

化粧と肌の 2 層構造からなる化粧肌反射特性モデル

馬場 葉子[†] 向川 康博[†] 八木 康史[†]

[†] 大阪大学 産業科学研究所

〒 567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘 8-1

E-mail: †{baba,mukaigaw,yagi}@am.sanken.osaka-u.ac.jp

あらまし 化粧が肌の見た目に与える影響は大きく、様々な方法で化粧による反射特性の変化が解析されてきた。本研究では、特に反射特性を大きく変えるファンデーションを対象として、化粧層と肌の 2 層構造で構成される反射特性モデルを提案する。このモデルでは、化粧層の反射と透過、肌の反射と表面下散乱を個別にモデル化し、その組み合わせによって化粧肌の反射特性を表現する。実際にファンデーションを塗布した場合の反射光を計測し、提案モデルと比較することで、有効性を確認した。

キーワード 肌, 化粧, 反射, 透過, 表面下散乱

Reflection Model for Made-up Skin

Consisting of Double-layered Structure of Cosmetic and Skin

Youko BABA[†], Yasuhiro MUKAIGAWA[†], and Yasushi YAGI[†]

[†] Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University

8-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, 567-0047, JAPAN

E-mail: †{baba,mukaigaw,yagi}@am.sanken.osaka-u.ac.jp

Abstract Cosmetics significantly affects the appearance of human skin, hence various methods have been developed to analyze the reflectance properties of made-up face. In this paper, we analyze the foundation which significantly changes the reflectance properties, and propose a novel reflectance model of the made-up skin which has a double-layered structure of cosmetic and skin. In this model, the reflection and transmission of cosmetics, and the reflection and subsurface scattering of skin are separately modeled. The combination of these models are used to express made-up skin. We measured reflectance of a made-up skin by foundation and compared with the proposed model.

Key words skin, cosmetic, reflection, transmission, subsurface scattering

1. はじめに

一般に成人女性は化粧をすることが多い。化粧をすることで、しみやそばかすなどを目立たなくする効果に加えて、肌の見かけの色を変えたり、透明感に関する質感を変える効果がある。CG 分野では写実的な顔画像を生成するために、また美容分野では化粧品の開発のために、化粧をした場合の効果を調べることが重要となる。

化粧をした場合の効果については、ファンデーションの分光反射特性を解析したり [1] [2], 多視点画像を解析する [3] など、主に肌の表面での反射光に関して、その色や反射特性がどのように変化するのが解析の対象となっている。実際には肌は半透明の性質を持つため、肌に入射した光は内部で散乱し、柔らかい見え方となる [10]。化粧は、肌内部へ到達する透過光の特性も変えてしまう

が、化粧が表面下散乱の特性をどのように変化させてしまうのかについては、まだ本格的には解析されていない。

最近では、肌の多層構造に基づいた反射解析法も盛んに研究されている。肌内部に存在するヘモグロビンとメラニンの成分を分離して [4], 半透明性を変化させた見え方を合成する方法 [5] などが提案されている。また、特に CG 分野では、実物と見分けのつかない写実的な顔画像を生成するために、専用に開発した装置を用いて肌の表面下散乱を計測したり [6], 空間的に不均一な表面下散乱を計測する [7] など、様々な計測手法が提案されている。最近では、このような肌の多層構造に基づく計測・生成法が一般的になりつつあり、自然な肌画像のレンダリングに成功している [8] [9]。しかし、肌の内部については詳細に検討されているものの、化粧がどのような影響を与えるのかについては、十分に解析されていない。

そこで本研究では、特に反射特性を大きく変えるファンデーションを対象として、化粧層と肌の2層構造で構成される反射特性モデルを提案する。このモデルに基づいて、実際にファンデーションと肌の反射・透過・散乱特性を解析することで、化粧をすることによって肌の反射光と表面下散乱がどのように変化するかを明らかにする。

2. 光学モデル

2.1 反射モデル

反射特性は双方向反射率分布関数 (BRDF:Bi-directional Reflectance Distribution Function) を用いて表せる。BRDF とは、図 1(a) に示すように、物体表面上のある点における、光源方向 (θ_i, ϕ_i) と観測方向 (θ_r, ϕ_r) の4パラメータで記述される入射光照度に対する反射光輝度の比率である。この関数は照明方向と法線方向の角度関係は含まないため、反射光の強度を算出する場合は式 (1) のように $N \cdot L$ を乗ずる必要がある。

$$f_{BRDF}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) N \cdot L \quad (1)$$

本稿では反射モデルとして Torrance-Sparrow モデルを使う。このモデルは物体表面が様々な向きの微小面で構成されると仮定し、鏡面反射が正反射方向からずれるオフスペキュラーという現象を表現できる物理的な解析に基づいた反射モデルである。このモデルでは物体表面の輝度 I_r は以下の式で表現される。

$$\begin{aligned} I_r &= L_c f_{BRDF}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) N \cdot L \\ &= L_c(\rho_d + \rho_s DGF_r) N \cdot L \\ &= P_d N \cdot L + P_s DGF_r N \cdot L \end{aligned} \quad (2)$$

$$D = e^{-(\alpha n)^2}$$

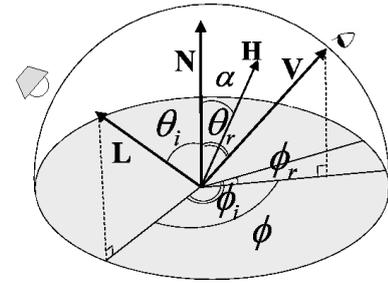
$$G = \min\left(1, \frac{2(N \cdot H)(N \cdot V)}{(V \cdot H)}, \frac{2(N \cdot H)(N \cdot L)}{(V \cdot H)}\right)$$

$$F_r = \frac{1}{2} \frac{(g-c)^2}{(g+c)^2} \left(1 + \frac{(c(g+c)-1)^2}{(c(g-c)+1)^2}\right)$$

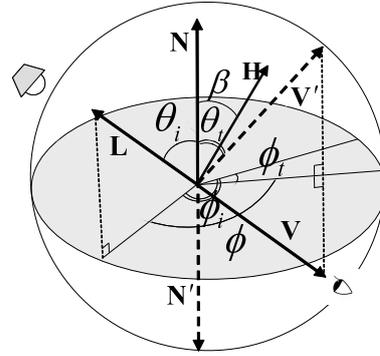
$$c = V \cdot H$$

$$g = \sqrt{\eta^2 + c^2 - 1}$$

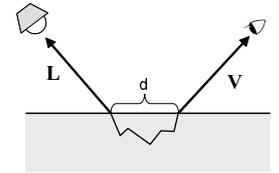
式 (2) における、右辺第1項は拡散反射成分、第2項は鏡面反射成分を表す。 L_c は照度を表す。 ρ_d と ρ_s はそれぞれ拡散反射係数と鏡面反射係数を表す。 L_c と ρ_d は分離が不可能であるため、それらの積を P_d と表す。同様に L_c と ρ_s は分離が不可能であるため、それらの積を P_s と表す。 D は法線分布項であり、物体表面の微正面の法線のばらつきを表す。係数 n は表面の荒さを表すパラメータである。 G は幾何減衰項であり微小面の自己遮蔽・自己陰影を表す。 F_r はフレネル反射を表す。 η は物体の屈折率を表す。 N, L, V, H はそれぞれ物体表面の法線ベクトル、光源方向ベクトル、視線方向ベクトル、光源方向と視線方向のハーフベクトルを表す。 α は法線方向ベクトル (N) とハーフベクトル (H) の成す角を表す。



(a) 反射モデル



(b) 透過モデル



(c) 表面下散乱モデル

図 1 光学モデル

2.2 透過モデル

透過特性は双方向透過率分布関数 (BTDF:Bi-directional Transmittance Distribution Function) を用いて表せる。BTDF とは、図 1(b) に示すように、物体のある点における、光源方向 (θ_i, ϕ_i) と観測方向 (θ_t, ϕ_t) の4パラメータで記述される入射光照度に対する透過光輝度の比率である。この関数も BRDF と同様に照明方向と法線方向の角度関係は含まないため、反射光の強度を算出する場合は式 (3) のように $N \cdot L$ を乗ずる必要がある。

$$f_{BTDF}(\theta_i, \phi_i, \theta_t, \phi_t) N \cdot L \quad (3)$$

本稿では透過モデルとして Torrance-Sparrow モデルをベースにしたモデルを使う。物体表面の輝度 I_t は次式で表される。

$$\begin{aligned} I_t &= L_c f_{BTDF}(\theta_i, \phi_i, \theta_t, \phi_t) N \cdot L \\ &= L_c(\rho_d + \rho_t DF_t) N \cdot L \\ &= P_d N \cdot L + P_t DF_t N \cdot L \end{aligned} \quad (4)$$

$$D = e^{-(\beta n)^2}$$

$$F_t = 1 - F_r$$

本研究では、式 (4) における、右辺第1項を拡散透過成分、第2項を非拡散透過成分と呼ぶ。物体表面の反射の場合では、視線方向が水平面に近づくるとフレネル反射率が高くなるが、透過の場合では逆に小さくなるため、透過のフレネル関数は $F_t = 1 - F_r$ と逆の性質をもつ。ま

た透過の場合は、自己遮蔽や自己減衰が起こらないと仮定し、幾何減衰項 G は導入しない。また照明方向と観測方向の2等分方向と法線のなす角 α は、透過の場合には、図 1(b) に示すように、観測方向 (V) の透過面に対して面対称な方向 (V') と照明方向 (L) の2等分方向と法線 (N) のなす角 β を用いる。

2.3 表面下散乱モデル

表面下散乱は双方向散乱面反射率分布関数 (BSSRDF: Bidirectional Scattering Surface Reflectance Function) を用いて表せる。BSSRDF とは図 1(c) に示すように、ある点に入射した光が物体の内部で散乱し、入射点とは異なる場所から外部に出射する光の輝度を表す関数である。光源方向 (θ_i, ϕ_i) と観測方向 (θ_r, ϕ_r) に加えて、入射点と出射点の距離 d で記述される関数である。

本研究では表面下散乱のモデルとしてダイポールモデルを使う。このモデルでは、物体内部の散乱が入射光と観測光の方向に依存しないと仮定することで、 $f_{BSSRDF}(\theta_i, \theta_r, \phi, d)$ を式 (5) のように分解できる。

$$f_{BSSRDF}(\theta_i, \theta_r, \phi, d) = \frac{1}{\pi} F_{t,o}(\eta, \omega_o) R(d) F_{t,i}(\eta, \omega_i) \quad (5)$$

ここで、 $F_t(\eta, \theta_t)$ は相対屈折率 η の境界面に対し、角度 θ_t 方向に光が透過する際のフレネル関数である。また、 $R(d)$ は、距離が d 離れた2点間での入射光の減衰を表す散乱項であり、次式で近似される。

$$R(d) = \frac{\gamma}{4\pi} \left\{ z_r \left(\sigma_{tr} + \frac{1}{d_r} \right) \frac{e^{-\sigma_{tr} d_r}}{d_r^2} + z_v \left(\sigma_{tr} + \frac{1}{d_v} \right) \frac{e^{-\sigma_{tr} d_v}}{d_v^2} \right\} \quad (6)$$

このとき、各変数は以下の式で与えられる。

$$\begin{aligned} d_r &= \sqrt{d^2 + z_r^2}, \quad d_v = \sqrt{d^2 + z_v^2} \\ z_r &= \frac{1}{\sigma'_t}, \quad z_v = z_r \left(1 + \frac{4}{3} A \right) \\ A &= \frac{1 + F_{dr}}{1 - F_{dr}} \\ F_{dr} &= -\frac{1.440}{\eta^2} + \frac{0.710}{\eta} + 0.668 + 0.0636\eta \\ \sigma_{tr} &= \sqrt{3\sigma_a\sigma'_t} \\ \sigma'_t &= \sigma'_s + \sigma_a, \quad \sigma'_s = \sigma_s(1 - g) \\ \gamma &= \frac{\sigma'_s}{\sigma'_t} \end{aligned}$$

ここで、 σ_s と σ_a はそれぞれ散乱係数、吸収係数と呼ばれるパラメータであり、 g は散乱の等方性を決めるパラメータである。

3. 化粧肌の反射特性

3.1 化粧肌の二層構造

近年、塗料などの層状表面における反射光のモデルが

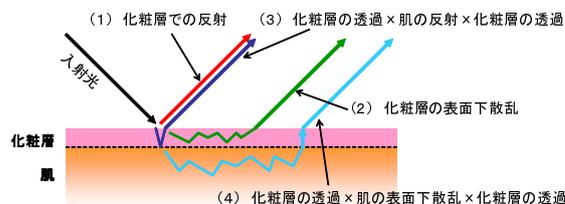


図 2 化粧肌の光学モデル

提案されている [11] 本研究では、図 2 に示すように、化粧を塗布した肌は、ほぼ厚みを無視できる薄い化粧層とその下に広がる2層構造で表されると仮定する。化粧層に入射した光は、肌に到達せずにそのまま反射する成分、化粧層内部で散乱する成分、肌に到達する透過成分の3成分に分かれる。

化粧層を透過して肌に到達した光は、肌表面で反射した後に再び化粧層を透過する成分と、肌内部で散乱した後に入射点とは異なる位置から再び化粧層を透過する成分の2成分に分かれる。

このように、化粧層と肌の2層構造を仮定すると、化粧肌の見え方は、これらの各種成分の総和として表現される。つまり、化粧を塗布することによって、化粧の反射特性が加わるだけでなく、肌の反射特性も変化する。また、肌内部での散乱も化粧の影響を受ける。

3.2 反射特性のモデル化

これらの反射・透過・表面下散乱の関数を組み合わせることで、化粧肌の反射特性をモデル化する。モデルで表現すべき成分は以下の4通りである。

- (1) 化粧層表面で反射する成分
- (2) 化粧層内部で散乱し、肌に到達せず入射点とは異なる位置から出射する成分
- (3) 化粧層を透過した後、肌表面で反射し、さらに化粧層を透過する成分
- (4) 化粧層を透過した後、肌内部で散乱し、さらに入射点とは異なる位置で化粧層を透過する成分

ここで、化粧と肌はともに等方性反射であると仮定すると、方位角については ϕ_i, ϕ_r の2パラメータではなく、その相対角 ϕ だけで表すことができる。そのため、(1) は $f_{BRDF_c}(\theta_i, \theta_r, \phi)$ と表現できる。(2) は $f_{BSSRDF_c}(\theta_i, \theta_r, \phi, d)$ と表現できる。

(3) と (4) は化粧層と肌の2層の反射特性の影響を持つ成分である。図 3(a) は化粧層を透過する光が肌に入射する様子を表している。図 3 は見やすさのため化粧層の厚みを描いているが、化粧層の厚みは肌と比較して非常に薄いため無視できると考える。化粧層の厚みは無視するので化粧層を透過するときの透過角と肌に入射するときの入射角は等しい。また化粧肌への入射光は化粧層の影響であらゆる方向に拡散する。よって肌へは半球面上すべての方向から光が入射する。図 3(b) は肌を反射もしくは表面下散乱した光が再び化粧層を透過して外部

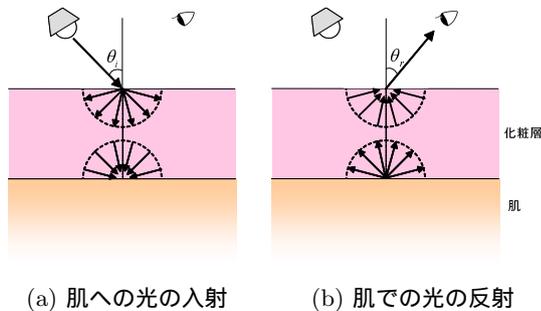


図 3 化粧層を透過する光



図 4 化粧層の計測の様子

へ出射する様子を表している．化粧層の厚みは無視するので肌を反射する時の反射角と化粧層に入射するときの入射角は等しい．また肌から出る光はあらゆる方向から化粧層へ入射し，化粧層を透過し反射角 θ_r で出射する．以上を踏まえると (3) と (4) はそれぞれ式 (7)，(8) のように表現できる．

$$f_{BRDF_{cs}}(\theta_i, \theta_r, \phi) = \int_{\Omega^+} \int_{\Omega^+} f_{BTDF_c}(\theta_i, \theta_a, \phi) f_{BRDF_s}(\theta_a, \theta_b, \phi) f_{BTDF_c}(\theta_b, \theta_r, \phi) dLdV \quad (7)$$

$$f_{BSSRDF_{cs}}(\theta_i, \theta_r, \phi, R) = \int_{\Omega^+} \int_{\Omega^+} f_{BTDF_c}(\theta_i, \theta_a, \phi) f_{BSSRDF_s}(\theta_a, \theta_b, \phi, d) f_{BTDF_c}(\theta_b, \theta_r, \phi) dLdV \quad (8)$$

ここで， Ω^+ は半球面を表す．

以上より化粧肌の反射成分，表面下散乱成分はそれぞれ式 (9)，(10) で表現できる．

$$f_{BRDF_c}(\theta_i, \theta_r, \phi) + f_{BRDF_{cs}}(\theta_i, \theta_r, \phi) \quad (9)$$

$$f_{BSSRDF_c}(\theta_i, \theta_r, \phi) + f_{BSSRDF_{cs}}(\theta_i, \theta_r, \phi, R) \quad (10)$$

4. 化粧層と肌の反射特性の計測

4.1 化粧層の計測とモデル化

まず，化粧層について，反射・透過・表面下散乱を実際に計測し，モデル化を行った．ガラス等の下地に化粧を塗布して計測を行うと，下地の反射特性が計測値に影響を与えるため，化粧層の反射特性だけを計測することができない．そこで，図 4 のように厚さ約 0.15mm のカバーガラスに直径 3mm の穴を空け，この穴に化粧品を満たすことで，空中に薄い化粧の膜を作成した．

実験で用いたカメラは Nikon D90 であり ISO 感度は 100，F 値は 20 とした．反射特性と透過特性の計測では MORITEX 製のハロゲンライト MHF-M1001 を光源とし，表面下散乱特性の計測では 3M 製のプロジェクター MPro110 を使った．すべての実験において，化粧膜とカメラと光源は同一平面上に置く．使用した化粧品は，リキッドファンデーションであり，株式会社ストーリーアのハリウッドエアークアファンデーションで，色はナチュラルである．

各実験では赤い光を観測した．これは，緑や青に比べて波長の長い赤い光は物体内部に入りやすい傾向があるため，より顕著な結果を期待できるからである．

4.1.1 化粧層の反射

化粧層の反射特性を計測するために，カメラと光源を固定した状態で，化粧膜を回転ステージを使い回転させ，化粧膜表面の法線方向のみを変えて撮影した．化粧膜からカメラまでの距離を 11cm，光源までの距離を 28cm とした．なお，カメラのシャッタースピードは 3 秒である．カメラと光源の相対角度は 30° ， 60° ， 90° ， 120° の 4 通りに変化させた．また，図 1(a) に示すように，照明方向 (L) と観測方向 (V) の 2 等分方向 (H) と法線 (N) のなす角を α とすると， $\alpha = 0$ 付近，つまり正反射領域で鏡面反射が強く観測されるため $\alpha = 0$ 付近は密に計測する． α の絶対値が 3° 以内では 0.2° 間隔で， 3° から 5° までは 0.5° 間隔で， 5° から 10° までは 1° 間隔で， 10° から 20° までは 2° 間隔で， 20° 以降は 3° 間隔で回転し計測した．

光源とカメラの各相対角の計測結果と反射角 θ_r の関係を図 5 の点に示す．このデータを式 (2) で表す Torrance-Sparrow モデルを使って近似する．実際に Torrance-Sparrow モデルにフィッティングした結果と反射角 θ_r の関係を図 5 に実線で表す．各パラメータは $P_d = 1.29 \times 10^4$ ， $P_s = 8.93 \times 10^5$ ， $n = 3.29 \times 10^{-2}$ ， $\eta = 1.19$ となった．なお，照度や輝度の物理量を計測したわけではなく，16bit で表される画素値をそのまま輝度値として用いているため， P_d と P_s はそれらの相対的な比率にのみ意味がある．図 5 より概ね良好な推定ができていると言える．

得られたパラメータを使って入射角が 30° と 60° の場合の反射光の空間的な広がりを，Torrance-Sparrow モデルから算出した結果を図 6 に示す．これより入射角が小さいと反射光の空間的な偏りは少なく，入射角が大きくなると正反射領域で反射光が強く観測されることがわかる．

4.1.2 化粧層の透過

化粧層の透過特性の計測では，カメラを固定した状態で，化粧膜と光源を同時に回転ステージを使い回転した．化粧膜からカメラまでの距離は 11cm，光源までの距離は 28cm とした．カメラのシャッタースピードは 10 秒である．光源と化粧膜を同時に回転することで，化粧膜への入射角を一定にした状態で透過角のみを変化できる．

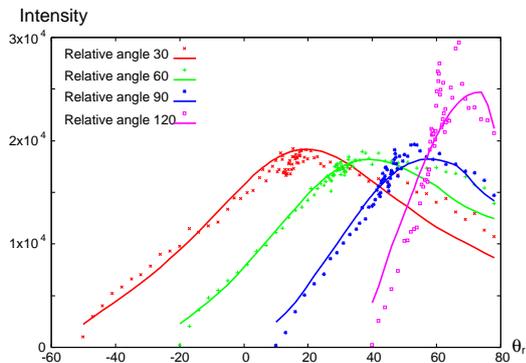
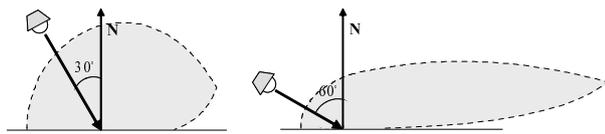


図5 化粧層への Torrance-Sparrow モデルフィッティング



(b) 入射角 30° (b) 入射角 60°

図6 化粧層を反射する光の広がり

入射角は 0°, 30°, 60° で計測した。また 4.1.1 節の計測と同様に、図 1(b) に示す β の値によって回転間隔を変えた。各入射角の計測結果と透過角 θ_t の関係を図 7 に示す。

このデータを式 (4) で表す透過モデルで近似する。フィッティングした結果と透過角 θ_t の関係を図 7 の実線に示す。各パラメータは $P_d = 2.64 \times 10^4$, $P_t = 1.08 \times 10^4$, $n = 3.46 \times 10^{-2}$, $\eta = 1.19$ となった。図 7 より 3 種類の入射角それぞれで概ね近似できていることがわかる。

得られたパラメータを使って入射角が 30° と 60° の場合の透過光の空間的な広がりを、透過モデルから算出した結果を図 6 に示す。これより化粧層は非拡散透過成分の空間的な広がりが大きく、透過光の空間的な偏りが少ない傾向があることがわかる。また入射角が大きくなるほど観測される輝度値も小さくなることがわかる。

4.1.3 化粧層の表面下散乱

化粧層の表面下散乱の計測では、プロジェクタから 1 画素を化粧層に投影し、周囲への光の広がりを調べた。計測の前に、プロジェクタから直接照明される領域の幅を調べるために、表面下散乱を起こさない金属面にプロジェクタから光を投影し、投影した光の幅を調べた。この幅をもとに、直接光が当たっている部分と表面下散乱によって散乱光が観測される部分を分離する。カメラのシャッタースピードは 15 秒で、カメラまでの距離が 27cm、光源までの距離は 48cm とした。図 9 のグラフは横軸を入射点からの距離として、縦軸を直接光を投影された画素に対する表面下散乱の輝度値の割合とする。距離 0 の点が直接光を投影した点である。表面下散乱の中心からの距離が 0.3mm までに表面下散乱の割合がほぼ 0 になっているのがわかる。薄い化粧層では表面下散乱がほとんど生じず、化粧層を照らす光の大部分は表面で

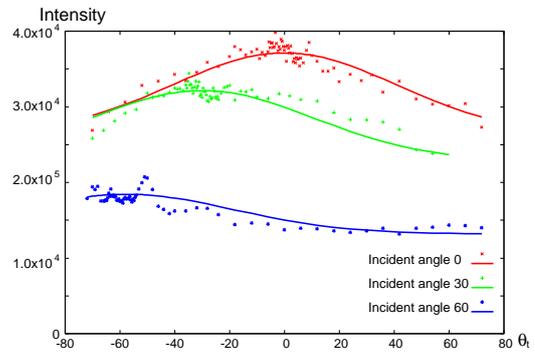
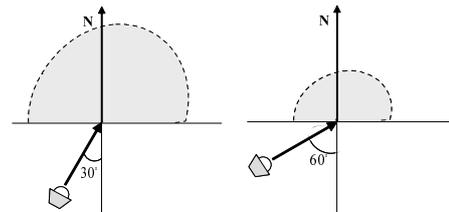


図7 透過モデルフィッティング



(b) 入射角 30° (b) 入射角 60°

図8 化粧層を透過する光の広がり

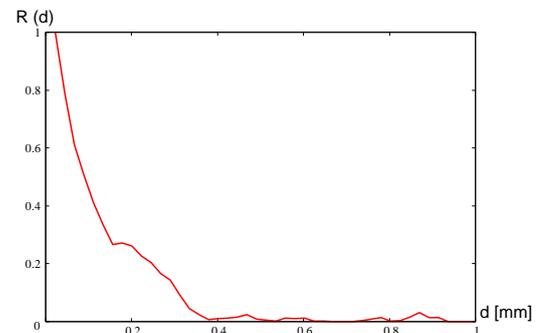


図9 化粧層の表面下散乱の広がり

反射するか透過するからである。そのため、本研究ではこの項を無視する。

4.2 肌の計測とモデル化

次に、肌の反射と表面下散乱を計測し、モデル化を行う。しかし、実際の人間の肌を正確に回転させることは難しい。そこで、厳密には肌とは反射特性が異なるものの、ほぼ肌に近い代用品として、図 10 に示すビューラックス製の白色のバイオプレートを使って計測した。

4.2.1 肌の反射

肌の反射特性は、4.1.1 節で述べた化粧層の反射特性と同様の方法で計測した。光源とカメラの各相対角で計測した結果と反射角 θ_r の関係を図 11 の点に示す。また Torrance-Sparrow モデルにフィッティングした結果を実線で示す。計測結果とモデルで近似した値はほぼ一致していることがわかる。各パラメータは $P_d = 2.00 \times 10^4$, $P_s = 2.05 \times 10^5$, $n = 4.00 \times 10^{-2}$, $\eta = 1.26$ となった。

得られたパラメータを使って入射角が 30° と 60° の場合の反射光の空間的な広がりを、Torrance-Sparrow モデ

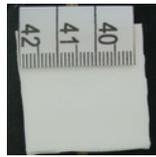


図 10 バイオプレート

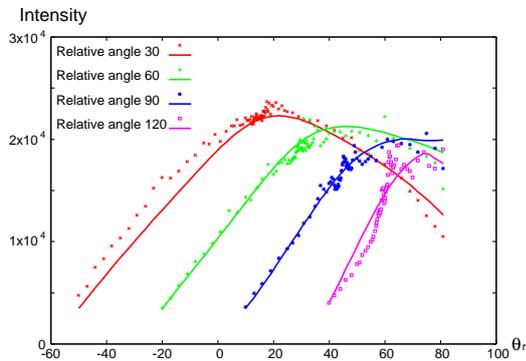


図 11 肌への Torrance-Sparrow モデルフィッティング

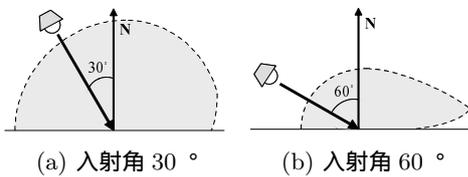


図 12 肌を反射する光の広がり

ルから算出した結果を図 12 に示す．これより化粧層の反射と同様に入射角が小さいと反射光の空間的な偏りは少なく，入射角が大きくなると正反射領域で反射光が強くと観測されることがわかる．また肌は化粧層よりも鏡面反射の影響が弱いことがわかる．

4.2.2 肌の表面下散乱

肌の表面下散乱は，4.1.3 節で述べた化粧層の表面下散乱と同じ方法で計測した．計測した表面下散乱の広がり距離との関係を，図 13 の点で示す．横軸が入射点からの距離であり，縦軸を直接光を投影された画素に対する表面下散乱の輝度値の割合とする．このデータに，ダイポールモデルをフィッティングする．実際にダイポールモデルをフィッティングした結果を図 13 の実線で示す．各パラメータは $\sigma_s = 2.83$ ， $\sigma_a = 2.82 \times 10^{-2}$ である． $d = 0$ 付近で計測結果とモデルのずれが大きいことがわかる．これはこの領域付近で直接光と表面下散乱の分離が不完全であることが原因であると考えられる．

5. 化粧肌推定実験

実際にバイオプレートに化粧を塗布した場合と我々のモデルによって推定した結果を比較する．

5.1 反射特性

入射点と出射点が一致する場合に，提案手法が有効であるか比較検証する．計測方法として相対角が 60° になるようにカメラと光源を固定し，化粧品を塗布したバイ

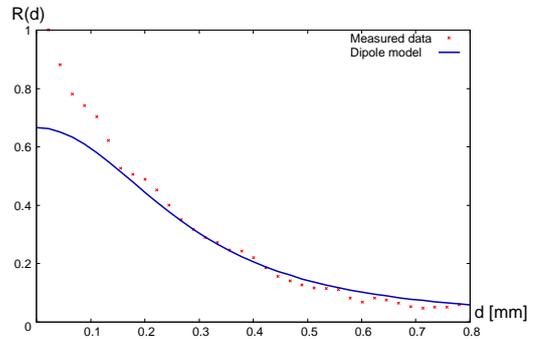


図 13 肌の表面下散乱の広がり

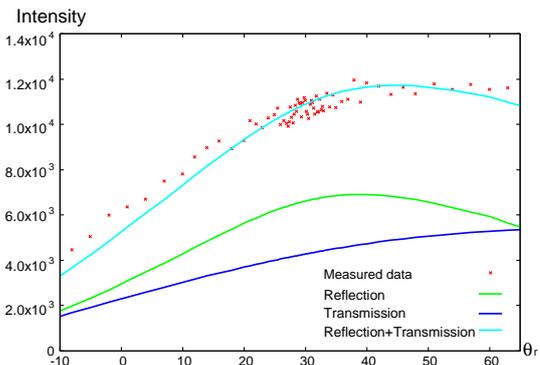


図 14 化粧品塗布肌の反射傾向

オプレートを回転ステージに載せて，表面の法線位置が変化する状態で撮影する．撮影条件は 4.1.1 節と同じである．このとき観測される輝度値は化粧層の表面で反射する成分と，化粧層を透過後に肌表面で反射し再び化粧層を透過する成分の和で表現できる．計測値，推定結果と反射角 θ_r の関係を図 14 に示す．実際に計測したデータを赤色の点で示す．化粧層表面で反射する成分の推定値を緑色の実線で表す．化粧層を透過後，肌の表面で反射し，再び化粧層を透過する光の推定値を青色の実線で表す．化粧層表面で反射する成分と化粧層を透過する光の成分の和を水色の実線で表す．ただし 4.1.1 節で化粧層のみで計測した時と実際にバイオプレートに塗布した時の化粧層の厚みは異なると考えられるため，2 成分の重み係数は手動で与えた．この結果より，化粧層表面で反射される光を Torrance-Sparrow モデル単体で近似するよりも提案手法の方が計測値に近く，有効であることが確認できる．

5.2 表面下散乱特性

入射点と出射点異なる場合に，提案手法が有効であるか比較検証する．撮影方法は 4.1.3 節と同じである．入射角，反射角はどちらも 30° で正反射領域を観測する．このとき観測される輝度値は化粧層を透過後に肌を表面下散乱し再び化粧層を透過する成分である．計測値，推定結果と入射点からの距離の関係を図 15 に示す．実際に計測したデータを赤色の点で示す．肌の表面下散乱特性をモデルにフィッティングした結果を緑の実線で示す．

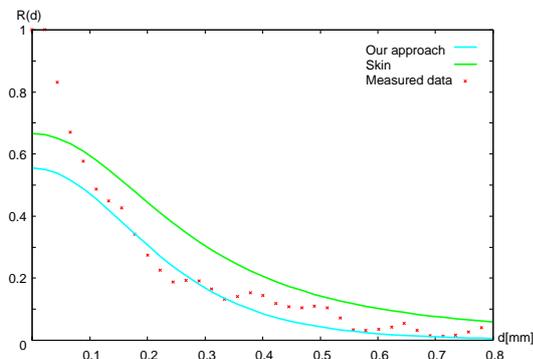


図 15 化粧肌の表面下散乱の広がり

我々の提案手法を水色の実線で表す．この結果より，化粧を塗ることで肌は表面下散乱が生じにくくなることが分かる．また肌単体のモデルよりも我々の提案手法の方が計測値に近く，有効であることが確認できる．

6. ま と め

本論文では，化粧品を肌に塗布することによって，肌の反射特性がどのように変化するかを明らかにするために，化粧層と肌の2層構造で構成される反射特性モデルを提案した．各層の反射特性をそれぞれ計測し，得たパラメータを組み合わせることで化粧肌の反射特性を推定した．

実際にファンデーションとバイオペレートを用いた実験を行った．Torrance-Sparrowモデルによる反射光と透過光の解析と，ダイポールモデルによる表面下散乱の解析では，比較的良好な結果を得た．これらの結果を基に化粧肌の反射特性の推定を行った．その結果入射点と観測点が一致する場合の提案手法が有効であることを確認した．さらに入射点と観測点が一致しない場合の化粧肌の推定結果では，肌単体のモデルよりも提案手法のほうが有効であることが確認できた．

今後は化粧層での吸収を考慮したモデルの提案を行い，推定結果が計測値に近づくように改良を進める予定である．また，様々なファンデーションを塗布した場合の化粧肌の反射特性を計測し，提案した反射特性モデルがどの程度正確であるかを定量的に評価する予定である．さらに本稿では素肌を対象として化粧後の肌の反射特性の推定を行ったが，今後は化粧後の肌の計測を行うことで別の化粧を塗った状態の推定を行う予定である．

文 献

- [1] 森内優介，堀内隆彦，富永昌治，“主成分分析による化粧品ファンデーションの反射解析とその応用”，信学技報，vol. 109, no. 249, PRMU2009-73, pp. 13-18, 2009.
- [2] 土居元紀，大槻理恵，富永昌治，池田直子，引間理恵，丹野修，“クベルカ-ムンク理論に基づいたファンデーション塗布肌の分光反射率の推定”，電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J92-D, No.9, pp.1602-1612, 2009.
- [3] 美崎栄一郎，塩見浩之，五十嵐崇訓，中尾啓輔，押谷潤，“多視点画像解析システムの開発と化粧品への応用”，粉

体工学会誌，Vol.45, No.45, pp.642-647, 2008.

- [4] N. Tsumura, N. Ojima, K. Sato, M. Shiraiishi, H. Shimizu, H. Nabeshima, S. Akazaki, K. Hori, and Y. Miyake, “Image-based skin color and texture analysis/synthesis by extracting hemoglobin and melanin information in the skin”, Proc. SIGGRAPH2003, pp.770-779, 2003.
- [5] N. Tsumura, R. Usuba, K. Takase, T. Nakaguchi, N. Ojima, N. Komeda, and Y. Miyake, “Image-based control of skin translucency”, Proc. CGIV2006, pp. 8-11, 2006.
- [6] T. Weyrich, W. Matusik, H. Pfister, B. Bickel, C. Donner, C. Tu, J. McAndless, J. Lee, A. Ngan, H. W. Jensen, and M. Gross, “Analysis of Human Faces using a Measurement-Based Skin Reflectance Model”, Proc. SIGGRAPH2006, pp.1013-1024, 2006.
- [7] S. Tariq, A. Gardner, I. Llamas, A. Jones, P. Debevec, and G. Turk, “Efficient Estimation of Spatially Varying Subsurface Scattering Parameters”, Vision, Modeling, and Visualization (VMV2006), 2006.
- [8] A. Ghosh, T. Hawkins, P. Peers, S. Frederiksen, and P. Debevec, “Practical Modeling and Acquisition of Layered Facial Reflectance”, Proc. SIGGRAPH Asia 2008.
- [9] C. Donner, T. Weyrich, E. d’Eon, R. Ramamoorthi, S. Rusinkiewicz, “A Layered, Heterogeneous Reflectance Model for Acquiring and Rendering Human Skin”, Proc. SIGGRAPH Asia 2008.
- [10] 向川康博，鈴木和哉，八木康史，“一般照明下での表面下散乱の解析”，MIRU ,pp.63-70,2008.
- [11] 森本哲郎，Robby T. Tan，川上玲，池内克史“層状表面におけるスパイダーモデルを用いた複雑反射表面の要素分解”，MIRU ,2009.
- [12] K. E. Torrance and E. M. Sparrow, “Theory for Off-Specular Reflection From Roughened Surfaces”, JOSA, Vol. 57, Issue 9, pp.1105-1112, 1967.
- [13] H. W. Jensen, S. R. Marschner, M. Levoy, and P. Hanrahan, “A Practical Model for Subsurface Light Transport”, Proc. SIGGRAPH2001, pp.511-518, 2001.