

都市・建築環境に配慮した再帰反射型外部ルーバーの 最適設計手法に関する研究

上 田 博 嗣

Optimization of Design Method for Retroreflective External Louvers, Considering Urban and Building Environment

Hirotsugu Ueda

Abstract

In this paper, external louvers were studied as the example to confirm the effectiveness of the optimal design method by the parametric design that automates and optimizes design.

In this study, the effectiveness of the parametric design approach to automate and optimize design was studied. External louvers were chosen as the experimental test structure due to the complex relationship between their shape and environmental performance. The following optimal design techniques were established: (1) A design technique for parametric models considering fabrication feasibility, (2) The use of high accuracy simulation technology to evaluate the target for optimization, and (3) The use of technology that efficiently automates and optimizes parametric modelling and simulation. Testing confirmed the effectiveness of the optimal design method, and indicated improvement in the optical performance of the louver post-optimization.

概 要

本論文では、設計の自動化・最適化が可能なパラメトリックデザインによる最適設計手法の有効性を確認するため、形状と環境性能が複雑に関連する外部ルーバーを例題として検討を行った。検討において、次に示す最適設計のための技術を確立した。(1)製作実現性を考慮したパラメトリックモデル(パラメータによる形状表現)の設計技術。(2)最適化のための目標(目的関数)を高精度に評価するシミュレーション技術。(3)パラメトリックモデルとシミュレーションを効率良く自動化・最適化する技術。これらの技術を用いて、最適化後におけるルーバーの光学性能の向上を確認し、最適設計手法の有効性を示した。

1. はじめに

従来のマンパワーに依存した設計手法は、極めて限定的なケーススタディや経験則から意思決定が行われてきた。しかし、近年ではBIMに代表されるCAD技術の高度化、計算機能力の向上、シミュレーション技術の進歩が相まって、物理パラメータに加え、形状パラメータも自動操作が可能になってきた。このようなパラメータ(設計変数)を自動的に変化させて、様々なデザインスタディを行い、最適な形状を決定していく、パラメトリックデザインによる最適設計手法の実用化が期待されている。

本研究では、形状と環境性能が複雑に関連する問題として、建築デザインで採用事例の多い外部ルーバーを例題に、その最適設計手法を検討した。

2. 最適設計のための目標

ルーバーの形状や配置決定においては、計画地や外装が面する方位等、立地条件により最適形状が異なるため、設計の標準化が困難であった。その改善策として、複雑な仕様のルーバーの光学性能解析が可能である、順方向モンテカルロ光線追跡法による計算法に、多目的最適化アルゴリズムを連成した最適設計手法を検討する。

Fig. 1に検討フローを示す。まず、試作により製作実現性と製作上の制約条件を確認する。次に計算に必要な各種素材の反射率の測定、及びそれを用いた計算法の構築とその精度検証を行う。最後に、最適設計のためのパラメトリックモデルを考案し、形状及び物理パラメータを多目的最適化アルゴリズムを用いて操作し、最適デザインを探索する。

本検討において、最適設計のための目標として、次の評価項目を設定した。

- 1) 日射遮蔽性能
- 2) 再帰反射性能
- 3) 視環境考慮(眺望性と眩しさへの配慮)

日射遮蔽性能は、ルーバーにおいて日射熱の影響を遮蔽する性能で、省エネルギーと快適性(室内温熱環境)の向上に寄与する。

再帰反射性能は、天空方向への反射率を高めた性能である。Fig. 2に再帰反射による都市の温熱環境改善効果を示す。再帰反射性能を付加したファサードは、都市全体の日射受熱量を軽減し、都市の温熱環境改善に寄与する。

視環境においては、ルーバーは外部からの景観や室内からの眺望に関係し、常に人の目に触れる部位である。そのため、人の目に触れる部位は、日射反射による眩しさを防止するため、拡散面のみが見えるようにする等、

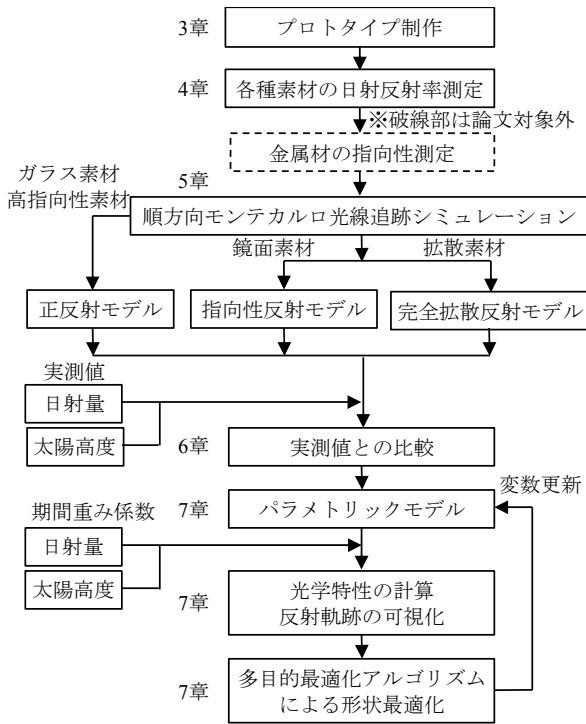


Fig. 1 検討フロー
Study Flow

視環境への配慮も必要となる。

以上の目標設定を考慮し、Fig. 3に示す人からの視点(室内側からの視点と歩道からの見上げ視点)と日射遮蔽性能と再帰反射性能に関連する太陽からの視点に着目し、それぞれに適した表面素材(鏡面/拡散面)を使い分けたルーバーを例題に検討する。

3. 製作実現性と製作上の制約条件の確認

2章で述べた最適設計のための目標を満足するルーバーの製作実現性と製作時における必要寸法等の遵守項目(制約条件)を確認するため、ルーバーを試作した(Fig. 4)。

結果、製作面においては、2つの課題があった。その内容と対応を次に示す。また試作ルーバーとしては、Fig. 4に示すように、ルーバー上面に対し、一般的に再帰性を得るのに用いられる、2次元の再帰反射構造(階段状の形状とし、多重反射により再帰性を得る構造)を付加した形状とした。

課題1 屋外仕様の単一ルーバーにおいて、鏡面素材と拡散素材は各々仕上げ工程が異なる。そのため、同一部材に各素材を併用することが、通常の製作方法では困難であった。

対応1 2つの形態を一体型として組合せる嵌合(かんごう)式ルーバーとすることで、鏡面素材と拡散素材の異なる仕上げを両立させることが可能であることがわかった(Fig. 4)。

課題2 拡散素材として焼付塗装を用いると、屋外仕様の場合、耐候性保持の観点から三分艶以上の被膜が必須となる。そのため、空気と屈折率の

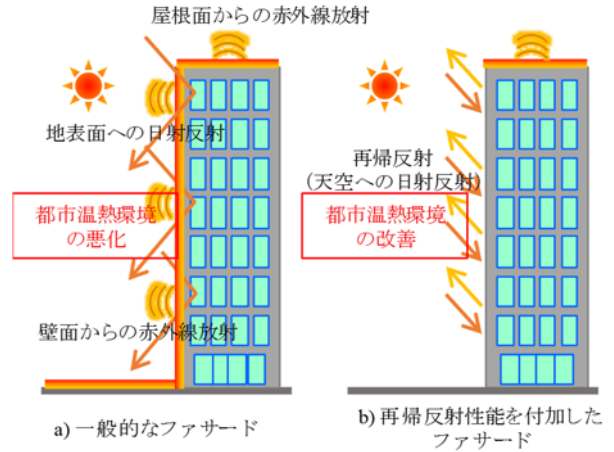


Fig. 2 再帰反射による都市の温熱環境改善
Improvement of Urban Thermal Environment
by Retroreflection

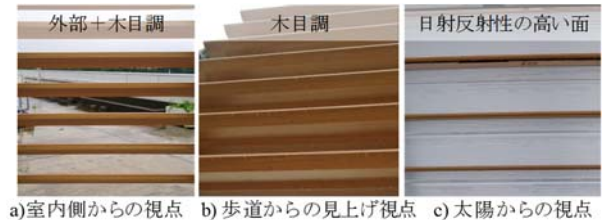


Fig. 3 提案するルーバーの概要
Outline of the Proposed Louver

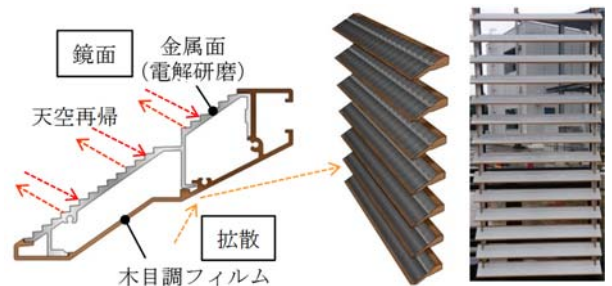


Fig. 4 試作ルーバー
Prototype Louver

異なる艶部においてフレネル反射が生じ、木目感が軽減する懸念があった。

対応2 屋外仕様かつ不燃認定品の木目調フィルムを採用した。

以上より、製作実現性が確認できると同時に、嵌合式を用いた場合に、遵守しなければならない必要寸法等の制約条件を製作過程において確認することができた。この制約条件については、7章において示す。

4. 各種表面素材の反射率測定

4.1 測定手順

ルーバーの光学性能を計算するのに必要な各種表面素材の反射率を測定した。本検討で候補に挙げたルーバーにおける表面素材の可視光反射率及び日射反射率の比較結果を示す(Table 1)。表中のバフ研磨とは、布製の円盤を

Table 1 各種素材の可視光反射率及び日射反射率
Measurement Results of Visible and Solar Reflectance of Various Surface Treated Materials

区分	鏡面					拡散		
表面の種類	金属(電解研磨) AA20	金属(電解研磨) AA20	金属(電解研磨) SA20	金属(電解着色) 艶有り・シルバー	金属(電解着色) 艶消し・シルバー	焼付塗装 白(N9.5)	焼付塗装 灰(N6.5)	焼付塗装 黒(N1.0)
下地材質	A6063材	A6063材	光輝材	A6063材	A6063材	A6063材	A6063材	A6063材
バフ研磨	なし	あり	なし	なし	なし	-	-	-
可視光反射率	0.70	0.73	0.68	0.78	0.66	0.94	0.35	0.04
日射反射率	0.69	0.72	0.67	0.78	0.65	0.85	0.27	0.04
写真								
区分	拡散							
表面の種類	焼付塗装 茶色(TA005)	焼付塗装 茶色(ガラスビーズ)	木目フィルム Type A	木目フィルム Type B	木目フィルム Type C	再生木		
下地材質	A6063材	A6063材	A6063材	A6063材	A6063材	A6063材		
バフ研磨	なし	なし	なし	なし	なし	なし		
可視光反射率	0.31	0.31	0.31	0.21	0.12	0.16		
日射反射率	0.30	0.30	0.42	0.33	0.23	0.18		
写真								

高速回転させ、物理的な研磨を行う手法である。測定装置は紫外可視近赤外分光光度計を用いた。紫外可視近赤外分光光度計は、5cm角の試験体を装置内部にある積分球に設置し、重水素ランプ及びハロゲンランプを光源とした全反射率が波長帯毎に測定できる。測定波長帯は300~2500nm、測定刻みは1nmとした。

次に測定手順を示す。

- 積分球を用いた全反射率測定値は、標準白色板を基準とした相対反射率となる。そのため、標準白色板の校正表を基に、波長帯毎の絶対反射率に換算する。
- 人工光源を用いた測定であるため、太陽光源基準に換算する必要がある。1)にて測定した波長帯毎の絶対反射率に対し、JIS R 3106:1998(板ガラス類の透過率・反射率・放射率・日射熱取得率の試験方法)の基準太陽光の重係数を乗じ、太陽光源に対する絶対反射率に換算する。ここで、可視光反射率用の重係数においては、CIE明順応標準比視感度が考慮されている。
- 波長帯毎の絶対反射率を可視光域及び日射波長域において平均し、各波長帯の全反射率として評価する。

4.2 測定結果

各種表面素材の日射反射率と視覚的な傾向について、次に述べる。

金属素材において、日射反射率は、0.65~0.78であり、表面処理の種類による差異は限定的であった。視覚的には光沢感(艶有り素材、光輝材)による違いが目立った。特に光輝材の場合はアルミニウム合金材特有の金属感が強く、一方A6063材は白みを帯びていた。

焼付塗装素材において、日本塗料工業会2015年H版 塗料用標準色N1.0(黒)~N9.5(白)の範囲で、日射反射率は0.04~0.85であった。その他、中間色のN6.5(灰)や木目近似色の茶系色では約0.3であった。視覚的には、耐候性を保持するための三分艶による光沢感がやや感じられた。

木目調素材において、屋外仕様の木目フィルムType A~Type Cで日射反射率は0.23~0.42、再生木で0.18であった。視覚的には、光沢感はほとんど感じられなかった。

この結果を基に本検討では、太陽からの視点に接する面は光沢感が比較的小さく、かつ指向性があり、反射率が比較的高い、電解研磨(A6063材+バフ研磨なし(Table 1 赤枠))とした。人からの視点に接する面は、拡散性があり、かつ反射率が比較的高い、木目フィルムType A(Table 1 青枠)を採用することとした。

5. 再帰反射性能評価のための計算手法

5.1 順方向モンテカルロ光線追跡法

計算法は、複雑形状、鏡面反射、拡散反射が混在する系に対して、柔軟に対応可能な順方向モンテカルロ光線追跡法を用いた。光線追跡法は計算負荷の観点から2次元で行った。ルーバー材は押出成形が基本となり、2次元的反射特性が高いことから、実用上支障はないと考えられる。コードはEXCEL上で入出力可能なVBAとし、描画出力はEXCELのオートシェイプ機能を利用した。主な計算フローを次に示す。計算法は文献^{1) 2)}を参考にした。

- Fig. 5の計算モデルに示すように、ルーバーの入射側間口に対して光源を設定する。
- 入射ベクトルは、直達日射の場合はプロファイル角(見掛けの太陽高度)のベクトルとし、拡散日射の場合は天空輝度一様を仮定し、完全拡散をモン

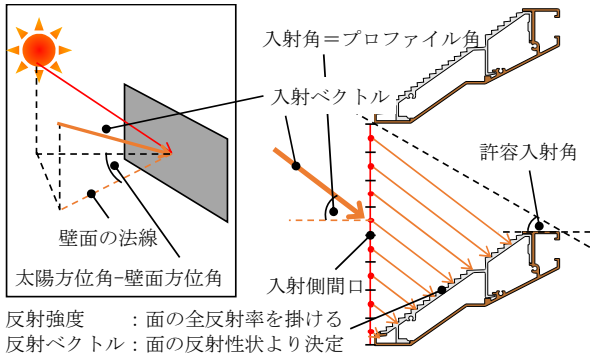


Fig. 5 計算モデル
Calculation Model

テカルロ法で表現したベクトルとした。

- 3) 光源をN個の要素に分割し、1要素毎に順次光線追跡を行う。光源面上における全エネルギーをN本の光線に離散化したことに相当する。
- 4) 各要素中心からの光線は、入射ベクトルに応じて任意の面に衝突する。衝突した面の反射率に応じて反射強度を決定し、衝突した面の反射性状(完全拡散反射, 正反射, 指向性反射)に応じて反射ベクトルを決定する。ここで、本来の順方向モンテカルロ光線追跡法では反射率に応じて、衝突した面からの光線を出射確率で表現するが、本手法では2次元反射解析であり、結果の可視化上の便宜のため、光線に対し反射率を乗じ、光線毎に重みを与える計算法を採用した。ここで、出射確率とは、ある面に入射した光線本数に対する、出射した光線本数の割合を指す。
- 5) 4)の過程を各反射面に対して行い、最終的にはルーバーの入射方向に戻る光線(反射光)と、室内側へと向かう光線(透過光)になるため、どちらかの面に到達するまで多重反射計算を行う。
- 6) 透過あるいは反射方向の面における値を光線毎に集計し、透過率、反射率とし、エネルギー保存則から、1に対する透過率及び反射率の差分を吸収率とした。集計次第で、指向性毎の性能を得ることも可能となる。

5.2 反射モデル

順方向モンテカルロ光線追跡法の特徴として、総和則の観点から、反射エネルギーは反射光線1本に集約させ、光線毎にエネルギー保存を考慮する。相反則の観点から、反射性状は放射強度を基に立体角に対応したベクトルを乱数で表現する。そのため、日射熱の影響を検討する場合、反射率はTable 1にて測定した日射波長帯の平均全反射率を使用する。また、各反射性状は文献^{3),4)}を参考に、以下に述べる方法で求める。

反射モデルは、完全拡散反射モデル、正反射モデル、指向性反射モデルの三種類を実装した。次の(1)~(3)に反射モデルの詳細を述べる。ここで、本検討では2次元解析としているため、式(1)、式(2)を用いて3次元ベクトルを2

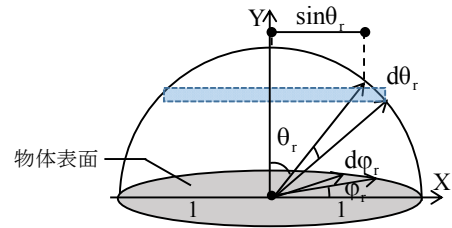


Fig. 6 完全拡散のモデル化
Modeling of Uniform Diffuse Reflection

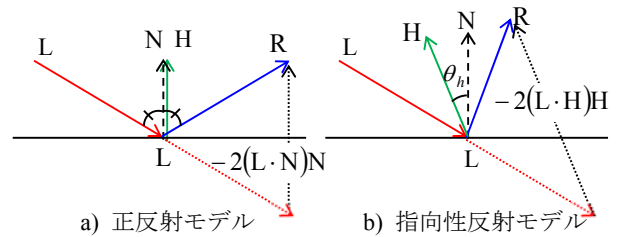


Fig. 7 正反射及び指向性反射のモデル化
Modeling of Specular and Directional Reflection

次元ベクトル(極座標からXY座標)へ変換している。

$$X = \sin \theta \cdot \cos \varphi \quad (1)$$

$$Y = \cos \theta \quad (2)$$

X : 各面に平行な軸, Y : 各面の法線方向の軸,
θ : 天頂角, φ : 方位角

(1) 完全拡散反射モデル

天頂角方向と方位角方向に分けて考える(Fig. 6)。天頂角方向は、Lambertの余弦則の放射強度に基づく立体角を確率密度関数(天球表面積に対して、天頂角が θ_r のときに占める面積の割合)で表現した場合、0~1の値をとる。そのため、式(3)のように天頂角(θ_r)を用いて、乱数(ζ_1)と対応させることが可能となる。

$$\zeta_1 = \frac{\int_0^{\theta_r} \int_0^{2\pi} \cos \theta_r \sin \theta_r d\varphi_r d\theta_r}{\int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} \cos \theta_r \sin \theta_r d\varphi_r d\theta_r} = \sin^2 \theta_r \quad (3)$$

方位角方向は、等方性を仮定し、円周に対する方位角(φ_r)を乱数(ζ_2)と対応させることで、式(4)となる。

$$\zeta_2 = \frac{\varphi_r}{2\pi} \quad (4)$$

以上より、乱数 ζ_1, ζ_2 から θ_r, φ_r を求め、反射ベクトル(R)が求められる。

(2) 正反射モデル

法線を軸に入射角と反射角が等しくなる反射ベクトル(R)を求める。反射ベクトル(R)は、式(5)のように内積を用いると、入射ベクトル(L)及び法線ベクトル(N)から求められる(Fig. 7)。

$$R = L - 2(L \cdot N)N \quad (5)$$

(3) 指向性反射モデル

天頂角方向と方位角方向に分けて考える。天頂角方

向は、微小な表面の凹凸により正反射がばらつくと考え、法線からのばらつきを基準化した正規分布(ガウス関数)でモデル化すると0~1の値をとる。そのため、式(6)のように平滑面の法線に対し、表面の凹凸を考慮した法線がなす角(θ_h)と、ばらつき度合を表す標準偏差(σ)を用いて、乱数(ζ_3)と対応させることが可能となる。

$$\zeta_3 = \exp\left(-\frac{\theta_h^2}{2\sigma^2}\right) \quad (6)$$

方位角方向は、等方性を仮定し、円周に対する方位角(ϕ_h)を乱数(ζ_4)と対応させることで、式(7)となる。

$$\zeta_4 = \frac{\phi_h}{2\pi} \quad (7)$$

以上より、乱数 ζ_3 、 ζ_4 から θ_h 、 ϕ_h を求め、法線のばらつきを考慮したハーフベクトル(H)が求められる。反射ベクトル(R)は式(8)のように、入射ベクトル(L)及びハーフベクトル(H)から求められる(Fig. 7)。

$$R = L - 2(L \cdot H)H \quad (8)$$

ここで、標準偏差(σ)は反射指向特性の実測値(ある入射角度に対する出射角度毎の反射率)をガウス関数で近似することで得られる。表面が滑らかな場合は標準偏差が小さくなり、正反射モデルに近づく。

表面素材毎に適用するモデルは、焼付塗装やフィルム等の拡散性の高い素材は、完全拡散反射モデルを用いる。金属やガラス等の指向性の高い素材は、正反射モデルまたは実測による反射指向特性をガウス関数で近似したモデルを用いる。

本検討において、鏡面に相当する電解研磨(A6063材+バフ研磨なし)は正反射モデル、拡散面に相当する木目フィルムは完全拡散反射モデルを用いた。

6. 計算手法の検証

6.1 検証方法

実測値と計算値を比較することで、計算精度の検証を行う。評価項目は、再帰成分を含む鉛直面上向き反射日射量(天空方向へ反射した日射量)とした。鉛直面日射量における直達成分、天空成分、地物反射成分、上向き反射成分の評価方法を次に述べる。Fig. 8に実測状況を示す。

鉛直面直達日射量(I_{v-dir})は、直達日射計を用いて、プロファイル角(h)に応じた法線面直達日射量(I_{n-dir})を実測し、法線面から鉛直面に投影した場合の面積換算より、式(9)を用いて得られる。

$$I_{v-dir} = I_{n-dir} \times \cosh \quad (9)$$

鉛直面天空日射量(I_{v-sky})は、直達日射成分が遮蔽された状態で、水平面に設置した全天日射計を用いて得られる水平面天空日射量(I_{h-sky})を実測し、鉛直面方向の形態係数を考慮し、式(10)を用いて得られる。

$$I_{v-sky} = I_{h-sky} \times 0.5 \quad (10)$$

鉛直面地物反射日射量(I_{v-gro})は、全天日射計を鉛直面

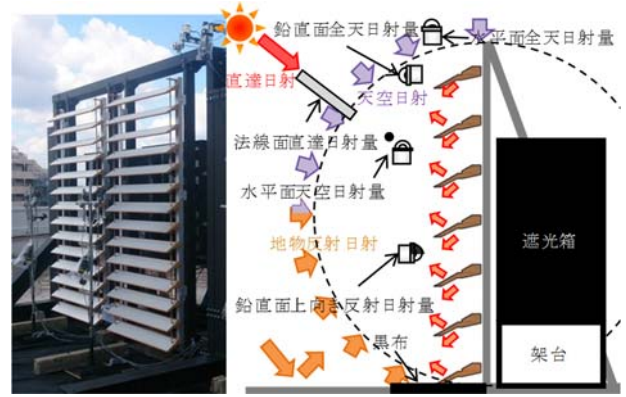
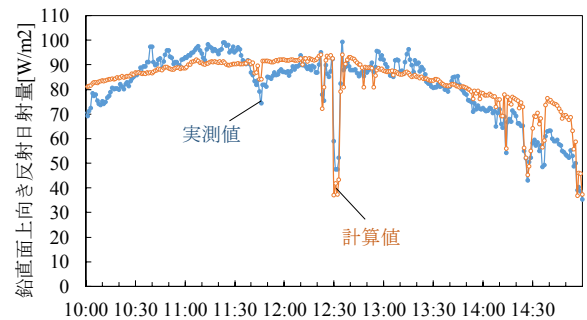
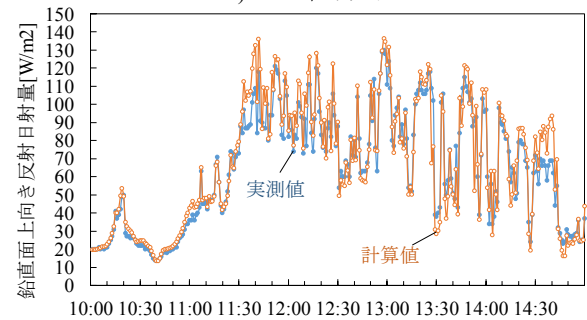


Fig. 8 ルーバー反射日射量の実測状況

Measurement of Reflected Solar Radiation from the Louver



a) 2016年9月1日



b) 2016年9月26日

Fig. 9 実測値と計算値の比較

Comparison of Measurement and Calculation

に設置して得られる鉛直面全天日射量(I_{v-all})の実測値から上述の鉛直面直達日射量(I_{v-dir})及び鉛直面天空日射量(I_{v-sky})を差し引いて、式(11)を用いて得られる。

$$I_{v-gro} = I_{v-all} - I_{v-dir} - I_{v-sky} \quad (11)$$

鉛直面上向き反射日射量(I_{v-rup})は、実測値は、鉛直面方向に設置した全天日射計に対し、四半球状のマスクを全天日射計の上半分被せて測定した。計算値は、式(12)に示すように、上述の各成分(直達、天空、地物反射)の日射量(I_{v-dir} 、 I_{v-sky} 、 I_{v-gro})に対し、順方向モンテカルロ光線追跡法により算出した各成分の鉛直面上向き日射反射率(ρ_{d-up} 、 ρ_{s-up} 、 ρ_{g-up})を乗じて得られる。

$$I_{v-rup} = I_{v-dir} \times \rho_{d-up} + I_{v-sky} \times \rho_{s-up} + I_{v-gro} \times \rho_{g-up} \quad (12)$$

ρ_{d-up} : 鉛直面上向き日射反射率(直達成分)

ρ_{s-up} : 鉛直面上向き日射反射率(天空成分)

ρ_{g-up} : 鉛直面上向き日射反射率(地物反射成分)

その他、測定上の留意点を次に述べる。

- 1) 通常は建物に遮られるルーバー設置面反対側からの天空光を排除するため、遮光箱を設置した。
- 2) ルーバー面以外からの反射日射(地物反射)を除外するため床面に黒布を敷き、反射測定用日射計周辺で短波長成分の反射が生じないように配慮した。

実測は晴天日の2016年9月1日と2016年9月26日を代表日とした。方位は真南、比較時間帯の各プロファイル角は2016年9月1日が62°、2016年9月26日が52°である。

6.2 実測値と計算値の比較結果

計算値において、各種表面素材の指向性測定を対象外としたため、5章で述べたように、鏡面部(電解研磨)は正反射モデル、拡散部(木目フィルム)は完全拡散反射モデルを用いている。特に鏡面部は理想的な正反射ではないため、その誤差の影響が懸念された。

Fig. 9に鉛直面上向き反射日射量における実測値と計算値の比較を示す。平均誤差率(実測値に対する計算値と実測値の差の割合の平均)は、2016年9月1日が2%、2016年9月26日が4%と小さく、特に2016年9月26日は挙動も概ね一致しており、指向性の影響は小さかったといえる。その要因として、電解研磨は指向性が高い仕様であること、評価対象が詳細な指向性に依らない再帰反射成分や上向き反射成分であることが考えられる。

以上より、本手法の計算精度を省エネルギー性の評価指標の一つである空調用熱負荷の観点から考えると、一般的に空調容量を選定する際には、安全率として10~

20%の余裕を見込むことが多い。その安全率に対し、本計算法による平均誤差率は最大4%と小さく、実用上、十分な精度を有していることが確認できた。

6.3 更なる精度向上への課題

2016年9月26日に比べ、2016年9月1日の実測値と計算値の各時刻における誤差が大きくなった点に着目すると、直達成分、天空成分、地物反射成分の日射反射率のうち、2016年9月1日は直達成分が支配的な気象条件であった。すなわち、直達成分の計算精度にやや課題があったことが推察される。今後、各表面素材の指向性測定を実施することで更なる精度向上が可能と考えられる。

7. パラメトリックデザインによる最適設計

7.1 最適設計の流れ

次の(1)~(3)に最適設計の流れを示す。まず、ルーバー形状をパラメトリック化し、計算アルゴリズムに形状操作を取り込む。次に、2章で述べた最適化のための目標と整合した目的関数を設定する。最後に、順方向モンテカルロ光線追跡法及びパラメトリックモデルに対し、多目的最適化アルゴリズムを連成し、ルーバー形状決定の自動化・最適化を行う。

(1) パラメトリックモデルの設定

Fig. 10にルーバー最適形状を検討するためのパラメト

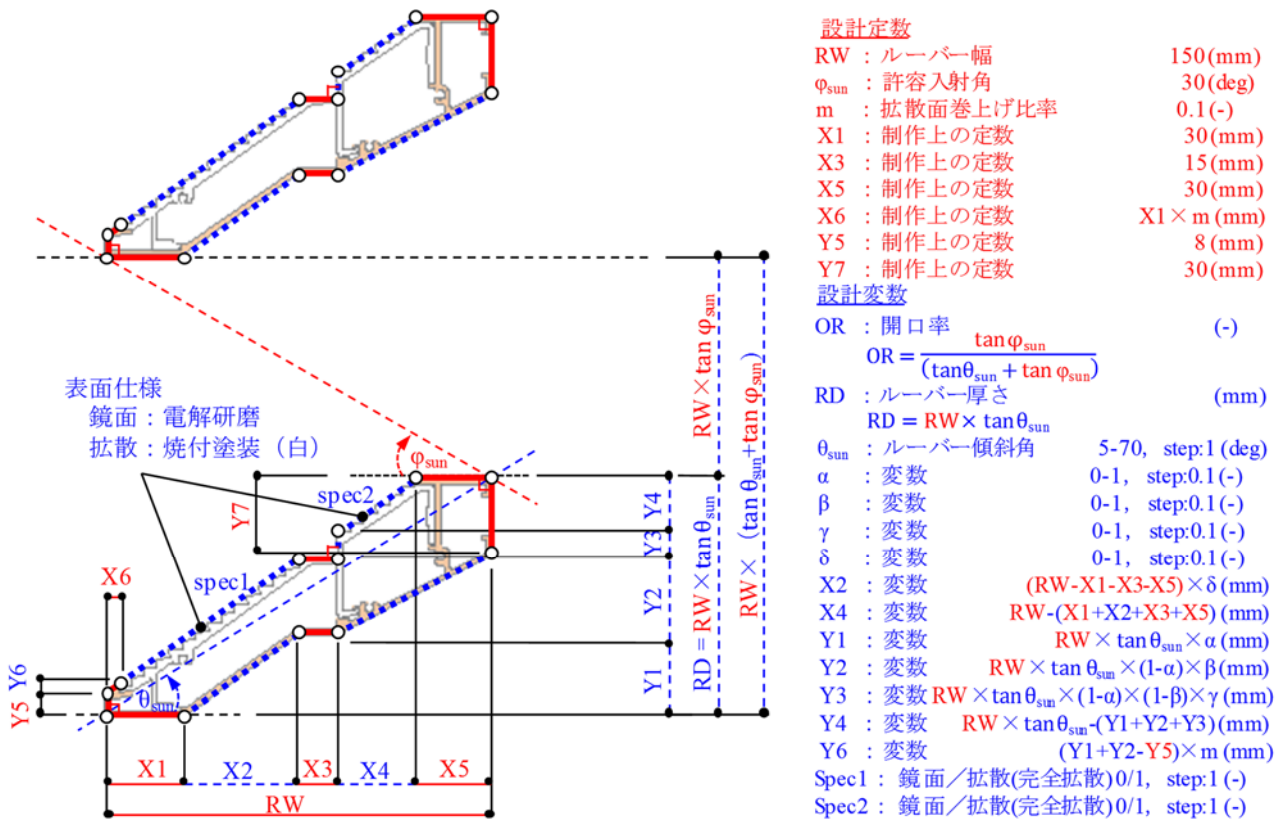


Fig. 10 多目的最適化アルゴリズム解析用のパラメトリックモデル
Parametric Model for Multi-Objective Optimization Analysis

リックモデルを示す。試作過程において明確化した製作上の設計定数となる部位(変えることのできない部位)を赤色, 設定した設計変数を基に最適化アルゴリズムで探索する部位(最適化する部位)を青色で示す。このパラメトリックモデルにより, 製作上の制約条件を満たした任意形状において, 開口率(OR)を評価することができる。

製作上の設計定数を除いた入力値は, ルーバー幅(RW)と許容入射角(ϕ_{sun})の2項目のみである。許容入射角(ϕ_{sun})は, その角度未満において直達日射の侵入を許容する角度と定義した。ルーバー幅(RW)はコストと開口率(OR), 許容入射角(ϕ_{sun})は直達日射侵入の許容度と開口率(OR)に大きく関連する項目である。このうち, ルーバー幅(RW)は製作コストを考慮し, 流通量の多いアルミニウム合金ビレット(7インチ)を前提とし, ルーバー幅(RW)を150mmとした。許容入射角(ϕ_{sun})は, 固定式ルーバーであることから, 解析者が許容値を与条件として定義することとした。本検討では許容入射角(ϕ_{sun})を 30° とした。

設計変数は, 形状パラメータの他に, 反射面の仕様を鏡面(電解研磨)または拡散面(焼付塗装(白))で設定した。

形状面の工夫として, 再帰性を得る手法は, 一般的に再帰反射構造(階段状の形状など)が用いられる。しかし, 多重反射により再帰性を得る再帰反射構造では反射性能が悪いと考え, 1回反射により再帰性が高められるように平坦な面でモデル化した。このパラメトリックモデルにより決定される形状データを基に計算を行った。

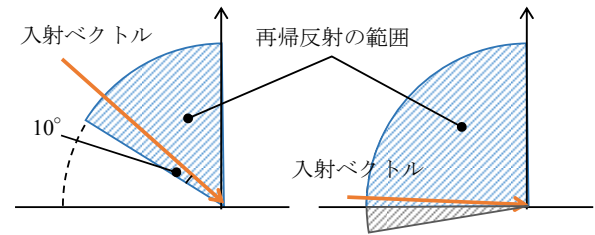
(2) 目的関数の設定

2章において設定した目標は, 日射遮蔽性能, 再帰反射性能, 視環境の両立である。これらを考慮して, 最適化計算時の目的関数(目標)を設定する必要がある。

日射遮蔽性能については, 上述の許容入射角(ϕ_{sun})の設定値で担保される。再帰反射性能については, 順方向モンテカルロ光線追跡法の計算値から評価することができるため, 再帰反射率を一つ目の目的関数とし, 最大化を図る。視環境については, 眩しさ防止は人の視野に入る部位に拡散面を使用することで担保し, 眺望性と関連の強い開口率がパラメトリックモデルから評価可能なため, 開口率を二つ目の目的関数とし, 最大化を図る。

以上より, 解析は「再帰反射率が最大, かつ開口率(眺望性)が最大」を満たすパレート解探索とした。パレート解とは, 今回の再帰性(再帰反射率)と眺望性(開口率)のようにトレードオフの関係にあり, 一意に最適解を得られない問題に対する解を指す。最終的には意思決定者が各目的関数に対する重みを決めて判断する必要がある。本検討では再帰反射率が最も高い解を最適解とする。

ここで, 再帰反射の定義は, 「 0° 以上かつ入射角- 10° 以上の反射角」とした(Fig. 11)。入射角- 10° としたのは, 水勾配等の汚れ防止措置を勘案し, 再帰性の条件を緩和したためである。また入射角- 10° とすると入射角が 10° 以下の場合, 0° 以下(地上方向)の反射角を許容することになるため, 0° 以上の反射角となる条件を加えた。



a) 入射角- 10° 以上となる場合 b) 0° 以上となる場合

Fig. 11 再帰反射の定義

Definition of Retroreflection

(3) 多目的最適化アルゴリズムとの連成

多目的最適化アルゴリズムと連成することで, 上述のパラメトリックモデルの変数を操作し, その変更に応じた形状に基づき, 順方向モンテカルロ光線追跡法で計算し, 各目的関数を評価しながら, パレート解を探索することが可能となる。

多目的最適化アルゴリズムは, 近傍培養型遺伝的アルゴリズム⁵⁾を用いた。この探索アルゴリズムは目的関数に対して適合度が高い順にソートし, 上から順に近傍2個体を選択, 交叉, 突然変異させることで, 各評価域近傍の個体(探索解)を重点的に進化させ, 偏りの小さい多様性のあるパレート解を探索する効果が見込まれている。ここで, 交叉とは親個体同士の変数がある割合で掛け合わせることを指し, 親個体の属性に近い個体を得る効果がある。突然変異とは全ての変数に対し, 一定確率で指定した変数の範囲, 刻みにおいて乱数で値を変更することを指す。運がよければ, 今までにない優良な個体を得る効果がある。

初期集団としての設計変数は, 解析者が指定した範囲・刻みにおいて一様乱数で生成する他, 解析者の経験値が反映できるように任意入力を可能とした。解析者の経験値を反映させることで, 次の効果が期待できる。

- 1) 最適解の探索効率を上げる。
- 2) 最適解が解析者の経験値以上の解となるため, 探索解に対する信頼性が高まる。

遺伝的アルゴリズムは, 実数値探索とし, 母集団40, 世代交代数250, 一様交叉, 突然変異率0.1とした。開発コードはVBAとした。

7.2 計算負荷軽減の工夫

遺伝的アルゴリズム(GA), 粒子群最適化(PSO), 差分進化法(DE)に代表されるメタヒューリスティクスによるパラメトリック最適化手法は, 設計変数を進化アルゴリズムに基づき変化させながら最適解を探索するため, 計算回数が多くなる課題があった。そのため, 評価期間における時々刻々の解析を全て実行すると効率が悪いので, 次の方法を用いた。

- 1) 評価対象の期間における鉛直面直達日射量をプロファイル角毎に集計し, 鉛直面直達日射量の期間積算値に対する比(重み係数)を算出する(Fig. 12)。

- 順方向モンテカルロ光線追跡法で算出した光学性能に対して重み係数を乗じ、評価期間中の平均光学性能として評価した。これにより、1セット(入射角 $0^{\circ} \sim 85^{\circ}$, 5° 刻み, 18ケース)の計算で評価期間中の平均光学性能が得られ、計算負荷が大幅に軽減される。この手法は評価期間に関わらず、18ケースの解析で期間平均値が評価可能となる。
- パレート解探索において、十分な収束を確保した解析を基にすると、計算負荷が多くなるため、5%程度の誤差を許容した。パレート解探索において

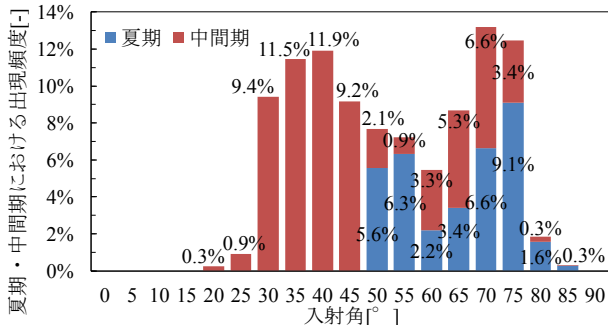


Fig. 12 直達日射量の重み係数
Weighting Factor of Direct Solar Radiation

は、計算誤差以上の優良解が得られれば探索上の問題は無いと、計算精度緩和の影響は小さいと考えた。

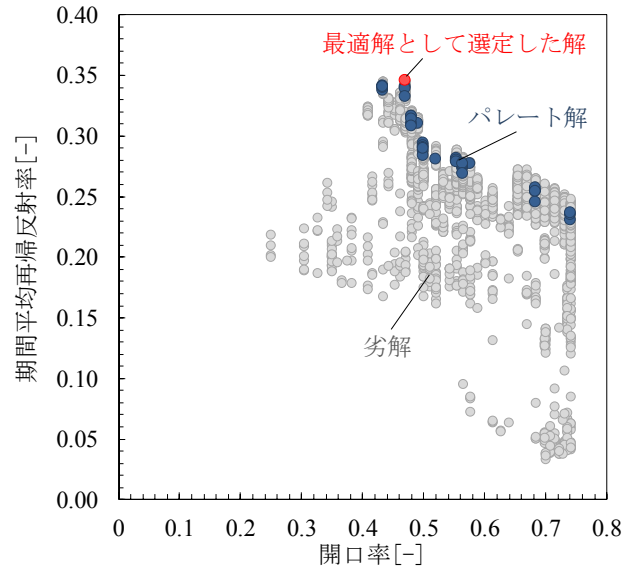


Fig. 13 多目的最適化のパレート解
Pareto Solutions in Multi-Objective Optimization

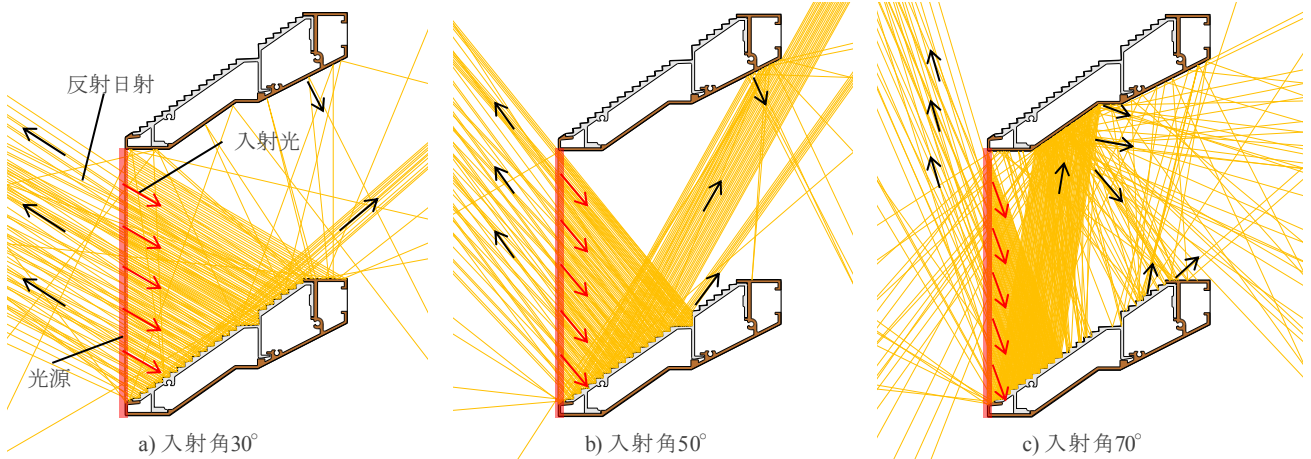


Fig. 14 最適化前の反射光軌跡 (開口率0.49)
Reflective Light Paths Before Optimization (Aperture Ratio 0.49)

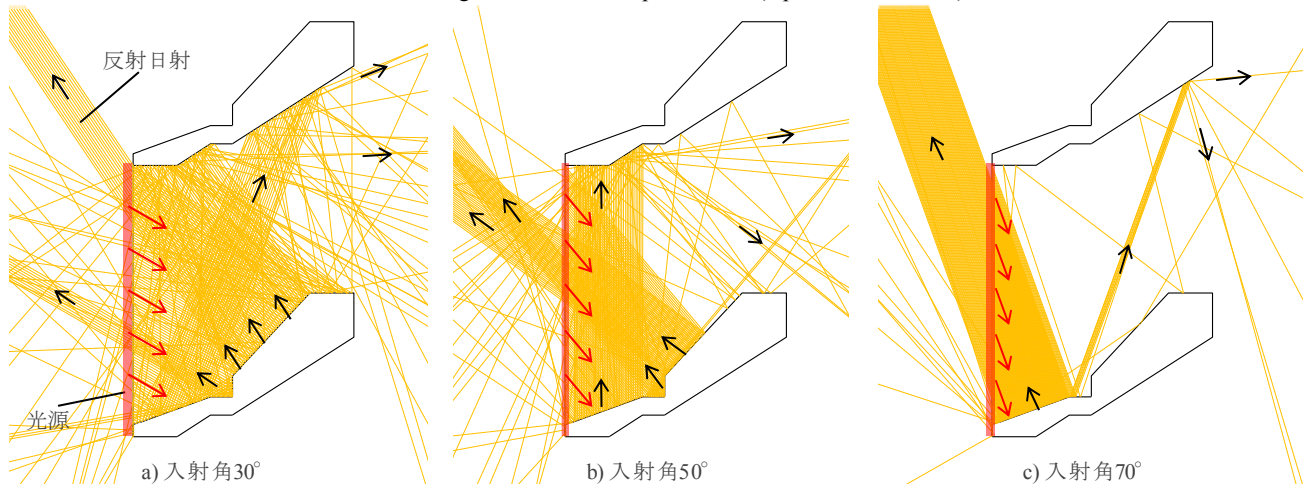


Fig. 15 最適化後の反射光軌跡 (開口率0.47)
Reflective Light Paths After Optimization (Aperture Ratio 0.47)

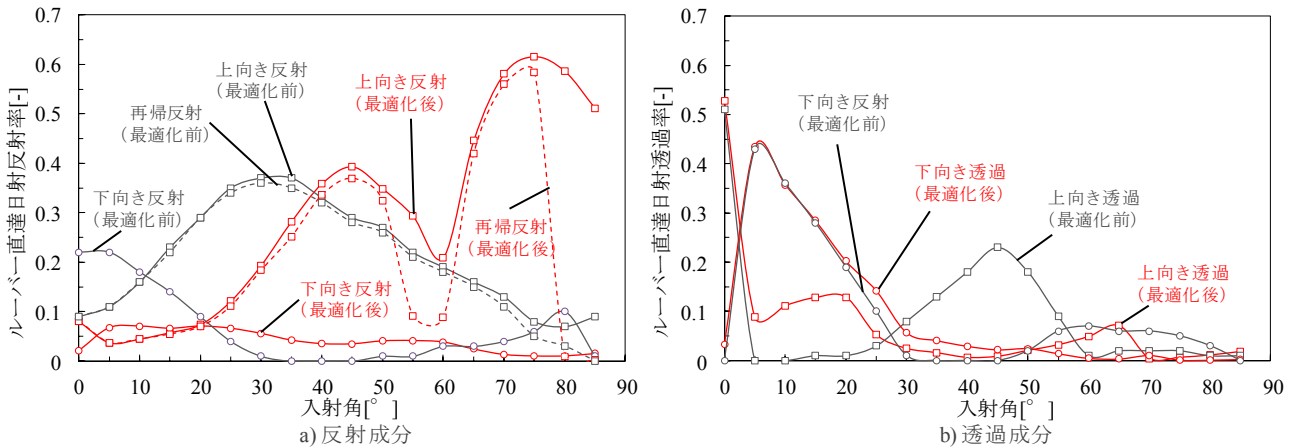


Fig. 16 最適化前後における直達日射の光学性能比較

Calculated Optical Performance in Direct Solar Radiation Before and After Optimization

7.3 解析結果

評価期間は夏期，中間期の11:00-15:00，方位は南面を対象に解析した。気象データは東京の気象官署データを用い，Udagawaモデル+Isotropicモデル^{6),7)}で直散分離した。再帰反射率は直達日射に対する性能として評価した。

解析の結果，Fig. 13のパレート解が得られた。これにより，再帰性を最重要視した中で，眺望性を可能な限り確保した解を得ることができる。また，多様なケーススタディから最適解が探索されている様子を視覚的に確認することができる。

Fig. 14及びFig. 15に最適化前後における入射角別の反射光軌跡の違いを示す。最適化後は，フラットな面にも関わらず，再帰方向の軌跡が顕著になっている。最適化前の再帰反射構造による多重反射ではなく，最適化後は，1回反射で再帰反射性能が向上するように，形状が変化していることがわかる。

Fig. 16に最適化前後における鉛直面直達日射の光学性能比較を示す。本計算は7.2節で述べた計算精度の緩和を行わず，十分に収束させた計算結果とした。Fig. 12の直達日射量の重み係数が高い入射角に対応して，再帰反射率が高くなる特性に変化している。反射率の平均値は，夏期の入射角が高い場合(入射角60°以上)の再帰成分が約3.2倍，上向き成分が約5.6倍に増加した。これにより，従来は地面または建物において受熱していた日射熱を天空方向へ帰す性能が高められていることがわかる。透過成分では，上向き成分が大幅に低下し，日射遮蔽性能が高められていた。また，計算条件で許容入射角を30°としたため，それ以下の透過率は急激に増加していた。

以上より，開口率を最大化しつつ，最適化後の再帰反射性能向上が確認でき，本手法の有効性を示した。

8. まとめ

外部ルーバーを例題とした最適設計手法について検討し，次に示す知見を得た。

- 1) 製作上の制約条件を試作等で把握することで，現

実に即したパラメトリックモデルによるシミュレーションが可能となった。

- 2) 精度の高いシミュレーションと多目的最適化アルゴリズムを連成させ，パレート解探索の自動化・最適化が可能となった。
- 3) 複雑な目標設定に対しても，パレート解による合理的な意思決定が可能となり，設計時に設定した所期性能を確保できることが確認できた。

今後，CADとの連携強化による形状操作の自由度向上，シミュレーション手法の高度化，コスト評価，多様な解析手法との連携を図ることで，様々な問題に対して，本手法が設計の品質・信頼性向上に寄与する技術になると考えている。

参考文献

- 1) 牛山太，草川徹：シミュレーション光学，東海大学出版会，pp. 189-202, 2003.6
- 2) 木下泰斗：ブラインドを考慮した窓グレーディング部の光学特性および日射熱取得の計算法に関する研究，鹿児島大学・博士論文，pp. 79-100, 2009.3
- 3) 向川康博：反射・拡散の計測とモデル化，情報処理学会研究報告，Vol. 2010-CVIM-172, No. 34, pp. 1-11, 2010.5
- 4) J.F.Blinn：Models of light reflection for computer synthesized pictures，Proc. SIGGRAPH'77, pp. 192-198, 1981.7
- 5) 渡邊，廣安，三木：近傍培養型遺伝的アルゴリズムによる多目的最適化，情報処理学会論文誌，Vol. 43, No. SIG10, pp. 183-198, 2002.11
- 6) 宇田川光弘，木村建一：水平面全天日射量観測値よりの直達日射量の推定，日本建築学会論文報告集，Vol. 267, pp. 83-90, 1978.5
- 7) 曾我和宏，赤坂裕，二宮秀典：全天日射量から斜面日射量を推定する各種モデルの比較，日本建築学会計画系論文集，No. 519, pp. 31-38, 1999.5