

〔報文〕 バーミヤーン遺跡における環境調査 (2) —石窟内環境と保存対策—

宇野 朋子・谷口 陽子・青木 繁夫

1. はじめに

バーミヤーン地域は北緯35° 東経67° 標高2500mの山岳地帯に位置し、大陸性の乾燥した気候下にある^{1)~3)}。バーミヤーン遺跡の大崖には、東西2体の大仏をはじめ大小数百の石窟が開鑿され、中には壁画が描かれた石窟も数多くあった。しかし、その壁画の多くは長年にわたる混乱の中で破壊や盗取といった損害を受けてきた。そういった人為的な被害とともに、厳しい自然環境もまた壁画や石窟自体の劣化の主要な要因となっている⁴⁾。文化財研究所では、バーミヤーン遺跡に残る壁画を保存するために「バーミヤーン遺跡保存事業」の中で「バーミヤーン仏教壁画の保存修復事業」⁵⁾を実施し、石窟内に散乱した壁画片の回収と保存、石窟の壁に残る壁画の保存修復処置、盗難防止を目的とした石窟の開口部やアクセス通路の閉鎖を実施している⁶⁾。

壁画の保存修復事業では、壁画の保存環境を左右する石窟内環境を把握した上で、保存修復方法の検討や適切な保存環境を整備するため、パイロットプロジェクトとして保存修復の対象としている2箇所の石窟を含んだ4箇所の石窟内環境の計測を実施している。加えて、壁画の保護のためには、石窟内の環境に大きく影響する外界気象の把握は不可欠であると考え、そのための詳細な外部環境の計測を行っている。これらバーミヤーン地域における環境計測のデータは、今後のバーミヤーンでの活動においても基礎資料として有用である。

2005年7月より環境計測を開始しこれまでに通年の結果が得られた。本報では、2005年7月から2006年9月までに回収した環境データを解析した結果について報告する。

2. 屋外および石窟内環境調査の概要

バーミヤーン谷のほぼ中央、大崖に面した「バーミヤーン教育文化センター」(地図1, 写真1)の屋上に2005年7月に自動気象観測機(気象ステーション: Campbell製データロガー



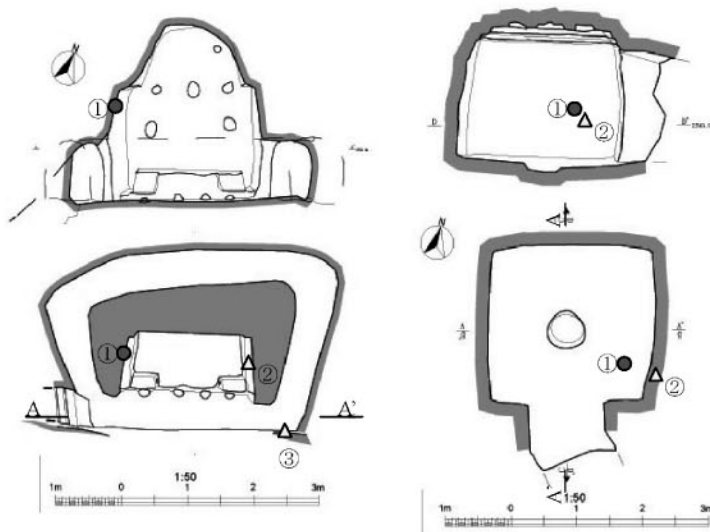
地図1 バーミヤーン教育文化センターの位置(◎) 写真1 バーミヤーン教育文化センター(↓)(北側から)

CRI10X)を設置し、外気の温度および相対湿度 (Vaisala製50Y), 水平面日射量 (Kipp&Zonen製CM03), 降雨量 (太田計器製34T), 積雪深 (Campbell製SR50), 風向風速 (R. M. Young製05103), 大気圧 (Vaisala製PTB101B) などの基本的な気候要素を計測している⁷⁾。

パイロットプロジェクトの対象であるI, N(a)窟と、参考窟であるK₃, M窟において、石窟内空気温湿度の計測を行った。また、I窟, N(a)窟では岩の亀裂部分での浸水の有無を確認するために、壁内にある亀裂部分での水分量の変化と温度の計測を行った。温湿度計測にはオンセット社製のデータロガー (HOBO H08-032-08) を、壁内温度および含水率変化の計測には、オンセット社製のデータロガー (HOBO Micro Station H21-002) に同社製温湿度センサー (S-TMB) および土壌水分センサー (S-SMA) を接続し使用している。図1にI, N(a)窟の平面図・断面図およびロガー設置位置を示す。

①I窟 (図1a) : 西大仏から東へ約180mの位置にあり、南面が外部に大きく開いた座仏龕と、仏龕の背後に穿たれた右繞道からなる。座仏龕に残る壁画は常に外気や日光にさらされている。壁画は、上部を除いてほとんどが剥落してしまい、天井に残る壁画の表面も細かなうろこ状剥離を呈している。温湿度計は、石窟の床上2.65mの高さにある西側壁面にあるくぼみ (図1a①, 写真2) に設置した。図1a②の石窟床面に水分量センサーと温度センサーを埋設し、③点に温度センサーを埋設した。

②N(a)窟 (図1b) : 西大仏から東へ約280mに位置する。南と西側に2カ所の小さな開口部を持つ小規模な石窟である。石窟内では、砂岩からなる支持体と壁画の下塗り層間との接着力の低下に起因して、壁画のほとんどが下塗り層ごと失われている。また、わずかに上部に残る壁画はスス状の黒色物質で覆われている。この物質は吸湿性があり、周囲の微小な湿度変動の影響を受けやすい⁸⁾。ここでは、石窟内の温度、相対湿度 (図1b①) に加えて、降雨時などに石窟に流れ込む水の影響を把握するために、東側にある亀裂部分 (図1b②) に水分量センサーと温度センサーをモルタル⁹⁾で埋設した。N(a)窟では、2006年での第6, 7次ミッションで、壁画



(●温湿度計、▲水分量センサー・温度センサー)

図1a I窟平面図(上)・A-A' 断面図(下)

図1b N(a)窟平面図(上)・A-A' 断面図(下)



写真2 I窟の西側壁に設置した温湿度計



写真3 M窟:開口部を閉鎖している

表面の黒色物質の除去が行われた⁸⁾。第7次ミッション終了後、露出した壁画を保護するために、応急的措置として開口部を閉鎖した。

③K₃窟：東西大仏のほぼ中央に位置し、比較的高い場所にある奥行き広い石窟である。南側に前室が、東面、北面に小石窟が隣接し、前室には、南面の外気に面した開口部と西側の石窟に続く開口部がある。温湿度計は石窟内の最も奥（石窟床上1.43m）と前室との間に設置した⁷⁾。高所にあるため、他の石窟に比べると壁画の盗取は少ないが、表面には特定の顔料の変色生成物とみられる黒色の物質が観察される。

④M窟：東大仏から東へ約60mの位置にあり、比較的小さな石窟である。2003年に壁画の盗難を避けるために、南側にある唯一の入口を木製の扉と日干しレンガで閉鎖している（写真3）。大崖の表面からは、2m以上の厚みのある壁となっている。温湿度計は石窟内の最も奥にある仏龕（石窟床上1.43m）に設置した。

3. 外部環境の計測結果と考察

ここでは、野外の基本的な気象要素について、測定結果を示す。

3-1. 降水量および積雪

図2に降水量と積雪深を示す。冬季は降雪などにより雨量計の凍結がおこることがあるため、ここでは、降雪が記録された期間（12月4日から3月26日）の降水量のデータを欠損として扱った。パーミヤーンでの降水のほとんどが、冬から春にかけての降雪であることが知られている³⁾。

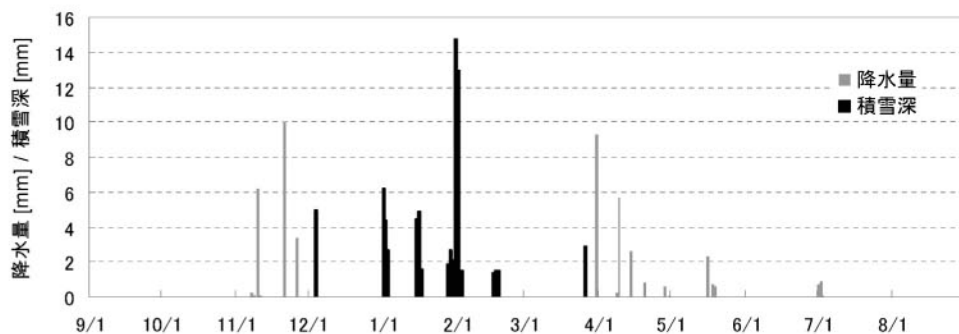


図2 降水量の日積算値と1時間ごとの積雪深 (2004年9月1日～2006年8月31日)

観測データでは、12月初旬に4cm程度の積雪が観測され、その後1月から3月末にかけて、数回にわたって5cmから13cmの積雪が観測された。また、4月から5月には、日積算で10mm程度の降雨があり、7月上旬以降、11月上旬までは降水は観測されていない。12月から3月を除く一年間の降雨量は44.6mmであった。計測値については、空気が非常に乾燥しているために計測前に蒸発してしまうことを考慮する必要がある。

3-2. 日射量 (図省略)

11月から4月中旬にかけての降雪(降水)のある日を除けば、一年を通して晴天が続く。晴天時の日積算の日射量は7月で $3.6\text{MJ}/\text{m}^2$ 、12月で $2\text{MJ}/\text{m}^2$ と変化している。晴天時の大気の透明度を示す日射の透過率(日射量の計測結果より算出)は0.7と高い。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。

日射の受照量は、太陽高度の低い冬季には、水平面よりも鉛直面で受ける日射量の方が大きく、12月では南に面している崖面は水平面の約1.5倍の日射量を受けることとなる。このような低い角度から石窟内へ差し込む日射が壁画表面へ照射することが、劣化に影響を与えていると考えられる。

3-3. 温度・相対湿度

図3に外気温度および相対湿度の日最高値および最低値を示す。11月上旬から4月中旬までは日最低値が氷点下となる日が続き、最も低い場合でマイナス 20.6°C (1月5日午前7:15)が記録されている。この時期には夜間の外気温は氷点下となるが、日中には 5°C 前後まで上昇しており、昼夜の温度差は大きい。冬季であっても、南向きの大崖には日射があたるため、崖表面では周辺空気よりも温度が上昇する。大きい場合には、 10°C ^{注(1)}近い温度上昇となり、昼夜の表面温度差は空気温度の差よりもさらに大きくなる。崖面に積雪があれば、その場所で結氷融解が繰り返されるといえる。結氷融解が繰り返されるによる亀裂部分の拡大は、比較的崩れやすい大崖の崩壊を助長し、崖や石窟の崩壊を進行させる一つの要因と考えられる。

5月以降10月頃までは降水はなく、気温と相対湿度ともに日々の変化が小さい。また、非常に乾燥している。

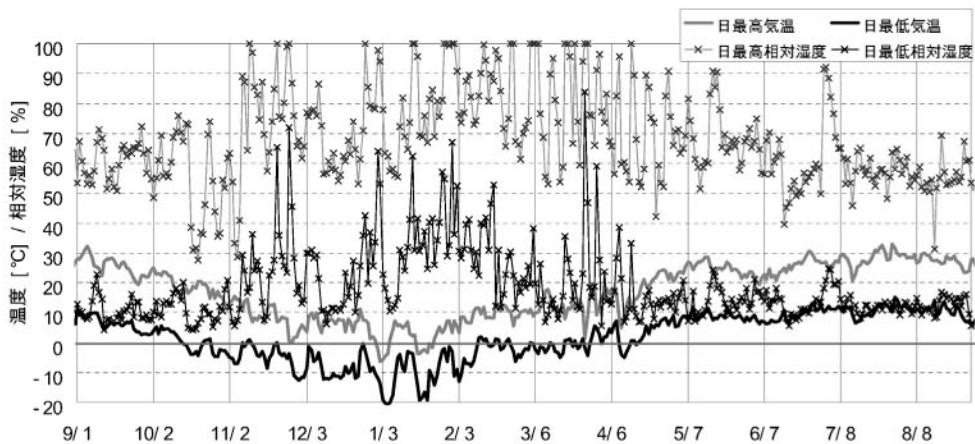


図3 外気温度と相対湿度の日最高値・日最低値 (2005年9月1日～2006年8月31日)

3-4. 風速・風向

図4に3ヶ月ごとの風向分布を、図5に2005年9月15日から18日の4日間分の風速と風向の時間変化を示す。測定結果から、風速風向には日変化とともに季節変化が観測された。一年を通して南南西方向からの風が主であることがわかる。降雨が無く温度が安定している8月から

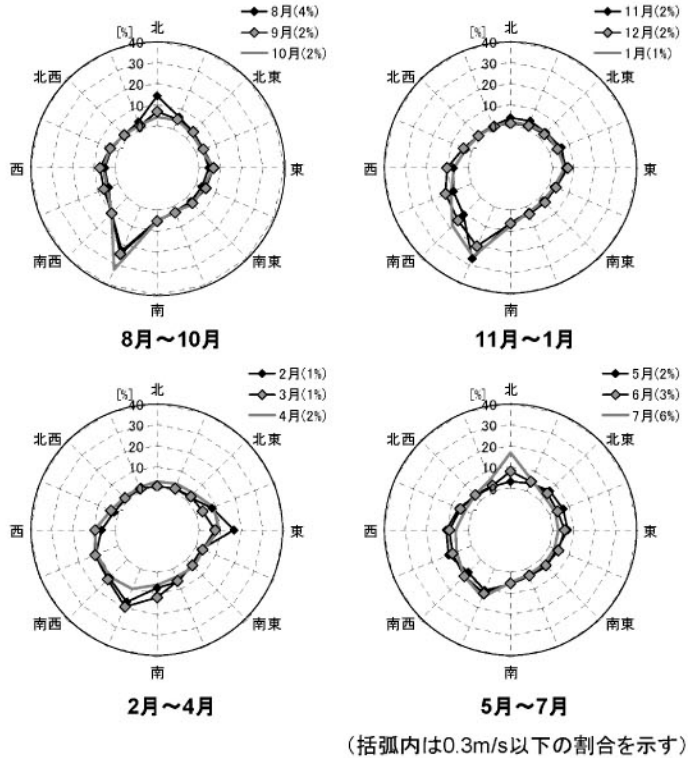


図4 風配図 (2005年8月~2006年7月)

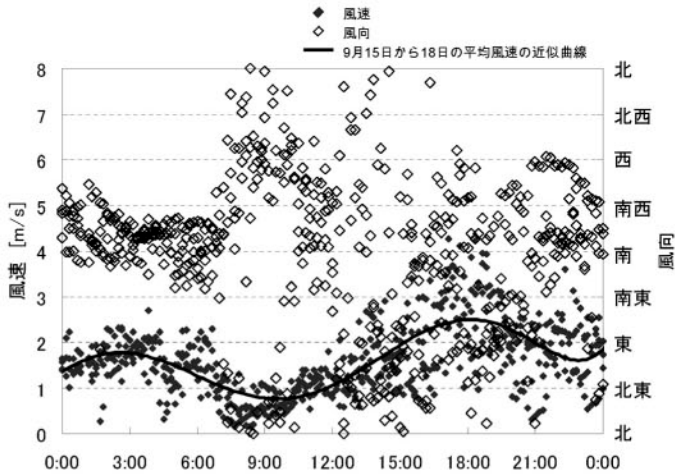


図5 風向および風速 (2005年9月15日~18日の重ねあわせ)

10月に、その傾向が強い。日最大風速は4月から6月にかけて大きく、日最大で10m/sから十数メートル以上の風が吹いている。この時期には、南から西側へと風向が乱れがちとなる。冬季の風速は、最大でも10m/s以下と小さい。

風向風速の一日の変化(図5)は季節によらず同じような変化をしており、午前中に無風もしくは数メートル程度と最も小さく、午後から夕方にかけて大きくなり、夜間から朝方にかけて小さくなる。18時前後に強い風が北～北西から吹き、夜間は1～2m/sの風が南から吹く。

4. 石窟内環境の計測結果と考察

①I窟

I窟では、西側の高さ2.6mの壁近傍に温湿度計を設置した。この場所に残る壁画の彩色には、うろこ状の彩色層の細かな剥離がみられる。図6にI窟の温度および相対湿度の年変化および水分量の変化を、外気のデータとともに示す。

I窟の計測結果では、9月中旬から4月中旬ごろまで、計測機の温度上昇が記録されており、計測点には太陽光が直接照射していることがわかる。このことから、計測器近辺の壁面にも日射が照射し、冬季であっても、壁面の表面温度の上昇が起きているといえる。これに対して夜間の空気温度は氷点下となっており、壁面表面の温度も同程度まで低下している。壁面に直接日射があたり急激に表面の温度が変化することにより、壁面表面で膨張収縮が繰り返されること、温度上昇によって急激に乾燥すると予想され、これらが細かな剥離の原因の一つと考えられる。これについては、今後さらに検討を進めたい。

外気相対湿度は、12月から4月にかけて80%を超える場合がある。いずれも気温が低い場合に生じており、空気中の水分量はきわめて低い。そのため、空気中の水分が原因となって壁面面で結水が起こるといった被害は考えにくい。

懸念していた亀裂部への液水の浸入は認められなかった(図7)。センサーの設置直後には、

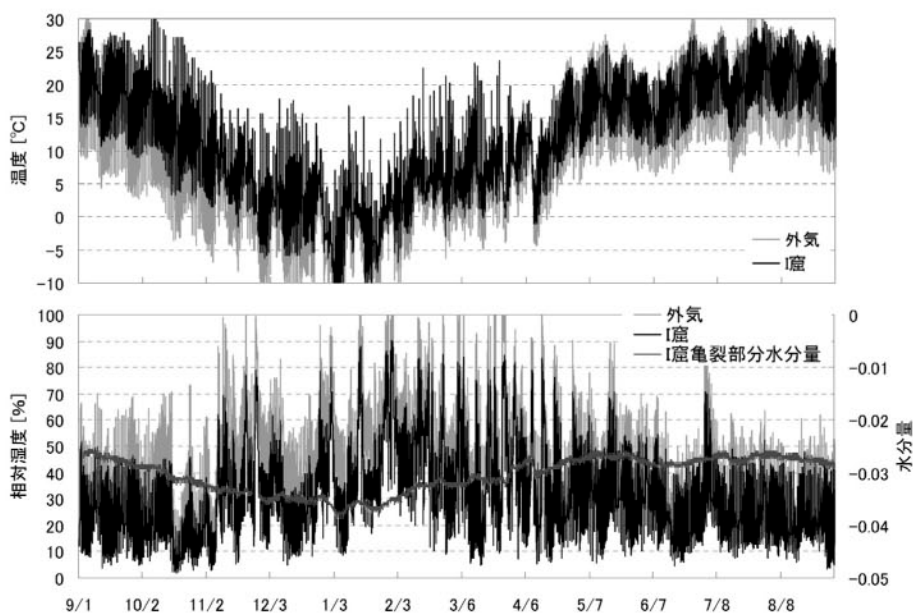


図6 I窟温度、相対湿度および亀裂部分水分量(2005年9月1日～2006年8月31日)

埋設に使ったモルタルの水分の影響で高い値を示しているが、数週間後には負値で安定した(結果はグラフの表示範囲外)。安定後の変動幅は非常に小さく水分の上昇はみられない。センサーの値が負値であることは、亀裂部分での水分量がきわめて小さいことを意味しており、亀裂部を含め壁は非常に乾燥しているといえる。計測値には、壁面温度が高い場合に吸湿に働き、低い場合に放湿する、わずかな水分量の変動が観察された。このことから、亀裂部での水分量の変化は外気の湿度変動よりむしろ、亀裂部周辺の温度変動の影響を受けていることが確認された。

②N(a)窟

図8に、N(a)、M窟の温度および相対湿度の結果を示す。N(a)窟は、室内に日射が入ることがほとんどなく、開口部での外気との換気により室内の温度変動が生じていることがわかった。外気をもっとも低くなる(日平均外気温度が -10°C)時期には、窟内の空気温度のみならず壁面の温度も終日氷点下となる。しかしI窟のような日中の温度上昇はみられず、日格差は窟内

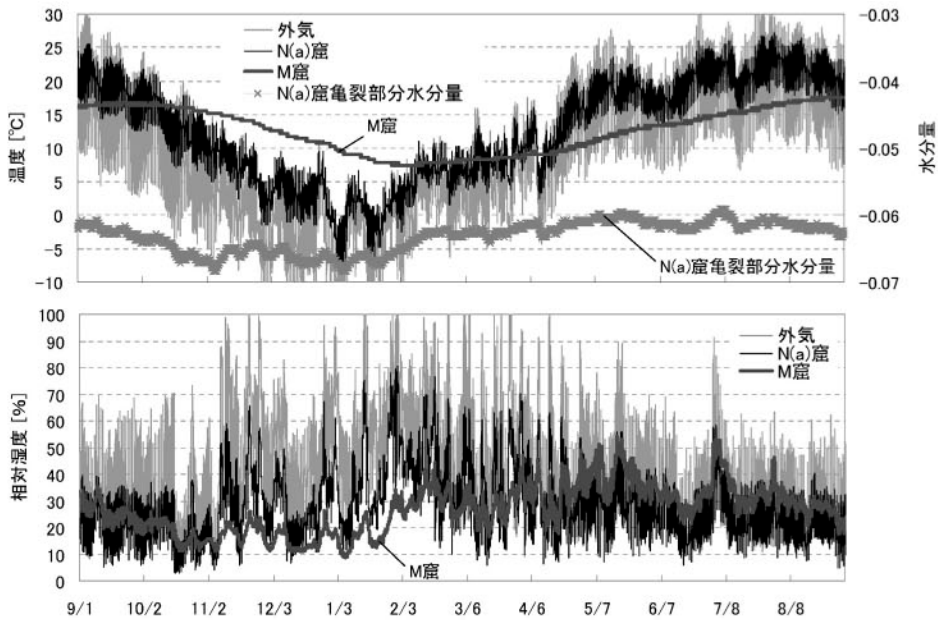


図7 N(a)窟およびM窟の温度、相対湿度および亀裂部分水分量(2005年9月1日～2006年8月31日)

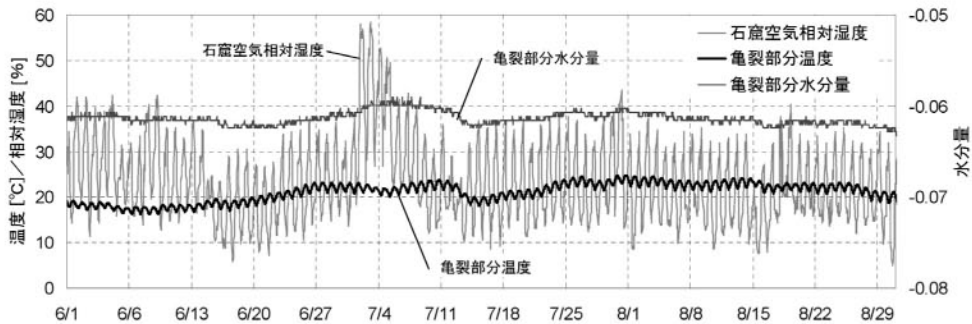


図8 N(a)窟亀裂部分の温度および水分量とN(a)窟空気相対湿度(2005年6月1日～2006年8月31日)

空気温度で10℃、壁面では数度に収まっている。ただ、場所によっては太陽光を直接受けるところもあるため、その場所の特定、受照量などの検討が必要である。

東壁の亀裂部分での水分量はI窟同様に、周辺空気の相対湿度変動にやや遅れて追従するが、それよりもむしろ亀裂内の温度変動の影響を大きく受けている(図8)。しかし、急激な上昇はみられない。変動の幅は小さく、石窟岩盤や壁画表面はほとんど水分を含んでいない状態であることがわかる。修復方法を検討する過程で、水系の洗浄剤を使用した際に、多くの水分が壁面へ吸収される現象が観察されており、壁面が非常に乾燥していたことが裏付けられる⁸⁾。

N(a)窟では2006年の修復活動後、洗浄によってスス状の黒色物質が除去され表面が露出した壁面を保護するために開口部の閉鎖を行った。岩盤奥からの水分の流入は見られないことから、石窟を閉鎖したとしても急激な湿度の上昇はないと考えられ、石窟内の環境の安定化には有効な措置であるといえる。

③K₃窟

K₃窟では前室と石窟内との2箇所での空気温湿度の計測を行ってきた。前室ではI窟同様に、冬季に日射の入遮が認められる(図省略)。夜間は氷点下となり、日中に20℃近くまで上昇する環境となっている。一方石窟内では、外部との換気によって引き起こされる温度変動も10℃以内と小さい。相対湿度は、前室、石窟内ともに、外気変動の影響を受けて変動している。日中には、石窟内の温度は前室よりさらに低くなっているが、相対湿度も低い。

壁面が非常に乾燥しているため、常に吸湿に働くことで、窟内の温度が低い状態でも相対湿度を常に低く、絶対湿度も低い状態に保たれていることが考えられる。N(a)窟と比較すると、石窟内の絶対湿度が、特に日中に低くなっていることが観察された。

④M窟

M窟の温湿度変化を図7に示す。年間の最大値は16.9℃、もっとも低い場合でも7.4℃であり、季節変動はあるが日変動はほとんどない。相対湿度では10～50%で推移している。外気の相対湿度が高くなる冬季の降雪時でも、石窟内は10～20%と低く空気中の水分量の上昇はみられない。これら結果より、他の3窟と比べると非常に安定した環境であったことが確認されたが、これは、M窟が崖から2m以上奥に掘り込まれていることに加え、開口部を閉鎖したことによって、外部の環境変化の影響を受けにくい状態に保つことができたためであるといえる。

1日の中で、わずかに湿度の変動が観察される。おそらく崖面外側もしくは扉の温度が上昇する日の出の直後に、室内の相対湿度が数%上昇し、その後日中は、外気の相対湿度の変動に伴って10%程度低下してゆくという繰り返しがあがる。このような微小な変化は、壁表面の水分量や温度への影響はないといえよう。

5. おわりに

パーミヤーン遺跡において、石窟内に残された壁画片の保存環境を把握するために、遺跡周辺の気象観測および石窟内の環境計測を実施してきた。気象観測結果より、11月から3月にかけて降水(降雪)が年間のほとんどを占め、その量は非常に少ないこと、そのため空気中の水分量が小さく年間を通して乾燥した気候であり、また、日射の大気透過率が大きいことなどが確認された。また、石窟内に砂塵をもたらし得る、一年を通して常に南から吹く強い風があることが確認された。

石窟内での計測結果から、外気に面しているI窟においては、日射があたる場所で急激に気温が上昇し、夜間に低下するために昼夜の温度差が大きいことが、表面の細かい剥離の原因のひとつとして考えられた。また、I、N(a)窟の亀裂部分で行った水分量の計測からは、一年を

通して水分の上昇は見られず、亀裂への冠水、浸水の可能性が低い。また、石窟壁は非常に乾燥していることが判明した。

開口部を閉鎖した石窟では、一年を通して温度、相対湿度ともに変動が小さく、日変化がほとんどなく安定した環境にあることが確認された。壁画保存環境の安定化のための開口部の閉鎖は、直接に太陽光が照射すること、外気との換気量を抑えることができ、また砂塵の吹き込みの防止にも極めて効果的な措置であるといえよう。

注釈1) $T_{\text{surface}} = (a_{\text{surface}} \times J_{\text{surface}}) / \alpha_{\text{surface}}$, $J_{\text{surface}} = J_{\text{global}} \times \cos(h)$ により算出。

T_{surface} : 壁面の温度上昇 [K], J_{surface} : 壁面にあたる法線面日射量 [W/m^2],

a_{surface} : 壁面の日射吸収率 [-], α_{surface} : 壁表面での熱伝達率 [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]

$J_{\text{global}} = 500 [\text{W}/\text{m}^2]$ (2005年12月の南中時水平面日射量のうち、大気透過率が0.7以上となる日の平均値),
 $h = 31 [^\circ]$ (12月の南中時の太陽高度の平均値), $a = 0.5 [-]$, $\alpha = 23.3 [\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$ とすると、壁面での温度上昇は9.2°Cとなる。

参考文献

- 1) East View Cartographic, Minneapolis.: 'Terrain Analysis of Afghanistan', pp.152-154. (2003)
- 2) De Planhol, W., Tarzi, Z. and Balland, D.: 'Bamian', In Ehsan Yarshater (ed.), Encyclopaedia Iranica vol. III, pp.657-661, London: Routledge & Kegan Paul. (1989)
- 3) Margottini, C.: 'The geomorphological instability of the Buddha niches and surrounding cliff in Bamiyan valley (Central Afghanistan)'. Paper presented at International Coordination Committee for the Safeguarding of Afghanistan's Cultural Heritage (ICC), 16-18 June 2003, UNESCO Headquarters, pp.2-4, Paris. (2003)
- 4) Lal, B. B.: 'Conservation of murals in the Bamiyan valley, Afghanistan', Conservation of Cultural Properties in India, 5, pp.83-95. (1970)
- 5) Taniguchi Y. and Aoki S.: 'Conservation Proposal (Chapter 6-2)', Protecting the World Heritage Site of Bamiyan: Key Issues for the Establishment of a Comprehensive Management Plan 2004, JCICC, NRICP, Japan. (2005)
- 6) 宇野朋子, 大竹秀実: バーミヤーン壁画の保存修復の現状, 佛教藝術, 289, 49-63 (2006)
- 7) 宇野朋子, 谷口陽子, 大竹秀実, 青木繁夫: バーミヤーン遺跡における環境調査 (1) —外部環境と石窟内の温湿度環境—, 保存科学, 45, 9-16 (2006)
- 8) 大竹秀実, 谷口陽子, 青木繁夫: バーミヤーン仏教壁画の保存修復 (2) —I窟およびN(a)窟における保存修復—, 保存科学, 46, 189-200 (2007)
- 9) 大竹秀実, 谷口陽子, 青木繁夫: バーミヤーン仏教壁画の保存修復 (1) —グラウティングによる応急処置—, 保存科学, 45, 17-24 (2006)

キーワード: バーミヤーン (Bamiyan); 気象観測 (meteorological observation); 石窟内環境計測 (Monitoring of thermal Environment in caves)

Environmental Investigation in Bamiyan Site (II): Microclimate in Caves and the Conservation of the Mural Paintings

Tomoko UNO, Yoko TANIGUCHI and Shigeo AOKI

In order to evaluate the conservation environment of the intact portions of mural paintings, basic meteorological observation of the site and environmental monitoring in the caves were conducted at the Bamiyan site. Valuable meteorological data such as air temperature, air humidity, wind speed and its direction, solar radiation, amount of rainfall, depth of snow and so on were collected. The measured data confirmed that there were less rainfall and snowfall between November and March, that the air water content was little through the year, that the atmospheric transmittance was large, and that the wind mainly blew from the south, probably causing the accumulation of sand particles in the caves.

From the results of microclimatic study in Cave I which opens to outside as a niche, it was found that the west wall surface temperature was severely affected by the direct solar radiation that came from a low angle. The temperature rose in the daytime during winter while it went down during nighttime. This large temperature difference on the surface between day and night and the repetition of this fluctuation is a possible cause of the continual expansion and contraction of the paint layer that leads to the flaking of the paint layer. The moisture contents in the cracks of Caves I and N(a) did not rise through the year, and the wall was extremely dry.

The temperature and relative humidity in Cave M were very stable compared to the conditions of other caves. It was confirmed that closing the caves helps to reduce solar radiation and air exchange. Therefore, closure of the caves will effectively stabilise the microclimate conditions and ensure suitable conservation conditions for the mural paintings.