

古墳壁画保存活用検討会保存技術ワーキンググループ から古墳壁画保存活用検討会への提案事項

石室内壁画を生物被害から保護しつつ、早期の全面剥ぎ取りを実現する方策として、新たな微生物対策の方法と期間集中的な剥ぎ取り方法を併用していくことが望ましい。

1. キトラ古墳における新たな微生物対策について

(1) 紫外線(UV)照射による生物制御

人が頻繁に出入りすることによる石室内環境の変化が指摘されていながら、これまで絵のある部分を保護するため止むを得ず繰り返してきた石室内の定期点検に代えて、他の文化財における使用例とその実効性に鑑み、紫外線(UV)照射による生物制御を行う。

(2) 次亜塩素酸ナトリウム溶液による殺菌

主な殺菌用の薬剤として、カビの栄養源となる可能性や人体への影響等が指摘されていながらこれまで止むを得ず使用してきたエタノールに代えて、高松塚古墳壁画における使用実績と高い殺菌効果に鑑み、次亜塩素酸ナトリウム溶液による殺菌を行う。

2. キトラ古墳壁画の集中的な剥ぎ取りの実施について

(1) 集中的な剥ぎ取りによる効果

生物被害が大きい高温の時期には点検も含めて人の出入りを避け、石室内環境が比較的落ち着いている期間、連続的に剥ぎ取りを行うことにより、早期の壁画全面(床面を除く)剥ぎ取りが可能となる。

主な効果は、

- ・剥ぎ取り作業が効率的にできる。
- ・剥ぎ取った時期による漆喰の状態(色や強度)の差異が少なくなる。
- ・人が出入りする期間を通年で抑制できる。

(2) 集中的に剥ぎ取りを行う期間及び実施方法

- ①石室内環境が比較的落ち着いている期間に実施すること。
- ②連続する剥ぎ取り作業の期間は1ヶ月程度とし、年間2回(5月頃、12月頃)程度設けること。
- ③集中的な剥ぎ取り後は、1時間程度、紫外線照射による生物制御を行う。

※ ただし、最初の集中的な剥ぎ取り期間における、技術者の集中力や体力、壁面の状況変化を踏まえ、2回目以降の見通しを立てる。

3. 石室内の点検方法の変更について

- (1) 石室の蓋に新たに透明窓を設け、石室内に人が出入りしない状況で窓越しに石室内の様子を観察するに留める。
- (2) 石室内に異常が確認された場合は、現場の判断により随時必要な措置を行う。

※ 上記の点検方法の変更により、石室内に人が入らない期間を確保することができる。

4. その他

上記の方法を可能な限り速やかに現場において試み、検証を繰り返しながら、剥ぎ取りが終了するまでの壁画の保存と壁画の早期剥ぎ取りを実現する。

ただし、検証の結果、総合的な効果が見られない場合は、その他の生物制御の方法を検討し、集中的な剥ぎ取り方法を見直す。

キトラ古墳壁画の新たな保存措置方法について

東京文化財研究所 川野邊 渉
木川 りか

1. キトラ古墳壁画における新たな微生物対策について

（1）紫外線（UV）照射による生物制御

紫外線殺菌灯を間欠的に照射する方法が有効である（参考資料1）。同様の方法による微生物への効果として、磨崖仏（大分県臼杵市）に着生する蘚苔類や地衣類に対し、波長約 254nm の紫外線を照射することにより、生長の抑制、もしくは枯死させることができることが確認されている。

また、石室のように狭い空間の中で殺菌灯を設置し照射することで、室内空気と照射している壁面の両方を加熱することが考えられる。小椋・鉾井氏のシュミレーションによれば、殺菌灯設置によって、石室内の温湿度変動は大きくなく、壁面の結露の危険性は小さいと考えられる（参考資料2）。

今回、20W（波長 254nm）の紫外線殺菌灯の導入を検討してはどうか。

（2）次亜塩素酸ナトリウム溶液による殺菌

これまで、漆喰表面のカビやバイオフィルム（ゲル）の処置に、エタノールなどの薬剤を使用してきた。今後、キトラ古墳壁画の微生物等の処置を目的として、使用後に有機物の残留がない次亜塩素酸ナトリウム（NaClO 水溶液）の使用を検討している（参考資料3）。次亜塩素酸ナトリウムは、すでに高松塚古墳壁画のクリーニング作業において使用し、一定の効果をあげている。また、キトラ古墳壁画の漆喰片の化学分析結果によれば、酸化鉛の含有量は 0.003% という結果が得られており（『キトラ古墳と発掘された壁画たち』飛鳥資料館、H18）、高松塚古墳壁画で懸案となっている鉛成分の変化による漆喰層の変色の問題はあまり考慮しなくてよい。

2. キトラ古墳壁画の集中的な剥ぎ取りの実施について

(1) 集中的な剥ぎ取りによる効果

生物被害が大きい高温の時期には点検も含めて人の出入りを避け、石室内環境が比較的落ち着いている期間、連続的に剥ぎ取りを行うことにより、早期の壁画全面（床面を除く）剥ぎ取りが可能となる。

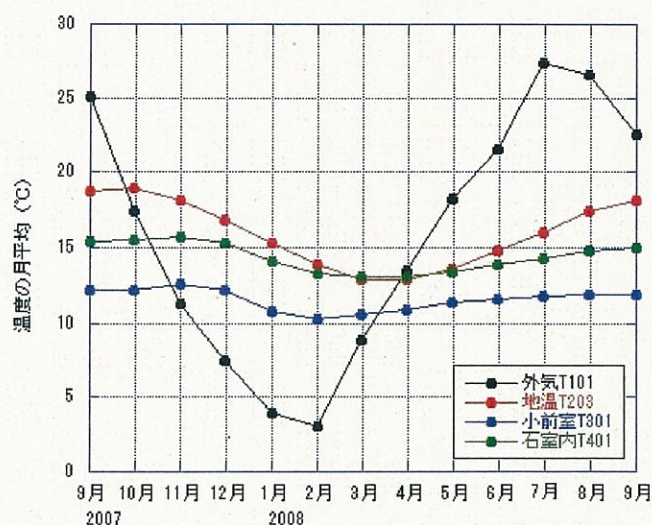
効果

- ・剥ぎ取り作業が効率的にできる。
- ・剥ぎ取った時期による漆喰の状態（色や強度）の差異が少なくなる。
- ・人が出入りする期間を通年で抑制できる。

(2) 集中的に剥ぎ取りを行う期間及び実施方法

- ①石室内環境が比較的落ち着いている期間に実施すること。
- ②連続する剥ぎ取り作業の期間は1ヶ月程度とし、年間2回（5月頃、12月頃）程度設けること。
- ③集中的な剥ぎ取り後は、1時間程度、紫外線照射による生物制御を行う。

<剥ぎ取り時期の目安>



※ ただし、最初の集中的な剥ぎ取り期間における、技術者の集中力や体力、壁面の状況変化を踏まえ、2回目以降の見通しを立てる。

3. 石室内の点検方法の変更について

(1) 石室の蓋に新たに透明窓を設け、石室内に人が出入りしない状況で窓越しに石室内の様子を観察するに留める。

(2) 石室内に異常が確認された場合は、現場の判断により随時必要な措置を行う。

※ 上記の点検方法の変更により、石室内に人が入らない期間を確保することができる。

4. その他

上記の方法を可能な限り速やかに現場において試み、検証を繰り返しながら、剥ぎ取りが終了するまでの壁画の保存と壁画の早期剥ぎ取りを実現する。

ただし、検証の結果、総合的な効果が見られない場合は、その他の生物制御の方法を検討し、集中的な剥ぎ取り方法を見直す。

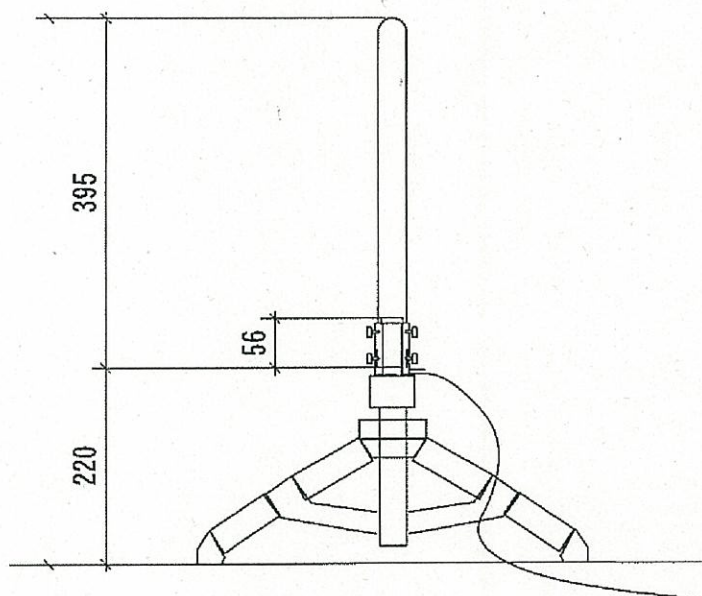


図 今回導入を検討している殺菌灯（イメージ）

(参考資料1)

古墳由来微生物に対するUV照射殺菌評価

2009年3月9日

高鳥浩介・久米田裕子

供試菌 菌株名	UV強度 uW/cm2	処理前	UV照射時間					
			30秒	45秒	1分	1分30秒	2分	3分
<i>Gluconactobacter</i> sp. K5929-1b	11.2-12.7	10 ⁵	<10	<10	<10	<10	<10	<10
<i>Stenotrophomonas</i> sp. K5916-1b	11.2-12.7	10 ⁵	10 ³	10 ²	<10	<10	<10	<10
<i>Bacillus</i> sp. K6203-3b	11.2-12.7	10 ⁵	10 ³	10 ¹	10 ¹	<10	<10	<10

供試菌 菌株名	UV強度 uW/cm2	処理前	UV照射時間				
			30秒	1分	2分	3分	5分
<i>Candida</i> sp. K5916-7-4	11.5-13.4	10 ⁵	10 ⁴	10 ³	10 ²	<10	<10
<i>Pichia guilliermondii</i> K7724-202	11.5-13.4	10 ⁵	10 ⁴	10 ³	10 ²	<10	<10

供試菌 菌株名	UV強度 uW/cm2	処理前	UV照射時間					
			5分	10分	20分	30分	40分	60分
<i>Penicillium paneum</i> K5916-7-1	10.2-13.4	10 ⁵	10 ⁴	10 ²	10 ¹	<10	<10	<10
<i>Fusarium solani</i> K5225-19-3	10.2-13.4	10 ⁵	10 ⁴	10 ²	<10	<10	<10	<10
<i>Trichoderma</i> sp. K5916-7-3	10.4-14.6	10 ⁵	10 ⁴	10 ¹	10 ¹	<10	<10	<10
<i>Acremonium</i> sp. K7511-1	11.3-13.5	10 ⁵	10 ³	10 ²	10 ²	10 ¹	10 ¹	<10

処理前; 初発菌数 UV照射時間後; 生残菌数を示す

本試験で使用する菌株は、杉山純多氏、佐野千絵氏、木川りか氏と協議のうえ決定し、菌株は杉山純多氏に供与いただいた。

キトラ古墳の石室内殺菌灯設置による石室内温湿度への影響の検討

京都大学大学院工学研究科 小椋大輔、鉾井修一

1. 目的と検討内容

石室内での殺菌灯の照射は発熱を伴い、室内空気と照射している壁面の両方を加熱する。これらが石室内温湿度に与える影響を調べるために、照射による発熱全てが空気を加熱するものとした場合と、照射による発熱全てが壁面を加熱するものとした場合の2ケースにわけてシミュレーションを行う。実際は、殺菌灯の照射による発熱は、一部が室内空気を、一部が壁面を加熱するため、両ケースの間をとるような結果となると考えられる。検討において、キトラ古墳の石室の大きさが、高松塚古墳の石室の大きさと非常に近いことと、解析が比較的短期間のため墳丘の大きさの違いがもたらす影響は小さいと考えられることから、高松塚古墳の解析で用いている解析モデル¹⁾を用いる。

2. 検討方法

2. 1 照射による発熱が全て空気を加熱するものとした場合

以下に計算方法と条件を示す。

- ・解析モデル：高松塚古墳の保存施設を設けている石室および周辺地盤の解析モデル¹⁾
 - ・基礎方程式：熱水分同時移動方程式²⁾
 - ・初期条件ⁱ：周囲温度 10℃、石材湿度：97.9-98.1%
 - ・取り合い部の温湿度：10℃、95%RH 一定
 - ・石室と取り合い部の間の換気量：
 - 照射時間帯：換気回数 0 回/h、5.0 回/h
 - それ以外の時間帯：換気回数 0 回/h
 - ・発熱量（殺菌灯）：30W、60W（初日、7日後、14日後の13時～17時（各4時間））
- ただし、発熱は室内空気のみ直接加熱するものとする。

2. 2 照射による発熱が全て壁面を加熱するものとした場合

発熱の与え方以外は、2. 1 節と等しい計算方法と条件を用いる。

発熱の与え方は、室内空気を直接加熱せず、壁の表面で全て吸収される、つまりそこで発熱するものとする。壁面の発熱は以下の2ケースを考える。

- 1) 北壁全面に一樣に放射され、全ての発熱がその表面で生じる場合
 - 2) 北壁の中央高さ（幅 30cm）に放射され、全ての発熱がその表面で生じる場合
- ただし、発熱スケジュールは2. 1 節と等しい。

また、照射前後の入室の影響を検討するために、2) の計算については以下の入室条件を考慮した計算を行う。

入室時間：殺菌灯の照射前の30分、照射後の30分

熱・水分発生量：発熱量 100W、水分発生量 20g/h（人一人の作業に相当）

3. 結果と考察

3. 1 照射による発熱が全て空気を加熱するものとした場合

(ア) 30Wの発熱の場合

図1、2にそれぞれ石室内温度、相対湿度の変動を示す。図1より、石室内温度は照射時間帯で換

ⁱ 外周の八咫鏡より、内側の土室空間の温度が、様々変化する。高松塚古墳石室解析技術報告書の温度条件を参考した。

気回数 0 回/h で 0.7°C 上昇し、終了後に低下し、照射終了一日後には 10.1°C 以下とほぼ最初の状態に戻る。また換気回数が増えることで石室の温度上昇は抑えられている。図 2 より、石室内相対湿度は換気回数 0 回/h の場合、照射時間帯で湿度が 95% を下回るが、照射終了後に湿度が若干上昇し、その後すぐに低下する。換気回数が増えることで照射時の石室の湿度低下が大きくなり、閉鎖時の上昇は抑えられている。これは、照射時の石室の温度上昇に伴って壁面から放湿された水分が、取り合い部との換気により排出されることが影響していると考えられる。なお、この間に壁面で結露が生じる状況は生じていなかった。また照射の繰り返しによって石室内温湿度の変化の傾向はほとんど変わっていない。

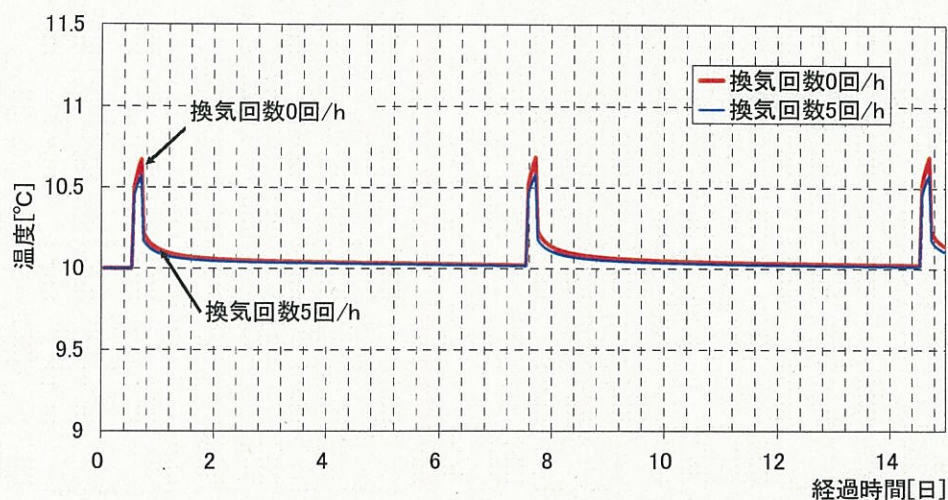


図 1 石室内温度変動（発熱量 30W）

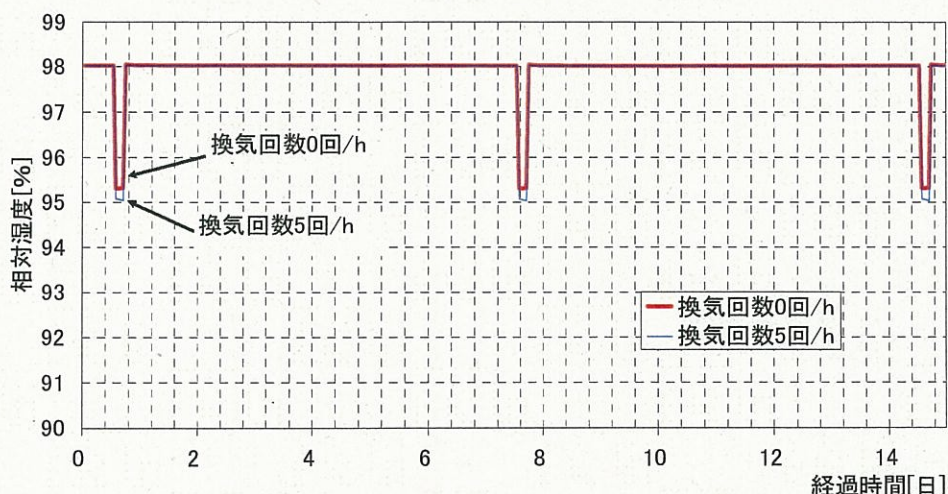


図 2 石室内相対湿度変動（発熱量 30W）

（イ） 60W の発熱の場合

参考までに、発熱量が 2 倍の計算を行った。図 3, 4 にそれぞれ石室内温度、相対湿度の変動を示す。図 3 より、石室内温度は、換気回数 0 回/h の場合、照射時の上昇が最大 1.3°C あり、30W の場合より上昇幅が大きい。また照射終了一日後で 10.1°C 程度であり、元の温度に近づくまでには 30W の場合より

時間がかかる。図 4 より、石室内湿度は照射時には最低 92.5%まで低下し、30W の場合より湿度低下が大きくなる。なお照射終了後に壁面で結露が生じる状況は生じていなかった。

(ア)、(イ) の結果をまとめると、殺菌灯照射による発熱が室内空気のみ加熱すると考えた場合、照射時の石室内の温度上昇は小さく、やや湿度が低下するものの、照射後の温度は数日でほぼ元に戻り、湿度変動は小さく、また結露も生じていないことが分かった。

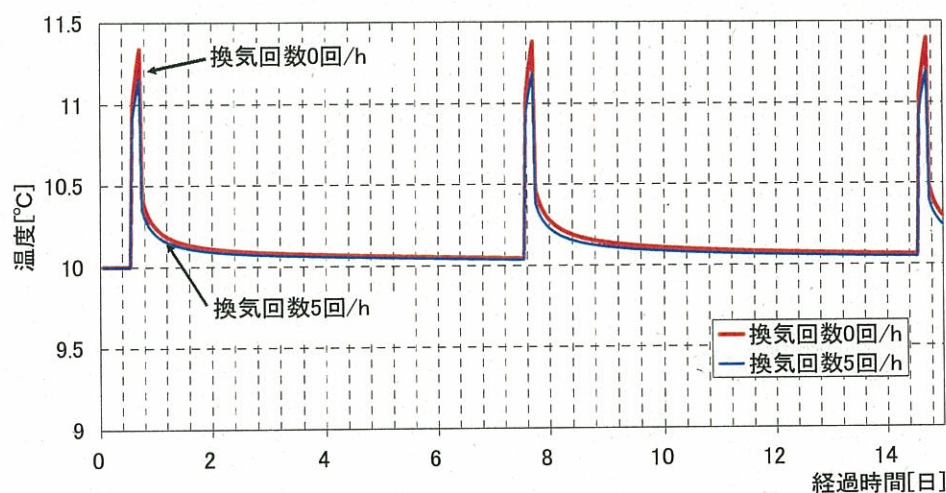


図 3 石室内温度変動（発熱量 60W）

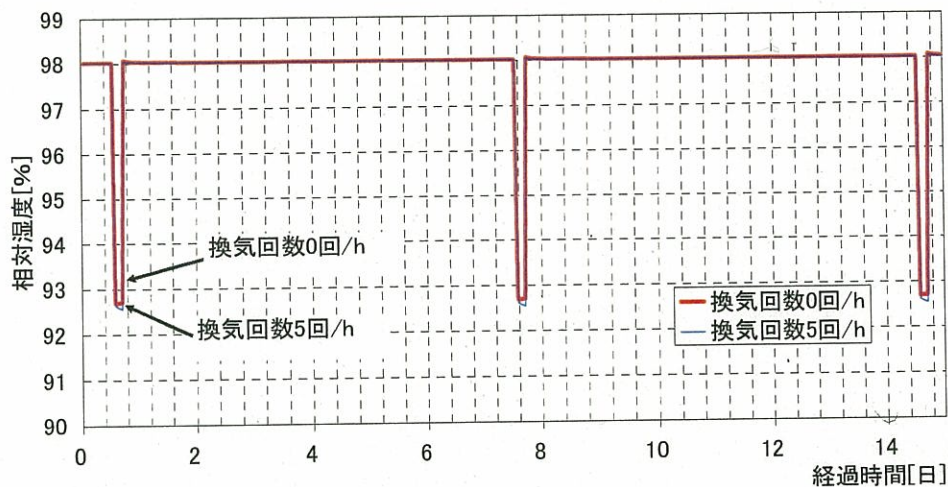


図 4 石室内相対湿度変動（発熱量 60W）

3. 2 照射による発熱が全て壁面を加熱するものとした場合の結果

(ア) 北壁全面に一樣に放射され、全ての発熱がその表面で生じる場合

図 5、6 にそれぞれ石室内温度、相対湿度の変動を示す。図 5 より石室内温度は、空気加熱と比べて、照射時の上昇が抑えられている。また換気回数が増えた場合、その上昇が僅かだが抑えられる。図 6 より石室内相対湿度は、空気加熱と比べて変動が非常に小さいことが分かる。また照射時に、換気がない場合には、相対湿度が若干上昇し、5 回/h の場合には、相対湿度が少しだけ下降する。これは、壁面が

直接加熱されることによる壁面からの放湿水分が影響を与えているためである。換気がない場合は、放湿水分により相対湿度が上昇し、換気回数が5回/hの場合は、放湿水分が換気により取り合い部に出て行くため下降する。

図7, 8にそれぞれ石室内壁表面の温度、相対湿度の分布を示す。図7より温度は、照射面である北側壁面で最高11℃まで上昇し、照射停止後1日でほぼ元の温度に戻る。図8より相対湿度は、照射面である北側壁面で照射後に若干低下し、2回目、3回目の照射後には、僅かであるが低下が進む。

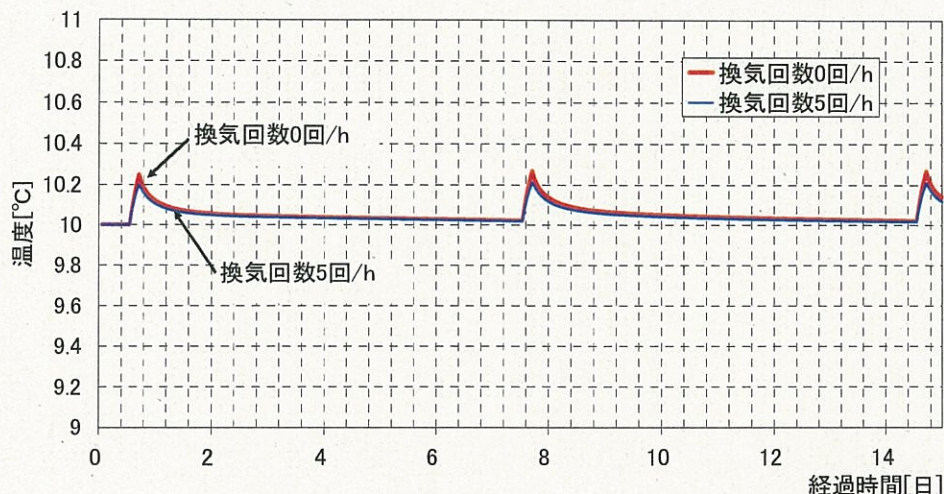


図5 石室内温度変動（北壁表面 発熱量 30W）

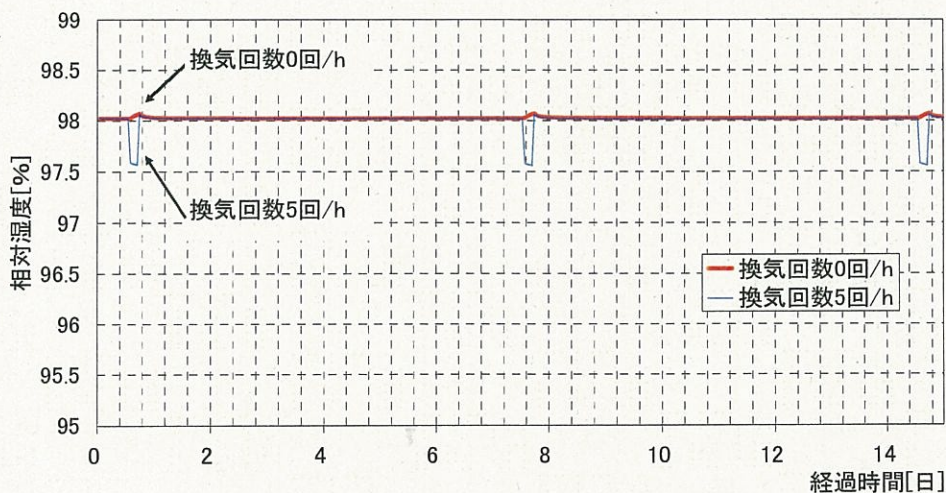


図6 石室内相対湿度変動（北壁表面 発熱量 30W）

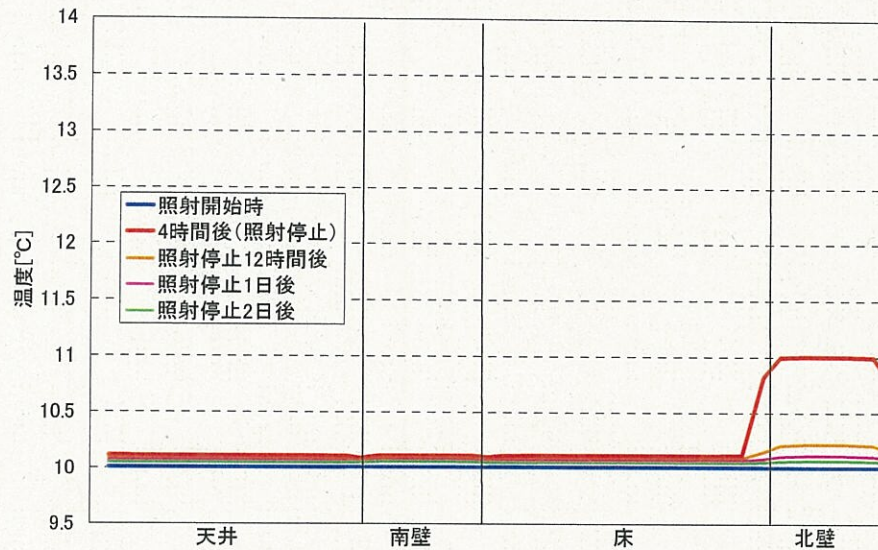


図7 石室内壁表面温度分布（北壁表面 発熱量 30W）

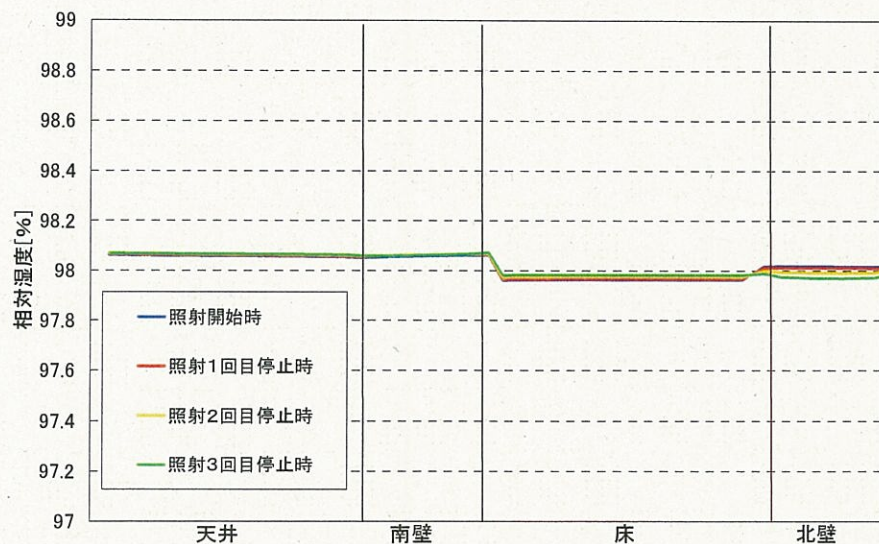


図8 石室内壁表面相対湿度分布（北壁表面 発熱量 30W）

（イ）北壁の中央高さ（幅 30 c m）に放射され、全ての発熱がそこで生じる場合

石室内温度、相対湿度の変動は、（ア）の場合とほぼ等しかったため、図を省く。図 9、10 にそれぞれ石室内壁表面の温度、相対湿度の分布を示す。図 9 より温度は、照射面である北側壁面中央で最高 13.6℃まで上昇し、照射停止 2 日でほぼ元の温度に戻る。図 10 より相対湿度は、照射面である北側壁面中央で、若干相対湿度が低下する。2 回目、3 回目の照射後に、その部位の相対湿度の低下は徐々に進んでいる。照射に伴う放湿により失われた水分が壁面に戻るのに時間がかかることを示している。つまり、照射が同一箇所を複数回ある場合には、その部位の表面が乾燥する傾向にある。

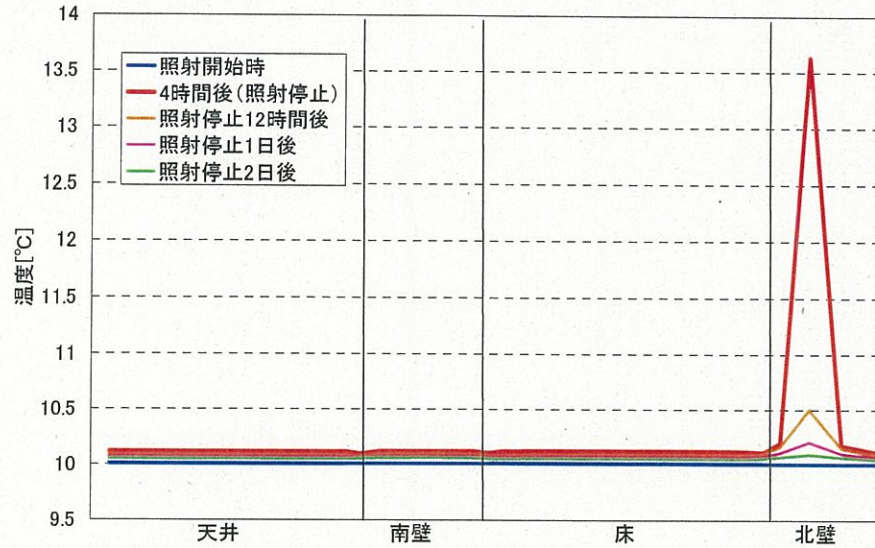


図9 石室内壁表面温度分布（北壁中央表面 発熱量 30W）

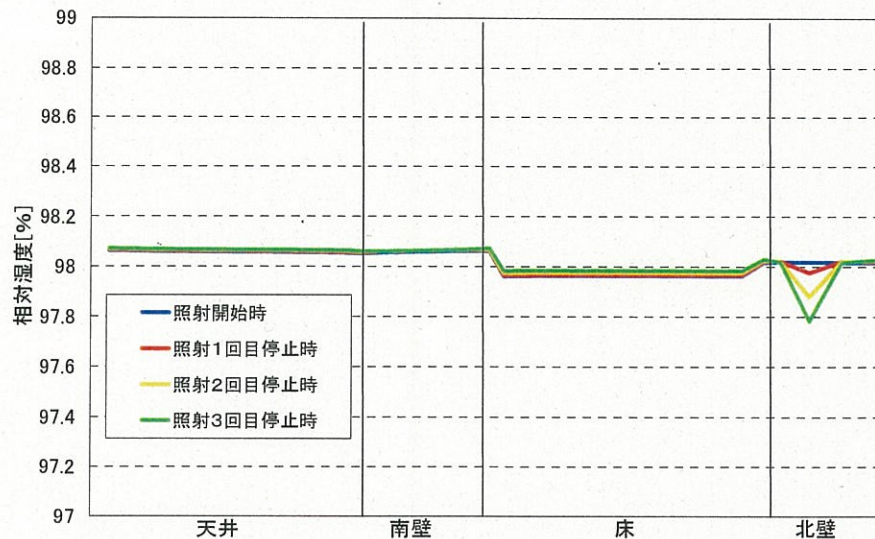


図10 石室内壁表面相対湿度分布（北壁中央表面 発熱量 30W）

（ウ）殺菌灯照射の前後30分間に入室作業がある場合

（イ）の条件で、照射前および照射後の30分間、入室作業があるものとした条件で計算を行った。入室による熱水分発生は人一人分を想定して室内発熱100Wと水分発生20g/hとした。入室がある場合の石室内温度、相対湿度変動の結果をそれぞれ図11, 12に示す。図11より、石室内温度は、入室時に上昇するものの、退室1日後は、10.1℃まで低下している。図12より、石室内湿度は、入室時に一時的に低下し、退室直後に若干上昇するものの、その後すぐ低下し元の状態に戻る。石室内表面の温湿度分布については、図9,10に示す（イ）の結果と若干異なるものの傾向は等しかった。

（ア）、（イ）、（ウ）の結果をまとめると、壁面で全て発熱すると考えた場合、照射時の石室内の温度上昇は小さく、照射時及びその後の湿度変動も小さく、また結露も生じていないことが分かった。ただし、照射時には照射位置で温度が上昇し、照射が同一箇所を複数回ある場合には、その部位で乾燥する傾向にあること、また照射前後の入室作業は、入室時には室温上昇、湿度低下が生じるが、その後に与

える影響は小さいことが分かった。

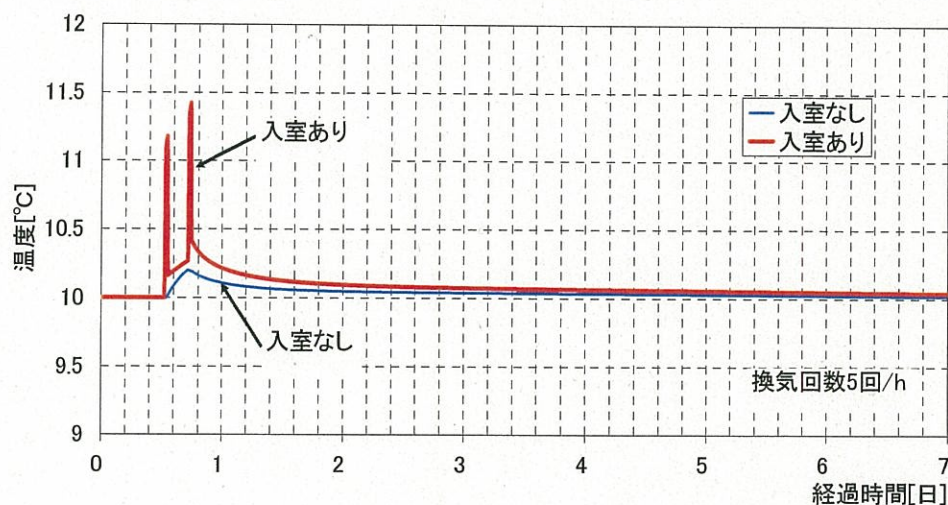


図 1 1 石室内温度変動（北壁中央表面 発熱量 30W 入室あり）

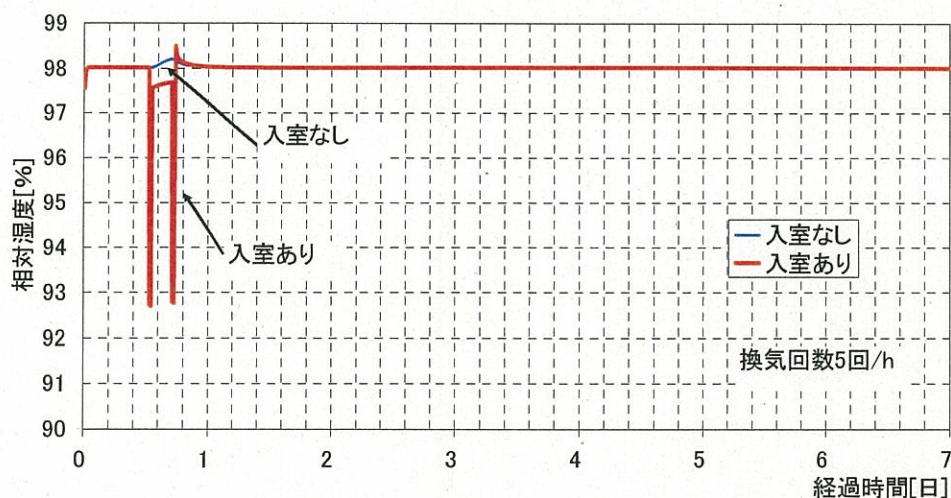


図 1 2 石室内相対湿度変動（北壁中央表面 発熱量 30W 入室あり）

4. まとめ

石室内での殺菌灯の照射は発熱を伴い、一部が室内空気を、一部が壁面を加熱する。これらが石室内温湿度に与える影響を調べるために、照射による発熱全てが空気を加熱するものとした場合と、照射による発熱全てが壁面を加熱するものとした場合の2ケースにわけて、高松塚古墳の解析モデルを用いてシミュレーションを行った。

殺菌灯照射による発熱が室内空気のみ加熱すると考えた場合の結果から、照射時の石室内の温度上昇は大きくなく、やや湿度が低下するものの、照射後の温度は数日でほぼ元に戻り、湿度変動は小さく、また結露も生じていないことが分かった。

壁面で全て発熱すると考えた場合の結果から、照射時の石室内の温度上昇は小さく、照射時及びその後の湿度変動も小さく、また結露も生じていないことが分かった。ただし、照射時には照射位置で温度が上昇し、照射が同一箇所でも複数回ある場合には、その壁面部位で乾燥する傾向にあること、また照射前後の入室作業は、入室時には室温上昇、湿度低下が生じるが、その後に与える影響は小さいことが分かった。

実際は、殺菌灯の照射による発熱は、一部が室内空気を、一部が壁面を加熱するため、両ケースの間をとるような結果となると考えられる。

以上から、殺菌灯設置により、石室内の温湿度変動は小さくなく、壁面の結露の危険性は小さいと考えられる。しかし、同一壁面位置に何度も照射する場合には、その部位の乾燥が進むことに注意が必要になると考えられる。

また、上記結果について、キトラ古墳の現地の周辺温湿度や入室等の条件を考慮し、現地温湿度測定値を用いることでより詳細な検討は可能と考えられる。

参考文献

- 1) 小椋大輔、銚井修一、李永輝、石崎武志、三浦定俊：過去の高松塚古墳石室内の温湿度変動とその要因について、高松塚古墳壁画劣化原因調査検討会（第5回）、資料5、(2008.12)
- 2) 松本衛：新建築学大系 10「環境物理」3.湿気、彰国社 (1983)

(参考)

殺菌灯を用いた紫外線照射による漆喰の影響について

殺菌灯を用いた紫外線照射を行ったときの漆喰の影響について調べるため、室内環境下で漆喰サンプルへの照射試験を行った。

1. 試験概要

紫外線照射装置 (SAN-EI SUPERCURE-203S (三永電機製作所製)) のファイバー光を石灰のみの漆喰サンプルに 3 時間照射した。紫外線照射装置の最大照射強度は $3000\text{mW}/\text{cm}^2$ であり、現地実験で使用予定である殺菌灯 (照射対象から殺菌灯を 50cm 離れた状態での強度: $0.07\sim 0.08\text{mW}/\text{cm}^2$) を約 12 年照射したことに相当する。試験内容は、グレースケールを入れた写真撮影および色差計 (NF 333 (日本電色工業社製)) による色差計測 (計測方法: 9 回の計測結果の平均値を算出) を行った。

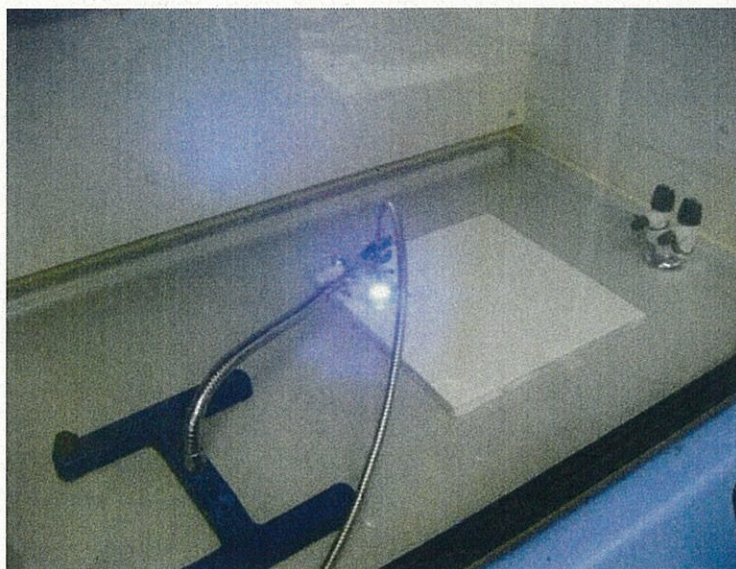


写真 1 紫外線照射装置による漆喰サンプルへの照射

2. 試験結果

写真2、3は照射前後の漆喰サンプル画像である。

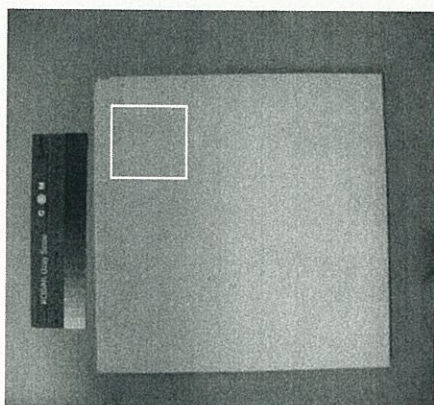


写真2 照射前

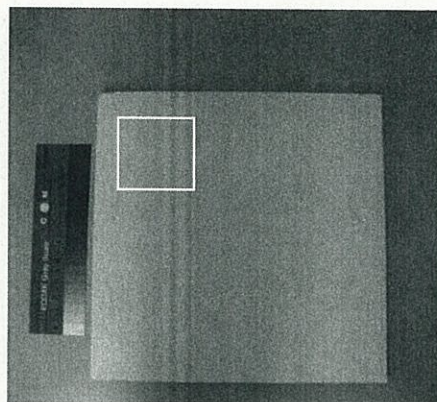


写真3 照射後

照射後の目視観察では、照射区域（写真中白枠で囲んだ部分）に目立った色変化は見られなかった。

測色結果は CIE-Lab で評価した。結果を下表に示す。色差（ ΔE^*ab ）は僅かであった。この色差は主に b^* の減少、つまり、黄味が減少して有彩色から無彩色へと変化したことが要因となっている。漆喰の主成分である炭酸カルシウムはそもそも無色透明であるので、この色変化は炭酸カルシウムの変化によるものではない。

表 測色結果

	L^*	a^*	b^*	ΔE^*ab
紫外線照射前	93.87	-0.14	5.07	0.67
紫外線照射後	93.88	-0.13	4.39	

次亜塩素酸の殺カビ効果について

2008年 3月9日

高鳥浩介

久米田裕子、木村千暁、水ト桂子、高橋順子

殺カビに一般的に使用されている次亜塩素酸で、さまざまな種類の代表的なカビを処理した際、死滅に要する時間を調査した結果をまとめた。

NaClO殺カビ効果 0.1% (有効塩素 約70ppm)

0.1%		15"	30"	45"	60"	90"	120"	180"	240"	300"
絶対好湿性	<i>Trichoderma</i> sp.	+++	+++	+++	+++	+++	++	-	-	-
	<i>Rhizopus stolonifer</i>	+++	+++	+++	+++	-	-	-	-	-
	<i>Rhodotorula</i> sp.	+++	++	-	-	-	-	-	-	-
好湿性	<i>C.sphaerospermum</i>	+++	+	+	+/-	-	-	-	-	-
	<i>F.graminearum</i>	+++	++	++	-	-	-	-	-	-
	<i>Chaetomium globosum</i>	+++	+++	+++	+++	+++	++	++	++	++
耐乾性	<i>Aspergillus niger</i>	+++	+++	+++	+++	+++	+++	-	-	-
	<i>Paecilomyces lilacinus</i>	++	++	++	++	-	-	-	-	-
	<i>A.ochraceus</i>	+++	+++	+++	+++	++	-	-	-	-
	<i>A.versicolor</i>	+++	+++	+++	+++	+++	++	-	-	-
好稠性	<i>A.restrictus</i>	+++	+++	+++	-	-	-	-	-	-
	<i>Eurotium repens</i>	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
	<i>Wallemia sebi</i>	+++	-	-	-	-	-	-	-	-

孢子産生著しい・・・ +++ 孢子産生・・・ ++

菌糸・・・ + わずかに菌糸有り・・・ ± 発育なし・・・ -

NaClO殺カビ効果 1% (有効塩素 約700ppm)

0.1%		15"	30"	45"	60"	90"	120"	180"	240"	300"
絶対好湿性	<i>Trichoderma</i> sp.	+++	+++	+++	+++	+++	-	-	-	-
	<i>Rhizopus stolonifer</i>	+++	-	-	-	-	-	-	-	-
	<i>Rhodotorula</i> sp.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
好湿性	<i>C.sphaerospermum</i>	+	-	-	-	-	-	-	-	-
	<i>F.graminearum</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	<i>Chaetomium globosum</i>	+++	+++	+++	+++	+++	++	++	++	++
耐乾性	<i>Aspergillus niger</i>	+++	+++	+++	+++	-	-	-	-	-
	<i>Paecilomyces lilacinus</i>	++	+	+	+	-	-	-	-	-
	<i>A.ochraceus</i>	+++	+++	+++	+++	-	-	-	-	-
	<i>A.versicolor</i>	+++	+++	+++	+++	+++	+	-	-	-
好稠性	<i>A.restrictus</i>	+++	++	+	-	-	-	-	-	-
	<i>Eurotium repens</i>	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
	<i>Wallemia sebi</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-

孢子産生著しい・・・ +++ 孢子産生・・・ ++

菌糸・・・ + わずかに菌糸有り・・・ ± 発育なし・・・ -

NaClO殺カビ効果 10% (有効塩素 約7000ppm)

10%		15"	30"	45"	60"	90"	120"	180"	240"	300"
絶対好湿性	<i>Trichoderma</i> sp.	+++	+++	+++	+++	+++	—	—	—	—
	<i>Rhizopus stolonifer</i>	+++	—	—	—	—	—	—	—	—
	<i>Rhodotorula</i> sp.	—	—	—	—	—	—	—	—	—
好湿性	<i>C.sphaerospermum</i>	+	—	—	—	—	—	—	—	—
	<i>F.graminearum</i>	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	<i>Chaetomium globosum</i>	+++	+++	+++	+++	+++	++	++	++	++
耐乾性	<i>Aspergillus niger</i>	+++	+++	+++	+++	—	—	—	—	—
	<i>Paecilomyces lilacinus</i>	++	+	+	+	—	—	—	—	—
	<i>A.ochraceus</i>	+++	+++	+++	++	—	—	—	—	—
	<i>A.versicolor</i>	+++	+++	+++	+++	+++	+	—	—	—
好稠性	<i>A.restrictus</i>	+++	++	+	—	—	—	—	—	—
	<i>Eurotium repens</i>	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
	<i>Wallemia sebi</i>	—	—	—	—	—	—	—	—	—

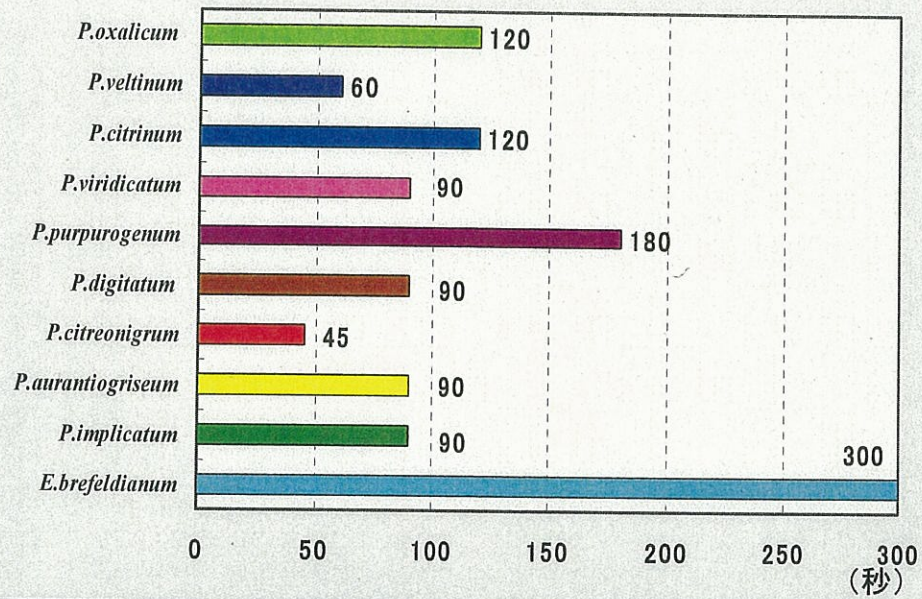
NaClO殺*Penicillium*効果 1% (有効塩素 約700ppm)

	15 "	30 "	45 "	60 "	90 "	120 "	180 "	240 "	300 "
<i>P.oxalicum</i>	++	+++	+++	+++	+	—	—	—	—
<i>P.veltinum</i>	+	+	+	—	—	—	—	—	—
<i>P.citrinum</i>	++	++	+++	+++	+	—	—	—	—
<i>P.viridicatum</i>	++	++	++	++	—	—	—	—	—
<i>P.purpurogenum</i>	+++	+++	+++	++	++	+++	—	—	—
<i>P.digitatum</i>	+++	+++	++	+++	—	—	—	—	—
<i>P.citreonigrum</i>	++	++	—	—	—	—	—	—	—
<i>P.aurantiogriseum</i>	+++	+++	+++	+	—	—	—	—	—
<i>P.implicatum</i>	++	+++	+++	+++	—	—	—	—	—
<i>E.brefeldianum</i>	++	++	++	++	++	++	++	++	++

胞子産生著しい… +++ 胞子産生… ++

菌糸… + わずかに菌糸有り… ± 発育なし… —

NaClO 1%における死滅に要する時間



高松塚古墳壁画に関する修理

施設内にある壁画に関し、現在、緊急と思われる作業を行っており、これらについて報告する。

1. ゲルの除去

漆喰の上には、現在バイオフィームと呼ばれる茶褐色のゲルが広範囲に広がっており、これらが施設内で乾燥していくにつれ、収縮していくが、このときに漆喰の最表面も巻き込んでひび割れを生じている。さらに、その着色性のために画面を汚損し、鑑賞の妨げとなっている。このため、ゲルの除去が緊急の課題となっている。

1.1 ゲルの物理的除去

乾燥したゲルは、水を与えると元の湿潤ゲルの状態に戻るものの、漆喰の凹凸にそって表面を巻き込んだ状態で強固に粘着しているため、物理的に除去することはきわめて困難であり、無理に除去作業を行おうとすると漆喰に損傷を与える可能性が高い。

そのため、なんらかの方法でゲルを剥離しやすい状態にしなければならない。

過酸化水素水や紫外線照射、また各種溶媒による除去などを試みたが、効果はほとんど得られなかった。

エチレンジアミン四酢酸(EDTA)は、キレート剤の一種であり、バイオフィームを抑制する場合があると経験的に言われてきていた。そこで、この薬品を試験的にゲルに施したところ、漆喰への粘着力が落ち、少量ながら除去を行うことが可能になった。

このとき、EDTAを塗布したゲルをスポンジ状のメラミン樹脂などでスポット的に押さえていくことで、ゲルを多少軽減することが可能である。

ただし、EDTAを使用した場合は、漆喰内への残存ができる限り少ないように使用後に複数回にわたり、吸い取るなどの除去作業を行っている。



写真1 EDTA 処置前



写真2 EDTA 処置後



写真3 メラミンスポンジによる処置作業



写真4 メラミン処置前



写真5 メラミン処置後

1.2 ゲルの脱色

ゲルは、その乾燥収縮により物理的に表面を損なうだけでなく、着色により画面を損なっている。この着色を軽減するために、過酸化水素などの使用を検討したが、効果が低い上に、作業中に気泡を発生するので脆弱化した表面をさらに傷める危険性がある。

次亜塩素酸ナトリウム (NaClO) を試験的に用いると、ゲルの着色は顕著に軽減された。しかし、顕微鏡で確認したところ、着色は軽減されているものの、脱色されたゲルが明瞭に残存しており (写真 8)、 NaClO は、ゲル自体を分解する作用は低く、色味を軽減するのみであることが明らかになった。

また、漆喰や石材への影響を最小限にするため、使用はごく低濃度で行い、作業後は EDTA を同じく複数回の除去作業を行う必要がある。



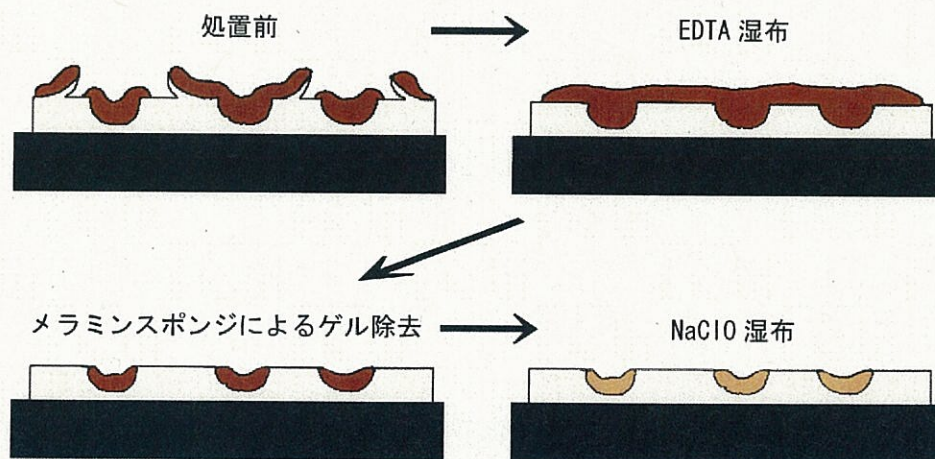
写真6 NaClO 処置前



写真7 NaClO 処置後



写真8 顕微鏡写真



ゲル除去過程模式図

＜高松塚バイオフィルムクリーニング工程の現状報告＞

- ① EDTA 3% 湿布 (30 分-1 時間)
↓
- ② 洗浄 お湯で湿布 5 回程度
↓
- ③ ゲル除去 メラミンスポンジ
↓
- ④ エタノール塗布
↓
- ⑤ 乾燥
↓ 一晚
- ⑥ NaClO 0.2% 湿布 (1-2 分)
↓
- ⑦ 洗浄 お湯で湿布 (色が付かなくなるまで)
↓ (7-8 回程度)
- ⑧ エタノール塗布
↓
- ⑨ 乾燥 一晚
↓ 一晚
- ⑩ MC (400cps) 2%
↓
- ⑪ EDTA 3% メラミンスポンジにて仕上げ



写真9 クリーニング前

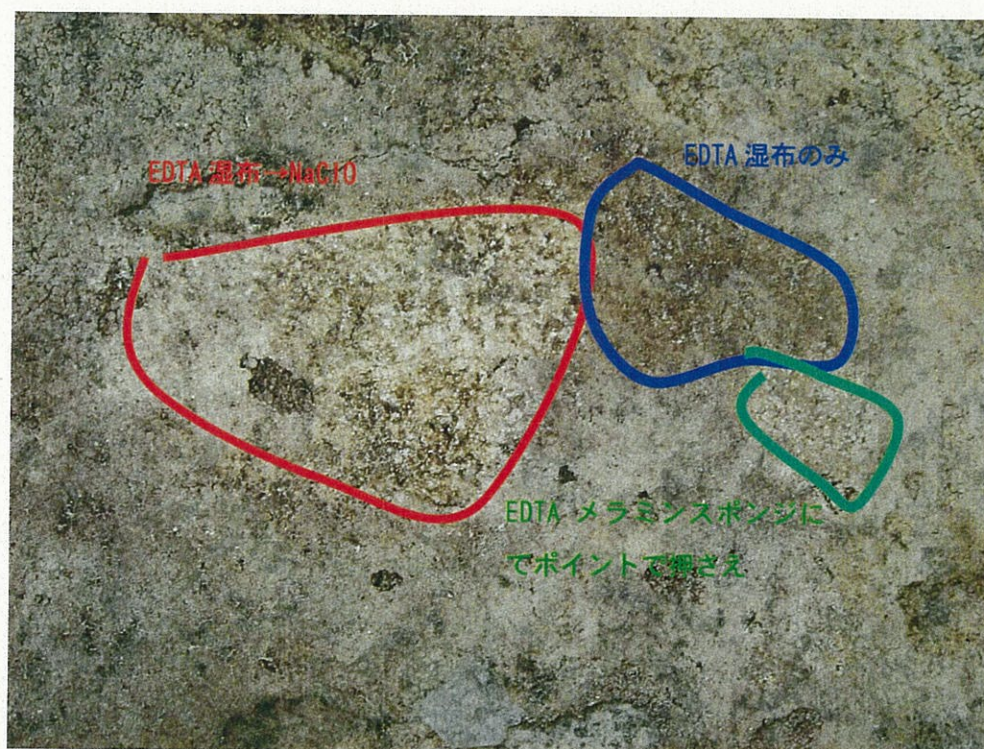


写真10 クリーニング途中



写真 11 天3クリーニング作業箇所



写真 12 天3クリーニング作業箇所（部分）

2. 使用する薬品の顔料への影響試験

現在、漆喰上に使用を考えている薬品は次亜塩素酸ナトリウム (NaClO) とエチレンジアミン四酢酸(EDTA)の二種類である。

EDTA

薬剤の使用目的

現在のところ、ゲルが剥離しやすくなる効果が確認されたのは EDTA 水溶液のみである。そこで、実際に EDTA を使用する前に、各種顔料に対する影響を確認した。

顔料への影響

写真で確認されるように、EDTA に浸漬すると、銅系顔料（緑青・群青）は、銅イオンと思われる青色の溶出が認められた。また、黄土を浸漬した場合も EDTA 水溶液に薄く着色が確認された。

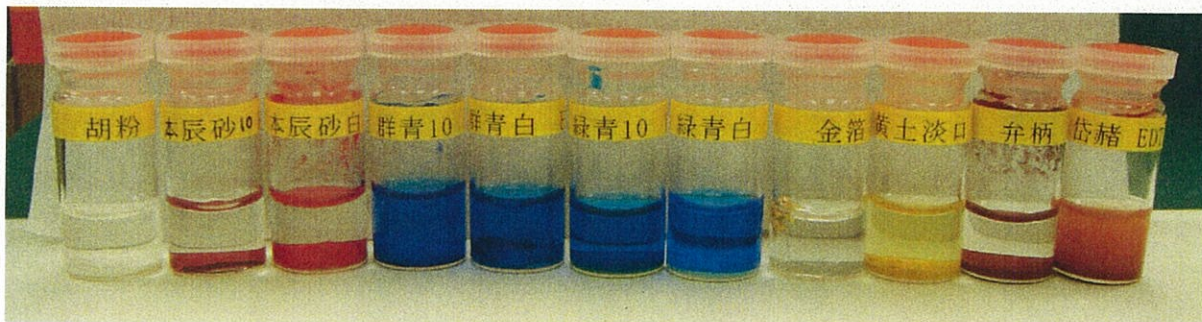


写真 13 EDTA5%水溶液に浸漬

NaClO

薬剤の使用目的

現在のところ、 NaClO 水溶液でのみゲルの色味の軽減が確認された。そこで、実際に NaClO を使用する前に、各種顔料に対する影響を確認した。

顔料への影響

濃度にも依存するが、辰砂では変色が確認され、黄土でも水溶液への薄い着色が確認された。

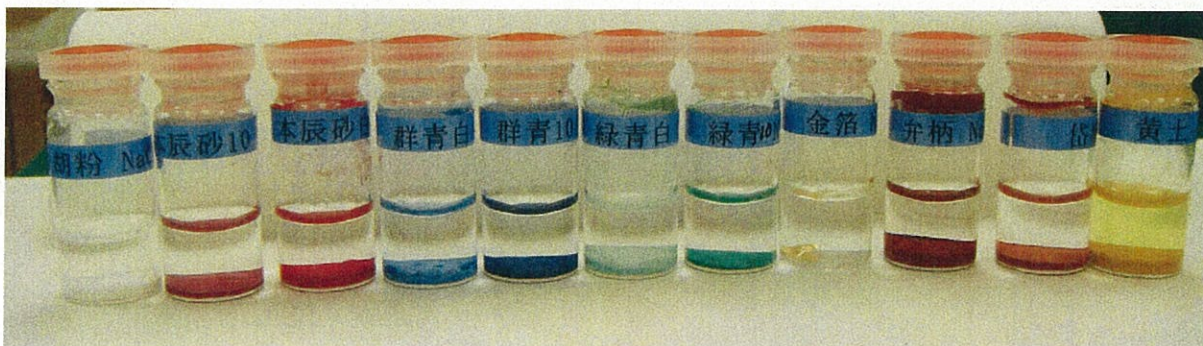


写真 14 NaClO 1%水溶液に浸漬

胡粉・鉛白への影響

高松塚の漆喰は、漆喰だけでなく鉛の検出が確認されていることから、彩色のない部分への薬品への影響を確認するために、胡粉と鉛白に対する EDTA と NaClO の影響を確認した。

EDTA の影響

1%から 7%までの水溶液を用意し、それぞれに胡粉と鉛白を浸漬したが、どちらも変色は認められなかった。

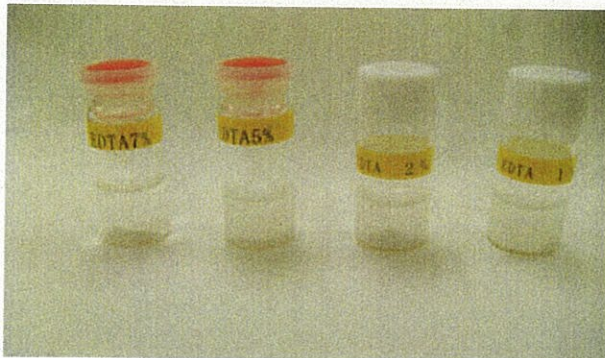


写真 15 EDTA に浸漬した胡粉



写真 16 EDTA に浸漬した鉛白

NaClO の影響

0.05%から 4%までの水溶液を用意し、それぞれに胡粉と鉛白を浸漬した。胡粉については変色は認められなかったが、鉛白は 0.05%でも茶色に変色した。



写真 17 NaClO に浸漬した胡粉

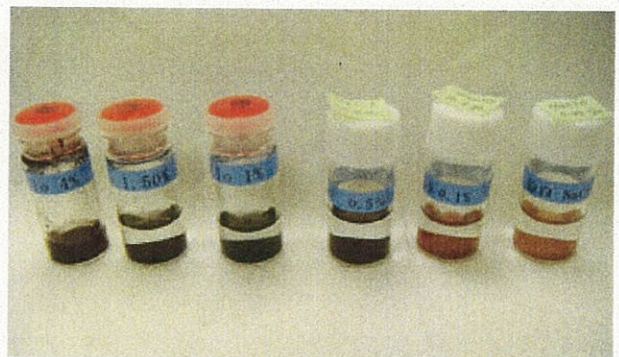


写真 18 NaClO に浸漬した鉛白

薬品を使用するにあたって

EDTA、NaClO とともに、顔料部分への使用は難しいと考えられる。

また、顔料彩色のない部分についても、使用する場合はゲル除去後に十分に薬品の除去作業（湿布し吸い上げる等）を行う必要があると考えられる。

3. 損傷図面の作成

現在、国宝指定の 11 面・7 項目の損傷について損傷図面を作成中である。

高松塚損傷図面 進捗状況 (2008 年 2 月 15 日現在)

	天 1	天 2	天 3	天 4	東 女 子	西 女 子	青 龍	白 虎	東 男 子	西 男 子	玄 武
漆喰層の 欠失	25 %		○	○	○	○		○		○	
表層面の 損傷			○	○	○					45 %	
亀甲状の 亀裂			○	○	○			○			
漆喰の 陥没			○	○	○			25 %			
黒スス黴			○	○	○	○		○		○	
バイオ フィルム			○	○	○						
流入土・ 土塊			なし	なし	○						

Ⅲ. キトラ古墳の壁画漆喰

肥塚 隆保

現在、キトラ古墳の壁画については剥ぎ取り作業が進められ、剥ぎ取った壁画については、特殊な樹脂フィルム製の密閉袋に入れて酸素濃度を低下させ、冷暗所で保管しながら緩やかに乾燥を進めている。乾燥が終了したものについては順次、保存修理を進める予定である。いっぽう、保存修理を進めるにあたっては、漆喰の現状を知るための科学的な調査や、彩色顔料の同定などに関する調査を実施している。ここでは主として漆喰の調査概要を報告する。

1. 漆喰の化学分析

これまで発見されている古墳のなかで、漆喰が石室に塗られているもので分析調査されたものは、ほぼ30数ヶ所におよぶ。大半のものは炭酸カルシウム (CaCO_3) 含有量は90%前後を示しているが、なかには50数%を示すものもある。いっぽう、特異なものとして酸化鉛 (PbO) が1~2%と高い数値を示すものとして、高松塚古墳 (奈良県高市郡明日香村) や東明神古墳 (奈良県高市郡高取町) の石室漆喰が知られている。一般的に漆喰の原料に不純物として鉛が混入することは考えにくく、漆喰に鉛白が混合されたのか、漆喰の表層に薄く鉛白が塗布されたのかもしれないが、詳細は不明である。いっぽう、キトラ古墳の漆喰については、壁体より崩落したもの (石室E区) と考えられる試料を用いて詳細な調査を実施した。分析法は、ICP発光分光分析法 (Ca , Si , Al , Mg , Fe , Ti , Mn) および原子吸光法 (Na , K , Pb) により、 Cl については水抽出ーイオンクロマトグラフ法、強熱灰化減量 (Ig.loss) については1000℃、1時間灰化時の重量減量を測定した。また、同じ試料を用いてX線回折粉末法による測定も併せて実施した。分析の結果、高松塚古墳の漆喰とよく似た組成を示し、主成分である炭酸カルシウム量はほぼ同じで、酸化マグネシウム (MgO) については、やや少ない傾向を示しているが、

表1. 漆喰の分析 (数値の単位はパーセント)

漆喰の風化状態や試料自身のバラツキなどを考えると、ほぼ同質であると考えられる。しかし、酸化鉛の含有量については、キトラ古墳の漆喰には0.003%しか含まれず、高松塚古墳の漆喰とはまったく異なる結果が得られた (表1)。また、X線回折の結果、方解石 (Calcite : CaCO_3) と極わずかに石英 (Quartz ; SiO_2) のピーク (Q_{110}) が観測された。

	キトラ古墳	高松塚古墳
SiO_2	1.2	
Al_2O_3	0.53	
Fe_2O_3	0.36	0.083 (Fe)
CaCO_3	94.59	95.05
MgO	0.18	0.322 (Mg)
Na_2O	0.067	
K_2O	0.058	
TiO_2	0.022	
MnO	0.039	
PbO	0.003	
Ig.Loss	44.52	
Cl	0.003	

今後の計画的な剥ぎ取りについて（たたき台）

<今後の計画的な剥ぎ取りについて>

平成21年度からの3年間で全面の剥ぎ取りを終える予定。

（1）集中剥ぎ取り（イメージ）

平成21年度以内：天井のうち優先すべき部分の剥ぎ取り

平成22年度以内：側壁のうち優先すべき部分の剥ぎ取り

平成23年度以内：その他の部分の剥ぎ取り

※絵の周辺の余白部分（側壁については、泥の下に十二支像が存在する可能性がある部分を含む）を優先し、石材の単位に合わせた剥ぎ取りを基本とする。

※1ヶ月程度の集中剥ぎ取り作業を、年2回程度実施する。

（2）集中剥ぎ取り以外の作業

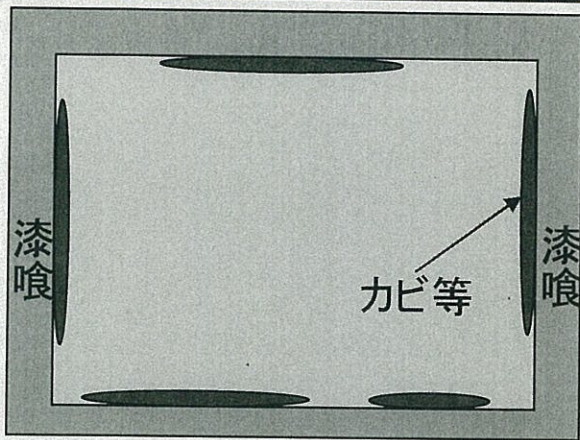
- ・剥ぎ取った壁画の安定化（状態を確認しながら博物館環境に慣らす）
- ・保存処置（裏打ち、クリーニング等）
- ・画面の再構成 等

	平成21年度	22年度	23年度	24年度以降
天井のうち 優先すべき部分	剥ぎ取り 安定化	安定化 保存処理	保存処理	保存処理
側壁のうち 優先すべき部分	剥ぎ取り 安定化	剥ぎ取り 安定化	安定化 保存処理	保存処理
その他の部分			剥ぎ取り 安定化	安定化 保存処理

- これまでの計画では、全面剥ぎ取り（床面を除く）は平成25年を目途に終了する予定であったが、集中的な剥ぎ取り方法を採用することで、約2年間剥ぎ取り期間を短縮することができる。
- 平成22年度頃には、側壁の泥の下（十二支像が存在する可能性がある部分）の剥ぎ取り作業を予定している。特に慎重を要する作業であるため、剥ぎ取り作業のペースが変わる可能性がある。

キトラ古墳における微生物対策について (参考)

現在の石室内の微生物状況



キトラ古墳石室内

◎ 漆喰表面にカビやゲルの発生が継続的に発生



◎ カビ等から酢酸菌を確認

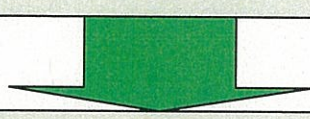
※酢酸菌は漆喰を構成している炭酸カルシウムを分解する



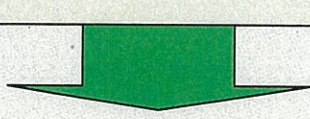
3年もすれば、漆喰の暗色化や消失が予想され得る。



短期間に剥ぎ取りを行うため、集中的な剥ぎ取りを実施

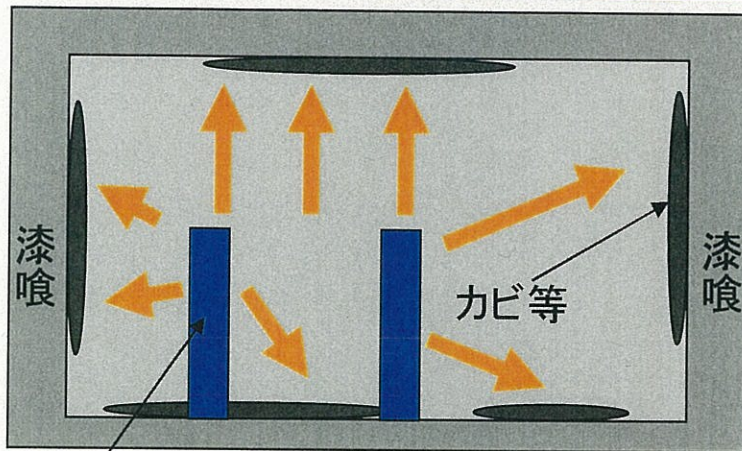


その間の微生物対策として取り得る方策



- 既存の薬剤の中から強力な薬剤を使用
- 殺菌灯を間欠的に照射
- 石室内の湿度調整を見直す

殺菌灯（紫外線）を間欠的に照射する。



殺菌灯

キトラ古墳石室内

【用語解説】

殺菌灯（紫外線）

紫外線を透過しやすいガラスを使用した水銀放電灯の一種。

水銀の放射する波長254nmの線の殺菌力を利用。強力で、菌種の別なく効果を発揮する。

殺菌灯のメリット

- ①キトラ古墳石室内に生息するカビ菌をほぼ60分間でかなり死滅させることができること。
- ②殺菌灯の照射による石室内の温度上昇は60分間で1℃以下であり、壁面の結露等の危険性は極めて小さいこと。

強力な薬剤（次亜塩素酸ナトリウム溶液）を使用する。

これまでは

顔料・描線の影響を考慮し、比較的穏和なエタノールを使用。有機物が壁面に残留。（カビ等の栄養源の可能性あり）

今後は

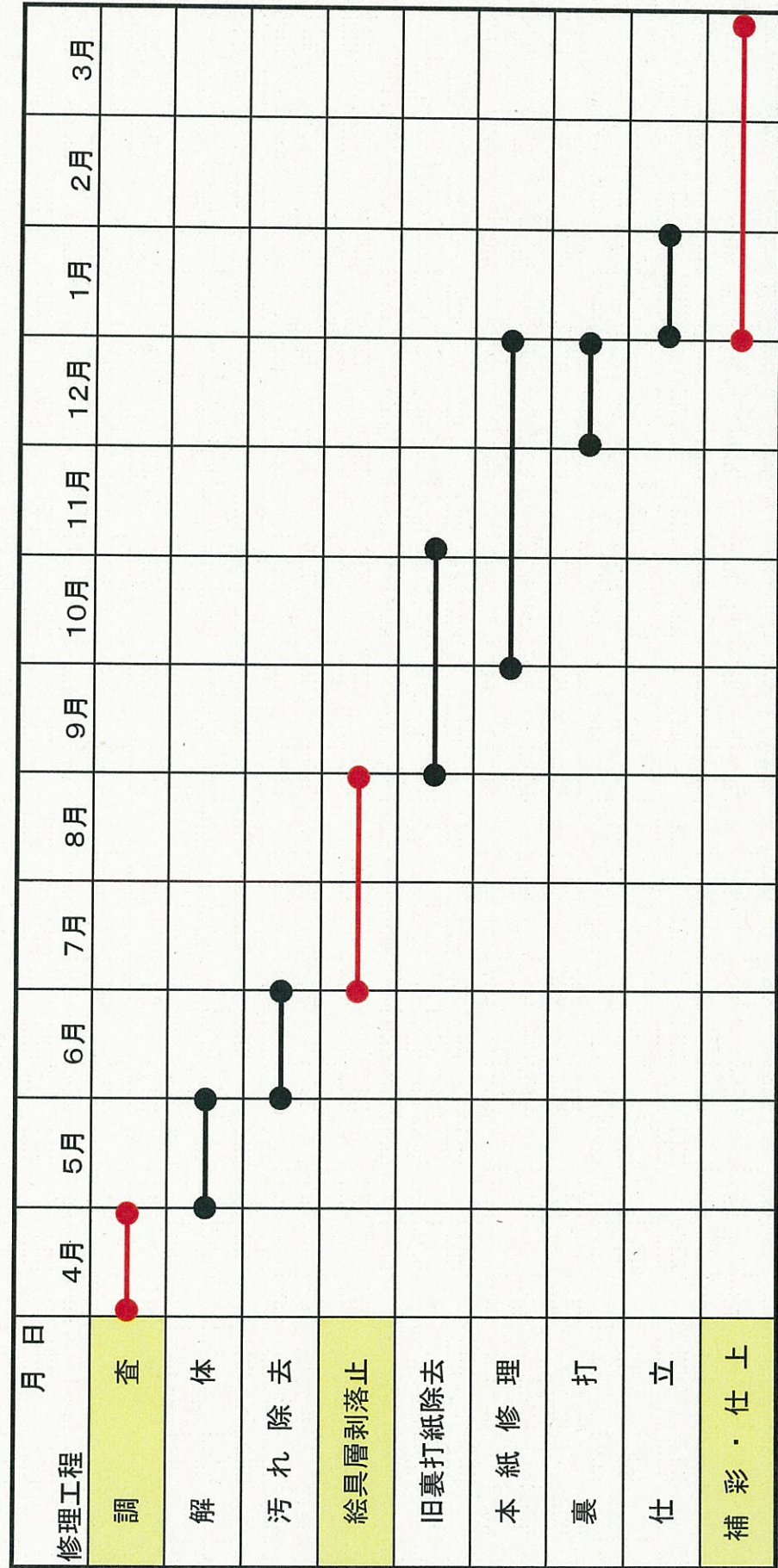
より強力な薬剤を使用。
次亜塩素酸ナトリウムを塗布すると、キトラ古墳石室内に生息するカビはほぼ5分以内に死滅する。有機物が壁面に残留しない。

【用語解説】

次亜塩素酸ナトリウム（NaClO）

強アルカリ性で強い酸化力をもつ。一般の家庭で使用される塩素系漂白剤、殺菌剤として用いられる。鉛との化学反応が懸念されるが、高松塚古墳とは異なり、キトラ古墳の漆喰は鉛をほとんど含まず、問題はないものと考えられる。

重要文化財修理(国庫補助事業 絵画)の一般的な年間作業スケジュール(イメージ)



※対象となる作品によって、年間スケジュールは若干前後することや、修理工程の進捗が工房によって異なることもある。

※上記「調査」・「絵具層剥落止」・「補彩・仕上」については、キトラ古墳壁画剥ぎ取り作業を担当する技術者(2人)が中心となって担当する。

※平成21年度の年間計画はすでに決定済みであり、変更は不可能である。平成22年度以降については、今後の調整による。