

氏 名（本 籍）	おお き ち か こ 大 木 知佳子（東京都）
学 位 の 種 類	博士（工学）
学 位 記 番 号	甲第 1082 号
学位授与の日付	2021 年 3 月 18 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学 位 論 文 題 目	光と熱の詳細連携計算に基づく日照・日射制御技術のエネルギー性能評価手法

論 文 審 査 委 員	（主査）教授 古澤 望
	教授 兼松 学 教授 寺部慎太郎
	教授 倉潤 隆 教授 長井 達夫

## 論文内容の要旨

本論文は、以下の 6 章から構成されている。

第 1 章「序論」では、本研究の背景、既往の研究、本研究の目的について述べた。本研究では、ZEB などの一層の省エネルギー化や、居住者の健康・快適性の Wellness 向上が社会的に求められ、またデザインの環境合理性をシミュレーションする技術が重要となる背景から、3 次元形状を使った Radiance による光環境シミュレーションを窓から入る日射熱計算に利用し、昼光利用時における多様な屋内外日照・日射制御装置のエネルギー性能を評価する研究が必要であると考えた。そこで、ガラスの入射角特性を考慮するために、窓面からの日射熱取得を直達成分と拡散成分に分けて取り扱う熱負荷計算プログラムの代表として、動的熱負荷計算プログラム NewHASP（以下、NewHASP）に着目し、熱負荷計算に Radiance 計算結果を連携させることを本研究の目的とすることを述べた。NewHASP に Radiance 計算結果を取り込んで年間熱負荷シミュレーションを行う「NewHASP を核としたメタシミュレーション技術」を用いて、屋内外日照・日射制御装置と昼光利用を考慮した年間時刻別熱負荷を求めた。メタシミュレーション技術は、複数のシミュレーション結果を NewHASP に取り込み、年間時刻別熱負荷計算を行うためのメタ（上位の）シミュレーションモデルである。それぞれのプログラムの変更を最小限にするため、データのやり取りは、双方のシミュレーション結果を書き出す専用時系列ファイルのみを介したバッチ処理（複数プログラムの同時実行は行わない）とし、各プログラムの独立性を保っている。

一方、実務での展開を考える時、複数の目的の中から設計仕様を選択する必要がある、より良い解集団を導く最適化検討が重要である。今回、熱負荷・エネルギー性能の詳細な計算法を開発したことにより、これらを含めた多目的最適化による検討が可能となった。本研究では、Radiance/OCTOPUS（多目的遺伝的アルゴリズムを扱うソフト）を利用することにより、エネルギーと視環境を目的関数として、屋外日照・日射制御装置の垂直ルーバー・屋内日照・日射制御装置のブラインドを組み合わせた複合窓システムの形状設定を求める多目的最適化システムを構築し、各種説明変数の組合せを予め設定して行なったスタディおよび多目的最適化計算を試みることを述べた。

第2章「屋内日照・日射制御装置の光・熱環境エネルギー性能評価手法」では、屋内日照・日射制御装置の1例として、ブラインドの光・熱環境エネルギー性能評価手法を提案した。Radianceを利用して太陽プロファイル角ごとのブラインド面の透過光・反射光による照度を求めてブラインド光学特性関数を作成し、NewHASPに取り入れるシステムを構築した。計算モデルを使った、ブラインドスラット角度別の空調・照明エネルギー評価について論じた。屋内日照・日射制御装置モデルにはブラインドを利用し、建物モデル形状はBIMを基に作成した。本評価法による結果として、はじめに、Radiance 昼光利用ブラインドスラット角45°一定、Radiance 昼光利用ブラインドスラット角水平一定、Radiance 昼光利用ブラインドスラット角保護角制御の3ケースについて、照明調光率と照明消費電力量を求め、ブラインドスラット角による適切な差が出ていることを確認した。そして、室全体における最大日装置顕熱負荷、月別・年間装置顕熱負荷、月別・年間電力使用量を求め、ブラインドスラット角による適切な差が確認された。さらに、従来NewHASPとの比較を、最大日装置顕熱負荷、月別・年間装置顕熱負荷、月別・年間電力使用量にて行い、昼光利用時における、屋内日照・日射制御装置の光・熱環境エネルギー性能評価結果を検証した。

第3章「屋外日照・日射制御装置の光・熱環境エネルギー性能評価手法」では、様々な形状の屋外日照・日射制御装置の光・熱環境エネルギー性能評価手法を提案した。従来NewHASPにおける計算法を説明し、Radianceと連携させることで、どんな形状の屋外日照・日射制御装置でもNewHASPに取り入れることが可能なシステムを構築した。計算モデルを使った、10種類の屋外日照・日射制御装置の空調・照明エネルギー評価について論じた。屋外日照・日射制御装置モデルとして、従来NewHASPで計算できる4種類を含んだ10種類、40ケースの熱負荷を求めた。本評価法による結果として、年間窓面日照面積率、年間平均調光率、年間熱負荷は、屋外日照・日射制御装置の形状から推察される遮光性能と一致した結果となった。年間電力使用量は、照明電力使用量、空調電力使用量、合計電力使用量とも、外ブラインドが一番大きく、屋外日照・日射制御装置なしが一番小さい結果となった。これは、屋外日照・日射制御装置による空調電力使用量の削減分よりも、屋外日照・日射制御装置による照明電力使用量の増加分の方が大きくなったためと考えられる。すなわち、昼光利用と屋外日照・日射制御装置を併用する場合、東京（百里）においては、屋外日照・日射制御装置は昼光利用の効果を減ずる場合があることを示している。ただし、今回は内ブラインドなしという条件で計算しているため、内ブラインドにより眩

しさを防ぐ制御をしていない。また、東京（百里）について、屋外日照・日射制御装置を基準とした場合の年間照明電力使用量の差分、年間空調電力使用量の差分の比較から、屋外日照・日射制御装置による空調電力使用量の削減分よりも、屋外日照・日射制御装置による照明電力使用量の増加分の方が大きくなり、昼光利用と屋外日照・日射制御装置を併用する場合、東京（百里）においては、屋外日照・日射制御装置は昼光利用の効果を減ずる場合があることが分かった。さらに、従来 NewHASP との比較から、Radiance を利用して求めた熱負荷は従来 NewHASP の熱負荷よりやや小さいが、全体的な傾向は概ね一致することを確認した。

第 4 章「屋内外日照・日射制御装置の光・熱環境エネルギー性能評価手法の妥当性検証」では、第 2, 3 章で構築したシステムの妥当性を検証した。はじめに既存のプログラムとして従来 NewHASP と EnergyPlus を使った検証を行い、次に、断熱箱を使った実験による測定値による検証を行って、システムの有効性を論じた。比較項目は、本研究による窓面転写ファイルへの入力データである、窓面拡散日射量を計算するための窓面平均照度、日照面積率と、出力データである断熱箱室温とした。また、断熱箱内輝度、照度についても実測し、Radiance シミュレーション値と比較した。入力データである、窓面平均照度と日照面積率のシミュレーション・実測比較により、どちらも同じような傾向で推移していることを確認した。本研究による計算法の結果である断熱箱室温のシミュレーション・実測比較により、ピーク時刻はほぼ一致していることを確認した。

実測値と、本評価法による最も詳細な Radiance 計算法「rtrace\_10mm 格子中心」、最も簡易な Radiance 計算法「DC\_10mm 水平」による室温、従来 NewHASP、EnergyPlus の室温の比較から、本研究の評価法による Radiance を連携させた NewHASP の室温は、簡易な Radiance 計算法を利用した場合も、非常に精度が高いことを確認した。

第 5 章「屋内外日照・日射制御装置エネルギー性能評価手法を利用した多目的最適化事例」では、屋内外日照・日射制御装置エネルギー性能評価手法を利用して、Radiance・NewHASP 統合シミュレーションによる屋内外日照・日射制御装置のエネルギー性能評価と、視環境評価を目的関数に加えた複合窓システムの形状設定を求める多目的最適化計算を行った。はじめに、グラフィカルアルゴリズムエディタ Grasshopper を利用して、エネルギー・グレア・眺望性の計算を実行し、基本的な屋内外日照・日射制御装置形状のパラメータの組合せにおける挙動を確認するために、パラメトリックスタディを行った。次に、多目的遺伝的アルゴリズムを扱うプラグインソフト OCTOPUS を用いた多目的最適化計算により、東京（百里）においては、空調・照明エネルギー使用量が大きいほどグレア、眺望性が小さく、眺望性が高いほどグレアが小さいという曲線状のパレート最適解が得られることを明らかにした。そして、パラメトリックスタディにおいて得られたエネルギー・エネルギー・グレア・眺望性の関係が一致したことを確認し、多目的最適化計算が正しくなされており、今後の複合窓システムの形状設定に有用であることが明らかになった。

第 6 章「結論・課題」では、本研究の評価法による Radiance を連携させた NewHASP の室温は、簡易な Radiance 計算法を利用した場合も、非常に精度が高いことが確認できたこと、エネルギー・グレア・眺望性の多目的最適化計算により、今後の複合窓システムの



形状設定に有用であることが明らかになったことを述べた。本研究では、代表的な屋外日照・日射制御装置である垂直ルーバーと、代表的な屋内日照・日射制御装置であるブラインドの年間固定角度における多目的最適化計算を実行したが、今後はブラインドを保護角制御した場合や、可動式の屋外日照・日射制御装置、そして曲面を含むより複雑な屋内外日照・日射制御装置の最適化計算にも適用していくことを、今後の課題として述べた。

以上

## 論文審査の結果の要旨

本論文では、光環境シミュレーション Radiance を窓から入る日射熱取得と照明熱取得計算に利用し、昼光利用時における多様な屋内外日照・日射制御装置による建物のエネルギー性能を評価する研究が必要との考えから、熱負荷計算に Radiance を連携させる計算法を構築し、さらに本論文による評価手法を利用したエネルギーと視環境を目的関数とし、屋外日照・日射制御装置の垂直ルーバーと屋内日照・日射制御装置のブラインドを組み合わせた複合窓システムの形状設定を求める多目的最適化計算を行った。

本論文の成果を以下に示す。1) 屋内日照・日射制御装置の光・熱環境エネルギー性能を評価するために、ブラインドの光・熱環境エネルギー性能評価手法を提案した。Radiance を利用してプロファイル角ごとのブラインド面の透過光・反射光による照度を求めてブラインド光学特性関数を作成し、NewHASP に取り入れるシステムを構築した結果、装置顕熱負荷にブラインド制御による季節ごとの違いが明確に表れることを確認した。2) 様々な形状の屋外日照・日射制御装置の光・熱環境エネルギー性能評価手法を提案した。従来 NewHASP における計算法を説明した上で、Radiance を利用して直達成分、拡散成分を求める計算法を構築した。窓面日射熱取得を、直達成分・拡散成分に分けて考え、それぞれに Radiance を利用することで、どのような屋外日照・日射制御装置でも詳細なエネルギー性能を評価できる方法を確認した。3) 屋内外日照・日射制御装置の光・熱環境エネルギー性能評価手法の妥当性を検証するために、従来 NewHASP と EnergyPlus との比較を行った結果、本論文による評価法を利用することで、日照・日射制御装置による日射遮蔽や反射を詳細に再現して、周辺建物の影響も加味することが可能となり、どのような条件でも屋内外日照・日射制御装置の熱負荷・室温を算出できることが明らかになった。4) 屋内外日照・日射制御装置エネルギー性能評価手法の応用として、屋内外日照・日射制御装置のエネルギー性能評価と、視環境評価を目的関数に加えた複合窓システムの形状設定を求める多目的最適化計算事例について論じ、複合窓システムの形状設定に有用であることを明らかにした。

本学位論文の審査は、提出論文の内容、口頭発表および口頭試問の質疑応答に基づき、5名の審査員によって行われた。審査会において審査員から出された主たる修正意見と対応結果を以下に示す。1) 熱と光の連携計算として、すでに確立されている内容と、今回新たに開発した内容を整理する必要があるとの修正意見に対しては、①窓面日射熱取得計算の直達成分と拡散成分にそれぞれ Radiance を連携させて、屋外日照・日射制御装置のある建物の熱負荷 (thermal load) とエネルギー使用量を求めた点と、②様々な形状の屋内日照・日射制御装置と屋外日照・日射制御装置を併せ持つ建物の空調・照明エネルギー使用量を評価できるようにした点に、本論文の新規性があることを第1章に追記した。2) シミュレーションの日照・日射制御装置によるエネルギー使用量の差が小さいため、この研究によって何が改善したのか明確に示す必要があるとの修正意見に対しては、本研究によるエネルギー性能評価手法は、ZEB を目指す建物のようにエネルギー使用量を基準ビルの半分以上に削減することが求められる徹底した省エネルギー建物の計画に有用であり、本研究による評価法を利用し、適切な機器容量を選定することで、エネルギー使用量の削減に貢献することが可能となる点を追記した。3) シミュレーション結果と実測値の評価の比較について、より定量的に結果を示す必要があるとの修正意見に対しては、光環境シミュレーション Radiance による照度・輝度については、CIE 技術報告書に記載されているシミュレーション値と実測値の許容誤差範囲との検証をしているが、熱負荷・室温については室温の誤差率を追加することで対応した。4) 断熱箱実験の結果において、実測室温と従来 NewHASP・EnergyPlus の誤差が大きくなる原因を確認する必要があるとの意見に対しては、より詳細な比較条件明記した上で誤差要因を説明するためのグラフ・説明を追加した。

本論文は、建物のエネルギー性能を評価する上でこれまで不十分だった光環境・熱環境の総合的考慮を可能にする手法を提案するものであり、ZEB などの一層の省エネルギー化や居住者の健康・快適性の Wellness 向上が社会的に求められる中で、今後の建築における環境設計分野に大きな影響を与える成果であり、博士 (工学) の学位論文として十分に価値のあるものと認められる。