A Simple Method for Assessment of Age-Related Changes in Physical Properties of Facial Dermal Papilla and Fibrous Structures*

Koji Mizukoshi, Kenya Hirayama

** POLA Chemical Industries, Inc.

Most age-related changes that appear on the surface of facial skin are caused by changes within the skin. Therefore, analyzing the internal state of the skin could make it possible to provide evidence-based counseling, which could offer benefits to customers. However, it is difficult to perform simple analyses of the inner condition of the skin, and conventional methods of analysis generally require costly laboratory equipment. Therefore, we used multiple regression analysis to create an estimation formula to calculate the skin's inner structure feature values based on skin surface feature values, which can be easily obtained. As objective variables, we used the number of dermal papillary structures and a score for dermal fibrous structure clearness. As explanatory variables, we used the feature values for sulci cutis and crista cutis characteristics, color characteristics, and frequency characteristics, as calculated from data including skin images. The concordance rate between corresponding before- and after-scores obtained with our novel estimation formula and the actual scores based on measured values for the number of dermal papilla structures was 100% and that for the clearness of dermal fibrous structures was 95%. These results demonstrate that skin surface feature values, which can be obtained using a simple device such as a microscope, can be used to estimate the condition of the inner structures of the skin, including the number of dermal papillary structures and the clearness of dermal fibrous structures.

Key words : dermal papilla, dermal fibrous structure, aging, simple method, estimation formula for skin inner structure, skin's inner structure feature, skin surface feature, multiple regression analysis, facial skin, evidence-based counseling

* Received, October 19, 2016; Accepted, February 24, 2017

** 560, Kashio-cho, Totsuka-ku, Yokohama 244-0812, Japan

顔面の真皮乳頭突起構造および 真皮線維状構造の簡便計測法の開発*

水越興治, 平山賢哉

**ポーラ化成工業株式会社 横浜研究所

顔面皮膚表面に現れる老化状態の多くは皮膚内部状態の変化が原因で表出する。そのため、皮膚内部状態の分析は、エビデンスに基づいたカウンセリングにつながり顧客ベネフィットとなる。一方で、従来の皮膚内部状態の分析は高価な研究用機器の使用が一般的であり、簡便な分析が困難であった。そこでわれわれは、容易に取得できる皮膚表面の特徴量から、皮膚内部構造の特徴量を算出する推定式の作成を重回帰分析で試みた。目的変数として真皮乳頭突起構造の数と線維状構造の鮮明性に対するスコアを用いた。説明変数には皮膚画像などから算出された皮溝皮丘特性、色特性および周波数特性に関する特徴量を用いた。作成した推定式を用いて算出した推定スコアと実測値から得た実測スコアを比較した結果、真皮乳頭突起構造の数については、対応するスコア前後のスコアを含む一致率が100%となった。真皮線維状構造の鮮明性については、対応するスコア前後のスコアを含む一致率が95%となった。以上の結果より、マイクロスコープのような簡便な機器で得られる皮膚表面の特徴量から、真皮乳頭突起構造の数や真皮線維状構造の鮮明性といった皮膚の内部構造の状態が推定できることが示された。

1. 緒 言

視覚的および触感的に認識される加齢に伴うシワ、たるみ、ハリのなさといった形態変化や、くすみといった皮膚色変化などに代表される顔面皮膚の老化変化は、皮膚内部構造の加齢に伴う変化によって引き起こされると考えられる。

コラーゲンやエラスチンからなる真皮線維状構造は、皮膚の粘弾性¹⁾や色²⁾に関係していることが知られており、その加齢変化を知ることは美容上重要である。たとえば、光老化部位ではソーラエラストーシスが生じ³⁾線維束構造が崩壊すること¹⁾、加齢によりコラーゲン分子の直径が変化すること⁴⁾、などが知られている。また、真皮-表皮間の凹凸構造である真皮乳頭突起構造も肌の色や粘弾性に関与することが示されており⁵⁾、加齢に伴い単位面積あたりの数が減少することや、突起構造の高さが低くなり断面積が増加することも示されている⁶⁾。さらに真皮乳頭突起構造は、酸素や二酸化炭素などの代謝に関係する毛細血管と一致して存在するため⁷⁾代謝への寄与が考えられる。したがって、加齢により変化する真皮線維状構造や真皮乳頭突

起構造の状態を計測・分析し、その情報をもとにカウンセリングや適切なスキンケアを行うことは美容や抗老化において重要である。

皮膚の内部構造の計測は、古くは直接的に組織切片を用いるなど侵襲的な検討が主流であったが、近年は非侵襲的に計測する機器が発達し、侵襲計測が容易ではない顔面皮膚の研究にも広く活用されている。これまでに *in vivo* 共焦点レーザー顕微鏡 (CLSM) を始めとして、マルチフォトン顕微鏡⁸⁾や第2高調波発生光 (SHG 光)⁹⁾、光干渉断層像 (OCT)、超音波測定装置などの多様な物理現象を利用し、直接的に皮膚内部構造からのシグナルを得て計測を行う機器が開発されている。このような機器を用いて真皮乳頭突起構造⁶⁾や真皮線維状構造¹⁰⁾の特徴量が定量的に計測され、年齢や皮膚の見た目との関連性も明らかにされてきた。

一方で、これらの機器を用いた計測では、被験者は仰臥位等で安静にする必要があり、データ取得にも一定時間を要するため被験者への負担が大きい。また、計測機器は一般に高価であり、計測結果である画像などから特徴量を数値として導出するための解析処理も必要である。そのため、多くの化粧品ユーザーを対象に日常的に計測・分析に基づいた皮膚内部の老化状態の情報を提供することは困難であり、簡便な皮膚内部の計測法が求められている。

* 2016.10.19 受付, 2017.2.24 採用

** 〒244-0812 横浜市戸塚区柏尾町 560

皮膚内部の状態を簡便に計測するには、皮膚表面に現れている特徴から推定する方法が考えられる。皮膚の内部構造と表面には関係性があることがさまざまな研究から示されており^{1), 2), 5)}、この関係性を用いることで、皮膚表面の情報から皮膚内部構造が推定できると考えられる。すなわち、皮膚表面の物性の特徴量を数値化し多変量解析で数学的に皮膚内部構造との関係性を数式化することで、皮膚内部の構造が推定できると考えられる。

皮膚表面の物性の特徴量化については、近年のビデオマイクロスコープなどの電子デバイスの発達により、皮膚表面画像を容易かつ安価に取得でき、またその画像からPCを用いて簡便に特徴量を抽出することが可能となっている。たとえば画像中の色の特徴に対しては、各種表色系における強度や標準偏差を用いて算出することができる。また、空間周波数解析などにより画像の濃淡や周期性に関する特徴量を計算することができる。色以外においても、小林らが¹¹⁾皮膚表面画像から皮溝皮丘などの構造の状態を100種類程度の特徴量で表現してキメスコアを算出しており、皮膚表面のさまざまな形状に関する特徴量の抽出も可能となっている。

そこで今回、多変量解析を用いた検討により、真皮乳頭突起構造や真皮線維状構造といった皮膚内部構造の特徴量を、ビデオマイクロスコープなどの汎用機器で取得できる皮膚表面の皮溝皮丘や色情報から簡便に推定する方法について検討を行った。

2. 実 験

2.1. 被 験 者

データ・セット1：20代から60代の各世代18名、合計90名の関東在住の日本人女性を被験者とした。

データ・セット2：20代5名、30代4名、40代3名、50代5名、60代5名の合計22名の関東在住の日本人女性を被験者とした。

今回実施したヒトを対象としたすべての試験は、ポーラ化成工業株式会社内の倫理委員会にて審査、承認の上実施した。またすべての被験者のインフォームドコンセントを得た上で実施した。

2.2. 計 測 部 位

本検討では、すべての計測において、頬部分1 cm 四方の内側 (Fig.-1) を計測領域とした。

2.3. 皮 膚 計 測

CLSM (Vivascope1500Plus : Lucid, Henrietta, NY, USA) を用いて皮膚内部を計測した。CLSMで計測される1視野の大きさは一辺が500 μm の正方形である。計測は、皮膚の深さ方向に3 μm 刻みで、真皮層である180 μm の深さ

Fig.-1 Facial measurement sites.

The area in the 1 cm² of the cheek shown in the image was the measurement target.

まで計測した。水平方向には、4視野四方 (2 mm 四方) で計測し、その中から最も毛包構造が少ない連続した2視野四方 (1 mm 四方) を選択して解析対象平面とした。

同一部位に対して、皮膚表面のデジタル画像をビデオマイクロスコープ (i-scope, Moritex, Tokyo, Japan) で30倍のレンズを用いて撮影した。画像サイズは640×480 pixels サイズであり、スケールを用いて実測した1視野の撮影面積は10.15×7.62 mmであった。皮膚色の計測には分光測色計 (CM-2600d : Konicaminolta, Tokyo, Japan) を用いて行い、HVC表色系, Lab表色系の値を算出した。

2.4. CLSMを用いた皮膚内部構造の特徴量の定量化

CLSMで得られた皮膚内部の画像を用い単位面積あたりの真皮乳頭突起構造の個数および、真皮の線維状構造の鮮明性をおのおの特徴量として定量化した。詳細は先行研究^{6), 10)}を参照されたいが、以下簡単に記載する。

真皮の線維構造の鮮明性については、まず定量化を行う解析平面の深さを設定した。CLSMで皮膚の深さ方向に画像を系列的に採取した際に、真皮領域において線維構造がはっきり見えていた状態からさらに深部に向かって計測していくと、線維構造が不鮮明となっていくが、不鮮明となる深さより12 μm 表皮側に戻った平面を解析平面とした。線維構造の鮮明性は、線維構造のはっきり度合いや線の太さ、線間の距離を基準としてスコア化 (Fig.-2a) を行った。設定した解析平面に対し、専門評価者3名でスコア評価を行いその平均値を用いた。小数点以下については四捨五入を行った。

真皮乳頭突起構造の個数の定量化については、Fig.-2b に示す代表的画像を判別規準として、真皮乳頭突起構造の

Fig.-2 a) Score criteria for clearness of dermal fibrous structures. The 1-5 score system was used, with a score of 1 indicating a dermal fibrous structure with a high degree of clearness and 5 indicating a dermal fibrous structure with such minimal clearness that it appeared to have been blocked out. See the previous study¹⁰⁾ for details on scoring. b) Extraction standards for dermal papillary structures. b-1) The standard CLSM images of dermal papillary structures for inclusion. A dermal papilla structure was employed in the analysis if the inner part of a donut-like circular structure had clear contrast compared to surrounding area (white arrow), b-2) The standard CLSM image of a dermal papillary structure for exclusion. A dermal papilla structure was excluded if the contrast of circular structure was less compared to the surrounding area than for b-1 (white arrow head). See the previous study⁶⁾ for details on extraction standards for dermal papillary structures.

抽出を行った。乳頭構造と考えられるリング形状の輝度差が周囲と明瞭なもの (Fig.-2, b-1, 白矢印) を解析対象として抽出した。一方で、その特徴が弱いもの (Fig.-2, b-2, 白矢印頭) は今回の解析対象からは除外した。その後単位計測面積あたりに存在する真皮乳頭突起個数を計測した。

いずれの皮膚内部構造の計測においても、計測領域にシミや開大した毛穴がある被験者およびアトピー性皮膚炎の可能性のある被験者は解析対象から除外した。

2.5. ビデオマイクロスコープ画像を用いた皮膚表面特徴量抽出

ビデオマイクロスコープで取得した画像を用い、皮膚皮丘に関する特徴量および周波数特性に関する特徴量を抽出した。

皮溝皮丘に関する特徴量は、十字二値化-短直線マッチング法¹¹⁾により算出した。本法は、線形状を抽出することに適した十字二値化法により画像を二値化して線形状を抽

出したのち、線形状に対して特定の長さの短直線を当てはめ、当てはめられた短直線の本数や角度、重なりなどから、画像中に存在する皮溝の本数や方向性、太さなどの特徴量を算出する方法である。算出に供した画像および短直線の条件を以下に示す。取得した画像の解像度 (640×480 pixels) は 736×552 pixels (1.15 倍) に変換した。また画像中で使用した短直線の長さは 5 pixels, 太さは 1 pixels とした。

画像の周波数特性については空間周波数を用いた方法^{10), 12)}を用いて算出した。取得した画像の解像度 (640×480 pixels) を 736×552 pixels (1.15 倍) に変換し、1024 pixels 四方の被験者の平均皮膚色をもつレイヤー上に貼り付け、グレースケールに変換した。1024 pixels 四方の画像の一辺の 2 倍である 2048 pixels の大きさの周波数を 1 cycle, 画像の一辺 2048 pixels を 1/1024 にした大きさ (2 pixels) の周波数を 1024 cycle と定義し、1 から 125 cycle にかけての空間周波数の解析を行うことにより cycle ごとの強度を

計算した。

以上の抽出した各特徴量について、対数や乗数、逆数などの算術を加え合計 580 個のパラメータを作成した。

2.6. 皮膚表面特徴量を用いた皮膚内部構造に対する推定式の作成

ビデオマイクロスコープ画像や分光測色計から得られる皮膚表面特徴量を用いて、真皮乳頭突起構造の単位面積あたりの個数および真皮線維状構造の鮮明性を算出する推定式を作成した。検討には JMP Ver.9 (SAS institute, Cary, USA) を用いた。

推定する皮膚内部構造 (目的変数) は、データ・セット 1 の CLSM 画像から算出された真皮乳頭突起構造の個数を対数化した数値、および真皮線維状構造の鮮明性をスコア評価した値^{6), 10)}を用いた。説明変数は、ビデオマイクロスコープ画像や分光測色計から算出された皮膚表面の特徴量に関する計測値および被験者の実年齢を設定し、ステップワイズ法を用いた重回帰分析を行った。説明変数となるパラメータの選別には AIC (Akaike's Information Criterion) 法による変数増減法条件を用いた。

データ・セット 1 を用いて作成した推定式の精度の検証には、データ・セット 2 の皮膚表面の特徴量および皮膚内部構造値を用い、推定値と実測値の一致率を算出した。

3. 結 果

3.1. CLSM を用いた皮膚内部構造の特徴量の定量化とその加齢傾向

CLSM を用いた皮膚内部構造の計測結果を以下に示す。

データ・セット 1 を用いた、加齢に伴う単位面積あたりの真皮乳頭突起構造の個数の変化を検討した結果⁶⁾を Fig.-3a に示す。被験者 90 名中、計測領域にシミや開大した毛穴がある被験者およびアトピー性皮膚炎の可能性がある被験者を除外した 77 名を計測対象とした。単位面積あたりの乳頭突起構造の個数は被験者間で 0~60 個のバリエーションがあり、加齢に伴い減少することが示された。本検討結果から、乳頭突起構造の個数に基づいた 4 段階のスコア値を 77 名の分布がおおむね正規性をとる値となるように score 1 (36 個~), score 2 (11~35 個), score 3 (1~10 個) および score 4 (0 個) を設定した。データ・セット 1 およびデータ・セット 2 のスコアごとの被験者数を Fig.-3b に示す。

データ・セット 1 を用いた、加齢に伴う真皮線維状構造の鮮明性スコア値の変化を検討した結果¹⁰⁾を Fig.-4a に示す。真皮乳頭突起構造の計測対象となった被験者と同一の 77 名を計測対象とした。真皮線維状構造の鮮明性は加齢とともに低下することが示された。またデータ・セット 1

Fig.-3 a) Age-related changes in the number of dermal papillary structures per unit of area using data set 1. b) Scores as classified by the number of dermal papillary structures per unit of area, and the number of subjects falling into each score class for data sets 1 and 2.

The circle depicts a 95% probability ellipse. The correlation coefficient was calculated using Pearson's product-moment correlation coefficient.

とデータ・セット 2 の鮮明性スコアごとの被験者数を Fig.-4b に示す。

3.2. ビデオマイクロスコープ画像および分光測色計を用いた皮膚表面特徴量の定量化とその加齢傾向

データ・セット 1 のビデオマイクロスコープ画像に対して行った十字二値化-短直線マッチング法、空間周波数および分光測色計を用いて抽出した特徴量の値の分布はおおむね正規分布であった (data not shown)。各特徴量と年齢との相関性は、十字二値化-短直線マッチング法を用いた皮膚表面の皮溝皮丘に関する特徴量のうち、解析画像内での皮溝 (短直線) の密度の分散を示す特徴量¹¹⁾のみが相関係数 0.25 ($p < 0.05$) 程度の弱い相関を示した。また、空間周波数の特徴量においても、8 および 10 cycle の強度のみ年齢と 0.25 ($p < 0.05$) 程度の弱い相関性を示した。分光測色計から得られる皮膚については、H (色相) と C (彩度) がそれぞれ 0.6 ($p < 0.01$) と 0.39 ($p < 0.05$) の正の相

Fig.-4 a) Age-related changes in the clearness of dermal fibrous structures for data set 1. b) The number of subjects falling into each score class for data sets 1 and 2. The circle depicts a 95% probability ellipse. The correlation coefficient was calculated using Pearson's rank correlation coefficient.

関を, V (明度) が -0.44 ($p < 0.05$) の負の相関性を示した。

3.3. 皮膚表面特徴量を用いた皮膚内部構造に対する推定式の作成

データ・セット 1 より求めた, 単位面積あたりの真皮乳頭突起構造の個数を対数化した値および真皮線維状構造の鮮明性スコア値それぞれを目的変数にし, 皮膚表面画像の特徴量および年齢を説明変数に用いた重回帰分析を行った結果, 説明変数として選定されたパラメータと係数, t 値を Table-1 および Table-2 に示す。また作成された推定式より算出された推定値と実測値のプロットを Fig.-5 および Fig.-6 に示す。

単位面積あたりの真皮乳頭突起構造の個数に対する推定式は, 表に示す 14 個の説明変数から構成され, その自由度調整済決定係数は 0.63 であった。また真皮線維状構造の鮮明性に対する推定式は, 13 個の説明線数から構成され, その自由度調整済決定係数は 0.61 であった。

次にデータ・セット 2 を用い, 作成した単位面積あたりの真皮乳頭突起構造の個数および真皮線維状構造の鮮明性に対する推定式の推定精度の確認を行った。真皮乳頭突起構造の個数の推定精度は, 実測値および推定式で算出される推定値を, 3.1. で記載した score 1 (36 個～), score 2 (11～

35 個), score 3 (1～10 個), score 4 (0 個) の 4 段階のスコア値に変換した値を用いて確認した。結果をおのの Table-3, 4 に示す。スコア化した単位面積あたりの真皮乳頭突起構造の個数については, 推定値と実測値が完全一致する推定精度は 74%, 実測値に対応する推定値のスコア前後のスコアまで許容した場合の推定精度は 100%であった。また真皮線維状構造の鮮明性については, 完全一致の推定精度 50%, 実測値に対応する推定値のスコア前後のスコアまで許容した場合の推定精度は 95%であることが確認された。

4. 考 察

今回われわれは, 簡便な皮膚内部構造状態の分析技術開発を目的として, ビデオマイクロスコープを代表とする皮膚表面計測機器から得られる皮膚表面の特徴量を用い, 皮膚内部構造の特徴量を算出する推定式の確立を重回帰分析を用いて試みた。

重回帰分析による推定式作成では, 目的変数として設定する皮膚内部構造の特徴量が定量的に数値化されていることが必要である。さらに皮膚内部構造の特徴量が, 一般女性が老兆として自覚できる粘弾性や皮膚色といった皮膚の

Table-1 Estimation formula created through multiple regression analysis. Relationship between measured score and the estimation formula (predicted score) results for the number of dermal papillary structures per unit of area.

Equation item	Mean of equation item		Coefficient	t Value
	Analytical method	Mean		
Y-intercept	—	Y-intercept of multiple regression equation	7.42	—
Log ₁₀ age	—	Logarithm of the subject's actual age	-5.07	-5.06
C value of skin color	Spectrophotometer	C value of HCV color plane	1.97	4.4
Value of 72 cycles	Spatial frequency	Value of 72 cycles	-10.92	-4.4
Value of 37 cycles	Spatial frequency	Value of 37 cycles	6.4	3.52
Value of 16 cycles	Spatial frequency	Value of 16 cycles	-3.26	-3.36
Reciprocal of kurtosis for 90°-180°	Short-line segment-matching processing	Reciprocal value of kurtosis. Kurtosis is a histogram shape of numbers of short-line segments for different angles, when a histogram from 90 degrees to 180 degrees is regarded as normal distribution	-21.5	-3.18
V value of skin color	Spectrophotometer	V value of HCV color plane	1.66	2.6
Value of 78 cycles	Spatial frequency	Value of 78 cycles	5.29	2.41
Kurtosis	Short-line segment-matching processing	Kurtosis of a histogram of numbers of short-line segments for different angles, when a histogram from 0 degrees to 180 degrees is regarded as normal distribution	-1.24	-2.35
Square value for modal width position	Short-line segment-matching processing	Square value for width at maximum value in width histogram. Width is defined as short line overlapping number to minor axis direction of short line	0.039	2.27
Reciprocal of kurtosis for 0°-180°	Short-line segment-matching processing	Reciprocal value of kurtosis. Kurtosis is a histogram of numbers of short-line segments for different angles, when a histogram at 0 degrees to 180 degrees is regarded as normal distribution	-0.015	-1.91
Reciprocal of maximum frequency in latter half	Short-line segment-matching processing	Reciprocal value of maximum number in more than 95 degrees in a short-line segment angle histogram	1770.31	1.66
Value of 60 cycles	Spatial frequency	Value of 60 cycles	1.14	0.54
Reciprocal for standard deviation of sulcus cutis density variance	Short-line segment-matching processing	Reciprocal value of standard deviation of sulcus cutis density variance. Sulcus cutis is defined as the ratio of short-line area to the measurement area	13.12	0.47

老化の原因となることが重要である。先行研究の結果から^{5), 6), 10)}, これら条件を満たす皮膚内部構造として、真皮乳頭突起構造および真皮線維状構造を検討対象として選定した。今回の推定式作成では特徴量の中から、真皮乳頭突起構造の存在程度を示す最も基本的な特徴量であると考えられる単位面積あたりの個数を、今回の検討対象として採用した。真皮線維状構造についても、線維束構造が崩壊すること¹⁾やソーラエラストーシスが発生すること¹³⁾が知られており、それらを反映する線維状構造の鮮明性が加齢と

ともに低下することがCLSMを用いた検討で定量的に示されている¹⁰⁾。また、皮膚の老化兆候との関係では、それら変化が皮膚色の変化²⁾や粘弾性¹⁾に関与することが示されている。以上のことから、鮮明性を今回の検討対象として採用した。

目的変数となる皮膚内部構造と同様に、説明変数として設定する皮膚表面の特徴量も定量的な数値データとして確保する必要がある。皮膚表面の特徴量は大きく形状的特徴と色の特徴の2つが考えられ、形状的特徴としては皮溝

Table-2 Estimation formula created through multiple regression analysis. Relationship between measured score and the estimation formula (predicted score) results for the clearness of dermal fibrous structures. The straight line in the figure indicates “measured values = estimated values.”

Equation item	Mean of equation item		Coefficient	t Value
	Analytical method	Mean		
Y-intercept	—	Y-intercept of multiple regression equation	0.5	—
Age ¹⁵	—	The subject's actual age to the 15th power	0.0074	7.47
Modal width position	Short-line segment-matching processing	Width at maximum value in width histogram	-0.55	-3.19
Maximum connectivity number	Short-line segment-matching processing	Maximum connectivity number of short lines	0.42	2.94
Kurtosis for 0° - 90°	Short-line segment-matching processing	Kurtosis is a histogram of numbers of short-line segments for different angles, when a histogram from 0 degrees to 90 degrees is regarded as normal distribution	0.79	2.01
Value of 10 cycles	Spatial frequency	Value of 10 cycles	-2.06	-2
Value of 50 cycles	Spatial frequency	Value of 50 cycles	4.58	1.97
Sulcus cutis width variance	Short-line segment-matching processing	Variance (variation) of sulcus cutis widths	-0.25	-1.57
Max value of sulcus cutis density	Short-line segment-matching processing	Max value of sulcus cutis densities. Sulcus cutis is defined as the ratio of short-line area to the measurement area	-0.35	-1.3
Cube for width mode	Short-line segment-matching processing	Cube value for maximum value in width histogram	-4.28E-09	-1.21
Value of 35 cycles	Spatial frequency	Value of 35 cycles	-2.35	-1.09
Value of 44 cycles	Spatial frequency	Value of 44 cycles	3.27	1.09
Value of 1 cycle	Spatial frequency	Value of 1 cycle	0.65	1.07
Value of 43 cycles	Spatial frequency	Value of 43 cycles	-2.23	-0.8

皮丘構造があげられる。従来、皮溝皮丘構造の定量化は、スコア化¹⁴⁾や粗さパラメータによる解析¹⁵⁾が主流であった。一方、皮溝皮丘は高次構造をもち、皮膚内部の構造変化の状態を反映することが知られていることから¹⁶⁾、皮膚内部構造の推定にはより詳細な特徴量化が必要である。そこでわれわれは、当てはめる短直線の本数、短直線のつながりおよび角度で、さまざまなスケールの構造を数値化できる十字二値化-短直線マッチング法¹¹⁾を用いて詳細な皮溝皮丘構造の抽出を行った。一方、皮膚表面の色に関する特徴には、毛穴に代表される凹凸構造による陰影や皮膚色のムラなどが存在する。そのような画像のうねりとして示される皮膚の皮膚表面の特徴を抽出するために、空間周波数解析を用いた特徴量抽出を行った。さらに皮膚色に関する特徴量については、分光測色計から得られるスペクトルを元に Lab 値や HVC 値を算出した。

次に各特徴量を用いて皮膚内部構造を推定する式の作成を試みた。多変量解析にはさまざまな方法があるが、今回の推定式作成では量的な説明変数を用いて量的な目的変数の予測を行うために重回帰分析を行った。重回帰分析においては、一般的に説明変数の数を増やすことで推定式作成に用いた計測データとの適合性を高めることができるが、過剰適合を起こしやすくなる。このため重回帰式作成時はパラメータ数を抑える必要があり、今回は AIC (Akaike's Information Criterion) 法を用いて検討を行い¹⁷⁾、AIC 値が最小となるモデルに必要な説明変数を選択した。

真皮乳頭突起構造の単位面積あたりの個数に対する重回帰式 (推定式) を作成した結果、14 個の説明変数から構成され (Table-1)、自由度調整済決定係数は 0.63 であった。一般に決定係数は 0.5 以上で、回帰式の当てはまりがよいとされており、実際作成された推定式より算出された

Fig.-5 Estimation formula created through multiple regression analysis.

Results of multiple regression analysis for the number of dermal papillary structures per unit of area. The straight line in the figure indicates “measured values = estimated values.” The dotted line indicates the 95% confidence interval (upper and lower limits). The chain line indicates the average measured values.

Fig.-6 Estimation formula created through multiple regression analysis.

Results of multiple regression analysis for the clearness of dermal fibrous structures. The straight line in the figure indicates “measured values = estimated values.” The dotted line indicates the 95% confidence interval (upper and lower limits). The chain line indicates the average measured values.

Table-3 Verification of the accuracy of the estimation formula created using multiple regression analysis with new data (data set 2).

		Score of number of dermal papillary structures				
		Actual score value				
		4	3	2	1	Sum
Estimated score value	4	1				1
	3	1	3	3		7
	2		2	12		14
	1				-	0
Sum		2	5	15	0	22

Accuracy of the estimation formula for the number of dermal papillary structures per unit of area.

Table-4 Verification of the accuracy of the estimation formula created using multiple regression analysis with new data (data set 2).

		Score of the dermal fibrous structure clearness					
		Actual score value					
		5	4	3	2	1	Sum
Estimated score value	5	3					3
	4	3	2				5
	3		1	2	2	1	6
	2				2	2	4
	1				2	2	4
Sum		6	3	2	6	5	22

Accuracy of the estimation formula for the clearness of dermal fibrous structures.

推定値と実測値のプロット (Fig.-5) もよい対応を示していることから、作成した推定式の当てはまりは良好といえる。選択された説明変数のうち、最も t 値が大きい変数としては年齢に関する値であった。皮膚の計測値としては、皮膚色である C 値や V 値が選択され、また複数の周波数成分の特徴量が選択された。先行研究から⁵⁾、乳頭突起構造の光の拡散性や皮膚色ムラへの寄与が示されており、この関係性から補色の関係性を示す特徴を持つ Lab 表色系ではなく、明るさや彩度といった特徴を示す HVC 表色系の特徴量や周波数成分が説明変数として選択されていると

推察できる。また説明変数としては短直線マッチング法のパラメータも選択された。真皮乳頭突起構造は角層の座屈曲の出現しやすさと関係することが示されており¹⁸⁾、これは皮溝皮丘として現れると考えられることから、短直線マッチング法の特徴量はこの関係を反映して選択されたと推察できる。

真皮線維状構造の鮮明性に対して作成した推定式においては、13 個の説明線数から構成され (Table-2)、その自由度調整済決定係数は 0.61 であった。また実際作成された推定式より算出された推定値と実測値のプロット (Fig-6) もよい対応を示していることから、本推定式も当てはまりが比較的高いといえる。選択された説明変数のうち、最も t 値が大きい変数としては年齢に関する値であった。皮膚の計測値としては、短直線マッチング法に関する特徴量が選択され、次に周波数成分に関する特徴量が選択された。短直線マッチング法の成分については、皮膚内部の線維構造の状態は皮溝皮丘と関係していることが考察されており¹⁹⁾、今回の結果もそれを反映して選択されていると推察できる。また、真皮線維マトリックス構造は光の拡散に重要であることが示されており²⁰⁾、この関係性から周波数成分も説明変数として選択されていると推察できる。

今回いずれの推定式の説明変数においても、最も t 値が大きい変数は年齢に関する値であった。一方で、年齢のみで真皮乳頭突起構造の単位面積あたりの個数や真皮線維状構造の鮮明性について回帰式を作成した場合、自由度調整済決定係数はおおよそ 0.1 と 0.4 程度であった (data not shown)。したがって年齢のみでは、作成した推定式より当てはまりが低く、皮膚計測値が皮膚内部構造の推定には必須であると考えられる。また 2 つの推定式間で選択された説明変数において、特に分光測色機の値の有無で違いが生じた。より皮表表層に近い真皮乳頭突起構造の方が光の拡散性に寄与しているからであると考察できる。

重回帰分析によって得られた真皮乳頭突起構造の単位面積あたりの個数および真皮線維状構造の鮮明性の推定式に対して、精度の確認を行った。この精度の確認においては、実際の顧客への情報提供では分析結果の良し悪しをスコアで提示すること、また真皮線維状構造の鮮明性がスコア形式であることから、真皮乳頭突起構造の個数も Fig-3b に示す 4 段階のスコア値に変換して検討を行った。その結果、データ・セット 2 に実測値スコア 1 の被験者が含まなかったものの、真皮乳頭突起構造の個数については推定式で算出した数値と実測値間の完全一致率が 74% であり、対応するスコアの前後のスコアを含んだ場合の一致率は 100% であった (Table-3)。また、真皮線維状構造の鮮明性に対しては、完全一致率が 50% であり、対応するス

コアの前後のスコアを含んだ場合の一致率は 95% であった (Table-4)。以上の結果より、ビデオマクロ스코プをはじめとして得られる皮膚表面の特徴量から、真皮乳頭突起構造の個数や真皮線維状構造の鮮明性といった皮膚の内部構造の状態が正確に推定できることが示された。

本研究では、単位面積あたりの真皮乳頭突起構造の個数に対する推定式作成を行ったが、真皮乳頭突起構造については、高さや断面積についても計測しており⁶⁾、また皮膚表面物性との関連も推察できることから、これらに特徴量に対する推定式の構築も可能であると考えている。また真皮線維状構造についても、今回示した鮮明性と同様に線維状構造の方向性についても計測しており、皮膚表面の皮溝皮丘の流れなどに関連している可能性が考えられることから、鮮明性と同様に推定式の作成は可能であると考えている。また今回の検討では、皮膚色を分光測色計から求めているが、ビデオマクロ스코プ画像を用いても色情報を得ることは可能であり、ビデオマクロ스코プ画像のみから皮膚内部構造を推定することができると考えられる。

5. 結 論

本研究で、従来は専用の比較的高価な非侵襲計測機を用い、計測から数値導出までの解析処理が複雑である手順をふむことでしか分析することができなかった皮膚の内部構造状態を、簡便かつ安価なデバイスにより、皮膚表面の特徴量から推定できることを示した。今後もデバイステクノロジーの進歩により、汎用的に得られる顧客の顔や皮膚の情報は増加していくと考えられる。今回示したような特徴量の数理的解析や現在発展している深層学習のような手法を取り入れることで、研究所などの専門機関でなければ提供できなかった顔や皮膚の情報を、多くの化粧品ユーザーに届けることが可能になると考えられる。

引用文献

- 1) Y. Nishimori, C. Edwards, A. Pearse, K. Matsumoto, M. Kawai, R. Marks, J. Invest. Dermatol., 117, 1458-1463 (2001)
- 2) Y. Nishimori, A. D. Pearse, C. Edwards, R. Marks, Skin Res. Technol., 4, 79-82 (1998)
- 3) E. C. Naylor, R. E. Watson, M. J. Sherratt, Maturitas, 69, 249-256 (2011)
- 4) M. C. Branchet, S. Boissic, C. Frances, C. Lesty, L. Robert, Archiv. Gerontol. Geriatr., 13, 1-14 (1991)
- 5) K. Mizukoshi, T. Nakamura, A. Oba, Skin Res. Technol., 22, 295-304 (2016)
- 6) K. Mizukoshi, K. Yonekura, M. Futagawa, T. Nakamura, K. Hirayama, K. Takahashi, Skin Res. Technol., 21, 224-231

- (2015)
- 7) K. A. Pasyk, S. V. Thomas, C. A. Hassett, G. W. Cherry, R. Faller, *Plast. Reconstr. Surg.*, 83, 939-945 (1989)
 - 8) T. H. Tsai, S. H. Jee, C. Y. Dong, S. J. Lin, *J. Dermatol. Sci.*, 56, 1-8 (2009)
 - 9) 平尾哲二, 江川麻里子, 山下豊信, *表面科学*, 35, 17-22 (2014)
 - 10) K. Mizukoshi, K. Hirayama, *Skin Res. Technol.*, 23, 312-320 (2017)
 - 11) 小林 宏, 橋本卓弥, 山崎和広, 平井義和, *日本機械学会論文集 C 編*, 76, 922-929 (2010)
 - 12) S. Inoue, K. Hirayama, K. Yamazaki, *Tech. Rep. IEICE*, 100, 15-22 (2001)
 - 13) V. Werth, X. Shi, E. Kalathil, C. Jaworsky, *Photochem. Photobiol.*, 63, 308-313 (1996)
 - 14) 木村知史, 山本美恵子, 堀野政章, 金田泰雄, *粧技誌*, 25, 87-109 (1991)
 - 15) 林 照次, 三村邦雄, 西島 靖, *粧技誌*, 23, 43-54 (1989)
 - 16) 今山修平, *日本美容皮膚科学会雑誌*, 13, 138-145 (2003)
 - 17) 坂元慶行, 石黒真木夫, 北川源四郎, *情報量統計学*, 共立出版, 1983
 - 18) 桑水流理, サウトン・ジャリヤポーン, 吉川暢宏, *生産研究*, 59, 124-127 (2007)
 - 19) 今山修平, *皮膚科診療最前線シリーズ スキンケア最前線*, 宮地良樹編, メディカルレビュー社, 2008, p. 120-123
 - 20) H. Kim, J. Baek, J. Eo, K. Choi, M. Shin, J. Koh, *Skin Res. Technol.*, 21, 41-46 (2015)