Radianceを用いたブラインド 光学特性の解析に関する実験的 検証

INVESTIGATION OF OPTICAL PROPERTY THROUGH VENETIAN BLINDS SIMULATED USING RADIANCE AND COMPARISON WITH EXPERIMENTAL DATA

鹿毛比奈子 — * 1 吉澤 望 — * 2
張本和芳 — * 3

Hinako KAGE — * 1 Nozomu YOSHIZAWA — * 2
Kazuyoshi HARIMOTO — * 3

キーワード：
ブラインド, 光学特性, Radiance, 透過率

Keywords:
Venetian blind, Optical property, Radiance, Transmittance

In this study, we compared the analytical values of light transmittance through venetian blinds calculated using the lighting simulation program Radiance with measured values of the transmittance. First, we measured the transmittance using a box with blinds on a building roof in summer and winter, and then, we simulated this box using Radiance under the same conditions. We investigated the appropriate conditions for simulation, including the number of planes in the curved surface of the blind slats and the slat reflectance for specular and diffuse reflections. Overall, the analytical values of transmittance are 0–10% lower than values measured.

1. はじめに

建築における省エネルギー性能の向上のため、昼光利用の重要性がさらに高まっている。直射日光を含む昼光を利用して快適な視環境および熱環境を実現することを目的として、ブラインドに代表される昼光利用装置の導入が検討されること多い。そのため設計段階において、それらの昼光利用装置の光学特性をできるだけ正確に把握することが求められる。光学特性の把握には、近年開発が進められ利用が広がっている照明シミュレーションプログラムが有効である。しかしながらシミュレーションにはアルゴリズムや物性値の設定方法などに基づく誤差が必ず存在するため、その検証は常に重要な課題となっている。本報告では、近年日本でも広く使われ始めているRadianceによる正反射成分を含むブラインドの光学特性(透過率)解析を、実測と比較しながら検証した結果を報告する。

2. 既往研究と本研究の位置づけ

照明シミュレーションプログラムの精度検証については、国際照明委員会 CIE が公開しているプログラムの性能検証のための Test Case¹⁾ に基づいた検証報告があり、Radiance(Lawrence Berkeley National Laboratory)は概ね良好の結果を示している^{注1)}。このTest Case では照明計算理論値との比較により、シミュレーションプログラムのアルゴリズムの検証を行っている。ただしベネシャンブラインドのような複雑な形状を持つ条件に関しては、検証が難しい。

ブラインドの光学特性に特化してその遮熱性能を計算する手法は以前から検討されており、斎藤・赤坂²⁾は屋内ブラインドの完全拡散反射と鏡面反射の場合の計算法を示し、また伊藤・石野ら³⁾は、

ブラインドの遮蔽性能チャートを提案している。近年では近藤ら⁴⁾⁵⁾(以下近藤方式)によるものと木下ら⁶⁾による計算手法が挙げられ、これらの実形状は直線で細分化し、スラットの光学特性は正反射率と拡散反射率に分離して計算している。アルゴリズムは、正反射成分の算出には光線追跡法(Forwards Raytracing)を、拡散反射成分の算出には光束伝達法を採用している。近藤方式による計算精度は拡散反射成分のみを考慮した実測実験との比較検討がなされており、さらに吉澤ら⁷⁾は、近藤方式とRadianceの比較した場合、正反射率比(=正反射率/全反射率)が20%以下のベネシャンブラインドで検討した限りでは、ほぼ近い値が得られていることを報告している。

Radianceをブラインドの光学特性計算に用いるメリットは、直射日光・天空光のどちらでの計算も可能であり、特に天空輝度分布に関しては、一様天空、CIE標準晴天空・曇天空、IDMP(International Daylight Measurement Programme)に基づく観測天空輝度分布など、多様な天空を光源として設定可能であること、照明シミュレーションとの連動が容易に図れること、さらに汎用性が高く他のモデリングプログラムとの連動も容易で、ベネシャンブラインドのみならず複雑な形状を持った昼光利用装置の計算への応用が可能であること、ソースが公開されたフリーソフトであることなど、将来的な応用性に優れていることがあげられよう。一方で照明計算アルゴリズムとしてはBackwards Raytracing(光線追跡法)が採用されているため、鏡面タイプのスリットから構成されるブラインドの照明計算の精度については懸念が残るところである。

CIEのTest Caseのように均等拡散面を想定した理論計算値との比較は、アルゴリズムの精度検証という点では目的が明確であるが、

¹⁾ 大成建設技術センター 研究員
(〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1)

²⁾ 東京理科大学 准教授・博士(工学)

³⁾ 大成建設技術センター 主任研究員・工修

¹⁾ Taisei Corporation Technology Center

²⁾ Assoc. Prof., Tokyo Univ. of Science, Dr. Eng.

³⁾ Taisei Corporation Technology Center, M. Eng.

一方で実際の設計の場では、実空間での実測値とシミュレーションによる予測値との差を予め把握しておきたいという要求もある。この差には、シミュレーションのアルゴリズムに起因する誤差のみならず、物性値の設定が現実の素材特性を完全に反映できないことや、空間や昼光利用装置の形状設定の限界など、シミュレーションを実施する上での様々な条件設定に起因する差が存在する。のみならず、そもそも実測値そのものが、照度計の入射角度に対する誤差、設置の微妙なずれなど様々な理由から、常に何らかの誤差を含む値となっているので、実測値とシミュレーション値の十全な比較検討は本来困難であると言わざるを得ない。

そこで本報告では、実測空間や実測条件を明確に示した上で、実際にシミュレーションを活用する上で現実的なパラメータ設定条件の下でのシミュレーション値を求め、両者の比較を行った結果を1事例として報告する。

3. 研究概要

Radiance による光学特性の解析を検証するため、昼光利用装置の代表例としてベネシャンブラインドを取り上げ、その可視光透過率の実測を行い、実測を再現した条件で解析を行った。パラメータ設定条件を把握するため、ブラインドの正反射・拡散反射成分やスラットの曲面形状の分割数の検討を行った。

4. 実測概要

測定は横浜市内にある4階建物の屋上にて夏期(2010/6/30~10/1)および冬期(2009/11/30~2010/1/7)の晴天日および曇天日における10~16時半^{注2)}に行った。写真1に測定状況を示す。

4.1 実験模型

図1に模型図面を示す。600mm 四方の箱の南面を開口部としてベネシャンブラインドを設置し、箱の内部表面は相互反射がないように暗幕を貼った。図2にブラインドの角度、図3にスラットの寸法を示す。

4.2 測定項目と方法

図4に測定点配置図を示す。照度計は水準器を用いて垂直に設置し、鉛直面照度およびブラインドを透過した光による照度(以下、透過照度)を測定した。スラット間隔1層分21.5mmの透過照度の垂直方向の分布を確認するため、4台の照度計受光部の中央部の設置高さが等間隔(約5mm)にずれるように配置した。図3に照度計受光部とスラットの位置関係を示す。受光部の直径は20mmであり、スラット間隔21.5mmとほぼ同等である。透過率は、透過照度をブラインドに入射する鉛直面照度で除した値とした。屋外の鉛直面照度代表点と各模型との距離があるため、事前に代表点と各模型位置における鉛直面照度の関係を測定して補正係数とし、模型に入射する各時刻の鉛直面照度を代表点との測定値から求めた。ただし測定結果では、4台の照度計のうち両端の2台は模型の壁の影響を受けており、かつ中央2台の照度計の値はほとんど差がなかったため、中央2台の照度計の平均値を透過照度の実測値としてシミュレーション値と比較することとした。

表1に測定機器を示す。シミュレーション用の天空光と直射日光を作成するため、魚眼レンズを装着したデジタルカメラによる輝度測光システムにより天空輝度分布を30分間隔で、また照度計により

全天空照度およびグローバル照度を2秒間隔で測定した。輝度測光システムは、事前にスポット輝度計(コニカミノルタ CS-100A)を用いて校正を行い、デジタルカメラで撮影された画像の階調値から輝度を算出可能としたものである⁸⁾。

写真1 測定状況

図1 模型図面

図2 ブラインド角度

図3 スラット寸法

図4 測定点配置図

表1 測定機器

場所	測定項目	測定 間隔	使用機器
模型 外部	天空輝度	30分	Coolpix5000+魚眼レンズ Fc-E8 (NIKON)
	全天空照度	2秒	デジタル照度計 T-10M (MINOLTA)
	グローバル照度		デジタル照度計 T-10M (MINOLTA)
模型 内部	鉛直面照度		照度ロガー 3640 (HIOKI)
	ブラインド透過照度		

表2 スラットの視感反射率

	明色	中間色	暗色	明色 (光沢)	銀色
全反射率	0.687	0.496	0.1015	0.685	0.622
拡散反射率	0.568	0.409	0.0832	0.548	0.498
正反射率	0.119	0.087	0.0183	0.137	0.124
正反射率比	17.3%	17.5%	18.0%	20.0%	19.9%

天空輝度の短時間変動の影響を極力回避するため、一回のシャッターレリーズで天空輝度の全レンジが測定可能となるように露出設定を調整した。ただし天候・時刻により最適な露出設定が異なるため、毎時刻ともシャッタースピード 1/2000 秒および 1/500 秒で撮影を行った上で、それぞれの時刻で最適な画像を選択した。

4.3 測定ケース

スラットの視感反射率の値を表 2 に、表 3 に測定ケースを示す。スラットの傾きは、45°、0°、-45° の 3 通りとした。スラットの色は明色・中間色・暗色および正反射率が高い明色(光沢)・銀色の 5 種類を用いた。スラット角度の比較を行うケースでは明色のタイプで統一し、一方スラットの反射率の比較検討を行うケースではスラット角度を 45° に固定した。

5. シミュレーション概要

Radiance を用いてブラインドの透過率の解析を行った^{注 3)}。模型内における透過照度を、模型中央への入射照度で除することにより可視光透過率を算出した。

5.1 シミュレーションモデル

シミュレーションモデルを図 5 に示す。各ブラインドはスラット 4 枚で構成した。算出面にブラインド以外から光が漏れ入らないように、ブラインドの側面部は反射率 0% の壁で塞ぎ、かつ室内側に反射率 0% の壁面からなる室を設置した。図 6 に示すように、ブラインドの室内側端部に入射光算出面を、室内側端部に透過光算出面を設置し、それぞれの面に入射する照度を求めた。各算出面は 1 スラット層分のみとし、算出ポイントはブラインド横方向中央を縦 100 分割して得られた各メッシュの中央点とし、その結果を平均することで平均照度を求めた。

① スラット分割数の検討

実験に用いたブラインド表面は曲面であるが、モデル形状が解析結果に及ぼす影響を把握するため、ブラインド表面を平板および 5 枚、10 枚の平板で分割して再現したモデルを用いた（以下 5 分割、10 分割と記す）。計算を行ったところ、ほとんどの時間帯で 5 分割と 10 分割の結果に大きな差は見られず、様々な方向に進む曲面の反射光を比較的単純に再現することのできる 5 分割モデルを採用した。

② 反射率設定方法の検討

光解析においては、計算時間の短縮のため全て拡散反射として設定する場合（以下、全拡散反射と呼ぶ）があるが、今回は正反射成分を含む反射光を検討するため、スラットの物性値として正反射率と拡散反射率に分けて入力した^{注 4)}。全拡散反射として入力した計算を比較した。

5.2 建物モデル

Radiance では実測における建物の形状、屋上の床および模型形状を再現し(図 7)、各部材の色に対応した視感反射率を設定した。なお視感反射率はマンセル色票を用いた視感測色により求めた明度より換算した値とした。

5.3 光源設定

光源として、実測時刻における太陽輝度データ（グローバル照度と全天空照度の差から計算）と天空輝度分布から、直射日光と天空光を設定した。天空光は、輝度測定システムを用いて測定した天空輝度分布データを Radiance 用フォーマットに変換した。

表 3 測定ケース

季節	比較ケース 天候・日付	色	角度
夏期	スラット角度の比較 晴天 2010/07/22	明色	45°
			0°
			-45°
	反射率の比較 晴天 2010/08/17	明色 中間色 暗色 明色(光沢)	45°
冬期	スラット角度の比較 晴天 2009/12/24	明色 明色(光沢)	45°
			0°
			-45°
	スラット角度の比較 曇天 2009/11/30	明色 明色(光沢)	45°
			0°
			-45°
	反射率の比較 晴天 2010/01/07	明色 中間色 暗色 銀色	45°
	反射率の比較 曇天 2009/12/09	明色 中間色 暗色 銀色	45°

スラット角度 45°・5 分割モデル スラット分割

図 5 シミュレーションモデル

図 6 入射・透過光算出面

図 7 建物屋上の形状

図 8 スラット分割数の検討 透過率

図9 [正反射+拡散反射]と[全拡散反射]の比較^{注5)}

図10 屋外照度

なお以下では、照度計（コニカミノルタ T-10M）で実測された値を基準として検討を進めるために、天空輝度分布から計算した全天空照度の値が、照度計を用いて実測した実測値と一致するように、事前に天空輝度分布データの補正を行った。

6. 解析結果

6.1 スラット分割数の検討

図8にスラット分割数別の透過率を示す。全体的に平板が高い値を示した。2009年7月22日晴天および2009年11月30日曇天の15時半までは、5分割と10分割はほぼ同じ値を示した。しかし曇天の15時以降は徐々に5分割の値が上昇し差が生じたことから、検証時

間帯は15時半までとした。

6.2 反射率設定方法による違い

年間シミュレーションなど計算時間の短縮が要求される場合は、スラットの反射率を、正反射を含めてすべて拡散反射（全拡散反射）と見なして計算が行われることも多く、実際に計算時間は劇的に短縮されることになる。図9に、5分割モデルによる[正反射+拡散反射]設定の場合と、[全拡散反射]設定の場合の比較結果を示す。反射率の低い暗色では両者の違いはないが、反射率の高い明色では[全拡散反射]設定の方がむしろ透過率が高く、実測値に近い値が算出される傾向が見られた。

図 11 スラット角度の違いによる比較

図 12 反射率の違いによる比較^(注5)

6.3 屋外照度

図 10 に屋外照度を示す。2009 年 11 月 30 日と 12 月 9 日の曇天時（グローバル照度と全天空照度の差が小さい）は屋外照度の変動が見られた。2009 年 12 月 24 日は屋外照度の変動がない 10～14 時（グローバル照度と全天空照度の差が大きい）を晴天時とした。

6.4 透過率

図 11 に実測に基づく透過率とシミュレーションによる透過率のグラフ、透過率の差〔実測値－解析値〕を示す。全体として解析値の方が常に実測値より透過率が小さく算出された。

スラット角度の比較では、夏期晴天時の 45° では解析値が実測値

より 5%程度小さい値を示し、一方 0° および -45° では 10%程度小さくなった。冬期曇天の場合は差の変動が大きい、スラット角度 45° の場合は、ほぼ一貫して解析値の方が 5%程度小さい。

図 12 に反射率の違いを比較したグラフを示す。明色は夏期・冬期を通じて 5%程度解析値の方が小さくなっている。また晴天の場合は正反射率が高い明色（光沢）や銀色の方が差が大きい。

夏期・冬期通じて暗色が最も差が小さく、暗色の場合は実測値と解析値はほぼ一致する。なお全てのケースを通して、シミュレーションにおいてブラインドの平板モデルより 5 分割モデルの方が透過率が小さく実測値から離れる傾向を示した。Radiance においては正

反射計算の反射回数を増やすと計算負荷が劇的に高くなり、今回はコンピュータの能力の制約^{注6)}から反射回数を3回に制限したため、5分割モデルの場合は正反射計算が十分に実行できなかった可能性に留意する必要がある。

7. まとめ

正反射成分を含むブラインドのRadianceによる光学特性解析を、実測値との比較により検証した。

冬期および夏期のいずれにおいても、シミュレーションによる透過率算出結果は、実測値よりも0～10%程度低くなっている。さらに正反射回数が多くなりやすい正反射率比の高いブラインドや明色ブラインド、また5分割モデルの方が実測値より透過率が低く算出される傾向が見られ、正反射成分の計算に関しては精度が若干低下している可能性が示されたと言えよう。また空間内部での光の方向性を無視して透過率を計算する目的であれば、反射率を全て拡散と見なして計算して良いことを示唆する結果が得られている。実測との差10%という数値そのものは、実測誤差に起因する部分も考えられるため、精度の良し悪しの議論は難しいが、正反射成分を考慮しようとした場合、Radianceによるシミュレーション値は実測値よりも若干低下する可能性があることは考慮に入れる必要がある。

謝辞

本研究を進めるにあたり、Radianceの解析において横川貴明氏（当時、東京理科大学大学院）に甚大なご協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

注記

- 注1) ただし拡散反射率が0.7よりも高い場合の相互反射成分計算の精度は極端に落ちていく傾向が報告されている。
- 注2) 夏期は15時半以降は太陽が真西に回り込み、模型南面から太陽が直接見えない状態となる。
- 注3) Radianceでの照度計算には下記のパラメータ設定を用いた。拡散光に影響するアンビエント設定については、パラメータ設定がブラインドの反射率および透過率の解析に与える影響について検討した既往研究⁷⁾を参考とした。精度が高く、かつ解析にかかる時間が現実的な値を設定した。また正反射の設定については、正反射回数(dr)を4回以上に設定した場合、計算途中でフリーズを起こしたため今回は3回とした。

付表1 Radiance パラメータ設定

パラメータ	名前	内容	設定値
-dr	direct relays	正反射 回数	3
-dp	direct presampling density	正反射 プリサンプリング密度	4096
-ab	ambient bounce	アンビエント バウンド回数	4
-ar	ambient resolution	アンビエント 解像度	256
-ad	ambient divisions	アンビエント 分割数	1024
-as	ambient super-samples	アンビエント スーパーサンプル数	512

- 注4) Radianceでは、表面の拡散反射成分を”plastic”、正反射成分を”mirror”として設定した。
- 注5) 測定時間中の実験模型の調整作業の影響を受けた測定値は、結果から除いた。また冬期・晴天(2010/1/7)の明色 45° の測定では、12:31～13:59、および14:01～14:29において、スラット角度がずれたため欠測とした。
- 注6) 今回解析に用いたコンピュータは、1)MacPro, OS10.6, CPU 3.2GHz クアッドコア Intel Xeon, メモリ 8GB, および2)Microsoft Windows XP, 3.06GHz, 1.96GBである。なお注3)に示すパラメータ設定の場合、2)では1時刻100点の計算時間は平板で10分、5分割で8時間30分、10分割で130時間であった。

参考文献

1) CIE 171:2006, TEST CASES TO ASSESS THE ACCURACY OF LIGHTING COMPUTER PROGRAMS

2) 斎藤平蔵, 赤坂裕: 窓ガラスにスラットタイプのしゃへい物を取り付けた場合の熱取得計算, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), 計画系, pp.337～338, 1974.10

3) 伊藤直明, 石野久彌, 須永修通, 三浦満雄: 開口部の熱遮断機構に関する研究(第1報)ブラインドの熱遮蔽特性の基礎理論, 空気調和・衛生工学会学術論文集(仙台), pp.393～396, 1982.10

4) 近藤純一, 稲沼實: 外装ブラインドのある窓の日射伝播性能に影響を与えるスラット特性に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, No.597, pp.27～33, 2005.11

5) 近藤純一, 稲沼實: 外装ブラインドのある窓に入射する日射伝播に関する実験的研究, 日本建築学会環境系論文集, No.593, pp.17～24, 2005.7

6) 木下泰斗, 赤坂裕, 二宮秀典: ベネシャンブラインドの光学特性の計算法, 日本建築学会環境系論文集, No.617, pp.1～8, 2007.7

7) 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, No.640, pp.675～683, 2009.6

8) 日本建築学会編: 建築環境工学実験用教材, 3-1, pp.30～35

9) 本橋比奈子, 吉澤望, 張本和芳: 高性能窓システムの性能評価手法に関する研究(その3) Radianceを用いたブラインド光学特性の解析および検証実測, 日本建築学会大会学術講演梗概集D-2, 2010.7

10) G.Ward, R.Shakespeare: Rendering with Radiance, Space & Light, 2003

[2013年1月23日原稿受理 2013年4月17日採用決定]