

G-02

ボリウム表現によるオパールモデル化 及び散乱と回折を考慮した映像化

Volumetric Modeling of Opal and Its Rendering Taking Account of Scattering and Diffraction

中嶋 竜太[†]
Ryuta Nakajima

河合 利幸[†]
Toshiyuki Kawai

1 はじめに

近年、コンピュータグラフィックスは、コンピュータの性能向上により多くの分野で利用され、写実性への要求も高まってきている。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、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。しかし、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化する現象(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されている [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表現手法 [2] が報告されている。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]。これまででは簡単化のため、回折を起こす領域の粒子配列が単純立方格子であるとしてモデル化し、格子面での屈折を考慮せずに回折光の計算を行ってきた。今回は、実際の粒子配列である面心立方格子を用い、屈折を考慮して回折光の強度計算を行った。これにより、シリカ粒子の大きさによって決まる色変化の範囲を、実際のオパールで観測される色変化の範囲に近づけた [4]。また、オパールモデルへの視線の入射の際に、映り込みや屈折処理を行った。

2 オパールの構造

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、図 1 のように 2 種類の領域に分けられる。

一つは、直径が $5 \sim 50nm$ の範囲のシリカ粒子が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、この散乱を起こす領域を散乱領域と呼ぶ。

もう一方は、直径が $150 \sim 450nm$ の範囲の同じ大きさのシリカ粒子が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と同程度で、規則的に並んでいるため、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(図 2)。この時のシリカ粒子配列は面心立方格子となっている。そして、回折光が干渉し合い、特定の波長が強調されて遊色現象が生じる。本研究では、この回折を起こす領域を回折領域と呼ぶ。

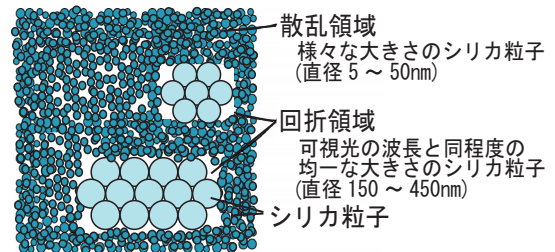


図 1: オパールの構造

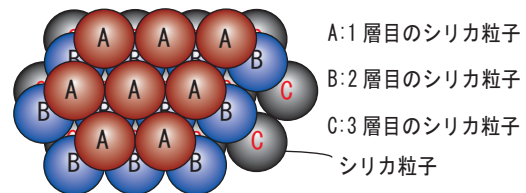


図 2: 回折領域内のシリカ粒子の配列(面心立方格子)

3 オパールのモデリング

本研究では、ボリウムモデルを用いてオパールの形状と内部構造を表現する(図 3)。ボリウムモデルとは、空間内に定義されたパラメータ分布により 3 次元的な形状を表現する手法のことである。本研究では、パラメータ分布が定義された空間をボリウム空間と呼び、これを 3 次元配列で表現する。3 次元配列の各要素をボクセルと呼ぶ。各ボクセルには、シリカ粒子の大きさ、法線、種別の情報(空、散乱領域、回折領域)を持たせる。

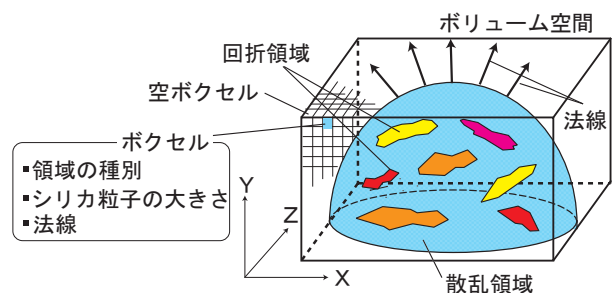


図 3: オパールのモデル

[†]大阪電気通信大学, Osaka Electro-Communication University

3.1 散乱領域の設定方法

オパールではカボションカットが用いられることが多い．これに近い形状である半楕円体を用いてオパールの形状を表す．まず，ポリウム空間内に半楕円体を設定し，その内部のボクセルを散乱領域として定義する(図3)．それ以外のボクセルは空ボクセルとする．オパール表面に該当する散乱領域のボクセルには，法線ベクトルを表面の向きに合わせて設定する．

3.2 回折領域の設定方法

散乱領域として設定した半楕円体内の一部の連続したボクセルの集合を回折領域として定義し直す．法線は回折領域の向きに合わせて設定する．

回折領域の形状は正多角形を基に決定する．まず，頂点数，大きさを，指定した範囲内でランダムに決定し， xz 平面内に原点を中心とした正多角形を作成する．次に，この正多角形の各頂点と中心を結ぶ線分上にランダムに点を取り，これらの点を結んで多角形を作成する(図4)．この時，極端に不自然な形状にならないように，多角形の各頂点の角度が指定した範囲内に収まるようにする．

次に，回転角を指定した範囲内で，移動方向と距離をオパール内に収まるようにランダムに決め，多角形を回転，平行移動する(図5)．移動後の多角形と交差するボクセルを回折領域とし，多角形に垂直な方向に法線を設定する．もし移動後の一部に既に回折領域が存在した場合は，再度回転と平行移動を行う．以上の処理を指定した回数だけ繰り返す，複数の回折領域を設定する．

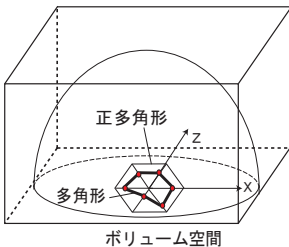


図 4: 多角形の設定

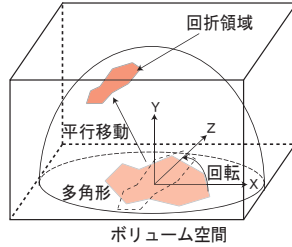


図 5: 回折領域の設定

4 散乱係数の算出

散乱領域内のシリカ粒子は，可視光の波長よりも小さいため，この領域内で起こる散乱は Rayleigh 散乱とみなすことができる．散乱係数は，粒子の大きさと光の波長によって決まり，波長の 4 乗に反比例する．粒子の直径を l ，単位体積当たりの粒子数を n ，屈折率を m とすると，波長 λ の平行な光が散乱領域に入射した場合の散乱係数 $\mu_s(\lambda)$ は式(1)で求められる．オパール内ではシリカ粒子は水に浮いている状態とみなし， m の値は式(2)によって求めた [5]．

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

$$m = \frac{\text{分散物質の屈折率 (シリカ粒子)}}{\text{基質の屈折率 (水)}} = \frac{1.55}{1.33} \quad (2)$$

5 回折光の強度計算

回折領域内では Bragg 回折が起こると考えられる．今回は格子面のうち，1-1-1 面での回折のみを考慮した [1]．図6は回折光が干渉する仕組みを示したものである．シリカ粒子で構成される格子の格子面間隔が d の時，波長 λ の平行な光が格子面に角度 θ_1 で入射し，同じ角度 θ_1 で正反射方向に進む様子を示している．

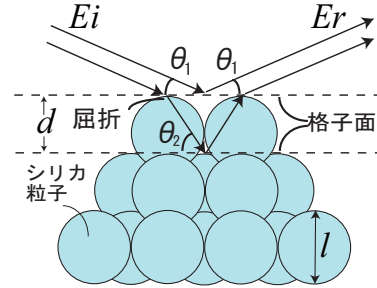


図 6: シリカ粒子による回折と干渉

シリカ粒子の直径を l とすると，格子面間隔 d は式(3)によって求められる．

$$d = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} l \quad (3)$$

この時，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出射した光線の光路長には，オパールの屈折率を μ とすると $\mu 2d \sin \theta_2$ の差が生まれる．この差が式(4)に示すように波長の整数倍であれば，同位相の波が重なり強めあう (Bragg 条件)．今回は簡単化のために $k = 1$ の場合のみ考慮した．

$$k\lambda = \mu 2d \sin \theta_2 \quad (4)$$

回折光の波長 λ が最大になるのは， $\theta_1 = \theta_2 = 90^\circ$ の時である．よって回折光の波長の最大値 λ_{max} は， $\mu 2d$ で表せる．また，格子面で光は屈折するので，入射した光が全反射せずに回折領域の表面から抜け出せる光の波長の最小値は，式(5)で求められる [1]．

$$\lambda_{min} = \lambda_{max} \sqrt{1 - \frac{1}{\mu^2}} \quad (5)$$

よって，格子面での屈折を考慮した場合，観測される回折光の波長は λ_{min} 以上， λ_{max} 以下に限られることになる．

干渉後の回折光の振幅は，表面の格子面で回折した光の振幅と，その下の格子面で回折した光の振幅の和となる．今回は回折時の減衰を考慮していないので，回折光の振幅は単純に入射光の 2 倍とした．光の強度は

振幅の2乗に比例するため、波長 λ の入射光がBragg条件を満たす場合、回折光の強度 $E_r(\lambda)$ は入射光強度 $E_i(\lambda)$ の4倍とした。Bragg条件を満たさない場合かつ格子面が十分多数あるとみなせる時には、格子面からの反射光が逆位相となる組み合わせが必ずできるため、互いに打ち消しあい、回折光の強度 $E_r(\lambda)$ は0となる。

6 画像生成手法

6.1 オパール表面での処理

光源には標準光源 D_{65} の点光源を用い、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、オパールの表面での鏡面反射成分を求め、スネルの法則を用いて視線を屈折させる(図7)。また、正反射方向に2次視線を出射して、映り込みの処理も行う。

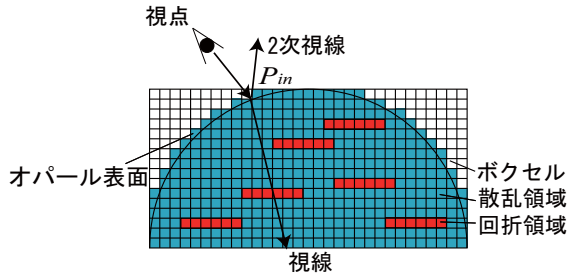


図7: オパール表面での処理

6.2 光源から標本点 P_s へ入射する光のスペクトル

オパールモデル内に入射した視線を一定間隔で標本化する。光源から視線上の標本点 P_s に入射する光(以下光線)のスペクトル $E_{P_s}(\lambda)$ をそれぞれ求める(図8)。 $E_{P_s}(\lambda)$ は、光源の相対スペクトルを $D_{65}(\lambda)$ 、光線のオパールへの入射点 L_{in} での強度を $E_{L_{in}}$ とすると、次の式(6)で求める。

$$E_{P_s}(\lambda) = E_{L_{in}} D_{65}(\lambda) T_{P_s}(\lambda) \quad (6)$$

$T_{P_s}(\lambda)$ は、光線の入射点 L_{in} から標本点 P_s の間の波長毎の透過率である。 L_{in} から P_s の間の光線上の標本点 P_j が存在するボクセルの消滅係数を $\mu_{t_j}(\lambda)$ (吸収係数と散乱係数の和)、光線上の標本点間の距離を d_j とすると、 $T_{P_s}(\lambda)$ は式(7)で求める。この時、各領域の吸収係数は今回は0とし、散乱係数には式(1)で求めた値を用いた。 P_j が回折領域内にあった場合の散乱係数は、今回は簡単化のため0とした。

$$T_{P_s}(\lambda) = e^{-d_j \sum \mu_{t_j}(\lambda)} \quad (7)$$

6.3 視線の入射点 P_{in} での散乱光スペクトル

標本点 P_s から、視線のオパールへの入射点 P_{in} に到達する光のスペクトル $E_{P_{in}}(\lambda)$ を求める。その標本点 P_s が散乱領域のボクセルに存在した場合は、式(8)を用いて $E_{P_{in}}(\lambda)$ を求める(図9)。

$$E_{P_{in}}(\lambda) = E_{P_s}(\lambda) \mu_{s_s}(\lambda) p(\theta_s) d_s T_{P_{in}}(\lambda) \quad (8)$$

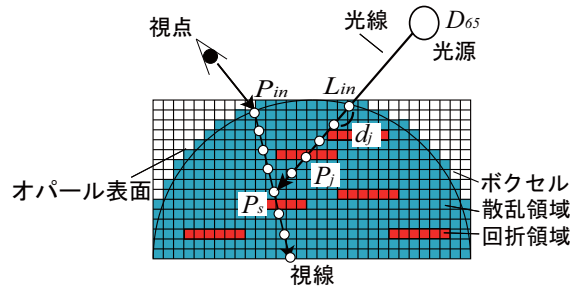


図8: 光源から標本点 P_s へ入射する光のスペクトル

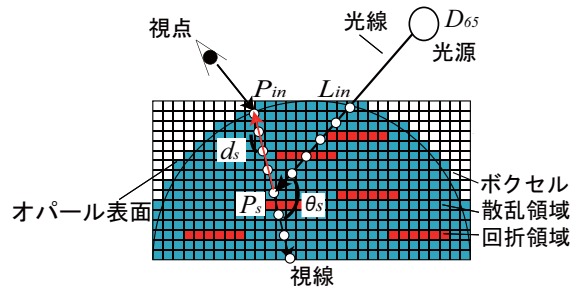


図9: 視線の入射点 P_{in} での散乱光スペクトル

ここで、 $\mu_{s_s}(\lambda)$ は標本点 P_s における散乱係数、 d_s は視線上の標本点間の距離である。 $T_{P_{in}}(\lambda)$ は、標本点 P_s から視線の入射点 P_{in} の間の波長毎の透過率であり、 $T_{P_s}(\lambda)$ と同様にして求める。 $p(\theta_s)$ は位相関数であり、今回は等方散乱とみなして、 $1/4\pi$ とした。

6.4 視線の入射点 P_{in} での回折光スペクトル

標本点 P_s が回折領域のボクセルに存在した場合は、式(4)のBragg条件の判定を行う。条件を満たす場合は、式(9)より $E_{P_{in}}(\lambda)$ を求める。条件を満たさない場合は $E_{P_{in}}(\lambda) = 0$ とする。

$$E_{P_{in}}(\lambda) = 4E_{P_s}(\lambda) T_{P_{in}}(\lambda) \quad (9)$$

6.5 輝度値の算出方法

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と2次視線方向の成分を加え、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。

7 画像生成例

160×80×200個のボクセルからなる領域内に、半楕円体の散乱領域を配置してモデルを作成した。半楕円体内には、250個の回折領域を配置した。横方向(図5の x 軸)の長さは16mm、縦方向(z 軸)の長さは20mm、高さ(y 軸)は8mmである。散乱領域のシリカ粒子の大きさを5~50nm、各回折領域のシリカ粒子の大きさを175nm、190~210nm、250~350nmの3種類の範囲内でそれぞれランダムに設定して作成したモデルの生成画像をそれぞれ図10~図12に示す。また、図12

のモデルを x 軸回りに 5° 回転させた場合の生成画像を図 13 に示す。

この時、各モデルの y 軸方向真上に 1 個の点光源を配置し、点光源と同じ位置に視点を配置して画像生成を行った。画像の解像度は 640×480 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。

画像生成には Xeon X5450(3.0GHz) を搭載した PC を用い、図 10 は 1348 秒、図 11 は 1367 秒、図 12 は 1360 秒、図 13 は 1379 秒を要した。

図 12, 13 のモデルの同じ回折領域 (図中丸印) を比較すると、色の変化が確認できる。また、文献 [1] では、回折領域のシリカ粒子の大きさが 175nm の場合は青色、 $190 \sim 210\text{nm}$ の場合は緑色、 $250 \sim 350\text{nm}$ の場合は赤色の回折光が観測されている。今回の生成画像例もこれに近い結果となった。

次に、実物のオパールの画像 (図 14, 図 16) と生成画像 (図 15, 図 17) を比較のために示す。実物に近い色が再現できていることがわかる。図 15, 図 17 のそれぞれのモデルでは、回折領域のシリカ粒子の大きさは、それぞれ $200 \sim 235\text{nm}$ 、 $220 \sim 300\text{nm}$ の範囲でランダムに設定した。画像の解像度は 300×300 画素である。

8 おわりに

回折光強度を求める際、屈折を考慮した Bragg 条件を適用すると共に、シリカ粒子配列が面心立方格子であるとして計算を行った。これにより、シリカ粒子径によって決まる色変化の範囲を実際のオパールに近づけることができた。

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が残っている。今回は 0 とした吸収係数や回折領域の散乱係数には正確な値を用いる必要がある。また、 $1-1-1$ 面以外からの回折光の考慮や、回折領域の形状と配置の改善などにも取り組む必要がある。

参考文献

- [1] 秋月, “オパール—その歴史と科学—2”, 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講演予稿集, pp.8-11, 2002.
- [3] 山口, 河合, “オパールの内部構造に基づいたボリュームモデル構築と映像化”, 平成 20 年度情報処理学会関西支部大会, pp.283-284, 2008.
- [4] 中嶋, 河合, “散乱と回折を考慮したオパールのボリュームモデル構築と映像化”, 第 25 回 NICOGRAPH 論文コンテストポスターセッション, P07, 2009.
- [5] 岸本, “超微粒子酸化亜鉛について”, 塗装と塗料, pp.27-33, 1997.

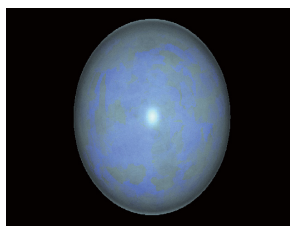


図 10: 回折領域のシリカ粒子径 175nm の時の生成画像

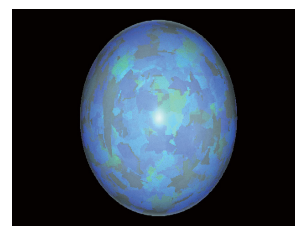


図 11: 回折領域のシリカ粒子径 $190 \sim 210\text{nm}$ の時の生成画像

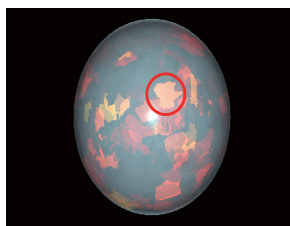


図 12: 回折領域のシリカ粒子径 $250 \sim 350\text{nm}$ の時の生成画像

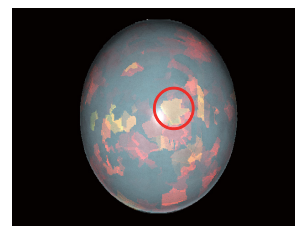


図 13: 図 12 のモデルを x 軸回りに 5° 回転した場合の生成画像

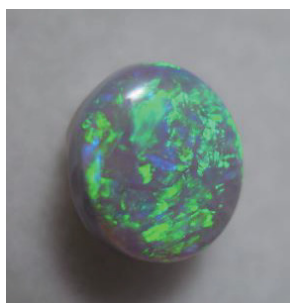


図 14: 実物のオパールの画像 (1)

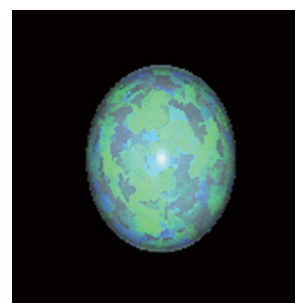


図 15: 回折領域のシリカ粒子径 $200 \sim 235\text{nm}$ の時の生成画像



図 16: 実物のオパールの画像 (2)

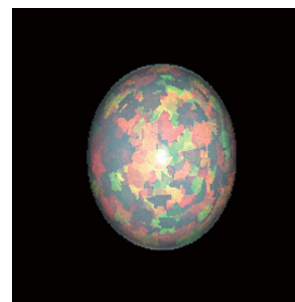


図 17: 回折領域のシリカ粒子径 $220 \sim 300\text{nm}$ の時の生成画像