

昼光導入装置設置時の室内照度予測 と照明エネルギー削減効果 —光拡散型天窗の事例—



静岡県工業技術研究所
機械科長 鈴木 敬明



株式会社スカイプランニング
代表取締役 外山 勸

1. はじめに

近年のエネルギー需給や、環境、CO₂削減といった社会問題に呼応して、代替エネルギーへの転換、省エネルギー社会の推進が強く求められている。そのような社会状況のもと、昼光を利用することによる照明用電力の削減に注目が集まり始めている。晴天時の屋外の照度（グローバル照度）は10万ルクスにまで上昇するのに対し、オフィスなどの室内空間で要求される照度は1000ルクス以下である。このことを考えれば、昼光の数%から10%程度を室内に導入することで、要求される照度を満足する空間を作り出せる可能性がある。ただ、これまでの昼光利用において、その指標の一つである昼光率が直射日光を除外して考えられているように、直射日光の利用についてあまり考慮されていなかった。しかし、屋外の照度における直射日光の割合は非常に大きく、直射日光を積極的に室内に導入し、照明光として利用しようという機運も高まっている。その際には、強烈な強さの平行光線である直射日光が引き起こすまぶしさや空間的な照度のムラなどの問題を解決するために、昼光導入装置には直射日光を拡散・反射・遮蔽する拡散板やルーバーなどが用いられることが多い。直射日光を制御して室内に導入することは世界的な技術トレンドでもあり、照明の国際技術標準を検討する国際照明委員会（CIE）においても、「日よけ装置を透過した直射日光、昼光の評価方法」を検討する技術委員会（TC3-55）が2013年2月に立ち上がり、筆者も委員として参加している。日本でも、環境省環境技術実証事業「地球温暖化対策技術分野（照明用エネルギー低減技術）」において、平成26年度から昼光導入装置が対象技術に加わっている¹⁾。

ところで、直射日光を拡散させて室内に導入する昼光導入装置を設計、開発する際には、以下のような課題を解決する必要がある。例えば、工場などの照明は、JIS Z 9125：

2007「屋内作業場の照明基準」において、照度、グレア制限値、均斉度などの照明設計基準が規定されている。昼光導入装置を設置し、昼光照明設備として機能させるためには、この基準を満足させる必要がある。しかし、直射日光は設置場所、時刻、天候によって変化する。また、拡散板などの光学部材を経由して室内に導入する際には、光学部材の光学的性質（反射率や散乱の程度）により光の方向や強度が変化する。そのため、昼光導入装置の設計においては、設置場所、時刻、天候、設備に用いる光学部材に対応させて複数の条件のもとで設置後の室内照度分布、グレアなどを予測、評価する必要がある。これは装置の設計パラメータが多いことを意味しており、その性能を実験的に評価することは非常に困難である。

既に照明設備として性能評価方法が確立されている人工照明（電灯など）では、製品設置後の照度などの予測は容易に行われている。これは、人工照明は昼光導入装置と異なり場所や時間によらず一定の性能で機能することと、照明メーカーが各製品に対する配光を実験的に計測し、配光データを提供していることによる（図1左）。昼光導入装置においても、人工照明と同様にその配光を数値化することで、設置後の照度などの予測が可能となる。しかし、昼光導入装置の場合、その性能は場所、時刻、天候に依存すること、仮想的な直射日光を実験的に作り出すことが困難であることなどの理由から、実験的に配光データを計測することは現状では不可能と考えられる（図1右）。

そこで、われわれは、光学シミュレーションを用いることで昼光導入装置の配光データを算出することを検討した。シミュレーションであれば、設置する場所や、想定する時間は任意に設定することができる。本報告では、具体的な事例として、単純な形状をした光拡散型天窗を対象とし、それを透過した昼光の配光データを構築する方法について紹介する。光拡散型天窗に用いられる、拡散板の光学特性と、天窗の設置場所や、季節、時間による太陽の位置に基づき、光学

シミュレーションを用いて配光データ（すなわち、その時間、場所における天窓を通して得られる昼光の光度とその分布データ）を構築した（図2）。また、その応用方法と、実際にシミュレーション予測に基づいて設置した光拡散型天窓による照明エネルギー削減事例について紹介する。

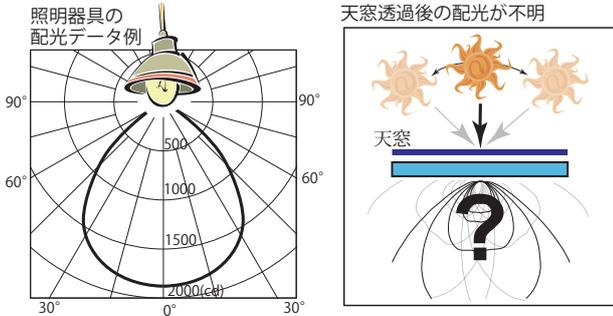


図1 技術的課題

人工照明では配光が明らかなため設置後の照度分布が計算できる(左図)。昼光導入装置(この場合は光拡散型天窓)設置時の照度分布を計算するには昼光(天空光+直射日光)入射時の配光を明らかにする必要がある(右図)。

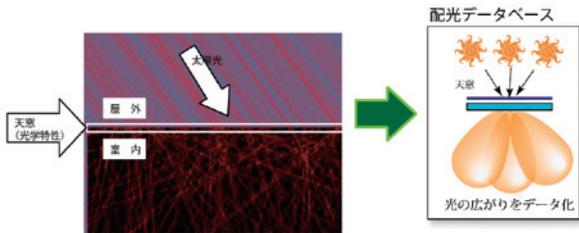


図2 紹介する光学シミュレーションの概要

天窓部材の光学特性(透過率、拡散度など)に基づき、昼光が天窓を通して・拡散した室内の光強度を光学シミュレーション(光線追跡法)で計算することで(左図:直射日光の場合)、太陽光の高度、位置に応じた天窓の配光をデータベース化した。

2. 光学シミュレーションによる天窓の配光データの計算^{2,3)}

2.1 対象とした天窓の構造

今回は、天窓部材の構造が型板ガラスと拡散板(中空層を持つポリカーボネート)の単純な2層の組み合わせの製品について検討を行った(図3)。実施する光学シミュレーションでは、3次元空間内を伝わる光の伝播経路を追跡すること

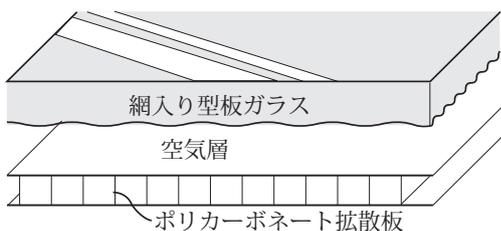


図3 検討した天窓部材の構造

で実際の光の挙動をシミュレートする光線追跡法という計算手法を用いる。そのため、昼光導入装置の構造は、3次元の幾何学的形状をシミュレーションソフト上に設定できれば、どのような形状の製品であっても室内に導入される光の配光が計算可能である。

2.2 天窓部材の光学特性の測定

使用した光学シミュレーションソフトウェアにおいては、光学部材の光学特性は双方向透過率分布関数、双方向反射率分布関数で設定する。それらの関数を実際の特性を反映させるように決定するため、天窓部材の光学特性として変角分光透過率(拡散透過、正透過)と変角分光反射率(拡散反射、正反射)を測定した。測定角度条件を表1、図4に示

表1 測定角度条件

透過率 (拡散透過)	入射角: 0 ~ 90度 (15条件) 方向角: 0 ~ 180度 (3条件) 偏角: 0 ~ 180度 (43条件) 面内回転角: 0度, 90度 上記の組合せで1315条件
透過率 (正透過)	入射角: 0 ~ 70度 (15条件)
反射率 (拡散反射)	入射角: -30 ~ 60度 受光角: -25 ~ 85度 あおり角: 0 ~ 55.7度 上記の組合せで412条件
反射率 (正反射)	入射角: 10 ~ 70度 (13条件)

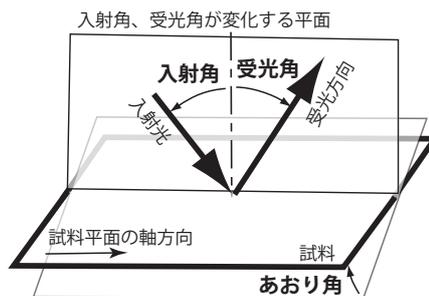
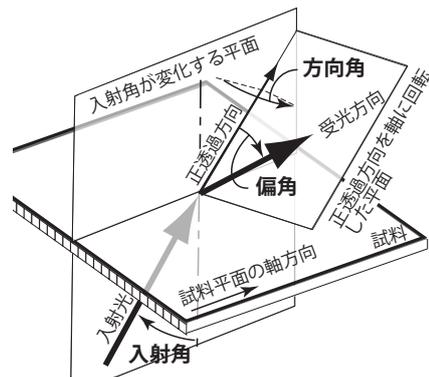


図4 変角分光透過率(上), 変角分光反射率の測定角度条件(下)

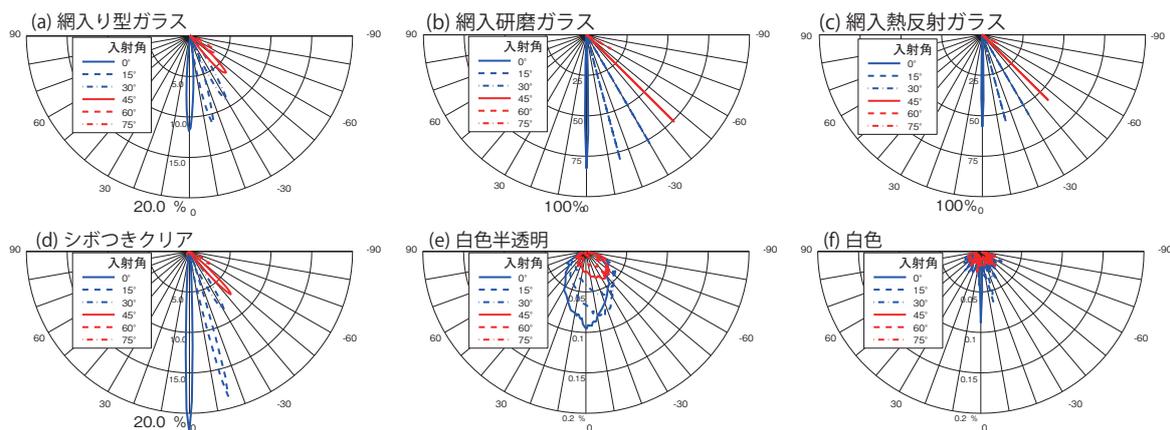


図5 天窓光学部材の光学特性の一例

変角分光透過率の測定データから視感透過率を計算し、入射角に対する拡散透過率を図示した。天窓に使われるガラス材料の代表例として(a)～(c)を、拡散板の例として中空層を持つポリカーボネート材の、(d)シボつきクリア、(e)白色半透明、(f)白色の測定結果を示す。

す。拡散板は、ストロー状の中空層を持つものがあるため、光学特性は面内異方性を示す可能性が考えられる。そこで、試料平面の軸方向は、入射角が変化する平面と水平(面内回転角 0°)と垂直(面内回転角 90°)の2方向とした。分光波長は $390 \sim 730\text{nm}$ の範囲で 10nm 間隔であった。測定には変角分光測色計GCMS-4((株)村上色彩技術研究所製)を用いた。

測定結果の一例を図5に示す。分光測定を行っているが、光学特性が分かりやすいよう図5では測定結果から視感透過率を算出し、図示した。天窓に用いられるガラス材料として、網入り型ガラス、網入り研磨ガラス、網入り熱反射ガラスの例を(a)～(c)に示す。網入り型ガラス(図4(a))では、ガラス表面の凹凸により他の二つ(図4(b),(c))に比べて光が拡散することが分かる。天窓に用いられる拡散板として、中空層を持つポリカーボネート材の、(d)シボつきクリア、(e)白色半透明、(f)白色の測定結果を示す。シボつきクリアではその拡散特性は網入り型ガラスと同程度であるが透過率が高いこと、白色試料では透過率が非常に小さいことが数値として確認できる。

2.3 光学シミュレーションの設定条件

測定した光学特性データに基づき、双方向透過率・反射率分布関数を作成し、天空の輝度分布については国際的に定められたCIE標準晴天空⁴⁾を仮定し、その天空下において天窓部材を透過した昼光の配光を、光学シミュレーションを用いて計算した。計算には、光学シミュレーション用ソフトウェアSPECTER((株)インテグラ社製)を用いた。このソフトウェアでは、双方向モンテカルロ光線追跡法に

よって、天窓部材を透過する昼光の光度と方向を計算した。シミュレーションの条件を図6に示す。 1m 四方の2層の平面を設定し、上層を型ガラス、下層を拡散板とし、それぞれの双方向透過率・反射率分布関数を設定した。試料面の軸方向は、真北を向く場合と真北から 90° 回転した場合の2条件について別々に計算した。直射日光の輝度は、大気外法線照度と大気消散係数、地球の楕円軌道補正などから算出した直射日光の法線照度に一致するよう値を設定した。天空輝度分布はCIE標準晴天空を等立体角になるよう670要素に分割した光源とし、太陽高度から推定する全天照度⁵⁾が実現されるように輝度の絶対値を求めて光学シミュレーションを行った。CIE標準曇天空、中間天空の場合でも同様の手法で計算が可能である。配光の水平角 ϕ は、平面中心の法線軸を中心に真西方向を 0° 、真南方向を 90° とした。配光は、 $\phi = 0 \sim 360^\circ$ の範囲を 5° 間隔、垂直角 $\theta = 0 \sim 90^\circ$ の範囲を 5° 間隔で計算した。

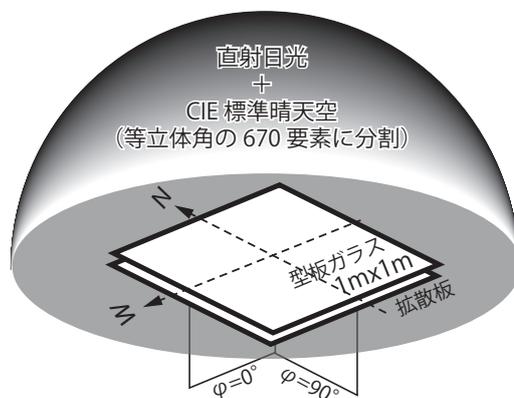


図6 光学シミュレーションの設定

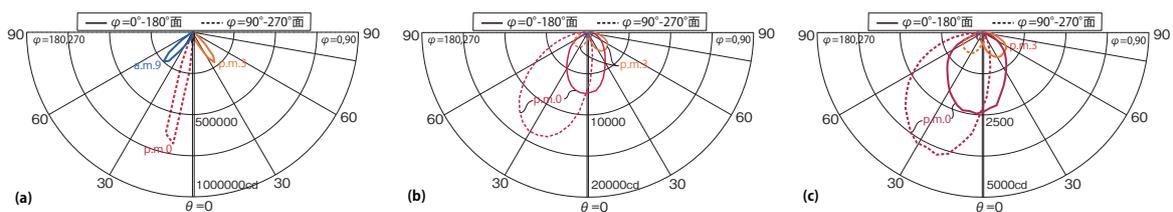


図7 北緯36°，東経140°の晴天の秋分日(午前9時，正午，午後3時)における天窓部材の配光型板ガラスと各拡散板((a) シボ付きクリア，(b) 白色半透明，(c) 白色)の組み合わせ。φ=0が西，φ=90が南，φ=180が東，φ=270が北である。

2. 4 シミュレーションの結果得られた配光データ

シミュレーションの結果得られた配光の一例として，北緯36°，東経140°の場所(房総半島先端付近)における秋分日(午前9時，正午，午後3時)の天窓部材各試料(試料面の軸方向は真北)の配光を図7に示す。「シボ付きクリア」の拡散板では拡散度が小さく，非常に鋭い配光を示すことが分かる(図7(a))。「白色半透明」，「白色」の拡散板を用いた場合(図7(b)，(c))では，よく似た拡散性能を示すが，白色試料では光度値が白色半透明の1/4程度に低下することが把握できた。本手法で得られる配光データを用いることで，その場所と時刻の条件下での天窓による室内昼光照明度分布の計算が可能となった。得られる配光データは，配光データの標準フォーマットであるIESデータ形式(IESNA: LM-63-1995)⁶⁾に変換することで，汎用の照明環境設計ソフトウェアで使用することが可能である。

3. 得られた配光データを用いた照明計算

得られた配光データを，IES配光データ形式(IESNA: LM-63-1995)に変換し，照明環境設計ソフトウェアDIALux(DIAL GmbH製)を用いて屋内昼光照明度を計算した。図8に，白色半透明拡散板を付けた天窓(1m×12m)を3列に施工した場合(建物:幅30m，奥行16m，天井高8m，作業面高0.85m)の作業面の昼光照明度分布を示す。シボ付きクリアの拡散板の場合(図8(a))は，室内照度は高いものの，その均斉度は低いことが分かる。透明白色板の場合(図8(b))は，シボ付きクリアの場合より照度は低下するが，工場などでの主な作業に必要な500ルクス以上の範囲は広く，かつ，均斉度も高いことが分かる。白色板の場合(図8(c))は，均斉度は高いが，得られる照度は低いことが分かる。このように，天窓の配光データさえ分かれば簡単に室内照度が計算できるため，要求される室内照度を満足するための拡散板の選定や，天窓の面積，設置場所，設置間隔が設計時に事前検討が可能となる。

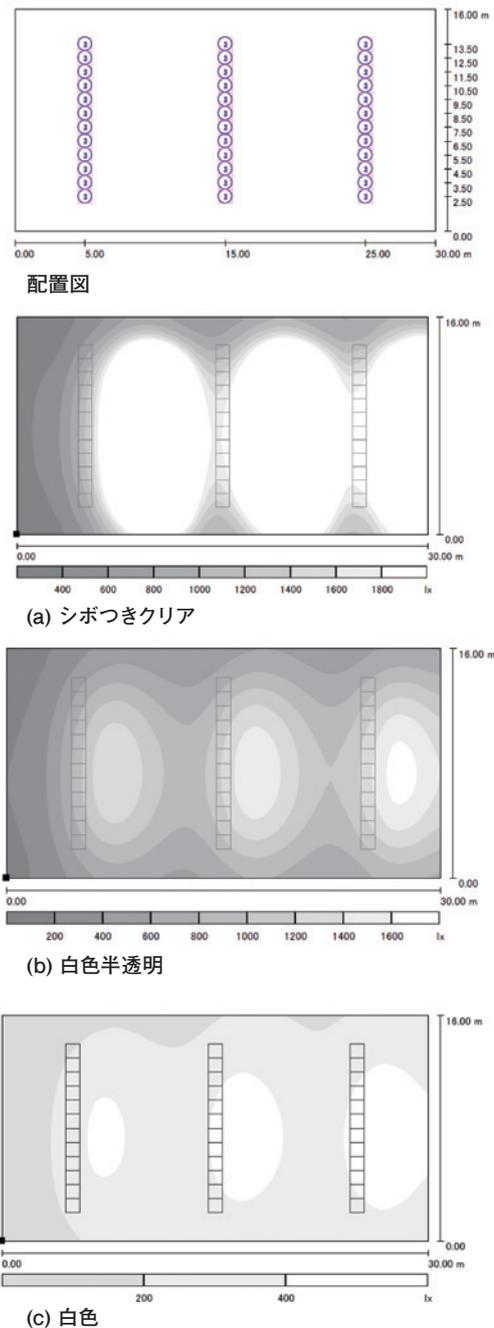


図8 各拡散板を用いた天窓での秋分日午後0時の配光から求めた作業面昼光照明度分布(床の反射率20%，壁の反射率70%，天井の反射率70%として計算)

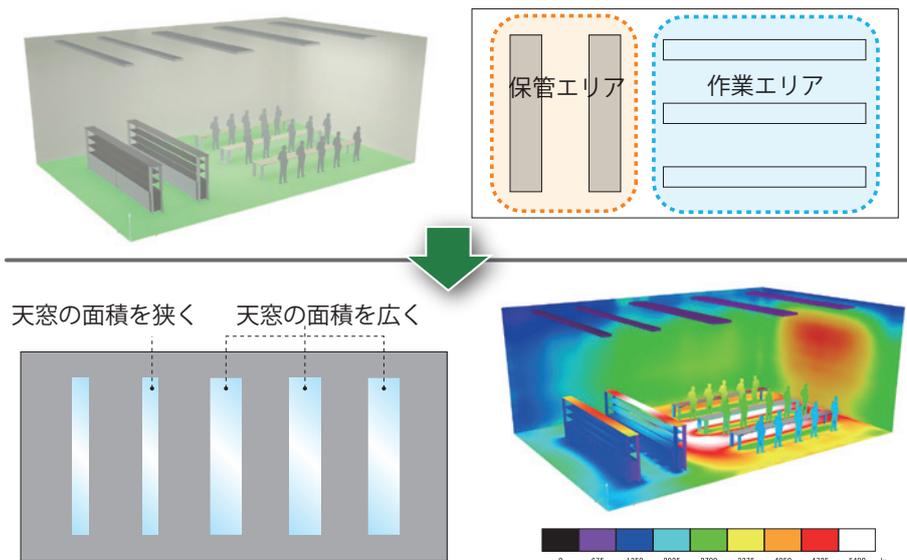


図9 室内の状況に応じた天窓の設計事例

同じ室内でも場所による空間の使い方の違いで要求される照度が異なる場合(上段), 本手法を用いれば天窓の構成を変えた場合の照度計算が容易にできるため(下段), 必要照度に応じた適切な天窓の設計を行うことが可能となる。

4. 照明計算の応用

今回の方法で得られた配光データを用いて天窓を設計するケースを考えてみる。例えば、図9上段のように室内に作業エリアと保管エリアが混在する場合には、同じ建屋内であっても、空間によって要求される室内の照度が異なる。配光データがあれば室内の照度分布が計算できるため、例えば、必要照度に応じて場所によって天窓の大きさを変えて室内照度分布を計算することが可能である(図9下)。このような検討により、設計者は要求される室内照度を満足する適切な天窓の設計が可能になるとともに、その効果を事前に数値で施主などに提示できるようになる。加えて、あまり高い照度の必要のない部分では天窓の面積を減らすといった施工コストを低減させる工夫も可能となる。今回の報告では、一部の拡散板、天窓構造についての事例を示したが、同様の手法で他の拡散板や異なった天窓構造に対する配光データも計算が可能である。

5. 実際の施工事例と照明電力削減効果^{3,7)}

矢板南産業団地(栃木県)に新設されたカインズ矢板流通センターは、関東・東北地方への商品を集積、配送を行う

物流センター(床面積16,040m²)である。光拡散型天窓からの昼光と調光機能を持つ人工照明を組み合わせ、必要照度や均斉度を維持しながら省電力化する照明設備を構築した。

5.1 光拡散型天窓による昼光照明

天窓は、上述の型板ガラスと光拡散板の2層構造を持つ光拡散型天窓を用いた。天窓の配光データを用いた照明シミュレーションと予備実験の結果に基づいて検討を行い、設計した天窓の配置(図10)では8~16時の時間帯で平均70%の時間、作業面(床上0.85m) 200Lux以上の照度が得られるよう、また作業を行う天窓下の均斉度(最小値/平均値)は0.6以上になるよう設計した。

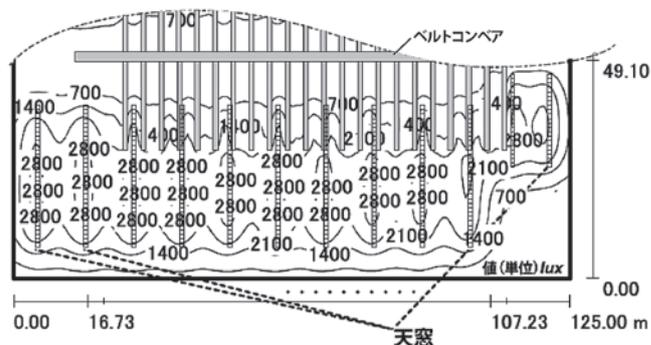


図10 天窓配置と得られる照度分布(夏至12時の例)



図11 照明設備全体の写真(天井のストライプ上の明かりが設置した光拡散型天窓)

5.2 調光機能を持つ人工照明

人工照明は Hf86W2 灯用反射笠付調光器具とパネル型コントローラー、あかりセンサーで構成し、常に 200Lux が得られるように自動的に出力を調整する。またタイマー制御機能によりスケジュール運転も行っている。この機能により昼光で必要照度が得られる時は出力を低減し、稼働時間帯の 8～16 時で約 65%，16～18 時で約 15%，トータルで約 50% の省電力を見込んだ。電力削減効果の確認のため、クランプ電力計を用いて消費した照明電力量を計測した。

5.3 電力消費量と電力削減効果

2011 年 4 月～8 月の間に、5 分ごとに計測した人工照明の消費電力量を図 12 に示す。4 か月にわたる全消費電力量は、約 17,682kwh であった。これは、営業日に 10 時間人工照明を点灯する場合（すなわち光拡散型天窓がない場合）に想定される消費電力量の約 39% に相当する。このことから、光拡散型天窓と調光機能付きの人工照明を併用したこの照明システムは、照明の消費電力量を 61% の削減したことが確認された。

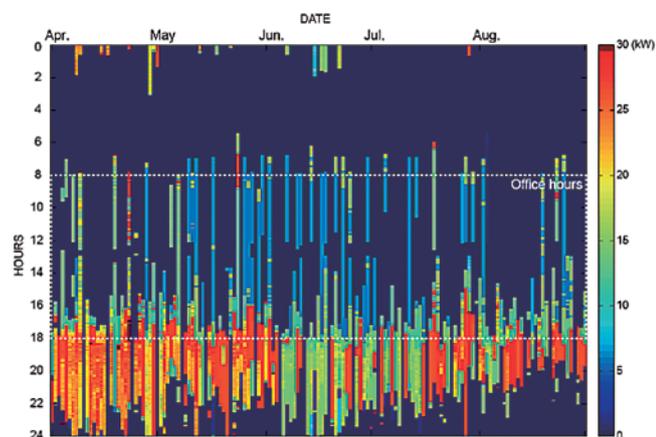


図 12 照明電力の計測結果(2011 年 4 月～8 月)

6. まとめ

本報告では、これまで照明性能の評価が難しかった昼光導入装置の評価方法として、光学シミュレーションを用いて配光データを計算する方法について提案した。また、具体的な事例として、光拡散型天窓における配光データの計算、それを用いた実際の応用、施工事例を紹介した。最後に、昼光照明と調光機能付き人工照明を併用した際の照明電力削減効果のデータを示した。近年普及が著しい LED 照明は、それ自体の消費電力が小さいことに加え、調光も従

来の蛍光灯や放電ランプよりも容易に行える。昼光導入装置(昼光照明器具)は、LED 照明などの新規人工照明と組み合わせることで、照明電力削減に対してさらに有効なツールとなりえるであろう。

謝 辞

今回紹介した内容は、(独) 科学技術振興機構の重点地域研究開発推進プログラム(地域ニーズ即応型) 委託研究として実施した研究成果である。本研究の遂行にあたりご助言いただいた九州大学大学院古賀靖子准教授、実際の施工事例と電力削減効果の実験にご協力いただいた(株)伊藤建築設計事務所本間篤様、東芝ライテック(株)西村修一様、佐々木智規様、(株)カインズ様、(株)アイシーカーゴ様に感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 環境省，“環境技術実証事業”，<http://www.env.go.jp/policy/etv/>，(参照：2014.11.11)
- 2) 鈴木，外山ほか：“光学特性に基づく天窓用透過材の配光計算，”平成 23 年度(第 44 回)照明学会全国大会講演論文集，pp.99-100，2010
- 3) SUZUKI T, TOYAMA T et al., "Design of light-diffusing skylights based on optical properties - estimation and measurement of lighting quality and energy savings," Proceedings of CIE 2012 Lighting Quality & Energy Efficiency, pp.578-585, 2012
- 4) ISO 15469 : 2004 (CIE S 011/E : 2003) : Spatial distribution of daylight - CIE standard general sky
- 5) IESNA : Lighting Handbook, 1993
- 6) ANSI Approved Standard File Format for Electronic Transfer of Photometric Data and Related Information, ANSI/IES LM-63-02 : 2002
- 7) 鈴木，外山ほか：“天窓昼光照明と調光照明を組合わせた照明の省電力化～カインズ矢板流通センターの照明設備～，”平成 24 年度(第 45 回)照明学会全国大会講演論文集，p.139，2011

プロフィール

鈴木 敬明(すずき・たかあき)

静岡県工業技術研究所 機械科

科長 博士(工学)

最近の研究テーマ：光学シミュレーションを用いた高齢者に見やすい配色の検討，LED 照明用樹脂光学部品の開発に関する研究

外山 勸(とやま・すすむ)

株式会社スカイプランニング

代表取締役

最近の研究テーマ：光拡散型天窓の開発，自立型エコ照明システムの開発