

表面下散乱モデルによる奈良絵本の表現

相井 孝仁
龍谷大学 理工学部

八木 貴司 廣瀬 翼 岡田 至弘
龍谷大学大学院 理工学研究科

近年、デジタルアーカイブ化に進展にともないインターネット上で貴重書の閲覧が可能となってきている。多くの閲覧用の貴重書の画像は、内容を読み取るだけならば十分な解像度・階調性を有するが、表面の質感までを表現することは困難である。貴重書の中には、彩色に用いられる顔料によって微細な凹凸が出来ている。その微細な凹凸により、反射が異なる。そのような顔料特性を考慮した反射を表現するため、従来の表面下散乱モデルを拡張させ、奈良絵本を対象として閲覧表示を目指す表現方法について述べる。

Expression of Nara-Ehonn by a Subsurface Scattering model

Takahito Soui
Faculty of Science and Technology
Ryukoku University

Takashi Yagi Yoku Hirose Yoshihiro Okada
Graduate School of Science and Technology
Ryukoku University

Recently, the valuable books can read on the Internet by digital archive. The images of the valuable books have high resolution property and high depth property. But the images cannot express surface feel of a material enough. Surface of valuable books has the minute unevenness by color pigments. By the minute unevenness, reflections are different. To express the reflection that considered such a colorant characteristic, we expand a conventional subsurface scattering model for the Nara-Ehonn.

1. はじめに

貴重書が公開展示される場合、厳重に管理されているため、直接触れることはできず、閲覧することは不可能である。しかし、近年では貴重書の保存や研究目的のために、デジタル化する動きが盛んである。そのようなデジタル化された貴重書の一部は、インターネット上で公開され、いつでも誰でも閲覧することが可能になった。

しかし、閲覧できる貴重書の多くは、一定方向からのみの画像である。そのため、このような貴重書などのページ画像から、ページ画像を繰る形式のブラウジングインターフェイス [1] の開発が進められている。これは、本を 3D オブジェクトとして表現し、ページ画像をテクスチャマッピングすることで、本の形態を再現している。また 3D オブジェクトであるため、回転も可能である。ページをめくる動作を再現しており、実際の本と同じようにめくることができる。しかし、回転やめくることによって生じる光の反射については考慮されていない。貴重書の中には、奈良絵本のように、鮮やかな色彩を持つものが多くある。その色彩は、用いる顔料としての岩絵具と、素地としての和紙を含めた反射特性による。このような顔料特性を考慮した反射を従来の反射モデルによる表現では実現できていなかった。

類似する研究として、デジタルアーカイブされた油彩画の表現方法 [2] がある。油彩画は奈良絵本と同様、表面に凹凸があるため、光沢やハ

イライトが光源位置や視点位置によって異なる。このような変化を表現するため、光源の位置を移動させ、絵画表面を異なった方向から照明し、複数の画像を撮影する。撮影した画像から観測データを取り出し、反射パラメータを推定する。そのデータに基づいて希望する照明と観察の条件で美術絵画の画像を生成している。

そこで本研究では単体のみの反射を考慮するだけではなく、紙のような透明に近い材質のものが重なることによる不透明さを表現するため、表面下散乱を考慮する。また、粒子による反射を再現するために、従来の表面下散乱モデルを拡張させることにより、奈良絵本を表現する。

2. 奈良絵本と顔料特性

2-1. 奈良絵本

奈良絵本とは、室町中期から江戸前期までの間に作られた明るい彩色の素朴な作風を特色とする奈良絵入りの写本のことである。現在のところ、約 400 編の作品が現存しており、「浦島太郎」や「一寸法師」、「竹取物語」など、今日まで読み継がれている作品もある。しかし、作者は不明であることが多い。

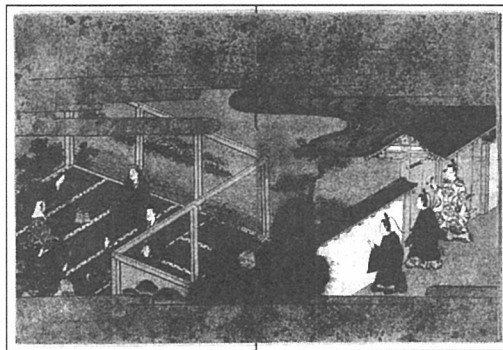


図0.奈良絵本 竹取物語上

奈良絵本は、おおよそ横本・縦本・大型縦本の3つに分けられ、その造本も様々である。その1ページ、ときに見開き2ページの絵は泥絵具などを用いた奈良絵風のもの、細密華麗な作風のものがあり、ともに天地に「すやり霞」と呼ばれる横に長く棚引く霞をつけた定形の構図を持つ。いずれも朱、緑など鮮やかな色彩が目立ち、その朱や緑などの鮮やかな色には、岩絵具と呼ばれる顔料を用いている。これが奈良絵本の表面に微細な凹凸を形成している。

2-2. 顔料特性

岩絵具とは、様々な鉱石や貴石等を砕いて出来た粉末状の絵具であり、膠（ニカワ）を定着剤として併用する絵具である。粉末の目の細かさは番数で分別されている。数字が大きくなるほど粒子が細くなり、最も細かいものを白（びやく）とよぶ。細かい粒子になるほど鉱物粒子表面の乱反射が多くなり白っぽくなる。また、粗い粒子になるほど乱反射が少なく暗色になる。その性質を利用することで、同じ鉱物から色調を調節することができる。この粒子の大きさの違いによる光の屈折率の違いが、奈良絵などの日本画独特の色合いを作っている。

また岩絵具には天然岩絵具と人工岩絵具がある。天然岩絵具は、藍銅鉱、孔雀石、赤珊瑚等の天然の原材料から作られる。中には「焼く」事で色合いを変えられる色が存在する。

一方、人工岩絵具には新岩絵具と合成岩絵具があり、ともに天然岩絵具の資源枯渇や値段の高価さのために代替品として用いられている。

新岩絵具は珪酸質を含む鉱物と発色性の金属酸化物を高温で溶かし温度差によって様々に発色させ人工岩石を砕いて製造したものである。そのため、天然にはない様々な色を作ることが可能である。また、合成岩絵具は天然の水晶・

方解石を粉砕し対光性のある染料で化学的に染め付けたものである。

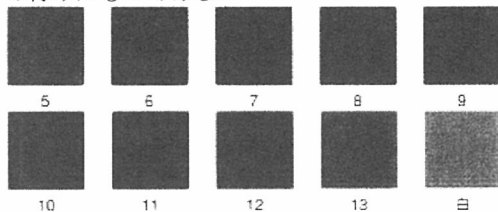


図1.岩絵具 群青[5~白]

3. 顔料特性の測定

先に述べた顔料特性は、人間の主観的評価であり、実験的に得られた結果ではない。そこで、天然岩絵具と人工岩絵具の粒子の大きさに応じた、反射強度を測定する。

3-1. サンプル作製

今回の実験では、天然岩絵具の群青と緑青、人工岩絵具の群青と群緑を用いてサンプルを作製した。顔料の番号と、粒子サイズの関係を表1に示す。使用した顔料はそれぞれ、天然の群青が9・14番の2種類、緑青が5・14番の2種類、人工の群青が6~14番の9種類、群緑が6・7・9・10・11・13番の6種類。サンプルの作製方法は、発泡スチロールに両面テープを貼り付け、そのテープの上に各顔料を一様に敷き詰めた。

表1.顔料の番号と平均粒子サイズ

番号	7	8	9	10	11	12	13	14
平均粒子サイズ(μm)	100	70	50	30	15	10	7	5

3-2. 測定方法

図3に示す、変角分光強度測定(ゴニオフォトメーター)を用いて反射強度の測定を行った。光源にはPACL-NEX(日本ピー・アイ,150W)を、受光部のセンサーにはマルチチャンネル分光器(オーシャンオプティクス)を使用した。光源先端のピンホール(1~30mm)を調節することで照射面積を設定することができる。また、対象物体設置ステージ、センサーアームともに水平方向に回転が可能で、入射角と反射角を任意に決めることができる。

今回の実験では、微小面積での反射強度を測定する必要があるため、ピンホールの直径を最小の1mmとした。また、入射角・反射角ともに固定し測定を行った。

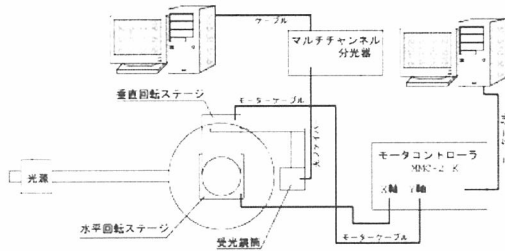


図 3. 計測装置の構成

3-3. 結果・考察

まず、天然岩絵具の群青と緑青の結果を図 4 に示す。この結果から、番号が大きいほど反射強度が大きくなることと、ピーク波長が長波長側に移動することが分かる。例えば、群青の 9 番では 500nm 付近にあったピークが、14 番では 520nm 付近に移動していることが分かる [図 4(a)]。この特性は、緑青でも同様に確認できる [図 4(b)]。

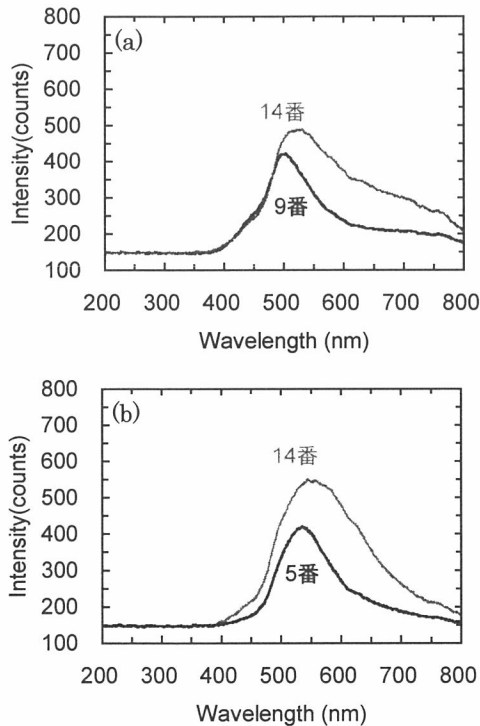


図 4. (a)天然岩絵具の群青(9・14 番),
(b)緑青(5・14 番)の反射強度

また、人工岩絵具の群青と群緑の結果を図 5 に示す。天然岩絵具の結果と同様に、番号が大きいほど反射強度が大きくなり、ピーク波長が長波長側に移動している事が、群青・群緑ともに確認できた。さらに人工岩絵具では、天然岩絵具では見られなかった特性が 2 つ確認できた。1 つ目は、人工の群青・群緑ともに、700 μ m 辺りにピークを持ち、粒度が大きいほど短波長側に移動している。2 つ目は、粒度が小さい場合は 550nm \sim 650nm 付近の反射強度と 500nm の反射強度の差が大きいが、粒度が大きくなるとその差が小さくなるという特性が確認できた。これが原因で、粒度が大きい顔料ほど白く見えるのではないかと考えられる。

この結果から、粒子のサイズの違いに伴う光の強度変化が確認できる。

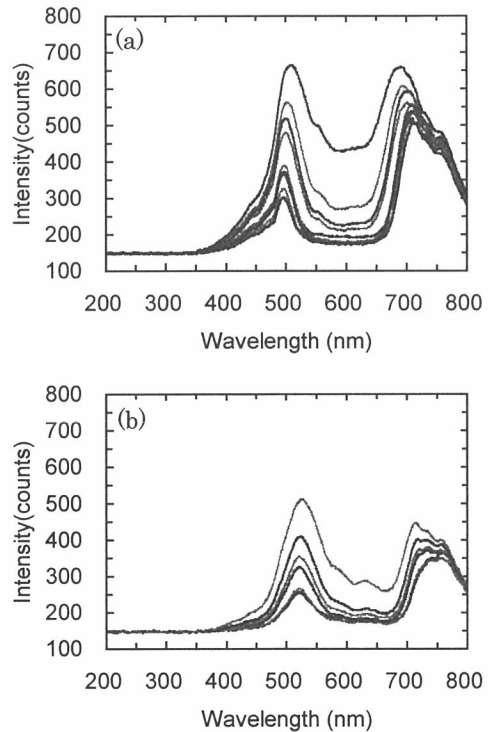


図 5.(a)人工岩絵具の群青(下から 6~14 番),
(b)群緑(下から 6・7・9・10・11・13 番)の
反射強度

4. 物体表面の表現

4-1. 物体表面上の反射特性

物体表面上の反射特性は基本的には物体特有のものである。物体を構成する材質や、表面上の微細形状に強い依存関係を持っており、反射特性を再現することで物体表面の質感を再現することが可能となる。しかし、一般の実物体における表面の微細形状は非常に複雑なため、単純なテクスチャマッピングやバンプマッピングだけでは表面の微細形状などに起因する反射特性を正確に再現することは不可能である。また、表面の微細形状などは個々の物体によって異なるため、それぞれの対象物体に応じた反射特性のモデルを設定する必要がある[3][4]。

そこで、一般の物体表面の反射特性を取得するために仮想世界で再現する物体の実物を用意し、それを実測することで質感を再現するために必要な情報を取得する方法がある。これは、実物体から情報を取り込むことでより精度の高い再現が可能になるためである。この反射の一般化された反射モデルは双方向反射率分布関数 (BRDF: Bidirectional Reflectance Distribution Function) で記述することが可能である[5]。BRDF の測定装置として、Goniophotometer、またはスペクトル分布を計測対象とする Goniospectrometer が挙げられる。また全方位型光学異方性反射測定装置を利用して布の異方性反射率を測定することで、布の質感を再現したレンダリング結果なども報告されている[6]。これらの測定装置は物体表面上の任意の1点における計測を対象としたもので、実物体のように表面の部位によって反射特性が変化するサンプルの計測は困難である。また BRDF では反射特性だけしか記述することができず、表面上の陰影を記述することは困難である。

そこで、撮影領域として一定の面積を考慮したものに、BTF (Bidirectional Texture Function) が挙げられる。BTF は光源や視点の方向などの4次元空間を2次元画像にマッピングしたものである。BTF とは基本的には画像の集合であり、前述の BRDF とは性質が少し異なってくるが、テクスチャの解析や合成処理において非常に有効なものと言える。BTF が全ての照明方向のパターンでの画像を含んでいることを考慮すると、それは本質的には光源から独立した物体表面の性質を定義することになる。よって、それぞれの BTF の画像の特徴を効果的に組み合わせることで、任意の照明状況下での物体表面の新たな画像を合成することが可能になる。このように、BTF は物体表面の反射特性や陰影などの質感の要因となる特性を表現するのに有効であるが、その基本的なデータは画像データの

集合であるため、データ量が非常に膨大になる。つまり、この膨大なデータ量によりレンダリングなどにおける処理コストが高くなってしまいうという欠点がある。Malzbender らは BTF の圧縮や再現手法として多項式近似を利用した PTM (Polynomial Texture Map) [7] という手法を提案している。PTM では任意に照明状況下での物体表面の合成画像を生成することが可能であるが、希望する結果を求めるためには非常に多くの画像データを事前に取得する必要がある。また撮影に利用する機器が特殊であり、視点と対象物体が固定であるため、レンダリング結果は単方向のものしか生成することができない。

本論文においては、表面の微細形状と顔料特性を考慮し、BRDF をより詳細に記述した反射モデルを提案する。

4-2. 表面下散乱

本研究では、顔料を用いて描かれた絵本を表現するための光の反射モデルを提案する。物体表面を正確に表現するためには表面上での反射のみではなく、物体内部を通過した光が物体内部で散乱し、再び物体表面から光が通過する現象 (表面下散乱) を考慮する必要がある (図5 (b) 参照)。本来、これは皮膚をよりよく表現するのに適した方法である。

この表面下散乱を考慮した光の輝度 $L_o(x_o, \vec{\omega}_o)$ は式(1)で表される。

$$L_o(x_o, \vec{\omega}_o) = \int_{\Omega} \int_{\Omega} S(x_i, \vec{\omega}_i, x_o, \vec{\omega}_o) L_i(x_i, \vec{\omega}_i) (\vec{n}_i \cdot \vec{\omega}_i) d\vec{\omega}_i dA(x_i) \quad (1)$$

ここで A は物体表面の面積、 Ω はサンプル点 x_i における半球上に分布した方向、 S は双方向散乱面反射率分布関数 (BSSRDF: Bidirectional Surface Scattering Reflectance Distribution Function)、 $L_i(x_i, \vec{\omega}_i)$ はサンプル点 x_i における $\vec{\omega}_i$ 方向からの入射輝度、 \vec{n}_i はサンプル点 x_i における法線であり $dA(x_i)$ はサンプル点 x_i における微小面積である。前節で述べた BRDF は BSSRDF を近似したものである (図5 (a) 参照)。この反射モデルにおいて、表面形状はなめらかであると仮定している。そこで Craig らは、物体内部での表面下散乱および表面粗さを考慮した拡散近似による BSSRDF モデルを提案した [8] (式2 参照)。

$$S_d(x, \vec{\omega}_i, x_o, \vec{\omega}_o) = \frac{1}{\pi} \rho_{ds}(x, \vec{\omega}_i) R_d(\|x - x_o\|) \rho_{ds}(x_o, \vec{\omega}_o) \quad (2)$$

ここで ρ_{ds} は式(3)で表され、 f_r は Torrance-Sparrow の BRDF である。

$$\rho_d(x, \vec{\omega}_o) = 1.0 - \int_{\pi} f_r(x, \vec{\omega}_o, \vec{\omega}_i)(\vec{\omega}_i \cdot \vec{n}) d\vec{\omega}_i \quad (3)$$

また、近似された拡散反射率 R_d は次式で表される。

$$R_d(\|x_i - x_o\|) = \frac{\alpha'}{4\pi} \left[z_r(1 + \sigma_r d_r) \frac{e^{-\sigma_r d_r}}{d_r^3} \right] + \frac{\alpha'}{4\pi} \left[z_v(1 + \sigma_r d_v) \frac{e^{-\sigma_r d_v}}{d_v^3} \right] \quad (4)$$

ここで式(4)で用いられている変数は以下の式で計算される。

$$\sigma_t' = \sigma_a + \sigma_s'$$

$$\alpha' = \sigma_s' / \sigma_t'$$

$$\sigma_r = \sqrt{3\sigma_a \sigma_t'}$$

$$D = 1/3\sigma_t'$$

$$F_{dr} = -\frac{1.440}{\eta^2} + \frac{0.710}{\eta} + 0.668 + 0.0636\eta$$

$$A = \frac{1 + F_{dr}}{1 - F_{dr}}$$

$$z_r = 1/\sigma_t'$$

$$z_v = z_r + 4AD$$

$$d_r = \sqrt{r^2 + z_r^2}$$

$$d_v = \sqrt{r^2 + z_v^2}$$

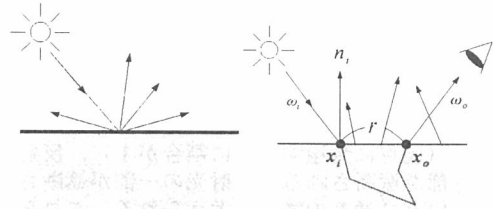
ここで、 σ_a は半透明材質の光の吸収係数、 σ_s' は縮小散乱係数であり、材質特有のパラメータとして与えられる[9]。

式(1)の S をこの S_d に置換し、積分計算を行うことによって光の輝度を求めている。[8]において扱われている対象物体は大理石、羊皮紙や人の肌である。

本研究で扱う対象物体は顔料を用いて描かれた絵本である。色の着色にこの顔料を用いることによって、顔料特性に応じた物体表面の見えがおきる。ここで顔料の特性として、顔料の粒子の大きさ(粒度分布)を考慮する必要がある。粒度分布が変化することによって対象物体表面の見え方に対して以下の特徴が挙げられる。

1. 物体の表面粗さが変化
2. 粒度が大きいときには暗い色になり、小さいときには明るい色(無彩色)に近づく

そこで本論文では、式(2)を拡張することによってこれらの特徴を考慮した表現を実現する。次節において、上記で示した1と2の特徴を再現するための手法を述べる。



(a) BRDF (b) BSSRDF

図6. 光の散乱

4-3. 顔料特性を考慮した表現

拡散反射率を求めるための式(4)において表面はなめらかであると近似されている。しかし、一般の物体において、物体表面は微細な凹凸が存在する。光源位置や視点位置の変化したとき、この微細な凹凸形状により物体の見えが変化する。この微細な凹凸を表現するため、Torrance-Sparrow モデルにおける BRDF を用いて、これは式(5)で表される。ここで D はマイクロファセット分布関数(Beckmann 関数)、 G は幾何学的減衰係数で F はフレネル反射率である。ここで本論文において、顔料が使われたものを対象にしているため、Beckmann 関数の粗さパラメータに顔料の粒度分布を利用する。マイクロファセットは微細な凹凸を構成する微小な面ひとつひとつのことである。

$$f_r(x, \vec{\omega}_o, \vec{\omega}_i) = \frac{D(x, \vec{\omega}_o, \vec{\omega}_i)G(x, \vec{\omega}_o, \vec{\omega}_i)F(x, \vec{\omega}_i, \vec{\omega}_o)}{4(\vec{\omega}_i \cdot \vec{n})(\vec{\omega}_o \cdot \vec{n})} \quad (5)$$

平面の微細な凹凸形状がひとつひとつのマイクロファセットで構成されていると考える場合、1つのマイクロファセットに入射する光の一部は、表面に到達する前、あるいは反射した後に、隣のマイクロファセットによって遮断される。この遮断によって、鏡面反射がわずかに暗くなり、この効果は幾何学的減衰係数によって表すことができる。図7(a)のように右のマイクロファセットで反射した光が右のマイクロファセットで遮断されるとき、視点に達する光の割合 G_1 は次式のように表される。

$$G_1 = \frac{2(\vec{n} \cdot \vec{h})(\vec{n} \cdot \vec{\omega}_o)}{\vec{\omega}_o \cdot \vec{h}}$$

また、図7 (b)のようにマイクロファセットに到達する前に光が遮断される場合、光の割合 G_2 は次式のようになる。

$$G_2 = \frac{2(\vec{n} \cdot \vec{h})(\vec{n} \cdot \vec{\omega}_i)}{\vec{\omega}_o \cdot \vec{h}}$$

ただし、 \vec{h} は入射方向 $\vec{\omega}_i$ と反射方向 $\vec{\omega}_o$ のハーフベクトルである。このようにマイクロファセットで反射する光に関して、光が全く遮断されない（視点に到達する光に割合が1）、反射光の一部が遮断される、入射光の一部が遮断されるという3通りの場合が考えられる。これらをすべて表すために、視点に到達する光の最小割合として幾何学的減衰係数は次式のように表される。

$$G(x, \vec{\omega}_o, \vec{\omega}_i) = \min\{1, G_1, G_2\} \\ = \min\left\{1, \frac{2(\vec{n} \cdot \vec{h})(\vec{n} \cdot \vec{\omega}_o)}{\vec{\omega}_o \cdot \vec{h}}, \frac{2(\vec{n} \cdot \vec{h})(\vec{n} \cdot \vec{\omega}_i)}{\vec{\omega}_o \cdot \vec{h}}\right\} \quad (6)$$

また、鏡面反射光強度は光の入射角によって変化し、入射角が浅いほど鏡面反射光強度は強まり、全反射に近づいていく。この現象を表すフレネル反射 F は次式のようになる。

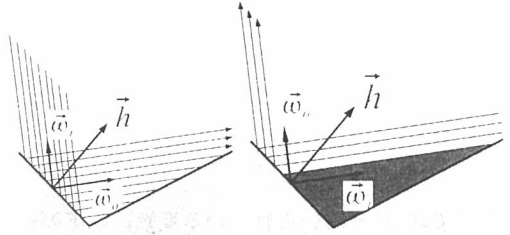
$$F = \frac{1}{2} \frac{(g-c)^2}{(g+c)^2} \left(1 + \frac{(c(g+c)-1)^2}{(c(g-c)+1)^2} \right) \quad (7) \\ c = \vec{\omega}_i \cdot \vec{h} \\ g = \sqrt{\eta^2 + c^2} - 1$$

η は材質の屈折率である。 D はマイクロファセット分布関数であり、微細面が面の法線に対してどの程度ズレて分布しているかを記述する関数である。 S_{rough} が小さいほど滑らかになる。本論文で用いる顔料による表面の粗さを表すために、 S_{rough} のパラメータに顔料の粒度分布（粒径）を用いる。粒度の違いによってこのパラメータを変化させることで顔料特性による表面粗

さを表現することができる。分布関数 D は以下の式で表される。

$$D(x, \vec{\omega}_o, \vec{\omega}_i) = \frac{1}{S_{rough}^2 \cos^4 d} \exp\left(-\left(\frac{\tan d}{S_{rough}}\right)^2\right) \quad (8)$$

ただし、 $d = \vec{n} \cdot \vec{h}$ である。



(a) 反射光が遮断 (b) 入射光が遮断
図7. マイクロファセットによる光の遮断

また、もうひとつの顔料による特徴として、前章で示した図5のように、顔料の粒度の大きさ（粒径）が異なると反射光強度は変化する。これは「粒度が大きいときには表面は暗い色になり、小さいときには明るい色（無彩色）に近づく」という顔料の特徴を示している。よってこの特徴を再現するために、粒度分布 σ_p (σ_p が大きいほど粒径が大きい) を用いる。粒度分布の大きさは前章で示したように電子顕微鏡で撮影した画像から粒径を平均化したものとする(表1参照)。この取得した粒度分布 σ_p を用いて、式(2)における拡散反射率 R_d を $R_d = R_d / \sigma_p$ に置換する。これにより、上記で述べた特徴を再現することが可能となる。以上のように、パラメータに粒度分布を用いることで顔料特性を考慮した BSSRDF のモデル化をおこなった

5. 奈良絵本の表現

ブラウジングインターフェイスを使い、奈良絵本を表現する。本研究では、3D Book Visualizer[1]を使用した。結果は、図8のようになる。最終的に、この結果に表面下散乱モデルを用いて表現する

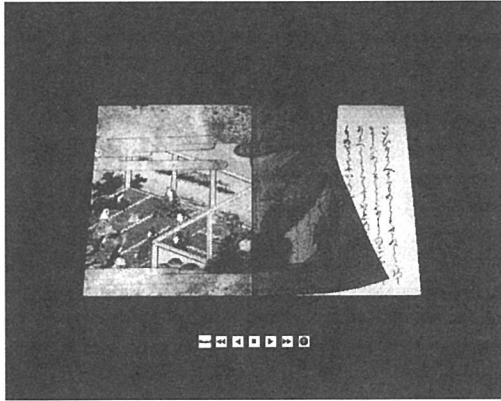


図 8 .適応例

6. おわりに

本研究では、表面下散乱モデルをベースに顔料としての岩絵具の粒度分布を考慮したモデルに拡張し、奈良絵本自身が持つ鮮やかな色彩表現を試みた。また、岩絵具による反射効果を実際に測定することで確認した。その際、得られたデータを提案手法に反映させた。

今後の課題として、奈良絵本を表現するに当り、全ページに BRDF 処理をリアルタイムで行うことは、不可能である。そのため、顔料が用いられている奈良絵のページのみに限定し、レンダリングをすることが必要である。また、処理の高速化や拡大表示に伴う更なる表面質感の詳細表現などが挙げられる。

参考文献

- [1] THE NEW ZEALAND DIGITAL LIBRARY: "3D Book Visualizer", [http://www.nzdl.org/html/open the book/](http://www.nzdl.org/html/open%20the%20book/)
- [2] 富永昌二, 田中法博: "カラーカメラを用いた絵画の分光反射率復元と色再現-先験情報を用いない試み-", 電子情報通信学会ヒューマン情報処理研究会, No; 100, pp. 43-46, 2004.
- [3] 立野竜也, 剣持雪子, 小谷一孔: "バラの品種と生長特性と考慮した花卉の微視的構造に基づく反射・透過モデルと CG 画像生成", 情報処理学会コンピュータビジョンとイメージメディア研究会, CVIM120-9, 2000 年 1 月.
- [4] Guillaume Poirier, "Human Skin Modeling and Rendering", University of Waterloo Technical Report Number CS-2004-05, January 2004.
- [5] G.J.Ward, "Measuring and Modeling anisotropic reflection", in Computer Graphics(Proc. SIGGRAPH 92), vol.26, pp255-272(July 1992).

[6] 武田祐樹, フィンクァンファイヴィエト, 竹村伸太郎, 坂口嘉之, 田中弘美, "フレネル項を考慮した多視点画像の反射解析に基づく織布の異方性反射モデリング", 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2005) .

[7] Tom Malzbender, Dan Gelb, Hans Wolters: "Polynomial Texture Maps", Proc. SIGGRAPH 2001.

[8] Craig Donner, H. W. Jensen, "Light Diffusion in Multi-Layered Translucent Materials", SIGGRAPH 2005, pp.1032-1039(2005).

[9] H.W.Jensen, S.R.Marschner, M.Levory, and P.Hanrahan: "A Practical Model for Subsurface Light Transport", In Proceeding of ACM SIGGRAPH2001, pp.511-518.