

メーキャップ化粧品の光学的機能評価に向けた人工皮膚の開発

芝浦工業大学工学部機械工学科

山田 純

In the current cosmetics industry, when developing make-up cosmetics and evaluating its appearance, a visual assessment has been performed by applying the cosmetics to human's skin. An evaluation using artificial skin using a resin material has been attempted, but it is not used for final evaluation of cosmetics. Since the present artificial skin cannot completely reproduce the characteristics of light propagation inside and surface of the living human skin, the appearance of the artificial skin is different from the living skin. In this study, we proposed a method that can individually adjust three optical properties and surface structures to create the artificial skin reproducing the appearance of the living human skin.

As for the absorption coefficient, it was shown that the mass concentration of dye and the absorption coefficient have linearity, so that the absorption coefficient can be controlled. With regard to the scattering coefficient and phase function, it was suggested that the scattering coefficient and phase function of the skin can be reproduced by controlling the particle diameter and particle volume fraction based on Mie theory. From these results, it was shown that artificial skin reproducing the optical properties of living human skin can be created by individually controlling the absorption coefficient by some dyes and the scattering coefficient and scattering phase function by white particles.

Three machining methods such as cutting, sandblasting and shaking were tried on the A5052 substrates to reproduce the characteristics of surface reflection on the human skin. Subsequently to the developing the surface structure, the surface structure data was measured using a laser microscope. These data indicated that it is possible to create a structure that can reproduce the optical characteristics on the human skin surface by combined several machining methods appropriately.

1. 緒言

現在の化粧品業界では、メーキャップ化粧品を開発し、その見栄えを評価する場合、実際に人の皮膚に化粧品を塗布した際の仕上がりを視感によって評価している¹⁻³⁾。しかし、この方法では被験者ごとの肌の違いや、同一被験者であっても、肌の状態が変化するために、定量的な評価は困難である。

これまでに、樹脂素材を使用した人工皮膚が製作されており、それをを用いた評価も試みられている。しかし、化粧品の最終評価には利用されていない。これは、現在ある人工皮膚では、皮膚内部の光伝播が十分に考慮されていないからである。色味は似ていても、実際の皮膚の質感と異なっていることが一つの理由である。

人の皮膚の見え方については、Computer Graphics (CG) 分野を中心に盛んに研究が進められている⁴⁻⁷⁾。従来の研究として、皮膚の見え方を再現する手法の一つとして、二方向反射率分布関数 (BRDF: Bidirectional Reflectance Distribution Function) をCGに適用したモデルが考えられてきた^{4, 5)}。しかし、この技術を用いて人の皮膚を再現し

た場合、実際の人の皮膚の持つ透明感などの質感を感じられないことが課題とされていた。そこで、近年では皮膚内部での散乱光を二方向散乱面反射分布関数 (BSSRDF: Bidirectional Scattering Surface Reflectance Distribution Function) をCGに適用したモデルが目目されるようになってきた^{6, 7)}。これらの研究結果から、皮膚-空気界面での光反射性質だけでなく、皮膚内部での散乱及び吸収(光物性)を考慮した反射光を再現することにより実際の人の皮膚に近い質感が再現されることが示された。

人工皮膚作製に関する従来の研究は、化粧分野では、化粧品の塗りやすさの試験や評価⁸⁾を目的としたものがある。また、医療分野では、レーザー治療や画像診断技術の研究⁹⁾、超音波診断や針・メスなどの医療器具の練習用¹⁰⁾として人工皮膚の開発が行われてきた。これらの人工皮膚では、人の皮膚の硬さや動摩擦係数など機械的性質の再現に関する研究が多く、光学特性に着目したものでも皮膚の見え方の再現が目的ではなく、使用するレーザーやx線など限定的な波長での光学特性の再現とされている。一方、人の皮膚の見え方を再現することを目的とした人工皮膚の作製に関する研究は少ない。Ivaら¹¹⁾は、人工皮膚で人の皮膚の分光反射率を再現することを目的に研究を行った。その結果、シリコン樹脂に馬の血液と脂肪乳剤の主成分の一つであるイントラリピッドを用いて、人の皮膚に近い分光反射率を持った独自の9層の人工皮膚を開発した。また、今後は、真皮層及び皮下組織も同様に色再現を行っていく必要があることを結論として述べている。前述したように、人の皮膚の見え方(質感)を再現した人工皮膚の作製には、



Development of artificial skin for optical performance evaluation of makeup cosmetics

Jun Yamada

Department of Engineering, Shibaura Institute of Technology

分光反射率の調整だけでなく、皮膚-空気界面での光反射性質と皮膚内部での散乱及び吸収を再現することが不可欠である。

筆者ら¹²⁾は皮膚表面の構造が光反射性質に与える影響を調べ、皮膚の持つ皮溝と皮丘にある細かい凹凸の傾きの方向分布を決定することで、人の皮膚の空気-皮膚界面での光反射性質を再現できることを示した。また、筆者ら^{13,14)}は、非侵襲で生きた人の皮膚の光物性を計測する手法及び計測装置の開発を行い、多数の日本人の皮膚の光物性の計測を行ってきた。本研究では、これらの計測データに基づき、人工皮膚において人の皮膚の質感を再現するために、空気-皮膚界面での光反射性質及び皮膚の光物性を再現する手法の確立を目的とする。

2. 方法

2.1. 光物性の制御方法

人の皮膚では、外から皮膚に入射した光のうち、一部は皮膚表面で反射されるが、残りは皮膚内部に浸透する。内部に浸透した光には、散乱されて再び皮膚の外に出ていくもの、あるいは、吸収されて熱に変わるものがある。このことから、皮膚は散乱・吸収性を持つ連続媒体と考え、次の光輸送方程式により取り扱われることが多い¹⁵⁾。

$$\frac{dl(s, \Omega)}{ds} = -(\sigma_s + \alpha)I(s, \Omega) + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_{4\pi} p(\Omega' \rightarrow \Omega) I(s, \Omega') d\Omega' \quad \dots (1)$$

ここで、 I ($W/m^2 \cdot sr$) は光の強度、 Ω (-) は光の進行方向を表す単位ベクトル、 s (m) はその方向の距離である。この輸送方程式には、吸収係数 α (mm^{-1})、散乱係数 σ_s (mm^{-1})、散乱位相関数 p (-) といった光物性が現れる。これら3つの光物性が皮膚内部での光伝播を特徴付ける。

これまでの人工皮膚の製作では、上記の光物性の再現という視点がなかったことに加えて、製作された人工皮膚が、実際の皮膚と同等であることを、光物性レベルで評価されることはなかった。本研究では、散乱係数、吸収係数の可視光域におけるスペクトルが実際の皮膚と同等となる人工皮膚の製作を目指す。

具体的な手法として、透明な樹脂を母材とし、吸収係数を染料で、散乱係数及び散乱位相関数を可視光において吸収のない白色粒子で、独立に制御することにより光物性の再現を試みる。

2.2. 空気-皮膚界面での光反射性質の制御方法

筆者らは、共焦点レーザー顕微鏡によって取得した皮膚表面構造の形状データ (Fig.1) を用いて、空気-皮膚界面での光反射性質を予測できる解析モデルを構築してきた¹²⁾。

図1(a)のような、皮膚表面形状データは、一定間隔で記録された高さデータ群から構成される。この形状データの隣り合うデータを結んだ三角形の表面要素(図1(b))を考え、その法線ベクトルの傾斜角度を算出する。そして、傾斜角度に関する確率密度関数としてまとめる。この確率密度関数は、 M を表面要素の数、 M_{tot} を一つの形状データに含まれる、全表面要素数、 $\Delta\Omega_e$ を表面要素の法線ベクトルが向く θ_e, ϕ_e 方向まわりの立体角として、(2)式で表される。

$$p_{surf}(\theta_e, \phi_e) = \lim_{\Delta\Omega_e \rightarrow 0} \frac{\Delta M(\theta_e, \phi_e)}{M_{tot} \Delta\Omega_e} \quad \dots (2)$$

これによって算出された二方向反射率は、実験から得られた皮膚表面の光反射性質と一致することが分かった。つまり、表面構造の光反射性質は、その表面要素の傾斜角度に関する確率密度関数を算出することによって評価できる。本研究では、人工皮膚作の表面形状データ(表面要素の傾斜角度に関する確率密度関数)が、実際の皮膚と同等となる人工皮膚の製作を目指す。

一般的に、人工皮膚の作製では、皮膚色に調整したシリコーン樹脂やウレタン樹脂を形成容器に流し込み、硬化させて作られる。よって、目的とする人工皮膚を実現するためには、空気-皮膚界面での光反射性質を再現できる構造を付与するための鋳型を作製する必要がある。本研究では、鋳型となる金属表面に様々な加工方法を用いて細かい凹凸を作製し、どのような加工方法が皮膚の表面構造の再現に適しているかを検証した。

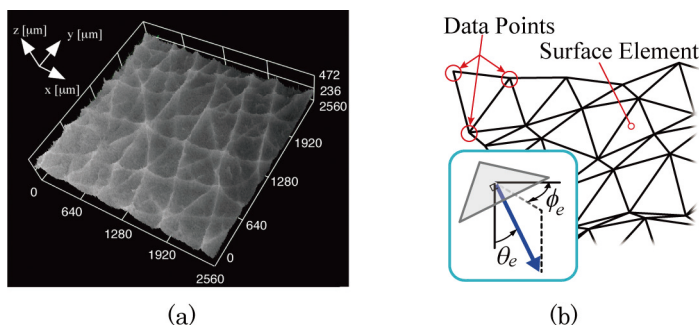


Fig. 1 (a) Surface morphology data of human skin and (b) analytical model of surface structure.

3. 結果と考察

3.1. 人工皮膚における光物性の再現

3.1.1. 吸収係数の線形性

透明樹脂に添加する染料の質量濃度を变化させたサンプルを作製し、透過率 τ を分光光度計（株式会社日立ハイテクサイエンス, U-5100）を用いて測定し、以下のLambert-Beerの法則に基づき、染料の吸収係数を計測した。

$$\tau = \beta s_d, \quad (\beta = \sigma_s + \alpha) \quad \dots\dots (3)$$

式中の s_d (m)は光路長である。ここで、染料は母材の透明樹脂に溶解し、散乱を生じないものを用いる。そうすることで、減衰係数 β (mm^{-1})のうちの散乱係数 σ_s が0となり、透過率から吸収係数が測定可能となる。本研究では、染料と透明樹脂との相性を考慮し、透明なウレタン樹脂（株式会社ポリシス, PC-00）と、日本化薬株式会社製；Yellow GN, Red B, 有本工業株式会社製；Plast Blue, Plast Green, Plast Orangeの5種類の染料を使用した。

Fig.2に染料(Plast Green)の質量濃度と吸収係数のグラフを示す。Fig.2の結果から、質量濃度と吸収係数が線形性を持つことが示された。同様の計測を行った結果、全ての染料において、質量濃度と吸収係数の線形性が示された。

3.1.2. 染料の足し合わせによる吸収係数の制御

3.1.1. 項の結果から、染料の質量濃度を調整することで吸収係数を制御可能であることが確認された。そこで、前述した5種類の染料をウレタン樹脂に混ぜ、人の皮膚の吸収係数の再現する人工皮膚を作製し、そのときの光物性を、本研究室で開発した光物性計測装置¹³⁾で計測した(Fig.3)。この際、Fig.2の濃度に対する吸収係数の傾き a_i を全ての染料について算出し、非負の最小二乗法¹⁶⁾を用いて、必要とされる染料の配合する質量濃度を求めた。その結果、人工皮膚の吸収係数は、予め計算した染料の足し合わせで得られることが確認できた。吸収係数の制御が本手法で可能である。

3.1.3. Mie理論による散乱係数の計算

媒質中の散乱係数は球形の粒子を用いた場合、Mie理論から導かれる粒子一つの散乱断面積と、粒子数密度を与えることで求められる。これまでの筆者らの研究¹⁷⁾で、粒子の粒径分布を考慮したMie理論を適用することで、粒子の平均直径 D_N (μm)と体積分率 f_v (-)から、Fig.4に示すように、人の皮膚の散乱係数スペクトルに近い値を再現できると予測された。しかし、この結果を基に製作した人工皮膚の散乱係数スペクトルは、大きさ、プロファイルとも予測値とは異なった。この原因は、散乱位相関数の波長依存性にある。

3.1.4. 散乱位相関数の影響を考慮した散乱係数の制御

皮膚の光物性を計測した手法(RSPM)¹³⁾では、波長

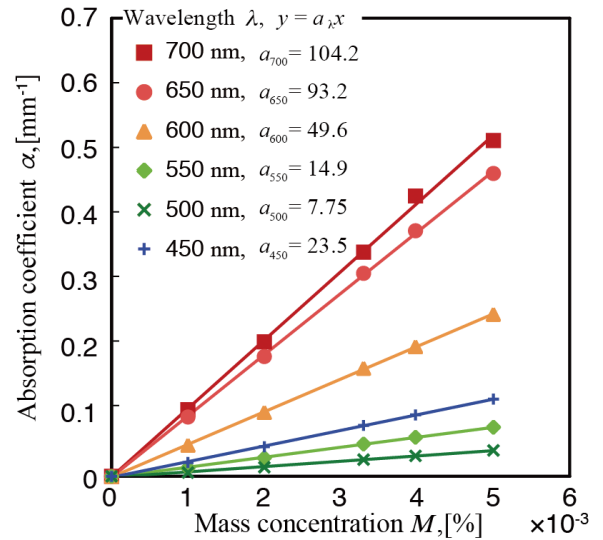


Fig. 2 Absorption coefficient of green dye samples.

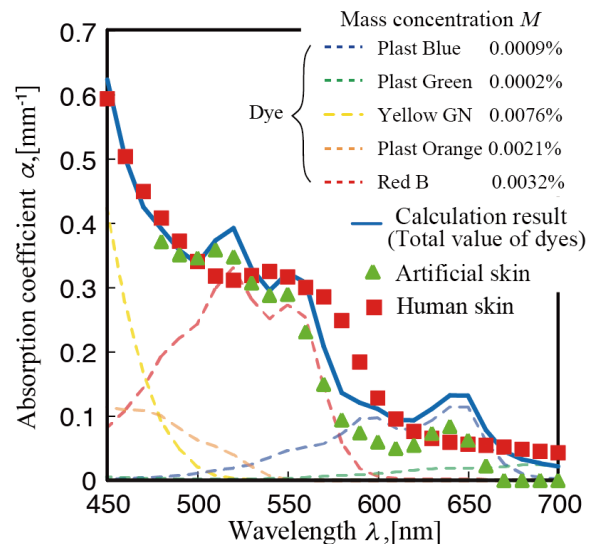


Fig. 3 Reproduction of skin absorption coefficient.

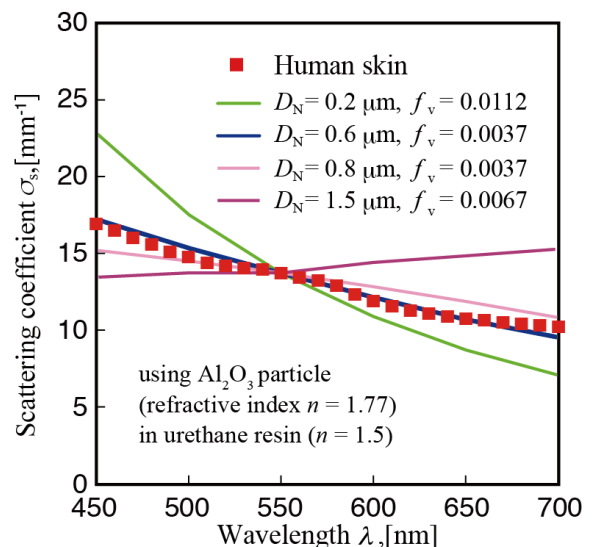


Fig. 4 Calculated scattering coefficient by Mie theory.

$\lambda=633\text{nm}$ の培養皮膚の散乱位相関数⁷⁾を与えて、逆解析を通じて散乱係数、吸収係数を推定している。しかし、実際の散乱位相関数には波長依存性があり、Mie理論においても波長の関数として散乱位相関数が導かれる。先に述べた、人工皮膚で散乱係数を再現できなかった原因は、Mie理論での予測と計測における逆解析で、散乱位相関数が異なっていたためである。

そこで、Fig. 5に示すモデルを用いて、Mie理論から算出された散乱係数(σ_{sa})、吸収係数及び散乱位相関数を皮膚の物性値として割り当て、培養皮膚の散乱位相関数を用いて逆解析により推定される値(σ_{se})を数値シミュレーションにより求めた (Fig. 6)。Fig. 6の結果から、散乱位相関数が異なる場合、 σ_{sa} と σ_{se} に大きな差が生じることが分かる。また、このシミュレーションから、粒子径が $0.1\text{-}0.2\mu\text{m}$ の Al_2O_3 粒子を用いれば、 σ_{se} が人の皮膚について計測された散乱係数スペクトルを再現できると考えられる。

本解析の検証として、 $D_N=0.6\mu\text{m}$ の Al_2O_3 粒子(住友化学株式会社, アドバンスアルミナ AA-05)を使用したサンプルを作製し、そのときの光物性をRSPMで計測した (Fig. 7)。Fig. 7の結果より、シミュレーションから予想される結果と人工皮膚の計測結果の値と傾きはよく一致し、この手法から散乱係数・散乱位相関数の制御が可能であることが示された。

3.2. 人工皮膚における空気-皮膚界面での光反射性質の再現

3.2.1. 鋳型の製作方法

鋳型となる形成容器の一面に機械加工を施し、その加工法に応じて、どのような光性質を持つ表面が作られるか検討する。Table 1に、今回行った加工法を示す。鋳型は、アルミニウム合金で作製することを想定し、大きさ $50 \times 50 \times 3\text{mm}$ のA5052基板を対象としてその表面に加工実験を行う。

3.2.2. 試作した鋳型の評価及び光性質の予測

Fig. 8に、各加工法で処理された表面の拡大画像、Fig. 9に、各表面構造のプロファイルの一例を示す。加工法1(切削)では、約 $15\mu\text{m}$ 程度のピーク形状が見られる。加工法2(サンドブラスト加工)では、不規則で細かい凹凸が形

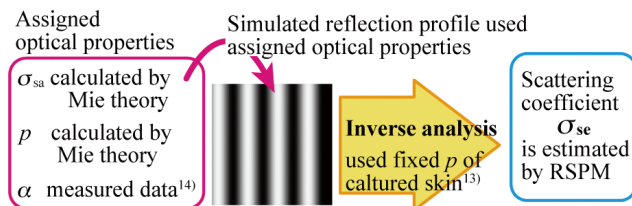


Fig. 5 Simulation flow.

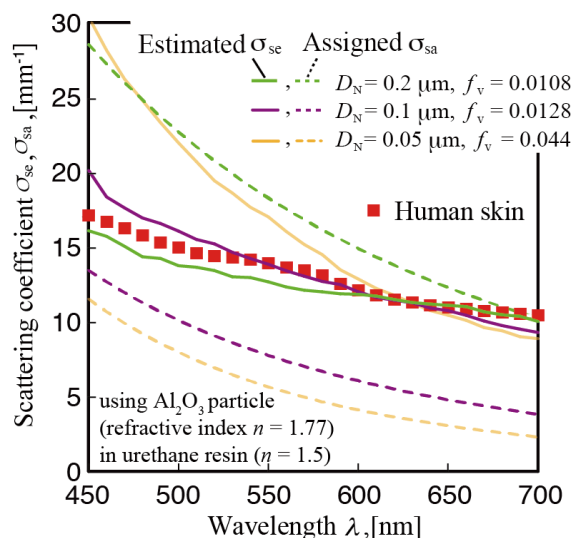


Fig. 6 Simulation of influence of scattering phase function.

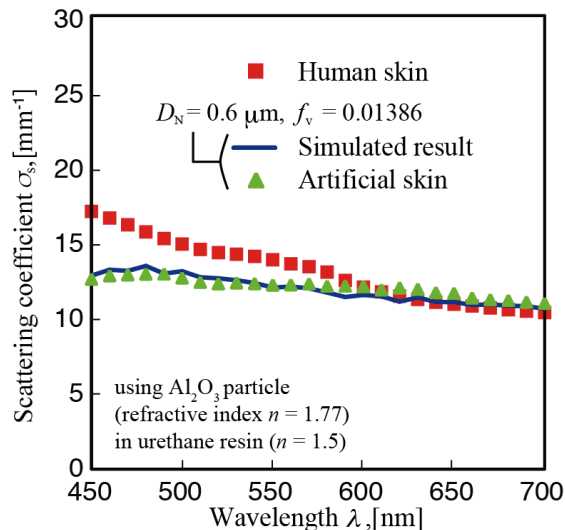


Fig. 7 Comparison of simulated result and artificial skin.

Table 1 Machining to construct the surface structures on A5052 substrates.

加工法 1: 切削(Cutting)	カッターナイフによってランダムな方向に溝状の傷を付与する
加工法 2: サンドブラスト加工(Sandblasting)	砥粒径 $\phi=425\text{-}600\mu\text{m}$ のアルミ系サンドブラスト用砂を、噴射ノズルから加工する A5052 基板表面までの距離を約 50mm に固定した状態で、噴射圧 0.3 MPa, 8 分間吹き付ける。
加工法 3: 揺動(Shaking)	大きさ W73 × D73 × H80 の容器底部に両面テープで A5052 基板を貼付け、その中に粒径 $\phi=1.6\text{mm}$ の球状のステンレス投射材を入れて、手動で上下に揺動させることによって A5052 表面に凹凸構造を付与する。上下の揺動幅は約 110mm, 振動数は 1 分間に約 200 回とした。

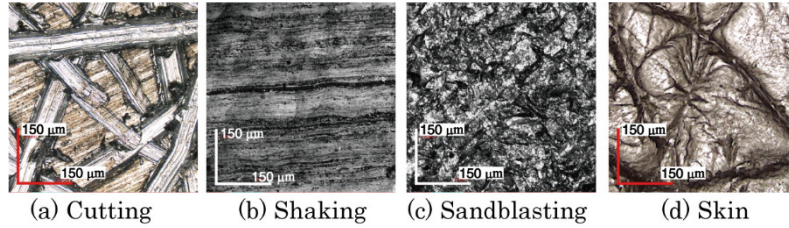


Fig. 8 Surface image of A5062 substrates after machining and human skin surface.

成されているが、その深さは約 6-12 μm 程度と見積もられる。加工法3 (揺動)は、サンドブラスト加工と類似して、不規則で細かい凹凸が見られるが、その構造は、サンドブラスト加工と比較してかなり小さく、ほとんど平滑であった。これは、手加工の方が、投射材の速度が遅かったためだと考えられる。

Fig. 10に、各加工法によって形成された表面形状データから算出した、傾斜角度に関する確率密度関数 $p_{surf}(\theta_e, \phi_e)$ を示す。この図より、実際の皮膚の表面構造の $p_{surf}(\theta_e, \phi_e)$ は、傾斜角 $\theta_e = 45^\circ$ 付近でゆるやかに上昇する傾向が見られた。これは、皮溝の斜面に起因すると考えられる。同様に、切削加工の $p_{surf}(\theta_e, \phi_e)$ で $\theta_e = 75^\circ$ 付近に小さなピークが現れるのも、溝構造の斜面によるといえる。そして、前述の確率密度関数をもとに、各表面に、光を入射角 $\theta_{in} = 45^\circ$ で入射させたときの光反射性質を予測した結果を、Fig. 11に示す。全ての加工法において、皮膚表面の光反射性質と異なる結果となった。特に、揺動加工で作製した表面構造の光反射性質は、Fig. 11に示されるように、正反射方向付近の二方向反射率が急激に上昇した。Fig. 10の結果より、これは、表面がほとんど傾斜のない構造であったことが原因だと考えられる。

これらの結果から、投射材形状や加工法により、表面構造の特徴を制御できることが示された。よって、これらの適切な組み合わせが明らかになれば、実際の皮膚表面構造を人工皮膚に転写せずとも、皮膚表面構造による光性質を再現する可能性があることが示された。

3. 2. 3. 表面構造の違いが内部での光伝播に与える影響

次に、皮膚内部での光伝播も再現した人工皮膚作製に向け、Fig. 10に示すような、表面傾斜角度の確率密度関数の違いが、皮膚内部での光伝播にどの程度影響を及ぼすかを、数値解析によって検討した。この光伝播解析は、Fig. 12のような解析モデルに対して、Monte Carlo法によって行う。これは、光を、エネルギーを持つ光束とし、解析モデルに入射させる試行を繰り返すことで近似的に解を求める解析方法である。皮膚表面での光挙動は、前述のように、表面形状データから算出される、傾斜角度の確率密度関数 $p_{surf}(\theta_e, \phi_e)$ より決定した。光の入射角度は $\theta_{in} = 45^\circ$ とし、光束が皮膚-空気界面に到達したとき、Fig. 5の確

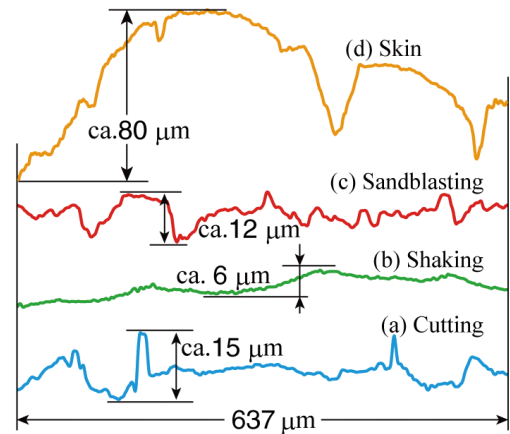


Fig. 9 Surface profile of A5052 substrates after machining and human skin.

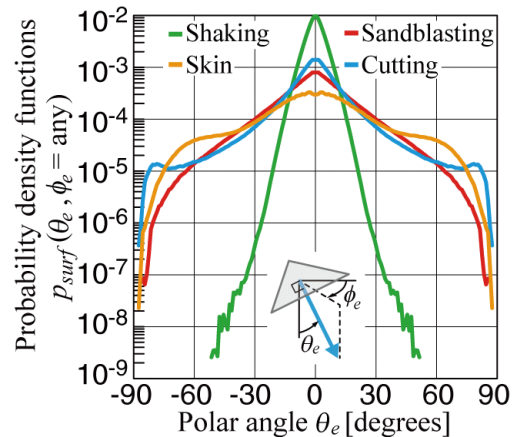


Fig. 10 Probability density function for machining surface structures and human skin.

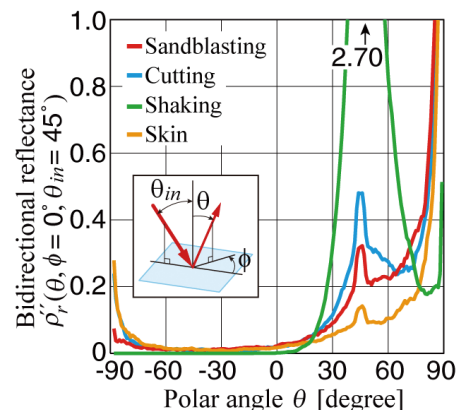


Fig. 11 Bidirectional reflectance for machining surface structures and human skin obtained by numerical analysis.

率密度関数をもとに、これが出くわす表面要素、及び、その表面要素上で反射するか、あるいは透過して皮膚内部に進むかが決定される。解析モデルの大きさは、一般的な皮膚の厚みとされる1.9mmとし、その周囲は周期境界とした。そして、光束が、皮膚内部で吸収されるか、あるいは再び皮膚-空気界面に達して皮膚外に射出されるまで追跡する。

表面構造による光性質の違いが、皮膚内部での光伝播に与える影響を調べるために、実際の皮膚を含む各表面構造について、表面構造を透過した直後の二方向透過率をFig. 13に、皮膚内部で散乱されて、再び皮膚外に射出された光が到達した最大の深さと光量の関係をFig. 14にまとめた。

Fig. 14の結果より、光がより深くまで到達したのは、揺動加工によるものであった。この加工法によって作られた表面構造は、Fig. 9, 10の結果より、ほとんど傾斜がない。そのため、光がこの構造表面を透過しても、その指向性が大きく変化せず、その結果として、深さ方向に進む光が減少しなかったためである。逆に、皮膚表面を透過した光は、その指向性が低下したため、皮膚の深くまで進む前に皮膚から射出されたと考えられる。これらの結果から、皮膚表面構造は、皮膚内部の光伝播にも影響を与えることが明らかとなった。

4. 総括

本研究では、生きた人の皮膚内部での光伝播及び空気-皮膚界面での光反射性質を再現した人工皮膚の作製を目的とし、吸収係数や散乱係数・散乱位相関数の3つの光物性を制御する方法及び表面構造を転写する鋳型の加工方法を検討した。

吸収係数については、人工皮膚の母材となる透明樹脂に溶解する染料を用いた場合、質量濃度と吸収係数が線形性を持ち、複数の染料を組み合わせることで、吸収係数を制御可能であることが示された。散乱係数については、散乱位相関数がMie理論と計測における逆解析とで異なるため、その違いを考慮した新たな解析モデルを導入した。その結果、この解析モデルから計算した値と、作製したサンプルの光物性の計測値を比較した結果、散乱係数スペクトルの一致が確認された。これらのことから、吸収係数を染料で、散乱係数・散乱位相関数を白色粒子で、独立に制御することにより、人の皮膚の光物性を再現した人工皮膚が作製可能であることが示された。

また、様々な加工方法を用いて、金属盤上に様々な表面構造を作製し、その構造が生じさせる光反射性質を分析した結果、一種類の加工方法では人の皮膚の光反射性質を再現することができないが、複数の加工方法を組み合わせることで、人の皮膚の光反射性質を再現可能であることが示された。

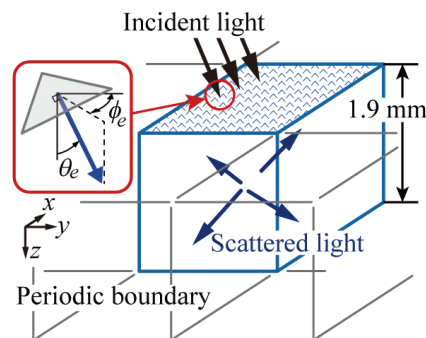


Fig. 12 Analytical model to analyze the influence of the structure of the skin surface on light propagation inside the skin.

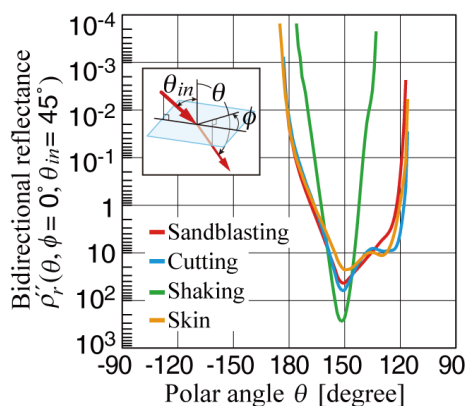


Fig. 13 Light transmittance for each direction on the surface structures obtained by the numerical analysis.

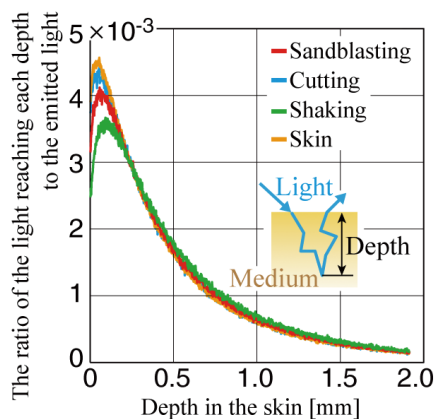


Fig. 14 Influence of the surface structure on the light propagation inside the skin.

本研究では、人工皮膚の光学的な性質を生きた人の皮膚と同等のものにするための手法を、内部と表面を個別に分けて検証した。ここでは、作製した人工皮膚の質感の評価までは行えておらず、その作製方法の検証のみであったが、これらの内部と表面の製作方法を合わせて一つの人工皮膚を作製することで、より生きた人の皮膚の質感を再現した物を作製可能になると考えられる。また、本研究では、光

学的な性質を個別に制御する手法を提案しているため、本手法を利用することで、個人差が大きく、人によって異なる皮膚の光学的な性質に合わせて、化粧品の評価に使用するための様々な種類の人工皮膚の製作できる。

謝 辞

本報告書の作成にあたり、共同研究者である河野貴裕氏(芝浦工業大学)に多大な貢献をいただいた。ここに記して謝意を表す。

(引用文献)

- 1) Nishimura H, Takasuka Y, Yamamoto M. Optical properties of skin gloss and development of mizumizushii-looking makeup foundation. *Int. J. Cosmet. Sci.*, 29, 67, 2007.
- 2) Nishikata, N., Nishimura, H., Mohri, K., Nakamura, N. A Natural-Looking Makeup. *Cosmetics & Toiletries Magazine*, 112, 39-56, 1997.
- 3) 上原孝一, 南浩治, 岩本啓, 長田みゆき, 五十嵐崇訓, 中尾啓輔, 大崎和友, 植松隆史, 野尻尚材, 榎本明生, 福田啓一: 透過光制御による若顔印象ファンデーションの開発. *日本化粧品技術者会誌*, 44, 48-56, 2010.
- 4) Weyrich T, Matusik W, Pfister H, Bickel B, Donner C, Tu C, McAndless J, Lee J, Ngan A, Jensen HW, Gross M. Analysis of human faces using a measurement-based skin reflectance model. *ACM Trans. Graphics*, 25, 1013-1024, 2006.
- 5) Marschner SR, Westin SH, Lafortune EPF, Torrance KE, Greenberg DP. Image-based BRDF measurement including human skin. In *Rendering Techniques' 99*, Springer, Vienna, 131-144, 1999.
- 6) Alotaibi S, Smith WAP. A Biophysical 3D Morphable Model of Face Appearance. *Proc. 2017 IEEE Conf. Comput. Vision and Pattern Recogn.*, 824-832, 2017.
- 7) Jensen HW, Marschner SR, Levoy M, Hanrahan P. A practical model for subsurface light transport. *Proc. 28th Annu. Conf. Comput. Gr. Interact. Techniques*, 511-518, 2001.
- 8) 菅沼薫, 丹羽雅子: マッサージクリーム of 触感と物理物性との関係. *日本化粧品技術者会誌*, 24, 212-219, 1991.
- 9) Jędrzejewska-Szczerska M, Wróbel MS, Galla S, Popov AP, Bykov AV, Tuchin VV, Cenian A. Investigation of photothermolysis therapy of human skin diseases using optical phantoms. *18th Int. School on Quantum Electron.: Laser Phys. Applications, Int. Soc. Opt. Photonics*, 9447, 2015.
- 10) Aminzadeh R, Saviz M, Shishegar AA. Theoretical and experimental broadband tissue-equivalent phantoms at microwave and millimetre-wave frequencies. *Electron. Lett.*, 50, 618-620, 2014.
- 11) Iva S, Tanabe A, Maeda T, Funamizu H, Aizu Y. Development of non-deterioration-type skin tissue phantom using silicone material. *Opt. Rev.*, 21, 353-358, 2014.
- 12) Nakamura K, Ogawa T, Takata S, Yamada J. Numerical model for optical characteristics of the human skin surface. *Thermal Sci. Eng.*, 23, 61-69, 2015.
- 13) Kono T, Yamada J. Development of measurement instrument for optical properties of human skin in vivo. *Jap. J. Thermophys. Prop.*, 31, 72-80, 2017.
- 14) Kono T, Toma S, Nozawa K, Yamada J. Scattering and Absorption Coefficients of Human Skin in Japanese People. *Proc. 1st Pacific Rim Thermal Eng. Conf., Hawaii's Big Island*, 15081-1-5, 2016.
- 15) Siegel R, Howel JR. *Thermal Radiation Heat Transfer*, 3rd edn., Taylor and Francis, New York, 686-689, 1992.
- 16) Lawson CL, Hanson RJ. *Solving Least Squares Problems*, Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 161, 1974.
- 17) Sarasuk K, Kono T, Nakamura K, Yamada J. Effect of scattering particle size on extinction coefficient of artificial human skin. *Proc. 1st Pacific Rim Thermal Eng. Conf., Hawaii's Big Island*, 15111-1-5, 2016.