

平成 22 年 5 月 21 日現在

研究種目：	基盤研究 (B)
研究期間：	平成 19 年度～平成 21 年度
課題番号：	19360103
研究課題名 (和文)	皮膚におけるふく射 (光) 伝播と微粒子によるその制御
研究課題名 (英文)	Radiation Transfer in Human Skin and its Control by Small Particles
研究代表者	山田 純 芝浦工業大学・工学部・教授
研究者番号：	40210455

研究成果の概要 (和文)：

本研究では、化粧品粒子の開発プロセスの高度化をめざし、「皮膚表面の微粒子が皮膚の光伝播に与える影響」を予測するシミュレータ開発を行っている。また、シミュレーションに要する皮膚の光物性の計測と、シミュレータの総合評価のための反射率計測装置の開発を行った。

研究成果の概要 (英文)：

To sophisticate development process of cosmetic particles, a simulator for predicting the effect of cosmetic particles on radiation transfer in and on human skin was developed. In addition, the radiative properties of the human skin used for the simulator were estimated.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
平成 19 年度	8,000,000	2,400,000	10,400,000
平成 20 年度	5,300,000	1,590,000	6,890,000
平成 21 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
年度			
総計	14,800,000	4,440,000	19,240,000

研究分野：

工学

科研費の分科・細目：

機械工学・熱工学

キーワード：

熱・物質移動, 光物性, ふく射物性, 皮膚光学

1. 研究開始当初の背景

人の皮膚におけるふく射 (光) 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、さらには、光 CT などの生体計測の実現に向けて、現在、さまざまな分野で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、それに匹敵する産業規模をほこる化粧品業界においても、化粧品開発のために、基礎となる皮膚の光性質を明ら

かにしようとする研究が進められている。

化粧品開発に関しては、皮膚を美しく見せるための微粒子の光散乱性質についても研究が進められている。その開発プロセスでは、化粧を施した際の皮膚の見映え (見え方) を、ある程度予測して、粒子開発を行っているが、粒子の光散乱性質と見え方の関係は十分に把握されていない。粒子完成後に実際に化粧

を施し、視感評価を行うという試行錯誤的な開発が未だ続けられているのが現状である。

皮膚は半透明であるため、皮膚に達した光の一部は、皮膚表面で反射されるが、残りは皮膚内部に浸透する。浸透した光は、細胞そのもの、あるいは、その組織により散乱を繰り返しつつ伝播する間に、熱として吸収されてしまうこともあるが、かなりの部分が再び、皮膚表面を通じて、外部に射出される。したがって、皮膚の見え方は、皮膚表面での反射光だけでなく、皮膚内部で散乱されて外に出て来る内部反射光にも依存する。皮膚表面に施される化粧粒子は、その両者に影響を及ぼすことになるので、化粧をした皮膚の見え方を予測するには、化粧粒子の光散乱性質と同時に、皮膚の光性質に関しても、詳細な把握が不可欠である。

2. 研究の目的

本研究では、皮膚をより美しく見える微粒子を開発するために、開発プロセスの高度化を行うことを最終的な目的としている。先にも述べたように、皮膚の見え方は、化粧粒子の光散乱性質だけでなく、それらが施される皮膚の光性質にも依存する。そのため、化粧開発には、これらを統合して取り扱うことが必要である。ここでは、この研究目的を達成するために、粒子デザインの観点から、

1) 「皮膚表面の微粒子が皮膚の光伝播に与える影響」を予測するシミュレータの開発、

- ① 皮膚表面の微粒子の光散乱性質を予測するための電磁波動解析
- ② 皮膚・空気界面での光挙動に与える皮膚のキメ（皮丘、皮溝）の影響に関する実験的検討
- ③ この実験結果に基づく、皮膚・空気界面における光挙動の解析モデルの開発
- ④ ①と③の解析と、皮膚内部の光伝播を予測するモンテカルロ法とのカップリング

2) そのシミュレータに用いられる皮膚光物性の計測手法の確立、および、その装置開発

3) 分光反射率計測装置による本シミュレータの総合評価、を行っている。

3. 研究の方法

(1) 微粒子の光散乱性質

先の目的に述べた、1)-①の皮膚表面の微粒子の光散乱性質を予測するための電磁波動解析については、以下の研究を行った。

皮膚表面に置かれた化粧品粒子の、肌の見え方に与える影響を予測するには、まず、化粧品粒子の光散乱性質を知る必要がある。一般的に化粧粒子は、可視光の波長程度の大きさを有しているため、その光散乱性質の把握には、幾何光学的な取り扱いでは不十分で、電磁波動論的な取り扱いが必要である。

この研究では、任意形状の粒子の光散乱性質を解析できる手法を開発した。この手法は、Maxwell 方程式

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$$

$$\nabla \cdot \mathbf{H} = 0$$

(ただし、 \mathbf{E} は電場、 \mathbf{H} は磁場、永久電荷、電流は無いものとした) を、有限要素法を用いて数値的に解くことのもので、得られた粒子周りの電磁場から、その光散乱性質を導くものである。

さて、上記の解析手法で、粒子単体あるいはそのクラスターの光散乱性質を予測することは出来る。しかし、化粧は、皮膚に施されるため、皮膚表面に付着した際の散乱性質を知る必要がある。これには、粒子の大きさに比較して、無限に広がる皮膚表面を如何にモデル化するかについて検討を要する。本研究では、Bloch の定理を利用した周期境界の導入を試みる。

(2) 皮膚表面の光挙動に与える皮膚のキメの影響

1)-②、③の皮膚のキメがその表面の光挙動に関する研究では、②実験による評価と、それに基づく③解析モデルの構築をおこなっている。

先に述べたように、皮膚による反射は、その表面だけでなく、皮膚内部の散乱によっても引き起こされる。キメ（皮膚表面構造）のみの効果を調べるために、皮膚表面構造を転写した光学プリズム（図1）を作成し、その光散乱性質を実験により調べた。

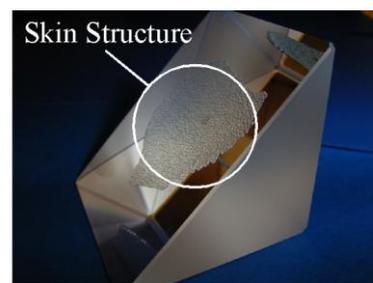


図1 皮膚の微細構造を転写したプリズム

皮膚表面における光反射性質には、以下の2方向反射率を利用した。

$$\rho^r(\theta_r, \phi_r) = \frac{\pi I_r(\theta_r, \phi_r)}{\Delta q_{in}}$$

また、共焦点レーザー顕微鏡を用いて、皮膚の表面構造を詳細に調べ、その反射性質を調べるための解析モデルの構築を行った。図

2に、共焦点レーザー顕微鏡により取得した皮膚表面の構造を示す。この幾何構造は、デジタルデータとして保存されている。

図2に見られように、皮膚表面には、三角の網の目のような比較的大きな溝構造（0.5 mm程度）と、それより小さい微細構造が混在している。ここでは、比較的大きな溝構造を「キメ (skin texture)」, 表面全体に存在する微細構造を、「細かい凹凸 (microstructure)」と呼ぶ。

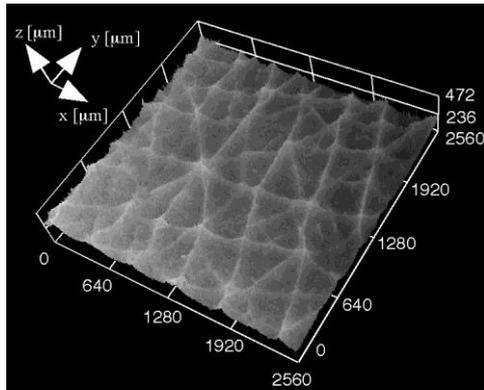


図2 皮膚表面のレーザー顕微鏡画像

この研究では、この構造データをもとに、三つのモデルを考案した。まず、大きな溝構造、すなわち、キメのみを考慮したモデル、細かい凹凸のみを考慮したモデル、さらには、両者を融合したモデルである。それぞれのモデルの詳細を以下に示すが、三者に共通する点は、皮膚表面（皮膚-空気界面）での反射は、皮膚と空気との屈折率差によって生じると仮定する点である。すなわち、表面での反射は、Fresnelの関係式に従うと仮定した。

典型的なキメ構造を基に考案したモデル (Model A) を図3に示す。皮膚の細かな凹凸は無視し、比較的大きい溝 (キメ構造) のみ着目したモデルである。

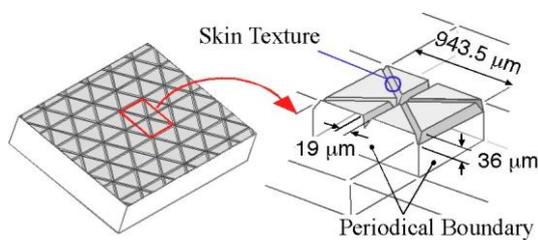


図3 Model A: キメ構造モデル

2番目のモデル (Model B) は、Model Aとは異なり、表面の大きな溝ではなく、細かな凹凸のみ着目している。さらに、Model Aのように現実の構造を皮膚表面上に考えるのではなく、統計的手法で、その表面の微細構造をモデル化している。

皮膚表面での反射は、先に述べた通り、

Fresnelの関係式に従うと仮定した。この場合、光が皮膚表面のある点に達したとき、光がどのように散乱されるかは、その点における表面の傾きで決まる。ここでは、その傾きを統計的に与えることとした。この手法は、上で述べた、実際に構造を与える手法と比較して、簡便だけでなく、光散乱を数値的に調べる際に利用されるモンテカルロ法になじみ易い。

出くわす面の傾き (傾斜) は、共焦点レーザー顕微鏡により取得された構造データを利用した。画像データには $0.125 \mu\text{m}$ ごとに、表面構造の高さデータが与えられている。図4に示すように、隣り合う3点の高さデータから小さな表面要素を作れば、その傾斜角度、天頂角 θ_e 、方位角 ϕ_e を求められる。 $125 \mu\text{m}$ 四方の表面要素について傾斜角度を調べ、傾斜角の確率密度関数 $p(\theta_e, \phi_e)$ を求めた。光の反射方向は、この確率密度関数を利用して導かれる。

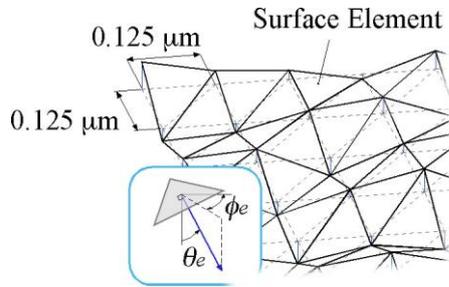


図4 皮膚の表面構造を構成する微少表面要素

最後のモデル Model C は、Model Aの構造の上に、この統計的に扱われる微細構造を当てはめたものである。

この研究では、この三つのモデルに光を入射させ、その際得られる反射光の強度分布を数値解析により求めた。さらに、それ基に、2方向反射率を求め、実験結果と比較することで、皮膚表面における光挙動の詳細を調べている。

(3) 皮膚表面の反射と皮膚内部の光散乱のカップリング

皮膚表面における表面散乱 (反射と透過) と、皮膚内部における光伝播をカップリングさせて、皮膚の反射性質を評価できるかどうかを検証するために、先の Model A と皮膚内部の光伝播をカップリングさせた解析をおこなった。

(4) 皮膚の光 (ふく射) 物性の計測

研究目的で示した2)の項目に関して、ここでは、これまでにない非侵襲の光 (ふく射) 物性推定法を開発した。まず、皮膚の光 (ふく射) 伝播を支配する輸送方程式と、そこに現れる物性について述べる。

皮膚に浸透した光は、先にも述べたように、散乱、吸収を伴いつつ伝播する。このような皮膚のふく射伝播は、次のふく射輸送方程式により取り扱われることが多い。

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

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 、散乱位相関数、 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。

図5に、本ふく射物性推定法の概要を示す。この推定法では、皮膚上で照射部と非照射部が縞状に繰り返されるように、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測定する。もし、皮膚が金属のように不透明であれば、反射光は、照射部分からのみ観察されることになる。一方、皮膚のような半透明の散乱・吸収性媒体では、図に示すように、皮膚内部に浸透した光が、散乱を繰り返しながら、皮膚内を伝播し、その一部が、入射光の照射部だけでなく、非照射部からも射出されることになる。すなわち、反射光は非照射部からも観察されることになる。もし、皮膚の減衰係数が小さければ、光は広がりやすく、非照射部から強い反射光が観察される。また、アルベドが大きければ、皮膚内部で吸収されるふく射のエネルギーが小さくなるので、全体的に（照射部、非照射部ともに）強い反射光が観察されることになる。このことは、反射光の空間分布に、皮膚内部のふく射物性情報が反映されていることを意味している。本研究では、この反射光強度の空間分布のデータをもとに、逆解析を通じて、皮膚のふく射物性値を推定する。

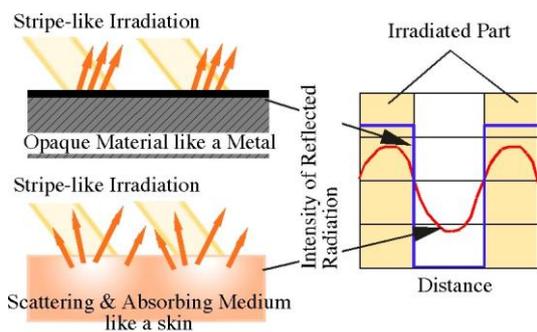


図5 光（ふく射）物性推定法の概要

図6に本計測に利用する実験装置を示す。光源には、ハロゲンランプを利用した。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、周期 l が 2 mm の縞状（水平方向）の入射光束を得ている。

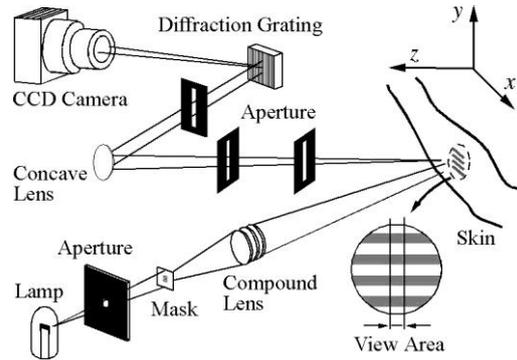


図6 光（ふく射）物性計測装置

(5) シミュレータ評価のための分光反射率計測装置の開発

「皮膚表面の微粒子が皮膚の光伝播に与える影響」を予測するシミュレータの開発を主な目的としている本研究においては、開発されたシミュレータの評価を行うことが必要である。ここでは、その評価のために、分光2方向反射率、分光半球反射率を計測できる装置の開発を行った。

本研究で開発した分光装置の仕様は下記の通りである。

- ・紫外・可視・近赤外域にわたる広い波長域($\lambda=300\sim 1600\text{nm}$)での計測ができる、
- ・2方向反射率、半球反射率の計測ができる、
- ・皮膚のような半透明物質に対応できる装置とする。

4. 研究の成果

(1) 微粒子の光散乱性質

図7に、上方からの電磁波にさらされる球状粒子周りの電磁場(TM mode)を示す。粒子形状は任意に与えることができるので、このコードにより、任意形状の粒子、粒子クラスターの光散乱性質を解析できる。

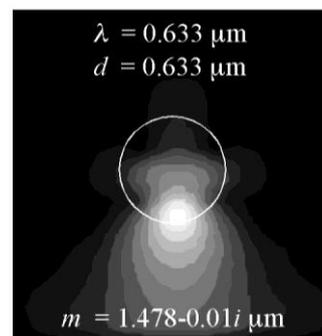


図7 球状粒子によって生じる散乱電場

図8に、皮膚表面に置かれた化粧粒子の散乱性質を予測するための、解析モデルを示す。Blochの定理を導入することで、周期境界条件を取り入れることが可能となった。

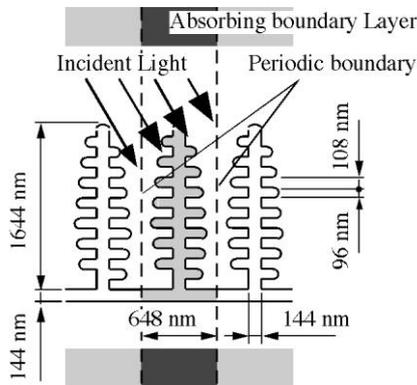


図8 基板に置かれる粒子の散乱電場解析モデル

(2) 皮膚表面の光挙動に与える皮膚のキメの影響

図9に、三つのモデルで予測された2方向反射率と、実験結果を示す。Model A: キメだけを持つ表面(—), Model B: 小さな凹凸だけをもつ表面(—), Model C: キメの上に小さな凹凸をもつ表面(—), また、皮膚の表面構造を転写した光学プリズムに、He-Neレーザー(632.8 nm)を入射させて計測した、異なる場所で測定した結果(■, ●, ▲)を同図に示す。

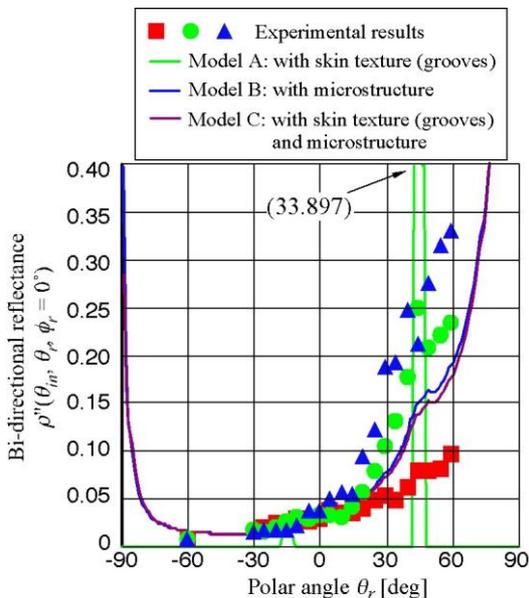


図9 2方向反射率：解析モデルと実験結果の比較

キメをもつ表面の解析については、反射光の強度分布はキメの向きと入射光軸のなす角

に依存する。キメの向きは、実際の皮膚では、ランダムであること(解析モデルでは図2に示すように3方向)を考慮して、入射光に対するキメの向きを全方向にわたって変化させ、その際得られる強度分布の平均値を取って、図に示した。

図9から分かるように、キメだけを持つ表面の反射光強度分布は、実験結果に全く一致しない。これは、実際の皮膚表面に存在する、細かい凹凸を無視したため、規則反射が強く生じたことが原因である。キメだけでは、実際の皮膚の光散乱性質を再現できない。一方、細かい凹凸を考慮すると、比較的实验結果によく一致する。また、キメと、小さな凹凸の両方を考慮した表面の反射光強度分布が、キメのみの場合と、よく一致していることから、細かい凹凸があれば、大きなキメ構造の有無は、光散乱性質に影響しないことが明らかとなった。

(3) 皮膚表面の反射と皮膚内部の光散乱のカップリング

皮膚表面の反射と皮膚の内分散乱を同時に考慮した際、キメ(比較的大きな溝構造)がどのように見えるかをシミュレーションした。これを通じて、皮膚表面の反射と皮膚内部の光散乱のカップリングできることを示した。

(4) 皮膚の光物性の計測

撮影された画像から読み取った反射光の強度分布と解析結果が一致するように、減衰係数、および、アルベドを同定した。

(5) シミュレータ評価のための分光反射率計測装置の開発

反射率を実際に測定する場合、金属などの不透明な物質に関しては、入射光束の大きさ(入射光の照射面)を、受光する検出器の視野より小さくすればよい。しかし、対象が皮膚のような半透明媒質の場合、媒質内を透過して、検出器の視野から出ていく反射光があると、定義通りの反射率が計測できなくなる。そこで、本研究では、十分に広い領域に光を照射し、その中央の小さな領域から反射される光を計測することで、定義通りの反射率を計測することとした。この方針のもと、開発した計測装置の主要部分を以下に示す。

図10は、半球反射率を計測する際に用いる光源ユニットと試料台である。図に示すように、半半球の形状をした放物面ミラーが向かい合わせに配置してある。計測対象の試料は、一方の放物面ミラーの焦点位置にある。試料で反射され、半球状に広がるふく射の半分が、二つの放物面ミラーで反射された後、受光部に集光される。受光部には、図10に示すように、直径10 mmの小さな積分球が設置されており、そこに設けられた直径3 mmの開口で反射ふく射は捉えられる(試料上での測定視野に相当)。積分球の反対側に設けら

れた開口からは、ふく射が等方に放射されるので、その一部を計測する。反射率は、反射率が既知の標準拡散板と、試料の両方の計測値から導かれる。

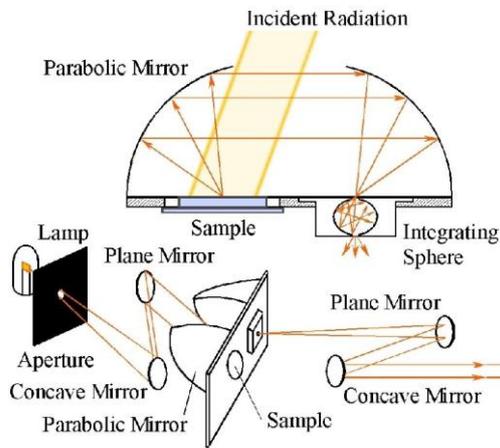


図10 半球反射率測定用試料台

図 11 の試料台から出力される反射ふく射は、独自に開発した分光部へと導かれる。本装置の妥当性は、標準試料等を用いて確認された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 2 件)

①Manon SANGKLINHOM and Jun YAMADA, "A Study on Radiative Transfer in a TiO₂ Photoelectrode for Improvement of Dye-Sensitized Solar Cell Performance" *Journal of Thermal Science and Technology*, 査読有, Vol. 4 (2009) No. 2, pp. 248-259

②山田純, 有田悠一, 安柄弘, 三浦由将, 高田定樹, 空間分解反射光計測に基づく皮膚のふく射物性の推定, *日本機械学会論文集 (B編)* Vol. 74, No. 745, 2008, 査読有, pp. 2034-2039

〔学会発表〕(計 13 件)

①Kazuo Naito, Jun Yamada, and Sadaki Takata, Measurement for Scattering Phase Function of Human Skin in Vitro The 4th South East Asian Technical University Consortium (SEATUC) Symposium, 査読有, 2010, pp.376-379

②内藤一夫, 山田純, 高田定樹, 皮膚の散乱位相関数の計測, 第 30 回日本熱物性シンポジウム講演論文集, 査読無, 2009, pp. 64-66

③吉田拓伸, 山田純, 小川達弥, 川井博和, 高田定樹, 化粧品粒子の付着状態が肌の見え方に与える影響, 日本化粧品技術者会第 65 回 SCCJ 研究討論会, 査読無, 2009, 講演要旨集, pp. 1-2

④J. Yamada, K. Nakamura, M. Kaizuka, K. Kikuchi, S. Takata, "Effect of Skin Texture on Radiative Characteristics of Human Skin" *Proceedings of 7th World Conference on Experimental heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, Krakow, Poland (ExHFT-7)* 2009, 査読有, p. 17, (CD-ROM) BS-1, pp. 227-233

⑤山田純, 永井竜二, 5 節点有限要素を用いた電磁波動解析による薄膜系により放射される熱ふく射, 第 46 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, 2009, 査読無, Vol. 1, pp. 81-82

⑥山田純, 中村嘉恵, 貝塚将樹, 菊池久美子, 高田定樹, 皮膚のふく射性質に影響を及ぼすキメのモデル化, 第 29 回日本熱物性シンポジウム講演論文集, 2008, 査読無, pp. 13-15

⑦山田純, 有田悠一, 安柄弘, 菊池久美子, 三浦由将, 高田定樹, 透きとおる肌とふく射物性, 第 57 回理論応用力学講演会 講演論文集 NCTAM2008, 査読無, pp. 53-56

⑧山田純, 高沢直弘, 安柄弘, 有田悠一, 2008. 3. 14, 2 方向・半球反射率スペクトル測定置日本機械学会 関東支部 第 14 期総会講演会 講演論文集, pp. 167-168

⑨山田純, 永井竜二, ふく射の放射性質予測のための有限要素法による電磁波動解析, 日本機械学会 関東支部 第 14 総会講演会講演論文集, 2008, 査読無, pp. 159-160

⑩山田純, 有田悠一, 安柄弘, 菊池久美子, 高田定樹, 皮膚のふく射性質に与える水分含有量の影響, 第 28 回日本熱物性シンポジウム講演論文集, 2007, 査読無, pp. 58-60

⑪山田純, 中村嘉恵, 山路尚孝, 大野和久, 三浦由将, 高田定樹, 皮膚の見え方に与える表面のキメと内部のふく射性質の影響, 第 44 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, 2007, 査読無, Vol. I, pp. 267-268

〔その他〕(計 4 件)

①山田純, ふく射と化粧, *日本伝熱学会誌「伝熱」* Vol. 48, No. 204, 2009, pp. 53-57

②山田純, 化粧品で肌の見え方はどう変わるの? *日本機械学会熱工学部門ニュースレター*, TED Newsletter No.54, 2008, http://www.jsme.or.jp/ted/NL54/TED-Plaza_yamada.htm

③山田純, 微細構造をもつ表面から放射される熱ふく射の干渉, *日本機械学会誌* 2009. 5 月号 vol. 112, No. 1086, pp. 382-385

④山田純, 伝熱学会誌グラビア, 構造色の代表, モルフォ蝶 (レテノール), *伝熱*, Vol. 47, No. 201, 2008, 表紙裏ページ

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山田 純 (YAMADA JUN)
芝浦工業大学・工学部・教授
研究者番号: 40210455