

〔報文〕 色材の“デジタルカメラ分光分析”に関する 基礎的検討

吉田 直人

1. はじめに

文化財の彩色に用いられる色材の非破壊・非接触的な分析手法のひとつとして、可視反射スペクトル法がある。これは、彩色部における照射光の波長と反射率との関係を分光光度計によって測定し、スペクトルから色材同定に繋がる情報を得るものであり、絵画や染織品など様々な文化財を対象とした調査に広く用いられている¹⁻³⁾。本研究は、同じ原理に基づく分析を、市販のデジタルカメラによる画像撮影によって実現することを目指すものである。

反射率の差を濃淡として画像で捕らえることによる色材調査は、デジタル化以前にも行われており、特に近赤外撮影による炭素系色材の検出は有名である。近赤外撮影により、出土木簡や漆紙文書、また絵画などから、目には見えない墨などによる文字や下描き線の発見が報告されている^{4,5)}。また、デジタルカメラ撮影による色材同定については、城野が近赤外画像から日本画の顔料を特定する試みを行った結果が論文として報告されている⁶⁾。また、一昨年から昨年にかけて、小澤らや小川らも文化財保存修復学会において、それぞれ研究発表を行っている。前者は、バンドパスフィルターを使った画像撮影によって、浮世絵版画に使われた色材を特定する試みである⁷⁾。後者は、赤外線透過フィルターを使った画像撮影によって、天然岩絵具と新岩絵具の区別を行うものである⁸⁾。デジタル画像撮影によるこれらの研究は、色材に特異的な光の反射特性を利用したものであり、特定の波長域を透過する数種類のフィルターで資料の撮影を行い、それぞれの明暗の差を視覚的に判断することにより、色材の特定を行うという点で共通している。

本研究も、反射率の波長による違いをデジタル画像から捉えることにより、色材を同定するという点では、これらの研究と考え方の基本は同じであるが、一歩踏み込んで、波長毎の光反射率を定量的に測定することを試みた。反射率を求めることが出来れば、複数の波長における値の相対的な差を標準試料の反射スペクトルと比較することにより、より多くの色材を同定するための情報が得られると考えたからである。また、デジタル撮影であれば、1枚の画像から任意の箇所を選択して、反射率を求めることも可能となる。撮像素子の画素数が大きいほど、より小さな範囲を選択できるであろう（分光光度計では、測定可能範囲の限界は検出系の設計に依存する）。この方法は、いわば“デジタルカメラ分光分析”と言えるものであるが、実現のためには、デジタル画像から反射率を求める手順と同時に、その反射率の確度が確保されなければならない。この際、問題となるのは、多くのデジタルカメラで標準となっているJPEG撮影モードでは、様々な補正を行った上で画像データが記録されることである。

これまでに、和紙に彩色した試験片の可視光デジタル画像撮影を、バンドパスフィルターを使って、いくつかの波長帯ごとに行い、JPEGおよび一部のデジタルカメラで可能なRAWフォーマットで記録した。そして、ある画像処理ソフトウェアを利用して各色材の反射率を算出した。両フォーマット間での算出値や分光光度計で測定した値との誤差、その原因などを考察し、“デジタルカメラ分光分析”の可能性について検討したこれまでの結果を報告する。

2. 試料, 撮影および反射率測定

2-1. 試験片

ドーサ引きした厚手の和紙 (55mm × 66mm) に、濃墨 (市販の墨汁) と、これを水で薄めた薄墨、膠で溶いたインディゴ粉末および天然の岩群青を筆で塗ったものを試験片とした (写真1: 口絵参照)。余白部分を基準とした各色材部分の反射スペクトルは図1のとおりである。本実験では、デジタル画像をもとに、後述する方法から算出した400nm付近から600nm付近にかけて6つの異なる波長帯の反射率をこのスペクトルデータと比較、検討した。

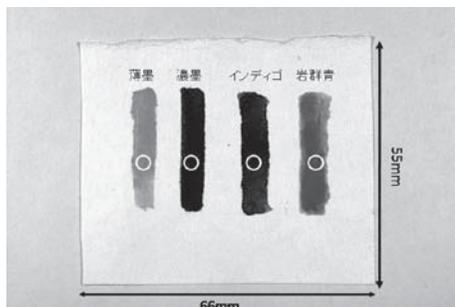


写真1 試験片の写真 余白を基準とした彩色部(丸印)の反射率を測定した。

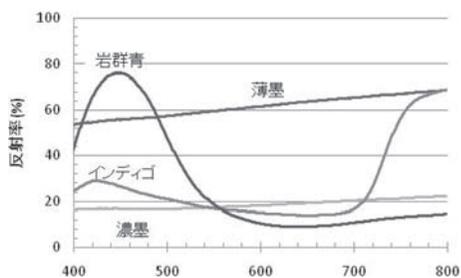


図1 試験片に彩色した各色材の可視反射スペクトル (大塚電子 同軸光ファイバー送受光型分光光度計 MCPD-7000で測定)

2-2. デジタルカメラによる画像撮影

デジタル画像撮影は、暗室内にデジタルカメラなどの機材をコピースタンドに固定して行った (写真2)。各機材のメーカー・型番は下記のとおり。

- ・デジタルカメラ: Canon EOS 1D Mark II (撮像素子 CMOS, 約820万画素)
- ・レンズ: Canon コンパクトマクロレンズ EF 50mm 1:2.5
- ・照明: LPL WEB DOT STUDIO LIGHT WL-230に附属の蛍光灯
- ・バンドパスフィルター (ゼラチンフィルターホルダーを介してレンズに装着): 富士フィルム製 特性波長透過フィルター BPB42 (透過極大波長 420nm), BPB45 (450nm), BPB50 (500nm), BPB53 (530nm), BPB55 (550nm) および BPB60 (600nm) の計6種類 (各フィルターの透過特性を図2に示す)

暗室内で、試験片に明るさが均一になるよう照明光を照射し、各フィルターを使って6枚のカラー画像撮影を行った。撮影条件は下記のとおり。

- ・撮影距離 (CMOS 面から試験片までの距離): 約40 cm
- ・レンズ絞り: f4 シャッター速度: 1/20 sec.
- ・ホワイトバランス設定: 蛍光灯
- ・記録フォーマット: JPEG (最高画質) および RAW
- ・画像サイズ: 3504 × 2336 pixels

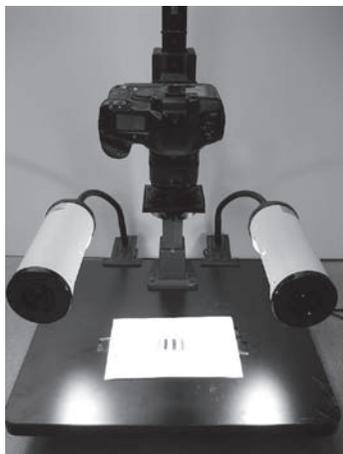


写真2 撮影機材

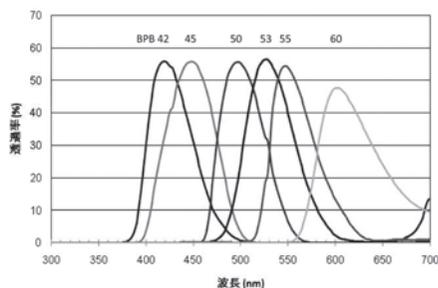


図2 撮影に用いたバンドパスフィルターの透過特性（島津製作所 ダブルビーム型分光光度計 UV-3101PC にて測定）

2-3. 反射率の算出

反射率の算出は、アメリカ国立衛生研究所（NIH）が開発し、インターネットを通じて公開している画像処理ソフト ImageJ（Ver.1.41, Windows 版）を使って行った。ImageJ は、主に医学や細胞生物学的研究に必要な画像処理・解析をサポートすることを目的としたソフトウェアであり、MRI や CT 画像、また細胞の顕微鏡画像などの処理と解析に用いられている^{9, 10}。大きな特徴は、ROI（Region of Interest）の選択が自在で、ピクセル毎、または選択範囲の信号強度データ（平均値、最小・最大値、標準偏差）の抽出が容易なことである。また、TIFF、JPEG、BMP をはじめ、多くの画像フォーマットに対応しているため汎用性に優れている。

ImageJ によって色材の反射率を求める手順を、バンドパスフィルター-BPB50（透過極大波長 500nm）を使って JPEG モードで撮影した画像を例にとって示す。信号強度抽出を行う範囲を選んだのち、メニューバーの“Analyze”をクリックし、プルダウンメニューから“Histogram”を選択すると、選択範囲に含まれる各ピクセルの信号強度平均値が mean として表示される（写真3）。この値が、その範囲におけるメモリーに記録された光の明るさを表している。ここでは、余白部分、薄墨部分の値がそれぞれ183.134、141.381なので、余白部分を基準（100%）とした薄墨の500nm 付近における反射率は $(141.381 / 183.134) \times 100 = \text{約}77\%$ と算出される。（後述するが、この値は分光光度計での値と大きく異なっている。あくまで、手順を示すための例としたものであることに留意していただきたい。）

RAW 画像は、直接 ImageJ で開くことが出来ないため、カメラ付属の画像処理ソフトウェア Digital Photo Professional（Ver. 1.0.0.5）を使って、トーンカーブを“リニア”に設定変更したのち、8bit-TIFF フォーマットに変換した。“リニア”に設定したのは、CMOS への入力信号の強さ（実際の光の強さ）と出力信号（メモリーへの記録値）との関係を正比例にするためである。TIFF フォーマットに変換した画像から、JPEG フォーマットと同じ手順で反射率を算出した。

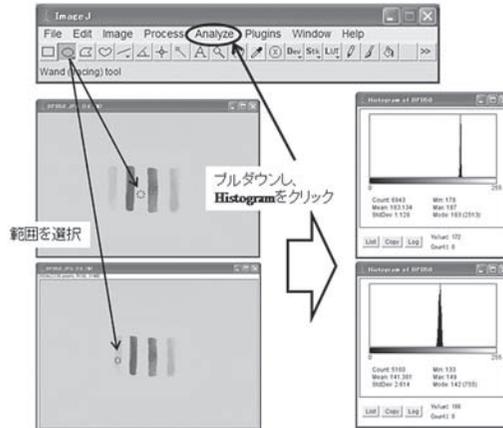


写真3 ImageJによる信号強度抽出を示したキャプチャー画像。選択した範囲の数値情報が別ウィンドウに表示される

3. 結果, 考察

3-1. デジタル画像からの反射率算出結果

6種類のバンドパスフィルターを通して、JPEG、RAWそれぞれの記録フォーマットで撮影した画像から求めた各色材の反射率を、分光光度計で測定した反射スペクトルと重ね合わせた結果を図3に示す。なお、今回用いたバンドパスフィルターの透過波長帯は図2で示すように幅広い(半値幅50nm前後)のものであるが、反射スペクトルとの比較のため、それぞれの透過極大波長における反射率として取り扱うこととした。

図3に示すとおり、算出された反射率は、両フォーマット間でかなりの差が生じた。RAW画像を基に算出した数値の方がJPEGに比べ、反射スペクトルの数値により近いものであった。

分光光度計で測定した値を基準とした誤差($\Delta\%$)をプロットした結果を図4に示す。誤差の割合は色材や波長によって異なるが、JPEG画像から求めた反射率は誤差が大きく、 $\Delta\%$ はすべて正の値となり、最大320%(600nmにおける岩群青の反射率)にも達した。また、同一色材でも波長によって誤差の程度に大きな差があることから、分光光度計で測定したスペクトルとの相似性は低いといえる。一方、RAW画像から求めた反射率にも最大40%弱の誤差が生じており、絶対値の正確性は十分とは言えないが、同一色材では比較的一定であり、スペクトルの相似性が比較的良好に再現できていることを示している。露出設定を変えて(f8, シャッター速度自動)撮影したRAW画像からの反射率算出も行ったが、結果に大きな差はなかった(図5)。

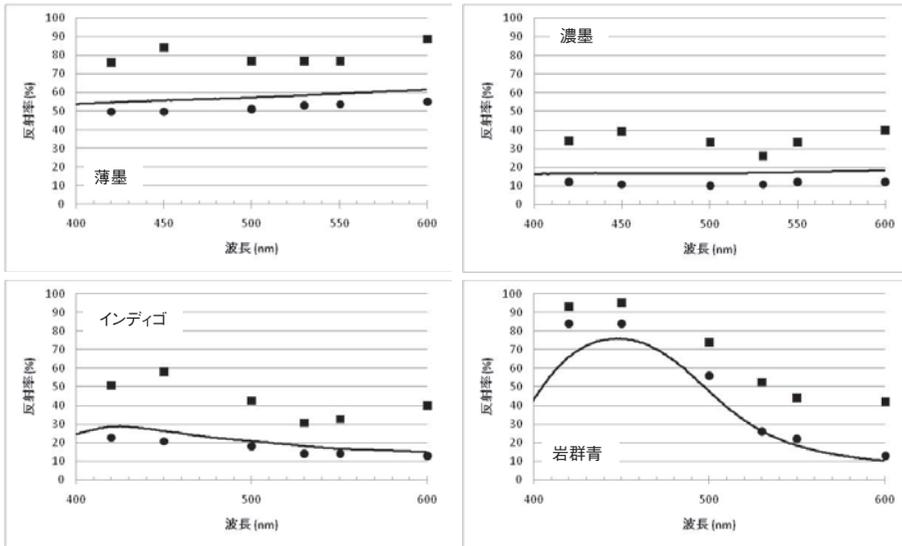


図3 デジタル画像から算出した反射率と分光光度計で測定した反射スペクトル（実線）との比較
 ■：JPEG ●：RAW ⇒8bit-Tiff

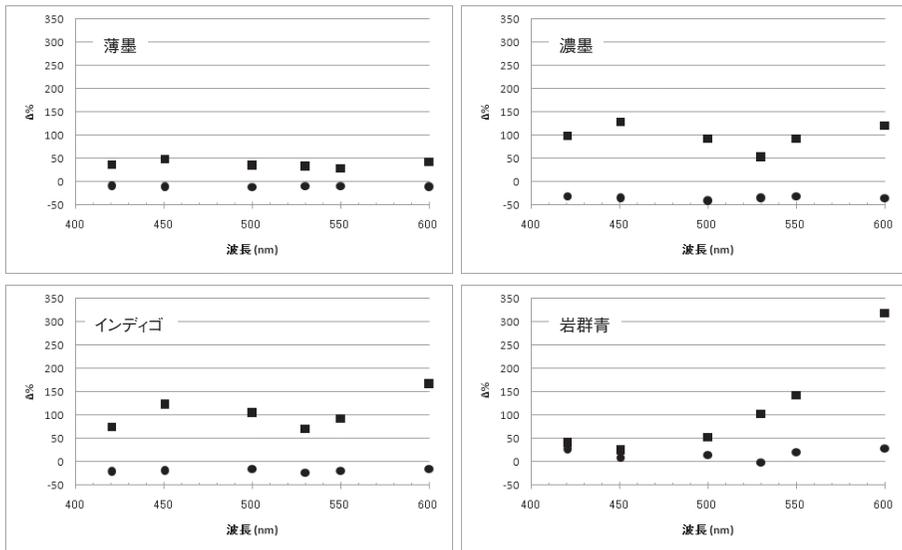


図4 分光光度計で測定した値を基準とした、デジタル画像から算出した反射率の誤差 (Δ%)
 ■：JPEG ●：RAW ⇒8bit-Tiff

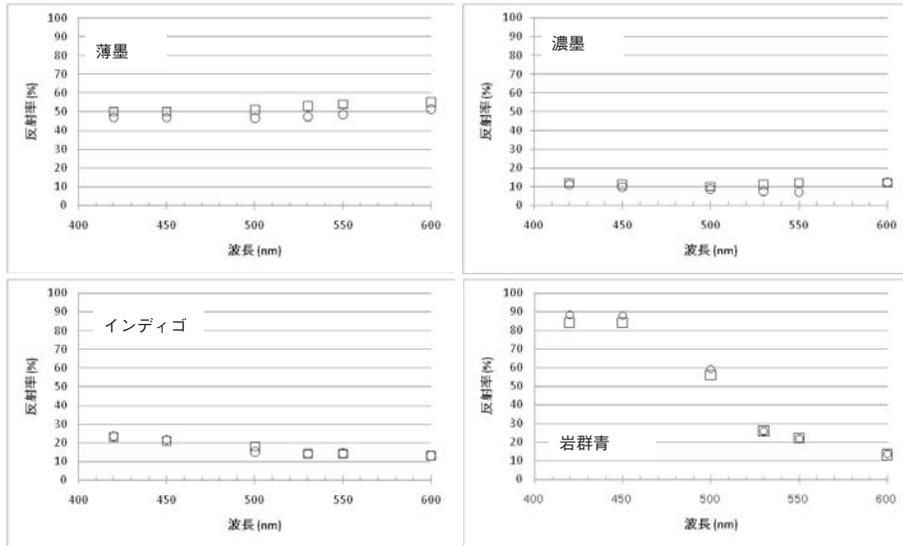


図5 異なる露出設定で撮影したRAW画像より算出した反射率

□ : f4, speed 1/20、○ : f8, speed auto

3-2. 考察

今回の実験結果から、次のことが分かった。

- ・ JPEG モードで撮影したデジタル画像を基に算出した反射率は、反射スペクトルとの相違が大きく、相似性も再現されない。
- ・ RAW 画像（8-bit TIFF に変換）から算出した値は、絶対値には反射スペクトルとの相違があるが、相似性は比較的よく再現される。

両フォーマット間で、このような結果の違いが生じた理由については、下記のように考えている。

デジタルカメラは、観賞用写真としてのクオリティを重視しているため、撮像素子が感知した信号に対して、様々なソフトウェア処理を行った上で記録している。特に JPEG 撮影モードは多くの民生用デジタルカメラに標準機能として搭載されているものであるが（特に、コンパクトタイプのデジタルカメラの多くは JPEG モードでしか撮影できない）、同じ対象を異なるカメラで撮影すると、色合いや明るさ、コントラストに違いがあることから分かるように、機種ごとに違ったアルゴリズムに基づいた補正を行っているためである。JPEG 画像から算出した反射率が、絶対値、相対値ともに分光光度計の値と大きく異なっていたのは、補正後のデータを使用しているためである。また、 $\Delta\%$ がすべて正の値となっているのは、画像内で相対的に暗いところを明るく補正しているためであると考えられる。

一方、RAW 撮影モードは、一眼レフタイプの機種の多くや、一部のコンパクトカメラに搭載されている機能で、撮像素子が感知した光の強度をそのまま記録するものである。RAW 画像は、いわば銀塩写真でのネガに相当するもので、ユーザー自身が自由に補正を行うのに適している。今回は、RAW 画像のトーンカーブを“リニア”に設定変更した上で、TIFF フォーマットに変換し、反射率を求めた。被写体の明るさに正比例した信号強度が TIFF データとして記録されたために、反射スペクトルとの相似性が高い結果が得られたと考えられる（同一条件で

撮影し、両フォーマットで記録した試験片の画像を写真4（口絵参照）で示す。相対的な明るさやコントラストに大きな違いがあることから分かるように、フォーマットの選択が重要である）。

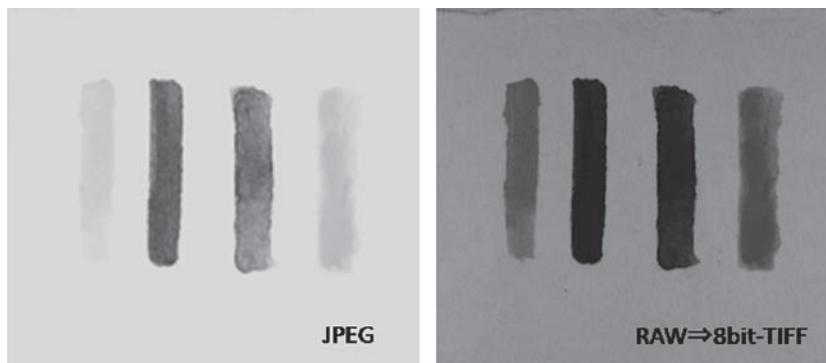


写真4 BPB50を使って撮影した試験片の画像。同じ撮影条件（f4, 1/20）にも関わらず、明るさやコントラストに大きな違いが見られる。

しかし、絶対値については、分光光度計の値と比較して最大40%弱の誤差が生じた。この原因の一つとして、今回用いたバンドパスフィルターの透過波長帯が広がったことが挙げられる。このフィルターの半値幅は約50nmである（図2）。従って実際は、透過極大波長を中心に幅広い波長帯の光を捉えているため、この波長帯で反射率が大きく変化するような色材の場合には特に影響を受けやすい。このことは、短波長側（400～500nm）で反射率の変化が大きい岩群青で、絶対値に比較的大きな誤差がみられたことから分かる（図3, 4）。この結果は、未知の色材を同定する手段としては、正確性に課題を残していることを示している。これを解決する策の一つとして、半値幅 10nm 前後のガラス製バンドパスフィルターを使用することにより、さらに正確性が向上できると考えられる（ただし、このような半値幅の狭いもので、民生用カメラのレンズに装着できるものは市販されていないため、他の光学機器用フィルターを流用する必要がある）。また、今回使用したTACベースのフィルターは透過波長帯が6種類のみに限られているため、420～600nmという狭い波長域での検討に留まった。朱や鉛丹などの赤系色材は、550～600nm以上で反射率が大きく変化するため¹¹⁾、さらに長波長側に対応したフィルターを使った測定が必要である。この点についても今後検討を進めていきたい。

4. まとめ

冒頭にも述べたが、本研究は、デジタルカメラによって撮影した画像から、様々な波長における彩色部の反射率を求め、これを基に色材の同定を行う手法の確立を目指すものである。今回はその手始めとして、画像処理ソフト ImageJ を使って反射率を求める手順を示し、得られた値を検討したものである。その結果、RAW撮影での画像データをもとに、比較的正確な値を求めることが可能であると分かった。とはいえ、反射スペクトルとの相似性は、まだ満足できるものとは言いがたい。考察でも述べたが、ガラスフィルターの使用などにより、精度の向上に向けて検討を進めていきたい。

今回提案した“デジタルカメラ分光分析”は、写真を撮るためのカメラを転用し、可視反射スペクトル法と同じ情報を得ようとするものである。従って、精度や確度の点では、専用の測

定機器である分光光度計にはかなわないかもしれない。しかし、誰でも機材を入手し、測定出来るというのは大きな利点である。詳細な可視反射分光分析や蛍光 X 線分析¹²⁾、また 3 次元蛍光分析¹³⁾ などを行う前に、事前調査として“デジタルカメラ分光分析”を実施するという使い方も考えられる。分析技術の研究には、新しい情報を得るための手法を開発することと、既存の手法をより低コスト化、簡便化するという二つの方向性がある。本研究は、後者を志向したものであり、写真のデジタル化がもたらしたのものである。今後も実用化に向けて、研究を進めていきたい。

引用文献

- 1) 朽津信明：白杵磨崖仏で観察される彩色表現について，保存科学，40，52-63（2001）
- 2) 吉田直人：可視反射分光スペクトル法による染料分析－近世絵図資料彩色調査への応用－，歴史学研究，841，35-42（2008）
- 3) 佐々木良子，藤井健三，佐々木健：「白紵地雪輪波頭に菊文様小袖裂」の非破壊分析，文化財保存修復学会誌，53，35-53（2008）
- 4) 馬淵久夫他編：赤外線（IR）写真撮影，『文化財科学の事典』朝倉書店 pp.287-288（2003）
- 5) 三浦定俊，石川陸郎：最近の赤外線テレビカメラの利用，保存科学，19，21-27（1980）
- 6) 城野誠治：近赤外線画像の形成と利用，美術研究，376，372-386（2002）
- 7) 小澤美和子，松井敏也，Morgos Andreas，沢田正昭：可視光線，近赤外線下でのデジタルカメラ撮影を利用した浮世絵版画に使用される顔料，染料同定の試み，文化財保存修復学会第29回大会研究発表要旨集，218-219（2007）
- 8) 小川絢子，佐藤香子，荒井経，二宮修治：赤外線撮影による天然岩絵と新岩絵具の判別法，文化財保存修復学会第30回記念大会研究発表要旨集，170-171（2008）
- 9) 亀田昌志，上野育子：脳腫瘍患者 MR 画像からの脳溝抽出と3次元可視化－脳神経外科の臨床現場における医療支援を目指して，画像ラボ（2008年9月号），49-52
- 10) V.Baecker and Pierre Travo：Cell image analyzer - A visual scripting interface for ImageJ and its usage at the microscopy facility Montpellier RIO imaging, Proceeding of the ImageJ users and developer conference, Ed.1, pp.105-110（2006）
- 11) 朽津信明，黒木紀子，井口智子，三石正一：鉱物顔料の可視光反射スペクトルに関する基礎的研究，保存科学，38，108-123（1999）
- 12) 早川泰弘：蛍光 X 線分析による地図資料の彩色材料調査，歴史学研究，841，29-34（2008）
- 13) 下山進，野田祐子，勝原伸也：光ファイバーを用いる三次元蛍光スペクトルによる日本古来の浮世絵版画に使用された着色料の非破壊同定，分析化学，47，93 - 100（1998）。

キーワード：非破壊分析（non-destructive analysis）；色材（coloring materials）；デジタル画像処理（digital image processing）

A Basic Study on “Digital Camera Spectroscopy” for Identifying Color Materials

Naoto YOSHIDA

UV-visible reflection spectra give useful information to identify color materials used for cultural properties such as paintings and textiles. The purpose of this study is to acquire correct light reflectance of color materials at any point in cultural properties, from images taken by a commercial digital camera and to establish a “digital camera spectroscopy” for identifying color materials.

A piece of Japanese paper painted with three different color materials-Chinese ink, indigo and azurite-was prepared for a test sample. The test sample was homogeneously illuminated by white light and its digital images (RAW and JPEG format) were taken by a digital camera (Canon EOS 1D MarkII) with a lens (Canon compact macro lens EF 50mm 1:2.5) and triacetate-based band-pass filters (420-600 nm). Reflectance was calculated using an image processing software ImageJ which is released from the National Institute of Health (NIH).

As a result, it was found that calculated reflectance values from taken images are significantly different between JPEG images and RAW images (converted to 8bit-TIFF with a linear tone curve). Values from the latter were much similar than those from the former to those measured by a spectrometer.