

実測輝度分布による採光装置の評価に関する方法

An Evaluation Method of Daylighting System with Measured Data of Luminance Distribution

環境図形科学研究室 大島広之

昼光利用のための採光装置の性能は、これまで照度を用いて評価されることが多かった。しかし、光環境の質を評価するためには、空間の輝度分布を求めることが必要である。そこで本研究では、デジタルカメラを利用した輝度分布測定法を利用することとし、特定のデジタルカメラにより撮影された画像の画素階調値と対応点の輝度の関係を明らかにした。その上で、2種の採光装置を設置した空間の模型を製作して輝度分布を求めシミュレーションにより求めた輝度分布と比較して妥当性を検討した。

Capability of daylighting system has been generally evaluated with illumination. However, we have to know luminance distribution of place for evaluating quality of lighting environment. So, in this study, I measured luminance distribution, and I showed the relationship between luminance of the particular dots to pixel values of images that were taken photographs of a particular digital camera. And, I analyzed adequacy for that by comparing luminance distribution of simulation's results with luminance distribution of experiment's results on models that I made with two type's daylighting system.

1.はじめに

昼光とは、居住者に開放感・広さ感といった心理的効果を与えるだけではなく、サーカディアンリズムのように人の生体リズムに寄与するといった、人の日々の生活に必要な不可欠なものとなっている。上記のような健康性に加え、無駄な人工照明のエネルギー削減の効果が期待できるため、昼光照明は住宅やオフィスにも積極的に導入が進められるべきものである。昼光利用のための採光装置の性能は、これまで照度を用いて評価されることが多かった。しかし、光環境の質を評価するためには、空間の輝度分布を求めることが必要である。その際、輝度計を用いて現場の輝度を逐点で測光していくのは非効率的であり、また、時間の経過を考慮すると同時的な輝度分布データは得られない。これらの欠点を補うものとして、フィルムカメラを用いた輝度計測方法¹⁾²⁾が知られているが、フィルムカメラでの輝度計測はフィルムの現像やその濃度測定といった撮影後の処理に膨大な作業と日数を要するため、実用的ではない。そこで近年性能の向上が著しいデジタルカメラを使用して輝度分布を求めることとする。これにより、刻一刻と変化しやすい輝度の瞬間的な分布を画像として残し、処理することを可能とする。

そこで本研究では、デジタルカメラを利用した輝度分

布測定法を利用することとし、特定のデジタルカメラにより撮影された画像の画素階調値と対応点の輝度の関係を明らかにした。その上で、2種の採光装置を設置した空間の模型を製作して輝度分布を求めシミュレーションにより求めた輝度分布と比較して妥当性を検討した。

2. デジタルカメラで撮影した画像における画素階調値と輝度の関係

2.1 測定の目的と方法

本測定では、デジタルカメラを用いて、採光装置の輝度分布を把握することを目的としているので、輝度と画素階調値の関係を求めるために、一定の露出で撮影できる輝度の範囲を測定した。単一の露出条件ではデジタルカメラのダイナミックレンジは狭いので、その露出条件を変化させることで対応可能な範囲を拡大することが出来る。具体的には、画素階調値 0~250 までの 10 刻みの画像計 26 枚をプロジェクター(日本ビクター(株)社製 *D-ILA* 方式 *DLA-SX21*)で投影し、それをデジタル一眼カメラ“ α ”用レンズ(ソニー(株)社製 *SAL1855 DT 18-55mm F3.5-5.6 SAM*)を取り付けたデジタルカメラ(ソニー(株)社製 *α 550 DSLR-A550*)により中央重点測光で撮影し、輝度とデジタルカメラにより撮影した画像の画素階調値の関係を導いた。

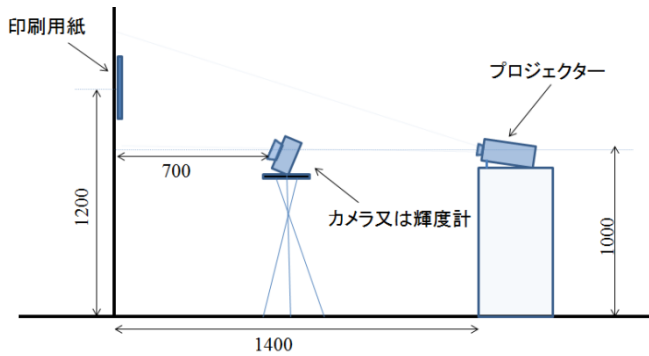


図1 測定・撮影の概要(単位:mm)

輝度の測定と撮影は、図1のように、暗室内において行った。なお、印刷用紙はA3サイズのスーパーファイン紙(EPSON製、KA3N100SFR)を使用し、撮影時はデジタルカメラの設定をすべてマニュアルモードとし、絞り5.6、ISO感度1600、ホワイトバランス設定「日陰」、シャッタースピード(以降SS)1/10、1/60、1/200、1/500の4通りで行った。

2.2 測定結果

色彩輝度計(MINOLTA製CS-100A)より測定した輝度、および画像処理ソフトウェアPhotoshopを使用して画像より得た画素階調値(rgb平均値)の関係式を求めた。その関係は対数軸において一部の区間で線形となる。本測定では決定係数0.99以上の条件を満たす範囲を用いることとした。なお、前述した通り単一の露出撮影画像から得られる輝度範囲は限られているので、SSを変えたものの関係を同様に導いた。その結果を図2に示す。

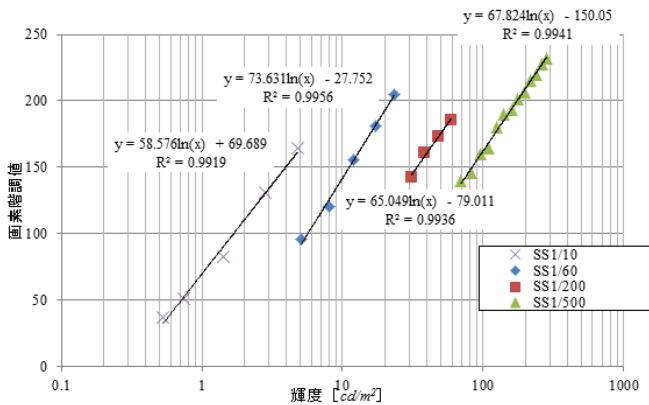


図2 輝度と階調値の関係

これにより用いたデジタルカメラは、輝度0.53~283 [cd/m²]の範囲に対応できることが分かった。それぞれの範囲は、(SS1/10) 0.5<輝度≤5.0 [cd/m²]、29.08<画素階調値≤163.96、(SS1/60) 5.0<輝度≤25.0 [cd/m²]、90.75<画素階調値≤209.25、(SS1/200) 25.0<輝度≤60.0 [cd/m²]、130.70<画素階調値≤187.73、(SS1/500) 60.0<輝度≤300 [cd/m²]、127.64<画素階調値≤236.80であった。

2.3 輝度分布の擬似カラー画像作成プログラム

実験で撮影した画像を視覚的に表現するため、輝度分布を表す擬似カラー画像を作成するプログラムを作成した。3章以降の実験はSS1/10で撮影するため、輝度

と画素階調値の関係式は、 $y = 58.576 \ln(x) + 69.689$ とした。この式により得られた輝度の値に対し、擬似カラーを割り当てた。なお、設定した最大輝度と最小輝度の範囲を超える輝度値の画素は画素階調値0(最小値以下)か255(最大値以上)で表現した。本プログラムは、実行速度を考慮し、C言語で作成した。

3. 斜角錐形天窗採光装置の検討

3.1 斜角錐形天窗採光装置の概要

近年の都市の高密度化で近隣建物の影響により、側窓では十分な採光が行えない場合があり、そのような空間では天窗が有効である。天窗は近隣建物の影響を受けにくく、採光率が高い。建築基準法では、天窗は同一面積の側窓の3倍の採光性能と計算されている。

本装置はすがアトリエ設計によるもので、形状は、高さ1100mmの正八角形斜角錐である(図3、図4、図5参照)。側面は反射板の役割をしており、反射板に相当する部分が仰角約60度以下の光の流れを制限し、グレアの発生を防いでいる。

斜角錐形天窗採光装置の上面には、調光ガラス(TTG トップライトガラス:アフィニティー社製、図6)が設置されている。TTGガラスは30度以上で白濁化し、入射した光を拡散光として透過させる。そのため、気温の高い時期の直射日光の入射を抑制することが可能である。

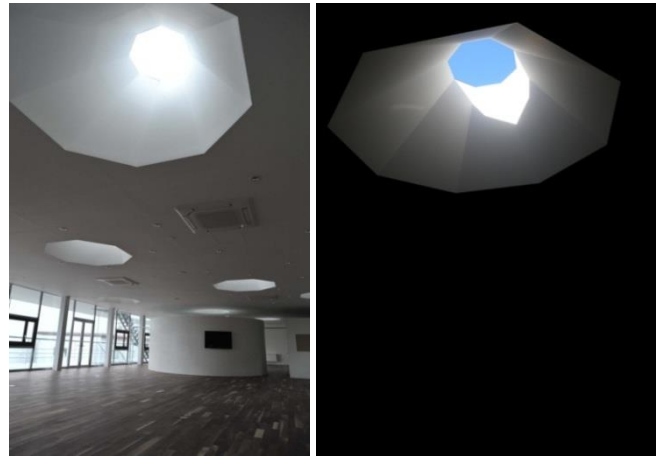


図3 装置を配置したオフィス
図4 斜角錐形天窗採光装置

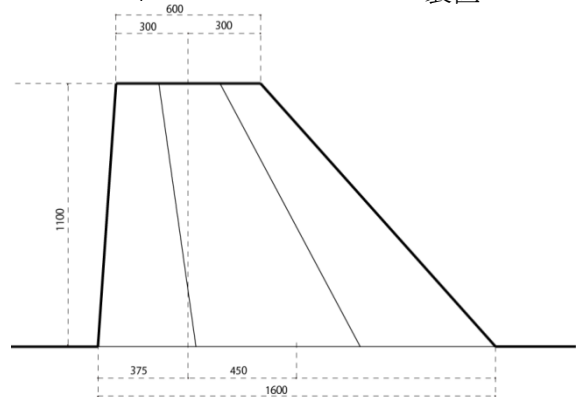


図5 天窗採光装置寸法 (単位:mm)



図6 TTG トップライトガラス

3.2 実験モデル概要

斜角錐形の天窓を伴った直方体空間を、スチレンボードを用いて作成した。7.5×7×2.75mの空間を想定し、スケールは1/10とした(図7参照)。模型の高さは実際のオフィスの高さである2750mmを想定し、天窓の最も傾斜の緩い面が南の方向を向くように設定した。輝度分布は南側壁面を外した状態でデジタルカメラで撮影した。また、天窓と床面にはスーパーファイン紙(EPSON、KA3N100SFR、反射率0.6)、壁面と天井面には黒模造紙(反射率0.07)を貼りつけた。

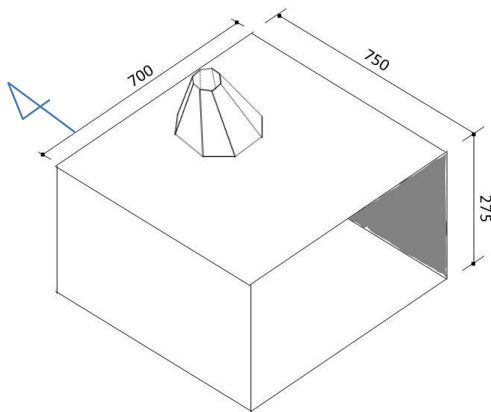


図7 斜角錐形天窓模型の形状(単位:mm)

本実験は、標準年の冬至、秋分、夏至の3日を対象とした。光源の位置は拡張アメダス気象データ³⁾から、方位角と太陽高度を読み取り、それを斜角錐型天窓模型の天窓上端を中心点として光源(MAGLITE 3-Cell D Flashlight)を設定した。さらに、光源自体に黒模造紙で作成した筒を設けることで擬似的な平行光とした。天窓上端の面を均等照射した。カメラの位置は図8に示した位置とし、奥行き位置は模型の中心とした上、カメラの向きは模型床面の中心点とした。実験は暗室内にて行い、デジタルカメラの設定をすべてマニュアルモードとし、絞り5.6、ISO感度1600、ホワイトバランス設定「日陰」、シャッタースピードSS1/10とした。

夏至は6:00~18:00、秋分は7:00~17:00、冬至は6:00~16:00のそれぞれ2時間毎の太陽位置を再現した測定

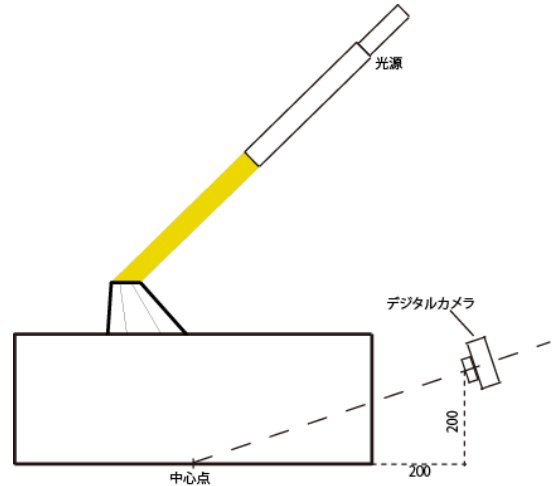


図8 実験モデル概要(単位:mm)

を行い、天窓から床面に対して直接直射が入る時間にTTGガラスが白濁すると想定した。本実験ではその白濁化時間は夏至8:00~16:00、秋分10:00~14:00とした。そしてトレーシングペーパーを均等拡散面と仮定し、これを7枚重ね、透過率18%となったものを白濁化TTGガラスと仮定して実験に用いた。

3.3 シミュレーション結果との比較

模型実験の結果から得られる輝度値を比較検討するためのシミュレーションを行った。CG作成ソフトSketchUp8(Google社製)により斜角錐型天窓採光装置のモデリングを行い、照明シミュレーションソフトであるRadiance(米国ローレンスバークレー国立研究所開発)を用い、対象の時間におけるシミュレーションを行った。

両画像の輝度値を比較するために図9のように17点の測定点(4は基準点)を設定した。模型を撮影した写真の画像はphotoshopにより画素階調値を測定後、輝度を算出した。シミュレーションも同様に対応する点の輝度を求め、各々の基準点4に対する輝度の比を比較した。さらに擬似カラーを見比べることで分布としての検討を行った。

暗室内での模型実験は空間的に限界があり、天窓上端から光源までの距離を統一することができなかつたため、模型の天窓上端に入射する法線照度を計測し、シミュレーションの光源の強さに反映させた。

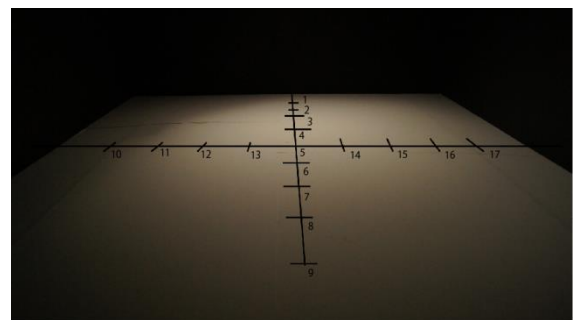


図9 輝度比較測定点

これらの検討結果を図 10～14 に示す。それぞれの図の左上は測定点の輝度のグラフ、左下は基準点に対する輝度比のグラフ、右上はシミュレーションによる擬似カラー画像、右下は模型実験による結果の擬似カラー画像である。擬似カラーを比較すると、床面の輝度分布が同様の円状を描いているのがわかる。そこで、基準点 4 に対する各点の割合を考察したところ、ほとんどの時刻で同様の傾向を示している事が読み取れた。

そこで基準点に対する輝度比のグラフで差が見られる図 10～図 12 では、基準点 4 から離れた点であればあるほど差異が大きくなる。これは、SS1/10 の輝度と画素階調値の式しかプログラムに組み込んでいないため、この式の輝度範囲が $0.5 < \text{輝度} \leq 5.0 \text{ [cd/m}^2\text{]}$ であり、この範囲外では実際の値よりも高い値を示すためである。したがって、差異が生じている点の実際の輝度は算出した輝度よりも低くなると考えられるので、基準点に対する割合のグラフからも同様の傾向が得られていると考えられる。よって、シミュレーションと実測実験結果が同様であったことにより、結果の信頼性は高いと考えられる。

以上よりデジタルカメラを用いた輝度分布の実測手法が確立したと考え、次章は別の形状の採光装置の評価を行った。

4. ダブルクロスカタナリー光拡散幕の検討

4.1 ダブルクロスカタナリー光拡散幕の概要

頂側窓による採光は、住宅が密集した地区でも採光経路の問題を解決して室内に日光を導くことを可能とする。本装置は直射日光を十分に確保した住宅の内部にスクリーンとなる拡散性の高い布をカタナリー曲線に沿って配置し、これにより日光の変動による趣きを確保しつつ、住宅内部の各部分に一定量の日光を導くことを試みたものである。本装置の目的は以下の 3 点である。

- ・天井面より下部に吊り下げられる布により、過剰な気積感を緩和する。
- ・拡散性を持つ布に直射日光を透過させることによりハイライト部分の輝度値を低下させる。
- ・ハイライトを、周辺壁面ではなく吹き抜け中央に移動させることにより、吹き抜けの下側を含む周辺全体に光が行き渡るようにする。

本装置は、神戸市須磨区の第 1 級低層住居専用地域に建つ個人住宅に設置されている。本装置の寸法を図 15 に、CG による透視投影図を図 16 に、実際の

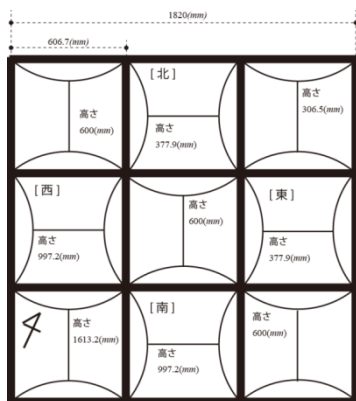


図 15 光拡散幕の寸法

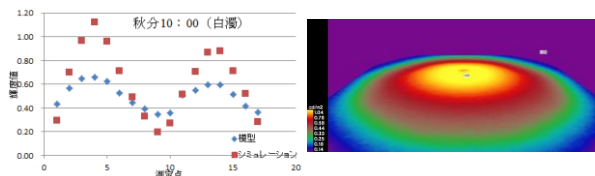


図 10 秋分 10:00 のデータ(輝度単位:cd/m²)

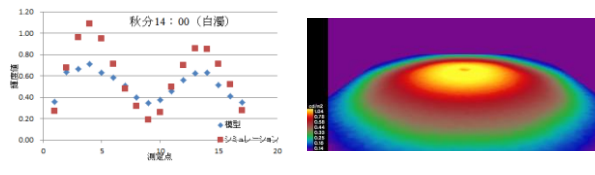


図 11 秋分 14:00 のデータ(輝度単位:cd/m²)

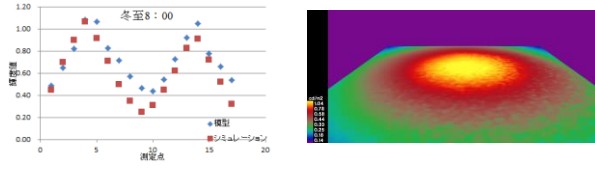


図 12 冬至 8:00 のデータ(輝度単位:cd/m²)

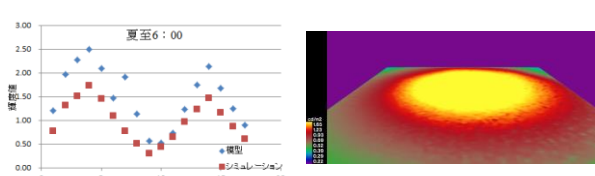


図 13 夏至 6:00 のデータ(輝度単位:cd/m²)

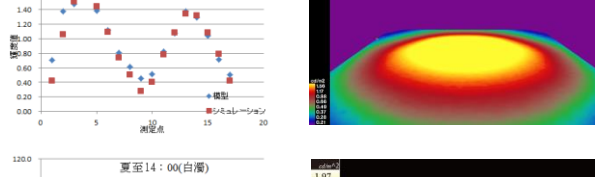


図 14 夏至 14:00 のデータ(輝度単位:cd/m²)

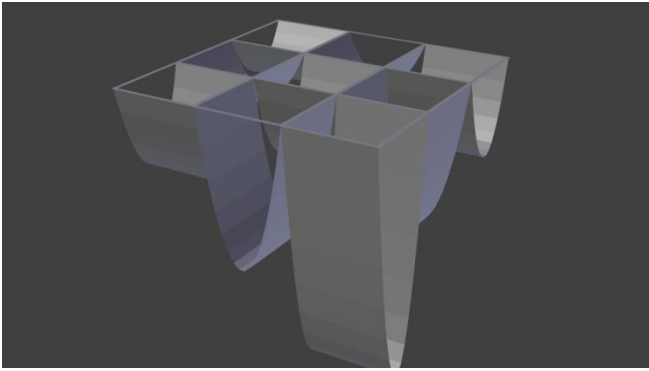


図 16 ダブルクロスカタナリー光拡散幕(CG)



図 17 拡散幕(朝日)

図 18 拡散幕(夕日)

写真を図 17 と図 18 に示す(文献⁴⁾より)。

光拡散幕の形態は、正方形のフレームを 3×3 箇所区切ってあり、それぞれの箇所に布を垂らして光を拡散させている。布は互い違いに東西、南北方向とし、様々な方向の光の流れに対応している。このように設置される布は、以下の式で示されるカタナリー曲線(懸垂線)の一部となることが知られている。

$$y = a \times (e^{x/a} + e^{-x/a}) / 2$$

a の値により布の高さをコントロールすることが出来る。この布の高さを南西角、南-西、南東角-中央-北西角、東-北、北東角の 5 種類に揃え、南西から北東に向かって高さが徐々に低くなるようにして設定されている。

4.2 実験モデルの概要

ダブルクロスカタナリー光拡散幕装置を中に含んだ直方体の天井が斜面となっている空間を、スチレンボードを用いて作成した。光拡散幕は実物と同じ布を用いた。図 19 ような空間を想定し、スケールは 1/5 とした。屋根の斜面は北側方向を向いている。また、天井と壁面にはスーパーファイン紙(EPSON 製、KA3N100SFR、反射率 0.6)を貼付している。実際の住宅には南と東の壁面に頂側窓がそれぞれ設けられているが、本実験では最も影響の大きい西側の窓だけを考慮している。文献³⁾より方位角と太陽高度を読み取り、その位置に光源(MAGLITE 3-Cell D Flashlight)を設定することとし、光源と西側窓の距離を 500mm として、西側窓の中心点に対して照射した。光源自体に黒模造紙(反射率 0.07)で作成した筒を設けることで、擬似的に平行光とした。カメラは北側壁面に西側壁面を格子状(51mm の正方形)に分割したときの赤丸の交点(図 20)を中心点となるようにカメラの位置を定めた。実験は暗室内にて行った。

本実験も斜角錐型天窗装置の実験同様、標準年の冬至、秋分、夏至の 3 日を対象とした。夏至は 14:00~18:00、

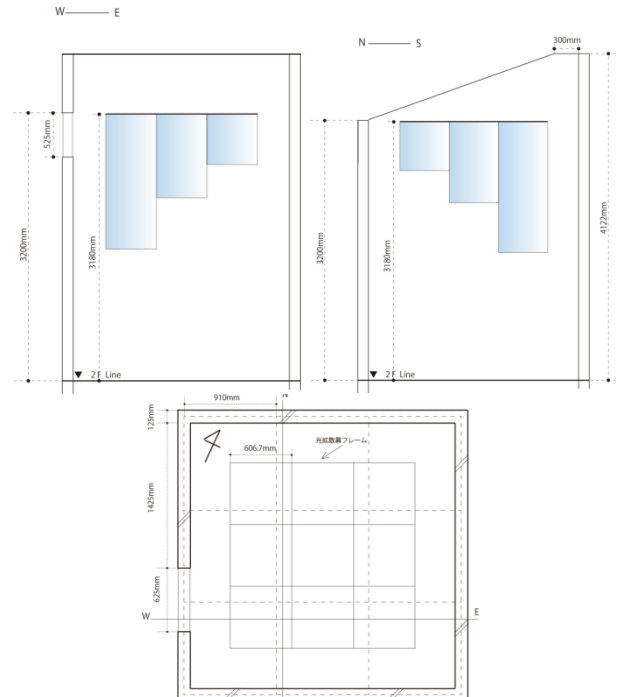


図 19 カテナリー光拡散幕模型の断面図(上)と平面図(下)

秋分は 13:00~17:00、冬至は 13:00~16:00 のそれぞれ 1 時間毎の撮影を行った。一つの時間に対して幕ありと幕なし(南西の最も高さがある幕のみまくり上げる)の 2 回撮影した。なお、デジタルカメラの設定は前章と同様とした。使用した光拡散幕の透過率は 27%、均等拡散透過率 18%であった。

4.3 シミュレーション結果との比較

斜角錐形天窗採光装置の時と同様、Radiance によりダブルクロスカタナリー光拡散幕のシミュレーションを行った。両画像の輝度値を比較するために図 20 のように 11 点の測定点を設け、輝度を比較した。

以上の結果の一例を図 21~図 25 示す。なお、各図の左上はそれぞれの測定点の輝度のグラフ、左下は基準点 1 に対する各点の輝度比のグラフ、右上はシミュレーションによる擬似カラー画像、右下は模型実験の擬似カラー画像となっている。

模型実験とシミュレーションの結果を比較検討したところ、秋分 13:00 時、夏至全ての時刻において、結果が異なっていた。その他の時刻では同様に輝度が得られた。秋分 13:00 時、夏至全ての時刻においては、模型と



図 20 カテナリー輝度測定点

シミュレーションで幕に入射するハイライト部分の光の面積が異なっていた。これは、光源の違いがあると考えられる。シミュレーションでは光源とモデルの距離を大きくすることで平行光を再現している。しかし、模型実験の場合、暗室で行っているので距離に制限があり、実際の平行光を実現することは困難となった。さらに側窓となる開口全てに光を流入させるために光源をわずかに拡散させる必要から、これが光の布への当たり方の違いとなっていると考えられる。さらに夏至においてはどの時刻も直射日光が壁面に直接当たっているのみで光拡散幕には、どの時刻においても当たっていない。この主な原因は不明であるが、模型実験の光源が完全な平行光ではない点や、シミュレーションはモデルの壁面の厚みを考えていない点、模型撮影などの精度が影響していると考えられる。しかしながら、図 24、図 25 のグラフ、擬似カラーを比較すると、光拡散幕にある程度の直射日光が当たれば同様の傾向が得られると考えられる。

5.まとめ

特定のデジタルカメラや社会に普及している器具を用いた簡易的な仕組みにより撮影された画像の画素階調値と対応点の輝度の関係を明らかにした。その上で、2種の採光装置を設置した空間の模型を製作して輝度分布を求めシミュレーションにより求めた輝度分布と比較して妥当性を検討した。

その結果、本研究で用いたデジタルカメラによる輝度分布の実測手法が確立した。斜角錐形天窗採光装置の検討では同様の結果を得る事ができ、シミュレーションと実測実験結果が同様であったため、得られた結果の信頼性が高い事を示した。ダブルクロスカタナリー光拡散幕の検討では、模型実験とシミュレーションで同様の結果を得られず、性能を適切に評価する事が出来なかった。しかし、原因を追求し改善することで、輝度の傾向が得られると考えられる。

参考文献

- 1) 中村洋;正射影カメラによる輝度および輝度分布の測定(その1.写真測光法と正射影カメラ,感光材料),日本建築学会論文報告集,第243号,昭和51年5月5日,p.73-79
- 2) 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,昭和51年5月6日,p.81-87
- 3) 日本建築学会;拡張アメダス気象データ 1981-2000,株式会社 鹿兒島 TLO,2005年8月12日
- 4) 鈴木広隆;頂窓側による採光のためのダブルクロスカタナリー光拡散幕の設計,日本建築学会大会学術講演梗概集,p.411-414,2007.8

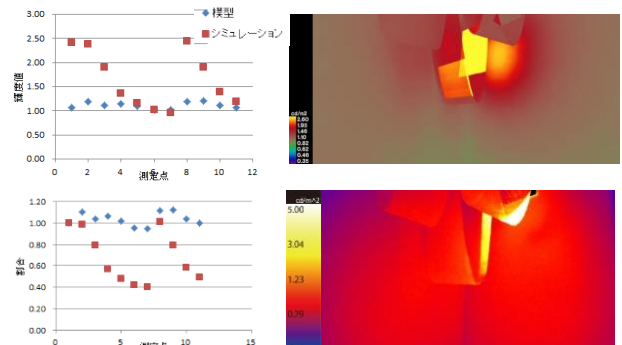


図 21 秋分 13:00 のデータ(輝度単位: cd/m^2)

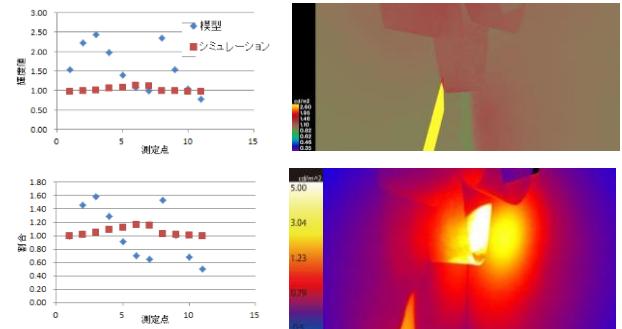


図 22 夏至 14:00 のデータ(輝度単位: cd/m^2)

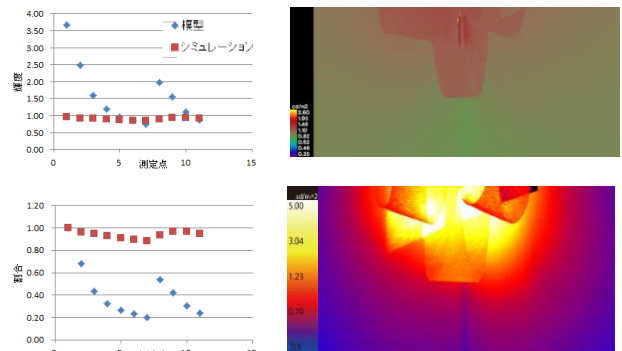


図 23 夏至 18:00 のデータ(輝度単位: cd/m^2)

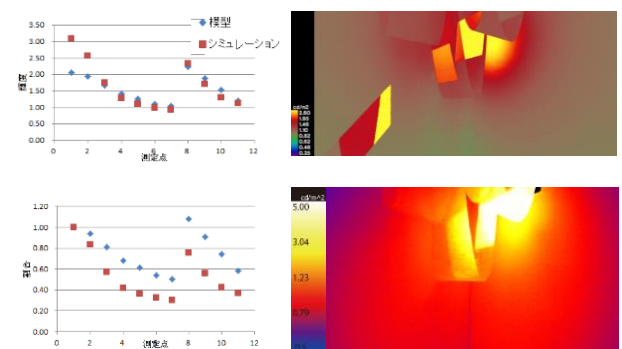


図 24 秋分 14:00 のデータ(輝度単位: cd/m^2)

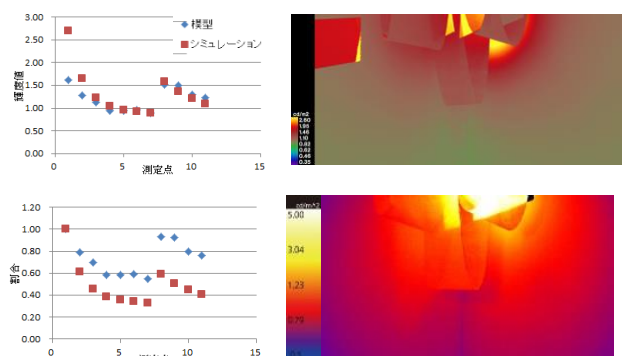


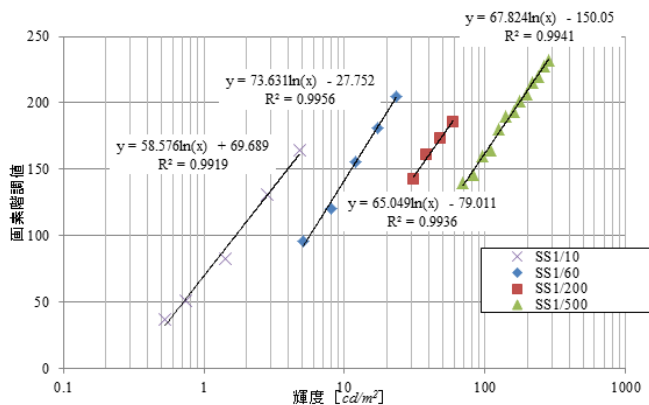
図 25 冬至 15:00 のデータ(輝度単位: cd/m^2)

討議[内田先生]

デジタルカメラはデジタルである以上、決定係数は1.0になると考えられる。図で決定係数1.0ではない事が見られ、そのズレが生じているのは何故か。

回答

本測定は暗室内にて行っており、デジタルカメラの測定点と輝度計の測定点とで微小の差が生じると考えられる。このように実測の過程で誤差が生じ、輝度と画素階調値の関係にもズレが生じるのではないかと考えられる。そのため、本測定では決定係数0.99以上の条件を満たす範囲を用いている。



討議[内田先生]

デジタルカメラの個体差の影響はあるのか。その場合、その影響は考慮しなくてもよいのか。

回答

デジタルカメラはその個体毎によって撮影された画像に差がある。そのため、本研究のように特定のデジタルカメラによる輝度と画素階調値の関係を導いている。

討議[西岡先生]

デジタルカメラによる輝度を検討するのであればシミュレーションと比較する必要はないのでないか。

回答

本研究ではデジタルカメラを利用した輝度分布測定法を利用し、特定のデジタルカメラにより撮影された画像の画素階調値と対応点の輝度の関係を把握している。その妥当性を検討するために、実測とするモデルとシミュレーションの輝度分布を比較している。

討議[西岡先生]

表題の採光装置の評価は、機能性の評価という事ではないのか。

回答

採光装置の機能性を評価するという事である。しかし、

本研究では妥当性を検討するのみであったため、用いたデジタルカメラにより採光装置を評価することは今後の展望となっている。

討議[内田先生]

この研究の新規性はどのような点なのか。

回答

輝度分布の観点から評価されたことのない2つの採光装置を対象とし、その機能性の評価を目的とし取り組んだ点である。結果は、その機能性の評価を行うに至らなかったものの、特定のデジタルカメラを用いた実測輝度分布手法の妥当性を検討するに至った。

討議[梅宮先生]

今後の目標として、平行光のみではなく天空光を考慮する事についてはどうか。

回答

本研究では装置の評価のための一つとして平行光のみを想定して行っている。よって、実際の昼光により近い、天空光を考慮した実験を行い、モデル実験、装置が実際に設置されている場所での実測と比較することで、機能性を考慮して評価を行ってきたい。