

## 論文

## 皮膚の分光反射率を用いた角層の特性の推定

## Estimation of stratum corneum properties using surface-spectral reflectance of human skin

大槻 理恵 Rie Ohtsuki

株式会社力ネボウ化粧品 Kanebo Cosmetics Inc.

千葉大学大学院融合科学研究科

Graduate School of Advanced Integration Science, Chiba University

丹野 修 Osamu Tanno

株式会社力ネボウ化粧品 Kanebo Cosmetics Inc.

坂巻 剛 Takeshi Sakamaki

株式会社力ネボウ化粧品 Kanebo Cosmetics Inc.

富永 昌治 Shoji Tominaga

千葉大学大学院融合科学研究科

Graduate School of Advanced Integration Science, Chiba University

## Abstract

The optical effect of the stratum corneum cannot be disregarded for the appearance of the human skin. The stratum corneum contains water and lipid. These amounts and fractions vary within the same individual. This study proposes a method for estimating the thickness and the transmittance of the stratum corneum from the surface-spectral reflectance of the human skin. First, we calculate the coefficients of scattering and absorption by using the stratum corneum samples that are taken from the human skin. Second, we define a model equation for surface-spectral reflectance of the human skin by considering the light decay in the stratum corneum, and propose an algorithm for estimating the thickness and the transmittance of the stratum corneum, by using the surface-spectral reflectance of the human skin. Third, the thickness and transmittance of the stratum corneum estimated are compared with the direct measurements by another method, and we confirm the reliability of the estimated values.

**Keywords:** Stratum corneum, transmittance of stratum corneum, thickness of stratum corneum, keratin, spectral reflectance, Kubelka-Munk theory

## 要 旨

人間の肌の見えに角層の影響は無視できない。角層には水分や脂質が含まれており、これらの量や割合は同じヒトでも大きく変動する。本論文では、肌の分光反射率データから角層の厚さと透過率を推定する方法を提案する。まず、実際のヒト皮膚から採取した角層サンプルを用いて散乱係数と吸収係数を算出する。次に、角層内での光の減衰を考慮して皮膚の分光反射率のモデル式を定義し、皮膚の分光反射率から角層の厚さと透過率を推定するアルゴリズムを提案する。さらに、実験では、推定した角層の厚さと透過率を別の手法で求めた実測値と比較し、これらの推定値の信頼性を確認する。

**キーワード：**角層，皮膚，角層透過率，角層厚，ケラチン，分光反射率，Kubelka-Munk理論

## 1. まえがき

肌の見えは、皮膚表面だけでなく皮膚内部の色素(以下、皮膚内部色素)や構造が影響している。「くすみ」や「透明感」といわれる肌の見えと肌内部の状態との関係を明らかにするために、これまでに画像データや分光反射率データを用いた皮膚の解析方法が開発されてきた<sup>1-2)</sup>。しかしながら、これらの手法は皮膚の表層である“角層”を無視した。

角層は、厚さ $1\mu\text{m}$ 程度の扁平な角質細胞が十数層重なった特殊な構造をしている。また、角層はケラチンや細胞間脂質、水分で構成されているが、これらの量や割合は人によって異なっているだけでなく、体内外部から影響を受け、同じヒトでも大きく変動する。さらに、角層の厚さが変化すると皮膚の見えにも影響を及ぼし、特に過剰な角層肥厚がくすみの要因になるとも考えられている。また、肌が乾燥して角層の水分が少ないときは、肌が不透明に見えることを我々は経験している。つまり、肌の見え方を客観的に解析するには角層の影響を無視できず、角層の厚さ(以下、角層厚)や角層成分が皮膚の光学特性に及ぼす影響を考慮する必要がある。

筆者らは、これまでに皮膚の分光反射率を用いて皮膚内部色素の濃度を推定する方法を提案した<sup>3)</sup>。提案方法では、皮膚を角層、表皮、真皮、皮下組織の4層構造と仮定し、Kubelka-Munk理論<sup>4)</sup>(以下、K-M理論)に基づき皮膚の分光反射率を表すモデル式を導いた。K-M理論では、物体に含まれている色素の散乱係数と吸収係数および物体の厚さを考慮して、物体の分光反射率と分光透過率を予測する関数(以下、K-M関数)が提案されている。これを利用して、筆者らのモデル式では、皮膚内部色素濃度および表皮や真皮の厚さ、角層の透過率を未知パラメータとして定め、モデルの逆計算により分光反射率からヘモグロビン濃度やメラニン濃度を推定した。しかし、従来法<sup>3)</sup>では角層の透過率は定数で近似し、角層厚や角層成分は考慮されていなかった。また、角層の透過率の波長依存性も考慮されていなかった。

本論文では、新たに角層の反射率と透過率をモデル化し、従来のモデル式<sup>3)</sup>と統合することで、皮膚の分光反射率データから角層の厚さと透過率を推定する方法を提案する。

はじめに、実際にヒト皮膚から採取した角層サンプルを用いて散乱係数と吸収係数を算出する。次に、角層の特性を考慮した皮膚の分光反射率のモデル式を導

く、このために角層厚とケラチン濃度をパラメータで表現し、皮膚の分光反射率のモデル式を角層内での光の減衰を考慮して提案する。次に、推定した角層厚と角層透過率の信頼性を評価するために実験を実施する。角層厚は共焦点ラマン分光装置を用いた皮膚のラマンスペクトルから直接計測し、角層透過率はヒトの皮膚から採取した角層サンプルから直接計測する。これらの計測データと推定値を比較することで、推定値の信頼性を確認する。さらに、角層内の多重反射を考慮した皮膚の分光反射率のモデル式を定義する。そして、このモデル式と提案するモデル式の実測分光反射率への適合精度を検証し、提案手法の妥当性を示す。

本論文の構成は、以下のとおりである。2章では分光反射率の計測系を説明する。3章ではヒトから採取した角層を用いて散乱係数と吸収係数を算出する。4章で角層を含む皮膚分光反射率のモデル式を導き、角層の厚さと透過率を推定する方法を示す。5章では、推定値の信頼性を検証する。6章では、角層内の多重反射を考慮したモデル式と提案するモデル式について、実測分光反射率の適合精度を調べる。7章はまとめである。

## 2. 分光反射率の計測系

### 2.1 計測機器

JIS Z 8722条件cに基づく分光測色計(コニカミノルタ社製CM2600-d)を用いて分光反射率を計測した。分光測色計の計測径/照明径は $\phi 8\text{mm}/\phi 11\text{mm}$ と設定し、可視域400～700nmで10nmおきに計測した。この測色計ではSCI (Specular component include)とSCE (Specular component excluded)の2条件で分光反射率が獲得できるが、本研究では視感との相関性が高いSCEを採用する。

### 2.2 角層サンプルの計測

本研究では、上腕から採取した角層サンプルを用いた。角層サンプルを白下地と黒下地の上に載せて、分光反射率を計測した。このとき以下の2点に注意した。

- ・皮膚から採取した角層は、時間が経過すると水分が蒸散し、その組成が徐々に変化していく。そのため、採取してから10分以内に分光反射率を計測した。
- ・分光反射率を計測する際には、角層と下地の間に空気層ができないように水をはさんだ。

### 2.3 肌の計測

測定室の環境は室温が24度、湿度は50%とし<sup>5)</sup>、被

験者が測定室内で20分間馴化した後に分光反射率を計測した。この分光測色計は物体表面に接触させて計測するので、計測者は分光測色計のファインダーで肌の色が変化していないか確認しながら分光反射率を計測した。

### 3. 角層の散乱係数と吸収係数の算出方法

#### 3.1 算出式

はじめに、散乱係数と吸収係数を算出するために以下の分光反射率を計測した。

- ・白下地の分光反射率： $R_W(\lambda)$ 、
- ・黒下地の分光反射率： $R_B(\lambda)$ 、
- ・白下地の角層サンプルの分光反射率： $R_{WC}(\lambda)$ 、
- ・黒下地の角層サンプルの分光反射率： $R_{BC}(\lambda)$ 、

ここで、下地は屈折率が1.43の黒と白の亚克力板を用いた。

次に、以下の①-③の手順に従い、角層の散乱係数  $S(\lambda)$  と吸収係数  $K(\lambda)$  を算出した<sup>6)</sup>。

① K-M理論<sup>4)</sup>は物体と空気との境界面で光の反射が生じないように理想状態を仮定しているので、実測分光反射率  $R_W(\lambda)$ 、 $R_B(\lambda)$ 、 $R_{WC}(\lambda)$ 、 $R_{BC}(\lambda)$  を、空気と物体表面の屈折率の差によって生じる鏡面反射と内部反射を除いた理想的な分光反射率に変換する。

実測分光反射率を  $R(\lambda)$  とおけば、K-M理論で定義されている理想的な分光反射率  $R'(\lambda)$  はSaundersonの補正式<sup>7)</sup>に基づき次式で記述される。

$$R'(\lambda) = \frac{R(\lambda)}{(1-k_1)(1-k_2)+k_2R(\lambda)}, \quad (1)$$

ここで、 $k_1$ は空気と物体との境界面での境界面反射率で、 $k_2$ は境界面の内側で起こる内部反射率である。これらの値として、Juddらが報告したデータ<sup>8)</sup>から、亚克力の屈折率1.43に対応する  $k_1=0.031$ 、 $k_2=0.543$  を用いた。

② 式(1)で変換した分光反射率  $R_W'(\lambda)$ 、 $R_B'(\lambda)$ 、 $R_{WC}'(\lambda)$ 、 $R_{BC}'(\lambda)$  を用いて、無限角層厚の分光反射率  $R_\infty(\lambda)$  を湊らの式<sup>9)</sup>に基づいて算出する。

$$R_\infty(\lambda) = \frac{-B(\lambda) + \sqrt{B(\lambda)^2 - 4A(\lambda)^2}}{2A(\lambda)} \quad (2)$$

$$A(\lambda) = R_{WC}'(\lambda)R_B'(\lambda) - R_{BC}'(\lambda)R_W'(\lambda)$$

$$B(\lambda) = (R_W'(\lambda) - R_B'(\lambda))(1 + R_{WC}'(\lambda) - R_{BC}'(\lambda)) - (R_{WC}'(\lambda) - R_{BC}'(\lambda))(1 + R_W'(\lambda)R_B'(\lambda))$$

③ 角層の散乱係数  $S_{SC}(\lambda)$  と吸収係数  $K_{SC}(\lambda)$  を次式により算出する。

$$S_{SC}(\lambda) = C(\lambda)D(\lambda)$$

$$C(\lambda) = \left( X \left( \frac{1}{R_\infty(\lambda)} - R_\infty(\lambda) \right) \right)^{-1}, \quad (3)$$

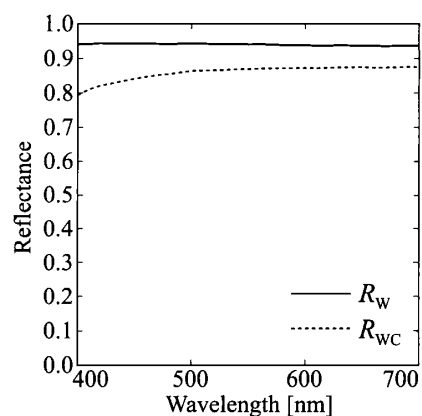
$$D(\lambda) = \ln \left( \frac{(R_\infty(\lambda) - R_W'(\lambda)) \left( \frac{1}{R_\infty(\lambda)} - R_{WC}'(\lambda) \right)}{(R_\infty(\lambda) - R_{WC}'(\lambda)) \left( \frac{1}{R_\infty(\lambda)} - R_W'(\lambda) \right)} \right)$$

$$K_{SC}(\lambda) = \frac{S(\lambda)(1 - R_\infty(\lambda))^2}{2R_\infty(\lambda)}, \quad (4)$$

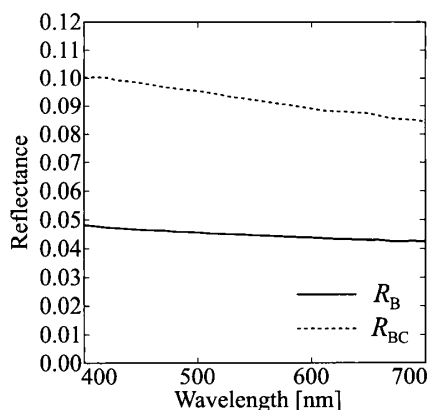
ここで  $X$  は角層厚で、レーザー変位計を用いて角層の断面曲線を計測し、 $X=0.40[\mu\text{m}]$  を採用した。

#### 3.2 算出結果

計測した分光反射率  $R_W(\lambda)$ 、 $R_{WC}(\lambda)$ 、 $R_B(\lambda)$ 、 $R_{BC}(\lambda)$  を図1に示す。図2に、算出した角層の散乱係数と吸収係数を示す。角層の吸収係数は低波長の係数値が高く、長波長の係数値が低いという波長依存性を示した。



(a)



(b)

図1 散乱係数と吸収係数の算出で用いる分光反射率。

(a)  $R_W(\lambda)$  および  $R_{WC}(\lambda)$ , (b)  $R_B(\lambda)$  および  $R_{BC}(\lambda)$ 。

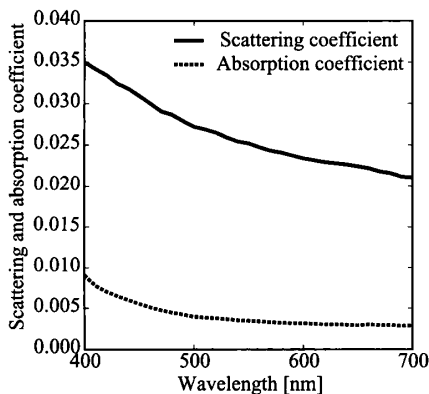


図2 角層の散乱係数と吸収係数.

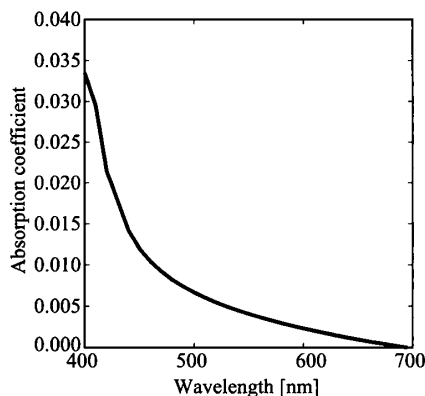
図3 ケラチンの吸収係数<sup>10)</sup>.

図3は角層の主成分であるケラチンの吸収係数<sup>10)</sup>である。図2と図3を比較すると、角層の吸収係数はケラチンと類似の波長依存性があることがわかる。このことから、ここで求められた角層の吸収係数は主にケラチンの成分を反映していると考えられる。

#### 4. 分光反射率のモデルと角層の特性推定

##### 4.1 表皮、真皮、皮下組織の分光反射率と分光透過率

本研究では、皮膚を皮下組織、真皮、表皮、角層の4層構造と仮定している。まず、皮膚と空気層との境界面での光の反射を無視した皮膚の光学モデル<sup>3)</sup>を図4に示す。図4左側のモデルは各層における光の経路を矢印で表している。 $D_e$ は表皮の厚みで、 $D_d$ は真皮の厚みである。図4右下のモデルは真皮の表面下で生じる多重反射を表している。 $R_d(\lambda)$ は波長に依存する真皮単独の分光拡散反射率で、 $T_d(\lambda)$ は真皮単独の分光透過率であり、 $R_h(\lambda)$ は真皮と皮下組織の境界で発生する分光反射率である。以下簡略化のため、波長 $\lambda$ の関数は分光関数とみなし、「分光」という表記は省略する。

表皮を通過して真皮に入射した光が真皮の表面下で

多重反射して、表皮に再び戻ったときの総合的な反射率を $R_{dh}(\lambda)$ とする。図4の右上にあるモデルは表皮の表面下で生じる多重反射を表している。 $T_{sc}(\lambda)$ は角層単独の透過率で、 $R_e(\lambda)$ は表皮単独の拡散反射率であり、 $T_e(\lambda)$ は表皮単独の透過率である。皮膚表面から入射した光が角層を通過し、最下層の皮下組織まで到達してから、角層に再び戻ったときの総合的な反射率を $R'(\lambda)$ とする。

次に、表皮と真皮の散乱係数と吸収係数を算出する。表皮の散乱係数 $S_e(\lambda)$ と真皮の散乱係数 $S_d(\lambda)$ はAndersonらが計測した係数<sup>11-12)</sup>を用いる。表皮の吸収係数 $K_e(\lambda)$ と真皮の吸収係数 $K_d(\lambda)$ は、Lambert-Beer則に基づき次式で表される。

$$K_e(\lambda) = \varepsilon_{\text{mela}}(\lambda) w_{\text{mela}}$$

$$K_d(\lambda) = (\varepsilon_{\text{oxy-Hb}}(\lambda) w_{\text{oxy-Hb}} + \varepsilon_{\text{deoxy-Hb}}(\lambda) w_{\text{deoxy-Hb}} + \varepsilon_{\text{bilirubin}}(\lambda) w_{\text{bilirubin}} + \varepsilon_{\text{carotene}}(\lambda) w_{\text{carotene}}), \quad (5)$$

ここで、添え字は皮膚内部色素を表し、メラニン(mela)、酸化ヘモグロビン(oxy-Hb)、デオキシヘモグロビン(deoxy-Hb)、ビリルビン(bilirubin)、カロチン(carotene)を示している。 $w$ はモル濃度、 $\varepsilon(\lambda)$ はモル吸光係数である。モル吸光係数は、Oregon Medical Laser Centerが公開しているデータ<sup>13)</sup>を用いる。

次に、表皮については、KubelkaとMunkが提案したオリジナルの一般化関数(以下、一般化関数)を適用する。表皮の拡散反射率 $R_e(\lambda)$ と透過率 $T_e(\lambda)$ は次式で記述される(詳細は文献(3)参照)。

$$R_e(\lambda) = \frac{1}{a_e(\lambda) + b_e(\lambda) \coth(b_e(\lambda) S_e(\lambda) D_e)}$$

$$T_e(\lambda) = \frac{b_e(\lambda)}{c_e(\lambda) + d_e(\lambda)}$$

$$a_e(\lambda) = (S_e(\lambda) + K_e(\lambda)) / S_e(\lambda), \quad (6)$$

$$b_e(\lambda) = \sqrt{a_e(\lambda)^2 - 1}$$

$$c_e(\lambda) = a_e(\lambda) \sinh(b_e(\lambda) S_e(\lambda) D_e)$$

$$d_e(\lambda) = b_e(\lambda) \cosh(b_e(\lambda) S_e(\lambda) D_e)$$

ここで、 $D_e$ は表皮の厚み、 $S_e(\lambda)$ と $K_e(\lambda)$ は表皮の散乱係数と吸収係数である。

また真皮の反射率と透過率を以下で記述する。K-M理論において、散乱の強弱によってStrong scattering material, Light material, Poorly scattering materialという分類がなされている。ここで、Light materialは $[(S_d(\lambda) + K_d(\lambda)) / (S_d(\lambda))]$ の値が1に近いことが条件で

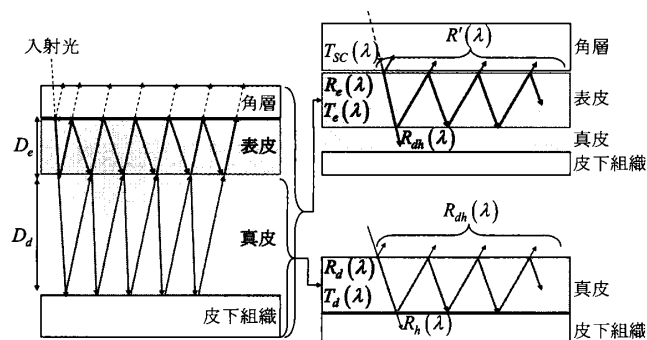


図4 角層以下の皮膚光学モデル.

ある。本研究で実際に、真皮の散乱係数と吸収係数を分析したところ、散乱係数が吸収係数に比べて極端に大きく、 $([S_d(\lambda) + K_d(\lambda)] / S_d(\lambda)) \rightarrow 1$  をほぼ満たしていることがわかった。したがって、真皮の拡散反射率  $R_d(\lambda)$  と透過率  $T_d(\lambda)$  は Light material のモデル関数を適用して、次式で記述できる。

$$\begin{aligned} R_d(\lambda) &= \frac{S_d(\lambda)D_d}{a_d(\lambda)S_d(\lambda)D_d+1} \\ T_d(\lambda) &= \frac{1}{a_d(\lambda)S_d(\lambda)D_d+1}, \\ a_d(\lambda) &= (S_d(\lambda)+K_d(\lambda))/S_d(\lambda) \\ b_d(\lambda) &= \sqrt{(a_d(\lambda)^2-1)} \end{aligned} \quad (7)$$

ここで  $D_d$  は真皮の厚みである.

さらに、皮膚表面から入射した光が角層を通過し、最下層の皮下組織まで到達してから、角層に再び戻る過程を考えると、この場合の総合的な反射率  $R'(\lambda)$  は次式で記述できる<sup>3)</sup>

$$\begin{aligned} R'(\lambda) &= R_e(\lambda) + \frac{T_e(\lambda)^2 R_{dh}(\lambda)}{1 - R_e(\lambda) R_{dh}(\lambda)} \\ R_{dh}(\lambda) &= R_d(\lambda) + \frac{T_d(\lambda)^2 R_h(\lambda)}{1 - R_d(\lambda) R_h(\lambda)} \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、 $R_h(\lambda)$ は皮下組織の表面反射率である。皮下組織に含まれている色素の影響は小さいので、 $R_h(\lambda) = 1.0$ とした。 $R_{dh}(\lambda)$ は、表皮を通過して真皮に入射した光が真皮の表面下で多重反射してから、表皮に再び戻ったときの総合的な反射率である。

#### 4.2 角層を考慮した皮膚の反射率

角層の主成分であるケラチンの量が増減すると，吸収係数も変化する．そのため3.2節で算出した吸収係数 $K_{SC}(\lambda)$ にケラチンの濃度 $w_{SC}$ を考慮させる．このと

き角層の吸収係数  $K_{sc}'(\lambda)$  は次式で変換される.

$$K_{SC}'(\lambda) = K_{SC}(\lambda)w_{SC}, \quad (9)$$

このとき角層厚を  $D_{SC}$  とおけば, Kubelka と Munk が提案した一般化関数<sup>4)</sup>に基づき, 角層単独の拡散反射率  $R_{SC}(\lambda)$  と透過率  $T_{SC}(\lambda)$  は次式で表される.

$$\begin{aligned} R_{SC}(\lambda) &= \frac{1}{a_{SC}(\lambda) + b_{SC}(\lambda) \coth(b_{SC}(\lambda) S_{SC}(\lambda) D_{SC})} \\ T_{SC}(\lambda) &= \frac{b_{SC}(\lambda)}{c_{SC}(\lambda) + d_{SC}(\lambda)} \\ a_{SC}(\lambda) &= \left( S_{SC}(\lambda) + K_{SC}'(\lambda) \right) / S_{SC}(\lambda) \\ b_e(\lambda) &= \sqrt{(a_{SC}(\lambda))^2 - 1} \\ c_{SC}(\lambda) &= a_{SC}(\lambda) \sinh(b_{SC}(\lambda) S_{SC}(\lambda) D_{SC}) \\ d_{SC}(\lambda) &= b_{SC}(\lambda) \cosh(b_{SC}(\lambda) S_{SC}(\lambda) D_{SC}) \end{aligned} \quad , (10)$$

次に、角層を通過して実際に計測される皮膚の反射率を求める。角層内を光が通過するときの挙動は、多重反射が生じているという説<sup>14)</sup>と、多重反射は生じず光の減衰が支配的であるという説<sup>15)</sup>がある。前者は、角層の散乱係数が高いことから考えられた説である。後者は、角層とその上の空気層の間では屈折率の差がほとんどなく、また角層には支配的な色素が存在しないことから考えられた説である。これら2つの説を比較して、その妥当性を検証した研究は見られない。

筆者らは、角層内の光の挙動(経路)を、(1) 光の減衰のみが生じる場合と(2) 角層内で多重反射が生じる場合、の2つの光学モデルを検討した。結果として、(1) の場合の光学モデルが高精度であった。以下では、(1) の光学モデルに基づく方法を述べる。また(2)のモデルとの比較については、6章「検討」で述べる。

多重反射を考慮せずに、光の減衰のみを想定すれば、角層を通過するときの光の経路は図5の矢印で表される。この場合、角層を通過して実際に計測される皮膚の反射率(SCF)は次式で表される。

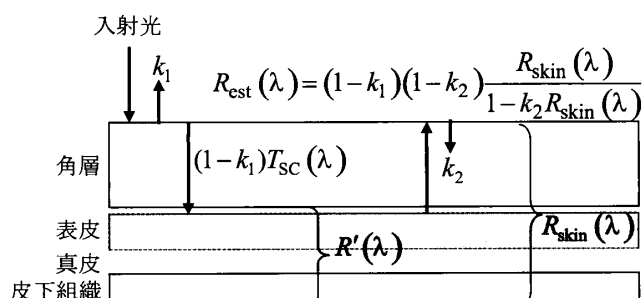


図5 光の減衰を表した角層の光学モデル.

表1 各パラメータの探索範囲.

パラメータ	探索範囲
酸化ヘモグロビン (g/dL)	1 - 20
還元ヘモグロビン (g/dL)	0.01 - 1.00
ビリルビン (mg/dL)	0.1 - 1
カロチン (μg/dL)	10 - 100
メラニン (mol/L)	0.0001 - 0.1000
境界面反射率	0.001 - 0.050
真皮の厚さ (cm)	0.1 - 0.4
表皮の厚さ (cm)	0.01 - 0.04

$$R_{est}(\lambda) = (1 - k_1)(1 - k_2) \frac{R_{skin}(\lambda)}{1 - k_2 R_{skin}(\lambda)}, \quad (11)$$

$$R_{skin}(\lambda) = T_{SC}(\lambda)^2 R'(\lambda)$$

ここで、 $R_{skin}(\lambda)$ は光が角層を通過したときの反射率であるが、物体と空気との境界面で光の反射が生じないような理想状態の反射率であるので、空気と角層の境界で発生する境界面反射率 $k_1$ と内部反射率 $k_2$ を用いて $R_{skin}(\lambda)$ を実際に計測される反射率 $R_{est}(\lambda)$ に変換している。

#### 4.3 角層厚と角層透過率の推定

計測データとして得られるのは反射率 $R_{est}(\lambda)$ であり、角層厚 $D_{SC}$ と角層透過率 $T_{SC}(\lambda)$ を推定する。なお、他の未知パラメータは $w_{mela}$ ,  $w_{oxy-Hb}$ ,  $w_{deoxy-Hb}$ ,  $w_{bilirubin}$ ,  $w_{carotene}$ ,  $D_e$ ,  $D_d$ ,  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $D_{SC}$ ,  $w_{SC}$ で、これらが推定できれば、 $T_{SC}(\lambda)$ は式(10)から推定できる。

パラメータ推定は全探索方式による。このため各パラメータの探索範囲を経験に基づいて定める。まず $w_{mela}$ ,  $w_{oxy-Hb}$ ,  $w_{deoxy-Hb}$ ,  $w_{bilirubin}$ ,  $w_{carotene}$ ,  $D_e$ ,  $D_d$ ,  $k_1$ の探索範囲を表1に示す。これは、従来法<sup>3)</sup>と同じである。さらに、本論文で新たに定義した $k_2$ ,  $D_{SC}$ と $w_{SC}$ の探索範囲は $[0.5, 0.6]$ ,  $[1, 25(\mu\text{m})]$ と $[0.1, 1.0(\text{mol/L})]$ とした。指定した範囲内でパラメータを連続的に変化させて、推定した反射率と実測反射率との平均二乗誤差RMSEが最小となるようにパラメータ値を探索した。

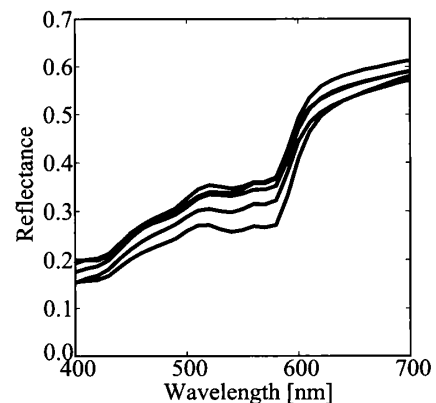
### 5. 角層厚と角層透過率の推定結果と精度評価

#### 5.1 角層厚の結果

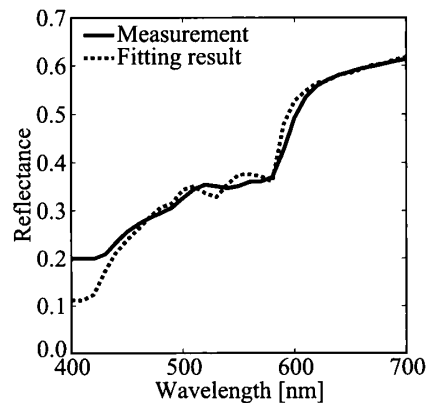
被験者は5名で、頬部について計測した反射率を図6(a)に示す。まず4.3節の手順に従い、これらの反射率データから角層厚を推定した。被験者1の角層厚を

表2 皮膚内部パラメータの推定結果.

パラメータ	推定値 (平均±標準偏差)	参考値
酸化ヘモグロビン (g/dL)	12.5 ± 2.23	12.0–16.0 <sup>16)</sup>
還元ヘモグロビン (g/dL)	0.2 ± 0.11	5.0以下 <sup>16)</sup>
ビリルビン (mg/dL)	0.7 ± 0.09	1.0以下 <sup>16)</sup>
カロチン (μg/dL)	33.7 ± 9.5	12.1–58.0 <sup>17)</sup>
メラニン (mol/L)	0.007 ± 0.002	–
角層の透過率	0.69 ± 0.12	–
境界面反射率	0.028 ± 0.019	–
真皮の厚さ (cm)	0.35 ± 0.068	0.03–0.24 <sup>18)</sup>
表皮の厚さ (cm)	0.03 ± 0.001	0.01–0.03 <sup>18)</sup>



(a)



(b)

図6 角層厚の検証実験で用いた反射率と適合結果の典型例。  
(a) 実験で使った反射率, (b) 適合結果の典型例。

推定した際の、式(11)で推定した反射率と実測反射率を図6(b)に示す。推定分光反射率は実測反射率によく一致している。さらに、皮膚内部色素濃度を含むパラメータの推定値を表2に示す。推定値と医学文献<sup>16-18)</sup>で得られた皮膚内部色素濃度の標準範囲を比較すると、提案法で推定したパラメータは、ほぼ標準範囲内であることが分かる。

提案法で推定した角層厚の5人の平均値は12.30(μm)で、標準偏差は2.68(μm)であった。さらに、角層厚の実測値は、清水らが提案したラマンスペクトル

解析による角層厚測定法<sup>19)</sup>によって求めた。ここでは、River Diagnostics社製の共焦点ラマン装置Skin analyzer を用いてラマンスペクトルを計測した。この計測機器は、皮膚表面から一定深さ(深度)までレーザーを照射し、各深度での2700-3100 (cm<sup>-1</sup>)のラマンスペクトル(レーザーを当てたときの物体からの散乱光)が獲得できる。そして、正規化されたラマンスペクトルの2880 (cm<sup>-1</sup>)の強度が0.6となるときの深度を角層厚として求めた。

ラマンスペクトル解析による実測角層厚は平均12.31 (μm)で、標準偏差は2.67 (μm)であった。誤差率は平均1.44 (%)と低く、厚さの推定値は信頼できる値であるといえる。

## 5.2 角層透過率の結果

別の被験者4名を対象に、肌トラブルがない前腕部の反射率を計測した。図7に計測した反射率を示す。これらの反射率データを用いて推定した角層透過率 $T_{SC}(\lambda)$ を図8に示す。

次に、実測値については、被験者の肌の反射率を計測した後に、同一部位の角層サンプルを採取した。そして角層サンプルから角層の反射率を直接計測し、さ

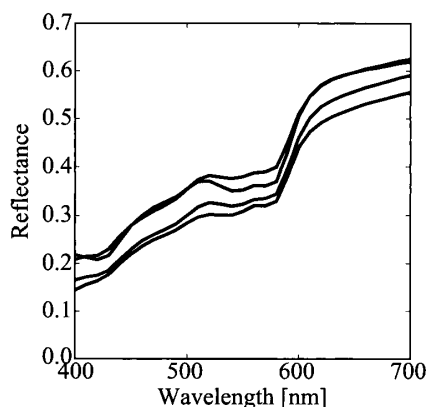


図7 角層透過率の検証実験で用いた反射率。

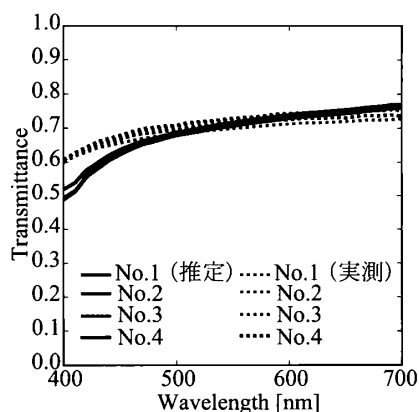


図8 推定した角層透過率と実測値との比較。

らに逆計算で透過率を求めた。これの具体的な算出は以下のとおりである。

まず白下地の上に載せた角層の反射率 $R_{WC}(\lambda)$ 、黒下地の上に載せた角層の反射率 $R_{BC}(\lambda)$ を計測する。そして3.1節の手順①-③を用いて、角層の散乱係数 $S_{SC}(\lambda)$ と吸収係数 $K_{SC}(\lambda)$ を算出する。そして、これらの係数値から、透過率 $T_{SC}(\lambda)$ を次式で算出する。

$$\begin{aligned} T_{SC}(\lambda) &= \frac{b_{SC}(\lambda)}{a_{SC}(\lambda)d_{SC}(\lambda) + b_{SC}(\lambda)e_{SC}(\lambda)} \\ a_{SC}(\lambda) &= (S_{SC}(\lambda) + K_{SC}(\lambda)) / S_{SC}(\lambda) \\ b_{SC}(\lambda) &= \sqrt{(a_{SC}(\lambda)^2 - 1)} \\ d_{SC}(\lambda) &= \sinh(b_{SC}(\lambda)S_{SC}(\lambda)D_{SC}) \\ e_{SC}(\lambda) &= \cosh(b_{SC}(\lambda)S_{SC}(\lambda)D_{SC}) \end{aligned} \quad (12)$$

図8の破線は上で得られた実測値を示す。

推定した角層透過率は、低波長域の透過率が低く長波長域の透過率が高いという波長依存性を示した。実測した角層透過率も類似の波長依存性があることが分かる。推定した角層透過率と実測透過率との誤差RMSEを調べたところ、平均0.040であった。以上のことから、提案法によって角層透過率をおおよそ推定できるといえる。

## 6. 検討 - 角層内で多重反射が生じる場合 -

4.2節において、角層内で光の減衰のみが生じることを想定して皮膚の反射率をモデル化した。一方、角層内で多重反射が生じる場合も想定される。以下ではこの場合を検討する。

角層内での多重反射を想定すると光の経路は図9の矢印で表される。この場合、角層を通過して実際に計測される皮膚の反射率は次式で表される。

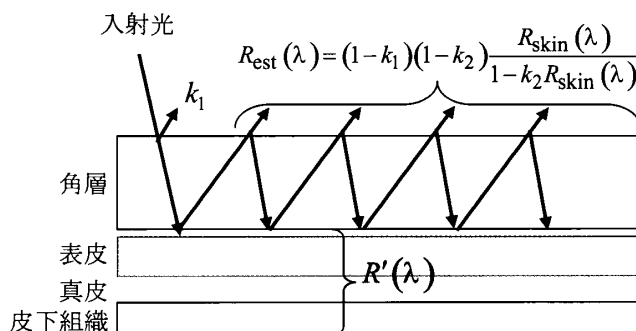


図9 多重反射を表した角層の光学モデル。

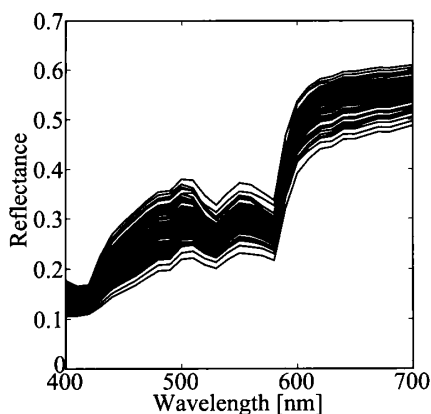


図10 追加実験で用いた反射率

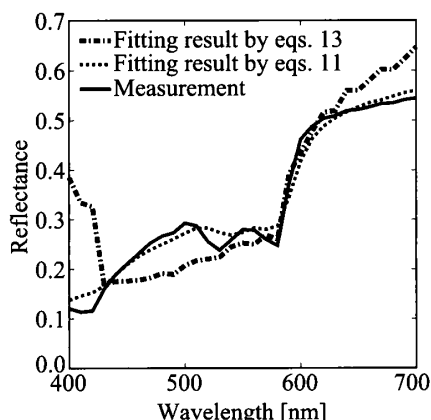


図11 適合結果の比較例

$$R_{est}(\lambda) = (1 - k_1)(1 - k_2) \frac{R_{skin}(\lambda)}{1 - k_2 R_{skin}(\lambda)}, \quad (13)$$

$$R_{skin}(\lambda) = R_{SC}(\lambda) + \frac{T_{SC}(\lambda)^2 R'(\lambda)}{1 - R_{SC}(\lambda) R'(\lambda)}$$

上式(13)の有効性を検証するため、筆者らは、新たに実験を行った。図10は被験者80名の前腕部の実測反射率である。提案する式(11)と上式(13)を用いて、以下の手順で反射率を推定し、適合精度を検証した。まず、パラメータ  $w_{oxy-Hb}$ ,  $w_{deoxy-Hb}$ ,  $w_{bilirubin}$  には血液検査による実測値を代入した。さらに  $w_{carotene}$ ,  $D_e$ ,  $D_d$  には医学データ<sup>17-18)</sup>から  $w_{carotene}=33.7(\text{mol/L})$ ,  $D_e=0.02(\text{cm})$ ,  $D_d=0.2(\text{cm})$  を代入し、 $k_1$  と  $k_2$  は  $k_1=0.027$ ,  $k_2=0.52$  とした<sup>8)</sup>。残りの、未知パラメータ  $w_{mela}$ ,  $D_{SC}$ ,  $w_{SC}$  を連続的に変化させ、推定反射率の RMSE の最小化を行った。

80名の推定した反射率と実測反射率との RMSE は、式(11)では 0.0191 で、式(13)では 0.0613 であった。図11は一例で、被験者1名について式(11)と式(13)で推定した反射率を示す。実線は、実測値である。提案した式(11)による反射率は実測値に良く適合している。

一方、式(13)は適合が悪い。以上より、本論文では提案した角層内の光の減衰を考慮したモデル式(11)を採用した。

## 7. むすび

本論文では、皮膚の反射率から角層厚と角層の透過率を推定する方法を開発した。まず、ヒト皮膚から採取した角層サンプルを用いて散乱係数と吸収係数を算出した。次に、角層内の光の減衰を考慮した皮膚の反射率のモデル式を導いた。このモデルを皮膚の実測反射率に適合させることにより、角層厚および角層透過率を推定できた。

推定の信頼性を確認するために、実験を実施した。角層厚の検証では、ラマンスペクトルから計測した実測値を用い、角層厚の推定精度が高いことを確認した。角層透過率の検証では、ヒト皮膚から採取した角層サンプルから角層透過率を実測し、おおよそ角層透過率が推定できることを確認した。さらに、角層内の多重反射を考慮したモデルについても検討を加えた。

このように本論文では、これまで反射率データから知ることができなかった角層厚と角層透過率を、皮膚の反射率から推定できることを明らかにした。今後は、提案手法を用いて様々な肌の見えと肌内部の関係を明らかにしていきたい。

## 謝辞

散乱係数と吸収係数を算出するにあたり、オフィス・カラーサイエンスの大住雅之氏に助言をいただいた。心より感謝申し上げる。実験で用いた表皮と真皮の散乱係数は大阪電気通信大学の土居元紀先生から提供頂いた。心より感謝申し上げる。本実験を実施するにあたり、参加した被験者および、多大なる協力や助言を頂いた株式会社カネボウ化粧品の研究員に感謝する。

## 参考文献

- 1) I. Nishidate, Y. Aizu, and H. Mishina: Estimation of melanin and hemoglobin in skin tissue using multiple regression analysis aided by Monte Carlo simulation, J. Biomed. Opt., 9-4 (2010) 700-710.
- 2) N. Tsumura, H. Haneishi, and Y. Miyake: Independent-component analysis of skin color image, J. Opt. Soc. Am A., 16-9 (1999) 2169-2176.
- 3) R. Ohtsuki, S. Tominaga, and O. Tanno: Multiple-



- Reflection model of human skin and estimation of pigment concentrations, OPTICAL REVIEW, 19-4 (2012) 254-263.
- 4) P. Kubelka: New Contributions to the Optics of Intensely Light-Scattering Materials Part1, J. Opt. Soc. Am. A., 27-5 (1948) 448-457.
  - 5) 化粧品機能評価法検討委員会:化粧品機能評価法ガイドライン, 日本香粧品学会論文誌, 30-4 (2006) 312-332.
  - 6) 大住雅之, 佐野和雄:日本色彩科学ハンドブック, 東京大学出版会, (2011) 677-678.
  - 7) J. Saunderson: Calculation of the color of pigmented plastics, J. Opt. Soc. Am. A., 32-12 (1942) 727-729.
  - 8) D. Judd: Fresnel reflection of diffusely incident light, J. Res. Natl. Bur. Stds., 29 (1942) 329-332.
  - 9) 湊幸衛: Reference Colorによる顔料の光学的特性と混合色, 千葉大学工学部研究報告, 19-36 (1968) 203-208.
  - 10) K. Nielsen, L. Zhao, J. Stamnes, K. Stamnes and J. Moan: The optics of human skin: Aspects important for human health, Proc. Solar Radiation and Human Health, (2008) 35-46.
  - 11) R. Anderson and J. Parrish: The Optics of human skin, J. Invest. Dermatol., 77-1 (1981) 13-19.
  - 12) R. Anderson and J. Parrish: Optical properties of human skin, The Science of photomedicine., 10-2 (1982) 147-194.
  - 13) Oregon Medical Laser Center: <http://omlc.ogi.edu/spectra/>
  - 14) J. McIntosh: Organization of Skin Stratum Corneum Extracellular Lamellae: Diffraction Evidence for Asymmetric Distribution of Cholesterol, Biophysical Journal, 85-3 (2003) 1675-1681.
  - 15) T. Igarashi, K. Nishino, and S. Nayar: The Appearance of Human Skin: A Survey, Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision, 3-1 (2007) 1-95.
  - 16) B. Robert, 福島雅典編:メルクマニュアル医学情報: 家庭版, 日経BP出版センター, (1999) 1382.
  - 17) 落合潤一, 伊藤宜則, 大谷元彦, 山内理充, 伊藤圓: 健康人の血清中脂溶性ビタミンの性・年齢別レベル, 藤田学園医学会誌, 17-1 (1993) 81-85.
  - 17) 小川鼎三, 細川宏: 解剖学第3巻, 金原出版株式

会社, (2003) 68.

- 18) 清水教男, 中川典昭, 尾藤宏達, 内藤智, 酒井進吾: ラマンスペクトル解析による角層厚計測, 日本香粧品学会誌, 34-3 (2010) 220-221.

(投稿受付日: 2012年9月11日)

(掲載決定日: 2012年12月16日)

## 著者略歴



おおつき りえ  
大槻 理恵

1981年生。2006年大阪電気通信大学大学院 工学研究科博士課程前期修了。日本色彩学会会員。現在、(株)カネボウ化粧品スキンケア研究所情報開発グループ研究員, 千葉大学大学院融合科学研究科研究生



たんの おさむ  
丹野 修

1960年生。1986年早稲田大学大学院理工学研究科博士課程前期修了。日本香粧品学会, 日本研究皮膚科学会, 各会員。現在, 花王(中国)研究開発中心有限公司室長



さかまき たけし  
坂巻 剛

1967年生。1990年北海道大学農学部農芸化学学科卒業。日本化粧品技術者会会員。現在, (株)カネボウ化粧品スキンケア研究所, 情報開発グループ主任研究員(グループ

長)。



とみなが しょうじ  
富永 昌治

1947年生。1975年大阪大学大学院基礎工学研究科博士課程修了。工学博士。日本色彩学会元会長, 電子情報通信学会フェロー, IEEE Fellow, IS&T Fellow, SPIE

Fellow。現在, 千葉大学大学院融合科学研究科教授