【報告】

光学特性に基づく天窓の室内照明シミュレーション

機械科　鈴木敬明　加藤俊文
株式会社スカイプランニング　小野巳吉　外山　勸

Lighting Simulation of skylights based on their optical properties

Taka-aki Suzuki, Toshifumi Kato, Miyoshi Ono and Susumu Toyama

We studied the simulation of the luminous intensity distribution of a skylight under the CIE standard clear sky. To calculate the luminous intensity distribution, we established the bidirectional transmittance distribution function (BTDF) and the bidirectional reflectance distribution function (BRDF) of optical elements of the skylight based on their measured gonio spectral transmittance and gonio spectral reflectance, and did bidirectional ray-trace simulation using BTDF and BRDF. The obtained luminous intensity distribution data make estimation of illumination distribution under the skylights easy as in the case of artificial lighting.

１．はじめに

近年、改正省エネ法の施行などによって、企業にエネルギー管理が求められており、CO_2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、CO_2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。天窓を設置した時の室内照度を昼光率を用いて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、照明メーカが、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。

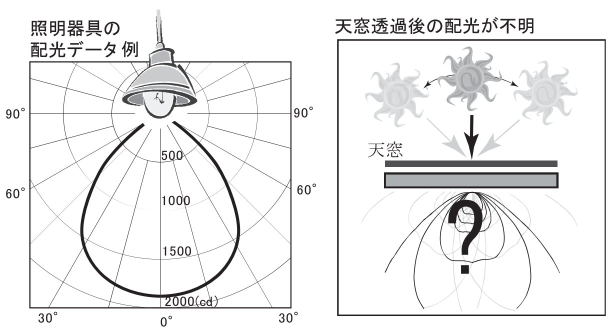

図１　技術的課題

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）。天窓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）。

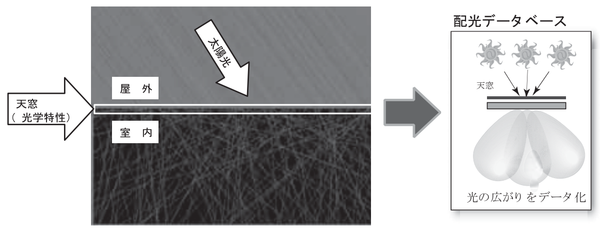

図２　紹介する光学シミュレーションの概要

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。

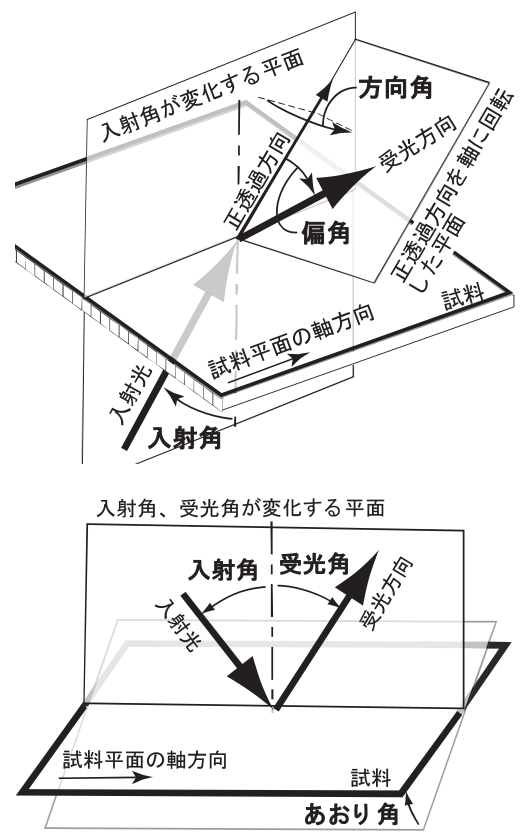

図３　変角分光透過率（上）、変角分光反射率（下）の測定角度条件

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）

【報告】

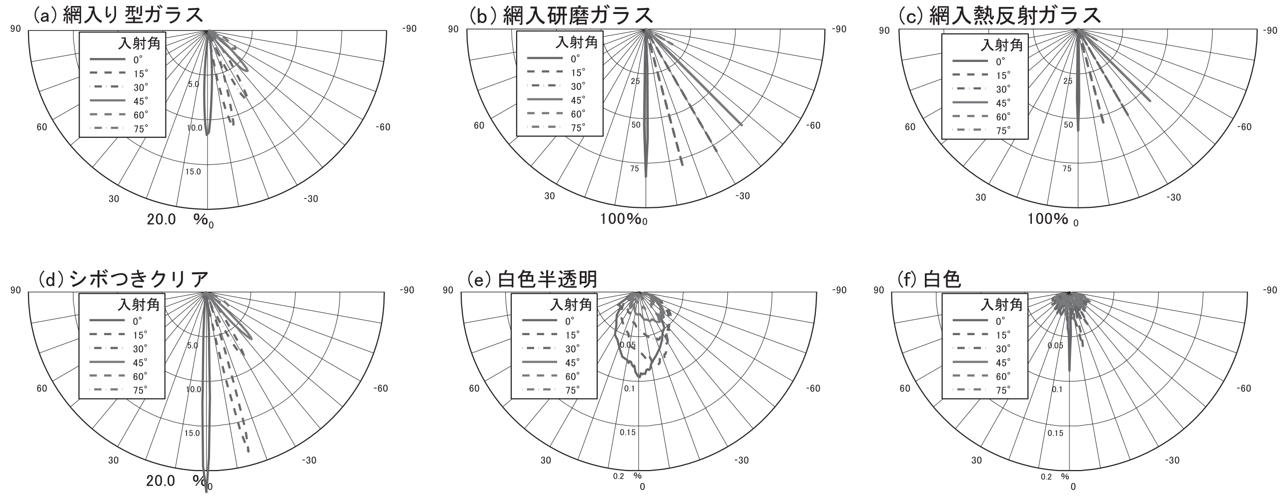

図４　天窓光学部材の光学特性の一例

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）。

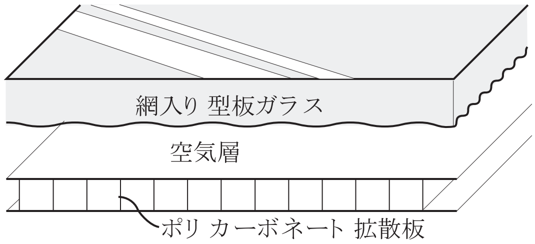

図５　検討した天窓部材の構造

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エアSPECTER（(株）インテグラ社製）を用いた。このソフトウエアでは、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空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、$\phi=0$〜360°の範囲を５°間隔、垂直角$\theta=0$〜90°の範囲を５°間隔で計算した。

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エアで使用することが可能である。

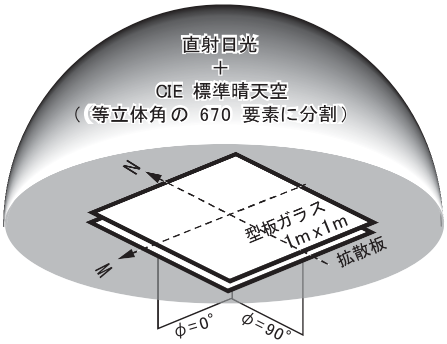

図６　光学シミュレーションの設定

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エア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。シボつ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、シボつ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。

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。

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。

※本報告は、「金属屋根　施工と管理」2010年10月号に掲載された内容を再編集したものである。

【報告】

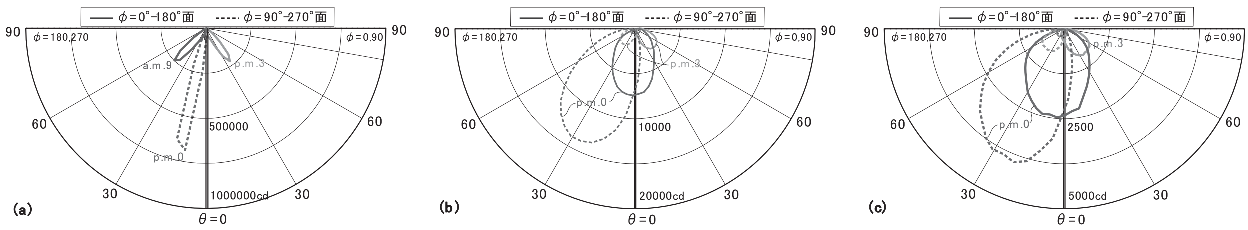

図７　北緯36°、東経 140°の晴天の秋分日（午前９時、正午、午後３時）における天窓部材の配光

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。$\phi=0$ が西、$\phi=90$が南、$\phi=180$が東、$\phi=270$が北である。

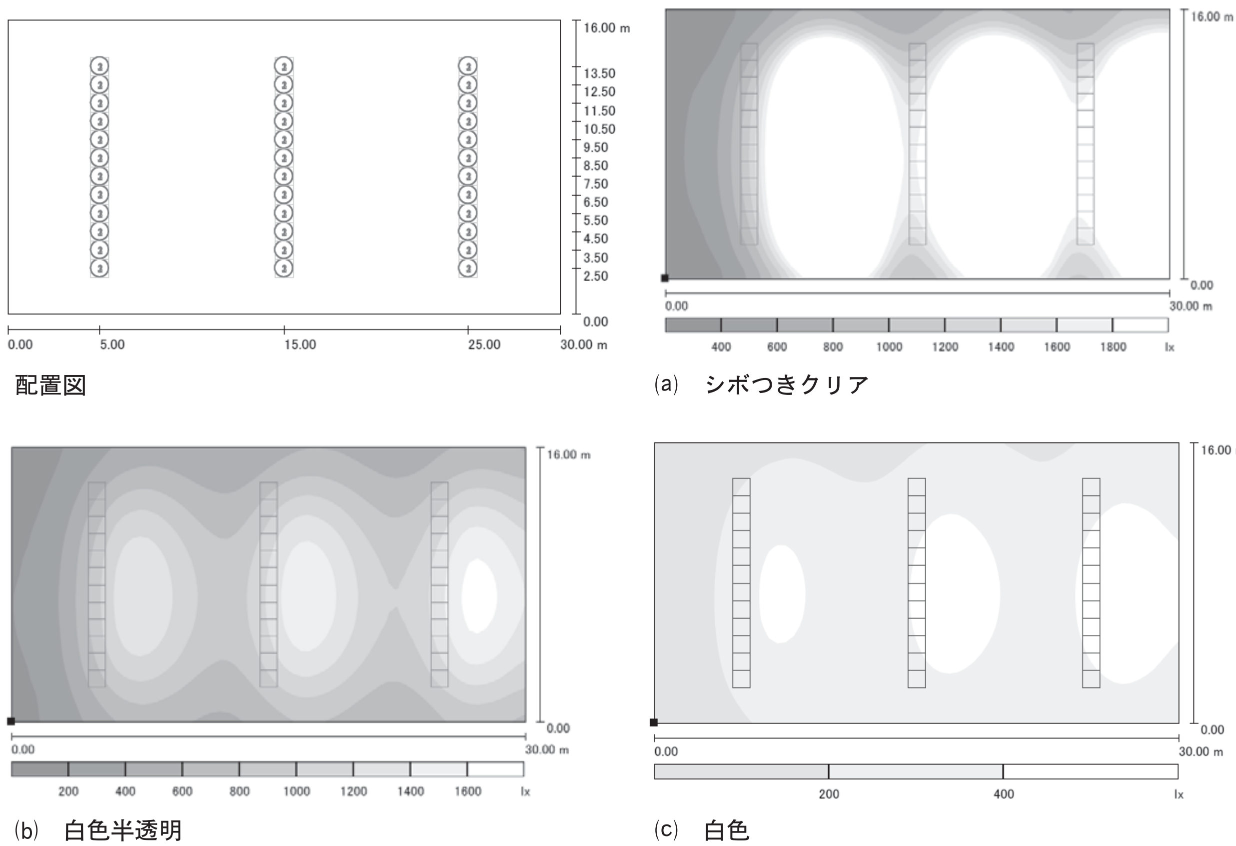

図８　各拡散板を用いた天窓での秋分日午後０時の配光から求めた作業面昼光照度分布

（床の反射率20%、壁の反射率70%、天井の反射率70%として計算）

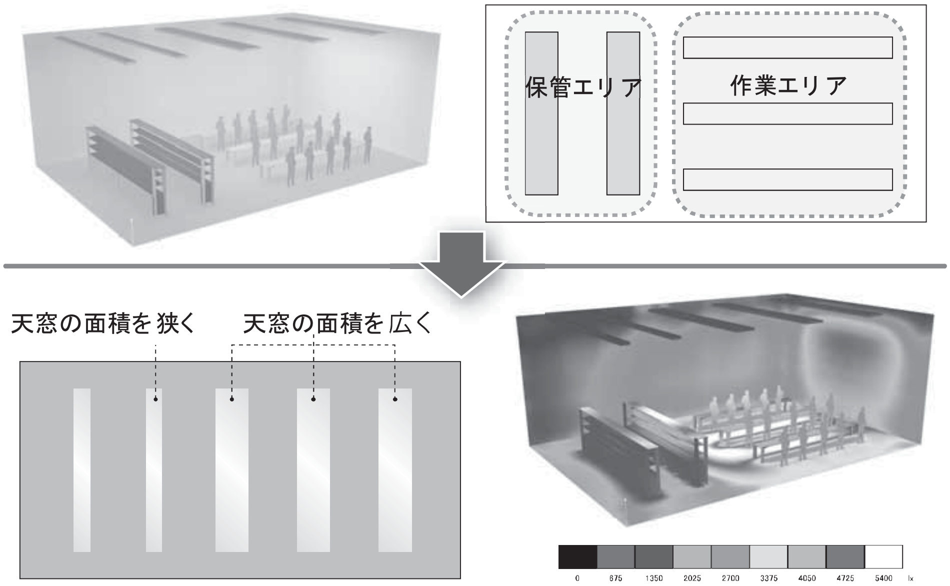

図９　室内の状況に応じた天窓の設計事例

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。