

天窓の室内照明シミュレーション

静岡県工業技術研究所 機械科
上席研究員 鈴木敬明

1. はじめに

近年、改正省エネ法の施行などによって、企業側にエネルギー管理が求められており、CO₂削減や代替エネルギーへの転換が早急の課題となっている。天窓は昼光を効率良く室内に導入できるため、昼間の人工照明の消費電力を削減でき、省エネ、CO₂削減に有効な昼光照明設備である。また、直射日光は非常に明るい平行光という性質を持っているため、そのまま室内に入射すると均斉度(照度の均一性)が低下し、作業用照明に適さないことから、様々な光拡散素材(拡散板)を使った天窓が提案されている。

しかし、天窓を昼光照明設備として設計、開発するうえで、以下のような問題を抱えていた。工場などの照明は、JIS Z9125:2007「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。天窓を照明設備として設置するには、この基準を満足させる必要があるが、拡散板を取り付けた天窓では拡散板の光学的性質により天窓下の昼光照度分布が変化するため、現状、天窓設置後の照度等を予測する方法がなかった。昼光率を用いた天窓を設置した時の室内照度を予測する方法も存在するが、昼光率は直射日光を除いた昼光の指標であるため、室内照明環境に大きな影響を与える直射日光の影響は考慮できていない。一方で、人工照明(電灯等)では、製品設置後の照度等の予測が可能である。これは、照明メーカーが、提供する各製品に対する配光データを提供しているからである。天窓においても、人工照明と同様に天窓の配光を数値化することで、天窓設置

後の照度等の予測が可能となる(図1)。

そこで、我々は、天窓を透過した昼光の配光データを構築する方法を検討した。拡散板の光学特性と、天窓の設置場所や季節、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)。今回、その検討内容と応用について紹介する。

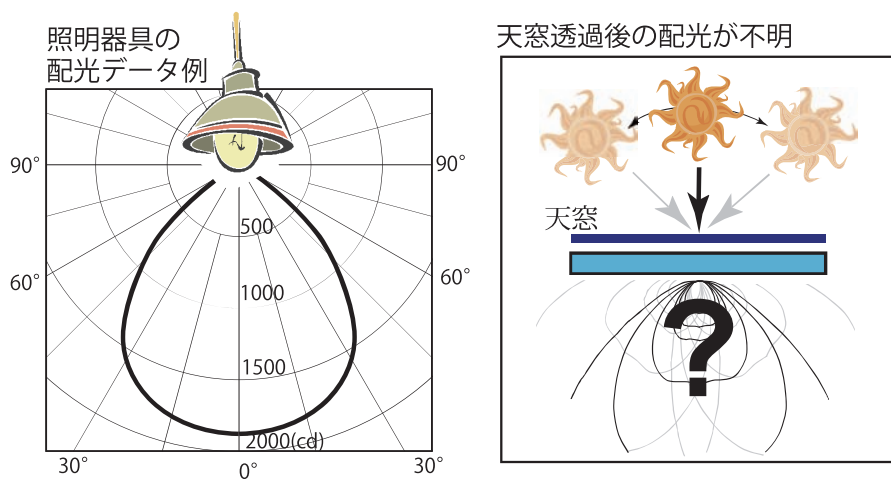


図1 技術的課題

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)。トップライト設置時の照度分布を計算するには太陽光入射時の配光を明らかにする必要がある(右図)。

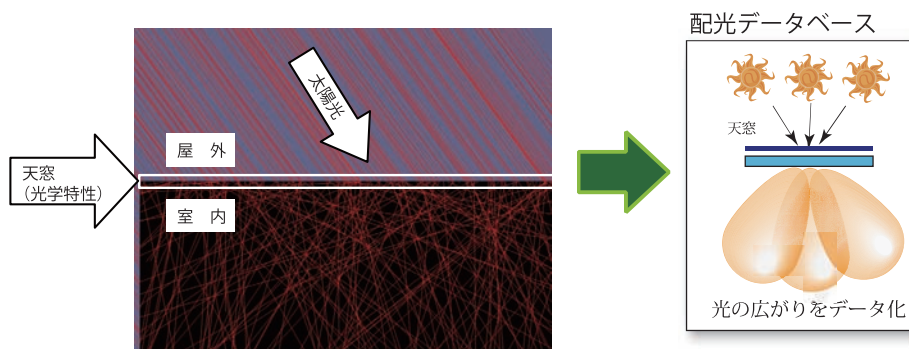


図2 紹介する光学シミュレーションの概要

天窓部材の光学特性(透過率、拡散度等)に基づき、太陽光が天窓を通過・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)、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. 天窓部材の光学特性

光学シミュレーションで使用する双方向透過率分布関数、双方向反射率分布関数を決定するために、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。測定角度条件を図3、表1に示す。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390～730nmの範囲で10nm間隔であった。測定には変角分光測色計GCMS-4(村上色彩技術研究所製)を用いた。

測定結果の一例を図4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4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た。

測定したデータは、次章で述べる光学シミュレーションにおいて、双方向透過率・反射率分布関数を定義する際に使用した。

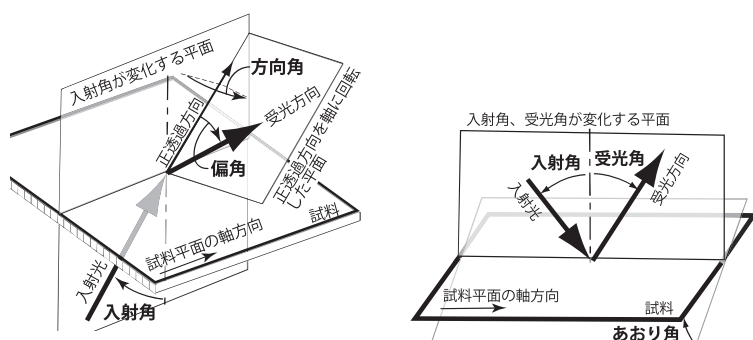


図3 変角分光透過率(左)、変角分光反射率の測定角度条件

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)

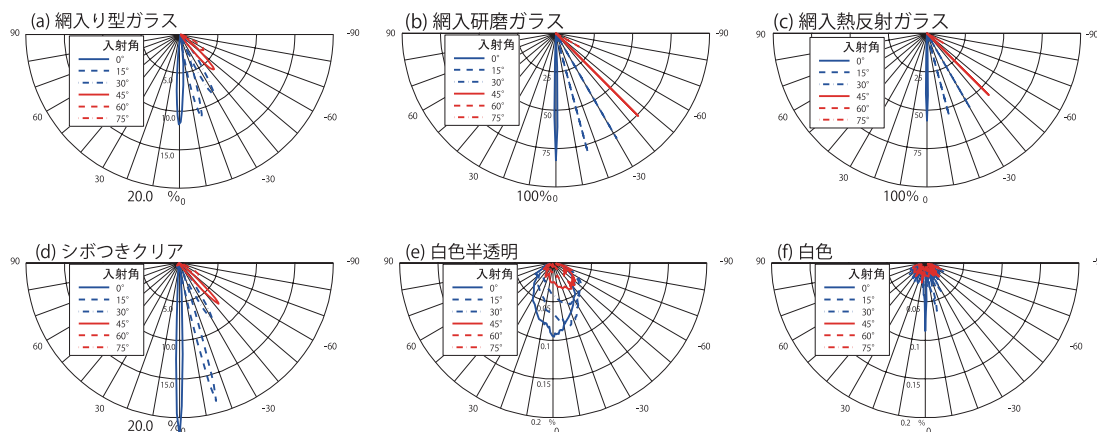


図4 天窓光学部材の光学特性の一例

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。

3. 光学シミュレーションによる天窓の配光データの計算

3.1 シミュレーションする天窓の構造

今回の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た。そのため、天窓の構造は、3次元の幾何学的形状をコンピュータ上に入力できれば、どのような形状の天窓であっても天窓から出る光の光度と方向(すなわち配光)が計算可能である。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層の組み合わせの検討結果について述べる(図5)。

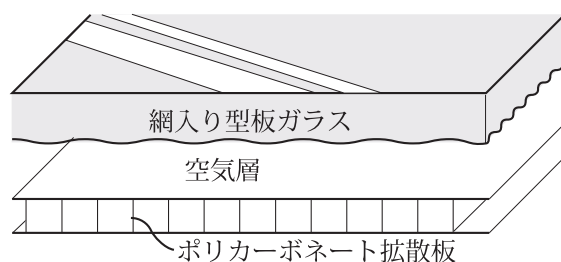


図5 検討した天窓部材の構造

3.2 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標準晴天空を仮定し、その天空下における天窓部材を透過した昼光の配光について光学シミュレーション計算を行った。計算には、3次元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する。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、上層に型ガラス、下層に拡散板の双方向透過率・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。天空輝度分布にはCIE標準晴天空を用いた。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。

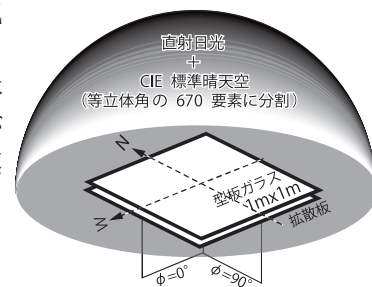


図6 光学シミュレーションの設定

3.3 計算の結果得られた配光データ

計算し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。「試料1：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))。「試料2：白色半透明、試料3：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)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。

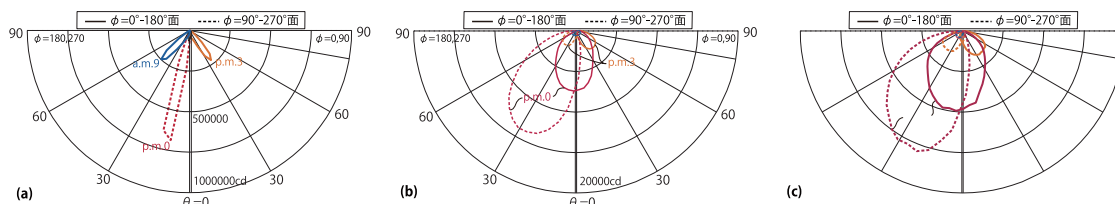
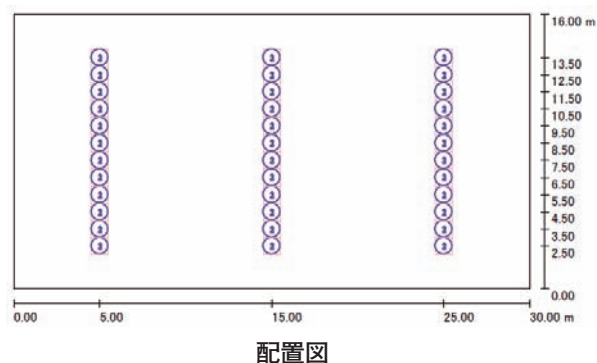


図7 北緯36°、東経 140°の晴天の秋分日(午前9時、正午、午後3時)における天窓部材の配光
型板ガラスと各拡散板((a)シボ付きクリア、(b)白色半透明、(c)白色)の組み合わせ。φ=0°が西、φ=90°が南、φ=180°が東、φ=270°が北である。

4. 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)の作業面の昼光照度分布を示す。シボ付きクリアの拡散板の場合(図7 (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7 (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7(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。



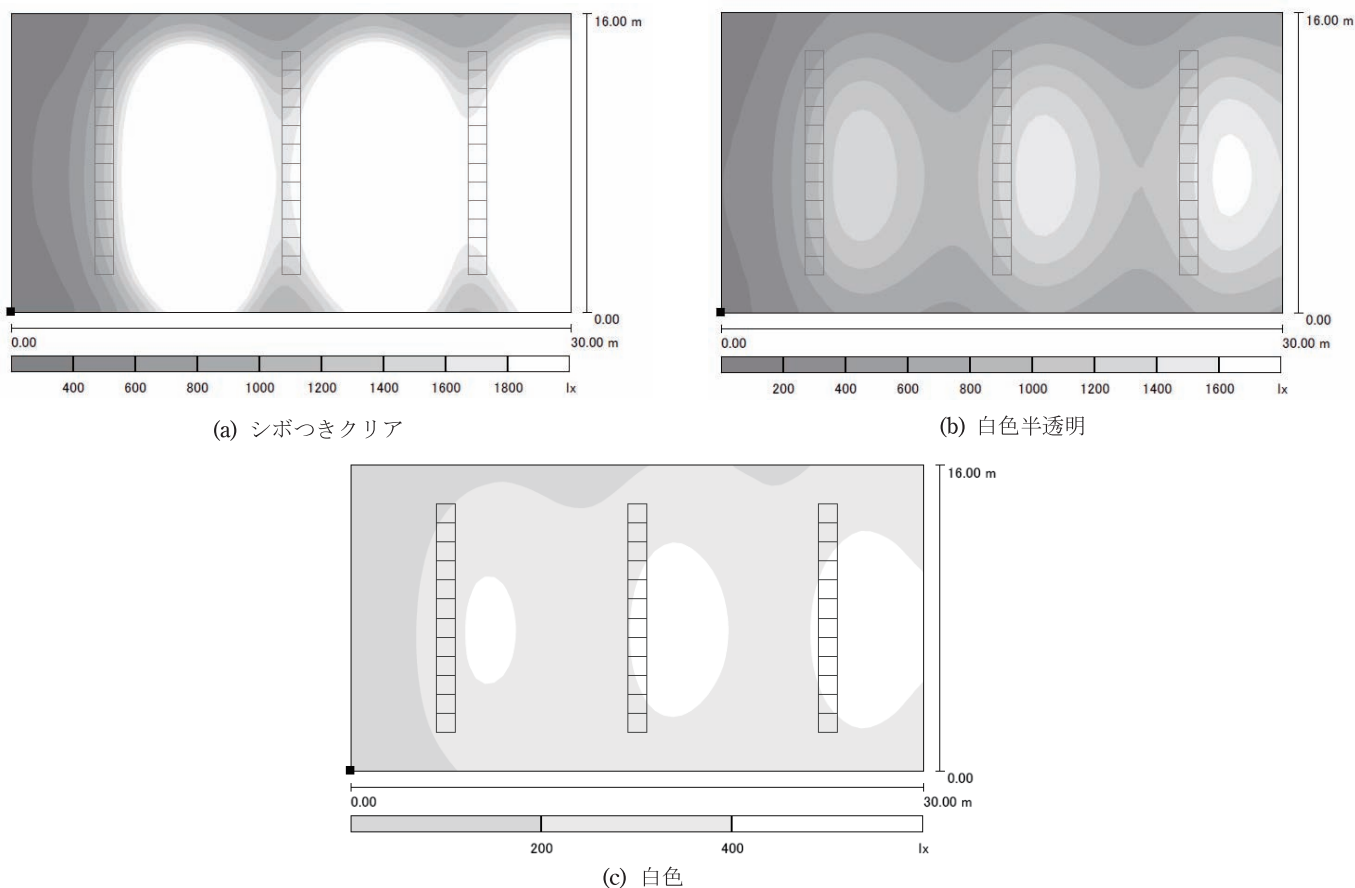


図8 各拡散板を用いた天窗での秋分日午後0時の配光から求めた作業面昼光照度分布
(床の反射率20%、壁の反射率70%、天井の反射率70%として計算)

5. 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、天窗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窗の大きさを覚えて室内用度分布を計算することが可能である(図8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窗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等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窗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、天窗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窗構造に対する配光データも計算が可能である。

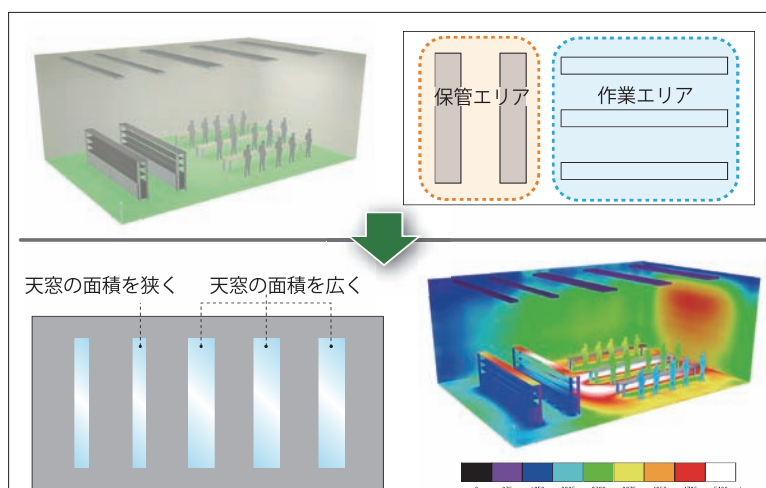


図9 室内の状況に応じた天窗の設計事例

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窗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窗の設計を行うことが可能となる。

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、(株)スカイプランニングと共同研究を実施した研究成果である。本研究の遂行にあたりご助言頂いた九州大学大学院古賀靖子准教授に感謝いたします。

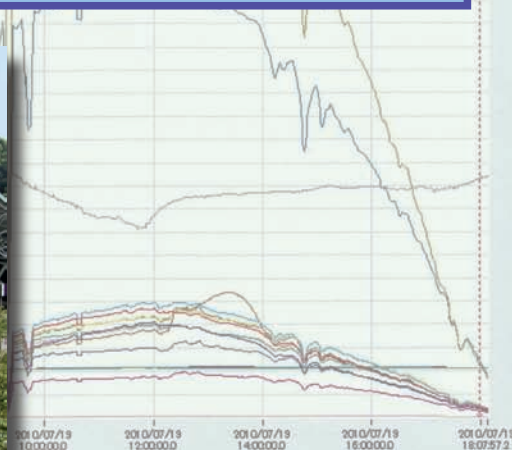
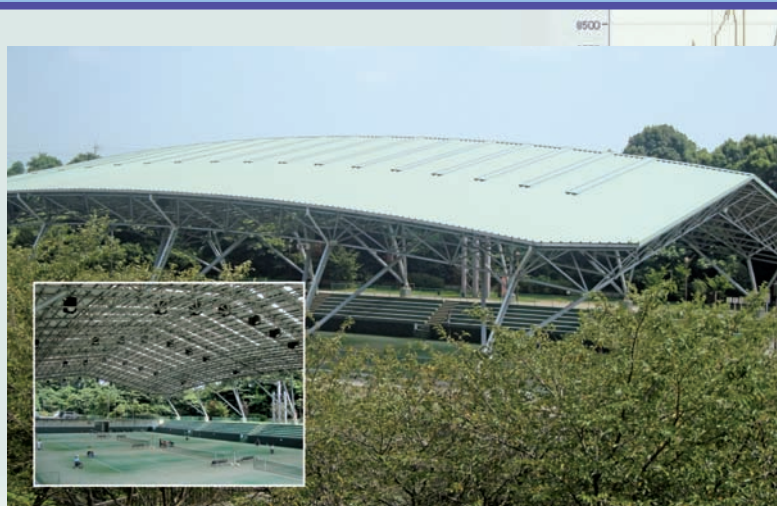
太陽の光を照明に利用する金属屋根用天窓

『スカイトップライト Lーデザイン』

断熱、直射日光拡散、紫外線防止機能付、改修工事も可能

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

省エネ法や改正省エネ法では照明設備について、その設備の使用電力を低減させる電灯やLED照明を奨励している。一方、太陽の光を利用する（以下昼光利用という）ことも推奨している。ただし、昼光利用においては「①作業の障害となる眩しい光がないこと ②明るさの不均一がないこと ③明るさに大きな変化がないこと ④熱の侵入がないこと」など問題点が指摘されている。その問題点について前法ではブラインドやカーテン等で制御する必要性を言及している。壁面開口からの昼光利用は大空間では開口部近傍でしか望めない。一方、屋根面は大空間を覆っており天窓による昼光利用はバランスの良い明るさを構成することが可能である。また、建築基準法には屋根面からの昼光利用が有効であるとの記載もある。ただし、天窓を利用するにあたっては前述の問題を取り除くことが肝要である。

そこで、本稿では、その問題点を取り除きバランスの良い明るさを導入する弊社製品の特徴を紹介すると共に、前出の「天窓照明シミュレーション」を活用した新製品である「スカイトップライト Lーデザイン」についても紹介する。

2. 「天窓」によるCO₂削減の可能性

経済産業省、環境省などから省エネ改正法や永続的な低炭素社会構築に向けた情報が多く発信されている。自治体も東京都に続いて、埼玉県が来春から県内事業主に対して具体的な省エネ削減目標を義務付けるなど、今や世界的な規模でその義務を果たさなければならないことが身近に感じられる。

現状の金属屋根は、広大な面積を覆い自然光を遮蔽し、主に化石燃料から生み出される電気を使用し続けている。それだけに天窓で省エネ対策に参加できる大きなチャンスが存在しているともいえる。

表1に金属屋根の下で昼間に消費している照明電力によって発生するCO₂（概算）を示す。我々のこれまでの実験で、従来からの弊社の製品である「スカイトップライト」において標準的な設置で昼間の照明を70%以上消灯可能であることを確認した。屋根全面に設置できない場合も多くある

折板屋根と照明消費電力・CO₂発生量

断熱・拡散機能付き「スカイトップライト」で昼間の70%の時間、照明を消すことができる

(東京電力：19年9月排出係数)

内容		消費電力	電力費	CO ₂
条件	500lux・24W/㎡	週6日・9時～17時稼働2,500時間/年	15円/kWh	0.339kg-CO ₂ /kWh
単位当たり	1㎡	60kWh/㎡・年	900円/㎡・年	20.3kg-CO ₂ /㎡・年

折板屋根直下の発生量(上記条件)

CO₂発生量

s51～h18年度累計(推計)

既設屋根	9億㎡	540億kWh/年	8,100億円/年	1,827万t-CO ₂ /年
新設屋根	0.37億㎡	22億2,000kWh/年	333億円/年	75万t-CO ₂ /年

雇用促進

(働き：1mの場合)

(屋根面積の約5%設置)

既設屋根	5人1組 30㎡	約1,000万人工
新設屋根	3人1組 30㎡	約25万人工/年

電気消費、CO₂発生量(計算値) 表-1

現在検討している物流センター（建築規模：幅100m、横125m、高さ9m）においては、250luxの照度が平均的に得られるよう、今回開発した「天窓照明シミュレーション」（前項参照）を利用し、新製品である「スカイトップライト L-デザイン」を用いた設計を行っているところである。弊社試算では天井面積の約5.2%の採光面積で、照明電気代で年間340万円、CO₂で72tの削減が実現できると推定している。

3. 明るさを損なわず「暑くない」天窓は施主の限らない要望から生まれました

天窓に関する要望は、以下のように様々である。

- ① 高齢者が多くなるので工場を明るくしたい。
- ② 明るさを損なわずに暑くない天窓を。
- ③ 既設の屋根に取り付けたい。

これらの要望に対応すべく、多くの採光板の選定や部材の改良・改善を実施してきた。関連するメーカからは、技術情報の提供を受け製品開発にご協力頂いた。また前出の「天窓照明シミュレーション」開発の主体メンバーとして参画したことは我々の技術力の大きな向上につながった。

4. 「暑くない」「結露・漏水しない」「均斉度が高い」商品+丁寧な「施工」が徹底

試験センターにおける一例。

(網入型硝子だけの場合と網入型硝子+拡散板(SPシート)の場合を比較)

従来の天窓採光は春分から夏至・秋分までの太陽高度が高い時には多くの直射光が入射する。そのため、拡散板のない天窓では直射光による陽だまりが発生し、かつ、時間とともにその位置が移動する。そのことは作業環境としては不适当と考えられる。また、赤外線の建物内部への入射による暑さも問題である。この問題点を改善するため、採光板に「網入型硝子+拡散板(SPシート)」を使用することで問題点を解消した。建物の用途や形状によってより機能性を高める必要がある場合を考慮し、各種実証試験・測定を行っているところである。

参考例として写真2～3や表2～3を示す。

写真4・5に拡散板(SPシート)を取付けたことによる改善事例を示す。

弊社では天窓をクレームのない省エネ商品として信頼してもらうため、引き合いを頂いたユーザーには、網入型硝子だけの物件については拡散板(SPシート)を追加して積算する旨お伝えし、かつ、過去の問題点等を解消している製品であることをお話しするように努めている。

このことは最終のユーザーである施主や実際に使用される方々へ明るく快適な空間を提供することにつながるものと自負しているところである。

写真で観る(輝度計他)



写真-2 網入型硝子

写真-3 網入型硝子+拡散板

測定値で観る グローバル照度(太陽直射光+天空光)と天窓から取り込んだ各作業面照度

上表-2 網入型硝子

下表-3 網入型硝子+拡散板(SPシート)

網入型ガラス(6.8mm)だけのトップライト

日 付	測定箇所 時 間	屋外照度 (グローバル照度)	屋内照度1	屋内照度2	屋内照度3	屋内照度4	屋内照度5	屋内照度6	屋内照度7	屋内照度8
2010年	9:00:00	45,450	319	352	386	360	377	392	344	252
1月16日	10:00:00	63,850	528	543	522	541	502	494	423	347
快 晴	11:00:00	73,910	2,758	4,309	852	910	4,444	709	505	320
	12:00:00	76,290	5,765	4,618	1,332	2,449	3,755	709	515	350
	13:00:00	71,270	5,494	2,446	1,429	2,678	2,107	659	497	320
	14:00:00	59,610	1,255	1,000	616	675	879	491	405	334
	15:00:00	38,740	416	417	377	389	347	323	292	268
	16:00:00	13,820	150	175	180	189	182	211	171	114

スカイトップライト 網入型ガラス(6.8mm)+拡散板(SPシート)

日 付	測定箇所 時 間	屋外照度 (グローバル照度)	屋内照度1	屋内照度2	屋内照度3	屋内照度4	屋内照度5	屋内照度6	屋内照度7	屋内照度8
2009年	6:00:00	7,475	106	105	111	110	128	115	97	95
7月20日	7:00:00	60,550	680	666	675	694	778	715	666	678
晴 天	9:00:00	113,800	1,863	1,707	1,677	1,778	2,066	1,788	1,749	1,816
	10:00:00	139,600	2,801	2,443	2,429	2,692	3,111	2,580	2,623	2,737
	11:00:00	130,500	3,012	2,525	2,577	2,899	3,315	2,682	2,873	2,900
曇天 ～大雨	12:00:00	23,270	422	409	407	439	472	434	430	420
	13:00:00	50,550	938	888	900	950	1,071	945	930	935
	14:00:00	63,030	1,219	1,122	1,134	1,230	1,377	1,200	1,208	1,192
	15:00:00	22,710	410	386	395	426	459	421	416	407
	16:00:00	15,700	281	269	247	268	293	268	264	257
	17:00:00	11,350	211	199	185	207	217	204	194	190
	18:00:00	7,709	141	129	123	134	128	115	125	108



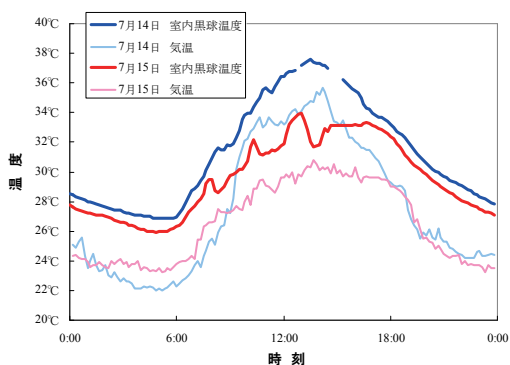
写真-4



写真-5 改善後

次のグラフは、網入り型硝子+拡散板(SPシート)の天窓が採光によって室内の温度を上昇させていないことを示している。

【室内温度の測定結果】



- 室内の黒球温度は、昼夜に関わらず気温より2~4℃高い値を示す。
- これは、工場の室温や、壁、天井、床からの輻射熱の影響と考えられる。
- 日中の黒球温度に顕著な上昇が全く見られないことから、室内の温度上昇にトップライトから入射する光の影響は少ないと考えられる。

(注) 2ヶ所の黒球温度の差は、最大0.8度、2日間平均は0.1度であった。そのためグラフは2ヶ所の平均値を示す。黒球温度は輻射熱の計測指標であり、労働環境や熱中症危険度など評価する際に使われる。測定は、空調、換気、トップライト以外の採光を行わない条件で実施した。気温はアメダス(天竜)。

5. 新製品「スカイトップライト L-デザイン」について

前出の「天窓照明シミュレーション」技術の開発によって、建物用途や使用目的に応じた天窓の採光設計や昼光照明デザインの提供が可能となった。そこで、弊社では、個別の建屋の場所や方角に対応したシミュレーションを実施し、天窓施工時の室内照度分布を事前に計算するとともに、要求照度を実現する最適な天窓設計を行った製品を「スカイトップライト L-デザイン」として販売する運びとなった。

「スカイトップライト L-デザイン」の販売にあたっては、事前に照明シミュレーションでその効果を検討することが可能である。その際には、以下の3つのステップで採光設計を実施する。

- ステップ1 採光計画に当たってご計画の建物概要、目的とする室内照度の設定
- ステップ2 その上で天窓の配置計画の立案
- ステップ3 天窓照明シミュレーションによる検証→必要に応じて配置計画の変更

6. 最後に

以上、述べたように、天窓の問題点を解決と、その照明性能をシミュレーションで予測する技術の開発により、天窓は昼光照明設備としての新たなステージに入ったと考えている。是非、省エネ、CO₂削減の一つの有効なツールとして注目していただきたい。

ある自動車メーカーの社長のインタビュー記事に「電気と水、空気はカネがかかるが、太陽と重力はタダ」という言葉がある。その自動車メーカーにおいては、工場、倉庫、販売店に至るまで太陽光を取り入れた天窓が設置され、作業場や整備スペースが明るく、しかも暑く感じない。また、最近、某コーヒESHOPの郊外店にも弊社天窓が採用され、工場や倉庫だけでなく、一般のお客さんがくつろぐ店舗においてもトップライトの市場が広がってきている。今回、販売を開始する「スカイトップライト L-デザイン」も含め、今後の天窓の普及に期待している。

問合せ先 本社 住所 〒431-141 静岡県浜松市北区三ヶ日町三ヶ日344
電話 053-524-1880 FAX 053-524-0496

E-mail: wbs50049@mail.wbs.ne.jp
<http://www.sky-planning.co.jp/>