

## 〔報告〕 ハギア・ソフィア大聖堂内壁の析出塩類の調査

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

### 1. はじめに

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）は、世界文化遺産イスタンブール歴史地区（1985年登録）の中心部に位置し、年間約300万人もの観光客が訪れるトルコ随一の博物館である。もとは537年に東ローマ帝国の首都コンスタンティノープルの総主教座聖堂として建立されたキリスト教会堂であったが、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。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、1935年からはトルコ共和国の博物館として一般に公開されている。

世界遺産登録を機に、ハギア・ソフィアとその内部装飾の保存に高い関心が寄せられ、ユネスコ主導の保存プロジェクトや各国調査団による学術調査の実施が始まった。1990年からは、ハギア・ソフィア学術調査団が調査を開始し、現在も続行中である。

建築は、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）による組積造で、4本のピア（支柱）、ピアを結ぶ東西大アーチ、東西半ドーム、南北ティンパヌム（半円形の壁面）、そしてペンデンティブ（東西大アーチと南北ティンパヌムに挟まれた部分）が中央ドーム（頂高約56m 直径約31m）を支えている<sup>1)</sup>。創建後すぐに始まった自重による歪みに加え、地震による亀裂や構造の疲労は、建築の維持すら危ぶまれる問題として常に注視されてきた。2011年になり博物館当局は、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。このきっかけは、2011年6月に第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てきたことにある。落下元では、広範囲にわたり塩が大量に析出しており、壁面表層のモルタル層は第2層のモルタル層から剝離していた。この事態を重く受け止めた博物館当局は、内壁面の剝離・剝落の原因解明と早急な対策を求めている。

そこで本稿では、剝離・剝落の抑止策を提案するにあたって必要な基礎情報として、ハギア・ソフィア内壁でみとめられる塩類の析出状況とその原因について報告する。

### 2. 塩類の析出状況

ハギア・ソフィアの中でも特に、ギャラリー一階天井と第2コーニス壁面からの塩の析出が著しいことを確認した。塩の析出は現在も進行中で、内壁面表層の剝離・剝落範囲もますます広がっている（図1、2）。特に北西部において、塩の析出が激増している。

ギャラリー一階北西部では、天井だけでなく壁面からも塩が析出していることを確認した。この壁面では、2006年から2010年までの4年の間に、特に下部での塩析出範囲が拡大している（図3）。

また、ギャラリー一階と同様に、第2コーニスでも塩の析出ならびに表層の剝離・剝落の進行

\*京都大学大学院工学研究科

\*<sup>2</sup>筑波大学大学院人間総合科学研究科

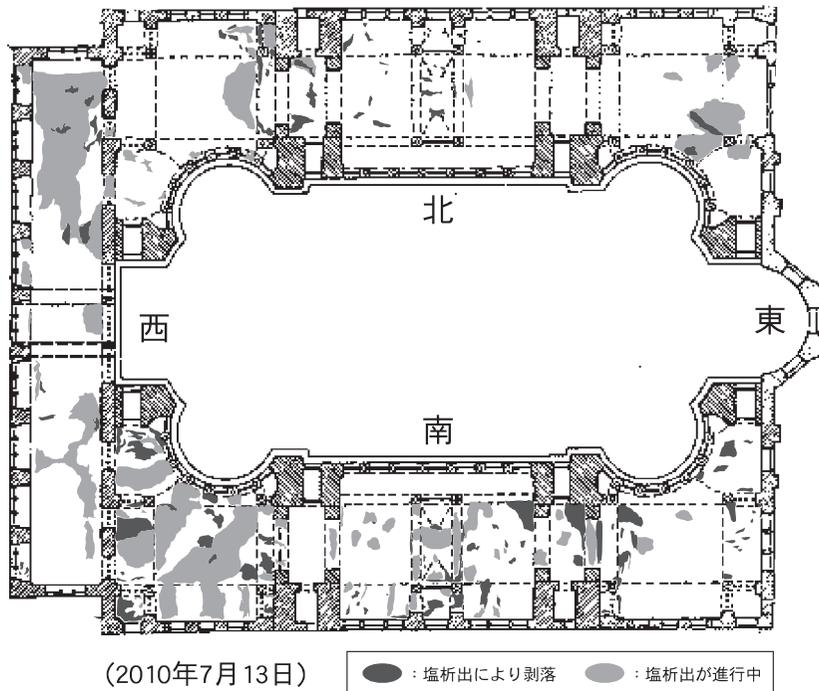


図1 2010年時点でのハギア・ソフィア博物館2階天井における塩の析出状況

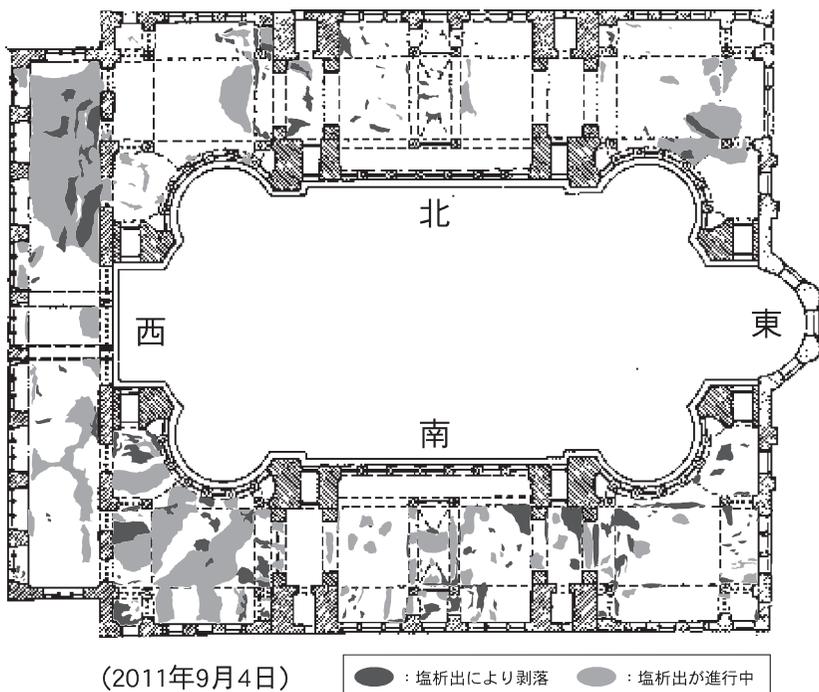


図2 2011年時点でのハギア・ソフィア博物館2階天井における塩の析出状況  
(図1, 2ともに Mainstone, 1988に掲載されている平面図を基に筆者が作成)

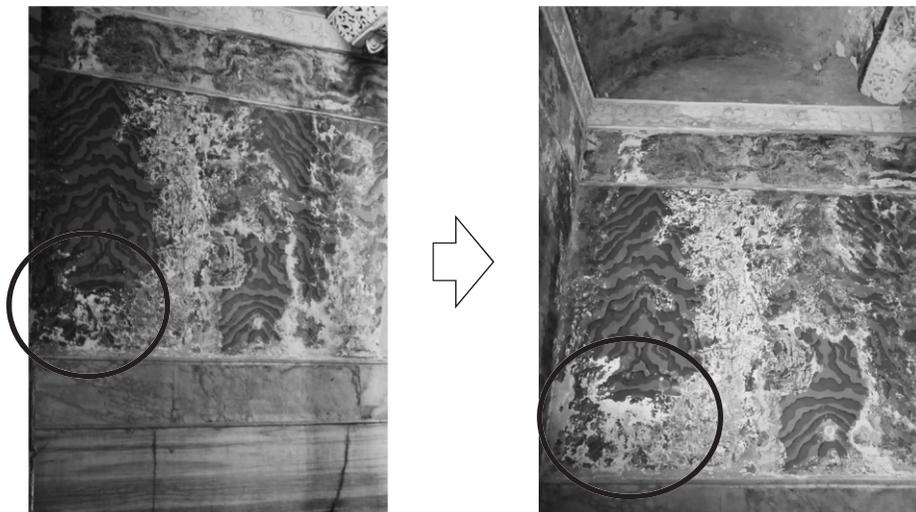


図3 ギャラリー階北西壁面における塩の析出状況（左：2006年11月，右：2010年9月）

が目立つ（図4）。南東・南西・北西・北東に接続しているエクセドラと呼ばれる半円構造のうち、特に北西エクセドラの状態悪化は著しい。2006年の時点ですでに塩の析出は始まっていたが、2010年までの4年間で、図中に示したように、窓の周辺や湾曲した壁面の下部において、塩の析出ならびに剝離・剝落が激しくなっている。

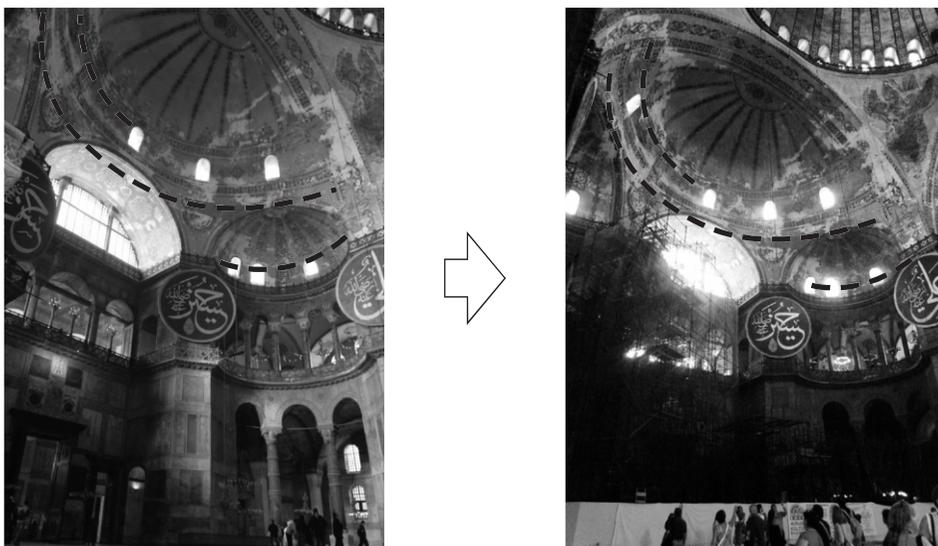


図4 第二コーニス北西エクセドラにおける塩の析出状況（左：2006年11月，右：2010年7月）

### 3. 析出塩のサンプリングとその分析結果

以上のように、ハギア・ソフィアの内壁では塩の析出と、それに伴う壁面表層の剝離・剝落が深刻化しており、これらを食い止めるには、析出塩の由来と環境要因を明らかにする必要がある。そこでまず、析出塩の同定をおこなった。各所で採取したサンプル合計48点の中から、

ドームおよび第2コーニス、ギャラリー階の計14か所（図5）で採取した28サンプルを、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： $\phi 1.8\text{mm}$

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 ( $2\theta$ ) 5 - 70°

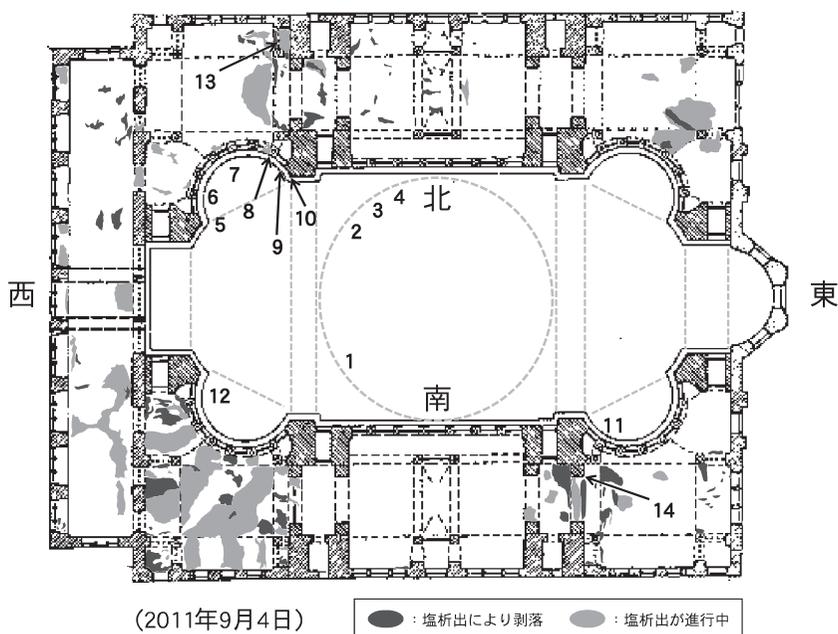


図5 析出塩サンプル採取場所  
(Mainstone, 1988に掲載されている平面図を基に筆者が作成)

分析結果は、表1の通りである。

表1 析出塩の分析結果一覧

図5中番号	採取場所	蛍光X線分析結果*	X線回折分析結果**
1	ドーム Rib.16-17	Na, (Si), S, Ca, Ti, Fe	Thenardite
2	ドーム Rib.26-27	Na, Si, S, Ca, (Fe)	Thenardite, Gypsum
		Na, (Si), S, Ca	Thenardite, Gypsum
3	ドーム Rib.27-28	Na, S, Ca, (Si)	Thenardite, Calcite
		Na, (Si), S, Ca, (Fe)	Thenardite, Calcite
4	ドーム Rib.28-29	Si, S, Ca, (Fe)	Gypsum
5	第2コーニス 北西①	Mg, (Si), S, (Ca)	Epsomite
		Na, (Si), S, Ca	Thenardite
6	第2コーニス 北西②	Mg, S, (Ca)	Epsomite, Calcite
7	第2コーニス 北西④	Na, (Si), S, Ca, (Fe)	Thenardite
8	第2コーニス 北西⑤	Na, (Si), S, Ca, (Fe)	Thenardite
		Na, Si, S, (K), Ca, (Fe)	Thenardite, Calcite
		(Na), (Si), S, K, Ca, (Fe)	Gypsum
		Na, (Si), S, Ca, (Fe)	Thenardite, Gypsum
		Na, (Si), S, Ca, (Fe)	Thenardite
9	第2コーニス 北西⑥	Na, (Si), S, Ca	Nitratine
		Na, (Si), S, Ca	Thenardite, Calcite
10	第2コーニス 北西⑦	Na, (Si), S, Ca, (Fe)	Thenardite
11	第2コーニス 南東	(Na), Si, S, Ca	Thenardite, Calcite, Gypsum
		Na, (Si), S, Ca, (Fe)	Thenardite, Calcium chloride
12	第2コーニス 南西	Mg, S, Ca, (Si)	Epsomite, Gypsum
		Mg, S, (Ca)	Epsomite
		(Si), S, Ca, (Fe)	Gypsum
		(Mg), (Si), S, Ca, (Fe)	Epsomite, Gypsum
13	ギャラリー 北西壁面	Mg, S, Ca, (Si)	Epsomite, Calcite
14	ギャラリー 南東ピア	Mg, S, Ca	Epsomite, Calcium chloride
		Mg, S, (Ca), (Si)	Epsomite
		Na, Mg, S, (Ca)	Epsomite, Calcite

\* ( )内は少量成分

\*\* Thenardite : Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, Epsomite : MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O, Nitratine : NaNO<sub>3</sub>,  
Calcium chloride : CaCl<sub>2</sub>, Calcite : CaCO<sub>3</sub>, Gypsum : CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O

ハギア・ソフィアで析出している塩は、硫酸ナトリウムと硫酸マグネシウム、硝酸ナトリウムで、それらの中でも硫酸ナトリウムが最も広い範囲で析出している。これら塩類は、建材であるレンガからの析出も確認されている<sup>2)</sup>。

ドームならびに第2コーニスの北西エクセドラにおいては、主として硫酸ナトリウムが析出している。ただし、北西エクセドラのうち、西側の壁面 (No.5) および窓下 (No.6) からは硫酸マグネシウムも析出している。また、最北の窓下 (No.9) からは硝酸ナトリウムも析出している。これら箇所は、2006年から2010年までの4年の間に急激に塩が析出した場所でもある。

第2コーニスの南東エクセドラ (No.11) からも同様に硫酸ナトリウム塩が析出している。しかし、この南東エクセドラを支える南東ピアに沿ってちょうど真下のギャラリー階で採取した塩 (No.14) は、硫酸マグネシウムである。同じく、硫酸マグネシウムは、ギャラリー階北西壁面 (No.13) と南西エクセドラ (No.12) からも析出している。

これらの結果から、ドームおよび第2コーニスとギャラリー階とは、析出する要因が異な

ると考えられる。

今回のサンプリングは、塩の析出が激しい北西部を中心に実施したためにデータ数に偏りはあるものの、北西・南西・南東で採取した塩の種類に、方位による違いはないと言えるだろう。

また、今回採取した塩のサンプルのほとんどに、カルサイトとジブサムが混入していた。第2コーニス北西エクセドラの壁材は、オリジナルの部分と補修部分とで異なることがわかっているが<sup>3)</sup>、今回の塩採取場所がこのどちらであるかは、目視では判別が困難であった。今回検出されたジブサムが、壁材あるいは析出塩のどちらであるかは、現時点で判然としない。

#### 4. 塩析出の原因

一般的に塩析出は、多孔質材内で可溶性塩を含む水分が移動し、表面で水分の蒸発に伴い結晶化することで生じる。建築物内壁表面において塩が析出する原因の一つにも、壁内の水分移動とそれに伴う含水率の上昇が挙げられるが、ハギア・ソフィアでは含水率を高める要因として、窓からの雨水の吹き込み、屋根と壁の隙間からの浸入、そして外壁面からの浸透が考えられる。特に、外壁面からの浸透が近年になって増したという可能性については、修復履歴からも十分に想定できるので、以下で説明する。



図6 ハギア・ソフィア 西外壁の状況 (左：2006年11月，右：2010年5月)

ハギア・ソフィアの外壁は、ビザンティン時代を除いて、漆喰で覆われていたと考えられている。1982年～1988年の修復においても漆喰で被覆され、その表面は赤灰色に塗装されていた。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)。オスマン・トルコ時代の黄色と赤色の縞模様、あるいは共和国時代の修復による薄黄色のどちらに塗り替えるべきかという議論は紛糾し、最終的に、創建当初の姿とされる、漆喰で覆われていない状態に戻すことが最良という判断に至り、2008年に西外壁の漆喰は除去され、モルタルとレンガからなる躯体は風雨にさらされることとなった。

隣接する同時代建築のアヤイリニ教会がそうであるように、創建時のハギア・ソフィアの外壁面は、レンガとモルタルの外表面が調整された状態(レンガは焼成面、モルタルはコテで整形した面が見えている状態)であった。しかし、2008年の漆喰除去時にレンガおよびモルタルの外表面が削られたため、調整された状態よりも雨水の浸透が容易となった(図7)。その結果、として、漆喰が除去された外壁の表面からは大量の雨水が浸透し、その水分が壁内部に保水されていることは、外表面の植被(植物の繁殖)からも明らかである(図8)。また、粗雑におこ

なわれた除去作業によって屋根との接合部にできた隙間からも、雨水が建築内部に浸入してい



図7 西外壁の風化状況



図8 西外壁の植被と雨水の浸入痕

る。

これら外壁に対応する内壁（西側）において、TDR水分計（TRIME-RM：IMKO）を用いて含水率を計測した。その結果、塩が著しく析出している北西エクセドラの壁面は、高い含水率であることがわかった（図9）。

含水率を高めているのは、外壁からの雨水の浸入・浸透か、あるいは結露によると考えられる<sup>4)</sup>が、壁面の含水率上昇が塩の析出を助長しているのであれば、その要因を明らかにすることで含水率上昇を抑える方策を講じ、ひいては塩の析出を食い止めることが可能になると考えている。そのためには、今後も現地調査を続け、科学的根拠に基づいた含水率上昇の原因を探る必要がある。

析出塩の種類については、イオンの供給源を特定しなければならないが、例えば、モルタルには火山灰が含まれているといわれており<sup>5)</sup>、硫酸ナトリウムや硫酸マグネシウムの由来の一つとして想定できるだろう。筆者らが採取した内壁モルタルの蛍光X線分析の結果においても、ケイ素、硫黄、カルシウム、(鉄)が検出されている。ただ、この点に関してはまだ実証されたものとは言えず、さらに分析を進める必要がある。

壁材だけではなく、大気中物質が由来源となることも考えられる<sup>6)</sup>ため、今後、空気環境面も含めた多角的な検証が必要である。

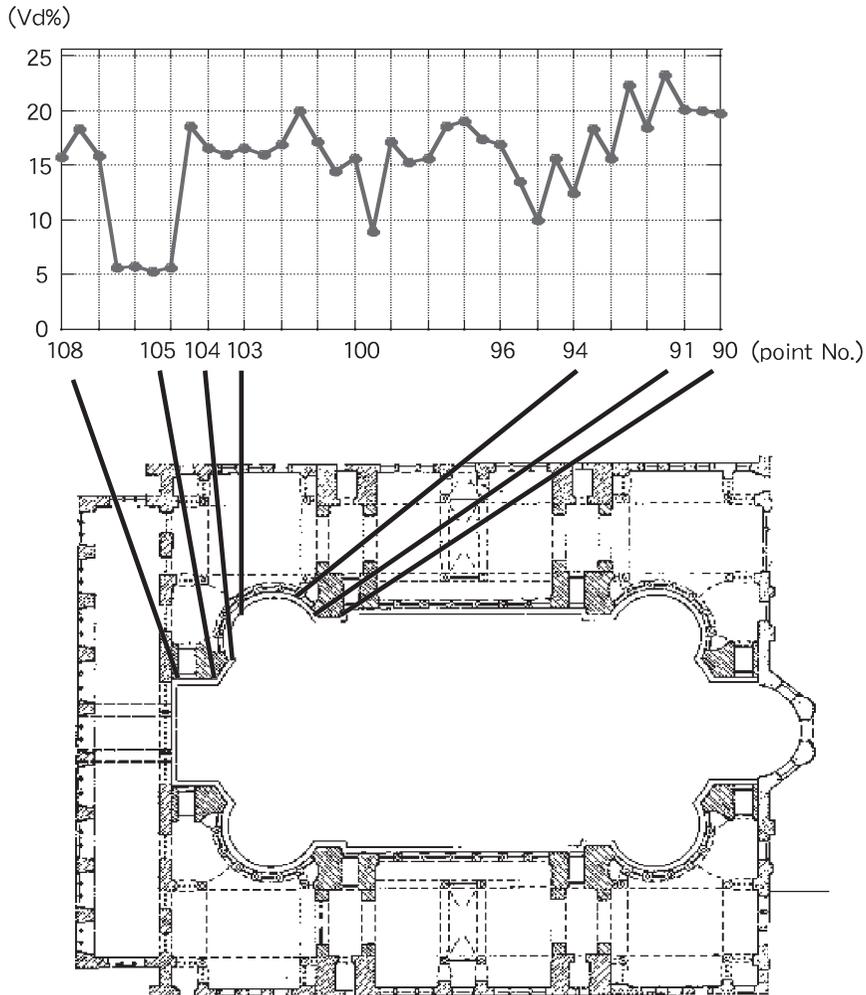


図9 北西内壁の含水率分布  
(Mainstone, 1988に掲載されている平面図を基に筆者が作成)

## 5. まとめ

ハギア・ソフィアでは、様々な種類の塩が析出しており、また、壁面含水率と塩の析出の程度の間には相関性があることが実証された。

塩析出とその種類の多様さの要因については、立地環境や修復履歴、建材などからいくつか想定できるがまだ特定には至っておらず、今後さらなる検討を進める必要がある。

塩析出を食い止めなければハギア・ソフィアの劣化は進む一方であることから、この貴重な歴史的建築物の保存のために、今後も調査を進めていきたい。

なお、本報告は、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)の成果の一部である。

## 参考文献

- 1) R. J. Mainstone, Hagia Sophia: architecture, structure, and liturgy of Justinian's great church, Thames and Hudson, London (1988)  
文中の建築部位名は、本文献の記述に従った。
- 2) A. Moropoulou, B. Christaras, G. Lavas, G. Penelis, N. Zias, G. Biscontin, E. Kollias, A. Paisios, P. Theoulakis, K. Bisbikou, A. Bakolas, A. Theodoraki: "Weathering phenomena on the Hagia Sophia Basilica Konstantinople", Transactions on the Built Environment, Vol.4, pp. 47-64 (1993)
- 3) Hagia Sophia Dome Mosaics Conservation Project: Report on the conservation work carried out during the period from May-November (2002)
- 4) 小椋大輔, 石崎武志, 小泉圭吾, 佐々木淑美, 日高健一郎, 河田慧: ハギア・ソフィア大聖堂の屋内外環境と劣化状態, 保存科学, 51, 59-76 (2012)
- 5) A. Moropoulou, A. Bakolas, M. Giannoulaki, M. Karoglou: "Characterization of Dome Mosaics of Hagia Sophia in Constantinople", I MOSAICI cultura, tecnologia, conservazione, pp.225-235 (2002)
- 6) A. Elena Charola: "Salts in the Deterioration of Porous Materials:An Overview", Journal of the American Institute for Conservation, Vo.39, No.3, pp.327-343 (2000)

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

## Study of Salt Crystallization on the Inner Wall of Hagia Sophia, Istanbul, Turkey

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

Hagia Sophia has been suffering from salt crystallization and flaking of the wall surface, especially at the northwest part of the building. Therefore, a survey was conducted with the following aims:

1. To identify the crystallized salts in Hagia Sophia
2. To clarify the origin of salt and the movement of water which is the main cause of salt crystallization
3. To make a suggestion for the future conservation program, including salt and water control.

Elements containing salt samples were detected by X-ray fluorescence spectroscopy, and crystallized molecules were identified by X-ray diffraction analysis.

As a result, the types of crystallized salt were identified as sodium sulfate, magnesium sulfate and sodium nitrate. At the northwest part of the building (northwest exedra), the major type of salt is sodium sulfate; magnesium sulfate and sodium nitrate were found at the western and northern parts of the exedra where salt crystallization is in progress. The removal of plaster from the outer wall surface and the infiltration of rainwater from the exposed wall are thought to be the causes of deterioration at the northwest part of the building.

---

\*Kyoto University, Graduate School of Comprehensive Human Sciences

\*\*University of Tsukuba, Graduate School of Engineering