

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 16 日現在

機関番号：34517

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25350396

研究課題名(和文) 乾湿サイクルに伴う表面膜の状態変化が石窟壁画に及ぼす影響

研究課題名(英文) Influence of surface coating associated with humidity fluctuation on the condition of mural paintings in conservation

研究代表者

宇野 朋子 (Uno, Tomoko)

武庫川女子大学・生活環境学部・講師

研究者番号：90415620

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、アジャンター石窟壁画を対象として、壁画の表面にある膜状物質(表面膜、とくに過去に表面保護のために塗布されたシェラック樹脂)が、乾湿の繰り返される環境において、壁画におよぼす影響を評価することを目的とした。

石窟内外の温湿度環境、表面膜と壁画の状態調査から、表面膜の存在する壁画の欠損個所の内部では土壁が粉化・消失していることを確認し、樹脂層の存在により彩色層の剥落が免れている可能性を示唆した。さらに、壁画の熱水分同時移動解析により表面膜の透湿抵抗が大きい場合には、石窟内湿度の日変動や季節変動の影響を緩和しており、湿度変化による劣化に対しては、保存上有利であることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The aim of study is to evaluate the influence of a coating layer on the conservation of mural paintings in Ajanta Caves, of which surfaces the shellac resin was applied in the past.

We conducted the environmental monitoring inside and outside of the caves and condition survey in the Cave 2, and have found the powdering of earthen wall under the paint layer with the shellac coating, therefore the shellac coating tend to retain the paint layers. From the results of the numerical analysis on the temperature and moisture in the earthen wall, the moisture changes of the earthen wall are diminished by the existing of the shellac layer.

研究分野：建築環境工学

キーワード：石窟壁画 表面膜 乾湿サイクル 保存環境 温湿度変動 シェラック樹脂

1. 研究開始当初の背景

世界文化遺産にも登録されているアジャンターの石窟寺院群はインド中西部に位置し、紀元前2世紀から紀元後6世紀にかけて栄えた仏教遺跡である。ワゴラー川に沿った三日月形をした断崖の中腹に、大小30の石窟寺院が掘られ、その多くには緻密な彫刻や彩色豊かな壁画が残されている。石窟群は1819年に再発見された後、これらの装飾の美術的な価値が重要視され、壁画の模写などの記録が残されてきた。1870年代に模写が行われた際には、表面の図像の判別をよくするため、また、湿気から保護するために、ワニス塗布された記録がある。さらに、1920～22年にイタリアの保存修復家によって保存修復が行われ、劣化したワニスの除去や洗浄、彩色層の剥落止め、土製下塗りの強化や、表面の保護を目的としたシェラック樹脂の塗布がなされた。シェラック樹脂以外にも、その後の保存修復において合成樹脂が使われてきた記録もある。

現在、シェラック樹脂の塗布から90年以上が経ち、壁画の保存のために使われたシェラック樹脂の変質や、シェラック樹脂の塗布された箇所土壁層や彩色層の浮きなどが生じている。シェラック樹脂の変質には、アジャンター気候の特徴である乾燥と湿潤の一年でのサイクルが大きく影響していると考えられており、さらにシェラック樹脂が土壁層や彩色層の浮きや亀裂に影響を及ぼしているといわれている。

壁画の保存修復においては、彩色層の剥落止めや保護のためにさまざまな天然樹脂や合成樹脂が用いられるが、その目的の一つに高湿度環境からの保護が語られることが多い。一方で、たとえば壁画の支持体に何らかの水分供給がある場合には、樹脂などの透湿抵抗のある材料が表面に存在することで、保護膜として働くよりもむしろ内部で塩類の析出が起こるなどの被害も報告されている。アジャンター壁画でも、シェラック樹脂が表面に膜状に存在しており、樹脂の暗色化、亀裂や剥落が報告されている。そして重ね塗りされたシェラック樹脂の存在が、壁画の水分移動を妨げ、彩色層や下地層の亀裂や浮きあがり、土壁の岩盤から壁画表面が剥離する要因の一つとして考えられている。

しかしながら、アジャンター遺跡のように乾湿を繰り返すような環境において、シェラック樹脂のような膜が壁画の表面に存在することが、壁画の保存状態へ及ぼす影響について詳細に検討した事例は多くない。

また現在、シェラック樹脂の劣化に伴い、クリーニングなどの保存修復処置が検討されているが、その保存修復処置自体が壁画にストレスを与え、別の問題を引き起こす可能性もある。したがって、保存修復を行う際には、表面膜の状態と周辺環境の変化によって、壁画がどのような影響を受けるのかを明らかにし、その影響の程度を定量的に把握する

ことが、きわめて重要と考える。

2. 研究の目的

本研究では、おもにアジャンター石窟の第2窟の壁画を対象として、壁画の表面に存在するシェラック樹脂のような薄膜が壁画の保存に与える影響を、これまでの知見に加え、現地における壁画の保存状態の調査、石窟内外の微環境の調査、壁画微小片の分析、シェラック樹脂の物性の把握、壁画における熱水分同時移動解析などにより検討する。

これらを明らかにすることにより、今後のシェラック樹脂などのクリーニングや保存修復の実施の判断などに寄与できると考える。

3. 研究の方法

本研究では、これまでの調査で蓄積されてきた壁画の状態調査の記録や壁画の高精細写真をベースとし、(1)石窟内外の環境、(2)壁画とシェラック樹脂などの現状の保存状態、(3)壁画上の表面膜の状態、(4)シェラック樹脂の物性などを調査し、さらに(5)表面膜を有する壁画の熱水分同時移動解析を実施する。これらにより表面膜の存在する壁画の挙動を解析し、壁画の劣化機構との関連性を解明する。さらに、シェラック樹脂のような表面膜に対する保存修復の方向性を示す。

4. 研究成果

(1) 石窟内外の環境

①アジャンター周辺の気候条件

アジャンター石窟は、北緯20.4°東経75.5°に位置する。ステップ気候に属し、一年は雨期、乾期、暑期に分けられる。年平均値が26℃、もっとも気温の高い4月は月平均値で31℃、もっとも低い12月は20.1℃である。6月から9月に降水があり、相対湿度は雨期には平均80%になるが、乾期には40%を下回る。このように、周辺の温湿度環境の変化が非常に大きい。外部の風は、おおむね南西方向からの風が多い。

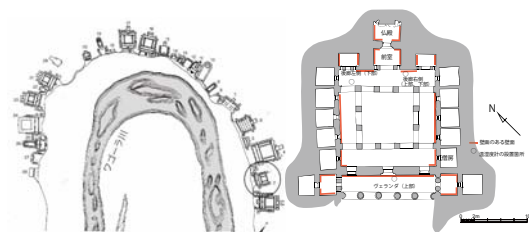


図1 アジャンター石窟配置図(左)と第2窟の平面図(○は温湿度計測箇所)(右)

②石窟内の環境

壁画の劣化に対して、石窟内の温湿度変化は重要な要因である。たとえば石窟内の相対湿度や温度の変動にともない壁表面や内部の土壁の水分状態が変化する。とくに、土壁は乾燥状態が続くと土粒子の接着力がなく

なり、それらに伴って彩色層や下地層の剥離や剥落が起こりうる。他方、雨期のような高湿度環境では、壁画を構成する下塗り内に虫が繁殖し、損傷や壁画表面の汚染などに影響することが考えられる。

石窟内の温湿度を内外複数個所において小型温湿度計により計測した(図1右)。その結果、石窟内は屋外と比較して温度変化はさわめて小さく、年較差は崖上(外気)が15°C程度であるのに対して、ヴェランダでは10°C程度、石窟奥の仏殿では4°C程度であった。石窟内の日較差は、年間を通して0.2~1.2°Cと非常に小さいことが明らかとなった。また年間を通して石窟内の温度は30°C前後であり、屋外の露点温度よりも低いことから、外気の流入による壁画表面での結露の可能性は低いといえる。

温度変動が小さいこととは対照的に、湿度変化は大きく、もっとも低い4月には相対湿度は20%を下回り、雨期には70%を超える。年間での乾湿サイクルがあること、また乾燥から湿潤、湿潤から乾燥に移行する時期の湿度変化が大きいことがわかった。

(2) 壁画とシェラック樹脂などの現状の保存状態

①壁画の構成

アジャンター石窟群は緻密な玄武岩を穿って作られた。第2窟の石窟内の壁画は、荒削りした玄武岩の岩盤の上に、複数層の下塗り層(土壁、厚さ10mm前後)、薄い白色の下地層、彩色層といった構成である(図2左)。シェラック樹脂などの表面膜は、彩色層の上に存在する(図2右)。

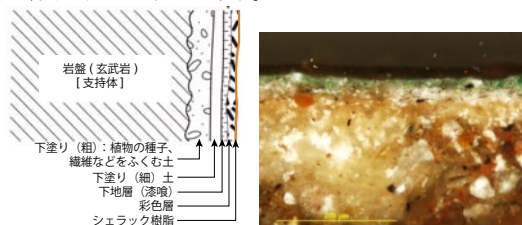


図2 壁画の構成^{注1)}(左)と壁画の断面(右)

注1)「アジャンター壁画の保存に関する調査事業 インド-日本文化遺産保護共同事業報告書第4巻」東京文化財研究所文化遺産国際協力センター・インド考古局、2014に加筆。

②シェラック樹脂が塗布された壁画の保存状態

シェラック樹脂などが塗布された壁画は、第2窟の回廊、左右の祠堂(房室)、前室、仏殿の側壁面の壁画である(図1右)。右側壁面など部分的にシェラック以外の合成樹脂(おそらくPVAc)が塗布されている。シェラック樹脂の塗布された壁画は、全体的に黄色みがかかり暗色化している。とくに右廊壁面の上部の暗色化が著しい。天井の壁画については、ワニスがほとんど塗られていない。

現地のシェラック樹脂を有する壁画の顕

微鏡写真(図3左)より、壁画にある亀裂やその周りにシェラック樹脂がたまり、シェラック樹脂の層が盛り上がっている様子が確認できた。シェラック樹脂が彩色層の亀裂を引き起こしているというよりも、シェラック樹脂の存在により亀裂が強調されて見えていると考えられる。

シェラック樹脂が塗布された壁画面では、側壁の壁面に数ミリ程度の欠損が多く見られ、欠損部や亀裂の周辺の土壁が粉化・消失している状態が観察され、また、壁面裏側が浮き上がっているようであった。第2窟の天井のように、シェラック樹脂の塗布がない箇所ではそういった欠損は少ないように見えた。

シェラック樹脂の塗布された壁画面が岩盤から浮いた状況は、シェラック樹脂が厚く塗られた第1窟で広く確認できたが、シェラック樹脂の厚みや下地層の厚みなどが影響していると考えられた(図3右)。また、通常こういった浮きが生じると、彩色や下地層は剥落するが、シェラック樹脂があることで剥落が抑制されている可能性があると考えられる。

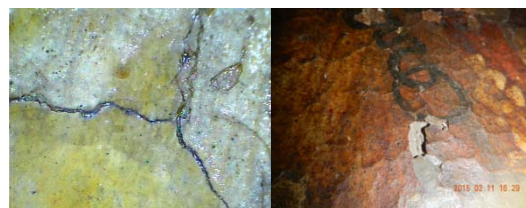


図3 壁画の表面状態(顕微鏡写真)(左)と壁画の浮き部分(第1窟)(右)

(3) 壁画上の表面膜の状態

壁画上の表面膜の状態を調べるため、シェラックが塗布された壁画の微小サンプル55個^{注2)}を対象に、シェラック樹脂の層の厚みを観察した。

採取したサンプル全体の半数以上で膜状のシェラック樹脂は確認されなかった。シェラック樹脂が確認できたサンプルでは、樹脂の厚みは1~50µmで、その半数は10µm以下であった。後述するシェラック樹脂の層の透水抵抗を求める際に作成した計測対象の材料から採取した微小サンプルは、3回塗りで35µm、6回塗りで55µm程度であり、現地で採取した壁画の微小サンプルと比べると、シェラック樹脂の層が厚いものに対応する。ただし、現地の微小サンプルは彩色調査のために採取したものであり、シェラック樹脂の層が厚い箇所からは採取していない。そのため、シェラック樹脂が厚塗りされている場所では、さらに厚みがあると考えられる。

注2) 東京文化財研究所による調査で採取されたサンプルの分析結果。彩色調査のためのサンプルであり、比較的シェラック樹脂が少ないと思われる箇所から採取している。

表1 壁画の微小片のシェラック層の厚み

シェラック樹脂の層の厚み [μm]	サンプル個数	割合 [%]
なし	31	56
5 以下	7	13
5~10	6	11
10 以上	11	20
合計	55	100

(4) シェラック樹脂の物性

シェラック樹脂はラックカイガラムシが分泌する樹脂状の物質であり、一緒に含まれる赤色色素は染料などに利用される。シェラック樹脂の湿気物性は明らかでないことから、本研究で透湿抵抗および吸放湿特性を確認した。透湿抵抗については実験室にて実測実験を行い、吸放湿特性については分析を依頼した。

① シェラック樹脂の透湿抵抗

シェラック樹脂の透湿抵抗はカップ法を用いて測定した。厚さ6mm、15cm角のソフトセラミック板（彩玉ボード）を基材とし、基材へのシェラック樹脂の浸透を抑えるためにエタノールを刷毛で塗布したのち、表面にシェラック樹脂（30g）を溶かしたエタノール（100ml）を、実際の壁画上での厚みを参考に3回および6回、刷毛で塗布した。シェラック樹脂の乾燥後の重量の増加はおおむね1.3~1.5g（3回塗り）、2.1~2.4g（6回塗り）であった。別途作成したサンプルでは、シェラック樹脂の厚みは35 μm （3回塗り）~90 μm （6回塗り）であった。

最終的に、基材にシェラック樹脂を塗布したものの透湿抵抗から、基材の透湿抵抗を差引き、シェラック樹脂層の透湿抵抗とした。基材の透湿抵抗は6回塗りでは $1.2\sim 3.8 \times 10^{10} \text{ m}^2\text{sPa/kg}$ （平均 $2.3 \times 10^{10} \text{ m}^2\text{sPa/kg}$ ）、3回塗りでは $0.5\sim 1.1 \times 10^{10} \text{ m}^2\text{sPa/kg}$ （平均 $0.7 \times 10^{10} \text{ m}^2\text{sPa/kg}$ ）となった。厚塗りになるほど、樹脂が表面に付着しやすくなり均等に塗布できず、とくに6回塗りではばらつきが大きい結果となった。

② シェラック樹脂の吸放湿特性

吸放湿性状を把握するため、シリコンシートにシェラック樹脂を複数回塗布し、膜状のシェラック樹脂を作成した。作成した樹脂膜を13mm \times 30mm程度に切断し測定用のサンプルとした。シェラック樹脂にはとくに吸放湿が顕著な相対湿度領域はなく、低湿度から高湿度まで吸放湿性を有しているといえる。具体的には、第2窟の年間の石窟内空気の相対湿度変動（20~70%程度）の範囲において、シェラック樹脂の質量含水率の変化は0.5~2.0kg/kgである。ただし、吸放湿量としては高湿度でも活性炭やシリカゲルの1/20以下である。

(5) 表面膜を有する壁画の熱水分同時移動解析

シェラック樹脂が塗布された壁画の欠損や浮き、剥離は、石窟内の温湿度の変化にもなうシェラック層やその下の彩色や土壁の層内での温度や水分量の変化や不均一さによる土壁の劣化が原因となる可能性がある。とくに土壁では乾燥状態が続くことも劣化につながる。そのため、第2窟での石窟奥壁を対象に、シェラック樹脂（表面膜）の有無と壁画近傍および岩盤奥の温湿度状態の違いが壁画層（土壁）の温湿度環境に与える影響を把握するために熱水分同時移動解析を行った。シェラック樹脂の透湿抵抗は測定値を参考に定めた。

① 解析対象と解析条件

壁画部分および岩盤の温度および水分量を、熱水分同時移動方程式を用いて解析した。解析対象範囲は、図4に示すように、表面膜（シェラック樹脂の層）、壁画層（土壁のみ）、岩盤層とし、二次元の系でモデル化した。表面膜は、表面に透湿抵抗を与えることでモデル化した。壁画層では熱水分同時移動を考慮した。壁画の支持体である玄武岩は非常に密な材料であり、現地から持ち帰った石材サンプルで確認したところ、吸水性や透水性はきわめて低いことが分かったため、2次元のモデルでは岩盤層においては熱移動のみを考慮した。また、欠損の影響を検討するため、壁画の一部に表面膜がない状況を想定した。

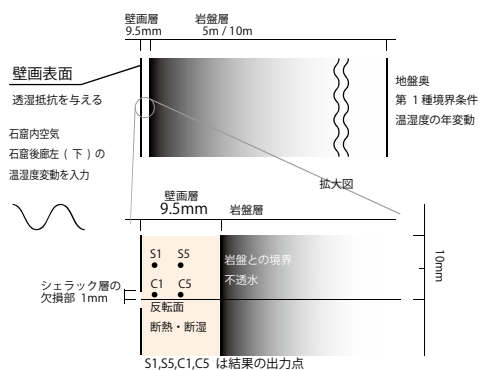


図4 解析モデル

初めに、壁画表面の一面に表面膜が存在する状況を一次元で解析した。表面膜が存在しない状況を想定した透湿抵抗なし（Case 0）、シェラック樹脂を3~6回塗りした状況を想定し $1.0 \times 10^{10} \text{ m}^2\text{sPa/kg}$ （Case 4）、Case 4の1/10、1/5、1/2、2倍（ $2.0 \times 10^{10} \text{ m}^2\text{sPa/kg}$ ）（Case 1~3、5）とした。Case 3が3回塗り、Case 5が6回塗りに相当し、Case 1はシェラック樹脂の層が薄い状況に相当すると考えた。次に、もっとも透湿抵抗の大きなCase 5（ $2.0 \times 10^{10} \text{ m}^2\text{sPa/kg}$ ）の条件で、表面膜の一部が欠損した状態を解析した。

壁画の石窟内側の境界条件には石窟内の通年の測定値（後廊左側（下部）、2009年9月から1年間の測定結果）を用い、岩盤奥5m

の部分（1次元では10m）で温度の変動を与え、それ以外は断熱、断湿とした。壁画層と岩盤層の初期条件には、岩盤のみで解析を実施し周期定常となった時点の解析結果を用いた。壁画層および岩盤層の物性値には、砂質土壌および玄武岩の値を用いた。

②壁画内の温湿度の解析結果

表面膜の透湿抵抗の影響：

すべてのケースにおいて温度の差が小さい（図5左）。相対湿度は、表面の透湿抵抗が大きくなると、日較差が小さくなった（Case0～5：9.1、5.8、4.2、2.5、1.6、1.0ポイント）。年間では、壁画層（土壁）内の相対湿度が30%を下回る時期が、表面膜のない場合（Case0）では一年の12.3%である一方、Case5では9.4%、また、相対湿度が70%を上回る時期もそれぞれ10.6%から7.9%へと減少している。

表面膜に欠損がある場合：

壁画全面に透湿抵抗の高い表面膜があるCase5においては、壁画内部の相対湿度の日変動がほぼなくなり、また、石窟内の湿度が急激に変化する時期でも、壁画層（土壁）内の湿度変化が緩やかとなる（図6左）。しかしながら、表面膜に欠損がある場合は、たとえば表面膜の透湿抵抗が大きい場合でも、壁画内部の湿度変動は表面膜のない状況に近づくことが明らかとなった（図6右）。

表面膜の壁画層内の温湿度への影響：

表面膜は薄膜のため熱抵抗は極めて小さく、壁画層内の温度は表面膜の有無により違いは生じない。表面膜の透湿抵抗が大きくなると、壁画層内の湿度変動が抑えられ、6回塗りのシェラック樹脂の層に相当する $2.0 \times 10^{10} \text{ m}^2 \text{ sPa/kg}$ （Case5）では、ほぼ日変動がなくなる。Case5ではさらに、石窟内の温湿度が急激に変化する時期（図6左）でも壁画層内での湿度は緩やかに変化し、石窟内空気との湿度差が大きくなる。年間で見ると壁画層内（土壁）が低湿度や高湿度の状態の頻度が下がる。アジャンターのケースでは、シェラック樹脂のように透湿抵抗が大きな材料が表面に存在することは、下塗り層である土壁の脆弱化を抑制していると考えられる。

表面膜に亀裂などの欠損が生じている場合には、表面膜の透湿抵抗が高い場合（Case5）でも、亀裂からある程度の範囲までの湿度変動が、石窟内気温の変動に影響を受けていることがわかった。表面膜の裏側での湿度変動は下塗り層である土壁の劣化にも寄与することから、表面膜の欠損部での浮きの要因となることが考えられる。また、このような状況が生じていてもシェラック樹脂が存在することで壁画の剥落が抑えられている可能性がある。

シェラック樹脂の塗布されていない壁画（天井部）でも欠損や浮きが少ない状況については、土壁の厚み、下塗りに使われる漆喰

などの透湿抵抗が寄与している可能性もあり、今後の検討課題である。

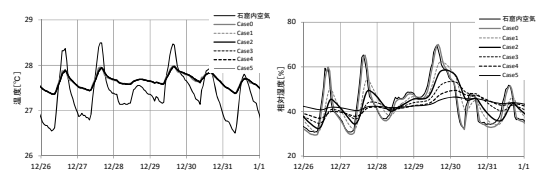


図5 石窟内の温湿度の日較差のもっとも大きい乾期の壁画層内部（中央、表面より5mm）での温度（左）と相対湿度（右）

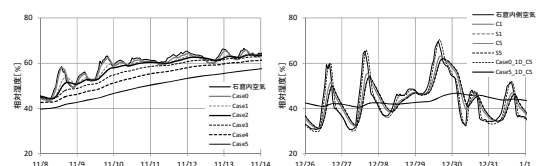


図6 壁画層内部の相対湿度（石窟内の湿度変化が大きな時期（左）と欠損がある場合（右））

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕（計5件）

- ① 宇野朋子, 伊庭千恵美: インド・アジャンター壁画における壁画表面の透湿性状が壁画の保存に及ぼす影響, 日本建築学会大会, 2016.8.24-26, 福岡大学, 福岡県・福岡市。
- ② Tomoko Uno, Yoshiko Shimadzu, Chiemi Iba: Influence of shellac coating and Environmental Condition on Conservation of Ajanta Cave Paintings, Archi-Cultural Translations through the Silk Road, 4th International Conference, International Association of Silk Road Universities, 2016.7.16-18, Mukogawa Women's University, Nishinomiya, Hyogo (Japan).
- ③ 宇野朋子, 伊庭千恵美, 島津美子: アジャンター壁画における表面膜と岩盤の水分量の影響, 文化財保存修復学会 第37回大会, 保存修復学会, 2015.6.27-28, 京都工芸繊維大学, 京都府・京都市。
- ④ 宇野朋子, 伊庭千恵美, 島津美子: アジャンター石窟の環境変化と表面膜の壁画への影響, 第44回熱シンポジウム, 日本建築学会, 2014.10.24-25, あべのハルカス, 大阪府・大阪市。
- ⑤ 宇野朋子, 伊庭千恵美, 島津美子: アジャンター遺跡の環境変化が壁画に及ぼす影響, 文化財保存修復学会 第36回大会, 保存修復学会, 2014.6.7-8, 明治大学アカデミーコモン, 東京都・千代田区。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宇野 朋子 (UNO TOMOKO)
武庫川女子大学・生活環境学部・講師
研究者番号：90415620

(2) 研究分担者

島津 美子 (SHIMADZU YOSHIKO)
国立歴史民俗博物館・研究部・助教
研究者番号：10523756

伊庭 千恵美 (IBA CHIEMI)
京都大学・工学研究科・助教
研究者番号：10462342

謝辞：本研究では、壁画の状態調査、高精細画像、気象データの一部を東京文化財研究所およびインド考古局に提供いただいた。また、インド考古局には現地調査において多大なご協力をいただいた。ここに謝意を示す。