

高松塚古墳の劣化や汚染に関与した微生物について

東京文化財研究所 木川 りか

(1)過去の記録の精査による壁画の生物劣化の経過と要因についての総合的調査

これまでの経過については、高松塚古墳壁画劣化原因調査検討会（第 3 回）（H20. 9. 30）にて報告済。

(2)最近の壁画の微生物汚染の原因となった微生物の詳細な調査

詳細な同定結果と主要な微生物種の分布状況の変遷および、墳丘土壌試料の解析結果について、今回報告（参考資料 1-1～1-5）。

(3)微生物の生理的性質などを含む生物学的特徴(Bio-profile)の調査

壁画の汚染に関わった主要な微生物について、その生理的性質を調査することにより、壁画の汚染や劣化との関連を考察する。

- ・ 過去に石室内や取合部で使用された樹脂などとカビの生育の関係
高松塚古墳壁画劣化原因調査検討会（第 7 回）（H21. 3. 12）にて報告済
- ・ 殺菌処置に使用された薬剤の効果
「高松塚古墳の微生物対策の経緯と現状」『保存科学第 45 号』（H18. 3）に報告済
国宝高松塚古墳壁画恒久対策検討会（第 7 回）（H18. 7. 24）にて報告済
「高松塚古墳における菌類等微生物調査報告(平成 18 年)」『保存科学第 46 号』（H19. 3）に報告済
- ・ 殺菌剤が微生物の栄養源として使用された可能性（資化性）の検討
高松塚古墳壁画劣化原因調査検討会（第 7 回）（H21. 3. 12）にて報告済
- ・ 劣化の要因となる有機酸の産生について
高松塚古墳壁画劣化原因調査検討会(第 7 回)（H21. 3. 12）、および高松塚古墳壁画劣化原因調査検討会(第 10 回)（H21. 9. 1）にて報告済
- ・ 温度条件による生理的変化の検討
高松塚古墳壁画劣化原因調査検討会(第 10 回)（H21. 9. 1）にて報告済
- ・ 暗色系代謝物産生の検討
高松塚古墳壁画劣化原因調査検討会(第 10 回)（H21. 9. 1）にて報告済、
および今回報告（参考資料 1-6、1-8）。
- ・ 殺菌剤等への馴化の検討
今回報告（参考資料 1-7）。

生物関係調査結果から推測される劣化原因の検討結果概要

A. 現地保存に必要不可欠な昭和 50 年代の剥落止めの作業

昭和 50 年代に壁画に実施された剥落止めの作業で使用された樹脂（現在入手できるものとしてパラロイド B72）を試験したところ、高湿度条件下では、高松塚古墳の主要なカビの分離株のいくつかが生育することがわかった（高松塚古墳壁画劣化原因調査検討会第 7 回、参考資料 2、平成 21 年 3 月 12 日）。

B. 平成 13 年取合部の工事

平成 13 年取合部の崩落止め工事に使用された樹脂のうち、現在入手可能なもの（アラライトなど）について、試験を行ったところ、崩落止め工事に用いられた樹脂の一部には、高松塚古墳から主に分離されたカビのいくつかの分離株が樹脂上に生育することがわかった（高松塚古墳壁画劣化原因調査検討会第 7 回、参考資料 2、平成 21 年 3 月 12 日）。

C. 平成 13 年取合部の工事のあとの石室内のカビの発生

平成 13 年 9 月に、石室を開封した際、石室の壁面でカビが発生していた。このことに関連する事項としては、以下のことがある。

- ・ 平成 13 年当時の調査結果は、あくまでもカビの属レベルでの調査ではあったが、平成 13 年 3 月以降、取合部で分離されたカビと、平成 13 年 9 月、12 月に石室内で発生したカビでは、属レベルでほぼ同様のものがみられていた（高松塚古墳壁画劣化原因調査検討会第 3 回、資料 5、平成 20 年 9 月 30 日）。
- ・ のちの平成 16 年以降の詳細な種レベルの調査においても、石室内と、取合部のカビのおおまかな種の構成には大きな違いはなかった（ただし、取合部からの試料数は必ずしも多くない状況での比較に基づく）（今回報告、参考資料 1-1）
- ・ 石室解体に伴う発掘調査の結果、石室は必ずしも外界から隔離されてはおらず、墳丘から石室へのびる地震痕跡の亀裂を経て、植物の根や、ムカデ、ダニなどの小動物などが石室の石組の隙間から十分に移動できる状況であったことが明らかとなった（高松塚古墳壁画劣化原因調査検討会第 4 回、資料 6、平成 20 年 10 月 20 日）。

これらの状況証拠より、石室内に平成 13 年 9 月に発生したカビは、平成 13 年 3 月以降、取合部にカビが大発生した事態と無関係とはいえないと推測される。

D. 平成 14 年石室壁面で発生した黒い汚れと対応

平成 14 年 10 月の下旬の点検時に、青龍、東壁女子群像の近くで粘性のある黒い汚れ

(シミ) が現れているのが発見された(国宝高松塚古墳壁画恒久保存対策検討会第3回、参考資料3・参考資料4、平成17年5月11日)。よく調査すると、この黒い汚れは、前年カビが発生した位置とほぼ一致することがわかった(高松塚古墳壁画劣化原因調査検討会第3回、資料5、平成20年9月30日)。

このような激しい汚損を避けるには、頻繁に点検を行い、わずかでも変化があった時点で対応する方向性と、逆にあまり人が出入りしないようにする方向性の間で対策を選択する必要があったが、結局、除去できるかどうかわからない黒い汚れなどによる劣化の進行を放置するわけにはいかないということから、点検が以前よりも多く実施されることとなった。

E. 点検と人の出入り

「高松塚古墳壁画の劣化原因に関わる事項の整理について」(高松塚古墳壁画劣化原因調査検討会第11回、資料3、平成21年9月30日)より、石室内にほとんど人が入る必要がなかった時期には、カビの発生は少ないことがわかっている。

人の出入りなどに伴う、石室内温度の上昇は、石室内のカビなどの発生のしやすさに間接的に影響を及ぼしていると考えられ、また人が入ることによっての呼気などに含まれる有機物のもちこみなども微生物の生育のしやすさに影響する可能性がある(古田太郎博士、国宝高松塚壁画恒久保存対策検討会第5回、資料3-2、平成18年2月9日)。

点検などに伴う光の照射と、カビの暗色系の色素形成に関係があるのかどうかについて、暗色系の *Acremonium* 属2株についてのみ予備的に検討したところ、高松塚分離株1株については、光照射があったときのほうが若干、色素産生が多い傾向がみられたものの、キトラ分離株1株については、蛍光灯の照射の有無と色素生産の多少については相関はみられていない(今回報告、参考資料1-6)

F. 殺菌処置と薬剤

パラホルムアルデヒド燻蒸は昭和50年代から高松塚古墳石室で実施され、当時大発生した *Doratomyces* sp. のカビの対策として一定の効果をあげたと考えられる。しかし、一方ではパラホルムアルデヒド燻蒸を行っても、分厚いコロニーが生じているような箇所では、コロニー内部までは効果が十分ではないことが知られており、分厚いコロニーが発生しているような場合は、物理的に殺菌しつつ、取り除くことを併用することが必要と考えられた。

絵画への影響が少なく、毒性が比較的低いという点で、このようなカビのコロニーの殺菌と除去という用途にはアルコール系のものが候補となった。

しかし、エタノールなどのアルコール系殺菌剤はすぐれた殺菌効力を持ち、残留しにくい一方で、うすまった際には、微生物の炭素源(栄養源)として使用される懸念も指摘された(古田太郎博士、国宝高松塚壁画恒久保存対策検討会第5回、資料3-2、平成18年2月9日)。

この可能性を検討した結果、エタノールが殺菌濃度からおよそ70倍-100倍程度にう

つまり、1%程度の低濃度になると、高松塚古墳から分離されたカビ、バクテリアや酵母などの炭素源になりうることが示された（高松塚古墳壁画劣化原因調査検討会第7回、参考資料4、平成21年3月12日）。

しかし、エタノールなどのアルコール系に限らず、パラホルムアルデヒドも、キトラ古墳でバイオフィルムの構成微生物の増殖抑制に効果があったため部分的に使用されたイソチアゾリンなどについても、有機系の殺菌剤、抗菌剤である以上、それらが分解されたときには、有機物として微生物の栄養源になる可能性は同様に指摘されている（古田太郎博士、国宝高松塚壁画恒久保存対策検討会第5回、資料3-2、平成18年2月9日）。

ある殺菌剤の継続的使用による、微生物の慣れ（馴化）の可能性について、TBZ、エタノール、イソプロピルアルコール、ホルマリンなどの薬剤について検討が行われた結果、TBZのような抗カビ剤に比較すると、アルコール系の殺菌剤は現在のところあまり明らかな馴化傾向は観察されていない（今回報告、参考資料1-7）。

また、高湿度環境においては壁画の剥落止めに昭和50年代に使用されたパラロイドB72に、高松塚古墳から分離されたカビが生育することが示された（高松塚古墳壁画劣化原因調査検討会第7回、参考資料2、平成21年3月12日）が、パラロイドB72を固化させたのちエタノールを噴霧し、再び乾燥させたものは、もとのパラロイドB72よりもさらにカビが発生しやすくなることが明らかとなった（高松塚古墳壁画劣化原因調査検討会第7回、参考資料2、平成21年3月12日）。

G. 微生物の漆喰、絵画への影響

今回の劣化原因調査のなかで、高松塚古墳から分離されたカビ、酵母、バクテリアのなかに、酢酸などの有機酸を産生するものが見出された（高松塚古墳壁画劣化原因調査検討会第7回、参考資料5、平成21年3月12日、高松塚古墳壁画劣化原因調査検討会第10回、資料5-2、平成21年9月1日）。このような有機酸は、絵画下地の漆喰をとかしたり、場合によっては顔料にも影響を及ぼしたりする可能性もあり得る。

カビでは、*Fusarium* 属分離株で酢酸の生成量が多く、酵母では、平成16年7月に白虎の前肢の爪付近から採取されたゲル状物質（バイオフィルム）に含まれていた *Pichia* 属分離株で酢酸生成量が多かった。この種類の酵母は、殺菌剤として使用したエタノールが70倍～100倍程度にうすまり、1%程度の低濃度で存在したときには栄養源として利用し、酢酸を生成することがわかった（高松塚古墳壁画劣化原因調査検討会第10回、資料5-2、平成21年9月1日）。

バイオフィルムの状況などから、古墳壁画保存活用検討会保存技術ワーキング委員の古田太郎博士に方法を相談のうえ、平成17年9月16日以降は、キトラ古墳と同様に高松塚古墳においてもより炭素源として使われにくいと考えられた消毒用イソプロピルアルコールを主体とする殺菌法に切り替えられた。

また、解体・発掘作業の過程で、石接合部から分離されたカビのなかには、昭和50年代に石室で大発生した *Doratomyces* sp. と同じ属のカビが含まれていた。このカビの

場合も、それ以外の菌類分離株と同様に、有機酸を生じて漆喰成分に影響を及ぼす可能性が示唆された（今回報告、参考資料 1-1）。

H. ダニや虫などの小動物、植物などの根

高松塚古墳石室内では、ダニ、ムカデのほか、ワラジムシなども頻繁に目撃されており、解体・発掘作業中でも同様にこれらの小動物が頻繁に観察されている（高松塚古墳壁画劣化原因調査検討会第 4 回、資料 6、平成 20 年 10 月 20 日）。植物性のものを餌とするワラジムシなどの侵入を考えると、墳丘から石室の石材のすきまへと入り込む植物の根などを通じて、これらが入ってきていたことが推測され、これらの小動物もカビなどの散布や、石室と周囲との物質や微生物のやりとりに深く関わっていたと考えられる。

I. 石室内の微生物の由来

平成 16 年以降の、石室内や取り合い部、解体・発掘に伴う石材間、石材付近の土、墳丘などの詳細な微生物種調査を行ったところ、種レベルの微生物の同定結果に基づき、文献調査によってそれらの微生物種の由来を調べた結果、ほとんどの微生物が「土壌由来」、「植物由来」、「空気由来」、「昆虫由来」とみられるものであった（今回報告、参考資料 1-1）。

石室、取合部などから分離された微生物は、石室周囲の土（発掘中の畦）、墳丘などから分離された微生物種と共通するものも多く、おそらく周囲の土壌から、雨水やダニ、虫類などの小動物、植物の根、人の出入りなどを介して、侵入したものと推測される（今回報告、参考資料 1-1）。ただし、石室には石室内の特徴的な環境により適応しやすかったとみられる種が主要に繁殖したと考えられる。

さらに、*Fusarium solani* species complex（以下 FSSC と略記）の詳細な遺伝子解析結果より、石室内での遺伝的多様性がきわめて大きいことが示された（高松塚古墳壁画劣化原因調査検討会第 4 回、資料 2、平成 20 年 10 月 20 日）。これは、単一の機会に侵入したカビが全域に広がったということではなく、一般に微生物の侵入の機会が非常に多いなかで、そのつど異なった遺伝的背景をもつ FSSC が侵入して定着してきたことを示唆している。

なお、漆喰などへの影響が大きい酢酸菌については、これまで高松塚由来の試料からは培養法による分離では検出されていないが、培養しにくい微生物の存在を検出する方法である DGGE 解析を行ったところ、高松塚古墳の壁石間や取合部土壌などのいくつかの試料で酢酸菌が優占種のひとつとして検出された。そのため、分離手法を変えて集積培養法による分離を試みた。その結果、DGGE 解析でバンドが確認された試料のほとんどから、酢酸菌が純粋分離された。このことから、高松塚古墳の壁石間や取合部土壌などには少なくとも酢酸菌が存在していたと考えられる。一方、石室内部の試料からは、培養法による分離および DGGE 解析ともに酢酸菌は検出されていない（今回報告、参考資料 1-5）。