

## 光線追跡法の吸収と散乱現象への適用

4S-1

鈴木 郁子                      二上 範之                      新開 謙三  
 シャープ（株）                  シャープ（株）                  大阪府立大学

## 1 はじめに

太陽電池のエネルギー変換効率やセンサーの感度、映像機器の輝度の向上を図るには、光エネルギーの遷移状況を正確に把握する必要があり、光線追跡法を基本とする光伝播解析システムを開発した。本システムでは原則的に光源側からモデル空間内を探索し被照射面に至るまでの光路と光エネルギーの伝播を解析している。

ところで、光線追跡法は幾何光学に基づいており、光線は波長 $\infty$ あるいは振幅0の波であると見做している。このため、以下のような波動光学的な振舞いをする現象を解析することが難しい。

1) 金属などのように複素屈折率を有する光吸収性媒質内での光路や光量。

2) 半透明なプラスチックでの散乱による濁度。

3) 反射防止膜のような薄膜での干渉エネルギー。

これらの課題に対して本研究では波動方程式をそのまま導入するのではなく、光線追跡法の持つアルゴリズムの簡明さを損なわないような以下の手法を試みた。

## 2 本システムの手法

## 2.1 光吸収性媒質

金属のような複素屈折率を有する媒体に対してもスネルの法則は成り立つ。しかし、屈折角を複素数で表現すると光線追跡時の物体との交差判定等も複素数空間に拡張する必要があり計算量が増加する。また、逆正弦は多価関数であるので一意に解を求め

るには位相の飛びを考慮しなければならず、アルゴリズムが複雑になる。

ところで、屈折光の波動方程式を複素数で表現すると、

$$\mathbf{E} = A \exp(i\mathbf{k}\mathbf{r}\mathbf{a} - \omega t)$$

$$\mathbf{k}\mathbf{r}\mathbf{a} = k_0(n + ik)(-x \cos \theta + z \sin \theta)$$

となる<sup>1)</sup>。Aは屈折光の振幅、 $\mathbf{r}$ 、 $\mathbf{a}$ は位置ベクトル、波面の法線ベクトルである。 $\theta$ は屈折角、 $n(n = n + ik)$ は屈折率でありいずれも複素数で扱う。

ここで、屈折光の位相が一定な面はこの波動方程式の実数項であることから等位相面を結ぶ線と境界面との実数角を求める事ができる。幾何光線は等位相面を結んだ線と見なすことができるので、この実数値の角度を用いて光線追跡を行なうことにより吸収性媒質内の光路を追跡する。なお、反射率/透過率も複素数に拡張したフレネルの式で求める。

## 2.2 散乱

散乱モデルには電磁説に基づくものと揺動説に基づくものがある。Rayleigh 散乱のような電磁説に基づいたモデルは気体の散乱現象のシミュレーションには有効であるものの、散乱点距離が短い固体では散乱光の干渉が生じるので適用できず、揺動説に基づくモデルが必要になる。なかでも、屈折率の異なる領域がランダムに存在する媒体では角度依存性のある散乱が大きくなる。Debye は近傍にある2点から散乱する光の干渉を考慮し、角度依存性散乱を

$$V = \frac{4\langle \eta^2 \rangle \pi^3}{\lambda_0^4} \int_0^\infty \frac{\sin(\nu sr)}{\nu sr} r^2 \gamma(r) dr$$

$$(\nu = 2\pi/\lambda, s = 2 \sin(\theta/2))$$

と表せる事を示した<sup>2)</sup>。ただし、 $\lambda$ 、 $\lambda_0$ は媒体および真空中の波長 $\langle \eta^2 \rangle$ は系全体の誘電率揺らぎの

Ray Tracing for Absorbed or Scattering Object  
 Ikuko Suzuki, Noriyuki Futagami  
 Sharp Corporation  
 Kenzo Shinkai  
 University of Osaka Prefecture

2乗平均、 $\gamma(r)$ は相関関数と呼ばれるもので距離 $r$ だけ離れた点における誘電率の揺らぎを表している。そこで、本研究では相関関数が乱数であると考え、角度依存性のある散乱を解析した。つまり、不均一構造の媒質内の光進行距離と媒質境界面への入射角を確率的に表現し、角度依存性をもつ散乱現象をシミュレーションしている。

### 2.3 干渉

光線追跡法では、光線は互いに独立に追跡されるので、一般的には直前の光や隣接する光との干渉を計算することは容易でない。また、波長以下の厚みの膜を $mm$ オーダー以上の素子と形状モデルとして同一に扱うと演算誤差が大きくなる。

しかし、平行平面薄膜に限定すれば、干渉は薄膜内での反射の繰り返しにより生ずるので、薄膜全体としての反射率を下記の式で表現できる。

$$r = r_1 + \sum_1^n a_n$$

$$a_n = (1 - r_1'^2) r_2 e^{-i\delta} (r_1' r_2 e^{-i\delta})^{n-1}$$

$$\delta = 4\pi n_1 d \cos \varphi / \lambda$$

ただし、 $a_n$ は $n$ 回反射後の光の振幅、 $\delta$ は膜間での位相差であり、位相差は入射角 $\theta$ と入射光の真空での波長 $\lambda$ の関数となる。そこで、薄膜があるとされる境界面ではその入射角をもとに膜としての反射率を計算して伝播エネルギーを算出し、光路は膜がないものと見做して追跡する。

### 3 おわりに

上記のような拡張した光線追跡法を組み込んだ光伝播解析システムを開発し、太陽電池や導光体などの解析を行なった。

図1は複素屈折率を有するアルミニウムの平面に800nmの波長の光線を $0^\circ$ から $88^\circ$ で照射した時の反射率である。入射角が $60^\circ$ 以上の場合には定数の反射率で近似すると誤差が大きくなる事が分かる。

図2は散乱解析の一例である。ここでは屈折率が1.5と1.6の媒質が不均一に混在するポリマーを想定

している。光の広がり実験値と合致するが、濁度は誤差が大きく検討の余地がある。

図3は多層アモルファス太陽電池に反射防止膜を付けたモデルを解析し反射率を算出したものである。膜の厚さにより反射率の低くなる波長域がずれており、実験値/理論値とよく合致した。

#### 【参考文献】

- [1] 龍岡静夫:光光学の基礎, 昭晃堂, pp.174~176, 1984
- [2] P. Debye et al.: J. Appl. Phys., 28, 679, 1957

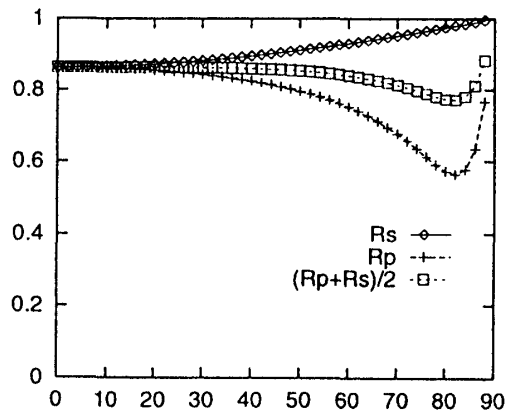


図1 アルミニウム表面での反射率

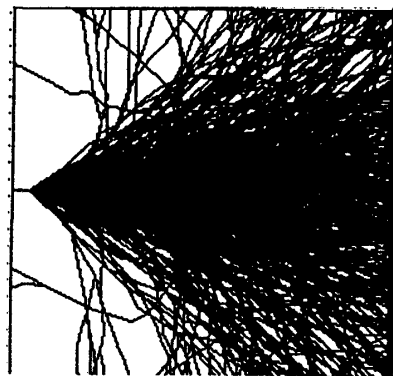


図2 本手法による散乱

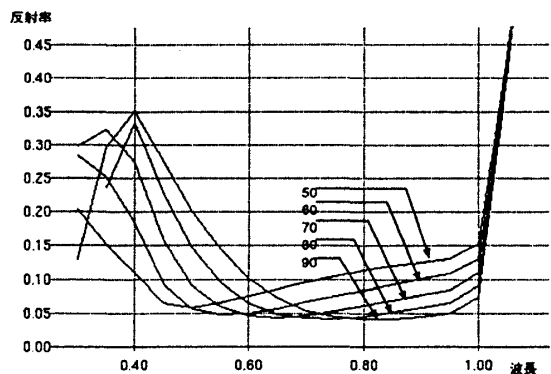


図3 薄膜厚さと波長別反射率