Sphere の導入

LFLUTE の計算負荷軽減のため、採光装置の Bounding Sphere を導入した。Bounding Sphere は球形で、性能評価を行う採光装置を完全に包み込むように設置する。図 2 に示すように、Bounding Sphere を通過する光線のみを計算対象とすることで、実際に採光装置に入射する光線のみを計算対象に含めることとなり、計算負荷は大幅に削減可能となる。Bounding Sphere は、光源が天空光である

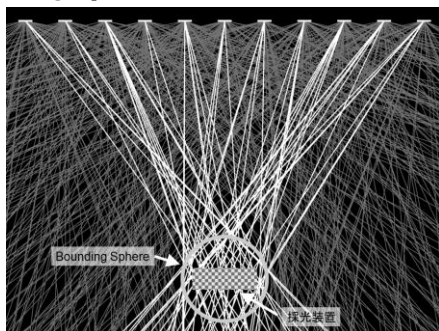


図 2 Bounding Sphere による光線の選択

場合など、拡散面光源である場合に効果を発揮する。

(2.3) 疑似回転面形正反射面データの導入

昼光装置には、円柱形の光ダクトや放物線回転面形の集光装置など、回転体形状の正反射ミラーが用いられることが多いが、オリジナルの LFLUTE には回転体形状の正反射ミラーの情報を正反射面データとして与えることができなかった。これらの形状を含めたシミュレーションを可能とするため、図 3 に示すような疑似回転面形正反射面データを導入した。疑似回転面形正反射面データは、元となる回転体を緯度線方向経度線方向に分割して 2 等辺 3 角形と台形の集合として近似したものであり、分割数と大きさは任意に設定することが可能である。

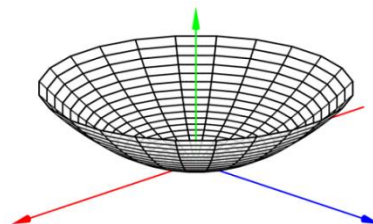


図 3 疑似回転面形正反射面データの例

(2.4) 疑似半球面/疑似半円柱面形建物要素データの導入

昼光装置単体の性能評価には、採光装置から発せられる反射光の方向別の強さである配光が重要となる。反射光の配光は、建物要素データを配光計算のデータに置き換えることで計算可能となる。このため、半球面を 2 等辺 3 角形と台形の集合で近似する疑似半球面形建物要素データと、円柱を長方形の集合で近似する疑似半円柱面形建物要素データ (図 4 参照) を導入した。疑似半球面形建物要素データは、反射光の全ての方向 (立体角 $= 4\pi$) の離散化された方向別の強さを求めるためのものであり、疑似半円柱面形建物要素データは、この疑似円柱の中心軸に垂直な面内の方向 (角度 $= \pi$) の離散化された方向別の強さを求めるためのものである。それぞれの建物要素データの分割数と大きさは任意に設定可能である。疑似半球面形建物要素データを用いた場合には、離散化された方向への光度を求めることが可能であるが、照明器具の配光の測定の場合と同様に、採光装置が点光源と見なせるように疑似半球面の半径を十分大きくする必要がある。

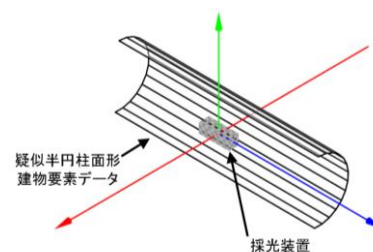


図 4 疑似半円柱面形建物要素データの例

(3) 昼光装置の相当発光効率

昼光装置の光と熱の割合を示す指標としては窓面の発光効率が考えられる。発光効率は、従来電気照明の指標で「光束[lm]/投入電力[W]」で示されるものを、昼光で「光束[lm]/日射[W]」と考えて示したものである。

窓面の発光効率に関する既往の研究では窓装置装着時を考慮した報告事例は少なく、窓装置を選択するためには十分なデータが整備されているとは言えない。そこで本研究では屋外実験を行い、開口部の熱及び光学特性値データベースの一例を作成した。

昼光装置の相当発光効率は昼光の発光効率に窓面の可視光透過率を乗算し、それを窓面の日射侵入率で除算したものと定義した。そのため、可視光透過率及び日射侵入率を測定する必要がある。表 2 に測定項目を示す。図 5 に装置断面図を示す。

可視光透過率測定装置は一辺が約 1000mm の立方体とし、装置の上部には水平面全天日射量と鉛直面全天日射量を計る日射計と、グローバル照度と鉛直面全天照度を計る照度計を取り付けた。内部には積分球を設置しさらに積分球内には窓面を透過した光束量を計るため照度計を取り付けた。積分球は直径 300mm の球体とし、開口部の直径は 100mm とする。

日射侵入率測定装置は一辺が約 1000mm の立方体とし、一面はガラス面になっており、装置の周囲を 100mm の厚さの断熱材で覆っている。内部は光の反射を防ぐ為に艶消し黒としており、装置内を均等な温度にするため 3 枚の黒網(バツフル)と小型ファンを設置している。装置内外には熱の測定をするために T 型熱電対を取り付けている。また、装置後部には温水式エアコンの室内機を取り付け、熱の出入り、流量、消費電力を測定出来るようになっている。

測定は 2014 年 12 月と 2015 年 1 月、10 月の 12:00~16:00 にもものつくり大学のグラウンドにて行った。条件としては普通複層ガラス(FL6+D12+FL6)のみ、普通複層+ブラインド、普通複層ガラス+すだれ、遮熱型 Low-e ガラス(SBQ6+D12+FL6)の計 4 条件とする。図 6 に使用した日射遮蔽装置の一例を示す。

図 7 に測定結果を示す。可視光透過率はブラインド、すだれが低くなった。また、日射侵入率でも同様の傾向を示したがすだれはブラインドと比べ更に低い。窓面の発光効率はブラインドやすだれの日射遮蔽装置が普通複層ガラス、Low-e ガラス単体より低くなった。一方、すだれは昼光の発光効率を上回るという結果になった。

太陽高度の影響では複層ガラスの窓面発光効率は 10 月と 12 月でほぼ同等となり、すだれと Low-e ガラスは高くなり、ブラインド装着時は低くなった。

表 2 測定項目一覧

測定装置	測定項目
可視光透過率測定装置	水平面全天日射量
	鉛直面全天日射量
	鉛直面全天照度
	積分球内照度
日射侵入率測定装置	外気温度
	室内空気温度
	室内表面照度
	室外表面温度
	エアコン出入温度
	残量
	電力
	風速

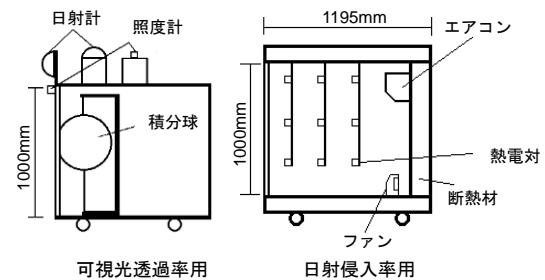


図 5 装置断面図



図 6 使用した日射遮蔽装置一例

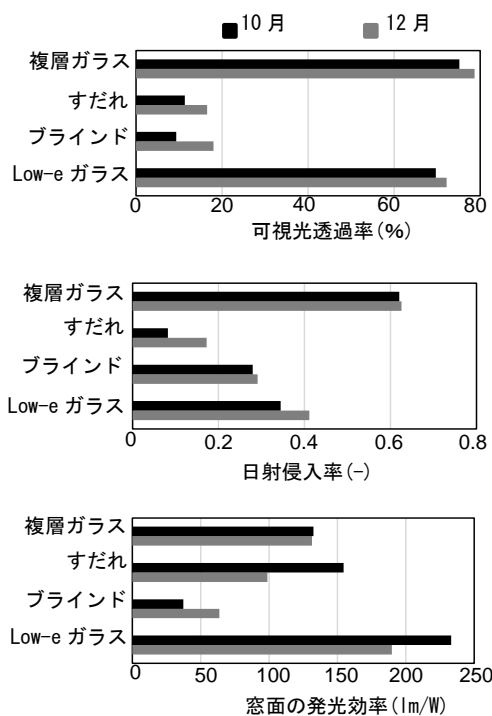


図 7 測定結果

(4) 窓装置の配光

日光装置の配光を得るには、太陽位置や気象条件の代表値を明らかにする必要がある。ここでは日光装置のうち窓装置を対象に、気象データから代表条件の抽出を行い、その条件において窓装置の配光測定を行った。

(4.1) 代表気象条件の抽出

拡張アメダス気象データの東京（標準年）を使用した。対象時間は8時～17時とし、直射日光照度と天空光照度の出現頻度をプロファイル角ごとに計算し、その結果から代表気象条件を表3のように決定した。

表3 抽出した代表気象条件

窓方位	プロファイル角 [deg]	鉛直面直射日光照度 / 天空光照度
南向き 0[deg]	45~60	$10^{4.8} (\equiv 63,000)$ [lx] / $10^{4.0} (\equiv 10,000)$ [lx]
西向き 90[deg]	15~30	$10^{4.4} (\equiv 25,000)$ [lx] / $10^{4.0} (\equiv 10,000)$ [lx]

(4.2) 配光測定

電気照明で用いられる照明器具の配光測定には器具または測定器を回転させる大掛かりな装置と測定時間を必要とするが、日光は瞬時に測定しなければならない。本研究では窓装置の配光を測定するため、図8、図9に示す窓面配光測定装置を開発した。配光測定装置の開口部と全体の大きさは、点光源とみなせる大きさとした。一面はガラス面(窓)でガラス試料の取り外しができ、遮蔽装置(ブラインドやレースカーテン等)を装着できる。(4.1)で求めた代表気象条件を満たす晴天日(2016年3月)に、配光測定を行った。

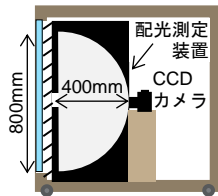


図8 装置断面図



図9 配光測定装置内部

試料には複層普通ガラス(FL6-D12-FL6)と普通ブラインド(反射率:72%)とツートンブラインド(上面反射率:72%、下面反射率:52%)の窓装置を使用した。各ブラインドのスラット幅と間隔は25mmと21mmで、スラット角は直射日光遮蔽角とした。装置を太陽と正対させた状態(太陽高度のみ変化)で測定した。図10に測定した窓面配光曲線を示す。

(5) 窓面配光による省エネルギーおよび視環境性能評価指標

窓装置の配光データから窓装置の省エネルギーおよび視環境の性能評価方法を提案し、ケーススタディとして提案指標による窓装置の比較を行った。

(5.1) 省エネルギー性能評価指標の検討

本研究では、窓装置の省エネルギー性能と

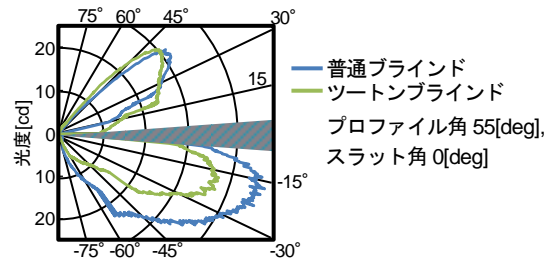


図10 南向き窓の代表気象条件時の配光

して「照明用電力の削減」に着目し、天井面に入る上向き光束が照明用電力削減に寄与する成分と考えた(図11)。窓装置装着前に対する窓装置装着後の上向き光束の割合を装置の省エネルギー性能評価指標とし、これを窓装置の「有効光束係数 EL」と定義した。例えば、 $EL=1.3$ は窓装置装着によって照明に有効な光束が30%増加したことを意味する。

(5.2) 視環境性能評価指標の検討

本研究では、窓装置の視環境性能として「不快グレアの抑制」に着目し、目に入る下向き光束が不快グレアを引き起こす成分と考えた(図11)。窓からの不快グレアは窓面輝度によって評価でき、輝度は式(1)により求められる。窓装置装着前に対する窓装置装着後の輝度の割合を装置の視環境性能評価指標とし、これを窓装置の「不快グレア抑制係数 GC」と定義した。例えば、 $GC=0.6$ では窓装置装着によって不快グレアに関わる輝度が60%に減少することを意味する。窓装置装着前の輝度は、太陽部分(直射日光部分)を除外した天空輝度とした。

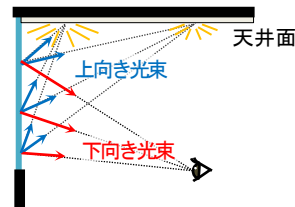


図11 天井面に入射する上向き光束と目に入る下向き光束

$$L_{win} = \frac{I(\theta)}{\cos \theta} \quad \dots \text{式(1)}$$

L_{win} : 配光による予測輝度[cd/m²] I : 光度[cd]

θ : 発光面の法線に対する視方向がなす角[deg]

(5.3) 提案指標による窓装置の比較

提案指標を用いて窓装置を比較した。ここでは、窓の大きさを目線高さから1.5m、天井照度計算位置と目線位置を窓からの1.5mとした。照明用電力削減に寄与する配光の範囲は上方5[deg]~45[deg]、不快グレアに関わる配光の範囲は下方5[deg]~45[deg]となる。窓装置の比較結果を図12に示す。今回比較した窓装置は、下向き面スラットの反射率のみ異なるため、不快グレア抑制係数に差がみられた。

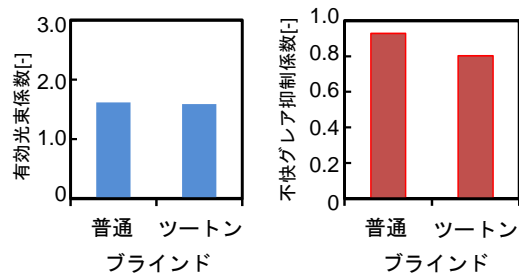


図 12 提案指標による窓装置の比較

(6) まとめ

本研究では、昼光装置の選択・設計支援に向けて、省エネルギー性能、視環境性能などを簡易に示す指標の提案を行った。昼光装置の分類から、基本特性として熱の流入、光の透過、光の方向、求められる性能を示す指標として流入する熱と光のバランス、照明に有効な光束の割合、不快グレアの抑制を対象にすることにした。

基本特性については正反射ミラーを用いた昼光装置の配光計算方法の開発を行い、複雑な形状の装置の配光の予測を可能にした。

性能指標については「相当発光効率」、「有効光束係数」、「不快グレア抑制係数」を提案し、標準気象条件を基にこれらの指標値を算出し、マトリクス指標の大枠を示した。今後、このマトリクス指標を充実させていき、昼光装置の簡易で合理的な選択・設計に貢献する。

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 11 件)

①Tomoko Taniguchi, Daisuke Ito, Toshie Iwata, Distribution curve of luminous intensity of window system using direct sunlight, 28th Session of CIE (International Commission of Illumination), 2015.7.2, マンチェスター (イギリス)

②Hiroataka Suzuki, Susumu Sugano, Daisuke Ito, Development of luminous flux tracking method for evaluation of daylighting system, 28th Session of CIE (International Commission of Illumination), 2015.7.1, マンチェスター (イギリス)

③ Daisuke Ito, Toshie Iwata, Outdoor measurement on luminous efficacy of window with shading, 28th Session of CIE (International Commission of Illumination), 2015.7.2, マンチェスター (イギリス)

④伊藤大輔、日射遮蔽装置装着時の窓面発光効率に関する研究、日本建築学会大会、2015年9月4日、東海大学(神奈川県・平塚市)

⑤Tomoko Taniguchi, Toshie Iwata, Daisuke Ito, Evaluation of window system performance

calculated from their distribution curves of luminance intensity, The Fifth International Conference on Human-Environment System, 2016.10.29, 名古屋大学(愛知県・名古屋市)

⑥谷口智子、伊藤大輔、岩田利枝、直射日光を模した疑似平行光による窓面配光測定装置の開発、照明学会全国大会、2015年8月27日、福井大学(福井県・福井市)

⑦谷口智子、岩田利枝、伊藤大輔、配光曲線を用いた配光曲線を用いた窓装置性能評価、照明学会全国大会、2016年8月31日、日本大学(東京都・千代田区)

⑧鈴木広隆、菅野普、伊藤大輔、正方向光線追跡法による採光装置の性能評価に関する研究、日本図学会春季大会、2016年5月14日、八戸グランドホテル(青森県・八戸市)

⑨前村拓哉、鈴木広隆、空間内部の光環境の可視化手法に関する考察、日本建築学会大会、2016年8月26日、福岡大学(福岡県・福岡市)

⑩竹内秀樹、伊藤大輔、輝度分布を用いた窓面の配光曲線測定方法の開発、日本建築学会大会、2016年8月24日、福岡大学(福岡県・福岡市)

⑪竹内秀樹、伊藤大輔、輝度分布を用いた配光曲線測定方法の精度検証、照明学会全国大会、2016年8月31日、日本大学(東京都・千代田区)

〔その他〕

ホームページ等

<http://iwatalab.web.fc2.com/work-projects.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岩田 利枝 (IWATA, Toshie)

東海大学・工学部・教授

研究者番号：8027062

(2) 研究分担者

鈴木 広隆 (SUZUKI, Hiroataka)

神戸大学・工学(系)研究科・准教授

研究者番号：60286630

(3) 研究分担者

伊藤 大輔 (ITO, Daisuke)

ものづくり大学・技能工芸学部・講師

研究者番号：10567978

(4) 研究協力者

谷口 智子 (TANIGUCHI, Tomoko)