

高松塚古墳石室内の温湿度および墳丘部の水分分布調査

石崎 武志・佐野 千絵・三浦 定俊

1. はじめに

高松塚古墳の壁画は、1972年3月21日に奈良県明日香村で発見された。古墳は、直径18m高さ5mの円錐形をしている。石室前の準備室入り口部分の写真を写真1に示す。古墳内の石室内面には漆喰が塗られており、その上に、壁画が描かれている。石室の大きさは、長さ2.65m、幅1.03m、高さ1.13mである。壁画の保存に関し



写真1 高松塚古墳石室入り口部分

ては、専門家からなる保存対策委員会が設置され、詳細な検討の後、壁画は現地保存されることになった。保存のための施設は、図1に示したように、石室、前室A、B、準備室、機械室からなっている¹⁾。壁画発見より約30年経過した2001年の秋に石室内部および取り合い部にカビの発生が見られた²⁾。このカビ発生原因を明らかにすること及び対策方法の検討のために、石室内部の温湿度、石室壁面の含水量、石室周辺地盤の含水率、古墳周辺の降水量、温湿度、風向、風速などの微気象データを測定したので、以下に報告する。

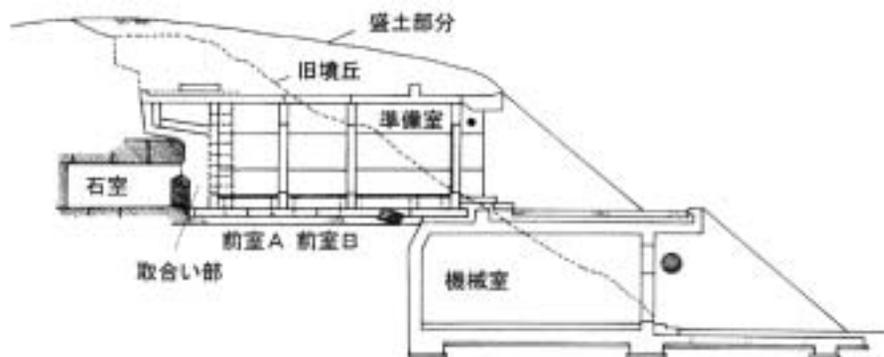


図1 高松塚古墳保存設備の模式図

2. 観測結果

2-1. 石室内の温度, 相対湿度変化

石室内の温度, 相対湿度は2001年12月より, 石室中央部で床より約20cm, 50cm, 80cmの高さで測定した。また温湿度は, 前室Aと石室と前室Aの間の取合い部でも測定した。2002年1月から2003年4月までの石室中央部の温度を図2に示す。グラフに急激な温度変化も見られるが, これは, 石室の点検のために, 一時的に温湿度記録計を石室の外へ出したためである。これらの変化を無視して考えれば, 温度の最低値は, 5月の中頃の15.8 であり, 最高値は, 11月初めに記録された20.2 であった。また, 石室内の温度の年間平均値は18.0 であり, 変動幅は4.4 であった。石室と前室A間の取合い部の温度の最低値は, 4月の初旬の16.1 であり, 最高値は, 10月初めに記録された21.4 であった。また, 取合い部の温度の年間平均値は18.8 であり, 変動幅は5.3 であった。ここで, 石室内の平均温度は, 取合い部より0.8 低くなっているのがわかる(図3)。

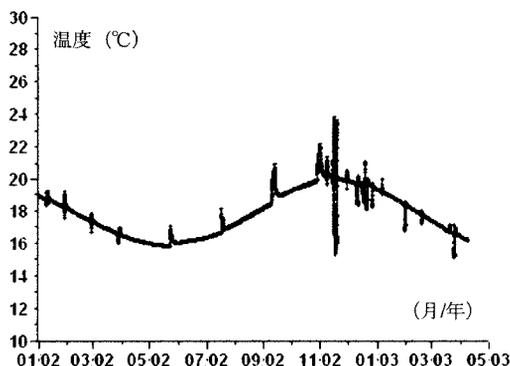


図2 石室内部の温度変化(2002年1月~2003年5月)

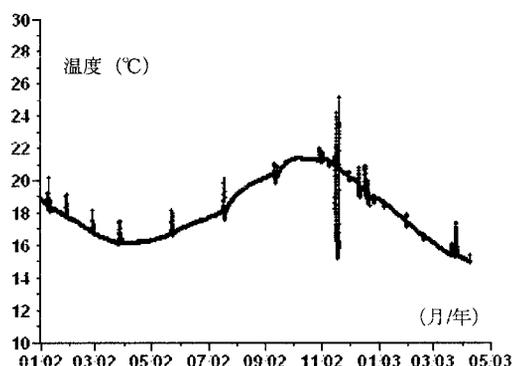


図3 取合い部の温度変化(2002年1月~2003年5月)

1973年に記録された石室内の平均温度は13.6 で, 年間の変動幅は5.6³⁾であった。また, 1981年には, 石室内の平均温度は15.3 で, 年間の変動幅は4.0 であった。これは, 石室内の年平均温度が徐々に上昇しているのを示している。奈良市の気象台のデータでは, 1981年の年平均気温は13.9 であり, 2002年の年平均気温は15.4 であることが示されている。これから, 1981年と2002年の石室内温度の違いは, 部分的に, 外気温の違いの影響を受けていることがわかる。

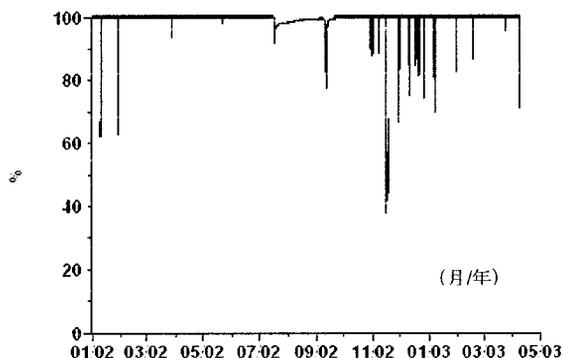


図4 石室内部の湿度変化(2002年1月~2003年5月)

図4に, 2002年1月から2003年4月までの石室内の相対湿度の変化を示す。石室内の湿度はほぼ100%であった。同様に, 石室と前室A間の取り合い部の湿度もほぼ100%であった。また, グラフに急激な湿度変化も見られるが, これは, 石室の点検のために, 一時的に温湿度記録計を石室の外へ出したためである。

2 - 2 . 石室内漆喰表面の含水率の測定

測定には、JTエンジニアリング社製赤外線水分測定装置（JE - 100）を用いた。水には、1.2 μm 、1.45 μm 、1.94 μm の3波長の赤外線の吸収帯があり、これらの光を物質に当てた場合、その含有水分に応じて光が吸収される（吸光度が変化する）。ここで、吸収帯の吸光度のみの測定では、物質の表面状態、粒子の大きさ、色等の影響を受け安定した測定ができないので、水分の影響を受けにくい近赤外線（参照波長）を別に設定し、吸収波長と参照波長を交互にあて、反射する両波長のエネルギー比を求め水分量に換算する。この装置では、吸収波長として1.94 μm 、参照波長として1.8 μm 、2.1 μm を用いている。

図5に、漆喰試料の赤外線吸光度と重量含水比の関係を示す。高松塚古墳石室内の剥落した漆喰試料は、小さすぎて実験には使用できなかったため、ここでは、参考のため江戸時代に作られた蔵の漆喰壁から採取した漆喰を用いて実験を行った。測定は、まず、試料を24時間110℃で乾燥し、漆喰試料の赤外線吸光度と重量含水比の間の関係を求め、次に蒸留水で試料を飽和した後、徐々に試料を乾燥させながら、試料中の含水比を変化させ、重量含水比と赤外線吸光度の間の関係を求めた。

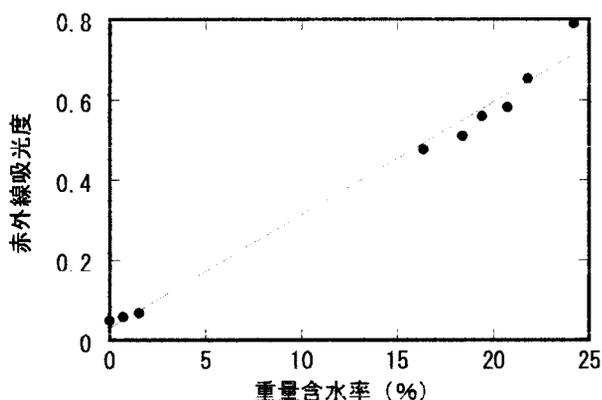


図5 漆喰の赤外線吸光度と重量含水率の関係

図5から、漆喰試料の重量含水率が増加するとほぼ直線的に、赤外線吸光度の値も増加することが確認された。

表1に平成14年12月10日に測定された東壁の赤外線吸光度の分布を示す。表1の分布から東壁の北下部分に、赤外線吸光度の高い部分が見られた。また、壁面に発生したカビは、この吸光度が高く、含水比の高い部分と対応が見られた。

表1 東壁の赤外線吸光度分布 (H14.12.10)

高さ	北壁からの距離 (cm)											
	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240
100	0.51	0.51	0.58	0.52	0.76	0.60	0.51	0.42	0.42	0.61	0.61	0.40
80	0.53	0.65	0.65	0.71	0.83	0.60	0.56	0.54	0.46	0.54	0.60	0.56
60	0.71	0.59	0.71	0.65	0.78	0.65	0.52	0.64	0.36	0.64	0.73	0.66
40	0.72	0.78	0.72	0.65	0.82	0.76	0.66	0.61	0.65	0.60	0.46	0.50
20	0.81	0.85	0.73	0.67	0.90	0.78	0.63	0.57	0.39	0.45	0.51	0.51
8	0.80	0.88	0.85	0.73	0.87	0.70	0.76	0.54	0.40	0.67	0.40	0.41

表2に平成14年12月10日に測定された西壁の赤外線吸光度の分布を示す。表2の分布から東壁の中央下部分に、赤外線吸光度の高い部分が見られた。壁面に発生したカビは、この吸光度が高く、含水比の高い部分と対応が見られた。全般的に西壁の含水率は、東壁より低くなっていた。

表2 西壁の赤外線吸光度分布 (H14.12.10)

高さ	北壁からの距離 (cm)											
	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240
100	0.60	0.63	0.63	0.57	0.56	0.46	0.49	0.43	0.56	0.54	0.51	0.44
80	0.65	0.51	0.59	0.65	0.63	0.56	0.57	0.67	0.58	0.53	0.63	0.46
60	0.64	0.54	0.61	0.59	0.60	0.66	0.66	0.64	0.58	0.57	0.53	0.53
40	0.70	0.56	0.69	0.62	0.63	0.71	0.74	0.67	0.58	0.67	0.57	0.53
20	0.73	0.68	0.61	0.67	0.72	0.84	0.77	0.73	0.58	0.57	0.54	0.70
8	0.76	0.74	0.72	0.79	0.72	0.70	0.59	0.75	0.69	0.59	0.54	0.43

表3, 表4には平成15年4月10日に測定された東壁, 西壁の赤外線吸光度の分布を示す。表1, 表2と比べると, 4月10日の東壁, 西壁の赤外線吸光度が全般的に小さくなっているのがわかる。これは, 石室周囲の地盤からの水の浸透量が変化したためと推測された。この周囲地盤中の水分量の変化を測定するために, 墳丘部に水分測定装置を設置した。

表3 東壁の赤外線吸光度分布 (H15.4.10)

高さ	北壁からの距離 (cm)											
	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240
100	0.57	0.56	0.55	0.57	0.72	0.44	0.45	0.40	0.41	0.45	0.58	0.42
80	0.63	0.54	0.64	0.65	0.83	0.60	0.69	0.52	0.48	0.61	0.68	0.63
60	0.65	0.49	0.50	0.69	0.71	0.61	0.57	0.62	0.35	0.58	0.79	0.45
40	0.60	0.62	0.71	0.62	0.75	0.68	0.63	0.53	0.63	0.57	0.45	0.59
20	0.71	0.72	0.58	0.59	0.82	0.71	0.57	0.62	0.35	0.40	0.44	0.49
8	0.72	0.75	0.75	0.59	0.74	0.65	0.67	0.51	0.39	0.47	0.39	0.53

表4 西壁の赤外線吸光度分布 (H15.4.10)

高さ	北壁からの距離 (cm)											
	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240
100	0.63	0.66	0.62	0.58	0.50	0.45	0.46	0.53	0.42	0.39	0.39	0.42
80	0.61	0.48	0.58	0.57	0.47	0.52	0.54	0.54	0.55	0.54	0.63	0.55
60	0.66	0.43	0.53	0.57	0.50	0.60	0.61	0.63	0.49	0.50	0.49	0.44
40	0.59	0.56	0.61	0.52	0.57	0.61	0.63	0.63	0.54	0.61	0.61	0.48
20	0.67	0.53	0.49	0.58	0.57	0.60	0.58	0.58	0.50	0.56	0.54	0.43
8	0.65	0.66	0.64	0.67	0.61	0.61	0.51	0.72	0.64	0.56	0.46	0.33

2 - 3 . 墳丘部の含水率測定

石室周囲の地盤の含水率分布を測定するため、石室から2m東側部分と、2m西側部分に、体積含水率測定装置（Easy AG, Sentek Sensor Technologies）を埋設した。含水率の測定は、それぞれの位置で、20, 60, 100, 140, 190cmの深さの地点で行った。2003年7月から12月までの結果を図6, 図7に示す。

20cmの深さの体積含水率変化は東側、西側（図6, 図7）のいずれにおいても、図8に示した降水量の変化に対応しているのがわかる。また、石室より東側の含水率の変化が西側より大きくなっている。これは、墳丘の石室より東側部分の方が、水の浸透性が良いためと考えられる。これは、石室内部の漆喰壁において東壁の方が西壁より赤外線吸収係数が高く含水率が高くなっていることに対応している。また、2003年9月末より、含水率の変動が小さく、徐々に低下しているのが見られる。これは、墳丘部に、遮水・断熱シートを設置したため、遮水シートにより、墳丘部への水の浸透が有効に止められているのがわかる。

2 - 4 . 墳丘部の地中温度測定

石室周囲の地盤の地温分布を測定するため、墳丘北東平坦部、石室から2m東側部分と、2m西側部分に、熱電対温度センサーを埋設した。地温の測定は、墳丘北東平坦部で、20, 40, 60, 100, 180cmの深さの地点で行った。また石室から2m東側部分と西側部分では、それぞれ20, 100cmの深さで地温を測定した。2003年7月から12月までの結果を図9, 図10, 図11に示す。

墳丘北東平坦部（図9）では、地

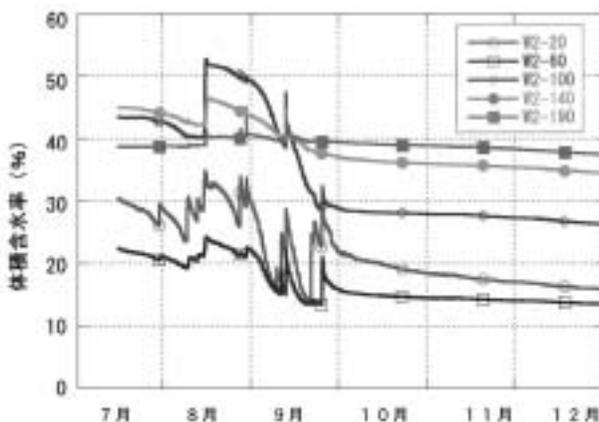


図6 高松塚古墳の石室より2m東側の体積含水率変化

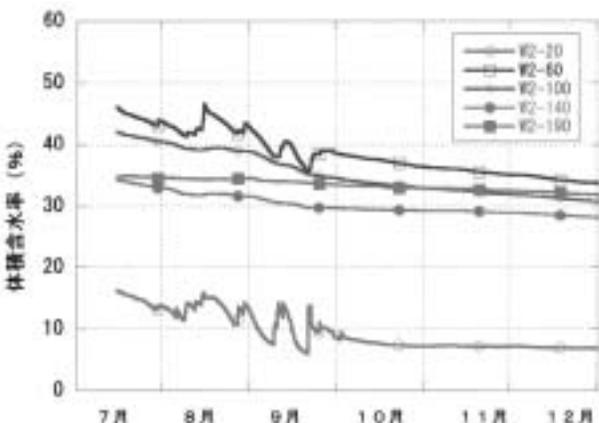


図7 高松塚古墳の石室より2m西側の体積含水率変化

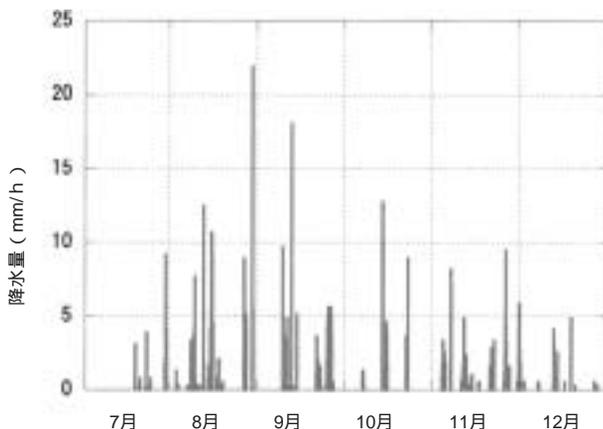


図8 高松塚古墳の7月～12月までの降水量変化

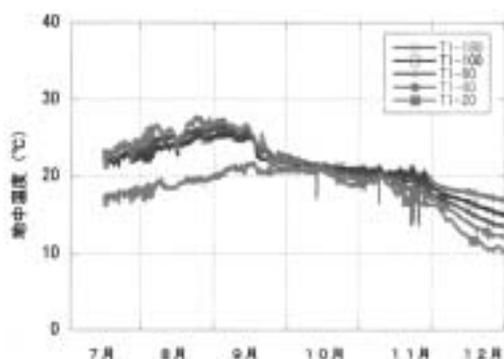


図9 高松塚古墳の墳丘北東平坦部の地中温度

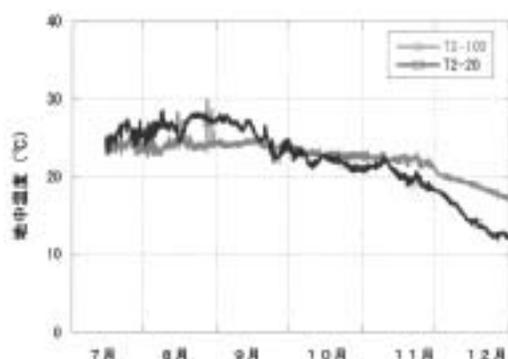


図10 高松塚古墳の石室より2m東側の地中温度

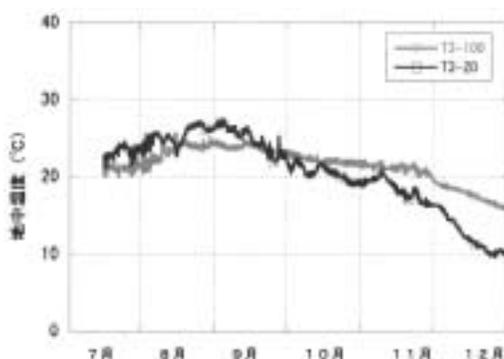


図11 高松塚古墳の石室より2m西側の地中温度

表面から20cmの深さの温度は、8月末に最大値27 になり、12月の末に10 まで下がっているのが分かる。地表面から180cmの深さの温度は、9月中旬に21 に達し、11月末から徐々に低下しているのが見られる。石室より東側2mの場所（図10）と西側2mの場所（図11）では、地表面より深さ20cmの温度は、8月末から9月初めに最大値の27 になり、その後徐々に温度が低下している。また、深さ100cmの温度は、8月末に24 に達し、その後徐々に低下しているのがわかる。

3. まとめ

高松塚古墳において、壁画発見より約30年経過した2001年の秋に石室内部および取り合い部にカビの発生が見られた。このカビの発生の原因を明らかにすることおよび対策方法の検討のために、石室内部の温湿度、石室壁面の含水量、石室周辺地盤の含水率、古墳周辺の降水量、温湿度、風向、風速などの微気象データを測定した。石室内部の温度測定から、2002年の年平均温度が18.0 で、1981年より2.7 高くなっているのがわかった。また、湿度は、年間を通してほぼ100%であった。

石室内部の漆喰部分の含水率を赤外線水分計により測定したところ、東壁の方が西壁より赤外線吸光度が高く含水率が高くなっていることがわかった。また、カビの発生位置と含水率の高い部分との対応が見られた。

墳丘部の含水率分布を測定したところ、石室より東側部分の含水率の変動が大きく、水の浸透性の良いことが分かった。これは、石室内部東壁の含水率の高いことに対応している。また、墳丘部に、遮水・断熱シートを設置した後は、墳丘部内の含水率の変動が小さく、墳丘部への水の浸透が有効に止められていることがわかった。

謝辞

現地調査には、文化庁文化財部美術学芸課 林温氏、小林達朗氏、森田稔氏、東京文化財研究所修復技術部 青木繁夫氏に多大なご協力を頂きました。ここに深く感謝申し上げます。

引用文献

- 1) 三浦定俊：高松塚古墳石室内温湿度と壁画の保存，国宝高松塚古墳壁画 - 保存と修理 - ，刊行文化庁，167 - 178 (1987)
- 2) 木川りか，佐野千絵，三浦定俊：高松塚古墳の微生物調査の歴史と方法，保存科学，43，79 - 86 (2004)
- 3) Miura S. and Saito H. : Temperature and humidity in the tumulus Takamatuzuka , Tokyo National Research Institute of Cultural Properties , - Conservation and Restoration of Mural Paintings (1) , 105 - 115 (1984)

キーワード：古墳 (tumulus); 壁画 (mural painting); カビ (fungi); 生物劣化 (biological damage); 含水率 (water content)

Study of Temperature and Humidity in the Stone Chamber of Takamatsuzuka Tumulus and water content profile in the surrounding mound

Takeshi ISHIZAKI, Chie SANO and Sadatoshi MIURA

We investigated the stone chamber with mural paintings in Takamatsuzuka tumulus (Kofun), which was built from the end of the seventh century to the beginning of the eighth century . Inside the stone chamber , humidity was approximately 100% . Because of this high humidity and high water content of the lime plaster wall , fungi appeared on the surface of the wall . In order to develop protective measures against fungi growth , water regime in the stone chamber and surrounding mound was studied . From observation it was found that the area of fungi growth corresponded well with the area of high water content on the lime plaster wall . It was also clarified that the water content in the mound increased with rain fall . The variation of water content of the deep part in the mound was higher in the east mound and lower in the west mound around the stone chamber . This corresponded to the fact that the east wall had a higher water content than the west wall of the stone chamber .

From these results , it was recommended to reduce water penetration to the mound surrounding the stone chamber . For this purpose as temporary protective measures , impermeable sheet is used to stop the penetration of rain into the mound and a drainage system is constructed around the mound . The detailed inspection of the stone chamber and surrounding mound is carried out continuously for the evaluation of the temporary protective measures .