

斜角錐形天窓採光システムによる室内の光環境の分析

A STUDY ON THE EVALUATION OF A DAYLIGHTING SYSTEM WITH OBLIQUE PYRAMID SKYLIGHTS

環境図形科学研究室 土方宙史

本報は、兵庫県尼崎市に実在するオフィスビルに設置されている斜角錐形天窓採光システムを対象とし、本装置設置下の室内の光環境を多角的に分析した結果の報告である。本研究の目的は、本装置の光環境に関する性能を明らかにし、また室空間における本装置と人工照明の合理的な配置パターンを示すことである。本研究において検討した昼光率や机上面照度等の予測により、本装置で十分な採光効果が得られることが明らかになった。

This paper shows an analysis of light environment around the daylighting systems with oblique pyramid skylights that is installed in the office building in Amagasaki, Hyogo Prefecture. The purpose of the study is to show light flow around the system and illuminance distribution of surrounding space. And the author presented effective arrangement pattern for the daylighting system considering artificial light source as well for practical light planning. The author showed that by this study, there is sufficient lighting effect in this skylight by simulation of daylight factor and horizontal illuminance etc.

1. 研究の目的

昼光は、24時間周期の環境に生体リズムを同調させ生理機能を保持する効用や、安らぎや落ち着きを与える心理効果がある¹⁾。また窓の心理的効果としては、時間の情報が得られることや開放感があること、気分転換がしやすいこと等が挙げられる。昼光利用による省エネルギー効果は、昼光導入量に応じて人工照明の出力を削減することにより達成される。また昼光照明は日射熱の取得に繋がるため、消費するエネルギーを総合的に低減させるには、熱環境と光環境のバランスが課題となる。近年の高密度な土地利用による不十分な採光環境を考慮すると、近隣建物の影響が小さく採光率の高い天窓は有効的である。本研究ではグレアカットと配光均一化を可能とする斜角錐形天窓採光システムを対象とし、本装置を取り付けた室内の光環境を分析し、本装置の設置する際に必要な情報を示すことを目的とした。

2. 斜角錐形天窓採光システムの概要

斜角錐形天窓採光システム(以下、斜角錐形天窓)はすがアトリエ(菅正太郎, 大阪市阿倍野区)による設計であり、2012年4月に竣工した兵庫県尼崎市に位置するオフィスビルの2階天井懐に設置されている。本建物の西向き側窓

からの眺望は工場街であり、良好な見晴らしを天窓から望む空に求めている。設計者のインタビュー調査では、執務者より「顔が明るく照らされ、皆が生き生きして見える」等の好意的な意見が上がっている。

斜角錐形天窓と周辺の光環境の様子を図1に、平面図・断面図を図2に示す。形状は高さ1,100mmの正八角形斜角錐であり、本装置上端にはガラス(TTG ガラス, アフィニティー(株)製の調光ペアガラス)が取り付けられている(図3参照)。



図1: 斜角錐形天窓とその周辺の光環境の様子 (平井広行氏撮影)

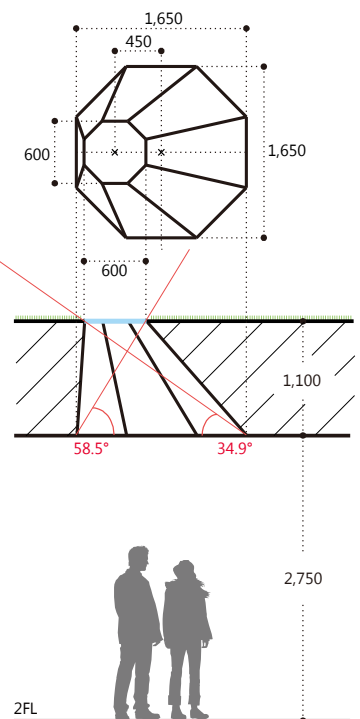


図2: 斜角錐形天窓の平面図・断面図

上面の正八角形の幅は 600mm, 下面の正八角形の幅は 1,650mm であり, 上下の正八角形の中心が 450mm ずれている。当オフィスビル 2 階の天井高は 2,750mm である。

本装置で使用している TTG ガラスは網入りガラスのペアであり, 温度 30°C 以上で白濁化し入射光を拡散光として透過させる(図 4 参照)ため, 6 月~9 月の気温の高い時期では直射日光の流入を抑制し熱負荷を低減できる。また 5 月と 10 月の気温が高い時間では, TTG ガラスが一時的に白濁する。

本装置は上面と下面の中心のずれており, 側面の傾き角度が対称で異なる。本装置の側面下端と対面する側面上端を結ぶ直線と水平面のなす角度は 5 つあり最大で 58.5°, 最小で 34.9°である(図 5 参照)。日本人の両眼の視野は上方が 60°であり, 最大角度 58.5°は仰角 60°の範囲内に直射日光が入らないことを考慮している。また最小角度 34.9°は冬至の南中高度である 32°(北緯 34 度)を意識し, 冬季の日照を多く採り入れる意図がある。

本装置の傾斜の大きい側面が北側の場合, 南中時の高度が 58.5°付近になる 3 月 30 日頃を境にして直射日光が床面に届くこととなる。TTG ガラスが透明な時期である 11 月から 3 月 30 日頃までは, 図 6 のように直射日光が側面で全て遮蔽される。3 月 30 日頃以降からガラスが透明な時期である 4 月頃までは, 直射日光が床面に到達する。一方, 傾きの最も小さな側面が北向きの場合, 1 月下旬から 4 月頃まで直射日光が床面に到達する。

当オフィスビルには合計 15 台の本装置が, 45 度ずつ向きを変えて配置されている。45 度である理由は, それより小さな角度のバリエーションとした場合でも採光効果が大きく変わらないためである。建物西側はカーテンウォールであり, 採光は本装置と西向きの側窓から得られる。それらの光量不足を補う役割として, 調光型の人工照明が天井に設置されており, 効率的な昼光照明と人工照明の併用により室内の快適な光環境を実現している。

3. 斜角錐形天窓単体の光環境分析

本研究では, 照明シミュレーションソフトである Radiance を用いて, 室内の光環境の分析を行った。

3.1 斜角錐形天窓の分類

(1) 傾きの方向による分類

図 5 で本装置の上面が北側寄りの場合と南側寄りの場合の 2 種類

に分け, 直射日光の入射に関して特徴を示した。本章でも同様に図 7 に示す 2 種類に分け, それぞれを斜角錐の上面が北に寄っている「北寄りモデル」, その逆の「南寄りモデル」とした。

(2) ガラス状態による分類

本装置の上面に取り付けられているガラスは温度により透過率が変化し, 気温の高い時期はガラスが白濁し拡散光として透過する。そのためガラス状態を透明状態と白濁状態に分けてシミュレーションを行った。

3.2 昼光率の分析

斜角錐形天窓を設置した室内における机上面の昼光率を図 8 に示す。図 8 左のガラス透明状態では昼光率のピークは本装置中心の直下で約 4.0% と高く, 精密な視作業を行う空間の推奨値程度である。また 4m×4m の範囲全体で昼光率は 0.5% 以上あり, 本装置により広い範囲まで光が到達していることが分かる。図 8 右のガラス白濁状態では, 透明状態よりも透過率が下がるため昼光率は小さいが, 本装置直下で約 1.0% 程度あり, 軽い視作業を行う空間の推奨値となる。実空間では壁面からの相互反射光や側窓からの採光の影響でこの数値より高くなると考えられる。



図 3: 本装置に設置された TTG トップライトガラスの様子

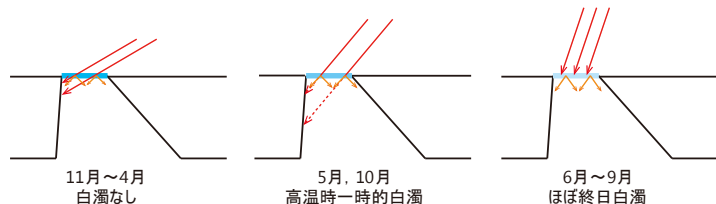


図 4: 各時期の調光ペアガラスの変化の様子

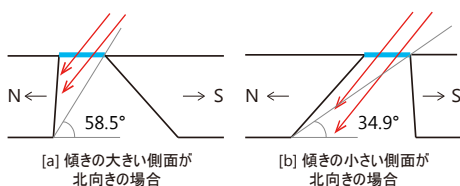


図 5: 斜角錐形天窓の向きの違いによる直射日光の様子



図 6: 直射日光が角錐側面に当たる様子 (2012 年 12 月 20 日撮影)

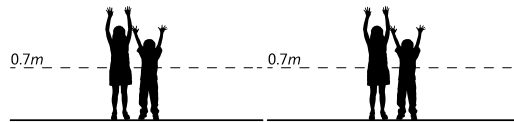
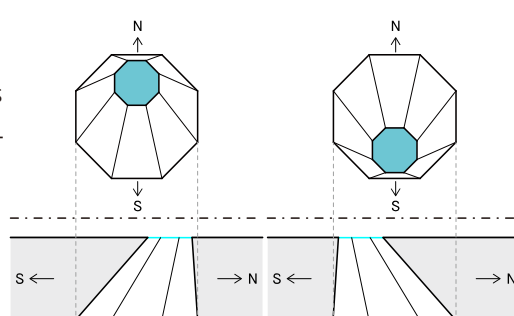


図 7: 斜角錐の傾き方向別に分類した本装置モデル

3.3 配光曲線の分析

本装置からの光の流れを人工光源の照明器具と同様に考え配光曲線による分類を行った。これは、本装置を容易に取り扱うためのデータを得るためである。配光曲線のための光度は、図9に示すxz平面とyz平面の鉛直面で算出した。図10に一樣天空時の天空状態を用いて、図11に二至二分に近い日の快晴時の標準年気象データ^{2),3)}を用いて全光束1,000lmあたりの光度の分布を図化した鉛直配光曲線を示す。xz平面上の配光曲線を破線で、yz平面上の配光曲線を実線で表している。

北寄りモデルと南寄りモデルの配光曲線を比較すると、一樣天空時はxz平面で対称になり、角錐側面の傾き角度が小さい側へ光が広がっている。光度は、z軸上から角錐側面の傾き角度が大きい側へピークが現れている。また、一樣天空ではガラスが正透過の透明状態、拡散透過の白濁ガラス状態ともに同様の配光曲線である。

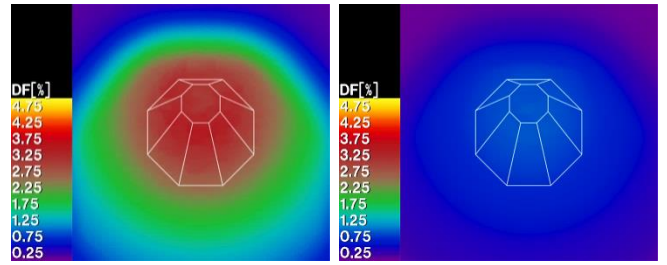
ガラスが透明状態である春分時は、北寄りとも南寄りとも天空光のみの場合で高い光度を示している。これは、晴天空の太陽周辺の高い輝度が影響したためと考えられる。直射日光を導入した場合、北寄りモデルでは角錐側面で遮蔽されるため南側へ広範囲に強い光が達し、南寄りモデルでは直射日光が床面に到達する。夏至と秋分は天窗ガラスが白濁し、拡散透過するため一樣天空時の配光分布とも類似している。冬至では再びガラスが透明状態となり、南寄りモデルでは2章で述べた設計意図の通りに冬至における十分な採光を実現している。また、春分と異なり直射日光が床面に到達しないため不均一な配光曲線にはならない。全体を通して、角錐側面の傾き角度が小さい側へ広範囲に光が届いており、また直射日光が側面で反射することでさらに広い範囲まで光が到達している。

採光装置による光の流れの配光曲線表示は新しい試みであるが、一樣天空や各時期における図化は装置の採光性能を示すうえで理解しやすく有効な表現といえる。

3.4 机上面照度の分析

天井高を2,750mmとした時の机上面照度分布を図8と同様に4m×4mの範囲で床面から0.7mの高さで出力し、一樣天空時の場合を図12に、各時期の気象データを用いた場合を図13示す。

一樣天空時の照度分布は全天空照度を15,000lxとした場合である。一樣天空と夏至と秋分は、配光曲線と同様に類似した分布となり照度値はグローバル照度に比例する。春分のガラス透明時で直射日光がありグローバル照度が約91,400lxの場合、北寄りモデルでは本装置直下で550lx程度であり全体で最も効果が高い。また天空光のみの場合ではピークが装置直下より北側



(a) ガラス透明時 (b) ガラス白濁時
図8: 斜角錐形天窗を設けた室内における机上面の昼光率

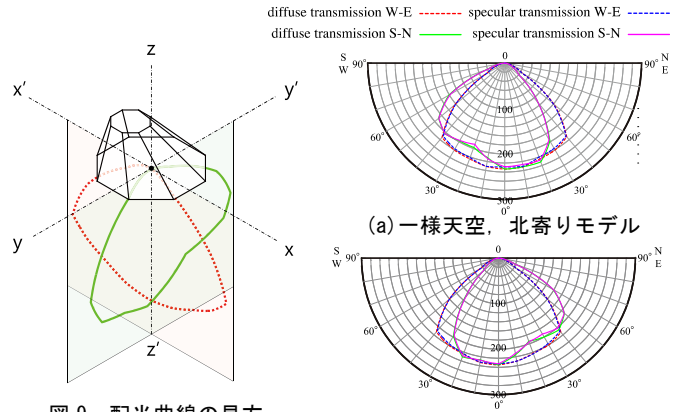


図9: 配光曲線の見方
図10: 本装置下における一樣天空の配光曲線

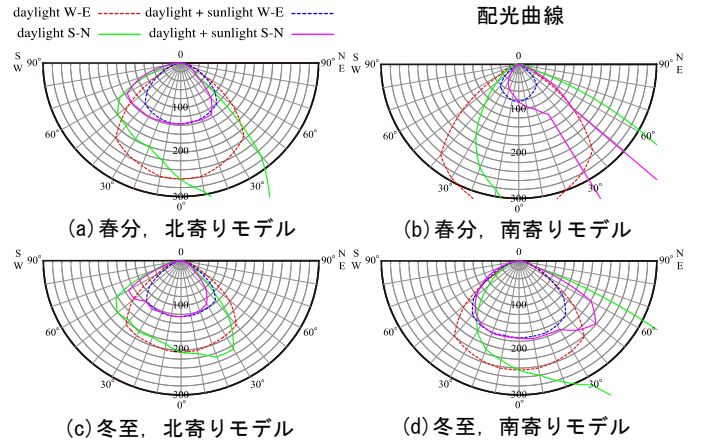
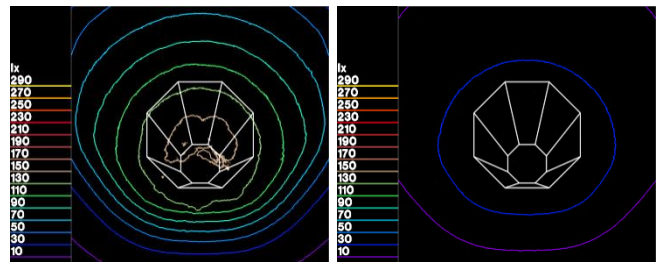


図11: 本装置下における各時期の配光曲線



(a) 一樣天空, ガラス透明時 (b) 一樣天空, ガラス白濁時
図12: 本装置下における一樣天空時の机上面照度

であるが、配光曲線と同様に晴天空の太陽周辺の高い天空輝度が影響したためであると考えられる。春分の南寄りモデルでは直射日光が到達し、机上面に開口部形状である正八角形の強いエッジの分布が出現している。冬至のグローバル照度が約48,400lxで直射日光がある場合、南寄りモデルの場合では、比較的照度が高く昼光が十分に採り入れられており、配光曲線と同様

に設計意図通りである。全体を通して、ガラス白濁時は本装置直下で 260~300lx 程度、ガラス透明状態時は最も高い時で 540~580lx 程度である。本装置単体で 500lx 以上得られた結果から本装置の採光性能の高さが明らかになった。

4. オフィスビル室内の光環境評価

本装置が設置されたオフィスビルを対象として、室内の床面昼光率と床面照度分布を出力し考察を行った。室モデルは、平面図を基に計算が煩雑にならないよう簡略化して作成した(図 14 参照)。

4.1 室内の昼光率

オフィスビル内の床面昼光率を図 15 に示す。本節の分析では、相互反射や西側窓からの採光も含め実物の空間を再現している。

ガラス透明状態の場合では、室内で 5%以上と非常に高い。昼光率 5%は長時間の精密な作業を行う空間の推奨値であり、様々な空間として利用可能である。また天窓直下周辺で昼光率が上がっている。ガラス白濁状態では透明時ほど大きな効果はないが、室内で 3~4%程度の値となっている。図 15 の双方とも西側窓からの影響が大きく、室内まで十分に光が届いていないため、天窓を室内に配置することが全体の昼光率を上げることに貢献していると考えられる。

4.2 室内の床面照度と一日の床面照度分布の変化

各時期における床面照度分布の様子を図 16 に示す。春分では、南寄りモデルの本装置直下のみで直射日光が床面に到達し、図 13 と同じ結果となった。また全体的に照度が高く、特に本装置直下付近で高い効果が得られている。夏至と秋分ではガラスが白濁しているた

め、本装置設置下で同様の床面照度となるが、オフィス室内の場合では西側窓の影響でグローバル照度の高い夏至の方が秋分より全体的に高い照度分布となっている。冬至では南寄りモデルの本装置真下付近で照度が高くなっており、全体的に 600lx 以上の値となっている。

一日の床面照度分布の変化を図 17 に示す。10 時から天窓直下周辺が明るくなるのが分かる。また 10 時から直射日光が床面に到達し、部分的に高い照度となっている。12 時では本装置直下周辺で特に明るくなっている。14 時以降は西日が差し込む影響が非常に大きいため、本装置による効果を判断することは難しい。図 17 から、天窓らしい変動的な光の動きを居住者が感じられることが明らかとなった。

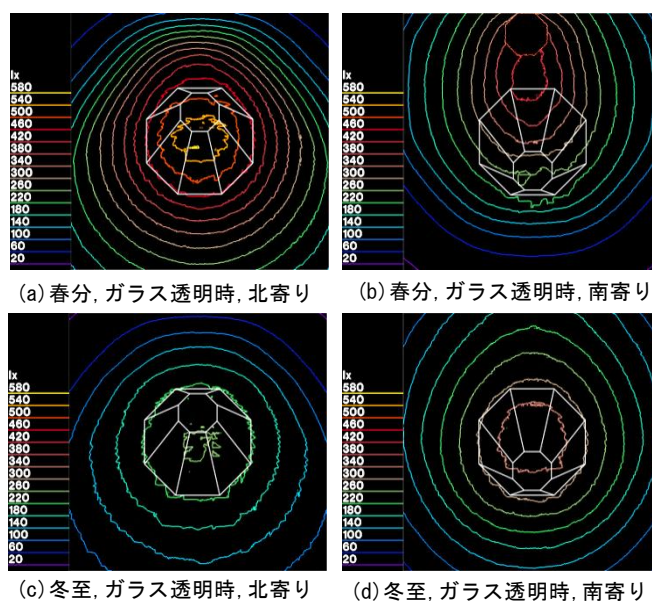


図 13: 本装置下における各時期の机上面照度

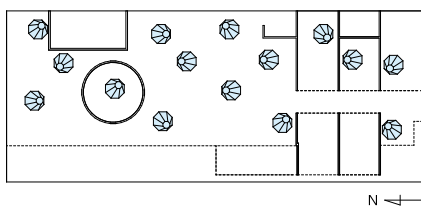
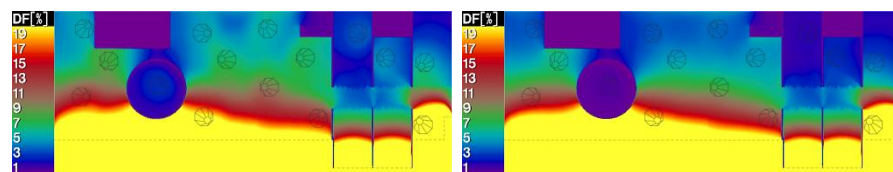
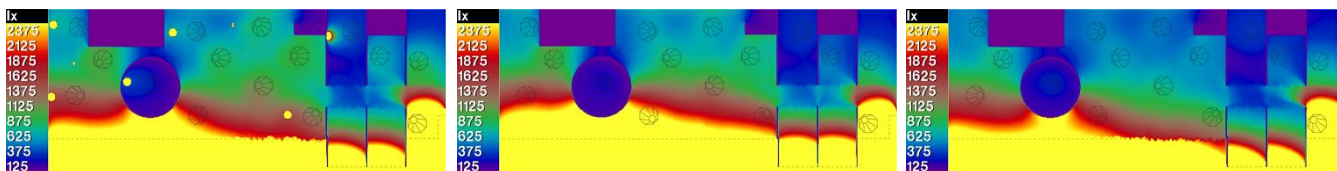


図 14: オフィスの平面図と装置設置位置



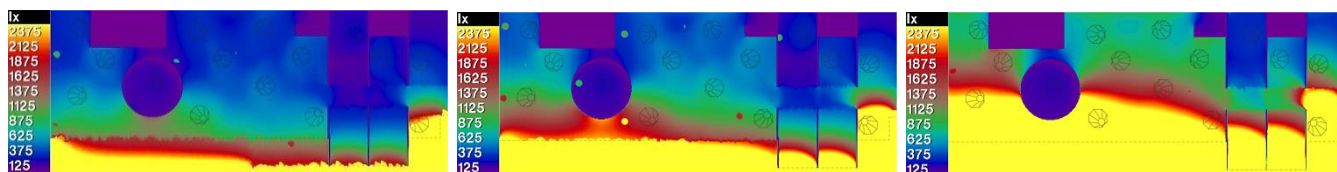
(a) ガラス透明時 (b) ガラス白濁時

図 15: オフィスビル内の床面の昼光率



春分(透明ガラス, グローバル照度 91,400lx) 夏至(白濁ガラス, グローバル照度 99,800lx) 冬至(透明ガラス, グローバル照度 48,400lx)

図 16: 各時期のオフィス室内の床面照度分布



(a) 標準年 3 月 25 日 10:00/神戸 (b) 標準年 3 月 25 日 12:00/神戸 (c) 標準年 3 月 25 日 14:00/神戸

図 17: 快晴日の 2 時間毎の床面照度分布の変化

5. 本装置と人工照明併用時における全般照明計画の検討

図 18 に示す執務空間の全般照明方式の照明設計を想定し、斜角錐形天窗と人工照明を併用し机上面全体が均一で高照度の分布を得ることを目的とした検討を行った。これは本装置が単独ではなく、他の採光装置や人工照明と併用して活用される可能性を考慮するためのものである。

5.1 天窗を固定し室内の相互反射を考慮しない配置

本装置は天井面の任意の位置に固定できるが、本節における検討では室の中心に定め、本装置の上面が北に寄ったモデルを天井懐に設置した。図 18 の室空間において照明器具を 1 台取り付け付けた場合の机上面照度を算出し、図 19 に赤印でプロットした。また赤印で示した光源直下を原点とした距離に関する机上面照度の近似式を誤差最小二乗法により求めた(図 19 参照)。

次に、本装置による採光のみの場合の机上面照度を求めた(図 20 参照)。使用した気象データは神戸地点標準年 3 月 26 日 12:00 で、この日時は直射日光が全て角錐側面で反射される期間において、グローバル照度が 83.3klx と最も高い値を示している。図 19 の照明器具の距離に関する机上面照度の近似式と図 20 の本装置

からの採光のみによる机上面照度を重ね合わせて室内の照度サンプリング箇所における各点の照度を計算し、その最小値を上げることを目的とし、照明器具の最適な配置を探索した。問題を解くためのツールとして Excel のソルバーアドインを利用し精度の高い解を得た。

結果の一例として、図 21 に器具 6 台における照明器具配置のパターンを示す。その他 7, 8 台の場合も含めて、照明器具の配置は左右対称に近く、器具間は 1.5~2.0m 程度離れている。最終的な照明器具の配置は夜間の場合まで考慮しなければならないため、照明器具のみの場合の検討も行った。図 21 の器具 6 台の配置における夜間時の机上面直接照度算出値を図 22 に示す。またそれらに照明器具を 2 台付け足して配置した場合の照度分布を図 23 に示す。表 1 に特徴的な照度値を示す。

Excel のソルバーを用いた配灯計画手法の利点は、比較的容易に精度の高い解を得られることである。設備や構造上の理由から先に本装置の配置場所が決定された場合、この手法は有効である。また表 1 を参照し、本装置と併用する人工照明の配灯計画では、先ず昼光照明と合わせて器具台数を少なく配置し、次に夜間用として数台付け足す本手法の配置が高い均斉度を得られ、効果的である。課題は、初めの条件設定で本装置を室の中央に設置したため、夜間で照明器具を追加した配置の場合でも、室中央周辺の机上面照度が低い結果となったことである。

5.2 天窗を移動し室内の相互反射を考慮する配置

本節では、前節の課題を考慮し本装置を移動し室内の相互反射を考慮する配置を検討した。本検討の分析のフローを図 24 に示す。この検討では、まず本装置と照明器具の台数を入力して、配置する座標を決定し、さらに天井面、斜角錐形天窗側面、TTG 調光ガラスの座標を記述したオブジェクトファイルを出力して、Radiance でシミュレーションを実行した。室内の照度サンプリング点における最小照度を抽出

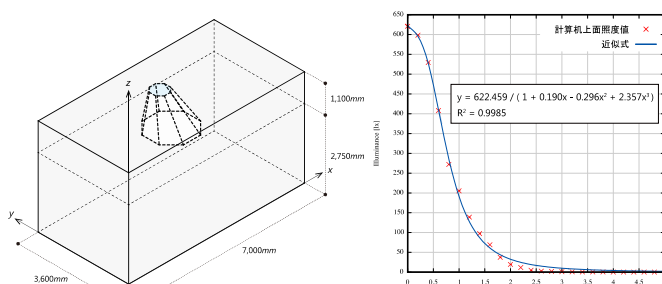


図 18：想定した執務室モデル 図 19：人工照明直下の机上面照度

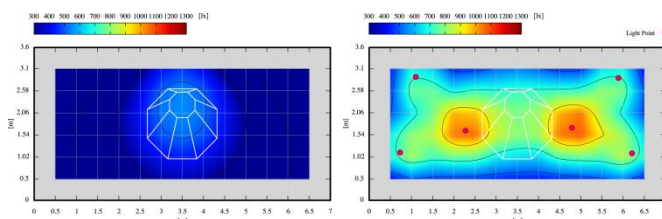


図 20：昼光光源のみの机上面直接照度分布

図 21：器具 6 台の配置による快晴時の直接照度分布

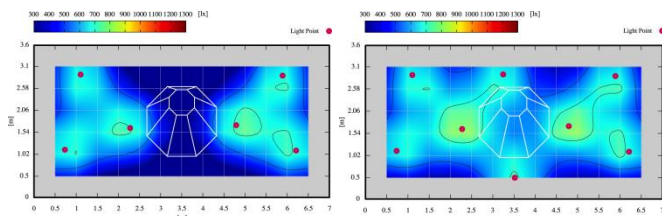


図 22：器具 6 台配置による夜間の直接照度分布

図 23：器具 6 台に 2 台足した配置による夜間の直接照度分布

表 1：夜間の配置における各器具台数の特徴的な照度値

器具台数	最小直接照度算出値[lx]	平均直接照度算出値[lx]	均斉度
(a)6 台+2 台	324.173	573.095	0.566
(b)7 台+1 台	278.766	532.772	0.523
(c)8 台+1 台	290.233	597.823	0.485

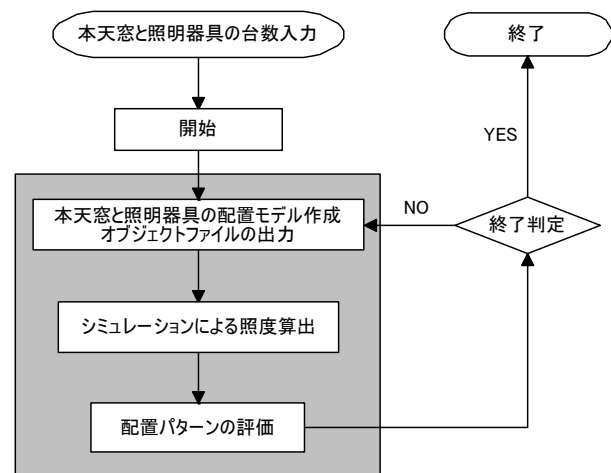


図 24：システムフロー

し、最小照度を上げることが目的関数とする単目的最適化問題として評価を行った。最適化手法としては適合度の高い個体の分布を統計的に予測して子を推定する分布推定アルゴリズム PBIL を用いた⁴⁾。PBIL の設定は個体数 50、世代数 100 とし、終了判定に関しては 50 世代を超えて適合度の上昇が見られなくなった場合に計算を終了した。上記の手法により得られた最適解を照明器具台数毎に図 25 に示す。

全体を通して、本装置は室の中心を外し比較的端の方へ寄った位置に配置された。角錐側面の傾き角度が小さい側が室中心へ向いており、同側へ広がる照度分布となる本装置にとって有効な配置といえる。また照明器具は一箇所に集中することなく全体に均等に散っており、合理的な配置であると考えられる。

図 26 で夜間用に追加された照明器具は、本装置位置周辺に多く配置され、本装置真下の照度不足を補っている。表 2 に特徴的な照度の値を示した。先に昼光照明と併用する形で器具を 4 台配置して、夜間用に 4 台追加する配置手法が、最も大きな最小照度となっており平均照度も高い。夜間照明を考慮すると本装置を室中心から外した配置は室中心周辺に照明器具を配灯で

きるため、全体的に安定した照度分布となり合理的である。

5.3 本装置を複数配置する場合の最適配置検討

昼光照明のみを考慮した最も合理的な本装置複数台の配置の検討を行った。気象データは設計時に用いる全天空照度 15,000lx の一様天空を再現し、5 台の本装置の配置を行った。手法全体の流れは前節と同様に、PBIL による最適化を行うもので大きな違いはない。目的関数も前節同様に最小照度を最大とすることを目標とした。

当オフィスビルでは西側窓の影響が強いため、求めた最適配置では、側窓からの採光量が小さい室内を本装置によりカバーしている(図 27 参照)。また本装置は照度算出箇所の範囲においてほぼ均等に配置された。特徴的な算出照度値で比較すると、最適配置は均斉度が 0.681 であり推奨値とする 0.7 に近く、照度がほぼ均一である。室全体では本装置が室内に偏って配置されているが、光環境の視点では合理的な配置であるといえる。

6. 成果とまとめ

本研究では斜角錐形天窗を対象とした光環境の分析を行った。昼光率と机上面照度から、装置単体で十分な採光効果が得られることを明らかにした。室内では西側窓の影響が強いが、本装置直下で昼光率が上がることを明らかにした。さらに最適化ツールを用いた配灯計画手法により精度の高い解を得られ、設計支援システムとして有効であることを示した。本研究の成果として、本装置の設置を検討する際に必要な情報を示すことができた。

参考文献

- 1) 平手小太郎：建築光環境・視環境，数理工学社出版，2011。
- 2) 日本建築学会：拡張アメダス気象データ 1981-2000，鹿児島 TLO，2005。
- 3) 菊池卓郎，井川憲男：All Sky Model-L を導入した昼光照明計算プログラムの性能検証，日本建築学会環境系論文集第 73 巻第 629 号，pp865-871，2008。
- 4) 日本建築学会：アルゴリズムック・デザイン 建築・都市の新しい設計手法，鹿島出版会，2009。

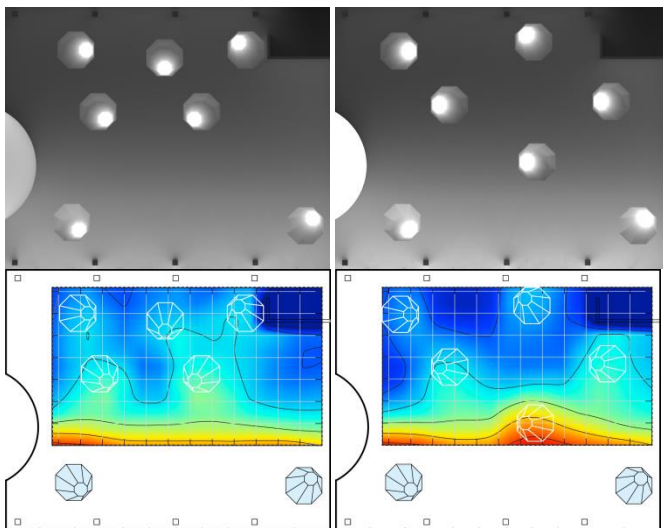


図 27：一様天空照度 15,000lx 時における机上面照度の比較

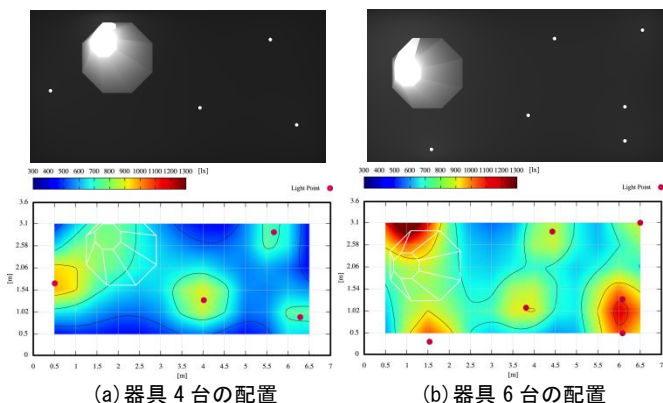


図 25：快晴時の照度分布図と天井の様子

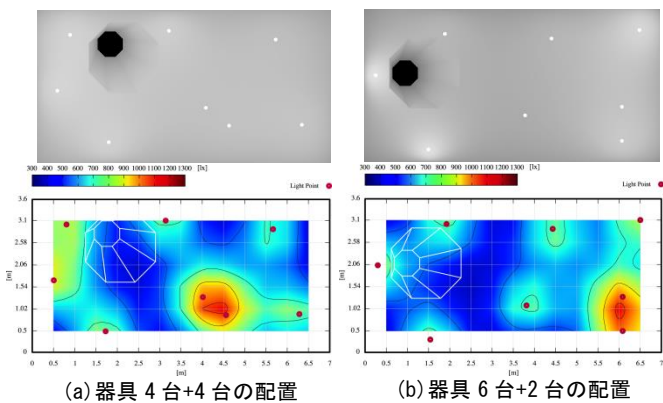


図 26：照明器具を付け足した場合における夜間の照度分布

表 2：夜間の配置における各器具台数の特徴的な照度値

器具台数	最小照度算出値[lx]	平均照度算出値[lx]	均斉度
(a)4 台+3 台	321.386	578.130	0.556
(b)4 台+4 台	369.081	629.885	0.586
(c)5 台+2 台	315.085	549.491	0.573
(d)6 台+2 台	358.146	598.143	0.599

討議

M12TD037 土方宙史

討議 [梅宮典子先生]

配光曲線や机上上面照度の分析で用いた気象データについて。曇天空での検討を行わないのか。一様天空と曇天空では異なった結果にならないか。

回答

分析では曇天空と一様天空を同様であると考えて、一様天空の場合でシミュレーションを行った。曇天空は低高度から天頂へ高度が上がるにつれて、輝度が高くなる。一方、一様天空は全高度で同輝度である。本装置の開口部は水平に設置されており(図1参照)、天空光のうち鉛直方向に届く光が大きく影響する。従って、天頂輝度の高い曇天空の方が装置直下の照度が高くなると推測される。また全体の照度分布には大きく影響はない。



図1：本装置の開口部

討議 [鈴木広隆先生]

調光ガラスを用いず透明ガラスにした場合、応用できるのか。再度シミュレーション等の分析をせずに、同様の採光装置を設計することは可能か。また角錐ではなく角柱でも可能か。開口部の面積を変えることはいいのか。他に形状のアイデアはないのか。この形状が斜角錐として最も良いのか。

回答

透明ガラスにした場合は太陽高度の高い時期で、床面に光が到達する。角柱のように斜角錐の傾き角度が大きくなると、床面に光が広がらない。また傾き角度を小さくすると、直射日光が角錐側面で反射せず、一般的な天窗のように、グレアが起り不均一な輝度分布となる。従ってこの形状が合理的であると考えられる。

討議 [水谷聡先生]

設計者はこの形状が最も良いと考えたのか。円錐や六角錐でも同様ではないのか。なぜ八角形であるのか。

回答

設計者の話によると、本来であれば緻密な分析を行った上で設計すべきであったが、今回は照明会社と検討を重ね設計者自身の経験に依り形状を決定した。また八角形である理由は、理想は円形であるが、斜円錐など多角形の角数を多くすると施工が大変となり、4角形程度に小さくすると円とは異なる。従って、8角形に決定した。この形状がベストであるかの検討は今後の課題となるが、非常に合理的な形状であるといえる。