

〔報告〕高松塚古墳発掘・解体作業に伴う 生物調査の概要について

木川 りか・杉山 純多*・高鳥 浩介**
間瀬 創・佐野 千絵・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、壁画の現地保存が決断された。その後30年以上が経過し、高湿度環境の古墳で壁画を保存する困難さから、古墳石室の解体・壁画の修理が決定され¹⁾、2007年、石室の発掘・解体が行われた。本稿では、2007年の高松塚古墳の石室の発掘・解体に伴う生物調査の概要について述べる。

2. 2007年の石室の発掘・解体作業に伴う試料のサンプリングについて

2005年9月より石室内のカビ等微生物の発育や被害を遅くするため、墳丘の冷却が開始された^{1,2)}。2006年10月の発掘・解体作業の開始に伴い、石室下部の冷却管を残して墳丘上部の冷却管が撤去された。また、2007年1月末には、石室まわりを約90%RH、約10℃に環境制御するために、空調設備を備えた断熱覆屋が建設された。

2007年2月16日、昭和51年の保存施設建設当時に取合部の上部に設置されたPC板の切断・撤去が行われ、32年ぶりに取合部と石室上面の一部があらわとなった。その際、一部にカビなど微生物が主因と思われる黒色の汚れもみつかった。取合部のカビは、石室の微生物被害との関連を調べるうえでも重要な試料であり、杉山・高鳥両検討会委員によるサンプリングが行われた。

2007年4月5日からは、天井石、壁石の解体・搬出作業が開始された。ほとんどの場合、石をはずした後の石と石の接合面に、カビなど微生物が主因と思われる黒い汚れが拡がり、植物の根も入り込んでいた。このときの微生物による汚染の状態や分布を正確に把握するため、試料のサンプリングを行った。サンプリング終了後には、カビ等微生物の作業空間への飛散を防ぐため、直ちに汚染面の消毒作業を行った。これ以降、2007年8月21日に床石を含む石室を構成するすべての石が搬出されるまで、継続的に目視調査、サンプリング、その後の消毒作業を行った。

主な生物調査およびサンプリングを行った日程は以下の通りである。

2007年2月16日	PC板撤去に伴う取合部のカビ等の調査
2007年4月5日	天井石4の取り上げ（黒色の汚れなど）
2007年4月13日	北壁目地漆喰の除去（隙間の黒い試料など）
2007年4月17日	北壁の取り上げ（接合面の黒色の汚れ、根など）
2007年4月25日・26日	天井石3の取り上げ（同上）
2007年5月10日・11日	西壁石3の取り上げ（同上）
2007年5月17日・18日	東壁石3の取り上げ（同上）
2007年5月28日	天井石2の取り上げ（同上）
2007年5月30日	天井石1の取り上げ（同上）

* 株式会社テクノスルガ・ラボ東京事務所、東京大学名誉教授

** 東京農業大学、前国立医薬品食品衛生研究所 衛生微生物部長

2007年6月7日・8日	東壁石2の取り上げ(同上)
2007年6月13・14日	西壁石2の取り上げ, 搬出(同上)
2007年6月15日	南壁石の取り上げ(同上)
2007年6月22日	東壁石1の取り上げ(同上)
2007年6月26日	西壁石1の取り上げ(同上)
2007年8月20日・21日	床石(4枚)の取り上げ(同上)

この間に採取したサンプル数は、杉山委員501点(土壌, 石材目地漆喰小片・土壌混合物, 植物の根, 壁面を綿棒で拭き取った検体など), 高鳥委員293点(土壌, ドレッシングテープによる回収検体, 空中落下菌測定用プレートなど)に及ぶ。試料の一例として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を写真1に挙げるが, このように試料の状態がわかる画像データを集積するとともに, 重要度の高い試料から順次直接顕微鏡観察, 微生物分離・同定作業などを進めている。

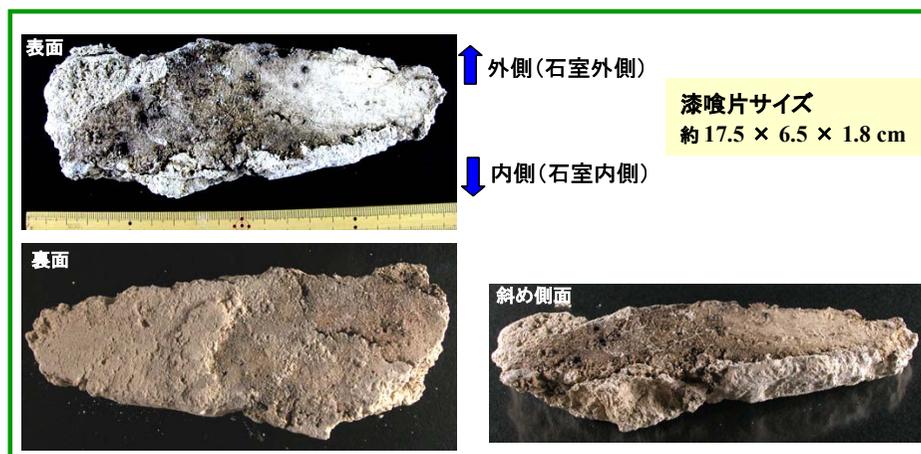


写真1 高松塚古墳 147次 5ALI 西側石3 南小口上半漆喰 070510 (試料No. T7510-1)
試料全体像 (国宝高松塚古墳壁画恒久保存対策検討会 (第9回) 資料3-6³⁾より)

3. 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³⁾

作業中の石室内の湿度は, 2007年2,3月は98-99%RHで推移していたが, 4月から石室の解体作業が始まって以降に, 石室周囲空気の流入の影響によって4月中旬ごろには90%RH程度まで低下した⁴⁾。開口部を断熱材で覆って湿度の低下を防ぐようにしたところ, 4月末には上昇し100%RHに達した⁴⁾。このため, 断熱材の一部を開けて, 石室周囲空気を一部流入させるようにすることで壁画のある壁石と天井石の取り上げが終了する6月下旬までは90%RH程度を中心として変動するようになった⁴⁾。4月末に石室内の相対湿度がほぼ100%RHに達した時期には, 暗色系のアクレモニウム属 (*Acremonium* (sect. *Gliomastix*) sp.) のカビが新たに画面に発生する事態が起きた。この際は, すみやかにサンプリングと, 養生班のご協力のもとに除去・殺菌作業が行われた。カビの除去は, 技術者によって, わずかに滅菌水を浸した筆でカビを慎重に拭き取るように行われ, その部位を直ちに90%容量のエタノールで殺菌した。こののちは, 石室を閉じていた断熱材を調整し, 石室内の湿度が上がりすぎないように注意して監視を行っ

た。

解体作業によって取り上げられた石が、温度約21℃、相対湿度およそ55%RHに調整された修理施設へ搬入された後は、壁画面への新たなカビ等の発生は確認されなかった。

4. 石室まわりの作業環境・壁画の微生物汚染対策

作業が行われていた断熱覆屋の中は、つねに相対湿度およそ90%RHの高湿度環境であったため、カビなどがきわめて繁殖しやすい環境である。そこで、石室の周囲の作業環境の微生物汚染をできる限り減らし、壁画への新たな微生物被害を防ぎ、また作業者の安全も確保するという目的から、以下のようなことが実施された。

(1) 土止めの木材の板や断熱覆屋の壁材のベニヤ板などについては、カビの繁殖を防止するためDDAC（ジデシルジメチルアンモニウムクロライド）塗布による防カビ処置を古田太郎博士と解体班のご協力のもと行った⁵⁾。

(2) 解体・発掘作業中は、石室まわりの作業環境の微生物汚染をできる限り防止し、また作業者の健康安全を確保するため、断熱覆屋の中では防塵衣・マスク・手袋・専用の作業靴などを着用することとした。

(3) 高鳥委員により、断熱覆屋および修理施設内での空中カビの調査が実施された。結果は以下の通りである³⁾。

- ・石を取り上げた直後の石室周辺環境では、10分間開放で、10～80コロニー/平板のカビが浮遊していた。採取日やシャーレを配置する位置によって、飛散する菌数は変動した。
- ・空中カビのなかで、*Penicillium*については、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り、解体が進むにつれて*Cladosporium*, *Rhodotorula* など次第と屋外環境と似たカビが検出されるようになった。
- ・石室周辺環境に*Penicillium*などの多量の胞子が飛散していると、作業者にとっても望ましくないが、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。
- ・解体された石が搬入された修理施設においては、前室及び修理室で空中カビ調査を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コロニー/平板、修理施設は0コロニー/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、壁石等に由来するものではないと考えられた。また、修理室は非常に清潔に保たれており、空中カビ調査でカビは検出されず、清浄な環境にあった。

5. 解体・発掘作業中の現場の目視調査およびサンプルの観察所見³⁾

石が取り上げられたあとの現場にて目視観察とサンプリングを行った。ほとんどの場合、石材同士の接触面とそのわずかな隙間や地面の接触部などに、著しい黒色や褐色の汚れ、および植物の根が入り込んでいる様子などがみられた（写真2～7）。サンプリングした後は、90%エタノールで汚染面の消毒を行った（写真8）。消毒のため、エタノールを噴霧すると、石材の隙間の土よりムカデなどが出てくる場合が何回もあった（写真9）。また、石室周辺の版築から石室へと続く亀裂には、植物の根や黒色の物質が入り込んでいる場合もあり（写真10）、また、発掘班の方がたによると、亀裂から虫などの小動物がでてくることもあったということである。したがって、このような亀裂が植物や小動物、微生物などの移動ルートになっていた可能性がある。また、石材同士の目地には隙間があいている箇所もあり、隙間へと続く版築、取合部などの状況などが石室へ影響していた可能性も十分考えられる。

また、採取試料について肉眼レベルならびに実体顕微鏡による観察を行った結果、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されている。また、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。壁石間の小口面、目地漆喰等の黒色部などは、このような観察結果から、微生物やダニ等のいわゆる“巣”となっているといえる。このような状況は、これまでの石室内の壁画の被害とも当然関連していると思われる。また、解体以前、石室内で消毒を行っていても、手の届かない石材の隙間や目地に入り込んだ微生物についてはとても駆除できておらず、今回隙間や目地などの汚染状況を見て、現地での生物被害防止の困難さをあらためて痛感する結果となった。

採取された試料についての調査結果の詳細と、それら微生物の生死の判別などについては、杉山委員、高鳥委員らにより現在進行中である微生物分離・同定作業の結果を待って総合的に判断する必要があるため、のちにあらためて報告していきたい。



写真2 東3石北小口（2007年4月17日）（左）、天井石4を外した後（2007年4月10日）（中央）、西3石北小口（2007年4月17日）（右）



写真3 西2石北小口（2007年5月10日）



写真4 天井石1を外した後（2007年5月30日）



写真5 西3石（西女子群像）上面小口
（2007年4月25日）



写真6 南壁と東1石の接合部の漆喰を外した後
（2007年6月11日）



写真7 床4石解体後（2007年8月20日）



写真8 エタノールによる汚染面の消毒
（2007年5月17日）

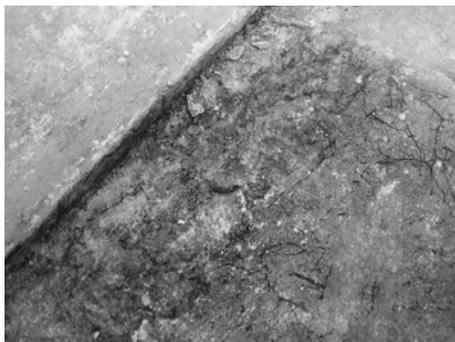


写真9 東2石（青龍）を外した後、壁石間に付着していた土の中から出てきたムカデ（2007年6月7日）

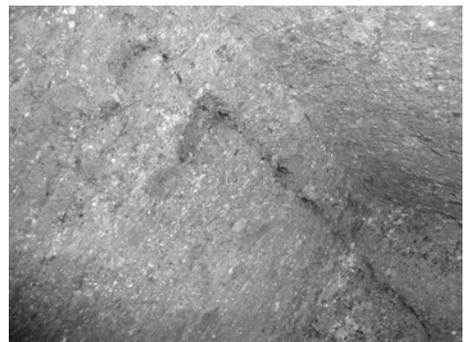


写真10 地震痕跡の亀裂の例（2007年8月20日）

6. 今後の予定

高松塚古墳壁画の生物劣化については、いくつかの段階を経て進める必要があると考える。

(1) 過去の記録の精査による壁画の生物被害の経過と要因についての総合的な調査

過去起きた微生物などによる生物被害については、その状況などについての記録はかなり残っているものの、そのときに発生したカビなどの分離株は残っておらず、直接的に過去の劣化原因となった微生物を再び調べたり、現在の分離株と比較することはできない。したがって、その被害が起きた経過や要因などについて、記録を精査し、状況証拠などからいくつかの作業仮説をたて、微生物の発生要因を検証していく必要がある。

(2) 2007年の発掘解体作業の段階での石室とその周辺部の汚染の全体像把握

2007年の発掘・解体作業の段階でサンプリングした試料と発掘班による詳細な汚染状況の記録について、あわせて総合的に調査し、2007年の発掘・解体作業の段階における微生物等による汚染の全体的な状況を正確に把握する。微生物調査の面からは、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比較していくことにより、2007年の発掘・解体作業の段階での微生物汚染と主要な微生物の正確な分布を明らかにする。この際には、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）についても応用を検討している。また、2004年以降、石室などから分離された純粋培養株との比較を行い、過去数年間の微生物相の動態を調べる。

また、微生物以外にも、発掘班によりムカデ、昆虫などについて詳細な記録がとられているほか、植物の根についても調査を行っている。

(3) 壁画に被害を及ぼした微生物の由来についての検討

石室内に被害を及ぼした微生物の由来について、(1) (2) の両面から検討を行う。

(4) 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（酸や色素の生産、温度条件による生理的变化、殺菌剤として使用した薬剤への抵抗性や資化性など）を精査することによって、壁画の劣化との関連についての考察を行う。

上記、(1)～(3)については、比較的短期間で結果をとりまとめ、(4)についてはより長期的な見地より検討を行っていければと考えている。

謝辞

発掘・解体作業中の調査やサンプリングに際しまして、奈良文化財研究所の都城発掘調査部（飛鳥・藤原地区）松村恵司氏をはじめとする発掘班の皆様、および奈良文化財研究所埋蔵文化財センターの肥塚隆保氏、高妻洋成氏をはじめとする解体班の皆様にひとかたならぬご援助をいただきました。また、東京文化財研究所の犬塚将英氏にサンプリングなどの作業の際、ご援助いただきました。株式会社テクノスルガ・ラボの喜友名朝彦氏、安光得氏、小出知己氏、永塚由佳氏、国立医薬品食品衛生研究所の朴奉柱氏には、微生物の分離や試験等で多大なご協力をいただきました。古田太郎サラヤバイオケミカル研究所所長には、断熱覆屋での微生物汚染対策に際し、薬剤や物理的な対策につきまして貴重な助言をいただきました。記して心より感謝いたします。

参考文献

- 1) 国宝高松塚古墳壁画恒久保存対策検討会（第4回）資料，（2005）文化庁
- 2) 木川りか，佐野千絵，石崎武志，三浦定俊：高松塚古墳の微生物対策の経緯と現状，保存科学，45，33-58（2006）
- 3) 国宝高松塚古墳壁画恒久保存対策検討会（第9回）資料3-6，カビ等の生物被害状況について（2007）文化庁
- 4) 小椋大輔，犬塚将英，石崎武志，銚井修一，北原博幸，多羅間次郎：高松塚古墳石室解体時の壁画保存のための温湿度環境の管理，保存科学，47，1-9（2008）
- 5) 木川りか，間渕創，高妻洋成，降幡順子，肥塚隆保：高松塚古墳発掘/石室解体作業に伴う取合部・断熱覆屋使用木材等の防カビ対策：DDACの検討と施工，保存科学，47，21-26（2008）

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

Overview of Biological Survey at Takamatsuzuka Tumulus during the Excavation and Relocation of the Stone Chamber in 2007

Rika KIGAWA, Junta SUGIYAMA*, Kosuke TAKATORI**, Hajime MABUCHI,
Chie SANO and Sadatoshi MIURA

Takamatsuzuka Tumulus was excavated in 1972 and it was determined to maintain the paintings on site. But the tumulus has experienced several outbreaks and damage by microorganisms, and difficulty has been recognized in keeping the paintings in the very high humidity. Thus excavation and relocation of the stone chamber were performed in 2007.

During the project, a tentative building was constructed in order to keep the relative humidity of the environment surrounding the stone chamber at about 90% to prevent exfoliation of the mural paintings. At the same time, the temperature was kept at about 10°C in order to slow down the growth of molds on the mural paintings. When each stone was moved, black colored smears, roots of plants and insects and other small soil organisms were observed on the surfaces of the stones where they had been hidden before relocation. Biological surveys (records and samplings) and disinfection of the smears were performed each time.

From observations at the site with naked eyes, most of the contact surfaces between stones had small spaces that had likely worked as “nests” of microorganisms and small soil organisms. Also spaces were found between stones and cracks in the mound soil. They seemed to work as routes for movements of microorganisms, soil organisms and plants. To know the detailed circumstances of the present biological contamination, extensive samplings were performed (more than several hundred points). Now investigations of the samples are being performed. These data will be investigated thoroughly together with past records of biological damage at Takamatsuzuka to know the process of its biological deterioration.