

建材の反射指向特性の簡易推定法  
および室内輝度分布の予測計算手法

矢部周子

# 目次

## 第 1 章 序論

1-1. 本研究の背景	1
1-1-1. 室内の光環境設計での輝度分布予測計算の重要性	
1-1-2. 室内の光環境における分光特性の重要性	
1-2. 既往研究と本研究の位置づけ	3
1-2-1. 輝度分布予測計算に必要なデータ	
1-2-2. 反射指向特性の数式モデル	
1-2-3. 反射指向特性の測定	
1-2-4. 実務的な光環境 3D シミュレーションのための汎用ソフトウェアにおける 計算手法	
1-2-5. 光束伝達法に基づく反射指向特性を考慮した計算手法	
1-3. 実務上の適用先	8
1-4. 本研究の目的	9
1-5. 本論文の構成	11

## 第 2 章 建材の反射指向特性の詳細測定とモデル化

2-1. はじめに	19
2-2. 反射特性関数の定義	20
2-3. 偏光を用いた反射指向特性の詳細測定	21
2-3-1. 測定装置	
2-3-2. 光源の偏光度の測定	
2-3-3. 試料面照度の測定	
2-3-4. 試料面輝度の測定	
2-3-5. 偏光による層内反射と表皮反射の分離	
2-4. 既往の反射指向特性の数式モデル	27
2-5. 測定対象試料	30
2-5-1. 試料概要	
2-5-2. 試料の物性値の測定	
2-6. 数式モデルのパラメータ推定	34
2-7. 詳細測定結果とモデル式	36
2-8. まとめ	40

## 第 3 章 建材の反射指向特性の簡易推定法

3-1. はじめに	43
-----------	----

3-2. 表皮・層内反射成分の特徴量と市販計測器による物性値との比較	44
3-2-1. 光沢度と表面粗さ	
3-2-2. 分光拡散反射率	
3-3. 反射指向特性の簡易推定法の提案	47
3-4. 入射角度の測定条件の検討	48
3-4-1. 簡易推定法による測定概要	
3-4-2. 測定結果とモデル式	
3-4-3. 表皮反射成分のパラメータ推定のための入射角度条件	
3-5. 凹凸の大きい建材の反射指向特性	58
3-5-1. 試料および測定概要	
3-5-2. 簡易推定法による数式モデルのパラメータ推定	
3-5-3. 測定結果とモデル式	
3-6. 可搬測定器を用いた現地測定による反射指向特性の推定	63
3-6-1. 推定手法	
3-6-2. 推定のための係数	
3-6-3. 線粗さ、光沢度、拡散反射率の現地測定	
3-6-4. 反射指向特性の推定	
3-7. まとめ	81

#### 第4章 建材の分光反射指向特性の簡易推定法

4-1. はじめに	85
4-2. 分光反射特性関数の定義	86
4-3. 偏光を用いた分光反射指向特性の詳細測定	87
4-3-1. 測定装置	
4-3-2. 試料面照度の測定	
4-3-3. 試料面輝度の測定	
4-4. 測定対象試料	90
4-4-1. 試料概要	
4-4-2. 試料の物性値の測定	
4-5. 分光反射指向特性の簡易推定法	92
4-6. まとめ	104

#### 第5章 反射指向特性を考慮した室内輝度分布の計算手法と模型実験による検証

5-1. はじめに	107
5-2. 反射指向特性を考慮した光束伝達相互反射式に基づく計算手法	108
5-2-1. 基本の計算式	
5-2-2. 立体角投射率 $f_{ij}$ の算出	

5-2-3.	再分割による $F_{JK}$ の高精度化	
5-2-4.	$F_{JK}$ の補正	
5-3.	反射指向特性を考慮した計算手法の模型実験による検証	114
5-3-1.	模型実験	
5-3-2.	模型内の輝度分布および照度分布の計算条件	
5-3-3.	測定と計算の比較	
5-4.	まとめ	132
<b>第 6 章</b>	<b>実在空間での室内輝度分布の予測計算</b>	
6-1.	はじめに	135
6-2.	見えがかりを考慮した立体角投射率の算出手法	136
6-3.	長い廊下空間での予測	139
6-3-1.	建物概要	
6-3-2.	計算条件	
6-3-3.	測定概要	
6-3-4.	測定輝度分布と計算輝度分布の比較	
6-4.	凹凸のある空間での予測	148
6-4-1.	建物概要	
6-4-2.	計算条件	
6-4-3.	測定概要	
6-4-4.	測定輝度分布と計算輝度分布の比較	
6-5.	まとめ	153
<b>第 7 章</b>	<b>総括</b>	<b>155</b>
発表論文一覧		159
謝辞		161

# 第1章 序論

## 1-1. 本研究の背景

### 1-1-1. 室内の光環境設計での輝度分布予測計算の重要性

地球環境問題の観点から、省エネルギー化対策は社会的要請であるが、日本では2011年の東日本大震災に伴う電力不足において、照明の省エネルギー化が重要な要件であることが再認識された。震災後の電力需要の逼迫により、日本では様々な節電対策がなされ、オフィスでは特に照明に関する節電手法は取り組みやすく、効果が大きいとされた<sup>1)3)</sup>。しかし、過度な消灯は快適性や生産性の低下につながり、長くは受け入れられない。そのため、省エネルギー性とともな快適性や健康に配慮した適切な室内光環境の創造が重要視される。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、それらを実現するための物理指標としては空間内の各点から目に届く光の輝度分布が重要である<sup>4)</sup>。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。Y. Suk<sup>ら</sup><sup>5)</sup>は窓に平行な視線方向での視覚的快適性のための輝度と輝度コントラストの閾値を定義している。D. Vries<sup>ら</sup><sup>6)</sup>は机上面照度が同程度であっても壁面の輝度が高いほどオフィスの知的労働者の部屋の評価が高まることを報告している。S. Chraibi<sup>ら</sup><sup>7)</sup>は同じ平均輝度 $200\text{cd/m}^2$ の壁であっても不均一な輝度分布の壁の方がデスクライトの好みの照度が低く抑えられたことを報告している。W. Kruisselbrink<sup>ら</sup><sup>8)</sup>は執務者の視野に対応する輝度分布測定に適した天井での測定位置を示し、照明システムに組み込むための実用的な輝度分布の長期測定において、天井位置での測定を提案している。小島<sup>ら</sup><sup>9)</sup>は輝度分布を利用した照明とブラインドの協調制御により、適切な空間の明るさを維持したまま省エネルギー性を達成する方法を示した。このように、輝度分布は快適な室内の光環境設計に深く関連しており、輝度分布を適切に設計することで、快適な光環境を実現できる。さらに、省エネルギー性を高められる可能性もある。そのため、室内の光環境設計において輝度分布の予測計算技術が重要である。

### 1-1-2. 室内の光環境における分光特性の重要性

人の知覚・心理効果である色の効果や雰囲気、光の生理的影響などを評価するための物理指標としては、光の分光特性が重要である。建築内部の色の見え方は、空間内の各点から目に届く光の分光特性により決定される。建築空間内の有彩色の内装での相互反射により、内部に置かれた物体色の見え方が変化することが示されている<sup>10)</sup>。光の色味を表す相関色温度や、光による物体の色の自然な見え方を評価する指標である演色性は、分光分布により算出される。分光相互反射計算により、昼光や人工照明の設計によって建築空間内の色の見え方がどのように変化するかを評価することができる<sup>11),12)</sup>。また、サーカディアンリズム(約24時間を周期とするリズム)は光を最大の同調因子としており、適切な光環境下によって人は体内リズムを整えることができる。分光特性により決定される光の明暗や色味は、サーカディアンリズム

や覚醒度などの生体の生理面に影響を与えるとともに、くつろぎ感や落ち着き感などの心理面にも作用する<sup>13)</sup>。例えば、催眠作用があるといわれるメラトニンの分泌は、光の明るさに影響をうける<sup>14)</sup>。光の色味によって覚醒度や気分が影響をうけ、色温度が高いほど覚醒度が高く<sup>15), 16)</sup>、低いほど気分が落ち着く<sup>13)</sup>という報告がある。よりよい睡眠をとるための照明の明るさと色味の制御に関しては多数報告がある<sup>例えば 17)~19)</sup>。体内リズムの調整、覚醒やリラックス、雰囲気をもっとよく設計していくためには、光の明暗だけでなく分光特性を考慮することが求められる。以上のことより、より高品質な光環境の予測計算技術として、分光特性の予測技術が求められると考える。

## 1-2. 既往研究と本研究の位置づけ

### 1-2-1. 輝度分布予測計算に必要なデータ

輝度分布の予測計算技術の重要性について 1-1 において述べたが、詳細な輝度分布予測計算を行うために必要な入力データとしては、建物の形状モデルの他に以下の3つが挙げられる。①天空輝度分布データ、②人工照明の配光特性データ、③内部の建材の反射特性のデータである。①は昼光計算を行う場合、②は人工照明を設置している場合にのみ必要である。

①については、天空輝度分布モデルを予測する研究が有用である。ISO/CIE (International Organization for Standardization/International Commission on Illumination) Standard (CIE 2003)の天空輝度分布のモデル<sup>20)</sup>が一般的によく使用されており、近年では、S. Janjai ら<sup>21)</sup>は衛星データを利用したモデリングについて報告している。また、M. Maskarenj ら<sup>22)</sup>は天空輝度分布の低コストな角度測定システムを開発し、CIE 天空と比較して検証を行った。これらの天空輝度分布モデルでは天頂輝度が必要となり、照度データが必要だが、多くの地域では直達日射量と拡散日射量全天日射データしか入手できない。その際には発光効率のモデル<sup>23)</sup>も有効である。

②については、各照明メーカーが照明器具の配光特性を示す ies ファイルを提示しており、依頼すれば取得できることが多い。これらのデータは照明器具から十分に離れている（一般的に器具サイズの5倍以上の距離と言われる）と仮定して、器具を点光源とみなした配光特性であり、光源に近づきすぎると ies ファイルの配光特性とは異なる特性を示すので注意が必要である。

③については、室内の詳細で正確な輝度分布を計算するためには、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の分布と比較して、対象点での反射光に大きく左右される輝度の分布には、反射指向特性の影響が直接的に現れる。そのため、輝度予測計算において反射指向特性を考慮することが求められ、建材の反射指向特性データが必要となる。

建材の反射指向特性の測定結果に関する研究としては、日射の分野では、牧野ら<sup>24)</sup>は金属の粗い表面のふく射に対する反射指向特性を測定した結果を、中大窪ら<sup>25)</sup>は多数の建材試料について日射の反射指向特性を測定した結果を示しているが、輝度計算において必要となる可視光域での特性については扱っていない。一方、可視光の分野では、田中<sup>26)-28)</sup>、松浦ら<sup>29)</sup>はすりガラス、紙、樹脂エナメルペイント試料、タイル、木材、石材等について反射指向特性を測定した結果を示しているが、近年一般的に使用される複層塩ビ床シートや化粧塩ビフィルム、樹脂焼付塗装金属板等の建材についての測定結果は示されていない。本研究においては、これらの建材の反射指向特性の測定結果を示すことで、輝度計算の適用対象を増やし、反射指向特性を考慮した輝度計算の実務利用に資することを目標とする。

光環境計算のさらなる高品質化としては、分光特性に関する詳細な計算が挙げられる。分光放射輝度分布計算により、色の見え方の予測や雰囲気、生理的な効果の検討が可能となる。吉

田ら<sup>11), 12)</sup>は昼光と人工照明を併用した建築空間において分光相互反射計算により分光放射照度分布を算出する方法を開発し、演色性評価を行っている。この計算手法を指向性を考慮できるように拡張することが考えられる。昼光や人工照明の指向性を考慮した分光計算を行う場合には①～③に対しても分光データが必要となる。①天空輝度分布データについては、CIE Technical Committeesにおいて天空放射輝度分布の整備<sup>30)</sup>が取り組まれている。また、天空の分光輝度分布の測定方法<sup>31)・34)</sup>や分光天空モデルを作成する方法論<sup>35)</sup>が報告されている。②人工照明のデータについては、配光特性と合わせて分光分布のデータが必要となる。これはメーカー値や分光計による計測により得られる。③内部の建材の反射特性のデータについては、一ノ瀬ら<sup>36)</sup>は多数の建材について分光反射特性を測定し、半球方向への積分により半球分光反射率を評価しているが、角度特性については扱っていない。そこで本研究においては、幾つかの有彩色の建材を選定し、分光反射指向特性の測定結果を示すことで分光計算に必要な入力データを提示し、分光計算のためのデータ整備とモデル化を試みた。

### 1-2-2. 反射指向特性の数式モデル

車や飛行機等の工業製品においては、その見えを正確に事前検討・計画し、仕様が決めれば大量生産を行うという特徴がある。そのため、精密な計測器を用いて、工業製品の表面に対して反射の角度分布を詳細に調べる二方向反射率の測定によって得られるような詳細な反射特性データ群を取得し、製品の見えの評価するための輝度分布の予測計算において、そのデータ群を直接用いるという検討が行われている。その一方で、建築物は基本的に一品生産であるため、物件ごとに建築形状や内装仕様が大きく異なるので、物件ごとに予測計算を行う必要がある。その度に、検討空間内の全ての建材に対して詳細な角度別の反射特性データ群を取得し、それを輝度予測計算に用いることは、費用面でも作業時間・解析負荷の面でも現実的ではない。そのため、詳細な反射特性データ群を網羅的に取得するのではなく、反射性状の数式モデルを利用し、反射指向特性の数式モデルのパラメータを比較的少数の二方向反射率の測定結果から同定する手法で、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が有効であると考えられる。

反射指向特性の数式モデルとしては、日射の分野では、牧野ら<sup>24)</sup>は金属の粗い表面のふく射に対する反射指向特性を鏡面反射成分と拡散反射成分に分離する一連のモデル式を提案している。これは、反射強度が最大となる方向を中心に正規分布関数を回転させた非等方的な分布モデルであるAND (Anisotropic Body of Rotation of Normal Distribution Function) モデルに基づき関数化している。一ノ瀬ら<sup>37)</sup>、中大窪ら<sup>25)</sup>、弓野ら<sup>38)</sup>は、牧野らの手法<sup>24)</sup>を用いて建材の日射反射指向特性の数式モデル化を行い、反射指向特性を考慮した放射伝熱計算を行っている。

蓮沼<sup>39)</sup>は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とし、表皮反射成分は境界面での反射であるため、その色は入射光の色とほぼ同じであり<sup>29)</sup>、光源の分光分布が保持される一方で、層内反射成分は内部層で選択吸収を受けるため材料特有の色を示し<sup>29)</sup>、材料の分光反射特性が反映されるとしている。これは二色性反射モデル<sup>40)</sup>と同等の考え方で



ある。この考え方に基づき、可視光の分野では、物理現象に基づく様々な反射指向特性の数式モデルが提案されている。層内反射成分に関しては、均等拡散性状であると仮定した Lambert モデル<sup>41)</sup>が用いられることが多く、本研究でも均等拡散性状を仮定する。他に、微小な小素面 (Microfacet) を仮定した Oren-Nayar モデル<sup>42)</sup>やフレネルの影響を加味した Burler<sup>43)</sup>の Disney モデル等が提案されている。表皮反射成分の数式モデルとしては、Torrance-Sparrow<sup>44)</sup>モデルや Cook-Torrance モデル<sup>45)</sup>が広く用いられている。フレネル法則に基づく反射率の項、表面粗さによって求まる微小な小素面 (Microfacet) の勾配の分布関数の項、マスキング現象による減衰項で求まり、4つのパラメータで反射特性が定まる。松浦ら<sup>46)</sup>、上谷ら<sup>47)</sup>、<sup>48)</sup>は偏光を用いて非金属材料からの反射光を表皮反射成分と層内反射成分に分離して可視光の反射指向特性を測定し、表皮と層内反射成分に分けて数式モデル化を行っている。松浦—上谷モデルは、基本的な概念は Torrance-Sparrow モデルや Cook-Torrance モデルと同様であり、前述の3つの項で反射指向特性が求まり、パラメータも4つである。Walter<sup>49)</sup>はさらに透過成分を考慮した微小面勾配分布関数の項と減衰項を提案している。Burler<sup>43)</sup>は映像クリエイターの視点に立って直感的に使いやすいパラメータで構成されたモデル (Disney モデル) を提案した。様々な材質の表現が可能であるが、パラメータ数が多くモデル式も非常に複雑である。本研究では、パラメータが少なくモデル式が比較的簡単な松浦—上谷モデルを用いる。

### 1-2-3. 反射指向特性の測定

松浦ら<sup>46)</sup>、上谷ら<sup>47)</sup>、<sup>48)</sup>は、田中の手法<sup>26)~28)</sup><sup>ほか</sup>に倣って、偏光を用いることで反射光を表皮・層内反射成分に分離する測定手法を示している。本手法では、同一角度条件に対して、偏光条件を変化させて5回の測定を行う必要があり、測定の作業工数が多い。原<sup>50)</sup>はその簡易測定手法として、評価関数を用いて反射指向特性モデルの係数を重み付き最小二乗法で決定することで測定条件数を削減する手法を提案しているが、係数の値を安定的に収束させるためには初期値の設定に経験が求められるという実用上の課題がある。その一方で、近年は市販の分光測色計、光沢度計、表面粗さ計が高性能となっており、様々な物性値 (拡散反射率、光沢度、表面粗さ等) が容易に取得可能である。本研究では、市販計測器で容易に測定可能な物性値を用いることで、偏光を用いることなく反射光を簡易に表皮・層内反射成分に分離して数式モデル化する方法を提案し、測定の作業工数を削減する。建材の反射指向特性を取得するために、作業工数が多く作業負荷が大きいことは、限られた時間内で予測計算を実施しなければならない実務の上では大きな障害となる。本研究により簡易化を提案することで、本数式モデルを組み込んだ輝度予測計算手法の実務への適用性を向上させることができる。

### 1-2-4. 実務的な光環境 3D シミュレーションのための汎用ソフトウェアにおける計算手法

建築での実務的な物理量に基づく光環境 3D シミュレーションの汎用ソフトウェアとしては、無償ソフトでは Radiance、DIALux、DIALux evo 等が、商用ソフトでは 3ds Max Design、Lumiccept 等が挙げられる<sup>51)</sup>。それぞれのレンダリング方式は、Radiance はモンテカルロ法

と光線追跡法もしくはフォトンマッピング法、DIALux はラジオシティ法、DIALux evo はフォトンマッピング法、3ds Max Design は光線追跡法とフォトンマッピング法 (Mental ray)、Lumicept はモンテカルロ法と光線追跡法である<sup>52)</sup>。Radiance は反射指向特性を考慮した計算を行うための面の反射指向特性の入力パラメータである二方向反射率分布関数 (以下、BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function)) を設定可能<sup>53)</sup>であるが、実務的計算において BRDF を設定した計算例はほぼ見られず、反射面は全て均等拡散面で近似されることが多い。DIALux と DIALux evo は均等拡散反射と正反射との割合を設定可能である<sup>52)</sup>が、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不均一な反射指向特性をもつことが多く、それを正確には表現できない。3ds Max Design ではフレネル反射もしくは視線に対して面の法線方向が  $0^\circ$ 、 $90^\circ$  での反射率とその間の反射率の変化の形状を任意に設定可能であるが、実際の面における拡散性の高い反射性状 (層内反射成分) と指向性のある反射性状 (表皮反射成分) が合成した反射性状や、光の入射角度に依存して反射光強度が変化する反射性状が再現できない<sup>54)</sup>。Lumicept は任意の BRDF が設定可能であるが、詳細な入力データが必要になり、シミュレーション負荷も大きくなる。さらに、上記のどのソフトウェアも光束伝達法を用いて任意の反射指向特性を考慮できない。

#### 1-2-5. 光束伝達法に基づく反射指向特性を考慮した計算手法

レンダリング方式によりそれぞれ得失があるが、光束伝達法の利点のひとつとして、ヴァーチャルリアリティ (以下、VR) 表示に適した計算手法であるという点が挙げられる。F. Abd-Alhamid ら<sup>55)</sup>は、実際の空間と仮想空間を主観的評価と客観的評価に基づいて比較し、VR はシーンの全体的なアピアランスを正しく取得できるため視覚調査に有望な代替表現媒体である可能性を示している。K. Chamilothoni ら<sup>56)</sup>は Radiance を用いた物理的シミュレーション結果の VR 表示により、ファサード形状とそれに関連した直射光の室内への入射のパターンの組み合わせが執務者の主観的な知覚と生理学に及ぼす影響を調査した。ヘッドマウントディスプレイ等を用いた光環境計算結果の VR 表示は、建物利用者等に計算結果をよりリアルに体感してもらうのに有効である。VR 表示では、使用者が視点位置や視線方向などの視点条件を自由に変化させるのに追従して、表示もリアルタイムに応答させるための速度が必要である。現状では、計算負荷の観点から、反射指向特性を考慮する照明計算には光線追跡法を用いるのが主流である。しかし、光線追跡法では、全ての面が均等拡散面であれば  $360^\circ$  の画角で一度に計算を行うことが可能だが、反射指向特性を考慮する場合には全ての視点条件について予め計算をする必要があり、計算条件が膨大となるため、VR 表示には不向きな計算法である。一方で、光束伝達法では、多少時間がかかっても、予め一度だけ計算しておけば、視点条件を変化させたときの計算結果を即座に表示させることができるため、VR 表示に適している。しかし、Radiance 等の 1-2-3 で前述した汎用ソフトには、光束伝達法を用いて反射指向特性を考慮した計算を行うものがない。本研究において、光束伝達法を用いて反射指向特性を考慮した輝度予測計算手法を構築することによって、VR 表示においても利用者の操作にリアルタイムに追従した計算結果表示を行うことを目指す。

光束伝達法により建材の反射指向特性を考慮した計算手法としては、上谷・松浦<sup>47), 48)</sup>は層内・表皮反射の数式モデルを光束伝達相互反射数値解法に組み込むことで、面の反射指向特性を考慮した輝度分布の予測計算を行い、拡散光源下での模型実験との比較検証によって、光束伝達相互反射数値解法により実験結果の傾向を再現できることを示している。しかし、近年のグラフィックソフト技術の進化により、本手法による輝度分布の計算結果の表示において、面の分割粗さにより輝度分布が波打つ等の課題が顕在化した。本研究では、隅部等の距離の近い面同士での計算における伝達光束量の計算誤差を小さくする手法を検討することで、隅部での輝度分布が不自然に波打つ課題を解決する。

反射指向特性を考慮した計算の検証としては、上谷・松浦<sup>47)</sup>は矩形の模型空間を対象として、実験室測定との比較・検証を行った。一ノ瀬ら<sup>37)</sup>、中大窪ら<sup>25)</sup>は反射指向特性を考慮した放射伝熱計算を行っているが、測定値との比較・検証は行っていない。本研究では、複雑な実建物形状を対象として、輝度分布計算を行い、実測結果との比較・検証を行うことで、実用化のための数値計算上の課題を明らかにし、その解決方法を考察する。

上谷・松浦<sup>47), 48)</sup>の計算手法では3面間の位置関係により反射特性を解く必要があるため、計算負荷が大きく実務に適用しづらいというデメリットがあり、L. Aupperleら<sup>57)</sup>は階層的な有限要素アプローチによって照明計算アルゴリズムの効率化を図っている。しかし、近年はパソコンの性能が飛躍的に向上しているため、本研究ではこのような近似は行わない。また、上谷ら<sup>47), 48)</sup>は各面を四角形の要素に分割して計算を行っていたが、本研究では、複雑な建築形状を計算するため、三角形の要素に分割する。

### 1-3. 実務上の適用先

反射指向特性を考慮すべき具体的な事例としては、高級感を演出した艶のある内装材の見え方の評価や、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には高級感を演出するため艶のある石材を採用する事例が多くみられる。人工照明の配置や直射日光の入射方向に応じてこれらの石材の見え方や眩しさを評価するには、反射指向特性を考慮する必要がある。

また、近年は CO<sub>2</sub> 固定や木材利用の観点から、建築での木質材料の積極的な利用が推進されている。内外装用建材として用いる木材には表面保護用の艶出し塗装が施されており、照明の配光特性や配置状況によっては自然素材である材料の自然な色合いが損なわれる状況が発生する。これは、主に保護塗膜での指向性のある反射（表皮反射が層内反射に対して大きくなることや、順応輝度に対して反射光輝度が大きくなること等）に起因しており、木質建材の反射指向特性の把握や、反射指向特性を考慮した輝度計算により事前検討することが有用となる。

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<sup>58), 59)</sup>。例えば、黒色樹脂塗装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について近隣から苦情が発生するケースがある。これは、屋根材の反射指向特性を把握することや、反射指向特性を考慮した輝度予測計算により事前に対処できる。

本研究による反射指向特性の把握と反射指向特性を考慮した輝度予測計算は、実務において、建物建設前の計画段階で、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まぶしさの検討などの詳細な光環境の設計を行う上で非常に有益である。

#### 1-4. 本研究の目的

本研究では、建材の反射指向特性の測定手法およびそのデータを組み込んだ輝度分布計算手法の実用性を向上させることを目的とする。1) 建材の反射指向特性データを測定値から数式モデル化し、2) 反射指向特性を考慮した輝度予測計算を行ううえでの実用上の課題を解決するための検討を行う。

1) では建材の反射指向特性を層内・表皮反射成分にわけて測定し、数式モデル化を行うが、層内と表皮反射成分に分離するために偏光を用いた既往の測定手法<sup>46)~48)</sup>では、同一角度条件において偏光条件を複数回変化させて測定を行う必要があり、実務で使用するうえでは作業工数が多いという課題がある。そこで、分光測色計、光沢度計、表面粗さ計によって計測可能な、建材の分光拡散反射率、光沢度、表面粗さといった物性値を計測し、反射指向特性の数式モデルのパラメータとの相関を明らかにすることで、物性値から反射指向特性の数式モデルのパラメータを推定する手法を提案する。本手法により、偏光を用いることなく反射光を表皮・層内反射成分に分離することができ、偏光を用いた既往の測定手法に対して、測定工数を削減することが可能となる。これにより、限られた時間で予測計算を行うことが求められる実務への適用性を向上させることができる。

さらに、光環境予測計算のさらなる高度化としては、分光特性に関する詳細な計算が挙げられ、分光放射輝度分布の予測計算により演色性等の建築内の色の見え方の予測<sup>11), 12)</sup>や、雰囲気、生理的影響の検討が可能となる。本研究では、分光計算を行ううえで必要となる建材の分光反射指向特性の測定結果を示し、数式モデル化を行う。分光放射輝度計測では、各測定角度条件に対して波長ごとの放射輝度データを扱うことから、測定データ数が膨大となり、データ処理にかかる負荷が大きいという実用上の課題がある。この課題に対して、分光放射輝度測定を行うことなく、分光拡散反射率と反射指向特性の簡易推定結果から分光反射指向特性を推定する手法を提案する。

2) では光束伝達法に基づく反射指向特性を考慮した既往の計算手法<sup>47), 48)</sup>では、計算結果の表示の際に輝度分布が波立つという課題があった。本課題は、計算の際の分割要素を細かくすることで概ね改善するが、要素同士の距離が近い条件では容易に解決しない。この原因のひとつとして、反射指向特性を考慮した計算の場合、距離の近い要素同士での光束伝達の比率を計算する際に、局所的に反射強度が大きくなる方向での2つの要素間での光束伝達を大きな立体角に適用してしまうことにより、計算誤差が大きくなることが考えられる。本研究では、距離の近い要素同士での光束伝達の比率を計算する際に、面を再分割する手法を提案し、本課題を改善する。

さらに、上谷・松浦<sup>47)</sup>の検証では単純な矩形の模型空間を対象としていたのに対して、本研究では複雑な形状をもつ実建物空間を対象とした輝度分布計算を行い、実測結果との比較・検証を行うことで、実用の際の数値計算上の課題を明らかにする。数値計算上の課題とは、建物の凹凸形状や什器への対応と、設定した建物モデル内の視点位置とモデルの分割要素の細かさとの関係によっては局所的な輝度変化が予測できなくなるという問題である。前者に対して

は、2つの要素間の立体角投射率を算出する際に、見えがかりを考慮した立体角投射率を算出する方法を提案し、後者に対しては、設定した視点位置によっては視野外でもモデルの分割要素の細かさを適切に設定する必要があることを示す。

## 1-5. 本論文の構成

本論文の構成を図 1.5.1 に示す。

第1章では、本研究の背景、既往の研究と本研究の位置づけ、本研究の目的と構成について述べた。

第2章では、内装材や外装材として一般的に使用される建材であり、方向依存性の少なく反射指向性があると予想される、樹脂系の床シートやフィルム、石材、樹脂焼付塗装の金属板を対象として反射指向特性の測定を行った。建材からの反射光を、偏光を用いて表皮・層内反射に分離する手法で測定を行い、上谷一松浦の数式モデルによる再現性を確認する。

第3章では、市販計測器によって近年容易に計測可能となった建材の光沢度、表面粗さ、分光拡散反射率といった物性値を計測し、反射指向特性の数式モデルのパラメータ（表皮反射成分の大きさを表す係数、小粗面の傾斜角の標準偏差、層内反射率といった特徴量を指す。）との関係を調査する。これにより、分光拡散反射率から層内反射成分を推定する手法によって、偏光を用いることなく反射指向特性の数式モデルのパラメータを簡便に推定する手法を提案する。

第4章では、有彩色の建材の分光反射指向特性の計測を行い、分光反射指向特性を明らかにする。さらに、分光放射輝度測定では膨大なデータ処理にかかる負荷が大きいという課題に対して、分光放射輝度を直接測定することなく、分光拡散反射率と3章の反射指向特性の簡易推定結果から分光反射指向特性を推定する手法を提案する。

第5章では、反射指向特性を考慮した輝度分布を光束伝達法で計算する既往の手法を示し、光束伝達の比率を計算する際の再分割手法と、再分割後の光束伝達の比率の補正手法を新たに提案する。測定により反射指向特性が既知であり、反射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、既往の計算手法では面の距離が近くなる隅部において計算誤差が大きくなり、隅部の輝度分布が不自然に波打つという課題を明らかにし、提案した再分割手法により本課題が改善し、輝度分布形状が測定された輝度分布に近づくことを示す。

6章では、実用上必要となる、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構築したうえで、実在する建物内空間である長い廊下空間と凹凸のある空間を対象として輝度分布計算を行う。計算輝度分布を実測した輝度分布と比較することで、指向性のある反射面において局所的に輝度が高くなる傾向を、本研究の計算手法により再現できることを示す。さらに、視点位置を建物の内部に設定した場合に、視野の外部に位置する面の分割粗さが不適切に粗いと、実測値と不自然に異なる計算輝度分布となるという数値計算上の課題を明らかとし、設定した視野の内部だけでなく、外部の面の分割粗さも適切に設定することで本課題を解決できることを示す。

第7章では、本研究の成果をまとめ、今後の課題について示す。

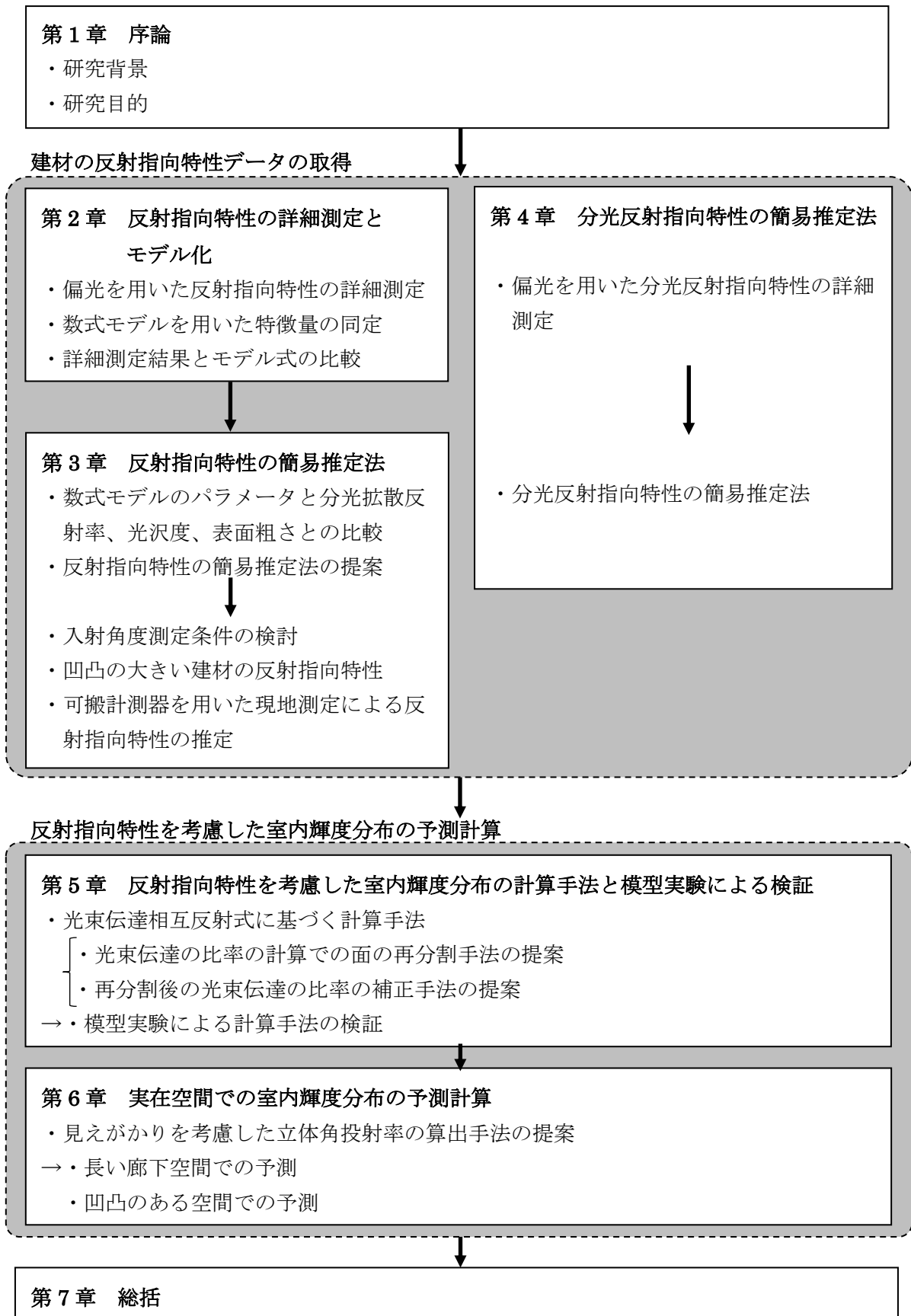


図 1.5.1 本論文の構成



## 参考文献

- 1) 一般社団法人日本サステナブル建築協会: DECC に基づく業務用建築物の夏季節電方策に関わる緊急提言, 2011. 5
- 2) 一般社団法人日本サステナブル建築協会: DECC に基づく業務用建築物の冬季節電方策に関わる緊急提言, 2011. 12
- 3) 田淵誠一, 平岡雅哉, 菰田英晴, 岩橋優子, 對馬聖菜, 田辺新一: 節電対策が電力消費量削減に与える影響: 日本建築学会環境系論文集, 第 78 卷, 第 692 号, pp. 793-798, 2013. 10, <https://doi.org/10.3130/aije.78.793>
- 4) 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
- 5) J. Y. Suk, Luminance and Vertical Eye Illuminance Thresholds for Occupants' Visual Comfort in Daylit Office Environments, *Building and Environment*, 148 (2019), 107–115, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.10.058>
- 6) A. D. Vries, J. L. Souman, B. D. Ruyter, I. Heynderickx, Y. A.W. D. Kort, Lighting Up the Office: The Effect of Wall Luminance on Room Appraisal, Office Workers' Performance, and Subjective Alertness, *Building and Environment*, 142 (2018), 534–543, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.06.046>
- 7) S. Chraibi, L. Crommentuijn, E. V. Loenen, A. Rosemann, Influence of Wall Luminance and Uniformity on Preferred Task Illuminance, *Building and Environment*, 117 (2017) 24–35, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.02.026>
- 8) T.W.Kruisselbrink, R.Dangol, E. J. V. Loenen, Feasibility of ceiling-based luminance distribution measurements, *Building and Environment*, 172 (2020), 106699, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106699>
- 9) 小島義包, 中村芳樹, 加藤洋子, 大木知佳子, 矢部周子, 金谷末子: 輝度画像を利用した照明とブラインドの協調制御システムの研究: 電気設備学会論文誌, 39 卷, pp. 1-9, 2019, [https://doi.org/10.14936/tieiej.39.1\\_1](https://doi.org/10.14936/tieiej.39.1_1)
- 10) 溝上陽子, 池田光男, 篠田博之: 照明認識視空間の色に影響される物体の色の見え, 照明学会誌, 第 83 卷, Appendix 号, p. 192, 1999, [https://doi.org/10.2150/jieij1980.83.Appendix\\_192](https://doi.org/10.2150/jieij1980.83.Appendix_192)
- 11) 吉田悟郎, 上谷芳昭: 分光相互反射計算による昼光・人工光併用照明の演色性評価, 日本建築学会環境系論文集, 第 78 卷, 第 691 号, pp. 697-702, 2013, <https://doi.org/10.3130/aije.78.697>
- 12) 吉田悟郎, 上谷芳昭: ベネシャンブラインドの分光透過指向特性の算出方法, 日本建築学会環境系論文集, 第 79 卷, 第 705 号, pp. 937-945, 2014, <https://doi.org/10.3130/aije.79.937>
- 13) 八十住浩明, 西川恭子, 川北桂三, 坂口敏彦: 照度・色温度が在室者の雰囲気評価に及ぼす影響, 平成 6 年度照明学会全国大会, 259, 1994, [https://doi.org/10.2150/jieij1980.78.Appendix\\_259](https://doi.org/10.2150/jieij1980.78.Appendix_259)

- 14) S. Hashimoto, K. Nakamura, S. Honma, H. Tokura and K. Honma, Melatonin Rhythm is not Shifted by Lights That Suppress Nocturnal Melatonin in Humans Under Entrainment, *American Journal of Physiology*, 270 (1996) 1073-1077, <https://doi.org/10.1152/ajpregu.1996.270.5.R1073>
- 15) 道盛章弘, 荒木和典, 井邊浩行, 荻原啓, 坂口敏彦: 色温度が覚醒度に与える影響-整理指標, 心理指標, 行動能力指標による評価-, 平成 10 年度照明学会全国大会, 220, 1998, [https://doi.org/10.2150/jiej1980.82.Appendix\\_220](https://doi.org/10.2150/jiej1980.82.Appendix_220)
- 16) 道盛章弘, 荒木和典, 井邊浩行, 荻原啓: 色温度の短時間の覚醒度への影響評価, 第 12 回生体生理工学シンポジウム論文集, 12, pp. 205-208, 1997
- 17) 北堂真子: 良質な睡眠のための環境づくりー就寝前のリラクゼーションと光の活用ー, *バイオメカニズム学会誌*, Vol.29, No.4, pp. 194-198, 2005, <https://doi.org/10.3951/sobim.29.194>
- 18) 小山恵美, 長谷川敦士, 岡本直之, 松原明央, 石井康晴, 松田恵里: 夜間就寝前光環境がその後のヒトの睡眠に及ぼす影響(2)-分光分布特性による考察-, 平成 24 年度照学会全国大会, pp. 8-39, 2012
- 19) 望月悦子, 吉野攝津子, 石川英樹, 矢部周子: 就床前・起床前の照明条件が睡眠に与える影響, *日本建築学会大会学術講演梗概集*, pp. 487-488, 2020. 9
- 20) CIE, Spatial distribution of daylight – CIE Standard General Sky, CIE S 011/E, 2003
- 21) S. Janjai, I. Masiri, M. Nunez and J. Laksanaboonsong, Modeling Sky Luminance Using Satellite Data to Classify Sky Conditions, *Building and Environment*, 43 (2008) 2059–2073, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.12.009>
- 22) M. Maskarenj, R. Banerjee and P. C. Ghosh, Design and Development of a Low-cost Angular Sky Luminance Measurement System, *Building and Environment*, 142 (2018) 22–33, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.06.001>
- 23) 例えば、D. Seo, Comparative Analysis of All-Sky Luminous Efficacy Models Based on Calculated and Measured Solar Radiation Data of Four Worldwide Cities, *Handawi, International Journal of Photoenergy*, (2018), 8180526, <https://doi.org/10.1155/2018/8180526>
- 24) 牧野俊郎, 中村彰成, 若林英信: 金属のあらい表面におけるふく射反射の角度特性とその伝熱パラメータ表現, *日本機械学会論文集 (B 編)*, 65 巻, 630 号, pp. 734-740, 1999, <https://doi.org/10.1299/kikaib.65.734>
- 25) 中大窪千晶, 梅干野晃, 浅輪貴史, 深澤英之: 屋外熱収支シミュレーションにおける建築材料の日射反射指向特性を考慮した放射伝熱計算モデルの導入, *日本建築学会環境系論文集*, 第 73 巻, 第 625 号, pp. 275-282, 2008. 3
- 26) 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, <https://doi.org/10.11470/oubutsu1932.25.207>

- 27) 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, <https://doi.org/10.11470/oubutsu1932.27.600>
- 28) 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, <https://doi.org/10.11470/oubutsu1932.28.508>
- 29) 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. 6, [https://doi.org/10.3130/aijax.388.0\\_15](https://doi.org/10.3130/aijax.388.0_15)
- 30) CIE: 3-60:SPECTRAL DAYLIGHT CHARACTERISTICS, CIE Technical committees, <https://cie.co.at/technicalcommittees/spectral-daylight-characteristics>, (参照 2022. 8. 14)
- 31) 八塚秀樹, 上谷芳昭: 魚眼レンズ付デジタルカメラによる全天空分光放射輝度分布の測定法, 日本建築学会環境系論文集, 第 78 巻, 第 690 号, pp. 623-629, 2013, <https://doi.org/10.3130/aije.78.623>
- 32) 八塚秀樹, 上谷芳昭: 主成分分析を用いた天空要素の分光放射輝度の推定法, 第 79 巻, 第 697 号, pp. 227-232, 2014, <https://doi.org/10.3130/aije.79.227>
- 33) Y. Uetani, Measurement of the All Sky Spectral Radiance Distribution Using a Fisheye Camera and Principal Component Analysis, Proceedings of International Solar Energy Society EuroSun 2014 Conference, Aix-les-Bains, France, (2014) 1162-1171, <https://doi.org/10.18086/eurosun.2014.08.13>
- 34) 秦由季, 八塚秀樹, 上谷芳昭: 魚眼レンズ付デジタルカメラによる紫外・可視・近赤外域の全天空分光放射輝度分布の測定法, 日本建築学会環境系論文集, 第 80 巻, 第 717 号, pp. 1037-1044, 2015, <https://doi.org/10.3130/aije.80><https://cie.co.at/.1037>
- 35) M. Knoop, A. Diakite and F. Rudawski, Methodology to Create Spectral Sky Models to Enable the Inclusion of Colorimetric Characteristics of Daylight in Research and Design, Proceedings of 28th CIE Session 2015, Manchester, UK, (2015) 564-573
- 36) 一ノ瀬雅之, 石野久彌, 永田明寛: 建材の日射透過および反射性能における分光感度特性, 日本建築学会環境系論文集 第 583 号, pp. 15-21, 2004. 9, [https://doi.org/10.3130/aije.69.15\\_5](https://doi.org/10.3130/aije.69.15_5)
- 37) 一ノ瀬雅之, 石野久彌, 郡公子, 永田明寛: 指向特性を考慮した放射伝熱計算法, IBPSA-Japan 講演論文集, pp.27-33, 2005. 3
- 38) 弓野沙織, 吉田伸治, 持田灯, 内田大貴: 指向性反射を考慮した放射伝熱シミュレーションによる熱線再帰性反射フィルムの評価(その 2) 指向性反射を考慮した放射伝熱解析手法の概要, 日本建築学会大会学術講演会, 環境工学 I, pp. 899-900, 2014
- 39) 蓮沼宏: 光沢, コロナ社, p. 47, 1960
- 40) G. J. Klinker, S. A. Shafer, and T. Kanade, The Measurement of Highlights in Color Images, International Journal of Computer Vision, 2 (1988) 7-32, <https://doi.org/10.1007/BF00836279>

- 41) J. Lambert, *Photometria Sive de Mensura Et Gratibus Luminis, Colorum Et Umbrae*, Eberhard Klett, Augsburg, Germany (1760)
- 42) M. Oren and S. K. Nayar, Generalization of Lambert's Reflection Model, SIGGRAPH, (1994) 239–246, <https://doi.org/10.1145/192161.192213>
- 43) B. Burley, Physically-Based Shading at Disney, SIGGRAPH 2012 Course, Practical Physically Based Shading in Film and Game Production, (2012) 1–27
- 44) K. Torrance and E. Sparrow, Theory for off-specular reflection from roughened surfaces, *Journal of Optical Society of America*, 57 (1967) 1105–1114, <https://doi.org/10.1364/JOSA.57.001105>
- 45) R. L. Cook and K. E. Torrance, A Reflectance Model for Computer Graphics, *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, 15 (1981) 307–316, <https://doi.org/10.1145/965161.806819>
- 46) 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
- 47) Y. Uetani, K. Matsuura, A Method of Luminance Calculation in an Anisotropic Diffuse Reflecting Interior, *Journal of the Illuminating Engineering Society*, 22 (1993) 166–175, <https://doi.org/10.1080/00994480.1993.10748049>
- 48) 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, <https://doi.org/10.14989/doctor.k4548>
- 49) B. Walter, S. R. Marschner, H. Li and K. E. Torrance, Microfacet Models for Refraction through Rough Surfaces, *Eurographics Symposium on Rendering*, (2007) 195–206
- 50) 原直也: 内装材料の反射特性の簡易測定法に関する研究, 平成 19 年度電気関係学会関西支部連合大会, 2007
- 51) 吉澤望: 照明シミュレーションプログラムの計算精度について, *照明学会誌*, 第 98 卷, 第 3 号, pp. 140-143, 2014. 3, <https://doi.org/10.2150/jiej.98.140>
- 52) 一般社団法人照明学会: 照明シミュレーションのためのプラットホーム整備に関する調査委員会報告書, pp. 32–33, 2019,
- 53) G. Ward, R. Shakespeare, *Rendering with Radiance, The Art and Science of Lighting Visualization*, Morgan Kaufmann Pub, p. 7, 1998
- 54) AUTODESK Help: [BRDF]ロールアウト, Autodesk Knowledge Network, 2017. 4. 14, <https://knowledge.autodesk.com/ja/support/3ds-max/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2017/JPN/3DSMax/files/GUID-8A661F93-AC62-4733-A675-1A4324DA026B-htm.html>, (参照 2022. 8. 14)
- 55) F. Abd-Alhamid, M. Kent, C. Bennett, Y. Wu, Developing an Innovative Method for Visual Perception Evaluation in a Physical-Based Virtual Environment, *Building and Environment*, 162 (2019), 106278, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106278>

- 56) K. Chamilothoni, G. Chinazzo, J. Rodrigues, E. S. Dan-Glauser, J. Wienold, M. Andersen, Subjective and Physiological Responses to Façade and Sunlight Pattern Geometry in Virtual Reality, *Building and Environment*, 150 (2019) 144–155, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.01.009>
- 57) L. Aupperle, P. Hanrahan, A Hierarchical Algorithm for Surfaces with Glossy Reflection, *SIGGRAPH* (1993) 155–162, <https://doi.org/10.1145/166117.166137>
- 58) L. Brotas, J. Wienold, Solar reflected glare affecting visual performance, *Proceedings of 8th Windsor Conference, Counting the Cost of Comfort in a Changing World, Cumberland Lodge, Windsor, UK*, (2014) 688–693
- 59) J. Wienold, Glare caused by reflections of solar panels, *12th European Lighting Conference, Lux Europa, Kraków, Poland* (2013)



## 第2章 建材の反射指向特性の詳細測定とモデル化

### 2-1. はじめに

本章では、反射指向特性を考慮した輝度計算の実務利用の拡大に資する目的で、偏光を用いた松浦・上谷の手法<sup>1)~3)</sup>を用いて建材の詳細な反射指向特性のデータを詳細に測定する。表皮反射と層内反射成分に分離したモデル式のパラメータを測定値から同定し、数式モデル化を行う。本数式モデルと測定値を比較することで、数式モデルの適用性を確認する。また、測定から数式モデル化までの一連の手順において、実用上の課題を明らかにする。

## 2-2. 反射特性関数の定義

反射の指向特性は、前田により定義された<sup>4)</sup>反射特性関数 $\rho$  [1/sr]を用いて以下の式<sup>1), 5)</sup>で表される。 $\rho$  は微小面での平行光の入射光の照度に対する反射光の単位面積あたりの光度の比であり、半球の立体角  $2\pi$ [sr]で積分すれば反射率となる。角度の説明図を図 2.2.1 に示す。

$$\rho(\theta_i, \varphi_i; \theta_o, \varphi_o) = L(\theta_i, \varphi_i; \theta_o, \varphi_o) \cdot \cos \theta_o / E(\theta_i, \varphi_i) \quad (2.1)$$

$\theta_i$  : 試料面への入射光の入射角

$\varphi_i$  : 試料面への入射光の方位角

$\theta_o$  : 試料面からの反射光の反射角

$\varphi_o$  : 試料面からの反射光の方位角

$L(\theta_i, \varphi_i; \theta_o, \varphi_o)$  : 試料面からの反射光の輝度 [cd/m<sup>2</sup>]

$E(\theta_i, \varphi_i)$  : 試料面照度 [lx]

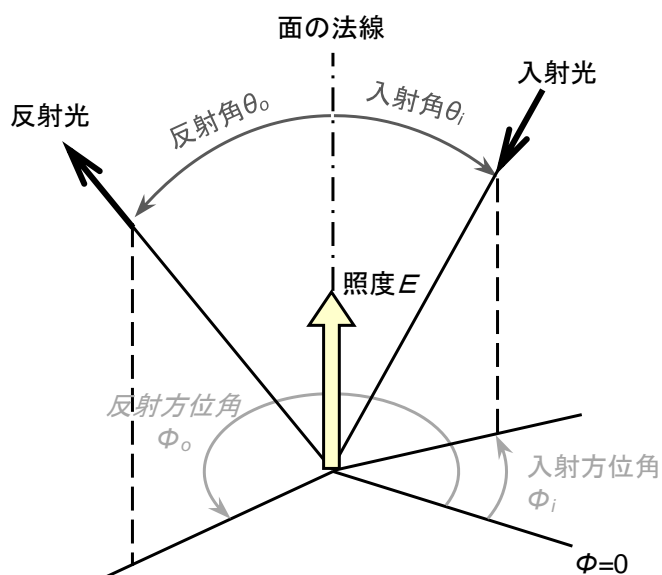


図 2.2.1 角度の説明図

1 反射指向特性を表す関数としてよく使用されている測光量としての  $BRDF$  [1/sr]は (注 2.1)式のように表される。本研究で用いた反射指向特性関数  $\rho$  との違いは  $\cos \theta_o$  を乗じるか否かであり、 $\rho$  から  $BRDF$  の算出もしくはその逆は容易に可能である。

$$BRDF(\theta_i, \varphi_i; \theta_o, \varphi_o) = L(\theta_i, \varphi_i; \theta_o, \varphi_o) / E(\theta_i, \varphi_i) \quad (\text{注 2.1})$$



## 2-3. 偏光を用いた反射指向特性の詳細測定

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>6)</sup> (図 2.3.1)。表皮反射成分は境界面での反射であるため、その色は入射光の色とほぼ同じであり<sup>1)</sup>、光源の分光分布が保持される。一方で、層内反射成分は内部層で選択吸収を受けるため材料特有の色を示し<sup>1)</sup>、材料の分光反射特性が反映される。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、田中<sup>7)~9)ほか</sup>は偏光を用いた測定により表皮反射、層内反射に分離した。本章では、田中<sup>7)~9)ほか</sup>の手法に基づき、入射光と反射光の偏光条件を変化させて反射特性関数  $\rho$  を表皮反射成分と層内反射成分に分離し、各成分について入射角、入射方位角、反射角、反射方位角との関係を測定した松浦・上谷による測定方法<sup>1)~3)</sup>に準拠する。

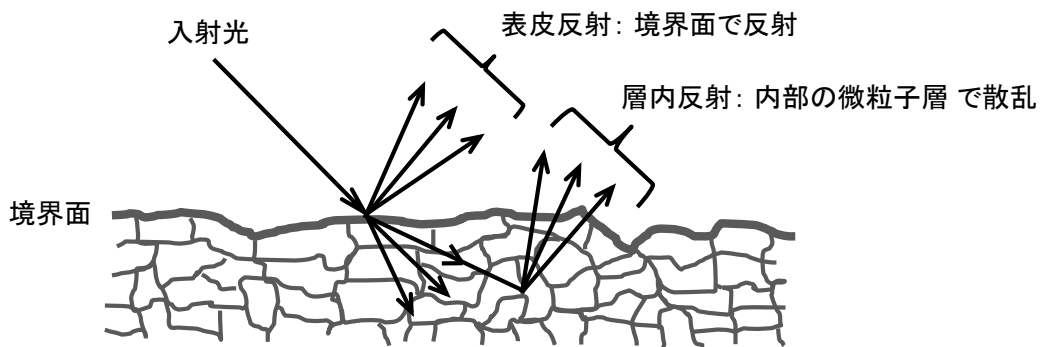


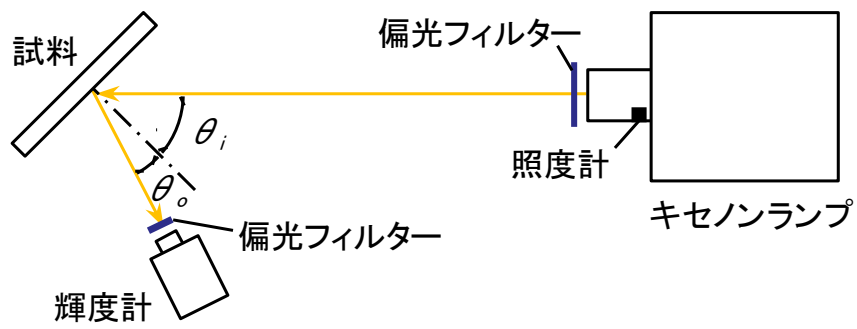
図 2.3.1 表皮反射と層内反射

## 2-3-1. 測定装置

図 2.3.2 に測定状況の概要図を、写真 2.3.1 に測定装置の写真を示す。測定は暗室にて行った。光源にはキセノンランプ（ウシオ電機製 SX-UI501XQ、出力 500W）を用い、内部には光源の出力の変動補正用に照度計（コニカミノルタ製 T-10MA）を設置した。照度計設置状況を写真 2.3.2 に示す。写真 2.3.1 において照度計と明示した箇所を、上から蓋を取って見た写真である。分光放射計（英弘精機製 MS-720）を用いて測定した光源の分光放射照度の相対分布を図 2.3.3 に示す。

試料からの反射光は測定角  $1^\circ$  の輝度計（コニカミノルタ製 LS-150）で測定した<sup>2)</sup>。偏光板はケンコー製偏光フィルターを用いた。なお、本測定では方位依存性の少ない建材を用いたため、方位角は固定とした。

<sup>2)</sup> 試料面の大きさは直径 50 mm の円形とし、平行光源の照射範囲も直径約 50 mm である。Fig. 1 に示す測定装置において、測定角  $1^\circ$  の輝度計によって計測される範囲は、試料面に正対した位置では直径約 8 mm の範囲であり、試料内に十分に収まっている。



※ 方位角は固定とした ( $\phi_i=0, \phi_o=\pi$ )

図 2.3.2 計測状況 概要図

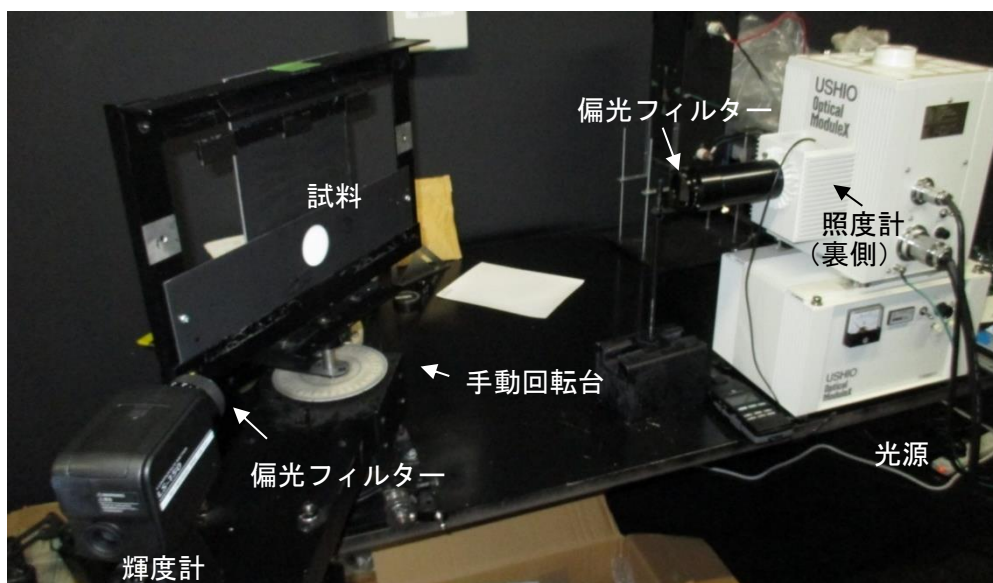


写真 2.3.1 反射指向特性 測定装置



写真 2.3.2 照度計設置状況

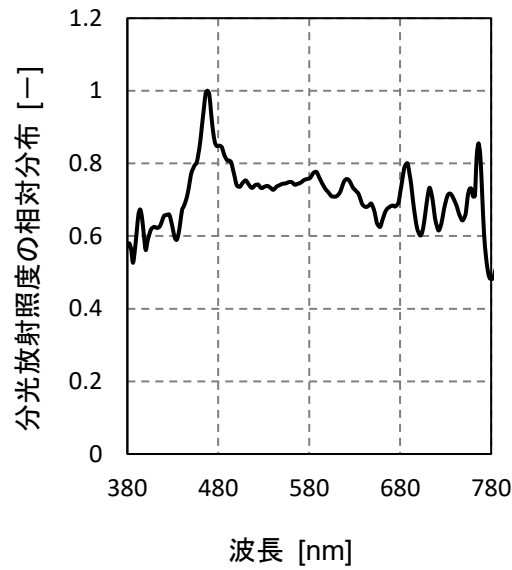


図 2.3.3 キセノンランプの分光放射照度

### 2-3-2. 光源の偏光度の測定

光源の偏光度を計測するため、図 2.3.4 に示す測定装置により偏光フィルターを  $10^\circ$  ごとに回転させて光源の偏光成分を計測した。測定した各偏光成分の最大値と最小値から、(2.2)式より偏光度  $P[-]$  を算出した。その結果、 $P$  は約 0.021 であったため、入射光はほぼ非偏光とみなした。

$$P = (I_{max} - I_{min}) / (I_{max} + I_{min}) \quad (2.2)$$

$I_{max}$  : 入射光の各偏光成分の最大値

$I_{min}$  : 入射光の各偏光成分の最小値

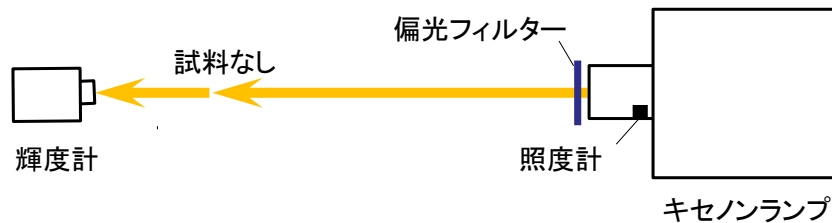


図 2.3.4 光源の偏光度の計測状況 概要図

### 2-3-3. 試料面照度の測定

(2.1)式の試料面照度  $E(\theta_i, \varphi_i)$  [lx]は、図 2.3.2 の試料位置に設置した標準白色板 (Labsphere Inc.製) からの反射光輝度  $L_{ds}(\theta_i, \varphi_i; \theta_o, \varphi_o)$  [cd/m<sup>2</sup>]を測定し、次式より求めた。

$$E(\theta_i, \varphi_i) = \pi L_{ds}(\theta_i, \varphi_i; \theta_o, \varphi_o) / r_{ds} \quad (2.3)$$

$r_{ds}$  : 標準白色板の反射率[-]

標準白色板は均等拡散面であるとみなし、メーカーの測定値から  $r_{ds}=0.99$  とする。図 2.3.5 に使用した標準白色板の可視光域の分光反射率を示す。測定条件を表 2.3.1 に示す。

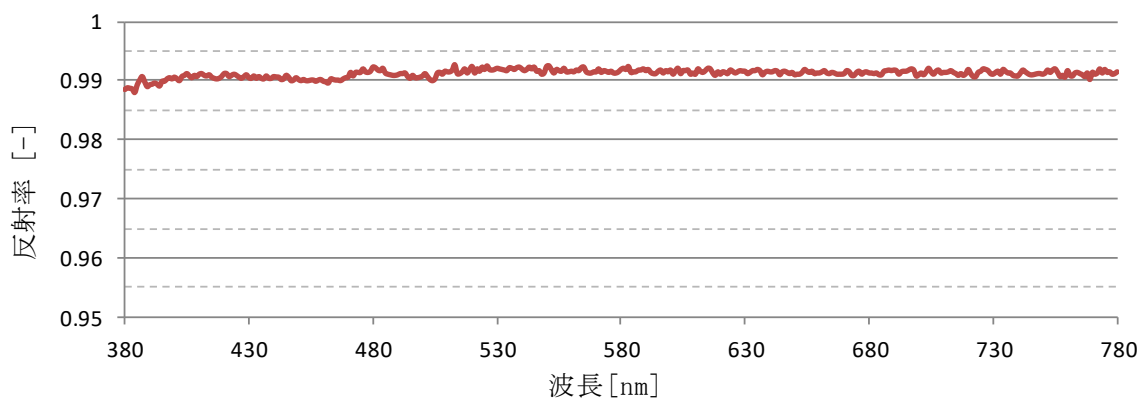


図 2.3.5 標準白色板の分光反射率

表 2.3.1 標準白色板の測定角度条件

入射角 $\theta_i$ [deg]	入射方位角 $\Phi_i$ [deg]	反射角 $\theta_o$ [deg]	反射方位角 $\Phi_o$ [deg]
45	0	0	180
60	0	0	180

2-3-4. 試料面輝度の測定

入射側、反射側の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  $L(\theta_i, \varphi_i; \theta_o, \varphi_o)$  を測定し、反射特性関数  $\rho$  を求めた。角度条件を表 2.3.2 に示す。

表 2.3.2 測定角度条件

入射角 $\theta_i$ [deg]	入射方位角 $\Phi_i$ [deg]	反射角 $\theta_o$ [deg]	反射方位角 $\Phi_o$ [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

2-3-5. 偏光による層内反射と表皮反射の分離

入射光と反射光のなす面に平行な平面偏光 p 偏光、これと垂直な偏光面を持つ平面偏光が s 偏光である。p 偏光の入射光を用いた際の反射光の p 偏光成分を  $I_{pp}$ 、s 偏光成分を  $I_{ps}$  とし、このときの表皮反射光の成分を  $M_p$ 、層内反射光の成分を  $D_p$  とする。表皮反射成分は p 偏光で反射され、層内反射成分は偏光性がなくなるため、1:1 の割合で p 偏光と s 偏光となるため、次式が成立する。

$$I_{pp} = D_p/2 + M_p \tag{2.4}$$

$$I_{ps} = D_p/2 \tag{2.5}$$

$I_{pp}$  : p 偏光の入射光に対する反射光の p 偏光成分 [1/sr]

$I_{ps}$  : p 偏光の入射光に対する反射光の s 偏光成分 [1/sr]

$D_p$  : p 偏光の入射光に対する反射光の層内反射成分 [1/sr]

$M_p$  : p 偏光の入射光に対する反射光の表皮反射成分 [1/sr]

s 偏光の入射光に対しても同様にして、次式が成立する。

$$I_{ss} = D_s/2 + M_s \tag{2.6}$$

$$I_{sp} = D_s/2 \tag{2.7}$$

$I_{ss}$  : s 偏光の入射光に対する反射光の s 偏光成分[1/sr]

$I_{sp}$  : s 偏光の入射光に対する反射光の p 偏光成分[1/sr]

$D_s$  : s 偏光の入射光に対する反射光の層内反射成分 [1/sr]

$M_s$  : s 偏光の入射光に対する反射光の表皮反射成分 [1/sr]

入射光に非偏光の光源を用いた場合であれば、s 偏光と p 偏光の強さは同じとなるため、反射光の層内反射成分  $D$  と表皮反射成分  $M$  は次式のようになる。

$$D = D_p + D_s = 2I_{ps} + 2I_{sp} \tag{2.8}$$

$$M = M_p + M_s = I_{pp} - I_{ps} - I_{sp} + I_{ss} \quad (2.9)$$

$D$  : 反射光の層内反射成分 [1/sr]

$M$  : 反射光の表皮反射成分 [1/sr]

次式のように、反射特性関数  $\rho$  を  $M$  と  $D$  の比に分割することで、層内反射成分  $\rho_D$  [1/sr]、表皮反射成分  $\rho_M$  [1/sr] が得られる。

$$\rho_D = \rho \cdot D / (M + D) \quad (2.10)$$

$$\rho_M = \rho \cdot M / (M + D) \quad (2.11)$$

$\rho$  : 反射特性関数  $\rho$  [1/sr]

$\rho_D$  : 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]

測定時の偏光条件を表 2.2.3 に示す。それぞれの偏光条件に対して、前節の表 2.2.4 に示す角度条件について測定を行うため、ひとつの試料に対して、偏光条件 5 × 角度条件 20 の計 100 パターンの測定条件となる。偏光条件を 5 種類に変えて測定する必要があるため、作業工数が必然的に多くなってしまふ。

表 2.3.3 偏光条件

測定対象	入射光側	輝度計側
$\rho$	偏光なし	偏光なし
$I_{pp}$	p 偏光	p 偏光
$I_{ps}$	p 偏光	s 偏光
$I_{sp}$	s 偏光	p 偏光
$I_{ss}$	s 偏光	s 偏光

#### 2-4. 既往の反射指向特性の数式モデル

実測値に基づいて反射指向特性の数式モデル化を行った。(2.12)～(2.28)式で表される上谷一松浦のモデル<sup>2), 3), 10)</sup>を用いた。

$$\rho(\theta_i, \varphi_i; \theta_o, \varphi_o) = \rho_D(\theta_i, \varphi_i; \theta_o, \varphi_o) + \rho_M(\theta_i, \varphi_i; \theta_o, \varphi_o) \quad (2.12)$$

$$\rho_D(\theta_i, \varphi_i; \theta_o, \varphi_o) = R_D \cos \theta_o / \pi \quad (2.13)$$

$$\rho_M(\theta_i, \varphi_i; \theta_o, \varphi_o) = K(\theta_i) m(\theta_i, \theta_o) p_f(\theta_f, \varphi_f) R(\psi_f) / 4 \cos \theta_f \cos \theta_i \quad (2.14)$$

ここに、

$\rho_D(\theta_i, \varphi_i; \theta_o, \varphi_o)$  : 層内反射成分 [1/sr]

$\rho_M(\theta_i, \varphi_i; \theta_o, \varphi_o)$  : 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 [-]

$p_f(\theta_f, \varphi_f)$  : 小素面の向きの確率密度関数 [1/sr]

$\theta_f, \varphi_f$  : 小素面の傾斜角、傾斜方位角 [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 [rad]

ただし、層内反射光は均等拡散性状で近似している。層内反射率  $R_D$  は(2.12)式より算出される。

$$R_D = \pi \cdot \overline{\rho_D}(\theta_i, 0; 0, \pi) \quad (2.15)$$

$\overline{\rho_D}$  :  $\rho_D$  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]

(今回測定した材料では、 $\theta_i=45^\circ, 60^\circ$  で大きくは変わらなかったため平均値を用いた。)

表皮反射光については、物質表面を構成する様々な方向を向いた微小な面 (小素面、facet) からの正反射光であると仮定して(Barkas の理論<sup>11)</sup>)、モデル化を行っている。

$\theta_f, \varphi_f, \psi_f$  は次式で表せる。

$$\theta_f = \cos^{-1} \frac{i_z + o_z}{\sqrt{(i_x + o_x)^2 + (i_y + o_y)^2 + (i_z + o_z)^2}} \quad (2.16)$$

$$\varphi_f = \cos^{-1} \frac{i_x + o_x}{\sqrt{(i_x + o_x)^2 + (i_y + o_y)^2}} \quad (2.17)$$

$$\psi_f = \frac{1}{2} \cos^{-1}(i_x o_x + i_y o_y + i_z o_z) \quad (2.18)$$

$$(i_x, i_y, i_z) = (\sin \theta_i \cos \varphi_i, \sin \theta_i \sin \varphi_i, \cos \theta_i) \quad (2.19)$$

$$(o_x, o_y, o_z) = (\sin \theta_o \cos \varphi_o, \sin \theta_o \sin \varphi_o, \cos \theta_o) \quad (2.20)$$

$p(\theta_i, \varphi_i)$ 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すると、 $K(\theta_i)$ は  $\rho_M$ の測定値を用いて次式より算出できる。

$$K(\theta_i) = \frac{1}{0.5} \int_0^{\pi/2} \rho_M(\theta_i, \varphi_i; \theta_o, \varphi_o) \frac{4 \cos \theta_f \cos \theta_i}{m(\theta_i, \theta_o) R(\psi_f)} d\theta_f \quad (2.21)$$

平均面への入射角や反射角が大きい場合に、小素面での入射光や反射光が、向かい合う小素面によって遮蔽されることで、試料からの反射光が減衰する現象（マスキング）が起こる。田中<sup>12)</sup>はすりガラスの測定から、マスキングは小素面の傾き角にほぼ因らないこと、入射角・反射角が  $50^\circ$ 以下ではマスキングが生じないこと、粗い面ほどマスキングが大きいことを示唆した。(2.21)式においてマスキングの影響を表す遮蔽係数  $m(\theta_i, \theta_o)$ は次式で表わされる。

$$m(\theta_i, \theta_o) = \{1 - m'(\theta_i)\} \{1 - m'(\theta_o)\} \quad (2.22)$$

$$m'(\theta) = \begin{cases} \{(\theta - 50^\circ)/(90^\circ - 50^\circ)\}^k & (\theta \geq 50^\circ) \\ 0 & (\theta < 50^\circ) \end{cases} \quad (2.23)$$

$m'(\theta)$  : マスキングの効果 [-]

$\theta$  : 入射角または反射角 [deg]

$k$  : 表面の粗さを表わす定数 [-]

$k$ は面の凹凸が細かいほど大きくなる。田中<sup>12)</sup>は#100~300の金剛砂で研磨したすり硝子の反射特性の測定結果からマスキングの効果  $m'(\theta)$ を導いている。(2.23)式において  $k$ を変化させて算出したマスキングの効果  $m'(\theta)$ と田中の示した結果との比較を図 2.4.1 に示す。田中の値は既往論文<sup>12)</sup>の表に示された値をプロットしたが、 $\theta=85^\circ$ については表に記載がなく、図から読み取った値であるため読み取り誤差を含む。 $k$ が 2~3 において田中の結果と近い値となる。田中<sup>13)</sup>は#100~300のすり硝子の二乗平均平方根粗さ  $R_q$ は  $1.8 \sim 10 \mu\text{m}$ 程度であったことを示している。本研究で測定する建材の  $R_q$ は  $0.01 \sim 11 \mu\text{m}$ 程度<sup>3)</sup>であり、#100~300のすり硝子より面の凹凸が細かい試料を含むため、大きい側の値である  $k=3$ を用いることにする。

<sup>3)</sup> 後述する 3-5 で測定する試料であるタイルカーペット、壁紙、木材については  $R_q$ を測定していないため除く。 $R_q$ が最も小さい試料はフロートガラスの 1.013、大きい試料は花崗岩ジェットアンドポリッシュ仕上げの 10.404 であった。試料の詳細はそれぞれ 3-4-1、2-5 において後述する。



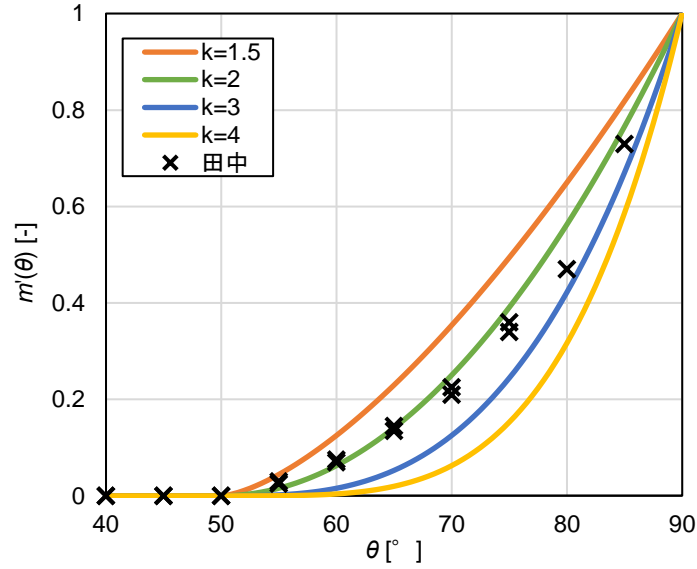


図 2.4.1 定数  $k$  によるマスキングの効果  $m'(\theta)$  と田中の測定による値の比較

フレネル法則に従うと仮定すると、小素面の正反射率  $R(\psi_f)$  は次式で表せる。

$$R(\psi_f) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left\{ \frac{\sin^2(\psi_f - \psi_{fr})}{\sin^2(\psi_f + \psi_{fr})} + \frac{\tan^2(\psi_f - \psi_{fr})}{\tan^2(\psi_f + \psi_{fr})} \right\} & (\psi_f \neq 0) \\ \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2} & (\psi_f = 0) \end{cases} \quad (2.24)$$

$$\psi_{fr} = \sin^{-1}(\sin \psi_f / n) \quad (2.25)$$

$\psi_{fr}$  : 屈折角

$n$  : 屈折率

小素面の向きの確率密度関数  $p_f(\theta_f, \varphi_f)$  は、正規分布を仮定して次式で表す。

$$p_f(\theta_f, \varphi_f) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_f(\theta_i)} \exp \left[ -\theta_f^2 / 2 \{ \sigma_f(\theta_i) \}^2 \right] \quad (2.26)$$

$$\sigma_f(\theta_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot p_f(0)} \quad (2.27)$$

(2.14)式より  $p_f(\theta_f, \varphi_f)$  は次式でも表せる。ここに、入射角  $\theta_i$  における正反射方向 ( $\theta_o = \theta_i, \varphi_o = \varphi_i + \pi; \theta_f = 0$ ) の表皮反射の反射特性関数の測定値  $\rho_M(\theta)$  と  $K(\theta)$  を代入すれば、小素面の法線方向の傾き  $\theta_f = 0, \varphi_f = 0$  での確率密度  $p_f(0)$  が得られる。

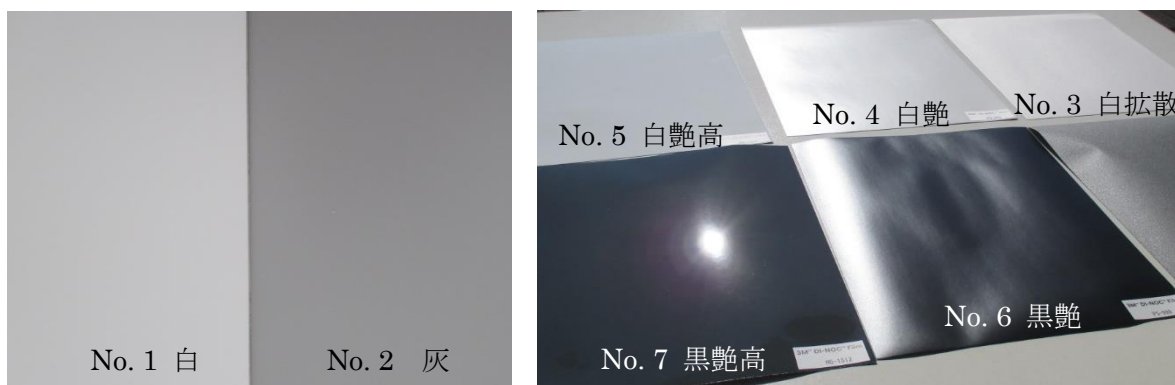
$$p_f(\theta_f, \varphi_f) = \rho_M(\theta_i, \varphi_i; \theta_o, \varphi_o) \frac{4 \cos \theta_f \cos \theta_i}{m(\theta_i, \theta_o) R(\psi_f) K(\theta_i)} \quad (2.28)$$

## 2-5. 測定対象試料

### 2-5-1. 試料概要

近年、一般的に内装材や外装材としてよく使用される建材の中から、方向依存性が少なく、指向性があると考えられる 17 種類を選定した。選定した試料を樹脂系、石系、塗装系の 3 つのグループに分類した。樹脂系の建材として、写真 2.5.1 に示す複層塩ビ床シートおよび化粧塩ビフィルム、石系の建材として、写真 2.5.2 に示す花崗岩のタイル、塗装系の建材として、写真 2.5.3 に示す樹付塗装したガルバリウム鋼板および樹脂塗装したアルミ板を用いた。塗装系の試料は金属製であるが、全て表面に樹脂塗装がされているため、非金属面として扱う。

ここで示した試料の写真（写真 2.5.1～2.5.3）は、周辺の照明環境やホワイトバランスや露光等のカメラの設定により、色や艶感が実際の見た目とは異なるため、参考資料とする。



a) 複層塩ビ床シート

b) 化粧塩ビフィルム

写真 2.5.1 樹脂系の試料



a) No. 8 花崗岩 本磨き仕上げ



b) No. 9 花崗岩 水磨き仕上げ

写真 2.5.2 石系の試料

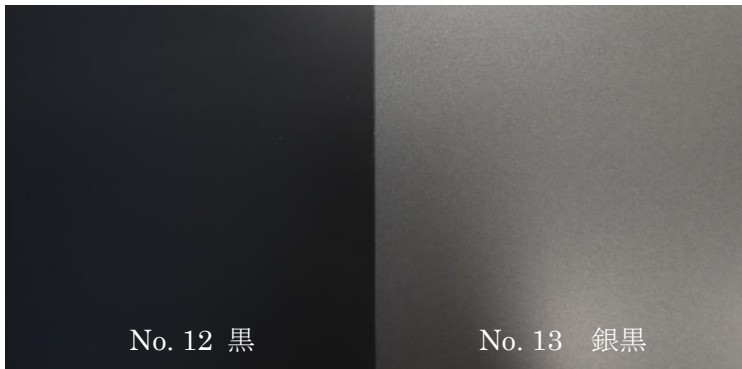


c) No. 8 花崗岩 レザー仕上げ



d) No. 9 花崗岩 ジェットアンドホリッシュ (J&P) 仕上げ

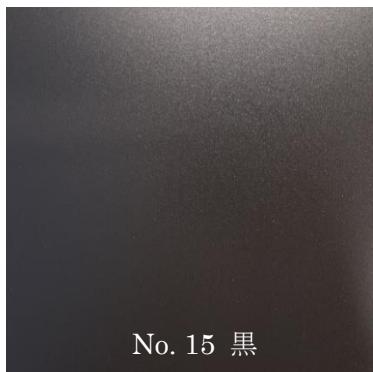
写真 2.5.2 石系の試料 (つづき)



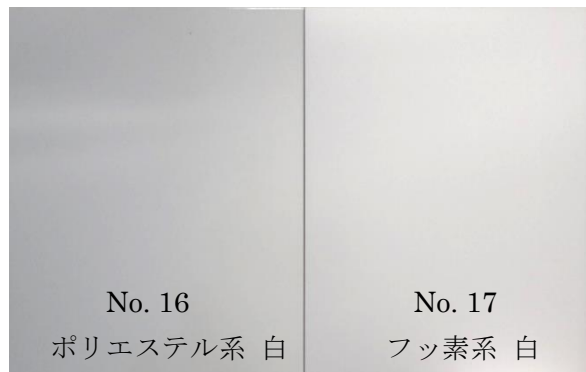
a) ガルバリウム鋼板フッ素系樹脂焼付塗装



b) ガルバリウム鋼板  
ポリエステル系樹脂塗装



c) ガルバリウム鋼板ウレタン系樹脂塗装



d) アルミ板樹脂塗装

写真 2.5.3 塗装系の試料

## 2-5-2. 試料の物性値の測定

選定した試料に対して、分光測色計（コニカミノルタ製 CM-700d4）により視感反射率  $Y$  と  $xy$  色度座標を、光沢度計（BYK-GARDNER 製 AG4446s）により光沢度を、表面粗さ計（東京精密製 SURFCOM FLEX -50c）により表面粗さ  $Ra$ （算術平均粗さ）を測定した。分光測色計、光沢度計、表面粗さ計の写真をそれぞれ写真 2.5.4～2.5.6 に示す。測定した結果を表 2.5.1 に示す。



写真 2.5.4 分光測色計 CM-700d



写真 2.5.5 光沢度計 AG4446



写真 2.5.6 表面粗さ計 SURFCOM FLEX -50

4 分光測色計 CM-700d の性能を以下に示す。 $Y_{xy}$  の測定では観察条件は  $2^\circ$  視野、D65 光源とした。

照明・受光光学系：de:  $8^\circ$ （拡散照明・ $8^\circ$  方向受光）、SCE（正反射光除去）、積分球サイズ： $\Phi$  40 mm、分光手段：平面回折格子、測定波長範囲：400 nm～700 nm、測定波長間隔：10 nm、反射率測定範囲：0～175%（表示分解能：0.01%）、光源：パルスキセノンランプ（UV カットフィルター付き）、測定時間：約 1 秒

5 光沢度計 AG4446 は JIS Z 8741 に準拠している。性能を以下に示す。光源：LED、測定角度（面積、範囲）： $20^\circ$ （ $10 \times 10$ mm, 0～2000GU）、 $60^\circ$ （ $9 \times 15$ mm, 0～1000GU）、 $85^\circ$ （ $5 \times 38$ mm, 0～160GU）

6 表面粗さ計 SURFCOM FLEX-50A の性能を以下に示す。測定範囲：Z 方向  $\pm 400 \mu\text{m}$ 、X 方向（駆動軸）50 mm、分解能：Z 方向  $0.00016 \mu\text{m} / \pm 4 \mu\text{m}$ ～ $0.016 \mu\text{m} / \pm 400 \mu\text{m}$

表 2.5.1 試料の物性値 (No. 1~17)

No.	試料の種類	$Y^{*1}$	$x^{*1}$	$y^{*1}$	光沢度 [GU]			表面粗さ $Ra$ [ $\mu\text{m}$ ]
					20°	60°	85°	
1	複層塩ビ床シート(白)	85.56	0.315	0.336	3.46	21.42	38.51	0.642
2	複層塩ビ床シート(灰)	45.14	0.314	0.334	2.85	20.69	40.79	0.719
3	化粧塩ビフィルム(白拡散)	86.33	0.316	0.333	1.36	3.97	3.78	3.254
4	化粧塩ビフィルム(白艶)	84.54	0.317	0.335	2.69	16.99	56.27	0.364
5	化粧塩ビフィルム(白艶高)	83.75	0.314	0.334	83.14	96.25	98.33	0.049
6	化粧塩ビフィルム(黒艶)	4.39	0.302	0.319	1.27	13.70	56.37	0.431
7	化粧塩ビフィルム(黒艶高)	6.88	0.291	0.318	84.36	94.65	97.72	0.044
8	花崗岩 本磨き仕上げ	18.41	0.313	0.332	83.81	91.66	95.99	0.341
9	花崗岩 水磨き仕上げ	16.92	0.309	0.330	0.47	3.54	25.47	1.113
10	花崗岩 レザー仕上げ	13.85	0.312	0.333	1.67	9.79	25.34	0.865
11	花崗岩 J&P <sup>※2</sup> 仕上げ	26.98	0.314	0.333	0.47	2.21	0.75	9.375
12	ガルバリウム鋼板フッ素系樹脂焼付塗装(黒)	3.43	0.308	0.326	2.70	24.33	69.63	0.320
13	ガルバリウム鋼板フッ素系樹脂塗装(銀黒)	11.29	0.315	0.332	2.34	16.41	34.04	0.720
14	ガルバリウム鋼板ポリエステル系樹脂塗装(黒艶消)	5.75	0.304	0.321	0.42	5.17	10.49	2.244
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	12.76	16.60	1.991
16	アルミ板ポリエステル系樹脂塗装(白)	79.53	0.314	0.334	93.08	97.82	99.31	0.035
17	アルミ板フッ素系樹脂塗装(白)	80.37	0.312	0.332	7.02	34.21	73.31	0.220

※1 D65, SCE (正反射光除去)

※2 ジェットアンドポリッシュの略

## 2-6. 数式モデルのパラメータ推定

試料の種類に応じて屈折率  $n$  を仮定<sup>7</sup>したうえで、2-4 で示した数式モデルのパラメータ (表皮反射成分の係数  $K(\theta_i)$ 、傾斜角の標準偏差  $\sigma(\theta_i)$ 、層内反射率  $R_D(\theta_i)$ ) の推定を行った。結果を表 2.6.1 に示す。

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  $\rho_M$  の数式モデル化は行っていない<sup>8</sup>。測定不可とならないための対策としては、測定角の小さい輝度計を用いることや、出力の低い光源を用いることが考えられる。

層内反射率  $R_D$  は入射角によらずほぼ同じ値を示したため、 $\theta_i = 45^\circ$ 、 $60^\circ$  での平均値を用いてモデル化を行った。一方で、係数  $K$  は入射角ごとにほぼ同じ値となった建材と、なかった建材 (例えば No. 4、13) があつた。シミュレーションに組み込む場合には、 $K$  を定数として用いてよいか、入射角を変数とした関数として用いるかを検討する必要があると考える。どのような建材において  $K$  を入射角を変数とした関数とする必要があるかについては、3-4 節において検討する。

---

<sup>7</sup> 屈折率  $n$  は過去の論文やオンライン上の記事などから、ひとつの素材に対して複数の情報を得て仮定した。集めた情報では、屈折率の値は幅のある値であったため、平均的な値で決め打ちした。屈折率の数値を、その幅のなかで変化させて数式モデルのパラメータを推定したが、数式モデルの形状はほぼ変化しないことを確認している。

<sup>8</sup> No.5、7、8、16 の試料については、正反射方向の輝度値が輝度計の測定限界値より大きくなったため、表皮反射成分の数式モデル化を行っていないが、層内反射成分については数式モデル化を行い  $R_D$  の同定結果を示している。また、本計測条件においては、どの程度の物性値 (光沢度等) の試料であると測定値の限界に達するのかわかる情報となるため、結果を明記している。光源は最小の出力としており、ND フィルター等を用いて減光を行わなかったのは、キセノンランプ光源の分光放射特性を極力変化させないためである。

表 2.6.1 試料の屈折率  $n$  の仮定値と数式モデルのパラメータ  $K$ 、 $\sigma_r$ 、 $R_D$  の推定値

No.	試料の種類	$n$ [-]	$K(\theta)$ [-]		$\sigma_r(\theta)$		$R_D(\theta)$ [-]		$R_D$ [-] 平均
			$\theta=45^\circ$	$\theta=60^\circ$	$\theta=45^\circ$	$\theta=60^\circ$	$\theta=45^\circ$	$\theta=60^\circ$	
1	複層塩ビ床シート(白)	1.54	4.692	5.250	0.060	0.064	0.809	0.824	0.817
2	複層塩ビ床シート(灰)	1.54	5.274	5.194	0.066	0.061	0.416	0.322	0.369
3	化粧塩ビフィルム(白拡散)	1.54	2.068	1.359	0.296	0.155	0.799	0.821	0.810
4	化粧塩ビフィルム(白艶)	1.54	7.089	5.560	0.102	0.087	0.711	0.757	0.734
5	化粧塩ビフィルム(白艶高)	—	—	—	—	—	0.804	0.829	0.816
6	化粧塩ビフィルム(黒艶)	1.54	4.656	4.364	0.094	0.076	0.011	0.012	0.011
7	化粧塩ビフィルム(黒艶高)	—	—	—	—	—	0.061	0.090	0.075
8	花崗岩 本磨き仕上げ	—	—	—	—	—	0.110	0.117	0.114
9	花崗岩 水磨き仕上げ	1.54	1.282	0.976	0.114	0.078	0.147	0.156	0.152
10	花崗岩 レザー仕上げ	1.54	2.207	2.333	0.048	0.042	0.145	0.153	0.149
11	花崗岩 J&P 仕上げ	1.54	1.146	0.712	0.200	0.137	0.271	0.286	0.278
12	ガルバリウム鋼板フッ素系樹脂塗装(黒)	1.35	9.895	9.802	0.043	0.036	0.010	0.010	0.010
13	ガルバリウム鋼板フッ素系樹脂塗装(銀黒)	1.35	10.67	7.631	0.076	0.068	0.011	0.012	0.012
14	ガルバリウム鋼板ポリエステル系樹脂塗装(黒艶消)	1.60	2.101	2.081	0.132	0.115	0.010	0.010	0.010
15	ガルバリウム鋼板ウレタン系樹脂塗装(黒)	1.49	4.708	4.284	0.067	0.059	0.021	0.021	0.021
16	アルミ板ポリエステル系樹脂塗装(白)	1.60	13.12	—	0.018	—	0.732	0.771	0.751
17	アルミ板フッ素系樹脂塗装(白)	1.35	10.02	10.29	0.042	0.045	0.716	0.752	0.734

## 2-7. 詳細測定結果とモデル式

反射特性関数の詳細測定結果とモデル式による推定値を図 2.5.1 に示す。プロットが実測値、曲線が数式モデルを表す。図中に点線で表す原点に接する円は、完全拡散面（反射率が 1 となる均等拡散面）を仮定した場合の反射指向特性関数  $\rho$  である。

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、光沢度が大きく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)は同じ種類で表面仕上げが異なる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。なお、本石材は天然素材であるため、建材サンプルによって色味の違いがみられた。

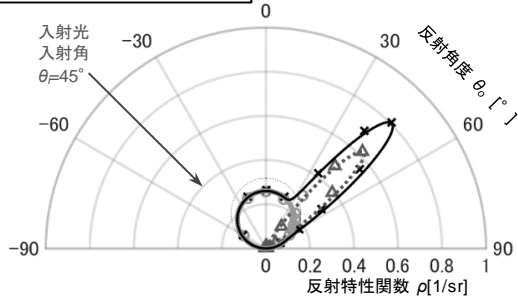
k)~n)は黒色の塗装をしたガルバニウム鋼板の結果である。これらの中で光沢度が最も大きかった No. 12 の表皮反射成分が最も強くなり、光沢度が最も小さい No. 14 が、表皮反射成分も小さくなった。No. 14 は黒色で艶消しを謳っている建材であったが、表皮反射成分がみられ、指向性のある反射特性となった。ガルバリウム鋼板は屋外の屋根等でよく用いられるが、艶消し黒色であっても反射光への配慮が必要といえる。No. 13 が少し広がりのある反射性状となったのは、パール系のフレークの入った素材であったためと考える。No. 12 と 13 は双方ともフッ素系樹脂塗装であるが、表皮反射成分の強度は異なった。一方、フッ素系樹脂塗装の No. 13 とウレタン系樹脂塗装の No. 15 の表皮反射成分の強度は比較的近い値となった。本測定では、樹脂塗装の種類と表皮反射成分の強度との関連性はみられなかった。

o)はフッ素系樹脂塗装のアルミ板の結果である。本建材は光沢度と  $Y$ がともに大きい。表皮反射成分が強く、広がりのない鋭い反射性状となった。層内反射成分は完全拡散性状に近い特性となった。

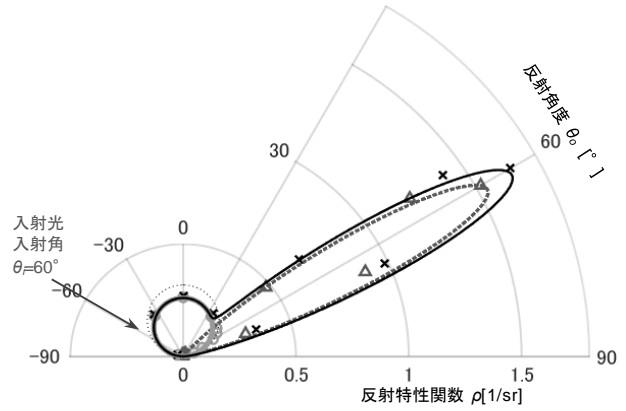
正反射方向の輝度値を計測できた試料は全て数式モデルによって実測値を近似できた。



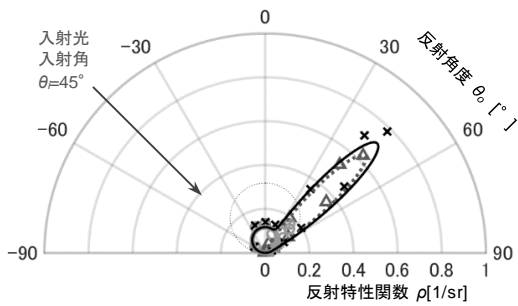
$\Delta$   $\rho_M$  実測値    .....  $\rho_M$  数式モデル  
 $\circ$   $\rho_D$  実測値    ———  $\rho_D$  数式モデル  
 $\times$   $\rho$  実測値    ———  $\rho$  数式モデル



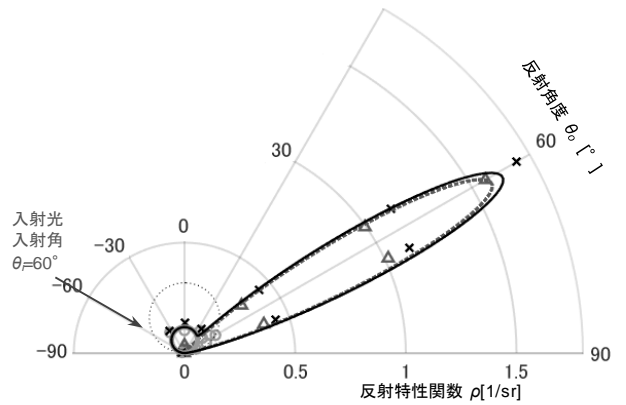
a) No. 1 複層塩ビ床シート (白)  
入射角  $\theta_i = 45^\circ$



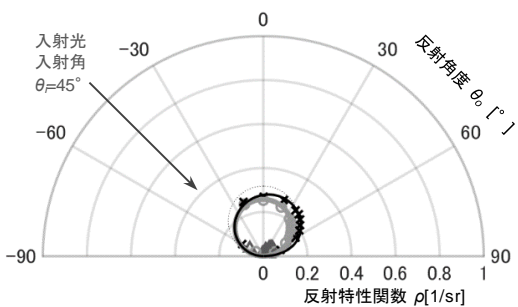
b) No. 1 複層塩ビ床シート (白)  
入射角  $\theta_i = 60^\circ$



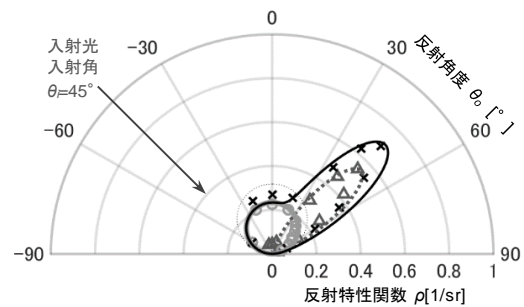
c) No. 2 複層塩ビ床シート (灰)  
入射角  $\theta_i = 45^\circ$



d) No. 2 複層塩ビ床シート (灰)  
入射角  $\theta_i = 60^\circ$

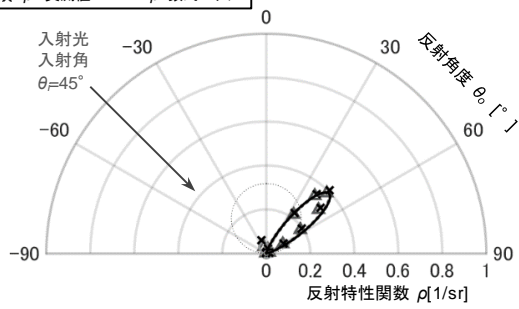
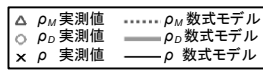


e) No. 3 化粧塩ビフィルム (白拡散)  
入射角  $\theta_i = 45^\circ$

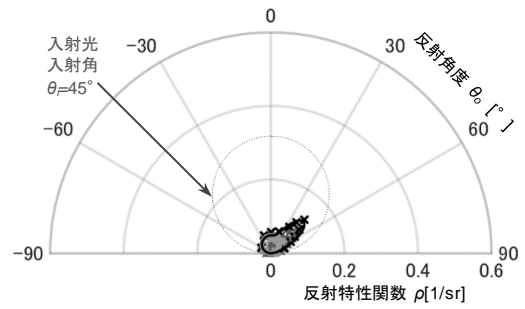


f) No. 4 化粧塩ビフィルム (白艶)  
入射角  $\theta_i = 45^\circ$

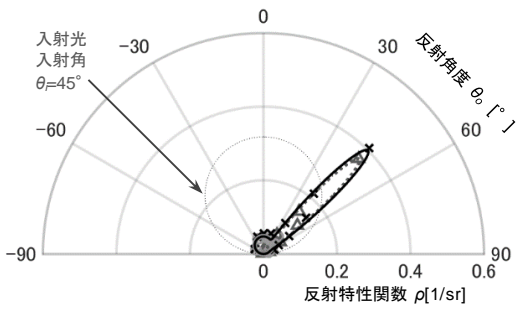
図 2.5.1 反射特性関数の実測値と数式モデル (a~f)



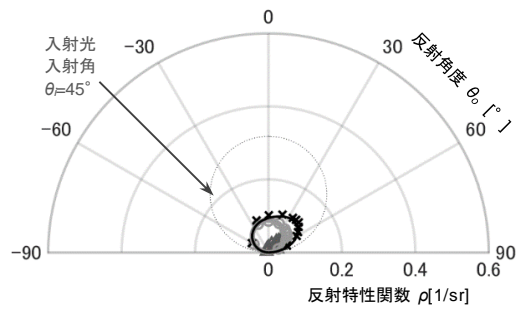
g) No. 6 化粧塩ビフィルム (黒艶)  
入射角  $\theta_i=45^\circ$



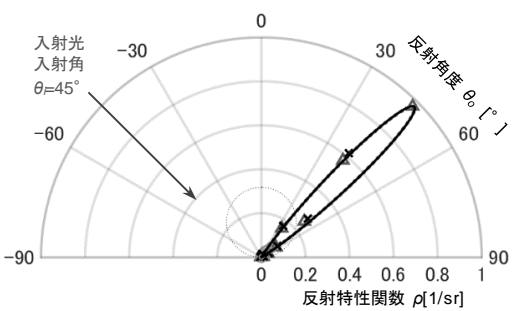
h) No. 9 花崗岩 水磨き仕上げ  
入射角  $\theta_i=45^\circ$



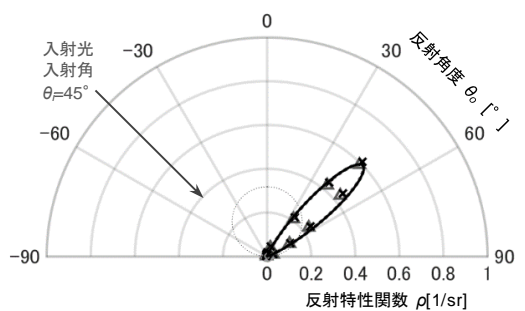
i) No. 10 花崗岩 レザー仕上げ  
入射角  $\theta_i=45^\circ$



j) No. 11 花崗岩 J&P 仕上げ  
入射角  $\theta_i=45^\circ$

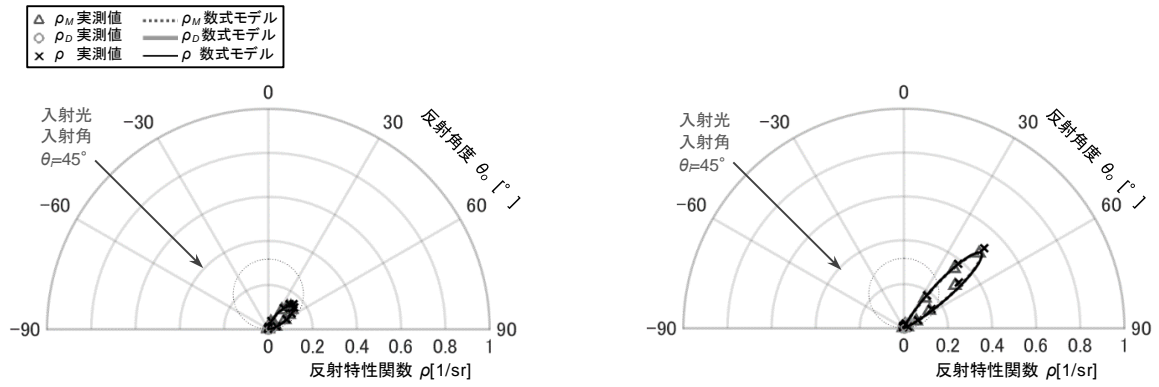


k) No. 12 ガルバニウム鋼板フッ素系  
樹脂塗装 (黒) 入射角  $\theta_i=45^\circ$



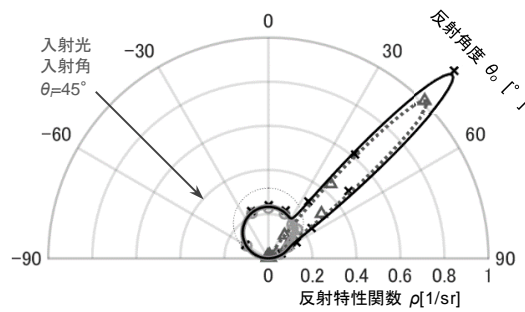
l) No. 13 ガルバニウム鋼板フッ素系  
樹脂塗装 (銀黒) 入射角  $\theta_i=45^\circ$

図 2.5.1 反射特性関数の実測値と数式モデル (g~l) (つづき)



m) No. 14 ガルバニウム鋼板ポリエステル系樹脂塗装（黒艶消）入射角  $\theta_i = 45^\circ$

n) No. 15 ガルバニウム鋼板ウレタン系樹脂塗装（黒）入射角  $\theta_i = 45^\circ$



o) No. 17 アルミ板フッ素系樹脂塗装（白）入射角  $\theta_i = 45^\circ$

図 2.5.1 反射特性関数の実測値と数式モデル (m~o) (つづき)

## 2-8. まとめ

複層塩ビ床シート、化粧塩ビフィルム、花崗岩、樹脂焼付塗装の金属板の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、以下の傾向を明らかにした。

- 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に与える影響が大きい。
- c) 表面仕上げの違いは表皮反射成分へ与える影響が大きい。
- d) 樹脂塗装鋼板で「艶消し」を謳っていても、表皮反射成分が存在することがある。
- e) 樹脂塗装の種類のみで、鋼板の反射指向特性を推測するのは困難である。

さらに、上谷－松浦モデルを用いて反射指向特性関数  $\rho$  のモデル化を行い、実測値を近似できることを示した。

偏光を用いて層内反射と表皮反射に分離する手法では、同一角度条件に対して、偏光条件を変化させて 5 回の測定を行う必要があり、作業工数が多いことが欠点である。これについては、次章で簡易化を試みる。

参考文献

- 1) 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. 6, [https://doi.org/10.3130/aijax.388.0\\_15](https://doi.org/10.3130/aijax.388.0_15)
- 2) 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, <https://doi.org/10.14989/doctor.k4548>
- 3) 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, <https://doi.org/10.1080/00994480.1993.10748049>
- 4) 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, [https://doi.org/10.3130/aijsaxxe.41.0\\_408](https://doi.org/10.3130/aijsaxxe.41.0_408)
- 5) 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
- 6) 蓮沼宏: 光沢, コロナ社, p. 47, 1960
- 7) 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, <https://doi.org/10.11470/oubutsu1932.25.207>
- 8) 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, <https://doi.org/10.11470/oubutsu1932.27.600>
- 9) 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, <https://doi.org/10.11470/oubutsu1932.28.508>
- 10) 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
- 11) 蓮沼宏: 拡散反射と表面の光沢 I, 応用物理, pp. 501-507, 1954
- 12) 田中俊一: 偏光によるすりガラスの反射特性の測定 (II), 応用物理, 第 27 巻, 第 12 号, pp. 758-762, 1958, <https://doi.org/10.11470/oubutsu1932.27.758>
- 13) 田中俊一: 偏光によるすり硝子の反射特性の測定, 応用物理, 第 26 巻, 第 3 号, pp. 85-91, 1957, <https://doi.org/10.11470/oubutsu1932.26.85>



## 第3章 建材の反射指向特性の簡易推定法

### 3-1. はじめに

前章で示した偏光を用いた詳細測定（以下、詳細測定手法）では、同一測定角条件に対して偏光条件を変化させて5回の測定を行う必要があり、測定の作業工数が多い。そのため、本章では、詳細測定手法と同等の精度が得られ、より簡易な推定方法について検討する。簡易推定のため、市販計測器によって近年容易に計測可能となった建材の光沢度、表面粗さ、分光拡散反射率といった物性値を計測し、反射指向特性の数式モデルのパラメータ（表皮反射成分の大きさを表す係数、小粗面の傾斜角の標準偏差、層内反射率といった特徴量を指す。）との相関から、数式モデルのパラメータを推定する方法によって、反射光を表皮・層内反射成分に分離し、反射指向特性を把握する方法を試みる。この方法の有効性を確認するために、偏光を用いた測定によって得た詳細な反射指向特性データと、簡易推定で得られた建材の反射指向特性とを比較する。

### 3-2. 表皮・層内反射成分の特徴量と市販計測器による物性値との比較

市販計測器によって近年容易に測定可能となった建材の光沢度、表面粗さ、分光拡散反射率といった物性値の計測結果(表 2.2.1)から反射指向特性の数式モデルのパラメータ(表 2.4.1)を簡易に推定する方法を検討するため、物性値とパラメータの関係を把握する。そのため、本節では、光沢度、表面粗さは 2-5-2 で測定した値を、反射指向特性のパラメータは 2-6 節で推定した値を用いて分析を行う。

#### 3-2-1. 光沢度と表面粗さ

図 3.2.1 に  $60^\circ$  光沢度と表皮反射成分の大きさのパラメータである係数  $K(60^\circ)$  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。図 3.2.2 に  $60^\circ$  光沢度と、表皮反射成分の分布の特徴量である小素面の傾斜角の標準偏差  $\sigma_f(60^\circ)$  との関係を示す。概して、光沢度が大きいほど  $\sigma_f$  は小さいが、相関は低い。図 3.2.3 に示すように、 $60^\circ$  光沢度と層内反射成分の大きさのパラメータである層内反射率の入射角  $60^\circ$  での値  $R_D(60^\circ)$  との相関はみられない。

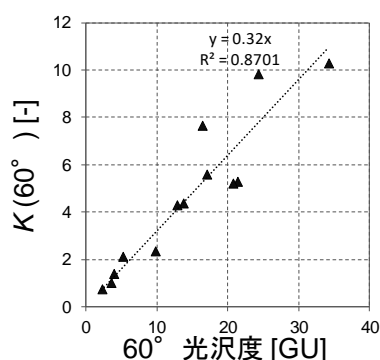


図 3.2.1 光沢度と  $K$

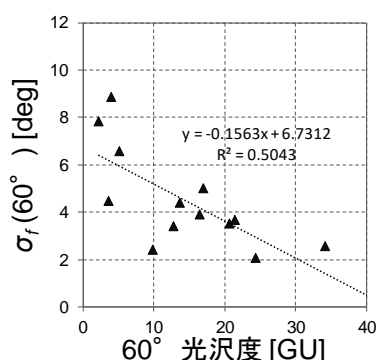


図 3.2.2 光沢度と  $\sigma_f$

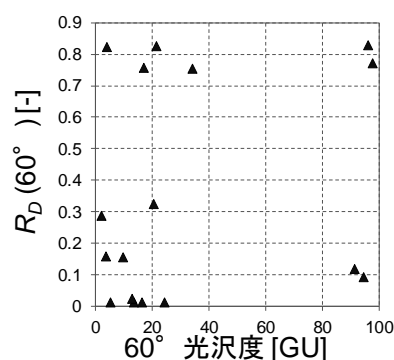


図 3.2.3 光沢度と  $R_D$

図 3.2.4 に表面粗さ  $R_a$  (算術平均粗さ) と入射角  $45^\circ$ 、 $60^\circ$  での  $K(\theta_j)$  の関係を、図 3.2.5 に  $R_a$  と入射角  $45^\circ$ 、 $60^\circ$  での  $\sigma_f(\theta_j)$  の関係を示す。概して、 $R_a$  が大きいほど  $K$  は小さく  $\sigma_f$  は大きい、相関は低い。図 3.2.6 に示す表面粗さ  $R_a$  と入射角  $45^\circ$ 、 $60^\circ$  での  $R_D(\theta_j)$  の関係では、 $R_a$  と  $R_D$  の相関はみられない。

以上より、光沢度が高いほど、表面粗さ  $R_a$  が小さいほど、表皮反射成分が大きい傾向があり、光沢度が高く表面粗さ  $R_a$  が小さいほど  $\sigma_f$  が小さく表皮反射の分布に広がり少なく鋭くなる傾向が示唆された。しかし、光沢度もしくは  $R_a$  の値単独で  $K$  や  $\sigma_f$  を決定可能なほど強い相関性は見られなかった。それらの値を直接決定するためには、光沢度や  $R_a$  を組み合わせて考える必要がある。



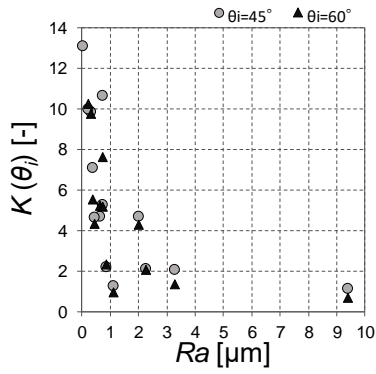


図 3.2.4 表面粗さ  $Ra$  と  $K$

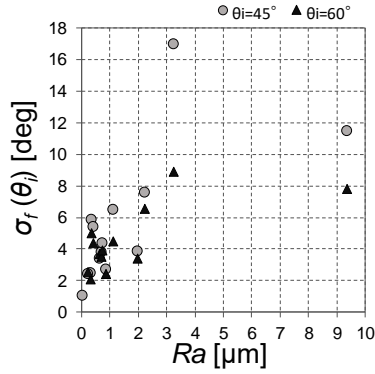


図 3.2.5 表面粗さ  $Ra$  と  $\sigma_f$

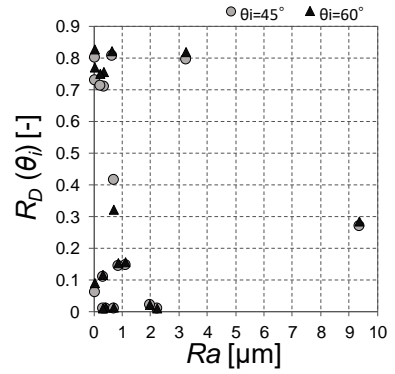


図 3.2.6 表面粗さ  $Ra$  と  $R_D$

### 3-2-2. 分光拡散反射率

2-5 節において、視感反射率  $Y$  と層内反射成分の大きさとの関係が見られたため、層内反射率  $R_D$  と拡散反射率との関係性を分析する。

2-2-1 で使用した分光測色計（コニカミノルタ製 CM-700d）による測定から得られた 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）での分光拡散反射率を用いて、(3.1)式より拡散反射率  $R_d$  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 ~ 740nm とした。

$$R_d = \frac{\int_{360}^{740} E_{xenon}(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda}{\int_{360}^{740} E_{xenon}(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda} \quad (3.1)$$

$E_{xenon}(\lambda)$  : 光源キセノンランプの分光放射照度 [ $W/(m^2 \cdot nm)$ ]

$R(\lambda)$  : 建材毎の分光拡散反射率 [-]

$V(\lambda)$  : 明所視の分光視感効率 [-]

拡散反射率  $R_d$  と層内反射率  $R_D$  との相関を図 3.2.7 に示す。決定係数は  $R^2=0.994$  となり、強い相関が見られる。

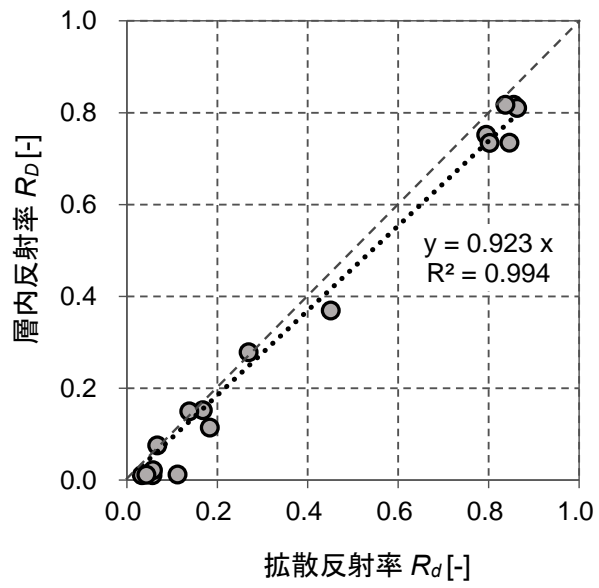


図 3.2.7 拡散反射率  $R_d$  と層内反射率  $R_D$  の比較

## 3-3. 反射指向特性の簡易推定法の提案

前節において、光沢度計で測定した光沢度もしくは表面粗さ計で測定した  $Ra$  の単独の値だけからパラメータ  $K$  や  $\sigma_f$  を決定できるほどの強い相関性は見られなかったが、分光測色計で測定した分光拡散反射率から算出した拡散反射率  $R_d$  と層内反射率  $R_D$  には強い相関があった。そのため、市販計測器で測定可能な物性値としては分光測色計による分光拡散反射率のみを活用して反射光を表皮・層内反射成分に分離し、反射指向特性をモデル化することを考える。

図 3.2.7 において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、(3.1) 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。得られた  $R_D$  と(2.13)式より層内反射成分  $\rho_D$  を推定し、(2.12)式の関係から偏光を用いずに測定した反射特性関数  $\rho$  の測定値から層内反射成分の推定値  $\rho_D$  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－松浦モデルにおいて表皮反射成分  $\rho_M$  を示す(2.14)式中の  $K(\theta)$ 、 $\sigma(\theta)$  を推定し、反射指向特性を数式モデル化した。偏光を用いた 2-2 節の詳細計測により推定した数式モデルと詳細測定値との相関と、簡易推定法により推定した数式モデルと詳細測定値との相関を、図 3.3.1 に比較する。簡易推定法による数式モデルと詳細測定による数式モデルではともに詳細測定値に対して一部乖離が見られたが、簡易推定による数式モデルは詳細計測による数式モデルと同等の精度が得られたため、提案した簡易推定法が有効であると考えられる。詳細計測では、同一角度条件に対して、5 通りの偏光条件で測定を行う必要があったが、本簡易推定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。

図 3.3.1 において、詳細測定と簡易推定とに関わらず、 $\rho$  の実測値と計算値とで大きな値の乖離がみられたのは、 $\rho$  の実測値 0.5~1 付近の 2 つのプロットである。これは入射角  $60^\circ$ 、反射角  $65^\circ$  での No.12 ガルバリウム鋼板フッ素系樹脂塗装（黒）と No. 17 アルミ板フッ素系樹脂塗装（白）での結果である。これらの試料の入射角  $60^\circ$  での反射角度ごとの  $\rho$  の詳細測定値とモデル式を図 3.3.2 に示す。モデル式により測定値の分布の形状をよく近似できているが、表皮反射の拡がり狭く鋭い反射性状（指向性が強い）を持つため、少しの角度ずれが値としては大きな乖離となる。ただし、輝度分布の形状を予測する場合には、微妙な視点位置の違いによる値の違いは特には重要でないと考えられる。

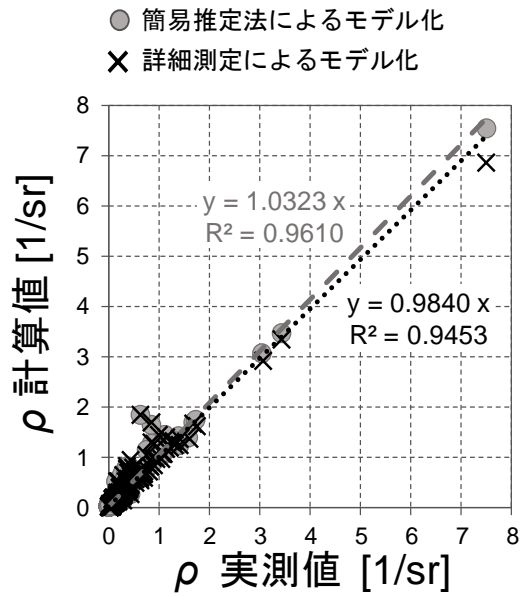


図 3.3.1 簡易測定、詳細測定による  $\rho$  の計算値と  $\rho$  実測値

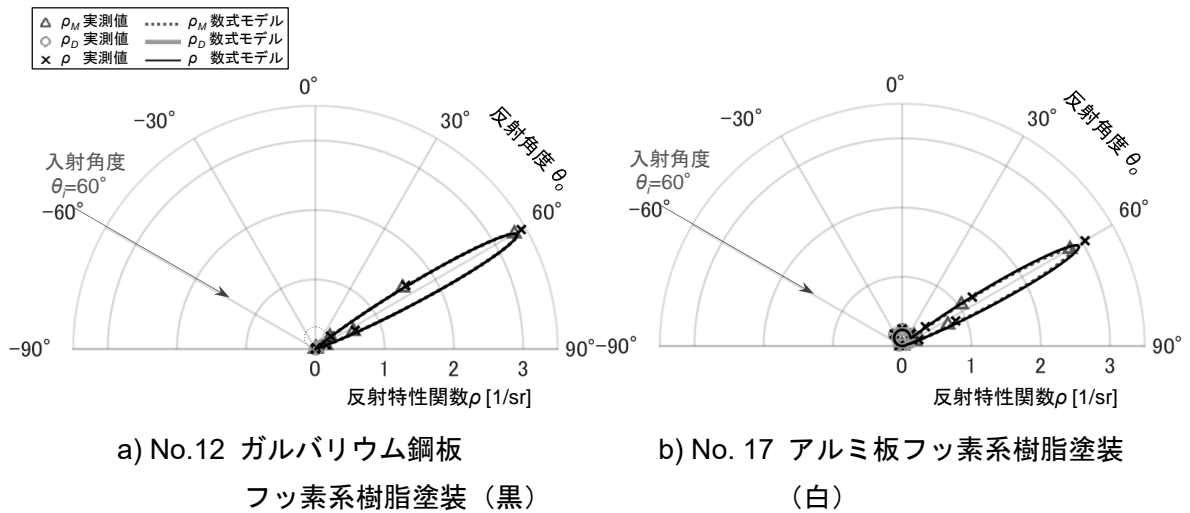


図 3.3.2 反射特性関数の詳細測定値と数式モデル (入射角  $60^\circ$ )

### 3-4. 入射角度の測定条件の検討

前節において提案した簡易推定法を用いて新たに 4 種類の建材について反射指向特性データを測定する。さらに、本手法では作業工数が削減できるため、入射角度条件を増やして測定を行い、反射指向特性の実用的予測に必要な入射角度条件について検討する。

#### 3-4-1. 簡易推定法による測定概要

前章の 17 種類の建材に類似の正反射と均等拡散反射の中間の反射特性をもつ 4 種類の建材を新たに選定した。石系の建材として、写真 3.4.1 に示す大理石水磨き仕上げ、大理石本磨き仕上げ、コンクリート打放し仕上げ、塗装系の建材として、写真 3.4.2 に示すブリキ板ポリエステル系樹脂粉体塗料 5 分艶仕上げについて簡易推定法により反射指向特性を把握した。さらに、透明な物体であるため、本簡易推定法の適用範囲内であるとは判断ができないが、参考として石系の建材として写真 3.4.3 フロートガラス（厚さ 5mm）についても測定を行った。ここで示した写真 3.4.1～.4.3 は実際の見た目とは異なるため、参考資料とする。



a) No. 18 大理石  
水磨き仕上げ

b) No. 19 大理石  
本磨き仕上げ

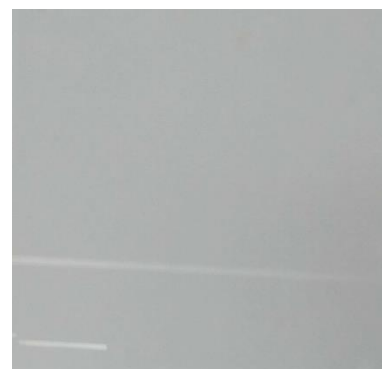
c) No. 20 コンクリート打ち放し  
顔料なしケイ酸質系

写真 3.4.1 石系の試料



No. 21 ブリキ板ポリエステル系樹脂粉体塗料  
5分艶仕上げ（薄橙）

写真 3.4.2 塗装系の試料



No. 22 フロートガラス 5mm厚さ

写真 3.4.3 石系の建材（参考）

図 3.4.1 に測定装置の概要図を示す。本測定では方向依存性の少ない建材を用いたため、方位角は固定 ( $\phi_i=0, \phi_o=\pi$ ) とした。光源には 2-2 節と同様のキセノンランプ (ウシオ電機製 SX-UI501XQ、出力 500W) を使い、内部には光源の出力の変動補正用に照度計 (コニカミノルタ製 T-10MA) を設置した。試料からの反射光は分光放射輝度計<sup>9</sup> (PHOTO RESEARCH 社製 PR-970) で測定した。測定角は基本的には  $1^\circ$  としたが、大理石本磨き仕上げ、ブリキ板ポリエステル系樹脂粉体塗料においては、光沢が強くて測定上限値を超えた条件があったため、測定角を  $0.25^\circ \sim 0.5^\circ$  とした。2 章では手動で角度を調整したが、本章の測定では電動で角度が調整できる写真 3.4.1 に示す測定装置を使用したため、より正確に細かい角度間隔での測定を行った。表 3.4.1 に測定角度条件を示す。光沢の強かったフロートガラスについては、表 3.4.2 のように測定角度条件を細かく設定した。また、フロートガラスは透明であるため透過光が発生する。透過光が暗室の壁面で反射し、輝度計測に影響を与えないよう、試料と暗室の壁の距離を十分にとった。(2.1)式の試料面照度  $E(\theta_i, \phi_i)$  は、2-2 節で用いたものと同様の標準白色板 (Labsphere Inc.製) からの反射光輝度  $L_{ds}(\theta_i, \phi_i; \theta_o, \phi_o)$  を測定して(2.3)式より算出した。

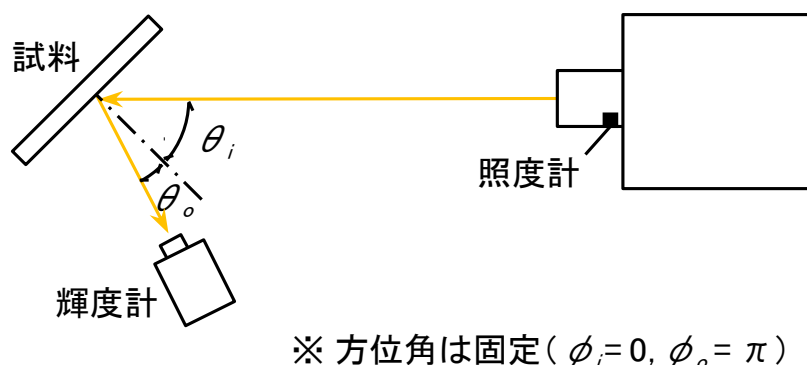


図 3.4.1 測定状況 概要図

<sup>9</sup> 本測定において分光放射輝度は必要ないため、分光計測のできない輝度計を用いれば事足りるが、計測機器の都合上、本測定では分光放射輝度計で輝度測定をしている。分光測定できる計測器を用いていることに特に意味はない。

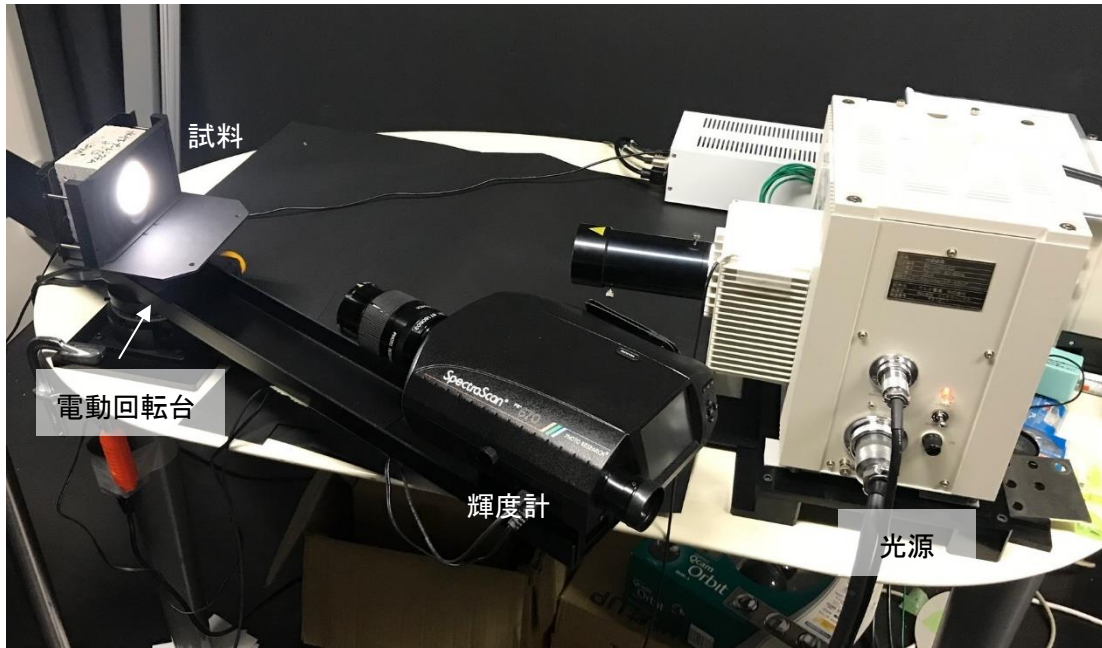


写真 3.4.1 反射指向特性 測定装置

表 3.4.1 簡易推定法での測定角度条件 (No. 18~21 大理石、コンクリート、ブリキ板)

入射角 $\theta_i$ [deg]	入射方位角 $\varphi_i$ [deg]	反射角 $\theta_o$ [deg]	反射方位角 $\varphi_o$ [deg]
15	0	-70, -35, 5, 10, 15, 20, 30, 50, 70	180
30	0	-75, -50, -10, 0, 15, 25, 30, 35, 45, 70	180
45	0	-75, -65, -15, 0, 15, 25, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 70	180
60	0	-80, -30, 0, 30, 40, 50, 55, 58, 60, 62, 65, 70	180

表 3.4.2 簡易推定法での測定角度条件 (No. 22 フロートガラス)

入射角 $\theta_i$ [deg]	入射方位角 $\varphi_i$ [deg]	反射角 $\theta_o$ [deg]	反射方位角 $\varphi_o$ [deg]
15	0	-70, -35, 5, 10, 13, 14, 15, 16, 17, 20, 30, 50, 70	180
30	0	-75, -50, -10, 0, 15, 25, 28, 29, 30, 31, 32, 35, 45, 70	180
45	0	-75, -65, -25, 0, 20, 40, 43, 44, 44.5, 45, 45.5, 46, 47, 50, 70	180
60	0	-80, -40, 0, 35, 50, 55, 58, 58.5, 59, 59.5, 60, 60.5, 61, 61.5, 62, 65, 70	180

選定した建材に対して、光沢度計 (BYK-GARDNER 製 AG4446) で測定した光沢度、分光測色計 (コニカミノルタ製 CM-700d) で測定した視感反射率  $Y$  と  $xy$  色度座標、表面粗さ計 (東京精密製 SURFCOM FLEX -50) で測定した表面粗さ  $R_a$ 、(2.26)式で得られた拡散反射率  $R_d$  ( $R_D$ として用いる) を表 3.4.3 に示す。計測器は全て 2-2 節と同一である。

フロートガラスは透明であるため、光沢度計と分光測色計での測定の際には、黒いスポンジで箱状の下地を設けることで透過光が反射して測定値へ影響を及ぼさないように配慮した<sup>10</sup>。

表 3.4.3 試料の物性値 (No. 18~22)

No.	試料の種類	$Y$ *	$x$ *	$y$ *	光沢度 [GU]			$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_D$ [-] ( $R_d$ )
					20°	60°	85°		
18	大理石 水磨き仕上げ	82.48	0.315	0.333	1.91	7.01	52.46	0.675	0.825
19	大理石 本磨き仕上げ	70.50	0.315	0.332	69.67	77.95	89.83	0.152	0.705
20	コンクリート打ち放し(セラグリーン 顔料なし ケイ酸質系)	29.78	0.327	0.344	0.81	5.84	10.84	1.553	0.300
21	ブリキ板ポリエステル系樹脂粉 体塗料 5 分艶仕上げ(薄橙)	71.22	0.337	0.351	16.07	54.66	73.49	0.318	0.722
22	フロートガラス 5mm	0.03	0.248	0.303	159.0	138.8	113.7	0.016	0.0003

※ D65, SCE (正反射光除去)

<sup>10</sup> 光沢度計と分光測色計での測定においても、反射指向特性の測定時と同様に、暗室において下地を設けずに十分に長い距離をとり、透過光を逃がした方がよい。しかし測定の都合上、試料と計測器を密着させて固定しないといけないため、黒色の箱状の下地を設けた。試料面と箱の底面との距離は数センチであるため、透過光が箱内でわずかに反射した光が測定に影響を与えた可能性は完全には除去できない。



## 3-4-2. 測定結果とモデル式

提案した簡易推定法に則り、(3.1)式から得られた  $Rd$  の値を層内反射率  $R_D$  として用いて(2.13)式より層内反射成分  $\rho_D$  を推定し、(2.12)式の関係より偏光を用いずに測定した反射特性関数  $\rho$  の測定値から層内反射成分の推定値  $\rho_D$  を減じて表皮反射成分  $\rho_M$  を推定した。本推定値に基づき数式モデルのパラメータを推定し、数式モデル化を行った。

図 3.4.2 に反射特性関数  $\rho$  の測定結果と簡易推定法により推定したモデル式を示す。プロットが実測値、曲線がモデル式を表す。図中に点線で表す原点に接する円は、完全拡散面を仮定した時の反射指向特性関数  $\rho$  である。また、No.18 大理石水磨き仕上げと No.20 コンクリート打放し面については、図 3.4.3 に次式で示す数式モデルの測定値との相対誤差の絶対値を入射角ごとに箱ひげ図で示す。

$$|\varepsilon_R| = |(\rho_{measured} - \rho_s) / \rho_{measured}| \quad (3.2)$$

$|\varepsilon_R|$  : 数式モデルの実測値との相対誤差の絶対値 [-]

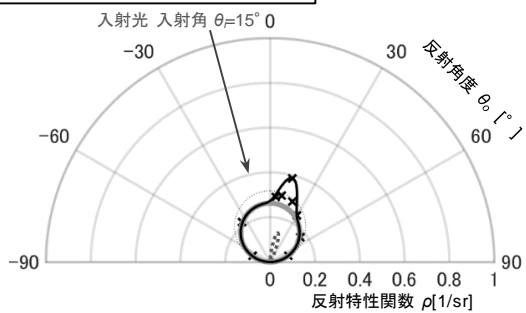
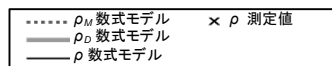
$\rho_{measured}$  : 測定による反射特性関数  $\rho$  [1/sr]

$\rho_s$  : 簡易推定法により推定したモデル式による反射特性関数  $\rho$  [1/sr]

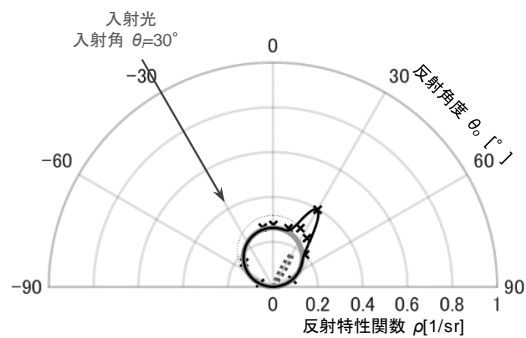
図 3.4.2 a)~d)、図 3.4.3 a)に示す No. 18 大理石水磨き仕上げでは、入射角が大きくなるほど測定値とモデル式との乖離が大きくなった。一方で、図 3.4.2 f)、図 3.4.3 b)に示す No. 20 コンクリート打放し仕上げでは、測定値と数式モデルとの誤差は入射角によって変わらなかった。以上より、入射角と誤差の関連性は建材種類によって異なった。

図 3.4.2 e)は No. 19 大理石本磨き仕上げの結果である。c)の No. 18 水磨き仕上げと比較して、層内反射成分は小さくなり、表皮反射成分の最大値は大きくなった。f) No. 20 コンクリート打ち放し仕上げでは、層内反射成分も拡散反射成分も小さくなった。g) No. 21 ブリキ板ポリエステル系樹脂粉体塗料では、e) 大理石本磨き仕上げと同様に表皮反射成分が局所的に大きくなる特性となった。h) No. 22 フロートガラス (厚さ 5mm) では、層内反射成分はほぼなく、表皮反射成分は正反射方向で非常に大きくなり、正反射性状に近い特性を示した。

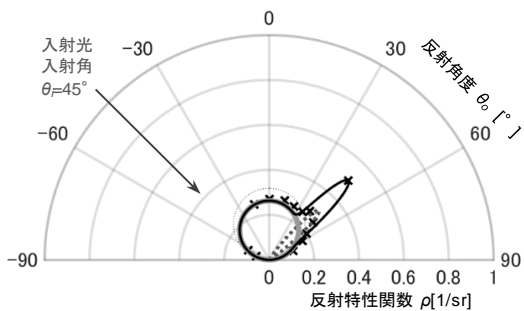
どの結果においても、簡易推定法により推定した数式モデルによって  $\rho$  の測定値を近似できた。f) No. 20 コンクリート打ち放し仕上げと g) No. 21 ブリキ板ポリエステル系樹脂粉体塗料では、測定値とモデル式が特によく一致した。



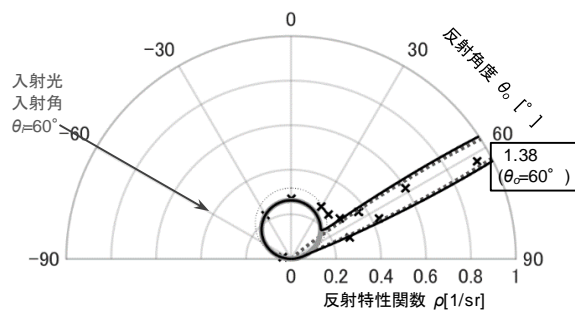
a) No. 18 大理石 水磨き仕上げ  $\theta_i=15^\circ$



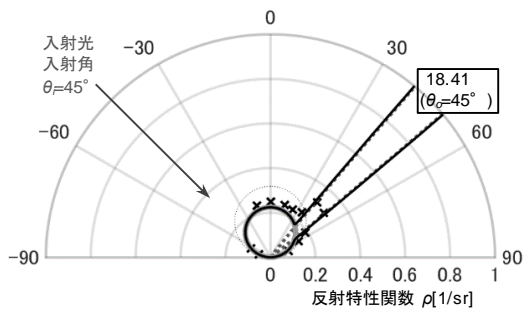
b) No. 18 大理石 水磨き仕上げ  $\theta_i=30^\circ$



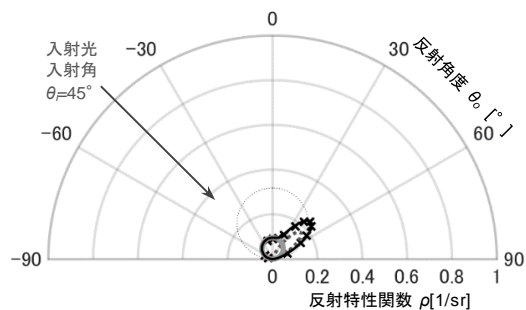
c) No. 18 大理石 水磨き仕上げ  $\theta_i=45^\circ$



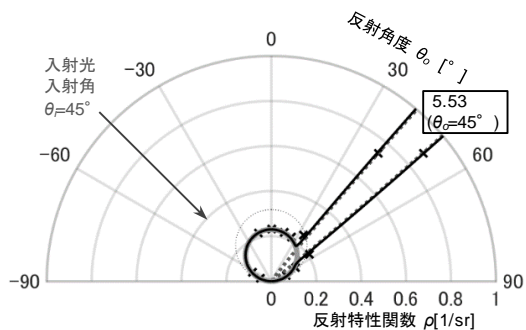
d) No. 18 大理石 水磨き仕上げ  $\theta_i=60^\circ$



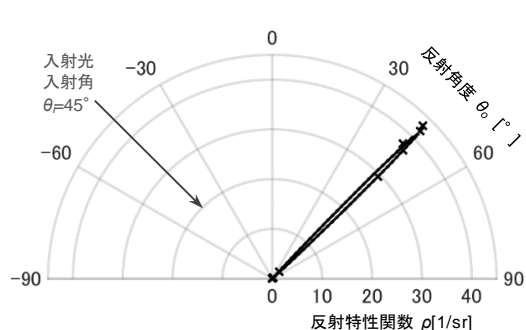
e) No. 19 大理石 本磨き仕上げ  $\theta_i=45^\circ$



f) No. 20 コンクリート打放し面  $\theta_i=45^\circ$

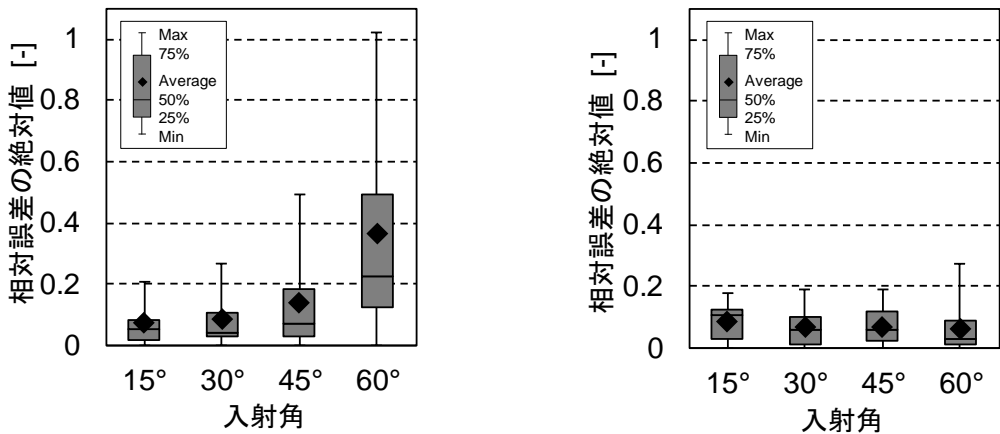


g) No. 21 ブリキ板ポリエステル系樹脂粉体塗料 (5分艶)  $\theta_i=45^\circ$



h) No. 22 フロートガラス (厚さ 5mm)  $\theta_i=45^\circ$

図 3.4.2 反射特性関数の測定値と簡易推定法による数式モデル



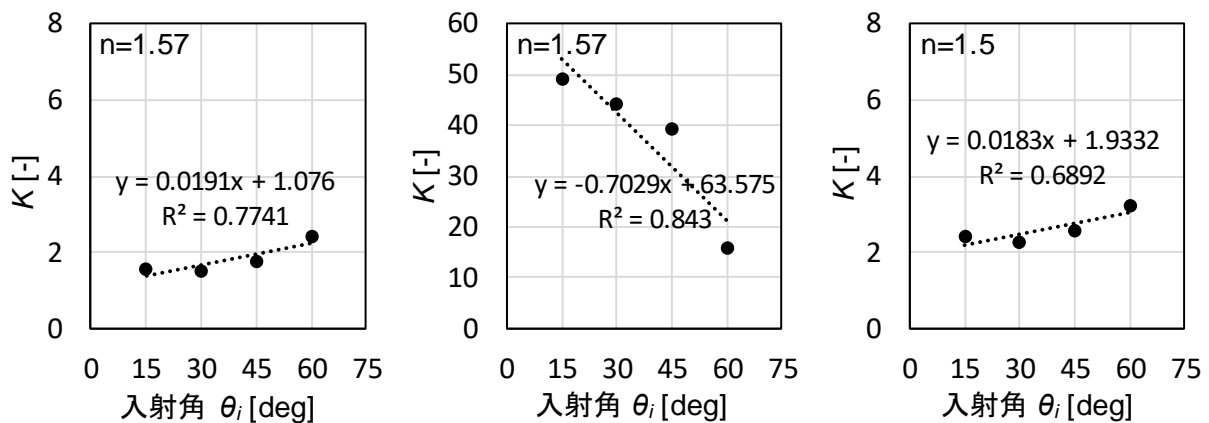
a) No. 18 大理石 水磨き仕上げ

b) No. 20 コンクリート打放し面

図 3.4.3 入射角毎の相対誤差の絶対値の箱ひげ図

### 3-4-3. 表皮反射成分のパラメータ推定のための入射角度条件

簡易推定法による数式モデルのパラメータ  $K(\theta_i)$  と  $\sigma(\theta_i)$  の推定値を入射角  $\theta_i$  ごとに図 3.4.4、3.4.5 に示す。屈折率  $n$  の仮定値は図中左上に明記している。 $K$  においては、特に b) No. 19 大理石本磨き仕上げと e) No. 22 フロートガラスにおいて入射角による  $K$  の増減が大きかった。入射角が増加するほど  $K$  が大きくなる場合と、逆の場合があった。一方で  $\sigma$  については、入射角による増減は最大でも  $0.021\text{rad}$  ( $1.2^\circ$ ) 以内に収まった。

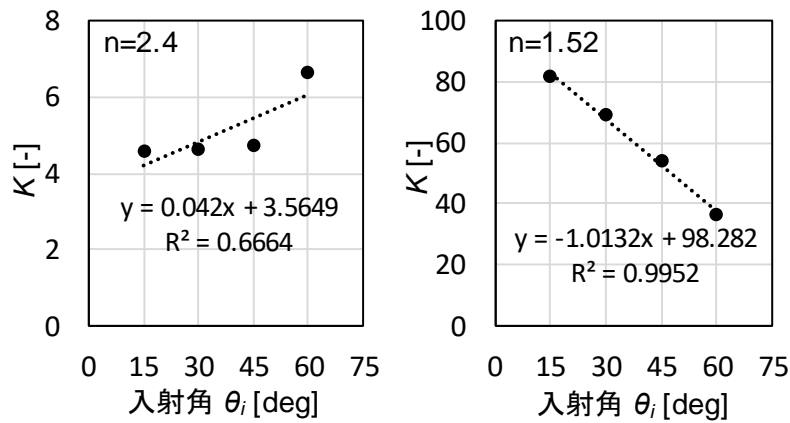


a) No. 18 大理石 (水磨き)

b) No. 19 大理石 (本磨き)

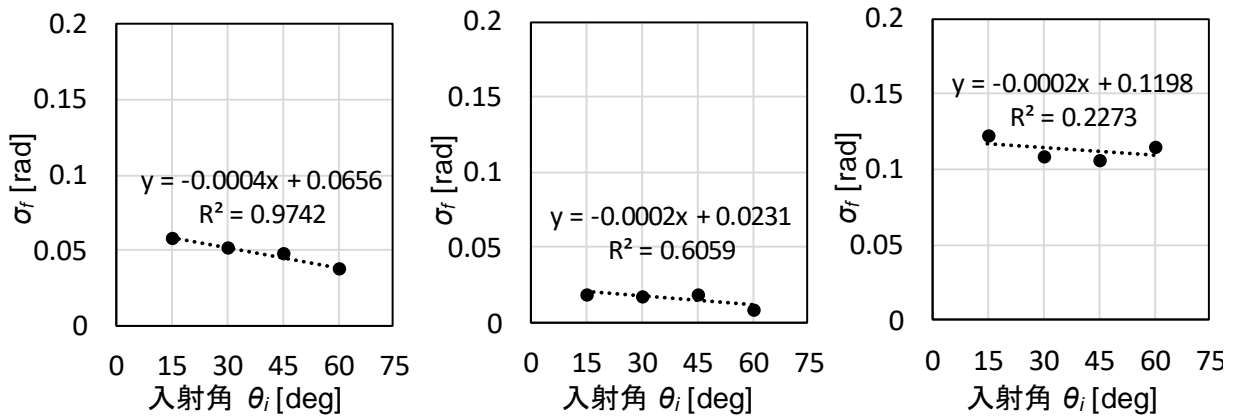
c) No. 20 コンクリート打放し

図 3.4.4 入射角毎の係数  $K$  (a~c)

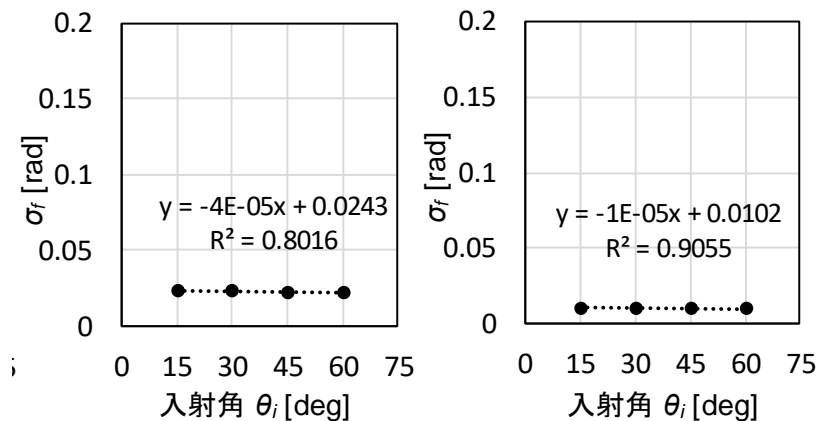


d) No. 21 ブリキ板ポリエステル系 樹脂粉体塗料 (5分艶) e) No. 22 フロートガラス

図 3.4.4 入射角毎の係数  $K$  (d、e) (つづき)



a) No. 18 大理石 (水磨き) b) No. 19 大理石 (本磨き) c) No. 20 コンクリート打放し



d) No. 21 ブリキ板ポリエステル系 樹脂粉体塗料 (5分艶) e) No. 22 フロートガラス

図 3.4.5 入射角毎の小素面の傾斜角の標準偏差  $\sigma_f$

図 3.4.6 に示すのは、No.18~22 の試料の光沢度（便宜上 20°、60°、80°の平均値を用いた）と、数式モデルのパラメータ  $K(\theta_i)$  の入射角  $\theta_i$  に対する線形近似式の傾きの絶対値との比較である。 $K$  の近似式の傾きは、光沢度が高い試料ほど大きい傾向となった。よって、光沢度が高い建材について  $K$  の推定を行う場合には、近似式の傾きを得るために入射角度を複数回設定し測定を行う必要があると考えられる。一方で、光沢度が低い試料については、入射角度による値の変動が小さいため、少数の代表的な入射角条件での測定で  $K$  の推定が可能であると考えられる。

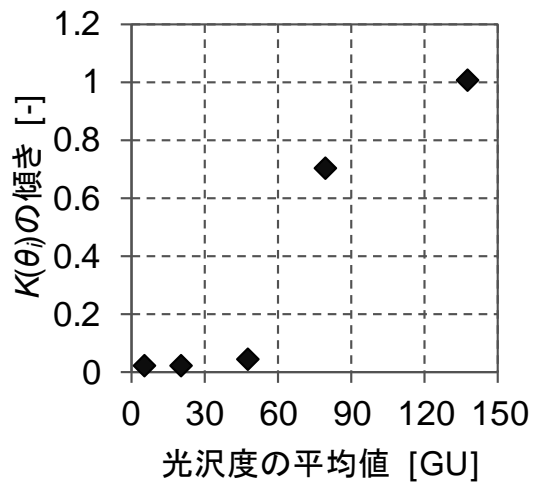


図 3.4.6 光沢度と  $K(\theta_i)$  の傾きとの関係

### 3-5. 凹凸の大きい建材の反射指向特性

凹凸の大きい建材として、タイルカーペット、壁紙、木質内装材の反射指向特性を簡易推定法を用いて推定し、簡易推定法および数式モデルの適用可否について考察する。

#### 3-5-1. 試料および測定概要

凹凸の大きい建材や方位角依存性があると考えられる建材として、繊維系の建材であるタイルカーペット（写真 3.5.1）、紙系の建材である塩化ビニル樹脂系壁紙（写真 3.5.2）、木系の建材である杉（写真 3.5.3）を用いた。タイルカーペットは 3.5mm 長さのループパイル（BCF ナイロン 100%）で構成され、壁紙は表面粗さ計（東京精密製 SURFCOM FLEX -50）により測定した表面粗さ  $Ra$  が  $10.39\mu\text{m}$  だった。木質内装材については、表面の保護塗装によってその反射指向特性が変化すると考えられるため、塗装をしていない試料と、保護塗装（透明アクリル塗装）をした試料を用意した。樹種は国産の杉とし、保護塗装のあり・なしとも同じ産地のものとした。

表 3.5.1 に各建材の、分光測色計（コニカミノルタ製 CM-700d）で測定した視感反射率  $Y$ 、 $xy$  色度座標、 $8^\circ$  光沢度、(3.1)式で得られた拡散反射率  $R_d$  ( $R_D$ として用いる)を示す。測定値は D65 光源、SCE（正反射光除去）方式とした。



写真 3.5.1 繊維系の試料



写真 3.5.2 紙系の試料

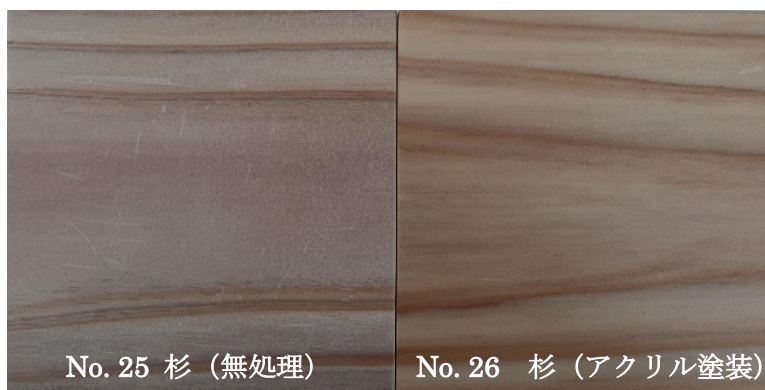


写真 3.5.3 木系の試料

表 3.5.1 試料の物性値 (No. 23~26)

No.	試料の種類	$Y^*$	$x^*$	$y^*$	8° 光沢度	$R_D[-]$ ( $R_d$ )
23	タイルカーペット(灰色)	17.99	0.310	0.338	2	0.179
24	壁紙(白)	85.52	0.320	0.338	8	0.858
25	杉(無処理)	43.40	0.364	0.364	29	0.438
26	杉(アクリル塗装)	44.64	0.375	0.379	49	0.450

測定装置、測定方法についても 3-4 節と同様とした。測定角度を表 3.5.2 に示す。ただし、杉に関しては、輝度の測定には輝度計（コニカミノルタ製 LS-150、測定角 1°）を用いた。また、入射角度 45° のみで測定を行い、木材の木目に対して水平方向と垂直方向に対してそれぞれ測定を行った。

表 3.5.2 測定角度条件

入射角 $\theta_i$ [deg]	入射方位角 $\Phi_i$ [deg]	反射角 $\theta_r$ [deg]	反射方位角 $\Phi_r$ [deg]
15	0	-70, -35, 5, 10, 15, 20, 30, 50, 70	180
30	0	-75, -50, -10, 0, 15, 25, 30, 35, 45, 70	180
45	0	-75, -65, -15, 0, 15, 25, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 70	180
60	0	-80, -30, 0, 30, 40, 50, 55, 58, 60, 62, 65, 70	180

### 3-5-2. 簡易推定法による数式モデルのパラメータ推定

簡易推定法に則り、(3.1)式から得られた  $R_d$  の値を層内反射率  $R_D$  として用いて数式モデルのパラメータを推定した。推定した数式モデルのパラメータを表 3.5.3 に示す。

タイルカーペットでは、入射角  $\theta_i=15^\circ$ 、 $30^\circ$  においては、簡易推定した  $R_D$  により算出した層内反射成分  $\rho_D$  の値が、測定した  $\rho$  より大きくなってしまったため、 $K(\theta_i)$  と  $\sigma(\theta_i)$  が同定できなかった。壁紙では、入射角  $\theta_i=15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$  において、同様の理由で  $K(\theta_i)$  と  $\sigma(\theta_i)$  が同定できなかった。これは、市販計測器で測定した拡散反射率の値には、タイルカーペットの毛足や壁紙の凹凸によって正反射でない方向へと不規則に反射した表皮反射成分が含まれており、推定した層内反射成分が実際の層内反射成分よりも大きくなったためと考えられる。

表 3.5.3 試料の屈折率  $n$  の仮定値と数式モデルのパラメータ  $K$ 、 $\sigma_r$ 、 $R_D$  の推定値

No.	試料の種類	$n$ [-]	$K(\theta)$ [-]		$\sigma_r(\theta)$		$R_D$ [-]
			$\theta=45^\circ$	$\theta=60^\circ$	$\theta=45^\circ$	$\theta=60^\circ$	
23	タイルカーペット(灰)	1.53	0.258	0.468	0.418	0.241	0.179
24	壁紙(白)	1.55	—	0.547	—	0.309	0.858
25	杉(無処理) 木目に水平方向	1.6	1.864		0.081		0.438
	杉(無処理) 木目に垂直方向		3.467		0.234		
26	杉(アクリル塗装) 木目に水平方向	1.6	4.384		0.095		0.450
	杉(アクリル塗装) 木目に垂直方向		5.726		0.138		

※ 「—」は測定したが同定不可、灰色塗りつぶしは測定していない。

※

### 3-5-3. 測定結果とモデル式

図 3.5.1 に反射特性関数  $\rho$  の測定結果と簡易推定法により数式モデル化した値を示す。プロットが測定値、曲線がモデル式を表す。図中に点線で表す原点に接する円は、完全拡散面での反射指向特性関数  $\rho$  である。タイルカーペットの入射角  $\theta_i=15^\circ$ 、 $30^\circ$ での簡易推定によるモデル式のパラメータについては、推定ができた  $K(45^\circ)$ 、 $\sigma_r(45^\circ)$ の値を用いた。壁紙の入射角  $\theta_i=15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ での簡易推定によるモデル式のパラメータについては、推定ができた  $K(60^\circ)$ 、 $\sigma_r(60^\circ)$ の値を用いた。

a)~d)に示すタイルカーペットの結果では、モデル式により測定値が再現できなかった。3-5-2で述べた通り、拡散反射率による層内反射成分の推定ができていないことに加えて、本測定に用いたタイルカーペットでは、パイルがループ状に連なっており(写真 3.5.1)、そこでの光の複雑な反射性状を、本研究で用いた数式モデルでは表現できないためと考えられる。複雑な反射性状とは、具体的には以下の通りである。入射角度  $30^\circ$ 、 $45^\circ$ では反射角  $0^\circ$ より反射角  $-15^\circ$ の方が  $\rho$ の測定値が大きくなっている。入射角度  $60^\circ$ での測定結果では、反射角度  $65^\circ$ 、 $70^\circ$ において反射強度が少し大きくなっている。これらの反射性状はタイルカーペットの測定位置や毛足の乱れ具合によっても変化するものと考えられる。

e)~h)に示す壁紙の結果では、どの入射角度でも拡散性の高い結果となり、数式モデルとの乖離も小さかった。壁紙では、入射角  $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ において、 $K$ と  $\sigma_r$ が推定できなかったが、推定できた入射角度  $60^\circ$ の結果により、他の入射角度についても推定してもさほど問題ないと考えられる。

i)~l)に示す杉の結果では、無処理の i)、j)と保護用のアクリル塗装ありの k)、l)を比較すると、アクリル塗装により特に表皮反射成分が大きくなる傾向がみられた。また、木目に垂直方向の方が水平方向よりも表皮反射成分の分布の拡がりが大きくなった。これは、木目に垂直方向に入射した光が木目の溝で多重反射することで、表皮反射成分が拡散するためと考えられる。反射角度  $0^\circ$ 方向付近の  $\rho$ の測定値は、木目に水平方向よりも垂直方向の方が大きくなった。これについても、垂直方向の方が木目の溝において拡散反射しやすいためと考えられる。木材は木目を有し、入射方位角により反射指向特性が異なるため、数式モデルのパラメータは、定数ではなく木目に対する光の入射方位角の関数にする必要があると考えられる。また、反射



角度 $-15^\circ$ 、 $0^\circ$ 付近において、数式モデルでの測定値の再現性が悪かった。タイルカーペットと同様に、拡散反射率の測定において木目の溝により多重反射した表皮反射成分が含まれてしまい、推定した層内反射成分が実際の層内反射成分よりも大きくなったことや、本研究で用いた表皮反射の数式モデルでは木目の溝での反射性状をうまく表現できないことが原因として考えられる。

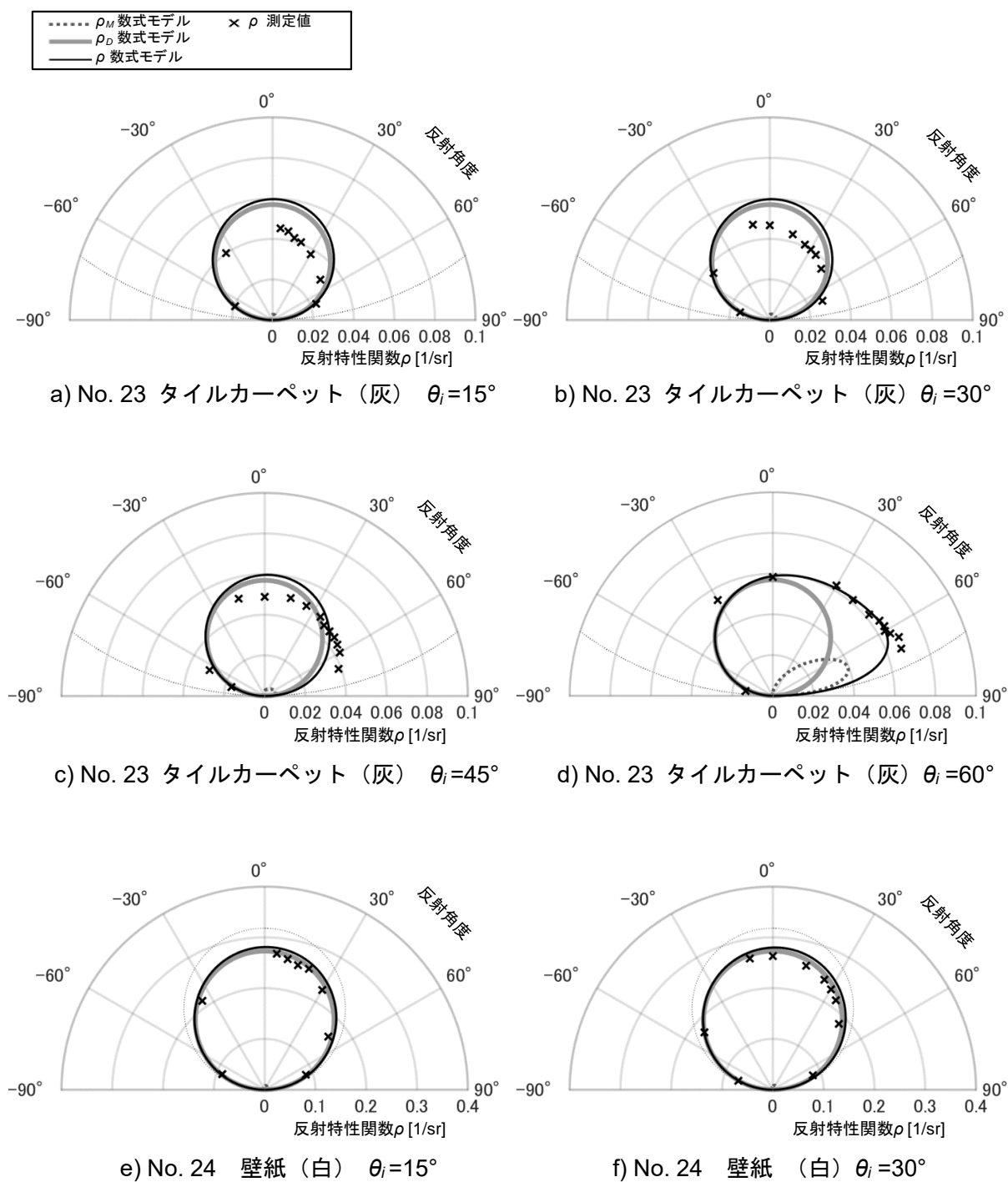
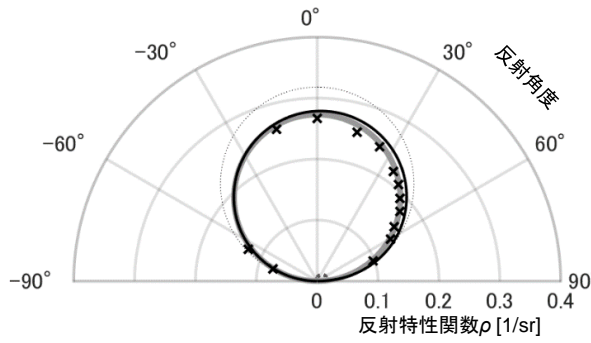
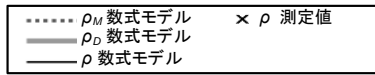
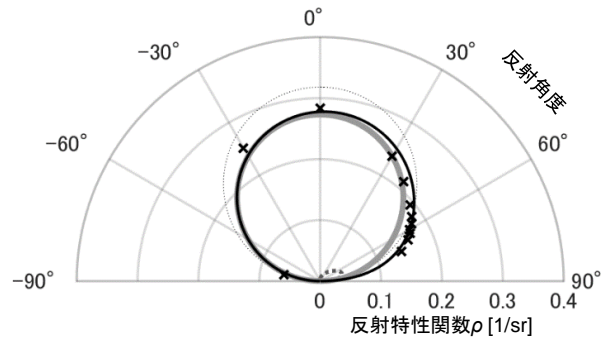


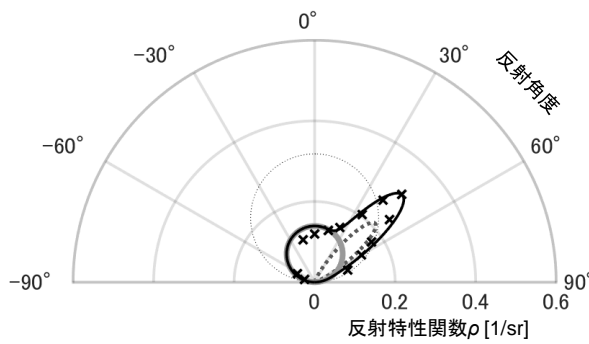
図 3.5.1 反射特性関数の実測値と簡易推定法による数式モデル (a~f)



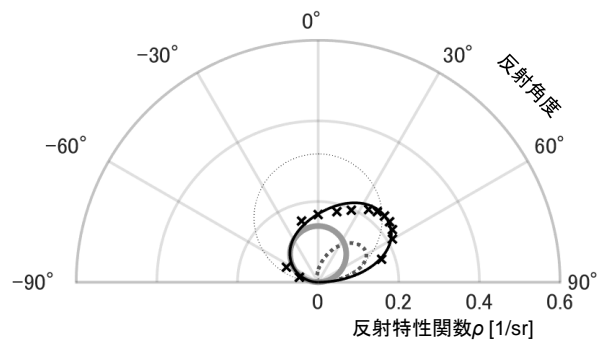
g) No. 24 壁紙 (白)  $\theta_i=45^\circ$



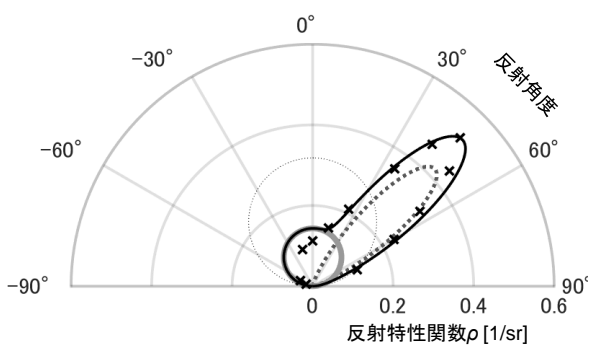
h) No. 24 壁紙 (白)  $\theta_i=60^\circ$



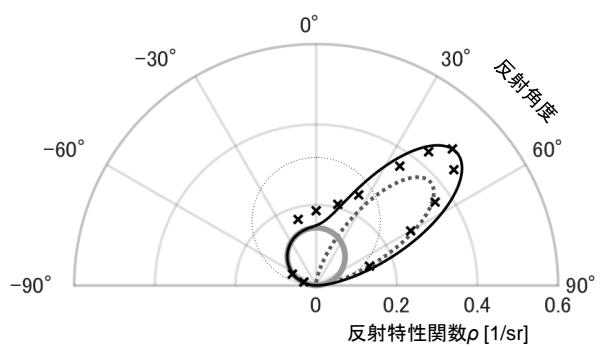
i) No. 25 杉 (無処理) 水平方向  $\theta_i=45^\circ$



j) No. 25 杉 (無処理) 垂直方向  $\theta_i=45^\circ$



k) No. 26 杉 (アクリル塗装) 水平方向  
 $\theta_i=45^\circ$



l) No. 26 杉 (アクリル塗装) 垂直方向  
 $\theta_i=45^\circ$

図 3.5.1 反射特性関数の実測値と簡易推定法による数式モデル (g~l) (つづき)

### 3-6. 可搬測定器を用いた現地測定による反射指向特性の推定

前節までの測定方法は建材サンプルを用いた実験室での測定を前提としているが、改修工事での現状調査など、既設の建物を対象に光環境計算を行う場合には、反射特性の現地測定の必要が生じる。そこで、可搬の計測器のみを用いた建材の反射特性を推定する方法が藤田ら<sup>1)</sup>により提案されている。本節では 3-6-1、3-6-2 において既往の推定方法についてまとめたうえで、3-6-3、3-6-4 において実建物での可搬計測器を用いた現地測定による反射指向特性の推定結果を示す。

#### 3-6-1. 推定手法<sup>1)</sup>

可搬計測器を用いて測定可能な3つの物性値（線粗さ、光沢度、拡散反射率）から図 3.5.1 の手順に従って、反射指向特性の特徴量である屈折率  $n$ 、小素面の傾斜角の傾きの標準偏差  $\sigma_f$ 、係数  $K$ 、層内反射率  $R_D$  を推定する。

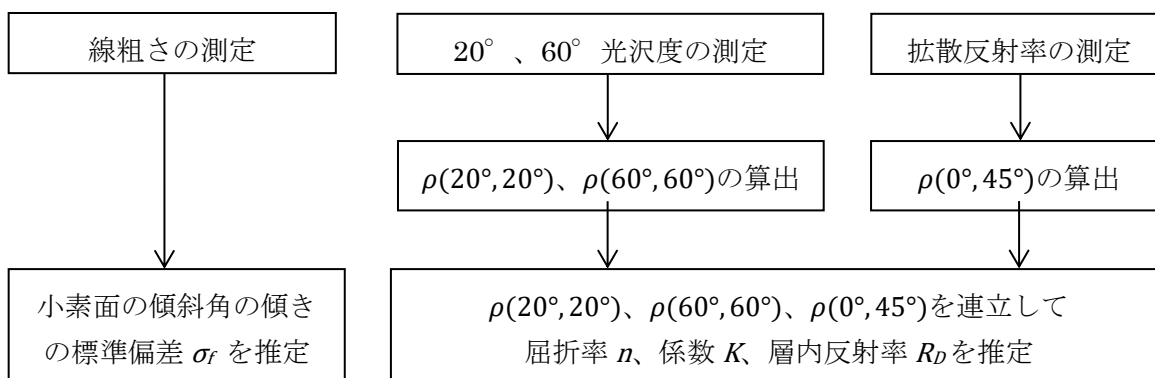


図 3.6.1 可搬測定器を用いて測定可能な物性値による反射指向特性の推定手順

#### 3-6-1-1. 小粗面の傾きの標準偏差

線粗さ計で測定した材料表面の線粗さから、測定点間ごとの傾斜角を求め、その標準偏差を二乗平均平方根傾斜角として算出し、小粗面の傾きの標準偏差  $\sigma_f$  として用いる。

#### 3-6-1-2. 屈折率、表皮反射の係数、層内反射率

入射光の入射角  $20^\circ$  および  $60^\circ$  での正反射方向の反射特性関数  $\rho$  は、同じ入射角での光沢度と比例すると考えられる。そこで、その比例定数  $C_{20}$ 、 $C_{60}$  を材料ごとに求めておくことで、(3.2)、(3.3)式より  $\rho(20^\circ, 20^\circ)$ 、 $\rho(60^\circ, 60^\circ)$  を測定できる。

$$\rho(20^\circ, 20^\circ) = C_{20} G_S(20^\circ) \cos 20^\circ \quad (3.2)$$

$$\rho(60^\circ, 60^\circ) = C_{60} G_S(60^\circ) \cos 60^\circ \quad (3.3)$$

$G_S(20^\circ)$ 、 $G_S(60^\circ)$  :  $20^\circ$  光沢度、 $60^\circ$  光沢度 [-]

$C_{20}$ 、 $C_{60}$  : 比例係数 [1/sr]

### 3-6-1-3. 拡散反射率

層内反成分が主となる入射反射角での反射特性関数 $\rho(0^\circ, 45^\circ)$ は  $0/45^\circ$  光学系<sup>11</sup>の分光色差計で測定できる拡散反射率 $R_0$ より(3.4)式から推定する。

$$\rho(0^\circ, 45^\circ) = R_0 \cos 45^\circ / \pi \quad (3.4)$$

以上より可搬計測器による線粗さ、光沢度、拡散反射率の測定値から $\rho(20^\circ, 20^\circ)$ 、 $\rho(60^\circ, 60^\circ)$ 、 $\rho(0^\circ, 45^\circ)$ が推定でき、3つの連立方程式を解くことで、屈折率  $n$ 、係数  $K$ 、層内反射率  $R_D$ が求められる。

### 3-6-2. 推定のための係数<sup>1)</sup>

正反射方向の反射特性関数を推定するための比例係数  $C_{20}$ 、 $C_{60}$ は、光沢度計（日本電色工業製 PG-IIIM）を用いて測定した光沢度から求められた。反射指向特性を推定するための光沢度の比例係数  $C_{20}$ 、 $C_{60}$ 、 $R_0$ の補正係数と、推定が可能な  $\sigma_f$ 、 $C_{20}$ 、 $C_{60}$ の範囲を表 3.6.1 に示す。プラスチック系、塗装系、石系、紙系の材料について係数が求められ、中程度の光沢のもので良好な結果が得られている。

層内反射が主となる $\rho(0^\circ, 45^\circ)$ は、理論上は(3.4)式より算出できるが、簡易型分光色差計（日本電色工業製 NF333）を用いて(3.4)式により求めた推定値が、平行光を試料面に反射させて直接輝度測定して求めた値より大きくなる傾向が見られた。そこで、分光色差計で測定した拡散反射率 $R_{0_m}$ に補正係数をかけて $R_0$ を算出することを提案している（表 3.6.1）。この値の差は、計測器による誤差によるものと考えられる。 $R_0$ の補正係数は建材の種類により大差がなかったため、材料によらず一律に平均値の 0.94 を用いる。

---

<sup>11</sup> 試料面に垂直に光を入射させて反射角  $45^\circ$  方向の光束を測定するものである<sup>2)</sup>。

表 3.6.1 推定のための係数（精度よく推定できた範囲については青字）

建材の種類	$\sigma_r$ の範囲	光沢度の比例係数		$R_o$ の補正係数
		$C_{20}$	$C_{60}$	
プラスチック系	0.046~0.076	0.176 ( $0.4 \leq G_s(20^\circ) \leq 4.0$ )	0.141 ( $3.0 \leq G_s(60^\circ) \leq 20$ )	0.91
		0.133 ( $30 \leq G_s(20^\circ) \leq 100$ )	0.419 ( $70 \leq G_s(60^\circ) \leq 90$ )	
		0.176 ( $1.5 \leq G_s(20^\circ) \leq 3.8$ )	0.141 ( $11.2 \leq G_s(60^\circ) \leq 19.8$ )	
塗装系	0.028~0.076	0.186 ( $0.5 \leq G_s(20^\circ) \leq 100$ )	0.256 ( $5.0 \leq G_s(60^\circ) \leq 80$ )	0.92
		0.186 ( $2.6 \leq G_s(20^\circ) \leq 18.8$ )	0.256 ( $15.4 \leq G_s(60^\circ) \leq 55.8$ )	
石系	0.015~0.055	0.172 ( $0.2 \leq G_s(20^\circ) \leq 10$ )	0.175 ( $1.0 \leq G_s(60^\circ) \leq 40$ )	0.97
		0.274 ( $50 \leq G_s(20^\circ) \leq 170$ )	0.954 ( $80 \leq G_s(60^\circ) \leq 140$ )	
		0.172 ( $1.7 \leq G_s(20^\circ) \leq 10.2$ )	0.175 ( $9.7 \leq G_s(60^\circ) \leq 41.2$ )	
紙系	0.032	0.221 ( $1.8 \leq G_s(20^\circ) \leq 50$ )	0.342 ( $5.0 \leq G_s(60^\circ) \leq 80$ )	0.94
		0.221 ( $G_s(20^\circ) = 13.3$ )	0.342 ( $G_s(60^\circ) = 46.4$ )	
平均	—	0.189	0.229	0.94

※ ( ) 内は適用範囲

### 3-6-3. 線粗さ、光沢度、拡散反射率の現地測定

実建物 A、B の内装材を対象として本節では可搬計測器による測定を行い、次節では反射指向特性の数式モデルのパラメータ（以下、反射指向特性値）を推定する。次節で推定する反射指向特性値は、後述の 6-3 節および 6-4 節の輝度分布計算において入力値として用いる。実建物 A、B の形状については 6-3 節および 6-4 節において後述する。

線粗さを線粗さ計<sup>12</sup>（Mitsutoyo 製 SJ-210）、20°、60° 光沢度は光沢度計（日本電色工業製 PG-IIM）、拡散反射率を簡易型分光色差計<sup>13</sup>（日本電色工業製 NF333）を用いて測定した。

<sup>12</sup> 線粗さ計の表面高さは 0.1nm 間隔、測定間隔は 500nm、1 回の測定点数は約 12800 である。

<sup>13</sup> 簡易型分光色差計の波長範囲は 400~700nm、波長間隔は 20nm である。

測定状況写真を写真 3.6.1～3.6.3 に示す。測定結果を表 3.6.2、3.6.3 に示す。建材の種類は目視により判断した。

実建物 A では、複層塩ビ床シート、塗装壁、塗装金属製扉、配電盤扉および塗装金属製シャッターを測定した。ただし、扉の線粗さを計測する際に線粗さ計が破損したため、二乗平均平方根傾斜角の値は扉 2 と配電盤の値の平均を使用した。測定した建材の写真を写真 3.6.4 に示す。

実建物 B では、天井の岩綿吸音板、複層塩ビ床シート、塗装壁、塗装金属製シャッター、シャッター枠および塗装金属製エレベーター扉を測定した。ステンレス（以下、SUS）製と想定されるシャッター枠は、長く連続した研磨目を持ったヘアライン仕上げであり、方位角依存性が顕著にみられたため、研磨目に水平方向、垂直方向に対してそれぞれ測定を行った。測定した建材の写真を写真 3.6.5 に示す。



写真 3.6.1 線粗さ測定状況

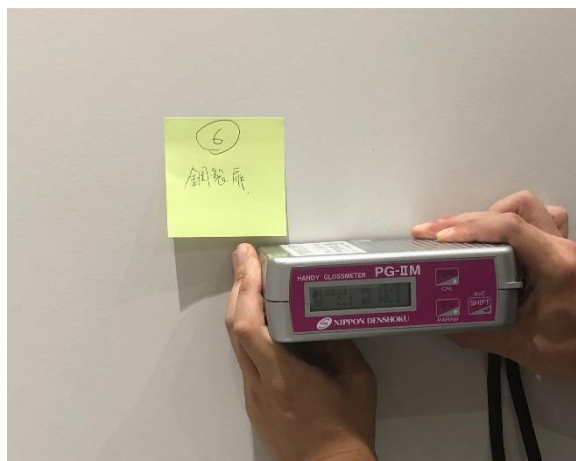


写真 3.6.2 光沢度測定状況



写真 3.6.3 拡散反射率測定状況



a) 壁面



b) 床面、配電盤

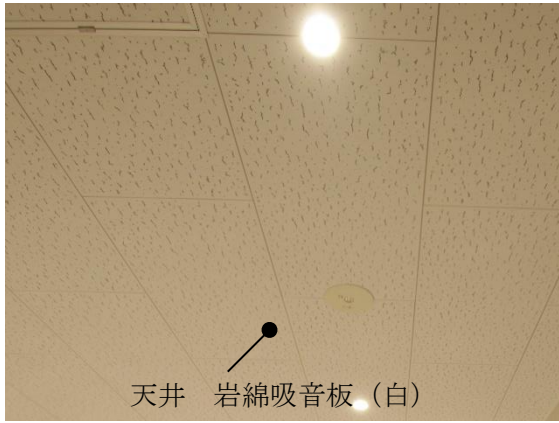


c) 扉面



d) 扉2面、シャッター面

写真 3.6.4 実建物 A での測定建材



天井 岩綿吸音板 (白)

a) 天井面



壁 石膏ボード塗装 (白)

b) 壁面



床 複層塩ビ床シート

シャッター2 金属塗装

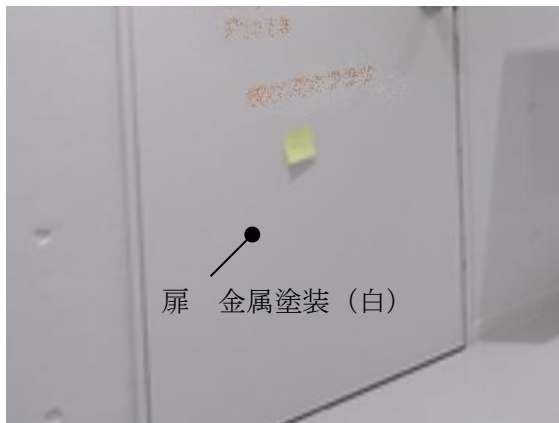
c) 床面、シャッター2面



シャッター1 金属塗装

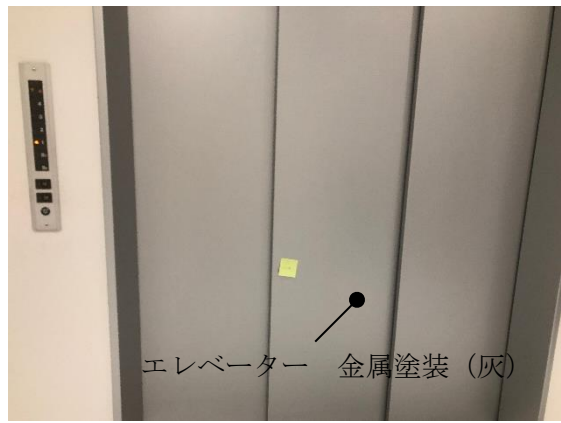
シャッター枠 SUS ヘアライン仕上

d) シャッター1面、シャッター



扉 金属塗装 (白)

d) 扉面



エレベーター 金属塗装 (灰)

e) エレベーター面

写真 3.6.5 実建物 B での測定建材



表 3.6.2 実建物 A の内装材の二乗平均平方根傾斜角、光沢度、拡散反射率の測定結果

建材の種類		建物部位	二乗平均平方根傾斜角[rad]	20° 光沢度 $G_s(20^\circ)$ [-]	60° 光沢度 $G_s(60^\circ)$ [-]	拡散反射率 $R_{0,m}$ [-]
プラスチック系	複層塩ビ床シート (白)	床	0.0468	1.8	13.0	0.247
	石膏ボード塗装 (白)	壁	0.213	0.9	1.7	0.531
塗装系	金属塗装 (灰)	扉	(0.0468)	1.8	13.0	0.247
	金属塗装 (黒)	扉 2	0.0569	1.2	10.6	0.037
	金属塗装 (白)	配電盤	0.0368	4.0	16.7	0.817
	金属塗装 (白)	シャッター	0.185	0.8	2.0	0.458

※ ( ) 内は粗さ計が破損したため、複層塩ビ床シートの値で代用した。

表 3.6.3 実建物 B の内装材の二乗平均平方根傾斜角、光沢度、拡散反射率の測定結果

建材の種類		建物部位	二乗平均平方根傾斜角[rad]	20° 光沢度 $G_s(20^\circ)$ [-]	60° 光沢度 $G_s(60^\circ)$ [-]	拡散反射率 $R_{0,m}$ [-]
プラスチック系	岩綿吸音板 (白)	天井	0.162	1.6	2.5	0.873
	複層塩ビ床シート (白)	床	0.0129	88.0	95.6	0.392
塗装系	石膏ボード塗装 (白)	壁	0.155	1.9	8.1	0.705
	金属塗装 (白)	扉	0.0711	2.1	11.8	0.716
	金属塗装 (灰)	エレベーター	0.0541	10.6	40.8	0.381
	金属塗装 (白)	シャッター 1	0.0620	2.0	11.6	0.700
	金属塗装 (白)	シャッター 2	0.119	1.2	4.3	0.533
金属系	SUS ヘアライン仕上げ (垂直方向)	シャッター	0.0227	102.2	230	0.069
	SUS ヘアライン仕上げ (水平方向)	枠	0.139	53	61	0.069

### 3-6-4. 反射指向特性の推定

表 3.6.4、3.6.5 に実建物 A、B の内装材の反射指向特性値の推定結果を示す。

図 3.6.2 に実建物 A において推定した反射指向特性値を用いた入射角  $45^\circ$  もしくは  $60^\circ$  での反射特性関数  $\rho$  の推定値を示す。図中、灰色の実線が層内反射成分、黒色の点線が表皮反射成分である。a)、e) に示す床、扉 2 は層内反射成分と比較して表皮反射成分が支配的で、指向性の高い反射面だといえる。b)、c)、g)、h) に示す壁、シャッターは、入射角が小さい場合には層内反射成分が支配的で、拡散性が高いが、入射角度が  $60^\circ$  と大きくなると、深い反射角度方向において表皮反射成分がみられるようになるという特徴があった。d)、f) に示す扉、配電盤では層内反射成分と表皮反射成分の双方ともみられる反射面である。

実建物 B でのシャッター枠は金属であり、本研究の表皮・層内反射モデルの対象外であるが、便宜的に石系に分類して推定した。床面の  $60^\circ$  光沢度と、シャッター枠の研磨目に垂直方向の  $60^\circ$  光沢度は推定式の適用範囲を超えていたが、便宜的に表 3.6.1 の係数を延長してそのまま使用した。表 3.6.5 に示すように、床の屈折率が一般的な材料の屈折率と比較して非常に大きい結果となった。シャッター枠の研磨目に水平方向では、推定式を満たす屈折率  $n$  の値が存在しなかったため、反射指向特性値を推定することができなかった。

図 3.6.3 に実建物 B において推定した反射指向特性値を用いた入射角  $45^\circ$  での反射特性関数  $\rho$  の推定値を示す。図中、灰色の実線が層内反射成分、黒色の点線が表皮反射成分である。a) に示す天井は層内反射成分の占める割合が大きく、非常に拡散性の高い面であることがわかる。c)、d)、f)、g) に示す壁、扉、シャッター 1、2 は層内反射成分と表皮反射成分の双方ともみられる反射面である。b)、e)、h) に示す床、エレベーター、シャッター枠は表皮反射成分が大きく、拡散性の高い反射面である。特に、床面は表皮反射の大きくなる正反射方向の角度が非常に局所的であり、非常に指向性の高い反射面だといえる。

表 3.6.4 実建物 A の内装材の反射指向特性値の推定結果

建材の種類		建物部位	屈折率 $n$ [-]	係数 $K$ [-]	傾斜角の標準偏差 $\sigma_r$ [rad]	層内反射率 $R_0$ [-]
プラスチック系	複層塩ビ床シート (白)	床	1.52	19.93	0.0307	0.214
塗装系	石膏ボード塗装 (白)	壁	1.06	28.51	0.213	0.490
	金属塗装 (灰)	扉	1.23	9.75	0.0468	0.232
	金属塗装 (黒)	扉 2	1.23	10.27	0.0569	0.0348
	金属塗装 (白)	配電盤	1.46	4.69	0.0368	0.768
	金属塗装 (白)	シャッター	1.03	78.24	0.185	0.424

表 3.6.5 実建物 B の内装材の反射指向特性値の推定結果

建材の種類		建物部位	屈折率 $n[-]$	係数 $K[-]$	傾斜角の標準偏差 $\sigma_f$ [rad]	層内反射率 $R_D[-]$
プラスチック系	岩綿吸音板 (白)	天井	1.05	6.90	0.162	0.873
	複層塩ビ床シート (白)	床	3.83	3.87	0.0129	0.393
塗装系	石膏ボード塗装 (白)	壁	1.20	21.9	0.155	0.682
	金属塗装 (白)	扉	1.13	26.4	0.0711	0.716
	金属塗装 (灰)	エレベーター	1.81	10.6	0.0541	0.380
	金属塗装 (白)	シャッター1	1.13	15.1	0.119	0.534
	金属塗装 (白)	シャッター2	1.11	27.8	0.062	0.701
金属系	SUSヘアライン仕上げ (垂直方向)	シャッター枠	1.48	151	0.0227	0.0691
	SUSヘアライン仕上げ (水平方向)		—	—	0.139	—

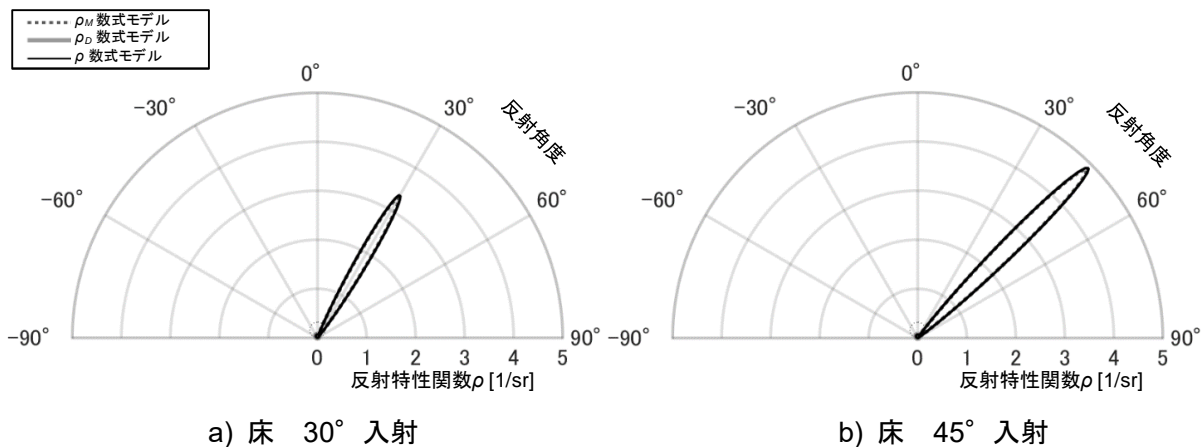
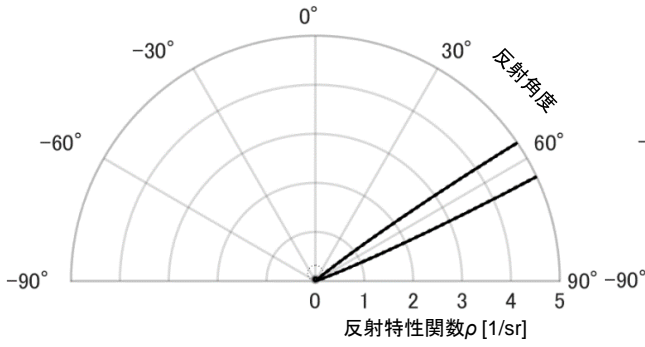
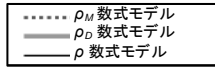
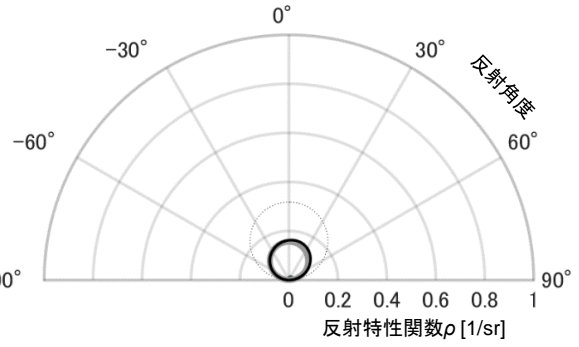


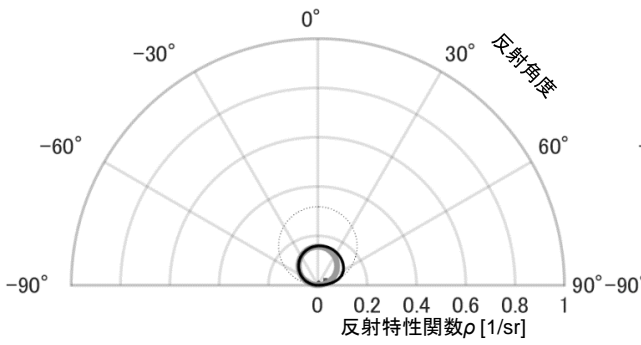
図 3.6.2 建物 A での現地測定による推定値による反射特性関数の数式モデル (a、b)



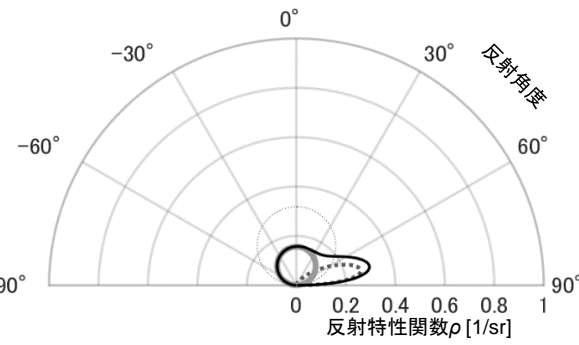
c) 床 60° 入射



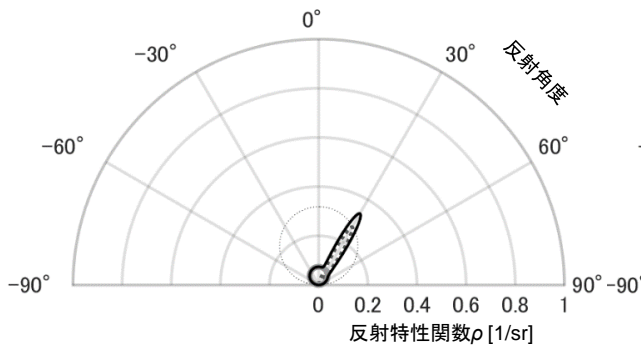
d) 壁 30° 入射



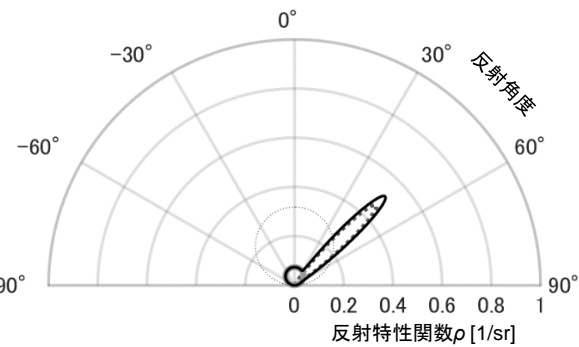
e) 壁 45° 入射



f) 壁 60° 入射



g) 扉 30° 入射



h) 扉 45° 入射

図 3.6.2 建物 A での現地測定による推定値による反射特性関数の数式モデル (c~h)  
(つづき)

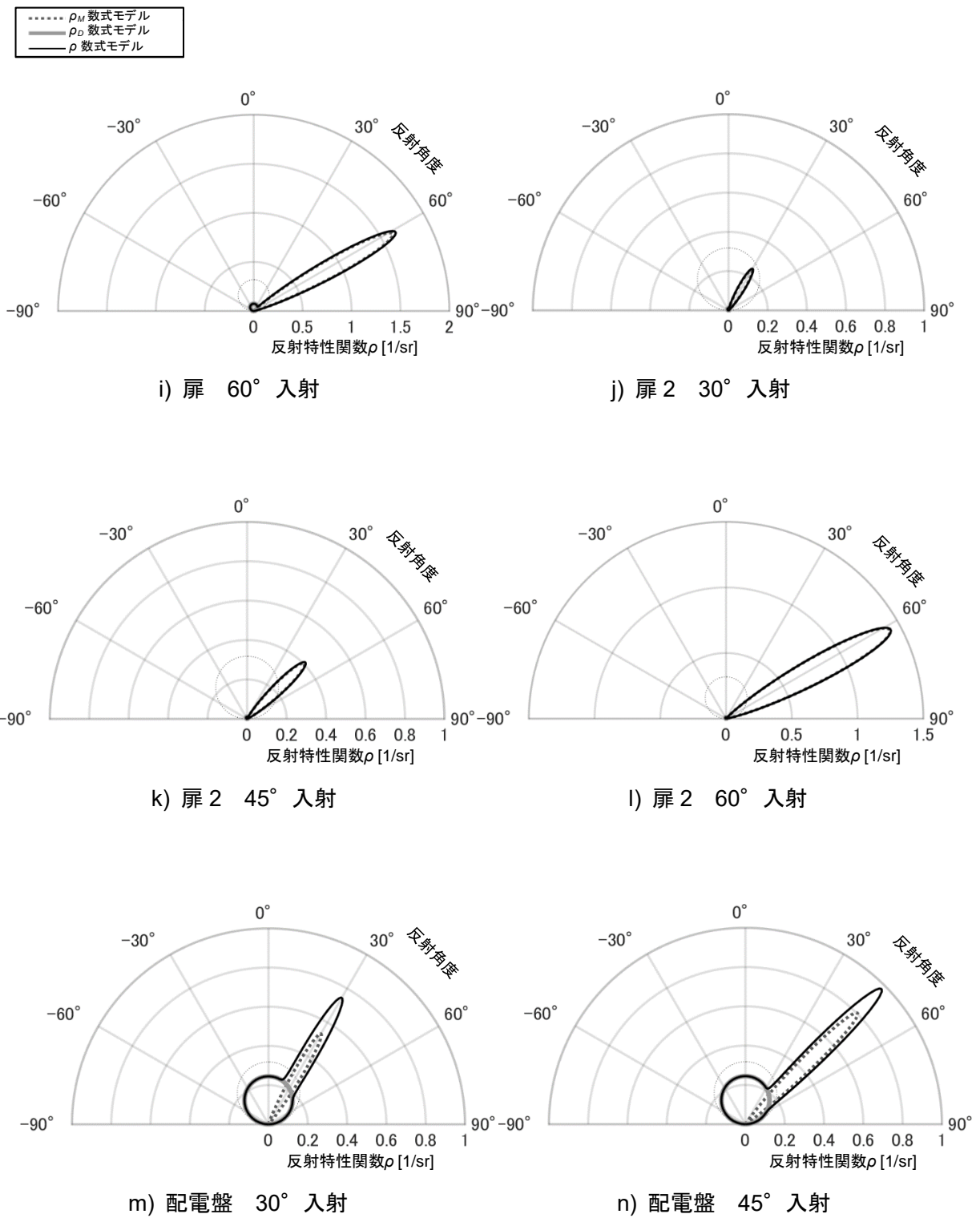


図 3.6.2 建物 A での現地測定による推定値による反射特性関数の数式モデル (i~n)  
(つづき)

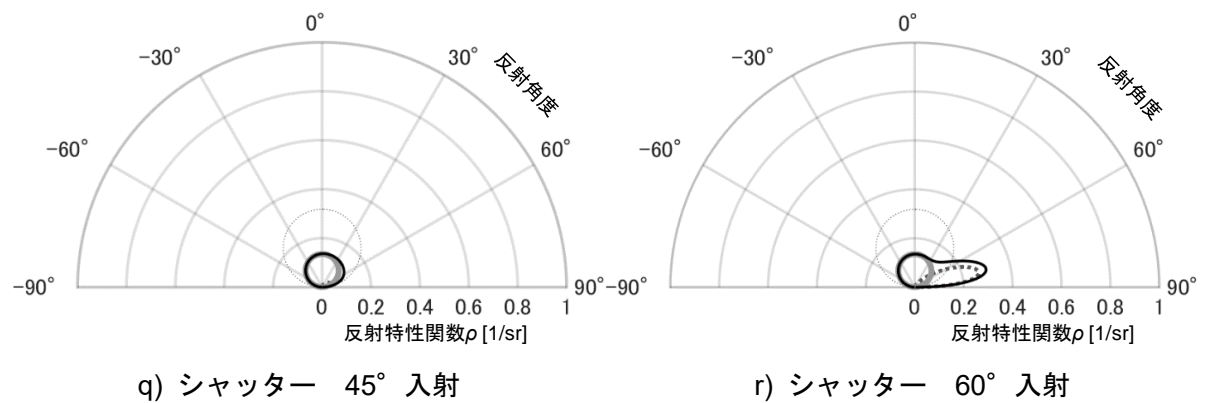
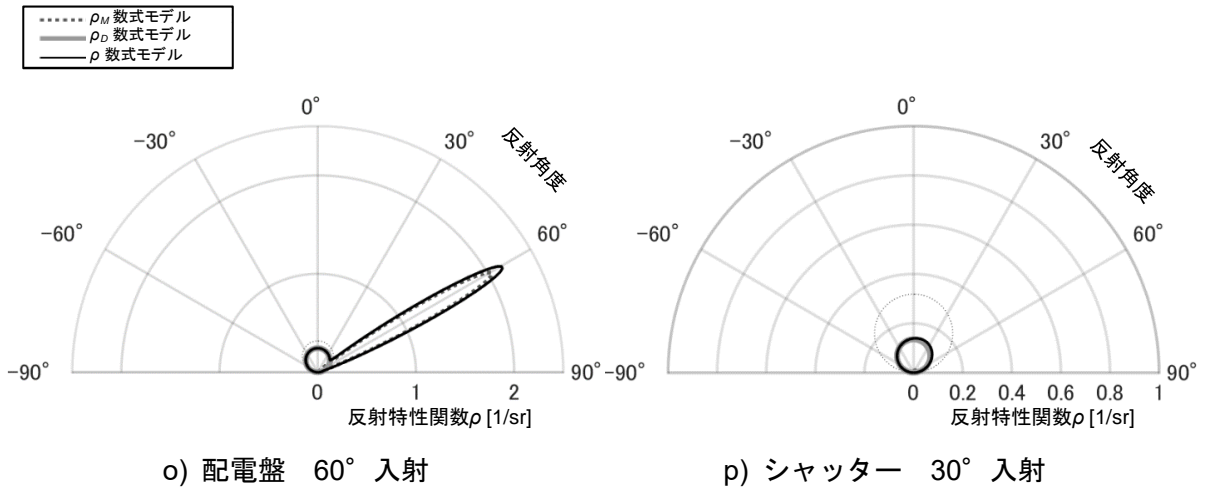


図 3.6.2 建物 A での現地測定による推定値による反射特性関数の数式モデル (o~r)  
(つづき)

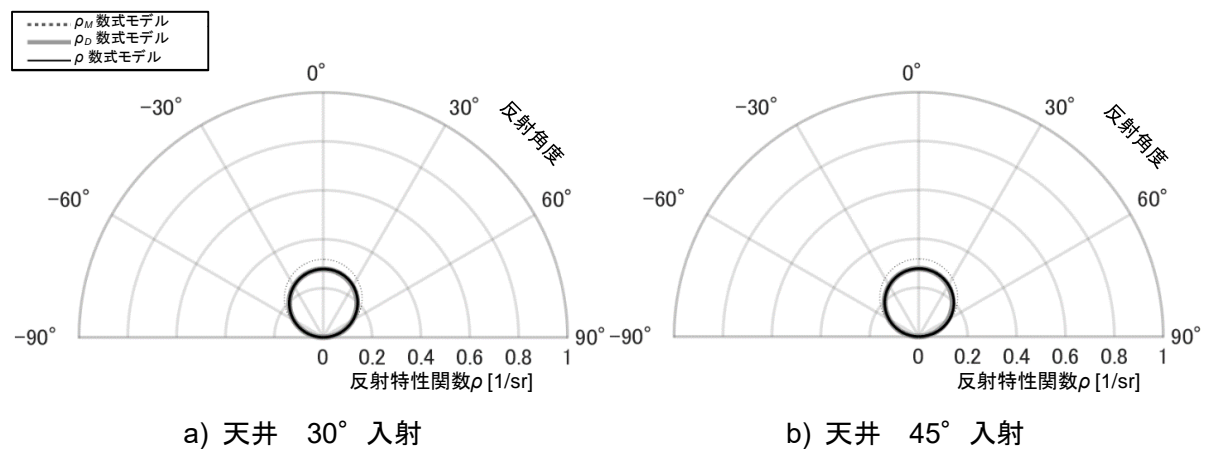


図 3.6.3 建物 B での現地測定による推定値による反射特性関数の数式モデル (a、b)

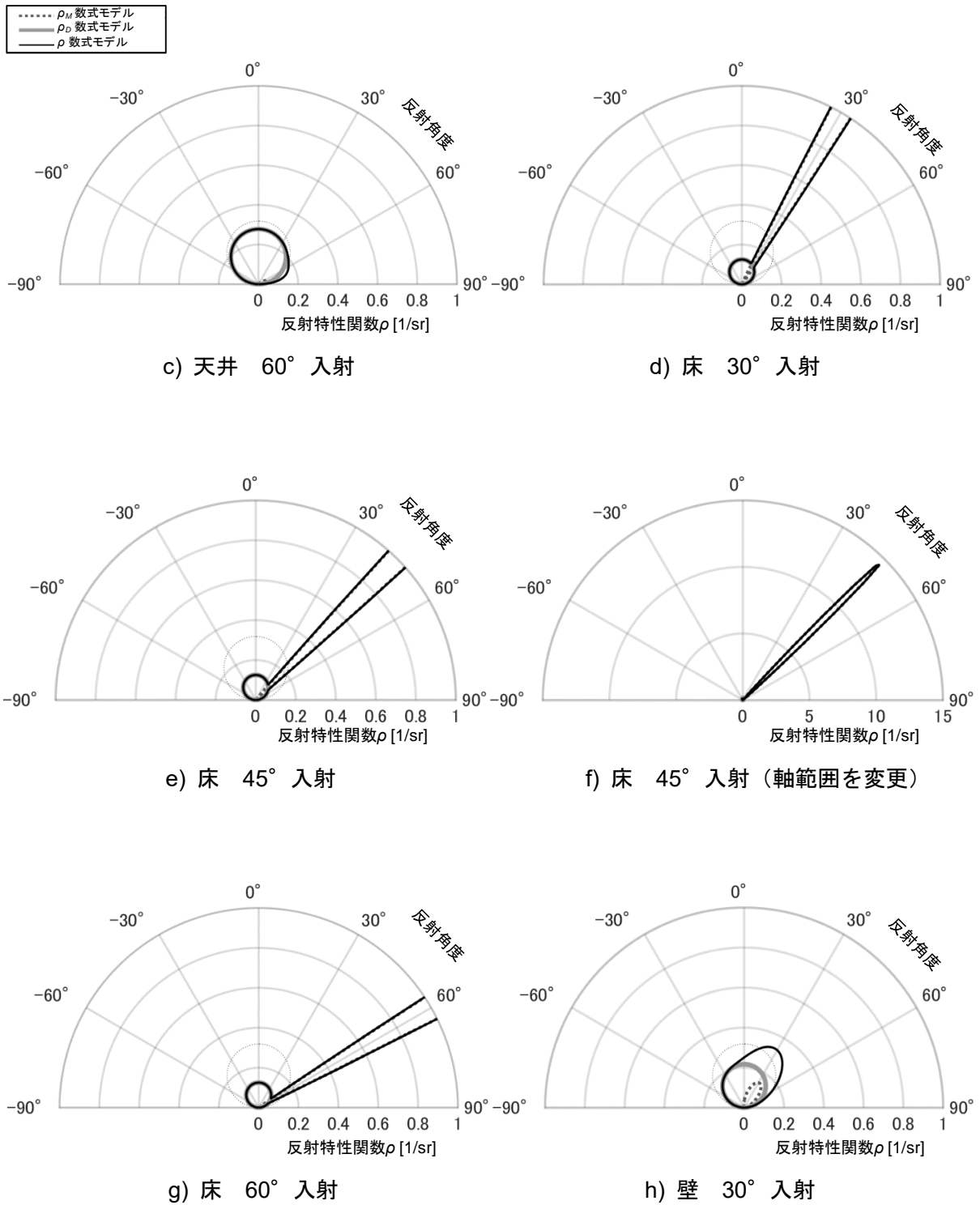
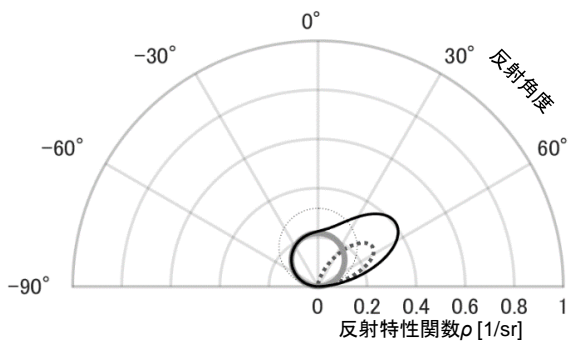
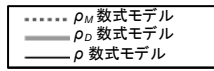
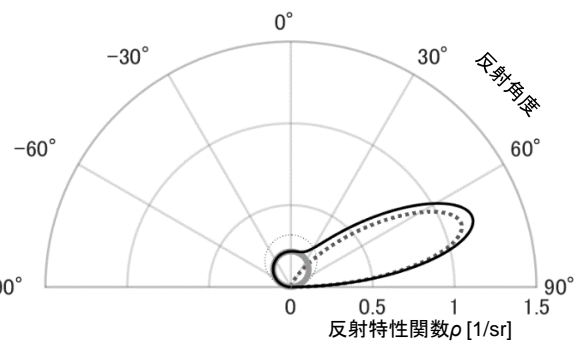


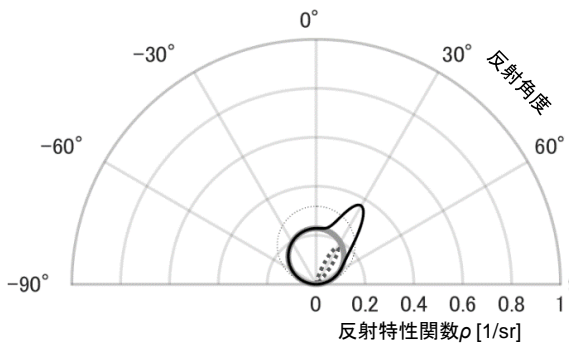
図 3.6.3 建物 B での現地測定による推定値による反射特性関数の数式モデル (c~h)  
(つづき)



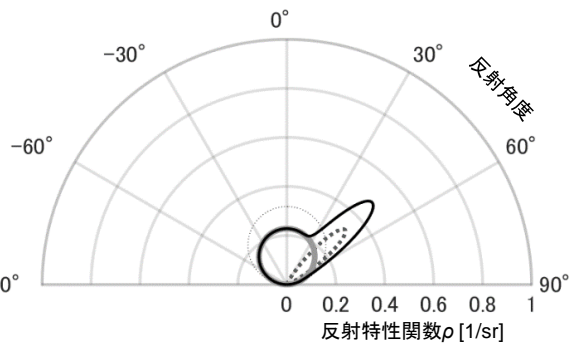
i) 壁 45° 入射



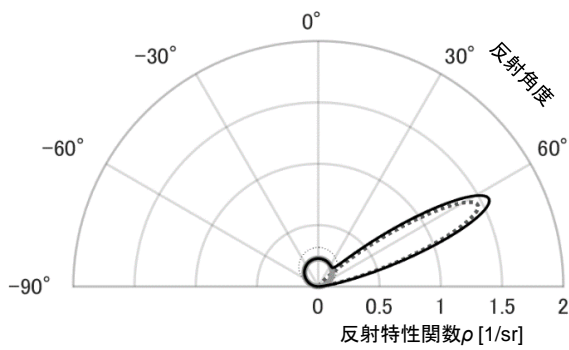
j) 壁 60° 入射



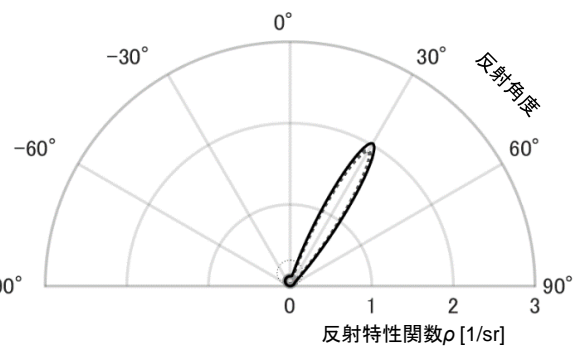
k) 扉 30° 入射



l) 扉 45° 入射



m) 扉 60° 入射



n) エレベーター 30° 入射

図 3.6.3 建物 B での現地測定による推定値による反射特性関数の数式モデル (i~n)  
(つづき)



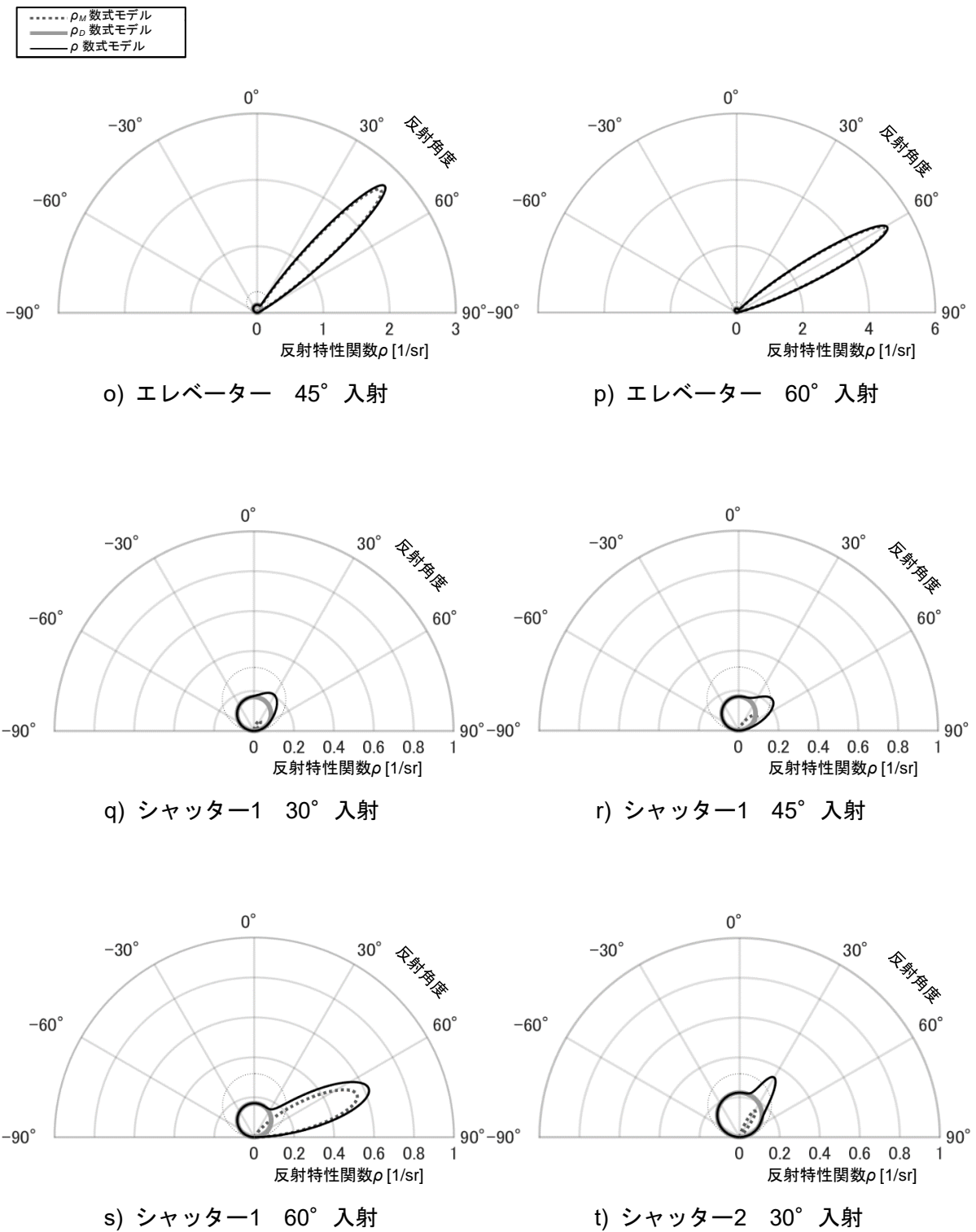
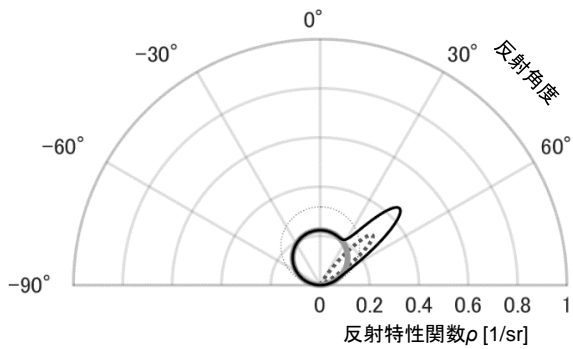
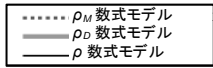
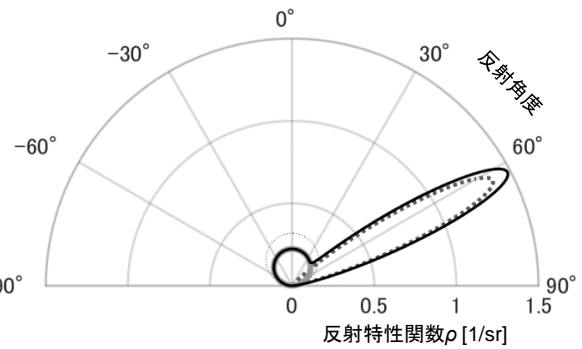


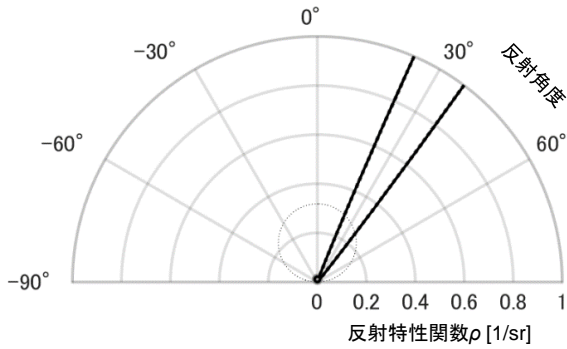
図 3.6.3 建物 B での現地測定による推定値による反射特性関数の数式モデル (o~t)  
(つづき)



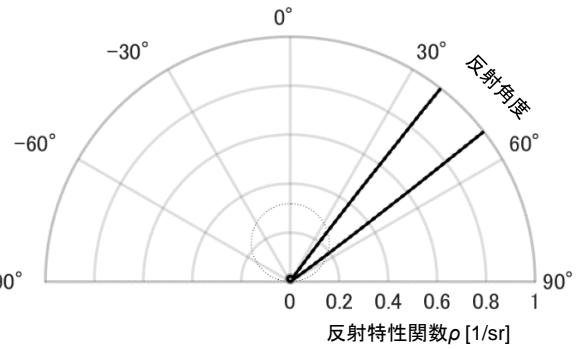
u) シャッター-2 45° 入射



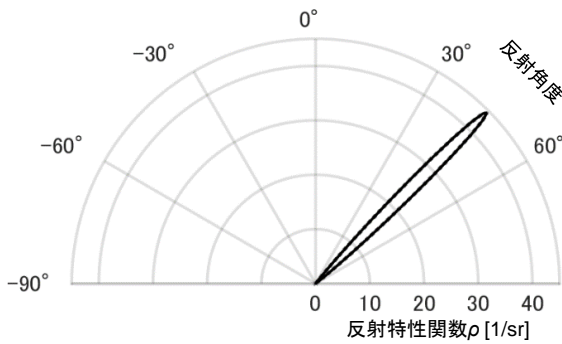
v) シャッター-2 60° 入射



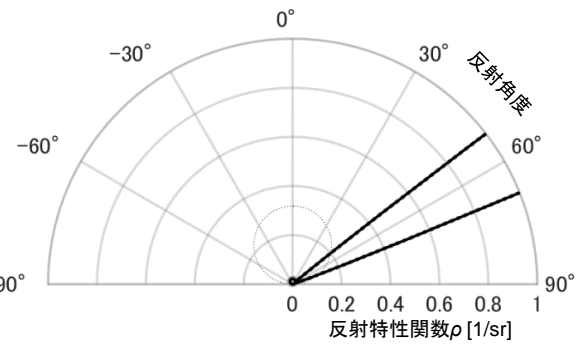
w) シャッター-枠 (垂直方向) 30° 入射



x) シャッター-枠 (垂直方向) 45° 入射



y) シャッター-枠 45° 入射 (軸範囲を変更)



z) シャッター-枠 (垂直方向) 60° 入射

図 3.6.3 建物 B での現地測定による推定値による反射特性関数の数式モデル (u~z)

(つづき)

図 3.6.2 および 3.6.3 に示す入射角 60°での反射特性関数  $\rho$  の推定結果において、幾つかの建材では、正反射方向である反射角度 60° よりも大きい角度で  $\rho$  が最大となった。特に顕著

にその傾向が確認されたのが、図 3.6.2 f)、r)に示す実建物 A の壁とシャッター、図 3.6.3 j)、s)に示す実建物 B の壁とシャッター1である。実建物 A の壁での入射角  $60^\circ$  での反射角度ごとの表皮反射成分  $\rho_M$ と遮蔽係数  $m$ 、小素面の分布係数  $p_f$ 、フレネル法則に従う小素面の正反射率  $R$ の相対分布を図 3.6.4 に示す。表皮反射成分  $\rho_M$ の算出式である(2.14)式を以下に再掲するが、 $m$ 、 $p_f$ 、 $R$ は  $\rho_M$ の分布に影響を与える変数である。

$$\rho_M(\theta_i, \varphi_i; \theta_o, \varphi_o) = K(\theta_i)m(\theta_i, \theta_o)p_f(\theta_f, \varphi_f)R(\psi_f)/4 \cos \theta_f \cos \theta_i \quad (2.14)$$

$\rho_M(\theta_i, \varphi_i; \theta_o, \varphi_o)$  : 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 [-]

$p_f(\theta_f, \varphi_f)$  : 小素面の傾きの確率密度[1/sr]

$\theta_f, \varphi_f$  : 小素面の傾斜角、傾斜方位角 [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 [rad]

図 3.6.4 より、小粗面の傾きの確率密度  $p_f$ が正反射方向で最大となるのに対して、フレネル法則に従う小素面の正反射率  $R$ は反射角が大きくなるほど値が大きくなり、その影響で  $\rho_M$ の最大値が正反射方向より大きい角度となることが分かる。また、 $p_f$ の山形の分布の拡がりが増えるほど、大きい反射角度において  $p_f$ の値が大きくなり、大きい反射角度で値が増加する  $R$ の分布の影響を受けやすくなるため、 $\rho_M$ の最大値が正反射方向より大きい角度となりやすい。小素面の正反射率  $R$ の算出式である(2.24)、(2.25)式を以下に再掲するが、 $R$ は屈折率  $n$ により定まる値である。そこで、入射角度  $60^\circ$ での屈折率  $n$ ごとの  $R$ の相対分布を図 3.6.5 に示す。屈折率  $n$ が小さいほど、大きい反射角度における  $R$ の増加量が大きくなり、 $\rho_M$ の最大値が大きい反射角度となりやすいと考えられる。

$$R(\psi_f) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left\{ \frac{\sin^2(\psi_f - \psi_{fr})}{\sin^2(\psi_f + \psi_{fr})} + \frac{\tan^2(\psi_f - \psi_{fr})}{\tan^2(\psi_f + \psi_{fr})} \right\} & (\psi_f \neq 0) \\ \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2} & (\psi_f = 0) \end{cases} \quad (2.24)$$

$$\psi_{fr} = \sin^{-1}(\sin \psi_f / n) \quad (2.25)$$

$\psi_{fr}$  : 屈折角

$n$  : 屈折率

図 3.6.2 および 3.6.3 において、正反射方向よりも顕著に大きい反射角度で  $\rho$ が最大となった実建物 A の壁とシャッター、実建物 B の壁とシャッター1での屈折率  $n$ の推定値は、順に 1.06、1.03、1.20、1.13 であり、非常に小さい(表 3.6.4、3.6.5)。一方で、実建物 B のシャ

ッター2 と扉の屈折率  $n$  の推定値も 1.11、1.13 であり同様に小さいが、図 3.6.3 m)、v) に示す入射角度  $60^\circ$  での反射特性関数  $\rho$  の分布の最大値が正反射方向と大きくずれなかったのは、局所的で拡がりの狭い分布特性であったため、 $R$  の分布の影響を受けづらかったためと考えられる。実際の塗装壁面や金属塗装面において、水の屈折率 1.33 より小さい屈折率となることはあり得ないため、推定した数式モデルでは、特に入射・反射角が大きい場合には実際の  $\rho$  の分布とは異なる分布を示すことが懸念される。また、実建物 B の床の屈折率の推定値は 3.83 であり、本数値も非現実的な値である。パラメータの推定において、屈折率の範囲を制限するなどの対策が必要であると考えられる。

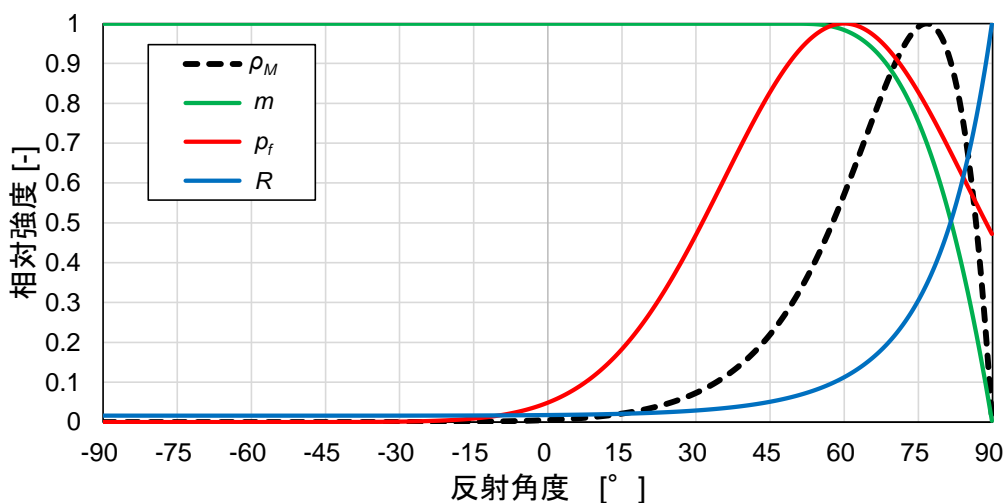


図 3.6.4 入射角  $60^\circ$  での反射角度ごとの  $\rho_M$ 、 $m$ 、 $\rho_f$ 、 $R$  の相対分布

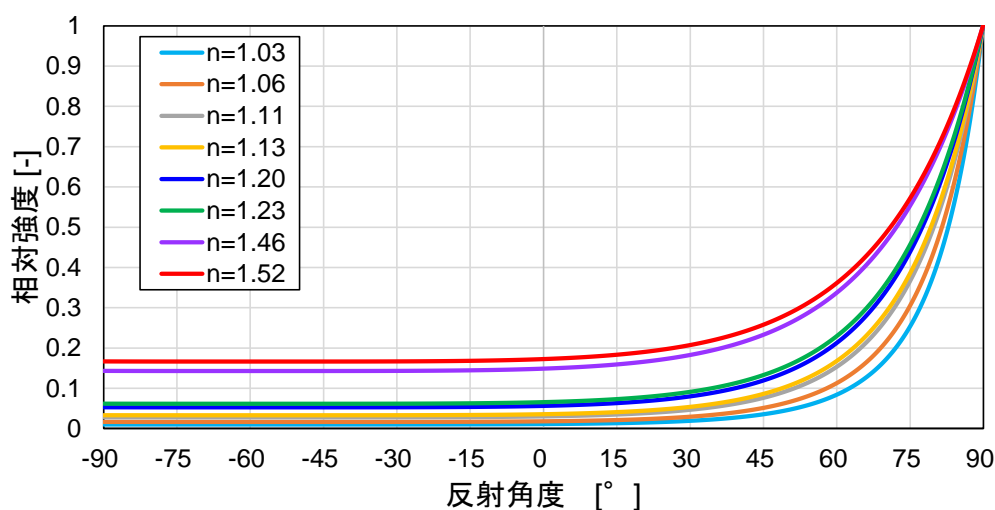


図 3.6.5 入射角度  $60^\circ$  での屈折率  $n$  ごとの  $R$  の相対分布

## 3-7. まとめ

- 1) 市販計測器を用いた光沢度、表面粗さ  $Ra$  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た。光沢度が高いほど、表面粗さ  $Ra$  が小さいほど、表皮反射成分が大きい傾向と表皮反射成分の分布形状が鋭い傾向があった。光沢度と表皮反射成分の大きさには相関が見られた。
- 2) 市販の計測器を用いて測定した分光反射率（SCE方式）から、測定装置に用いた光源に対する拡散反射率を算出し、数式モデルによる層内反射成分の特徴量の同定値と比較した。拡散反射率と層内反射率  $R_D$  には強い相関がみられることを示した。
- 3) 正反射と均等拡散反射の中間の反射指向特性もしくは均等拡散反射に近い反射特性を示す建築材料について、市販の計測器で測定可能な分光拡散反射率を用いることで、偏光を用いずに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。本方式は測定工数を1/5に削減できるうえ、偏光を利用した詳細測定と同等の精度が得られることを示した。
- 4) 提案した簡易予測法により、大理石水磨き仕上げ、大理石本磨き仕上げ、コンクリート打放し仕上げ、亜鉛めっき鋼板5分艶仕上げ、フロートガラスの計5種の仕上げの異なる建材の反射指向特性が測定できることを確かめた。
- 5) 光沢度が高い建材については、表皮反射成分の特徴量である係数  $K$  を決定するために、複数の入射角度条件で測定を行う必要があると考えられる。
- 6) 凹凸が大きい壁紙や毛足の長くループ状のパイルで構成されたタイルカーペットでは、市販計測器で測定できる拡散反射率に凹凸で反射した表皮反射成分が含まれていること等の影響により、簡易推定した層内反射成分が実際よりも大きく算出され、数式モデルのパラメータが同定できない場合がある。また、タイルカーペットでは、本研究で用いた数式モデルでは反射指向特性の適用性が悪かった。
- 7) 木材では、木目に対する入射方位角により反射指向特性が異なるため、それを数式モデルでも考慮する必要がある。
- 8) 既設の建物を対象に光環境計算を行う場合には、反射指向特性を現地測定する必要が生じる。可搬の計測器を用いた既往の建材の反射指向特性の推定方法についてまとめたうえで、本手法を利用して、実建物空間において可搬計測器を用いた現地測定を行い、反射指向特性を推定した結果を示した。

- 9) 可搬の計測器を用いた既往の建材の反射指向特性の推定方法を用いる際に、屈折率  $n$  が非現実的に小さい値と推定されると、特に入射・反射角が大きい場合に、推定した反射特性が実際の反射特性とは乖離する懸念があることを示した。

**参考文献**

- 1) 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(関東), 環境工学 I, pp.469-470, 2020/9
- 2) JIS Z 8722 2009, 色の測定方法－反射及び透過物体色





## 第4章 建材の分光反射指向特性の簡易推定法

### 4-1. はじめに

光環境計算のさらなる高品質化としては、分光特性を考慮した詳細な計算が挙げられる。分光放射輝度分布計算により、色の見え方の予測や雰囲気、生理的な効果の検討が可能となる。吉田ら<sup>1),2)</sup>は昼光と人工照明を併用した建築空間において分光相互反射計算により分光放射照度分布を算出する方法を開発し、演色性評価を行っている。この計算手法を指向性を考慮できるように拡張することが考えられる。指向性を考慮した分光計算を行うには、各建材の分光反射指向特性データが必要となる。そこで、本章では有彩色の建材の分光反射指向特性の測定を行った結果を示す。さらに、分光放射輝度計はあまり普及しておらず、また、分光測定では扱うデータ量が膨大となることから、データ処理にかかる負荷が大きい。そこで、3章で示した簡易推定法を応用し、反射指向特性と分光測色計等で測定可能な分光拡散反射率により、分光放射輝度を直接測定することなく分光反射指向特性を簡易に推定する手法を提案する。

#### 4-2. 分光反射特性関数の定義

反射の分光指向特性は、前田<sup>3)</sup>による反射特性関数  $\rho$  [1/sr] の定義式<sup>4), 5)</sup> (2.1)式を分光に拡張して次式により求める。

$$\rho(\theta_i, \varphi_i; \theta_o, \varphi_o; \lambda) = L(\theta_i, \varphi_i; \theta_o, \varphi_o; \lambda) \cdot \cos \theta_o / E(\theta_i, \varphi_i; \lambda) \quad (4.1)$$

$\lambda$ : 波長 [nm]

$\theta_i$ : 試料面への入射光の入射角

$\varphi_i$ : 試料面への入射光の方位角

$\theta_o$ : 試料面からの反射光の反射角

$\varphi_o$ : 試料面からの反射光の方位角

$L(\theta_i, \varphi_i; \theta_o, \varphi_o; \lambda)$ : 試料面からの反射光の分光放射輝度 [W/(sr·m<sup>2</sup>·nm)]

$E(\theta_i, \varphi_i; \lambda)$ : 試料面の分光放射照度 [W/(m<sup>2</sup>·nm)]

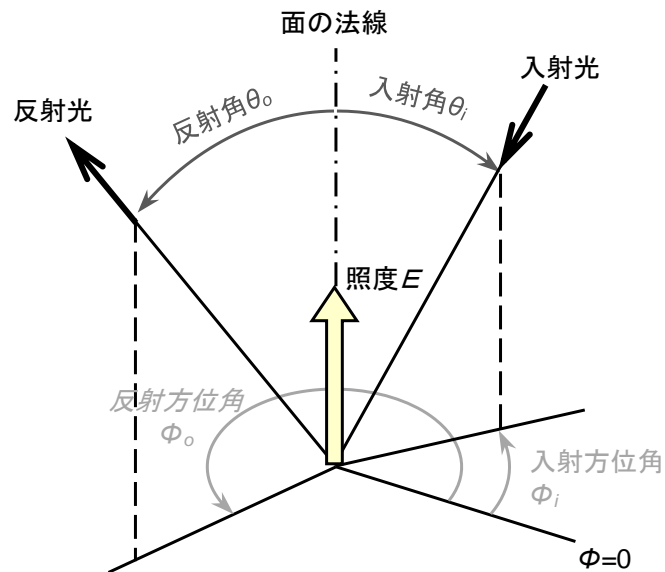


図 4.2.1 角度の説明図 (図 2.2.1 の再掲)

## 4-3. 偏光を用いた分光反射指向特性の詳細測定

2-3節に示した偏光を用いた松浦・上谷による測定手法を分光に拡張し、輝度に代わって分光放射輝度を測定することによって、表皮反射成分と層内反射成分それぞれの分光反射指向特性を把握する。

## 4-3-1. 測定装置

測定装置の配置は2-3-1と同様（図2.2.2と同様）とし、暗室にて測定を行った。光源にはキセノンランプ（ウシオ電機製 UXL-300SX2<sup>14</sup>）を用い、内部には光源の出力の変動補正用に照度計（T&D 製 TR-74Ui）を設置し、試料からの反射光を分光放射輝度計（PHOTORESEARCH 社製 PR-670、MS-75 レンズ）により測定した。偏光板は光源側ではシグマ光機製の偏光板、輝度計側ではケンコー製の偏光フィルターを用いた。

光源の写真を写真4.3.1に示す。写真4.3.2は光源の背面の蓋を開けた内部の写真である。出力変動補正用の照度計は、ランプの横に垂直方向に設置した。

分光放射計（英弘精機製 MS-720）を用いて測定した光源の分光放射照度の相対分布を図4.3.1に示す。本光源の偏光度  $P$  [-] を2-3-2と同様に偏光角度  $10^\circ$  ごとに測定視野角  $2^\circ$  で測定した結果、 $P$  は約 0.012 であったため、入射光はほぼ非偏光とみなした。

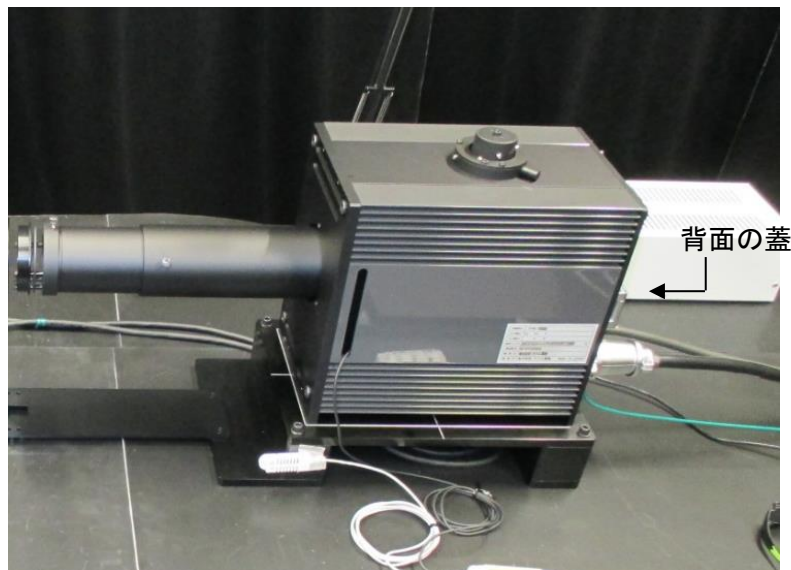


写真 4.3.1 光源 (UXL-300SX2)

<sup>14</sup> 300W キセノンランプ光源、ランプハウス OPM2-302X、均一平行光（バックミラー）方式、レンズ先端から 200mm の距離で照度 15000lx、同距離で面内均一性  $\pm 15\%$ 、有効照射径  $\phi 50$ 、赤外域の透過率を下げ、色温度 6500K の昼光に近似させるためのフィルターであるスーパーコールドフィルターを設置。

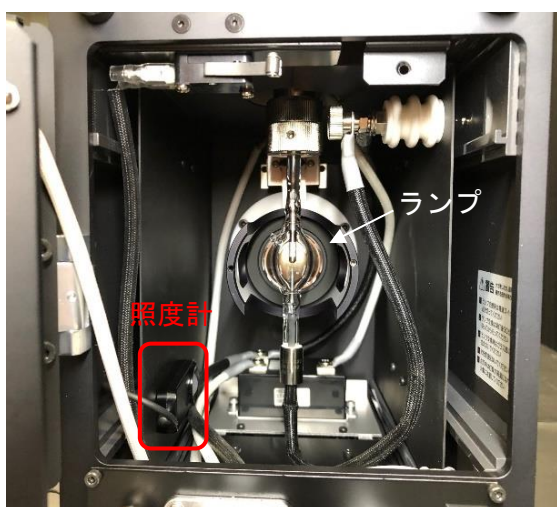


写真 4.3.2 光源内の照度計設置状況

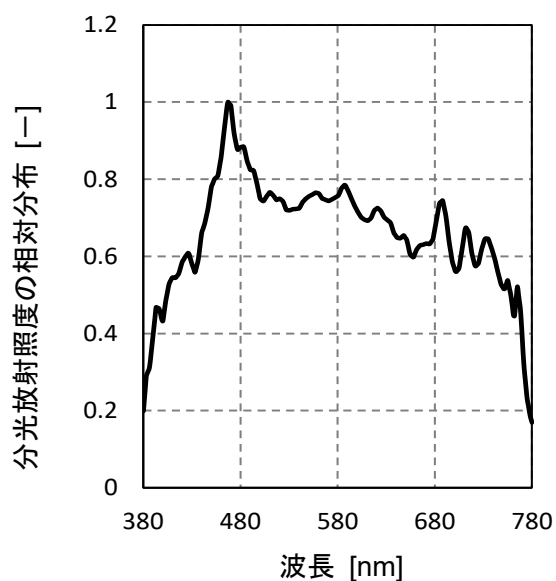


図 4.3.1 キセノンランプの分光放射照度

#### 4-3-2. 試料面照度の測定

(4.1)式の試料面の分光放射照度  $E(\theta_i, \varphi_i; \lambda)$  [ $W/(m^2 \cdot nm)$ ]は、試料位置に設置した標準白色板 (Labsphere Inc.製) からの反射光の分光放射輝度  $L_{ds}(\theta_i, \varphi_i; \theta_o, \varphi_o; \lambda)$  [ $W/(sr \cdot m^2 \cdot nm)$ ]を測定し、次式より求めた。標準白色板は均等拡散面であると仮定した。標準白色板の分光反射率を図 4.3.2 に、測定角度条件を表 4.3.1 に示す。

$$E(\theta_i, \varphi_i; \lambda) = \pi L_{ds}(\theta_i, \varphi_i; \theta_o, \varphi_o; \lambda) / r_{ds}(\lambda) \quad (4.2)$$

$r_{ds}(\lambda)$  : 標準白色板の分光反射率 [-]

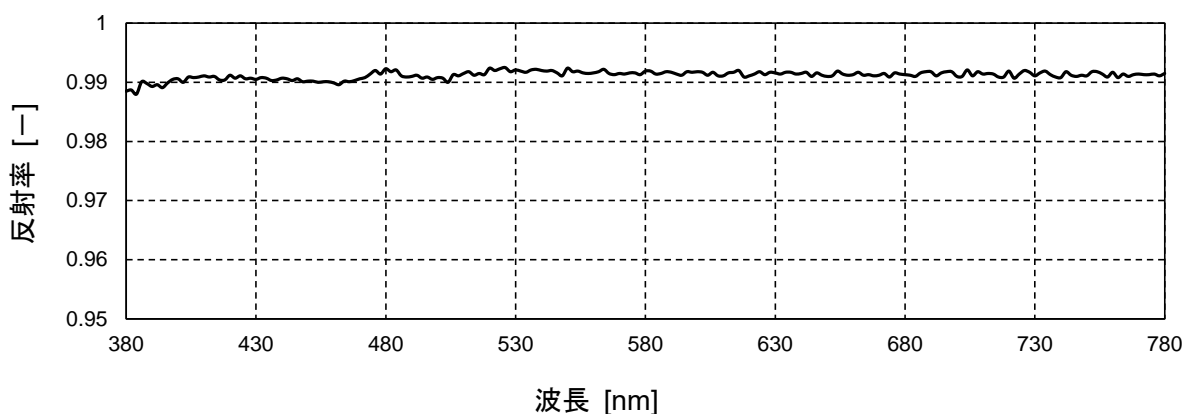


図 4.3.2 標準白色板の分光反射率

表 4.3.1 標準白色板の測定角度条件

入射角 $\theta_i$ [deg]	入射方位角 $\varphi_i$ [deg]	反射角 $\theta_o$ [deg]	反射方位角 $\varphi_o$ [deg]
45	0	0	180
60	0	0	180

## 4-3-3. 試料面輝度の測定

試料の分光反射指向特性の測定においては測定視野角を  $0.5^\circ$  とした。測定角度条件を表 4.3.2 に示す。本測定では方向依存性の少ない建材を用いるため、方位角は固定とする。

表 4.3.2 測定角度条件

入射角 $\theta_i$ [deg]	入射方位角 $\varphi_i$ [deg]	反射角 $\theta_o$ [deg]	反射方位角 $\varphi_o$ [deg]
45	0	-75, -65, -25, 0, 20, 30, 35, 40, 43, 45, 47, 50, 55, 60, 70	180
60	0	-80, -40, -20, 0, 20, 35, 45, 50, 55, 58, 60, 62, 65, 70, 75	180

2-3-5 と同様に、入射側、反射側の偏光板を取り外した状態で、各角度条件での反射光の分光放射輝度  $L(\theta_i, \varphi_i; \theta_o, \varphi_o; \lambda)$  を測定し、分光反射特性関数  $\rho(\theta_i, \varphi_i; \theta_o, \varphi_o; \lambda)$  を得た。偏光フィルターを入射側・反射側にそれぞれ取付け、同角度条件において反射光の各偏光成分の強さ  $I_{pp}$ 、 $I_{ps}$ 、 $I_{sp}$ 、 $I_{ss}$  を得た。(2.8)~(2.11)式より分光反射特性関数  $\rho(\theta_i, \varphi_i; \theta_o, \varphi_o; \lambda)$  [1/sr] を表皮反射成分  $\rho_M(\theta_i, \varphi_i; \theta_o, \varphi_o; \lambda)$  [1/sr] と層内反射成分  $\rho_D(\theta_i, \varphi_i; \theta_o, \varphi_o; \lambda)$  [1/sr] に分離した。

#### 4-4. 測定対象試料

##### 4-4-1. 試料概要

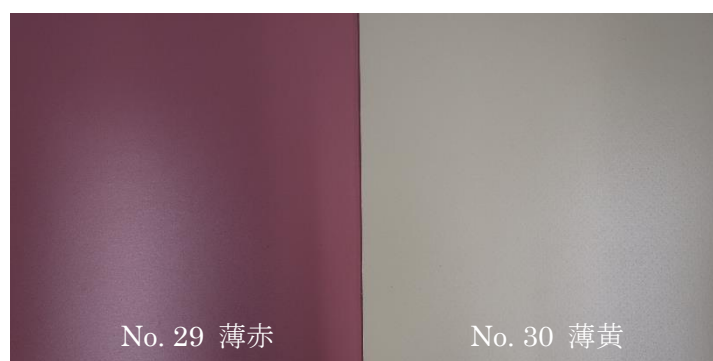
2章、3章の測定で用いた試料 No. 1~22 (表 2.5.1、3.4.3) は主に無彩色の建材であったが、層内反射成分に違いが見られるように有彩色を中心とした試料を新たに選定した。樹脂系の建材として、写真 4.4.1 に示す化粧塩ビフィルムおよび複層塩ビ床シート、石系の建材として、写真 4.4.2 に示す花崗岩のタイル、大理石のタイルおよびコンクリート、塗装系の建材として、樹脂塗装したガルバリウム鋼板およびブリキ板である。加えて、2章で測定を行った表 2.5.1 の樹脂系の試料である No. 4 化粧塩ビフィルム (白艶)、石系の試料である No.9 花崗岩水磨き仕上げ、3章で測定を行った表 3.4.3 の石系の試料である No. 18 大理石水磨き仕上げ、No. 20 コンクリート打ち放し仕上げ、塗装系の建材である No. 21 ブリキ板ポリエステル系樹脂粉体塗装 (薄橙) も測定対象とした。

塗装系の試料は金属製であるが、全て表面に樹脂塗装がされているため、非金属面と見做した。ガルバリウム鋼板フッ素系樹脂塗装は上塗り塗膜厚さが 20 $\mu\text{m}$  (カタログ値) であった。

ここで示した試料の写真 4.4.1、4.4.2 は、実際の見え目とは異なるため参考資料とする。

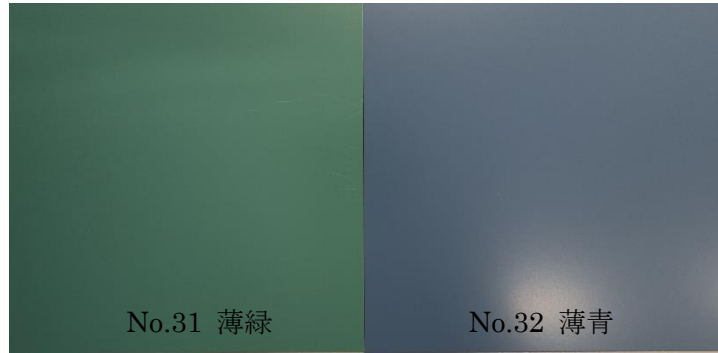


a) 化粧塩ビフィルム



b) 複層塩ビ床シート

写真 4.4.1 樹脂系の試料



ガルバリウム鋼板フッ素系樹脂塗装

写真 4.4.2 塗装系の試料

4-4-2. 試料の物性値の測定

選定した試料に対して、分光測色計（コニカミノルタ製 CM-700d）により視感反射率  $Y$  と  $xy$  色度座標を、光沢度計（BYK-GARDNER 製 AG4446）により光沢度を、表面粗さ計（東京精密製 SURFCOM FLEX-50A）により表面粗さ  $Ra$  を測定した。測定に用いた計測器は 2-5-2 と同様である。測定結果を表 4.4.1 に示す。

表 4.4.1 試料の物性値 (No. 4, 9, 18, 20, 21, 27~32)

No.	試料の種類	$Y^*$	$x^*$	$y^*$	光沢度 [GU]			表面粗さ $Ra$ [ $\mu m$ ]	屈折率 (仮定値) $n$ [-]
					20°	60°	85°		
4	化粧塩ビフィルム(白艶)	84.54	0.317	0.335	2.69	16.99	56.27	0.364	1.54
27	化粧塩ビフィルム(濃緑艶)	5.25	0.245	0.355	1.83	17.59	61.63	0.375	1.54
28	化粧塩ビフィルム(濃紫艶)	9.95	0.410	0.240	1.32	11.12	51.70	0.482	1.54
29	複層塩ビ床シート(薄赤)	34.8	0.382	0.341	2.72	20.88	41.27	0.724	1.54
30	複層塩ビ床シート(薄黄)	70.93	0.356	0.377	3.210	20.36	37.54	0.852	1.54
9	花崗岩 水磨き仕上げ	16.92	0.309	0.330	0.47	3.54	25.47	1.113	1.54
18	大理石 水磨き仕上げ	82.48	0.315	0.333	1.91	7.01	52.46	0.675	1.57
20	コンクリート打ち放し仕上げ (顔料なしケイ酸質系塗装)	29.78	0.327	0.344	0.81	5.84	10.84	1.553	1.50
31	ガルバリウム鋼板フッ素系樹脂 塗装(薄緑)	23.26	0.275	0.347	3.49	24.27	50.18	0.435	1.35
32	ガルバリウム鋼板フッ素系樹脂 塗装(薄青)	18.65	0.251	0.291	3.31	25.97	67.58	0.274	1.35
21	ブリキ板ポリエステル系樹脂粉 体塗料 5 分艶仕上げ(薄橙)	71.22	0.337	0.351	16.07	54.66	73.49	0.318	2.40

※ D65, SCE (正反射光除去)

#### 4-5. 分光反射指向特性の簡易推定法

分光測定では測定データ量が膨大となることから、データ処理にかかる負荷が大きい。そこで、分光反射指向特性を簡易に推定する手法を提案する。

層内反射成分は材料の分光反射特性が反映されるため、分光測色計で測定できる分光拡散反射率  $R_{d\lambda}$  を分光層内反射率  $R_{D\lambda}$  に相当する値であると仮定して、次式より分光層内反射成分  $\rho_{D\lambda_s}$  [1/sr] を推定する。

$$\rho_{D\lambda_s}(\theta_i, \varphi_i; \theta_o, \varphi_o; \lambda) = R_{D\lambda}(\lambda) \cos \theta_o / \pi \quad (4.3)$$

$$R_{D\lambda}(\lambda) = R_{d\lambda}(\lambda) \quad (4.4)$$

$\rho_{D\lambda_s}(\theta_i, \varphi_i; \theta_o, \varphi_o; \lambda)$  : 簡易推定した分光層内反射成分 [1/sr]

$R_{D\lambda}(\lambda)$  : 分光層内反射率 [-]

$R_{d\lambda}(\lambda)$  : 分光測色計で測定した SCE 方式での分光拡散反射率 [-]

表皮反射成分は光源の分光分布が保持されるため、波長に拠らず定数となると仮定し、(4.8) 式で示すように表皮反射成分  $\rho_M$  をそのまま分光表皮反射成分  $\rho_{M_s}$  [1/sr] として用いる。表皮反射成分  $\rho_M$  は(4.6)～(4.8)式で示すように、3-3 節で提案した簡易推定法により以下の関係により求められる。

$$\rho_{M\lambda_s}(\theta_i, \varphi_i; \theta_o, \varphi_o; \lambda) = \rho_M(\theta_i, \varphi_i; \theta_o, \varphi_o) \quad (4.5)$$

$\rho_{M_s}(\theta_i, \varphi_i; \theta_o, \varphi_o; \lambda)$  : 簡易に求めた分光表皮反射成分 [1/sr]

$\rho_M(\theta_i, \varphi_i; \theta_o, \varphi_o)$  : 表皮反射成分 [1/sr]

$$\rho_M(\theta_i, \varphi_i; \theta_o, \varphi_o) = \rho_{M_s}(\theta_i, \varphi_i; \theta_o, \varphi_o) \quad (4.6)$$

$$\rho_{M_s}(\theta_i, \varphi_i; \theta_o, \varphi_o) = \rho(\theta_i, \varphi_i; \theta_o, \varphi_o) - \rho_{D_s}(\theta_i, \varphi_i; \theta_o, \varphi_o) \quad (4.7)$$

$$\rho_{D_s}(\theta_i, \varphi_i; \theta_o, \varphi_o) = R_d \cos \theta_o / \pi$$

$$R_d = \frac{\int_{400}^{700} E_{xenon}(\lambda) \cdot R_\lambda(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda}{\int_{400}^{700} E_{xenon}(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda} \quad (4.8)$$

$\rho_{M_s}$  : 3-3 節の簡易推定法により求めた表皮反射成分 [1/sr]

$\rho$  : 輝度測定により得られた反射指向特性関数 [1/sr]

$\rho_{D_s}$  : 3-3 節の簡易推定法により求めた層内反射成分 [1/sr]

$E_{xenon}(\lambda)$  : 光源キセノンランプの分光放射照度 [W/(m<sup>2</sup>·nm)]

$R_d$  : 拡散反射率 [-]

$R_\lambda(\lambda)$  : 分光拡散反射率 [-]

$V(\lambda)$  : 明所視標準比視感度 [-]



(4.3)~(4.5)式が有効であれば、3-3節で示した簡易推定法により推定した分光表皮反射成分  $\rho_{M\lambda_s}$  と分光測色計等で測定可能な分光拡散反射率により推定した分光層内反射成分  $\rho_{D\lambda_s}$  により、分光放射輝度測定を行うことなく分光反射指向特性を推定できることとなり、測定がかなり簡易化できる。

図 4.5.1~4.5.11 に分光反射指向特性の偏光を用いた詳細測定結果と、(4.3)~(4.8)式による簡易推定値との比較を示す。なお、分光測色計で測定可能な波長範囲が 400~700nm であったため、本波長範囲の結果を示している。また、簡易推定法により表皮反射成分  $\rho_M(\theta_i, \varphi_i; \theta_o, \varphi_o)$  を求める際に、拡散反射率  $R_d$  を (4.8)式から求める必要があるが、その際の波長範囲も同様とした。360~740nm の波長範囲で求めた場合と比較して 400~700nm で求めた  $R_d$  の値はほぼ変わらず、相対誤差は 0.15%以下だった。図 4.5.4 に示す複層塩ビ床シート（薄赤）については、45°入射 60°入射の測定に失敗したため、代わりに 45°入射 55°反射の結果を示している。

どの建材においても、層内反射成分の分光分布は簡易推定法による分光分布とよく一致した。図 4.5.1~4.5.5 に示す化粧塩ビフィルムおよび複層塩ビ床シートと図 4.5.8 に示すコンクリート打ち放し仕上げにおいては、表皮反射成分の分光分布は波長に依らずほぼ定数となり、簡易推定法でおおよそ推定できた。図 4.5.6 に示す花崗岩においては、表皮反射成分の分光分布は波長に依らずほぼ定数となったが、e)の 60° 入射 45° 反射においては、簡易推定法と 0.06~0.07 程度の値の乖離がみられた。

図 4.3.7 に示す大理石と図 4.3.9、4.3.10 に示す樹脂塗装ガルバリウム鋼板、図 4.3.11 に示す樹脂塗装ブリキ板では、表皮反射成分は特に b)、f)に示す正反射方向の反射光において、波長が長くなるほど  $\rho_M$  が大きくなる傾向があり、簡易推定法で推定できなかった。大理石は結晶の集合体であり、半透明な箇所やパールがあった箇所があるため、他の建材と同一に評価するのが難しい可能性がある。花崗岩も同様に灰色や白色の結晶の集合体であり、大理石ほどではないが、半透明な箇所が含まれている。

塗装をしていないガルバリウム鋼板（以下、ガルバリウム鋼板原板）の  $\rho$  の分光分布を図 4.3.12 に示す。ガルバリウム鋼板は金属であり、層内反射と表皮反射のモデルには該当しないため、 $\rho$  のみを示している。図 4.3.9~4.3.11 の樹脂塗装をしたガルバリウム鋼板およびブリキ板と同様に、b)、f)に示す正反射方向の反射光において、波長が長くなるほど  $\rho$  が大きくなる傾向が見られ、反射強度もかなり大きくなった。そのため、波長が長くなるほど  $\rho_M$  が大きくなる傾向は、樹脂塗装によるものとは考えにくい。本試料の塗装については製造所での焼付塗装工程を踏んでいるが、塗膜は完全には鋼板を密閉できず、微小ながら穴が開いているような構造になっているとのことであり、その微小な穴において、原板表面で表皮反射した光があるのではないかと考えられる。特に正反射方向においては、原板での反射光の強度が大きくなるため、原板の傾向が表れやすいのではないかと考えられる。

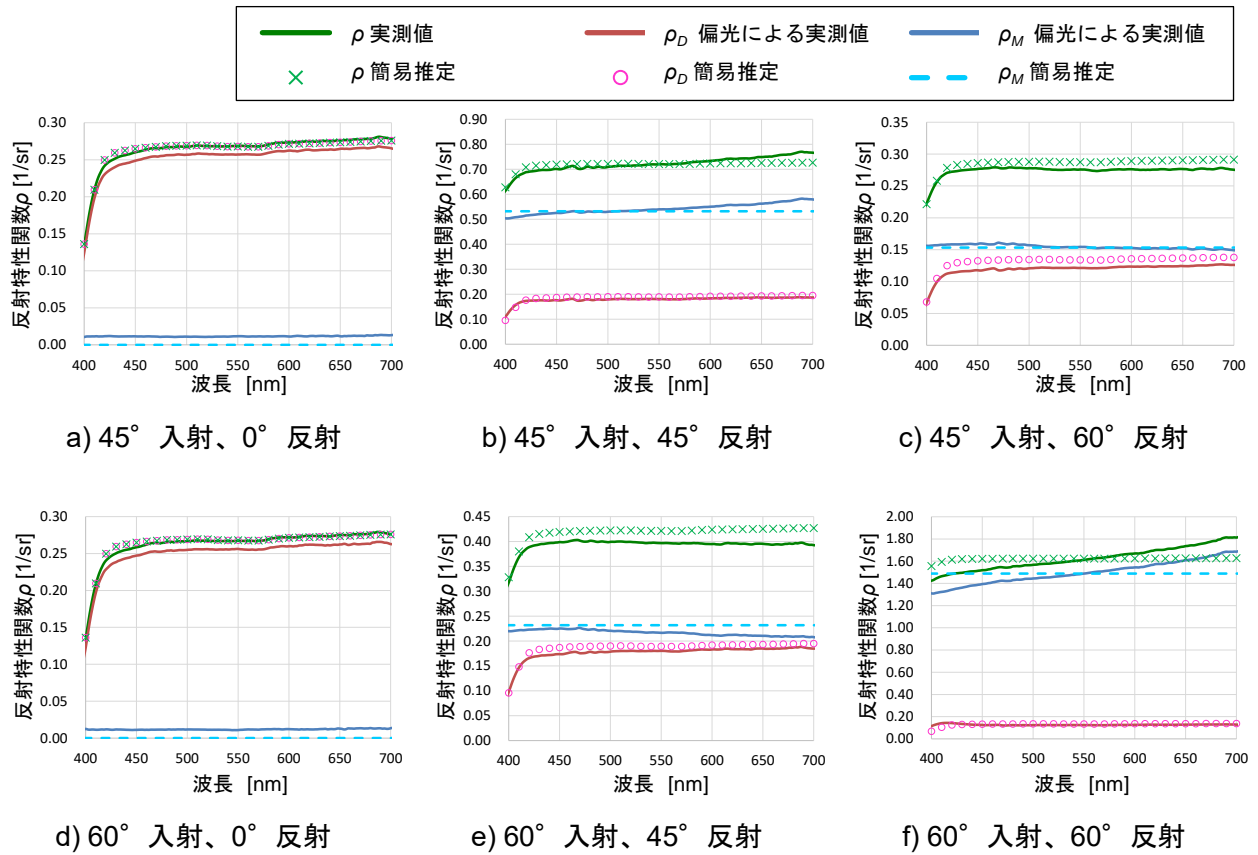


図 4.5.1  $\rho$  の偏光による実測値と簡易推定値の分光分布 No. 4 化粧塩ビフィルム (白艶)

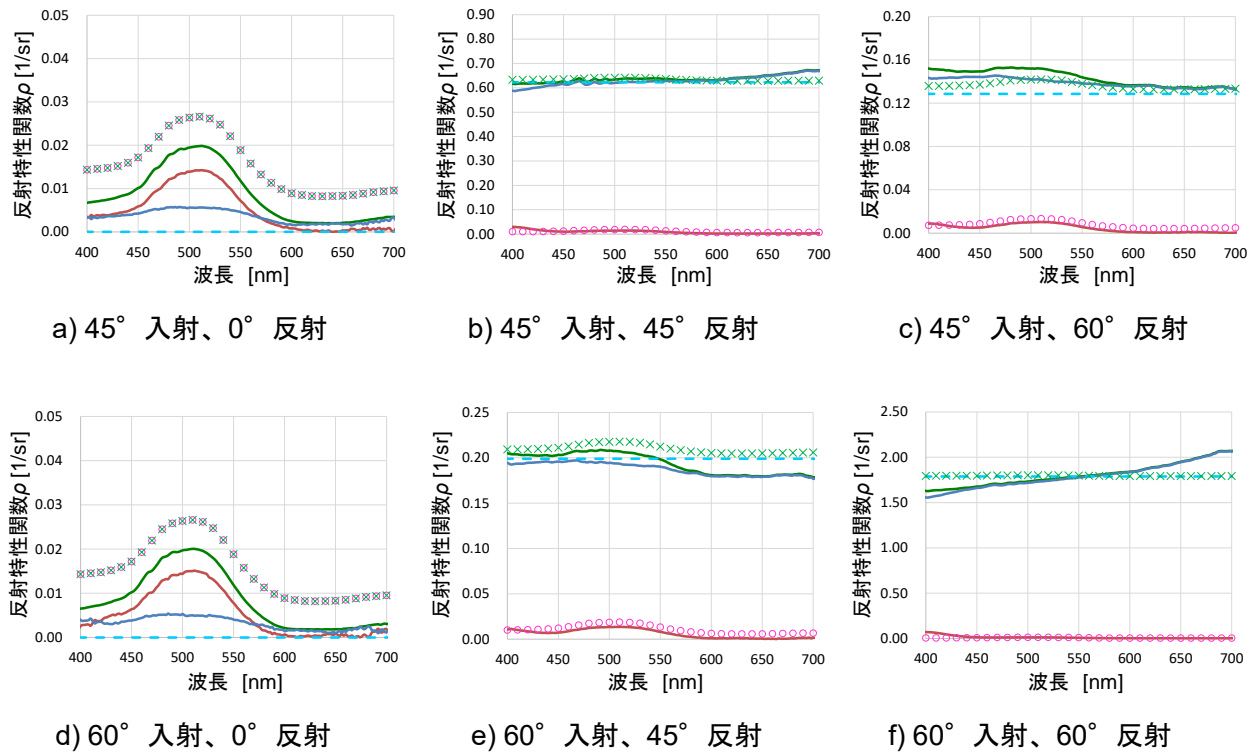


図 4.5.2  $\rho$  の偏光による実測値と簡易推定値の分光分布

No. 27 化粧塩ビフィルム (濃緑艶)

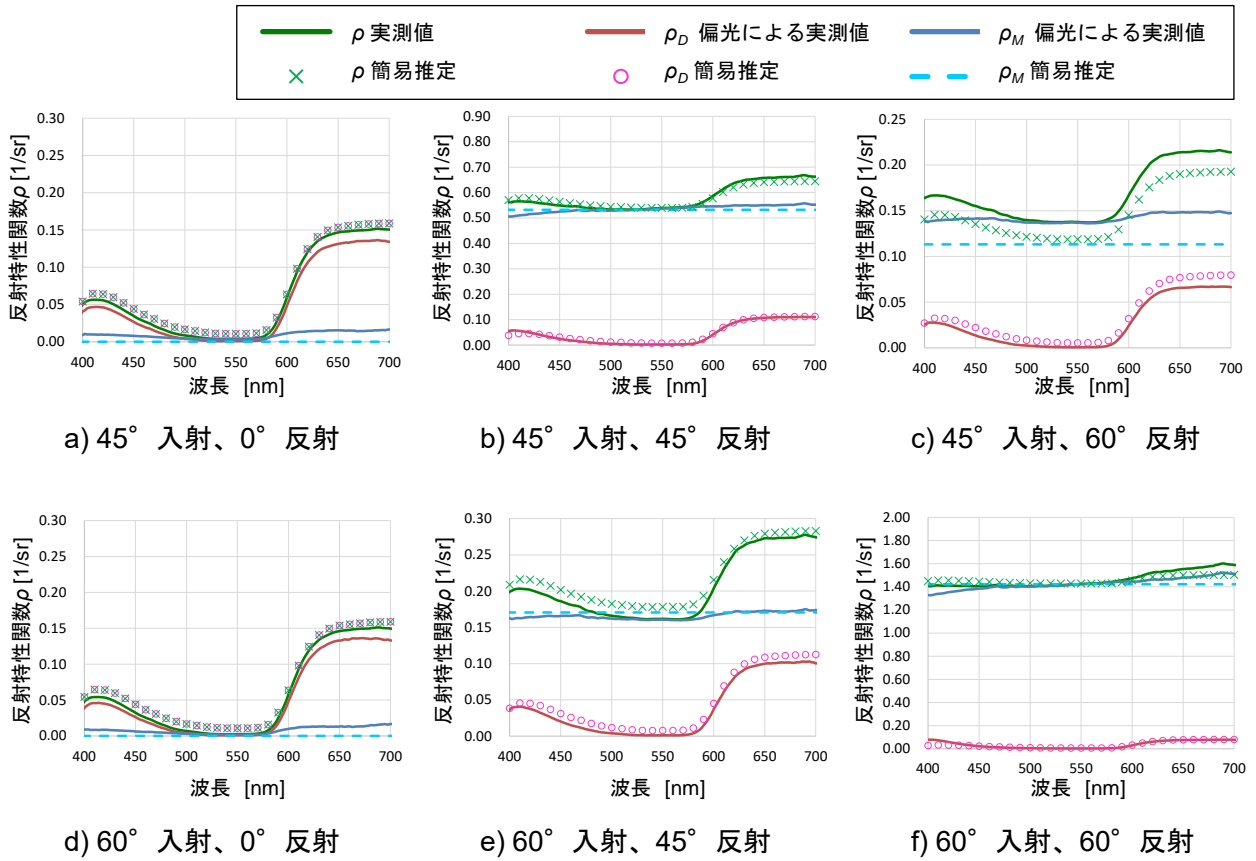


図 4.5.3  $\rho$  の偏光による実測値と簡易推定値の分光分布

No. 29 化粧塩ビフィルム (濃紫艶)

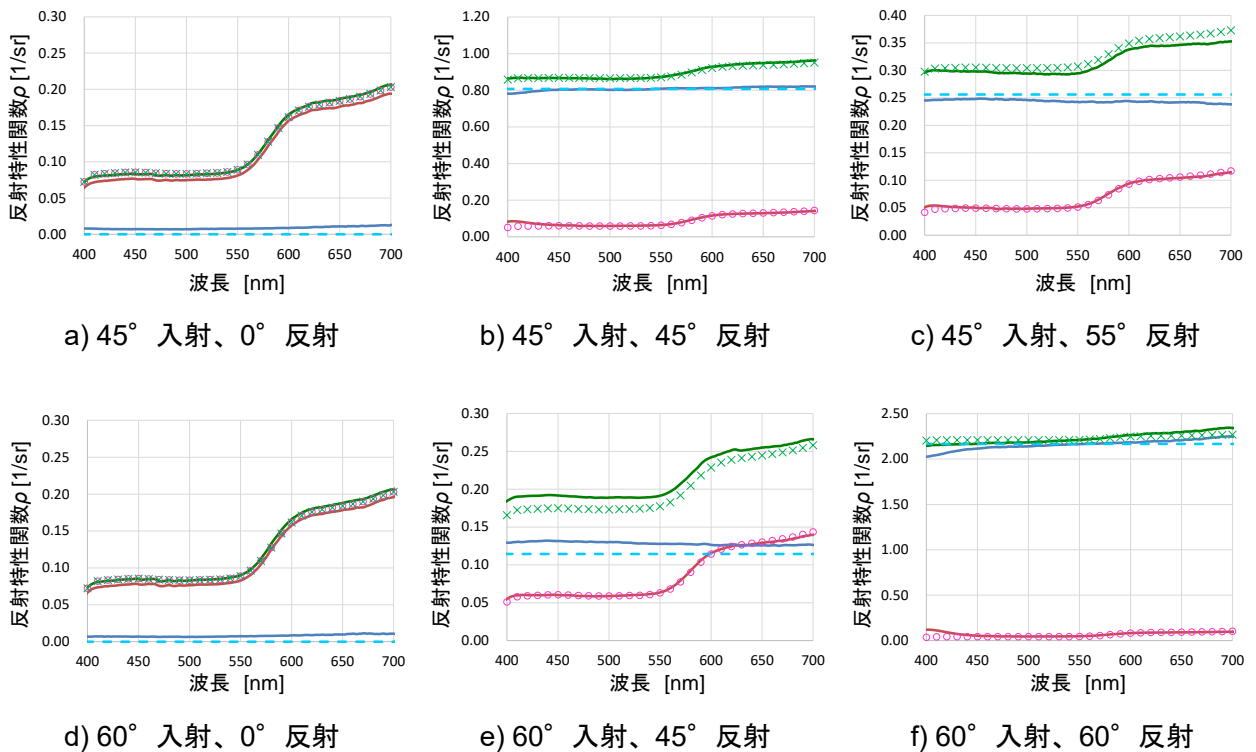


図 4.5.4  $\rho$  の偏光による実測値と簡易推定値の分光分布 No. 28 複層塩ビ床シート (薄赤)

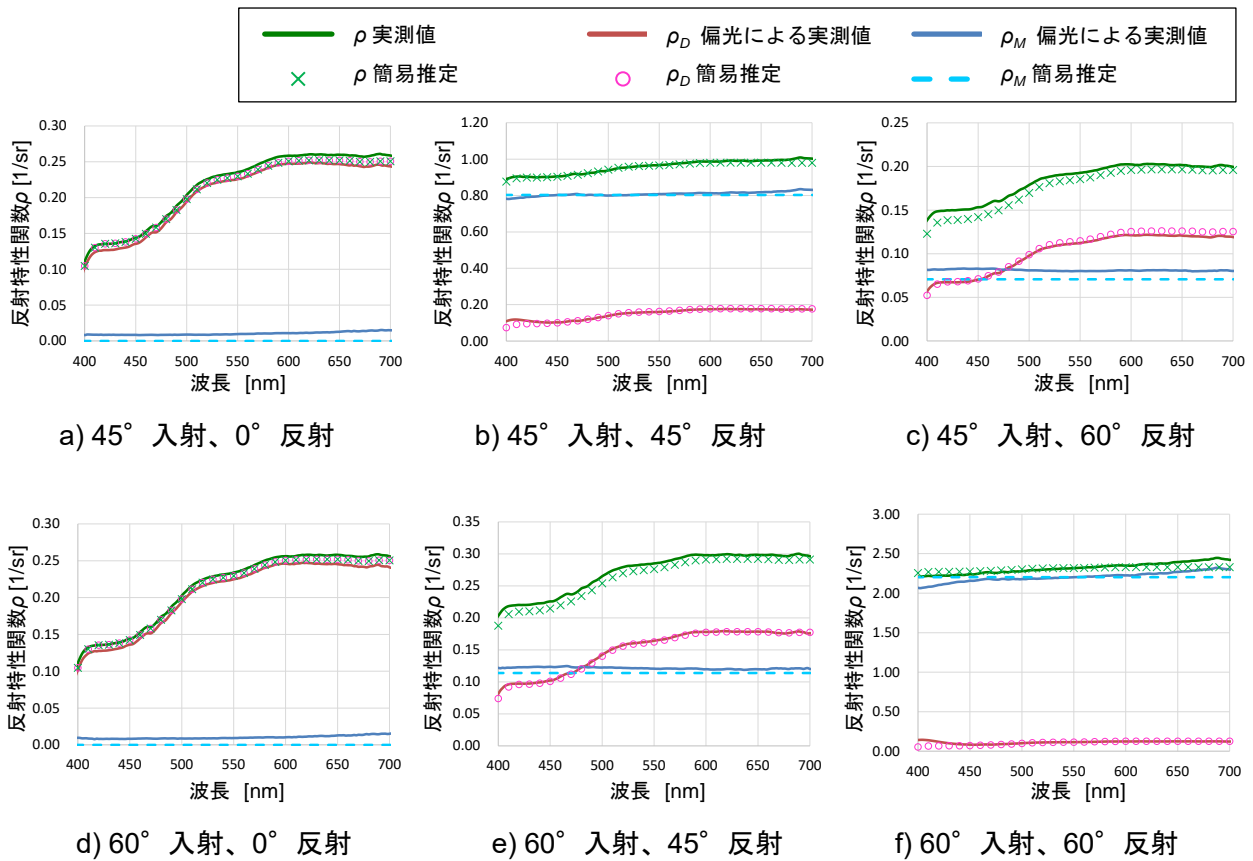


図 4.5.5  $\rho$  の偏光による実測値と簡易推定値の分光分布 No. 30 複層塩ビ床シート (薄黄)

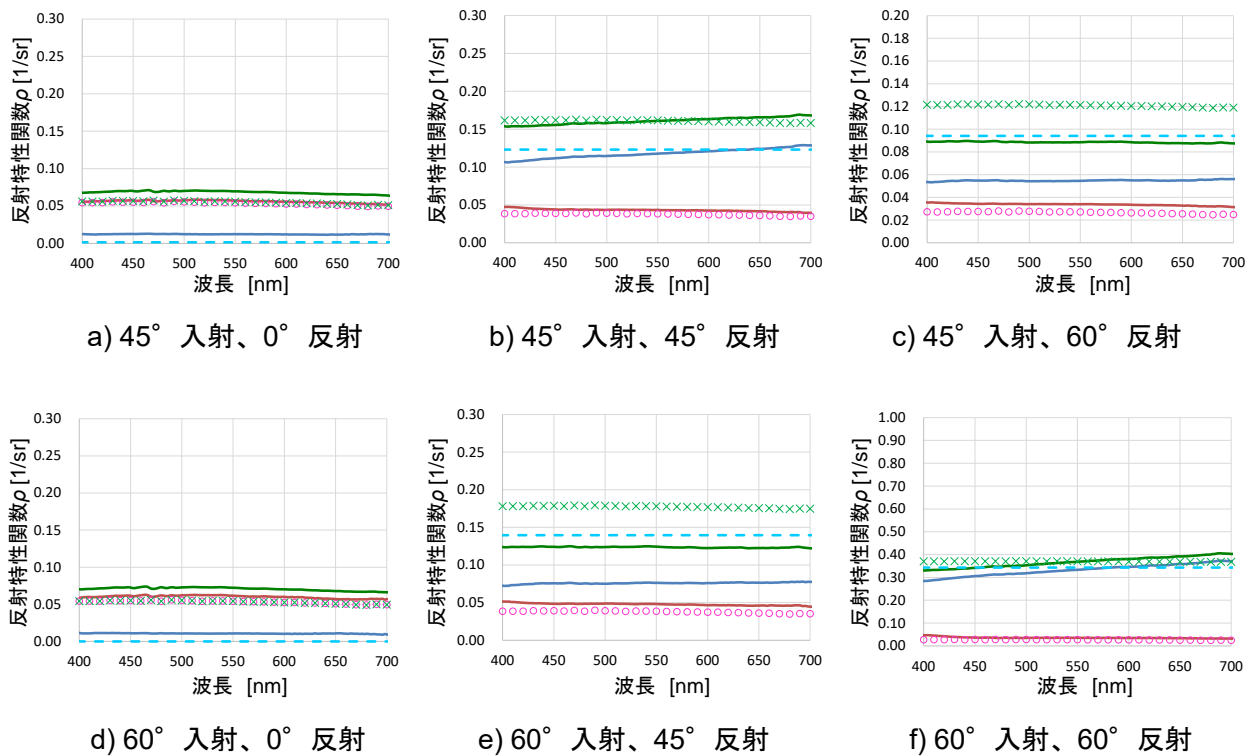


図 4.5.6  $\rho$  の偏光による実測値と簡易推定値の分光分布 No. 9 花崗岩 水磨き仕上げ

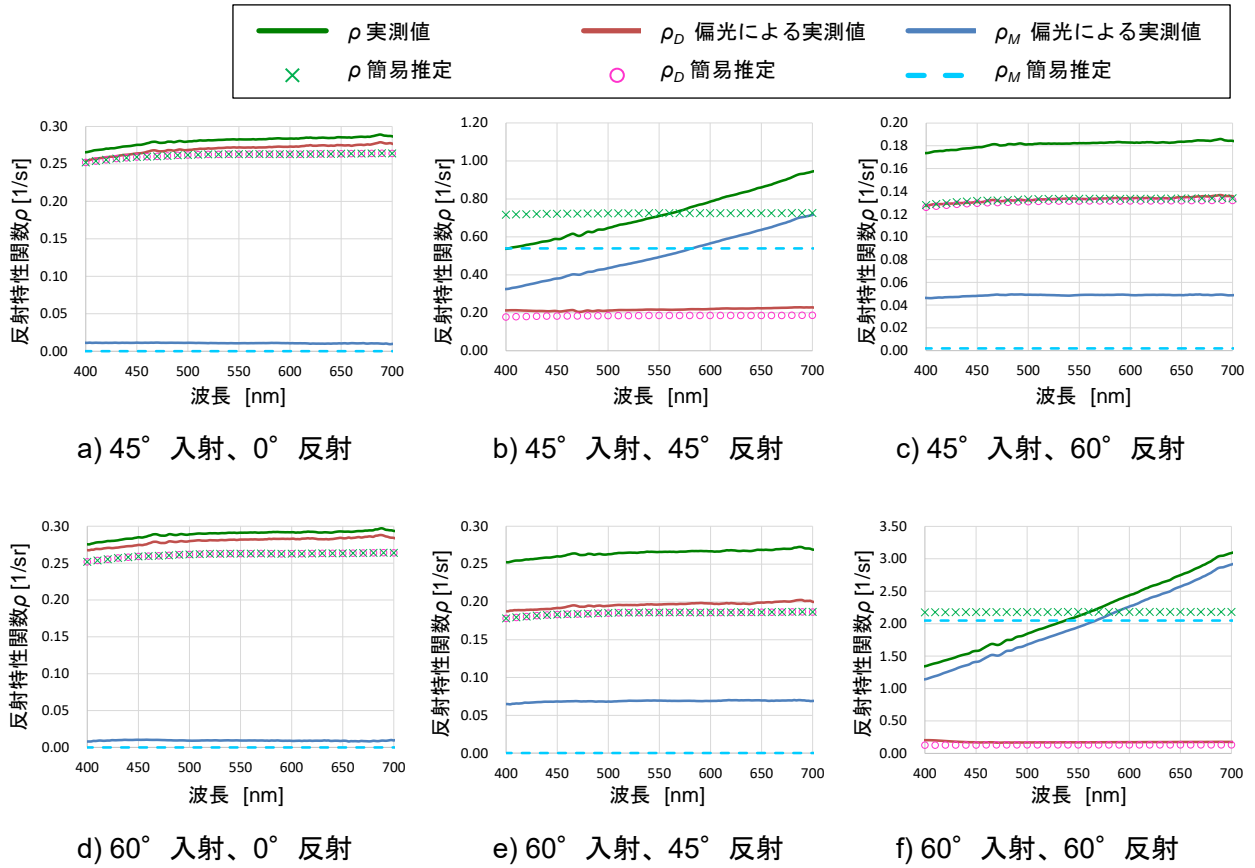


図 4.5.7  $\rho$  の偏光による実測値と簡易推定値の分光分布 No. 18 大理石 水磨き仕上げ

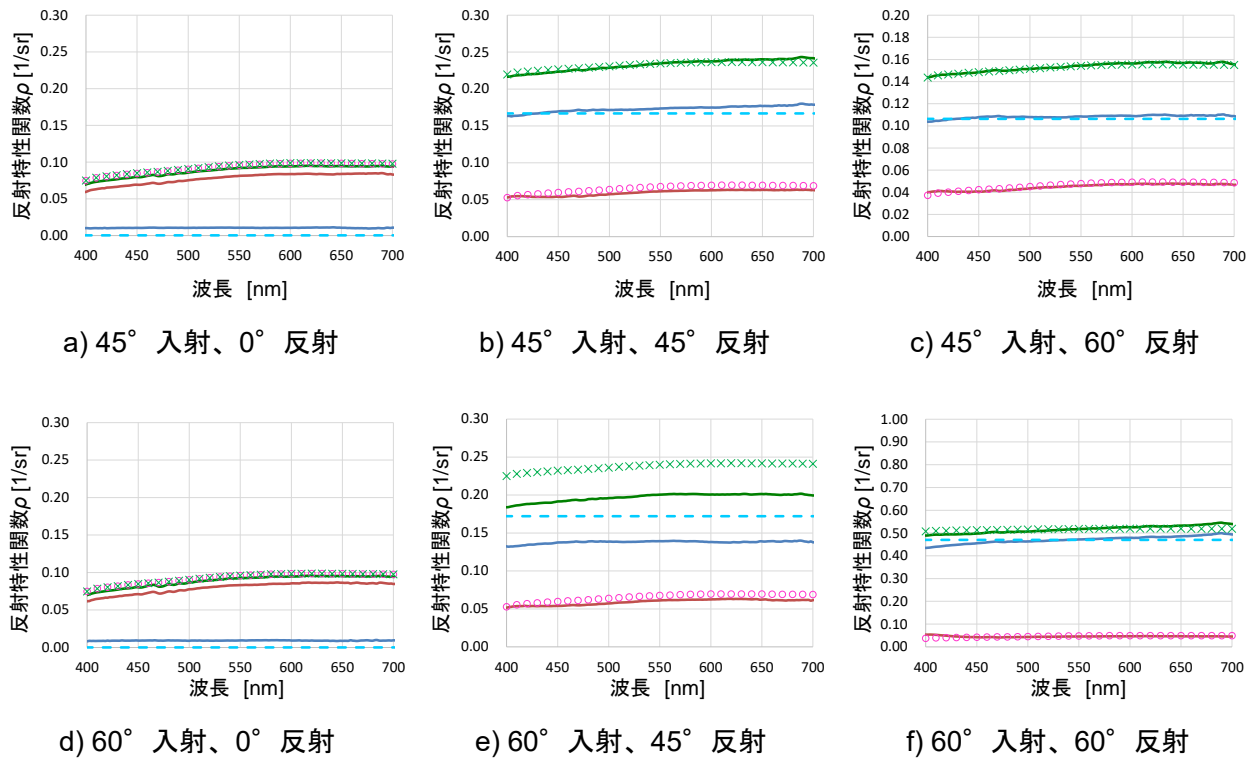


図 4.5.8  $\rho$  の偏光による実測値と簡易推定値の分光分布

No. 20 コンクリート打ち放し仕上げ

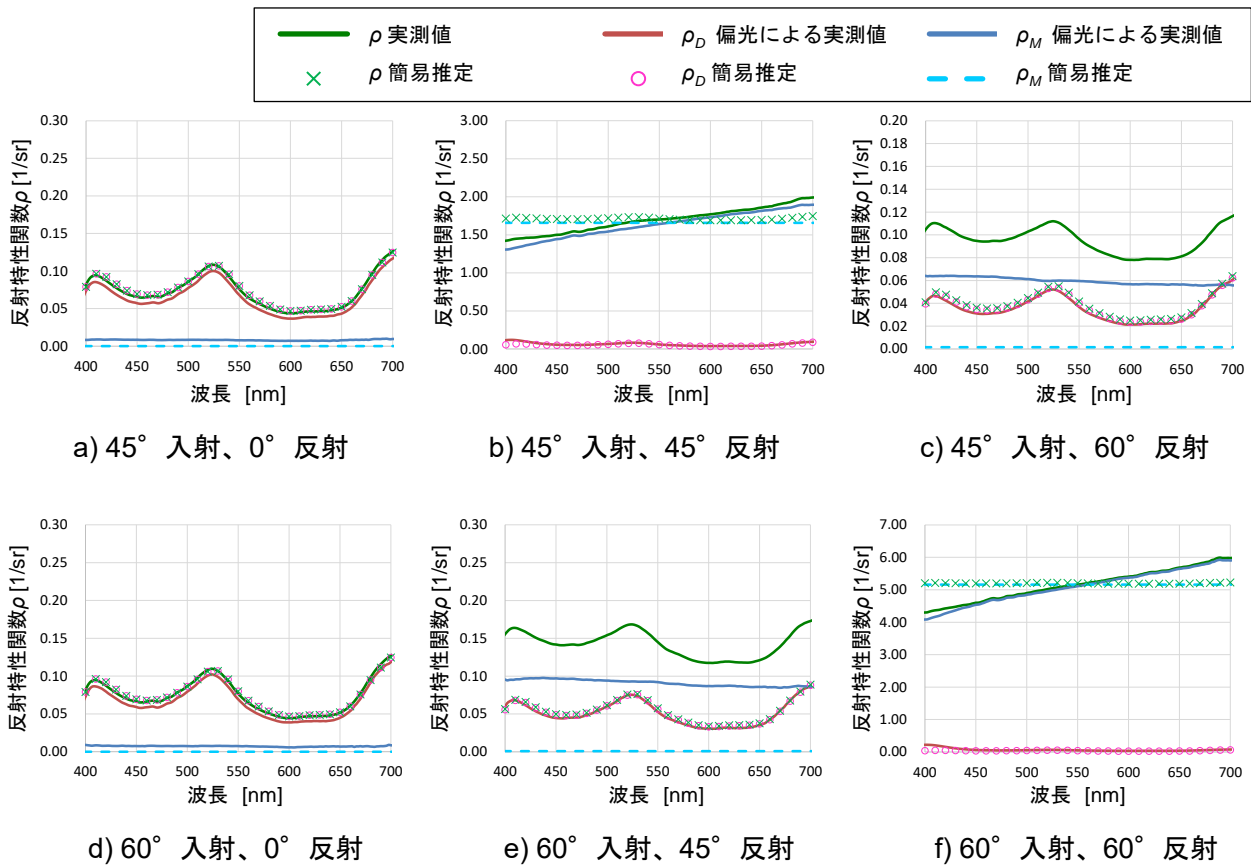


図 4.5.9  $\rho$  の偏光による実測値と簡易推定値の分光分布 No. 31 ガルバ鋼板塗装 (薄緑)

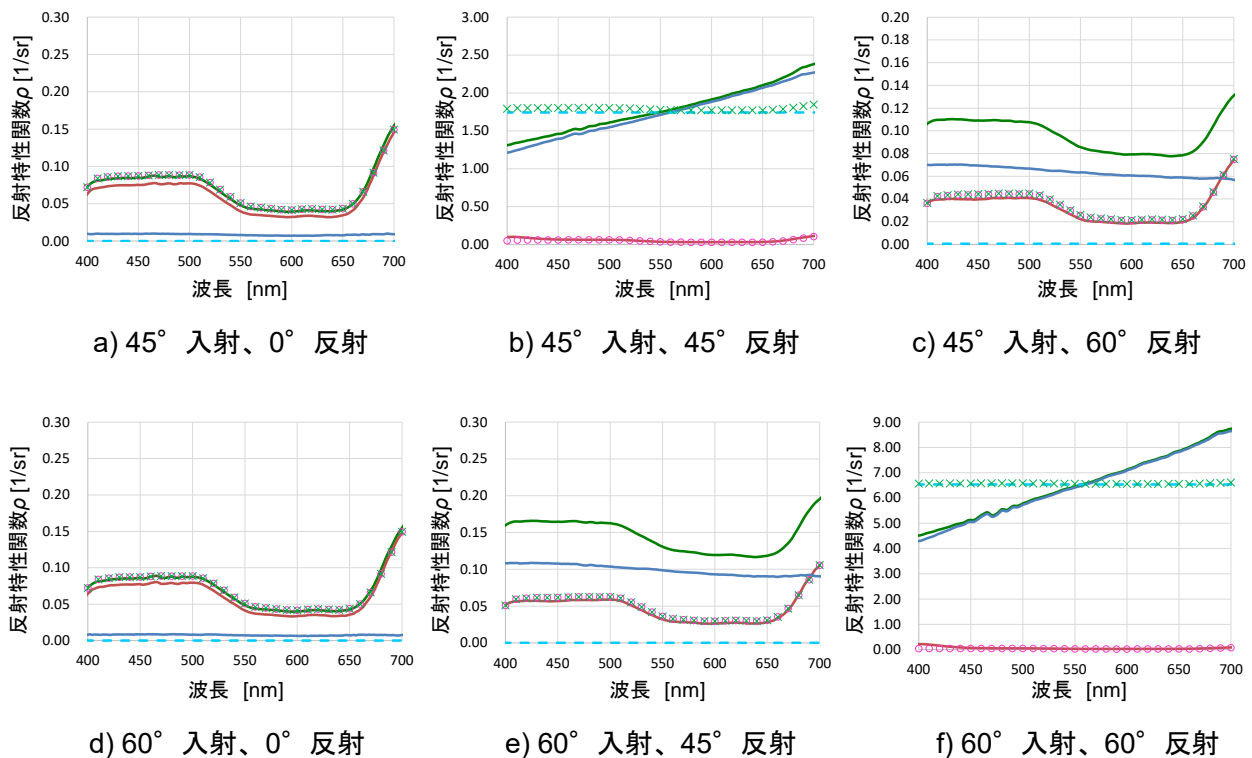


図 4.5.10  $\rho$  の偏光による実測値と簡易推定値の分光分布 No. 32 ガルバ鋼板塗装 (薄青)

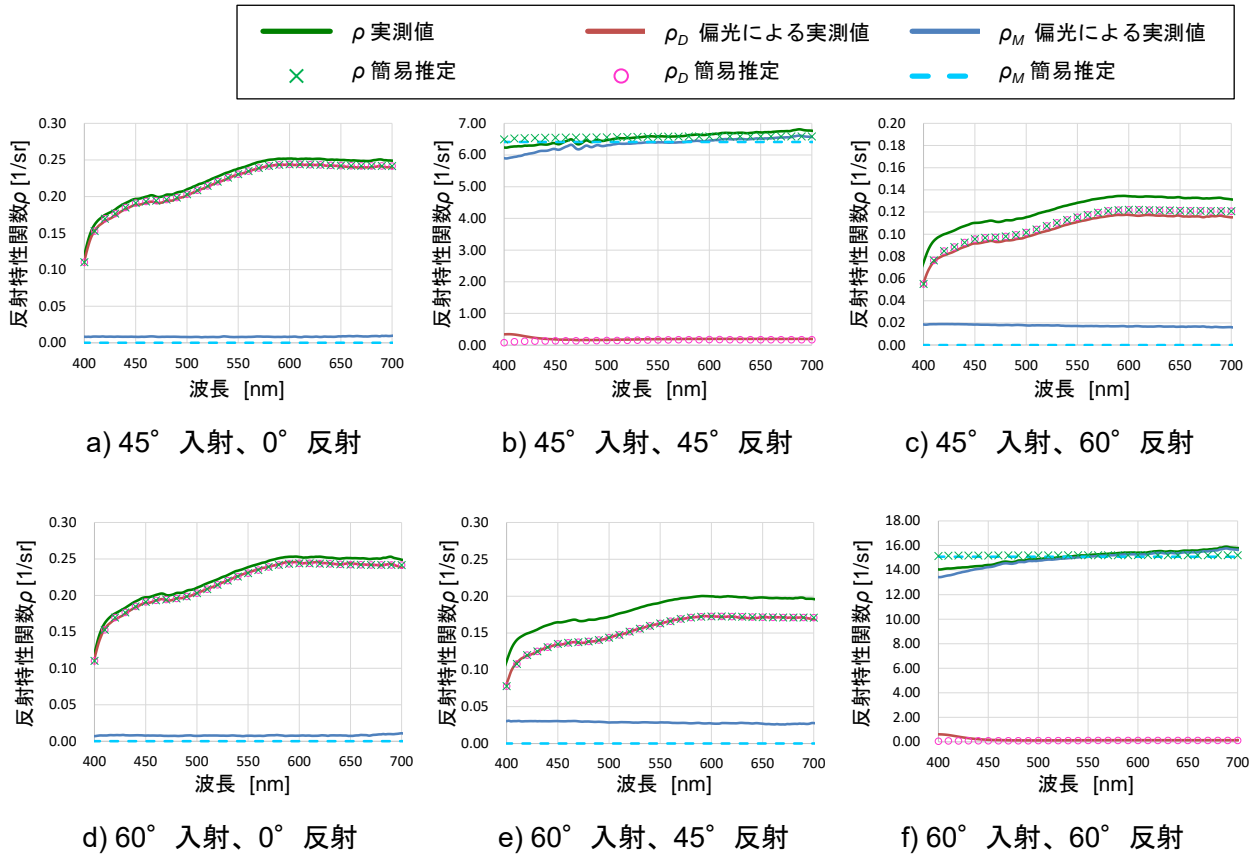


図 4.5.11  $\rho$  の偏光による実測値と簡易推定値の分光分布

No. 33 ブリキ板 5 分艶塗装 (薄橙)

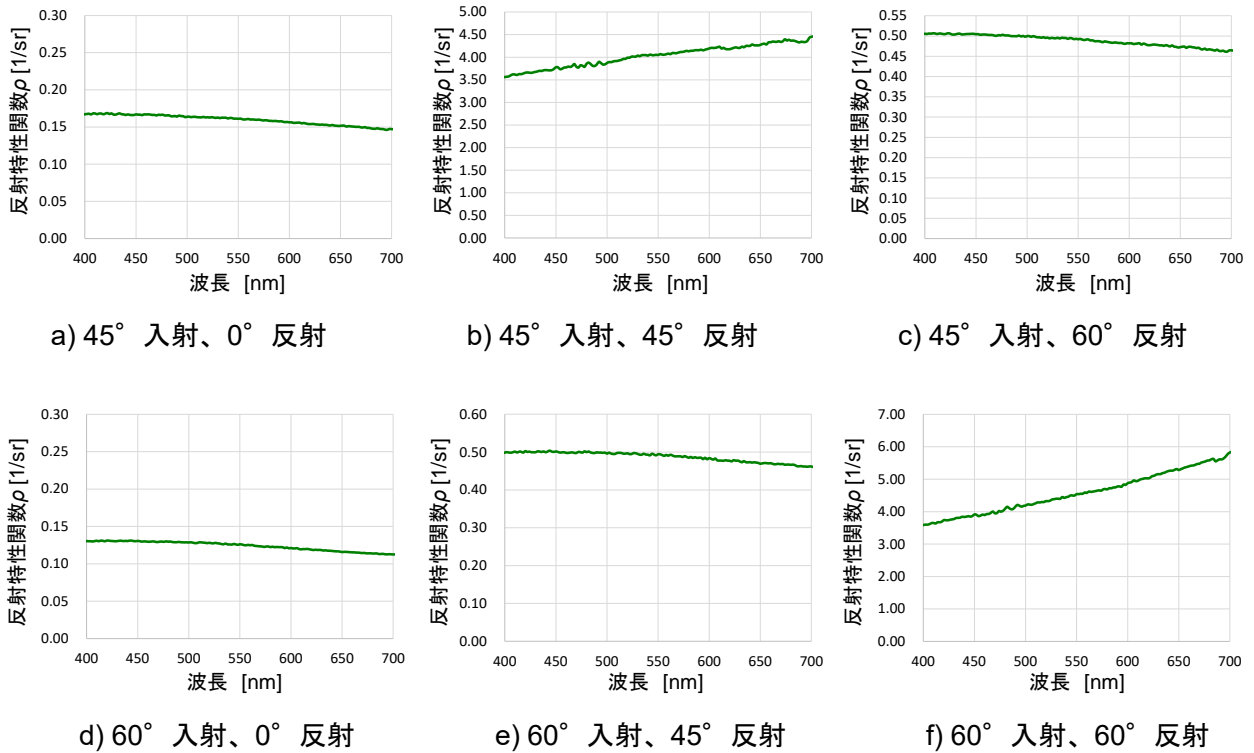
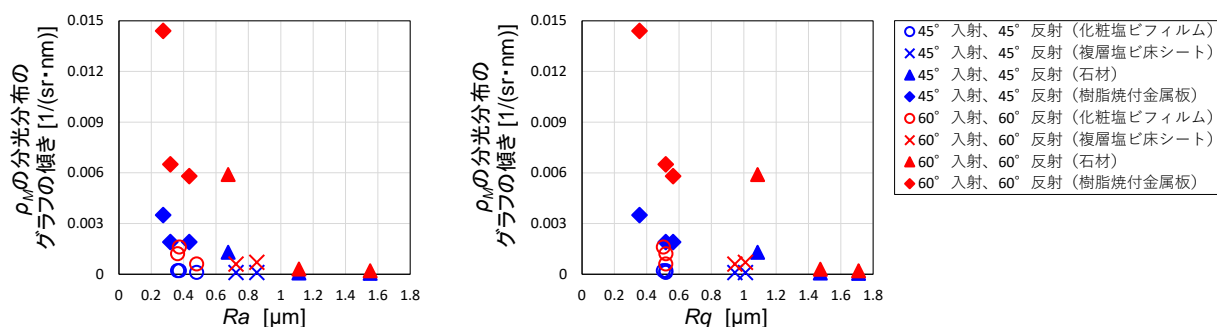


図 4.5.12  $\rho$  の偏光による実測値と簡易推定値の分光分布 ガルバリウム鋼板原板

表皮反射成分が波長に拠らずほぼ定数となる建材は(4.5)式により簡易推定できるが、波長が長くなるほど反射強度が大きくなる建材は簡易推定が難しい。そこで、(4.5)式による表皮反射成分の簡易推定が難しい建材の特徴を考察する。波長が長くなるほど反射強度が大きくなる傾向の強さを評価するため、正反射光の表皮反射成分の分光分布を線形に近似させた直線の傾きを算出した。この値が大きくなるほど、簡易推定に適さない建材といえる。各建材の図 4.5.1 ~ 4.5.11 b)、f) で示した正反射光の表皮反射成分の分光分布を線形に近似させた直線の傾きと、建材の表面粗さのパラメータである算術平均粗さ  $Ra$  もしくは二乗平均平方根粗さ  $Rq$  との相関を図 4.5.13 に示す。光沢度との相関を図 4.5.14 に示す。石材と樹脂焼付金属板については、表面粗さが小さいと  $\rho_M$  の分光分布の傾きが大きくなった。金属板では塗装の下の原板の影響がある場合があり、結晶のある石材については、結晶構造を考慮したモデルが必要と考えられる。 $Ra$  と  $Rq$  とではさほど傾向は変わらなかったが、 $Ra$  の方が  $0.5\mu\text{m}$  付近のデータの重なりが少なくて多少見やすい。一方、光沢度については特徴的な傾向はみられなかった。



a) 算術平均粗さ  $Ra$  との相関

b) 二乗平均平方根粗さ  $Rq$  との相関

図 4.5.13 正反射光の表皮反射成分の分光反射指向特性のグラフの傾きと表面粗さとの関係

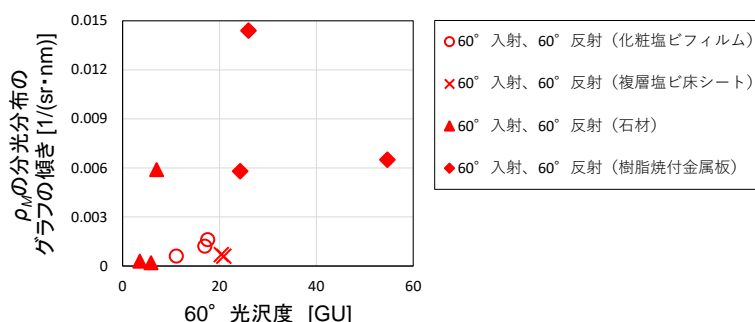


図 4.5.14 正反射光の表皮反射成分の分光反射指向特性のグラフの傾きと光沢度との関係

花崗岩、大理石、ガルバリウム鋼板の  $60^\circ$  入射  $45^\circ$  反射において、表皮反射成分の偏光による実測値と簡易推定値とで  $\rho_M$  の大きさの乖離が見られた (図 4.5.6 e)、図 4.5.7 e)、図 4.5.9 e)、図 4.5.10 e))。入射角度  $45^\circ$  での反射角度毎の偏光による詳細測定と (4.3) ~ (4.8) 式による簡易推定での反射特性関数  $\rho$  を図 4.5.15 に示す。f)、g)、i)~m) に示す花崗岩、大理石、



ガルバリウム鋼板フッ素系樹脂塗装、ブリキ板ポリエステル系樹脂粉体塗料では、詳細測定値と簡易推定値とで正反射方向付近で反射強度が大きくなる分布の形状に乖離が見られた。結晶のある石材は結晶構造により、樹脂焼付塗装の金属板では塗装の下の金属の影響により、本研究で用いた層内と表皮の数式モデルでは分布の形状の推定が他の建材より悪くなった可能性がある。これが表皮反射成分の分布の形状の乖離によるものであり、入射角度が大きくなるほど反射強度が大きくなるため、乖離した値も大きくなると考えられる。分光分布での  $60^\circ$  入射  $45^\circ$  反射の実測値と簡易推定値の乖離もこれによるものといえる。

図 4.5.15 a)~e)、h)より、化粧塩ビフィルム、複層塩ビ床シート、コンクリート打ち放し仕上げにおいては、分光分布での結果と同様に、(4.3)~(4.8)式による簡易推定によって詳細測定での  $\rho$  の反射性状が推定できた。

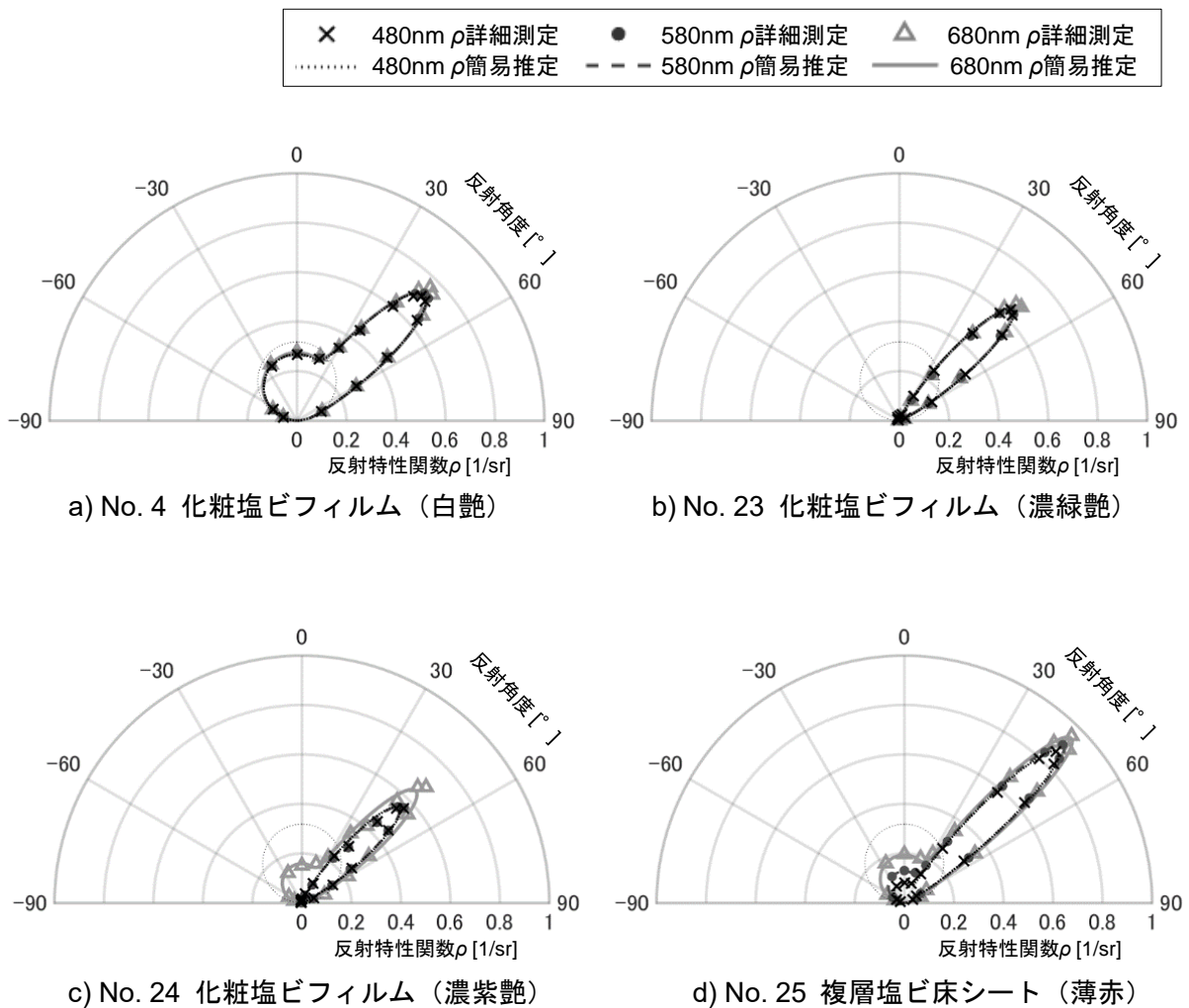
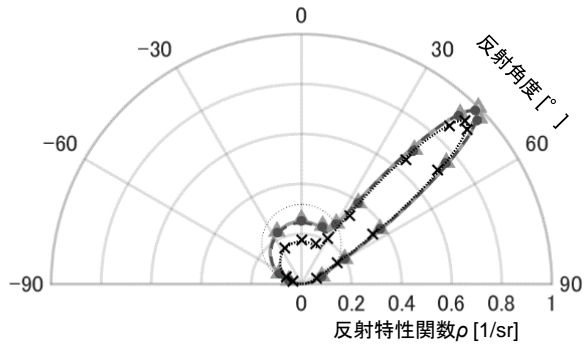
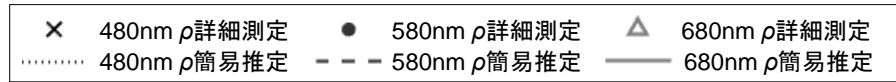
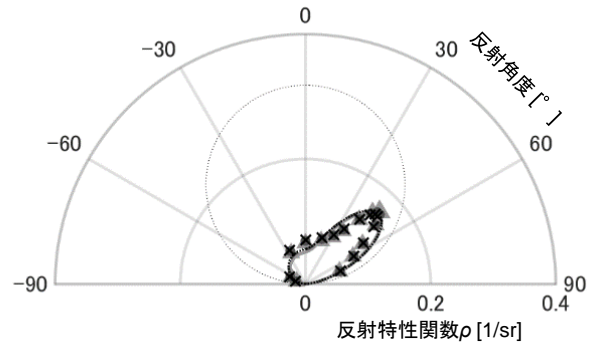


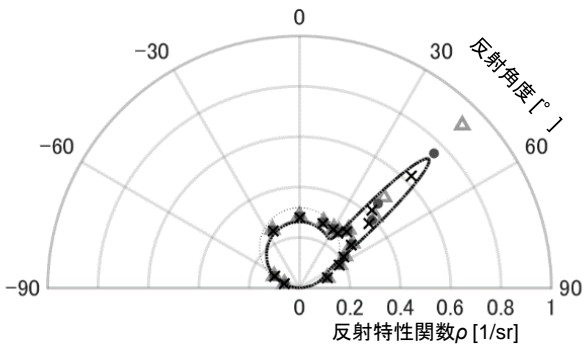
図 4.5.15 入射角度  $45^\circ$  での詳細測定と簡易推定による分光反射特性関数  $\rho$  (a~d)



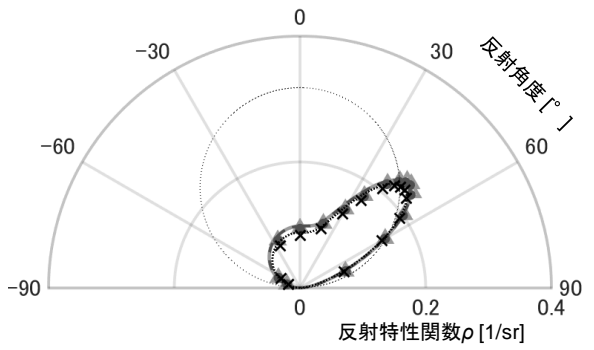
e) No. 26 複層塩ビ床シート (薄黄)



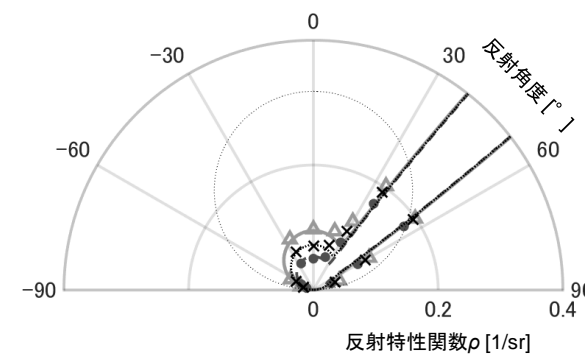
f) No. 9 花崗岩 水磨き仕上げ



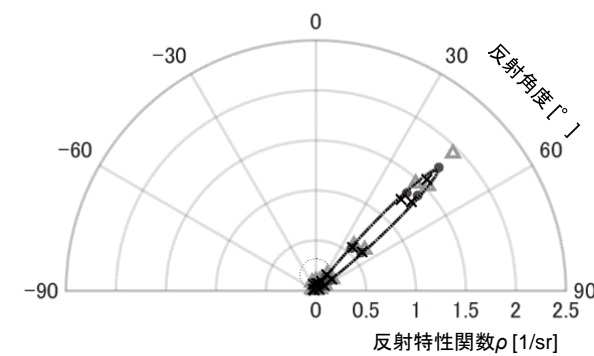
g) No. 18 大理石 水磨き仕上げ



h) No. 20 コンクリート打ち放し仕上げ



i) No. 27 ガルバリウム鋼板塗装 (薄緑)



j) No. 27 ガルバリウム鋼板塗装 (薄緑) 軸変更

図 4.5.15 入射角度 45° での詳細測定と簡易推定による分光反射特性関数  $\rho$  (e~j)

(つづき)

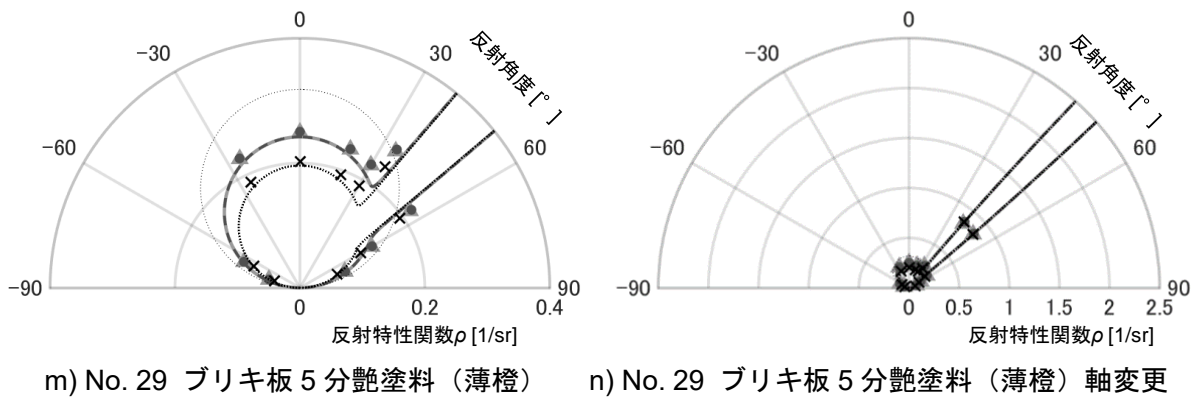
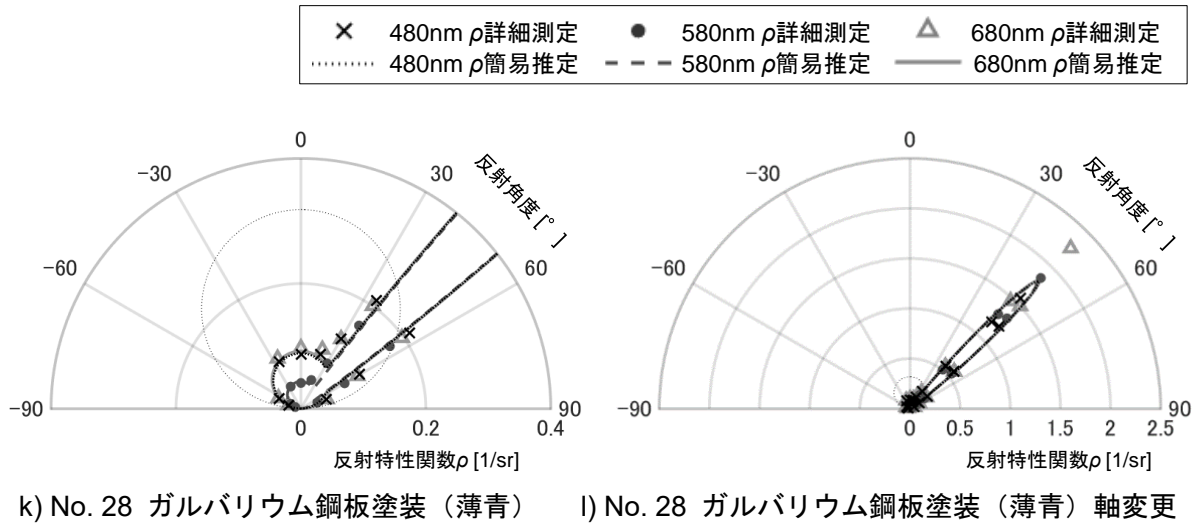


図 4.3.15 入射角度 45° での詳細測定と簡易推定による分光反射特性関数  $\rho$  (k~n)  
(つづき)

#### 4-6. まとめ

偏光を用いて層内・表皮反射成分に分けて非金属の試料面からの反射光の入射反射角度別の分光反指向特性の測定を行い、以下の知見を得た。

- 1) 層内反射の分光分布は、分光測色計で測定した拡散反射光の分光分布とよく一致した。
- 2) 表皮反射の分光分布は、化粧塩ビフィルム、複層塩ビ床シート、コンクリート打ち放し仕上げ、花崗岩では波長によらずほぼ定数となったが、大理石、ガルバリウム鋼板フッ素系樹脂塗装、ブリキ板ポリエステル系樹脂粉体塗料では、正反射光において波長が長いほど強度が大きい傾向があった。表面粗さの小さい石材と樹脂焼付け金属板では、その傾向が大きくなった。

3 章で示した簡易推定法により得られた反射指向特性と分光測色計等で測定可能な分光拡散反射率により、分光放射輝度測定を行うことなく分光反射指向特性を簡易に推定する手法を提案し、以下の知見を得た。

- 3) 化粧塩ビフィルム、複層塩ビ床シート、コンクリート打ち放し仕上げにおいては、簡易推定法で実測値が推定できた。
- 4) 大理石、ガルバリウム鋼板フッ素系樹脂塗装、ブリキ板ポリエステル系樹脂粉体塗料では簡易推定法により実測値が推定できなかった。石材と樹脂塗装した金属板で表面粗さの小さいものについては、簡易推定法が有効でないと考えられる。金属板では塗装下地の原板の影響がある場合があり、結晶のある石材については、結晶構造を考慮したモデルが必要と考えられる。
- 5) 花崗岩、大理石、ガルバリウム鋼板フッ素系樹脂塗装、ブリキ板ポリエステル系樹脂粉体塗料では、実測値と簡易推定値とで、特に表皮反射成分の正反射方向付近で反射強度が大きくなる分布の形状に乖離が見られた。

参考文献

- 1) 吉田悟郎, 上谷芳昭: 分光相互反射計算による昼光・人工光併用照明の演色性評価, 日本建築学会環境系論文集, 第78巻, 第691号, pp. 697-702, 2013,  
<https://doi.org/10.3130/aije.78.697>
- 2) 吉田悟郎, 上谷芳昭: ベネシャンブラインドの分光透過指向特性の算出方法, 日本建築学会環境系論文集, 第79巻, 第705号, pp. 937-945, 2014,  
<https://doi.org/10.3130/aije.79.937>
- 3) 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・臨時増刊 学術講演要旨集, 第41巻, p. 408, 1966. 10,  
[https://doi.org/10.3130/aijsaxxe.41.0\\_408](https://doi.org/10.3130/aijsaxxe.41.0_408)
- 4) 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, 第8巻, pp. 33-36, 1968. 5
- 5) 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. 6, [https://doi.org/10.3130/aijax.388.0\\_15](https://doi.org/10.3130/aijax.388.0_15)



## 第5章 反射指向特性を考慮した室内輝度分布の計算手法と 模型実験による検証

### 5-1. はじめに

本章では、反射指向特性の数式モデルを入力値として、反射指向特性を考慮した輝度分布を光束伝達相互反射式に基づいて計算する手法を示す。整理した上で、分割要素間の距離が近くなる隅部における計算精度の向上のため、距離が近い分割要素間での光束伝達の比率を計算する際の再分割手法と、再分割後の光束伝達の比率の補正手法を提案する。さらに、第3章の簡易推定手法により反射指向特性が既知である、反射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、輝度分布と代表点の照度を計算し、模型での測定値と比較・検証を行う。

## 5-2. 反射指向特性を考慮した光束伝達相互反射式に基づく計算手法

### 5-2-1. 基本の計算式

本節では、反射指向特性を考慮した輝度分布計算での計算手法について述べる。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<sup>1)3)</sup>に従い、基本の計算式を整理する。

#### 5-2-1-1. 均等拡散面

5-2-1-2 に後述する指向性のある反射面での計算式との比較のため、本項では均等拡散面での光束伝達相互反射式を示す。図 5.2.1 に示す均等拡散面で構成された閉じた面  $S$  内を  $N$  個の面に分割する。分割面  $S_j$  での間接照度と反射率が一定と仮定すると、分割面  $S_l$  に入射する間接光束  $\Phi_{ir_l}$  は(5.1)式で表せる。分割面  $S_l$  に入射する第 1 回反射光束  $\Phi_{ir_{1l}}$  は(5.2)式で表せる。(5.1)式の連立方程式の解は LU 分解法等の直接法やガウス・ザイデル法等の反復法により解くことができる。

$$\Phi_{ir_l} = \Phi_{ir_{1l}} + \sum_{j=1}^N R_j f_{jl} \Phi_{ir_j} \quad (5.1)$$

$$\Phi_{ir_{1l}} = \sum_{j=1}^N R_j f_{jl} A_j E_{d_j} \quad (5.2)$$

$\Phi_{ir_l}$  : 分割面  $S_l$  に入射する間接光束 [lm]

$\Phi_{ir_{1l}}$  : 分割面  $S_l$  に入射する第 1 回反射光束 [lm]

$N$  : 分割要素の数 [-]

$R_j$  : 分割面  $S_j$  の反射率 [-]

$f_{jl}$  : 立体角投射率 [-]

$A_j, A_l, A_k$  : 分割面  $S_j, S_l, S_k$  の面積 [m<sup>2</sup>]

$E_{d_j}, E_{d_l}, E_{d_k}$  : 分割面  $S_j, S_l, S_k$  の直接照度 [lx]

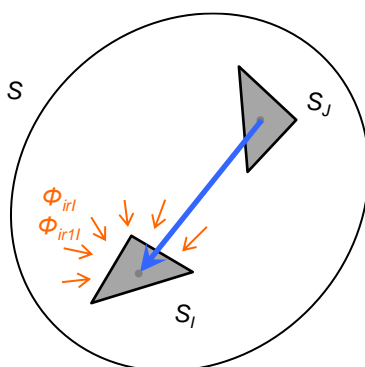


図 5.2.1 均等拡散面 S 内の光束伝達

#### 5-2-1-2. 指向性のある反射面

本項では、反射指向特性を考慮できる光束伝達相互反射式を示す。均等拡散面ではどの方向にも同じ輝度で反射するため、2つの分割面間の関係を解けばよいが、面の反射指向性を考慮する場合には、入射方向と反射方向によって反射率が異なるため、3面間の関係を解く必要が



ある。図 5.2.2 に示す指向性のある反射面で構成された閉じた面  $S$  内を  $N$  個の面に分割すれば、分割面  $S_I$  を発散して分割面  $S_K$  に入射する間接光束は(5.3)式で表される。分割面  $S_I$  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  $F_{JK}$  は(5.4)式で表される。ただし実際の計算では、立体角投射率を用いて、(5.4)式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(5.5)式を用いる。

$$\Phi_{rIK} = \Phi_{r1IK} + \sum_{J=1}^N F_{JK} \Phi_{rJI} \quad (5.3)$$

$$F_{JK} = \frac{1}{f_{IJ} A_I} \int_{S_K} \int_{S_I} \int_{S_J} \frac{\pi \rho(x', x; x, x'')}{\cos \theta_o(x, x'')} e_o(x', x) e_o(x, x'') dS_{x'} dS_x dS_{x''} \quad (5.4)$$

$$F_{JK} = \frac{\pi A_K f_{KI} \cdot \rho(x_J, x_I; x_I, x_K)}{A_I \cos \theta_o(x_I, x_K)} \quad (5.5)$$

$\Phi_{rIK}$  : 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]

$\Phi_{r1IK}$  : 分割面  $S_I$  を発散して分割面  $S_K$  に入射する第 1 回反射光束 [lm]

$F_{JK}$  : 分割面  $S_I$  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 [-]

$x', x, x''$  : 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<sup>15</sup> [1/m<sup>2</sup>]

$x_J, x_I, x_K$  : 分割面  $S_J, S_I, S_K$  の重心の 3 次元位置ベクトル [m]

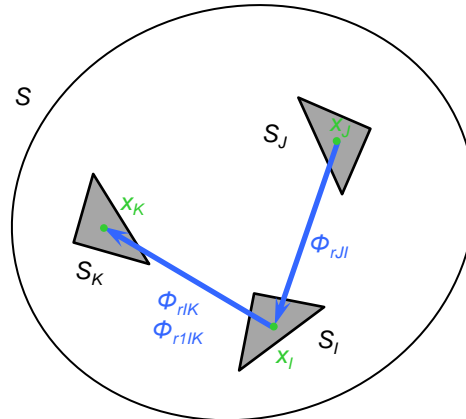


図 5.2.2 指向性のある面  $S$  内の光束伝達

(5.3)式の連立方程式の解は反復法であるガウス・ザイデル法により求める。(5.3)式の第  $P$  次の近似解を  $\Phi_{rIK}^{(P)}$  として、(5.6)式を満たすまで反復計算を行う。本研究では  $\epsilon = 10^{-3}$  とした。

<sup>15</sup> 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>4)</sup>。

$$\frac{|\Phi_{rIK}^{(P)} - \Phi_{rIK}^{(P-1)}|}{\Phi_{rIK}^{(P)}} \leq \varepsilon \quad (5.6)$$

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/m<sup>2</sup>] は、光束が求められたのちに(5.7)式より算出する。

$$L_{rIK} = \frac{1}{\pi f_{IK} A_I} \Phi_{rIK} \quad (5.7)$$

分割面  $S_K$  の照度  $E_K$  [lx] は(5.8)～(5.10)式より算出する。

$$E_K = E_{dK} + E_{rK} \quad (5.8)$$

$$E_{dK} = \begin{cases} \sum_{I=1}^N \frac{\pi f_{KI} I_{dIK}}{A_I \cos \theta_o(x_I, x_K)} & (\text{点光源}) \\ \sum_{I=1}^N \pi f_{KI} L_{dIK} & (\text{拡散光源}) \end{cases} \quad (5.9)$$

$$E_{rK} = \frac{1}{A_K} \sum_{I=1}^N \Phi_{rIK} \quad (5.10)$$

$E_{dK}$  : 分割面  $S_K$  の直接照度 [lx]

$E_{rK}$  : 分割面  $S_K$  の間接照度 [lx]

### 5-2-2. 立体角投射率 $f_{IJ}$ の算出

立体角投射率  $f_{IJ}$  は、錐面積分の法則<sup>5)</sup>を用いて、分割面  $S_I$  の代表点  $x_I$  からみた分割面  $S_J$  の立体角投射率を(5.11)式により算出する。(5.11)式の角度の説明を図 5.2.3 に示す。本研究では分割面を三角形形状とするため、 $i$  は 1～3 となる。

$$f_{IJ} = \frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^3 \beta_i \cdot \cos \delta_i \quad (5.11)$$

$\beta_i$  : 分割面  $S_I$  の代表点  $x_I$  と分割面  $S_J$  の頂点を結ぶ直線と、 $x_I$  と  $S_J$  の別の頂点を結ぶ直線とのなす角

$\delta_i$  : 分割面  $S_J$  の頂点 2 点と  $x_I$  とで構成される三角形を含む平面と分割面  $S_I$  との交角

( $S_J$  の頂点 2 点と  $x_I$  とで構成される三角形の法線ベクトルと  $S_I$  の法線ベクトルのなす角)

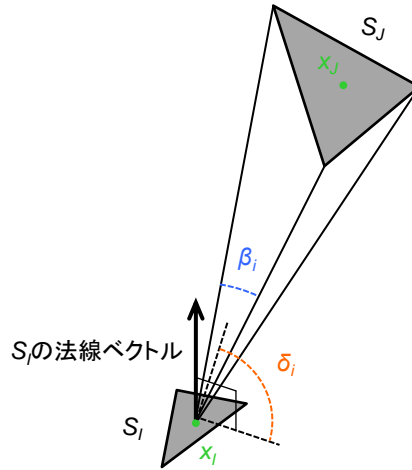


図 5.2.3 錐面積分の法則の角度  $\beta$ 、 $\delta$

形態係数は $A_I F_{IJ} = A_J F_{JI}$ の相反則と $\sum_{j=1}^N f_{ij} = 1$ の総和則を満たす必要がある。そこで、村上ら<sup>6)</sup>の手法に倣って、以下の補正を行う。まず、相反則を満たすための補正を行う。錐面積分法では、点からみた面の立体角投射率を算出する手法であるため、小さい分割面から大きい分割面を見た立体角投射率の方が、その逆より精度が高いと考えられる。そこで、 $D_{IJ} = A_I F_{IJ}$ とすると、(5.12)式のようにして面積比による重み付けをして対称化を行う。次に、総和則を満たすように(5.13)式によって補正する。(5.13)式を  $J$  に対して総和を取ると右辺は  $A_I$  となり補正された  $D''_{IJ}$  は総和則をみたす。この結果、相反則は保証されなくなるが、総和則を優先して本値を用いることにする。(5.12)式、(5.13)式を式展開すると(5.14)式が得られる。

$$D'_{IJ} = D'_{JI} = (A_J D_{IJ} + A_I D_{JI}) / (A_I + A_J) \quad (5.12)$$

$$D''_{IJ} = D'_{IJ} A_I / \sum_{j=1}^N D'_{IJ} \quad (5.13)$$

$$f'_{ij} = \frac{A_j}{A_i + A_j} (f_{ij} + f_{ji}) / \sum_{j=1}^N \frac{A_j}{A_i + A_j} (f_{ij} + f_{ji}) \quad (5.14)$$

$D'_{IJ}$  : 相反則の補正後の  $D_{IJ}$  [m<sup>2</sup>] (ただし、 $D_{IJ} = A_I F_{IJ}$ )

$D''_{IJ}$  : 総和則の補正後の  $D_{IJ}$  [m<sup>2</sup>]

$f'_{ij}$  : 補正後の立体角投射率 [-]

### 5-2-3. 再分割による $F_{JK}$ 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 $F_{JK}$ の誤差が大きくなる。この原因のひとつとして、反射指向特性を考慮した計算の場合、距離の近い面同士では、局所的に反射強度が大きくなる方向での反射特性値を大きな立体角に適用してしまうことにより計算誤差が大きくなることが考えられる。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、分割面の要素数が多くなり、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、 $F_{JK}$ 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。再分割には図 5.2.4 のような方法を取り、再分割後の面の形状にばらつきが出ないようにした。図 5.2.5 に示すように、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(5.15)式により総和をとることで、分割前よりも精度よく $F_{JK}$ が算出できるようにした。その結果、(5.15)式は 5-2-2 で述べた立体角投射率を用いて(5.16)式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<sup>5)</sup>を用いて算出する。

$$F'_{JK} = \frac{1}{f_{IJ}A_I} \sum_{x'_j} \sum_{x'_i} \sum_{x'_k} \frac{\pi\rho(x'_j, x'_i; x'_i, x'_k)}{\cos\theta_0(x'_i, x'_k)} e_o(x'_j, x'_i) e_o(x'_i, x'_k) A'_j A'_i A'_k \quad (5.15)$$

$$F'_{JK} = \frac{1}{f_{IJ}A_I} \sum_{x'_j} \sum_{x'_i} \sum_{x'_k} \frac{\pi\rho(x'_j, x'_i; x'_i, x'_k)}{\cos\theta_0(x'_i, x'_k)} f_{i'j'} f_{k'i'} A'_k \quad (5.16)$$

$F'_{JK}$  : 再分割して算出した $F_{JK}$  [-]

$x'_j, x'_i, x'_k$  : 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 [m<sup>2</sup>]

$f_{i'j'}$  :  $x'_i$  からみた分割面  $S'_j$  の立体角投射率 [-]

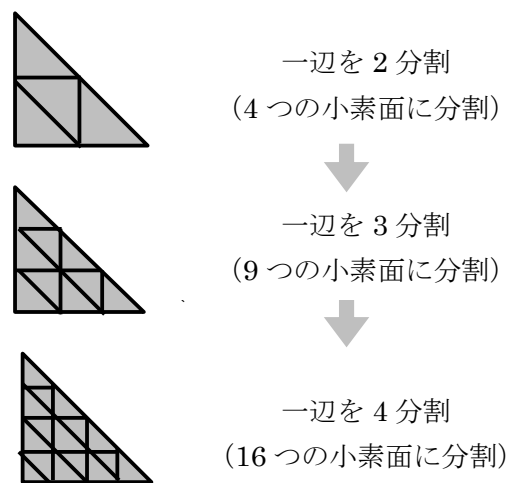


図 5.2.4  $F_{JK}$  算出時の分割面の再分割方法

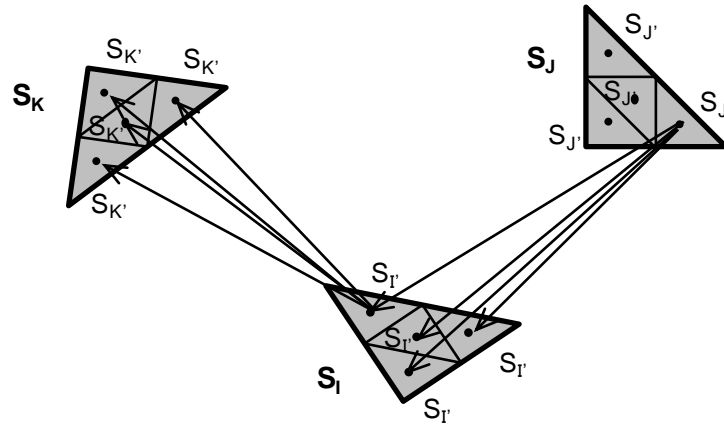


図 5.2.5 1 辺を 2 分割した際の  $F_{JK}'$  の関係

#### 5-2-4. $F_{JK}$ の補正

完全拡散面（反射率が 1 となる均等拡散面）での反射特性関数  $\rho(x_J, x_I; x_I, x_K)$  は(5.15)式で表される。(5.17)式と(5.5)式により、完全拡散面同士での  $F_{JK}$  ( $F_{JK\_u}$  とよぶ) は(5.18)式となる。

$$\rho_{_u}(x_J, x_I; x_I, x_K) = \cos\theta_0(x_I, x_K)/\pi \quad (5.17)$$

$$F_{JK\_u} = f_{KI} A_K/A_I \quad (5.18)$$

$\rho_{_u}(x_J, x_I; x_I, x_K)$  : 完全拡散面での反射特性関数  $\rho(x_J, x_I; x_I, x_K)$  [1/sr]

$F_{JK\_u}$  : 完全拡散面同士での  $F_{JK}$  [-]

前節のように再分割を行い  $F_{JK}$  を算出しないおす過程において、5-2-2 で補正した立体角投射率  $f_{IJ}$  の総和則が崩れ  $\sum_{J=1}^N \sum_{I=1}^N F_{JK\_u} = 1$  ( $K$  を固定し、 $S_J$  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に  $F_{JK}$  の補正を行う。再分割後の完全拡散面同士での  $F_{JK}$  ( $F'_{JK\_u}$  と呼ぶ) は(5.19)式で表せるため、総和則を満足するように補正係数  $c$  [-] を(5.20)式より算出し、(5.21)式のように  $F_{JK}$  の補正を行う。

$$F'_{JK\_u} = \frac{1}{f_{IJ} A_I} \sum_{x'_J} \sum_{x'_I} \sum_{x'_K} f_{I'J'} f_{K'I'} A'_K \quad (5.19)$$

$$c = F_{JK\_u}/F'_{JK\_u} \quad (5.20)$$

$$F''_{JK} = c F'_{JK} \quad (5.21)$$

$F'_{JK\_u}$  : 完全拡散面同士での再分割して算出した  $F_{JK\_u}$  [-]

$F''_{JK}$  : 補正後の  $F'_{JK}$  [-]

### 5-3. 反射指向特性を考慮した計算手法の模型実験による検証

5-2 節で示した計算手法の精度を検証するため、模型実験を行い、計算結果と比較した。

#### 5-3-1. 模型実験

##### 5-3-1-1. 模型概要

実験模型の形状を図 5.3.1 に示す。内寸は  $D60 \times W60 \times H30$  cm とし、窓を模した長方形の開口 ( $W50 \times H15$ cm) 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  $40 \phi$  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るようにした。例えば、視点位置 A で測定する際には視点位置 B、C の穴は塞いだ。模型は 5mm 厚さの黒色つや消しアクリル板により構成し、模型内部側は拡散性の高い白 (Model 1) と艶のある白 (Model 2)、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。さらに、参照条件として、反射面を全て均等拡散面としたモデルを Model 0 とする。Model 0 は理想化されたものであり、実在しないため、計算のみを行う。計算については 5-3-2 において後述する。それぞれの素材の反射指向特性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算出できるキセノンランプ<sup>16</sup>での拡散反射率を層内反射率として用いる 3-3 の簡易推定法により推定し、表 5.3.1 の値を得た<sup>17</sup>。 $K(\theta_i)$ 、 $\sigma_f(\theta_i)$ については、どの素材も光沢度が低く入射角 $\theta_i$ による値の変動が小さいと考えられるため、入射角 $\theta_i$ によらず定数とした。図 5.3.2 に入射光入射角  $45^\circ$  に対する反射特性関数  $\rho$  の計測値 (計測概要は 2-2 と同様) と 3-3 で提案した簡易予測法に基づいて数式モデルで近似した曲線を示す。

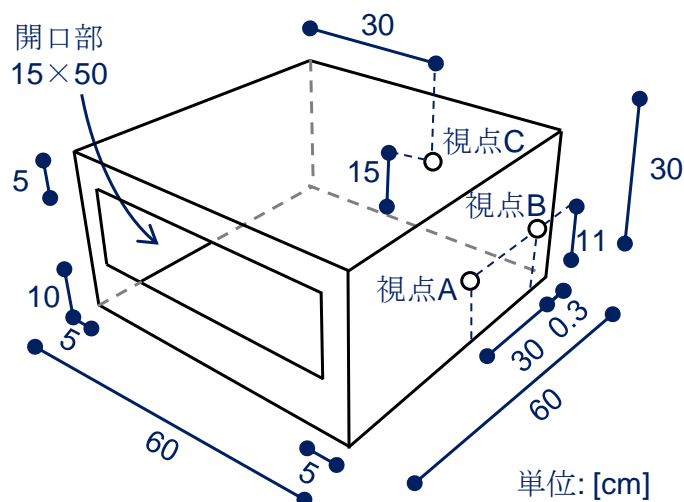


図 5.3.1 実験模型の形状

<sup>16</sup> 反射指向特性の測定に用いた光源はキセノンランプ (ウシオ電機製 SX-UI501XQ) であり、模型実験で用いた光源と分光特性が異なるが、特に補正は行っていない。

<sup>17</sup> 表 5.3.1 に示す反射指向特性の数式モデルのパラメータは、光源の入射角  $45^\circ$  の場合と  $60^\circ$  の場合でそれぞれ推定し、その平均値を用いた。

表 5.3.1 モデル内装面の反射指向特性値

	屈折率 $n [-]$	係数 $K [-]$	傾斜角の標準偏差 $\sigma_r [\text{rad}]$	層内反射率 $R_D [-]$
Model 0	—	0	0	0.864
Model 1 (拡散性の高い白)	1.54	0.877	0.155	0.864
Model 2 (艶のある白)	1.54	4.805	0.076	0.846
Model 3 (艶のある黒)	1.54	4.535	0.085	0.044

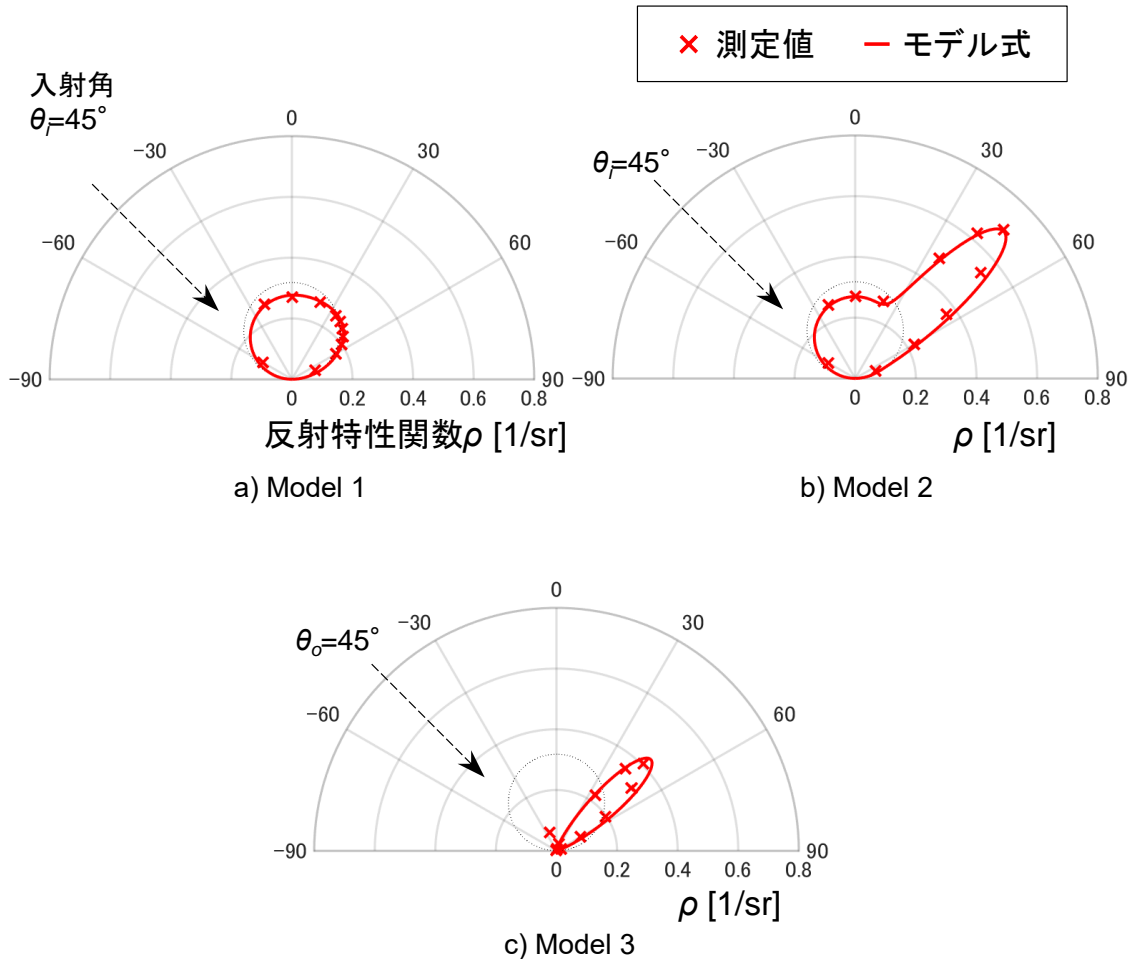


図 5.3.2 反射特性関数  $\rho$  の計測値と簡易予測法に基づく数式モデル

### 5-3-1-2. 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。

#### (1) 点光源

疑似点光源<sup>18</sup>として配光角度 21° の LED スポットライト (遠藤照明製 RAD671M) を用いた。表 5.3.2、図 5.3.3 にメーカーが開示している配光分布を示す。図 5.3.4、写真 5.3.1 に点光源、模型、および計測機器の配置を示す。スポットライト高さは 15 cm とし、開口から入射した。点光源の実験は暗室内で行った。点光源の脇にスポットライトの出力変動の補正用に照度計を設置したが、ランプ出力の変動よりも模型内の反射率の変化の影響を強く受けたため、ランプ出力変動の補正は行わなかった。

表 5.3.2 LED スポットライトの配光特性 (全光束: 510lm)

Angle [°]	Luminous intensity [cd]
0 (真下)	1638
5	1396
15	540
20	329
25	214
30	138
35	88
40	59
45	42
50	31
55	24
60	18
65	14
70	11
75	8
80	5
85	2
90	0

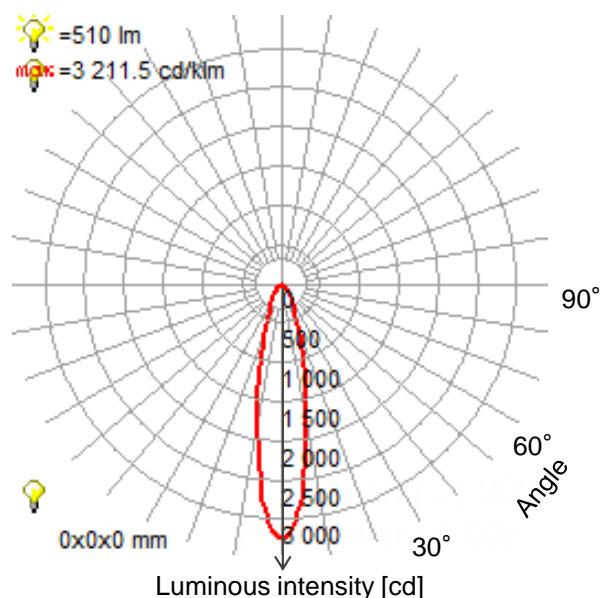


図 5.3.3 LED スポットライトの配光分布 (器具の全光束が 1000lm の場合での光度で表記)

<sup>18</sup> 実際には、光源として用いたスポットライトは複数の LED が寄り集まったものであったが、スポットライトから測定位置が十分に離れているため、点光源として扱うことができる。



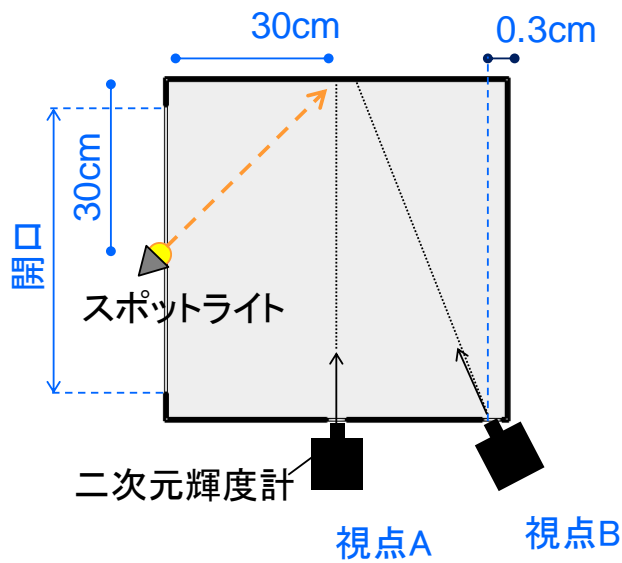


図 5.3.4 点光源での配置 (平面図)

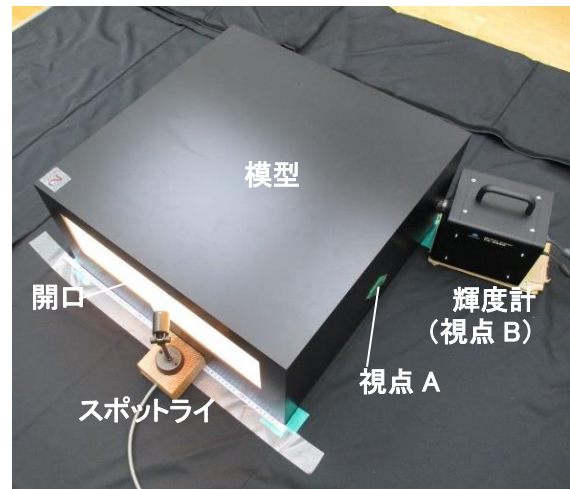


写真 5.3.1 点光源での配置

(2) 拡散光源

疑似拡散光源の実験では、図 5.3.5、写真 5.3.2 のように光源、模型、輝度計を配置した。模型の開口部を疑似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立てて設置し、さらに光源の拡散性を高めるために、開口部には乳白パネルを設置した。模型の外には照度計（英弘精機製 ML-020S-I）を設置し、測定した水平面照度から蛍光灯の出力変動の補正を行った。

それぞれの光源の輝度については 5-3-2-2 において後述する。

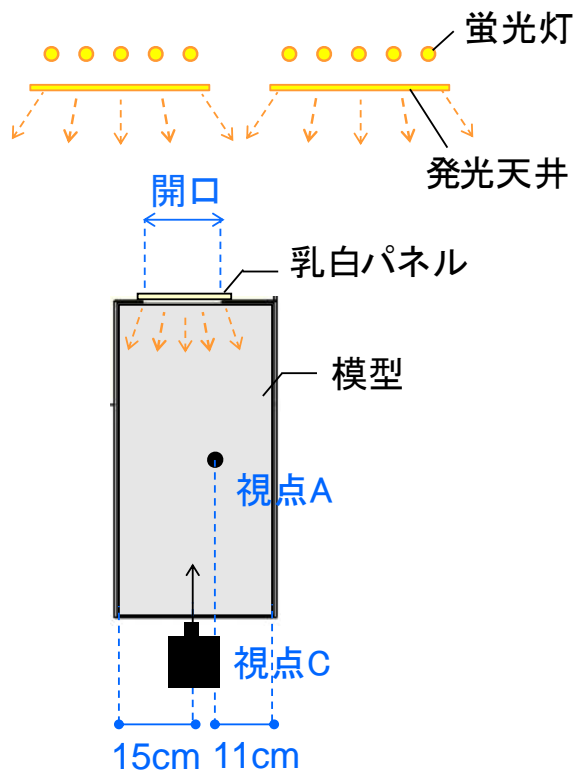


図 5.3.5 拡散光源での配置（断面図）



写真 5.3.2 拡散光源での配置

### 5-3-1-3. 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。

#### (1) 輝度計

輝度分布の測定には 2 次元色彩輝度計（コニカミノルタ製 CA-2500/CA-2000<sup>19</sup>）を用いた。点光源下では、前述の図 5.3.3 に示す視点位置 A、B において、拡散光源下では、前述の図 5.3.4 に示す視点位置 A、C において、模型内の輝度分布を測定した。

#### (2) 照度計

照度の測定には照度計（コニカミノルタ製 T-10MA）を用いた。照度計は図 5.3.6 に示すように、床面と壁面に 10cm 間隔でそれぞれ 5 点ずつ配置した。照度計の個体差の補正を行うために、測定前に 5 つの照度計を並べて水平面照度を測定し、その平均値を正として個々の照度計の出力に対する補正係数を求めた。

<sup>19</sup> 点光源下での模型実験では CA-2500 を、拡散光源下での模型実験では CA-2000 を用いた。

写真 5.3.3 に壁面への照度計設置状況を示す。照度計は測定の簡便さを高めるため、黒体スプレー<sup>20</sup>を塗布して反射率を極力小さくした帯状の紙の上に配置した。

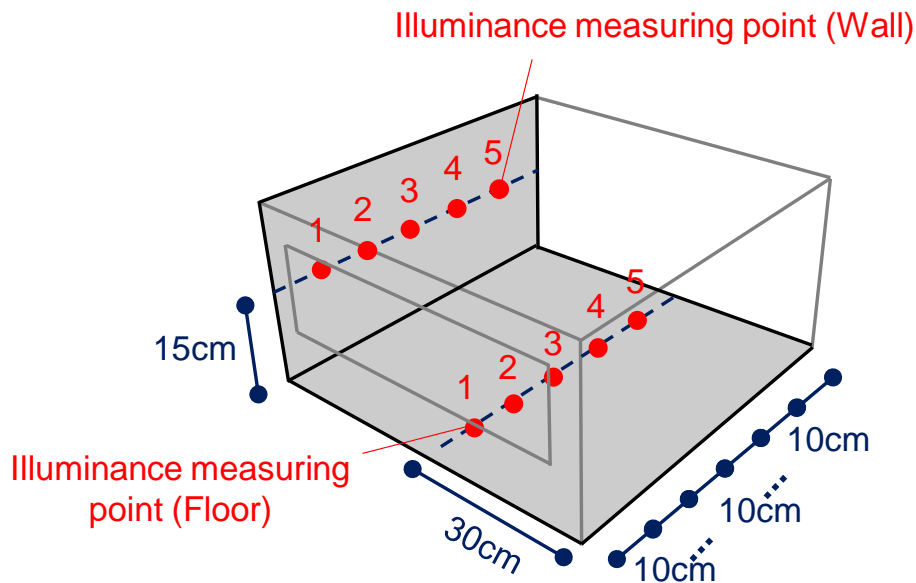


図 5.3.6 照度の測定位置

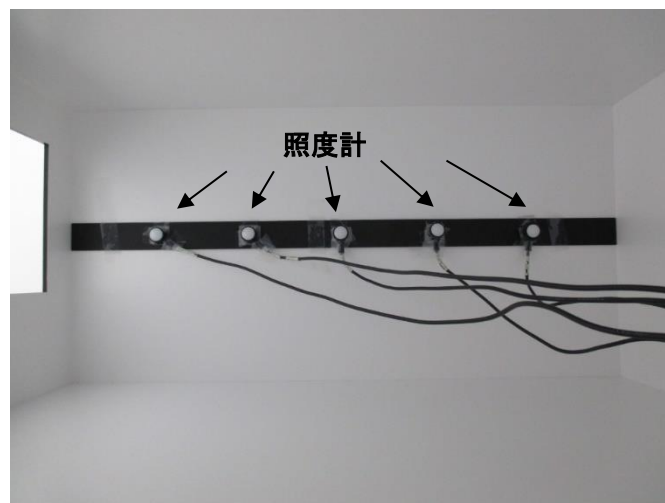


写真 5.3.3 模型内壁面への照度計設置状況

### 5-3-2. 模型内の輝度分布および照度分布の計算条件

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、5-2 節で示した計算手法により模型内の輝度分布および照度分布の予測計算を行う。

<sup>20</sup> TASCOS 社製のスプレーで、放射率 0.94 と謳っている。

### 5-3-2-1. 計算モデル

実験に用いた模型の内寸と同じ形状の模型を作成し、図 5.3.7 に示すように 1,152 個の三角形要素に分割した。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、前述の表 5.3.1 に示した値を使用した。さらに、反射面を全て均等拡散面とした理想化された仮想モデル Model 0 についても比較のため計算を行った (表 5.3.1)。Model 0 の層内反射率は Model 1 と同様とした。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ように開口部の反射率を 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%<sup>21)</sup>の均等拡散面とした。

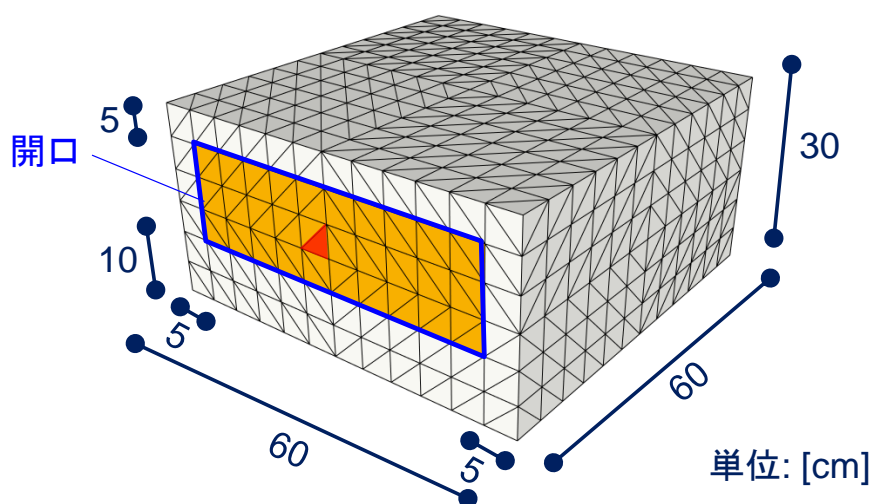


図 5.3.7 計算モデルの分割面要素

### 5-3-2-2. 光源の境界条件

境界条件となる光源の第 1 回反射光束  $\Phi_{r1IK}$  は、点光源については (5.20) 式より、拡散光源については一様な発光面であると仮定して (5.21) 式より算出する。

$$\Phi_{r1IK} = \sum_{j=1}^N \frac{F_{JK} \pi f_{IJ} A_I I_{dJI}}{A_J \cos \theta_o(x_j, x_I)} \quad (5.20)$$

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

$$\Phi_{r1IK} = \sum_{j=1}^N F_{JK} \pi f_{IJ} A_I L_{dJI} \quad (5.21)$$

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

<sup>21)</sup> 分光測色計 CM-700d (コニカミノルタ製) を用いて D65 光源 SCE 方式で測定した反射率を用いた。

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が提示する配光データ（表5.3.2）の値をそのまま用いた。拡散光源の直接輝度 $L_{dJI}$ は、図5.3.4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。算出した平均輝度 $L_{dJI}$ は $711\text{cd/m}^2$ だった。

### 5-3-2-3. 再分割の条件

5-2-3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 $S_I$ 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 $F_{JK}$ 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。

### 5-3-2-4. 輝度分布の計算結果の表示方法

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。図5.3.8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 $L_{rIK}$ を(5.7)式より算出し表示した。今回の視点位置（例えば、図5.3.8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、図5.3.8中の視点C）には、さらに光源の直接輝度 $L_{dIK}$ も合算する。光束計算は分割面内の代表点（重心）について行ったが、結果の表示では、代表点と代表点の間は線形補間を行って塗りつぶし2次元等値線図で表示した。

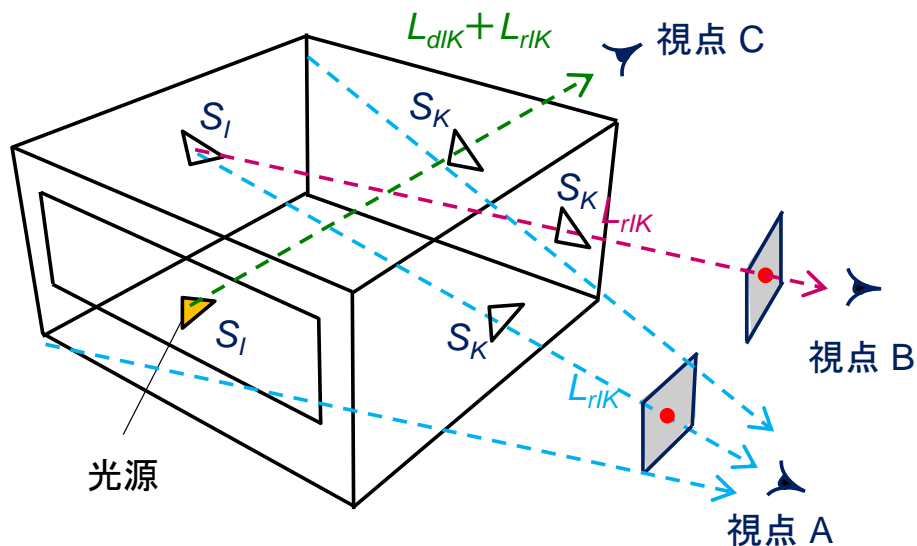


図 5.3.8 輝度分布の表示方法

### 5-3-2-5. 照度分布の計算結果の表示方法

図5.3.6で照度計を設置した床面と壁面に対して、各分割面要素の代表点（今回は重心位置）の照度 $E_K$ を(5.8)式から算出し、輝度分布と同様に代表点と代表点の間は線形補間を行い、塗りつぶし2次元等値線図で表示した。

### 5-3-3. 測定と計算の比較

#### 5-3-3-1. 点光源での輝度分布・照度分布

点光源下での模型内の輝度分布および照度分布について測定結果と計算結果を比較し、Model ごとに考察する。

##### (1) Model 0

理想的な均等拡散面をもつ Model0 での視点 A、B からの計算輝度分布、スポットライトを照射した壁面と床面（図 5.3.6 中、灰色で示した面）の計算照度分布、代表点の計算照度（図 5.3.6 中、赤色で示した点）を図 5.3.9 に示す。a)、b)、d)、e)の図中、ドットで示しているのは計算点である。また、図中、Max は最大値、Min は最小値、Ave は平均値、 $\sigma$  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。理想的な均等拡散面をもつ Model0 の計算輝度分布では、a)の視点 A と d)の視点 B とで見る方向を変えても最大輝度が同じ値となる。b)、c)の壁面照度では、スポットライトが照射されている箇所の照度が高くなり、e)、f)の床面照度では、壁面からの第 1 回反射光が照射する箇所の照度が高くなる様子が見られた。

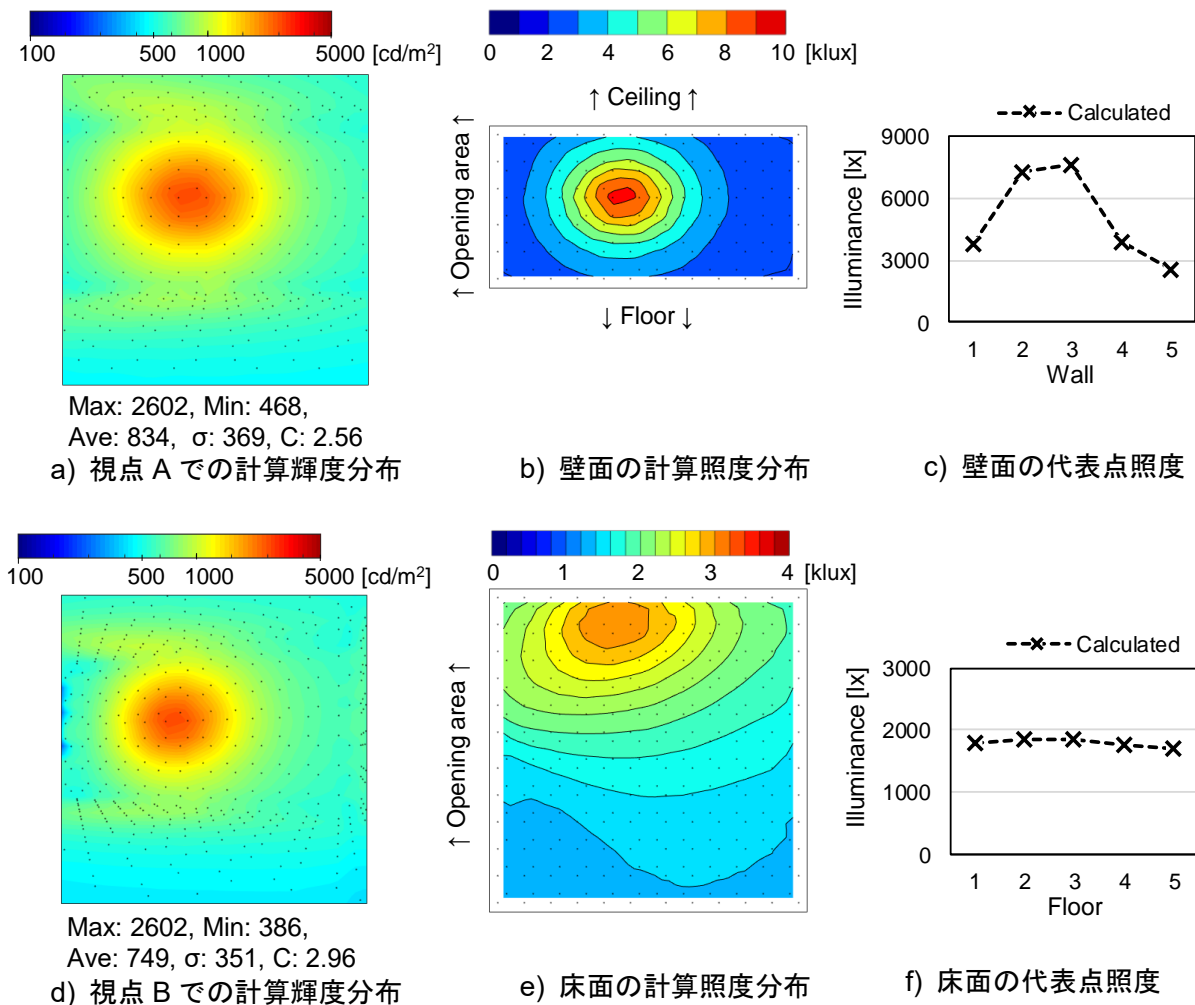


図 5.3.9 Model 0 の輝度分布と照度分布

(2) Model 1

拡散性が高いがわずかに指向性のある白色の反射面を持つ Model1 での視点 A からの模型内部の写真、測定輝度分布と計算輝度分布を写真 5.3.4、図 5.3.10 に、視点 B からの模型内写真、測定輝度分布と計算輝度分布を写真 5.3.5、図 5.3.11 に示す。計算によって測定分布の形状が再現できた。全体的に計算の方が測定より輝度が高い傾向となったのは、模型内の汚れの影響で反射率が低下したことが一因として考えられる。

視点位置の違いについては、測定結果では視点 A (図 5.3.10 a)) よりも視点 B (図 5.3.11 a)) の方が最大輝度が高くなった。視点 A よりも視点 B の方がスポットライトの正反射方向に近い視点位置であるためである。この傾向は、図 5.3.10 b)、図 5.3.11 b)) に示す計算結果において再現できた。

図 5.3.12、5.3.14 に Model1 での壁面と床面 (図 5.3.6 中、灰色の面) の計算照度分布を示す。図 5.3.12 の壁面の照度分布は図 5.3.9 b) の Model0 と似た分布となったが、図 5.3.14 の床面の照度分布では図 5.3.9 e) の Model0 と比較して最大照度が高くなった。床面はスポットライトの光が壁面で反射したあとの第 1 回反射光を受照するため、壁面の反射指向特性の違いの影響を受けやすく、局所的に反射強度が高くなった位置での床面の照度が高くなったと考えられる。

図 5.3.13、5.3.15 に Model1 での代表点 (図 5.3.6 中、赤色の点) での計算照度と測定照度の比較を示す。計算によって測定値の傾向が再現できた。

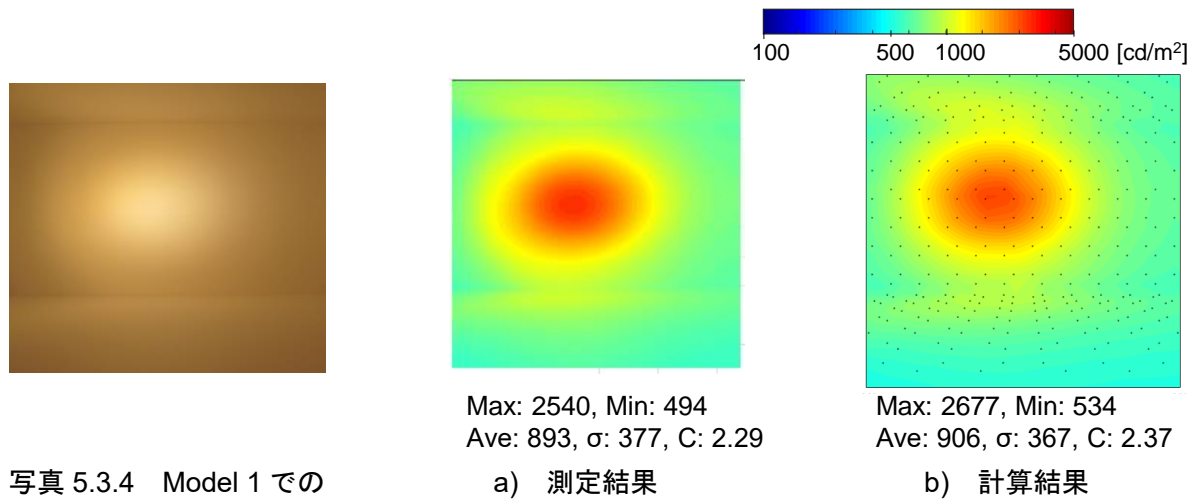


写真 5.3.4 Model 1 での  
視点 A からの模型内部

図 5.3.10 Model 1 の視点 A での輝度分布

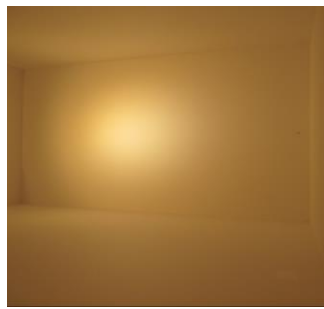
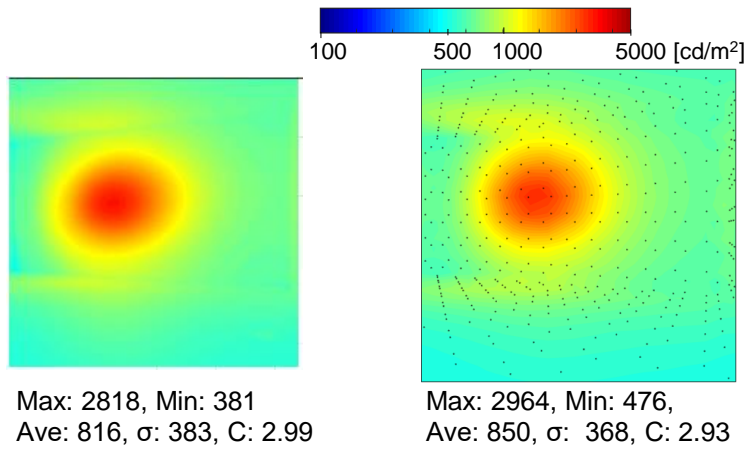


写真 5.3.5 Model 1 での  
視点 B からの模型内部



a) 測定結果

b) 計算結果

図 5.3.11 Model 1 の視点 B での輝度分布

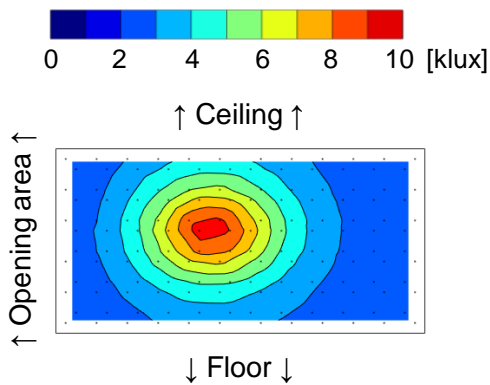


図 5.3.12 Model 1 壁面の計算照度分布

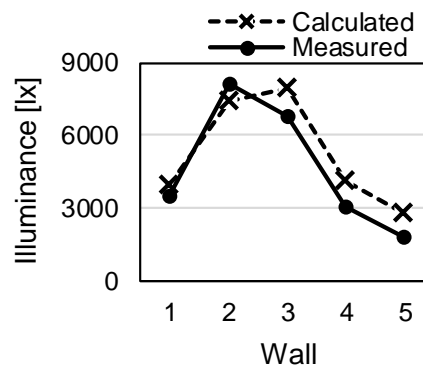


図 5.3.13 Model 1 壁面の代表点照度

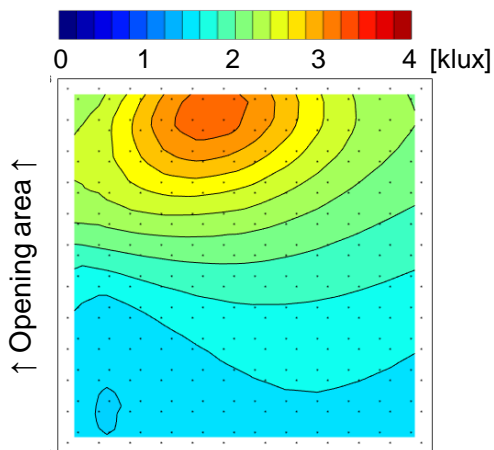


図 5.3.14 Model 1 床面の計算照度分布

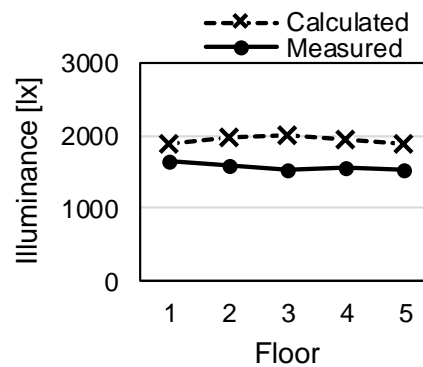


図 5.3.15 Model 1 床面の代表点照度



(3) Model 2

艶のある指向性のある白色の反射面をもつ Model2 での視点 A からの模型内部の写真、測定輝度分布と計算輝度分布を写真 5.3.6、図 5.3.16 に、視点 B からの模型内写真、測定輝度分布と計算輝度分布を写真 5.3.7、図 5.3.17 に示す。計算によって測定分布の形状が再現できた。Model1 と同様に計算の方が測定より輝度が高い傾向となった。

視点位置の違いでは、測定結果では視点 A (図 5.3.16 a)) よりも視点 B (図 5.3.17 a)) の方が最大輝度が顕著に高くなった。Model1 よりも Model2 の反射面の方が指向性が強いいため、視点方向による輝度の変化が大きくなるためである。図 5.3.16 b)、図 5.3.17 b)の計算輝度分布においてもその傾向が再現できた。また、図 5.3.16 a)の視点 A 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。図 5.3.18 に示すように、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。図 5.3.16 b)の計算輝度分布においても左端が明るくなる分布を再現できた。

図 5.3.19、5.3.21 に Model2 での壁面と床面 (図 5.3.6 中、灰色の面) の計算照度分布を示す。図 5.3.19 の壁面の照度分布は Model0 (図 5.3.9 b))、Model1 (図 5.3.12) と類似した分布となったが、図 5.3.21 の床面の照度分布では Model0 (図 5.3.9 e))、Model1 (図 5.3.14) と比較して最大照度が高くなった。床面はスポットライトの光が壁面で反射したあとの第 1 回反射光を受照するため、壁面の反射指向特性の違いの影響を受けやすいためである。

図 5.3.20、5.3.22 に Model2 での代表点 (図 5.3.6 中、赤色の点) での計算照度と測定照度の比較を示す。計算によって測定値の分布の傾向は再現できたが、値としては乖離がみられた。一般的には、拡散光源下で均等拡散面を対象とした条件で計算が行われることが多いが、本測定結果では、疑似点光源下において反射指向特性のある反射面を対象としている。そのため、図 5.3.19、5.3.21 に示す照度分布の計算結果からわかるように、少しの測定点の位置の違いにより照度が大きく変化してしまう点が原因のひとつとして考えられる。

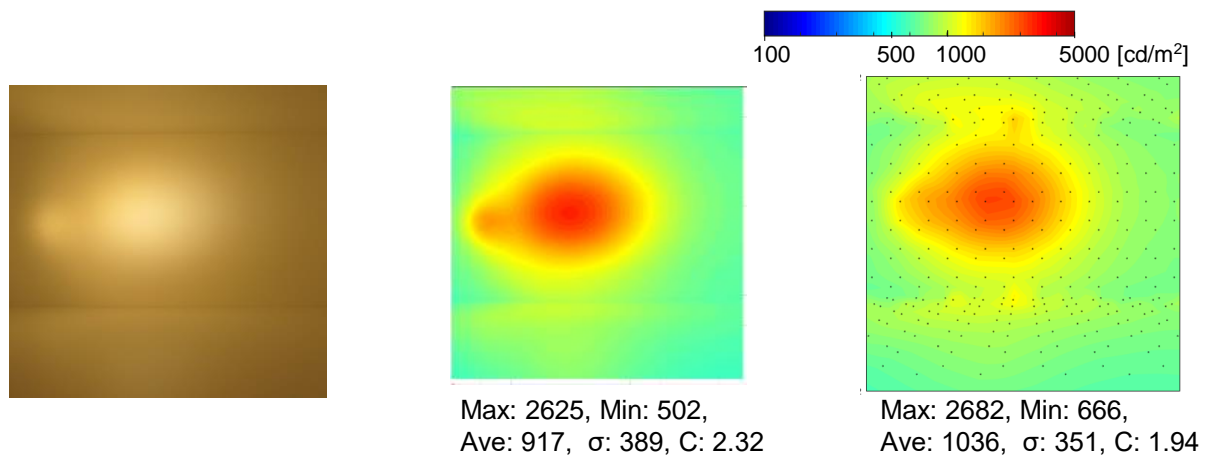


写真 5.3.6 Model 2 での  
視点 A からの模型内部

a) 測定結果  
b) 計算結果  
図 5.3.16 Model 2 の視点 A での輝度分布

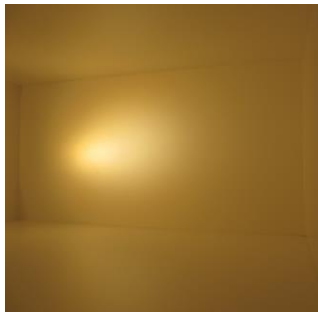
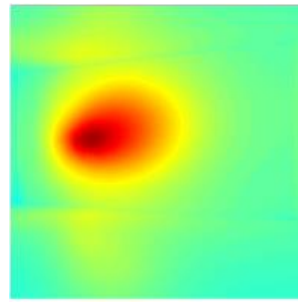
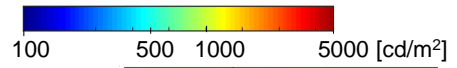
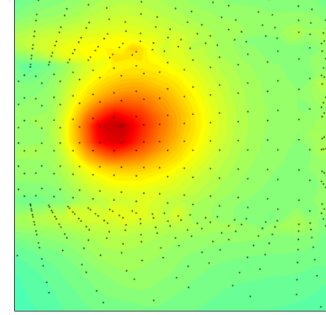


写真 5.3.7 Model 2 での  
視点 B からの模型内部



Max: 4342, Min: 409  
Ave: 855,  $\sigma$ : 476, C: 4.60

a) 測定結果



Max: 4453, Min: 588,  
Ave: 1009,  $\sigma$ : 460, C: 3.83

b) 計算結果

図 5.3.17 Model 2 の視点 B での輝度分布

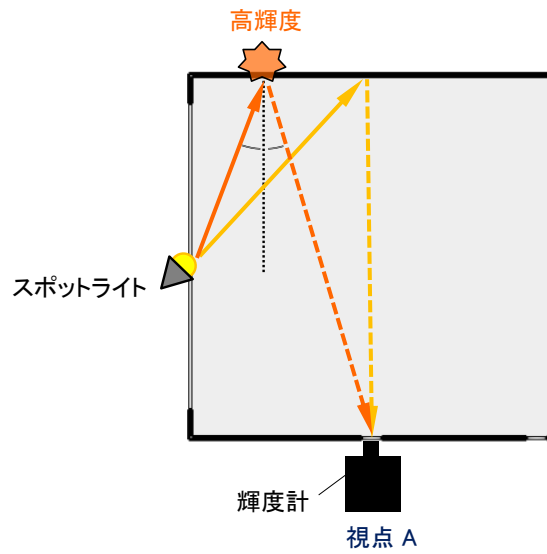


図 5.3.18 スポットライトと輝度計の位置関係

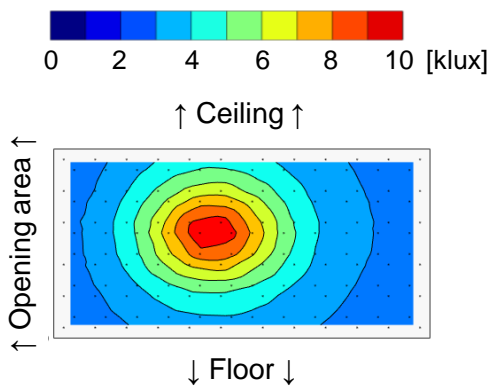


図 5.3.19 Model 2 壁面の計算照度分布

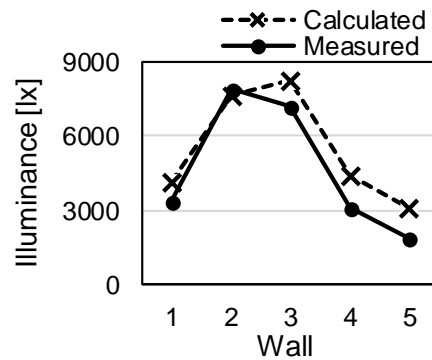


図 5.3.20 Model 2 壁面の代表点照度

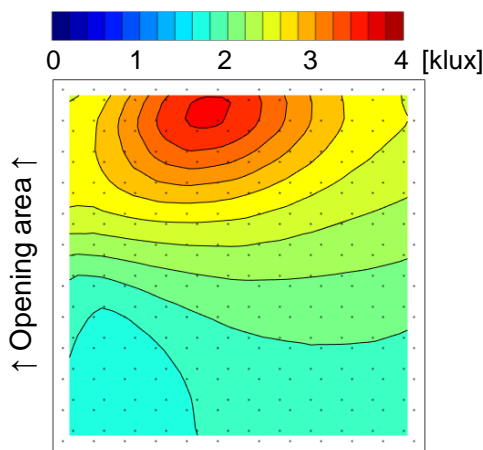


図 5.3.21 Model 2 床面の計算照度分布

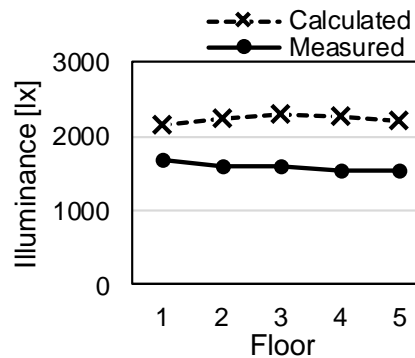


図 5.3.22 Model 2 床面の代表点照度

#### (4) Model 3

艶のある指向性のある黒色の反射面をもつ Model3 での視点 A からの模型内部の写真、測定輝度分布と計算輝度分布を写真 5.3.8、図 5.3.23 に、視点 B からの模型内写真、測定輝度分布と計算輝度分布を写真 5.3.9、図 5.3.24 に示す。計算によって測定分布の形状が再現できた。平均輝度については Model1、2 と同様に計算の方が測定より輝度が高い傾向となったが、最大輝度については低くなった。これは、ちょうど最大輝度となる位置において計算点がなかったためと考えられる。Model3 のように指向性が特に強い面では、局所的な輝度の変化が大きくなるため、面の分割サイズが計算結果へ与える影響が大きくなるといえる。

視点位置の違いでは、Model2 と同様に測定結果では視点 A (図 5.3.23 a)) よりも視点 B (図 5.3.24 a)) の方が最大輝度が顕著に高くなった。図 5.3.23 b)、図 5.3.24 b)の計算輝度分布においてもその傾向が再現できた。また、図 5.3.23 a)の視点 A の測定輝度分布では Model2 と同様に開口部側に近い左端が高輝度となった。図 5.3.23 b)の計算輝度分布においてもその傾向を再現できた。

図 5.3.25、5.3.27 に Model3 での壁面と床面 (図 5.3.6 中、灰色の面) の計算照度分布を示す。Model 3 では層内反射率が非常に小さいため、間接照度が小さくなり、結果として全体的に照度分布の値が小さくなった。

図 5.3.26、5.3.28 に Model3 での代表点 (図 5.3.6 中、赤色の点) での計算照度と測定照度の比較を示す。図 5.3.28 の床面においては計算によって測定値の分布の傾向を再現できたが、図 5.3.26 の壁面では計算値と測定値に大きな乖離が生じた。しかし、山形に増減する傾向は再現できているため、模型実験においてスポットライトの照射位置にずれがあり、それが照度分布のずれに繋がったのではないかと考えられる。

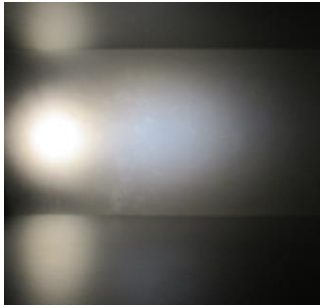
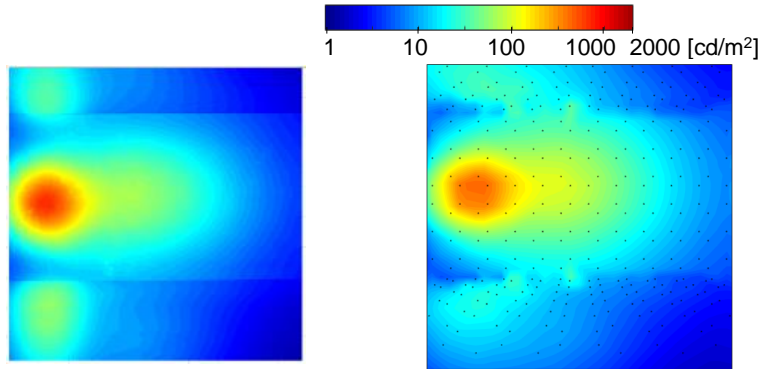


写真 5.3.8 Model 3 での  
視点 A からの模型内部



Max: 538, Min: 1,  
Ave: 24,  $\sigma$ : 53, C: 22.20

a) 測定結果

Max: 440, Min: 2  
Ave: 30,  $\sigma$ : 57, C: 14.78

b) 計算結果

図 5.3.23 Model 3 の視点 A での輝度分布

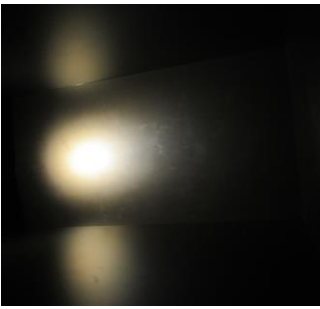
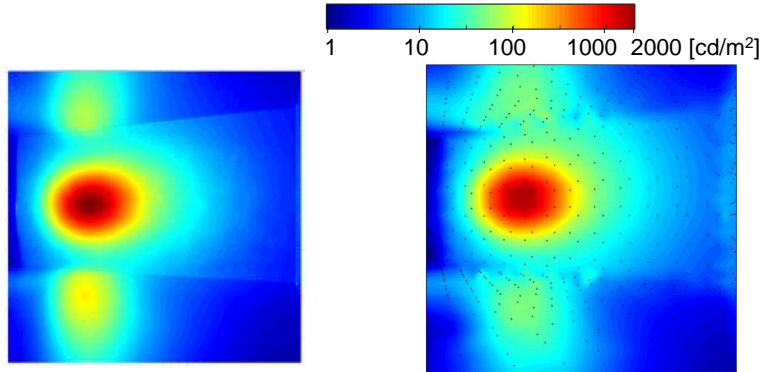


写真 5.3.9 Model 3 での  
視点 B からの模型内部



Max: 1949, Min: 1  
Ave: 46,  $\sigma$ : 165, C: 42.37

a) 測定結果

Max: 1801, Min: 1  
Ave: 52,  $\sigma$ : 195, C: 34.64

b) 計算結果

図 5.3.24 Model 3 の視点 B での輝度分布

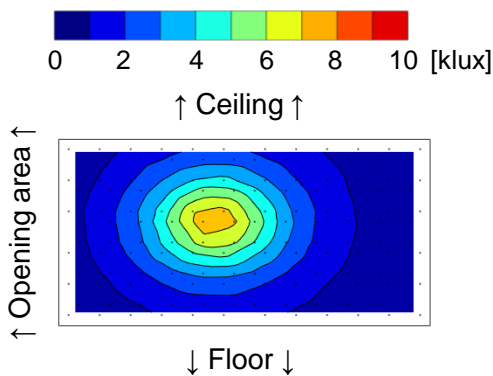


図 5.3.25 Model 3 壁面の計算照度分布

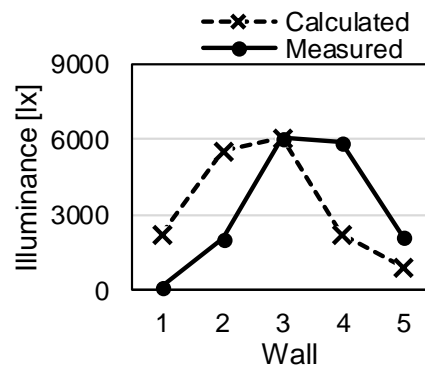


図 5.3.26 Model 3 壁面の代表点照度

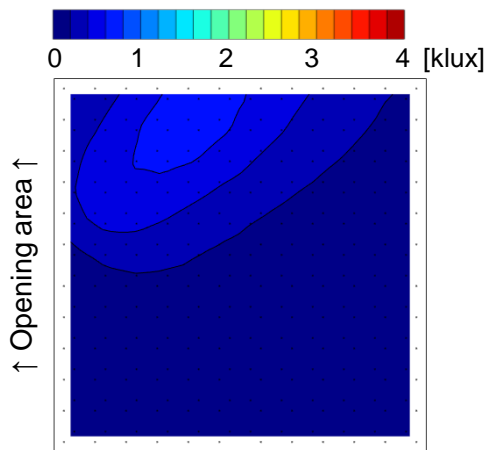


図 5.3.27 Model 3 床面の計算照度分布

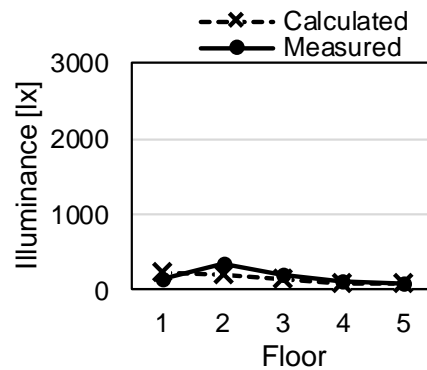


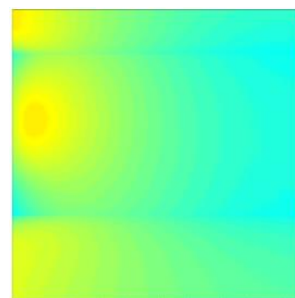
図 5.3.28 Model 3 床面の代表点照度

### 5-3-3-2. 拡散光源での輝度分布

拡散光源下での Model1 の視点 A からの写真、測定輝度分布を写真 5.3.9、図 5.3.29 に示す。Model2 の視点 A からの写真を写真 5.3.10 に、測定輝度分布を図 5.3.30 a)に示す。拡散光源下の測定結果では、Model1 と Model2 とで測定輝度分布にあまり差がみられなかったため、Model2 のみ輝度分布計算を行った。結果を図 5.3.30 b)に示す。計算によって a)の測定輝度分布の形状が再現できたが、全体的に計算の方が測定より輝度が高い傾向となった。模型内の汚れの影響が考えられる。図 5.3.30 b)の計算輝度分布では隅部の中央の上下に高輝度の点が生じた。5-3-3-3 において詳細を考察するが、今後の課題である。



写真 5.3.9 Model 1 での  
視点 A からの模型内部



Max: 281, Min: 177,  
Ave: 217,  $\sigma$ : 22.76, C: 0.48

図 5.3.29 Model 1 の視点 A での  
測定輝度分布

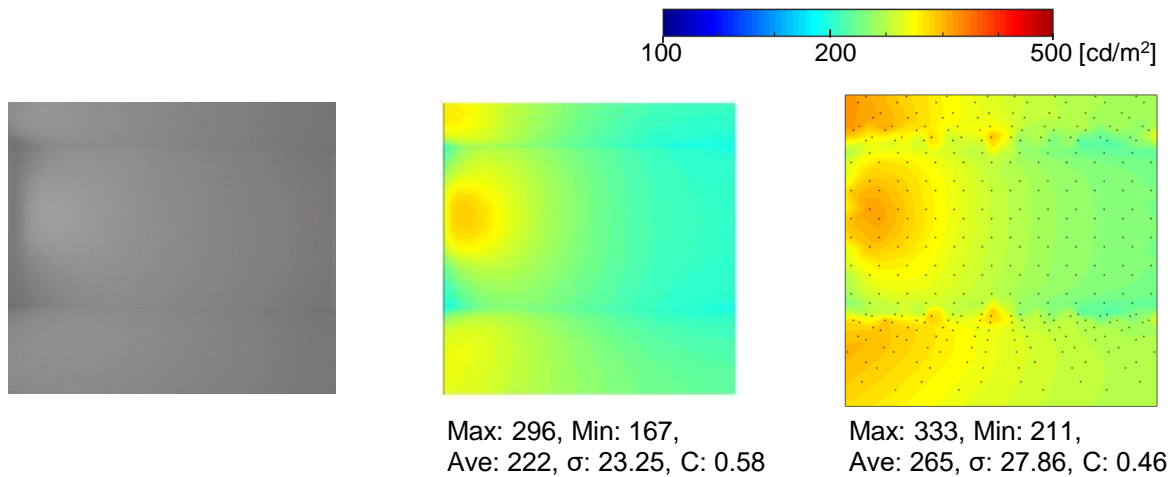


写真 5.3.10 Model 2 での  
視点 A からの模型内部

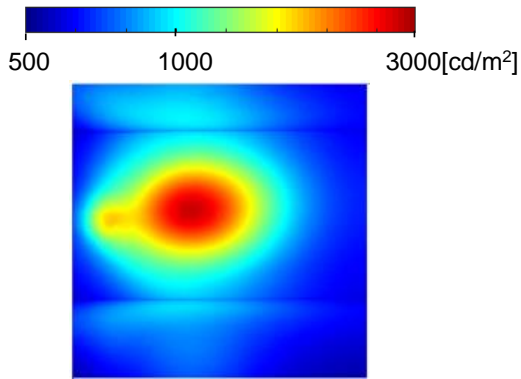
a) 測定結果  
b) 計算結果  
図 5.3.30 Model 1 の視点 A での輝度分布

### 5-3-3-3. $F_{JK}$ 算出時の再分割手法および補正手法による計算精度

ここでは、5-2-3、5-2-4 で提案した光束伝達の比率  $F_{JK}$  を算出する際の再分割手法と再分割後の  $F_{JK}$  の補正手法による計算精度について考察する。

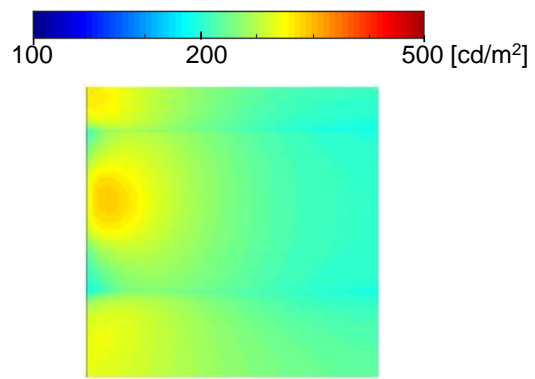
点光源下での Model2 での視点 A からの測定輝度分布を図 5.3.31 に、計算輝度分布を図 5.3.33 に示す。拡散光源下での Model2 での視点 A からの測定輝度分布を図 5.3.32、計算輝度分布を図 5.3.34 に示す。

図 5.3.33 a)、図 5.3.34 a) に示す再分割手法も補正手法も行わなかった計算結果では、隅部に高輝度となる斑点状の分布や波打つ分布が現れ、計算精度が良くない。指向性の高い反射面においては、隅部の距離の近い 2 面間の代表点を結んだ線が正反射に近い方向（反射特性関数  $\rho$  が大きくなる方向）の面からの入射光束の反射による、隅部の 2 面間での伝達光束量を、立体角投射率を用いた計算によって大きな立体角に適用していることにより、過大に計算していることが原因のひとつとして考えられる。本課題への対策として、5-2-3 において  $F_{JK}$  算出時の再分割手法を提案し、さらに 5-2-4 において面が完全拡散面であると仮定した場合に反射した総光束が保存されるような  $F_{JK}$  の補正方法を提案した。図 5.3.33 b)、図 5.3.34 b) に示す再分割手法を行った計算輝度分布では、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するため、隅部での斑点状の分布や波打つ分布が改善されることが分かった。さらに、 $F_{JK}$  の補正を行った結果を図 5.3.33 c)、図 5.3.34 c) に示す。b) と比較して大きな輝度分布の違いは見られなかった。また、再分割および補正手法を行った図 5.3.10 c)、図 5.3.12 c) においても、隅部の天井面、床面の中央付近に一部、高輝度な箇所が残った。再分割および補正手法だけでは、距離が近い面同士の光束伝達の誤差を解消するには十分ではない場合があると考えられ、今後の検討課題である。例えば、分割面への入射光束に対する総反射光束量の比率が  $\rho$  を立体角で積分した値（反射率）と一致するような  $F_{JK}$  の補正方法等が考えられる。



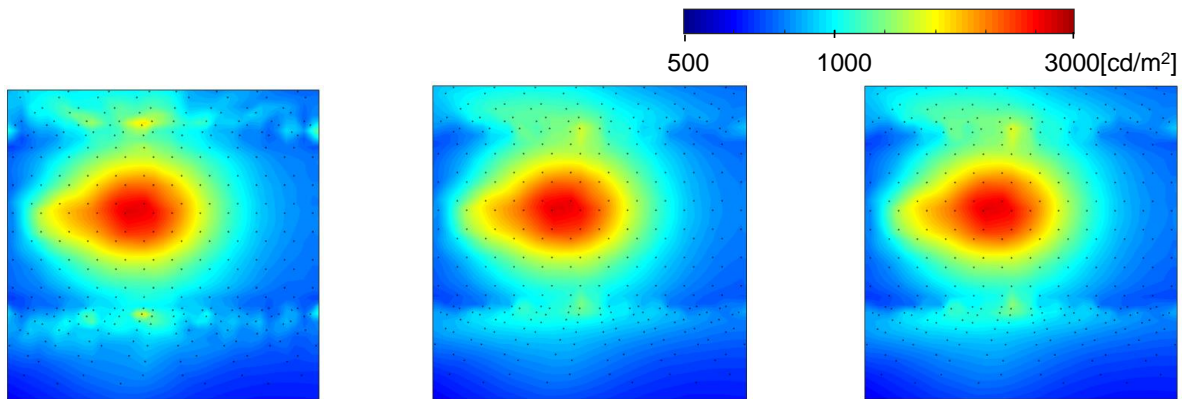
Max: 2625, Min: 502,  
Ave: 917,  $\sigma$ : 389, C: 2.32

図 5.3.31 点光源下での Model 2  
視点 A の測定輝度分布



Max: 296, Min: 167,  
Ave: 222,  $\sigma$ : 23.25, C: 0.58

図 5.3.32 拡散光源下での Model 2  
視点 A の測定輝度分布



Max: 2688, Min: 672,  
Ave: 1038,  $\sigma$ : 359, C: 1.94

a)  $F_{JK}$  再分割なし

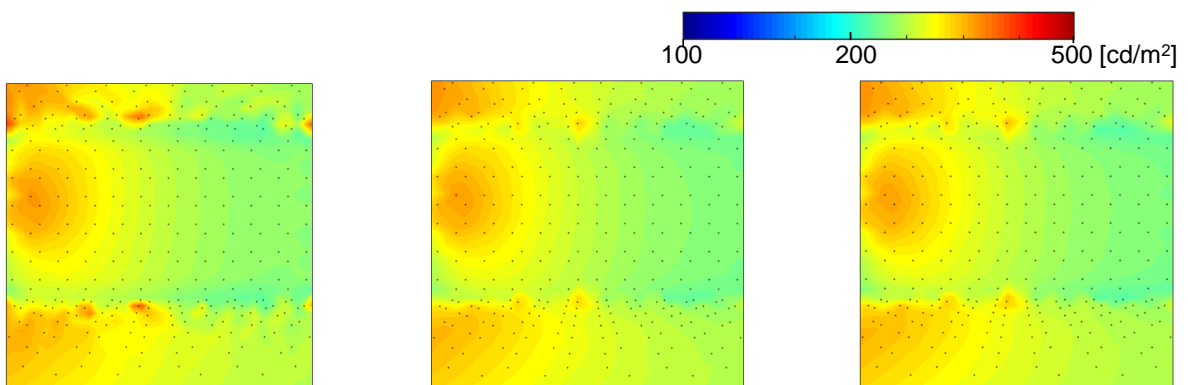
Max: 2685, Min: 672,  
Ave: 1039,  $\sigma$ : 351, C: 1.94

b)  $F_{JK}$  再分割あり、補正なし

Max: 2682, Min: 666,  
Ave: 1036,  $\sigma$ : 351, C: 1.94

c)  $F_{JK}$  再分割あり、補正あり

図 5.3.33 点光源下での Model 2 の計算輝度分布



Max: 419, Min: 213,  
Ave: 266,  $\sigma$ : 31.98, C: 0.77

a)  $F_{JK}$  再分割なし

Max: 335, Min: 215,  
Ave: 265,  $\sigma$ : 27.14, C: 0.45

b)  $F_{JK}$  再分割あり、補正なし

Max: 333, Min: 211,  
Ave: 265,  $\sigma$ : 27.86, C: 0.46

c)  $F_{JK}$  再分割あり、補正あり

図 5.3.34 拡散光源下での Model 2 の計算輝度分布

#### 5-4. 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、輝度分布および照度分布の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、疑似点光源と疑似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照度および輝度分布を再現できることを示した。
- 6) 艶のある黒色のような指向性が特に強い反射面では、面の分割要素の大きさが計算結果へ与える影響が大きくなるため、最大輝度の計算精度を向上させるためには、分割要素の大きさを適切に小さく設定する必要がある。
- 7) 提案した再分割手法および補正手法により、隅部の計算精度が改善されることを明らかにした。一方で、計算輝度分布において一部、不自然な高輝度部分が残るという課題を示した。



**参考文献**

- 1) 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
- 2) Y. Uetani, K. Matsuura, A Method of Luminance Calculation in an Anisotropic Diffuse Reflecting Interior, Journal of the Illuminating Engineering Society, 22 (1993) 166-175, <https://doi.org/10.1080/00994480.1993.10748049>
- 3) 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, <https://doi.org/10.14989/doctor.k4548>
- 4) 渡辺要: 建築計画原論 I, 丸善株式会社, pp. 277-278, 1965
- 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



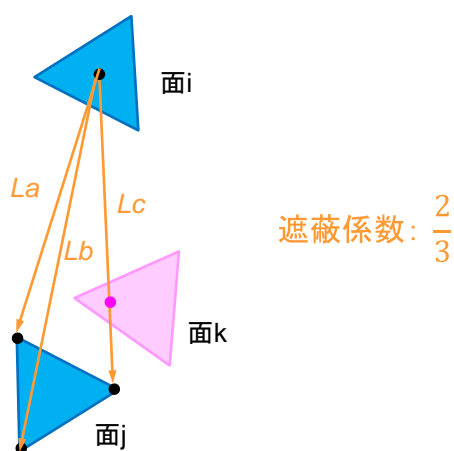
## 第6章 実在空間での室内輝度分布の予測計算

### 6-1. はじめに

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、本章では見えがかりを考慮した立体角投射率の算出方法を構築する。さらに、3-5節において示した現場測定により簡易推定した建材の反射指向特性データを入力値として、実在する建物空間である長い廊下空間と凹凸のある空間を対象として、反射指向特性を考慮した輝度分布予測計算を行う。計算結果を実測値と比較・検証することで、5章で示した本研究の計算手法および本章で提案する見えがかりを考慮した立体角投射率の算出手法の実建物を対象とした計算への適用性を検討する。

## 6-2. 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、2面間の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。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よって幾何的に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阻まれなかった光線本数によって遮蔽係数を決定した(図6.2.1)。光線の出し方とその本数によって計算精度が変化するため、図6.2.2に示す単純な形状に対して、光線の出し方と本数の設定を変化させて遮蔽係数の算出<sup>22</sup>を行った。モデルの各面は全て同じ形の112の直角二等辺三角形に分割した。検討した光線の本数とそれぞれでの起点と終点位置を図6.2.3に示す。光線の起点と終点の位置は、細分割後の重心もしくは頂点とした。



遮蔽係数 = 他の面に阻まれなかった光線本数 / 全光線本数

図6.2.1 光線本数3本での遮蔽係数算出イメージ

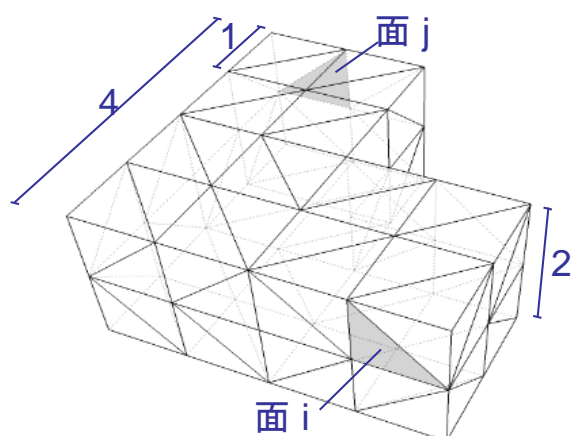


図6.2.2 遮蔽係数検討のための計算モデル

<sup>22</sup> 本計算は Mathworks 社 MATLAB を用いて行った。

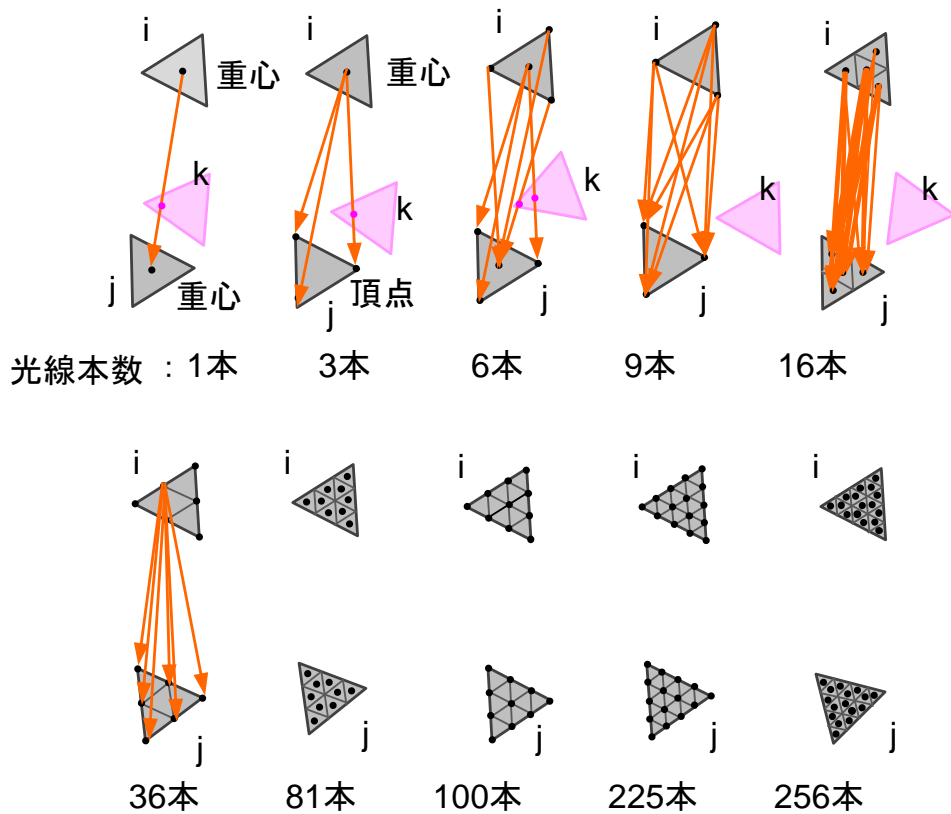


図 6.2.3 光線の本数と起点・終点位置

代表値として図 6.2.2 のモデル中の面  $i$ 、 $j$  間の重み付け立体角投射率の計算値と、全ての 2 面間での立体角投射率を算出し終えるまでの時間と光線本数との関係を図 6.2.4 に示す。光線の起点・終点の位置に関わらず、光線本数が増えるほど立体角投射率の値は収束し、計算時間は増加した。本検討では光線本数が 36 以上であれば妥当と判断した。ただし、面の大きさに対する面間の距離により収束結果は異なると考えられる点には注意が必要である。

立体角投射率の計算の全体の手順としては、まず錐面積分法により遮蔽物が無い場合の 2 面間の立体角投射率を算出し、本節の遮蔽係数を掛けて見えがかりを考慮した 2 面間の立体角投射率を算出し、5-2-2 の総和則の補正を行い、5-2-3、5-2-4 の再分割と補正手法により指向性を考慮した 3 面間の  $F_{ijk}$  を算出する。

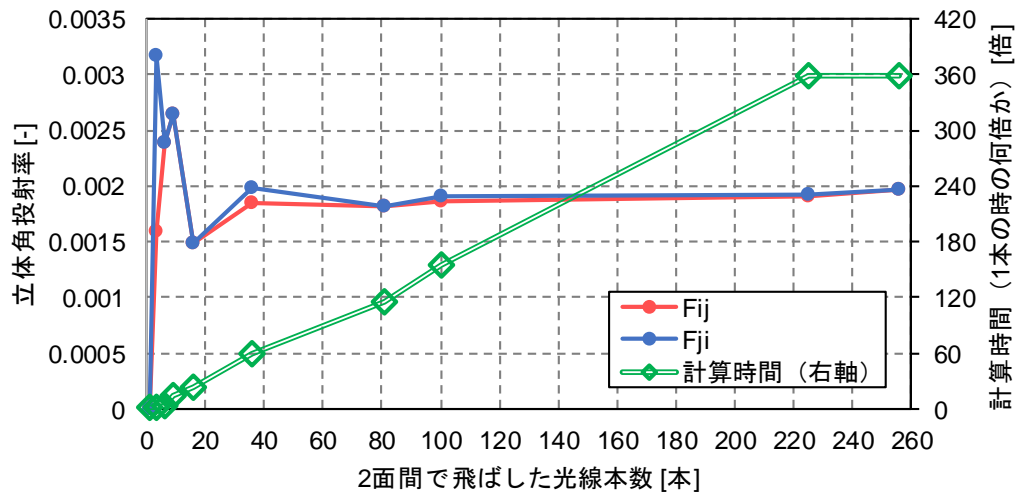


図 6.2.4 光線本数による立体角投射率と計算時間

### 6-3. 長い廊下空間での予測

前節で検討した見えがかりを考慮した立体角投射率を用いて、長い廊下空間をもつ実建物 A を対象として、反射指向特性を考慮した予測計算を行い、測定との比較を行った。

#### 6-3-1. 建物概要

3-6 節において現地測定による各面の反射指向特性を推定した実建物 A を対象とする。実建物 A は幅が 3.4m で長さが 57.3m の長い廊下空間である。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。建物内観写真を写真 6.3.1 に示す。建物形状を示す図については 6-3-2-1 計算モデルにおいて後述する。



写真 6.3.1 実建物 A の内観写真

#### 6-3-2. 計算条件

##### 6-3-2-1. 計算モデル

実建物 A と同一形状の数値計算用のモデル A を作成し、図 6.3.1、6.3.2 に示すように不均一な三角形要素に分割した。分割方法は、図 6.3.1 に示す 1574 の要素に分割した場合（以下 Case A-1）と、図 6.3.2 に示す 1704 の要素に分割した場合（以下 Case A-2）とで、2 種類のケースについて計算を行った。図中、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色とは無関係である。Case A-2 は Case A-1 と比較して、視点位置（方向）よりも後方の面に対して分割数を多く設定している。Case A-2 では要素数とその分多くなるため、計算負荷の削減のため視点位置より背後の空間の大きさを Case A-1 より少し小さくした。それ以外の面については Case A-1 と Case A-2 は同一の分割方法としている。

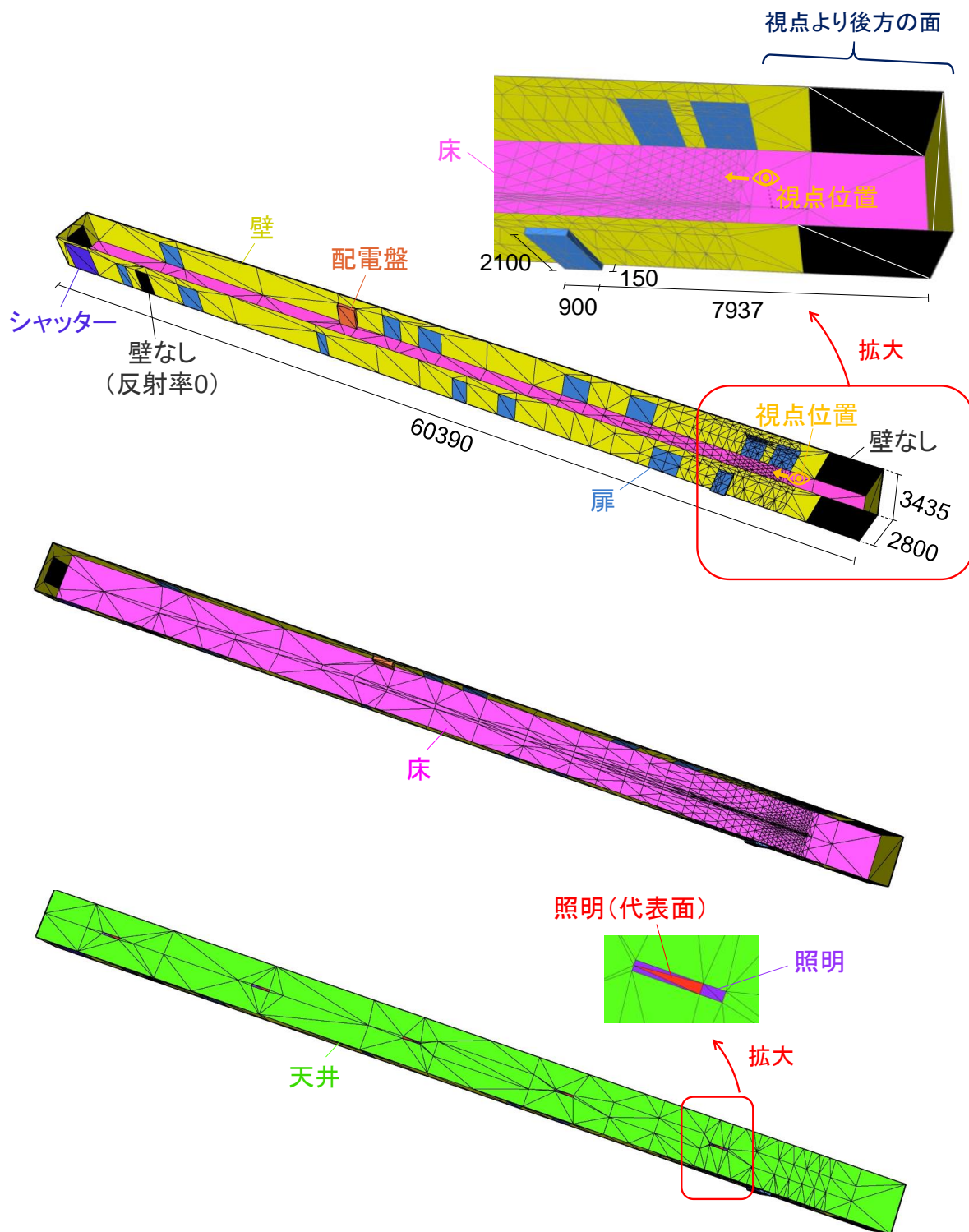


図 6.3.1 Case A-1 でのモデルの形状と分割方法 (面の数 : 1574) 単位 : mm



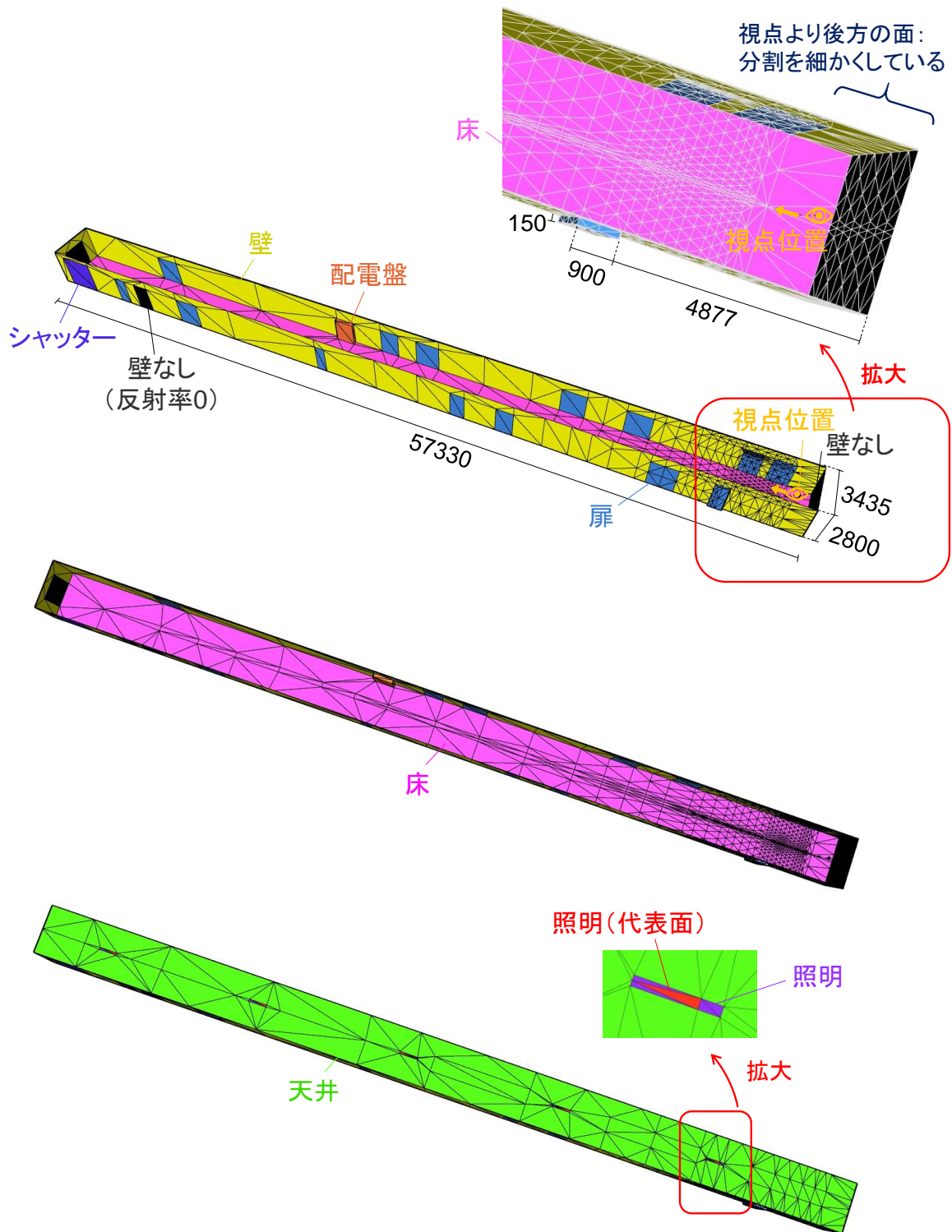


図 6.3.2 Case A-2 でのモデルの形状と分割方法 (面の数 : 1704) 単位 : mm

### 6-3-2-2. 各面の反射指向特性の入力条件

実建物では建材を採取して実験室での反射指向特性の測定ができないため<sup>23</sup>、3-6 節で示した可搬計測器を用いた現地測定により推定した値（表 3.6.4）をモデル内各面の反射指向特性の入力値とした（表 6.3.1）。実建物 A では、天井面の現地測定ができなかったため、天井面の反射指向特性値は実建物 B と同じく岩綿吸音板の値を用いた。

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、層内反射率は表 6.3.1 と同一で表皮反射成分の係数  $K$  を 0 とした。

表 6.3.1 モデル A の内装材の反射指向特性値

部位	屈折率 $n[-]$	係数 $K[-]$	傾斜角の標準偏差 $\sigma_r[\text{rad}]$	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

### 6-3-2-3. 光源の入力条件

天井の蛍光灯については、実際に使用されている蛍光灯が古く、メーカーから配光特性のデータが得られなかったため、類似の製品（パナソニック社製 FSA41610APH9）の配光特性データを用いた。また、蛍光灯は方位角方向に配光分布が異なるが、大差がなかったので方位角に関わらず表 6.3.2 の値を用いた。図 6.3.3 に配光分布を示す。光源面に対して壁や床は十分な距離があるため、光源は点光源として扱った。

<sup>23</sup> 新築物件の設計時には建材サンプルを用いて実験室において反射指向特性の測定が可能であり、既設の建物の改修工事の際にも、内装仕上げの記録があり同一材料が製造されていれば改めて建材サンプルを取り寄せることができる。本研究では、実際に工事を行うわけではなく、内装に使用した建材の記録が入手できなかったため、現地測定による反射指向特性の推定値を用いた。

表 6.3.2 蛍光灯の配光特性（全光束 4560lm）

Angle [°]	Luminous intensity [cd]
0 (真下)	1213
5	1211
10	1186
15	1165
20	1152
25	1132
30	1092
35	1054
40	1011
45	971
50	935
55	873
60	795
65	703
70	614
75	461
80	283
85	118
90	9

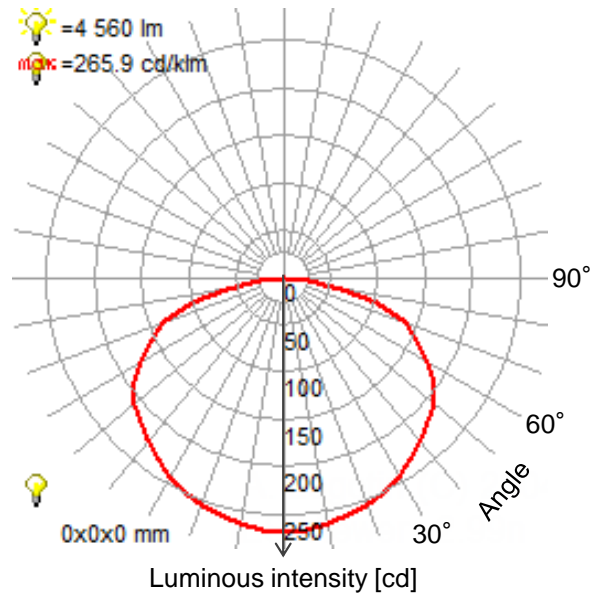


図 6.3.3 蛍光灯の配光分布  
（器具の全光束が 1000lm の場合での  
光度で表記）

#### 6-3-2-4. 再分割の条件

5-2-3 に示した  $F_{JK}$  算出の際の再分割を行う条件については、分割面  $S_j$  と  $S_l$  の距離もしくは  $S_l$  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、再分割前後の  $F_{JK}$  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。比較のため、Case A-2 では再分割をしない場合についても計算を行った。

#### 6-3-2-5. 見えがかりを考慮した立体角投射率算出の条件

6-2 節に示した立体角投射率の遮蔽係数の算出のための分割面 2 面間で飛ばす光線本数は Case A-1 では 81 本、Case A-2 では 16 本とした。モデル A は凹凸が少ない空間であったため、遮蔽係数検討のための計算モデル（図 6.2.2）と比較して、凹凸のある箇所面の大きさに対して面間の距離が離れていたため、より少ない本数でも計算可能だと考えられる。そのため、分割面の数が多い Case A-2 では計算時間短縮のため、16 本とした。

### 6-3-3. 測定概要

輝度分布の測定では、一眼レフカメラ（Canon EOS 80D）を用いて絞りを固定し、シャッタースピードを7段階に変えた写真を撮影し、輝度変換ツール（ビジュアル・テクノロジー研究所社製 REALAPS Clum）を用いて合成および輝度分布画像へ変換した。図 6.3.4 に手順を示す。測定位置は、図 6.3.1 および 6.3.2 に示した視点位置において高さ 150cm の位置とした。写真 6.3.2 に測定状況を示す。

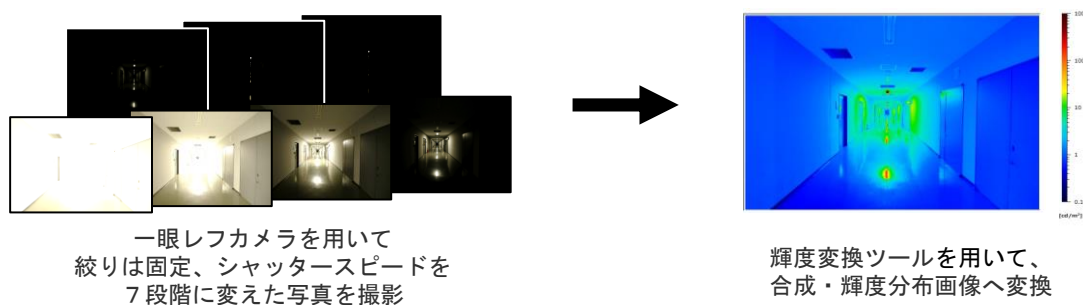


図 6.3.4 輝度分布画像の取得の手順



写真 6.3.2 輝度分布の測定状況

### 6-3-4. 測定輝度分布と計算輝度分の比較

輝度分布の測定位置からの撮影写真を写真 6.3.3 に、測定輝度分布を図 6.3.5 に、計算輝度分布を図 6.3.6～6.3.8 に示す。計算値は、各分割面内では輝度が等しいと仮定して、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。図 6.3.6～6.3.8 の輝度分布の凡例は図 6.3.5 と同一である。

図 6.3.5 に示す測定輝度分布では、床の中央部分に蛍光灯が映り込み、輝度が高くなっているが、図 6.3.6 に示す Case A-1 の計算結果では、その映り込みの位置が床の中心からずれてしまった。図 6.3.8 に示す Case A-2 の計算結果では改善され、測定輝度分布に近い位置の床

面が高輝度となった。これは、5-3-2-4 で示した輝度分布の表示方法によるものである。輝度分布を表示する際には、図 6.3.9 a)のように視点が計算モデルの面内（図 6.3.9 a)では壁面）にある場合には、見ている分割面  $S_I$  から、視点が含まれる分割面  $S_K$  への平均間接輝度  $L_{rIK}$  を表示する。光源面を見る場合には光源からの直接輝度  $L_{dlK}$  も合算する。一方で、Case A-1、A-2 のように視点が計算モデルの空間内部にある場合には、図 6.3.9 b)のように見ている面  $S_I$  から視点方向への輝度は、視線方向に対して後方の面  $S_K$  方向への輝度  $L_{rIK}$  によって示される。計算モデル内で視線方向に対して後方に位置する面は、画角に入らないため、計算負荷の削減のため分割数を少なく設定したくなるが、分割数を極端に少なくしてしまうと、光線の角度計算が粗くなり Case A-1 のように輝度表示の際に精度が落ちるため注意が必要といえる。

図 6.3.5 に示す測定輝度分布では、天井の蛍光灯に加えて、輝度の高い壁面や扉面が床に映り込む様子も確認できる。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様子が確認できる。図 6.3.7 に示す全ての面を均等拡散面と仮定した Case A-2 の計算結果では、その傾向を再現していない。一方で、図 6.3.8 b)に示す反射指向特性を考慮した本研究の計算手法による Case A-2 の計算結果では、床面の中心に線状に蛍光灯が映り込み、局所的に輝度が高くなる状況や、輝度の高い壁や扉の直下の床において縦に輝度が高くなる状況を再現した。右側の扉の左上部においては、局所的に輝度が高くなる状況を再現した。

図 6.3.8 は反射指向特性を考慮した計算輝度分布であるが、a)は 5-3-2 で提案した  $F_{JK}$  算出の際の再分割手法を行っていない場合、b)は再分割手法を行った場合の結果である。再分割を行わなかった a)では、特に壁に近い床面において局所的に輝度が高い面ができ、輝度分布に斑が生じた。これは、斑が生じた床面の各分割面は、壁面下部の分割面と距離が近いため、再分割手法を行わないと、各分割面の位置座標を 1 点（本研究では重心）で代表させていることによる  $F_{JK}$  の算出誤差が大きくなるためである。また、床に近い壁面よりも壁に近い床面の方が斑が大きいのは、床面が非常に指向性が高く、表皮反射成分の最大値が大きい反射面であるためである（3-6-4 の図 3.6.2 a)~c)）。指向性の高い反射面では、ある方向に対して反射強度が局所的に大きくなり、その反射強度で計算した光束伝達を距離の近い分割面では大きな立体角に適用することになり、過大に輝度が算出されると考えられる。再分割手法を行った b)においてはその斑が改善され、測定輝度分布に近づく傾向となった。本研究において提案した再分割手法により計算精度が向上することが 5-3-3 と同様に確認できた。

図 6.3.5 の測定輝度分布より図 6.3.8 b)の本研究の計算輝度分布が全体的に明るくなったのは、蛍光灯の配光特性は新品のデータを用いているが、実際の蛍光灯は長年使用されており、経年劣化による出力低下や汚れ等を考慮する必要があること等が原因として挙げられる。実用上は適切な保守率  $\eta$  を設定することで、対応可能であると考ええる。また、図 6.3.7 の均等拡散面と仮定した場合の方が、図 6.3.8 b)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たのは、均等拡散面の反射特性値を、層内反射成分は図 6.3.8 の条件と同一のまま表皮反射成分を 0 としたため、表皮反射成分の分だけ反射光束が減ったためである。

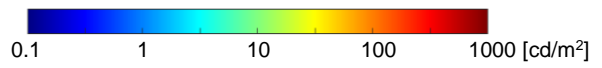


写真 6.3.3 実建物 A の内観



図 6.3.5 実建物 A の測定輝度分布

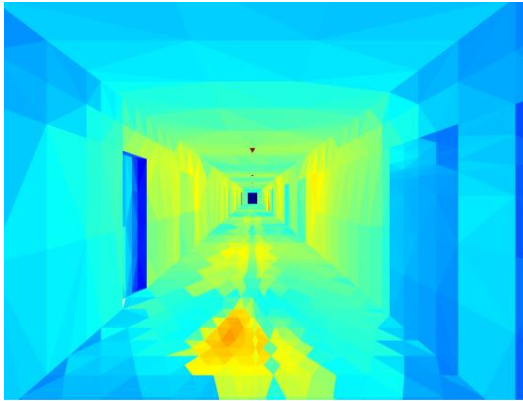


図 6.3.6 Case A-1 の計算輝度分布  
(反射指向特性を考慮、再分割あり)

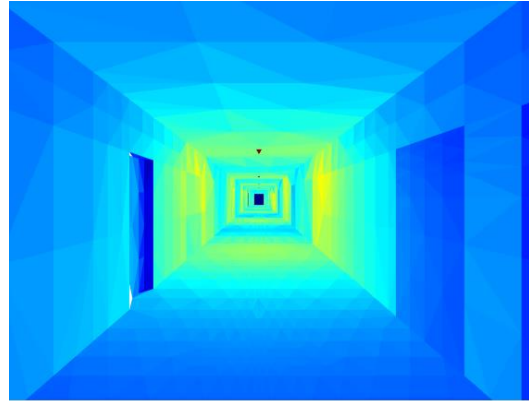
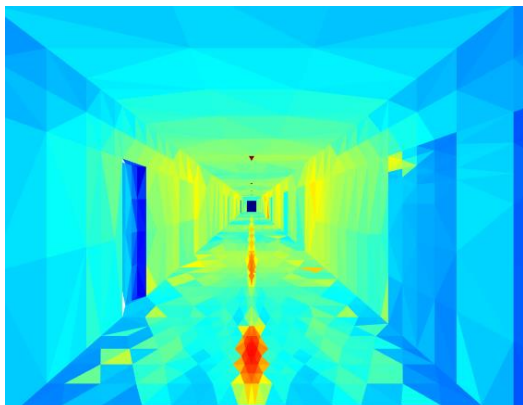
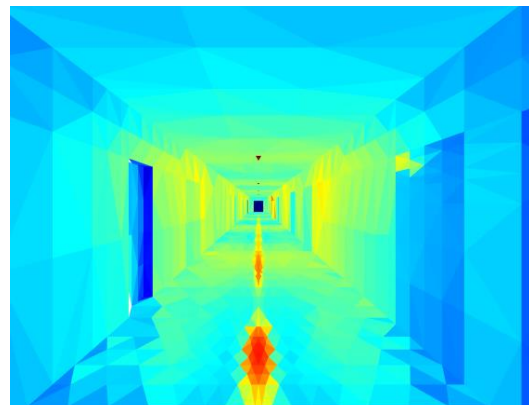


図 6.3.7 Case A-2 の計算輝度分布  
(均等拡散と仮定)

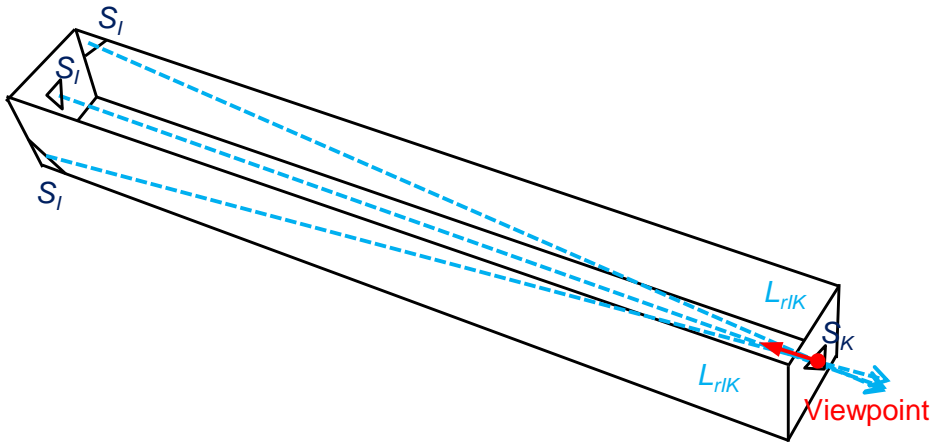


a) 再分割なし

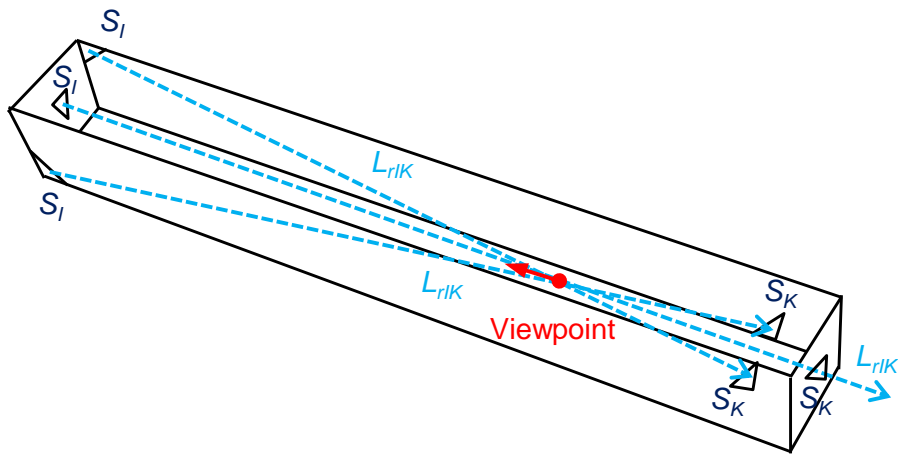


b) 再分割あり

図 6.3.8 Case A-2 の計算輝度分布 (反射指向特性を考慮)



a) 視点が計算モデルの面内（本図では壁面）にある場合



b) 視点が計算モデルの空間内部にある場合

図 6.3.9 視点位置による輝度表示方法

## 6-4. 凹凸のある空間での予測

実建物 A よりも多くの凹凸のある建物形状をもつ実建物 B を対象として、反射指向特性を考慮した予測計算を行い、測定との比較を行った。

### 6-4-1. 建物概要

3-6 節において現地測定による各面の反射指向特性を推定した実建物 B を対象とする。実建物 B は L 字型の空間にエレベーターの扉など凹部があり、凹凸が多い空間である。天井にはダウンライトが配置されている。建物内観写真を写真 6.4.1 に示す。建物形状を示す図については 6-4-2-1 計算モデルにおいて後述する。



写真 6.4.1 実建物 B の内観

### 6-4-2. 計算条件

#### 6-4-2-1. 計算モデル

実建物 B と同一形状の数値計算用のモデル B を作成し、図 6.4.1 に示すように 1167 の不均一な三角形要素に分割した（以下、CaseB）。図中、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色とは無関係である。



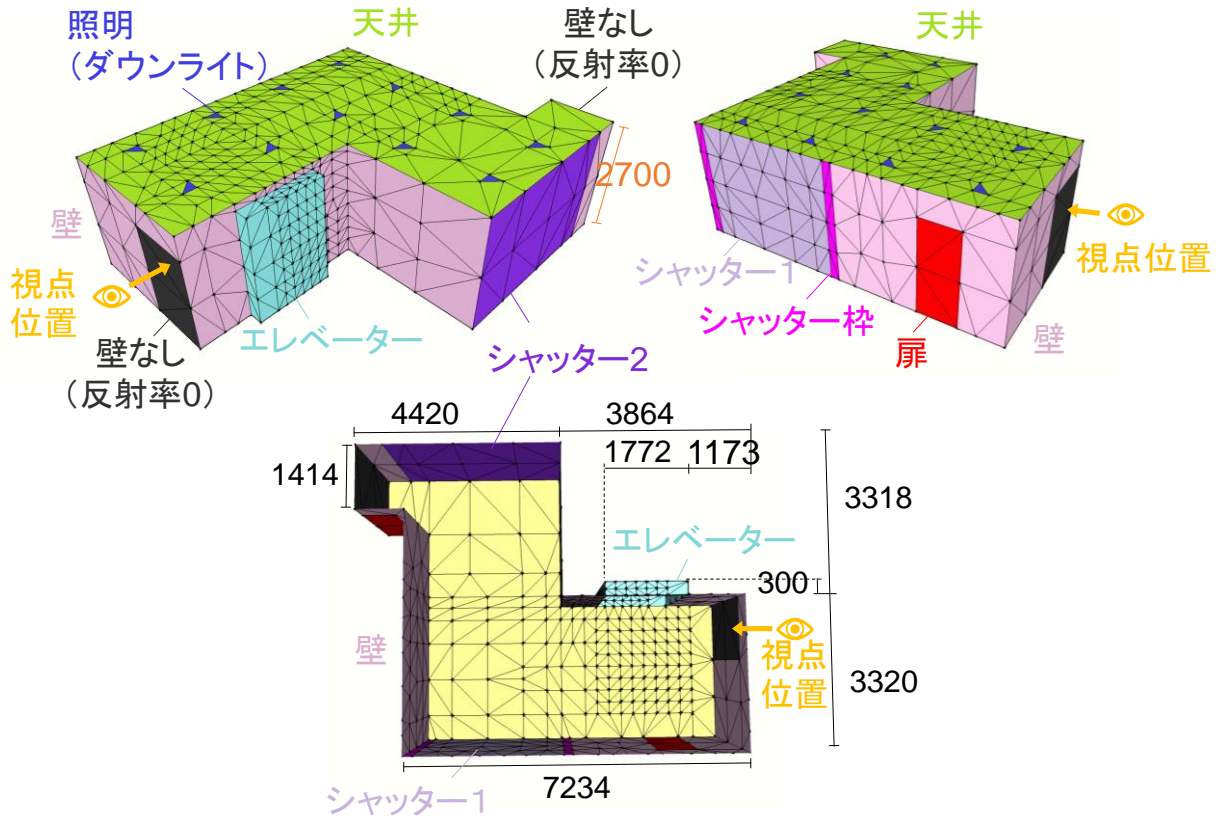


図 6.4.1 Case B でのモデル形状と分割方法（面の数：1167） 単位：mm

#### 6-4-2-2. 各面の反射指向特性の入力条件

各面の反射指向特性の入力値は 3-6 節で示した可搬計測器を用いた現地測定により推定した値（表 3.6.5）を用いた。シャッター枠については、推定できた研磨目に垂直方向での推定値を方位角に関係なく用いた。モデル B 内各面の反射指向特性の入力値を表 6.4.2 に示す。

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特性値は、層内反射成分は表 6.4.1 と同一で表皮反射成分を 0 とした。

表 6.4.1 モデル B の内装材の反射指向特性値

部位	屈折率 $n$ [-]	係数 $K$ [-]	傾斜角の標準偏差 $\sigma_f$ [rad]	層内反射率 $R_D$ [-]
天井	1.05	6.90	0.162	0.873
壁	1.20	21.9	0.155	0.682
床	3.83	3.87	0.0129	0.393
扉	1.13	26.4	0.0711	0.716
シャッター-1	1.13	15.1	0.119	0.534
シャッター-2	1.11	27.8	0.062	0.701
シャッター枠	1.48	151	0.0227	0.0691
エレベーター	1.81	10.6	0.0541	0.380

### 6-4-2-3. 光源の入力条件

天井のダウンライト（パナソニック社製 XNDN1609WWK LE9）は点光源として扱い、直接光度は、表 6.4.2、図 6.4.2 に示すメーカーの配光データを用いた。

表 6.4.2 LED ダウンライトの配光分布（全光束：1430lm）

Angle [°]	Luminous intensity [cd]
0 (真下)	1838
5	1827
10	1752
15	1475
20	1163
25	806
30	487
35	315
40	232
45	161
50	114
55	86
60	66
65	48
70	32
75	20
80	11
85	4
90	0

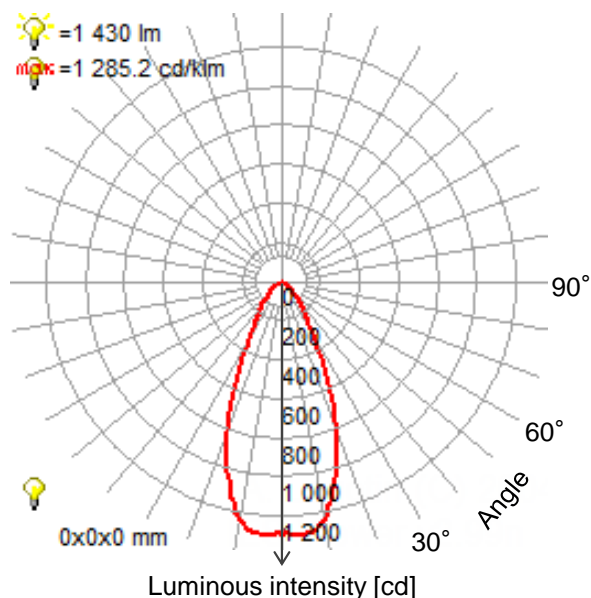


図 6.4.2 ダウンライトの配光分布  
（器具の全光束が 1000lm の場合での  
光度で表記）

### 6-4-2-4. 再分割の条件

5-2-3 に示した  $F_{JK}$  算出の際の再分割を行う条件については、分割面  $S_j$  と  $S_l$  の距離もしくは  $S_l$  と  $S_k$  の距離が分割面の最長の辺の長さ 1900mm の 5 倍以下にある 3 分割面同士とし、再分割前後の  $F_{JK}$  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。

### 6-4-2-5. 見えがかりを考慮した立体角投射率算出の条件

6-2 節に示した立体角投射率の遮蔽係数の算出のために分割面 2 面間で飛ばす光線本数は 81 本とした。

### 6-4-3. 測定概要

輝度分布の測定では、6-3-3と同様に、一眼レフカメラ（Canon EOS 80D）を用いて絞りを固定し、シャッタースピードを7段階に変えた写真を撮影し、輝度変換ツール（ビジュアル・テクノロジー研究所社製 REALAPS Clum）を用いて合成および輝度分布画像へ変換した。

### 6-4-4. 測定輝度分布と計算輝度分布の比較

輝度分布の測定位置からの撮影写真を写真 6.4.2 に、測定輝度分布を図 6.4.3 に、計算輝度分布を図 6.4.4 に示す。計算輝度分布は、各分割面内では輝度が等しいと仮定して、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。図 6.4.3 の輝度分布の凡例は図 6.4.4 と同一である。

図 6.4.3 の測定輝度分布では、左側のシャッター1面と右側のエレベーター面において、ダウンライトの光を反射して局所的に輝度が高くなる様子が確認された。図 6.4.4 a) に示す全ての面を均等拡散面と仮定した計算結果では、シャッター1面ではその傾向が再現できているが、エレベーター面では再現していない。図 6.4.4 b) に示す反射指向特性を考慮した本研究の計算手法では、シャッター1面では a) と同様にその傾向を再現でき、エレベーター面においては上部でわずかに局所的に明るくなったように見えるが、図 6.4.3 の測定輝度分布ほど明確ではない。局所的に明るくなる箇所が大きすぎたためと考えられる。また、測定輝度分布では画角から見切れてしまっているが、図 6.4.4 b) の計算輝度分布では、シャッター1の左側のシャッター枠の上部が局所的に輝度が高くなった。一方で、シャッター1の右側のシャッター枠では輝度が低くなった。これは、シャッター枠が層内反射成分が小さく表皮反射成分が限られた反射角度の範囲で大きくなる、指向性の高い反射特性であり（3-6-4の図 3.6.3 x)～z)）、見る方向によって輝度が大きく変化するためである。図 6.4.4 a) の均等拡散面と仮定した場合の方が、図 6.4.4 b) 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たのは、均等拡散面の反射特性の入力値を、層内反射成分は b) の条件と同一で表皮反射を 0 としたためである。

図 6.4.3 の測定輝度分布で確認されたダウンライトが床に映り込む様子は、図 6.4.4 b) の反射指向性を考慮した計算結果においても再現できなかった。床面は艶が強く指向性が非常に強い反射特性であったため（3-6-4の図 3.6.3 d)～g)）、光源に対しての位置がわずかでも異なると局所的に輝度が高くなる性質がある。しかし、計算モデルでは分割面サイズが大きく、繊細な位置条件の差による影響を再現できなかった、もしくは本位置条件が再現できていても、分割面において平均化されることで、輝度の変化が均されてしまったことが原因として考えられる。ダウンライトの床への映り込みのような、非常に局所的な輝度の変化を再現するためには、分割面サイズをより小さくする必要があるが、計算負荷が極めて増加することが予想される。これを避けるため、照明計算部とレンダリング計算部とに分けて扱うアルゴリズム<sup>2)</sup>が研究されている。レンダリング時に第1回反射光束については分割数を細かく設定して光線追跡法を用いて別に計算し、第2回以降の反射輝度と合算すれば、よりリアルな画像表示を実現できる<sup>3)</sup>。第1回反射輝度と鏡面反射輝度の計算を効率よく行える光線追跡法と、指向性のある反射面での相互反射の計算を効率的に行うことが可能な光束伝達法に基づく本研究の計算手法

を組み合わせることは合理的と考えられる<sup>3)</sup>。本研究の計算手法はこれらの取り組みにより、さらに実用的となると考えられる。

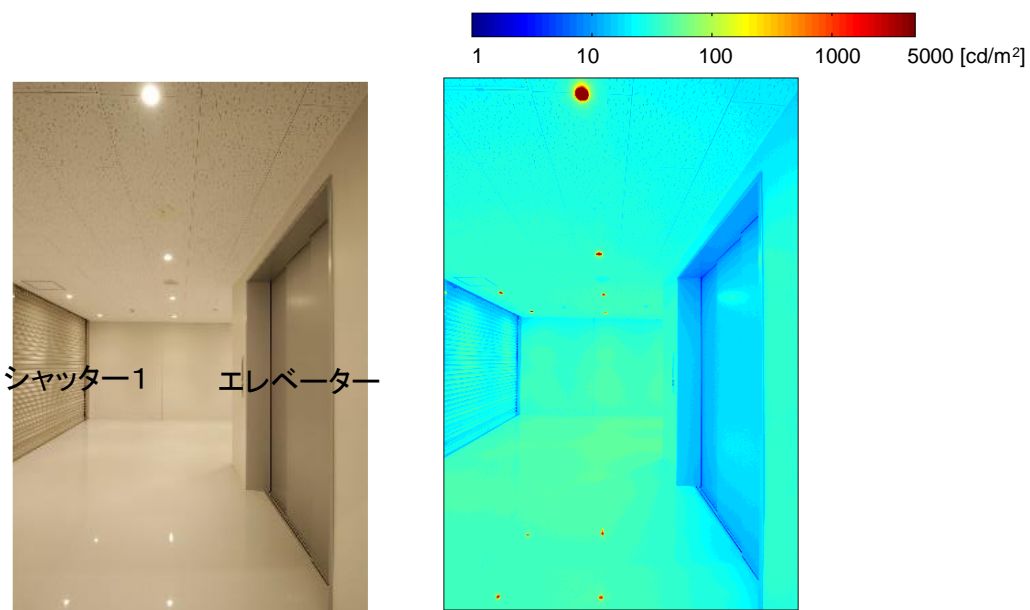
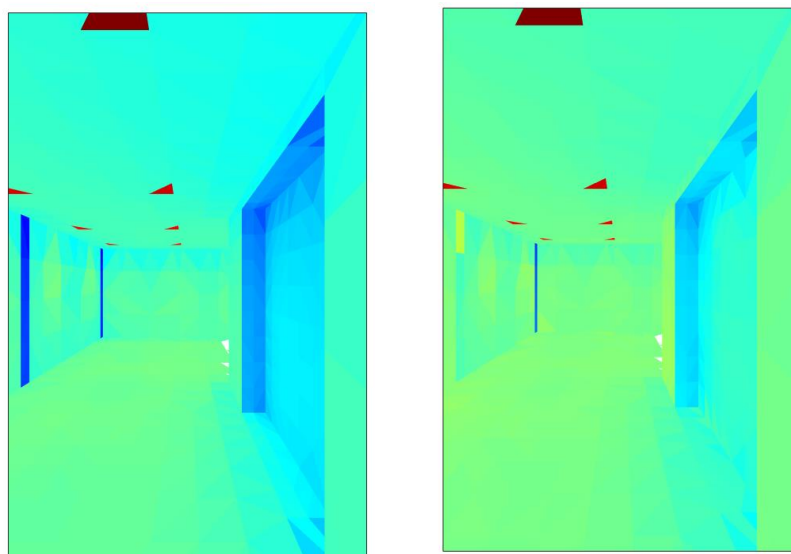


写真 6.4.2 実建物 B の内観

図 6.4.3 実建物 B の測定輝度分布



a) 全ての面を均等拡散面と仮定 b) 反射指向特性を考慮 (本研究の手法)

図 6.4.4 Case B の計算輝度分布

## 6-5. まとめ

実在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、凹凸や障害物の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示した。本手法を用いて、反射指向特性を考慮した光束伝達相互反射式に基づき、実在する建物内空間である長い廊下空間と凹凸のある空間を対象とした輝度分布の予測計算を行った。本計算結果を全ての面を均等拡散面として計算した輝度分布、現地で測定した輝度分布と比較し、以下の知見を得た。

- 1) 測定輝度分布では指向性のある反射特性をもつ扉や床等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、その傾向を再現できないが、本研究の計算手法では再現できた。
- 2) 分割面同士の距離が近くなる隅部での特に指向性の高い面において、5-2-3 で提案した光束伝達の比率を計算する際の面の再分割手法によって計算輝度分布の斑が解消され、実建物においても測定輝度分布に近づくことが確認できた。
- 3) 視点位置を建物の内部に設定した場合には、視野の外部に位置する面の分割粗さが不適切に粗いと、実測値と不自然に異なる計算輝度分布となるという数値計算上の課題を明らかとし、視野の外部の面の分割粗さも適切に設定する必要があることを示した。
- 4) 指向性の高い反射特性をもつ床面へのダウンライトの映り込み等の第1回反射光による非常に局所的な輝度の変化を再現するには、面の分割要素を小さくする必要があるが、必要以上に計算負荷が増加することが予想される。対策として、照明計算部とレンダリング計算部とに分けて扱うアルゴリズム<sup>2),3)</sup>を採用することが考えられる。

## 参考文献

- 1) 例えば、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
- 2) 例えば、 J. R. Wallace, M. F. Cohen, D. P. Greenberg, A Two-Pass Solution to the Rendering Equation: A Synthesis of Ray Tracing and Radiosity Methods, SIGGRAPH (1987) 311-320, <https://doi.org/10.1145/37401.37438>
- 3) 藤井俊一，中村洋，松浦邦男，上谷芳昭，古賀靖子：光束伝達法・虚像法・光線追跡法を組み合わせた新照明計算アルゴリズム FLSS (Flexible Lighting Simulation System) の開発 (その 1) ，日本建築学会計画系論文集，第 62 号，第 501 号，pp. 23-27, 1997, [https://doi.org/10.3130/aija.62.23\\_8](https://doi.org/10.3130/aija.62.23_8)

## 第7章 総括

本研究では、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について、測定値と数式モデルにより入射・反射角毎の反射指向特性を示し、市販の分光測色計により測定可能な分光拡散反射率により、反射指向特性の数式モデルのパラメータをより簡便に推定する手法を提案した。また、有彩色の建材の分光反射指向特性を示し、上記手法により得られた反射指向特性の簡易推定値と分光拡散反射率により、分光放射輝度測定を行わずに簡便に分光反射指向特性を推定する手法を提案した。

推定した反射指向特性の数式モデルを入力値として、反射指向特性を考慮した輝度分布を光束伝達法で計算する手法を示し、光束伝達の比率を計算する際の再分割手法とそれに伴う光束伝達の比率の補正手法を提案した。模型実験による比較・検証を行い、本計算手法により指向性のある反射面での測定輝度分布の特徴を再現できること、提案した計算手法により隅部の計算精度が向上することを示した。さらに、実建物空間での凹凸や障害物へ対応するための見えがかりを考慮した立体角投射率の算出方法を構築したうえで、実建物空間を対象とした輝度分布の予測計算を行い、指向性のある反射面の測定輝度分布の傾向を再現できることを示した。以下に各章毎に総括する。

第1章では、本研究の背景、既往の研究と本研究の位置づけ、本研究の目的と構成を示した。

第2章では、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、複層塩ビ床シート、化粧塩ビフィルム、花崗岩、樹脂焼付塗装の金属板の仕上げの異なる17種の建材について、偏光を利用した測定により、層内・表皮反射成分に分けて入射・反射角度毎の反射指向特性を明らかにし、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に与える影響が大きい。
- c) 表面仕上げの違いは表皮反射成分へ与える影響が大きい。
- d) 樹脂塗装の種類のみで、樹脂塗装金属板の表皮反射成分の反射特性を推測するのは困難である。

また、上谷一松浦モデルを用いて反射指向特性関数のモデル化を行い、測定値を近似できることを示した。

第3章では、市販の分光測色計、光沢度計、表面粗さ計によって計測可能な、建材の光沢度、表面粗さ、分光拡散反射率といった物性値を計測し、反射指向特性の数式モデルのパラメータ（表皮反射成分の大きさを表す係数、小粗面の傾斜角の標準偏差、層内反射率といった特徴量を指す）との相関から、本特徴量を推定する方法を検討した。光沢度が高いほど、表面粗さ  $Ra$  が小さいほど、表皮反射成分が大きい傾向と表皮反射成分の分布形状が鋭い傾向があったが、光沢度と表皮反射成分の大きさ以外の相関は低かった。分光拡散反射率（SCE方式）から求

めた拡散反射率と層内反射率には強い相関がみられた。それ故、分光測色計により測定可能な分光拡散反射率を用いて、偏光を用いずに層内反射率を推定する手法を提案した。偏光を利用して層内・表皮反射成分に分離する詳細測定と比べて本手法では測定工数を 1/5 に削減できるうえ、詳細測定と同等の精度が得られることを示した。また、提案した簡易推定法により、大理石、保護塗装付コンクリート、樹脂焼付塗装の金属板等の仕上げの異なる 5 種の建材について、反射指向特性が測定できることを確かめたうえで、光沢度が高い建材については、表皮反射成分の特徴量である係数を決定するために、複数の入射角度条件で測定を行う必要があると考えられることを示した。

簡易推定法の適用範囲としては、上記建材よりも凹凸の大きい壁紙や毛足が長くループ状のパイルで構成されたタイルカーペットでは、小さい入射角度において数式モデルのパラメータが同定できない場合があった。また、タイルカーペットでは、本研究で用いた数式モデルでは反射指向特性の再現性が悪いことを示した。さらに、木材では木目に対する入射方位角により反射指向特性が異なることを示し、それを数式モデルでも考慮する必要があることを示唆した。

また、既設の実建物を対象にした光環境計算等において反射指向特性を現地測定する場合を想定し、可搬計測器を用いた建材の反射指向特性の既往の推定方法について整理した。本手法を用いて実建物空間において現地測定を行い、反射指向特性を推定した結果を示した。それにより、屈折率が非現実的に小さい値と推定されると、特に入射・反射角が大きい場合に、推定した反射特性が実際の反射特性とは乖離する懸念があることを示した。

光環境計算のさらなる高品質化としては、分光特性に関する詳細な計算が挙げられる。第 4 章では、有彩色を中心とした複層塩ビ床シート、化粧塩ビフィルム、花崗岩、大理石、保護塗装付コンクリート、樹脂焼付塗装の金属板の仕上げの異なる 11 種の建材について、偏光を利用した測定により、層内・表皮反射成分に分けて入射・反射角度毎の分光反射指向特性を明らかにし、以下の知見を得た。

- a) 層内反射の分光分布は、分光測色計で測定した拡散反射光の分光分布とよく一致した。
- b) 表皮反射の分光分布は、化粧塩ビフィルム、複層塩ビ床シート、保護塗装付コンクリート、花崗岩では波長によらずほぼ定数となったが、大理石、ガルバリウム鋼板フッ素系樹脂塗装、ブリキ板ポリエステル系樹脂粉体塗料では、正反射光において波長が長いほど強度が大きい傾向があり、表面粗さの小さい石材と樹脂焼付け金属板では、その傾向が大きくなった。

以上の特性を利用して、3 章で示した簡易推定法により得られた反射指向特性と分光測色計等で測定可能な分光拡散反射率により、分光放射輝度を直接測定することなく分光反射指向特性を簡易に推定する手法を提案した。本手法により、化粧塩ビフィルム、複層塩ビ床シート、保護塗装付コンクリートについては測定値を推定できたが、大理石、ガルバリウム鋼板フッ素系樹脂塗装、ブリキ板ポリエステル系樹脂粉体塗料では推定できなかった。石材と樹脂塗装した金属板で表面粗さの小さいものについては、提案した分光の簡易推定法が有効でないと考えられる。



第5章では、推定した反射指向特性の数式モデルを入力値として、反射指向特性を考慮した照度および輝度分布を光束伝達法で計算する手法を示し、隅部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と、それに伴う光束伝達の比率の補正手法を提案した。測定により反射指向特性が既知である、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示した。また、層内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や、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、指向性のある反射面内でのこれらの測定輝度分布の特徴を計算により再現できることを示した。さらに、艶のある黒色のような指向性の強い反射面では、面の分割要素の大きさが計算結果へ与える影響が大きくなるため、分割要素の大きさを適切に小さく設定する必要があることを明らかにした。

第6章では、凹凸や障害物に対応するため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、実在する建物空間である長い廊下空間と凹凸のある空間を対象として輝度分布の予測計算を行った。全ての面を均等拡散面と仮定した一般的な計算手法による輝度分布、現地で測定した輝度分布と比較した。それにより、均等拡散面と仮定した計算では再現できない、指向性のある反射特性のある床面や扉面等で局所的に輝度が高くなる測定輝度分布の傾向を、本研究の計算手法により再現できることを示した。また、分割面同士の距離が近くなる隅部での特に指向性の高い面において、5章で提案した光束伝達の比率を計算する際の再分割手法によって計算輝度分布の斑が解消され、実建物においても測定輝度分布に近づくことが確認できた。

また、視点位置を建物モデルの内部に設定した場合に、視野の外部に位置する面の分割粗さが不適切に粗いと、実測値と不自然に異なる計算輝度分布となるという数値計算上の課題を明らかとし、設定した視野の内部だけでなく、外部の面の分割粗さも適切に設定することで本課題を解決できることを示した。

一方で、指向性の強い反射面へのダウンライトの映り込みのように非常に局所的な第1回反射光の輝度変化を表現しづらいという点が明らかとなった。光源の大きさと反射面の指向性に応じて生じる局所的な輝度変化を捉えるために、面の分割数を非常に細かく設定する必要がある、計算の収束に時間を要するためである。対策として、照明計算部とレンダリング計算とに分けて扱うアルゴリズムを採用すること等が今後の検討課題として考えられる。

本研究による反射指向特性の簡易推定および反射指向特性を考慮した輝度計算の精度向上は、実務において、建築建設前の計画段階で、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まぶしさの検討などの詳細な光環境の設計を行う上で非常に有益である。

光環境計算のさらなる高品質化としては、分光特性に関する詳細な計算が挙げられる。測定に基づく分光反射指向特性の数式モデルを組み込んだ分光相互反射計算により、建築空間における分光放射輝度分布を算出する手法の構築が今後の課題である。

## 発表論文一覧

### 査読付き論文

- 1) 矢部周子, 原直也, 原田和典, 山口純一: 建材の表皮・層内における分光反射指向特性の測定, 日本建築学会環境系論文集, 第 84 巻, 第 755 号, pp. 29-37, 2019. 1, <https://doi.org/10.3130/aije.84.29>
- 2) 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, <https://doi.org/10.3130/aije.84.377>
- 3) Chikako YABE, Kazunori HARADA, Naoya HARA: 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, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108670>

### 学術講演

- 1) 矢部周子, 原田和典, 原直也, 山口純一: 反射指向特性を考慮した光環境シミュレーションのための研究 その 1 反射指向特性の測定と数式モデル化, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学-I, pp. 459-460, 2017. 7
- 2) 矢部周子, 原田和典, 原直也, 山口純一: 反射指向特性を考慮した光環境シミュレーション—その 1 反射指向特性の測定および数式モデル化—, 平成 29 年度 (第 50 回) 照明学会全国大会講演論文集, 2017. 9
- 3) 矢部周子, 原直也, 原田和典, 山口純一: 反射指向特性を考慮した光環境シミュレーションのための研究 その 2 疑似点光源を用いた模型実験と光束伝達相互反射式による再現計算, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学-I, pp. 469-470, 2018. 7
- 4) 藤田翔, 大藪彩乃, 原田和典, 仁井大策, 原直也, 矢部周子: 建築材料の表面特性からの反射特性値の推定とその精度, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学-I, pp. 465-466, 2018. 7
- 5) 大藪彩乃, 原田和典, 仁井大策, 原直也, 矢部周子: 反射特性値の簡易推定法における建材パラメータ推定方法に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学-I, pp. 467-468, 2018. 7
- 6) 矢部周子, 原直也, 原田和典, 山口純一: 反射指向特性を考慮した光環境シミュレーション—その 2 疑似点光源を用いた模型実験と光束伝達相互反射式による再現計算—, 2018 年度 (第 51 回) 照明学会全国大会講演論文集, 2018. 9
- 7) 大藪彩乃, 原田和典, 原直也, 矢部周子, 仁井大策: 反射特性値のパラメータの相互関係を考慮した推定方法, 日本建築学会近畿支部研究報告書, 環境系, pp. 257-260, 2019. 6

- 8) 藤田翔, 矢部周子, 原田和典, 仁井大策: 建築材料の表面特性からの反射特性値の推定, 日本建築学会近畿支部研究報告書, 環境系, pp. 261-264, 2019. 6
- 9) 矢部周子, 原田和典, 原直也: 反射指向特性を考慮した光環境シミュレーションのための研究 その3 分光反射指向特性の測定, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学-I, pp. 579-580, 2019. 7
- 10) 藤田翔, 矢部周子, 原田和典, 仁井大策: 建築材料の表面特性からの反射特性値の推定, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学-I, pp. 575-576, 2019. 7
- 11) 大藪彩乃, 原田和典, 仁井大策, 原直也, 矢部周子: 建材の反射特性値のパラメータ推定, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学-I, pp. 577-578, 2019. 7
- 12) 矢部周子, 原田和典, 原直也: 反射指向特性を考慮した光環境シミュレーションーその3 測定による分光反射指向特性の把握ー, 2019年度(第52回)照明学会全国大会講演論文集, 2019. 9
- 13) 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
- 14) 矢部周子, 原田和典, 原直也: 反射指向特性を考慮した光環境シミュレーションーその4 凹凸のある実建物形状での計算と実測との比較ー, 2021年度(第54回)照明学会全国大会講演論文集, 2021. 9

## その他

- 1) 矢部周子, 原直也: 配光特性・反射特性を考慮したシミュレーション(建築物を対象)2, 照明学会視覚・色・光環境分科会主催シンポジウム「照明シミュレーションの可能性」, 2018. 2
- 2) 矢部周子, 山口純一, 大塚清敏: 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, 大林組技術研究所報, No. 82, 2018
- 3) 豊田敏裕, 大久保和明, 原直也, 矢部周子: 反射・透過特性データの測定と管理, 照明学会誌, 第103巻, 第3号, pp.107-108, 2019. 3
- 4) 一般社団法人照明学会: 照明シミュレーションのためのプラットホーム整備に関する調査委員会報告書, 2019 (2-1-3 建築分野のシミュレーションでの反射指向特性を担当)
- 5) 矢部周子: 光のシミュレーションを建築設計に活かす, 月刊建築技術 2020年5月号, pp. 94-97
- 6) 矢部周子, 山口純一, 大塚清敏: 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, 大林組技術研究所報, No. 86, 2022 (投稿中)

## 謝辞

本研究を行うにあたり熱心にご指導いただきました京都大学教授 原田和典先生に深く感謝いたします。ご多忙な中、非常に根気強く丁寧なご指導をいただいたことで、本論文をなんとかまとめることができました。研究を通じて、常に研究に対して誠実でひとつひとつの理論を緻密に積み上げていく原田先生の姿勢に感銘を受けました。原田先生にご指導いただいたことを糧に、今後も精進して参りたいと思います。心より御礼申し上げます。

関西大学教授 原直也先生には、2016年に共同研究をさせていただいた時から長期に渡って熱心にご指導いただき、光環境分野の幅広い知見をご教授いただきました。心より感謝申し上げます。行き詰った際にも、いつも広い視野でのご指導、ご助言をいただいたことで、研究を進めていくことができました。深く御礼申し上げます。

京都大学教授 石田泰一郎先生、小椋大輔先生には調査委員をお引き受けいただき、多角的なご指導、ご助言をいただきました。深く感謝申し上げます。

京都大学准教授 故 上谷芳昭先生には、本研究の動機付けをして頂き研究方針についてもご指導頂きました。深く感謝いたします。

大林組技術研究所 山口純一主席技師には、本研究を立ち上げる際からご相談にのっていただき、研究の進め方、目標設定などの多くのご指導や励ましをいただきました。山口様のご指導がなければ、本研究を始めることも叶いませんでした。心より感謝いたします。

大林組技術研究所 大塚清敏上級主席技師には、計算手法の構築において多大なご助言を賜り、深く御礼申し上げます。計算結果が思うようにいかず何度も困窮しましたが、大塚様の深い知識に基づく多角的なご助言により、ひとつひとつ解決していくことができました。心より御礼申し上げます。

元大林組技術研究所 須藤修二氏には、模型実験の際に援助いただきました。京都や大阪にまで足を運んでいただき、数日間、実験施設に缶詰めになり測定にご協力いただきました。実験終わりに夕食をご一緒させていただいたのが良い思い出です。深く感謝申し上げます。

バロン電子株式会社 中村強氏、角田竜也氏には、反射指向特性測定装置を作製いただきました。多くの議論の場を設けさせていただき、細やかな配慮の行き届いた設計により、耐久性と使い勝手と精度を兼ね備えた想像以上の素晴らしい測定装置を作製いただきました。心より御礼申し上げます。

当時京都大学大学院生の梶並俊彦氏には、研究をはじめたばかりで悩むことが多かった時期に、近い研究分野に取り組みされており、お話しさせていただくことで多くの刺激を受けました。また、暗室での長時間の気が滅入る反射指向特性の測定にもご協力いただきました。深く感謝いたします。

当時関西大学の濱本将稔氏には、模型実験の拡散光源と点光源での測定にご協力いただきました。実験施設での連日の測定にも元気に澆刺と取り組んでいただき、とても楽しい測定となりました。大変感謝いたします。

当時京都大学大学院生の清水彩乃氏には、模型実験の点光源での測定にご協力いただきました。いつも明るい笑顔で、研究室の測定装置の場所やキャンパス内の食堂や京都のお店などについても教えていただき、桂キャンパスがより過ごしやすくなりました。心より感謝いたします。

当時京都大学大学院生の藤田翔氏は、凹凸のある空間での反射指向特性の現地測定にご協力いただきました。近い研究分野に取り組みされており、豊かな発想と論理展開に多くの刺激を受けました。深く感謝いたします。

大林組技術研究所 勝俣英雄所長、都市環境技術研究部 片岡浩人部長には、社会人博士として研究に取り組むことを後押しいただき、ご支援いただきました。深く御礼申し上げます。

大林組 設計本部設備設計第四部 小島義包部長、技術ソリューション部 大木知佳子課長、技術研究所 岸上昌史副課長には、社会人博士を取得された先輩として、いつもご相談にのっていただき、多くの励ましをいただいたことが精神的な支えとなりました。心より感謝いたします。

最後に、研究に関わってくださった皆様、実質的にも精神的にも常に強力な支援をしてくださった両親、姉、夫、いつも頑張ろうというモチベーションを高めてくれた子供に深く感謝いたします。