

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：32619

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289046

研究課題名(和文) メーキャップ化粧品の客観的光機能評価指標とその評価用標準疑似皮膚の開発

研究課題名(英文) Development of a standard artificial skin with optical characteristics of real human skin for performance assessment of makeup cosmetics

研究代表者

山田 純 (JUN, YAMADA)

芝浦工業大学・工学部・教授

研究者番号：40210455

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,400,000円

研究成果の概要(和文)：基礎化粧品であるファンデーションは、肌全体を美しくみせるベースメイクにおいて主要な役割を担っている。本研究では、これまで視感に頼っていたファンデーションの機能評価を、客観的に評価するための物理的指標の確立を目的とした。研究期間内に、皮膚の光物性2次元分布を計測するための装置開発、および、その検証を行った。また、ファンデーションの機能評価試験のために、200人あまりの被験者を対象に、皮膚を一樣と見なし、光物性計測を行い、その計測結果に近い光物性をもつ標準疑似皮膚を開発した。さらに、評価手法の開発のために、ファンデーション層の反射および透過特性を詳細に把握するための装置開発を行った。

研究成果の概要(英文)：Foundation, which is one of the basic cosmetics, plays an important role in making skin up. The purpose of this study is to set assessment standards in evaluating foundation performances, which has been made by visual assessment so far. In this study, we have developed a system for measuring 2-dimensional optical properties distribution of human skin and we verified the usefulness of the system. In addition, assuming human skin has uniform optical properties, we have measured optical properties of skin for over 200 people. Based on the measured results, an artificial skin with optical properties of real human skin has fabricated. Furthermore, to develop an assessment method, we developed a measurement instrument for understanding optical characteristics of foundation layer, such as reflection and/or transmission characteristics.

研究分野：熱工学

キーワード：化粧 ふく射物性 光物性 皮膚 光散乱 逆解析 標準化

1. 研究開始当初の背景

日本における化粧品市場規模は約 2 兆円と大きく、今後も、東南アジアをはじめとして、全世界への拡大が期待されることから、新規に参入してくる異業種の大企業もあるほど、魅力的な市場である。

この大きく、かつ、成長が期待される市場のおかげで、日本には多数の化粧品メーカーが存在する。また、それらの情報交換を目的とした、いくつかの学会も存在する。その一つに化粧品技術者会があり、国際組織 IFSCC (The International Federation of Societies of Cosmetic Chemists) の主要構成学会の一つとなっている。日本における化粧品関係の研究成果は IFSCC の誌上に発表されることも多い。そこに投稿される技術論文の数を見ても、半数近くが日本からのもので、日本の研究レベルの高さを知ることができる。この掲載数の多さは、ひとえに、伝統工芸にも見られるような、日本人の美や技能に対するこだわりがなせるものである。今後も、世界をリードしていくためには、日本のこの分野における基盤技術をより強固なものにしていく必要がある。

研究代表者は、これまで化粧品開発に資する基礎研究として、皮膚の光物性計測、皮膚表面、内部での光の挙動、さらには、化粧品粒子の散乱性質について研究を進めてきた。その中で、この分野特有の課題として、化粧品の光学的機能の評価手法がきわめて曖昧であることを知った。最終評価の多くが、未だに、人に施した際の視感に頼っているという点である。具体的には、評価結果が、被験者、評価者ごとに異なること、そして、もう一つは、評価すべきが「美しさ」、「透明感」、「つや」といった曖昧なものであることである。このせいで、自社開発した製品でさえ、適切な機能評価ができておらず、結果として、機能実現に向けて培った技術が蓄積されることなく、風化してしまっていた。視感に頼らず、客観的に化粧品機能を評価できる指標を確立することが、この分野の技術を発展させていく上で、必須の課題といえる。

2. 研究の目的

2.1 非一様な皮膚の光物性 2 次元分布 (散乱係数, 吸収係数) 計測装置の開発

皮膚は散乱吸収性をもつ媒質で、その光物性には、散乱係数、吸収係数、散乱位相関数の三つがある。研究代表者は、これまでに、(1) 皮膚の光物性 (散乱係数, 吸収係数) 計測手法・装置、および、それとは別に(2) 散乱位相関数の計測手法・装置の開発を行ってきた。比較的広い領域 (長さ 1 cm, 幅 2 mm 程度) の平均的光物性の計測実績もある。しかしながら、人の皮膚は、歳を重ねるごとに肌むらやシミを生じ、さらに小さなスケール (数 mm) で物性分布をもつことになる。化粧品の機能評価には、この肌むらやシミを再現した疑似皮膚が必要で、その製作には、光

物性の 2 次元分布を知ることが不可欠である。

先にも述べたように、研究代表者がこれまでに開発した(1)の光物性計測装置では、比較的広い領域における平均的光物性の計測し方ができない。本研究では、非一様な皮膚の光物性の 2 次元分布 (解像度 1 mm 程度) を計測できる装置の開発を行う。

2.2 皮膚の散乱位相関数の波長依存性

課題研究では、光物性レベルで人と類似の疑似皮膚の開発を行うことを目標としている。光物性の一つである散乱係数について、研究代表者は、皮膚の散乱位相関数を計測する手法を提案した。しかしながら、その手法では、前方散乱成分が計測されていないことに加えて、散乱位相関数の波長依存性も明らかに出来ていない。光学的に類似な疑似皮膚の製作には、その波長依存性を知る必要がある。ここでは、購入した波長可変光源を用いて、散乱位相関数の波長依存性を計測する。

2.3 疑似皮膚の開発

上記で得られた光物性分布データを基に、肌むらをも再現した疑似皮膚の開発を行う。疑似皮膚の母材には、無色透明なシリコンラバー (もしくは、ポリウレタン) を使用する。その中に、高屈折率粒子および染料を混ぜることで、皮膚と類似な光物性を再現することをめざす。ここでは、まず、一様な皮膚の光物性を有する疑似皮膚の製作手法を確立する。散乱係数のスペクトルについては、粒子のサイズや添加量を変えることで、吸収係数のスペクトルに関しては、光を散乱しない複数の染料を混合することで、それぞれ、独立に制御する。人の皮膚の光物性と合致させるために、粒子径やその添加量、また、染料の混合割合を、数値的に予測する手法を開発し、検証する。

2.4 化粧品の機能評価指標および装置の開発

研究代表者と化粧品メーカーとの共同研究において、基礎化粧品であるファンデーションに求められる機能について議論してきた。その結果、肌に施されたファンデーション層の透過率が高いこと、さらには、肌むらやシミなどの遮蔽効果が高い (目立たなくさせる) ことが、現時点では、望まれる機能であるとの考えに至っている。両者は相反する特性に見えるが、ファンデーション層の拡散性が高ければ、透過率が大きくても遮蔽効果は高くなる。他にも、青い光に対して遮蔽効果を上げ、赤い光に対して透過性をあげることで、ファンデーションの高機能化を果たせる可能性がある。本研究では、これまでの視感評価に変えて、この遮蔽効果と透過特性を客観的に評価できる指標、および、評価装置の開発を行う。

3. 研究の方法

3.1 光物性 2 次元分布推定法

図 1 に、光物性推定法の概要を示す。この推定法では、皮膚に縞状の光束を照射部と非

照射部が繰り返されるように照射し、その反射光の空間分布を計測する。もし、金属のように不透明な物であれば、反射光は、照射部からのみ計測される。一方、皮膚のような散乱・吸収媒体では、内部に浸透した光が、散乱を繰り返しながら伝播し、照射部だけでなく、非照射部からも反射光が計測される。この時、皮膚の減衰係数が小さければ、光は広がりやすく、非照射部からも強い反射光が計測される。また、アルベドが大きければ、内部で吸収される光エネルギーが小さくなり、照射部、非照射部ともに強い光が計測される。このことは、反射光の空間分布に、皮膚内部の光物性の情報が反映されることを意味している。したがって、この反射光強度の空間分布のデータを基にすれば、逆解析を通じて、光物性の推定が行える。

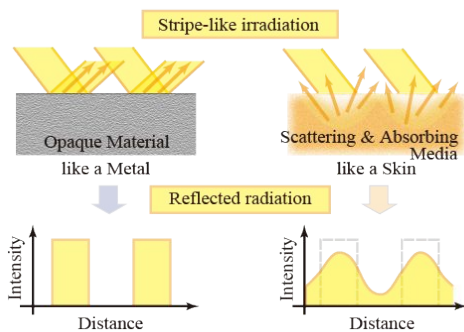


Fig.1 Reflection by surfaces exposed to stripe-like radiation.

平面方向への光物性の分布計測これまでの筆者らの光物性計測では、前述したように、縞状の光を皮膚に照射し、その範囲内での平均的な光物性の計測を行っていた。本研究では、平面方向への光物性の分布計測を行うため、図2に示すような、正方形の光束群を照射部と非照射部が繰り返されるように皮膚に照射する。そうすることで得られる、個々の正方形（図2の $P \times P$ ）の範囲内の反射光の広がりや強度の分布を元に、逆解析を行い、一つの正方形の光束ごとに光物性を推定することで、平面方向への光物性の分布計測が可能となる。この際、分布計測の解像度は、照射する正方形の光束の一つの大きさ（ $P \times P$ ）に依存する。

本研究で、平面方向への光物性の分布計測に用いた計測装置の概要を図3に示す。本装置では、様々な波長での光物性を計測できるように、波長可変光源（Opto-Spectrum Generator、浜松ホトニクス株式会社）を用いている。この光源からの光を正方形の穴が一定間隔で開いているマスクに照射し、レンズを用いて、皮膚上に正方形の光束群を投影する。そして、その反射光の分布を CCD カメラで計測する。この際、ハーフミラーをレンズと皮膚の間に入れ、皮膚に対して垂直な（ 0° ）方向の反射光を計測した。

本手法を用いれば、短時間で、平面方向へ広範囲の光物性の分布計測が可能となる。そのため、生きた人の皮膚を計測する際に、人が動いてしまった時の計測への影響を少な

くするだけでなく、被験者への負担も軽減できるといった利点もある。

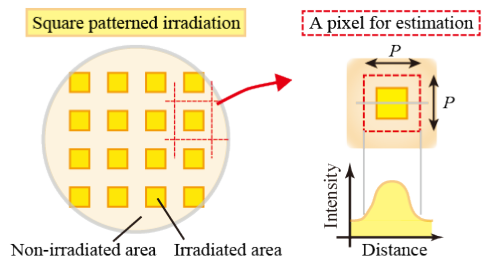


Fig.2 Square patterned irradiation for distribution measurement.

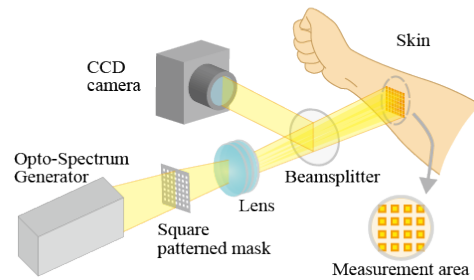


Fig.3 Schematic drawing of measurement apparatus.

3.2 散乱位相関数の波長依存性

散乱位相関数の波長依存性を計測する手法は、これまでに研究代表者が開発した散乱位相関数計測装置と同等（後に述べる2方向反射率および透過率計測装置に類似）である。ただし、その装置では光源にレーザーを用いていた。ここでは、連続波長可変光源（Opto-Spectrum Generator、浜松ホトニクス株式会社）を、レーザーの代わりに利用し、波長依存性（スペクトル）を計測する。具体的には、拡散的な光源光をビーム状に変換する光学系を導入する。

3.3 疑似皮膚の開発

疑似皮膚の開発においては、まず、人の皮膚を一樣と見立て、その光物性を再現することを目指した。この研究では、日本人の平均的な皮膚の光物性を計測するために、200人に及び計測を行った。そのデータもとに、散乱係数、吸収係数の再現を試みた。疑似皮膚は、シリコン樹脂に、散乱係数のスペクトルを制御するための粒子（ TiO_2 あるいは Al_2O_3 ）と吸収係数スペクトルを制御するための染料を添加することで製作する。添加する粒子のサイズや量は、Mie 散乱理論をベースに、実際の人計測データに合致するように決定した。さらに、染料の調合割合についても利用できる染料の吸収係数の計測データをベースに、解析的に決定する手法を開発した。

3.4 化粧品機能評価指標および装置の開発

化粧品の機能評価を行うための装置として、化粧膜からの反射光および透過光の強さ分布（2方向反射率および透過率）を短時間で計測するための装置を開発する。この装置は、回転放物面鏡と CCD カメラからなる。測定方法の概念図を図4に示す。

図に示すように，放物面鏡を垂直上向きに設置し，その焦点位置に，計測対象を，その法線が水平となるように配置する．入射光は，水平方向から対象に導かれる．対象（の法線方向）と入射光のなす角 θ_{in} は，対象を回転放物面鏡の対称軸周りに回転させることで，変えることができる．対象によって反射，あるいは，対象を透過した光は，放物面鏡により，垂直上方に反射される．

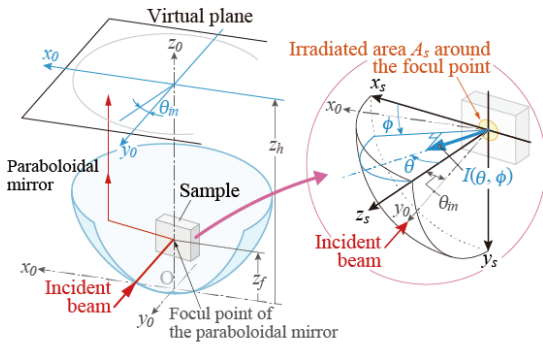


Fig. 4 Measurement method for directional profiles of reflected and transmitted light intensity

いま，放物面鏡の上方に，仮想の水平平面を考えると，その仮想平面に到達する光の光束分布 $q(x_0, y_0)$ は，反射光あるいは透過光強さの角度分布 $I(\theta, \phi)$ に，以下の式で関係づけることができる．

$$I(\theta, \phi) = \frac{q(x_0, y_0)}{(A_s/L^2)\cos\theta}$$

本手法では，仮想平面上での光光束の分布 $q(x_0, y_0)$ を計測することで， $I(\theta, \phi)$ を求める．

2 方向反射率および透過率は，対象となる化粧層からの透過の強さ分布に加えて，完全拡散反射板からの光の強さ， I_d を計測することで，求める

I_d に関しても， $I(\theta, \phi)$ と同様，仮想平面上の光光束， $q(x_0, y_0)$ と次の関係が成り立つ．

$$I_d = \frac{q_d(x_0, y_0)}{(A_s/L^2)\cos\theta}$$

したがって，2 方向反射率・透過率は，次式で求めることができる．

$$\rho^r(\theta, \phi) = \frac{I(\theta, \phi)}{I_d} = \frac{q(x_0, y_0)}{q_d(x_0, y_0)}$$

4. 研究成果

4.1 光物性 2 次元分布推定法

人の皮膚（29 歳女性上腕部）で光物性の分布計測を行った結果（波長 $\lambda = 550\text{nm}$ ）を図 5 に示す．本報告では，光物性の分布計測が行えているかの検証のために，シミ（Freckle）のある部位を選び，計測範囲に含まれるように実験を行った．また，本計測では，図のように， 9×9 個の正方形の光束群（ $P = 1\text{mm}$ ）を皮膚に照射し，計測範囲をその中の 7×7 個の正方形として，光物性の推定を行った．これらの推定結果から，アルベドと減衰係数のどちらも，シミのある場所とその値が低くなっていることが分かる．シミを実際に目で見た時，他の場所と比べて少し黒ずんで見えている．見た目と相関のある妥当といえる結果が得られた．

4.2 散乱位相関数の波長依存性

光源強度が十分ではなく，信頼にたるデータを得るには至らなかった．ただし，本研究課題の遂行においては，たとえ計測できたとしても，その計測データを，散乱係数や吸収係数の光物性分布の推定に活かすことが難しいことから，従前のデータを用いることとした．計測できれば学術的には，新たな知見を与える可能性が高いため，今後も開発を続ける予定である．

4.3 疑似皮膚の開発

Mie 散乱の理論を利用して，粒子サイズが散乱係数のスペクトルに与える影響を調べた．結果を図 6 に示す． $0.7\ \mu\text{m}$ の粒子を用いた場合，人の皮膚の散乱係数スペクトルとよく一致することが分かる．

吸収係数に関しては，市販の染料を組み合わせることで，人の皮膚の吸収係数に，数学的に最もよく一致する割合を決定した．設計値とともに吸収係数単独の spectrophotometer による計測結果，および，実際の人の皮膚の吸収係数を図 7 に示す．概ね，人の吸収係数スペクトルを再現できていることが分かる．

これらの結果を利用して，実際に，疑似皮膚を作成し，研究代表者らが開発した装置において，散乱係数および吸収係数の計測を行った．結果を，それぞれ，図 8 と図 9 に示す．

散乱係数に関しては，図 8 に示されるように，短波長側で，人の皮膚のそれを下回っている．これは，添加した粒子が十分に分散さ

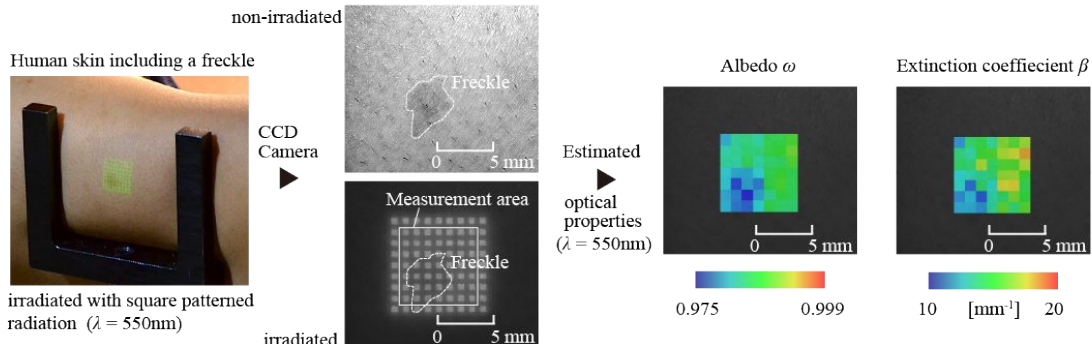


Fig. 5 Measurement results of distribution of optical properties for human skin including a freckle

れていなかったためである。凝集した粒子群が径の大きな一つの粒子として振る舞うことで、波長の増加に伴う散乱係数の低下が、緩やかになったと考えられる。

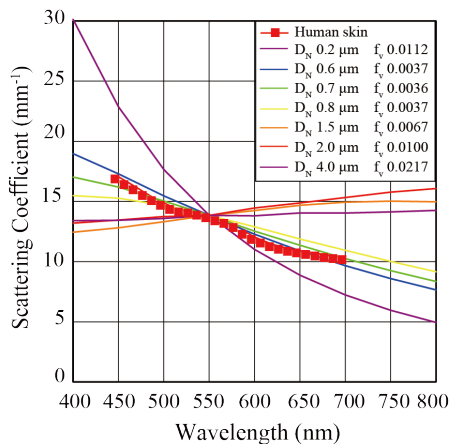


Fig. 6 Designed absorption coefficient spectrum and its measurement results

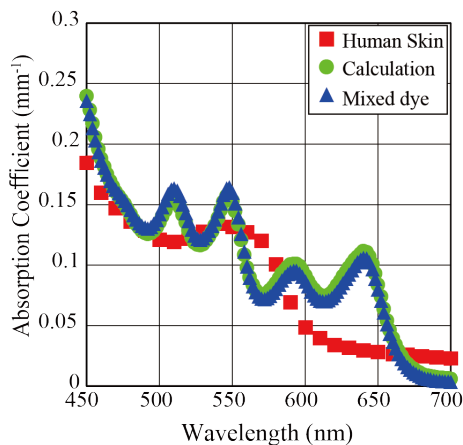


Fig. 7 Designed absorption coefficient spectrum and its measurement results

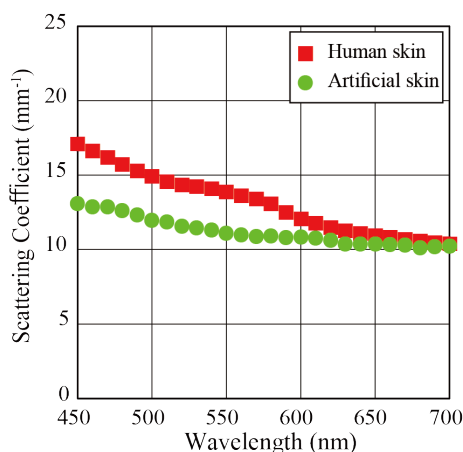


Fig. 8 Comparison between an artificial and real skin in scattering coefficients spectrum

一方、吸収係数に間には、人の皮膚の吸収係数と違うだけでなく、図7に示す設計値とも異なる。これは、本研究で使用した散乱性媒質の光物性計測に際し、適切な散乱位相関数

を与えることができなかつたためと考えられる。本研究では、散乱位相関数を別途計測しているが、シリコン樹脂が固まる前に計測したもので、粒子の凝集のために、固まった後の疑似皮膚と異なつたと考えられる。

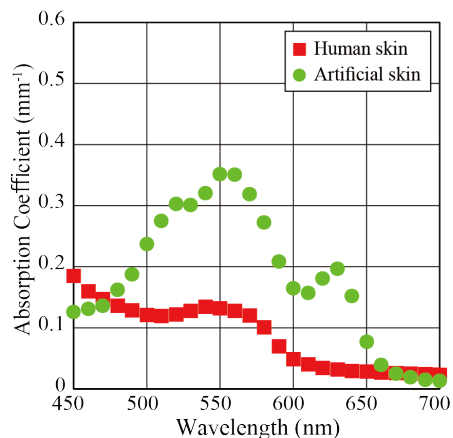


Fig. 9 Comparison between an artificial and real skin in absorption coefficient spectrum

4.4 粒子層の2方向反射率・透過率計測

ファンデーション層の機能評価を想定し、粒子層の計測を行った。平均直径0.7 μmの酸化チタン TiO₂ 粒子を、ガラス板表面に塗布したサンプルを対象に、入射角 $\theta_{in} = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ でレーザー光を入射させたときの、2方向反射率・透過率を計測した。結果を図10に示す。図中のパラメータは、方位角 $\phi = 0^\circ (180^\circ), 10^\circ (190^\circ), 20^\circ (200^\circ), 30^\circ (210^\circ)$ である。ここで、()内は、入射光後方側の方位角を表す。

2方向反射率に見られるピーク(図上段、 $\theta = \theta_{in}, \phi = 0^\circ$)は、粒子層で散乱されずにガラス板に到達した入射光が、鏡面反射されたことによって現れたものである。また、2方向透過率(図下段)に見られるピークが、入射角度と異なるのは、粒子を塗布したガラス板表面で、光が屈折したためである。

なお、ガラス板表面へのTiO₂粒子群の塗布は、イソプロピルアルコールに粒子を分散させた懸濁液をガラス板表面上に垂らして乾燥させることによって行った。今回塗布した粒子の量は、0.03mg/cm²であった。この量は、一般に、化粧をする際に塗布されるファンデーション量に比べて少ない(一般的には、0.1 - 0.2 mg/cm²)。粒子層の光学的な厚さが薄いため、反射と透過に強いピークが見られたが、一般的な塗布量であれば、このピークは小さくなり、反射、透過はより拡散的になる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計3件)

1. 中村嘉恵, 山田純, 2016.2, 回転放物面鏡を用いた2方向反射率・透過率測定システム, 熱物性, Vol.30, No.1, pp.18-26
2. Kae Nakamura, Tatsuya Ogawa, Sadaki

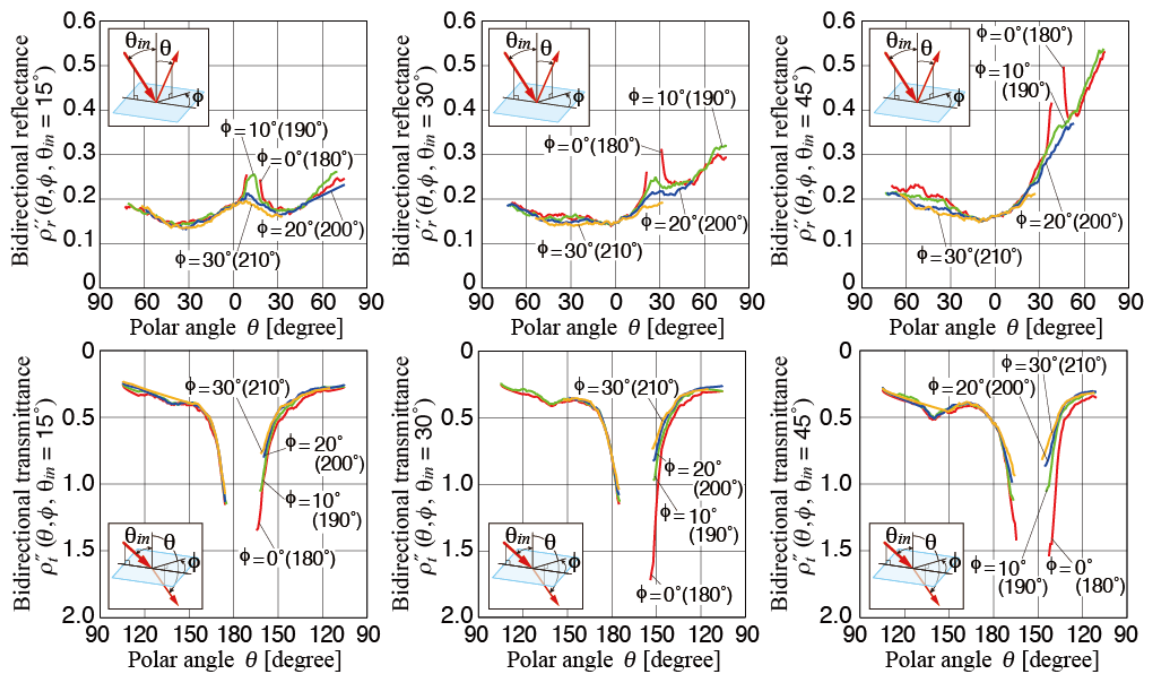


Fig.10 Measurement results for TiO₂ particles on the glass-slide

Takata, Jun Yamada, 2016.1, Numerical Model for Optical Characteristics of the Human Skin Surface, Thermal Science and Engineering, Vol. 54, No. 229, pp.61-69

- 山田純, 神佳弘, 岡本論. 2015.9.3, 光学的質感制御に向けた散乱性媒質の透明感の定量化, 日本機械学会論文集, Vol.81, No. 830, Dol:10.1299/transjsme

[学会発表](計11件)

- Takahiro Kono, Syoko Touma, Keiko Nozawa and Jun YAMADA, 2016.3.13-17, Scattering and Absorption Coefficients of Human Skin in Japanese People, Proceedings of the First Pacific Rim Thermal Engineering Conference, Hawaii's Big Island, USA, No. PRTEC-15081
- Sarasuk Kantawan, Kono Takahiro, Nakamura Kae, Yamada Jun, 2016.3.13-17, Effect of Scattering Particle Size on Extinction Coefficient of Artificial Human Skin, Proceedings of the First Pacific Rim Thermal Engineering Conference, Hawaii's Big Island, USA, No. PRTEC-15111
- 河野貴裕, 藤間勝子, 野澤桂子, 山田純, 2015.10.20, 日本人における皮膚の散乱係数および吸収係数, 第36回日本熱物性シンポジウム講演論文集, A223, pp.183-185
- Kantawan Sarasuk, 河野貴裕, 中村嘉恵, 山田純, 2015.06.03, ヒトの皮膚の光学特性を有する疑似皮膚, 第52回日本伝熱シンポジウム講演論文集, SP105
- 中村嘉恵, 山田純, 2014.11.22, 物体表面の2方向反射率測定, 第35回日本熱物性シンポジウム講演論文集, pp.46-48
- 河野貴裕, 山田純, 2014.11.8, 皮膚の光物性分布計測, 熱工学コンファレンス2014, G143

- Takahiro Kono, Jun Yamada, 2014.8, Measurement of Radiative Properties of Scattering and Absorbing Layered Media., The 15th International Heat Transfer Conference, IHTC15-9126/RAD-J-425, Kyoto, JAPAN

- 山田純, 神佳弘. 2014.5.21, 光学的質感制御に向けた散乱性媒質の透明感の定量化, 第51回日本伝熱シンポジウム講演論文集, H343
- 河野貴裕, 越野誠也, 山田純, 2013.11.20, 散乱吸収性層構造媒質の光物性計測, 第34回日本熱物性シンポジウム講演論文集, pp.111-113
- Takahiro Kono, Masaya Koshino, Sadaki Takata, Jun Yamada, 2013.10., Measurement Instrument of Optical Properties of Human Skin for Standardization, The 10th Asian Thermophysical Properties Conference, Jeju, KOREA
- 中村嘉恵, 大和田智弘, 高田定樹, 山田純, 2013.5.29, 粒子層の反射・透過性特性に及ぼす粒子性状の影響, 第50回日本伝熱シンポジウム講演論文集, Vol.1, pp.178-179

6. 研究組織

(1)研究代表者

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

(2)研究協力者

河野貴裕 (芝浦工業大学大学院)
中村嘉恵 (芝浦工業大学大学院)
Kantawan Sarasuk (芝浦工業大学大学院)