

〔報文〕 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

宇野 朋子・薛 平*・高林 弘実

1. はじめに

敦煌莫高窟には400を越える壁画のある石窟がある。壁画は、石窟という限られた空間内にあるために、千数百年たった現在でも比較的良好な状態で保存されている。しかしながら、長い年月を通じて、日常的なわずかな温度や水分の変化や太陽光の照射が累積することによって、結果として彩色の変色や褪色、剥離といった劣化や、塩類の析出などの問題が生じている。

敦煌莫高窟では、東京文化財研究所による敦煌研究院との共同研究が1986年より継続されており、劣化の要因としての温湿度変化や壁体内の水分量、塩類の分布などの調査がなされてきた¹⁻⁵⁾。第5期となる2006年からは、第285窟の壁画を対象に、制作材料・技法に関する包括的な調査研究が実施されている⁶⁾。2008年までの調査から、同一面にある彩色かつ同一の材料が使用されていると考えられる箇所でも、褪色など劣化状況は一樣でないことなどが明らかになってきた⁷⁻⁹⁾。

壁画の劣化の程度には、使用された材料や含有物、製作技法によって決定付けられる壁画を構成する物質の物性などが影響を与える。加えて、壁画表面での温湿度変動、光の照射、水分の存在など、さまざまな環境要因が複雑に絡み合い影響を及ぼしている。これらの環境要因を定量的に把握することは、劣化のメカニズムの解明、さらには適切な環境下での保存のために不可欠となる。本研究は、さまざまな環境要素のうち壁面に照射する日射量に注目し、要素の定量化を行い、壁画の劣化との関係について検討することを目的としている。

2. 石窟の概要と屋外環境

敦煌莫高窟（北緯40.1°東経94.5°）は中国北西部タクラマカン砂漠の東端にあり、大泉河と呼ばれる河が浸食してできた鳴砂山の東側崖面に、高さ約40m、南北約2kmに渡って掘られた石窟群である。

現在の敦煌は砂漠気候に属しており、敦煌莫高窟崖上に設置された気象ステーションで計測された記録の1997年から2006年までのデータをみると、年間の平均気温は11.3℃、夏季7月の平均気温は平均25.6℃、冬季1月は平均-7.6℃、相対湿度は年平均値で30.3%と非常に低い。年間の積算降水量は平均38.4mmで、もっとも雨の多かった年では69.4mm（2006年）、少なかった年では22.1mm（2004年）であった。降雨は6月から8月の夏季に多いが、それ以外の月にも見られることはある。

図3、4に2006年の年間の温湿度、降水量と日射量の測定結果を示す。この年は8月がもっとも気温が高く、平均気温は26.2℃、最高値は37.9℃に達した。冬期は1月にもっとも気温が低くなり、平均で-10.1℃、最低値は-20℃であった。相対湿度は、4月から10月にかけて平均30%を下回っており、特に最低値は5%程度であった。年積算降水量は平年に比べるとやや多く、そのほとんどが4月から7月に集中していた。

調査対象となる第285窟は、敦煌莫高窟の南区の中程にあり、崖面の中層に位置する。中層の石窟は、下層や上層の石窟と比較して洪水による浸水や、雨水などの浸透の影響が小さく、

*敦煌研究院

壁画の保存状態は比較的良好⁴⁾。

調査窟は前室と主室（第285窟），それらをつなぐ甬道から構成される（図1）。主室は幅約6.3m（南北方向）奥行き約6.4m（東西方向）のほぼ方形平面に，伏斗式と呼ばれる天井をもち最高部での高さが約5.0mの石窟である。東側に入口となる幅1.2m高さ2.0mの開口部があり，西側の高さ約0.7mの位置に奥行き約1.2mの同窟の本尊像を安置する仏龕がある。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年にロシア隊によって撮影された写真¹⁰⁾からは，当時は第285窟の前室が崩れ，入口開口部が外部に開放された状態であったことがわかる（図2）。当時，莫高窟では前方部分に大量の土砂が堆積していたが，1950～60年代には大がかりな発掘調査と整備作業が行われた。この調査の結果，莫高窟は当初はどの石窟についてもいま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。

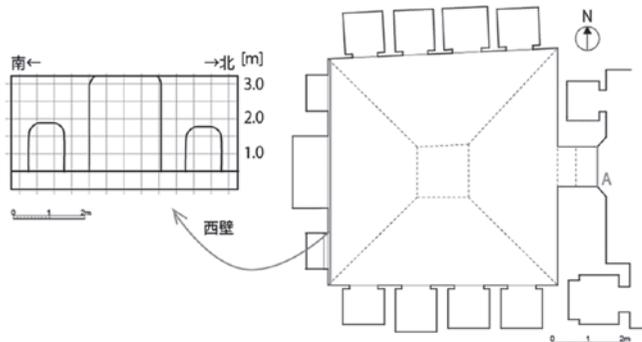


図1 第285窟平面図（右）および西壁立面図（左）



図2 第285窟開口部（1914年）

3. 壁画の保存状態

第285窟におけるこれまでの第5期の調査において，目視観察，顕微鏡観察，可視・側光・紫外線・赤外線による写真撮影，蛍光X線分析などによる理化学分析調査が実施されている⁶⁾。目視で観察できる現象として，壁体の亀裂，下地層・彩色層の亀裂や欠損，塩類の析出に伴う損傷，落書きや傷，鳥・虫などによる劣化が観察されている。これらについては記録作業も実施している。記録の一部については，損傷の幾何学情報と位置をデジタル化して損傷箇所について空間解析を行っている^{7～9)}。西壁の解析から，彩色層には亀裂や剥落が壁の全体にわたって生じており，仏龕外の壁では全体の8割近くに亀裂もしくは剥落の状態が存在することが明らかとなっている⁸⁾。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るが，これらの定量的な把握については今後の解析を待ちたい。このような物理的な劣化のほか，彩色層では変色や褪色といった化学劣化が進行していることも理化学分析から明らかとなっている⁹⁾。

4. 壁面への日射の影響

4-1. 直達日射量と天空放射量の算定

太陽からの放射は、大気層を通過し地上に到達するまでに、一部は空気や水蒸気などの散乱を受け、一部は吸収される。太陽からくる放射は、直接光によって地上に届く直達日射、直達日射の一部が天空で散乱されたのち地上に到達する天空放射、そして大気温度放射である大気放射に分けられる（図5）。天空の状況によるが、可視光領域では直達日射が80~90%、天空放射が10~20%を占める。

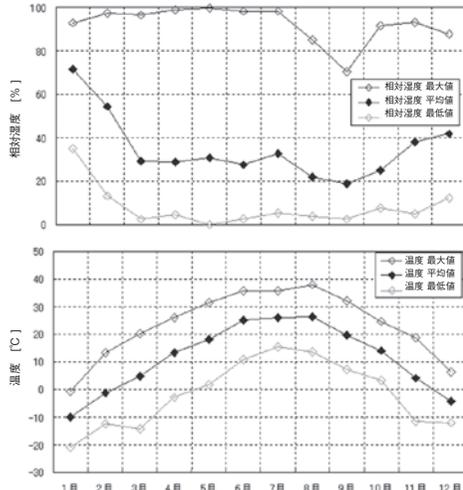


図3 温湿度の月最高値・最低値・平均値

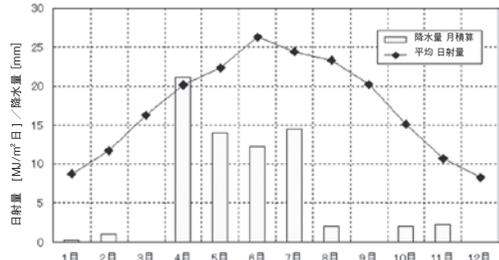


図4 月積算降水量と月平均日射量

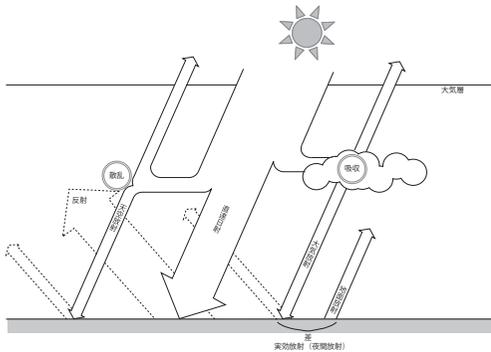


図5 太陽光の分類

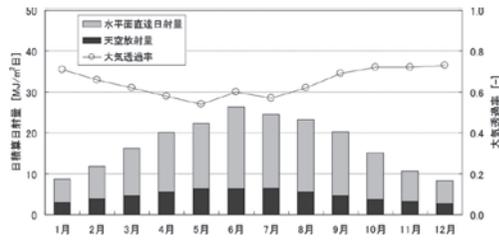


図6 月平均水平面直達日射量、
天空放射量および大気透過率

水平面全天日射量から直達日射および天空放射の算出方法について述べる。ここでの大気透過率は、直達日射を求めるフーガ式（1）と天空放射を求めるペルラーゲ式（2）¹¹⁾で得たそれぞれの和と、実測された日積算日射量が等しくなる際の値とした。地上での日射の強さと大気圏外での日射の強さの比を大気透過率という。

$$J_d = J_o \times P^{\text{cosech}} \tag{1}$$

$$J_{SH} = J_o \sin h \times \frac{1 - P^{\text{cosech}}}{1 - 1.4 \cdot \ln P} \tag{2}$$

ここで、 J_d ：放線面直達日射量 [W/m^2], J_{SH} ：天空放射量 [W/m^2], J_0 ：太陽定数（大気圏外における日射の放線面での強さ） [W/m^2], P ：大気透過率 [-], h ：太陽高度 [°]である。

2006年の日積算全天日射量の月平均値を、直達日射量、天空放射量、大気透過率とともに図6に示す。以降の検討では、2006年各月の日積算日射量の月平均値をもとに算出した大気透過率を各月の値として用いた。その大気透過率と各時刻の太陽高度・方位角から、直達日射量と天空放射量を求めた。

大気透過率は降雨がある4月から7月に比較的lowく、0.5~0.6程度であり、冬季は0.7を超える。降雨のない冬季は、大気中の水蒸気や塵埃が少なく非常に澄んでいることがわかる。日積算全天日射量は、6月にもっとも高く26.3 MJ/m²日、12月は8.2 MJ/m²日であった。全天日射量に対する天空放射量の割合は、大気透過率の高い4月から7月に小さく、冬季は小さい。

4-2. 壁面にあたる日射量の算定

4-2-1. 直達日射

第285窟壁面を各格子点に分割し（図1右）、太陽高度と方位角をもとに東側開口部から入る直達日射の入射角度を計算し、各壁の各格子点に照射する日時を確認した。東側壁に遮られず、格子点に直達日射が照射する場合のみ、直達日射の影響を考慮する。ここでは、現在のように崖面が整備される以前の状況について検討するため、開口部を第285窟甬道の東側に設定した。現在の開口は近年に整備された際に設置されたものであり、それ以前の長期にわたり甬道から東側が崩落していた（図2）。

4-2-2. 天空放射

壁面上各格子点に対する甬道の東側開口部（図1中のA点）の形態係数¹¹⁾を算出した。甬道や東壁によってさえぎられる部分を除いている。形態係数に各時刻の天空放射量を乗算し、その時間積算値を取ることで、各点に対する天空放射量の照射量が求められる。ただし本報では、天空放射量の影響については形態係数を比較することで検討した。

形態係数とはある面からの放射の影響を考える際の指標となるものであり、ある点から見える半球面に対する放射面の割合を表す。具体的には、図7のようにある受照点Pから半径1の半球を考え、Pを頂点とした錐体と半球の相貫面の面積を S' 、この相貫面を受照面Tへ正射影下ものの面積を S'' とすると、 S''/π が形態係数となる。

4-2-3. 反射光

直達日射は壁面に直接照射しなくとも、甬道の壁や石窟の床面に照射し、反射した光も壁面への影響があることが考えられる。天空放射も同様にさまざまな壁面での反射し石窟内に入射する。しかしながら、本報ではもっとも影響量の大きな要素に注目し、直接石窟内に照射する光の量について検討した。反射光については今後の検討課題としたい。

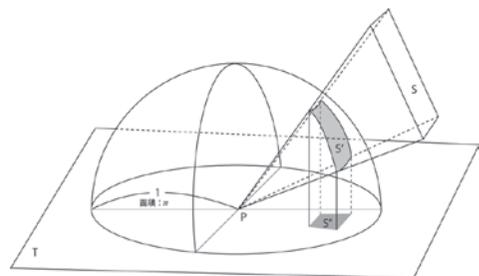


図7 形態係数の考え方

5. 壁面に照射する日射量の分布と劣化状況

第285窟では、石窟大きさに対し東側にある開口部が小さいために、一年を通して東側開口部から直達日射が石窟内に照射する時間帯は短い。直達日射の及ぶ範囲は、西壁、南壁の西側、北壁の西側の床上高さ2.0m（甬道の高さに相当）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。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（12月21日ごろ）で、日の出時の方位角は -57° （真南から東へ 57° の角度）である。このとき直達日射は北壁に照射し、西壁には照たらない。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（3月21日ごろ、9月21日ごろ）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（6月21日ごろ）では、日の出直後の方位角は -120° （真北から東へ 60° の角度）で、直達日射は南壁西寄りから西壁の南寄りに照射する。西壁には1時間20分程度直達日射の当たる時間があるが、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8に一年間の直達日射の照射量の計算値を示す。4-1で算出した大気透過率から、直達日射量を算出し、方位角と太陽高度を考慮して壁に垂直に照たる日射量を計算した。西壁の中央部よりも南側で値が大きい。中央部は、直達日射が垂直に照たり、また、照射時間と日射量は、太陽が真東より北側から登る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、各格子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を超える範囲での形態係数は、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9）。形態係数は、甬道の東側開口部の正面となる南から3.25mの床付近が最も大きく、

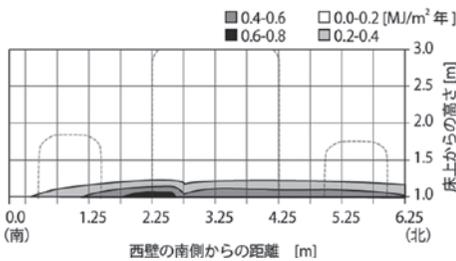


図8 西壁に照射する直達日射の年積算値

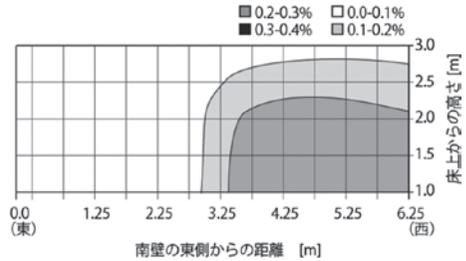


図10 南壁面に対する開口部の形態係数

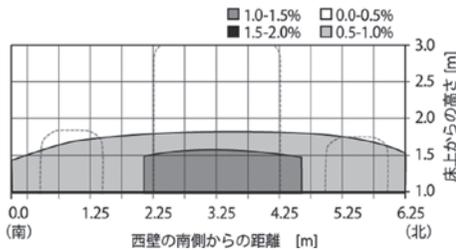


図9 西壁面に対する開口部の形態係数

表1 西壁仏龕内外への開口部に対する形態係数

床上高さ	外	内
300	0.21%	0.06%
250	0.19%	0.13%
200	0.17%	0.20%
150	1.05%	0.27%
100	1.05%	0.33%

1.5%程度，そこから放射状に値が小さくなる。したがって，中央下部が天空放射の影響を最も受けるといえる。一年間に照射する天空放射量の積算値は，年間の天空放射量を形態係数に掛け合わせることで求まる。1年間の天空放射量の積算値はおよそ1700MJ/m²年であり，形態係数が1.0%であれば17MJ/m²年の天空放射が照射することとなる。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。

南壁での形態係数の分布を図10に示す。形態係数は東から4.75mで床に近い範囲が最も高く1.0%程度，そこから西側にかけては同様の分布である。東壁から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。石窟の奥行方向にみられる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形態係数を，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形態係数は1/3となった。図11に西壁仏龕内外部での赤色の有機色料による彩色箇所の特徴的な箇所を顕微鏡写真を示す。白色顔料の上に半透明の有機色料によると推定される赤色の層が塗布されており，同じ材料・技法によるものと考えられる。二つの写真を比較すると，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。顕微鏡下での写真は特徴的な箇所を示しているが，このような状況は仏龕内外の同じ彩色の箇所でも観察される。また，図11に示した彩色に限らず，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。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る。

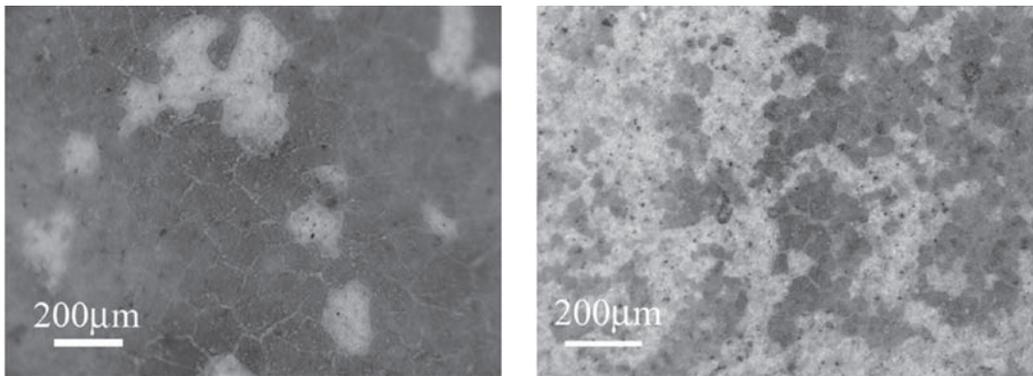


図11 赤色の有機色料による彩色（左：西仏龕内，右：西仏龕外）

6. おわりに

本報では敦煌莫高窟第285窟において，壁面に照射する直達日射と天空放射について検討した。西壁の床上2.0m以下の範囲では，ほとんどの場所で直達日射が照射する時期があるが，その時間や量は限られる。壁画の残る床上1.0m以上に注目すると，年間の照射量は大きくない。対して，天空放射は広い範囲にわたって影響を及ぼしており，照射量も直達日射に比べて大きい。壁画の広範囲における劣化の要因として，天空放射量が関係している可能性が考えられる。しかしながら，本報では日射の影響については直接に照射する光についてのみ定量化を行ったため，直接開口部のみえない部分の影響がゼロと算出されている。劣化との関係を考える上では，反射光など間接光の影響についても同様に定量的に検討する必要がある，今後の課題としたい。

劣化の要因としては光の照射のほかにも、温湿度の変動や壁体内の水分量などさまざまな環境要素が考えられる。それらの情報を収集分析し、光環境との関連も含め総合的に把握することが求められる。

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金 若手研究 (B) (課題番号20700665) の助成を受けました。

参考文献

- 1) 東京国立文化財研究所：敦煌文化財の保存修復に関する調査研究 論文集 II (1995)
- 2) 三浦定俊，西浦忠輝，李実，張拥軍：敦煌における気象観測 (1) -1988 年発の温度・湿度変化について-，保存科学，29，1-8 (1989)
- 3) 三浦定俊，西浦忠輝，張拥軍，王宝義：敦煌莫高窟の気象 (2) -1989 年から 1991 年まで-，保存科学，31，87-94 (1991)
- 4) 朽津信明，段修業：敦煌莫高窟における塩類の晶出と壁画の劣化，保存科学，32，28-34 (1992)
- 5) 谷口陽子，森井順之，陳港泉，蘇伯民：敦煌莫高窟 53 窟仏龕周辺における土壁中の可溶性塩類について，保存科学，44，127-134 (2004)
- 6) 東京文化財研究所文化遺産国際協力センター：敦煌壁画の保護に関する日中共同研究 2006・2007・2008 (2007・2008・2009)
- 7) 大場詩野子，大竹秀実，高林弘実，渡邊真樹子，王小偉，柴勃隆：敦煌莫高窟第 285 窟壁画の保存状態，保存科学，48，99-107 (2009)
- 8) 高林弘実，柴勃隆，王小偉，津村宏臣，大場詩野子，渡辺真樹子：敦煌莫高窟第 285 窟西壁および南壁における物理的損傷の分布解析，日本文化材科学会第 26 回大会要旨集，94-95 (2009)
- 9) 高林弘実，小瀬戸恵美，于宗仁，范宇権：敦煌莫高窟第 285 窟壁画に使用された彩色材料の非接触分析，保存科学，47，89-101 (2008)
- 10) 俄藏敦煌艺术品 III，上海古籍出版 (2000)
- 11) 鉦井修一，池田哲朗，新田勝通：『建築環境工学 II 一熱・湿気・換気一』，pp. 4-9，pp.62-64，朝倉書店 (2002)

キーワード：直達日射 (direct solar radiation)；天空放射 (diffused solar radiation)；壁画への日射照射量 (amount of solar radiation on murals)；壁画の劣化 (deterioration of mural paintings)

Influence of Solar Radiation on the Deterioration of the Mural Paintings in Mogao Cave 285

Tomoko UNO, Ping XUE * and Hiromi TAKABAYASHI

Influences of direct and diffused solar radiation on the deterioration of mural paintings are quantified in Cave 285. Diffused solar radiation influences a large range of the walls and contributes to widespread deterioration across the mural paintings. The influence of direct solar radiation is limited to the part on the west, south, and north walls.

This paper considers direct solar radiation on walls and not solar radiation reflected from the walls. In order to understand the relationship between deterioration and the amount of solar radiation, the influence of radiation reflected from the walls and the floor remains to be considered.

There are many environmental factors causing deterioration of mural paintings: fluctuations of temperature and relative humidity, water contained in materials and so on. A comprehensive consideration should be given to prevent and control the deterioration of mural paintings.

* Researcher, Dunhuang Academy