

## カビ等の生物被害状況について

### 1. 解体・発掘作業中におけるカビ等の微生物発生状況の監視

4月末に石室内の湿度が100%になった時期があり、カビ（暗色系のアクレモニウム属）が画面に発生したが、すみやかにサンプリングと養生班による殺菌・除去作業を行った。また新たなカビの発生を防ぐために環境班が、石室を閉じていた断熱材を調整し、湿度が上がりすぎないように注意深く監視した。

解体後、石が修理施設へ搬入されたのちは壁画面に新たなカビ等の発生は目視の範囲では確認されなかった。

### 2. 壁面の汚染防止と作業者の安全確保

解体・発掘作業中は、壁面の汚染防止と作業者の健康のため、断熱覆屋の中では防塵衣・マスク・手袋・作業靴などを着用することとした。

断熱覆屋内で空中カビの調査を行った（高鳥委員）ところ、作業後の石室周辺では、通常的生活環境より多量のカビが浮遊していたが、マスクや作業着着用によって労働安全に配慮した対策がとられていた（添付資料参照）。

壁面を搬入した修理施設内でも空中カビの調査を行った（高鳥委員）が、修理施設内では空中カビは検出されず、清浄な環境にあることがわかった（添付資料参照）。

### 3. 解体・発掘作業中の目視観察

杉山委員・高鳥委員とともに、解体作業後に毎回、石材や接触する土壌面などの汚染状況調査と試料採取を実施した（試料数、概略については、添付資料参照）。

石材同士の隙間や石材と地面の接触部などに、著しい黒色や褐色の汚れ、および植物の根などがみられた。隙間に土が入りこんでいるところもあり、黒褐色に変色している場合も多かった。微生物との関連が予想されたため、適宜サンプリングした後に、エタノールで消毒した。消毒作業の際、石材の隙間の土よりムカデなどが出てくる場合もあった。また、石材から石室周辺の版築にのびる亀裂には、植物の根や黒色の物質が入り込んでいる場合が多く、虫がでてくることもあった。

以上の観察結果から、石材同士の目地と隙間の状態や、それらに続く版築、取り合い部の状況などが、石室へ影響していたと考えられる。

### 4. 今後の予定

#### (1) 石室とその周辺部の汚染の全体像把握

石室内の微生物発生状況と、石室をとりまく環境の汚染状況について、採取した試料を用いて詳細な調査を行い、汚染の全体的な状況の正確な把握に努める。

#### (2) 微生物の由来の検討

石室内、石材目地などの隙間、取り合い部、周囲の土壌など、それぞれから採取された微生物種を調査・比較していくことによって、石室内に被害を及ぼしていた微生物の由来について検討する。

#### (3) 微生物の性質の調査

石室などから分離された主要な微生物の同定結果から推測される生理的性質を調査することによって、微生物と壁面の劣化との関連性についての考察を行う。

微生物等による汚れの状況



東壁石 3 北小口  
(2007年4月17日)



天井石 4 を上げた後 (2007年4月10日)



西壁石 3 北小口  
(2007年4月17日)



西壁石 2 北小口 (2007年5月10日)



天井石 1 を上げた後 (2007年5月30日)



西壁石 3 (西壁女子群像) 上面小口 (2007年4月25日)



南壁石と東壁石1の接合部の漆喰を外した後  
(2007年6月11日)



エタノールによる消毒  
(2007年6月11日)



東壁石2(青龍)を外した後、壁石と壁石の間に付着していた土の中から出てきたムカデ  
(2007年6月7日)



床石4解体後(2007年8月20日)



地震痕跡の亀裂の例(2007年8月20日)

## 高松塚古墳微生物調査（経過報告）

東京大学名誉教授 杉山 純多  
 東京文化財研究所 木川 りか・佐野 千絵

### 1. 2004年から2007年8月までに採取した試料について

2004年5月から2007年8月にかけて高松塚古墳壁画の生物劣化に関与する微生物種・侵入経路などを解明する目的で、微生物調査・研究用に総計661点の試料を採取してきた（表1）。古墳の発掘・石室解体前の2004年から2006年にかけて石室内から計89点の試料を、付随して取合部・前室・準備室等から37点の試料を採取した。また、2006年に古墳周辺環境から土壌等試料8点、墳丘部の発掘調査が開始された2006年10月以降に、発掘調査・石室解体作業の進行に伴い、墳丘部から79点、畦・床面等から68点、壁石間の小口面や目地漆喰等試料220点、解体時の壁画面の養生作業等で採取された試料67点、南閉塞石上の盗掘口入口に被せられたプラスチックカバー（1974年設置）の裏面等から13点、床石面（床石直下の床面含む）から76点、旧保存施設内の床下の切石面等から4点の試料を採取した。これらの試料については全て全体像を含めた試料の概観が分かるよう画像データを集積している。

表1. 2004年5月から2007年8月にかけて高松塚古墳の石室内外から採取した微生物調査・研究用試料数

|       | 発掘・解体前 ←   |      | → 発掘解体以降 |     |       |                   |     |            |    |               |
|-------|------------|------|----------|-----|-------|-------------------|-----|------------|----|---------------|
|       | 石室内        | 取合部等 | 石室外      |     |       |                   |     |            |    |               |
|       |            |      | 古墳周辺     | 墳丘部 | 畦・床面等 | 壁石間<br>(小口面・目地漆喰) | 壁画面 | 盗掘口<br>カバー | 床石 | 切石<br>(旧保存施設) |
| 2004年 | 22         | 15   | -        | -   | -     | -                 | -   | -          | -  | -             |
| 2005年 | 8          | -    | -        | -   | -     | -                 | -   | -          | -  | -             |
| 2006年 | 59         | 22   | 8        | 22  | -     | -                 | -   | -          | -  | -             |
| 2007年 | -          | -    | -        | 57  | 68    | 220               | 64  | 13         | 76 | 4             |
| 小計    | 89         | 37   | 8        | 79  | 68    | 220               | 67  | 13         | 76 | 4             |
| 総計    | <b>661</b> |      |          |     |       |                   |     |            |    |               |

これまで採取してきた試料は次のように種類別できる（図1）。

#### ① 壁画面（壁石面）からの採取試料

ゲル状試料（バイオフィルム）49点、石室解体後、修理施設に搬入後の壁画面に由来する乾燥したゲル5点、黒ススなど肉眼で確認された微生物コロニー等を滅菌綿棒等で採取した試料127点。

② 墳丘部発掘調査および石室解体に伴い採取された試料

土壌 147 点、漆喰片（小片）65 点、漆喰碎片や土壌、分解が進んだ根等の植物基質が混合した状態の漆喰土壌片 189 点。

③ その他

ダンゴムシやムカデ等の虫試料 6 点、根等の植物基質 29 点、石室内の空中浮遊菌調査用の平板 12 点、その他の培養平板 19 点、南閉塞石上のプラスチックカバー・壁面養生用のレーヨン紙、ベニヤ板等の試料 13 点。

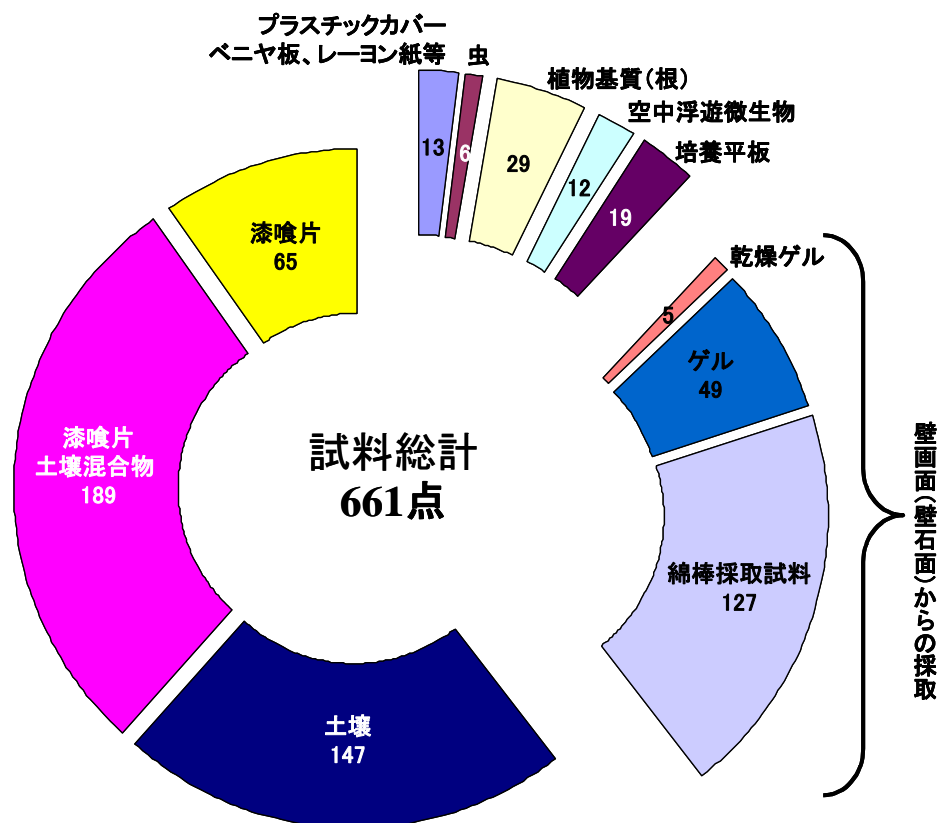


図 1. 2004 年 5 月から 2007 年 8 月にかけて高松塚古墳の石室内外から採取された微生物調査用試料 661 点の種類別の内訳。

## 2. 石室解体に伴い採取した試料の直接顕微鏡観察結果について

石室解体が始まった2007年4月以降、石室を構成する壁石面、壁石間の小口面や目地漆喰、石室周辺の畦面から主に漆喰片や漆喰土壌片（漆喰碎片や土壌等の混合物）、土壌、植物基質から成る総計434点の試料を採取してきた。これらの試料全てを対象に肉眼レベルならびに実体顕微鏡による観察を行い、記録を取ると同時に、試料の一部から光学顕微鏡観察用にプレパラートを作製して、高倍率下での顕微鏡観察を行ってきた。その結果、大多数の試料中には暗色系不完全菌類を中心とするカビや細菌（バクテリア）が含まれており、その細胞形態等から複数の微生物が混生している状態が観察できている。それら微生物の生死の判別については現在進行中である微生物分離作業の結果を待って総合的に判断することにする。

一方、複数の試料からダニ等微小動物の遺骸や生きた状態のダニが検出されている。特に、壁石間の小口面から採取した黒褐色に着色した漆喰片土壌混合物（他試料に比べ湿り気が高く表面がややゲル状になっていることが多い）や漆喰片にダニ等の微小動物が比較的多い傾向が認められた。

特に、壁石間の小口面や目地漆喰等の試料は他の試料に比べて、多数の微生物細胞ならびにダニ等微小動物の遺骸等が確認されたことから、これらの環境が微生物やダニ等の微小動物のいわゆる“巣”となっており、石室内壁画面の生物劣化と関連していると思われる。

これまで観察した試料の中で、代表的試料の一つ、2007年5月10日に西側石3南小口の上半部から採取した漆喰片試料（試料No. T7510-1:147次5ALI 西側石南小口上半漆喰（西3-2石間）070510）の写真を記す。

### 3. 微生物調査（分離・同定、群集解析）の経過報告

2007年2月以降、墳丘部の発掘調査に伴い、微生物調査用に採取してきた試料は501点にのぼる。現在、これらの501点の試料から約半分の試料について微生物分離作業中である。結果が得られ次第、これまで得られた石室内の89点の試料から分離した微生物相と詳細に比較解析を行い、微生物の種類や侵入経路等について究明していく予定である。

一方、石室解体に伴い、壁石間や石室周辺から採取した試料から数十点の試料を選定し、各試料から微生物のDNAを直接抽出し、試料間の微生物相を遺伝子レベルで比較解析を行う微生物群集解析（DGGE法）についても微生物分離作業と平行して行っている。

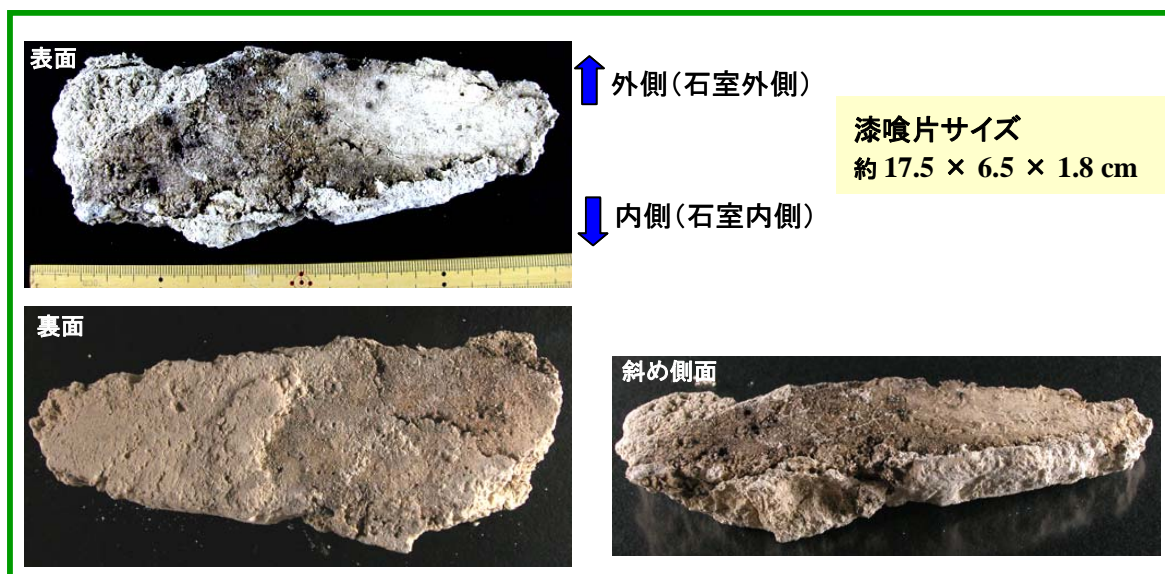


図2. 高松塚古墳 147次 5ALI 西側石3 南小口上半漆喰 070510 (試料No. T7510-1) 試料全体像.

2007年9月1日

## 高松塚古墳石室解体による微生物（カビ）調査中間報告概要

高鳥 浩介 東京農業大学

高松塚古墳石室解体による微生物、特にカビについての調査を実施した。6月26日調査までの中間結果の概要を報告する。

### 1. 今回の調査目的

石室壁石解体により、今まで調査できなかった箇所のサンプリングを行い主にカビ調査を実施する。調査目的は、石室解体に伴う①カビ汚染の把握、②汚染カビの生残性、③石室環境周辺の空中カビ調査であり、石室のカビによる汚染状況について把握することである。

### 2. 解体調査

今回の解体に伴う調査対象件数は 以下のとおりである。

| 調査日（2007年） | 解体等      | サンプリング    |      |        |
|------------|----------|-----------|------|--------|
|            |          | ドレッシングテープ | 土壌など | 空中カビ調査 |
| 4月17日      | 北壁解体     | 5         | 4    | 4      |
| 5月10日      | 西壁3解体    | 9         | 4    | 6      |
| 5月17日      | 東壁3解体    | 9         | 5    | 6      |
| 5月28日      | 天井石2解体   | 14        | 4    | 6      |
| 5月30日      | 天井石1解体   | 9         | 13   | 6      |
| 6月7日       | 東壁2解体    | 8         | 12   | 4      |
| 6月8日       | 東壁2解体翌日  |           | 10   |        |
| 6月11日      | 東壁2解体4日後 |           | 10   |        |
| 6月14日      | 西壁2解体    | 9         | 11   | 6      |
| 6月15日      | 南壁解体     | 15        | 18   | 4      |
| 6月22日      | 東壁1解体    | 7         | 6    | 12     |
|            | 前室       |           |      | 4      |
|            | 修理施設     |           |      | 4      |
| 6月26日      | 西壁1解体    | 9         | 19   | 11     |
|            | 前室       |           |      | 4      |
|            | 修理施設     |           |      | 4      |
| 計          |          | 94        | 116  | 83     |



### 3. 測定法

- (1) ドレッシングテープ法： 壁石、土壌表面のカビ汚染程度の半定量的測定。採材した試料は、直接微生物用培地に貼付した。カビはポテトデキストロース寒天培地 25℃ 1週間、また湿性試料については細菌検査を実施し、普通寒天培地 30℃、48時間培養した。評価は検出頻度による半定量法とした。
- (2) 土壌などの培養法：汚染の可能性高い土壌等のカビ汚染程度の測定。採材した土壌等は、上記と同じ培地を用いて直接培地表面に微量接種または塗抹した。培地、培養条件、同定及び評価は上記と同じである。
- (3) 空中カビ測定法：作業時に空中カビの測定を行った。ポテト・デキストロース寒天培地 n = 2 として 10 分間開放した。以後培養に供し生菌数及び同定を行った。
- (4) 土壌中でのカビの生残性測定法：汚染の可能性ある土壌等中のカビ生残性汚染形態を測定。土壌等のカビ生残性をヘモサイトメータ、定量培養、生残性確認蛍光法により比較検討した。

### 4. 結果及び考察

#### (1) 壁石解体によるカビの確認

##### ① カビが確認されるか

多くの試料からカビ等が確認され、主要な微生物はカビであった。

##### ② 汚染か付着か

暗色部の多くはカビ等による汚染。また、褐色かつ乾燥している部分は比較的付着。なお、暗色でジメジメしている部分は、カビ酵母細菌によるバイオフィルム形成汚染

##### ③ 汚染カビの分布

汚染種の数はい少ない。一方、付着種は分布広い。

##### ④ 主要汚染種

カビでは、*Penicillium*、暗色系 *Acremonium*、*Fusarium* が主であり、他に *Verticillium*、*Aspergillus versicolor* など。

さらに湿性試料では酵母、細菌。

##### ⑤ 汚染部位

壁石間や壁石と土壌にできる通気性のある湿った部分の壁面や土壌等

##### ⑥ 汚染部位のカビは共通か

解体された部位により汚染カビは異なる。

例：*Penicillium* による汚染

暗色系 *Acremonium* と *Penicillium* による汚染

##### ⑦ 汚染カビの組み合わせ (210 件に対する当該検出件数)

(1) *Penicillium* 単独汚染 (36)

(2) 暗色系 *Acremonium* 単独汚染 (6)

(3) *Penicillium* 主 暗色系 *Acremonium* 従 (43)

- (4) 暗色系 *Acremonium* 主 *Penicillium* 酵母 細菌 従 (18)
- (5) *Fusarium* 主 (8)
- (6) 酵母 細菌 主 カビ 従 (0)
- (7) 酵母検出 (24)
- (8) 放線菌検出 (4)

## (2) 解体時に確認された汚染カビの生物学的特性

### ①培養結果

- ・解体により採材した壁面や土壌から特定のカビ汚染が確認された。
- ・汚染部位から多量のカビ胞子が確認された。
- ・多量の *Penicillium* 胞子は生残性を有していた。
- ・暗緑色や灰黒色部分は *Penicillium* が著しく汚染している可能性が高かった。
- ・*Penicillium* 胞子の活性は一般に強く、長期にわたり土壌中などで生残しているものといえた。
- ・暗色部は、*Acremonium* など暗色系カビの菌体と推察されるが必ずしも活性状態にあるとはいえなかった。

### ②直接観察と培養結果

- ・汚染カビの菌糸確認はできるが、菌糸体形成のまま死滅している可能性も高い。
- ・生菌数と汚染胞子数の関係から *Penicillium* のように生残性の強いカビがみられる一方で、生残性の弱い酵母や好湿性カビが確認された。
- ・酵母はカビに比べて死滅しやすい。

### ③汚染カビの特徴

- ・*Penicillium*: 乾性及び湿性基質で発育。低温下で発育可 長期生残性あり
- ・暗色系 *Acremonium*: 湿性基質で発育。低温下で発育可。乾燥に弱い。
- ・*Fusarium*: 湿性基質で発育。低温下で発育可。乾燥抵抗性あり。

### ④暗色汚染はカビが原因か

- ・暗色になっている要因は多様でカビも一因と考えられる。
- ・菌体、菌体外代謝物、細胞融解、色素産生、細胞の新旧性、細胞変性、他の微生物との生物反応(拮抗、共生、亢進)など

### ⑤暗色汚染微生物は特定されるか、また劣化に関与しているか

- ・今後の課題。

### ⑥暗色汚染する要因

- ・今後の課題。低温、高湿、微生物共生・拮抗・亢進 養分など複雑に絡んでいると思われる。

### ⑦カビ汚染はいつ頃から

- ・今後の課題。

### (3) 周辺環境の空中カビ

#### ①石室周辺環境

- ・空中カビは、通常的生活環境より多量であった。
- ・石室解体により飛散する菌数は変動し、10～80/平板（10分間開放）であった。
- ・空中カビ数の変動要因は *Penicillium* にあった。
- ・*Penicillium* は、解体初期は1種程度であったが、解体が進むにつれて2～5種と広範な菌種分布になった
- ・暗色系 *Acremonium* は、ときおり検出されたが飛散量としては少なかった。
- ・解体が進むに連れ、*Cladosporium*, *Rhodotorula* など次第と屋外環境と似た分布に変化した。
- ・放線菌の飛散は、解体の状況により差がみられた。
- ・飛散しているカビや放線菌の多くは、壁石解体作業によって発生したものと考えられる。
- ・空中に *Penicillium* が多いことは、石室周辺環境に依然と多量の孢子が飛散しており、マスクや作業着着用で労働衛生に配慮した対策が取られていた。

#### ②前室及び修理施設

- ・前室及び修理施設の空中カビ調査を6月に2回実施した。2回とも10分間開放により前室は1～5/平板、修理施設は0/平板であり、著しく少なかった。
- ・前室のカビは外気に由来するものであり、壁石等に由来しなかった。
- ・修理施設でのカビは検出されず、清浄な環境にあった。