

高松塚古墳壁画及びキトラ古墳壁画の材料調査について

国立文化財機構古墳壁画PT材料調査班

○調査項目

古墳壁画PT材料調査班では、高松塚古墳壁画・キトラ古墳壁画に用いられている材料の分析及びそれらの状態のモニタリングを行うために、様々な自然科学的手法を用いて調査を実施している。

これまでに、以下の分析を継続的に実施している。

- 1) 蛍光X線分析（高松塚・キトラ）
- 2) 泥に覆われたキトラ古墳壁画の調査
- 3) デジタルアーカイブスキャニング（高松塚）
- 4) 分光分析（高松塚・キトラ）
- 5) テラヘルツイメージングによる高松塚古墳壁画の漆喰層の状態調査
- 6) SfM/MVS を用いた壁画面モニタリング手法の検討（キトラ）

また今後、高松塚古墳壁画・キトラ古墳壁画の材料調査への適用を目指して、以下の分析手法について精度及び安全性に関する評価を行っている。

- 7) X線回折分析
- 8) ハイパースペクトルカメラ

さらに本年度から、保存環境の変化が与える壁画材料への物理的な影響を調べるため、

- 9) 漆喰の基礎的な物性値の評価
- を行っている。

ここでは、1)～3)の項目を中心に報告する。

○蛍光X線分析

令和2年12月、再構成後のキトラ古墳壁画東壁面について、壁面全体をメッシュ状に測定を行った（図1）。今回で、図像の描かれた5壁面の測定が終了した。

東壁において検出された銅、水銀、鉛の分布を図2に示す。

銅の検出範囲は、高松塚古墳壁画から推定される青龍図像周辺で広範囲に検出されており、青龍を覆う泥内部では、下方へ広がりをもちつつ顔料粒子が残存・分散していると考えられる。鉛は玄武、朱雀に続き図像内の一部から検出された。高松塚古墳壁画のように図像周辺全体から検出されてはいないことから、



図1 測定風景

彩色材料として使用されたことも考慮する必要がある。水銀は、肉眼で観察できる箇所以外では、泥内の青龍後脚付近に強度の大きい箇所があり、赤色の描画（火炎・後脚爪など）がこの付近に描かれている可能性がある。また、首付近にも水銀の強度が大きい箇所があることから、この付近にも赤色の描画（翼・火炎・鬘など）が描かれている可能性がある。

十二支寅では、銅、水銀が検出された。衣部分から銅が検出されていることから、現状でやや灰色掛かった衣部分は銅を主成分とする顔料が使用されていたと考えられる。十二支卯の存在が推定される欠損部周囲では、銅の強度はやや大きい傾向が認められたが、寅位置よりもやや下方でさらに強度の大きい箇所があり、さらに水銀は寅付近と同程度の強度では検出されなかったなど、卯に関する明確な情報を得ることはできなかった。銅、水銀は画面下側で強度がやや大きく、分布が広がる傾向が認められる。盗掘孔から流入し床面に堆積した土中には漆片や金属製品が含まれており、これらの影響とも考えられるが、流入土からはやや距離もあるため、引き続き北壁との比較・検討をすすめる（北壁でも銅、水銀は画面下側がやや多い傾向がある）。

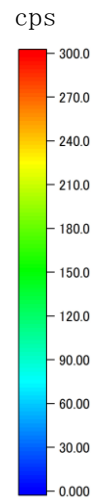
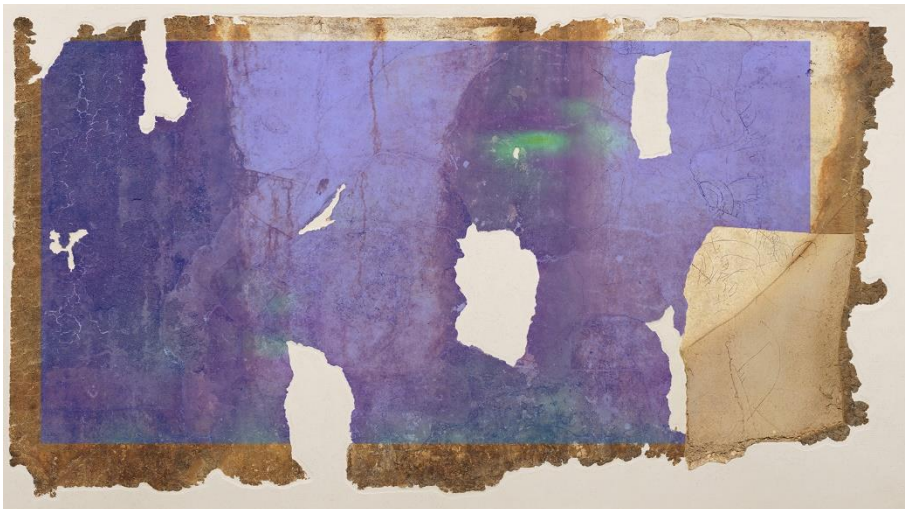
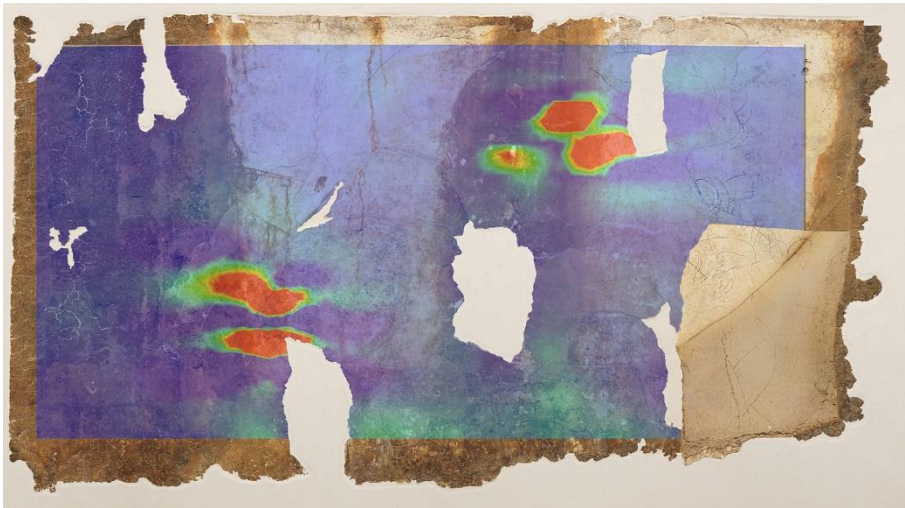
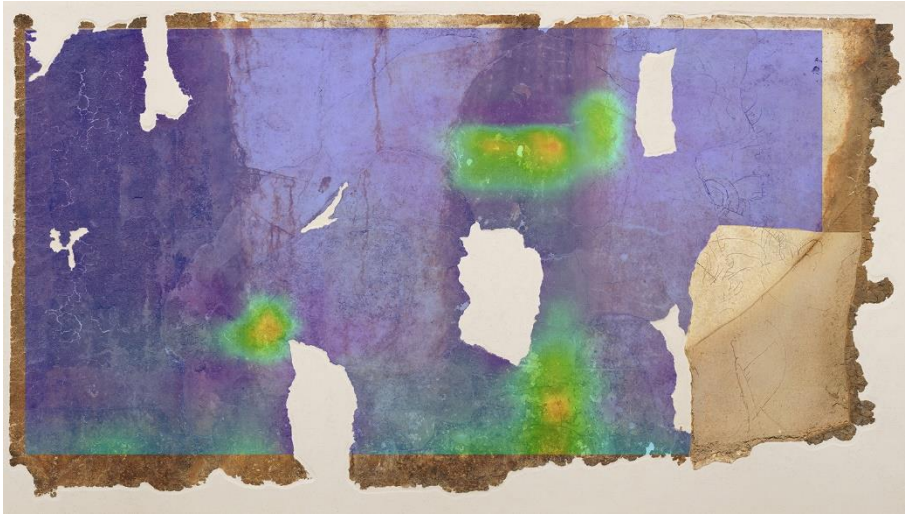


図2 キトラ古墳東壁・再構成後の銅、水銀、鉛検出状況
 上；銅、中；水銀、下；鉛（カラスケールは共通）

○泥に覆われたキトラ古墳壁画の調査

キトラ古墳壁画のうち別置保管している十二支像（辰・巳・申）が残存している可能性のある箇所において、令和2年12月にテラヘルツイメージング（辰・巳・申）、蛍光X線分析（辰・申）を実施した。

（1）テラヘルツイメージング

高松塚古墳壁画での調査と同様の測定条件（測定のピッチ=2 mm、ヘッドの動く速度=20 mm/s）にて、辰・巳・申が描かれていると想定される領域をカバーするように、それぞれ250mm×250mmの範囲をスキャンして分析を行った。

図3は辰が残存している可能性のある壁画片の分析を行っている様子である。図4と図5にはそれぞれ辰が描かれていると想定される箇所（図6(a)中の●）と図像から明らかに外れていると想定できる箇所（図6(a)中の▲）における典型的なテラヘルツ反射波の波形を示す。

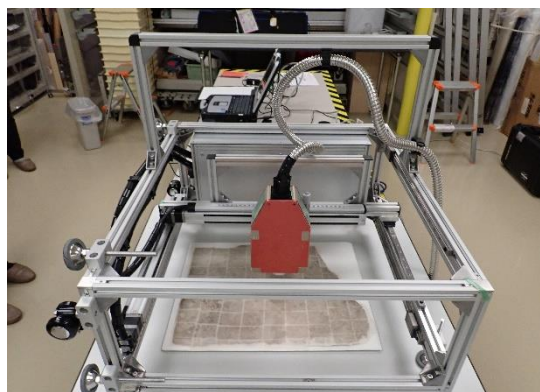


図3 テラヘルツイメージングによる測定風景

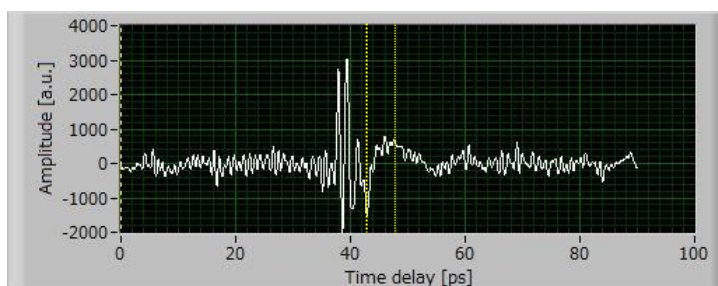


図4 辰が描かれていると想定される箇所でのテラヘルツ反射波

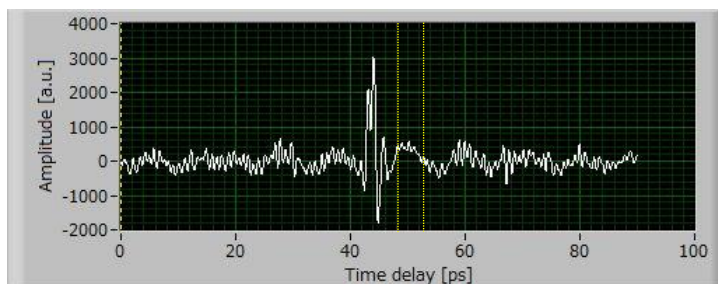


図5 辰の図像から外れていると想定できる箇所でのテラヘルツ反射波

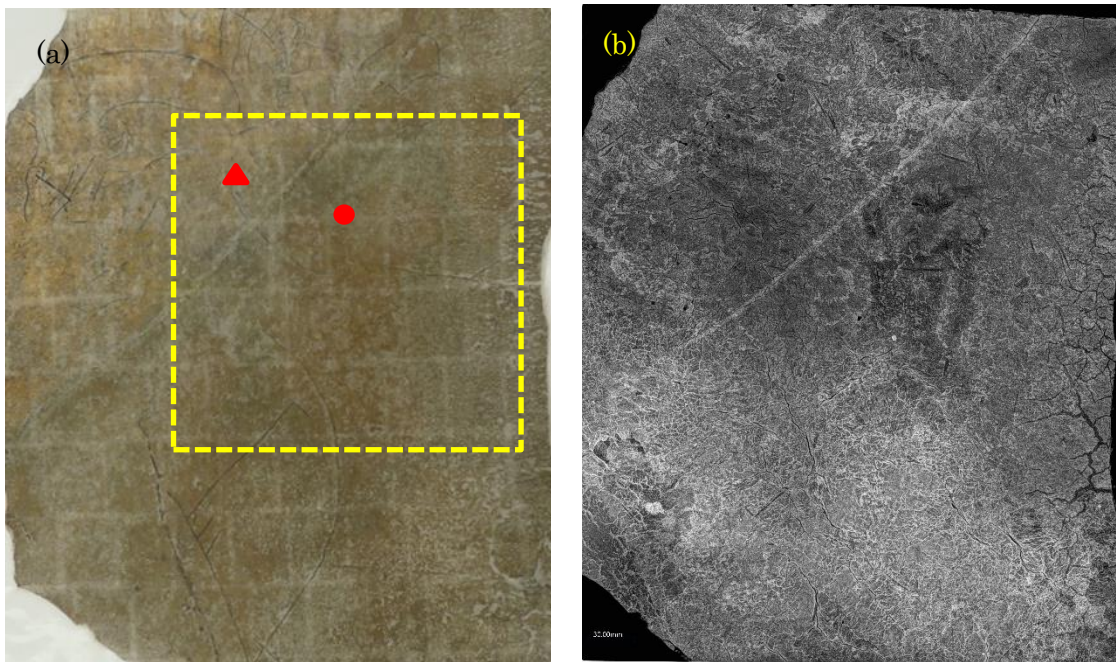


図6 辰が残存している可能性のある壁画片の(a)可視画像と(b)X線透過画像

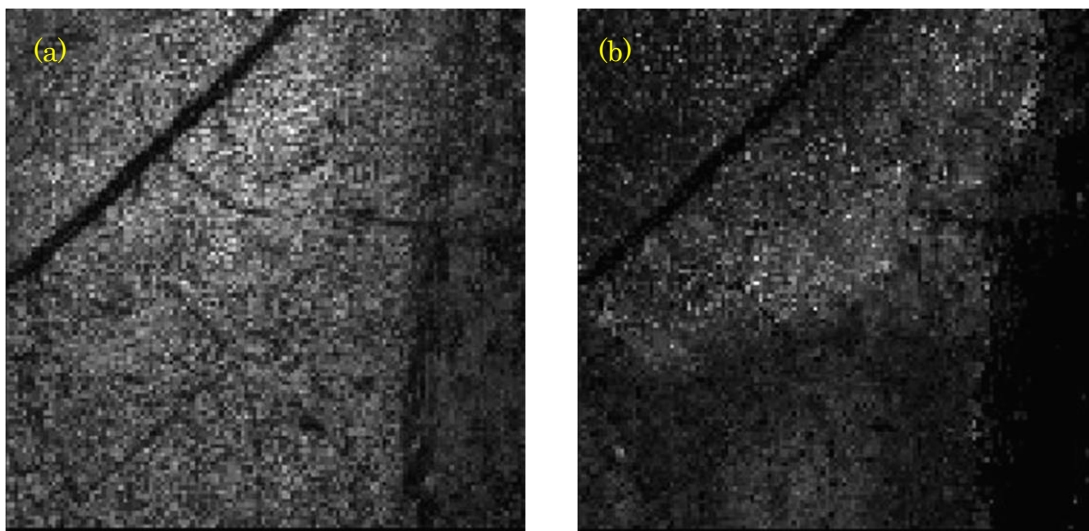


図7 テラヘルツイメージング画像(辰)

(a)全信号を積算した結果と(b)図4・図5で示した時間領域における信号を積算した結果

図6は辰が残存している可能性のある壁画片の可視画像とX線透過画像である。図6(a)中の四角で示した領域についてのテラヘルツイメージング画像を図7に示す。ここで、図7(a)は全時間領域で信号強度を積算した結果、図7(b)は図4・図5中の点線で示した時間領域で積算した結果である。この調査から得られたデータの解析結果では、明瞭に凶像を確認することはできなかった。

巳および申が残存している可能性のある壁画片について、図6(a)と図7(b)

に相当する結果をそれぞれ図8と図9に示す。いずれの壁画片からも、明瞭に図像を確認することはできなかった。

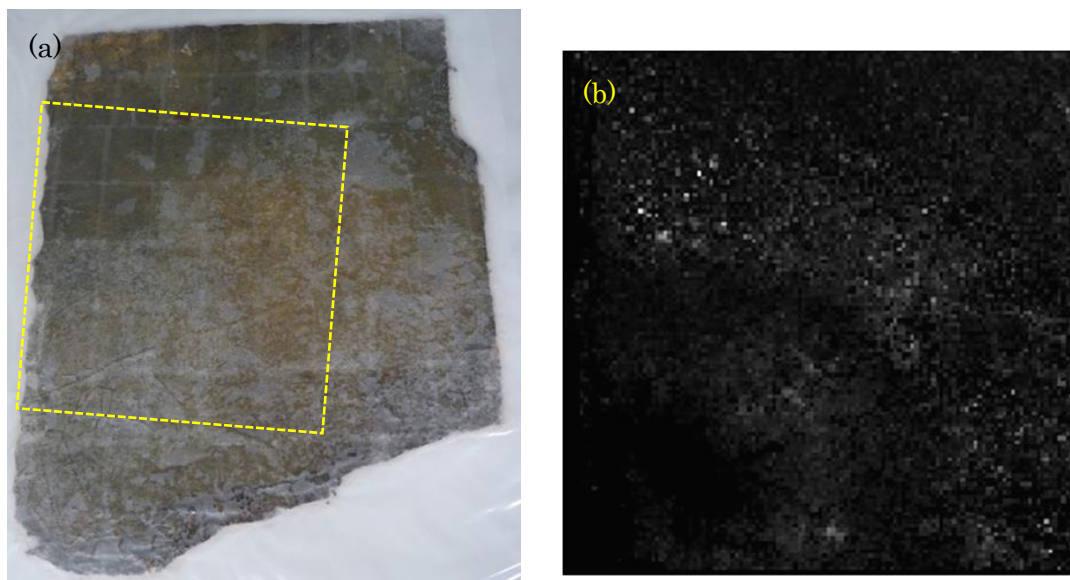


図8 巳が残存している可能性のある壁画片の
(a)可視画像と(b)テラヘルツイメージング画像

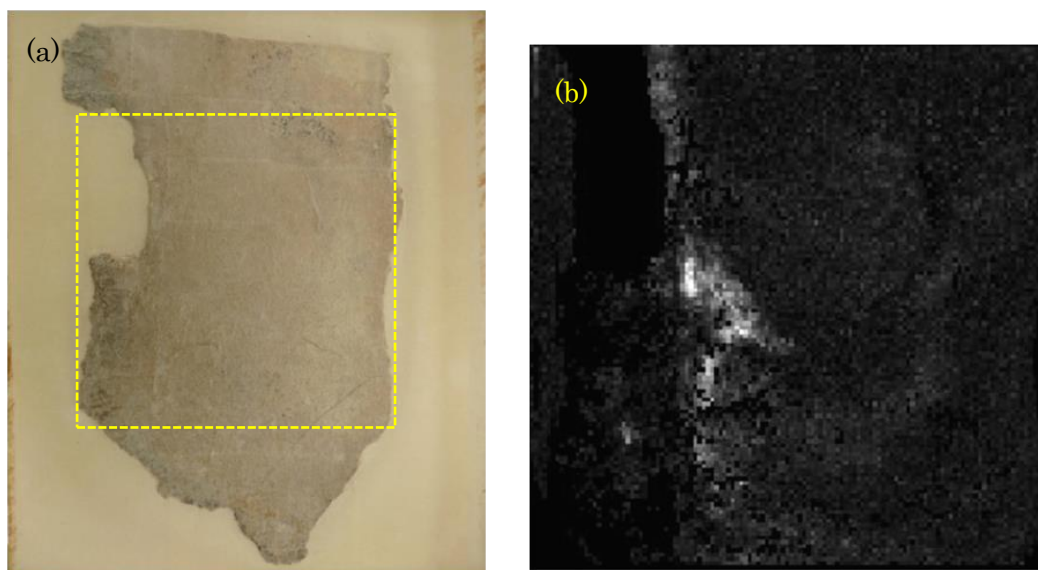


図9 申が残存している可能性のある壁画片の
(a)可視画像と(b)テラヘルツイメージング画像

(2) 蛍光X線分析

辰と申が描かれている可能性のある壁画片に対して蛍光X線分析による調査を実施した。それぞれの壁画片について、図像が描かれていると推定される位置を中心に、縦横 2cm 間隔で分析箇所を設定した。BRUKER 社製ハンドヘルド蛍光X線分析装置 (Tracer5i) を用いて、以下の条件で分析を行った。

- ・ X線管球：Rh
- ・ 管電圧・管電流：40kV・20 μ A
- ・ X線照射径： ϕ 8mm
- ・ 測定時間：120 秒
- ・ 測定雰囲気：大気
- ・ 装置ヘッドから壁画間距離：約 5mm



図 1 0 蛍光X線分析の様子

辰が残存する可能性のある壁画片について、典型的な蛍光X線スペクトルを図 1 1 に示す。分析装置に付随している専用ソフトウェア (Artax) を用いてバックグラウンドを引き算し、各測定点の水銀 (Hg) の L α の信号強度 (cps) を算出した結果、図 1 2 のようになった。

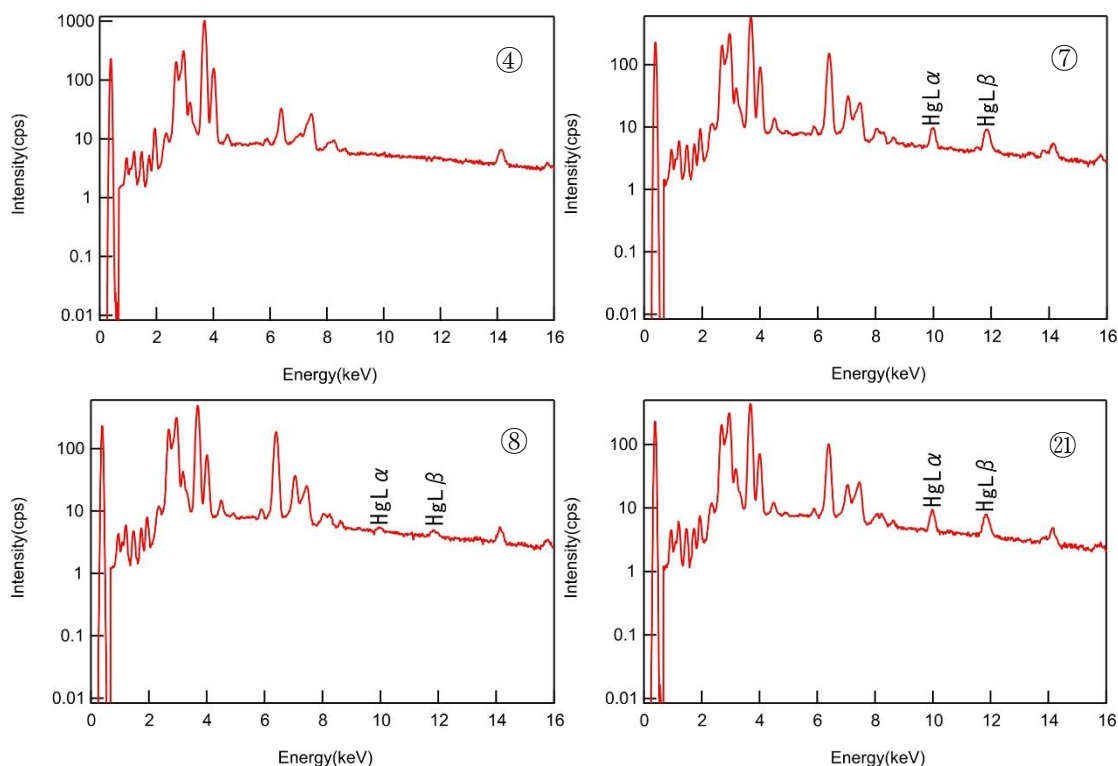


図 1 1 辰が残存する可能性のある壁画片から得られた典型的な蛍光X線スペクトルの例

ここでは、信号強度が 1:>20cps、2:15~20cps、3:10~15cps、4:<10cps の4つのランクに分類し、図 1 3 に信号強度の分布を辰が残存している可能性のある壁画片の可視画像上に示す。測定点 7 と 21 では Hg に帰属する強い信号が検出された。

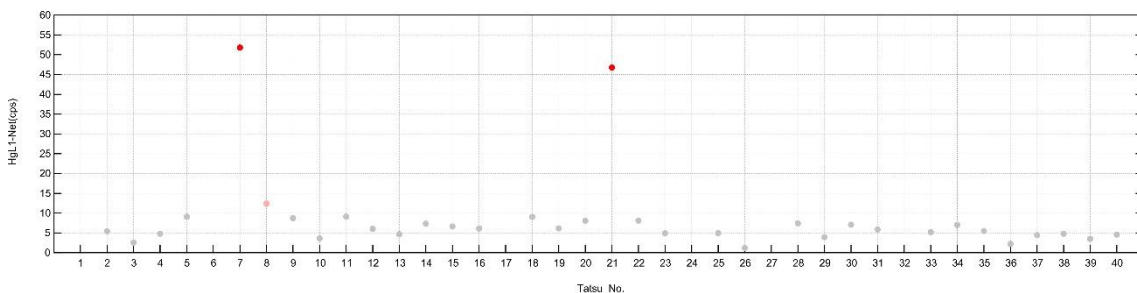


図 1 2 各測定点における Hg の Lα の信号強度

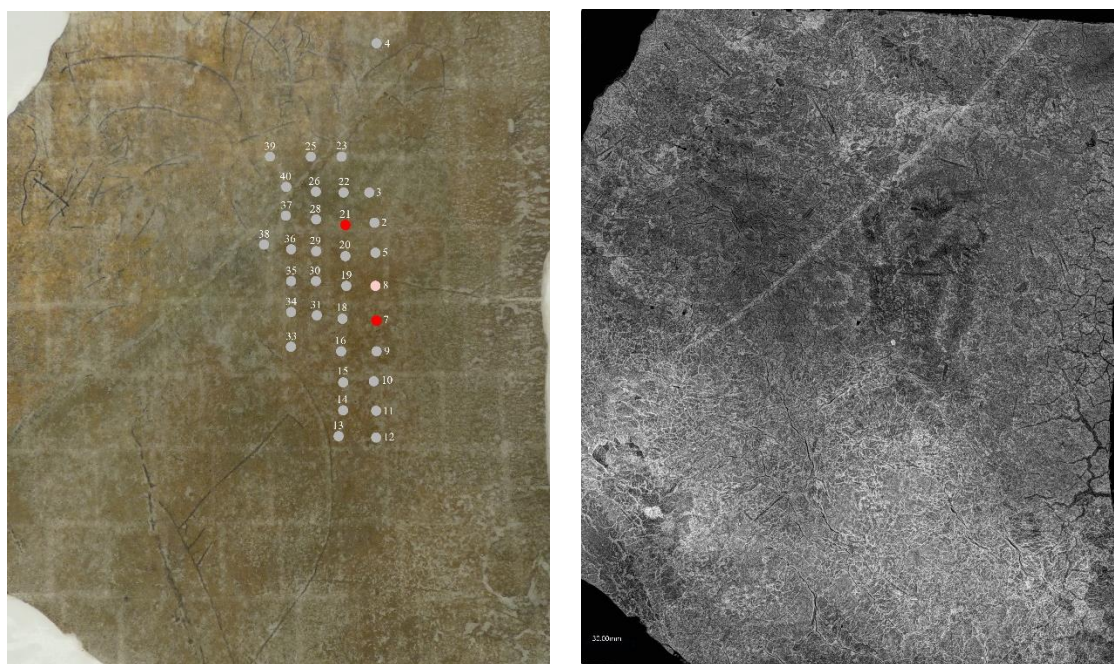


図 1 3 信号強度の分布と X 線透過画像

申が残存する可能性のある壁画片についても同様に、典型的な蛍光 X 線スペクトルを図 1 4、各測定点における信号強度を図 1 5、壁画片上における信号強度の分布を図 1 6 に示す。辰と比較すると、辰の測定点 7 と 21 と同じレベルの強い信号強度を示す箇所は無かったが、Hg が検出された箇所は辰よりも広く分布していた。今後、測定結果の更なる分析を進め、壁画残存の可能性について引き続き検討したい。

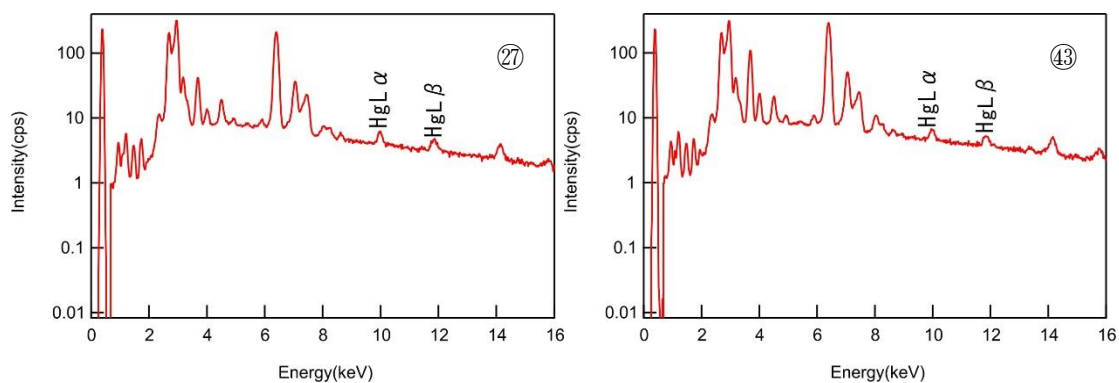


図 1 4 申から得られた典型的な蛍光X線スペクトルの例

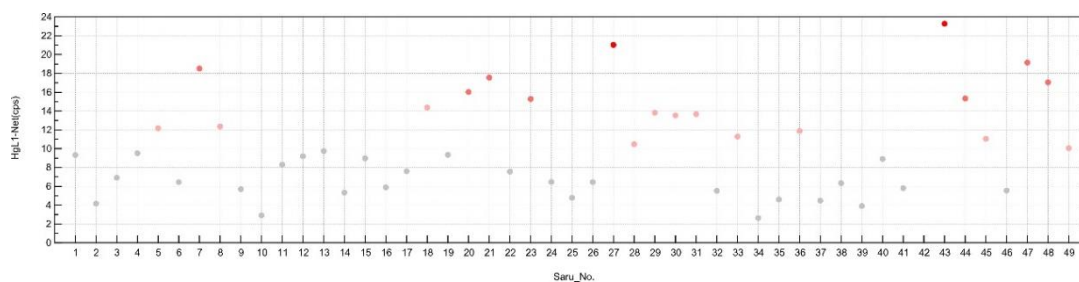


図 1 5 各測定点における Hg の L α の信号強度

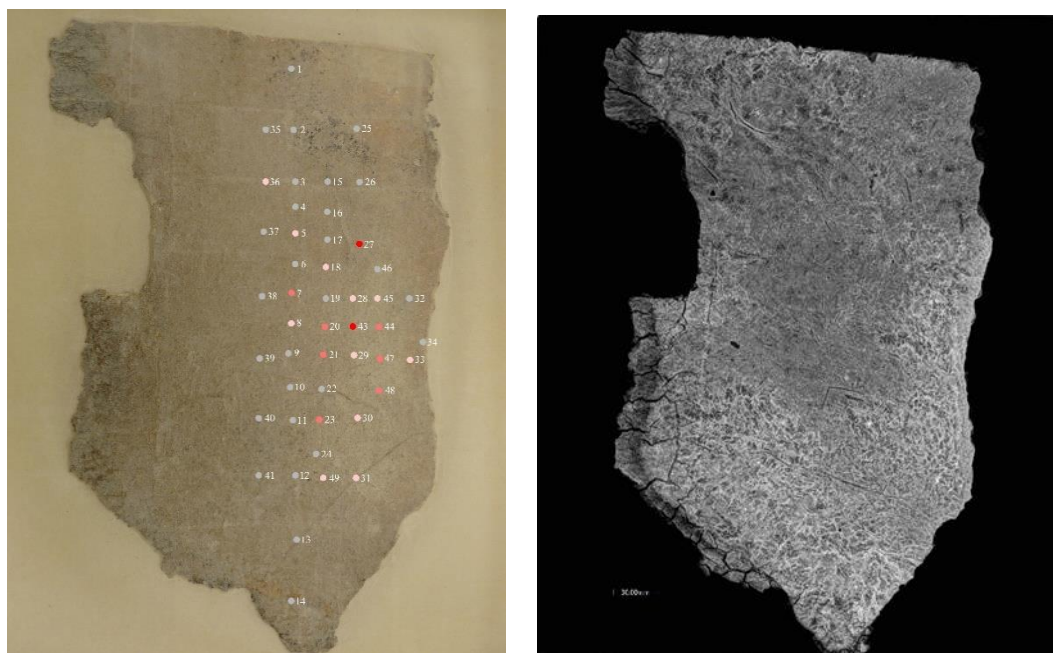


図 1 6 信号強度の分布と X 線透過画像

(3) カルサイト再結晶に関する実験

第 25 回検討会で報告したとおり、辰が描かれていると想定される部分で X 線透過画像が黒く写っている現象について、壁画が描かれていない部分でカルサイト再結晶が生じていると考えられる。本年度は、メカニズム解明のため、彩色

を施した漆喰板の表面を泥で覆うようなキトラ古墳壁画を模した試料に対して、高濃度 CO₂ 雰囲気下における乾湿繰り返し・強制的な結露発生等の条件下でのカルサイト再結晶化を検証するための実験装置を製作した。

○デジタルアーカイブスキャニング（高松塚）

令和2年3月に高松塚古墳壁画の修理が完了したため、修理中の経年変化を記録するためのデジタルアーカイブスキャニング事業は、本年度を持って終了した。比較のために、平成21年度（修理初期、左）に撮影した画像と令和2年度（修理終了後、右）に撮影した画像を以下に掲載する。

・西壁1（西壁男子群像）



• 西壁 2 (白虎・月像)



• 西壁 3 (西壁女子群像)



・東壁 1 (東壁男子群像)



・東壁 2 (青龍・日像)



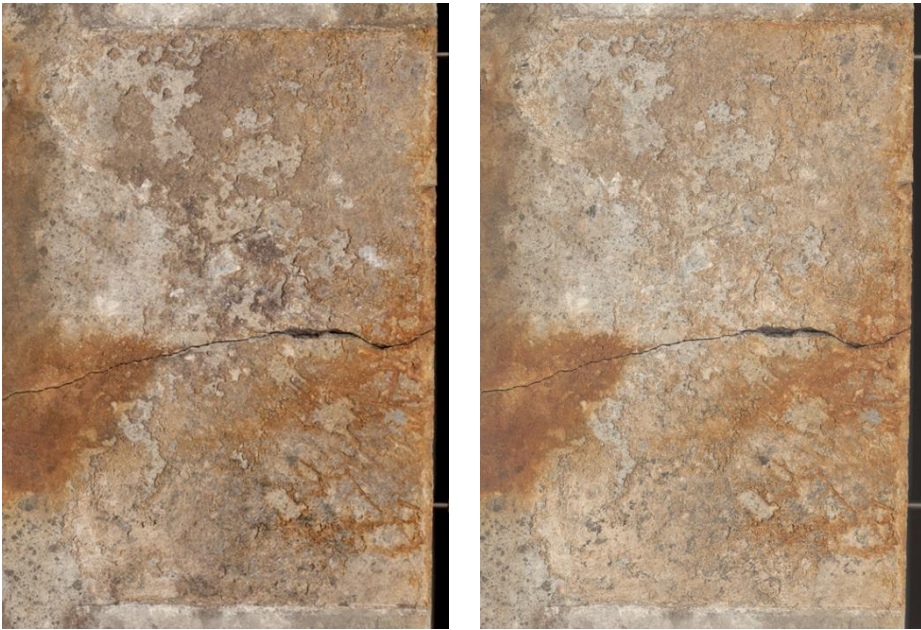
・東壁 3 (東壁女子群像)



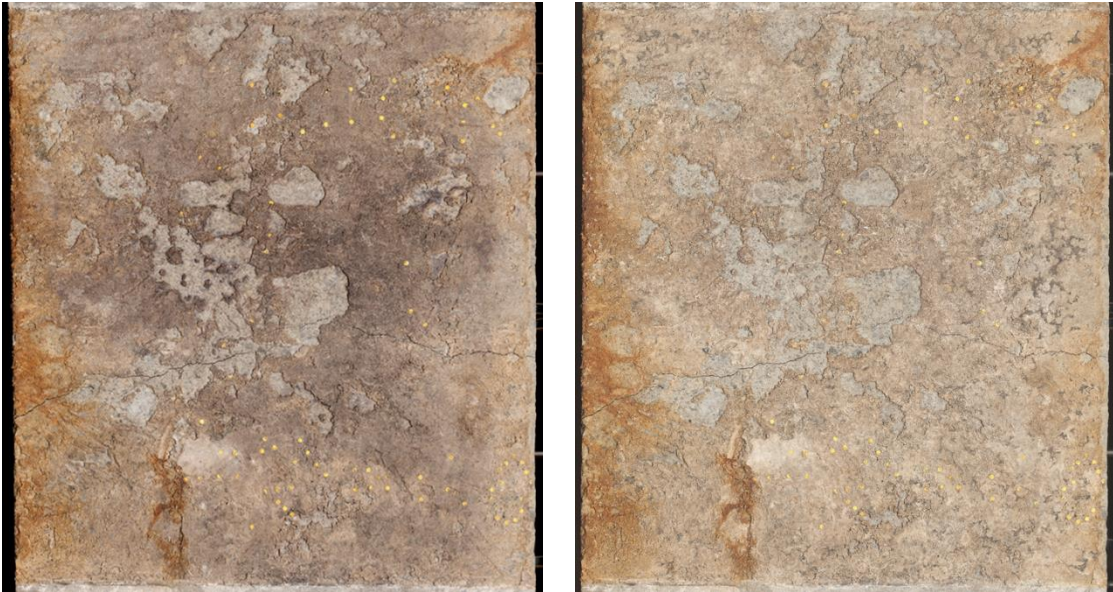
・北壁 (玄武)



・天井石 1



・天井石 2



・天井石 3



・天井石 4

