

BSDF について

株式会社タイコ
牛山善太

様々な照明系を設計する際には、しばしば光を適当に散らすことの出来る拡散面は重要な要素となる。当然 LED を用いた照明系においても同様であり、詳しくは本連載において何れ触れさせていただくつもりではあるが、色むらを消したり、影を目立たなくしたり、輝度の集中を避けて品位の高い照明系を目差す場合にも必須となる。

実はこうした拡散面の性質をコンピュータ・シミュレーション的に表現する事は、とくに一般的に利用可能なコンピュータ性能がブアな時代には簡単ではなかった。また様々な計算方法も存在した。しかし現在では確率的なモンテカルロ法により照明計算のための光線追跡を行うことも主流となり、またこの計算方法にも相性が良く、拡散面の情報は今回解説させていただく BSDF 関数によるデータの蓄積、活用がやはり最も汎用性もあり、便利ではないかと言う意見が、多くの照明系評価ソフトに BSDF による拡散面の表現機能が装備されている事からも判るとおり、説得力を持つに至った。この背景にある、これまでセンシティブ過ぎて困難であった BSDF の測定が現場レベルでも可能となって来たことの意義も大きい。

今回は、まず、この BSDF についての基本的な解説をさせていただきたい。

1. 表面の散乱反射特性・BRDF の概念

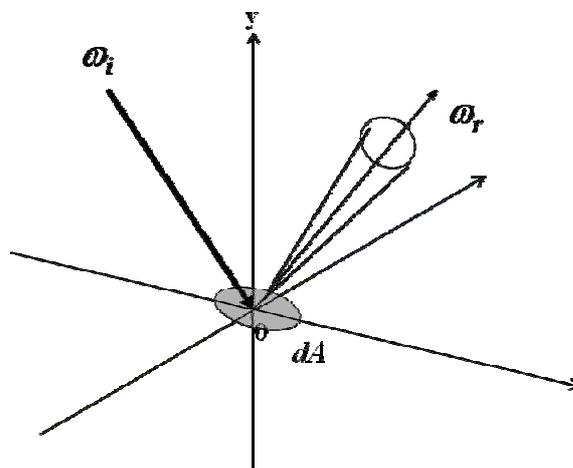


図1 BSDFの定義 (図はBRDF)

面積 dA のある媒質境界表面微小部分 a に ω_i 方向からの微小立体角 $d\omega_i$ 内の光が到達する場合を考えよう(図1)。ここで、さらに ω_i とは異なる方向 ω_r に反射される光を考えると反射される光のエネルギーは ω_i 方向から a に達する光の照度に比例すると考え、この関係を、

$$dL_r(\vec{\omega}_r) \propto dE(\vec{\omega}_i) \quad (1)$$

と表わそう。そこで、(1)式の関係における比例定数を BRDF とすれば、

$$BRDF = (\text{散乱光の輝度}) \div (\text{入射面積 } dA \text{ に於ける照度})$$

であり、

$$dL_r(\vec{\omega}_r) = BRDF(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_r) \cdot dE(\vec{\omega}_i)$$

dPi を dA に含まれる光束とすれば、照度、輝度の定義から

$$dE(\vec{\omega}_i) = \frac{dP_i}{dA} = \frac{dL_i(\vec{\omega}_i) d\omega_i dA \cos \theta_i}{dA}$$

と成るので(入射照度 dE は、立体角、光束中のエネルギー密度に比例してその値が変化する。また、平面の法線に対し入射方向が傾くことにより入射スポットが大きくなり単位面積当たりのエネルギー・照度も変化する。)、

$$dL_r(\vec{\omega}_r) = BRDF(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_r) \cdot dL_i(\vec{\omega}_i) \cos \theta_i d\omega_i \quad (2)$$

と(1)式は表わされ、BRDF(bidirectional reflectance distribution function) は、

$$BRDF(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_r) = \frac{dL_r(\vec{\omega}_r)}{dL_i(\vec{\omega}_i) \cos \theta_i d\omega_i} \quad (3)$$

となる。BRDF とは斯様に、物質表面における散乱特性をその表面固有の定数として定量化するものであり、(3)式において、おのこの規定される入射方向、反射方向における、それぞれ、(微小)照度と輝度の比であって、steradian⁻¹なる次元を持つ。この BRDF が分かれば、どの方向からの入射光に対しても、その反射光の輝度分布を得ることが出来る。そして BRDF が測定値としてデータベース化、或いは関数化されていれば(いずれにしても、コンピュータ計算のためには、補完の意味も含めて何らかの関数化が必要になってくるが)、散乱面で度の様に光が散乱されるかのシミュレーションが汎用的に可能になる。

この BRDF は BSDF(bidirectional scatter distribution function)、双方向散乱分布関数と呼ばれるものの一つであり、反射と同様に定義され、透過の場合には、

BTDF(bidirectional transmittance distribution function)

がある。透過面の入射光とは裏の側に、輝度を調べる拡散方向をとれば、上述のBRDFとまったく同じ様に考えられる。また、さらに回折散乱光、空間散乱に対する、

BDDF(bidirectional diffraction distribution function)

BVDF(bidirectional volume samples distribution function)

等も存在する。そしてこれらは波長領域ごとに設定が可能となる。

2. BRDFにおける入射照度と反射輝度の関係

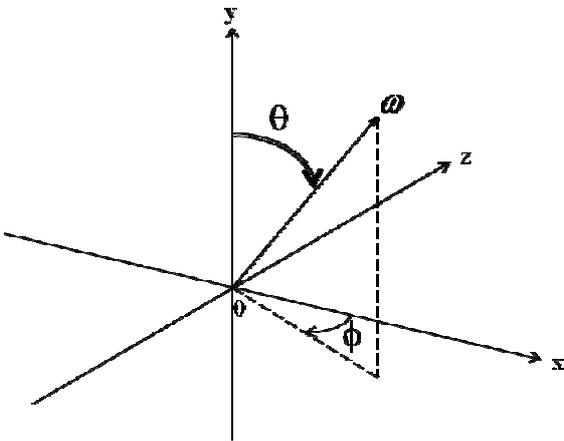


図2 角度、方位座標

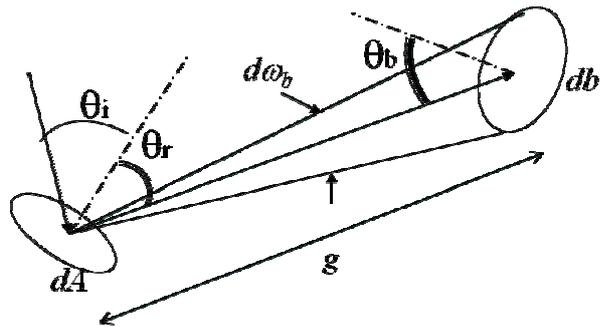


図3 BRDFの考察

BRDFを考える上で重要になる(1)式の成立についてここで検討してみよう。図2、図3にあるように諸量を設定する。微小面積 dA における拡散を考えると、入射、反射方向についての表記はこれまで通りである。また、反射光束の立体角を考えるために、反射光により照らされる微小面積 db を設定しよう。この時、反射光と、この面の法線の為す角度を θ_b 、 dA 面と db 面の距離を g とする。この時、 db に達するエネルギー・放射束 dF_b は、

$$dF_b = dL_r(\theta_r, \phi_r) dA \cos \theta_r \frac{db \cos \theta_b}{g^2} \quad (4)$$

この式を θ_i 、 ϕ_i 方向から dA 面に入射するエネルギー、 dF_a で片々割ると、

$$\frac{dF_b}{dF_a} = dL_r(\theta_r, \phi_r) \frac{dA}{dF_a} \cos \theta_r \frac{db \cos \theta_b}{g^2} \quad (5)$$

となる。 db に張る立体角 $d\omega_b$ と dA 上の照度 dE_i を考えれば(5)式は、

$$\frac{dF_b}{dF_a} = \frac{dL_r(\theta_r, \phi_r)}{dE_i(\theta_i, \phi_i)} \cos \theta_r d\omega_b \quad (6)$$

なので、

$$\frac{dL_r(\theta_r, \phi_r)}{dE_i(\theta_i, \phi_i)} = \frac{dF_b}{dF_a} \cdot \frac{1}{\cos \theta_r d\omega_b} \quad (7)$$

一般的には、入射のエネルギーの変化により光波の進行経路が変化することとは無く、(7)式右辺のエネルギー比、或は反射角、反射立体角は、入射光の反射後の光波の進行経路により定められる数値なので、これらの値は、そして、(7)式右辺の BRDF は特定の入射、射出方向、特定の表面の拡散性に対する定数となる。

3. 双方向の意味について

BSDF の bidirectional、双方向の意味について考える。簡単に言えば、光源と測定点の役割を入れ替えても BSDF の値は変わらない、と言う事であるが、既述のように BSDF は回折現象等も包含する概念であり、それらの領域をも含む考察が必要であるが、ここでは測光学の範疇で、つまり幾何光学でこの性質について解説させていただきたい。

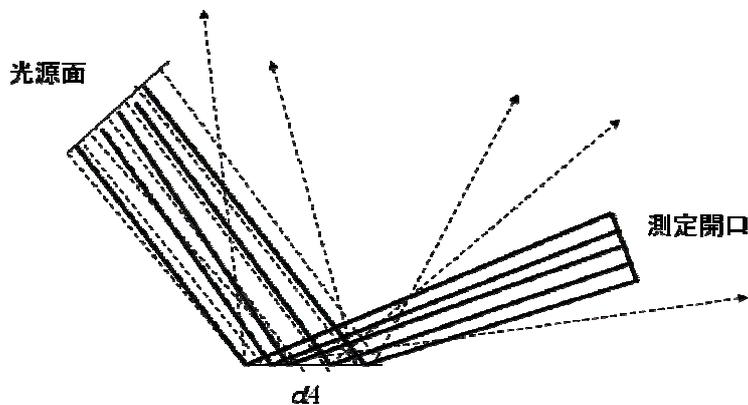


図4 拡散面光線追跡図

図4にある様な光源、測定器開口によって BSDF を測定する場合を考える。面積 dp 、 dq の光源面、測定開口までの距離をそれぞれ、 g, h とする。この状況を照明評価ソフトで精密に評価するとすれば、多数の光線が光源面より発せられて、拡散面に達し、散乱される。ここでの散乱現象は幾何学的には拡散面の微細構造に基づいた、基本的に、スネルの屈折則、反射則の適用に従い光路が決められる。つまり、微小な、硝子等の誘電体境界面、或いは金属面の多くの集合によりそれぞれにおいて屈折、反射が起き、光が散乱されると考える。そして、そのうちの何本かが無事測定開口に達し、それらのエネルギーが集計され光束が計算され、輝度も得られることになる。

ここで、面積 dp の光源面と面積 dq の測定開口の役割のみをそっくり入れ

替えることを考えよう。測定開口を光源面、光源面を測定開口と看做するのである。すると、上記のこれら二つの開口を結ぶ幾つかの光線は、その方向を逆にしても経路は変わらないはずである。なぜならば、上記の幾何光学的法則は可逆（入射と射出の条件に対して対称）だからである。すると、順方向の場合と同じエネルギー（光束）が測定開口に達する事になる。

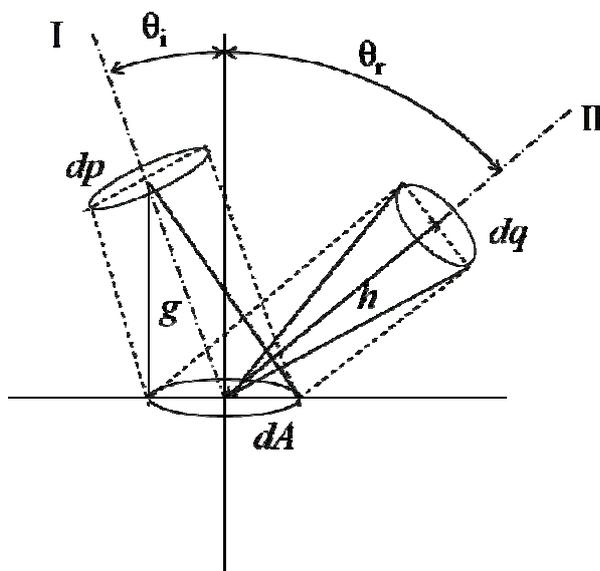


図5 双方向性の検討

順方向の場合、 dA に入射する光束は、光源からの光の輝度は同じに考えるべきであるから（図5）、完結のために、軸 I と II は同一平面内に存在し、軸 I と dp 、軸 II と dq は直交しているとして、

$$dF_a = dL_i \frac{dA \cos \theta_i}{g^2} dp$$

逆方向の場合には (8)

$$dF'_a = dL_i \frac{dA \cos \theta_r}{h^2} dq$$

となる。従って、順方向、逆方向における dA 上の照度は

$$dE = dL_i \frac{\cos \theta_i}{g^2} dp \quad , \quad dE' = dL_i \frac{\cos \theta_r}{h^2} dq \quad (9)$$

となる。また、順方向の場合にも、上述の通り逆方向の場合にも測定に掛かる光線本数、つまり光束 dF_b は同じであるからそれぞれの方向の輝度は

$$dL_r = \frac{dF_b}{dA \cos \theta_r \frac{dq}{h^2}} \quad , \quad dL'_r = \frac{dF_b}{dA \cos \theta_i \frac{dp}{g^2}} \quad (10)$$

従って、順方向、逆方向から測定した BRDF はそれぞれ定義より、

$$BRDF = \frac{dL_r}{dE} = \frac{dF_b}{dA \cos \theta_r \frac{dq}{h^2}} \frac{g^2}{dL_i \cos \theta_i dp} = \frac{dF_b g^2 h^2}{dL_i dA \cos \theta_r \cos \theta_i dp dq} \quad (11)$$

$$BRDF' = \frac{dL'_r}{dE'} = \frac{dF_b}{dA \cos \theta_i \frac{dp}{g^2}} \frac{h^2}{dL_i \cos \theta_r dq} = \frac{dF_b g^2 h^2}{dL_i dA \cos \theta_r \cos \theta_i dp dq} \quad (12)$$

となる。従って

$$BRDF = BRDF' \quad (13)$$

であって、順・逆どちらから測っても BRDF が変化しない事がわかる。因みに光線が出発する光源面上の出発点の分布（例えば等間隔ピッチ）と測定開口面における光線到着位置の分布が大きく偏っている場合には、逆追跡にすると、光線発生座標が偏る、という困った事になる。しかしこの場合には、そもそも輝度測定 of 開口上で輝度分布が大きく異なる事を意味し、輝度測定系としては開口の設定等の不具合により、旨く機能していない事になる。

4 . 参考文献

- 1) J.C.Stover:Optical Scattering(SPIE Press,Bellingham,1995)
- 2) E.F.Church & P.Z.Takacs:SCATTERING THEORY,HAND BOOK OF OPTICSI (McGraw-Hill,New York,1995)
- 3) M.F.Cohen,J.R.Wallace:Radiosity and Realistic Image synthesis (Morgan Kaufmann,San Francisco,1993)
- 4) F.E.Nicodemus,et al.:”Geometrical Considerations and Nomenclature for Reflectance”,NBS Monograph 160,1977
- 5) “TracePro Users Manual”(Lambda Research Corp.,Littleton,1995)
- 6) 鶴田匡夫:第 5・光の鉛筆(新技术コミュニケーションズ,東京,2000)