

複雑系反射モデル螺鈿蒔絵の推論的描画法

TAKE, Takashi / 武, 孝

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院情報科学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 情報科学研究科編 / 法政大学大学院紀要. 情報科学研究科編

(巻 / Volume)

8

(開始ページ / Start Page)

183

(終了ページ / End Page)

188

(発行年 / Year)

2013-03

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00009863>

複雑系反射モデル螺鈿蒔絵の推論的描画法 Illumination Model of Pearl Inlay Based on Empirical Approach

武 孝

Takashi Take

法政大学情報科学研究科情報科学専攻

E-mail: takashi.take.qr@stu.hosei.ac.jp

Abstract

Japanese traditional artifacts, Makie and Raden, decorated by lacquer, mother-of-pearl inlay and gold/silver leaf have unique textures with complex reflections. The real-time and realistic rendering for these craft-products has not been successful so far in practical use. Especially, it is very few to find the past researches subjected to the rendering of pearl inlay on Makie due to the difficulty of modeling in complex structures with multi-layer thin films in nacre and rainbow-colored glow by light interference between the layers. This paper proposes new rendering technology based on empirical approach for the expression of mother-of-pearl inlay analyzing the reflections behaviors in actual samples (Aizu Shikki). The refraction data measured by spectrometer in all-round directions of light, viewpoint and normal on object were used, and the data were classified into diffuse and specular components in order to easily derive the mathematical model. Furthermore, to obtain a high-speed rendering, the tables for interpolation between discrete-reflection values were implemented. With these empirical methods, we could obtain the high-quality images of pearl inlay and show the availability of this method for the virtual-reality presentation which requires both realism and real-time rendering.

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構造内部の光学的所作を考慮することが求められる。

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一つである。CG 分野におけるこれまでの関連研究としては、貝の多層構造のシミュレーション[1]、回折格子による干渉の研究[2][3]、伝統工芸品である漆器の表現[4][5]、薄膜干渉モデルにおけるマルチチャンネルレイトレーシングによる虹色光沢の表現[6]、構造色による虹色光彩の研究等[7][8]があるが、螺鈿に関しての研究はほとんど見当たらない。一方、真珠も螺鈿と同様のシェル構造からなり、真珠の質感表現の研究[9][10]やパールペイントに関する研究[11]がある。これら研究では真珠に近い光沢は得られているものの、日本の伝統工芸であ

る螺鈿を描画するには、より不規則な多層構造、漆や金属箔等の周辺物質の影響を考慮する必要があり、複雑系反射には適していないと考えられる。

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等にはめ込み、その上から漆を塗り磨いたものである。よって単一の物質反射特性ではなく、異種から成る多層薄膜構造である。本研究では、螺鈿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) [12]を特殊化した双方向反射率分布関数 (BRDF) [13]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に依頼して製作し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、テーブル化をそれぞれ行い、各シェーディングモデルの式を導き出し描画の現実感を検証した。

2. 螺鈿について

2.1 螺鈿とは

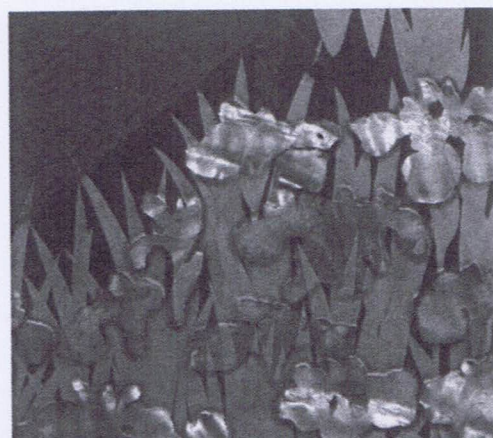


図1 実際の螺鈿細工の写真 (八橋蒔絵螺鈿硯箱)

螺鈿は日本に古くから伝わる伝統工芸品である蒔絵の一つであり、装飾技法として知られている。蒔絵は漆器に金や銀の粉を塗り、研磨や漆を塗る等の工程を経て完成するものであり、細かい金属粉の粒子が視点・光源によって様々な反射が起こることからキラキラと光る特徴を持ち、古くから高級食器や重箱等に用いられてきたものである。螺鈿は金属粉ではなく、貝を素材として用いる。貝の内側を薄く板状に切り出したものを虹色光彩が出る真珠層まで削り、漆器にはめ込んだ後に漆を塗り、ツヤが出るまでさらに磨くことで完成する。漆器に施す

紋様によっては大きな絵柄を一枚の貝から螺鈿にする必要があり、螺鈿にしたときの虹色光彩が鮮やかなものでないと商品価値が失われてしまうことや、日本の優れた職人技を要することなどから、非常に高価で貴重なものである。図1は日本の国宝に指定されている八橋蒔絵螺鈿硯箱[14]の拡大写真であり、花模様として螺鈿細工が施されているものである。

本研究では螺鈿をCGで表現するにあたって、会津若松市にある漆器店「鈴善」に商品に用いる実際の螺鈿を、測定し易い様に特別にカットした実体サンプルを製作依頼し、それを分光測定器で測定した。図2は測定した夜光貝の螺鈿サンプルである。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。螺鈿は生物である貝から作られる自然物である為、1つ1つ模様や反射具合・表面の凹凸等が異なる。表面の状態は測定を行う際に反射率に影響してくると考えられる為、比較的凹凸が無く、均一なものであることが好ましいと考えた。この夜光貝の螺鈿サンプルは表面が比較的滑らかであるため測定に適していると言える。

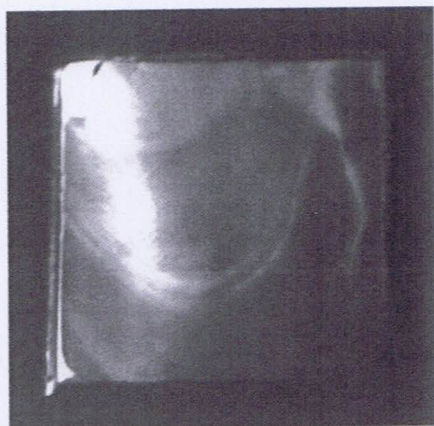


図2 夜光貝を用いた測定用の螺鈿

2.2 貝の構造

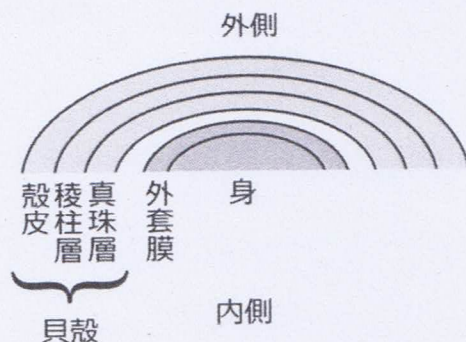


図3 貝殻の構造

図3は貝殻の構造を断面図で示したものである。螺鈿が虹色光彩を放つのは貝の構造によるものである。貝は軟体動物の一種であり、軟体動物は外套膜と呼ばれる特有の器官を持つ。貝のような生物は外套膜から炭酸カル

シウムを主成分とした液体を分泌し、それが堆積してできるのが真珠層である[15]。真珠層による虹色光彩は真珠にも言えることであり、真珠は外套膜が偶然貝の体内に入ってしまう、それを包むように真珠層を形成することで生まれる。

真珠と螺鈿は物質構成が同じであり、どちらも多層薄膜構造による反射構造で虹色光彩を発している。しかし、真珠は真珠核を中心に球体状に何千層もの真珠層できているため、螺鈿と比べて球状であることから光の干渉による見え方が異なるという点が挙げられる。

真珠層の構造は炭酸カルシウムが作るアラゴナイトと呼ばれる結晶とタンパク質で構成されるコンキオリンという物質できている。アラゴナイトは炭酸カルシウムが六角形状に結晶化したものであり、真珠層の1層はアラゴナイトがタイル状に敷き詰められた状態であり、約0.4ミクロンの薄さである。この様な層が何千層にも堆積して真珠層が作られているが、アラゴナイトの層同士の隙間にコンキオリンが入り込み、接着剤のような役割をしている。さらに、アラゴナイトの層は互いに少しずつずれるように配置されている。

真珠層が虹色光彩に見えるのはこのアラゴナイト結晶の多層薄膜構造からなる光の干渉によるものである[16][17]。その色合いは結晶の色素の違いやコンキオリンの色、または真珠層の下にある有機質の色合いが作用して色の違いが出ることもある。

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4に示す反射状態であるものと考えられる。

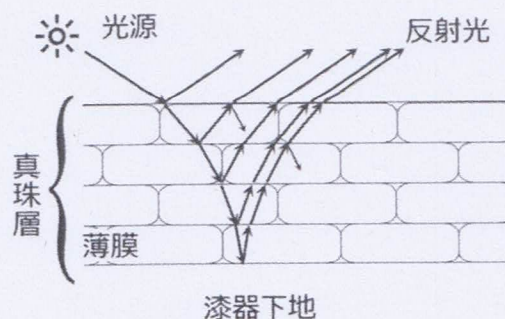


図4 螺鈿における貝の反射モデル

3. 螺鈿における分光測定

本研究では分光測定器(日本電色工業 DDS-5000)を用いて螺鈿の反射光を測定した。図5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、その際の反射光の反射率である色空間 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。入射角は70~90度、受光角・あおり角に関しては-90~70度と70~90度の測定データが、今回使用した DDS-5000 では測定範囲外となる。

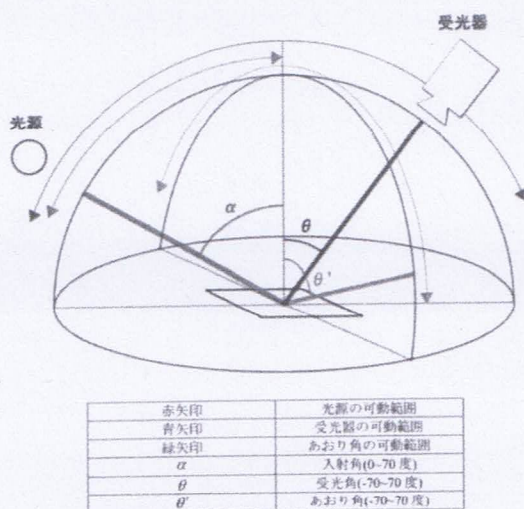


図5 測定器での測定方法

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, Id は拡散反射係数, Is は鏡面反射係数である.

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

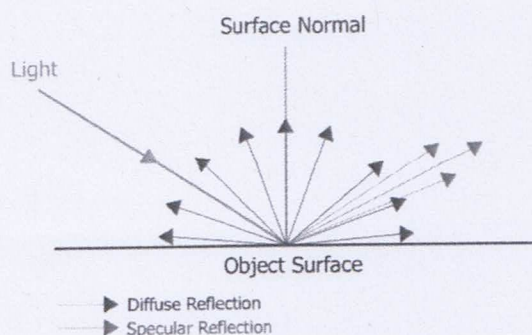


図6 鏡面反射・拡散反射について

図6は光源から入った光の物質表面での反射様態を示した図である. 鏡面反射光 (Specular Reflection) は拡散反射光 (Diffuse Reflection) に比べて, ある角度で急に反射率が強くなる特徴があり, ハイライトのような光り方をする場合等がある. 一方, 拡散反射光は光源の位置によらず広範囲に反射が起こり, その反射は弱いものである. 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. 既存研究との比較

これまで行った研究[18][19]は, 螺鈿物質のもつ数千の真珠層における反射様態を構造解析した物理シミュレーションによる描画ではなく, 分光測定による実測値に基づく反射データについてのカーブフィッティング法によるモデル化である. 具体的には, 測定データからあおり角を0度に固定した際の測定データを基準として入射角・受光角における鏡面反射成分について近似を行い, その際の入射角の変化に対して鏡面反射の強度変化の曲線について近似モデルを考え, これらから鏡面反射光の局所的な強い反射と急に減衰する様子を表現した. また, 拡散反射については測定データの乱雑さを螺鈿の特徴として必要な要素と見なし, 実測値からのテーブル化によってモデル化を図った. 以前の研究ではあおり角の影響を考えないものとして近似化を行ったが, この条件では螺鈿の全方向からのCG表現には不十分である. このアプローチでは真珠層の放つキラキラ感という色彩は表現できていたが, 実物の螺鈿上の反射光のグラデーションや, 入射光, 面法線, 視点角の変化等を要求する場合, VRシステムへの応用にはさらなるリアリティを追求することが必要であるとの結論に至った.

その結果, 本研究では鏡面反射成分と拡散反射成分について, 詳細な分析を行い, 鏡面反射においては不規則性の高い特性変化部分のテーブル化と, 全反射に対する近似, 拡散反射に対しては入射角・受光角についての3次元空間での近似と, あおり角の変化に対する減衰による近似によって既存手法の問題に対する解決を図った.

6. 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 成分についてグラフ化し, 一例として入射角20度, あおり角10度のときの特性を示したのが図7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.

図6から, この強い反射成分は鏡面反射光である. 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. よって, 図7の反射率10以下程度の部分は拡散反射であると言える. このように測定データから2つの成分に分けることにより, それぞれ分離した要素に対して近似・モデル化が可能となる.

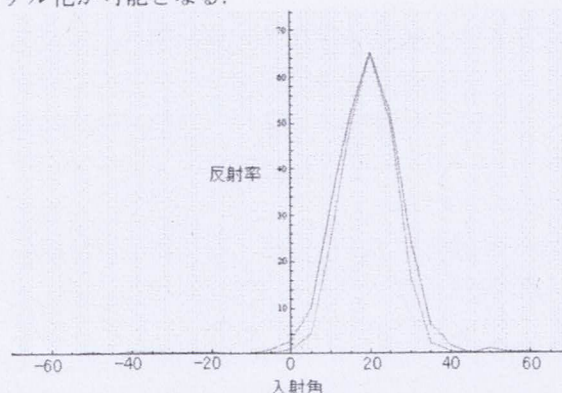


図7 測定データのグラフ化

6.1 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。また、測定データは測定器がハロゲン光を発生し、物体が返す反射光を受光することで反射率を測定するが、その際は受光点付近の平均的なデータとなり測定点の周囲からの影響を受け、測定値のバラつきが生じる。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することで補間をし、連続的なデータにする。

拡散反射成分の傾向として、視線・光源の角度にあまり左右されずに鈍い反射を返すため、入射角・受光角・あおり角のそれぞれの変化で反射率が極端に変化することはない。しかし、あおり角が0度から離れるにつれ拡散反射成分における反射率のピークが小さくなるという特徴があることが測定データから判明した。

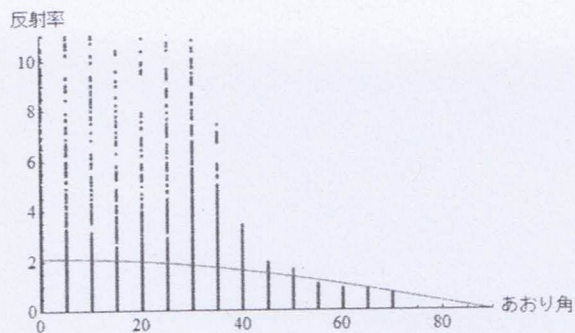


図8 あおり角での近似

図8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。

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

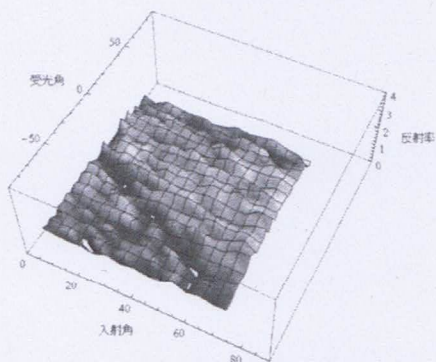


図9 あおり角55度の3Dグラフ

次にあおり角を固定して近似を行う。図9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9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推定することができる。なお、式(4)(5)のグラフ化を行うと図10となる。

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

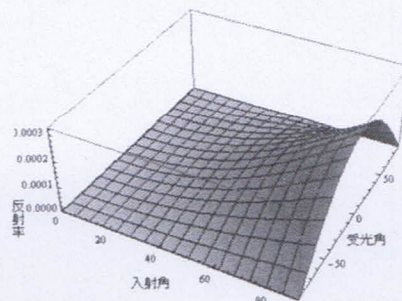


図10 近似式の3Dグラフ

図9では受光角が0度付近の時、反射率が最も強くなっていることを示している為、赤色についての近似は前述の式(4)で近似することができた。しかし、青・緑の測定から受光角が0度の際に反射率が最大になるとは限らないということが明らかとなった。この結果、色成分によって図10に示すコサインの形状が受光角から見て左右に移動するということを考慮に入れる必要がある。

そこで、式(4)以下の p, m, q の新しいパラメータを追加することで、すべての色成分についての近似を可能にしたのが式(7)である。

$$R(r) = S_r * \cos(p * (r - m))^q \quad (7)$$

例として以下の図11は青成分についての3Dグラフとそれに対してパラメータフィッティングしたものであり、式(8)(9)はそれ際使用した式である。

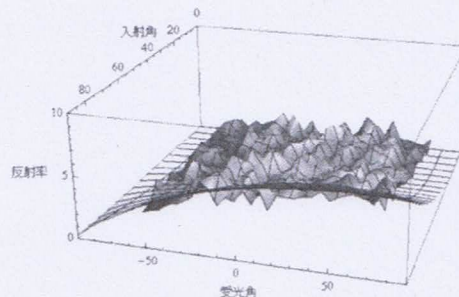


図11 青成分のパラメータフィッティング

$$R(r) = 0.1 * \cos(0.6 * (r - 57.5))^{0.8} \quad (8)$$

$$I(a) = 67.4 * (1 - \cos a)^{1.4} \quad (9)$$

6.2 鏡面反射成分

測定結果の鏡面反射成分において、入射角 20 度のとき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 12 である。

図 12 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。

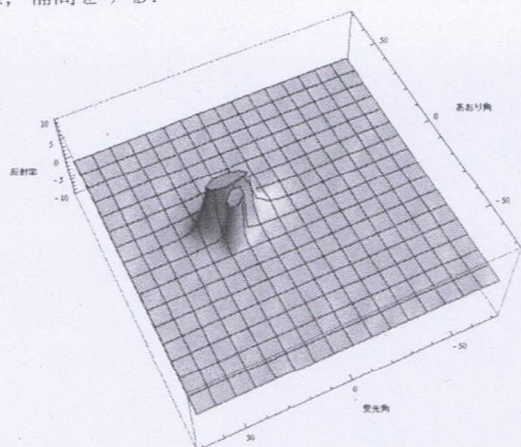


図 12 鏡面反射についてのグラフ

6.3 テーブルを用いた補間法

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。

鏡面反射成分の測定範囲外のデータについては、入射角・受光角・あおり角の角度が極端になるに連れて反射率が減少するであろうと考えて、測定範囲外の点を描画する際には距離的に一番近い測定可能点から反射率を取得し、その点から描画点の距離に応じて反射率を線形的に小さくすることで補間を行った。

実際のレンダリングの際には各描画点における法線 N 、視点 V 、光源 L 、によって RGB 値を決定する為、入射角、受光角、あおり角をそれぞれ変換する。

7. 実装結果

実装結果としての描画図を図 13-15 に示す。図 13 は球体に描画を行ったものであり、図 14 は複雑な形状として

ティーポットに螺鈿モデルを描画したものである。緑色が強く反映されている箇所と紫色に見える部分などがあり、これは螺鈿特有の虹色光彩が表現できているものと考えられる。

また、図 15 は黒漆の漆器の平面に螺鈿細工を施したと想定し、対象のオブジェクトの角度を変えたときにどのような色変化が起こるかを検証したものである。視点と法線の成す角が物体に対して大きいものが一番左の映像であり、右に行くにつれて視線と法線が近づいている。一番左の映像は全体的に緑が強く出ており、右の映像では青、赤と強く発色する成分が変わっている。このように角度によって見える色が変わるのは螺鈿の特徴であり、それを表現できていると言える。

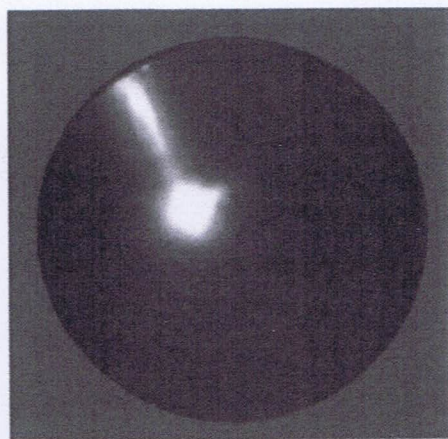


図 13 球に描画にしたもの



図 14 ティーポットへの描画結果

8. むすび

本研究では、実用品となる螺鈿を実測し、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分離し、これらデータを近似・補間・テーブル化したものを BRDF モデルにすることにより、夜光貝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、より複雑な形状やパターンをもつ螺鈿の描画が挙げられる。今回使用した分光測定器

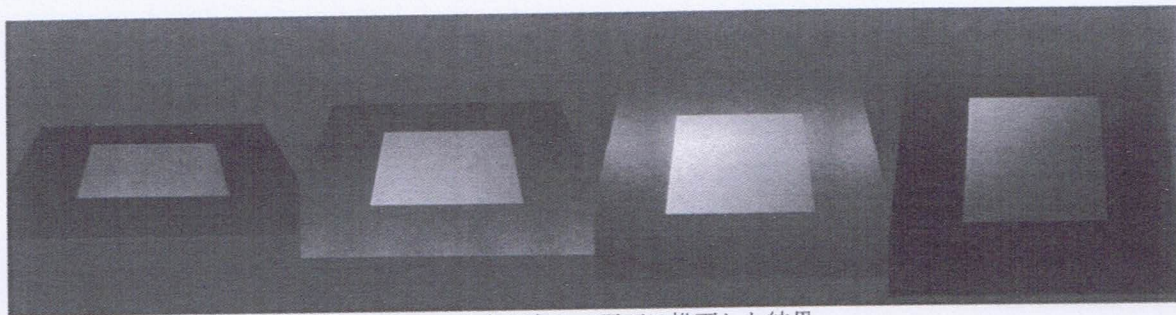


図 15 角度を変えて平面に描画した結果

DDS-5000 で測定する場合，図 2 で示した夜光貝のような凹凸が少なく，角度による色変化がシンプルであるものに対しては，BRDF モデル化が可能であるが，螺鈿細工によってはそれが難しいものがある．例えば，メキシコ貝を使用した螺鈿があるが，分光測定を行ったところ，夜光貝の螺鈿サンプルとは異なる結果となった．これは，測定点の計測範囲が一定のアパーチャをもつため平均的なデータを取得し，微細な変化を得ることができないためと考えられる．この問題を解決するには，ビデオカメラ等で測定物のある点に注目し，測定物の角度を変えながら撮影したとき，ある点がどのような色変化をするかを観測・モデル化することを複数のサンプル点で行う方法，または測定データの各色の反射率の比率を考慮しながら，同時に実測値だけではなくアドホック的な手法を用いて BRDF モデルを提案する必要があると考えられる．さらに複数のサンプル点から複数の反射モデルを定義し，実際の螺鈿の写真を撮り，そこからフォトメトリックステレオ等の手法などより螺鈿の表面の形状を取得，描画することによりさらにリアリティーを持つ螺鈿を CG 描画できると考えられる．

文 献

- [1] H. Hirayama, Y. Yamaji, Y. Kaneda, H. Yamashita, and Y. Monden, "Rendering iridescent colors appearing on natural objects," *Computer Graphics and Applications*, 2000. Proceedings. The Eighth Pacific Conference on, pp. 15-22, 2000.
- [2] Yinlong Sun, F. David Fracchia, Mark S. Drew, and Thomas W. Calvert, "Rendering Iridescent Colors of Optical Disks," *Proceedings of the Eurographics Workshop on Rendering Techniques 2000*, pp. 341-352, Springer-Verlag, London, UK, UK, 2000.
- [3] 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.
- [4] 井上 岳, "Expression for a Lacquer Ware Using Bidirectional Reflectance Distribution Function," 法政大学卒業論文, pp.257-260, 2009.
- [5] 瀬下 裕介, "Illumination Model for Lacquerware with Filmy Multi-Layer Structure," 法政大学卒業論文, pp.475-477, 2009.
- [6] 田代成美, "Iridescent Luster Rendering," 九州大学卒業研究論文, 2008.
- [7] B. Gralak, G. Tayeb, and S. Enoch, "Morpho butterflies wings color modeled with lamellar grating theory," *Opt Express*, vol. 9, no. 11, pp. 567-578, 2001.
- [8] 佐伯昌彦, 井村誠孝, 安室喜弘, 眞鍋佳嗣, 千原國宏, "光路差のテクスチャ表現による構造色レンダリング(CG一般(2), テーマ:可視化のためのCGおよびCG一般)", 情報処理学会研究報告. グラフィクスとCAD研究会報告, vol. 2005, no. 116, pp. 85-90, Nov 2005.
- [9] 土橋外志正, 長田典子, 眞鍋佳嗣, "多層薄膜干渉モデルに基づいた真珠の表現と真珠らしさの評価," 情報処理学会研究報告, vol. 96, no. 98(CG-82), pp. 33-40, Oct 1996.
- [10] 長田典子, 宇佐美照夫, 眞鍋佳嗣, 井口征士, "品質評価のためのビジュアルシミュレーションによる真珠の表現," 電子情報通信学会論文誌. D-II, 情報・システム, II-情報処理, vol. 80, no. 1, pp. 206-214, 一般社団法人電子情報通信学会, Jan 1997.
- [11] Sergey Ershov, Roman Đuriković, Konstantin Kolchin, and Karol Myszkowski, "Reverse engineering approach to appearance-based design of metallic and pearlescent paints," *Vis. Comput.*, vol. 20, no. 8-9, pp. 586-600, Springer-Verlag New York, Inc., Secaucus, NJ, USA, Nov 2004.
- [12] Jensen, H. W., Marschner, S. R., Levoy, M., Hanrahan, P., "A practical model for subsurface light transport," *SIGGRAPH 2001*, pp.511-518, 2001.
- [13] Eric Lengyel, *MATHEMATICS for 3D GAME PROGRAMMING & COMPUTER GRAPHICS*, Mark DeLoura, 狩野智英 翻訳, pp.158-171, ボーンデジタル社, 2002.
- [14] 小松大秀, 加藤寛, 漆芸品の鑑賞基礎知識, 至文堂, 1997.
- [15] 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.
- [16] 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, Sep 1978.
- [17] 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.
- [18] 武孝, "Illumination Model of Pearl Inlay Based on Measured Value," 法政大学卒業論文, pp.369-372, 2010.
- [19] 武孝, "実測値を用いた螺鈿の質感表現," 情報処理学会研究報告. CVIM, [コンピュータビジョンとイメージメディア], vol. 2012, no. 14, pp. 1-4, 情報処理学会, Nov 2012.