大規模データベースを用いた肌の反射・散乱光の統計的解析

馬場　葉子†　　間下　以大††　　向川　康博†　　八木　康史†

† 大阪大学 産業科学研究所
〒 567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘 8-1
†† 大阪大学 サイバーメディアセンター
〒 560-0043 大阪府豊中市待兼山町 1-32
E-mail: †{baba,mukaigaw,yagi}@am.sanken.osaka-u.ac.jp, ††mashita@ime.cmc.osaka-u.ac.jp

あらまし　人間の肌の特徴は年齢や性別によって異なる．本研究では年齢や性別によって異なる肌の特徴を約 1000 名分の幅広い年代から得た大規模データベースを基に統計的に解析することで，肌に入射した光の反射・散乱特性が個人によってどのように異なるのかを調べることを目的とする．肌は半透明であり，肌への入射光は，表面で反射する反射光と肌の内部に入り込む散乱光の性質の異なる 2 つの成分に分かれる．まず肌を撮影した画像を反射光成分と散乱光成分に分離し，両成分の比率を調べることで主に透明さを解析する．さらに反射光成分を拡散反射と鏡面反射に分離し，鏡面反射の強度を調べることで主に肌の脂っぽさを解析する．実際に肌の特徴を計測するために 3 台のプロジェクタと 2 台のカメラからなる計測システムを構築し，幅広い年代の男女の肌データを計測した．計測したデータを用いて反射光と散乱光から特徴量を抽出し，性別や年齢の違いによる肌の特徴を統計的に解析した．
キーワード　肌，反射光，散乱光，拡散反射，鏡面反射，表面下散乱

Statistical Analysis of Reflection and Scattering Characteristics on Human Skin using Large-Scale Database

Youko BABA†, Tomohiro MASHITA††, Yasuhiro MUKAIGAWA†, and Yasushi YAGI†

† Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University
8-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, 567-0047, JAPAN
†† Cybermedia Center, Osaka University
1-32 Machikaneyama-cho, Toyonaka, Osaka, 560-0043, JAPAN
E-mail: †{baba,mukaigaw,yagi}@am.sanken.osaka-u.ac.jp, ††mashita@ime.cmc.osaka-u.ac.jp

Abstract　The characteristic of human skin depends on the age and gender. In this paper, we statistically analyze skin characteristics based on the large-scale database of about 1000 people in a wide age range to find the differences of skin characteristics in personality. Since skin is translucent, the incident ray on the skin surface is divided into reflection and scattering. That is, some rays reflect on the surface while the other rays scatter into the media. In our method, we first acquire reflection component and scattering component from facial images. Translucency of skin is analyzed by calculating the proportion of both components. Then, reflection component is divided into diffuse reflection and specular reflection. We analyze how oily the skin is by calculating the specular strength. Facial images among people over all ages were taken with measurement system including three projectors and two cameras. The characteristic of the facial image is calculated and the skin characteristic which depends on the age and gender is statistically analyzed.
Key words　skin, reflection, scattering, diffuse reflection, specular reflection, subsurface scattering

1. はじめに

人間の肌の特徴は個人によって異なる．例えば子供の肌は透き通るように見えたり，化粧している肌は滑らかに見える．それは肌が光を内部に通す半透明な性質を持ち，表面での光の反射や内部での散乱の様子が個人によって異なるからである．そのため肌の反射・散乱特性の研究はコンピュータグラフィックス (以下 CG)，美容，医療などの幅広い分野において盛んに行われている．

CG 分野では Debevec ら [1] が様々な方向から顔を光

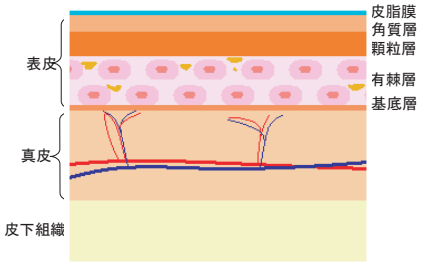


図 1　肌の断面図

で照らし，複数のカメラで撮影し解析を行うことであらゆる照明環境における肌を正確にレンダリングする方法を提案している．美容の分野においては，肌のメラニン色素やヘモグロビンが見た目にどのような影響を与えているかを解析し，それらの影響を受けた光の成分を実画像から分離することによってその成分を増減し，シミ・そばかすが多い顔や血行が良いときの顔などを通常の顔画像から作成する方法が提案されている [2]．また医療の分野では光を肌から体内に入射して内部で散乱された光を肌の表面で計測し解析を行う拡散光トモグラフィによって体内に異常がないか調べることができる [3] [4]．

肌の中の光の散乱特性を解析する研究は多数報告されている．肌に計測機器を直接接触させて肌の中での光の空間的な広がりを調べる方法 [5] や，複数の層でできた肌の各層で反射した光を分離する方法 [6] などである．しかし，いずれの研究も肌は半透明であるという観点から，肌表面での反射光と表面下散乱の特性を男女の幅広い年代で統計的に調べたものではなかった．本研究では複数のプロジェクタとカメラによって構成される計測システムを用いて，約 1000 名分の幅広い年代の大規模データベースを元に解析を行い，個人によって異なる肌の特徴を求めることを目的とする．

2.　肌の反射・散乱モデル

2.1　肌で生じる反射光・散乱光

肌は図 1 に示すように複雑な多層構造をしている．表面に皮脂膜があり，大きく分けて表皮，真皮，皮下組織の順に厚さが異なる層が複数存在する．表皮の厚さは 0.07mm〜0.2mm で，外側から角質層・顆粒層・有棘層・基底層に分けられ各層ごとに厚さが異なる．基底層には有棘層にメラニンを生成するメラノサイトがあり，メラニンが多く作られるとシミ・そばかすの原因となり肌の質感は変わって見える．また真皮には血管が通っているため，血液中のヘモグロビン色素の影響で肌が赤っぽく見える．真皮が薄い人ほど肌が赤く見える傾向がある．このような多層構造をしている肌は半透明である．つまり肌表面への入射光の一部は肌の内部に入り込み，下位の層にまでたどり着く．

肌表面への入射光は，肌の内部に入り込む光と入り込まない光に分けて考えることができる．肌の内部に入り込まない光は，極めて表面に近い層で反射されるので反射光と呼ぶ．また肌の内部に入り込んだ光は下位の層にまでたどり着き，複数の層で複雑な反射を繰り返した後，入射点とは異なる位置から出射する．これを散乱光と呼ぶ．反射光と散乱光は性質が異なっている．以下で詳しく述べる．

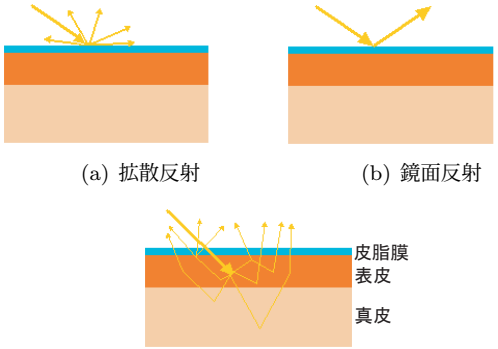


図 2　肌で生じる反射光と散乱光

2.2　肌表面での反射光

肌表面での反射光は，さらに拡散反射と鏡面反射に分けて考えることができる．

拡散反射とは図 2(a) のように，物体の表面で反射される光で，あらゆる方向に同じ強さで拡散する．拡散反射は石膏などの表面がざらざらした物質で生じる成分であり，ランバートモデルなどでモデル化されている．

一方，鏡面反射とは図 2(b) のように，物体の表面で反射される光の中でも，入射方向とは反対方向で強く観測される光のことを言う．鏡面反射は金属の表面などで見られるハイライトと呼ばれる成分であり，光源色となるのが特徴であり，肌では主に皮脂膜で反射される成分である．Torrance-Sparrow モデルなどでモデル化されている．

2.3　肌内部での散乱光

物体の媒体内での散乱を表面下散乱と呼ぶ．表面下散乱とは図 2(c) のように，光が物体の内部に入り，内部で様々な方向に散乱した後に，入射点とは別の場所から出射する光のことを言う．

反射光と散乱光はその性質がまったく異なる．表面下散乱を起こした場合，光は物体の内部に入り込むので物体表面の細かな凹凸による影響はほとんど受けない．また物体の透明度が高いほど内部に入り込む光が多くなるので表面下散乱は強くなる．ただし RGB の波長によって下位層への到達深度が異なるため表面下散乱の強さは波長によって異なる．

3.　肌の計測と解析

3.1　成分に基づく解析

肌は人によって見え方が異なる．例えば子供，皮脂分

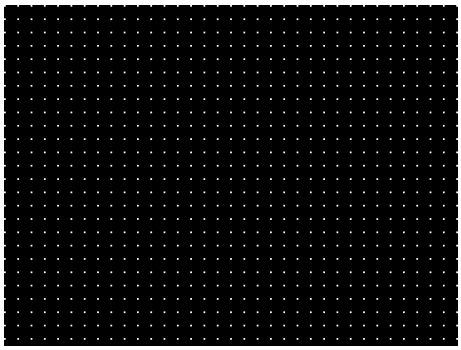


図 3　ドットパターン

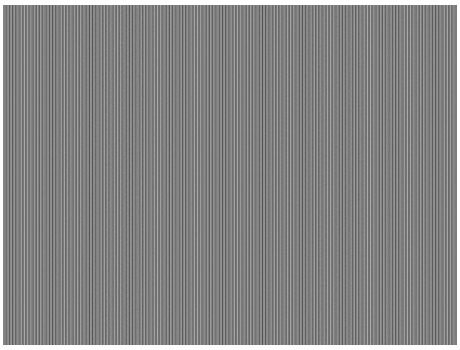


図 4　高周波パターン

泌の多い人，化粧をしている人等は肌の見た目が全く異なり個性として現れる．本研究では肌に現れる個性を定量的に評価することを目的とする．そのために肌で反射される光の成分を分離し，それぞれの成分の強度を調べることで評価を行う．2. 章で述べたように肌への入射光は，主に表面で反射する反射光と，内部に光が入り込む散乱光に分けて考えられる．反射光と散乱光のそれぞれの振る舞い自体が個性を表している．例えば肌の表面の凹凸や皮脂は反射光に影響を与える．また肌の内部の血液中の赤色色素ヘモグロビンは散乱光に影響を与える．

肌に現れる個性を定量的に評価するために顔の部位によって異なる光の空間的な広がり，散乱光の反射光に対する比率と，鏡面反射成分の強度の年齢や性別による統計的な解析を行う．

3. 2　散乱光の空間的な広がり

散乱光の空間的な広がりは光源方向によってどのように異なるかを調べる．プロジェクタを顔の正面と左右の合計 3 箇所に配置する．各プロジェクタから図 3 のようなドットパターンを投影し顔の正面に設置したカメラで撮影する．被験者の頬に投影されたドットの RGB ごとに最大値を見つけ，最大値となる画素を中心に左右にそれぞれ 10 画素分の値を取り出す．ただし 1 箇所のみで調べると結果が安定しないので 2〜5 箇所の平均を求め，それを散乱光の減衰とする．

3. 3　散乱光の解析

反射光と散乱光を分離しそれぞれを比較することで解析を行う．本研究では Nayar ら [7] が提案した高周波パターンを利用した方法を用いて，肌のある 1 点から出射する光を反射光と散乱光に分離する．

本研究では顔の正面に配置したプロジェクタから図 4 のような白 3 画素，黒 3 画素の縦じまの繰り返しの高周波パターンを投影し，正面のカメラで撮影した．高周波パターンを空間的にずらしながら投影することで物体上の各点は照明・非照明の状態に変化する．照明時の各点への入射光は反射光成分と散乱光成分を併せ持ち，非照明時は散乱光成分のみである．この関係から両成分を分離することが可能である．各点においてパターン光投影画像の同一座標の値を比較して最大値 (i_{max}) と最小値 (i_{min}) を求める．i_{max} は照明時の値であり，i_{min} は非照明時の値である．この投影パターンでは全照明時より光量が半分である．反射光成分を L_r，散乱光成分を L_s とすると以下の式が成り立つ．

$$L_r = i_{max} - i_{min} \tag{1}$$

$$L_s = 2i_{min} \tag{2}$$

式 (1)，(2) の演算を全ての画素の RGB ごとに行うことによって，反射光成分と散乱光成分を分離した画像を生成することができる．

肌の内部に入る光の割合を解析するために，反射光に対する散乱光の RGB ごとの比率を調べた．被験者から見て正面のプロジェクタを光源としたときの右頬 20 × 20 画素の比率の中央値を求めた．

3. 4　鏡面反射成分の解析

鏡面反射成分を分離する方法は多数提案されている．光の偏光の性質を利用した方法 [9] や，4 光源フォトメトリックステレオ法 [10] などである．ただし偏光板を使った方法だと偏光板を回転する機械が必要であり撮影に時間がかかる．また 4 光源フォトメトリックステレオ法では少なくとも 4 方向から照射した場合の画像が必要であり，また外れ値となる鏡面反射を区別するための閾値の設定が難しく不安定になりやすい．

本研究では対象物体が人間であることから計測時間を短くする必要があるため，撮影枚数が少ない方法を採用する．鏡面反射は視線方向に依存し，拡散反射は視線方向に依存しない．この性質を使って，3. 3 節で述べた反射光成分をさらに拡散反射成分と鏡面反射成分に分離する．顔の正面にカメラを 1 台 (以下カメラ 1)，その横に 1 台のカメラ (以下カメラ 2) を合計 2 台設置する．カメラ 1 で撮影した画像の鏡面反射成分が強くなるように光源は顔の正面位置とする．

カメラ 1，カメラ 2 から顔を撮影する．そして後述するグレイコードパターン投影による対応付けに基づいてカメラ 2 の画像のすべての画素をカメラ 1 の画像に対応する画素に置き換える．これによってカメラ 2 の視線か

表 1　撮影パターンとカメラ・プロジェクタの組み合わせ

投影パターン	カメラ	プロジェクタ	撮影枚数
グレイコードパターン	正面	右横	40 枚
高周波パターン	正面と右横	正面	12 枚
ドットパターン	正面	3 方向	3 枚
白パターン	正面と右横	3 方向	6 枚
黒パターン	正面と右横	3 方向	6 枚

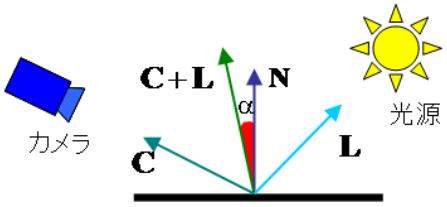


図 5　法線と鏡面反射率

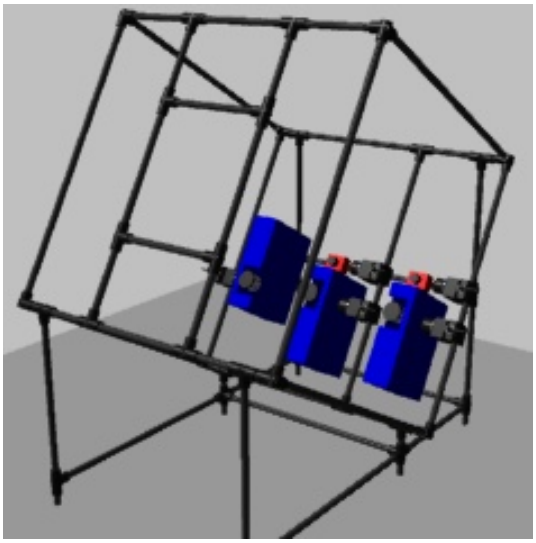
ら見た明るさをカメラ 1 の視線から見た形で表現した合成画像を作成できる．鏡面反射は視線方向に依存するので合成した画像とカメラ 1 による撮影画像は鏡面反射の位置が異なる．よって 2 つの画像の差分を取ることで鏡面反射成分を分離できる．

鏡面反射率を解析するために，鏡面反射成分の中で最大値である画素値を鏡面反射率とする．鏡面反射成分は入射方向とは正反対の地点で最も強く観測される．この性質を使うと光源方向ベクトル，顔表面の法線ベクトル，カメラの位置ベクトルの関係から鏡面反射成分が強く観測される位置がわかる．図 5 のように光源方向の単位ベクトルを $\mathbf{L}$，カメラ方向の単位ベクトルを $\mathbf{C}$，法線単位ベクトルを $\mathbf{N}$ とする．$\mathbf{L}+\mathbf{C}$ の向きと $\mathbf{N}$ の向きが一致する点で鏡面反射成分が最も強く観測される．本研究では $\mathbf{L}+\mathbf{C}$ と $\mathbf{N}$ の為す角 α が 15 度以下の点を鏡面反射成分が強く観測される点とした．被験者の右頬の領域内で鏡面反射が強く観測される点の画素値を比較して最大値を求め，鏡面反射率とする．

4.　計測システム

4.1　機 器 構 成

人間の肌の個性を計測するためには，幾何情報と反射特性を求める必要がある．幾何情報とは 3 次元形状と表面の法線であり，反射特性とは反射光と散乱光の強さや散乱光の空間的な広がりのことである．本研究では幾何情報と肌の反射特性についての情報をパターン光を投影した画像から得る．幾何情報を得るためには X 方向と Y 方向のグレイコードパターンを使う．出射光を反射光と散乱光に分離するためには高周波パターンを使う．また散乱光の空間的な広がりを調べるためにはドットパターンを使う．本研究では統計的な解析のために幅広い年代で多くのデータが必要であることと，被験者が静止する必要があることから撮影は短時間で終えなければならない．よって各プロジェクタから投影するパターンと撮影



(a) 機器構成

(b) 外観

図 6　計測システム

するカメラは表 1 に示す必要最小限の組み合わせとした．

本研究ではこれらのカメラとプロジェクタの組み合わせを満たす図 6 のような計測システムを構築した．(a) は計測システムの機器構成で，(b) は実際の計測システムである．この計測システムは箱の 1 面に顔を入れる穴が開いており，その正面と右側に合計 2 台の高感度カメラを設置している．また正面と左右に光源となるプロジェクタを 3 台設置している．カメラは Lumenera の LW-160C，プロジェクタは EPSON の EMP-X5 である．

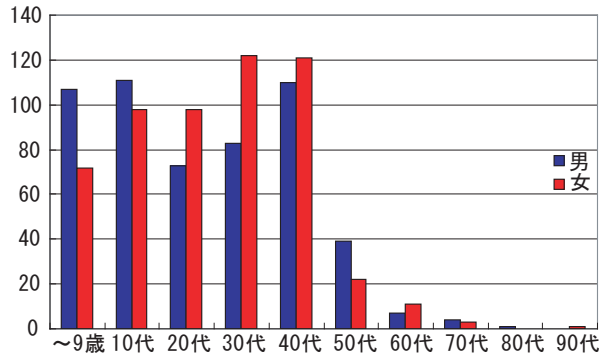


図 7　大規模データベースの男女別年齢分布

プロジェクタを異なる位置に 3 台設置することで様々な角度から光を投影することができる．これらのプロジェクタから 1 台ずつ適切なパターン光を投影して，カメラで顔を撮影する．パターン光を投影した画像を使って人間の顔の幾何情報と反射特性を得ることができる．

4.2　キャリブレーション

解析を行うにあたって幾何学的キャリブレーションと光学的キャリブレーションを行った．

鏡面反射成分を分離するのに必要な 3 次元座標を求めるために，空間コード化投影法によってキャリブレーションを行った．

一方，光学的キャリブレーションでは，各プロジェクタとカメラを使って撮影した画像の色と明るさを一致させる．本研究では光源として複数のプロジェクタを用いて撮影を行うが，撮影した画像はプロジェクタの色や明るさの影響を受ける．またプロジェクタやカメラには個体差があるので，同じパターンを投影しても色と明るさが一致しない．よって色と明るさはマクベスカラーチェッカを使って各 RGB 空間をアフィン変換することでマクベスカラーチェッカの色空間へ値を変換した．

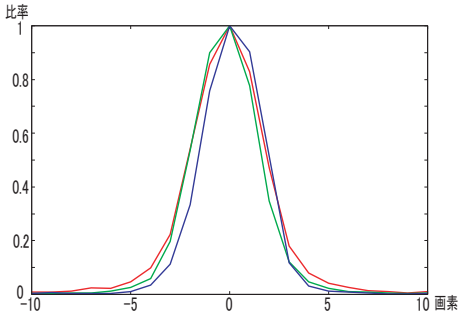
5.　解 析 結 果

5.1　データベース

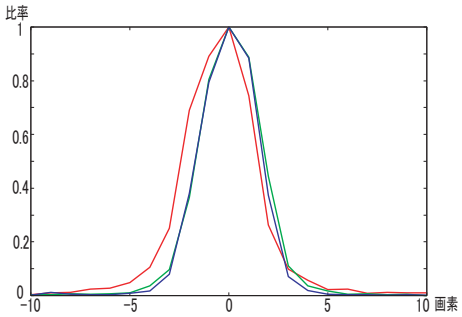
2009 年 3 月に東京の日本科学未来館で 3 日間行われた文部科学省 科学技術振興調整費「重要課題解決型研究等の推進」プログラムでの「新映像技術ダイブイントゥザムービーの研究」のアウトリーチ活動の一環として 995 名分のデータを得た．さらに 2009 年 5 月の大阪大学の銀杏祭のデモンストレーションで 85 名分のデータを得た．これらの約 1000 名分の大規模データベースを使って統計的解析を行った．各年代，性別の内訳を図 7 に示す．

5.2　散乱光の空間的な広がり

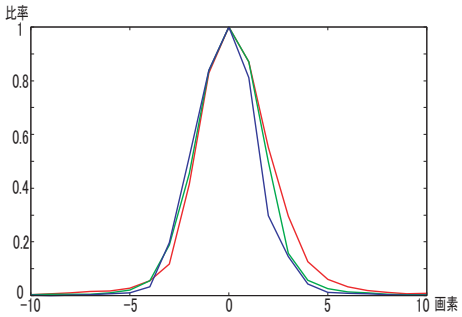
光源方向が異なる場合の散乱光の空間的な広がりを RGB ごとに調べた．散乱光の減衰を表すグラフが図 8 である．各グラフの色が RGB に対応し，縦軸が最大値を 1 としたときの画素値の比率を表し，横軸が最大値を



(a) 左光源



(b) 正面光源



(c) 右光源

図 8　光源方向が異なる場合の散乱光の空間的な広がり

表 2　歪　　度

	R	G	B
左光源	-0.15	-0.12	-0.05
正面光源	-0.29	-0.05	-0.56
右光源	0.55	0.07	0.03

0 としたときの画素の X 座標を表す．被験者から見て左にある光源を左光源とする．

図 8 のグラフの歪度を RGB ごとに求めた結果を表 2 に示す．歪度とは分布の非対称性を示す指標である．

一般的に表面下散乱は入射方向に依存しないと考えられている．しかし表 2 を見るとすべての波長は左光源のとき負に歪んでいることがわかる．同様にすべての波長は右光源の場合は正に歪んでいることがわかる．このことより表面下散乱は入射方向に依存し，入射方向とは逆の向きに広がることが確認された．また青い波長の歪みが赤と緑の波長より小さくなるのは青い波長は波長が短いため肌の内部に入りにくいためだと考えられる．

(a) 白パターン　(b) 反射光成分　(c) 散乱光成分

(d) 拡散反射成分　(e) 鏡面反射成分　(f) 解析部分の抽出

図 9　入射光の分離

5.3　成分の分離

白パターン投影画像，反射光成分画像，散乱光成分画像，拡散反射成分画像，鏡面反射成分画像をそれぞれ図 9 に示す．図 9(b) と 9(c) を見比べると色，てかり，影の明るさ，表面の凹凸に違いがあることがわかる．

反射光成分は全体的に青色であり，散乱光成分は全体的に赤色である．このことより青の光が赤や緑に比べて肌の内部に入りにくいことがわかる．また散乱光成分が赤色であるのは肌の内部に入り込んだ光が血液中の赤い色素を持つヘモグロビンの影響を受けているからと考えられる．

肌のてかりは全投影パターンでは鼻や唇に観測される．てかりは反射光成分の中の鏡面反射によって起きるので，反射光成分画像では観測されるが散乱光成分画像では観測されないことが確認できる．

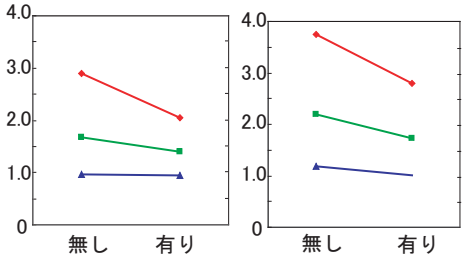
また肌表面の凹凸をみると反射光成分は全体的にざらついていて，散乱光成分は滑らかであることがわかる．これは反射光成分が表面で反射された光の成分のみであるので表面の凹凸の影響を受けるからである．それに対して散乱光成分は光が肌の内部に入り込み，入射点の周辺に強い散乱光が到達するため，表面の細かい凹凸が見えにくくなるので表面が滑らかに見える．

また図 9(b) の画像から図 9(d)，9(e) の拡散反射成分と鏡面反射成分を分離する．これらの分離した画像を使って解析を行う．解析を行うにあたり被験者の頬の位置を知る必要がある．よって図 9(f) に示すように円形のシールを張った眼鏡を被験者にかけてもらい，テンプレートマッチングによって目の位置を抽出し，その位置を基準に頬の位置を求める．

5.4　化粧による散乱光の比率の変化

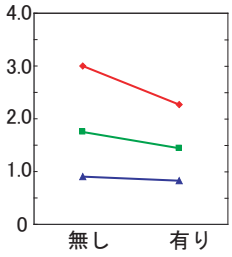
化粧は肌の反射・散乱特性を変化させる大きな要因になる．化粧をしている場合としていない場合で，内部に入り込む光の量の変化ついて調べた．化粧をしている場合としていない場合の画像を撮影し，反射光成分と散乱光成分に分離し，RGB ごとにその比率を調べた．被験者は 22 歳の女性で両頬，額，鼻，あご，下唇，両まぶたの 20 × 20 画素の平均の比率である．散乱光の反射光に対する比率を図 10 に示す．

この結果より，化粧をすることで散乱光成分の比率が減ることがわかる．つまり化粧をすることで肌の内部に入り込む光の量が減ると言える．部位によって比率の減少具合に差が出ている．これは化粧をする際に肌全面に均一にムラなく化粧はせず，部位によって厚く塗る部分と薄く塗る部分があることが原因と考えられる．また赤い波長は緑と青の波長に比べて，比率の減少具合が大きい．赤い波長は緑や青の波長に比べて肌の内部に入りやすいと考えられるため，化粧を塗ることでの比率の減少が最も大きいと考えられる．

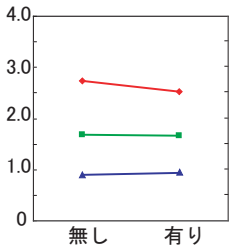


(a) 左頬

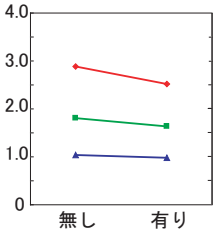
(b) 右頬



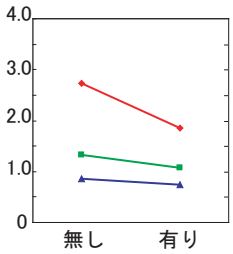
(c) 鼻



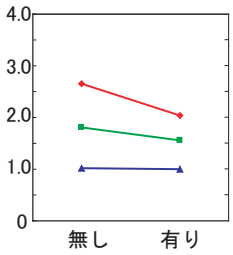
(d) 額



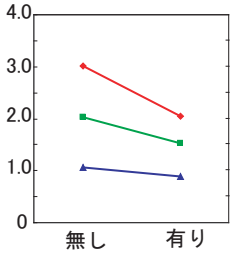
(e) あご



(f) 唇

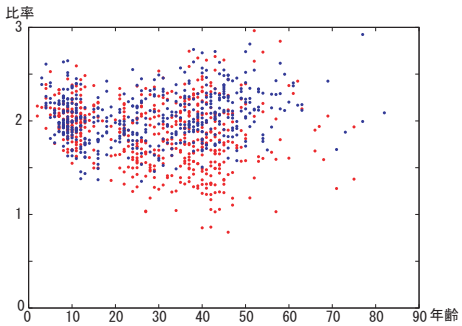


(g) 左まぶた

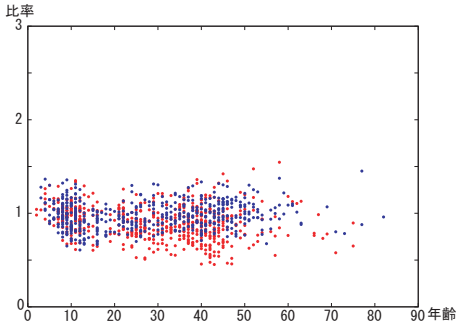


(h) 右まぶた

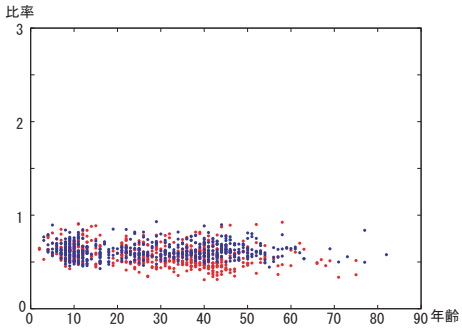
図 10　化粧による散乱光の減衰



(a) R



(b) G



(c) B

図 11　散乱光の比率

5.5　統計的解析

5.5.1　年齢・性別による散乱光の比率の違い

年齢・性別による散乱光の反射光に対する比率を図 11 に示す．横軸が年齢を，縦軸が反射光に対する散乱光の比率の値を表す．グラフ中の青色が男性，赤色が女性である．図 11(a) の各年代ごとの散乱光の比率の平均と分散を男女別に表したグラフが図 12 である．横軸が年代を，青色が男性，赤色が女性で，実線が平均値を，破線が分散を表す．図 12 より，10 歳前後の子供の場合は男女共に比率自体に大きな分散はない．しかし女性のみ年齢と共に比率の分散が大きくなることがわかる．また 10 歳前後の子供の場合，性別による比率の平均値に違いは見られないが，20 歳以上になると女性の値が男性よりも低くなる傾向がある．これらの傾向は化粧をしている成人女性が多いことや 5.4 節の化粧によって散乱光の比率が減るという結果からも化粧による影響であると考えられる．グラフ全体で見ると年齢と散乱光の反射光に対する比率の間には相関は見られず，比率の違いは主に個性によるものだと考えられる．また図 11(a) より，RGB の波長ごとに見ると RGB の順に比率は小さくなる．よって化粧によって肌の内部に入る光の比率に変化はあるが，散乱光の比率は年齢や性別よりも個性による影響が強いと考えられる．

5.5.2　年齢・性別による鏡面反射率の違い

年齢，性別と鏡面反射率に関するグラフを図 13 に示す．横軸が年齢を，縦軸が鏡面反射率を表す．鏡面反射率は 16bit の画素値で示している．図 13 の各年代ごとの鏡面反射率の平均と分散を男女別に表したグラフが図 14 である．横軸が年代を，青色が男性，赤色が女性で実線が平均値を，破線が分散を表す．

図 14 より，鏡面反射率の平均値は男女共に年齢と比例する傾向があることがわかる．また 10 歳前後の子供

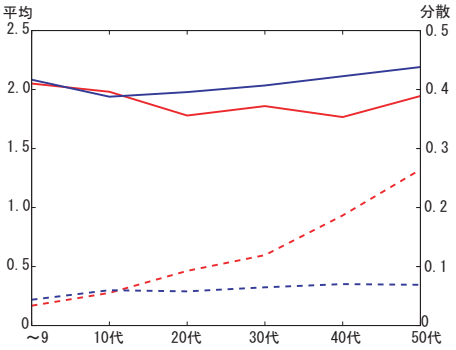


図 12　各年代の散乱光の比率の平均と分散

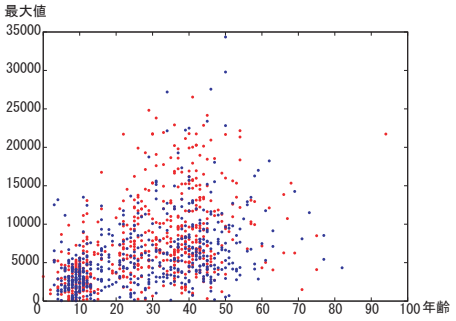


図 13　鏡面反射成分の強さと年齢・性別の関係

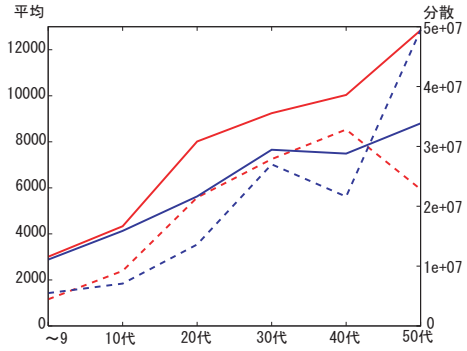


図 14　各年代の鏡面反射率の平均と分散

の場合は分散が小さいが年齢と共に分散が大きくなる傾向がある．このことより，子供は肌のてかりが少なく個人差はあまりないが，成人するとてかりは強くなり個人差が大きくなることがわかる．

6. ま と め

本論文では，人間の肌への入射光を鏡面反射，拡散反射，表面下散乱の 3 つの成分に分けて考え，表面下散乱の局所的な性質と空間的な広がり，鏡面反射の強度を統計的に解析した．表面下散乱の局所的な性質を調べるために入射光を散乱光と反射光に分離し，肌の 1 点において反射光に対する散乱光の比率を調べた．これによって被験者の肌が光を内部に通しやすいかどうか調べることができる．また反射光を拡散反射成分と鏡面反射成分に分離し，鏡面反射率を調べることで肌のてかりの強さを求めた．これらを約 1000 名分の大規模データベースを元に解析することで年齢や性別によって傾向が異なることを明かにした．さらに光源位置が異なるプロジェクタからドットパターンを投影し，ドット部分の周囲の値を調べることで表面下散乱の空間的な広がりを求めた．これによって表面下散乱は入射方向に依存することがわかった．

本論文では表面下散乱の空間的な広がりについて統計的な解析を行っていない．今後の課題として，入射角に対する表面下散乱の広がりを統計的に解析する必要がある．

謝　　辞

本研究の一部は，文部科学省科学技術振興調整費「新映像技術ダイブイントゥザムービーの研究」により進められた．

文　　献

[1] P. Debevec, T. Hawkins, C. Tchou, H. Duiker, W. Sarokin and M. Sagar , “Acquiring the Reflectance Field of a Human Face ”, Proc. SIGGRAPH’99, pp.145-156, 2000.

[2] N. Tsumura, N. Ojima, K. Sato, M. Shiraishi, H. Shimizu, H. Nabeshima, S. Akazaki, K. Hori, and Y. Miyake, “Image-based skin color and texture analysis/synthesis by extracting hemoglobin and melanin information in the skin”, Proc. SIGGRAPH2003, pp.770-779, 2003.

[3] V. Ntziachristos, A. G. Yodh, M. Schnall, and B. Chance, “Concurrent MRI and diffuse optical tomography of breast after indocyanine green enhancement”, Proc. National Academy of Science, vol.97, no.6, pp.2767-2772, 2000.

[4] K. Nitta, O. Matoba, and T. Yoshimura, “Characteristics of Weight Function in a Steady-state Diffusion Optical Tomography”, IEEJ Trans. FM, Vol. 127, No. 7, pp.397-401, 2007.

[5] T. Weyrich, W. Matusik, H. Pfister, B. Bickel, C. Donner, C. Tu, J. McAndless, J. Lee, A. Ngan, H. W. Jensen, and M. Gross, “Analysis of Human Faces using a Measurement-Based Skin Reflectance Model”, Proc. SIGGRAPH2006, pp.1013-1024, 2006.

[6] A. Ghosh, T. Hawkins, P. Peers, S. Frederiksen, and P. Debevec, “Practical Modeling and Acquisition of Layered Facial Reflectance”, Proc. SIGGRAPH Asia 2008.

[7] S. K. Nayar, G. Krishnan, M. D. Grossberg, and R. Raskar, “Fast Separation of Direct and Global Components of a Scene using High Frequency Illumination”, Proc. SIGGRAPH2006 pp.935-944, 2006.

[8] H.W.Jensen, S.R.Marschner, M.Levoy, and P.Hanrahan, “A Practical Model for Subsurface Light Transport”, Proc.SIGGRAPH2001,pp.511-518,2001.

[9] S.K. Nayar, X. Fang and T.E. Boult, “Removal of specularities using color and polarization”, Proc. CVPR’93, pp.583-590, 1993.

[10] S.Barsky and M.Petrou, “The 4-Source Photometric Stereo Technique for Three-Dimensional Surfaces in the Presence of Highlights and Shadows”, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 25, Issue. 10,pp.1239-1252,2003.