

〔報告〕 デジタル画像撮影による高松塚古墳壁画 表面状態の調査

吉田 直人・高妻 洋成*・降幡 順子*・辻本 与志一*・間渕 創
早川 泰弘・佐野 千絵・三浦 定俊・肥塚 隆保*

1. はじめに

国宝高松塚古墳壁画に関しては、2004年に公表された写真¹⁾に対して、1972年の発見当初と比べ、図像の描線や彩色が不鮮明になっている。特に、西壁・白虎像が目視では判別しづらくなっていることや、カビなど微生物によると考えられる人物像の汚れがあるとの指摘をマスクミ等から受けて、劣化が一般に知られるようになった。その原因やこれまでの現地保存のあり方について検討するため、2008年より文化庁は高松塚古墳壁画劣化原因調査検討会を開催し、その報告は2010年3月にまとまる予定である。

本報告は、壁画劣化原因調査の一環として、2007年の解体後は、修理施設で管理されている石材に描かれている全ての図像を対象に、デジタルカメラによる近接斜光撮影を行った結果に関するものである。得られた画像から、図像の不鮮明化には微生物による汚れの他に2つの要因があることが判明した。以下にその概略を報告する。

2. 調査方法

修理施設には、各種非破壊調査用機器を固定し、石材の直上をレールによって平面方向に自由に移動できるよう設計された特殊なフレームが配備されている。これに撮影機材と照明光源を取り付け、各図像とその周囲を等間隔にマス目上に区切った高精細分割撮影を行うことを基本方針とした。撮影機材は当初、デジタルファイバースコープを検討したが、合焦のためには、一定のワーキングディスタンスを維持しなければならず、床面からの高さが一定ではない図像の撮影には、頻繁に直上でピントリングの微調整を手動で行う必要がある。このような操作には、接触への懸念が伴うことから、ファイバースコープの使用は断念し、代わってオートフォーカス式のデジタルスチルカメラを使用することにした。機種を選定に当たっては、軽量かつレンズ一体型であること、レンズ性能が良く、マクロ撮影に優れていること、さらにレリーズやリモコンの使用により、本体に触れることなく撮影が可能であること等を条件として検討した結果、リコー製GX-100を使用することに決定した。

GX-100、および斜光撮影用白色LED光源（Hama LED デジタルマグナムライト、色温度5500K）をフレームに取り付け、横方向に4cm、また縦方向に2.5cm ずつ移動させながら、図像表面の分割撮影を行った（写真1）。撮影にあたっては、AVケーブルで接続した外部モニターにより撮影箇所を確認し、ケーブルレリーズを使ってシャッター操作を行った。各図像の撮影年月日、および撮影条件は下記のとおりである。

【撮影年月日】

西壁・白虎、および同・月象：2009年2月16日

東壁・青龍：同年2月17日

西壁・男子像：同年5月11日

北壁・玄武, および東壁・日象: 同年5月12日
西壁・女子像: 同年8月27日
東壁・女子像: 同年8月18日
東壁・男子像: 同年8月24日
天井・星宿(天井石3): 同年8月24日
天井・星宿(天井石2): 同年8月25日

【撮影条件(すべての図像に共通)】

レンズ焦点距離: $f=15.3\text{ mm}$ (最望遠)
撮影距離: 約8.5 cm (注)
撮影範囲: 約4.5 cm × 3.0 cm (注)
画素数: 3648 × 2432 (約900万画素)
絞り: $f8.9$ シャッタースピード: 自動設定
照射光: 斜光(右斜め上方から照射)
画像はRAWおよびJPEGフォーマットにて保存

(注) 図像面の床面からの高さが一定ではないため、画像ごとに撮影距離の変動がある。従って、撮影範囲も若干変化する。

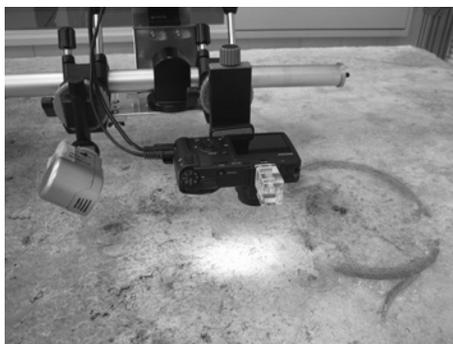


写真1 撮影の様子

(実際は室内消灯下で実施)

撮影した画像の枚数は、白虎 168枚、月象 60枚、青龍 192枚、日象 63枚、西壁・男子像 230枚、同・女子像 273枚、東壁・男子像 275枚、同・女子像 247枚、玄武 128枚、星宿 454枚、合計 2090枚である。

3. 画像から判明した各図像の表面状態について

上記方法によって撮影した各図像の近接画像を、発見から約半年後の1972年10月に撮影されたもの²⁾と比較した。両者は、撮影場所や機材、また撮影条件も異なるため単純な比較は難しいが、今回、表面の凹凸を強調する斜光撮影を行ったことにより、明らかに図像の不鮮明化が認められる箇所について、カビなどによる汚れ以外に大きく2つの要因が存在することが判明した。ひとつは色材の漆喰表面からの消失や剥落によるもの、もうひとつは、漆喰や色材上に乳白色の物質が発生していることによるものである。色材上にこの物質が発生している箇所

では、その結果として彩色が不鮮明となっていることが判明した。以下、図像ごとに、これらの現象について典型的な例を示し、必要に応じて1972年の画像と比較しながら説明する（1972年の写真は、印刷物からの複写のため、網点が大きく写っているものを了承していただきたい）。

3-1. 西壁・白虎

白虎像は、72年の発見時に比べて、特に描線の不鮮明化が著しい。写真2（口絵参照）は顔を撮影したものであるが、72年の画像と比べて、描線や眼球の黒色が薄れている。この箇所の漆喰は比較的平滑を保っていることから、描線の材料そのものが何らかの原因で消失したものと推測される。このような現象は、白虎像の描線ほぼ全体で認められた。また、黒色描線のみではなく、唇や舌、脚の爪といった、赤色に彩色されている箇所での色材の消失も部分的に起こっていることが分かった。

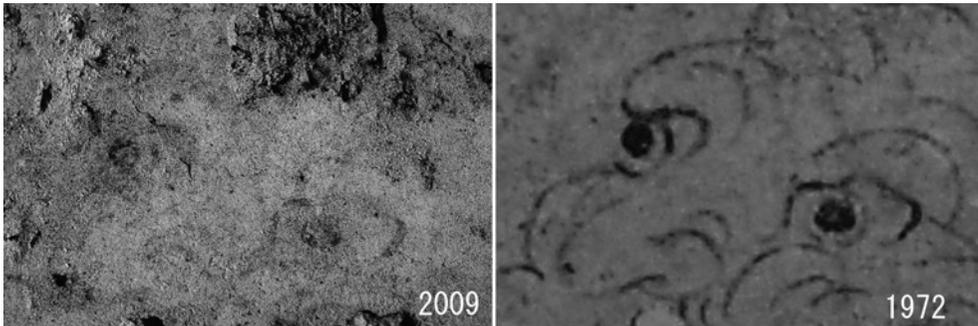


写真2 西壁・白虎 顔面上部の近接画像と1972年に撮影された同箇所の画像

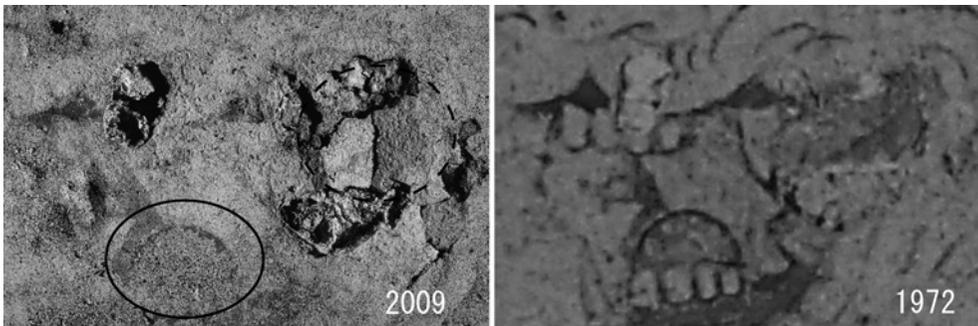


写真3 西壁・白虎 顔面下部の近接画像と1972年に撮影された同箇所の画像。実線で囲んだ部分では色材の剥落により、一方破線で囲んだ部分では乳白色物質の発生により、1972年に比べて赤色が不鮮明になっている。

また、乳白色物質が色材上に発生している箇所も多く認められた。写真3（口絵参照）は顔面下部の画像である。実線で囲んだ舌では、赤い彩色材料が漆喰上から剥落している。一方、破線で囲んだ上唇は、同様に彩色が不鮮明化しているが、斜光で撮影したことにより、漆喰上からの色材消失ではなく、色材の上を乳白色物質が覆っていることが認められた。画像をよく見ると、物質の下層に赤い色材が存在することがわかる。

写真4（口絵参照）は、左前脚の爪である。72年の画像では、爪全体が赤く彩色され、さら

に上部に黒線での縁取りが施されている様子がわかる。今回撮影した画像では、この縁取りに沿うように乳白色物質が発生していることが判明した。この箇所についてはさらに赤外線撮影を行い、72年のものと比較した（写真5：口絵参照）。その結果、今回撮影した画像にも乳白色物質の下層に黒い線が写っており、縁取りは消失せずに残っていることが確認できた。

写真6（口絵参照）は左前脚の輪郭線である。72年の画像から、その一部に切れ目があることがわかるが、今回撮影した画像により、この箇所も乳白色物質に覆われていることが判明した。

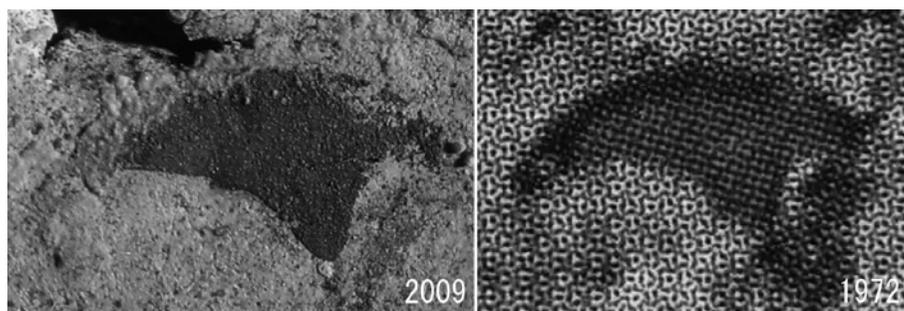


写真4 西壁・白虎 右前脚の爪の近接画像と1972年に撮影された同箇所の画像

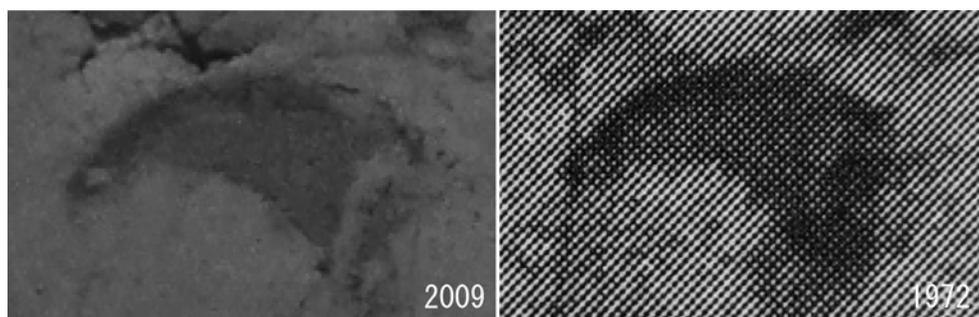


写真5 写真4と同箇所の赤外線画像（Sony cybershot DHC-H50により撮影、光源は970nmLEDを使用）と1972年に撮影された画像

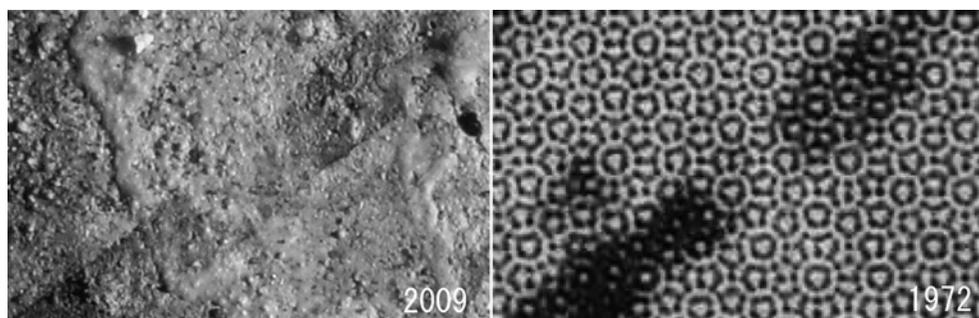


写真6 西壁・白虎 右前脚輪郭線（部分）の近接画像と1972年に撮影された同箇所の画像

3-2. 東壁・青龍

胴体部や首、頭部、さらに長く伸ばしている舌の彩色部は、ほぼ全体にわたり、乳白色物質に覆われていることが確認された（写真7：口絵参照）。脚部や爪などでは比較的物质の発生

は少ないが、その一方、白虎ほどではないが、描線や彩色の消失がみられた。



写真7 東壁・青龍 胴体（部分）の近接画像

3-3. 北壁・玄武

北壁は他の壁面と比較しても漆喰の保存状態が良好であるが、ペースト状の乳白色物質が漆喰上に多数発生しており（写真8：口絵参照）、彩色材料上にも広範囲に存在する。また、彩色材料の消失も多く場所でみられた（写真9：口絵参照）。



写真8 北壁・玄武 図像西側余白部分の近接画像

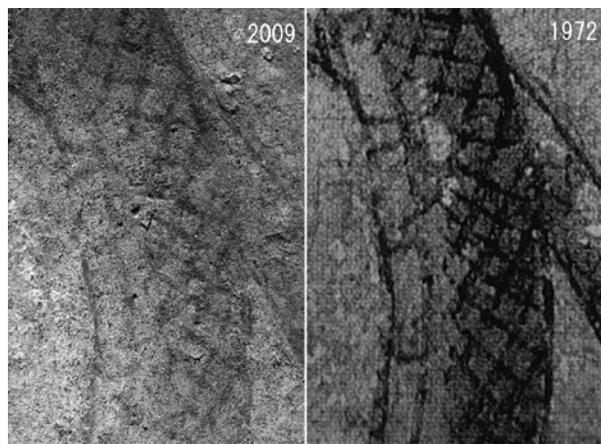


写真9 北壁・玄武 蛇胴体部（部分、尾の付け根付近）の近接画像

3-4. 人物像

東西の壁にはそれぞれ、女子象と男子像が描かれており、衣や帯、裳などに鮮やかな彩色が施されているが、写真10および11（口絵参照）で示すように、彩色部はかなり広範囲にわたって乳白色物質に薄く覆われており、その下に彩色層が存在することがわかった。写真12（口絵参照）は比較的乳白色物質の発生が少ない箇所の画像である。青色は比較的大きな粒子の顔料を使っていて、個々の粒子が判別できるが、一部剥落が起きている。また、一部は物質が覆っていて、このような場所は不鮮明になっている。緑色の部分は、ほぼ完全に物質に覆われているが、下層の彩色はほぼ完全に残っている。



写真10 西壁・男子像 緑衣像 衣および帯
（部分）の近接画像

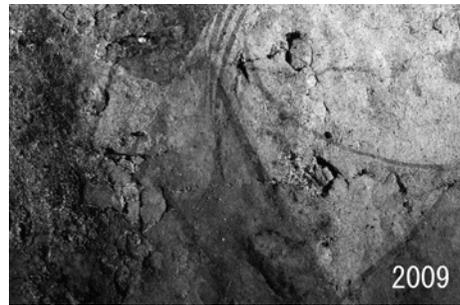


写真11 西壁・女子像 赤衣像 衣の襟付近
の近接画像

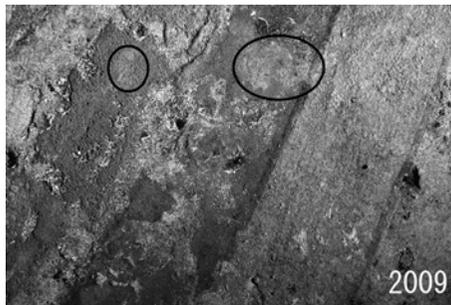


写真12 東壁・女子像 緑衣像 衣および帯（部分）
の近接画像。実線で囲んだ部分には乳白色物質が
発生している。

3-5. 西壁・月象および東壁・日象

月輪と日輪の輪郭線、および雲を表す線には黒色と赤色のものがある。他の図像と同様、漆喰が残存しているところではかなりの部分が薄く乳白色物質によって覆われており、その結果として色がくすんで見える（写真13, 14：口絵参照）。

また、雲の付近には青または緑で彩色された山岳が描かれているが、これについても剥落および乳白色物質によって彩色が不明瞭化していることがわかる。さらに、72年撮影の画像では、一部の山に黒色の輪郭線が施されている様子をはっきりと見て取れるが、今回の撮影では、これらがほぼ完全に消失していることが判明した（写真15：口絵参照）。

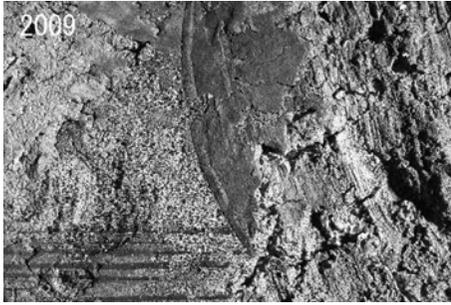


写真13 西壁・月象 日輪および雲（部分）の近接画像

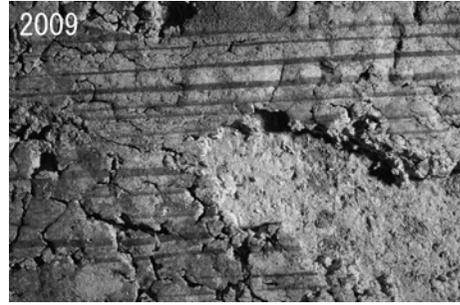


写真14 東壁・日象 雲（部分）の近接画像

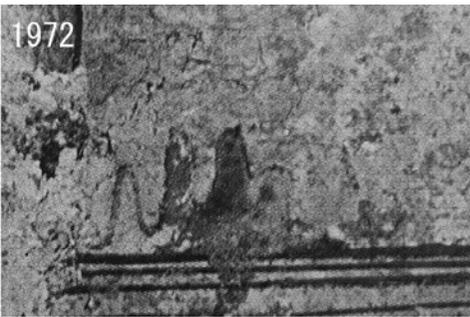
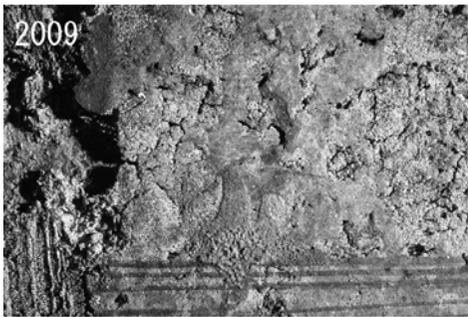


写真15 西壁・月象 右側に描かれている緑色の山および雲の近接画像，および1972年に撮影した同箇所画像。山の輪郭線がほぼ完全に消失している。

3-6. 天井・星宿

天井石には星を表す円形の金箔が漆喰上に接着し，また星座を表す朱線が引かれている。天井でも，漆喰上での乳白色物質の発生が認められ，その一部は朱線を覆っている。また，金箔上に物質が発生している状態も多くみられた（写真16：口絵参照）。



写真16 天井・星宿 星および朱線（部分）の近接画像

4. 乳白色物質について

4-1. 形状

今回、その存在が明らかになった乳白色物質の形状は様々であるが、発生部位によってある程度特徴に傾向があることがわかった。

まず、彩色の施されていない余白部分では、餅を押しつぶしたような平たいペースト形状の物質が比較的多く見られた(写真9)。大きさは様々であるが、円形状とした場合、大きくとも直径数ミリである。また、余白部でも、漆喰内部が空隙化し、表面が荒れているような部位では、ごく小さな粒状を成している物質が多数発生しているところも多くみられた(写真17:口絵参照)。

彩色部では、一部でペースト状や粒状のものがみられるが(写真4)、大部分では特定の形状を成しておらず、全体的に薄くパールを被せたように発生しているパターンが多くみられた(写真8, 11~15)。

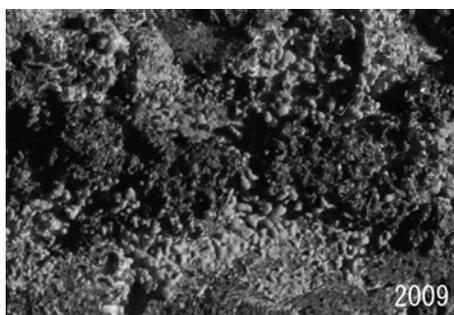


写真17 西壁・白虎 漆喰内部が空隙化し、
表面が荒れている箇所における粒状
乳白色物質の発生

4-2. 発生時期

このような物質がいつ発生したのか、画像のみからは判断することは実質不可能である。しかし、西壁や東壁女子像の衣や裳などでは、物質が発生し彩色が不明瞭になっている箇所とそうではない個所の違いが72年撮影の画像と一致しているものが多く(写真18:口絵参照)、こ

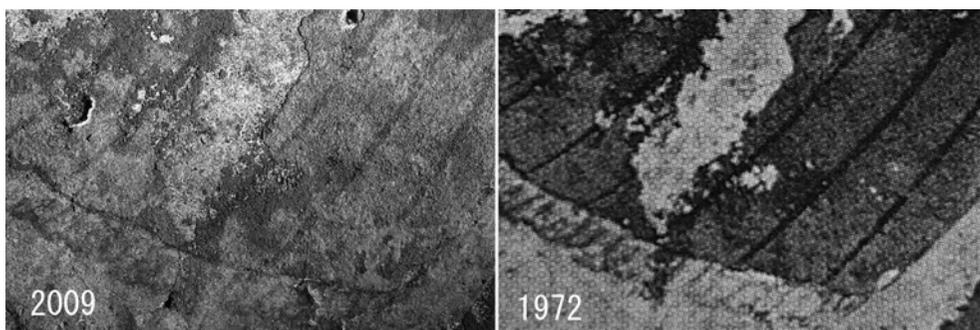


写真18 東壁・女子像 黄衣像の裳(部分)の近接画像および1972年撮影の同箇所の画像。1972年の撮影時にはすでに乳白色物質が形成されていたと考えられる。

のような箇所における乳白色物質は少なくとも72年の撮影時以前に発生していたと考えられる。これは、西壁・白虎の右足輪郭線についても同様である（写真7）。一方、西壁・白虎の爪や唇に発生している物質に関しては、72年の写真では認められないことから（写真4）、それ以降に発生した可能性が指摘できる。

ただ、72年の画像は今回のような近接撮影によるものではなく、図像全体を1枚に収めたものであるため、細部までは判別が難しく、全体を把握するのは困難である。

4-3. 物質の正体

画像のみから、この物質が何であるかを決定することは不可能である。また、発生した物質全てが同一のものであるということも言えないが、漆喰成分である炭酸カルシウムが一旦溶解したのち、再固化したカルサイトである可能性が考えられる。石室内は発見前、発見後もほぼ100%に近い相対湿度を維持していたため、表面の水分によって炭酸カルシウムが表面で溶けやすい環境にあったことは十分に考えられる。ただ、カルサイトであるか否かを非破壊的に分析することは困難であるため、サンプリング可能な目地漆喰の分析や、同様の漆喰壁画での類例などを通じて検証したい。さらに、すべての乳白色物質が自然現象によって発生したかどうかは現在のところ分らない。発見後の薬剤処置によって溶解が進んだ箇所がある可能性も否定できず、今後これまでの処置履歴を調べるとともに、再現実験等も行う必要がある。

4-4. 物質の発生と色材剥落との関係

特に人物像の画像では、物質の有無によって、色の鮮やかさに大きな差が認められる。4つの人物像において、漆喰面が良好に保存されている部位の画像を調べると、物質が発生していない、つまり彩色層は表面に存在する部位では、色材の剥落が多く箇所で起こっていることがわかった（写真13, 18）。一方、物質に覆われているところでは、その多くで下層に彩色が良く残っている様子が確認できる（写真11~13）。これについては、東壁・青龍にもいえる。青龍は、彩色部のほぼ全域が薄く物質に覆われている一方、色材の剥落はほとんど起こっていない。このことは、カルサイトと推定される物質が色材上で固化することにより、1300年の間剥落を防ぐ役割を結果的に果たしていたともいえる。

5. まとめ

デジタルカメラによって近接撮影した画像から、表面状態の様子を詳細にしらべ、かつ発見直後の画像と比較することにより、図像の不鮮明化には微生物によるもの以外に、

- ・漆喰表面からの色材消失、または剥落
- ・乳白色物質の発生に起因する不鮮明化

という二つの要因が存在することがわかった。さらに、乳白色物質には72年以前に発生していたものも存在すること、この物質が色材を剥落から保護する役割を果たしていたことも判明した。乳白色物質の正体については、カルサイトが有力であると考えているが、今後必要かつ可能な手段によって明らかにするべく検証を進めていきたい。

参考文献

- 1) 文化庁：『国宝高松塚古墳壁画』，中央公論美術出版（2004）
- 2) 高松塚古墳総合学術調査会：『国宝高松塚古墳壁画』（1973）

キーワード：高松塚古墳壁画（murals of the Takamatsuzuka Tumulus）；劣化（deterioration）；科学的調査（scientific investigation）

Surface Condition of the Murals of the Takamatsuzuka Tumulus Observed by Digital Camera

Naoto YOSHIDA, Yohsei KOHDZUMA*, Junko FURIHATA*,
Yoshikazu TSUJIMOTO*, Hajime MABUCHI, Yasuhiro HAYAKAWA, Chie SANO,
Sadatoshi MIURA and Takayasu KOEZUKA*

Since the discovery of full-colored murals in the stone chamber in 1972, the Takamatsuzuka Tumulus had been conserved on-site. However, in recent years, staining by molds and blurring of the murals have become serious issues. The Agency for Cultural Affairs (Bunkacho) decided, in 2005, to dismantle and move the stone chamber to a newly constructed facility for restoration. Restoration and various scientific investigations on the murals have been conducted since 2007.

The purpose of this research is to acquire detailed visual information on the present surface condition of the murals by digital photography.

A compact digital camera (Ricoh GX-100, about 8 million pixels) was attached to a specially designed frame, which surrounded the dismantled stone, to be facing the mural. This camera can take images of an area approx. 3.0 cm x 4.5 cm with the working distance of about 8.5 cm. Images were taken with slanting rays of white LED light illumination from the right.

As a result, it was found that two different phenomena, besides molds, were concerned to the blurring of murals:

- i) vanishing of painting materials from plaster
- ii) appearance of milky-white solid substances on the plaster and painting materials.

Milky-white substances in various forms such as paste, particle and sphere, were found distributed widely on all murals. These substances are assumed to be calcite, which eluted from the plaster by some reason. Identification and investigation on the cause of generation of these substances are to be considered in the future.