

高松塚古墳壁画の劣化の経緯と 生物的要因について

2007. 11月

高松塚古墳壁画発見 S47年(1972年)

- 美しい濡れ色の漆喰壁画
 - フランス、イタリアなどからも専門家を招聘して、慎重に保存方針を協議
 - 「現地保存の大原則」
「壁画剥離の技術的困難さ」
「湿度が変化すると脆弱な漆喰が剥落してくること」
から、高湿度で安定してきた壁画の
「現地保存」が決定された

微生物の生育条件

- 温度
- 湿度(水分) ← 高湿度で現地保存
- 酸素濃度
- 栄養分
- pH

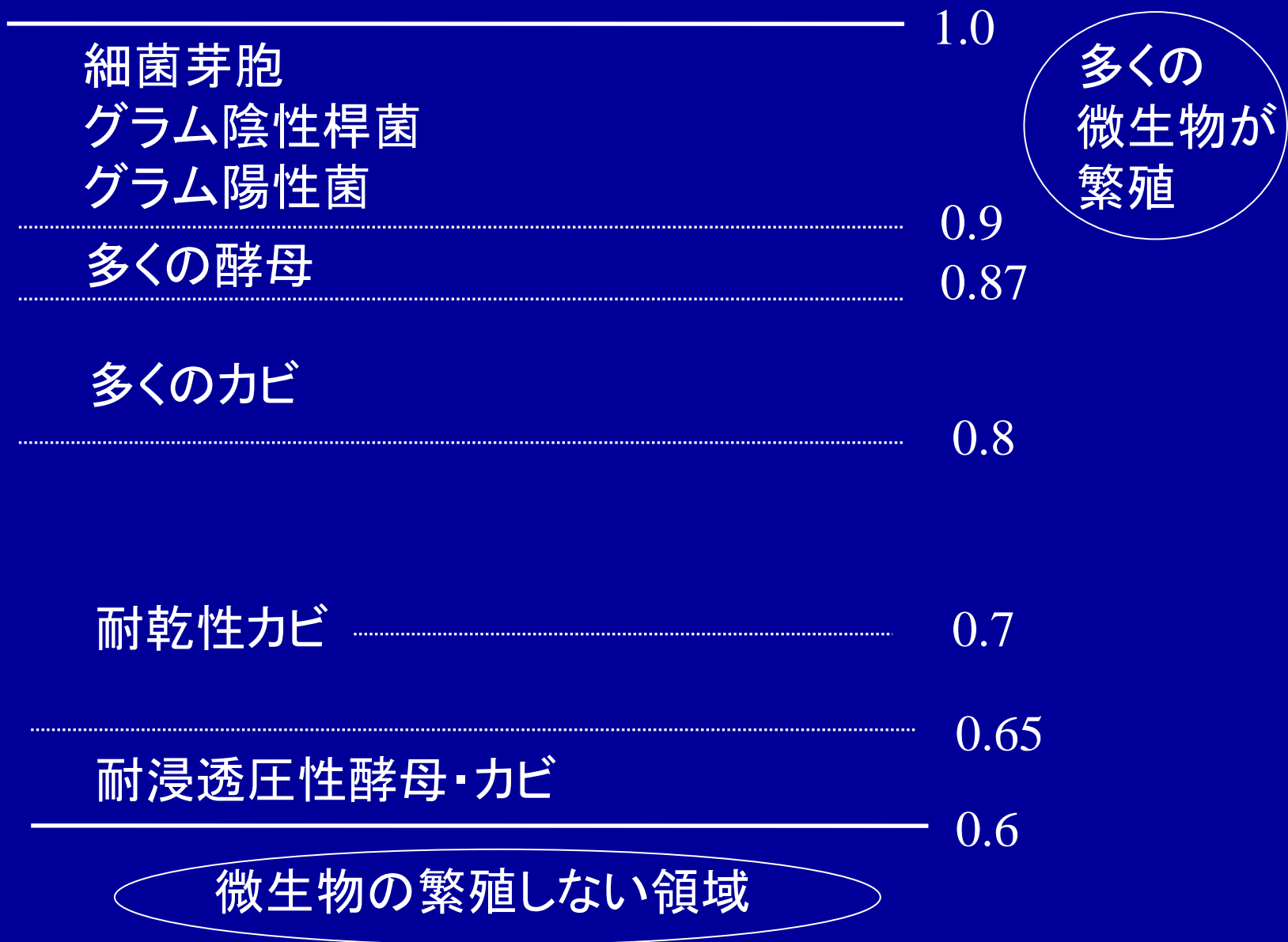


図. さまざまな微生物の発育に必要な最低水分活性

微生物(カビ)にとって、湿度100%RHとは、どういう環境か？

日
数

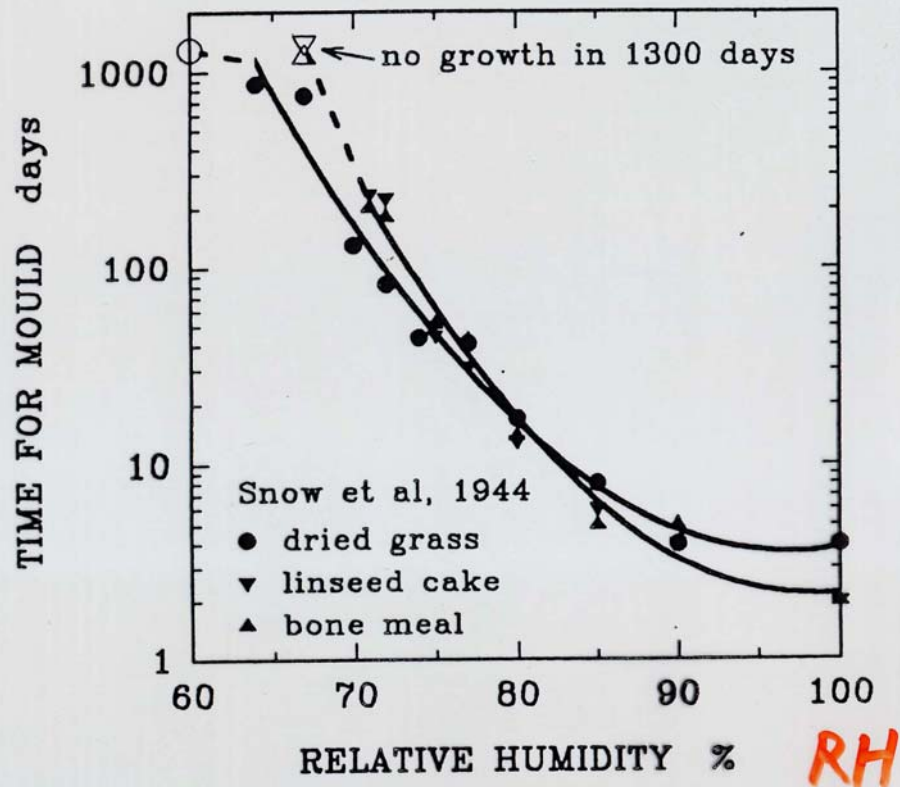


Figure 2. Time required for mould to develop on some high nutrient materials (first appearance of mycelium, many species). After Michalski (1993)

どのように制御するか

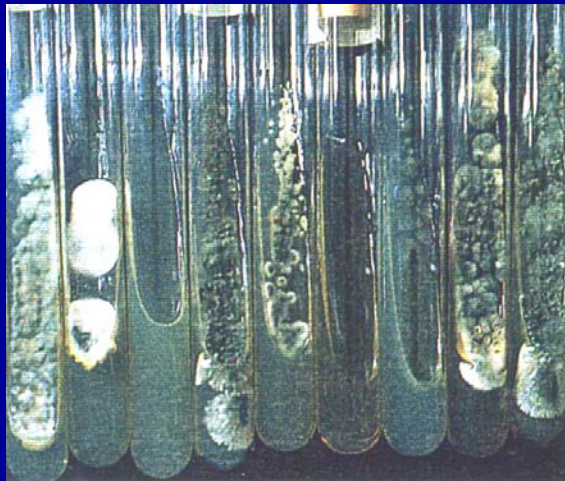
方法	細菌への効果	カビへの効果	可否
低温	△	△	施設の大きな改変が必要
乾燥(60%RH以下)	◎	◎	不可
酸素を除去	×	○	不可
汚染源や栄養を減らす	△	△	できるだけ
薬剤	△	△	壁面に極力影響を与えないもの、作業者への安全性

「もとの環境にできるだけ近く…」

- 発掘前の環境

→ → “平衡状態”

…… バランスがとれ、微生物の増殖が
一時的に止まっている状態



高鳥浩介 編 1991
一目でわかる図説かび検査・
操作マニュアルより

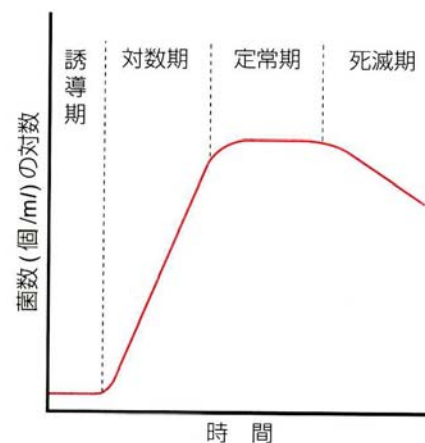


図 6.6 ●微生物の成長曲線

別府輝彦 2004 新・微生物学より

石室は
完全な密閉系では
なく、
周囲の土壌
(植物の根や
小動物を含む)
を含めたシステム
となっている

平衡状態にあるときは・・・

外界から

新たに微生物が入らず、
栄養分となる有機物が入らず、

酸素濃度

温度

湿度



が変化しなければ
バランスは崩れない

しかし・・・

- 温度
- 湿度
- 酸素濃度 などの変化
- 外界からの微生物や栄養分の持ち込み
 などがあれば、

→ バランスは、たやすく崩れる

高松塚古墳の場合

- (1) 過去の盗掘など
- (2) 1972年、石室の開封
- (3) 1976年以降の必要不可欠な修復作業
- (4) 2001年の取り合い部の工事以降の外的な要因

によって

温度、湿度、栄養状態などの変化、微生物の持ち込みを経験

変化を減らす努力

非常に狭い空間なので、変化し
やすい

- 非公開
- やむを得ない場合のみ入室
- 機器の消毒、無塵衣着用.....



第Ⅰ期

- 発掘直後（1972 – 1975）

「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）資料より要約、抜粋）

開封によって、湿度は低下傾向

パラホルムアルデヒドが昇華

パウダー状の漆喰で「頭が白くなる」

第II期

- 第一次修理、第二次修理の時期（1976 – 1981）

厳しい労働環境のなかでの作業

「昭和53年頃から石槨内の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。」

（国宝高松塚古墳壁画

恒久保存対策検討会（第3回）資料
より要約、抜粋）



- 昭和48年 モーラ氏来日。
接着剤としてパラロイドB72を使用することとする。
- 昭和49年 保存施設工事着工。
- 昭和50年 微生物調査。石槨内でそれまで認められなかった糸状菌 (*Doratomyces* sp., *Fusarium* sp., *Cladosporium* sp., *Mucor* sp.) を採取。
- 昭和51年 保存施設完成。
保存修理。天井部分。取り合い部にカビが発生(12月)
- 昭和52年 布置したパラホルムアルデヒドは完全に気化(1月)
保存修理(主に天井)。

----文化庁ホームページ「国宝高松塚古墳壁画保存管理の経緯(昭和47年～平成18年)」より抜粋

昭和53年 第2次修理開始。天井と側壁の剥落止め(9月-12月)

11月-12月 カビ発生、処置(ホルマリン1:エタノール9)

東壁: 男子群像、青龍首剥落部、青龍後方の汚濁部分、
女子群像部分など

西壁: 月像下部から右上部、男子緑衣ほか広範囲。
天井近く漆喰木口部。

昭和54年 保存修理。
東西壁で *Doratomyces* sp.ほかを同定。
石槨内で極小の虫類多く確認。

昭和55年 保存修理。
広い範囲で *Doratomyces* sp.ほかを同定。
東壁: (青龍の左側?)汚濁部上方。
西壁: 白虎の前方、天井近くまで、白虎の上下。

昭和56年 保存修理。

1月 カビが石槨内の広域に発生。
取り合い部でも白綿状カビを確認。
カビ処置

東壁： 群像部、青龍の左目周辺、青龍の全面に白い粒状

西壁： 白虎左胸から前肢付け根。左肢より下方の広い範囲。
男子群像ほぼ全面。

2月 石槨内ほぼ全面に白い粒状菌。カビ処置
ホルマリン、TBZともに効果がなく、トリクレンにてカビ処置

6月 パラホルムアルデヒドの燻蒸殺菌を開始。

----文化庁ホームページ「国宝高松塚古墳壁画保存管理の経緯(昭和47年～平成18年)」より抜粋

S55年 - 56年の処置

ホルマリン1:エタノール9の溶液で殺菌

TBZ - 効果なし トリクロロエチレンで除去

物理的に除去 パラホルムアルデヒド燻蒸



白虎・昭47.jpg



白虎・昭51.jpg



白虎・昭55.jpg



白虎・昭56.jpg

(写真) 国宝高松塚壁画恒久保存
対策検討会(第3回)資料より

昭和50年代の修理の時期の状況

- 保存施設完成 昭和51年
- 保存修理作業開始 昭和51年～

取り合い部、石室内の湿度、水分量が再び上昇した時期

→ 壁面の乾燥を防ぐため、前室を加湿して入室

→ 「昭和53年ごろからパラホルムアルデヒドが水浸しになり蒸散しなくなった」

頻繁な人の出入り (必須の作業)

剥落止めの樹脂(パラロイドB72/トリクレン溶液)などの注入

第Ⅲ期

・沈静化の時期（1982 – 2000）

「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」

（国宝高松塚古墳壁画恒久保存対策検討会（第3回）
資料より要約、抜粋）

→ ふたたび、平衡状態になっていった時期

1986年-1987年の微生物調査

Aspergillus sp., *Trichoderma* sp., *Fusarium* sp.,
Actinomycetes (褐色、白色)など

(「国宝 高松塚古墳壁画－保存と修理－」より)

1994年-2000年の微生物調査

Penicillium sp., *Aspergillus* sp., *Fusarium* sp.,
Trichoderma sp., など

→この時期の石室内常在菌
(被害が及ぶわけではない)

(国宝高松塚古墳壁画恒久保存対策検討会(第3回)資料より)

第IV期

- ・再び平衡状態が破れる
(2001 -)

「平成13年春に取り合い部
天井の崩落止め工事を実施したが、この時からカビ
が取り合い部及び石槨内
に発生し、絵画にも被害
が及んだ。」

(国宝高松塚古墳壁画恒久保存
対策検討会(第3回)資料より
要約、抜粋)

取合部への水の侵入、
土の崩落が起きていたため、工事は必要



石棺部強化:
ワッカーOH

版築壁の強化:
サイトSX

空洞部修復・
側壁擬土仕上げ:
エポキシ樹脂
(アラルダイト・
ハードナー)

(H12点検報告書
より)

工事の後(2001年3月26日)のカビ

Aspergillus sp.
Cladosporium sp.
Penicillium sp.
Fusarium sp.など

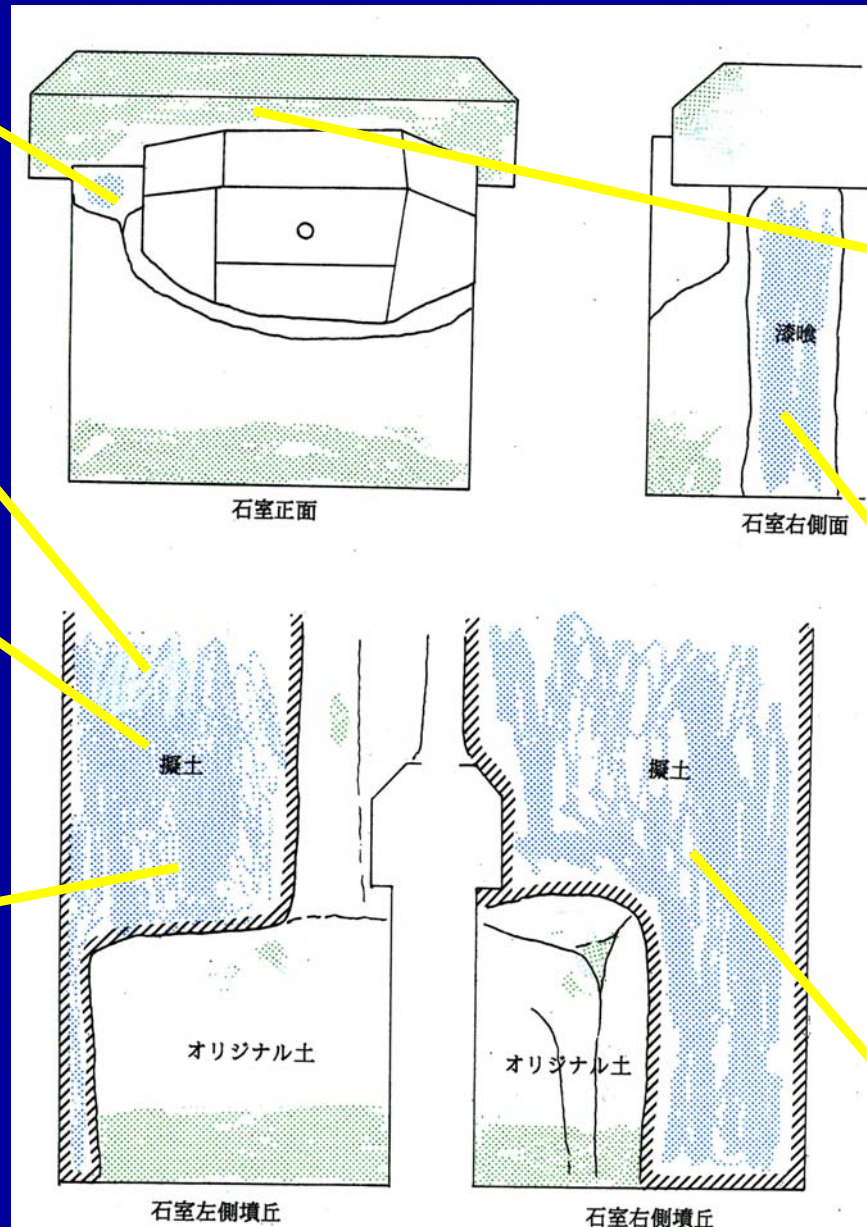
Penicillium sp.



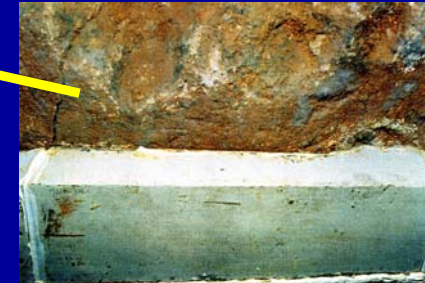
Penicillium sp.
Aspergillus sp.



Penicillium sp.
黄色いカビ(不明種)



Penicillium sp.
Fusarium sp.



Penicillium sp.
ケカビ?(不明種)



Penicillium sp.

工事の後(2001年3月26日)のカビ

「取合部から検出された主要なカビは、

Penicillium sp., *Aspergillus* sp., *Fusarium* sp. などで、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、石室内では検出されていない *Cladosporium* sp., やそのほかの不明種などもみられた。」

(国宝高松塚古墳壁画恒久保存対策検討会(第3回)資料より)

取合部のカビの対応

- 2001年2月13日-3月2日 工事

- 2001年3月25日-28日 定期点検

取合部にカビが大発生しているのを発見、

取合部の殺菌(消毒用エタノール、パラホルムアルデヒド燻蒸)、
微生物調査

- 2001年4月、5月、7月、8月

取合部の殺菌(コートサイド159-エタノール製剤)

- 2001年9月 取合部の殺菌、防カビ処置

(コートサイド159で殺菌、コートサイド123を樹脂(パラロイドB72)
に練りこんで塗布)

石室周辺・石室内の平衡が破れ、
微生物が再び壁面に
(2001年9月26日－29日石室内点検)



2001年9月27日



写真11 開室時西壁のカビ発生状態

2001年9月のカビ発生位置（南壁・盗掘口）

（「国宝 高松塚古墳壁画保存点検報告書 平成13年9月26－29日」より引用）



写真1 開室時プラスチック板上のカビ発生状態

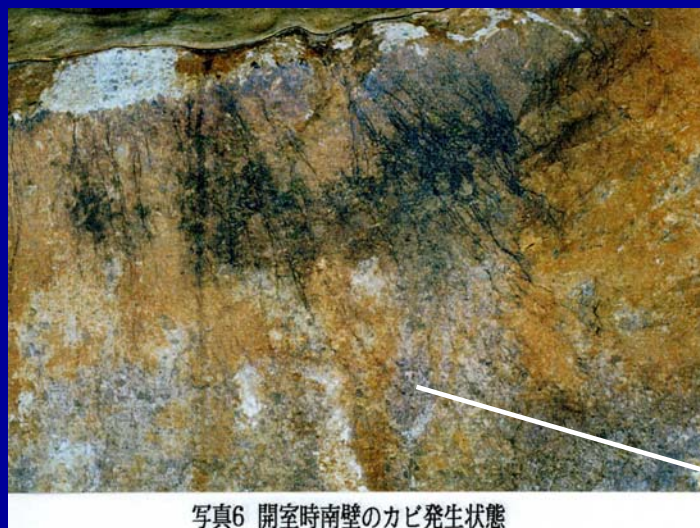


写真6 開室時南壁のカビ発生状態



写真26 南壁カビ発生箇所

Penicillium sp. (きいろ)

Aspergillus sp.

Penicillium sp.

2001年9月の石室内のカビ発生位置（東壁）

（「国宝 高松塚古墳壁画保存点検報告書 平成13年9月26－29日」より引用）



写真23 東壁カビ発生箇所

- ・青龍後方、女子群像部分は、S53年にもカビが初期に発生 *Penicillium* sp.
- ・漆喰目地部分の発生に注目 → ムカデ、昆虫、ダニなどとの関連？



2001年12月19日

再び、石室内壁面に
カビが発生(白、茶、黒色の
カビ)



石室内温度が年間でもっとも
上昇する時期

2001年12月の石室内のカビ発生位置（東壁）

（「国宝 高松塚古墳壁画保存点検報告書 平成13年12月18－21日」より引用）



図1 東壁カビ発生状況

Cylindrocarpon sp. (褐色),

暗色系 *Acremonium* sp. (sect. *Gliomastix*)

2001年12月の石室内のカビ発生位置（西壁）

（「国宝 高松塚古墳壁画保存点検報告書 平成13年12月18－21日」より引用）



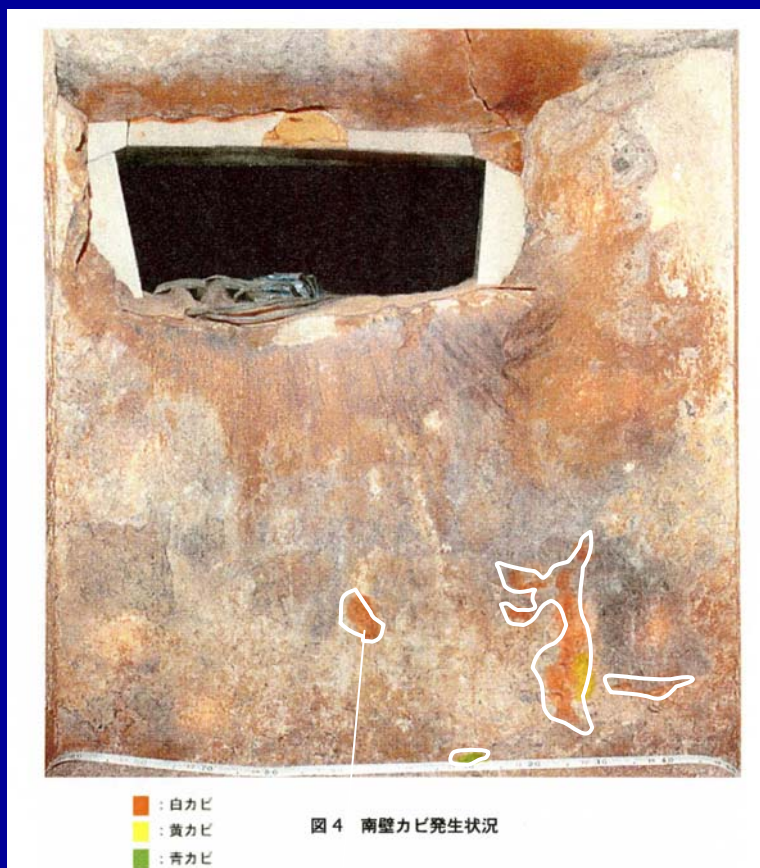
Cylindrocarpon sp. (褐色),
Penicillium sp.,
Aspergillus sp.

Cylindrocarpon sp. (褐色),
暗色系 *Acremonium* sp. (sect.
Gliomastix), *Fusarium* sp.

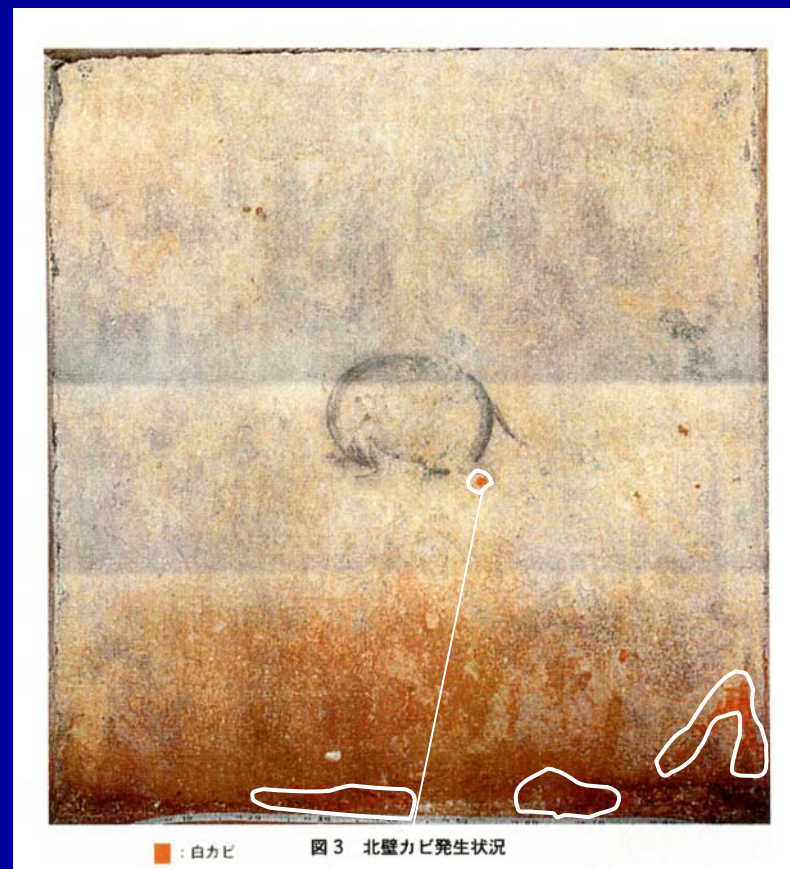
Cylindrocarpon sp. (褐色),
Penicillium sp., *Aspergillus* sp.

2001年12月の石室内のカビ発生位置（南壁・北壁）

（「国宝 高松塚古墳壁画保存点検報告書 平成13年12月18－21日」より引用）



Cylindrocarpon sp. (褐色),



Cylindrocarpon sp. (褐色),
Trichoderma sp.

2001年12月のカビ

- 取合部

Penicillium sp., *Aspergillus* sp., *Trichoderma* sp.
ケカビ様のカビ、*Cylindrocarpon* sp. (暗色系)

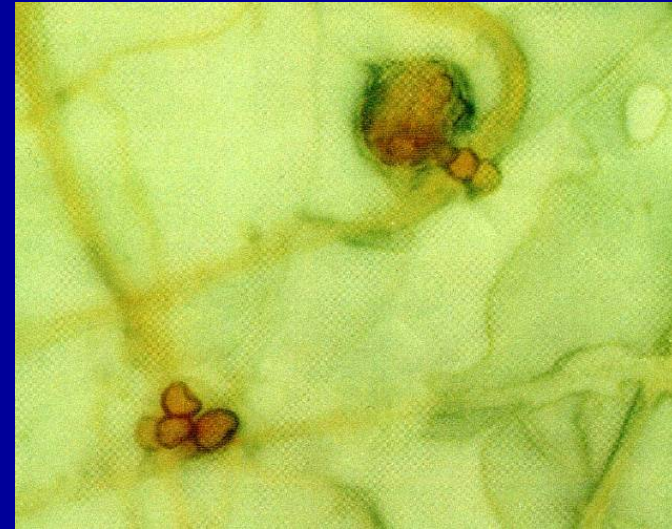
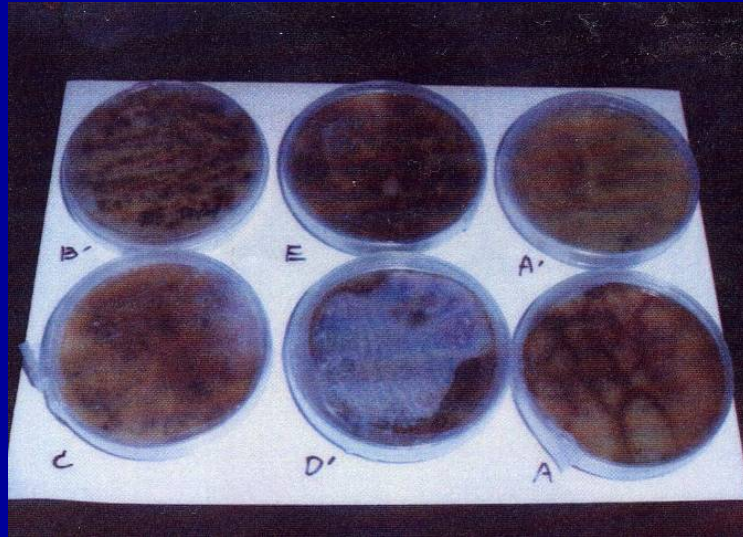
- 石室壁面

Cylindrocarpon sp. (暗色系), *Penicillium* sp.,
Aspergillus sp., 暗色系 *Acremonium* sp. (sect.
Gliomastix sp.), *Fusarium* sp., *Trichoderma* sp.

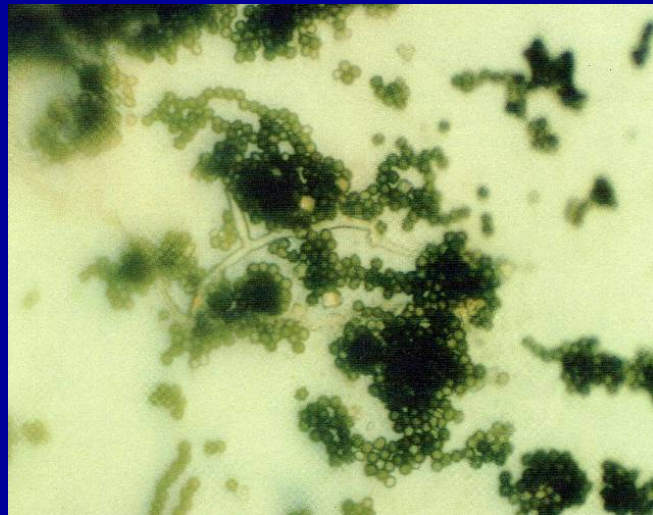
「茶色カビは表面の綿状菌糸を除去しても、壁面に色素を沈着させてしまう。黒色カビは根を壁面にくいこませているため、ごく表面しか除去することができない。」

(「国宝 高松塚古墳壁画保存点検報告書 平成13年12月18－21日」より引用)

2001年12月18-21日の点検時に
石室内／取合部より検出された
褐色・黒色のカビ



玄武下の拭き取り試料、
褐色のカビ(400倍)
Cylindrocarpon sp.(褐色)



青龍下の拭き取り試料、
黒色のカビ(400倍)
暗色系*Acremonium* sp.

2001年9月

近年、初めて石室の壁面にカビ発生

2001年12月

同じ場所を中心に、さらにカビが拡大

「どのようなプロセスで、壁面にこのような分布のカビが発生するにいたったか？」

侵入経路・水分・栄養分

水の侵入、隙間、植物の根や遺存体、虫などの棲息状況
過去の発生部位等との関連、水分量……

→ 「発掘による石室と周辺部の詳細調査」
「石室と周辺部の微生物分布詳細調査」

2002年10月 黒色の汚れ





2001年12月



2002年10月以降



2001年12月



2002年10月以降

2002年－2003年

2002年～2003年 点検回数をふやす
(ほぼ一月に一度)

2002年9月～2003年4月 デジタル写真撮影

2003年、8月、11月 取合部の防黴処置

2003年

「取合部にはカビが依然として散発的に発生していたため、2003年8月に再度防黴処理（コートサイド123をパラロイドに混合して塗布）。しかし、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い、土壌表面にポリシロキサン樹脂を何回かにわたって塗布。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。」

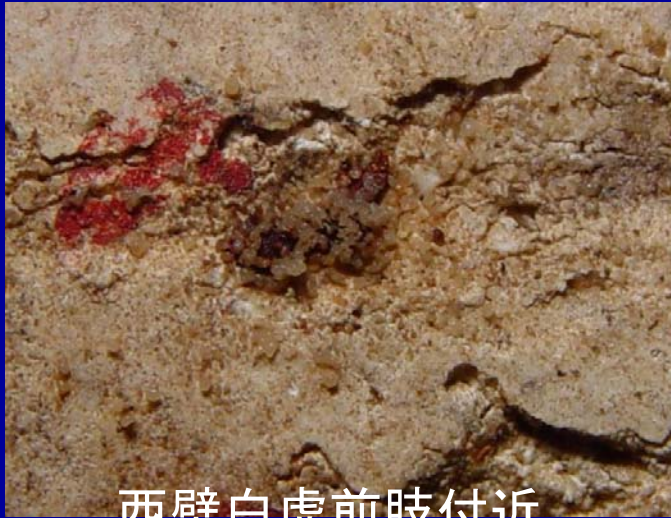
（国宝高松塚古墳壁画恒久保存対策検討会（第3回）資料より）

2004年

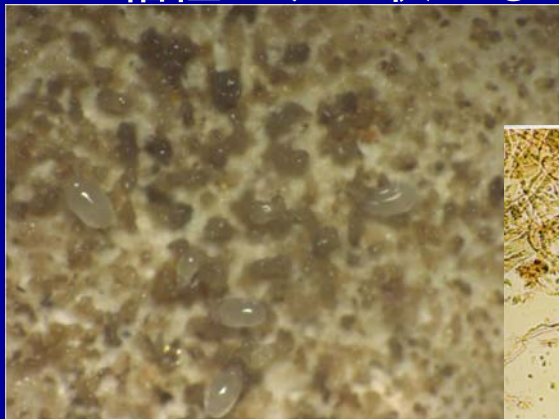
- 取合部の黴は、かなり抑制されたものの石室内では、2月以降、継続的にカビが発生。
（以前発生したところを中心に、繰り返し出る）
- 点検回数増加（1月に一度から、2週間に一度）
- ゲル状物質・ダニ
- 9月に西壁男子群像上にカビが大発生

（国宝高松塚古墳壁画恒久保存対策検討会（第3回）資料より）

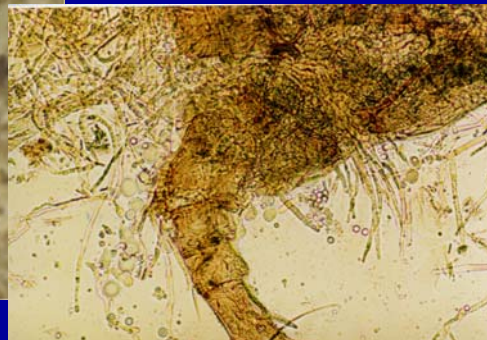
2004年7月
ゲル状物質とダニ



西壁白虎前肢付近
粘性のゲル状のもの



ダニとダニの死骸



2004年9月



西壁男子群像

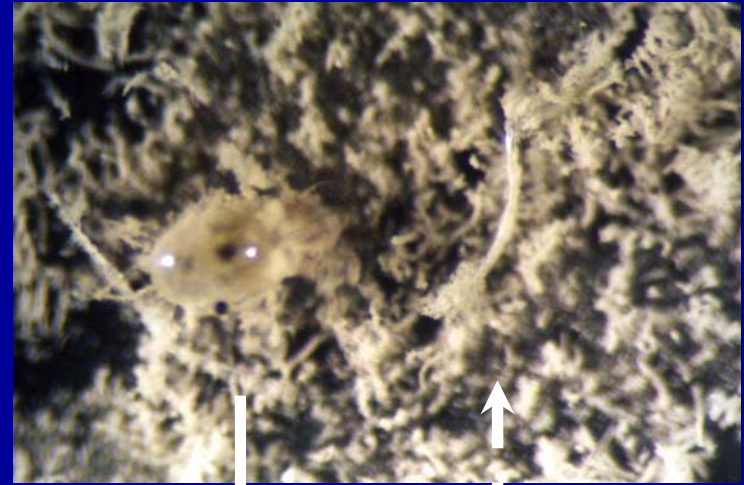


絵の上、
50倍拡大像

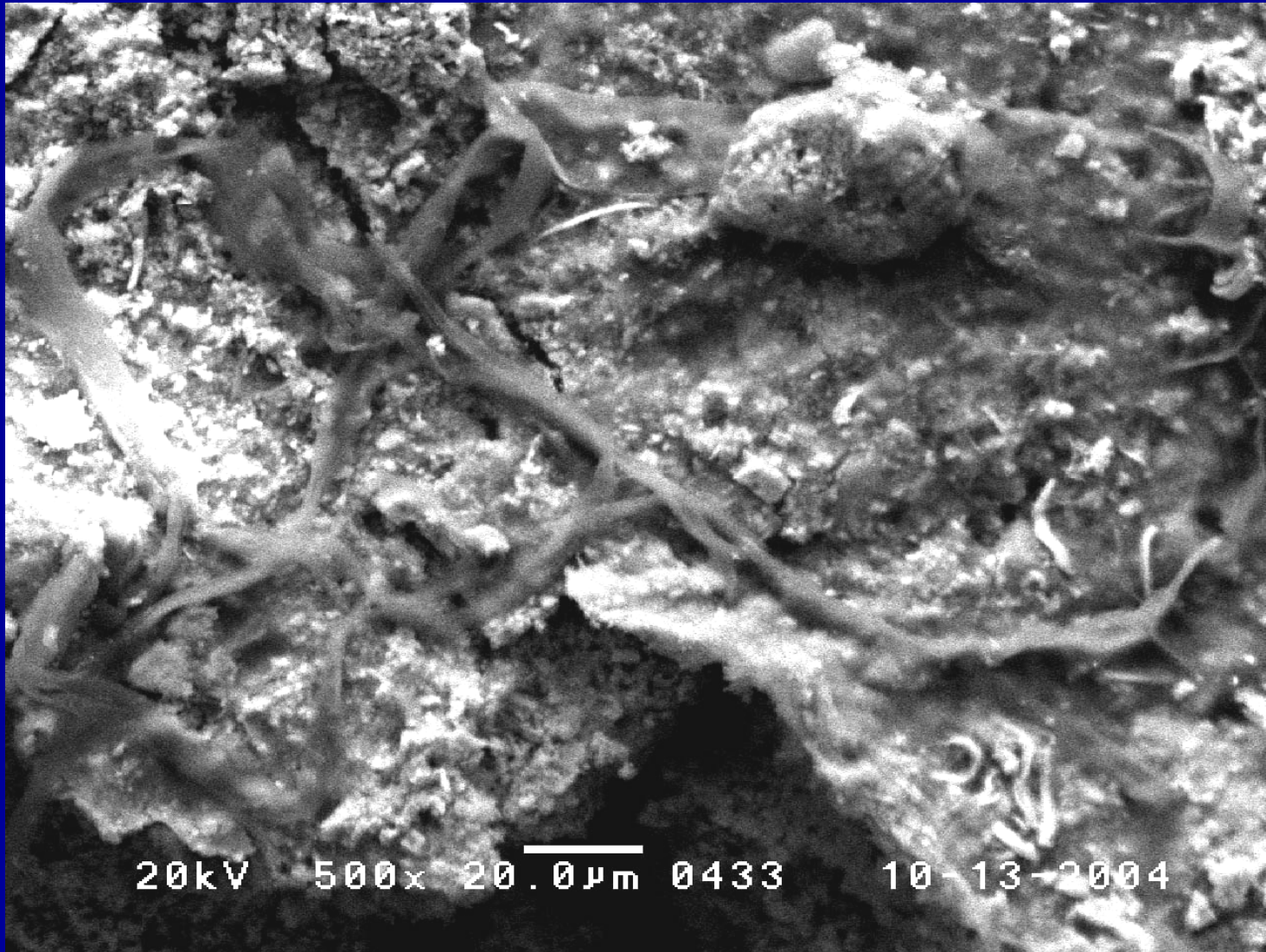
ダニが歩いたあと
にカビが散っている



カビを食べるダニ
(寒天培地上)



カビを食べつくして増えたダニ
(寒天培地上)



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見える

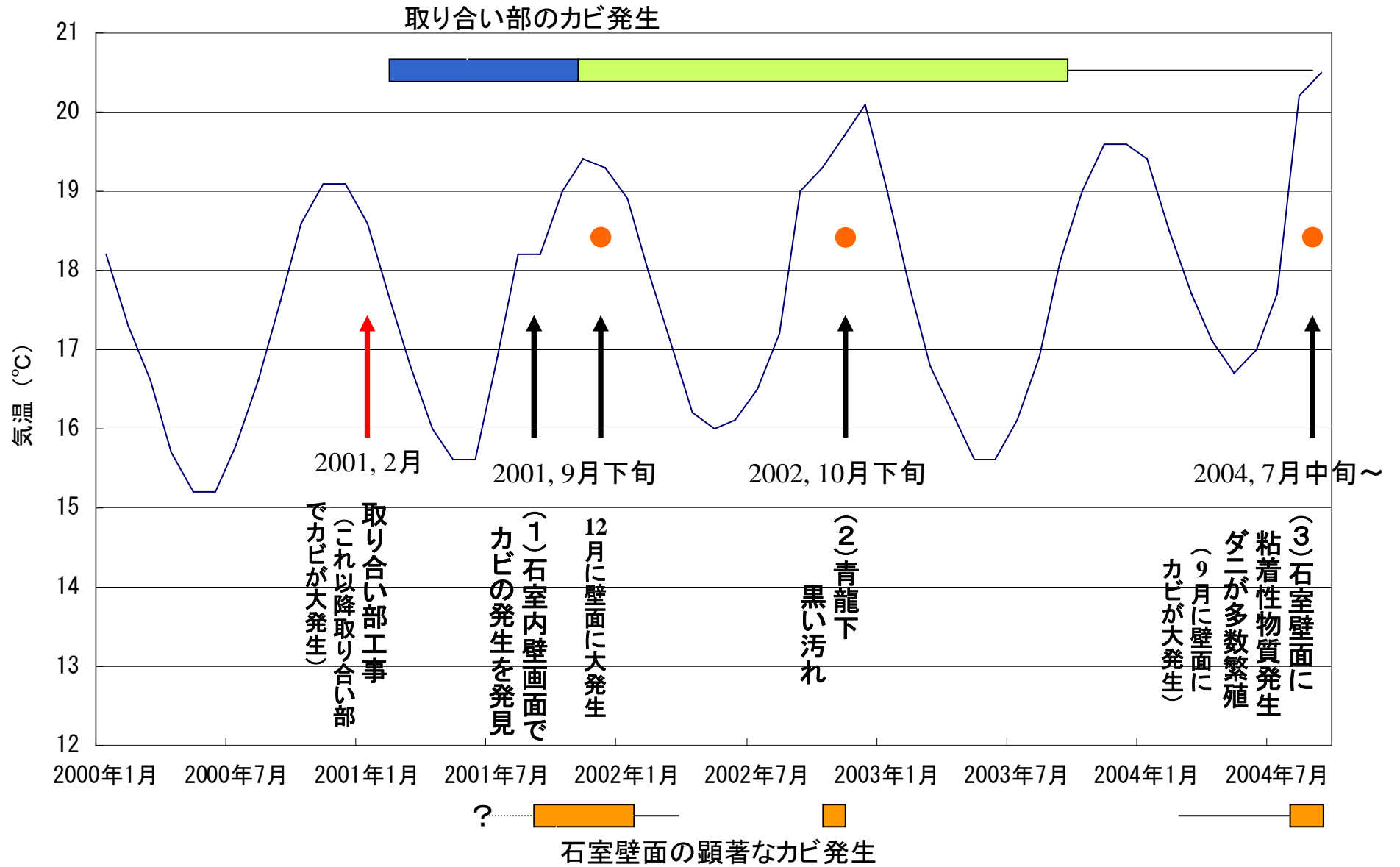
2004年の対応

- エタノールや、パラホルムアルデヒド燻蒸を行うが、抜本的な対策にならず

ゲル状物質がでてきた

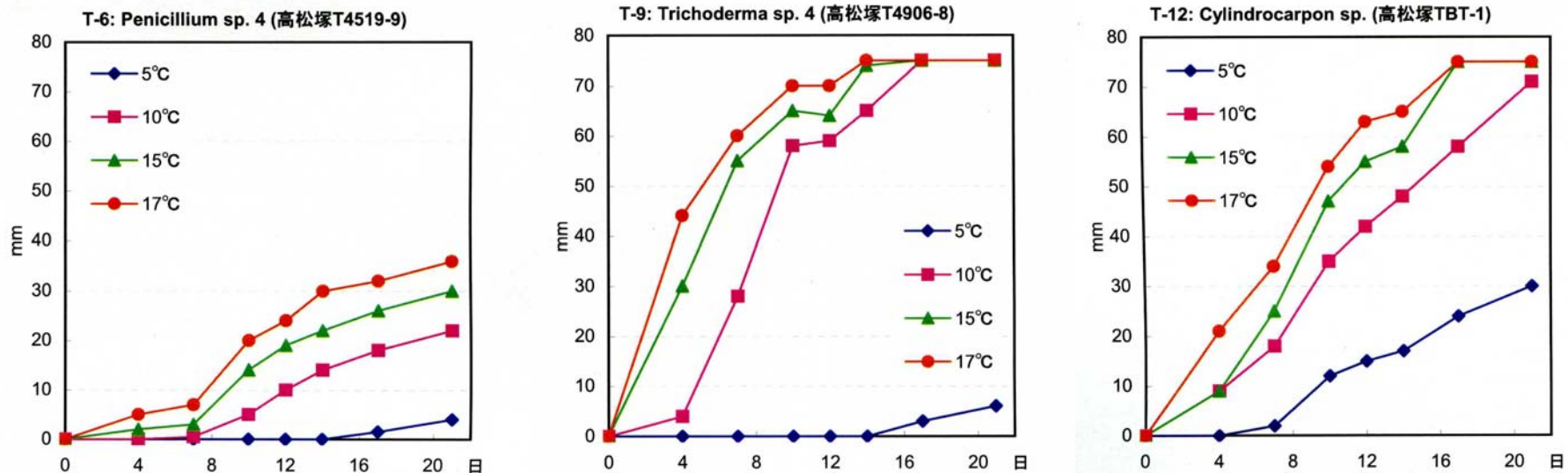
他の処理法の選択肢が望まれたが、決め手になる方法がみつからない

高松塚古墳石室内温度変化（2000-04年）



緊急的な対策として、 温度の上昇を抑える

→ 生育速度は遅くなるが、
完全に生育を抑えることはできない。



高松塚から採取されたカビの発育温度試験より (高鳥 2005)

2005年9月 (冷却開始直後)



2005年9月 白虎の下の黒い汚れ



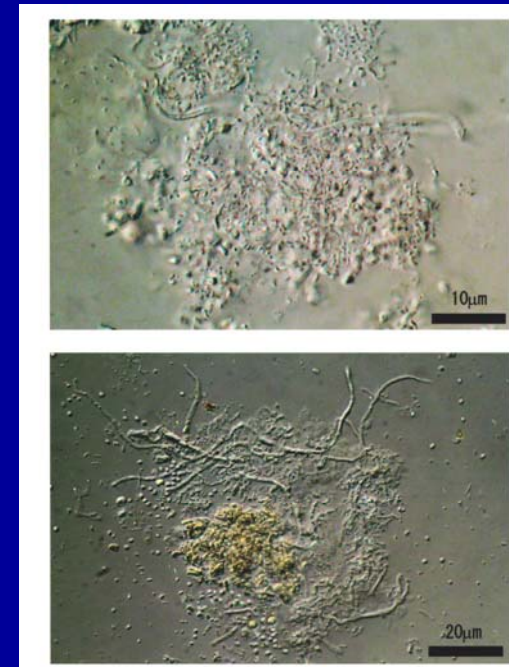
ゲル状物質

Penicillium sp. , *Fusarium* sp. Yeast を含むゲルが主
Penicillium sp.は、エタノールに耐性が強いことがわかり、ゲルの発生の防止の点からもイソプロピルアルコールに切り替える

2006年2月 西壁女子群像の黒いしみ



2006年2月20日、西壁女子群像付近



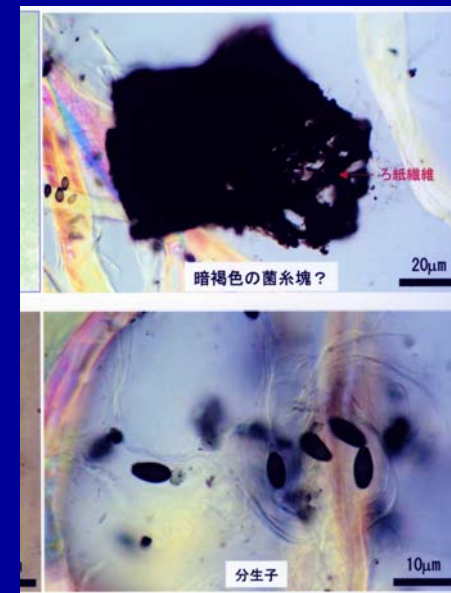
女子右肩の赤い着物上から
採取された試料の顕微鏡写真
(写真提供: 杉山純多博士)

主に *Penicillium* sp. や
Fusarium sp. とゲル

2006年5月 西壁女子群像の黒いしみ



2006年5月17日 西壁女子群像付近



左女子頭部後方の黒色部分から
採取された試料の顕微鏡写真
(写真提供: 杉山純多博士)

暗色系 *Acremonium* sp.

以前に、カビやゲル、ダニなどが発生した場所に
あとから暗色系のカビが発生する傾向がある

Ex1. 2001年9月 → 2001年12月
 ... → 2002年10月

Ex.2 2006年2月 → 2006年5月

冷却との関連 2005年以降
(主要な菌種の一部が交代)

まとめ

高松塚古墳の「現地保存」は、ほぼ100%RHの
高湿度条件での保存が前提

微生物についても、高湿度のもと、自然の均衡
(平衡状態)を保つ方針で行われた

→ 均衡は、きわめて微妙なバランスのうえに
立っているものであり、一度崩れると、カビな
どの微生物がただちに繁殖する