

# ボリウム表現されたオパールモデルにおける 散乱光と回折光計算の改善

Improvement of Scattering and Diffraction Calculation for Volumetric Visualization of Opal

小森 淳矢<sup>†</sup>  
Junya Komori

河合 利幸<sup>†</sup>  
Toshiyuki Kawai

## 1 はじめに

半透明物体は、物体内部での光の散乱を考慮する必要があるため、CG による写実的な表現が難しい。このような半透明物体の一つにオパールがある。しかも、オパールのモデル化と映像化には、光の散乱だけでなく、見る角度によって色が変わる現象（遊色現象）も考慮しなければならない。遊色現象は、光の回折により生じるものであると言われている [1]。

オパールの表現方法としては、これまでに、階層化モデルを用いて回折を考慮した手法 [2] が報告されている。しかし、この手法では散乱は考慮されていなかった。これに対し我々は、散乱と回折を考慮しボリウムモデルを用いて表現する手法を提案し、実装を行ってきた [3][4]。

これまでは、Rayleigh 散乱のみを考慮し、さらに光源からの直接光のみが回折するとして計算を行ってきた。このため、限られた状況下でしか遊色現象を表現できなかった。今回は、Mie 散乱も考慮するとともに、単散乱光が回折するものとして処理を行った。

## 2 オパールの構造とモデル化手法

ホワイトオパールは、シリカ（二酸化珪素）粒子からなる非結晶質の鉱物であり、10%程度までの水分を含んでいる。オパール内部は、2種類の領域に分けられる。一つは、直径が5~50nmの範囲のシリカ粒子が不規則に集まった領域である。シリカ粒子の大きさが可視光の波長より小さいため、光が散乱されて、白色または乳白色の地色になる。本研究では、この領域を散乱領域と呼ぶ。もう一方は、直径が150~450nmの範囲の同じ大きさのシリカ粒子から構成される領域である。シリカ粒子の大きさが可視光の波長と同程度で、規則的に並んでいる（面心立方格子）ため、これが微小な間隔で隙間がある天然の回折格子を形成する。本研究では、この領域を回折領域と呼ぶ。

このようなオパールの構造と形状を表現するため、ボリウムモデルを用いる。まず、ボリウム空間内に半楕円体または双3次ベジェ曲面を設定する。次に、これらの面で囲まれた内部のボクセルをすべて散乱領域として設定する。それ以外のボクセルは空ボクセルとする。さらに、散乱領域のボクセルのうち、面状のボクセルの集合を複数、回折領域として定義し直す [3][4]。各ボクセルには、領域の種別、シリカ粒子径、法線などの情報を持たせる (図 1)。

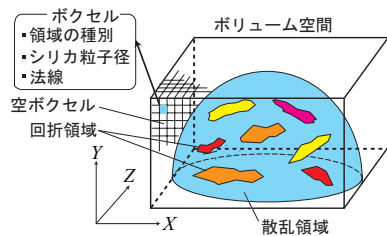


図 1: オパールのモデル

## 3 画像生成手法

### 3.1 視線の出射と標本点の設定

波長毎に視線探索を行うことにより画像を生成する。視線がオパール表面のボクセルに到達した場合は、オパール表面での鏡面反射成分を求める。さらに、Snell の法則を用いて視線を屈折させ、モデル内に入射させる (図 2)。この視線上に、一定間隔で標本点  $P_s$  を取る。

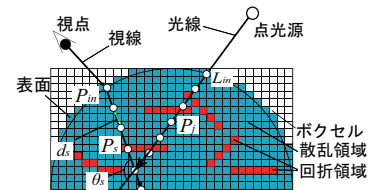


図 2: 視線と散乱光の処理

### 3.2 標本点 $P_s$ での散乱光スペクトル

視線上の標本点  $P_s$  が散乱領域のボクセルに存在した場合は、まず光源から  $P_s$  に入射する光（以下光線）のスペクトル  $E(P_s, \lambda)$  を求める。光線のオパールへの入射点  $L_{in}$  でのスペクトルを  $E(L_{in}, \lambda)$ 、 $L_{in}$  から  $P_s$  の間の波長毎の透過率を  $T(L_{in}, P_s, \lambda)$  とすると、 $E(P_s, \lambda)$  は、次の式 (1) で求める。

$$E(P_s, \lambda) = E(L_{in}, \lambda) T(L_{in}, P_s, \lambda) \quad (1)$$

次に、各標本点  $P_s$  での散乱係数  $\mu_s(P_s, \lambda)$  及び位相関数  $p(\theta_s)$ 、視線上の標本点間の距離  $d_s$  を用いて、各標本点  $P_s$  で散乱され、視線上を視点方向に向かう光のスペクトル  $S(P_s, \lambda)$  を算出する (式 (2))。

$$S(P_s, \lambda) = E(P_s, \lambda) \mu_s(P_s, \lambda) p(\theta_s) d_s \quad (2)$$

ここで  $\theta_s$  は、視線のモデルへの入射点  $P_{in}$  方向への光線の散乱角である。

このとき、散乱係数  $\mu_s(P_s, \lambda)$  と位相関数  $p(\theta_s)$  の値は、次のようにして求める。まず、 $P_s$  が存在するボクセルのシリカ粒子径  $l$  と光の波長  $\lambda$  より、Rayleigh 散乱と Mie 散乱のどちらが起こるかを判定する。 $\alpha = \pi l / \lambda \ll 1$  であれば Rayleigh 散乱、 $\alpha \approx 1$  であれば Mie 散乱と判定する。次に、それぞれの場合の値を、以下に述べる方法で求める。

#### 3.2.1 Rayleigh 散乱の場合

Rayleigh 散乱が起こる場合は、次の式 (3) を用いて、散乱係数  $\mu_s(P_s, \lambda)$  を求めた。

$$\mu_s(P_s, \lambda) = \frac{2\pi^5}{3} n \left( \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right)^2 \frac{l^6}{\lambda^4} \quad (3)$$

ここで、 $n$  は単位体積当たりの粒子数であり、シリカ粒子の充填率が 60% であるとして求めた。 $m$  は相対屈折率であり、今回はオパール内ではシリカ粒子が水に囲まれているものと仮定して、水に対するシリカの相対屈折率を用いた。

位相関数の値は、次の式 (4) を用いて求めた。

$$p(\theta_s) = \frac{3}{16\pi} (1 + \cos^2 \theta_s) \quad (4)$$

<sup>†</sup>大阪電気通信大学, Osaka Electro-Communication University

### 3.2.2 Mie 散乱の場合

Mie 散乱が起こる場合、文献 [5] に掲載されているソースコードを利用して、散乱係数  $\mu_s(P_s, \lambda)$  と位相関数  $p(\theta_s)$  の値を求めた。これらを求めるために必要なパラメータは、Rayleigh 散乱と同じく、シリカ粒子径、単位体積当たりの粒子数、水に対するシリカの相対屈折率である。

### 3.3 標本点 $P_s$ での回折光スペクトル

視線上の標本点  $P_s$  が回折領域のボクセルに存在した場合は、 $P_s$  で回折され視線を視点方向に向かう回折光のスペクトル  $D(P_s, \lambda)$  を求める。

#### 3.3.1 Bragg 条件の判定

回折領域内では、Bragg 回折が起こると考えられる。ある格子面で回折した光線と、屈折した光線がその真下に位置する格子面で回折して外部に射出した光線 (図 3) のそれぞれの光

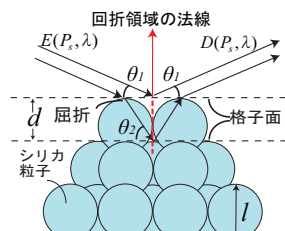


図 3: シリカ粒子による回折と干渉

路長には、 $m2d \sin \theta_2$  の差が生まれる。この差が波長  $\lambda$  の  $k$  倍 ( $k$  は整数) であれば、同位相の波が重なり、強め合う (Bragg 条件)。ここで、 $m$  は水に対するシリカの相対屈折率、 $d$  はシリカ粒子で構成される格子の格子面間隔であり、今回は格子面のうち 1-1-1 面での回折のみを考慮して求めた [1][3]。また、可視光のみを対象としているので、 $k = 1$  とした。

回折領域内の標本点  $P_s$  が取られている視線の波長  $\lambda$  が Bragg 条件を満たしていない場合は、 $D(P_s, \lambda) = 0$  とする。満たしている場合は、入射光強度  $E(P_s, \lambda)$  を求め、その 4 倍を回折光の強度  $D(P_s, \lambda)$  とした (今回は、回折光の振幅が入射光の 2 倍になると仮定)。

#### 3.3.2 回折領域への入射光強度

回折領域内にある標本点  $P_s$  への入射光スペクトル  $E(P_s, \lambda)$  は、以下のようにして求める。Bragg 条件を満たし、 $P_s$  から視点方向に回折する光の入射方向は、図 4 に示すような円錐の母線方向と

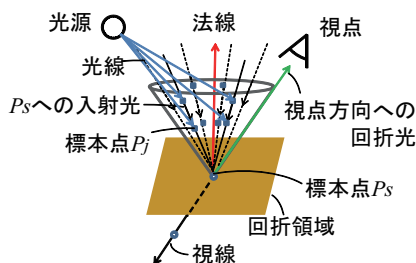


図 4:  $P_s$  における回折光の計算

と考えられる。そこで、まずこの円錐の母線方向に  $P_s$  から複数の 2 次視線を出射する。次に、各 2 次視線上に等間隔に標本点  $P_j$  を取る。各標本点  $P_j$  で散乱され  $P_s$  へ向かう散乱光のスペクトル  $S(P_j, \lambda)$  を求め、 $P_j - P_s$  間で減衰させて合算する。各 2 次視線で求めたこれらの値から、回折領域の標本点  $P_s$  に入射する光のスペクトル  $E(P_s, \lambda)$  を推定した。

#### 3.4 輝度値の算出方法

各標本点  $P_s$  で散乱もしくは回折され、視線のモデルへの入射点  $P_{in}$  に到達する光のスペクトルを、式 (1) と同様に、 $P_s - P_{in}$  間での減衰を考慮して求める。視線上のすべての標本点  $P_s$  から  $P_{in}$  に到達した光の総和を求め、表面での鏡面反射成分を加え、出射光のスペクトルとする。最後に、これを等色関数を用いて RGB 値に変換することで、 $P_{in}$  での輝度値とする。

## 4 実写画像と生成画像の比較

実物のオパールの画像 (図 5) と、作成したモデルの生成画像との比較を行う。また、これまでの手法を用いて Rayleigh 散乱のみを考慮し、光源からの直接光のみが回折するとして生成した場合と、今回の手法を用いて生成した場合の比較も行う。

図 5 を参考に、 $180 \times 100 \times 220$  個のボクセルからなる領域内に半楕円体の散乱領域を設定し、その内部に 250 個の回折領域を配置したモデルを作成した。横方向 ( $X$  軸) が 11.5mm、縦方向 ( $Z$  軸) が 15.5mm、高さ ( $Y$  軸) は 6.4mm である。散乱領域のシリカ粒子径は 50nm とし、各回折領域のシリカ粒子径は 180~240nm の範囲内でランダムに設定した。モデルの左上方に、標準光源  $D_{65}$  の点光源を 1 つ配置した。

モデルの中央真上に視点を設定した場合 (a) と、その視点の位置を  $X$  軸、 $Z$  軸周りにそれぞれ 10 度回転した場合 (b) の生成画像を図 6~9 に示す。画像の解像度は  $320 \times 240$  画素、1 ボクセルに少なくとも 1 個程度の標本点が取られるようにした。

図 5~9 より、今回の手法の方が実物に近いことがわかる。また、回折領域の色変化も確認できる。



図 5: 実物のオパール画像

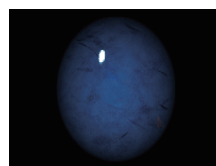


図 6: 従来の手法 (a), 生成時間 892 秒

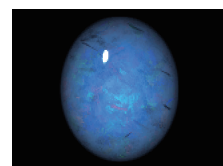


図 7: 今回の手法 (a), 生成時間 904 秒

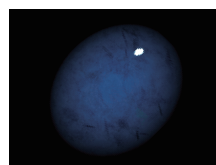


図 8: 従来の手法 (b), 生成時間 820 秒

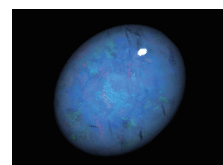


図 9: 今回の手法 (b), 生成時間 865 秒

## 5 おわりに

今回、Rayleigh 散乱だけでなく Mie 散乱も考慮するとともに、回折領域への入射光計算を改善した。しかし、実際のオパールの内部構造や光学特性値については、不明な点はまだ残っている。また、多重散乱も考慮する必要がある。

## 参考文献

- [1] 秋月, “オパール—その歴史と科学—”, 宝石学会誌, Vol.2, No.1, pp.11-24, 1975.
- [2] 安部, 井村, 金谷, 安室, 眞鍋, 千原, “オパールの構造に基づく階層化モデルを用いた遊色現象の再現”, 映像情報メディア学会冬季大会, pp.8-11, 2002.
- [3] 中嶋, 河合, “ボリューム表現によるオパールのモデル化及び散乱と回折を考慮した映像化”, 平成 22 年度情報処理学会関西支部大会, G-02, 2010.
- [4] 渡邊, 河合, “ベジェ曲面とボリューム表現を用いたオパールのモデル化手法”, 2012 年電子情報通信学会総合大会 学生ポスターセッション, ISS-P-237, 2012.
- [5] S. Prahl, “Mie Scattering”, Oregon Medical Laser Center, <http://omlc.ogi.edu/software/mie/>, 2012.