

携帯型蛍光 X 線分析法による高松塚古墳壁画漆喰に関する調査

東京文化財研究所 早川泰弘

奈良文化財研究所 降幡順子

1. 目的

今回の調査は石室解体後の 2008 年から、壁画表面の主要元素について携帯型蛍光 X 線分析装置を用いて実施した。特に、壁画表面では鉛の検出強度が場所により異なることが報告されているため、その面的な分布状況を明確にすることなどを主な目的とし、劣化原因の調査および今後の修理に有用な情報を得るためにおこなっている。

2. これまでの研究報告

高松塚古墳の漆喰に関する調査は 1972 年に出土漆喰片(剥落片)を用いた分析が実施され、その結果高いカルシウム含有率と、0.21-0.44%のマグネシウム、および 0.16-0.37%の鉛を含むことが報告されている。漆喰から鉛が検出された例としては 5 世紀に築造された高句麗の双楹塚古墳が挙げられる。2002-2003 年の東京文化財研究所が実施した石室内部でおこなわれた顔料調査では、下地の漆喰層の上に鉛を含んだ材料による彩色のための下地層の存在を推測している。また日像・月像真下から青龍・白虎にかけて帯状に鉛濃度の高い部分があることが報告されている。さらに、黒カビ発生箇所から得られた鉛の検出量は、その周囲の漆喰部分に比べて少ないと報告されている。また 2008 年には、目地漆喰の分析が実施され、目地漆喰の鉛含有率が 0.002wt% 以下であり壁画面を構成している漆喰とは異なることが報告されている。



写真1: 分析フレーム

3. 分析方法

石材を囲うフレームと三方向にスライド可能なアームが取り付けられている分析用フレームを作製し、この分析用フレームへ機材を取り付けて測定をおこなった(写真 1,2)。装置は携帯型蛍光 X 線分析装置 Niton XLt-500 を使用した(写真 3)。本装置は重量が約 1.7kg と小型・軽量で、さらにフレームの外から操作可能であるため安全に測定が実施できる。また測定箇所を移動する際は、常に壁面との距離を監視し、安全を確認している。



写真2: 分析風景

測定条件は、管電圧 40kV、電流 Auto(約 10 μ A)、測定時間 60 秒/点、照射径 10mm ϕ (試料間距離 7mm時)である。測定箇所は、壁画面を 13 \times 18 点にメッシュ分割し(図1)、5cm 又は 10cm 間隔で測定をおこない、さらに必要とする箇所を追加した。測定点数は白虎 272 点、青龍 250 点、玄武 335 点、西壁男子群像 264 点、天井石 249 点である。分析箇所の詳細な表面状態は、分析用フレームに取り付けた CCD カメラで記録し確認をおこなっている。(写真 4)。



写真3: 分析装置

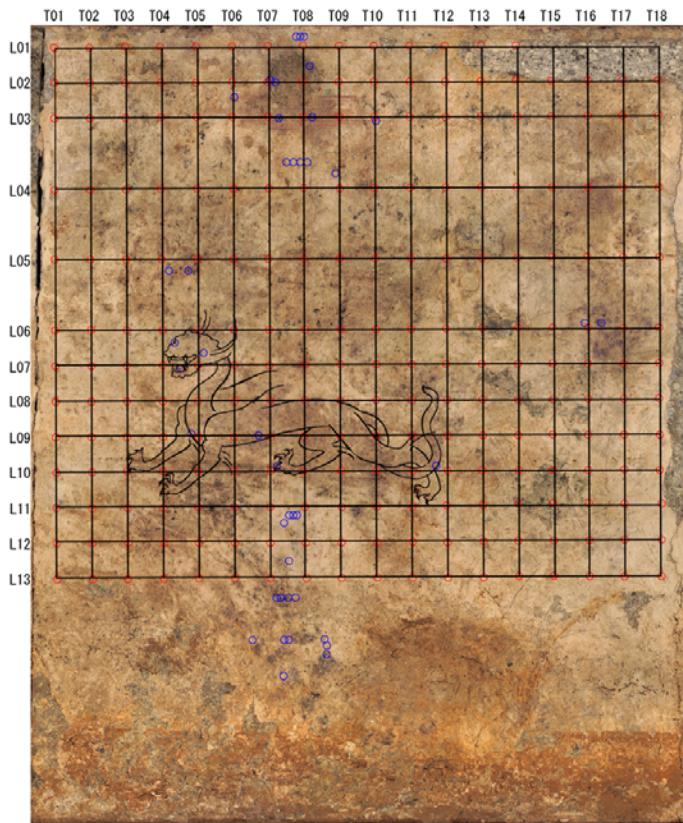
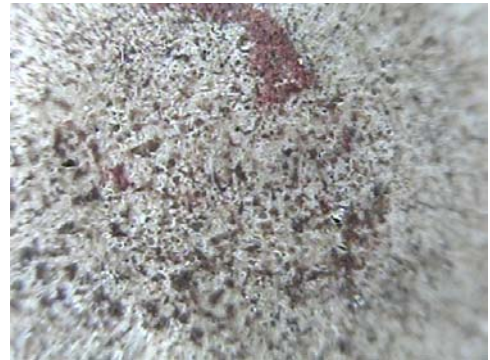


図 1:メッシュ分割の一例 (西壁石2、白虎の位置はイラストにて示す) 白虎の場合、平行方向13、垂直方向18に分割し、その交点を測定している(○印は測定範囲)。



白虎 舌赤色部



白虎 L7-T5

写真4:測定位置の記録

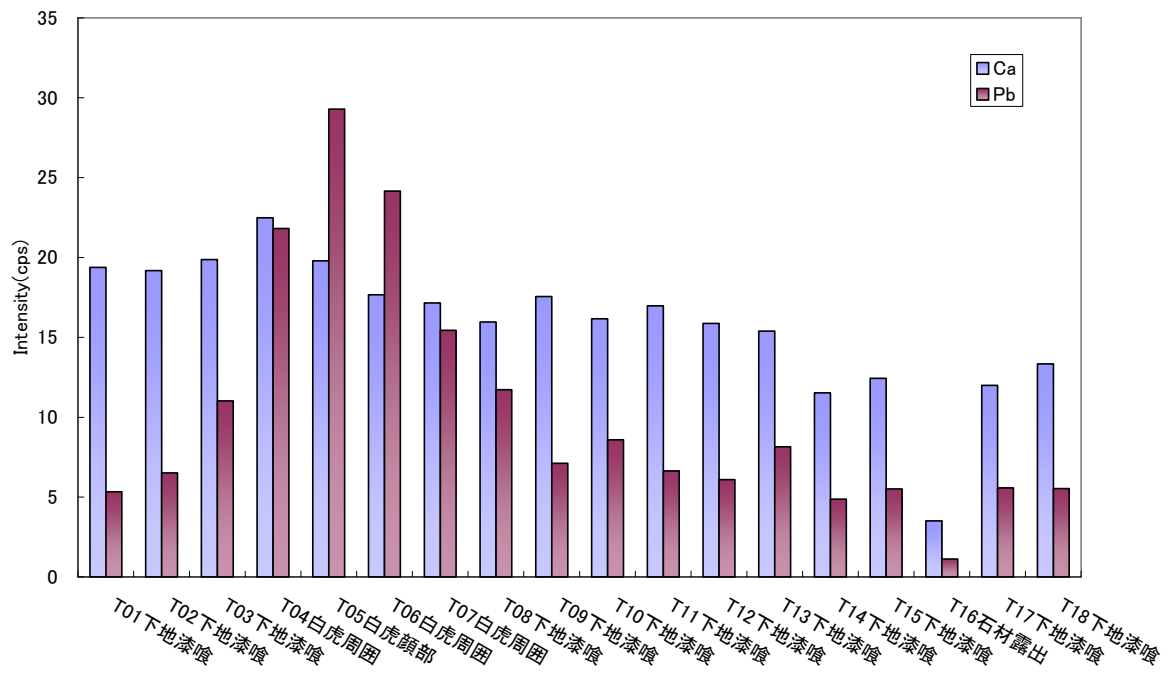


図 2:測定結果一例 (白虎 L7、T1-T18)

4.測定から得られるデータ評価

測定から得られるX線強度は、壁面の凹凸や石材自体の傾きにより、条件を一定に保てないためそのままでは比較できない。そこで事前にX線強度の装置特性を調べ、装置と試料間距離が変化した場合のX線強度の増減を計算し有意差を判断する指標とした。

実験に使用した試料は、塩基性炭酸鉛(Ⅱ)[水白鉛鉱 hydrocerussite ; $Pb_3(CO_3)_2(OH)_2$]粉末を各0.5wt%、1.0wt%、3.0wt%、5.0wt%、10wt%含有する炭酸カルシウム粉末のペレットを用いておこなった。装置と試料の距離を0mm、2mm、5mm、7mm、9mm、11mm、13mm、15mm、17.5mm、20mmに変化させて、各10回測定をおこないそれらの強度を比較した。

この結果から、測定距離が2mm違うと測定値の統計誤差以上に鉛検出強度が変化することがわかったため、2mm以上測定距離が変動した場合には補正が必要であるといえる。しかし、実際の測定では、漆喰の表面状態が写真5に示すように一定ではないため、表面状態の違いによる測定値の変動のほうが、測定距離の変動による影響よりも大きいと判断できる。従って、本報告では、得られたデータに関して特別な補正をすることなく、得られたデータをそのまま提示することとした。しかし、下記の点はデータの比較検討の際に十分留意した。

塩基性炭酸鉛0.5wt%含有する試料の結果を図3に示す。この結果から、壁画表面が平坦で、且つある程度の深さまで均質であった場合、測定距離が7mmの時、本装置での鉛検出強度は約6-8cpsであることがわかる(95%信頼区間)。実際の測定距離は約6mmから15mmの間であり、ほとんどの測定距離は約7mm~10mmの間であった。したがって、表面状態が均質でしかも健全であるならば、鉛検出強度が約10cpsという値は下地漆喰に由来するものと考えることができ、それ以上の検出強度が得られた場合は別の要因、例えば表面に塗布された鉛を含む物質の影響など、を考慮しつつ、得られたデータの解析をおこなっている。



亀裂



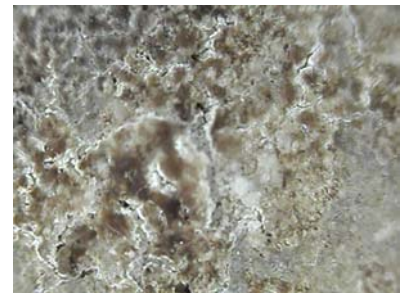
表層部分の欠損



流入土による被覆



石材の露出



ゲル状物質による被覆

写真5:漆喰表面の状態(測定時における CCD カメラによる記録画像)

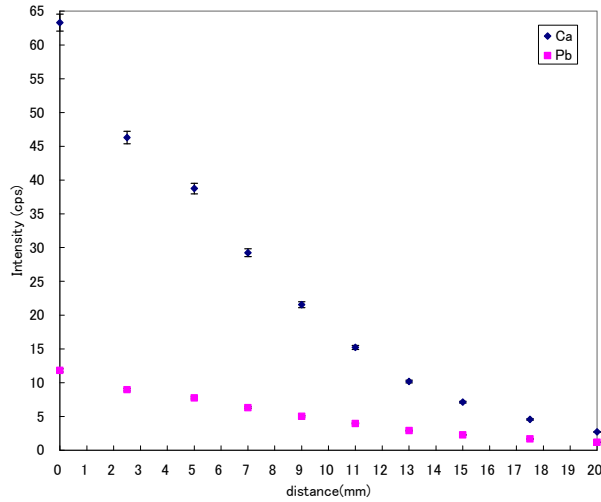


図 3: 測定距離と強度 (0.5wt% $Pb_3(CO_3)_2(OH)_2$)

5.分析結果

現在測定が終了している石材は東壁石 1、東壁石 2、西壁石 2、北壁石、天井石 2 である。以下に各石から得られた Pb 検出量の測定結果を示すが、今回は面的な分布をわかりやすく表示するために、等高線図による表示をおこなった。このため、測定ポイント間のデータは補完された値として表示されている。

①西壁石 2(白虎・月像)

- 壁面全面から Ca と Pb は検出される。図像のない部分の Ca 検出量と Pb 検出量の間には正の相関が認められ(図 4)漆喰中に Pb 成分が混ぜられて壁面を構成していることがわかる。
- 図像部分については、図像のない部分に比べて Pb 検出量が明らかに大きい(図 5)。白虎の図像を取り囲むように Pb 検出量の多い領域が広がり、さらにその内側には(図像のない部分においても)さらに Pb 検出量の多い部分が認められる。
- 白虎の図像を取り囲むように広がる Pb 検出量の多い領域においては、Ca 検出量と Pb 検出量との間に明瞭な相関が見られなくなる。

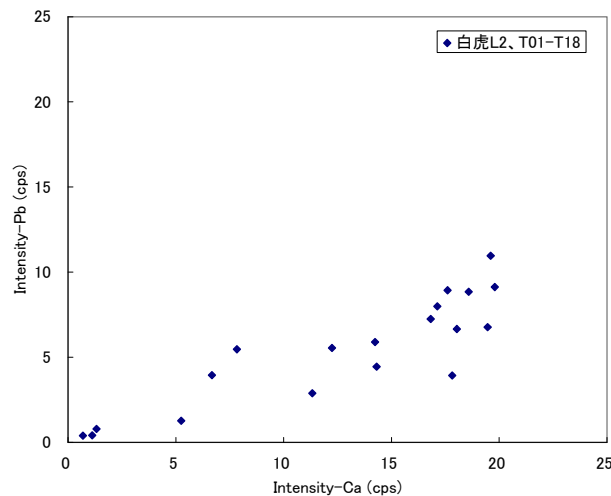


図 4: 白虎 L2 における Ca と Pb 検出強度の相関

- ・月像から真下の方向に、Pb 検出量の多い帯状の部分が存在している。Pb 検出量は、すぐ横に比べて 5-10 倍以上の箇所もある(図 6)。月像の上方にも Pb 検出量が高い部分は伸長しており、白虎の図像をつき抜け、石の下方にまで延びている。
- ・Ca と Pb 以外の検出元素としては、舌や爪の赤色部分から Hg が、山岳表現の青色や緑色部分から Cu が検出されている程度である。
- ・表面状態は、白虎下部および前脚より南側、上部南端が比較的良好であるといえる。
- ・白虎頭部および前脚、右・左後脚の鉛検出強度が大きく、これは図像の残存状態に良い箇所と一致する。

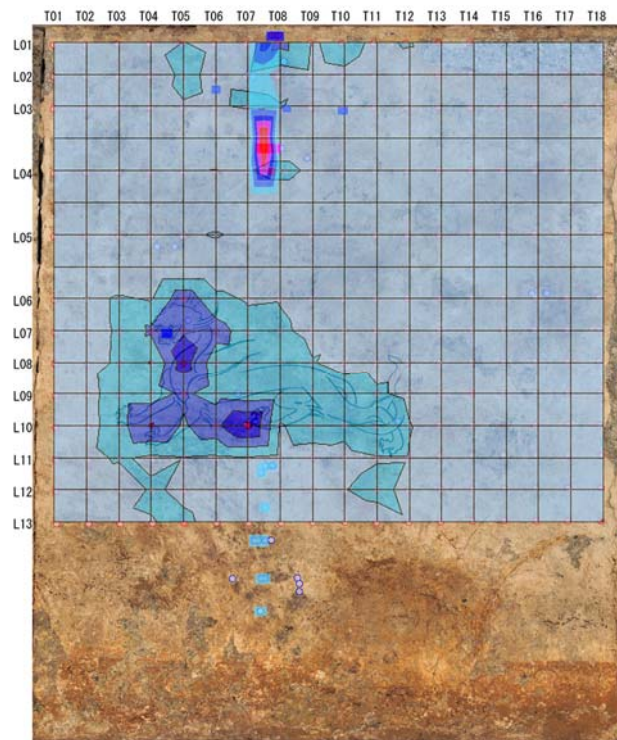


図 5: 白虎測定結果

(白虎の位置はイラストにて示す)

minor major

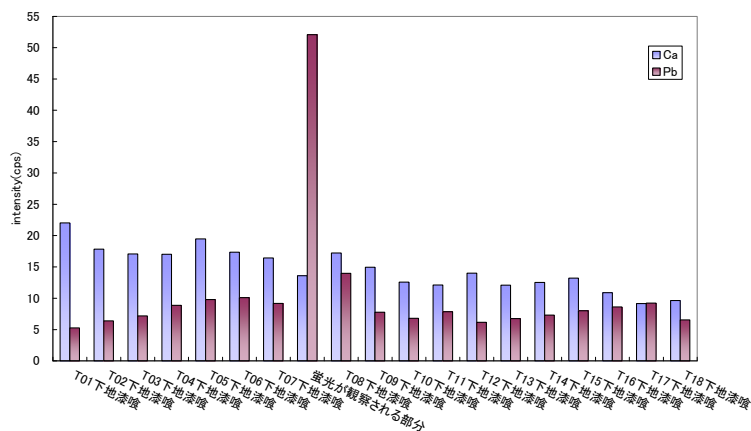


図 6: 白虎測定結果 (L4、T01-T18、蛍光が観察できる部分を含む)

②東壁石 2(青龍・日像)

- 西壁石 2 (白虎) 同様、壁面全面から Ca と Pb が検出され、図像のない部分の Ca 検出量と Pb 検出量の間には正の相関が認められる。
- Ca および Pb 検出量として、西壁石 2 (白虎) からの検出量と大きな相違はないと判断できる。漆喰層の塗り方や厚み、あるいは含有 Pb 濃度に大きな差はないと判断できる。
- 図像部分については、図像のない部分に比べて Pb 検出量が明らかに大きい (図 7)。青龍の図像を取り囲むように Pb 検出量の多い領域が広がり、さらにその内側で図像が描かれている部分では、さらに Pb 検出量の多い部分が存在している。

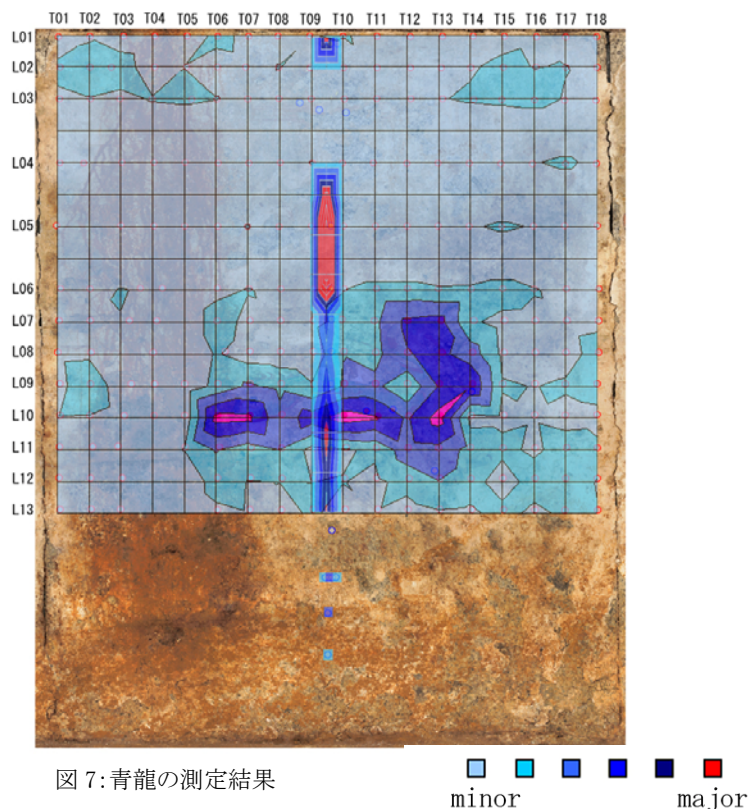


図 7: 青龍の測定結果

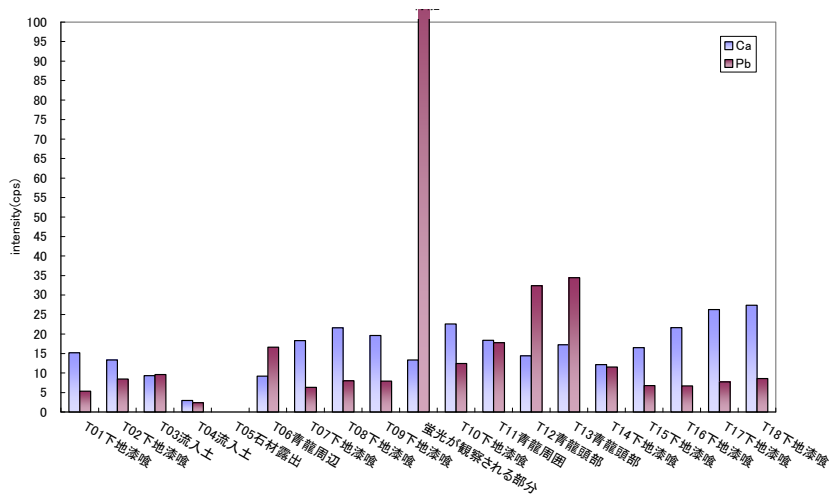
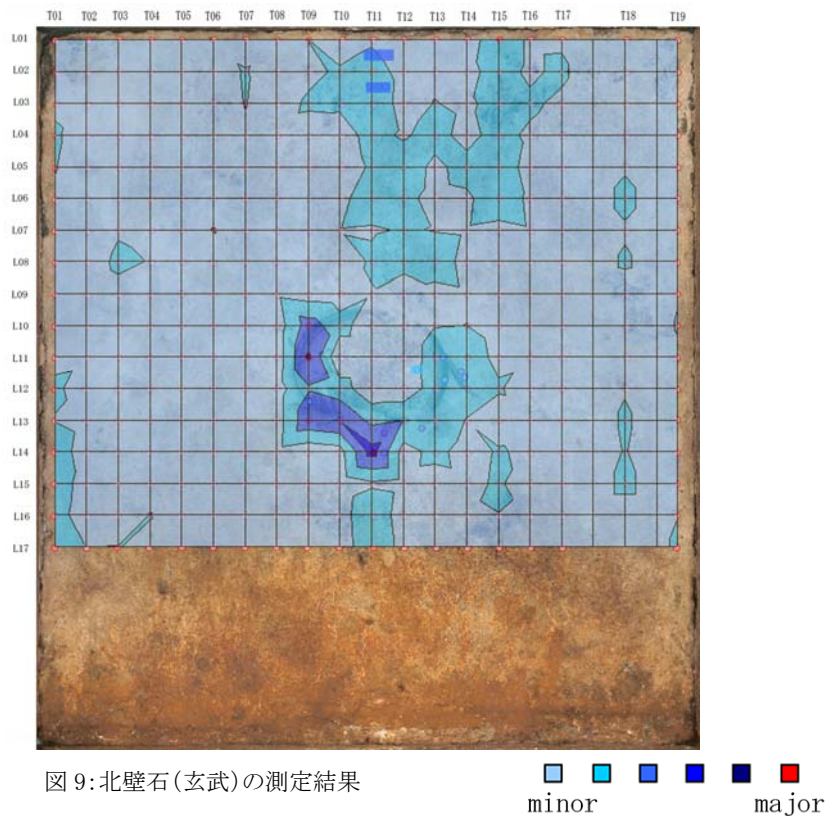


図 8: 青龍の測定結果(L7、T01-T18、蛍光が観察できる部分を含む)

- 青龍の図像を取り囲むように広がる Pb 検出量の多い領域においては、Ca 検出量と Pb 検出量との間に明瞭な相関が見られない。
- 日像から真下の方向に、Pb 検出量の多い帯状の部分が存在している。日像の上方から青龍の下方にまで Pb 検出量が高い部分が伸長している。Pb 検出量が、すぐ横に比べて 10 倍近い箇所もある (図 8)。
- Ca と Pb 以外の検出元素としては、青龍の青・緑色部分から Cu が、赤色部分から Hg が大量に検出されている。

③北壁石(玄武)

- 壁面全面から Ca と Pb が検出され、図像のない部分の Ca 検出量と Pb 検出量の間には正の相関が認められる。
- Ca および Pb 検出量は、西壁石 2 (白虎)、東壁石 2 (青龍) と大きな相違はない。
- 図像部分については、図像のない部分に比べて Pb 検出量が多い。玄武の図像を取り囲むように Pb 検出量の多い領域が広がっているが (図 9)、白虎、青龍に比べると図像輪郭に近い部分だけである。玄武の図像内側 (蛇の内側) においても、Pb 検出量が多い。これらの領域で、Ca 検出量と Pb 検出量との間に明瞭な相関が認められない。
- 中央上方に、Pb 検出量の多い部分が見つかったが、西壁石 2 (白虎)、東壁石 2 (青龍) のように明らかに縦に伸びる帯状部分は存在していない。
- Ca と Pb 以外の検出元素としては、玄武の緑色部分から Cu が、赤色部分から Hg が大量に検出されている。



④西壁石 1(男子群像)

- 壁面全面から Ca と Pb が検出され、図像のない部分の Ca 検出量と Pb 検出量の間には正の相関が認められる。Ca および Pb 検出量は、他の壁面と大きな相違はない。
- 図像部分については、図像のない部分に比べて Pb 検出量が多い(図 10)。人物像を取り囲むように Pb 検出量の多い領域が広がっているが、白虎、青龍に比べて Pb 検出量が低い傾向にある。
- Ca と Pb 以外の検出元素としては、衣の緑色部分から Cu が検出された。肩に担ぐ長袋や帯の赤色部分、緑服男子の顔部分からは極微量の Hg が検出され、緑帯人物(一番北の男子)がもつ袋からは Hg が顕著に検出される。
- 黄色部分からは相対的に Pb 検出量が多い傾向がある。
- 南端(図左側)に鉛検出強度の強い範囲が存在している。

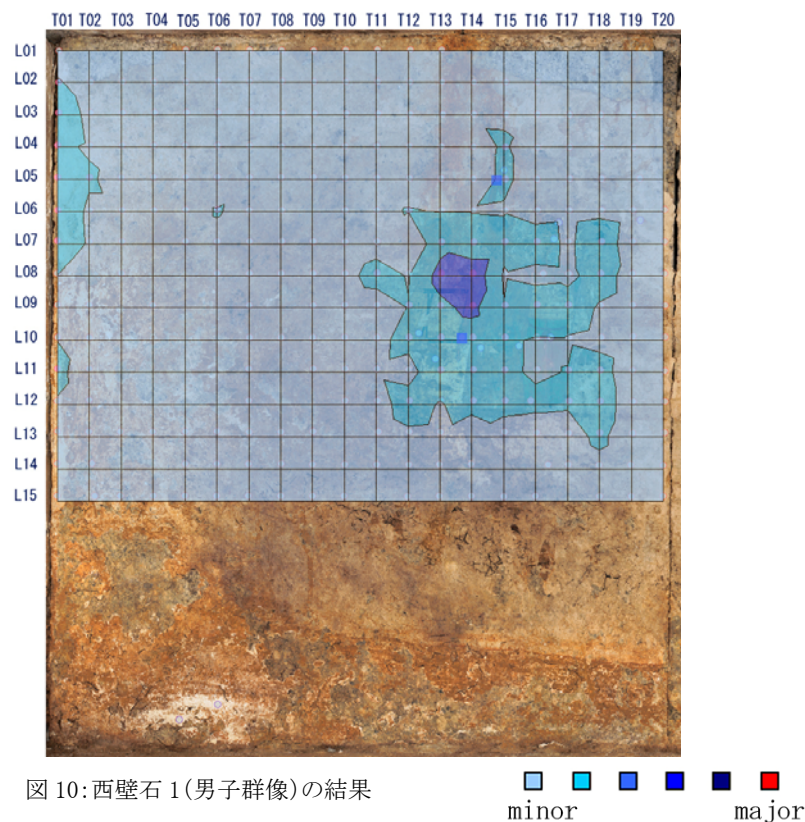


図 10: 西壁石 1(男子群像)の結果

⑤天井石2の結果

- 天井石2全面から Ca と Pb が検出され、図像のない部分の Ca 検出量と Pb 検出量の間には正の相関が認められる。Ca および Pb 検出量は、西壁石 2(白虎)、東壁石 2(青龍)、北壁石(玄武)と大きな相違はないと考えられる。
- 星宿部分については、星宿全体を取り囲むように Pb 検出量が多い領域が広がっている。ただし、L01 側(東側)の星宿では、Pb 検出量が多い領域はあまり観察されなかった。
- 西側の Pb 検出量が相対的に多いが、これは測定距離の影響を含んでいると考えられる。
- 星宿部分からは大量の Au が、また朱線部分からは Hg が顕著に検出された。星宿の金箔下層に赤色が見える部分からは Hg も同時に検出される。

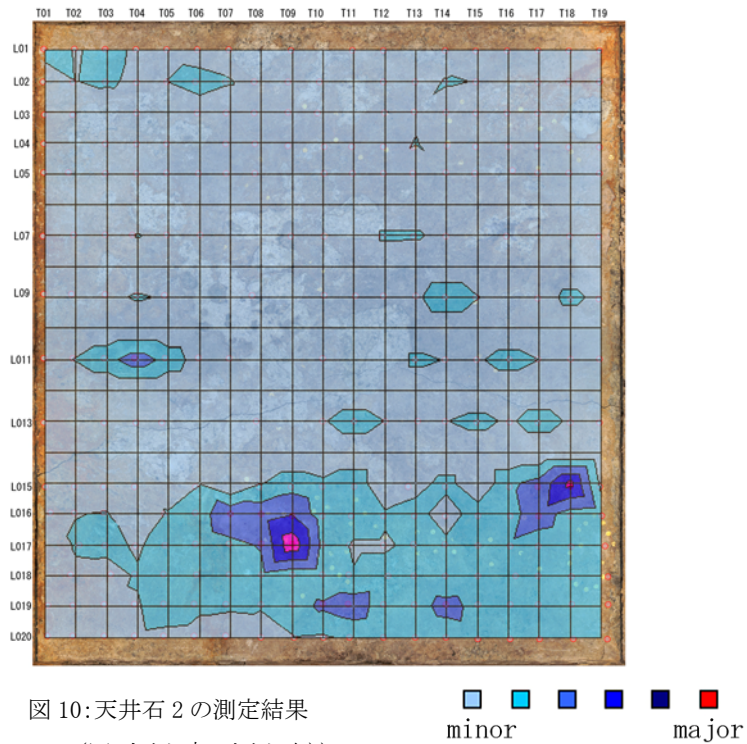
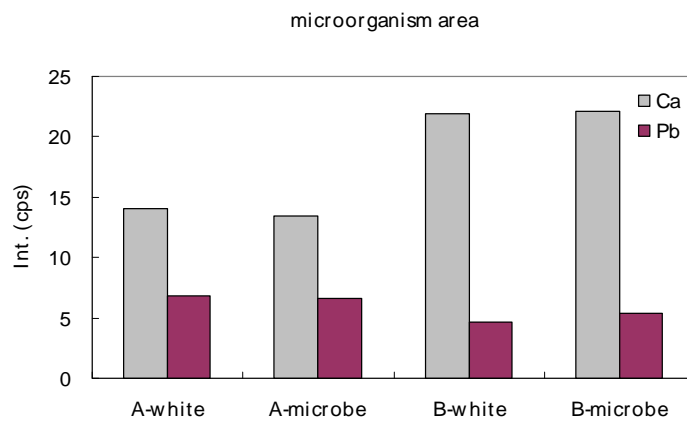
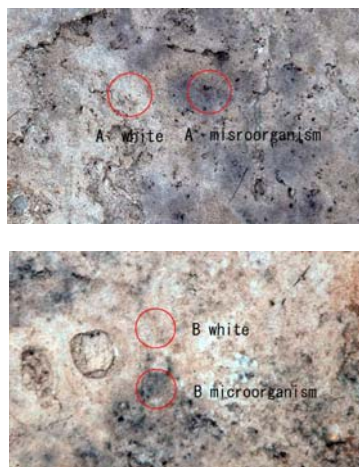


図 10:天井石 2 の測定結果
(図;左側・南、上側・東))

⑥カビ部分(西壁石 2)

西壁石 2 において、カビの痕跡と考えられる黒色(暗色)部分と、その近傍の黒色ではない部分について比較のため測定をおこなった。その結果、カビと鉛検出量については今回の調査では特に関連性を見つけないことはできなかった。



6. 考察

すべての壁面の測定が終了していないため石室全体の特徴を把握するには至らないが、鉛は検出量の差はあるものの壁面の表面全体から検出され、特に凶像とその周囲は検出量が多いことがわかった。凶像の無い部分からも鉛を検出することから、漆喰表面全体に鉛を含む下地層を塗布した可能性や漆喰に微量の鉛を含む物質を予め混入した可能性などが考えられる。凶像周囲が特に高いことは、この部分に鉛を含む物質が厚く塗布されていたため良好に残存した可能性や、微生物劣化との関連などが考えられる。日・月像の下に垂下痕跡のような白色帯状の蛍光反応が確認されている部分から顕著に鉛が検出されることがわかったが、鉛を多く含むこの物質については、残念ながら非破壊・非接触分析による調査では、いまだ特定できていない。今後さらに調査をおこなう必要があると考えている。

参考文献: 壁画古墳高松塚(1972)、古墳壁画調査報告書(1973)、保存科学 No43(2004)