

高松塚古墳壁画の材料調査

1 はじめに

高松塚古墳の石室解体後、文化庁は古墳壁画の劣化原因を解明するため、関連する様々な分野からの調査を実施した。材料学的な調査は、奈良文化財研究所と東京文化財研究所の合同チームによって、個々の壁画について観察調査と分析調査（非破壊法）が実施された。

いっぽう、目地漆喰と下地漆喰（嶋倉資料）については、偏光顕微鏡観察、化学分析、元素分布調査など詳細な調査がおこなわれたので、本報告ではそれらに関する概要をまとめた。なお、これらの詳細については、文化庁から発行される報告書を参照されたい。

2 偏光顕微鏡観察

試料とした漆喰片は、超低粘性エポキシ樹脂（150Pa/s）によって固化した後、薄片試料を作成した。以下、偏光顕微鏡観察の結果について記載する。目地漆喰の基質は、方解石（Calcite）の微晶集合体で、基質には同質起源と推定される垂円状、微小礫が認められる。気泡ではなく空隙が多量に存在することが特徴で、墮円状ないし扁平に伸びたものなど形状はさまざま、空隙には方解石や霰石（Aragonite）が再結晶して充填しているものや、繊維状を呈するスサ状物質らしき痕跡も観察された。空隙の大きさは、平均的には0.5mmから0.7mm幅程度のもが多いようであるが、かなり不均質である。これらの空隙の正体は、もともとはひび割れ防止のために添加されたスサが腐朽したことにより生じたと考えられる。なかには、スサが化石化して石灰化しているものが肉眼でも観

察されることがある（図41）。空隙部は、モード（modal composition）で見積もると、ほぼ50%前後に達する。

下地漆喰は、目地漆喰と同様にその基質は微細な方解石の集合体で、ごく稀に0.3mm前後の垂円状の石英、長石が観察された。石英は波動消光を示し、長石はAb成分の多い曹長石でソーシュライト化していた。なお、下地漆喰（2.5-3.0mm）の断面構造からは、層構造が認められないことから、何回も重ねて漆喰が塗られたのではなく、一気に塗布されたことを示していた。いっぽう、表層には二次的に形成された方解石がモザイクな糖状組織（Saccharoidal）を呈して薄層を形成していることが明らかになった（図42）。下地漆喰の基質部石灰（方解石集合体）とは、まったく異なる組織である。なお、この二次的な方解石は、壁画表面のファインスコープによる観察や、近接撮影などで発見されている乳白色半透明な皮殻状物質と同質のものと考えられる。

下地漆喰は目地漆喰と同じように空隙が多数存在していることが特徴的である。その形状は多様で一定せず、多くは虫食い状を呈し、一部では扁平にして連続的に伸びる空隙も認められた。断面中央部付近の空隙は、二次的に形成したサッカロイダルなカルサイト（アラゴナイトも存在する？）が充填しており、表層付近では、空隙の周辺部だけに結晶が成長しているなどの特徴が見られた。つまり、表層は連続する空隙が多く存在しており、きわめて陥没しやすい状態にあることが明確になった。これらの空隙は、目地漆喰と同様にスサが充填されていたと考えられる（目地漆喰のスサと下地漆喰のスサは異なっていたと推定される）。つまり、本来、ひび割れ防止等の目的で添加されていたスサが消失することにより、漆喰は急激に劣化をはじめ、多くのひび割れが発生して、さらに剥落へと進んだものと考えられる。目地漆喰のスサと同様



図41 化石化したスサ状物質（写真の横幅は5mm）

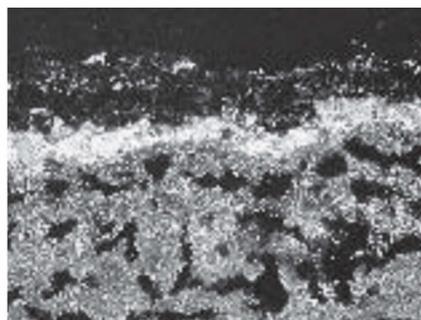
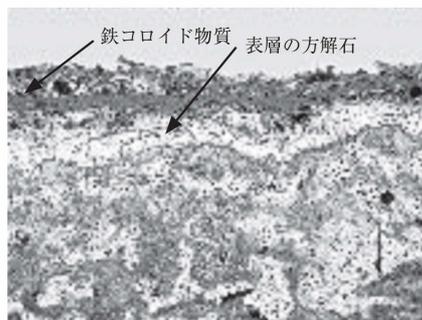


図42 漆喰の表層を層状に覆う二次的に生じた方解石。（左：-ニコル、右：+ニコル、横長さ：0.7mm）

に、化石化して方解石（一部はアラゴナイト？）に置き換わって形状は残存しているものの、本来のスサの種類を同定することは不可能である。なお、下地漆喰の表層最上部には、高い屈折率を示す物質は観察できなかった。つまり、鉛の炭酸塩化合物（Cerussite, Hydrocerussit, など）はこの試料の表層には存在していないことを示した。

3 化学分析

化学分析にあたっては、漆喰の表面から内部に染み込んだ鉄分や腐朽した樹木の根、黴などを実体顕微鏡下で取り除いて分析試料とした。目地漆喰は14試料、下地漆喰は2試料に加えて、他地域出土の漆喰も参考とした。

測定は、ICP発光分光分析、原子吸光分光分析、イオンクロマト法により、主成分と微量成分の合計19元素と、1,000℃ - 1時間で灰化したときの灼熱減量を求めた。

測定の結果、目地漆喰は、酸化カルシウム(CaO)が多く、14試料の平均値と標準偏差は $51.5 \pm 3.0\%$ に達し、灼熱減量(Ig. Loss)は $44.0 \pm 0.6\%$ であった。これら以外の成分は、二酸化ケイ素(SiO₂)が0.3-4.3%とバラツキが大きく、酸化アルミニウム(Al₂O₃)、酸化ナトリウム(Na₂O)などの含有量は1%以下である。ただし、二酸化ケイ素の含有量は4試料のみが大きく、外来物による汚染の可能性が高い。燐酸(P₂O₅)は、0.1%前後を示し、キトラ古墳の目地漆喰と近似する。なお、酸化鉛(PbO)についても、キトラ古墳の目地漆喰と同様に0.01%以下であり、(ほとんどは<0.001%)酸化バリウム(BaO)などと同じように微量にともなう不純物と考えられる。

下地漆喰は、酸化カルシウム含有量が50.2%、灼熱減量は43.9%で主成分においては、目地漆喰と同質と考えられる。ただし、目地漆喰に比べて二酸化ケイ素はやや少なく、酸化マグネシウム(MgO)は高い値を示した(高槻市の阿武山古墳の漆喰に近い値)。最も顕著なのは酸化鉛の含有量が全く異なり、下地漆喰には、従来の調査であきらかにされているように、ほぼ0.3%におよぶ高濃度の鉛が検出されているので、目地漆喰とは異なる。

表1 化学分析結果(平均値のみで標準偏差を省略、酸化物重量百分率)

	CaO	MgO	PbO	Na ₂ O	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Ig.Loss
目地漆喰	51.5	0.34	0.005	0.259	1.23	0.38	44.0
下地漆喰	50.2	0.91	0.34	0.60	0.47	0.56	43.9



図43 下地漆喰のBSE画像(左)および鉛分布測定図(中央・右)

4 EPMAによる元素分布調査

下地漆喰に含有する酸化鉛の分布状態をあきらかにするため元素マッピング分析を実施した。その結果、鉛は比較的分散して存在しているが、部分的には10-50μm前後の粒状ないし微小塊として密集していることがあきらかになった(図43)。下地漆喰原料が作成される時に、石灰原料に鉛化合物(顔料)が混合されたと仮定すると、部分的に塊になることは十分に考えられるが、予想以上に均一に分散していた。いっぽう、どのような鉛化合物が形成されているのか推定するため、燐や塩素などの元素分布測定を実施して検討したが、これらの元素間に関与はなく、酸化物や水酸化物として存在している可能性が推定された。もちろん、長期間にわたって高湿度下に存在していたので、変質していることは十分に考えられる。

5 まとめ

偏光顕微鏡観察の結果、漆喰表面に方解石の層が形成されていることがあきらかになった。その原因は、水分が大きく関与して漆喰の成分である炭酸カルシウムを溶解して、表面で方解石として再結晶したと考えられる。つまり、石灰岩地帯の洞窟によく見かける鍾乳石の形成過程と同じである。つまり、高松塚古墳のように湿潤な環境下に漆喰壁画が存在すること自体が漆喰の劣化を著しく進めていたのである。しかし、いっぽうでは、表層で二次的な結晶が成長して、天然のフレスコが形成され、それが保護層として働いていたとも言える。顔料の剥落が防止されたことも事実である。この保護層が欠落している部分では、顔料の剥落が著しいという観察結果が得られている。しかし、湿潤な環境下では漆喰が溶解し続けて、漆喰の多孔質化がより進んで、剥落が顕著に進み、修復不可能となり、やがて壁画は消失する可能性も理解できる。この湿潤な環境下において、漆喰の溶解と保護層の形成という両者の矛盾するなかで、長期間にわたって壁画が存在していた。(肥塚隆保・高妻洋成・降幡順子)