

令和 2 年 6 月 10 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K18916

研究課題名（和文）非結像光学の手法を用いた建築自然採光レンズの開発

研究課題名（英文）Development of architectural natural daylight lens using non-imaging optical method

研究代表者

小林 光（Kobayashi, Hikaru）

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：90709734

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、窓面に設置する固定式の太陽光採光装置を開発した。固定式で太陽高度の変化に対応するため、非結像光学の手法を採用して透明ルーバーの断面検討を行い、屈折と全反射によって屋内への採光を可能とした。透明体で屈折を利用する事で、曲面鏡によるルーバーに比べてコンパクトで保守の容易な装置を実現した。アクリルを用いた試験体による実験及び光解析によって採光効果を確認した。採光装置は太陽光を天井に配光し、天井の反射光で机上面に採光する。太陽高度が高く採光が難しい夏季の正午においても、室奥8mで数百ルクスの照度が期待される。また、透明材料で構成することで見た目の閉塞感や曇天時などの暗さを解消した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地球温暖化問題を背景とした建築物における省エネルギーの推進は急務であり、建築物に適用可能な自然エネルギー利用技術が求められている。太陽光は全ての建物で得られる自然エネルギーであり、昼光照明は昼間の照明用電力を軽減するとともに、快適性や知的生産性の向上に寄与することが期待できる。また、自然採光によって災害時などに最低限の照度を建築空間に確保するなどの目的にも利用できる。

研究成果の概要（英文）：In this research, we developed a transparent stationary daylighting louver installed on the window. In order to respond to a solar trajectory with a stationary louver, the cross-section was designed using a non-imaging optic method, and it is possible to illuminate indoors by refraction and total reflection. By using a transparent body as the daylighting louver, we have realized a device that is more compact and easier to maintain than the louver with a curved metal mirror. The daylighting performance of the louver was confirmed by experiments using test pieces using clear acrylic resin and optical simulation. The daylighting device distributes sunlight to the ceiling and reflects the light from the ceiling to illuminate the desk surface. Even at noon in the summer when the solar altitude is high, and it is difficult to take daylight, an illuminance of several hundred lux is expected at a depth of 8m.

研究分野：建築環境工学

キーワード：採光装置 非結像工学 透明ルーバー

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

建築空間への自然採光は、エネルギー消費抑制の面から検討される他、オフィスなど執務空間における知的生産性の観点からも注目され、単に照明電力削減だけではない要請に応える必要がある。エネルギー抑制の観点では、太陽の運行になるべく左右されずに一定以上の採光量を実現する事が重要であり、知的生産性の観点からは、室内照度の偏りが小さく、グレアを生じない配光が重要となる(図1)。従来、こうした要求に応える高度な固定型採光装置として、非結像光学の手法によって設計される曲面ミラーを用いた「アニドリック採光装置」と称される装置が提案され、申請者も同様の手法を用いた採光装置の研究開発を行ってきた。しかしながら、建築空間の平面的奥行の増大に伴って、より正確で狭角の配光が望まれている。ミラーを用いた非結像採光装置で、より狭角の配光コントロールを行う場合、放光側(図2)のミラーが肥大化し、対応が難しくなってくる。また、その様な採光装置は窓面を大きく塞ぎ、曇天時には採光の妨げになる他、視覚的にも閉塞感を生じ、新たな手法が望まれる。

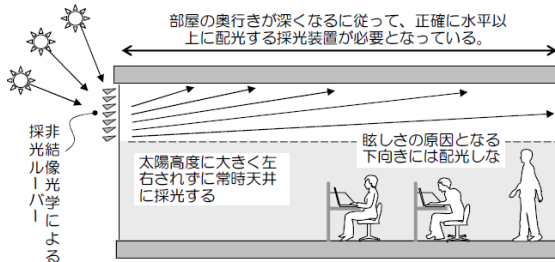


図1 非結像採光ルーバーの機能

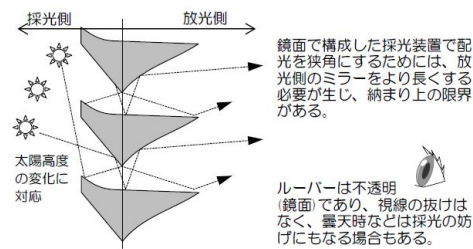


図2 反射式採光ルーバーの課題

2. 研究の目的

本研究は「非結像光学の手法を用いた建築自然採光レンズの開発」と題し、ゼロエネルギー建築の要素技術のひとつでもある、自然採光(直射光利用)に関するものである。非球面レンズ等の光学系の開発に用いる手法を建築採光に導入し、光の屈折を利用した透明体による採光装置であって、太陽高度の変化に大きく左右されずに安定した自然採光を実現する、これまでに例のない2次元形状(ルーバ状)或は3次元形状(球体状等)の自然採光レンズの実現を目的とした。具体的には建築側窓やトップライト面に設置する固定式の採光装置で、建築内へ効率良く直射日光を採り入れ、且つ眩しさ(グレア)の無い正確な空間内への配光と、窓等に設置した際に視覚的閉塞感のないことを同時に満足する屈折系採光装置の実現を目指した。

3. 研究の方法

(1)採光装置の条件設定

南面に窓を持つ図1のような執務空間への適用を想定した。開発を目指す採光装置の適用地域を北緯35度(関東圏を想定)とした。採光可能とする太陽光のプロファイル角(窓法線面に対する太陽高度)を20~80°とした。配光の条件は、昼光を室内天井面に広く配光することとした。また、執務室内でまぶしさ(グレア)を生じないように、水平よりも下方向への配光を極力抑えることを条件とした。

(2)検討方法

現実的に利用可能な透明材料としてアクリル(屈折率約1.5)を選定し、レンズ界面での屈折と全反射による建築空間への採光及び配光を検討した。プロファイル角20~80°で入射する直射日光を採光レンズ内で天井に向けて方向を転換し、水平面よりも上向きで且つ室奥への配光を可能とする入射面、全反射面、放光面の検討を実施した。机上検討では3次元モデラーにてパラメトリックに光線の挙動を検討し、光学シミュレーションソフトによる光線追跡、採光シミュレーションによる評価を行った。また、レーザーカッターによる2D試験体の製作、採光及び目視確認を目的とした実験による評価を行った。

4. 研究成果

(1)2つの採光レンズに関するアプローチ

本研究では、結果的に採光レンズについて、以下の2つのアプローチの提案を行った(採光レンズ:採光レンズ内の全反射曲面による光線の制御を主体とした採光レンズ、採光レンズ:レンズの入射面、放光面の屈折を主体とする光線の制御を行う採光レンズ)。

反射を主体とする採光レンズは、放物曲面の全反射面で光線を制御する。アニドリック採光装置を始めとする反射面を利用する採光装置に近いアプローチを透明材料で実現しているが、アニドリック採光装置が用いるCPC(Compounded Parabolic Concentrator)の原理とは異なっている。屈折を主体とする採光レンズは、SMS(Simultaneous Multiple Surfaces)と称される非球面レンズの設計法を用いてシンプルに実現したKöhler Integrator(以降KI、ケーラー照明に用いられた光の均質化を実現する技術)の手法を用いて、採光と配光を行う。

(2)採光レンズ

図3に採光レンズをルーバー状に用いた際の断面形状を示す。直線の入射面、放光面と、Fを焦点とする放物面による全反射の導光面からなる。入射光の内、焦点Fを通過する光線は導光面で反射することで、レンズ内では常に放物面の軸方向へ反射される。これを放光面で屈折することで射出角を調整可能に構成する。このときの射出角について本研究ではグレアに配慮して $+5^\circ$ とした。入射面上の焦点FからF'方向にずれた位置を通過する光線が導光面に達する際には、Fを通過する光線に比べて、常に小さい入射角となる。その結果、射出角は常にFを通過した光線よりも大きくなるため、最も小さい射出角(配光の最遠端を照射する角度)は厳密に $+5^\circ$ に維持できる(図4)。入射プロファイルが高高度になるに従い、鉛直面に入射する光量が減少するとともに、配光に占める射出角の大きい光の割合が増えるため、夏季の高高度の採光ではその効果が減じる。また、屈折率1.5の場合、全反射の臨界角が 42° であること等の制約から、図3中でサポート材とした着色部分に入射する光が計画的に利用できない等の課題もある。

図5に太陽光の法線面照度を8万lxとした際のプロファイル角による室内机上面照度のシミュレーション結果を示す。高度毎に照度分布は類似したカーブを示し、高高度になるに従って照度が低下した。

図6に縮尺模型(1/10)及び入射プロファイル毎の天井面への配光の状況を示す。写真は視線相当の高さで撮影しており、採光レンズ面にグレア源となる高輝度領域は確認されない。

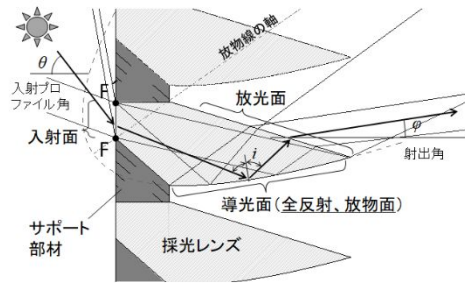


図3 採光レンズ 断面

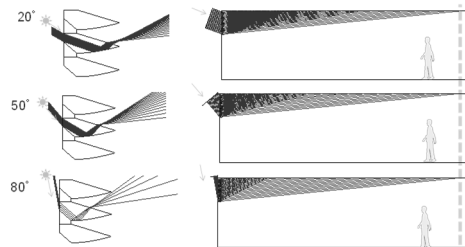


図4 入射プロファイルと配光

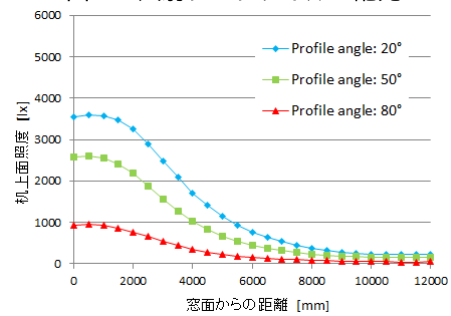


図5 室内机上面照度(解析)

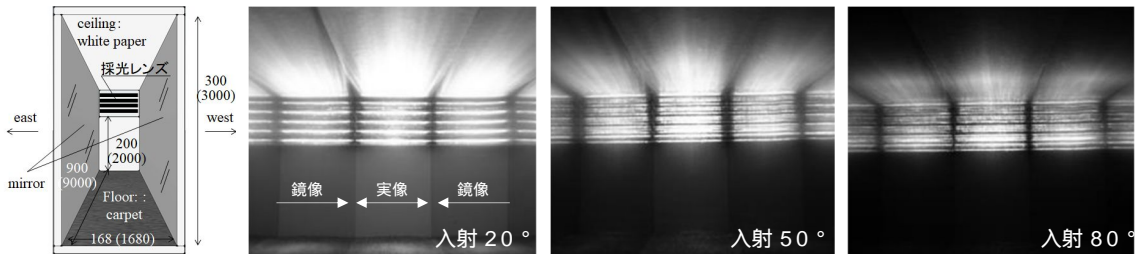


図6 実験装置(左)と入射プロファイル毎の配光

(3)採光レンズ

図7に採光レンズの断面形状を示す。曲線の入射面c-d、直線と円弧からなる導光面a-p-g-d、曲線による放光面a-f'からなる。図8(a)は、 $\pm 15^\circ$ から入射する光線を $\pm 15^\circ$ の範囲に均等化する一対の非球面レンズからなるKIを示す。このKIはレンズの隙間を埋めた図8(b)に示す形状とすることができる。これを適切に折り返して全反射面を形成することで $\pm 15^\circ$ の入射範囲に対して $\pm 15^\circ$ の射出角を持つ採光レンズの基本形を得る。採光範囲の $20\sim 80^\circ$ の内 $20\sim 50^\circ$ をKIで実現し、 $50\sim 80^\circ$ に対して、採光面、放光面を延長するとともに、折り返し面の調整を行うことで $\sim 80^\circ$ までの採光を確保した。但し、全反射面の臨界角を満足する必要があることから、図7の直線の折り返し面を設定し、円弧面を介して接続している。

配光の制御について、採光部、放光部共に曲面の延長を含めた調整により構成したことで、厳密なKIではないため、本研究成果の範囲においては射出角の精度が低くなった。

図9に入射プロファイル角毎の射出角を示す。高高度

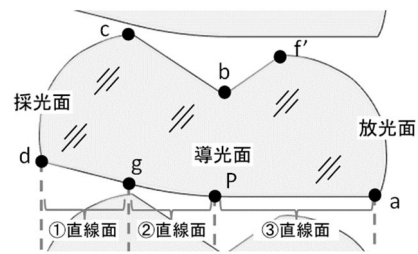


図7 採光レンズ 断面

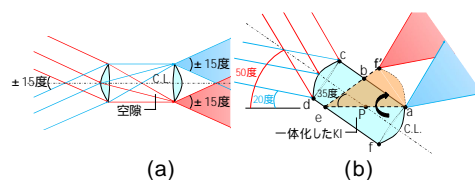


図8 Köhler Integrator とその利用

度において、下向きの光線を生じるものの、元来入射光量が減る高高度の日光をより室奥へ導く構成となった。前述の KI の調整には改善の余地があると考えており、本研究の成果をベースに更に射出角に関する検討を行うことで、グレアの回避とより効率の良い採光を実現できる可能性がある。

図 10 に太陽光の法線面照度を 8 万 lx とした際のプロファイル角による机上面照度のシミュレーション結果を示す。採光性能は、図 9 に示した配光特性に加え、採光量によって決定される。採光レンズの採光面 c d には、採光レンズで生じた入射光を利用できない範囲が存在しないため、採光量を大幅に改善している。このことで、より高い机上面照度を得ている。また、高高度の太陽光を室奥に配光するため、高高度時の室奥方向の机上面照度が飛躍的に高くなった。

図 11 に実験用採光レンズを示す。図 11(a) の試験体表面は、屈折による採光及び放光制御を受け持つが、レーザーカッターによる切断に伴う面の粗さを持つ。このことで、実験では本来の射出角の周辺に拡散的な配光を行うこととなり、グレアを助長する可能性がある。なお、実用においては押し出し成型等でより平滑な表面を形成すれば解決可能である。

図 12 に実験による入射プロファイル毎の天井面への配光の状況を示す。採光レンズが低高度で高い性能を示すのに対して、採光レンズは中高度、高高度で広範囲に配光することが確認できる。50° 程度の入射プロファイル角は中緯度地域における春秋分の南面窓で終日得られる高度で、年間を通じて出現頻度が高い。この領域の性能向上は省エネルギー面への効果も期待できる。レンズ面は採光レンズの配光特性が厳密に下向き光線をカットしないことに加えて、前述の試験体表面の粗さに起因して、高輝度になる傾向が見られた。

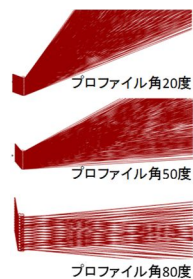


図 9 入射プロファイルと配光

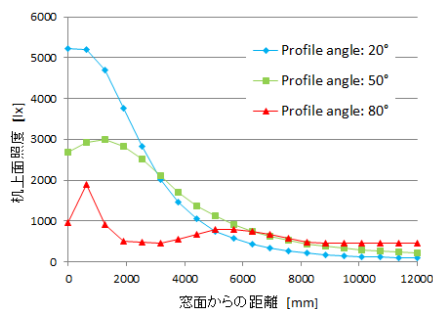


図 10 室内机上面照度

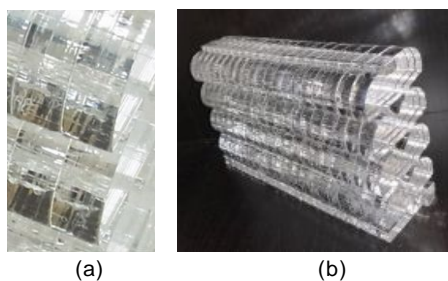


図 11 縮尺実験用採光レンズ試験体

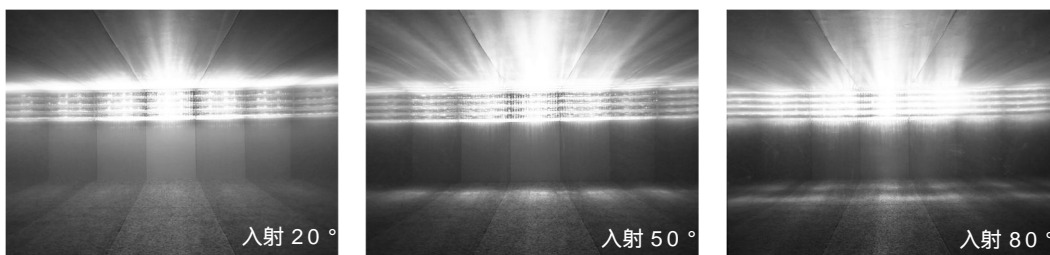


図 12 入射プロファイル毎の配光

(4) 屈折と全反射による採光装置のコンパクト化と省メンテナンス化

図 2 の様な反射材料による採光装置の場合には、放射角を小さく制御するために、特に放光側の反射面を長くして、光線の方向をコントロールする必要が生じる。一方、透明体で採光面、放光面で屈折による光線制御を行う場合には、界面で光線をコントロール可能なため、適切な面の設定さえできれば採光装置をコンパクトにすることができる。透明体では屈折のみで光線を大きく方向転換出来ないため、全反射を併用することとなる。全反射は臨界角の制約により反射面を計画する際には自由度が低くなるものの、金属など反射材料による採光装置と違って鏡面が雰囲気に晒されることがなく、汚れ等による性能劣化が生じにくい。このことで運用時には清掃の手間が少なくなると考えられる。更に、今回の採光レンズのように光路を透明体で一体に構成すれば、金属製の反射ルーバーのようにルーバー一本一本の設置精度を意識する必要がなく、製造及び設置面でのメリットも大きい。製造及び運用面でのメリットを含めて屈折と全反射による採光レンズの可能性は十分に高いと言える。

(5) まとめ

本研究では、中緯度地域の建築空間の省エネルギー性や生産性向上に寄与することを意図して、窓面やトッブライトに設置する固定式採光装置を透明材料で実現することに挑戦した。その結果、従来反射材料で実現されている採光装置と同等以上の性能を有し、且つコンパクトでメンテナンス性能に優れた採光レンズを実現できることが明らかになった。本研究では、実用可能な採光レンズを提案できたが、本研究で得られた知見をベースに更に改良を行うことで、性能向上を図るとともに、低緯度やより高緯度地域に適した採光装置を実現できると考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

| | |
|-------------------------------------------------|-----------------|
| 1. 著者名 今田 茉莉奈, 小林 光 | 4. 巻 83 |
| 2. 論文標題 透明材料による屈折と全反射を用いた固定型採光装置の開発 | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 日本建築学会環境系論文集 | 6. 最初と最後の頁 - |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aije.83.435 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

| |
|------------------------------------------|
| 1. 発表者名 荒田啓輔, 小林光 |
| 2. 発表標題 非結像光学を用いた固定型透明採光ルーバーの開発に関する研究 |
| 3. 学会等名 日本建築学会年次大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|-----------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 川岸岳大, 小林光, 荒田啓輔 |
| 2. 発表標題 非結像光学を用いた固定型透明採光ルーバーの開発に関する研究 (その2) 光のロスを考慮したルーバーの改良 |
| 3. 学会等名 日本建築学会学術講演会 |
| 4. 発表年 2020年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|---------------------------|-----------------------|----|
|---------------------------|-----------------------|----|