空間分解反射光計測に基づく皮膚のふく射物性の推定

Estimation of Radiative Properties for Human Skin by Reflection Profile Measurement

○ 正 山田 純 (芝浦工大), 安 炳弘 (芝浦工大), 有田 悠一 (芝浦工大), 三浦 由将 (資生堂)
高田 定樹 (資生堂)

Jun Yamada*, Akihiro An*, Yuichi Arita*, Yoshimasa Miura**, Sadaki Takata**

*Shibaura Institute of Technology, Toyosu 3-7-5, Koto-ku, Tokyo

**Shiseido Co., Ltd, Hayabuchi 2, Tsuzuki, Yokohama

An inverse method for estimating radiative properties of scattering and absorbing media has been developed. This method allows us to estimate radiative properties of human skin in vivo in wide range of wavelength. In this method, a target planar medium is non-uniformly irradiated by radiation that has passed multi-slits, and the intensity profile of radiation reflected by the medium is measured. The radiative properties, such as extinction coefficient and albedo are estimated by an inverse analysis based on the intensity profile of radiation. We applied the present method for human skin, and estimated the extinction coefficient and albedo of the skin in the visible range of wavelength.

Key Words: Radiative Properties, Skin, Spectroscopy, Scattering, Albedo

1. 緒言

人の皮膚内部のふく射伝播に関する研究は、皮膚ガンやシミの診断、そのレーザー治療に向けて、現在、精力的に取り組まれている。また、このような医療目的だけでなく、肌を美しく見せるための化粧品開発においても、その制御対象となる肌のふく射伝播についての研究が進められている。

人の皮膚は、主にケラチンからなる表面の角質層 (10 - 15 μm)、その下の表皮層 (100 - 300 μm)、さらにその下の比較的厚い真皮層 (600 - 2000 μm) からなる。外から皮膚に達したふく射は、その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。内部に浸透したふく射には、細胞内組織や細胞界面によって散乱され、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。このような皮膚のふく射伝播は、皮膚を散乱・吸収性をもつ連続媒体と考え、次のふく射輸送方程式により取扱われることが多い。

$$\frac{1}{\beta} \frac{dI(s, \Omega)}{ds} = -I(s, \Omega) + \frac{\omega}{4\pi} \oint_{4\pi} p(\Omega' \rightarrow \Omega) I(s, \Omega') d\Omega \quad (1)$$

ここで Ω はふく射の進行方向を表す単位ベクトル、 s はその方向の距離である。この輸送方程式には、減衰係数 β 、アルベド ω 、位相関数 p といったふく射物性が現れるが、皮膚におけるふく射伝播の把握には、これらの値を知ることが不可欠である。しかし、これまでに報告されている物性値は、計測に利用したレーザー波長に限られていたり、生体から採取した皮膚組織について計測したものが多く、非侵襲で、かつ、広い波長範囲にわたるデータはほとんど報告されていない。また、これら皮膚のふく射物性値は、人種、部位、状態によっても変わるので、広く利用できるデータの蓄積には、簡便な計測手法が必要である。

筆者らは、これまで極単パルスレーザーを用いた時間分解反射光計測に基づくふく射物性値の推定法を提案、その妥当性をレーザー波長の 800 nm において検証してきた。現在、計測波長範囲を赤外線、可視光、紫外線にまで広げるべく研究が進められているが、広い波長範囲で安定した極短パルスを得るには至っていない。本研究では、それらを補う新たなふく射物性推定法として、スリット列を通過したふく射を、対象となる皮膚に照射し、その際得られる反射光の空間分布を基礎データとする推定法を提案する。さらに、本手法により得られた、人の皮膚の可視光域における減衰係数、アルベド

の値を示す。

2. ふく射物性値推定法および解析モデル

本推定法では、スリット列を通過したふく射 (光) を皮膚に照射し、その反射光の空間分布を基礎データとして、逆解析により皮膚のふく射物性値を推定する。逆解析に必要なモデルは、前報⁽¹⁾に準じる。ここでは、皮膚は無限平行平板としてモデル化される。特に薄い部分を除き、皮膚の光学厚さは厚く、皮膚背面の生体組織は、あまり皮膚内のふく射伝播に関与しない。このことから、皮膚の光学厚さ τ を十分に大きい 20 と仮定し、背面の境界条件を黒体面とした。また、皮膚表面は平滑で、かつ、そこでのふく射は、フレネル則に従い (皮膚の屈折率 n を 1.5 と仮定) 反射、透過すると仮定した。

解析では、平行な縞状の光束を皮膚表面に入射させ、その際得られる反射光の空間分布を、ふく射物性値をパラメータとして求める。これらを実験結果と比較し、両者が一致するように物性値を同定する。ここでは、求めるべき物性値を、減衰係数とアルベドの二つとする。散乱位相関数については、線形非等方散乱位相関数

$$p(\Omega' \rightarrow \Omega) = 1 + a(\Omega' \cdot \Omega) \quad (2)$$

を用い、その非対称因子 a の値には、0.9 を採用した。この位相関数および値は、解析の簡便さ、さらには、皮膚が強い前方散乱を示すという知見に基づき採用した。なお、解析には、Monte Carlo 法を利用している。

図 1 に周期 2 mm (照射部 1 mm, 非照射部 1 mm) で縞状の光束を入射させた際に得られる、反射光強度の空間分布 (縞に垂直な方向) を示す。30°入射、垂直反射の強度である。パラメータは、減衰係数とアルベドである。図から分かるように、反射光の強度分布には、入射光の強度分布を反映した強弱が見られる。反射光の振幅の大きさは、減衰係数とアルベドの両者に依存するが、その平均的な強度が、主にアルベドに依存することが分かる。このことは、まず、平均強度からアルベドを決定し、そのアルベドの値を既知として、振幅の大きさから減衰係数が容易に推定できることを示している。

3. 測定装置および測定結果

図 2 に本推定に利用する実験装置を示す。縞状の入射光束を得るために、スリット列マスクを利用する。マスク背面をハロゲンランプで照射し、そのスリット列を通過した光を、

カメラレンズにより、対象となる皮膚表面に結像させ、縞状（水平方向）の入射光束を得ている。縞に垂直な方向の反射光の空間分布が、分光用の回折格子を通した後、冷却 CCD カメラにより記録される。本計測では、先に示した解析と同様、光束を 30° で入射させ、垂直方向に反射される光を計測した。測定結果を図 3 に示す。この反射光の強度分布は、光照射部に入射する光の強度により標準化されている。パラメータは波長で、460 - 699 nm の波長範囲を約 10 nm 毎に示した。被験者は 22 歳の日本人男性で、前腕内側の部位を対象とした。測定結果には、解析結果と同様、周期的な強度分布が観察される。

4. 減衰係数およびアルベドの推定結果

測定結果を基に、先に述べた逆解析により求めた減衰係数、および、アルベドの結果を表 1 に示す。解析結果に見られるように、散乱性の強い（アルベドが大きい）媒体では、わずかなアルベドの違いが、反射光の平均強度に大きく影響する。このことは、アルベドが精度良く推定できることを示している。表では、アルベドの値を小数点 3 桁まで示した。

5. まとめ

空間的に一様でない縞状の光束を入射させ、その際、得られる反射光強度の空間分布を基礎データとする、皮膚のふく射物性値推定法を提案、実際に、人の皮膚のふく射物性値（減衰係数とアルベド）を、可視光の広い波長範囲で計測した。

今回提案した推定法は、単一スリットを通した光を照射し、その際観察される反射光の空間的な広がりを基礎データとする逆解析でも行える。本手法は、それを複数回繰り返し、平均を取ることを、一度の計測、逆解析で行えるというメリットがある。さらに、紙面の都合で詳しくは触れていないが、逆解析手続きを大幅に低減している。

なお、今回採用した散乱位相関数は、皮膚のふく射伝播を扱う分野では一般的とは言えない。よく利用される Henyey-Greenstein 位相関数の採用を検討する必要がある。

謝辞 本研究経費は、芝浦工業大学プロジェクト研究助成、および、科学研究費補助金「基盤研究(A)、17206019」によった。

参考文献

(1) 山田・他 4 名, 25 回日本熱物性シンポジウム講演論文集, (2005)198

Fig.1 Relative intensity of reflected radiation(Numerical)

Fig.2 Experimental apparatus

Fig.3 Relative intensity of reflected radiation(Experiment)

Table.1 Estimated result

wavelength[nm]	β [mm ⁻¹]	ω
460	6.1	0.961
470	6.4	0.964
480	6.3	0.969
489	6.0	0.969
501	6.0	0.972
510	5.8	0.970
520	5.6	0.969
530	5.6	0.968
540	5.7	0.970
549	5.5	0.972
561	5.4	0.972
570	5.4	0.973
580	5.2	0.977
590	5.2	0.983
599	5.0	0.986
611	4.9	0.988
620	5.0	0.989
630	4.9	0.991
640	4.9	0.991
649	4.7	0.991
661	4.6	0.991
670	4.5	0.992
680	4.5	0.993
690	4.6	0.993
699	4.4	0.993