

京都大学	博士 (工学)	氏名	矢部周子
------	---------	----	------

論文題目	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
------	---------------------------------

(論文内容の要旨)

省エネルギー性と適切な照明環境の要件である明るさ、快適性、雰囲気等を両立させた室内光環境を実現させるためには、輝度分布に基づく光環境設計が重要となり、その予測計算技術が求められる。室内での詳細で正確な輝度分布の予測計算のためには、建材の不均一な反射特性（以下、反射指向特性）を考慮する必要がある。対象点への入射光に着目する照度分布と比較して、対象点での反射光である輝度分布には、反射指向特性の影響が直接的に現れるためである。反射指向特性を考慮した輝度予測計算を行うには、建材の反射指向特性データが必要となる。本研究では、近年一般的に使用される建材について、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表した。また、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分光拡散反射率により、反射指向特性の既往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。さらに、有彩色の建材の分光反射指向特性については、分光放射輝度測定を行うのではなく、分光拡散反射率の測定値から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補正手法を提案した。模型実験において、本手法により計算精度が向上することを実証的に示したうえで、実建物空間への適用性について検討した。

以下、得られた知見を本文の章毎に示す。

第1章では、研究の背景および目的と構成を示した。

第2章では、一般的に内装材や外装材としてよく使用される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た。また、既往の数式モデルを用いて反射指向特性関数のモデル化を行い、実測値を近似できることを示した。

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との相関から、数式モデルのパラメータを推定する方法を検討した。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くなりその分布が鋭くなる傾向があったが、光沢度と表皮反射成分の大きさ以外の相関は低かった。一方、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。これらのことから、偏光を用いる代わりに、市販計測器により測定可能な分光拡散反射率を用いて層内反射特性を推定する手法を提案した。本手法を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材に対して適用すると、偏光を用いた詳細測定と比べて本手法では測定工数を 1/5 に削減できるにも関わらず、同等の精度が得られることを示した。また、提案した簡易予測手法により、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認したうえで、光沢度が高い建材については、表皮反射成分の数式モデルのパラメータ K を決

京都大学	博士 (工学)	氏名	矢部周子
<p>定するために、複数の入射角度で測定を行う必要があると考えられることを示した。さらに、既設の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、可搬計測器のみで建材の反射指向特性を推定する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現地測定を行った。</p> <p>光環境計算のさらなる高精度化としては、分光分布に関する詳細な計算が挙げられる。そのため、第4章では、有彩色を含む複層塩ビ床シート等の11種の建材について、偏光を用いた測定により、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測定した。これにより、表皮反射成分は光源の波長分布が保存されること、層内反射成分は物体色に依存することを確認した。この特性を利用して、分光放射輝度測定代わりに分光拡散反射率を測定する方法を提案した。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およそ推定できた。しかし、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がうまくできなかった。石材と樹脂塗装した金属板等で表面粗さの小さいものについては、この方法が有効でないと考えられた。また、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、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。</p> <p>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た。このとき、従来の方法では、計算結果の輝度分布が波打つ現象が確認されていた距離の近い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補正手法を提案した。反射指向特性が既知であ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従来の方法よりも計算精度が向上することを示した。また、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再現した。</p> <p>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、2つの実建物内空間を対象として輝度分布計算を行った。現地で測定した輝度分布と比較すると、艶のある床面や扉面等で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した。一方で、本研究の手法による計算結果をそのまま表示する場合には、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り、計算の収束に非常に時間を要するためである。</p> <p>第7章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、建材の反射指向特性の詳細な測定とそれに基づく簡易化を行い、その結果を用いて模型空間および実在の建物空間における輝度分布の実用的予測手法を提案するものである。得られた主な成果を以下に示す。

1. 建材の反射指向特性データの測定と数式モデル化

一般的な建材について、偏光を用いて表皮反射と層内反射に分けて反射指向特性の詳細な測定を行った。その結果から既往の指向反射特性モデルのパラメータを推定した。さらに、偏光を用いた詳細測定に替えて、拡散反射率を市販の汎用的な測定器で測定し、その結果から層内反射率を推定する簡易推定法を提案した。これによると、偏光を用いた詳細測定と比較して測定工数を1/5に削減したにもかかわらず、同等のデータが得られた。

また、分光反射指向特性に関しては、手間の掛かる分光放射輝度測定を市販機器による分光拡散反射率測定で代替して分光反射指向特性を簡易に推定する手法を提案した。これにより、予測計算に必要な反射指向特性を迅速に得ることが出来るようになり、実務への適用性が大きく向上した。

2. 光束伝達法に基づく反射指向特性を考慮した輝度予測計算

反射指向特性を考慮した光束伝達計算を行う方法を定式化した。空間内の表面を三角形要素に分割し、3要素間の反射を考慮して、各要素間の光束を求める方法である。従来の方法では、計算結果の輝度分布が波打つ現象が報告されていたが、距離の近い要素間での光束伝達の比率を計算する際に、要素を再分割する手法を提案した。計算結果を模型実験と比較し、解が滑らかになるとともに精度も向上することを示した。

さらに、実建物空間を対象とした予測計算と測定との比較により、艶のある建材からの反射による局所的な輝度分布を再現できることを示した。

本研究の成果を総括すると、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を実用化するための課題を解決し、実用性を向上させることとなる。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、建物建設前の計画段階における建材の見え方、採光の影響、艶のある建材からの反射光のまぶしさの検討等を行う上で非常に有益であると評価できる。また、光環境予測のさらなる高精度化として、分光反射指向特性の測定の簡易化と、そのデータを組み込んだ分光反射指向特性を反映した計算手法の構築が望まれることを指摘した。

以上のように、本論文は学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和4年7月28日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。