

分光データベースを利用した色再現手法の 陶磁器における評価

長谷川隆行¹, 飯野浩一¹, 宮原健吾², 加茂竜一¹, 大橋康二³

¹凸版印刷株式会社

²財団法人京都市埋蔵文化財研究所

³佐賀県立九州陶磁文化館

文化財の画像アーカイブにおいては、色の正確な保存、再現が重要となる。画像の取得にはデジタルカメラが広く用いられているが、カメラの信号値は人間の知覚色を表すものではないため、正確な色再現のためには色変換が必要となる。従来の手法では、カラーチャートの撮影画像に基づいた色変換を行うのに対し、分光データベースを利用した色再現手法では、被写体の分光反射率特性を反映した色変換を行うため、被写体に応じた最適な色再現を行うことができる。本手法の精度を主観的に検証するため、陶磁器とその再現画像を用いた評価実験を実施した。実験の結果、従来の手法と比較して、本手法では、より高精度な被写体の色再現が可能であることが確認された。

Visual Evaluation of a Color Reproduction Method Using Spectra Databases Applied to Porcelain

Takayuki Hasegawa¹, Koichi Iino¹, Kengo Miyahara², Ryuichi Kamo¹, Koji Ohashi³

¹Toppan Printing Co., Ltd.

²Kyoto City Archaeological Research Institute

³Kyushu Ceramic Museum

Accurate color preservation and reproduction are important factors of cultural heritage image archives. Since color signals recorded by digital cameras, which are widely used for digital image acquisition, are not equivalent to the human perception, color conversion is necessary for accurate color reproduction. Conventional methods utilize a color chart image for color conversion, whereas a color reproduction method using spectra databases realizes superior color reproduction accuracy by incorporating spectral properties corresponding to real objects. An experiment using porcelain samples and their reproductions was carried out in order to visually evaluate the performance of the method. Results show the method is able to achieve more accurate color reproduction than the conventional method.

1 緒言

博物館や美術館、図書館等を中心に、文化遺産をデジタル情報として保存、活用することを目的としたデジタルアーカイブの取り組みが行われている。アーカイブの対象は、芸術、文化、産業等、様々なものがあり、また、記録手段としても、映

像、音声、文字情報、統計データ等、多岐に渡るが、実体のある対象物に対しては、画像が担う役割は大きい。特に、有形文化財のアーカイブに際しては、その形状とともに、色彩の正確な記録が望まれる。また、モニタ上への表示や、印刷物としての出力等、保存された画像を再現して利用する際には、再現すべき色が正確に記録されていることが前提となる。

デジタル画像の作成手段としては、過去数年で画質、解像度ともに急速な発展を遂げたデジタルカメラが広く利用されている。デジタルカメラから得られる画像は、CCD や CMOS 等のイメージセンサが検出した電気信号であり、一般には R, G, B の 3 チャンネルデータとして記録される。一方、人間が知覚する色は CIE 三刺激値 X, Y, Z として表されるが、カメラのイメージセンサと人間の眼では分光感度特性が異なるため、通常はカメラ信号値と三刺激値とは一致しない。被写体の色の正確な記録のためには、撮影によって得た画像のカメラ信号値から人間が知覚する被写体の色である三刺激値への変換が必要となる。

デジタルカメラのカラーマネジメントとして一般に用いられる技術としては、カメラ信号値 R, G, B から三刺激値 X, Y, Z 値への変換を行列演算により行う手法がある^{1,2}。以下では、この手法を行列演算法と表記する。例えば、高次の項を含む行列演算法では、式 (1) により色変換を行う。

$$\begin{bmatrix} \hat{X} \\ \hat{Y} \\ \hat{Z} \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} R & G & B & R^2 & G^2 & B^2 & RG & GB & BR & RGB & 1 \end{bmatrix}^T \quad (1)$$

式 (1) において、左辺は予測された被写体の再現色であり、T は転置を示す。また、 \mathbf{M} は 3 行 11 列の行列であり、一般には、カラーチャートの撮影データ及び測定データに基づく最適化により決定される。しかしながら、この手法は RGB 値と XYZ 値との対応関係を理論的に導いたものではなく、必ずしも最適な解が得られるとは限らない。また、カラーチャートを基準とした色変換であるため、撮影対象物の分光反射率特性がカラーチャートと異なる場合には、予測誤差はより大きなものとなる。

一方、被写体の分光反射率特性を考慮し、被写体再現色予測誤差を最小化するカラーマネジメント手法として、メタマ推定法が提案されている。この手法では、被写体と同じ属性（陶磁器、布、油彩画等）を持つ分光データベースを利用し、カメラ信号値から被写体の分光反射率を推定することにより、所望の光源下での被写体の色を高精度で予測できることが、数値シミュレーションにより示されている^{3,4}。

本稿では、実際にデジタルカメラで撮影した画像を使用し、メタマ推定法の有効性を主観的に評価するために行った検証実験、及びその結果について示す。実験では、撮影対象物として肥前磁器を使用した。陶磁器は、文化財のデジタルアーカイブという点でも画像の重要性が高く、検証実験の対象として適当である。また、古陶磁の判別では、色彩が判断材料となる場合があり、色情報の正確な記録、再現が求められる。こうした実際的な応用性も、実験対象の選択基準とした。

2 実験

メタマ推定法を用いたデジタルカメラ画像色再現の有効性を主観的に検証するための主観評価実験を行った。本実験では、デジタルカメラによる撮影で得た画像から色再現サンプルを作成し、2種類の光源下で実物と色再現サンプルとの色の一致度を目視により評価した。評価対象としては、図1に示す肥前磁器3点を使用した。本稿では、便宜上、(a) 現代有田焼、(b) 古伊万里染付、(c) 古伊万里色絵と呼称することとする。以下に、実験の詳細を述べる。

2.1 撮影

撮影には、図2(a)に示す分光感度特性を持つ市販の3チャンネル型デジタルカメラを使用した。撮影時照明光源としては、ストロボ、タングステンランプの2種類を用い、それぞれの光源下で肥前磁器を撮影した。図2(b), (c)に各光源の分光特性を示す。

2.2 被写体再現色予測

メタマ推定法、行列演算法の2通りの被写体再現色予測手法により、画像の全画素において、カメラの信号値 R , G , B から三刺激値 X , Y , Z を算出した。最終的な主観評価実験では、肥前磁器と色再現サンプルとの色の一致度を、観察用照明光源下で評価するため、三刺激値の算出には観察用照明光源の分光特性を規定する必要がある。本実験では、観察用照明光源として、図3に示す分光特性を持つ2種類の照明光源、デイライトとタングステンをを用いた。

メタマ推定法では、被写体と同じ属性を持つ複数のサンプルの分光反射率から構築される分光データベースを参照することにより、被写体再現色の予測を行う。本

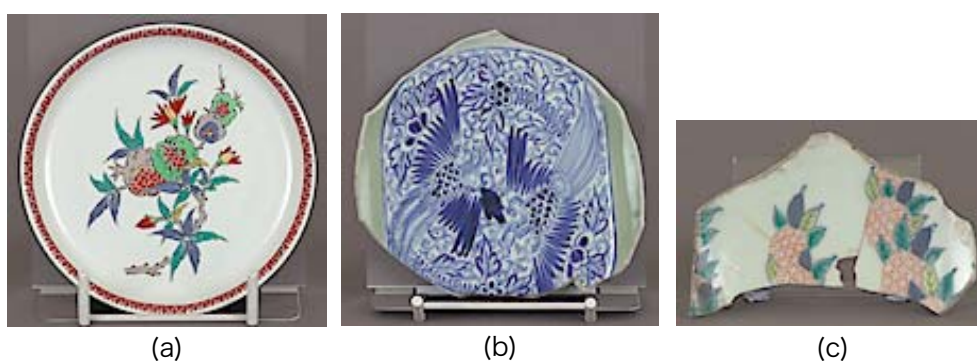


図1 実験に使用した肥前磁器。(a) 現代の有田焼、(b) 1820～1860年代樋口窯染付陶片(九州陶磁文化館所蔵)、(c) 1690～1710年代鍋島藩窯色絵陶片(九州陶磁文化館所蔵)。

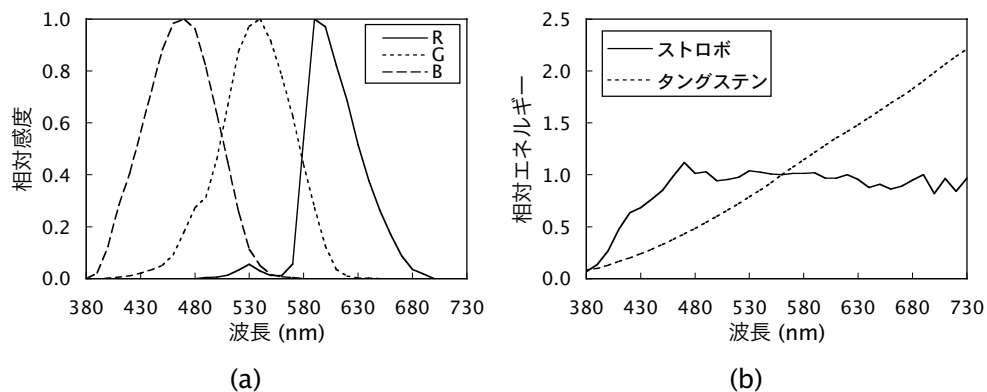


図2 撮影用機材の分光特性. (a) カメラ分光感度. (b) 撮影時照明光源の分光特性.

実験では、肥前磁器に対応する分光データベース構築のため、(有) エクセル、(有) 大串翠紅堂、(株) 銘品堂各社の有田焼上絵具見本全 146 色（生地を含む）の分光反射率測定を行った。測定した分光反射率データから、主成分分析により基底ベクトルと主成分を導出し、肥前磁器に対応する分光データベースを作成した。なお、肥前磁器の分光反射率を基底ベクトルの線形和で近似するための基底ベクトル数は 7 とした。この値は、累積寄与率が 99.9% を超える最小の基底ベクトル数である。図 4 に、これら 7 つの基底ベクトルを示す。

メタマ推定法の比較対象として、行列演算法による被写体再現色予測を行った。本実験では、画像の RGB 値と XYZ 値との関係を、式 (1) に示す変換式により規定した。式 (1) における変換行列 \mathbf{M} を導出するためには、RGB 値と XYZ 値とが既

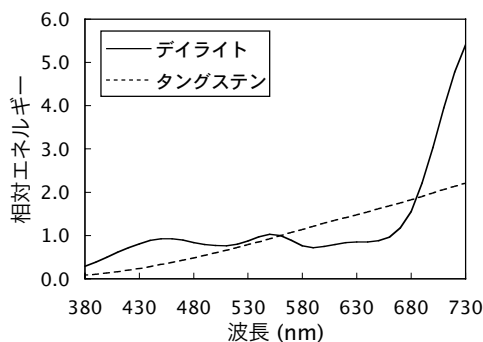


図3 観察用照明光源の分光特性.

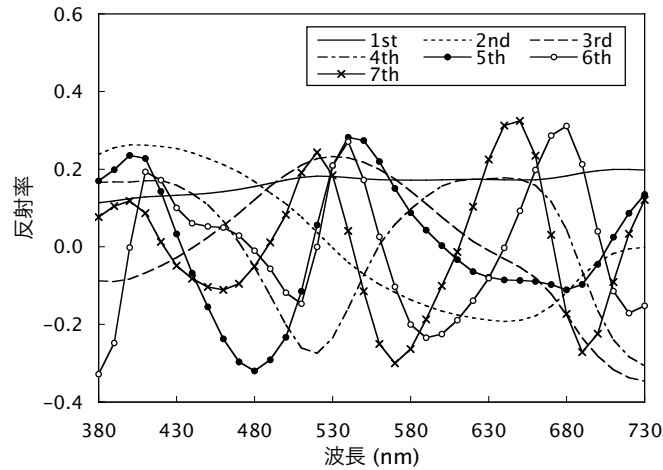


図4 有田焼上絵具見本 146 色の分光反射率から算出した第 1～第 7 基底ベクトル。

知である複数のカラーサンプルの組が必要となる。本実験では、変換行列 \mathbf{M} の導出に、GretagMacbeth 社製 ColorChecker DC を使用した。ColorChecker DC はデジタルカメラのカラーマネージメントで一般的に用いられるカラーチャートであり、237 の色票から構成される。同チャートを肥前磁器撮影と同じ撮影条件下で撮影し、色票毎に一定画素領域の平均 RGB 値を取得した。また、各色票の分光反射率を測定し、観察用照明光源下での XYZ 値を算出した。変換行列 \mathbf{M} は、これら 237 組の RGB 値と XYZ 値より、重回帰分析により導出した。

2.3 色再現サンプル

前節で述べた被写体再現色予測では、画像の全画素において三刺激値 X , Y , Z が算出されるが、主観評価を行うためには、これを再現したサンプルが必要となる。色再現に用いるデバイスは、十分な色再現精度が得られるものであれば、モニタ、プロジェクタ、印刷物等、形式は問わないが、本実験では、主観評価実験の際に肥前磁器実物と色再現サンプルとの絶対的な明るさの整合性を取るため、ハードコピーによる色再現を行った。ハードコピーの作成には、市販の顔料型インクジェットプリンタ、及び非光沢紙を用いた。撮影、及び観察のそれぞれで 2 種類の光源を使用しているため、それらの組み合わせにより、各肥前磁器について色再現手法毎に計 4 通りの色再現サンプルを作成した。

所望する三刺激値を十分な精度で再現するためには、プリンタの色再現特性に基づき、三刺激値からプリンタ制御信号値への変換を行う色変換が必要となる。プリンタの色再現特性を把握するため、プリンタの制御信号値を均等間隔にサンプリングしたカラーチャートを出力し、各色の分光反射率を測定した。そこから、観察用

照明光源の分光特性を用いて観察時の三刺激値を算出し、プリンタ制御信号値と三刺激値との関係を look-up table 化して、色変換を行った。

また、主観評価実験の際、大きさによる視覚効果の影響を排除するため、全ての色再現サンプルは被写体原寸大で出力した。

2.4 主観評価実験

色再現サンプルの主観的評価として、一対比較法による主観評価実験を行った。被験者は、陶磁器の調査、研究関連業務従事者 8 名、及び印刷の色関連業務従事者 5 名、計 13 名である。

実験では、肥前磁器実物の左右それぞれに色再現サンプルを 1 枚ずつ提示し、被験者には実物の色により近いと思われる色再現サンプルを選択させた。背景には N5 相当の羅紗紙を用いた。一度に提示する比較対は、同じ撮影光源で撮影し、再現色予測手法が異なる色再現サンプルとした。色再現サンプルの左右への提示、及び順序は無作為とした。肥前磁器及び色再現サンプルを照射する照明光源としては、図 3 に示す分光特性を持つダイライト、並びにタングステンの 2 つの光源を使用し、他の照明の影響が無いよう、実験は暗室で行った。また、判断に要する時間に制限は設けなかった。

3 結果と考察

各比較対について得られた結果から、Thurstone の Case V に従って間隔尺度を算出した⁵。結果を図 5 に示す。撮影光源、観察光源、及び被写体のいずれの組み合わせにおいても、メタマ推定法に基づく色再現精度は行列演算法よりも統計的な差を持って優位であるか、または同等であり、行列演算法が優っている組み合わせは得られなかった。メタマ推定法では、被写体の属性を反映した分光データベースを利用した色再現を行うため、カラーチャートに基づく行列演算法よりも高い精度が得られることが示された。また、メタマ推定法では、被写体の分光反射率を介してカメラ信号値と人間の知覚色とを対応付けるため、光源の違いによる物体色の変化をより正確に予測することが可能であり、実験結果に反映されたと考えられる。この結果より、デジタルカメラのカラーマネージメント手法として一般的に用いられている行列演算法と比較し、メタマ推定法ではより高い精度での色再現を実現することができ、有効な手法であることが確認された。

4 結語

分光データベースを利用した色再現手法の精度を主観的に評価する実験を行った。実験では、肥前磁器をデジタルカメラで撮影した画像から、撮影光源、及び観察光源各 2 種類についてハードコピーによる色再現サンプルを作成し、肥前磁器実物との色の一致度を評価基準とした。従来のデジタルカメラカラーマネージメント技術

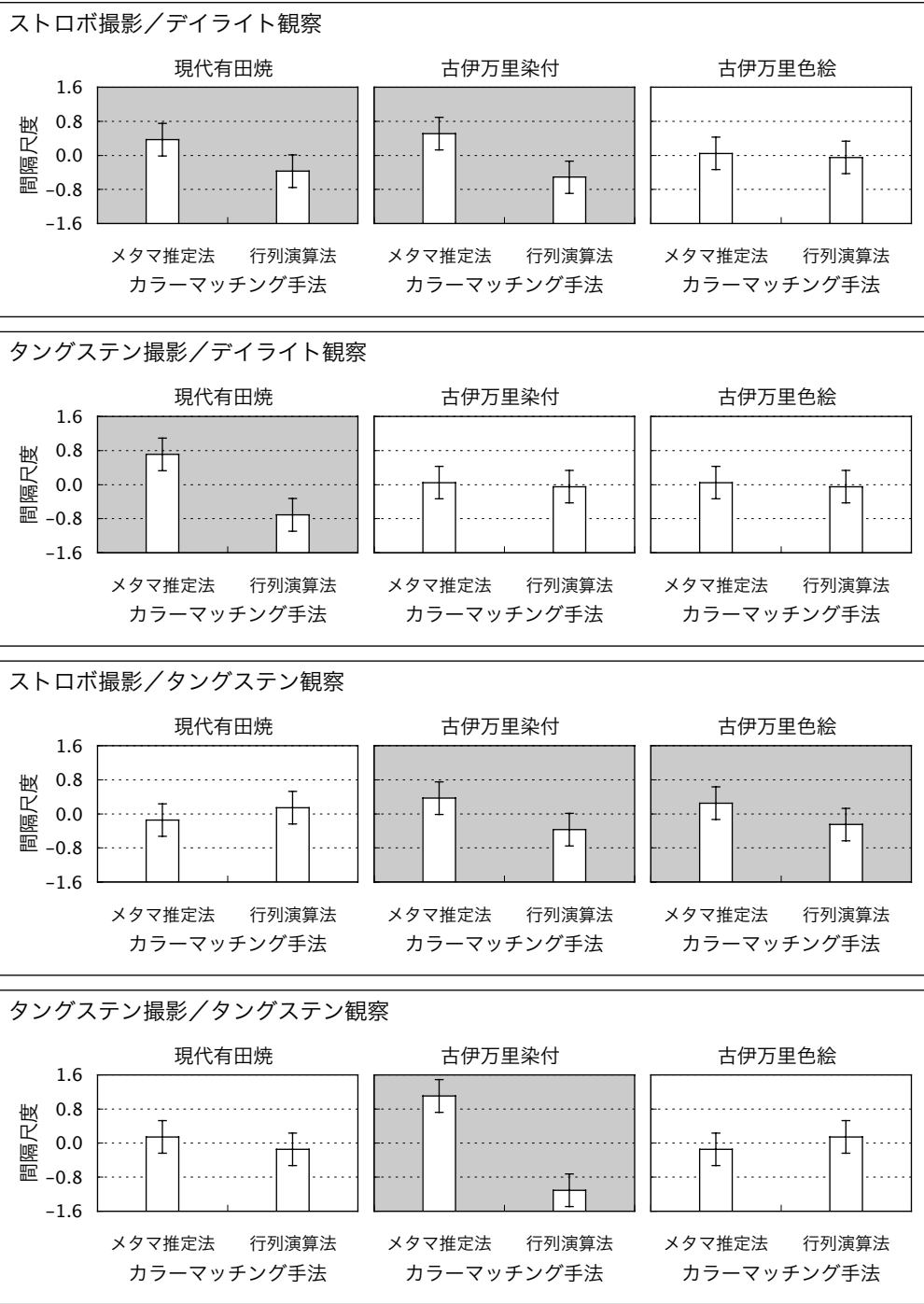


図5 一対比較実験結果 (グレイ背景は統計的有意差のある比較対, 信頼区間 95%).

である行列演算法との一対比較実験により、本手法ではより高精度な色再現が可能であることが確認された。この結果から、カラーチャートを用いる従来の手法に対し、被写体の分光反射率特性を反映した分光データベースを利用した色再現手法では、カメラ信号値と被写体分光反射率、及び人間の知覚色とを対応付けることにより、光源の違いによる被写体の再現色の変化をより正確に予測し、被写体に最適な色変換を実現できることが示された。

デジタル撮影画像のカラーマネージメントは、デジタルアーカイブだけでなく、文化財の遠隔研究や電子閲覧、図録作成等、様々な応用展開が考えられる。本稿で述べた実験では、評価に陶磁器を使用したがる、手法自体は陶磁器に特化するものではない。他の対象物においても評価を行うことにより、手法の汎用性を確認することを今後の課題とする。

謝辞

被験者実験にご協力頂いた佐賀県立九州陶磁文化館の学芸員の皆様、有限会社 DAT の武廣氏、佐賀県窯業技術センターの関戸氏、並びに、本実験で使用した現代有田焼及び有田焼上絵具見本をお貸し頂いた大有田焼振興協同組合の岩永氏に感謝致します。

参考文献

1. T. Johnson, Methods for characterizing colour scanners and digital cameras, *Display*, **16**, 183-191 (1996).
2. G. Hong, M. R. Luo and P. A. Rhodes, A study of digital camera colorimetric characterization based on polynomial modeling, *Col. Res. Appl.*, **26**, 76-84 (2001).
3. T. Hasegawa and M. D. Fairchild, Estimation of object reflectance spectra from digital camera images, *Proc. IS&T/SID's CIC12*, 111-116 (2004).
4. 長谷川隆行, 飯野浩一, メタマー推定に基づくデジタルカメラ画像からの被写体再現色予測, 日本印刷学会第 114 回春期研究発表会予稿集, 115-119 (2005).
5. P. G. Engeldrum, *Psychometric scaling*, Imcotek Press, Winchester, MA (2000).