

学位論文

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

Energy performance evaluation method
of sunshine / solar radiation control technology
based on detailed cooperative calculation of light and heat

2021 年 3 月

大木知佳子

Chikako Ohki

目次

第1章	序論	3
1.1	本研究の背景	4
1.2	既往の研究	5
1.2.1	屋内外日照・日射制御技術の窓面日射熱取得計算	5
1.2.2	屋内外日照・日射制御技術の照明熱取得計算	5
1.2.3	シミュレーション連携と最適化計算	6
1.3	本研究の目的	7
1.4	論文の構成	10
第2章	屋内日照・日射制御設備の光・熱環境エネルギー性能評価手法	15
2.1	屋内日照・日射制御設備の日射熱取得・照明熱取得計算法	16
2.1.1	従来 NewHASP における計算法	16
2.1.2	本研究で提案する計算法	18
2.2	熱負荷・電力使用量計算法	24
2.3	熱負荷・エネルギーシミュレーションによる検証	29
2.3.1	屋内日照・日射制御設備形状	29
2.3.2	建物形状	29
2.3.3	光・熱負荷・エネルギーシミュレーション結果	31
2.4	第2章のまとめ	40
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	43
3.1	屋外日照・日射制御装置の日射熱取得計算法	44
3.1.1	従来 NewHASP における計算法	44
3.1.2	本研究で提案する計算法	45
3.2	熱負荷・電力使用量計算法	48
3.3	熱負荷・エネルギーシミュレーションによる検証	50
3.3.1	屋外日照・日射制御装置形状	50
3.3.2	建物形状	50
3.3.3	光・熱負荷・エネルギーシミュレーション結果	53
3.4	第3章のまとめ	61
第4章	本研究で提案する評価手法の妥当性検証	63
4.1	屋内外日照・日射制御装置の日射熱取得計算法	64
4.1.1	本研究で提案する計算法	64
4.2	従来 NewHASP・EnergyPlus との比較	65
4.2.1	屋内外日照・日射制御装置形状	65

4.2.2	建物形状.....	65
4.2.3	熱負荷・室温計算の詳細フロー.....	66
4.2.4	光・室温シミュレーション結果.....	75
4.3	実大モデル実験による実測値との比較.....	89
4.3.1	検証項目.....	89
4.3.2	計測.....	93
4.3.3	実験概要.....	96
4.3.4	実験結果.....	106
4.4	第4章のまとめ.....	133
第5章	本研究で提案する評価手法を利用した多目的最適化検討.....	137
5.1	多目的最適化シミュレーションの構成.....	138
5.1.1	空調・照明エネルギー評価手法.....	140
5.1.2	グレア評価手法.....	143
5.1.3	眺望性評価手法.....	143
5.1.4	多目的最適化計算手法.....	145
5.2	多目的最適化の検討.....	148
5.2.1	建物形状.....	148
5.2.2	屋内外日照・日射制御装置形状.....	148
5.2.3	パラメトリックスタディ結果.....	149
5.2.4	多目的最適化検討の結果.....	154
5.3	第5章のまとめ.....	157
第6章	結論・課題.....	159
6.1	本研究の結論.....	160
6.2	今後の課題と展望.....	162

謝辞

付録

研究業績一覧

第1章 序論

1.1 本研究の背景

建築に求められる社会的役割として、ZEB（ネット・ゼロ・エネルギー・ビル）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 向上が挙げられる。

省エネルギー化については、2014 年 4 月に閣議決定したエネルギー基本計画¹⁻¹⁾において、建築物では、2020 年までに新築公共建築物等で、2030 年までに新築建築物の平均で、ZEB を実現することを目指すとしている。ZEB 化実現のためには、照明分野においても、徹底した省エネルギーが求められており、高効率な照明器具や各種センサによる照明制御の採用のほか、昼光の有効利用が重要と考えられる。昼光利用によって人工照明にかかる電力使用量を削減することが可能となるが、昼光の導入は同時に日射熱を取得することになるため、光・熱環境を総合的に評価する必要がある。

居住者の健康・快適性向上の観点では、2018 年に発表された昼光照明基準・同解説¹⁻²⁾に、昼光照明の計画・設計・評価・運用において必要な昼光照明環境の量と質の指標、昼光光源、昼光照明計画、建築照明のエネルギー性能に対する昼光利用について技術的規準が定められている。また、2019 年 3 月に発表された欧州規格¹⁻³⁾には、昼光を確実に確保することを奨励するとともに、十分に昼光を得るための昼光照度や開口部の目標値、眺望性・グレアの評価基準が定められている。さらに、建物使用者の健康・快適性に焦点を当てて開発された、建物・室内環境評価システム Well Building Standard™（WELL 認証）¹⁻⁴⁾においても、空気、食物、光などに関するガイドラインが示され、光・熱環境の総合的な評価が求められている。

近年パソコンの性能が向上し、生産性向上や作業の効率化を目的として BIM（Building Information Modeling）の利用が急速に進んでいる。BIM は、建物の形を構成する部位や部材の情報（形状情報）だけでなく、材質や種類などの情報（属性情報）を与えることができる。さらに、コンピューテーショナルデザインの高度化と建築生産技術の発展によって、複雑なファサードデザインの実現が可能となった。環境シミュレーション分野においては、設計中の BIM による 3 次元モデルを使って解析やシミュレーションを行うことで、設計内容に整合した解析結果を得ることができるようになってきた。そして、自由な曲面を持つ建築や、ルーバーや庇など多様な形状の屋外日照・日射制御装置を持つ建築の増加に伴い、そのエネルギー評価が必要となってきた¹⁻⁵⁾。

光環境シミュレーションプログラムとして世界中で利用されている Radiance¹⁻⁶⁾は、Greg Ward によって 1990 年代に Lawrence Berkeley Laboratory で開発され、現在も Lawrence Berkeley Laboratory を中心に、ユーザーも参加しながら新しい機能を追加し、進化し続けている。Radiance は、開口部形状や室形状を考慮した 3 次元の室内空間における光環境解析が可能であり、気象データを基に設定する直射日光・天空光を利用して、日時によって変化する天空輝度分布を考慮した室内の光環境を高い精度で計算することができる。Radiance による精度の高いシミュレーションは、時として計算時間が多くかかり、標準気象データを利用した 1 年間の計算には膨大な時間がかかることもあったが、近年、Matrix

を利用した年間計算手法¹⁻⁷⁾が開発され、光環境の年間評価が実用的となった。

動的熱負荷計算プログラム NewHASP¹⁻⁸⁾ (以下、従来 NewHASP) は、2012 年 4 月に社団法人建築設備技術者協会から公開された最新版の高精度なプログラムであり、学術研究および設計実務で広く利用されている。従来 NewHASP は、空調ゾーンごとの 1 年分の時刻別非定常計算や 5 種類の夏冬ピーク代表日を繰り返すとした周期定常計算が可能であり、10 秒間程度で短時間に年間の熱負荷が計算できる。また、数千行のシンプルなプログラムであるため、比較的内容を読み解きやすく、従来の計算法を部分的に最新の計算法に置き換えやすいという特徴もある。従来 NewHASP は、IEA (International Energy Agency) から刊行された、熱負荷計算プログラムのテストプロトコルである BESTEST¹⁻⁹⁾によって検証されたプログラムである¹⁻¹⁰⁾。

1.2 既往の研究

1.2.1 屋内外日照・日射制御技術の窓面日射熱取得計算

熱負荷計算用窓計算の既往研究として、屋内日照・日射制御装置である内ブラインドについては、郡ら¹⁻¹¹⁾の提案する日射熱取得率と透過率の変動を求める簡易な計算法が利用されてきた。詳細な計算法としては、吉澤ら¹⁻¹²⁾が、Radiance を利用し、入射角により変化するガラス光学特性の近似式と内ブラインド光学特性のプロファイル角別データを用意し、これを用いて多重反射と窓熱平衡を時々刻々解く方法を提示した。また、武田ら¹⁻¹³⁾は、内ブラインド設置時の光学特性を Radiance で求めて熱負荷計算プログラム LESCOM¹⁻¹⁴⁾に組み込み、1 分間隔の各種内ブラインド制御による年間冷暖房負荷計算を行った。外ブラインドについては、菊池ら¹⁻¹⁵⁾が、Radiance を利用し、外ブラインドの透過日射量と透過率を算出し、一様天空モデルと輝度分布モデルの比較評価を行った。

しかしながら、外ブラインドを含む屋外日照・日射制御装置のある室内空間における昼光利用の効果について、照明電力使用量、熱負荷、空調電力使用量を総合的に評価した報告はまだない。

1.2.2 屋内外日照・日射制御技術の照明熱取得計算

従来 NewHASP や HASP/ACLD/8501¹⁻¹⁶⁾における屋外日照・日射制御装置は、外壁面に取り付けられた、基本的な形状(上庇、袖庇、ボックス型庇)に限定されている。形状のイメージを図 1-1 に示す。

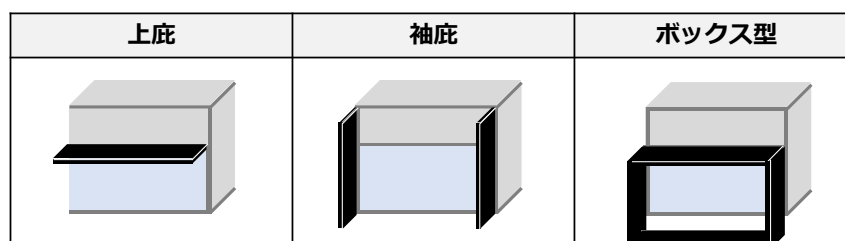


図 1-1 従来 NewHASP で計算可能な屋外日照・日射制御装置

昼光利用については、床平面や窓の形状を同面積の長方形に置き換えて簡易に昼光照度を算出しており、昼光利用時の人工照明調光率は、目標照度の 1/2 以上の範囲で消灯し、その他は全点灯と制御を単純化している。HASP-L¹⁻¹⁷⁾では、窓の形状や、昼光利用時における消灯の列数・調光率パターンが HASP/ACLD/8501 に比べて改善されているが、複雑な屋外日照・日射制御装置のある窓面からの昼光照度計算や、連続的な調光制御には対応していない。

既往のエネルギー計算プログラムである建築物総合エネルギーシミュレーションツール BEST¹⁻¹⁸⁾は、各種気象データを利用し、多様な窓種類とブラインド操作に対応可能なエネルギー計算プログラムであるが、屋外日照・日射制御装置については、外壁面に取り付けられた基本的な形状（上庇、袖庇、ボックス型庇）に限定される。昼光利用については、照明電力使用量の計算は内ブラインドの保護角制御に対応しているが、空調電力使用量の計算では内ブラインドのスラット角度を 45 度固定としている。

しかしながら、屋外日照・日射制御装置と屋内日照・日射制御装置を併せ持つ空間におけるエネルギー性能を、グレア・眺望性の視環境評価との多目的最適化に応用した事例についての報告はまだない。

1.2.3 シミュレーション連携と最適化計算

Lee ら¹⁻¹⁹⁾は、EnergyPlus と連携するために、Radiance を利用して直射日光による窓面入射日射量を求めた。EnergyPlus¹⁻²⁰⁾は、国立再生エネルギー研究所（米エネルギー省）が開発した、フリーでオープンソースな熱負荷・エネルギー使用量シミュレーションプログラムである。EnergyPlus も、従来 NewHASP 同様、熱負荷計算プログラムのテストプロトコルである BESTEST¹⁻⁹⁾によって検証されたプログラムである¹⁻²¹⁾。

Manzan¹⁻²²⁾らは、水平庇の設置高さ、庇の長さ、角度、窓方の離れを変数として、空調・照明エネルギー使用量を最小とする単目的最適化計算を行い、Radiance で求めた昼光率を利用した。Atzeri¹⁻²³⁾らは、ロールスクリーンと様々なガラスを組み合わせ、EnergyPlus を利用して PMV (Predicted Mean Vote), DGI (Daylight Glare Index), 空調・照明エネルギー量を計算した。今田ら¹⁻²⁴⁾は、DIVA (RhinoCeros の日照シミュレーション用プラグイン) による年間昼光シミュレーションを利用して、トップライトに設置する採光ルーバーの形

状を変数とし、DA (Daylight Autonomy)・空調エネルギー消費・材料費を目的関数とする最適化計算を、グラフィカルアルゴリズムエディタ Grasshopper¹⁻²⁵⁾と、Grasshopper の多目的遺伝的アルゴリズムを扱うプラグインソフトである OCTOPUS¹⁻²⁶⁾を使用して行った。和田ら¹⁻²⁷⁾は、夏季の直射日光と天空光を効果的に制御するルーバーを検討するために、ルーバーのスラット形状を均等に分割した位置の奥行きの変数とし、天空率と直射光遮蔽率を目的関数とする最適化計算を、多目的最適化アルゴリズム (MOGA) を使用して行った。大木¹⁻²⁸⁾、佐藤ら¹⁻²⁹⁾は、西面ファサードの縦ルーバーを対象に、縦ルーバーの枚数・奥行・角度を変数とし、窓面日射量・インテリアの昼光照度・眺望性・材料費を目的関数とした多目的最適化計算を、遺伝的アルゴリズム (NSGA-II) によって行った。そして、原田ら¹⁻³⁰⁾は、学校教室における昼光利用型ファサードの検討のために、ライトシェルフの断面形状と室内ルーバー形状を変数とし、空調・照明エネルギー使用量・代表時刻のグレアを目的関数とした最適化計算を、アルゴリズムエディタ Grasshopper と単目的最適化プラグインソフト Galapagos を使用して行った。

しかしながら、屋外日照・日射制御装置と屋内日照・日射制御装置を併せ持つ空間におけるエネルギー性能を、グレア・眺望性の視環境評価との多目的最適化に応用した事例についての報告はまだない。

1.3 本研究の目的

ZEB を目指す場合、エネルギー使用量を基準ビルの半分に削減するために、徹底した省エネルギー建物の計画が求められる。「ZEB 設計ガイドライン (ZEB Ready 中規模事務所編)」¹⁻³¹⁾では、一般的な事務所ビルにおける一次エネルギー使用量 (PC や OA 機器等を除く) のうち、空調に起因するものが $800\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{年}$ (全体の約 60%)、照明に起因するものが $400\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{年}$ (全体の約 30%) を占めるとし、ZEB 実現に向けた仕様では、空調は基準ビルに比べて 45~50%減、照明は 50~80%減と提案している。しかしながら、従来の手法による熱負荷計算では、日照・日射制御装置の詳細な熱負荷を求めることができないため、算出された熱負荷に安全率を見込み、過大な空調機器の容量を選定することが多々ある。ZEB などの徹底した省エネルギーのためには、詳細なエネルギーシミュレーションが必要であり、多様な日照・日射制御技術や照明制御の影響を正確に計算することが重要である。

また、居住者の健康・快適性の Wellness 向上が社会的に求められ、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・日射制御装置による建物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。

従来 NewHASP や EnergyPlus では、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計算している。本研究では、直達成分と拡散成分

にそれぞれ Radiance を連携させて熱負荷計算に取り込み、熱負荷とエネルギー使用量を求め、光と熱の詳細連携計算に基づく日照・日射制御技術による建物のエネルギー性能を評価することを目的とした。

光と熱の詳細連携計算では、従来 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」¹⁻³²⁾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によるデータ入れ替えイメージを図 1-2 に示す。

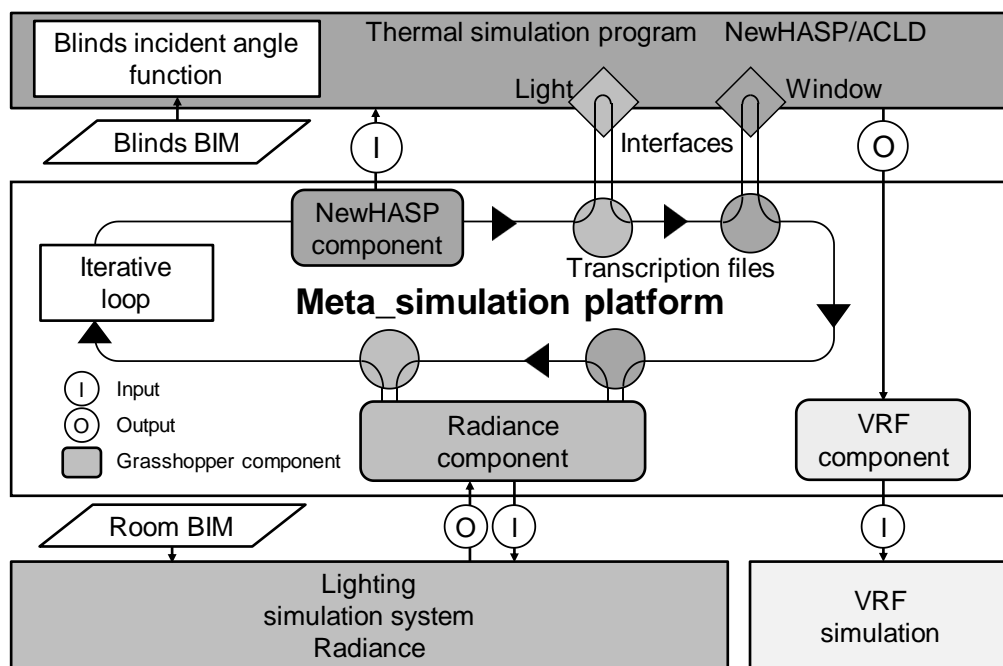


図 1-2 メタシミュレーション

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（図 1-2 Transcription files（転写ファイル）：詳細は第 2 章にて説明）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。

BIM による 3 次元モデルを用いて、Radiance を利用して算出した屋外日照・日射制御装置と屋内日照・日射制御装置（ベネシャンブラインド（以下、ブラインド））の複合日射特性および、昼光利用時の照明制御特性を、NewHASP に取り込み、年間時刻別熱負荷を求めた。次に、この熱負荷を用いたビル用マルチシステムを想定した空調エネルギー使用量と、Radiance によって求めた昼光利用による照明制御時の照明エネルギー使用量を合算して、

空調・照明エネルギー使用量を求めた。これらの一連の複合シミュレーションにより、様々な形状の屋内外日照・日射制御装置を併せ持つ空間のエネルギー性能を検証した。

屋外日照・日射制御装置計算は、ガラスの入射角特性を加味するため、Radiance による照度を直達成分と拡散成分に分けて算出した。また、屋内日照・日射制御装置の光学特性は、プロファイル角ごとのブラインド面の透過光・反射光による照度によって求めたブラインド光学特性関数を NewHASP に取り込んで反映した。屋内外日照・日射制御装置計算の分割イメージを図 1-3 に示す。

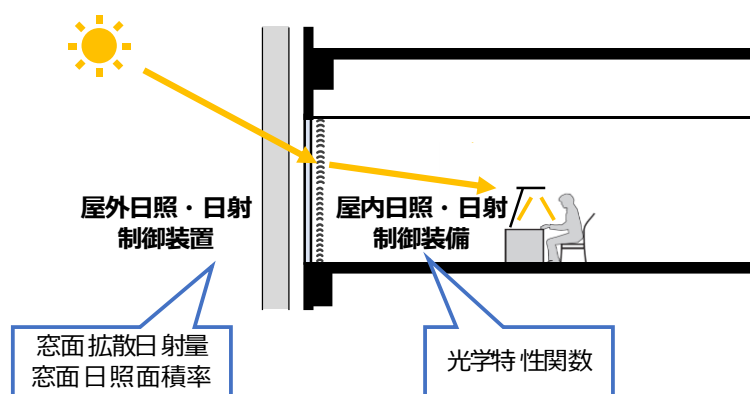


図 1-3 屋内外日照・日射制御装置計算分割イメージ

そして、本研究による計算法の室温と既存シミュレーションの室温、さらに断熱箱を利用した実験による実測室温の比較を行い、本研究による計算法の妥当性を検証した。既存シミュレーションは、従来 NewHASP と EnergyPlus を対象とした。既存シミュレーションと本研究による計算法の屋内外日照・日射制御装置の違いを表 1-1 に示す。

表 1-1 各計算法における屋内外日照・日射制御装置

	屋内日照・日射制御装置	屋外日照・日射制御装置
従来 NewHASP	ブラインド 45° 固定	上庇・下庇・ボックス
EnergyPlus	自由角度の平板スラット	自由形状 (簡易な光線追跡法)
本研究の計算法	Radiance によるブラインド光学特性関数を使用した自由角度の曲面スラット	自由形状 (Radiance による詳細な光線追跡法)

屋内日照・日射制御装置計算について、Radiance によるブラインド光学特性関数を作成して窓面日射熱取得を計算し、熱負荷計算に組み込んだ事例は、LESCOM¹⁻¹⁴⁾にて確認されている。屋外日照・日射制御装置計算について、Lee らにより、EnergyPlus と連携するために、Radiance を利用して直射日光による窓面入射日射量を求めた事例も確認されている。

1-19)。また、照明熱取得計算について、Radiance と連携して昼光利用によって得られる昼光照度を求めて、熱負荷・エネルギー計算に組み込んだ事例は、EnergyPlus¹⁻³³⁾や BEST¹⁻¹⁸⁾にて確認されている。

本研究では、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とエネルギー使用量を求めた点と、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空間の空調・照明エネルギー使用量を評価した点に新規性がある。

一方、実際の設計では、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確立することにより、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 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・日射制御装置である垂直ルーバーと屋内日照・日射制御装置である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た。シミュレーションモデルと、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結果および多目的最適化計算結果について報告する。

1.4 論文の構成

本論文は、図 1-4 に示す 6 章で構成される。

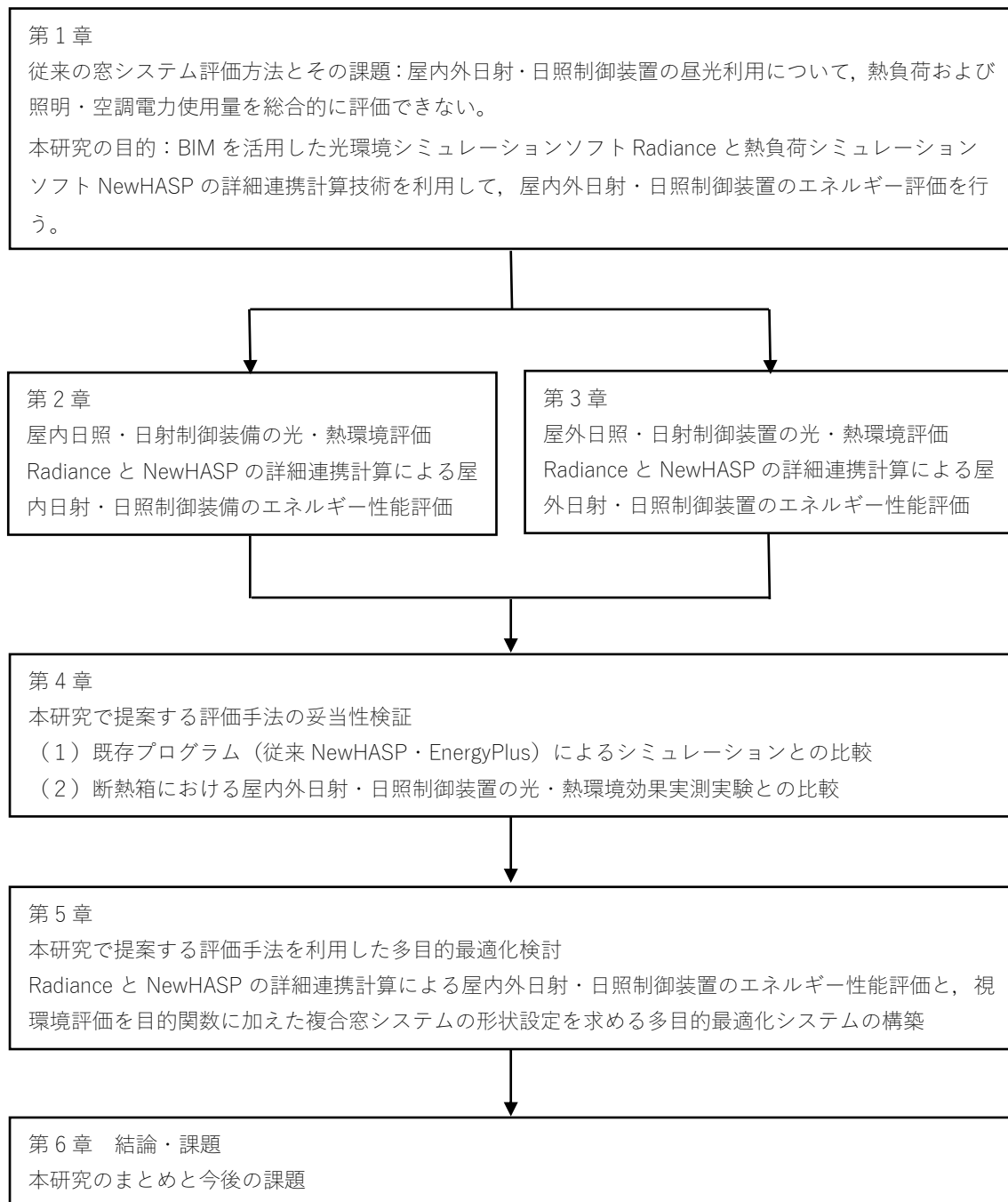


図 1-4 論文の流れ

第1章（本章）は、序論である。はじめに、建築物において昼光利用に求められている省エネルギー性、建物内で働く人々の健康・快適性に関する社会的動向から本研究の意義を述べる。次に、屋内外日照・日射制御装置の評価に関する既往の研究と既往のプログラムについて論じ、Radiance と NewHASP を連携させて、様々な形状の屋内外日照・日射制御装置による建物のエネルギー性能評価を目指す本研究開発の目的と論文構成を示す。

第2章では、屋内日照・日射制御装置の1例として、ブラインドによる建物の光・熱環境エネルギー性能評価手法を提案する。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。シミュレーションによる、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る。

第3章では、様々な形状の屋外日照・日射制御装置による建物の光・熱環境エネルギー性能評価手法を提案する。Radiance による直達成分と拡散成分を利用して、様々な形状の屋外日照・日射制御装置のある窓からの日射熱取得を求めることが可能なシステムを構築した。シミュレーションによる、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る。

第4章では、第2,3章で構築した評価手法の妥当性を検証した。はじめに本研究による計算法と既存のプログラム（従来 NewHASP, EnergyPlus）による検証を行い、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、評価手法の有効性を論じる。

第5章では、屋内外日照・日射制御装置による建物のエネルギー性能評価手法の応用として、屋内外日照・日射制御装置による建物のエネルギー性能評価と、視環境評価を目的関数とし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る。

第6章は、本研究の結論を述べる。

【第 1 章の参考文献】

- 1-1) 経済産業省資源エネルギー庁, エネルギー基本計画,
http://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/140411.pdf, accessed 2020.5.5
- 1-2) 日本建築学会: 日本建築学会環境規準 AIJES-L0003-2018 昼光照明規準・同解説, 2018
- 1-3) Daylight in buildings; English version EN 17037:2018, English translation of DIN EN 17037:2019-03, 2019.3
- 1-4) WELL Building Standard v2 (2018), <https://www.wellcertified.com/certification/v2/>, accessed 2020.10.30
- 1-5) 須崎岳導, 郡公子, 石野久彌: 高性能窓システムをもつ建築の熱負荷解析第 18 報 熱負荷曲線に基づく年間熱負荷と室内環境評価, 日本建築学会学術講演梗概集, 41506, 2017
- 1-6) Radiance: <https://floyd.lbl.gov/radiance/>, accessed 2020.5.5
- 1-7) Daylighting Simulations with Radiance using Matrix-based Methods: <https://www.radiance-online.org/learning/tutorials/matrix-based-methods>, accessed 2020.5.5
- 1-8) 長井達夫, 相賀洋: NewHASP/ACLD-8 の特徴と利用法, 空気調和・衛生工学会シンポジウム 熱負荷・空調ソフトウェアの現状と将来, 2004
- 1-9) R.Judkoff and J.Neymark: International Energy Agency Building Energy Simulation Test (BESTEST) and Diagnostic Method, 1995
- 1-10) 長井達夫, 相賀洋: NewHASP/ACLD β の特徴と利用法, 空気調和・衛生工学会シンポジウム 熱負荷・空調ソフトウェアの現状と将来 (東京), 2014.3.16,
- 1-11) 郡公子, 石野久彌: 一般窓の日射遮蔽性能変動の実用的推定法 熱負荷計算のための窓性能値に関する研究 第 2 報, 日本建築学会環境系論文集, 第 77 巻, 第 672 号, pp89-93, 2012.2
- 1-12) 吉澤望, 武田仁, 近藤純一: 日射遮蔽物の入射角特性を考慮した熱負荷計算 内付けブラインドの光学特性計算への Radiance の適用, 日本建築学会環境系論文集, 第 74 巻, 第 640 号, pp675-683, 2009.1
- 1-13) 武田仁, 鈴木宏和, 早川眞: 開口部の日射遮蔽物による熱特性 ベネシャンブラインドの光学特性および中空層の熱特性の検証, 日本建築学会環境系論文集, 第 79 巻, 第 706 号, pp1037-1047, 2014.1
- 1-14) 武田仁, 稲沼實, 吉澤望, 磯崎恭一郎: 標準気象データと熱負荷計算プログラム LESCO, 井上書院, 2005
- 1-15) 菊池卓郎, 井川憲男: 天空放射輝度分布を用いた日射遮蔽体の透過特性の評価に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 第 74 巻, 第 635 号, pp17-24, 2009.1
- 1-16) 松尾陽: HASP/ACLD/8501 解説, 日本建築設備士協会, 1985
- 1-17) 日本板硝子協会: HASP-L 利用者マニュアル, 日本建築設備士協会, 1985
- 1-18) Kobayashi, K., Inoue, T., Takase, K, Yoshizawa, N., Miki, Y.: Comparison of Calculated Results using BEST and Radiance and Study on Lighting, Cooling and Heating Energy Consumption considering Daylighting, Technical Papers of Annual Meeting, Vol.10, E-67, 2015

- 1-19) Lee, E.S., Geisler-Moroder, D. and Ward G. : Modeling the direct sun component in buildings using matrix algebraic approaches: Methods and validation, Solar Enregy, Vol.160, pp.380-395, 2018
- 1-20) EnergyPlus : <https://energyplus.net/>, accessed 2020.8.13
- 1-21) EnergyPlus : <https://energyplus.net/testing>, accessed 2020.12.19
- 1-22) Manzan, M. and Pinto, F. : GENETIC OPTIMIZATION OF EXTERNAL SHADING DEVICES, Proceedings of BS2009, 11th International IBPSA Conference, 2009Glasgow, Scotland, pp.180-187, 2009.7
- 1-23) Atzeri, A., Cappelletti, F. and Gasparella, A. : Internal Versus External Shading Devices Performance in Office Buildings, ScienceDirect, Energy Procedia 45, pp463-472, 2014
- 1-24) 今田茉莉奈, 邵琪, 山田浩嗣, 小林光 : アルゴリズムエディタを用いた年間評価に基づくトッ
ブライトシステムデザインの進化的最適化に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工
学-I, pp. 529-530, 2018.7
- 1-25) Grasshopper algorithmic modeling for Rhino : <https://www.grasshopper3d.com/>, accessed 2020.7.4
- 1-26) OCTOPUS : <https://www.food4rhino.com/app/octopus>, accessed 2020.7.4
- 1-27) 和田基, 中大窪千晶 : 多目的遺伝的アルゴリズムを用いたスラットの形状操作に基づく夏季の
南面設置型ルーバーの最適化, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学-I, pp. 531-532, 2018.7
- 1-28) 大木泰祐, 佐藤大樹, 高取昭浩 : 西面ファサードの縦ルーバーを対象とした形状最適化 その 1
パラメトリックスタディによる日射遮蔽に着目した最適解, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境
工学-I, pp. 1101-1102, 2018.7
- 1-29) 佐藤大樹, 大木泰祐, 高取昭浩 : 西面ファサードの縦ルーバーを対象とした形状最適化 その 2
遺伝的アルゴリズムを用いた多目的最適化, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学-I, pp.
1103-1104, 2018.7
- 1-30) 原田尚侑, 田辺新一 : パラメトリックデザインを用いた学校教室の新しい昼光利用型ファサー
ドの提案, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 第 10 巻, E-66, 2015
- 1-31) ZEB 設計ガイドライン (ZEB Ready 中規模事務所編), 一般社団法人 環境共創イニシアチ
ブ, 2018.4.10 公開
- 1-32) 相賀洋 : NewHASP を核としたメタシミュレーション技術に関する研究 第 1 報 メタシミュレ
ーションモデルの基本設計, 日本建築学会学術講演梗概集, 41010, 2016
- 1-33) 谷口景一郎, 吉澤望, 三木保弘, 堀慶朗, 児島輝樹, 松本駿太, 野崎海地, 細川仁規 : 熱負荷シ
ミュレーション・光環境シミュレーションの連携による窓面の自律的透過光制御の年間熱負荷・照
明エネルギー消費量削減効果の検討 (第 1 報) 熱負荷シミュレーションによるサーモクロミックガ
ラスの光学特性および熱負荷削減効果の算出, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 第 10 巻,
E-66, 2015, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 2020

第2章 屋内日照・日射制御設備の光・熱環境 エネルギー性能評価手法

本章では、屋内日照・日射制御装備の一例として、ブラインドによる建物の光・熱環境エネルギー性能評価手法を提案する。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。シミュレーションによる、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る。

2.1 屋内日照・日射制御装備の日射熱取得・照明熱取得計算法

2.1.1 従来 NewHASP における計算法

(1) 窓面日射熱取得

従来 NewHASP では、標準日射熱取得（普通透明 3 mm ガラス）に遮蔽係数をかけ合わせた式(2.1)により、窓面日射熱取得を求めている。

$$I = \{I_D \sinh^* f_G g(\sinh^*) + I_s \varphi_S g_s + I_D \sinh \rho_G \varphi_G g_s + I_s \rho_G \varphi_G g_s\} \cdot (\eta_R + \eta_C) \quad \cdots (2.1)$$

I	: 窓面日射熱取得	[W/m ²]
I_D	: 法線面直達日射	[W/m ²]
I_s	: 水平面天空日射	[W/m ²]
φ_S	: 窓の天空に対する形態係数	
φ_G	: 窓の地物に対する形態係数	
ρ_G	: 地物反射率	
f_G	: 窓面日照面積率（直射日光が当たる部分の窓面積に対する割合）	
$g(\sinh^*)$: 標準ガラスに対する直達日射の熱取得率入射角特性	
g_s	: 標準ガラスに対する天空日射の熱取得率（=0.808）	
h	: 太陽高度	[°]
h^*	: 窓面から見た太陽高度	[°]
η_R	: 放射遮蔽係数	
η_C	: 対流遮蔽係数	

標準日射熱取得は、第1項が直達日射による日射熱取得の直達成分、第2項が天空日射による日射熱取得の拡散成分、第3項が直達日射の地物反射による日射熱取得の拡散成分、第4項が天空日射の地物反射による日射熱取得の拡散成分を表す。ガラス窓標準日射熱取得が直達成分と拡散成分に分かれているのは、それぞれの成分にガラスの入射角特性を考慮するためである。

太陽高度に対する垂直窓面の各種角度を示すイメージを図 2-1 に示す。

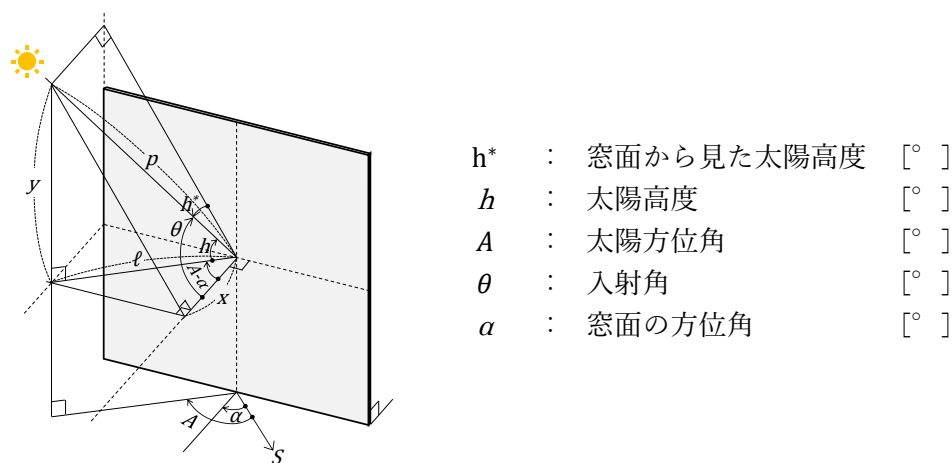


図 2-1 太陽高度に対する垂直窓面の各種角度

また、従来 NewHASP では、ブラインドがある場合の窓面日射熱取得は、ガラスとスラット角 45° 固定のブラインドを合わせた遮蔽係数を用いて求める。遮蔽係数は、入射角 0° の日射が普通透明 3mm ガラス 1m^2 を通して室内に流入する熱取得率に対する、入射角 0° の日射が対象ガラス 1m^2 を通して室内に流入する熱取得の割合である。ブラインドがある場合の遮蔽係数は、入射角 0° の日射がガラスとスラット角 45° 固定のブラインドを通して室内に流入する熱取得を元に求められており、入射角が変化した場合のブラインドの透過特性は、普通透明 3mm ガラスと同じように変化すると想定している。普通透明 3mm ガラスの透過特性を図 2-2 に示す。

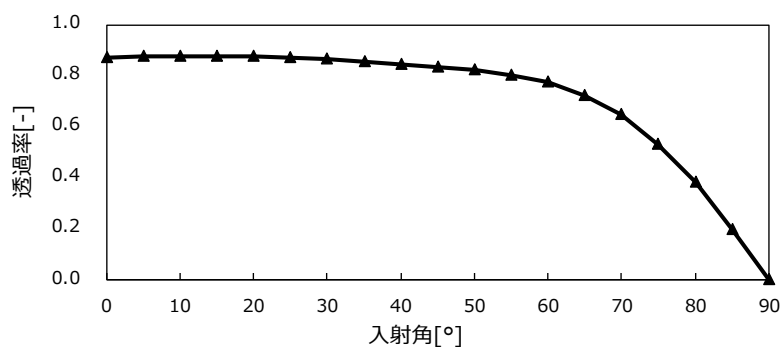


図 2-2 普通透明 3mm ガラス透過特性

また、ブラインドの状態は、室に居住者がいて、かつ限界日射取得量（窓を透過後の日射量）が設定値以下の場合にはブラインド全開（巻き上げ）、それ以外を全閉（スラット角 45° 固定）として、窓面日射熱取得を求めている。

(2) 照明熱取得

昼光利用時の従来 NewHASP の昼光照度¹⁾は、床平面や窓の形状を同面積の長方形に簡易化して置き換えて算出している (図 2-3)。

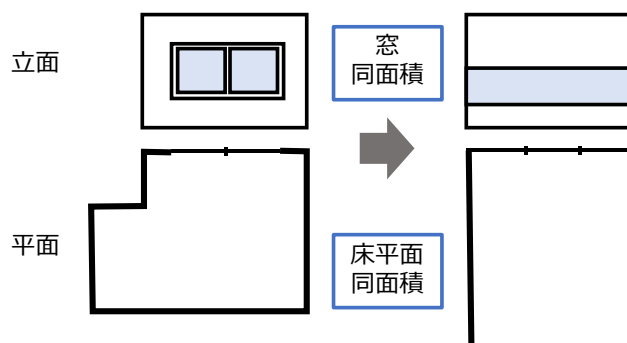


図 2-3 床平面・窓形状の簡易化

昼光利用時の昼光照度は、日射熱取得計算で用いられる透過日射量に係数を乗じた窓を通過した直後の光束密度から、作業面切断公式による間接照度と直射照度を合計して算出している。また、昼光利用を利用した照明制御は、昼光による照度が設定照度の 1/2 以上の範囲を消灯する設定になっている (図 2-4)。

(HASP-L プログラム¹⁻¹⁷⁾ではより詳細に照明消費電力を求めることが可能)

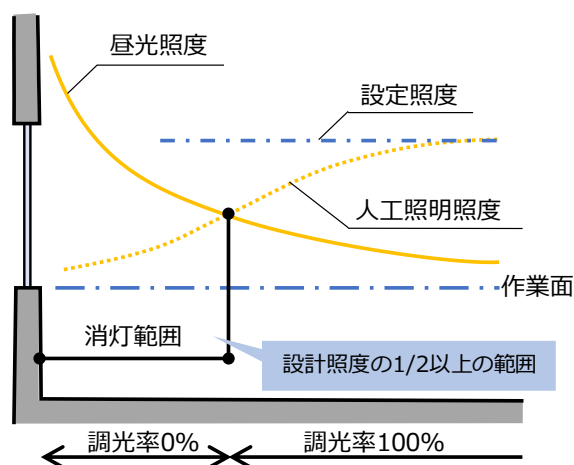


図 2-4 昼光利用時の人工照明消灯範囲

2.1.2 本研究で提案する計算法

(1) 窓面日射熱取得

本研究では、ブラインドの透過率特性、反射率特性を組み込んだブラインド光学特性モデルを求め、ブラインドスラット角の入射角特性を考慮できるようにした。Radiance のコマンドでブラインドを作成し、ブラインド単体モデルのスラット角度とプロファイル

角度を変化させた時の反射率および透過率の関数を作成して NewHASP に組み込み、窓面日射熱取得を求めた。

図 2-5 に示すブラインドにプロファイル角 0° ～ 85° まで 5° 間隔に直射日光を入射させ、スラット角を -75° , -45° , 0° , 45° , 75° に変化した場合の、各放射束算出面の放射束を Radiance により求め、ブラインド単体の透過率 τ , 反射率 ρ を求めた。各スラット角におけるプロファイル角 ϕ と透過率・反射率の関係を $\cos \phi$ の 5 次式で近似し、その近似式係数をスラット角 θ の近似式で示すことにより、透過率の関数 $\tau(\phi, \theta)$ と反射率の関数 $\rho(\phi, \theta)$ を求めた。これらの関数で作成した透過率特性、反射率特性を図 2-6, 図 2-7 に示す。

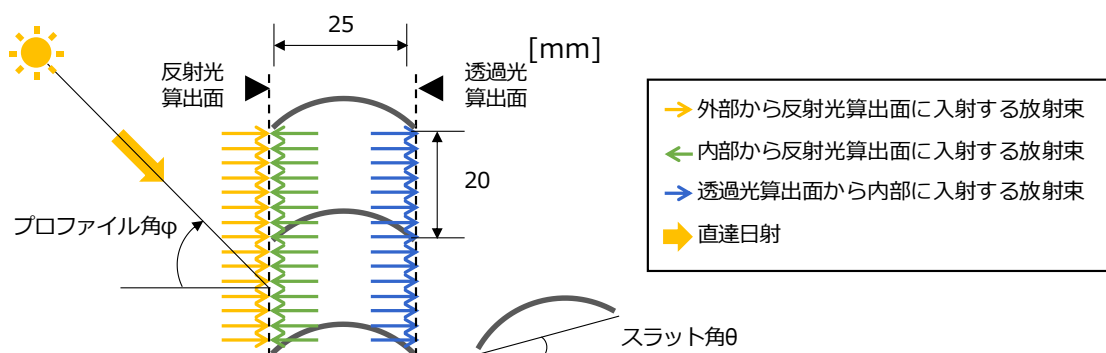


図 2-5 ブラインド光学特性モデル算出イメージ

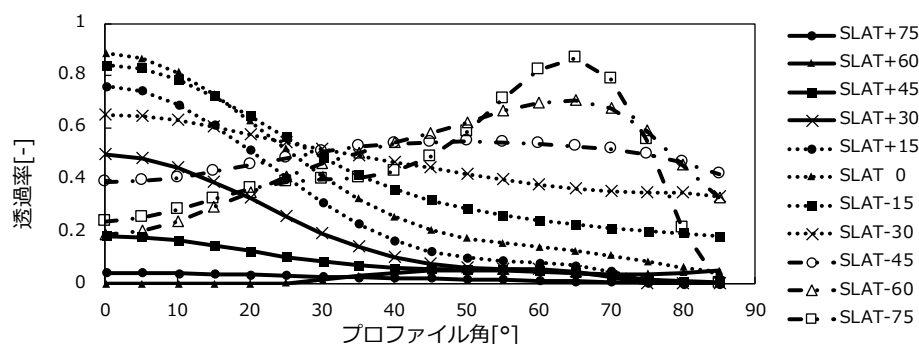


図 2-6 透過率特性

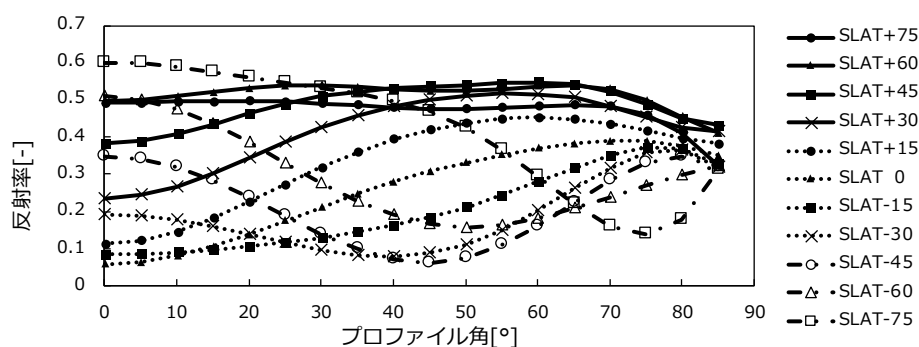


図 2-7 反射率特性

本研究で提案する計算法では、時刻ごとのプロファイル角に基づき、ガラスとブラインドのそれぞれの時刻ごとの透過率・反射率を取得し、式(2.2)～(2.7)から、時刻ごとの複合日射熱取得係数を求める。この計算に、ブラインド光学特性関数を使用する。

$$\tau_x = \frac{\tau_1 \tau_2}{1 - \rho_1 \cdot \rho_2} \quad \cdots (2.2)$$

$$a_{c1} = a_1 \left(1 + \frac{\tau_1 \rho_1}{1 - \rho_1 \rho_2} \right) \quad \cdots (2.3)$$

$$a_{c2} = \frac{\tau_1 a_2}{1 - \rho_1 \rho_2} \quad \cdots (2.4)$$

$$N_1 = \frac{R_o}{R_o + R_a + R_i} \quad \cdots (2.5)$$

$$N_2 = \frac{R_o + R_a}{R_o + R_a + R_i} \quad \cdots (2.6)$$

$$SHGC_r = \tau_c + \frac{\alpha_r (N_1 a_{c1} + N_2 a_{c2})}{\alpha_c + \alpha_r} \quad \cdots (2.7)$$

$$SHGC_c = \frac{\alpha_c (N_1 a_{c1} + N_2 a_{c2})}{\alpha_c + \alpha_r}$$

τ	: 透過率	
ρ	: 反射率	
a	: 吸収率	
α	: 熱伝達率	[W/°C・m²]
N	: 吸収成分のうち熱取得になる割合	[m²/°C・W]
R	: 熱抵抗	[m²・°C/W]
$SHGC_r$: 複合日射熱取得率（放射）	
$SHGC_c$: 複合日射熱取得率（対流）	
α_r	: 放射伝達（=4）	
α_c	: 対流伝達（=6）	
添え字		
$x, 1, 2$: ガラス+ブラインド, ガラス, ブラインド	
o, a, i, c, r	: 室外側, 空気層, 室内側, 対流, 放射	

窓面日射熱取得は、式(2-7)の複合日射熱取得率を、普通透明 3mm ガラスの法線入射熱取得率 0.889 で除したものを遮蔽係数として、式(2-1)により求めた。

（2）照明熱取得

本研究では、Radiance を用いて対象照明の時刻別調光率を求めた。

BIM で作成した 3 次元モデルによる任意の窓形状から入る屋光を基に、調光グループ毎のセンサで検知している照度を求めて、調光グループ毎に調光率を変化させた計算をしているため、実際の制御に近い連続した調光率とその照明消費電力を求めることができる。年間調光率および照明消費電力は、図 2-8 に示すフローで算出した²⁻¹⁾。なお、今

高照度センサは天井面に設置し、図2-9に示す底部を開放した円錐状の形状(反射率0%)を照度センサ位置に設置して、実際の検知エリア(64°)で検知する照度を正確に再現した。

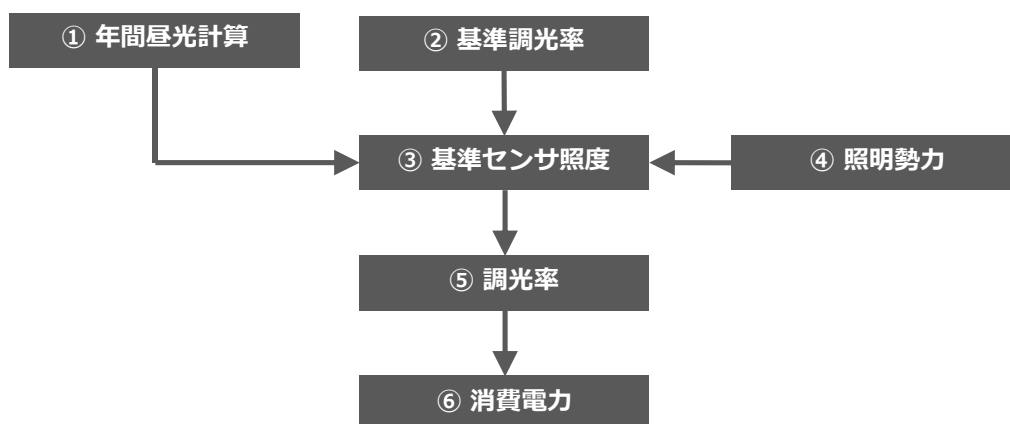


図 2-8 調光率・照明消費電力算出フロー

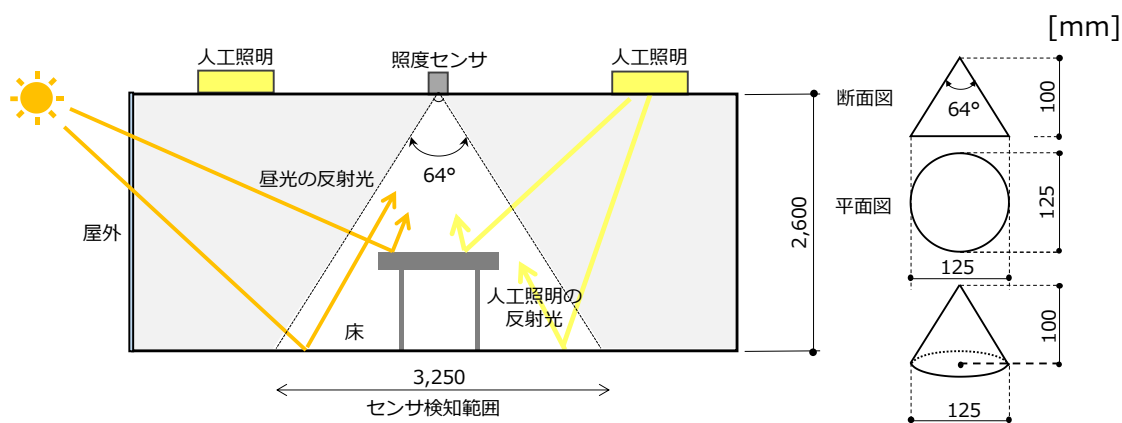


図 2-9 センサ形状と検知範囲

以下に具体的な内容を示す。

① 年間昼光計算

人工照明を設置せず、窓面から入る昼光による照度センサ位置の照度を時刻ごとに年間を通して計算する。

② 基準調光率の算出

昼光を導入せず、人工照明のみの状態で、調光率を10%ごとに变化させた100mm間隔の机上面照度を算出し、調光比照度の回帰直線式を用いて設定照度となる基準調光率を算出する。（これは夜間の調光率に相当する。）

③ 基準センサ照度の算出

基準調光率で点灯した時の各照度センサの照度（基準センサ照度）を計測し、これを目標照度とする。

④ 照明勢力の計測

1つの調光エリアを100%，その他を0%とした時の各エリアセンサの照度から，調光エリアごとの相互影響（照明勢力）を求める。

⑤ 調光率の算出

調光グループごとの調光率を変数とした連立方程式(2.8)を解き，机上面が目標照度になるための調光率を求める。

$$E_{(i)} = E_{0(i)} + \sum_j^N (a_j E_{(i,j)}) \quad \cdots (2.8)$$

i	: センサのある点	
j	: 調光エリア名	
$E_{(i)}$: 点 i における基準センサ照度	[lx]
$E_{0(i)}$: 点 i における昼光センサ照度	[lx]
a_j	: エリア j の調光率	
$E_{(i,j)}$: エリア j の照明による点 i における照度(照明勢力)	[lx]

2.2 熱負荷・電力使用量計算法

NewHASP による熱負荷計算フロー²⁻²⁾を図 2-10 に示す。

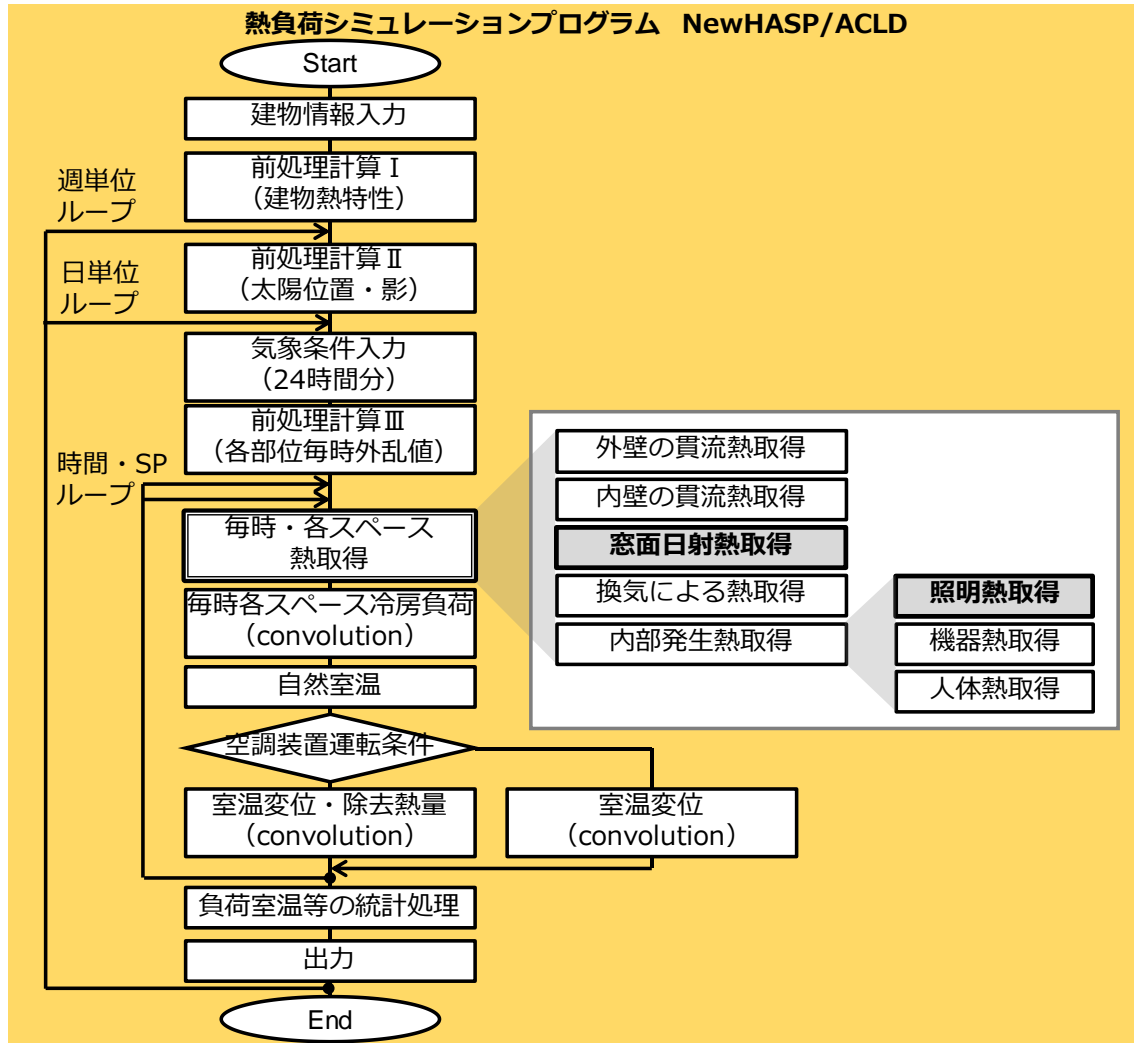


図 2-10 NewHASP 熱負荷計算フロー

毎時・各スペース熱取得は、外壁の貫流熱取得、内壁の貫流熱取得、窓面日射熱取得、換気による熱取得、内部発生熱取得の 5 つから求まり、さらに内部発生熱取得は、照明熱取得、機器熱取得、人体熱取得の 3 つから求まる。以降の NewHASP フローでは、日照・日射制御技術の影響を受けて置換する窓面日射熱取得と照明熱取得のみを取り上げる。

本研究で構築した屋内日照・日射制御装備がある場合の熱負荷・電力使用量計算法^{2-3), 4), 5)}について、NewHASP フローと Radiance による光環境シミュレーションの関係を図 2-11 に示す。

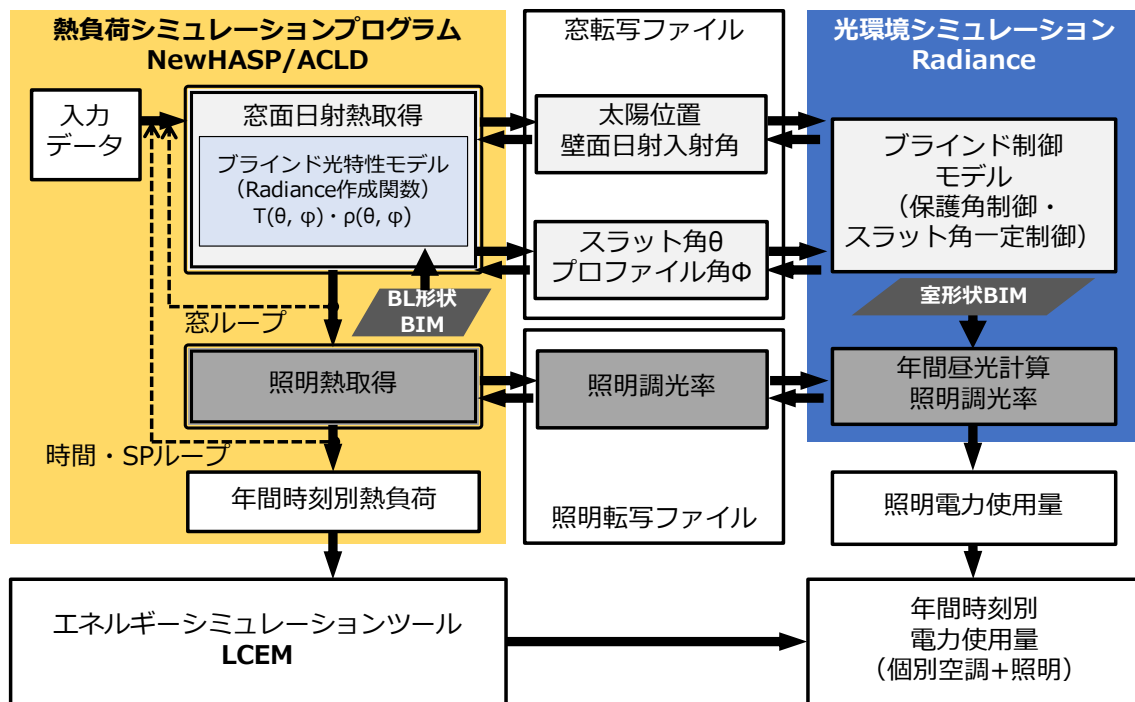


図 2-11 熱負荷・電力使用量計算法（屋内日照・日射制御技術）

本研究による熱負荷・電力使用量計算では、詳細シミュレーションモデルへ情報をダウンロードするための1回目のNewHASP計算を行い、Radianceによる詳細シミュレーションの結果をアップロードするための転写ファイルを作成する。転写ファイルには、窓情報を入力する窓転写ファイルと、照明情報を入力する照明転写ファイルの2種類がある。この転写ファイルの情報を取り込み、2回目のNewHASP計算を行うことで、Radianceによる詳細シミュレーションの結果を取り込んだ熱負荷を計算することができる。NewHASPの入力データは1回目、2回目とも同じデータを用いる。

NewHASPへの入力データイメージを図2-12に示す。

(1) 熱面日射熱取得

NewHASPの窓入力データの窓コードに、たとえば予約語「TRA3」を与え、昼光利用ブラインド制御対象窓（以降対象窓と呼ぶ）を定義する。対象窓は任意のスペース、方位に複数定義できる。

(2) 照明熱取得

人工照明入力データの室内設定照度値に、たとえば予約値「999999」を与え、昼光利用人工照明（以降対象照明と呼ぶ）を定義する。なお対象照明の制御区域ごとにNewHASP熱負荷計算スペースを定義する。

W N D W	TRA3		%	%	0	#	0	%	4.0	#		#
窓種グループ	EXPS名	品種番号	ブラインド	窓通気量 [m ³ /m ² h]	窓排気率 [%]	昼光利用時 窓台高さ[m]	昼光利用時 壁面高さ[m]					

L I G H T	\$		%	1	#	2.0	%	1		9999999	
DSCH名	器具形式	電気容量	単位	昼光利用時 室内設計照度[lx]							

図 2-12 NewHASP 入力イメージ

- 1 回目計算

- (1) 窓面日射熱取得

対象窓の熱取得を計算するプログラム箇所を通過するごとに、詳細シミュレーション側の熱取得計算に必要な毎時刻データを窓転写ファイルに書き出す。日時、スペース名、方位、太陽位置、壁面入射角等のデータを出力しながら年間熱負荷計算を行う。

- (2) 照明熱取得

対象照明の調光率（点灯率）を用いて照明発熱を計算するプログラム箇所を通過するごとに、日時、スペース名、置換前 NewHASP 入力データ由来の調光率（点灯率）を照明転写ファイル（図 2-13 参照）に書き出す。

- 2 回目計算

- (1) 窓面日射熱取得

以下の手順で窓面日射熱取得を求める。

- ① 対象窓の熱取得を計算するプログラム箇所を通過するごとに窓転写ファイルからブラインド制御詳細シミュレーション結果であるスラット角とプロファイル角を順次読み出す。
- ② NewHASP の内部関数として、ブラインド光学特性関数を用意しておく。
- ③ スラット角とプロファイル角を与え、この関数によりブラインド単体の透過率、反射率を求めた後、ガラスとブラインドの総合透過率、総合反射率を求め、直達日射成分の対流および放射熱取得を求める。
- ④ ガラス単体の透過率、反射率、吸収率は、NewHASP 入力データで指定されたガラスのガラス単体ブラインドなしの対流および放射遮蔽係数から法線入射時の透過率、反射率、吸収率を求め、ガラスの入射角特性近似式により入射角による補正を行って求める。
- ⑤ 拡散日射成分の熱取得は、ブラインド光学特性関数を入射角について積分して求める。

- (2) 照明熱取得

対象照明の照明熱取得を計算するプログラム箇所を通過するごとに、照明転写ファイル

ルから調光率（点灯率）を読み出して置換し，熱取得を求める（図 2-13 参照）。

1 回目計算

	A	B	C	D	E	F	G	
1	年	月	日	時	SP	置換前点灯	置換後点灯率	
2	-	-	-	-				
2283	0	1	3	1	G1	0	0	
2284	0	1	3	2	G1	0	0	
2285	0	1	3	3	G1	0	0	
2286	0	1	3	4	G1	0	0	
2287	0	1	3	5	G1	0	0	
2288	0	1	3	6	G1	0	0	
2289	0	1	3	7	G1	0	0	
2290	0	1	3	8	G1	1	0	
2291	0	1	3	9	G1	1	0	
2292	0	1	3	10	G1	1	0	
2293	0	1	3	11	G1	1	0	
2294	0	1	3	12	G1	1	0	

NewHASPで算出した
昼光利用時の調光率

2 回目計算

	A	B	C	D	E	F	G	
1	年	月	日	時	SP	置換前点灯	置換後点灯率	
2	-	-	-	-				
2283	0	1	3	1	G1	0	0	
2284	0	1	3	2	G1	0	0	
2285	0	1	3	3	G1	0	0	
2286	0	1	3	4	G1	0	0	
2287	0	1	3	5	G1	0	0	
2288	0	1	3	6	G1	0	0	
2289	0	1	3	7	G1	0	0	
2290	0	1	3	8	G1	1	0.553	
2291	0	1	3	9	G1	1	0.513	
2292	0	1	3	10	G1	1	0.497	
2293	0	1	3	11	G1	1	0.471	
2294	0	1	3	12	G1	1	0.413	

Radianceで算出した
昼光利用時の調光率

図 2-13 照明転写ファイル

さらに，NewHASP で算出した熱負荷を，図 2-14 に示す LCEM ツール²⁻⁶⁾（Life Cycle Energy Management tool：国土交通省開発のエネルギーマネジメントツール）の個別分散空調システムモデルに取り込み，空調電力使用量を求める。Radiance で求めた昼光利用時の調光率による照明電力使用量を合わせて，年間時刻別電力使用量とし，エネルギー性能を評価する。

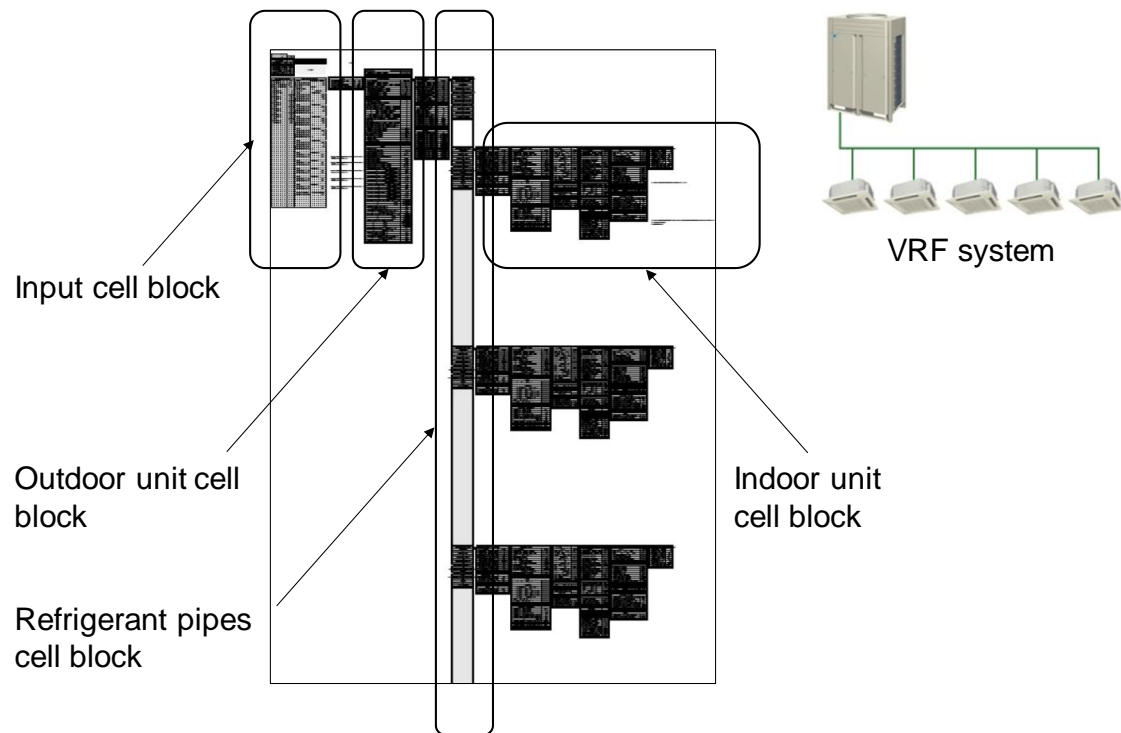


図 2-14 LCEM 個別分散空調システムの構成シートイメージ

2.3 熱負荷・エネルギーシミュレーションによる検証

2.3.1 屋内日照・日射制御装備形状

シミュレーションに利用する屋内日照・日射制御装備モデルを図 2-15 に示す。ブラインド形状は Radiance の genblinds²⁻⁷⁾ コマンドで作成した。

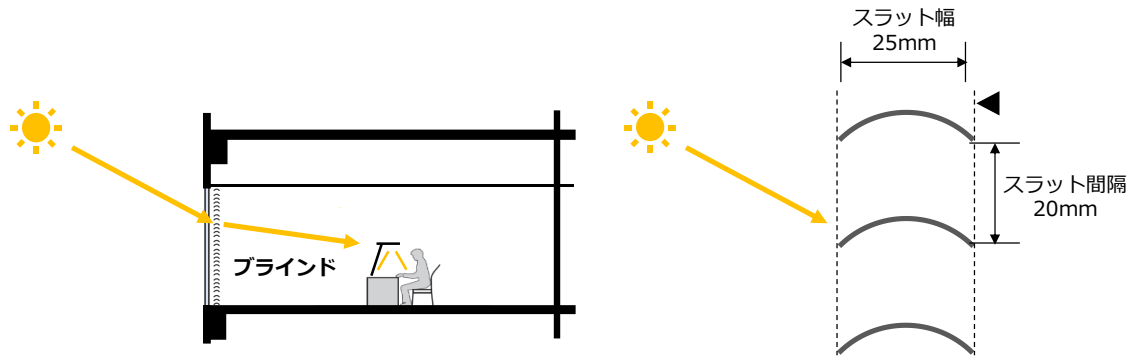


図 2-15 ブラインド形状

2.3.2 建物形状

シミュレーションに利用した建物モデル形状を図 2-16 に示す^{2-3), 4), 5)}。本建物は一般的な側窓採光オフィス（床面積 197 m²）であり、南西・北西面は全面がフルハイトの窓で、角度調節可能な電動ブラインドを設置している。アンビエント照明として、600mm グリッド天井用 LED 照明器具と LED ダウンライトが図 2-16 のように配置されている。照明調光グループは 5 つ (G1~G5) とし、ダウンライトは調光しないものとした。反射率は天井 85.6%、壁 90.2%、床 2.8%、ガラスの透過率は 74.1% とし、スラット幅 25mm、スラット間隔 20mm の白色ブラインドを設置する条件とした。

建物モデルは、設計で使用する建築 BIM (ArchiCAD) を基に、シミュレーション計算時間短縮のため、BIM 上で対象室だけを切り出し、計算に不要な部分を削除し、Radiance 用形状に出力可能な SketchUp 形式または Rhinoceros 形式に変換した。

SketchUp の場合は、取り込んだ 3 次元形状を使って、Radiance で計算できるよう以下の加工を行い、su2rad コマンドで形状データおよびマテリアルデータ (material.rad) を作成する。

- ・対象室切断面から光が入る箇所をふさぐ。
- ・床、壁、窓など反射率や透過率によって色を塗り分ける。

Rhinoceros の場合は、SketchUp と同様の加工の後、3dm→3ds、3ds2mgf、mgf2rad コマンドで、形状データを作成する。

今回は、建築 BIM (ArchiCAD) モデルを SketchUp 形式に変換してシミュレーションを実行した。夏至・晴・12:00・昼光のみのシミュレーションによる輝度画像を図 2-17 に示す。正面が南西面、右手が北西面の窓で、スラット角 45° のブラインドのある窓付近が明るくなっていることが分かる。

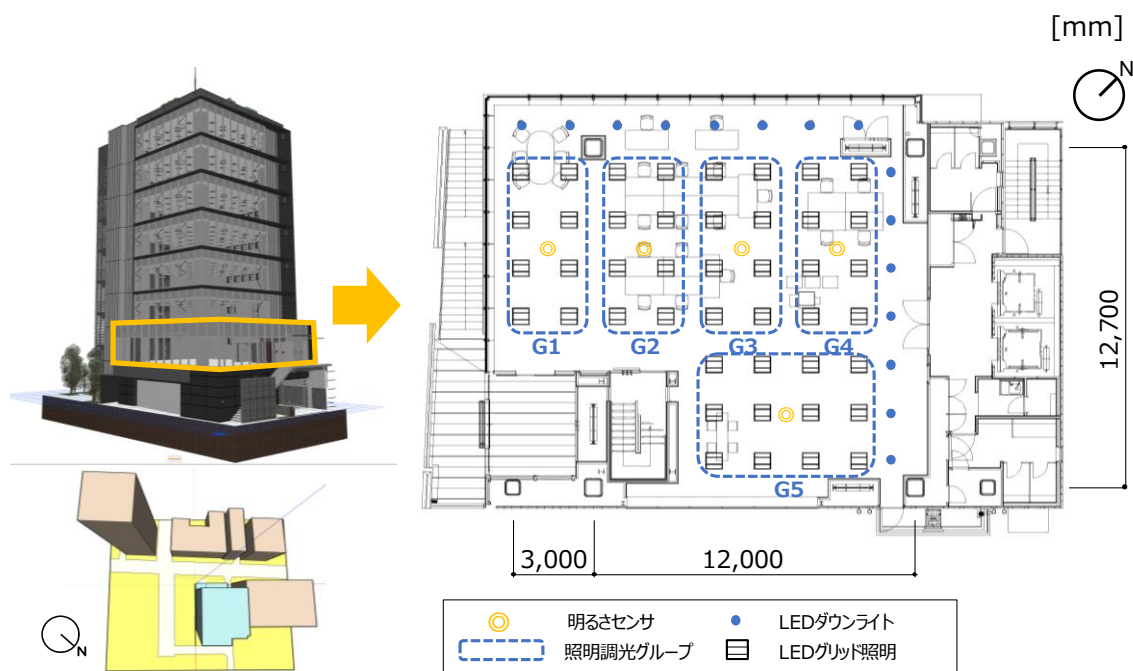


図 2-16 建物形状

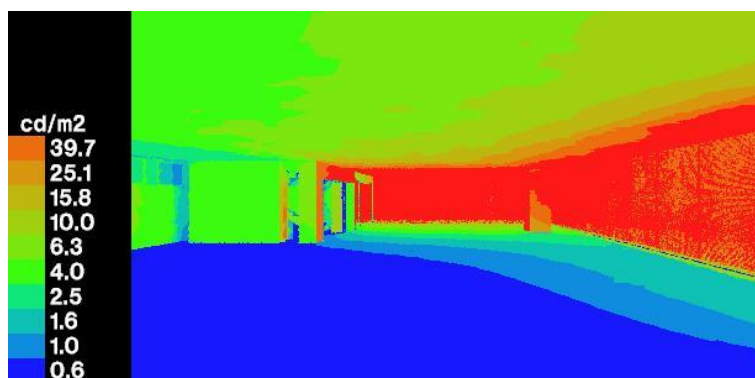


図 2-17 シミュレーション画像（夏至・晴・12:00・昼光のみ）

ブラインド保護角制御時のスラット角度 θ_p は、式(2.9)より求めた。保護角特性を図 2-18 に示す。

$$\theta_p = \arcsin\left(\frac{h}{w} \cos \varphi\right) - \varphi \quad \dots (2.9)$$

h : スラット間隔 [mm]
 w : スラット幅 [mm]
 φ : プロファイル角度 [°]

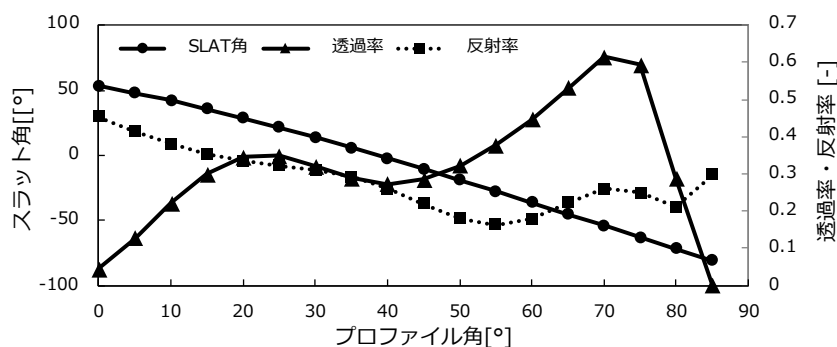


図 2-18 保護角特性

なお、日射がない夜間はスラット角を -90° （逆全閉）とした。

2.3.3 光・熱負荷・エネルギーシミュレーション結果

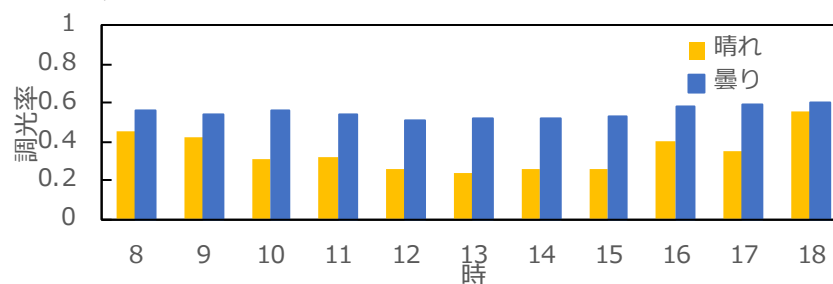
2.3.3.1 本研究による評価法の結果

表 2-1 に示す Radiance の計算条件により, 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, 机上面照度 500lx を目標とした場合の, 図 2-16 に示す G1 ゾーンにおける代表日（夏至）の時刻別調光率の変化と, 南西面における保護角制御時の時刻ごとのスラット角度を図 2-19 に示す。

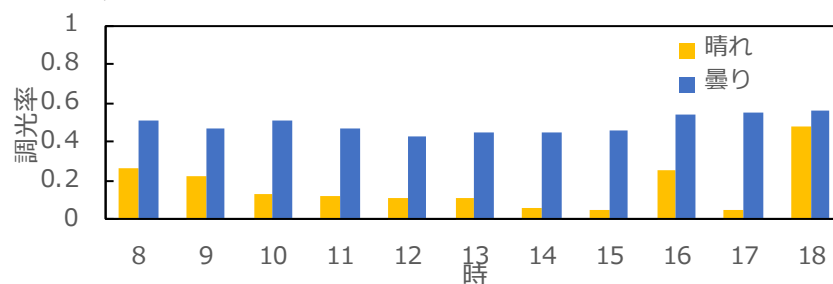
表 2-1 Radiance 光環境シミュレーションパラメータ

Parameter	Name	Value
ab	ambient bounces	6
aa	ambient accuracy	0.15
ar	ambient resolution	128
as	ambient super-samples	256
ad	ambient divisions	512

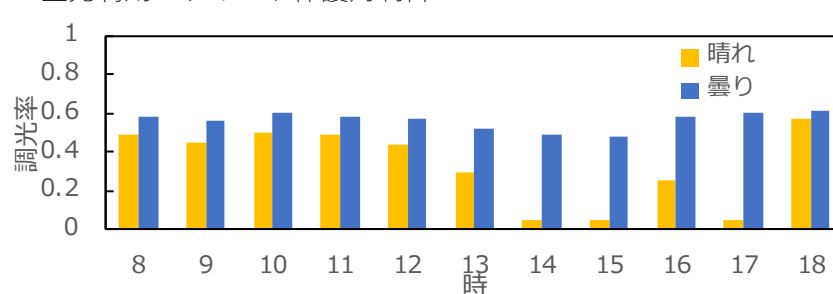
Radiance 昼光利用ブラインドスラット角 45° 一定



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保護角制御



時	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
南西面 保護角[°]	53	53	53	0	0	0	0	0	0	0	17

図 2-19 時刻別調光率 (G1・夏至)

45° 一定は昼光が遮られる割合が多いため調光率が高く、水平一定は調光率が低い。保護角制御は、午前中は 45° よりも深い保護角になることが多いため調光率が高く、午後は保護角が浅くなるため調光率は低くなっている。

次に、月別照明消費電力量を図 2-20 に示す。建物の稼働時間は 8 時～18 時とし、グリッド天井用 LED 照明器具は消費電力 31W/台で 5～100%の範囲で調光、LED ダウンライトは消費電力 16.5W/台で常時 100%点灯するものとした。

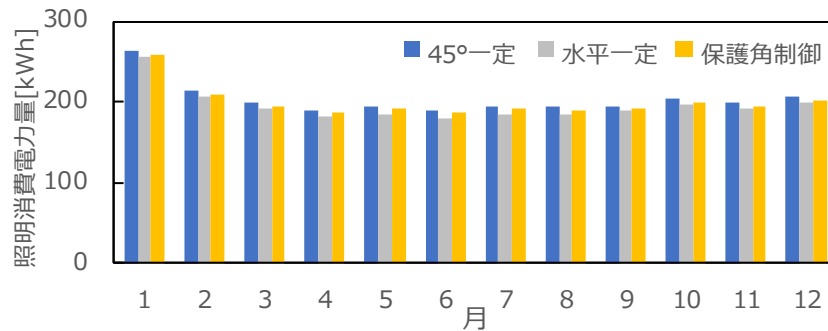


図 2-20 月別照明消費電力量

単位面積当たりの照明消費電力量は、45°一定：4.32Wh/m²、水平一定：4.14Wh/m²、保護角制御：4.24Wh/m²となり、水平一定が最も小さくなった。

そして、Radiance で求めた窓転写ファイルおよび照明転写ファイルの情報を組込んだ熱負荷シミュレーション計算条件を表 2-2、LCEM 個別分散空調システム条件を表 2-3 に示す。また、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 ケースにおける、最大日装置顕熱負荷（冷房最大 8 月 10 日、暖房最大 1 月 23 日）を図 2-21、月別・年間装置顕熱負荷を図 2-22 に示す。

表 2-2 NewHASP 熱負荷シミュレーション条件

室仕様	用途	事務室	階高	3.9 m
	床面積	197 m ²	天井高	2.7 m
主要部材構成	ガラス	Low-eクリア+透明	8+12+8 mm	
	外壁	グラスウール	50 mm	
		石膏ボード	35 mm	
		半密閉空気層	-	
		ガラス	6 mm	
	内壁	石膏ボード	9+12 mm	
		半密閉空気層		
		石膏ボード	9+12 mm	
	屋根	軽量コンクリート	80 mm	
		スチレン発泡板	25 mm	
		アスファルト	10 mm	
		半密閉空気層	-	
		コンクリート	150 mm	
		半密閉空気層	-	
		岩綿吸音板	15 mm	
	床	カーペット	5 mm	
		ケイ酸カルシウム板	25 mm	
		半密閉空気層	-	
		コンクリート	150 mm	
		吹付岩綿	25 mm	
		半密閉空気層	-	
		石膏ボード	12 mm	
		ケイ酸カルシウム板	6 mm	
内部発熱条件	人員密度	0.03 人／m ²	8時-18時	100 %
	照明密度（定格）	12 W／m ²	8時-18時	100 %
	機器密度	15.8 W／m ²	8時-18時	100 %
	内部発熱期待率	照明	人体・機器	
	夏期	100%	75%	
	冬期	100%	75%	
	中間期	100%	75%	
その他条件	室内熱容量	顕熱	40 kJ/(m ² ・K)	
		潜熱	40 kJ/(m ² ・(g/kg(DA)))	
	スペース間移動風量	150 m ³ /h・m		
室内温湿度条件	夏期	26℃/50%		
	冬期	22℃/40%		
	中間期	24℃/50%		
空調条件	空調時間	7時-18時		
		夏期・冬期：予熱1時間、中間期：なし		
	外気導入量	5 m ³ /h・m ²		
	週休	2 日		
隣棟条件	NW 隣棟高さ	21m	隣棟間隔	3.8m
	SW 隣棟高さ	12m	隣棟間隔	14m
気象データ	地点	東京		
	LESCOM気象データをHASP型に変換			

表 2-3 LCEM 個別分散空調システム条件

構築シート	その他システム期間計算_個別分散 (EHP) _Ver310.xls	
室外機 (×1台)	個別分散EHP-XX1-310-S_560 (LCEMのEHP室外機オブジェクトファイル名)	
	定格冷却能力	55.9 kW
	定格加熱能力	62.5 kW
	定格COP (冷却)	3.63 -
	定格COP (加熱)	3.74 -
	定格消費電力 (冷却)	15.4 kW
	定格消費電力 (加熱)	16.7 kW
室内機 (×5台)	コイル能力 冷却	3.6 kW
	コイル能力 加熱	4 kW
	ファン定格風量	600 m ³ /h
	ファン定格消費電力	0.11 kW
外気処理機 (室内機1台換算)	全熱交換器の有無	有
	全熱交換器定格電力消費量	0.2 kW/h
	全熱交換器外気導入量 [m ³ /h]	270 m ³ /h

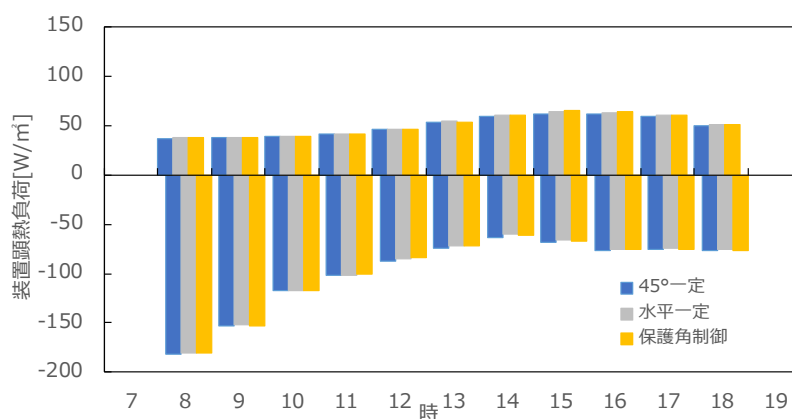


図 2-21 最大日装置顕熱負荷 (冷房最大 8/10, 暖房最大 1/23) (室全体)

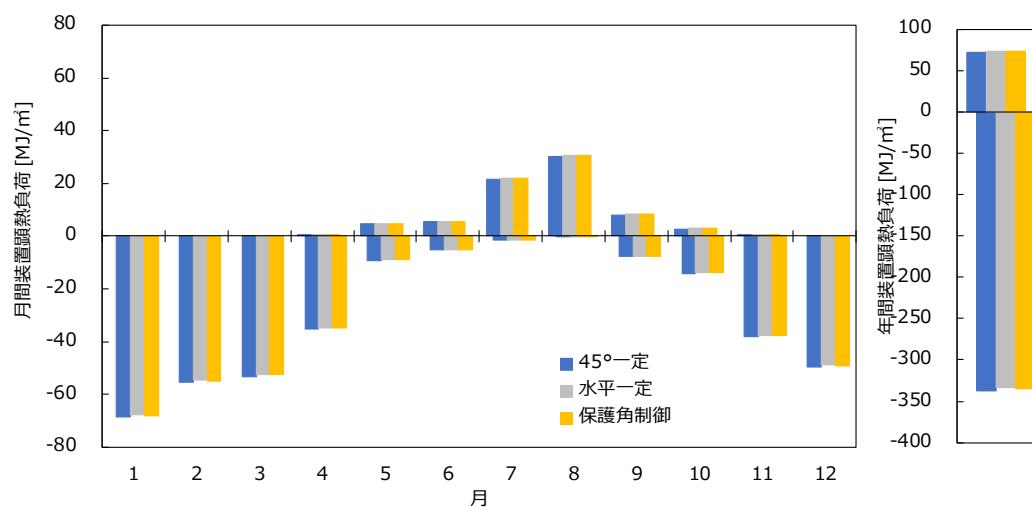


図 2-22 月別・年間装置顕熱負荷 (室全体)

冷房負荷最大日における時刻別冷房負荷の推移は、南西・北西向きの窓の影響を受け、15時～16時頃が最も大きくなっている。暖房負荷最大日における時刻別暖房負荷の推移を見ると、午前中はブラインドによる差が小さいが、日射が入る12時頃からは、45°一定が最も大きく、水平一定、保護角制御は小さい。

年間冷房熱負荷は、日射を遮る割合が多い45°一定が最も小さく、水平一定、保護角制御が同じ程度となった。年間暖房負荷は、冷房負荷と逆に、45°一定が最も大きく、水平一定、保護角制御が同じ程度となった。

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ケースにおける、月別・年間電力使用量を図2-23に示す。

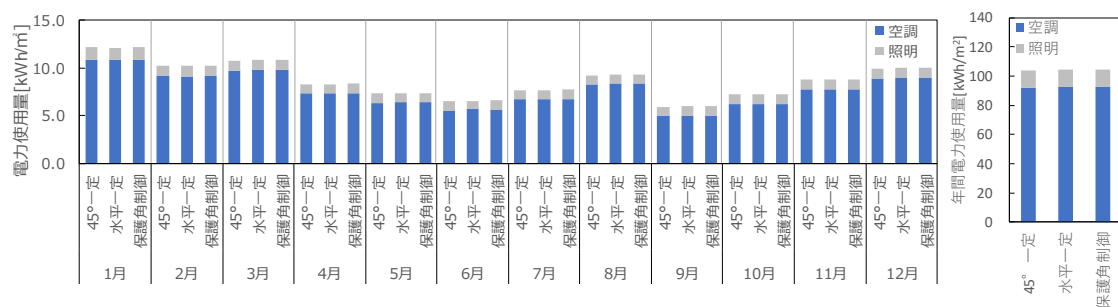


図 2-23 月別・年間電力使用量（室全体）

空調電力使用量は、冬に大きく夏に小さいという傾向が見られ、年間電力使用量では、ブラインド制御による違いは小さいものの、45°一定が一番小さく、水平一定、保護角制御の順に大きくなった。

2.3.3.2 従来 NewHASP との比較

図 2-16 に示す G1, G2 ゾーンに着目し、45°一定、水平一定、保護角制御と、従来 NewHASP（昼光利用による照明制御なし）の熱負荷計算結果を比較した。従来 NewHASP のブラインド開閉は、限界日射熱取得 (200W/m²) で判定し、ブラインド有りのガラス遮蔽係数は NewHASP 窓データファイルの値とした。G1, G2 ゾーンにおける最大日装置顕熱負荷の結果を図 2-24, 2-25 に、室全体の結果を図 2-26 示す。

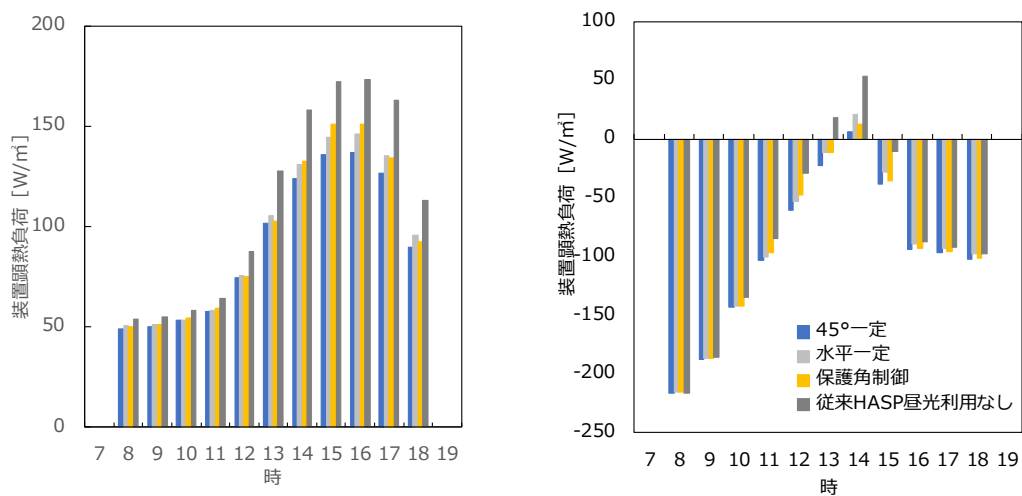


図 2-24 最大日装置顕熱負荷（冷房最大 8/10, 暖房最大 1/23）(G1 ゾーン)

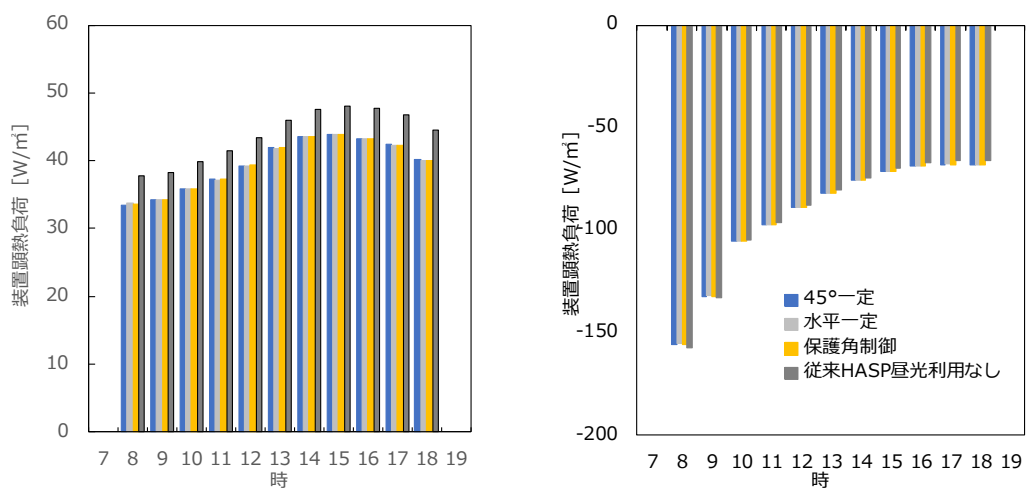


図 2-25 最大日装置顕熱負荷（冷房最大 8/10, 暖房最大 1/23）(G2 ゾーン)

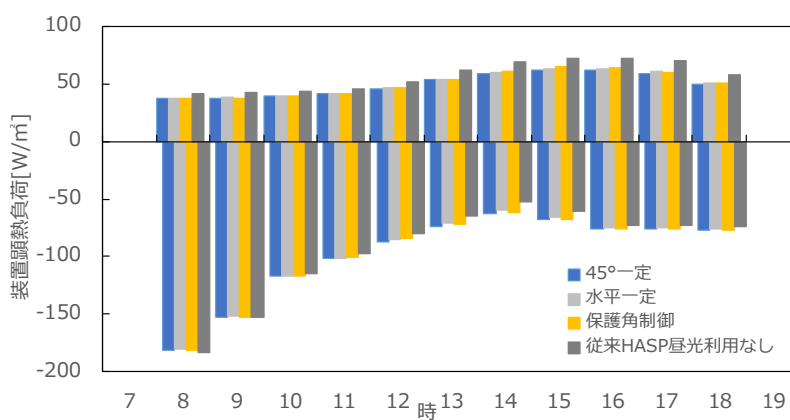


図 2-26 最大日装置顕熱負荷（室全体）

G1 ゾーンの冷房最大負荷（16 時）は、45° 一定<水平一定<保護角制御<従来 NewHASP となった。スラットを保護角にした場合、スラット上面から天井方向への反射により日射が入射するためスラット水平よりも熱負荷が大きくなったと考えられる。方位が前面建物の影響が大きい北西に面する G2 ゾーンでは、ブラインド制御による冷房負荷の差はほとんど見られない。暖房最大負荷は立ち上がり時に生じている。G1, G2 ゾーン共に東側には窓がないためブラインド制御による差はない。暖房最大日であるが、南西ガラス面に日射が当たる 12 時頃から G1 ゾーンに冷房負荷が生じ、冷房負荷は 45° 一定<保護角制御<水平一定<従来 NewHASP となった。

次に、G1, G2 ゾーンの月別・年間装置顕熱負荷を図 2-27、図 2-28 に、室全体の結果を図 2-29 に示す。

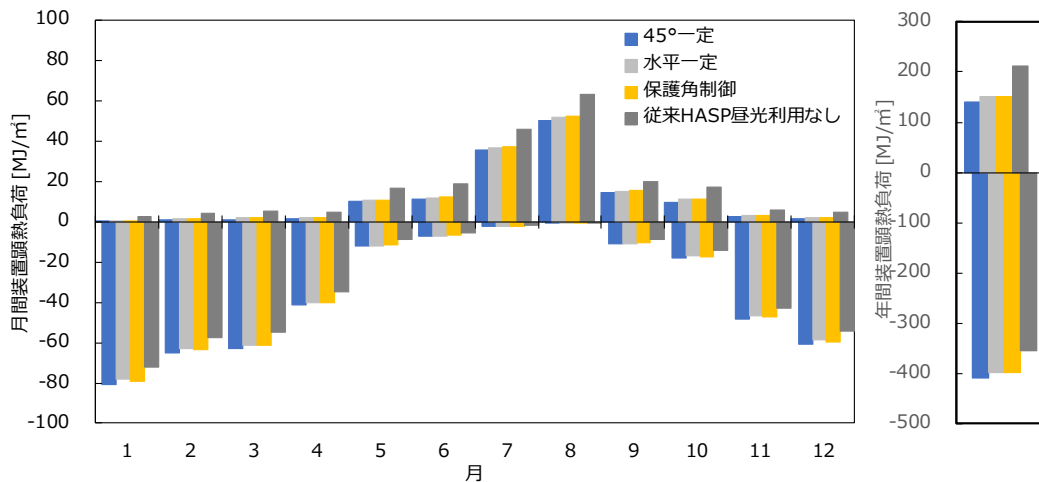


図 2-27 月別・年間装置顕熱負荷 (G1 ゾーン)

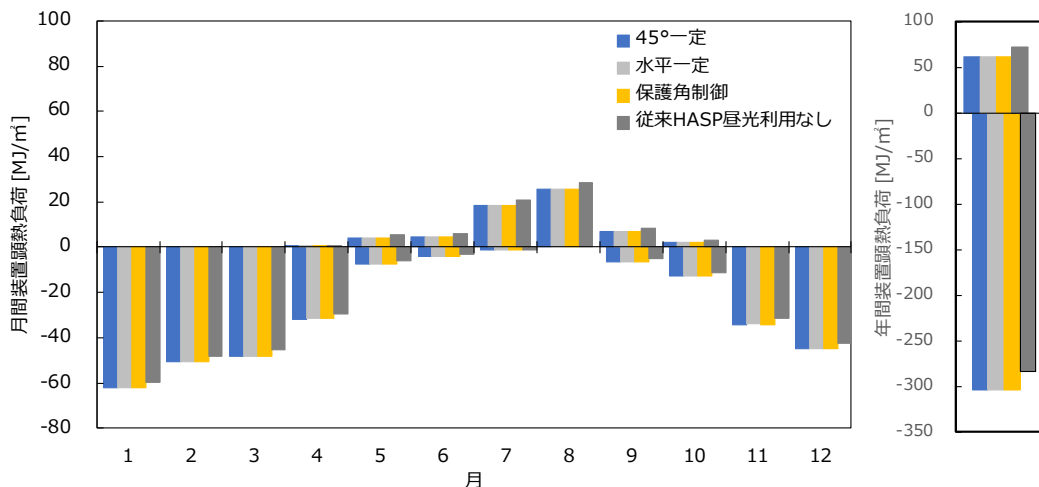


図 2-28 月別・年間装置顕熱負荷 (G2 ゾーン)

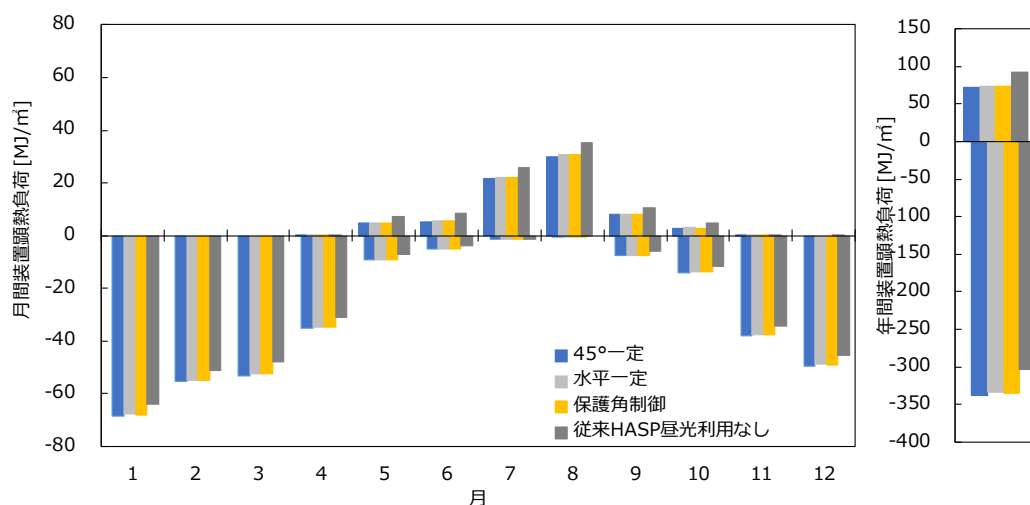


図 2-29 月別・年間装置顕熱負荷（室全体）

G1 ゾーンの月別・年間負荷は、冷房期はスラット 45° 一定<水平一定<保護角制御<従来 NewHASP となり、暖房期は 45° 一定>保護角制御>水平一定>従来 NewHASP となった。前面建物の影響が大きい北西に面する G2 ゾーンは冷房、暖房共にスラット制御の差が少ない。

フロア全体における月別・年間電力使用量を図 2-30 に示す。

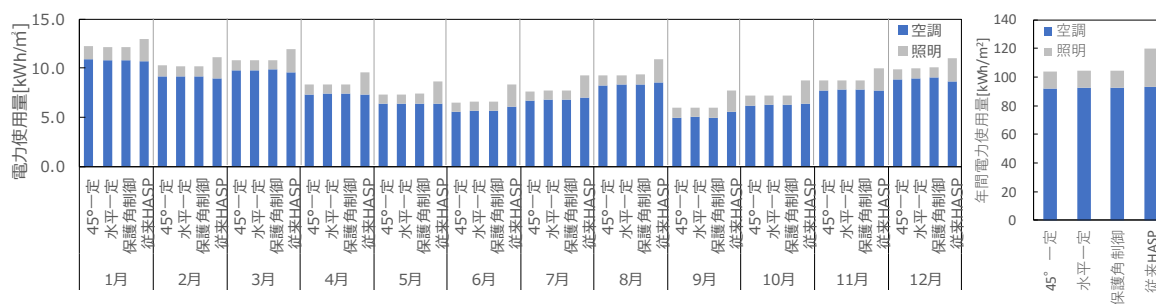


図 2-30 月別・年間電力使用量

年間電力使用量は、昼光利用ありと昼光利用なしの差が大きく、昼光利用ありのブラインド制御による違いは小さいものの、45° 一定が一番小さく、水平一定、保護角制御の順に大きくなった。昼光利用ありの違いが小さい原因としては、照明電力が個別空調電力に比べて小さく、ブラインド制御による調光率の変化の影響が小さくなったためと考えられる。

2.4 第2章のまとめ

本章では、屋内日照・日射制御装備による建物の光・熱環境エネルギー性能評価手法について検討した。

第1節では、屋内日照・日射制御装備の日射熱取得・照明熱取得計算法として、従来 NewHASP における窓面日射熱取得、照明熱取得計算法を説明した。本研究においては、窓面日射熱取得については、透過率特性、反射率特性、保護角制御特性を組み込んだブラインド光学特性関数を作成し、ブラインドスラット角の入射角特性を考慮できるようにする計算法を提案した。照明熱取得については、Radiance を使って、BIM モデルで作成した任意の部屋・窓形状から入る昼光を元に、調光グループ毎のセンサで検知している照度を求め、調光グループの影響を考慮して変化する調光率から、昼光利用時における詳細な照明熱取得を求めた。

第2節では、熱負荷・電力使用量計算法として、双方のプログラム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写す「転写ファイル」を利用した、各プログラムの独立性を保つ熱負荷・電力使用量計算法（屋内日照・日射制御技術）を提案し、NewHASP フローと詳細シミュレーションの関係を示した。電力使用量計算は、LCEM ツールの個別分散空調システムモデルを利用した。

第3節では、第1節、第2節で得られた知見による熱負荷・エネルギーシミュレーションを実施し、結果を検証した。屋内日照・日射制御装備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。本研究による評価法の結果として、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を確認した。さらに、従来 NewHASP との比較を、G1、G2 ゾーンおよび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・年間電力使用量にて行い、屋内日照・日射制御装置による建物の光・熱環境エネルギー性能評価結果を検証した。装置顕熱負荷では、ブラインド制御による季節ごとの違いが表れた結果となり、月別・年間電力使用量では、昼光利用ありと昼光利用なしの差が大きく、昼光利用ありのブラインド制御による違いは小さいものの、45° 一定が一番小さく、水平一定、保護角制御の順に大きいという結果を確認した。Radiance を利用したブラインド光学特性関数を NewHASP に組み込み、Radiance による昼光利用時の照明調光率を求めて、どのようなブラインド角度でも詳細なエネルギー性能を評価できることを示した。

【第2章の参考文献】

- 2-1) 吉澤望, 他: 昼光利用による照明エネルギー消費量削減効果に関する系統的研究 その6 Radiance を用いた昼光利用効果の系統的検討, 日本建築学会学術講演梗概集 40221, 2
- 2-2) 松尾陽, 横山浩一, 石野久彌, 川元昭吾: 空調設備の動的熱負荷計算入門, 社団法人 建築設備技術者協会, 1992
- 2-3) 相賀洋, 吉澤望, 大木知佳子, 相沢則夫: NewHASP を核としたメタシミュレーション技術に関する研究 第3報 昼光利用メタシミュレーションモデル, 日本建築学会学術講演梗概集, 41644, 2017
- 2-4) 大木知佳子, 吉澤望, 相賀洋, 相沢則夫: 昼光利用システムの光・熱環境性能の年間評価に関する研究, 日本建築学会学術講演梗概集, 40209, 2017
- 2-5) 相賀洋, 吉澤望, 相沢則夫: NewHASP を核としたメタシミュレーション技術に関する研究 第4報 昼光利用システムと個別分散空調システムの複合メタシミュレーションモデル, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 第5巻, H-20, 2017
- 2-6) Ito, M., Murakami, S., Nobe, T., Sakamoto, Y., Okumiya, M., Niwa, H., Tokita, S., Matsunawa, K., Sugihara, Y., Sato, M., Murayama, Y., Shiboi, T., Ichikawa, T., Furuta, Y., Funatani, A., Hamane, J., Muranishi, R., Kusafuka, T., : Development of HVAC System Simulation Tool for LCEM (Life Cycle Energy Management), Proceedings of Clima 2007 WellBeing Indoors
- 2-7) RADIANCE WWW server, Alphabetical list of all RADIANCE programs, https://floyd.lbl.gov/radiance/man_html/genblinds.1.html, accessed 2020.11.01

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

本章では、様々な形状の屋外日照・日射制御装置による建物の光・熱環境エネルギー性能評価手法を提案する。Radiance を利用した直達成分と拡散成分を利用して、様々な形状の屋外日照・日射制御装置のある窓からの日射熱取得を求めることが可能なシステムを構築した。シミュレーションによる、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る。

3.1 屋外日照・日射制御装置の日射熱取得計算法

3.1.1 従来 NewHASP における計算法

従来 NewHASP におけるガラス窓標準日射熱取得は、図 3-1 に示す各部に分けて単純化し求めている。単純化のための前提条件を以下に示す。

- ・ 上庇、両袖庇、隣棟壁面からはいかなる放射も到来しない。
- ・ 下庇の存在は無視する。
- ・ 天空面からは直達日射、散乱日射、夜間放射が到来する。
- ・ 地物からは反射日射が到来する。

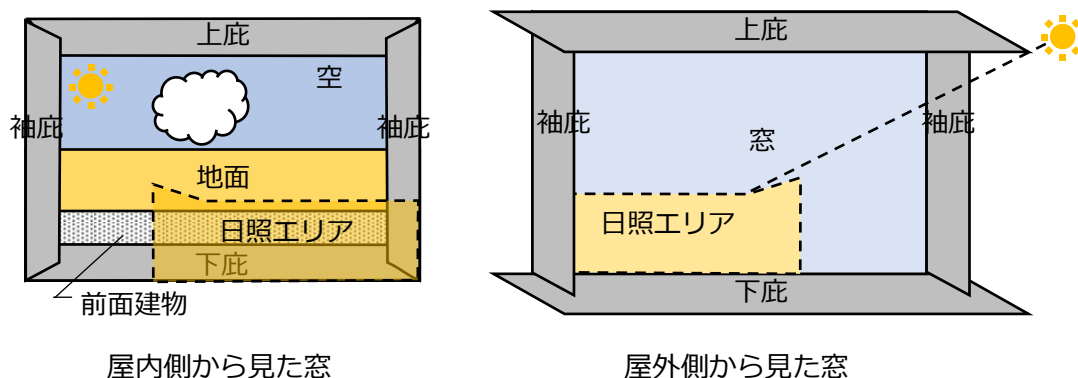


図 3-1 ガラス窓標準日射熱取得の考え方

標準日射熱取得は、第2章と同様、式(3.1)により求めている。

$$I = I_D \sinh^* f_G g(\sinh^*) + I_S \varphi_S g_S + I_D \sinh \rho_G \varphi_G g_S + I_S \rho_G \varphi_G g_S \quad \cdots (3.1)$$

I	: 標準日射熱取得	[W/m ²]
I_D	: 法線面直達日射	[W/m ²]
I_S	: 水平面天空日射	[W/m ²]
φ_S	: 窓の天空に対する形態係数	
φ_G	: 窓の地物に対する形態係数	
ρ_G	: 地物反射率	
f_G	: 窓面日照面積率（直射日光が当たる部分（図 3-1 日照エリア）の窓面積に対する割合）	
$g(\sinh^*)$: 標準ガラスに対する直達日射の熱取得率入射角特性	
g_S	: 標準ガラスに対する天空日射の熱取得率（=0.808）	
h	: 太陽高度	[°]
h^*	: 窓面から見た太陽高度	[°]

3.1.2 本研究で提案する計算法

本研究では、Radiance を利用してガラス窓標準日射熱取得を求める。Radiance を利用するために、図 3-1「屋内側から見た窓」を図 3-2 に示すように 3つの区域に分割して考えた³⁻¹⁾。式(3.1)第 1 項の直達成分の計算には、Radiance で求めた窓面に当たる照度で日照の有無を判定した窓面日照面積率を用いた（図 3-2 日照エリア）。窓面日照面積率とは、窓全体の面積に対する直射日光が当たる面積の割合を示す。式(3.1)第 2 項の天空光による拡散成分の計算には、Radiance で求めた天空光の拡散成分（図 3-2 天空）を、第 3 項、第 4 項の地物反射光の拡散成分には Radiance で求めた地物反射の拡散成分を用いた。さらに式(3.1)では考慮されていなかった屋外日照・日射制御装置からの反射光の拡散成分を Radiance で求めた（図 3-2 地物および屋外日照・日射制御装置）。この考え方に基づいたガラス窓標準日射熱取得を求める計算式を式(3.2), (3.3)に示す。

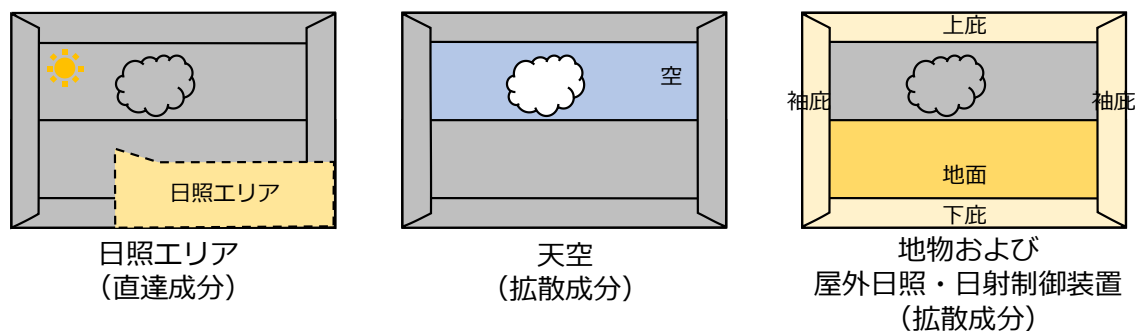


図 3-2 ガラス窓標準日射熱取得分割方法

$$I = I_D \sinh^* f_G g(\sinh^*) + D_{fa} g_s \quad \cdots (3.2)$$

$$D_{fa} = D_{fs} + D_{fg} + D_{fo} \quad \cdots (3.3)$$

D_{fa}	： 全拡散成分	[W/m ²]
D_{fs}	： 天空日射による日射熱取得の拡散成分	[W/m ²]
D_{fg}	： 地物反射による日射熱取得の拡散成分	[W/m ²]
D_{fo}	： 屋外日照・日射制御装置からの反射光による拡散成分	[W/m ²]

従来 NewHASP と本研究における Radiance 利用によるガラス窓標準日射熱取得の特徴を表 3-1 に示す。

表 3-1 光源と反射率設定

	従来 NewHASP	Radiance 連携 NewHASP
日照エリア	・上庇と隣棟は水平に無限に長い面 ・両袖庇は垂直に無限に長い面	屋外日照・日射制御装置, 前面建物の形状は自由
屋外日照・日射制御装置 と前面建物からの反射光	考慮しない	考慮可能
天空	一様天空	輝度分布を考慮可能

従来 NewHASP は、窓面日照面積率を計算する時に、上庇と隣棟は水平に無限に長い面、両袖庇は垂直に無限に長い面としているのに対し、Radiance を連携した場合は、上庇と両袖庇を含む屋外日照・日射制御装置および隣棟壁面の形状を自由に計算することができる。また、従来 NewHASP は、上庇と両袖庇および隣棟壁面からの反射を考慮していなかったが、Radiance は考慮することができる。さらに、従来 NewHASP は一様天空であるのに対し、Radiance を連携した場合は天空輝度の分布を考慮することができる。

本研究における窓面日照面積率と、天空光、地物反射光、屋外日照・日射制御装置からの反射光による拡散成分の計算には、窓面を 100mm 間隔の格子に分割した格子中心の照度を Radiance で求めて利用した。

窓面日照面積率の計算は、光源に直射日光のみを設定し、地物と屋外日照・日射制御装置の反射率を 0% にした窓面の照度を算出し、照度が 0 lx より大きい点の比率を求めた（表 3-2 日照エリア）。

天空光、地物反射光、屋外日照・日射制御装置反射光による窓面照度の計算には、年間計算手法 Three-phase method³⁻²⁾を利用した。Three phase とは、①窓外側の直射日光・天空光部分 (Daylight Matrix)、②窓ガラス透過部分 (Transmission Matrix)、③窓から内部空間

への光の伝達 (View Matrix) 部分の計算過程を意味する。Three-phase method は、3つの phase ごとに計算した結果の行列計算によって年間シミュレーションを行う手法であり、予め計算した3つの phase の結果を掛け合わせて、指定した平面の照度や輝度を求めるため、通常の計算方法よりも計算時間が大幅に短縮される。今回は、Three-phase method を応用して、①直射日光・天空光から屋外日照・日射制御装置の外側部分、②屋外日照・日射制御装置透過部分、③屋外日照・日射制御装置内側から窓面部分のように区分して計算した。また、Three-phase method で用意されている Radiance のコマンドは、EnergyPlus 用気象データ (以下、EPW)³⁻³⁾の使用を前提としているため、公式な EnergyPlus ホームページから取得できる日本国内 9 地点の内、最も東京に近い「Tokyo Hyakuri / 東京 (百里)」と「Kagoshima / 鹿児島」を利用した。

天空光による窓面照度の計算は、光源に天空光のみを設定し、地物と屋外日照・日射制御装置の反射率を 0%とした時の窓面平均照度を求め、EPW の毎時の発光効率 η_{epw} (以下、EPW 発光効率)で除して拡散成分とした (表 3-2 天空)。

地物反射光と屋外日照・日射制御装置反射光による窓面照度の計算は、光源に直射日光と天空光を設定して、地物と屋外日照・日射制御装置の反射率を入力した場合の照度と、反射率を 0%とした場合の照度を求め、差分をとって地物と屋外日照・日射制御装置からの反射による照度とした。その照度を EPW 発光効率 η_{epw} で除した式(3.4)を利用して、地物反射光と屋外日照・日射制御装置反射光による拡散成分を求めた (表 3-2 地物、屋外日照・日射制御装置)。

$$D_{fo} = (D_{fo \text{ Enter Reflectance}} - D_{fo \text{ Reflectance } 0\%}) / \eta_{epw} \quad \cdots (3.4)$$

- $D_{fo \text{ Enter Reflectance}}$: 地物と屋外日照・日射制御装置の反射率
を入力した窓面平均照度
- $D_{fo \text{ Reflectance } 0\%}$: 地物と屋外日照・日射制御装置の反射率
0%の窓面平均照度

表 3-2 光源と反射率設定

日射熱	場所	光源	地物および屋外日照・日射制御装置の反射率
直達成分	日照エリア	直射日光	0%
拡散成分	天空	天空光	0%
	地物,	直射日光	① 反射率を入力
	屋外日照・日射制御装置	+ 天空光	② 0% ① - ②

3.2 熱負荷・電力使用量計算法

本研究で構築した屋外日照・日射制御装置がある場合の熱負荷・電力使用量計算法について、NewHASP フローと Radiance による光環境シミュレーションの関係を図 3-3 に示す。

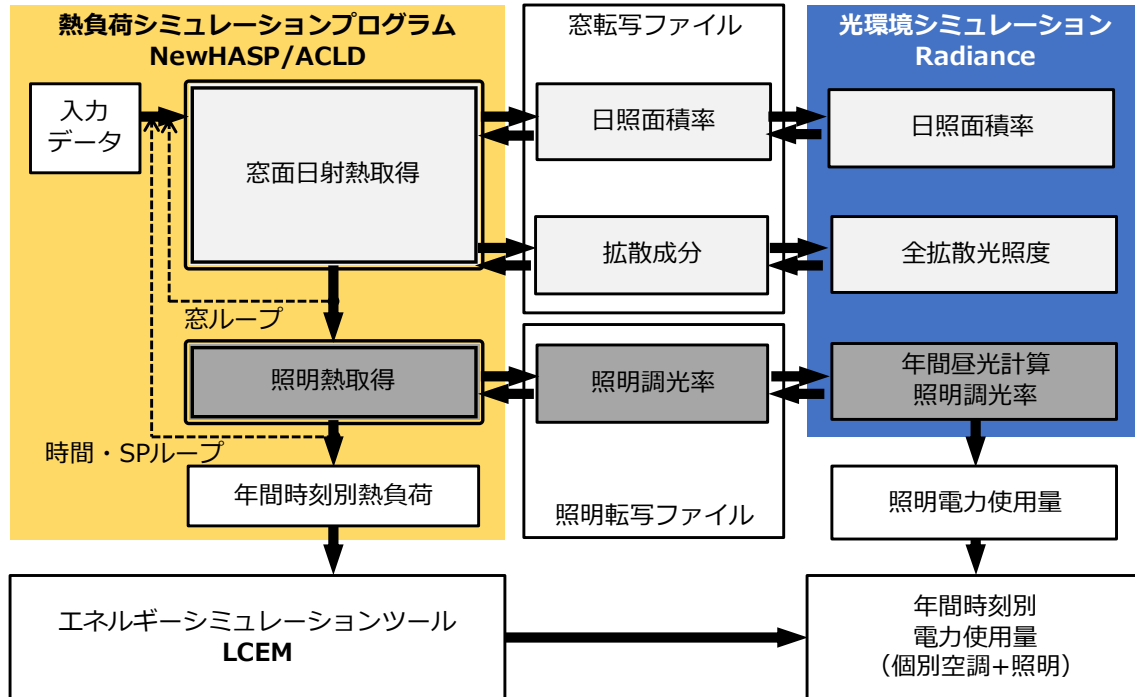


図 3-3 熱負荷・電力使用量計算法（屋外日照・日射制御技術）

窓転写ファイル作成時には、NewHASP プログラム内部の式(3.1)を保持するため、式(3.5)、式(3.6)で求めた値をパラメータとして与えた。

$$\rho_G \varphi_G = 0 \quad \cdots (3.5)$$

$$\varphi'_S = \frac{D_{fa}}{I_s} \quad \cdots (3.6)$$

φ'_S : Radiance で求める D_{fa} を NewHASP に与えるための
ダミーのパラメータ

図 3-4 に窓転写ファイルの例を示す。また、照明転写ファイルは、図 2-13 と同様の構成で作成した。

そして、熱負荷計算結果を、第 2 章同様、LCEM ツール²⁻⁶⁾の個別分散空調システムモデルに取り込んで空調電力使用量を求め、Radiance で求めた昼光利用時の調光率による照明電力使用量を合わせて、年間時刻別電力使用量とし、エネルギー性能を評価した。

1 回目計算

	A	B	C	D	E	F	G	H	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC
1	年	月	日	時	SP	方位	窓順番	窓面積	外気温	法直達日射	水拡散日射	夜間放射	$\rho_g \cdot \psi_g$	ψ_s	sinh	sinh*	g(sinh*)	日照面積率
2	-	-	-	[h]	-	-	-	[m ²]	[°C]	[W/m ²]	[W/m ²]	[W/m ²]	-	-	-	-	-	-
3	0	12	15	1	G1	S1	1	19	0	0	0	55.556	0.1	0.39	0	0	0	0
4	0	12	15	2	G1	S1	1	19	0	0	0	55.556	0.1	0.39	0	0	0	0
5	0	12	15	3	G1	S1	1	19	0	0	0	58.334	0.1	0.39	0	0	0	0
6	0	12	15	4	G1	S1	1	19	-1	0	0	55.556	0.1	0.39	0	0	0	0
7	0	12	15	5	G1	S1	1	19	-0.5	0	0	55.556	0.1	0.39	-0.344	0	0	0
8	0	12	15	6	G1	S1	1	19	0	0	0	55.556	0.1	0.39	-0.151	0	0	0
9	0	12	15	7	G1	S1	1	19	-1	0	2.778	52.778	0.1	0.39	0.037	0.517	0.428	0.972
10	0	12	15	8	G1	S1	1	19	0	138.89	50.001	52.778	0.1	0.39	0.207	0.641	0.552	0.876
11	0	12	15	9	G1	S1	1	19	6	402.782	108.335	58.334	0.1	0.39	0.346	0.743	0.646	0.821
12	0	12	15	10	G1	S1	1	19	8	600.007	119.446	61.112	0.1	0.39	0.446	0.816	0.715	0.79
13	0	12	15	11	G1	S1	1	19	11	758.342	94.445	63.89	0.1	0.39	0.499	0.855	0.754	0.775
14	0	12	15	12	G1	S1	1	19	11	794.453	88.89	63.89	0.1	0.39	0.503	0.858	0.756	0.775

2 回目計算

	A	B	C	D	E	F	G	H	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC
1	年	月	日	時	SP	方位	窓順番	窓面積	外気温	法直達日射	水拡散日射	夜間放射	$\rho_g \cdot \psi_g$	ψ_s	sinh	sinh*	g(sinh*)	日照面積率
2	-	-	-	[h]	-	-	-	[m ²]	[°C]	[W/m ²]	[W/m ²]	[W/m ²]	-	-	-	-	-	-
3	0	12	15	1	G1	S1	1	19	0	0	0	55.556	0	0	0	0	0	0
4	0	12	15	2	G1	S1	1	19	0	0	0	55.556	0	0	0	0	0	0
5	0	12	15	3	G1	S1	1	19	0	0	0	58.334	0	0	0	0	0	0
6	0	12	15	4	G1	S1	1	19	-1	0	0	55.556	0	0	0	0	0	0
7	0	12	15	5	G1	S1	1	19	-0.5	0	0	55.556	0	0	-0.344	0	0	0
8	0	12	15	6	G1	S1	1	19	0	0	0	55.556	0	0	-0.151	0	0	0
9	0	12	15	7	G1	S1	1	19	-1	0	2.778	52.778	0	0.3724	0.037	0.517	0.428	0
10	0	12	15	8	G1	S1	1	19	0	138.89	50.001	52.778	0	1.211793	0.207	0.641	0.552	0.889957
11	0	12	15	9	G1	S1	1	19	6	402.782	108.335	58.334	0	1.341372	0.346	0.743	0.646	0.816239
12	0	12	15	10	G1	S1	1	19	8	600.007	119.446	61.112	0	1.620017	0.446	0.816	0.715	0.774573
13	0	12	15	11	G1	S1	1	19	11	758.342	94.445	63.89	0	1.815529	0.499	0.855	0.754	0.73344
14	0	12	15	12	G1	S1	1	19	11	794.453	88.89	63.89	0	1.811294	0.503	0.858	0.756	0.730769

$$\rho_g \varphi_g = 0$$

$$\varphi_s'$$

Radianceによる
日照面積率

図 3-4 窓転写ファイル

3.3 熱負荷・エネルギーシミュレーションによる検証

3.3.1 屋外日照・日射制御装置形状

従来 NewHASP で計算可能な屋外日照・日射制御装置は、基本的な形状である上庇・袖庇・ボックス型の 3 通りである（図 1-1）。一方，従来 NewHASP では計算できないが，一般的な建物のファサードに利用されている屋外日照・日射制御装置を図 3-5 に示す³⁻¹⁾。

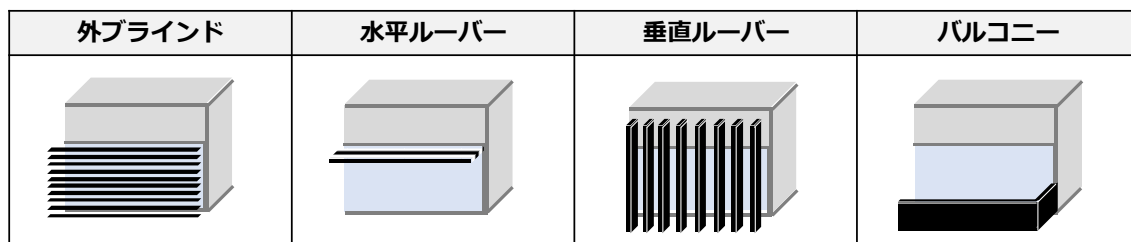


図 3-5 従来 NewHASP では計算できない屋外日照・日射制御装置

3.3.2 建物形状

本研究で開発したシミュレーションシステムを利用したケーススタディとして，屋外日照・日射制御装置による建物のエネルギー性能を評価するために，図 3-6 に示す国土交通省・建築基準整備促進事業による省エネ法モデル建物基準階をベースに，屋外日照・日射制御装置の一例として図 3-7, 3-8 を設定し，表 3-3 に示す 10 種類，40 ケースの熱負荷を求めた³⁻⁴⁾。照明調光グループおよび熱負荷計算のゾーニングは図 3-6 に示すとおりとする。定格光束 3,334lm（定格消費電力 333.4W）の LED 照明を想定し，調光最大で 1,000lx となるように 176 灯を 600mm グリッド天井に配置し³⁻⁵⁾，昼光利用により平均机上面照度が 750lx になるよう調光制御した。今回は，屋外日照・日射制御装置だけの影響を確認するため，室内側のブラインドは設置せず，直射日光が室奥まで差し込むケースを含めて計算した[※]。次に，LCEM を利用して空調電力使用量を求めた。空調システムは，第 2 章と同様の個別分散空調システム（VRF system）とした。Radiance, NewHASP, LCEM のシミュレーションケースを表 3-3 に示す。

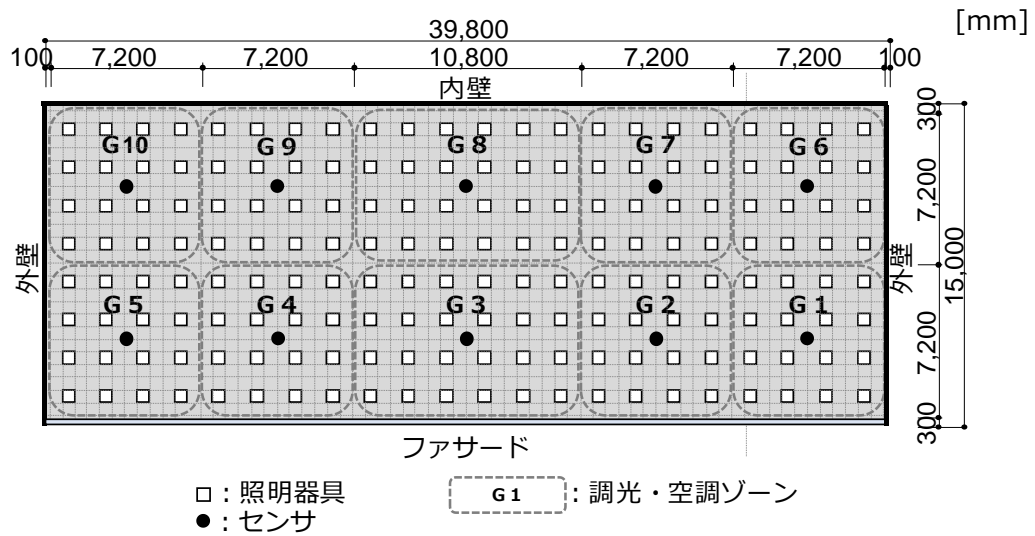


図 3-6 平面図（調光グループ，空調ゾーン）

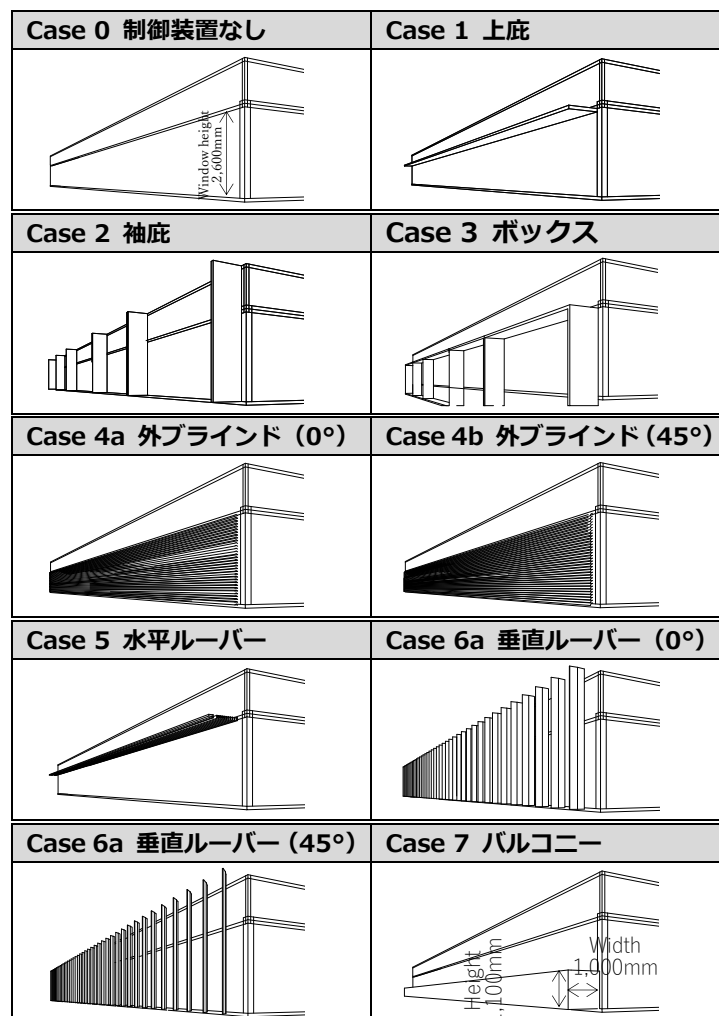


図 3-7 シミュレーション用屋外日照・日射制御装置

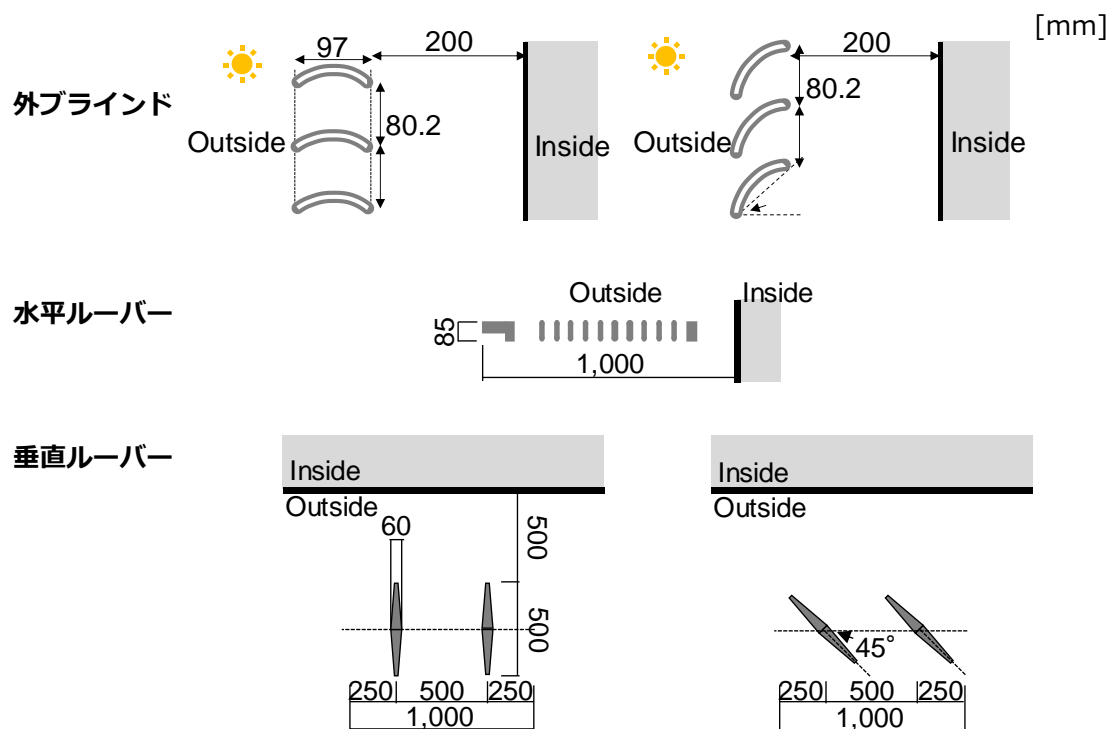


図 3-8 外ブラインド，水平ルーバー，垂直ルーバー詳細図

表 3-3 シミュレーションケース

ケース	屋外日照・日射制御装置	東京 南	鹿児島 南	鹿児島 西	鹿児島 東
0	制御装置なし	T_S0	K_S0	K_W0	K_E0
1	上庇	T_S1	K_S1	K_W1	K_E1
2	袖庇	T_S2	K_S2	K_W2	K_E2
3	ボックス	T_S3	K_S3	K_W3	K_E3
4a	外ブラインド (0°)	T_S4a	K_S4a	K_W4a	K_E4a
4b	外ブラインド (45°)	T_S4b	K_S4b	K_W4b	K_E4b
5	水平ルーバー	T_S5	K_S5	K_W5	K_E5
6a	垂直ルーバー (直角)	T_S6a	K_S6a	K_W6a	K_E6a
6b	垂直ルーバー (45°)	T_S6b	K_S6b	K_W6b	K_E6b
7	バルコニー	T_S7	K_S7	K_W7	K_E7

※ Radiance で求めた，冬至付近で日射量の多い 12 月 17 日における，窓側の照明調光グループ G3 ゾーンと室奥の照明調光グループ G8 ゾーンの，照度センサ位置の昼光照度の比較を図 3-9 に示す。窓側 G3 ゾーンにおける照度の時刻変動を見ると，窓面入射日射の時刻変動と同様の動きが見られ，直射日光が床や屋外日照・日射制御装置に当たって天井

の照度センサに影響していることが分かる。一方室奥 G8 ゾーンにおける照度は、窓側に比べて圧倒的に小さいものの、朝方または夕方に大きくなっている。これは太陽高度の低い時刻における直射日光の室奥への入射を表現しているものと考えられる。このように、Radiance を利用することで、天井面に設置したセンサへの直射日光の影響を正確に再現することができる。

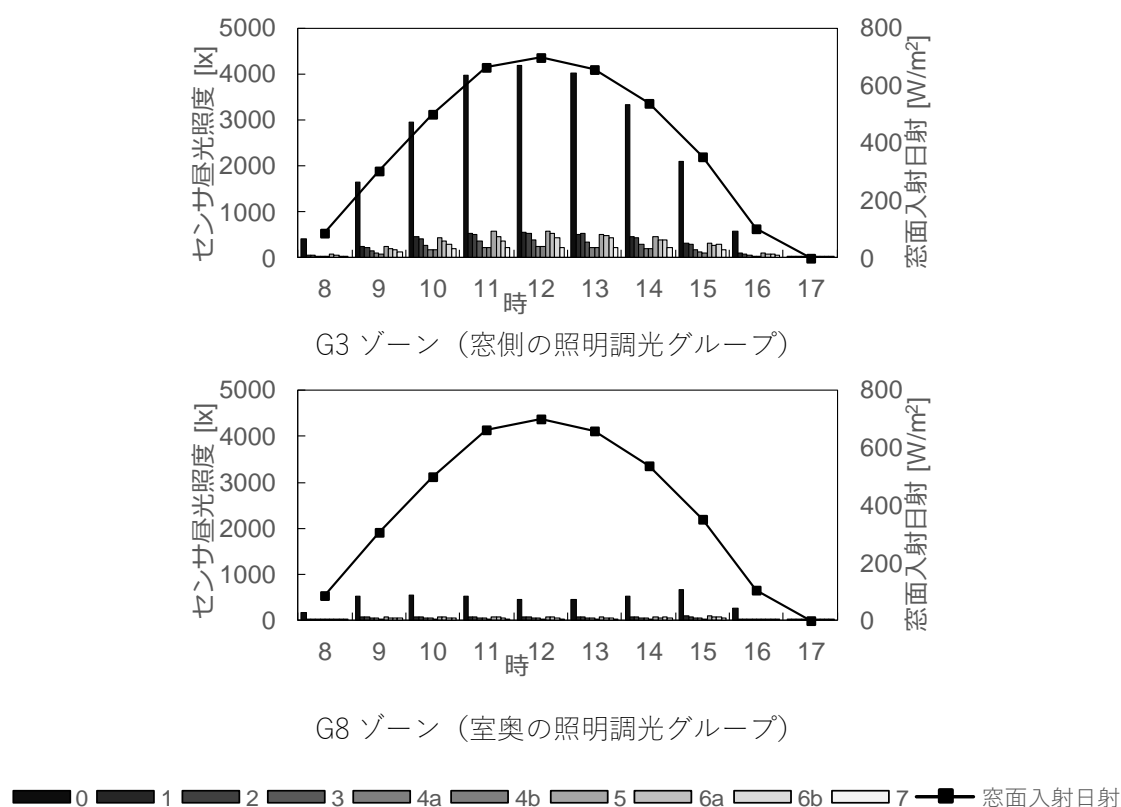


図 3-9 センサ位置の昼光照度と窓面入射日射の関係

3.3.3 光・熱負荷・エネルギーシミュレーション結果

3.3.3.1 本研究による評価法の結果

Radiance の計算条件を表 3-4、3-5、NewHASP の計算条件を表 3-6、LCEM ツールの計算条件を表 3-7 にそれぞれ示す。

表 3-4 Radiance 光環境シミュレーションパラメータ説明

Parameter	Name
ab	ambient bounces
aa	ambient accuracy
ar	ambient resolution
as	ambient super-samples
ad	ambient divisions
lw	Limit the weight of each ray to a minimum
dc	direct certainty
dt	direct threshold
dj	direct jittering
st	specular sampling threshold
ss	specular sampling
e	the number of samples produced per Klems division
c	sample rays to accumulate

表 3-5 Radiance 光環境シミュレーションパラメータ設定値

	ab	aa	ar	as	ad	lw	dc	dt	dj	st	ss	e	c
Directsun	0	0.15	512	32768	65536	1.52e-5	1	0	0	1	0	MF:6	-
Daylight Matrix direct	0	0.15	512	32768	65536	1.52e-5	-	-	-	-	-	MF:1	1000
View Matrix direct	1	0.15	512	32768	65536	1.52e-5	-	-	-	-	-	MF:1	-
Daylight Matrix	2	0.15	512	32768	65536	1.52e-5	-	-	-	-	-	MF:1	1000
View Matrix	6	0.15	512	32768	65536	1.52e-5	-	-	-	-	-	-	-
Dimming levels	6	0.15	512	256	512	-	-	-	-	-	-	-	-

表 3-6 NewHASP 熱負荷シミュレーション条件

建物モデル	室用途	事務室			
	方位	南向き 東西面には窓無し			
	床面積	597 m ²			
	階高	4.0 m			
	天井高	2.6 m			
	床面地上高さ	25.2 m	対象室を6階と設定（上下階も同じ事務室）		
	軒高	33.2 m			
空調ゾーニング	照明調光ゾーンに合わせて10ゾーンに分ける。ペリメータ、インテリアの区別無し ゾーン間空気移動考慮（150m ³ /mh）				
気象データ	地点	東京（茨城県百里の気象データを東京としている） EPWデータ（EnergyPlusのWeatherDataのURLより）			
地物反射率		20 %			
限界日射取得量		0 W/m ²			
日射吸収率		80 %			
長波放射率		90 %			
季節	夏期 6～9月、冬期 10～5月（中間期を冬期として設定 ※）				
週間スケジュール	平日 空調、土日祝日 非空調、特別日 非空調				
特別日	省エネ法標準室カレンダーパターン採用 →平日241＋土曜日51＋日曜日祝日73＝計365				
空調条件	空調時間	14 時間	7時～21時		
	室使用时间	13 時間	8時～21時		
	外気導入量	5 m ³ /m ² h			
	予冷予熱時間	1 時間	7時～8時	外気カット	
	全熱交換器・外調機 無し				
室内温湿度条件	夏期 26℃、60％以下、冬期・中間期 22～26℃、40％以上				
内部発熱ほか	人員密度	0.1 人／m ²	平日のみ	8時～21時	
			土日祝日	オフ	
	作業強度	3			
	照明密度（定格）	12 W／m ²	平日のみ	8時～21時	
			土日祝日	オフ	
	機器密度（顕熱のみ）	12 W／m ²	平日のみ	8時～21時	
			平日夜間、土日終日	25％発熱	
	強制冷却				
	発熱割合（期待率）	夏 75％、冬期・中間期 75％			
	室内熱容量	顕熱	40 kJ/(m ² ・K)		
		潜熱	40 kJ/(m ² ・(g/kg(DA)))		
隙間風	換気回数法	0.2 回/h	窓面のみに設定		
スペース間空気移動	150 m ³ /mh	双方向			
隣室空調条件	上下階	空調	α＝0（対象室と同じ温度）		
	コア側	非空調	α＝0.2		
壁体構造	窓ガラス	横連窓	103.5 m ²	普通透明単板	8 mm
		開口率	65 %		
		方位	南		
		ブラインド	無し		
		庇	無し		
	外壁	南	55.7 m ²	石こうボード	8 mm
		東	60 m ²	非密閉中空層	- mm
		西	60 m ²	押出法ダ リスフェンフォーム保温板1種	25 mm
				普通コンクリート	150 mm
				セメント・モルタル	25 mm
				タイル	10 mm
	内壁		159.2 m ²	石こうボード	25 mm
				非密閉中空層	- mm
				石こうボード	25 mm
	床		597 m ²	カーペット	7 mm
	天井も同じ（材料構成の順番は逆）			スチール	3 mm
				非密閉中空層	- mm
				普通コンクリート	150 mm
				非密閉中空層	- mm
				ロックウール化粧吸音板	15 mm

表 3-7 LCEM 個別分散空調システム条件

G1～G5 ゾーン（窓側）

室外機（×1台）	定格冷却能力	63.0 kW
	定格加熱能力	69.0 kW
	定格COP（冷却）	3.44 -
	定格COP（加熱）	3.71 -
	定格消費電力（冷却）	18.3 kW
	定格消費電力（加熱）	18.6 kW
室内機（×16台）	コイル能力（冷却）	3.6 kW
	コイル能力（加熱）	4 kW
	ファン定格風量	600 m ³ /h
	ファン定格消費電力	0.08 kW
外気処理機 （各ゾーンに 室内機1台換算）	全熱交換器の有無	有
	全熱交換器定格消費電力（G3ゾーン）	0.3 kW
	全熱交換器定格消費電力（上記以外）	0.2 kW
	全熱交換器外気導入量（G3ゾーン）	400 m ³ /h
	全熱交換器外気導入量（上記以外）	270 m ³ /h

G6～G10 ゾーン（コア側）

室外機（×1台）	定格冷却能力	45.0 kW
	定格加熱能力	50.0 kW
	定格COP（冷却）	3.91 -
	定格COP（加熱）	4.27 -
	定格消費電力（冷却）	11.5 kW
	定格消費電力（加熱）	11.7 kW
室内機（×11台）	コイル能力（冷却）	3.6 kW
	コイル能力（加熱）	4 kW
	ファン定格風量	600 m ³ /h
	ファン定格消費電力	0.08 kW
外気処理機 （各ゾーンに 室内機1台換算）	全熱交換器の有無	有
	全熱交換器定格消費電力（G8ゾーン）	0.3 kW
	全熱交換器定格消費電力（上記以外）	0.2 kW
	全熱交換器外気導入量（G8ゾーン）	400 m ³ /h
	全熱交換器外気導入量（上記以外）	270 m ³ /h

8:00～20:00 における年間窓面日照面積率，年間平均調光率，年間装置顕熱負荷の結果を図 3-10～3-12 に示す。

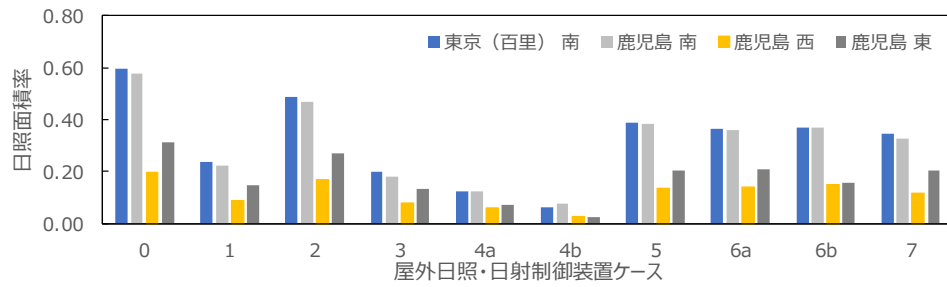


図 3-10 年間窓面日照面積率（8:00～20:00）

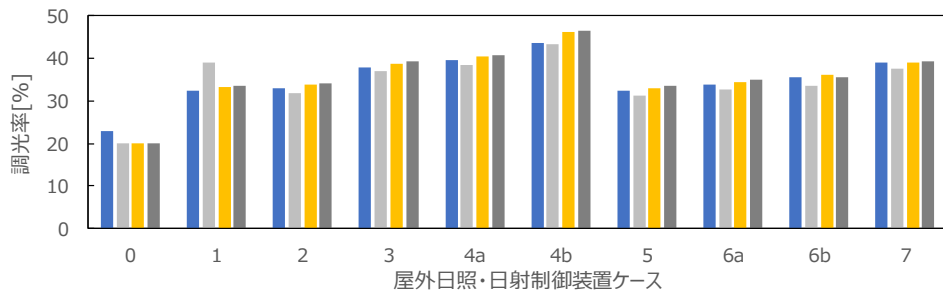


図 3-11 年間平均調光率（8:00～20:00）

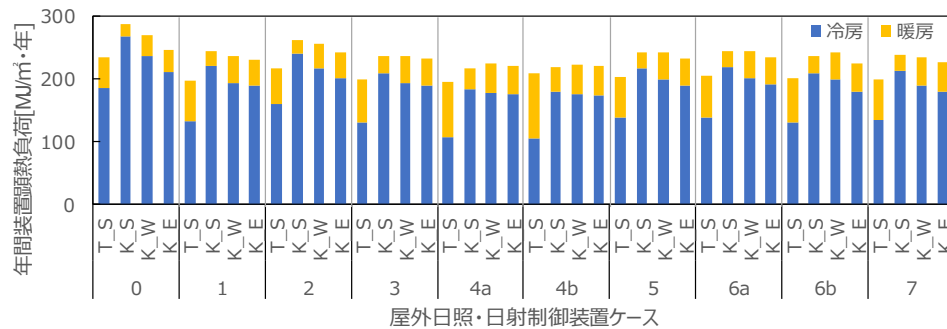


図 3-12 年間装置顕熱負荷

年間窓面日照面積率は、屋外日照・日射制御装置なし（ケース 0）が最も大きく、外ブラインド（ケース 4a,4b）が最も小さい。また、南向きが大きく、西向きが小さくなり、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である。

年間平均調光率は、年間窓面日照面積率とは逆に、昼光を遮る割合の大きい外ブラインド（ケー4a,4b）が最も大きく、次にバルコニー（ケース 7）、ボックス型庇（ケース 3）、垂直ルーバー（ケース 6a,6b）の順に小さくなり、屋外日照・日射制御装置なし（ケース 0）が最も小さい。地域別に見ると、鹿児島南向きの上庇で大きくなる他は、地域・方位による傾向が同じで、制御装置なしが低く、外ブラインド 45° が高い。これは、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ている。

年間冷房負荷は、地域・方位により若干傾向は異なるものの、外ブラインド（ケース 4a,4b）

が一番小さく、屋外日照・日射制御装置なし（ケース0）が一番大きい、年間暖房負荷は逆に屋外日照・日射制御装置なし（ケース0）が一番小さく外ブラインド（ケース4a,4b）が一番大きい。冷房負荷と暖房負荷の合計では、屋外日照・日射制御装置なし（ケース0）が一番大きく、外ブラインド（ケース4a）と上庇（ケース1）、ボックス型庇（ケース3）が小さくなり、これらの屋外日照・日射制御装置が熱負荷削減に効果的なことが分かった。

8:00～20:00における年間電力使用量を図3-13に示す。

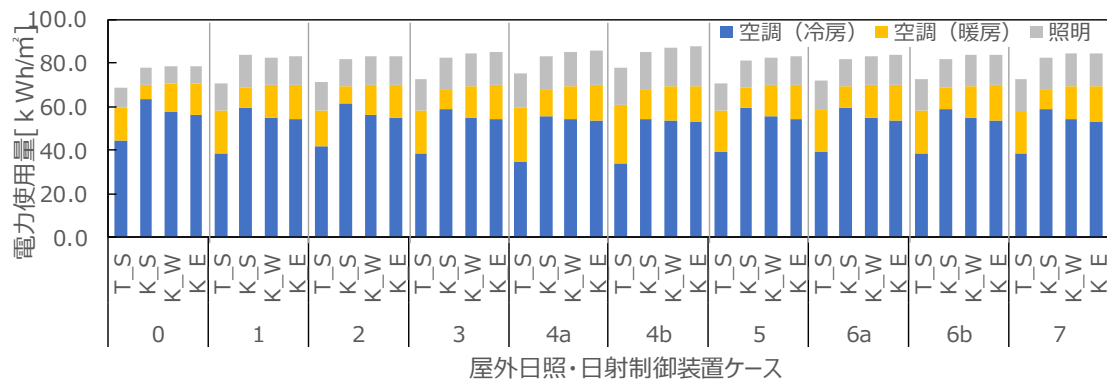


図 3-13 年間電力使用量

屋外日照・日射制御装置別に見ると、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（ケース4a,4b）が一番大きく、屋外日照・日射制御装置なし（ケース0）が一番小さくなった。

これを検証するために、東京（百里）について、ケース0と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を比較した結果を図3-14に示す。各ケースの空調電力使用量の差分は、照明電力使用量の差分に比べて小さい。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ことになる。つまり、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ことが影響していると考えられる。

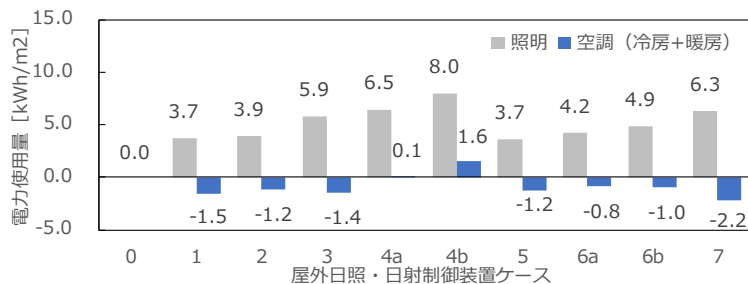


図 3-14 空調・照明電力使用量差分

3.3.3.2 従来 NewHASP との比較

従来 NewHASP で計算できる屋外日照・日射制御装置について、従来 NewHASP による結果と Radiance を連携させて求めた結果と比較した。気象条件は、東京（百里）とした。ケース 1, 2, 3 の窓面直達日射入射時の日照面積率を図 3-15 に示す。

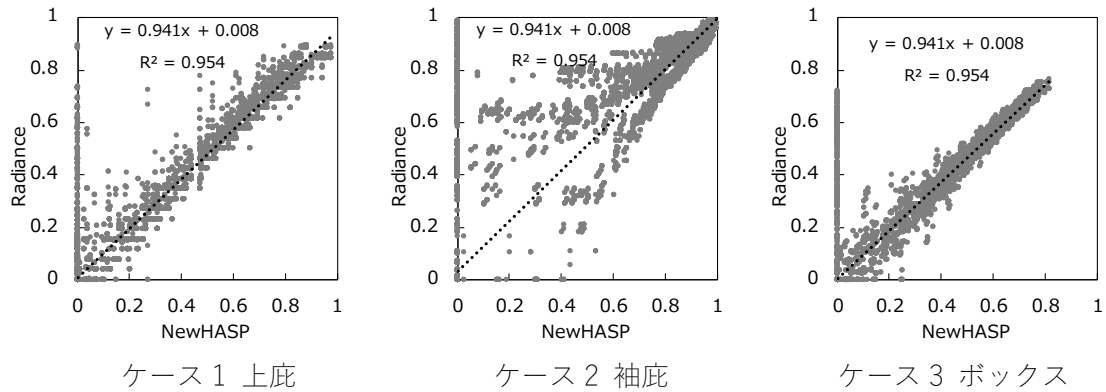


図 3-15 日照面積率

従来 NewHASP では計算時間短縮のため 1 週間周期で同じ太陽位置データを使っているため、毎日太陽位置が変化する Radiance とは、日の出、日没近くの時間帯を中心に誤差が生じたが、特に上庇とボックス型庇は日照面積率の傾向がほぼ一致した。袖庇は、屋外日照・日射制御装置の影ができる時間帯が日の出や日没近くの時間帯になるため、結果にばらつきが生じた。また、Radiance による日照面積率が階段状に現れているのは、100mm 間隔の照度を元にして求めた影響であり、この間隔を細かくすることにより精度はより高くなると考えられる。

次に、従来 NewHASP と Radiance を利用して求めた熱負荷（室負荷（顕熱））を図 3-16～3-19 に示す。左側は熱負荷（上段：冷房、下段：暖房）の全空調時間におけるデュレーションカーブ、右側はピーク日の時刻別熱負荷（上段：冷房最大（8 月 10 日）、下段：暖房最大（1 月 5 日））を表す。

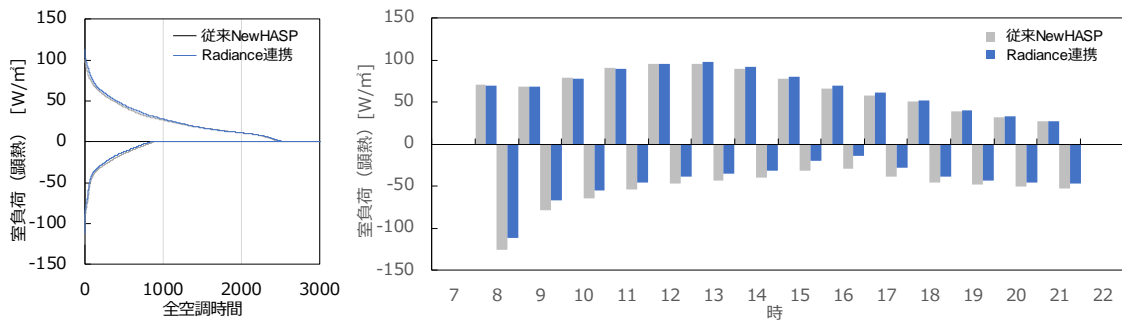


図 3-16 室負荷比較（制御装置なし）

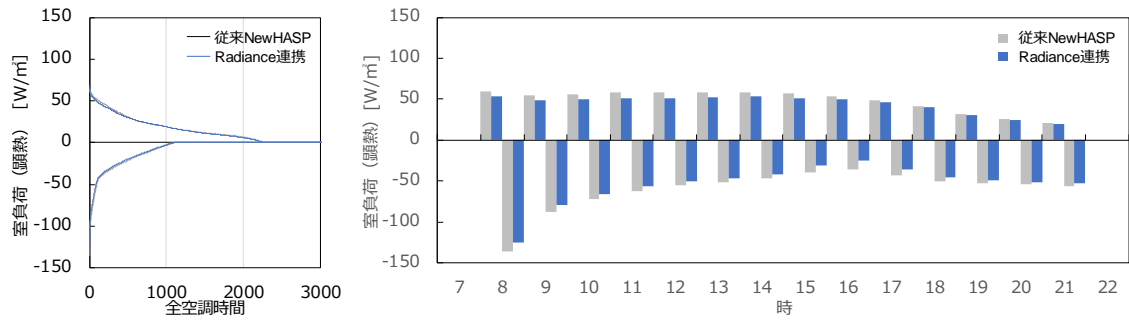


図 3-17 室負荷比較（上庇）

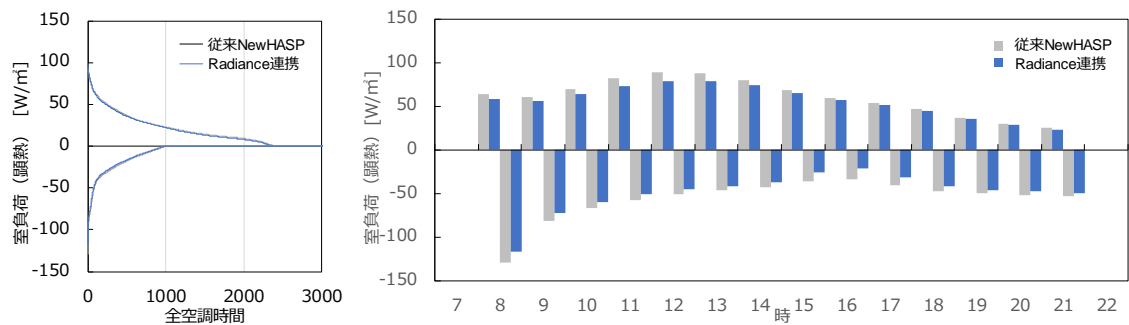


図 3-18 室負荷比較（袖庇）

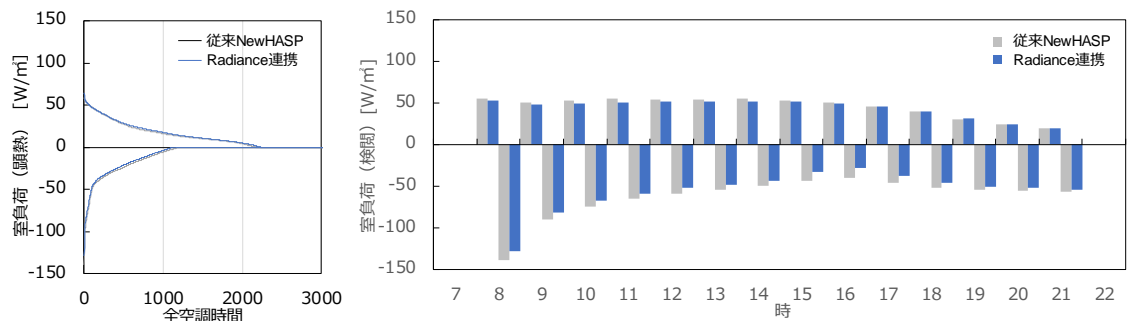


図 3-19 室負荷比較（ボックス）

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し、本研究による評価法の熱負荷が正しく求められていることが確認できた。

3.4 第3章のまとめ

本章では、屋外日照・日射制御装置による建物の光・熱環境エネルギー性能評価手法について検討した。

第1節では、屋外日照・日射制御装置の日射熱取得計算法として、従来 NewHASP における窓面日射熱取得計算法を説明した。本研究では、Radiance を利用してガラス窓標準日射熱取得を求めた。Radiance を利用するために、「屋内側から見た窓」を日照エリア・天空・地物および屋外日照・日射制御装置の3つの区域に分割した。直達成分の計算には、Radiance で求めた窓面に当たる照度で日照の有無を判定した窓面日照面積率を利用し、次に、天空光による拡散成分の計算には、Radiance で求めた天空光の拡散成分を、そして地物反射光の拡散成分には Radiance で求めた地物反射の拡散成分を用いた。さらに従来 NewHASP では考慮されていなかった屋外日照・日射制御装置からの反射光の拡散成分も含めた。

第2節では、熱負荷・電力使用量計算法として、「転写ファイル」を利用した、各プログラムの独立性を保つ熱負荷・電力使用量計算法（屋外日照・日射制御技術）を提案し、NewHASP フローと詳細シミュレーションの関係を示した。空調電力使用量計算には、LCEM ツールの個別分散空調システムモデルを利用した。

第3節では、第1節、第2節で得られた知見による熱負荷・エネルギーシミュレーションを実施し、結果を検証した。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ケースの熱負荷等を求めた。その結果、本研究による評価法の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。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。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、Radiance を利用して求めた日照面積率と室負荷を従来 NewHASP の結果と比較し、日照面積率と熱負荷の傾向が概ね一致し、本研究による評価法の熱負荷が正しく求められていることを確認した。

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立した。

【第3章の参考文献】

- 3-1) 大木知佳子, 岡本俊英, 相賀洋, 吉澤望 : RadianceとNewHASPを用いた外部日射遮蔽物のエネルギー性能評価, 日本建築学会環境系論文集, 第83巻, 第753号, pp. 861-870, 2018.11
- 3-2) The Three-Phase Method for Simulating Complex Fenestration with Radiance, <https://www.radiance-online.org/learning/tutorials/Tutorial-ThreePhaseMethod.pdf#search=%27Radiance++phase+method%27>, accessed 2020.7.14
- 3-3) EnergyPlus Weather data : <https://energyplus.net/weather>, accessed 2018.1.9
- 3-4) 大木知佳子, 吉澤望, 相賀洋, 相沢則夫 : 外部・内部日射遮蔽物の光・熱環境性能年間評価に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学- I , pp. 585-586, 2019.7
- 3-5) 吉澤望, 三木保弘, 山口秀樹 田村仁人 : 昼光利用によるオフィスの照明エネルギー削減効果の系統的検討 東京圏の年間標準気象データを用いたシミュレーションによる検討, 日本建築学会環境系論文集, 第83巻, 第747号, pp425-434, 2018.5

第4章 本研究で提案する評価手法の妥当性検証

本章では、第2,3章で構築した評価手法の妥当性を検証した。はじめに本研究による計算法と既存のプログラム（従来 NewHASP・EnergyPlus）による検証を行い、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、評価手法の有効性を論じる。

4.1 屋内外日照・日射制御装置の日射熱取得計算法

4.1.1 本研究で提案する計算法

本研究で構築した熱と光の詳細連携計算に基づく日照・日射制御技術による建物のエネルギー性能評価手法における熱負荷・室温計算に関わる部分について、NewHASP フローと Radiance による光環境シミュレーションの関係を図4-1に示す。

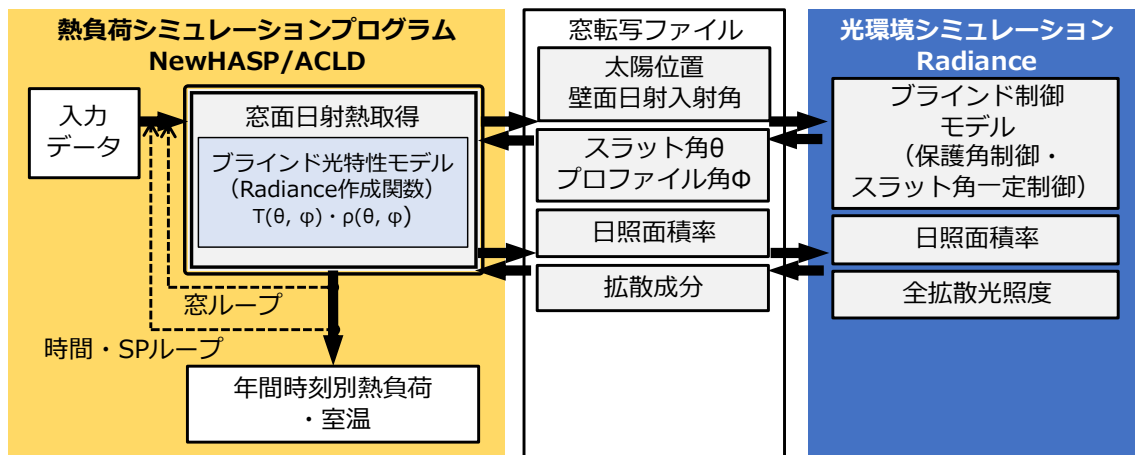


図 4-1 熱負荷・室温計算法（屋内外日照・日射制御技術）

第2章で構築したブラインドの透過率特性（図2-6）・反射率特性（図2-7）を利用し、第3章で構築した屋外日照・日射制御装置のガラス窓標準日射熱取得分割方法（図3-2）と窓転写ファイル（図3-4）を組み込んで、様々な形状の屋外日照・日射制御装置と屋内日照・日射制御装置を併せ持つ空間の熱負荷・室温を計算する方法を構築した。

本章では、本研究による光と熱の詳細連携計算に基づく計算法による室温と、既存シミュレーション（従来 NewHASP・EnergyPlus）による室温、そしてシミュレーションと同条件の断熱箱実験による室温を、それぞれ比較する精度検証を行う。なお、本章では人工照明は設置せず、日射熱取得のみを検証の対象とした。

4.2 従来 NewHASP・EnergyPlus との比較

4.2.1 屋内外日照・日射制御装置形状

検証に利用する屋内日照・日射制御装置はブラインドとし、ブラインドの角度は、図4-2に示す 0° と 45° の2通りとした。

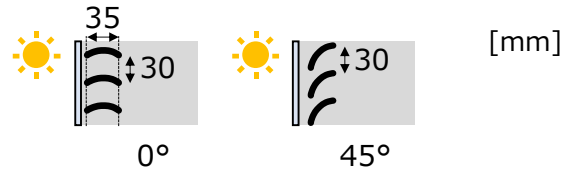


図 4-2 屋内日照・日射制御装置

検証に利用する屋外日照・日射制御装置は垂直ルーバーとし、垂直ルーバーの角度は、図4-3に示す 0° と 45° の2通りとした。

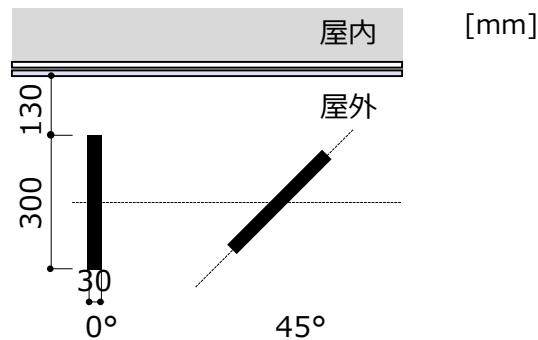


図 4-3 屋外日照・日射制御装置

4.2.2 建物形状

検証のための建物形状の平面図を図4-4、立面図を図4-5に示す。

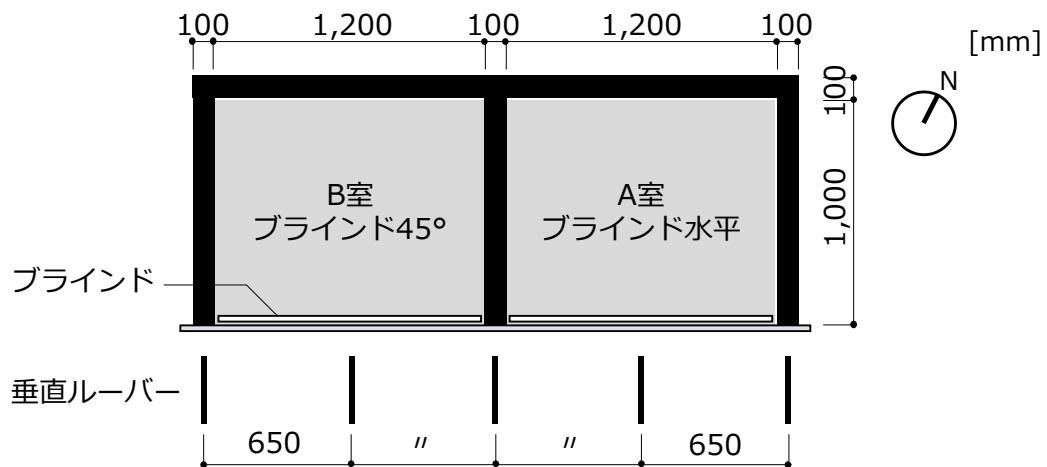


図 4-4 平面図

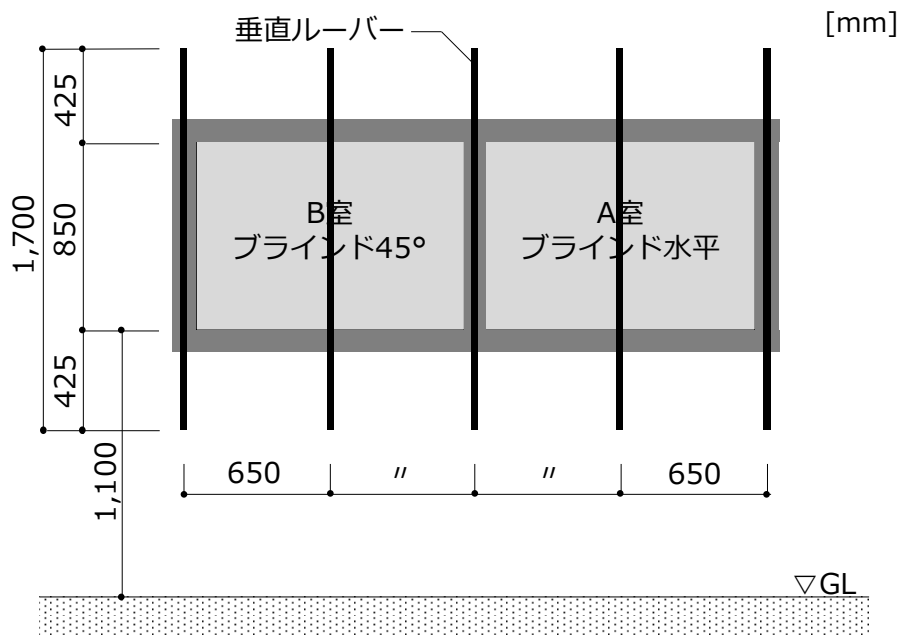


图 4-5 立面图

同一形状・仕様の2つの断熱箱が、横に並んでいると想定した。窓面には、屋内日照・日射制御装備として図 4-2 に示すブラインドを設置し、A 室のスラット角度を 0°（水平）、B 室を 45° とした。屋外日射・日照制御装置は、図 4-3 に示す垂直ルーバーを設置し、窓面に対して垂直を 0° と考え、0° と 45° の 2 ケースの検証を実施した。

4.2.3 熱負荷・室温計算の詳細フロー

検証内容を明らかにするため、Radiance による入力データと気象データを示した熱負荷・室温計算の詳細フローを図 4-6 に示す。

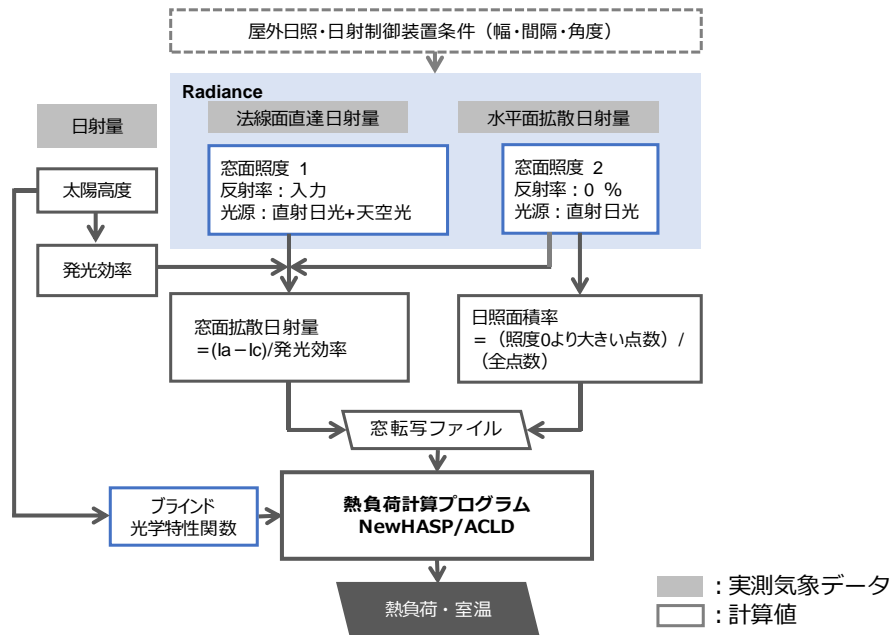


図 4-6 熱負荷・室温計算詳細フロー

拡散成分は、光源に直射日光と天空光を設定し、Radiance による地物や屋外日照・日射制御装置等の反射率を入力して計算した「窓面照度 1」と、光源を直射日光のみ、反射率を 0%として計算した「窓面照度 2」を求め、それぞれの平均値の差分を発光効率⁴⁻¹⁾で除して窓面拡散日射量とした。直達成分には、光源に直射日光のみを設定し、地物や屋外日照・日射制御装置等の反射率を 0%にして求めた「窓面照度 2」から、照度が 0lx より大きい面積の比率を求めて、日照面積率として利用した。そして、拡散成分と直達成分を窓転写ファイルに入力し、NewHASP で室温を算出した。

窓面照度 1 は、窓面を 100mm 間隔の格子に分割した格子中心の照度を Radiance で求め、その平均値とした。

窓面照度 2 は、窓面を 10mm 間隔の格子に分割した格子中心と、窓中央の高さを水平に 10mm 間隔に分割した点の 2 通りを Radiance で求めた。拡散成分の計算には 10mm 格子中心の照度の平均値を利用し、日照面積率は、10mm 格子中心と 10mm 水平の 2 通りの照度を利用して求め、屋外日照・日射制御装置が垂直ルーバーの場合の、日照面積率計算の簡易化を検証した。日照面積用の照度計算点の取り方を図 4-7 に示す。

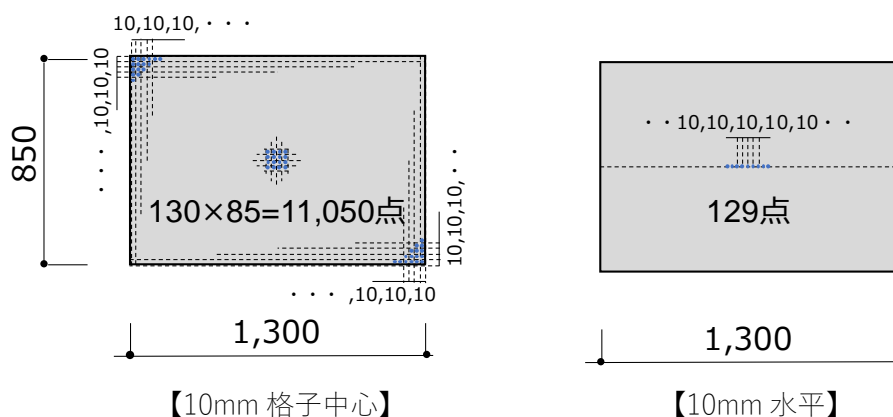


図 4-7 日照面積率計算用照度算出点

4.2.3.1 NewHASP 計算に必要な項目

NewHASP による室温計算に必要なデータを表 4-1 に示す。

表 4-1 NewHASP データ

物性データ	ガラス・ブラインド：熱貫流率，遮蔽係数 外装材・断熱材・内装材：熱伝導率，容積比熱
気象データ	乾球温度 絶対湿度 法線面直達日射量 水平面天空日射量 夜間放射量
転写ファイルデータ	拡散日射量 日照面積率
プログラム内蔵データ	外表面熱伝達率 内表面熱伝達率
NewHASP インプットデータ	緯度・経度 地物反射率 基準温度 出力形式 助走計算開始月日 外表面方位角 材版，材質 形状データ 隣室条件 窓面積 室内熱容量 換気ファン風量・温度

本研究では，転写ファイルデータの拡散日射量と日照面積率を Radiance によって求めた。

4.2.3.2 Radiance 計算に必要な項目

Radiance による計算に必要なデータを表 4-2 に示す。

表 4-2 Radiance データ

気象データ	法線面直達日射量 水平面天空日射量 緯度・経度
Radiance インプットデータ	3次元形状 (ArchiCAD→Rhino) 反射率 ガラス透過率

4.2.3.3 気象データの測定

シミュレーションに取り込む気象データは、東京都清瀬市にある(株)大林組技術研究所にて、表 4-3 に示す日に測定した。気象庁が発表する過去の気象データ⁴⁻²⁾による天気を合わせて示す。NewHASP は、前日までの影響を加味するため助走期間を設定する必要があるため、気象データは助走日 (1 日) を含めて測定した。

表 4-3 気象データの実測日と天気⁴⁻²⁾

垂直ルーバー	夏		冬	
	実測日	天気	実測日	天気
0°	2019 年 8 月 28 日 (助走日)	雨	2020 年 1 月 8 日 (助走日)	曇一時雨
0°	2019 年 8 月 29 日 (評価対象日)	晴時々曇	2020 年 1 月 9 日 (評価対象日)	晴後一時曇
45°	2019 年 9 月 1 日 (助走日)	曇時々晴	2020 年 1 月 10 日 (評価対象日)	晴
45°	2019 年 9 月 2 日 (評価対象日)	晴時々曇		

次に、各気象データの測定方法と測定データを示す。

① 外気温度・外気絶対湿度

外気温度は、図 4-8 に示す機器で 10 分間隔に計測した。直射日光を受けないよう、機器を軒下に設置した。

外気絶対湿度は、図 4-8 に示す機器で計測した 10 分間隔の外気温度・外気相対湿度から計算して求めた。

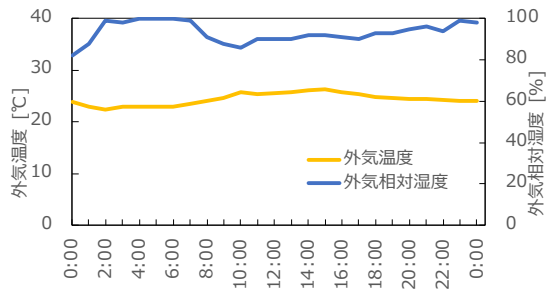


T&D 社
おんどとり TR-72wf

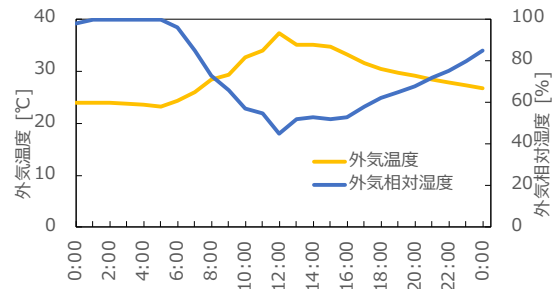
図 4-8 外気温度・外気相対湿度測定

実測日における外気温度・外気相対湿度を図 4-9 に示す。助走日の 8/28, 1/8 は雨のため外気相対湿度が高くなったが、夏の評価対象日 8/29, 9/2, 冬の評価対象日 1/9, 1/10 は、日中に外気温度が上昇し、外気相対湿度が低い日であった。

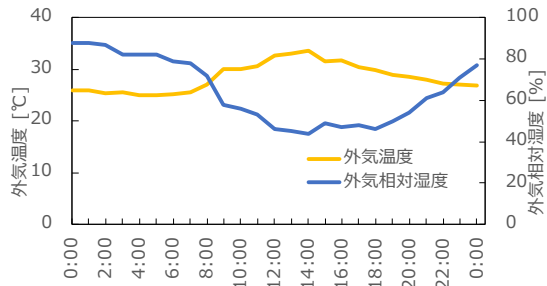
2019年8月28日（助走日）



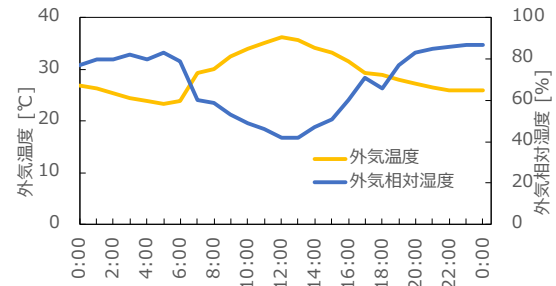
2019年8月29日



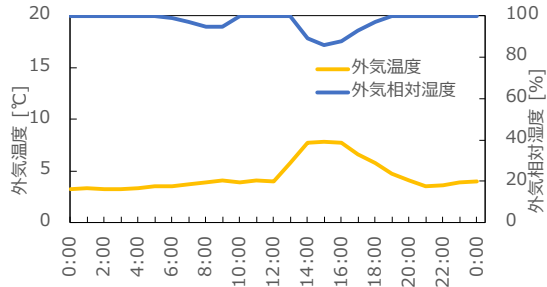
2019年9月1日（助走日）



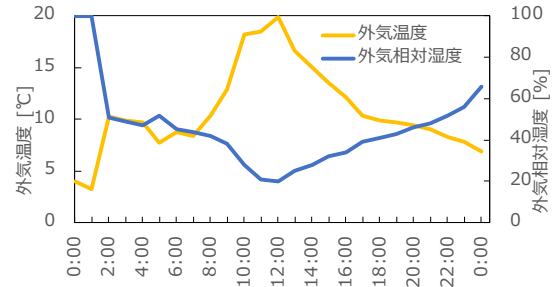
2019年9月2日



2020年1月8日（助走日）



2020年1月9日



2020年1月10日

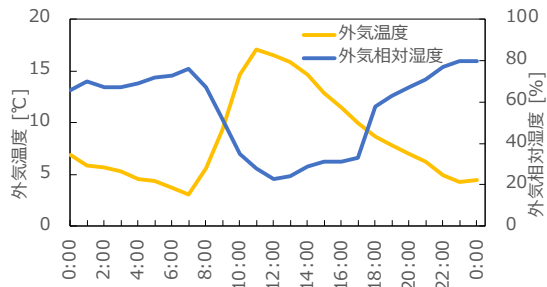


図 4-9 外気温度・外気相対湿度

② 法線面直達日射量・水平面天空日射量

法線面直達日射量と水平面天空日射量は、図 4-10, 4-11 に示す機器で 1 分間隔に計測した。



プリード社
直達日射計 CHP1
自動追尾装置 ASTX-2
太陽光遮蔽装置 PO-155-1/OM

図 4-10 法線面直達日射量測定

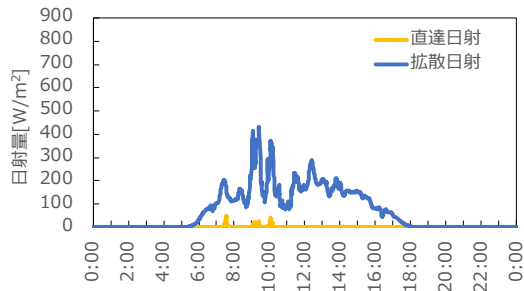


プリード社
全天日射計 CMP-6

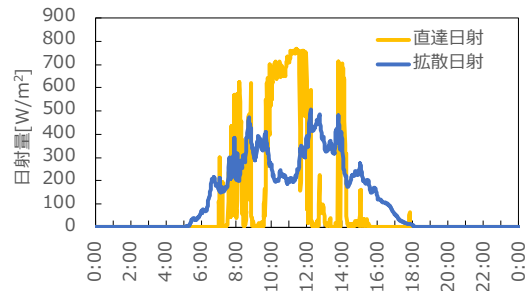
図 4-11 水平面全天日射量測定

実測日における法線面直達日射量と水平面天空日射量を図 4-12 に示す。夏の評価対象日 8/29, 9/2 は、直達日射量が多いが、日射量の変動が大きい日であった。冬の評価対象日 1/9, 1/10 は、直達日射量・天空日射量ともに安定していた。また、助走日の 8/28, 1/8 は雨のため直達日射がほとんどなかった。

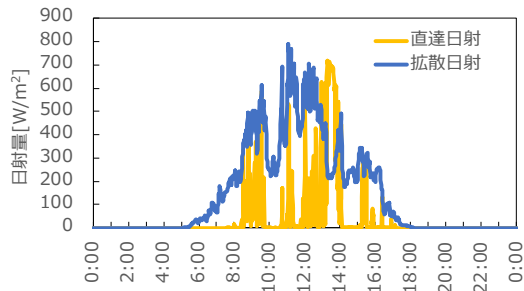
2019年8月28日（助走日）



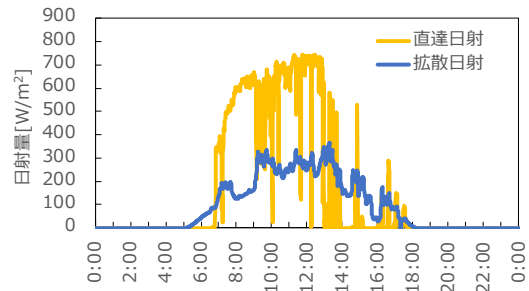
2019年8月29日



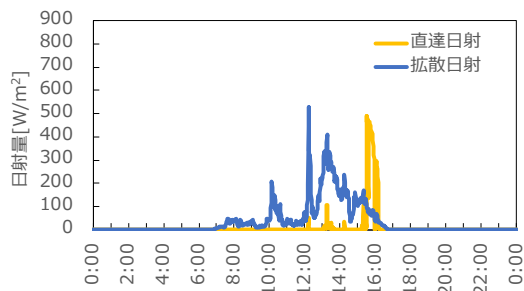
2019年9月1日（助走日）



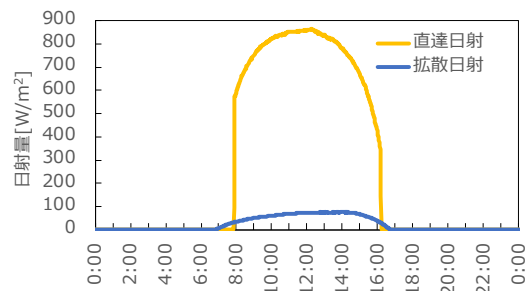
2019年9月2日



2020年1月8日（助走日）



2020年1月9日



2020年1月10日

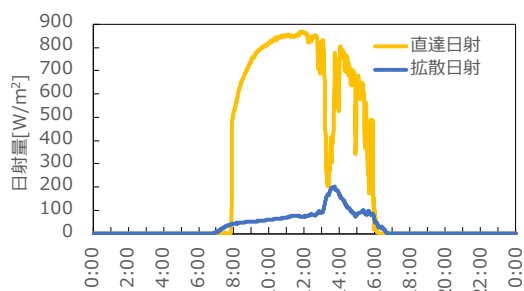


図 4-12 法線面直達日射量・水平面天空日射量

③ 夜間放射量

夜間放射量は、気象庁が発表する雲量⁴⁻²⁾と、外気温度、絶対湿度から、Bruntの実験式⁴⁻³⁾式(4.1)を利用して求めた。

$$I_L = 4.88(T_o/100)^4 \left(0.49 - 2.1 \sqrt{\frac{x}{622 + x}} \right) (1 - 0.062c) \quad \dots (4.1)$$

T_o : 外気の絶対温度 [K]
 x : 外気の絶対湿度 [g/kg]
 c : 雲量

実測日の雲量を表4-4に示す。

表 4-4 雲量

	8月28日	8月29日	9月1日	9月2日	1月8日	1月9日	1月10日
3:00	10	10	10-	3	10	0+	10-
6:00	10	10-	10-	6	10	0	10-
9:00	10	10-	10-	10-	10	0+	0+
12:00	10	7	9	7	10	0+	2
15:00	10	4	10-	8	10-	0+	6
18:00	10	8	10-	6	8	10-	4
21:00	9	7	10-	6	0+	10-	1

雲量は0～10で表され、「0+」は「雲はあるが雲量が1に満たない場合」、「10-」は「雲量が10でも雲がない部分がある場合」である。雲量データがない時刻は直近の時刻のデータを利用した。

夏の評価対象日8/29,9/2は、午前中に雲が多く、午後になると徐々に少なくなった。冬の評価対象日1/9はほとんど雲がなく、1/10は午後から少し雲が出ていた。また、助走日の8/28,9/1,1/8は終日雲が多かった。

④ 天空輝度分布

天空輝度分布を、緯度・経度、法線面直達日射量、水平面天空日射量の値を元に gendaylit⁴⁾ コマンドによって仮想天空輝度分布を作成し、Radiance シミュレーションに利用した。gendaylit コマンドでは、直達日射量・拡散日射量や緯度・経度、時刻等から、Pretz モデル⁴⁻⁵⁾を使って天空を作成することができる。

4.2.4 光・室温シミュレーション結果

4.2.4.1 本研究による評価法の結果

Radiance による照度計算は、rtrace⁴⁻⁶⁾コマンドによる方法と Daylight Coefficient⁴⁻⁷⁾（以下 DC 法）による方法の2つを対象とした。

rtrace は、従来から利用されている、視点から飛ばした光線を追跡して照度を求める計算法である。計算条件を表 4-5 に示す。

表 4-5 Radiance 光環境シミュレーションパラメータ (rtrace)

Parameter	Name	Value
ab	ambient bounces	10
aa	ambient accuracy	0.15
ar	ambient resolution	128
as	ambient super-samples	256
ad	ambient divisions	512

DC 法は、太陽を含んで 145 に分割した天空の各パッチの輝度と、照度算出点の照度の関係を係数化し、天空の輝度に係数をかけ合わせて照度値を求める年間計算法である。計算条件を表 4-6 に示す。

表 4-6 Radiance 光環境シミュレーションパラメータ (DC)

	ab	aa	ar	as	ad	lw	dc	dt	dj	st	ss	e	c
View Matrix	10	0.25	16	128	5,000	2e-06	-	0.5	0	0.85	0	-	1

※Radiance 計算パラメータは表 3-4 参照

日照面積率を算出するための2種類の照度算出点と2つの Radiance 計算法を組み合わせた、表 4-7 に示す4ケースの Radiance シミュレーションを実施して、NewHASP に連携させた。

表 4-7 Radiance 計算ケース

日照面積率用照度算出点	rtrace	DC
10 mm格子中心 (grid)	○ (詳細)	○
10 mm水平 (line)	○	○ (簡易)

「rtrace_10mm 格子中心」は最も詳細な Radiance 計算法、「DC_10mm 水平」は最も簡易な Radiance 計算法である。

次に、NewHASP の計算条件を表 4-8 に示す。

表 4-8 NewHASP 室温シミュレーション条件

建物モデル	室用途	なし
	方位	南東 27° (南 0°)
	床面積	1.2 m ²
	天井高	0.85 m
	床面地上高さ	1.1 m
空調ゾーニング	1ゾーンに分ける。ペリメータ、インテリアの区別無し	
気象データ	地点	東京都清瀬市 実測値からNewHASP形式気象データを作成
地物反射率	10 %	
限界日射取得量	1 W/m ²	
日射吸収率	80 %	
長波放射率	90 %	
季節	夏期 6～9月、冬期 12～3月、中間期4,5,10,11月	
週間スケジュール	全日 非空調	
特別日	なし	
空調条件	空調時間	なし
室内温湿度条件	成り行き温湿度	
内部発熱ほか 隣室空調条件	なし 隣室無	
壁体構造	窓ガラス	横連窓 1.06 m ² 開口率 100 % 方位 南東 透過率 LowEペアガラス
	内壁	3 m ² 反射率 48.4 %
	床	0.9 m ² 反射率 17.9 %
	天井	反射率 66.3 %
	垂直ルーバー	反射率 66.3 %

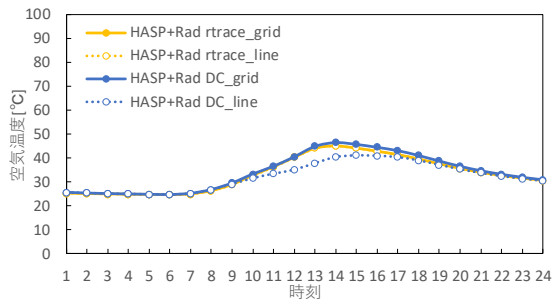
なお、対象とする断熱箱の南側には、屋根のある通路や樹木があることを想定して、計算を実行した。

本研究による評価法は、Radiance と連携することで、日射がある時間帯の窓面日射熱取得を詳細に評価することが可能であるが、夜間の日射がない時間帯は同様の方法では評価することができない。そのため、貫流熱計算に必要な夜間放射を考慮するために、窓から見えている樹木等に相当する前面建物を想定した。

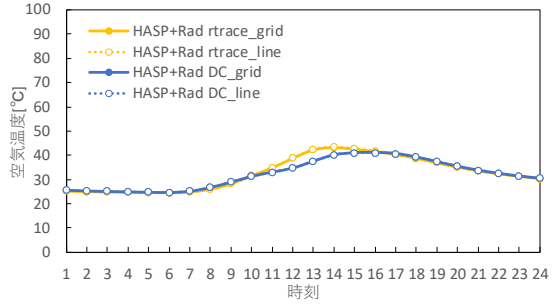
本研究による評価法の断熱箱室温を図 4-13 に示す。

2019年8月29日

ルーバー垂直・ブラインド水平

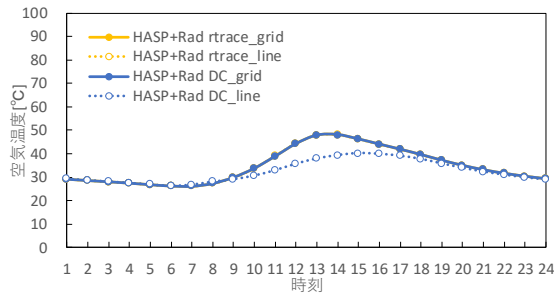


ルーバー垂直・ブラインド 45°

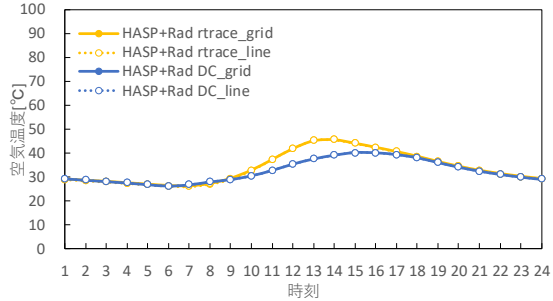


2019年9月2日

ルーバー45°・ブラインド水平

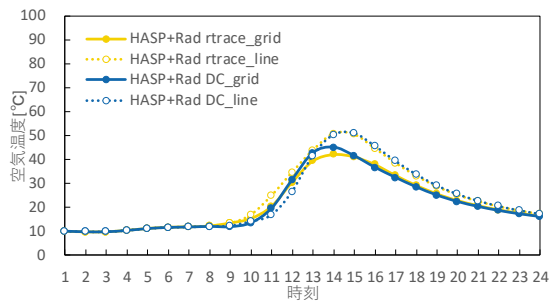


ルーバー45°・ブラインド 45°

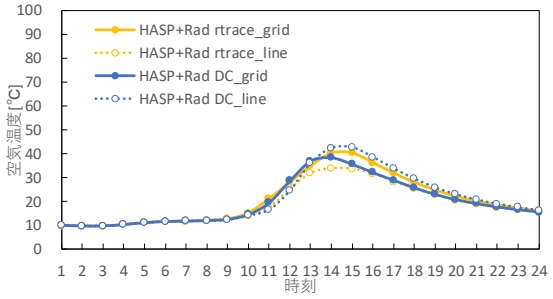


2020年1月9日

ルーバー垂直・ブラインド水平

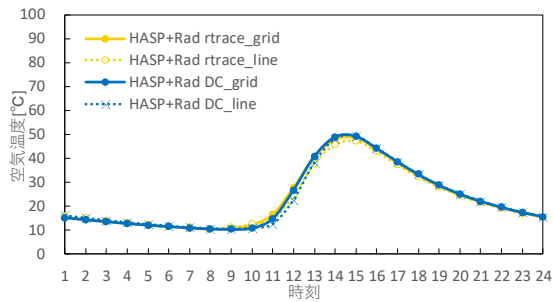


ルーバー垂直・ブラインド 45°



2020年1月10日

ルーバー45°・ブラインド水平



ルーバー45°・ブラインド 45°

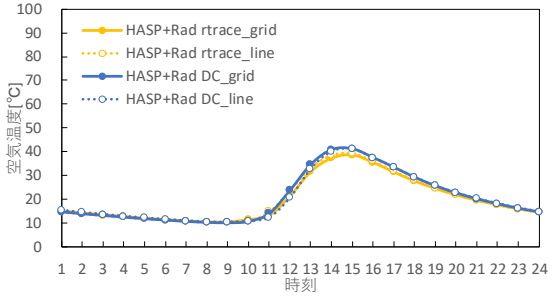


図 4-13 断熱箱室温（本研究による評価法）

ブラインド水平とブラインド 45° の室温を比較すると、各設定とも、ブラインド 45° の方が低い。Radiance 計算法の rtrace と DC による室温は、夏のブラインド 45° では 10 時～16 時に DC の室温がやや低くなったが、その他は、目立った差異がなかった。日照面積率計算点 10 mm格子中心と 10 mm水平ラインによる室温は、夏は、ブラインド 45° では差異がほとんどなく、ブラインド水平では、DC・10 mm水平ラインの日中の室温がやや低くなった。冬は、DC・10 mm水平ラインの室温が午前若干低めで、ルーバー垂直の時に、DC・10 mm水平ラインの午後の室温がやや高くなった。午前中の日照面積率計算点 10 mm格子中心と 10 mm水平ラインの差異は、前面通路が窓面に落とす水平な影の影響と考えられる。

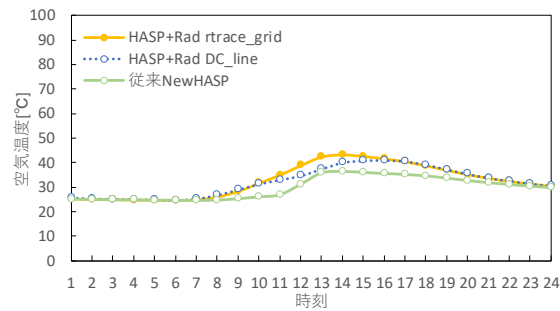
4.2.4.2 従来 NewHASP との比較

従来 NewHASP で計算可能な日照・日射制御装置の条件、ルーバー垂直・ブラインドスラット角 45° について、従来 NewHASP と、本研究による評価法の表 4-7 に示す最も詳細な Radiance 計算法「rtrace_10mm 格子中心」、最も簡易な Radiance 計算法「DC_10mm 水平」による室温を比較した結果を図 4-14 に示す。

従来 NewHASP の屋外条件は、隣棟までの距離と高さで入力する。今回の検証では、通路や樹木を想定した天空形態係数分の前面建物を入力して、従来 NewHASP の計算を実行した。

2019年8月29日

ルーバー垂直・ブラインド 45°



2020年1月9日

ルーバー垂直・ブラインド 45°

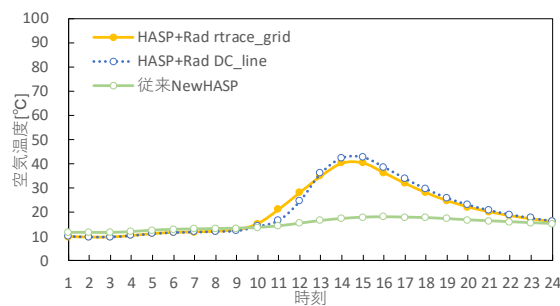


図 4-14 断熱箱室温（従来 NewHASP）

夜間の室温は本研究による評価法とほぼ一致したが、昼間は従来 NewHASP の室温が低くなった。従来 NewHASP は、上庇、両袖庇、隣棟壁面からはいかなる放射も到来しない前提で計算しているため、屋外ルーバーと、通路や樹木を想定した前面建物からの反射日射が含まれずに、窓面日射熱取得が小さくなったと考えられる。参考として、前面建物がなかった場合の室温を、図 4-15 に示す。

2020年1月9日

ルーバー垂直・ブラインド 45°

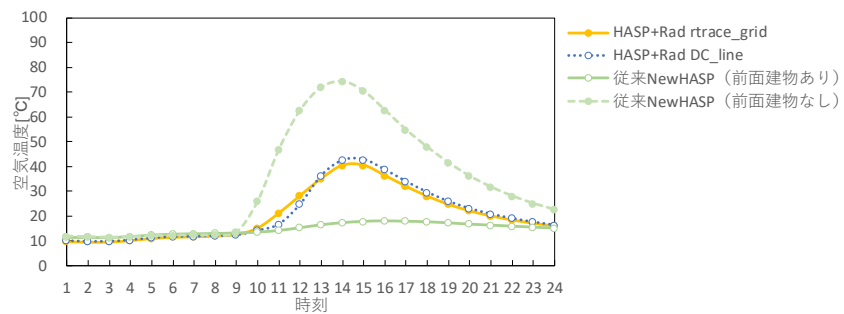


図 4-15 従来 NewHASP における前面建物あり・なしの断熱箱室温

前面建物なしの昼間の室温は、本研究による評価法の室温より高くなり、通路や樹木を想定した前面建物からの反射日射が、室温に大きな影響を与えていることが分かった。

4.2.4.3 EnergyPlus との比較

EnergyPlus¹⁻²⁰⁾は、シミュレーション条件の入力、結果の出力ともテキストファイルベースで実行するが、SketchUp と OpenStudio を利用することにより、形状作成や、計算条件の入力を簡易化することができる。本研究では、図 4-16 に示すフローにて EnergyPlus 計算を実行した。



図 4-16 EnergyPlus 計算フロー

EnergyPlus における日射熱取得は、従来 NewHASP 同様、直達成分と拡散成分に分けた式(4.2)により算出している。

【Engineering Reference⁴⁻⁸⁾ 5.4.7 Solar Gains 参照】

$$Q_{so} = \alpha \cdot (I_b \cdot \cos \theta \cdot S_s / S + I_s \cdot F_{ss} + I_g \cdot F_{sg}) \cdots (4.2)$$

Q_{so}	: 日射熱取得	total solar gain
α	: 吸収率	solar absorptance of the surface
I_b	: 直達日射	intensity of beam (direct) radiation
θ	: 太陽方位角	Azimuth angle of point in sky
S	: 面の面積	area of the surface
S_s	: 日照面積	sunlit area
I_s	: 天空からの拡散日射	intensity of sky diffuse radiation
F_{ss}	: 面の天空に対する形態係数	angle factor between the surface and the sky
I_g	: 地物からの拡散日射	intensity of ground reflected diffuse radiation
F_{sg}	: 面の地物に対する形態係数	angle factor between the surface and the ground

日照・日射制御装置がある場合は、空の放射輝度分布を考慮した補正係数によって F_{ss} が変更されるが、地物の拡散日射の影は計算されないため、日照・日射制御装置の効果を推定して、 F_{sg} の入力値を修正して反映する。

EnergyPlus では、日照・日射制御装置として、以下の4種類を取り扱うことができる。

- ・ Shades
- ・ Blinds
- ・ Screens
- ・ Switchable glazing

【Engineering Reference⁴⁻⁸⁾ 7.7.8 Optical Properties of Window Shading Devices 参照】

屋内日照・日射制御装置として本研究で取り上げたブラインドについて、EnergyPlus では、以下のように取り扱われている。

- ・ スラット面は平板
- ・ スラットは均等拡散面

【Engineering Reference⁴⁻⁸⁾ 7.7 WINDOW CALCULATION MODULE 7.7.9.1 Blinds 参照】

EnergyPlus では、ブラインドを図4-17に示すように、スラットとスラットで囲まれた部分を、 $S_1 \sim S_6$ のエリアを持つ1つのセルと考えて、ブラインド面に入射する日射量を求めている。

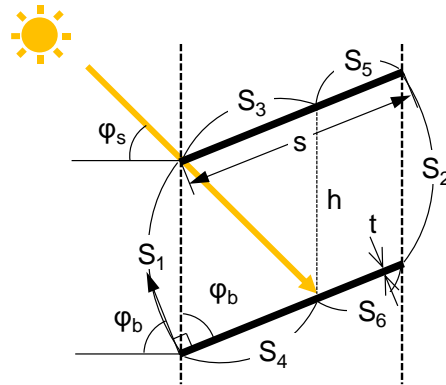


図 4-17 ブラインド面入射日射計算のためのスラット分割

S_1 と S_2 はスラット間隔 h に等しく、 S_3 と S_4 は直達日射が当たるエリアを指している。

直達日射が直接室内に入射する日射量は、図 4-18 に示すように、スラット間隔に対する直達日射が室内に入る比率から求めている。

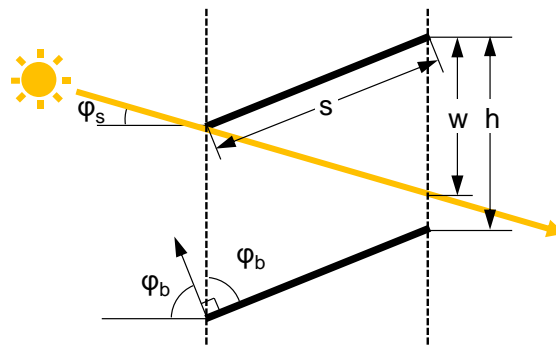


図 4-18 直達日射の直接入射

直達日射がスラットから拡散して入射する日射量は、図 4-17 に示す $S_1 \sim S_6$ のエリアに対する形態係数で日射量を振分けて、透過・反射・吸収分を幾何学的に求めている。

また、直達日射の直接入射と拡散入射は、太陽のプロファイル角は $-90 \sim 90^\circ$ を 5° 間隔に計算している。スラット角は $-90 \sim 90^\circ$ を 10° 間隔に計算し、保護角制御やスケジュール制御にも対応している。

さらに、スラットの厚さ（図 4-17 に示す t ）分からは入射日射がないように補正にすることができる。

スラットはフラットな面と仮定して計算しているが、曲率効果を考慮した補正も可能である。

【Engineering Reference⁴⁻⁸⁾ 7.8 WINDOW HEAT BALANCE CALCULATION 7.8.16.8 Venetian Blinds 参照】

次に、屋外日照・日射制御装置の取り扱いについては、EnergyPlus では、屋外面から反射されて建物に当たる直達日射と、天空からの拡散日射を考慮して計算することができる。

【Engineering Reference⁴⁻⁸⁾ 6.1. DIFFUSE REFLECTION OF BEAM SOLAR AND SKY SOLAR RADIATION 参照】

図 4-19 に示す庇や隣接する建物は、拡散反射率や鏡面反射率を指定して反射日射を求めている。

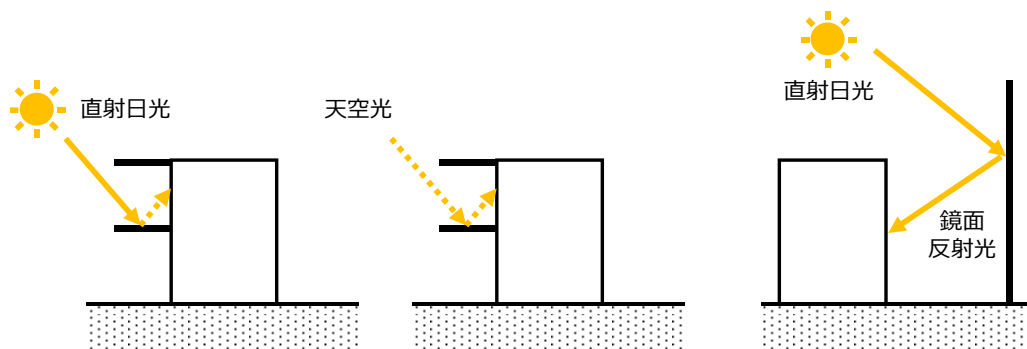


図 4-19 Shadowing Surfaces

EnergyPlus では、建物外皮に入射する日射量を、簡易な光線追跡法を利用して求めている。簡易な光線追跡法では、受光面における各受光点から、外向きの半球方向に進む光線を生成し、次に各光線が、天空に当たるか、地面に当たるか、外構造物等の障害物に当たるかを決定している。直射日光や天空拡散光から受光点の放射輝度が決定され、その放射輝度の受光面への寄与が計算される。さらに、他の受光点からの寄与も考慮し、平均化している。

受光点割り当ての例を図 4-20 に示す。

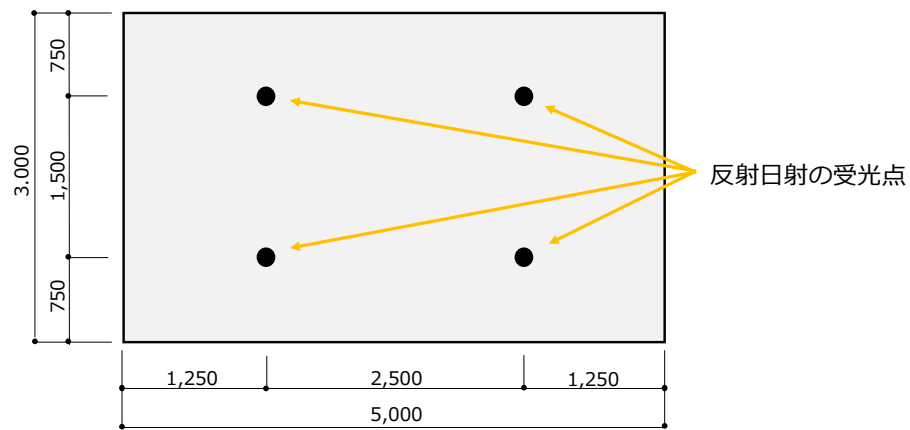


図 4-20 受光点の割り当て

図 4-20 に示す 3,000×5,000mm の長方形の場合は、4つの受光点が割り当てられる。次に、受光点からの光線イメージを図 4-21 に示す。

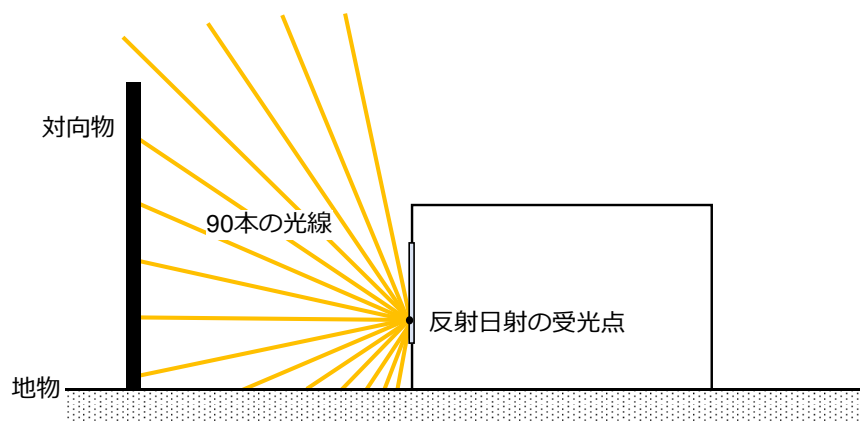


図 4-21 受光点からの光線イメージ

90本の光線が、受光点から外部の半球状に飛ばされ、上向きの光線は対向物や天空、下向きの光線は対向物や地物に当たり、対向物の放射輝度が計算される

地物に当たる光線については、その地点に到達する天空からの放射輝度を計算する。この計算は、地物上に当たる点から上向きに光線を飛ばし、これらの光線のうちどれが天空に到達するのか判断して行う。地物に当たる点からの上向き光線のイメージを図 4-22 に示す。

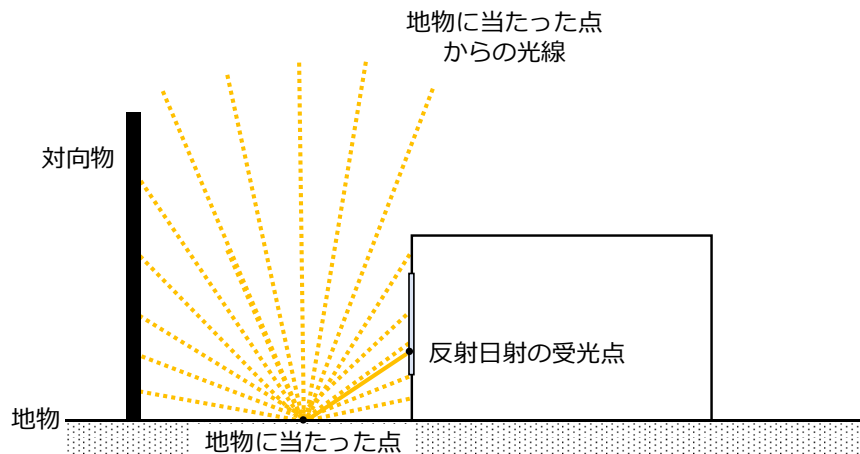


図 4-22 地物に当たる点からの上向き光線

また, EnergyPlus 計算にあたり, 図 4-23 に示すように, 一定温度(冷房 26°C, 暖房 22°C)に空調した大空間の中に, 断熱箱 A,B があるモデルを作成した。空調ゾーンは, 断熱箱 A,B 室と, 各断熱箱に接する面にそれぞれ隣接する空間を設け, それぞれに空調設定ができるよう, 合計 24 ゾーンに分割した。そして, 断熱箱以外の空間が連結した一体の空間となるよう, 空調ゾーン境界の壁を「Air wall」として, 大空間が一定温度で空調されていることとした。

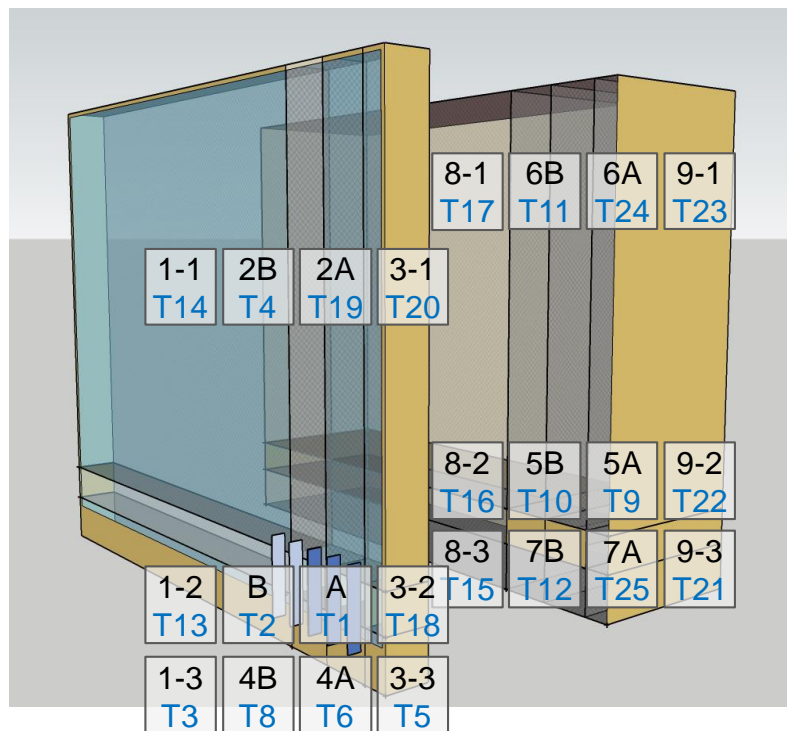


図 4-23 EnergyPlus の空調ゾーン

EnergyPlus と、本研究による評価法の表 4-7 に示す最も詳細な Radiance 計算法「rtrace_10mm 格子中心」、最も簡易な Radiance 計算法「DC_10mm 水平」の室温を比較した結果を図 4-25 に示す。

なお、本研究による評価法と同様、対象とする建物の南側には、屋根のある通路や樹木があることを想定し、図 4-24 のように 3 次元形状に通路と樹木を屋外日照・日射制御装置として入力して、計算を実行した。

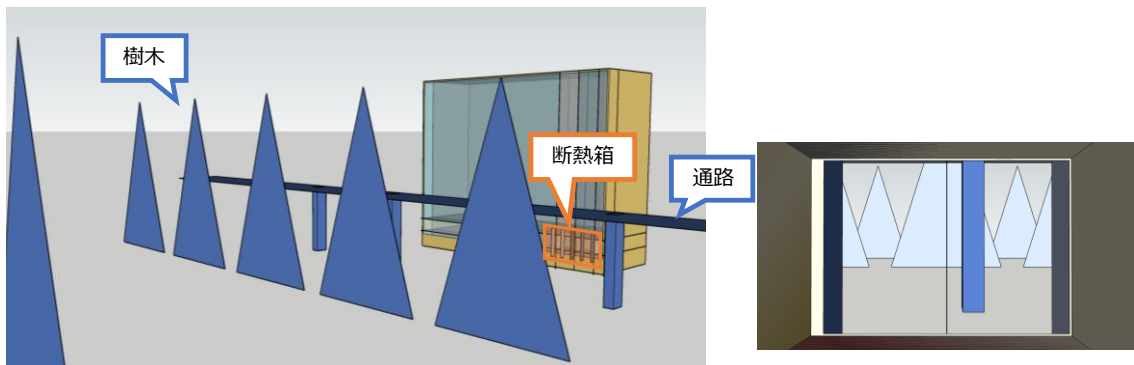
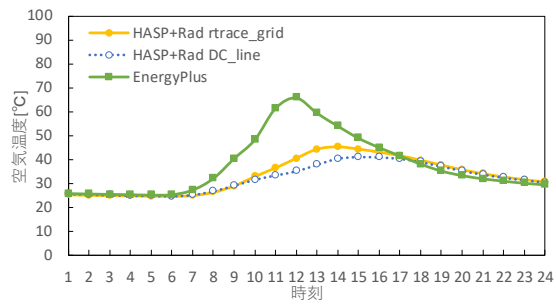


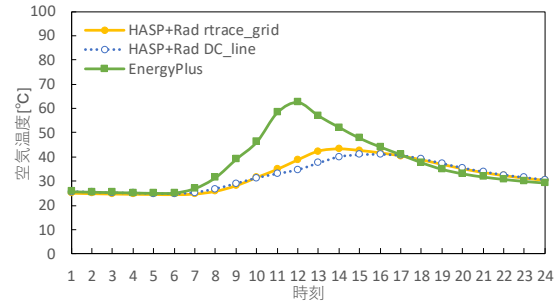
図 4-24 断熱箱周辺と断熱箱の中から見た屋外の様子

2019年8月29日

ルーバー垂直・ブラインド水平

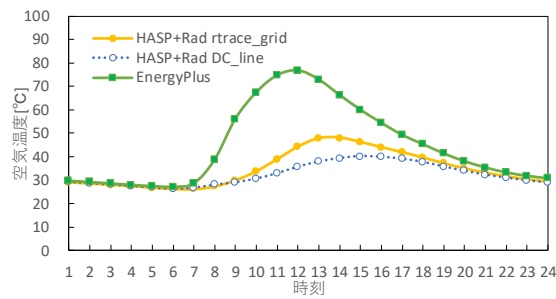


ルーバー垂直・ブラインド 45°

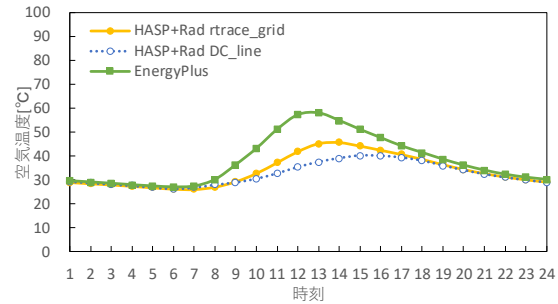


2019年9月2日

ルーバー45° ・ブラインド水平

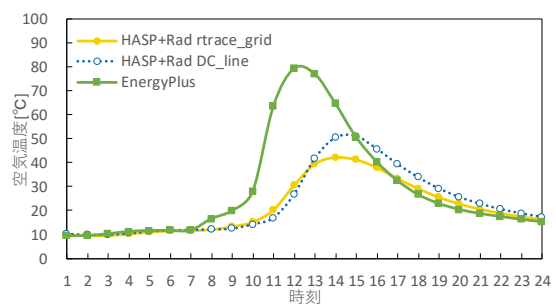


ルーバー45° ・ブラインド 45°

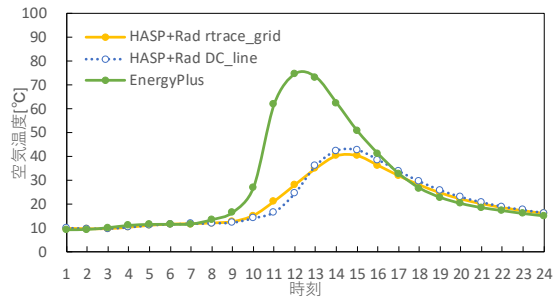


2020年1月9日

ルーバー垂直・ブラインド水平

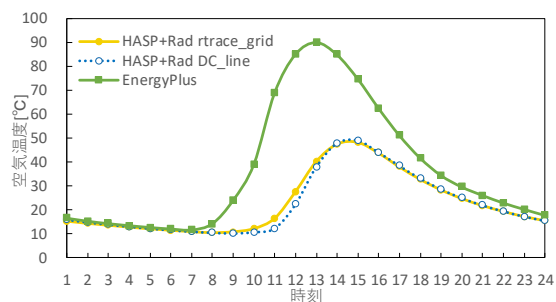


ルーバー垂直・ブラインド 45°



2020年1月10日

ルーバー45° ・ブラインド水平



ルーバー45° ・ブラインド 45°

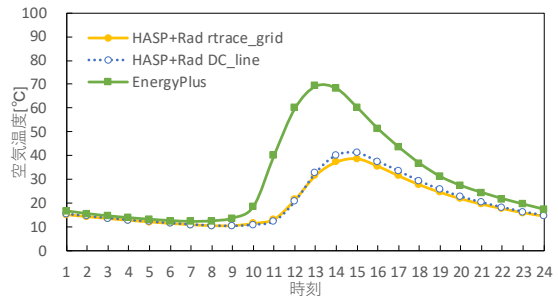


図 4-25 断熱箱室温 (EnergyPlus)

EnergyPlus の室温は、ブラインド水平とブラインド 45° を比較すると、各設定とも、ブラインド 45° の方が低い。また、ルーバー垂直のピークが 12 時、ルーバー 45° のピークが 13 時となり、1 時間の差異が見られた。太陽高度の低い冬の 9 時・10 時に、通路の影響で直射日光が遮られて、室温の上昇が抑えられている点は、本研究による評価法の傾向と一致した。夜間の室温は本研究による評価法とほぼ一致したが、昼間の室温は本研究による評価法より大きいという結果となった。これは、EnergyPlus は簡易な光線追跡法を利用して、建物外皮に入射する日射量を求めており、簡易な光線追跡法で設定される窓面に 4 点の反射日射受光点では、ルーバーや通路の反射日射を詳細に感知することができずに、窓面日射熱取得が大きくなったためと考えられる。参考として、通路や樹木がなかった場合の室温を、図 4-26 に示す。

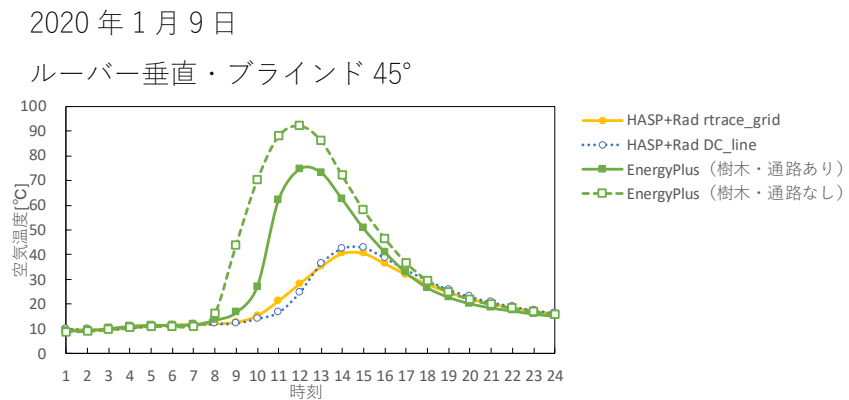


図 4-26 EnergyPlus における通路・樹木あり・なしの断熱箱室温

樹木・通路なしの室温は、ありの室温に比べて高く、樹木・通路ありでは、太陽高度の低い冬の 9 時・10 時に、通路の影響で直射日光が遮られて、室温の上昇が抑えられていた現象が、樹木・通路なしの室温では見られない。樹木・通路が、室温に影響を及ぼしていることが確認できた。

4.3 実大モデル実験による実測値との比較

4.3.1 検証項目

シミュレーションと同様の断熱箱を用いた屋内外日照・日射制御装置の光・熱環境効果実測実験を行い、本研究による計算法の精度検証を行った。検証項目を明らかにするため、実測値を利用した場合の窓転写ファイル作成フローを図4-27に示す。

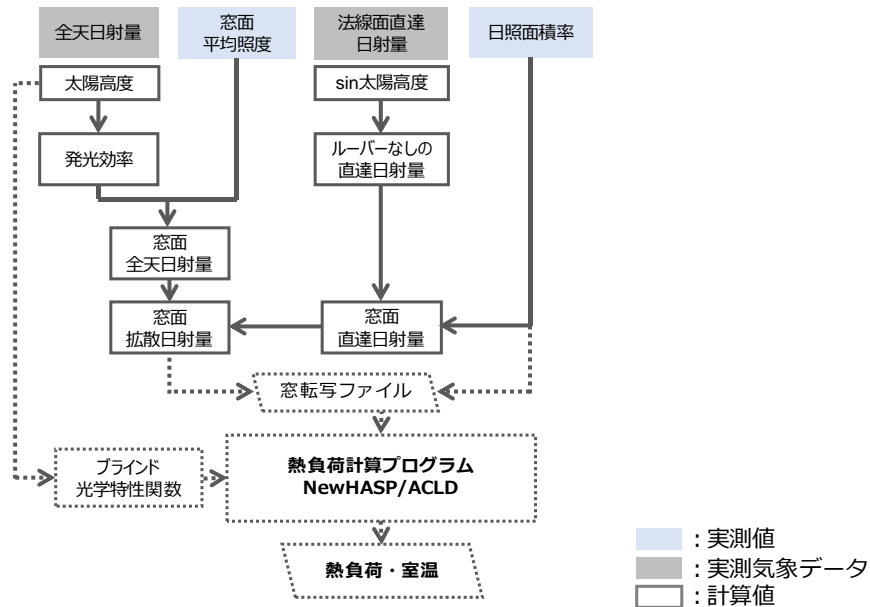


図 4-27 実測値による窓転写ファイル作成フロー

窓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、窓面直達日射量を計算するための日照面積率と、出力データである断熱箱室温を実測して、本研究法による結果と比較した。また、Radiance そのものの性能検証として、断熱箱内輝度と断熱箱内照度を実測し、シミュレーション値と比較した。検証項目を表4-9に示す。

表 4-9 検証項目

本研究による計算法	
窓転写ファイル入力	①窓面平均照度
	②日照面積率
窓転写ファイル出力	③室温
Radiance 性能検証	
	④断熱箱内輝度
	⑤断熱箱内照度

表 4-9 に示す①②④⑤の Radiance シミュレーションに使用する天空は、日射量による仮想天空輝度分布と、輝度測定による天空輝度分布の2つを対象とした。図 4-28 に示す機器で1時間間隔に計測した画像を基に、画素ごとの輝度値を算出して、Radiance 天空を作成した。



Nikon 社 D3100+魚眼レンズ
輝度測定ソフト L-CEPT

図 4-28 天空輝度測定

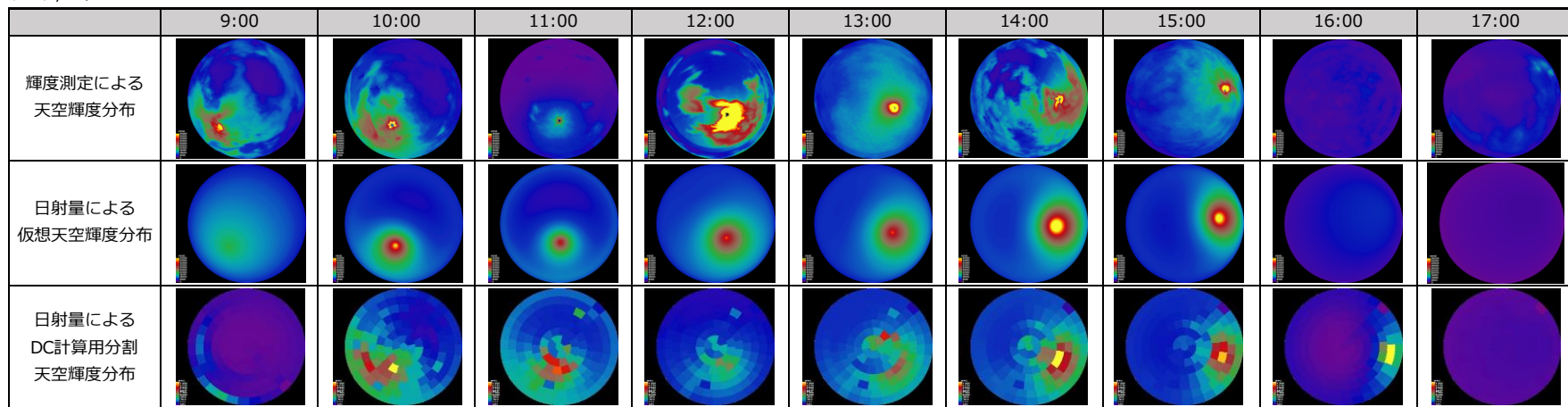


図 4-29 測定天空画像

輝度測定による天空輝度分布、日射量による仮想天空輝度分布、DC 法の太陽を含んで145に分割した天空輝度分布を図 4-30, 4-31 に示す。冬の1/9,1/10は天空輝度測定に失敗したため、輝度測定による天空輝度分布は夏の8/29, 9/2のみ作成した。

日射量による仮想天空輝度分布は、時刻ごとに緯度・経度、法線面直達日射量、水平面天空日射量を元に作成しているため、太陽の位置は輝度測定による天空輝度分布と一致しているが、夏の8/29,9/2は、図 4-12 に示すように日射量の変動があり、表 4-4 のように雲が発生していたため、天空の輝度分布が異なっていることが分かる。冬の1/9,1/10は、天空輝度測定に失敗したが、雲が少なく安定した晴れであったため、日射量による仮想天空輝度分布とほぼ一致した輝度分布になっていたと予想される。

夏 (8/29)



夏 (9/2)

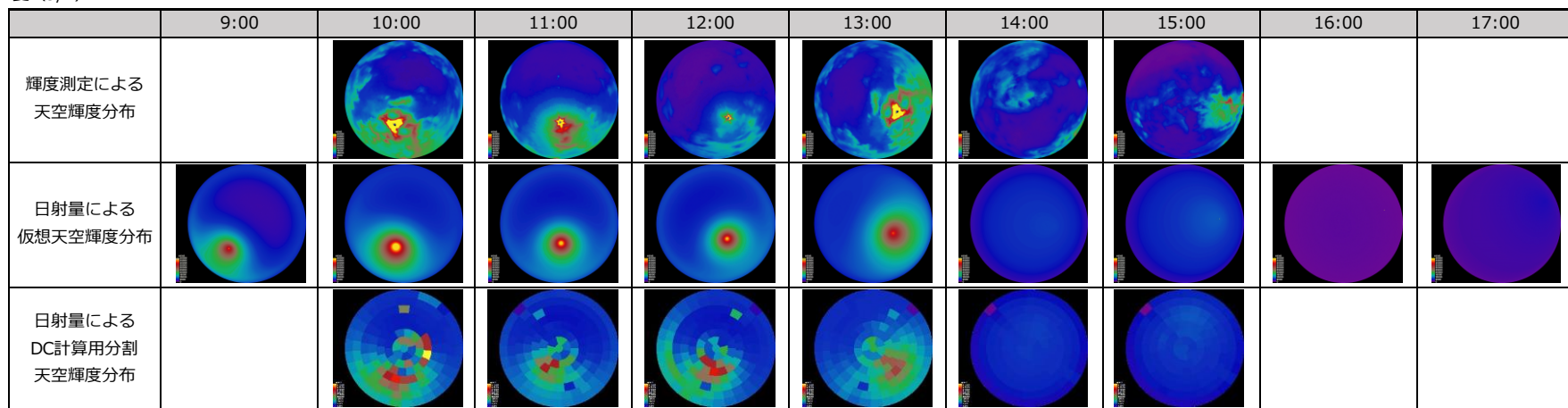
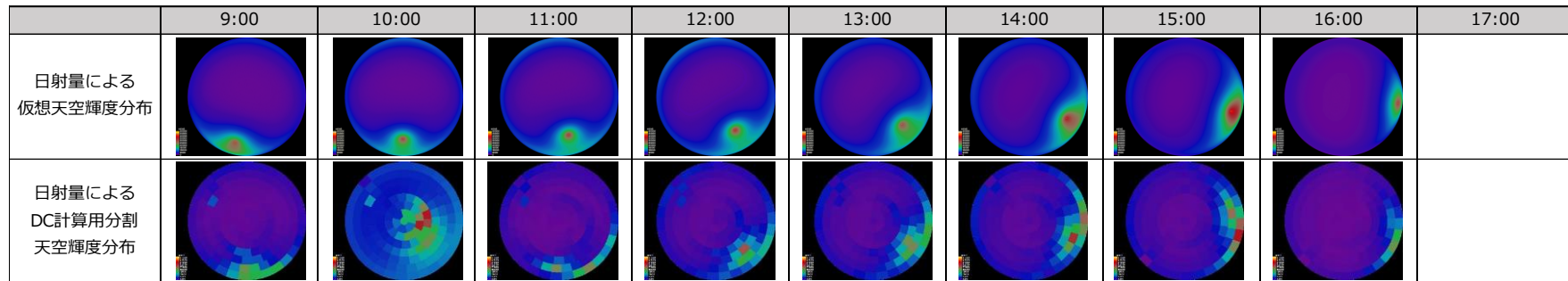


図 4-30 天空輝度分布 (夏)

冬 (1/9)



冬 (1/10)

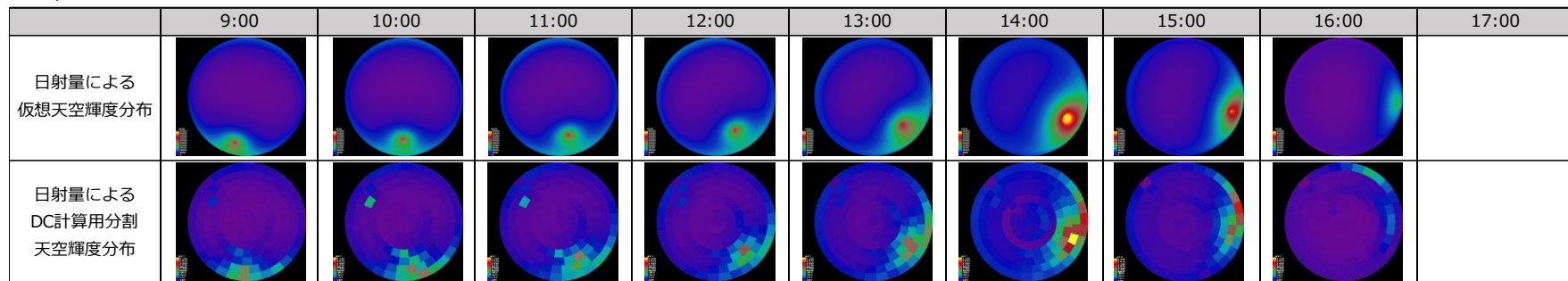


図 4-31 天空輝度分布 (冬)

Radiance シミュレーション時のパラメータは、基本的に表 4-5, 4-6 と同様とし、箱内輝度画像作成のみ表 4-10 とした。

表 4-10 断熱箱内輝度 Radiance 光環境シミュレーションパラメータ (rtrace)

Parameter	Name	Value
ab	ambient bounces	10
aa	ambient accuracy	0.1
ar	ambient resolution	550
as	ambient super-samples	512
ad	ambient divisions	1024

各検証項目における天空輝度分布・計算手法・日照面積率計算を整理した、本研究による評価法の Radiance 計算方法を表 4-11 に示す。

表 4-11 本研究による評価法の Radiance 計算方法

天空輝度分布	日射量仮想輝度分布 (gendaylit)				輝度測定による天空輝度分布 (real)			
計算手法	rtrace		DC		rtrace		DC	
日照面積率計算点	grid	line	grid	line	grid	line	grid	line
①窓面平均照度		○		○		○		○
②日照面積率	○	○	○	○	○	○	○	○
③室温	○	○	○	○	-		-	
④断熱箱内輝度		○		○		○		○
⑤断熱箱内照度		○		○		○		○

NewHASP による室温の計算には、助走日を含めた 24 時間のデータが必要であるため、輝度測定による天空輝度分布を利用した計算は行わなかった。

4.3.2 計測

実験では、表 4-9 に示す①～⑤を、以下のように計測した。

①窓面平均照度

窓面平均照度は、断熱箱横に仮想の断熱箱を想定して、垂直ルーバーを設置し、窓に相当する面に貼った模造紙を利用して測定した。測定点（照度センサ位置）を図 4-32 に示す。

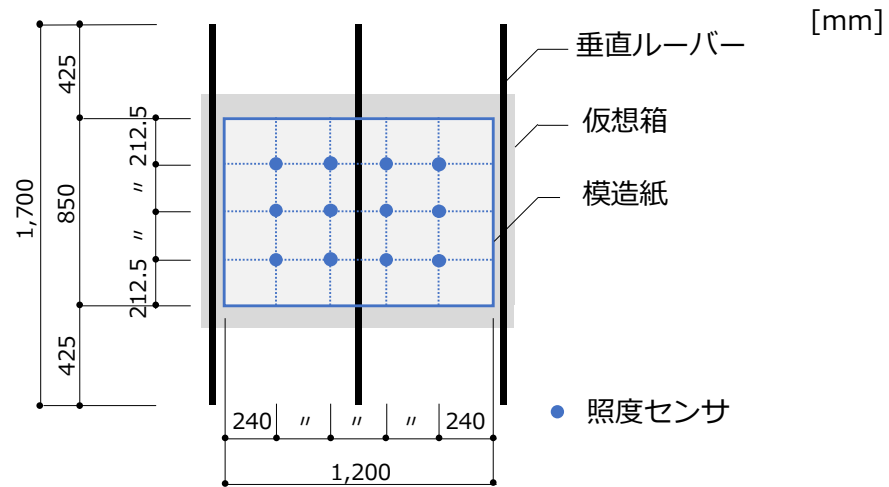


図 4-32 窓面平均照度測定点（屋外側から仮想箱を見た図）

②日照面積率

日照面積率を求めるために、図 4-32 の模造紙を屋内側から見て輝度画像を測定した。測定した輝度画像を、付録（付 1）に示す。

③室温

室温は、断熱箱の天井中央・床中央に熱電対を設置して、自然室温（成り行き温度）を測定した。

④断熱箱内輝度

断熱箱内輝度は、断熱箱内に魚眼 CCD カメラを設置して測定した。

⑤断熱箱内照度

断熱箱内照度は、天井・壁（東・西）・床・鉛直面（魚眼 CCD カメラ横）に照度センサを設置して測定した。

①～⑤の計測器を表 4-12、計測方法を表 4-13 に示す。

表 4-12 計測器

計測項目	計測器メーカー・型番
①窓面平均照度	T&D 社 おんどとり TR-72wf
②日照面積率	Canon EOS 80D+広角レンズ (使用プログラム:REALAPS)
③室温	熱電対
④断熱箱内輝度	Baumer GigE カメラ TXG13c + FUJIFILM 魚眼レンズ FE185C046HA-1 (使用プログラム:独立行政法人建築研究所 L-CEPT)
⑤断熱箱内照度	T&D 社 おんどとり TR-72wf

表 4-13 計測方法

項目	計測対象	計測間隔
①窓面平均照度	仮想箱窓面の屋外照度 (12 点)	20 秒
②日照面積率	仮想箱窓面の輝度画像	1 時間 (毎正時)
③室温	A,B 室内の自然室温 (天井中央・床中央)	1 分
④断熱箱内輝度	A,B 室内の輝度画像 (天井・壁 (東・西)・床)	1 時間 (毎正時)
⑤断熱箱内照度	A,B 室内の照度 (天井・壁 (東・西)・床・鉛直面)	20 秒

4.3.3 実験概要

本研究による計算法の精度検証を行うため、断熱箱を用いた屋内外日照・日射制御装置の光・熱環境効果を測定する実験を行った。実験概要を以下に示す。

4.3.3.1 実験場所

実験は、東京都清瀬市にある(株)大林組技術研究所のオープンラボ2の1階で実施した。実験実施場所の配置図を図4-33に示す。

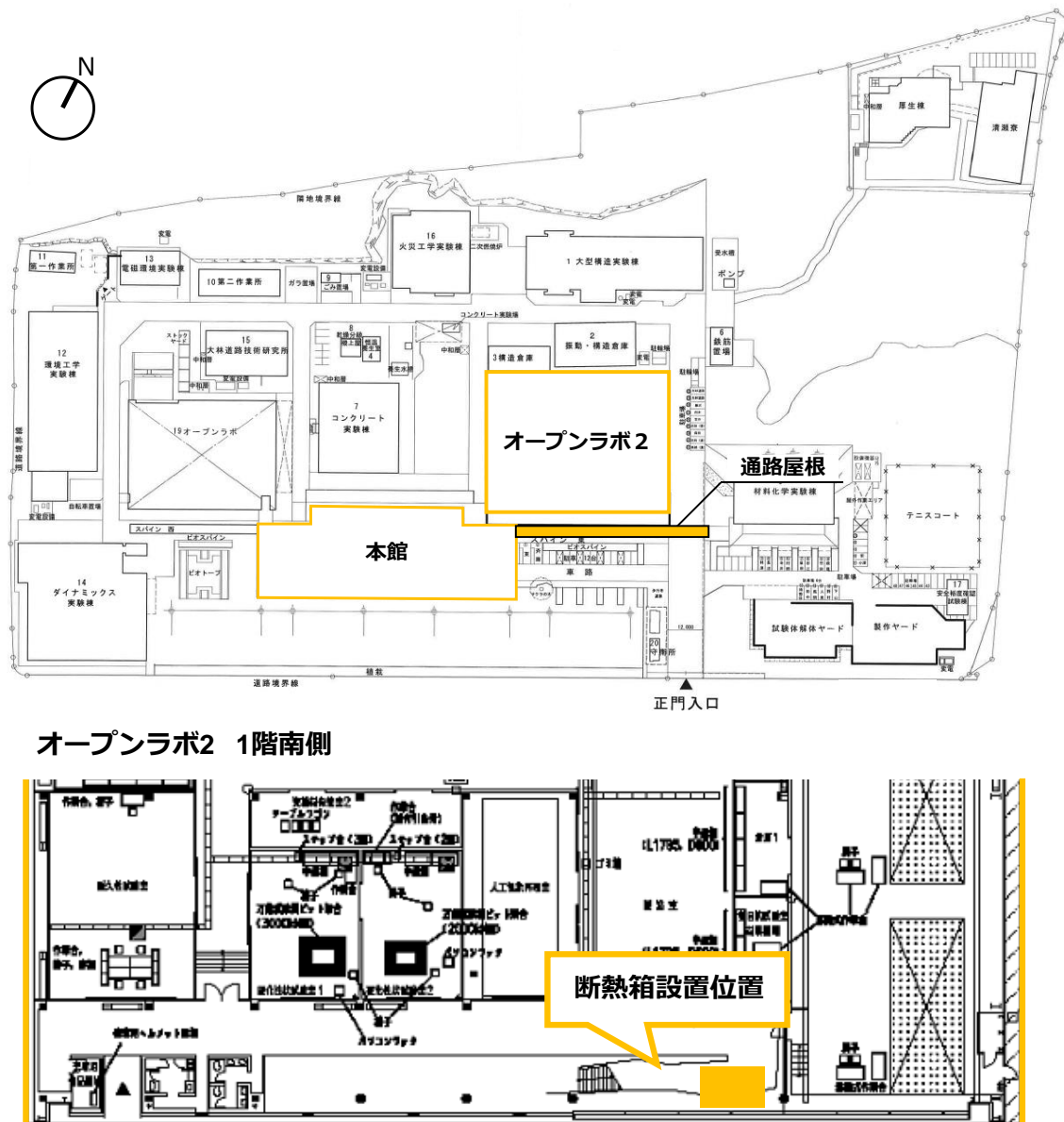


図 4-33 配置図

4.3.3.2 断熱箱仕様

測定に用いる断熱箱の平面図・断面図を図4-34に示す。断熱箱には、屋内日照・日射制御装備（ブラインド）、屋外日照・日射制御装置（垂直ルーバー）が取り付けられている。それぞれの詳細を図4-35, 4-36に示す。

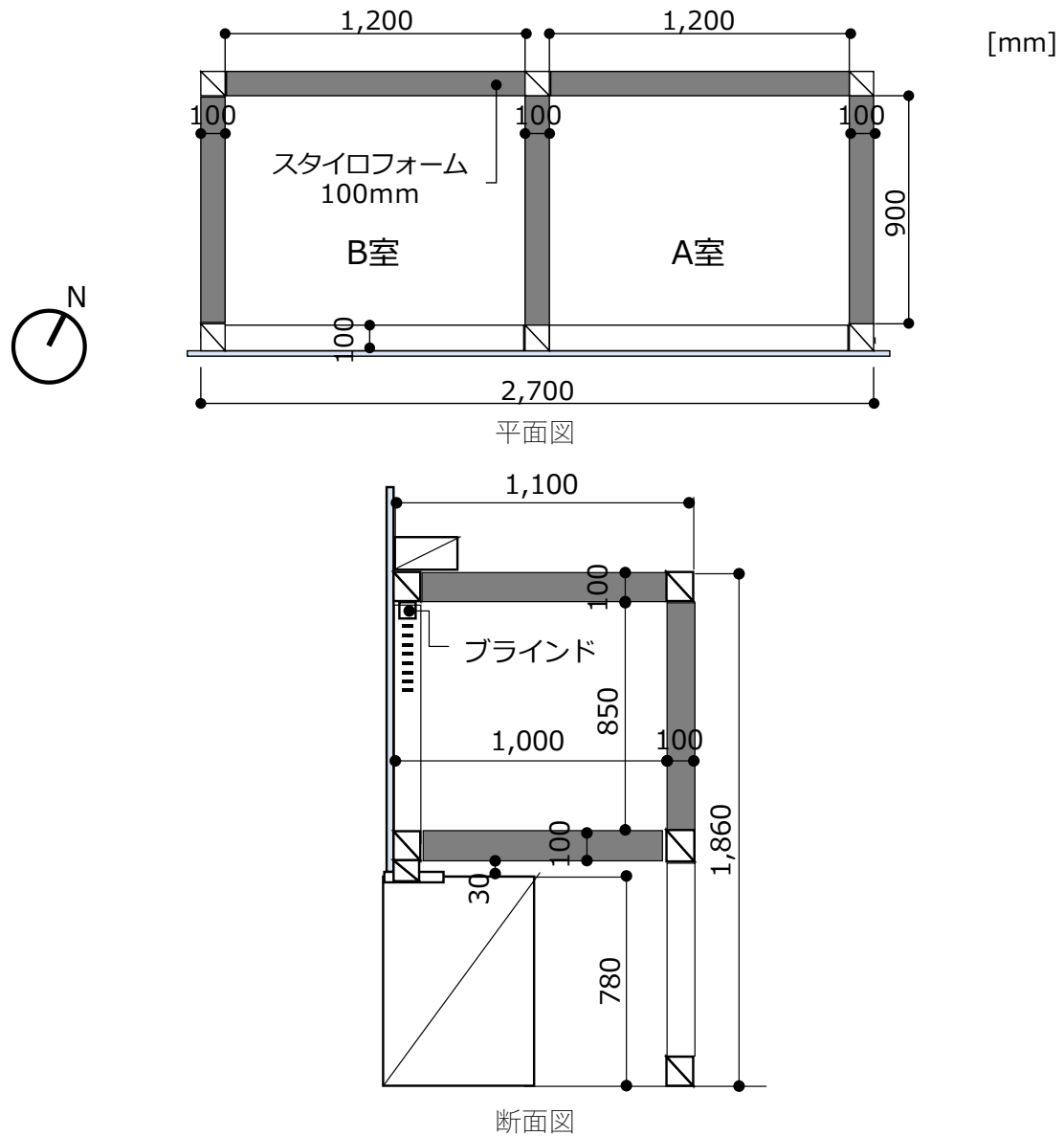
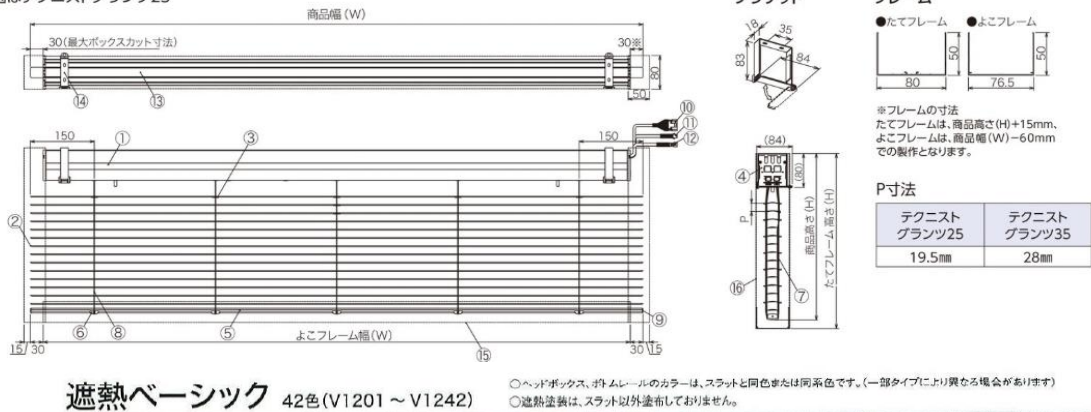


図 4-34 断熱箱

図はテクニストグランツ25



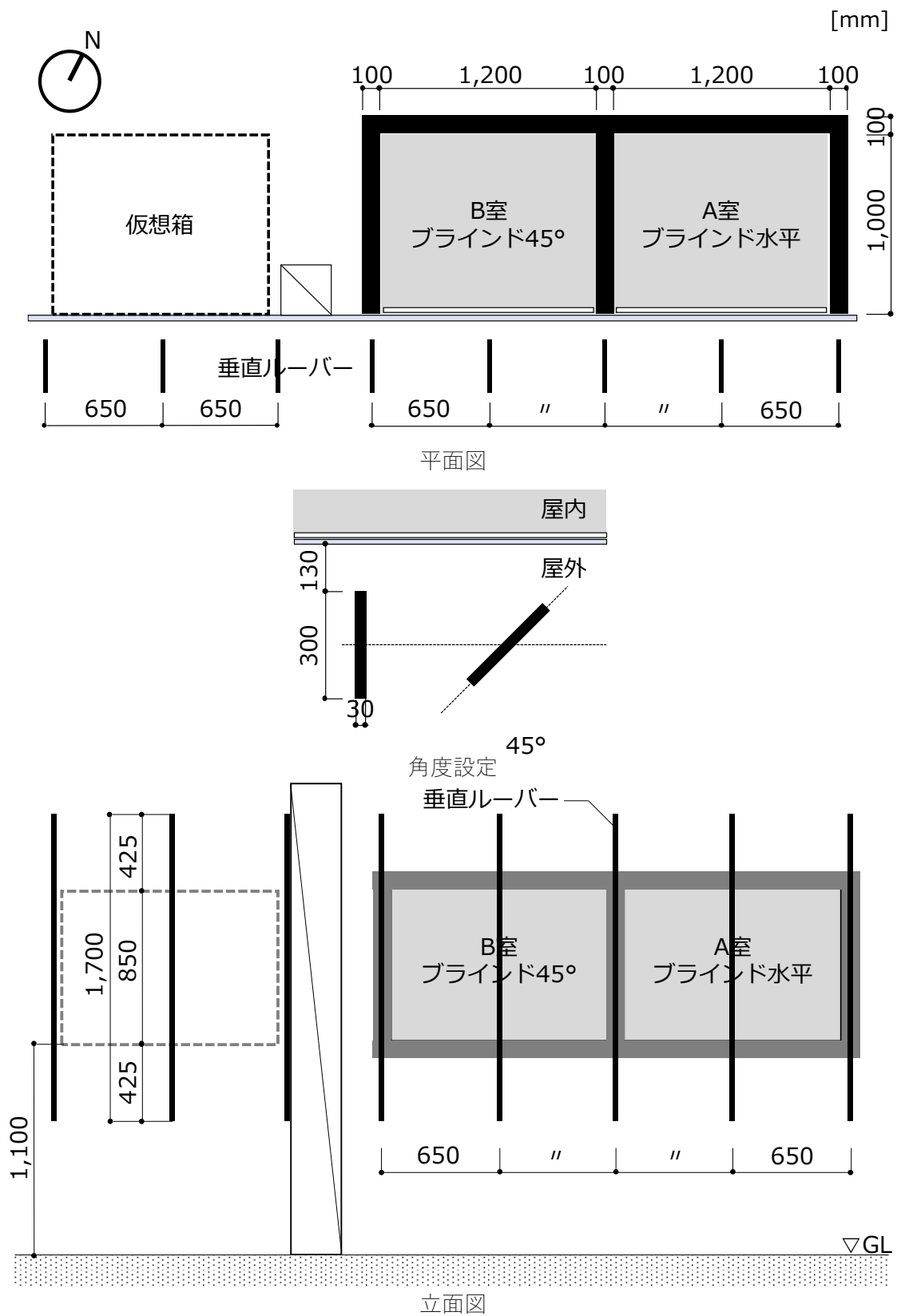


図 4-36 垂直ルーバー

断熱箱の天井・壁・床・ルーバーには完全つや消し塗料加工アルミパネル（艶シャットコート）（図 4-37）を張り、完全拡散面とした。



図 4-37 艶シャットコート

断熱箱付近の地面の反射率を一定にするため、簡易なシミュレーションにて窓面の照度に影響が及ぶ範囲を確認の上、反射シート（9.0×5.7m）を設置した。

断熱箱内および反射シートの反射率を表 4-14 に示す。

表 4-14 反射率
(分光測色計 コニカミノルタ CM-700D にて測定)

部位	指定色	1 回目[%]	2 回目[%]	3 回目[%]	平均値[%]
天井	N8.5	66.18	66.27	66.39	66.3
壁（東）	N7.5	48.32	48.37	48.46	48.4
壁（西）	N7.5	48.4	48.57	48.36	48.4
壁（OL2 室内側）	N7.5	48	48.1	48.67	48.3
床	N5	17.94	17.88	17.75	17.9
反射シート	-	9.64	9.79	9.77	9.7

実際に設置した断熱箱の様子を図 4-38 に示す。

内観（A 室ブラインド水平）



内観（B 室ブラインド 45° ）



外観（ルーバー垂直）



外観（ルーバー 45° ）



仮想箱



図 4-38 断熱箱の様子

断熱箱の西側に本館建物があり、断熱箱の前面には、本館へ続く通路の屋根がかかっている。通路の屋根が、窓面に影を落とす時間帯があるため、断熱箱内の室温に影響を与えると考えた。そこで、Radiance シミュレーションには、通路とその屋根の形状を入力し、断熱

箱への影響が正しく反映されるようにした。断熱箱と前面通路との関係を図 4-39 に示す。

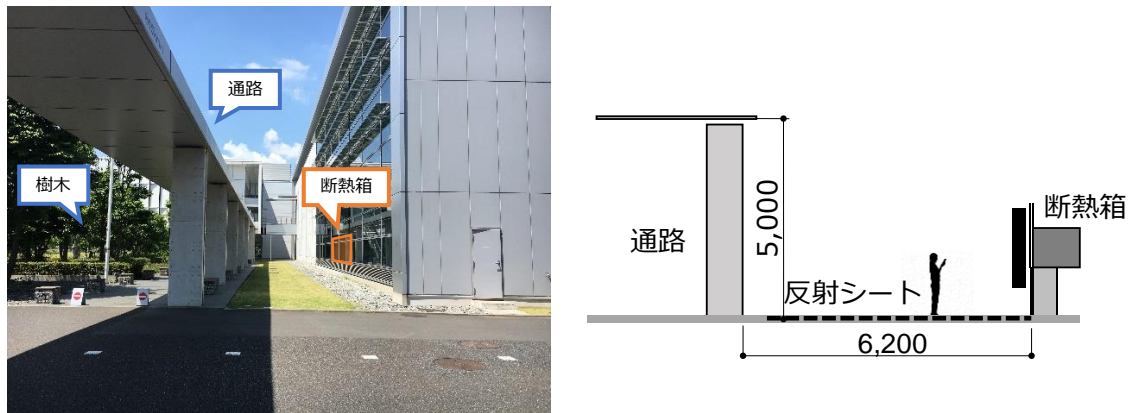


図 4-39 前面通路との関係

4.3.3.3 実験日

実験日と日照・日射制御装置であるルーバー、ブラインド角度の条件を表 4-15 に示す。

表 4-15 実験日と日照・日射制御装置条件

垂直ルーバー	ブラインド	夏	冬
0°	A 室：0°	2019 年 8 月 29 日	2020 年 1 月 9 日
	B 室：45°		
45°	A 室：0°	2019 年 9 月 2 日	2020 年 1 月 10 日
	B 室：45°		

実験日の気象データは「4.2.3.3 気象データの測定」と同様である。

NewHASP は、表 4-1 に示す気象データを元に室温を計算しており、気象データ作成時には、毎正時に、1 時間前からの平均値を与えている。光環境評価は瞬時に行われるものであるため、NewHASP 気象データに与える日射量をベースとした毎正時の窓面照度・日照面積率は、1 時間前からの平均日射量と平均時刻から算出した。その他、発光効率、NewHASP 気象データを含めた時刻差を、図 4-40 に示す。

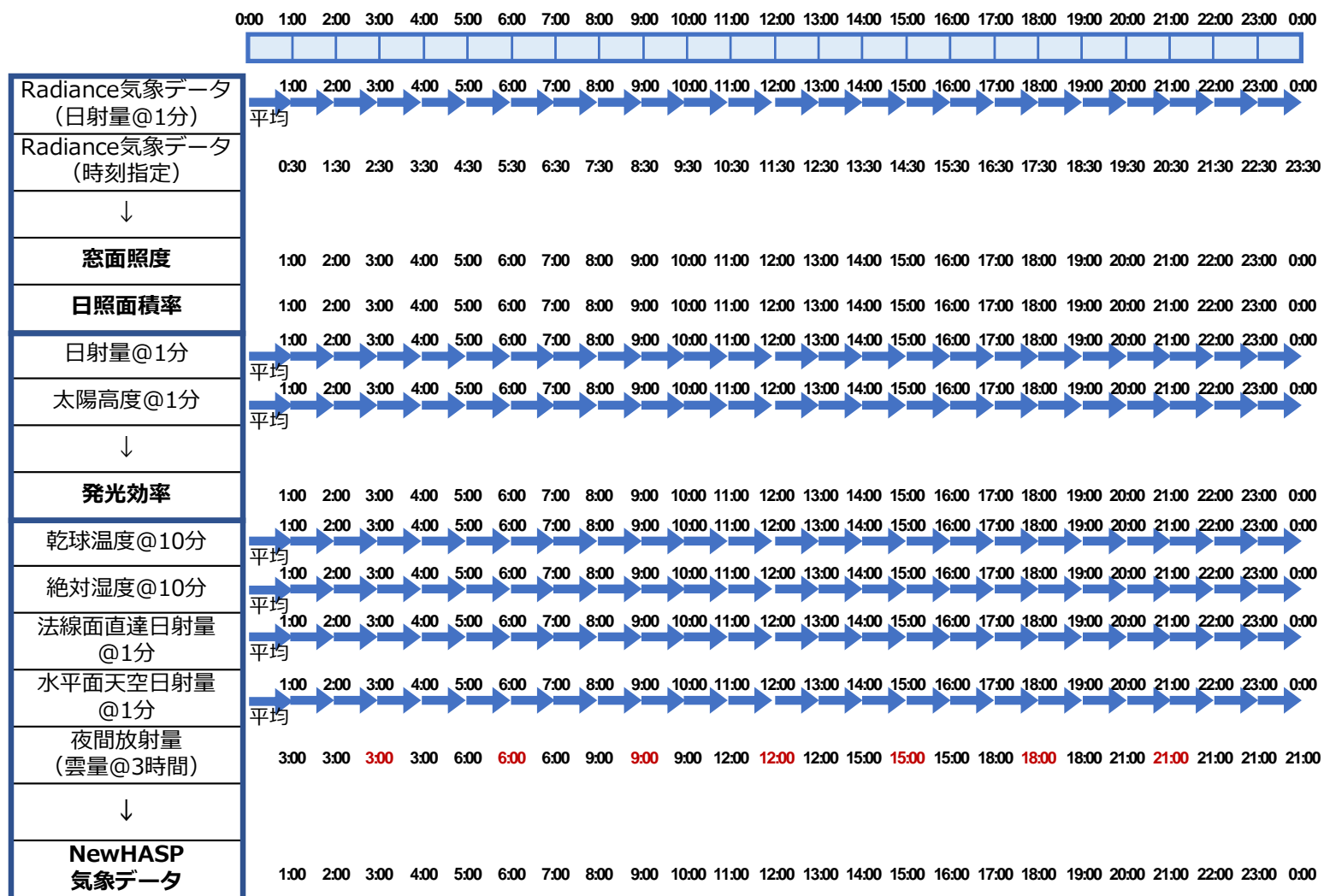


図 4-40 Radiance と NewHASP 気象データの時刻差

4.3.3.4 誤差要因の検討

実測値とシミュレーションを比較する場合の誤差要因を検討した。

Radiance については、CIE 技術報告書「照明コンピュータ・プログラムの精度を評価するためのテストケース」⁴⁻⁹⁾を参考に検討した。Radiance に関連する誤差要因と対策を表 4-16 に示す。

表 4-16 Radiance 誤差要因と対策

- a. 実測値 Objective Errors : ハードに起因する誤差
- b. 実測値 Subjective Errors : 測定時に発生する誤差（人が絡む）
- c. シミュレーション値 Objective Errors : シミュレーション設定に起因する誤差
- d. シミュレーション値 Subjective Errors : シミュレーションの入力に伴う誤差

データ種別	要因	誤差原因	対策
気象データ	天空輝度	a 輝度カメラの誤差	スポット輝度計で校正済み
		b 複数枚測定するための時刻誤差	測定開始時刻を他測定と合わせる
		b 測定場所が模型の隣棟	誤差あり
		c 天空画像に森・建物が入る	全天空照度で補正
	直達照度	d 方位誤差	真北を事前に合わせる
		a 照度計の精度	校正済み照度計に合わせる
		b データ欠測	
		b 時刻誤差	実験日に確認
		b 測定場所が模型の隣棟	誤差あり
		c 10 分データ	毎正時に近い値を利用
		c 視野角 15° の測定値利用	天空輝度と合わせて、グローバル照度で補正
			誤差あり
	法線面直達 日射量 水平面拡散 日射量	a 日射量計の精度	誤差あり
		b データ欠測	
		b 時刻誤差	実験日に確認
		b 測定場所が敷地内別棟	誤差あり（5 時半～7 時半は塔屋の影になっている。）
		c 1 分データ	毎正時に近い値を利用
		c gendaylit による仮想分布天空による誤差	誤差あり
マテリアルデータ	反射率	a 色彩色差計の精度	校正確認
		c 面の場所による反射率の変化	3 か所測定
		c 反射の方向性	箱内およびブルーバーは完全拡散塗料を使用
計算結果	照度	c 計算方式，計算精度	Daylight coefficient, rtrace 法計算して結果を比較
			真北を確認
	輝度画像	d 方位誤差	測定開始時刻を他測定と合わせる
		b 複数枚測定するための時刻誤差	
		c 計算方式，計算精度	Daylight coefficient, rtrace 法で計算して結果を比較
		d 方位誤差	真北を確認

同様に NewHASP に関連する誤差要因について検討した。誤差要因と対策を表 4-17 に示す。

表 4-17 NewHASP 誤差要因と対策

- a. 実測値 Objective Errors : ハードに起因する誤差
 b. 実測値 Subjective Errors : 測定時に発生する誤差（人が絡む）
 c. シミュレーション値 Objective Errors : シミュレーション設定に起因する誤差
 d. シミュレーション値 Subjective Errors : シミュレーションの入力に伴う誤差

データ種別	要因	誤差要因と対策
物性データ	ガラス・ブラインド 外装材・断熱材・内装材	熱貫流率 遮蔽係数 熱伝導率 容積比熱
気象データ	乾球温度 絶対湿度 法線面直達日射量 水平面天空日射量 夜間放射量	乾球温度と相対湿度測定値から計算式で求める
転写ファイルデータ	日照面積率 全拡散日射量	a 照度計の精度：校正済み照度計に合わせる b 時刻誤差：実験日に確認 b 測定場所の誤差：窓内外のずれを測定 b 方眼紙の誤差：印刷，持ち運び，貼付時の歪みに注意 b 輝度画像読み取りの誤差 a 照度計の精度：校正済み照度計に合わせる b 時刻誤差：実験日に確認 b 測定ポイントの粗さ
プログラム内蔵データ	外表面熱伝達率 内表面熱伝達率	
NewHASP インプットデータ	緯度・経度 地物反射率 基準温度 出力形式 助走計算開始月日 外表面方位角 材版・材厚 形状データ 隣室条件 窓面積 室内熱容量 換気ファン風量・温度	平均値・直前直後 2 つ 床面積・天井高 OL2 室温→実験中は 24 時間運転により室温一定に保つ 実験プラザ室温→実験中は 24 時間運転により室温一定に保つ 仮想 SP02 を作成し，24 時間室温一定として CFLW より実験箱側へ隙間風として与える。
計算結果	室温	a 温度計の精度 b 時刻誤差：実験日に確認

また、同 CIE 技術報告書⁴⁻⁹⁾では、照明シミュレーションプログラムの精度を検討するためのテストケースが提案されている。単純な矩形空間+人工照明を対象とした「テストケース I」では、シミュレーションと実測値の誤差を、

各点の照度	±10.5%
空間の平均照度	±6.3%

の範囲で許容してよいとしている。本研究では、周辺建物を含んだ複雑な空間+昼光が対象であるが、参考として「テストケース I」の誤差範囲との検証を行った。誤差率は、式 (4.3) により算出した。

$$\text{誤差率} = \frac{\text{シミュレーション値} - \text{実験による実測値}}{\text{実験による実測値}} \times 100 \quad [\%] \quad \cdots (4.3)$$

4.3.4 実験結果

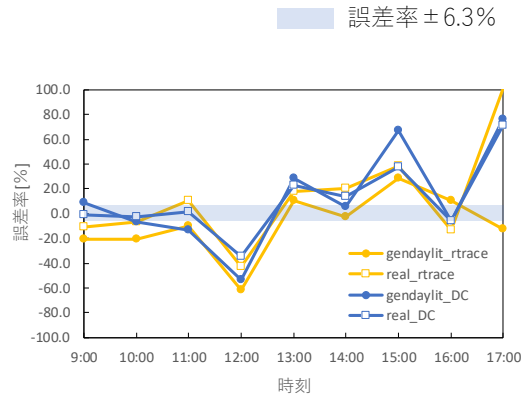
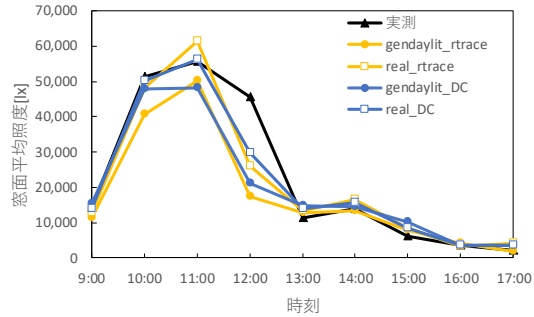
4.3.4.1 本研究による評価法の検証

実験による実測値と、表 4-9 に示す本研究による評価法のシミュレーション値を比較した結果を示す。また、表 4-11 に示す本研究による評価法の Radiance 計算方法による窓面平均照度、日照面積率については、実測値との誤差率と CIE 技術報告書⁴⁻⁹⁾による誤差率(空間の平均照度 ±6.3%) 範囲を示し、室温については、天井と床面で測定した実測した室温の平均との誤差率を合わせて示す。

①窓面平均照度

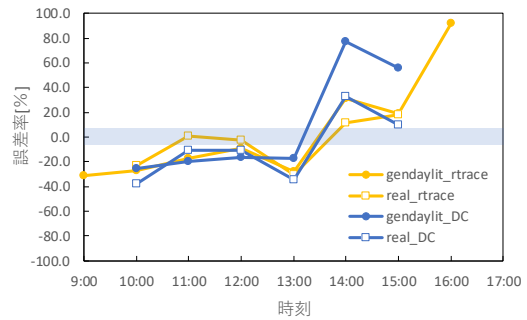
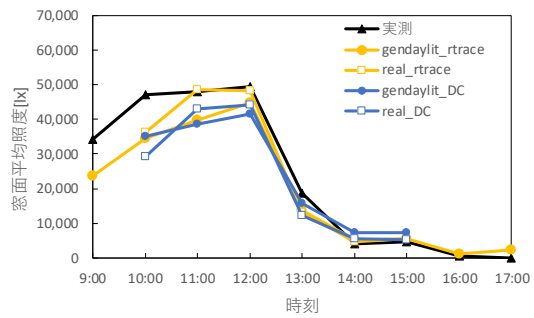
2019年8月29日

ルーバー垂直



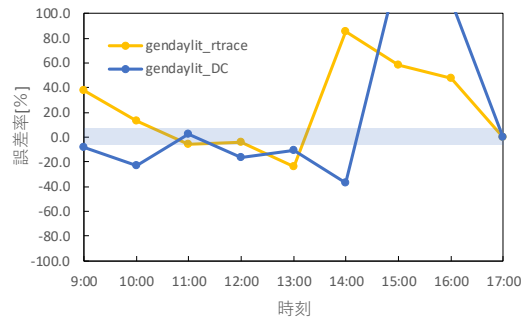
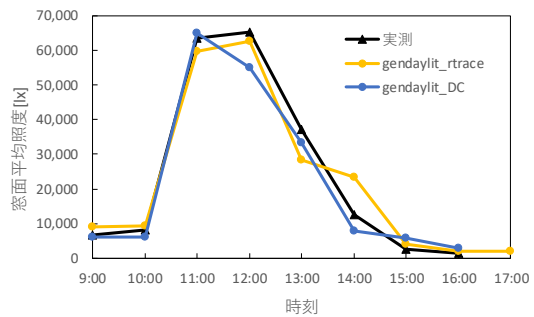
2019年9月2日

ルーバー45°



2020年1月9日

ルーバー垂直



2020年1月10日

ルーバー45°

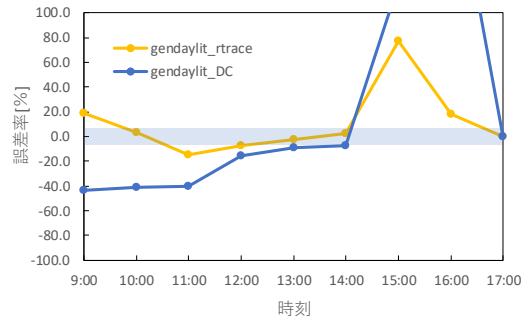
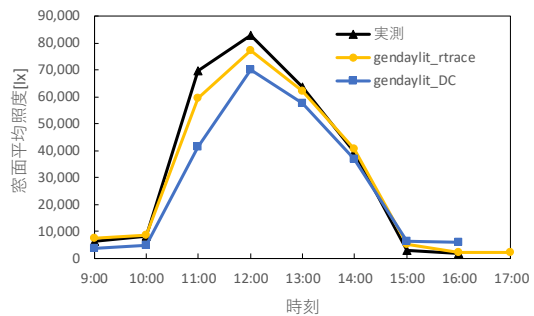
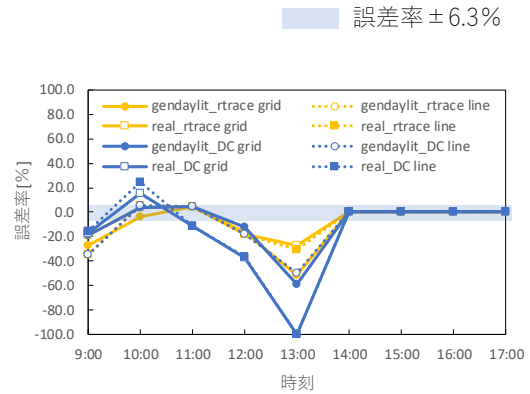
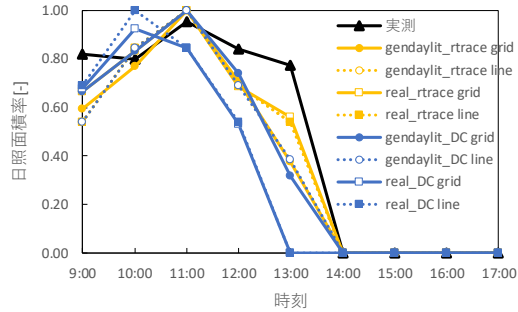


図 4-41 窓面平均照度

②日照面積率

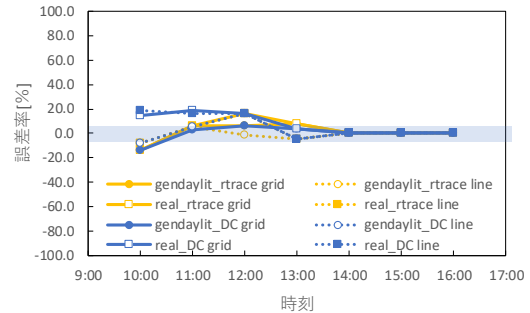
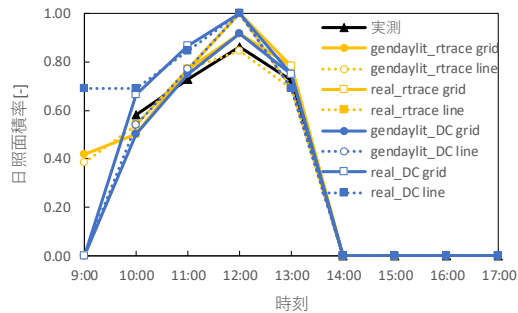
2019年8月29日

ルーバー垂直



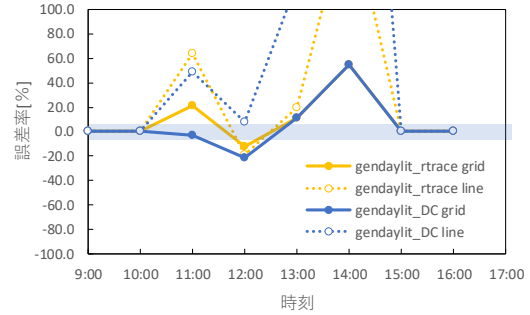
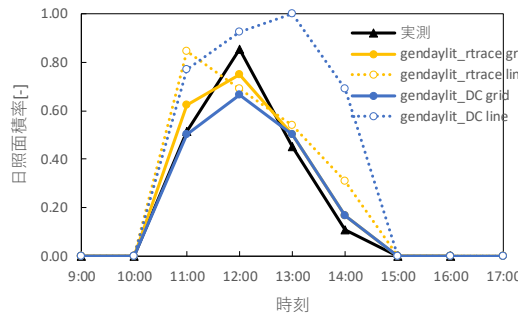
2019年9月2日

ルーバー45°



2020年1月9日

ルーバー垂直



2020年1月10日

ルーバー45°

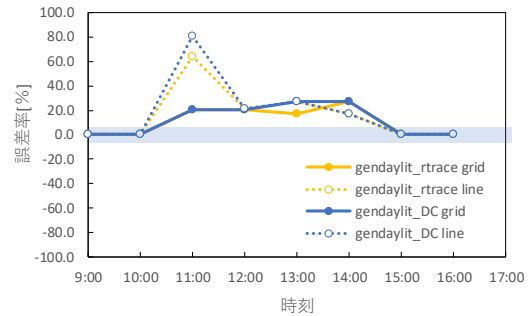
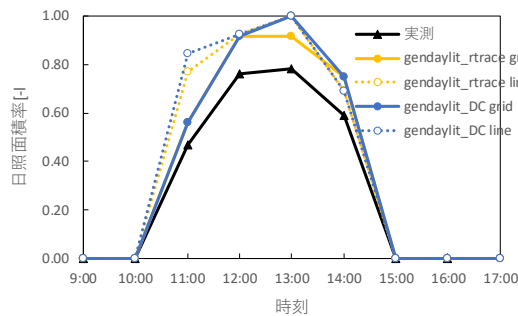


図 4-42 日照面積率

③室温

2019年8月29日

ルーバー垂直・ブラインド水平

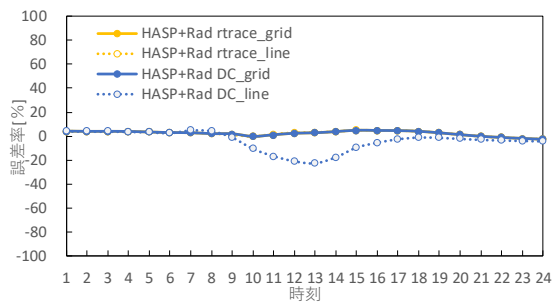
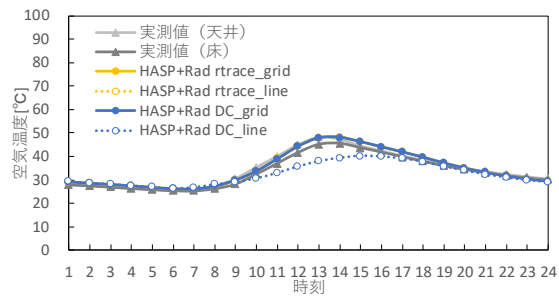
実測室温欠測

ルーバー垂直・ブラインド45°

実測室温欠測

2019年9月2日

ルーバー45°・ブラインド水平



ルーバー45°・ブラインド45°

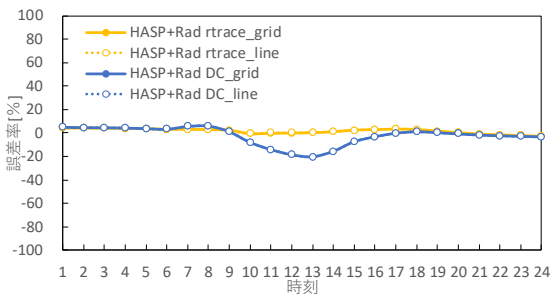
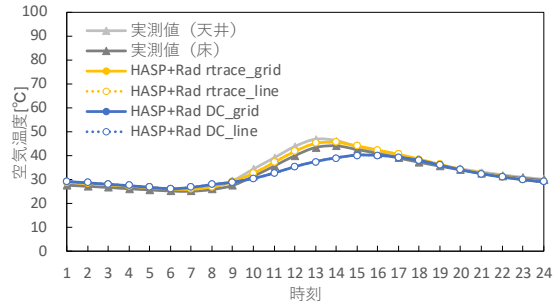
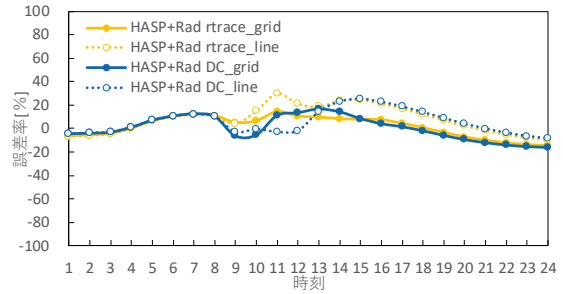
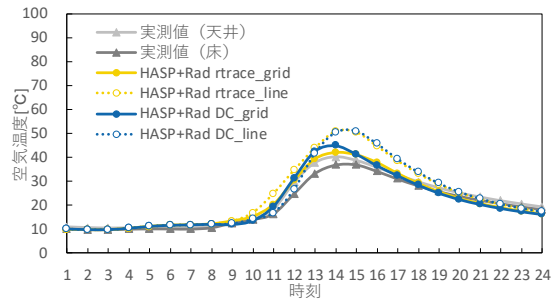


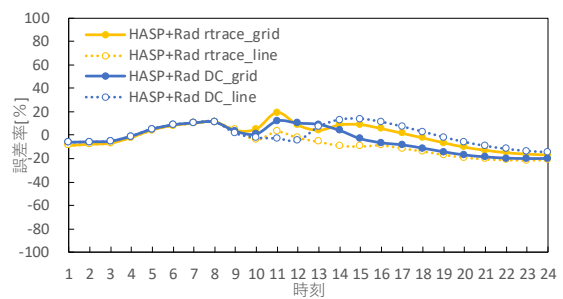
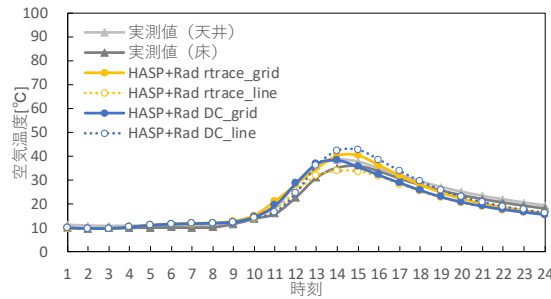
図 4-43 室温 (夏)

2020 年 1 月 9 日

ルーバー垂直・ブラインド水平

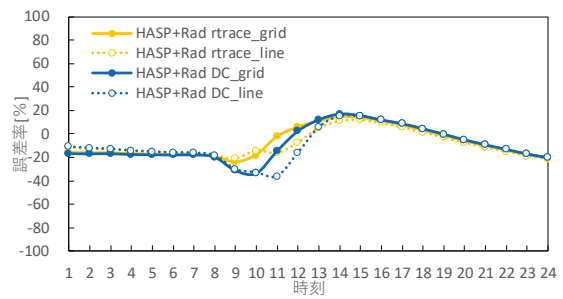
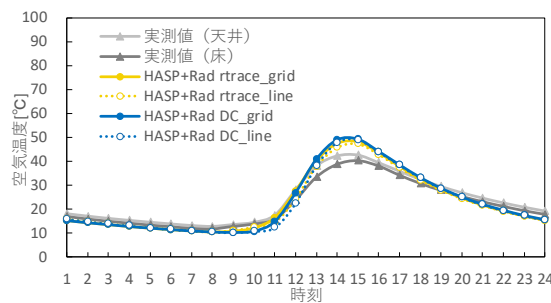


ルーバー垂直・ブラインド 45°



2020 年 1 月 10 日

ルーバー45° ・ブラインド水平



ルーバー45° ・ブラインド 45°

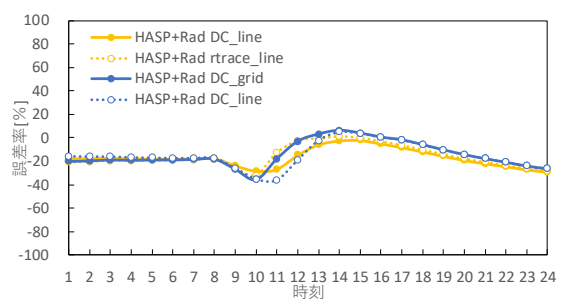
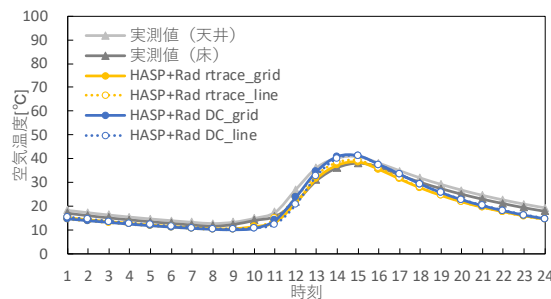


図 4-44 室温（冬）

窓面平均照度について、Radiance 計算法の rtrace と DC で比較すると、視点から飛ばした光線を追跡して照度を求める rtrace の方が、天空と照度算出点の照度の関係を係数化した年間計算法である DC に比べて、実測値との誤差率が小さく、誤差率の許容範囲($\pm 6.3\%$)に含まれる数が多い。天空別に比較すると、輝度測定による天空輝度分布の方が、日射量による仮想天空輝度分布より照度が高く、実測値との誤差率が小さい。なお、8/29 は、図 4-12 に示すように日射量の変動が大きく、特に 12 時前後に日射量が激しく上下していたため、実測値とシミュレーション値の誤差が大きくなったと考えられる。

日照面積率について、rtrace と DC で比較すると、rtrace の方が DC より実測値との誤差率が小さく、誤差率の許容範囲($\pm 6.3\%$)に含まれる数が多い。天空別に比較すると、輝度測定による天空輝度分布と日射量による仮想天空輝度分布による日照面積率の値は近い。日照面積率計算点で比較すると、夏は、10 mm格子中心と 10 mm水平ラインによる日照面積率の差は小さいが、冬は、10 mm水平ラインによる日照面積率が実測値を上回る時刻が多く、10 mm格子中心による日照面積率の方が実測値との誤差率が小さい。

室温について、rtrace と DC で比較すると、差は小さいものの rtrace の方がより実測値に近い。日照面積率計算点で比較すると、rtrace ではほとんど差が見られないが、DC では夏のルーバー 45° ・ブラインド水平の条件で、10 mm水平ラインによる室温が実測値より低く、冬のルーバー垂直・ブラインド水平の条件で、午後に 10 mm水平ラインによる室温が実測値より高くなった。総合的にみると、Radiance 計算法の最も詳細な組み合わせである rtrace・10 mm格子中心の室温が最も実測値に近く、比較すると DC・10 mm水平ラインによる室温は実測値から前後するものの、誤差率の差異は小さい。

実測値と、本研究による評価法の最も詳細な 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、および 4.2 節で求めた従来 NewHASP、EnergyPlus の室温を比較した結果を図 4-45 に示す。従来 NewHASP の実測値との誤差率は最大で約-110%，EnergyPlus の誤差率は最大で約 70%，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（DC 法×日照面積率 10mm 水平 line）を利用した場合でも誤差率は最大 14% となり、本研究による評価法の室温は、非常に精度が高いことが分かった。

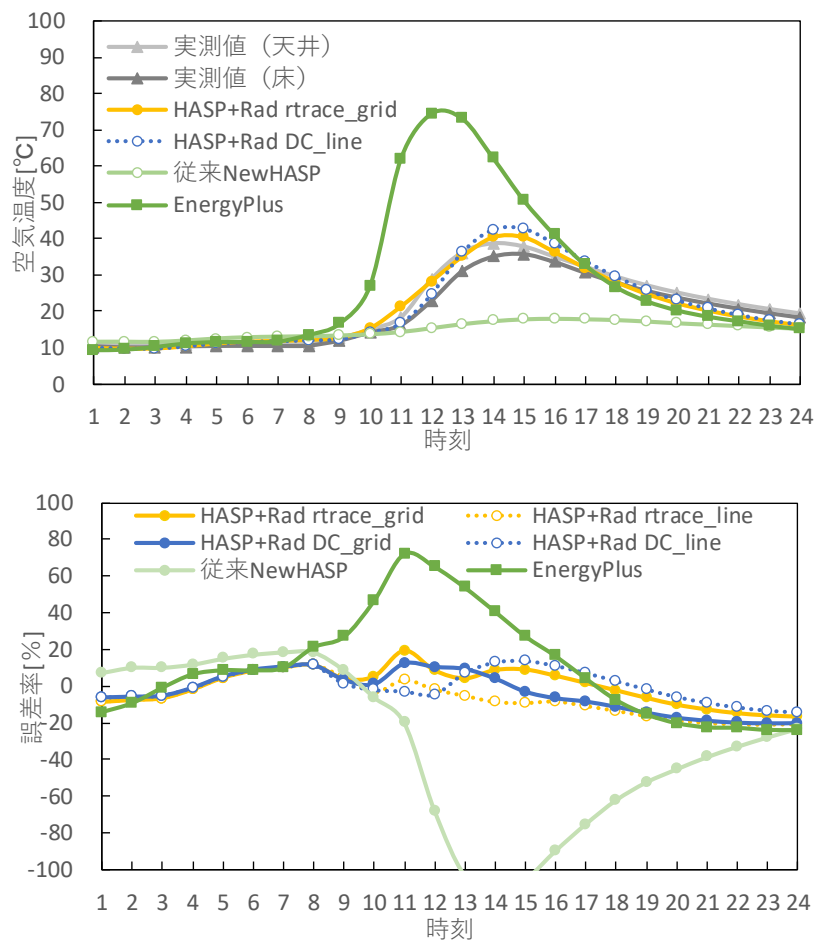


図 4-45 実測・本研究の評価法・従来 NewHASP・EnergyPlus の室温
(2020 年 1 月 9 日 ルーバー垂直・ブラインド 45°)

本章での実験による検証は、部屋の容量に対して窓面が大きく、奥行 1m の断熱箱における窓から 50cm の距離の室温を対象としており、窓の影響を非常に受けやすいケースであった。従来 NewHASP と EnergyPlus は、屋内外日照・日射制御装置や周辺建物の影響を簡易に計算しているため、計算結果の誤差が大きくなったと考えられる。本研究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、周辺建物

の影響も加味することが可能となり、このような窓の影響を受けやすいケースでも、屋内外日照・日射制御の熱負荷・室温を算出できることが明らかになった。

4.3.4.2 Radiance 性能検証

Radiance 性能検証のために、実験による実測値と、表 4-11 に示す本研究による評価法の Radiance 計算方法によるシミュレーション値を比較した結果を図 4-47～4-54 に示す。

断熱箱内輝度は、図 4-46 に示す、天井・壁（東・西）・床の白抜きエリア（室の奥行半分から窓面方向）の平均値を算出して比較した。また、実測値とシミュレーション値の誤差率と、CIE 技術報告書⁴⁻⁹⁾による誤差率（空間の平均照度 $\pm 6.3\%$ ）範囲を合わせて示す。

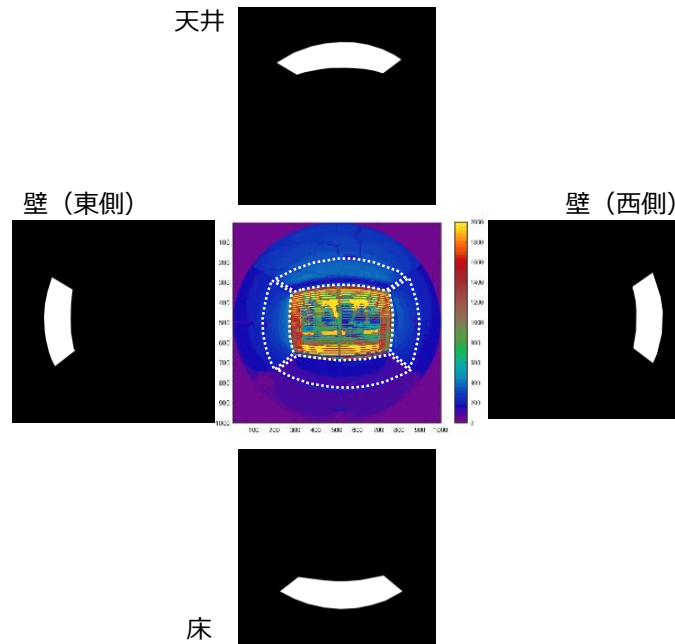


図 4-46 断熱箱内輝度平均値算出エリアとマスク画像

断熱箱内輝度を算定するための輝度画像を、付録（付 2）に示す。

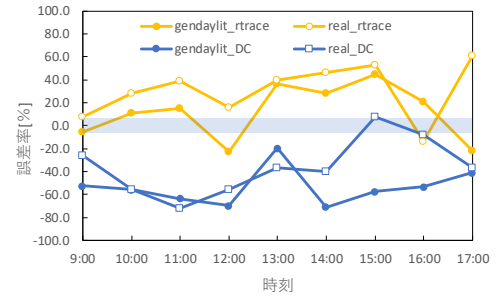
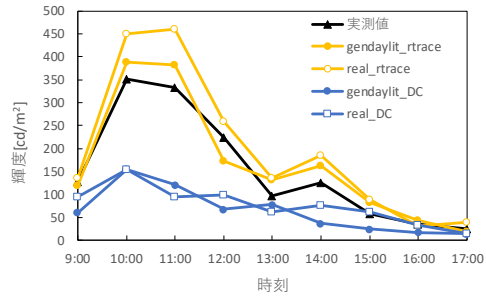
④断熱箱内輝度

2019年8月29日

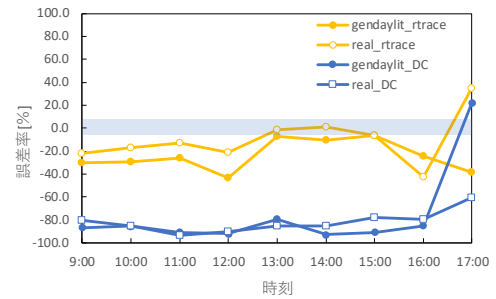
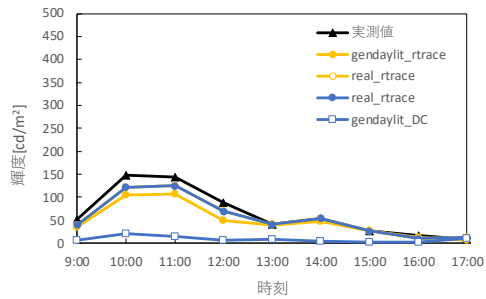
ルーバー垂直・ブラインド水平

天井

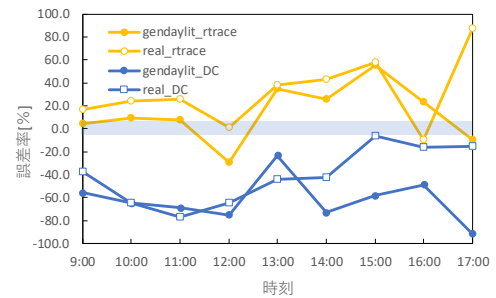
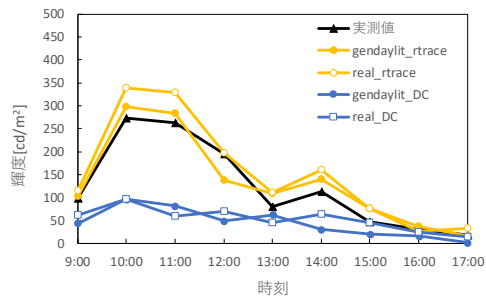
誤差率±6.3%



床



壁（東側）



壁（西側）

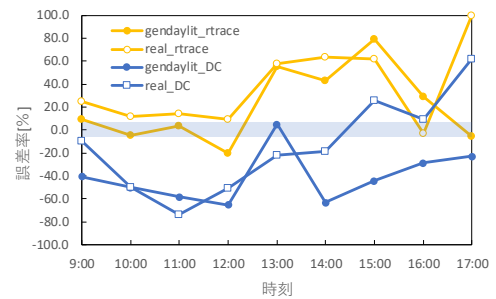
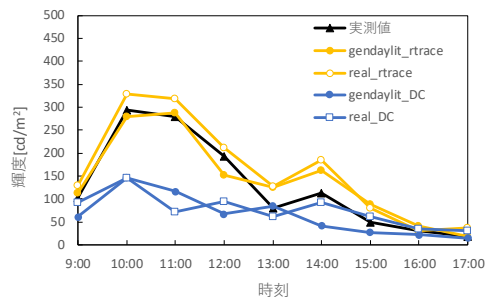
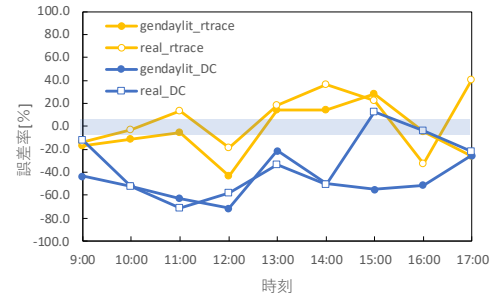
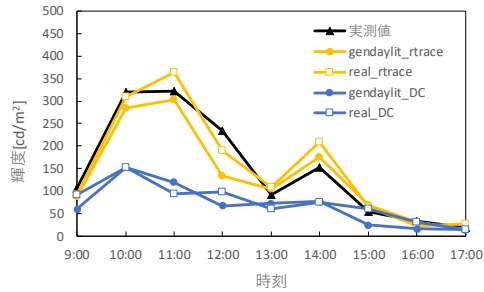


図 4-47 断熱箱内輝度（夏・ルーバー垂直・ブラインド水平）

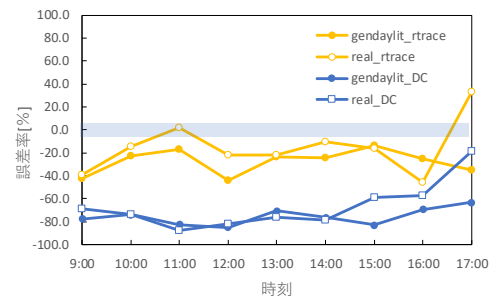
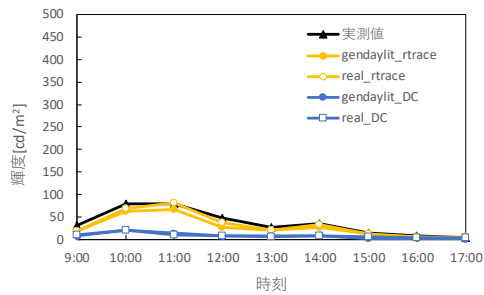
2019年8月29日

ルーバー垂直・ブラインド 45°

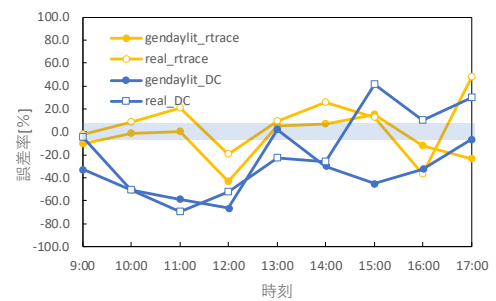
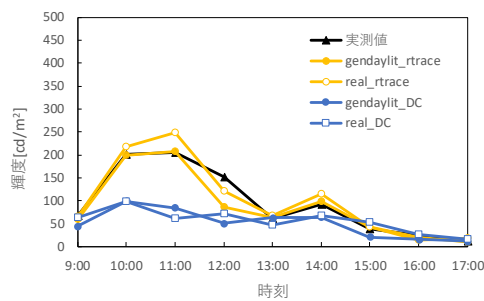
天井



床



壁 (東側)



壁 (西側)

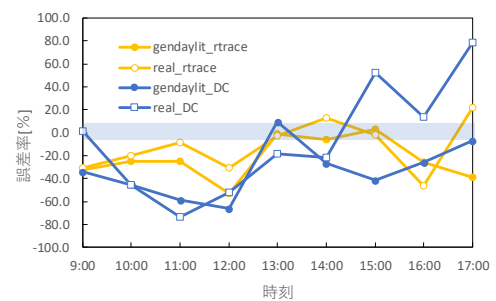
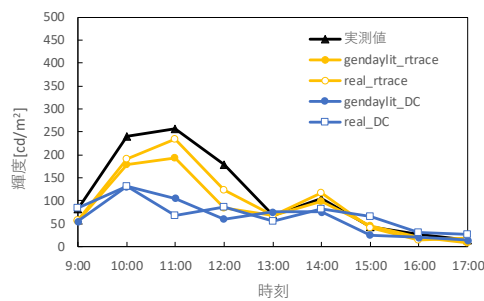
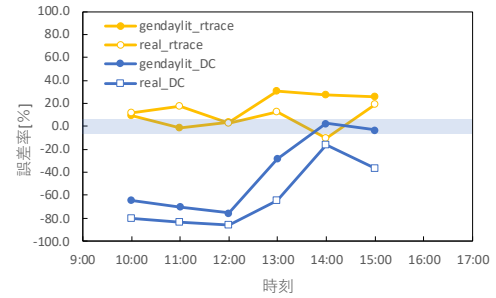
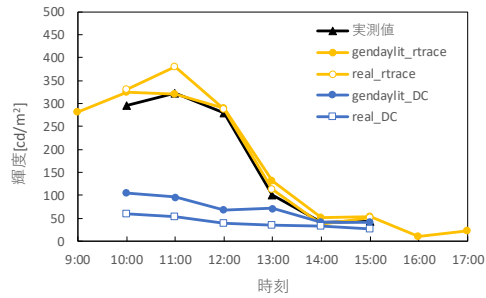


図 4-48 断熱箱内輝度 (夏・ルーバー垂直・ブラインド 45°)

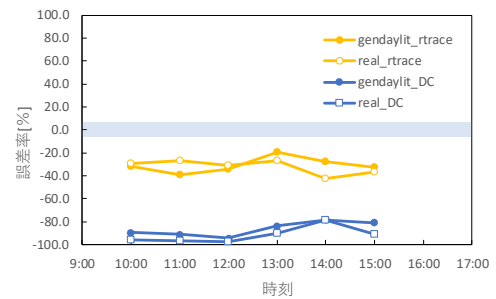
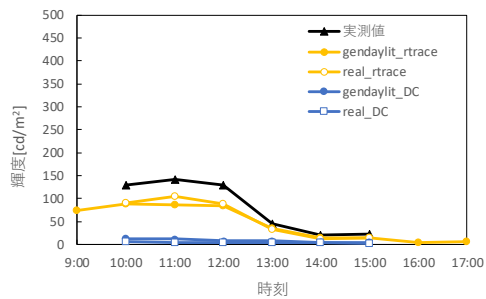
2019年9月2日

ルーバー45° ・ ブラインド水平

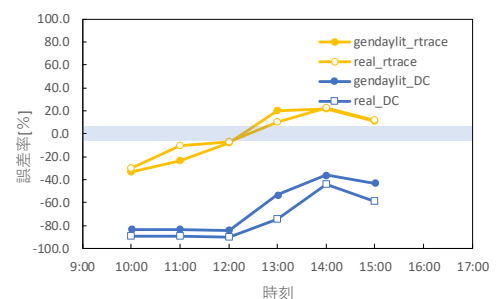
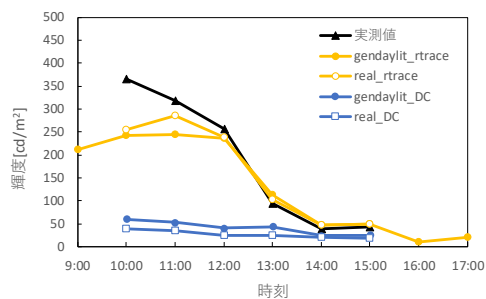
天井



床



壁（東側）



壁（西側）

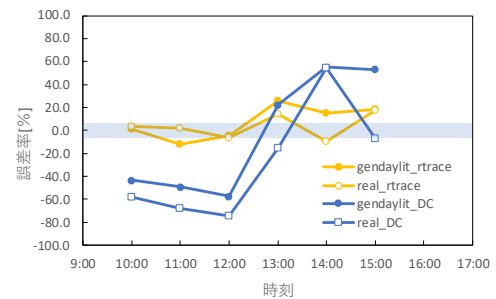
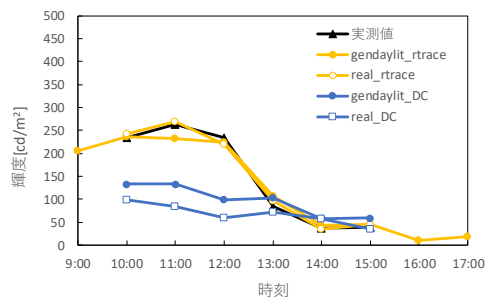


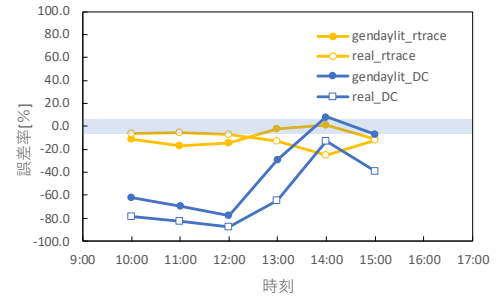
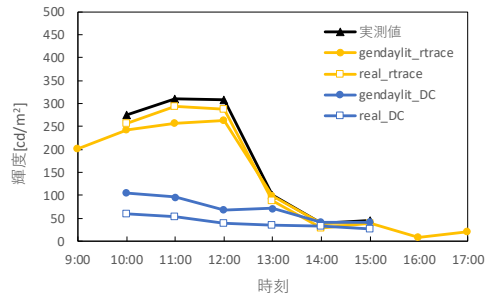
図 4-49 断熱箱内輝度（夏・ルーバー45° ・ ブラインド水平）

2019年9月2日

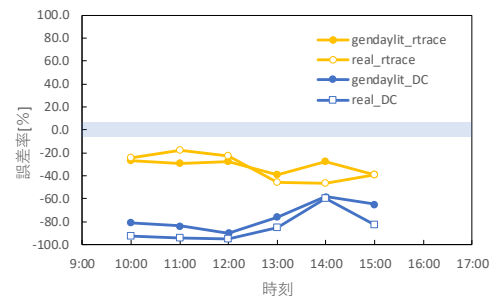
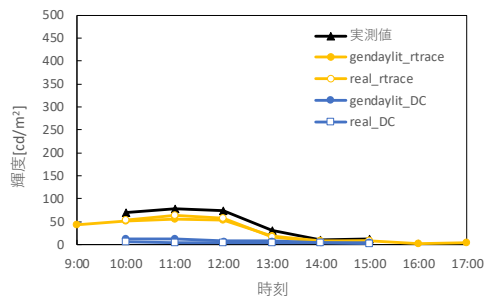
ルーバー45° ・ ブラインド 45°

誤差率±6.3%

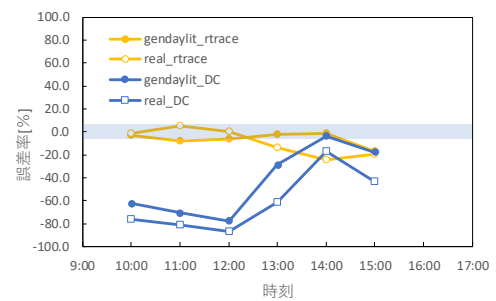
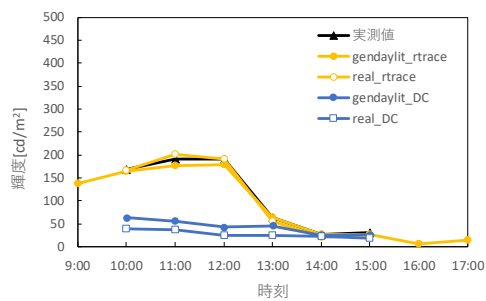
天井



床



壁 (東側)



壁 (西側)

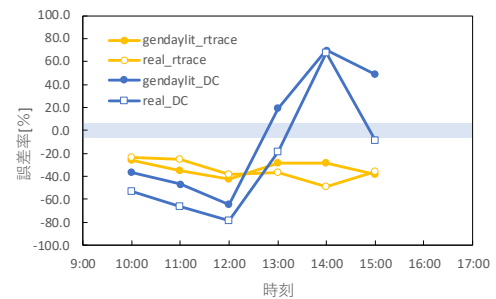
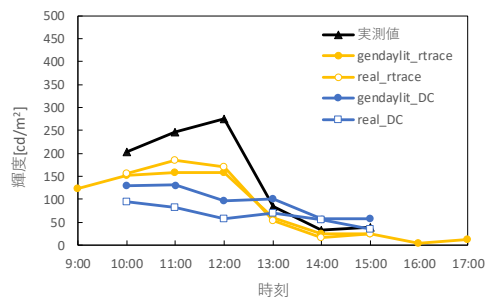
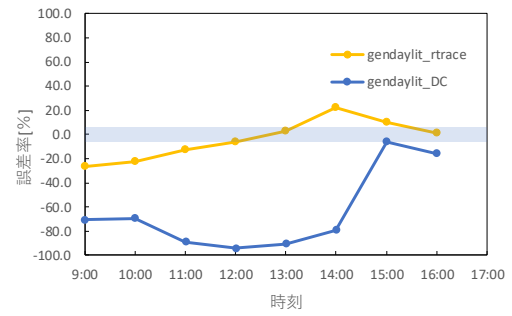
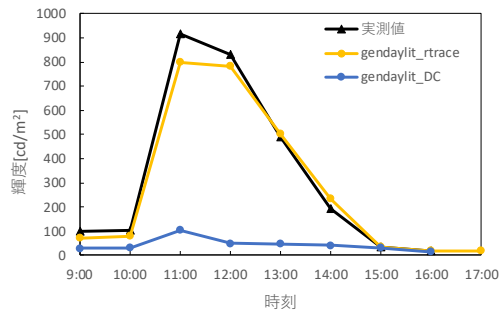


図 4-50 断熱箱内輝度 (夏・ルーバー45° ・ ブラインド 45°)

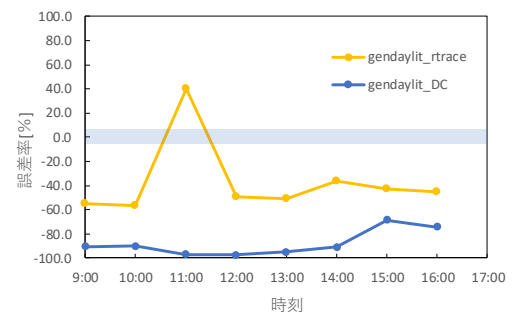
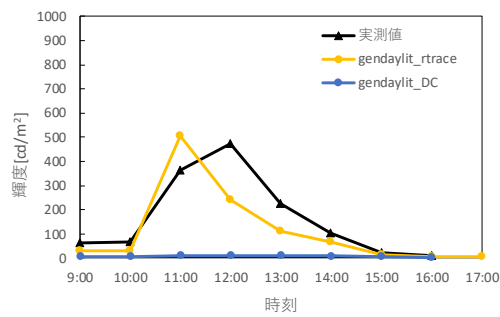
2020年1月9日

ルーバー垂直・ブラインド水平

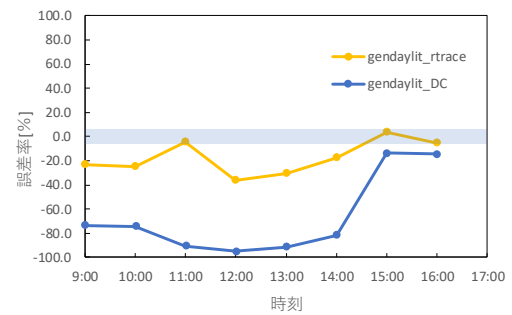
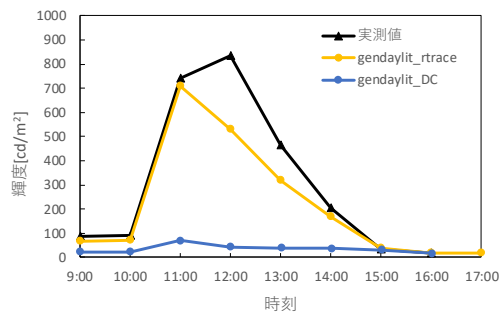
天井



床



壁（東側）



壁（西側）

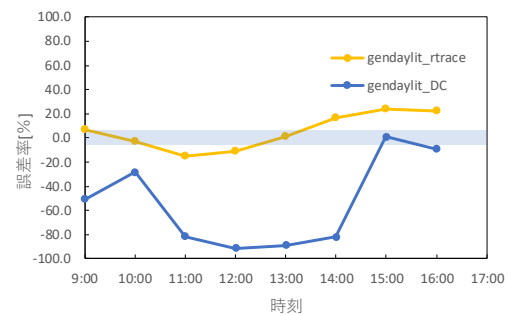
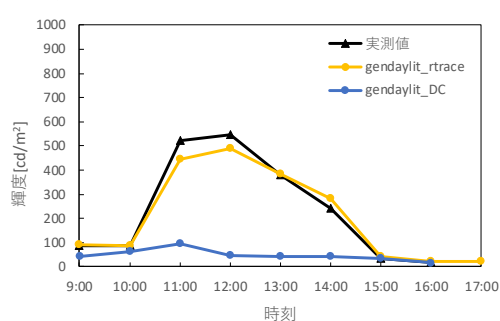
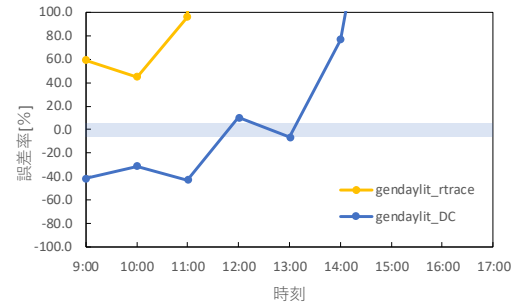
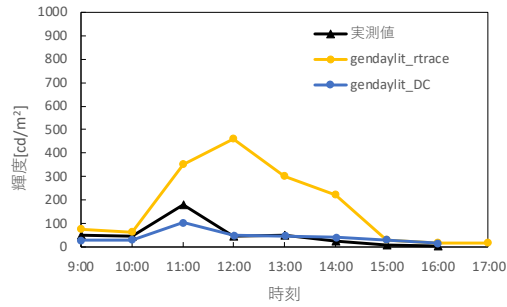


図 4-51 断熱箱内輝度（冬・ルーバー垂直・ブラインド水平）

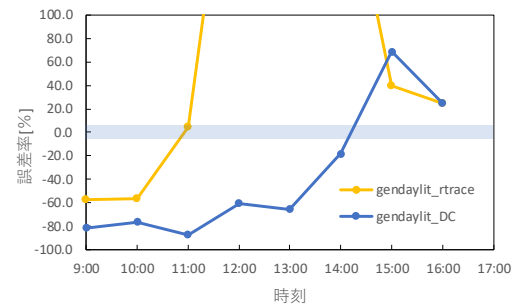
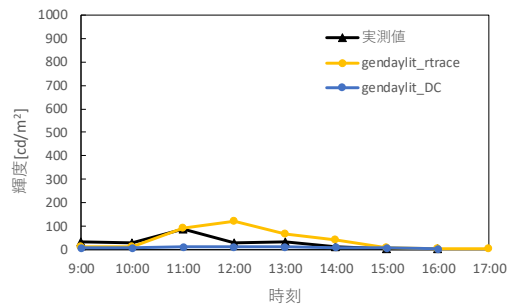
2020年1月9日

ルーバー垂直・ブラインド45°

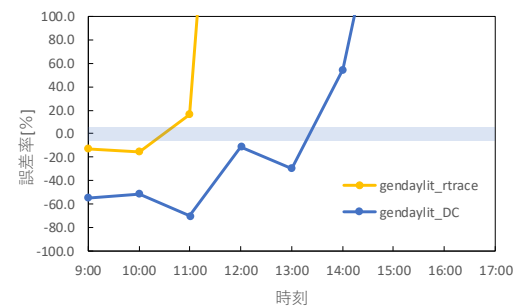
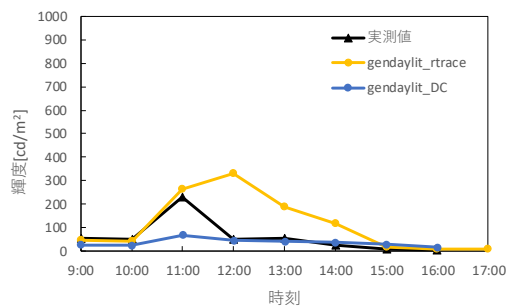
天井



床



壁 (東側)



壁 (西側)

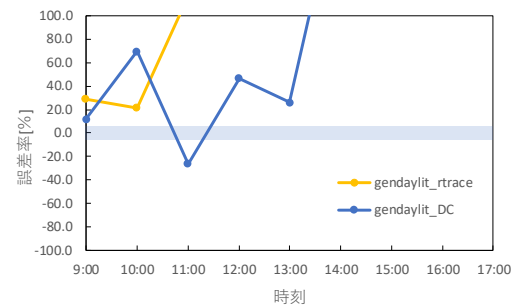
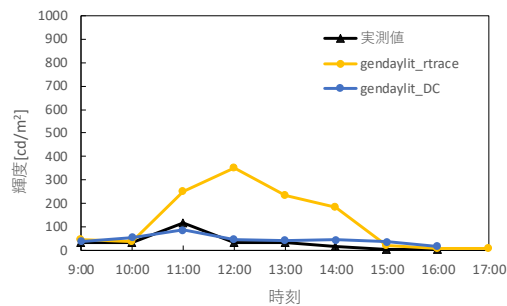


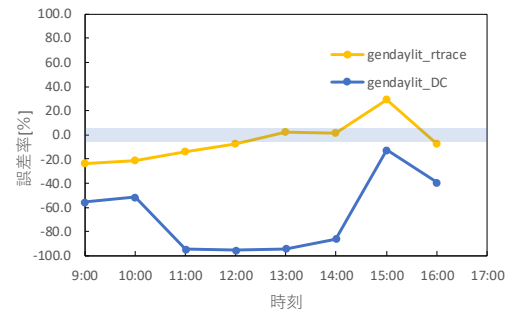
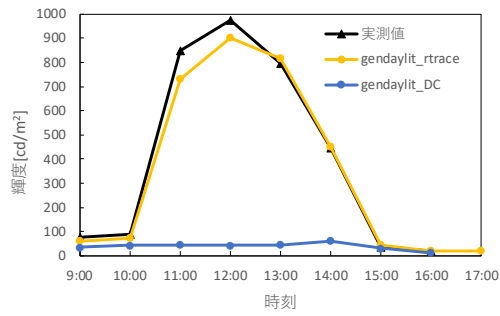
図 4-52 断熱箱内輝度 (冬・ルーバー垂直・ブラインド45°)

2020年1月10日

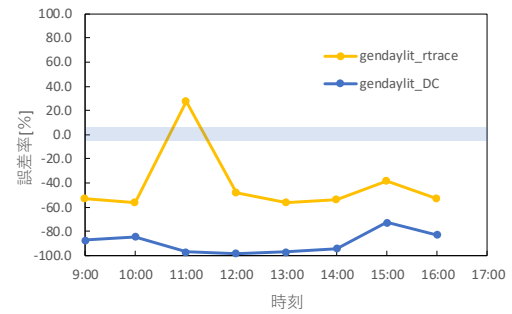
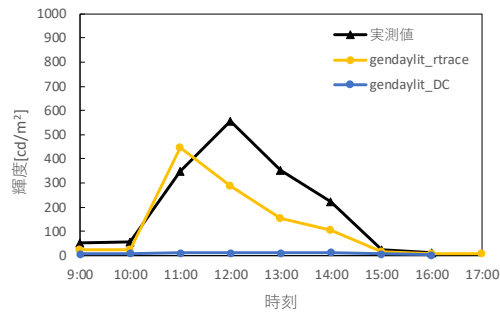
ルーバー45°・ブラインド水平

誤差率±6.3%

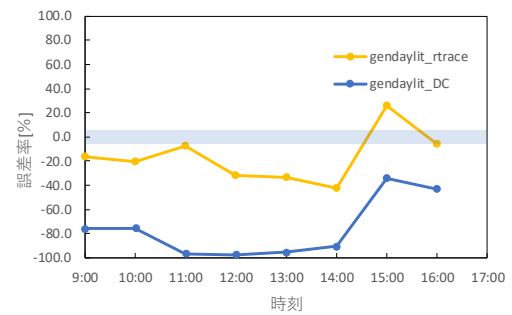
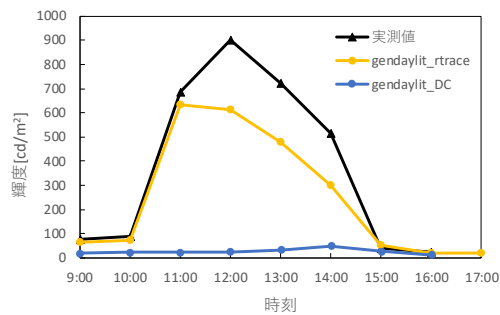
天井



床



壁 (東側)



壁 (西側)

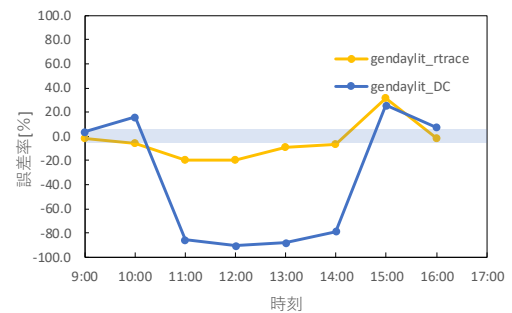
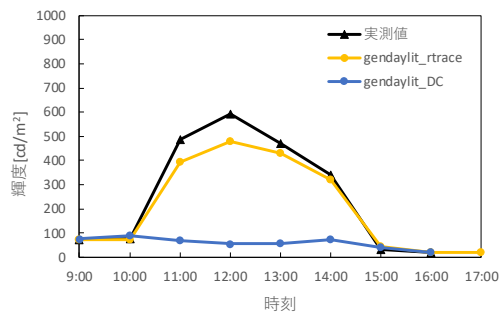


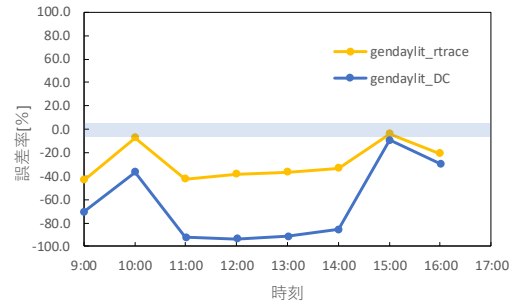
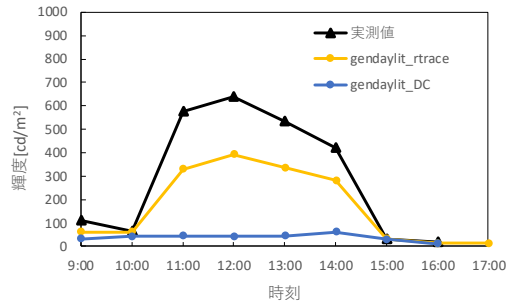
図 4-53 断熱箱内輝度 (冬・ルーバー45°・ブラインド水平)

2020年1月10日

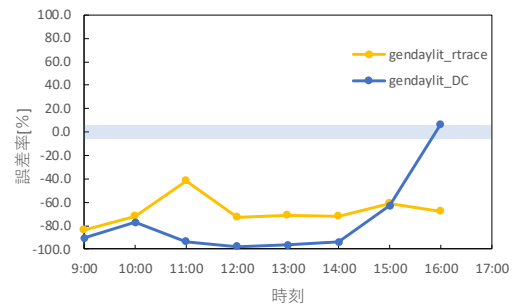
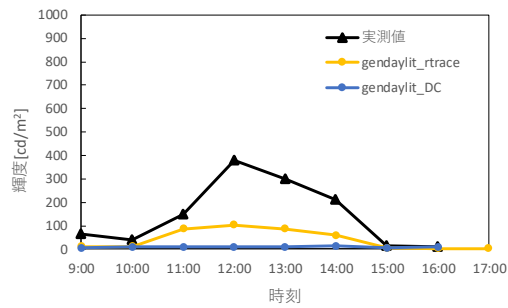
ルーバー45° ・ ブラインド 45°

誤差率 ±6.3%

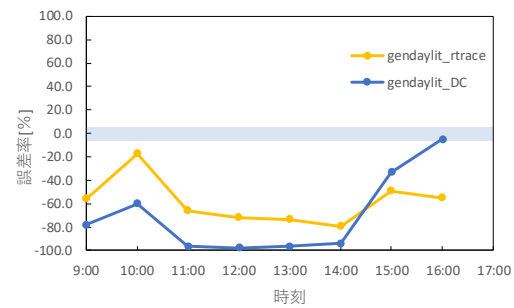
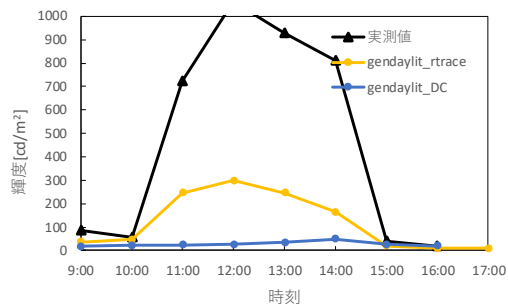
天井



床



壁 (東側)



壁 (西側)

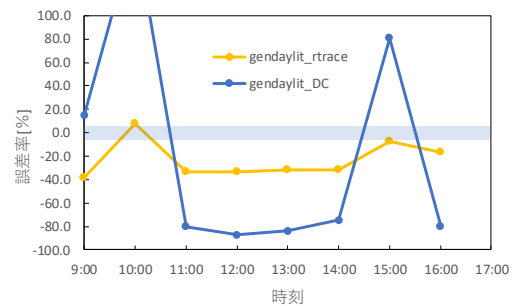
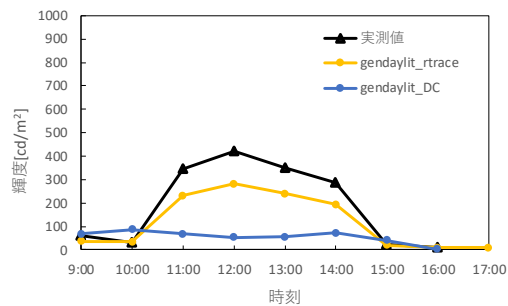


図 4-54 断熱箱内輝度 (冬・ルーバー45° ・ ブラインド 45°)

断熱箱内輝度について、夏は、rtrace と DC を比較すると、rtrace の方が DC に比べて実測値との誤差率が小さく、誤差率の許容範囲 ($\pm 6.3\%$) に含まれる数が多い。DC の輝度は低めとなることが多く、誤差率が高い。午後は実測値・rtrace・DC の輝度が近い値となったが、輝度そのものが小さいため、誤差率が高い。また、DC の壁面（東側・西側）では、誤差率の変動が大きく、午前はマイナス側、午後はプラス側に変動する傾向が見られた。

冬は、rtrace と DC どちらも実測値との誤差率が高いが、rtrace の方が DC に比べて誤差率が小さい。1/9 ルーバー垂直・ブラインド 45° は、rtrace の輝度が実測値を大きく上回り、実測した輝度カメラの位置や測定方向に問題があった可能性も考えられる。天井の rtrace 計算は、比較的誤差率が小さい。

全体的に見て、DC は低めの輝度となり、特に太陽高度が低い冬に誤差率が高い。これは、太陽を含んで天空を 145 に粗く分割した DC 計算法の限界であると考えられる。

次に、断熱箱内照度について、実験による実測値と、表 4-11 に示す本研究による評価法の Radiance 計算方法によるシミュレーション値を比較した結果を図 4-56～4-63 に示す。断熱箱内照度は、図 4-55 に示す、天井・壁（東・西）・床面の中心の値を算出して比較した。また、実測値とシミュレーション値の誤差率と、CIE 技術報告書⁴⁻⁹⁾による誤差率（各点の照度 $\pm 10.5\%$ ）範囲を合わせて示す。

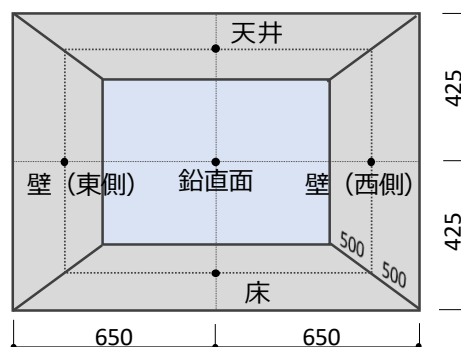


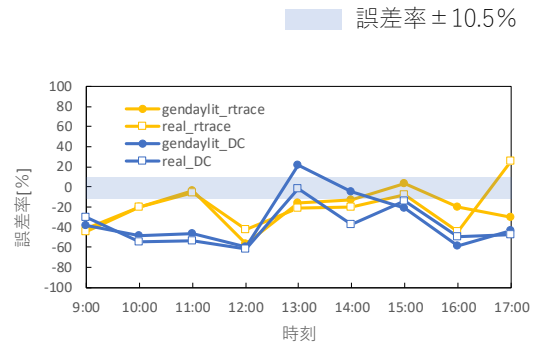
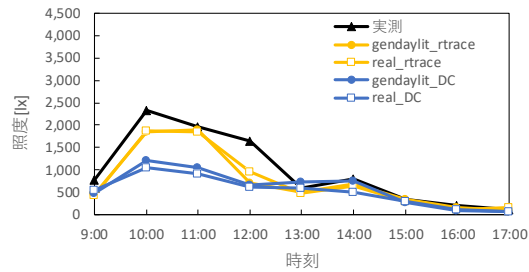
図 4-55 断熱箱内照度算出点

⑤断熱箱内照度

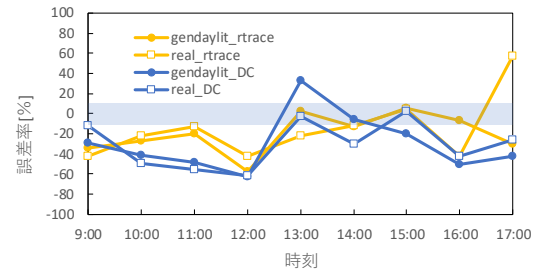
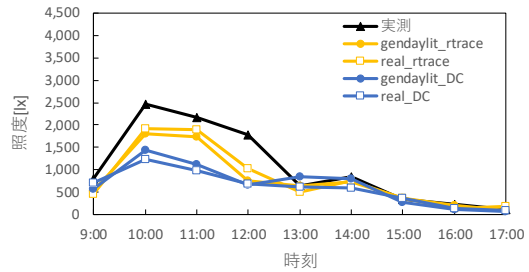
2019年8月29日

ルーバー垂直・ブラインド水平

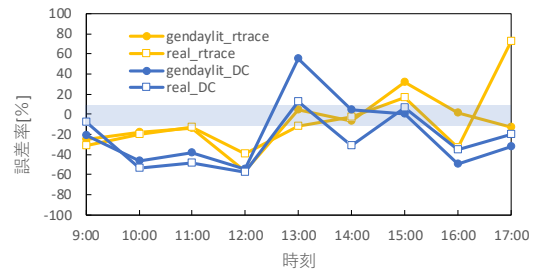
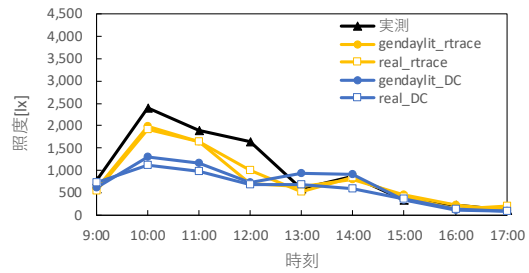
天井



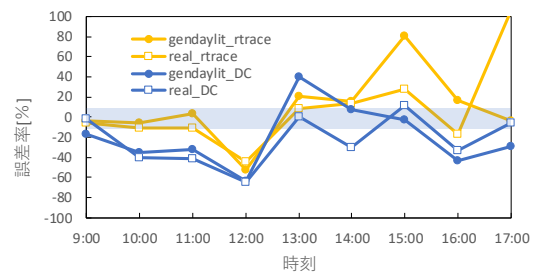
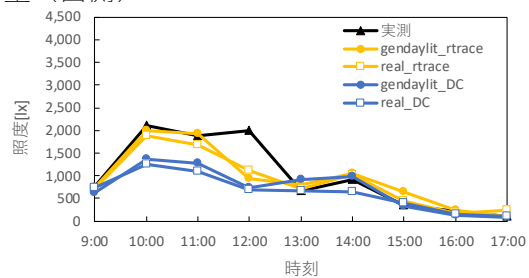
床



壁 (東側)



壁 (西側)



鉛直面

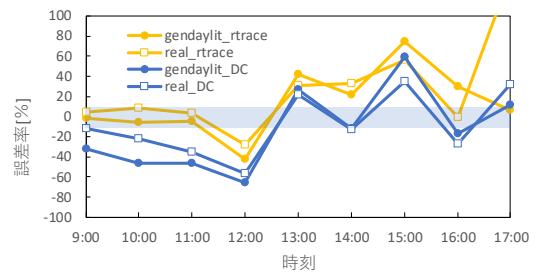
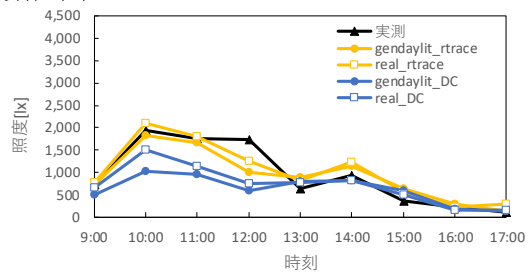


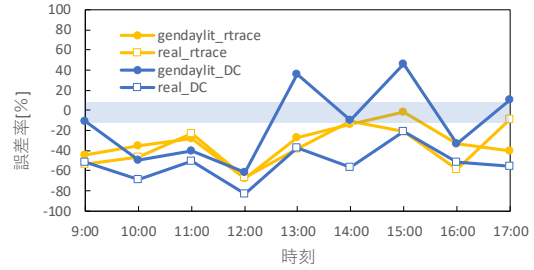
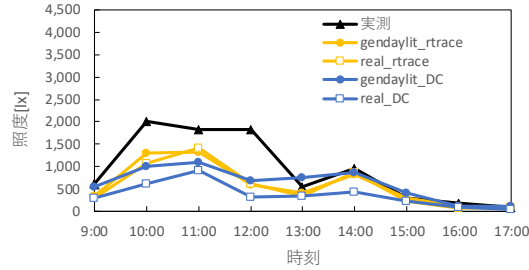
図 4-56 断熱箱内照度 (夏・ルーバー垂直・ブラインド水平)

2019年8月29日

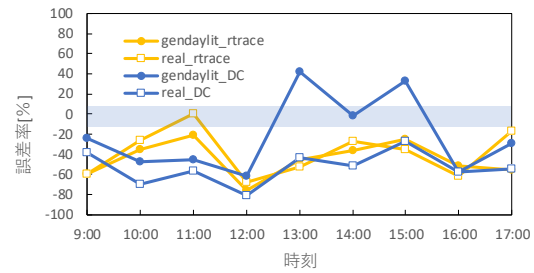
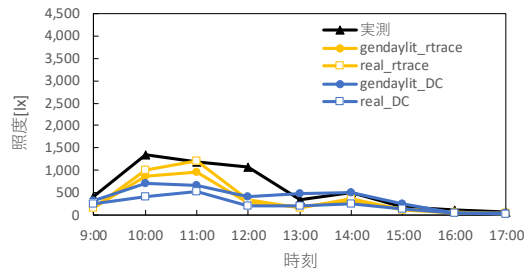
ルーバー垂直・ブラインド 45°

誤差率 ±10.5%

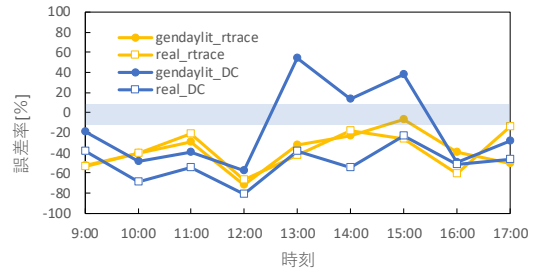
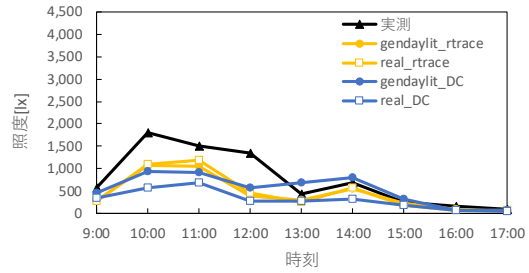
天井



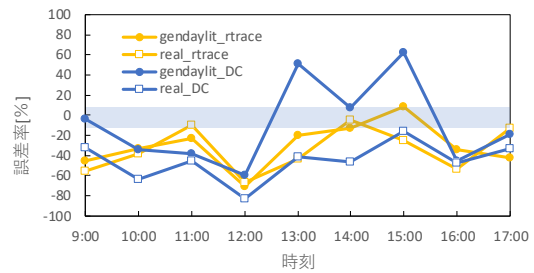
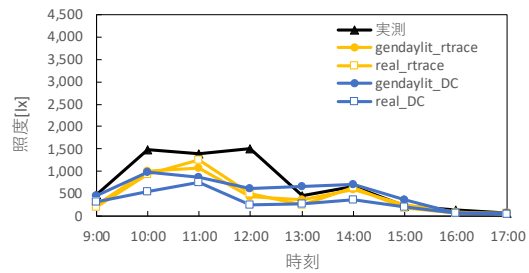
床



壁 (東側)



壁 (西側)



鉛直面

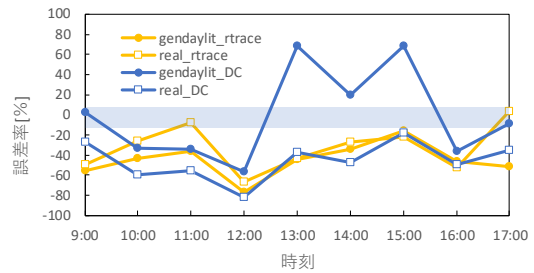
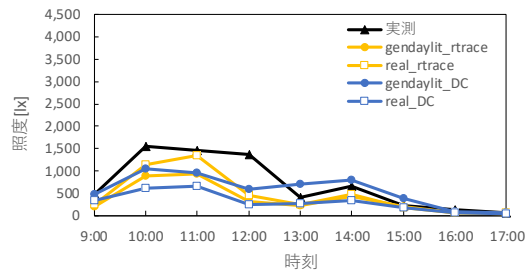


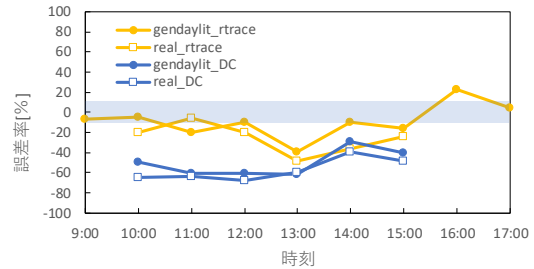
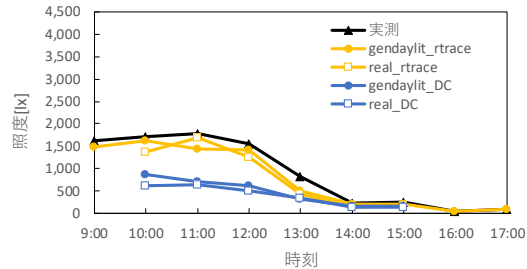
図 4-57 断熱箱内照度 (夏・ルーバー垂直・ブラインド 45°)

2019 年 9 月 2 日

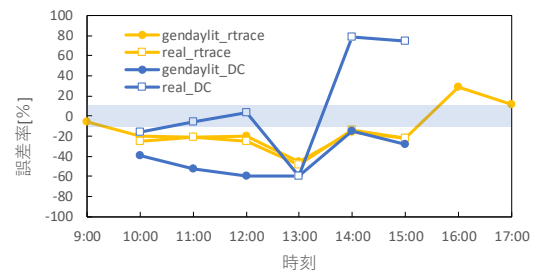
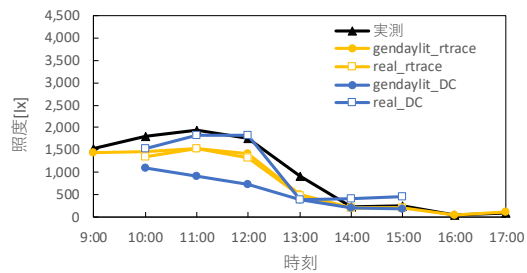
ルーバー45° ・ ブラインド水平

誤差率 ±10.5%

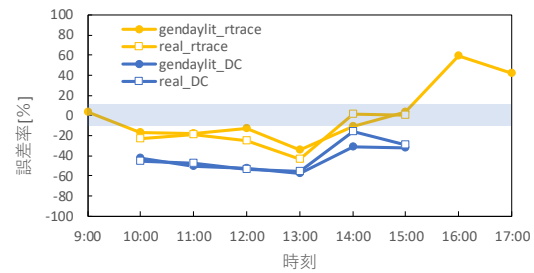
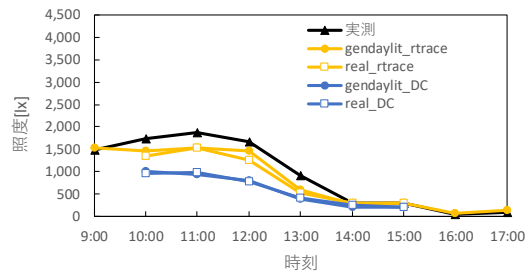
天井



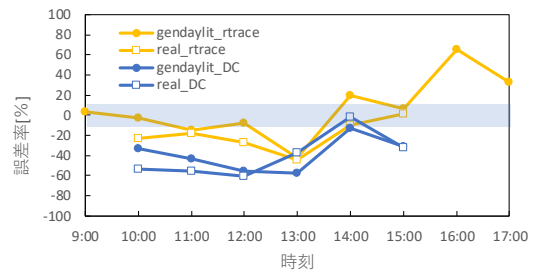
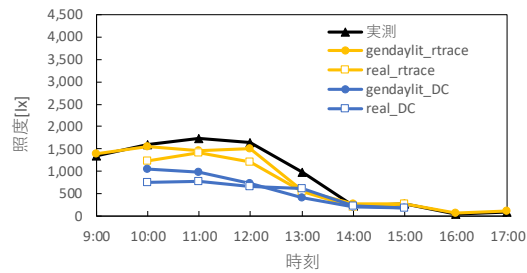
床



壁 (東側)



壁 (西側)



鉛直面

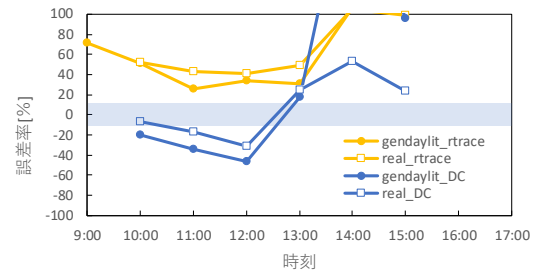
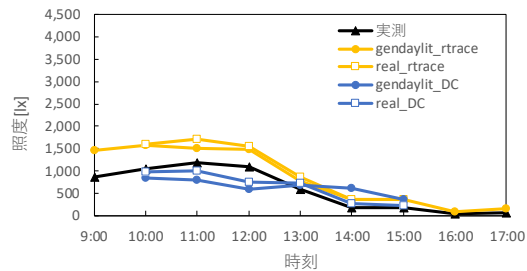


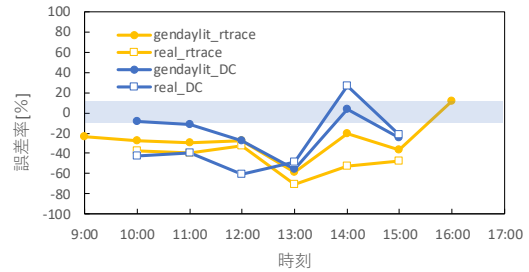
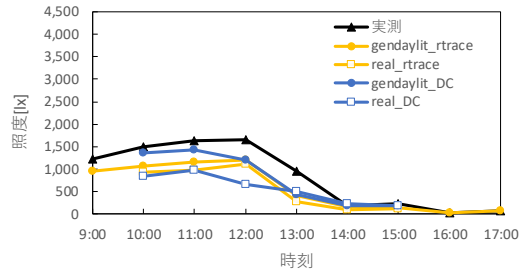
図 4-58 断熱箱内照度 (夏・ルーバー45° ・ ブラインド水平)

2019年9月2日

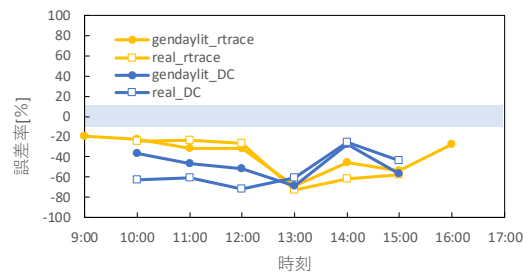
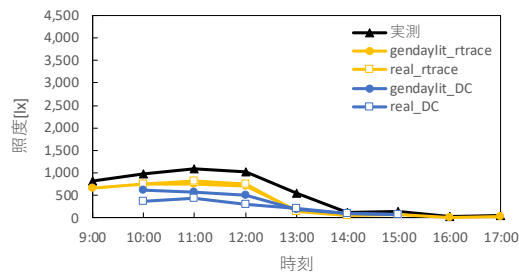
ルーバー45° ・ ブラインド 45°

誤差率 ±10.5%

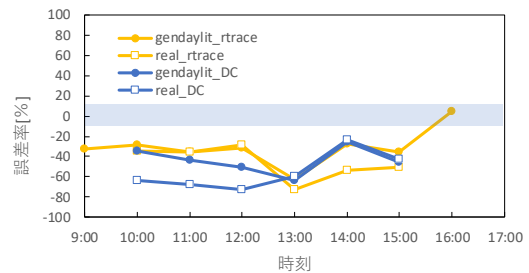
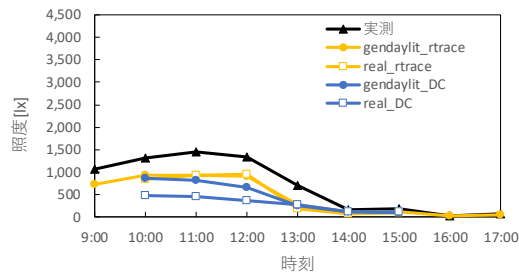
天井



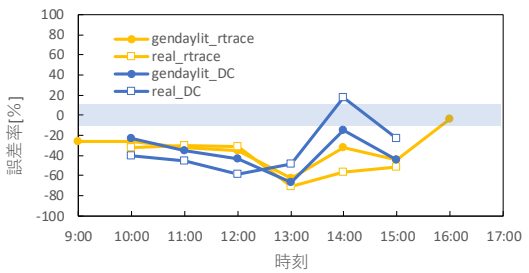
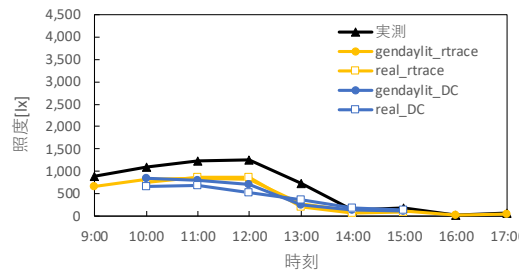
床



壁 (東側)



壁 (西側)



鉛直面

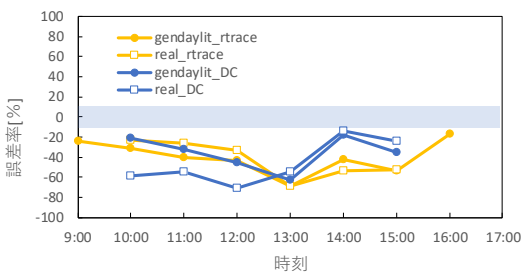
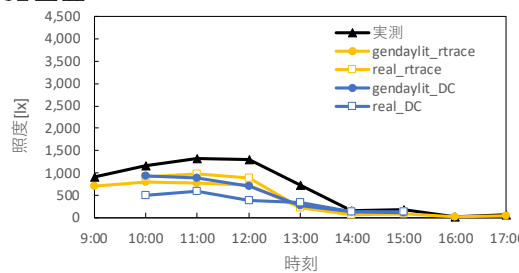


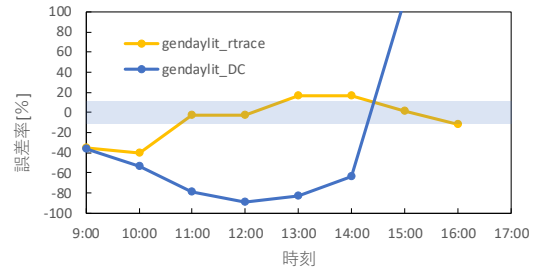
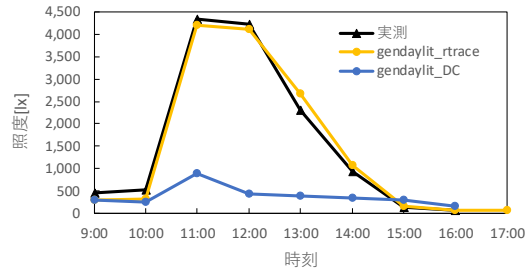
図 4-59 断熱箱内照度 (夏・ルーバー45° ・ ブラインド 45°)

2020年1月9日

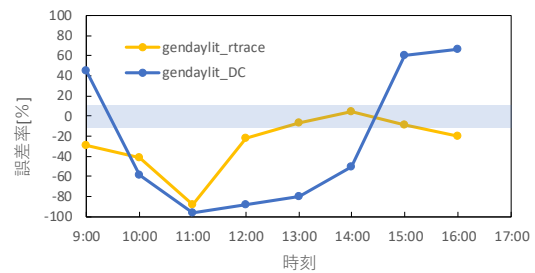
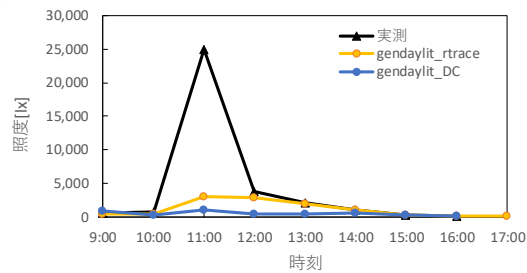
ルーバー水平・ブラインド水平

誤差率±10.5%

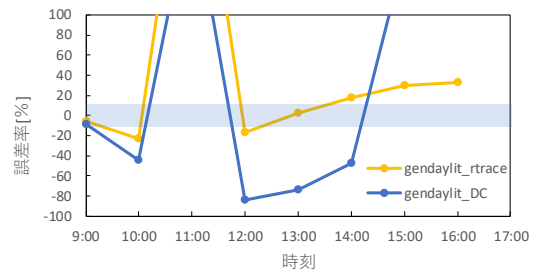
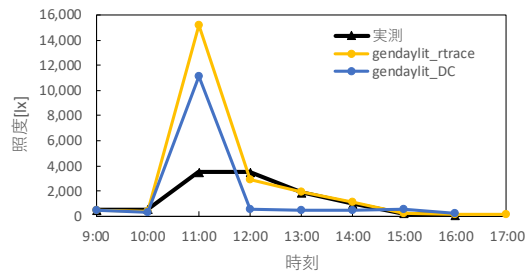
天井



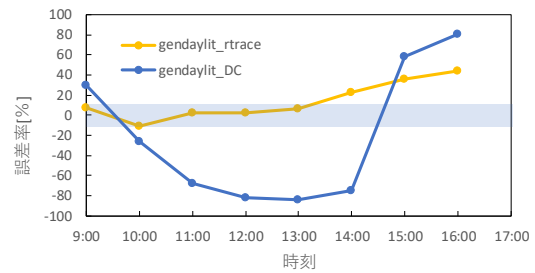
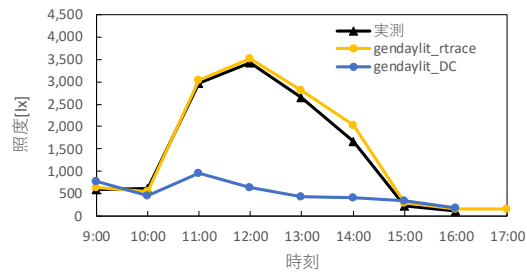
床



壁 (東側)



壁 (西側)



鉛直面

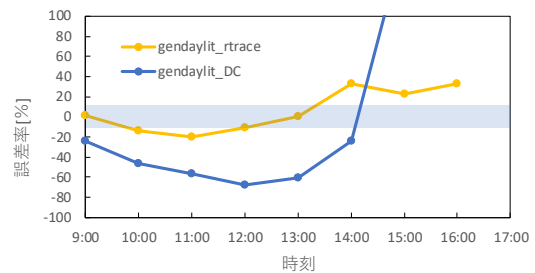
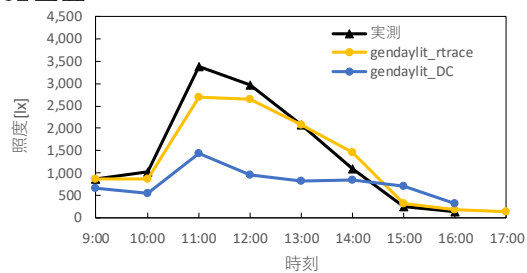


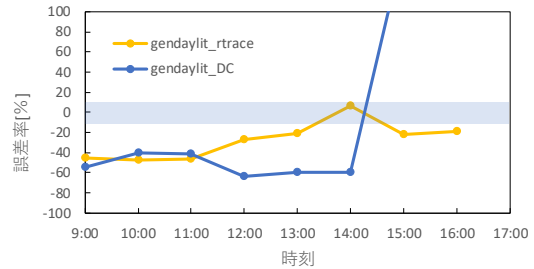
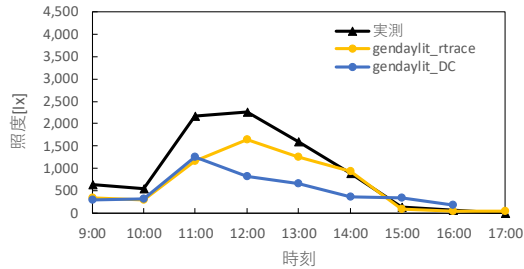
図 4-60 断熱箱内照度 (冬・ルーバー垂直・ブラインド水平)

2020年1月9日

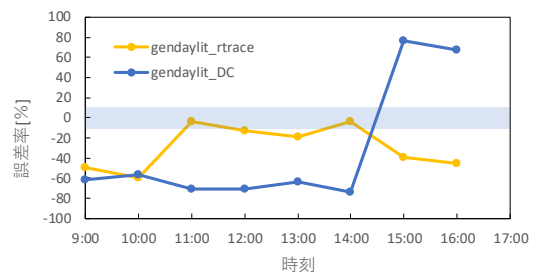
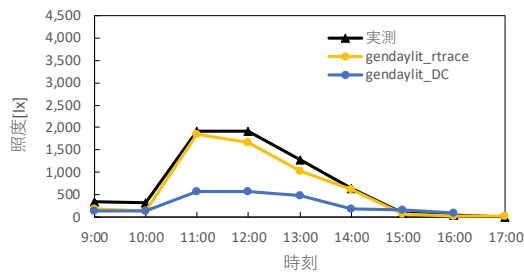
ルーバー水平・ブラインド 45°

誤差率 ±10.5%

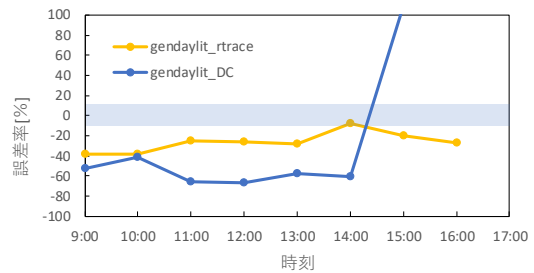
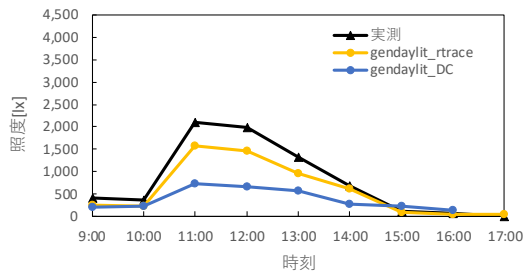
天井



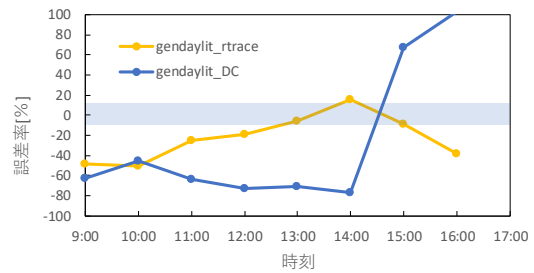
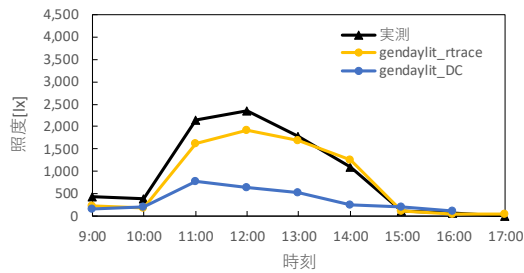
床



壁 (東側)



壁 (西側)



鉛直面

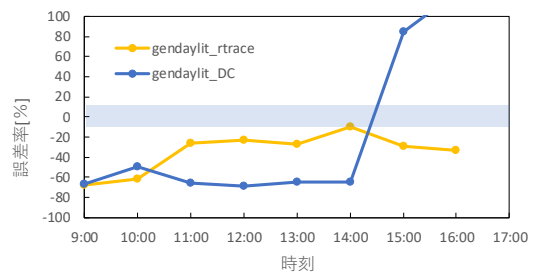
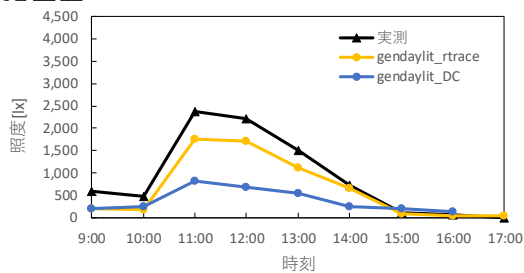


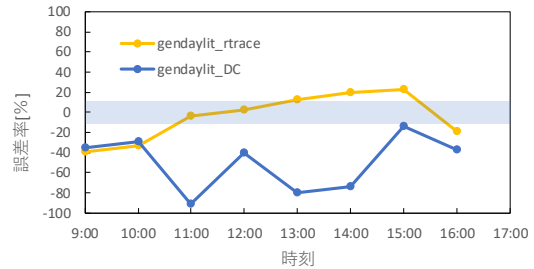
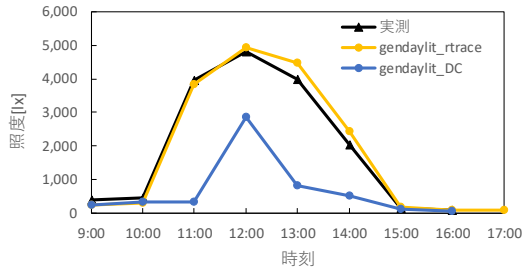
図 4-61 断熱箱内照度 (冬・ルーバー垂直・ブラインド 45°)

2020年1月10日

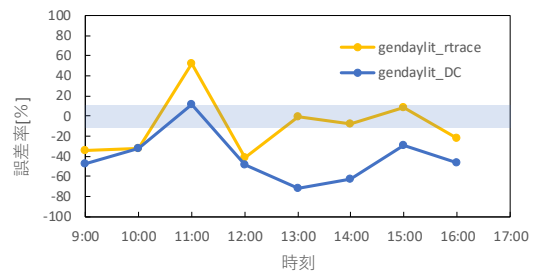
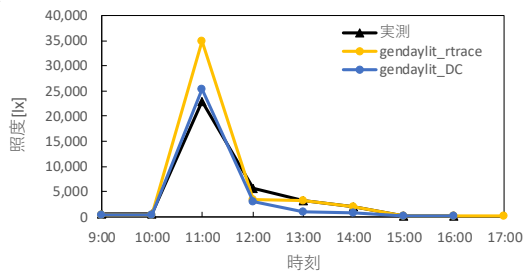
ルーバー45°・ブラインド水平

誤差率±10.5%

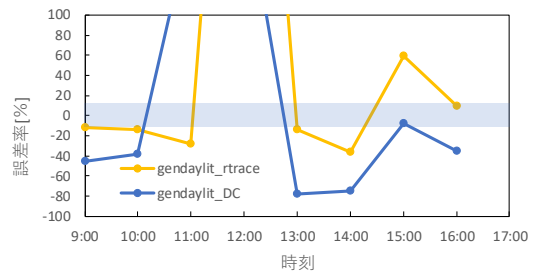
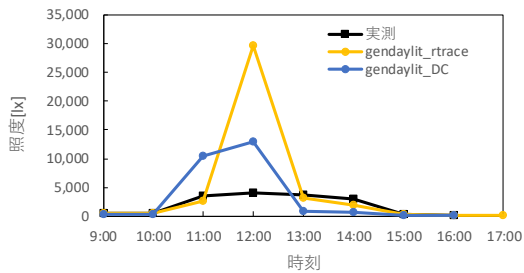
天井



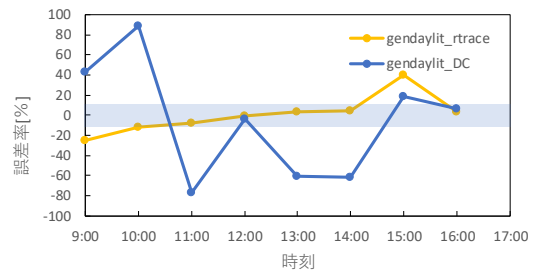
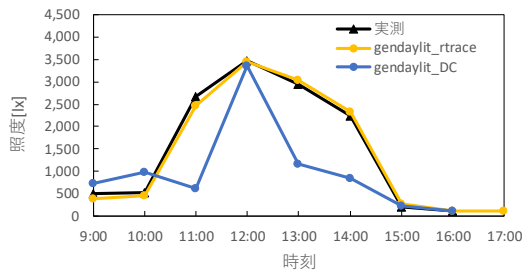
床



壁 (東側)



壁 (西側)



鉛直面

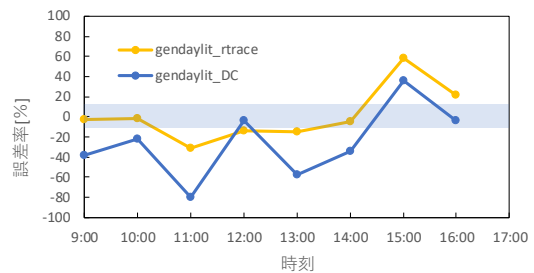
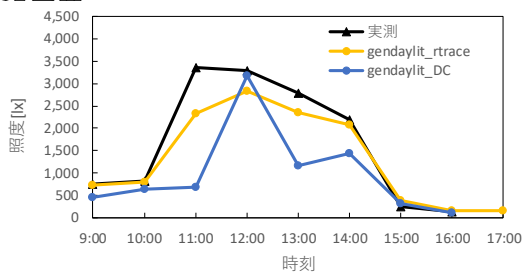


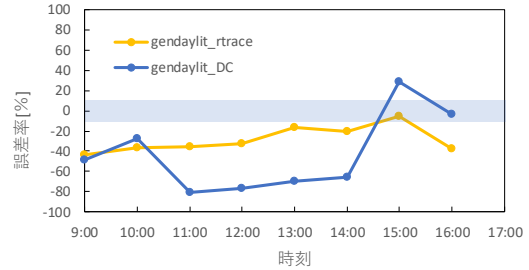
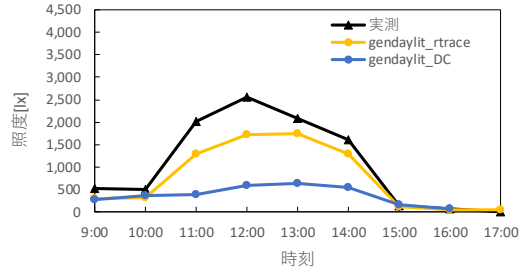
図 4-62 断熱箱内照度 (冬・ルーバー45°・ブラインド水平)

2020年1月10日

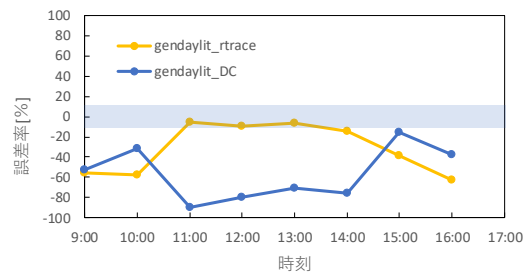
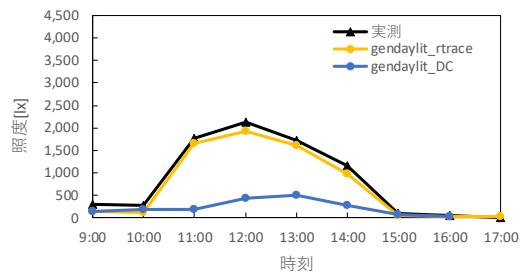
ルーバー45° ・ ブラインド 45°

誤差率 ±10.5%

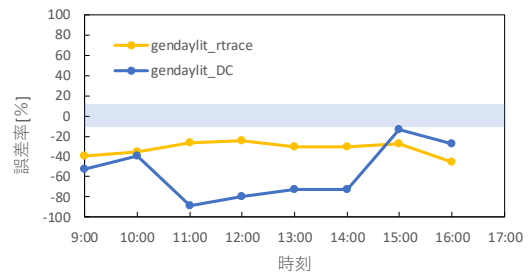
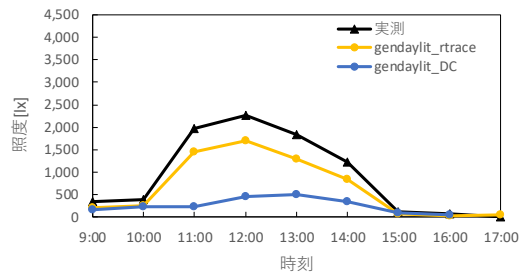
天井



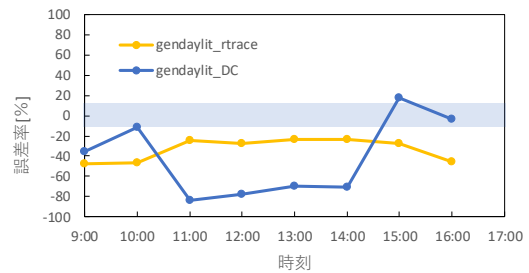
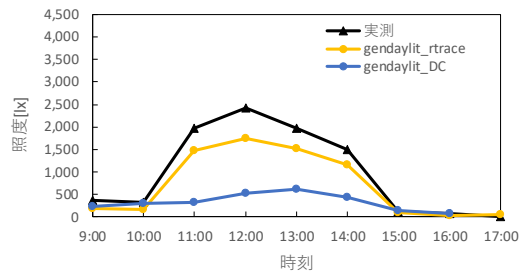
床



壁 (東側)



壁 (西側)



鉛直面

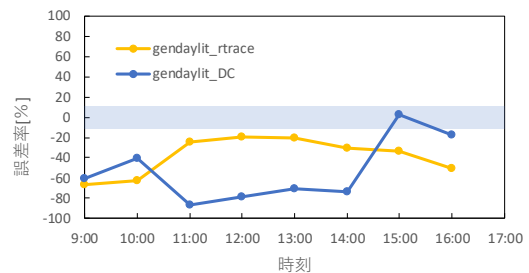
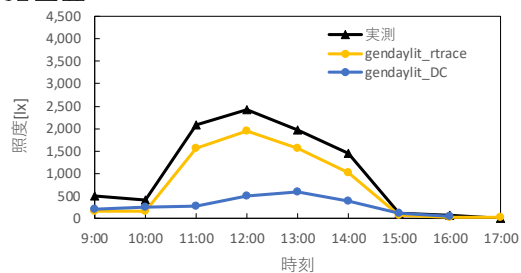


図 4-63 断熱箱内照度 (冬・ルーバー45° ・ ブラインド 45°)

断熱箱内照度について、夏は、rtrace と DC を比較すると、rtrace の方が DC に比べて実測値との誤差率が小さく、誤差率の許容範囲（ $\pm 10.5\%$ ）に含まれる数が多い。DC の照度は低めとなることが多く、誤差率が大きくなった。午後は実測値・rtrace・DC の照度が近い値となったが、照度そのものが小さいため、誤差率は大きくなった。また、DC の壁面（東側・西側）では、誤差率の変動が大きく、午前はマイナス側、午後はプラス側に変動していた。

冬は、実測値と rtrace の誤差率が小さく、誤差率の許容範囲（ $\pm 10.5\%$ ）に含まれる数が多い。DC の照度はほとんどの時間帯で低くなり、誤差率が大きくなった。ブラインド水平の床や壁に、突出して高い照度となったのは、ブラインドスラットの隙間から差し込んだ直射日光の影響と考えられる。特徴的なのは、ルーバー 45° ・ブラインド水平であり、全体的に DC が低めな中に、実測値・rtrace の照度に合う時刻が混在していた。

全体的に見て、DC は低めの照度となり、特に太陽高度が低い冬に誤差率が大きい。これは、太陽を含んで天空を 145 に粗く分割した DC 計算法の限界であると考えられる。

ただし、窓面日射熱取得の計算に利用している窓の外の Radiance による照度計算では、ブラインドを介していないため、DC 計算でもある程度の精度が確保でき、DC 計算は有用と考えた。

4.4 第4章のまとめ

本章では、本研究による光と熱の詳細連携計算に基づく計算法によって求める室温と、既存シミュレーション（従来 NewHASP・EnergyPlus）による室温、そしてシミュレーションと同条件の断熱箱を用いた実測室温を比較する精度検証を行った。

第1節では、第2章で構築したブラインドの透過率特性および反射率特性と、第3章で構築した屋外日照・日射制御装置のガラス窓標準日射熱取得分割方法と窓転写ファイルを組み込んで、様々な形状の屋外日照・日射制御装置と屋内日照・日射制御装置を併せ持つ空間の熱負荷・室温を計算する方法を示した。

第2節では、屋内日射・日照制御装置としてブラインド、屋外日射・日照制御装置として垂直ルーバーを設置したモデルを利用して、本研究による計算法と既存シミュレーション（従来 NewHASP, EnergyPlus）の比較を行った。検証内容を明らかにするため、Radiance による入力データと気象データを示した熱負荷・室温計算の詳細フローを確認し、NewHASP 計算に必要な項目と、Radiance 計算に必要な項目を整理した。そして、シミュレーションに必要な気象データの測定方法と測定結果を示した。本研究による室温と、従来 NewHASP, EnergyPlus それぞれによる室温を比較し、本研究による室温は、従来 NewHASP より高く、EnergyPlus の室温より低い傾向があることが分かった。

第3節では、第2節同様の断熱箱を、大林組技術研究所オープンラボ2に設置した実験を行い、本研究による計算法の結果と比較した。比較項目は、本研究による窓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、直達成分を計算するための日照面積率と、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、誤差率が小さく、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、Radiance 計算法の最も詳細な組み合わせである rtrace・10 mm 格子中心の室温が最も実測値に近く、比較すると DC・10 mm 水平ラインによる室温は実測値から前後するものの、誤差率の差異は小さいことを確認した。

Radiance 性能検証のために行った、実測値と Radiance シミュレーション値の比較では、DC による輝度・照度が低めとなった。特に太陽高度が低い冬に誤差率が大きく、これは、太陽を含んで天空を 145 に粗く分割した DC 計算法の限界と考えた。

ただし、窓面日射熱取得の計算に利用している窓の外の Radiance による照度計算では、ブラインドを置いていないため、DC 計算でもある程度の精度が確保でき、DC 計算は有用と考えた。

第2節・第3節の内容より、実測値と、本研究による評価法の最も詳細な 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、および従来 NewHASP, EnergyPlus の室温を比較した結果、本研究による 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。本研究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。

【第4章の参考文献】

- 4-1) 井川憲男, 島崎佐智代, 中村洋 : 日射量による昼光照度の推定方法に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 第526号, pp17-24, 1999.12
- 4-2) 気象庁 過去の気象データ検索, <https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>, accessed 2020.8.13
- 4-3) 空調設備の動的熱負荷計算入門, 日本建築設備士協会コンピュータ・プログラム委員会編, 日本建築設備士協会, pp.133, 1980
- 4-4) RADIANCE WWW server, Abbreviated list of RADIANCE Commands, <https://floyd.lbl.gov/radiance/gendaylit.1.html>, accessed 2020.7.14
- 4-5) Perez et al., : ALL-WEATHER MODEL FOR SKY LUMINANCE DISTRIBUTION--PRELIMINARY CONFIGURATION AND VALIDATION, Solar Energy Vol. 50, No. 3, pp. 235-245, 1993
- 4-6) RADIANCE WWW server, Abbreviated list of RADIANCE Commands, https://floyd.lbl.gov/radiance/man_html/rtrace.1.html, accessed 2020.7.14
- 4-7) Daylighting Simulations with Radiance using Matrix-based Methods, <https://www.radiance-online.org/learning/tutorials/matrix-based-methods>, accessed 2020.7.14
- 4-8) EnergyPlus Engineering Reference, https://energyplus.net/sites/all/modules/custom/nrel_custom/pdfs/pdfs_v9.3.0/EngineeringReference.pdf, accessed 2020.10.27
- 4-9) CIE 171 Test cases to assess the accuracy of lighting computer programs

第5章 本研究で提案する評価手法を利用した 多目的最適化検討

本章では、屋内外日照・日射制御装置による建物のエネルギー性能評価手法の応用として、屋内外日照・日射制御装置による建物のエネルギー性能評価と、視環境評価を目的関数とし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る。

5.1 多目的最適化シミュレーションの構成

本研究で提案する評価手法を利用した空調・照明エネルギー使用量と、視環境評価としてグレア、眺望性を合わせた3つを目的関数とし、垂直ルーバーの角度、幅、間隔およびブラインドの角度を変数とした、日照・日射制御装置の最適形状導出のための多目的最適化モデルの構成と全体フローを図5-1に示す。

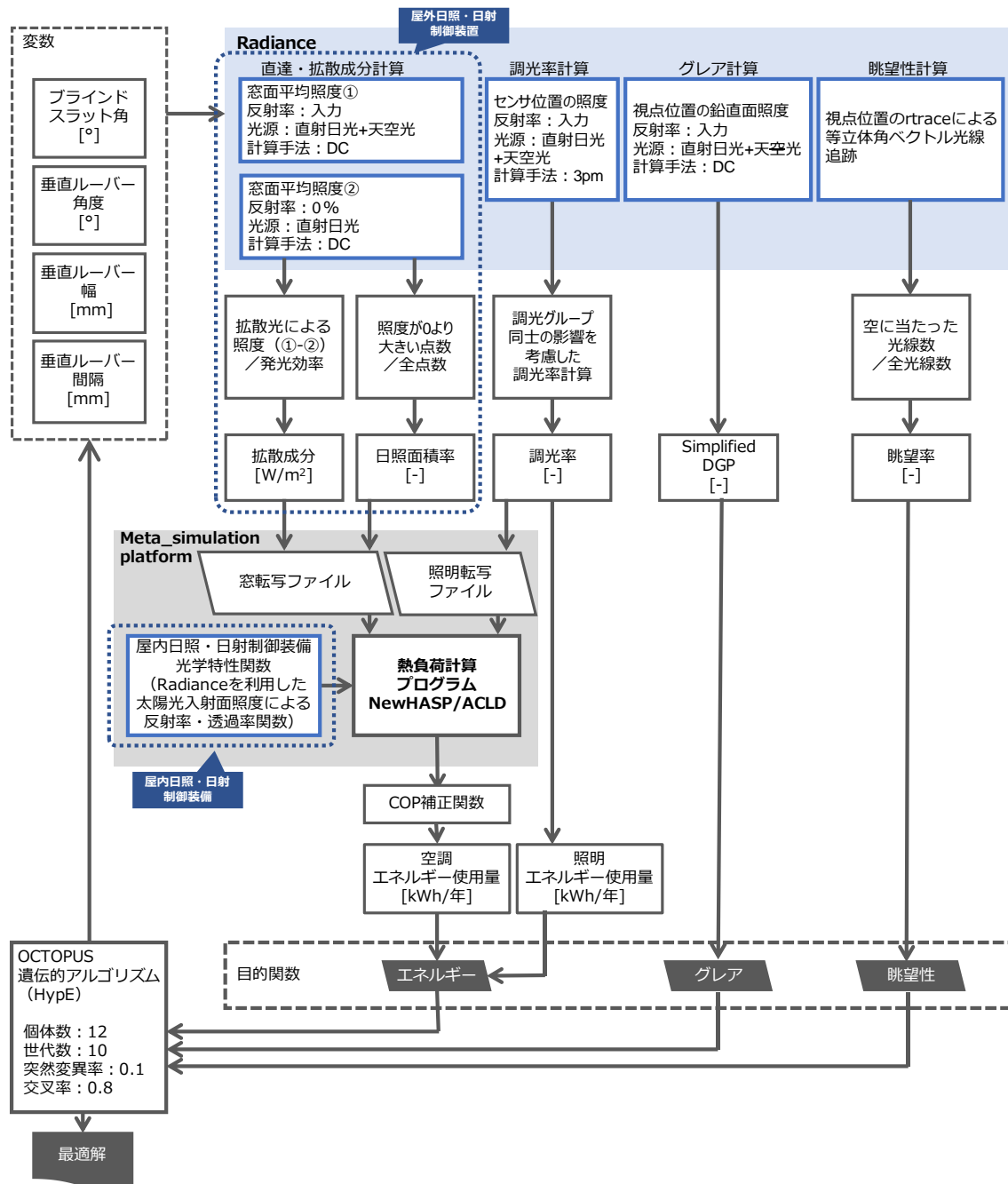


図 5-1 多目的最適化モデルの構成と全体フロー

Radiance による直達成分・拡散成分・調光率・ブラインド光学特性関数を NewHASP に取り込んで熱負荷を求め、COP 補正関数により、空調エネルギー使用量を求める。調光率計算は、照明エネルギー使用量にも利用する。グレア計算、眺望性計算にも、Radiance を利用している。

5.1.1 空調・照明エネルギー評価手法

第4章で検証した計算手法（図4-1）を利用して、空調・照明エネルギーを算出した。本研究で構築した屋外日照・日射制御装置がある場合の熱負荷・電力使用量計算法について、NewHASP フローと Radiance による光環境シミュレーションの関係を図5-2に示す。

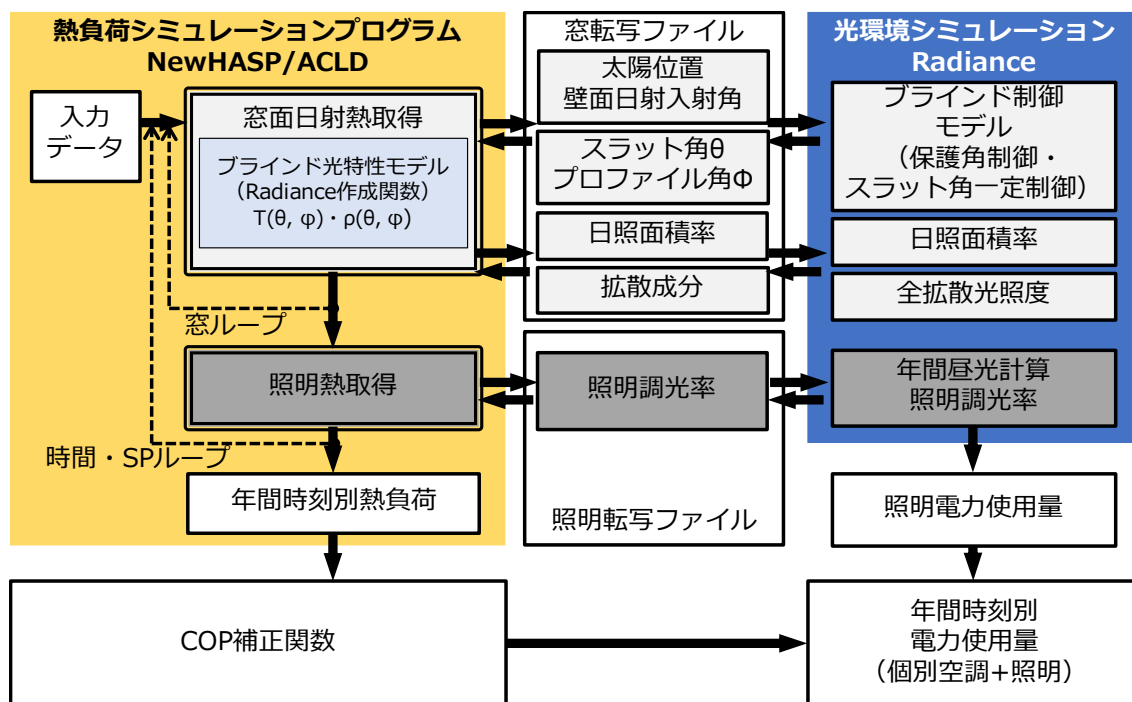


図 5-2 熱負荷・電力使用量計算法（屋内外日照・日射制御技術）

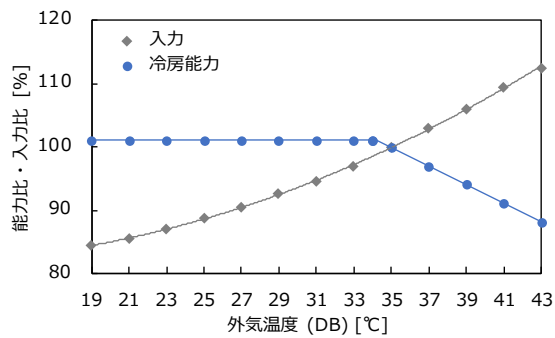
第4章の検証により、Radianceによる日照面積率・拡散成分の計算にはDC計算による照度を利用し、日照面積率の計算は、窓面中央の高さを水平に10mm間隔に分割した点の照度を利用して、計算時間の短縮を試みた。

第2,3章では、LCEMを利用して空調エネルギー使用量を求めたが、LCEMは空調機器を選定する必要があるため、本章では、グラフィカルアルゴリズムエディタGrasshopperをベースに計算を実行させるため、Excelのマクロ機能を利用するLCEMと連携させることは複雑すぎると考えた。機器特性は、メーカー・機種・容量によって変化するため、今回は、建築設備設計基準⁵⁻¹⁾記載のデータを代表特性として利用し、NewHASPの熱負荷を、外気温度と室内温度の入出力比および部分負荷特性で補正したCOPで除した式(5.1)により、空調エネルギー使用量を求めた。補正関数を図5-3に示す。

$$COP_S = COP \times \frac{O_o}{I_o} \times \frac{O_i}{I_i} \quad \cdots (5.1)$$

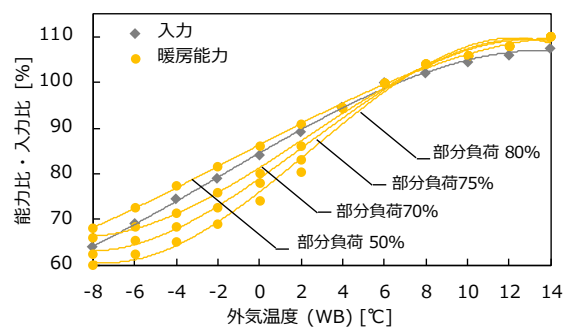
COP_S	:	運転 COP	[-]
COP	:	定格 COP	[-]
I_o	:	外気温度 (DB) 入力比	[%]
O_o	:	外気温度 (WB) 出力比	[%]
I_i	:	室内吸込空気温度 (WB) 入力比	[%]
O_i	:	室内吸込空気温度 (DB) 出力比	[%]

外気温度による補正_冷房



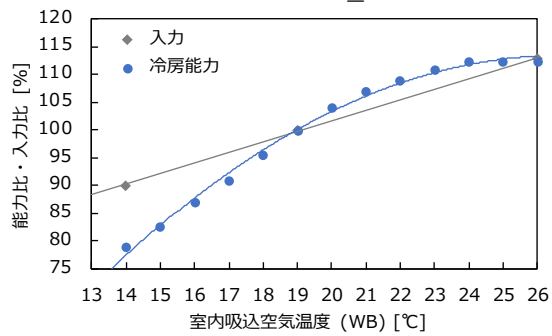
Input
 $y = 0.0268x^2 - 0.4822x + 83.889$
 $R^2 = 0.9997$
 Output
 $DB \leq 34$
 $y = 101$
 $DB > 34$
 $y = -1.4658x + 151.11$
 $R^2 = 0.999$

外気温度による補正_暖房



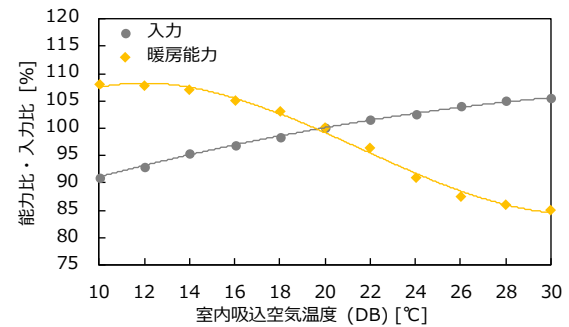
Input
 $y = -0.0036x^3 - 0.0205x^2 + 2.6078x + 84.485$
 $R^2 = 0.9986$
 Output
 50%
 $y = -0.0028x^3 - 0.0095x^2 + 2.3603x + 86.312$
 $R^2 = 0.9989$
 70%
 $y = -0.0086x^3 + 0.0568x^2 + 2.8751x + 81.278$
 $R^2 = 0.9964$
 75%
 $y = -0.0103x^3 + 0.0688x^2 + 3.1874x + 78.921$
 $R^2 = 0.9936$
 80%
 $y = -0.0132x^3 + 0.0982x^2 + 3.5338x + 75.974$
 $R^2 = 0.99$

室内吸込空気温度による補正_冷房



Input
 $y = 1.9128x + 63.381$
 $R^2 = 0.9997$
 Output
 $y = -0.2225x^2 + 11.9x - 45.644$
 $R^2 = 0.9948$

室内吸込空気温度による補正_暖房



Input
 $y = -0.0178x^2 + 1.4382x + 78.465$
 $R^2 = 0.9985$
 Output
 $y = 0.0069x^3 - 0.4435x^2 + 7.6704x + 68.222$
 $R^2 = 0.9941$

図 5-3 COP 補正関数

5.1.2 グレア評価手法

オフィスにおける執務者の快適性のために、昼光によるグレアを評価した。グレア指標には、予測グレア感 PGSV (predicted Glare Sensation Vote)¹⁻²⁾や昼光グレア確率 DGP (Daylight Glare Probability)¹⁻²⁾等の指標がある。PGSV は、昼光照明による不快グレアを予測、評価する指標であり、日本のオープンプランオフィスの窓の大きさに適した指標である¹⁻²⁾。DGP は、昼光による眩しさを不快と感じる人の割合を表し、0.35 で「最も良い」と判断される¹⁻²⁾。さらに、欧州規格¹⁻³⁾では、「スペースの占有時間の5%以上で超えない DGP 値」を利用してグレアを年間評価しており、DGP 0.35 が最も高い評価基準である。欧州規格のグレア基準値を、図 5-4 に示す。



図 5-4 欧州規格グレア保護基準の推奨値

simplified DGP は、視点位置の鉛直面照度によって簡易に評価することができるため、ファサードや日照・日射制御装置の年間評価に適している⁵⁻²⁾。今回は、部屋の代表点における鉛直面照度を、Radiance による年間計算によって算出し、simplified DGP を利用してグレアを評価した。simplified DGP は式(5.2)により求め、部屋の代表点における simplified DGP が、閾値 (0.35) を超える割合で評価した。

$$DGP_s = 6.22 \times 10^{-5} \times E_v + 0.184 \quad \cdots (5.2)$$

E_v : 視点位置の鉛直面照度 [lx]

5.1.3 眺望性評価手法

Radiance の rtrace コマンドを使用して、図 5-5 に示すように、ある視点位置において視線方向ベクトルからの光線を追跡し、到達した対象面が天空や、地面、日照・日射制御装置といった要素のいずれかであることをピクセルごとに出力した。今回は、見た目の大きさとピクセル数の割合が等しくなるという特徴を持つ等立体角射影方式を採用し、式(5.3)を用いて、視線内 (180 度視野の円周画像) に占める天空の割合を算出し、眺望性の指標とした。

本研究では、窓面中央から室内側に 2,000mm、高さ 1,200mm の位置を視点とし、視線方向は窓面と正対させた。解像度は、ブラインド幅を通過する光線が十分に確保できるように

設定した。屋外日照・日射制御装置として垂直ルーバー，屋内日照・日射制御装置としてブラインドを設置した場合における眺望性の関数を図 5-6 に示す。後述の図 5-11, 5-12 に示す垂直ルーバー角度とブラインド角度別の眺望率を，垂直ルーバー幅 360mm，間隔 1,500mm に固定して求めた。

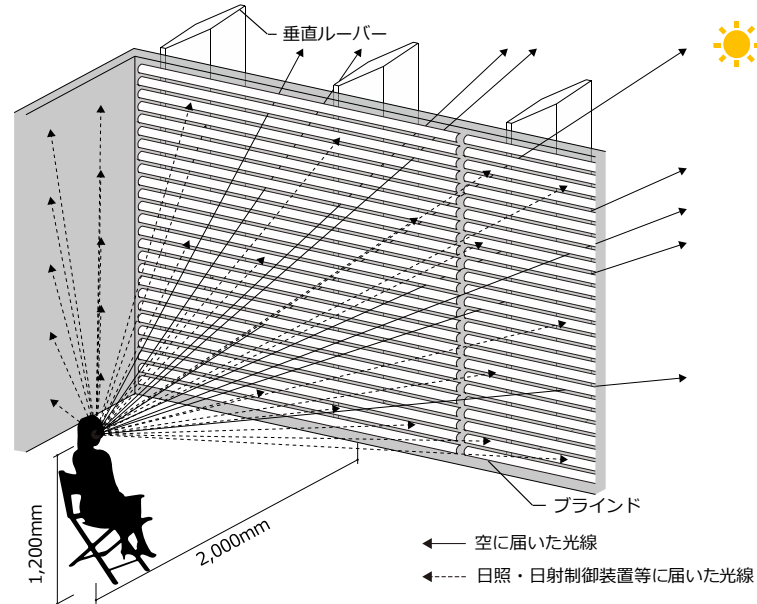


図 5-5 Radiance rtrace コマンドによる眺望性評価

$$V = \frac{N}{\pi R^2} \quad \dots (5.3)$$

- V : 眺望率 [-]
 N : 空の要素を抽出したピクセル数 [-]
 R : 円周画像の半径に相当するピクセル数 [-]

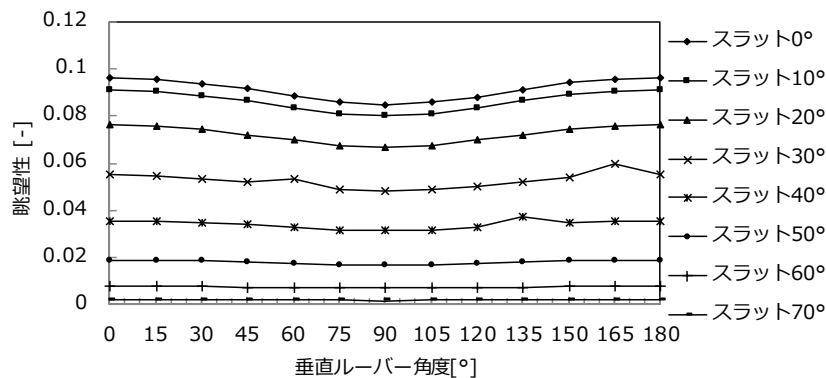


図 5-6 眺望性関数（垂直ルーバー幅 360mm，間隔 1,500mm 固定）

5.1.4 多目的最適化計算手法

本研究では、グラフィカルアルゴリズムエディタ Grasshopper¹⁻²⁵⁾を利用して、空調・照明エネルギー・グレア・眺望性の計算を実行した。最適化計算は、多目的遺伝的アルゴリズムを扱う Grasshopper のプラグインソフト OCTOPUS¹⁻²⁶⁾を用い、屋内外日照・日射制御装置に関する4つのパラメータ（垂直ルーバーの角度、幅、間隔およびブラインドの角度）を変化させ、3つの目的関数によって評価した。なお本研究の最終的な目標は、固定・可動を含めた多種多様な条件のもとでの屋内外日照・日射制御装置の最適化を検討することであるが、本章においては、その最初の取り組みとして、ルーバーやブラインドの角度は年間を通して固定とした。

空調・照明エネルギーは、COP 補正関数を利用した空調エネルギー使用量に、調光率計算による調光率と照明消費電力密度による照明エネルギー使用量を合算した空調・照明エネルギー使用量によって評価した。

グレアは、部屋の代表点における simplified DGP が、閾値を超える割合で評価した。

眺望性は、部屋の代表点における空の見える割合で評価した。

5.1.4.1 多目的進化的最適化計算

OUTPOUS では、多目的進化的最適化 (Multi-Objective Evolutionary Optimization) ⁵⁻³⁾ が実行されている。

多目的最適化問題 (Multi-Objective Optimization Problem) は、式(5.4), (5.5)で定義される ⁵⁻³⁾。

$$\begin{cases} \text{Minimize / Maximize } f_1(x), f_1(x), \dots, f_m(x) & \dots (5.4) \\ \text{subject to } x \in X & \dots (5.5) \end{cases}$$

X は実行可能領域、 x は設計変数ベクトルで解、 $f_i (i = 1, 2, \dots, m)$ は、 m 種類の目的関数を表す。多目的最適化問題は、一般的に m 種類の目的関数を最小化もしくは最大化する x を見出す問題である。しかし、目的関数間にトレードオフ関係があると、すべての目的関数を最小化もしくは最大化できる唯一の x は存在しない。そのため、多目的最適化問題では、目的間の最適なトレードオフ関係を示す解集合を獲得することが目的になる。

最小化問題において、解 x と y が式(5.6)を満たす時、 x は y を支配（優越）するという。

$$\forall i: f_i(x) \leq f_i(y) \wedge \exists i: f_i(x) < f_i(y) (i = 1, \dots, m) \quad \dots (5.6)$$

ある解 x を支配する解が、実行可能領域 X に存在しない場合、 x をパレート最適解という。多目的最適化のゴールは、パレート最適解集合を近似する解集合を獲得することである。解探索の過程で得られた解集合の中から、パレート支配されない非劣解集合を最適化の結

果として出力する。

進化計算は、解集団による多点探索により、大域的な探索を実現している。一般的な進化計算の手順を図 5-7 に示す⁵⁻⁴⁾。

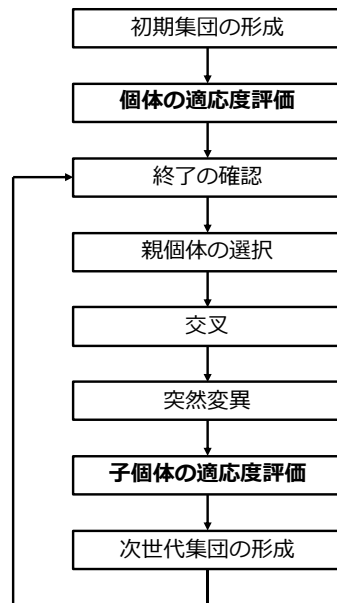


図 5-7 進化計算の計算手順

まず、乱数を用いて初期集団を形成する。次に、集団内の個体について適応度評価を行う。そして、探索のループに入る。ループ内では、まず親個体を選択する。そして、交叉や突然変異を施し、子個体を生成する。生成された子個体は適応度評価を受け、選択された個体によって、次世代の集団を生成する。終了条件を満たしていなければループの先頭に戻り、探索を続ける。

多目的進化的最適化では、適応度を評価するための様々なアルゴリズムが開発されている。OCTOPUS で採用されている 2 つのアルゴリズム「HypE」「SPEA-2」の考え方を、以下に説明する。

① HypE

解の評価尺度に HyperVolume (HV) を使用して、パレート解集合が支配している空間を表す手法であり、HV 値が大きいほど、より大きな空間を支配しているため優れた解集合であることを意味する。個々の解について、その解が解集団に存在する時としない時の HV の差分を適応度とする。ただし、目的数の増加に伴い計算時間が増大する問題がある。HypE は、モンテカルロ法によって HV を推定する方法であり、評価には基準点 (reference) が必

要となる $f_1(x), f_2(x)$ を最小化する x を見出す問題。

目的関数 $f_1(x), f_2(x)$ を最小化する x を見出す問題

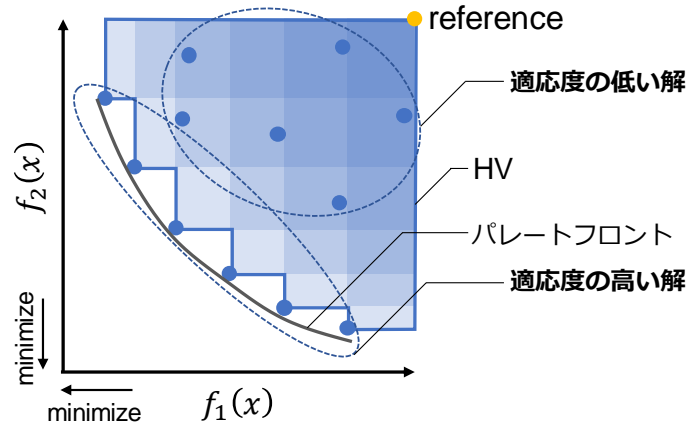


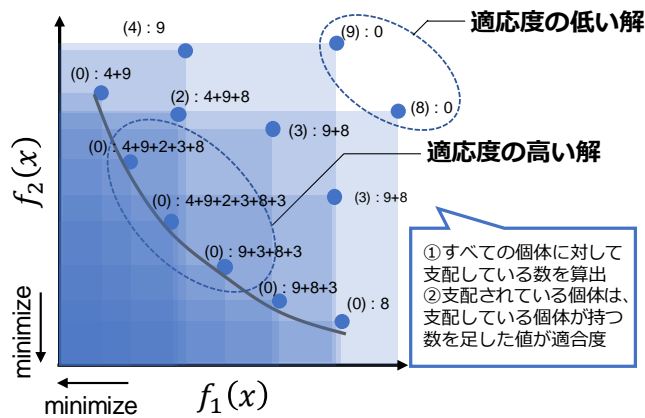
図 5-8 HypE 概念図

② SPEA-2

1999 年に開発された SPEA (Strength Pareto Evolutionary Algorithm) を改良した手法であり、適応度評価に【適合度の割り当て手法】と、パレート個体を削減する【アーカイブ端切手法 (truncation method)】を適用する $f_1(x), f_2(x)$ を最小化する x を見出す問題。

目的関数 $f_1(x), f_2(x)$ を最小化する x を見出す問題

【適合度割り当て手法】



【アーカイブ端切手法】

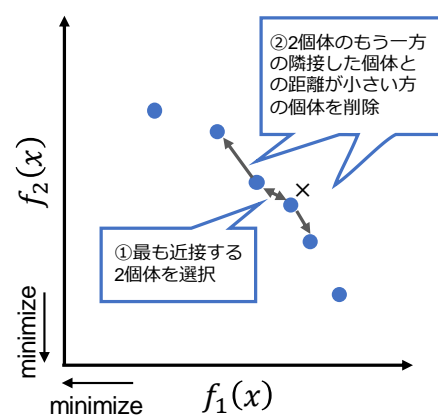


図 5-9 SPEA-2 概念図

5.2 多目的最適化の検討

5.2.1 建物形状

本研究で開発したシミュレーションシステムを利用し、図 5-10 に示す建物を対象として、屋内外日照・日射制御装置による建物のエネルギー性能、グレア、眺望性を評価した。定格光束 3,334lm（発光効率 100 lm/W）の LED 照明を想定し、調光最大で 1,000lx となるように 24 灯を 600mm グリッド天井に配置して、昼光利用により平均机上面照度が 750lx になるよう調光制御した。照度センサ位置は、部屋の中央とし、グレアと眺望性は、ファサード面から 2,000mm、床上 1,200mm の位置を代表点として評価した。

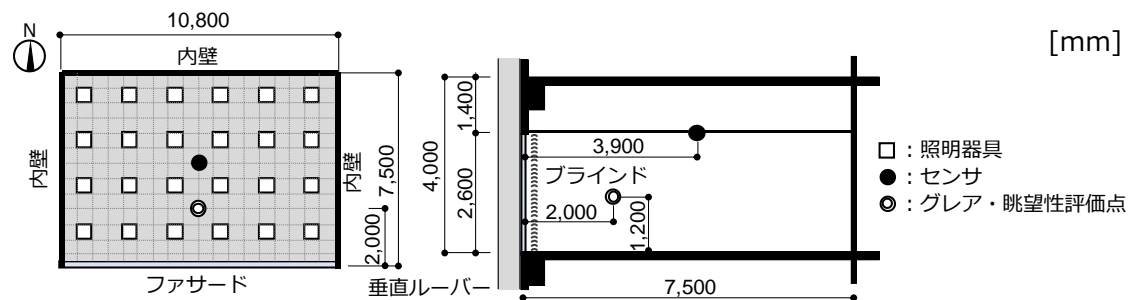


図 5-10 平面図・断面図

5.2.2 屋内外日照・日射制御装置形状

シミュレーションの対象とした屋内外日照・日射制御装置の形状を図 5-11、5-12 に示す。屋外日照・日射制御装置は垂直ルーバーとし、角度 0°～180°，幅 220～500mm，間隔 1,000～2,000mm の範囲で任意に変化することとした。屋内日照・日射制御装置はブラインドとし、角度が 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70° のように 10° 刻みに変化することとした。

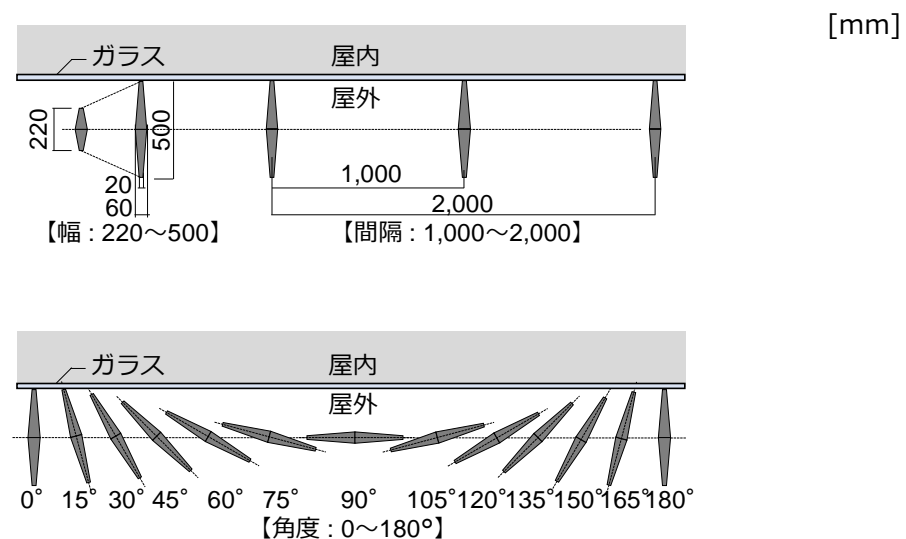


図 5-11 屋外日照・日射制御装置詳細図

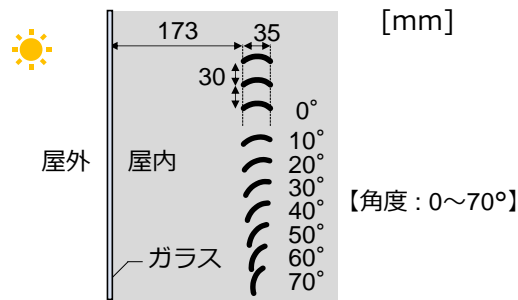


図 5-12 屋内日照・日射制御装備詳細図

5.2.3 パラメトリックスタディ結果

多目的最適化を行うにあたり、基本的なパラメータの挙動を調べるために、表 5-1 に示す屋内外日照・日射制御装置条件における年間の空調・照明エネルギー使用量、グレア、眺望性を求めた。窓面日射熱取得・照明熱取得・グレア・眺望性を求める Radiance 計算条件を表 5-2、Radiance で求めた組込んだ各要素を組み込んだ熱負荷シミュレーション計算条件を表 5-3 に示す。そして、パラメトリックスタディの結果を図 5-13, 5-14, 5-15, 5-16 に示す。

表 5-1 屋内外日照・日射制御装置条件

ケース	ブラインド 角度[°]	垂直ルーバー 角度[°]	垂直ルーバー 幅 [mm]	垂直ルーバー 間隔 [mm]
a	0	0	220	1,000
b	0	0	220	2,000
c	0	0	500	1,000
d	0	0	500	2,000
e	0	90	220	1,000
f	0	90	220	2,000
g	0	90	500	1,000
h	0	90	500	2,000
i	70	0	220	1,000
j	70	0	220	2,000
k	70	0	500	1,000
l	70	0	500	2,000
m	70	90	220	1,000
n	70	90	220	2,000
o	70	90	500	1,000
p	70	90	500	2,000

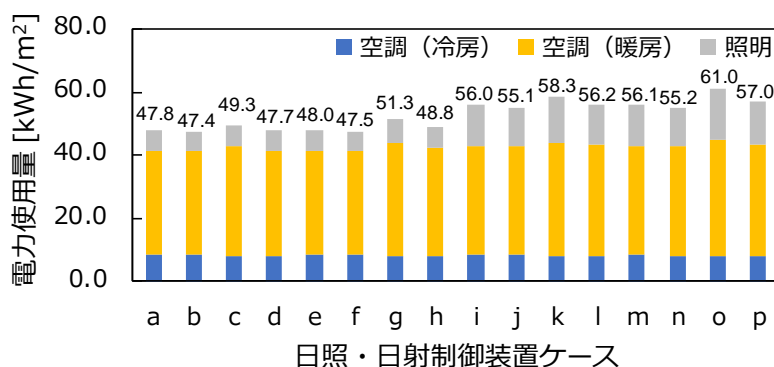
表 5-2 Radiance 光環境シミュレーションパラメータ

	ab	aa	ar	as	ad	lw	dc	dt	dj	st	ss	e	c
Direct radiation Three phase method	0	0.15	512	32768	65536	1.52e-5	1	0	0	1	0	MF:6	-
Diffuse radiation Three phase method	0	0.15	512	32768	65536	1.52e-5	-	-	-	-	-	MF:1	1000
Dimming level Daylight Coefficient	1	0.15	512	32768	65536	1.52e-5	-	-	-	-	-	MF:1	-
Glare Daylight Coefficient	6	0.15	512	256	512	-	-	-	-	-	-	-	-

※Radiance 計算パラメータは表 3-4 参照

表 5-3 NewHASP 熱負荷・空調エネルギー使用量計算条件

建物モデル	室用途	事務室
	方位	南向き 東西面には窓無し
	床面積	81 m ²
	天井高	2.6 m
	床面地上高さ	33.2 m
空調ゾーニング	1ゾーンに分ける。ペリメータ、インテリアの区別無し	
気象データ	地点	東京(茨城県百里の気象データを東京としている)
	EPWデータ(EnergyPlusのWeatherDataのURLより)	
地物反射率		20 %
限界日射取得量		0 W/m ²
日射吸収率		80 %
長波放射率		90 %
季節	夏期 6～9月、冬期 10～5月(中間期を冬期として設定 ※)	
週間スケジュール	平日 空調、土日祝日 非空調、特別日 非空調	
特別日	省エネ法標準室カレンダーパターン採用 →平日241+土曜日51+日曜日祝日73=計365	
空調条件	空調時間	14 時間 7時～21時
	室使用时间	13 時間 8時～21時
	外気導入量	5 m ³ /m ² h
	外気カット	1 時間 7時～8時
室内温湿度条件	夏期 26℃、60%以下、冬期・中間期 22～26℃、40%以上	
内部発熱ほか	人員密度	0.1 人/m ² 平日のみ 9時～21時 100 % 土日祝日 オフ 0 %
	作業強度	3
	照明密度	9.8 W/m ² 平日のみ 9時～21時 100 % 土日祝日 オフ 0 %
	機器密度(顕熱のみ)	12 W/m ² 平日のみ 9時～21時 100 % 土日祝日 終日 25 %
	発熱割合(期待率)	夏 75%、冬期・中間期 75%
	室内熱容量	顕熱 40 kJ/(m ² ・K) 潜熱 40 kJ/(m ² ・(g/kg(DA)))
	隙間風	換気回数法 0.2 回/h 窓面のみに設定
隣室空調条件	上下階	空調 α=0(対象室と同じ温度)
壁体構造	窓ガラス	横連窓 28 m ² 開口率 65 % 方位 南 透過率 普通透明単板 8mm
	外壁	南 15.1 m ² 反射率 50 %
	内壁	25.8 m ² 反射率 50 %
	床	81 m ² 反射率 20 %
	天井	反射率 70 %
	地面	反射率 20 %
	屋内外日照・日射制御装置	反射率 70 %
空調機	個別分散空調 COP	冷房:3.36 暖房:3.77



	[kwh/m²]															
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p
空調（冷房）	8.3	8.3	7.9	8.1	8.2	8.2	7.8	8.0	8.2	8.2	8.1	8.1	8.2	8.2	8.1	8.1
空調（暖房）	33.1	32.9	35.0	33.4	33.4	33.1	36.2	34.3	34.5	34.4	35.7	35.1	34.8	34.6	36.5	35.5
照明	6.4	6.2	6.4	6.2	6.4	6.2	7.3	6.4	13.3	12.5	14.5	13.0	13.2	12.4	16.3	13.4

図 5-13 年間電力使用量

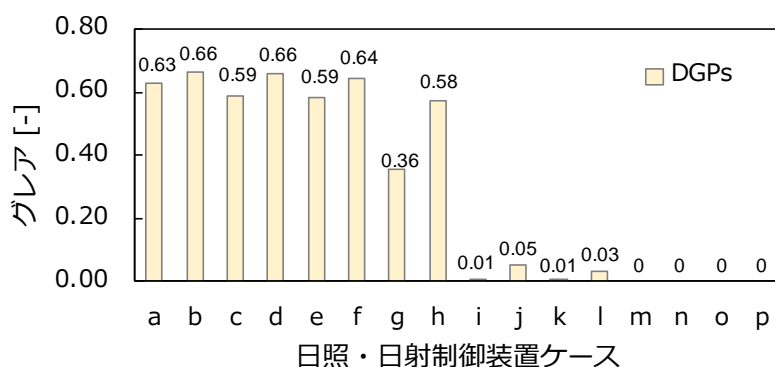


図 5-14 年間グレア

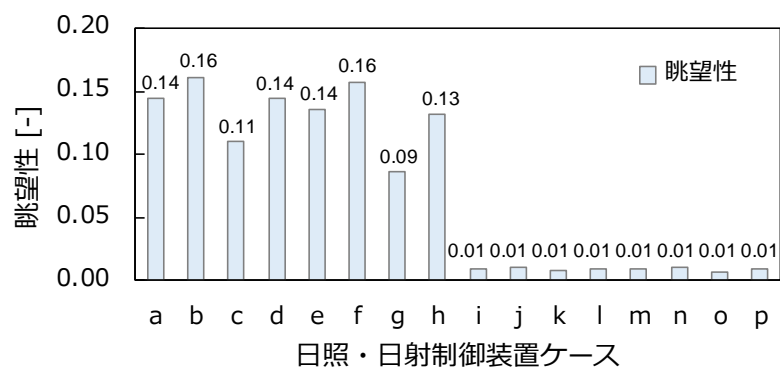


図 5-15 眺望性

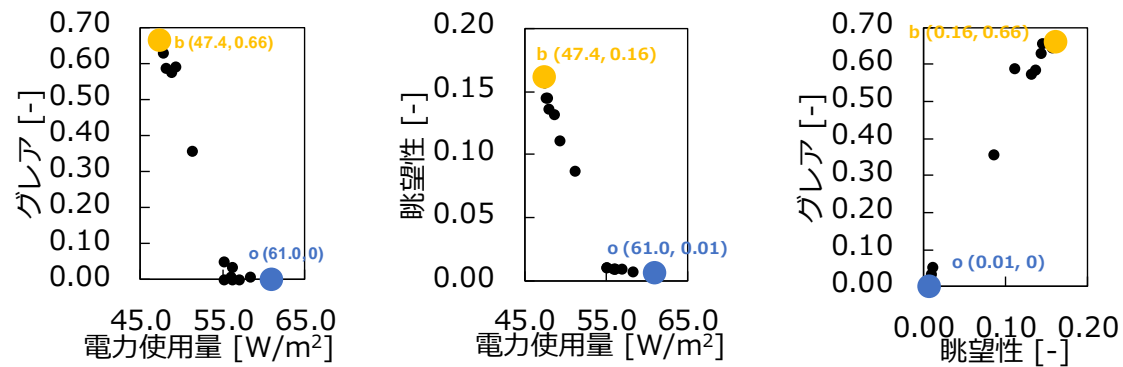


図 5-16 年間電力使用量・年間グレア・眺望性の関係

空調・照明エネルギー使用量は、ブラインドの角度は深く、垂直ルーバーの角度は深く、幅は長く、間隔は狭くなる程、大きくなる傾向が見られた。これは、気象条件を東京(百里)としたため、冬の外気温度が低く、空調エネルギー使用量(暖房)の占める割合が大きいことが原因と考えられる。

EPW の東京(百里)と NewHASP の東京における外気温の比較を図 5-17 に示す。百里は EPW では「東京」と表記されているが、実際には茨城県に位置し、東京より外気温が約 5°C 低いいため、暖房負荷が大きく、COP が悪くなり、暖房エネルギー使用量が増大し、冷房負荷が小さく、COP が良くなり、冷房エネルギー使用量が減少した。

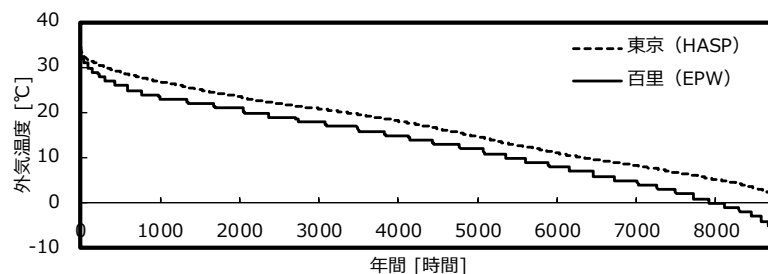


図 5-17 百里と東京の外気温

空調エネルギー使用量(冷房)は、垂直ルーバーの幅は短く、間隔は広くなる程、大きくなる傾向があり、ブラインド角度、垂直ルーバー角度の影響はあまり受けていない。空調エネルギー使用量(暖房)は、ブラインドの角度は深く、垂直ルーバーの角度は深く、幅は長く、間隔は狭くなる程、大きくなる傾向が見られた。照明エネルギー使用量は、ブラインドの角度は深く、垂直ルーバーの幅は長く、間隔は狭くなる程、大きくなる傾向があり、垂直ルーバーの角度の影響はあまり受けていない。

グレアと眺望性は、ブラインドの角度は浅くなるほど大きくなり、垂直ルーバーの角度は浅く、幅は狭く、間隔は広くなるとやや大きい。グレアは、グレア光源からの発散光束に依存した視点位置の鉛直面照度によって評価したためと考えられる。

次に、昼光利用による照明制御の有無と、気象条件を東京（百里）から鹿児島に変えた場合における、年間合計熱負荷と年間の空調・照明エネルギー使用量を、ブラインドと垂直ルーバーの条件が最も開放的なケース b と、最も閉鎖的なケース o で比較した結果を図 5-18, 5-19 に示す。

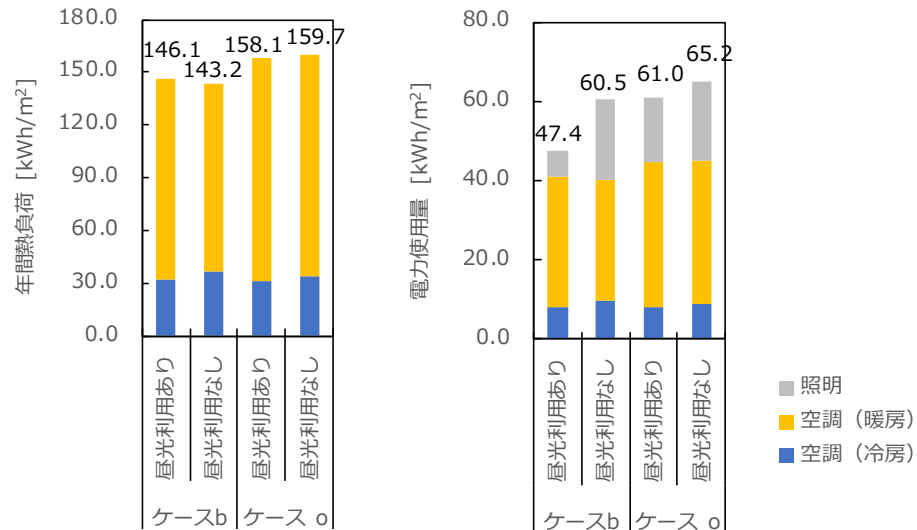


図 5-18 昼光利用あり・なしの熱負荷・エネルギー使用量（東京（百里））

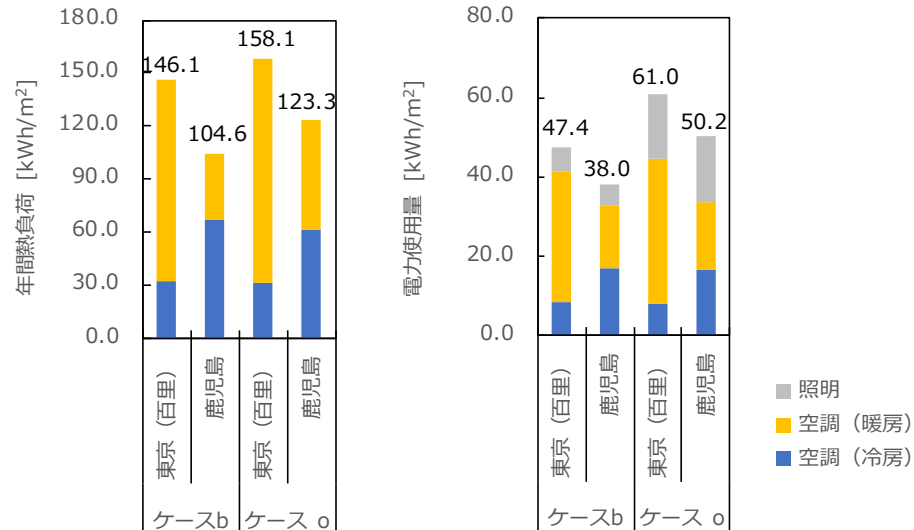


図 5-19 東京（百里）と鹿児島の熱負荷・エネルギー使用量

昼光利用による照明制御がある場合、年間合計熱負荷は、ケース b はやや大きく、ケース o はやや小さいが、照明制御なしと大きな差が見られなかった。空調・照明エネルギー使用量は、ケース b は昼光利用の効果が大きく、昼光利用による照明制御は、照明エネルギー使用量に対する効果が大きいことが示された。

気象条件を鹿児島とした場合は、東京（百里）に比べ、年間合計熱負荷は、冷房負荷が増

加するが、暖房負荷が減少するため、ケース b, ケース o ともに鹿児島の方が小さくなった。鹿児島の空調・照明エネルギー使用量は、空調エネルギー使用量（冷房）が増加するが、空調エネルギー使用量（暖房）が減少するので、ケース b, ケース o どちらの場合も、東京（百里）より小さくなることが示された。また、東京（百里）、鹿児島ともに、開放的なケース b の方が閉鎖的なケース o に比べて空調・照明エネルギー使用量、年間合計負荷ともに小さくなった。これは、ブラインドを常に下ろした状態で比較しているため、空調エネルギー使用量に差が生じにくいと考えられる。また、今回は、空調と照明を合わせたエネルギー使用量で評価するため、熱負荷として屋内外日照・日射制御装置の影響を受けない外気負荷や潜熱負荷を含めた装置全熱負荷を用いた。そのため、空調エネルギー使用量の内、変化しない部分が大きくなり、差が小さくなった。

5.2.4 多目的最適化検討の結果

パラメトリックツール Grasshopper と多目的最適化プラグインソフト OCTOPUS を使用したエネルギー・グレア・眺望性を目的関数とする多目的最適化計算を行った。遺伝的アルゴリズムの計算条件として、一世代の個体数を 12、世代数を 10、突然変異率を 0.1、交差率を 0.8 と設定し、アルゴリズムは HypE (5.1.4.1 節参照) を選択した。OCTOPUS は、前の世代からの優れた解をマーキングし、透明性が高いほど古いものを表している。そして、パレート支配されない非劣解集合を不透明な色でマーキングし、最適化の結果として出力する。結果を図 5-20 に示す。

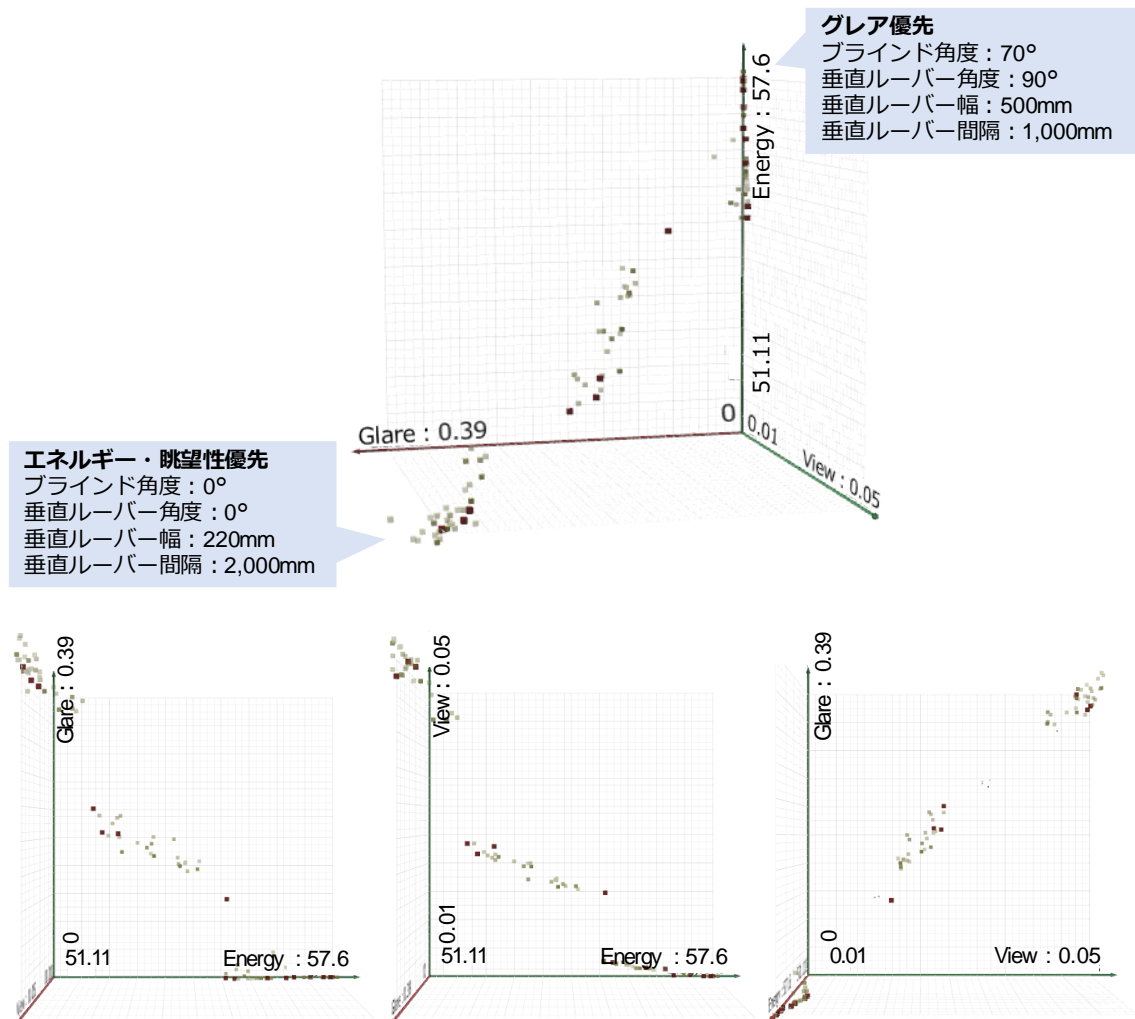


図 5-20 OCTOPUS によるパレート最適解

エネルギー・グレア・眺望性の結果をそれぞれの軸に表したパレート最適解は、空調・照明エネルギー使用量が多いほどグレア、眺望性が小さく、眺望性が高いほどグレアが大きくなっており、パラメトリックスタディ結果と傾向が一致した。グレアと眺望性の相関が高いため、曲面ではなく、曲線状のパレート最適解が算出された。

このパレート最適解の中から、エネルギーと眺望性を優先するならば図 5-20 上図の左下（ブラインド：角度 0°，垂直ルーバー：角度 0°・幅 220mm・間隔 2,000mm），グレアを優先するならば同図の右上（ブラインド：角度 70°，垂直ルーバー：角度 90°・幅 500mm・間隔 1,000mm）など、設計者の考えでブラインドやルーバーの条件を選択する。

空調・照明エネルギー使用量は小さいほど省エネルギーに貢献し、眺望性は数値が高いほど空がよく見えて眺望性が高い。グレアについては、前述のように欧州規格では、年間の 5% の時間では DGP が 0.35 を超えてもよいとしている。本章の目的関数であるグレアは、小さければ小さいほど 0.35 を超える時間数が少なく、眩しく感じないことを意味するが、年間の 5% を意味する 0.05 が、パレート最適解の中から日照・日射制御装置の条件を選択す

る場合の目安になると考えられる。

5.3 第5章のまとめ

本章では、第2章、第3章で構築し、第4章で妥当性が検証された屋内外日照・日射制御装置による建物のエネルギー性能評価手法を利用して、多目的最適化計算を試みた。

第1節では、空調・照明エネルギー、グレア、眺望性を目的関数とし、4つのパラメータ（垂直ルーバーの角度、幅、間隔およびブラインドの角度）を変化させて最適形状を求める多目的最適化シミュレーションの全体フローを説明した。そして、空調・照明エネルギー評価法、グレア評価法、眺望性評価法についてそれぞれ説明した。空調・照明エネルギーには、本研究による評価法で算出した熱負荷を、外気温度と室内温度の入出力比および部分負荷特性で補正したCOPで除した空調エネルギー使用量を利用した。グレアは、部屋の代表点における鉛直面照度を、Radianceの年間計算によって算出し、simplified DGPを利用して評価した。眺望性は、Radianceのrtraceコマンドを使用して、視線内に占める天空の割合を算出して、評価した。

第2節では、第1節で構築したシミュレーションフローに基づいた最適化計算を実行し、結果を検証した。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、基本的なパラメータの組合せにおける挙動を確認するための、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多いほどグレア、眺望性が小さく、眺望性が高いほどグレアが大きいという曲線状のパレート最適解が得られた。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・グレア・眺望性の関係と、多目的最適化計算で得られたパレート最適解における目的関数（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を明らかにした。

【第 5 章の参考文献】

- 5-1) 建築設備設計基準平成 27 年度版, 国土交通省大臣官房官庁営繕部設備・環境課, 一般社団法人公共建築協会, pp.428, 2015.8.30
- 5-2) Wienold, J, : DYNAMIC DAYLIGHT GLARE EVALUATION, Proceedings of BS2009, 11th International IBPSA Conference, 2009Glasgow, Scotland, pp.944-951, 2009.7
- 5-3) 佐藤寛之 : 進化計算による多数目的最適化, システム/制御/情報, Vol.60 No.7, pp 265-271, 2016
- 5-4) 石淵久生, 半田久志, : 進化計算の内外の研究動向, 進化計算学会論文誌, Vol.1 No.1, 2010
- 5-5) Carlos M. Fonseca, Joshua D. Knowles, A Tutorial on the Performance Assessment of Stochastic Multi objective Optimizers, An invited talk at the Evolutionary Multi-Criterion Optimization Conference (EMO 2005), Guanajuato, Mexico
- 5-6) 廣安知之, 三木光範他 : 多目的遺伝的アルゴリズムにおける各手法の比較, 同志社大学理工学研究報告 第 43 巻 第 1 号 pp 41-52, 2002
- 5-7) 佐藤寛之, 石淵久生, : 進化型多数目的最適化の現状と課題, 機関誌オペレーションズ・リサーチ, 第 62 巻, 第 3 号, pp.156-163, 2018.3
- 5-8) 同志社大学 知的システムデザイン研究室 2004 年度研究ページ , http://mikilab.doshisha.ac.jp/dia/research/mop_ga/moga/3/3-5-6.html, accessed 2020.7.4
- 5-9) ETH Zurich : <https://sop.tik.ee.ethz.ch/pisa/>, accessed 2020.7.4

第6章 結論・課題

6.1 本研究の結論

本研究では、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た。また、実務への展開に向けて、本研究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。

本研究の検討により、以下のことを明らかにした。

第1章では、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であるとの考えを述べ、本研究の目的や研究範囲を示した。

第2章では、屋内日照・日射制御装置による建物の光・熱環境エネルギー性能を評価するために、屋内日照・日射制御装置の一例として、ブラインドによる建物の光・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、シミュレーションによる、ブラインドスラット制御別の空調・照明エネルギー評価について論じた。その結果、装置顕熱負荷は、ブラインド制御による季節ごとの違いが表れた結果となり、月別・年間電力使用量は、昼光利用ありと昼光利用なしの差が大きく、昼光利用ありのブラインド制御による違いは小さいものの、45° 一定が一番小さく、水平一定、保護角制御の順に大きいという結果を確認した。Radiance を利用したブラインド光学特性関数を NewHASP に組み込み、Radiance による昼光利用時の照明調光率を求めて、どのようなブラインド角度でも詳細なエネルギー性能を評価できることを示した。

第3章では、様々な形状の屋外日照・日射制御装置による建物の光・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、「屋内側から見た窓」を日照エリア、天空、地物および屋外日照・日射制御装置の3つの区域に分割して考え、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。そして、シミュレーションによって、10種類の屋外日照・日射制御装置の空調・照明エネルギーを算出し、本研究による評価法を検証した。その結果、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、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。この結果から、東京（百里）では、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、屋光利用と屋外日照・日射制御装置を併用する場合、屋外日照・日射制御装置は屋光利用の効果を減ずる場合があるとの考えを示した。さらに、従来 NewHASP で計算可能な屋外日照・日射制御装置について、Radiance を利用して求めた日照面積率と室負荷を従来 NewHASP の結果と比較し、日照面積率と熱負荷の傾向が概ね一致し、本研究による評価法の熱負荷が正しく求められていることが確認できた。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立した。

第4章では、屋内外日照・日射制御装置による建物の光・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、はじめに既存のプログラムとして従来 NewHASP と EnergyPlus との比較を行い、次に、断熱箱を使った実験による測定値との比較を行って、本研究による評価法の有効性を論じた。実測値と、本研究による評価法の最も詳細な 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、および従来 NewHASP、EnergyPlus の室温を比較した結果、本研究による 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。本研究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。

第5章では、屋内外日照・日射制御装置による建物のエネルギー性能評価手法の応用として、屋内外日照・日射制御装置による建物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た。エネルギー・グレア・眺望性を目的関数とし、屋内外日照・日射制御装置形状の4つのパラメータ（垂直ルーバーの角度、幅、間隔およびブラインドの角度）を変数とした多目的最適化計算によりパレート最適解を導き、パラメトリックスタディにおいて得られたエネルギー・グレア・眺望性の関係と、多目的最適化計算で得られたパレート最適解における目的関数（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を明らかにした。

6.2 今後の課題と展望

本研究で提案した手法には、今後の実用化と普及に向けて、以下の課題と展望がある。

本研究では、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、従来 NewHASP に着目し、熱負荷計算に Radiance 計算結果を連携させて、光と熱の詳細連携計算に基づく日照・日射制御技術による建物のエネルギー性能を評価した。従来 NewHASP は、公開されたシンプルなプログラムであるため、本研究による計算法を取り込むことができたが、今後は、その他の熱負荷計算プログラムに本研究の計算法を取りこむことを、検討したい。

屋内日照・日射制御装備の光・熱環境評価について、本研究では、1 例として、ブラインドの光学特性関数を作成し、光・熱環境エネルギー性能評価手法を提案した。その他の屋内日照・日射制御装備である、スクリーンや障子、カーテン等の評価を行う場合は、ブラインドと同様に、Radiance によるプロファイル角ごとの透過率特性、反射率特性を使った光学特性関数を作成する必要がある。

昼光利用による照明制御について、BIM で作成した 3 次元モデルによる任意の窓形状から入る昼光を基に、調光グループ毎に、実際の制御に近い連続した調光率とその照明消費電力を求めた。照度センサは天井面に設置してケーススタディを実施したが、センサを視点位置や壁面に設定することによって、視点位置や壁面で感じる明るさを目標値とする照明制御を再現することが可能である。今後は、様々な照明制御を想定した空調・照明エネルギー使用量の算出に、本研究の成果を活用したい。

屋外日照・日射制御装置による建物の光・熱環境評価について、本研究では、代表的な屋外日照・日射制御装置におけるケーススタディを実施したが、曲面を含むより複雑な屋外日照・日射制御装置の効果検証や、可動式の屋外日照・日射制御装置の最適化計算にも適用していきたい。

屋内外日照・日射制御装置による建物のエネルギー性能評価手法を利用した多目的最適化について、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・日射制御装備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外日照・日射制御装置の最適化計算にも適用していきたい。

2019 年 3 月に発表された欧州規格¹⁻³⁾では、昼光を確実に確保することを奨励するとともに、十分に昼光を得るための昼光照度や開口部の目標値、眺望性・グレアの評価基準が定め

られている。

グレアについて、今回は代表する 1 点で評価したが、複数点の平均値をシミュレーションに組み込むことも可能である。

眺望性について、欧州規格では、窓の水平角、隣棟までの距離、そして空・風景・地面が何層見えるかで評価している。参考として、第 5 章のモデルにおけるブラインド 0°、垂直ルーバー角度 0°、幅 220mm、間隔 2,000mm とした場合の、窓面から室内側に 2 m（第 5 章での眺望性評価点）、4m、6m、7.5m の視点位置における天空、地面、天井、壁、床、ルーバー、ブラインドが見える割合を図 6-1 に示す。窓面から 6m までの視点からは、天空と地面が見えていることが分かる。

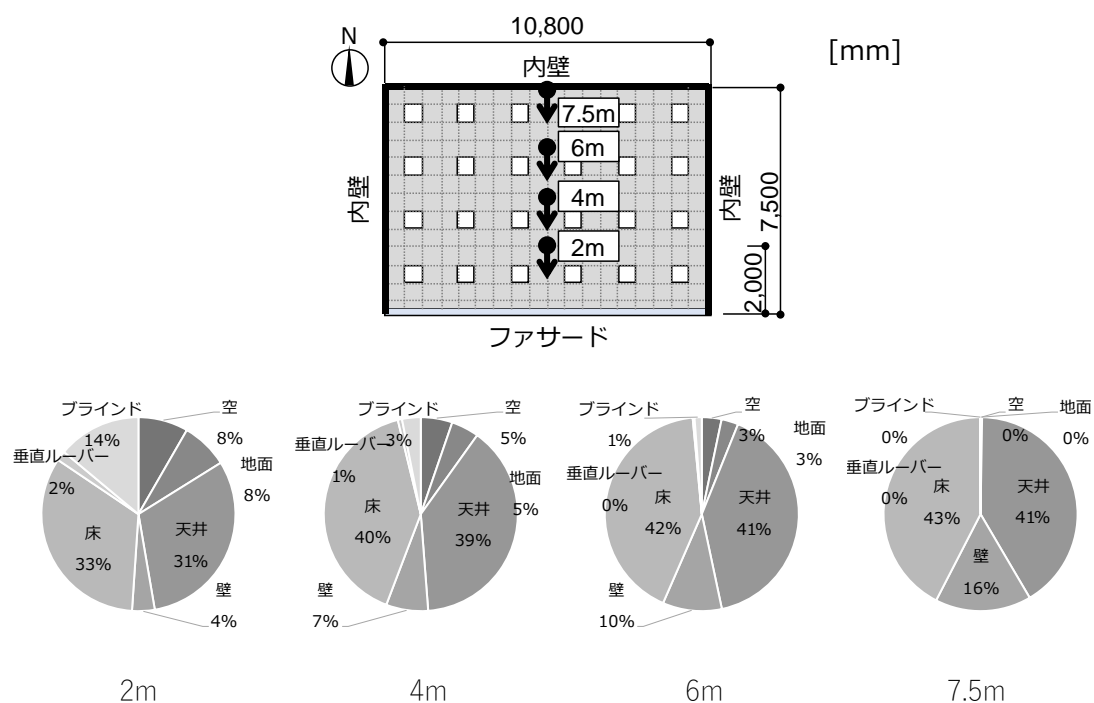


図 6-1 眺望比率

このようにして、欧州規格に応じた、窓から空・風景・地面が何層見えるかという評価も可能であり、最適化計算に組み込むことを検討したい。

謝辞

本研究を進めるにあたり、貴重なご指導と助言を賜りました東京理科大学理工学部建築学科教授 吉澤望博士に深く感謝いたします。2016 年から共同研究を通して熱心なご指導をいただき、博士後期課程への入学に導いていただきました。先生の要求は、常に私の想像より高い次元にあり、力不足の私に目指すべき目標を示していただきました。Radiance に関する基本的な知識から根気よくご指導いただいたこと、2 度の海外発表や、海外論文調査のために苦しい英語に向き合ったことなど、全てが私にとって貴重な経験であり、大きな財産となりました。卒業しましても、吉澤研究室 OG として、胸を張って光環境の研究に関わっていけるよう努力いたします。今後ともどうぞよろしくお願いいたします。

ご多忙の中、本論文を審査して頂きました、倉淵隆教授、長井達夫教授、寺部慎太郎教授、兼松学教授の先生方には、多角的なご指導、ご助言を賜り心より感謝申し上げます。審査中には、私に欠けていた視点からたくさんのご意見をいただき、本論文の完成を後押ししていただきました。WEB での審査となり、直接お会いすることが叶いませんでしたが、世情が落ち着きましたら、ぜひご挨拶に伺わせてください。

本研究は、大林組での研究開発業務として始まり、これまで約 5 年間にわたり遂行してまいりました。熱環境の研究者として、また研究開発業務の幹事として、大林組技術研究所都市環境技術研究部 相賀洋博士には、熱負荷計算やシミュレーション連携についてたくさんのご指導を賜り深く感謝いたします。相賀さんのご指導がなければこの研究は成り立たず、時には手取り足取り、時には議論を重ねながら研究を進めてまいりました。今後も熱・光環境解析技術の発展に貢献できるよう、取り組んでいきたいと思っております。

光環境の研究者として、また設計者として、多岐にわたるご指導をいただいた大林組設計本部設備設計部 小島義包博士に感謝いたします。黄表紙や CIE Full Paper の提出など切羽詰まった時、常に私の味方となり、精神的にも支えていただきました。お忙しい中、本論文もチェックしていただき、大変お世話になりました。小島さんが常に前を走っているから、私も最後まで頑張ることができました。ありがとうございました。

共同研究が始まった当初は東京理科大学理工学部建築学科吉澤研究室の学生であり、後に大林組に入社した岡本俊英氏に感謝いたします。岡本さんはとても研究熱心で、Radiance や Grasshopper の知識と技をいつも頼りにしていました。「大林組に入社します。」と聞いた時には、夢かと耳を疑うくらい嬉しかったです。今後は同じ会社の仲間として、光環境の研究開発を一緒に続けていきましょう。

断熱箱での実験やシミュレーションにご協力いただいた東京理科大学理工学部建築学科吉澤研究室の只木寿理恵さんに感謝いたします。只木さんには、数えきれないくらい清瀬の技術研究所に来ていただきました。元気でかわいらしい只木さんは、技研ではとても目立つ存在だったと後で聞きました。最後の最後まで研究にお付き合いいただき、ありがとうございました。社会人になっても、明るくパワフルにご活躍ください。

実験や EnergyPlus 計算にご協力いただいた東京理科大学理工学部建築学科吉澤研究室の松本駿太さん、野崎海地さん、細川仁規さん他、研究室のみなさんに感謝いたします。出会ったころには初々しさのあったみなさんが、努力を重ねて自信をつけていく様子を見て、とても頼もしく思っていました。社会人になっても、今と同じ誠実さでがんばってください。

技術研究所で行った夏・冬の実験や Grasshopper での最適化計算にご協力いただいた大林組 熱・光環境解析研究開発チームのみなさまに、感謝いたします。どんなにがんばってもひとりではできなかった事を、みなさまのおかげで乗り切ることができました。仕事以上の厚意による温かなご協力に感謝いたします。

1997 年、当時の上司である斎藤満博士の博士論文作成に関わったこと、2013 年に開始した NEDO 助成事業による取り組みを通して、小島義包博士の研究に協力したことが、博士を目指そうとするきっかけになりました。これからは、研究で得た知見を業務に活かすとともに、後輩の育成に努めてまいります。

私の母校でもある大好きな理科大で、また学生として 3 年間を過ごすことができ、本当に幸せでした。2 号館の古い校舎も、私にとっては懐かしい思い出の場所であり、いつもワクワクしながら研究室に通っていました。素晴らしい巡りあわせと、新たな出会いに感謝いたします。

最後に、ここで記載できなかった多数の方々のご協力に心よりお礼申し上げます。

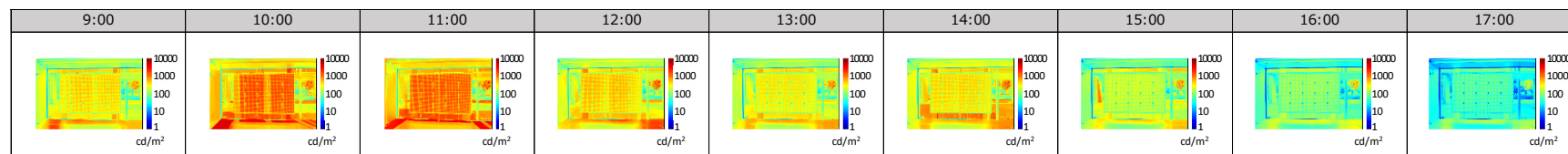
2021 年 1 月
大木知佳子

付録

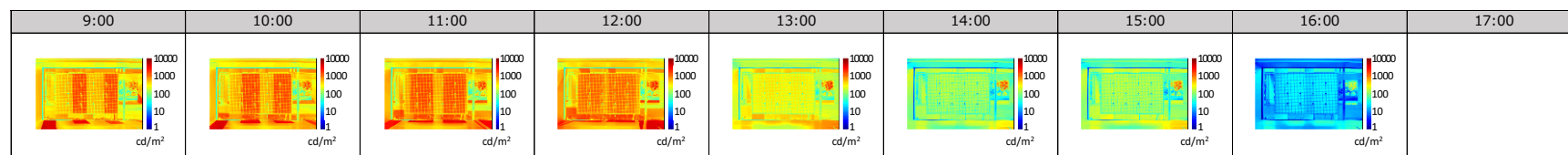
- 付 1. 日照面積率を算定するための仮想箱窓面の輝度画像
- 付 2. 断熱箱内輝度を算定するための輝度画像

付 1. 日照面積率を算定するための仮想箱窓面の輝度画像

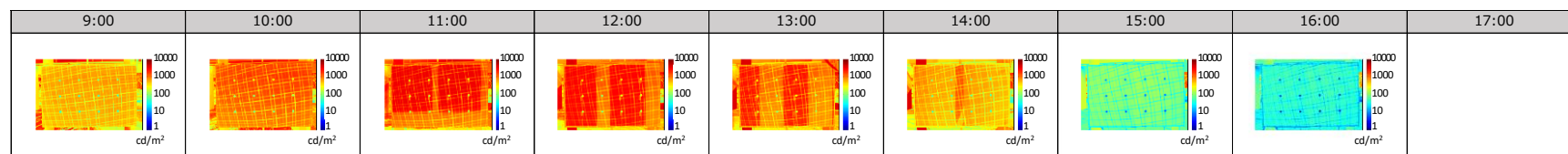
夏 (8/29) ルーバー 垂直



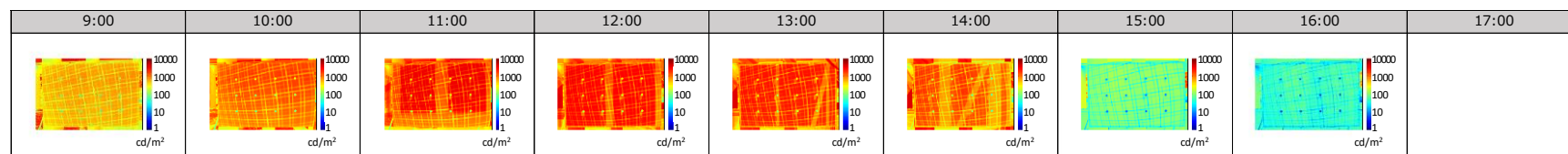
夏 (9/2) ルーバー 45°



冬 (1/9) ルーバー 垂直



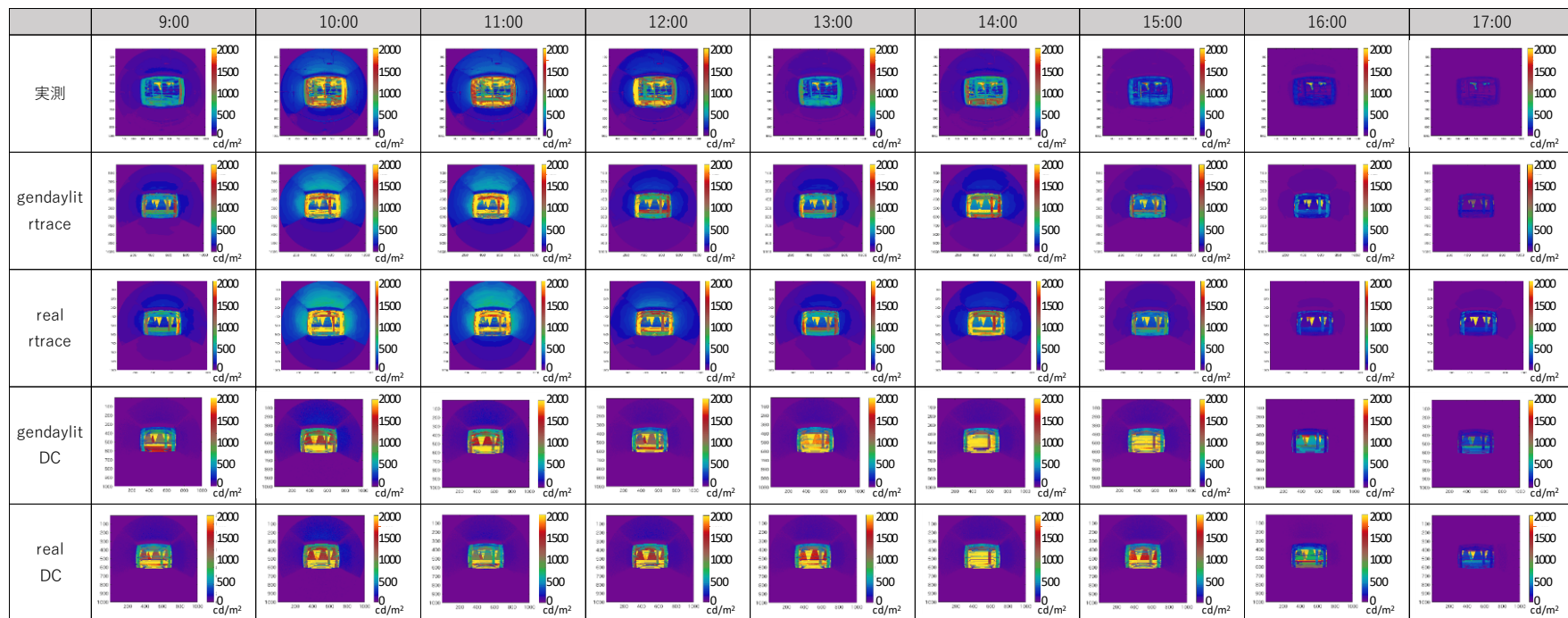
冬 (1/10) ルーバー 45°



付2. 断熱箱内輝度を算定するための輝度画像

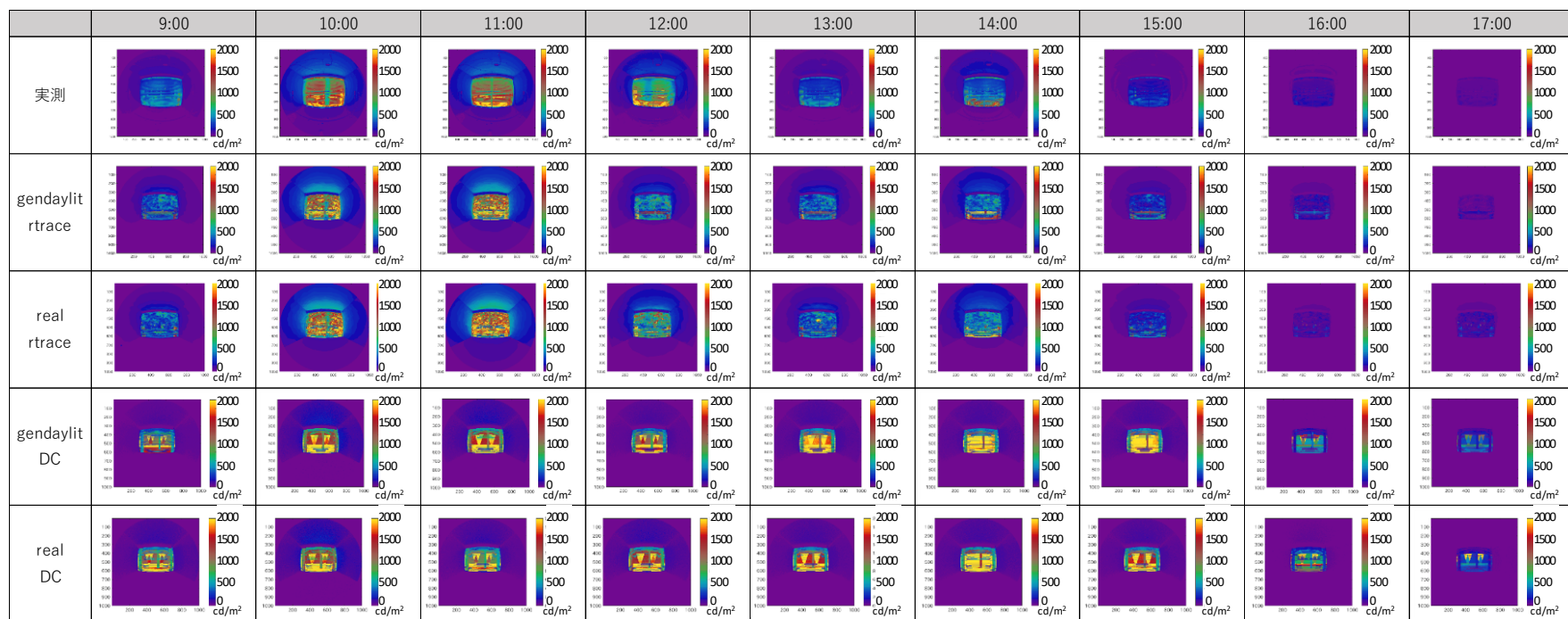
夏 (8/29)

ルーバー 垂直・ブラインド 水平



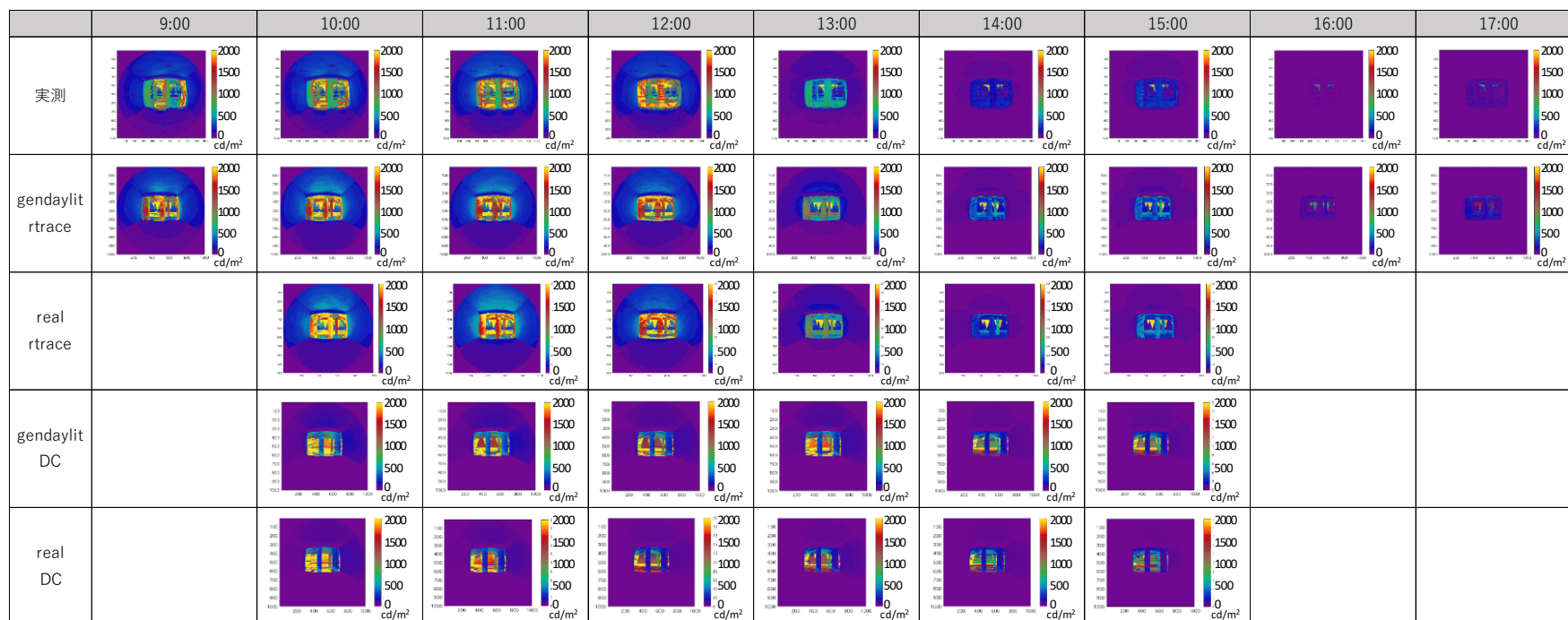
夏 (8/29)

ルーバー 垂直・ブラインド 45°



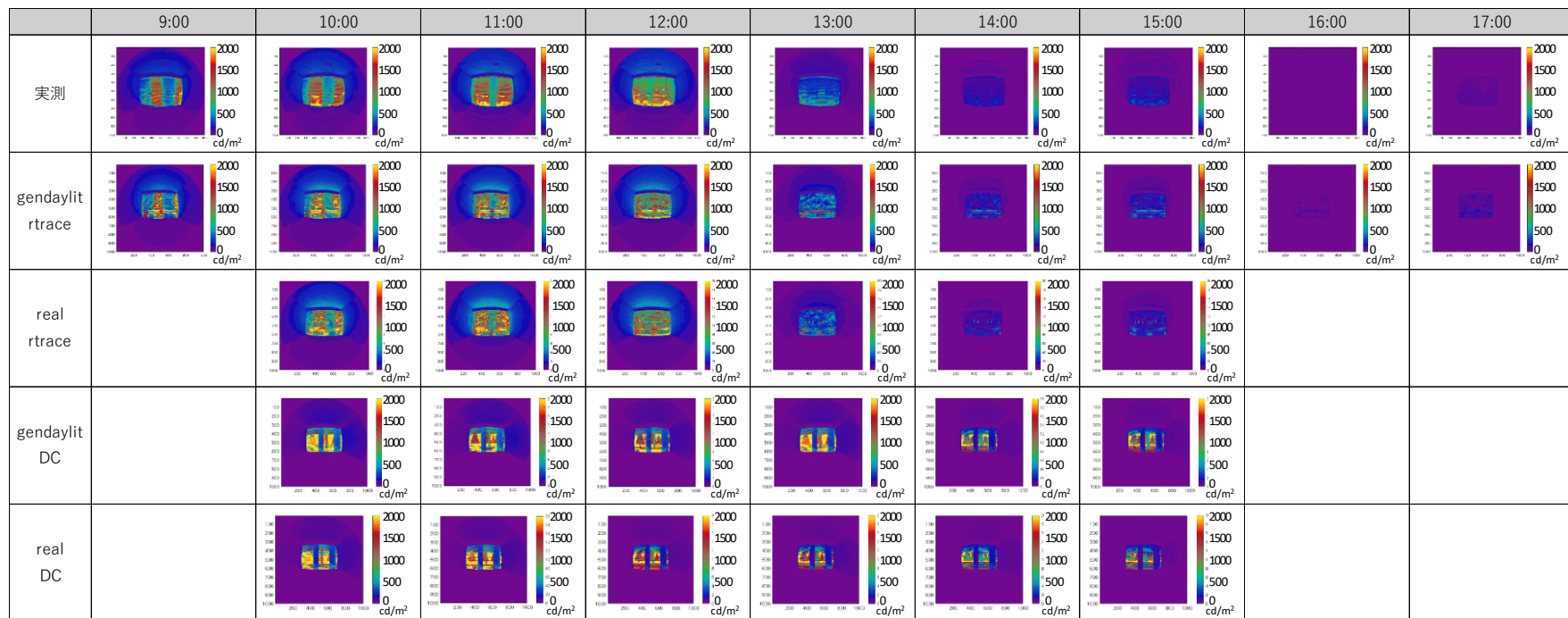
夏 (9/2)

ルーバー 45° ・ブラインド 水平



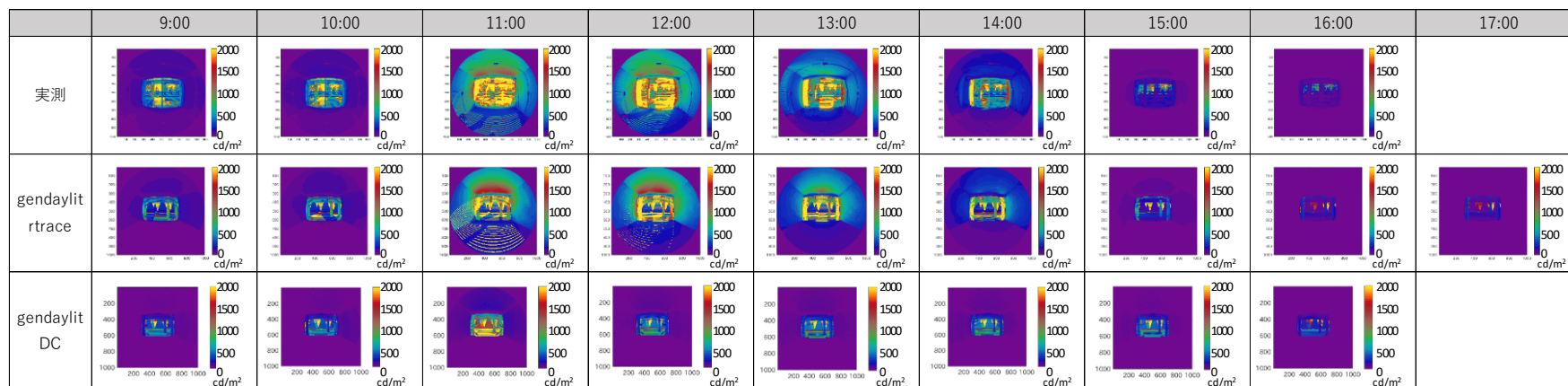
夏 (9/2)

ルーバー 45° ・ ブラインド 45°

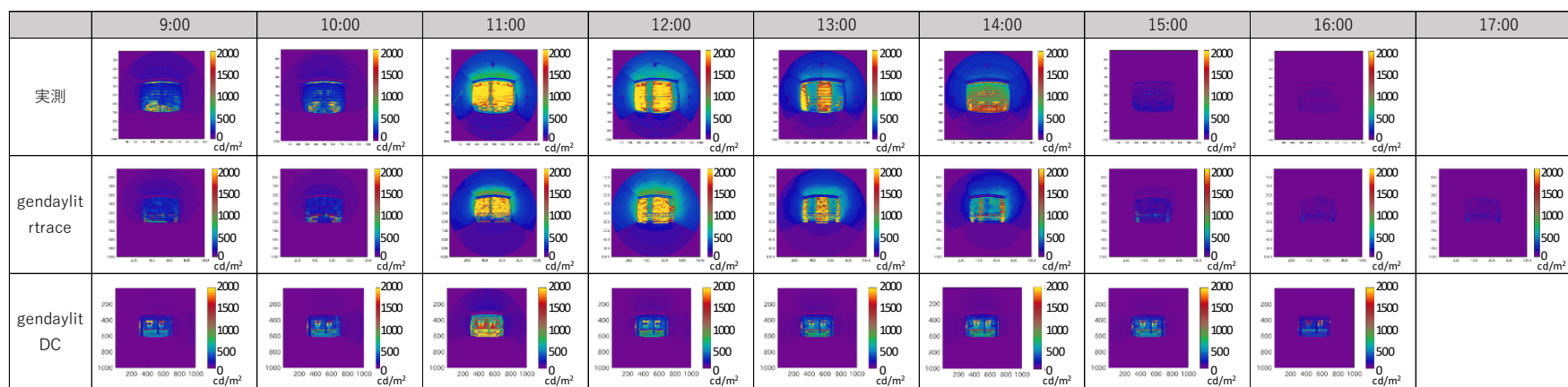


冬 (1/9)

ルーバー 垂直・ブラインド 水平

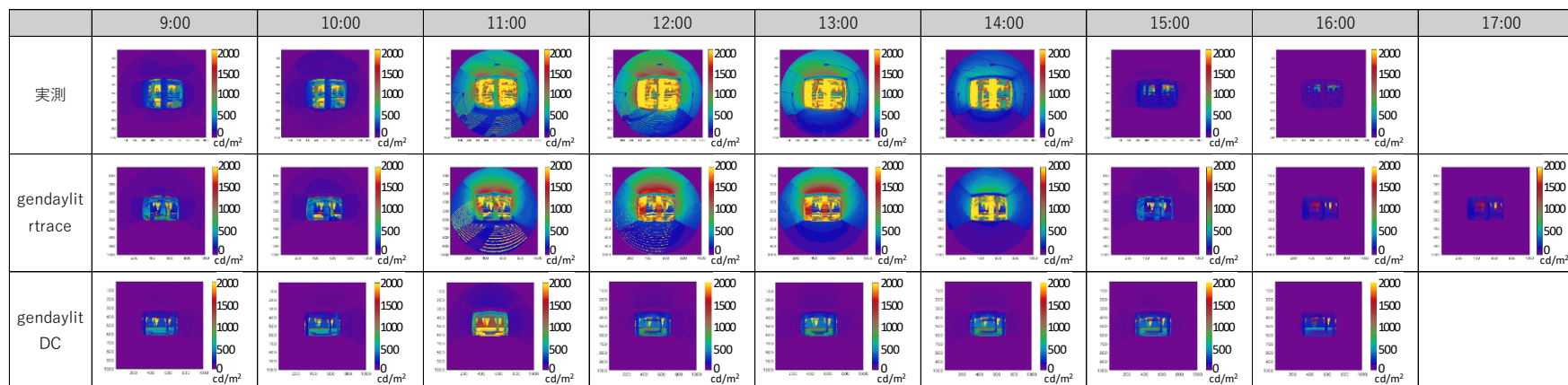


ルーバー 垂直・ブラインド 45°

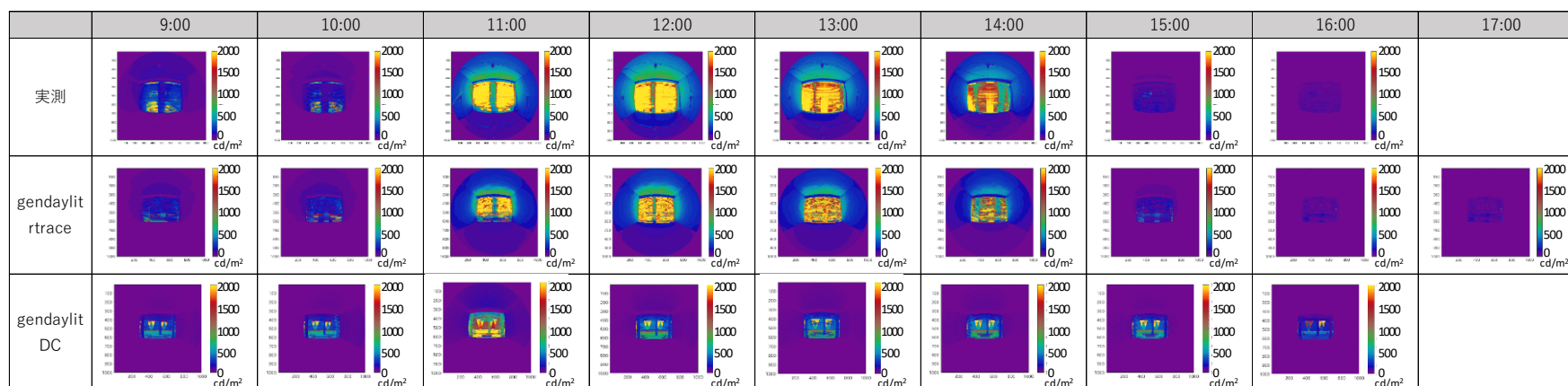


冬 (1/10)

ルーバー 45° ・ブラインド 水平



ルーバー 45° ・ブラインド 45°



研究業績一覧

審査付き論文

1. Radiance と NewHASP を用いた外部・内部日射遮蔽物の最適化 エネルギー性能・グレア・眺望性によるパレート解の導出
大木 知佳子, 岡本 俊英, 只木 寿理恵, 山本 竜也, 相賀 洋, 吉澤 望
日本建築学会環境系論文集, 第 84 巻 第 766 号, pp. 1067-1076
2019 年 12 月に掲載
2. Radiance と NewHASP を用いた外部日射遮蔽物のエネルギー性能評価
大木 知佳子, 岡本 俊英, 相賀 洋, 吉澤 望
日本建築学会環境系論文集, 第 83 巻 第 753 号, pp. 861-870
2018 年 11 月に掲載
3. 輝度画像を利用した照明とブラインドの協調制御システムの研究
小島 義包, 中村 芳樹, 加藤 洋子, 大木 知佳子, 矢部 周子, 金谷 末子
電気設備学会誌, 39 巻 第 1 号, pp.1-9
2019 年 1 月に掲載
4. 輝度画像を利用した照明制御システムの研究
小島 義包, 中村 芳樹, 加藤 洋子, 大木 知佳子, 矢部 周子, 金谷 末子
電気設備学会誌, 第 38 巻 第 1 号, pp. 62-69
2018 年 1 月に掲載
5. 輝度画像を利用したブラインド制御用遮光要否判定方法の研究
小島 義包, 中村 芳樹, 加藤 洋子, 大木 知佳子, 矢部 周子, 金谷 末子
日本建築学会環境系論文集, 第 82 巻 第 735 号, pp. 435-442
2017 年 5 月に掲載

審査付き Proceedings

1. FAÇADE DESIGN OPTIMIZATION BASED ON ENERGY USAGE, GLARE, AND VIEW USING RADIANCE AND NEWHASP
Ohki, C., Okamoto, T., Tadaki, J., Ohga, H., Yoshizawa, N.
CIE 2019 Conference Washington D.C.
2019 年 6 月
2. LIGHT ENVIRONMENT CONTROL SYSTEM USING PERCEPTION OF BRIGHTNESS
Kojima, Y., Ohki, C., Nakamura, Y., Kato, Y.
CIE (The International Commission on Illumination) 2015 MANCHESTER UK
2015 年 6 月

3. DEVELOPMENT OF AUTOMATIC LIGHTING CONTROL SYSTEM USING BRIGHTNESS IMAGE

Kojima, Y., Ohki, C., Nakamura, Y., Kanaya, S.

CIE CENTENARY CONFERENCE Towards a new century of Light Paris

2013 年 4 月

講演論文

1. オフィス実測調査を通じた年間グレア評価手法の検証
大木 知佳子, 鹿毛 比奈子, 山崎 弘明, 伊藤 大輔, 高安 結子, 松本 駿太, 野崎 海地,
細川 仁規, 吉澤 望
日本建築学会学術講演梗概集, 環境工学 I , 40267, pp. 585-586
2020 年 9 月
2. NewHASP を核としたメタシミュレーション技術に関する研究 (第 6 報) 断熱箱実験
による検証
大木 知佳子, 相賀 洋, 吉澤 望, 只木 寿理恵, 岡本 俊英
空気調和・衛生工学会大会が医術講演論文集
2020 年 9 月
3. NewHASP を核としたメタシミュレーション技術に関する研究 (第 5 報) 昼光利用シ
ステムの多目的最適化
大木 知佳子, 相賀 洋, 吉澤 望, 岡本 俊英, 只木 寿理恵
空気調和・衛生工学会大会が医術講演論文集, 第 5 巻 G-15
2019 年 9 月
4. 外部・内部日射遮蔽物の光・熱環境性能年間評価に関する研究
大木 知佳子, 岡本 俊英, 只木 寿理恵, 相賀 洋, 吉澤 望
日本建築学会学術講演梗概集, 環境工学 I , 40267, pp. 585-586
2019 年 9 月
5. 外部・内部日射遮蔽物の年間グレア評価
大木 知佳子, 吉澤 望, 岡本 俊英, 只木 寿理恵
照明学会全国大会講演論文集, ③-O-10
2019 年 9 月
6. 外部日射遮蔽物の光・熱環境性能年間評価に関する研究
大木 知佳子, 岡本 俊英, 相賀 洋, 吉澤 望, 相沢 則夫
日本建築学会学術講演梗概集, 環境工学 I , 40246, pp. 523-524
2018 年 9 月
7. 外部日射遮蔽物の光・熱環境性能評価と窓面グレア評価
大木 知佳子, 相賀 洋, 吉澤 望, 岡本 俊英

照明学会全国大会講演論文集, ③-O-04

2018 年 9 月

8. 昼光利用システムの光・熱環境性能の年間評価に関する研究

大木 知佳子, 吉澤 望, 相賀 洋, 相沢 則夫

日本建築学会学術講演梗概集, 環境工学 I, 40209, pp. 439-442

2017 年 9 月

9. 昼光利用時の光・熱環境性能年間評価と窓面グレア評価

大木 知佳子, 相賀 洋, 相沢 則夫, 吉澤 望

照明学会全国大会講演論文集, 3-27

2017 年 9 月

10. 明るさ感を向上させた省エネルギー照明システムに関する研究 その 10 タスクライト制御の開発

大木 知佳子, 小島 義包, 中村 芳樹, 加藤 洋子, 金谷 末子

日本建築学会学術講演梗概集, 環境工学 I, 40260, pp. 559-560

2016 年 8 月

11. 明るさ感を向上させた省エネルギー照明システム その 9 タスクライト制御の開発

大木 知佳子, 小島 義包, 中村 芳樹, 加藤 洋子, 金谷 末子

照明学会全国大会講演論文集, 03-12

2016 年 8 月

12. 明るさ感を向上させた省エネルギー照明システム その 6 タスクライト制御の開発

大木 知佳子, 小島 義包, 中村 芳樹, 加藤 洋子, 金谷 末子

電気設備学会全国大会講演論文集, H-4, pp. 447-448

2016 年 9 月

13. 明るさ感を向上させた省エネルギー照明システムに関する研究 その 7 側窓採光オフィスのタスク・アンビエント照明制御事例

大木 知佳子, 小島 義包, 中村 芳樹, 加藤 洋子, 金谷 末子

日本建築学会学術講演梗概集, 環境工学 I, 40190, pp. 403-404

2015 年 9 月

14. 明るさ感を向上させた省エネルギー照明システム その 7 側窓採光オフィスのタスク・アンビエント照明制御事例

大木 知佳子, 小島 義包, 中村 芳樹, 加藤 洋子, 金谷 末子

照明学会全国大会講演論文集, 0307

2015 年 8 月

15. 明るさ感を向上させた省エネルギー照明システム その 5 タスク・アンビエントオフィスにおける照明制御の概要と結果

大木 知佳子, 小島 義包, 小関 由明, 矢部 周子, 中村 芳樹, 加藤 洋子, 金谷 末子

電気設備学会全国大会講演論文集, H-10, pp. 439-440

2015 年 9 月

16. 明るさ感を向上させた省エネルギー照明システムに関する研究 その 5 導入概要および省エネルギー性・快適性の評価

大木 知佳子, 小島 義包, 中村 芳樹, 加藤 洋子, 金谷 末子, 矢部 周子

日本建築学会学術講演梗概集, 環境工学 I, 40251, pp. 543-544

2014 年 9 月

17. 明るさ感を向上させた省エネルギー照明システム その 4 導入概要および省エネルギー性の評価

大木 知佳子, 小島 義包, 中村 芳樹, 加藤 洋子, 金谷 末子

照明学会全国大会講演論文集, 5-2

2014 年 9 月

18. 明るさ感を向上させた省エネルギー照明システム その 4 実証概要および省エネルギー性・快適性の評価

大木 知佳子, 小島 義包, 中村 芳樹, 加藤 洋子, 金谷 末子

電気設備学会全国大会講演論文集, H-10, pp. 409-410

2014 年 8 月

19. 明るさ感を向上させた省エネルギー照明システムに関する研究 その 2 空間の明るさ感と照明消費電力の実測結果

大木 知佳子, 小島 義包, 中村 芳樹, 金谷 末子

日本建築学会学術講演梗概集, 環境工学 I, 40246, pp. 507-508

2013 年 8 月

20. 明るさ感を向上させた省エネルギー照明システム その 2 明るさ画像を用いた人工照明制御下での光環境の評価

大木 知佳子, 小島 義包, 矢部 周子, 中村 芳樹, 金谷 末子

照明学会全国大会講演論文集, 5-23

2013 年 9 月

21. 明るさ感を向上させた省エネルギー照明システム その 2 明るさ画像を用いた人工照明制御下での光環境の評価

大木 知佳子, 小島 義包, 矢部 周子, 中村 芳樹, 金谷 末子

電気設備学会全国大会講演論文集, F-20, pp. 319-320

2013 年 9 月

講演・研究報告

1. Annual environmental performance evaluation of light and heat in daylight harvesting systems using Radiance and NewHASP
Ohki, C., Ohga, H., Yoshizawa, N.
2017 INTERNATIONAL RADIANCE WORKSHOP
2017 年 8 月

特許

1. 特許第6154100 光環境制御方法および光環境制御システム
2. 特願2018-008870 熱負荷計算装置，熱負荷計算方法，該方法を実行するためのプログラム及び記憶媒体

受賞

1. 電気設備学会賞 技術部門 開発奨励賞「明るさ感指標を利用した光環境制御システムの開発」
2017 年 6 月

助成事業

1. 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）
戦略的省エネルギー技術革新プログラム
「明るさ感指標を利用した光環境制御技術の開発」
実用化開発 2013年1月7日～2014年3月31日
実証開発 2014年4月1日～2016年2月28日