

高松塚古墳壁画と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

○高松塚古墳壁画の X 線回折分析（令和4年度の事業報告）

小型 X 線回折装置は、古墳壁画に用いられている顔料を同定することを主目的として開発した装置である。令和3年度の検討会において「装置を安全に設置して調査を実施することができる」ことをご確認頂いたため、令和4年度は高松塚古墳壁画の分析調査を開始した。

令和4年度は7月に西壁女子群像、12月に青龍、西壁女子群像が描かれている壁画の調査を実施した。青龍及び西壁女子群像における調査箇所を図1と図2に示す。分析条件は以下の通りである。

- ・管電圧：40 kV
- ・管電流：250 μ A
- ・測定時間：1200 秒（一部 600 秒の測定箇所もあり）
- ・資料間距離：10 mm
- ・管球：Cu



図1 青龍での分析箇所

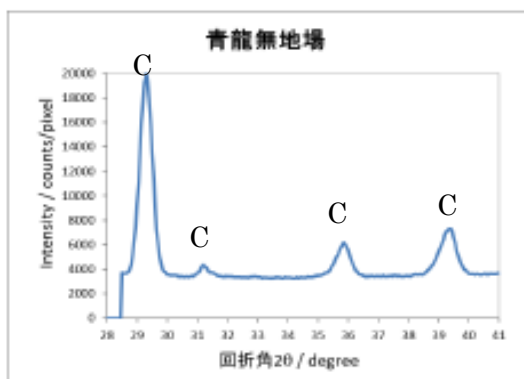


図2 西壁女子群像での分析箇所

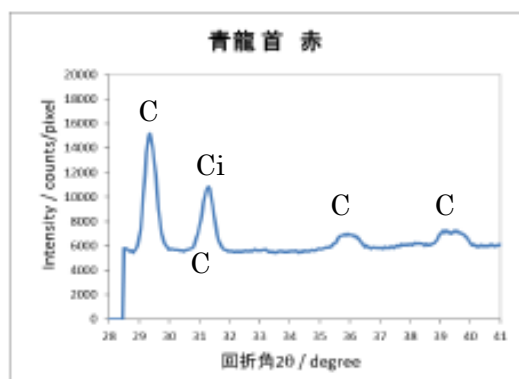
青龍では、図1に示すように、16箇所で行った。西壁女子群像では、7月に20箇所（図2中の赤丸）、12月に13箇所（図2中の白抜きの丸）の分析を行った。

青龍の分析箇所のうち、①画像が描かれていない箇所、②赤色を呈する箇所、⑥青色を呈する箇所、⑩緑色を呈する箇所の2θの1次元回折パターンを図3に示す。これらの箇所からは、それぞれカルサイト、辰砂、アズライト、マラカイトの存在を示すピークが検出された。

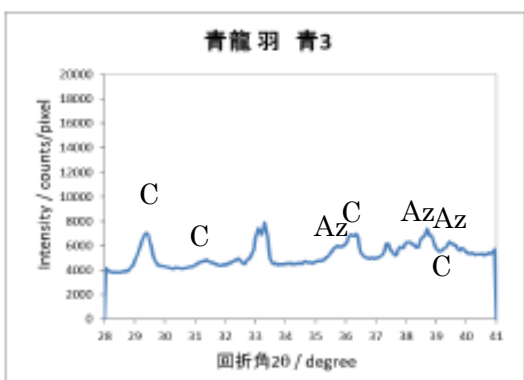
①無地



②赤色



⑥青色



⑩緑色

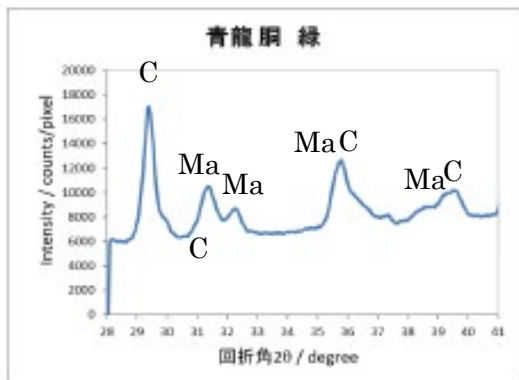
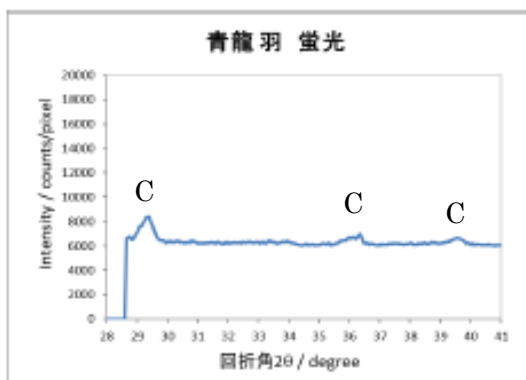


図3 青龍の分析箇所から得られた2θの1次元回折パターンの例

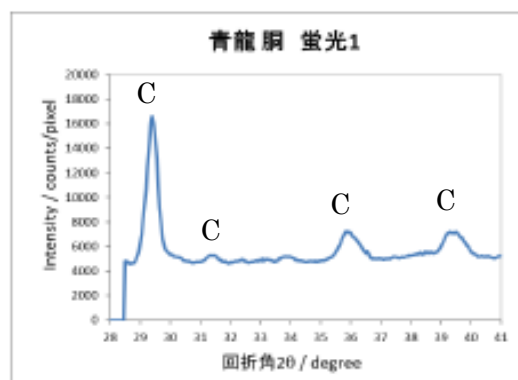
各ピークの上部に挿入したラベルC、Ci、Az、Maはそれぞれカルサイト (calcite)、辰砂 (cinnabar, HgS)、アズライト (azurite, $2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$)、マラカイト (malachite, $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$) のピークであることを示す。

青龍の分析箇所のうち、蛍光撮影で得られた画像で蛍光現象が観測された箇所⑦、⑧、⑨の 2θ の1次元回折パターンを図4に示す。

⑦



⑧



⑨

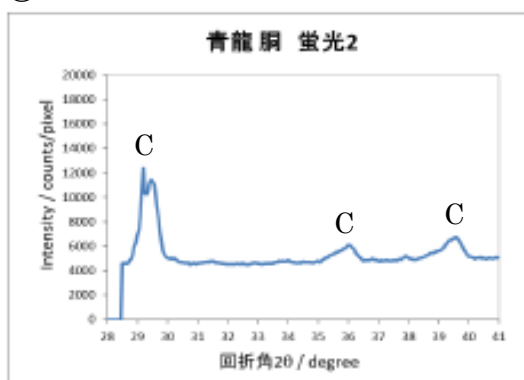
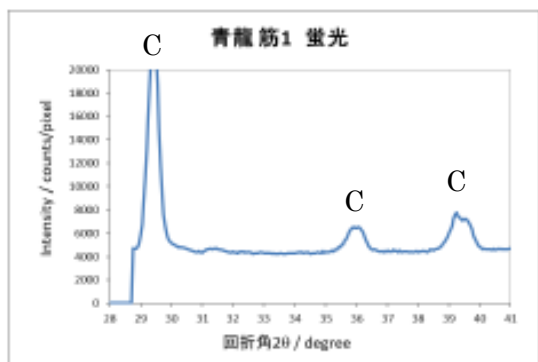


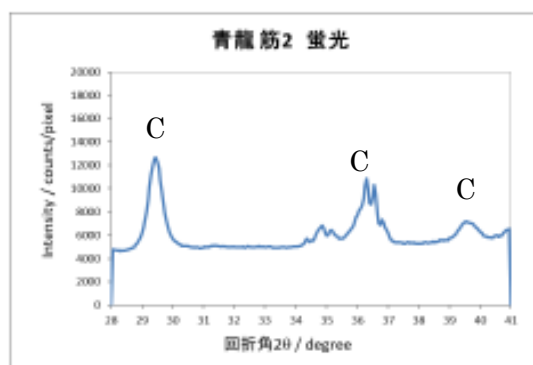
図4 青龍の分析箇所のうち、蛍光現象が観測された箇所から得られた 2θ の1次元回折パターンの例

青龍の分析箇所のうち、蛍光撮影で得られた画像で蛍光現象が観測され、蛍光 X 線分析では Pb が強く検出された、青龍上部の上下にわたる帯状の箇所⑬、⑭、⑮の 2θ の 1 次元回折パターンを図 5 に示す。

⑬



⑭



⑮

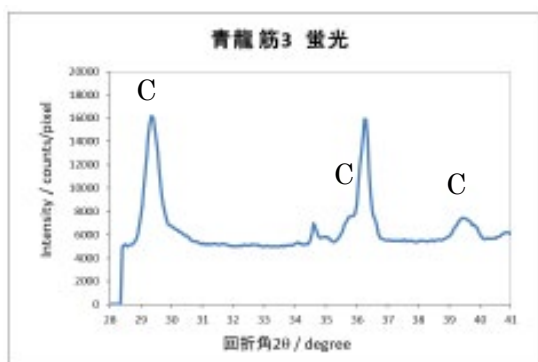
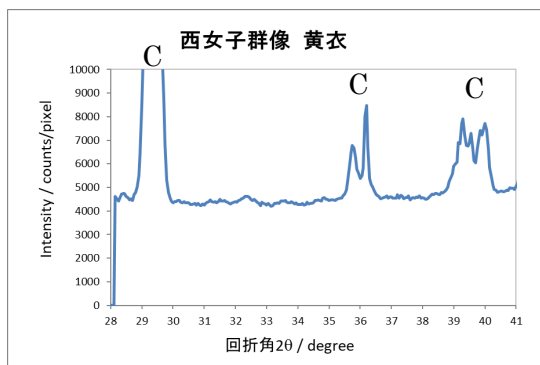


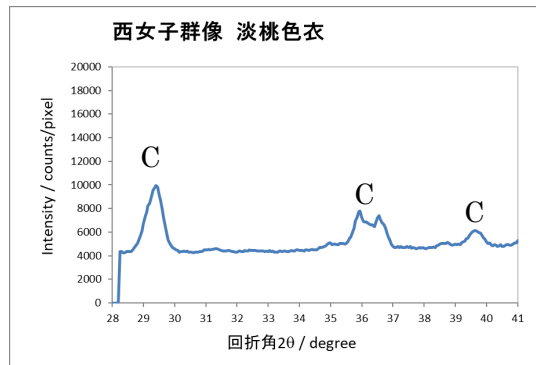
図 5 蛍光現象が観測され、XRF では Pb が強く検出された箇所から得られた 2θ の 1 次元回折パターン

西壁女子群像の分析箇所のうち、⑳黄色の衣、㉑ピンクの衣、㉒赤色の衣の箇所での1次元回折パターンを図6に示す。

㉑黄色の衣



㉑ピンクの衣



㉒赤色の衣

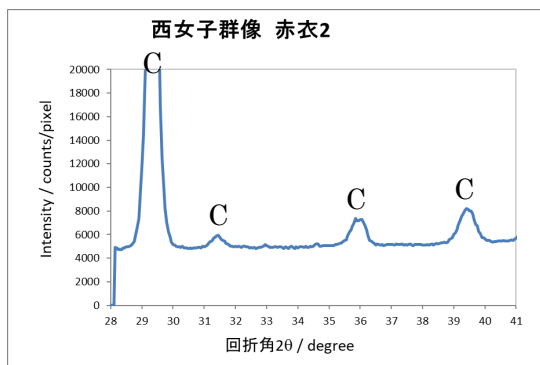


図6 西壁女子群像の分析箇所から得られた 2θ の1次元回折パターンの例

令和5年度以降の調査計画

- ・ 壁画の分析データの詳細な解析
- ・ 壁画の分析結果との比較のための試料の作成と分析
- ・ 追加の分析箇所の検討及び壁画の分析調査

○分光分析（高松塚・キトラ）（令和4年度の事業報告）

分光分析とは、対象に光を照射して波長ごとの反射率を測定する分析方法である。色材は種類によって異なる分光反射スペクトルを示し、その波形を観察することで、壁画に使用された色材を推定するための有効な情報を得ることができ、高松塚古墳壁画およびキトラ古墳壁画の調査ではこれまでに蛍光 X 線分析を用いた元素分析が行われてきたが、分光分析を併用することで色材についてより詳細に検討することができる。

高松塚古墳壁画における分光分析（第31回検討会で報告）

5月：西壁男子群像、青龍

キトラ古墳壁画における分光分析

12月：西壁（白虎、十二支（戌））、東壁（青龍、十二支（寅））

ここでは、令和4年12月に実施したキトラ古墳壁画・西壁のうち十二支（戌）と東壁のうち十二支（寅）の調査で得た結果の一部を報告する。

■西壁・十二支（戌）

全分析箇所（図7）

西壁十二支（戌）は図像の一部が目視で確認できる（図8左上および図9）。衣服の襟（測定点27）や袖付近の赤色を呈する箇所（測定点26）からは赤色を示す反射スペクトルが得られた。キトラ古墳壁画には彩色材料として辰砂（水銀朱）が用いられているとする報告があるが、測定点26、27で得られたスペクトルもそれに類似するものであった（図9）。



図7 西壁・十二支（戌）の全分析箇所

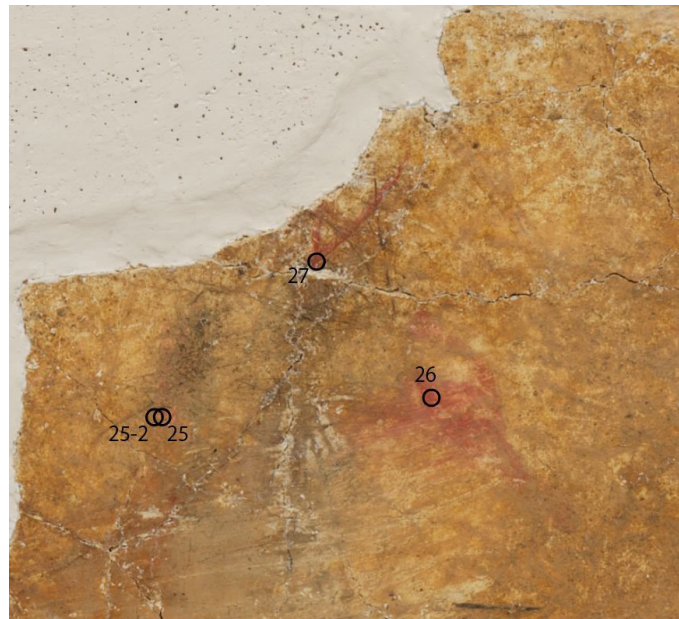


図8 西壁・十二支（戌）の分析箇所（拡大）

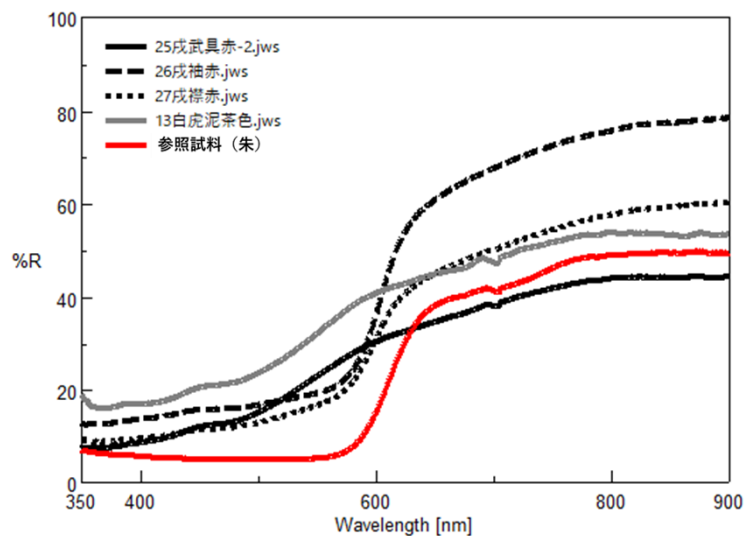


図9 十二支（戌）の赤色を呈する箇所の見視反射スペクトル
 (黒線：(戌)の各分析箇所 灰色：西壁の泥部分 赤：漆喰下地に朱を塗布した参照試料)

■東壁・十二支（寅）

全分析箇所 (図 10)

東壁十二支（寅）は図像が目視で確認できる（図 10）。衣服の襟（測定点 20）や裾（測定点 26）の赤色を呈する箇所からは赤色を示す反射スペクトルが得られ、それは朱のスペクトルと類似するものであった（図 11）。また、灰色を呈する衣部分は、蛍光 X 線分析の結果から銅（Cu）を主成分とする顔料の使用が推察されているが、可視反射スペクトルからはそれらの顔料に由来するピークは確認されなかった（図 12）。



図 10 東壁・十二支（寅）の全分析箇所

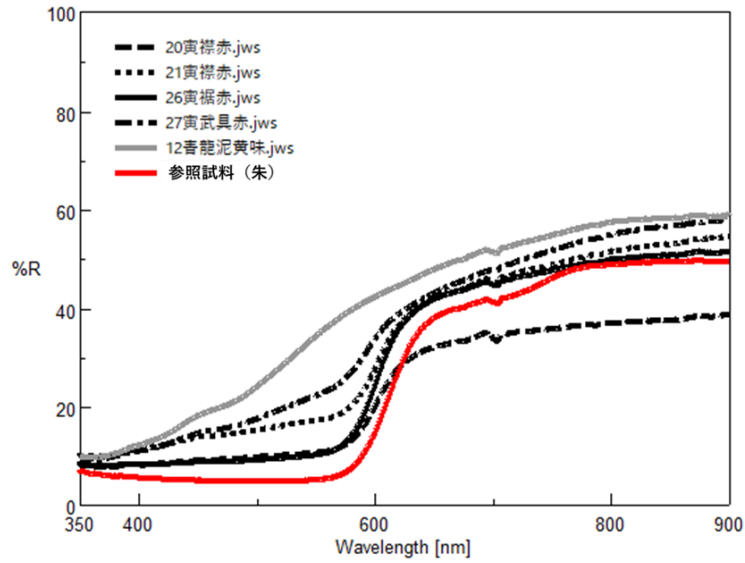


図 11 十二支（寅）の赤色を呈する箇所の可視反射スペクトル
 （黒線：（寅）の各分析箇所 灰色：東壁の泥部分 赤：漆喰下地に朱を塗布した参照試料）

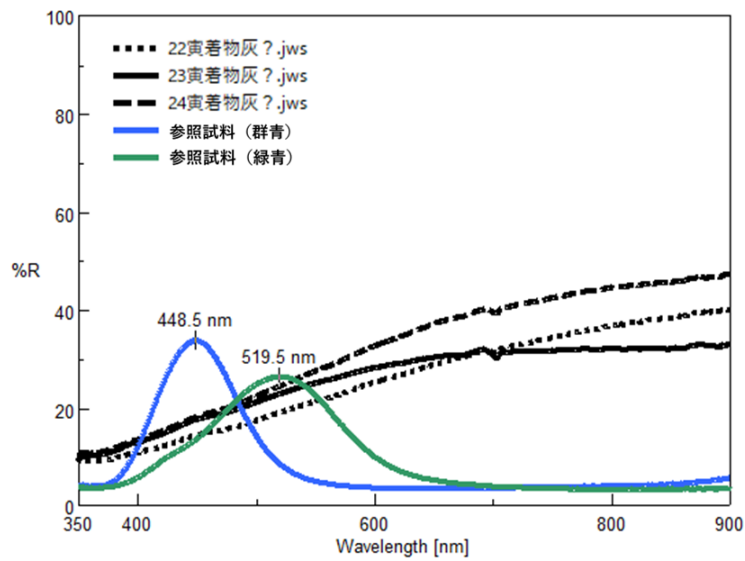


図 12 十二支（寅）の灰色を呈する箇所の可視反射スペクトル
 （黒線：（寅）の各分析箇所 青：漆喰下地に群青を塗布した参照試料 緑：漆喰下地に緑青を塗布した参照試料）

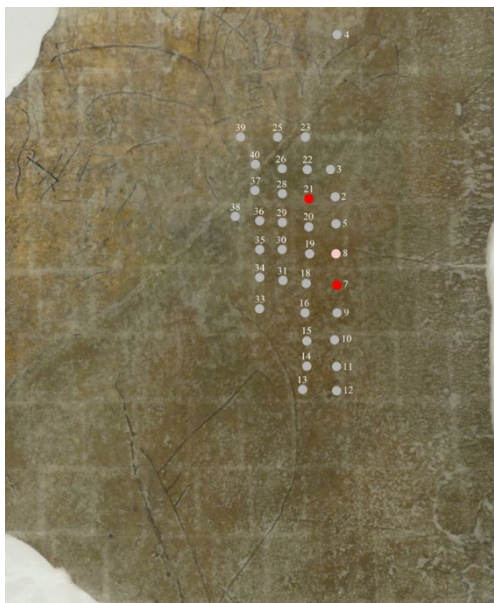
令和 5 年度以降の調査計画

- ・分光分析データ集の作成準備
- ・ハイパースペクトルカメラを用いた分析調査の準備

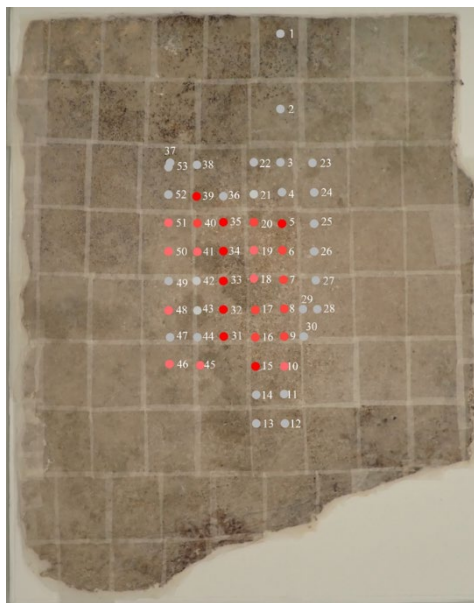
○キトラ古墳壁画の蛍光 X 線分析（令和 4 年度の事業報告）

これまでに、泥に覆われた部分の図像（辰・巳・申）の存在をより明確にするために、X 線撮影および蛍光 X 線分析による分析調査を実施した。令和 3 年度までに実施した可搬型蛍光 X 線分析装置を用いた調査により、図像が存在すると予想される箇所から水銀 (Hg) が検出されたことから、図像存在の可能性が示された（図 13）。

辰



巳



申



図 13 可搬型蛍光 X 線分析装置で検出された Hg の信号強度の分布

令和 4 年度は、図像の存在をさらに明確にするために、ブルカー社製 M6 JETSTREAM (図 14) を国宝高松塚古墳壁画仮設修理施設に輸送・設置して、令和 5 年 2 月に蛍光 X 線分析の 2 次元マッピングによる調査を実施した。

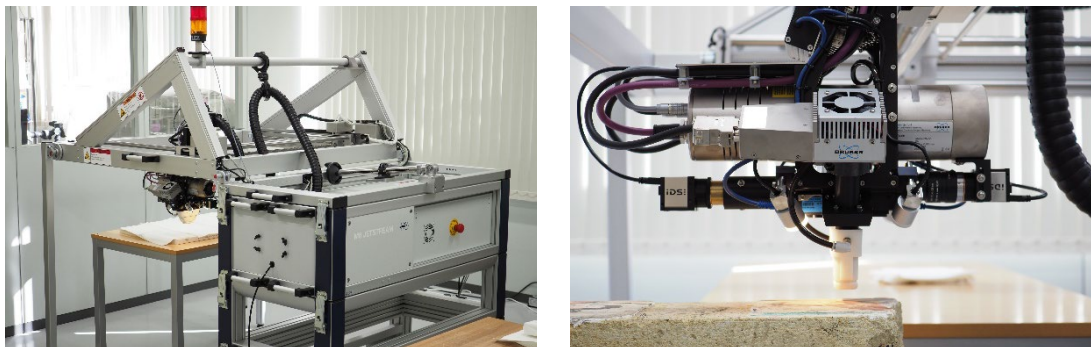


図 14 蛍光 X 線分析装置 (ブルカー社製 M6 JETSTREAM)

本装置を用いての分析調査を実施するにあたり、以下に示すように、安全性の評価と分析条件の評価を行った。

■検討 1 壁画の設置位置と走査範囲における安全性の確認

①ケーブルと壁画との接触がないか

「辰」「巳」「申」のうち、もっとも大きい「辰」の原寸大写真を用いて、走査範囲の安全性を確認した。目視及びレーザー水平器で確認したところ壁画との接触は見られなかった。

②ケーブル被覆のヘッドの接触がないか

走査範囲内では、検出器のヘッドを構成する金属部分とケーブルの被覆がわずかに接触する現象がみられた。接触により被覆 (プラスチック) が削れる可能性が考えられるため、当該事象を防ぐ検討を行った。ケーブルをフレームの右側で固定することで金属部への接触を防ぐことができた (図 15)。この際、ケーブルへの負荷はないことも確認した。

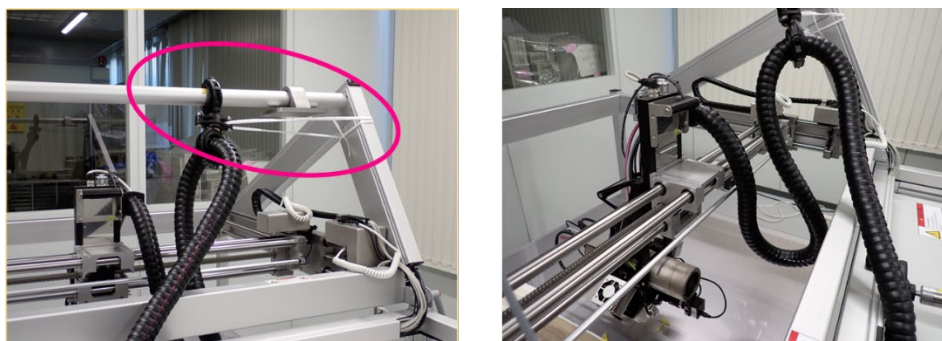


図 15 ケーブルを固定した様子 (左図) と走査終了時のヘッド位置 (右図)

■検討2 分析条件の検討

分析条件に関する優先事項は以下の通りである。

- ・壁画の安全面から6～7時間／1日の測定時間とする
- ・壁画全体を測定する。
- ・泥に覆われた箇所から水銀（Hg）を十分に検出できる条件にする
- ・高分解能で測定する

① 測定時間の検討

鮮明な図像を得るためには高い分解能で測定する必要があるが、その分長い測定時間を要する。M6 JETSTREAMの最高分解能は0.1mm（100 μ m）であるが、壁画全体の走査範囲での実施には現実的でないことがわかった。

検討の結果、壁画全体の測定と十二支推定箇所の測定で条件を分け、それぞれ580 μ m、350 μ mの分解能での測定が妥当であることがわかった。

② 泥に覆われた朱が検出できる条件

泥に覆われた壁画を想定したテストピースを用いて検討をおこなった。

管電圧50kV、管電流：600 μ A、積算時間：30ms／ピクセルで行えば、泥の下のHgが検出できることがわかった。

③ X線の壁画（顔料）に対する影響

分析後のテストピースに、視認できる変化はなかった。

以上の検討結果から、

管電圧：50kV、管電流：600 μ A、積算時間：30ms／ピクセル

- ・壁画全体測定時の分解能：580 μ m（ワーキングディスタンス：26mm）
- ・十二支推定箇所の分解能：350 μ m（ワーキングディスタンス：20mm）

の条件で測定を実施することにした。

以上のような検討を経て、令和5年2月に分析調査を実施した結果、「辰」、「巳」、「申」が描かれていると想定されている壁画から得られた水銀（Hg）と銅（Cu）の分布を図16～20に示す。

令和5年度の計画

- ・蛍光X線分析2次元マッピングのデータ解析

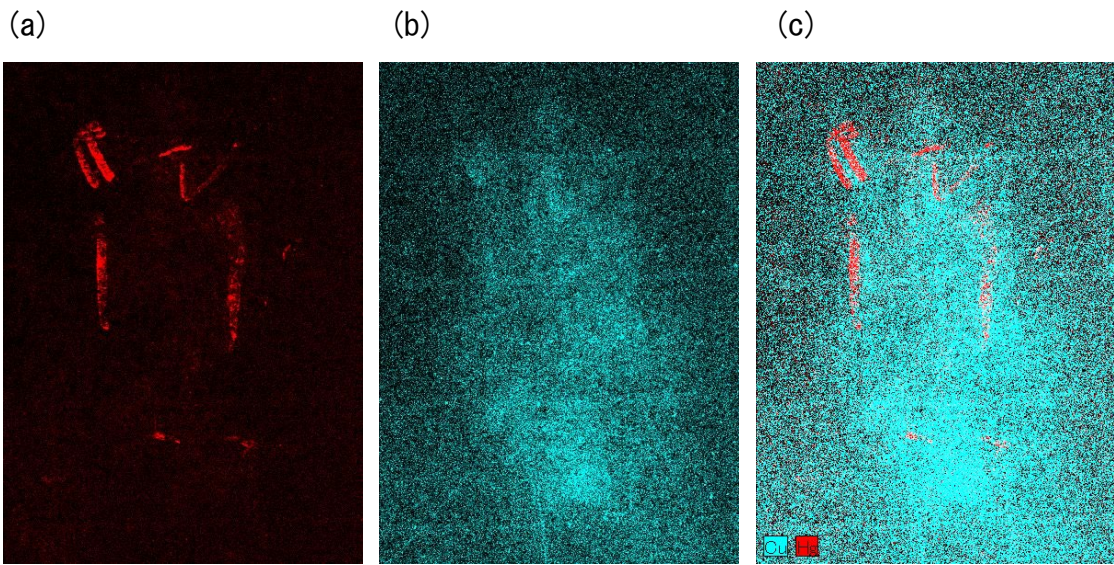


図 16 元素マッピングの分解能を $350\ \mu\text{m}$ として「辰」から得られた (a) Hg、(b) Cu、(c) Hg+Cu の分布

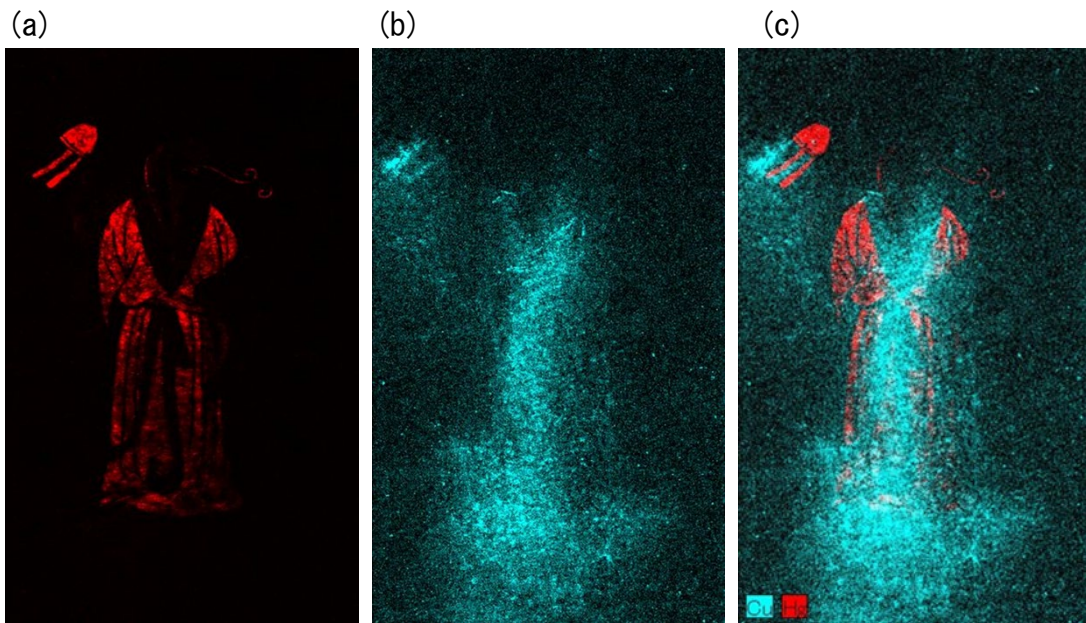


図 17 元素マッピングの分解能を $350\mu\text{m}$ として「巳」から得られた (a) Hg、(b) Cu、(c) Hg+Cu の分布

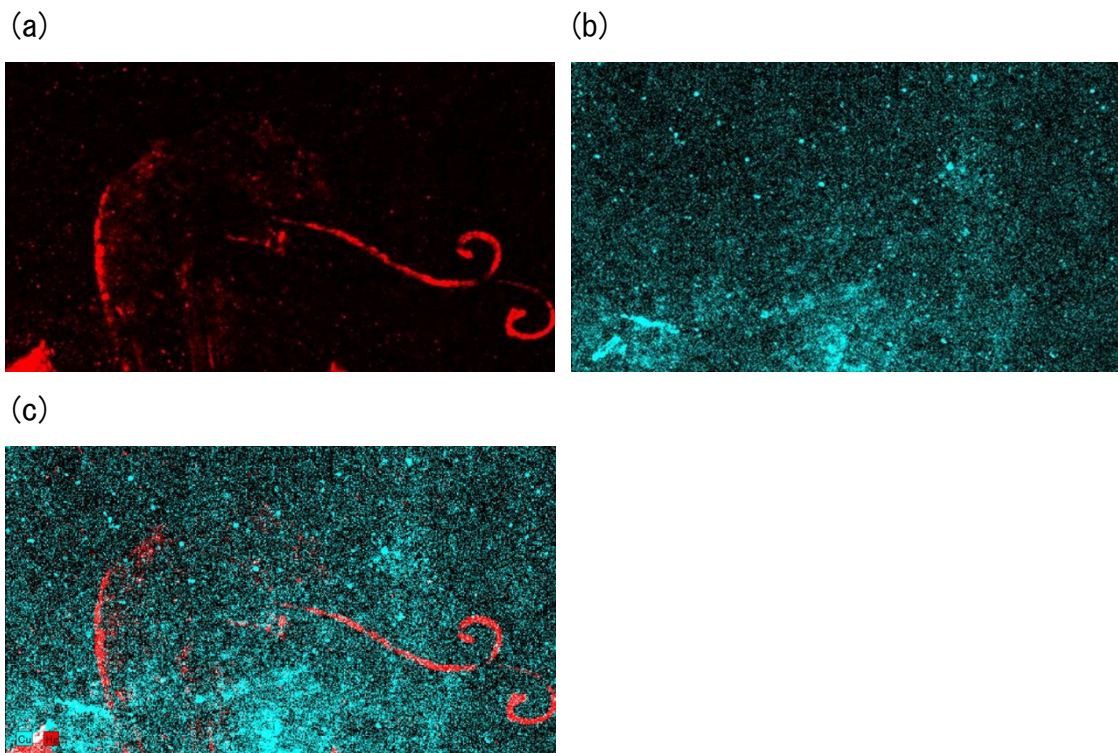


図 18 元素マッピングの分解能を $100\mu\text{m}$ として「巳」の頭部から得られた (a) Hg、(b) Cu、(c) Hg+Cu の分布

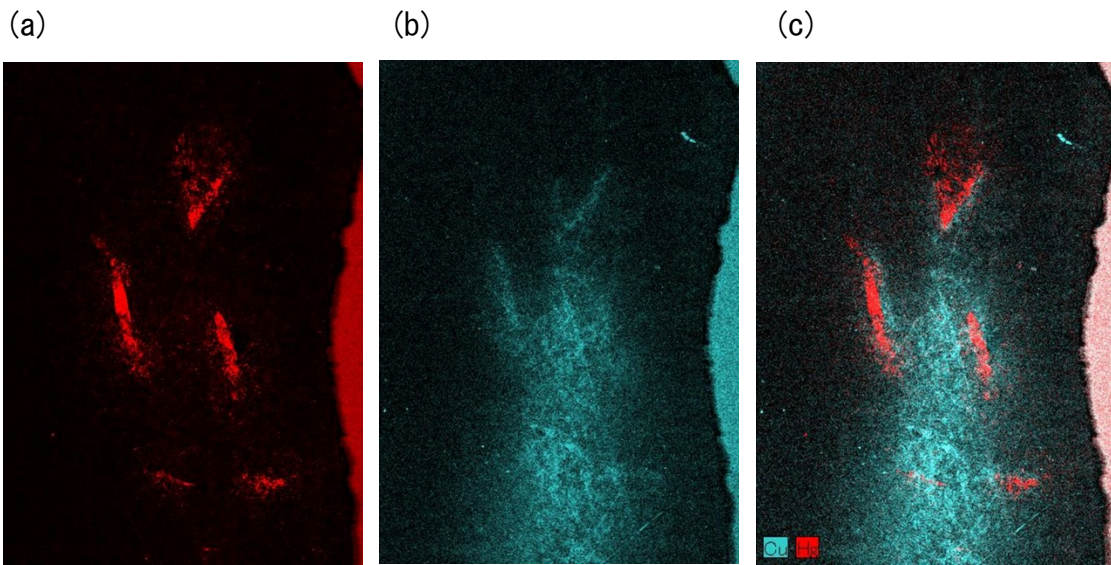


図 19 元素マッピングの分解能を $350\mu\text{m}$ として「申」から得られた (a) Hg、(b) Cu、(c) Hg+Cu の分布

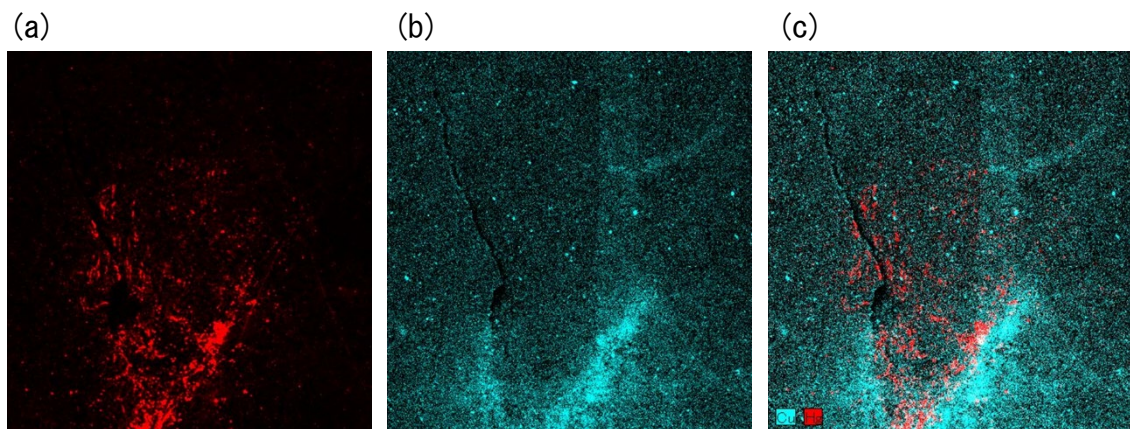


図 20 元素マッピングの分解能を $100\mu\text{m}$ として「申」の頭部から得られた (a) Hg、(b) Cu、(c) Hg+Cu の分布

○SfM/MVS を用いたキトラ古墳壁画面モニタリング手法の検討

現地施設内での壁画面撮影に先立ち、計測精度や測定条件等の検討のため、壁画面片様試料（石材に漆喰塗のうえ部分模写）を対象として SfM/MVS および高精度レーザースキャナ（FARO）による三次元計測試験を実施。

⇒ 比較的高確度・高精度であるレーザースキャナによる計測データを基準として、SfM/MVS によるデジタルカメラ撮影画像から生成される三次元モデルの精度を検討。以下に概要を記す。

① レーザースキャナによる三次元計測実験

壁画面片様試料上面の模写部分（約 40 cm×15 cm，漆喰厚さ 約 3 mm）を測定、三次元モデルを生成した。

測定条件

- ・使用機器 FARO 社製 8-Axis Quantum FaroArm
- ・カタログスペック 正確度 0.03mm 精密度 0.03mm
- ・実機スペック 正確度 0.015mm 精密度 0.0123mm
- ・計測モード 詳細
- ・点の間隔 0.02mm
- ・計測時間 5分 準備時間 30分（キャリブレーション等）

⇒ 不要部分を除いた点群数 … 約 4.9 億点

※ 点群データファイルサイズ … 約 34 GB

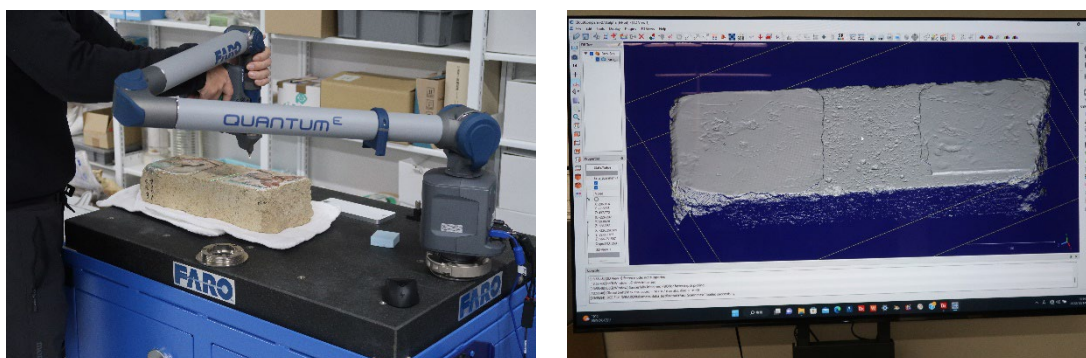


図 21 レーザースキャナによる測定の様子

② SfM/MVS による三次元計測実験

上記と同一の試料を対象にデジタルカメラを用いて多視点で写真を撮影、SfM/MVS により三次元モデルを生成した。

撮影・解析条件

- ・使用カメラ Nikon D850 (フルサイズセンサー)
- ・使用レンズ AF-S VR Micro-Nikkor 105mm f/2.8G IF-ED
- ・保存形式 RAW および jpeg
- ・解析画像 RAW を Adobe Lightroom を用いて tiff に現像
- ・色補正 現像時にグレーカードを基準に補正
- ・画像解像度 8256×5504
- ・撮影距離 48.9 cm
- ・撮影枚数 130 枚 (総ファイルサイズ … RAW : 9.87 GB, tiff : 16.5 GB)
- ・撮影作業時間 5 分
- ・解像度 0.016mm
- ・点群数 6600 万点 (解析負荷 : High)、2 億 7354 万点 (解析負荷 : 最高)

※ファイルサイズ … 4.2 GB (解析負荷 : High)、16.6 GB (解析負荷 : 最高)

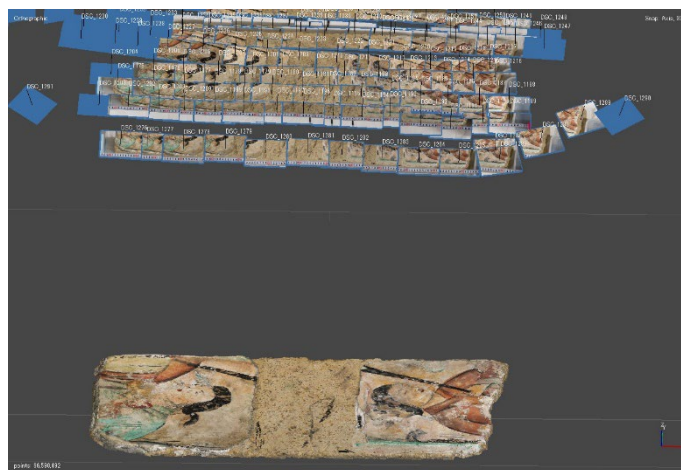


図 22 SfM/MVS によるデジタルカメラ画像からの三次元計測

⇒ FARO による計測では、短時間で高精度なデータを得ることができる。一方、一度に計測可能な領域は、アームの稼働範囲に限られる。計測範囲を分割し、機器を移動させて計測することも可能ではあるものの、機器の安定性確保に留意する必要があるほか、都度のキャリブレーションが煩雑となるなどの課題がある。

これに対し SfM/MVS による三次元計測は、十分なオーバーラップを保ち、ブ

レ・ボケのない鮮明な画像を取得することができれば、同等の解像度での三次元モデル化が行える可能性があるといえる（スケールの基準となる「定点ターゲットマーカ―」の設置が必要）。ただし、質の高い画像群を安全かつ効率よく撮影するためには、適当な治具や架台などを用いてカメラの移動と撮影を自動化するといった方策を検討する必要があると考えられる。

令和5年度以降の調査計画

上記実験における測定データをより詳細に分析するとともに、壁画面モニタリングへの適用を念頭に、SfM/MVSを中心とした三次元計測手法の精度や課題について検討を進める。とくにSfMについては、現地施設での試験に必要な治具や安全対策について具体的に検討を行い、令和5年度中の実施を目指す。