



Proposal and performance evaluation of a daylighting system composed of concave and convex parabolic mirrors

Tsuji, Yusuke

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2021-03-06

(Date of Publication)

2022-03-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

乙第3399号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D2003399>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



(様式3)

論文内容の要旨

氏名 辻 雄介論文題目 (外国語の場合は、その和訳を併記すること。)

Proposal and performance evaluation of a daylighting system composed of concave and convex parabolic mirrors

(凹側と凸側放物線ミラーで構成された採光システムの提案と性能評価)

第一章は、本研究の背景と目的である。現在世界で最も注目されている話題の一つとして、環境問題がある。環境問題にはエネルギー削減とコスト削減の二つの側面がある。その両方を同時に達成する方法の一つとして、建築空間における昼光の利用が注目されている。その一つの手法として採光システムがある。採光システムとは、太陽光をミラーやレンズなどの光学的手法を用い、建物の奥深くへ送り届けるシステムである。採光システムは大きく分けると、採光部、導光部、放光部から構成される。特に採光部は採光システム全体の入口であり、光を集めるための最も重要な構成要素である。そのため、導光部や放光部よりも採光システム全体の性能に大きく影響する。本研究では、この採光部に着目し、高効率採光部を提案し、その性能を評価することを目的としている。採光部の開発において、その性能を決定づける重要な要素は、光の流れと密度である。光の流れを適切にコントロールすることで、反射・透過の回数を減らし、より高い性能を引き出すことが可能である。また密度を適切にコントロールすることで、より小さな導光部とし空間を効率的に利用することができる。また採光部として最も適しているのは、自由度が十分低くかつ高いエネルギー密度を実現するシステムである。ここでいう自由度とは、システムの回転に関する自由度である。これまで様々な採光システムが提案されているが、エネルギー密度を上げるため密度コントロールを行なう場合、焦点を要請するケースが多く、無視できない熱問題が発生する。そのため、焦点を持つことなく高いエネルギー密度を実現するシステムが必要である。また、より高いエネルギー密度の実現には、複雑なシステムが要求されるケースが多く、駆動部が増え自由度が高くなる。本研究の最大の目的は、自由度が低くかつ熱問題を起こさずに高いエネルギー密度を生み出すことのできる採光システムを実現することである。その構造として、放物線凹側と凸側を組み合わせた CCCP (Composed of Concave and Convex Parabola) システムを提案し、その幾何的性質を調べた。次に CCCP システムを用いた採光システム (CCCP 採光システム) を提案し、その振る舞いについてレイ・トレーシング・シミュレ

ーションを用いて詳細に調べた。そして、採光効率と3つの性能指標を導入し、年間シミュレーションを行い、システム形状の最適化とそのシステムの地理的依存性を詳細に調べた。

第二章は、本研究の基礎となっている CCCP システムについてである。一般的に集光に利用される放物線ミラーは集光時に焦点が生じる。そのため建築空間で利用するためには、熱問題を無視することはできない。これを解決するには、焦点に集まる光を焦点到達前に平行光に戻す必要がある。先行研究により凸側放物線ミラーがこれを実現することが分かっている。しかしその導出には数値的手法を用いており、解析的な導出はなされていなかった。そこで本研究では、解析的手法及び幾何的手法によって理論的裏付けを行なった。本研究ではこれらの結果を踏まえ、焦点を持たない放物線システム (CCCP システム) を提案する。CCCP システムは、二つの放物線ミラーを組み合わせたシステムである。一次ミラーである凹側ミラーで平行に入射した光を焦点に集まる光に変換し、二次ミラーである凸側ミラーで焦点に到達する前に、より密度の高い平行光へ変換するシステムとなっている。このシステムの最も特筆すべき点は、平行光をより密度の高い平行光に変換する過程で、一切の焦点を持たない点である。そしてこの CCCP システムに対して、その幾何的特徴の検討を行い三つの回転状態によるタイプ分けを行なった。CCCP システムの状態によるタイプ分けは、少しずつ回転が進行させ、少し回転した場合、回転した場合、回転し過ぎた場合の三つに分けた。まず少し回転した場合、(A)：凹側ミラーで反射されるが凸側ミラーに入射しない光線、(B)：凹側ミラーで反射されたあと凸側ミラーで焦点に到達する前に反射される光線、(C)：凸側ミラーの裏側で吸収される光線が発現する。CCCP システムでは、(B)の光線が最も重要であり、この領域がシステムを有効に機能させる領域である。(B)は回転に伴い、少しずつ減少していく。そして回転した場合、(X)：凹側ミラーと凸側ミラーの間をすり抜けていく光線が発現する。これは、(B)の領域が減少し続けた結果、回転によって凹側ミラー右端から漏れ出る光線である。(X)は回転に伴い増加していくが、システムの形状によっては発現しない場合もあることを留意しておく。そしてさらに回転を進め、回転し過ぎた場合、(B)は完全に消失し、(X)の領域が増加していくため、この状態では CCCP システムは有効に機能しない。またこの場合も、(X)は常に発現するわけではなく、凹側ミラーと凸側ミラーの組み合わせによっては発現しない場合もあることだけ付け加えておく。

第三章は、CCCP システムを利用した CCCP 採光システムの構成と理論モデルの定義である。CCCP システムは焦点を持つことなく、平行光をより密度の高い平行光に変換することができる。この性質を採光システムに応用し、CCCP 採光システムを提案した。CCCP 採光システムは、CCCP システムを z 軸方向に回転させた放物線回転面の形状をとる。この形状を採用することにより、平行光をより高密度に小さなスペースへ集めることができる。本研究に近い先行研究では、自由度を下げるために光ファイバーを導入している。光ファイバーはコストが高く、また変換した平行光を平行でなくしてしまう。またこの研究の採光システムは重心位置が高く、装置の大型化には大きな制約がつく。我々の提案する CCCP 採

光システムはこれらのデメリットを完全に克服しており、先行研究に対してこれら二つの点で大きなアドバンテージを有している。次にシミュレーションを行うため、CCCP 採光システムの形状を数学的に定義した。CCCP 採光システムの形状を数学的に定義するため、ミラー-I は、原点を焦点とし原点を中心として回転する放物線、ミラー-II は原点を焦点とする放物線と定義した。さらにミラーの形状を決定づける四つの定数 x_{IL} , x_{IR} , x_{II} , x_{IIR} を定義した。そして CCCP 採光システムの性能を評価するため、レイ・トレーシングシミュレーションを行った。また、性能評価には採光効率 η_E 及び三つの性能指標最大有効時間 T_{max} 、最小有効時間 T_{min} 、年間採光効率 p_{yr} を定義した。レイ・トレーシング・シミュレーションの結果から、システムは本研究で期待されている通りの振る舞いをしていることがわかった。また採光効率の年間シミュレーションの結果から、CCCP 採光システムは夏至で最大のパフォーマンスを有し、冬至に向けてパフォーマンスが下がることが分かった。年間シミュレーションは、採光システムの性能を視覚的にかつ簡潔に知る指標として用いることができる。さらに三つの性能指標は採光システムの性能を知るのに役立つ。本研究における性能の比較はこれらの指数を用いた。

第四章は、形状依存性に関するシミュレーションの結果である。年間シミュレーションを通して得られた採光効率及び性能指数を用いて、三つの CCCP 採光システムの形状を決定づける定数 ℓ_1 , ℓ_{II} , d_1 を最適化した。 ℓ_1 の最適化には、 $\ell_1 = 2.0, 4.0, 6.0, 8.0$ の四つのケース・スタディを行い最適化した。その結果、 $\ell_1 = 6.0$ の時に最適なパフォーマンスが得られることがわかった。しかし、ここでのケース・スタディでは2.0ごとの値で計算しているため、数値の飛びが大きい。そこで、前回のケース・スタディの結果を踏まえ、追加のスタディとして、 $\ell_1 = 5.0$ を行った。その結果、 $\ell_1 = 5.0$ がより最適であることがわかった。次に $\ell_1 = 5.0$ を利用して、 $\ell_{II} = 1.0, 2.0, 3.0, 4.0$ の四つのケース・スタディを行った。その結果、 $\ell_{II} = 1.0$ が最適であることがわかった。同様に、 $\ell_1 = 5.0, \ell_{II} = 1.0$ を用いて、 $d_1 = 2.0, 4.0, 6.0, 8.0$ に対してケース・スタディを行った。その結果、 $d_1 = 8.0$ が最適であることがわかった。ここでも、数値の飛びが大きい、年間シミュレーションの結果から性能差が圧倒的かつ単調増加であることがわかったので、追加スタディは行わなかった。よって本研究で行われたシミュレーションの範囲内で数値的に得られた最適値として、 $\ell_1 = 5.0, \ell_{II} = 1.0, d_1 = 8.0$ が得られた。ここでの最適化はあくまで各々の定数の定義域を恣意的に決め打ちして数値的に求めた値であって、解析的に最適化した訳ではないことに改めて留意しておく。

第五章は、CCCP 採光システムの地理的依存性をシミュレーションによって調べた結果である。便宜上、以降の議論では緯度はすべて北緯を表し、以降の検討は北半球に関するものとする。南半球に関しても同じようにスタディできるので、この設定は不自然なものではない。さて CCCP 採光システムは、北回帰線である緯度 23.45° 以南では南中時において二つのピークを持つ。これは太陽高度の扱いが地軸の傾きのため、北回帰線が変わるからである。赤道から北回帰線に緯度が上がるにつれ、二つのピークは夏至に向かって徐々にピーク

間の期間が狭まっていき、北回帰線でピークは一つに収束する。北回帰線以北では、ピークは常に一つであり、その場所は夏至の南中時である。次に周辺部の性質を述べる。夏至の南中時をピークとし、冬至に向けて採光効率は単調に減少する。夏至から冬至に向けては対称的な変化をする。また時刻方向には、南中時が最大の性能を発揮し、そこから対称にパフォーマンスが減少していく。なので、システムの採光効率は、ちょうど夏至の南中時を中心を目玉のような形状をとる。そして緯度が上がるにつれ、採光効率は目玉の形が楕円から円形に変化するよう減少を続け、まず冬至での利用ができなくなり、最終的には全く使えなくなってしまう。現在の最適化の範囲では、その緯度は約 50° であり、この緯度までであれば採光システムは有効に機能する。この緯度の検討は今後の課題として取り組む必要がある。この時目標とする緯度、および時刻は緯度 65° 以下の地域で時刻の範囲 $8.00\text{--}16.00$ である。緯度 65° 以下としたのは、世界の主要都市の中で最も緯度が高い場所がアイスランドの首都レイキャビクであり、その緯度が 64.13° であるためである。また時刻の範囲を定めたのは、ワーキング・タイムと言う考え方を導入し、多くの人々がオフィスで働いていると考えられる時間(8.00—16.00)で採光システムが有効であるかどうかを確認したいからである。16.00は早く感じられるかもしれないが、実際日本やヨーロッパの主要な緯度帯では、冬至の日の入り時刻は16時—17時の間であることが多いためであり、16時以降はそもそも日光が得られないので不適切と考え除外した。

第六章は、結論として、本研究のまとめと今後の課題についてである。本論文の主要な結論は以下の通りまとめられる(要点1—7)。要点1として、放物線ミラーの特徴を、解析的手法と幾何学的手法を用いて明らかにした。要点2として、CCCPシステムを定義し、その幾何学的特徴を明らかにした。要点3として、CCCP採光システムを提案し、その振る舞いをレイ・トレーシング・コードを用いて確認した。要点4として、採光システムの性能を見積もることの出来る、年間シミュレーション、採光効率、三つの性能指標を定義した。要点5として、CCCP採光システムの形状依存性について、本研究で行ったシミュレーションの範囲内における最適値 $\ell_1 = 5.0, \ell_{II} = 1.0, d_1 = 8.0$ を導出した。要点6として、CCCP採光システムは、地球の地軸の傾きのために、緯度 23.45° 以下では二つのピークを持つことが分かった。要点7として、最適化されたCCCP採光システムを用いることにより、緯度約 50° 以下において採光システムは有効に機能する。また、今後の課題として、緯度約 50° 以下までしか、CCCP採光システムを利用できないという問題を解決する必要がある。この課題を克服するため、本研究では数値的手法によって行なった最適化を解析的手法によって行う必要がある、また先行研究によってCCCPシステム全体の回転を回転させることによって、システムのパフォーマンスが向上することがわかっている。ここで言うシステム全体の回転とは、焦点周りの回転に関するガリレイ変換である。しかしこの研究では、その可能性の示唆のみに留まっており、解析的な検討はなされていない。そこで、本研究のゴールとして、システム全体の回転まで考慮した解析的な検討を行い、最適化することで更なるパフォーマンスの向上を目指す。

氏名	辻 雄介		
論文題目	Proposal and performance evaluation of a daylighting system composed of concave and convex parabolic mirrors. (凹側と凸側放物線ミラーで構成された採光システムの提案と性能評価)		
審査委員	区分	職名	氏名
	主査	准教授	鈴木 広隆
	副査	教授	阪上 公博
	副査	教授	多賀 謙蔵
	副査	教授	原 直也
	副査		
要 旨			
<p>採光は、照明エネルギー削減のために必須の技術であり、採り入れた昼光の向きと密度をコントロールすることが重要となる。しかし、屈折や反射を用いて光の流れをコントロールすると、焦点付近で密度が過大となり、発生した熱は火災の原因になり得る。放物線の凸側を用い、光が焦点に集まる前に反射して平行光とする技術はこれに対する1つの解であるが、これまでこの原理を活用した採光装置の提案は少なく、またその装置の採光性能の評価も十分ではなかった。本研究は、放物線の凸側と凹側を組み合わせ、密度の高い昼光を常に一定の方向に導く機構を少ない可動部で実現する採光装置の提案するものであり、かつその装置の採光性能の評価を詳細に検討したものである。</p> <p>第1章は、本研究の背景と目的の解説である。採光システムは、太陽光をミラーやレンズなどの光学的手法を用いて建物の奥深くへ送り届けるシステムであり、採光部、導光部、放光部から構成される。ここでは、本研究の目的が、反射・透過が少なくなるよう光の流れを適切に制御でき、かつ導光部を小さくするために密度をコントロール可能な採光部の提案と評価であることを明らかにしている。そして、可動部が少なくエネルギー密度をコントロール可能で、かつ熱の問題が発生しない装置を実現するため、放物線凹側と凸側を組み合わせた CCCP (Composed of Concave and Convex Parabola) システムを提案してその解析的幾何的特徴を検討すること、CCCP システムを用いた採光システムを提案すること、CCCP 採光システムの評価を詳細に行うことが本博士論文の骨子であることを述べている。</p> <p>第2章は CCCP システムについての説明が行われている。一般的に放物線ミラーは集光を目的として利用されるが、集光時に焦点が生じるために建築空間で利用するためには熱の問題を無視することはできない。しかし、これまで放物線を利用した採光システムに利用されてきたのは放物線の凹側を用いたミラーである。そこで、放物線の凸側が、1点に集まる光をその点に到達する前に反射することにより平行光に変換することを解析的手法及び幾何的手法によって理論的裏付けを行っている。また、これらの結果を踏まえ、焦点を持たない採光装置である CCCP システムを提案している。CCCP システムは、2つの放物線ミラーを組み合わせたシステムであり、1次ミラーである凹側ミラーにより入射した平行光を焦点に集まる光に変換し、2次ミラーである凸側ミラーで焦点に到達する前により密度の高い平行光へ変換するシステムとなっている。このシステムの特筆すべき点は、平行光をより密度の高い平行光に変換する過程で一切の焦点を持たない点である。そしてこの CCCP システムに対して、その幾何的特徴の検討を行い、3つの回転状態によるタイプ分けを行い、その状態ごとの挙動を明らかにしている。</p> <p>第3章は、CCCP システムを利用した CCCP 採光システムの構成と理論モデルを定義している。焦点なしで平行光の密度をコントロール可能である CCCP システムの特徴を採光システムに応用し、CCCP 採光システムを提案している。CCCP 採光システムは、CCCP システムをz軸方向に回転させた放物線回転面の形状となっている。この形状を採用することにより、平行光をより小さなスペースへ集めることができ、かつ太陽位置によらず最終的な出力方向を固定することが可能となっている。次にシミュレーションを行うため、CCCP 採光システムの形状を数学的に定義している。CCCP 採光システムの性能を評価するため、レイトレーシング法により年間シミュレーションを行い、CCCP 採光システムが夏至に最大のパフォーマンスとなり、冬至に向けてパフォーマンスが下がることを明らかにした上、採光装置の性能を評価するための3つの指標を提案している。</p>			

氏名	辻 雄介		
<p>第4章は、シミュレーションにより形状依存性の検討を行っている。年間シミュレーションを通して得られた採光効率及び性能指標を用いて、3つの CCCP 採光システムの形状を決定づけるパラメータの最適化を行っている。複数のパラメータを用いた最適化を行うため、一部のパラメータのみ変数としたり、結果に応じてパラメータとして入力する値を変更したりすることで、本装置に最適な値を導いている。</p> <p>第5章では、CCCP 採光システムの地理的依存性について検討を行っている。ここでは、時刻、季節、緯度を変数とした性能評価を行っている。そして、北回帰線である緯度23.45°以南では南中時において CCCP 採光システムが2つのピークを持つこと、北回帰線以北ではピークは常に1つであり、その場所は夏至の南中時であることを明らかにしている。さらに、緯度に応じた採光性能の変化の状況について得られたことを詳述している。</p> <p>第6章では、結論として本研究のまとめと今後の課題について説明を行っている。本論文の主要な結論を下記のようにまとめている。</p> <p>要点1: 放物線ミラーの特徴を解析的手法と幾何学的手法を用いて明らかにした。 要点2: CCCP システムを定義し、その幾何学の特徴を明らかにした。 要点3: CCCP 採光システムを提案し、そのふるまいをレイトレーシング法を用いて確認した。 要点4: CCCP 採光システムの性能を評価するための指標の提案を行った。 要点5: CCCP 採光システムの形状依存性について検討を行い、検討範囲内の最適解を得た。 要点6: CCCP 採光システムの地理的依存性の検討を行い、緯度による増減の変化を明らかにした。 要点7: CCCP 採光システムの地理的依存性の検討を行い、緯度約50°以下において採光システムは有効であることを明らかにした。</p> <p>本研究が提案する装置は、常に熱の発生と切り離すことができない採光装置の問題を解決するものであり、かつ少ない可動部でありながら常に出力方向を一定に保つことを可能とするものである。さらに、この画期的な装置の採光性能の評価や地理的依存性についての詳細な検討を行っている。提出された論文は工学研究科学学位論文評価基準を満たしており、学位申請者の辻雄介は、博士(工学)の学位を得る資格があると認める。</p>			
・特記事項			
・特許登録数	0	件	
・発表論文数	3	編	