# 建材の反射指向特性を考慮した輝度シミュレーション技術

矢 部 周 子 山 口 純 一

### 大塚清敏

# A Luminance Simulation Model for Anisotropic Diffuse Reflection

Chikako Yabe Jun-ichi Yamaguchi

Kiyotoshi Otsuka

# Abstract

Highly accurate luminance simulation methods are required to appropriately predict and design various light environments. In this study, firstly, the directional reflection characteristics data sets of building materials to be incorporated into the luminance simulation were obtained by a measurement method using polarizers. Secondly, we compared the detailed data sets with physical properties such as glossiness, surface roughness and spectral diffuse reflectance measured by using commercial measuring instruments, so we proposed the simplified prediction method of directional reflection characteristics. Finally, we developed a computational code of luminance simulation for anisotropic diffuse reflection using the luminous flux transfer interreflection formula. The accuracy of this simulation was confirmed by comparing the calculation results with the model experiment results under the same conditions.

#### 概 要

様々な光環境を適切に予測して設計するには、高精度の輝度シミュレーション手法が求められる。本研究で は、まず、種々の建材からの反射光を、偏光を用いた既往の測定法により表皮反射成分と層内反射成分とに分 離して測定し、輝度シミュレーションに組み込むための反射指向特性データを得た。次に、偏光を用いた測定 法で得られた反射指向特性の詳細データと市販測定器を用いて測定した光沢度、表面粗さ、分光拡散反射率な どの物性値を比較し、反射指向特性の簡易予測法を提案した。さらに、本手法によって把握した反射指向特性 データを入力値として、反射指向性のある面の相互反射を考慮できる光束伝達相互反射式を用いた輝度シミュ レーションの開発を行った。計算結果を同条件下での模型実験結果と比較することで、本シミュレーションに よって反射指向性を有する面の輝度分布の傾向を再現できることを示した。

### 1. はじめに

省エネルギー性と快適性の両立の実現のため,自然光 の効果的な利用や室の使われ方に即した多様な照明計画 が注目されている。室内の照度を均一に保つ空間ではな く,使われ方によって多様な光環境・視環境を実現した 空間設計が求められるようになった。2016年には日本建 築学会で新たな照明環境規準<sup>1)</sup>が,2017年には照明学会 においてオフィス照明設計技術指針<sup>2)</sup>が発行され,照度 だけでなく輝度による照明設計法と設計基準が示された。 今後,多様な光環境設計を適切に検討・評価するために は輝度予測シミュレーション技術が必要になると考える。

従来の光環境予測シミュレーションでは,反射面は全 て均等拡散面として仮定されることが多い。実在の表面 は均等拡散反射性状と正反射性状との中間の反射指向特 性をもつことの方が多く,仮定とは異なるのが現状であ る。対象点への入射光に着目する照度の分布に比べ,対 象点での反射光に大きく左右される輝度分布には,反射 指向特性の影響が顕著に現れる。そのため,輝度予測シ 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 一層求められ,シミュレーションに組み込むための反射 指向特性データを得る必要がある。

建材の反射指向特性の詳細は、反射光を表皮反射成分 と層内反射成分に分け、各成分について入射角、入射方 位角、反射角、反射方位角の組合せと反射率との関係を 測定すれば取得可能であり, 照明計算に利用するための 数式モデルも提案されている。偏光を用いて反射光を表 皮反射成分と層内反射成分に分離測定した報告3)-6)、数式 モデル化を行った報告7)-9)がある。これらの測定では,偏 光条件を変化させて,同一角度条件に対して5回の測定を 行う必要があるため、測定負荷が大きい。そのため、反 射性状の数式モデルを利用し、なるべく簡易な測定によ って得られる情報を用いて反射指向特性の数式モデルの 特徴量を同定する手法で、シミュレーションに組み込む 反射指向特性データを得ることを考えた。本報ではまず, 市販計測器によって近年手軽に計測可能となった試料の 物性値を活用する方法を試みる。この方法の有効性を確 認するために、偏光を用いた測定手法によって得た詳細 な反射指向特性データと,市販計測器で得られた建材の 光沢度,表面粗さ,分光拡散反射率といった物性値とを 比較し,それらの関係を導くことで,反射指向特性の簡 易予測法を提案した。

次に、本手法によって把握した反射指向特性データを 入力値として、松浦・上谷の光束伝達相互反射式<sup>7)-9)</sup>を用 いた反射指向性のある面の相互反射を考慮できるシミュ レーションの開発を行った。計算結果を同条件下での模 型実験結果と比較することにより、本シミュレーション によって反射指向性を有する面の輝度分布の傾向を再現 できることを示した。

## 2. 市販計測器による試料の物性値

近年一般的に内装材や外装材としてよく使用される建築材料として、樹脂コーティングされた床シートや壁シート,花崗岩、樹脂焼付塗料金属板の計17種類の試料を 選定した。市販の計測器を用いて物性値の測定を行った 結果をTable1に示す。視感反射率Yとxy色度座標は分光測 色計によるD65光源での計測値、光沢度は光沢度計によ る計測値、表面粗さRaは表面粗さ計による計測値である。

No.8~11に示す表面の仕上げ粗さの異なる花崗岩については、天然素材であるため試料によって色味の違いがみられ、*Yxy*値の違いへ影響を与えていると考える。

### 3. 偏光を用いた反射指向特性の詳細測定

#### 3.1 測定概要

反射の指向特性は,前田により定義された反射特性関数<sup>10</sup>ρ[1/sr]を用いて以下の式<sup>11)</sup>で表される。

$$\rho(\theta_i, \varphi_i; \theta_o, \varphi_o) = \frac{L(\theta_i, \varphi_i; \theta_o, \varphi_o) \cdot \cos \theta_o}{E(\theta_i, \varphi_i)}$$
(1)

非金属面の反射は表皮反射と層内反射に分離して捉え られる<sup>12)</sup>。表皮反射は入射光と同じ平面偏光性を持ち, 層内反射は偏光性が無くなる性質を利用し,偏光を用い て反射指向特性を計測した。本計測は松浦・上谷による 測定方法<sup>6,7,9</sup>に準拠した。本測定では,金属製の建材も 用いたが,これらは全て表面に樹脂塗装がされているた め,非金属面とした。

#### 3.2 測定装置

Fig.1に測定状況の概要図を示す。測定は暗室にて行った。光源にはキセノンランプを用い、内部には光源の出力の変動補正用に照度計を設置した。光源の相対分光分布をFig.2に示す。本光源の偏光度Pを(2)式より算出した結果、約0.021であったため、入射光はほぼ非偏光とみなした。入射光の偏光成分は偏光角度10°ごとに測定した。

Table 1	試料の物性値(No.1~17)	
---------	-----------------	--

Material Properties of the Samples (No.1 $\sim$ 17)

	<u>^</u>			_				
		- 26 26 26		光	Ra			
No.	試料の種類	Y	x	y~	20°	60°	85°	[µm]
1	複層塩ビ床シート(白)	85.6	0.315	0.336	3.46	21.4	38.5	0.642
2	複層塩ビ床シート(灰)	45.1	0.314	0.334	2.85	20.7	40.8	0.719
3	粘着剤付き化粧塩ビフィルム(艶なし白)	86.3	0.316	0.333	1.36	3.97	3.78	3.25
4	粘着剤付き化粧塩ビフィルム(艶あり白)	84.5	0.317	0.335	2.69	17.0	56.3	0.364
5	粘着剤付き化粧塩ビフィルム(高光沢白)	83.8	0.314	0.334	83.1	96.2	98.3	0.049
6	粘着剤付き化粧塩ビフィルム(艶あり黒)	4.39	0.302	0.319	1.27	13.7	56.4	0.431
7	粘着剤付き化粧塩ビフィルム(高光沢黒)	6.88	0.291	0.318	84.4	94.6	97.7	0.044
8	花崗岩 (本磨き)	18.4	0.313	0.332	83.8	91.7	96.0	0.341
9	花崗岩(水磨き)	16.9	0.309	0.330	0.474	3.54	25.5	1.11
10	花崗岩(レザー仕上げ)	13.9	0.312	0.333	1.67	9.79	25.3	0.865
11	花崗岩(ジェット&ポリッシュ仕上げ)	27.0	0.314	0.333	0.469	2.21	0.754	9.38
12	ガルバリウム鋼板フッ素系樹脂塗装 (黒)	3.43	0.308	0.326	2.70	24.3	69.6	0.320
13	ガルバリウム鋼板フッ素系樹脂塗装 (銀)	11.3	0.315	0.332	2.34	16.4	34.0	0.720
14	ガルバリウム鋼板ポリエステル系樹脂 塗装(艶消し黒)	5.75	0.304	0.321	0.417	5.17	10.5	2.24
15	ガルバリウム鋼板ウレタン系樹脂塗装 (黒)	5.78	0.321	0.337	1.39	12.8	16.6	1.99
16	アルミ板ポリエステル系樹脂塗装 (白)	79.5	0.314	0.334	93.1	97.8	99.3	0.035
17	アルミ板フッ素系樹脂塗装(白)	80.4	0.312	0.332	7.02	34.2	73.3	0.220

※ D65, SCE (正反射光除去)







Measurement Conditions of the Diffuse Reflectance Standard

入射角 θ <sub>i</sub> [deg]	入射方位角 $\varphi_i$ [deg]	反射角 θ <sub>0</sub> [deg]	反射方位角 $\varphi_o$ [deg]
45	0	0	180
60	0	0	180

Table 3 測定角度条件

Measurement	Conditions
measurement	Conditions

入射角 <i>θ<sub>i</sub></i> [deg]	入射方位角 $\varphi_i$ [deg]	反射角 <i>θ<sub>o</sub></i> [deg]	反射方位角 <i>φ。</i> [deg]
45	0	-60, -20, 0, 20, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 70	180
60	0	-75, -35, 0, 35, 50, 55, 60, 65, 70	180

 $P = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}$ 

*I<sub>max</sub>*:入射光の各偏光成分の最大値 [cd/m<sup>2</sup>]

*I<sub>min</sub>*:入射光の各偏光成分の最小値 [cd/m<sup>2</sup>]
 試料からの反射光は測定角1°の輝度計で測定した。本
 測定では方位依存性の少ない建材を用いたため、方位角
 は固定(φ<sub>i</sub>=0, φ<sub>o</sub>=π)とした。

### 3.3 試料面照度の測定

(1)式の試料面照度E(θ<sub>i</sub>, φ<sub>i</sub>)は,標準白色板からの反射光 輝度L<sub>ds</sub>(θ<sub>i</sub>, φ<sub>i</sub>; θ<sub>o</sub>, φ<sub>o</sub>) [cd/m<sup>2</sup>]を測定し,次式より求めた。

$$E(\theta_i, \varphi_i) = \frac{\pi L_{ds}(\theta_i, \varphi_i; \theta_o, \varphi_o)}{r_{ds}}$$
(3)

r<sub>ds</sub>:標準白色板の反射率 [-](標準白色板は均等拡散 面であると仮定し, r<sub>ds</sub> = 0.99とする。)

Fig. 3に使用した標準白色板の可視光域の分光反射率 を示す。測定角度条件をTable 2に示す。

#### 3.4 試料面輝度の測定

入射側, 反射側の偏光フィルターを取り外した状態で, 各角度条件の反射光輝度L(θi, φi; θo, φo)を測定した。続い て, 偏光フィルターを入射側, 反射側にそれぞれ取付け, 同角度条件における反射光の各偏光成分の強さIpp, Ips, Isp, Issを測定する。そして, 次式より反射特性関数の表皮 反射成分pMと層内反射成分pDを推定した<sup>6,7),9)</sup>。測定した 角度条件をTable 3に示す。

$$M = M_p + M_s = I_{pp} - I_{ps} - I_{sp} + I_{ss}$$
(4)  
$$D = D_p + D_s = 2I_{ps} + 2I_{sp}$$
(5)

$$\rho_{M} = \frac{\rho \cdot M}{\rho_{M}} \tag{6}$$

$$M + D$$

$$\rho_D = \frac{\rho \cdot D}{M + D} \tag{7}$$

- M:反射光の表皮反射成分 [1/sr]
- M<sub>p</sub>, M<sub>s</sub>:表皮反射光のp偏光成分, s偏光成分 [1/sr]
- *I<sub>pp</sub>*, *I<sub>ps</sub>*: p偏光の入射光に対する反射光のp偏光成分, s偏光成分 [1/sr]
- *I<sub>sp</sub>*, *I<sub>ss</sub>*: s偏光の入射光に対する反射光のp偏光成分, s偏光成分 [1/sr]
- D:反射光の層内反射成分 [1/sr]

D<sub>p</sub>, D<sub>s</sub>: 層内反射光のp偏光成分, s偏光成分 [1/sr]

### 4. 数式モデルを使った特徴量の同定

実測値から反射指向測定の数式モデル化を行った。(8) ~(12)式で表される上谷-松浦のモデル<sup>7)-9)</sup>を用いた。

$$\rho(\theta_i, \varphi_i; \theta_o, \varphi_o) = \rho_D + \rho_M \tag{8}$$

$$\rho_D = \frac{R_D \cos \theta_o}{\pi} \tag{9}$$

$$\rho_M = \frac{K(\theta_i)m(\theta_i, \theta_o)p_f(\theta_f, \varphi_f)R(\psi_f)}{4\cos\theta_f\cos\theta_i}$$
(10)

Table 4 屈折率n, 係数K, 層内反射率R<sub>D</sub>の同定値 n, K and R<sub>D</sub> of the Samples

		n [-]	K	[-]	$R_L$	· [-]
No.	試料の種類		$\theta_i = 45^{\circ}$	$\theta_i = 60^{\circ}$	$\theta_i = 45^{\circ}$	$\theta_i = 60^{\circ}$
1	複層塩ビ床シート(白)	1.54	4.69	5.25	0.81	0.82
2	複層塩ビ床シート(灰)	1.54	5.27	5.19	0.42	0.32
3	粘着剤付き化粧塩ビフィルム(艶なし白)	1.54	2.07	1.36	0.80	0.82
4	粘着剤付き化粧塩ビフィルム(艶あり白)	1.54	7.09	5.56	0.71	0.76
5	粘着剤付き化粧塩ビフィルム(高光沢白)	-	-	_	0.80	0.83
6	粘着剤付き化粧塩ビフィルム(艶あり黒)	1.54	4.66	4.36	0.01	0.01
7	粘着剤付き化粧塩ビフィルム(高光沢黒)				0.06	0.09
8	花崗岩(本磨き)	-	-	-	0.11	0.12
9	花崗岩(水磨き)	1.54	1.28	0.98	0.15	0.16
10	花崗岩(レザー仕上げ)	1.54	2.21	2.33	0.14	0.15
11	花崗岩(ジェット&ポリッシュ仕上げ)	1.54	1.15	0.71	0.27	0.29
12	ガルバリウム鋼板フッ素系樹脂塗装 (黒)	1.35	9.89	9.80	0.01	0.01
13	ガルバリウム鋼板フッ素系樹脂塗装 (銀)	1.35	10.7	7.63	0.01	0.01
14	ガルバリウム鋼板ポリエステル系樹脂 塗装(艶消し黒)	1.60	2.10	2.08	0.01	0.01
15	ガルバリウム鋼板ウレタン系樹脂塗装 (黒)	1.49	4.71	4.28	0.02	0.02
16	アルミ板ポリエステル系樹脂塗装 (白)	1.60	13.1	_	0.73	0.77
17	アルミ板フッ素系樹脂塗装(白)	1.35	10.0	10.3	0.72	0.75

 $\rho_D: 反射特性関数\rhoの層内反射成分 [1/sr]$   $\rho_M: 反射特性関数\rhoの表皮反射成分 [1/sr]$   $R_D: 層内反射率 [-]$   $K(\theta_i): 係数 [-]$   $m(\theta_i, \theta_o): マスキング現象を表す遮蔽係数 [-]$   $p_f(\theta_f, \varphi_f): 小素面の分布関数 [1/sr]$   $\theta_f: 小素面の傾斜角 [rad]$   $R(\psi_f): フレネル法則に従う小素面の正反射率 [-]$   $\psi_f: 小素面への入射角$ (9)式中の層内反射率 $R_D$ は(11)式より推定する。  $R_D = \pi \cdot \overline{\rho_D}(0)$ (11)  $\overline{\rho_D}(0): \rho_D$ の法線方向( $\theta_o = 0$ )の測定値の入射角 $\theta_i$  による平均値 [1/sr]

による十岁値 [I/SI] (今回は $\theta_i = 45^\circ$ , 60° での平均値を用いた)

(10)式中のフレネル法則に従う小素面の正反射率 R(ψ)は屈折率nと小粗面への入射角ψから推定できる。

(10)式中の $K(\theta_i)$ は $\rho_M$ の実測値を用いて(12)式より推定 する。

$$K(\theta_i) = \frac{1}{0.5} \int_0^{\pi/2} \rho_M \left( \theta_{i,} \varphi_i; \theta_o, \varphi_o \right) \frac{4 \cos \theta_f \cos \theta_i}{m(\theta_i, \theta_o) R(\psi_f)} d\theta_f$$
(12)

(10)式中の小素面の分布関数 $p_f(\theta_f, \varphi_f)$ は平均面の法線 に関して対称で、傾斜角 $\theta_f$ を確率変数とする正規分布で あると仮定して、 $p_f(\theta_f, \varphi_f) = p_f(\theta_f)$ を次式で推定する。

$$p_f(\theta_f) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_f(\theta_i)} exp\left[-\theta_f^2/2\{\sigma_f(\theta_i)\}^2\right]$$
(13)

$$\sigma_f(\theta_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot p_f(0)} \tag{14}$$

 $\sigma_f(\theta_i):$ 傾斜角 $\theta_f$ の標準偏差 [rad]

同定した表皮反射成分の係数Kと層内反射率 $R_D$ を Table 4に示す。屈折率nは樹脂の種類に応じて表中nの値 と仮定した。なお、試料No. 5, 7, 8, 16については、光 沢度が大きく正反射方向の輝度値が計測不可となったた め、表皮反射成分 $p_M$ のモデル化を行っていない。







Fig. 6 光沢度と層内 反射率R<sub>D</sub> Relationship between Glossiness and R<sub>D</sub>

#### 詳細測定結果とモデル式

Relationship between

Glossiness and K

反射指向特性の詳細測定結果とモデル式による推定値 を比較した。結果の一部をFig. 4に示す。プロットが実測 値,曲線がモデル式を表す。図中の原点に接する円は, 完全均等拡散面での反射特性関数pである。

Fig. 4におけるa)とb), c)とd)は同一建材に対して入射 光の入射角度を変化させた結果である。入射角が大きい ほど表皮反射成分が大きくなったが,層内反射成分はほ ぼ同じ特性を示した。一方,a)に示すNo. 1とc)に示すNo. 2は同じ種類で色の異なるビニル床シートの結果である。 色の違いが特に層内反射成分の特性の違いに現われ,視 感反射率Yの大きい白色のNo. 1の方が大きくなったが, 表皮反射成分はほぼ同じ特性を示した。e)に示すNo. 3と f)に示すNo. 4はYが近くどちらも白色だが,光沢度が異 なる塩ビシートの結果である。光沢度の大きいNo. 4の方 が表皮反射成分が大きくなったが,層内反射成分は近い 性状となった。e), f)に示す塩ビシートの結果では,層内 反射成分は均等拡散性状に近い性状となった。g)は黒色 の塩ビシートの結果である。層内反射成分はほぼ0となり, 表皮反射成分のみとなった。h)~j)は同じ種類で表面の仕 上げ粗さが異なるグレー系花崗岩の結果である。特に表 皮反射の特性に違いが現われた。層内反射成分について は均等拡散性状に近い性状となった。

層内反射率RD

Relationship between Ra and RD

正反射方向の輝度値を計測できた試料は全て数式モデ ルによって実測値をおよそ近似できた。

# 6. 数式モデルの特徴量と市販計測値による物性 値との比較

2章において市販計測器を用いて測定した物性値と,4 章において同定した数式モデルの特徴量とを比較し,そ れらの関連性を考察する。

#### 6.1 光沢度と表面粗さ

Relationship between

Ra and K

Fig. 5に60°光沢度と表皮反射成分の大きさの特徴量で ある係数K(60°)の関係を示す。両者には相関がみられ,光 沢度が大きいほどKは大きい傾向になった。一方, Fig. 6 に示すように, 60°光沢度と層内反射成分の大きさの特徴 量であるRo(60°)との相関はみられなかった。次に, Fig. 7 に表面粗さRaと表皮反射成分の係数K(45°, 60°)の関係を, Fig. 8に表面粗さRaと層内反射率Ro(45°, 60°)の関係を示 す。Raが小さいほどKは大きい傾向があるが, 相関は低 い。RaとRDの相関はみられなかった。

以上より,光沢度が大きいほど,表面粗さRaが小さい ほど,表皮反射成分が大きい傾向があった。しかし,光 沢度もしくはRaの単独の値だけでは係数Kを決定可能な 強い相関性は見られず,光沢度やRaを組み合わせたモデ ル式が必要と考えられる。

### 6.2 分光拡散反射率

- . .

前章の考察において視感反射率Yが大きいほど層内反 射成分が大きくなる関係が見られたため,層内反射率R<sub>D</sub> と拡散反射率との関係性を確認する。

2章で使用した分光測色計による測定から得られた分 光拡散反射率(SCE方式:光トラップを設けて正反射光を 除去して測定する方式)を用いて, (15)式より拡散反射 率*R*<sub>d</sub>を算出した。分光測色計の測定可能範囲に合わせて 可視光域は360~740 nmとした。

$$R_{d} = \frac{\int_{360}^{740} E_{xenon}(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot V(\lambda) \, d\lambda}{\int_{360}^{740} E_{xenon}(\lambda) \cdot V(\lambda) \, d\lambda}$$
(15)

*E<sub>xenon</sub>*(λ):光源キセノンランプの分光放射照度 [W/(m<sup>2</sup>・nm)]

R(λ):建材毎の分光拡散反射率 [-]

V(λ):明所視の分光視感効率 [-]

拡散反射率*R*<sub>d</sub>と層内反射率*R*<sub>D</sub>との相関をFig. 9に示す。 R<sup>2</sup>=0.9868となり,強い相関が見られた。

### 7. 反射指向特性の簡易予測法の提案

前章において,拡散反射率 $R_d$ が層内反射率 $R_D$ と強い相 関が得られ,線形近似式の傾きが0.923とおよそ1に近い 数値を示したことから,(15)式から得られた $R_d$ の値を層 内反射率 $R_D$ として用いることを考える。得られた $R_D$ と (9)式より層内反射成分 $\rho_D$ を推定し,(8)式の関係から偏光 を用いずに測定した反射特性関数 $\rho$ の測定値から推定値  $\rho_D$ を減じて表皮反射成分 $\rho_M$ を推定した。この推定値に基 づいて上谷一松浦モデルの表皮反射成分 $\rho_M$ を示す(10) 式中の $K(\theta_i)$ ,(13)式中の $\sigma(\theta_i)$ を同定し,反射特性値の簡易 予測式を得た(以下,簡易予測法モデル化値)。そして,偏 光を用いた測定(以下,詳細計測)によるモデル化値と実 測値の相関と,簡易予測法モデル化値と実測値の相関を Fig.10に比較した。簡易予測法モデル化値と詳細計測で のモデル化値はともに実測値に対して一部乖離が見られ たが,両モデル化値は同等の精度が得られた。

詳細計測では、偏光フィルターの設置状況を変えて5パタ ーンの条件で測定を行う必要があったが、本簡易予測法 では偏光を用いない測定のみを行えばよいため、偏光条 件を変える必要がなくなり、作業工数が1/5となる。

### 8. 反射指向特性を考慮したシミュレーション

前章で得た反射指向特性データを入力値として、光束



Table 5 模型内部の反射指向特性条件

Directional Reflection C	Characteristics	inside	the	Model
--------------------------	-----------------	--------	-----	-------

	屈折率 <i>n</i> [-]	係数 K [-]	傾斜角の 標準偏差 <i>o</i> f [rad]	層内反射率 <i>R</i> <sub>D</sub> [-]
Model 1	1.54	0	0	0.864
Model 2	1.54	4.813	0.076	0.846

伝達法を用いた反射指向性を考慮できる輝度シミュレー ションを開発した。同条件下での模型実験結果と再現計 算結果とを比較することで,本シミュレーションの検証 を行った。

#### 8.1 模型実験

 8.1.1 模型概要 Fig. 11の形状の模型を作製した。
 内寸はD60×W60×H30 cmとし,窓を模した長方形の開口を側面にひとつ設けた。模型内部の内装は拡散性の高い 白(Model 1)(Table 1 No. 3)と艶のある白(Model 2)(Table 1 No. 4)の2種類を比較した。それぞれの素材の反射指向特 性については前章で提案した簡易予測法により推定した (Table 5)。

8.1.2 測定概要 光源には疑似点光源としてスポットライトを用い,2次元色彩輝度計によって模型内の輝度 分布を計測した。測定は暗室にて行った。Fig. 12にスポットライトと輝度計の配置を平面図で示す。スポットラ イトは高さ15 cmの位置に、2次元色彩輝度計は高さ11 cm の位置に設置した。

### 8.2 光束伝達法を用いた再現計算

8.2.1 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. 13に示すように1152個の三 角形要素に分割した。反射指向特性の入力条件は,前項 Table 5に示した値を使用した。開口部については,反射 率を0とした。

8.2.2 計算式 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4<sup>1-6</sup>に従って,模型実験の再現計算を行った。Model1については均等拡散面と仮定して(16),(17)式を用い, Model2については指向性のある反射面を考慮できる(18),(19)式を用いた。分割面要素間の相互反射を重心位置でのやりとりに代表させ,(19)式は形態係数を用いて(20)式に展開した。

$$\Phi_{irI} = \Phi_{ir1I} + \sum_{J=1}^{N} R_J f_{JI} \Phi_{irJ}$$
(16)
$$\Phi_{ir1I} = \sum_{J=1}^{N} R_J f_{JI} A_J E_{dJ}$$
(17)

$$E_{dJ}$$
: 分割面 $S_J$ の直接照度 [lx]  
 $\Phi_{rIK} = \Phi_{r1IK} + \sum_{J=1}^{N} F_{JIK} \Phi_{rJI}$  (18)

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

$$\times \pi e_o(x, x") \mathrm{d}S_x \mathrm{d}S_x \mathrm{d}S_{x"} \tag{19}$$

$$F_{JIK} = \frac{iAK_{KJKI} + p(X_J, X_I, X_K)}{A_I \cos\theta_o(X_I, X_K)}$$
(20)

- **Φ**<sub>rIK</sub>: 分割面Siを発散して分割面Sikに入射する

   間接光束 [lm]
- **Φ**<sub>r1IK</sub>: 分割面Siを発散して分割面Sikに入射する

   第一回反射光束 [lm]
- F<sub>JIK</sub>:分割面S<sub>J</sub>を発散して分割面S<sub>J</sub>に直接入射する光 束のうち分割面S<sub>J</sub>で反射して分割面S<sub>K</sub>に直接 入射する光束の比率 [-]

**x'**, **x**, **x**": 分割面*S*<sub>J</sub>, *S*<sub>L</sub>, *S*<sub>K</sub>内の点

- ρ(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]
- θ<sub>o</sub>(x,x"): xに立てた法線とx, x"を結ぶ線のなす角 [rad]
- *e*<sub>o</sub>(x', x): x'よりxへの固有照度係数 [1/m<sup>2</sup>]
- $x_I, x_I, x_K: 分割面S_J, S_I, S_Kの重心$

固有照度係数 $e_o(x',x)$ とは、x'点まわりの微小面積を dS(x')とすれば、点x'の光束発散度が1のとき、他の点xに 生ずる直接照度を $e_o(x',x) \cdot dS(x')$ とおいたときのdS(x')の 係数である<sup>13)</sup>。



Fig. 13 計算モデルの分割要素 Split Elements of the Calculation Model







光源は点光源として、 $\Phi_{rllK}$ は(21)式より算出した。

$$\Phi_{r1IK} = \sum_{J=1}^{N} \frac{F_{JIK} \pi f_{IJ} A_I I_{dJI}}{A_J \cos \theta_o(x_J, x_I)}$$
(21)

*I<sub>d11</sub>*:光源面*S*」から分割面*S*<sub>1</sub>への光度 [cd]

指向性のある反射面を解くModel 2については, 隅部に おいて分割面同士の距離が近くなることで誤差が大きく なったため, *F*<sub>JIK</sub>を算出する際に再分割をする工夫を行 った。再分割の際はFig. 14のような分割方法をとること で, 再分割後の面の形状にばらつきが出ないようにした。 再分割を行う条件は, 分割面の一辺の長さの5倍以下の距 離にある分割面同士とし, 分割前後の*F*<sub>JIK</sub>の差が10<sup>-2</sup>以下 となるまで分割を繰り返し, 最大で一辺4分割(16要素に 分割)までとした。

### 8.3 実験結果と再現計算結果の比較

Table 6に実験結果と再現計算の結果を比較する。実験 結果において,拡散性の高い反射面を有するModel1と比 較して,艶のある反射面を有するModel2は左端に輝度が 高い箇所が現れた。指向性のある反射面においては,正 反射方向の反射強度が大きくなる傾向にあり,本測定で は左端の箇所が入射角と反射角が同程度になり正反射に 近い角度条件となったためと考える。再現計算において も左端が明るくなる分布を再現することができた。一方 で、輝度の絶対値においては計算精度の課題が残る。反 射指向特性の測定値や隅部の計算精度の誤差、数式モデ ルの再現性等が要因として考えられる。計算に用いた反 射特性関数µの数式モデルは、表皮反射成分の正反射方向 のピーク値に関連する係数Kを、入射角45°、60°での同定 値を平均して定数としたが、実際にはKの値は入射角に 依存すると考えられる。

# 9. まとめ

本論文では、反射指向特性を考慮できる輝度シミュレ ーションの構築を目的として、シミュレーションに組み 込むための反射指向特性の簡易測定による予測法を提案 し、反射指向性のある面の相互反射を考慮した光束伝達 法による輝度シミュレーション技術の開発を行った。以 下に得られた知見をまとめる。

- 仕上げの異なる建材について、偏光を利用して反 射指向特性を層内・表皮反射成分に分けて計測し、 以下の傾向を確認した。a)入射角が大きくなるほ ど表皮反射成分が大きくなりやすい、b)色の違い は層内反射成分との関連がある、c)表面仕上げの 違いは表皮反射成分との関連がある。
- 上谷-松浦モデルを用いて反射特性関数pのモデ ル化を行い、実測値をおよそ近似できることを示 した。
- 3) 市販の計測器を用いた光沢度,表面粗さRa,分光 拡散反射率と,数式モデルによる表皮・層内反射 成分の特徴量の同定値を比較し,以下を示した。

   a)光沢度は高く,表面粗さRaは小さいほど,表皮
   反射成分が大きい傾向がみられるが,表面粗さRa
   と表皮反射成分の大きさの相関は低い。b)分光拡 散反射率から算出した測定用光源に対する拡散反
   射率と層内反射率Roには強い相関がみられる。
- 4) 拡散反射率から層内反射特性を推定する簡易予測 法を提案した。本方式は、偏光を利用した方式に 対して同等の精度が得られるうえ、測定工数を1/5 に削減できることを示した。
- 5) 反射指向特性の異なる模型を用いて、疑似点光源 を用いた輝度分布の測定実験を行った。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 が異なることを確認した。
- 6) 光東伝達相互反射式を用いて、反射指向特性を考慮した模型実験の再現計算を行った。分割方法を

工夫した計算により,模型実験での指向性のある反 射面の輝度分布の傾向を再現できることを示した。 一方で,輝度の絶対値の計算精度の向上については 今後の課題である。

# 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

- 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,2016
- 2) 照明学会:オフィス照明設計技術指針 JIEG-008(2017), 2017
- 田中俊一: 偏光による紙の反射特性の測定, 応用物 理, 第25巻, 第5号, pp. 207-213, 1956
- 田中俊一: 偏光による紙の反射特性の測定(II), 応用 物理, 第27巻, 第10号, pp. 600-604, 1958
- 5) 田中俊一: 非金属拡散面の反射特性, 応用物理, 第28 巻, 第9号, pp. 508-514, 1959
- 6) 松浦邦男,上谷芳昭:建築材料の偏光を用いた反射指 向特性の測定,日本建築学会計画系論文報告集,第 388 号, pp. 15-22, 1988
- Uetani, Y. and Matsuura, K.: A Method of Luminance Calculation in an Anisotropic Diffuse Reflecting Interior, Journal of the Illuminating Engineering Society, Vol. 22, No. 2, pp. 166-175, 1993
- 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
- 9) 上谷芳昭:照明計算における完全拡散でない面内の 相互反射の研究,京都大学博士論文,1990
- 前田敏男:光および熱輻射問題へのDirac's Delta Function の利用,日本建築学会論文報告集号外, p. 408,1966
- 11) 松浦邦男:正反射成分を含む反射特性関数を用いた 不完全拡散面相互反射式,日本建築学会近畿支部研 究報告集, pp. 33-36, 1968
- 12) 蓮沼宏:光沢, コロナ社, p. 47, 1960
- 13) 渡辺要:建築計画原論 I, 丸善株式会社, pp. 277-278, 1965