

〔報告〕 ハギア・ソフィア大聖堂をはじめとした歴史的建築物の内壁の劣化と材料に関する調査

佐々木 淑美*・吉田 直人・小椋 大輔*²・安福 勝*³・
水谷 悦子*²・石崎 武志*⁴

1. はじめに

筆者らは、2009年からハギア・ソフィア大聖堂（現アヤ・ソフィア博物館、以後「アヤ・ソフィア」と略記）において顕著に進行がみとめられる塩類析出とそれに伴うモルタル剥落に注視し、劣化状態の記録・評価をおこなってきた。調査の成果は博物館と共有し、また彼らが抱える管理上の問題に対しても調査し提言するなど、協力して適切な保存方を講じられるよう取り組んでいる。2013年からは、イスタンブールに残る他のビザンティン建築のうち、アヤ・イリニ聖堂（現アヤ・イリニ教会博物館、以下「アヤ・イリニ」と略記）ならびにコーラ修道院付属ソーテール聖堂（現カーリエ博物館、以後「カーリエ」と略記）での調査も開始した。各聖堂における劣化状況の比較をおこなうとともに、今後劣化が進行しないよう予防的措置を検討すること、そして将来実施されるであろう保存・修復事業の際の基礎となる知見を得ることを目的とし、今後継続的に調査を実施していく予定である。本報では、これまでの調査結果の総括として、各建築における劣化状況をまとめるとともに、共通してみられる変化をそれぞれの建築がもつ環境要因から検討する。

また、2012年の調査においてアヤ・ソフィアの南ティンパナム壁表面の黒色物中に鉛が含まれていることを確認した。博物館の依頼を受けて、2013年および2014年に南北ティンパナム壁面の塗装材および壁材について調査を実施したので、その結果もここで報告する。

2. アヤ・ソフィアにおける内壁の劣化とその要因

2-1. 内壁からの塩類析出—2010年から2014年にかけての変移

2010年から開始したアヤ・ソフィアでの環境調査は、建築内外の環境の違いと壁体含水率と劣化との関係等を明らかにし、2013年に開始された西側外壁の修理に貢献する成果を得ることができた。ここでは、得られた結果のうち、2010年から継続的に観察・記録してきた塩類析出状況を総括するとともに、析出の変遷と季節変化について考察する。

まず、ハギア・ソフィア内壁において最も顕著に塩類析出が進行しているのは、これまでも報告してきた通り北西エクセドラである。北西エクセドラの内壁は、少なくとも4期の修復がみとめられ、その際に使用された壁材によって析出塩類の種類が決定されている可能性は前報で指摘している¹⁾。壁材によって劣化の程度も異なるが、一様に塩類析出とそれに伴うモルタル剥落はこの4年で明らかに進行していることを確認した。さらに、冬季に析出していた塩類が夏季に消失する可能性があることを新たに確認した。

例えば、北西エクセドラの西側では硫酸ナトリウムの析出とそれに伴う表層ペイントの剥落の進行がみとめられてきた。どのように剥落が進行しているのかその変遷を追うために、2010

*日本学術振興会特別研究員 PD

*²京都大学大学院工学研究科

*³近畿大学建築学部

*⁴東北芸術工科大学

年9月(図1)から2014年12月(図2), 2011年2月(図3), 2014年8月(図4)と観察を続けた結果, まず表層ペイントが剥落し, その後中間層モルタルが塩類の顕著な析出とともに粉状化し, 下地モルタルあるいは構造が露出することがわかった。このことは, 小椋らによるシミュレーション²⁾から推測される壁体内の水分蒸発のメカニズムとも合致している。

また, 北西エクセドラの最東端にあたる壁面からは2011年2月(図5)および2013年11月(図6)に硝酸ナトリウムの顕著な析出がみとめられたが, 2014年8月(図7)には析出物が一切みとめられず, 表面近傍の壁材からも硝酸ナトリウムは検出されなかった。その後, 2014年12月(図8)には再び硝酸ナトリウムが析出していることを確認した。つまり, 冬季において析



図1 北西エクセドラ西側 (2010年9月30日)



図2 北西エクセドラ西側 (2014年12月2日)



図3 北西エクセドラ西側 (2011年2月17日)



図4 北西エクセドラ西側 (2014年8月23日)



図5 北西エクセドラ最東端 (2011年2月17日)



図6 北西エクセドラ最東端 (2013年11月4日)



図7 北西エクセドラ最東端 (2014年8月23日) 図8 北西エクセドラ最東端 (2014年12月2日)

出していた硝酸ナトリウムが夏季には消失していることになる。2011年と2014年の壁面表層の状態を比較すると、黄色のペイントの剥落も進行しており、表層ペイントの剥落はこうした析出、消失、再析出の繰り返しによるものであることが示唆される。

同様の状況は、この後に述べるアヤ・イリニならびにカーリエでも確認されている。

2-2. 南北ティンパヌムの黒変色

南北ティンパヌム (図9, 10) とは、ハギア・ソフィアの中央ドームを南北で支える大アーチ内側の半円形壁面を指す。2012年に、塩類調査の一環として、南ティンパヌム内壁表面の劣化状況を調査したところ、南ティンパヌムの内壁表面は北に比べ黒ずんでおり、近くで観察すると埃が付着しているだけでなく、流水の痕跡、そして結露と思われる痕跡が黒くなっていることをみとめた (図11)。北ティンパヌムでは埃の付着は確認されたが、流水および結露の痕跡はなかった (図12)。この黒色化したペイントおよび黒色化していない黄色い部分のペイントを採取し分析した結果、それらのすべてに鉛が含まれていることがわかった (南ティンパヌム合計11点、北ティンパヌム合計2点)³⁾。

2014年に北ティンパヌムの修復計画として内壁表面のクリーニングと再塗装が検討されたため、壁面材料の分析を博物館から依頼され、2013年および2014年の調査で南ティンパヌムから合計19点、北ティンパヌムから合計47点のサンプルを採取した。採取箇所は図13, 14の通りである。北ティンパヌムには2014年8月の調査時に足場があったため、壁面上部からもサンプル



図9 南ティンパヌム



図10 北ティンパヌム



図11 南ティンパナム黒色付着物と結露の痕跡



図12 北ティンパナムでの黒色付着物



図13 南ティンパナム サンプル採取箇所



図14 北ティンパナム サンプル採取箇所

を採取することができた。また、南北ともにペイント層も採取し、その最表層と下地層との違いも確認した。南北ともに黄色い顔料によるペイントを最表層に伴うが、下地層は南北で異なり、北ティンパナムでは白色であるのに対して、南ティンパナムでは白色ではあるがわずかに黒色化していた。

サンプルは博物館およびトルコ文化観光省の許可を得て日本に持ち帰り、東京文化財研究所にて蛍光X線分析法 (XRF) による元素検出から鉛の有無を確認した。また、ペイント層の最表層 (黄色) と下地層 (白) の違いをみるために、蛍光X線分析に加えてX線回折分析法 (XRD) による結晶相の同定も実施した。使用した機器および設定は以下の通りである。

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)

測定領域：φ1.8mm

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 (2θ) 5-70°

分析の結果、南北ティンパナムの全サンプルから鉛が検出された。また、ペイント層については、南ティンパナムでは表裏ともに鉛が検出され、XRD 分析の結果から表面の黄色顔料ではなく黒色化している白色層が鉛を含む顔料であることがわかった。これに対して、北ティンパナムでは表裏ともに鉛が検出されたが、XRD 分析の結果から表面の黄色顔料が鉛を含む顔料であり、裏面の白色層は炭酸カルシウムであることがわかった。

この結果は南北ティンパナムの修復時期について検討する必要性を提起している。南ティンパナムが1910年頃にワクフによって修復されたことが記録としてあるのに対して、北ティンパナムは修復の記録がない。1980~1990年代にロレベによって表面にペイントが再塗布されたと言われているが、この時の作業記録は残っておらず、作業の有無および使用された顔料を知ることできない。しかし、1930年以降のトルコにおいて、鉛を含む顔料の使用が禁止されてきたことを考慮すると、1980年代の修復の際に今回確認された通りの鉛を含む顔料の使用は不可能であり、北ティンパナムの修復時期は1930年代まで遡ることになる。鉛の由来として、顔料ではなく他の要因も検討する必要があるかもしれない。過去の調査で、ドーム壁面からの析出物中に鉛を検出し、その由来について鉛屋根からの水の流入の可能性が指摘されている⁹⁾。しかし、南北で流水および結露の痕跡の有無に差異があるにもかかわらず鉛が一樣に検出されたこと、また塩類調査で他壁面から採取している析出塩類からは鉛が一切検出されていないことを考慮すると、鉛屋根の影響とは言い難い。

今後、南北ティンパナム壁面の修復も計画されているが、今回の分析により南北ティンパナム内壁面に使用された顔料に鉛が含まれていることが明らかとなり、壁画の歴史的価値の評価が必要となった。博物館と協力して、トルコで使用されてきた歴史的壁画材料について調査するとともに、保存・修復方策についても協議・検討していく予定である。

3. 他の歴史的建築物における内壁の劣化

3-1. アヤ・イリニの2階北西部における塩類析出とその変化

2013年にアヤ・イリニ調査を開始し、その際に2階北西部とアトリウムにおける塩類析出を確認した。2014年の調査で同箇所での塩類析出状況を確認したところ、ハギア・ソフィアと同様、析出状況に変化がみとめられた。

2階北西部における塩類析出は、2013年10月(図15)と2014年8月(図16)とでは、析出量に違いがみとめられる。図16中の①で示した箇所では、いずれの時期も硫酸ナトリウムが析出しているが、2013年10月にはレンガ表面全体を覆うように粉状の硫酸ナトリウムが析出していたのに対して(図17)、2014年8月には粉状の硫酸ナトリウムがみとめられず結晶状の硫酸ナトリウムのみが残存していることを確認した(図18)。



図15 2階北西部 (2013年10月9日)



図16 2階北西部 (2014年8月21日)

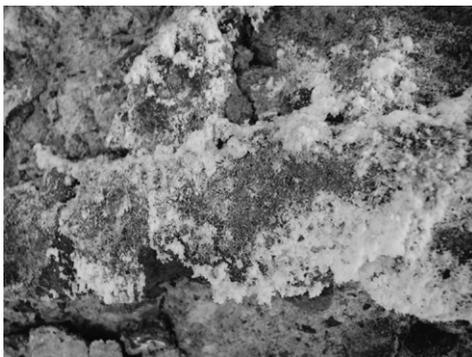


図17 図16中①硫酸ナトリウムの析出
(2013年10月9日)



図18 図16中①硫酸ナトリウムの析出
(2014年8月21日)

また、2013年10月に硝酸ナトリウムが析出していた箇所（図16中②）では、2014年8月には一切の析出物がみとめられなかった。なお、硝酸ナトリウムのかわりに表面を覆っていた硬い膜状の物質は硫酸カルシウムであることを確認している。2014年12月に再び同じ箇所の一部から硝酸ナトリウムの析出がみとめられたことから、アヤ・ソフィアと同様に、夏季における硝酸ナトリウムの消失と冬季における再析出を繰り返していると推測される。ただし、2013年10月ほどの析出はみとめられなかった。これは、なんらかの環境の変化によるものと考えられる。

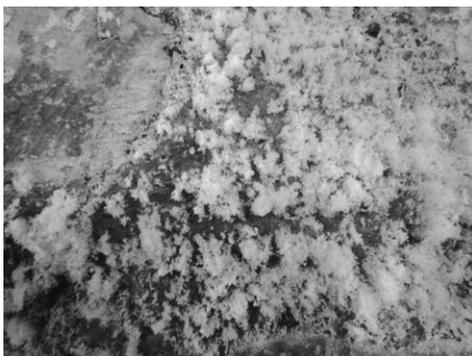


図19 図16中②硝酸ナトリウムの析出
(2013年10月9日)



図20 図16中②硝酸ナトリウムの消失
(2014年8月21日)

2014年1月8日（水）から開始された一般公開により、朝9時から夕方5時（夏季は7時）まで入り口扉が開放され、1日平均300～400人が来館することによる室内環境の変化も考慮し、今後検討していく必要がある。

2階の北西部のみにて塩類析出が顕著である理由を検討するにあたり、図15, 16に示した内壁に対応する外壁を確認したところ、雨天時に雨水が集中して流下する場所であることがわかった(図21)。屋根に設けられた排水溝によってこの場所は他に比べてより多くの雨水が壁面に直撃しており、アヤ・ソフィアと同様に接合モルタルの著しい削れがみとめられた。表面にはコケが繁茂しており、水分が保持されていることも明らかである。つまり、本報で取り上げる2階北西部における顕著な塩類析出の要因は、屋根の構造に起因する外壁への雨水の集中流下とそれに伴う雨水の過度な浸透であると言える。今後の対策としては、屋根の排水溝の変更が困難であることから、外壁の補強ならびに壁面に直下しない工夫を提案する必要がある。



図21 2階北西部の外壁

3-2. カーリエにおけるモザイクからの塩類析出とその変化

カーリエは、アヤ・ソフィアと同じ6世紀に建立された修道院の付属聖堂として、12世紀前半にイサキオス・コムネノス (Isaakios Komnenos, 在位：1093-1152) によって建てられた内接十字式のプランをもつビザンティン聖堂である(図22, 23)。ナオスは12世紀の建立当時の建築として現存しているが、外ナルテクス、内ナルテクス、そしてパレクシオン（墓廟礼拝堂）は1316～1321年のテオドロス・メトキティス (Theodoros Metochites, 在位：1270-1332) による増築である⁵⁾。増築部の天井や壁面には、12世紀以降に制作されたモザイクが数多く残っている。

オスマン・トルコ時代には、イスラム教のモスク「カーリエ・ジャミイ」に転用され、モザイクも漆喰で被覆されていた。1958年にカーリエ博物館として一般公開され、現在は年間約35万人の観光客が訪れるイスタンブールで人気のある博物館の一つである。1948～1958年にかけてポール・アンダーウッド (Paul A. Underwood, 1902-1968) 率いるビザンティン研究所に



図22 カーリエ外観 (2010年4月23日)



図23 修復中のカーリエ (2014年8月20日)

よって調査・修復が実施され、モザイク上の漆喰は除去された⁶⁾。彼らの調査以降、大規模な調査はおこなわれておらず、イスタンブール保存修復研究所による簡易の環境調査(1991年と2001年)⁷⁾⁸⁾や一部モザイクの修復(1999年)⁹⁾が実施されたのみである。

2012年にカーリエの修復が計画され、聖堂の地盤調査のための発掘が実施された。2013年10月からは聖堂全体の修復のための足場が設置され、第1区画としてナオスにおける大理石飾り板の洗浄や天井セメントの除去、接合モルタルの充填といった本格的な作業も2014年8月から開始された。現在、今後の作業として、モザイクやフレスコ画の保存処置等が検討されている。

カーリエでは、モザイクからの塩類析出が顕著にみとめられた。特に内ナルテクスの壁面モザイクからは、大量の塩類が析出しており、美観を損ねている。内ナルテクス(図24)には聖母マリアの物語と一部キリストの物語が描かれており、例えば南北のドームには聖母(北)とキリスト(南)、そして聖人らが配されている。ナオスに通じる扉の上部ティンパヌムには「キリストとテオドロス・メトキティス」が、南ドーム下部の東壁面にはデイシス(図25)が描かれている¹⁰⁾。このデイシス・モザイクからの塩類析出は特に顕著で、これは1991年のイスタンブール保存修復研究所による調査の際にも確認されていたことがレポートからわかっている。当時はモザイク下部にプラスチックのカバーが付けられていた。これは、観光客に塩類が飛散しないためであったが、このカバーによって析出が促進されている可能性が指摘され、その後撤去された。

デイシスでは図像以外の部分で下地モルタルが露出している。この露出した下地モルタルから塩類は析出しており、モザイクのテッセラ部分からは一切の塩類析出はみとめられない。これは、アヤ・ソフィアでも同様であり、ガラスや大理石のテッセラが表面を覆っている状態では塩類は析出せず、その周囲のモルタル露出部からの集中的な析出や、あるいはテッセラとテッセラの間から盛り上がるように析出することがわかっている。カーリエのモザイクはそのほとんどが区画全面をモザイクで覆っており、下地モルタルが露出しているのは、このデイシスとナオスに通じる扉の両脇に描かれた使徒のモザイク、そして外ナルテクスのモザイクの一部にしかない。これらのモザイクから顕著に塩類が析出していることから、露出した下地モルタルへの対策が必要であると言える。



図24 内ナルテクス(南向き)



図25 南ドーム下部東壁面デイシス・モザイク

カーリエでの析出塩類の種類をみると、アヤ・ソフィアならびにアヤ・イリニと同様に、2013年9月と2014年8月、12月とで硝酸ナトリウムの析出の有無に違いがあった。

まず、図25中①(図26, 27)はデイシス・モザイクの中間部の高さに位置し、モザイク・テッセラを埋め込んだような加工がしてある箇所である。ここからは、2013年9月に硝酸ナトリウムの析出が確認され、2014年8月、12月いずれにおいても同様の析出状況が確認された。しかし、モザイクの下部に位置する図25中②(図28, 29, 30)および図25中③(図31, 32, 33)で



図26 図25中①硝酸ナトリウムの析出
(2013年9月18日)



図27 図26拡大(図25中①硝酸ナトリウムの析出)
(2013年9月18日)

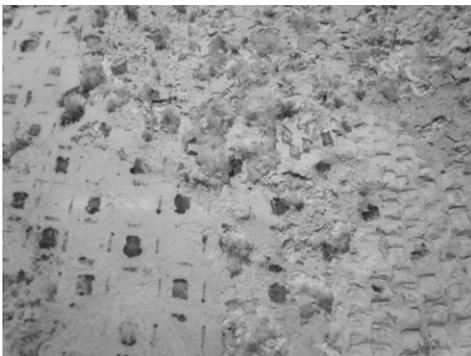


図28 図25中②硝酸ナトリウムの析出
(2013年9月18日)



図29 図25中②硝酸ナトリウムの消失
(2014年8月20日)



図30 図25中②硝酸ナトリウムの消失
(2014年12月9日)

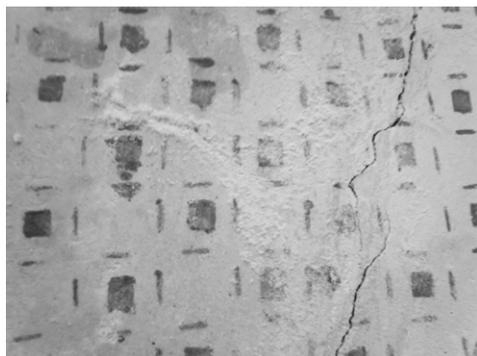


図31 図25中③硝酸ナトリウムの析出
(2013年9月18日)

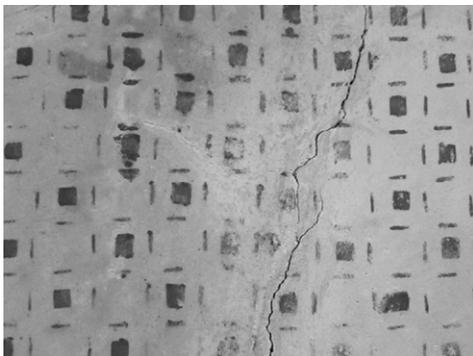


図32 図25中③硝酸ナトリウムの消失
(2014年8月20日)

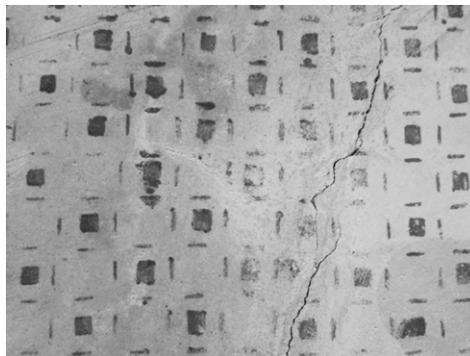


図33 図25中②硝酸ナトリウムの消失
(2014年12月9日)

は、2013年9月に析出が確認された硝酸ナトリウムが2014年8月、12月いずれにおいても一切析出していなかった。

この理由として、内ナルテクスから北ナルテクスに通じる南扉と同軸線上にある外に通じる扉からの風の流入の有無が考えられる。2013年10月に修復のための足場が設置されたことで、通常は入り口として常に開放されていた南扉が閉じられた。2014年8月の調査時には、換気のために開館時には扉が開放されていたが、外からの風の流れは2013年9月の調査時よりも少なく、内ナルテクスまで届くほどではなかった。2014年12月の調査時には、扉は完全に閉じられていた。修復終了後には再びこの南扉が入り口として使用される予定であり、風の流入が再開される。扉の開閉状況による温度湿度変化への影響と、デイシス・モザイクの下部における塩類析出との関係について、今後検討し、必要な方策を提案する必要がある。

4. まとめ

調査を実施している3つの歴史的建築物それぞれの劣化状況について本報で総括してきたが、どの建築においても同様に、硝酸ナトリウムが時季によって消失する事例を確認した。この析出・再析出の繰り返しが壁面に損傷を与えており、こうした季節変化をどのように緩和するのかを検討する必要があると言える。いずれの建築においても、塩類析出の主な要因は外壁あるいは屋根からの水分供給とするのが妥当といえるが、その是正については容易ではなく、博物館と協議し検討していく必要がある。また、アヤ・ソフィアで鉛を含む顔料の使用が確認されたことは、これまであまり注目されてこなかった内壁ペイントの歴史的評価につながる成果であるとともに、修復の実施にあたってこうした歴史的材料をどのように保存するのかを考えるきっかけとなった。

これまでの基礎的・予備的考察を基点とし、今後も各建築における現状の精査を継続していくとともに、実際的な保存方策の提案につながるよう、博物館と協議しながら調査を実施していく。

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、ハギア・ソフィアおよびコーラ修道院を管理するアヤ・ソフィア博物館の館長ならびに学芸員の方々、そしてアヤ・イリニを管理するトプカプ宮殿の館長ならびに学芸員の方々の理解と協力を得て実施することができた。ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 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・ソフィア大聖堂外壁の劣化とその要因に関する調査, 保存科学, **52**, 167-180 (2013)
- 2) 水谷悦子, 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・ソフィア大聖堂の壁画保存に関する研究 その3 内壁の仕上げ材が外壁および壁画の劣化に与える影響の検討, 日本建築学会大会(神戸)梗概集 (2014)
- 3) 佐々木淑美, 吉田直人, 小椋大輔, 安福勝, 水谷悦子, 石崎武志: ハギア・ソフィア大聖堂における内壁劣化の分布と南ティンパヌム壁画材料に関する調査, 日本文化財科学会第31回大会発表要旨 (2014)
- 4) 中井泉ほか: ハギア・ソフィア大聖堂の建築材料について, 日本文化財科学会第10回大会発表要旨, pp.98-99 (1993)
- 5) Robert Ousterhout: The Art of the Kariye Camii, SCALA, 33 (2002)
- 6) Paul A. Underwood: THE KARIYE DJAMI Vol.1-3, Bollingen Foundation distributed by Pantheon Books (1966)
- 7) Berçet Erdal: Müdürlük Makamına, İstanbul Rölöve ve Anıtlar Müdürlüğü, (1991), イスタンブール修復研究所所蔵報告書を参照
- 8) Revza Ozil: Müdürlük Makamına, İstanbul Restorasyon ve Konservasyon Laboratuvar, (2001), イスタンブール修復研究所所蔵報告書を参照
- 9) Hende Günyol: Müdürlük Makamına, İstanbul Restorasyon ve Konservasyon Laboratuvar, (2000), イスタンブール修復研究所所蔵報告書を参照
- 10) Robert Ousterhout: The Art of the Kariye Camii, SCALA, 103-116 (2002)

キーワード: 歴史的建築物 (historical buildings); 硝酸ナトリウムの消失 (Disappearance of nitratine); 硫酸ナトリウムの析出 (Crystallization of thenardite); 鉛を含む顔料 (pigment containing lead); モザイク (mosaic)

Research on the Degradation and Materials of the Inner Walls in Hagia Sofia and Other Historic Buildings of Turkey

Juni SASAKI*, Naoto YOSHIDA, Daisuke OGURA*², Masaru ABUKU*³,
Etsuko MIZUTANI*² and Takeshi ISHIZAKI*⁴

Surveys have been conducted in Hagia Sophia since 2009 and a new phase of our survey was launched in 2013 as a component of a large project, “Documentation, Analysis and Conservation of the Historical Architecture in Turkey.”

In Hagia Sophia, deterioration of the walls has accelerated owing to rainwater infiltration from the outside and evaporation on the inside surface. Additionally, crystallization is caused by water and salt movement in the porous materials, and it changes depending on the season.

At the North and South Tympanum, the use of pigment containing lead was confirmed: in the yellow pigment at the North Tympanum, and in the white pigment at the South Tympanum.

Survey has been started in Aya Irini since 2013 and it has been observed that crystallization at the second floor is also mainly caused by rainwater infiltration from the outside.

A new survey has also started in Kariye in 2014 and it has been observed that crystallization at the bottom part of some mosaics is especially caused by exposure of the setting bed and the incoming of air from the door in exonarthex.

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

*²Kyoto University

*³Kinki University

*⁴Tohoku University of Art and Design