

# 〔報告〕 X線透過撮影による泥に覆われたキトラ 古墳壁画の調査

犬塚 将英・早川 典子・大場 詩野子・早川 泰弘・高妻 洋成\*

## 1. はじめに

キトラ古墳壁画は漆喰下地層の上に描かれており、各側壁の中央に描かれた四神、各側壁に三体ずつ描かれた獣頭人身の十二支、天井に描かれた天文図、日像、月像から構成される。キトラ古墳壁画の保存・活用については、文化庁によって2001年に設置された「特別史跡キトラ古墳の保存・活用等に関する調査研究委員会」にて検討が重ねられ、漆喰下地層の剝離や石室内の生物環境の変化等の理由により、壁画のはぎ取りが2004年に開始された<sup>1)</sup>。はぎ取られた壁画は高松塚古墳壁画仮設修理施設にて保管され<sup>2)</sup>、2016年までに安定化と再構築が完了し、同年秋からキトラ古墳壁画体験館「四神の館」にて一般公開が行われている。そして、2019年7月23日にキトラ古墳壁画は国宝に指定された<sup>3)</sup>。

十二支は各壁面の中央よりもやや低い位置に、ほぼ同じ高さ、ほぼ等間隔に描かれている。それらのうち、子・丑・寅・午・戌・亥の6体の像は存在を確認することができる。しかし、卯・未・酉に該当する箇所は漆喰ごと完全に失われている。残りの辰・巳・申に関しては、該当する箇所の表面が泥に覆われており、像が残存している可能性を残しているが存在は確認できていない<sup>4)</sup>。これらの図像の存在を確認することは、美術史的・考古学的な意義が大きいことは言うまでもないが、壁画の修復方法の方針を検討する上でも極めて重要である。そこで著者らは、壁画に接触しない調査手法としてX線透過撮影を選択し、泥に覆われた箇所における図像の有無の調査を実施した<sup>5)</sup>。

ここでは、キトラ古墳壁画を模したテストピースを使った予備実験の結果、及びX線透過撮影による辰・巳・申の図像の有無に関する調査結果について報告する。

## 2. 予備実験

### 2-1. テストピースの作成

現在までに完了しているキトラ古墳壁画の再構築には、辰・巳・申の図像が残存している可能性のある3つの壁画片は含まれていない。これらの壁画片はレーヨン紙および和紙で表面と裏面が保護された状態で、高松塚古墳壁画仮設修理施設内にて保管されている。

周囲の温湿度環境の変化に伴い壁画片の含水量が変化すると、壁画片に歪みが生じる危険性があるため、X線透過撮影による調査は短時間で実施する必要があった。X線透過撮影を効率良く行うために、事前にX線の照射条件を定めておくための照射実験を東京文化財研究所にて実施することにした。その準備実験に供する試料として、キトラ古墳壁画片の深さ方向の構造を模したテストピースの作成を行った。

本研究で調査対象とする3つの壁画片の漆喰と泥の厚さは均一ではなく、計測を行った結果、漆喰の厚さは1～2 mm、泥の厚さは1～4 mmのばらつきがあることがわかった。また、

\*奈良文化財研究所

確認されている十二支像の観察結果から、図像は主に水銀由来の顔料を用いて描かれかかっていると想定した。以上の観察及び計測結果を鑑みて、以下のようにテストピースの作成を行った。

厚さが1 mmと2 mmの2通りの漆喰の板(10 cm × 10 cm)を作成した。漆喰の表面には7通りの濃度の水銀朱(金開堂社製)を帯状に彩色し、その上に厚さが1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mmの整形した4本の帯状の泥を水銀朱の帯に直行するように設置した。この時に使用した泥は、発掘調査時にキトラ古墳の石室周辺から採取された泥である。そして保管されている壁画片の現状を再現するために、レーヨン紙および和紙で表面と裏面の養生を行った。このようにして作成した2枚のテストピースを図1に示す。

## 2-2. X線の照射条件の検討

図像の有無をX線画像上のコントラストの差として認識するためには、漆喰層でのX線透過率と顔料層でのX線透過率との差が大きい方が望ましい。欧州原子核研究機構(CERN)がインターネット上で公開しているデータベース<sup>6)</sup>を活用し、厚さ1 mmの漆喰と厚さ100  $\mu\text{m}$ の



図1 作成したテストピース

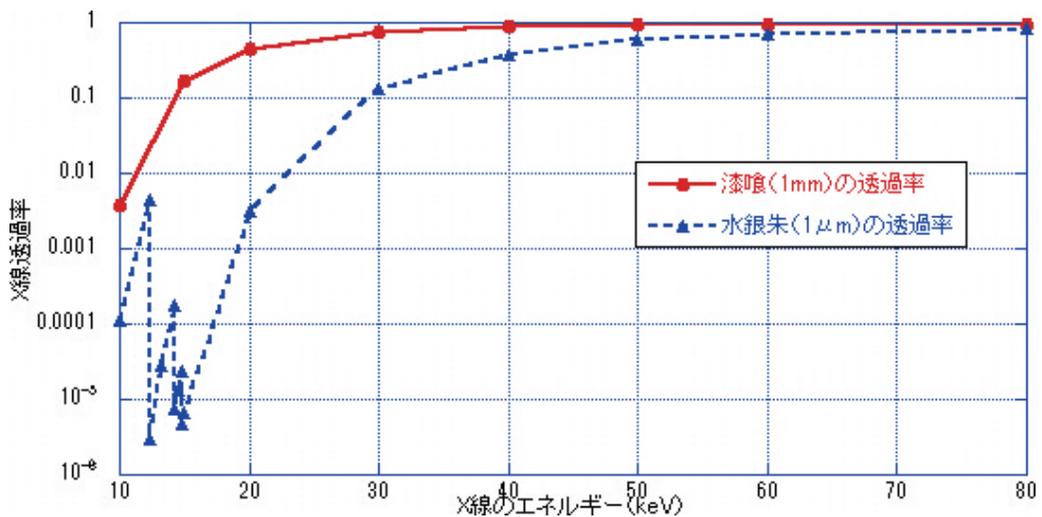


図2 漆喰(1 mm)と水銀朱(100  $\mu\text{m}$ )についてのX線透過率の計算結果

水銀朱についてのX線透過率を計算し、X線のエネルギーの関数として示したのが図2である。X線のエネルギーが40 keVより小さければ、漆喰層と顔料層のX線透過率の差が大きくなり、約15~20 keVでそれらの差が最も大きくなると予測した。この結果から、X線照射装置の管電圧を40 kV以下に設定し、2-1で作成したテストピースのX線透過撮影を行うことにした。

### 2-3. 実験結果

X線を照射する時の管電圧は40 kV以下に設定すること、キトラ古墳壁画の調査は高松塚古墳壁画仮設修理施設で行うことの2点を考慮し、X線照射装置はソフテックス社製の可搬型X線管球「K-II」を使用することにした。管電流と被写体までの距離をそれぞれ3 mAと130 cmと固定し、以下に示すように、管電圧と照射時間の検討を行った。

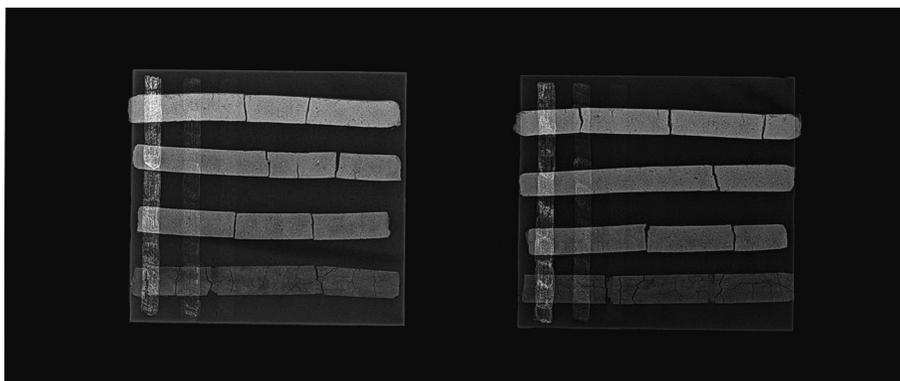
X線透過画像を得るために、富士フィルム社製のイメージングプレート(43.0 cm × 35.4 cm)及び現像装置(Dynamix HR2システム)を用いた<sup>7)</sup>。現像を行う際のX線画像のピクセルサイズは100 μm × 100 μmとした。

X線照射装置が安定した照射をすることができる管電圧の下限値が25 kVであることから、管電圧を25 kV、40 kVと設定して、テストピースのX線透過撮影を行った。X線の照射時間を30秒として、管電圧が25 kVと40 kVとして撮影をして得られたX線透過画像をそれぞれ図3(a)と(b)に示す。テストピースは図2と同じように配置した。画像中で色が白いほどX線の透過率が低いことを意味する。いずれの条件においても、1番目と2番目に濃い顔料の線は泥の下でも白色の像として確認することができたが、3番目に濃い顔料の線は泥の厚さが4 mmになると認識が困難になった。漆喰の厚さが1 mmの方が2 mmよりも泥の下の顔料の線が鮮明に写し出された。図3(a)と(b)を比較すると、泥の下の顔料の線の見えやすさは漆喰の厚さ、泥の厚さ、顔料の濃さに依存するため、優劣を付けるのが容易ではなかった。

X線の照射時間によるX線透過画像への影響を調べるために、照射時間を3分として得られたX線透過画像を図4に示す。図3と比較した結果、照射時間を30秒から3分としたことによるコントラストの改善を確認することができなかった。

以上のテストピースを使った実験結果を踏まえて、キトラ古墳壁画片の調査の時のX線照射時間は30秒とし、調査対象とした3つの壁画片のそれぞれに対して管電圧を25 kV、40 kVとした場合のX線透過撮影を実施することにした。

(a)



(b)

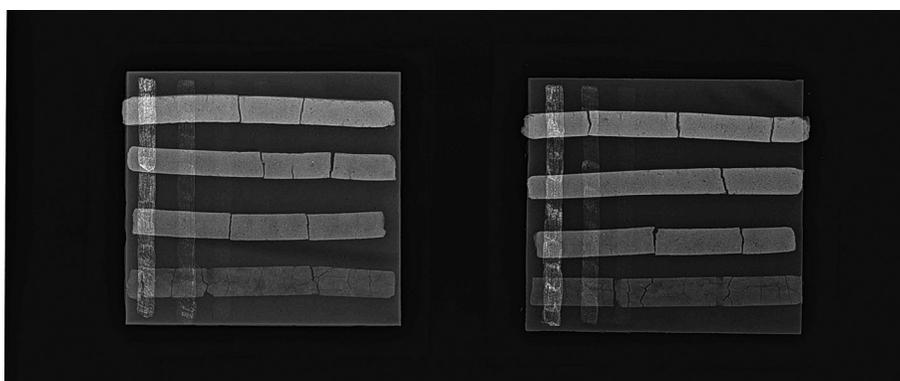


図3 管電圧を(a)25 kV と(b)40 kV とした時のテストピースのX線透過画像 (X線の照射時間 = 30秒)

### 3. キトラ古墳壁画の調査

#### 3-1. 調査結果

テストピースを用いた東京文化財研究所での予備実験(2-3)で使用したX線照射装置とイメージングプレート及び現像装置を持ち込んで、2018年11月14日に高松塚古墳壁画仮設修理施設にて、辰・巳・申の図像が残存している可能性のある3つの壁画片のX線透過撮影による調査を実施した。組立式可搬型治具にX線照射装置を取り付けて、東京文化財研究所での予備実験の時と同様に、壁画片までの照射距離が130 cmになるように調整した(図5)。

各壁画片について、それぞれ管電圧を25 kVと40 kVの2通りでX線透過撮影を行ったが、管電圧が25 kVの時の方がX線透過画像のコントラストが若干高かったので、ここでは管電圧が25 kVとして撮影をしたX線透過画像を示す。

図6, 7, 8はそれぞれ辰, 巳, 申像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。それぞれの可視画像中の赤丸は、十二支像が描かれていると推測される箇所である。

図6(c)中の辰が描かれていると推測される箇所には、何らかの図像が描かれているように見える。ただし、何かが写っているように見える箇所は黒く写っている、すなわちX線の透過率が高いので、物質量が少ないことを意味する。これはテストピースを用いた予備実験で得られ

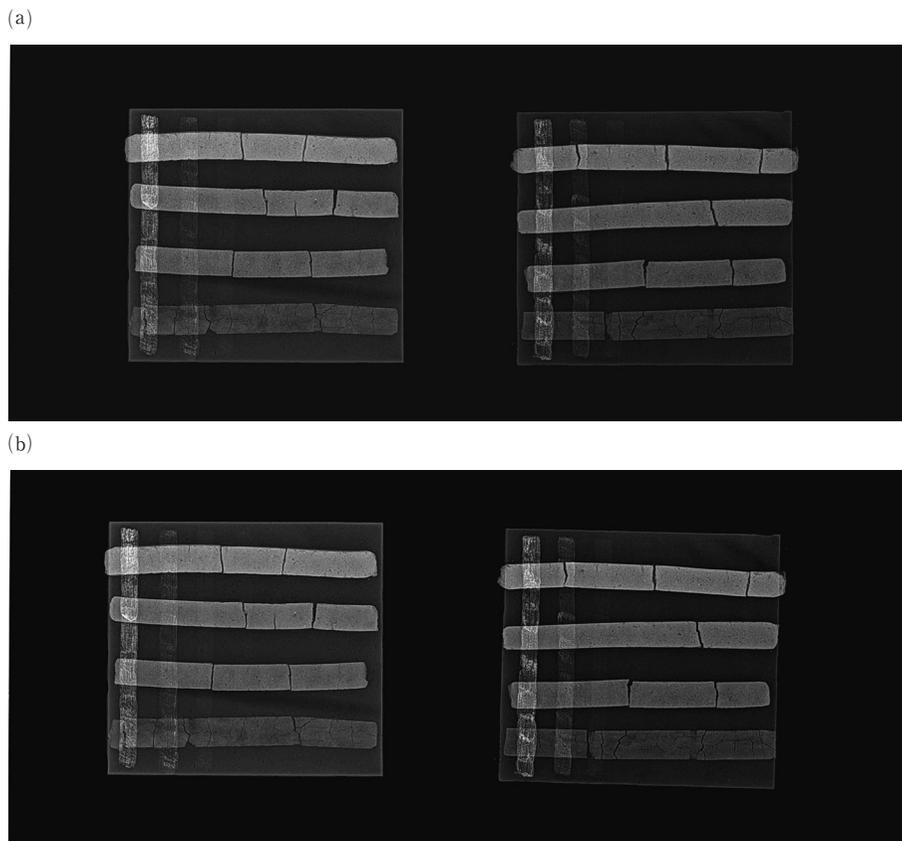


図4 管電圧を(a)25 kV と(b)40 kV とした時のテストピースのX線透過画像 (X線の照射時間 = 3分)

たX線透過画像では、顔料が塗られている箇所が白く写っていたことと対照的な結果である。このようなX線透過画像が得られた理由については、次節で考察する。

已と申に関しては、それぞれの描かれていると推測される箇所に一定の広がりを持って、図7(c)では相対的に白く図8(c)では相対的に黒く写っている領域が想定されたが、図6(b)に見られたほどには明瞭ではなかった。

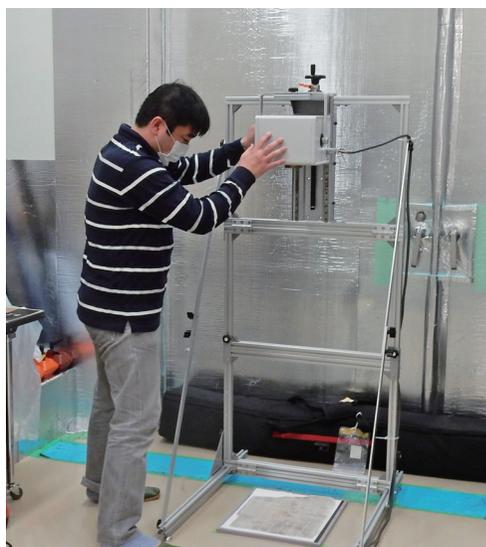


図5 キトラ古墳壁画の調査風景

(a)



(b)



(c)

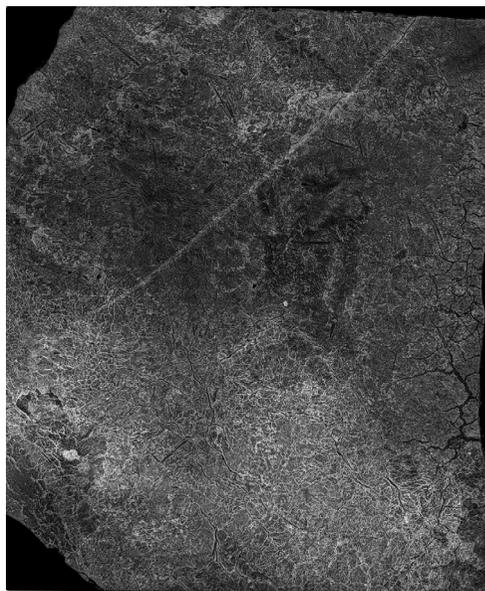
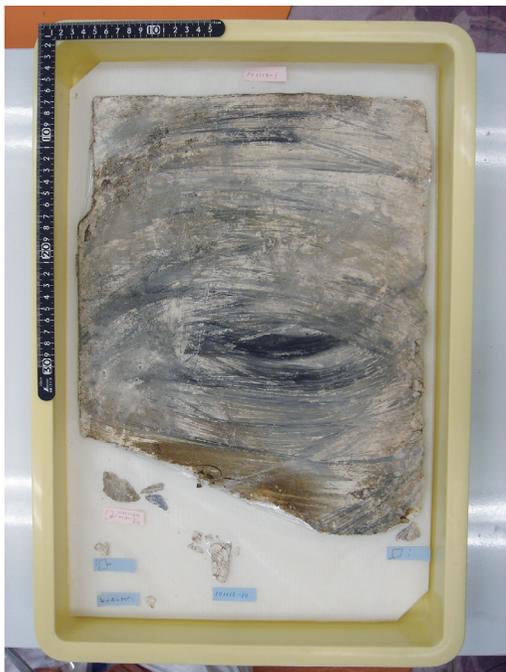


図6 辰が残存している可能性のある壁画片の(a)全体像(裏側, スケール入り), (b)X線透過撮影を行った部分の可視画像, (c)X線透過画像

(a)



(b)



(c)

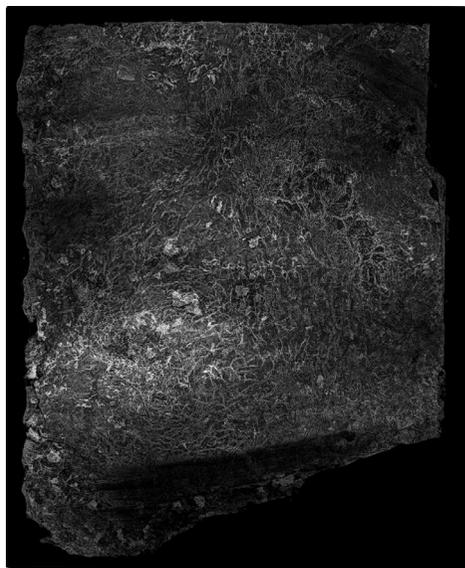
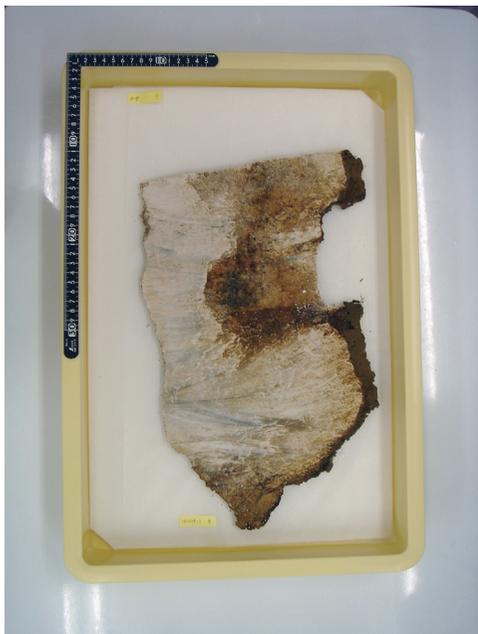


図7 已が残存している可能性のある壁画片の(a)全体像(裏側, スケール入り), (b)X線透過撮影を行った部分の可視画像, (c)X線透過画像

(a)



(b)



(c)

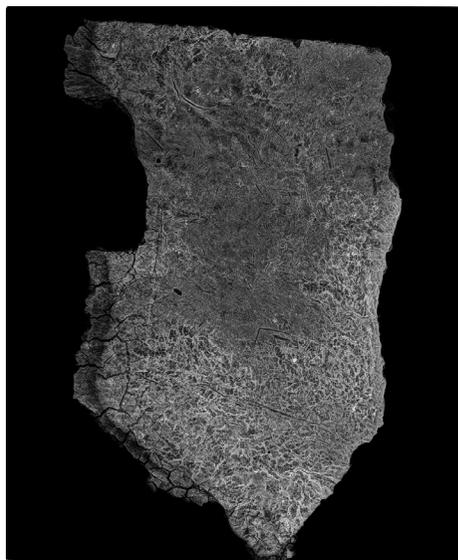


図8 中が残存している可能性のある壁画片の(a)全体像(裏側, スケール入り), (b)X線透過撮影を行った部分の可視画像, (c)X線透過画像

### 3-2. 考察

テストピースのX線透過画像（図3，図4）では、顔料の線が濃い箇所ではX線の透過率が低くなり、顔料が塗られていない箇所と比較すると相対的に白く写っていることから、泥の下の顔料の線の存在をX線透過画像上で認識することができた。また、2010年に予備調査として、泥に転写された午像のX線透過撮影を行ったところ<sup>5)</sup>、図9(b)に示すように、赤色顔料が存在している箇所はX線透過画像中で白く写っている。

一方、図6(c)に見られるように、辰が描かれていると推測される箇所には、何らかの図像が描かれているように見えるが、テストピースや午像の結果とは対照的に、周辺よりも相対的に黒く写っていた。2010年の予備調査では漆喰上に確認できる戌像のX線透過撮影も行ったが<sup>5)</sup>、図10(b)に見られるように、赤色顔料が確認できる箇所はX線透過画像中で黒く写っている。

X線の透過率が高い（低い）ということは、その部分の密度（ $\text{g}/\text{cm}^3$ ）と厚さ（ $\text{cm}$ ）の積で表される面密度（ $\text{g}/\text{cm}^2$ ）が小さい（大きい）ことを意味する。図10(b)のようなX線透過画像となるためには、彩色が施された部分の面密度が少なくなった、または彩色が施されていない部分の面密度が多くなった、のいずれかまたは両方が起こったと考えられる。後者の現象が起こる可能性として、彩色が塗られていない漆喰表面におけるカルサイトの再結晶化が挙げられる<sup>8)</sup>。キトラ古墳の石室内の相対湿度は長期間にわたってほぼ100%に近い高湿度が保たれていたため、彩色が施されていない表面で水分に溶解した漆喰を構成するカルシウムと二酸化炭素によってカルサイトが再結晶化したことにより面密度が大きくなった、というのが考えられるメカニズムである。このような仮説の妥当性を評価するために、カルサイトの再結晶でX線透過画像中の該当箇所が相対的に白くなるのかの検証が必要であることがわかった。

辰（図6(c)）と比較すると、申が描かれていると推測される箇所（図8(c)）では明瞭には図像を確認することができなかった。仮に図像が泥の下に存在するとしたら、相対的に黒く写っている原因のひとつとして、辰（図6(c)）と同様に、図像周辺の漆喰表面におけるカルサイトの再結晶化が考えられる。

巳が描かれていると推測される箇所（図7(c)）でも、辰（図6(c)）ほどには明瞭に図像を確認することができなかった。仮に図像が泥の下に存在するとしたら、相対的に白く写っている原因として、図像周辺の漆喰表面におけるカルサイトの再結晶化が起こらなかった、または起こったとしても彩色材料の面密度を越えなかったなどが挙げられる。さらに、図像が明瞭に見えなかった理由として、彩色材料の種類や濃さの違いなども考えられる。

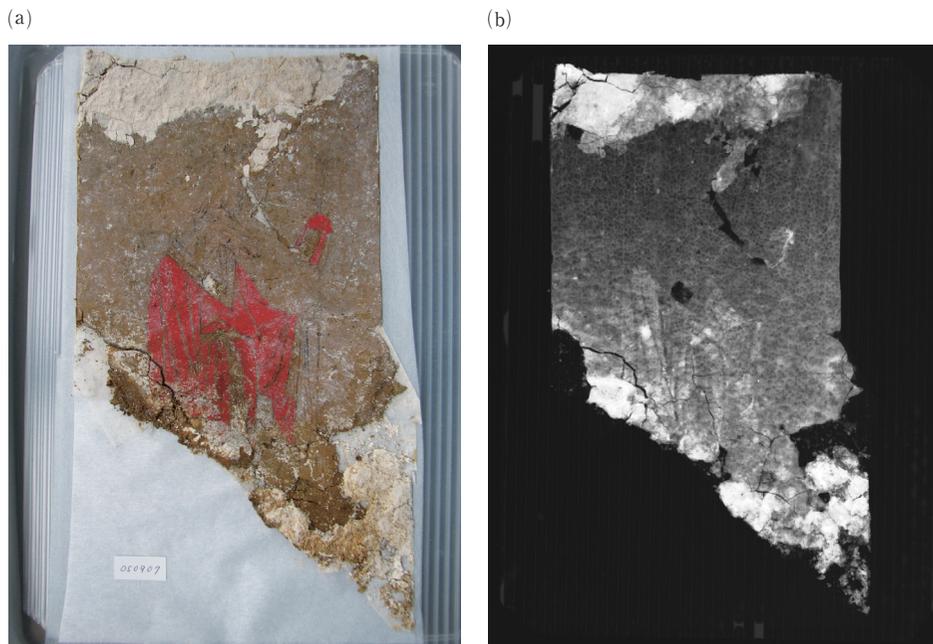


図9 泥に転写された午像の(a)可視画像と(b)X線透過画像(参考文献5)より)

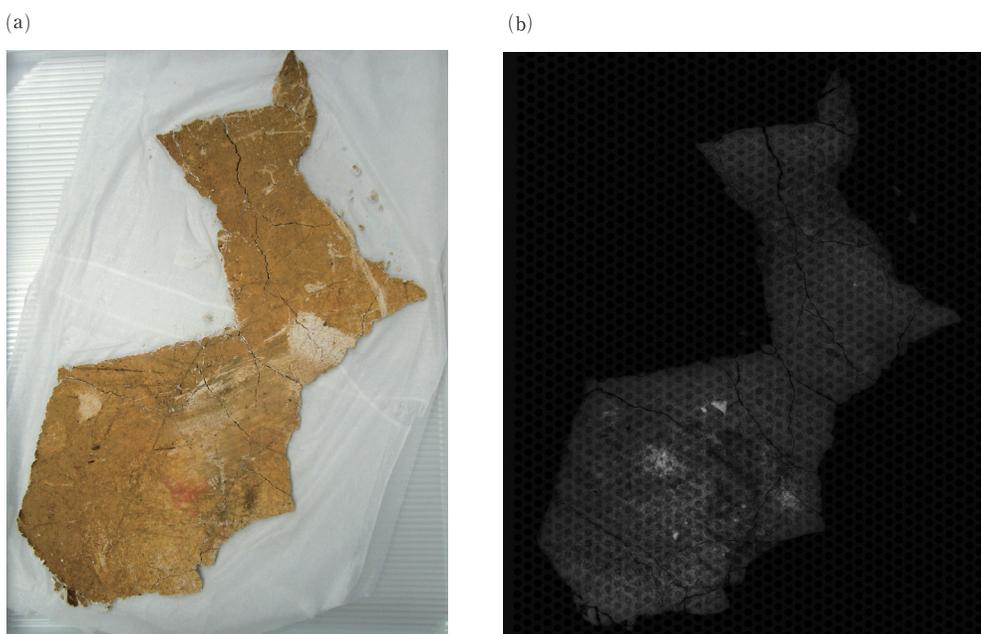


図10 漆喰上で確認できる戌像の(a)可視画像と(b)X線透過画像(参考文献5)より)

## 4. まとめ

キトラ古墳壁画の十二支像のうち、辰・巳・申に関しては、該当する箇所が泥に覆われており、像が残存している可能性を残しているが存在は確認できていない。現時点でキトラ古墳壁画の再構築に含まれていないこれらの3つの壁画片の修復方法の方針を検討する上で、図像の存在を確認することは重要である。そこで筆者らは、X線透過撮影による調査を実施した。

X線透過撮影による調査を安全かつ効率よく実施するために、事前にキトラ古墳壁画を模したテストピースを作成し、東京文化財研究所にてX線の照射条件の検討を行った。

X線透過撮影の結果、辰に関しては、何らかの図像が描かれているように見えるX線透過画像が得られたが、テストピースの結果とは対照的に、周辺よりも相対的に黒く写っていた。このような結果となった原因として、彩色が施されていない箇所の漆喰表面におけるカルサイトの再結晶化が挙げられる。このような仮説の妥当性を評価するために、カルサイトの再結晶がX線透過画像に及ぼす影響を検証する必要があることがわかった。

## 謝辞

高松塚古墳壁画仮設修理施設にてX線透過撮影による調査を実施した際には、国宝装こう師連盟・亀井亮子氏、奈良文化財研究所・辻本与志一氏、東京文化財研究所・古田嶋智子氏にご協力いただきました。調査に際しては、文化庁・宇田川滋正氏、森井順之氏からご指導いただきました。また、図6～図10に用いた壁画片の可視画像は国宝修理装こう師連盟からご提供いただきました。ここに記して感謝致します。

## 参考文献

- 1) 古墳壁画保存活用検討会（第1回）資料7、文化庁（2008）
- 2) 古墳壁画保存活用検討会（第2回）資料8、文化庁（2008）
- 3) 文化庁文化財第一課：新指定の文化財—美術工芸品一、月刊文化財、669、4-43（2019）
- 4) 古墳壁画保存活用検討会（第2回）資料7、文化庁（2008）
- 5) 古墳壁画の保存活用に関する検討会（第25回）資料3-3、文化庁（2019）
- 6) XCOM: Photon Cross Sections Database, <https://www.nist.gov/pml/xcom-photon-cross-sections-database>（2019年11月20日参照）
- 7) 犬塚将英、早川泰弘：X線透過撮影による伊豆長八の作品の調査、保存科学、55、115-124（2016）
- 8) 高松塚古墳壁画劣化原因調査検討会（第12回）資料2-3、文化庁（2009）

キーワード：キトラ古墳壁画（wall paintings of Kitora Tumulus）；十二支像（twelve zodiac signs）；X線透過撮影（X-ray radiography）；テストピース（test piece）；漆喰（plaster）；泥（mud）

## Investigation of Wall Paintings of Kitora Tumulus by X-ray Radiography

INUZUKA Masahide, HAYAKAWA Noriko, OBA Shinoko,  
HAYAKAWA Yasuhiro and KOHDZUMA Yohsei\*

Among the twelve zodiac signs in the wall paintings of Kitora Tumulus, the signs of dragon, snake and monkey have not been discovered because they are covered with mud. In order to decide the treatments for restoration, it is important to identify the existence of those signs. Therefore, the authors conducted investigation by X-ray radiography.

In order to conduct the investigation of the wall paintings safely and efficiently, the conditions for X-ray radiography, for example the tube voltage, were determined in advance by checking the X-ray images of a test piece which reproduces the structure of the wall paintings.

As a result of the investigation by X-ray radiography, signs of snake and monkey could not be recognized in X-ray images. On the other hand, an image appeared at the location where the dragon was expected to be drawn. However, the obtained contrast of the X-ray image was opposite to expectation; the transmittance of X-ray around the image looked lower than that on the image. One of the possible reasons is the recrystallization of calcite on the surface of the plaster where no image was drawn.

---

\*Nara National Research Institute for Cultural Properties