

# 光学シミュレーションを用いた 織物の繊維断面形状に基づく光の伝搬解析

田中士郎<sup>†1</sup> 坂口嘉之<sup>†1</sup> 田中弘美<sup>†1</sup>

**概要:** 衣類に用いられる織物は身近なものであるが、繊維は複雑な構造体であり、その質感再現は容易ではない。シルクやそれを模倣して作られたポリエステル繊維には透過性があり、光沢を放つために丸みを帯びた三角断面形状を持たせている。しかし、繊維の断面形状によって、どのように光が繊維内部を伝搬して、織物の光沢に影響されるかは明らかにされていない。そこで本研究では、織物を構成する単繊維の断面形状に着目して、幾何光学に基づく三次元光学シミュレーションにより得られる反射光がどのような光の伝搬に基づくものかを解析する。シミュレーションの光源の入射角  $15^\circ$  と観測角  $15^\circ$  の正反射条件で、まず、シルクライク織物で使用される三葉断面形状のポリエステル単繊維モデルと、その比較対象として三角断面形状の単繊維モデルを作成し、それぞれの物体色の反射光が強く観測される繊維軸の回転角度、光源色が強く観測される角度をシミュレーションより求め、どのような伝搬経路の影響によるものかを解析する。つぎに、複数本の単繊維を平行に並べたとき、さらに繊維を多層にしたときに、周辺単繊維への光の伝播経路と反射光の色度と強度と分布に及ぼす影響を解析する。さらに、三葉断面形状の単繊維を束ねたよこ糸モデルを作成し、シミュレーションと実測との反射光の色度変化を比較検証し、シミュレーションにおける光の伝搬経路について考察する。

**キーワード:** 織物, 光沢, 繊維, 光学シミュレーション

## 1. はじめに

織物や肌のような物体表面の複雑で微妙な色や光沢などの質感を、観測画像データから抽出し高精度にモデリングすることや、それらを忠実に再現しフォトリアルスティックなレンダリングを実現することは、依然としてCV(Computer Vision)およびCG(Computer Graphics)の研究分野における重要な課題である。

最近では、CV、CGの工学、心理物理学、脳科学の分野で質感認知の研究が国際的に注目を集めている。EUでは2011年よりPRISM(Perceptual Representation of Illumination, Shape & Material)プロジェクトが開始され、国内では2010年より新領域「質感脳情報学」が発足し、脳科学に基づく質感認知メカニズムの解明と同時に、素材固有の表面テクスチャの質感情報を工学的に獲得し生成する研究が進められてきた。「質感脳情報学」は、2015年より新領域「多元質感認知」として研究が継続されており、研究者のみならず、企業からも注目を集めている。

織物表面は、色や材質の異なるたて糸とよこ糸の織構造や繊維の断面形状や撚りに基づく微小構造をもつため、異方性光学反射特性を示す。また、絹のような透過性のある繊維や金糸のような素材でできた織物は、光沢を表す鏡面反射光が光源色ではないことが報告されており、富永らは従来の二色性反射モデルを拡張している[1]。

絹糸の繊維は、半透明のガラス棒のような形状をしており、その断面はやや丸みを帯びた三角形で、プリズムのような構造をもつため「絹のプリズム」と表現されている。絹織物はこの絹糸の構造によって光を透過・反射し、複雑

な光沢や質感を発するとされている。

近年のCG分野における織物のレンダリングに関する研究では、織物の透過性が着目され、BSSRDF(Bidirectional Scattering Surface Reflectance Distribution Function)に基づく、表面下散乱を用いたレンダリング法[5][18]が提案されている。しかし、繊維の断面形状による織物の光沢に基づくものではない。

我々は織物の質感を高精度に表現するために、単繊維レベルの高分解能な画像計測を行い、織物表面の微小構造に基づき、鏡面反射光の強さと色度変化を解析した[10][15]。その結果、正反射条件では、よこ糸中心において単繊維の繊維軸が水平であり、単繊維内部に侵入した光が反対側の境界面で反射し、その反射光が観測方向に向かうことで、物体色の強い鏡面反射が観測され、織物の光沢は繊維内部での表面下散乱よりも、単繊維の断面形状に基づく反射による影響が大きいと考察した。

しかし、単繊維の断面形状による織物の光沢の効果は不明であり、画像による解析では極めて困難とされる。

そこで本研究では、三次元光学シミュレーションを構築し、単繊維の断面形状に基づいて、繊維内部における光の伝搬と織物の光沢を解析する。まず、シルクライク織物で使用される三葉断面形状のポリエステル単繊維モデルと、その比較対象として三角断面形状の単繊維モデルを作成し、幾何光学に基づく光学シミュレーションを構築する。次に、光の入射角  $15^\circ$  と観測角  $15^\circ$  の正反射条件で、1本の単繊維の軸の回転角を  $0^\circ \sim 60^\circ$  まで  $1^\circ$  刻みで変化させ、回転角ごとに観測方向へ出射される光の強さと色度を光学シミュレーションより算出する。また、物体色の反射光が強

<sup>†1</sup> 立命館大学 情報理工学部  
School of Information Science, Ritsumeikan University

く観測される単繊維軸の回転角をシミュレーション結果より求め、どのような伝搬経路の影響によるものかを解析する。つぎに、最も物体色の反射が強くなる単繊維の回転角に基づき、複数本の単繊維を平行および多層に並べたときに、周辺単繊維への光の伝播と反射光の色度と強度変化を解析する。さらに、三葉断面形状の単繊維を束ねたよこ糸モデルを作成し、シミュレーションと実測との反射光の色度変化を比較検証し、光の伝搬経路を解析する。

実験結果より、三葉断面の先端の丸みとその間の曲面形状が、繊維内部で光が全反射しやすく、複数本の単繊維を平行および多層に並べたときでは、周辺単繊維への光の伝播が水平および深い層も含めた放射状に広がる効果を持ち、それらの光が観測されることが確認された。また、三葉断面形状の単繊維を束ねたよこ糸モデルでは、1層目の単繊維内での全反射によって、物体色の強い出射光が観測され、表面で生じる光源色の鏡面反射よりも2倍強く、光源色の影響が少ないことが確認された。単繊維に沿った方向での反射光の強さと色度変化を確認すると、入射方向側からよこ糸中心に近づくほど、物体色の色度と反射光の強さが増加し、画像解析による結果と同じ傾向を示すことが確認された。

## 2. 織物の微小構造

絹織物の絹糸やシルクライク織物のポリエステル繊維は長繊維(5~10×10<sup>5</sup>mm)を束ねたフィラメント糸であり滑らかで光沢がある。また、透過性が高く、断面が三角形の半透明なガラス棒のような形状をしており、「絹のプリズム」と表現されている。図1(a)に示す、繭糸の2本の繊維(フィブロイン)の断面はやや扁平な丸味を帯びた三角形形状をしている。そのため、ポリエステルのような人絹繊維は、図1(b)(c)に示すように、三葉断面と呼ばれる断面形状で透過性がある。

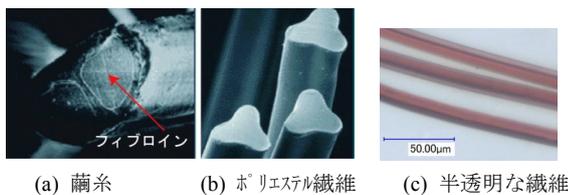


図1 繊維の断面形状

また織物は、組織図とよばれるたて糸とよこ糸が浮沈して交差する仕方に基づいて織られ、複雑で微細な立体形状が織物表面の微小構造を形成している。図2に、朱子織の組織図と朱子織(サテン)を実体顕微鏡で撮影した画像を示す。

このように、組織図に基づいて、繊維の束からなるたて糸とよこ糸の交差により形成される、複雑で微細な立体形状が織物表面の微小構造を形成している。

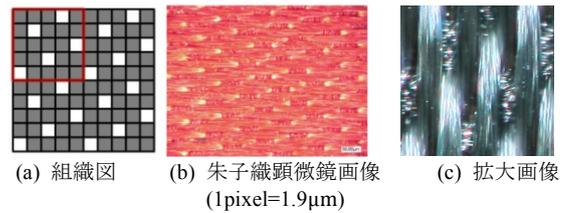


図2 朱子織(サテン)の組織図と顕微鏡撮影画像

## 3. 関連研究

織物の構成要素は、布(fabric)、糸(yarn)、繊維(fiber)に分類され、一般的な剛体や均一な半透明物体のレンダリングと比べて複雑なものであり、従来からCVおよびCGの分野において研究テーマとされている。

能装束に代表される有形文化財では、金箔を糸に張り付けた金欄や、透過性が高く独特の光沢を生み出す絹糸等、さまざまな素材で構成された織物が存在し、それらをVR空間で忠実に再現するために、素材固有の反射光を計測しモデル化を行う研究が進められてきた[11,12,13]。

近年ではコンピュータの高性能化に伴い、透過性のある物体を対象としたレンダリングの研究が進められている。双方向散乱面反射率分布関数(BSSRDF)[4]の概念に基づく表面下散乱現象をモデル化することによって、牛乳や人肌など透過性を持つ媒体および材質が、従来のBRDF(Bidirectional Reflectance Distribution Function)によるレンダリング[16][17]よりもリアリティに表現されるようになった[3]。織物のレンダリングの研究に関しても同様に、糸、あるいは繊維が透過性を持つことに着目し、糸の断面を楕円形状に近似した糸モデルをベースとした表面下散乱を用いたレンダリング法[5]や、繊維レベルの高分解能で織構造の透過率を測定して作成されたポリウムデータを用いたレンダリング法[6]などが提案されている。Irawanら[5]は、織物の表面下散乱のレンダリング法として、糸モデル内部の単一散乱による計算を行っているが、繊維までは考慮されていない。繊維は糸モデルに巻きつけた状態として定義され、鏡面反射を計算するために用いられる。このように、繊維内部に侵入した光の伝搬と織物の光沢との関係については解明されておらず、単繊維の断面形状に基づいたレンダリングまでには至っていないとされる。

織物とは別に繊維に近い存在のレンダリングとして、髪の毛のレンダリングが挙げられる[7][8]。髪の毛を覆うキューティクルによる表面構造によって、反射光は正反射方向よりも2~3°ずれた方向に強く観測されることが報告されている。髪の毛のように断面の直径が短い場合、髪の毛内部を伝搬する光の反射によるレンダリングが用いられる。

織物の単繊維と髪の毛の異なるところは、髪の毛の断面は楕円形状であるが、織物の単繊維は、異形断面も含まれる点である。そのため、繊維の研究分野では異形断面の単繊維での反射解析も行われている[9]が、VRでの再現を目

のとされていない。

我々は実世界に存在する織物の質感を忠実に再現するために、単繊維の太さ ( $10\mu\text{m}$ ) が観測可能な分解能で織物の微小領域で観測される鏡面反射光および表面下散乱光の解析を行った。図 3 (a) に示すように、織物のよこ糸に沿って正反射となるような入射角と観測角の条件において、1 画素  $5\sim 7\mu\text{m}$  の分解能で織物の微小構造を多重露光で観測し、得られた高分解能マルチバンド HDR 画像から、各画素の鏡面反射光の分光反射率 (標準白色板の分光反射率を基準) を推定した [10]。織物から物体色の強い鏡面反射光が観測された。また、織物の微小面から観測される鏡面反射光の強さと色度と、その領域との相関を解析した [1514]。その結果、図 3 (b) に示すように、観測された鏡面反射光はよこ糸中心の正反射に近づくほど強く、色度は物体色が強くなる方向へ変化することが確認された。

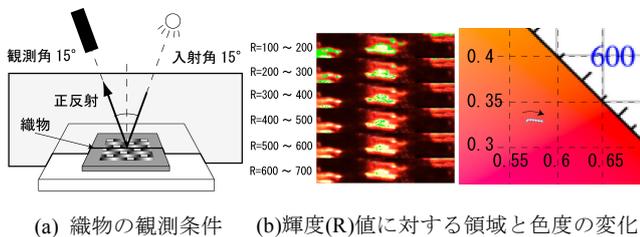


図3 織物の鏡面反射の解析

これに関する考察として、まず、透過性のある物体の物体内部で生じる光学現象として、表面下散乱と境界面での反射および透過の2つが挙げられる。表面下散乱の計算として主にパーティシペイティングメディアの式が用いられる。これは、物体内部に侵入した光が粒子に衝突したときに発生する光の散乱現象をモデル化したものである。また、表面下散乱は1回の粒子との衝突した光が観測される指向性の強い単一散乱と、複数回の粒子との衝突によって等方性となる多重散乱に分類される。織物の単繊維は透過性が高いため、単繊維の内部では単一散乱のような指向性の高い表面下散乱が生じやすく、光の進行方向のエネルギーの減少が少ない。また、単繊維の厚みは  $10\mu\text{m}$  と非常に薄いことから、単繊維内部に侵入した光が反対側の境界に到達しやすくなる。実際の画像解析において、正反射条件ではよこ糸中心付近において物体色の強い鏡面反射が観測されたことから、よこ糸中心では単繊維の繊維軸が水平になっており、単繊維内部に侵入した光が反対側の境界面で反射し、その出射光が強く観測されるものと考察した。

しかし、単繊維の軸方向の曲がりと多層による鏡面反射光の影響であり、単繊維の断面形状による影響に関しては未解決である。図 3 (b) のよこ糸の観測画像に示すように、複数の単繊維が束になって構成される1つのよこ糸上で観測される反射光の強さは、単繊維ごとに大きく異なる。これは、単繊維の断面形状とその向きによって、単繊維内部に侵入した光の伝搬が異なるからであると推測され、このような変化が、人が織物を見たときに感じる光沢の質に影

響するものと考えられる。したがって、シルクおよびシルクライク繊維のような極めて透過率が高い織物では、表面下での光の伝搬の解析が重要であり、本研究の本質的な位置づけとされる。

実測より得られた物体色の鏡面反射がどのような光の伝搬によって得られたものかを画像から解析することは極めて困難である。そこで本研究では、光学シミュレーションを構築して光の伝播解析を行う。

#### 4. 三次元光学シミュレーションの構築

本研究では、幾何光学に基づいた光学計算による3次元の光学シミュレーションを行う。図 4 に示すように、3次元の単繊維モデルを定義して、それらを平行および多層に定義した繊維モデルを構築し、繊維モデルに入射した光の伝搬経路や観測方向へ向かう光を分光分布で示す。本章では、単繊維モデルの構築、光学シミュレーションで使用する光学計算について述べる。

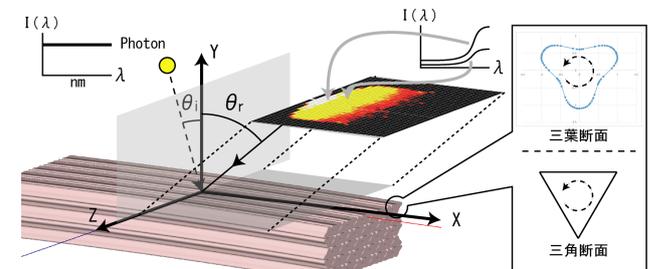


図4 光学シミュレーションの概要

##### 4.1 三葉断面の単繊維モデルの生成

三葉断面の単繊維モデルの生成法について述べる。画像解析で使用した赤色サテンの繊維をばらし、光学顕微鏡で撮影した単繊維の断面形状を図 5 (a) に示す。この画像から得られた三葉断面の輪郭情報を抽出し、図 5 (b) に示す三葉断面の輪郭データを作成する。次に、この輪郭データに対して、垂直方向成分となる繊維軸方向の直線または曲線情報を与えることで、図 5 (c) に示すような三葉断面の単繊維モデルを生成する。

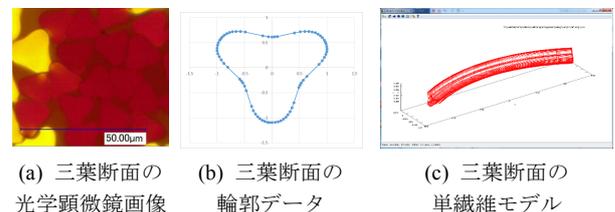


図5 三葉断面の単繊維モデル

##### 4.2 光学計算について

図 6 に光学計算の概要図を示す。光は繊維と空気の境界面において、反射、屈折による透過を起こす。実際の繊維には織構造に基づき繊維軸に曲がりがあるが、曲がりのない直線で示す。

入射光をエネルギーの持つ光の粒子 (以降 Photon と呼ぶ) が複数集まったものとして定義する。理想光源環境下で入

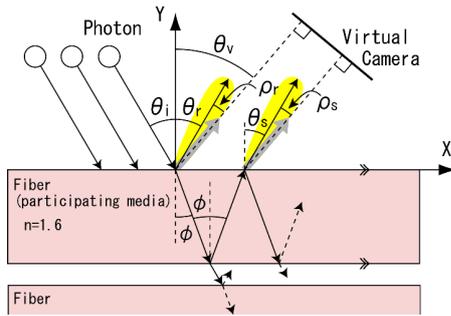


図6 光学計算の概要

射光は白色で、可視光とされる範囲の各波長におけるエネルギーが一定値となる分光分布を初期値とする Photon を定義する。シミュレーション空間座標系の Y 軸を垂直方向とし、Y 軸に対する角度  $\theta_i$  を入射角と定義して、Photon の入射ベクトル  $I$  を算出する。

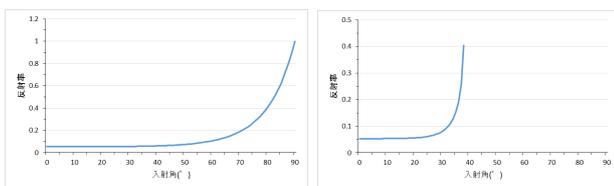
入射ベクトル方向に直進する Photon は、図 6 に示すように、単繊維に接触する。接触の際、繊維の境界面において反射、屈折による透過現象が生じる。Photon の入射ベクトルと境界面との交点における法線ベクトルと屈折率から、光線屈折式を用いて反射および屈折方向ベクトルを算出する。光線屈折式はスネルの法則を三次元に拡張したもので、次式により示される。

$$N \times I' = \left| \frac{n_1}{n_2} \right| \cdot N \times I \quad (1)$$

$n_1$ ,  $n_2$  は 2 つの媒体のそれぞれの屈折率、 $I$  は Photon の入射ベクトル、 $N$  は入射光と境界面との交点における法線ベクトル、 $I'$  は屈折された光の方向ベクトルを示す。媒体の屈折率  $n_1 = 1.0$  (空気) とし、媒体の屈折率  $n_2$  は、繊維の材質である PET (ポリエチレンテレフタレート) であることから、媒体の屈折率  $n_2 = 1.6$  と定義する。

また、境界面における反射と屈折による光のエネルギーは、フレネルの式により算出される。図 7 に、フレネルの式を用いて空気から繊維内部に入射したときの入射角に対する反射率と、その逆の条件での反射率のグラフを示す。グラフの横軸は繊維境界面に対する光の入射角を示し、縦軸は反射率 (最大=1.0) を示す。繊維内部を伝搬する光が境界面に進む場合、境界面に対して入射角  $39^\circ$  以上で全反射することから、繊維内部を伝搬する光の方が全反射しやすいことがわかる。

単繊維境界面で屈折した Photon は繊維内部に侵入する。繊維内部では、波長ごとに Photon のエネルギーの吸収率が



(a) 空気( $n_1=1.0$ )→繊維( $n_2=1.6$ ) (b) 繊維( $n_2=1.6$ )→空気( $n_1=1.0$ )

図7 入射角に対するフレネル反射率

異なる。単繊維内での光の吸収について、波長  $\lambda$  の光  $I(0, \lambda)$  が繊維内部において距離  $x$  (光路長) まで進んだ時のエネルギー  $I(x, \lambda)$  は、吸収係数  $\alpha(\lambda)$  を用いると式(2)のように示される。

$$I(x, \lambda) = I(0, \lambda) e^{-\alpha(\lambda)x} \quad (2)$$

また、吸収係数と透過係数  $T(\lambda)$  は以下の関係式で示される。

$$T(\lambda) = 1 - \alpha(\lambda) \quad (3)$$

繊維内部での Photon のエネルギーを計算するためには、単位長における波長ごとの透過係数が必要となる。この透過係数については、織構造の隙間等で直接光が入るため、直接計測して求めることが困難であったため、今回は拡散反射の分光反射率を用いた。繊維内部の伝搬距離  $x$  が増加するほど  $I(x, \lambda)$  は減少する。織物は赤色なので、青、緑等の短波長側のエネルギーが吸収され、初期状態である白色の分光分布から赤色成分の多い分光分布へと変化する。CIE-xy 色度座標は、 $x$  の座標値が増加する方向へと変化する。

以上の光学計算に基づき、光の伝搬経路のシミュレータの構築を行う。

### 4.3 出射光の観測方向成分について

繊維内部において反射および透過を繰り返して繊維から出射された Photon の方向ベクトルは、図 6 に示すように、必ずしもカメラの観測方向ベクトルと一致するわけではなく、各 Photon に対して観測方向成分のエネルギーを計算する必要がある。単繊維表面での鏡面反射光に対する観測方向成分と、単繊維内部からの出射光に対する観測方向成分を別々で扱う方法として、本研究では高周波格子パターン投[2]による、直接成分 (鏡面反射・拡散反射) と大域成分 (表面下散乱・相互反射) の分離法を用いる。プロジェクタより数種類の高周波パターンを織物に投影して、その入射角を 1 度ずつ変化させた多方向照明画像を観測し、直接成分と大域成分を抽出する[14]。

図 8 に、正反射条件からのズレ角に対する直接成分と大域成分の反射率のプロットデータを示す。正反射条件 (ズレ角=0) での反射率が 1 になるように正規化した。

次に、直接成分と大域成分の反射率のプロットデータに対し、式(4)、式(5)でフィッティングを行い、パラメータを算出した。直接成分のフィッティング式を示す式(4)では、拡散反射成分と鏡面反射成分の線形和として、それぞれランバーシアンとガウス関数を用いた。

$$f_{direct}(\theta) = a \cos(\theta - b) + (1 - a) e^{-\frac{(\theta-d)^2}{2c^2}} \quad (4)$$

$$f_{global}(\theta) = a|\theta - d| + b + e^{-\frac{(\theta-d)^2}{2c^2}} \quad (5)$$

図 8 の実線は、算出したパラメータによる近似曲線を示

す。パラメータ  $d$  に関しては、計測環境による誤差によるものと考えられ、実際のシミュレーションでの計算では使用しない。光源色の鏡面反射では式(4)によるパラメータ、繊維内部からの出射光に関しては式(5)によるパラメータを用いて、観測方向成分のエネルギーを算出する。

光の伝搬経路データから、設定した仮想カメラの各画素で受光される反射光のスペクトルを算出する。

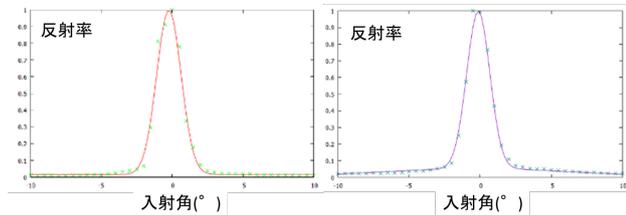


図8 入射角に対する直接成分・大域成分の反射率

## 5. 実験

### 5.1 単繊維の断面形状の違いによる反射光解析

よこ糸中心では繊維軸方向が水平であることから、微小面における法線の X 軸方向成分（観測画像の X 軸方向成分）は真上である。微小面は複数本の単繊維の側面により構成される。しかし、繊維軸の回転角度によって、微小面における法線の Y 軸方向成分は変化する。また、単繊維の太さは約  $10 \mu\text{m}$  で、観測画像の 1 ピクセル ( $7 \mu\text{m}$ ) 範囲内においても、微小面における法線の Y 軸方向成分は変化する。そのため、反射光の方向や繊維内部からの出射方向も変化するため、観測される反射光の強さと色度が変化する。

そこで、繊維軸の回転角度に対する反射光のエネルギーと色度の変化をシミュレーションより解析する。また、観測される反射光の色度および鏡面反射が強くなる回転角度を決定する。

図 9 に示すように、単繊維モデルを水平方向に定義し、入射角  $15^\circ$ 、観測角  $15^\circ$  の正反射の条件で、Photon エネルギーの初期値を 100 とし、 $0.1 \mu\text{m}$  の間隔で単繊維の太さを 1 ライン分の Photon を入射させる。1 本の単繊維の軸の回転角  $\rho$  を  $0^\circ \sim 60^\circ$  まで  $1^\circ$  刻みで変化させ、各  $\rho$  の条件において観測方向へ出射される光の色度とエネルギーを光学シミュレーションより算出する。繊維断面形状として三角断面と三葉断面の 2 種類で評価した。

図 10 に、光学シミュレーションによって得られた、三葉断面と三角断面の回転角  $\rho$ （グラフ横軸）に対する、正反射方向への反射光の強さと色度の結果を示す。最上段の図

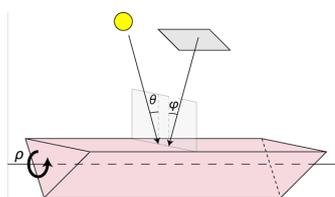
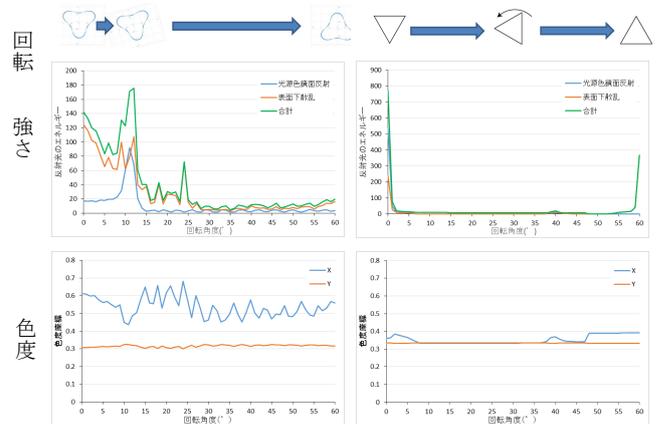


図9 単繊維の繊維軸回転による実験概要

は  $\rho$  での単繊維の断面の向きの状態を示す。

三葉断面では、 $\rho = 0^\circ$  の時、赤色の強い反射光が得られる結果となった。また、 $\rho = 11^\circ$  の時、光源色の鏡面反射が強い結果となった。一方、三角断面では、 $\rho = 0^\circ$  の時に反射光が三葉断面よりも 5 倍強いものの、色度は極めて光源色に近く、色度座標はいずれの回転角においても  $x < 0.4$  で、光源色に近い状態となることが確認された。



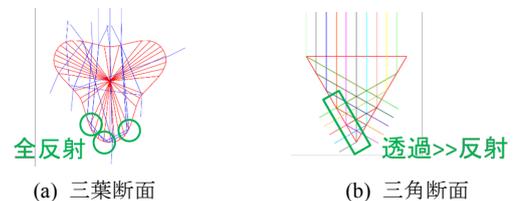
(a) 三葉断面

(b) 三角断面

図10 単繊維の断面回転による正反射方向の反射光の結果

次に、三葉断面の  $\rho = 0^\circ$  における反射光が赤くなる原因を解析するために光の伝播経路を出力した。図 11 に特徴となる光の伝播経路を示す。

三葉断面では、図 11 (a) に示すように、丸みを帯びた先端部において、繊維内部を伝搬する光が全反射することによって、観測方向へ物体色の強い光が出射されることが確認された。一方、三角断面では、図 11 (b) のに示すように、緑で囲まれた境界において入射角が少なく、透過が多くなるため観測方向へ物体色の光が出射されにくいことが確認された。三葉断面の先端の丸みとその間の緩やかな曲面により、内部での全反射が生じやすく、表面での反射光や出射光が拡散され、赤色の強い反射光として観測される効果を持つことが確認された。



(a) 三葉断面

(b) 三角断面

図11 光の伝搬経路の比較( $\rho = 0^\circ$ )

### 5.2 単繊維を平行・多層に並べた場合の周辺繊維への光の伝搬解析

複数本の単繊維を平行および多層 (5 層) にしたときに、周辺単繊維への光の伝播経路と反射光の色度と強度と分布に及ぼす影響を解析する。前節より、三葉断面の回転角度  $0^\circ$  が最も赤い反射光が観測されることから、三角断面と三葉断面を図のように敷き詰めて並べたときの周辺単繊維への光の伝播のシミュレーションを行った。Photon の入射条

件は前節と同様の条件とした。また、観測側の空間分解能を  $0.7 \mu\text{m}$  とした。

図 12 に、三葉断面と三角断面それぞれの光の伝播の分布および、各層から観測方向へ出射された光のエネルギーおよび色度を示す。上段の光の伝播の分布の緑の実線が Photon の入射光を示し、青色の実線が繊維内部からの出射光を示す。観測方向への出射光の強さ、色度を示す画像の 1 ピクセルは、 $0.7 \mu\text{m}$  の範囲を示す。

単繊維を平行に並べることによって、中心の単繊維に入射した光が周辺繊維に伝搬することが確認された。周辺繊維の伝播の分布に関しては、三葉断面の方がどの方向にも広がるのに対し、三角断面では特定の方向のみの広がりとなった。繊維内の光の伝播の広がりは各断面の法線方向の分布に特徴づけられることがわかった。また、光の伝播が単繊維の方向に対して周辺繊維に広がりがあるのは、入射角  $15^\circ$  と低いことも関連する。入射角を大きくすると、単繊維内部での全反射が生じやすくなるため、周辺繊維への光の伝播が減少すると考えられる。

単繊維を多層にすることで、2 層目以降の物体色の色度を持つ出射光があることが確認された。入射点から繊維軸方向に対して遠くの位置で出射される光は、深い層まで伝播した光によるものということが確認された。

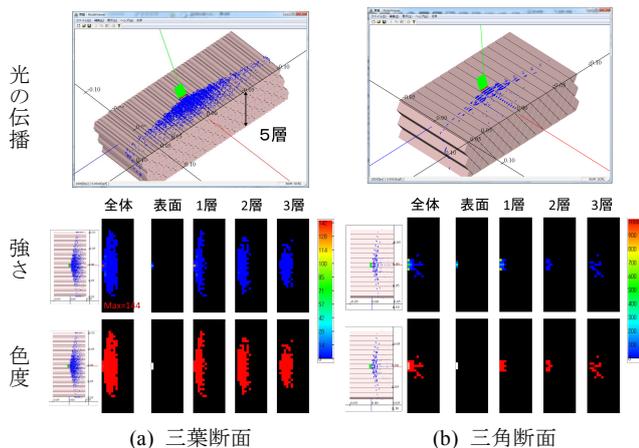
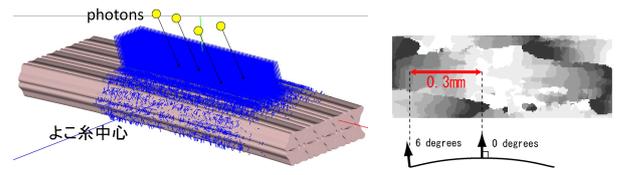


図12 周辺単繊維への光の伝播経路と反射光の色度と強度

### 5.3 よこ糸上における反射光解析

織構造による、よこ糸の浮沈による曲がり方を考慮した光の伝搬解析を行う。

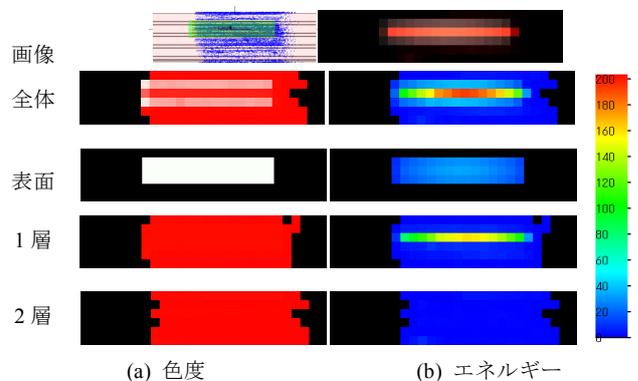
まず、単繊維によこ糸の曲がりを与えるために、よこ糸方向に沿って光源位置を変化させて撮影された多方向照明画像から、図 13 (b)に示す、X 軸方向成分の法線マップ画像を生成した。法線マップの最も高い輝度値(=255)を示す領域が正反射領域を示し、その中心位置からの距離と正反射のズレ角の対応から近似曲線を算出し、各単繊維モデルに同じ曲がりを与え、よこ糸モデルを作成した。5.2 節と同じ入射、観測角の条件で、入射領域を繊維軸方向に対し  $x = -50 \sim 50 \mu\text{m}$ 、軸の垂直方向に対し  $z = -10 \sim 10 \mu\text{m}$  の範囲に指定して、光学シミュレーションを行った。



(a) 光学シミュレーション (b) よこ糸の法線マップ

図13 光学シミュレーション結果と法線マップ

図 13 (a)に、光学シミュレーション結果を示す。また、図 14 に観測方向成分の RGB 画像 (最上段) と、各繊維層からの観測方向への出射光の強さと色度を示す。結果より、表面層で生じる光源色の鏡面反射光よりも、1 層目の単繊維内部からの出射光が 2 倍ほど強く (実際には赤色波長領域にエネルギーが集まっている)、全体の観測方向への反射光の色度は、1 層目からの出射光による影響が大きいことが確認された。

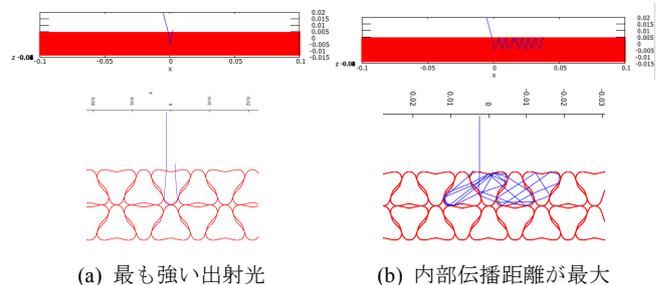


(a) 色度 (b) エネルギー

図14 三葉断面の観測方向成分の反射光の色度と強度

また、図 15 に、最も出射光の強い光の伝播経路と、最も距離の長い光の伝播経路を示す。上段は単繊維の軸を水平方向として真横から見た図を示し、下段は繊維の断面方向から見た図を示す。

出射光の最も強いのは、1 層目の単繊維において、三葉断面の丸みのある先端部で 3 回全反射を生じる経路であった。距離が最も長い経路の特徴としては、周辺単繊維を含めた全反射が繰り返されていることが確認された。



(a) 最も強い出射光 (b) 内部伝播距離が最大

図15 光の伝播経路

最後に、図 14 内で最も観測方向への出射光が強くなるピクセル X 軸方向、つまり繊維軸方向に沿ったピクセルの反射光と色度変化をグラフ化した結果を図 16 に示す。グラフの横軸  $X = 0.0 \mu\text{m}$  の位置がよこ糸の中心位置となる。グラフから、入射方向側である  $X = -50 \mu\text{m}$  からよこ糸中心

( $X = 0.0$ )に近づくほど、観測方向に向かう光源色の鏡面反射と、単繊維内部から出射される物体色の反射光が増加し、色度  $x$  も増加することによって赤色成分が増加した。この変化に関しては、図3で示した織物の物体色の鏡面反射解析による結果と同じ傾向を示すことが確認された。したがって、厚みが  $10\ \mu\text{m}$  と薄く透過性のある単繊維では、繊維内部を伝搬する光の繊維内部で生じる反射が、織物の光沢に影響されると考察される。

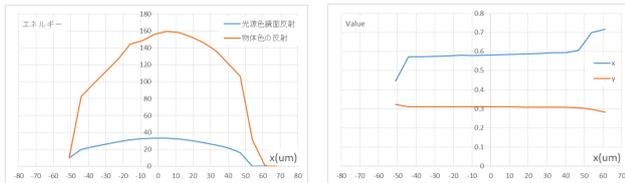


図16 よこ糸繊維上の反射光の強さと色度変化

## 6. おわりに

本研究では、織物を構成する単繊維の断面形状に着目して、幾何光学に基づく三次元光学シミュレーションを構築し、単繊維1本での正反射方向での反射光の分布、複数本の単繊維を平行および多層方向に並べたときの周辺単繊維への光の伝播経路と反射光の色度と強度の分布を解析した。その結果、単線の断面の回転角が  $0^\circ$  の状態では、三角断面よりも正反射方向に物体色の色度の強い反射光が観測され、他の回転角に関しても正反射方向へ出射する光は物体色が強くなることを確認された。三葉断面の先端の丸みとその間の曲面形状が、繊維内部での全反射を生じやすくさせ、また、断面を含む方向成分に対して、偏りのない光の出射が生じることによって、周辺繊維への光の伝播が放射状に広がることを確認された。

さらに、三葉断面形状の単繊維を並べたよこ糸モデルを作成し、正反射条件での光学シミュレーションを行った。解析結果より、1層目の単繊維内での全反射によって、物体色の強い出射光が観測され、表面で生じる光源色の鏡面反射よりも2倍強く、光源色の影響が少ない結果となった。また、単繊維に沿った方向での反射光の強さと色度変化を確認すると、入射方向側からよこ糸中心に近づくほど、物体色の色度と反射光の強さが増加し、画像解析による結果と同じ傾向を示すことが確認された。

今後の課題として、まず、糸を構成する各単繊維が実際にどのような配置になっているか、繊維間距離や断面の向き、さらに糸の撚りに着目して、単繊維の向きが判断できるほどの高分解能なCTスキャンを用いて織物の糸の断面形状の測定を行う。また、光学シミュレーションの精度評価として、単繊維や糸モデルを3Dプリンタで出力し、実測による反射光の計測による比較も必要と考えられる。

**謝辞** 本研究の一部は、新学術領域研究「質感脳情報学」公募研究(25135730,代表:田中弘美)と、科研費補助金 基盤C (26330213,代表:坂口嘉之) 助成を受けたものである。

## 参考文献

- 1) S. Tominaga, "Dichromatic Reflection Models for a Variety of Materials," Color Research and Application, Vol.19, No.4, pp.277-285, 1994.
- 2) 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.
- 3) H. W. Jensen, S. R. Marschner, M. Levoy, P. Hanrahan, "A Partical Model for Subsurface Light Transport", Proc. SIGGRAPH2001, pp.511-518, 2001.
- 4) S. Tariq, A. Gardner, I. Llamas, A. Jones, P. Debevec, and G. Turk, "Efficient Estimation of Spatially Varying Subsurface Scattering Parameters", Modeling, and Visualization 2006.
- 5) P. Irawan, "Specular Reflection from Woven Cloth," ACM Transactions on Graphics, Vol. 31, No. 1, Jan 2012.
- 6) S. Zhao, W. Jakob, S. Marschner and K. Bala, "Structure-aware Synthesis for Predictive Woven Fabric Appearance," Proc. ACM SIGGRAPH 2012, Vol. 31, No. 4, July 2012.
- 7) S. R. Marschner, H. W. Jensen, M. Cammarano, S. Worley, and P. Hanrahan, "Light scattering from human hair fibers." ACM Transactions on Graphics, Vol. 22, No. 3, pp. 780-791, 2003.
- 8) W. Jakob, J. T. Moon, S. Marschner, "Capturing Hair Assemblies Fiber by Fiber," ACM Transactions on Graphics, Vol. 28 No. 5, 2009.
- 9) X. Liu, R. K. Ramaprasad, Y. Ning, F. Wang, "Goniophotometric Study of Reflectance of Non-circular Cross-section Polyester Monofilament and Its Yarn under Various Applied Tensions," Fibers and Polymers, Vol. 14, No. 10, pp. 1754-1761, 2013.
- 10) 田中士郎, 高柳亜紀, 土田勝, 坂口嘉之, 田中弘美, "高分解能マルチバンドHDR画像解析に基づく織物の分光反射率推定", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.20, No.1, pp.35-44, Mar. 2015.
- 11) 武田祐樹 坂口嘉之 田中弘美:少数視点画像の反射光解析に基づくシルクライク織物の異方性反射レンダリング, 芸術学会論文誌, vol.17, no.4, (2008).
- 12) 尾崎遼 西脇靖洋 武田祐樹 湯原卓広 田中弘美:多方向HDR画像を用いたシルクライク織物の3次元構造モデリング, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.14, No.3, pp.315-324 (2009).
- 13) 武田祐樹 田中弘美:多方向照明HDR画像を用いた金襴の多重解像度異方性BTFモデリング, 電子情報通信学会論文誌D, Vol.J91-D, No.12 (2008).
- 14) 田中士郎, 平井佐和, 坂口嘉之, 田中弘美, "超高解像度HDR画像計測によるシルクライク織物の反射と散乱特性抽出", CVIM研究会技術研究報告, Vol. 186, No. 6, pp. 1-8, Mar. 2013.
- 15) 田中士郎, 坂口嘉之, 田中弘美, "高分解能マルチバンドHDR画像を用いた織物の微小構造に基づく鏡面反射の色度解析", CVIM研究会技術研究報告, Vol. 195, No. 11, pp. 1-7, Jan. 2015.
- 16) M. Ashikhmin, S. Premoze and P. Shirley, "A Microfacet-based BRDF Generator," Proc. SIGGRAPH 2000, pp.65-74, July 2000.
- 17) S. H. Westin, J. R. Arvo, and K. E. Torrance, "Predicting Reflectance Functions from Complex Surfaces," Proc. SIGGRAPH 92, pp. 255-264, 1992.
- 18) I. Sadeghi, O. Bisker, J. D. Denken, and H. W. Jensen, "A Practical Microcylinder Appearance Model for Cloth Rendering," ACM Transactions on Graphics, Vol. 32, No. 2, 14:1-14:12, Apr 2013.