

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¹⁾²⁾。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. 千仏壁画の色彩再現

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]

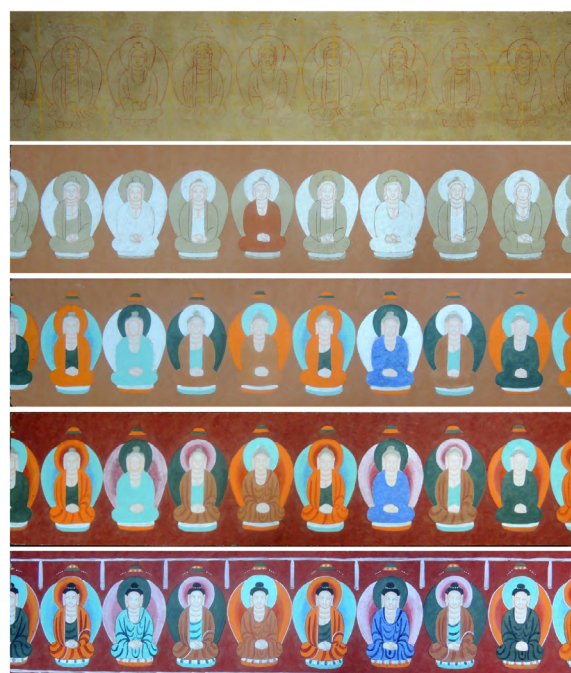


図2. 再現千仏壁画の制作工程



図3. 制作当時の技法・材料を検討し色彩再現した千仏壁画（光背配色 上：交差型，下：一方向型）

過去および未来の時の意味合いを付すなど、宗教的な空間をつくりあげる上で重要な役割を果たしていることが知られる³⁾。

千仏壁画が示す規則的な色彩はその機能を具現化する上で重要な要素であるが、経年に伴う変色や退色により、その視覚的効果は造営当時からは大きく変わっている。そこで、先行研究における材料分析結果などを参照するとともに、現地調査を実施し彩色材料や層構造の目視観察をおこない、使用材料および制作過程を整理して当時の色彩を再現した千仏壁画を作成した（図2、図3）⁴⁾。制作の過程では、背景に有機色料の臘脂（ラック）を施すことで壁面全体の印象が大きく変わることなどが確認された（図2四段目）。臘脂は光に敏感な色料であり、現在の見え方が大きく異なる要因のひとつと考えられる。

3. 光源による見え方の違い

人間の目が捉える色の情報は、照射する光の特性により異なる。現在普及している白熱灯、蛍光灯、LEDなどの人工光源は、それぞれで発光特性が異なり、色温度や演色性もさまざまである。また、人工光源が登場する以前は、太陽光（自然光）の他、蠟燭、灯明などの燃焼光が利用され、それらを照らした際の色を元に彩色材料や技法が選択されていたはずである。

特定の分光特性を持つ照明光源と、対象物が物理的に光を反射させる分光特性、そして人間の目が知覚する色の感度特性がわかれば、原理的には分光特性が既知の他の光源の下で観察した際の色彩値を取得することができる。そこで、照射する光の分光特性によって視認する色彩の違いを比較・検証するために、分光

画像がピクセルごとに有する分光反射率と、任意に選択する光源の分光特性、そして人間の目の感度である等色関数を演算し、各ピクセルの輝度を変換するプログラムを作成した（図4）⁵⁾。本プログラムにより、ある特定の光源を照射した際の対象物の見え方をXYZ色空間の値として取得し、さらにRGB色空間の値に変換することができる。等色関数は、国際照明委員会（CIE）が提示するCIE1931（2°視野）とCIE1964（10°視野）のXYZ表色系等色関数データを使用し、視野角および演算波長間隔（1nm/5nm）は処理時に選択できるよう実装した。また、光源データは、分光器を用いて太陽光（昼光）、白熱灯、LED、蠟燭などの各種の

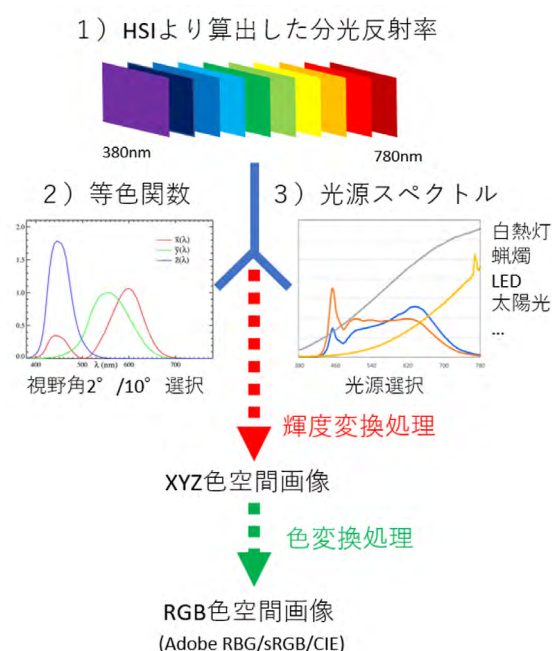


図4. 分光画像を用いた光源選択式輝度変換プログラムの模式図

光源スペクトルデータを取得した。

当時の色彩を再現した千仏壁画より分光画像を取得し(図5), 太陽光(5590K/Ra97), LED(3191K/Ra97.5), 蠟燭(1954K/Ra99.2)の3つの光源の分光スペクトルデータを適応した結果, 図6に示す画像を得た。三者を比較すると, 蠟燭の分光データを適応した画像は, 他の2つと画面全体の印象が大きく異なり, 特に, 赤を基調とする背景(岱赭+臙脂)や, 顔や胸などの肉身部の肌色(白土+鉛丹)に明確な差異が認められた。肉身部は金のような黄味を呈しており, 仏の身体的特徴(三十二相)のひとつ, 仏の身体が黄金に輝く特徴である「金色相」を彷彿させる。当時壁画を描いていた画工は, 入手することのできる彩色材料の色味とともに窟内を照らす光の特性を理解し, その制作にあたっていたことが示唆された。



図5. 分光画像の撮影風景



図6. 光源による千仏壁画の見え方の検証結果
(上: 太陽光, 中: LED, 下: 蠟燭)

4. 色順応による見え方の再現

上記プログラムによる検証にて, 光源による見え方の違いが理解された。しかし, 人間の目は色の恒常性を確保するために, 色味の異なる白色を同一の「白」

として認識するなど, 状況に応じて色順応する働きを有する。そのため, 上記プログラムで抽出した画像は, 実際の見え方とは必ずしも一致はしていない。そこで分光画像より色順応後の画像を出力するために, 国際照明委員会が提唱するカラーアピランスモデル「CIECAM02」⁶⁾で提示される下記色順応予測式を適用するプログラムを作成した⁷⁾。XYZ色空間より求めた二次元画像に対して, CIECAM02で提示される下記式を適用することで, 色順応後のRGBの値を求めて画像として出力することができる。式中の R_w G_w B_w は基準となる白色である。また定数の D は順応度を示しており, 白色に全く順応しない場合は0, 完全に順応する場合は1となる。

$$R_c = \left[\left(100 \cdot \frac{D}{R_w} \right) + (1 - D) \right] R$$

$$G_c = \left[\left(100 \cdot \frac{D}{G_w} \right) + (1 - D) \right] G$$

$$B_c = \left[\left(100 \cdot \frac{D}{B_w} \right) + (1 - D) \right] B$$

本計算式で画像を出力した結果, 図7に示す画像を得た。予測式を適用する前後の画像を比較すると, 壁画中央上部に配置した標準白色板の色をより白く感じるといった色順応を経た色彩を再現することができた。適用後の画像は, 全体的に暖かみがあり蠟燭で照らして見た目の色合いに近く, 洞窟などの薄暗い環境下における壁画の見え方が擬似的に再現されている。



図7. 色順応予測式の適用前後の画像比較
(上: 適用前, 下: 適用後)

5. おわりに: 今後の展開

本稿では, 敦煌莫高窟に描かれた規則性を備える千仏壁画は, 薄暗い空間においてどのように視覚認知されていたかを検証することを目的に進めてきた色彩再現および分光画像を用いた研究成果を紹介した。千仏壁画は壁面の広い面積に描かれる図であり, 遠くから

捉えると模様のような装飾であり、近づいていくと仏
 一体一体を観想できる機能を有している(図8)。今後
 は、光源の特性による視覚認知の変化や、距離による
 千仏壁画の視認性の変化などについて、分光画像から
 出力した薄明視下における画像などを刺激とする認知
 実験を通して、検証を進めていくことを計画している。

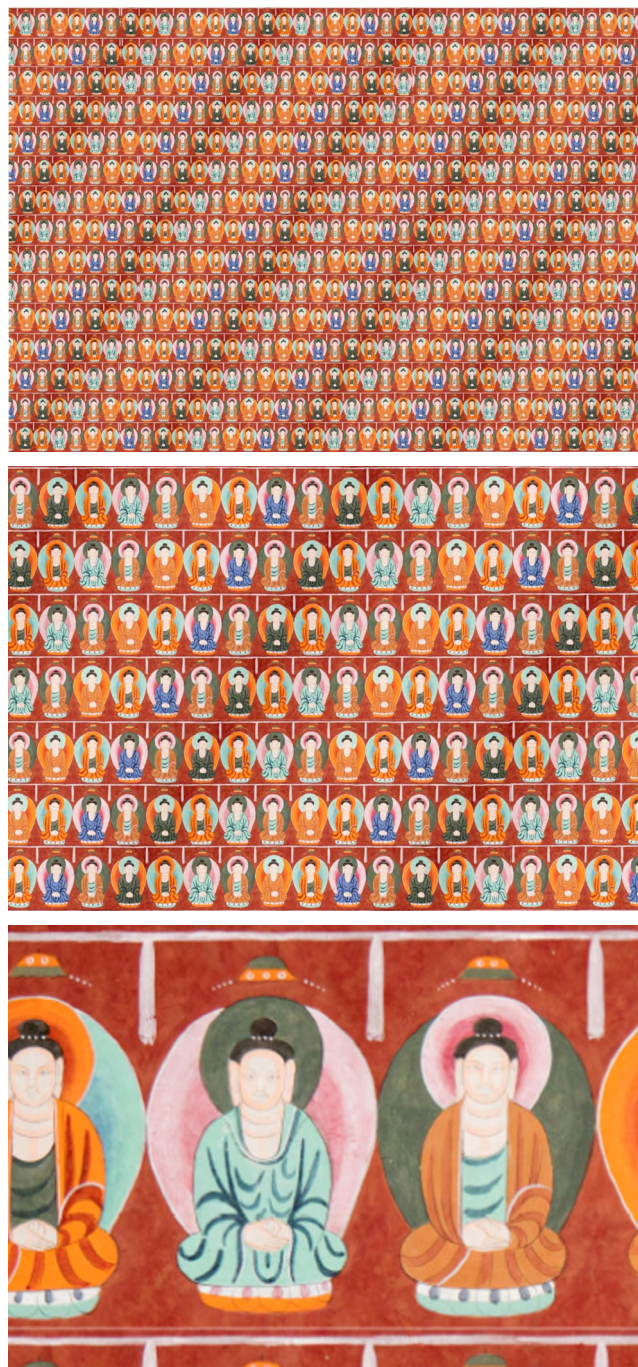


図8. 千仏壁画との距離による視認性の変化

謝辞

千仏壁画の色彩再現にあたっては京都市立芸術大学
 の正垣雅子氏に、視覚認知実験にあたっては関西大学
 の石津智大氏にご尽力いただいています。本稿の内容
 は、科研費(19H01364, 23H00720) および関西大学先
 端科学技術推進機構の助成を受けて実施した研究成
 果の一部です。

参考文献

- 1) M Picollo, C Cucci, A Casini, L Stefani, "Hyper-Spectral Imaging Technique in the Cultural Heritage Field: New Possible Scenarios", Sensors, 5894, 2020.
- 2) Simon C., Mansouric, A., Marzani, F., Booch, F., "Integration of 3D and multispectral data for cultural heritage applications: survey and perspectives", In Image and Vision Computing, 31(1), pp.91-102, 2013.
- 3) 末森薫, 敦煌莫高窟と千仏図－規則性がつくる宗教空間－, 法蔵館, 2020.
- 4) 末森薫, 正垣雅子, 高林弘実, 張梁, 園田直子, 日高真吾, "敦煌莫高窟に描かれた規則性を備える千仏図の再現". 文化財保存修復学会第42回大会研究発表集. pp.214-219, 2020.
- 5) 川口拓哉・末森薫・安室喜弘, "分光画像計測を用いた燃焼光源下における古代壁画の見え方の再現", 情報処理学会第84回全国大会講演論文集, pp.553-554. 2022.
- 6) Fairchild MD., "Color Appearance Models", John Wiley & Sons, 2005.
- 7) 川口拓哉・末森薫・安室喜弘, "古代壁画の分光画像を用いた燃焼光源下における色順応後の見え方の再現", 情報処理学会第85回全国大会講演論文集, pp. 553-554, 2023.