

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

平成元年12月

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

平成元年12月

上谷 芳昭

目次

第1章 序論	1
1. 1 研究目的	
1. 2 本論文の構成	
第2章 完全拡散でない面内の相互反射の計算法	6
2. 1 序	
2. 2 完全拡散でない面内の相互反射に関する従来の研究	
2. 3 反射指向特性を表わす量	
2. 3. 1 反射特性関数	
2. 3. 2 その他の反射指向特性を表わす量	
2. 4 相互反射基本式	
2. 4. 1 完全拡散面内の相互反射基本式	
2. 4. 2 完全拡散でない面内の相互反射基本式	
2. 4. 3 拡散反射と正反射を合わせ持つ面内の相互反射基本式	
2. 5 光束伝達相互反射式	
2. 5. 1 完全拡散面内の光束伝達相互反射式	
2. 5. 2 完全拡散でない面内の光束伝達相互反射式	
2. 5. 3 拡散反射と正反射を合わせ持つ面内の光束伝達相互反射式	
2. 6 結	
第3章 建築材料の反射指向特性の測定	35
3. 1 序	
3. 2 反射指向特性に関する従来の研究	
3. 3 反射指向特性の測定	
3. 3. 1 反射特性関数	

3.3.2	偏光を用いた表皮反射、層内反射の分離	
3.3.3	測定装置	
3.3.4	測定手順	
3.3.5	参考測定	
3.3.5.1	正反射率測定装置と測定手順	
3.3.5.2	色彩色差計による測定	
3.3.6	試料	
3.4	測定結果と考察	
3.4.1	入射面内の測定結果と考察	
3.4.2	入射面外の測定結果と考察	
3.5	反射指向特性の分類	
3.6	結	
第4章	反射指向特性の数式モデル化	59
4.1	序	
4.2	表皮反射のモデル化	
4.2.1	正反射性小素面の理論に基づく反射モデル	
4.2.2	マスキングの理論に基づく反射モデル	
4.3	層内反射のモデル化	
4.4	実測値による反射モデルの推定	
4.4.1	係数および小素面の分布関数の推定	
4.4.2	表皮反射の反射特性関数	
4.4.3	層内反射の反射特性関数	
4.5	結	

第5章 完全拡散でない面内の相互反射の数値計算法	79
5.1 序	
5.2 完全拡散面を持つ矩形室の相互反射の性状	
5.2.1 完全拡散面内の光束伝達数値解法	
5.2.2 計算条件と計算結果	
5.2.3 考察	
5.3 準完全拡散反射および正反射を合わせ持つ面を持つ矩形室の相互反射の性状	
5.3.1 準完全拡散反射および正反射を合わせ持つ面内の光束伝達数値解法	
5.3.2 計算条件と計算結果	
5.3.3 考察	
5.4 拡散反射面を持つ矩形室の相互反射の性状	
5.4.1 拡散反射面内の光束伝達数値解法	
5.4.2 計算条件と計算結果	
5.4.3 考察	
5.5 拡散反射面内の光束伝達簡易解法	
5.5.1 簡易計算法	
5.5.2 計算条件と計算結果	
5.5.3 考察	
5.6 結	
第6章 総括	110
付録 平均面と正反射性小素面の角度関係	112
関連発表論文	115
謝辞	116

第1章 序論

1. 1 研究目的

照明設計の目的は、建築の内部あるいは外部の空間に、その用途にふさわしい光環境、すなわち、作業をする場においては、疲労をとまなうことなく視対象がよく見える光環境を、また休息の場においては、不快感を生じさせず、雰囲気の良い光環境を作り上げることである。

照明設計の基本的な方針は、図1.1.1のように3つの段階に大別される。まず<計画>の段階で、光源・室形状・仕上げなどの建築計画・照明計画を作成する。次に<予測>の段階では、<計画>の結果を基に照度、輝度などの物理量を計算する。最後に<評価>の段階では、<予測>で計算された物理量を、生理・心理学的に用途ごとに定められた照明設計の目標値により評価する。そして目標が満たされるまで、<計画>の修正、<予測>、<評価>を繰り返す。[1]

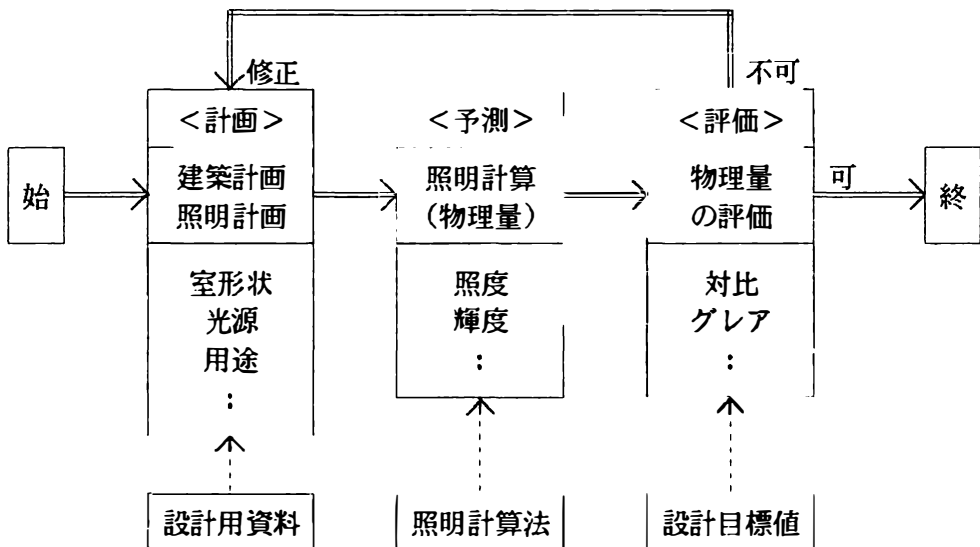


図1.1.1 照明設計の方針

人が視覚によって物体表面の明るさを知覚するのは、物理量でいえば物体表面の輝度によってであり、照度によるのではない。しかし、従来、照明設計において照明環境の予測は主として照度に基づいてなされてきた。すなわち、まず空間の構成面の反射指向特性を完全拡散性かあるいは完全拡散反射と正反射を併せもつと仮定して、空間の照度分布を求める。そして、完全拡散反射の仮定の下に照度を拡散反射率によって輝度に変換するのである。そのような場合は、本来は指向性を持つ物理量である輝度が指向性を持たない光束発散度と等価なものとして扱われ、ある点の輝度はあらゆる方向で一定となる。これは、指向性を持つ輝度を十分に精度よく予測することが照度を予測することに比べて膨大な計算を行わねばならず、計算機が今日のように発達していなかった時代には困難であったためである。

一方、照明環境の評価に関しては、従来から輝度に基づいた研究が多くなされてきた。それは、これらの研究が、ある輝度分布を持つ視野を被験者に提示してそれを評価させるという評価実験によることが多いためである。しかし、設計目標そのものは、照明計算による指向性輝度の予測が困難であったので、輝度を照度に変換した形で設定されることが多かった。すなわち、物体表面の輝度はその照度と拡散反射率に比例すると仮定され、目標値とされるべき輝度を拡散反射率で除すことで照度の目標値とするのである。実際の建築空間における仕上げ材料表面の反射指向特性は完全拡散性でも正反射性でもなくその中間の反射指向特性（拡散反射性）を持つことが多いため、これらの表面上のある点の輝度は一般に方向によって異なる指向性を持つ。これを指向性を持たないと仮定することは照明環境の評価の精度を、ひいては照明設計全体の精度を損なう危険がある。

近年、事務所のOA化が進むなど視環境がますます複雑化し、また計算機の技術が急速に進歩する中で、必要照度を確保することに重点をおく従来の「量の照明」に加えて、いわゆる「質の照明」が要求されている。「質の照明」とは、視対象の輝度対比を確保したり不快グレアを除去するなど、視野内の輝度分布を適

切に調整した照明のことである。[2] それにともなって照明環境の評価手法に、従来の照度に基づくものに加えて、輝度そのものに基づくものが導入されつつある。

しかし、評価されるべき照明環境の輝度の予測技術、すなわち照明計算法は、輝度が指向性を持つ物理量であるにも関わらず、依然として指向性を持たない物理量の照度に基づく従来の手法が用いられている。コンピュータグラフィックスの分野で、空間から視点の方向への指向性輝度分布を、予め空間の照度分布を完全拡散の仮定の下に計算した後に、面の反射指向特性の簡易モデルを用いたレイトレーシングにより求める輝度計算法が開発されている。[3] しかし、この方法も照度が介在するため、得られる指向性輝度分布は、いわゆるリアリティはあっても実際とは異なるだろう。つまり意匠などの検討のためのバースを描くためには有用であろうが、照明環境の定量的な評価に適用することは難しいと思われる。

輝度に基づく照明環境の予測および評価の観点から、空間の指向性輝度分布を求めることは次に示す二つの理由で重要である。一つは、直接光源および間接光源として視対象を照明する空間の指向性輝度分布と視対象の反射指向特性によって、机上の紙面なりVDTなりの視対象の視点方向の輝度が得られるため、空間の指向性輝度分布が視対象の見え方に影響するためである。[2] もう一つは、空間から視点の方向への指向性輝度分布は視野の輝度分布であるので、視対象の見え方を評価する上で重要な順応輝度に直接的に影響し、また照明環境の雰囲気の評価にも影響するためである。

本研究の目的は、実際の建築材料の反射指向特性を実験的に把握して相互反射計算に組み込むための数式モデルを構成し、完全拡散でない面内の反射指向特性を考慮した相互反射計算法に反射モデルを組み込むことによって空間の指向性輝度分布を詳細に予測することである。これによって、輝度に基づく評価手法が導入されつつある照明設計法に、輝度に基づく予測手法を導入することができ、照明設計全体としての精度を向上させることが可能となる。

1. 2 本論文の構成

第1章において、照明設計法の概要を述べ、従来の照明計算法の問題点を考察し、本研究の照明設計における位置づけおよび研究目的について述べている。

第2章では、本研究の理論的根拠となる基本式を展開している。まず、反射特性関数を用いて反射指向特性を表現している。次に、輝度を未知数とする完全拡散でない面内の相互反射の基本式を導入し、それを用いて完全拡散でない面内の光束伝達相互反射式を導いている。

第3章は、反射指向特性モデルを構成するための基礎資料を得ることを目的としている。実際の室内空間の内表面の反射指向特性を把握するため、各種建築材料を、偏光を用いた表皮反射・層内反射分離変角測光法により測定している。次に、測定結果を表皮反射・層内反射別に分類することで、反射指向特性の総合的な性状を明らかにしている。

第4章では、完全拡散でない面内の相互反射の計算法に実際の反射指向特性を組み込むための数式モデルを構成している。まず、正反射性小素面の理論およびマスキングの概念を導入し、表皮反射のモデルを反射特性関数を用いて構成している。次に、層内反射比によって層内反射の反射指向特性のモデルを反射特性関数を用いて構成している。さらに、測定値を用いて、反射モデルを推定している。

第5章では、反射指向特性の数式モデルを完全拡散でない面内の光束伝達法に組み込み、拡散反射面を持つ矩形室内の指向性輝度分布の性状を数値実験により明らかにしている。数値実験の結果を、従来の近似的手法すなわち照度を求めた後に完全拡散反射の仮定によって輝度に変換する方法による結果と比較している。また、拡散反射面を持つ面内の指向性輝度分布を十分な精度で求めることのできる簡易計算法を開発し、精算に比べて計算時間を大きく削減できることを示している。

第6章では、本研究を総括し、今後の展望について述べている。

参考文献

- [1] 松浦邦男：建築照明，共立出版，p.2，(1971).
- [2] I. Lewin (Chairman)：RQQ Report No.5 — The Predetermination of Contrast Rendition Factors for the Calculation of Equivalent Sphere Illumination, Journal of the Illuminating Engineering Society, pp.149-166, (1973).
- [3] 山崎 均；山下一彦：レイ・トレーシング法を用いた室内の表示，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.223-224，(1989).

第2章 完全拡散でない面内の相互反射の計算法

2.1 序

人が物を見る場合に、人の目に入ってくるのは、光源を出てから直接的に、あるいは空間内で何度か反射されて間接的に物の表面に入射し、人の目の方向に反射された光である。物の表面の明るさを表わす物理量は輝度であるが、従来は計算・実測の容易な照度が照明設計に使われることが多かった。近年は、「質の照明」が求められており、輝度に基づく照明設計が行われるようになりつつある。しかし、指向性輝度分布に大きく影響する物の表面の反射指向特性は、完全拡散性（均等拡散性ともいう）と仮定されるか、考慮されたとしても視対象のみであり、視対象を照明する間接光源として、あるいは背景として視環境に大きく影響する室内表面の輝度分布は、完全拡散反射の仮定の下に計算されているのが現状である。従来の完全拡散でない面内の相互反射の研究は、次節で述べるように、ほとんどが照度を求めることを目的としており、指向性輝度分布の計算に適用することは難しい。

本章では、完全拡散でない面内の相互反射を解いて指向性輝度分布を求めることを目的としている本研究の理論的根拠を述べている。まず、反射指向特性を反射特性関数を用いて表わし、それを用いて完全拡散でない面内の相互反射基本式を示す。さらに、基本式を用いて以降の数値実験で用いる光束伝達相互反射式を導く。

2. 2 完全拡散でない面内の相互反射に関する従来の研究

完全拡散でない面内の相互反射の研究は、1960年頃より放射伝達の問題として始まっている。

EckertとSparrowは、2鏡面間の相互反射を虚像法で解いている[1]。また、BevansとEdwardsは、鏡面反射を1回行なった後は完全拡散反射をするものとして近似し[2]、SarofimとHottelは、完全拡散反射と鏡面反射の和で近似した[3]。ToorとViskantaは、反射指向特性を確率密度関数で表わし、モンテカルロ法を適用した[4]。

中村は、2次元の場合の非完全拡散面の解析法を示した[5]。また松本らは、2次元の場合の非完全拡散面の数値計算を行なっている[6]。

放射伝達の分野での研究と前後して、照明の分野でも研究が始まっている。

O'BrienとBobcoは、2壁面が鏡面の直方体室の相互反射を扱っている[7]。また、O'Brienは、反射指向特性を鏡面反射と完全拡散反射の和で近似した[8][9][10]。

松浦は、完全拡散でない面内の相互反射式[11]および入射角を考慮した正反射と準完全拡散反射を含めた相互反射式を導き[12]、2次元の場合[13]および3次元の場合[14]について照度計算を行なった。飯塚らは、1壁面が完全拡散反射成分と正反射成分を有する場合の照度計算を行なった[15]。磯村らは、同様の場合について模型実験を行ない[16][17]、近似計算法を提案している[18][19]。

以上の完全拡散でない面内の研究は、おもに未知数として照度を用いたものであるが、未知数として輝度を用いた場合は未知数の数が膨大になるため、これまで数値実験的にも模型実験的にも研究された例はなく、松浦が輝度を未知数とする完全拡散でない面内の相互反射式を導いたのみである[11]。

近年発達したコンピュータ・グラフィックスの分野でも、リアリティを得るために反射指向特性を取り扱っている。

この分野では、一般に計算コストが重要視されるので、アルゴリズムの研究が盛んである[20]。反射の理論は光学の分野[21][22]から導入し、近似を行なって計算に組み込んでいる[23][24][25]。

2.3 反射指向特性を表わす量

2.3.1 反射特性関数

反射指向特性は、反射特性関数 ρ で表わす。前田は、反射特性関数を「入射光の強さが $\delta(\phi_i)\delta(\theta_i)$ で表される場合の反射光の強さ」と定義している[26]。ここで、光の強さとは前田の定義した概念で、光束の立体角および面積密度である[27]。しかし、光の強さは一般の測光量には定義されていないので、以下では光の強さおよび反射特性関数を輝度を用いて定義する。

図2.3.1に示すように、微小面 dS 上の点 P に、 (θ_i, ϕ_i) の方向から、微小立体角 $d\Omega_i$ 内に光束 $d^2\Phi_i$ が入射するものとする。 P 点の入射光の点光度（入射光束の立体角密度）は、

$$dJ_{Pi} = d^2\Phi_i / d\Omega_i \quad [\text{cd}] \quad (2.3.1)$$

受光点密度は $1/dS [1/\text{m}^2]$ で表わされるので、面 dS の入射光の強さ（入射光束の立体角および面積密度）

$J_{Pi}(\theta_i, \phi_i)$ は、

$$J_{Pi}(\theta_i, \phi_i) = dJ_{Pi} / dS = d^2\Phi_i / dS d\Omega_i \quad [\text{cd}/\text{m}^2] \quad (2.3.2)$$

入射光の強さ $J_{Pi}(\theta_i, \phi_i)$ と P 点の照度 $dE_P(\theta_i, \phi_i)$ とは、次の関係にある。

$$J_{Pi}(\theta_i, \phi_i) = dE_P(\theta_i, \phi_i) / d\Omega_i \quad (2.3.3)$$

入射光が平行光の場合は、ディラックのデルタ関数を用いて、 P 点の点光度は、

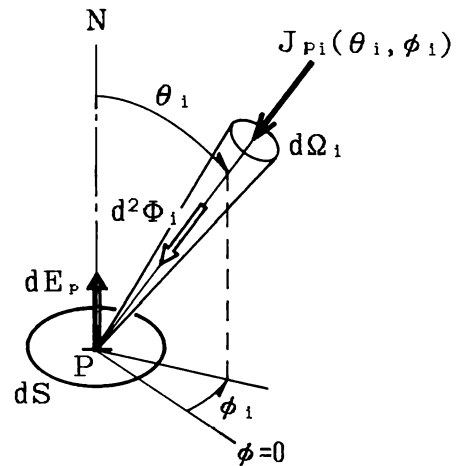


図2.3.1 入射光の強さ

$$dJ_{Pi} = d\Phi_i \delta(\theta_i - \theta) \delta(\phi_i - \phi) / \sin\theta_i \quad (2.3.4)$$

面 dS の入射光の強さ $J_{Pi}(\theta_i, \phi_i)$ は、

$$\begin{aligned} J_{Pi}(\theta_i, \phi_i) &= dJ_{Pi} / dS \\ &= d\Phi_i \delta(\theta_i - \theta) \delta(\phi_i - \phi) / dS \sin\theta_i \end{aligned} \quad (2.3.5)$$

で表わされる[28]。平行な入射光の強さ $J_{Pi}(\theta_i, \phi_i)$ と照度 $E_P(\theta_i, \phi_i)$ とは、

$$J_{Pi}(\theta_i, \phi_i) = E_P(\theta_i, \phi_i) \delta(\theta_i - \theta) \delta(\phi_i - \phi) / \sin\theta_i \quad (2.3.6)$$

あるいは、

$$E_P(\theta_i, \phi_i) = \int_{2\pi} J_{Pi}(\theta_i, \phi_i) d\Omega_i \quad [\text{lx}] \quad (2.3.7)$$

の関係にある。

面が拡散反射をする場合の反射光の強さ（反射光の光度の面積密度）

$$J_{PoD}(\theta_i, \phi_i; \theta_o, \phi_o)$$

は、入射光の強さ

$$J_{Pi}(\theta_i, \phi_i)$$

定義すれば、図2.3.2

を参照して、

$$J_{PoD}(\theta_i, \phi_i; \theta_o, \phi_o) = d^2\Phi_o / dS d\Omega_o \quad (2.3.8)$$

このとき、反射光の輝度は、

$$L_{Po}(\theta_i, \phi_i; \theta_o, \phi_o) = d^2\Phi_o / dS \cos\theta_o d\Omega_o \quad [\text{cd/m}^2] \quad (2.3.9)$$

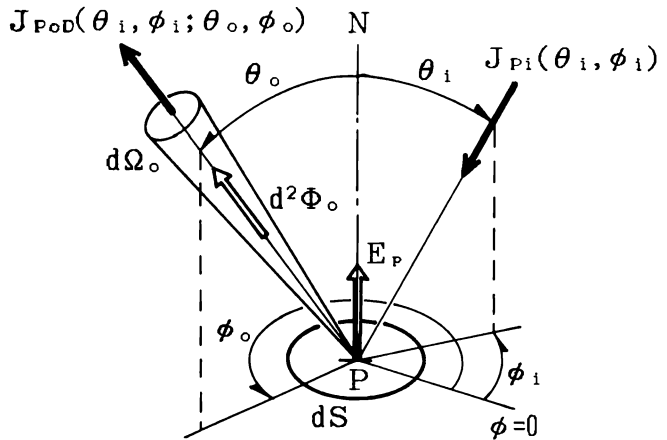


図2.3.2 反射光の強さ

であるから、反射光の強さを輝度で表わせば、

$$J_{PoD}(\theta_i, \phi_i; \theta_o, \phi_o) = L_{Po}(\theta_i, \phi_i; \theta_o, \phi_o) \cos \theta_o \quad (2.3.10)$$

となる。

以上から、拡散反射する場合の反射特性関数 $\rho_D(\theta_i, \phi_i; \theta_o, \phi_o)$ は、(2.3.7) 式と(2.3.10)式を用いて次式で定義される。

$$\begin{aligned} \rho_D(\theta_i, \phi_i; \theta_o, \phi_o) &= \frac{J_{PoD}(\theta_i, \phi_i; \theta_o, \phi_o)}{\int_{2\pi} J_{Pi}(\theta_i, \phi_i) d\Omega_i} \\ &= \frac{L_{Po}(\theta_i, \phi_i; \theta_o, \phi_o) \cos \theta_o}{E_P(\theta_i, \phi_i)} \quad [1/\text{sr}] \quad (2.3.11) \end{aligned}$$

面が正反射をする場合の反射光の強さ $J_{Pos}(\theta_i, \phi_i; \theta_o, \phi_o)$ は以下のように求められる。(θ_i, ϕ_i) の方向から $J_{Pi}(\theta_i, \phi_i)$ の強さの平行光がP点に入射し、照度 $E_P(\theta_i, \phi_i)$ を与えるとする。反射光は $(\theta_o, \phi_o) = (\theta_i, \phi_i + \pi)$ の方向に平行光で反射される。正反射率を $R_s(\theta_o, \phi_o)$ とすると、反射光束は

$$d\Phi_o = R_s(\theta_i, \phi_i) E_P(\theta_i, \phi_i) dS \quad [\text{lm}] \quad (2.3.12)$$

となるので、反射光の強さ $J_{Pos}(\theta_i, \phi_i; \theta_o, \phi_o)$ は、

$$\begin{aligned} J_{Pos}(\theta_i, \phi_i; \theta_o, \phi_o) &= d\Phi_o \delta(\theta_o - \theta) \delta(\phi_o - \phi) / dS \sin \theta_o \\ &= R_s(\theta_i, \phi_i) E_P(\theta_i, \phi_i) \\ &\quad \times \delta(\theta_i - \theta_o) \delta(\phi_i + \pi - \phi_o) / \sin \theta_i \quad (2.3.13) \end{aligned}$$

よって、正反射する場合の反射特性関数 $\rho_s(\theta_i, \phi_i; \theta_o, \phi_o)$ は、(2.3.7)式と(2.3.13)式を用いて次式で定義される。

$$\begin{aligned} \rho_s(\theta_i, \phi_i; \theta_o, \phi_o) &= \frac{J_{PoS}(\theta_i, \phi_i; \theta_o, \phi_o)}{\int_{2\pi} J_{Pi}(\theta_i, \phi_i) d\Omega_i} \\ &= R_s(\theta_i, \phi_i) \delta(\theta_i - \theta_o) \delta(\phi_i + \pi - \phi_o) / \sin \theta_i \end{aligned}$$

[1/sr] (2.3.14)

拡散反射と正反射を合わせ持つ面の反射特性関数 $\rho(\theta_i, \phi_i; \theta_o, \phi_o)$ は、

$$\rho(\theta_i, \phi_i; \theta_o, \phi_o) = \rho_D(\theta_i, \phi_i; \theta_o, \phi_o) + \rho_s(\theta_i, \phi_i; \theta_o, \phi_o)$$

[1/sr] (2.3.15)

(2.3.11)式と(2.3.14)式を用いれば、

$$\begin{aligned} \rho(\theta_i, \phi_i; \theta_o, \phi_o) &= \frac{L_{Po}(\theta_i, \phi_i; \theta_o, \phi_o) \cos \theta_o}{E_p(\theta_i, \phi_i)} \\ &\quad + R_s(\theta_i, \phi_i) \delta(\theta_i - \theta_o) \delta(\phi_i + \pi - \phi_o) / \sin \theta_i \end{aligned}$$

[1/sr] (2.3.16)

以上のように、反射特性関数は「平行光で与えた照度と、反射光の光度の面積密度の比」あるいは「平行光で与えた照度と、反射光の輝度と反射角の余弦の積の比」と定義することができる。

2. 3. 2 その他の反射指向特性を表わす量

面の反射指向特性を表わす量には反射特性関数 ρ の他に、以下のものがある。

(i) luminance factor (輝度率) β_v [29]

$$\beta_v(\theta_o, \phi_o) = \frac{L(\theta_o, \phi_o)}{L_u} \quad [-] \quad (2.3.17)$$

ここに、 $L(\theta_o, \phi_o)$ は面の (θ_o, ϕ_o) 方向の輝度で、 L_u は同じ照明/受光条件における反射率1の完全拡散面の輝度である。

(ii) luminance coefficient (輝度係数) q_v [30]

$$q_v(\theta_o, \phi_o) = \frac{L(\theta_o, \phi_o)}{E} \quad [1/\text{sr}] \quad (2.3.18)$$

ここに、 $L(\theta_o, \phi_o)$ は、面の (θ_o, ϕ_o) 方向の輝度で、 E はそのときの面の照度である。

(iii) bi-directional reflectance distribution function (BRDF) f_r [31]

$$\begin{aligned} f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_o, \phi_o) &= \frac{dL_r(\theta_i, \phi_i; \theta_o, \phi_o)}{dE_i(\theta_i, \phi_i)} \\ &= \frac{dL_r(\theta_i, \phi_i; \theta_o, \phi_o)}{L_i(\theta_i, \phi_i)d\Omega \cos \theta_i} \quad [1/\text{sr}] \quad (2.3.19) \end{aligned}$$

ここに、 $dL_r(\theta_i, \phi_i; \theta_o, \phi_o)$ は (θ_i, ϕ_i) の方向から微小立体角 $d\Omega$ で面を照明した場合の (θ_o, ϕ_o) 方向の輝度で、 $dE_i(\theta_i, \phi_i)$ はそのときの面の照度、また $L_i(\theta_i, \phi_i)$ は入射輝度である。

β_v 、 q_v の入射光は拡散光でも平行光でもよく、 f_r の入射光は ρ と同様平行光である。入射光が (θ_i, ϕ_i) の方向からの平行光の場合は、 β_v 、 q_v は次式のように表わされる。

$$\beta_v(\theta_i, \phi_i; \theta_o, \phi_o) = \frac{L(\theta_i, \phi_i; \theta_o, \phi_o)}{L_u(\theta_i, \phi_i)} \quad [-] \quad (2.3.20)$$

$$q_v(\theta_i, \phi_i; \theta_o, \phi_o) = \frac{L(\theta_i, \phi_i; \theta_o, \phi_o)}{E(\theta_i, \phi_i)} \quad [1/\text{sr}] \quad (2.3.21)$$

このとき、これらの量は反射特性関数と以下の関係にある。

$$\begin{aligned} \rho(\theta_i, \phi_i; \theta_o, \phi_o) &= f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_o, \phi_o) \cos \theta_o \\ &= q_v(\theta_i, \phi_i; \theta_o, \phi_o) \cos \theta_o \\ &= \{ \beta_v(\theta_i, \phi_i; \theta_o, \phi_o) / \pi \} \cos \theta_o. \end{aligned} \quad (2.3.22)$$

反射特性関数は、輝度係数になれば光度係数 (coefficient of luminous intensity あるいは luminous intensity coefficient) [29]と呼ぶことができる。

2. 4 相互反射基本式

2. 4. 1 完全拡散面内の相互反射基本式

次節に示す完全拡散でない面内の相互反射基本式との比較のため、完全拡散面内の相互反射基本式を示す。

完全拡散面 S 上の互いに向き合った任意の2点を x 、 x' とし、 x の全照度を $E(x)$ 、直接照度を $E_d(x)$ 、反射率を $R(x)$ 、 x を含む微小面積を $dS(x)$ とすれば、相互反射の基礎式は、全照度 $E(x)$ を未知関数とするフレドホルム型第2種積分方程式で表わされる。(図2.4.1参照)

$$E(x) = E_d(x) + \int_S R(x') e_o(x', x) E(x') dS(x') \quad (2.4.1)$$

$e_o(x', x)$ は x' より x への固有照度係数で、

$$e_o(x', x) = \frac{\cos \alpha \cos \beta}{\pi r^2} \quad (2.4.2)$$

ただし、 α 、 β は x と x' を結ぶ線と x 、 x' に立てた法線のなす角、 r は x 、 x' の距離である。

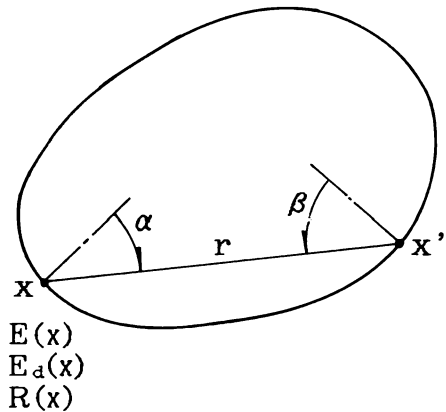


図2.4.1 完全拡散面

この積分方程式を解析的に解くことは一般に困難であり、通常は適当な近似を行なって多元連立方程式に離散化し数値的に解く。[32][33] 一般に、室内空間は滑らかでなく、隅角部では照度分布が特異となるため、離散化に際して特別の工夫が必要である。[34]

2.4.2 完全拡散でない面内の相互反射基本式

松浦は、正反射成分を含む反射特性関数を用いて完全拡散でない面内の相互反射の基本式を導いた。[11] 本節では、完全拡散でない面内の相互反射基本式を示し、次節において、反射特性関数が正反射成分を含む場合の基本式を示す。

図2.4.2において、 $L(x, x'')$ 、 $L_a(x, x'')$ 、 $L_r(x, x'')$ をそれぞれ x の (x, x'') 方向の全輝度、初輝度および反射輝度とすると、

$$L(x, x'') = L_a(x, x'') + L_r(x, x'') \quad (2.4.3)$$

ここで、初輝度とは面自身が光源である場合の光源の輝度である。

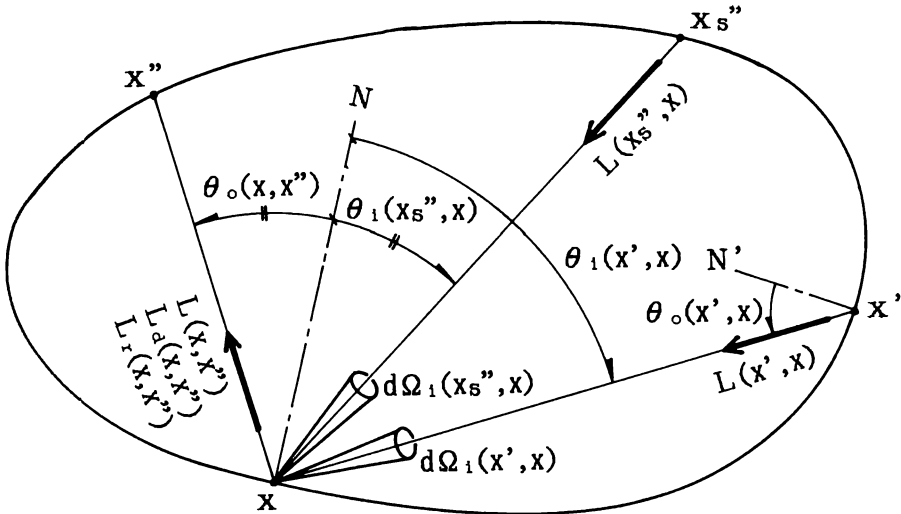


図2.4.2 完全拡散でない面

半空間(2π [sr]) から x への入射光による (x, x'') 方向への反射輝度 $L_r(x, x'')$ は次のように導ける。

x' から (x', x) 方向への全輝度 $L(x', x)$ によって生じる x の照度を $dE_i(x', x)$ とすると、

$$dE_i(x', x) = L(x', x) \cos \theta_i(x', x) d\Omega_i(x', x) \quad (2.4.4)$$

$dE_i(x', x)$ によって生じる x の (x, x'') 方向の反射光の輝度を $dL_r(x', x; x, x'')$ とすると、反射光の強さは $dL_r(x', x; x, x'') \cos \theta_o(x, x'')$ で表わされるので、反射特性関数 $\rho(x', x; x, x'')$ は、

$$\rho(x', x; x, x'') = \frac{dL_r(x', x; x, x'')}{dE_i(x', x)} \cos \theta_o(x, x'') \quad (2.4.5)$$

(2.4.5)式を変形し、(2.4.4)式を代入すれば、

$$dL_r(x', x; x, x'') = \rho(x', x; x, x'') L(x', x) \frac{\cos \theta_i(x', x)}{\cos \theta_o(x, x'')} d\Omega_i(x', x) \quad (2.4.6)$$

(2.4.6)式を半空間(2π [sr])にわたって積分すれば、

$$L_r(x, x'') = \int_{2\pi} \rho(x', x; x, x'') L(x', x) \frac{\cos \theta_i(x', x)}{\cos \theta_o(x, x'')} d\Omega_i(x', x) \quad (2.4.7)$$

(2.4.3)式に代入すれば、全輝度 $L(x, x'')$ を未知関数とする相互反射積分方程式は次式で表わされる。

$$L(x, x'') = L_a(x, x'') + \int_{2\pi} \rho(x', x; x, x'') L(x', x) \frac{\cos \theta_i(x', x)}{\cos \theta_o(x, x'')} d\Omega_i(x', x) \quad (2.4.8)$$

あるいは、 $d\Omega_i(x', x) = dS(x') \cos \theta_o(x', x) / \{r(x', x)\}^2$ の関係を用いれば、 x' と x の固有照度係数 $e_o(x', x)$ を用いて、

$$L(x, x'') = L_a(x, x'') + \int_s \frac{\rho(x', x; x, x'')}{\cos \theta_o(x, x'')} \pi e_o(x', x) L(x', x) dS(x') \quad (2.4.9)$$

2. 4. 3 拡散反射と正反射を合わせ持つ面内の相互反射基本式

空間の内表面が拡散反射と正反射を合わせ持つ場合も、(2.4.8)式あるいは(2.4.9)式の相互反射積分方程式は形式的には成立する。しかし、実際の数値計算をする場合は特異な正反射成分を別に扱うことになるので、以下では正反射成分を分離した基本式を示す。[11]

反射特性関数 ρ が拡散反射成分 ρ_D と正反射成分 ρ_S からなるとき、(2.4.7)式は

$$L_r(x, x'') = \int_{2\pi} \rho_D(x', x; x, x'') L(x', x) \frac{\cos \theta_i(x', x)}{\cos \theta_o(x, x'')} d\Omega_i(x', x) \\ + \int_{2\pi} \rho_S(x', x; x, x'') L(x', x) \frac{\cos \theta_i(x', x)}{\cos \theta_o(x, x'')} d\Omega_i(x', x) \quad (2.4.10)$$

右辺の第1項は半空間(2π)から x への入射光による (x, x'') 方向への拡散反射光の輝度であり、第2項は x_S'' から x への全輝度 $L(x_S'', x)$ による (x, x'') 方向への正反射光の輝度である。(図2.4.2参照) 第2項に(2.3.14)式を代入すれば、 $\theta_i(x', x) = \theta_o(x, x'')$ であるので、

$$\begin{aligned} (\text{第2項}) &= \int_{2\pi} R_S(x', x) \delta\{\theta_i(x', x) - \theta_o(x, x'')\} \\ &\quad \times \delta\{\phi_i(x', x) + \pi - \phi_o(x, x'')\} \{1/\sin \theta_i(x', x)\} \\ &\quad \times L(x', x) d\Omega_i(x', x) \\ &= \int_{\phi_i} \int_{\theta_i} R_S(x', x) \delta\{\theta_i(x', x) - \theta_o(x, x'')\} \\ &\quad \times \delta\{\phi_i(x', x) + \pi - \phi_o(x, x'')\} L(x', x) d\theta_i(x', x) d\phi_i(x', x) \\ &= R_S(x_S'', x) L(x_S'', x) \end{aligned} \quad (2.4.11)$$

よって、正反射成分を含む反射特性関数を用いた相互反射積分方程式は、

$$\begin{aligned}
L(x, x'') &= L_d(x, x'') \\
&+ \int_{2\pi} \rho_D(x', x; x, x'') L(x', x) \frac{\cos \theta_i(x', x)}{\cos \theta_o(x, x'')} d\Omega_i(x', x) \\
&+ R_S(x_S'', x) L(x_S'', x)
\end{aligned} \tag{2.4.12}$$

あるいは、 x' と x の固有照度係数 $e_o(x', x)$ を用いて、

$$\begin{aligned}
L(x, x'') &= L_d(x, x'') + \int_S \frac{\rho_D(x', x; x, x'')}{\cos \theta_o(x, x'')} \pi e_o(x', x) L(x', x) dS(x') \\
&+ R_S(x_S'', x) L(x_S'', x)
\end{aligned} \tag{2.4.13}$$

2.5 光束伝達相互反射式

2.5.1 完全拡散面内の光束伝達相互反射式[35]

(a) 全光束を未知数とする場合

光束伝達法は、分割された要素に入射する光束を未知数とするため、要素の平均の照度あるいは輝度が得られるのみであるが、要素が滑らかであれば相互反射基本式の直接的数値解法における隅角部の処理[34]をする必要がなく、また非整形の空間への応用が容易である。[36]

図2.5.1に示す完全拡散反射の閉じた面内の全内表面積 S を N 個に分割すれば、(2.4.1)式は

$$E(x) = E_d(x) + \sum_{J=1}^N \int_{S_J} R(x') e_o(x', x) E(x') dS(x') \quad (2.5.1)$$

(2.5.1)式を分割面 S_I について積分すれば、

$$\begin{aligned} \int_{S_I} E(x) dS(x) &= \int_{S_I} E_d(x) dS(x) \\ &+ \sum_{J=1}^N \int_{S_I} \int_{S_J} R(x') e_o(x', x) E(x') dS(x') dS(x) \end{aligned} \quad (2.5.2)$$

左辺および右辺第1項はそれぞれ分割面 S_I に入射する全光束 Φ_{iI} および直接光束 Φ_{idI} である。ここで、分割面 S_J で全照度 $E(x')$ と反射率 $R(x')$ を一定と仮定する。 S_J の反射率を R_J とすると(2.5.2)式は、

$$\Phi_{iI} = \Phi_{idI} + \sum_{J=1}^N R_J f_{JI} \Phi_{iJ} \quad (2.5.3)$$

ここに、 f_{JI} は固有光束分布係数（形態係数）で次式で表わされる。

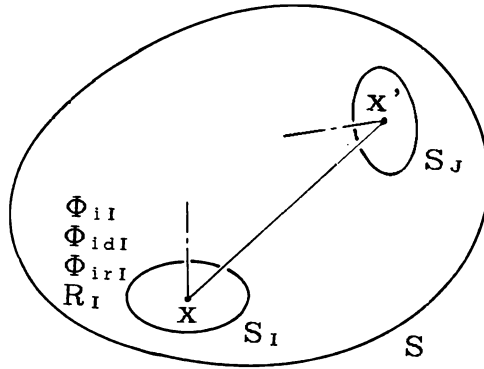


図 2.5.1 完全拡散面内の光束伝達

$$f_{JI} = \frac{1}{S_J} \int_{S_I} \int_{S_J} e_o(x', x) dS(x') dS(x) \quad (2.5.4)$$

ただし、 $e_o(x', x)$ は固有照度係数。

(b) 間接光束を未知数とする場合

x の間接照度を $E_r(x)$ とすれば、

$$E(x) = E_d(x) + E_r(x) \quad (2.5.5)$$

(2.5.5)式を(2.4.1)式に代入すれば、[37]

$$E_r(x) = E_{r1}(x) + \int_S R(x') e_o(x', x) E_r(x') dS(x') \quad (2.5.6)$$

ただし、 $E_{r1}(x)$ は第1回反射光による照度であり、

$$E_{r1}(x) = \int_S R(x') e_o(x', x) E_d(x') dS(x') \quad (2.5.7)$$

全内表面積 S を N 個に分割し、(2.5.6)式を分割面 S_I について積分すれば、

$$\int_{S_I} E_r(x) dS(x) = \int_{S_I} E_{r1}(x) dS(x) + \sum_{J=1}^N \int_{S_I} \int_{S_J} R(x') e_o(x', x) E_r(x') dS(x') dS(x) \quad (2.5.8)$$

左辺および右辺第1項はそれぞれ分割面 S_I に入射する間接光束 Φ_{irI} および第1回反射光束 Φ_{ir1I} である。分割面 S_J で間接照度と反射率を一定と仮定すると、(2.5.8)式は、

$$\Phi_{irI} = \Phi_{ir1I} + \sum_{J=1}^N R_J f_{JI} \Phi_{irJ} \quad (2.5.9)$$

ただし、第1回反射光束 Φ_{ir1I} は、(2.5.7)式より、

$$\begin{aligned} \Phi_{ir1I} &= \int_{S_I} E_{r1}(x) dS(x) \\ &= \int_{S_I} \int_S R(x') e_o(x', x) E_d(x') dS(x') dS(x) \end{aligned} \quad (2.5.10)$$

一般に、直接照度は間接照度に比べて特異な分布をする事が多く、全照度の分布も特異になることが多い。従って、分割面 S_J で全照度 $E(x')$ を一定と仮定した(2.5.3)式よりも間接照度 $E_r(x')$ を一定と仮定する(2.5.9)式の方が精度がよい。

2. 5. 2 完全拡散でない面内の光束伝達相互反射式

(a) 全光束を未知数とする場合

図2.5.2に示す完全拡散でない閉じた面内の全内表面積 S を N 個に分割すれば、(2.4.9)式は、

$$L(x, x'') = L_d(x, x'') + \sum_{J=1}^N \int_{S_J} \frac{\rho(x', x; x, x'')}{\cos \theta_o(x, x'')} \pi e_o(x', x) L(x', x) dS(x') \quad (2.5.11)$$

(2.5.11)式の両辺に $\pi e_o(x, x'')$ をかけて分割面 S_I 、 S_K について積分すれば、

$$\begin{aligned} & \int_{S_K} \int_{S_I} \pi e_o(x, x'') L(x, x'') dS(x) dS(x'') \\ &= \int_{S_K} \int_{S_I} \pi e_o(x, x'') L_d(x, x'') dS(x) dS(x'') \\ &+ \sum_{J=1}^N \int_{S_K} \int_{S_I} \int_{S_J} \frac{\rho(x', x; x, x'')}{\cos \theta_o(x, x'')} \pi e_o(x', x) L(x', x) \\ &\times \pi e_o(x, x'') dS(x') dS(x) dS(x'') \quad (2.5.12) \end{aligned}$$

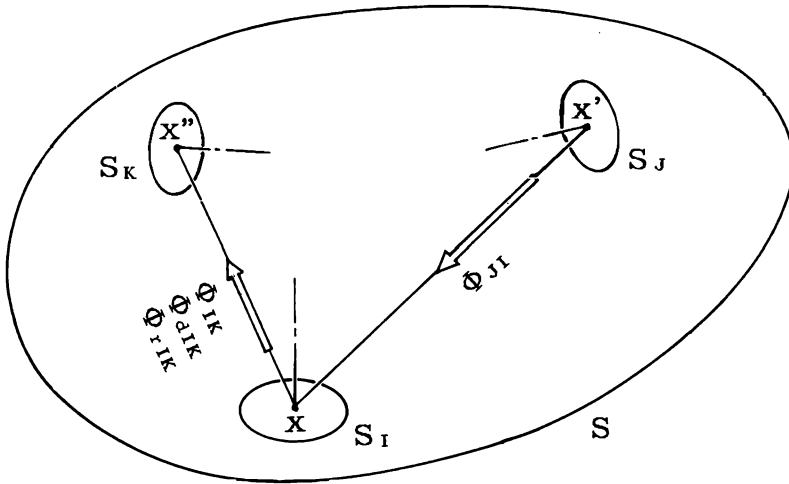


図2.5.2 完全拡散面でない面内の光束伝達

左辺および右辺第1項はそれぞれ分割面 S_I を発散して分割面 S_K に入射する全光束 Φ_{IK} および直接光束 Φ_{dIK} である。各分割面 S_J 、 S_I 間で全輝度が一定値 L_{JI} をとると仮定すると、(2.5.12)式は、

$$\begin{aligned} \Phi_{IK} &= \Phi_{dIK} \\ &+ \sum_{J=1}^N \pi L_{JI} \int_{S_K} \int_{S_I} \int_{S_J} \frac{\rho(x', x; x, x'')}{\cos \theta_o(x, x'')} e_o(x', x) \\ &\times \pi e_o(x, x'') dS(x') dS(x) dS(x'') \end{aligned} \quad (2.5.13)$$

固有光束分布係数 f_{JI} を用いて、

$$\begin{aligned} \Phi_{IK} &= \Phi_{dIK} \\ &+ \sum_{J=1}^N \pi L_{JI} f_{JI} S_J \frac{1}{f_{JI} S_J} \\ &\times \int_{S_K} \int_{S_I} \int_{S_J} \frac{\rho(x', x; x, x'')}{\cos \theta_o(x, x'')} e_o(x', x) \pi e_o(x, x'') dS(x') dS(x) dS(x'') \end{aligned} \quad (2.5.14)$$

分割面 S_J を発散して分割面 S_I に入射する全光束 $\pi L_{JI} f_{JI} S_J$ を Φ_{JI} とすれば、全光束を未知数とする光束伝達相互反射式は、

$$\Phi_{IK} = \Phi_{dIK} + \sum_{J=1}^N F_{JIK} \Phi_{JI} \quad (2.5.15)$$

ただし、

$$\begin{aligned} F_{JIK} &= \frac{1}{f_{JI} S_J} \int_{S_K} \int_{S_I} \int_{S_J} \frac{\rho(x', x; x, x'')}{\cos \theta_o(x, x'')} \\ &\times e_o(x', x) \pi e_o(x, x'') dS(x') dS(x) dS(x'') \end{aligned} \quad (2.5.16)$$

係数 F_{JIK} は、 S_J を発散して 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である。

(b) 間接光束を未知数とする場合

(2.4.3)式を(2.4.9)式に代入すれば、

$$L_r(x, x'') = L_{r1}(x, x'') + \int_S \frac{\rho(x', x; x, x'')}{\cos \theta_o(x, x'')} \pi e_o(x', x) L_r(x', x) dS(x') \quad (2.5.17)$$

ただし、 $L_{r1}(x, x'')$ は第1回反射光の輝度であり、

$$L_{r1}(x, x'') = \int_S \frac{\rho(x', x; x, x'')}{\cos \theta_o(x, x'')} \pi e_o(x', x) L_d(x', x) dS(x') \quad (2.5.18)$$

全内表面積 S を N 個に分割し、(2.5.18)式の両辺に $\pi e_o(x, x'')$ をかけて分割面 S_I 、 S_K について積分すれば

$$\begin{aligned} & \int_{S_K} \int_{S_I} \pi e_o(x, x'') L_r(x, x'') dS(x) dS(x'') \\ &= \int_{S_K} \int_{S_I} \pi e_o(x, x'') L_{r1}(x, x'') dS(x) dS(x'') \\ &+ \sum_{J=1}^N \int_{S_K} \int_{S_I} \int_{S_J} \frac{\rho(x', x; x, x'')}{\cos \theta_o(x, x'')} \pi e_o(x', x) L_r(x', x) \\ &\times \pi e_o(x, x'') dS(x') dS(x) dS(x'') \end{aligned} \quad (2.5.19)$$

左辺および右辺第1項はそれぞれ分割面 S_I を発散して分割面 S_K に入射する間接光束 Φ_{rIK} および第1回反射光束 Φ_{r1IK} である。各分割面 S_J 、 S_I 間で反射輝度が一定と仮定すると、間接光束を未知数とする光束伝達相互反射式は、

$$\Phi_{rIK} = \Phi_{r1IK} + \sum_{J=1}^N F_{JIK} \Phi_{rJI} \quad (2.5.20)$$

ただし、第1回反射光束 Φ_{r1IK} は、(2.5.18)式より、

$$\begin{aligned} \Phi_{r1IK} &= \int_{S_K} \int_{S_I} \pi e_o(x, x'') L_{r1}(x, x'') dS(x) dS(x'') \\ &= \int_{S_K} \int_{S_I} \int_S \frac{\rho(x', x; x, x'')}{\cos \theta_o(x, x'')} \pi e_o(x', x) \pi e_o(x, x'') \\ &\quad \times L_d(x', x) dS(x') dS(x) dS(x'') \end{aligned} \quad (2.5.21)$$

全輝度の分布は反射輝度の分布に比べて特異になることが多いので、分割面 S_J 、 S_I 間で全輝度が一定と仮定する(2.5.15)式よりも反射輝度を一定と仮定する(2.5.20)式の方が精度がよい。

2. 5. 3 拡散反射と正反射を合わせ持つ面内の光束伝達相互反射式

反射特性関数 ρ が拡散反射成分 ρ_D と正反射成分 ρ_S からなるときは、係数 F も拡散反射成分 F_D と正反射成分 F_S に分離して、

$$F_{JIK} = F_{DJIK} + F_{SJIK} \quad (2.5.22)$$

$$F_{DJIK} = \frac{1}{f_{JI} S_J} \int_{S_K} \int_{S_I} \int_{S_J} \rho_D(x', x; x, x'') \cos \theta_o(x, x'') \times e_o(x', x) \pi e_o(x, x'') dS(x') dS(x) dS(x'') \quad (2.5.23)$$

$$F_{SJIK} = \frac{1}{f_{JI} S_J} \int_{S_K} \int_{S_I} \int_{S_J} \frac{\rho_S(x', x; x, x'')}{\cos \theta_o(x, x'')} \times e_o(x', x) \pi e_o(x, x'') dS(x') dS(x) dS(x'') \quad (2.5.24)$$

(2.5.24)式に(2.3.14)式を代入すれば、

$$\begin{aligned} F_{SJIK} &= \frac{1}{f_{JI} S_J} \int_{S_K} \int_{S_I} \int_{S_J} R_S\{\theta_i(x', x)\} \\ &\times \delta\{\theta_i(x', x) - \theta_o(x, x'')\} \delta\{\phi_i(x', x) + \pi - \phi_o(x, x'')\} \\ &\times \frac{e_o(x', x) \pi e_o(x, x'')}{\sin \theta_i(x', x) \cos \theta_o(x, x'')} dS(x') dS(x) dS(x'') \\ &= \frac{1}{f_{JI} S_J} \int_{S_K} \int_{S_I} D[x_S'', S_J] R_S\{\theta_i(x_S'', x)\} \\ &\times \frac{\cos \theta_i(x_S'', x)}{\cos \theta_o(x, x'')} e_o(x, x'') dS(x) dS(x'') \end{aligned} \quad (2.5.25)$$

ここに、 x_S'' は x'' の x に関する正反射像であり、 $D[x_S'', S_J]$ は x_S'' が S_J の内部にあることを判定する関数である。(図2.5.3参照)

$$\begin{aligned}
 D[x_s'', S_J] &= \int_{\Omega_J} \delta\{\theta_i(x', x) - \theta_o(x, x'')\} \delta\{\phi_i(x', x) + \pi - \phi_o(x, x'')\} \\
 &\times \frac{1}{\sin\theta_i(x', x)} d\Omega(x', x) \\
 &= \begin{cases} 1 & (x_s'' \in S_J) \\ 0 & (x_s'' \notin S_J) \end{cases} \quad (2.5.26)
 \end{aligned}$$

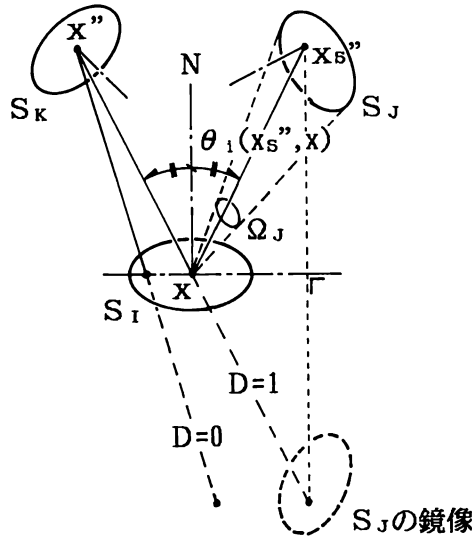


図2.5.3 正反射成分を含む面の光束伝達

係数の拡散反射成分 F_D と正反射成分 F_S を用いて、拡散反射と正反射を合わせ持つ面内の全光束を未知数とする光束伝達相互反射式は、(2.5.15)式に(2.5.22)式を代入して、

$$\Phi_{IK} = \Phi_{aIK} + \sum_{J=1}^N F_{DJIK} \Phi_{JI} + \sum_{J=1}^N F_{SJIK} \Phi_{JI} \quad (2.5.27)$$

また、間接光束を未知数とする光束伝達相互反射式は、(2.5.20)式に(2.5.22)式を代入して、

$$\Phi_{rIK} = \Phi_{r1IK} + \sum_{J=1}^N F_{DJIK} \Phi_{rJI} + \sum_{J=1}^N F_{SJIK} \Phi_{rJI} \quad (2.5.28)$$

ただし、第1回反射光束 Φ_{r1IK} は、(2.5.18)式より、

$$\begin{aligned} \Phi_{r1IK} = & \int_{S_K} \int_{S_I} \int_S \frac{\rho(x', x; x, x'')}{\cos \theta_o(x, x'')} \pi e_o(x', x) \\ & \times \pi e_o(x, x'') L_d(x', x) dS(x') dS(x) dS(x'') \\ & + \int_{S_K} \int_{S_I} D[x_s'', \mathbf{S}] R_s\{\theta_i(x_s'', x)\} \frac{\cos \theta_i(x_s'', x)}{\cos \theta_o(x, x'')} \\ & \times \pi e_o(x, x'') L_d(x_s'', x) dS(x) dS(x'') \end{aligned} \quad (2.5.29)$$

2.6 結

本章では、本研究の理論的根拠となる基本式を展開した。まず、平行光で与えた照度とそのときの反射光の強さである反射特性関数を用いて拡散反射面の反射指向特性および拡散反射と正反射を合わせ持つ面の反射指向特性を表現した。次に、照度を未知数とする完全拡散面内の相互反射基本式と、輝度を未知数とする完全拡散でない面内の相互反射基本式を導入した。それを用いて完全拡散面内および完全拡散でない面内の光束伝達相互反射式を、全光束を未知数とする場合と間接光束を未知数とする場合について導いた。

参考文献

- [1] E.R.G.Eckert, E.M.Sparrow: Radiative Heat Exchange between Surfaces with Specular Reflection, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.3,pp.42-54, (1961).
- [2] J.T.Bevans, D.K.Edwards: Radiation Exchange in an Enclosure with Directional Wall Properties, Journal of Heat Transfer, pp.388-396, (1965).
- [3] A.F.Sarofim, H.C.Hottel: Radiative Exchange among Non-Lambert Surfaces, Journal of Heat Transfer, pp.37-44, (1966).
- [4] J.S.Toor, R.Viskanta: A Numerical Experiment of Radiant Heat Interchange by the Monte Carlo Method, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.11, pp.883-897, (1968).
- [5] 中村泰人: 放射性媒質がない場合の非完全拡散性室内放射伝達の解析法, 日本建築学会近畿支部研究報告集, pp.13-16, (1974).
- [6] 松本衛, 栗田孝之: 非完全拡散面から成る空間内の日射による輻射分布(2次元の場合), 日本建築学会近畿支部研究報告集, pp.65-68, (1983).
- [7] P.F.O'Brien, R.P.Bobco: Interreflections in Mirrored Rooms, Illuminating Engineering, Vol.59, pp.337-344, (1964).
- [8] P.F.O'Brien: Effective Reflectance of Room Cavities with Specular and Diffuse Surfaces, Illuminating Engineering, Vol.61, pp.189-195, (1966).
- [9] P.F.O'Brien, Antulio V.Gomez: Luminous Transfer in Rooms with Semi-diffuse-Specular Surface, Illuminating Engineering, Vol.62, pp.181-186, (1967).
- [10] P.F.O'Brien, Antulio V.Gomez: On Directional Reflectances of Room

- Surfaces, Illuminating Engineering, Vol.64, pp.245-252, (1969).
- [11] 松浦邦男：正反射成分を含む反射特性関数を用いた不完全拡散面相互反射式，日本建築学会近畿支部研究報告集，pp.33-36，(1968).
- [12] 松浦邦男：完全拡散・正反射両成分から成る面内の相互反射式，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.67-68，(1968).
- [13] 松浦邦男：フレネル型正反射成分を含む面内の相互反射について，照明学会全国大会講演論文集，pp.83-84，(1968).
- [14] 松浦邦男，小西弘高：フレネル型正反射成分を含む天井面を有する片側採光室の作業面間接照度，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.489-490，(1987).
- [15] M.Iizuka, T.Kawashima, K.Ishino: An Illuminance Calculation in Room with both Diffuse and Specular Reflectance Component at the Wall Surface in case of the Luminous Panel, Journal of the Illuminating Engineering Institute of Japan, Vol.54, pp.123-131, (1970).
- [16] 磯村稔，山内基海：拡散と正反射成分を有する1壁面から作業面に入射する光束について(その1)，照明学会誌，第64巻，第10号，pp.554-558，(1980).
- [17] 磯村稔，山内基海：壁面に鏡面反射を有する矩形室の作業面に入射する光束について，照明学会誌，第65巻，第4号，pp.146-150，(1981).
- [18] 磯村稔：拡散反射と正反射成分とを有する室内の相互反射の一近似計算法について，照明学会誌，第66巻，第10号，pp.455-458，(1982).
- [19] 磯村稔，山内基海：拡散反射と正反射成分とを有する室内の相互反射の一近似計算法について(その2)，照明学会誌，第67巻，第10号，pp.509-513，(1983).
- [20] David S.Immel, Michael F.Cohen, Donald P.Greenberg: A Radiosity Method for Non-Diffuse Environments, ACM Computer Graphics (1986 Proceedings), Vol.20, No.4, pp.133-142, (1986).

- [21] K.E.Torrance, E.M.Sparrow: Polarization, Directional Distribution, and Off-Specular Peak Phenomena in Light Reflected from Roughened Surfaces, Journal of the Optical Society of America, Vol.56, No.7, pp.916-925, (1966).
- [22] K.E.Torrance, E.M.Sparrow: Theory for Off-Specular Reflection from Roughened Surfaces, Journal of the Optical Society of America, Vol.57, No.9, pp.1105-1114, (1967).
- [23] Bui-Tuong Phong: Illumination for Computer-Generated Pictures, Comm. ACM, Vol.18, No.6, pp.311-317, (1975).
- [24] Blinn J.F.: Models of Light Reflection for Computer Synthesized Pictures, Computer Graphics, Vol.11, No.2, pp.192-198, (1977).
- [25] Cook R.L., Torrance K.E.: A Reflectance Model for Computer Graphics, ACM Transaction on Graphics, Vol.1, No.1, pp.7-24, (1982).
- [26] 前田敏男: 発散光の強さ、入射光の強さ、反射特性関数の定義とその応用, 日本建築学会講演論文集, pp.29-32, (1965).
- [27] 前田敏男: 点源密度を用いる面光度の定義と応用, 日本建築学会論文報告集, 第60号, pp.53-56, (1958).
- [28] 前田敏男: 光および熱輻射問題へのDirac's Delta Function の利用, 日本建築学会講演論文集号外, p.408, (1966).
- [29] 日本照明委員会訳: C I E 国際照明用語集・第4版, CIE Publ. No.17.4, JCIE 翻訳出版, (1989).
- [30] R.T.Dorsey (Chairman): RQQ Report No.4 — A Method of Evaluating the Visual Effectiveness, Journal of the Illuminating Engineering Society, p.504, (1970).
- [31] H.J.McNicholas: Absolute Methods in Reflectometry, Bureau of Standards Journal of Research, Vol.1, pp.29-73, (1928).

- [32] 松浦邦男：完全拡散面内の相互反射による照度分布の研究(I)[2次元の場合]，日本建築学会論文報告集，第67号，pp.75-82，(1961).
- [33] 松浦邦男：完全拡散面内の相互反射による照度分布の研究(II)[3次元の場合]，日本建築学会論文報告集，第70号，pp.61-67，(1962).
- [34] 松浦邦男：矩形室の相互反射における隅角部の問題，日本建築学会近畿支部研究報告集，pp.49-52，(1961).
- [35] 松浦邦男：建築照明，共立出版，p.113，(1971).
- [36] 松浦邦男，上谷芳昭：非整形な空間内の相互反射の計算，照明学会全国大会講演論文集，p.56，(1989).
- [37] 前田敏男，松浦邦男：相互反射による照度分布(その2)，日本建築学会近畿支部研究会，(1953).

第3章 建築材料の反射指向特性の測定

3.1 序

照明計算を行う場合、空間の構成面の反射指向特性を完全拡散性（均等拡散性ともいう）とすることが多い。しかし、実際の室の構成面は完全拡散性でも正反射性でもなく、その中間的な反射指向特性（拡散反射性）を持つと考えられるがこれに関する実用的な資料は必ずしも十分ではない。

完全拡散でない面内の相互反射について、あるいは物の見え方を主とする視環境について予測計算するためには、空間の構成面の反射指向特性を計算に組み込む必要がある。それには、実際の建築材料の様々な反射指向特性を実験的に明らかにし、それをもとに実際の照明計算に組み込める反射指向特性モデルを構成することが必要である。

本研究では、このようなモデルを構成するための資料を得るために、一般の建築材料の反射指向特性を実測によって明らかにした。さらに偏光を用いて表皮反射光と層内反射光を分離し、入射光の角度条件および材料表面の状態によって、表皮反射光と層内反射光が異なる反射指向特性を持つことを示す。

3. 2 反射指向特性に関する従来の研究

物質表面の反射指向特性については、光沢の問題として古くから理論的、実験的研究が行なわれている。[1]

照明工学的には、前田が厳密な定義がされていなかった面の光の強さを定義し[2]、面の反射指向特性を表わす量として反射率の密度関数である反射特性関数 ρ を定義した。[3][4]

伊藤、手塚は、視対象の反射指向特性を測定した。[5] 松浦らは、建築内装材やブラインドの羽根板の反射指向特性を相互反射計算の物性値を得ることを目的に測定している。[6][7] 松本らは、建築材料の日射に対する反射指向特性を測定している。[8][9]

3.3 反射指向特性の測定

3.3.1 反射特性関数

反射指向特性は、前田によって定義された反射特性関数[4]を用いて表現した。反射特性関数 ρ は、点（あるいは十分小さな面）での入射光（平行光）による照度と反射光の光度の比であり次式で表される。

$$\rho(\theta_i, \phi_i; \theta_o, \phi_o) = \frac{L(\theta_i, \phi_i; \theta_o, \phi_o) \cos \theta_o}{E(\theta_i, \phi_i)} \quad [1/\text{sr}] \quad (3.3.1)$$

ここに、 θ_i 、 ϕ_i 、 θ_o 、 ϕ_o はそれぞれ入射角、入射方位角、反射角、反射方位角を、また $L(\theta_i, \phi_i; \theta_o, \phi_o)$ は反射光の輝度、 $E(\theta_i, \phi_i)$ は入射光による照度を表す。

また、反射特性関数 ρ は、反射光の立体角(2π [sr])で積分すれば反射率となる。

3. 3. 2 偏光を用いた表皮反射、層内反射の分離

図3.3.1(a)のように、紙などの非金属材料の表面に入射した光が一部は境界面で反射し、一部は内部へ屈折して散乱、吸収を繰り返したのち再び境界面から外へ出るときに、前者を表皮反射、後者を層内反射と呼ぶ。[10] 表皮反射光はフレネルの透明体境界面での反射理論に従い、その色は入射光の色とほとんど同じである。層内反射光は内部層で選択吸収を受けるため材料特有の物体色を示す。金属材料の場合は、図3.3.1(b)のように、材料特有の物体色を示す表皮反射光のみである。

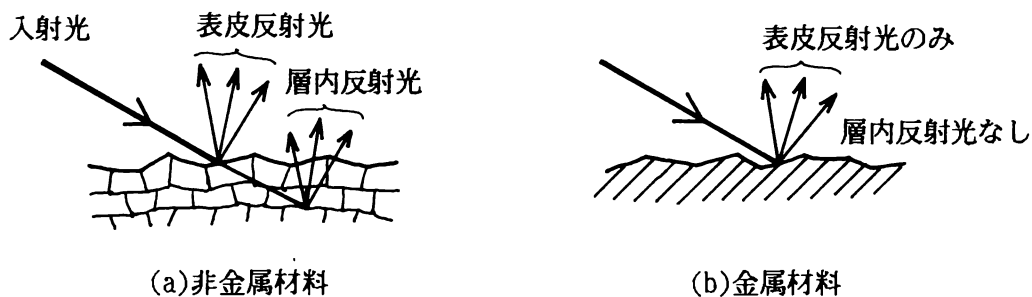


図3.3.1 材料表面の表皮反射と層内反射

表皮反射、層内反射の分離は田中の方法によった。[11] これは入射光として平面偏光を使用し、反射光の偏光特性を測定することで両成分を分離する方法である。この方法は、表皮反射光は入射光と同じ偏光面を持つ平面偏光で反射され、層内反射光は偏光性がまったくなくなるという仮定を使っている。この仮定が第一近似として成り立つことは蓮沼によって確認されている。[12]

いま、入射光と反射光のなす面に平行な偏光面を持つ平面偏光(p偏光)を入射光として使い、反射光のp偏光とこれと直角なs偏光の成分の強さを I_{PP} 、 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。上述の仮定により、表皮反射成分 M_P はそのまま p 偏光で反射され、層内反射成分 D_P は偏光性が全くなくなるので p 偏光と s 偏光は 1 : 1 の割合で反射されることか

ら、次式が成立する。(図3.3.2参照)

$$I_{PP} = M_P + D_P / 2 \quad (3.3.2)$$

$$I_{PS} = D_P / 2 \quad (3.3.3)$$

同様に入射光としてs偏光を使い、反射光のp偏光とこれと直角なs偏光の成分の強さを I_{SP} 、 I_{SS} として、このときの表皮反射光の成分を M_S 、層内反射光の成分を D_S とすると、次式が成立する。(図3.3.2参照)

$$I_{SP} = D_S / 2 \quad (3.3.4)$$

$$I_{SS} = M_S + D_S / 2 \quad (3.3.5)$$

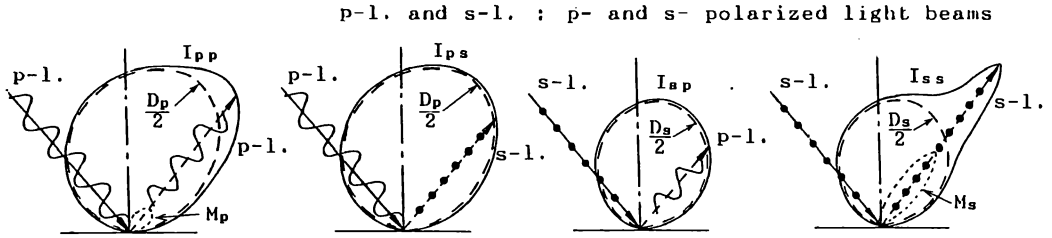


図3.3.2 偏光による表皮反射と層内反射の分離

光源として自然光(非偏光)を使用し、正しい偏光器によって平面偏光をつくれれば、入射光のp偏光の強さとs偏光の強さは等しいので、入射光として自然光(非偏光)を使用した場合の反射光の表皮反射成分 M 、層内反射成分 D は、次式のようなになる。

$$M = M_P + M_S = I_{PP} - I_{PS} - I_{SP} + I_{SS} \quad (3.3.6)$$

$$D = D_P + D_S = 2 I_{PS} + 2 I_{SP} \quad (3.3.7)$$

反射特性関数 ρ を $M : D$ の比に分割すると反射特性関数の表皮反射成分 ρ_M 、層内反射成分 ρ_D を得る。(図 3.3.3 参照)

$$\rho_M = \rho \cdot M / (M + D) \quad (3.3.8)$$

$$\rho_D = \rho \cdot D / (M + D) \quad (3.3.9)$$

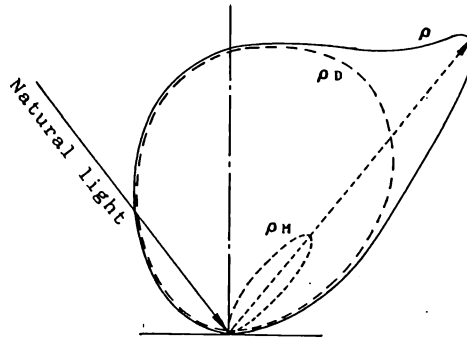


図 3.3.3 反射特性関数 ρ の表皮反射成分 ρ_M と層内反射成分 ρ_D

3. 3. 3 測定装置

測定装置は、光源と変角測光装置からなる。(図3.3.4参照)

光源にはD₆₅標準光源(JIS Z 8720)に近似する500Wのキセノンランプを用い、ランプからの光を100mmφの凸レンズによって平行光(開き角は約10′)とした。測定は、照度計(ミノルタT1M)を用いて光源の出力が変動しないことを確かめながら行った。

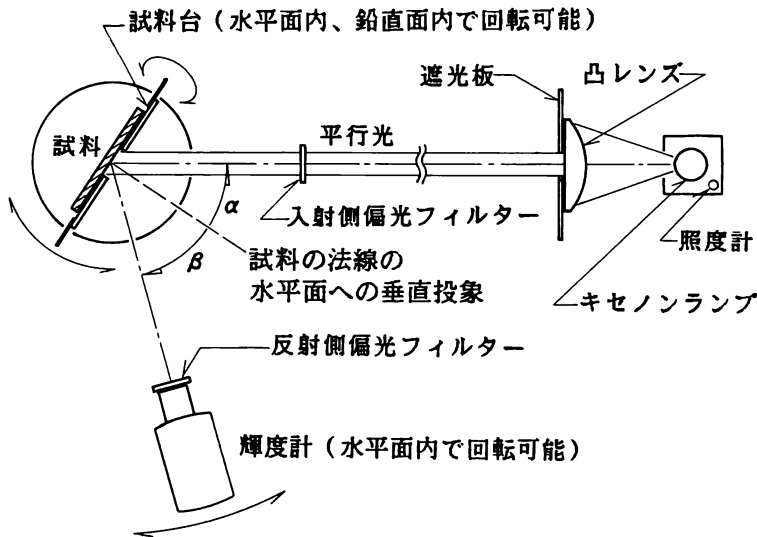


図3.3.4 変角測光装置の概要(平面図)

3.3.2節で述べたように、表皮、層内反射成分を分離するためには入射光が自然光(非偏光)でなくてはならないが、入射光の偏光度 p を測定した結果、約0.012であって、入射光はほぼ非偏光とみなせる。ただし偏光度 p は次式で表わされる。

$$p = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min}) \quad (3.3.10)$$

ここで I_{\max} 、 I_{\min} とは、入射光の各偏光成分の強さの内の最大値と最小値であ

る。なお、入射側（東芝フィルターP L52mmφ）、反射側（東芝フィルターP L49mmφ）の偏光フィルターを重ねた場合の透過率の最小値と最大値の比は約0.035であった。

変角測光装置は、試料台を水平面内（回転角 α ）および鉛直面内（回転角 γ ）で回転させることができ、試料の試料台への取り付け角（回転角 $\delta + \phi_i$ ）を変えることができる。ここで δ は方位角の基準線（ $\phi_i = \phi_o = 0^\circ$ ）の角度である。また、輝度計（トプコンBM3、開き角 2° ）を取り付けた腕は、水平面内（回転角 β ）で回転させることができる。各回転軸および入射光軸、反射光軸はすべて試料台に取り付けた試料の中心に一致するようになっている。これらの回転角を、あらかじめ計算しておいた角度に合わせることで、任意の入射角 θ_i 、入射方位角 ϕ_i 、反射角 θ_o 、反射方位角 ϕ_o を設定することができる。以下に、回転角の関係式を示す。（図3.3.5参照）

$$\delta = \sin^{-1} (\tan \alpha / \sqrt{\tan^2 \alpha + \sin^2 \gamma}) \quad (3.3.11)$$

$$\theta_i = \cos^{-1} (\cos \alpha \cos \gamma) \quad (3.3.12)$$

$$\theta_o = \cos^{-1} (\cos \beta \cos \gamma) \quad (3.3.13)$$

$$\phi_o = \delta + \sin^{-1} (\tan \beta / \sqrt{\tan^2 \beta + \sin^2 \gamma}) \quad (3.3.14)$$

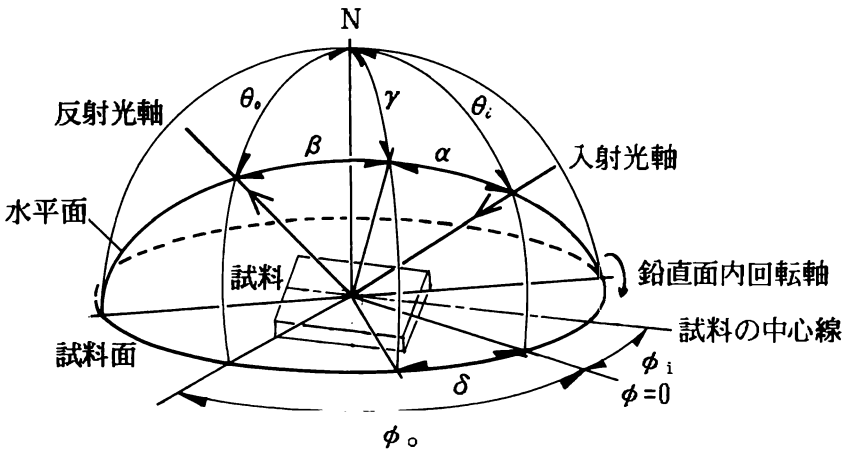


図3.3.5 変角測光装置の角度関係

3.3.4 測定手順

(3.3.1)式における試料面照度 $E(\theta_i, \phi_i)$ は、試料台に標準白色板（硫酸バリウム、島津光電分光光度計QV50付属品、30mm ϕ ）を取り付けて、輝度 $L_{ds}(\theta_i, \phi_i; \theta_o, \phi_o)$ を測定し、次式から求めた。

$$E(\theta_i, \phi_i) = \frac{\pi L_{ds}(\theta_i, \phi_i; \theta_o, \phi_o)}{r_{ds}} \quad [lx] \quad (3.3.15)$$

ここに、標準白色板は完全拡散であるとし、その反射率 r_{ds} を0.97とした。また入射角 θ_i 、入射方位角 ϕ_i 、反射角 θ_o 、反射方位角 ϕ_o は $(\theta_i, \phi_i; \theta_o, \phi_o) = (45^\circ, 0^\circ; 0^\circ, 0^\circ)$ または $(60^\circ, 0^\circ; 0^\circ, 0^\circ)$ とした。

試料の測定は、まず入射側、反射側の偏光フィルターを取り外し、各角度条件の反射光輝度 $L(\theta_i, \phi_i; \theta_o, \phi_o)$ を測定して反射特性関数 ρ を(3.3.1)式より求め、次に偏光フィルターを取り付けて同じ角度条件における反射光の各偏光成分の強さ（輝度） I_{PP} 、 I_{PS} 、 I_{SP} 、 I_{SS} を測定して、反射特性関数の表皮反射成分 ρ_M と層内反射成分 ρ_D を(3.3.6)、(3.3.7)、(3.3.8)、(3.3.9)式より求めた。

3.3.5 参考測定

3.3.5.1 正反射率測定装置と測定手順

正反射方向の指向性の強い試料では、反射特性関数 ρ が無限大となり、3.3.3節の測定装置では測定が困難であるので、正反射率 R_r を別に測定した。ただし、ここでの正反射率は、近似的に正反射方向に開き角 2° で反射する光束と入射光束の比としている。測定装置は、反射特性関数の測定装置と同じ光源（キセノンランプ、500W）および照度計（ミノルタT1M）を内蔵した受光部（開き角 2° ）からなる。（図3.3.6参照）

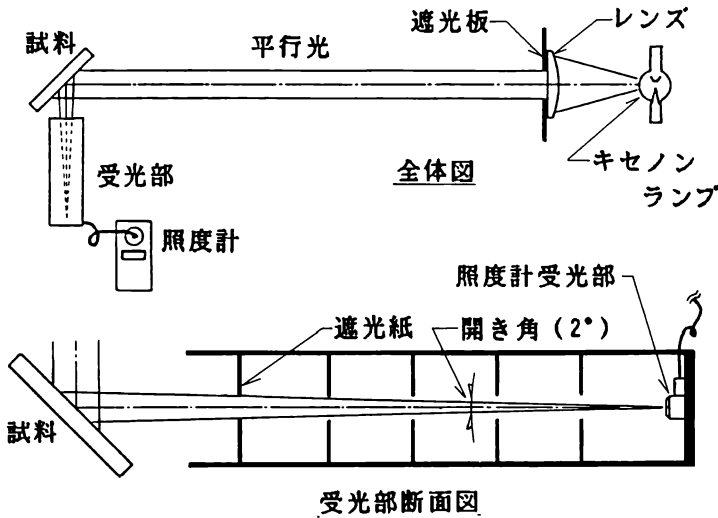


図3.3.6 正反射率測定装置の概要

測定は、鏡面光沢度の一次標準面（JIS Z 8741、屈折率1.50）の照度値 E_{rs} および試料の照度値 E_r を測定し、次式により正反射率 R_r を求めた。

$$R_r = \frac{E_r}{E_{rs}} R_{rs} \quad (3.3.16)$$

ただし、(3.3.16)式において R_{rs} とは一次標準面の正反射率であり、次式(フレネルの式)で表される。

$$R_{rs} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\sin^2(i - r)}{\sin^2(i + r)} + \frac{\tan^2(i - r)}{\tan^2(i + r)} \right\} \quad (i \neq 0) \quad (3.3.17)$$

ここに、 i, r はそれぞれ入射角、屈折角を表す。入射角 i を 45° 、屈折率 $n = \sin i / \sin r$ を 1.50 として計算すると、正反射率 R_{rs} は 0.050 であった。

3.3.5.2 色彩色差計による測定

色彩色差計（ミノルタCR110、測定面50mmφ）を用いて試料の拡散入射反射率[%]と色度（Y, x, y）を測定した。測定結果を表3.3.1に示す。

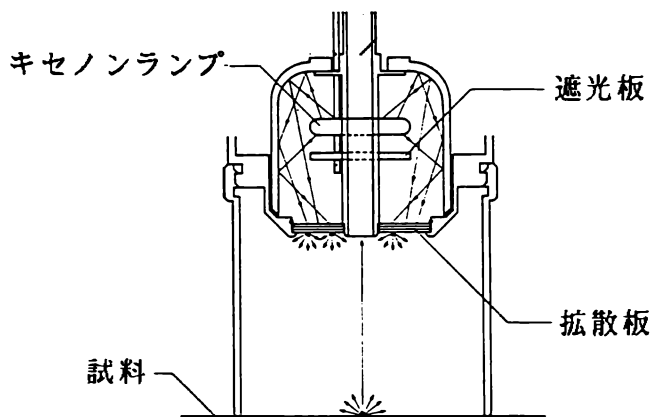


図3.3.7 色彩色差計の照明光学系

3.3.6 試料

増田稔博士(京大農学部)の属する研究グループ[13]により作成された木質系および非木質系材料(B5版 サイズ)74種から、3.3.1に示す試料について測定した。

3.3.1 試料一覧

試料	試料番号	表面処理	Y	x	y
木質材料					
素材(ひのき)	104	A	53.8	.374	.376
つき板(チーク)	205	B	10.5	.390	.369
つき板(チーク)	206	C	11.7	.369	.357
紙・繊維質材料					
プリント紙	302	C	40.3	.403	.394
クロス	726	-	66.0	.338	.346
たたみ	700	-	24.5	.360	.378
石材					
花崗岩	601	D	42.1	.317	.334
大理石	610	E	62.8	.313	.309
合成樹脂材料					
インシュレーションボード	403	-	77.7	.324	.341
Pタイル	741	-	35.3	.336	.348
標準白色板					
硫酸バリウム	-	-	-	-	-

表面処理

- A: 塗装なし、手がんな仕上げ
- B: 塗装なし、サンディング(#240)仕上げ
- C: アミノアキッド樹脂塗装
- D: ジェット仕上げ
- E: 水磨仕上げ

木質材料においては入射方位を、試料の長手方向の中心線（繊維と平行）を入射方位角 ϕ_i の基準として平行入射（ $\phi_i = 0^\circ$ ）、垂直入射（ $\phi_i = 90^\circ$ ）、斜め入射1（ $\phi_i = -45^\circ$ ）、斜め入射2（ $\phi_i = 45^\circ$ ）の4通りとした。（図3.3.8 参照）

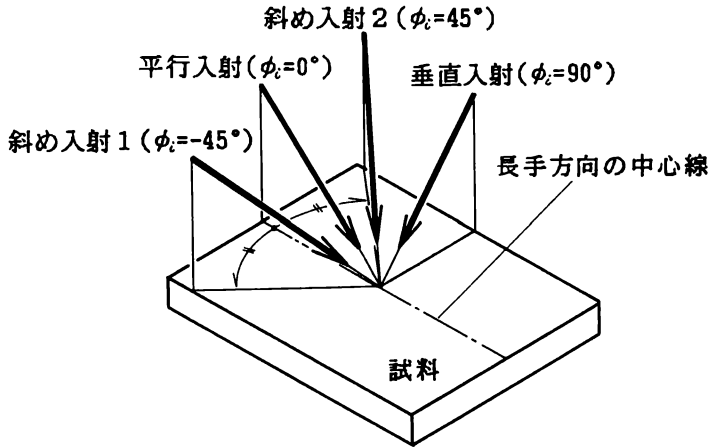


図3.3.8 入射方位

3. 4 測定結果と考察

3. 4. 1 入射面内の測定結果と考察

入射面内の測定結果を図3.4.1に示す。ただし、ここでの入射面内とは、試料の法線と入射光軸を含む面（入射面）内に反射光軸が含まれる場合の角度条件（図3.3.5において $\gamma = 0^\circ$ とする）をいう。反射特性関数 ρ 、その層内反射成分 ρ_D 、表皮反射成分 ρ_M を反射角 θ_0 による極座標で表してある。×印は測定点 $\rho(\theta_0)$ を、また矢印は入射光軸および正反射光軸を表し、原点に接する円は反射率1の完全拡散面の反射特性関数 $\rho = \cos \theta_0 / \pi$ [1/sr]である。また、正反射率 R_r を測定した試料について図中に示した。

図3.4.1(a),(b),(c),(d)は、素材（ひのき、No.104、塗装なし、手がんな仕上げ）を入射方位と入射角 θ_i を変えて測定した結果である。（繊維に対して）平行入射の(a),(b)と比べて垂直入射の(c),(d)では、層内反射成分 ρ_D はより完全拡散性に近くなり、表皮反射成分 ρ_M は正反射方向以外の値がより大きくなる。

また、入射角 45° の(a),(c)と比べて入射角 60° の(b),(d)では層内反射成分 ρ_D はあまり変化せず表皮反射成分 ρ_M は全体的に値が大きくなる。入射条件（入射方位、入射角）が変わると表皮反射成分 ρ_M が顕著に変化し、反射特性関数 ρ に大きく影響することがわかる。図3.4.1(e),(f)はいずれもつき板で、(g)(No.205)は塗装なし、(h)(No.206)は樹脂塗装を施したものである。塗装により正反射方向の表皮反射成分 ρ_M がかなり増大したが、正反射率 R_r は0.001とそれほど大きくはない。

図3.4.1(g),(h)はプリント紙（No.302、樹脂塗装）を、入射角 θ_i を変えて測定した結果である。入射角 θ_i が 45° から 60° へと大きくなると、層内反射成分 ρ_D はほとんど変化しないが表皮反射成分 ρ_M は素材（ひのき）の場合と同様に増大する。図3.4.1(i)はクロスである。表皮反射成分 ρ_M 、層内反射成分 ρ_D とも完全拡散性に近いことがわかる。図3.4.1(j)はたたみの（繊維に対し

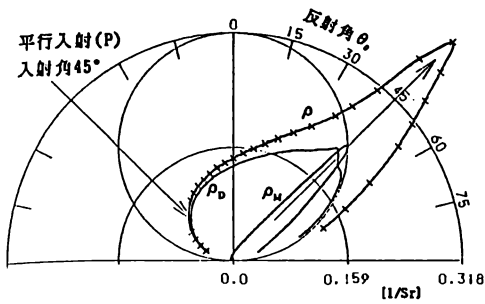
て) 平行入射である。素材(ひのき)と似た指向特性を持つ。

図3.4.1(k)は花崗岩(No.601, ジェット仕上げ)で、表面にはかなり凸凹がある。層内反射成分 ρ_D はほぼ完全拡散性で、表皮反射成分 ρ_M はあまり大きくない。図3.4.1(l)は大理石(No.610, 水磨仕上げ)である。表面には鈍い光沢があり、正反射率 R_r は0.027であった。層内反射成分 ρ_D はほぼ完全拡散性である。

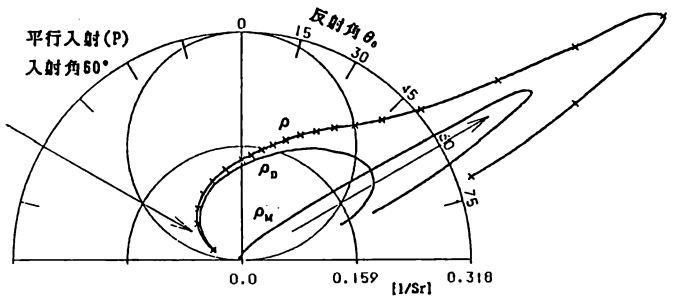
図3.4.1(m)はインシュレーションボードで、表皮反射成分 ρ_M は少なく、層内反射成分 ρ_D はほぼ完全拡散性である。図3.4.1(n)は、Pタイルで、表皮反射成分 ρ_M は正反射方向に指向性を持つがそれほど大きくはなく、層内反射成分 ρ_D はほぼ完全拡散性である。

図3.4.1(o)は、試料面照度 $E(\theta_1, \phi_1)$ を求める際に使用した標準白色板(硫酸バリウム)の反射指向特性で、ほとんど完全拡散性である。

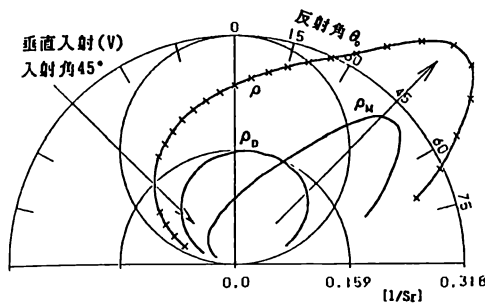
いずれの試料も、層内反射はおおむね拡散性で入射条件や材料表面の状態が変わっても変化が少ないのに対し、表皮反射は入射条件および表面の状態に左右され、正反射方向を中心とする指向性を持ち、反射指向特性の総合的な性状に大きく影響している。



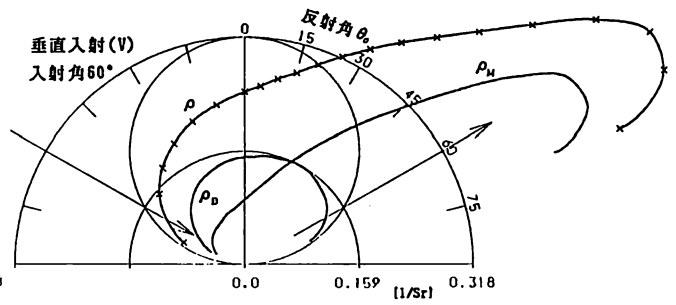
(a) 素材(ひのき), No. 104, 塗装なし



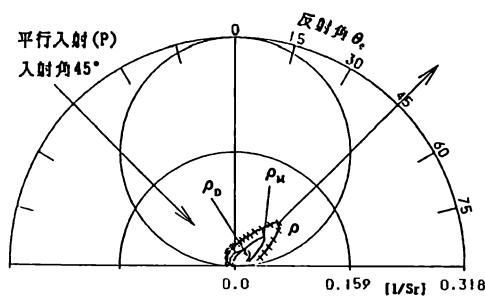
(b) 素材(ひのき), No. 104, 塗装なし



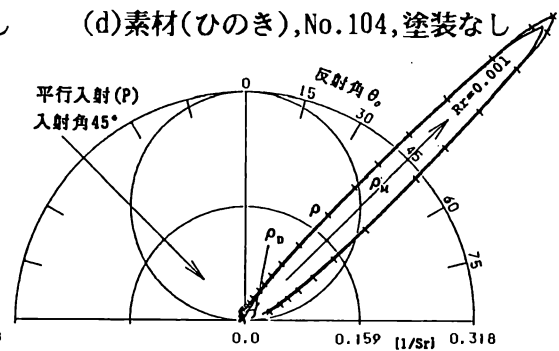
(c) 素材(ひのき), No. 104, 塗装なし



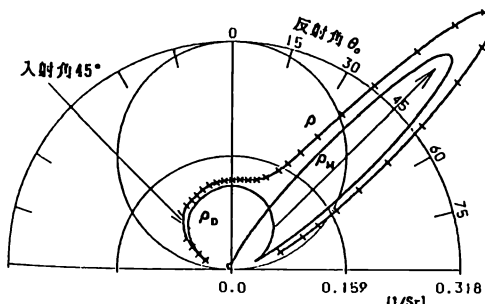
(d) 素材(ひのき), No. 104, 塗装なし



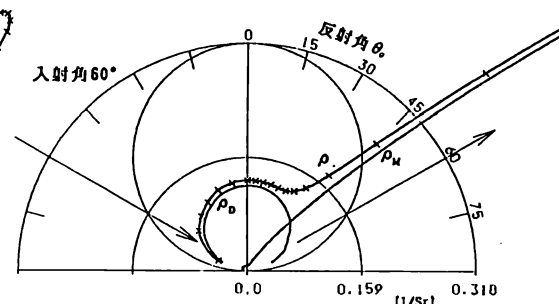
(e) つき板(チーク), No. 205, 塗装なし



(f) つき板(チーク), No. 205, 樹脂塗装

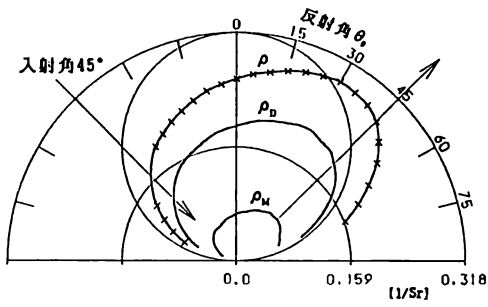


(g) プリント紙, No. 302, 樹脂塗装

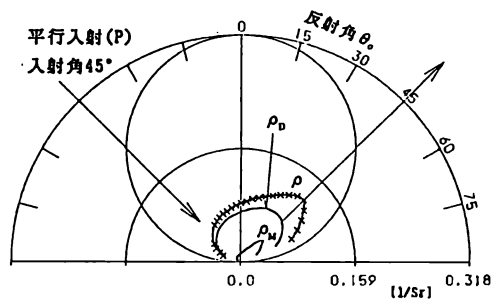


(h) プリント紙, No. 302, 樹脂塗装

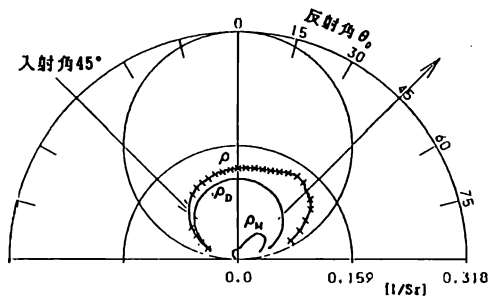
図3.4.1 入射面内の反射特性関数の測定結果(つづく)



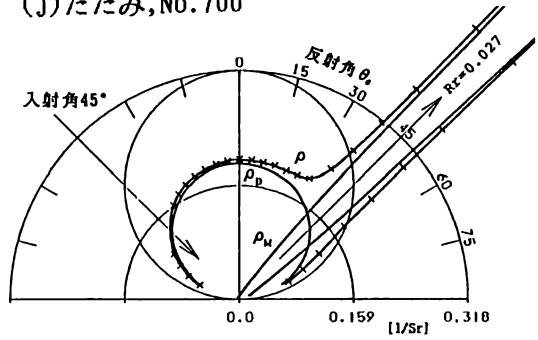
(i) クロス, No. 726



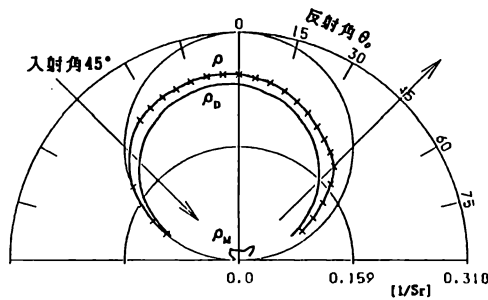
(j) たたみ, No. 700



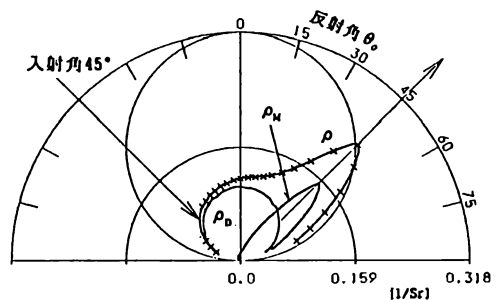
(k) 花崗岩, No. 601, ジェット



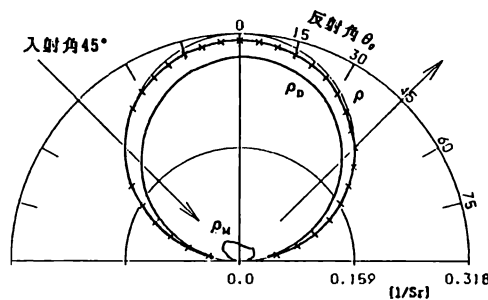
(l) 大理石, No. 610, 水磨



(m) インシュレーションボード, No. 403



(n) Pタイル, No. 741



(o) 硫酸バリウム

図3.4.1 入射面内の反射特性関数の測定結果(つづき)

3.4.2 入射面外の測定結果と考察

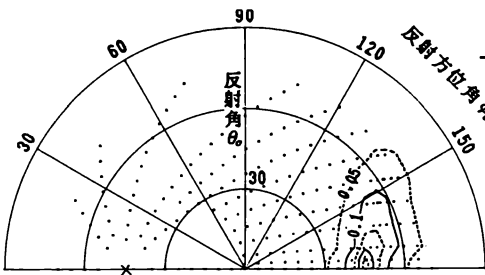
図3.4.2(a)~(h)は、図3.4.1(a)~(d)と同じ試料(素材(ひのき),塗装なし,手がんな仕上げ)を、入射角 θ_i は 45° に固定し、入射方位を変えて入射面外について測定した結果である。ただし、ここでの入射面外とは、試料の法線と入射光軸を含む面(入射面)に反射光軸が含まれない場合の角度条件(図3.3.5において $r > 0^\circ$ とする)をいう。反射特性関数の表皮反射成分 ρ_M 、層内反射成分 ρ_D を反射角 θ_r と反射方位角 ϕ_r による等距離射影図上に等高線で表してある。図中の×印は入射光の座標(θ_i, ϕ_i)を、・印は測定点の座標(θ_o, ϕ_o)を表す。また、図の中央に試料の木目(繊維)方向に対する入射方向を矢印で示した。

図3.4.2(a),(b)および図3.4.2(c),(d)は、それぞれ(繊維に対して)平行入射および垂直入射の場合の反射特性関数の表皮反射成分 ρ_M 、層内反射成分 ρ_D である。図3.4.2(e),(f)および図3.4.2(g),(h)は、斜め入射1および斜め入射2の場合の表皮反射成分 ρ_M 、層内反射成分 ρ_D である。

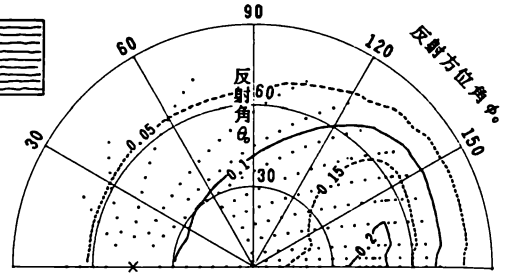
図3.4.2(a),(c),(e),(g)から、表皮反射成分 ρ_M は入射方位によってその反射指向特性は大きく異なるが、いずれの方位においても木目と平行な方向にはあまり拡がらず、木目と垂直な方向によく拡がることからわかる。

図3.4.2(b),(d),(f),(h)から、層内反射成分 ρ_D も表皮反射成分 ρ_M と同様に木目の方向に影響を受けるが、その影響は、表皮反射成分 ρ_M ほど強くないことがわかる。

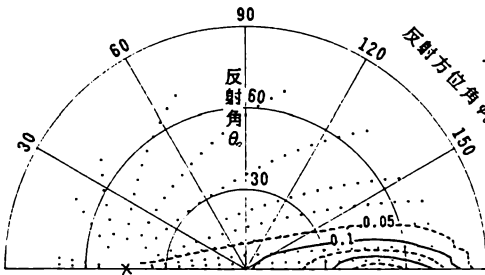
入射面内の測定結果と同様に層内反射はおおむね拡散性であるが、表皮反射は入射条件に左右され、反射指向特性の総合的な性状に大きく影響している。



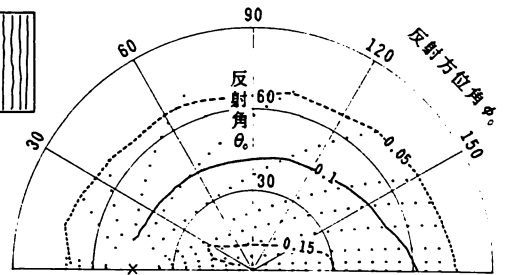
(a)表皮反射成分 (平行入射)



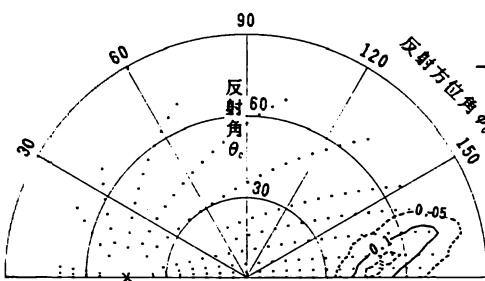
(b)層内反射成分 (平行入射)



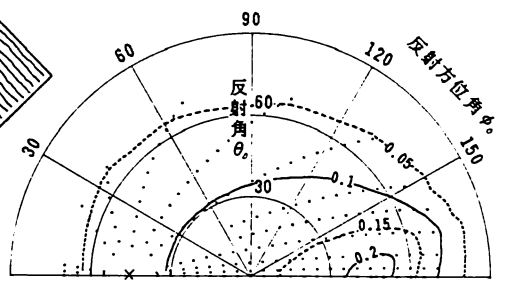
(c)表皮反射成分 (垂直入射)



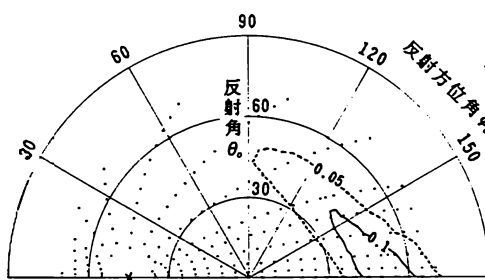
(d)層内反射成分 (垂直入射)



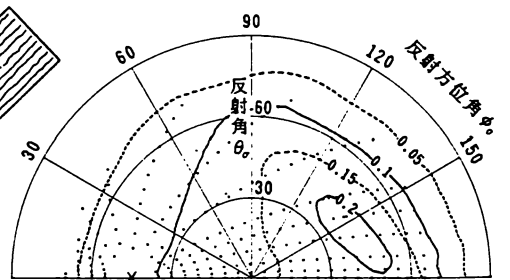
(e)表皮反射成分 (斜め入射 1)



(f)層内反射成分 (斜め入射 1)



(g)表皮反射成分 (斜め入射 2)



(h)層内反射成分 (斜め入射 2)

図3.4.2 入射面外の反射特性関数の測定結果
(素材(ひのき), No.104, 入射角45°)

3. 5 反射指向特性の分類

測定結果からわかるように実際の室空間の構成面の反射指向特性は必ずしも完全拡散性ではない。このことは、完全拡散の仮定の下での照明計算法が必ずしも正しい解を与えるものではないことを示唆している。

反射指向特性モデルは、それを組み込む照明計算の手法によってその構造を決定しなければならない。ここでは、次章の相互反射計算のための反射指向特性モデルの構成に先だって、今回の測定結果のうち入射面内のものについて定性的に分類することを試みた。

反射指向特性モデルとしては以下の4通りを考える。(表3.5.1参照)

(Ⅰ)正反射は、正反射方向の狭い範囲に集中する成分とする。

(Ⅱ)準正反射は、正反射方向に集中するが(Ⅰ)ほど大きくはない拡散反射成分とする。

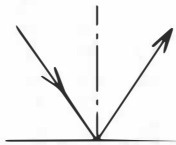
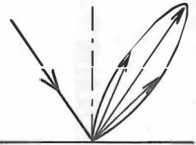

(Ⅲ)半拡散反射は、(Ⅱ)と(Ⅳ)の中間的な拡散反射成分とする。

(Ⅳ)完全拡散反射は、ほぼ完全拡散の成分とする。

入射面内の測定結果(図3.4.1参照)を表皮・層内各反射成分ごとに4通りのモデルに分類し表3.5.1の様に整理した。

表3.5.1から今回測定した試料については、表皮反射成分では(Ⅱ)準正反射と(Ⅲ)半拡散反射が多く、層内反射成分では(Ⅲ)半拡散反射と(Ⅳ)完全拡散反射が多いことがわかる。つまり、表皮反射成分は正反射方向を中心とする拡散反射性を持ち、層内反射成分は完全拡散性または完全拡散性に近い拡散反射性を持つことが多い。

表3.5.1 反射指向特性の分類

		モデルの配光				
		I. 正反射	II. 準正反射	III. 半拡散反射	IV. 完全拡散反射	V. なし (層内反射に 比べて小さい)
表皮反射	層内反射					
	配光は表皮反射と同様	I. 正反射	II. 準正反射	III. 半拡散反射	IV. 完全拡散反射	V. なし (表皮反射に 比べて小さい)
	I. 正反射					
	II. 準正反射					
	III. 半拡散反射		(a)素材[A](P) (b)素材[A](P) (g)つき板[B] (j)たたみ(P)	(i)クロス		
	IV. 完全拡散反射	(l)大理石[E]	(e)プリント合板[C] (f)プリント合板[C] (n)Pタイル	(c)素材[A](V) (d)素材[A](V) (k)花崗岩[D]		(m)インシュレーション ボード (o)標準白色板
	V. なし (表皮反射に 比べて小さい)		(h)つき板[C]			

注. 試料欄の(a)~(o)の記号は、図3.4.1の記号(a)~(o)に対応する。
 [A]~[E]の記号は、材料の表面処理を表す。(表3.3.1参照)
 (P)、(V)の記号は入射方位(平行入射、垂直入射)を表す。(図3.3.8参照)

3. 6 結

一般の建築材料の反射指向特性を測定し、入射光と同じ色を持つ表皮反射成分と、材料特有の物体色を示す層内反射成分とに分離した。

測定結果から、反射指向特性の層内反射成分は完全拡散性に近く入射条件（入射角および入射方位）と材料表面の状態が変わっても顕著には変化しないが、表皮反射成分は入射条件と材料表面の状態によって著しく変化し反射指向特性そのものに大きく影響することがわかった。

測定結果の表皮反射成分と層内反射成分を定性的に分類し、それらを組み合わせることで、表皮反射成分は正反射方向を中心とする拡散反射性を持ち、層内反射成分は完全拡散性または完全拡散性に近い拡散反射性を持つことが多いということがわかった。

参考文献

- [1] 蓮沼 宏：拡散反射と表面の光沢 I . II . III ., 応用物理, p.501, (1954) ; p.548, (1954) ; p.97, (1955).
- [2] 前田敏男：点源密度を用いる面光度の定義と応用, 日本建築学会論文報告集, 第60号, pp.53-56, (1966).
- [3] 前田敏男：発散光の強さ、入射光の強さ、反射特性関数の定義とその応用, 日本建築学会講演論文集, pp.29-32, (1965).
- [4] 前田敏男：光および熱輻射問題への Dirac's Delta Function の利用, 日本建築学会講演論文集号外, p.408, (1966).
- [5] 伊藤克三, 手塚二郎：反射特性の測定について, 日本建築学会大会学術講演要旨集, p.183, (1962).
- [6] 松浦邦男, 沖 允人：壁、床材の反射特性について, 名城大学理工学部研究報告, pp.17-24, (1971).
- [7] 松浦邦男, 金 會瑞：ブラインド羽根板材料の偏光を用いた反射指向特性の測定, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.497-498, (1985).
- [8] 松本 衛, 森山正和, 栗田孝之, 北出 充：日射に対する反射特性関数の測定に関する研究, 日本建築学会近畿支部研究報告集, pp.93-96, (1982).
- [9] 松本 衛, 森山正和, 野口利也：日射に対する反射特性関数の測定に関する研究(その2), 日本建築学会近畿支部研究報告集, pp.61-64, (1983).
- [10] 蓮沼宏：光沢, p47, コロナ社, (1960).
- [11] 田中俊一：応用物理, vol.25, No.5, pp.207-213, (1956) ; vol.26, No.3, pp.85-91, (1957) ; vol.27, No.10, pp.600-604, (1958) ; vol.27, No.12, pp.758-762, (1958) ; vol.28, No.9, pp.508-514, (1964).
- [12] 文献[10], p.57.
- [13] 内藤昌ほか：木質空間の快適性に関する応用的研究, 鹿島学術振興財団研究助成研究成果報告書, (1984).

第4章 反射指向特性の数式モデル化

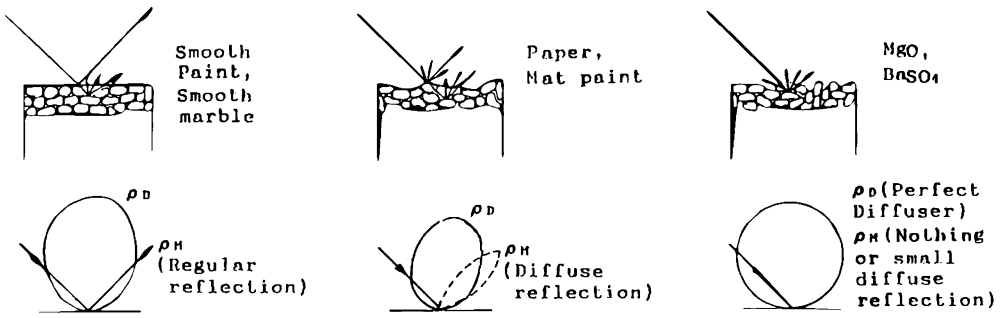
4.1 序

物質表面の反射光は、層内反射光と表皮反射光の和であると考えられる。前者は、非金属透明体の表面より内部へ屈折した入射光が、内部層で多重反射・散乱を経て再び表面より出てきた反射光で、一般に拡散反射となる。後者は、金属・非金属を問わず、表面への入射光がそのまま反射されたもので、表面の凹凸の状態によって正反射から拡散反射へと変化する。（図4.1.1参照）

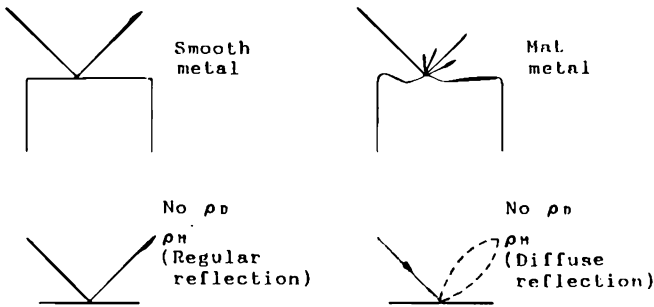
通常、照明計算における室内の相互反射の計算は、室空間を適当な要素に分割し、各要素間の光束伝達を解く。要素が完全拡散性の場合、反射指向特性は拡散反射率で一元的に表される。また、要素が正反射性の場合、反射指向特性は入射角と表皮の屈折率によって決まる正反射率で表される。一方、要素が完全拡散性でも正反射性でもない中間的な反射指向特性（拡散反射性）の場合は、反射指向特性は入射・反射の角度条件、表皮の屈折率、後述の層内反射比など様々な要因に影響される。

照明計算を行なう場合、実際の建築仕上げ材料の反射指向特性を、光学的測定により十分に把握した上で計算に組み込まなければならない。仕上げ材料が完全拡散性または正反射性の場合、測定は比較的容易である。しかし、材料が拡散反射性である場合は、照明計算に必要とされるあらゆる角度条件について反射指向特性を測定することは実用的でないので、適当な簡易化を導入する必要がある。

本章では、表皮反射と層内反射の反射特性関数を用いて材料の表面の状態を考慮した反射指向特性の数式モデルを構成する。そして、反射指向特性の実測値によって反射モデルを推定し、特定の角度条件の反射指向特性の測定によって任意の角度条件の反射指向特性を推定できることを示す。



(a) 非金属材料：表皮反射成分 ρ_M と層内反射成分 ρ_D



(b) 金属材料：表皮反射成分 ρ_M のみ

図 4.1.1 物質表面の反射光

4. 2 表皮反射のモデル化

4. 2. 1 正反射性小素面の理論に基づく反射モデル

非金属または金属材料の表面への入射光がそのまま反射されることを表皮反射という。表皮反射の反射指向特性は、物質表面の状態に影響を受け、一般に正反射方向を中心とする指向性を持つことが多い。表皮反射光は、図4.2.1に示すような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する理論の研究は古くから行なわれており、研究者の名をとってBarkasの理論と呼ばれることもある[1][2]。本節では、Barkasの理論に反射特性関数の定義を導入し、表皮反射のモデル化を行なう。

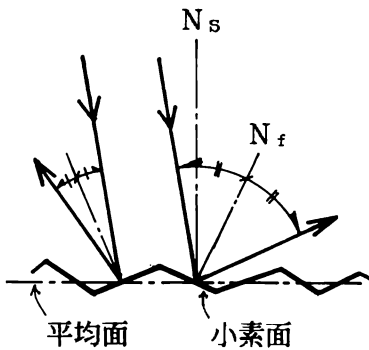


図4.2.1 正反射性小素面のモデル

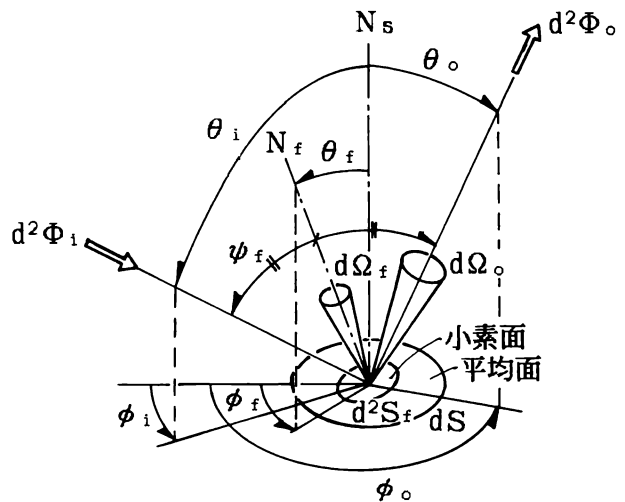


図4.2.2 平均面と小素面の角度関係

図4.2.2において、 (θ_i, ϕ_i) の方向からの平行光が、法線 N_s を持つ平均的な表面（平均面）上にあつて、 (θ_f, ϕ_f) の方向の法線 N_f を持つ小素面に入射角 ψ_f で入射し、 (θ_o, ϕ_o) の方向に反射されたとする。このとき θ_f, ϕ_f, ψ_f は

$\theta_i, \phi_i, \theta_o, \phi_o$ を用いて次のように表される。(付録参照)

$$\theta_f = \cos^{-1} \frac{i_z + o_z}{\sqrt{(i_x + o_x)^2 + (i_y + o_y)^2 + (i_z + o_z)^2}} \quad (4.2.1)$$

$$\phi_f = \cos^{-1} \frac{i_x + o_x}{\sqrt{(i_x + o_x)^2 + (i_y + o_y)^2}} \quad (4.2.2)$$

$$\psi_f = \frac{1}{2} \cos^{-1}(i_x o_x + i_y o_y + i_z o_z) \quad (4.2.3)$$

ここに、

$$(i_x, i_y, i_z) = (\sin\theta_i \cos\phi_i, \sin\theta_i \sin\phi_i, \cos\theta_i) \quad (4.2.4)$$

$$(o_x, o_y, o_z) = (\sin\theta_o \cos\phi_o, \sin\theta_o \sin\phi_o, \cos\theta_o) \quad (4.2.5)$$

平均面の微小面 dS において、微小立体角 $d\Omega_f(\theta_f, \phi_f)$ 内に法線 N_f を持つ微小な小素面 d^2S_f の平均面への投影面積 $d^2S_f \cos\theta_f$ の、面積 dS に対する割合を $dP_f(\theta_f, \phi_f)$ とし、法線 N_f の向きを確率変数とする $dP_f(\theta_f, \phi_f)$ の確率密度関数(小素面の分布関数)を $p_f(\theta_f, \phi_f)$ とすると、

$$dP_f(\theta_f, \phi_f) = \frac{d^2S_f \cos\theta_f}{dS} \quad (4.2.6)$$

$$p_f(\theta_f, \phi_f) = \frac{dP_f(\theta_f, \phi_f)}{d\Omega_f(\theta_f, \phi_f)} \quad (4.2.7)$$

また、

$$\int_{2\pi} p_f(\theta_f, \phi_f) d\Omega_f(\theta_f, \phi_f) = 1 \quad (4.2.8)$$

(θ_i, ϕ_i) の方向から平行光が小素面 d^2S_f に入射角 ψ_f で入射するならば、

入射光の法線照度を E_n とすると、 d^2S_f への入射光束 $d^2\Phi_i$ は、

$$d^2\Phi_i = E_n \cos \psi_f d^2S_f \quad (4.2.9)$$

小素面の正反射率 $R(\psi_f)$ はフレネル法則に従い、非金属（透明体）の場合は屈折率を n とすれば、

$$R(\psi_f) = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\sin^2(\psi_f - \psi_{fr})}{\sin^2(\psi_f + \psi_{fr})} + \frac{\tan^2(\psi_f - \psi_{fr})}{\tan^2(\psi_f + \psi_{fr})} \right\} \quad (4.2.10)$$

ここに、 ψ_{fr} は屈折角であり、

$$\psi_{fr} = \sin^{-1}(\sin \psi_f / n) \quad (4.2.11)$$

ただし、 $\psi_f = 0$ のときは、

$$R(\psi_f) = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2} \quad (4.2.12)$$

塗膜、合成樹脂、木材など非金属の空気に対する屈折率 n は 1.5 ないし 1.6 程度である。[3] 小素面が金属の場合は屈折率を n 、消衰係数を κ とし、複素屈折率 $n_i = n(1 - i\kappa)$ を (4.2.11) 式の屈折率 n の代わりに用いればよい。

入射光束 $d^2\Phi_i$ のうち、小素面の正反射率 $R(\psi_f)$ によって、正反射方向 (θ_o, ϕ_o) に反射される光束 $d^2\Phi_o$ は、

$$d^2\Phi_o = R(\psi_f) d^2\Phi_i = R(\psi_f) E_n \cos \psi_f d^2S_f \quad (4.2.13)$$

小素面の法線 N_f が立体角 $d\Omega_f(\theta_f, \phi_f)$ 内にあるとき、反射光の立体角 $d\Omega_o(\theta_o, \phi_o)$ は、[4]

$$d\Omega_o(\theta_o, \phi_o) = 4 \cos \psi_f d\Omega_f(\theta_f, \phi_f) \quad (4.2.14)$$

(4.2.6)、(4.2.7)式を代入すれば、

$$d\Omega_o(\theta_o, \phi_o) = \frac{4 \cos \psi_f \cos \theta_f d^2 S_f}{p_f(\theta_f, \phi_f) dS} \quad (4.2.15)$$

よって、反射光の強さ I_o は、

$$I_o = \frac{d^2 \Phi_o}{d\Omega_o dS} = \frac{p_f(\theta_f, \phi_f) R(\psi_f) E_n}{4 \cos \theta_f} \quad (4.2.16)$$

また平均面の照度は、

$$E_s = E_n \cos \theta_i \quad (4.2.17)$$

表面に細かい凹凸のある面では、入射角あるいは反射角が大きくなると干渉の影響が現われたり、向かい合う小素面が入射・反射光を遮蔽するマスキング (Masking) の影響が現われる。[5] また、小素面の表面が多重薄膜状になっている場合は、小素面の総合的な反射率は(4.2.10)式よりも大きくなる。[6]

ここでは、正反射性小素面の分布 $p_f(\theta_f, \phi_f)$ 以外の要因の影響のうち、マスキングの影響を次節でのべる遮蔽係数 $m(\theta_i, \theta_o)$ で、その他の影響を実験的に求める係数 K で表わすことにする。

以上から、表皮反射の反射特性関数 ρ_M は、反射特性関数の定義より、[7]

$$\begin{aligned} \rho_M(\theta_i, \phi_i; \theta_o, \phi_o) &= K m(\theta_i, \theta_o) \frac{I_o}{E_s} \\ &= K m(\theta_i, \theta_o) \frac{p_f(\theta_f, \phi_f) R(\psi_f)}{4 \cos \theta_f \cos \theta_i} \end{aligned} \quad (4.2.18)$$

4. 2. 2 マスキングの理論に基づく反射モデル

平均面への入射角 θ_i 、あるいは反射角 θ_o が非常に大きい場合は、小素面への入射光または反射光が、向かい合う小素面によって遮蔽されるために減衰するマスキング (Masking) の現象が起きる。(図4.2.3参照)

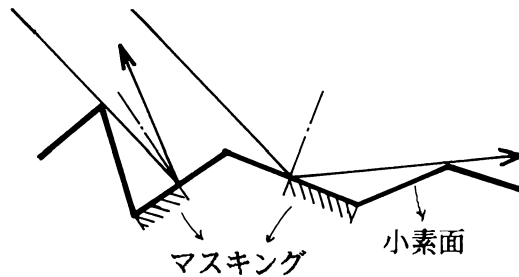


図4.2.3 マスキング現象

田中は、マスキングは小素面の傾き角にほとんどよらないこと、入射角、反射角が約 50° 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すりガラスの反射指向特性の測定により示した。[5]

田中は、マスキングの効果が入射角、反射角の指数関数で近似できることを示唆したが、ここでは次式で近似する。

$$m'(\theta) = \begin{cases} \{ (\theta - 50^\circ) / (90^\circ - 50^\circ) \}^k & (\theta \geq 50^\circ) \\ 0 & (\theta < 50^\circ) \end{cases} \quad (4.2.19)$$

ここに、 θ は入射角または反射角[deg]である。また、 k は表面の粗さを表わす定数で、表面の凹凸が細かいほど大きくなる。

(4.2.18)式における遮蔽係数 $m(\theta_i, \theta_o)$ は次式で表わされる。

$$m(\theta_i, \theta_o) = \{ 1 - m'(\theta_i) \} \{ 1 - m'(\theta_o) \} \quad (4.2.20)$$

図4.2.4に、(4.2.19)式において定数 k を変えた場合のマスクング効果 $m'(\theta)$ と、田中が実験から導いた結果を示す。定数 k を2ないし3とすることで田中の実験値をほぼ説明できることがわかる。図4.2.5に入射角 θ_1 、反射角 θ_0 による遮蔽係数 $m(\theta_1, \theta_0)$ を示す。ただし、定数 k は3としている。

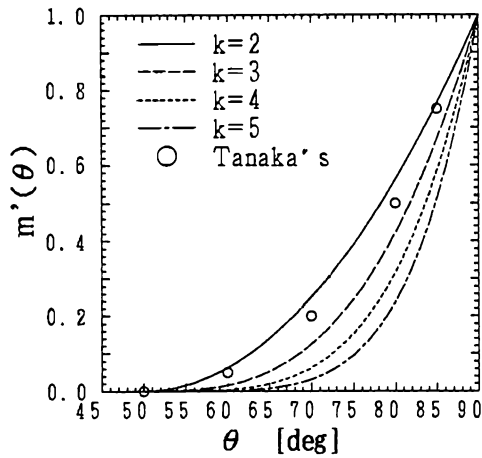


図4.2.4 マスクング効果 $m'(\theta)$

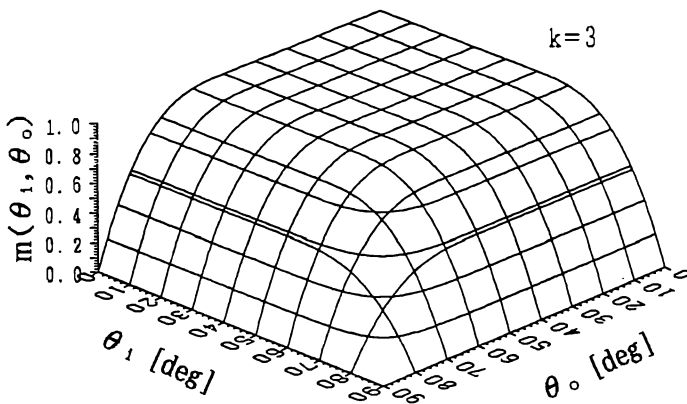


図4.2.5 遮蔽係数 $m(\theta_1, \theta_0)$

4.3 層内反射のモデル化

非金属材料の表面への入射光が内部へ屈折し、内部層での散乱・吸収を経て、再び外部へ出て来ることを層内反射という。第3章の結果より、層内反射の反射指向特性は完全拡散性または完全拡散に近い拡散反射性であることが多いので、ここでは完全拡散性であると仮定してモデル化を行なう。

表面への入射光は、一部が表皮反射光としてそのまま反射され、残りは内部へ屈折する。(図4.3.1(a)参照) そして、屈折した光の一部が層内反射光として再び出て来る。(図4.3.1(b)参照)

表皮反射の反射特性関数を $\rho_M(\theta_i, \phi_i; \theta_o, \phi_o)$ とすると、表皮反射率 $R_M(\theta_i, \phi_i)$ は、

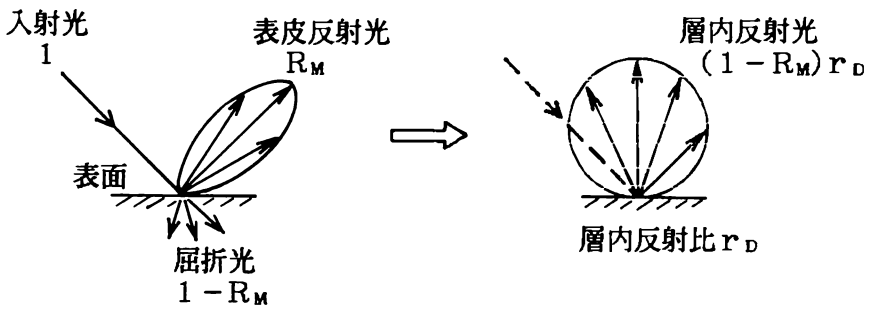
$$\begin{aligned} R_M(\theta_i, \phi_i) &= \int_{2\pi} \rho_M(\theta_i, \phi_i; \theta_o, \phi_o) d\Omega_o(\theta_o, \phi_o) \\ &= \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \rho_M(\theta_i, \phi_i; \theta_o, \phi_o) \sin\theta_o d\theta_o d\phi_o. \end{aligned} \quad (4.3.1)$$

表皮から内部へ屈折した光のうち、再び外部へ出て来る光の割合を、層内反射比 $r_D(\theta_i, \phi_i)$ とすると、層内反射率 $R_D(\theta_i, \phi_i)$ は、[8]

$$R_D(\theta_i, \phi_i) = r_D(\theta_i, \phi_i) \{1 - R_M(\theta_i, \phi_i)\} \quad (4.3.2)$$

よって、層内反射の反射特性関数 $\rho_D(\theta_i, \phi_i; \theta_o, \phi_o)$ は、

$$\begin{aligned} \rho_D(\theta_i, \phi_i; \theta_o, \phi_o) &= \frac{1}{\pi} R_D(\theta_i, \phi_i) \cos\theta_o \\ &= \frac{1}{\pi} r_D(\theta_i, \phi_i) \{1 - R_M(\theta_i, \phi_i)\} \cos\theta_o. \end{aligned} \quad (4.3.3)$$



(a)表皮反射光と内部への屈折光

(b)層内反射光

図4.3.1 層内反射のモデル化

4. 4 実測値による反射モデルの推定

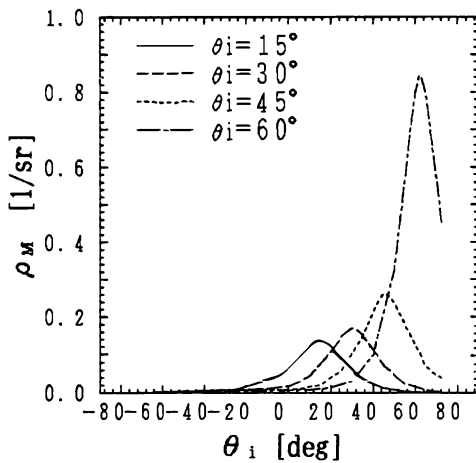
4. 4. 1 係数および小素面の分布関数の推定

4. 2節で導いた表皮反射の反射モデルの係数 K と小素面 (facet) の分布関数 p_f を、反射特性関数 ρ_M の実測値を用いて推定する。

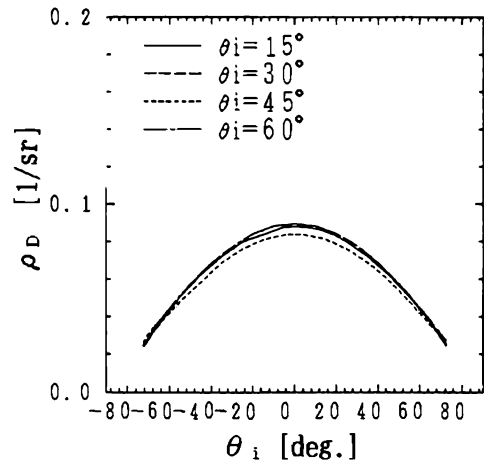
(4.2.18)式を変形して、

$$K p_f(\theta_f, \phi_f) = \rho_M(\theta_i, \phi_i; \theta_o, \phi_o) \frac{4 \cos \theta_f \cos \theta_i}{m(\theta_i, \theta_o) R(\psi_f)} \quad (4.4.1)$$

図4.4.1(a)に示す表皮反射の反射特性関数 ρ_M の実測値を用いて係数 K と分布関数 p_f の積 $K p_f(\theta_f, \phi_f)$ を(4.4.1)式によって求めた結果を図4.4.2に示す。ただし、(4.2.11)式における屈折率 n は1.55とし、(4.2.19)式における定数 k は3としている。



(a)表皮反射



(b)層内反射

図4.4.1 反射特性関数の実測値
(プリント合板、ポリエチレン樹脂コーティング)

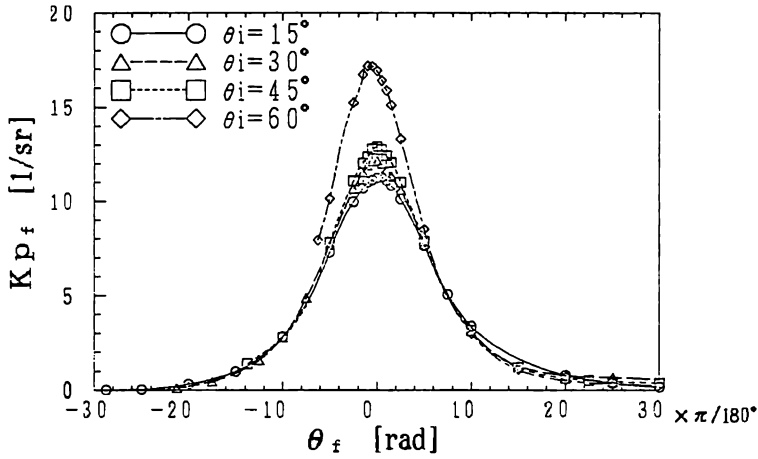


図4.4.2 係数Kと分布関数 p_f の積 $K p_f$

図4.4.2 から係数Kと分布関数 p_f を適当な方法で推定し、(4.2.18)式に代入すれば、表皮反射の反射特性関数 ρ_M が得られる。

以下では、分布関数 $p_f(\theta_f, \phi_f)$ が平均面の法線に関して対称で、傾斜角 θ_f [rad] を確率変数とする正規分布であると仮定して、係数 K および分布関数 $p_f(\theta_f, \phi_f)$ を推定する。

(4.4.1)式を θ_f に関して積分すれば、

$$\int_0^{\pi/2} K p_f(\theta_f) d\theta_f = \int_0^{\pi/2} \rho_M(\theta_i, \phi_i; \theta_o, \phi_o) \frac{4 \cos \theta_f \cos \theta_i}{m(\theta_i, \theta_o) R(\psi_f)} d\theta_f \quad (4.4.2)$$

$p_f(\theta_f)$ は正規分布であるので、

$$K = \frac{1}{0.5} \int_0^{\pi/2} \rho_M(\theta_i, \phi_i; \theta_o, \phi_o) \frac{4 \cos \theta_f \cos \theta_i}{m(\theta_i, \theta_o) R(\psi_f)} d\theta_f \quad (4.4.3)$$

(4.4.3)式を図4.4.1に示す ρ_M の実測値を用いて数値積分すれば、入射角 θ_i [rad]における係数 K が求められる。最小二乗法を用いて K を直線で近似すると、

$$K(\theta_i) = 0.273 \cdot \theta_i + 3.216 \quad (4.4.4)$$

図4.4.3に、実測値を(4.4.3)式によって数値積分した結果得られた係数 K と、(4.4.4)式による直線 $K(\theta_i)$ を入射角 θ_i によって示す。

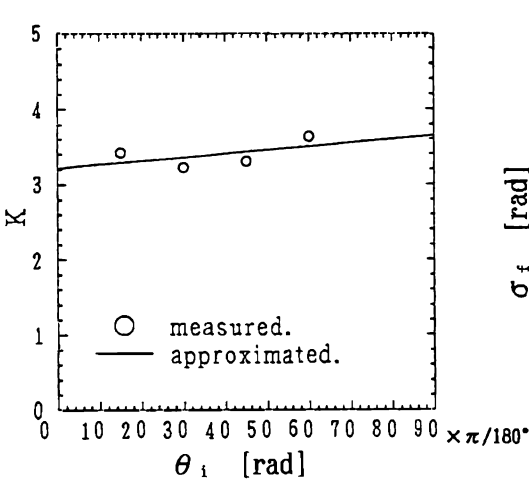


図4.4.3 係数 K

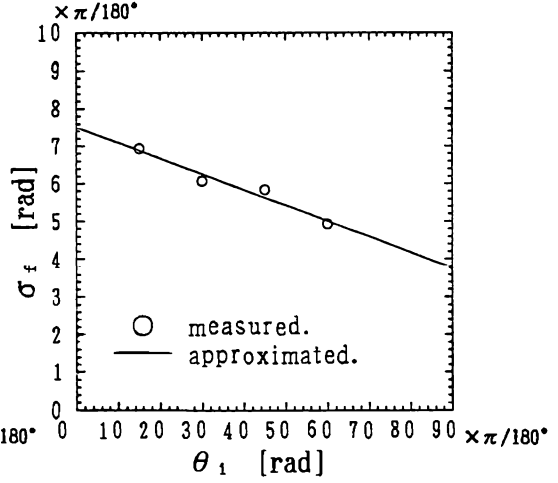


図4.4.4 小素面の傾斜角 θ_f の標準偏差 σ_f

入射角 θ_i における正反射方向 ($\theta_o = \theta_i$, $\phi_o = \phi_i + \pi$; $\theta_f = 0$) の表皮反射の反射特性関数の測定値 $\rho_M(\theta_i)$ と、係数 $K(\theta_i)$ を(4.4.1)式に代入すれば、小素面の傾斜角 θ_f が0の場合の分布関数の値 $p_f(0)$ が得られる。 $p_f(0)$ によって、傾斜角 θ_f の標準偏差 σ_f [rad]が次式で得られる。

$$\sigma_f = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot p_f(0)} \quad (4.4.5)$$

最小二乗法を用いて σ_f を直線で近似すると、

$$\sigma_f(\theta_i) = -0.042 \cdot \theta_i + 0.131 \quad (4.4.6)$$

図4.4.3に、正反射方向の測定値 $\rho_M(\theta_i)$ による標準偏差 σ_f と、(4.4.6)式による直線 $\sigma_f(\theta_i)$ を入射角 θ_i によって示す。

$\sigma_f(\theta_i)$ を用いて、小素面の分布関数 $p_f(\theta_f)$ は、

$$p_f(\theta_f) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma(\theta_i)} \exp[-\theta_f^2 / 2\{\sigma(\theta_i)\}^2] \quad (4.4.7)$$

図4.4.5に、(4.4.4)式による係数 $K(\theta_f)$ と ρ_M の測定値を(4.4.1)式に直接代入して得られる分布関数 $p_f(\theta_f, \phi_f)$ と、(4.4.7)式による分布関数 $p_f(\theta_f)$ を小素面の傾斜角 θ_f によって、入射角 θ_i 別に示す。

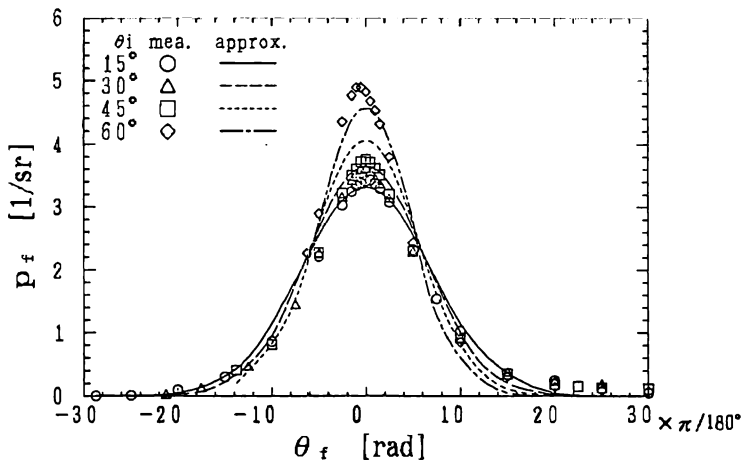


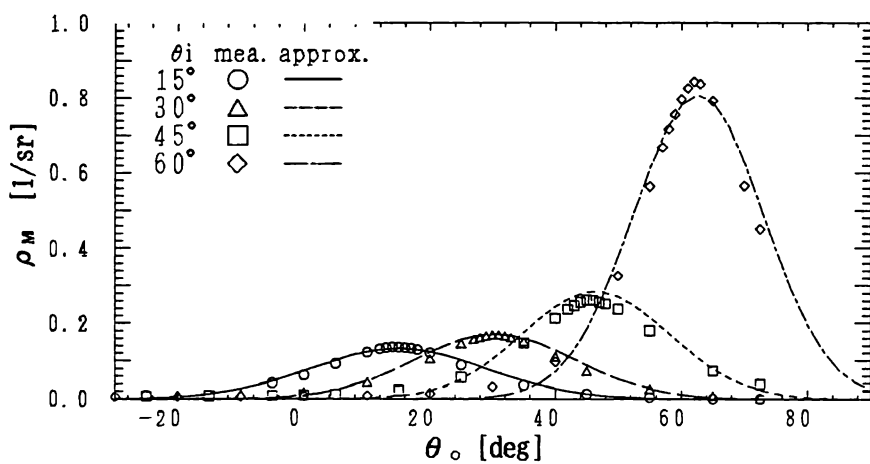
図4.4.5 小素面の分布関数 p_f

4. 4. 2 表皮反射の反射特性関数

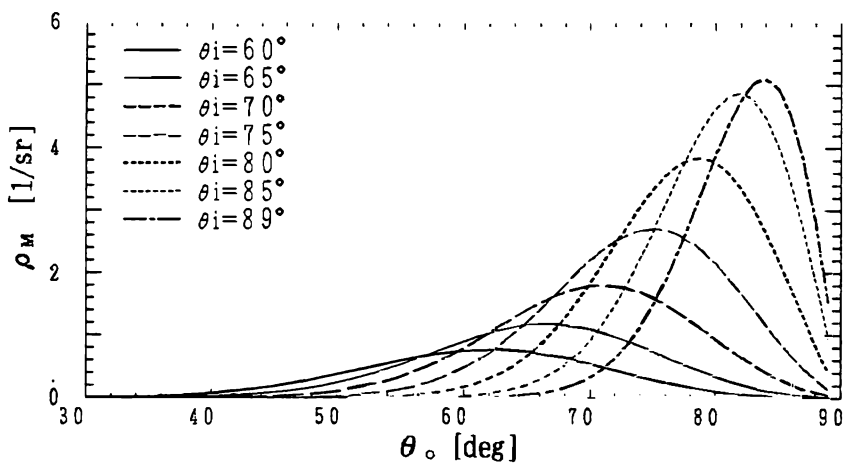
(4.4.4)式による係数 $K(\theta_f)$ と(4.4.7)式による分布関数 $p_f(\theta_f)$ を(4.2.18)式に代入すれば、表皮反射の反射特性関数 ρ_M が得られる。

$$\rho_M(\theta_i, \phi_i; \theta_o, \phi_o) = K(\theta_i)m(\theta_i, \theta_o) \frac{p_f(\theta_f)R(\psi_f)}{4 \cos \theta_f \cos \theta_i} \quad (4.4.8)$$

図4.4.6(a)に、入射面内の表皮反射の反射特性関数 ρ_M の(4.4.8)式による反射モデルおよび実測値を入射角 θ_i 別に示す。いずれの入射角においても反射モデルと実測値はよく一致していることがわかる。図4.4.6(b)には、入射角 θ_i が 60° を越える場合の反射モデルを示す。



(a) 反射モデルと実測値の比較



(b) 入射角 θ_i が 60° を越える場合の反射モデル

図 4.4.6 表皮反射の反射特性関数 ρ_M

4. 4. 3 層内反射の反射特性関数

図4.4.1 に示したプリント合板の層内反射の反射特性関数 ρ_D が、入射角によらずほぼ完全拡散性であったことから、層内反射は完全拡散性と仮定する。層内反射の反射率 $R_{Dm}(\theta_i, \phi_i)$ は、反射特性関数の法線方向($\theta_o = 0$)の実測値 ρ_{Dm0} を用いて、

$$R_{Dm}(\theta_i, \phi_i) = \pi \rho_{Dm0} \quad (4.4.9)$$

また、(4.4.8)式を(4.3.1)式で数値積分すれば表皮反射の反射率 $R_M(\theta_i, \phi_i)$ が得られる。層内反射の反射率 $R_{Dm}(\theta_i, \phi_i)$ の入射角 θ_i に関する平均 R_D と表皮反射の反射率 $R_M(\theta_i, \phi_i)$ を(4.3.2)式に代入して、層内反射比 $r_D(\theta_i, \phi_i)$ は、

$$r_D(\theta_i, \phi_i) = \frac{R_D}{1 - R_M(\theta_i, \phi_i)} \quad (4.4.10)$$

(4.4.9)式または(4.4.10)式を(4.3.3)式に代入すれば、層内反射の反射特性関数 ρ_D が得られる。

$$\rho_D(\theta_i, \phi_i; \theta_o, \phi_o) = \frac{1}{\pi} R_D \cos \theta_o \quad (4.4.12)$$

図4.4.7 に各反射率 $R_{Dm}(\theta_i, \phi_i)$ 、 R_D 、 $R_M(\theta_i, \phi_i)$ および層内反射比 $r_D(\theta_i, \phi_i)$ を入射角 θ_i によって示す。また、図4.4.8に、(4.4.12)式による層内反射の反射特性関数 ρ_D と、入射角 θ_i が 30° の場合の実測による ρ_D を示す。反射モデルと実測値がよく一致していることがわかる。

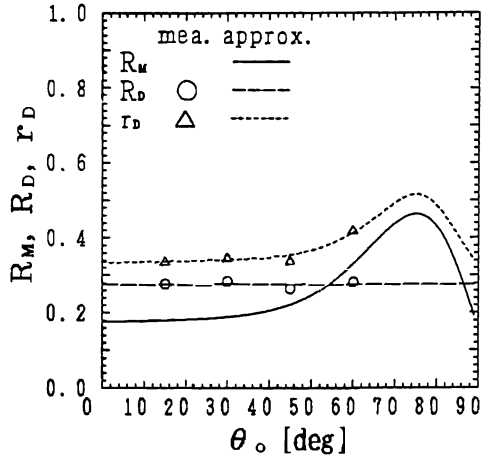


図4.4.7 表皮反射率 R_M と層内反射率 R_D および層内反射比 r_D

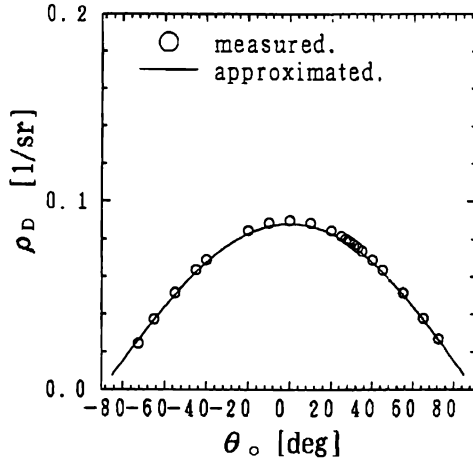


図4.4.8 層内反射の反射特性関数 ρ_D (反射モデルと実測値の比較)

4. 5 結

本章では、測定により得られた拡散反射性の建築仕上げ材料の反射指向特性を完全拡散でない面内の相互反射の計算に組み込むための反射モデルを構成した。表皮反射のモデルは、正反射性小素面の理論とマスキングの理論を用いて構成し、層内反射のモデルは、層内反射比を用いて構成した。そして実測値から材料表面固有の小素面の分布関数と係数を推定し反射モデルが実測値をよく再現することを示した。これにより、特定の角度条件の反射特性関数の測定によって材料表面の物理的特性を把握し、それをもとに任意の角度条件の反射特性関数を推定することが可能となり、反射指向特性の測定の簡略化が可能となった。

参考文献

- [1] W.W.Barkas : ANALYSIS OF LIGHT SCATTERED FROM A SURFACE OF LOW GLOSS INTO ITS SPECULAR AND DIFFUSE COMPONENTS, Proceedings of the Physical Society, Vol.51, pp.274-295,(1939).
- [2] 蓮沼 宏：拡散反射と表面の光沢 I , 応用物理, pp.501-507,(1954).
- [3] 蓮沼 宏：光沢, p.29, コロナ社, (1960).
- [4] William A. Rense : Polarization Studies of Light Diffusely Reflected from Ground and Etched Glass Surfaces,Journal of the Optical Society of America, Vol.40, No.1, pp.55-59,(1950).
- [5] 田中俊一：偏光によるすり硝子の反射指向特性の測定(I)(II), 応用物理, pp.85-91,(1957) ; pp.758-762,(1958).
- [6] 松浦邦男：建築設備体系1 光, p.303, 彰国社, (1965).
- [7] 前田敏男：発散光の強さ、入射光の強さ、反射特性関数の定義とその応用, 日本建築学会講演論文集, pp.29-32, (1965).
- [8] 松浦邦男：フレネル型正反射成分を含む面内の相互反射について,照明学会全国大会講演論文集, pp.83-84,(1968).

第5章 完全拡散でない面内の相互反射の数値計算法

5.1 序

室内面上の初輝度は、昼光光源や人工光源の輝度分布によって決まる。初輝度による直接照度分布は、投射率解法や逐点法などを用いて容易にまた詳細に求めることができる。また、室内の間接照度分布は、室内表面が完全拡散性でない場合も反射指向特性を正反射と完全拡散反射の組合せで近似することで比較的少ない計算量で求めることができる。[1]

一方、室内の反射輝度の指向性分布を求めるには、初輝度の指向性分布や室内表面の反射指向特性を扱わねばならず、膨大な計算量が必要になる。従来、反射輝度分布を未知数とする基本式は導かれていたものの、[2] 計算機の制約上、その数値解を求めることは困難であった。近年、計算機およびコンピュータグラフィックス（CG）の急速な発達により様々な環境情報の視覚化が可能になり、また実用化されている。[3] 視覚そのものを扱う照明の分野にもコンピュータグラフィックスの技術が導入され、空間内の輝度分布を任意の視点からリアルに図示することが可能となっている。[4] しかし、コンピュータグラフィックスで表示される輝度分布そのものは従来の完全拡散反射の仮定に基づく照明計算法や、コンピュータグラフィックスのための近似計算法を用いて計算されるため、グレアの予測などの定量的な照明環境の予測や評価に用いるには限界がある。

本章では、第2章に示した光束伝達相互反射式を数値的に解くことで、完全拡散面内、入射角により反射率の異なる準完全拡散反射と正反射を合わせ持つ面内および第4章で構成した表皮反射と層内反射の反射モデルに従う拡散反射面内の間接照度分布および反射輝度分布を詳細に求める方法を示す。その方法を用いて、反射指向特性が照度分布および反射輝度の指向性分布に及ぼす影響について考察する。また、拡散反射面内の相互反射を精度をほとんど損なうことなく、少ない計算量で解くことのできる簡易計算法を示す。

5.2 完全拡散面を持つ矩形室の相互反射の性状

5.2.1 完全拡散面内の光束伝達数値解法

完全拡散反射の閉じた面 S を N 個に分割し、2.5.1節に示した間接光束を未知数とする完全拡散面内の光束伝達相互反射式を数値的に解いて、分割面 S_I の平均間接照度 E_{rI} および平均反射輝度 L_{rI} を求める。

分割面 S_I に入射する第1回反射光束 Φ_{ir1I} は、(2.5.10)式により精度よく求められる。空間に比べて分割面が十分に小さければ、 S_J の中心の直接照度 E_{dJ} 、反射率 R_J と固有光束分布係数 f_{JI} を用いて、

$$\Phi_{ir1I} = \sum_{J=1}^N R_J f_{JI} S_J E_{dJ} \quad (5.2.1)$$

第1回反射光束 Φ_{ir1I} が得られれば、(2.5.9)式を参照して次の N 元連立一次方程式が導かれ、これを解けば S_I に入射する間接入射光束 Φ_{irI} が得られる。

$$[\delta_{IJ} - R_J f_{JI}] \{\Phi_{irJ}\} = \{\Phi_{ir1I}\} \\ (I=1,2,\dots,N; J=1,2,\dots,N) \quad (5.2.2)$$

ただし、 δ_{IJ} はクロネッカーのデルタである。

S_I の平均間接照度 E_{rI} は、

$$E_{rI} = \frac{1}{S_I} \Phi_{irI} \quad (5.2.3)$$

S_I の平均反射輝度 L_{rI} は、反射率 R_I と、平均の直接照度 $\overline{E_{dI}}$ を用いて、

$$L_{rI} = \frac{R_I}{\pi} (E_{rI} + \overline{E_{dI}}) \quad (5.2.4)$$

5.2.2 計算条件と計算結果

図5.2.1に示す立方体状の矩形室について計算を行った。室内表面の分割は室の高さ、幅、奥行き方向ともに7分割とし、正方形要素の個数は各面に49、室全体で294とした。光源は、完全拡散の配光を持つ光束発散度1（一様輝度 $1/\pi$ ）の光天井である。

内表面の反射指向特性は天井、壁、床とも完全拡散性とし、分割面の反射率は単純のためすべて同一とした。計算は、内表面の全反射率を0.3、0.5、0.7と変えて行った。なお、特に断わらないかぎり、以下で照度、輝度とは、要素の平均照度、平均輝度を意味する。

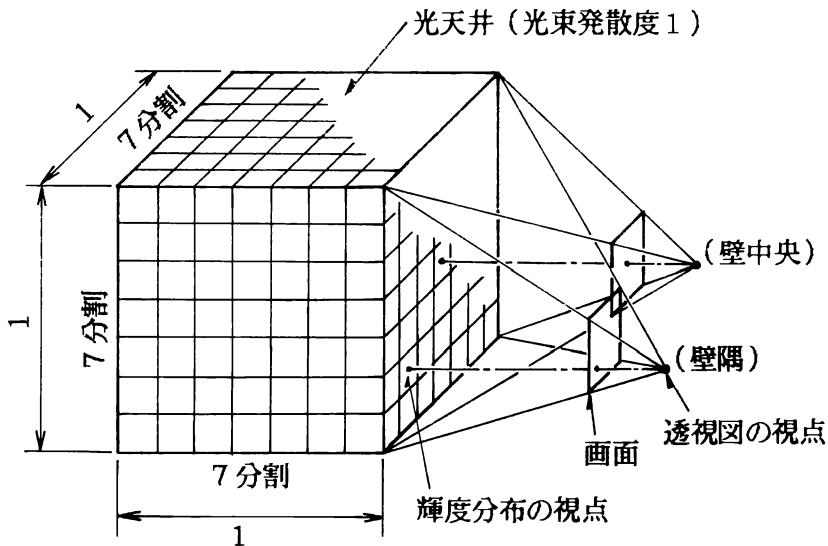


図5.2.1 計算対象

図5.2.2 および図5.2.3 に床および壁の直接照度分布を、図5.2.4および図5.2.5に床および壁の間接照度分布を反射率の条件別に、等照度線により示す。ただし、直接照度は要素の中心の値を、間接照度は(5.2.3)式による要素上の平均値を用いている。・印は分割面の中心を表わし、+印の分割面にはそ

の照度を数値で示した。

図5.2.6および図5.2.7に、壁面の中央および隅から室内を見た場合の反射輝度分布を、各反射率別に等輝度線により透視図で示す。ただし、反射輝度は(5.2.4)式による要素上の平均値である。また、透視図の視点および画面は壁面よりも後方に移動している。(図5.2.1参照) 各図の横には、等照度線、等輝度線の値の他に最大値と最小値を示した。

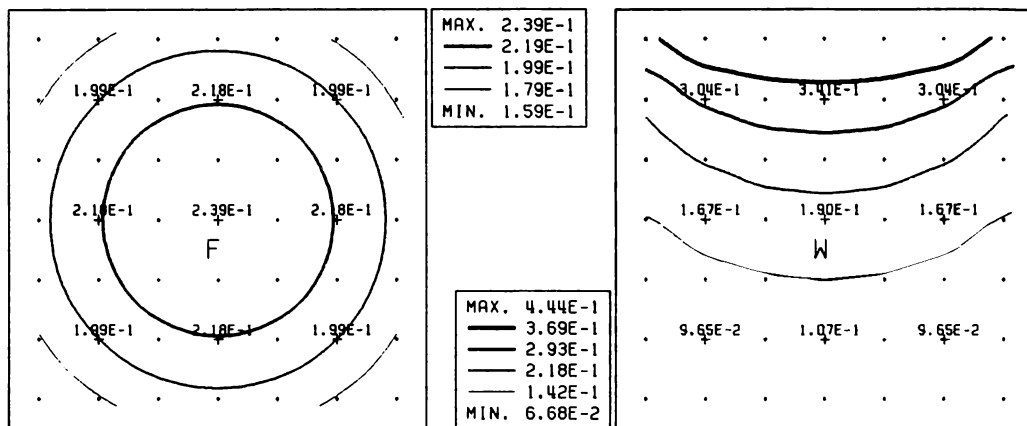
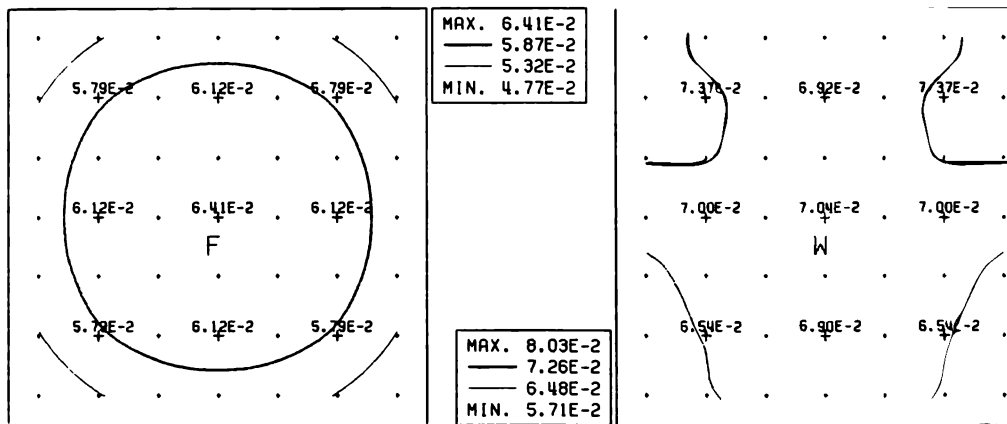
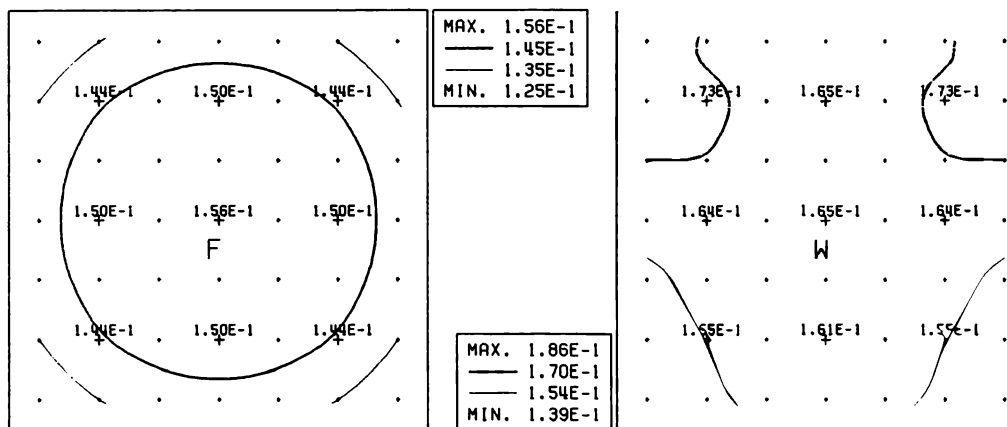


図5.2.2 床の直接照度分布

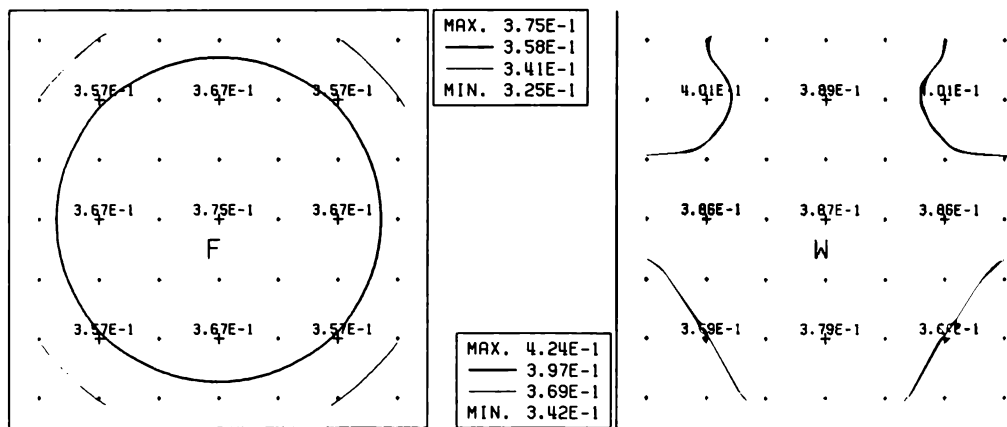
図5.2.3 壁の直接照度分布



(a)全反射率が 0.3 の場合



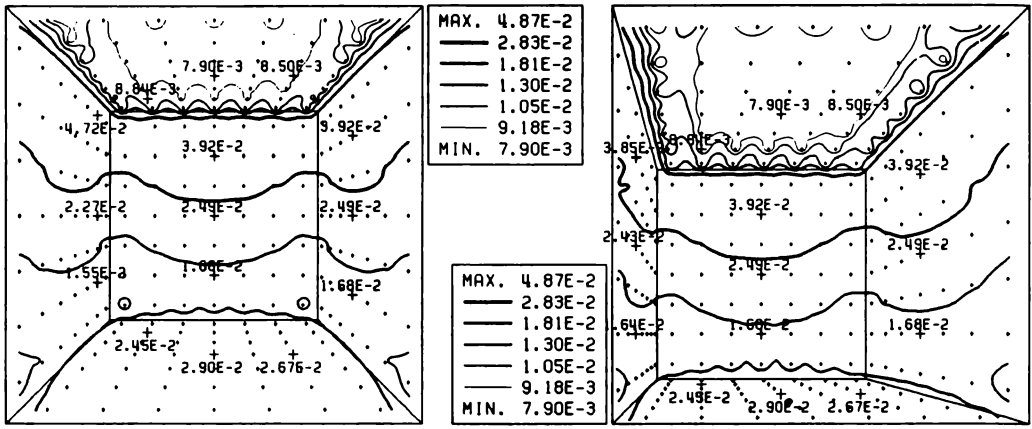
(b)全反射率が 0.5 の場合



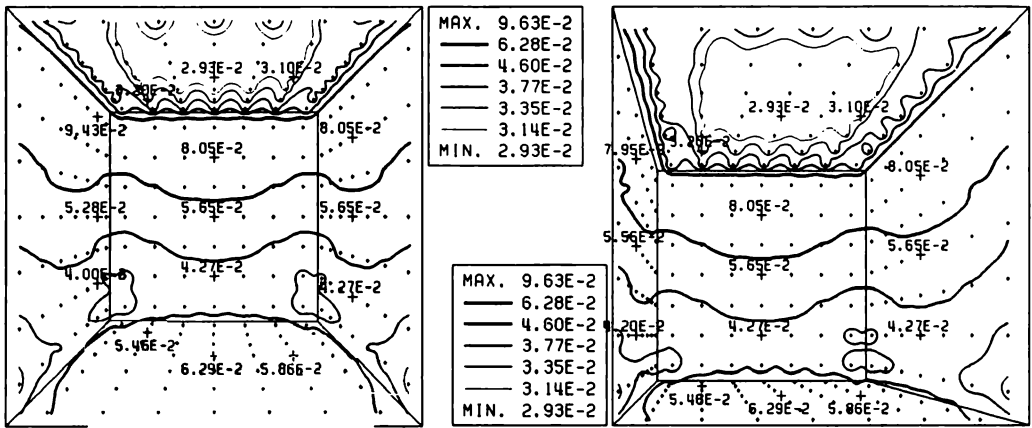
(c)全反射率が 0.7 の場合

図 5.2.4 床の間接照度分布

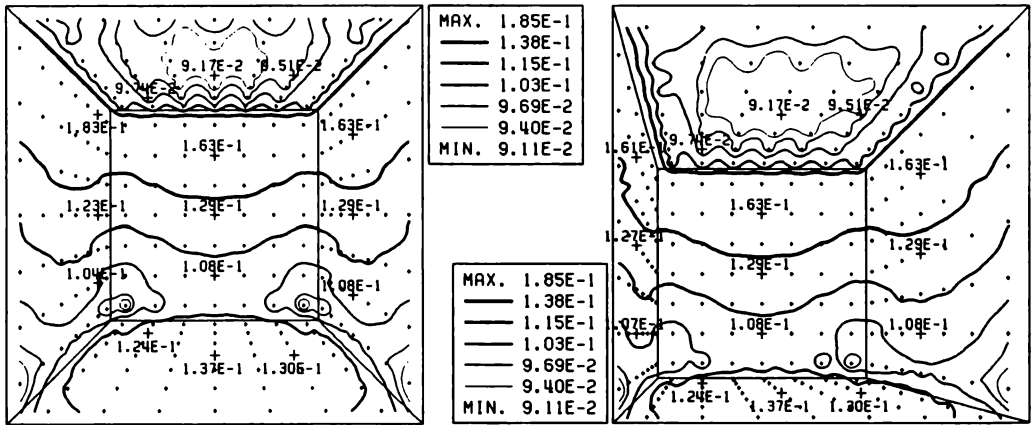
図 5.2.5 壁の間接照度分布



(a)全反射率が 0.3 の場合



(b)全反射率が 0.5 の場合



(c)全反射率が 0.7 の場合

図 5.2.6 反射輝度分布(壁中央) 図 5.2.7 反射輝度分布(壁隅)

5. 2. 3 考察

室内表面の反射指向特性が完全拡散の場合、内表面の反射輝度はあらゆる方向に一樣であり、直接照度および間接照度の和（全照度）と反射率の積を π で除すことで容易に得られる。そのため、照度および輝度計算を行なう場合は、たとえ室内表面が完全拡散からかけ離れた反射指向特性を持っていても、簡単のために完全拡散反射の仮定を用いることが多い。

本節では、次節以降の完全拡散でない面を持つ場合の計算法との比較のため、完全拡散反射の仮定を用いた間接照度および反射輝度の計算結果を示した。ただし、単純のため、反射率は全ての要素で同一としている。

表5.2.1に、図5.2.6の天井中央と正面の壁の上部、中央、下部および床中央の要素の反射輝度を反射率別に示す。輝度の比から、反射率が等差数列的に増加すると反射輝度は等比数列的に増加することがわかる。また、反射輝度が小さくなるにしたがって、反射率の増加に対する反射輝度の増加の割合（公比）が大きくなっている。これは、反射率の影響を強く受ける第2回以降の反射輝度の割合が、相対的に増加するためと考えられる。

表5.2.1 反射率が反射輝度に及ぼす影響

			反射率		
			0.3	0.5	0.7
天井	中央	輝度 (比)	$7.90 \cdot 10^{-3}$ (1/3.70)	$2.93 \cdot 10^{-2}$ (1)	$9.17 \cdot 10^{-2}$ (3.13)
	上部	輝度 (比)	$3.92 \cdot 10^{-2}$ (1/2.05)	$8.05 \cdot 10^{-2}$ (1)	$1.63 \cdot 10^{-1}$ (2.02)
正面 の壁	中央	輝度 (比)	$2.49 \cdot 10^{-2}$ (1/2.27)	$5.65 \cdot 10^{-2}$ (1)	$1.29 \cdot 10^{-1}$ (2.28)
	下部	輝度 (比)	$1.68 \cdot 10^{-2}$ (1/2.54)	$4.27 \cdot 10^{-2}$ (1)	$1.08 \cdot 10^{-1}$ (2.53)
床	中央	輝度 (比)	$2.90 \cdot 10^{-2}$ (1/2.17)	$6.29 \cdot 10^{-2}$ (1)	$1.37 \cdot 10^{-1}$ (2.18)

5. 3 準完全拡散反射および正反射を合わせ持つ面を持つ矩形室の 相互反射の性状

5. 3. 1 準完全拡散反射および正反射を合わせ持つ面内の 光束伝達数値解法

準完全拡散反射面とは、反射指向特性は完全拡散反射性（すなわち、反射光の輝度の指向性は一様）ではあるが、入射角により反射率が異なると定義された面である。

準完全拡散反射および正反射を合わせ持つ閉じた面SをN個に分割し、2. 5. 3節に示した間接光束を未知数とする拡散反射と正反射を合わせ持つ面内の光束伝達相互反射式を数値的に解いて、分割面S_kの平均間接照度E_{r_k}およびS_iで反射してS_kに入射する平均反射輝度L_{r_{i_k}}を求める。

分割面S_iで反射してS_kに入射する第1回反射光束Φ_{r_{1_{i_k}}は(2.5.29)式により精度よく求められる。空間に比べて分割面が十分に小さいならば、S_jの中心を発散してS_iに入射する初輝度L_{d_{j_i}}、固有光束分布係数f_{j_i}、拡散反射成分および正反射成分の係数F_{D_{j_{i_k}}およびF_{S_{j_{i_k}}を用いて、}}}

$$\Phi_{r1ik} = \sum_{j=1}^N F_{Djik} \pi f_{ji} S_j L_{dji} + \sum_{j=1}^N F_{Sjik} \pi f_{ji} S_j L_{dji} \quad (5.3.1)$$

第1回反射光束Φ_{r_{1_{i_k}}が得られれば、(2.5.28)式を参照して次のN²元連立一次方程式が導かれ、これを解けばS_iで反射してS_kに入射する間接光束Φ_{r_{i_k}が得られる。}}

$$[\delta_{I'J'} - F_{D'I'J'} - F_{S'I'J'}] \{\Phi_{rJ'}\} = \{\Phi_{r1I'}\} \\ (I'=1,2,\dots,N^2; J'=1,2,\dots,N^2) \quad (5.3.2)$$

ただし、(5.3.2)式において次のように書き換えている。

$$\begin{aligned}
\Phi_{rJ'} &= \Phi_{rJI} & (J' = N(J-1) + I) \\
\Phi_{rI'I'} &= \Phi_{rI'IK} & (I' = N(I-1) + K) \\
F_{D'I'J'} &= F_{DJIK} \\
F_{S'I'J'} &= F_{SJIK}
\end{aligned}
\tag{5.3.3}$$

また、 $\delta_{I'J'}$ はクロネッカーのデルタである。

S_K の平均間接照度 E_{rK} は、間接光束 Φ_{rIK} より

$$E_{rK} = \frac{1}{S_K} \sum_{I=1}^N \Phi_{rIK}
\tag{5.3.4}$$

S_I で反射して S_K に入射する平均反射輝度 L_{rIK} は、固有光束分布係数 f_{IK} を用いて、

$$L_{rIK} = \frac{1}{\pi f_{IK} S_I} \Phi_{rIK}
\tag{5.3.5}$$

5.3.2 計算条件と計算結果

比較のため、計算対象および光源は5.2節と同様とした。従って、床および壁の直接照度分布は図5.2.2および図5.2.3と同一である。

各内表面の反射指向特性は、天井、壁、床とも同一とし、非金属のフレネル反射（屈折率 $n = 1.55$ ）に従う表皮反射と、入射角により反射率の異なる準完全拡散反射の層内反射を合わせ持つものとする。すなわち、1の入射光のうち、表皮反射率 $R_M(\theta_i)$ のフレネル反射をした残り $(1 - R_M(\theta_i))$ が内部に屈折し、内部で拡散されて再び表皮から外部へ層内反射光として反射される。屈折光と層内反射光の割合（層内反射比 r_D ）を入射角によらず一定と考えて、層内反射率 $R_D(\theta_i)$ は次式で表される。[5]

$$R_D(\theta_i) = (1 - R_M(\theta_i)) \cdot r_D \quad (5.3.6)$$

45° 入射の積分球反射率計で反射率を測定することを前提として、5.2節の完全拡散反射の場合と比較のため、各内表面の45° 入射全反射率 R_{45} を0.3、0.5、0.7と変えて計算を行った。表皮反射率および各場合の層内反射率を図5.3.1に入射角によって示す。

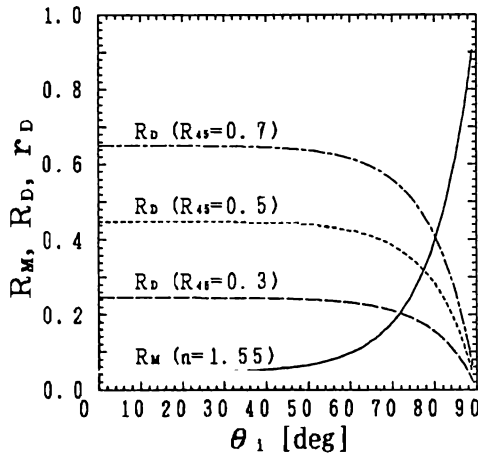
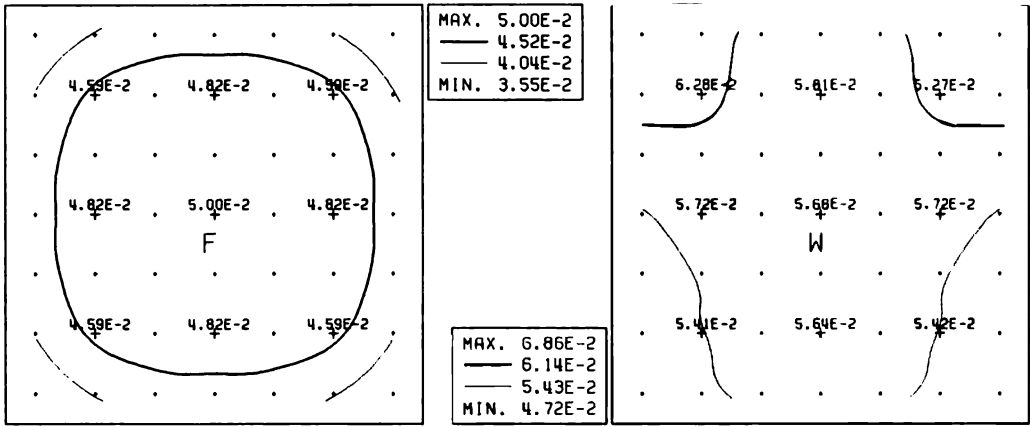


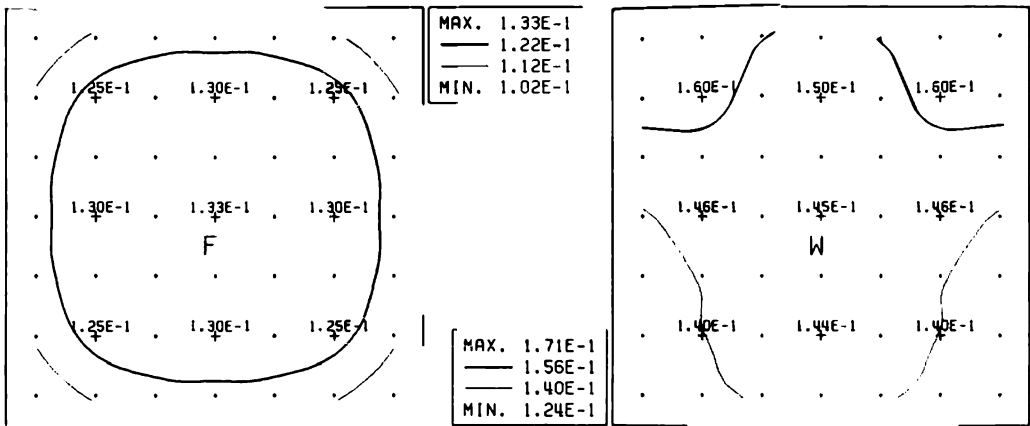
図5.3.1 内表面の表皮反射率 R_M および層内反射率 R_D

図5.3.2および図5.3.3に、床および壁の間接照度分布を各反射率別に等照度線により示す。

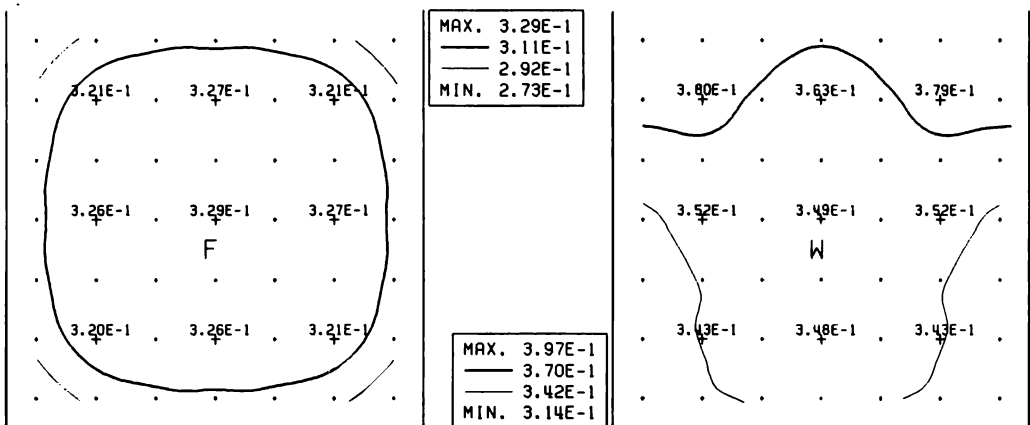
図5.3.4および図5.3.5に、壁面の中央および隅から室内を見た場合の反射輝度分布を、各反射率別に等輝度線により透視図で示す。



(a)全反射率が 0.3 の場合



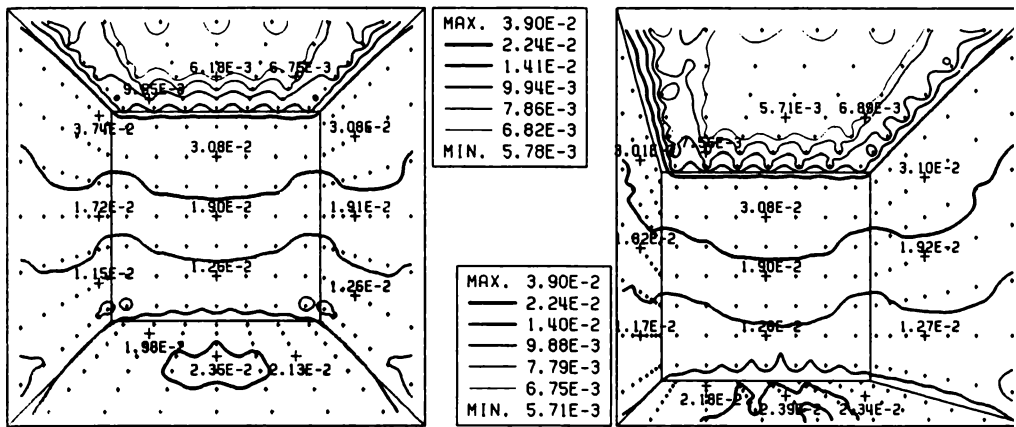
(b)全反射率が 0.5 の場合



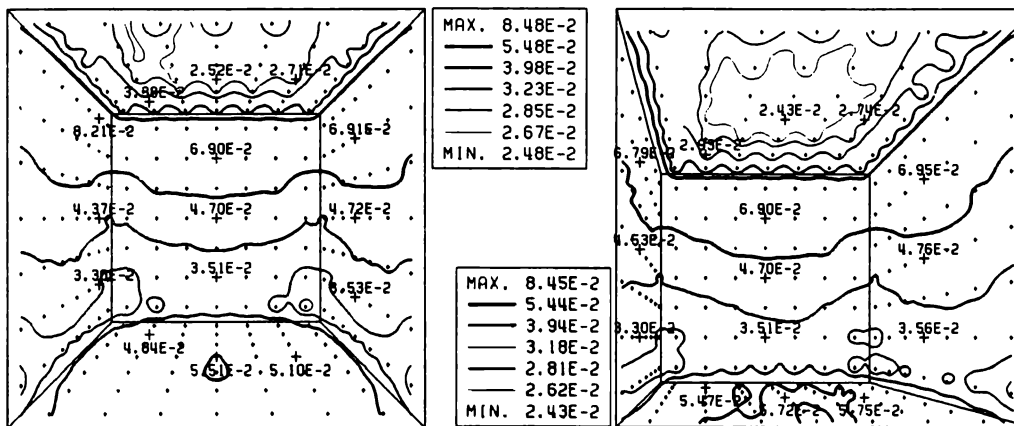
(c)全反射率が 0.7 の場合

図5.3.2 床の間接照度分布

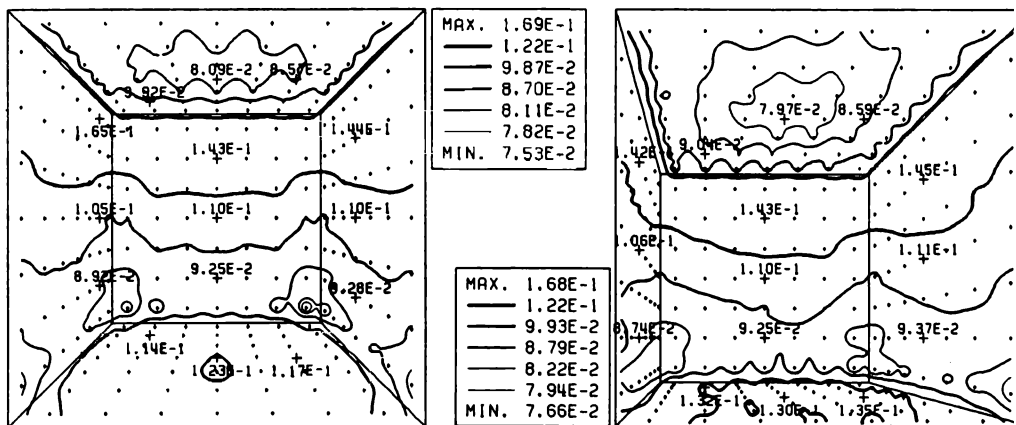
図5.3.3 壁の間接照度分布



(a)全反射率が 0.3 の場合



(b)全反射率が 0.5 の場合



(c)全反射率が 0.7 の場合

図 5.3.4 反射輝度分布(壁中央) 図 5.3.5 反射輝度分布(壁隅)

5.3.3 考察

数値計算により得られた間接照度と反射輝度を5.2節の完全拡散反射の場合と比較、考察する。

間接照度は、床および壁ともに、相対的な分布が完全拡散反射の場合とよく似ている。すなわち、床では、中央が最も大きく、周辺部では小さくなっており、壁では、上部（天井側）の隅角部が最も大きく、下部（床側）の隅角部が小さくなっている。

一方、間接照度の絶対値は、床、壁ともに、その中央の値が完全拡散反射の場合と比べて、全反射率が0.3、0.5、0.7の場合にそれぞれ約20%、15%、10%低くなっている。これから、全反射率が小さい程完全拡散反射の場合との差が大きくなることが分かる。これは、全反射率に占める層内反射率の割合が小さいためと考えられる。

反射輝度についても間接照度と同様で、完全拡散反射の場合と比べて相対的な分布はよく似ており、絶対値は約10～20%低くなっている。

以上から、準完全拡散反射と正反射を合わせ持つ面内の相互反射を、完全拡散反射の仮定により解いても大きな誤差は生じないと思われる。ただし、図5.3.1からわかるように非金属のフレネル反射は入射角が 60° を超えると反射率が急激に増大するため、視点への反射角が大きな場合は注意が必要である。

5. 4 拡散反射面を持つ矩形室の相互反射の性状

5. 4. 1 拡散反射面内の光束伝達数値解法

ここでいう拡散反射面とは、完全拡散反射性でも正反射性でもない中間的な反射指向特性を持つ面であり、表3.5.1の(II)準正反射および(III)半拡散反射の両者を含む。

拡散反射の閉じた面SをN個に分割し、2.5.2節に示した間接光束を未知数とする完全拡散でない面内の光束伝達相互反射式を数値的に解いて、分割面S_kの平均間接照度E_{r,k}およびS_iで反射してS_kに入射する平均反射輝度L_{r,i,k}を求める。

分割面S_iで反射してS_kに入射する第1回反射光束Φ_{r1,i,k}は(2.5.21)式により精度よく求められる。空間に比べて分割面が十分に小さいならば、S_jの中心を発散してS_iの中心に入射する初輝度L_{d,j,i}、係数F_{j,i,k}と固有光束分布係数f_{j,i}を用いて、

$$\Phi_{r1,i,k} = \sum_{j=1}^N F_{j,i,k} \pi f_{j,i} S_j L_{d,j,i} \quad (5.4.1)$$

第1回反射光束Φ_{r1,i,k}が得られれば、(2.5.20)式を参照して次のN²元連立一次方程式が導かれ、これを解けばS_iで反射してS_kに入射する間接光束Φ_{r,i,k}が得られる。

$$[\delta_{i',j'} - F'_{i',j'}] \{\Phi_{r,j'}\} = \{\Phi_{r1,i'}\} \\ (i'=1,2,\dots,N^2; j'=1,2,\dots,N^2) \quad (5.4.2)$$

ただし、(5.4.2)式において次のように書き換えている。

$$\begin{aligned}
\Phi_{rJ'} &= \Phi_{rJI} & (J' = N(J-1) + I) \\
\Phi_{rI'} &= \Phi_{rIK} & (I' = N(I-1) + K) \\
F'_{I'J'} &= F_{JK}
\end{aligned}
\tag{5.4.3}$$

また、 $\delta_{I'J'}$ はクロネッカーのデルタである。

(5.4.2)式の係数行列は、 N^4 個の要素のうち約 $N^4 - N^3$ 個が0であるので、LU分解などを利用する直接解法（クラウト法など）よりは、反復解法（ガウスザイデル法など）を使用する方が効率がよい。[6] (5.4.2)式の第P次の近似解 $\Phi_{rI'}^{(P)}$ を反復解法の計算式で示せば、

$$\begin{aligned}
\Phi_{rI'}^{(P)} &= \Phi_{rII'} + \sum_{J'=1}^{I'-1} F'_{I'J'} \cdot \Phi_{rJ'}^{(P)} + \sum_{J'=I'+1}^{N^2} F'_{I'J'} \cdot \Phi_{rJ'}^{(P-1)} \\
& & (I' = 1, 2, \dots, N^2)
\end{aligned}
\tag{5.4.4}$$

適当に小さな ε をあたえて、間接光束の増分 $\Delta \Phi_{rI'}^{(P)}$ が次式を満足するときに反復を打ち切る。

$$\Delta \Phi_{rI'}^{(P)} / \Phi_{rI'}^{(P)} \leq \varepsilon \quad (I' = 1, 2, \dots, N^2)
\tag{5.4.5}$$

ただし、

$$\Delta \Phi_{rI'}^{(P)} = | \Phi_{rI'}^{(P)} - \Phi_{rI'}^{(P-1)} |
\tag{5.4.6}$$

本節での計算では、 ε を 10^{-3} とした。

S_K の平均間接照度 E_{rK} は、間接光束 Φ_{rIK} より

$$E_{rK} = \frac{1}{S_K} \sum_{I=1}^N \Phi_{rIK}
\tag{5.4.7}$$

S_I で反射して S_K に入射する平均反射輝度 L_{rIK} は、固有光束分布係数 f_{IK} を用い

τ、

$$L_{rIK} = \frac{1}{\pi f_{IK} S_I} \Phi_{rIK} \quad (5.4.8)$$

5. 4. 2 計算条件と計算結果

比較のため、計算対象および光源は5. 2節と同様とした。従って、床および壁の直接照度分布は図5. 2. 2および図5. 2. 3と同一である。

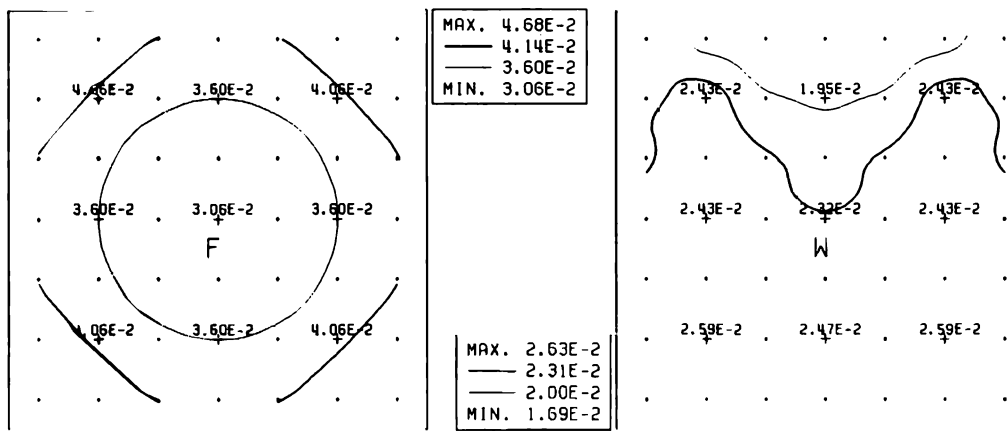
各内表面の反射指向特性は、天井、壁、床とも同一とし、第4章で構成した反射モデルに従って、拡散反射性の表皮反射と完全拡散性の層内反射を合わせ持つものとする。計算は、各内表面の45°入射全反射率を0.3、0.5、0.7と変えて行った。各場合の45°入射表皮反射率および層内反射率を表5. 4. 1に示す。

表5. 4. 1 内表面の45°入射表皮反射率および層内反射率

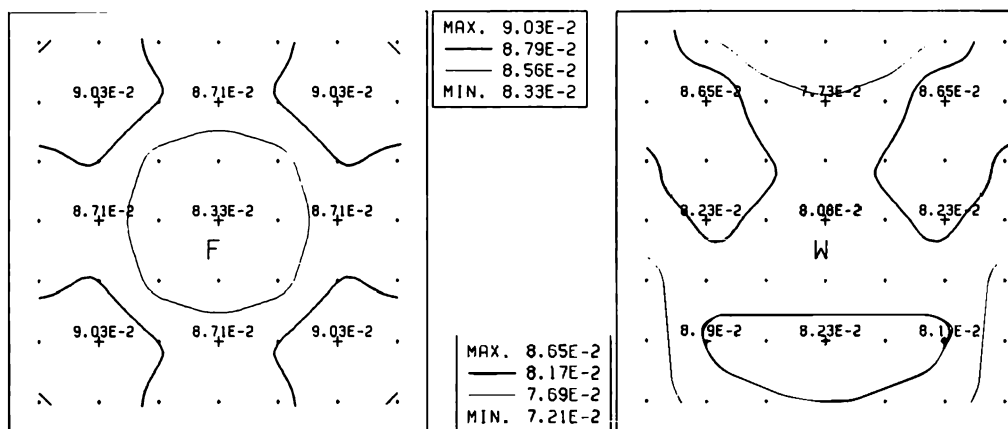
45° 入射全反射率	45° 入射表皮反射率	層内反射率
0.3	0.222	0.078
0.5	0.222	0.278
0.7	0.222	0.478

図5. 4. 1および図5. 4. 2に、床および壁の間接照度分布を各反射率別に等照度線により示す。

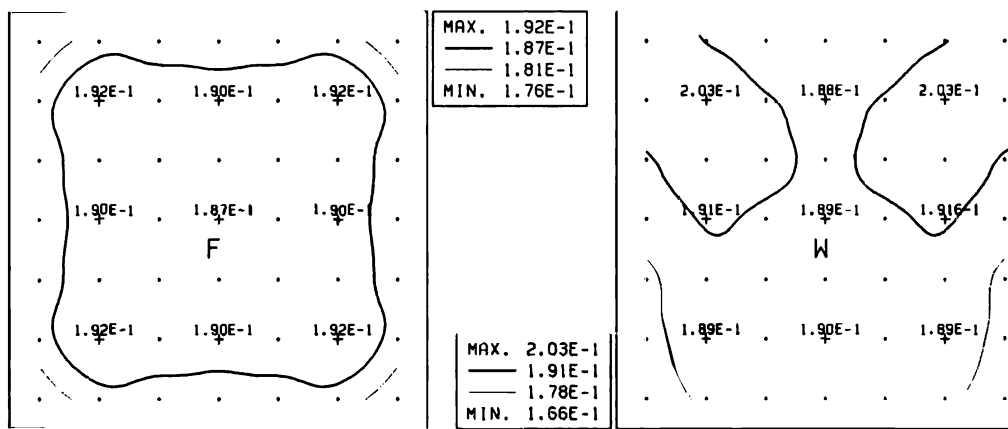
図5. 4. 3および図5. 4. 4に、壁面の中央および隅から室内を見た場合の反射輝度分布を、各反射率別に等輝度線により透視図で示す。



(a) 反射率が 0.3 の 合



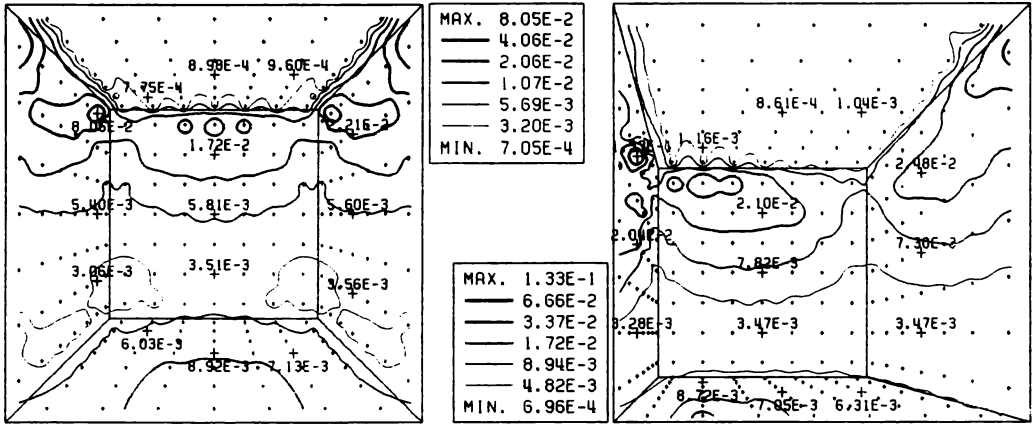
(b) 反射率が 0.5 の 合



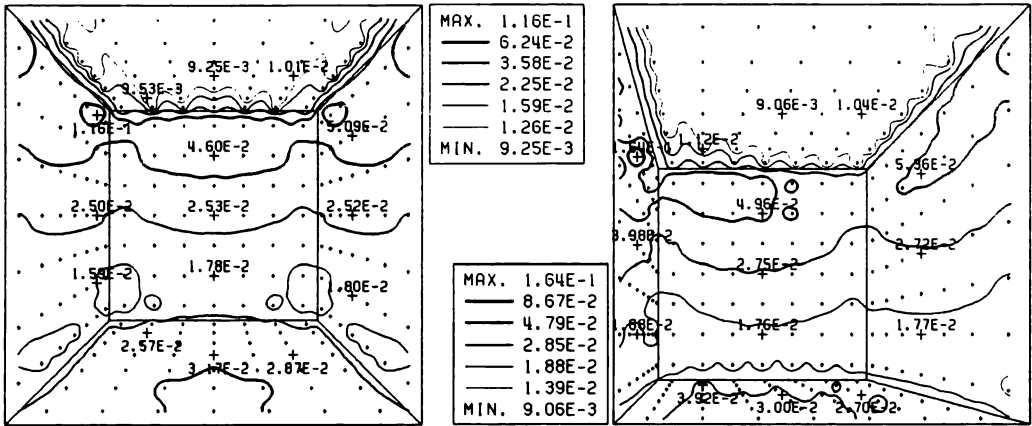
(c) 反射率が 0.7 の 合

図 5.4.1 床の間接照度分布

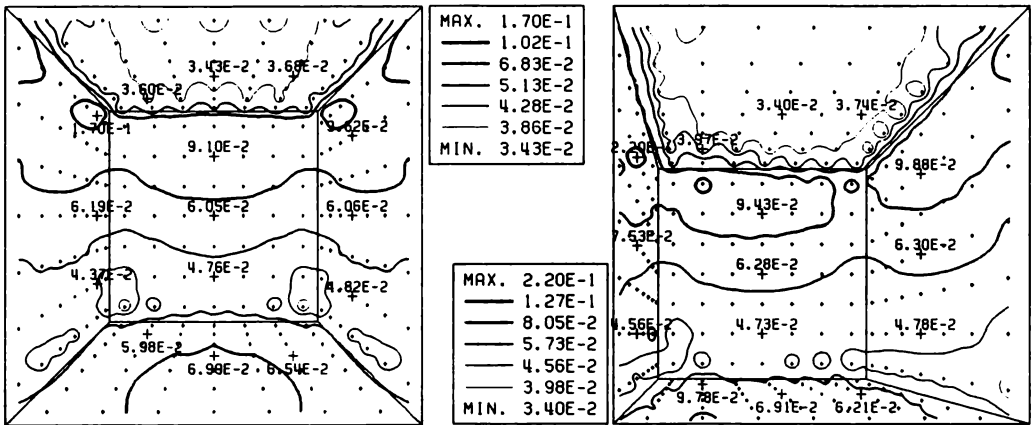
図 5.4.2 壁の間接照度分布



(a)全反射率が 0.3 の場合



(b)全反射率が 0.5 の場合



(c)全反射率が 0.7 の場合

図5.4.3 反射輝度分布(壁中央)

図5.4.4 反射輝度分布(壁隅)

5. 4. 3 考察

5. 2節と5. 3節に示した完全拡散面内および準完全拡散反射と正反射を合わせ持つ面内の相互反射の性状と比較、考察する。

間接照度の相対的な分布は、床では中央が低く、周辺部が高くなっており、壁では上部が低く、下部が高い。これは、完全拡散反射あるいは完全拡散反射と正反射を合わせ持つ場合と全く逆転している。この傾向は、全反射率が小さい程著しいが、これは、全反射率に占める表皮反射率の割合が大きくなるためと考えられる。

間接照度の絶対値は、床および壁の中央の値で反射率によらず約半分になっており、図5. 2. 2と図5. 2. 3の直接照度をそれぞれ加えて全照度で比較しても約20%~30%低くなっている。

反射輝度についても、相対的な分布、絶対値ともに大きく異なっている。

図5. 4. 3の視点が壁面中央にある場合は、全体的には完全拡散反射の場合と同様の相対的分布であるが、左右の壁の天井との隅角部で反射輝度が特に高くなっている。反射輝度の絶対値は、床および壁の中央の値で、完全拡散反射の場合に比べ約50%~70%低くなっており、一方、壁と天井の隅角部では、全反射率が0.3、0.5の場合に約20%~60%高くなり、全反射率が0.7の場合は、約10%低くなるのみである。

図5. 4. 4の、視点が床と壁の隅にある場合は、壁の上部では視点への反射角が大きくなり、反射輝度は完全拡散反射の場合に比べて約1.3~3.5倍にもなっている。以上の傾向は、全反射率が小さい程顕著である。

以上から、拡散反射面の相互反射を、完全拡散反射の仮定や準完全拡散反射と正反射の近似によって解くことは、照度および反射輝度分布をかなり高く見積る危険があり、部分的に高輝度となる要素を予測できないことが分かる。

5. 5 拡散反射面内の光束伝達簡易解法

5. 4節で、拡散反射面を持つ室の相互反射は、完全拡散反射の仮定や準完全拡散反射と正反射の近似では精度よく予測できないことが分かった。しかし、拡散反射面を持つ場合の計算は非常に時間がかかるため、日常的な実務には適用し難い。

本節では、精度を十分に保ちながら計算時間を節減できる拡散反射面内の相互反射の簡易計算法を示す。

5. 5. 1 簡易計算法

(a) 各種計算法と所要計算時間

5. 2節、5. 3節および5. 4節に示した完全拡散面内、準完全拡散反射と正反射を合わせ持つ面内および拡散反射面内の相互反射の計算法で、 45° 入射全反射率が0.5 の場合の各々の反射指向特性を持つ室（要素数294）の相互反射を解くのに要した計算時間（cpu時間）を表5.5.1に示す。計算には京都大学大型計算機センターのFACOM M780-30（159MIPS）を用いた。完全拡散反射の場合は、面への入射光束を未知数とする5. 2節に示した方法（完全拡散：5. 2節）による計算時間と、ある面を反射して他の面へ入射する光束を未知数とする5. 4節で示した方法（完全拡散：5. 4節）において反射指向特性を完全拡散反射とした場合の計算時間をあわせて示した。

表5.5.1において、「前処理」は係数行列の計算などに要する時間であり、「第1回反射」は(5.2.1)、(5.3.1)または(5.4.1)式で第1回反射光束を計算するのに要した時間、また、「間接光束」は(5.2.2)、(5.3.2)および(5.4.2)式の連立方程式を反復解法で解くのに要した時間である。反射回数は計算が収束するまでの全反射回数である。ただし、(5.4.5)式の収束条件 ε は 10^{-3} とした。

「前処理」において、（準完全拡散+正反射 5.3節）の方法の計算時間が他に比べて大きいのが、これは(2.5.26)式関数 $D[x_s, S_j]$ の計算に時間がかかるためである。 $D[x_s, S_j]$ の計算時間は要素数の2乗に比例して増大するが、室の寸法と分割方法のみに依存するので、同一の室について反射率や光源の条件だけを変えて繰り返し計算をする場合は、最初に一度だけ計算すればよい。

「1回反射当」において、（拡散反射：5.4節）の方法の計算時間が他と比べ約20倍にもなっている。これは、(5.4.1)式の係数 F_{IK} の総数が全要素数の3乗個にもなり、前処理の段階で計算しておいて計算機の内部記憶にすべてを保持しておくのが記憶容量の制約上困難であるので、逐一計算しているためである。一回反射当りの間接光束の計算時間は要素数の3乗に比例して増大するため、大規模な計算においては係数 F_{JK} の計算アルゴリズムに工夫を加えて高速化することが、全計算時間の削減に効果がある。

また、記憶容量が十分であれば、係数 F_{JK} を保持しておくことができ、一回反射当りの計算時間は、（完全拡散：5.4節）の方法と同等となる。

表5.5.1 各種計算法と所要計算時間

計算法	前処理 A	第1回反射 B	間接光束 C	反射回数 n	1回反射当 C/(n-1)	全時間 A+B+C
(完全拡散: 5.2節)	5.7 (95.0)	0.09 (1.5)	0.21 (3.5)	7 -	0.03 (0.5)	6.0秒 (100%)
(完全拡散: 5.4節)	5 (8.1)	2 (3.2)	55 (88.7)	7 -	9 (14.5)	62秒 (100%)
(準完全拡散 +正反射: 5.3節)	172 (71.7)	2 (0.8)	66 (27.5)	9 -	8 (3.3)	240秒 (100%)
(拡散反射: 5.4節)	7 (0.5)	37 (2.7)	1350 (96.8)	8 -	193 (13.8)	1394秒 (100%)

(b) 反射回数と反射光束の増加量

表5.5.1に示したように、(拡散反射：5.4節)の方法において間接光束の計算が計算時間の大部分を占めている。間接光束の計算時間は一回反射当りの計算時間と反射回数の積であるから、反射回数を減らすことによって計算時間は削減できる。

図5.5.1に、 45° 入射全反射率が0.3の場合の拡散反射面内の相互反射を(拡散反射：5.4節)の方法で解く過程における、 P 回目の反射光束 $\Phi_{rIK}^{(P)}$ と $P-1$ 回目の反射光束 $\Phi_{rIK}^{(P-1)}$ の差(増加量) $\Delta\Phi_{rIK}^{(P)}$ を各反射回数別に室の中心を通る断面図で示した。ただし、 $P=1$ の場合は第1回反射光束 $\Phi_{rIK}^{(1)} = \Phi_{r1IK}$ を示している。また、反射光束は(5.4.8)式により平均反射輝度とし、輝度の尺度は反射回数 P によって 10^{-P} に比例するように変えている。

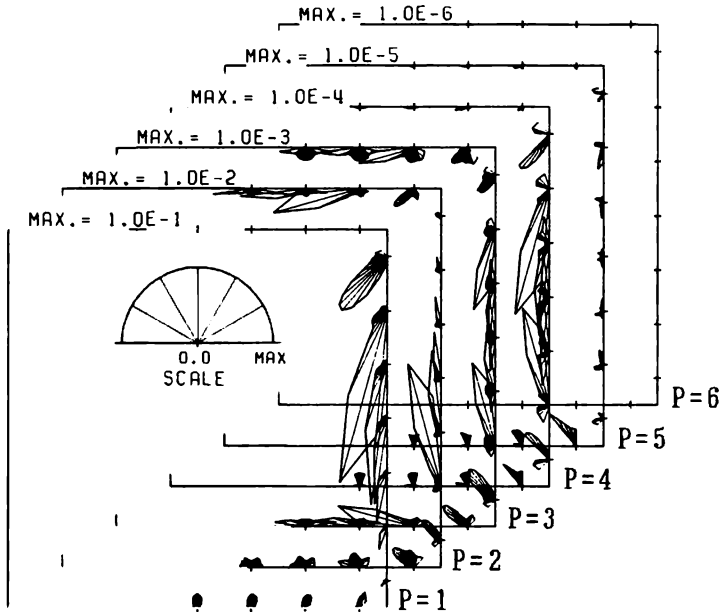


図5.5.1 反射光束の増加量

図5.5.1において、第2回反射（ $P=2$ ）の増加量は第1回反射（ $P=1$ ）のそれとはまったく異なった性状を示している。すなわち、第1回反射光束の指向性反射成分は大部分が床へ入射するが、第2回反射光束の指向性反射成分は壁から天井へ向かうものと天井から壁へ向かうものが多い。また、第2回反射光束が同じ方向の第1回反射光束よりも大きいところがかかなりあり、全反射光束を求める場合に第2回反射光束が無視できないことがわかる。一方、第3回以降の反射光束の指向性反射成分は、第1回と第2回反射を組み合わせたようになるが、その大きさは第1回および第2回反射と比べ、約 $1/100 \sim 1/10$ と小さく無視しても差し支えないと思われる。

(c) 簡易計算法

以上の考察から、拡散反射面内の簡易計算法は、1回および2回反射までは（拡散反射：5.4節）の方法を使用し、3回以降は、指向性を持つ表皮反射は無視して完全拡散反射の層内反射のみが起こると仮定して（完全拡散：5.2節）の方法を使用する。この簡易計算法によって 45° 入射全反射率が0.5の場合の室の相互反射を解くのに要する時間は、表5.5.1を参照して表5.5.2の様になる。ただし、第3回以降の時間には、完全拡散反射の前処理の時間を含む。全時間は243秒となり、（拡散反射：5.4節）の方法による全時間1394秒の約 $1/6$ である。

表5.5.2 簡易計算法と所要計算時間

前処理	第1回反射	第2回反射	第3回以降	全時間
7 (2.9)	37 (15.2)	193 (79.4)	6.0 (2.5)	243秒 (100%)

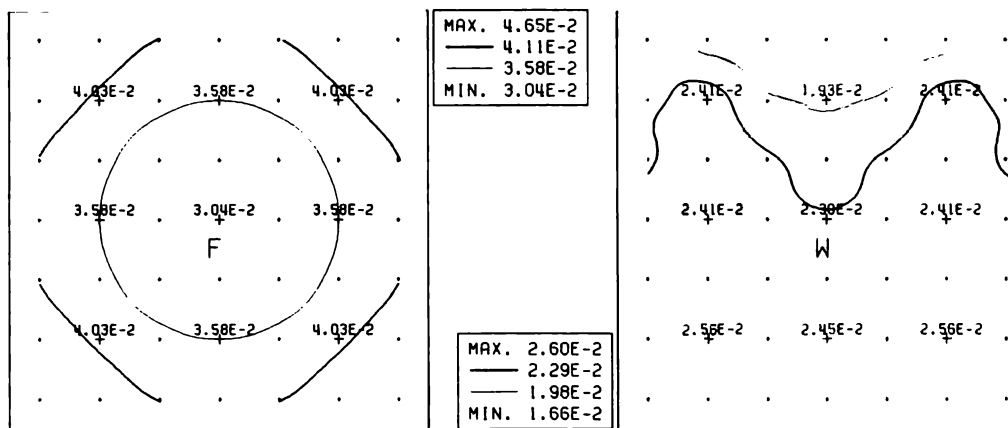
5.5.2 計算条件と計算結果

比較のため、計算対象および光源は5.2節と同様とした。従って、床および壁の直接照度分布は図5.2.2および図5.2.3と同一である。

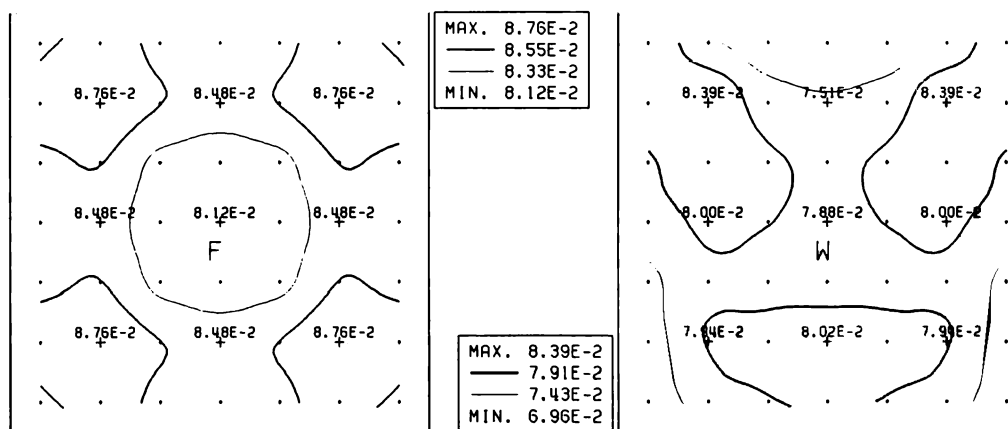
各内表面の反射指向特性は5.4節と同様とした。すなわち天井、壁、床とも同一とし、第4章で構成した反射モデルに従って、拡散反射性の表皮反射と完全拡散反射性の層内反射を合わせ持つものとする。計算は、各内表面の45°入射全反射率を0.3、0.5、0.7と変えて行った。

図5.5.2および図5.5.3に、床および壁の間接照度分布を各反射率別に等照度線により示す。

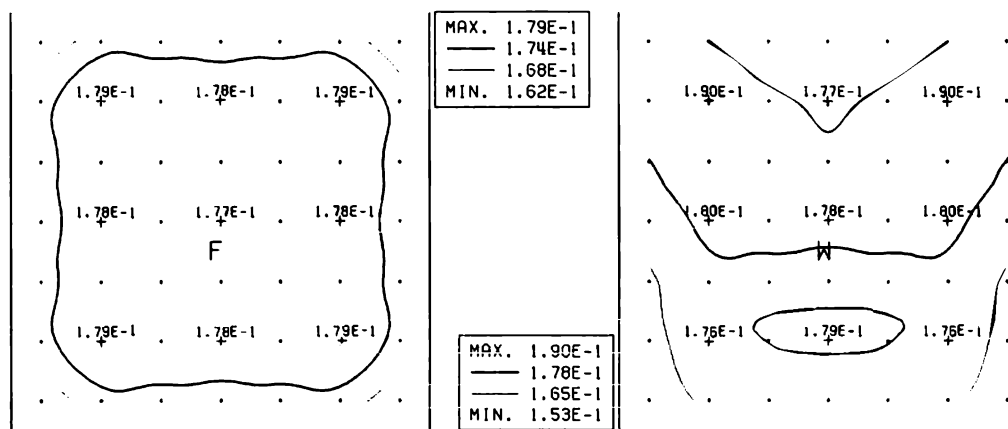
図5.5.4および図5.5.5に、壁面の中央および隅から室内を見た場合の反射輝度分布を、各反射率別に等輝度線により透視図で示す。



(a)全反射率が 0.3 の場合



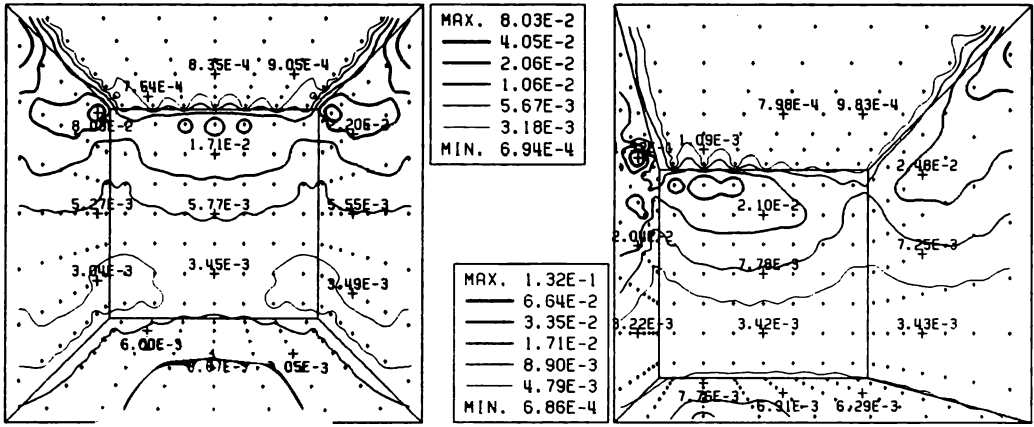
(b)全反射率が 0.5 の場合



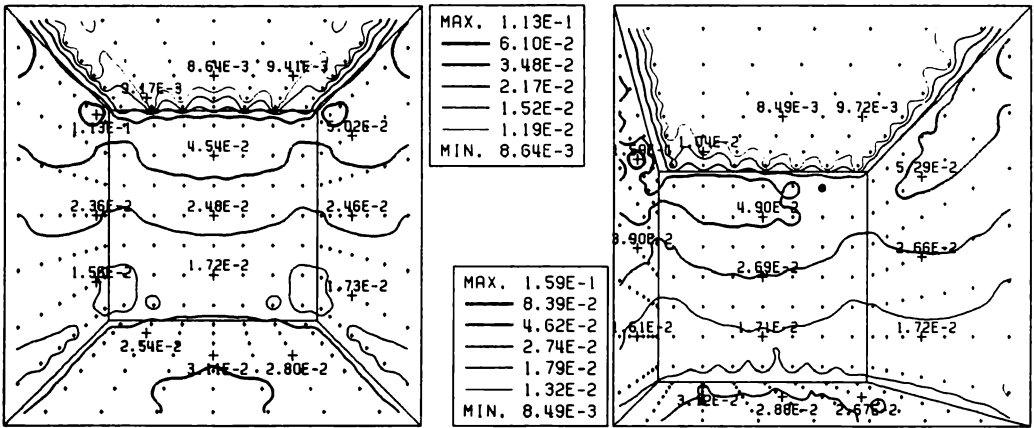
(c)全反射率が 0.7 の場合

図5.5.2 床の間接照度分布

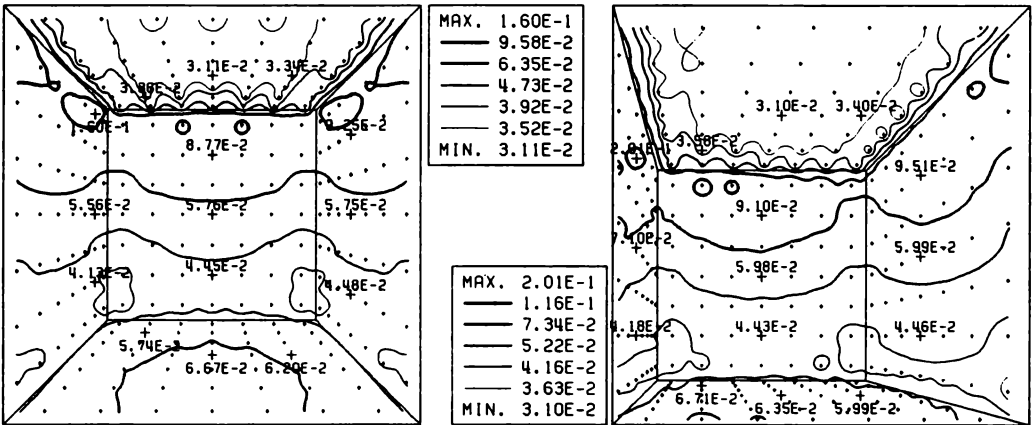
図5.5.3 壁の間接照度分布



(a)全反射率が 0.3 の場合



(b)全反射率が 0.5 の場合



(c)全反射率が 0.7 の場合

図 5.5.4 反射輝度分布(壁中央)

図 5.5.5 反射輝度分布(壁隅)

5. 5. 3 考察

5. 4節に示した拡散反射面内の相互反射の性状を精算とみなして比較、考察する。

間接照度の相対的な分布は、床および壁のいずれも精算とほとんど同様である。また、絶対値は、床および壁の中央の値で、反射率によって約1%~6%減少しているのみである。

反射輝度についても同様で、相対的な分布は精算とほとんど同様である。絶対値は、床、壁中央および部分的に高輝度な要素においても、反射率によって約1%~6%の減少しているのみである。

以上から、第3回反射以降は、表皮反射を無視する拡散反射面内の簡易計算法が有効であることが分かる。

5.6 結

本章では、完全拡散面内、準完全拡散反射と正反射を合わせ持つ面内、拡散反射面内の3種の相互反射の数値計算法で、それぞれの反射指向特性を持ち光天井を光源とする立方体状の矩形室の相互反射を解き、測定の容易な45°入射反射率を同一とした場合の結果を比較、考察した。また、拡散反射面内の簡易計算法を示し、精解法と比べて十分な精度を持ち、計算時間を大幅に削減できることを示した。

以下に、本章で得られた結果をまとめる。

完全拡散面内の相互反射の性状は、反射率が等差数列的に増加すると反射輝度は等比数列的に増加し、その公比は、反射輝度が小さくなるにしたがって大きくなる。

準完全拡散反射と正反射を合わせ持つ面内の相互反射の性状は、間接照度、反射輝度ともに相対的な分布は完全拡散面内の場合と似ており、絶対値は、約10%~20%低くなる。その差は、全反射率が小さい程大きくなる。

拡散反射面内の相互反射の性状は、完全拡散面内や、準完全拡散反射と正反射を合わせ持つ面内の性状とかなり異なっており、拡散反射面内の相互反射を、完全拡散反射の仮定や完全拡散反射と正反射の近似によって解くことは、照度分布および全体的な反射輝度分布をかなり高く見積る危険があり、また、部分的に高輝度な要素を予測することができない。この傾向は、反射率が小さい程著しい。

拡散反射面内の相互反射の計算に要する時間のうち、間接光束の計算が占める割合が大きい。全反射光束のうち、拡散反射による第1回反射光束および第2回反射光束は大きく、無視することができない。第2回反射までは拡散反射の反射指向特性を考慮し、第3回以降はそれを無視する拡散反射面内の簡易計算法によれば、精解法と比べて、間接照度、反射輝度ともに十分な精度で得られ、計算時間を大幅に削減できる。

参考文献

- [1] 松浦邦男, 小西弘高: フレネル型正反射成分を含む天井面を有する片側採光室の作業面間接照度, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.489-490, (1987).
- [2] 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).
- [3] コンピュータによる地域・建築環境情報の視覚化, 日本建築学会大会(九州)環境工学部門研究協議会研究資料, (1989).
- [4] 金子直礼, 菊池壮一, 高橋貞雄: 照明計画支援コンピュータグラフィックスシステム, 照明学会誌, 第72巻, 第11号, pp.652-656, (1988).
- [5] 松浦邦男: フレネル型正反射成分を含む面内の相互反射について, 照明学会全国大会講演論文集, pp.83-84, (1968).
- [6] 小門純一, 八田夏夫: 数値計算法の基礎と応用, p.28, 森北出版, (1988).

第6章 総括

近年、視環境が複雑化し、必要照度を確保することに重点をおく従来の「量の照明」に加えて、視野内の輝度分布を適切に調整する「質の照明」が求められている。しかし、輝度予測は、依然として完全拡散反射の仮定の下に照度を拡散反射率によって輝度に変換する従来の方法により行われている。本研究は、完全拡散でない面内の相互反射計算法に、実測により把握した建築仕上げ材料の反射指向特性を組み込み、空間の指向性輝度分布を詳細に予測する手法を提案するものである。

以下で本研究を各章毎に総括する。

第1章において、照明設計の目的および概要を述べ、従来の照明計算法の問題点を考察している。そして、本研究で提案する空間の指向性輝度分布の予測手法の照明設計における位置づけおよび本研究の目的について述べている。

第2章では、本研究の理論的根拠となる基本式を展開した。まず、反射特性関数を用いて完全拡散でない面の反射指向特性を表現した。次に、輝度を未知数とする拡散反射および拡散反射と正反射を併せ持つ面内の相互反射の基本式を導入し、それを用いて実際の数値計算に適した完全拡散でない面内の光束伝達相互反射式を導いた。

第3章は、反射指向特性モデルを構成するための基礎資料を得ることを目的としている。実際の室内空間の内表面の反射指向特性を把握するため、偏光を用いた表皮反射・層内反射分離変角測光法により各種建築材料の反射指向特性を測定し、各材料の反射指向特性が表皮反射と層内反射の組合せで表わせること、層内反射はおおむね拡散性で入射条件や材料表面の状態が変わっても変化が少ないのに対し、表皮反射は入射条件および表面の状態に左右され、正反射方向を中心とする指向性を持ち、反射指向特性の総合的な性状に大きく影響することを明らかにした。

第4章では、完全拡散でない面内の相互反射の計算法に実際の反射指向特性を組み込むための反射指向特性の数式モデルを構成した。まず正反射性小素面の理論およびマスキングの概念を導入して表皮反射のモデルを反射特性関数を用いて構成した。また層内反射比によって層内反射の反射指向特性のモデルをやはり反射特性関数を用いて構成した。そして、実測値によりこれら反射モデルの係数を推定した。これにより、特定の角度条件の反射特性関数の測定によって材料表面の物理的特性を把握し、それをもとに、照明計算で必要となる任意の角度条件の反射特性関数を推定することが可能となり、反射指向特性の測定の簡略化が可能となった。

第5章では、反射指向特性の数式モデルを完全拡散でない面内の光束伝達法に組み込み、種々の反射指向特性を持つ矩形室内の指向性輝度分布の性状を数値実験により明らかにした。数値実験の結果を、完全拡散反射の仮定および準完全拡散反射と正反射の近似による結果と比較し、これらの仮定および近似が拡散反射面内の相互反射を過大に見積る危険のあることを示した。また、完全拡散でない面内の指向性輝度分布を十分な精度で求めることのできる簡易計算法を開発し、精算に比べて計算時間を大きく削減できることを示した。

以上述べたように、本研究により完全拡散でない面を持つ一般の室内空間の指向性輝度分布を詳細に予測することが可能となり、より精度の高い照明環境の予測手法を照明設計に導入することができる。

今後は、各種建築材料の反射指向特性の設計用資料を系統的に収集することが望まれる。

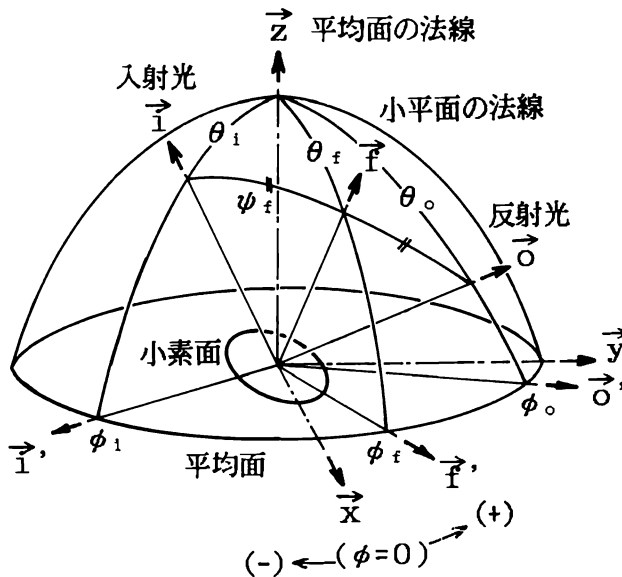
付録 平均面と正反射性小素面の角度関係

平均面への入射方向 (θ_i, ϕ_i) と反射方向 (θ_o, ϕ_o) から、小素面の法線の方向 (θ_f, ϕ_f) と小素面への入射角 ψ_f を求める。

(θ_i, ϕ_i) の方向からの平行光が、 (θ_f, ϕ_f) の向きの法線を持つ小素面に入射角 ψ_f で入射し、 (θ_o, ϕ_o) の方向に正反射したとする。平均面の単位法線ベクトルを $\vec{z} = (0, 0, 1)$ 、方位角 ϕ の基準線($\phi = 0$)の単位方向ベクトルを $\vec{x} = (1, 0, 0)$ とすれば、入射光と反射光の単位方向ベクトルは、(図A.1参照)

$$\begin{aligned} \vec{i} &= (i_x, i_y, i_z) \\ &= (\sin\theta_i \cos\phi_i, \sin\theta_i \sin\phi_i, \cos\theta_i) \end{aligned} \tag{A.1}$$

$$\begin{aligned} \vec{o} &= (o_x, o_y, o_z) \\ &= (\sin\theta_o \cos\phi_o, \sin\theta_o \sin\phi_o, \cos\theta_o) \end{aligned} \tag{A.2}$$



図A.1 平均面と小素面の角度関係

特に、面が入射方位に関して等方性ならば、 $\phi_i = 0$ として、

$$\vec{i} = (i_x, i_y, i_z) = (\sin\theta_i, 0, \cos\theta_i) \quad (\text{A.3})$$

さらに、反射光が入射面内にある場合は、 $\phi_o = 0$ または $\phi_o = \pi$ として、

$$\vec{o} = (o_x, o_y, o_z) = (\pm\sin\theta_o, 0, \cos\theta_o) \quad (\text{A.4})$$

ただし、負号は反射光が法線に関して正反射側にある場合である。

小素面の単位法線ベクトル \vec{f} は、 \vec{i} 、 \vec{o} を用いて

$$\vec{f} = \frac{\vec{i} + \vec{o}}{|\vec{i} + \vec{o}|} = \frac{1}{\sqrt{(i_x + o_x)^2 + (i_y + o_y)^2 + (i_z + o_z)^2}} \times (i_x + o_x, i_y + o_y, i_z + o_z) \quad (\text{A.5})$$

\vec{i} 、 \vec{o} の平均面への射影ベクトルを \vec{i}' 、 \vec{o}' とすれば

$$\vec{i}' = (i_x, i_y, 0) \quad (\text{A.6})$$

$$\vec{o}' = (o_x, o_y, 0) \quad (\text{A.7})$$

\vec{f} の平均面への単位射影ベクトル \vec{f}' は、 \vec{i}' 、 \vec{o}' を用いて

$$\vec{f}' = \frac{\vec{i}' + \vec{o}'}{|\vec{i}' + \vec{o}'|} = \frac{1}{\sqrt{(i_x + o_x)^2 + (i_y + o_y)^2}} \times (i_x + o_x, i_y + o_y, 0) \quad (\text{A.8})$$

以上を用いて、 θ_f 、 ϕ_f 、 ψ_f は次式で表される。

$$\begin{aligned} \theta_f &= \cos^{-1}(\vec{f} \cdot \vec{Z}) \\ &= \cos^{-1} \frac{i_z + o_z}{\sqrt{(i_x + o_x)^2 + (i_y + o_y)^2 + (i_z + o_z)^2}} \end{aligned} \quad (\text{A.9})$$

$$\begin{aligned} \phi_f &= \cos^{-1}(\vec{f}' \cdot \vec{X}) \\ &= \cos^{-1} \frac{i_x + o_x}{\sqrt{(i_x + o_x)^2 + (i_y + o_y)^2}} \end{aligned} \quad (\text{A.10})$$

$$\psi_f = \frac{1}{2} \cos^{-1}(\vec{f} \cdot \vec{O}) = \frac{1}{2} \cos^{-1}(i_x o_x + i_y o_y + i_z o_z) \quad (\text{A.11})$$

関連発表論文

日本建築学会計画系論文報告集

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, 第388号, 昭和63年6月, pp.15-22.

Proceedings of Sixth European Light Congress, Part 2

Kunio MATSUURA, Yoshiaki UETANI : A Separation Measurement of Boundary Reflected and Layer Reflected Components of the Directional Characteristics of Building Materials Using a Gonio-Reflectometer with Polarizers, pp.226-235,(1989).

日本建築学会近畿支部研究報告集

松浦邦男, 木内隆子, 上谷芳昭: 完全拡散でない面を持つ側窓室の作業面間接照度に関する模型実験, 第27号, 昭和62年, pp.141-144.

松浦邦男, 上谷芳昭: 建築材料の反射指向特性のモデル化, 第28号, 昭和63年, pp.121-124.

日本建築学会大会学術講演梗概集

松浦邦男, 上谷芳昭: 木質材料の表皮・層内各反射指向特性(続報 入射面以外の反射指向特性), 昭和61年8月, pp.627-628.

松浦邦男, 木内隆子, 上谷芳昭: 建築材料表面の偏光を用いた反射指向特性の測定, 昭和62年10月, pp.501-502.

松浦邦男, 上谷芳昭: 完全拡散でない面内の相互反射の計算, 昭和63年10月, pp.47-48.

日本照明学会全国大会講演論文集

松浦邦男, 上谷芳昭: 非整形な空間内の相互反射の計算, 平成元年8月, p.56.

謝辞

本研究をまとめるにあたり、終始御指導、御鞭撻を賜り、かつ暖かい励ましを頂いた京都大学教授松浦邦男先生に心より厚く御礼申し上げます。

また、京都大学教授寺井俊夫先生、同助教授中村泰人先生、同助教授古江嘉弘先生には、貴重なご助言、ご意見をいただき、暖かく見守っていただいたことに深く感謝致します。

大学院進学以来、日本建築学会近畿支部光環境部会に出席させていただき、大阪大学名誉教授伊藤克三先生をはじめ諸先生方に御教示や激励をいただいたことに深謝致します。

京都大学助手広川美子先生、同吉田治典先生、同平岡久司先生には、ご配慮、激励と有益なご助言をいただいたことに感謝致します。

京都大学技官木内隆子氏、同助手原田和典氏、同堀之内吉成氏には研究環境を整えていただくとともに気楽な相談相手として励ましていただきましたことに感謝致します。

論文をまとめるにあたりご助力いただいた松浦研究室の大学院生岩田朋子氏、激励をいただいた檀国大学校助教授金會瑞氏、実験にご協力いただいた当時の卒論生藤井俊一氏、佐々木毅氏、大森利氏ならびに松浦研究室の皆様には謝意を表します。

最後になりましたが、貴重な試料を快くお貸しくださった京都大学農学部増田稔先生に深謝致します。