

国宝高松塚古墳壁画恒久保存対策検討会（第3回）17.5.11 配布資料（資料3）

※文化庁ホームページ(<http://www.bunka.go.jp/>)に掲載しております。

「国宝高松塚古墳壁画」の現状について

【目次】

はじめに	1
1. 生物被害の状況	2
2. 壁面の状況	6
3. 石室の状況	12
4. 墳丘の状況	15
5. 発掘調査の成果	22
6. 周辺の環境とその影響	24
総括	30

【参考資料】

- 参考資料 1 国宝高松塚古墳壁画の状態変化について
- 参考資料 2 高松塚古墳壁画保存状態調査報告の概要
- 参考資料 3 高松塚古墳の微生物調査記録
- 参考資料 4 高松塚古墳点検・生物状況（平成13年～）
- 参考資料 5 国宝高松塚古墳壁画の微生物についての所見
- 参考資料 6 漆喰壁の物理的性質
- 参考資料 7 高松塚古墳の植生の変遷と考える石室への影響に関する考察
- 参考資料 8 高松塚古墳への降水浸透変動予測
- 参考資料 9 高松塚古墳発掘調査の概要
- 参考資料 10 電気探査による高松塚古墳墳丘内の水分分布調査報告
- 参考資料 11 高松塚古墳における30年間の気温変動
- 参考資料 12 高松塚古墳石室の空気漏洩量調査

はじめに

昭和 47 年に発見された高松塚古墳壁画は、慎重な検討の結果、発見当時の環境で保存することが壁画にとって最善の方法であるとされ、以後、その方針に沿って保存対策が進められてきた。しかし、壁画の劣化状況を踏まえ、平成 16 年 8 月 10 日に行われた第 2 回国宝高松塚古墳壁画恒久保存対策検討会において、壁画の保存方針の再検討が必要とする提言がなされた。

本資料は、同提言に基づいてあらゆる保存方針の可能性を検討するために、検討会が必要とする検討資料を作業部会において作成収集したものである。

本報告書の内容は、発見当初からの経緯を含めた生物被害の状況をはじめとして、壁面の状況、石室の状況、墳丘の状況、発掘調査の成果、周辺の環境とその影響に分けて、各項目ごとに説明するものであり、参考資料 1 ～ 12 は、上記各項目の説明の根拠となる各調査資料である。両者はともに、壁面の保存状態、石室内の微生物調査といった石室内部の状況にはじまり、墳丘および周辺環境から気象に至る、石室内から墳丘外部への順に配列されている。各項目の内容は互いに密接に関連し、個別に切り離して考えることのできないものである。

1. 生物被害の状況

はじめに

文化庁がホームページ上ですでに公開している内容も含めて、現在までの高松塚古墳石室内生物被害発生状況と対応の概略について報告する。

(1) 発見当初から修理作業終了まで

約 1300 年以上もの長い期間、地中の安定した環境下にあった壁画は、発掘によって大きな環境の変化を受け、発見当初から石室内ではムカデなど虫類の侵入やカビの発生が見られている。そのため、発見直後の昭和 47 年（1972）4 月 6 日及び 17 日に微生物調査を実施し、調査時に微生物数が増加すること、黒色や緑色を呈する菌が多いこと等が確認された。その対策としてパラホルムアルデヒドをシャーレに入れて石室内に布置し、その時点では効果があった。

しかし、昭和 53 年（1978）頃から石室内に布置したパラホルムアルデヒドが結露水によって溶け、気化しない状況となった。これに呼応するかのようにカビの発生量が増加傾向を示し、昭和 55 年暮れから同 56 年にかけて大量に白色及び灰白色のカビが石室内に発生し、絵画にも及ぶ状況となった。これらカビに対する処置としては、ホルマリン 1：エタノール 9 の溶液で繰り返し滅菌したが、すぐに再発する状況であった。また、TBZ による防黴を実施したが、効果がなかった。昭和 56 年 6 月にはパラホルムアルデヒドを加熱蒸散させて燻蒸する方法を開発し、はじめて石室内で行った。昭和 57 年以降カビの発生は漸減し、昭和 60 年（1985）には大発生は抑圧された。しかし、一連のカビ処置により、漆喰が脆弱化したことによる画面の荒れ、黒線や赤色の薄れが生じ、また、白虎及びその周辺部、玄武周辺にはカビ痕と推定される汚れが残った（参考資料 1）。さらにはカビの菌糸により漆喰層が破壊されるという状況が現出している（「壁面の状況」写真 2－7）。

(2) 定期点検による監視

その後は平成 12 年（2000）春まで 1 年に 1 回、3 月頃に定期点検を行い、その都度、数点のカビコロニーの発見と処置を行っていた。また滅菌綿棒を用いて石室内の決まった場所からサンプリングし、常在菌の状況を監視していた（参考資料 3）。石室内に虫の侵入は続いていた。

(3) 平成 13 年（2001）以降のカビ大発生とその対策

平成 13 年春に取合部天井の崩落止め工事を実施したが、カビ対策が不十分で、その直後からカビが取合部に大発生した（写真 1－1）。取合部を

くりかえし処置し、浮遊菌量が減少していることを確認した後に石室内を点検したが（平成 13 年秋）、すでにカビは石室内に広がり、絵画にも被害が及んだ（写真 1－2）。カビの除去と殺菌にはエタノールを使用し、特にカビが繰り返し発生する余白部分はコートサイド 159 で滅菌した。取合部には防黴剤コートサイド 123 を用いた。これら処置により、この時のカビは一旦沈静化したように見えた（参考資料 1）。この時期、加熱処理、紫外線処理、放射線処理、各種消毒剤の使用、窒素封入や二酸化炭素置換による繁殖抑制、また酸化エチレン等燻蒸剤の使用を検討したが、壁画の材料や技法、また石室の封入状況からこれらの対策は採用できなかった。

平成 14 年秋より再び取合部と石室内に複数種のカビが多量発生し、特に青龍下、東壁女子群像下に黒色の汚れが発生した（写真 1－3）。エタノール噴霧及び湿布並びにパラホルムアルデヒドでの燻蒸にて処置した。これら処置により、この時のカビは一旦沈静化した（参考資料 1、3）。

平成 15 年（2003）3 月より「国宝高松塚古墳壁画緊急保存対策検討会」が開催され、同検討会ではカビ対策について検討を重ね、同年 6 月に検討結果が提言にまとめられた。この中でカビ発生と降水の浸透による水分上昇の可能性が指摘され、この提言を受けて、墳丘部は遮水シートで覆い、また、発掘により墳丘部の状態を確認する計画が立てられた。

（４）現状について

平成 16 年（2004）春からカビが再発生し、石室内の温度上昇とともに、夏にはカビを食するダニの発生も見られるようになった（写真 1－4）（参考資料 3）。このダニは虫類によって石室内に運ばれたものと推定されるが、ダニの死骸からカビが生え（写真 1－5）、カビの胞子をダニが媒介して石室内に撒布し、両者の繁殖が全体的に広がっている。これらの処置には、エタノール湿布並びにパラホルムアルデヒド燻蒸をおこなっているが、現在に至っても増殖速度に処置が追いつかず、被害を抑圧できていない。この状況を放置すると、急速に壁面の劣化が進行するのは必定であり、緊急事態と考え、すみやかに新たな対策をとらなければならない。

まとめ

現在の生物被害状況について、菌類・微生物制御の専門家3名の意見を求めたところ、以下のとおりであった（参考資料5）。

カビ・酵母等の微生物、ダニ等の微小動物による被害（汚染）は極めて深刻な状況にある。カビ発生の要因としては、環境変化が最も大きい要因として考えられる。特に温度の上昇がカビの発生に強く影響している。

石室内にカビが大繁殖した結果、同時に繁殖したダニによるカビの再散布が影響として大であろう。また、発生したカビは、ダニのえさになり、一方、ダニの排泄物や死骸はカビの栄養分となっていると思われる。

微生物被害を防ぐという見地から、現在の現地保存という保存方法を考えると、カビ等微生物、ダニ等の微小動物による被害（汚染）を防ぐことはできない。短期的な保存対策を講じて、長期的に効果を期待できるものではない。

当面のカビ対策として、石室内の壁画の特性から取りうる方法は限られている。脆弱化した漆喰（参考資料6）を考えると、現在の状態で湿度を落すことはできない。当面は、石室内の温度を少なくとも15℃（できれば10℃）以下にし、結露を避けるため温度変動の少ない環境に維持するのが短期的な制御としては効果的と思われる。しかし、この対策はカビの成育を遅らせるだけであって、確実にその被害をくいとめることはできない。酸素濃度の制御は、石室内を完全に密閉できないことから、現状では非現実的である（参考資料12）。薬品処理は短期的な対応としては可能な消毒剤があれば使用の可能性はあるが、長期的な観点から残存した場合の壁画への影響が心配である。

カビはいったん発育しはじめると、その制御は容易ではない。石室内カビ対策が現在最も重要であり、このまま放置するとカビの成育は止まらず、緊急事態と考え早い時期に抜本的な対策を打たねばならない。

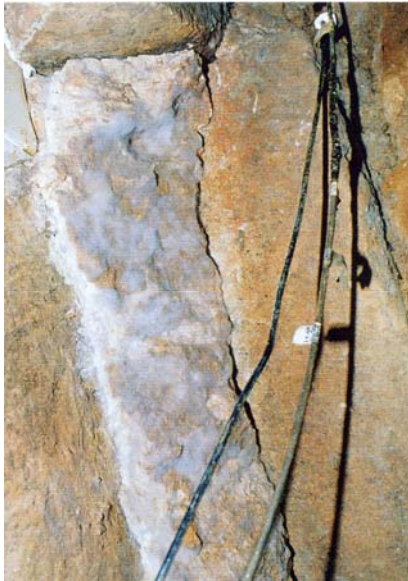


写真 1-1 取合部のカビの発生状況
(平成 13 年 3 月)



写真 1-2 青龍のカビ発生状況
(平成 13 年 12 月)



写真 1-3 青龍の黒色カビ発生状況
(平成 14 年 10 月)

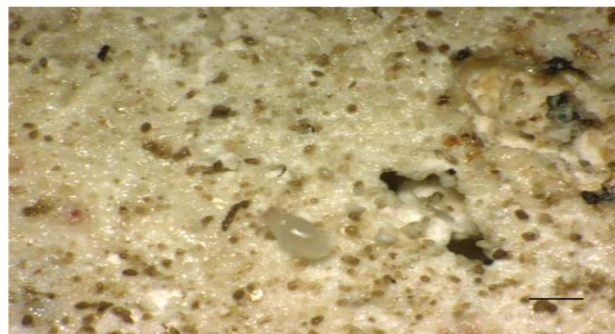


写真 1-4 壁面に見つかったダニ
(平成 16 年 7 月)

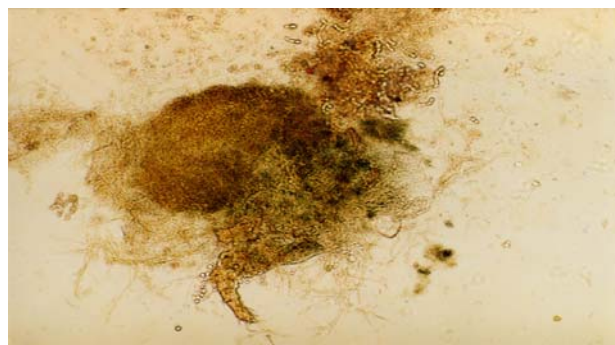


写真 1-5 ダニの死骸から伸びたカビの
菌糸 (平成 16 年 9 月)

2. 壁面の状況

はじめに

現在、高湿度下で保存されている高松塚古墳壁画は、わずかな環境の変化により大きな損傷を受けやすい。

それらの損傷には、温湿度の変化による漆喰の剥離や粉状化、カビ処置による漆喰層の脆弱化、以前の修理に使われた樹脂の影響などが挙げられる。以下に、現在の壁画の保存状態についての詳細を述べる（参考資料2）。

（1）剥離

天井壁では楕円形状に崩落している箇所があり、その周辺に大きな剥離がみとめられる。側壁での剥落は漆喰層に入っている細かな亀裂から5mm～10mmの大きさを剥落が発生し、その集合したものと思われる。また石壁の境目に見られる漆喰層のヒビ割れ箇所や、樹脂の処置がなされた箇所となされていない箇所の境目は、今後剥落の危険性があると考えられる（写真2-1）。

（2）亀裂

石室内漆喰壁全面に不定形に細かな網目状の亀裂が多数見受けられる。そのほとんどが昭和50年（1975）代の樹脂処置により強化され、その状態で漆喰層が固まり、石のように硬くなっている。石壁との接着は不安定である（写真2-2）。

（3）粉状化

表層より漆喰が粉状になり剥離が発生している（写真2-3）。これは進行中であり天井に多数発生していて、それに伴って漆喰層の崩落も生じている。側壁絵画部分においてすでに表面の絵具層が剥落している箇所があるが、現状では絵具が漆喰層から剥離を起こしている様子は見受けられない。しかし、今後、小口から剥離の可能性がある。

（4）漆喰層の中空化（密度が低く巣状になっている状態）

漆喰層は高湿度の中で長時間保存されてきたため内部から多孔質となり、細かな多数の点で接触しているように思われる。目視では健全に見えるが脆弱で、層としての強度はない。また漆喰層内部が表面を支えられずに陥没を起こしているところが、壁面に多数見受けられる（写真2-4、5、6）（参考資料6）。

(5) 以前修理・カビ処置による影響

漆喰層表面に樹脂膜の層があり、光沢がある。また樹脂（アクリル系）が注入された部分では、濡れ色に変色している箇所も認められる（写真2-6）。細かな亀裂のある部分はその状態で漆喰層が硬化している。石壁との接着は不安定である。

またカビ処置のためのエタノール噴霧により、古い樹脂層が白濁しつつ剥離している箇所が見受けられる（写真2-2、4、6）。今後もカビの発生が続くなら、殺菌処置に伴いこのような箇所は増加すると考えられる。

(6) カビによる影響

石室内環境の変化に伴い白色・黒色・緑色等のカビの発生がみとめられていて、これらの着色したカビにより、壁面が汚損されている。また、カビの菌糸により漆喰層が破壊されている様子も確認されている（写真2-7）。このようにカビの菌糸が漆喰の中に入り込んでしまうと、完全に殺菌することはできず、菌糸は長期間にわたって生き残る。また漆喰は菌糸により物理的に破壊されるだけでなく、菌糸の先端部分から出るカビの代謝物のために化学的な劣化も起きることになる。

まとめ

以上、壁面に観察される漆喰の損傷について述べてきた。特に、(3)粉状化、(4)漆喰層の中空化、(5)以前の処置による影響、(6)カビによる影響、については現在進行中であるため、現状の環境で壁画を維持し続けることは非常に困難であると考えられる。



写真 2－1 剥離箇所の一例



写真 2－2 樹脂処置された漆喰層（樹脂の白濁化も見られる）



写真 2－3 天井漆喰表面の粉状化



写真 2－4 漆喰層内部が中空化し、表層を支えられず陥没している
また、中央部に白濁した樹脂が見られる



写真 2－5 漆喰層内部が中空化し、陥没



写真 2－6 漆喰層内部が中空化し、陥没。また樹脂処置部分が濡れ色となっている（青色彩色部分から黄色彩色部分）。さらに、その樹脂の白濁化も見られる（画面右上方）

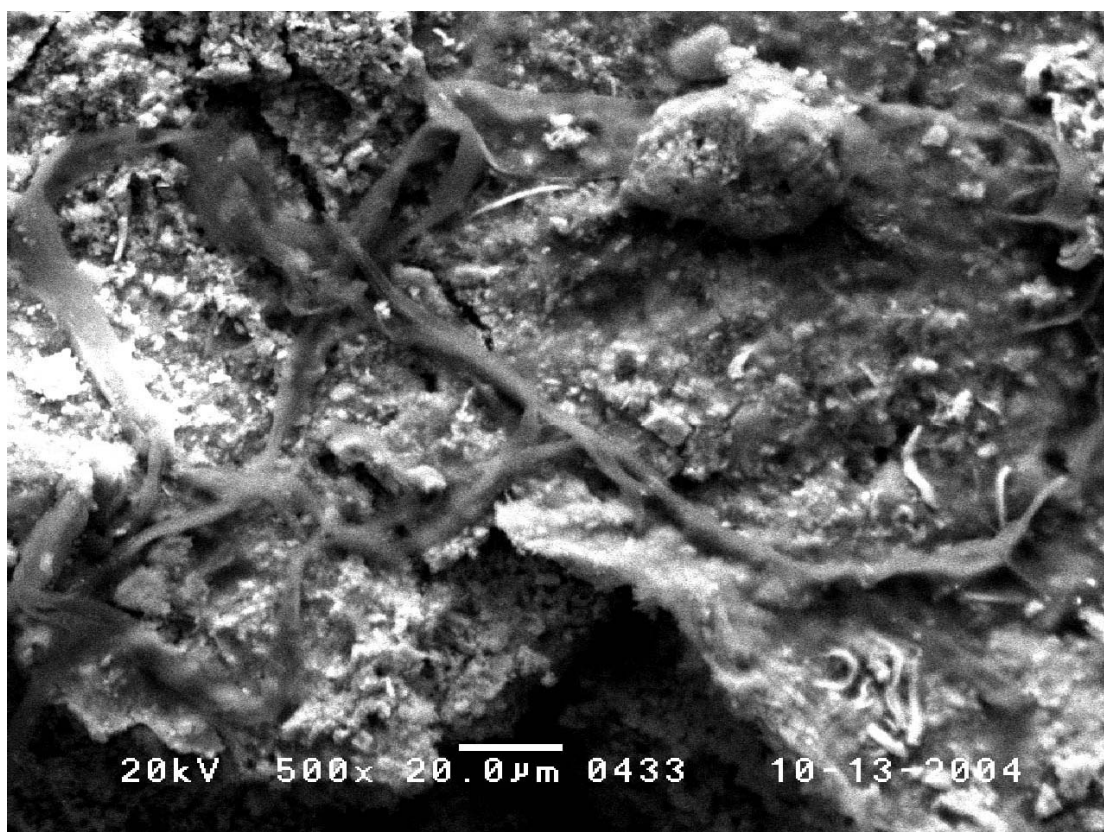


写真 2－7 漆喰表面上に生じた粒状物質（西壁）。カビの菌糸で漆喰が物理的に破壊されている様子がみられる。菌糸は自然界ではこの写真に示されるように、不均一な形で基質（この場合は漆喰）の中に入り込み、漆喰を物理的に傷めるとともに代謝物により化学的にも劣化させる。

3. 石室の状況

はじめに

石室に用いられている石材については、長期間水分を多く含んだ状況にあったため劣化し、強度が低下していると考えられる。また、天井石は、南第1石と南第2石とに南北方向に亀裂がある。石室構造の力学的解析結果から、石室構造単体としても安定しているが、その安定性はきわめて低い。

(1) 石材の性質

高松塚古墳の石室に用いられている石材に関して益富（地学研究 vol21. No. 1-6, 1973）らによる報告がある。大阪府二上山の南方、竹内峠鹿谷寺跡付近に分布する流紋岩質凝灰角礫岩で、構成礫種としては、黒色の溶結凝灰岩、白色のパミス、産出場所によっては白色の流紋岩礫などである。マトリックスは火山ガラスで時に赤色のガーネットを含む。現在では古墳の石棺材、飛鳥から平城地域における寺院・宮殿の基壇化粧石、礎石に大量に使われたことが明らかになっている、平城宮などから発見される水分の多い環境に存在した多くの凝灰岩の強度は、著しく低下しており、構造物としては利用できない状況を呈する。いっぽう、乾燥することによって、水分が失われさらに強度の低下が起こる。劣化の著しいものでは含水比が30%に達することが知られている。推定比重で1.8程度と考えられる。壁体の基質にこの岩石が利用された理由は明らかでないが、この凝灰岩自身は比較的水分の吸収と放出性に優れており、土壁の構造の代わりとしての物理的特性があったのであろう。しかし、長期間にわたる水分の吸収は岩石を膨潤させ、さらに基質のガラスを劣化させ、固着力を低下させたと推定される。健全な凝灰岩に比べてどの程度強度が低下しているかについては、今後詳しい調査が必要である。

(2) 石室の構造

上記石材を切石とし、東西壁各3枚、天井4枚、床3枚、南北壁各1枚を使用し、石室を構築している。石室の内法は、奥行き266cm、幅104cm、高さ113cmで、石材の厚さは、天井南第1石で61cm、南壁石の上部で49cm、下部で45cmである。この南壁の上部東よりは、東西88cm、上下60cmにわたって、盗掘時に大きく打ち砕かれ、現在この部分が、石室への進入口となっている。また天井石の南2枚には、南北方向に亀裂がはいっている（図1）。

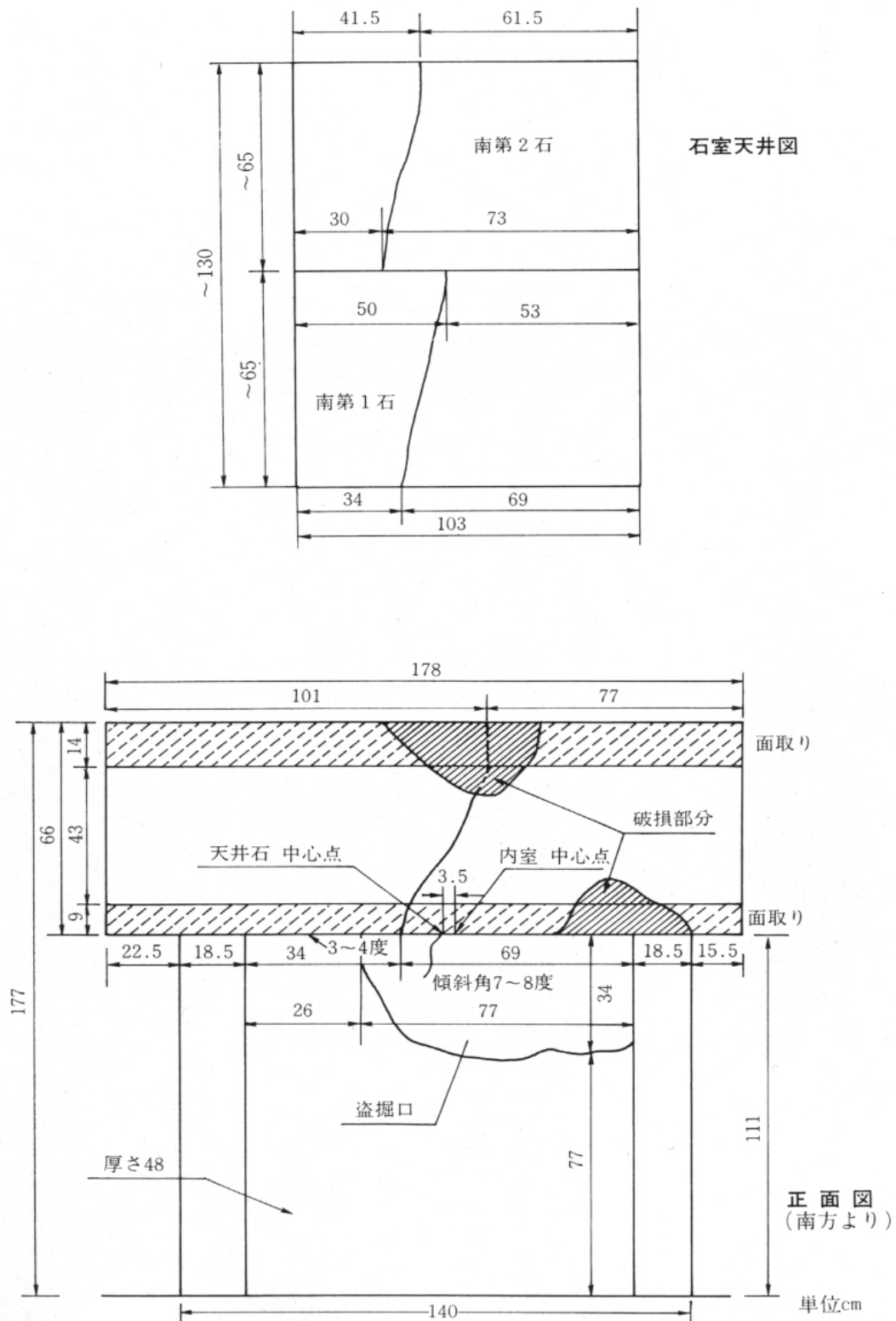
(3) 石室の気密性

石室の気密性を測定するために、石室内をわずかに加圧し、空気の漏洩速度を測定し、開口面積の計算を行った。測定結果から、石室内の隙間の総面積は 600 mm^2 であることが分かった（参考資料12）。

まとめ

石室を構成している凝灰岩は、長い間高い水分条件のもとにあったため、固着力が低下していると考えられるが、健全な凝灰岩に比べてどの程度強度が低下しているかについては、今後詳しい調査が必要である。また、天井石の南2枚には、南北方向に亀裂が入っている。石室の気密性は低く、石室内の隙間の総面積は 600 mm^2 程度であることが分かった。

図1 天井石の状況



参考文献

文化庁：「国宝 高松塚古墳壁画 —保存と修理—」（1987）

4. 墳丘の状況

はじめに

壁画発見より約30年経過した平成13年（2001）の秋に石室内部および取合部にカビの発生が見られた。このカビの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。墳丘部北低部の地温は、平成15年（2003）7月から測定している。また、石室内の温度測定は、昭和54年（1979）3月より、石室内の湿度は、平成13年12月より測定している。墳丘部の状況としては、平成15年9月に墳丘部の竹、木を切った後で、遮水シートを設置し、平成16年（2004）10月に墳丘部上の遮水シートを取り除き、墳丘部の発掘のため覆屋を設置している。高松塚古墳周囲の気象観測装置の写真を写真4に示す。なお、墳丘部の植生の変遷に関しては、参考資料7に詳しくまとめられている。

（1）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 A G, 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。降水量と墳丘部内の体積含水率変化の関係を見るために、平成15年（2003）7月から11月までの結果を図4-1、2に示す。20cmの深さの体積含水率変化は、西側東側いずれにおいても、図4-3に示した降水量の変化に対応しているのが分かる。また、石室より東側部分の含水率の変化が西側部分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、墳丘上面からの水に対する浸透性が良いためと考えられる。また、平成15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、遮水シートを設置したためで、遮水シートにより、墳丘部への上からの雨水の浸透が有効に止められているのが分かる。

また、福田らの墳丘部分の水収支に関する解析によると（参考資料8）、竹林の場合は、地中への雨水の浸透量は、竹林のない地表面の場合より年間1㎡あたり50mmほど小さくなるが、降水量から蒸発量を引いた差の350mm程度の量が墳丘部へ浸透していくこととなる。そのため遮水シートは、雨水の直接の浸透を妨げるので、墳丘への累積水分供給量を考えると竹林より有効であることがわかる。

図4-4、5に、平成15年7月から平成17年1月までの石室より2m東側と2m西側の体積含水率変化を示す。平成16年（2004）4月から体積含水率のゆるやかな上昇が見られる。これは、発掘結果から分かった様

に、墳丘部北側からの水の浸透が原因と考えられ（参考資料 9）、墳丘への水の浸透をなくすには、北側からの水を防ぐ対策も必要であると考えられる。

（２）地温測定

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、180 cmの深さの地点で行った。平成 15 年 7 月から平成 17 年 1 月までの結果を図 4－6 に示す。

墳丘北東平坦部（図 4－6）では、地表面から 20 cmの深さの温度は、平成 15 年 8 月末に最大値 27℃になり、1 月の初めに 8℃まで下がった。平成 16 年（2004）8 月に 30℃まで上がっているが、これは昨年、1 年間の平均気温が高かったためと考えられる。また深い位置ほど変化幅は小さい。平成 16 年の 11 月以降は表土を搬出したので乱れている。

まとめ

高松塚古墳に於いて、壁画発見より約30年経過した平成13年（2001）の秋に石室内部および取合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及び対策方法の検討のために、石室内部の温湿度、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。

墳丘部の含水率分布を測定したところ、遮水シートをかける前は、石室より東側の部分の含水率変動が大きく、上からの水の浸透性の良いことが分かった。遮水シートの設置の後は、体積含水率は安定し減少傾向になった。

平成16年（2004）4月頃からまた、墳丘部の体積含水率のゆるやかな上昇が見られた。これは、発掘調査によって明らかになったように、墳丘北側からの水の浸透によるものと考えられる。墳丘への水の浸透をなくすには、北から浸透してくる水も防ぐことが必要と考えられる。



写真 4 高松塚古墳石室入り口部分に設置した微気象観測装置

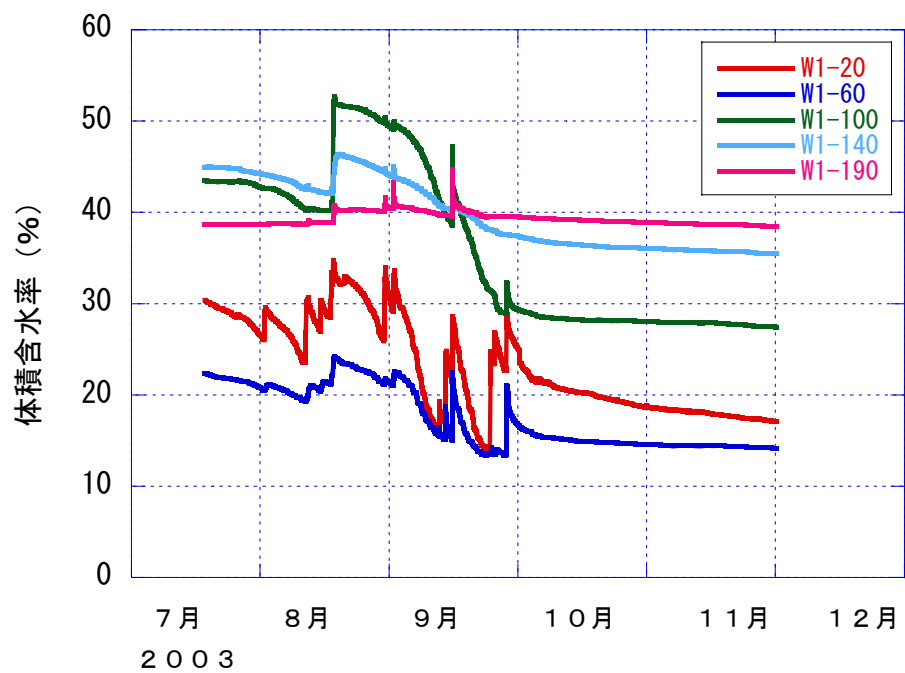


図 4 - 1 石室より 2 m 東側の体積含水率変化 (2003 年 7 月～9 月)

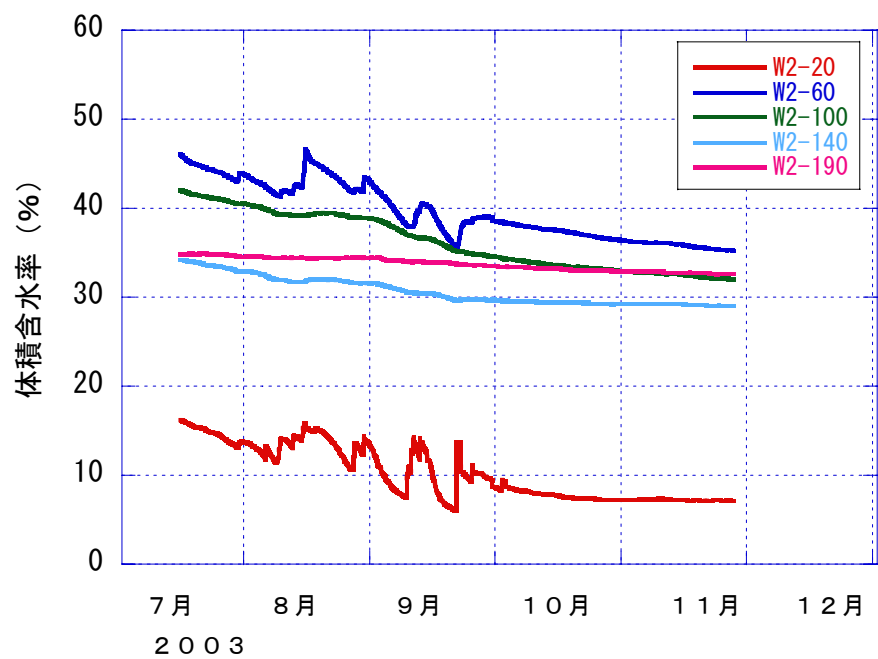


図 4 - 2 石室より 2 m 西側の体積含水率変化 (2003 年 7 月～9 月)

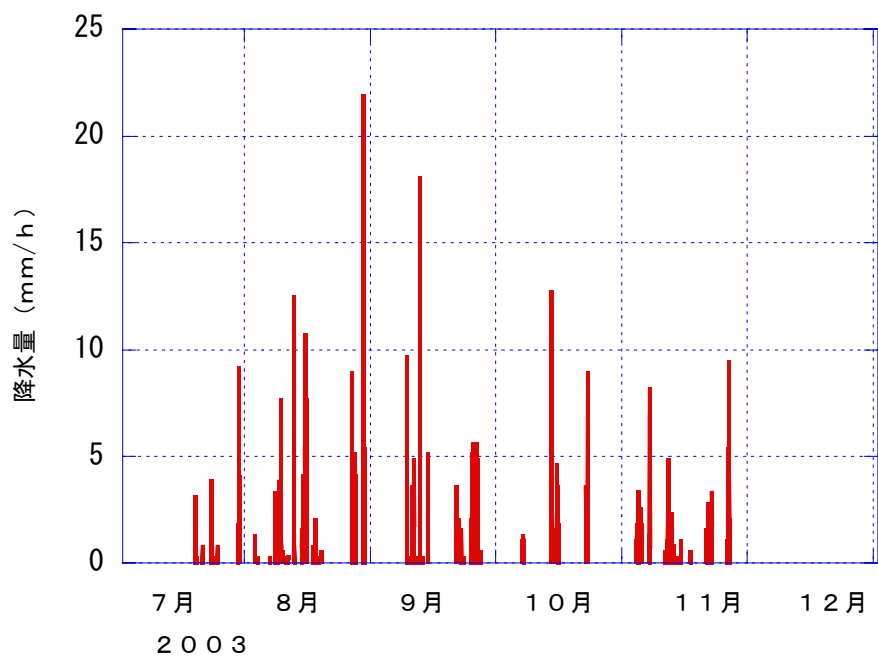


図 4 - 3 降水量変化 (2003 年 7 月～9 月)

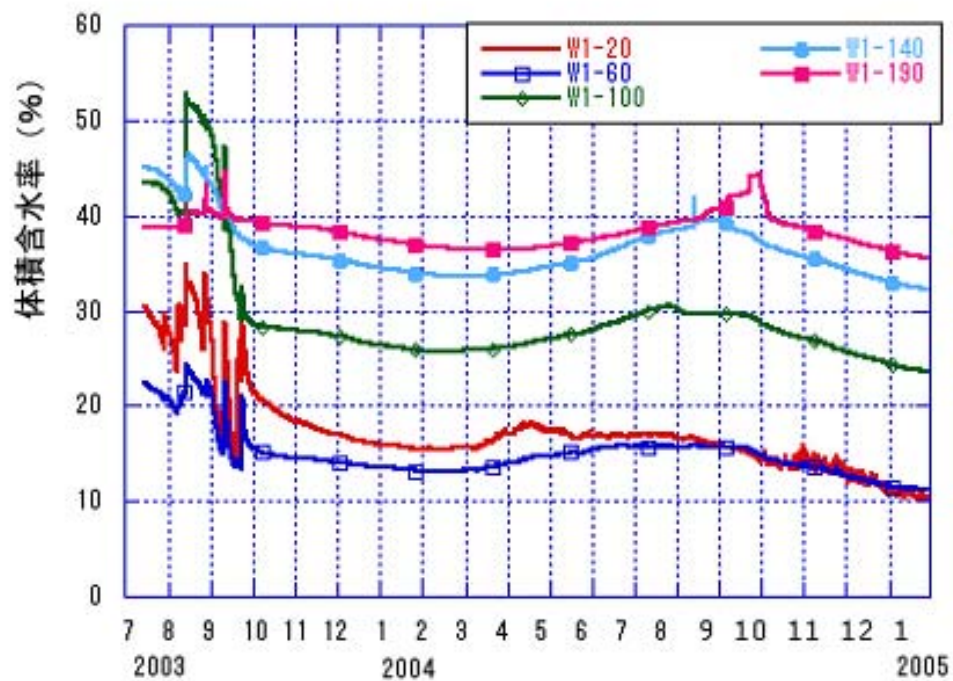


図 4 - 4 石室より 2 m 東側の体積含水率変化 (2003 年 7 月～2005 年 1 月)

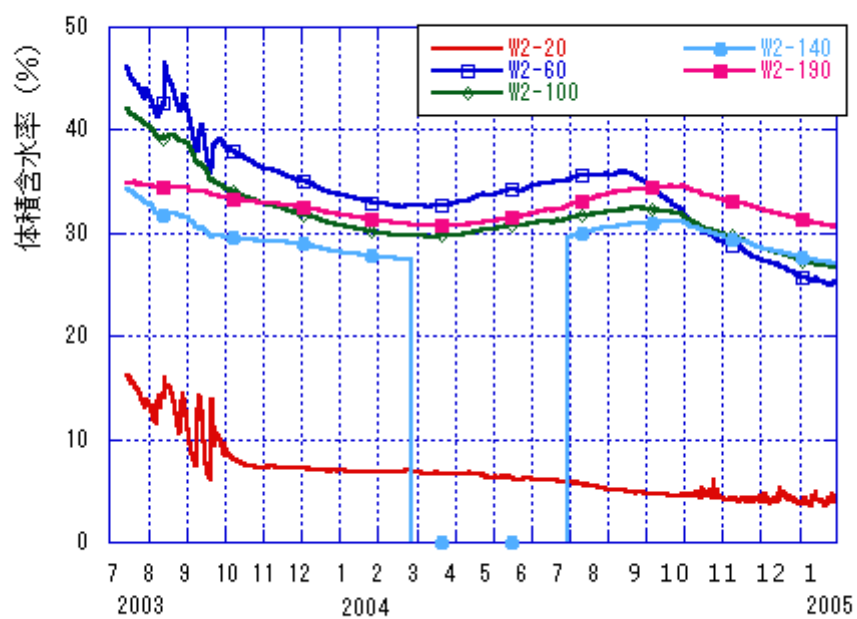


図 4 - 5 石室より 2 m 西側の体積含水率変化 (2003 年 7 月～2005 年 1 月)

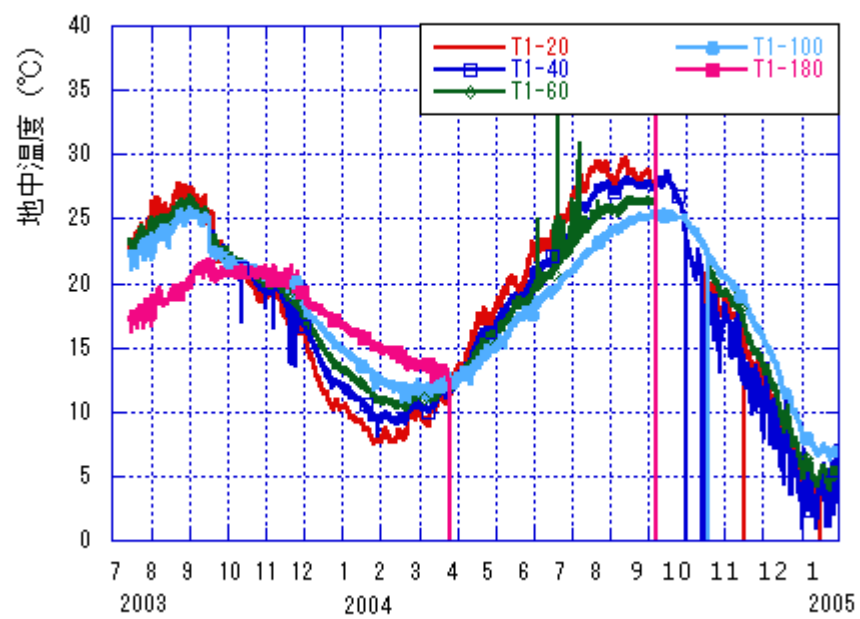


図 4－6 墳丘北東平坦部の地中温度変化（2003 年 7 月～2005 年 1 月）

5. 発掘調査の成果

はじめに

平成16年（2004）10月から平成17年（2005）3月31日にかけて、フェンスに囲まれた史跡指定地内、及び北・東・西に隣接する未指定地の計710㎡を対象に、文化庁の委託を受けた（独）奈良文化財研究所（飛鳥藤原宮跡発掘調査部）が、奈良県立橿原考古学研究所・明日香村教育委員会と共同して発掘調査を実施した。その結果、墳丘の規模や形態をはじめ、古墳の築造方法や壁画の保存環境の一端が明らかになった。発掘調査で得られた成果を要約すると、以下のようになる（参考資料9）。

調査成果

- （1）墳丘裾をめぐる周溝の発見により、従来不確定であった古墳の規模と形態が明らかになった。
古墳は、下段が直径23m、上段が直径18mの二段築成の円墳となる可能性が高い。
- （2）判明した墳丘規模は、昨年、墳形が六角形であることが明らかになったマルコ山古墳の規模（下段の対角長23、6m、上段18m前後）に近い点が注目される。
- （3）墳丘の築造時期は、版築最下層から出土した土器から、藤原宮期（7世紀末～8世紀初頭）の前後と推定される。
- （4）墳丘は、中世以降に周囲を大きく削られており、築造当初の姿を失っている。この墳丘の改変は、出土土器から、12世紀の後半を中心に、13世紀代にかけておこなわれたと推定できる。
- （5）墳頂部にはモチノキの木株が存在し、墳丘内に深く根を張る。また現在は痕跡を確認できないが、江戸時代に高い松の木が存在し、昭和10年代には藤の木が存在した記録が残る（参考資料7）。
- （6）過去の緊急保存対策に伴う調査によって、墳丘北東部の土中水分が他の箇所よりも多く、土壌の含水率が高いことが指摘されてきたが（参考資料10）、今回の発掘調査により、その原因を具体的に解明することができた。墳丘北東部の土中水分の多い理由は、古墳が築造された丘陵地山の土層構造や墳丘裾部の埋没状況、墳丘周囲の削平状況に起因すると推測される。すなわち古墳の背面に、透水性の低い灰白色粘土地山が存在し、この粘土層にそって雨水が南方に流下し、粘土層を切って据えられた石室に水分を供給している可能性が高い。また古墳の東半部は、古墳の周溝が埋没した後に、墳丘の崩壊土や腐植土が1m以上堆積して平坦化し、水はけの悪い環境を生じていた。このため墳丘や北・東方の丘

陵斜面から浸透した雨水が滞留し、版築盛土に浸透する結果となっている。

一方、古墳の西半部は、後世の畑地造成に伴う地下げによって、下段の墳丘封土や粘土層が失われ、削平面に透水性の高い砂礫層が露出する。削平面は石室底石よりも低位にあるため、北の丘陵側から流下した雨水は、版築盛土に浸透することなく、丘陵下に排水されていることが判明した。

- (7) 墳丘封土の断ち割り調査をおこなった結果、版築層に鉛直方向の亀裂が多数存在することが判明した。これは過去に周期的に発生した南海地震の地割れ痕跡とみられ、既往の調査成果と総合すると、地震に伴う亀裂や断層が墳丘の各所に存在する可能性が高い。
- (8) 地震痕跡の亀裂にそって、木竹が根をはる状況が観察されたが、こうした亀裂が雨水の浸透や、石室内への虫の侵入経路となっている恐れがある。

まとめ

発掘調査の結果、従来不確定であった古墳の規模と形態が明らかになり、築造時期は7世紀末から8世紀初頭前後と考えられた。また古墳の北側に透水性の低い灰白色粘土地山があり、この粘土層に沿って雨水が南方に流下し、石室周辺に水分を供給している可能性が高い。特に古墳の東半分は墳丘の崩壊土や流入土が厚く堆積するために水はけが悪く、このために北東部の土中含水率が高い原因となっていると推測される。また墳丘封土の版築層には、古い地震動によって生じたと思われる亀裂が多数あり、そこに木根が入り込んでいる様子が観察された。このような亀裂は墳丘内部にも多数存在している可能性が高く、石室の安定性や壁画の保存環境に影響を与えていると考えられる。

6. 周辺の環境とその影響

はじめに

高松塚古墳は昭和 47 年（1972）の発掘以降、公園整備などにより周辺の環境が変化しているが、ここでは壁画の保存に影響があると考えられる気象を中心に検討する（参考資料 1 1）。

（1）外気温の変化

高松塚古墳に最も近い地点で長期間の観測記録があるのは奈良地方気象台である。図 6－1 に奈良地方気象台で測定した昭和 47 年からの外気温の年平均値を示す。これを見ると 1970 年代から 1980 年代頃までは、外気温の年平均値は 14 度台に収まっているが、1980 年後半頃から年ごとの細かな変動はあるものの、全体として見ると平均して 1 度ほどの外気温上昇が見られる。

この温度上昇が何によっているか調べるために、日本の他の地点と比較した。外気温の平均値は各地点によって異なるので、温度の変化だけを調べるため長期間の平年値と各年の平均値の差（平年差）を比較することが行われる。奈良と日本の年平均気温の平年差の経年変化を比べたものが図 6－2 である。ここに示した日本の年平均値は、地球温暖化などの地球全体の気候変動が日本にどのように現れているか調べるために、地理的な分布も考慮しながら都市化の影響が小さい 17 地点を選んで、気象庁が算出しているものである。

奈良における気温の平年差は日本全体の平年差の動きと良く一致していて、北半球全体の動きもほぼ同じである。このことから 1980 年代後半から外気温が 1 度上昇した理由は、地域的なものではなく地球全体の気温変化（図 6－3）に関係しているであろうと推定できる。

（2）降水量の変化

奈良地方気象台における昭和 47 年以降の降水量の変化を見ると、年降水量は特に増加していないが、雨の降り方が変わって一日あたりまとまった雨が降る（日降水量が 10 mm 以上）日数が、平成 2 年（1990）以降、一年に 50 日をしばしば超えるようになっている（図 6－4）。

（3）高松塚古墳石室内の変化

昭和 47 年に発見された高松塚古墳壁画には、昭和 49 年（1974）から昭和 50 年（1975）にかけて石室前に前室（前室 A、B および準備室）とその地下に空調用の機械室がある保存施設が建設された。保存施設の空調設備は前室のみを空調して石室内は直接空調しないシステムとなっている。また空

調設備は、取合部の土中温度と等しくなるように温水（冷水）を前室の天井・壁・床面に張り巡らした銅管パネルに常時流す「パネル系」と、保存施設内に人が立ち入るときにのみ高湿度の空気を前室に送り込む「空調系」の二つの系からなっている（図 6－5）。

高松塚古墳ではカビによる被害が問題となっているが、カビの生育は年間を平均した温度より、もっとも温度の高い時期の気温が重要であるので、ここでは年間でもっとも気温が高くなる月（11月ないし12月）の気温についてみていく。

図 6－6 に、石室内気温が最も高くなった月の気温を、昭和 53 年（1978）から平成 16 年（2004）まで示した。なお図 6－6 には、先に示した奈良の外気温もあわせて示し、長期的な変化を見やすくするために 5 年ごとの移動平均を太い線で示した。

昭和 48 年（1973）の気温の高い月の温度は約 17 度であった。1980 年代の半ばまでは、もっとも温度の高い月でも 17 度台に収まっている。このように石室内気温が低かったこともあって、発掘後から修復処置中の昭和 54 年（1979）～昭和 60 年（1985）頃に発生したカビについては、その発生を抑えることができたと考えられる。

1980 年代後半から石室内の温度が上がっている。これははじめに述べたように外気温の上昇によるものと考えられ、類似の気温上昇がフランスのラスコー洞窟でも観測されていて、そのことが近年のカビの発生に関係しているのではないかと疑われている。高松塚古墳でも平成 12 年（2000）頃になるともっとも気温の高い月の温度が 19 度を超え、カビが発育しやすい環境となって、取合部に発生したカビが急激に広がったと考えられる。

平成 13 年（2001）にカビが発生してからは殺菌処置のために頻繁に石室に入室しなければならず、そのことがまた石室内の温度を上昇させている様子が図 6－6 から読みとることができ、生物被害の項目で指摘されているように、このことが新たなカビの拡大を招く結果となっている。平成 15 年（2003）は冷夏だったため、カビの発生はいったん収まったかに見えたが、平成 16 年（2004）は年平均値が平年値を 1℃以上上回る暑い年であったために、再びカビの発生がひどくなった。さらにこの年の夏にはダニが壁面に見つかり、ダニがカビを食べて繁殖し、動き回ってカビをあちこちに拡げ、ダニの死骸がまたカビのえさになるという状態になっていることが明らかになり、加速度的に生物による被害が広がっていくことが懸念されている（参考資料 3）。

まとめ

高松塚古墳周辺の環境とその影響について、これまでの高松塚古墳の温度記録を下に考察すると、次のようなことが考えられた。

- (1) 外気温の上昇の影響を受けて、平成 13 年（2001）までに石室内気温は図 6－6 のように上昇し、このことが平成 13 年のカビの発生に大きく関与していたと考えられる。
- (2) 平成 13 年の取合部におけるカビの発生以降は、カビ処理や点検のために石室内へ頻繁に立ち入りしなければならず、そのための温度上昇が新たなカビの生育につながっていると考えられる。

地球温暖化予測によれば、100 年後の地球の平均気温は 4.0℃上昇し、日本の夏の日平均気温は 4.2℃、日最高気温は 4.4℃、降水量は 19%増加すると予想されているので、周辺環境が石室内部に与える影響はさらに厳しくなると考えられ、現状での高松塚古墳壁画の保存はきわめて難しくなっている。

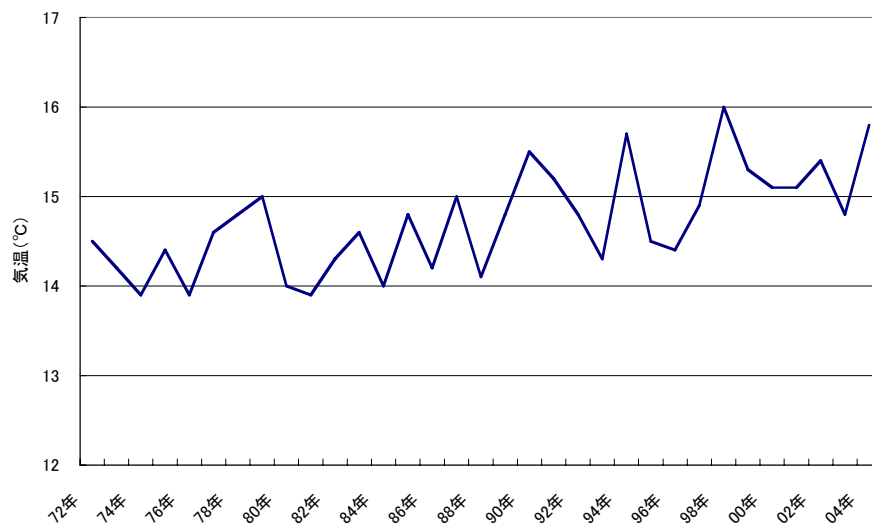


図 6 - 1 奈良における年平均気温の経年変化（1972 年～2004 年）

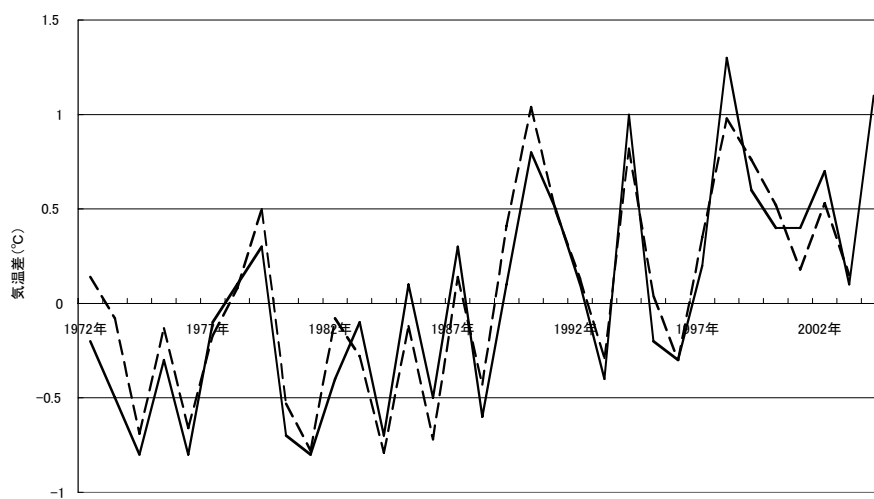


図 6 - 2 気温の平年差の経年変化（奈良、日本）

実線：奈良（1972 年から 2003 年までの 32 年間の平均値を平年値とした平年差）

破線：日本（1971 年～2000 年間の 30 年間の平均値を平年値とした平年差）

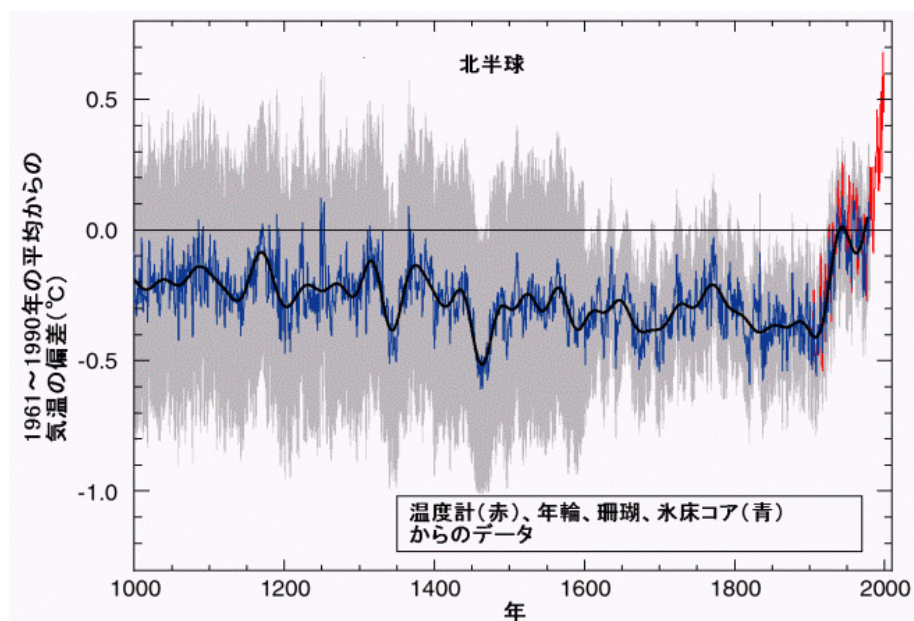


図 6 - 3 北半球における過去 1000 年間の年平均気温の経年変化（地球温暖化）
（IPPC 第三次報告書より）

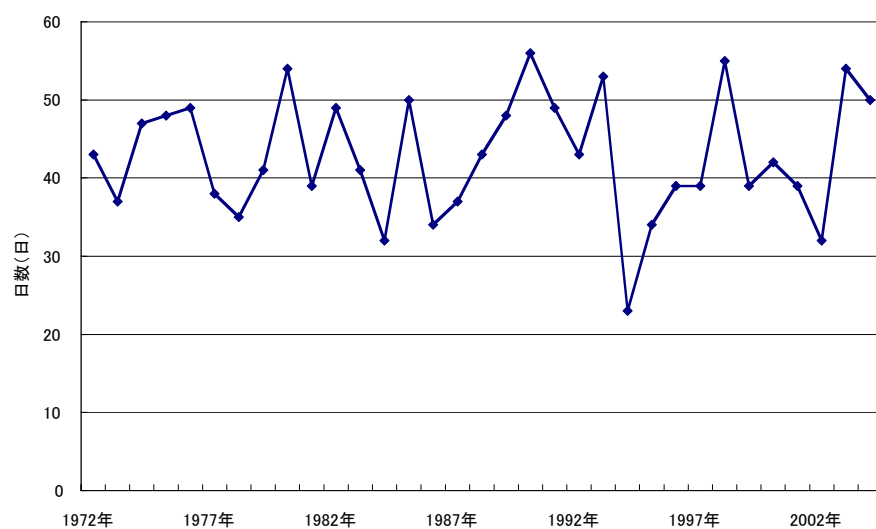


図 6 - 4 奈良における日降水量が 10mm 以上の日数（各年ごと）

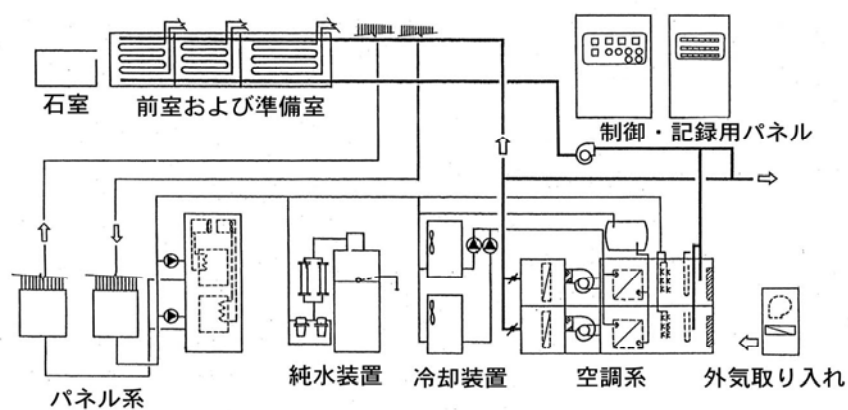


図 6 - 5 高松塚古墳の空調設備

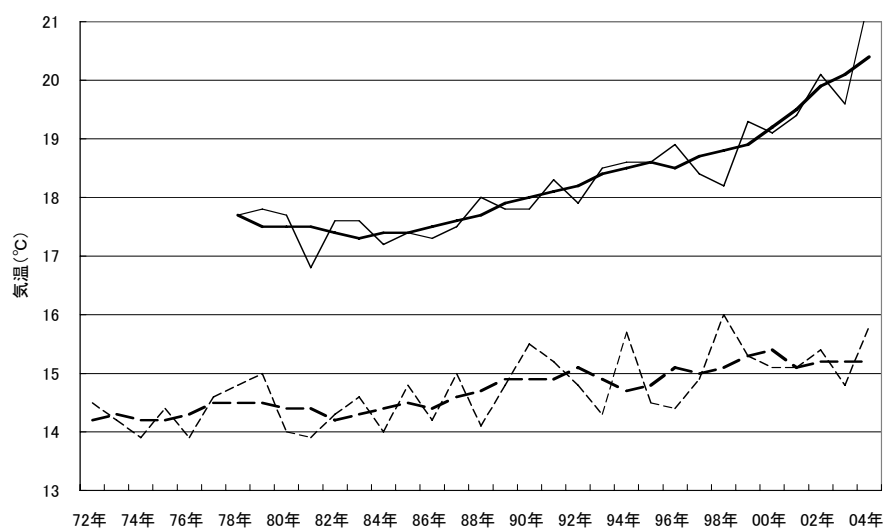


図 6 - 6 高松塚古墳石室内における最高月気温の経年変化

実線：石室内における最高月平均気温（細線）とその 5 年移動平均（太線）

破線：奈良地方気象台における年平均気温（細線）とその 5 年移動平均（太線）

総括

土中には数多くの種類の微生物が存在して、環境条件が変わったり、栄養分が与えられたりすると、それが引き金となって目に見える形でカビが発生する。約 1,300 年間にわたって地中にあった高松塚古墳は、安定した環境の石室内で微妙な平衡が保たれて壁画が保存されてきたと考えられる。昭和 47 年（1972）に壁画が見つかり入口が開封され、外気が流入し、中に人が立ち入るなどの環境変化を受けて、発見後から石室内の落下菌数が増加した。発見当時の調査は落下菌調査等のみであったため、現在の状況と詳しく比較することはできないが、同じ漆喰壁画を持つキトラ古墳で、発掘直後から石室手前の土にカビが多く発生して、開封後の環境変化が壁画に与える影響の大きさを示している。

高松塚古墳壁画の漆喰は発見された当時から、既に水のために成分が流出していて健全な漆喰に比べて比重がかなり小さく、粗くて水を含み表面にカビが生えやすい状態であった。いったんカビが生えたと、カビの菌糸は漆喰の中に喰い込んで、漆喰を破壊する。殺菌処置をしても、脆弱になった漆喰からは付着したカビを完全に除去できないために、後に残ったカビの痕跡が新しい栄養分となる。この繰り返しの中で、発見当初から劣化していた漆喰はさらに汚損され、表面が荒れていったと考えられる。昭和 50 年代までに描線が不鮮明になった箇所は、この様な漆喰表面の劣化に関係しているのではないかと推定される。「壁面の状況」で述べたように、現在、漆喰には剥離や網目状に亀裂、粉状化、漆喰層の中空化などが多数見受けられ、このままの環境で壁画を維持し続けることは困難である。

殺菌処置を行って、その時点で発生したカビを殺すことはできても、温度、水分、酸素、栄養等の要素がそろえば、またすぐに新たなカビが発生する。昭和の終わりから平成 12 年（2000）頃までは顕著なカビの発生が見られず比較的安定した時期であったが、昭和 50 年代に発生したカビの滓が残った壁面は当初より傷んだ状態になっていて、実はきわめて微妙なバランスの中でカビ被害が起きずに先年まで壁画が保存されてきたと考えられる。

高松塚の保存施設は空調設備を備えているが、壁面に風を当てると壁面が傷む危険があったので、石室を直接空調してはいない。石室周囲の土中温度に等しくなるように、単に前室の温度を制御しているだけである。周囲の墳丘土の温度を強制的に下げるようには設計されていないので、もし石室周囲の土中温度が上昇してしまうと石室の気温も上がる。しかし発見当時から比べると奈良では、図 6-6 に示すような気温上昇があり、石室の気温はその影響を受けて上昇した。

一方、石室周辺には墳丘上面からの雨水だけでなく、背面からの水も流れ込んでいる。すなわち古墳の北側から、透水性の低い粘土層にそって雨水が流れ落ちて、粘土層を切って据えられた石室に水分を供給している。また古墳の東

半部は水はけが悪いために、墳丘や周囲から浸透した雨水が滞留し、版築盛土に浸透して含水率が高くなっていると考えられる。

このような中、外気温の上昇による石室内気温の上昇が主な原因となり、平成 12 年（2000）頃には、石室内にカビが大変生育しやすい環境が作られていたと考えられる。平成 13 年（2001）春に起きた石室入口部分（取合部）でのカビの大量発生をきっかけに、気温の高い時期に石室内で黒褐色のカビなど壁面を著しく汚損するものが発生するようになり、平成 13 年以降は、殺菌処置のために石室内へ入室すると、作業に伴う発熱のためにさらに温度が上昇して、新たなカビが繁殖するという悪循環に陥っている。

発生したカビに対する処置として、エタノールやホルムアルデヒドが用いられてきたが、この方法は土壤中に含まれる広い種類のカビやバクテリアに対する効力や作業者の健康への影響等を考慮すると、現在でも最善の方法であると考えられる。しかしカビ処置のためのエタノール噴霧により、昭和 50 年代（1975～85）に処置をした古い樹脂層（アクリル系樹脂）が、白濁したり剥離したりしている箇所が認められるようになった。エタノールの噴霧は避けたいが、殺菌方法としてエタノールを中心にした処置をとらざるをえない現在の状況では、できるだけ少量の噴霧にとどめるしかなく、この面から見ても壁画の保存は困難になっている。

また平成 14 年（2002）頃から石室内に、多数の生きたムカデ、アリ、ワラジムシ等が発見され（参考資料 4）、薬剤を用いたり、隙間をふさぐ目止めを行うことなどによりある程度阻止することはできた。しかし天井石の継ぎ目などでは漆喰層がまたがっている箇所もあり、壁画を傷めずに隙間をすべてふさぐことは不可能で、虫の侵入を完全に抑えることはできていない。

特に平成 16 年（2004）秋以降は、虫によって石室内に運ばれたと推定される、カビを食べるダニが壁面に数多く発見された。現在では、ダニが動いてカビを壁面にまき散らし、死んだダニの死骸がまたカビのえさとなる生物的な連鎖が生じて、生物被害が一層拡大する緊急事態となっている。外気温は引き続き上昇すると予測されているので、石室内の気温もさらに上がって、カビや虫による汚損は今後一層激しくなると考えられる。

また今回の発掘調査による重要な知見として、過去に起きた大規模地震で古墳の墳丘が大きな損傷を受けていることが明らかになった。今後起きるであろう大規模地震への対策も急務であり、高松塚古墳壁画の保存はきわめて難しい問題を抱え、現状を打開できる保存対策が早急に必要とされている。