

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、様々な自然科学的な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。

- ・分光分析（高松塚・キトラ）
- ・蛍光X線分析（高松塚・キトラ）
- ・デジタルアーカイブスキャニング（高松塚）
- ・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
- ・SfM/MVSを用いたモニタリング手法の検討（キトラ）
- ・泥に覆われたキトラ古墳壁画の調査とカルサイト再結晶に関する実験

今後、高松塚古墳壁画・キトラ古墳壁画の材料調査に適用することを目的として、以下の分析手法の精度及び安全性に関する評価を行っている。

- ・X線回折分析
- ・ハイパースペクトルカメラ

さらに令和2年度から、保存環境の変化が壁画材料に与える物理的な影響を調べるため、

- ・漆喰の基礎的な物性値の評価
- を行う予定である。

ここでは、以上の調査項目に関する①令和元年度の成果報告、②令和2年度の計画、③主な進捗状況について報告する。

○令和元年度報告

1) 分光分析

令和元年度は以下のような日程で分析調査を実施した。

9月30日～10月1日 高松塚古墳壁画 西壁 男子群像

12月2日 高松塚古墳壁画 西壁 白虎・月像

3月2日 キトラ古墳壁画 南壁 朱雀

高松塚古墳壁画の西壁男子群像とキトラ古墳壁画の南壁朱雀における分析箇所を以下に示す。現在、分析で得られたデータの詳細な解析を行っている。



高松塚西壁男子群像の分析箇所



キトラ南壁朱雀の分析箇所

2) 蛍光X線分析

令和元年度は以下のような日程で蛍光X線分析調査を実施した。

12月17日～18日 キトラ古墳壁画 南壁 朱雀

縦13列×横19列(5cm刻み)の交点を分析して元素分布を調べるとともに、朱雀の特徴的な部位の彩色材料を調査した。現在、得られたデータの詳細な解析を行っている。

3) デジタルアーカイブスキャニング

壁画の状態を詳細かつ高精度に記録するため、可視光線、赤外線、紫外線によるデジタルアーカイブスキャニングを行っている。令和元年度は以下の日程で調査を実施した。

7月29日～8月2日	高松塚古墳壁画	東壁 女子群像 東壁 男子群像 北壁 玄武
9月9日～13日	高松塚古墳壁画	西壁 女子群像 西壁 男子群像 西壁 白虎・月像
11月18日～22日	高松塚古墳壁画	東壁 青龍・日像 天井石2 星宿図 天井石4
1月27日～31日	高松塚古墳壁画	天井石3 星宿図 天井石1
3月9日～13日	高松塚古墳壁画	西壁 男子群像 東壁 男子群像 天井石1 天井石4



高松塚古墳壁画東壁男子群像のスキャニング画像

(左：可視光線 中：赤外線 右：紫外線)

4) テラヘルツイメージング

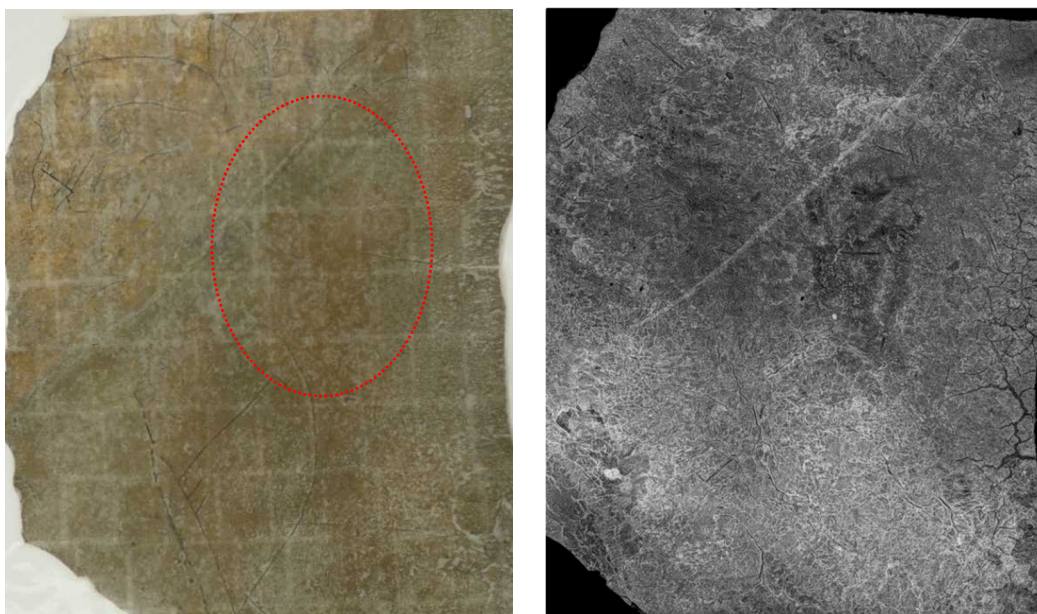
令和2年2月3日～5日に高松塚古墳壁画のうち玄武が描かれている壁画の漆喰の状態に関する調査を実施した。本調査をもって、現在使用している分析装置を用いた高松塚古墳壁画の調査を一通り終了した。

5) SfM/MVS

令和2年3月18日にキトラ古墳壁画のうち南壁朱雀の撮影を行い、SfM/MVS技術を用いて三次元データの構築を行った。そして、平成30年度に得られたデータとの差分を調べることで、経年変化の有無の検出の可能性を検討した。その結果、高精度の評価を実現するためには基準点を設定した撮影が必要であることがわかった。

6) 泥に覆われたキトラ古墳壁画の調査と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推測される箇所に、何らかの図像が描かれているように見える部分があった。ただし、この図像のように見える部分においては、X線の透過率が高く、物質量が少ないことを示している。このような現象が起こるメカニズムとして、彩色が施されていない箇所におけるカルサイトの再結晶が考えられる。キトラ古墳壁画を模した試料を作成し、カルサイトの再結晶化の有無を検証するための基礎実験を開始した。



キトラ古墳壁画十二支辰（左）およびX線透過画像（右）

7) X線回折分析装置の開発

平成30年度までに行った実験結果をもとに開発を進めて、令和元年度にX線回折分析装置の製作が完了した。

○令和2年度計画

1) 分光分析

令和2年度は以下に示す予定で調査を行う：

8月18日 キトラ古墳壁画 北壁 玄武・十二支

8月19日 高松塚古墳壁画 北壁 玄武

本調査の速報的な内容は、後述の「進捗状況」で報告する。

2) 蛍光X線分析

キトラ古墳壁画東壁青龍の分析調査を予定している。この際に、図像が描かれていない余白部分の分析も実施し、漆喰に含まれている材料成分の評価も行う予定である。

3) デジタルアーカイブスキャニング

令和2年度は以下に示す予定で、可視光線及び赤外線によるデジタルアーカイブスキャニングを行う：

8月3日～7日	高松塚古墳壁画	西壁 女子群像 西壁 男子群像 西壁 白虎・月像
9月7日～18日	高松塚古墳壁画	東壁 女子群像 東壁 男子群像 東壁 青龍・日像 北壁 玄武 天井石2 星宿図 天井石3 星宿図 天井石1 天井石4

4) テラヘルツイメージング

天井石2の漆喰の状態の調査を令和3年1月に実施する。天井石2は剥離した漆喰を処置した箇所が多いため、平成30年度に実施した調査結果との比較を行うことにより修理の効果の検証を行う。

また、これまでに実施してきた人物群像や四神が描かれた壁画の調査結果の詳細なデータ解析を行い、漆喰の状態を二次元的に視覚化する予定である。

5) SfM/MVS

令和元年度の調査結果から、高精度の評価を実現するためには基準点を設定した撮影が必要であることがわかった。令和2年度に再撮影を実施する予定である。

また、SfM/MVS から得られるモニタリングの精度を検証するために、手板試料を用いたレーザー三次元計測に関する実験も行う予定である。

6) 泥に覆われたキトラ古墳壁画の調査とカルサイト再結晶に関する実験

泥に覆われている可能性のある十二支像（辰・巳・申）の有無をさらに調べるために、テラヘルツイメージング及び蛍光 X 線分析による追加調査を予定している。

また、キトラ古墳壁画を模した試料を作成し、高濃度 CO₂ 雰囲気下において乾湿を繰り返した場合のカルサイトの再結晶化の有無を検証するための基礎実験を実施する。

7) X 線回折分析装置の開発

次年度以降に高松塚古墳壁画の彩色材料の分析を実施することを目指して、

- ・手板試料を用いた詳細な基礎データの蓄積及びデータ解析による性能評価
- ・安全に調査を行うための治具の改良と設置方法の再検討

を行う予定である。

本調査の速報的な内容は、後述の「進捗状況」で報告する。

8) ハイパースペクトルカメラ

ハイパースペクトルカメラを用いると、撮影によって得られる二次元画像の各ピクセルに、可視光線から近赤外線までの反射スペクトルの情報を取得することができる。この装置を用いることにより、反射スペクトルのデータに基づいて、同一の彩色材料が面的にどのように分布しているのかを調べることが可能となる。使用を予定している装置は、以下のような仕様を有するエバ・ジャパン社製ハイパースペクトルカメラ「NH-1S」である

サイズ、重量：H76.0mm×W72.4mm×L213.0mm、1030g

映像解像度：752×480 画素（36.1 万画素）

波長範囲：350nm～1100nm

スペクトル分解能：5 nm

データ解析：SAM (Spectral Angle Mapper) 解析、線形判別解析等

次年度以降に高松塚古墳壁画・キトラ古墳壁画の分析を実施することを目指して、令和2年度は、

- ・安全に調査を行うための装置の固定方法の検討
 - ・手板試料を用いた性能評価
- を行う予定である。



ハイパースペクトルカメラ本体



治具に固定したハイパースペクトルカメラ

9) 漆喰の基礎的な物性値の評価

温度や湿度等の保存環境の変化が壁画材料に与える物理的な影響を調べるために、模擬壁画を用いた基礎実験を行い、壁画の構成材料の物性に関する検討を行う予定である。

実験には漆喰、凝灰岩、及び凝灰岩に漆喰を施工した材料を用いて、材料の乾燥時に生じるひずみを計測し、相対湿度・乾燥速度と生じるひずみとの関係を明らかにする。

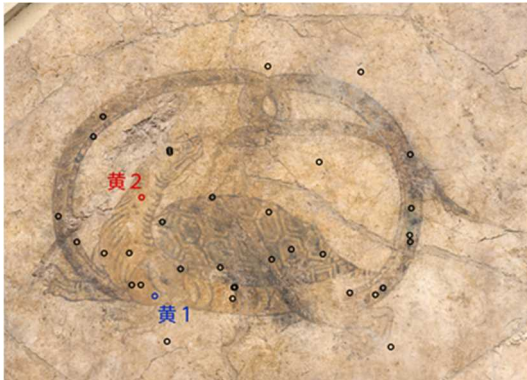
また、ひずみの形成に関与する漆喰の材料物性（平衡含水率、熱膨張率）の測定も実施する予定である。

○進捗状況

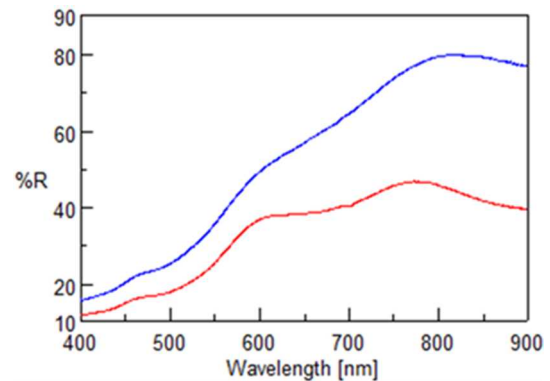
1) 分光分析

令和2年8月18日に実施したキトラ古墳壁画・北壁玄武の調査結果の一部を報告する。左図には分析箇所を、右図には玄武の胴体・首部分の黄色を呈している箇所の反射分光スペクトルを示す。

現在、分析で得られたデータの詳細な解析を行っている。



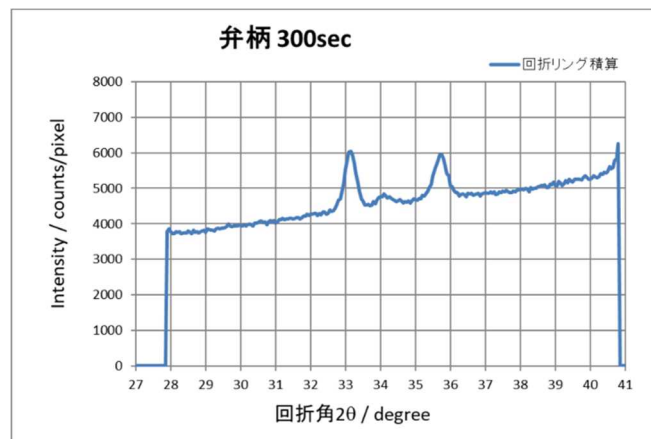
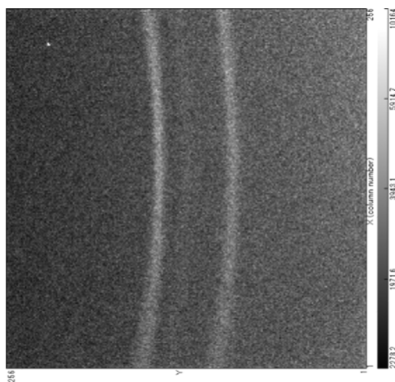
キトラ古墳壁画・北壁玄武の分析箇所



黄色を呈する分析箇所の分光スペクトル

2) X線回折分析装置の開発

令和2年8月26日～27日に、漆喰下地及び漆喰＋鉛白下地に様々な彩色材料を塗布して作成した手板試料を用いて、分析装置の性能評価を開始した。以下に、評価実験で得られたベンガラに関する二次元X線回折像と回折角 2θ の結果を示す。



ベンガラに関する二次元X線回折像（左）と回折角 2θ 分布（右）