

皮膚組織多層構造モデリングと光伝搬シミュレーション

1. はじめに

光計測技術は医療・生体分野へ幅広く応用されているが、光の組織侵達長が皮下組織と合致することから、とくに皮膚科学分野で近年発展が著しい。ここで重要なことは、光が皮膚組織内をどのように伝搬するかである。筆者らは、組織学的知見に基づく独自の多層構造皮膚モデルを提案し、皮膚光伝搬を実用レベルの精度で計算するモンテカルロシミュレーション (MCS) 法を開発したので紹介する⁽¹⁾⁽²⁾。

2. 光伝搬モンテカルロ法

従来の皮膚モデルは、表皮、真皮、皮下組織の3層が一般的であり、皮膚の多様な生理学的・組織学的変化を表現できていない。図1に皮膚組織模式図と提案した多層構造皮膚モデルを示す。光伝搬特性の差異に基づき9層構造に設定した点、各層に適切な光学・幾何パラメータ値を見出した点に新規性がある。

皮膚最表面に厚さ10 μ m程度の角層があり、その下の顆粒層・有棘層と基底層が厚さ100 μ m程度以下の表皮層を形成する。この下には乳頭層、乳頭下層、上部毛細血管網層、網状層、下部毛細血管網層が続き、厚さ1.5mm程度の真皮層を形成する。真皮層の下に皮下組織が厚さ数mmのオーダーで広がっている。

図2のMCSでは皮膚に重み1の光子を順次入射させ、衝突ごとに軌跡(ステップごとの伝搬長さ l 、散乱角 θ 、方位角 ψ で定義)を乱数計算する。各層で散乱の度合いを与える散乱係数 μ_s 、吸収の強さを与える吸収係数 μ_a 、散乱強度の方位分布を特徴づける非等方性散乱パラメータ g 、媒質の屈折率 n 、層の厚み t の五つのパラメータに数値設定し光伝搬を規定する⁽³⁾。メラニン・ヘモグロビン色素濃度は吸収係数に、組織構造は散乱係数に反映される。光子の重みは衝突時に吸収を受け図中の重み w で残存量が計算される。最表面に戻る光子や一定層を通過する光子の積算重みを全入射光子重みで割り、反射率や透過率が求められる。

3. 計算例

ヒト皮膚分光反射率の計算例を図3に示す。実線は成人男性被験者の上腕外側部で分光光度計から得た実測値であり、プロットがフィッティングを試みたMCSの結果である。良好な一致が見られる。CIELAB色空間での実測とシミュレーション結果の色差 ΔE は、D₆₅光源使用、2°視野観察条件で0.59と、色味では人間が識別できない高い精度を示している。

図4は光が皮膚組織入射後に侵達

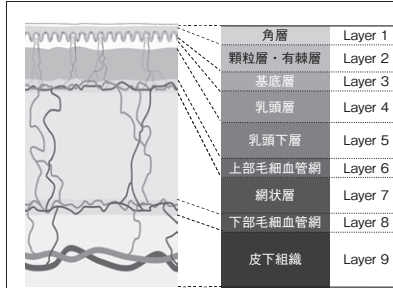


図1 皮膚模式図と多層構造皮膚モデル

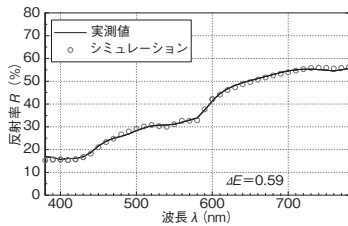


図3 分光反射率のシミュレーション

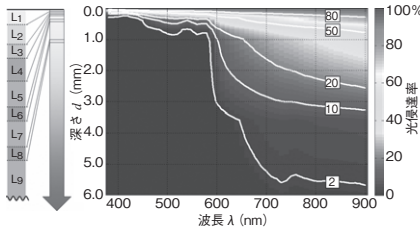


図4 皮膚内光侵達のシミュレーション

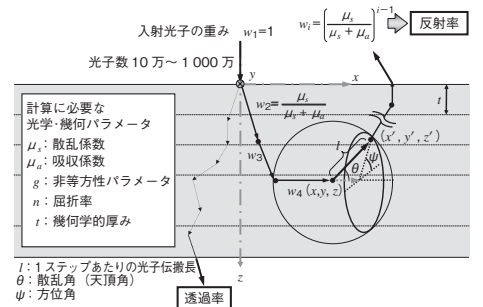
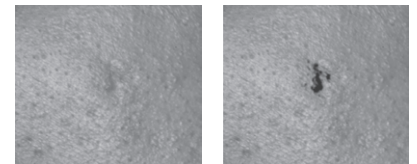
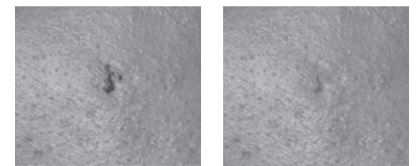


図2 皮膚光伝搬モンテカルロシミュレーション



(a) 元画像 (b) メラニン強調



(c) ヘモグロビン強調 (d) 散乱強調

図5 皮膚画像の局所的色彩制御

する深さ(縦軸)における残存エネルギー(グレースケール)を侵達率として定義し、スペクトル表示した例である。波長ごとの光の侵達深さと、そのときの残存エネルギーが定量的に把握できるようになった。

図3の実測値に近似するスペクトルを生成した際のパラメータセットを被験者固有の基本皮膚条件(初期値)とし、メラニン・ヘモグロビン濃度、散乱の度合い等を増減させれば、被験者ごとにさまざまな条件での分光反射率を生成でき、表色が可能となる。図5は、元画像(a)内中央部の変性部位を抽出し、その実測スペクトルに本手法を適用して、メラニン濃度(b)、ヘモグロビン濃度(c)、散乱(d)をそれぞれ強調した場合の皮膚色を求め、画像を再構成した例である。物理モデルに基づく光伝搬計算から得た画像であり、単なる画像処理とは全く異なる点が重要である。

4. おわりに

紹介した技術は、実際の症例に即した皮膚内色素濃度や組織構造分布を設定でき精度の高い光伝搬計算と色再現を行える点で有用であり、すでに真皮

病変所見との比較も成果を上げている⁽⁴⁾。色彩を制御した画像再構成は化粧品開発においても活用され、レーザー血流計や生体埋め込み電極の光エネルギー供給等でも光侵達解析が進んでいる。皮膚科学分野での今後の展開が期待される。

謝辞

本稿で紹介した技術は(株)資生堂スキンケア研究開発センターとの共同研究の成果であり、ここに深く謝意を表す。

(原稿受付 2011年2月21日)
[相津佳永 室蘭工業大学]

●文献

- (1) 相津佳永, 多層構造皮膚モデルに基づく分光反射率のシミュレーション, 光技術コンタクト, 47-1 (2009), 5-13.
- (2) Maeda, T., Arakawa, N., Takahashi, M. and Aizu, Y., Monte Carlo Simulation of Spectral Reflectance Using a Multilayered Skin Tissue Model, *Optical Review*, 17-3 (2010), 223-229.
- (3) Wang, L., Jacques, S.L. and Zheng, L.Q. MCML-Monte Carlo Modeling of Photon Transport in Multi-layered Tissues, *Comput. Methods Programs Biomed.*, 47-2 (1995), 131-146.
- (4) 宇谷厚志・相津佳永, 真皮の病変, *Visual Dermatology*, 9-4 (2010), 388-394.