

## 特集「色彩科学と情報技術の融合による文化財研究」

Special Issue: The fusion of color science and information technology for research on cultural properties

## 特集にあたって

## Editor's Introduction

望月 宏祐

Kosuke Mochizuki

長野大学

Nagano University

文化財や美術品に使われている色彩を精密にデジタルアーカイブし、科学的に分析するためには最新の情報技術 (IT) が欠かせないものになっている。文化財をデジタルアーカイブ化することによって、半永久的に文化財情報を保存できるというだけでなく、その情報から色彩の重要な知見を得る機会につながる。

また、近年では最新の IT と組み合わせ文化財を有効活用することが期待されるようになってきている。文化財を映像コンテンツとして再現することや、新たな鑑賞システムの開発によって、観光や教育など多くの分野への貢献につながると考えられる。

本特集では、実際の文化財や美術品といった人々の文化を支えているものを対象とした色彩のデジタル化について解説する。デジタル化の例として、主にデジタル入力技術 (分光画像計測)、デジタル処理技術 (色彩情報処理)、デジタル出力・表現技術 (プロジェクションマッピング・3DCG) の三つの視点から解説の内容を深めていく。この解説のために本特集では5編にわたって記事を掲載させていただくことになった。

高精度な色彩のデジタル化技術の例として、分光画像計測技術が挙げられる。分光画像計測から得られる画像は、文化財がもつ固有の物理情報である分光反射率を知ることにつながり、文化財の材質推定や色彩分析、精密な映像再現などへの応用が期待できる。

日本電信電話株式会社コミュニケーション科学基礎研究所の土田勝先生には、デジタル入力技術として最先端の研究である高解像度の分光画像が取得できる3ショット7バンド撮影方式とその技術について解説をしていただいた。そして堺アルフォンス・ミュシャ館に展示される作品を対象として画像記録した研究成果について解説をいただいた。

また、分光画像計測によって得られた文化財の画像は、色彩情報処理と組み合わせることによって新たな知見が得られる。

デジタル入力技術からデジタル処理技術の高次の融合に関する研究をされている国立民族学博物館の末森薫先生には、分光画像計測に基づいた文化財の色彩再現の手法について解説をいただいた。中国甘粛省敦煌

市郊外の莫高窟内の古代壁画を対象とし、実際の空間内における視覚認知の検証を目的として画像再現した結果について解説をいただいた。

文化財や美術品に含まれている制作者の個性や特徴を計量的に表すことができれば、色彩分野だけではなく、芸術やデザイン、文化研究などにも役立つ知見になると考えられる。

国立新美術館の室屋泰三先生には、デジタル処理技術という視点で高度な数学的色彩解析の有効性を解説いただいた。特に、様々な高精細の絵画画像からその作品に使われている色彩情報の特徴を計量的に明らかにするための方法について解説をいただいた。

文化財や美術品は、より有効活用するために IT との融合によって表現する研究がある。その例としてプロジェクションマッピング技術がある。プロジェクションマッピング技術は建造物などの特徴や魅力を色彩や演出によって引き立て、楽しめる鑑賞を可能にする。

デジタル出力・表現技術として極めて高い表現力を IT の力で引き出す研究が重要であり、愛知工業大学の小栗真弥先生には、文化財建造物の外装、内装を活かした最新のプロジェクションマッピング技術について解説をいただいた。

また、文化財や美術品のデジタル表現の例として3DCG 技術も挙げられる。実際の文化財の3次元形状や色彩情報を統合して再現することが可能となる。そして3DCG 技術によって文化財を自由な視点で鑑賞できるようになる。

特集企画者の望月は、歴史的建造物である江戸中期の古城を対象として、歴史資料に示された形状や材質情報を読み取り、現存する建造物とすでに消失している建造物それぞれの3DCG 再現手法について解説する。

以上のように、本特集では色彩科学と IT を融合した文化財研究について掲載させていただいた。最後に、ご多忙にも関わらず本特集の執筆をお引き受けいただいた共著を含める7名の先生とご協力いただいた皆様に感謝の意を表したい。

## 特集「色彩科学と情報技術の融合による文化財研究」

Special Issue: The fusion of color science and information technology for research on cultural properties

## 文化財の分光画像撮影とその応用

Spectral image capturing of cultural properties and its applications

土田 勝

Masaru Tsuchida

日本電信電話株式会社

NTT corporation

キーワード：色再現, 可視化, マルチスペクトル画像, ハイパースペクトル画像, デジタルアーカイブ

Keywords: color reproduction, visualization, multispectral image, hyperspectral image, digital archive

## 1. はじめに

文化財の画像計測の目的には、対象の形状、構造、色彩、素材、質感等の記録・分析などがある。本稿では色彩情報、分光情報の記録技術に関して述べていく。

世の中の大半の画像機器では色を赤 (Red)、緑 (Green)、青 (Blue) の3色で表現し、被写体の色彩情報を記録・処理・表示している (以降、この3色で色を記録するカメラをRGBカメラと呼ぶ)。しかし、通常のRGBカメラでは、カメラと人間の目の分光感度特性は一致していないため実物と画像を比較すると「色の見え」が一致しない場合が多い。この問題を解消するため各カメラメーカーは色信号処理などで様々な工夫を行っている。一方でカメラに取り付けるフィルタを工夫することで、人間の目の感度に近づける工夫も試みられてきた。これらの技術の発展により高いレベルでの「色の見え」の再現が実現されており、文化財のデジタルアーカイブでもRGBカメラが使用されている。

一方で「色の見え」は、対象を観察する照明環境に大きく依存している。具体的には、物体表面に入射する照明光の分光スペクトル (以下、照明光スペクトル) が「色の見え」に影響を与えている。照明光スペクトルの影響を受けない色に関する成分、すなわち正確な分光反射率 (波長毎の反射率の分布) を得ることができれば、任意の照明環境下での「色の見え」を高い精度で再現することが可能となる。文化財の画像撮影現場では使用可能な照明光源が限定されることも多く、観察に適した照明光下での色の見えが再現できることは非常に価値がある。さらに分光反射率は素材固有の物理特性であることから、対象物を構成する素材 (絵画の場合は使用されている絵の具の種類など) の特定や、劣化レベル等の状態が推定できる可能性がある。

この分光反射率の推定 / 計測を目的の一つとして開発が進められているのがマルチスペクトル / ハイパースペクトル画像技術である。1990年代にデジタルデー

タとしての分光画像計測<sup>1,2)</sup>が始まり30年余り、まだ高価ではあるものの、技術者でなくても比較的容易にマルチスペクトル (マルチバンド) / ハイパースペクトル画像が撮影でき分析も可能な市販品が世の中に出始めている。ワンショットでのスナップ撮影のみならず動画撮影が可能なものもある。現状、大半のマルチスペクトル / ハイパースペクトル画像撮影方式に共通する課題の1つに、RGB画像の撮影と比較して大光量の照明が必要なことが挙げられる。強い照明光の照射は、文化財に与えるダメージのリスク管理の観点から好ましくないと考えられる場合が多い。加えて現状のマルチスペクトル / ハイパースペクトルカメラの画素数は、文化財の撮影に用いられるRGBカメラより一桁以上少ない。文化財の画像撮影においてマルチスペクトル / ハイパースペクトル画像の収集を普及させるためには、現行のRGBカメラを用いた画像撮影に準じた照明環境で、同等のスペックの画像が得られる必要がある。

筆者らの研究グループでは、RGBカメラにより得られる画像品質は担保しつつ、更に分光情報の取得が可能な2ショット型6バンド画像撮影方式<sup>3)</sup>を用いて文化財のデジタルアーカイブを進めてきた<sup>4,5)</sup>。この方式では、カメラの赤外カットフィルタを取り外し、代わりに赤外透過フィルタ (可視光カットフィルタ) を取り付けることで、画角と画素数が可視光と同じ赤外画像を3ショット目で撮影することも可能である。

今回、堺市および堺アルフォンス・ミュシャ館 (堺市立文化館) の協力により、堺市が所蔵するアルフォンス・ミュシャ作品のコレクションの一部を3ショット7バンド撮影方式により1億画素以上の高精細画像として記録する機会を得たので報告する。その際に低解像度ではあるがハイパースペクトルカメラでの撮影も行った。堺市が所蔵するミュシャとその関連作家の作品約500点は、株式会社ドイの創業者、土居君雄氏 (1926-1990) が収集したもので、ポスターや油彩画、

## 特集「色彩科学と情報技術の融合による文化財研究」

Special Issue: The fusion of color science and information technology for research on cultural properties

## 古代壁画の視覚認知解析を目的とする色彩情報処理

Color information processing for visual recognition analysis of ancient wall paintings

末森 薫

Kaoru Suemori

国立民族学博物館

National Museum of Ethnology, Japan

安室 喜弘

Yoshihiro Yasumuro

関西大学

Kansai University

川口 拓哉

Takuya Kawaguchi

株式会社かたち

Katachi Co. Ltd.

キーワード：敦煌莫高窟，壁画，彩色再現，燃烧光，視覚認知

Keywords：Dunhuang Mogao Grottoes, mural painting, reproduction of colors, frame light, visual perception

## 1. はじめに：薄明空間に描かれた壁画

古代のシルクロード沿いには、洞窟を宗教的な空間に模した石窟寺院が数多くつくられた。中国甘肅省敦煌市の郊外にある莫高窟もそのひとつであり、1700mにおよぶ崖面には1000年以上にわたり造営された700以上の洞窟が残る。洞窟は光が届きにくい薄暗い環境にもかかわらず極彩色の壁画が描かれ、空間が荘厳されている。人が色を認知するには光は不可欠であり、電気的な光がない時代には蠟燭など赤味が強く、揺らぐ性質を有する燃烧光を用いて洞窟を照らしていたはずである。石窟寺院の空間において壁画が果たした役割を検証するために、描かれた当時の色と光の環境を再現し検証する研究を進めてきた。

ハイパースペクトルカメラを用いて取得する分光画像 (Hyperspectral Image, HSI) は、二次元の画像情報と波長情報を組み合わせた多次元のデータである。被写体の分光特性を面的に得ることができ、近年文化財や文化遺産の調査・研究に用いる事例が増えている<sup>1)2)</sup>。本稿では古代壁画の彩色再現と、分光画像を用いた古代壁画の見え方の検証に関する研究成果を紹介したい。

## 2. 千仏壁画の彩色再現

莫高窟に描かれた壁画の中で大きな面積を占めるものに規則的な配列・配色で描かれた千仏壁画がある(図1)。莫高窟の早期の千仏は八体の坐仏を一組とする配色によって描かれ、同じ配色の坐仏が斜めに連続する視覚的特徴(斜行方向)と、隣り合う二体の頭光・身光の配色関係によって生まれる視覚的特徴(光背配色)を有している。千仏壁画は壁面を装飾するとともに、この二つの視覚的特徴を用いて礼拝を導いたり、



図1. 極彩色の壁画で荘厳された莫高窟第272窟  
[出典:敦煌研究院編『敦煌石窟全集第一巻』2011]



図2. 再現千仏壁画の制作工程

特集「色彩科学と情報技術の融合による文化財研究」

Special Issue: The fusion of color science and information technology for research on cultural properties

絵画画像の計量的な色彩分析の試み

A trial of color analysis of paintings by recursive step-function system considering the composition of painting art

室屋 泰三  
Taizo Muroya

国立新美術館  
The National Art Center, Tokyo

キーワード：絵画画像, 色変化, 計量的分析, 再帰的分割, 完全正規直交系, 適応的基底関数  
Keywords: painting art, recursive division, adaptive basis function, color analysis

1. はじめに

さまざまな絵画作品の高精細デジタル画像がインターネットに公開され, それらを対象として絵画の色彩情報を分析できるようになった. 本稿では, それら高精細な絵画画像を通して, 絵画作品の画面上にある色彩の特徴について計量的に分析する方法を解説する. 絵画作品を視覚的に鑑賞するだけでなく, あたかも人体をCTスキャナで検査するように, 絵画画像の「見かた」を変えて観察することで絵画の中の色彩に関する新たな「気づき」を得ること, もしくは「気づき」に対する計量的な「裏付け」を得ることを目指す.

2. 色変化の計量的な分析

絵画画像の画面上の色情報について平均, 標準偏差などといった統計量, ヒストグラムや色成分ごとの画像 (例えば, 明度画像や彩度画像, 特定色相の色のみの画像) のほか, エッジ検出のように局所的な色変化に注目する方法, 色空間上での分布等様々な見かたがある. ここでは画面上の色の配置によって生じる色変化に着目して, その変化の強さを計量することを試みる. 色はその配置により, 役割を変えて, 見る者にさまざまな印象を与える. 画面の上の色彩, すなわち「画像色彩」の効果について分析するために, 画面上に配置された色の間の差を測ることにする. 以下, 絵画画像をCIELABで表色するものとし, 画面上の点  $(x, y)$  に対応する関数  $f(x, y)$  を色成分  $L^*$  値,  $a^*$  値,  $b^*$  値を

返す関数  $L^*(x, y), a^*(x, y), b^*(x, y)$  のいずれかと考えることとする.

3. 画面上の「領域」

画面上の色の配置を考える際, 「どこ」の色を考えるのかということに注意する必要がある. 画面上の色を取得する最小単位は画素であるが, 画面上の色の効果を計量するためには, 画素単位の色情報ではなく, 画面を構成する領域 (部分画像) に対応した色, 例えば平均色や代表色を扱った方が良い. 「領域」は絵画の画面上にさまざまなスケールで存在している. すなわち,

- ・構図がもたらす「領域」
- ・構図を構成する事物がもたらす「領域」
- ・構成要素を描写する筆致等がもたらす「領域」
- ・画素がもたらす, 最小の「領域」

図1に示すパウル・クレーの作品のように画面全体に対してゆるやかに変化する色彩とその上にちりばめられた小さなドットが織りなす構成のように, 色の

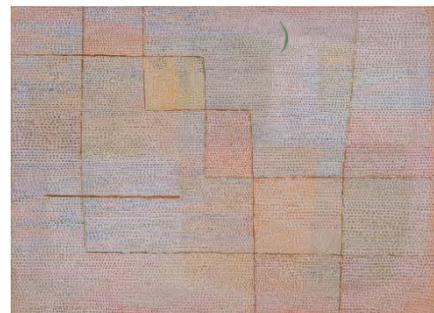


図1. Paul Klee, “Clarification”, 1932.

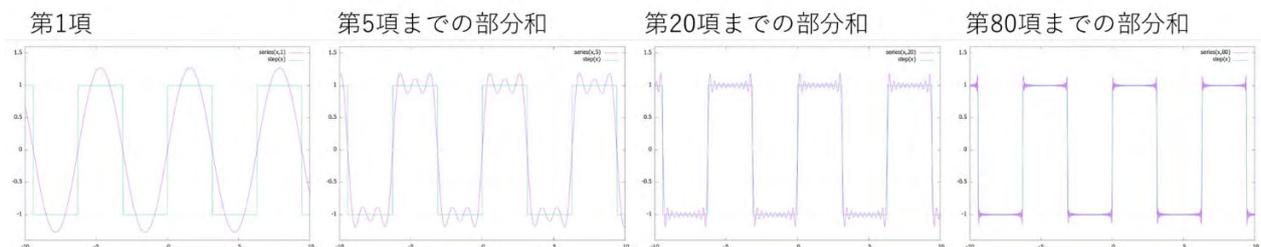


図2. フーリエ変換の例

特集「色彩科学と情報技術の融合による文化財研究」

Special Issue: The fusion of color science and information technology for research on cultural properties

プロジェクションマッピング技術による文化財の活用

Applying Projection Mapping Technology for Cultural Properties

小栗 真弥  
Shinya Oguri

愛知工業大学情報科学部  
Aichi Institute of Technology

キーワード：プロジェクションマッピング, 文化財建造物, 登録文化財  
Keywords : projection mapping, cultural properties, heritage

1. はじめに

文化財と聞いて、真っ先にイメージするのは清水寺や法隆寺のような寺院、または城郭や古墳のような遺跡ではないだろうか。これらは日本の歴史や文化を象徴する貴重な財産であり、多くの人々にとって親しみやすい存在である。一方で、文化財全体の件数からすると、このように誰もがすぐイメージできる有名なもの、または観光のために簡単に訪問できるものはごく一部である。本稿では文化財の中でも特に登録有形文化財の建造物に焦点を当てて、プロジェクションマッピング技術を用いた文化財活用の事例について述べていきたい。

2. 登録有形文化財建造物とは

「文化財」と呼ばれるものは有形、無形、建造物から美術工芸品や民俗芸能まで多種多様であり、また、国・都道府県・市町村がそれぞれに定めるもの様々なものが存在している。一般的には国が文化財保護法によって規定しているものを指すことが多い。この文化財保護法は1949年に法隆寺金堂壁画を焼損したことを契機に1950年に制定されたものである。その後、経済の高度成長や都市開発、生活様式の変化のなかで社会的評価を受けるまもなく消滅の危機に晒されている大量の近代等の文化財建造物を後世に継承していくために1996年の法改正で「登録文化財」と呼ばれる制度ができた。これは従来の国宝や重要文化財のような「指定」制度に加えて、さらに広く保存・活用の措置が必要だと思われるものを届け出ることによって文部科学大臣が文化財登録原簿に「登録」をおこなう制度となっている。現在の文化財保護法によって保護されている文化財の種別を図1に示す。文化財となっている建造物に関しては、文化財に指定・登録されることによって修繕や改修による現状変更は国に届出が必要だが、登録文化財の場合は内装に関する改修や外観の4分の1以下の規模であれば国に届出をすることなくおこなえるなど

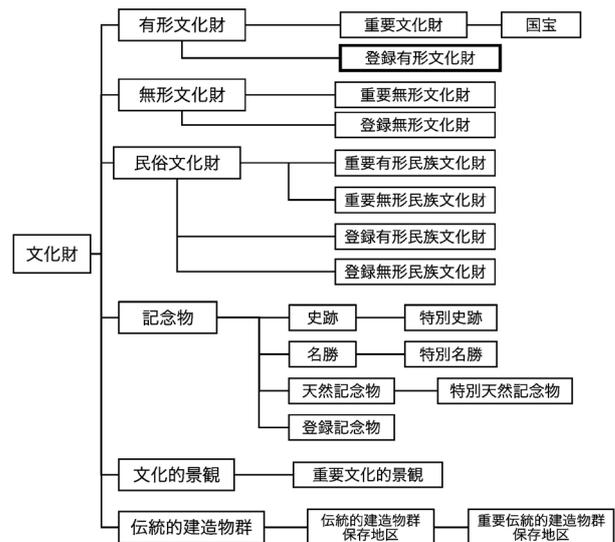


図1. 文化財保護法で規定される文化財の種別 (筆者作成)

柔軟な活用が可能であるのが特徴となっている。また、国宝・重要文化財と比べて建造物としての規模は小さいが、件数に関しては国宝 231 件、重要文化財 2,565 件に対して、登録文化財 13,761 件 (2024 年 1 月時点) と非常に多い。さらに種別に関しては寺社仏閣だけではなく、住宅や店舗として利用されている登録文化財が多いのもの特徴である。

3. 登録文化財建造物を取り巻く現状と課題

これまで文化財保護法では、文化財を保護し、保存することが重視されていたが、2017年に策定された文化経済戦略<sup>1)</sup>において文化財の保存だけではなく、産業や観光の資源として地域経済の活性化やインバウンド拡大の実現のために保存と活用が明確に期待されるようになった。一方で典型的な活用の例としてはカフェやレストラン、宿泊施設などに改装したり博物館にしたりといったことが考えられるが、コストや立地条件などを考えると、どこの文化財でもできるというものではない。住宅や店舗として利用されている文化財の場合には仮に公開するにしても単発のイベントと

## 特集「色彩科学と情報技術の融合による文化財研究」

Special Issue: The fusion of color science and information technology for research on cultural properties

## 歴史調査に基づく歴史文化財の3DCG再現

3DCG reproduction of historical and cultural properties based on historical research

望月 宏祐 長野大学  
Kosuke Mochizuki Nagano University田中 法博 長野大学  
Norihiro Tanaka Nagano University

キーワード：文化財, 3DCG再現, 材質

Keywords: cultural properties, 3dcg reproduction, material

## 1. はじめに

古城などの文化財や文化遺産となっている歴史的建造物は、3次元コンピュータグラフィックス(3DCG)による再現が行われるようになってきている<sup>1)</sup>。この理由としては、純粋に当時の古城の姿が3次元的に臨場感を持って見たいという要求があることや建造物を自由な視点で鑑賞できるようになることが挙げられる。さらに3DCGデータは、Virtual Reality (VR) や Augmented Reality (AR) などの映像技術と組み合わせることで、ディスプレイに表現するよりも、没入的な体験が可能なコンテンツとなる。

本研究では、現在の長野県小諸市に、かつて存在していた江戸中期の小諸城を対象とし、歴史資料を基にして3DCG再現する手法について述べる。本稿では、小諸城の代表的な建造物でもある「二の丸」、「本丸」、「大手門」を主に取り上げ、歴史資料の情報を基にした建造物の形状の再現に加え、建材の色や質感に関する情報にも着目したこと、ならびに3DCG再現手法とその課題について述べる。

現代において古城の築城当時の姿を史実に基づいて3DCG再現するためには、そもそも古城の本体が消失していたり、古城の情報を残した歴史資料(古文書等)の詳細な情報が記された歴史資料(古文書や絵図等)の多くが消失していたりする場合も多い。この場合、元の古城の姿がわからないので3DCGの制作者の想像や予想で3DCG化しなければならない。そのため、現在の多くの古城の3DCG再現(復元)では、史実に基づいた再現が困難となっていることが多い。また、絵図などの資料として残っている場合であっても、それらの資料は散在してまとまっておらず、資料から立体的に古城の全体像を把握して3Dモデルを作成することが難しいといった問題がある。

これらの現状を踏まえ、本稿では主に小諸城の

3DCG復元に関する取り組みを事例として取り上げ、歴史調査に基づく、歴史文化財の3DCG再現に関する知見について述べる。

## 2. 小諸城の特徴

小諸城は、浅間山の火山活動やその後の浸食によって形成されたとされる深い谷や崖に囲まれた場所に建てられた城である。1614年頃までに江戸中期以降の小諸城の規模になるように仙石越前守秀久によって整備された<sup>2)</sup>。城下町においては、一般の城下町とは異なり、城よりも標高の高い位置に存在していたことから、小諸城は「穴城」とも呼ばれるほどに地形に大きな特徴をもっている。

しかし、江戸期の城の多くが明治期の廃藩置県に伴い取り壊され消失している。小諸城の場合も同時期に多くの城郭の多くが消失している。現在、かつての小諸城の場所は、小諸城址懐古園、小諸駅、広場などになっている。現在も建築時と同一の場所に存在している建造物は、大手門(図1)と三の門があり、この両方が国の重要文化財に指定されている。他では、小諸城から城下町内に移築された門や蔵がある。こういった現存している建造物の場合は、3DCG再現するために必要な情報を直接調査・計測することが可能であるが、消失している建造物の場合は歴史資料や発掘調査から情報を得る必要がある。また、現存している建造物であっても、現在に至るまでの修復や改築によって、江戸中期の姿と異なっている可能性がある。しかし、小諸城は消失している建造物を含めた110点以上の江戸中期の絵図があり、小諸市教育委員会が所蔵している。現存する大手門と三の門については、これらと絵図を調査した情報を比較し検証して再現することができると考えられる。

これらのことから、本研究では、まず所蔵された小