

肌の透明感測定

桑 原 智 裕

Measurement of Skin Translucency

Tomohiro KUWAHARA

Many Japanese women are concerned about the translucency of the skin, and this trend is gradually growing stronger. Therefore, in cosmetic companies, there is a demand for objective evaluation methods for skin translucency to develop the products related to skin translucency. In recent years, there has been the progress in the investigation of the relationship between skin physiological characteristics and skin translucency, and some useful methods for measuring skin translucency are suggested with the advance of optical skin measuring technologies. In this paper, I introduce the objective evaluation methods for the translucency, especially of the bare skin, and also refer to definition suggestions for skin translucency and its plausible physiological causes.

Key words: translucency, transparency, diffuse reflection, internally reflected light, skin

日本人女性の感じているさまざまな肌の悩みの中で、肌の透明感に関する悩みは幅広い年代に共通して強く、年々その割合は高まってきている。こうした肌の透明感を改善したいという声にこたえていくことは、化粧品会社にとって商品を開発していくうえで重要な課題となっている。「透明感」という表現には必然的に感覚的な要素が含まれており、個人の主観や経験など心理的な要因にも左右される指標ととらえられる。しかし、商品の効果を実証し、より説得力のある商品開発を進めるうえでは、肌の透明感を客観的に評価する技術が求められており、その本質の科学的な解明に向けた試みが行われてきている。

従来、客観的に肌の透明感を評価することは、専門の訓練を受けた美容技術者が担ってきた。しかし、視感による評価は長期間での比較などでは精密な評価が困難な場合も多く、機器測定による客観的な評価が望まれていた。近年、透明感と皮膚生理特性との関係についての研究が進み、皮膚の光学的な計測技術の進歩と相まって、機器による透明感の実用的な測定法が提案されてきている。本稿では、透明感の定義・要因についての知見とともに、特に素肌の透明感を客観的に評価する測定技術について紹介する。

1. 透明感の定義

肌を構成する皮膚組織は層構造になっており、最外層となる角層から順に、表皮、真皮、皮下組織とおおまかに分類される。表皮にはメラニン色素、真皮には血液中に含まれるヘモグロビンが多く存在しており、肌の色を構成するおもな要因となっている。また、表面の微細な凹凸を形成する皮溝と皮丘からなる表面形態は一般的に「きめ」（肌理）とよばれており、「しわ」はこれよりも大きな凹凸の状態として認識されている。このような皮膚組織の構造・状態は肌の外観に及ぼす影響も大きいと考えられる。

では、「透明感のある肌」とはどういう肌の状態を意味しているのだろうか。征矢ら¹⁾は女性の「透明感のある肌」に対する意識について言語的概念からの分析を試みている。他の肌表現語との関連度調査の結果、「透明感のある肌」との関連度の高い表現として「にごりのない肌」「きめの整った肌」といった表現が高い関連度を示し、クラスター分析を行った結果、若年層では「色・形態の均一、にきび」「うるおい」「きめ・生まれたての肌」の、中高年層では「きめ・うるおい」「色・形態の均一」「乾燥・にきび」の複合概念であったと報告している。「透明感のある肌」という表現の中には、視覚的な要素だけでなく、理想的な

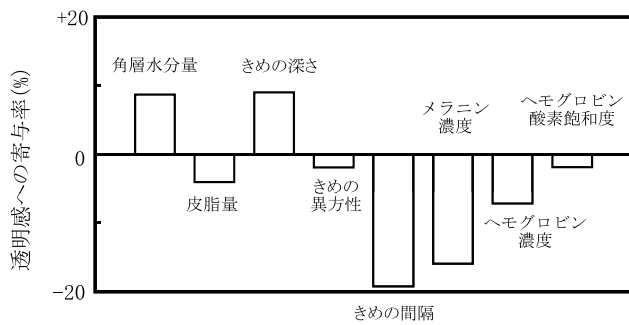


図1 皮膚生理パラメーターの皮膚透明感への寄与率。

状態の肌に対するイメージも含まれている様子が見えがえる。しかし、具体的にどういう状態を意味するのかは人によってあいまいな部分もあることが、客観的な評価を困難にさせている一因ともなっていると考えられる。

こうした中、日本化粧品工業連合会の効能効果専門委員会では、「透明感とは視覚的な表現であり、皮膚がくもりなく透き通ったように見える状態を言う。肌の透明感には角質層の光透過性が大きく影響している。角質層の光透過性、すなわち入射光に対する透過光の比率が高いほど透明感が高いと考えられ、角質層の水分量や肌表面のきめの整い具合などの要素により左右される」との定義案をまとめている。透明感の物理的な側面について端的にまとめた定義案となっており、計測による客観的な評価への可能性を示している。本稿で紹介する測定手法においても、基本的な考え方はこの定義案を踏襲している。

2. 透明感の要因

計測可能な皮膚生理指標との関連性を調べることで透明感を説明する試みも行われている。舛田らは肌に透明感がある女性15名と透明感がない女性15名の30名(25~64歳)について、頬部を対象に皮膚生理測定を実施している²⁾。ここでは、専門の訓練を受けた美容技術者の視感評価を透明感評価の基準としている。透明感と肌状態の関連性を明らかにするために、美容技術者の透明感評価値と皮膚生理特性間でPLS解析(partial least square analysis)を実施した結果、計測した皮膚生理特性である角層水分量・皮脂量・きめの深さ・きめの乱れ・皮溝の間隔および分光測色スペクトルより解析したメラニン量・ヘモグロビン量・ヘモグロビン酸素飽和度の8項目による透明感の説明分散の総和は54.41%を示し、説明分散の高い上位4因子において53.35%とそのほとんどを占めた。4因子の説明分散に因子負荷量を乗算することで算出した各皮膚生理特性の透明感への寄与率を図1に示す。この中で透明感への寄与率が5%以上を示す皮膚生理特性は、きめの間隔および

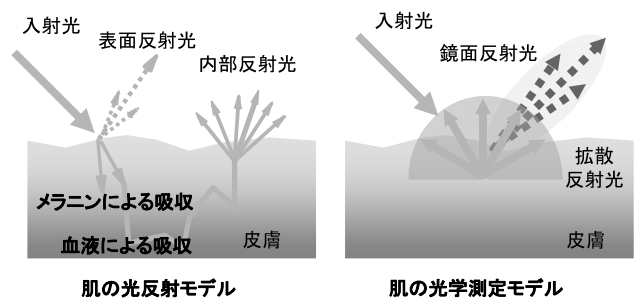


図2 肌での光の伝播経路および光学測定モデル。

深さ・角層水分量・メラニン量・ヘモグロビン量の5項目であり、角層水分量およびきめの深さについては正の寄与率を示し、きめの間隔・メラニン量・ヘモグロビン量については負の寄与率を示した。これは透明感の高い肌はきめが深く、細かく、角層水分量が多く、メラニン量およびヘモグロビン量が少ないことを意味している。

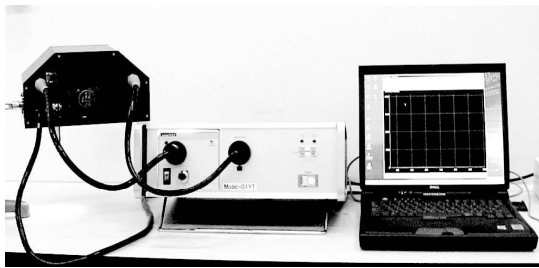
3. 透明感測定の考え方

日本化粧品工業連合会の定義案にあるように、透明感のある肌では入射光に対する透過光の比率が高いとした場合、知覚的には皮膚内部から光が多く戻ってくる肌としてとらえていると考えることができる。Andersonら³⁾により提案されている皮膚における光の伝播に対する光学モデルを、図2に示す。皮膚に入射した光は約5%が表面で反射され、皮膚内に入った光のうち、おもに表皮領域に分布するメラニンや血液中のヘモグロビンなどで吸収される光以外は、表皮や真皮で散乱されて戻ってくる。このモデルに基づき、肌の透明感は光が皮膚の内部へ透過して、皮膚内部から反射されて戻ってくる内部反射光に起因すると考えられる。皮膚表面からの反射光は鏡面反射光であり、皮膚内部から戻ってくる光は皮膚内部での散乱により拡散反射光としてとらえられる。そこで、皮膚からの反射光(鏡面反射光と拡散反射光の総和)のうち、拡散反射光を分離して計測することで透明感の定量的評価が可能になる。

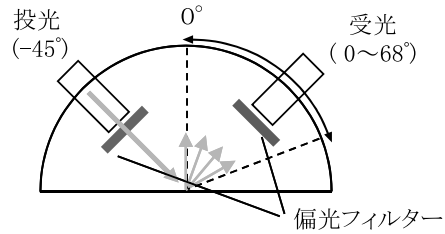
4. 拡散反射光の測定

上記の考えに基づき、実用的な透明感測定法として開発された偏光ゴニオメーターを用いた手法を紹介する。

舛田らは皮膚からの反射光を鏡面反射光と拡散反射光とに分離して詳細に計測する手法として、偏光ゴニオメーターを独自に開発している³⁾。投光角度を-45度に固定し、受光部の角度を0~68度までの範囲で変化させて皮膚の反射率を計測するゴニオメーターをベースとし、その投光部と受光部の双方に偏光フィルターを組み込んだ形となっている(図3)。



(A) 装置外観



(B) 測定条件

図3 偏光ゴニオメーター。

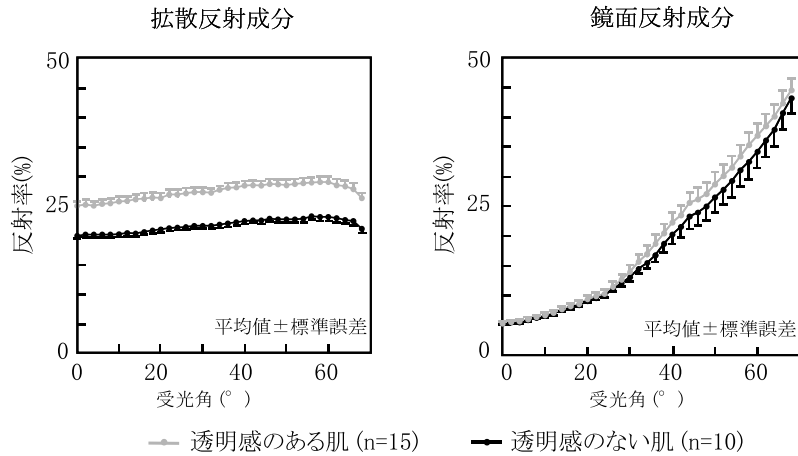


図4 拡散および鏡面反射光の反射率と透明感との関係。

表面反射光では入射光の偏光状態が保たれ、拡散反射光では偏光性が失われていることから、小島ら⁴⁾の研究を参考に、投光側と受光側の偏光フィルターを直交に配置して計測した光量を2倍することで拡散反射成分 (D) を、偏光フィルターを平行に配置して計測した光量から直交に配置して計測した光量を減算することで鏡面反射成分 (S) をそれぞれ独立に計測する仕組みとなっている。式で表すと以下ようになる。

$$S = (I_{ss} + I_{pp}) - (I_{sp} + I_{ps})$$

$$D = 2 \times (I_{sp} + I_{ps})$$

I は計測された反射率、添え字の s, p は入射光および受光側の偏光フィルターの方向を示しており、例えば I_{sp} は入射光側に S 偏光フィルター、受光側に P 偏光フィルターを入れたことを表す。

この開発した偏光ゴニオメーターを用い、透明感と皮膚表面からの光 (鏡面反射光) および皮膚内部からの光 (拡散反射光) との関連性を検討した結果を以下に示す。

被験者 30 名を対象に美容技術者が視感による透明感評価 (5 段階評価, 1: ほとんどない, 2: 少しある, 3: ある, 4: かなりある, 5: 非常にある) を実施した。評価の結果、透明感がかなりある、もしくは非常にあると判断さ

れた肌 (15 名) と、透明感がほとんどない、もしくは少しあると判断された肌 (10 名) について、偏光ゴニオメーターを用いた測定結果を図 4 に示す。透明感のある群となない群において鏡面反射光はほぼ同程度で、両者に大きな違いはみられなかった。一方、拡散反射光は透明感のある肌ですべての受光角度において高い値を示している。また、全被験者の測定結果より、受光角 45 度における鏡面反射光および拡散反射光の反射率と、美容技術者による透明感の視感評価 (5 段階評価) との関係について、スピアマン順位相関係数検定により解析した結果、透明感と鏡面反射光にはほとんど相関はみられない (スピアマンの順位相関係数 $r=0.190, p>0.05$) が、一方、拡散反射光には高い正の相関がみられた (スピアマンの順位相関係数 $r=0.699, p<0.01$)。このような結果から、肌の透明感は皮膚内部からの光と密接な関係にあり、偏光ゴニオメーターによる拡散反射光の計測により透明感の定量的な解析が可能であることが示されている。

5. 内部反射光の測定

偏光ゴニオメーターによる手法では、皮膚の内部を通過する光は多重散乱により偏光性が失われることを利用して

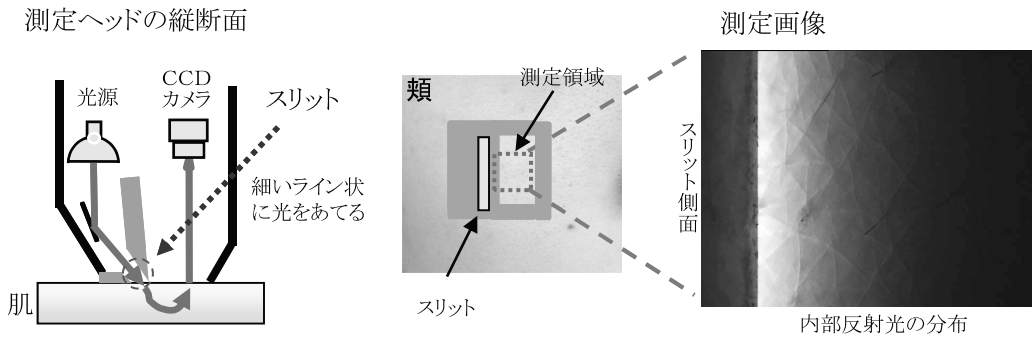


図5 スリットライトセンサーの測定原理.

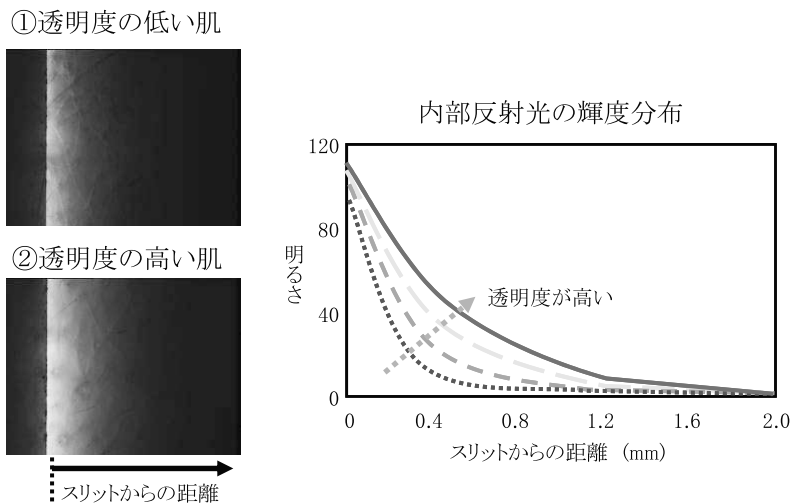


図6 内部反射光の分布状態の違い.

表面反射光と拡散反射光に分離しており、厳密には皮膚の内部を透過する光を直接計測してはいない。そこで筆者らは、皮膚の内部を透過する光を内部反射光として直接計測するスリットライトセンサーの開発を行った⁵⁾。図5に、システムの構成および測定原理を示す。光源からの光を肌当てる、その反射光を CCD カメラで検知するという基本構造であるが、先端に肌と密着するスリットを配置する形となっている。光源からの光はスリットを通して肌に照射され、表面での反射はスリットで遮られることから、肌内部を通った光だけを検知することができる。図5中央に、真上から見た測定のイメージを示す。スリットの間隙を通し、細いライン状に光が当てられることになり、実際に CCD カメラで撮像されるのは点線内の四角い領域である。図5右に、この装置で肌の内部反射光の分布状態を可視化した画像を示す。画像の左端にはスリット側面が写っており、このきわから右方向へ内部反射光が広がっている様子がわかる。

開発したスリットライトセンサーにて取得した皮膚の内部反射光画像から、皮膚内部を透過する光を定量的に解析

するため、肌の透明度指標の算出を行った。画像解析によりスリットからの距離に対する明るさの分布状態を解析した結果を図6に示す。内部反射光の輝度が、スリットからの距離が大きくなるにつれて減衰していく様子を示している。この内部反射光の分布状態の変化をカーブフィッティングにより解析したところ、以下の式のように距離の指数関数で表されることがわかった。

$$R_{\text{slit}}(r) = C_1 \exp(-C_2 r)$$

ここで、 $R_{\text{slit}}(r)$ は輝度、 r はスリットからの距離、 C_1 、 C_2 は変数を示す。このモデルにおいては式の中の C_1 と C_2 が分布状態に応じて変化するパラメーターとなる。異なる透明度の肌のモデルを計測したところ、透明度が高いほど上のほうにグラフがシフトし、パラメーター C_2 が小さくなる結果が得られた。パラメーター C_2 はグラフの傾きに相当することから、傾きが緩やかなほどスリットからの距離 r に対する減衰が小さく、透明度が高いということを表している。そこで C_2 の逆数である $1/C_2$ を肌の透明度の指標とした。

図7に、美容技術者の判定した視感による肌の透明感と、

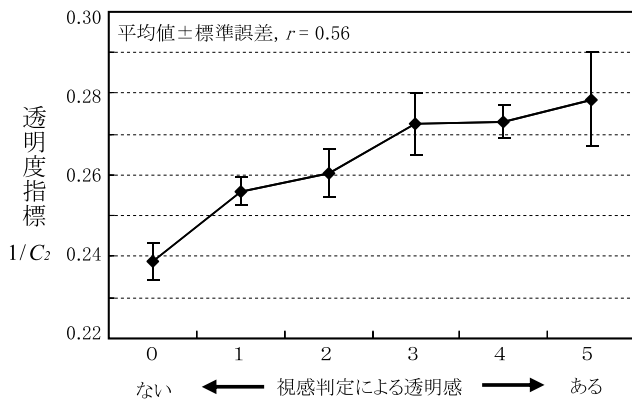


図7 肌の透明度と視感評価の関係。

スリットライトセンサーにて計測した透明度指標 $1/C_2$ との関係について示す。横軸は6段階で評価した透明感のグレードを示しており、縦軸は各グレードの女性被験者(計35名)の頬を計測して肌の透明度を評価した平均値を示している。解析された肌の透明度と透明感は相関係数 $r=0.56$ と高い相関を示しており、肌の内部反射光の状態が透明感に大きな影響を与えていることがわかる。

近年、岩井ら⁶⁾の研究において、皮膚の最外層に位置する角層中のタンパク質が日常生活における紫外線の影響などでカルボニル化されることにより、角層の透明度が低下することが明らかになり、肌の透明感が低下する要因となっていることが示唆されている。頬の角層は厚さ約10 μm 程度と非常に薄い層であり、その光学特性の変化を肌の上で直接とらえるには高精度な計測手法が必要となってくる。スリットライトセンサーによる精密な内部反射光の計測手法はこのような角層の光学特性の変化に伴う透明感の変化を評価するのに適した手法であると考えられる。

本稿では、おもに素肌を対象とした透明感の計測手法について紹介した。透明感の客観的な評価を試みた研究はほかにもいくつか報告されているが、肌の拡散反射光もしくは内部反射光の状態を評価することが本質となっている。松原ら⁷⁾は Tri-Ring Spectrophotometer というドーナツ型円形光源を内蔵した分光測定器を用い、肌内部の光の透過性の評価を行っている。Jiang ら⁸⁾は偏光フィルターとレーザー光源の組み合わせにより拡散反射光の広がり解析し、透明感との関連を報告している。

内部反射光の状態が透明感に影響を与えていることはコンピュータグラフィックス(CG)にも応用されている。Jensen ら^{9,10)}は肌内部からの反射光に相当する微小面散乱を考慮することで肌の透明感を表現した、よりリアルなCGの作成に成功している。顔の偏光画像を解析し、シェー

ディング成分を制御することで透明感を変化させたCGを作成する試みも行われている¹¹⁾。

このような素肌における透明感研究の成果は透明感のあるファンデーションなどメーキャップ製品の開発への応用にも試みられている¹²⁾。しかし、粉体による拡散反射光の増加など、内部反射光だけの測定では評価できない現象もあり、化粧肌における透明感の評価においては必ずしも素肌と同じ手法がそのまま適用できるとは限らないため、注意が必要である。

本稿で紹介したように、肌の透明感の機器による光学的な測定により定量的な評価が可能となりつつある。しかし、光の透過性だけで肌の透明感をすべて説明できているわけではなく、その要因についても未解明な部分が残っている。昨今、肌をターゲットとした光計測技術の発展はめざましく、さまざまな技術が開発されつつある。新たな計測技術の活用により、より包括的な評価手法の開発に向けて、肌の透明感に対するさらなる研究の発展が期待される。

文 献

- 1) 征矢智美, 野村美佳, 林 照次, 長谷川敬: “肌の透明感の意識構造と皮膚生理特性—若年層と中高年層の比較—”, 日本化粧品技術者会誌, **38** (2004) 115-124.
- 2) 舩田勇二, 國澤直美, 高橋元次: “肌の透明感測定とその対応化粧品の有用性評価”, 日本化粧品技術者会誌, **39** (2005) 201-208.
- 3) R. R. Anderson and J. A. Parrish: “The optics of human skin,” *J. Invest. Dermatol.*, **77** (1981) 13-19.
- 4) 小島伸俊, 羽石秀昭, 三宅洋一: “化粧肌の質感推定 (II)”, 日本写真学会誌, **56** (1993) 264-269.
- 5) T. Kuwahara, I. Iwai, Y. Masuda and T. Hirao: “*In vivo* evaluation of optical properties of the stratum corneum,” *Int. J. Cosmet. Sci.*, **31** (2009) 313.
- 6) 岩井一郎, 桑原智裕, 平尾哲二: “角層タンパク質のカルボニル化による肌透明感の低下”, 日本化粧品技術者会誌, **42** (2008) 16-21.
- 7) 松原 晃: “透明感肌の評価”, *Fragrance J.*, **35** (2007) 61-63.
- 8) Z. Jiang and P. D. Kaplan: “Point-spread imaging for measurement of skin translucency and scattering,” *Skin Res. Technol.*, **14** (2008) 293-297.
- 9) H. Jensen, S. Marschner, M. Levoy and P. Hanrahan: “A practical model for subsurface light transport,” *Proc. SIGGRAPH* (2001) 511-518.
- 10) C. Donner and W. Jensen: “A spectral BSSRDF for shading human skin,” *Eurographics Symposium on Rendering* (Cyprus, 2006) pp. 409-417.
- 11) N. Tsumura, R. Usuba, K. Takase, T. Nakaguchi, N. Ojima, N. Komeda and Y. Miyake: “Image-based control of skin translucency,” *Appl. Opt.*, **47** (2008) 6543-6549.
- 12) 高橋秀企, 高田定樹: “光学特性を応用した最近のファンデーション技術”, *Fragrance J.*, **34** (2006) 67-73.

(2010年6月11日受理)