

論文

金箔質感のプリント再現のための要件解析*

Requirements Analysis for Print Reproduction of Gold Leaf Appearance*

長谷川隆行**・飯野浩一**・中口俊哉***・津村徳道****

Takayuki HASEGAWA**, Koichi IINO**, Toshiya NAKAGUCHI*** and Norimichi TSUMURA****

** Toppan Technical Research Institute, Toppan Printing Co., Ltd.

1-3-3, Suido, Bunkyo-ku, Tokyo, 112-8531 JAPAN

*** Graduate School of Engineering, Chiba University

1-33, Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba, 263-8522 JAPAN

**** Graduate School of Advanced Integration Science, Chiba University

1-33, Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba, 263-8522 JAPAN

Abstract

A fundamental study was conducted to analyze the requirements for appropriately reproducing the appearance of gold leaf on print without metallic inks in cases where accurate colorimetric matching is not possible because of the large difference in the luminance range. Based on the pixel-wise bidirectional reflectance distribution functions (BRDFs) and surface normals of a gold leaf sample (a sheet of gold leaf pasted on a sheet of Japanese paper), a wide variety of print reproductions under different geometric conditions of image rendering and luminance compression were created using computer graphics. A visual experiment was carried out where the observers evaluated the reproducibility of the appearance of the original gold leaf sample on the prints. The results of this visual experiment show that the requirements possibly include the following: (1) spatial change in brightness (or lightness) in the gold leaf region should be apparent through control over geometric conditions for image rendering, (2) the brightest area in the gold leaf may not necessarily be as bright as the print gamut, and (3) the darkest area in the gold leaf should be sufficiently dark when compared with the brightest area.

1. 緒言

美術品や文化財（以下、資料と呼ぶ）のデジタルアーカイブにおいては、資料の色や形状の正確な記録が求められる。また、物体の見えは観察方向や照明方向によっても変化するため、より詳細な記録のためには、対象資料の見えを決定する要素として、光沢特性や微細凹凸も記録することが有用となる¹⁾。

アーカイブデータの活用においては、記録された情報に基づく画像再現が求められる。人間が対象資料の特徴を

る上では、色や形状の正確な再現に加えて、画像上で光沢感や凹凸感などの質感を再現することが重要となる。しかし、実際の画像再現媒体には色域や輝度レンジの制約があり、必ずしも対象資料実物の測色値を正確に再現できるとは限らない。特に、印刷物や、輝度再現域の比較的狭い一般的なディスプレイなどの再現媒体上で光沢の強い資料を画像再現する際には、輝度再現における適切な処理が必要となる。

本論文では、実物と再現媒体の輝度レンジが大きく異なるケースとして、金箔を含む物体を画像アーカイブの対象に想定し、プリント上で実物の質感を損なわず再現するための要件について検討する。

日本画では、金属を薄く延ばした箔や、絵具状に溶いた泥と呼ばれる画材が用いられる。特に、金箔は日本画の伝統技法を代表する画材であり、金を一万分の一ミリの薄さ

* 2011年8月22日受理

** 凸版印刷(株)総合研究所

(〒112-8531 東京都文京区水道1-3-3)

*** 千葉大学大学院工学研究科

(〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町1-33)

**** 千葉大学大学院融合科学研究科

(〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町1-33)

にまで光沢を失わずに均一に延ばす技術は日本特有のものと言われる。画像アーカイブの対象として日本画を扱う上では、金属箔や金属泥等の色と質感の記録・再現は不可欠な要素である。

2. 理論

金属には、非金属物質とは異なる特有の質感が感じられる。その代表的な要因としては、以下が考えられる。

高反射率

物体表面の反射率は、光の入射方向と反射方向の関数である双方向反射率分布関数 (BRDF: Bidirectional Reflectance Distribution Function)²⁾ によって表すことができる。表面粗さの等しい金属と非金属の BRDF を比較した場合、一般的に、光の正反射方向においては、金属の方が高い値を示す。誘電体の BRDF は拡散成分と鏡面成分を持つが、正反射方向では後者が支配的となる。BRDF の鏡面成分の大きさは、屈折率の異なる媒質間の界面における光の反射率であるフレネル反射率³⁾ によって特徴付けられる。誘電体においては、フレネル反射率は光の入射角が大きくなるにつれて 1 に近付くが、光の入射角が小さい場合は 0.1 前後である。一方、金属の反射光は拡散反射成分を持たず、鏡面反射成分のみから成る。多くの金属において、フレネル反射率は誘電体より高い。たとえば純金では、屈折率と吸収係数の実測データ⁴⁾ から算出したフレネル反射率は、入射角 0 度でも長波長域では 0.9 を超える。

有色の鏡面反射

金属は各金属固有の色特性を持つ⁴⁾。誘電体の鏡面反射光は照明と同じ分光組成を持つが、金属の場合には反射光が鏡面反射成分でありながら、照明と異なる分光組成を有する。

光反射の角度依存性

金属における反射光は鏡面反射光であるため、光の入射角と反射角に大きく依存し、その振る舞いは拡散反射とは顕著に異なる。誘電体の拡散反射においては、BRDF に Lambert モデルを仮定すれば、反射光の放射輝度は観察方向によらず、光の入射方向と物体の法線との余弦に比例する。一方、鏡面反射では、正反射方向に対しては高い放射輝度の反射が生じるが、観察方向が正反射方向から離れるに従って反射光の放射輝度は著しく低下する。

光反射の角度依存性に関しては、対象が複雑な形状の三次元物体である場合、物体表面上の位置毎に光の入射角や

観察方向への反射角が異なるので、人間がその物体の反射特性を把握することは、静止画像からであっても比較的容易である⁵⁾。一方、本研究で対象とする日本画の金箔は巨視的には平面であるため、光の入射関係を一枚の静止画像において変化させることはできない。画像再現の媒体としてモニタを用いる場合には、記録された形状、色、光沢特性、微細凹凸の情報から、コンピュータグラフィックス (CG) を用いたインタラクティブな画像レンダリング (仮想空間内に物体、光源、カメラを三次元的に配置し、光の反射計算に基づいてカメラの撮影画像を生成すること) によって同等の効果を得ることができる。視点や照明方向の変化による見えの変化をリアルタイムで観察することが可能であり、光反射の角度依存性は一連の見えの変化から認識することができる。また、ハイダイナミックレンジ (HDR) ディスプレイ⁶⁾ を用いれば、高輝度な反射光も正確に再現することが可能である。

それに対して、プリントは反射型画像再現媒体であるため、反射率 1 以上の再現ができないという制約が課せられる。また、対象の見えの角度依存性に関するデータが記録されていても、動的に再現することができず、固定した視点、照明条件のみしか与えることができない。

しかし、こうした限定的な条件であっても、商業写真から作成した通常のプロセス 4 色の印刷物においては、被写体の金属質感を十分に再現している。これは一般に、フォトグラフィやレタッチャの経験的な表現技術によってもたらされているが、このノウハウを定量化することができれば、画像レンダリングにおいて非常に有用である。本研究では、前述の金属質感知覚の要因に基づき、プリントによる金箔の質感再現に必要な条件として、金属の固有色の再現に加え、(1) 適切な輝度圧縮、(2) 被写体面上の位置による入射角、観察角の違いに伴う反射光強度の空間的変化の表現、の 2 点を仮定し、これらの要素が質感知覚に与える影響を主観評価実験により検証する。

具体的には、まず、金箔を含むサンプルを撮影し、画素単位で対象サンプルの BRDF と法線を求める (3.1 節)。次に、CG を用いて照明条件やカメラ位置の異なる複数のレンダリング画像を生成し (3.2 節)、輝度圧縮を適用 (3.3 節) した後にプリント出力する (3.4 節)。そして、プリントサンプルにおける金箔質感の再現性を主観的に評価し (3.5 節)、画像の特徴との相関を解析する (5 節)。

3. 関連研究

Matusik ら⁷⁾ は、光反射特性の異なる複数のインクを

用いて、所望のBRDFをプリント再現する手法を提案した。この手法では、被写体のBRDFを画素単位で取得することにより、被写体の光沢特性を近似したプリントを生成することが可能となる。ただし、法線を再現することはできないため、表面に微細な起伏が存在する物体については、必ずしもその見えを再現することはできない。本研究ではプリントによるBRDF再現は考慮しないが、物体のBRDFと法線を用いた固定照明条件下での画像レンダリングにより、法線の空間的変化を含めた見えの再現を行う。

小島と面谷⁸⁾は、人間が金色を認識するには対象物の形状認識が必要条件であるという検証実験結果を示した。また、Vangorpら⁵⁾の研究等においても、質感の知覚には形状や照明光の多様性が有効であるとの結果が示されている。しかしこれらの研究では、平面物体の質感を効果的に画像再現する方法については言及していない。

Motoyoshiら⁹⁾は、画像のヒストグラムを操作することで、知覚される質感が変化することを示した。色と質感の正確な再現を前提とした画像アーカイブにおいては、レンダリング後の画像に対してヒストグラム変換を行うことは適当ではない。しかし、画像レンダリング時の照明条件などを変化させることにより、画像内の輝度分布を制御し、アーカイブデータに忠実な再現を行うことができる。本研究では、レンダリング時の視点位置や照明方向などによって変化する画像内の空間的な明るさの分布と、レンダリングされた画像から知覚される質感の主観的尺度との相関を解析する。

輝度レンジ圧縮手法は局所的圧縮と大域的圧縮とに大別される¹⁰⁾。局所的圧縮は主に視野角の広いシーンの輝度レンジ圧縮に用いられ、シーンの輝度の空間的変化に基づき、画像の画素毎に異なる圧縮率が適用される。本研究で対象とする物体は絵画であり、視野角の狭い観察条件を想定するため、輝度レンジの圧縮には大域的圧縮を用いる。

MontagとFairchild¹¹⁾は、画像表示デバイス間の色域圧縮手法の評価において、いくつかの大域的レンジ圧縮方法についても比較を行った。この実験で高い評価が得られたレンジ圧縮方法は、画像のハイライト部だけでなく、シャドウから中間調にかけても輝度の変換が行われている。一方、美術品や文化財の画像アーカイブにおいては、対象資料の質感とともに、色彩情報をできるだけ正確に画像再現することが求められる。そのため、本研究では、シャドウから中間調にかけては輝度の変換は行わず、ハイライト部にのみ輝度の圧縮を適用する。

4. 実験

金箔を含む物体の撮影画像からプリントサンプルを作成し、質感の再現性を評価する主観評価実験を行った。以下に、実験の詳細を述べる。

4.1 金箔の質感要素記録

被写体としては、Fig.1に示す金箔サンプルを用いた。このサンプルは、10 cm角の純金箔を15 cm角の和紙に貼り、台紙で固定したものである。カメラを金箔サンプル面の垂直方向に固定した状態で、照明方向の異なる複数の画像を撮影した。なお、広い反射光放射輝度レンジを画像記録するため、シャッタースピードを変えながら露出の異なる画像を撮影して合成し、HDR画像を生成した¹²⁾。Fig.2に、撮影した画像群の一部を示す。Fig.1の画像では金箔表面は平滑に見えるが、実際には微細な皺や凹凸が存在していることがFig.2から確認できる。

撮影画像群から、文献1の手法を金属のBRDFに拡張した非線形最適化により、BRDFと法線を画素単位で求め



Fig.1 Gold leaf sample used in the experiment.

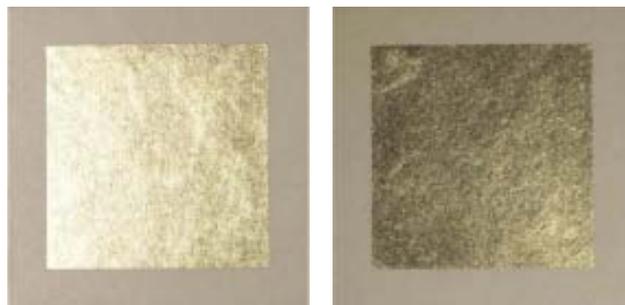


Fig.2 Examples of the captured images used for derivation of pixel-wise BRDFs and normals.

た。この手法では、BRDF を数式モデルで表し、被写体各点における光の入射関係のモデル計算値と実測値との誤差を最小化するモデルパラメータと法線を非線形最適化によって決定する。BRDF の鏡面成分はフレネル反射率と表面粗さをモデルパラメータとし、これらのパラメータと法線の最適化結果から BRDF の拡散成分を従属的に導出する。文献 1 ではフレネル反射率はカメラの red, green, blue の 3 チャンネルで共通としているが、本研究では金箔領域のフレネル反射率をチャンネル毎に求めた。また、金箔領域では拡散反射は発生しないものとし、BRDF の拡散成分の計算は行わなかった。

4.2 放射輝度画像の生成

次に、求めた BRDF と法線から、複数の反射光放射輝度画像を生成した。レンダリング時の照明条件としては、空間的に光量が均一な平行光を主照明に用いた。また、一般的な物体の観察条件として単一照明のみを使用するケースは稀であることから、一様な周辺光（サンプル上のすべての点に対して全方位から均一な光量）を加えた。

第 2 節で述べたように、金属の質感知覚要因のひとつとして、反射光が鏡面反射のみから成る金属では、光反射の角度依存性が非金属物体と異なる点が挙げられる。本研究では、金属（金箔の領域）と非金属（和紙の領域）の偏角反射特性の対比を画像上で表現し、その変化と知覚する質感との相関を解析するため、レンダリング時の視点位置と、主照明である平行光の入射方向を複数のパターンに設定し、それぞれについて反射光放射輝度画像を生成した。

また、非金属の反射光に対する金属の反射光の相対的な強度が質感知覚に与える影響を検討するため、周辺光と直接光の強度比も画像生成におけるパラメータとし、金箔領域と和紙領域における反射光放射輝度の比に変化をあたえた。すなわち、反射光放射輝度 R は、周辺光に対する反射光放射輝度 R_{amb} と直接光に対する反射光放射輝度 R_{dir} との和として、

$$R = kR_{amb} + (1 - k)R_{dir} \quad (1)$$

によって表されるとし、係数 k ($0 \leq k \leq 1$) を複数の値に設定してそれぞれの画像を生成した。

Fig.3 に、反射光放射輝度画像生成時の幾何条件とパラメータの概念図を示す。図の右側は、被写体とカメラ、照明方向の位置関係、および、周辺光の寄与を模式的に表している。主照明となる平行光は被写体に対して斜め上方向から照射するものとし、被写体面の大域的な法線方向と成す角を第一のパラメータとした。カメラは被写体面に対して

垂直方向に設置し、カメラから被写体までの距離を第二のパラメータとした。また、周辺光の寄与率を第三のパラメータとした。

Fig.3 の左側は、被写体面の上下方向での反射光放射輝度の変化を模式的に表したものである。金箔の領域では、上部と下部とでカメラへの反射方向が異なるため、より正反射の条件に近い上部ほど高い放射輝度の反射光が得られる。上下方向の放射輝度変化は、設定した直接光の入射角、および、カメラ位置に依存する。和紙の領域では、光の拡散反射が生じるため、上下方向の放射輝度変化は金箔より小さいものとなる。

本実験では、平行光の入射角、観察距離、周辺光寄与率の各パラメータを Table 1 に示す値に設定し、これらすべての組み合わせから成る計 18 通りの反射光放射輝度画像を生成した。

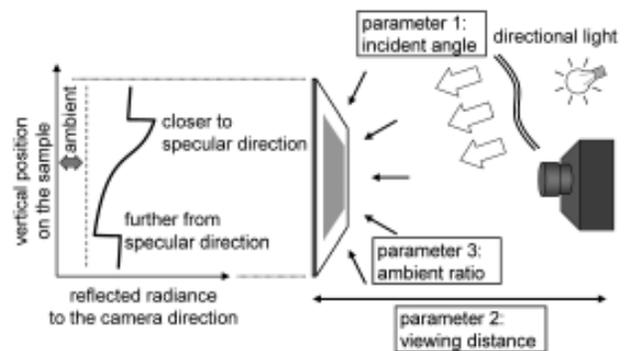


Fig.3 Geometric conditions and parameters for image rendering.

Table 1 Image rendering parameters used to create reflected radiance images.

| Parameter | Values |
|-------------------------|---------------|
| Incident angle [degree] | 10, 20, 30 |
| Viewing Distance [cm] | 30, 50 |
| Ambient ratio (k) | 0.2, 0.5, 0.8 |

4.3 輝度圧縮

物体面と照明方向、およびカメラ方向の位置関係が正反射に近い場合、金箔の BRDF は非常に大きくなり、その反射光の強さはプリントでは再現することができない。そこで、以下に示す方法により、輝度の圧縮を行った。

まず、人間が知覚する色空間内で輝度圧縮を行うため、反射光放射輝度画像から各画素の三刺激値 X , Y , Z を求めた。文献 4 に基づいて導出した数種類の金属の分光反射率を主成分分析した結果、金属の分光反射率は 3 つの基底ベクトルの線形和で表せることを確認した。そこで、反射

光放射輝度画像の red, green, blue の 3 チャンネル情報から三刺激値への変換には 3 行 3 列の行列を用いた。

次に、導出した三刺激値の Y から明度 L^* を計算し、Fig.4 に示す方法により圧縮を行った。明度を計算する際に用いる基準白色の輝度は、被写体面中央に完全拡散面を設置した場合の Y の値とした。Fig.4 において、横軸は圧縮前の L^* 、縦軸は圧縮後の L^* を示す。圧縮の度合いは制御点 $P_1 (S_1, T_1)$ と $P_2 (S_2, T_2)$ によって制御するものとした。圧縮前の明度が $0 \leq L^* < S_1$ の範囲では圧縮は行わず、値を保持した。また、圧縮前の明度が $S_2 \leq L^*$ の場合には、圧縮後の明度はプリント用紙の L^* 値 T_2 とした。圧縮前の明度が $S_1 \leq L^* < S_2$ の範囲では、制御点 P_1 で傾き 1、制御点 P_2 で傾き 0 となる二次関数、または楕円関数により非線形圧縮を行った。

なお、反射光の色については、反射光放射輝度画像から求めた三刺激値の色度座標 x, y を保持することとした。

本実験では、以下の手順により輝度圧縮特性を決定した。まず、4.2 節で述べた反射光放射輝度画像から三刺激値を求め、Fig.4 の S_1 および S_2 の値を様々に変化させて得られる圧縮曲線を適用し、多数の画像を生成した。次に、明らかに金箔の質感が失われているものや、再現特性が類似しているものを除外し、ある程度有効と思われる画像を抽出した。そして、再現画像の特性に広い変化を与える代表的な輝度（明度）圧縮特性として、Fig.5 に示す 3 通りの圧縮曲線を選択した。

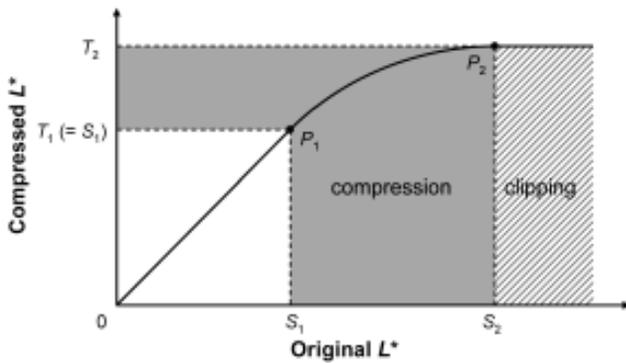


Fig.4 Luminance (lightness) compression scheme.

4.4 プリント出力

4.2 節で述べた 18 通りの反射光放射輝度画像と 4.3 節で述べた 3 通りの輝度（明度）圧縮曲線のすべての組み合わせから成る計 54 通りの画像をプリントにより出力した。画像の例を Fig.6 に示す。プリントの作成には、市販の顔料型インクジェットプリンタ、および無光沢用紙を用い、事前に測定した色再現特性に基づくカラーマネージメント

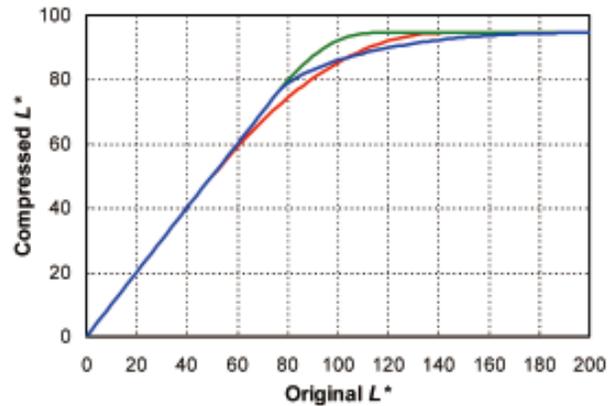


Fig.5 Three luminance (lightness) compression curves adopted for image reproduction. Control parameters are (S_1, S_2) , $(47.2, 141.7)$, $(75.6, 113.4)$, and $(75.6, 189.0)$ for each curve.

を適用した。出力されたプリントを測色し、十分な精度で色再現が行われていることを確認した。すべてのプリントサンプルは、被写体原寸で出力した。

4.5 主観評価実験

主観評価実験は、被験者に系列評価尺度に基づいて評価対象（本実験ではプリントサンプル）を評価させ、心理尺度上での評価対象の位置関係を統計的に示すことのできる

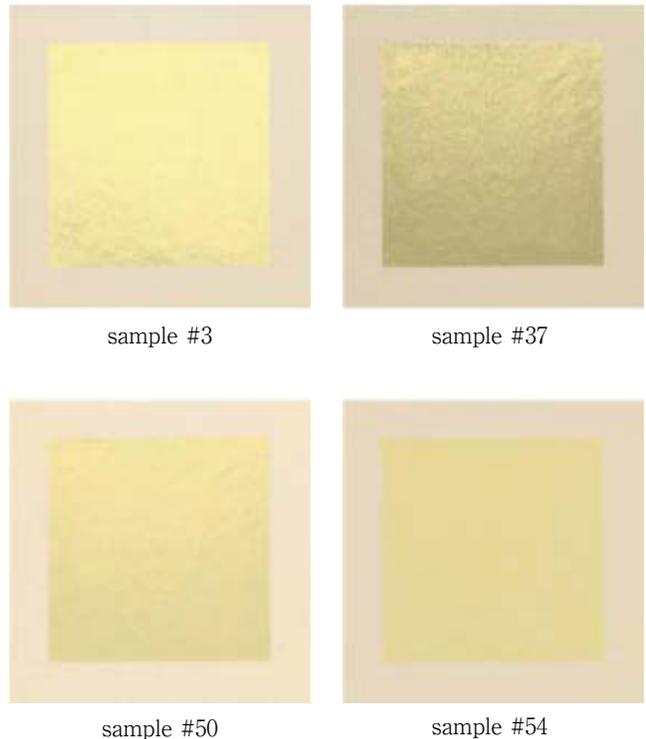


Fig.6 Examples of reproduced images.

系列範疇法¹⁴⁾に基づき、19名の被験者により行った。被験者にはプリントサンプルのそれぞれについて、金箔サンプル実物の質感の再現性を Table 2 に示す7段階の評価値により評価させた。

実験ではまず、被験者に実物の金箔サンプルのみを提示し、被験者に金箔サンプルの位置や角度を自由に変えさせることにより、その色や質感を観察させた。次に、金箔サンプルを回収し、30秒経過後、全54枚のプリントサンプルを順次1枚ずつ提示し、それぞれについて、記憶した金箔サンプルの質感の再現性を評価させた。プリントサンプルは観察距離約50cmの所定位置に提示し、提示順は無作為とした。

評価の間、被験者は任意のタイミングで実物の金箔サンプルを再度観察できることとした。ただし、金箔サンプルの観察中、プリントサンプルは一時回収し、被験者が両者を同時に観察することはできないこととした。金箔サンプルの観察が終了したら金箔サンプルは回収し、30秒経過後にプリントサンプルの評価を再開した。

プリントサンプルの観察条件は、ISO 3664¹³⁾に準じた。また、金箔サンプルの観察はプリントサンプルの観察と同一の照明環境で行った。金箔サンプルの観察、および、プリントサンプルの評価に要する時間に制限は設けなかった。

Table 2 Evaluation criteria used for the category scaling experiment regarding the appearance reproduction.

| Evaluation value | Appearance reproducibility |
|------------------|----------------------------|
| 7 | Very good |
| 6 | Good |
| 5 | Moderately good |
| 4 | Fair |
| 3 | Moderately bad |
| 2 | Bad |
| 1 | Very bad |

5. 結果と考察

主観評価実験の回答結果から、各プリントサンプルの質感再現性が心理尺度上で分散の等しい正規分布となること(ThurstoneのCase V)を仮定し、間隔尺度を算出した¹⁴⁾。間隔尺度は主観評価値相互の相対関係を示す指標であるが、ここでは解釈を容易にするため、算出した間隔尺度値を実験に使用した1から7の評価値に変換した。各系列の平均尺度値と1から7の評価値との対応関係から、

変換式は3次多項式とし、最小二乗法により係数を決定した。この変換に基づく系列範疇実験の解析結果を Fig.7 に示す。いくつかのプリントサンプルでは5 (moderately good) を超える評価値が得られており、金箔サンプル実物の質感が良好に再現されていると見なすことができる。一方、評価値が2 (bad) を下回るプリントサンプルも存在し、54枚のプリントサンプルから広範囲に及ぶ評価値が得られた。画像レンダリングに使用したBRDFや法線は同一のものであっても、レンダリング条件やレンジ圧縮条件によって、再現画像から知覚される質感は大きく異なることが分かる。

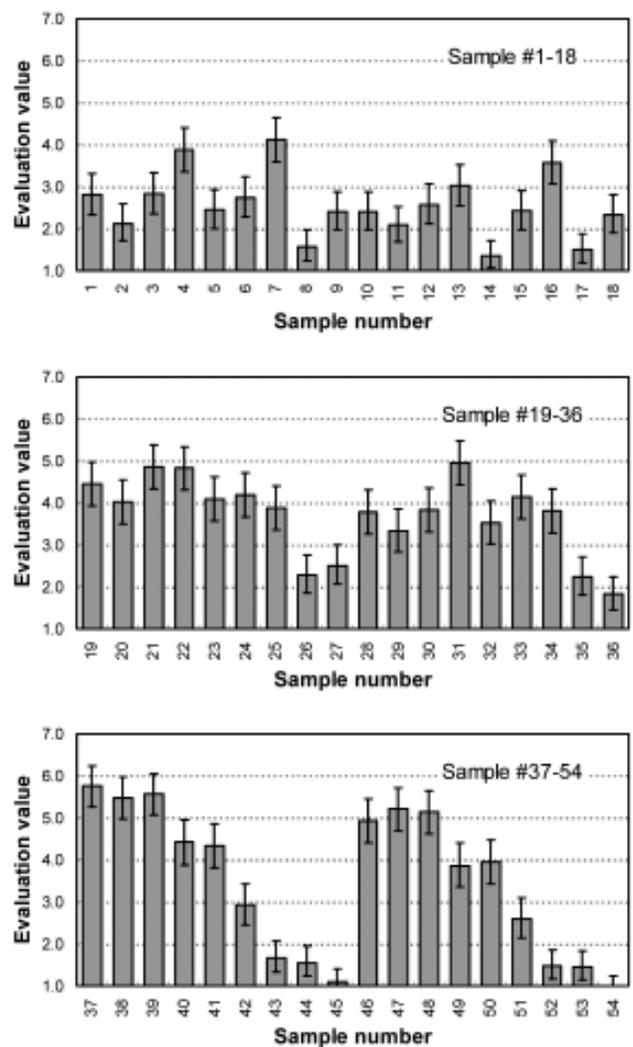


Fig.7 Results of the category scaling experiment (error bars represent the 95% confidence limits).

得られた評価値と画像の特徴との相関を解析した。本実験における画像レンダリング時の幾何条件では、金箔領域の上下方向で明るさの変化が生じる (Fig.3)。そこで、再

現画像の金箔領域内の明度変化と主観評価値との相関を解析するため、Fig.8 に示す region 1 から region 3 の各領域について、プリントサンプル毎に画像データから平均明度を求めた。画像レンダリング時には、被写体面に対して斜め上方向からの平行光を用いているため、region 1 は金箔領域内で最も明るい領域、region 2 は最も暗い領域に相当する（いずれも画像中の面積は金箔領域の約3%）。また、region 3 は下地となる和紙領域全体である。これらの領域における明度 L^* の平均値を、それぞれ L_1, L_2, L_3 とした。

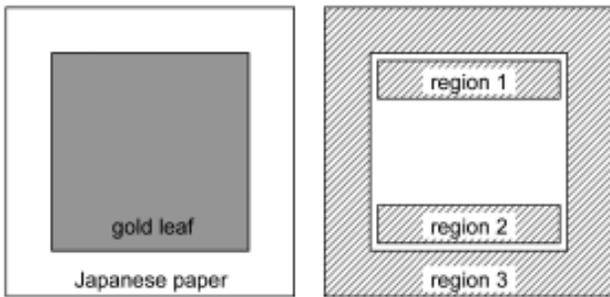


Fig.8 Three regions on the gold leaf sample for each of which the average brightness of a print reproduction was calculated.

Fig.9 に、平均明度 L_1, L_2, L_3 のそれぞれと、実験で得られた主観評価値との相関を示す。この結果からは、 L_2 と主観評価値との間にある程度の相関が認められ、 L_2 の値が小さいほど主観評価値が高くなる傾向が現れている。すなわち、金箔領域内の最暗部の明度を低く設定することで、高い評価値が得られる可能性を示唆している。他の要素である L_1 と L_3 に関しては、主観評価値との間に有効な相関は認められなかった。

次に、平均明度 L_1, L_2, L_3 、それらの相互演算（乗算、除算）、および定数を含めた説明変数によって主観評価値を予測するモデルを、重回帰分析により構築した。統計的に有意な説明変数のみを選択し、他を除外する変数増減法により、式 (2) に示すモデルが得られた。

$$\hat{V} = 0.843L_2 - 0.005L_1^2 - 114.376 \frac{L_1}{L_2} - 236.387 \frac{L_2}{L_1} + 316.309 \quad (2)$$

ただし、 \hat{V} は主観評価値の予測値である。なお、変数増減法における変数の選択は検定量 F 値の上側確率 p に基づき、変数追加の条件は $p < 0.05$ 、除外の条件は $0.10 < p$ とした。Fig.10 に、実験により得られた主観評価値とこのモデルによる予測値との相関を示す。

式 (2) より、主観評価値は和紙領域の平均明度 L_3 の

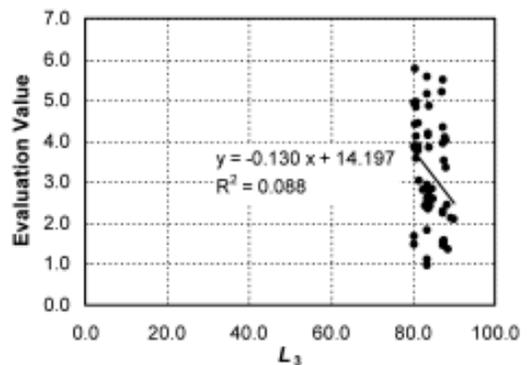
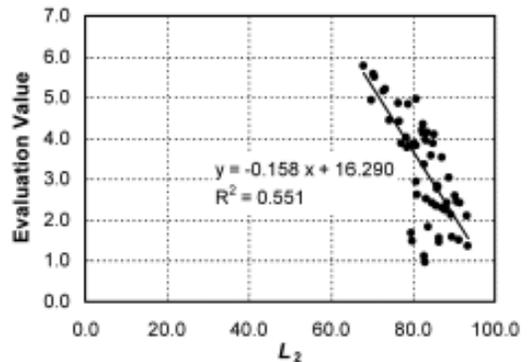
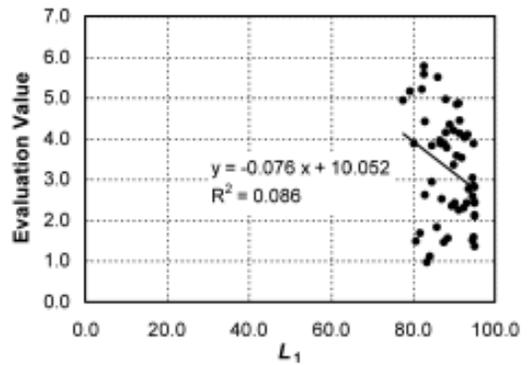


Fig.9 Relationship between average brightnesses (L_1, L_2, L_3) and subjective evaluation values.

影響を受けず、 L_1 および L_2 による影響が大きいことが示された。Fig.11 に、モデルから導出される主観評価値と L_1 および L_2 との関係を示す。曲線上の数値は式 (2) のモデルによる主観評価値の予測値 \hat{V} を表す。また、グラフ中のドットは、実際に主観評価実験で使用した 54 枚のプリントサンプルの (L_1, L_2) 座標を表している。式 (2) の予測モデル構築にはこれらのドットが表す L_1, L_2 を用いているため、Fig.11 の等評価値曲線もドットの分布領域付近においては有効と見なすことができる。

等評価値曲線は右上 - 左下方向を長径とする楕円に近い形状を表しており、 L_1 と L_2 の比（楕円と見なした場合の短径方向の変化）が評価値に大きく影響することを意味し

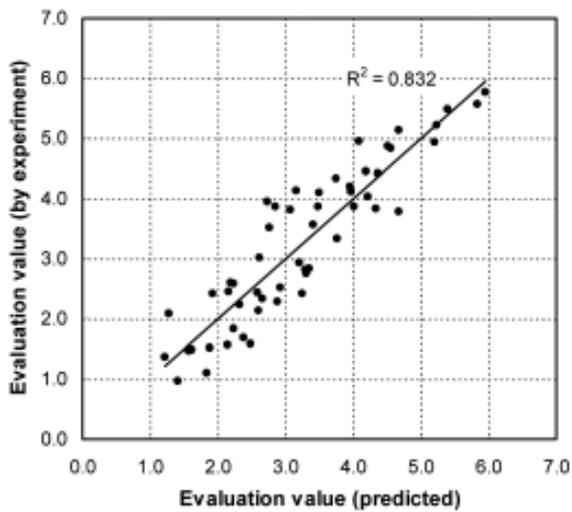


Fig.10 Relationship of the subjective evaluation values between model prediction and experimental results.

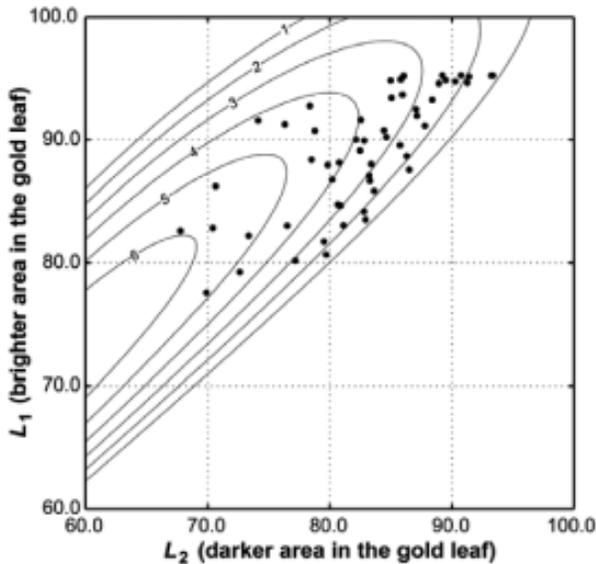


Fig.11 Prediction model of the subjective evaluation values represented as equi-evaluation value curves in the L_1 - L_2 plane.

ている。また、ドットの分布付近では、 L_1 と L_2 の差が大きくなるほど評価値が高くなる傾向にあることも確認できる。モデルの成立が実験条件から大きく逸脱しない範囲という制約の上では、全体として高い評価値が得られる色再現条件は、おおむね $L_1=80$ 、 $L_2=65$ 前後であることが分かる。このことから、金箔領域における最明部の平均明度 L_1 の値を再現媒体の最大値（本実験では $L^*=94.5$ ）に近い値に設定し、できるだけ高い明度（または輝度）で金箔の光輝感を強調することは、質感の適切な再現の必要条件とはならないことが示された。実際に、最も高い評価

値5.8が得られたプリントサンプル#37では、 L_1 の値は82.6とそれほど大きくはなく、また、サンプル#3のように、 $L_1=94.9$ 、 $L_2=85.8$ と、 L_1 の値が大きく、かつ、 L_1 と L_2 の差が十分に大きい色再現であっても、低い評価値2.8が得られたケースも見られた。

以上の結果は、本実験で用いた金箔サンプルの反射特性やサイズ、色再現サンプル作成時のレンダリング条件などに基づくものであり、一般性の高い結論を得るためには、各種条件の設定や評価の方法を多様化し、より多くの実験を行う必要がある（たとえば、Fig.11は、実験で利用したサンプルより L_1 や L_2 が小さくなる色再現を行えばより高い質感再現性が得られる可能性を示している）。本実験からは、その一端として、平面状の金箔の質感をプリント上で適切に再現するための要件として、金の固有色の再現だけでなく、(1)被写体上の位置による光の入射角と観察角の変化に伴う反射光強度の空間的变化を利用し、輝度（明度）圧縮をコントロールして金箔領域内に明暗を生成すること、(2)最明部は必ずしも再現可能な最大明度でなくとも良いこと、(3)最暗部は最明部と十分な差をもって暗いこと、を含んでいることが示唆された。

6. 結語

本論文では、美術品や文化財のデジタルアーカイブにおいて、対象資料の色と質感を適切に画像再現するための方法について検討を行った。特に、実物と画像再現媒体の輝度レンジが大きく異なり、実物と再現画像との直接的な測色値の一致が困難なケースとして、金箔のプリント再現を取り上げた。平面状の金箔サンプルの再現画像をプリントにより作成し、質感の再現性を評価する主観実験を行うことにより、金属質感の適切な再現のための要件を解析した。

文化財や美術品の実際の撮影では、機材や撮影環境の制約により、必ずしも所望のライティングが行えるとは限らない。一方、対象資料のBRDFや法線を取得し、それらを用いて画像のレンダリングを行えば、仮想的に任意のライティング条件下での被写体の見えを生成することができる。その際、本実験で得られた要件を満たすライティング条件や輝度圧縮条件を設定すれば、通常の撮影では表現することが困難な金箔質感であっても、レンダリング画像上ではより適切に再現することが可能となる。

本実験から得られた結果は、使用した金箔サンプルの反射特性やサイズ、レンダリング時のライティング条件などに依存するものである。対象とするサンプルや評価実験の方法、レンダリング画像生成時の各種条件を変えて実験を

行い、様々な側面から金属質感知覚の要因を解析することは今後の課題である。特に、実験で用いた金箔サンプルは、正方の金箔を和紙に貼っただけの単調なパターンのものであったため、金属箔や金属泥が用いられた日本画などを用い、実際の画像アーカイブに即した条件での実験を行う必要がある。

参考文献

- 1) T. Hasegawa, N. Tsumura, T. Nakaguchi, and K. Iino, *Journal of Electronic Imaging*, **20** (1), 013006-1 (2011).
- 2) F. E. Nicodemus, *Applied Optics*, **4** (7), 767 (1965).
- 3) 富永昌治, 情報処理学会論文誌, **34** (2), 289 (1993).
- 4) E. D. Palik, "Handbook of Optical Constants of Solids", Academic Press (1985).
- 5) P. Vangorp, J. Laurijssen, and P. Dutre, *ACM Trans. on Graphics*, **26** (3) 77: 1 (2007).
- 6) H. Seetzen, W. Heidrich, W. Stuerzlinger, G. Ward, L. Whitehead, M. Trentacoste, A. Ghosh, and A. Vorozcovs, *ACM Trans. on Graphics*, **23** (3), 760 (2004).
- 7) W. Matusik, B. Ajdin, J. Gu, J. Lawrence, H. P. A. Lensch, F. Pellacini, and S. Rusinkiewicz, *ACM Trans. on Graphics*, **28** (5), 128: 1 (2009).
- 8) 小島 聡, 面谷 信, 日本画像学会誌, **46** (5), 375 (2007).
- 9) I. Motoyoshi, S. Nishida, L. Sharan, and E. H. Adelson, *Nature*, **447** (7141), 206 (2007).
- 10) K. Devlin, "A review of tone reproduction Techniques", Technical Report, University of Bristol, Department of Computer Science (2002).
- 11) E. D. Montag and M. D. Fairchild, *IEEE Trans. on Image Processing*, **6** (7), 977 (1997).
- 12) P. Debevec and J. Malik, in *Proc. of SIGGRAPH*, 369 (1997).
- 13) ISO 3664: 2009 (2009).
- 14) P. G. Engeldrum, "Psychometric Scaling: A Toolkit for Imaging Systems Development", Imcotek Press (2000).