

斜め多層膜を持つ貝殻に現れる遊色効果の物理ベースシェーディングモデル

Asahina, Yuki / 朝比奈, 佑樹

(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

(巻 / Volume)

19

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

7

(発行年 / Year)

2024-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00030605>

斜め多層膜を持つ貝殻に現れる遊色効果の物理ベースシェーディングモデル Physically Based Shading Model for Iridescence Effect on Shells with Oblique Multilayers

朝比奈 佑樹 *

Yuki Asahina

法政大学大学院 情報科学研究科 情報科学専攻

Email: yuki.asahina.9b@stu.hosei.ac.jp

Abstract—The author presents a iridescence effect shading model for rendering shells, which takes into account oblique multilayer interference. Iridescence effect is a phenomenon in which light interferes, diffracts, reflects, scatters, and transmits through the microstructure of an object, and causes the object to emit a color. One of the iridescence effect is multilayer interference, in which light interferes with multiple thin films made of different materials. Among objects with multilayer interference, shells have oblique multilayer interference. Although a real-time rendering method has already been presented for objects with iridescence effect caused by multilayer interference, no method has been presented that consider the oblique multilayer. In this study, the author presents a shading model for the iridescence effect of shells that considers the oblique multilayer in order to render the iridescence effect of shells with a more realistic appearance.

1. はじめに

物体のもつ微細な構造によって光が干渉、回折、反射、散乱、透過し、発色する色を構造色という。構造色の具体例として、1層の薄い膜によって光が干渉する薄膜干渉や、複数の薄い層によって光が干渉する多層膜干渉、光が物体の影の中に入り込むように曲がる回折がある。薄膜干渉を起こす物体の例としてシャボン玉やカワラバト、多層膜干渉を起こす物体の例として貝殻、回折を起こす物体の例としてコンパクトディスクがある。このような構造色を持つ物体をコンピュータグラフィックス(CG)で表現する研究が増えている。

貝殻は、炭酸カルシウムによってできている層と、コンキオリンと呼ばれる複合タンパク質によってできている層が交互に重なり合っている。そのため、貝殻は、多層膜干渉と回折による構造色をもつ。また、貝殻の多層膜は表面から少し傾いている。このことを、本論文では「斜め多層膜」として説明していく。貝殻は、表面に118本/mmの溝を持ち、それによって回折を起こす。

多層膜干渉をモデル化した手法に、Hirayamaらの研究があげられる。これは、貝殻が持つ斜めの多層膜には対応していない。

本研究では、貝殻の構造色をより写實的にレンダリングすることを目指す。そのため、斜めの多層膜による構造色の計算モデルを提案する。「入射角に、多層膜の斜めの角度(以降、傾斜角とする)を足した角度が90度以下のとき」と「入射角に傾斜角を足した値が90度を超えたとき」の2つに場合分けして計算モデルを作成している。入射角に、傾斜角を足した角度が90度以下の

ときは、入射角に傾斜角を足した値を新たな入射角として計算する。また、入射角に傾斜角を足した値が90度を超えたときは、180度から入射角と傾斜角を足した結果を引いた値を新たな入射角としている。さらに、入射角に傾斜角を足した値が90度を超えたときは、多層膜干渉の透過率の値を用いて色を計算している。これらにより、貝殻の構造により近い計算モデルで、貝殻をシェーディングできるようになる。

2. 関連研究

構造色をレイトレーシングでレンダリングした手法が提案されている。Gondekらは、レイトレーシングにより、薄膜干渉による構造色を表現している[1]。しかし、この研究ではリアルタイムでの描画は実装されていない。Hirayamaらは、多層膜干渉による構造色を表現している[2]。この研究では、薄膜干渉による式を拡張し、多層膜干渉の反射率を求めている。しかし、レイトレーシングによってレンダリングしているため、リアルタイムレンダリングには対応していない。

構造色をリアルタイムレンダリングした手法が提案されている。Iwasakiらは、薄膜干渉の構造色を考慮したシャボン玉をリアルタイムレンダリングする手法を提案している[3]。Iwasakiらの研究は、まず薄膜干渉の反射率から構造色を事前に計算する。膜厚と入射角を入力とするルックアップテーブル(LUT)に、求めた構造色を保持して、シャボン玉のリアルタイムレンダリングをした。この手法では、薄膜干渉のリアルタイムレンダリングのみにしか対応していない。Imuraらは、薄膜干渉や多層膜干渉、回折格子に起因する構造色物体のリアルタイムレンダリングを汎用的におこなう手法を提案している[4]。Imuraらの手法では薄膜干渉、多層膜干渉、回折格子の3つ構造発色現象を、光路差の変化によって色が変わることを用いて、光路差のみを変化させることで共通の手法でリアルタイムレンダリングするアルゴリズムを提案した。また、著者の過去研究では、薄膜干渉による構造色の物理ベースシェーディングパラメータを提案している[5]。この研究では、入射角、反射角に加え、膜厚の局所的変化、媒質の屈折率、光源の色温度、色空間、構造色の強度をパラメータとして、ツール上からリアルタイムで変更することができる。

貝殻の構造は、古くから研究されている。貝殻や真珠の構造色について、最初に取り組んだのはBrewsterで19世紀半ばのことである[6]。Brewsterは、アコヤ貝にろうそくの火をあて、光を反射させたところ、反射された光が何か所かに分かれて出てくことに気づいた。Brewsterはこれに「転写可能な色」と名付けた。Brewsterは貝殻の表面が118本/mmの感覚の溝を作っていて、それによる回折が色の原因であると考えた。Rayleighは、貝殻を薄

* Supervisor: Prof. Takafumi Koike

く磨いてその透過スペクトルを測定し、430nmと590nmに反射帯があることを見つけた[7]。これが、多層膜干渉のピークに一致していると考えた。貝殻が回折による構造色と多層膜干渉による構造色のどちらを持つかについては、Ramanが提案している[8]、[9]、[10]。Ramanは貝殻の多層膜が斜めであることに注目し、回折と多層膜干渉の両方が起きている構造色を持つことを示した。

Imuraらの手法[4]では、多層膜は傾いておらず、貝殻が持つ斜めの多層膜には対応していない。そのため、斜め多層膜による干渉を計算できないと、貝殻が持つ特性を考慮した構造色の計算が必要である。

3. 準備

多層膜干渉による反射率と透過率について説明する。多層膜干渉の原理を図1に示す。膜に入射した光は、媒質0と媒質1、媒質1と媒質2の界面で多重反射を起こす。また、媒質1と媒質2の界面を透過した光は、さらに媒質2と媒質3の界面に入射し、これが層数分繰り返される。媒質0から媒質2までの媒質で、全ての反射光の電場を足し合わせることで、1つの膜の干渉による反射光の電場を計算することができ、それを層数分再帰的に計算することで、多層膜干渉による反射率を計算することができる。多層膜干渉による反射率を計算することで色が求まるが、提案手法で述べている斜めの多層膜は多層膜干渉による透過率も用いるため、多層膜干渉による透過率も説明する。

まず、多層膜干渉の反射率を求める。媒質0の屈折率を n_0 、媒質1の屈折率を n_1 、媒質2の屈折率を n_2 、膜厚を d とする。また、入射角を $\theta_{01,i}$ 、反射角を $\theta_{01,o}$ 、屈折角を $\theta_{12,i}$ 、その屈折角で反射した角度を $\theta_{12,o}$ とする。 $\theta_{12,i}$ と $\theta_{12,o}$ は、スネルの法則を用いて導出する。それを式(1)と式(2)に示す。

$$n_0 \sin \theta_{01,i} = n_1 \sin \theta_{12,i}. \quad (1)$$

$$n_0 \sin \theta_{01,o} = n_1 \sin \theta_{12,o}. \quad (2)$$

多層膜干渉の反射率 R_{mult} を求める式を式(3)に示す。

$$R_{mult} = |\gamma_N|^2. \quad (3)$$

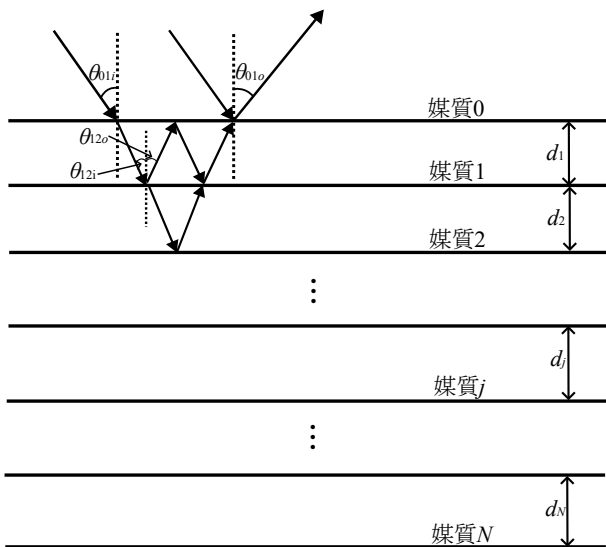


図1. 多層膜干渉の原理図

γ_N は N 層目までの多層膜干渉全体の振幅反射率である。振幅反射率の2乗を求めることで、多層膜干渉の反射率を求めることができる。 γ_N を求めるため、1層目までの振幅反射率である γ_1 を導出する。これを薄膜干渉の振幅反射率と定義する。薄膜干渉の振幅反射率 γ_1 は式(4)によって求める。

$$\gamma_1 = \frac{E_r}{E_{inc}}. \quad (4)$$

E_{inc} は入射光の電場、 E_r は反射光の電場を示す。入射光の電場と反射光の電場の比を求めることで、薄膜干渉の振幅反射率を求めることができる。反射光の電場 E_r を式(5)に示す。

$$E_r = E_0 + E_1 + E_2 + E_3 + \dots + E_n + \dots \quad (5)$$

E_n は $n=0$ の時、式(6)で書くことができる。

$$E_0 = E_{inc} r_{01}. \quad (6)$$

r_{01} は、媒質0から媒質1に入射するときの反射率である。 E_1 は、媒質0と媒質1の界面を透過した後、媒質1と媒質2の界面を反射する。最後に、光は媒質0と媒質1の界面を透過する。 E_1 は式(7)によって計算することができる。

$$E_1 = E_{inc} t_{01} t_{10} r_{12} e^{i\phi}. \quad (7)$$

t_{01} は媒質0から媒質1に入射するときの透過率、 t_{10} は媒質1から媒質0の透過率、 r_{12} は媒質1から媒質2に入射するときの反射率である。媒質 $j-1$ と媒質 j の界面での反射率 $r_{(j-1)j}$ を式(8)に、媒質 $j-1$ と媒質 j の界面での透過率 $t_{(j-1)j}$ を式(9)に示す。

$$r_{(j-1)j} = \frac{r_{(j-1)j}^s + r_{(j-1)j}^p}{2}. \quad (8)$$

$$t_{(j-1)j} = \frac{t_{(j-1)j}^s + t_{(j-1)j}^p}{2}. \quad (9)$$

$r_{(j-1)j}^s$ がs偏光での振幅反射率、 $r_{(j-1)j}^p$ がp偏光での振幅反射率、 $t_{(j-1)j}^s$ がs偏光での振幅透過率、 $t_{(j-1)j}^p$ がp偏光での振幅透過率である。 $r_{(j-1)j}^s$ は式(10)、 $r_{(j-1)j}^p$ は式(11)、 $t_{(j-1)j}^s$ は式(12)、 $t_{(j-1)j}^p$ は式(13)で示している。

$$r_{(j-1)j}^s = \frac{n_{(j-1)} \cos \theta_{(j-1)j,i} - n_j \cos \theta_{j(j+1),i}}{n_{(j-1)} \cos \theta_{(j-1)j,i} + n_j \cos \theta_{j(j+1),i}}. \quad (10)$$

$$r_{(j-1)j}^p = \frac{n_j \cos \theta_{(j-1)j,i} - n_{(j-1)} \cos \theta_{j(j+1),i}}{n_j \cos \theta_{(j-1)j,i} + n_{(j-1)} \cos \theta_{j(j+1),i}}. \quad (11)$$

$$t_{(j-1)j}^s = \frac{2n_{(j-1)} \cos \theta_{(j-1)j,i}}{n_{(j-1)} \cos \theta_{(j-1)j,i} + n_j \cos \theta_{j(j+1),i}}. \quad (12)$$

$$t_{(j-1)j}^p = \frac{2n_{(j-1)} \cos \theta_{(j-1)j,i}}{n_{(j-1)} \cos \theta_{j(j+1),i} + n_j \cos \theta_{(j-1)j,i}}. \quad (13)$$

式(10)から式(13)はフレネルの式によって求めることができる。

E_n は $n \geq 1$ の時、式(14)のように一般化できる。

$$E_n = E_{inc} t_{01} r_{12} (r_{10} r_{12} e^{i\phi})^{n-1} t_{12} e^{i\phi}. \quad (14)$$

式 (14) は, $r_{10}r_{12}e^{i\phi}$ を公比とする等比数列である. ϕ を位相差とする. 式 (14) を用いて, 無限級数の和を求める. 式 (15) となる.

$$\begin{aligned}
E_r &= E_0 + E_1 + E_2 + E_3 + \dots + E_n + \dots \\
&= E_{inc}(r_{01} + t_{01}t_{10}r_{12}e^{i\phi} + t_{01}t_{10}r_{12}^2r_{10}e^{2i\phi} + \dots \\
&\quad + t_{01}t_{10}r_{12}e^{i\phi}(r_{10}r_{12}e^{i\phi})^{n-1} + \dots) \\
&= E_{inc}(r_{01} + t_{01}t_{10}r_{12}e^{i\phi} \sum_{n=1}^{\infty} (r_{10}r_{12}e^{i\phi})^{n-1}) \\
&= E_{inc} \left(r_{01} + t_{01}t_{10}r_{12}e^{i\phi} \frac{1}{1 - r_{12}r_{10}e^{i\phi}} \right) \\
&= E_{inc} \left(\frac{r_{01} - r_{01}r_{12}r_{10}e^{i\phi} + t_{01}t_{10}r_{12}e^{i\phi}}{1 - r_{12}r_{10}e^{i\phi}} \right) \\
&= E_{inc} \left(\frac{r_{01} + (r_{01}r_{01} + t_{01}t_{10})r_{12}e^{i\phi}}{1 + r_{12}r_{01}e^{i\phi}} \right) \\
&= E_{inc} \left(\frac{r_{01} + r_{12}e^{i\phi}}{1 + r_{12}r_{01}e^{i\phi}} \right). \tag{15}
\end{aligned}$$

式 (15) の 6 行目から 7 行目の変形は, $r_{ij} = -r_{ji}$ と $r_{ij}^2 + t_{ij}t_{ji} = 1$ を用いた. 多層膜干渉の反射率は, 式 (15) を式 (16) のように再帰式にすることで導出できる.

$$\gamma_{N-j+1} = \frac{r_{(j-1)j} + \gamma_{N-j}e^{i\phi_j}}{1 + r_{(j-1)j}\gamma_{N-j}e^{i\phi_j}}. \quad (\text{for } j = N, \dots, 1) \tag{16}$$

$j = N$ から $j = 1$ まで繰り返し計算していくことで, 最終的に多層膜干渉の反射率 γ_N を求めている. また, γ_0 の時は式 (17) となる.

$$\gamma_0 = r_{N(N+1)}. \tag{17}$$

j 層目の位相差の式を式 (18) に示す.

$$\phi_j = \frac{2\pi\Delta_j}{\lambda}. \tag{18}$$

光路差から波長を割ることで波がいくつあるかを計算でき, それに 2π をかけると位相差を求めることができる. j 層目の時の光路差の式 (19) に示す.

$$\begin{aligned}
\Delta_j &= n_j d_j \left(\frac{1}{\cos \theta_{j(j+1),i}} + \frac{1}{\cos \theta_{j(j+1),o}} \right) - \\
&\quad n_{(j-1)} d_j (\tan \theta_{j(j+1),i} + \tan \theta_{j(j+1),o}) \sin \theta_{(j-1)j,o}. \tag{19}
\end{aligned}$$

d_j は, j 層目の膜厚である.

次に, 多層膜干渉の透過率を求める. 多層膜干渉の透過率 T_{mult} を求める式を式 (20) に示す.

$$T_{mult} = \frac{n_2 \cos \theta_{N(N+1),i}}{n_0 \cos \theta_{01,i}} |\tau_N|^2. \tag{20}$$

τ_N は N 層目までの振幅透過率である. τ_N を求めるため, 1 層目までの振幅透過率である τ_1 を求める. τ_1 は式 (21) によって求めることができる.

$$\begin{aligned}
\tau_1 &= t_{01}t_{12}e^{i\frac{\phi}{2}} + t_{01}r_{12}r_{10}t_{12}e^{i\frac{3\phi}{2}} + \dots \\
&= \frac{t_{01}t_{12}e^{i\frac{\phi}{2}}}{1 - r_{12}r_{10}e^{i\phi}} \\
&= \frac{t_{01}t_{12}e^{i\frac{\phi}{2}}}{1 + r_{12}r_{01}e^{i\phi}}. \tag{21}
\end{aligned}$$

多層膜干渉の反射率を求めたように, 再帰式として書きなおすと多層膜干渉の透過率を導出することができる. 導出した式を式 (22) に示す.

$$\tau_{N-j+1} = \frac{t_{(j-1)j}\gamma_{N-j}e^{i\frac{\phi_j}{2}}}{1 + r_{(j-1)j}\gamma_{N-j}e^{i\phi_j}}. \quad (\text{for } j = N, \dots, 1) \tag{22}$$

τ_{N-j+1} は, $N-j+1$ 層目までの多層膜干渉の透過率である. また, τ_0 の時は式 (23) となる.

$$\tau_0 = \tau_{N(N+1)}. \tag{23}$$

多層膜干渉の反射率を用いて色を導出する方法は, 木下らの書籍 [11] を参考にする. 求まった多層膜干渉による色, 回折による色, 拡散反射と鏡面反射による色を足すことで, 最終的な色を求めている.

4. 提案手法

本研究では, 斜めの多層膜による構造色の計算モデルを提案する. それによって, 貝殻が持つ斜めの層を考慮して, 貝殻をよりよい質感でレンダリングすることを目指す.

斜めの多層膜による干渉を考慮した構造色について, 以下の 2 つに場合分けして, それぞれ考える.

- 1) $\theta_{01,i} + \alpha < 90^\circ$
- 2) $\theta_{01,i} + \alpha \geq 90^\circ$

α は傾斜角を示す. $\theta_{01,i} + \alpha < 90^\circ$ の場合の光路図を図 2 に, $\theta_{01,i} + \alpha \geq 90^\circ$ の場合の光路図を図 3 に示す. $\theta_{01,i} + \alpha < 90^\circ$ の場合は, 図にある通り傾斜角 α を足すのみが変更点となる. しかし, $\theta_{01,i} + \alpha < 90^\circ$ の場合は, 入射位置が従来の多層膜干渉の手法と異なることが図からわかる. そのため, 入射角を $180 - \theta_{01,i} + \alpha$ にする必要がある. また, 最終的に多層膜を透過することで, 観測者の目に光が届く. そのため, 多層膜干渉の透過率を計算することで, 観測者の目に届く光を計算できる.

また, 貝殻では回折の要素や, 構造色以外では拡散反射や鏡面反射の要素もあり, 回折は Imura らの手法 [4], 拡散反射と鏡面反射は Burley の手法 [12] を用いている.

4.1. 斜めの多層膜を考慮した干渉による構造色

$\theta_{01,i} + \alpha < 90^\circ$ の場合の, 斜め多層膜による干渉を述べる. $\theta_{01,i} + \alpha < 90^\circ$ の場合, 斜めでない多層膜との違いは「入射角 $\theta_{01,i}$ に傾斜角を足す」である. そのため, 式 (1) と式 (2) で求めたスネルの法則の式を, 式 (24) と式 (25) に変える.

$$n_0 \sin(\theta_{01,i} + \alpha) = n_1 \sin \theta_{12,i}. \tag{24}$$

$$n_0 \sin(\theta_{01,o} - \alpha) = n_1 \sin \theta_{12,o}. \tag{25}$$

次に, 媒質 $j-1$ と媒質 j の界面での振幅反射率と振幅透過率について, 式 (10) から式 (13) を, 式 (26) から式 (29) に変更する.

$$r_{(j-1)j}^s = \frac{n_{(j-1)} \cos(\theta_{(j-1)j,i} + \alpha) - n_j \cos \theta_{j(j+1),i}}{n_{(j-1)} \cos(\theta_{(j-1)j,i} + \alpha) + n_j \cos \theta_{j(j+1),i}}. \tag{26}$$

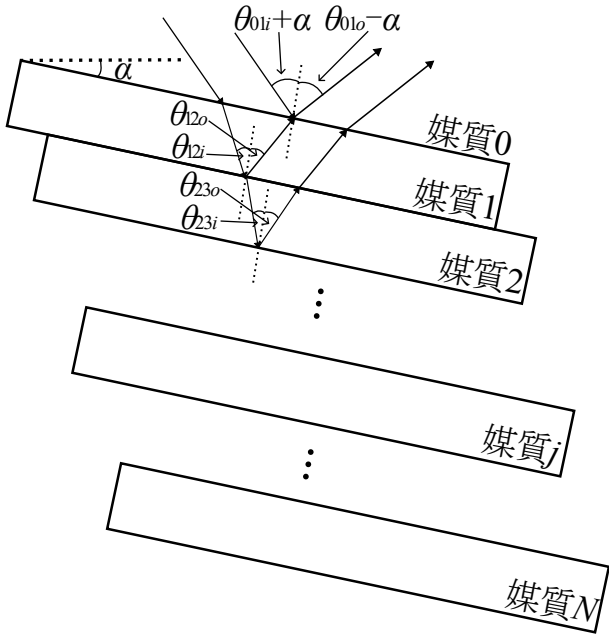


図 2. 斜め多層膜モデルの形状と光路図 ($\theta_{01,i} + \alpha < 90^\circ$ の場合)

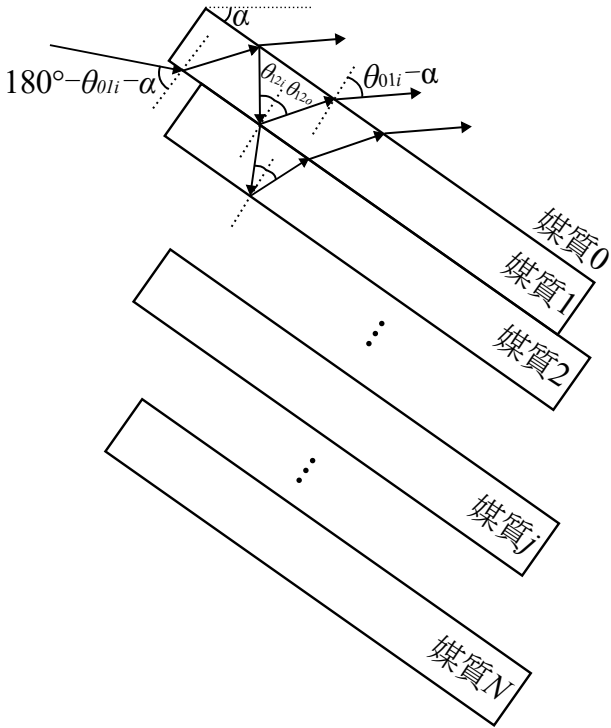


図 3. 斜め多層膜モデルの形状と光路図 ($\theta_{01,i} + \alpha \geq 90^\circ$ の場合)

$$r_{(j-1)j}^p = \frac{n_j \cos(\theta_{(j-1)j,i} + \alpha) - n_{(j-1)} \cos \theta_{j(j+1),i}}{n_j \cos(\theta_{(j-1)j,i} + \alpha) + n_{(j-1)} \cos \theta_{j(j+1),i}} \quad (27)$$

$$t_{(j-1)j}^s = \frac{2n_{(j-1)} \cos(\theta_{(j-1)j,i} + \alpha)}{n_{(j-1)} \cos(\theta_{(j-1)j,i} + \alpha) + n_j \cos \theta_{j(j+1),i}} \quad (28)$$

$$t_{(j-1)j}^p = \frac{2n_{(j-1)} \cos(\theta_{(j-1)j,i} + \alpha)}{n_{(j-1)} \cos \theta_{j(j+1),i} + n_j \cos(\theta_{(j-1)j,i} + \alpha)} \quad (29)$$

また、式 (19) の光路差の式を、式 (30) に変える。

$$\Delta_j = n_j d_j \left(\frac{1}{\cos \theta_{(j-1)j,i}} + \frac{1}{\cos \theta_{j(j+1),o}} \right) - n_{(j-1)} d_j (\tan \theta_{j(j+1),i} + \tan \theta_{j(j+1),o}) \sin(\theta_{(j-1)j,i} + \alpha) \quad (30)$$

式 (26) から式 (30) で求めた Δ_j と $r_{(j-1)j}^s$, $r_{(j-1)j}^p$, $t_{(j-1)j}^s$, $t_{(j-1)j}^p$ を、式 (16) と式 (18) に代入することで斜め多層膜による干渉を計算することができる。

次に、 $\theta_{01,i} + \alpha \geq 90^\circ$ の場合について考える。 $\theta_{01,i} + \alpha \geq 90^\circ$ の場合、斜めでない多層膜との違いは「 $180^\circ - \theta_{01,i} - \alpha$ を斜め多層膜に入射する角度、 $\theta_{01,i} - \alpha$ を斜め多層膜から反射する角度にする」と「多層膜干渉の反射率の式を透過率の式に置き換える」である。まず、「 $180^\circ - \theta_{01,i} - \alpha$ を斜め多層膜に入射する角度、 $\theta_{01,i} - \alpha$ を斜め多層膜から反射する角度にする」について述べる。図 3 に示すように、膜の裏から光が入射するため、入射角 $180^\circ - \theta_{01,i} - \alpha$ で入射し、反射角 $\theta_{01,i} - \alpha$ で反射する。そのため、スネルの法則の式である式 (1) と式 (2) を式 (31) と式 (36) に変える。

$$n_0 \sin(180^\circ - \theta_{01,i} - \alpha) = n_1 \sin \theta_{12,i} \quad (31)$$

$$n_0 \sin(\theta_{01,o} - \alpha) = n_1 \sin \theta_{12,o} \quad (32)$$

同じように入射角を考えると、振幅反射率の式である式 (10) から式 (13) を式 (33) から式 (36) に変える。

$$r_{(j-1)j}^s = \frac{n_{(j-1)} \cos(180^\circ - \theta_{01,i} - \alpha) - n_j \cos \theta_{01,i}}{n_{(j-1)} \cos(180^\circ - \theta_{01,i} - \alpha) + n_j \cos \theta_{01,i}} \quad (33)$$

$$r_{(j-1)j}^p = \frac{n_j \cos(180^\circ - \theta_{01,i} - \alpha) - n_{(j-1)} \cos \theta_{01,i}}{n_j \cos(180^\circ - \theta_{01,i} - \alpha) + n_{(j-1)} \cos \theta_{01,i}} \quad (34)$$

$$t_{(j-1)j}^s = \frac{2n_{(j-1)} \cos(180^\circ - \theta_{01,i} - \alpha)}{n_{(j-1)} \cos(180^\circ - \theta_{01,i} - \alpha) + n_j \cos \theta_{01,i}} \quad (35)$$

$$t_{(j-1)j}^p = \frac{2n_{(j-1)} \cos(180^\circ - \theta_{01,i} - \alpha)}{n_{(j-1)} \cos \theta_{01,i} + n_j \cos(180^\circ - \theta_{01,i} - \alpha)} \quad (36)$$

光路差も同様に、式 (19) を式 (37) に変える

$$\Delta_j = n_j d_j \left(\frac{1}{\cos \theta_{12,i}} + \frac{1}{\cos \theta_{12,o}} \right) - n_{(j-1)} d_j (\tan \theta_{12,i} + \tan \theta_{12,o}) \sin(180^\circ - \theta_{01,i} - \alpha) \quad (37)$$

次に、「多層膜干渉の反射率の式を透過率の式に置き換える」を考える。図 3 を見ると、反射した光は膜を透過して観測者の目まで届く。そのため、 $\theta_{01,i} + \alpha \geq 90^\circ$ のときは、式 (16) を式 (38) に変える必要がある。

$$\gamma_{N-j+1} = \frac{t_{(j-1)j} \gamma_{N-j} e^{2i\phi_j}}{1 + r_{(j-1)j} \gamma_{N-j} e^{2i\phi_j}} \quad (\text{for } j = N, \dots, 1) \quad (38)$$

よって、 γ_0 の時は式 (39) となる。

$$\gamma_0 = t_{N(N+1)} \quad (39)$$

4.2. 貝殻のパラメータ値

木下らの書籍 [11] を参考に、本研究で使用する貝殻のパラメータとその値を定める。図 4 に本研究でレンダリングする貝殻の写真を示す。また、写真中の横線で貝殻を切断した際に観察できる層構造を、木下らの書籍を参考にモデル化し、断面図として図 5 に示す。コンキオリン層と炭酸カルシウム層が交互になって並んでおり、それが斜めの多層膜としている。また、貝殻の表面から少し出ている箇所が回折で影響するピットとなっており、ピットの間の穴を溝とする。

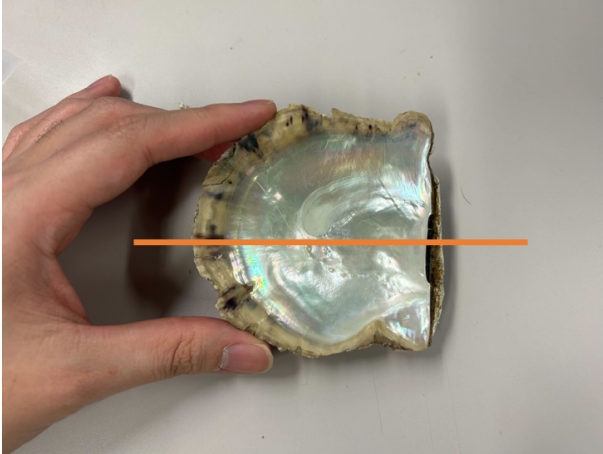


図 4. 使用した貝殻。線は図 5 で示す断面

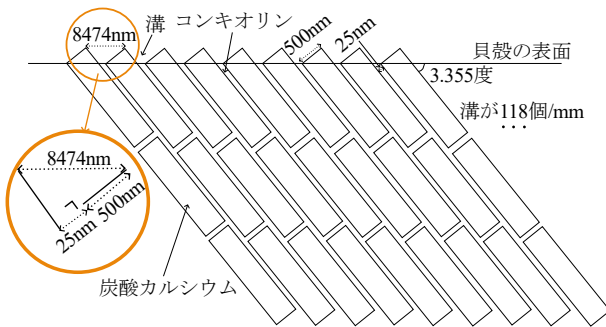


図 5. 貝殻の断面図 (図 4 で示す線で切った断面)

以下に、貝殻のシェーディングで用いるパラメータとその値や材質について述べる。

- 層の材質 n_j : 炭酸カルシウム層 (屈折率 1.66) とコンキオリン層 (屈折率は実装結果を見て手動で決定) が交互
- 炭酸カルシウム層の厚さ d_{odd} : 500nm
- コンキオリン層の厚さ d_{even} : 25nm
- 溝の数: 118 個/mm
- 溝の長さ: 8474nm
- 層の傾斜角度 α : 3.335°
- 層数 N : 32 個

d_{odd} は奇数媒質の膜厚, d_{even} は偶数媒質の膜厚である。層の材質, 層の厚さは木下らの書籍の値を参照している [11]。溝の長さは、溝の数を用いて式 (40) で求めることができる。

$$1000000\text{nm}/118 = 8474\text{nm} \quad (40)$$

傾斜角は、溝の長さ、炭酸カルシウム層とコンキオリン層の厚さから、正弦定理を使って求める。正弦定理を用

いることで、式 (41) によって傾斜角の値を出すことができる。

$$\begin{aligned} \frac{8474}{\sin 90^\circ} &= \frac{525}{\sin \alpha} \\ 8474 &= \frac{525}{\sin \alpha} \\ \sin \alpha &= \frac{525}{8474} \\ \sin \alpha &= 0.06195 \\ \alpha &= 3.355 \end{aligned} \quad (41)$$

よって、傾斜角は 3.355° だと求めることができる。

また、層数とコンキオリン層の屈折率は、実装結果を見て手動でパラメータを調整することで決定した。層数を推定することが難しい理由は、光が入射してから反射するまでどれだけの数の層が影響しているかを推定することが難しいためである。また、コンキオリン層の屈折率を推定することが難しい理由は、小倉の研究 [13] で「高屈折率 (不明)」となっていたためである。

5. 実装と結果

「フォトグラメトリ」によって貝殻の 3D モデルを作成し、その 3D モデルに、構造色を計算して描画するシェーダを作成し適用した。ゲームエンジンの Unity の Built in Render Pipeline によって貝殻の CG を実装した。貝殻の 3D モデル、4 つのテクスチャ、シェーダを用いて、レンダリングする。

作成した 4 つのテクスチャとは、物体が外部から受ける光をどれくらい反射するかを記したアルベドテクスチャ、構造色が出ている画素に 1、出していない画素に 0 を格納しているマスクテクスチャ、構造色の事前計算データを格納した LUT がある。LUT は、構造色の計算をリアルタイムで処理できるように、事前計算データを格納している。アルベドテクスチャとマスクテクスチャを図 6 に示す。

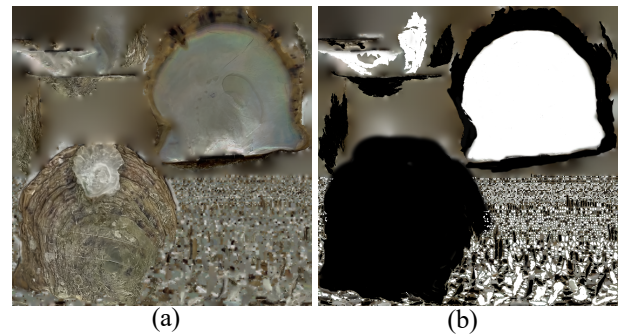


図 6. 使用したテクスチャ。(a) アルベドテクスチャ、(b) マスクテクスチャ

作成した多層膜干渉による色を格納した LUT を図 7 に、回折による色を格納した LUT を図 8 に示す。多層膜 LUT は x 軸が反射角, y 軸が入射角, z 軸が層数であり、回折 LUT は x 軸が層数, y 軸が反射角である。回折 LUT のサイズが 64×64 , 多層膜 LUT のサイズが $64 \times 64 \times 64$ である。

6. 評価

提案した斜め多層膜について、それを実装した貝殻のシェーディングを評価するため、Imura らの手法 [4] で作

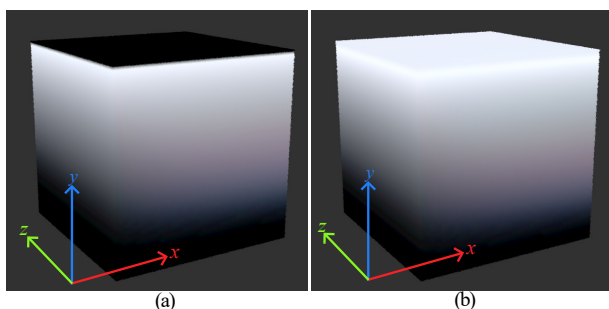


図 7. 多層膜 LUT(a) 斜めでない多層膜 (b) 斜めの多層膜

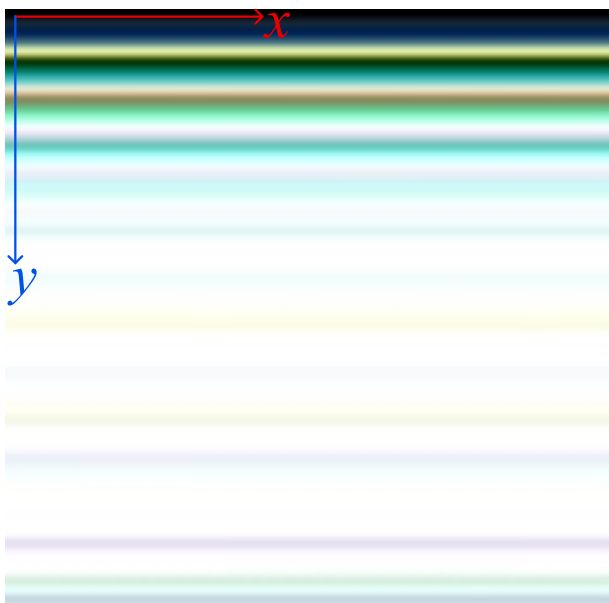


図 8. 回折 LUT

成したシェーダを用いて実装した貝殻の CG と比較する。リファレンス画像に実物の貝殻を用いて、CIEDE2000[14]という手法を用いて評価した。

評価に用いた画像を図 9 に示す。貝殻の置き方を 3 パターン作り、それぞれ画像 1、画像 2、画像 3 とする。色差をとった結果を表 1 に示す。すべての画像で値が良くなっている。

7. 考察

CIEDE2000 の値が良くなっている理由を考察する。目視で確認すると、提案手法と従来手法で LUT を見ると、提案手法の方が明るい。明るさが実物の写真に近いため、実物の貝殻の色に近くなるのは提案手法の方だと考える。

また、貝殻は緑色とピンク色の構造色が出るが、LUT の結果から、貝殻が持つ緑色は回折によるものもかなり大きく影響しているのではないかと考える。なぜなら、多層膜干渉の LUT では、主にピンク色と青色のあたりが出ており、緑色に近い色が出ていないためである。よって、貝殻のレンダリングについて考えるためには、多層膜干渉だけでなく回折についても詳しく調べる必要があると考える。

8. まとめ

本研究では、より実物に近い目目で貝殻をレンダリングするため、斜めの多層膜による干渉を考慮した構造色のシェーディングモデルを作成した。また、提案手法と既存手法の比較を行った結果、CIEDE2000 で色差をとると良くなっていたことが分かった。

今後の課題として、緑色の再現のために、回折も考慮することがある。貝殻が持つ構造色には、多層膜干渉だけでなく回折もある。しかし、本研究では多層膜干渉についてのみしか考えられておらず、回折については深く考えられていない。そのため、貝殻が持つ回折についてさらに研究し、貝殻の回折の計算モデルを作るべきだと考える。

参考文献

- [1] J. S. Gondek, G. W. Meyer, and J. G. Newman. “Wavelength Dependent Reflectance Function”. *SIGGRAPH '94: Proceedings of the 21st Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, 1994.
- [2] H. Hirayama, K. Kaneda, H. Yamashita, and Y. Monden. “An Accurate Illumination Model for Objects Coated with Multilayer Films”. *Computers Graphics*, 2001.
- [3] K. Iwasaki, K. Matsuzawa, and T. Nishita. “Realtime Rendering of Soap Bubbles Taking into Account Light Interference”. *Proceedings of Computer Graphics International Conference*, 2004.
- [4] M. Imura, M. Saeki, Y. Yasumuro, O. Oshiro, and Y. Manabe. “A Generic Realtime Rendering Approach for Structural Colors”. *VRST '09: Proceedings of the 16th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, 2009.
- [5] 朝比奈佑樹, 中本啓子, 小池崇文. “薄膜干渉に起因する構造色を持つ物体の CG 制作における物理ベースシェーディングパラメータの検討と評価”. 第 84 回全国大会講演論文集, 2022.
- [6] D. Brewster. “Treatise on Optics”. 1895.
- [7] L. Rayleigh. “Studies of Iridescent Colour, and the Structure Producing it. II. Mother-of-Pearl”. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, Vol. 102, No. 719, pp. 674–677, 1923.
- [8] C. V. Raman. “On iridescent shells. Part I. Introductory”. *Proceedings of the Indian Academy of Sciences, Section A*, Vol. 3, pp. 567–573, 1935.
- [9] C. V. Raman. “The structure and optical behaviour of iridescent shells”. *Proceedings of the Indian Academy of Sciences, Section A*, Vol. 39, pp. 1–13, 1954.
- [10] C. V. Raman. “The structure and optical behaviour of pearls”. *Proceedings of the Indian Academy of Sciences, Section A*, Vol. 39, pp. 215–222, 1954.
- [11] 木下修一, 近藤寿人. “生物ナノフォトンクス-構造色入門”. 朝倉書店, 2010.
- [12] B. Burley. “Physically Based Shading at Disney”. *SIGGRAPH 2012 Course Notes*, 2012.
- [13] 小倉繁太郎. “自然界に存在する格子および多層膜構造による干渉色”. 応用物理, 1997.
- [14] M. R. Luo, G. Cui, and B. Rigg. “the Development of the CIE 2000 Colour-Difference Formula: CIEDE2000”. *Special Issue: Special Issue on Color Difference*, 2001.

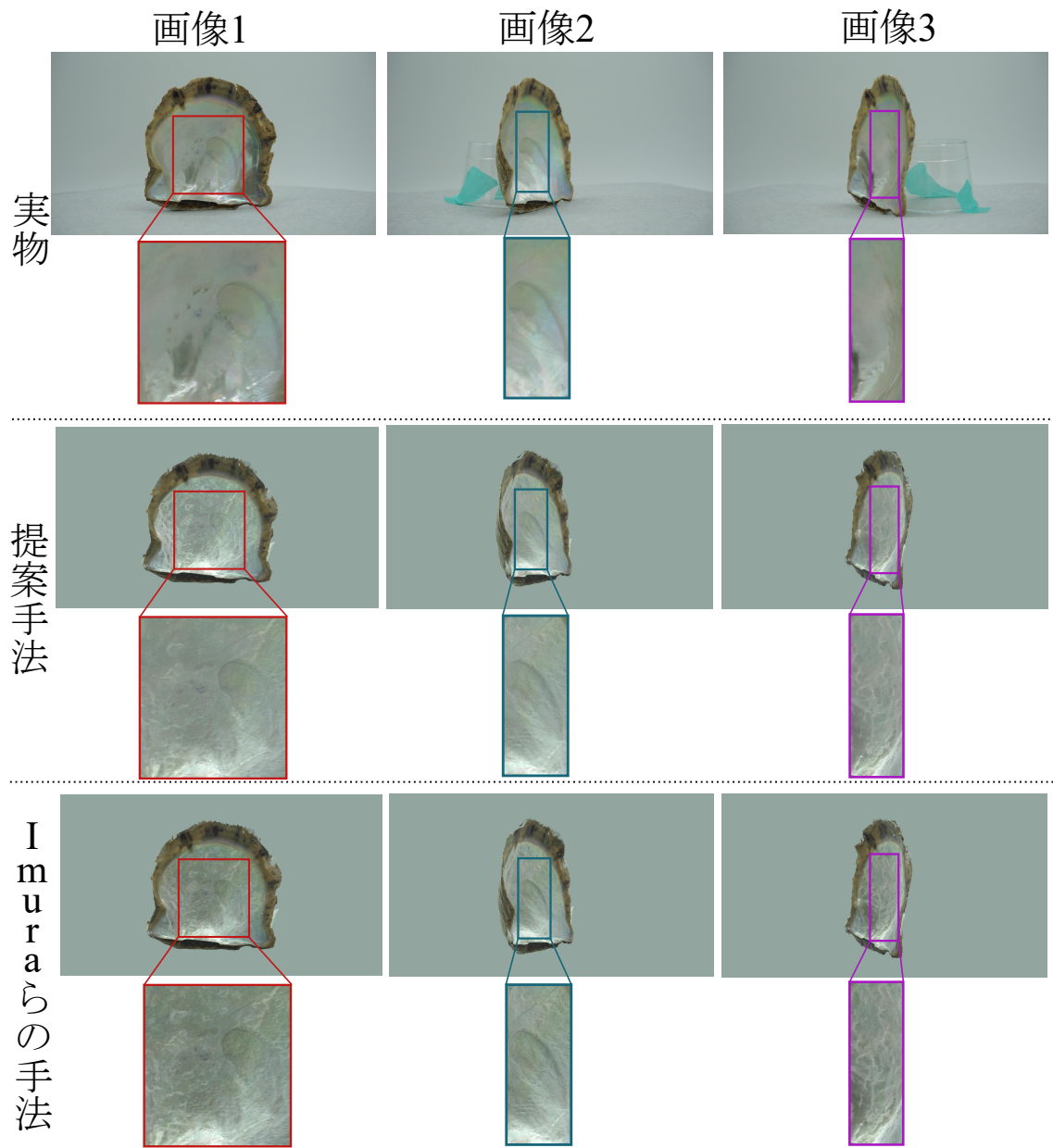


図 9. 評価に用いた画像. 画像 1 と画像 2 と画像 3 で置き方を変え, それぞれ実物, 提案手法, 従来手法で画像を作成した.

表 1. CIEDE2000 による色差をとり比較した結果

	画像 1	画像 2	画像 3
提案手法: 領域の 1 画素の平均をとった CIEDE2000 による色差	5.14	4.58	6.91
Imura らの手法: 領域の 1 画素の平均をとった CIEDE2000 による色差	6.28	5.46	7.59