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

OPTIMIZATION OF OUTSIDE AND INSIDE SUN SHADING DEVICES
USING RADIANCE AND NEWHASP

Pareto optimal solution by energy usage, glare and view

大木 知佳子^{*1}, 岡本 俊英^{*2}, 只木 寿理恵^{*2},
山本 竜也^{*2}, 相賀 洋^{*3}, 吉澤 望^{*4}*Chikako OHKI, Toshihide OKAMOTO, Jyurie TADAKI,
Tatsuya YAMAMOTO, Hiroshi OHGA and Nozomu YOSHIZAWA*

Daylight harvesting is attracting attention from both energy saving and the viewpoint of improving the health and wellness of people in buildings. First, we made it possible to investigate the energy performance of outside and inside sun shadings in detail, by combining the annual calculation results by Radiance and NewHASP. Then, the evaluation module of visual environment, such as glare and view, was incorporated in the system using Radiance. Finally, multi-objective optimization simulation system is constructed for finding the optimal shape of the composite window system combining outside vertical louvers and inside venetian blind.

Keywords : *Radiance, NewHASP, Thermal Load Calculation, Energy Simulation, Multi-objective Optimization*

Radiance, NewHASP, 熱負荷計算, エネルギーシミュレーション, 多目的最適化

1. はじめに

ZEB 化実現のために、徹底した省エネルギーが求められている。照明分野においても、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、昼光の有効利用が省エネルギーのために重要と考えられている。昼光利用によって人工照明にかかるエネルギー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、熱環境を含めて総合的にエネルギー性能を評価する必要がある。

また昼光利用は、省エネルギーだけでなく、建物内で働く人々の健康・快適性向上の観点からも、注目されている。2019年3月に発表された欧州規格¹⁾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た。

本研究では、光環境シミュレーションプログラム Radiance²⁾を利用して算出した外部日射遮蔽物と内部日射遮蔽物(ベネシャンブラインド(以下、ブラインド))の複合日射特性と、昼光利用時の照明制御特性を、熱負荷計算プログラム NewHASP³⁾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により、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を行なうプログラムを開発し、いろいろな形状の外部日射遮蔽物と内部日射遮蔽物を併せ持つ室のエネルギー性能を計算することを可能にした。

さらに、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、外部日射遮蔽物の垂直ルーバー・内部日射遮蔽物のブラインドを組み合わせた複合窓システムの形状設定を求める多目的最適化システムを構築した。本論文では、シミュレーションモデルと、各種説明変数(以下、パラメータ)の組合せを予め設定して行なったスタディ(以下、パラメトリックスタディ)結果および多目的最適化計算結果について報告する。

2. 既往研究と本研究の位置づけ

熱負荷計算用窓計算の既往研究として、ブラインドについては、郡ら⁴⁾の提案する日射熱取得率と熱貫流率等を用い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⁵⁾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⁶⁾は、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

^{*1} (株)大林組/
東京理科大学理工学研究科建築学専攻 博士後期課程
^{*2} 東京理科大学理工学研究科建築学専攻 修士課程
^{*3} (株)大林組 博士(工学)
^{*4} 東京理科大学理工学部建築学科 教授・博士(工学)

Obayashi Corporation /
Grad. Student, Dept. of Architecture, Tokyo University of Science
Grad. Student, Dept. of Architecture, Tokyo University of Science
Obayashi Corporation, Dr.Eng.
Prof., Dept. of Architecture, Tokyo University of Science, Dr.Eng.

LESCOM⁷⁾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。そして、筆者ら⁸⁾は、BIMによる3次元モデルを用いて、光環境シミュレーションプログラム Radianceにより外部日射遮蔽物の日射遮蔽性能および昼光利用による照明制御時の照明エネルギー使用量を求め、その日射遮蔽性能を熱負荷計算プログラム NewHASP⁹⁾に取り込んで求めた年間時刻別熱負荷から空調エネルギー使用量を求める一連の複合シミュレーションシステムを開発し、各種外部日射遮蔽物のエネルギー性能を評価できるようにした。Leeら⁹⁾は、Radianceを利用してEnergyPlusと連携し、直射日光による窓面入射日射量を求めた。

しかしながら、外部日射遮蔽物と内部日射遮蔽物を併せ持つ空間における昼光利用の効果について、照明エネルギー使用量、熱負荷、空調エネルギー使用量を総合的に評価した報告はまだない。

外部・内部日射遮蔽物に関する最適化計算の既往研究として、Manzan¹⁰⁾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。Atzeri¹¹⁾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¹²⁾は、DIVA (Rhino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、アルゴリズムエディタ Grasshopperと多目的最適化プラグインソフト OCTOPUSを使用して行った。和田ら¹³⁾は、夏季の直射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長さを変数とし、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¹⁴⁾、佐藤ら¹⁵⁾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¹⁶⁾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、外部日射遮蔽物と内部日射遮蔽物を併せ持つ空間におけるエネルギー性能・グレア・眺望性の多目的最適化についての報告はまだない。

なお、本研究の一部である外部・内部日射遮蔽物のエネルギー性能評価に関する内容については2019年度日本建築学会大会 (北陸) 学術講演¹⁷⁾にて、また多目的最適化についてはCIE (International Commission on Illumination) 2019 29TH Quadrennial Session at Washington¹⁸⁾で報告を行なっている。本論文は、熱環境と光環境の総合的な評価のため、新たな解析結果を加えて作成したものである。

3. シミュレーション全体フロー

本研究で構築したエネルギー・グレア・眺望性を目的関数とした遮

蔽物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Fig.1に示す。Radianceによる直達成分・拡散成分・調光率・ブラインド透過率特性それぞれの計算モジュールを利用して、NewHASPで熱負荷を求め、ビル用マルチシミュレーションにより、空調エネルギー使用量を求める。調光率計算モジュールは、照明エネルギー使用量にも利用する。グレア計算モジュール、眺望性計算モジュールにも、Radianceを利用する。

Fig.1 Configuration and flow of simulation model

3. 1 Radianceによるシミュレーション

各計算モジュールを以下に説明する。なお直達成分・拡散成分・調光率・ブラインド透過率特性計算モジュールは、既に既報⁸⁾で示した手法であるが、以下ではその概略を記載する。

3. 1. 1 直達成分計算モジュール

空調エネルギー使用量を求めるためのガラス窓標準日射熱取得計算では、日射熱取得を3つに分割して考えた⁸⁾。直達成分の計算には、Radianceで求めた窓の照度による窓面日照面積率を利用した。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、地面と外部日射遮蔽物からの反射光の拡散成分には、Radianceで求めた拡散成分を用いた。これによって、従来のNewHASPでは考慮できなかった、外部日射遮蔽物からの反射光の拡散成分が、正しく計算できるようになっている。

窓面日照面積率の計算は、光源に直射日光のみを設定し、地物と外部日射遮蔽物の反射率を0%にした窓面の照度を算出して^{注1)}、照度が0より大きい面積の比率を求めた。

3. 1. 2 拡散成分計算モジュール

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、地物と外部日射遮蔽物の反射率を0%とした時の窓面平均照度を求め^{注1)}、EnergyPlus用気象データ (以下、EPW)¹⁹⁾の毎時の発光効率で除して拡散成分とした。

地物反射光と外部日射遮蔽物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、地物と外部日射遮蔽物の反射率を入

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^{注1)}、差分をとって地物と外部日射遮蔽物からの反射による照度とした。その照度を EPW の毎時の発光効率で除して、地物反射光と外部日射遮蔽物反射光による拡散成分とした。

3. 1. 3 調光率計算モジュール

昼光の影響を考慮して、照度センサで感知している年間時刻別照明調光率を求めた^{20) 注1)}。この調光率は、NewHASP における照明熱取得計算および照明エネルギー使用量を求めるために利用した。

3. 1. 4 グレア計算モジュール

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)²¹⁾や昼光グレア確率 DGP (Daylight Glare Probability)²²⁾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ている²¹⁾。DGP は、昼光による眩しさを不快と感じる人の割合を表し、simplified DGP は、視点位置の鉛直面照度によって簡単に評価することができるため、ファサードや遮蔽物の年間評価に適している²²⁾。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。

3. 1. 5 眺望性計算モジュール

Radiance の rtrace コマンドを使用して、Fig.2 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、遮蔽物といった要素のいずれかであるか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たため、以下の式(1)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。

$$V = \frac{N}{\pi R^2} \quad (1)$$

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[-]

Fig.2 Radiance ray tracing

本研究では、窓面中央から室内側に 2m、高さ 1.2m の座標を視点位置とし、視点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。外部日射遮蔽物として垂直ルーバー、内部日射遮蔽物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注 2 に示す。

3. 1. 6 ブラインド透過率特性計算モジュール

Fig.3 に示すブラインドにプロファイル角 $0^\circ \sim 85^\circ$ まで 5° 間隔に直達日射を入射させ、スラット角を $-75^\circ, -45^\circ, 0^\circ, 45^\circ, 75^\circ$ に変化した場合、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²³⁾。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 $\cos \varphi$ 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 $\tau(\varphi, \theta)$ と反射率の関数 $\rho(\varphi, \theta)$ を求めた。なお、本関数は近似法によるものであり、誤差は計算した 180 ケース中 165 ケースで 10% 以内であった。これらの関数で作成した透過率特性を Fig.4 に示す。

Fig.3 Radiance simulation blind function: $\tau(\varphi, \theta)$, $\rho(\varphi, \theta)$

Fig.4 Blind transmittance function: $\tau(\varphi, \theta)$, $\rho(\varphi, \theta)$

3. 2 NewHASP によるシミュレーション

本研究では、2004 年に空気調和・衛生工学会により開発された動的熱負荷計算プログラム NewHASP に着目し、従来の NewHASP に Radiance 計算結果を取り込み、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」^{23) 24) 25) 26)}を利用して、年間熱負荷を求め、エネルギー性能を評価した。本技術は、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 (Transcription files) 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。

Fig.5 Meta_simulation platform

3. 3 ビル用マルチエネルギーシミュレーション

NewHASP による時刻別熱負荷を利用して、空調エネルギー使用量を求めるために、外気温度と室内温度の入出力比関数²⁷⁾式を作成した^{注3)}。式(2)によって、時刻ごとの外気温度と室内吸込空気温度の入出力比および部分負荷特性でビル用マルチの定格 COP (Coefficient Of Performance) を補正し、熱負荷を除した。

$$COP_s = COP \times \frac{O_o}{I_o} \times \frac{O_i}{I_i} \quad (2)$$

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

3. 4 多目的最適化

本研究では、グラフィカルアルゴリズムエディタ Grasshopper²⁸⁾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 OCTOPUS²⁹⁾を用い、外部・内部日射遮蔽物に関する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外部・内部日射遮蔽物の最適化を検討することであるが、本報においては、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、ビル用マルチシミュレーションによる空調エネルギー使用量に、調光率計算モジュール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、グレア計算モジュールによる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、眺望性計算モジュールによる部屋の代表点における空の見える割合で評価した。

4. シミュレーション事例

4. 1 シミュレーション対象建物

本研究で開発したシミュレーションシステムを利用して、Fig.6に示す建物を対象として、外部・内部日射遮蔽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、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²⁰⁾。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 の位置を代表点として評価した。計算条件を Table1 に示す。

Fig.6 Room plan and section

4. 2 シミュレーション対象外部・内部日射遮蔽物

シミュレーションの対象とした外部・内部日射遮蔽物の形状を Fig.7, 8 に示す。

外部日射遮蔽物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。内部日射遮蔽物はブラインドとし、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。

Fig.7 Detail of vertical louver

Fig.8 Detail of Venetian blind

4. 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、Table2 に示す外部・内部日射遮蔽物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。結果を Fig.9 ～Fig.12 に示す。

Table1 Calculation condition

Building model	Room usage	Office	
	Orientation	Facing south	
	Floor space	81 m ²	
	Ceiling Height	2.6 m	
	Floor above ground level	25.2 m	
Air Conditioning Zoning	1 zones(No distinction between perimeter and interior)		
Weather data	Tokyo Hyakuri	EPW data (Weather Data for EnergyPlus)	
Season	Summer season from June to September, winter months from October to May (set as winter for the interim period)		
Weekly schedule	Weekday air conditioning, Saturdays-and-Sundays public holidays non-air conditioning, special day non-air conditioning		
Special day	Employment of energy conservation law standard room calendar pattern		
Condition	Air conditioning time	14 hours	7am · 9pm
	Room usage time	13 hours	8am · 9pm
	Amount of outside air introduced	5 m³/m²h	
	Pre-cooling preheating time	1 hour	7am – 8am
	Outside air cut		
Condition of indoor temperature and humidity	Summer : 26 ° C, 60% or less Winter / intermediate period : 22 to 26 ° C, 40% or more		
Internal heat and others	Personnel density	0.1 persons/m²	Weekday : 8am – 9pm Saturdays, Sundays, and holidays : off
	Lighting density	9.8 W/m²	Weekday : 8am – 9pm Saturdays, Sundays, and holidays : off
	Equipment density (sensible heat only)	12 W/m²	Weekday : 8am – 9pm Weekday night, Saturday and Sunday all day 25% fever
	Heat release rate	Summer : 75% Winter / intermediate period 75%	
	Indoor heat capacity	Sensible heat : 40 kJ/(m²·K) Latent heat : 40 kJ/(m²·(g/kg(DA)))	
	Draft of wind	Ventilation frequency : 0.2 Times / h	
Next room air-conditioning condition	Both floors	Air conditioning	
Glass	Side continuous windows	28 m²	
	Aperture ratio	65 %	
	Orientation	South	
	Ordinary transparent single plate	8 mm	
	Transmittance	87 %	
Outer wall	South	15.1 m²	
	Reflectance	50 %	
Inner wall		25.8 m²	Fully insulated wall
	Reflectance	50 %	
Floor		81m²	
	Reflectance	20 %	
Ceiling	Reflectance	70 %	
Ground	Reflectance	20 %	
Outside and inside sun shading	Reflectance	70 %	
VRF system COP	Cooling : 3.36 Heating : 3.77		
Glare	simplified DGP threshold : 0.35 Viewpoint height : FL + 1,200mm		
View	Viewpoint height : FL + 1,200mm		

Table2 Simulation cases

Case	Venetian blind angle [°]	Vertical louver angle [°]	Vertical louver width [mm]	Vertical louver interval [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

Fig.9 Annual electric power usage

Fig.10 Glare

Fig.11 View

Fig.12 Energy, glare and view results

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ため

である^{注4)}。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、外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、間隔は広くなるほどやや大きい。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。

また、日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 Case b と、最も閉鎖的な Case o で比較した結果を Fig.13, 14 に示す。

Fig.13 Thermal load and energy with and without daylight harvesting

Fig.14 Thermal load and energy of Tokyo (Hyakuri) and Kagoshima

日光利用による照明制御がある場合、年間合計熱負荷は、Case b はやや大きく、Case 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、Case b は日光利用の効果が大きく、日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、Case b, Case 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、Case b, Case 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 Case b の方が閉鎖的な Case 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ためと考えられる^{注5)}。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、熱負荷として外部・内部日射遮蔽物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。

4. 4 多目的最適化計算の結果

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 HypE³⁰⁾ を選択した。HypE は、進化計算による多目的最適化のアルゴリズムであり、パレートフロントを近似する解への貢献度を算出して、細やかに解を優劣づけするアプローチである。獲得した解集合が目的関数空間に作る超体積を評価尺度とし、値が大きい解集合ほどパレートフロントの近似性能が良好と判断する³¹⁾。結果を Fig.15 に示す。

Fig.15 Pareto optimal solution

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大きいほどグレア、眺望性が小さく、眺望性が高いほどグレアが大きくなっており、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。

今回の結果を見ると、エネルギーと眺望性を優先するならば、ブラインド:角度 0°、垂直ルーバー:角度 0°・幅 220mm・間隔 2,000mm が最適解であり、グレアを優先するならば、ブラインド:角度 70°、垂直ルーバー:角度 90°・幅 500mm・間隔 1,000mm が最適解となっている。選好最適解としては、3 つの目的関数のバランスをとり、

ブラインド：角度 70°，垂直ルーバー：角度 0°・幅 220mm・間隔 2,000mm が採用できよう。

5. まとめ

本研究では、光環境シミュレーションプログラム **Radiance** と熱負荷シミュレーションプログラム **NewHASP** を組合せたメタシミュレーションプラットフォームを利用して、外部日射遮蔽物と内部日射遮蔽物を合わせた照明・空調エネルギーを評価した。また、エネルギー性能評価の他に、**Radiance** を利用して求めたグレアと眺望性の評価を加え、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に、パラメトリックスタディを行った。次に、多目的遺伝的アルゴリズムを扱うブラグインソフト **OCTOPUS** を用いた多目的最適化計算により、外部・内部日射遮蔽物に関する 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）を変化させた場合の、3 つの目的関数（エネルギー、グレア、眺望性）を評価し、東京（百里）においては、空調・照明エネルギー使用量が大きいほどグレア、眺望性が小さく、眺望性が高いほどグレアが小さいという曲線状のパレート最適解が得られることを明らかにした。そして、パラメトリックスタディにおいて得られたエネルギー・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が明らかになった。

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¹⁾。今回は簡易な評価として、代表点から見た空の割合を利用したが、欧州規格に応じた評価をシミュレーションモデルに組み込むことも可能である^{注6)}。

本研究では、代表的な外部日射遮蔽物である垂直ルーバーと、代表的な内部日射遮蔽物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、可動式の外部日射遮蔽物、そして曲面を含むより複雑な外部日射遮蔽物の最適化計算にも適用していきたい。

注

注 1) Radiance 計算パラメータを以下に示す。

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

Table A2 Radiance parameter setting

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

注 2) Fig.7, 8 に示す垂直ルーバー角度とブラインド角度別に求めた眺望性の結果を Fig.A1 に示す。垂直ルーバー幅 360mm，間隔 1,500mm とした。

注 3) ビル用マルチ定格 COP 補正のための、外気温度と室内温度の入出力比関数式を Fig.A2～A5 に示す。(R²は全て 0.99 以上)

注 4) EPW の東京（百里）と NewHASP の東京における外気温の比較を Fig.A6 に示す。百里は東京より外気温が約 5℃低いため、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。

Fig.A6 Temperature of Hyakuri and Tokyo

注 5) Fig.9, 11 空調エネルギー (冷房) (暖房) と眺望性の関係を Fig.A7 に示す。常にブラインドを下ろしているため、全体的に遮蔽される割合が高い。

Fig.A7 Cooling energy, heating energy and view

注 6) 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、本研究での眺望性の評価点 (窓面から室内側に 2m) および室内側に 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円グラフに示す。窓面から 6m までの視点からは、天空と地面が見えている。

Fig.A8 Ratio of view

参考文献

- Daylight in buildings; English version EN 17037:2018, English translation of DIN EN 17037:2019-03, 2019.3
- Radiance : <https://www.radiance-online.org/about/main.html>, accessed 2019.5.8
- Nagai, T., Ohga, H., : Features and User's Guide of New HASP/ACLD-B, Proceedings of SHASE Symposium 'The Present and the Future of Software for Thermal Load and HVAC, SHASE, 2004
長井達夫, 相賀洋 : NewHASP/ACLD-B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
- Kohri, K. and Ishino, H. : A PRACTICAL CALCULATION METHOD OF SOLAR SHADING PERFORMANCE CHANGES A study on performance values of windows for thermal load calculation Part 2, Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ), Vol.77, No.672, pp.89-93, 2012.2(in Japanese)
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
- Yoshizawa, N., Takeda, H., Kondo, J., : THERMAL LOAD CALCULATION METHOD CONSIDERING INDIRECT ANGLE CHARACTERISTICS OF SUN SHADES Radiance application for optical properties calculations of inner blinds, Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ), Vol.74, No.640, pp.675-683, 2009.1(in Japanese)
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
- Takeda, H., Suzuki, H., Hayakawa, S., : THERMAL CHARACTERISTICS OF AN OPENING WITH SOLAR RADIATION SHADING Evaluation of optical characteristics on a venetian blind and

- thermal characteristics regarding an air space, Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ), Vol.79, No.706, pp.1037-1047, 2014.1(in Japanese)
- 武田仁, 鈴木宏和, 早川真 : 開口部の日射遮蔽物による熱特性 ベネシア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
- Takeda, H., Inanuma, M., Yoshizawa, N., Isozaki, K., : Standard weather data and thermal load calculation program LESCO : Inouesyo, 2005
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LESCOM, 井上書院, 2005
 - Ohki, C., Okamoto, T., Ohga, H., Yoshizawa, N., : ENERGY PERFORMANCE EVALUATION OF OUTSIDE SUN SHADINGS USING RADIANCE AND NEWHASP, Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ), Vol.83, No.753, pp.861-870, 2018.11(in Japanese)
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
 - Lee, E.S., Geisler-Moroder, D. and Ward G., : Modeling the direct sun component in buildings using matrix algebraic approaches: Methods and validation, Solar Energy, Vol.160, pp.380-395, 2018
 - 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
 - Atzeri, A., Cappelletti, F. and Gasparella, A., : Internal Versus External Shading Devices Performance in Office Buildings, ScienceDirect, Energy Procedia 45, pp463-472, 2014
 - Konta, M., Shao, Q., Yamada, H. and Kobayashi, H., : Evolutionary Optimization of the Top-Lighting Systems using algorithm editor based on the Annual Simulation, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Environmental Engineering-I, pp. 529-530, 2018.7
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プ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
 - Wada, M. and Nakaohkubo, K., : Shape optimization of slats of Louver using Multi objective Genetic Algorithm, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Environmental Engineering-I, pp. 531-532, 2018.7
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
 - Ohki, T. et al. : Shape Optimization of Vertical Louvers for the West Facade Part1. Optimum Solution Focused on Sunlight Shading using Parametric Study Method, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Environmental Engineering-I, pp. 1101-1102, 2018.7
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
 - Sato, T. et al. : Shape Optimization of Vertical Louvers for the West Facade Part2. Multi-Objective Optimization using Genetic Algorithm, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Environmental Engineering-I, pp. 1103-1104, 2018.7
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
 - Harada, N. and Tanabe, S., : Proposal of New Daylighting Façade for School Classroom Using Parametric Design, Technical Papers of Annual Meeting, Vol.10, E-66, 2015
原田尚佑, 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星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
 - Ohki, C., Okamoto, T., Ohga, H., Yoshizawa, N., Aizawa, N., : Study on annual evaluation of light and thermal environment performance of

- exterior and interior sun shadings Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Environmental Engineering-I, pp. 585-586, 2019.7
- 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
- 18) Ohki, C., Okamoto, T., Tadaki, J., Ohga, H., Yoshizawa, N., : FAÇADE DESIGN OPTIMIZATION BASED ON ENERGY USAGE, GLARE, AND VIEW USING RADIANCE AND NEWHASP, CIE (International Commission on Illumination) 2019 29TH Quadrennial Session at Washington, 2019
- 19) EnergyPlus Weather data : <https://energyplus.net/weather>, accessed 2019.3.30
- 20) Yoshizawa, N., Miki, Y., Yamaguchi, H., Tamura, H., : SYSTEMATIC EVALUATION ON DAYLIGHT HARVESTING ENERGY-SAVING EFFECTS IN OFFICES, Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ), Vol.83, No.747, pp.425-434, 2018.5(in Japanese)
- 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
- 21) Architectural Institute of Japan: Architectural Institute of Japan Environmental Standards AIJES-L0003-2018 Standards for Daylighting, 2018 (in Japanese)
- 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
- 22) Wienold, J., : DYNAMIC DAYLIGHT GLARE EVALUATION, Proceedings of BS2009, 11th International IBPSA Conference, 2009Glasgow, Scotland, pp.944-951, 2009.7
- 23) Ohga, H., Yoshizawa, N., Ohki, C., Aizawa, N., : NewHASP-Based Meta-Simulation Part3 Basic Meta-Simulation of Lighting, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Environmental Engineering-II, pp. 1351-1354, 2017.7
- 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, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学-II, pp. 1351-1354, 2017.7
- 24) Ohga, H. : NewHASP-Based Meta-Simulation Part1 Basic Design of NewHASP-Based Meta-Simulation, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Environmental Engineering-II, pp. 31-32, 2016.7
- 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, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学-II, pp. 31-32, 2016.7
- 25) Ohki, C., Yoshizawa, N., Ohga, H., Aizawa, N., :Annual environmental performance evaluation of light and heat in daylight harvesting systems, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Environmental Engineering-I, pp. 439-442, 2017.7
- 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, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学-I, pp. 439-442, 2017.7
- 26) Ohga, H., Yoshizawa, N., Aizawa, N., : NewHASP-Based Meta-Simulation Part4 Coupled Meta-Simulation Model of Daylight Harvesting System & Multi-Split Air-Conditioning System, Technical Papers of Annual Meeting, Vol.5, H-20, 2017
- 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
- 27) Building Equipment Design Standards 2015 Edition, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism Minister's Secretariat Government Office Administration Department, Facilities and Environment Division, Public Architectural Institute of Japan, pp. 428, 2015.8.30
- 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
- 28) Grasshopper algorithmic modeling for Rhino : <https://www.grasshopper3d.com/>, accessed 2019.3.30
- 29) OCTOPUS : <https://www.food4rhino.com/app/octopus>, accessed 2019.3.30
- 30) ETH Zurich : <https://sop.tik.ee.ethz.ch/pisa/>, accessed 2019.4.16
- 31) Sato, H., Ishibuchi, H., : Current status and subjects of evolutionary many-objective optimization, Communications of the Operations Research Society of Japan, Vol.62, No 3, pp.156-163, 2018.3
- 佐藤寛之, 石渕久生, : 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

OPTIMIZATION OF OUTSIDE AND INSIDE SUN SHADING DEVICES USING RADIANCE AND NEWHASP

Pareto optimal solution by energy usage, glare and view

Chikako OHKI^{*1}, *Toshihide OKAMOTO*^{*2}, *Jyurie TADAKI*^{*2},
Tatsuya YAMAMOTO^{*2}, *Hiroshi OHGA*^{*3} and *Nozomu YOSHIZAWA*^{*4}

^{*1} Obayashi Corporation /

Grad. Student, Dept. of Architecture, Tokyo University of Science

^{*2} Grad. Student, Dept. of Architecture, Tokyo University of Science

^{*3} Obayashi Corporation, Dr.Eng.

^{*4} Prof., Dept. of Architecture, Tokyo University of Science, Dr.Eng.

Daylight harvesting is now attracting attention not only from energy saving but also from the viewpoint of improving the health and comfort of people working in the building. Daylighting standards, such as EN 17037:2018, provides the target values to obtain sufficient daylight, and also prescribe the evaluation criteria for view and glare.

We used a Meta_Simulation platform that combined Radiance and NewHASP to evaluate lighting and air conditioning energy of exterior and interior sun shading devices. We confirmed the behaviour of basic parameters by combining glare and view evaluations from Radiance and using the graphical algorithm editor Grasshopper to calculate air conditioning/lighting energy, glare index and view. By utilizing the plug-in software OCTOPUS, we evaluated air conditioning/lighting energy usage, glare, and view based on four variables of exterior and interior sun shading devices and the optimal solution for Tokyo (Hyakuri) was confirmed.

For glare, the vertical illuminance of the viewpoint was not high in the building targeted by our simulation, and because no cases exceeded the allowable simplified DGP value of 0.35, the threshold was lowered to evaluate glare in the multi-objective optimization calculation.

Under the European Standard, view is evaluated based upon the horizontal angle of the window, the distance to adjacent buildings, and the number of layers for sky, landscape, and ground that can be seen (European committee for standardization, 2019). We used a simple evaluation based upon the ratio of sky that could be seen from a sample point, however it is possible to incorporate the view metrics of the EN 17037:2018 into our new module using Radiance.

We conducted a multi-objective optimization calculation for the annual fixed angle of vertical louvers and of blinds typically used in the sun shading devices. In the future, we plan to apply optimization calculations to complex sun shading devices such as slat cut-off angle controls for blinds, moveable or curved surfaces for exterior sun shading.

(2019年5月8日原稿受理, 2019年8月19日採用決定)