

実測値を用いた螺鈿の質感表現

武孝^{†1}

概要：蒔絵のような漆、金・銀薄膜、螺鈿等の複合反射による独特の質感をもつオブジェクトの、現実感のある実時間描画は未だ十分とは言えない。中でも螺鈿は貝の真珠層がもたらす多層薄膜構による虹色光彩が特徴であり、その反射様態は層の形成過程の異方性や多様性により極めて複雑である。本研究では現実感のある螺鈿を描画するため、分光測定器から得た螺鈿の反射率データを基にその反射特性をシミュレートする数式モデルを導出し、CGによる螺鈿の質感表現を可能にした。

Illumination Model of Pearl Inlay Based on Measured Value

TAKASHI TAKE^{†1}

Abstract: The paper addresses the expression of pearl inlay on gold-relief lacquer ware, which has complex light-reflection manners originated with multilayer thin films in the shell nacre. To render the realistic image of its rainbow-colored glow on the basis of empirical approach, it measured the reflectance of real pearl inlay practically used for Makie by spectrometer and developed the mathematical model to simulate the attributes from the data. With the approaches simulating approximation property on real object and the implementation of the measured data-tables, we obtained the high-quality images of pearl inlay and the easy immigration of it to virtual-reality presentation.

1. はじめに

現在、CG (Computer Graphics) 技術の発展に伴い、よりリアリティーのある映像描画が要求されている。高品質なCGを表現するには物体の素材(構造と光学的所作)を研究しなければならない。

日本の伝統工芸である螺鈿は、主に漆器に施される装飾技法のひとつであり、CGにおける真珠の表現[1]や漆器表現[2,3]、また薄膜干渉のモデルでマルチチャンネルレイトレーシングによる虹色光沢を表現した研究[4]、薄膜干渉、多層膜による干渉、回折格子による干渉等の研究[5]が見られるものの描画に関する研究は多くない。

螺鈿は貝の内側に存在する虹色光沢を持つ真珠層を薄く切り出し、模様に沿って彫り込んだ漆器等にはめ込み、その上から漆を塗り磨いたものである。貝の真珠層は何層にも重なっている多層薄膜構造である。本研究では、実測値に基づき、表現に多層薄膜での光の反射を考慮する双方向散乱面反射率分布関数(BSSRDF)[6]を特殊化した双方向反射率分布関数(BRDF)[7]を真珠層の独特な反射特性に適用し、さらにその反射モデルを改良することで、この複雑な構造を表現した。実装手段として漆器業者から提供された螺鈿サンプルの反射特性を分光測定器で測定し、グラフ化、それに伴う必要な数学的近似、テーブル化を行い、各シェーディングモデルの式を導き出し検証した。

2. 螺鈿について

2.1 螺鈿の構造

螺鈿は貝の内側の真珠層の部分を薄く板状に切りだし、貝殻を真珠層まで削って虹色光沢を出して漆器にはめ込み、その上に漆を塗り、ツヤが出るまで磨く。本研究では螺鈿サンプルとして夜光貝を測定し、CG表現を行った。夜光貝はインド洋や太平洋のサンゴ礁域に生息する大型の巻貝である。螺鈿サンプルは実用品としての製作工程を経たものである。図1は今回使用した螺鈿の写真である。



図1 夜光貝を用いた測定用の螺鈿

2.2 貝の構造

貝の内側にある真珠層とは、図2のように軟体動物の外殻膜から分泌堆積された構造を持ち主成分は炭酸カルシウムである[8]。

^{†1} 法政大学
Hosei University

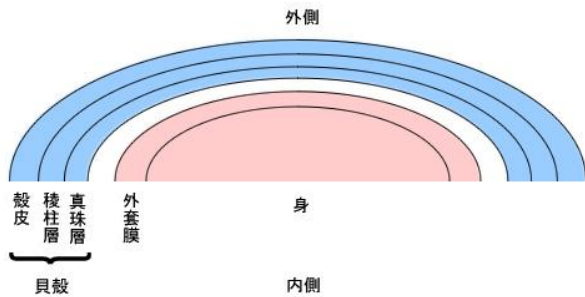


図 2 貝殻の構造

この炭酸カルシウムが作るアラゴナイトの結晶構造の多層薄膜が光の干渉を引き起こし真珠層を虹色にする [9][10]. 夜光貝の螺鈿は巻貝の貝殻を薄くスライスしたもので、螺鈿の表面の真珠層の薄膜構造は平らな層状になっているのではなく、曲面が表面に露出し、図 3 のように光を反射しているものと考えられる。

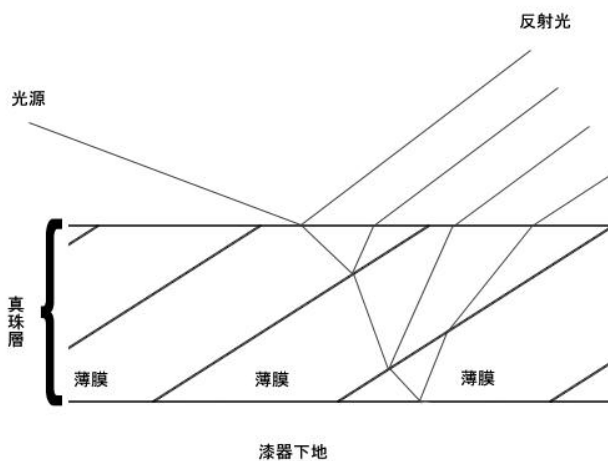


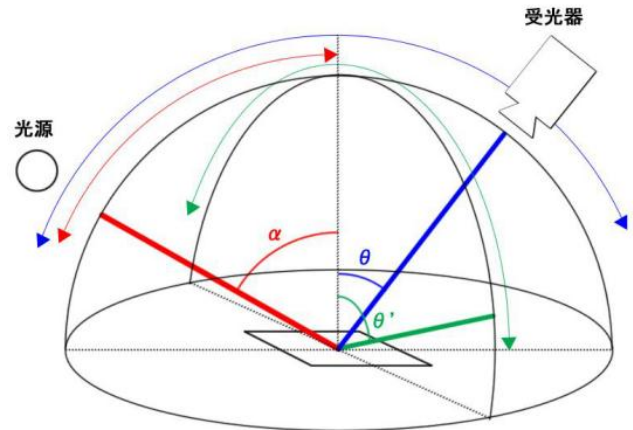
図 3 螺鈿における貝の反射モデル

貝殻の多層薄膜構造は、育った環境や個体差などによる違いや、切り出し方に依存するため光の反射様態は多様であり一様なモデル化は難しい。よって、本研究では螺鈿を詳細に測定、分析し、そのデータをベースとしたモデルを提案する。

3. 螺鈿における分光測定

本研究では分光測定器 (DDS-5000) を用いて螺鈿の反射光を測定した。図 4 に示すように、測定器は測定物と法線との入射角 (0~70 度)、受光角 (-70~70 度)、物体の入射角と受光角から成る平面から見た傾きであるあおり角 (-70~70 度) の 3 要素を指定し、その際の反射光の色空間 X,Y,Z を測定する。さらに測定された色空間を CG で表現

するのに適した R,G,B 値に変換する。



| | |
|-----------|----------------|
| 赤矢印 | 光源の可動範囲 |
| 青矢印 | 受光器の可動範囲 |
| 緑矢印 | あおり角の可動範囲 |
| α | 入射角(0~70 度) |
| θ | 受光角(-70~70 度) |
| θ' | あおり角(-70~70 度) |

図 4 測定器での測定方法

4. BRDF モデル

BRDFは描画点における ω_i, ω_r と波長 λ の関数であり、放射照度 E_i と放射輝度 L_r の比として式(1)で表される。

$$f(\omega_i, \omega_r, \lambda) = \frac{dL_r}{dE_i} = \frac{dL_r}{L_i \cos \theta_i d\omega_i} \quad (1)$$

θ_i, L_i はそれぞれ法線と光源方向のなす角、光源の強度である。この式の反射エネルギーは、拡散反射光 *diff* と鏡面反射光 *spec* の和であると近似することで式(2)のように表すことができる。なお、 I_d は拡散反射係数、 I_s は鏡面反射係数である。

$$f(\omega_i, \omega_r, \lambda) = I_d * diff + I_s * spec \quad (2)$$

本研究では、この拡散反射成分と鏡面反射成分についてのモデルを提案する。

5. 実測値からのモデル化

分光測定器で測定した反射率データ RGB 成分について視覚的に捉えるためグラフ化し、一例として入射角 20 度、あおり角 10 度のもので示したのが図 5 である。このグラフから、受光角 20 度付近で最も強く反射しているのが分かる。これが鏡面反射成分であると判断することができる。また、拡散反射成分は鏡面反射成分に比べて視線の角度によらず鈍い反射をするのが特徴のため、反射があまり強くない低周波成分が拡散反射成分であると見なすことができる。これらをそれぞれの特徴を踏まえて分離して考えることにより螺鈿の反射モデルを定義する。

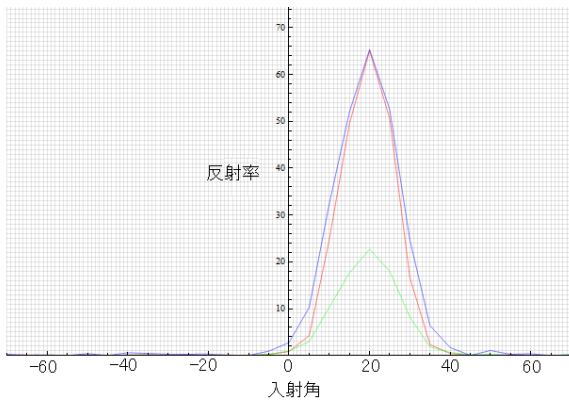


図 5 測定データのグラフ化

5.1 拡散反射成分

拡散反射成分において、今回使用した分光測定器では入射角、受光角、あおり角のそれぞれに測定範囲外が存在する。そのため、拡散反射成分について近似を行い、その式より反射率を推定し、補間をする。

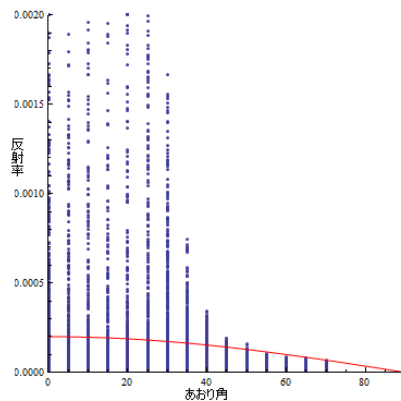


図 6 あおり角での近似

図 6 は測定データをあおり角の変化に合わせて赤い曲線で近似したグラフである。反射率が急に大きくなっている部分は鏡面反射であると考えられるため、反射率が小さい値の部分に合わせて式(3)の近似を行う。このとき t はあおり角である。

$$T(t) = S_T * \cos t \quad (3)$$

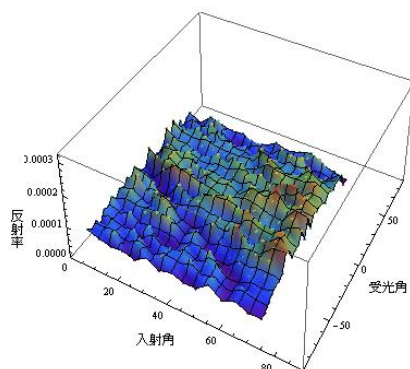


図 7 あおり角 55 度の 3D グラフ

次にあおり角を固定して近似を行う。図 7 より、入射角が大きくなると反射率も大きくなっているのが分かる。このデータに沿う形の式が式(4)(5)になる。

$$R(r) = S_R * \cos r \quad (4)$$

$$I(a) = S_I * (1 - \cos a)^n \quad (5)$$

このときの r, a はそれぞれ受光角、入射角である。近似は図 7 に近づくように手動で各 S, n のパラメータフィッティングを行う。最後に式(6)を用いて測定範囲外の反射率を求めることができる。なお、式(4)(5)のグラフ化を行うと図 8 のようになる。

$$rgb = T(t) * R(r) * I(a) \quad (6)$$

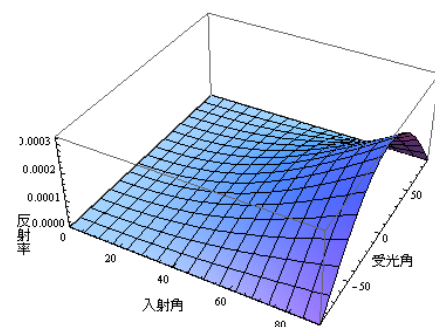


図 8 近似式の 3D グラフ

5.2 鏡面反射成分

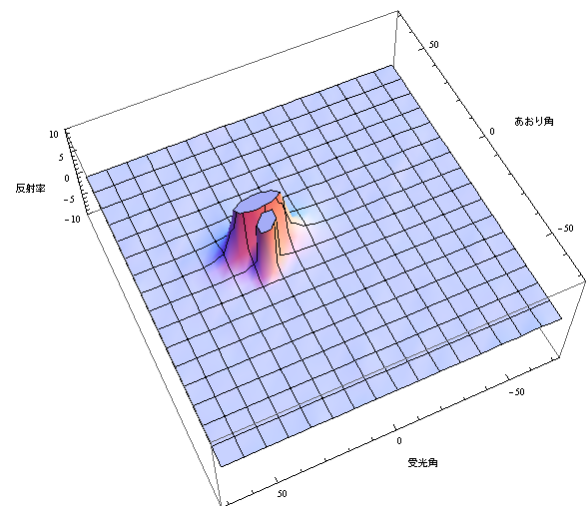


図 9 鏡面反射についてのグラフ

測定結果の鏡面反射成分において、入射角 20 度の際の緑色のデータについて受光角とあおり角について 3D 描画したものが図 9 である。

図 9 によると、鏡面反射は入射角と受光角の関係がミラー角になる部分で強く反射しているのがわかる。また、ピークが 2 箇所あり、あおり角の変化により 2 つの山を形成

している。これは今回測定した夜光貝の特徴であると考えられる。同様に他の螺鈿や蒔絵を測定した際には、それぞれ別の特徴が出るため、鏡面反射成分については測定データからテーブル化を行い、各パラメータにより参照、補間をする。

5.3 テーブルから値を補間

本研究で測定したデータは入射角、受光角、あおり角、それぞれ5度間隔で測定している。このため、入射角5度ずつのテーブルを用意し、その中に受光角とあおり角の5度ずつのデータを格納している。データ自体は入射角ごとにテーブル化してあるため、入射角の近いテーブルを2つ取得し補間する。その2つの値は、入射角ごとのテーブルから、受光角、あおり角のそれぞれの近い項のデータを4つ取り出し、補間した値である。

5.4 描画点の各角度を算出

本研究では入射角、受光角、あおり角の3つのパラメータを描画点の N (法線ベクトル), L (光源ベクトル), V (視線ベクトル) から出す必要がある。測定器の仕様上、光源と視線が同一平面上に存在する状態で測定する。そのため、 LV 平面上に N が存在していないと各角度を正しく導き出すことができない。よって、 L と V の外積により LV 平面の法線を取得し、 N を LV 平面に投影する。投影したベクトル N' と L の内積が入射角となり、 N' と N との内積があおり角となる。ただし、あおり角は-90度から90度まで取り得るので、向きを決めて90度から引く必要がある。受光角も-90度から90度までの範囲であるから、 LV 平面の法線と V の外積から90度を引く。

6. 実装結果

実装結果として図 10-11 を示す。螺鈿独特の虹色光彩と局所的な鏡面反射光が表現できていることがわかる。

7. むすび

本研究では、実際に本物の螺鈿を測定し、得られた反射成分のデータから拡散反射成分と鏡面反射成分について分離し、データから近似とテーブル化したものを BRDF モデルにすることにより、螺鈿の特徴的な虹色光彩を表現することができた。

今後の課題としては、より複雑な螺鈿の描画が挙げられる。例えば、夜光貝の他にメキシコ貝などの螺鈿があるが、種類によっては1つの反射モデルでは表現できないような貝も存在する。それを複数のサンプリング点を測定、反射モデルを定義し、描画点によって使い分けるという手法を提案することにより、より複雑な螺鈿や蒔絵模様を表現できるはずである。

参考文献

- [1] 土橋外志正, 長田典子, 眞鍋佳嗣, 宇佐美照夫, 井口征士: Simulation and evaluation of virtual pearl (1), 電子情報通信学会総合大会講演論文集, pp422, 社団法人電子情報通信学会, 1996.
- [2] 井上岳: Expression for a Lacquer Ware Using Bidirectional Reflectance Distribution Function", 法政大学卒業論文, pp.257-260, 2010.
- [3] 瀬下裕介: Illumination Model for Lacquerware with Filmy Multi-Layer Structure, 法政大学卒業論文, pp.475-477, 2010.
- [4] 田代成美: Iridescent Luster Rendering, 九州大学卒業研究論文, 2008.
- [5] 佐伯昌彦: Generic Rendering Method of Structural Color Objects, 奈良先端科学技術大学院大学 情報処理学専攻 修士論文, 2006.
- [6] Jensen, H. W., Marschner, S. R., Levoy, M., Hanrahan, P.: A practical model for subsurface light transport, SIGGRAPH 2001, pp.511-518, 2001.
- [7] Eric Lengyel: MATHEMATICS for 3D GAME PROGRAMMING & COMPUTER GRAPHICS, Mark DeLoura, 翻訳:狩野智英, pp.158-171, ボーンデジタル社, 2002.
- [8] 船水, 中島, 山田: UAE(UNITED ARAB EMIRATES)における真珠産業について, 海外調査報告, 2006.
- [9] 和田浩爾: Crystal Formation in Shell Calcification, Journal of the Gemmological Society of Japan 5(3), pp.99-106, Gemmological Society of Japan, 1978.
- [10] 和田浩爾: Growth of CaCO₃ Crystals in Bivalve Shell Mineralization, Journal of the Japanese Association of Crystal Growth 12(1&2), pp.57-70, The Japanese Association for Crystal Growth (JACG), 1985.



図 10 球に描画にしたもの

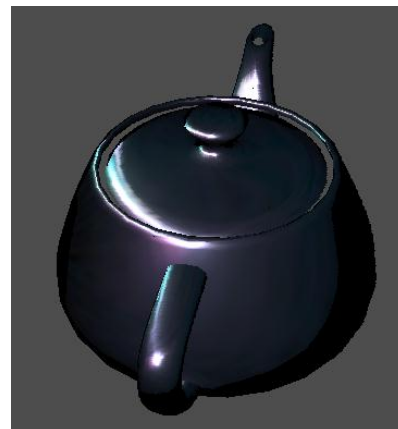


図 11 描画結果

正誤表

下記の通り、誤記がありましたので訂正いたします。

3 ページ右段落 (6) 式

| 誤 | 正 |
|----------------------------|----------------------------|
| $rgb = T(t) * R(r) * T(a)$ | $rgb = T(t) * R(r) * I(a)$ |