

高松塚古墳壁画の微生物についての所見

2004 年 12 月 17 日

国立医薬品食品衛生研究所 衛生微生物部長
高鳥浩介

カビ等の微生物による壁画の被害を防止するために、今後とるべき保存方法についての総合的所見

(1) 現在の壁画の微生物、ダニなどによる被害 (汚染) 状況についての所見

* 発見当時に比べてその被害は著しい。原因は微生物、ダニだけに限らないと思うがいずれにしても甚大な被害である。

(2) 過去の記録と現在の状況から考えられるカビ発生の要因についての所見

(とくに、温度湿度の変化や、人の出入り、工事などの人工的要因が与える影響について)

* 環境変化が最も大きいと思われる。人の出入りによることだけでなく、外部環境としての温湿度差。特に温度の上昇がカビに強く影響している。

(3) 現行の保存方法の評価 (微生物を防ぐという見地から)

* カビ発生防止の観点から期待できない。短期的な保存対策を講じているが、期待できるものではない。

(4) 当面の対策として、現在の環境における対処法は どのような方法が適しているか (温度制御、湿度制御、酸素濃度制御、薬品の使用などの可能性について)

また、それぞれの方法に限界があるとすれば、どのような点か

* 高湿であることから湿度の制御は期待できない。温度の制御であるが、あまりにも変化がありすぎることがカビ発生に強く影響している。

温度変化のない発見時の温度を維持することが短期的な制御になるであろう。

酸素濃度は現状では非現実的。薬品処理は短期的な対応としてよいが、長期的な観点から壁画への影響が心配である。

(5) 微生物対策面から壁画の恒久的保存方法はどうあるべきか

また、ワーキンググループで提案されている恒久的保存対策についての5案では、どの方法が適切と考えられるか

* 思い切った対策が必要。この問題は壁画をどのように将来ともに維持するかであり、それを考慮してみると、

1案では長期的な維持対策にならない×

2案 すでにカビ発生が進んでいることから×

3案 2案同様に×

5案 できないことではないが現実には無理で×

4案 思い切った対策であるが現状のカビ発生を制御するには4案が妥当であろうか。

いずれにしても現状で重要なことは壁画周辺でのカビ対策にあり、カビによる影響が今後壁画に及ぼす被害を考えると早い時期に打たねばならない。カビはいったん発育しはじめると、あとは惰性で汚染する生物である。そのためにも汚染カビを特定しておくことも重要である。

高松塚古墳壁画の微生物についての所見

2004年12月23日

東京大学名誉教授、NCIMB Japan 学術顧問

杉山 純多

9月のサンプルの同定結果を出すのにまだ時間を要します。本当のところはその結果を分析してからお答えしたいところですが、お急ぎのようですのでとりあえず私のコメントをお送りします。

カビ等の微生物による壁画の被害を防止するために、今後とるべき保存方法についての総合的所見

(2) 現在の壁画の微生物、ダニなどによる被害(汚染)状況についての所見

本年5月18日および9月6日の石室内の微生物調査の結果、カビ・酵母等の微生物、ダニ等の微小動物による被害(汚染)は極めて深刻な状況にある。これまで用いた薬品や発生した微生物の代謝産物の化学的変化等により、壁画は発見当初の状態と比較して明らかに放置できないほど劣化が進行している。

(2) 過去の記録と現在の状況から考えられるカビ発生の要因についての所見

(とくに、温度湿度の変化や、人の出入り、工事などの人工的要因が与える影響について)

温度湿度、人の出入り、ダニの生息等の複合的な要因によると思われる。とくに石室内の急速なカビの発生ならびに壁面での展開は石室内に定住し、繁殖しているダニによる散布が大であると推定される。発生したカビはダニのえさになり、一方ダニの排泄物や死骸はカビの栄養分となっているように思われる。

(3) 現行の保存方法の評価(微生物を防ぐという見地から)

現在採用している保存方法ではカビ等の微生物、ダニ等の微小動物による被害(汚染)を防ぐことはできない。

(4) 当面の対策として、現在の環境における対処法は どのような方法が適しているか(温度制御、湿度制御、酸素濃度制御、薬品の使用などの可能性について)

また、それぞれの方法に限界があるとすれば、どのような点か

石室内の壁画の特性から取りうる方法は限られている。石室内の温度を15℃以下に制御するのが効果的と思われる。薬品については、壁画にダメージを生じないような（劣化に結びつかない）新規の薬剤（薬品）の開発が必要である。温度制御をするにしても、現在石室内に生息（定住）しているダニをまず駆除してから行うべきと思う。

（5）微生物対策面から壁画の恒久的保存方法はどうか

また、ワーキンググループで提案されている恒久的保存対策についての5案では、どの方法が適切と考えられるか

恒久的な対策までの当面の対策としてはダニ等を駆除してから石室内の温度を下げ、できれば可能な限り湿度も下げる。しかし、この対策は壁画の劣化の進行を遅らせるだけであって、確実に生物による劣化をくいとめることはできない。

石室内の壁画を保存するためのカビ・ダニ等による生物汚染に対する恒久的対策としては、「第4案 石室を取り出し修理、管理」がベストの方法と思う。

高松塚古墳壁画の微生物についての所見

2004年12月12日

環境生物学研究所 阿部恵子

高松塚古墳での最大の問題点は、

1. 「内部の壁画」と「外側の封土・石室」の保存のどちらを優先するのか明確でない。
 2. 現状では内部の壁画を保存するのは不可能。
- ということと思います。

まず、カビが発育する条件から内部環境について考えてみます。発見当初と現在の古墳内部環境は、明らかに違います。変化が認められる環境条件は、「栄養分」と「温度」です。

カビの発育には、「栄養分」、「温度」、「酸素」、「水分」の環境条件が満たされていることが必要です。環境条件が満たされている状態が持続する箇所はカビが発育し、カビにより汚染されます。そこで、古墳内部の各環境条件の変化について簡単に述べます。

栄養分：古墳内部でカビが発生した時は、エタノールをベースとした殺菌剤が使用されます。カビの菌糸は殺菌で死滅しても壁面に残留し、新たなカビの栄養源になります。そのため、一旦壁面にカビが発育すると、殺菌しても、すでに発育したカビにより壁面の栄養状態が高まったまま保たれ、栄養状態が高まった壁面ではさらに発育するカビの量が増え範囲が広がり、殺菌する頻度も面積もしいに増えていきます。エタノールは殺菌効果が高く、他の抗菌剤に比べれば壁画に与える影響が少ない物質ですが、頻繁な使用で古墳内部に残留するようになれば、エタノールを炭素源として利用できる微生物が発育可能になります。殺菌せざるを得ないために使用したエタノールも長期的には関与して、発見当初は栄養源になるような有機物があまり付着していなかった壁面が富栄養化し、カビの発生がなかなか止まらない状況になっていると思われる。

温度：発見当初、1972年（昭和47年）の石室閉鎖時の床面温度は、最低温度は4月中旬頃で11℃、最高温度は11月中旬で17℃（国宝 高松塚古墳 - 保存と修理 - p.40）であるのに対し、2004年は最低温度が17℃、最高温度が21～22℃に上昇しています。温度の上昇により明らかにカビの発育速度は高まっていると思われる。

酸素：酸素が無いとカビは発育できませんが、発見当初から、古墳内部は水が流れ込むような環境で、酸素の無い嫌気的条件であったとは考えられません。酸素条件には変化が無いと思われる。

水分：水分はカビの発育には必須で、空気中の相対湿度が高いほどカビは早く発育しますが、古墳内部の空気は発見当初も現在、常に高い相対湿度を保っており、相対湿度には大きな変化は無いと思われます。

現在のほうが古墳内部の温度が高いので、古墳内空気中の水分の絶対量は現在のほうが多くなっているのは明らかです。

環境の持続：古墳内部は環境条件の変動が少ない状態ですので、発見当初から現在まで、発育可能な環境が途切れることなく持続していると考えられます。

閉鎖されて安定した環境であれば、ある程度微生物が増殖した状態を経た後は平衡状態を保ち古墳内部で微生物が増加することも無かったと思われるが、人が封を切り環境を攪乱し、新たな微生物を入れた時から、新たに微生物の増殖が再開したと思われる。

以下にメールに記載の項目について所見を申し上げます。

(1) 現在の壁画の微生物、ダニなどによる被害(汚染)状況についての所見

前記の栄養分と温度の項で述べたように、古墳内部は微生物の発育に極めて適した環境になっています。現場の方々の努力により、かろうじて保っている状況と思われます。内部壁面には、すでに有機物が蓄積し、除去できない状態ですので、今後は残留する有機物を栄養源としてカビによる汚染が加速度的に進行するものと思われます。

(2) 過去の記録と現在の状況から考えられるカビ発生の要因についての所見(とくに、温度の変化や、人の出入り、工事などの人工的要因が与える影響について)

温度の変化：保存施設完成前の昭和48年(1973年)の測定値(床面で測定)とスタンドの下で測定した値を比較すると、施設完成前は 13.6 ± 2.8 だったのが、完成後(昭和51年~52年)には 16.3 ± 1.9 (p.170) と記載されています。高松塚古墳温度(1991年~2004年)のグラフを見ると石室閉鎖時の温度が1996年以降年々高くなっています、特に2001年以降は最低温度が15を切ることが無い状況になっています。温度の上昇がカビ汚染の進行に大きく影響していると考えられます。

人の出入り：人が入ることにより古墳内部の温度が上昇します。絶対湿度が一定の環境で温度が上昇すれば相対湿度が低下するはずですが、古墳内部を加湿することにより相対湿度の低下を防いでいました。人が出入りするたびに加湿して内部の水分量を増加させ、カビ汚染を促進したと思われます。

表1 昭和47年9月30日~10月10日 石室床上下5cmの空気環境

調査時期	時刻	温度 ()	相対湿度 (%)	絶対湿度 kg/kgDA	露点温度 ()
1972/9/30	9:55	18.6	95	0.0128	17.7
	15:15	19.7	97	0.0140	19.2
1972/10/1	9:35	18.3	98	0.0129	17.9
	16:10	19.6	97	0.0139	19.1
1972/10/3	9:47	18.2	99	0.0130	18.0
	16:10	21.4	96	0.0154	20.7
1972/10/4	9:53	18.8	98	0.0133	18.4
	14:30	19.6	99	0.0142	19.4
1972/10/6	9:50	18.2	99	0.0130	18.0
	16:00	21.0	95	0.0149	20.2
1972/10/8	12:17	18.9	96	0.0131	18.2
	17:13	22.2	96	0.0162	21.5
1972/10/9	9:42	19.4	98	0.0139	19.1
	16:28	20.8	98	0.0151	20.5
1972/10/10	10:08	19.4	98	0.0139	19.1
	19:30	21.0	98	0.0153	20.7

人の出入りの一例として、昭和 47 年の石室内の温湿度変化 (p.38) を引用し表 1 に記載します。例えば、10 月 6 日は石室床上 5cm の温度が、9:50 の 18.2 から 16:00 の 21.0 に上昇しています。18.2 の時に相対湿度 99% ですので、絶対湿度は 0.0130kg/kgDA です。この絶対湿度が保たれた状態で気温が 21 になれば、計算から相対湿度は 83% に低下したはずですが、ところが実際は、加湿していたため絶対湿度が高くなり、相対湿度は 95% で止まっていた。

空気の絶対湿度が高くなれば露点温度も高くなります。表 1 に記載の、作業終了時の床上 5cm の露点温度と、翌日の作業開始時の温度を比較すると、期間中は毎回、作業開始時の温度のほうが前日終了時の露点温度より低い状態が続いています。空気の温度が露点温度以下になれば結露が現れます。相対湿度低下を抑えるために日中加湿され、空気中に含まれていた水蒸気が、空気温度が露点温度以下に低下する夜間に結露となり壁面に付着することが繰り返されたことがわかります。

昭和 47 年 7 月の中間報告では「石室内湿度が 80% に下がった場合に石室を閉鎖し、石室内湿度が 90% 以上に復位するまで調査を行うべきでない。」と記載があります (p.25)。下限 80% は、内部で作業をした場合の温度上昇による相対湿度低下の範囲で、妥当な値です。ところが、昭和 47 年 11 月 29 日の報告には「中間報告では、学術調査時の保護対策の一つとして、石室内湿度を 80% 以上に保持することが条件とされていたが、学術調査後の所見から、よりいっそうの安全をはかるため、その限界を 90% に引きあげた。」と記載があります (p.30)。石室内の相対湿度の下限を 90% に変え、相対湿度を上昇させるために加湿し、その結果、調査作業中は常に絶対湿度を上昇させることになったことは、表 1 から明らかです。

工事：2001 年以降古墳内部温度が上昇しています。2004 年は急速に上昇しており、古墳の工事が内部温度の上昇に寄与した可能性が考えられます。

温度上昇は微生物発育速度を高め、汚染の進行速度を高めます。汚染進行速度が高まった結果人が内部に入ってカビ防止のための作業する頻度が高まり、人が入って内部で作業する度に加湿され、この加湿がさらに汚染を促進させた可能性があります。

(3) 現在の保存方法の評価 (微生物を防ぐという見地から)

どう考えても現在の保存方法で微生物汚染を防ぐことは無理と思われる。無理を通し、壁画を劣化させているように思えます。

(4) 当面の対策として、現在の環境における対処法はどのような方法が適しているか (温度制御、湿度制御、酸素濃度制御、薬品の使用など)

温度制御：古墳の内部温度を発見当初に近い温度まで低下させる必要があります。発見当初の石室床面の温度、すなわち、平均で 13.6 ± 2.8 (p.170) を再現し、最も温度が高い 10 から 11 月頃に 17 以下、最も低温になる 4 月～5 月頃に 11 程度にできれば良いと思われます。一般に、温度を 5 度低下させれば発育速度は約半分に落ちます。

さらに、人が内部に入る時に温度を上昇させないように、入室時には加湿による対応ではなく、温度制御による対応、つまり送り込む空気の温度を低くすることにより温度上昇に伴う相対湿度低下を抑え、内部の絶対湿度を上昇させないことが必要と思われます。

湿度制御：古墳内部の相対湿度を下げることであれば、最も有効と思われますが、漆喰の剥落可能性があり、相対湿度を下げる事ができません。

相対湿度が下がれば発育速度は落ちますので、多少でも相対湿度を下げるのであれば下

げるほうが良いと思われます。相対湿度を下げることにより発育するカビの種類が変わり、現在と異なる種類のカビが入れ替わって増殖する可能性があります。カビの種類が違ってても発育速度は現在の発育速度よりも遅くなります。相対湿度を5%低下させると発育速度が半分になります。発育速度が半分になると、発育して目に見える汚染状態になるまでの期間が2倍になります。相対湿度を10%低下させると発育速度は1/4になり、目視される汚染状態になるまでの期間は4倍で、2ヶ月に1回エタノールで殺菌している環境は、8ヶ月に1回の処理で済むことになります。

酸素濃度制御：古墳は外部から空気が進入できる環境ですので、酸素濃度を下げる対策は難しいと思われます。

薬品の使用：薬品を使えば、必ず化学変化を起こし別の化学物質に変わります。薬品の使用は、経年変化が予測できないのでお勧めできません。仮に、薬品で内部の微生物を全滅させることができたとしても、内部はすでに栄養分の多い環境になっていますので、外部から虫が進入するような環境では虫に付着して内部に持ち込まれた微生物が繁殖します。薬品による対応は一時しのぎです。

(5) 微生物対策面から壁画の恒久的保存方法はどうあるべきか

当面の対策は、あくまでもカビによる汚染の進行を遅らせるだけです。できるだけ早く壁画を現在の高湿度環境から取り外し、湿度制御のできる環境で保存すべきです。

ワーキンググループで提案されている恒久的保存対策についての5案の中で、「第4案 石室を取り出し修理、管理」が最良の方法と思います。