

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—

宇野 朋子・谷口 陽子・大竹 秀実・青木 繁夫

1. はじめに

バーミヤーン地域は北緯35°40′-25°20′, 東経67°-68°, 標高2500mの山岳地帯に位置している¹⁾。大陸性の乾燥亜熱帯気候下にあり, 年平均気温は7.4℃, 夏季(7月)の平均気温は17.4℃, 冬季(1月)は-5.6℃である^{2), 3)}。年間の降水量は平均で160mm程度であり, その大部分は冬季から春期にかけての降雪による³⁾。

バーミヤーン遺跡の中核をなすバーミヤーン大崖には, 大小数百の石窟が分布し, その中には仏教壁画の描かれた石窟が多く存在している。長年にわたる混乱の末, 東西大仏を初めとして多くの壁画が破壊や盗取により失われてきた。また, 厳しい自然環境により, 壁画の劣化は現在も進行し続けている。文化財研究所では, 「バーミヤーン遺跡保存事業」の一環として, これら石窟に残る壁画の保存修復を実施している⁴⁾。石窟内に散乱していた壁画片の回収と保存を行いつつ, 現在でも石窟内に残る壁画の保存修復事業として1カ所の石窟を対象に, 壁画のクリーニングと保存処理を予定している。さらなる人為的被害を防止するため, 石窟の開口部やアクセスルートの閉鎖も行っている。

壁画の保存修復においては, 周辺環境の変化がどのように壁画に影響を与えているのかについて把握し, 適切な保存環境を形成する必要がある。1970年代にインド・アフガニスタン隊による大仏龕周辺の保存修復事業の際には, 大崖上部に排水経路が設置されたことからわかるように, 大崖を流れる降雨や雪解け水は石窟や壁画に大きな被害を与える要因といえる⁵⁾。水による被害のほかにも, 土壁の上に描かれている壁画には, 水分の蒸発・吸収を繰り返すことによる塩の析出や乾燥収縮, 微生物, 植物の繁茂など様々な劣化要因が考えられる。これらの劣化の進行には, 周辺および岩石内の温湿度の変化が大きく影響するため, 保存修復を行う際には環境の変化を把握し, 将来の変動を予測することが重要である。

本報では, 石窟内環境の把握のために実施している環境計測について報告する。環境計測は2005年7月に開始し, 2005年11月末までの結果が得られている。石窟内の環境と同時に, 外部気候要素の計測を行っている。バーミヤーン地域において, 温湿度などの基本的な気候要素の定期的な計測はこれまでほとんど行われておらず, これらのデータは今後の活動において貴重な資料となる。

2. 環境調査の概要

2-1. 屋外環境調査

屋外環境の調査を行うため, バーミヤーン教育文化センターの屋上に環境観測機を設置した(写真1)。外気の温度および相対湿度, 水平面日射量, 降雨量, 積雪深, 風向風速, 大気圧などの基本的な気候要素を計測している。各項目は1時間間隔および10分間隔に瞬時値もしくは平均値データを計測しデータロガーで記録を行っている。2005年7月に測定を開始した。観測にはキャンベル社の自動気象観測ステーションを使用している。

2-2. 石窟内環境調査

現在も壁画の残る石窟（I, K₃, M, N(a)窟）において、石窟内の温湿度変動が壁画の保存状態に与える影響を把握するため、石窟内において空気温湿度、壁内の含水率変化および温度の計測を行っている。温湿度計測にはオンセット社のデータロガー（HOBO-H08）を、壁内温度および含水率変化の計測には、オンセット社のデータロガー（HOBO-Micro Station）をそれぞれ使用し、1時間毎にデータを記録している（写真2）。図1～4にI, K₃, M, N(a)窟それぞれの平面図およびロガー設置位置を示す。春季には大量の雪解け水が崖面を流れるといわれており⁵⁾、流水による崖面の崩壊が予想される。このような水の変化によって起こる、壁面での水分変動と壁画への影響を把握するため、I窟、N(a)窟の亀裂部には水分センサーを設置し、亀裂部での水分量の変化を調べることにした。また、同位置に温度センサーを設置し、温湿度の変動も測定している。

I窟（図1）：I窟は南面が外部に大きく開放された形の仏龕である。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1①）に設置した。この位置には季節によっては直達日射が当たる。水分センサーは図1②の石窟床面に埋設し、同位置に温度センサーを埋設した。また、図1③点に温度センサーを埋設した。

K₃窟（図2）：K₃窟は南側の前室に面した開口があり、東面、北面はさらに小さい石窟と隣接している。前室は南側に外気に面した開口部が一方所と、西側の石窟に続く開口部が一方所ある。比較的奥行きが広い石窟である。温湿度計は石窟内の最も奥に位置する仏龕①（石窟床上1.43m）と前室との間の地点②に設置した。

M窟（図3）：M窟は壁画の盗難を避けるために、外気に面する南側入り口を木製の扉と日干しレンガで閉鎖している。扉部以外に外部に面する開口は無い。大崖の表面からは、1m以上の厚みのある壁となっている。天井高は2.26mであり、比較的狭い石窟である。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。

N(a)窟（図4）：N(a)窟は南側、西側の2カ所に小さな開口がある。天井高は2m程度であり容積の小さな石窟である。N(a)窟では亀裂部および石窟内へ流れ込む水分の影響を把握するために、水分センサーと温度センサーを崖面の亀裂部分（図4②）に設置した。また、温湿度計を石窟内の床上高さ1.3mに設置した（図4①）。



写真1 気象観測ステーション



写真2 温湿度計設置状況

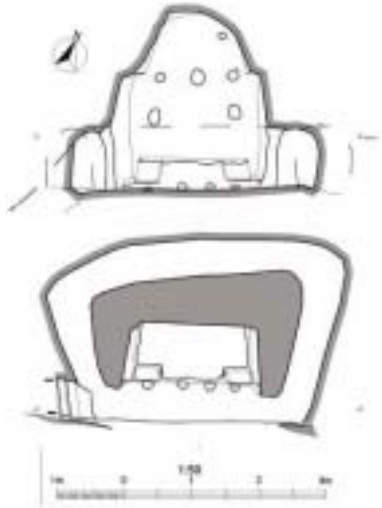


図1 I窟平面図・A-A'断面図

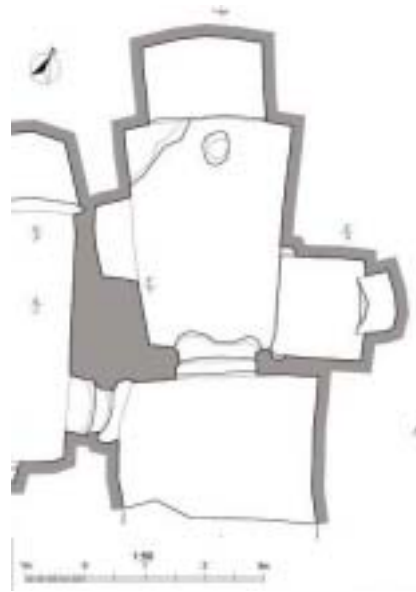
図2 K₀窟平面図

図3 M窟平面図



● 温湿度計設置位置
▲ 水分量センサー・温度センサー設置位置

図4 N(a)窟平面図

3. 外部気象

3-1. 温度・相対湿度

図5に2005年7月10日から11月28日までの外気温および外気相対湿度の日最高値・最低値の変化を示す。7月から10月上旬までは、外気温度はほぼ日較差18℃程度で変化しており、日による差異は小さい。10月中旬に入ると気温は大きく下がり最低気温が氷点下となる。低温のため相対湿度の変動は激しくなるが、絶対湿度の変動は1～4 g/kg(DA)の範囲内にあり大きくない。

3-2. 降水量・日射量

7月から10月下旬までは晴天の日々が続く、降水がみられた日はわずか数日である。11月に入り10mm/day程度の降水がある。日積算日射量は、太陽高度が高く晴天の日が続く7月には平均3.5MJ/day、大気透過率は0.7程度である。日射量は12月に向けて減少し、11月の晴天時は2.5MJ/day（大気透過率0.8程度）、曇天時には1MJ程度となる。

晴天時の平均的な大気透過率は、水分中の水蒸気量が少ない冬季の方が夏季よりもやや高い傾向がある。

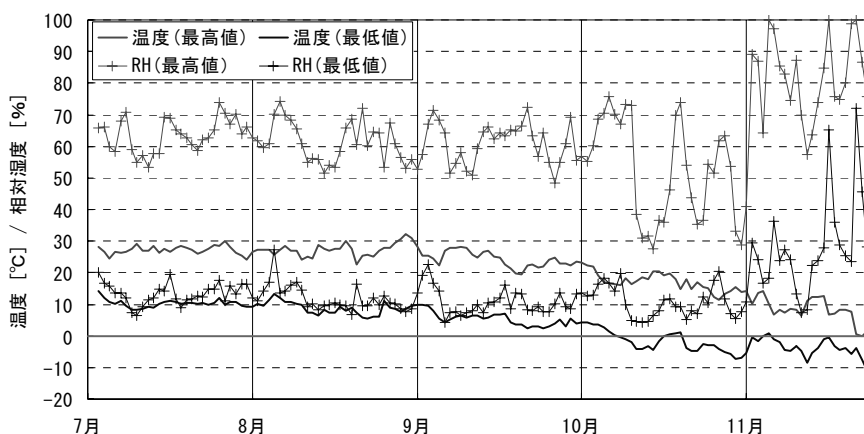


図5 外気温度および相対湿度の日最高値と最低値

3-3. 風速・風向

風速は、午前中は無風に近く夕刻にかけて大きくなり2～4 m/s程度となる。夜間は2 m/s程度の風速がある。7月から11月までは季節に依らずこのような傾向が見られる。一日の最大の風速は10m/s前後であり、主に12～17時の間に現れる。主風向は南南西である。

4. 石窟内の温湿度環境

図6にI, M, N(a)窟の温湿度変動を示す。2005年7月5～9日と11月5～9日の5日間に計測されたものであり、それぞれの季節の代表的な変化を示している。

7月の外気温度は、最高が26°C前後、最低が10°C前後で日較差は15°C程度ある。I窟は外気よりも日較差が小さく10°C程度である。N(a)窟の日較差はI窟よりさらに小さく、6°C程度である。I窟は外部に広く開放されているために、外気との換気量が多く、N(a)窟と比較すると外気変動の影響を大きく受けているといえる。相対湿度は、外気の湿度変動に追随している。I窟、N(a)窟ともに日中の絶対湿度は外気の絶対湿度とほぼ変わらないが、夜間は石窟内の方が外気よりも高くなる。石窟内の相対湿度は、日中でも40%程度、夜間には5%まで低下する。

M窟には壁画の盗難防止のために扉を設置している。気温の日変動が無くほぼ14°Cで一定である。外部に面した扉を閉鎖したために、外気との換気量が非常に小さくなる。また、周囲はすべて1m以上の厚さのある岩塊であるため、外部の環境変動を極めて受けにくく、さらにその熱容量によって温度が一定に保たれていると考えられる。

11月のI窟の温度は外気よりも平均的に高い値となっている。温湿度計は西側の壁面に設置しているため、午前中に東からの日射を直接に受け、急激に気温が上昇している。冬季は太陽高

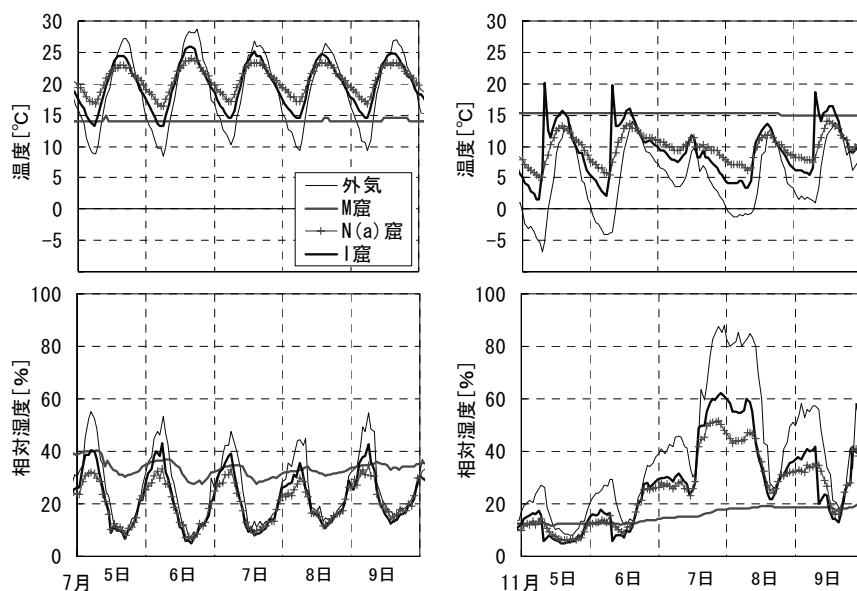


図6 石窟内温度および相対湿度
(左(7月)(上:温度, 下:相対湿度), 右(11月)(上:温度, 下:相対湿度))

度が低いために、石窟内に直達日射が差し込むためである。I窟の西側壁面は日射によって同様の温度上昇が考えられる。N(a)窟もI窟同様に石窟内の気温は平均的に外気よりも高くなっている。N(a)窟でも、I窟ほどではないが日中に日射が射入しているといえる。石窟内の相対湿度を7月と比較すると高くなり、60%近くまで上昇する日がある。外気の相対湿度変動が大きいために、この影響を受けている。しかし絶対湿度でみるとその変動はそれほど大きくない。

M窟は7月と変わらず、昼夜の変動が無くほぼ15°Cの一定値を保っている。開口部を閉鎖したことにより、昼夜のみならず季節間の温度変動が抑制されている。相対湿度もほぼ一定に保たれており、非常に安定した環境にあるといえる。

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いる。

測定を行った石窟の温湿度環境は、外部への開口の違いにより大きく異なる。外気に面した開口が大きい窟は、外気の変動を受け、日射の入りがある場合には急激に気温が上昇する。一方、開口部を閉鎖した石窟では、夏季から冬季にかけてほぼ一定の温湿度が得られ、安定した環境にある。今後、このような環境の変化が石窟に残された壁画にどのような影響を与えるのかを検討する予定である。

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, London: Routledge & Kegan Paul., pp.657-661 (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, Paris, pp.2-4 (2003)
- 4) 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)
- 5) Lal, B. B.: 'Conservation of murals in the Bamiyan valley, Afghanistan', *Conservation of Cultural Properties in India*, 5, pp.83-95 (1970)

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

Environmental Investigations in the Bamiyan Site (I) : Meteorological Condition and Thermal Environment in Caves

Tomoko UNO, Yoko TANIGUCHI, Hidemi OTAKE and Shigeo AOKI

Outdoor environment influences the microclimate of caves and the condition of mural paintings. However, sufficient meteorological observation has not been made in the Bamiyan area. In order to monitor basic weather elements (air temperature, relative humidity, wind speed and its direction, solar radiation, amount of rain fall and depth of snow) of the Bamiyan site, an automatic weather station was installed on the rooftop of the Bamiyan Centre for Cultural Heritage Conservation. Furthermore, the microclimates in the caves are being monitored. Air temperature and relative humidity in Caves I, K₃, M and N (a), and moisture content in the walls of Caves I and N (a) are being measured. Obtained data indicate that the conditions in Caves I and N (a) received a strong impact from outdoor conditions since these caves had openings to outside. The diurnal range of the outdoor temperature was 15°C, and that in Cave I was 10°C whilst that in Cave N (a) was 6°C. This difference between the data of Caves I and N (a) could be due to the size of the openings to outside. Cave M was closed by a wooden door and brick wall. The data showed that its interior condition was quite stable. The temperature was around 15°C without any daily fluctuations. This condition might be favourable for the state of conservation of the mural paintings.

