

高松塚古墳壁画劣化原因調査検討報告書（素案）

<目次>

1. 物の劣化に関する基本的な理解について・・・・・・・・・・・・・・・・	1
(1) 基本的な考え方	
(2) 高松塚古墳壁画の場合	
2. 現地保存を決定した経緯・・・・・・・・・・・・・・・・	2
(1) 現地保存方針決定への経過	
(2) 現地保存方針の決定	
3. 高松塚古墳壁画の技法・材料・・・・・・・・・・・・・・・・	4
(1) 絵画技法の調査	
(2) 漆喰の調査	
(3) 顔料・描線等の調査	
4. 高松塚古墳の劣化・ 損傷 の具体的な内容について・・・・・・・・	10
(1) 漆喰層・石材の劣化	
(2) 壁画（顔料・描線等）の劣化	
(3) 壁画の損傷	
5. 高松塚古墳壁画発見時の状況について・・・・・・・・	14
6. 温湿度等の環境変動について・・・・・・・・	22
(1) 高松塚古墳石室内の温湿度について	
(2) 石室の温湿度解析モデルを使用したシミュレーション結果について	
(3) 石室内の温湿度と壁面の劣化との関係	

7. 地震等の石室への影響について・・・・・・・・・・・・・・・・	27
(1) 平成 16 年度発掘調査の主な調査成果	
(2) 平成 18・19 年度発掘調査の主な調査成果	
8. カビ等の微生物被害について・・・・・・・・・・・・・・・・	30
(1) 基本的な考え方	
(2) 微生物等の被害について	
(3) 殺菌処置と薬剤	
(4) 点検と人の出入り	
(5) 微生物の漆喰、絵画への影響	
(6) 平成 16 年石室壁面で発生した黒い汚れと対応	
(7) 6 ダニや虫などの小動物、植物などの根	
(8) 7 石室内の微生物の由来	
9. 保存管理上の諸問題について・・・・・・・・・・・・・・・・	36
(1) 旧保存施設による制御	
(2) 石室内の人の出入りの状況	
(3) 漆喰の強化に用いた接着剤による影響	
壁画の修理（剥落止め）について	
(4) 取合部天井の崩落止め工事	
(5) 壁画の損傷事故	
(6) 壁画の劣化に関する諸要因に係る当時のチェック体制	
10. まとめ・・・・・・・・・・・・・・・・	52
11. 今後の課題	
(参考) 国内外の（古墳）壁画の状況について	
(1) 国内の装飾古墳の保存管理について	
(2) 海外の壁画の保存管理について	

1. 物の劣化に関する基本的な理解について

- (1) 基本的な考え方
- (2) 高松塚古墳の場合

2. 現地保存を決定した経緯

各種記録から知られる現地保存方針の決定の経緯は以下の通りである（特に重要な記述に下線を付した）。壁画発見直後から現地保存を前提として多角的な調査・議論が行われたことが理解できる。

（1）現地保存方針決定への経緯

昭和 47 年 4 月 5 日～6 日 第 1 回 高松塚古墳応急保存対策調査会
（座長・関野克東京国立文化財研究所長）

昭和 47 年 7 月 19 日 第 4 回 高松塚古墳応急保存対策調査会

『高松塚古墳応急保存対策調査会 中間報告』提出

「高松塚古墳は、これまでの保存科学調査からすれば、墳丘、石室等の諸条件が、壁画の保存にとって、きわめて好適なものであったといえることができる。したがって、種々の保存科学上の調査研究が完了し、恒久保存対策が確立されるまでの間は、必要最少限の応急的保存処置を実施するほか、できうるかぎり原状を保持し、古墳の内外の環境諸条件の変化を避けるべきである。（以下略）」

昭和 47 年 10 月 13 日 高松塚古墳総合学術調査会による現地調査（9 月 30 日～10 月 10 日）終了後の Y.M.フロウドボー氏と J.フォション氏（いずれもフランス人専門家）のコメント

「この壁画は諸作業の振動で剥落し破壊される危険が多分にある。したがって、何よりもまず壁画をはずして必要作業の完成まで収蔵しておくべきであろう。再び取り付けるには、必ず前設備の殺菌後でなければならない。」

『国宝高松塚古墳壁画―保存と修理―』（以下、『保存と修理』より（P45）

昭和 47 年 11 月 29 日 第 6 回 高松塚古墳応急保存対策調査会

『高松塚古墳応急保存対策調査会調査報告』提出 閉会

「高松塚古墳の保存では、壁画の保存を第一義としなければならない。このためには、石室環境の安定化を計り、壁画の検査を可能にする施設等を設ける必要がある。（中略）壁画の保存のために必要な環境の安定を確保し、その保存状況の検査を可能にする

ためには、保存施設として、少なくとも2室から成る前室を石室の前方に設けることを要する。この施設は、できうるかぎり、既発掘トレンチを利用し、入口以外は外見されないよう、墳丘内あるいは周辺の地下に設置されなければならないだろう。』『保存と修理』より（P42）

昭和47年12月18日 第1回 高松塚古墳保存対策調査会

（会長・関野克東京国立文化財研究所長）

「壁画の保存状況、史跡としての現状変更等の観点からみて、現地で保存していくことを原則とした。その上で、今後の保存対策を講じてゆく過程で問題点を整理してゆくことにした。』『保存と修理』より（P46）

*この調査会の中には、保存施設部会・壁画修復部会が設けられた。

（2）現地保存方針の決定

昭和48年10月14日 第4回壁画修復部会

P. モーラ氏（イタリア人専門家）から調査報告と保存方針について見解を聴収した後検討に入り、次のような結論を得た。

- （1）壁画は歴史上・芸術上・保存上の観点から、現地保存とする。
- （2）保存施設工事前に緊急必要な部分の応急補強処置を行う。
- （3）保存施設工事完了後に、本格的修復作業を行う。
- （4）応急補強処置と本格的修復は同一方法によって行う。
- （5）修復作業に際して、必要な箇所のクリーニングを行う。
- （6）壁画を良好に保存するための温湿度、炭酸ガスに対する適切な対策を講じる。
- （7）壁画修復のための合成樹脂の使用及びクリーニングは、濃度等に十分留意する。
- （8）彩色部分部の資料採集は行わない。

3. 高松塚古墳壁画の技法・材料

高松塚古墳壁画の技法・材料に関する調査は主に以下の五つの機会に実施された。

- ①壁画発見時の発掘調査及びその報告書作成の過程で橿原考古学研究所により実施された調査（昭和 47 年。以下、「昭和 47 年の橿研調査」と記す。）
- ②文化庁が設置した高松塚古墳総合学術調査会による調査（昭和 47 年。以下、「昭和 47 年の文化庁調査」と記す。）。
- ③総合学術調査会の委員であった秋山光和氏等により、総合学術調査を補完する目的で実施された双眼実体顕微鏡等による調査（昭和 51 年。以下、「昭和 51 年の調査」と記す。）。
- ④壁画発見 30 年を契機に実施された文化庁及び東京文化財研究所による調査（平成 14 年・15 年。以下、「平成 14 年・15 年の調査」と記す。）。
- ⑤高松塚古墳石室解体作業後の修理施設における調査（平成 19 年～現在。以下、「平成 19 年以降の調査」と記す。）。

（1）絵画技法の調査

高松塚古墳壁画における絵画技法の調査は、主に「昭和 47 年の文化庁調査」、「昭和 51 年の調査」、「平成 14 年・15 年の調査」で実施され、「平成 19 年以降の調査」でも随時調査が実施されている。

ここでは、各調査の具体的な内容について逐年的に概観する（各調査内容については、各報告書及び文化庁『高松塚古墳壁画－保存と修理－』（昭和 62 年、第一法規）を参照した。）

絵画技法の調査として最も規模の大きいものが「昭和 47 年の文化庁調査」である。これは、この調査の要項にあるとおり「壁画の筆法、彩色技法、図様及び服飾、持物などの細部の美術史的・工芸史的調査、星辰等の科学史的調査並びに顔料等の自然科学的調査を行う」ことを目的としたもので、これに基づき、昭和 47 年 8 月 21 日に開催された第 1 回総合学術調査会において壁画調査の具体的内容が定められた。すなわち（1）現状記録（壁画の内容・構図・形式・技法・彩色）（2）比較考証（壁画の内容・構図・形式・技法・彩色）（3）許容される判断（筆者数、粉本の有無、影響関係の度合い、制作年代の幅、服制等より見た身分等の判断）（4）必要とされる科学調査等（赤外線写真、顕微鏡写真、顔料の分析）、の四項目について調査することとされた。

また、具体的な調査手順については、壁画保存の観点から『高松塚古墳応急保存対策調査会 中間報告』に基づくものとされた。

実際の調査は、昭和 47 年 10 月 1 日から 6 日（2 日は実施せず）にかけて各委員により分担して行われた。4 日には、大韓民国及び朝鮮民主主義人民共和国からの招請学者による調査が実施された。また、8 日から 9 日にかけて赤外線写真を含む写真撮影が行われた。

調査成果については、各委員の専門的立場からの所見を加え、数次の会議によって報告書案を総合的に検討した上で、壁画を中心とする客観的な記録と赤外線写真を含む原色図版から成る『高松塚古墳壁画』として昭和 48 年刊行され、同書に「高松塚古墳壁画調査報告書」が収載された。

この報告書によれば、絵画技法に関する「昭和 47 年の文化庁調査」の成果として、目視及び赤外線写真等により壁画図様の細部が明確となったこと、壁画が、「淡墨線による下描き→彩色→濃墨線による描き起こし」という手順で制作されていること、各画面の技法の比較から画家が複数であること等が判明したことがあげられる。この中で白虎の現状について「現在、残っている肉線の淡墨線は下描き線と見られ、描き起しの濃墨線は肉身を表わす白色顔料とともに大部分は剥落したと見られ」（同報告書 18 頁）と報告されていることは、白虎が発見当初より壁画の他の部分より淡い色調を呈していたことを示唆する。

発見以降の壁画の劣化を鑑みる時、この調査によって、発見時における壁画の絵画技法に関する細部にわたる客観的な作品記述が残された意義はきわめて大きいといえる。また、客観的な壁画の観察に立脚し、壁画の内容や絵画史上における位置付けを行ったことは、被葬者論をも含めた、これ以降の高松塚古墳壁画に関する研究の出発点となったものと言える。

「昭和 51 年の調査」は、「昭和 47 年の文化庁調査」において、壁画保存のための時間上の制約から部分的な実施となった双眼実体顕微鏡による調査、顕微鏡写真撮影を補完するため、高松塚古墳保存施設の竣工を待って行われたものである。この調査成果によって「昭和 47 年の文化庁調査」の時点では留保された諸点のいくつかが明確になった。具体的には、淡墨による下描線が壁画全体に存在することが判明したこと、人物群像における赤色による肉身の隈取りの方法、さらには、西壁男子群像において下絵を転写した際に付着したと思われる赤色顔料の存在などが報告されたことがあり、壁画の制作過程がより明確となった。

また、「昭和 47 年の文化庁調査」によって下描き線のみが残存するとされた白虎について、「昭和 51 年の調査」の時点では、確認できる他より若干薄い墨線が最終的な仕上げの線であるとの見解が訂正された。すなわち、白虎においては、壁画制作時に他の壁画とは異なる仕上げがなされていた可能性がある。

「昭和 47 年の文化庁調査」と「昭和 51 年の調査」の意義としては、学術的な成果とともに、壁画に保存処置が加えられる前に発見当初の表現技法を正確に判定し記録しておくことが出来たことが大きく、その後の保存対策の中で何を如何に残すべきかという方向を示すものとなった¹。

「平成 14 年・15 年の調査」は、壁画発見 30 年を期して、「昭和 47 年の文化庁調査」「昭和 51 年の調査」以降の光学機器の進展などを受け、改めて壁画に関する非破壊、光学的調査を行ったものである。その成果として、絵画技法に関しては人物群像の赤色や黄色に染料が、また青龍等の青色にラピスラズリが用いられている可能性が指摘された。また壁画の全面に及んで鉛系の白色顔料の存在が指摘されたことも壁画の下地作りの方法を知る上で重要な知見であった²。

「平成 19 年以降の調査」は、国宝高松塚古墳壁画仮設修理施設で壁画を平置きした状態での目視による調査により、壁画の輪郭線に部分的に線状のくぼみや赤色の顔料が確認されたものである。これについては、「昭和 51 年の調査」においても部分的な指摘がなされているが、これにより「昭和 47 年の文化庁調査」によって判明した壁画の作画工程に先行して、あらかじめ用意された下絵を壁面に転写する工程のあったことが確認された³。

あわせて、平成 19 年の石室解体時における石室床面の詳細な調査により、壁画制作時に付着したと見られる多数の絵の具の痕跡が見出されたことも壁画の制作過程を知る上で重要なことと言える。

（２）漆喰の科学調査

壁画発見直後に実施された漆喰下地の科学調査は、「昭和 47 年の檀考研調査」と「昭和 47 年の文化庁調査」の二つの機会に実施された。漆喰の炭酸カルシウム（ CaCO_3 ）の純度は 89.0～96.3%で、その他にマグネシウム（Mg）が 0.21～0.44%、鉛（Pb）が 0.16～0.37%程度含まれていること（これら以外の元素の含有には言及されていない）が報告されている。また、漆喰の表層には、再結晶した炭酸カルシウムの薄い層が形成されていることが報告され、画面の保存とも関係す

るのではないかと指摘された。

「平成 14 年・15 年の調査」では、携帯型蛍光 X 線分析装置を用いた測定が行われ、壁面の各所から鉛 (Pb) が検出された。なかでも図像のある部分の鉛は、図像のない部分より強い反応を示したことが報告された。

「平成 19 年以降の調査」では、旧嶋倉試料（壁画発見当初、奈良教育大学嶋倉巳三郎教授が奈良県立橿原考古学研究所の依頼により下地漆喰の調査が実施されたが、その残り試料が近年奈良教育大学金原正明准教授より提供された。）を用いてサンプリング調査を行った。この調査では、実体顕微鏡下や偏光顕微鏡下の漆喰断面の観察を行い、表層に炭酸カルシウムが不均一ではあるが、薄く形成していることが明らかになった。また、「スサ」⁴が腐朽・消失してできたと思われる虫食い状の空隙が形成されている部分が多く見られた。これは、漆喰が剥落・陥没する大きな原因であると考えられる。

また、携帯型蛍光 X 線分析装置を用いた壁画表面の面的な鉛の分布を明らかにすることを目的とした調査も行われた。壁画面を 5cm 又は 10cm 間隔で測定を行い、さらに必要とする箇所を追加しながら分析を行った。測定点数は石材ごとに 249～335 点である。この結果、鉛は検出量の差はあるものの壁面全体から検出され、特に図像近傍においては検出量が多いことが分かった。さらに、先の旧嶋倉試料のサンプリング調査によって、漆喰層全体に鉛が分布していることが明らかになったため、壁面作成時に、漆喰に微量の鉛を含む物質をあらかじめ混入し、漆喰表面全体に鉛を含む下地層を塗布した可能性が考えられる。

（3）顔料・描線等の科学調査

壁画発見直後に実施された顔料・描線等の科学調査は、「昭和 47 年の橿考研調査」と「昭和 47 年の文化庁調査」の二つの機会に実施された。

「昭和 47 年の橿考研調査」では、発掘土壌中に含まれていた 3～4mm² の薄片、数試料を用いて材料調査が行われ、ペーパークロマトグラフィーを用いた化学分析の結果、顔料物質が推定された。赤色試料から鉄 (Fe)、水銀 (Hg)、Pb、茶褐色試料から Fe、Pb、黄色部分から Fe、緑・青色部分から銅 (Cu) をそれぞれ検出された。

「昭和 47 年の文化庁調査」では、分析試料、分析方法とも不明ではあるが、赤色（濃赤色）は朱、赤褐色はベンガラ、淡紅色（淡赤紫色、

白肉色)は朱と白色顔料の混合物、黄色(淡黄色)は黄土、緑色(淡緑色)は岩緑青、青色(淡青色)は岩群青、白色は不明、黒色は墨、この他に金箔、銀箔が用いられているとされた。金箔の金(Au)中には銀(Ag)が2.2%、Cuが0.02%含まれるとされた。

「平成14年・15年の調査」では、携帯型蛍光X線分析装置と高精度デジタルカラー撮影等による調査が行われた。この両手法から得られた情報は、以下の通りである。

・白色部分

すべての測定箇所からカルシウム(Ca)とともにPbが検出された。絵が描かれている部分だけでなく、その周囲の白色の壁面からも少量ながらPbが検出された。絵が描かれている部分のPbの検出量は、用いられている彩色材料の種類や厚みの違いによってまちまちであったが、絵が描かれていない部分については、絵からの距離に応じて検出量が変化し、ある距離以上離れても少量ながらほぼ一定のPb検出量が得られた。用いた携帯型蛍光X線分析装置のPb検出下限が0.1%前後なので、ここで検出されたPb量は昭和48年の報告書で得られた値よりずっと大きいと考えられる。

・赤色部分

女子群像の唇、帯、裳、西壁白虎の爪や舌、東壁青龍の首や背鰭(せびれ)、天井の星座連結線などからHgが検出された。しかし女子群像の赤色上衣からはHgは一切検出されず、可視光励起⁵による蛍光反応が得られた。西壁・東壁の女子群像および男子群像の中の緑色上衣像には、いずれも赤色の帯が描かれているが同じように、女子像の赤色帯からはHgが多く検出されたのに対し、男子像の赤色帯からはHgはまったく検出されなかった。

これまでベンガラの赤色と考えられていた、男子像が肩に担いでいるやや茶色がかった赤色の長袋部分などについて蛍光X線分析を行ったが、顕著なFeを検出することはできず、ベンガラが使われているとは考えにくいとの結果が得られた。

・黄色部分

西壁・東壁女子群像の黄色上衣からは、他の部分と同程度のCa、Pbの他に、わずかな量のFeが検出されただけであった。この部分でも可視光励起で軽微な蛍光が見られた。

・緑色、青色部分

上衣、裳などの緑色、青色のいずれの箇所からも大量のCuが検出された。また緑色や青色箇所の蛍光撮影を行うと、そのほとんど

の箇所から明瞭な蛍光反応が得られた。緑青や群青のような無機鉱物だけが存在しているのであれば、このような蛍光を発することはないので、銅を主成分とする緑色あるいは青色の絵具の上に、可視光励起によって蛍光を発する何らかの物質が存在していると考えられた。

- ・金色、銀色部分

東壁日像、天井星宿の星などで Au が検出された。西壁月像では Ag が検出された。

- ・黒色部分

髪や描線などの黒色は近赤外線撮影で黒く撮影されたので、近赤外線を吸収する材料（例えば墨）で描かれていると考えられた。

また、「平成 19 年以降の調査」においても、顔料や描線等の調査を実施している（後述）。

4. 高松塚古墳の劣化の具体的な内容について

(1) 漆喰層・石材の劣化

○漆喰層の劣化

高湿度下で保存されてきた壁画は、わずかな環境の変化が大きな劣化につながると考えられる。これらの劣化には、温湿度の変化による漆喰の剥離や粉状化のみならず、カビ処置の影響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も大きな要因となっている。平成 16 年 6 月、昭和 50 年代に行った剥落止め修理から約 30 年を経過したため、合成樹脂の接着力の持続性の確認、新たな剥落の進行の調査などを目的として、壁画の調査が行われた。その結果は以下の通りである。

・剥離

天井では楕円形状に崩落している箇所があり、その周辺は、めくれあがったような漆喰の剥離がみとめられた。側壁での剥落は漆喰層に入っている細かな亀裂から 5 mm～10 mm の大きさで剥落が発生し、それらが拡大することで漆喰層の崩落が起こったと思われる。

・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た。そのほとんどが昭和 50 年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た。石壁との接着は不安定であった。

・粉状化

表層より漆喰が粉状になり剥離が発生していた。これは進行性のものであり天井に多数発生しており、それに伴って漆喰層の崩落も生じていた。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ったが、ほぼ安定化していた。

・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、細かな多数の点で石材に接触しているような状態と考えられる。目視では健全に見えるが脆弱で、層としての強度はなかった。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た。

・過去の修理・カビ処置による影響

漆喰層表面に樹脂膜の層があり、光沢があった。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

た。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た。石材との接着は不安定であった。またカビ処置のためのエタノールを噴霧した箇所には、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。

・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認められ、これらの有色のカビにより、壁面が汚損されていた。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た。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。

○石材の劣化

高松塚古墳の石室に用いられている石材は、大阪府と奈良県の県境に所在する二上山の南方から産出された凝灰岩である。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。古墳の石室石材に用いられた凝灰岩は、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。

(2) 壁画（顔料・描線等）の劣化

壁画発見後、調査のたびに記録のため壁画の細部写真が撮影されており、その比較等から壁画の劣化を検討した。その結果は以下の通りである。

①黒線（墨線）の薄れ

西壁白虎における黒線は発見直後から淡い色調であったが(P5参照)、特に耳に注目して変化を追うと、昭和51年の写真では明瞭に識別できる。しかし、昭和55年12月撮影の写真では耳の形は確認できるものの既に薄れており、昭和56年6月の写真では耳の形状はさらに曖昧となっている。昭和58年以降は写真を比較する限り、線の薄れは微細である(図1、2)。

また、西壁男子(左端)の衣裾の描線は、昭和47年の写真でも既に薄れが進行している。以後漸次薄れが進行していることが、昭和62年

及び平成 14 年の写真の比較により認められる（図 3）。東壁青龍は、昭和 51 年から昭和 53 年までの写真は残っていないが、昭和 54 年 12 月の写真では、2 本ある角のうち、左側の角について根元が薄くなっており、昭和 57 年 10 月の写真ではさらに薄れている。なお、左前肢の一部の黒線は平成 13 年 12 月のカビ処置の結果、薄れたものである（図 5-1、5-2、6）。

以上のことから、黒線は昭和 54 年までに漸次薄れつつあったと考えられ、昭和 56 年から 57 年までに薄れが増したと推測される。その後は、急激な薄れは認められない。なお、西壁の女子群像における黒線の薄れは微細なものであり、変化の時期を特定できない（図 4）。

②赤色の薄れ

西壁白虎の口、特に舌や歯茎部分の赤色に薄れが認められる。昭和 55 年の写真でも薄れつつあることがわかるが、昭和 56 年以降徐々に薄れが進行したものと思われる（図 1、2）。東壁青龍の首や尾のヒレの一部に赤色の薄れがある。昭和 54 年の写真で既に認められる（図 5-1、5-2、6）。天井星宿の赤線が、昭和 59 年の写真を見ると既にこの時には薄れが進んでいることが推測される（図 7）。

③壁画表面の汚れと荒れ

西壁白虎周辺の漆喰表面が、昭和 55 年の写真では、昭和 50 年の写真に見えるような平滑さを失いつつあるように見え、昭和 56 年以降、漸次表面の粗鬆化が進行していることが写真の比較によって推定できる（図 1、2）また、東壁青龍の首から前肢及び東壁右端の女子右下辺にかかる汚れは、平成 13 年 12 月に発生したカビによるものである（図 6、8-2）。同壁女子（右側の 2 像）の頭頂部（髻）は、昭和 47 年の写真に比べて昭和 60 年 12 月の写真では輪郭がぼやけている（図 8-1）。北壁玄武の下半分の輪郭周辺の壁面が汚れているが、これは昭和 62 年の写真でも確認できる。後肢の踵の汚れは平成 13 年 12 月のカビ痕である（図 9）。

④漆喰の剥落

西壁女子（右から 2 人目）青色裳の正面上端部分の欠損は、平成 13 年 12 月から翌 14 年 1 月 28 日の間に生じたことが、写真の比較によってわかる。この間、点検を 1 月 7 日から 9 日と 1 月 27 日から 29 日の 2 回実施しているが、剥落は認識できず、剥落片も採集されていない

(図 10)。

また、東壁女子(左から2人目)左衿部の欠損は、昭和50年5月と昭和62年1月の写真を比較すると、この間に拡大したことがわかる(図11)。同女子右肩下の赤色部分は、昭和50年5月の写真では既に欠失している。したがって、本格的な壁画修理を開始する以前に生じた剥落である(図11)。同壁男子群像下方の余白部分については、昭和47年9月30日及び10月1日に崩落が確認されている(『国宝高松塚古墳壁画―保存と修理―』(昭和62年刊行)P35参照)。同壁青龍の舌の半ば辺り、輪郭に沿って荒れがあり、これは平成13年12月のカビ処置の際に生じたものである(図6)。

さらに、劣化原因調査では、壁画表面の状態を観察するためにデジタルカメラを用いた近接撮影を行った。これらの画像から西壁白虎などにおいては、描線や彩色部における色材の消失が著しいことが明らかとなった。また彩色された箇所が多くで乳白色物質が覆っていることが判明し、本来鮮やかであるはずの彩色がくすんで見える現象の一つの原因であることがわかった。この物質は電子線マイクロアナライザ等によって、新たなカルサイト層が壁画表面に形成されたことが明らかとなった。一方で、カルサイト層が形成されていない、言い換えれば色材が最表面に表れている箇所では剥落箇所が多いこともわかった。これは、カルサイト層が結果的には彩色層を現在まで保護する役目をしていたともいえる。蛍光X線分析では、壁画面を構成する漆喰には鉛が含まれ、画像近傍では特に高い値が示されたが、描線の薄れが確認されている白虎の背中周辺等ではその傾向が弱くなっていることも明らかとなった。

5. 高松塚古墳壁画発見時の状況について

高松塚古墳壁画発見時の状況については、発見以降の各種報告書の記載から、概要としては、以下のようなことが判る。

①昭和47年7月の『高松塚古墳応急保存対策調査会中間報告』によれば、「東西両壁では、南に高く、北側に低く、楔形に、損傷と汚染が生じている。とくに顕著なところでは、酒粕状に石灰層が剥離している」等の記載がある。

②昭和48年3月の「高松塚古墳壁画調査報告書」によれば、「天井と側壁の切石の接合部分の一部から下辺にかけて鉄分を含んだ水の滲出による赤褐色の汚染があり、このため東西両壁の男子群像および青龍の一部が著しく不鮮明となっている」等の記載がある。

③昭和52年5月の『国宝・高松塚古墳壁画修理報告書（中間報告）』によれば、「漆喰層の表層が浮き上り、表層と共に剥落する恐れのある部分がある」等の記載がある。

以下、これらの記述を具体的に確認することとする。

①昭和47年7月『高松塚古墳応急保存対策調査会中間報告』（抜粋）

Ⅱ. 調査の結果

C 石室壁画面について

(i) 現 状 石室内は、凝灰岩切石の表面に、厚さ2～7mmの石灰層（いわゆる漆喰）が形成されている。その表面は、もともと平滑であったと思われるが、それに薄い顔料層から成る彩画がある。

壁画の保存状況は、南の盗掘口から流入した土砂の影響を受けた部位が悪い。とくに、南壁は、ほとんど石灰層がすべて剥離している。

東西両壁では、南に高く、北側に低く、楔形に、損傷と汚染が生じている。とくに顕著なところでは、酒粕状に石灰層が剥離している。また、天井の星宿の金箔のうちには、落下寸前のものが数か所あった。

切石の目地のところでは、石灰層に亀裂がある。天井の切石目地からは、その時期は不明だが、流水があったらしく、その部位から下へ東西両壁面の一部に、赤褐色の汚染が見られた。

壁面の石灰層は、もとは強固であったらしい。それは、盗掘時に固い刃物様のもので掻き取った痕跡から推測できる。

しかし、長年月の間に、地下水が石灰層に供給され、その可溶成分が流出し、あるいは石材にしみこみ、あるいは壁面上を流れ、そのため、石灰層は、漸次粗鬆となり、脆弱化したと思われる。一部には、石材面から剥離し、ふくらんだところが、その後陥没しているのが、観察されたところもある。

現状の観察からすると、壁画の保存の問題は、彩画層の粉化、彩画層の石灰層からの剥落、石灰層の粗鬆脆弱化、石灰層の石材面からの剥落、以上の4点にまとめることができる。

(ii) 石灰層について 壁面に塗られた石灰、いわゆる漆喰について、橿原考古学研究所から試料の提供を受け、定量分析をおこなった。分析に際しては、試料を100℃で乾燥後、塩酸に溶かし、不溶解物を除去し、カルシウムとマグネシウムを定量した。その結果は表1の通りである。(表は省略)

この結果によると、石室壁面にあるいわゆる漆喰は、純度の高い炭酸カルシウムであると判定できる。

また、石灰層には、砂やスサの混入も認められなかった。

昭和47年11月『高松塚古墳応急保存対策調査会調査報告』(抜粋)

II. 第2回現地調査報告

B 調査結果

3 壁画の保存状況

壁画の保存状況については、調査の全期間を通じて観察し、その状況を写真に記入した。保存状況は、一般に、剥離、亀裂、脆弱化、剥脱、微小欠損、機械的損傷、汚損に分類できる。

剥離個所は、ふくれあがっており、天井で見られるものでは、その中央が離脱欠損しているものがあつた。

細かい亀裂は広く点在しており、老化が進んだ部分は全体に脆弱化し、やがて剥脱する運命にある。さらに数mm程度の微小欠損は全体にみられ、また鉄分を含む流水の赤色痕跡が東西壁で顕著に見られた。

壁面の保存状況をより詳細に調査するために、拡大写真を撮影したが、その際、炭酸ガスによる石灰面上の再結晶の現象が確認された。保存状況調査のためには、総合学術調査の際に撮影された絵画部分の拡大写真の分析も今後必要である。

9月30日の開口当初に剥離落下していた部分は、東壁南第1石の向かって左下にあたり、今春の調査の際にすでに酒粕状になって剥落す

前であったところであって、10月1日に剥離落下した部分もそれに南接するところであった。落下した石灰層の裏面は、切石表面との間に植物の根部が網状に存在していた状態を示しており、これが石灰層の切石面からの剥離の一つの大きな原因であることを考えせしめた。

壁画の保存状況の危険性については、フランスの2名の専門家も指摘しており、上空を飛行するヘリコプターの振動すらも共鳴によって剥脱を誘発することがありうると語っていた。なお、フランス人専門家によって、壁画がフレスコ技法によると思われるとの所見が述べられ、今後の保存法の検討に注意が与えられた。

②昭和48年3月 高松塚古墳総合学術調査会『高松塚古墳壁画』 「高松塚古墳壁画調査報告書」(抜粋)

二 壁画概要

ここで壁画の損傷状況について概略を述べておく。

まず壁面は切石の接合部分で漆喰層に亀裂を生ずるほか、西壁上部などにはこれに起因する漆喰層の剥落がある。また天井と側壁の切石の接合部分の一部から下辺にかけて鉄分を含んだ水の滲出による赤褐色の汚染があり、このため東西両壁の男子群像および青竜の一部が著しく不鮮明になっている。

南壁の盗掘孔から流れ込んだ土砂は床面に対して約二〇度の傾斜で北壁の近くまで達し、これが原因で土砂に埋れていた部分の漆喰層は著しく汚染と粗鬆化を来し、かなり広範囲に剥落する。東西両壁男子群像の下辺はこれが原因で著しく不鮮明になっている。

その他、画面の剥落の著しい個所は、東壁女子群像の頭部および腹部、西壁男子群像の一部、青竜の尾部周辺、日輪の下辺などに見られる。このうち東壁女子群像の腹部の剥落は、盗掘時のものと思われる擦傷に起因しており、そのためと思われる金箔の付着が明瞭に認められる。また類似の擦傷は青竜の上部、白虎の下部、西壁男子群像の下辺にもみられる。

この外、玄武の中心部には意識的に搔き落したとみられる切石に及ぶ搔き傷状の打痕があるほか、日輪、月輪の中心部にも金箔や銀箔を意識的に搔き取った形跡が認められる。なお、壁面の各所にこれらに起因すると思われる金箔の小断片の付着がある。

最後に切石の損傷について一言すれば、天井の南寄りの二枚の切石

は、そのほぼ中央部に亀裂があり、また西壁の南寄り第一、二の切石の境目にも亀裂が入っている。

③昭和 52 年 5 月 『国宝・高松塚古墳壁画修理報告書（中間報告）』
（文化庁）（抜粋）

高松塚古墳壁画の修理について

I 壁画の構造と損傷の状況

高松塚古墳壁画は凝灰岩の切石を組み、内壁に消石灰を塗り（以下漆喰と呼ぶことにする）、顔料で、東西の側壁に男女各一組ずつの群像と青竜、白虎を、北の壁に玄武を各々描き、天井に星宿を表している。漆喰の塗り方は丁寧であり、特に絵を描いている部位は入念に施工している。壁画が今日まで保たれた大きな技術的要因である。しかし、現在では表面的には損傷も少なく比較的健全と見られる部分でも漆喰層の中層部が弱くなっていると見られるところが多い。以下は外見上の損傷を中心に記述するが、損傷の実態は複合的であり、修理施工にあたってはそれ等の損傷を壁画の上記の構造的な変化や損傷と併せ、総合的に把握する必要がある。

1 顔料層の状況

過去における顔料の剥落や、表面を水が流れて顔料を洗い流してしまったような痕跡が認められるが、現在では比較的安定した状態である。ただし、漆喰層の表層が浮き上り、表層と共に剥落する恐れのある部分がある。

2 漆喰層の損傷の諸態

a 漆喰層の剥離

漆喰層は天井壁、側壁と天井壁との接合部、側壁底辺部を中心に数多くの大きな面積の剥脱があり石面が露出しているが、その開口部の周辺では漆喰層が盛り上ったようになり、石切面から剥離していることが多い（図 10）。漆喰の剥脱は往々楕円形を成しているが、次に述べる漆喰層のふくれと密接に関係すると見られる。側壁を斜めから観察すると相当の起伏が認められ、漆喰層の剥離は広い範囲にわたり散在すると判断される。

b 漆喰層のふくらみ

漆喰層が部分的にたるんだように脹れ、あるいは半球状に脹れる現象である。前者は側壁の上端部に認められ剥落の危険が大きい。後者

は東壁女子群像の壁面に多発している他、北壁にも認められる。東壁の女子群像では押し潰されているものもある（図 9）。天井部の剥脱は多くの場合、この膨れが生長した結果と見ることができるようである。

c モザイク状の小片化

漆喰層のモザイク状の小片化（5mm 角程になってしまう）は損傷の最も代表的な形態であり、天井壁、側壁共随所に認められる。表層の剥離と共に早急な処置を求められる損傷である。剥落の危険度はその位置と周辺の状態によって異なるが、当然のことながら位置的にも天井壁の危険度が高く、なかでも漆喰層が大きく剥落して開にした部分に生じている場合は特に危険な状態にあると見られる。

このモザイク状小片化の分布状況は天井壁に最も大きく、しかも一つの小片が剥落すると次の小片の剥落を喚び起しかねない状態となっていることが少なくない。特に星宿が多数描き配されている二枚目と三枚目の切石の接合部の附近の状態は表層剥離も生じ、辛うじて保たれているとよい程である（図 21）。

漆喰層の損傷の代表的な形は以上の如くであり、この他、漏水や盗掘口からの土砂の流入等によって、汚染と相当の損傷を受けており、各部分の損傷の様子は千差万別の感がある。

このような剥脱した部分を含めた損傷の分布を概括すると、高さ関係では絵の描かれている中位の部分よりその上と下が、方位では東側より西側に多いといえることができる。

また、修理を通じて確認された状況は次の記述に詳しい。

昭和 62 年 3 月 『国宝高松塚古墳壁画-保存と修理-』（文化庁）
渡邊明義・増田勝彦「高松塚古墳壁画の損傷状況とその修理」（抜粋）

2 高松塚古墳壁画の損傷の様態

漆喰壁には様々な損傷の形が見られる。剥離、亀裂、表層の剥落、漆喰層のポーラス化、陥没等である。

剥離は円形に剥落した周辺で一般的に観察されるが、剥離は剥落周辺部にとどまらず、かなり深くなっている。西壁では盗掘口から見ると女子群像が描かれている壁で全体的に波うったような緩やかな起伏が感じられる。この壁画では半球状の膨れが多く見られるが、これは高松塚古墳壁画の特徴的にして、典型的な剥離の形である。天井壁の円形状の剥落の周縁はやや盛り上がったようになっており、このように半球状に膨れ、剥落していったのではないかと考えられるが、半球

状の膨れの生長は剥離の拡大を意味するから注意を要する。

この半球状の膨れと、円形の剥落の周辺を観察すると皺が生じていることがわかるが、壁の隅ではこの皺が必ずといってよいほどに生じている。おそらくこの皺は、その部分で漆喰壁が浮き上がり、進行しつつあることを示すであろう。

漆喰壁の異状で特に目立つのが亀裂である。亀裂は網の目状に不定形に生じている。一つの亀裂は3mmの方眼に入るほどに小さくなっており、しかも割れ目の隙間が広い。これは収縮した結果で、剥離の危険は高い。この亀裂は側壁面に多く認められる。天井壁にも亀裂が前面にわたっており、その位置もあって剥落の危険は特に高くなっているが、亀裂の形状は側壁のそれとは異なっている。

側壁面の亀裂の周辺では、往々、部分的に陥没したように断続する不完全な亀裂が認められる。亀裂の成長過程を示すようでもある。

壁画の異状の中で、軽く見られそうな異状ではあるが、注意を要する異状として小さな陥没がある。この陥没は女子群像や四神などの絵の中にも生じ、また、比較的狀態のよい西壁・白虎の辺りでも生じているように、全面にわたっているといえる。この陥没は押されて生じたものではなく、自然発生の異状である。

このような状態から、漆喰壁は表面が緻密と見られる部分も含め、全体に層の内部がポーラス(密度が弱くがさがさとなった状態)になっていると判断される。この点はモーラ氏の最初の調査でも指摘されている。原因についてはモーラ氏は炭酸ガスの影響と見、江本・三浦両氏は過剰な水分の影響と考えているが、漆喰壁の異状は全体的に水分が大きく作用していると思われる点が多いようである。

彩色面には部分的な剥落や流れたような損壊があるが、現状では安定していると判断される。

高松塚古墳壁画は、自然条件の中での異状の外に、人為的な損壊とその影響も受けている。日月・玄武は故意の破壊を受けており、天井には鑿の跡も多く残っている。

盗掘人たちはまず天井石を壊そうとしており、そのために石に割れ目が生じたが、それを果たせず南壁に掘り進んで南壁を壊して中に侵入している。このためこの盗掘口から多量の土砂が入り、天井石の継ぎ目からは鉄分を含んだ泥水も漏水するようになってしまったようである。土砂は斜めになってなだれ込み、側壁底部には吃水線のように褐色の汚れがついていることから水も溜まったことがあった。

こうした状況の激変が、漆喰壁の状態の変化を更に助長したと思わ

れる。土砂に埋まった部分の漆喰壁は壊滅状態であり、漏水のあったところで漆喰が切れるように剥落している部分もあり、影響の大きさは容易に類推することができる。

昭和 62 年 3 月 『国宝高松塚古墳壁画-保存と修理-』（文化庁）
増田勝彦「高松塚古墳壁画修理記録原図の作成」（抜粋）

昭和 50 年 5 月、修理原図を作成するために、石室の各石面を約 16 分割した斜光照明によるカラー写真撮影が、修理担当者の手によって行われた。その写真の整理と保管は、東京国立文化財研究所修復技術部で行っている。

撮影の際には、焦点を固定したとはいえ、カメラの手持ちの撮影のうえ、石面の 16 分割も目測によるものであったので、そのまま合成して大画面とすることができるよう写真ではないが、1 枚ずつ独立して使用する時には、修理記録用として十分に役立つ。原則として画面右上からのストロボ 1 灯による斜光照明であったが、石室の隅近くや天井近くでは、真横、または、やや下からの照明で撮らざるを得なかった。6 cm×6 cm カラーネガフィルムで撮影し、四つ切り判の印画紙にノートリングで焼付けして、2 組を用意した。1 組を東京国立文化財研究所に、1 組を現地に保管して、修理に利用している。東京の 1 組は、処置箇所記録用のコピーを作ったり、修理中に撮影した写真の整理をする時に参考とするためである。

写真には、斜光照明による影で漆喰層の凹凸が強調されているが、漆喰脱落部分では、影のできる側の剥落が強調されている割には、光源に向かって口があいている剥離が、実際よりも控え目に映っている。

その写真を、できるだけ薄いコピーにとり、記録用紙とする。ただ、茶色系と灰色が紛れてしまうため、写真を見ながら損傷部の輪郭線を鉛筆で描き起こさねばならない。

このコピーには、修理作業中に注入したパラロイド B 7 2 トリクロルエチレン溶液の濃度と注入箇所などを記入していった。修理が進むにつれて、写真撮影した時には映っていた漆喰が落下して、すでに石面が露出している部分も確認されるので、その箇所を記録する。たしかに、主に天井からの小片の落下は継続していたのである。それが、大面積の剥落へとつながる前に、修理作業を進行させねばならない。

（以下略）

以上の諸報告を通じて、壁画発見時の高松塚古墳壁画の状況については

- 壁画発見当初から、壁面は制作当時と比べかなり劣化していたと考えられる。
- 壁画発見時の状態は、漆喰層に空隙ができており、漆喰の強度が低下していた（顕微鏡観察・E P M A）。色材部分を含む表面にカルサイト層が形成されており（近接撮影・顕微鏡観察・E P M A）、画像を見えにくくしている一方、保護膜となって色材を保護していた。

ということが判明した。

6. 温湿度等の環境変動について

(1) 高松塚古墳石室内の温湿度等について

壁画発見以降、壁画の保存を検討するために、石室内の温度や湿度などの環境調査が行われてきた。しかし、平成 13 年以降見られたカビなどの微生物等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の測定も開始した。

1) 外気温

高松塚古墳に最も近い地点で外気温についての観測記録があるのは奈良地方気象台（奈良県奈良市半田開町 7 番地）である。奈良地方気象台で測定された昭和 47 年から平成 16 年までの外気温の年平均値を示す（図 12）。これを見ると昭和 40 年代後半から昭和 62 年までは、外気温の年平均値は 14℃台に収まっているが、昭和 63 年頃から年ごとの細かな変動はあるものの次第に上昇して、全体として見ると平均して 1℃ほどの外気温上昇が見られる。日本全体の長期間の平年値と各年の平均値の差（平年差）と奈良における平年差を比較すると、日本全国の平均差の動きとよく一致しており、さらに北半球全体の動きとも類似している。このことから、昭和 63 年頃から外気温が 1℃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に関係しているものと推定される。

2) 降雨量

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、年間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 10mm 以上）日数が、平成 2 年以降、しばしば一年に 50 日を超えるようになっている。

3) 石室内の温湿度

石室内の温度記録に関しては、以下のようなものがある。

昭和 47 年 4 月～11 月

昭和 48 年 1 月～12 月

昭和 53 年 1 月～12 月

昭和 54 年 1 月～平成 17 年 8 月

特に石室内の温度は、保存施設の空調設備設計の重要な要素となる

ため、昭和 47 年～51 年までの約 4 年間にわたって、ガラス管に封入したサーミスタ温度計⁶を石室床の中央付近において測定を行った（図 13）。その後、昭和 49 年から昭和 51 年にかけて石室前に保存施設が建設され、保存施設が完成してからは、空調点検時に石室内中央部、上中下の位置に設置されたサーミスタ温度計を用いて温度測定が行われた。

またこれ以外に、

平成 13 年 12 月～平成 17 年 1 月

温湿度データロガー⁷を用いて、石室内中央部、上中下の位置で温度及び湿度の測定を行った。

平成 16 年 11 月～平成 19 年 8 月

温湿度センサーを用いて床上 20cm 程度の高さとで測定した。

これらの測定結果を見ると、昭和 47 年は石室床上で、最低温度は、4 月中旬で 11℃、最高温度は 11 月中旬で 16℃であった。昭和 48 年には石室内温度は $13.6 \pm 2.8^{\circ}\text{C}$ 、昭和 51～52 年には $16.3 \pm 1.9^{\circ}\text{C}$ であった。昭和 53 年には、 $16.0 \pm 2^{\circ}\text{C}$ であり、これは橿原市での地中 3～5m で測定した地温の年平均値にほぼ等しい。また、4 月上旬と 10 月上旬頃に、外気温と石室内温度がほぼ一致することも、この測定によって明らかとなった。こうしたことから、調査及び修理のための石室の開口は、原則として春と秋の 2 回とすることが決められた。外気温と比較すると、石室内温度は 3～4 ヶ月遅れて連動していることも明らかとなった。

石室内の相対湿度はほぼ 100% であり、石室内に人が立ち入ると 90% 程度に低下することも明らかになっている。

昭和 47 年 4 月並びに 10 月に行われた調査では、温湿度の他に炭酸ガス・酸素の測定も行われた。

4) 地温測定

平成 15 年 7 月から平成 17 年 1 月まで、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、20、40、60、100、180cm の深さの地点で測定を行った。地表面から 20cm 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 8 月に 30℃まで上がっているが、これは前年の 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 11 月以降は表土を搬出したので乱れている。

5) 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。降水量と墳丘内部の体積含水率変化の関係を見るために、平成 15 年 7 月から 11 月までの結果を検討すると、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、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 月に墳丘部の竹、木を切った後で、防水シートを設置し、平成 16 年 10 月に墳丘部上の防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。これによって平成 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。防水シートにより、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。

(2) 石室の温湿度解析モデルを使用したシミュレーション結果について

過去の石室周囲の環境や修理といった内部作業等の要因が、石室内の温湿度変動に与える影響についてシミュレーションにより推定した。このシミュレーションには、墳丘や保存施設等を考慮した石室の温湿度解析モデルを作成し、石室内の温湿度変動の測定や記録等をもとに解析を行った。以下のような結果を得た。

①高松塚古墳発掘から保存施設の稼働までの期間における仮保護施設の影響について

発掘前は、石室内相対湿度は年間を通じて 100% 近くであり、石室内表面も同様と考えられる。また、発掘後の仮保護施設が設けられた状況で、石室内温度は発掘前より振幅がやや大きくなり、湿度は 100% に近い値から若干低下したと考えられる。同時期に、石室の南壁とその近くの天井付近で夏期に室内側表面の湿度が 100% に近い値から低下した可能性がある。調査時以外に設置された石室南側の覆土は、湿度低下を抑制する効果があったと考えられる。

②保存施設の稼働から石室解体前までの期間における気象条件の影響

保存施設稼働後の約 30 年間の気象条件の変化は、この間の石室内の温度上昇の主要な原因の一つといえるが、それだけでは温度上昇を説明することはできない。

③墳丘の被覆状況の変化が石室内温度変動に与える影響

平成 16 年末頃の石室内の温度上昇の要因の一つとして、平成 15 年 9 月に、竹、木を伐採し防水シートを設置したことが影響している可能性が高い。その後、平成 16 年 9 月に墳丘に設置された仮設覆屋の効果は、防水シート設置のみの状態を継続するより石室内の温度を低くしたと考えられる。保存施設稼働時の（年）平均的な石室の温度上昇は、気象条件の影響や被覆条件の変化だけでは十分説明することはできない。

④吸放熱パネルへの送水温度の影響

吸放熱パネルへの送水温度測定値を用いた解析による石室温度は、平成 14～16 年を除いて測定値とかなり良く一致する。すなわち、保存施設稼働後の約 30 年間の石室温度の上昇は、この間の気象条件の変化と送水温度の変化を考慮すると大略説明できる。しかし、平成 14～16 年の石室温度の急激な上昇は、以上の解析でも十分説明することはできない。

⑤入室の影響

石室温度、入室人数とカビの繁殖との間には相関がある可能性がある。特に、連続した入室があった後には、石室温度はやや高めに推移する。石室の高温化の要因の一つと考えられる。

⑥旧保存施設機械室温度の影響

冷却開始後一年間の測定値からの判断であるが、機械室の温度は年間を通して高い。それが過去 30 年間近くについても同様であったとすると、長期間にわたる影響で準備室に近い地盤の温度が上昇した可能性がある。準備室の高温化にも機械室室温が影響している可能性は考えられる。

⑦旧保存施設の躯体における熱移動の影響

準備室の温度は年間を通して前室より高温となっており、これには

準備室南面に当たる日射が大きく影響していると考えられる。従って、保存施設の躯体を通しての熱移動が、保存施設の温熱環境に影響していると考えられる。

（３）石室内の温湿度と壁面の劣化との関係

温湿度は、壁面の劣化に直接の影響は少ないと思われるが、壁面に付着したカビやゲル等の生育環境に影響を及ぼしたものと考えられる。温度の上昇はカビ等の生育環境を良好にし、湿度が高いことによってカビ等の恒常的な生育環境をつくり出すこととなった。特に平成 12 年頃になると石室内温度のもっとも高い月の温度が 19℃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前述の（２）－⑤の「入室の影響」からも読みとることができ、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 年は石室内温度の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た。

7. 地震等の石室への影響について

(1) 平成 16 年度発掘調査の主な調査成果

国宝高松塚古墳壁画恒久保存対策の一環として、墳丘の現況や埋没状況が壁画保存環境に及ぼす影響の解明と、整備計画策定のための基礎資料の収集を目的に発掘調査が行われた（平成 16 年 10 月～平成 17 年 3 月）。調査前の古墳は、平成 15 年度に実施した緊急対策によって、竹、木が伐採され、土嚢と防水シートで覆われていた。発掘調査はこれらを撤去して行ったが、雨水や日照が壁画の保存環境に影響を与えないよう仮設覆屋を建設し、その内部で調査を行った。

壁画保存環境の劣化原因究明のため、昭和 47 年発掘調査区の埋め戻し状況や、木竹による墳丘の損傷状況などを調査したところ、墳丘整備時の埋め戻しに異常はなく、墳頂部に根を張るモチノキや、墳頂北東部に存在する蜜柑畑造成時の段差などが保存環境に悪影響を及ぼしている可能性が考えられる。また、過去に行われた電気探査や水分分布調査により、墳丘北東部に含水率の高い土壌分布が想定されてきたが、それは古墳が築造された丘陵の土層構造や、古墳周囲の埋没環境に起因することが明らかとなった。

墳丘の断割（たちわり）調査により、大規模地震で生じた版築の地割れや断層を多数確認し、昭和 47・49 年調査時に墓道部で検出された大規模な土層の陥没は、一連の地震痕跡と推測できるようになった。これらの地震痕跡は、過去に周期的に発生した南海地震の痕跡と考えられる。地割れにそって植物が根を張る状況が確認され、石室内への雨水の浸透や、虫の侵入経路となっている可能性が考えられる。

(2) 平成 18・19 年度発掘調査の主な調査成果

平成 17 年 6 月 27 日開催の国宝高松塚古墳壁画恒久保存対策検討会において、石室を解体し、壁画の保存修理をおこなうことが決定されたことを受け、石室を解体可能な状態に露出させるための発掘調査が行われた（平成 18 年 10 月～平成 20 年 8 月）。発掘調査の進行にともない昭和 47・49 年の発掘調査区が検出され、その埋め戻し土を除去したところ、亀裂の入った石室南端部の天井石を保護するために、保存施設の屋根から石室上に庇状に設置した PC 版を確認した。また旧調査区との間に存在する空隙を埋めるために、PC 版の周囲には直方体の凝灰岩切石が並べられ、細かい隙間は粘土により充填されていたことも

確認した。この粘土には乾燥によりひび割れが生じ、さらには一部の凝灰岩切石が取合部側に落下していたことから、取合部が PC 版により完全に遮断されていなかったと考えられる。石室解体時の障害となるため、この凝灰岩切石を除去し PC 版を切断撤去したところ、凝灰岩切石の裏側と取合部の旧発掘区壁面にカビを含む黒色の汚れが確認された。また、保存施設設置に際して昭和 49 年発掘調査区（＝保存施設掘方⁸（ほりかた））と保存施設の間に生じた空間と、取合部とを遮蔽するために、直方体の凝灰岩切石を縦に 4 石程度積み上げていたことも確認されたが、この凝灰岩切石の全面にもカビを含む黒色の汚れが認められた。

取合部床面に堆積した崩落土を除去したところ、埋没部分に黒色のカビが密生するなど、取合部で発生したカビが、亀裂や版築の層理面などを通じて周囲に拡散、浸透した状況を示していた。

墳丘を掘り下げる過程で、版築層を突き破る多数の地割れを検出した。地割れは、表土層直下から墳頂下 6m の地山まで連続する。地割れには、粘性のない軟質土が充満し、それに沿って植物の根が石室まで伸長していた。これらの地割れは、奈良盆地南部を 90～150 年周期で襲う巨大地震、南海地震の痕跡と考えられる。石室の直上（天井石の 0.1m 上）で検出した地割れは、石室の輪郭に沿って直線的に走り、石室の隅から外側へ放射状に派生するなど、直下に位置する石室の形状を反映していた。壁画発見時から天井石の 2 石を南北に縦断する亀裂や、床石 2（各石材の名称は図 14 を参照）にみられる亀裂は、地震による損傷と理解できるようになった。高松塚古墳が西暦 700 年前後に築かれて以来、9 回の南海地震が発生しているが、墳丘や石室の損傷がいつの地震によるものなのかは定かではない。

地割れは石室の背面に回って空隙をつくり、石室へ雨水が浸透する水みちや、根や虫の石室への侵入経路になるなど、壁画劣化の遠因となった可能性が高い。石室とそれを固定する版築層の間に生じた亀裂に沿って植物の根が伸張し、蔦が絡むように石室外側を覆っていた。また、解体作業の過程で、天井石や壁石の接合面にも軟質土とともに根が侵入し、その多くが自然炭化していた。植物の根は深さ 6m 近い床石下にも及んでおり、床石接合面や床石下の版築上面でも大量の根が確認された。

虫は植物の根と同様に石室の外面に生じた版築の隙間を自由に移動し、地震で緩んだ石材の目地の隙間から石室への出入りを繰り返していたとみられる。特に床石接合部の目地からは数多くの虫が発見され、

目地を出入りする様子が確認できた。また、天井石 1 と西壁石 1、南壁石が組み合う部分の隙間には、クモが網を張っており、虫が石室内へ侵入した経路を推測することができた。

石室の外面は、暗褐色や黒色のカビに広範に覆われていた。暗褐色の汚れは、石材の目地留め漆喰の周囲から石材の外面に及ぶ。またカビを含む黒色の汚れは、取合部の周囲と北壁石の背面、石材の接合面で顕著に確認された。天井石 4 は、不安定な状態で架構されていたために、北壁を支点にした天秤状態にあり、西壁石 3 との間に石室内部に通じる空隙が生じていた。その空隙を中心に、天井石 4 と北壁石・天井石 3 の接合面にカビを含む黒色の汚れが広範囲に確認された。このカビは北壁石背面の地割れを通じて、北壁石の外面を黒色に汚損していた。取合部では、盗掘口を保護する樹脂製のプロテクターの下面や天井崩落土に埋もれた部分、墓道部の版築の層理面、南壁石と東・西壁石 1 の目地を塞ぐ漆喰の周囲などに広がるカビを含む黒色の汚れを確認した。カビ含む黒い色の汚れは、石材の接合面や版築の層理面でわずかな隙間にもくまなく生じており、見えない部分で微生物が繁殖している状況が明らかになった。

発掘調査によって、古墳墳丘内部に地震由来と考えられる多くの亀裂や地割れが認められており、これらに対し動的解析を行った。その結果、高松塚古墳は繰り返し地震の影響を受け、発掘調査に見られるような亀裂や地割れが広がったと考えられる。

8. カビ等の微生物被害について

(1) 基本的な考え方

微生物の生育に関わる条件としては、温度・湿度・酸素濃度・栄養分・pH など様々な条件があるが、高松塚古墳壁画の場合、「壁画は歴史上・芸術上・保存上の観点から現地保存とする」ということで、ほぼ 100% RH の高湿度条件での保存が前提であり、微生物対策は、高湿度のもと、自然の均衡を保つという方針で行われた。一般的には、カビやバクテリアなどの微生物を制御するには、水分のコントロールが最も確実な方法であるが、高松塚古墳壁画の場合においては、基本方針により、水分（湿度）による制御は不可能である。

発掘前には壁画は高湿度環境であっても、微生物に侵されることなく、安定した状態で保たれていた。発掘前の環境は、外界からほとんど遮断されているため、長期間のうちに微生物は平衡状態に達しており、微生物の活動が一時的に停止している状況にあったと考えることができる。しかしながら、このような均衡は、きわめて微妙なバランスのうえに立っていたものであり、一旦崩れたら、カビなどの微生物が直ちに繁殖する環境となったと考えられる。

(2) 微生物等の被害について

壁画発見直後からカビの発生が見られた。このため、昭和 47 年 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。微生物対策として、石室内作業終了時に、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、効果があった。古墳石室の微生物学的環境調査は、当初、落下法⁹によって微生物の計測・採集が行われた。その結果、石室内の微生物数が著しく高い値を示し、かつ、ばらつきが認められた。これは、特に発見直後は、各分野の調査のために、種々の専門家が石室に入る必要があったことや、石室内には盗掘口から出入りするため、石室に土壌が入りやすかったことなどが要因として考えられる。

昭和 53 年の第 2 次修理では、主に東壁・西壁でカビの発生が認められた。この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かびの発生量が増加傾向を示し、昭和 55 年から 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。特に、昭和 55 年には、樹脂溶液を注入した箇所や剥落止めに用いたうす紙にもカビは発生した。これらのカビに対する処置としては、ホルマリンとエタノールの溶液で滅菌したが、この処置部分に白色粒状のカビが発生した（昭和 56 年 2 月）ので、トリクロルエチレンで除去した。なお、TBZ による防カビを実施したが、効果は見られなかった。

昭和 56 年 6 月には高湿度の環境下でパラホルムアルデヒドで加熱蒸散させて燻蒸する方法を開発し、はじめて石室内で実施した。密閉時に所定の薬量を完全に気化して石室に導入し、その後、昭和 57 年以降カビの発生は漸減し、昭和 60 年から平成 13 年までほとんど抑制された状態となった。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。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明らかとなった。

昭和 60 年度までの 3 次にわたる壁画の修理事業が終わった後、平成 12 年春までは 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。しかしながら、石室内に虫の侵入は続いていた。

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。取合部をパラホルムアルデヒド燻蒸による殺菌や除菌作業を繰り返し行い、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。カビの除去と殺菌という用途には、絵画への影響が少なく、毒性が比較的低く、残留しにくいという点で、アルコール系のものが候補となった。このようなカビのコロニーの殺菌と除去には、主にエタノールを使用して処置が行われた。特にカビが繰り返し発生する余白部分は防カビ剤コートサイド 159 で滅菌した。取合部にはコートサイド 123 を用いた。これらの処置により、この時のカビは一旦沈静化したように見えた。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、また石室の密閉度の問題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た。特に、青龍、東壁女子群像の近くで粘性のある黒い汚れ（シミ）が現れているのが発見され

た。よく調査すると、この黒い汚れは、前年カビが発生した位置とほぼ一致することがわかった。このような激しい汚損を避けるには、頻繁に点検を行い、わずかでも変化があった時点で対応する方向性と、逆にあまり人が出入りしないようにする方向性の間で対策を選択する必要があったが、結局、除去できるかどうかわからない黒い汚れなどによる劣化の進行を放置するわけにはいかないということから、以前よりも多くの点検を実施することとなった。この時のカビは、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、一旦沈静化した。平成 17 年からはこれらに併せてイソプロパノールを使用した。

平成 15 年 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、墳丘部は防水シートで覆い、また、発掘により墳丘部の状態を確認する等の諸措置を講じた。

平成 16 年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。ダニの死骸からはカビが生え、ダニがカビの胞子を媒介して石室内に撒布し、両者の繁殖が全体的に広がったと考えられる。

平成 16 年 6 月「国宝高松塚古墳壁画恒久保存対策検討会」を開催し、高松塚古墳壁画の保存について抜本的な検討を開始した。平成 17 年 6 月に石室解体の方針が決定され、平成 19 年 4 月に解体が開始されるまでの間、カビの大発生を抑制することを目的に、墳丘を冷却することが実施された。平成 17 年 9 月より墳丘の冷却が実施され、石室内の温度は徐々に下がり、平成 18 年 3 月から石室内はおよそ 10℃の低温に保たれた。当初、大きなカビの発生も見あらず推移していたが、平成 18 年 2 月の点検時に、西壁女子群像部分に黒いシミが発見された。それ以降は、西壁白虎の上など、複数箇所に黒いカビが新たに発生していた。こうした暗色系の *Acremonium* sp. の殺菌には、高濃度のエタノール、あるいは状況に応じて約 3% のホルマリンを使用することとした。その他の微生物にはイソプロピルアルコールが使用された。

(3) 殺菌処置と薬剤

パラホルムアルデヒド燻蒸は昭和 50 年代から高松塚古墳石室で実施され、当時大発生した *Doratomyces* sp. のカビの対策として一定の

効果をあげたと考えられる。しかし、一方ではパラホルムアルデヒド燻蒸を行っても、分厚いコロニーが生じているような箇所では、コロニー内部までは効果が十分ではないことが知られており、分厚いコロニーが発生しているような場合は、物理的に殺菌しつつ、取り除くこととした。しかし、カビのコロニーの殺菌と除去に用いられたエタノールなどのアルコール系の殺菌剤がうすまった際には、微生物の炭素源（栄養源）として使用される可能性が指摘された。この可能性を実験的に検討した結果、エタノールが殺菌濃度からおおよそ 70 倍-100 倍程度にうすまり、1%程度の低濃度になると、高松塚古墳から分離されたカビ、バクテリアや酵母などの炭素源になりうることが示された。同様に、エタノールなどのアルコール系に限らず、パラホルムアルデヒドも、キトラ古墳でバイオフィルムの構成微生物の増殖抑制に効果があったため部分的に使用されたイソチアゾリンなどについても、有機系の殺菌剤、抗菌剤である以上、それらが分解されたときには、有機物として微生物の栄養源になる可能性が指摘された。

こうした特定の殺菌剤の継続的使用による、微生物の慣れ（馴化）の可能性については、TBZ、エタノール、イソプロピルアルコール、ホルマリンなどの薬剤を試料として検討を行ったが、その結果、TBZ のような抗カビ剤に比較すると、アルコール系の殺菌剤は現在のところあまり明らかな馴化傾向は観察されていない。

（４）点検と人の出入り

「高松塚古墳壁画の劣化原因に関わる事項の整理について」（表 6）より、石室内にほとんど人が入る必要がなかった時期には、カビの発生は少ないことがわかっている。人の出入りなどに伴う、石室内温度の上昇は、石室内のカビなどの発生のしやすさに直接的、間接的に影響を及ぼしたと考えられ、また人が入ることによっての呼気などに含まれる有機物のもちこみなども微生物の生育のしやすさに影響する可能性がある。また、点検などに伴う光の照射と、カビの暗色系の色素形成に関係があるのかどうかについて、暗色系の *Acremonium* 属 2 株についてのみ検討したところ、高松塚分離株 1 株については、光照射があったときのほうが若干、色素産生が多い傾向がみられたものの、キトラ分離株 1 株については、蛍光灯の照射の有無と色素生産の多少についての相関はみられなかった。

(5) 微生物の漆喰、絵画への影響

高松塚古墳より分離されたいくつかの微生物については、壁画の劣化に関わる可能性のある酢酸を生成するものが存在し、pHの低下も引き起こす可能性が示された。さらにエタノールを単一の炭素源としたときの酢酸生成量についても、いくつかの微生物において、酢酸生成量が増加し、pHの低下を引き起こす可能性があることがわかった。また、低温下で生育することによって色調が暗色化する微生物がいたことも明らかとなった。さらに、カビから分泌される代謝物にも暗色系の色素が含まれることが確認された。

(6) ダニや虫などの小動物、植物などの根

高松塚古墳石室内では、ダニ、ムカデのほか、ワラジムシなども頻繁に目撃されており、解体・発掘作業中でも同様にこれらの小動物が頻繁に観察されている。植物性のものを餌とするワラジムシなどの侵入を考えると、墳丘から石室の石材のすきまへと入り込む植物の根などを通じて、これらが入ってきていたことが推測され、これらの小動物もカビなどの散布や、石室と周囲との物質や微生物のやりとりに深く関わっていたと考えられる。

(7) 石室内の微生物の由来

平成16年以降、石室内や取合部、解体・発掘に伴う石材間、石材付近の土、墳丘などの詳細な微生物種調査について、種レベルの微生物の同定結果に基づき、文献調査によってそれらの微生物種の由来を調べた結果、ほとんどの微生物が「土壌由来」、「植物由来」、「空気由来」、「昆虫由来」とみられるものであった。

石室、取合部などから分離された微生物は、石室周囲の土（発掘中の畦）、墳丘などから分離された微生物種と共通するものも多く、おそらく周囲の土壌から、雨水やダニ、虫類などの小動物、植物の根、人の出入りなどを介して、侵入したものと推測される。ただし、石室には石室内の特徴的な環境により適応しやすかったとみられる種が主に繁殖したと考えられる。

Fusarium 属（フザリウム；*Fusarium solani* species complex clade 以下 FSSC と記す）の詳細な遺伝子解析結果より、石室内での遺伝的多

様性がきわめて大きいことが示された。これは、単一の機会に侵入したカビが全域に広がったということではなく、一般に微生物の侵入の機会が非常に多いなかで、そのつど異なった遺伝的背景をもつ FSSC が侵入して定着してきたことを示唆している。

漆喰などへの影響が大きい酢酸菌については、これまで高松塚由来の試料からは培養法による分離では検出されていないが、培養しにくい微生物の存在を検出する方法である DGGE 解析¹⁰を行ったところ、高松塚古墳の壁石間や取合部土壌などのいくつかの試料で酢酸菌が優占種のひとつとして検出された。そのため、分離手法を変えて集積培養法による分離を試みた。その結果、DGGE 解析で存在の可能性が確認された試料のほとんどから、酢酸菌が純粋分離された。このことから、高松塚古墳の壁石間や取合部土壌などには少なくとも酢酸菌が存在していたと考えられる。一方、石室内部の試料からは、培養法による分離および DGGE 解析ともに酢酸菌は検出されていない。

9. 保存管理上の諸問題について

(1) 旧保存施設による制御

①旧保存施設

旧保存施設は、昭和 51 年 3 月に、修理・点検等の石室内作業を安定的環境の下で行うために設置されたものである。

旧保存施設は、ラスコー洞窟壁画の保存とその施設に深い経験を持つフランスの専門家ら（建築家・微生物学者）の所見を参考にして「高松塚古墳保存対策調査会」で以下の設計方針が決定された（昭和 47 年 12 月）。

(1) 壁画は現状保存を原則として、石室内外の環境が発掘以前の安定した状態に保たれること。

(2) 石室内の温度・湿度を測定する記録装置を設けること。

(3) 壁画の保存状況の調査、保存のための修復処置が随時可能であること。

(4) 黴・苔・微生物の発生には注意をはらい、炭酸ガスの増加はさけること。

(5) 保存施設は周辺環境の変更を最小限にとどめること。

(6) 保存施設は 2 室程度の前室を既存の発掘用のトレンチを利用して、石室の手前の墳丘内に設けること。

(7) 付属施設としての機械室は、墳丘外の地下に設けること。

(8) 石室の天井石の一部に亀裂が入っているので、その上部へ埋め戻す覆土の荷重を保存施設により負担すること。また、石室正面にある「切石」も床下に保存すること。

(9) 工事にあたっては、振動によって石室の壁画に影響を与えないこと。

(10) 石室前面での作業日程をできるだけ短縮すること。

(11) 将来、保存施設の撤去も可能であること。

設計の具体的な検討は、「高松塚古墳保存対策調査会」での審議を経て、主にその保存施設部会で行われた。

設計の方針をふまえ、この施設は、作業者が石室内に出入りする際、外気の影響が石室内に及ぶことを出来る限り少なくするため、3 つの前室を経て石室入口に到達する構造とされた。

また、前室の温度を石室周辺の土中温度と調和させるため、

銅管パネルに常時温水（冷水）を流す「パネル系」と、前室に入室する場合に石室と同じ温度の風を前室に送風する「空調機制御系」の 2 系統の空調設備で保存環境を維持しようとする構造とされた。

なお、旧保存施設と石室をつなぐ接続部の空間を「取合部（とりあいぶ）」と呼び、管理した。この空間は、先の設計方針（8）を実現するため、石室の天井石に土圧をかけずに埋め戻す方法として、旧保存施設の天井を底状に延ばしたことにより出来たものであったが、壁画の点検や修理作業等においては、前室から石室に入る前の作業空間の役割も果たした。取合部の壁面は、昭和 47・49 年の発掘調査時の版築土が露出していた。

②旧保存施設の不具合

旧保存施設の稼働時から、夏期において冷却能力が不足するなどのパネル系の不具合が指摘されており、改善策の必要性が指摘されていた。また、制御の基準とした温度センサーが、石室より外界の影響を受けやすい取合部土中の浅い場所に埋められているため、より深い位置に埋め直すよう、指摘を受けていた（昭和 62 年：高松塚古墳壁画－保存と管理－）が、改善が図られてこなかった。

石室内温度の上昇勾配は外気温の上昇勾配よりも急であり、特に昭和 63 年頃からその傾向があらわれ、平成 14 年から 16 年頃には顕著になることが判明した。その要因を検討するため、当時の条件を復原してシミュレーションを実施し、次の結論を得た。

- ・ 冷却開始後一年間の機械室の温度は年間を通して高い。それが過去 30 年間近くについても同様であったとすると、長期間にわたる影響で準備室に近い地盤の温度が上昇した可能性がある。
- ・ 準備室の高温化にも機械室室温が影響している可能性は考えられる。
- ・ 準備室の温度は年間を通して前室より高温となっており、これには準備室南面に当たる日射が大きく影響していると考えられる。従って、保存施設の躯体を通して熱移動が、保存施設の温熱環境に影響していると考えられる。

(2) 石室内への人の出入りの状況

高松塚古墳保存対策調査会において、旧保存施設の開閉については次の場合に限ることとされていた（昭和 50 年 4 月）。

- (1) 壁画修理事業のとき。
- (2) 地震・大雨等の自然災害の事後点検のとき。
- (3) 空調機器運転にともなう点検・調査のとき。
- (4) カビ等に対する定期的な点検のとき。

施錠の開閉に係る判断とその実施については、文化庁美術工芸課（現美術学芸課）が担当していた。

壁画発見後の石室内への人の出入りに関しては、昭和 50 年代の壁画修理時と、平成 13 年 9 月から石室解体まで続く一連の生物対策等の時期の二つの時期に大きなピークが認められる（図-15）。

第 1 次修理は、昭和 51 年 9 月から開始され、修理作業が実施された月の月ごとの石室への入室者人数は、30～50 人（月の延べ人数）程度を示し、第 2 次修理が終了する昭和 56 年度頃まで同様の傾向が続いた。石室内への人の出入りが最も多かったのは、第 2 次修理時の昭和 54 年 9 月で 60 人であった。

平成 13 年 2 月の取合部天井の崩落止め工事に端を発するカビ等の大発生に係る石室内での対応は、同年 9 月から開始された。これ以降石室解体（平成 19 年 4 月～）までの時期は、継続的な生物対策等により、月ごとの石室への入室者人数は、5～40 人程度であった。平成 18 年 10 月に 70 人を超える人の出入りがあったが、これは石室解体準備のための壁画の養生（石材接合部上の壁画漆喰の切断等）を目的としたもので、石室周辺の冷却対策（石室内を 10℃程度で制御）が順調に実施されている時期の作業である。

石室内への人の出入りに係る 2 つのピークは、それぞれ、昭和のカビの大発生と平成のカビの大発生の時期と重なっている。昭和 50 年代の修理作業が開始されてから 2 年程は頻繁な人の出入りがあったにも関わらず大きな生物被害は認められないこと、また、平成 13 年 9 月以降の対応は生物被害が確認された後の対応であったこと等を考慮すれば、一概に人の出入りと生物被害をそれらのみで直結させることは難しいであろうし、石室内に人が立ち入らないで必要な対策が実施できたとも思えないが、昭和のカビの大発生、平成のカビの大発生、い

ずれにおいても、石室内への人の出入りが、直接的あるいは間接的に壁画への生物被害に影響を与えている可能性は高いと考えられる。昭和のカビの大発生がひと段落し、その後、10数年間石室内へあまり人が出入りしなくなる時期が訪れるが、この時期には大きな生物被害が認められていないことは、この予想を傍証するものといえよう。

(3) 壁画の修理（剥落止め）について

①壁画修理（剥落止め）の方針・方法決定の経緯

壁画修理（剥落止め）の方針・方法は以下の経緯を経て決定された。

（下線部は特に重要な事項）

昭和 47 年 4 月 6 日 第 1 回 高松塚古墳応急保存対策調査会

（座長・関野克 以下、応急対策調査会）

4 月 17 日 壁画面の剥落度の大きい部分（星 3 ヶ所を含む 10 ヶ所程度）につきアクリルエマルジョン（プライマル AC34）により仮止め措置

5 月 19 日 第 2 回 応急対策調査会

6 月 14 日 第 3 回 応急対策調査会

7 月 29 日 第 4 回 応急対策調査会 『高松塚古墳応急保存対策調査会中間報告』提出

8 月 21 日 第 1 回 高松塚古墳総合学術調査会（座長・原田淑人 以下、総合学術調査会）

美術部会・考古歴史部会を設置

9 月 18 日 第 5 回 応急対策調査会

総合学術調査会に対し保存科学面での対策を講じることとする。

9 月 22 日 第 2 回 総合学術調査会

11 月 29 日 第 6 回 応急保存対策調査会『高松塚古墳応急保存対策調査会調査報告』提出 閉会

「壁画の周到な科学的調査に立脚した修復技術の研究と技術者の養成を早急に実施する必要がある。これには、海外への専門家の派遣と海外からの専門家の招聘も考慮すべきである。」（同報告抜粋）

（参考） 担当者の海外への派遣

昭和 48 年 1～2 月 美術工芸課長・東文研修復技術研究室長をイ

タリアへ派遣

昭和 48 年 4 月 東文研修復技術研究室長をイタリアへ

昭和 48 年 7～9 月 修理担当者をイタリアへ

昭和 49 年 3～10 月 修理担当者をイタリアへ

昭和 50 年 3～7 月 修理担当者をイタリアへ

昭和 51 年 3～7 月 修理担当者をイタリアへ

12 月 18 日 第 1 回 高松塚古墳保存対策調査会（座長・関野克 以下、対策調査会）

保存施設部会・壁画修復部会（主査・松下隆章）
を設置

昭和 48 年 1 月 19 日 第 1 回 壁画修復部会

3 月 29 日 第 3 回 総合学術調査会 閉会

3 月 『高松塚古墳壁画報告書』刊行

4 月 2 日 第 2 回 壁画修復部会

5 月 24 日 第 2 回 対策調査会

保存施設の設置計画と壁画修復計画の検討

10 月 4 日 第 3 回 壁画修復部会

10 月 11 日～13 日 イタリア中央修復研究所・パウロ・モー
ラ氏他 2 名壁画調査

10 月 14 日 第 4 回 壁画修復部会（壁画修復の基本方針の
確認）

壁画修復の基本方針（第 4 回高松塚古墳保存対策調査会壁画修復部
会）

- 1、壁画は歴史上、芸術上、保存上の観点から現地保存すること。
- 2、保存施設工事前に緊急必要の部分の応急補強処置を行うこと。
- 3、保存施設工事完了後に本格的修復作業を行うこと。
- 4、応急補強処置と本格的修復は同一方法によって行うこと。
- 5、修復作業に際して必要な箇所のクリーニングを行うこと。
- 6、壁画を良好に保存するため温湿度、炭酸ガスに対する適切な対策を講ずること。
- 7、壁画修復のための樹脂の使用およびクリーニングは濃度等十分留意すること。
- 8、顔料部分の資料採集は行わないこと。

壁画修復の基本方針が決定した直後の10月15日～17日に古墳現地において壁画修復及びクリーニングテストを実施した。

壁画修復作業

作業はあらかじめ絵画のない部分で予備的実験を実施した後絵画のある危険箇所について補強作業を実施した

1、危険箇所の補強作業はアクリル樹脂（パラロイドB72）3%溶液を使用して計7ヶ所について実施した。（パウロ・モーラ氏担当）

2、壁画の赤褐色汚染定着部分については、絵画のない部分4ヶ所についてクエン酸少量を加えた水溶液にて実験的に払拭した。（ラウラ・モーラ氏担当）

いずれもきわめてよい結果がえられた。

*これらについては、昭和48年10月26日文化財保護審議会において「高松塚古墳保存対策調査及び壁画修復作業について」として報告された。

昭和49年2月7日 第3回 対策調査会

3月5日 第4回 対策調査会

4月23日 第5回 対策調査会

11月11日 第5回 壁画修復部会

保存施設工事に伴う壁画の応急措置について検討

11月22日 保存施設工事に備え壁画応急処置（天井部剥落に備え架台を搬入）

昭和50年3月20日 第6回 壁画修復部会

修復のための事前調査の検討

3月26日～29日 壁画応急処置・壁画状況調査

4月23日 第7回 対策調査会

修理基本計画承認

5月8日 第7回 壁画修復部会

壁画修理のための事前調査を検討

昭和51年2月16日～28日 壁画全体の損傷状況調査、修復のための漆喰の構造調査、

剥落止め試験施行

5月31日～6月5日 溶剤除去法の検討

7月23日～31日 修理調査

8月24日 第8回 壁画修復部会 修理方針・修理仕様等
の決定

壁画修理の目的と方法

【修理の目的】

粗鬆化し密度が低下している漆喰層を補強し、剥落の恐れのある部分を接着し恒久的保存を計る。

【修理の方針】

1. 漆喰層の強化、接着にはアクリル樹脂を用いる。
2. 合成樹脂は注射器や筆で漆喰層の内側、あるいは基底部に加える。
3. 合成樹脂を漆喰層の表面に一面に塗布したり、吹き付けたりしない。
4. 漆喰層の強化と接着は必要最小限度にとどめる。
5. 漏水による画面の汚れのクリーニングは特に行わない。

8月30日 壁画修理実施の新聞発表（現地）

9月2～10日 第1次修理－第1回現地修理

9月26日～10月4日 第2回現地修理

11月5日～16日 第3回現地修理

11月13日 壁画修理打ち合わせ会

12月15日～24日 第4回現地修理 接着剤としてプライマル
AC55及びエマルジョンを試用

昭和52年1月6日～15日 第5回現地修理

2月5日～15日 第6回現地修理

2月14日 モーラ氏現地視察、修理指導 増粘アクリルエ
マルジョンの併用を指示

昭和52年5月『国宝・高松塚古墳壁画修理報告書（中間報告）』（文化庁）刊行

5月23日 高松塚古墳壁画修理中間報告会を開催

『国宝・高松塚古墳壁画修理報告書（中間報告）』（抜粋）

【修理の方針】

修理事業としては昭和 51 年度事業は第一次修理とし、最も緊急な部分の補強処置を重点的に行うこととし、我国では初めての修理でもあり、修理結果を科学的、実的に検討する期間を設けて次の第二次修理を計画し、壁画修理の万全を期することにした。この方針は高松塚古墳壁画保存対策調査会壁画部会で承認されたが、修理実施にあたっては、別に文化庁、東京国立文化財研究所、東京芸術大学の各関係者によってワーキンググループを作り、その都度実地的な検討を行い、また壁画部会の委員によって小委員会を設け、修理途次において中間報告と協議を行うことが定められたのである。

【修理の概要】

漆喰層の損傷は化学合成樹脂を用いて漆喰層の強化と、切り石面への接着を行う。使用する化学合成樹脂については、イタリアの中央修復研究所・チーフレスタウラーであるパウロ・モーラ氏からアクリロイド B 7 2 が有効であろうという意見を受けていたが、東京国立文化財研究所の意見も徴して主としてこの樹脂を用いることを決定した。

アクリロイド B 7 2 はヨーロッパにおいては既に十分の使用例と研究がある。その特性はいくつか存するが、主なものは次の通りである。

（１）アクリル酸メチルとメタクリル酸エチルの共重合体で、一般のアクリル樹脂同様に安定性に優れており、かつ柔軟性に富む。

（２）樹脂の比重 1.15、粘度 350～650 で作業し易く、浸透性に富む。

（３）各種の溶剤に可溶であるが、トリクロルエチレンに溶かしたものは少々の水分が混入しても白濁しない。また、このフィルムは水分による白濁に対する抵抗性が強い。

（中略）溶剤として主としてはトリクロルエチレンを用い、3%、5%、8%の溶液とし、漆喰層の損傷とそれに対する処置の目的に応じて適当な濃度を選択使用する。

（以下略）

昭和 53 年 9 月 19～30 日 第 2 次修理事業－第 1 回現地修理

10 月 12～22 日 第 2 回現地修理

- 11月7～18日 第3回現地修理
 12月5～16日 第4回現地修理
 昭和54年10月30～11月10日 第5回現地修理
 12月4～15日 第6回現地修理
 昭和55年1月11～23日 第7回現地修理
 2月13～23日 第8回現地修理
 11月10～22日 第9回現地修理
 12月10～29日 第10回現地修理
 12月19日「白虎の上黒色部筆にて払い」
(修理作業日誌より抜粋)
 昭和56年1月9～21日 第11回現地修理
 1月13日「黒いカビ汚れと一緒に線描が不明」
(修理作業日誌より抜粋)
 2月8～19日 第12回現地修理
 (白虎が退色した時期はこの頃と考えられる。)

国宝高松塚古墳壁画第2次修理実施要項 (抜粋)

1. 目的

国宝高松塚古墳壁画の恒久的保存を図るため、第2次修理を昭和53年度から55年度の3ヶ年継続事業として実施する。

2. 事業主体

文化庁の直営事業とし、実行に当たっては東京国立文化財研究所、奈良国立文財研究所等関係各機関に協力を依頼する。

3. 修理担当者

修理監督	文化財保護部美術工芸課長	西川杏太郎
主任	東京国立文化財研究所修復技術部	増田勝彦
	文化財保護部美術工芸課文化財調査官	渡邊明義
		有賀祥隆

4. 保守

修理実施中の高松塚古墳保存施設の管理・機械操作は、美術工芸課員が当る。

5. 保存科学上の処理

修理実施中の通常の保存科学的処置は、美術工芸課員が行い、特別な保存科学的処置については、東京国立文化財研究所保存科学部に協力を依頼する。

*第3次修理に際しても同様の要項を作成

昭和56年6月16日 修理に関する懇談会

昭和56年6月29日～7月3日 第3次修理－第1回現地修理

昭和57年10月5～9日 第2回現地修理

昭和58年5月30～6月7日 第3回現地修理

昭和59年10月23日～11月3日 第4回現地修理

昭和60年4月2日 高松塚古墳壁画の保存に関する打ち合わせ

昭和61年12月17～25日 現地修理

昭和62年1月11～16日 現地修理

昭和62年9月17日 高松塚古墳壁画保存のための検討会

昭和62年3月 『国宝 高松塚古墳壁画－保存と修理－』（文化庁）
刊行

②過去の高松塚古墳壁画の生物対策について（昭和47年～平成13年）
ここで、壁画発見時以降の壁画の生物対策に関する経緯を整理する。

昭和47年～51年 発見～応急処置 「カビは壁画発見直後から発生が見られたため、昭和47年4月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。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槨内に布置し、効果があった。」

（国宝高松塚古墳壁画恒久保存対策検討会第3回参考資料1より）

昭和47年4月6日・17日 高松塚古墳恒久保存対策調査会現地調査
『高松塚古墳応急保存対策調査会中間報告』（昭和47年7月29日）

II 調査の結果

D 石室内外の環境

（iii）微生物 空中と壁面において、微生物の採取調査を実施した。
空中菌の採取は、落下法によった。その結果、石室内調査によって室内の菌数が増加していることがわかった。壁面菌については、肉眼的にはその発生は認められなかった。しかし、採取

培養の結果では東西両壁と床面各 1 か所から、菌が検出された。細菌対策としては、石室内作業終了時に、各約 1 g、計 4 g のパラホルムアルデヒドを布置した。この薬効は、空中菌を殺滅する程度の少量であり、彩画への影響の無いことを期した。

V 学術調査と保護対策

B 学術調査の時期・方法など

(iii) 学術調査期間中の保存科学的調査

- a. 埋め戻し土中のポリプロピレン布の検討
- b. 石室内の応急保存処置の結果の調査
- c. 4 月閉鎖後の壁面の保存状況の調査
- d. 調査期間中の外気及び石室内の温湿度の測定と空中菌の採取
- e. 調査期間中の石室内の炭酸ガスと酸素の測定
- f. その他保存上必要な調査

昭和 47 年 9 月 25 日～10 月 12 日 高松塚古墳総合学術調査会調査

10 月 10 日 J. フォション（パスツール研究所地中微生物・生物科学部長）調査

11 月 29 日 高松塚古墳応急保存対策調査会 『高松塚古墳
応急保存対策調査会報告』

前回の石室閉鎖時に、石室床上に布置した計 4 g のパラホルムアルデヒドは、完全に気化し、石室内に残留していなかった。開口時の測定結果もあわせると、その量はやや僅少にすぎたのではないかと判断されたので、今回の閉鎖時には、1 包 1 g を各 2 包 4 箇所、計 8 g 布置した。

昭和 51～52 年 第 1 次修理

壁画面の定点の拭き取りによる微生物相の調査を行った。目視によるカビの大きな発生は認められていない。

昭和 53～56 年 第 2 次修理～第 3 次修理第 1 回

「昭和 53 年頃から石槨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か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槨内に発生し、絵画にも及ぶ状況となった。特に、

昭和 55 年には、樹脂溶液を注入した箇所、剥落止めに用いたうす紙にもカビが発生した。」

(国宝高松塚古墳壁画恒久保存対策検討会第3回参考資料1より)
これに対しては、

「これらのカビに対する処置としては、ホルマリン1：エタノール9の溶液で滅菌したが、この処置部分に、白色粒上のカビが発生した(昭和56年2月)ので、トリクロルエチレンで除去した。なお、TBZ(防カビ剤)による防カビを実施したが、効果がなかった。

昭和56年6月には高湿度の環境下でパラホルムアルデヒドで燻蒸する方法を開発した。」

(国宝高松塚古墳壁画恒久保存対策検討会第3回参考資料1より)

＊この間、修理仕様(剥落止めの方針・方法等)のように委員会で決定され記録された「仕様書」等の存在は確認できていない。現場におけるカビ等への処置法としては、空筆による物理的な除去、ホルマリン・エタノール溶液、トリクレンをを用いた殺菌が行われた旨の作業メモがある。

「高松塚古墳壁画の修理工具と使用材料」(『国宝高松塚古墳壁画－保存と修理－』)

ホルマリン 殺菌用。消毒用アルコールとの混合溶液として用いる。
消毒用アルコール ホルマリンに混合させて用いるほか、手・器具及び準備室の消毒殺菌にも用いる。

パラホルムアルデヒド 殺菌用。第1次・第2次修理ではシャレーや布袋に入れて、石室内に設置した。
第3次修理からは燻蒸殺菌用として用いる。

昭和57～平成13年 第3次修理～定期点検

昭和57年以降カビの発生は漸減し、昭和60年から平成13年まではほとんど抑制された状態となった。(国宝高松塚古墳壁画恒久保存対策検討会 第3回 参考資料1 より)

この期間、定期点検時の観測定点の拭き取り、培養調査及び点検最終日にパラホルムアルデヒド燻蒸を実施した。

③アクリル樹脂「パラロイドB72」のカビへの影響について

遺跡や壁画の強化、剥落止め等においては樹脂が使用されることが多いが、環境が多湿な日本の遺跡や壁画等では、使用後にカビの被害が問題になる場合がある。昭和48年から昭和50年代の時期を中心に、高松塚古墳壁画の修理（剥落止め）の際に用いられた接着剤は、アクリル樹脂「パラロイドB72」であった。

この樹脂は、当時の壁画保存の世界的権威であった、イタリア中央修復研究所パウロ・モーラ氏らから漆喰層の修理に有効との助言を得て使用されたものである。

修理の際にアクリル樹脂を使用して剥落止めした箇所には、カビ等の生物被害が生じており、少なくとも昭和55年前半から現場ではこれらに相関関係がある可能性が意識されていた。当時の日誌等にある情報を表1と表2に整理すると、昭和54年後半頃から、過去に修理を行った箇所にしばらくするとカビが生える様子が理解できる。昭和55年前半には修理からカビの発生まで1ヶ月程度の時間を要していたが、昭和56年2月には4日前に修理した箇所にカビが発生したことが確認されており、修理からカビ発生までに要する時間がとても早くなったことが理解できる。

近年行われたパラロイドB72等の樹脂を対象としたカビ抵抗性試験によれば、パラロイドB72については、概ねカビ発生との因果関係を示唆する結果が得られた（木川他2005、早川他2008）。

さらに、これらの研究では、高湿度条件下では、壁画の剥落止めに昭和50年代に使用された樹脂（現在入手できるものとしてパラロイドB72）に、高松塚古墳の主要なカビの分離株のいくつかが生育することが示されたが、パラロイドB72を固化させたのちエタノールを噴霧し、再び乾燥させたものは、もとのパラロイドB72よりもさらにカビが発生しやすくなることも明らかとなった。

ただし、パラロイドB72になぜカビが生えるかは現段階では不明である。可能性としては、不純物の影響、あるいはカビが樹脂そのものを資化（栄養源として利用）する可能性、そのほか、樹脂表面の水分がカビに利用されやすい状態にあるなどが考えられる。

（4）取合部天井の崩落止め工事

本工事についてはすでに高松塚古墳取合部天井の崩落止め工事及び石室西壁の損傷事故に関する調査委員会により分析と検討が加えられているため、詳細はその報告書に譲り、ここでは概要を記す。

①取合部天井の崩落止め工事

この工事は昭和 55 年頃から確認されてきた取合部天井の崩落を止めることを目的とした工事で、平成 13 年 2 月から 3 月にかけて実施されたものである。

この工事では、カビ対策を適切に施さなかったことに起因し、工事直後（平成 13 年 3 月）に取合部に大量のカビが発生した。

②取合部天井の崩落止め工事と取合部のカビの相関

この工事とその直後に発生した取合部のカビの直接の因果関係の立証は困難であるが、工事がきっかけとなった可能性がきわめて高いと推測される。

その根拠としては、

- ・わずかな期間で大量のカビが発生したこと
- ・発生要因として、工事方法、温湿度、外気、作業者等による環境変化が考えられること
- ・平成 13 年に大量に発生したカビは、既に取合部の環境内に定着していた常在カビの可能性が高い。

平成 13 年の取合部の崩落止め工事に使用された樹脂のうち、現在入手可能なもの（アラルダイトなど）について、試験を行ったところ、崩落止め工事に用いられた樹脂の一部には、高松塚古墳から主に分離されたカビのいくつかの分離株が樹脂上に生育することがわかった。

③取合部のカビと石室内のカビの相関

平成 13 年 9 月に、石室を開封した際、石室の壁面でカビが発生していた。

このことに関連する事項としては、以下のことがある。

- ・平成 13 年当時の調査結果は、あくまでもカビの属レベルでの調査ではあったが、平成 13 年 3 月以降、取合部で分離されたカビと、平成 13 年 9 月、12 月に石室内で発生したカビでは、属レベルでほぼ同様のものがみられていた。
- ・のちの平成 16 年以降の詳細な種レベルの調査においても、石室内と、取合部のカビのおおまかな種の構成には大きな違いはなかった（ただし、取合部からの試料数は必ずしも多くない状況での比較に基づく）。
- ・石室解体に伴う発掘調査の結果等から、石室は必ずしも外界から隔絶されてはおらず、墳丘から石室へのびる地震痕跡の

亀裂を経て、植物の根や、ムカデ、ダニなどの小動物などが石室の石組の隙間から十分に移動できる状況であったことが明らかとなった。

など

これらの状況証拠より、石室内に平成 13 年 9 月に発生したカビは、平成 13 年 3 月以降、取合部にカビが大発生した事態と無関係とはいえないと推測できる。

なお、『高松塚古墳取合部天井の崩落止め工事及び石室西壁の損傷事故に関する調査報告書』においては、以下の組織上の問題等が一連の不祥事の遠因となったことが指摘された。

- ・ 取合部工事については、史跡、壁画と所管がわかれた文化庁内および研究所内の体制、双方の情報が十分に伝達されないことに起因して、カビ対策が不十分なまま実施され、結果として大量のカビが取合部に発生したものと考えることができる。（同報告書 p 19）
- ・ 現地で石室を密封したまま保存することによる公開上の制約はあったにせよ、組織としての文化庁にはありのままの高松塚の状況を広くかつ正しくオープンにする姿勢に欠けていたというほかない。とりわけ、必然的に劣化を免れ得ない宿命にあった壁画の情報をより率直、積極的に国民に伝え、より広い専門家等の協力を求めていくことが、高松塚という重要な文化財を守る上で、文化庁として最も留意すべきことであったはずである。このように情報公開と説明責任に対する感覚や認識の甘さが、結果的に大小取り混ぜた不手際の連鎖を生んだとも言える。（同報告書 p 56）

（５）壁画の損傷事故

①西壁男子群像の損傷事故

平成 14 年 1 月に室内灯の接触等によって石室西壁の男子群像下方部及び同群像胸部に損傷事故が発生した（『高松塚古墳取合部天井の崩落止め工事及び石室西壁の損傷事故に関する調査報告書』に分析がある。）。

②東壁女子群像の損傷事故

平成 20 年 11 月に東壁女子群像について可視分光分析を行った

際、機器の先端が誤って壁面に接触し、壁面の損傷事故が発生した。

（６）壁画の劣化に関する諸要因に係る当時のチェック体制

壁画の劣化に関する諸要因に係るチェック体制を含む、高松塚古墳の保存対策については、すべて壁画発見に伴い発足した「高松塚古墳緊急保存対策調査会」（昭和 47 年 4 月～同 11 月 関野克会長）及びその後継である「高松塚古墳壁画保存対策調査会」（昭和 47 年 12 月～ 関野克会長）による審議を経て、決定された事項について、文化庁の責任において保存対策が実施されてきた。「高松塚古墳保存対策調査会」には、「保存施設部会」と「壁画修復部会」が置かれ、旧保存施設の設計建設については主に「保存施設部会」で、壁画の修理については主に「壁画修復部会」で検討が重ねられた。各調査会の委員名簿を、表 3 と表 4 に示した。

「高松塚古墳緊急保存対策調査会」及び「高松塚古墳保存対策調査会」（各部会を含む）の開催と、その時期の主要な事項をまとめた年表を、表 5 に示した。「高松塚古墳保存対策調査会」は、第 7 回会合（昭和 50 年 4 月）をもってそれ以降は開催されていない。その後は、本格的な修理が開始される直前に開催された「壁画修復部会」（昭和 51 年 8 月）の記録が残るが、これ以降は部会も開催されなくなり、有名無実化した可能性が高い。おそらく修理の現場における様々な判断等については、この日の部会で決定された「修理組織」のメンバーを中心とした実務者らにより行われたと考えられる。

これらは旧保存施設の竣工から本格的な修理（剥落止め）開始の時期と重なるが、本来であれば、わが国においてはじめての本格的な古墳壁画の修理作業が開始されるこの時期以降こそ、「高松塚古墳保存対策調査会」が機能しなくてはいけなかったと思われる。外部からのチェック機能が事実上失われた中で本格的な壁画の修理が始まったことは、昭和のカビの大発生等への対策にも何らかの影響を与えていると考えられる。

この調査会に代わる組織は、平成のカビの大発生を契機とする「国宝高松塚古墳壁画緊急保存対策検討会」（平成 15 年 3 月～平成 16 年 3 月）まで存在していなかったのである。

10. まとめ

これまで項目ごとに整理してきた事項を時系列に沿いながら横断的に概観すれば、高松塚古墳壁画の劣化の経緯と原因は、以下のように整理することができる。

(1) 壁画発見以前（昭和47年以前）

7世紀末から8世紀初頭頃に制作された高松塚古墳壁画は、昭和47年に発見されるまでの約1300年の間に、地震による石室・墳丘への物理的損傷及びその際に出来た地割れ・亀裂・石材の隙間等、あるいは盗掘口から壁画周辺への草木根・泥・水の流入およびムシやカビの侵入・繁殖の影響等を受けて、不可逆な過程において壁画の劣化が進行していた。

壁画は、長年にわたり相対湿度100%近い環境で保存されたことにより、カルシウム成分等が溶脱し、壁面漆喰の粗しょう化が起り、また漆喰内部には多くの空隙が出来た。色材部分を含む表面には薄いカルサイトの再結晶層が出来、図像が見えにくくなる一方、それが保護膜となり色材や図像が保護された部分もあったと考えられる。同時に漆喰表面の細かい亀裂やしわ、剥落などの劣化も進行した。

(2) 壁画の発見と認識が甘かった生物被害（昭和47年）

昭和47年の壁画発見時、特に4月6日からの文化庁による調査により、壁面を構成する漆喰層が「酒かす状」になっているという記録等がある。このとき漆喰が、かなり劣化していることが確認され、これを放置しておくとも壁画の剥落が進行する危険があることが認識された。また、壁画のもう一つ重要な劣化因子であることが後に判明するカビ等の生物被害についても、壁画発見当時から懸念はされており、適宜生物調査や殺菌処置等が実施されていた。しかしながら、漆喰の劣化と同程度には重視されてはいなかったようである。石室周辺には潜在的に常在菌が存在していたし、後にムシ等の侵入経路であることが判明する地震による地割れもすでに存在していたが、地震考古学の研究が発達するのが主に平成以降ということもあり、当時はあまり認識されなかった。

(3) 認識が甘かったアクリル樹脂の使用と保存施設の設計（昭和47～51年）

高松塚古墳壁画の保存方針は、「高松塚古墳応急保存対策調査会」(昭和 47 年 4 月 6 日～同 11 月 29 日) 及び「高松塚古墳保存対策調査会」(同 12 月 18 日～) において、史跡としての現状変更等の観点を踏まえながら壁画の現状に則した多角的な議論がなされ、イタリアの専門家らの助言もあり、最終的に「高松塚古墳保存対策調査会壁画修復部会」(昭和 48 年 10 月 14 日) において現地保存の方針が決定された。現地保存を実現するために石室南側の墓道部及びその下部にコンクリート製保存施設を設置し、漆喰の剥落止めを中心とした修理作業を行うこととされた。その際、漆喰の強化処置については主にアクリル樹脂(パラロイド B72) を用いることが決定された。保存施設の設計に関しては、「高松塚古墳保存対策調査会保存施設部会」を中心に議論が重ねられ、施工された(昭和 51 年 3 月 29 日竣工)。なお保存施設は出入りのためのもので、石室内環境を制御するものではない。後に、このアクリル樹脂がカビにより資化されることが明らかとなり、また、保存施設の温度制御に係る設計等が石室内温度上昇の主要な要因であることが明らかとなるが、この段階ではそれらのことは認識されていなかった。

(4) 現場の実務者による判断への移行(昭和 51～54 年)

保存施設の完成に伴い、昭和 51 年度から壁画の剥落止めを中心とした本格的な修理作業が開始された。この頃から「高松塚古墳保存対策調査会」はあまり開催されなくなり、現場作業やその判断は現場担当者を中心とした実務者中心に行われるようになった。修理作業(剥落止め)の際には、「高松塚古墳保存対策調査会」で決定された方針に従い、アクリル樹脂に対しトリクレン(トリクロロエチレン)を溶剤として用い、注射器で注入する方法がとられた。当初は防カビ処置としてパラホルムアルデヒドを床面に布置し、それを常温で気化させる方法がとられたが、昭和 53 年頃からこれが常温では気化しなくなった。この背景としては、石室内の湿度環境に何らかの変化が起きた可能性が考えられる。石室内のカビは壁画発見時から確認されており、それは修理作業が開始された初期においても同様であったが、昭和 55 年頃から特にその被害は大きくなり、壁面を汚すようなカビが頻出するようになった。

(5) 昭和のカビの大発生と白虎の描線の退色(昭和 55～59 年)

修理日誌等の当時残された記録によれば、この頃、アクリル樹脂に

よる処置を施した箇所にしばらくするとカビが発生する傾向、あるいはそれが日を追うごとに短い期間でカビが生えるようになる傾向等が現場では認識されていた。しかし文化庁・東文研等においてこれへの対応や代替法に関する議論が組織として行われた形跡はあまり認められない。

この頃から、修理作業の内容として従来の剥落止め処置以外に、カビ等の生物被害への対応が現地作業の中で大きなウェイトを占めるようになり、それは昭和 59 年頃まで続いた。修理作業（後半は生物被害への対応が中心）の際には、おのずと石室内への人の出入りが多くなることとなり、これも生物被害の要因のひとつと考えられる。

昭和のカビの大発生の大渦中にあった昭和 55 年 12 月から翌年 2 月までの間に、西壁白虎の図像（描線）が著しく退色した。この時期、3 回にわたり修理作業が実施されているが、修理日誌によれば、白虎周辺にカビが大量に発生しており、それに対処するため「筆にて拭う」等の物理的な処置がとられた。白虎の図像は、これらの因子が単独あるいは複合したことにより退色したと考えられる。退色後の白虎の図像は、昭和 62 年の修理報告書『国宝高松塚古墳壁画—保存と修理—』（文化庁編）に写真が掲載され公表されてはいたものの、多くの国民に周知されるのは、平成 16 年の写真集『国宝高松塚古墳壁画』（文化庁監修）の刊行を契機とする一連の劣化報道以降のことであった。

（6）「かりそめの安定」した時期（昭和 60～平成 12 年）

理由は不明だがその後カビの発生が小康状態となる。昭和のカビの大発生が一段落した昭和 60 年から平成 12 年までの約 16 年間、石室内点検を年 1 回だけ行い、他の大きな現地作業もほとんど行わない時期が続いた。年 1 回の定期点検は、結果的に石室内への人の出入りを抑制することにもなり、これがこの時期に比較的長期間、カビが大発生しなかった原因のひとつとなった可能性は高い。この間のことを文化庁でも近年まで「かりそめの安定した時期」と呼んでいたが、実際には、この時期はカビの大発生こそなかったものの、次の「平成のカビの大発生」につながる前提となる要因が蓄積されていた時期といえる。昭和 55 年以降、特に平成に入ってから断続的に取合部天井の崩落が点検時に確認され、常在菌が多数生息する土層を新たに露出させた。また昭和 63 年頃からは保存施設の構造上の問題等により石室内温度が外気温より急な傾向で上昇した。

(7) 平成のカビ大発生と損傷事故（平成 13～14 年）

このような状況の中、平成 13 年 2 月に取合部天井の崩落止め工事が実施された。この工事をめぐる諸問題については、すでに『高松塚古墳取合部天井の崩落止め工事及び石室西壁の損傷事故に関する調査報告書』（平成 18 年 6 月）において検証がなされているが、この工事を直接的な引き金として、この後のカビの大発生（平成のカビの大発生）が起きた可能性が高い。工事の設計・施工に関する一連の生物対策が不十分であったこと、またその遠因となった文化庁内（美術学芸課と記念物課）あるいは東京・奈良両文化財研究所をめぐる組織の縦割り構造や情報公開に対する認識の甘さ等については、ここであらためて指摘しておく必要がある。

さらに、平成のカビの大発生の渦中において、その対応作業中に石室西壁の損傷事故が発生した（平成 14 年 1 月）。カビに対処するために、この時期の石室内への人の出入りが多くなったが、結果的にこれがカビ等の発生をさらに促すことにつながった可能性は否定できない。また、墳丘上から石室周辺への雨水の浸入を防ぐために、平成 15 年度に墳丘上の植栽を伐採し、防水シートを設置した。これにより石室周辺への雨水の浸入は抑えられたものの、これが墳丘及び石室の温度上昇の一因となったことが後に明らかとなる。

(8) 石室の解体修理の決定とその後のカビの被害（平成 15～18 年）

平成のカビの大発生を契機として、「国宝高松塚古墳壁画緊急保存対策検討会」（平成 15 年 3 月～平成 16 年 3 月）が設置され、科学的なデータの収集が進められた。続く「国宝高松塚古墳壁画恒久保存対策検討会」（平成 16 年 6 月～平成 20 年 3 月）において、劣化した漆喰層の修理と、カビ等の生物対策を現地で行うことは困難との判断がなされ、石室を解体修理する方針が決定された（平成 17 年 6 月）。

解体修理方針の決定以降、実際の石室解体までの間（具体的な解体方法の検討や発掘調査等を行う期間）の緊急対策として、墳丘上に覆屋を設置し、また、石室周辺に冷却管を設置した。覆屋を設置したことにより墳丘への直射日光や雨水等を避けることができ、冷却管を設置して石室内温度を下げたことにより当時壁面に影響を与えていたカビやゲル状物質（カビ・酵母・バクテリアやそれらの排出物の混合物）が大枠で抑制され、所期の目的は概ね達成された。しかし、その一方で、低温に適応したカビの発生や、低温でカビの色が変化すること等を抑えることはできず、低温による生物対策が恒久対策とはなりえな

いことがあらためて示される形となった。

（９）石室の解体と発掘調査による新たな知見（平成 18～19 年）

平成 18 年 10 月に開始された石室解体のための発掘調査（石室解体時の発掘調査を含む）により、墳丘の構築方法等に関する多くの考古学的知見が得られたが、これとともに壁画の劣化原因に関する多くの重要な情報も得られた。特に重要であったのは、墳丘に過去の地震の影響による多数の亀裂や断層が入っていることが確認できたことで、墳丘の一部は地すべりにより崩落していることも分かった。石室石材を南北に縦断する亀裂の存在や、石室全体がねじれて歪んでいることも地震の影響であることが明らかになった。取合部周辺は地割れにより版築層の構造が相当崩れていることも明らかとなり、取合部天井が断続的に崩落していた原因が特定された。墳丘に刻まれた亀裂を経路として、雨水・木根・ムシ・カビ等が石室・壁画周辺まで及んだことが予想され、実際に石室外面や石材同士の接合面等には多くのカビ等が確認された。また、天井石材の接合面に目地埋めの漆喰を塗り忘れた、「古代の手抜き工事」とでもいうべき箇所があり、当該箇所から石室内に雨水が浸入したことも明らかとなった。これらの事象の大半は壁画発見以前から存在していたものと考えられるが、壁画発見後の石室内への頻繁な人の出入りや、石室内での諸々の作業、あるいは取合部天井の崩落止め工事等を機会に、カビ等の生物被害の拡大を促す前提条件となった可能性が高い。石室解体作業は平成 19 年 4 月に開始され、同 8 月に終了した。これに伴う発掘調査は同 9 月に終了した。

（10）複数の因子による壁画の劣化

以上が、壁画の劣化原因に関する石室解体までの一連の過程であるが、壁画の劣化原因を一つの因子に絞り込めないことが理解出来る。すなわち、壁画発見時以降の壁画の劣化について、特に生物被害が大きく進行した二つの時期（昭和のカビの大発生、平成のカビの大発生）に焦点をあてれば、前者は石室内の湿度環境の変化・修理作業における樹脂や薬剤の選択・度重なる石室内への人の立ち入り等が複合して起こった可能性が高く、おそらくその対応中に白虎の図像が退色したと考えられる。後者はさらに石室内の温度上昇、取合部天井の崩落による微生物（常在菌）を多く含む土層の露出という条件が加わった上で、不十分な生物対策により実施された工事が直接の引き金となった可能性が高く、その後の度重なる石室内への人の立ち入りも生物被害

を拡大させる要因のひとつとなった。

(11) チェック体制の不備

翻って、壁画発見時以降の高松塚古墳壁画の保存対策をめぐるチェック体制を検証すると、初期の保存方針及び具体的な対策については、壁画発見時（文化庁に移管された昭和 47 年 4 月）に設置された「高松塚古墳応急保存対策調査会」（～同年 11 月）とそれに続く「高松塚古墳保存対策調査会」（同年 12 月～）により多角的な議論が行われた。これにより、現地保存の方針が示され、それに伴う壁画修理の方法と保存施設の設計内容等が決定されたが、保存施設の竣工（昭和 51 年 3 月）以降、この調査会及びその作業部会は、解散こそされてはいなかったものの、ほとんど開催されなくなり、有名無実化した。文化庁をはじめとする担当機関の内部事情もこれとよく似た傾向を示し、昭和のカビの大発生時（昭和 54 年頃～）には、実務者を中心とした現場の担当者によって重要事項を判断する構造に変化していた。この状態は、おそらく、「国宝高松塚古墳壁画応急保存対策検討会」が設置される平成のカビの大発生時まで続いた。保存施設が竣工していよいよ本格的に修理作業が始まり、未知の領域に突入し前進する、本来であれば大変重要な段階において、多視点的なチェック機能を有する調査会が機能しなくなり、文化庁等の担当機関でも全庁あげての組織的な取り組みが行われなくなったことが、壁画劣化の遠因となった可能性はきわめて高い。

¹ 秋山光和、柳澤孝：「高松塚古墳壁画に関する二、三の新知見」、月刊文化財 154 号、pp4-13、第一法規、昭和 51 年

² 文化庁監修『国宝高松塚古墳壁画』中央公論美術出版、平成 16 年

3 増記隆介：「壁画に関する二、三の新知見」、月刊文化財 532 号、pp46-49、ぎょうせい、平成 20 年

4 スサは、土壁や漆喰の「つなぎ」として用いる繊維質の材料で、乾燥後のひび割れや落壁防止のために混ぜられるもの。

5 可視光励起による観察は、物質に対し適切に反応を示す帯域の可視域内励起光を与え、励起光を吸収するフィルターを通し蛍光を観察するもの。紫外線と比較して励起エネルギーが微弱であるため、色素や水分を多く含む対象物の場合でも褪色や破壊につながる影響は少ないと考える。

6 サーミスタ温度計は、温度変化に対して電気抵抗の変化の大きい金属の性質を利用し、その電気抵抗率と温度が比例して変わることを利用した温度センサーである。

7 温湿度データロガーとは、温度や湿度のデータを計測し、保存する計器のこと。

8 保存施設掘方とは、保存施設を設置するために墳丘を掘りくぼめた穴のこと。

防カビ剤コートサイドとは、

Acremonium sp.

Doratomyces sp.

Acremonium 属

Fusarium 属 (フザリウム ; *Fusarium solani* species complex clade

9 大気中の空中浮遊菌の採取する方法の一つで、空中を落下してくる菌を採取する。これに対し、大気を強制的に吸引し微生物を集める方法、吸引法もある。

10 培養法によらない微生物（主としてバクテリア）の検出については、採取サンプルから混合 DNA を抽出し、これを用いた変性剤濃度勾配ゲル電気泳動法 (Denaturing Gradient Gel Electrophoresis、DGGE と略記) を採用した。DGGE 法は現在、バクテリア（細菌）の群集解析に広く用いられている。
(バンドについてもここで解説)

参考 国内外の（古墳）壁画の状況について

（１）国内の装飾古墳の保存管理について

わが国には、高松塚古墳・キトラ古墳以外に、装飾古墳とよばれる壁画をもつ古墳が約 600 基存在する。この両者の間では所在する地域や築造年代等において異なる点がみられる。高松塚古墳とキトラ古墳は奈良県に所在し、その築造年代は概ね 7 世紀末から 8 世紀初頭で、壁画は石室内面に漆喰による地塗が行われた後に描かれ、その内容は比較的写実的なものであり、極彩色の色料が用いられている。一方、装飾古墳は九州北部地域と、関東地方北部から東北地方南部にかけての地域に集中し、その築造年代は 6 世紀を中心に 5 世紀から 7 世紀前半にかけてであり、装飾の方法は彩色によるものと、彫刻によるものがあるが、その内容は比較的抽象的なものが多く、一部を除き地塗は行われない。高松塚古墳とキトラ古墳同様に漆喰が地塗された古墳としては、カヅマヤマ古墳、マルコ山古墳（いずれも奈良県）、法塔山古墳（群馬県）があるが、いずれも壁画などの装飾は施されていない。

これらの装飾古墳の主な保存方法には、

- ①主体部等に保存施設を設置
- ②覆屋を設置
- ③石室開口部・入口等に扉等を設置
- ④開口部周辺等に囲さく等を設置

などの方法があるが、管理の程度としては①から④に向かい軽くなる。

また、装飾古墳の公開方法については、石室内に立ち上った上、あるいは石室入口部に設置されたガラス越しに装飾を常時観察可能とするものから、期間を限定し一般公開するもの、まったく非公開のものなど様々である。

これらの保存・公開の方法は、装飾の発見以後、石室内で散発的に発生した生物被害や漏水等の問題に対処するなど様々な経緯をへて策定されたものであり、現在その状態は安定しているものであっても、装飾等の状態にあわせて保存・公開の方法を柔軟に変えている場合が多い。

高松塚古墳と同様に、現地に保存施設を設置した装飾古墳で、史跡指定を受けているものの代表例としては、虎塚古墳（茨城県）、王塚古墳（特別史跡）、珍敷塚古墳（いずれも福岡県）、チブサン古墳（熊本県）がある。珍敷塚古墳が円墳である以外はすべて前方後円墳であり、

その築造年代は概ね 6 世紀代であり、装飾は彩色によるものである。その公開の方法は、石室入口等に設置したガラス越しによるものであるが、公開時期には差があり、珍敷塚古墳とチブサン古墳が常時公開なのに対して、虎塚古墳と王塚古墳は年 2 回の限定的な公開である。装飾の状態については、いずれの古墳も現在は安定しているが、珍敷塚古墳については平成 21 年にカビなどの生物被害が報告されている。

（２）海外の壁画の保存管理について

①イタリアの古墳壁画の修復・保存について

イタリアにおける保存修復に係る組織としては、保存修復高等研究所（ローマ）、硬石工房（フィレンツェ）、考古、美術、建築環境などを所管する各地域の文化財監督局などがあり、歴史的にみてその修復の理念は、芸術作品の潜在的な統一性を回復することにある。絵画の場合、剥落部分、褪色部分、劣化部分を周囲の良好な部分にあわせて補筆、加筆されることがあるが、後世にその部分が識別可能な方法により行われることが求められる。

イタリア国内において墳墓に壁画等が描かれた例としては、エトルリア時代のタルクィニア墓室墓がある。同時代の墓室墓は約 3000 基が確認されているが、壁画で装飾された墓のほとんどはタルクィニアのモンテロッツィに集中し、その数は約 200 基である。タルクィニア墓室墓の壁画は 19 世紀からその劣化が指摘され、当初、剥ぎ取り（ストラッポ）による保存が考えられたが、湿度が高く膠が使用できないため水彩画による記録保存が主体となっていた。20 世紀に入ると、加筆・補筆による修復作業が行われる様になったが、その部分の識別が困難な形で実施されていたため、最終的に加筆・補筆部分は撤去されることになった。第二次世界大戦後、科学的修復技法の発展により壁画は剥ぎ取り（ストラッポ）され、博物館内で墓室として再現展示される事例が増えたが、乾燥した彩色層の発色性が問題となり現在この方法は中止されている。

現在、タルクィニア墓室墓壁画が抱える最大の問題は、見学者・修復者の入室にともなう温度・湿度などの環境の変化であり、それにより彩色層表面で塩類が結晶化し、その過程で彩色層の剥落など問題が発生している。またこれ以外の問題点としては、菌類、藻類、バクテリアの繁殖、昆虫など小動物の排泄物の付着・堆積、異常気象による泥流の堆積などがあげられる。これらの問題に対して、墓室を外気・

見学者から遮断し、見学者数自体も制限したうえで、温度・湿度を管理して環境の安定化を図っている。また保存・修復に使用する薬剤については、可逆性を確保するために化学的、物理的、美的に原材料に近いものを使用し、その処置に際しては美術史、考古学、保存科学の各研究者、修復技術者がチームを構成して検討している。

②フランスのラスコー洞窟壁画の保存について

ラスコー洞窟は、フランス、ペリゴー州モンティニャック村に所在する後期旧石器時代後期の遺跡であり、1940年9月12日に酸化鉄、酸化マンガン、木炭などにより描かれた動物（馬・牛・鹿・バイソン）、人物からなる壁画が発見された。洞窟は石灰岩台地にあり、発見当時、洞窟入口部分は堆積物にふさがれて極めて狭小であり、さらには洞窟上部には不透水層があり、それが洞窟内部への水の侵入を防いでいた。洞窟発見後、洞窟入り口を閉塞する堆積物を除去した上で内部に階段を設置して、一般公開を1948年より開始した。1960年以後の入場者数は年間10万人（1日あたり1800名）であるが、その結果、洞窟内の炭酸ガス濃度が上昇したことから、内部に換気装置が設置され、強い空気の流れが生じることとなった。

1963年には、洞窟内に藻類の発生（緑の病気）が、壁画の表面には析出した炭酸カルシウムの被覆（白の病気）が確認された。入場者の排出する熱と炭酸ガス、照明がその一因とされ、一般公開は中止され洞窟は閉鎖された。これらの問題に対して、ラスコー洞窟救済のための科学調査委員会が設置され、ホルムアルデヒド溶液（ホルマリン）噴霧による定期的な土壌の殺菌が行われた。これらの作業は1970年代まではパスツール研究所、それ以後は歴史記念物研究所がその任に当たっていた。ラスコー洞窟においては、7月から12月にかけて壁面に結露するおそれがあるため空調設備が設置されているが、2001年に老朽化したこの空調設備の改修工事を行ったことが契機になり、ホルマリンに耐性をもった白カビが大規模発生、翌2002年には黒カビも確認された。見つかった白カビは、一箇所から侵入した一つの種が洞窟に広がったものではなく、地上から様々な経緯を辿って侵入したものと推定される。これら新たに発生したカビに対しては、当初、殺菌剤（四級アンモニウム塩水溶液）の噴霧や生石灰の散布を床面を中心に行ったが効果は見られず、その後殺菌剤の壁面への湿布や抗菌剤による処置を行ったところ、2004年までに状況はやや安定化した。

2004年以後には、洞窟内環境を元の平衡状態に戻すことを目的に、

薬剤を使った処理から物理的除去処置へと変更し、2007年には洞窟の平衡回復の様子を確認するために三ヶ月の完全閉鎖を実施した。その結果、カビはほぼ沈静化した但、汚染のひどかった場所や処置しにくい場所ではまだ十分ではない。また殺菌剤はカビの抑制には一定の効果が認められたが、洞窟内環境の平衡状態はまだ不安定であり、現在もその状態を継続的にモニタリングしている。



白虎·昭47



白虎·昭50



白虎·昭51



白虎·昭55



白虎·昭56



白虎·昭58



白虎·昭62



白虎·平16

图 2



西壁男子·昭47



西壁男子·昭62



西壁男子·平14

图 3



西壁女子·昭47

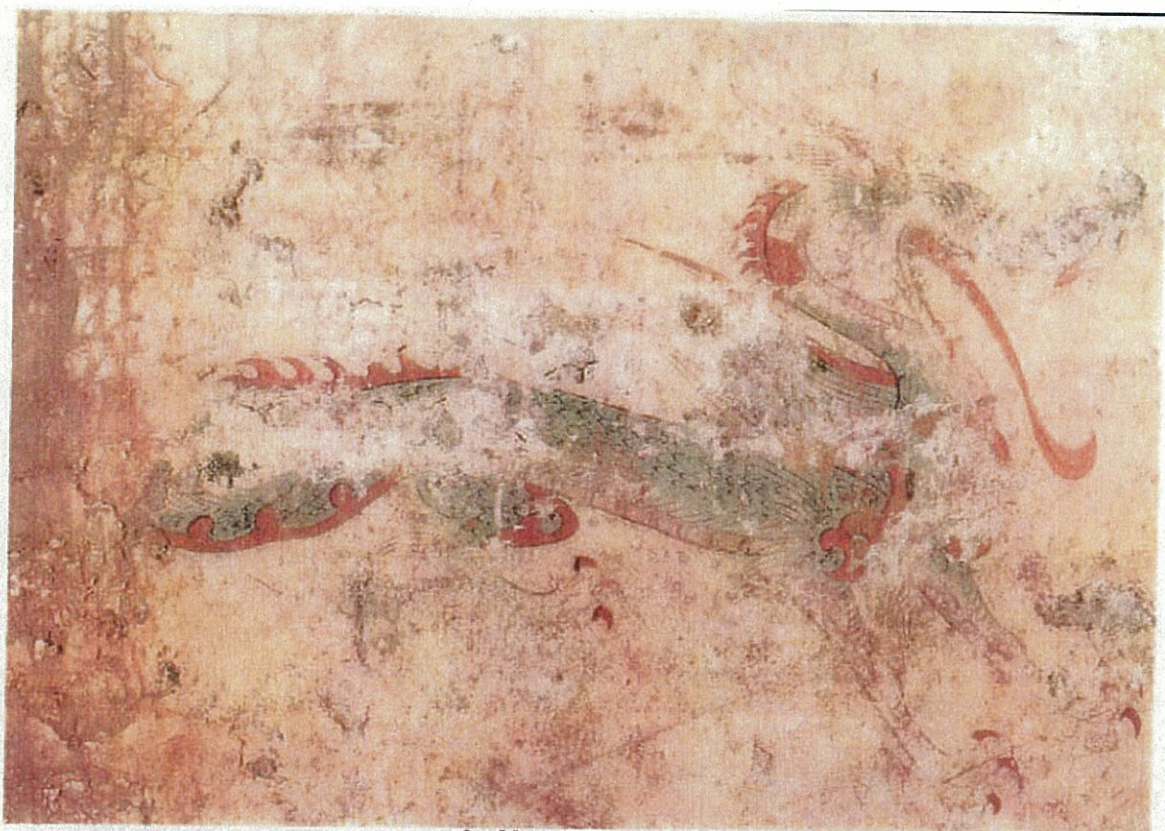


西壁女子·昭62



西壁女子·平14

图 4

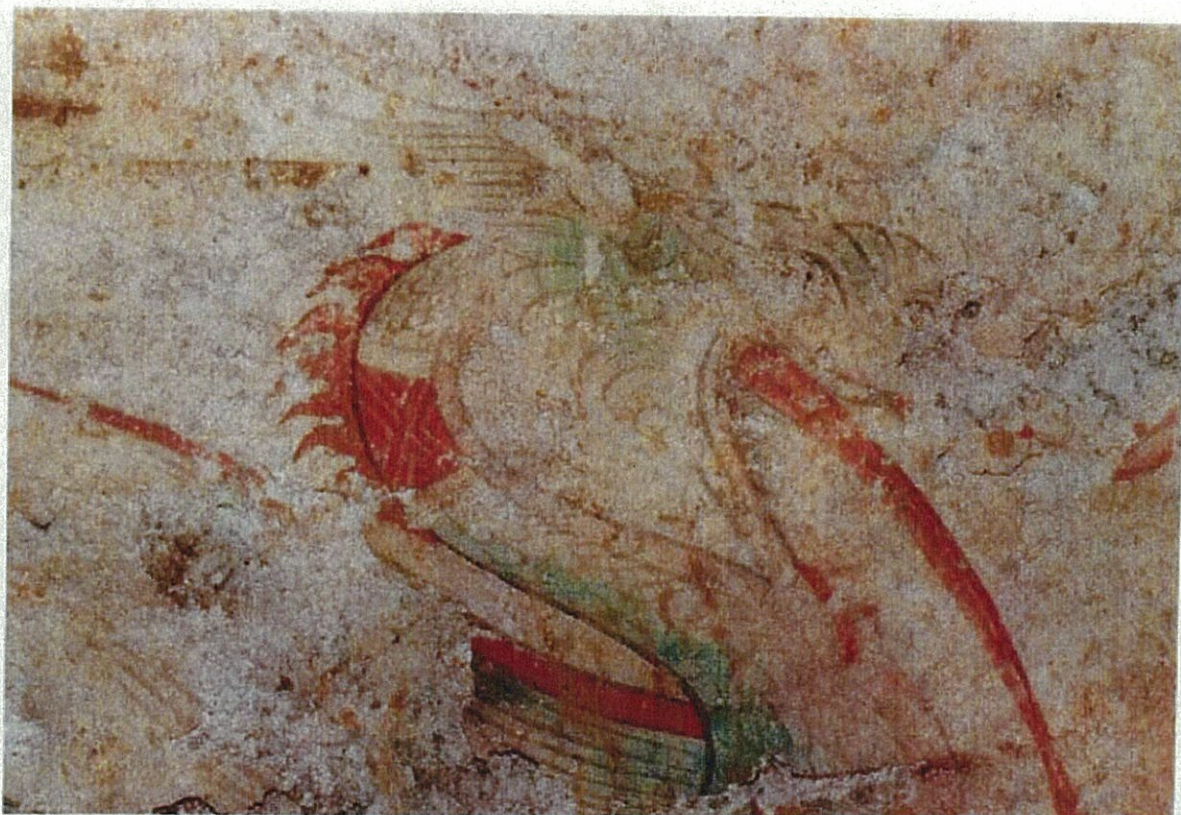


青龍・昭47



56.2.8-2.30

青龍・昭56(頭頂)



54-12-3-1-34

C-10-11

青龍昭54年12月.jpg

1002

図5-2



57.10.9-18

青龍・昭57



青龍・平16

11



図 7

天井・昭47年.jpg



天井・昭和59b.jpg



東壁女子・昭47



60.12.17-29

東壁女子・昭60



東壁女子・平15



東壁女子3・平13年9月.JPG



東壁女子3・平13年12月.JPG

15の2



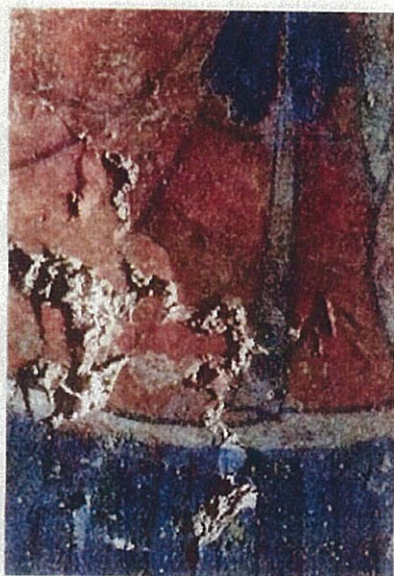
玄武·昭47



玄武·昭62



玄武·平16



西壁女子青裳・昭63



西壁女子青裳・平13.12.1...



西壁女子青裳・平14.1.28....



東壁女子2・昭47



東壁女子2・昭50



NA-1-56-2-11AB

東壁女子2・昭56



東壁女子2・平成14

18

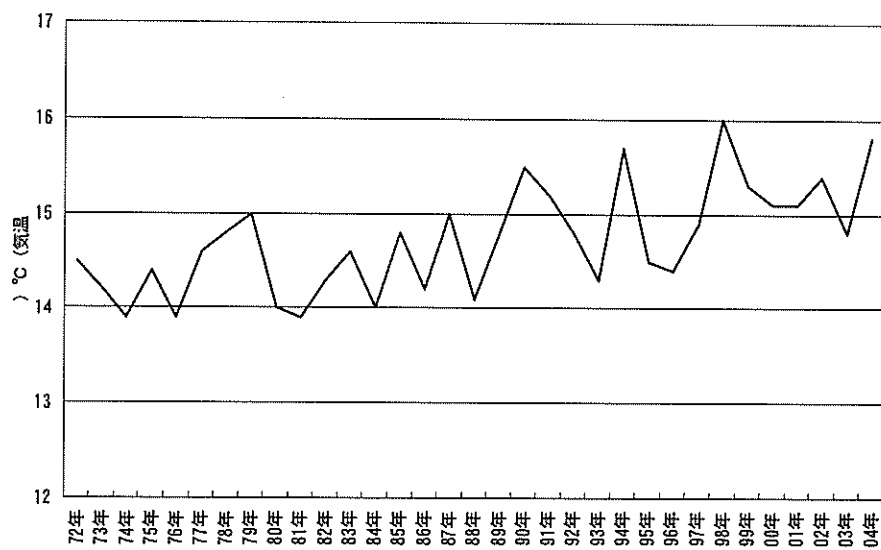


図 1 2 奈良における年平均気温の経年変化（昭和 47～平成 16 年）

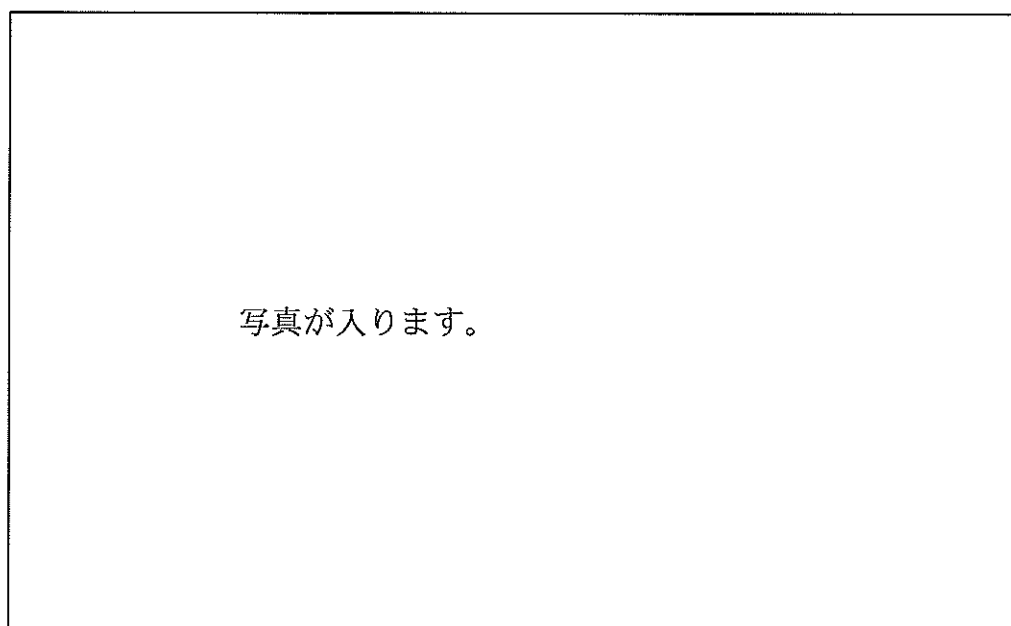


図 1 3 石室内に設置されたサーミスタ温度計

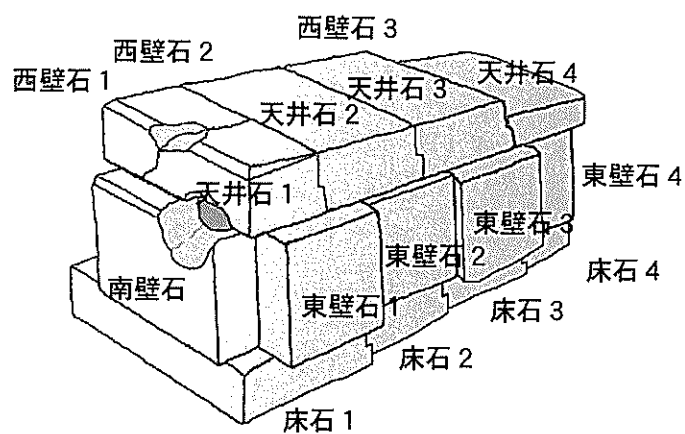
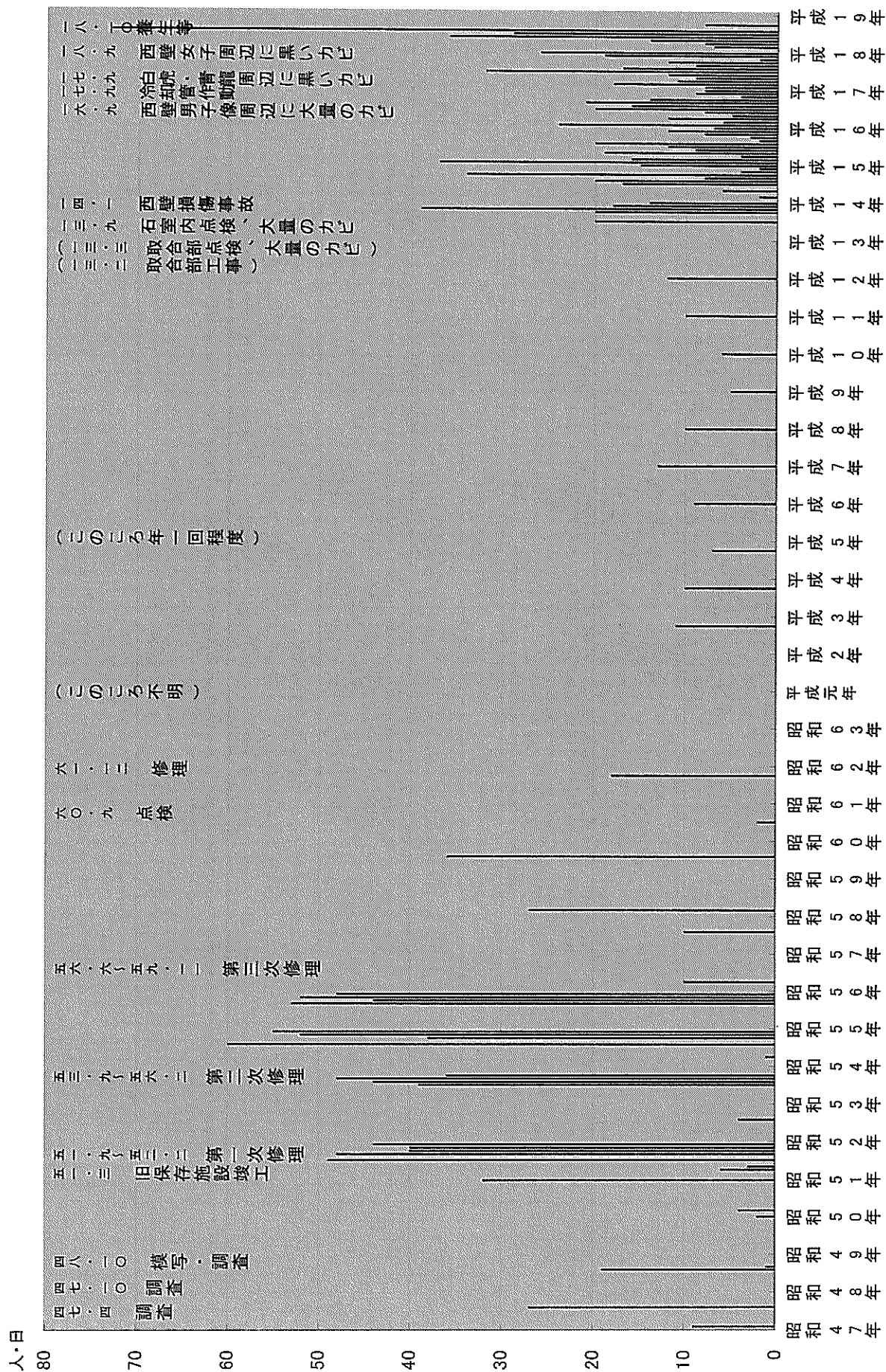


図 1 4 石室を構成する各石材の名称

高松塚古墳石室内の人の出入り



※記録から石室内に出入りしたと判明する人数を月ごとに集計した。

過去の修理(剥落止め)と生物対策(カビ等)の実施時期について(時系列) 表1

年	月	修理(剥落止め)		生物対策(カビ等)		
		箇所	処置	箇所	状況	処置
昭和51年	8月	東2、東3	修理デモ			パラホルムアルデヒド(PFA)を石室内に布置
昭和51年	9月	東1、西1、天1、天2	3%、5%、7%、10%			
昭和51年	10月	天2、天3	3%、10%			
昭和51年	11月	天3	10%、15%	内壁全体	「次第に濃くなっているような気がする」	
昭和51年	12月	西1、東1、天1、天3、南	3%、10%、15%、AC55			
昭和52年	1月	東1、天1、天2	3%、10%、15%、AC55			
昭和52年	2月	東1、天2、天3	3%、15%、20%			
昭和53年	9月	西1、東1	5%、10%、20%			この頃よりPFAが気化しなくなる
昭和53年	10月	西1	3%、10%			
昭和53年	11月	西1、東1	10%、20%	東1		トリクレン、ホルマリン・エタノール(1:9溶液、以下「ホル・エタ」)
昭和53年	12月	東2	10%、20%	天井、東壁、西1		ホル・エタ
昭和54年	11月	西1、東1、東2	10%			
昭和54年	12月	東1、東2	10%、20%	東2(青龍周辺)	黒いしみ	エタノール筆ではらった程度では落ちない。

昭和55年	1月	天1、天2	5%、10%			
昭和55年	2月	西1、西2、天1、天2	5%、10%、20%	天2(前回10%注入した部分)	カビ	採取
昭和55年	11月	西2	10%			
昭和55年	12月	天1、天2	5%、10%、20%	西2(10%注入部分他)、西1、天1	カビ	ホル・エタ
昭和56年	1月	東1	5%、10%	取合部、西1、西2、東1、東2	白いカビ	ホル・エタ、TBZ(試し塗り)
昭和56年	2月	東1、東2、西1、天1、天2	10%、20%	西1、西2、東2(青龍 4日前にカビ拭払した箇所)、天井	白いもの。	トリクレン(白濁)
昭和56年	6月					PFA燻蒸法開始
昭和58年	5月			壁に貼った丸紙	「カビが盛り上がるように発生。殆んど灰色モヤっとしたカビ」	
昭和58年	6月			西1(男子像)	「黒カビによって黒っぽくなっている部分」	消毒用エタノール

* 修理(剥落止め)の表示(%)は、アクリル樹脂(パロイドB72)の濃度(トリクレン溶液)。

* これ以降、平成13年まで、年1回の定期点検時に問題があると判断した箇所について、これ以前と同様の方法で剥落止め処置を実施した。

* 昭和57年以降カビの発生は漸減し、昭和60年から平成13年までは大きな状態の変化は無かった。この期間は、定期点検時の観測定点の拭き取り、培養調査及び点検最終日にPFA燻蒸を実施した。

過去の修理(剥落止め)と生物被害(カビ等)の実施時期について(石材別) 表-2

	西1 (男子)	西2 (白虎)	西3 (女子)	東1 (男子)	東2 (青龍)	東3 (女子)	天1	天2 (星宿)	天3 (星宿)	天4	南	北 (玄武)	取合部	備考
昭和51年8月					○									PFA石室内に布置
昭和51年9月	○			○			○	○						
昭和51年10月								○	○					
昭和51年11月									○					
				(内 壁 全 体 ×)										
昭和51年12月	○			○			○		○		○			
昭和52年1月				○			○	○						
昭和52年2月				○				○	○					
昭和53年9月	○			○										この頃よりPFA気化し なくなる
昭和53年10月	○													
昭和53年11月	○			○ ×										トリクレン、ホル・エタ
昭和53年12月	×			(東 壁 ×)			(天 井 ×)							ホル・エタ
昭和54年11月	○			○	○									
昭和54年12月				○	○ ×(青龍周辺)									
昭和55年1月							○	○						
昭和55年2月	○	○					○	○ ×(前回注入箇所)						
昭和55年11月		○												
昭和55年12月	×	×					○ ×	○						ホル・エタ この頃白虎薄れる
昭和56年1月	×	×		○ ×	×								×	ホル・エタ、TBZ(試し 塗り)
昭和56年2月	○ ×	×		○	○ ×(青龍)		○	○ (天 井 ×)						トリクレン白濁
昭和56年6月														PFA燻蒸法開始
昭和58年5月														
				(壁に貼った丸紙 × 場所不明)										
昭和58年6月	×	(男子像)												消毒用エタノール

○ 修理(剥落止め)、 × カビ

高松塚古墳応急保存対策調査会

関野 克（東京国立文化財研究所長）	保存科学
山崎一雄（名古屋大学教授）	保存科学
登石健三（東京国立文化財研究所・保存科学部長）	保存科学
岩崎友吉（東京国立文化財研究所・修理技術研究室長）	保存科学
江本義理（東京国立文化財研究所・化学研究室長）	保存科学
江本義教（東京国立文化財研究所・嘱託研究室員）	保存科学
末永雅雄（奈良県立橿原考古学研究所長）	考古学
有光教一（前京都大学教授）	考古学
松下隆章（京都国立博物館長）	美術史
岡田 譲（文化庁文化財部鑑査官）	美術史
赤井浩一（京都大学教授）	土木工学

表4

高松塚古墳保存対策調査会委員一覧

(昭和47年12月1日当時及び50年補充)

◆委員

(部門)	(氏名)	(所属)	(担当部会)
保存科学	関野 克	(東京国立文化財研究所長)	保存施設部会・保存対策調査会会長
保存科学	登石健三	(東京国立文化財研究所保存科学部長)	保存施設部会・壁画修復部会
保存科学	岩崎友吉	(東京国立文化財研究所修復技術研究室長)	壁画修復部会
保存科学	西川杏太郎	(東京国立文化財研究所修復技術部長)	保存施設部会・壁画修復部会
－昭和50年4月就任－			
保存科学	江本義理	(元学習院大学教授)	保存施設部会・壁画修復部会
保存科学	江本義教	(東京国立文化財研究所嘱託研究員)	保存施設部会・壁画修復部会
保存科学	山崎一雄	(名古屋大学教授)	壁画修復部会
考古	末永雅雄	(樞原考古学研究所長)	壁画修復部会
考古	有光教一	(元京都大学教授)	壁画修復部会
考古	網干善教	(関西大学助教授)	保存施設部会
考古	横山浩一	(奈良国立文化財研究所主任研究官)	保存施設部会
歴史	井上光貞	(東京大学教授)	壁画修復部会
美術史	松下隆章	(京都国立博物館長)	壁画修復部会
美術史	摩寿意善郎	(東京芸術大学美術学部長)	壁画修復部会
美術史	米澤嘉圃	(武蔵野美術大学教授)	壁画修復部会
土木	赤井浩一	(京都大学教授)	保存施設部会
建築	斎藤平蔵	(東京大学教授)	保存施設部会
構造力学	丹羽義次	(京都大学教授)	保存施設部会
壁画研究	島村三七雄	(元東京芸術大学教授)	壁画修復部会
壁画研究	寺田春弼	(東京芸術大学教授)	壁画修復部会
	井上 靖	(作家)	壁画修復部会
	小川 鍛	(財団法人飛鳥保存財団常務理事)	壁画修復部会
－松下電器産業常務取締役－			
関係機関	内山 正	(奈良国立文化財研究所長)	保存施設部会
関係機関	小川修三	(奈良国立文化財研究所長)	保存施設部会
－昭和50年4月就任－			
関係機関	池田武夫	(奈良県教育委員会教育長)	保存施設部会・壁画修復部会
関係機関	岸下利一	(明日香村長)	保存施設部会・壁画修復部会

◆臨時委員

技術	岡 岩太郎	(装演師連盟会長)	壁画修復部会
技術	絹谷幸二	(画家)	壁画修復部会
技術	三宅 晋	(入江・三宅設計事務所)	保存施設部会
保存科学	樋口清治	(東京国立文化財研究所第2修復研究室長)	壁画修復部会

－昭和50年4月就任－

(注 所属等は発足当時のものである。)

高松塚古墳応急保存対策調査会・高松塚古墳保存対策調査会等の経緯

年	月日	事項
昭和47	3. 1	発掘調査開始（明日香村・奈良県立橿原考古学研究所）（～4. 5）
	3. 21	壁画発見
	3. 26	壁画発見の報道発表
	4. 6	古墳の管理が文化庁に移管 第1回高松塚古墳応急保存対策調査会
	4. 7	史跡指定の諮問及び答申（6. 17史跡指定告示）
	4. 17	応急保存措置（～4. 18）
	5. 19	第2回高松塚古墳応急保存対策調査会
	6. 14	第3回高松塚古墳応急保存対策調査会
	6. 16	寄付金つき切手の発行を定めた特例法成立
	7. 19	第4回高松塚古墳応急保存対策調査会（中間報告）
	8. 21	第1回高松塚古墳総合学術調査会（美術部会・考古部会を設ける）
	9. 18	第5回高松塚古墳応急保存対策調査会
	9. 22	第2回高松塚古墳総合学術調査会
	9. 30	総合学術調査会による現地調査（～10. 10）
	10. 25	『壁画古墳高松塚』刊行（奈良県教育委員会・明日香村教育委員会）
	11. 29	第6回高松塚古墳応急保存対策調査会（恒久保存方針を検討）。閉会。
	12. 18	第1回高松塚古墳保存対策調査会（保存施設部会・壁画修理部会を設ける）
昭和48	3. 21	寄付金つき切手の発行
	3. 29	第3回高松塚古墳総合学術調査会（現地調査のまとめ）。解散。
	3. 31	『高松塚古墳壁画』刊行（高松塚古墳総合学術調査会）
	4. 23	特別史跡に指定
	5. 24	第2回高松塚古墳保存対策調査会（保存施設設置計画、壁画修理計画の検討）
	6月	壁画模写準備開始
	8月	壁画模写開始
	10. 4	第3回高松塚古墳保存対策調査会（保存施設設置計画、壁画修理計画の検討）
	10. 11	壁画修理現地調査（修理調査・試験、模写色合わせ等）（～10. 18）
	10. 14	壁画修理部会（現地保存方針の決定）
昭和49	2. 7	第4回高松塚古墳保存対策調査会（保存施設設置計画案の提出） 保存施設WG
	3. 5	第5回高松塚古墳保存対策調査会（保存施設の基本設計を承認）
	3. 21	壁画模写完成
	3. 31	壁画模写の報道公開
	4. 17	壁画（4面）を重要文化財に指定。同日、国宝に指定。出土品を重要文化財に指定。
	4. 23	第6回高松塚古墳保存対策調査会
	4. 28	壁画模写及び出土品を奈良・岡山・福岡・仙台・東京で公開（～7. 14）
	5. 6	保存施設WGで保存施設の設計等を最終的にまとめる
	7. 1	保存施設設置工事開始
	8. 5	保存施設設置工事に伴う事前発掘調査（1F部分）開始（～8. 14）
	11. 23	保存施設設置工事に伴う事前発掘調査（2F部分）開始（～12. 4）
	12. 25	保存施設（1F、2F）工事完了
昭和50	4. 23	第7回高松塚古墳保存対策調査会（空調機器の基本内容承認他）
	8. 27	空調機器関係設備工事開始
	9. 22	空調用電気ケーブル埋設に伴う事前発掘調査（～9. 25）
昭和51	1. 28	空調機器関係設備工事完了検査。同日運転開始。
	2. 16	壁画修理作業開始
	3. 29	保存施設竣工式

年	月日	事項
	8. 24	高松塚古墳保存対策調査会壁画修復部会の開催（東京国立文化財研究所） （修理日程、修理仕様・方針等の了承、修理組織の確認）
	8. 30	高松塚古墳壁画修理着工について現地新聞発表（部会での了承内容の発表）
	9. 10	文化財保護審議会にて「高松塚古墳壁画の修理実施について」報告
昭和52	5. 23	高松塚古墳壁画修理報告会（明日香村公民館）

(参 考)

[illegible]

表 6

外気温：奈良市気象台における年平均気温
石室内温度：石室内における最高月平均気温
降水量：奈良市気象台における年間降水量

古墳壁画の保存活用に係る調査研究について

平成20年5月9日
文化庁長官裁定

1. 目 的

高松塚古墳壁画及びキトラ古墳壁画の適切な保存活用を行うために必要な事項等を調査研究する。

2. 調査研究事項

- (1) 高松塚古墳壁画の保存活用に関する事項
- (2) キトラ古墳壁画の保存活用に関する事項
- (3) 高松塚古墳壁画の劣化原因に関する事項
- (4) その他古墳壁画に関する事項

3. 実施方法

- (1) 2. (1)、(2) 及び (4) の調査研究を行うため、有識者で構成する「古墳壁画保存活用検討会」（以下「保存活用検討会」という。）を置く。
- (2) 2. (3) の調査研究を行うため、有識者で構成する「高松塚古墳壁画劣化原因調査検討会」（以下「調査検討会」という。）を置く。
- (3) 保存活用検討会及び調査検討会は、必要に応じて適宜情報を提供し合い、連携しつつ検討を行う。
- (4) 2. (1) 及び (2) に関する技術的な事項について調査研究するため、保存活用検討会に保存技術ワーキンググループ（以下「ワーキンググループ」という。）を置く。
- (5) ワーキンググループは、保存活用検討会の委員のほか専門委員をもって構成する。
- (6) 保存活用検討会、調査検討会及びワーキンググループは、それぞれ互選により座長を選出する。座長に事故があるときは、あらかじめその指名する委員（以下「副座長」という。）が、その職務を代理する。
- (7) 保存活用検討会の座長及び副座長は調査検討会に、調査検討会の座長及び副座長は保存活用検討会に、それぞれ出席することができる。
- (8) 保存活用検討会、調査検討会及びワーキンググループは、独立行政法人国立文化財機構及び関係機関の協力を求めることができる。

4. 庶 務

この調査研究に関する庶務は、文化財部美術学芸課古墳壁画室が行う。

高松塚古墳壁画劣化原因調査検討会委員名簿

(敬称略、五十音順)

青柳 正規	独立行政法人国立美術館理事長・国立西洋美術館長
○北田 正弘	東京藝術大学名誉教授 (検討会発足時は東京藝術大学大学院美術研究科教授)
佐古 和枝	関西外国語大学国際言語学部教授
佐野 みどり	学習院大学文学部教授
杉山 純多	東京大学名誉教授・株式会社テクノスルガ・ラボ学術顧問
高鳥 浩介	東京農業大学客員教授
◎永井 順國	政策研究大学院大学客員教授
成瀬 正和	宮内庁正倉院事務所保存課長
和田 晴吾	立命館大学文学部教授

◎：座長、○：副座長

(計 9 名)

高松塚古墳壁画劣化原因調査検討会のこれまでの議事について

- 第1回 平成20年7月4日（金曜日）文部科学省東館 5F3 会議室
 - ・ 古墳壁画の保存活用に係る調査研究について
 - ・ 座長及び副座長の選出について
 - ・ 議事の取扱いについて
 - ・ 高松塚古墳壁画の保存対策について
 - ・ 高松塚古墳壁画の劣化原因調査について
 - ・ 今後のスケジュールについて

- 第2回 平成20年8月27日（水曜日）奈良文化財研究所平城宮跡資料館講堂
 - ・ 高松塚古墳壁画の保存管理について
 - ・ 高松塚古墳壁画の状態変化について
 - ・ 高松塚古墳壁画の劣化の経緯と生物的要因について
 - ・ これまでの発掘調査で判明した壁画の劣化に関する事項
 - ・ 壁画の顔料・描線等の劣化について

- 第3回 平成20年9月30日（水曜日）文部科学省東館 3F1 特別会議室
 - ・ 美術品の劣化と保存について
 - ・ 過去の壁画の保存修理について
 - ・ 壁画の劣化の経緯と生物的要因について
 - ・ 壁画の材料調査について

- 第4回 平成20年10月20日（月曜日）文部科学省東館 3F1 特別会議室
 - ・ 生物劣化にかかわる微生物について
 - ・ 過去の壁画の保存修理について
 - ・ これまでの発掘調査で判明した壁画の劣化に関する事項について
 - ・ 墳丘部の地震痕跡の分析について

- 第5回 平成20年12月11日（木曜日）東京文化財研究所地階会議室
 - ・ 高松塚古墳壁画の科学分析時における壁面の損傷について
 - ・ 海外の壁画の状況について
 - ・ 古墳周辺・石室内の温湿度環境について
 - ・ 壁画管理時の現場における事実関係等の記録について
 - ・ 壁画の材料調査について

- 第6回 平成21年2月19日（木曜日）文部科学省東館 3F2 特別会議室
- ・生物劣化の制御について
 - ・国内の壁画古墳について
 - ・壁画の材料調査について
 - ・劣化原因の検討の経過について
- 第7回 平成21年3月12日（木曜日）文部科学省東館 3F2 特別会議室
- ・市民参加型の遺跡の保護活用について
 - ・カビ等の微生物被害について
 - ・劣化原因に関する検討の経過について
- 第8回 平成21年5月13日（水曜日）旧文部省庁舎 2階第2会議室
- ・高松塚古墳壁画のサンプリング調査実施の具体的な検討について
 - ・国内の壁画古墳について
 - ・高松塚古墳壁画の劣化原因に関する検討について（現地保存から石室解体に至った経緯等）
- 第9回 平成21年7月9日（水曜日）旧文部省庁舎 2階第2会議室
- ・正倉院宝物の顔料調査について
 - ・高松塚古墳壁画の劣化原因に関する検討について（旧保存施設の設計・構造について－取合部を中心に－）
- 第10回 平成21年9月1日（火曜日）文部科学省東館 3F2 特別会議室
- ・考古学的な視点からみた高松塚古墳について
 - ・高松塚古墳壁画の劣化原因に関する検討について
- 第11回 平成21年9月30日（水曜日）金融庁 12F 第2特別会議室
- ・高松塚古墳壁画の劣化原因に関する検討について
- 第12回 平成21年11月30日（月曜日）明日香村立中央公民館研修室
- ・高松塚古墳壁画の劣化原因に関する検討について
 - ・昭和48年高松塚古墳調査時の8mm映像の発見について
- 第13回 平成21年12月21日（月曜日）文部科学省東館 3F1 特別会議室
- ・高松塚古墳壁画の劣化原因に関する検討について