

建材の反射指向特性を考慮した輝度シミュレーション手法の開発と計算事例

矢部 周子 山口 純一
大塚 清敏

Development of a Luminance Simulation for Building Models with Directional Reflection Surfaces

Chikako Yabe Jun-ichi Yamaguchi
Kiyotoshi Otsuka

Abstract

Brightness, comfort, atmosphere, and other relevant factors are required to create an appropriate indoor light environment. Lighting design based on luminance distributions is important because these factors can be evaluated through luminance distribution, which determines various visual effects. In general, in lighting environment simulations, all reflective surfaces are often assumed to be uniform diffuse surfaces; however, actual building materials have non-uniform directional reflection characteristics, which are different from this assumption. Therefore, we developed a luminance simulation that considers the directional reflection. We proposed a subdivision and correction method for calculating the ratio of luminous flux transmission in the simulation. It was shown that the simulation accuracy was improved when the proposed method was employed by comparing the calculated values with the measured values in the model experiment.

概要

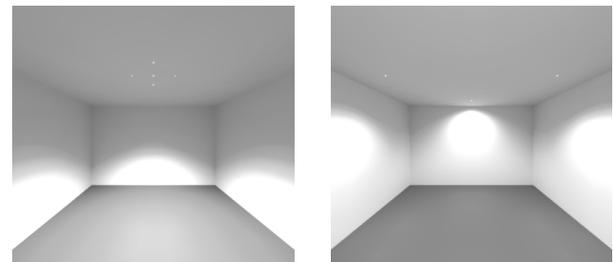
適切な室内光環境の創造のためには、明るさ、快適性、雰囲気、健康などの多角的な検討が必要となる。これら进行评估するためには、様々な視覚的効果を決定づける輝度分布が重要であり、輝度分布に基づく照明設計が求められる。既往の光環境シミュレーション技術では、反射面を均等拡散面として仮定することが多いが、実際の建材は不均一な指向性のある反射特性を持ち、仮定とは異なる。反射光に起因する輝度分布では、この反射指向特性の影響が顕著に表れるため、輝度シミュレーションにおいて反射指向特性を考慮することが求められる。そこで、反射指向特性を考慮した輝度シミュレーション手法を開発した。既往の計算式を示したうえで、光束伝達の比率を計算する際の再分割手法と補正手法を新たに提案した。模型実験を行い測定値と計算値とを比較することで、本手法により反射指向特性を考慮した輝度シミュレーションの精度が向上することを示した。

1. はじめに

省エネルギー性とともな快適性や、ウェルネスの構成要素のひとつである健康に配慮した適切な室内光環境の創造が重要視されている。適切な光環境の要件である明るさ、快適性、雰囲気などは人間の知覚・心理尺度として捉えられ、それら进行评估するための物理指標としては光の輝度分布が重要である¹⁾。面に入射する光束の密度を表す照度と比較して、ある地点から見たときの面の明るさを表す輝度では、人の明るさの感じ方を評価できる。Fig. 1に示すのは、同一の内装仕様の室モデルにおいて天井の照明配置を変えてシミュレーションを行った例である。a) と比較してb) の方が床面照度は低いが、全体に明るい印象を受ける。これは、視野内の多くを占める壁面の輝度がb)の方が高いためである。また、黒い壁よりも反射率が高い白い壁の方が、照度が同一であっても輝度が高くなり明るい印象となる。このように、輝度分布は明るさや視認性などの視覚的効果を決定づける。そのた

め、輝度分布に基づく照明設計が重要であり、そのシミュレーション技術が求められる。

輝度分布を高精度に計算するためには、不均一な建材の反射特性（以下、反射指向特性）を考慮する必要がある。対象点への入射光に着目する照度分布と比較して、対象点での反射光に大きく左右される輝度分布には、反



a) 照明器具の中央配置 (5灯:床面照度420lx)
b) 照明器具の分散配置 (4灯:床面照度290lx)

Fig. 1 壁面輝度による印象の違い
Different Impressions due to Wall Luminance

射指向特性の影響が直接性に現れるためである。

建築の内外装材には様々な反射性状の素材が使用されている。反射率がおよそ同程度と明記されている建材であっても、反射指向特性が異なる建材では反射性状が大きく異なり (Fig. 2), 同一建材でも光の入射角度や見る角度によって見え方は異なる (Fig. 3)。反射指向特性の違いは見え方や印象に大きな影響を与え、反射指向特性を考慮したシミュレーションによって、その予測が可能となる。

2. シミュレーションとその利用

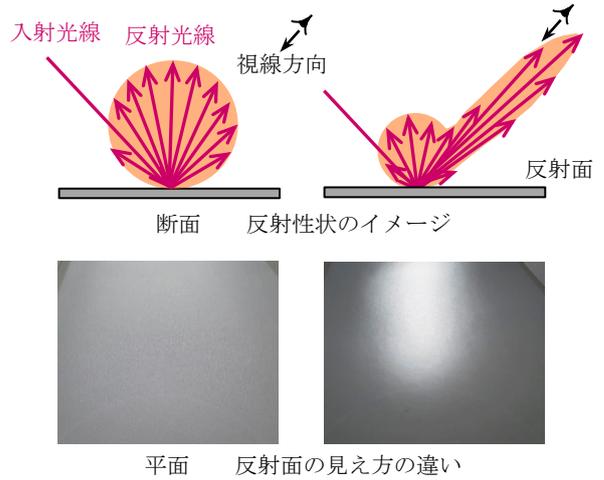
反射指向特性を考慮した輝度シミュレーションの利用場面としては、艶のある (指向性のある) 建材の見え方の予測・評価や、屋根材や壁面、太陽光パネルからの直射日光の反射による不快な眩しさ (以下、グレア) の検討等が挙げられる。

オフィスや集合住宅のエントランスでは石材等の艶のある建材を採用した設計により高級感や特別感を演出することができる。反射指向特性の異なる内装材を選択することで、執務や会議、休憩といった室の使われ方に応じた異なる雰囲気的空間を計画できる。また、局所的な光の反射によって空間にメリハリをつけた設計も行われる。以上のような設計の際に、空間の見え方や印象を予測するには、反射指向特性を考慮したシミュレーションが有効である。

さらに別の例として、外装材の艶出しコーティングや太陽光パネルの反射防止コーティングは非鏡面反射の場合があり、これらからの反射光によるグレアの検討においては、その反射指向特性を考慮する必要がある²⁾。例えば、黒色の屋根材を選定したのにも関わらず、直射日光の反射によるグレアが発生することがある。これは、屋根材の反射指向特性を考慮した輝度シミュレーションにより事前に予測することで対処できる。ここで紹介したのは一部であり、様々な場面で反射指向特性を考慮したシミュレーションが有用となる。

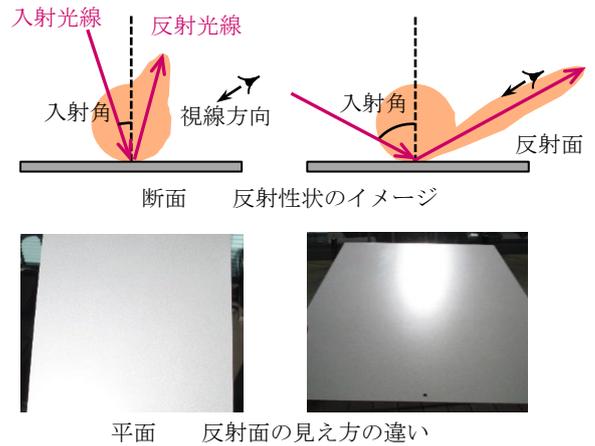
そこで、本研究では反射指向特性を考慮した輝度シミュレーション手法を開発した。本報では既往の計算式を示したうえで、光束伝達の比率を計算する際の再分割手法と補正手法を新たに提案した。反射指向特性が異なる内表面で構成された模型空間を対象として、計算値と測定値を比較することで、提案した手法により計算精度が向上することを明らかにし、本計算手法により指向性のある反射面の特徴を再現できることを確認した。さらに、実在する建物内空間を対象として輝度分布計算を行い、現地でも測定した輝度分布と比較することで、本計算手法の実建物空間への適用性の検討を行った。

3. 反射指向特性を考慮した光束伝達法に基づく計算手法



a) 拡散性の高い建材 b) 反射指向性のある建材

Fig. 2 反射指向特性の異なる建材の見え方の違い
Differences in Surface Appearance due to Directional Reflection Properties



a) 入射角が小さい場合 b) 入射角が大きい場合

Fig. 3 同一建材での入射角による見え方の違い
Differences in the Appearance of the Same Surface due to the Angle of Incidence

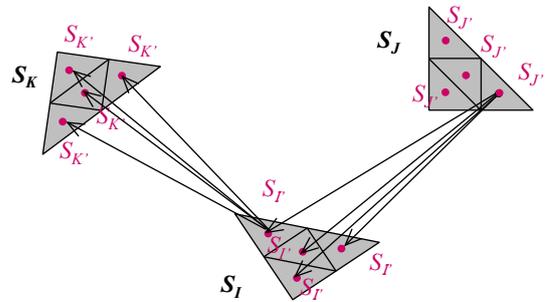


Fig. 4 再分割時の F_{JK} の関係(1辺を2分割した例)
Repartition Method

3.1 基本の計算式

反射指向特性を考慮できる光環境計算手法の構築に向けて、基本の計算式を整理する。間接光束を未知数とする松浦・上谷の光束伝達相互反射式^{3),4)}に従い、式(1), (2)を用いる。ただし実際の計算では、立体角投射率を用いて、式(2)の三重面積分を各分割面要素の重心位置でのやりとりに置き換えて単純化した式(3)を用いる。

$$\Phi_{rIK} = \Phi_{r1IK} + \sum_{j=1}^N F_{JIK} \Phi_{rJI} \quad (1)$$

$$F_{JIK} = \frac{1}{f_{JI} A_J} \int_{S_K} \int_{S_I} \int_{S_J} \frac{\rho(x', x; x, x'')}{\cos\theta_o(x, x'')} e_o(x', x) \times \pi e_o(x, x'') dS_{x'} dS_x dS_{x''} \quad (2)$$

$$F_{JIK} = \frac{\pi A_K f_{KI} \cdot \rho(x_j, x_i; x_i, x_K)}{A_I \cos\theta_o(x_i, x_K)} \quad (3)$$

N : 面の数 [-]

Φ_{rIK} : 分割面 S_I を発散して分割面 S_K に入射する間接光束 [lm]

Φ_{r1IK} : 分割面 S_I を発散して分割面 S_K に入射する第一回反射光束 [lm]

F_{JIK} : 分割面 S_J を発散して分割面 S_I に直接入射する光束のうち S_I で反射して S_K に直接入射する光束の比率 [-]

f_{JI} : 立体角投射率 [-]

A_J, A_I, A_K : 分割面 S_J, S_I, S_K の面積 [m²]

x', x, x'' : 分割面 S_J, S_I, S_K 内の点の

3次元位置ベクトル [m]

$\rho(x', x; x, x'')$: (x', x) 方向から x に平行光で入射し (x, x'') 方向に拡散反射する場合の反射特性関数 [1/sr]

$\theta_o(x, x'')$: x に立てた法線と x, x'' を結ぶ線のなす角 [rad]

$e_o(x', x)$: x' より x への固有照度係数 [1/m²]

x_j, x_i, x_K : 分割面 S_J, S_I, S_K の重心の

3次元位置ベクトル [m]

式(1)の連立方程式の解は反復解法であるガウス・ザイデル法により求める。式(1)の第 P 次の近似解を $\Phi_{rIK}^{(P)}$ とすると、相対残差 ε を収束判定条件に用い、式(4)を満たすまで反復計算を行う。本研究では $\varepsilon=10^{-3}$ とした。

$$\frac{|\Phi_{rIK}^{(P)} - \Phi_{rIK}^{(P-1)}|}{\Phi_{rIK}^{(P)}} \leq \varepsilon \quad (4)$$

分割面 S_I で反射して分割面 S_K に入射する平均間接輝度 L_{rIK} [cd/m²]は式(5)より算出する。

$$L_{rIK} = \frac{1}{\pi f_{IK} A_I} \Phi_{rIK} \quad (5)$$

分割面 S_K の照度 E_K [lx]は式(6)~(8)より算出する。

$$E_K = E_{dK} + E_{rK} \quad (6)$$

$$E_{dK} = \begin{cases} \sum_{i=1}^N \frac{\pi f_{KI} I_{dIK}}{A_I \cos\theta_o(x_i, x_K)} & \text{(点光源)} \\ \sum_{i=1}^N \pi f_{KI} L_{dIK} & \text{(拡散光源)} \end{cases} \quad (7)$$

$$E_{rK} = \frac{1}{A_K} \sum_{I=1}^N \Phi_{rIK} \quad (8)$$

E_{dK} : 分割面 S_K の直接照度 [lx]

E_{rK} : 分割面 S_K の間接照度 [lx]

3.2 立体角投射率 f_{IJ} の補正

立体角投射率 f_{IJ} は、錐面積分の法則⁵⁾を用いて、代表点 x_I からみた分割面 S_J の立体角投射率から算出する。その後、村上⁶⁾の手法に倣って、式(9)に示すように、面積比による重みづけを行ったうえで総和則が成り立つよう補正をする。

$$f'_{IJ} = \frac{A_J}{A_I + A_J} (f_{IJ} + f_{JI}) / \sum_{j=1}^N \frac{A_j}{A_I + A_j} (f_{IJ} + f_{JI}) \quad (9)$$

f'_{IJ} : 補正後の立体角投射率 [-]

3.3 再分割による F_{JIK} の高精度化

指向性のある反射面を解く場合については、特に隅部などにおいて分割面同士の距離が近くなることで F_{JIK} の計算誤差が大きくなる。対策として、全ての分割面をより小さくすることが考えられるが、分割面要素数が多くなり、3面間の関係を解くには計算負荷が飛躍的に増加することが懸念される。そこで、 F_{JIK} を算出する際に、隅部においてのみ分割面を再分割する工夫を行った。再分割の際には、再分割後の面の形状にばらつきが出ないようにした。式(10)のように、再分割後の各分割面の代表点に対して光束が到達する比率を求め総和をとることで、分割前よりも精度よく F_{JIK} が算出できるようにした(Fig. 4)。式(10)は3.2節で述べた立体角投射率を用いて式(11)のように書き換えられる。なお、立体角投射率 $f'_{I'J'}$ は錐面積分法⁵⁾を用いて算出する。

$$F'_{JIK} = \frac{1}{f'_{IJ} A_I} \sum_{x'_j} \sum_{x'_i} \sum_{x'_k} \frac{\pi \rho(x'_j, x'_i; x'_i, x'_k)}{\cos\theta_o(x'_i, x'_k)} e_o(x'_j, x'_i) \times e_o(x'_i, x'_k) A'_j A'_i A'_k \quad (10)$$

$$F'_{JIK} = \frac{1}{f'_{IJ} A_I} \sum_{x'_j} \sum_{x'_i} \sum_{x'_k} \frac{\pi \rho(x'_j, x'_i; x'_i, x'_k)}{\cos\theta_o(x'_i, x'_k)} f'_{I'J'} f_{K'I'} A'_k \quad (11)$$

F'_{JIK} : 再分割して算出した F_{JIK} [-]

x'_j, x'_i, x'_k : 再分割後の分割面 $S_{J'}, S_{I'}, S_{K'}$ の重心

A'_j, A'_i, A'_k : 再分割後の分割面 $S_{J'}, S_{I'}, S_{K'}$ の面積 [m²]

$f'_{I'J'}$: x'_i からみた分割面 $S_{J'}$ の立体角投射率 [-]

3.4 F_{JIK} の補正

完全拡散面での反射特性関数 $\rho(x_j, x_i; x_i, x_K)$ は式(12)で表される。式(12)と式(3)により、再分割前の完全拡散面同士での F_{JIK} (F_{JK_u} と称する)は式(13)となる。

$$\rho_u(x_j, x_i; x_i, x_K) = \cos\theta_o(x_i, x_K) / \pi \quad (12)$$

$$F_{JK_u} = f_{KI} A_K / A_I \quad (13)$$

$\rho_u(x_j, x_i; x_i, x_K)$: 完全拡散面での反射特性関数 $\rho(x_j, x_i; x_i, x_K)$ [1/sr]

F_{JK_u} : 再分割前の完全拡散面同士での F_{JIK} [-]

前節のように再分割を行い、 F_{JK} を算出しなおす過程において、3.2節で補正した立体角投射率 f_{IJ} の総和則が崩れ、 $\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N F_{JK-u} = 1$ (K 固定、 S_j と S_i が同一面に属するときは0)を満たさなくなる問題が生じる。そこで、総和則を満足するよう F_{JK} の補正を行う。再分割後の完全拡散面同士での F_{JK} (F'_{JK-u} と称する)は式(14)で表されるため、補正係数 c [-]を式(15)より算出し、式(16)のように F_{JK} の補正を行う。

$$F'_{JK-u} = \frac{1}{f_{IJ}A_i} \sum_{x_j} \sum_{x_i} \sum_{x_k} f_{I'J'} f_{K'I'} A'_k \quad (14)$$

$$c = F_{JK-u} / F'_{JK-u} \quad (15)$$

$$F''_{JK} = c F'_{JK} \quad (16)$$

F'_{JK-u} : 完全拡散面同士において再分割して算出された F_{JK-u} [-]

F''_{JK} : 補正後の F_{JK} [-]

4. 反射指向特性を考慮した計算手法の検証⁷⁾

3.3節で示した光束伝達の比率 F_{JK} 算出の際の再分割手法と3.4節で示した F_{JK} の補正手法による計算精度を検証するため、模型実験を行い、再現計算結果と比較した。

4.1 模型実験

4.1.1 模型概要 実験模型の形状をFig. 5に示す。内寸はD60×W60×H30 cmとし、窓を模した長方形の開口(W50×H15cm)を側面にひとつ設けた。図中A, B, Cの位置には輝度測定のために開け閉め可能な40φの穴を設け、それぞれの視点位置において輝度測定するときのみ開けられるようにした(視点位置Aで測定する際には視点位置B, Cの穴は塞ぐ)。模型外部は厚さ5mmの黒色つや消しアクリル板により構成し、模型内部は拡散性の高い白(Model 1)と艶のある白(Model 2)と艶のある黒(Model 3)の3種類の内装用シートを貼り、比較した。それぞれの素材の反射特性関数 ρ を決定づけるパラメータ⁸⁾については市販計測器で測定可能な分光拡散反射率から簡易推定⁸⁾した(Table 1)。Fig. 6に入射光の入射角45°に対する反射特性関数 ρ の計測値と数式モデル⁸⁾で近似した曲線を示す。

4.1.2 光源 光源は、点光源を模した場合と拡散光源を模した場合との2パターンとした。

点光源として配光角度21°のLEDスポットライトを用いた。Fig. 7にスポットライト、模型、および計測機器の配置を示す。スポットライトの床面からの高さは15cmとし、開口から入射した。視点A, Bの高さは11cmとした(Fig. 5)。実験は暗室内で行った。

拡散光源の実験では、機器類をFig. 8のように配置した。模型の開口部を拡散光源の面光源と見なせるようにするため、蛍光灯に拡散パネルを取り付けた発光天井下において、模型の開口が発光天井の方向を向くように模型を垂直に立てて設置し、さらに光源の拡散性を高める

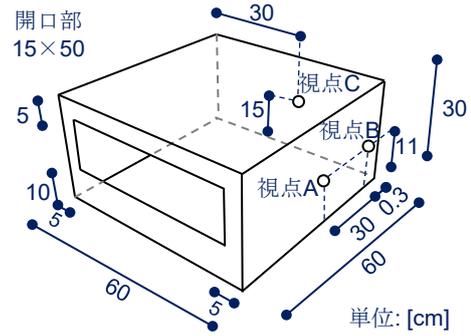


Fig. 5 実験模型の形状 (内寸)
Shape and Dimensions of the Scaled Physical

Table 1 模型内表面の反射指向特性値
Directional Reflection Characteristics inside the Models

	屈折率 n [-]	係数 K [-]	傾斜角の 標準偏差 σ_f [rad]	層内 反射率 R_D [-]
Model 1 (拡散 白)	1.54	0.877	0.155	0.864
Model 2 (艶あり 白)	1.54	4.805	0.076	0.846
Model 3 (艶あり 黒)	1.54	4.535	0.085	0.044

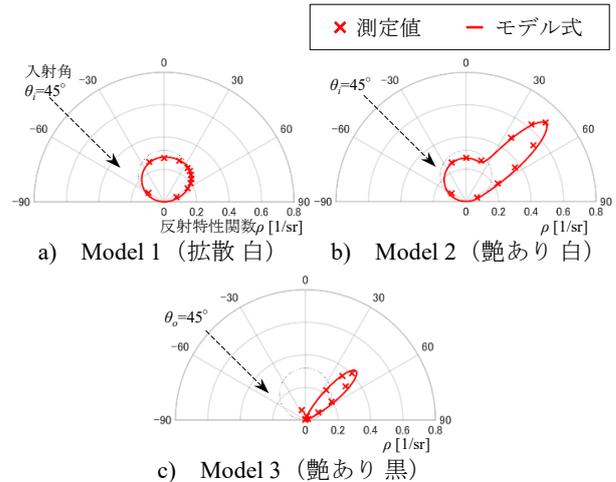


Fig. 6 反射特性関数 ρ の測定値と数式モデル式
Measurement of the Luminous Intensity Coefficient ρ and Estimation of the Model

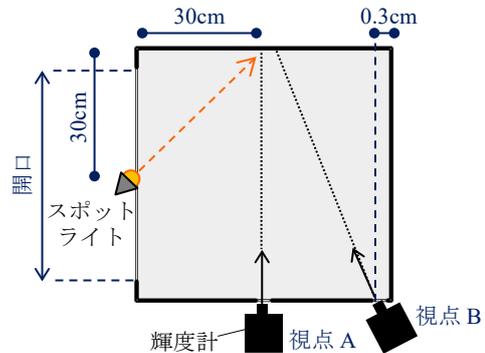


Fig. 7 点光源下での配置 (平面図)
Arrangement of the Point Light Source

ために、開口部には乳白パネルを設置した。

それぞれの光源の輝度については4.2.2項において後述する。

4.1.3 測定装置 Model 1~3それぞれについて、点光源下および拡散光源下において、輝度分布と照度分布の測定を行った。

輝度分布の測定には輝度分布画像が測定可能な二次元色彩輝度計を用いた。点光源下では、Fig. 7に示す視点位置A、Bにおいて、拡散光源下では、Fig. 8に示す視点位置A、Cにおいて、それぞれ測定した。

照度の測定においては、照度計はFig. 9のように、床面と壁面に10cm間隔でそれぞれ5点ずつ配置した。

4.2 光束伝達法を用いた再現計算

反射指向特性を数式モデルで近似した式を反射特性の入力条件として、光束伝達法を用いて反射指向性を考慮した光環境再現計算を行う。

4.2.1 計算モデル 実験に用いた模型の内寸と同じ形状のモデルを作成し、Fig. 10に示すように全部で1152個の面に分割した。分割面要素を三角形としたのは、今後、様々な形状に対応できるようにするためである。黄色で示す箇所が拡散光源の位置、赤色で示す箇所がスポットライトの位置である。

反射指向特性の入力条件は、Table 1に示した値を使用した。点光源に対する計算では、開口部では全ての光が通り抜けるため反射率を0とした。拡散光源に対する計算では、開口部の乳白パネルは、拡散反射率14.7%の均等拡散面とした。

4.2.2 計算式 3章で示した計算手法を用いた。第1回反射光束 Φ_{r1IK} は、点光源については式(17)より、拡散光源については一様な発光面であると仮定して式(18)より算出する。

$$\Phi_{r1IK} = \sum_{j=1}^N \frac{F_{jIK} \pi f_{IJ} A_j I_{dJI}}{A_j \cos \theta_o(x_j, x_I)} \quad (17)$$

I_{dJI} : 光源面 S_j から分割面 S_I への直接光度 [cd]

$$\Phi_{r1IK} = \sum_{j=1}^N F_{jIK} \pi f_{IJ} A_j L_{dJI} \quad (18)$$

L_{dJI} : 光源面 S_j から分割面 S_I への直接輝度 [cd/m^2]

点光源の直接光度 I_{dJI} は、使用したスポットライトのメーカーから入手できる配光データの値を用いた。拡散光源の直接輝度 L_{dJI} は、Fig. 8の視点Cにおいて測定した輝度分布から、開口部の輝度を開口部全面で平均して算出した。算出した輝度 L_{dJI} は $711 \text{cd}/\text{m}^2$ だった。

3.3節に示した再分割を行う条件については、分割面 S_j と S_I の距離もしくは S_j と S_K の距離が分割面の短辺の長さの5倍以下にある3分割面同士とし、再分割前後の F_{jIK} の差が 10^{-2} 以下となるまで分割を繰り返し、分割は最大で一辺あたり4分割(16要素に分割)までとした。再分割を細かくするほど精度は良くなるが、計算時間が長くなる。上記の条件は、様々な条件で比較した結果、計算時間と

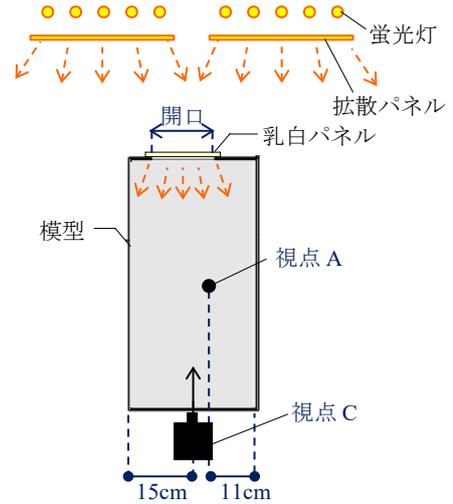


Fig. 8 拡散光源下での配置 (断面図)
Arrangement of the Diffuse Light Source

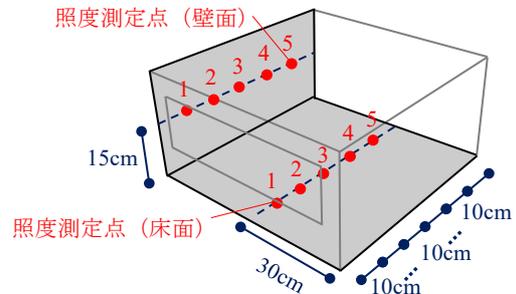


Fig. 9 照度の測定位置
Illuminance Measuring Points

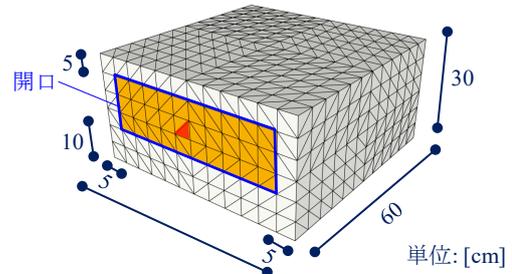


Fig. 10 計算モデルの分割面要素
Split Elements of Computerized Model

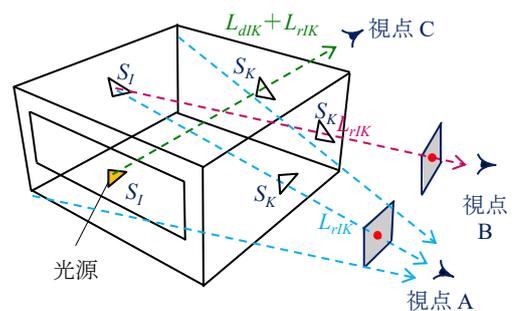


Fig. 11 輝度分布の表示方法
Display Method of Luminance Distribution

精度とのバランスが良かった条件である。

4.3 輝度分布の測定結果と計算結果の比較

4.3.1 輝度分布の表示 計算結果を可視化するため任意の視条件（視点位置，注視方向，視野）に対する模型箱内壁面の輝度分布を算出する。Fig. 11のように，各分割面要素の代表点（今回は重心位置）から視点位置方向への平均間接輝度 L_{rlk} を式(5)より算出し表示した。今回の視点位置（例えば，Fig. 11中の視点A）では直接光源が視界に入っていないが，直接光源を見る場合（例えば，Fig. 11中の視点C）には，光源からの直接輝度 L_{dlk} も合算する。光束計算は分割面内の代表点（重心）について行った。結果は線形補間による2次元カラーコンターで表示した。Fig. 12に視点A，Bからの模型内部の透視図と，輝度分布の測定および計算範囲を示す。

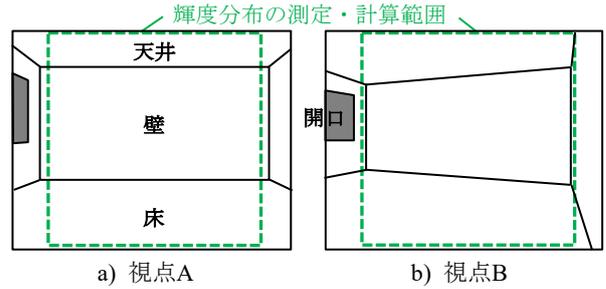


Fig. 12 視点位置ごとの模型内透視図と輝度分布範囲
Perspective View inside of the Model at Each Viewpoint
Position and Calculation Area of Luminance Distribution

4.3.2 F_{JK} の再分割および補正による計算精度の比較

3.3節，3.4節で提案した F_{JK} の再分割および F_{JK} の補正の効果をみるため，Fig. 13～15にModel 2（艶あり 白）での視点Aからの壁面の測定輝度分布，計算輝度分布を示す。図中，Maxは最大値，Minは最小値，Aveは平均値， σ は標準偏差，Cは「(最大値-最小値)/平均値」によって算出した輝度対比を表す。Fig. 14，15中，ドットで示しているのは計算点である。

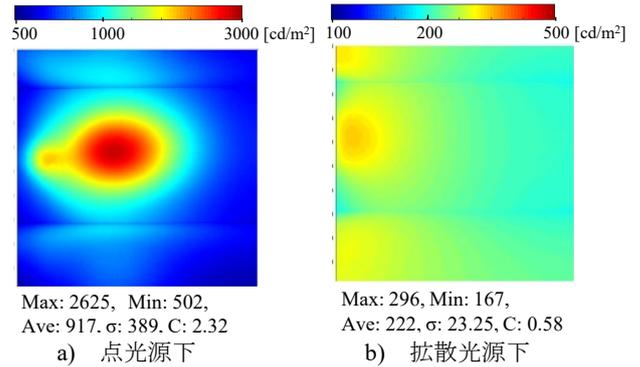


Fig. 13 Model 2の視点Aでの測定輝度分布
Measurement Luminance Distributions of Model 2

Fig. 14 a), Fig. 15 a)に示す F_{JK} の再分割と補正を行わなかった計算輝度分布では，隅部に高輝度となる斑点状の分布が現れ，計算精度が良くない。隅部は分割面同士の距離が近くなるため， F_{JK} の誤差が大きくなりやすいためである。提案した F_{JK} の再分割手法と補正手法により(Fig. 14 b), Fig. 15 b))，距離の近い面同士での光束のやり取りについての計算精度が向上し，隅部での計算結果が改善され，実測値の分布に近づく傾向となった。一部，隅部に高輝度部分が残る点については，今後の課題である。

a) F_{JK} 再分割，補正なし b) F_{JK} 再分割，補正あり

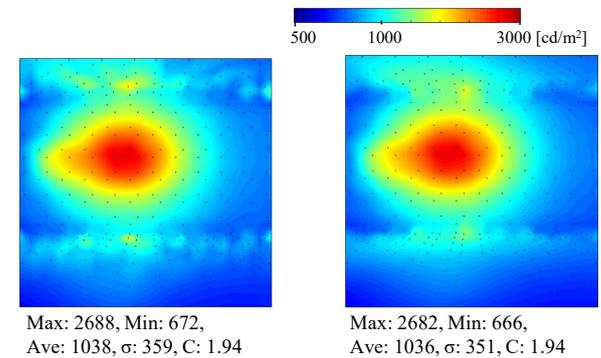


Fig. 14 点光源下でのModel 2の計算輝度分布
Reproduced Calculated Luminance Distributions
of Model 2 under the Spotlight

4.3.3 反射特性的比較 Fig. 16～18に示すのは，反射特性の異なる内表面を持つModel 1～3の点光源下での輝度分布の測定結果と計算結果である。拡散性が高い白色の内表面を持つModel 1の測定輝度分布(Fig. 16 a), b))では，視点AとBで見る方向を変えても最大輝度はそれほど変わらないが，指向性のある反射特性を持つ白色のModel 2(Fig. 17 a), b))および黒色のModel 3 (Fig. 18 a), b))では，正反射方向に近い位置になる視点Bの方が，視点Aよりも最大輝度がかなり高くなった。この傾向はFig. 17 c), d), Fig. 18 c), d)に示す計算結果において再現できた。また，Fig. 17 a), Fig. 18 a)に示すModel 2および3の視点Aでの測定輝度分布では，開口部側に近い左端に輝度が高い箇所が現れた。輝度計の測定位置がスポットライトの正反射に近い角度条件となる壁面の左端の位置では，指向性のある反射面では反射強度が大きくなるためである。Fig. 17 c), Fig. 18 c)の再現計算において，左端が明るくなる測定輝度分布の特徴を再現できた。

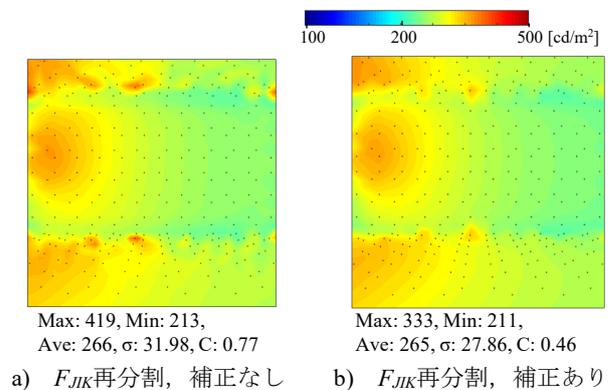


Fig. 15 拡散光源下でのModel 2の計算輝度分布
Reproduced Calculated Luminance Distributions
of Model 2 under the Diffuse Light

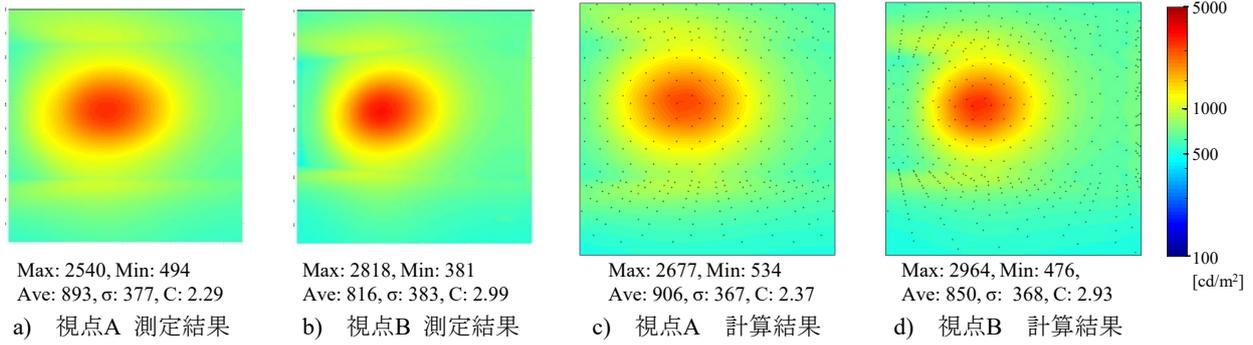


Fig. 16 Model 1 (拡散白)での輝度分布
Measured and Calculated Luminance Distributions of Model 1

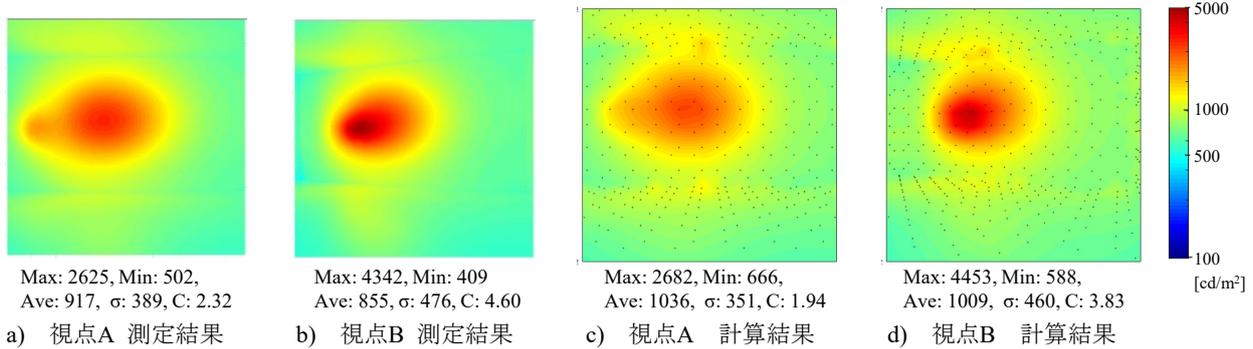


Fig. 17 Model 2 (艶あり白)での輝度分布
Measured and Calculated Luminance Distributions of Model 2

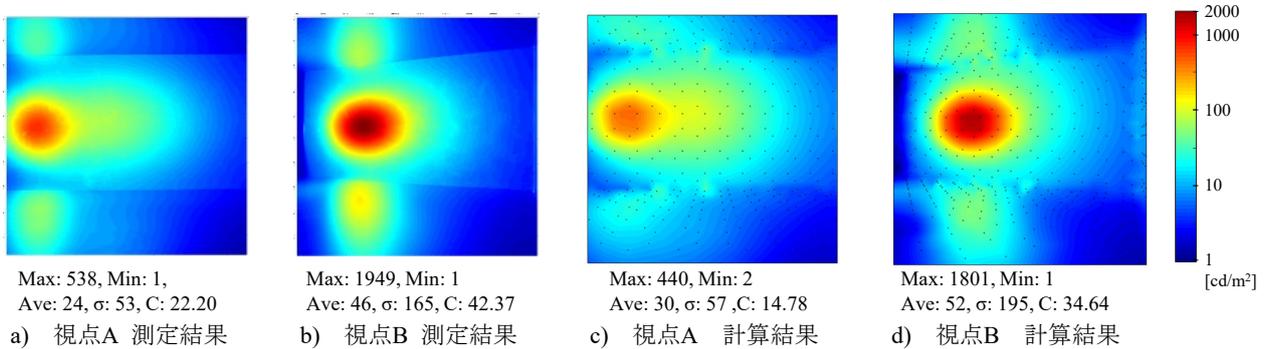


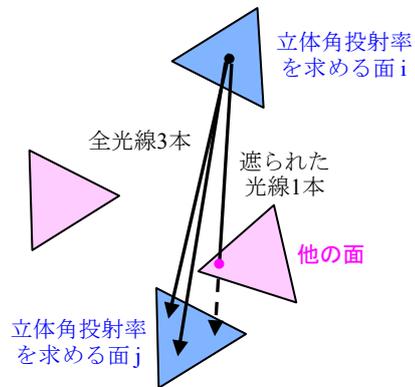
Fig. 18 Model 3 (艶あり黒)での輝度分布
Measured and Calculated Luminance Distributions of Model 3

5. 実建物での検証

実建物において輝度分布の予測計算を行う際には、凹凸のある建物形状や室内にある什器等を考慮する必要がある。そこで、見えがかりを考慮した立体角投射率の算出方法を提案したうえで、実建物において反射指向特性を考慮した輝度シミュレーションを行い、実測値と比較検証する。

5.1 見えがかりを考慮した立体角投射率の算出手法

2面間での相互の光束伝達が他の面によって遮られる割合によって、立体角投射率の重み付けを行うことで見えがかりを考慮する。Fig. 19に示すように、立体角投射率を算出する2面間で光線を飛ばし、その光線が他の面に



見えがかりの係数 = 遮られなかった光線 / 全光線 (本図では2/3)

Fig. 19 見えがかりの係数の求め方 (光線3本の例)
The Way to Calculate the Apparent Coefficient

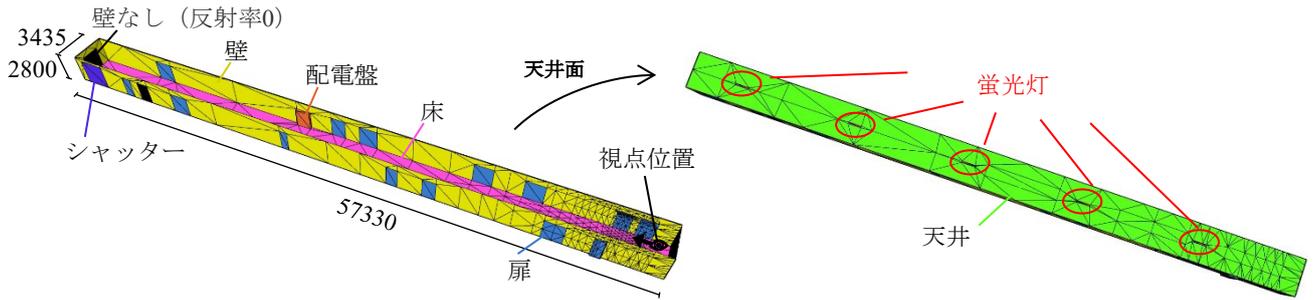


Fig. 20 実建物モデルの形状と分割要素(単位：mm)
Elements of Computerized Building Model

よって遮られるかどうかの判定を行い、全光線本数に対する他の面に遮られなかった光線本数によって見えがかりの係数を決定した。

5.2 建物概要

実建物は、幅が3.4mで長さが57.3mの長い廊下空間を対象とした。天井高さは2.8mで天井中央には蛍光灯が配置されている。建物形状を示す図については5.3.1項の計算モデルにおいて後述する。床や扉には艶があり、指向性のある建材が用いられている。内装材の反射指向特性の詳細については5.3.2項において後述する。

5.3 計算条件

5.3.1 計算モデル Fig. 20に示す実建物と同一形状の数値計算用のモデルを作成し、不均一な1704の三角形形状に分割した。計算負荷を削減するため、視点位置 (Fig. 20中、黒色で図示) から遠い面では粗い分割とした。また、Fig. 20において各面は反射特性が同一な面ごとに同色で塗分けられているが、この色自体は実際の面の色とは無関係である。

5.3.2 反射面の反射指向特性 各面の反射指向特性値については、現地測定により推定⁹⁾した値を入力値とした (Table 2)。また、比較のため、全ての面が均等拡散面であると仮定した場合についても計算を行った。その際の各面の反射率は、層内反射成分を Table 2 と同一とし、表皮反射成分を0とした。

5.3.3 光源の入力条件 天井の蛍光灯の直接光度については、実際に使用されている蛍光灯が古く、同一製品の配光データが入手できなかったため、類似製品の配光データを用い、照明の保守率は0.69とした¹⁰⁾。

5.3.4 見えがかりを考慮した立体角投射率算出の条件 5.1節に示した立体角投射率算出の見えがかりの係数を算出するための、分割面2面間で飛ばす光線本数は81本とした。

5.3.5 再分割の条件 3.3節に示した F_{JK} の再分割を行う条件については、分割面 S_J と S_K の距離もしくは S_I と S_K の距離が分割面の最長の辺の長さ7710mmの5倍以下にある3分割面同士とし、再分割の限度は第3章と同条件と

Table 2 実建物モデルの内装材の反射指向特性値
Directional Reflection Characteristics
inside the Real Building Model

部位	屈折率 n [-]	係数 K [-]	傾斜角の 標準偏差 σ_f [rad]	層内 反射率 R_D [-]
天井	1.05	6.90	0.162	0.873
壁	1.06	28.51	0.213	0.490
床	1.52	19.93	0.0307	0.214
扉	1.23	9.75	0.0468	0.232
配電盤	1.46	4.69	0.0368	0.768
シャッター	1.03	78.24	0.185	0.424

した。比較のため、再分割をしない場合についても計算を行った。

5.4 測定概要

輝度分布の測定では、一眼レフカメラを用いて露光状態を変えた写真を複数枚撮影し、輝度変換ツールを用いて合成および輝度分布画像へ変換した。測定位置は、Fig. 20で示した視点位置において高さ150cmの位置とし、廊下に沿って対面の壁を正対してみる視線方向 (Fig. 20中、矢印の方向) で測定した。

5.5 測定輝度分布と計算輝度分布の比較

視点位置からの撮影写真を Photo 1に、測定した輝度分布を Fig. 21に、計算した輝度分布を Fig. 22, 23に示す。計算値は、各分割面内部を一様の輝度で塗りつぶして表示している。

Fig. 21に示す測定輝度分布では、天井の蛍光灯や輝度の高い壁面、ドア面が床に映り込む様子が確認された。また、右側の扉の左上において局所的に輝度が高くなる様子が確認された。Fig. 23に示す全ての面を均等拡散面と仮定した一般的な計算結果では、その傾向が再現できなかった。一方で、Fig. 22 に示す反射指向特性を考慮した本研究の計算手法では、床面の中心に帯状に蛍光灯

が映り込み、局所的に輝度が高くなる分布や、床面に輝度の高い壁や扉が反射して、輝度が高くなる分布の傾向が再現できた。また、右側の扉の左上部において局所的に輝度が高くなる状況も再現できた。

測定画像と比較して分布に滲みが生じているのは、分割面サイズによるものである。また、Fig. 23の均等拡散面と仮定した場合の方が、Fig. 22の反射指向特性を考慮した場合よりも全体的に輝度が低くなっているのは、均等拡散面の仮定の際に、層内反射成分の条件は同じとして表皮反射成分のみを0としたためである。

以上より、本研究の手法と一般的な手法(Fig. 22, 23)では輝度分布の計算結果が異なり、本研究では実際に近い輝度分布の予測結果を顧客に提示できるといえる。局所的な光の反射によって空間にメリハリをつけたり、高級感や特別感を狙った設計を行う際の予測に有効である。

6. まとめ

反射指向特性を考慮した光束伝達相互反射式を用いて、輝度分布計算手法を構築した。基本の計算式を示したうえで、以下の提案を行った。

- 1) 隅部等の距離が近くなる分割面間での光束伝達の比率を計算する際の分割面の再分割手法
- 2) 再分割手法により算出した光束伝達の比率の補正手法

反射指向特性の異なる3種類の模型（拡散性の高い白色、艶のある白色、艶のある黒色）を用いて、点光源と拡散光源を用いた測定を行い、上記計算手法による計算結果と比較した。その結果、以下の知見を得た。

- 3) 拡散反射率がほぼ同等であっても、拡散性の高い反射面と指向性のある反射面とでは輝度分布の形状が異なることを確認した。
- 4) 指向性のある反射面では見る角度によって最大輝度が大きく変化することを確認した。
- 5) 反射指向特性を考慮した光束伝達相互反射式を用いて、指向性のある反射面の輝度分布を再現できることを示した。
- 6) 提案した再分割手法および補正手法により、分割面同士の距離が近くなる隅部の計算精度が改善されることを明らかにした。

実建物空間を対象とした輝度分布の予測計算を行う上で必要となる、凹凸や障害物がある場合の見えがかりを考慮した立体角投射率の算出方法を提案した。本手法を用いて、実建物空間において反射指向特性を考慮した輝度分布の計算を行った。本結果を、全ての面を均等拡散面と仮定して計算した輝度分布および現地で測定した輝度分布と比較し、以下を示した。

- 7) 測定輝度分布では艶のある扉や床面において局所的に輝度が高くなる様子が確認された。均等拡散面として仮定した一般的な計算手法では、その傾



Photo 1 内観写真
Inside of the Building



Fig. 21 測定輝度分布
Measured Luminance Distribution (LD)

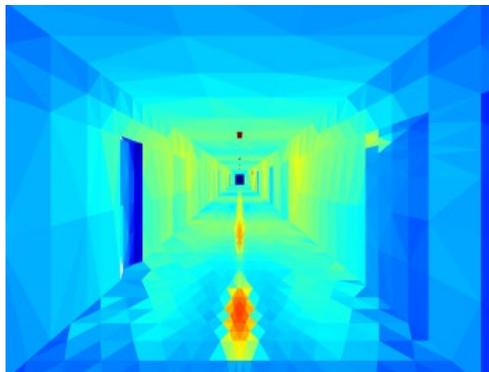


Fig. 22 本報の計算輝度分布
LD Calculated by the New Method

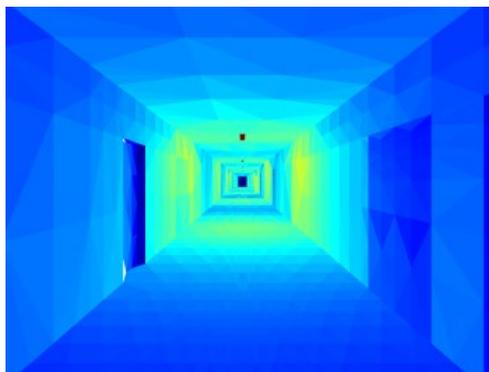


Fig. 23 本報の計算輝度分布
LD Calculated by the New Method

向を再現できなかったが、開発した計算手法においては再現できた。

本報による反射指向特性を考慮した輝度シミュレーション技術は、空間の明るさや視覚的な快適性、照明器具の配置や採光による建材の見え方、艶のある建材からの反射光の眩しさの検討など多岐にわたり、詳細な光環境の予測を行ううえで有益であり、顧客の要望に沿った空間をエビデンスに基づいた計画により実現できる。

なお、指向性の非常に強い反射面での局所的な輝度変化を表現するには、計算精度や解析時間に課題が残る。今後も継続的に計算の効率化と精度向上に取り組みたい。

謝辞

本研究は京都大学および関西大学との共同研究「輝度シミュレーションの精度向上に関する研究」において実施したものである。多大なる助言をいただきました京都大学原田和典教授および関西大学原直也教授に深謝致します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：日本建築学会環境規準AIJES-L0002-2016照明環境規準・同解説，丸善出版，p. 1，2016. 6
- 2) Brotas, L., Wienold, J.: Solar reflected glare affecting visual performance, Proceedings of 8th Windsor Conference, Counting the Cost of Comfort in a Changing World, Cumberland Lodge, Windsor, UK, pp. 688-693, 2014
- 3) 松浦邦男，上谷芳昭：照明計算のための反射指向特性の数式モデル化，日本建築学会近畿支部研究報告集，pp. 33-36，1990
- 4) Uetani, Y., Matsuura, K.: A Method of Luminance Calculation in an Anisotropic Diffuse Reflecting Interior, Journal of the Illuminating Engineering Society, 22 pp. 166-175, 1993
- 5) 照明学会：新編照明専門講座テキスト 第33期，第4版，p. 11-3，2017. 8
- 6) 村上周三，加藤信介，大森敏明，崔棟皓，小林光：複雑形状室内空間における熱環境場の対流，放射連成シミュレーション，生産研究，第44巻，第2号，pp. 56-63，1992. 2
- 7) Yabe, C., Harada, K., Hara, N.: Verification of the Accuracy of the Calculated Luminance Distributions of Scaled Physical Models with Directional Reflective Surfaces, Building and Environment, Vol. 209, 108670, 2022. 2
- 8) 矢部周子，原直也，原田和典：容易に測定可能な物性値を用いた建材の反射指向特性の簡易推定，日本建築学会環境系論文集，第84巻，第758号，pp. 377-384，2019. 4
- 9) 藤田翔，矢部周子，原田和典，仁井大策：建築材料の表面特性を用いた反射特性値の推定，日本建築学会大会学術講演梗概集，環境工学I，pp. 469-470，2020. 9
- 10) 照明学会：技術指針JIEG-001 照明設計の保守率と保守計画 第3版，2005