

高松塚古墳の微生物対策の経緯と現状

木川 りか・佐野 千絵・石崎 武志・三浦 定俊

1. はじめに

高松塚古墳は、昭和47年（1972年）に発見され、当時、文化庁によって組織された保存対策委員会により、保存と修理の方針について慎重な検討が行われた。当時、古墳の学術調査には、大韓民国、朝鮮民主主義人民共和国の研究者の参加協力を得¹⁾、さらに保存方針について壁画保存の経験の深いフランスやイタリアの専門家を招聘して検討が行われた¹⁻⁴⁾。その結果、当時、最終的に壁画の現地保存が決断され、その後30年以上が経過した。本稿では、高湿度環境の古墳という特殊な環境での微生物制御の可能性とこれまでの対策の経緯と現状について述べる。

2. 壁画の剥ぎ取りか現地保存かの決断

高松塚古墳が発見された1972年当時、壁画は湿度がほぼ100%RHに近い高湿度に保たれていたため、美しい濡れ色の漆喰壁画であったと記述されている^{4,5)}。しかし、同時に、高い湿度と盗掘の影響などの複合的要因によって、当時でも部分剥落や漆喰下地の浮き上がり、漆喰内部が酒粕状に粗しょう化している状況や、植物の根の侵入など、随所に危険な状態を呈していた^{4,13)}。このとき、剥ぎ取り（ストラッポ）を行うか、現地保存するかについては、真剣に議論が行われたことが当時の記録から読み取れる^{2,4)}。

高松塚古墳の壁画の保存については、まず古墳が発掘された1972年に、フランスのラスコー洞窟の保存に経験の深かったY. M. フロアドヴォ教授と J. ポション教授が調査のため招聘された。この調査後のフランスの専門家の所見は、「壁画は傷みが大きいので、一度剥がして強化し移しかえをするのがよいと思われる。この作業を学ぶため欧州に日本から専門家を派遣すること、同時に欧州から熟練者を日本に招致すること」と壁画を剥がして保存する可能性を示唆するものであった。

しかし、一方では、永年このような高湿度のもとに安定してきた壁画が、湿度の低下を来たしたときには、壁画の美しさを失い、収縮を原因とする新しい亀裂、剥落など起きる可能性が懸念されていた⁴⁾。その後の検討の場では、「壁画はフレスコとは考えがたく、フレスコを前提としての剥離修理（ストラッポ）はそのまま認めることはできない」という意見も出されたという²⁾。このような当時の状況を、当時の文化庁の美術工芸課長の濱田隆氏は、「我々にとって全く経験のないこのような限界状況を認知した時から、われわれには新しい分野への道の挑戦が始まったのである。」と記述している⁴⁾。

壁画を取り外すか、現地で保存するかという問題について、当時の文化庁の濱田隆氏、東京国立文化財研究所修復技術研究室長の岩崎友吉氏がイタリアへ派遣され、イタリアの壁画保存の実情の調査が行われた。当時、イタリアで剥ぎとられた古墳壁画を視察した濱田氏は、「私がイタリアで実見したエトルスクの古墳壁画の実態はまったく生彩のないものであった。」と記述しており⁴⁾、さらに高松塚古墳壁画については、「永年高湿度のもとに安定してきた壁画にとって、湿度の低下を来たすことは壁画の新鮮さを失うばかりか、収縮を原因とする新しい亀裂、剥落のごとき致命的損傷を引き起こすであろう」⁴⁾と記述している。その後、イタリア

の国立中央修復研究所のモーラ氏夫妻が招致され、壁画の調査にあたった。その見解を聴いた後、討論を経て、最終的に「壁画は歴史上・芸術上・保存上の観点から、現地保存とする」という方針が結論づけられた^{2,4)}。

このような当時の状況を総合的に考えると、歴史的記念物の保存理念として当然とされていた“現地保存の原則”を敢えて冒してまで、非常に難易度が高く、したがってリスクも高い「脆弱な漆喰壁画のストラッポによる剥ぎ取り」に踏み切るという判断は現実的ではなかったと思われる。「濡れ色の美しい壁画を本来の状態での現地保存」という決定は、当時の記録を見ると、当時の自然な判断であったと思われるのである。

3. 高湿度環境と微生物の生育

では、微生物の制御という観点からこのような現地保存について考えると、どうであろうか。

微生物の生育には、温度、湿度（水分）、酸素濃度、pHなど、さまざまな環境条件が影響する（図1）。

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もっとも確実な方法である。しかしながら、高松塚古墳の壁画においては、「壁画は歴史上・芸術上・保存上の観点から、現地保存とする」「湿度の低下を来たしたときには、壁画の美しさを失い、収縮を原因とする新しい亀裂、剥落などが懸念される」⁴⁾という基本方針により、水分（湿度）による制御の道が最初から絶たれていることになる。

では、ほぼ湿度100%RHの環境とは、微生物にとってどのような環境であろうか。

図2は、室温におかれた試料（干草や食品といった、栄養分の豊富なもの）を、実験的に一定湿度の環境に置き、カビが目視で認められるようになるまでの期間を示したものである⁶⁾。これをみると、湿度100%RHの環境に栄養分が豊富なものが置かれた場合、およそ2-3日でカビが発生することがわかる。また、図3は、さまざまな微生物が発育できる最低の水分活性（ここでは、便宜的に平衡にある相対湿度を100でわった値と考える）を、文献7,8)を参考に示したものである。その結果、ほぼ湿度100%RHの環境は、非常に多くの種類のバクテリアやカビ、酵母が容易に生育する条件であることは明白である。

- ・ 温度
- ・ 湿度（水分）
- 高松塚では、芸術性を考慮し、高湿度
- ・ 酸素濃度
- ・ 栄養分
- ・ pH ………

図1. 微生物の生育に影響する環境条件

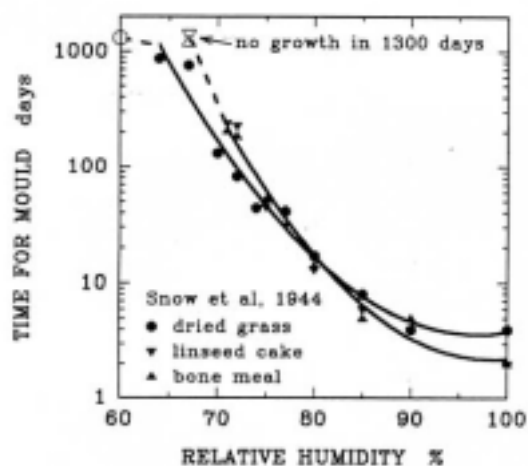


図2. さまざまな相対湿度条件でカビが目視で確認されるまでの日数 (Michaliski (1993)⁶⁾より引用) 干草や食品など栄養分が豊富な試料について

では、そのような微生物をどのように制御すれば良いか。

表1は、高松塚古墳の石室の環境を想定して、主要な微生物制御法について、バクテリアへの効果、カビへの効果をそれぞれおおまかに評価してみたものである。

まず、2行目の乾燥であるが、もし仮に60%RH以下の環境が維持できたとすれば、バクテリアもカビも繁殖することがない。しかし、高松塚古墳の場合、高湿度で現地保存することが前提となっているので、このような制御は不可能である。そこで、温度を考える。微生物の生育を抑え、かつ劣化を遅くするためには低温にする方法がある。温度を零下まで下げると、大部分の微生物の発育はほぼ抑制されるであろうが、問題は、ほぼ100%RHの高湿度環境では、今度は凍結劣化の問題がでてきて、もとより非常に脆弱な漆喰壁面に物理的な劣化が及ぶことになる。では、冷蔵庫程度の3-10度くらいの低温ではどうであろうか。この場合にも、冷蔵庫のなかで食品は、ゆっくりとはあるが、カビが生え、バクテリアで食品が腐敗するのをみて判るとおり、冷蔵庫程度の低温では、微生物の生育は遅くすることもできても、生育を完全に

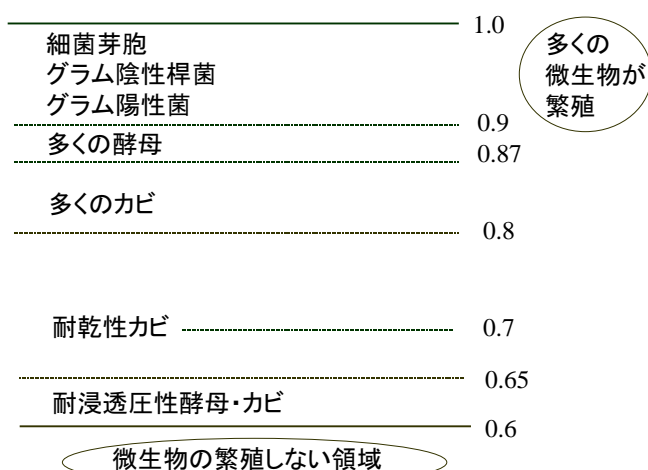


図3. さまざまな微生物の発育に必要な最低水分活性（文献 7）8）を参考に作成）

表1 各種の微生物の制御方法と石室環境を想定したときに期待される効果

方 法	バクテリアへの効果	カビへの効果	可 否
低温	△	△	大規模施設への改変が必要
乾燥（60%RH以下）	◎	◎	不可
酸素を除去	×	○	不可
汚染源や栄養を減らす	△	△	できるだけ
薬剤	△	△	壁面に極力影響を与えないもの、作業員への安全性

抑制することはできない。実際に、高鳥浩介博士あるいは阿部恵子博士による高松塚古墳から分離された菌株の発育温度試験の結果をみても、5度、10度という低温でもカビや酵母などの発育をすべて抑制できるわけではない^{9,10)}。したがって、バクテリアやカビへの効果は、「まったくないわけではないが、完全ではない」、すなわち表中では、△としてある。しかも、恒久的な低温施設を考える場合は、相当な大規模施設が必要となり、冷却によって部分的に温度差が生じれば、結露が起きて、かえって微生物の生育を促す危険性もあること、災害時などに停電が起きた場合、急激な温度変化によって内部に環境の急変が起きる可能性があるなど、かなり技術的な問題は大きいと考えられる。

次に酸素濃度を下げ、カビの生育を抑制する方法であるが、この方法を実現するためには石室に高い気密性が要求される。この可能性に関して検討するため、石室の気密性が測定された。その結果、石室の気密性は低く、漆喰壁面に影響が及ばないような微風速で石室内を常時窒素置換し、低酸素濃度に維持することは不可能であることが示された¹¹⁾。また、仮にほとんどのカビの生育を抑制するような酸素濃度（酸素濃度およそ0.1%未満）に石室が保てたととしても、バクテリアのなかには通性嫌気性、嫌気性といった、生育に酸素を必要としないグループがあり、このようなバクテリアの発育を抑制することはできない。

残された方法は、「清浄度管理」すなわち、微生物の栄養源となる有機物や、汚染源である新たな微生物の外部からの持ち込みを極力なくすこと、そして、石室内に存在する微生物の安定を変化させないような「環境管理」、それでも制御できないときの補助手段としての薬剤の使用である。

「清浄度管理」および「環境管理」については、次項で述べるとおり、高松塚古墳の現地保存のもっとも基本的な方針である。しかし、「清浄度管理」については、石室は土中に埋まっているものであり、さまざまな記録^{12,13)}にあるとおり、昆虫やワラジムシ、ムカデやダニなどが常に侵入し、かつ植物の根なども侵入している状況で、完全に微生物の栄養源となる有機物をなくすことはまず不可能である。したがって、少なくとも外部から中へ入る人間が新たな外部微生物を持ち込んだり、栄養源となるような有機物を持ち込んだりすることを「できる限りなくす」というほかはない（表1）。

「環境管理」について言えば、高松塚の現地保存の原則は「発掘前の状況にもどす」ことであったので、ゆるやかな温度の季節変動は土中でも起きてきたことであり、高松塚の保存施設は、基本的に土中の温度の季節変動をそのまま維持する形で設計された。一方、急激な温度や湿度の変化は、脆弱な漆喰壁面にストレスを与えるだけではなく、土中の石室壁面に潜在的には存在しても、普段は積極的に活動していない微生物を刺激して「起こし」、場合によっては活動を促すことになる。このような観点から、点検のため止むを得ず人が入るときには、タイベックスや、微生物や塵を極力通さないマスクを着用し、温度と湿度を厳密に管理した状態で入室する手続きがとられてきたのである。

このような厳重な管理をしていても、微生物の活動を制御しきれない場合、やむを得ず、薬剤を使用することになる。しかし、薬剤として、まずは漆喰壁面に変色や化学変化などの影響を極力与えないものを選ぶ必要があり、かつ入室する必要がある作業員への安全性を考慮すると、使用できるものは非常に限られてしまう。また、殺菌を行っても、殺菌効果は一時的なものであるため、カビの死骸が現地に残っている限りは、他のカビや微生物の栄養源となってしまう。壁面に影響を与えず、土中のすべての微生物を滅菌できるような方法は皆無である。残効性がある薬剤を考えても、100%RHの高湿度環境で安定な薬剤は少なく、短期間に劣化する。従って、定期的に塗布することになり、使い続けることによる影響も過小評価できない。さらに、

漆喰壁など多孔質材質では、薬剤の塗膜を形成しにくく、また完全にすべての小さい孔のなかに薬剤が浸透していくわけではないので、薬剤は効きにくいという難点もある。「使用しても、今後長期にわたって壁面に変色や劣化などの原因にならないことが保障されており」、「人体への毒性が低く」、「きわめて高湿度環境でも安定で効果があり」、「必要なときに壁面から除去できるもの」という制約のなかで、薬剤による根本的な制御を望むのは不可能である。薬剤はそれを使用することによる壁面への影響というリスクとひきかえに、止むを得ず使用するものであり、ひとつの補助的な手段としかなり得ないのである(表1)。

まとめると、壁面の現地保存により、湿度(水分)管理による微生物制御の道が絶たれている高松塚古墳では、「できる限りの」環境管理と清浄度管理を行い、補助的に薬剤を使用する、ということが微生物制御の基本的な対策にならざるを得ない状況であった。

4. 現地保存の基本理念となった「発掘以前の安定した状態」

さて、ここで高松塚古墳の現地保存の基本となったアイデアをひとことでいうならば、「壁面を発掘以前の安定した状態に保つ」ということであった。これは、すなわち、「発掘前には壁面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。この環境に戻してやれば、古墳はもとのように安定した状態で保つことができるのではないか」という考え方である。

では、発掘前の石室でなぜ微生物の活動が一時的に止まっていたのであろうか。

この説明としては、「酸素濃度が低くなっていったからではないか」という説や、「屍毒」のために微生物の生育が抑制されているという説、アミンが屍毒として働いているのではないかという説¹⁴⁾など、いろいろな説がある。しかし、筆者は、一番大きな理由は、「発掘前の環境は、外界からほとんど遮断されているため、永年の間に微生物的に“平衡状態”に達している」ためではないか、と考えている。ここでいう、微生物の活動の“平衡状態”とはなにか。それは、「外界から遮断された空間では、ほかの目新しい微生物や栄養分が入ってこなければ、そこに常に存在する微生物がある程度発育したあと、微生物の動的な変遷が止まり、微生物の活動が一時的に止まっている状態」と言ってよいと考える。

身近な例で考えると、たとえば、栄養寒天培地を入れた試験管に特定のカビを植えて栓をして、外界から遮断しておいた場合、培地の上に、それぞれのカビはある程度増殖したあとに、増殖が止まる(図4)。ここで見かけ上は、動的な変化がないので、“平衡状態”に達したと仮に呼ぶとする。このあとは、細胞が老化するにしたがって、だんだんと死んでいくのであるが、寒天培地が乾いてしまうまでこの系のみかけはずっと変らない。しかし、途中で栓をあけると、ほかのカビの胞子が飛び込み、あるいはカビをえさにするダニなどが侵入して、試験管のなかの様子はどんどん変化していく。これは、“外部の影響により平衡が破れた”例と考えられる。

次の例は、たとえばあるバクテリアを液体培地で培養するような例である(図5)。最初はごくわずかであったバクテリアは、栄養が豊富な環境で、指数関数的に増殖し(対数期)やがて、栄養分を食い尽くしてきたところで、増殖が止まり(定常期)、やがて死滅が始まる(死滅期)。この場合も、しっかりと栓をしているため、外界からほかのカビやバクテリアが入ってこないが、仮に栓をあけると、このバクテリアの死骸をえさに、ほかの微生物が次々と繁殖し、動的な微生物の増殖連鎖が続く。

では、古墳石室の場合はどうであったらうか。まず、古墳が造営され、被葬者が埋葬された直後の状態は、さまざまな微生物が急激に増殖したであろうことは想像に難くない。それに、

土中のダニや昆虫という小動物も加わって、めばしい有機物という有機物を栄養源にして増殖したと想像できる。土中の環境は、厳密に言えば、完全に閉鎖系ではない。土中の微生物、小動物がいくらかでも入ってこられるからである。しかし、大きな意味でいえば、その土中に存在する微生物のフローラ、小動物の種類はそう大きく変動するものではないと考えると、その系のなかで活動できる微生物と小動物が活動しつくしたときに、みかけ上は、動的な変化が止まって“平衡状態”に達すると考えることができる。

発掘前の状態は、いうなれば、「このきわめて特殊な環境で活動できる微生物と小動物が活動しつくしたあと、一時的に”平衡状態”に達していた状態」ということができるのではないかと、考えている。

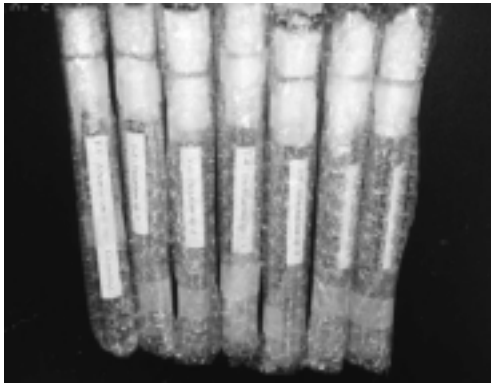


図4. 試験管のなかのカビ

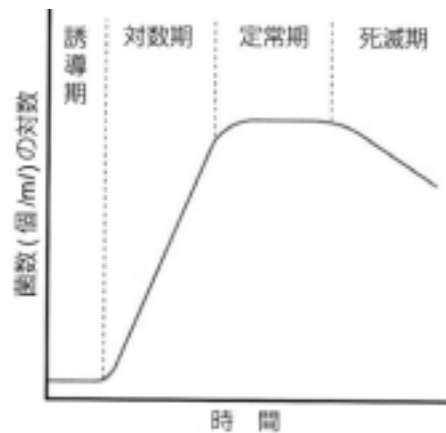


図5. 微生物の成長曲線 別府輝彦(2004)「新・微生物学」²¹⁾より引用

5. 平衡状態を保つ条件

「発掘前の状態を保つ」ということは、すなわち、微生物についても、みかけ上微生物が動的に活動しない“平衡状態”を保ちなさい、ということにほかならない。

平衡状態が保たれるためには、

- ・外界から新たに微生物が入らず、
- ・外界から新たな栄養分となる有機物が入らず、
- ・温度、湿度、酸素濃度 などの条件が(急激に)変化しない

ことが条件となる。

すなわち、そのような変化がなければ、これまで築かれてきたバランスは崩れない、ということである。

しかし、このことの裏を返せば、「外界からの微生物の持ち込み、栄養分の新たな持ち込み、温度変化、湿度変化、酸素濃度の変化、などの変化要因があれば、バランスは容易に崩れる」ということである。すなわち、このようなバランスを崩す要因を徹底的に制御しない限り、「発掘前の状態を保つ」という概念による保存は不可能と言ってよい。

ここにきて、さきに述べたように、高松塚古墳壁画の現地保存については、「清浄度管理」と「環境管理」が微生物制御の基本的な対策にならざるを得ないと述べた理由は明らかであろう。

平成16年から高松塚古墳壁画恒久対策検討会委員の高鳥浩介博士によると、「カビはちょっとした温度、湿度の変化が原因となって、増殖することがよくある」との事であり、急な環境変化が原因で、それまでは潜伏していた新たなカビが発生することは普遍的なことと考えてよいと思われる。

「発掘前の状態に保つ」最もてっとり早い方法には「埋め戻し」がある。事実、中国ではこのような古墳壁画の保存に際し、「埋め戻し」を行ってきた例があると聞く。しかし、高松塚の場合は、埋め戻さずに、石室を現世につなげて必要な時には見られる状態にしたまま、「発掘前の状態に保つ」ことを目指したのであり、このこと自体が漆喰壁画では当時類例を見ない大きなチャレンジであったと言える。

このような事情を鑑みると、高松塚古墳の一般公開は、脆弱な漆喰壁画を保つための厳密な「清浄度管理」と「環境管理」の必要性から、当時どう考えても不可能であったといえる。虎塚古墳などの例では、ガラス張りにして一般公開を実現しているが、高松塚古墳の場合は、人ひとりが水泳の飛び込みのような格好でやっと石室内に入れる盗掘口がひとつあいているだけで、かつ、石室内は幅約1m、高さ約1m、奥行き約2mの狭い空間である。この想像しがたい狭小さのため、わずかな前室の環境変化でも、石室内におよぶ影響は大きい。ここで、唯一の入り口である小窓程度の盗掘口をガラス張りにしてでも公開するという事は、非常に難しくなると想像する。

また、よく誤解されていることであるが、当時設計された高松塚の保存施設は、石室の温度や湿度を積極的に一定値にコントロールする施設ではない。当初のアイデアは「石室の環境が発掘以前の（土中の）安定した状態に保たれること」であり、（石室はもともと土中に埋まっているのだから何も条件を変えずに）、点検の際、石室を開封することによって急激に石室の温度、湿度を変化させることのないよう、「前室を土中と同じ温度、湿度に保つ」ように設計されたものであった¹⁵⁾。

高松塚古墳石室は非常に狭小な空間であり、人ひとりが作業で入っただけで、簡単に温度上昇が起こり、また呼気の湿気の影響を受けてしまうような空間である。また、それに隣接する空間の影響も大きい。このため、原則として非公開、点検などやむを得ない場合のみに入室、作業時間はなるべく短縮する、入室する際には持ち込む器具はすべて消毒し、作業者はタイベックス、マスクを着用し靴裏を消毒した専用の靴をはいて入室するなど、作業、点検時には厳しい取り決めがあり、それにのっとって通常は作業が行われてきた。（図6）



図6. 石室内作業を行う際の装束

6. 平衡状態が崩れる機会

しかし、高松塚古墳の場合、歴史的にたどると、微生物的な平衡状態を破るような機会が何度かあったことがわかる。それは

- (1) 過去にあった盗掘など
- (2) 1972年の発掘による、石室の開封
- (3) 1976年以降の必要不可欠な漆喰壁画の修復作業
- (4) そのほかの外的な要因

などである。

高松塚古墳は、過去から遡ると、その都度、温度、湿度などの急激な変化、栄養状態の変化、微生物の持ち込みなどによって、微生物のバランスが崩れることを経験してきているといつてよい。

以下に順にその時々状況を述べる。ここでは、発掘が行われた1972年以降の期間を、便宜的にⅠ期からⅣ期として整理して述べる。

<過去の盗掘など>

石室が開封されると、急激な温度、湿度などの変化、外部からの微生物の持ち込みがあり、盗掘があるたびに、それが引き金となって新たな微生物の増殖や、物理的損傷等が進んだと思われる。

<Ⅰ期- 発掘直後 1972-1975年>

以下は、国宝高松塚壁画恒久保存対策検討会（第3回）資料からの要約、抜粋である。

「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。」（国宝高松塚壁画恒久保存対策検討会（第3回）参考資料1¹³⁾からの要約、抜粋）

この時期、発掘して石室を開封したことにより、人の入室時に微生物数が増加すること、発見直後からカビの発生がみられたことが窺える。石室の開封は、それまで土中に埋まっていた古墳壁画にとって、大きな環境の変化であった。

<Ⅱ期- 第一次修理、第二次修理の時期 1976-1981年>

発見当初、壁画の漆喰層の状態は「亀裂・剥離・陥没・粉状化を生じ、表層部分は剥落等の損傷状態を呈していた。天井の粉状化は殊に甚だしく、天井石の継ぎ目に沿って米粒大の漆喰小片の落下が多くみられ、星宿の部分まで落下してしまう恐れがあった¹³⁾」という記述にみるとおり、著しく傷んでいた。このため、剥落を防ぐための修理は、現地保存を行う場合も必要不可欠であった。当時は、溶剤としてトリクロルエチレンがまだ規制されていなかった。有毒な溶剤等を換気しながら使用し、壁画を守るために、高湿度かつ狭隘な石室内で、作業者にとってはきわめて困難、かつ命がけの作業が行われた時期である。

この時期に使用された樹脂は、パラロイドB72（アクリル系樹脂）（第一次修理以降）、アクリル系エマルジョン（第一次修理、昭和51年に天井の一部のみ）¹³⁾であった。

しかし、作業時には、どうしても作業者がまとまった時間、石室内に入室する必要があり、また、剥落止めのために、樹脂も漆喰面に使用された。必要不可欠な作業であるが、このよう

な温度変化、漆喰壁面の栄養状態の変化、少しではあっても、どうしても避けられない外部微生物等の持ち込みは、石室にとっては大きな負荷にならざるを得ず、この時期、石室内壁面にカビが発生した。以下のその頃の様子を引用する。

「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。」

(国宝高松塚壁画恒久保存対策検討会(第3回)参考資料1¹³⁾)

剥落止めの作業の困難さに加えて、カビの増殖を止める必要があり、想像を絶する努力が行われた時期であった。

このときの処置については、以下の記録がある。

「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。」(国宝高松塚壁画恒久保存対策検討会(第3回)参考資料1¹³⁾)

この時期のカビの殺菌、除去は非常に困難な作業であったと推察される。のちの項でも詳述するが、いくら殺菌しても、カビの死骸が残っていれば、それを新たな栄養源として、土中のほかの微生物や小動物が繁殖する。したがって、殺菌とともに、カビを物理的に除去することも、新たなカビの増殖を抑えるためにはきわめて大切であり、殺菌除去作業がすすめられたと推察される。

この時期の多大な努力によって、このあとカビの被害は漸減していくが、壁画の一部にはこの一連の出来事によって、描線が薄れるなどの影響が及んだ(図7)。

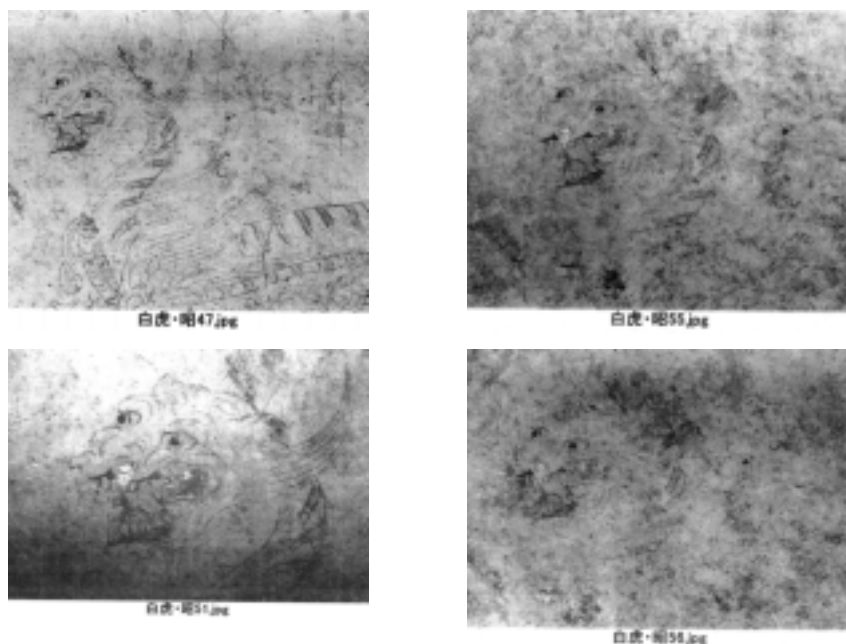


図7. 西壁白虎の様子(国宝高松塚壁画恒久保存対策検討会(第3回)参考資料1¹³⁾より)

＜Ⅲ期- 沈静化の時期 1982-2000年＞

「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。」（国宝高松塚壁画恒久保存対策検討会（第3回）参考資料1¹³³）

剥落が危ぶまれた箇所への修理は、これ以前にすでに一段落し、この時期はほとんど石室内への立ち入りがなくなった時期でもある。この時期には、いったん崩れていたバランスが再び回復し、微生物の活動という点では、動的な変化がほとんどなくなり、新たな平衡状態が形成されていった時期であった。

しかし、三浦らの報告¹⁶⁾にあるように、実はこの時期は、墳丘の外の外気温そのものが徐々に上昇している時期にあっており、それに呼応するように、石室内の平均温度も上昇していったこと¹⁶⁾が後に明らかにされた。

＜Ⅳ期- 再び平衡状態が破れる 2001年- >

「平成13年春に取合部天井の崩落止め工事を実施したが、この時からカビが取合部及び石槨内に発生し、絵画にも被害が及んだ。」（国宝高松塚壁画恒久保存対策検討会（第3回）参考資料1¹³³）

取合部とは、石室の閉塞石の前の、土を固めたせまい空間である。石室の入り口として使用されている閉塞石の盗掘口は、この取合部に存在する。発掘からおよそ30年近く年月が経過すると、施設の老朽化はある程度免れ得ない。取合部天井から土が崩落し始め、雨のときに取合部に水がたたまっているという状況も確認されていたため、取合部天井の崩落止め工事が実施された。これも、施設を維持するためには、必要であった。

しかし、このとき強化された部分に、カビが大発生する事態となった（図8）。

2001年以降の詳しい状況については、＜資料1＞にまとめるが、ここでは、このとき以降の状況を要約して記述する。

取合部は、閉塞石をはさんで、もっとも石室に近接する空間である。ここで、おびただしいカビが発生したという事態を受け、取合部の殺菌や防カビに必死の努力が続けられた。このような状況で石室を開封すると、多くのカビが持ち込まれることは必定であったので、2001年3月の石室内の点検調査はいったん中止され、取合部のカビがある程度沈静化する2001年の9月まで石室の調査は延期された。

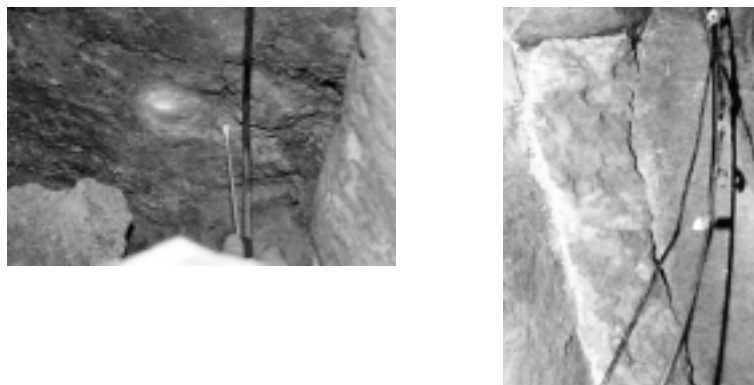


図8. 取り合い部工事の後、2001年3月25-28日の点検時に取り合い部で発生していたカビの様子
左：石室外左側、墳丘盛土部下方 右：石室外側右側面

2001年9月、取合部のカビを処置したのち、浮遊菌数が測定され、その数が高くないレベルにあることを確認したうえで、石室が開封された。しかし、開封してみると、石室のなかには青龍の画の近辺などにすでにカビが発生していた（図9）。このとき、漆喰壁のカビは消毒用エタノールにより、殺菌、除去されたが、石室内の温度が上昇する時期である12月、再びカビが発生する事態となった（図10）。このときの調査では、これまで石室の定期点検で検出されていた近年の常在菌のほかに、近年みだことのない、黒っぽい色素を出すカビが複数検出された（図11）。



図9. 2001年9月26-28日、東壁、青龍付近の様子
2001年2月の取り合い部の工事-カビ大発生以来、初めて石室を開封したときの様子



図10. 2001年12月18-21日の点検時に石室内で発生したカビの様子
東壁青龍付近

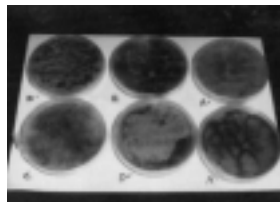


図11. 2001年12月18-21日の点検時に石室内／取り合い部の拭き取り試料より検出された褐色・黒色のカビ
上 培養したプレート (MA)
中 玄武下の拭き取り試料, 褐色のカビ, 明視野顕微鏡写真 (400倍)
下 青龍下の拭き取り試料, 黒色のカビ, 明視野顕微鏡写真 (400倍)

さらに、翌年の2002年10月、石室内温度が季節変動によって20度近くに上昇した時期であるが、青龍の近くや女子群像の下部に、黒色の汚れが発見される事態となった(図12・13)。この汚れを培養したが、すでに黒色のカビは死滅していたためか、検出されなかった。しかし、汚れを直接顕微鏡観察すると、褐色のカビの厚膜胞子様の構造がみられた(図14)。この試料からカビを培養すると、*Fusarium* sp.などの植物腐生菌などが分離され、おそらく前年に発生したカビの死骸を栄養源にさらにカビによる汚染が進んだものと推測された。



図12. 2002年10月28-30日の点検時に東壁の青龍付近にみられた黒色の汚れ



図13. 2002年10月28-30日の点検時に女子群像付近にみられた黒色の汚れ

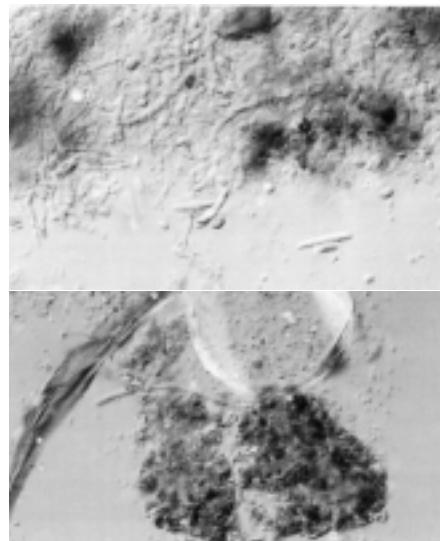


図14. 2002年10月28-30日の点検時の石室内の黒色の汚れの観察像
微分干渉顕微鏡写真 (470倍)

2004年9月、記録的猛暑により、石室内温度が20度を超えた時期、再び西壁男子群像部分を中心にカビが発生した。白い菌糸が絵画を被うように発生し（図15）、カビの殺菌が行われたが、今後さらに微生物の栄養源となってしまうカビの死骸を除去しようにもカビの菌糸が絵画面に食い込み、除去できるような状態ではなかった（図16）。もし、無理に除去するならば、顔料が剥落し、絵画の彩色が損傷を受けてしまうであろう。

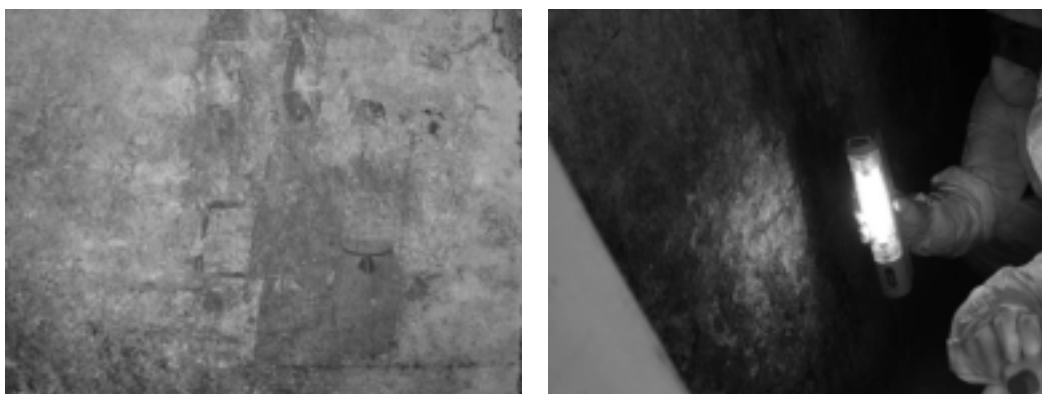


図15. 2004年9月6-7日の点検時に発見された西壁群像付近の白いカビの菌糸

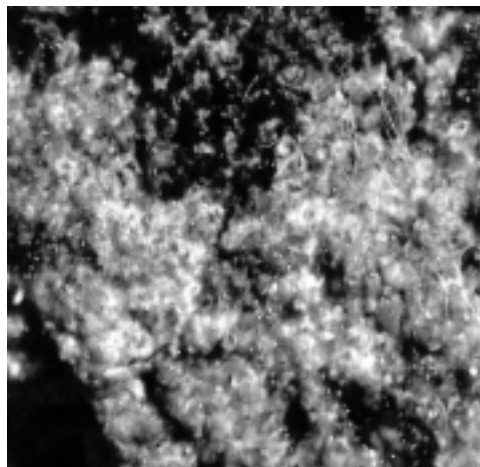


図16. 2004年9月の西壁群像上の白いカビの菌糸（50倍拡大像）
（殺菌を行っても、顔料のうえに菌糸が残留している）

また、発生したカビをえさにして、ダニが多く発生した。同年、壁面に増えた黒い汚れを観察したところ、ダニの死骸が多く含まれ、そのダニが食べたカビの胞子が、今度はダニの死骸を栄養源にダニの体内から発芽している様子が窺え（図17）、カビだけではなく、ダニなどの小動物が関与してさらにカビが拡大する非常事態に至った。

2001年以降に石室内の微生物の均衡が崩れる以前の点検では、石室内は「無機的な空間」に感じられていたのに対して、この時点では、有機物が豊富な一種の生態系のような状態が形成され、微生物や小動物の活動が容易に止まらない状況にまで進んでしまったのである。

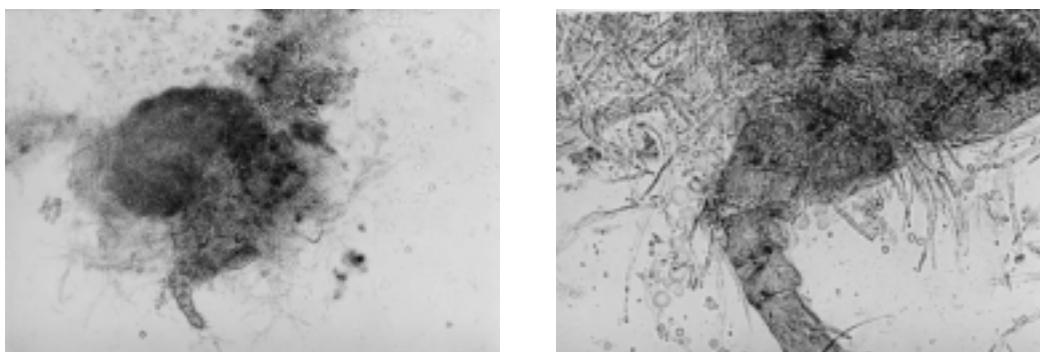


図17. 2004年9月6-7日の点検時に発見された青竜前方の黒い汚れを一部採取して顕微鏡で観察したもの
ダニの死骸とその死骸から、カビの菌糸が伸張している様子が観察される。
左 100倍 右 400倍

さらに、2004年10月、西壁の漆喰表面上に生じた粒状の物質が調べられたところ、カビの菌糸が漆喰に侵入し、漆喰を物理的に破壊している様子が明らかとなった（図18、写真提供、修復技術部、早川典子）。カビの菌糸は、漆喰に入り込み、物理的に破壊するだけでなく、菌糸からは有機酸を含む、各種代謝物質が放出されるため、漆喰壁画の化学的な劣化も同様にひきおこされる。

微生物は、壁画にしみや汚れといった美的な被害を及ぼすが、次の段階では、物理的、化学的な劣化により、彩色層の割れや絵画の層をもろくしてしまい、結果的として彩色層の剥離や欠失といった深刻な被害をももたらす¹⁷⁾。

現在、高松塚ではすでにそのような段階に被害が及んでおり、もし仮に今後、また微生物の均衡が仮に回復することがあったとしても、このままの状態では漆喰壁画を放置することは、もはや不可能な状況であると言わざるを得ない。

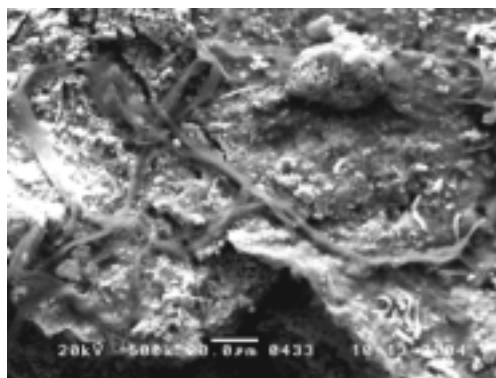


図18. 漆喰表面上に生じた粒状物質（2004年10月、西壁）カビの菌糸が漆喰を物理的に破壊している様子がうかがえる（写真提供：修復技術部 早川典子）

7. 石室内温度とカビの発生確率

石室内温度が近年、少しずつではあるが上昇しつづけていることが三浦らにより報告されている¹⁰⁾。最近では、石室内の温度が年間で一番高い時期には20度を越す年も現れた。

図19は、2000年以降の石室内温度と、カビの顕著な発生の時期を示したものである。これを見ると、2001年2月に取合部でカビが大発生して以来、石室内温度が高くなる時期にあわせて石室内でカビの大発生や、汚損が起きていることがわかる（図19、矢印部分）。

さらに、高松塚古墳壁画恒久保存対策検討会委員の高鳥浩介博士、同ワーキンググループ委員の阿部恵子博士により独立に行われた高松塚古墳から分離されたカビの発育温度試験結果によると、高松塚から分離されたいずれのカビも、20度近辺では非常によく発育し、低温になるにしたがって発育は遅くなることが明らかになった^{9,10)}。

このような結果から、少なくとも極端な石室内の温度上昇は、カビの大発生の頻度を高くする要因となると考えられた。このため、当面の対策として、高松塚古墳石室の極端な温度上昇を抑えることを目的として、墳丘を冷却することが提案された¹⁸⁾。

しかし、高鳥博士、阿部博士いずれの結果でも、たとえ温度が5度、10度という低温になっても、カビの発育を完全に抑制できるわけではなく、生育速度が遅くなるだけであることが示されている^{9,10)}。したがって、低温にするという対策は、最初に述べたとおり、あくまでも短期的にカビの大発生の可能性を低くするための対策であって、長期の対策とはなり得ない。

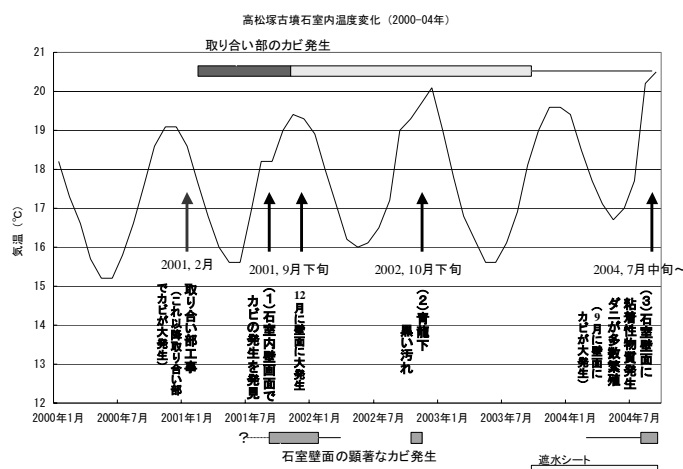


図19. 2000年以降の石室内温度変化と顕著なカビの発生時期

8. バランスが回復すれば、現地保存は可能か

では、仮に現在再び崩れているバランスが石室内で回復すれば、元通り、高湿度環境での壁画の現地保存は可能であろうか。

「昭和50年代に一度、均衡が崩れてカビが大発生したときには、なんとか後に均衡が戻ったのに、なぜ今回はそうできないのか」ということを議論される場合がある。しかし、この点について議論する場合は、「劣化は蓄積していく」ということを考える必要がある。高松塚古墳の壁画は、微生物の平衡バランスが崩れて、劣化が進むという事態を、過去の盗掘を含め、何

度か経験しているが、そのたびに壁画にカビ等の微生物が発生し、前述したような美的、物理的、化学的な劣化が引き起こされてきた。劣化された材質は、堅牢性を失って、さらに微生物からの劣化や、物理的、化学的にも劣化を受けやすい状態に変化していく¹⁹⁾。言い換えれば、劣化が進めば進むほど、次になんらかの劣化要因が及んだ場合のダメージはより甚大になっていくのである。したがって、なんらかの原因で、再び万が一バランスが崩れた場合、これまでよりももっとひどい劣化がひきおこされる可能性は、きわめて高いと言えよう。

非常に適切な例ではないかもしれないが、例として、大地震が起きたときに倒壊を免れた家屋について考えた場合、「前回の地震で大丈夫だったのだから、今度同じようなことが起きても大丈夫」と言えるだろうか。建物の構造体には、外から見えなくとも、小さな亀裂等は蓄積されているであろう。このような事態を冷静に判断するならば、「次回も大丈夫」といった安易な保障はできないはずである。

高松塚古墳壁画の保存については、高松塚古墳壁画恒久保存対策検討会委員の杉山純多博士、および高鳥浩介博士、同ワーキンググループ委員の阿部恵子博士による現地の状態調査後の所見に、「壁画の特性から現行で取りうる方法が限られている。現行の方法では、カビの発生防止は期待できない。思い切った（石室を取り出し、修理、管理する）対策が必要である。」という意見が明記されている(国宝高松塚壁画恒久保存対策検討会（第3回）参考資料5²⁰⁾)。

9. まとめ

ほぼ100%RHという高湿度環境で、微生物がみかけ上発育しない平衡状態に保たれるためには、きわめて微妙なバランスが維持される必要がある。高松塚古墳壁画の現地保存は、このような前提にあって、「発掘以前の環境を実現する」という基本方針で行われたといえる。そのために、これまで、石室の公開は禁止され、石室内の環境変化をおさえ、微生物や栄養分の持ち込みを抑えようという多大な努力が払われてきた。しかし、そのような高湿度環境での微生物のバランスは、なんらかのきっかけによる急な環境の変化、微生物の持ち込みなど、ちょっとした刺激でも容易に崩れる危険性をはらんだものである。そして、バランスが崩れるたびに多大な劣化が蓄積され、壁画の損傷は進む。さらに、劣化は同じスピードで進むものではなく、ある閾値をこえたところで、材質は急激に堅牢さを失い、ある日突然に崩れ落ちてしまう。

このような観点から、高松塚古墳の壁画について、生物学的な見地からは、このままの状況で保存するのは不可能であり、根本的な対策をとるのは今を置いてほかはないと考える。

謝辞

本報告中の微生物の調査にあたりましては、杉山純多東京大学名誉教授（現（株）テクノスルガNCIMB事業部学術顧問）、高鳥浩介国立医薬品食品衛生研究所衛生微生物部長、阿部恵子環境生物学研究所長にお世話になり、壁画の保存方針につきましても大変貴重な助言をいただきました。また、古田太郎サラヤ株式会社研究開発担当取締役には、壁画の微生物の除去法、薬剤等につきましても貴重な助言をいただきました。（財）日本食品分析センター微生物試験課、馬場浩氏には、微生物の同定に際し、お世話になりました。記して心より感謝いたします。

参考文献

- 1) 坪井清足：高松塚拾年展によせて、「月刊文化財」230, 24-31（1982）

- 2) 渡邊明義：高松塚古墳壁画修理の歩み，『国宝高松塚古墳壁画 -保存と修理-』，文化庁，114-122 (1987)
- 3) 関野克，三浦定俊：高松塚と保存対策，「月刊文化財」230，4-11 (1982)
- 4) 濱田隆：高松塚古墳壁画の修復について，「月刊文化財」230，12-18 (1982)
- 5) 平山郁夫：高松塚古墳壁画模写の思い出，「月刊文化財」230，19-23 (1982)
- 6) Michalski, S.: Relative Humidity: A Discussion of Correct/ Incorrect Values, ICOM Committee for Conservation 10th Triennial Meeting, Washington DC, 624-629 (1993)
- 7) 村尾澤夫，藤井ミチ子，荒井基夫：「くらしと微生物」，培風館 (1993改訂版)
- 8) 井上嘉幸：文化財を劣化させる微生物，「文化財の虫菌害防除概説」(財)文化財虫害研究所，85-109 (1991)
- 9) 高鳥浩介：高松塚古墳から採取されたカビ・酵母の発育温度試験，国宝高松塚壁画恒久対策検討会 (第4回) 資料，資料2-1 (2005)
- 10) 阿部恵子：高松塚古墳から採取されたカビ・酵母の発育調査，国宝高松塚壁画恒久対策検討会 (第4回) 資料，資料2-2 (2005)
- 11) 高松塚古墳石室の空気漏洩量調査，国宝高松塚壁画恒久対策検討会 (第3回) 資料，参考資料12 (2005)
- 12) 高松塚古墳点検・生物状況 (平成13年～)，国宝高松塚壁画恒久対策検討会 (第3回) 資料，参考資料4 (2005)
- 13) 国宝高松塚古墳壁画の状態変化について，国宝高松塚壁画恒久対策検討会 (第3回) 資料，参考資料1 (2005)
- 14) Hideo Arai: Microbiological Studies on the Conservation of Mural Paintings in Tumuli, Conservation and Restoration of Mural Paintings (1), Proceedings of International Symposium on the Conservation and Restoration of Cultural Properties, Nov. 1983, Tokyo National Institute of Cultural Properties. pp.117-124. (1984)
- 15) 三宅晋，大野昌信：高松塚古墳保存施設の設計，『国宝高松塚古墳壁画 -保存と修理-』，文化庁，68-81 (1987)
- 16) 三浦定俊，石崎武志，赤松俊祐：高松塚古墳における30年間の気温変動，「保存科学」44，141-148 (2005)
- 17) Ciferri, O: Minireview. Microbial Degradation of Paintings, Applied and Environmental Microbiology, 65, no.3, 879-885 (1999)
- 18) 高松塚古墳壁画における当面の生物対策について，国宝高松塚壁画恒久対策検討会 (第3回) 資料，資料5 (2005)
- 19) Caneva, G., Nugari, M. P. and Salvadori, O.: "Biology in the Conservation of Works of Art" ICCROM, Rome, (1991)
- 20) 高松塚古墳壁画の微生物についての所見，国宝高松塚壁画恒久保存対策検討会 (第3回) 参考資料5 (2005)
- 21) 別府輝彦：『新・微生物学』，I B S 出版 (2004)
- 22) 林温：壁画保存の現状，『国宝高松塚古墳壁画』，文化庁監修，中央公論美術出版 (2004)
- 23) 高松塚古墳の微生物調査記録，国宝高松塚壁画恒久保存対策検討会 (第3回) 参考資料3 (2005)

キーワード：古墳(tumuli)；微生物(microorganisms)；生物劣化(biodeterioration)

<資料1> 高松塚古墳の微生物調査記録

本資料は、著者が微生物の調査を担当して以降（1994年以降）の記録である。

1) 1994年～2000年の状況（2001年の取り合い部の工事（補強，樹脂処置）以前の状況）

現在の東京文化財研究所生物科学研究室担当者が培養による調査を担当したのは1994年以降であるが、微生物については、望ましい「均衡」が保たれていた状況（すなわち、常在菌は存在するが被害は起きない状態）にあったと判断される。

この期間の調査結果の概要を以下に記す。

高松塚古墳の定期点検（毎年3月に実施，1994年-2000年）に伴う微生物調査は、毎年、目視調査と、定点の拭き取り／培養により行われてきた。

・目視による微生物調査結果（担当者2-3名により実施）

石室内には目視でみる限り、例年、顕著なカビの集落等は見あたらず、良好な保存状態にあると考えられた。石室入口のプラスチックカバーについては、例年、数箇所直径数mm程度の白いカビの菌糸による小塊が観察されたが、大きな異常にはつながらなかった。

・微生物の培養

壁画付近に潜在的に存在するカビを調べるために、壁面を滅菌綿棒で静かに拭き取ったものを培地に接種し、培養を行った。例年、以下の観測定点から採取することになっていた。

- A. 石室入口プラスチックカバー上（石室外側）のコロニー
- B. 石室奥壁（A壁）玄武の尾と身体との下
- D. 石室西壁（E壁）黄色の衣装の女子像裳の下部分
- E. 石室西壁（E壁）白虎の顔外側
- F. 石室東壁（C壁）青龍前足部分
- G. 石室南壁 盗掘口の真下

採集後の脱脂綿を1.25% 麦芽寒天培地（MA）に塗抹して、室温で7日間培養した。

培養結果の所見

例年、石室内では、培養によりほぼ同じ種類のカビが検出されている。すなわち、もっとも主要に検出されるのは、1種類の*Penicillium* sp.であり、その他、*Aspergillus* sp., *Fusarium* sp., *Trichoderma* sp. 等が例年、若干認められていた。これらは、石室内の常在菌と考えられるが、現在進行中の被害を及ぼしているわけではなく、大きな問題はないと思われた。

なお、定期点検の最終日に行われるパラホルムアルデヒド燻蒸は、新井英夫氏らによる方式に従い、行われてきた。しかし、この方法では、薬剤を気化したのちに石室に送るダクトで薬剤が再結晶するため、非常に高い殺菌効果が得られるわけではなかった（1995年3月）。

2) 2001年の状況（取り合い部の工事（補強，樹脂処置）以後の状況）

取り合い部の盛り土部分に少しずつ崩落が進んできたとの判断より、2001年2月13日-3月2日にかけて、取り合い部墳丘盛り土部分の崩落防止工事（盛り土部分の補強，樹脂処置）が行なわれた（文化庁）。

2001年3月25-28日の定期点検時、取り合い部の石室外表面および墳丘盛り土部分に多量のカビが発生していることが確認された（図8）。カビはほぼ取り合い部全面を覆いつくしていた

ため、石室を開封・石室内の定期点検は中止され、取り合い部のカビの処置（パラホルムアルデヒド燻蒸、消毒用エタノールによる拭き取り、殺菌）が行われた。このとき、取り合い部に発生した部分から検出された主要なカビは、*Penicillium* sp., *Aspergillus* sp., *Fusarium* sp. など、石室内で例年検出されるものと同様のものが多かったが、ここ数年、石室内の調査では検出されていない*Cladosporium* sp.やその他の不明種などもみられた。

パラホルムアルデヒド燻蒸および消毒用エタノールによる殺菌・クリーニング作業の直後は、少なくともカビは効果的に殺菌されていた。

しかし、取り合い部の土は樹脂によって補強されており、カビの新たな栄養源が常に供給されている状態と考えられ、また環境の湿度は常に95-100%RHであることを考えると、その後も完全にカビの再発を防止することは困難であることがその時点で予想された。

2001年4月24-25日、全体的な発生量は3月よりは少なかったものの、取り合い部にカビの再発生がみられた。検出された菌種は3月の調査と同様であった。

2001年5月8-9日、前回の殺菌処置からあまり時間があいていないためか、その時点の調査では、目視ではほとんどカビの発生がみられなかった。培養結果もそれと対応して、カビはほとんど検出されなかった。しかしながら、消毒用エタノールによる殺菌の効果は永続的なものではないので、今後も警戒が必要であると考えられた。

2001年7月、取り合い部のカビが再発した。

殺菌処置を繰り返しても、カビの生育を抑えることは困難であった。

また、石室内の状況を確認できない状況が続いて石室の壁面の状態が懸念されたため、取り合い部の大発生をくい止め、内部の点検ができる状況にすることが必要であった。

当時タケダ薬品工業株式会社（現日本エンバイロケミカルズ）の防カビ剤関係の担当者に相談のうえ、処置法、薬剤等を検討した。その結果、「極めて湿度の高い環境での防カビ対策では、十分量の防カビ剤が添加されたある程度の厚みをもった塗膜を形成する必要がある。すでに樹脂が塗られているため、さらに上から防カビ剤を練りこんだ樹脂を上塗りし、塗膜を形成することによってカビの発生を減らす方法をとるしかない」と考えられた。

しかし、この部分の透水性を完全に遮断すると石室内の環境に望ましくない影響がでる可能性が指摘されたため、あくまでも通気性を維持する樹脂濃度で防カビ剤を使用せざるを得なかった。さらには、防カビ剤自体が劣化していくので、この効果は数年で衰えることが予想された。

2001年9月10-14日、取り合い部の殺菌、防カビ処置作業が実施された（コートサイド123）。

2001年9月20日、取り合い部の浮遊菌数の調査を実施した。その際は、バイオテスト社のRCS High Flow Air Samplerを用い、500リットルの空気を培地に吹き付け、生菌数を計測した。取り合い部のほか、古墳周囲の外気も採取した。

結果：

表2. 屋外および取り合い部での浮遊菌数

採取箇所	一般細菌（培地TSM）	真菌（カビ）（培地SDX）
古墳周囲の屋外（1）	100	158
古墳周囲の屋外（2）	136	156
取り合い部（1）	18	45
取り合い部（2）	24	30

その時点で取り合い部には、目視ではまったくカビが発生しておらず、浮遊菌数も上記のレベルであるので、石室内の安全確認を現段階で行って大きな支障はないのではないかと判断した。

2001年9月26-29日、石室内の調査が実施された。

石室を1年6ヶ月ぶりに開封したところ、石室内でところどころカビの発生が確認された(図9)。彩色のある部分にはカビはほとんど確認されなかったが、カビの菌糸が確認された場所についてはエタノールをベースとした殺菌剤を含ませ、丁寧に除去作業が行われた。

2001年12月18-21日、取り合い部、石室内の調査が実施された。

防カビ処理の結果、取り合い部のカビの発生度はやや少なくなっはきたが、十分に抑えられたわけではない。石室内においても、壁面の複数の場所において顕著なカビの発生が確認された(図10)。

取り合い部、石室内部の両方から、これまで培養で検出されなかったことのない、きわめて濃い褐色の色素を出すカビ(図11)が検出された。食品分析センターに同定を依頼したところ、褐色の色素をもつ *Cylindrocarpon* sp., また黒色の集落を呈する *Gliomastix* sp. のカビであることがわかった。

これらは、従来、ほとんど石室内で検出されなかったものであり、また褐色ないしは黒色の濃い色を呈することから、今後、嚴重な注意が必要なものと考えられた。取り合い部、石室内部ともに、念入りの殺菌作業が行われた。

2002年1月8-10日、取り合い部のカビの発生量は、前回の殺菌処置からあまり期間があいていないこともあり、ごくわずかであった。石室内部には再び、白っぽいカビが発生していた。

培養結果では、主にこれまで石室でみられた常在菌 (*Penicillium* sp., 褐色でない *Fusarium* sp. など) が中心であった。消毒用エタノール、および90%エタノールにより、殺菌処置が行われた。

3) 2002年の状況

2002年1月27-29日、取り合い部、石室内部ともに、カビの発生はごくわずかであった。

2002年2月25-27日、取り合い部、石室内部ともに、若干のカビの発生がみられたが、石室内部のは密集したような状況ではなかった。培養結果からは、さほど問題のあるカビは検出されなかった。

2002年5月21-24日、石室内でカビの発生が続いている状況を受け、これまでのパラホルムアルデヒド燻蒸の方式ではなく、直接的に石室内部で、パラホルムアルデヒドガスを発生させる方式に変更した。今回の調査では、取り合い部では若干カビの再発生がみられたものの一時よりは落ち着いており、また石室内もさほど問題のある状況ではなかった。

2002年7月、取り合い部、石室内の調査が実施された

培養した結果、石室内は、ほぼ問題のないときの常在菌のレベルであった。取り合い部については、若干のカビを検出した。

2002年9月、取り合い部、石室内の調査が実施された。大きな異変はなかった。

培養した結果、石室内は、ほぼ問題のないときの常在菌のレベルであった。取り合い部については、若干のカビを検出した。

2002年10月、取り合い部、石室内の調査が実施された。

石室内に多数のムカデ、アリ等、生きた虫が侵入し、石室内の壁に黒い大きなしみが発生する(図12, 13)という大きな異変が発生した。石室内がこれまでより、湿っているように感じられた。

2002年11月、黒い汚れの原因微生物について同定を試みたが、培養してもこの時点では褐色、黒色を呈するカビは生育せず、最終的な同定は困難であった。

黒いカビ様の汚れ(青龍の下から殺菌処置前と処置後にそれぞれ採取)を光学顕微鏡で観察したところ、いずれにも褐色の有機物の塊のようなものが観察された(図14)。かならずしも活性状態にあるカビの菌糸様のものが観察されたわけではないが、一部に*Fusarium* sp. の大型分生子に似た形状のものや、厚膜胞子のなれのはてと思われるような構造がみられるため、黒色の汚れは、現在は活性状態にはないカビの厚膜胞子等による褐色の成分が主因ではないかと考えられた。

2002年12月、青龍の下から採取された黒色の汚れから、微生物を分離、同定したところ、*Fusarium* sp.および*Trichoderma* sp.が検出された。今回、検出された*Fusarium* sp.は褐色にはならないことから、黒いカビ様のよごれに直接関係するかどうかは疑問であり、おそらく褐色、黒色のカビは、すでに採取した時点では生存していなかったものと思われる。

4) 2003年(2003年3月緊急対策委員会設置後以降)の記録
緊急委員会設置後の全体的な対策について、以下に要約する²²⁾。

(墳丘) 降雨の後、取り合い部の天井から水がしたたっていた等の近年の観察結果を受けて、雨水の影響が懸念されていた。雨水のしみこみを防ぐため、2003年9月墳丘の竹や枯木を伐採し、遮水シートがかけられた。さらに、一般通路から多量の雨水が墳丘へ浸入するのを防ぐため、2003年墳丘の北側・東側に排水溝が設置された。

墳丘から石室内に侵入してくるアリなどの昆虫の対策としては、まずアリの対策として、2003年8月にベイト剤の使用を試みたがあまり効果がなかったため、ピレスロイド系殺虫剤を含浸させたナイロン製ネットで巣や通路を覆い、効果があった。

枯木の根周辺に生息すると考えられるワラジムシなどの侵入は依然として続いていたため、今後の対策として枯木の根の除去を行なう必要があるとされた。

2004年10月からは墳丘の発掘調査が行なわれており、その際に遮水シートは撤去され、発掘のための仮覆屋がかけられた。

(取り合い部) 取り合い部にはカビが依然として散発的に発生していたため、効果的な防カビ対策が必要とされた。2003年8月、再度、防黴剤(コートサイド123)とキシレンに溶かしたアクリル系樹脂(パラロイドB72)を混合したものを擬土部分に塗布する処置を行なったが、かえってカビの再発をみたため、2003年11月、ついに擬土部分の除去を行ない、土壤表面にポリシロキサン樹脂を何回かにわたって塗布することになった。この措置により、取り合い部のカビの発生は、非常に少なくなった。

(石室) 墳丘の枯木を伐採したのちでも、アリやワラジムシなどの石室への侵入は相変わらず止まっていない。昆虫類が侵入すると、壁面でカビの胞子を運ぶほか、歩行することによる漆喰面への物理的な損傷も懸念される。また、その死骸にカビが発生するため、侵入の防止が必要である。そこで、2003年9月より石室内の間隙部に通気性を保持した素材をつめて目止めする作業が行なわれたが、完全に阻止することは困難であった。目止めを行なったあとは、侵入数はやや減少したように思われるが、依然として侵入は続いている。

(2003年の石室内のカビの状況)

2003年4月～2003年末、カビの発生そのものは、しばらくは落ち着いた状況にあった。しかし、点検の際には壁画の上をワラジムシが歩行しているのがみつかると、虫の侵入は止まっていなかった。石室内は、体感では、とくに天井部分で以前より“乾いている感じ”がするとのことであった。

5) 2004年の状況

<2004年初めから6月までのカビの状況>

しばらく沈静化していたカビが、2004年2月頃から再び小規模ながら観察され始めた。取り合い部では、若干、白いカビが発生する場合があった。石室では、以前にカビが生えたあとの黒いしみの上に再び白いカビの菌糸が発生している場合や、その他の箇所にもカビが発生している場合があった。また、石室内ではこれまでと同様にワラジムシやダニなどが生存、歩行していた。

検出されたカビの主要なものは、*Penicillium* sp. および *Fusarium* sp., *Trichoderma* sp. などであり、これらは、いずれも2001年のカビの大発生をみる以前の定常状態のころからよく検出されていたカビと同種のものであり、とくに黒い色素を出すものは見い出されなかった。

2004年5月19日の点検²³⁾

杉山純多東京大学名誉教授に同行いただき、石室内のカビを調査した。試料の採取場所は以下の通りである。

採取場所：

- T 4519-1 取り合い部, 石室南閉寒石, 西側上面, 白色コロニー
- T 4519-2 取り合い部, 石室南閉寒石, 中央下部, 緑色コロニー
- T 4519-3 取り合い部, 盗掘口下面, 樹脂カバー, 小球状緑色コロニー
- T 4519-4 取り合い部, 石室南閉寒石, 中央下部, 綿状緑色コロニー

- T 4519-5 石室内床面, 白色コロニー
- T 4519-6 石室内床面, ガーゼ上, 白色コロニー
- T 4519-7 石室内床面, 緑色コロニー
- T 4519-8 石室内, 西壁
- T 4519-9 石室内, 東壁
- T 4519-10 石室内, 西壁近傍, 漆喰

Fusarium sp., *Trichoderma* sp., *Penicillium* sp. などが従来と同様に, 主要なカビとして検出された。これらのカビは, 土壤に一般的に見出されるものであるが, 主要に検出されるカビの種類は多くはなく, かなり限定された属のみが見出された。石室では, そのほかに *Acremonium* sp., (sect. *Gliomastix*) sp., *Gliocladium* sp., *Paecilomyces* sp., *Verticillium* sp. なども一部では検出された。石室, 取り合い部ともに, カビの種類は似通っていた。この時点では, 濃い色を出すカビは主要に検出されていないが, 2004年に入ってカビが発生する度合いが上昇しているため, 警戒を要する状況であると考えられた。またダニが検出され, ダニによってカビの被害が拡大する危険性があることが指摘された。

2004年7月15-17日の点検

取り合い部には, 従来通り数カ所に白いカビが発生, 石室内部にはムカデ, ハサミムシ, ワラジムシなどがおり, 死骸には白いカビが発生していた。壁画面は, 従来とは異なる状況を示していた。壁画面が, 従来よりも, より湿っている感じになり, 粘り気のある汚れ(図20)や, ダニなどが見出された。石室壁面に, 新たなカビはみられなかったが, 白虎の足の付近に, やや茶色見を帯びた乳白色の水分をふくんだ粒状のものが発見された(図21)。滅菌綿棒採取試料からは, カビのほか酵母が分離された。消毒用エタノールやパラホルムアルデヒド燻蒸により石室を処理した。

2004年8月11-12日の点検

石室の壁画面はいかかわらず湿っており, 拡大観察でダニ(図21)や粘性のある汚れが多数認められた。また, 白い菌糸や青緑色をした粘性のあるカビ様のものが観察された箇所もあった。パラホルムアルデヒドにより燻蒸が行なわれた。

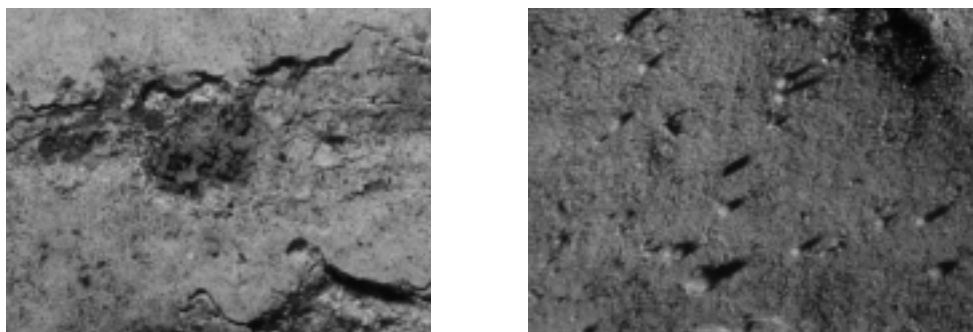


図20. 2004年7月15-17日の点検時に壁面にみられた粘性のある塊状の物質

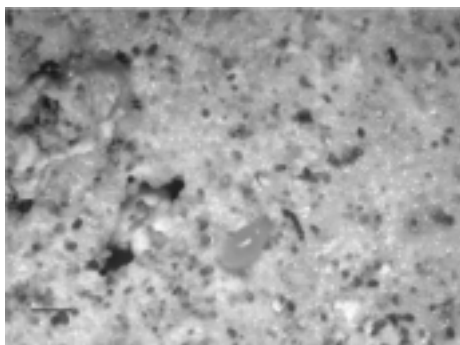


図21. 2004年8月11-12日の点検時に壁面にみられたダニ
バーは、約1mm

2004年9月6-7日の点検

西壁南側群像上には、白い菌糸の湿り気のあるカビが広範囲に発生し（図15）、東壁青龍前方には、2002年にみられたものと類似の黒い汚れが発生していた（図22）。石室の壁面は、かなり湿り気、粘り気があり、ダニが多数認められ、このまま有効な対策がとれないと、劣化が急激に進行するきわめて危険な状況であると判断された。壁面では生きたワラジムシが歩行しており、壁面が微生物や、ダニ、昆虫などの死骸や排泄物などによって富栄養化している危険な状況と考えられた。

黒い汚れを一部採取して、顕微鏡で観察したところ、ダニの死骸が多数みられ、その死骸から、幾種類ものカビの菌糸が発芽、成長している様子が観察された（図17）。

この状況では、急速に壁面の劣化が進行するのは、必定であり、すみやかに、微生物やダニ、昆虫の活動を阻止する必要がある緊急事態と考えねばならない。生物による劣化は、いったん加速が始まると、生態系が形成され、もとの基質は急速に分解されていく。このような事態では、できるだけ早期に抜本的な対策をとる必要がある。



図22. 2004年9月6-7日の点検時に新たに発見された青龍前方の黒い汚れ

2004年12月21日の点検

2004年12月21日、文化庁美術学芸課による点検が行なわれた際、天井に直径5センチメートル

ルほどの輪状に黒いカビが発生しているのが発見された。また、西壁女子群像の上にも若干の黒ずみがみられた。また、西壁の男子群像の左上にも白いカビが発生していた。

さらに、石室の中の温度は、2004年12月時点で21.4℃と高かったため、カビの発生には最適であった。早急に低温に移行する方法が必要であると考えられる。その際には、天井や壁面への結露を避けるための方策をとる必要がある。

6) 2005年の状況

2005年9月5-7日の文化庁の点検で、白虎、青虎の周辺にさらに黒い汚れが発生したことが明らかとなった。すでに墳丘の冷却は開始された後であったが、冷却開始の直後であったため、まだ石室内温度は下がっていなかったなかでの発生であった。

9月16日、杉山純多博士、高鳥浩介博士、古田太郎博士同行のうえ、調査が行われ、その部分からは、単一の*Penicillium* sp. が分離されている（杉山純多博士、高鳥浩介博士、私信）。また、その*Penicillium* sp.については、消毒用エタノールにかなり耐性があることが明らかとされた（高鳥浩介博士、私信）。この状況を受け、古田太郎博士に方法を相談のうえ、2005年9月16日以降、キトラ古墳と同様に高松塚古墳においても消毒用イソプロピルアルコールを主体とする殺菌法に切り替えた。

2005年12月現在は、冷却により室温も下がってきたこともあってか、カビの被害は全体としては少なくなっている。

Concept and Measures of the Conservation of Takamatsuzuka Tumulus for Thirty Years and the Present Situation of Biodeterioration

Rika KIGAWA, Chie SANO, Takeshi ISHIZAKI and Sadatoshi MIURA

Takamatsuzuka Tumulus was excavated in 1972, and the policy of conservation of its beautiful plaster paintings was discussed intensely at that time. Specialists in the conservation of historical sites made of stone were invited from France and Italy. Though there was a suggestion to relocate the plaster paintings by a method like the *storappo* method used with fresco, there was also a great concern about the stability of the plaster paintings which had been kept in high humidity of about 100% RH for more than a thousand years. The plaster of the mural paintings had deteriorated significantly at the time of the excavation in 1972; exfoliation and flaking were seen at many places on the paintings. Considering such conditions, it was thought that desiccation would be catastrophic to the beauty and stability of the plaster paintings. It was also feared that *storappo* of such heterolytic plaster surfaces would be very difficult. Thus it was determined to maintain the plaster paintings on site, in very high humidity. The basic concept of this decision was to keep the plaster paintings in the original environment, hopefully in the environment of unexcavated, buried condition. High humidity was good for the physical condition of the plaster, but at the same time it imposed a very difficult situation on fighting biodeterioration of the paintings. None of the methods of control by chemicals, low oxygen atmosphere, very low temperature, etc. was realistic in this case.

Keeping the plaster paintings in about 100% RH means relying mainly upon the natural balance of microorganisms in a closed environment. When a small system is shut out from the outside world, microorganisms such as fungi and bacteria would be active at the start, but gradually come to a balancing point of no drastic change. However every small perturbation of temperature, humidity, invasion of new kinds of microorganisms from outside, or change by restoration works would break the balance and cause a new outbreak of microorganisms. Thus the strategy for maintaining the paintings should be to keep any stimulations out from the stone chamber, to keep the original buried environment. A facility was constructed to maintain the temperature and humidity of the adjacent space the same with those in the soil when staff had to go into the stone chamber. Thorough disinfection has also been performed on mechanics and staff when restoration works or annual checking were necessary.

More than thirty years have passed since the decision was made. Although great efforts have been made to keep the paintings free from outbreak of microorganisms, changes in the condition that occurred a few times have caused fungal outbreaks on the plaster paintings. Once such an outbreak occurred, fungi deteriorated the plaster paintings significantly both esthetically and physically. Such deterioration has accumulated to a very dangerous point for keeping the paintings in the present condition. Now it is considered time to make drastic decisions for the conservation and restoration of the paintings to protect them from further deterioration.