

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 11 日現在

機関番号：82641

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2008～2011

課題番号：20700665

研究課題名（和文）石窟壁画の劣化に影響を与える環境要素の予測と定量化に関する研究

研究課題名（英文）Study of environment elements affecting to deterioration of mural paintings in caves

研究代表者

宇野 朋子（UNO TOMOKO）

（財）電力中央研究所

研究者番号：90415620

研究成果の概要（和文）：

敦煌石窟などの石窟に遺された壁画（石窟壁画）は、長期にわたり自然環境にさらされることで褪色などの劣化が進行している。本研究では、壁画の劣化の程度と石窟内外の環境の調査によって、壁画の劣化に影響を与える環境要因を抽出し、環境調査や数値解析によって、それら環境要因が壁画の劣化へ与える影響を定量的に把握することを目的とした。とくに、石窟内の光環境と温湿度環境について、壁画の位置による差異を示し、環境の影響を受けやすい箇所を特定した。

研究成果の概要（英文）：

The purpose of this study is to evaluate the environmental elements that lead to the deterioration of mural paintings in caves. The deterioration of mural paintings in Mogao Caves China has been surveyed, and the thermal and light environments inside these caves have been measured. The relationship between the deterioration level and the environmental elements has also been investigated on the basis of field measurement and numerical analysis.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：文化財科学

科研費の分科・細目：文化財科学・文化財科学

キーワード：文化財科学、壁画、石窟環境、光環境、気流環境、温湿度環境、保存修復

## 1. 研究開始当初の背景

世界には、中国の敦煌莫高窟やアフガニスタンのバミヤン遺跡などさまざまな地域に石窟内に壁画が遺された遺跡がある。石窟内の壁画は屋外にある遺跡でありながら、石窟という屋外とはある程度は遮断された空間内に存在している。そのため、屋外の自

然環境が石窟内の環境へ及ぼす影響は比較的穏やかで、千数百年たった現在でも、彩色などが鮮やかな状態で保たれている場合が多い。しかしながら、石窟といってもわずかな開口部からの光の照射や壁裏からの水の浸透などがある。その影響は短時間であれば微少であるが、長い年月に渡って絶えず与え

続けられていることから、積算すると無視できない量となり、石窟内の壁画の劣化の一つの要因となっている。

石窟内の壁画に起こる劣化のメカニズムは、実験室レベルでは、壁や壁画を構成する材料によって大きく異なることや、劣化の進行が光の照射、水の存在、温度の上昇によって促進されることが、多くの調査研究によって明らかにされている。一方で、実際に壁画のあるフィールドで確認できる劣化については、使用される材料や技法、過去から現在までの石窟が置かれてきた環境などに不明な点が多く、劣化のメカニズムの解明には至っていない。

## 2. 研究の目的

本研究では、石窟内の壁画が現在受けている、またこれまでに受けてきた光環境、温湿度環境を細かく分析し、定量的に把握することで、石窟内の壁画の位置によって生じる劣化の程度の差の要因を明らかにすることを目的とした。また、過去や将来の壁画の置かれる環境を予測し、過去の状況の解明や将来の保存対策の構築に寄与することを目的とした。

本研究では、おもに敦煌莫高窟の第285窟を対象として、石窟内の光環境と温湿度環境に注目し、実態調査と数値解析からそれらの要素が壁画の劣化の程度に及ぼす影響について検討した。

## 3. 研究の方法

以下のとおり、石窟内の光環境と温湿度環境について調査・解析を行い、それら環境の変化が石窟内の壁画の劣化の程度に及ぼす影響を評価した。

(1) 石窟の状態：現在および過去の石窟および前室の状況について、文献調査を行った。

(2) 屋外の気象データの収集と解析：屋外の気象を把握するため、敦煌莫高窟周辺の気象データを解析した。気象データは敦煌研究院が莫高窟の崖の上と下でそれぞれ測定しているデータを使用した。

(3) 石窟内の環境調査：石窟内の光環境および温湿度環境を把握するため、対象とした石窟の主室および前室の照度、温湿度、気流速を測定した。

(4) 石窟内の光環境の定量的な解析：石窟内の壁画に照射する日射量を評価するため、現在と過去の石窟の状況における太陽光の入り方を解析した。

(5) 石窟内の温湿度環境の定量的な解析：石窟内の温湿度変動の程度を評価するため、現在と過去の石窟の状況における石窟内の温湿度変動を解析した。

(6) 他地域での石窟環境の調査：敦煌莫高窟とは全く異なる高温多湿環境にあるイン

ドアジャンター遺跡の石窟壁画について、環境調査を行った。

## 4. 研究成果

### (1) 石窟の状態

対象とした敦煌莫高窟の第285窟は主室と前室、それらをつなぐ甬道で構成されている。主室は幅6.4m四方のほぼ方形平面に、最高部での高さが5.0mの伏斗式天井をもつ。東側に入口となる幅1.2m高さ2.0mの開口部があり、西側の高さ0.7mの位置に奥行き1.2mの仏龕がある。現在、前室の天井はコンクリートで整備され外側の開口部には扉が設けられているが、1914年に撮影された写真<sup>1)</sup>では前室が崩れ、入口開口部が屋外に開放された状態であったことがわかっている。この時期の発掘調査からは、莫高窟の多くの石窟において現在より大きな前室を備えていたが、長い年月の間に崩落したことが確認されている<sup>1)</sup>。

第285窟の石窟内の壁画の劣化の程度については、西壁の仏龕外の壁では全体の8割近くにわたって、彩色層には亀裂や剥落が生じていることが明らかにされている<sup>2,3)</sup>。また、目視観察から西壁では仏龕内の状態よりも仏龕外の方が彩色層に損傷の程度が大きく、南壁では西壁に近い部分や下部に損傷が多い傾向がみられた<sup>2)</sup>。

### (2) 屋外気象

屋外の気象を把握するため、敦煌研究院が崖上において測定しているデータのうち、1990年から2006年のデータを解析した。一例として、図1~3に2006年の月平均の温度と相対湿度、日射量について示す。

月平均の温度の最高値は7月にあられ、年によって25~32℃、月平均の最低値は1月

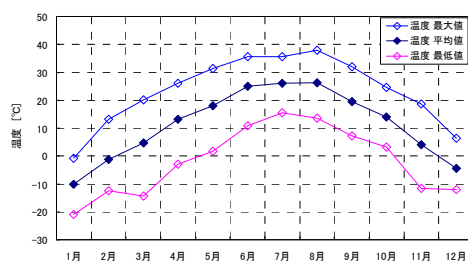


図1 崖上での温度 (2006年)

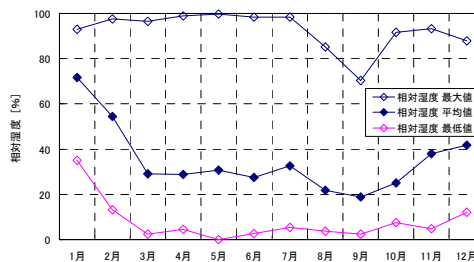


図2 崖上での相対湿度 (2006年)

にあらわれ-10~-5°Cであった。1997年から2006年までの年平均温度は11.3°C、年平均相対湿度は30%程度であった。外気の月平均値の年較差は30~42°Cであり、非常に寒暖の差が激しい地域である。

1990~2006年までの降水量の年積算値(欠損のあった1991年、1996年を除く)は、18mm/年(1992年)から94mm/年(1993年)であった。10mm/月以上の降雨は3月から10月にみられ、1ヶ月の降水日は数日程度であった。数年に一度、洪水をもたらす雨が降ることがある。

水平面日射量の月平均では6月がもっとも大きく7kWh/m<sup>2</sup>日であった。測定された水平面日射量をもとに直達日射と天空放射、大気透過率を求めた。大気透過率は1年を通して0.5以上であった。

### (3) 石窟内の環境調査

#### ①光環境

石窟内の光環境を把握するため、石窟内の照度と日射量を測定した。現在の石窟の状況では、前室と主室の両方の扉を開放していても、西壁鉛直面の照度は東の開口部に向けた方向で30lx程度、仏龕の内向きでは数lx以下であった。現在の石窟の状況では、西壁にある仏龕の内側には、ほとんど太陽光が照射しないことを確認した。

#### ②温湿度環境

石窟内の温湿度環境を把握するため、主室と前室の複数箇所において測定された通年の温湿度のデータを解析した。また、屋外環境の変動が石窟内の温湿度におよぼす影響を調べるため、主室の上部と下部や前室、前室の出入り口開口部などの複数点の温湿度と前室の出入り口開口部での気流速分布を測定した。

図4と5に、冬季と夏季の石窟内の温湿度を示す。冬季は、主室下部の気温は5°C、前室の気温が3°Cであった。相対湿度は、前室と主室ともにともに30%前後であった。夏季は、主室の気温は18~18.5°C、前室の気温が21°C、相対湿度は30~50%であった。いずれの季節も、前室の温度と相対湿度がもっとも屋外の温度と相対湿度に近かった。主室では下部に比べて上部で、温度が高く、相対湿度が低い傾向がみられた。

現在の石窟の状況では、主室の年変化は15°C程度であった。日格差は、屋外では10~15°Cであるのに対して、主室では一年を通して数°C以内であり、非常に安定した環境であった。主室の入口側(南東角)と奥(西仏龕中)では大きい場合で1°Cの温度差があった。また、上下方向にも温度差があり上部の温度が下部よりも2°C程度高かった。

第285窟は特別窟に指定されており、見学者の人数が制限されているが、一度に20名

もの人が見学に訪れることがある。また、とくに夏季には、石窟内で壁画の保存修復や調査などが実施され、長時間、人が滞在する場合がある。見学者など石窟内で滞在する人が多い場合、短時間に大きい場合では2°C程度の温度上昇と0.4g/kgKの絶対湿度の上昇が見られた。

#### (4) 石窟内の光環境の解析

第285窟では過去の比較的長い間、現在のような閉鎖的な状況ではなく、前室がなく外部に大きく開かれていたことが分かっている。そこで、前室のない状況を想定して、主室の光環境を解析した。主室の開口部から入る太陽光が東西南北の各壁面に照射する程度について解析した。

主室の東西南北の各壁面を格子状に分割し、各分割点に照射する日射量を求めた。日射量については、崖上で測定した水平面日射量から直達日射成分と天空放射成分を求めた。壁面に及ぼす影響の評価では、直達日射の影響については、各壁面に垂直に照射する日射量を年積算した。天空放射については、各点において東側の開口に対する形態係数を求め、天空放射量の年積算値を乗ずることで、年間の照射量を求めた。

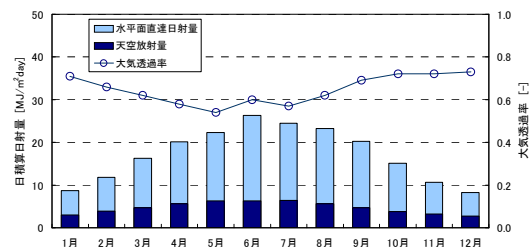


図3 日射量(2006年)

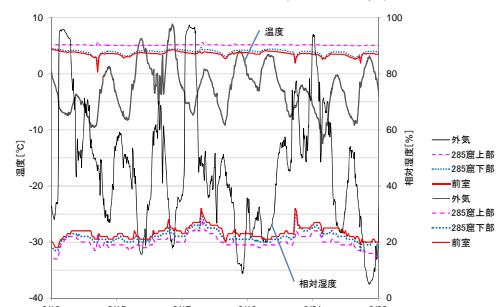


図4 石窟内と屋外の温湿度(冬季3月)

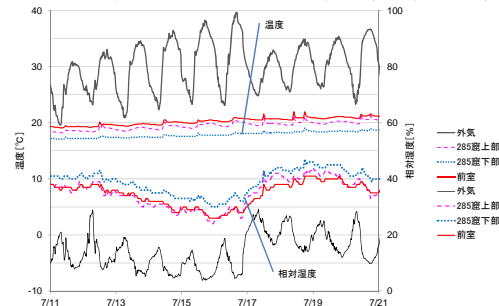


図5 石窟内と屋外の温湿度(夏季7月)

図6に夏至の早朝における直達日射の入り方を示す。主室は石窟の大きさに対し東側にある開口部が小さいために、一年を通して直達日射が石窟内に照射する時間が短い。直達日射の及ぶ範囲は、西壁、南壁の西側、北壁の甬道の天井高さよりも低い位置であり、日の出直後の太陽高度が低い時間帯に限られる(図6)。日の出直後の太陽位置がもっとも南寄りになるのは、冬至で、日の出時の方位角は $-57^\circ$ (真南から東へ $57^\circ$ の角度)である。このとき直達日射は北壁に照射し、西壁には照らさない。西壁に直達日射が照たるのは、1月25日ごろからであり、東側開口部から入射した直達日射は、西壁の南から6~6.5m、高さ0~1.75mまでの範囲に照射する。その時間はわずか10分程度である。太陽が真東から昇る春分と秋分では、直達日射は日の出から50分程度まで西壁のほぼ中央に照射する。

ほとんどの時間帯では床上1.0m以下に照射し、床上1.0mよりも高い位置に照射するのはわずかに15分程度である。日の出直後の太陽位置がもっとも北寄りとなる夏至では、直達日射は、日の出直後では、真北から東へ $60^\circ$ の角度つまり南壁西寄りから西壁

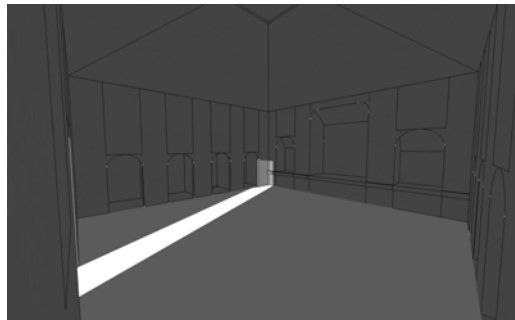


図6 夏至の日の出直後に石窟へ入る太陽光

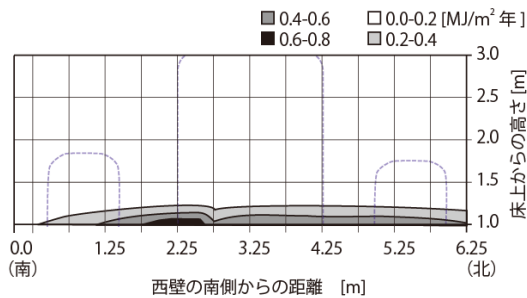


図7 西壁に照射する直達日射の年積算値

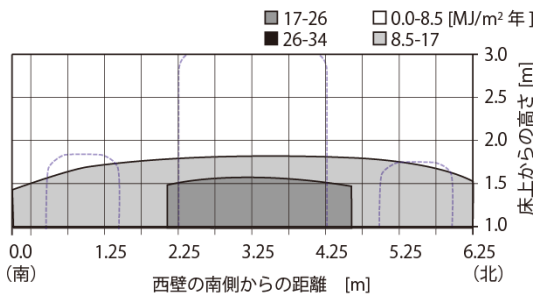


図8 西壁面に照射する天空放射の年積算値

の南寄りに照射する。西壁には1時間20分程度直達日射のあたる時間があるが、多くの時間帯は床上1.0m以下で、それよりも高い位置には30分程度照射する。

図7に直達日射の照射量の年積算値を示す。西壁の中央部よりも南側で値が大きい。中央部は、直達日射が垂直にあたり、また、照射時間と日射量は、太陽が真東より北側から昇る3月から6月にかけて大きくなるため、西壁の南寄りで、日射量の積算値が大きい。西壁の南側から2.25~2.5m、床上0mの位置では、積算値が1年間に $20\text{MJ}/\text{m}^2$ 年と4月の1日の積算日射量に相当する量が照射していた。一方、床上1.0mよりも高い位置では大きくとも $0.13\text{MJ}/\text{m}^2$ 年と積算日射量では非常に小さい値となった。

天空放射の影響は、各分割点に対する甬道の東側開口部の形態係数をもとに検討した。西壁の2.0mを超える範囲での天空放射量は、甬道の天井によって開口部が遮られるために非常に小さい(図8)。天空放射量は、甬道の東側開口部の正面となる南から3.25mの床付近がもっとも大きく、 $25\text{MJ}/\text{m}^2$ 年、そこから放射状に値が小さくなる。西壁に照射する天空放射量は、直達日射量に比べて非常に大きい事がわかった。

南壁での天空放射の照射量は、東入口側から4.75mで床直上がもっとも高い。東入口側から3.0mよりも東側では、甬道と東壁によって光が遮られるために、計算上はゼロとなった。西壁中央と比較すると南壁西側ではわずかであるが値が大きい。奥行方向にみられる石窟内の壁画の劣化の分布との関連が考えられる。

西壁の南から2.25mおよび中央仏龕の南側壁の表面から0.2m奥側における高さ方向の照射量を表1に示す。仏龕内部は仏龕外部(西壁)に比べると同じ高さにおいても照射量は1/3となった。仏龕内外の赤色の有機色料による彩色がある箇所では、顕微鏡による観察によると、全体的に仏龕外部で剥落が多く、また赤色彩色層が呈する色の彩度が低い。つまり、仏龕外は内より劣化の程度が大きい。同じような状況が仏龕内外の同じ彩色の箇所でも観察されている<sup>2,3)</sup>。目視観察では仏龕外部の方が彩色に亀裂や欠損の程度が大きい

表1 西壁仏龕の外と仏龕内に照射する天空放射量の年積算値 [ $\text{MJ}/\text{m}^2$ 年]

床からの高さ [m]	外	内
3.0	3.6	1.0
2.5	3.2	2.2
2.0	2.9	3.4
1.5	17.9	4.6
1.0	17.9	5.6



い。このような仏龕内外での褪色・劣化の程度差の要因として、天空放射の照射量が関係していることが考えられた。

#### (5) 温湿度環境の定量的な解析

石窟内の温湿度を2次元の熱水分同時移動解析プログラムを用いて解析した。解析では、第285窟を含む崖上から崖下までの地盤内での熱水分移動、石窟内空気と地盤での熱水分移動を考慮している。また、主室と前室は1質点として扱っている。前室と屋外、主室と前室間での換気を考慮した。

解析では、現在の石窟や開口部の状況、および、過去に前室が開放された状態について検討した。それぞれの状況では、前室の構造は同じとして、石窟内へ入る日射量は考慮せず、内外の換気量が異なるとし、前室と屋外、主室と前室間で行われる換気回数を各条件で設定した。換気回数は、開口部での気流速の測定結果および内外の温度差から推定した値を用いた。一例として、夏季の解析結果を示す(図9、10)。Case1では現在の石窟の状況を想定しており、Case2では開口部が常に開放された状況つまり過去のある時期における石窟内環境に相当する状況を想定した。

Case1の夏季の温湿度の結果(図9)では、相対湿度変動がやや屋外の温湿度の変動に追随する傾向があるものの、前室、主室の現在の石窟の状況をよくあらわしている。

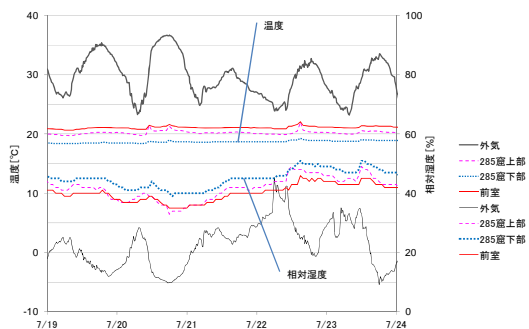


図9 Case1における主室、前室の温湿度(屋外-前室3回/h、前室-石窟6回/h)

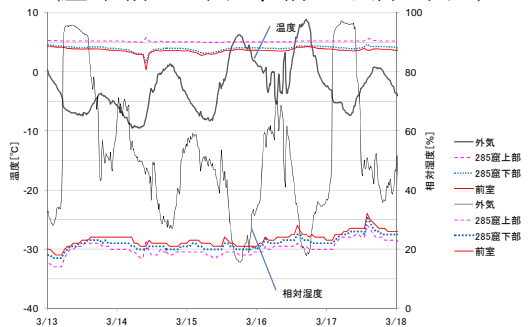


図10 Case2における主室、前室の温湿度(屋外-前室30回/h、前室-石窟40回/h)

主室の温度と相対湿度の日較差は、Case1では1℃以下、10%程度であるが、Case2では10℃以上、20%程度と大きくなった。また、Case2では、Case1と比べると、前室のみならず主室の年較差も屋外の値に近くなった。このような前室が開放された状況での、石窟内の温湿度がうける屋外の温湿度変動の影響について確認できた。

謝辞 本研究を進めるにあたり、東京文化財研究所および敦煌研究院に多大なご協力をいただきました。屋外気象データおよび通年の石窟内の温湿度測定結果は、敦煌研究院よりご提供いただきました。

#### 参考文献

- 1) 上海古籍出版(2000)、俄藏敦煌芸術品III
- 2) 東京文化財研究所・敦煌研究院(2007・2008・2009) 敦煌壁画の保護に関する日中共同研究2006・2007・2008
- 3) 高林弘美ら(2009) 敦煌莫高窟第285窟に鹿部および南壁における物理的損傷の分布解析、日本文化財科学会第26回大会要旨集、pp.94-95

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計10件)

- ① 宇野朋子、薛平、岡田健、小椋大輔、長谷秀俊、銚井修一、敦煌莫高窟第285窟における窟内環境-外界気象の変化が窟内環境へ及ぼす影響-、文化財保存修復学会第34回大会研究発表要旨、2012、掲載予定
- ② Tomoko Uno, Yoshiko Shimazdu, Thermal Environment in Ajanta Caves, 2nd International Conference on Archi-Cultural Translations through the Silk Road (iaSU2012 JAPAN)、査読あり、2012、掲載予定
- ③ 長谷隆秀、銚井修一、岡田健、小椋大輔、宇野朋子、敦煌莫高窟内の壁画の劣化に及ぼす塩の影響に関する研究：外界気象条件の変化、上下層窟を考慮した窟内温湿度環境の解析、日本建築学会近畿支部研究報告集・環境系、2011、pp.273-276
- ④ 宇野朋子、島津美子、アジャンター遺跡における環境調査-観光客の出入りに伴う石窟内の温湿度環境の変化、保存修復学会第33回大会研究発表要旨、2011、p.22-23
- ⑤ 宇野朋子、薛平、高林弘美、敦煌莫高窟第285窟における壁画の劣化への光環境の影響、保存科学第49号、査読あり、2010、pp.111-118
- ⑥ 宇野朋子、島津美子、アジャンター遺跡における環境調査、保存修復学会第32回

- 大会研究発表要旨、2010、pp.196-197
- ⑦ 長谷隆秀、銚井修一、岡田健、小椋大輔、宇野朋子、敦煌莫高窟内の壁画の劣化に及ぼす塩の影響、日本建築学会学術講演梗概集 D-2、2010、pp.239-240
  - ⑧ 長谷隆秀、銚井修一、岡田健、小椋大輔、宇野朋子、敦煌莫高窟内の壁画の劣化に及ぼす塩の影響、日本建築学会近畿支部研究報告集・環境系、2010、pp.341-344
  - ⑨ 宇野朋子、薛平、敦煌莫高窟第 285 窟における壁画の保存に対する日射の影響、保存修復学会第 32 回大会研究発表要旨、2009、pp.146-147
  - ⑩ 宇野朋子、バーミヤーン石窟壁画の保存状態と微環境に関する研究－壁画にあたる日射の影響－、保存修復学会第 30 回記念大会研究発表要旨、2008、pp.292-293

〔学会発表〕(計 4 件)

- ① 宇野朋子、島津美子、アジャンター遺跡における環境調査－観光客の出入りに伴う石窟内の温湿度環境の変化、保存修復学会第 33 回大会、2011. 6. 4
- ② 宇野朋子、島津美子、アジャンター遺跡における環境調査、保存修復学会第 32 回大会、2010. 6. 12-13
- ③ 宇野朋子、薛平、敦煌莫高窟第 285 窟における壁画の保存に対する日射の影響、保存修復学会第 31 回大会、2009. 6. 13-14
- ④ 宇野朋子、バーミヤーン石窟壁画の保存状態と微環境に関する研究－壁画にあたる日射の影響－、保存修復学会第 30 回記念大会、2008. 5. 17

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

宇野 朋子 (UNO TOMOKO)

(財) 電力中央研究所・システム技術研究所・特別契約研究員

研究者番号：90415620