

## 〔報告〕ハギア・ソフィア大聖堂外壁の劣化とその要因に関する調査

著者	佐々木 淑美, 吉田 直人, 小椋 大輔, 石崎 武志, 日高 健一郎
雑誌名	保存科学
号	52
ページ	167-180
発行年	2013-03-26
URL	<a href="http://id.nii.ac.jp/1440/00003855/">http://id.nii.ac.jp/1440/00003855/</a>



## 〔報告〕 ハギア・ソフィア大聖堂外壁の劣化と その要因に関する調査

佐々木 淑美\*・吉田 直人・小椋 大輔\*<sup>2</sup>・石崎 武志・日高 健一郎\*<sup>3</sup>

### 1. はじめに

筆者らは、2010年から継続してハギア・ソフィア大聖堂（現アヤソフィア博物館、以下「ハギア・ソフィア」と略記）の建築内外における劣化と環境要因についての調査研究を実施してきた。本年度も8月～9月に現地調査を実施し、ハギア・ソフィアに対して、3年間にわたる環境モニタリングの結果や内壁における劣化状況の記録と析出塩の分析結果から、今後の保存方策への提案をおこなった。なかでも、2008年に漆喰が除去され躯体が露出した状態にある西側外壁の再被覆について、適切な時期と手法による作業を提案できたことは、3年間におよぶ調査研究から得られた大きな成果であると言える。再被覆の必要性については、小椋がシミュレーションからその効果について報告している通りである<sup>1)</sup>。

そこで本稿では、2013年夏に再び漆喰で覆われることとなった西側外壁の現状の記録および考察と、漆喰の除去がもたらした内外壁への影響の評価をおこない、今後の保存方策への基礎的検討として報告する。

### 2. 西側外壁の漆喰除去の経緯と現況

キリスト教会堂として建立されたハギア・ソフィアは、オスマン・トルコ軍による侵略後(1453年)、イスラム教のモスクへと転用された。外壁は、オスマン・トルコ治世下のある時期に漆喰で覆われ、黄色と赤色の縞模様塗装された。アタトゥルク・ケマルによるトルコ革命後(1934年)、アヤソフィアモスクは世俗化され国営博物館として一般に公開されている。共和国時代の外壁は、薄黄色に塗装されていた。

1982年～1988年の修復において、外壁の漆喰に対する処置が講じられ、その表面は赤灰色に塗装された。しかし、この外壁の色を不適切とする主張を発端に、2006年～2007年に外壁の塗り替えについての論争が起きた（2006年12月2日付 Milliyet 紙、2007年3月4日付 Milliyet 紙）。議論が続く中、2006年11月にはすでに、試験的に北西バットレスの一部で漆喰が除去され、創建当初の姿とされる、漆喰で覆われていない壁面（レンガとモルタル（レンガの粉末、レンガの欠片、川の砂、石灰の混合）による組積造の躯体）が露出した。最終的に、このビザンティン時代の外壁に戻すことが最良という判断に至り、2008年から西側外壁の漆喰の除去作業が開始された（図1）。

しかし、除去後2年が経過した2010年に、小規模ではあるが屋根からモルタル片やレンガ片が落下してきたという報告を受けようになり、翌年から博物館当局は屋根からの落下物の記録を開始した。また、専門家会議を開き、西側外壁以外での漆喰除去作業は完全に中止されることが確定した。この時はまだ、外壁の風化を注視するのみで、外壁を再び覆うことで問題は解決すると考えられていた。しかし、2011年6月には第2コーニス北西エクセドラの内壁面から、最大で15cm×30cmのモルタル片が大量に地上階へと落下したことで、外壁面だけでなく

\*日本学術振興会特別研究員 PD      \*<sup>2</sup>京都大学大学院工学研究科建築学専攻

\*<sup>3</sup>筑波大学大学院人間総合科学研究科世界文化遺産学専攻



図1 西側外壁の漆喰除去前と除去後（左：2006年11月，右：2011年9月）



図2 漆喰除去作業の様子と除去後の状態（南西エクセドラ，左：2008年2月，右：2012年9月）

内壁面表層の剝離・剝落にこれまで以上の強い関心と危機感を持つこととなった。

筆者らは、2011年、2012年の2年間にわたり実施した調査の結果から、西側外壁の漆喰除去の影響で壁内部での保水や窓や構造的継ぎ目からの建築内部への水の浸入が引き起こされ、それに伴って内壁北西エクセドラでの塩の析出が急速に進行し、壁材の剝離・剝落を助長したとの見解を博物館側に提示した。この事態を重く受け止めた博物館当局は、外壁への漆喰の再被覆ならびに内壁面の修復を決定したが、その作業時期について十分な検討をすることなく、2012年8月に外壁および内壁の同時修復に向けた作業準備を始めた。これに対して筆者らは、雨が降る冬季での作業を避け、冬の間壁内部に浸透・保水された水分がある程度蒸発した後、つまり夏季（7月頃）からの作業が適切であるとする提案書を提出した。また、その中で、外壁および内壁の同時修復では、処置後に内壁の剝離・剝落が再び生じる可能性が高いことから、外壁の修復後、養生期間を置いてから内壁を修復することが望ましいとの意見も示した。これらの提案が受け入れられて、2013年夏に外壁の作業から開始されることが決まった。

こうした経緯から、筆者らは、西側外壁が再び漆喰で覆われる以前の外壁の状況をつぶさに記録し、劣化状況とその要因を考察することで、外壁の漆喰除去という歴史的な修復作業の評価を客観的立場からおこなう必要があると考えている。そして、適切な時期および手法によって外壁を覆わなければ、内壁での剝離・剝落ならびに塩の析出がさらに進行する可能性もあることから、2013年の作業開始まで、基礎的検討を継続して進めていく必要がある。

### 3. 外壁の劣化

#### 3-1. 接合モルタルの削れ

西側外壁は、隣接するアヤ・イリニ教会の外壁がそうであるように、創建当初つまりビザンティン時代の、レンガとモルタルが交互に積み重なった姿に戻されている。レンガとレンガの間を接合するモルタル（以後「接合モルタル」と略記）は、石灰とレンガの粉末、細骨材として粒径平均約4mm（最大10mm，最小0.1mm）のレンガ片，川砂が混合された一般的なビザンティン・モルタル<sup>2)</sup>で、外表面が調整された状態（レンガ表面と同レベルまで充填され，表面がコテで整形されている状態）であった。しかし，大部分で，接合モルタルは削られてレンガ表面よりも凹んでいる。

この削れの要因として，次の2つの可能性が挙げられる。まず1つ目は，漆喰を除去した際に偶発的にもたらされた人的過失による損傷である。図2左は2008年の除去作業時の様子であるが，当初から接合モルタルがある程度削られていたことがわかる。ただし，除去作業時の過失による損傷は，これ以降の削れの進行のきっかけにすぎないと筆者は推測した。むしろ2つ目の可能性であるモルタルの特性および周辺環境に起因する風化の進行が，大きく影響しているのではないだろうか。そこで，モルタルの間隙率を測定するとともに削れの程度を簡易的に計測し，それらの分布から，削れに対するモルタルの特性および周辺環境からの影響を考察する。



図3 西側外壁の削れ程度の計測場所

### 3-1-1. 間隙率の測定結果と削れ程度の計測結果

まず、漆喰が除去された場所の接合モルタルの間隙率を、水銀圧入式ポロシメーター (Quantachrome 社製 PORE MASTER PM60GT-16) を使用して計測した。細孔直径測定範囲は、 $0.0035\sim 1000\mu\text{m}$  である。細孔分布測定用試料は、48時間の炉乾燥をおこない絶対乾燥状態にし、約0.5gの試料をセルに入れて測定した。なお、水銀の表面張力は $480\text{ergs/cm}^2$ 、接触角は140度とした。

その結果、南西では8~9% (一部4%) であるのに対して、北西では11~12% (一部8%) とより高いことがわかった<sup>3)</sup>。南北で施工時期が異なるという記録はなく、同様の接合モルタルが使用されたと考えられることから、この南北での漆喰の間隙率の違いは、外的影響でモルタルが変質したことによるものと推察される。これについては、今後さらに物性値の測定および分析をおこないたい。

次に、筆者は、2012年8月~9月の現地調査の際に、電子キャリパー (シンワ社製 Digital Caliper Model19978, 1/10mm まで計測可能) を使用して、レンガ表面を基準、つまり0mmとし、どの程度接合モルタルが削られて凹んでいるのかを計測した。図3に示した西側外壁の北 (No.1および10) から南 (No.9および16) にかけての計16箇所は、ハギア・ソフィアの構造が複雑であるため図からは判別し難いが、建築内部での地上から3階目にあたる第二コーニスレベルと、その上部構造である西半ドームレベルとでは、3mほどの高さの違いがあることを勘案していただきたい。各所において、壁面下辺から約1mの高さで計測したランダムな30点の計測結果の平均値および中央値、最小値、最大値は以下の通りである (表1)。

接合モルタルは、平均21.8mm (全測定ポイントの平均値) レンガ表面から削れて凹んでいることがわかる。最も削れの程度が小さい場所でも、レンガ表面から5.7mm削られており (西半ドーム西部)、接合モルタルの削れは西側外壁全体においてみられることをこの結果は示している。また、最も削れがひどい場所では、57.6mmもレンガ表面から凹んでおり (北西エクセド

表1 西側外壁の接合モルタルの削れ計測結果

第二コーニス	北西バットレス			北西エクセドラ			西	南西エクセドラ	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
平均値 (mm)	20.55	23.15	20.16	31.59	17.81	15.70	17.25	20.82	29.02
中央値 (mm)	19.65	20.05	20.05	30.10	17.05	15.30	17.30	21.80	26.55
最小値 (mm)	13.10	15.00	6.30	19.00	9.40	9.50	8.70	10.10	15.70
最大値 (mm)	37.10	47.70	32.90	57.60	30.70	23.10	25.00	31.80	53.90

西半ドーム	北西			西	南西		
	10	11	12	13	14	15	16
平均値 (mm)	15.48	22.97	28.13	14.55	19.69	18.90	18.09
中央値 (mm)	14.00	21.25	27.40	15.10	18.40	17.65	16.10
最小値 (mm)	7.30	9.60	13.80	5.70	12.20	10.70	6.40
最大値 (mm)	25.60	38.40	46.40	40.00	37.50	42.60	46.20

(第二コーニス：2012年8月14日時点、西半ドーム：2012年9月27日時点)

ラ)、付近ではモルタルだけでなくレンガも削られ、崩れ始めている。

削れの程度が大きい順に並び変えると、第二コーニスレベルではNo.4 > 9 > 2 > 1 > 8 > 3 > 5 > 7 > 6で、最も削れの程度が大きいのは、北西エクセドラ脇 (No.4) で、南西エクセドラ脇 (No.9) がこれに続く。西半ドームレベルでは、No.12 > 11 > 14 > 15 > 16 > 10 > 13の順で削れの程度が大きく、特に北西部での削れが著しい。

場所毎に見ていくと、北西バットレスで計測したNo.1～3の削れ値は、どれも比較的大きく、同様に西半ドームレベルにおいても北西部で計測したNo.10～12の削れ値が西部および南西部に比べて大きい。両レベルとも、西側の計測点 (No.7ならびにNo.13) の削れ値が他の場所に比べて小さいことがわかる。

### 3-1-2. 削れ程度の分布とその要因

以上の計測結果を、平面図上に示すと図4の通り、削れ程度の分布がみとめられる。

まず、第二コーニスレベルで最も削れが著しいのは、先にも述べた通り、北西エクセドラ脇 (No.4) で、続いて南西エクセドラ脇 (No.9) である。この2箇所は、ちょうど構造的にエクセドラと側壁面およびバットレスが接続する部分で、周囲よりも比較的深く入り込んだ構造になっており、風雨は強く吹き当たることはない。しかし、上部構造 (西半ドーム) から屋根を伝って雨水が下に流れ落ちる経路の中でも特に流れが集中する場所である。この場所に植被が著しいことから、常時雨水が流下し壁内部での保水状態が継続していることは明らかである。したがって、流下する雨水によって削られた可能性が高い。

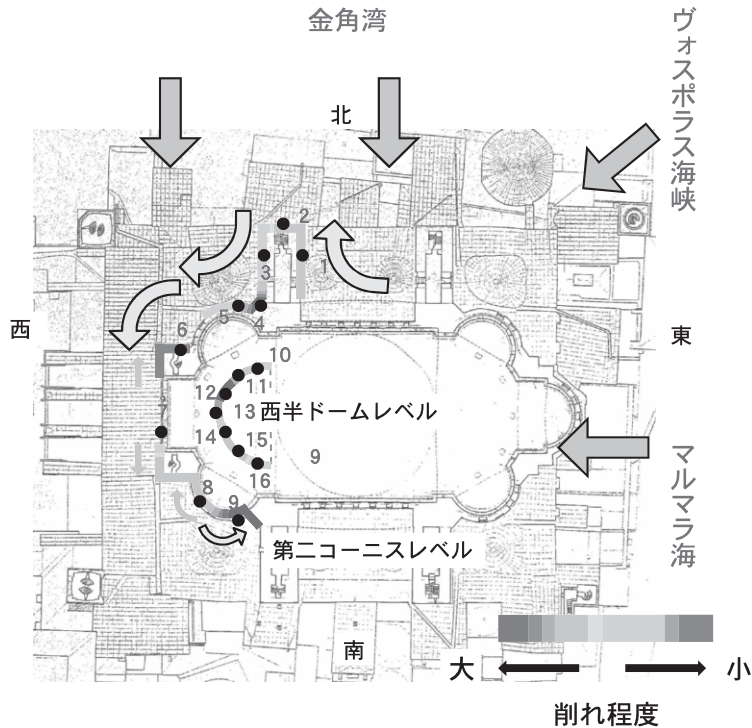


図4 西側外壁の削れ程度の分布と風の流れ

⇒: 海からの風, ⇨: 第二コーニスレベルに回り込む風, ⇨: 過去観測した風

(2012年度調査時の気流ならびに2011年度気流調査の結果<sup>4)</sup>を参照)

次に削れ程度が大きいのは、北西バットレスで計測したNo.1～3である。特に、北に面するNo.2は、レンガの表面の崩壊もみとめられる。この北西バットレスは、北から南に吹き抜ける風がまずぶつかる位置にある。そのため、No.2の削れは風および雨による削れであると推察できる。風雨による影響は、No.3よりもNo.1の削れ程度が大きい点からもうかがえる。No.1は北西バットレスの東面であり、東側からの海風を受けている。これに対してNo.3は北西バットレスの西面であり、北から南に吹き抜ける風の通り道に沿っており、風が直に吹きあたることは少ない。したがって、No.1とNo.3の削れ程度の違いには風の当たり方が影響していると推定できる。また、西側壁面で計測したNo.7の削れ程度が小さいことから、風雨によって外壁の削れ程度に違いが生じているとの見解は妥当と言える。

ここで、上部構造である西半ドームレベルでの削れ程度の分布をみると、風の吹きあたりが強い北西側No.11とNo.12の削れが大きい。これもまた、風雨の影響であると言え、今後、シミュレーション解析をおこない、高さ方向での風雨の影響の違いなどについてさらに検討を進める必要がある。

最後に、南西エクセドラで計測したNo.8の削れ値に注目したい。先に述べた風の流れからすると、南西エクセドラには北からの風が直接吹きあたることはないにもかかわらず、近く No.8に比べて削れ程度が大きい。この場所については、日射の影響が考えられる。同様のことは、西半ドームレベルの南西側No.14～16の削れ程度が大きいことからもうかがえる。今年度の調査で計測した南西エクセドラ付近の日射量を用いて、今後、日射による劣化進行予測もおこなう。

### 3-2. 植被による影響や修理材料の劣化

イスタンブールでは、冬季に多く雨が降ることから、雨水が乾燥する間もなく壁内部に保水され、表面に藻類あるいは植物が生育する。しかし、6月以降夏季には雨がほとんど降らなくなり、乾燥が進むと植物は枯れ、根とともに接合モルタルが剥落し、大きな穴として残る。この部分から建築内部に雨水が浸入していると考えられる(図5, 6)。

また、外壁の漆喰を除去した後、屋根との接続部分の隙間をモルタルで充填する補修がおこなわれたが、湿潤と乾燥を繰り返すうちに、補修モルタルも劣化し剥落している(図7)。この部分からも建築内部へ雨水が浸入していると思われる。



図5 北西エクセドラ外壁の植被(左:2011年2月,右:2012年8月)



図6 北西エクセドラ外壁の植被が乾燥してできた穴（左：2011年2月，右：2012年8月）



図7 北西エクセドラ外壁の補修モルタルの劣化による剝落（左：2011年2月，右：2012年8月）

## 4. 内壁への影響

### 4-1. 塩の析出とそれに伴う壁材の剝落

外壁から浸入した雨水は、内壁の劣化の要因と推察される。ここで図8および図9に、北西エクセドラの内壁面の状態を示す。図からもわかるように、内壁面の特に下部において、壁面表面や中間層モルタル部分で塩が析出し、ペイントや表層モルタルの剝落を引き起こしている（図8）。また、幾度となく水の浸入、乾燥、剝落が繰り返されたことで、壁材は脆弱化し、過去の補修部分でさえ再び剝落している。最も水の浸入が多いと思われる部分では、建築の躯体までも露出しており、内壁そのものの維持すら危ぶまれる状態にある（図9）。これらの場所に

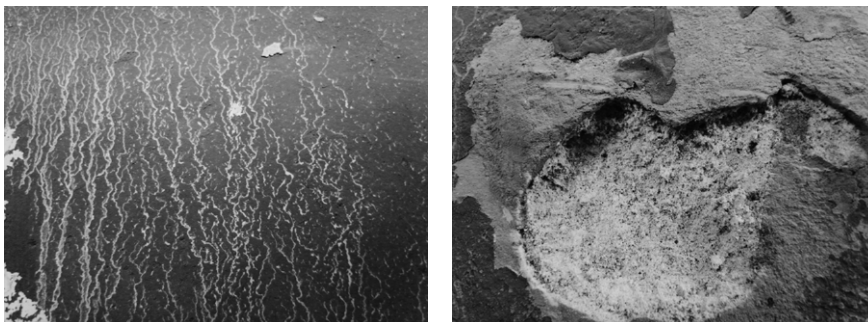


図8 塩の析出（左：水分の蒸発に伴う塩の析出，右：壁材の剝落を伴う塩の析出，北西エクセドラ内壁）



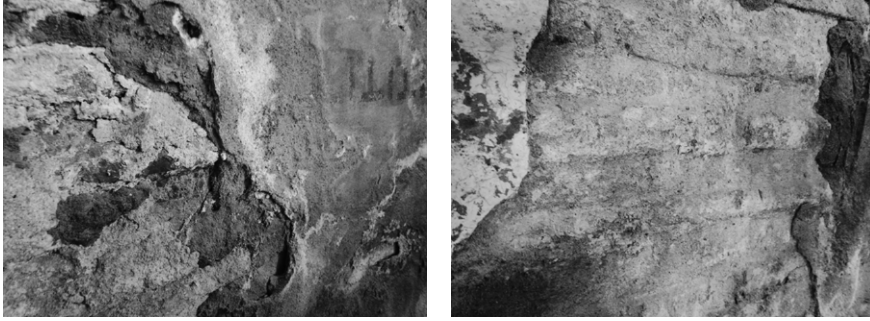


図9 壁面下部の損傷(左：補修部分の再剥落, 右：露出してしまった建築躯体, 北西エクセドラ内壁)

対応する外壁は図5～7で示した通り植被による穴隙ならびに補修モルタルの剥落がみとめられるとともに、削れ値(表1-4, 5)も大きい。これらのことから、雨水の浸入が内壁の劣化に直接的な影響を及ぼしていることは明らかである。

#### 4-2. 析出塩の分析結果と析出状況

これまで、北西エクセドラ内壁において計19点から析出塩をサンプリングしてきた。北西エクセドラ内壁は、ハギア・ソフィアの中でもここ6年間で特に塩の析出が著しく進行した場所である。前回の報告<sup>5)</sup>で、建築内部垂直方向(ドームおよび第二コーニスとギャラリー階)で析出する要因が異なること、水平方向では方位による違いがみとめられないことを示した。また、塩のサンプルのほとんどに、カルサイトとジプサムが混入していたことから、壁材であるモルタルの基材がオリジナル部分では石灰、補修部分では石膏であることにも触れた。しかし、前回までの分析結果からでは、ジプサムが、壁材由来か、あるいは析出したものかを判別できなかった。

そこで、今回採取した計36点の塩サンプルを加えた合計55点から、北西エクセドラにおいて析出している塩の分布と、それが析出している壁面の壁材の分布とを示し、塩の析出への対策のための基礎的検討をおこなう。

まず、北西エクセドラ内壁で採取した塩サンプルの分析結果を表2に、採取場所を図10に示す。示す。今回も、蛍光X線分析法(XRF)による元素検出およびX線回折分析法(XRD)による結晶相の同定結果から分析した。各分析に使用した装置および測定条件を以下に示す。

##### 蛍光X線分析法(XRF)

セイコーインスツルメンツ(株) 蛍光X線分析装置 SEA5230E

X線管球：モリブデン(Mo)、管電圧・管電流：15kV・自動、測定領域： $\phi$ 1.8mm、

測定時間：60秒、測定雰囲気：真空

##### X線回折分析法(XRD)

PANalytical 社製 X'pert PRO

X線管球：銅(Cu)、管電圧・管電流：45kV・40mA、走査範囲：回折角(2) 5-70°

まず、北西エクセドラ内壁で主として析出している塩は、前回の報告と同様に、硫酸ナトリウム(Thenardite)である。また、これまでには見られなかったカルサイトとジプサムが一緒

表2 北西エクセドラで析出している塩類の分析結果

採取場所		XRF 分析による元素検出	XRD 分析による結晶相の同定
北西エクセドラ NW ①	1	Mg, (Si), S, (Ca)	Epsomite
	2	Na, (Si), S, Ca	Thenardite
	3		Epsomite
	4		Thenardite, Calcite
	5		Thenardite
	6	(Na), S, Ca, (Fe), Si?	Thenardite
	7	Na, Ca, S, Ca, (Fe), (Mg)	Thenardite, Calcite
	8	(Al), Si, S, (K), Ca, (Ti), Fe	Calcite
	9	Si, S, Ca, Fe, (Na?), (Mg?)	Gypsum
	10	Si, S, Ca, Fe, (Na?), (Mg?), K	Gypsum
	11	Si, S, Ca, Fe, (Na?), (Mg?), (Al?)	Gypsum
北西エクセドラ NW ①-②	12	(Na), (Si?), S, Ca, Fe	Thenardite
	13	Mg, Si, S, (K), Ca, Fe	Epsomite, Gypsum
	14	(Mg), (Si?), S, Ca	Calcite
北西エクセドラ NW ②	15	Mg, S, (Ca)	Epsomite, Calcite
	16	Al, Si, S, Cl, K, Ca, Ti, (Mn), Fe	Calcite
	17	Mg, Si, S, Ca, Fe	Epsomite
	18	Mg, Si, S, Ca, Fe	Epsomite
北西エクセドラ NW ②-③	19	(Mg), (Mg), S, (Cl), Ca, (Fe)	Calcite
	20	(Na), (Mg), S, (Cl), Ca, (Fe)	Calcite
北西エクセドラ NW ③	21		Nitratine, Gypsum
	22	Si, S, (K), Ca, Ti, Fe, (Na?), (Mg?), (Cl?)	Gypsum
	23	Si, S, (K?), Ca, Ti, Fe, (Mg?)	Gypsum
	24	(Mg), Al, Si, S, Cl, K, Ca, (Ti), Fe	Gypsum
	25	Al, Si, S, Cl, K, Ca, (Ti), Fe	Calcite
	26	Mg, Si, S, Ca, (Fe)	Epsomite
北西エクセドラ NW ④	27	Na, (Si), S, Ca, (Fe)	Thenardite
	28	Si, S, (K?), Ca, Fe	Gypsum
	29	Na, Si, S, (K), Ca, Fe	Thenardite
北西エクセドラ NW ④-⑤	30	Na, Si, S, (K), Ca, Fe	Thenardite
北西エクセドラ NW ⑤	31	Na, (Si), S, Ca, Fe	Thenardite
	32	Na, Si, S, (K), Ca, (Fe)	Thenardite, Calcite
	33	(Na), (Si), S, K, Ca, (Fe)	Gypsum
	34	Na, (Si), S, Ca, (Fe)	Thenardite, Gypsum
	35	Na, (Si), S, Ca, (Fe)	Thenardite
	36		Thenardite
	37	(Na), Si, S, (K), Ca, Fe	Gypsum?
	38	(Na), Si, S, K, Ca, Ti, Fe, (Al)	Gypsum, Calcite
	39	Na, Si, S, K, Ca, Fe	Thenardite, Calcite
	40	Na, Si, S, Ca, Fe, (K?)	Thenardite, Calcite
	41	Na, Si, S, K, Ca, Fe	Thenardite, Gypsum
	42	Na, (Si), S, Ca, Fe	Thenardite
	43	(Na?), (Al), Si, S, Ca, Fe, (Mg?)	Gypsum, Calcite
	44	Na, Si, (Al), S, (K), Ca, Fe	Gypsum, Calcite
	北西エクセドラ NW ⑥	45	Na, (Si), S, Ca
46		Na, (Si), S, Ca	Thenardite, Calcite
47			Thenardite
48			Nitratine
49		(Na), (Al), Si, S, K, Ca, Ti, Fe	Gypsum, Calcite
50		Na, (Al), Si, S, K, Ca, Fe	Thenardite, Calcite
51		Mg, Si, S, Cl, (K?), Ca, Fe	Calcite
52		Na, Mg, Al, Si, S, (K), Ca, (Ti), Fe, (Mn?)	Calcite Gypsum?
53		Na, (Si), S, Ca, Fe	Thenardite
54		Na, (Si), S, Ca, (Fe)	Thenardite
北西エクセドラ NW ⑦	55	Na, (Si), S, Ca, (Fe)	Thenardite



図10 北西エクセドラ内壁 析出塩サンプル採取場所

に採取される場所もあった。

次に、析出場所と塩の関係を考察していく。まず、硫酸ナトリウムが、エクセドラ東側（北西エクセドラ NW ⑤～⑦）に比較的集中していることがわかる。対応する外壁の状態（図5）から、雨水の浸透および保持が推察される。エクセドラ全体を通して、壁面内部の高い含水率と塩の析出の関係は、これまでも指摘してきた通りである（佐々木ほか，2012）。

北西エクセドラ NW ①～③の一部からは、硫酸マグネシウム（Epsomite）が析出している。採取した硫酸マグネシウムはどれも、粉状でなく柱状の結晶を成しており、ペイントや表層モルタルを完全に剝落させていた。これらは、エクセドラ内壁西側の、特に窓縁に集中している。4章ですでに述べたが、対応する外壁では、補修モルタルが劣化し剝落した部分からの水の浸入が確認されている（図7）。屋根との接続部分から浸入した雨水は、壁面下部で大量の塩を析出させるとともに、表層モルタルあるいは中間層モルタルの剝落を促進していると推測される。

NW ③-21と⑥-45, 48からは、硝酸ナトリウム（Nitratine）が析出しており、特にNW ⑥からの析出は、激しい表層モルタルの剝落を伴っている。北西エクセドラ内壁の東側下部にあたるNW ⑥は、外壁No.4（図4参照）に対応する場所で、バットレスとの接続部分であり外壁の中で最も接合モルタルの割れ程度が大きい。現時点では、外壁から浸入した水が作用しているとの推察に留まるが、今後実験等から硝酸ナトリウムの由来を特定する必要がある。

### 4-3. 壁材と析出塩の関係

最後に、塩のサンプル採取場所、析出塩の種類と壁材の分布（図11）から、壁材と析出塩の関係を考察する。まず、北西エクセドラ内壁では、これまでに複数回の修復が実施されてきたとされている<sup>9)</sup>。しかし、2012年までに実施された修復のうち、2002年に実施されたUNESCOプロジェクトによる修復を除いて、記録が残されていない。そこで、筆者は目視観察から、オリジナルの壁材の他に材質および色彩が異なる4期の修復を判別し、その分布を図示した。同じ箇所でも何度も剝落が生じたようで、修復モルタルは幾重にも上塗りされている。その順序から最も先行する（最も早い時期に処置された）のは修復①であることがわかった。

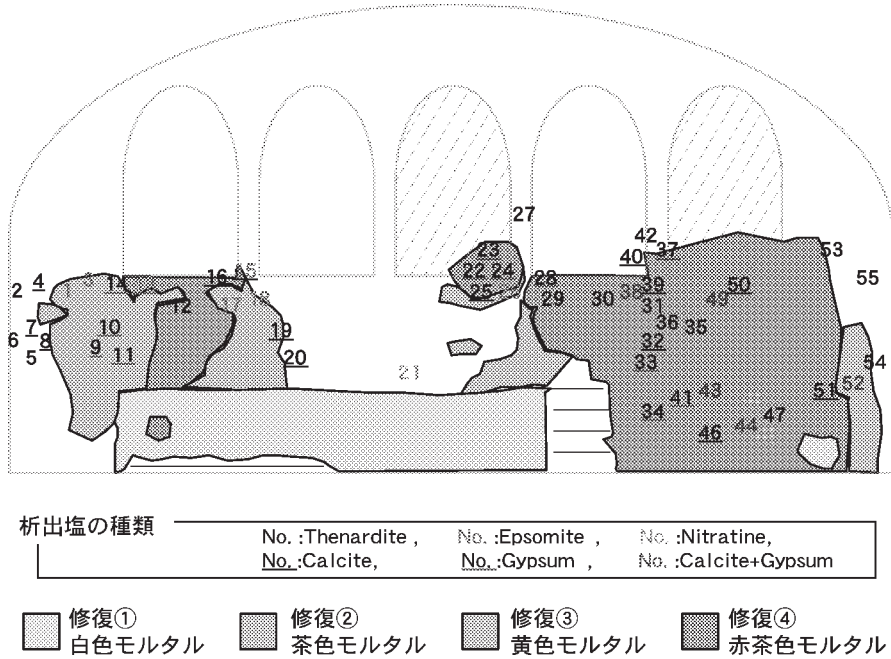


図11 北西エクセドラ内壁 析出塩サンプル採取場所と析出塩、壁材の分布  
(析出塩の種類は、表2のサンプル番号を明暗および下線で示した)

では、各壁材と析出塩との関係性を考察していこう。壁材の組成は、筆者が、析出塩と同じ方法で分析した結果である<sup>7)</sup>。まず、オリジナルの壁材は、石灰を基材とするモルタルで、砂が多く含まれ、レンガ片やレンガの粉末はほとんど含まれていない。析出している塩のほとんどが硫酸ナトリウムである。修復されている場所以外では、エクセドラ全体を通して、オリジナルの壁材が残っていると言える。場所によっては、修復①～④の下層にオリジナルの壁材が残存している可能性も考えられるが、目視観察からは判別できなかった。オリジナルの壁材が最表面まで残っている場所は図11中の白色の部分で、ほぼエクセドラ下部ではオリジナルが残っている場所がない。このことから、かなり以前から継続的に、北西エクセドラにおける塩の析出およびモルタルの剥落が生じてきたことがわかる。

このことは、修復①の範囲からも推察される。修復①は、砂をほとんど含まない石灰モルタルである。表面にペイントが施されていた痕跡がみとめられるが、ほとんどがモルタルの粉状化に伴い失われている。今回の調査では、析出塩らしきものを確認できなかった。確認される中で最も早い時期に実施された修復①は、エクセドラ内壁下部にのみ実施されており、この場所で早くから剥落が発生していたことがわかる。また、修復①付近では、躯体が露出するほど剥落した場所もあり、エクセドラ下部の劣化の著しさがうかがえる。

エクセドラ全体に対して実施された修復②のモルタルは、基材である石膏の割合が高く、レンガの粉末と小片が混合されている。密着度が高いようで、あまり剥落は起きておらず、塩の析出もあまり見られない。採取したサンプルからはジブサムやカルサイトが確認されたが、これらが壁材であるのか、あるいは析出したものであるのかは判別しがたい。表層まで残る修復②の状態は良いにもかかわらず、多くの場所で、のちに実施された修復④の下層となっていることを確認した。このことから、修復②の上に修復④が重なっている場所は、他に比べて近年

劣化が進行した場所と言えるだろう。

修復③は、剥落箇所に対して最小限の範囲でモルタルを充填し、その表面に黄色のペイントを施している。新たな剥離・剥落は生じておらず、塩も析出していなかった。サンプルを採取できていないため、組成はわかっていないが、2002年の UNESCO プロジェクトによる修復である可能性が高い。しかし、実施箇所を特定できるような記録が残っていないため、今後、聞き取り調査などによって明らかにしたい。

修復④は、石灰を基材とし、レンガの粉末を多く含む粗目な質感の赤茶色のモルタルである。一度に広範囲にわたって充填されているが、その大部分がすでに粉状化ならびに再剥落をおこなっている。先に述べたように、先行する修復②に上塗りしており、そうした下層に他モルタルを持つ場所からは、カルサイトとジプサムが混合して採取されている場合が多くみとめられた。特にエクセドラ東側で上塗りした場所では、表層の修復④が下層モルタルを伴い剥落しかけている場所があり、硝酸ナトリウムの析出が確認されている。これは、外壁からの雨水の浸入や浸透といった影響を断つことなく上塗りした結果、劣化が継続して生じたためである可能性が高い。

## 5. まとめ

2008年に漆喰を除去されたハギア・ソフィア西側外壁では、風雨の吹きあたり方や雨水の流下経路、日射による乾燥サイクル、植被や補修材の劣化、そして人為的影響によって、接合モルタルの削れや壁体への穴隙が生じている。これら損傷は、外壁の剥離・剥落のみならず、穴隙から浸入した雨水による内壁での塩の析出や壁材の剥離・剥落によって、建築そのものの保存を危うくするものである。

内壁の劣化は、外壁の劣化状態、特に接合モルタルの削れと補修モルタルの穴隙の程度に対応しており、外壁を再び漆喰で覆うことで、これらの問題は一樣の解決をみることが期待できる。しかし、筆者らが提案した通り、雨の降らない夏季を待っての作業が必須であり、また、入念に穴隙を補修材で事前に充填した後に、漆喰で被覆することで完全に水の浸入経路を断つことが必要不可欠である。

2013年6月以降に実施予定の外壁の被覆作業に向けて、今後は今回の結果をもとに、風雨や日射の影響をシミュレーションし、改めてより詳細な処置内容の提案をおこなうことで、本調査研究の成果を現地に還元することができるだろう。

## 謝辞

本研究は、平成24年度学術振興会特別研究員研究奨励費の助成を受けたものである。また、調査平成22年度科学研究費補助金 基盤(S)(課題番号:21226014 研究代表者:日高健一郎)の助成を受けた調査成果の一部を参照させていただいた。記して感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) 小椋大輔, 石崎武志, 安福勝, 小泉圭吾, 佐々木淑美, 日高健一郎: ハギア・ソフィア大聖堂の屋内外環境と劣化状態 (2) 一熱画像・含水率分布調査およびレンガ造壁体の熱水分移動解析一, 保存科学, **52**, 27-42 (2013)
- 2) A.Moropoulou, A.S.Cakmak, A.Bakolas, K.Labropoulos, K.Bisbikou: "Properties and technology of the crushed brick mortars of Hagia Sophia", Seventh International Conference on

Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Greece, pp.651-661 (1995)

この他に、わらや大理石の粉末、火山灰等が含まれる場合がある。

- 3) 佐々木淑美, 吉田直人, 石崎武志, 小椋大輔, 小泉圭吾, 日高健一郎: ハギア・ソフィア大聖堂における内壁面の構造と析出塩類の調査, 日本文化財科学会第29回大会研究発表要旨集, pp. 142-143 (2012)
- 4) 河田慧: ハギア・ソフィア大聖堂の屋内外環境が壁画劣化に及ぼす影響, 京都大学平成24年度修士論文, pp.13 (2012)  
河田らの計測は, 2011年9月14日に吹き流しを使用して実施。
- 5) 佐々木淑美, 吉田直人, 小椋大輔, 石崎武志, 日高健一郎: ハギア・ソフィア大聖堂内壁の析出塩類の調査, 保存科学, **51**, 303-312 (2012)
- 6) Hagia Sophia Dome Mosaics Conservation Project: Report on the conservation work carried out during the period from May-November (2002)
- 7) A.Moropoulou, A.S.Cakmak, A.Bakolas, K.Labropoulos, K.Bisbikou, "Properties and technology of the crushed brick mortars of Hagia Sophia", Seventh International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Greece, pp.651-661 (1995) .

筆者による分析結果は, 先行研究の中で挙げられている組成とも相違ない。

キーワード: ハギア・ソフィア大聖堂 (Hagia Sophia); 塩の析出 (salt crystallization); 外壁の削れ (shaving of outer wall); 外壁面からの漆喰の除去 (removal of the plaster from outer wall); 雨水の浸入 (infiltration of rainwater)

## Study on the Deterioration of the Outer Wall of Hagia Sophia, Istanbul, Turkey

Juni SASAKI\*, Naoto YOSHIDA, Daisuke OGURA\*<sup>2</sup>,  
Takeshi ISHIZAKI and Kenichiro HIDAKA\*<sup>3</sup>

Hagia Sophia has many conservation problems, especially at the west part of the building. The inner wall has been suffering from salt flaking of mortar and crystallization, and the outer wall has also been weakened. Removal of plaster from the outer wall surface and rainwater penetration from the exposed wall are thought to be the causes of deterioration at the inner/outer wall.

As a result of survey and analysis of the outer wall, it was found that shaving was caused by the following factors.

- 1) Strong north-east sea wind has been shaving the joint mortar.
- 2) Rainwater flow has been providing the wet condition and removing the joint mortar and restored mortar.
- 3) Solar insolation is thought to be also affecting the wall surface.

Analysis of the crystallized salts on the inner wall revealed that they were sodium sulfate, magnesium sulfate and sodium nitrate. At the northwest part of the building (northwest exedra), the major type of salt was sodium sulfate; magnesium sulfate was found at the edge of the windows. The corresponding outer wall of these parts are degraded and have holes at the junction with the wall and the roof. Sodium nitrate was found at the lower part of the inner wall.

---

\*Research Fellow of the Japan Society for the Promotion of Science (PD)

\*<sup>2</sup>Kyoto University, Graduate School of Engineering

\*<sup>3</sup>University of Tsukuba, Graduate School of Comprehensive Human Sciences