

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：82620

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H01380

研究課題名(和文) 白鳳時代の壁画の構造と材料に関する研究

研究課題名(英文) Study on structure and material of wall paintings in the Hakuho period

研究代表者

犬塚 将英 (Inuzuka, Masahide)

独立行政法人国立文化財機構東京文化財研究所・保存科学研究センター・センター長

研究者番号：00392548

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 7,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は我が国の絵画史において非常に重要な位置を占める法隆寺金堂壁画の今後の保存・活用に関する検討を行うために必要な構造・材質及び劣化状態を、非破壊・非接触な分析手法を用いることにより正確に把握することを目的とした。そして、非破壊・非接触な分析手法の中で、本研究ではハイパースペクトルカメラを用いた2次元分光分析に着目し、その性能評価及び分析手法の安全性の評価を行った。そして、同手法を適用することにより、法隆寺金堂壁画のうち山中羅漢図及び飛天小壁18号壁の分析調査を実施した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

文化財の科学調査では試料採取が許可されず、非破壊・非接触を大前提とした調査手法を要求されることが非常に多い。しかも、法隆寺内の壁画収蔵庫で保管されている大壁と小壁については、資料を移動させることも不可能である。本研究で実践した非破壊・非接触による現地調査のノウハウは法隆寺金堂壁画のみならず、古墳壁画、屏風等の絵画作品、油彩画等の移動が困難な文化財の科学調査にもそのまま適用することが可能である。よって本研究により、文化財科学や美術史の分野における新たな知見が得られることにとどまらず、国民の財産である貴重な文化財の活用方法の可能性の飛躍的な拡大など、社会への大きな波及効果を期待することができる。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study was to obtain a more accurate understanding and to examine the future preservation and utilization of the Horyuji Kondo mural paintings, which occupy a very important position in the history of Japanese paintings. This research uses non-invasive analysis methods to examine the structure, materials, and state of deterioration of the mural paintings. Among non-invasive analytical methods, this research focused on two-dimensional spectroscopic analysis using a hyperspectral camera, and evaluated its performance and safety. We conducted an analytical investigation of some of the Horyuji Kondo mural paintings at the Horyuji Temple.

研究分野：保存科学

キーワード：法隆寺金堂壁画 反射分光分析 ハイパースペクトルカメラ 現地調査 治具

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

昭和 24 年に法隆寺金堂が火災に遭い、壁画が焼失してから、約 70 年が過ぎた。この火災がきっかけとなり文化財保護法が制定され、1 月 26 日は文化財防災デーと定められた。このように文化財保護という観点からも、法隆寺金堂と壁画は我が国を代表する貴重な文化財であることは論を俟たない。

火災後まもなく、被災した金堂壁画は法隆寺内に建てられた壁画収蔵庫で保管され、現在に至っている。平成 27 年に法隆寺は、金堂壁画の保存と活用のために「法隆寺金堂壁画保存活用委員会」を設置し、金堂の壁画と建築部材、その保存環境等についての総合的な調査を実施することにした。さらに翌年には、この委員会の下に「壁画」、「建築部材」、「保存環境」、「アーカイブ」のワーキンググループが置かれた。壁画ワーキンググループは「美術史班」と「材料調査班」で構成されている。材料調査班は、金堂壁画の保存と活用の観点から、金堂壁画を構成している壁体、下地、彩色材料等の構造・材質に関する学術的調査を実施することを目的としている。本研究の研究代表者、研究分担者、研究協力者は主にこの材料調査班のメンバーから構成されている。

法隆寺金堂壁画に用いられている顔料と火災によって生じた化学変化については、火災の前後に山崎一雄先生によって系統的な分析が行われた¹⁾。ただし当時と比較すると、現代の分析手法は多様化し、分析装置の性能は格段に向上しているため、私たちが現代の科学技術を駆使して顔料の分析を行うことにより、さらに新しい知見が得られる。また、金堂壁画の今後の保存のあり方に加えて、博物館等での展示等の将来的な活用方法を検討することも重要である。その際には、金堂壁画の輸送も念頭に置き、壁体や下地層の現在の状態を正確に把握する必要があり、現代の保存科学の研究者に問われている重大な課題であると言える。

2. 研究の目的

法隆寺金堂壁画の今後の活用について、例えば将来的には一般に公開することも視野に入れた場合、金堂壁画を構成する壁体や下地層の構造・材質、そして現時点での劣化状態を正確に把握することが重要になってくると考えられる。

そして、文化財の展示・収蔵を行う場合、文化財を取り巻く温湿度や空気環境を適切に保つ必要がある。逆に周辺環境が文化財を構成する材料に対してどのような物理的・化学的な影響を及ぼすのかを予測するためには、文化財を構成する材料の科学分析が必須である。この調査研究は美術史班のメンバーとも連携を取りながら進めていくため、保存科学のみならず、白鳳時代の絵画技法についての研究を深める可能性も秘めている。

当初の予定では、本研究では白鳳時代に描かれた壁画として、以下の 4 つの壁画を調査対象とした：法隆寺金堂外陣の第一号壁から第十二号壁に描かれ、昭和 24 年の火災に遭った壁画（以下、大壁とする）、飛天が描かれており、火災に遭わなかった内陣小壁の壁画（以下、小壁とする）、山中羅漢図が描かれており、火災に遭った外陣小壁の壁画片（以下、山中羅漢図とする）、鳥取県米子市の上淀廃寺跡から大量に出土された仏教壁画片（以下、上淀廃寺壁画とする）。上淀廃寺壁画も平安時代中期に火災に遭ったとされている。このように、それぞれ特徴的な経緯を経て現存している白鳳時代の壁画の科学調査を実施し、その分析結果の比較を通じて保存科学的・美術史的研究を実施するところが、本研究の独創的な点である。しかし、令和 2 年から始まった新型コロナウイルス感染症 (COVID-19) の流行による影響により、の調査を実現することができず、の調査に至ることが困難な状況となった。本研究では、の順で分析調査を実施した。

文化財の科学調査では試料採取が許可されず、非破壊・非接触を大前提とした調査手法を要求されることが非常に多い。調査対象である上述の壁画資料についても試料採取は許されない。しかも、法隆寺内の壁画収蔵庫で保管されている大壁と小壁については、資料を移動させることも不可能である。このような事情から、計画している全ての分析手法において、可搬型分析装置を現場に持ち込み、文化財に全く損傷を与えずに非破壊・非接触な手法で科学調査を実施するところも本研究の大きな特徴のひとつである。このようにして培われた非破壊・非接触による現地調査のノウハウは白鳳時代の壁画のみならず、古墳壁画、屏風等の絵画作品、油彩画等の移動が困難な文化財の科学調査にもそのまま適用することが可能である。よって本研究により、文化財科学や美術史の分野における新たな知見が得られることにとどまらず、国民の財産である貴重な文化財の活用方法の可能性の飛躍的な拡大など、社会への大きな波及効果を期待することができる。

3. 研究の方法

先述の通り、我が国の絵画史において非常に重要な位置を占める法隆寺金堂壁画の今後の保存・活用に関する検討を行うために必要な構造・材質及び劣化状態を、可搬型分析装置を用いて非破壊・非接触な手法で把握することを本研究の目的とする。

本研究を開始する前に、いくつかの準備調査を実施した。ひとつめは、X 線透過撮影による構造調査及び撮影条件の検討を行うために、明治期に制作された唐招提寺の土壁（奈良文化財研究

所蔵)の構造調査を実施した。その結果得られたX線透過画像から、壁体中で角材が使われていること、それらが縄や釘で固定されていること等の内部構造を確認することができた。そして、この調査結果を参考にして、令和元年10月には、小壁16号壁と18号壁のX線透過撮影を実施した。また、平成30年8月7日に上淀白鳳の丘資料館にて、上淀廃寺壁画の材質調査を実施した。1日という限られた調査時間ではあったが、蛍光X線分析、X線回折分析、可視分光分析、赤外線撮影が有効な調査手段であることを確認することができた。

本研究では、可搬型分析装置を用いた非破壊・非接触な分析手法のうち、ハイパースペクトルカメラを用いた反射分光分析に注目した²⁾。反射分光分析では、分析対象から得られた反射スペクトルを既知の材料から得られた反射スペクトルと比較することにより、材料の種類の同定を行う。従来の方法では、光源からの入射光を絞って評価したいポイントに照射し、それぞれの測定ポイントについての分析が行われていた。一方、法隆寺金堂壁画の分析への適用を検討しているハイパースペクトルカメラを用いると、1画素ごとに分光情報を取得することができることから、2次元の位置情報と反射分光スペクトルのデータを同時に集積することができるので、類似した彩色材料が用いられている箇所のマッピングを行うことも可能になる。

4. 研究成果

4-1. 予備調査

法隆寺金堂壁画の現地調査に向けて、奈良文化財研究所が所有する内モンゴルで描かれた壁画片を対象として、壁画片を俯瞰した状態で安全に分析調査を実施することが可能であること等の確認を行った。

ここで評価を行った装置は、エバ・ジャパン社製ハイパースペクトルカメラ、NH-1Sである²⁾。このカメラで取得できる画素数は $752 \times 480 =$ 約36万画素である。各画素において仕様上の計測可能な波長領域は350 nm~1100 nmであり、その波長分解能は5 nmである。カメラ本体は軽量(1030g)なので、調査現場への搬送、及び調査時の設置が容易である。また、内蔵分光スキャン技術が採用されていることから、外部可動装置を用いて装置本体もしくは調査対象の資料を動かさなくても分析可能であることが本装置の特徴である。

本装置を用いた内モンゴル壁画の調査風景を図1に示す。装置はアルミ製の専用フレームに固定した。今回は1mm程度の大きさの識別ができるように、壁画片とカメラとの間の距離を50cmとした。スキャンスピードを10(Line/s)、ゲインを50、露光時間を最大値である99.96(ms)の条件で撮影を実施した。調査時に用いる光源としては、短波長側の強度が十分に強い高温度のハロゲンランプ(河北ライティングソリューションズ社製JR-AKW/5EZ-47K)を選定し、調査時には資料表面に対して45°の角度から2台のランプを用いて照射を行った。

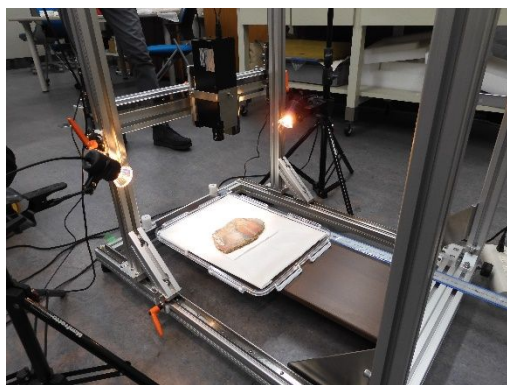


図1 ハイパースペクトルカメラを用いた壁画片の調査風景



図2 今回調査を行った内モンゴルの壁画と反射スペクトルを調べた解析領域

今回の分析対象とした内モンゴルの壁画片の画像を図2に示す。壁画には複数の種類の彩色材料が用いられているが、それらの中で特徴的な11種類の彩色を選択し、図2中で示す解析領域から得られた反射スペクトルを調べた(図3)。ここでは代表的な結果について報告する。

裾の橙色の部分(解析領域3)は、540 nmより短波長で低い反射を示し、それ以降の反射率が上がり600 nmより長波長で比較的高い反射を示す。長波長域の反射率はそれほど高くないが、反射スペクトルの形状は鉛丹から得られる反射スペクトルの特徴に類似している。一方、裾の赤色の部分(解析領域4)は、580 nmより短波長で低い反射を示し、それ以降の反射率が上がり640 nmより長波長で比較的高い反射を示す。こちらも長波長域における反射率はそれほど高くないが、反射スペクトルの形状は辰砂から得られる反射スペクトルの特徴に類似している。

さらに、線形判別分析等の手法を適用することにより、類似した反射スペクトルを有する画素のマッピングを行った。その結果、図2で示した各解析領域における反射スペクトルの形状に類似する反射スペクトルを有すると判断された部分を同じ色で示すと図4のようになった。

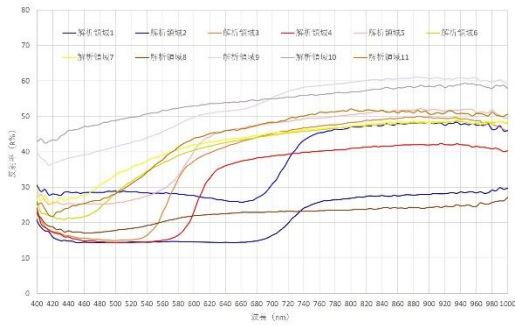


図3 各解析領域から得られた反射スペクトル

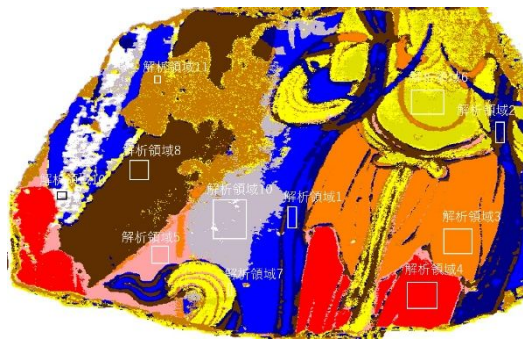


図4 線形判別分析によって得られたマッピング画像の例

4 - 2 . 山中羅漢図の調査

前年度の基礎実験及び分析調査の結果(4 - 1)に基づいて、今年度は法隆寺金堂壁画の収蔵庫にて、ハイパースペクトルカメラを用いることにより、合計で16点の山中羅漢図の壁画片の現地調査を実施した。分析で得られた反射スペクトルから彩色に用いられた個々の材料の同定を行うことは、焼損による影響のため容易ではなかったが、壁画片表面における異なる反射スペクトルを有する箇所²の2次元分布に関する情報を得ることができた。

4 - 3 . 飛天小壁 18号壁の調査

本研究では、可搬型分析装置を用いた非破壊・非接触な分析手法のうち、ハイパースペクトルカメラを用いた反射分光分析を選択し、奈良文化財研究所が所有する内モンゴルで描かれた壁画片を対象として分析調査の安全性、分析手法の有用性を確認し(4 - 1)、法隆寺にて山中羅漢図の分析調査を実施した(4 - 2)。そして、2024年2月に法隆寺にて飛天小壁の分析調査を実施する機会を得ることができた。

法隆寺の境内にある壁画収蔵庫には、焼損した大壁に加えて、火災に遭わなかった内陣小壁も保管されている。本調査では、収蔵庫内の西収蔵庫で保管をされている18号壁を対象として、ハイパースペクトルカメラを用いた反射分光分析を実施した(図5)。

飛天小壁はそれぞれ木製の箱に収められており、普段は壁画が描かれている表面は木製の蓋でカバーされている。このようにして木製の箱に収められた壁画は垂直ではなく傾斜を付けて置かれており、18号壁の場合、小壁の傾斜角度は約20°である。分析調査の時には、傾斜している壁画面に対して正対するようにハイパースペクトルカメラを設置する必要があった。このような条件を満たすために、以前に実施された蛍光X線分析による16号壁の調査³⁾の時に使用された専用治具を再利用し、その先端部分にハイパースペクトルカメラを設置して、壁面に対してハイパースペクトルカメラが正対するように角度の調整を行った。

壁画面とハイパースペクトルカメラとの間の距離は65cmとした。この条件では、1.2mm程度の大きさの図像の識別が可能であり、1回の撮影における視野範囲は約220mm×148mmである²⁾。飛天小壁の壁画面の面積は約1350mm×70mmであるので、飛天小壁18号壁の壁画面全体を撮影するために、専用治具を用いてハイパースペクトルカメラを水平・垂直報告に移動させることにより、壁画面を7×6=42区画に分割して撮影を実施した。本報告書を執筆している現時点では、本調査で得られたデータの詳細な解析を進行中である。

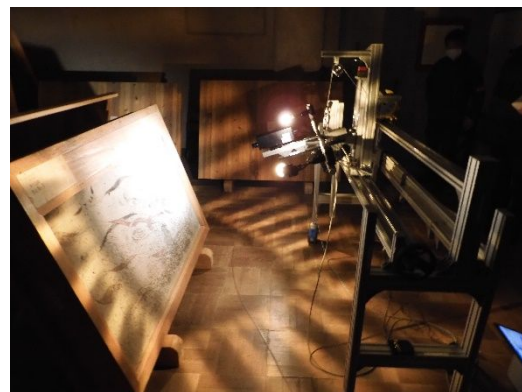


図5 調査の様子

本研究では、ハイパースペクトルカメラを用いた反射分光分析を実施することにより、蛍光X線分析等の他の分析手法では得られない彩色材料の色情報に直接関連するようなデータを安全に取得することができることを示した。また、他の分析手法と比べると比較的短時間で、2次元の位置情報と各ピクセルにおける反射分光スペクトルを同時に集積することが可能であることから、今後検討をしている大壁の調査においても有益な分析手法であることを示すことができた。本研究で得られた成果からのひとつの提案として、例えば、大壁の調査での最初の段階で壁画面全体にわたる反射分光スペクトルのデータを短時間で取得することにより、その後続く他の分析手法を用いた詳細な調査の計画を立案するための基礎情報を提供することができる

であろう。

参考文献

- 1) 山崎一雄：法隆寺金堂壁畫の顔料及びその火災による變化について、『美術研究』第 167 号、84-92 (1953)
- 2) 紀芝蓮・犬塚将英：文化財の 2 次元的な分光分析を行うためのハイパースペクトルカメラの性能評価、保存科学、61、93-107 (2022)
- 3) 『法隆寺金堂壁畫の保存と活用に関する提言』(2023)、3 - 3 . 壁畫ワーキンググループ材料調査班、pp.38-41

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 紀芝蓮、犬塚将英	4. 巻 61
2. 論文標題 文化財の2次元的分光分析を行うためのハイパースペクトルカメラの性能評価	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 保存科学	6. 最初と最後の頁 93-107
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 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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	早川 泰弘 (Hayakawa Yasuhiro) (20290869)	独立行政法人国立文化財機構東京文化財研究所・保存科学 研究センター・特任研究員 (82620)	
研究分担者	降幡 順子 (Furihata Junko) (60372182)	独立行政法人国立文化財機構京都国立博物館・学芸部保存科 学室・室長 (84301)	
研究分担者	高妻 洋成 (Kohdzuma Yohsei) (80234699)	独立行政法人国立文化財機構奈良文化財研究所・その他部局 等・参与 (84604)	

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
---------	---------