

令和 5 年 5 月 14 日現在

機関番号：64401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H01364

研究課題名(和文)再現模写・仮想空間構築による敦煌莫高窟千仏図が有する規則的描写の複合的評価

研究課題名(英文) Multiple Verification on Visual Characteristics of Patterned Thousand Buddha Image depicted in Mogao Grottoes, Dunhuang, China: through Originally Reproduction and Virtual Grotto Space

研究代表者

末森 薫 (SUEMORI, KAORU)

国立民族学博物館・人類基礎理論研究部・准教授

研究者番号：90572511

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：中国甘粛省の敦煌莫高窟に規則的配色によって描かれた千仏壁画の視覚的特徴を解明することを目的として、同壁画の色彩を再現した壁画を制作した。また、ハイパースペクトルカメラを用いて再現壁画の分光画像を取得し、異なる光源で照らされた際の壁画の見え方、薄暗い空間において人の目が色順応した時の見え方などを検証した。本研究を通して、千仏壁画を描いた当時の絵師たちは色材と光の特性をよく理解し壁画を制作したことが理解された。また、薄暗い洞窟空間における規則的な配色による壁画の役割の一端を把握することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

古来、人は蝋燭などで照らされた薄暗い洞窟に絵を描き、精神世界を創造してきた。敦煌莫高窟に描かれた坐仏を並べた千仏壁画は、規則的な配色によって広い面積に描かれ続けたが、その視覚的特徴が担った役割については限定的にしか理解されていなかった。そこで、描かれた当時の壁画の色彩を再現するとともに、壁画が有する色彩が蝋燭の光によってどのように見えるかを検証した。本研究を通して、多色を用いる視覚芸術を人がどう創造し、用いて来たのかについて、その一端を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：To understand the visual characteristics of the Thousand Buddha murals painted in regular color schemes in the Dunhuang Mogao Grottoes in Gansu Province, China, we produced murals that reproduced the colors of the same mural paintings. In addition, we acquired spectral images of the reproduced mural paintings using a hyperspectral camera. We verified how the mural paintings look when illuminated by different light sources and how the human eye sees the murals when humans adapt chromatically in a dim cave space. Through this research, we reveal that the painters who painted the mural paintings of the Thousand Buddhas at the time had a sufficient understanding of the characteristics of color, materials, and light sources. In addition, the research provides the idea of grasping the function of mural paintings with regular polychromatic schemes in the dark cave space.

研究分野：文化財科学

キーワード：敦煌莫高窟 千仏壁画 再現模写 分光画像 燃烧光 色順応

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

### 1. 研究開始当初の背景

中国甘肃省にある敦煌莫高窟には、北朝、隋、唐の時代にかけて約 200 年の間、跏趺仏を等間隔に並べ規則的に配色を施した千仏壁画が描かれ続けた。千仏壁画は同じ配色の跏趺仏が斜めに連続する視覚的特徴(斜行方向)と、隣り合う跏趺仏の光背の配色による視覚的特徴(光背配色)を有し、参拝者の動作を導いたり、観念的な意味を付したりするなど、薄暗い石窟内に宗教的空間を創出する上で大きな役割を担っていたことが想定される(図1、図2)。しかし、現状では彩色の変退や光環境の変化により、千仏壁画の規則的な描写が参拝者に与えた元来の視覚的な効果は限定的にしか分からない。



図1 同じ配色の跏趺仏が斜めに連続する「斜行方向」(左:第288窟西壁 右:第254窟北壁)  
[出典 左:『敦煌 THE ART OF DUNHUANG』1992、右:『敦煌石窟1 第二五四・二六〇窟』、2002]

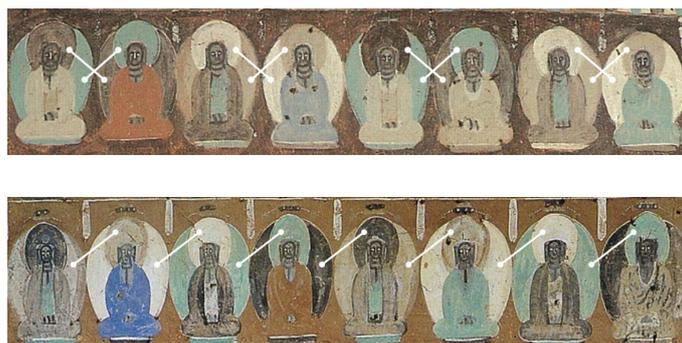


図2 頭光・身光の配色によってつくられる「光背配色」(左:第251窟南壁、右:第257窟西壁)  
[出典 上:『中国石窟 敦煌莫高窟一』1980、下:『中国敦煌壁画全集1 敦煌北凉・北魏』2006]

### 2. 研究の目的

本研究課題は、彩色材料および描写技法の科学的検証に基づいて、規則的な配色で描かれる千仏壁画の色彩を再現するとともに、蠟燭などの燃焼光で照らされた薄暗い石窟空間における千仏壁画の視覚的特徴が石窟空間にもたらす影響を光学的に解明し、仏教信仰の場である石窟空間を新たな視点から解釈することを目的とする。

### 3. 研究の方法

下記3点を軸に、研究を進めた。

#### A) 色彩を再現した千仏壁画の制作

莫高窟に描かれた壁画の多くは、経年により退色・変色している。他方、後代に上塗りされた北魏造営の第263窟の壁面(図3)や、柱の後ろに隠れ太陽光が届かない壁面などには、描かれた当時の色彩を復元する上で有用な情報が残されている。そこで第263窟の千仏壁画を含め、壁画に用いられた材料や技法について現地調査を進めるとともに、先行研究の整理を通して千仏壁画に用いられた彩色材料および技法を検討する。そして、その成果に基づき、彩色材料および技法を再現した千仏壁画を制作する。



図3 後代の壁に隠されていた第263窟北壁の千仏壁画 [出典:『中国敦煌壁画全集1 敦煌北凉・北魏』2006]

## B) 再現模写壁画を対象とした光学的調査

A) で制作した再現模写壁画を対象として、各種の光源を用いた光学撮影を実施するとともに、ハイパースペクトルカメラにより、画像情報と波長情報の多次元のデータを有する分光画像データを取得し、再現壁画の視覚的特徴の分析をおこなう。また、再現壁画を照射する光を検討するために、各種光源の分光特性を測定し、その特徴を分析する。

## C) 洞窟空間における壁画の見え方の検証

電気等による人工光源が開発される以前、太陽光（自然光）の光が届かない（届きにくい）洞窟などの遮光空間、薄明空間では、蝋燭、灯明などの燃焼光を頼りに壁画などの色が認識されていたはずである。そこで、照射光による見え方の違いを把握するために、色彩を再現した千仏壁画を対象に取得した分光画像に、任意に選択した光源の分光情報を適用するプログラムなどを作成し、光源による色味の違いを検証する。また、薄暗い空間に順応し感度が変わる人間の目の特性を考慮し、色順応予測式を適応したプログラム等により薄暗い空間における見え方を検証する。

## 4. 研究成果

それぞれの項目について、研究成果を記す。

### A) 色彩を再現した千仏壁画の制作

現地調査で得た情報および先行研究を精査し、千仏壁画に使用された材料および制作工程を復元的に検討した。千仏壁画は、垂直で大きな大画面に複数の絵師が集団で制作した図であるが、壁面上方と下方で表現技法に大きな違いは認められなかったため、作画にあたっては、絵具を予め調整する、絵筆は極力交換しないなど、不安定な足場や暗い洞窟内でも支障がでない工夫がなされたと考えられる。複数の絵師で段取り良く、規則的な配色を施していくためには、絵師間で共有できる目印が設定されたと推定され、比較的広い面積に施される岱赭の衣を想定した。また、同じ大きさの趺坐仏を等間隔に並べていくためには、趺坐仏の位置、各部位の位置の基準を決め



図 4 千仏壁画の再現工程

る区画線が必要となる。区画線は、色料を付けた紐を弾いて直線を引く墨壺のような道具が使用されたと推定した。これらを前提条件とした上で、目視による層位関係、効率的な彩色、上塗りされる箇所乾燥時間などを考慮し、(1)から(16)の工程に整理した(図4)。(1)区画線の割付、(2)型紙による転写、(3)下書き線の描写、(4)肉身部(白+鉛丹)の着色、(5)肉身部の隈(白+鉛丹8)の描写、(6)赤色の着色、(7)白色の着色、(8)鉛丹の着色、(9)石黄+藍の着色、(10)アタカマイトの着色、(11)ラピスラズリの着色、(12)臙脂の着色、(13)藍の着色、(14)墨の着色、(15)墨線の描写、(16)白線、白点の描写、である。なお、実際に作図を進める中で、(8)鉛丹は、(9)石黄+藍、あるいは(10)アタカマイトの後の工程とした方が彩色しやすいことが理解された。

## B) 再現模写を対象とした光学的調査

色彩を再現した千仏壁画を対象として、偏光白色光、近赤外光、近紫外光を用いた光学撮影を実施し、取得した画像を比較した。その結果、臙脂を使用した箇所が強い蛍光を発するなどの特徴を確認した。また、偏光白色光を照射し、正反射光を除去して取得した画像を用いた画像処理をおこない、広い画面に描かれた千仏壁画が有する視覚的特徴を擬似的に再現した。その結果、壁画との距離が遠いと模様のような装飾的効果が強くなる一方、壁画との距離が近づくと仏一体一体の様子を詳細に観察できることが明らかとなり、礼拝者との距離を意図して千仏壁画が描かれた可能性などが示唆された(図3)。

また、壁画に照射する光源として、自然光(太陽光)、ハロゲン光およびLED(人工光)、そして蠟燭(燃焼光)の分光特性を取得した。それぞれスペクトルの特性や色温度、演色性が異なることを確認した。特に、人工光がない時代に主要な光源であった燃焼光は、色温度が低く(赤みの強く)、ゆらぎがあり、その他の光源と大きく特徴が異なることを把握した。



図5 千仏壁画との距離により視覚的特徴の比較  
(左：遠距離、右；中間、右：近距離)

## C) 洞窟空間における壁画の見え方の検証

光源による色の違いを比較するために、画像情報と波長情報の多次元のデータを有する分光画像データに、任意に選択した光源の分光情報を適用して輝度を変換するプログラムを作成した。そして、色彩を再現した千仏壁画を対象として、光源による色の差異を擬似的に可視化し、視覚的な特徴の違いを検証した。その結果、蠟燭の分光データを適応した画像は、太陽光やLEDを適応した画像に比べ、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や、顔や胸などの肉身部の肌色に顕著な



図6 照射光により千仏壁画の見え方の比較  
(光源選択式輝度変換プログラムにより変換した画像)

差異が認められた(図4)。薄暗い洞窟内では、蠟燭や灯明などの燃焼光を頼りに壁画制作や礼拝がおこなわれたことが想定され、空間を照らす光と壁画の彩色は相依相関する関係にあったと考えられ、光の特性に合わせ、制作材料や技法が意図的に選択された可能性が示唆された。

また、上記プログラムは、洞窟の薄暗い場所や、異なる照明下における人間の目の順応(色順応)については考慮していないことから、反射率を演算することによって画像全体の明度を変換するプログラムや、色順応予測式を含むCIECAM02のカラーアピランスモデルを適用するプログラムを作成し、色順応後の見え方の再現を試みた。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 末森薫	4. 巻 6
2. 論文標題 敦煌莫高窟早期窟千佛圖像規律性的繪制方法 - 第254窟空間設計中的千佛圖像功能研究	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 絲綢文化研究	6. 最初と最後の頁 193-222
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 末森薫	4. 巻 21
2. 論文標題 天水麦積山石窟東崖窟の造営年代の再考 - 建築遺構を手掛かりとして -	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 中国考古学	6. 最初と最後の頁 149-162
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 川口拓哉, 末森薫, 安室喜弘	4. 巻 4
2. 論文標題 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	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 情報処理学会第84回全国大会講演論文集	6. 最初と最後の頁 553-554
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 川口拓哉, 末森薫, 安室喜弘	4. 巻 4
2. 論文標題 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	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 情報処理学会第85回全国大会講演論文集	6. 最初と最後の頁 425-426
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 正垣雅子, 末森薫, 寺井淳一	4. 巻 67
2. 論文標題 インド・ラダック地方ヌブラ渓谷で近年確認された仏教壁画の調査報告	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 京都市立芸術大学美術学部研究紀要	6. 最初と最後の頁 163-173
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 中沢新一, 川瀬慈, 末森薫	4. 巻 1183
2. 論文標題 鼎談 イメージの脈動にふれる	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 思想	6. 最初と最後の頁 121-138
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 末森薫	4. 巻 37
2. 論文標題 敦煌莫高窟初唐窟に描かれた千仏図の研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 鹿島美術研究 年報別冊	6. 最初と最後の頁 427-437
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 末森薫	4. 巻 24
2. 論文標題 敦煌莫高窟北周時代の石窟空間構成 - 解析図案展示的方向性	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 芸術学界	6. 最初と最後の頁 103-153
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 N. Mori, T. Higo, K. Suemori, H. Suita, and Y. Yasumuro	4. 巻 1
2. 論文標題 Visualization of the Past-to-Recent Changes in Archaeological Heritage based on 3D Digitization	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 23rd International Conference on Cultural Heritage and New Technologies 2018	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計15件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 未森薫
2. 発表標題 色・光の再現から、敦煌莫高窟につくられた宗教的空間を再考する
3. 学会等名 特別研究「デジタル技術時代の文化遺産におけるヒューマニティとコミュニティ」第3回研究会、国立民族学博物館
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 未森薫
2. 発表標題 関于敦煌莫高窟千仏図有規律性繪制的多角度考察 - 再現模写和虚拟空間的思考
3. 学会等名 敦煌唐代芸術研討会、敦煌研究院・仏学研究中心 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 八木春生
2. 発表標題 敦煌莫高窟唐前期第一期主窟中三世仏的表現
3. 学会等名 敦煌唐代芸術研討会、敦煌研究院・仏学研究中心 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 末森薫
2. 発表標題 文化財を対象とした光学撮影・画像処理の方法 - 壁画や博物館資料への活用事例
3. 学会等名 第63回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 末森薫, 正垣雅子, 高林弘実, 張梁, 園田直子, 日高真吾
2. 発表標題 敦煌莫高窟に描かれた規則性を備える千仏図の再現
3. 学会等名 文化財保存修復学会第42回大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 末森薫, 劉成, 王, 劉逸, 安室喜弘
2. 発表標題 中国義県・奉国寺大雄殿に描かれた壁画のハイパースペクトル画像解析
3. 学会等名 日本文化財科学会第37回大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 末森薫, 川口拓哉, 森田吉嵩, 安室喜弘
2. 発表標題 光源選択式輝度変換プログラムを用いたハイパースペクトル画像 彩色情報の可視化 - 敦煌莫高窟再現壁画が有する視覚情報の検証
3. 学会等名 日本文化財科学会第38回大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 末森薫
2. 発表標題 敦煌莫高窟唐前期窟の空間構想 - 千仏壁画の描写設計を中心として
3. 学会等名 日本中国考古学会2021 年度大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川口拓哉, 末森薫, 安室喜弘
2. 発表標題 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
3. 学会等名 情報処理学会第84回全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 末森薫
2. 発表標題 色と光がつくりだす敦煌莫高窟のイメージ世界
3. 学会等名 みんなく公開講演会「イメージの脈動にふれる」
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 末森薫
2. 発表標題 敦煌莫高窟千仏図像規律性的の绘制方法和石窟空間中的功能
3. 学会等名 絲綢之路与考古：中日學術研討会（招待講演）（國際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 末森薫, 川口拓哉, 安室喜弘
2. 発表標題 遮光空間・燃焼光下における壁画の見え方の再現 ハイパースペクトル画像を用いた明度変換プログラムによる検証
3. 学会等名 日本文化財科学会第39回大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kaoru SUEMORI
2. 発表標題 Optical Investigation of Mural Paintings: Case Studies in China and Ladakh
3. 学会等名 International Workshop on 'Buddhist Mural Painting of Asia: Interface with India' (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 末森薫
2. 発表標題 文化遺産の分析や可視化のための分光計測技術
3. 学会等名 第27回 関西大学先端科学技術シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 川口拓哉, 末森薫, 安室喜弘
2. 発表標題 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
3. 学会等名 情報処理学会第85回全国大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 未森 薫	4. 発行年 2020年
2. 出版社 法藏館	5. 総ページ数 354
3. 書名 敦煌莫高窟と千仏図：規則性がつくる宗教空間	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>科学研究費助成事業による研究プロジェクト   基盤研究 (B)  <a href="https://www.minpaku.ac.jp/research/activity/project/other/kaken/19H01364">https://www.minpaku.ac.jp/research/activity/project/other/kaken/19H01364</a></p>
---

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	園田 直子 (SONODA NAOKO) (50236155)	国立民族学博物館・人類基礎理論研究部・教授  (64401)	
研究分担者	日高 真吾 (HIDAKA SHINGO) (40270772)	国立民族学博物館・人類基礎理論研究部・教授  (64401)	
研究分担者	八木 春生 (YAGI HARUO) (90261792)	筑波大学・芸術系・教授  (12102)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	安室 喜弘  (YASUMURO YOSHIHIRO)  (50335478)	関西大学・環境都市工学部・教授    (34416)	
研究分担者	正垣 雅子  (SHOGAKI MASAKO)  (90749441)	京都市立芸術大学・美術学部 / 美術研究科・准教授    (24301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関