

〔報文〕ハギア・ソフィア大聖堂の屋内外環境と劣化状態（２）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

著者	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, 早瀬 礼子
雑誌名	保存科学
号	52
ページ	27-42
発行年	2013-03-26
URL	http://id.nii.ac.jp/1440/00003842/



〔報文〕 ハギア・ソフィア大聖堂の屋内外環境と劣化状態（2） —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—

小椋 大輔*・石崎 武志・安福 勝*²・小泉 圭吾*³・佐々木 淑美・
日高 健一郎*⁴・早瀬 礼子*

1. はじめに

ハギア・ソフィア大聖堂では、屋内の壁画が塩の析出などにより部分的に劣化しており、これは屋内外環境が影響を与えていると考えられる。ハギア・ソフィア大聖堂のギャラリー階や第2コーニス部分では、特に西側部分のほぼ全面に見られる表面塗装の剥落に加え、一部では下地材の剥離も確認され、そのメカニズムの解明が急務である。本研究は、この様な場所による劣化の違いの原因を明らかにし、今後の保存対策について提案を行うことを目的としている。前報では、ハギア・ソフィア大聖堂内部の温湿度性状を明らかにするために2010年9月に現地に設置された外界気象観測装置と屋内の温湿度センサーの測定結果と2011年9月に行った壁面の劣化状態と含水率分布の現地調査結果について述べた¹⁾。本報では、2012年9月に行った屋内壁面の含水率分布と降雨後に撮影した屋外熱画像について検討を行う。次に2010年9月より測定を行っている屋内外の温湿度データを元に壁体内の熱水分移動の数値シミュレーションを行い壁体内の水分性状について検討を行い、壁体外側を被覆し防水するのに適切な時期の検討を行う。

2. 含水率分布の分析

2-1. 含水率計測

図1に示すように、ハギア・ソフィア大聖堂は4階（地上階、ギャラリー階、第2コーニス、ドームコーニス）で構成されている。第2コーニス西側外壁では2008年にビザンチン時代の建設当時の外壁面の再現を目的として漆喰面を剥がしレンガが露出している²⁾。表面塗装の剥落や下地材の剥離等の劣化の主な原因は、塩類析出であり、その他には表面塗装の乾湿繰り返しによる膨脹収縮などが考えられる。この内、第2コーニスの室内側壁面が劣化の進行が早いと考えられることから、昨年度と同様、この壁面の含水率測定を2012年9月の調査時に行った。含水率測定は、昨年度と同様の TDR 水分計（ドイツ IMKO 社製 TRIME-FM3, S3F Surface Probe 使用）を用い、壁面下部の絵が描かれていない漆喰面に接触型センサーを押し当てて行った。なお、ここの壁体構成は、図2に示すように、レンガ造で、屋内外の仕上げが漆喰となっており屋内は表面が塗装されている。図3に含水率測定時の第2コーニスの壁面位置の参照番号を示す。この番号は、第2コーニスの手すりに付置されているものであり、南西部を原点として、南東、北東、北西部の反時計回りに順番が割り振られている。図中の小数点は番号の中間の位置を表している。外壁の漆喰は2008年に西側壁面で剥がされており、東側壁面では漆喰が残っている²⁾。

*京都大学大学院工学研究科 *²近畿大学建築学部 *³大阪大学大学院工学研究科

*⁴筑波大学大学院人間総合科学研究科



図1 大聖堂の内観

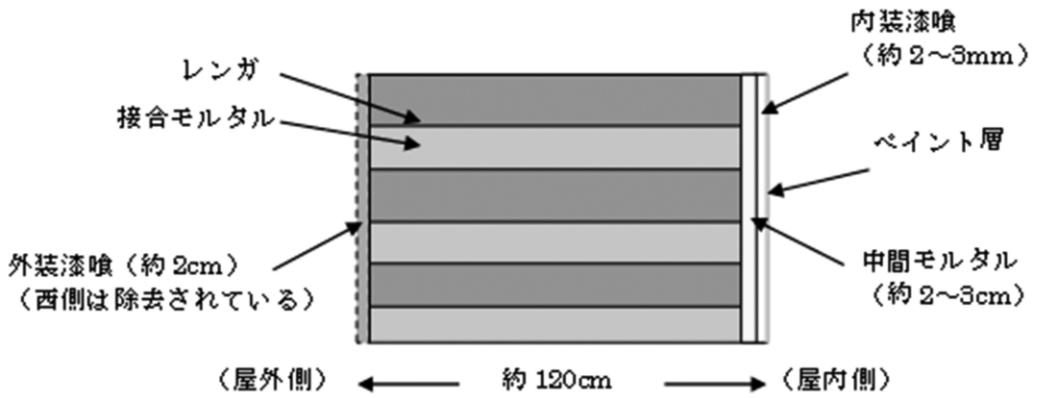


図2 壁体構成の概要

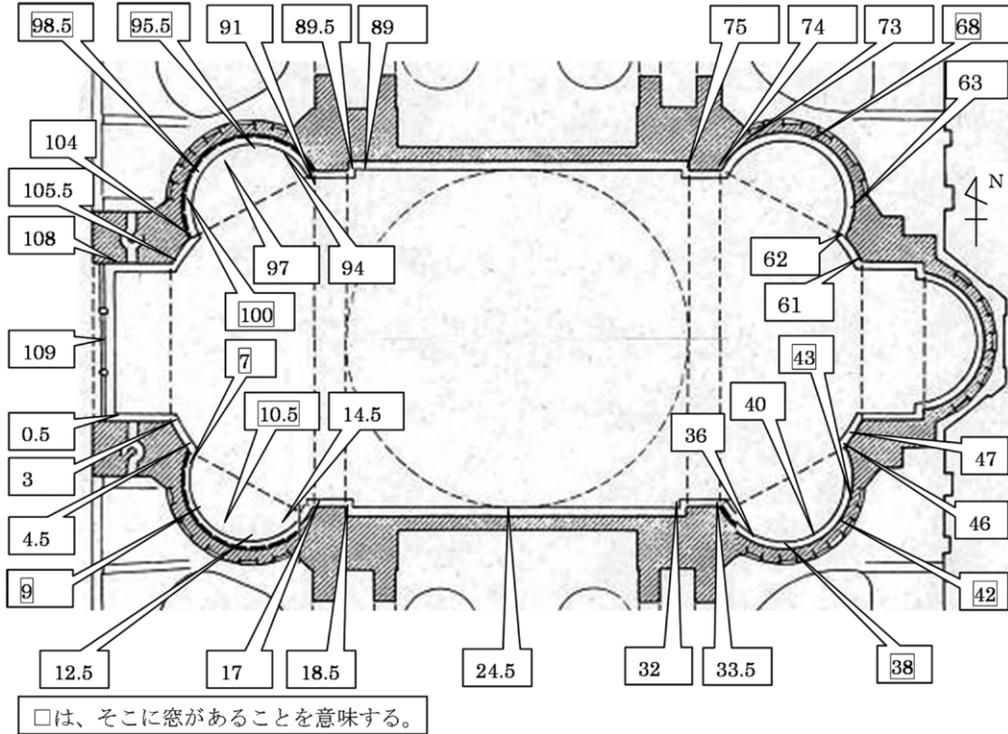


図3 第2コーニスの壁面位置の参照番号

2-2. 第2コーニスの含水率分布

(1) 第2コーニスの北西、南の測定結果と昨年度の測定結果との比較

図4、5にそれぞれ第2コーニスの北西、南側の含水率分布を示す。

北西では昨年度より若干低い領域が部分的にあるが、全体的にほぼ等しい分布である(図4)。南では昨年度より3~5ポイント低い含水率となっている部位が南東に集中している(図5)。

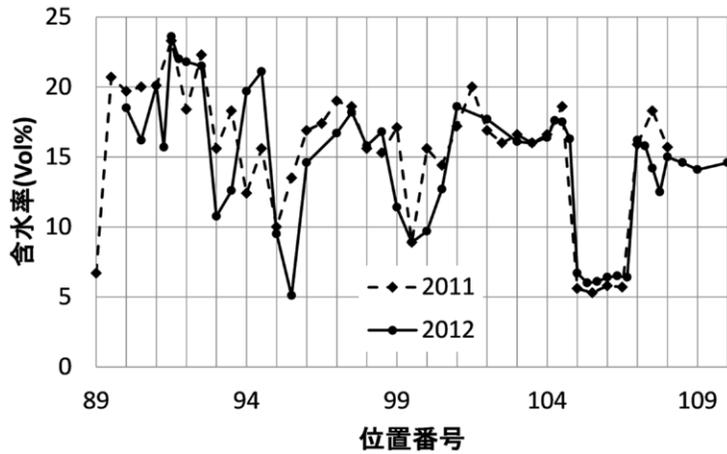


図4 第2コーニスの北西の壁面の含水率分布

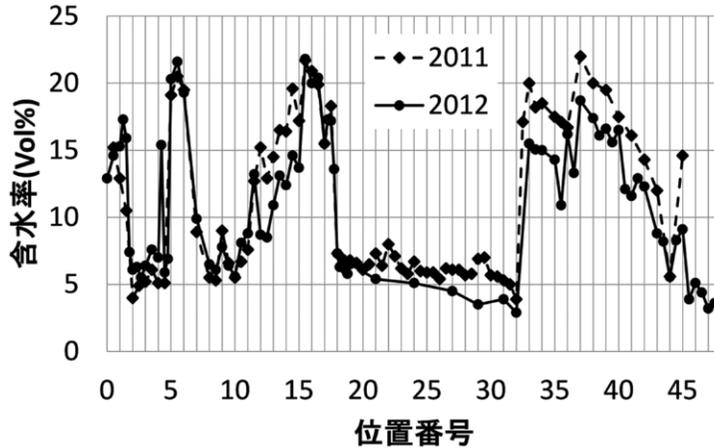


図5 第2コーニスの南側壁面の含水率分布

(2) 第2コーニスの北東の測定結果

昨年度は、測定出来ていなかった第2コーニスの北東部の含水率分布を図6に示す。65～68の領域の含水率が高く、その次に68～73の領域が高い。

(3) 平均含水率

各壁面の平均含水率を表1に示す。南東、南西、北西の平均含水率は、2011年より2012年の方が若干下がる。他の部位より南東部の低下は若干大きい。2012年で最も平均含水率の低い場所は北東部である。ただし、最大含水率は、どの部位でも20%を超えており、含水率の高い領域はどの壁面でも存在している。

2-3. 第2コーニスの含水率測定結果の考察

図7に、2010年10月から2012年8月までハギア・ソフィア大聖堂の屋外で計測している降雨量を示す。2010年10月と12月は、2011年の同月より大きな降水量があるものの、1月～8月は、

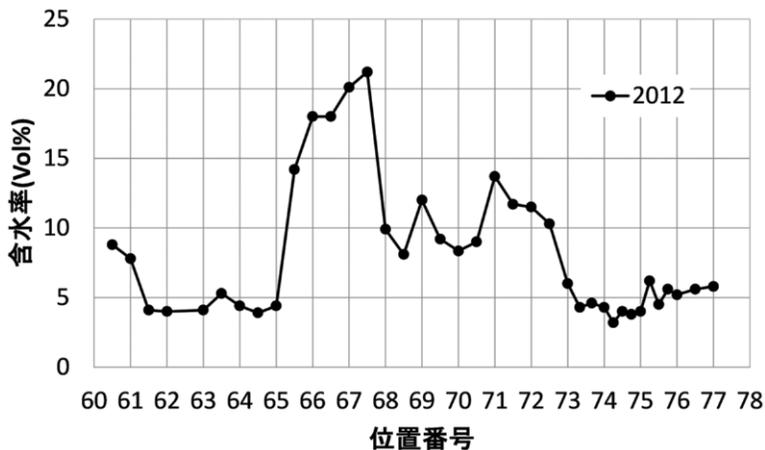


図6 第2コーニスの北東壁面の含水率分布

表1 各壁面の平均含水率

場所	番号	含水率[vol%]	
		2011年9月	2012年9月
南西	0-19	11.8	11.3
南東	32-47	14.7	11.2
北西	89-108	15.5	14.5
北東	60-75		8.6

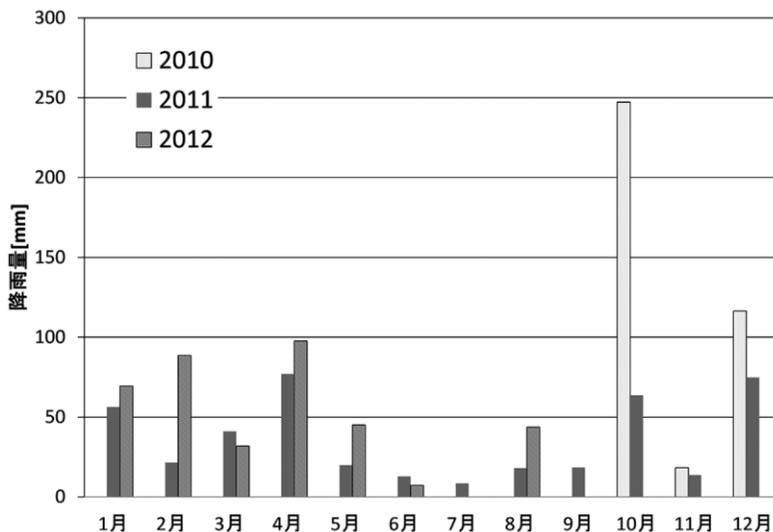


図7 2010年10月～2012年8月までの月積算降水量

2011年より、2012年の方が各月で降水量がやや大きくなっている。ただし、第2コーニスの含水率の年ごとの変化は大きくない。この2年間の降水量の違いは測定部位の含水率の変化に与える影響は小さいと考えられる。

3. 屋外表面の熱画像の分析

3-1. 熱画像による測定

熱画像は、測定表面の放射率の差が小さければ面的な温度分布を知る上で有効な測定手法である。もし壁表面で濡れている、あるいは含水率が高い部位があると、そこからの水分蒸発により、温度が低くなる。従って、同一の壁体構成の熱画像で明確に温度が低い部位は含水率が高くなっている可能性がある。ただし、表面温度は、表面材料の放射率⁽¹⁾、その壁体構成に加えて、材料に接する空気温度、気流、日射といった環境条件の影響⁽²⁾を受けるため、これらの影響を考慮して測定値を分析する必要がある。2012年9月の現地調査時の降水のあった翌日に、第2コーニスの屋外で赤外線サーモグラフィ装置(日本アピオニクス社製F30S)を用いて、直達日射が当たらない壁面を対象に、熱画像撮影を行い、壁面への雨水の当たり方を検討する。

3-2. 西側の第2コーニスの屋外側表面の可視画像と熱画像

2012年9月18日に降雨があり、その翌日の午前中に西側の第2コーニスの屋外側表面で熱画

像撮影を行った。図8～11に温度低下が確認できる典型的な部位の可視画像および熱画像を示す。図8では、底下および窓横の温度が低い。図9では、手前の屋根からその直下の壁面と、奥の壁面で温度が低い部位がある。また、図9の可視画像から、低温部位で藻類の繁茂が確認でき、手前の壁面は、レンガを接合するモルタルが大きく削れていることが分かる。図10では、壁面に3箇所縦長の低温部位が確認できる。図11では、壁面の下部で低温部位が確認できる。また、可視画像から、この部位は、接合モルタルの削れが大きく、表面のレンガの剥落も生じ

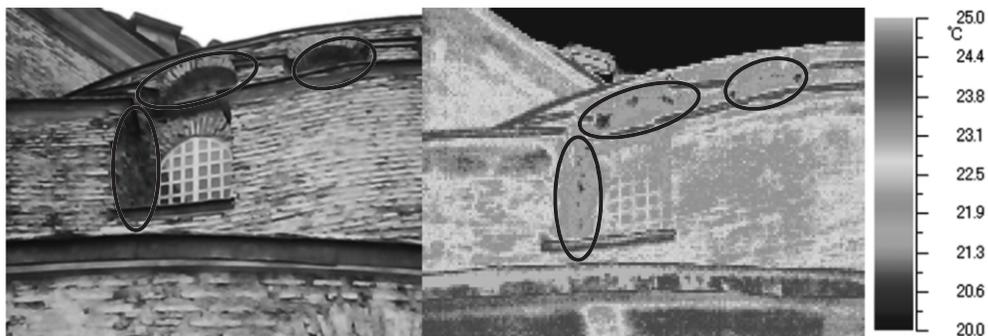


図8 第2コーニス北西上部の可視画像(左)と熱画像(右)(口絵参照)



図9 第2コーニス北西部の可視画像(左)と熱画像(右)(94の外)(口絵参照)



図10 第2コーニス北西部の可視画像(左)と熱画像(右)(口絵参照)

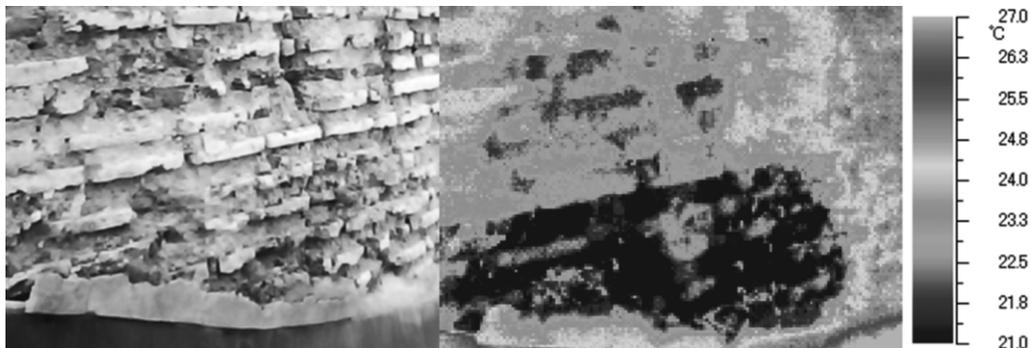


図11 第2コーニス南西部壁面下部の可視画像（左）と熱画像（右）（口絵参照）

ており、藻類の繁茂が確認できる。

3-3. 西側の第2コーニスの屋外側表面の熱画像の低温部位に関する考察

図8～10の熱画像で確認できた低温となる部位の理由は、雨水が流れて含水率が高くなっているためと考えられる。ただし、図8の底下の温度が低い原因は、日射（天空日射）が遮蔽されているためと、雨水が底下を伝って流れて含水率が高くなっているためとの両方の影響が考えられる。また、図11の低温の部位は、可視画像より壁面の上面より出っ張りが大きい部位と重なり、屋根面から流れ落ちる水が衝突し易い部位となっているためと考えられる。

3-4. 第2コーニスの屋外側表面熱画像と劣化状態との関係について

屋外壁面の温度が低い場所は、屋根面に降った雨が壁面を流下したり、落下して出っ張った部分に衝突することで、含水率が高くなっていると考えられる。これらの部位では、可視画像から、藻類の繁茂（図9、11）や、レンガの接合モルタルで大きな削れ（図8～11）がみられる。雨の流下が顕著な部位は、壁面の劣化が進行しやすくなっていると考えられる。壁面の保護の観点から、壁面の雨の流下を抑えるために屋根の庇を長くしたり、樋を設けることは、抜本的な対策になると考えられるが、建物の外観を変えてしまうため実現は難しいといえる。レンガが露出した壁の保護や壁体への水分の浸透を抑えるためには、透水性の低い材料で壁を覆うことや、外壁の隙間、特に壁面と開口部の間や、壁と屋根の間の隙間を埋めることが有効と考えられる。

4. レンガ壁体における熱・水分移動解析

本章では、大聖堂の壁体の水分の浸透と結露の挙動を明らかにするため、熱・水分移動の数値シミュレーションを行う。ここでは、まず現地で剥落していたレンガの水分拡散係数の同定を行う。次に、検討の第1段階として、図2の壁体構成をレンガのみで構成される壁体とおき、上記水分拡散係数を用いて屋内外環境の測定値の条件下でレンガ壁体の水分挙動を明らかにする。降雨が外壁を浸透する影響と、その場合のレンガの水分移動係数の違いの影響について検討を行う。最後に、屋外から壁体への水分浸透を抑える方策の一つとして、壁体の外壁を覆って外表面に防水措置を施す事を考え、どの時期に壁体内の含水率が低くなるのかを、上記計算結果から判断し、外壁を覆うのに適切な時期について数値シミュレーションによる検討を行う。

4-1. 現地レンガの水分拡散係数の同定

大聖堂の壁面から剥落したレンガを採取し、乾燥炉で乾燥させた後、水分浸透速度計（デカゴン社製 携帯型ミニディスクインフィルトロメーター）を用いて水分浸透実験を行った。測定はレンガ試料の水平な面の上に、水で満たしたインフィルトロメータを置き、水分化学ポテンシャル一定（-0.098J/kg）の条件下で、浸透断面（円形）の水分流量の時間変化を計測した。この水分流量に一致するように、水分収支式を用いて円筒2次元座標の数値解析を行い、含水率勾配水分拡散係数を同定した。用いた水分収支式は、後述の熱水分同時移動方程式を、等温状態として含水率を水分移動の駆動力としたものである。

$$\rho_w \frac{\partial \psi}{\partial t} = \nabla \cdot (D_\psi \nabla \psi + \lambda'_\mu g)$$

ここで、 ρ_w ：液水の密度 [kg/m³]、 ψ ：含水率 [m³/m³]、 D_ψ ：含水率勾配水分拡散係数 [kg/ms]、 μ ：水分化学ポテンシャル [J/kg]、 g ：重力加速度 [m/s²]

後述の熱水分同時移動方程式の水分化学ポテンシャル勾配に関する水分伝導率 λ'_μ と、水分拡散係数 D_ψ の関係式を以下で示す。

$$\lambda'_\mu = D_\psi \frac{\partial \psi}{\partial \mu}$$

なお、上式で必要となる含水率と水分化学ポテンシャルの関係は、レンガの平衡含水率から求めた。図12に水分流の測定値と同定された水分拡散係数を用いて求めた水分流の計算結果を示す。同定された水分拡散係数は以下の式である。

$$D_w = 1.332 \times 10^{-6} e^{31.6\psi}$$

4-2. 解析概要

ハギア・ソフィア大聖堂の壁体をモデル化し、熱・水分移動解析を行う。用いる基礎方程式は、以下の熱水分同時移動方程式³⁾である。

$$\text{熱収支式} \quad (c\rho)_{ap} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot ((\lambda + r\lambda'_{Tg}) \nabla T + r\lambda'_{\mu g} \nabla \mu)$$

$$\text{水分収支式} \quad \rho_w \frac{\partial \psi}{\partial \mu} \frac{\partial \mu}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda'_\mu \nabla \mu + \lambda'_T \nabla T)$$

ここで、 $(c\rho)_{ap}$ ：みかけの容積比熱 [J/m³K]、 T ：温度 [K]、 μ ：水分化学ポテンシャル [J/kg]、 λ ：熱伝導率 [W/m²K]、 r ：相変化熱 [J/kg]、 λ'_{Tg} ：温度勾配による気相水分伝導率 [kg/

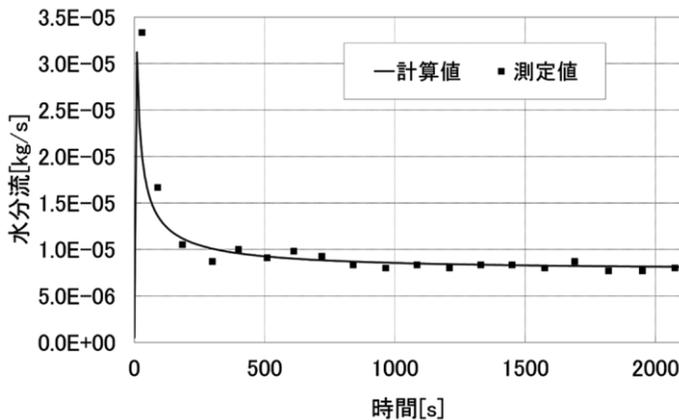


図12 水分浸透実験の測定値と同定された水分拡散係数を用いた計算値

msK], $\lambda'_{\mu g}$: 水分化学ポテンシャル勾配による気相水分伝導率 [kg/ms(J/kg)], λ'_T : 温度勾配による水分伝導率 [kg/msK], λ'_μ : 水分化学ポテンシャル勾配による水分伝導率 [kg/ms(J/kg)]

4-3. 解析対象および計算条件

壁体は図13のように厚さ120cmのレンガのみで構成される1次元壁体とする。数値シミュレーション手法は、前進型有限差分法を用いた。室内外は第3種境界条件とし、図15~17に示すように、2010年9月26日から2011年9月26日までの1年間の室内外の温湿度と降水量の測定値を与え、この条件が繰り返し続くものとし、周期的な定常状態が得られた結果について検討を行う。なおここでは北側壁面のように日射があたりづらい部位を想定し、日射は考慮しない。外壁面にあたる雨は、風によって運ばれるものや、屋根面に降った後に壁面を流れるものなどが考えられる。本解析では、屋根から壁面を流下する雨のみを考慮し、図14に示すような屋根の斜線部に降った雨が、図中の半円部分から一様に壁面を流下することとした。壁面は、水平面の降水量の最大約3倍の水量が流下する条件となる。レンガの熱水分物性値は、比熱は920 (J/kg K)、密度は1800 (kg/m³) とし、水分化学ポテンシャル勾配による水分伝導率は4章の水分拡散係数の結果を、その他は文献値⁴⁾を用いる。

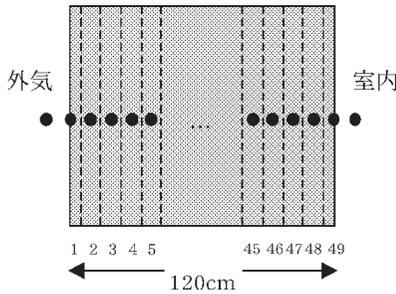


図13 解析対象

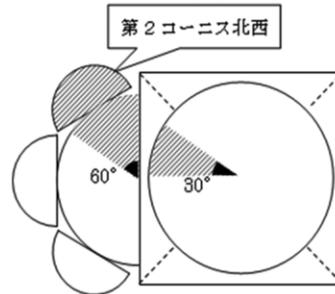


図14 屋根からの雨水流下

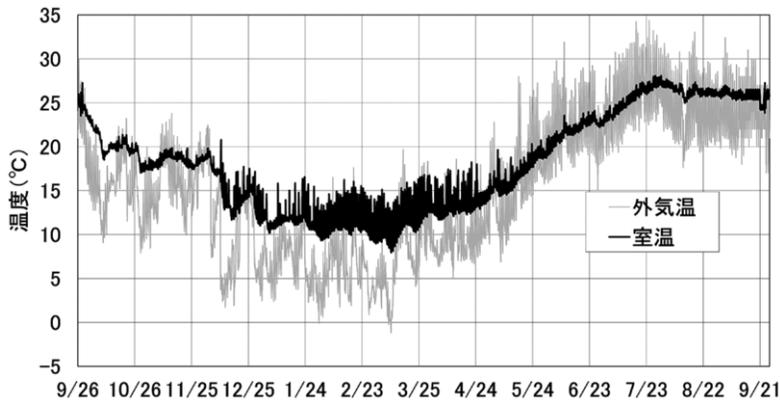


図15 解析に用いた外気、室内の温度

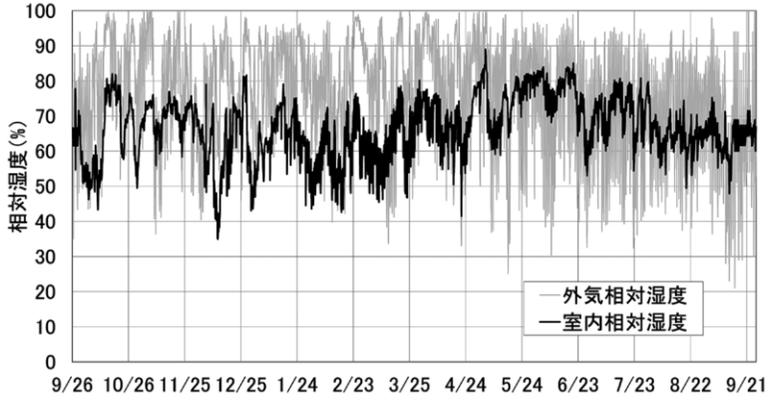


図16 解析に用いた外気, 室内の相対湿度

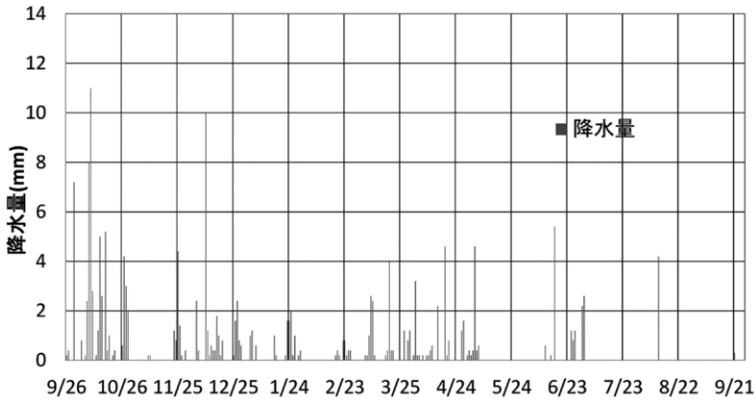


図17 解析に用いた降水量

4-4. 降雨の有無の影響の検討

まず降雨の有無による違いについて検討する。図18, 19にそれぞれ降雨が無い場合と降雨がある場合の壁体の室外表面, 中央, 室内側表面 (以下内壁面) の含水率の解析結果を示す。降雨が無い場合, 内壁面の含水率は最大でも0.4 (vol%)であった (図18)。降雨がある場合, 内壁面では5~6月に最大5.2 (vol%)と上昇するが, 9月には0.2 (vol%)に低下する (図19)。

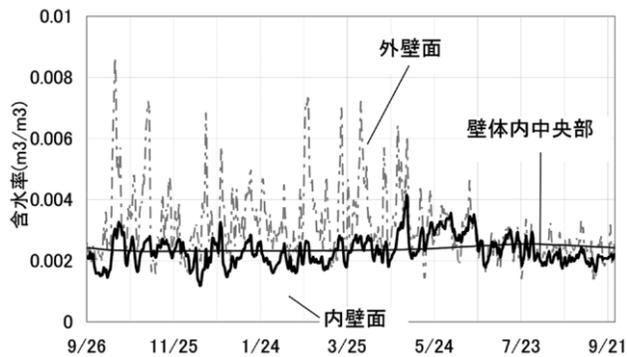


図18 降雨が無い場合の含水率変動

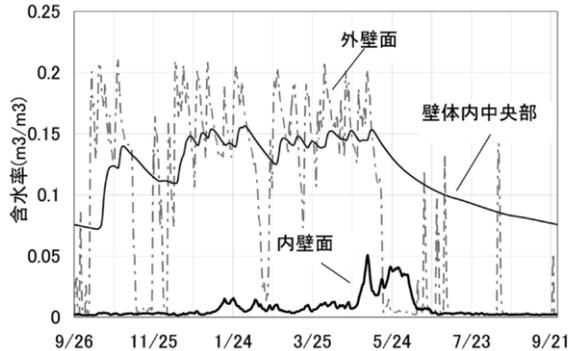


図19 降雨が有る場合の含水率変動

ただし、内壁面での結露^{注3)}は、降雨の有無に関わらず発生しなかった。以上から、内壁面の含水率が高くなる原因は、屋外からの雨水の浸透によるものといえる。

壁体に使われているレンガは製作時期の違い等により物性値はばらつくと考えられる。次に、レンガの透水性が大きい場合を想定し、降雨が有り、水分伝導率が5倍となった場合について検討する。図20にその結果を示す。水分伝導率が上がることで内壁面の最大の含水率は20 (vol%) 近くに達し、高含水となる期間が長くなるが9月には約0.2 (vol%) に低下する。この場合も結露は発生しなかった。

現地の含水率測定値は9月で最大となる場所は20 (vol%) 程度であり、最小となる場所は4 (vol%) 程度であり、解析結果 (図19, 20) は乾燥側の方が近い。図19の結果から、夏期に屋内壁面で低い含水率を示す部位については説明できるが、夏期に屋内壁面で高い含水率を示す部位については十分説明できない。図20の結果も同様である。これは隙間を通じた水分浸透の影響や、レンガを接合するモルタルの水分浸透の影響、境界条件の雨水の与え方等が考えられ、さらに検討が必要である。

4-5. 壁体の屋外側表面を覆う時期の検討

前節から、室内側表面の含水率の上昇は、壁体の屋外側からの降水の浸透の影響が大きいことが示された。3-4節に述べたように屋外からの水分浸透をできるだけ抑えるための方法の一つとして屋外側表面を透水性の低い材料で被覆することが考えられる。ただし、壁体内の含水状態が高いままで被覆をすると、壁体内の水分が抜けづらくなり、その多くが室内側で蒸発

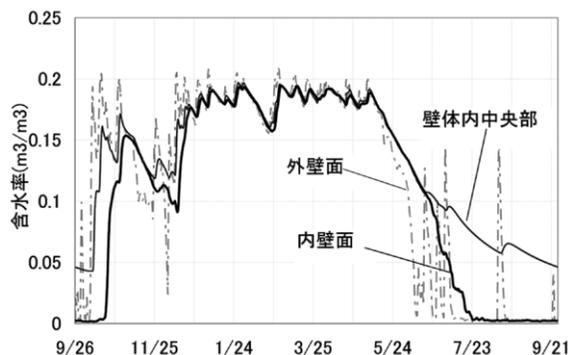


図20 水分伝導率が5倍かつ降雨が有る場合の含水率変動

し塩類析出がより進行してしまう危険性も考えられる。ここでは、いつの時期に屋外側表面を被覆すれば、壁体内の含水率がより低い状態となるのかについて、4-3節の解析モデルを用いて検討を行う。

まず前節の降雨がある場合の壁体内の含水率分布の計算結果を図21, 22に示す。含水率が高くなる時期は、11月から4月(12月を除く^{※4)})にかけてであり、低くなる時期は、8~10月である。これを踏まえて屋外側表面を覆う時期の違いがその後の壁体内含水率に与える影響を検討するため、2月と8月のそれぞれの時期で屋外側表面が完全に防水防湿されるものとして計算を行った。

図23, 24に、それぞれ2月, 8月から屋外側表面を覆う場合について覆った直後からの含水率分布の変化を示す。2月に覆う場合、覆った直後は最大17 (vol%) の値が半年で10 (vol%) となり、そこから徐々に減少する。8月に覆う場合、覆った直後は最大9 (vol%) であり、半年で7 (vol%) となり、徐々に減少する。図23と24の比較より、8月から防水措置を施した場合、2月の半分近くの含水率の値から緩やかに減少していく。また、覆った後から半年間で屋

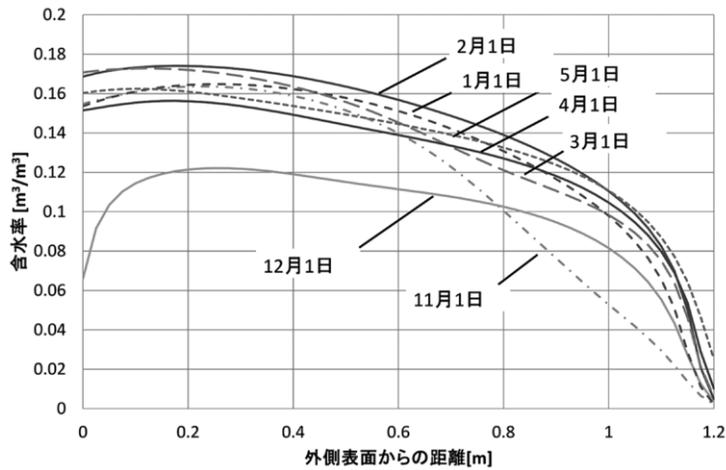


図21 降雨がある場合の壁体内含水率分布 (11月から5月)

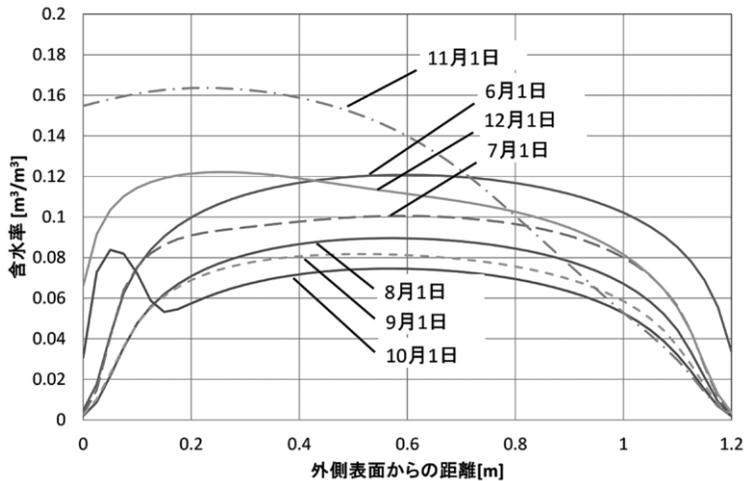


図22 降雨がある場合の壁体内含水率分布 (6月から12月)

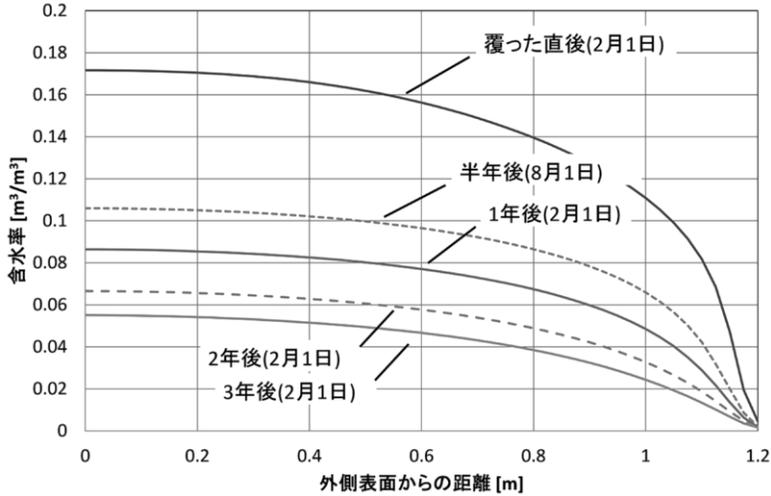


図23 2月に屋外側表面を防水・防湿した場合の含水率分布変化

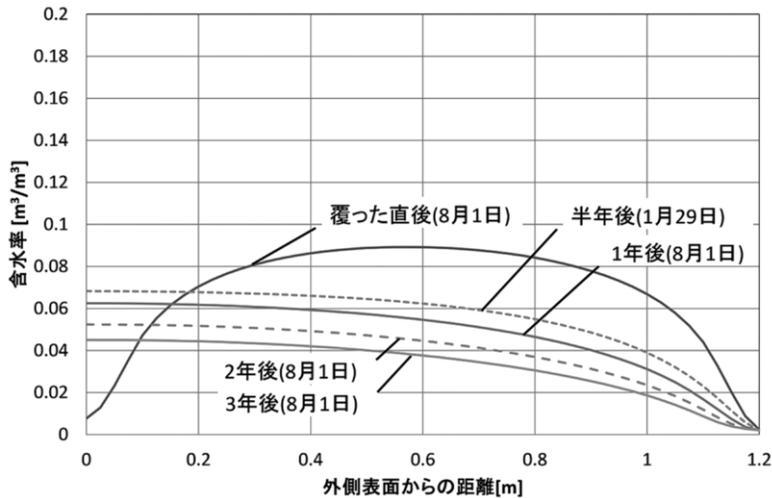


図24 8月に屋外側表面を防水・防湿した場合の含水率分布変化

内側表面から蒸発する水分量を計算すると、2月に覆う場合と8月に覆う場合で、壁面単位面積あたりで、それぞれ66.1kgと16.3kgであり、8月に覆う場合が、2月に覆う場合の四分の一であった。被覆時期の違いがその後の壁体内含水率分布や屋内側の水分蒸発量に与える影響が大きい事が分かる。従って、壁体が乾燥している時期（8～10月）に被覆を施すことが、その後の壁体の含水率を低く保ち、屋内側表面からの水分蒸発を抑制することが分かる。なお今回の計算は、壁体の外側を完全防水としているが、実際に覆う場合は透水性をある程度有する材料を用いるため、壁体に蓄積した水分が屋外側に放湿したり、屋外から量的に少ないながら降水が浸透すると考えられる。乾燥するまでの期間は、より詳細な検討が必要である。

5. まとめ

本研究は、ハギア・ソフィア大聖堂内部の劣化の原因を明らかにし、今後の保存対策について提案を行うことを目的として、本報では、2012年9月に行った屋内壁面の含水率分布と降雨後に撮影した屋外熱画像について検討を行った。次に2010年9月より測定を行っている屋内外の温湿度データを元に壁体内の熱水分移動解析を行い壁体内の水分性状について検討を行い、壁体外側を被覆し防水するのに適切な時期の検討を行った。

得られた主な結果は以下の通りである。

第2コーニスの屋内壁表面の含水率測定および西側の屋外壁表面の熱画像調査から以下の結果を得た。

- 1) 第2コーニスの屋内壁表面の平均含水率は北西が最も高く、南東、南西、北東の順に小さくなる。しかし、いずれも20%を超える含水率の部位が存在した。
- 2) 2011年9月と2012年9月の第2コーニスの屋内壁表面の含水率分布の差は小さかった。
- 3) 降雨後の屋外壁表面の熱画像から、壁面で水分が流下しやすい部位が明らかになった。また雨の流下が顕著な部位は、接合モルタルの割れが大きく、劣化が進行していた。レンガが露出した壁の保護や壁体への水分の浸透を抑えるためには、透水性の低い材料で覆うことや、外壁の隙間、特に壁面と開口部の間や、壁と屋根の間の隙間を埋めることが有効と考えられる。

次に、降雨が外壁を浸透する影響と、その場合のレンガの水分移動係数の違いの影響について明らかにするため、検討の第1段階として、レンガのみで構成される壁体の熱水分挙動の数値シミュレーションによる検討を行い、以下の結果を得た。

- 4) 降雨の外壁からの浸透により内壁表面の含水率が上昇する。
- 5) 夏期は屋内壁表面の含水率は低下し乾燥する。測定結果と比較すると、夏期に屋内壁面で低い含水率を示す部位については説明できるが、夏期には屋内壁面で高い含水率を示す部位については十分説明できない。これは隙間を通じた水分浸透の影響や、レンガを接合するモルタルの水分浸透の影響、境界条件の雨水の与え方等が考えられ、さらに検討が必要である。

さらに、屋外から壁体への水分浸透を抑える方策の一つとして、屋外表面に防水措置を施した場合に、いつの時期に屋外側表面を被覆すれば、壁体内の含水率がより低い状態となるのかについて、数値シミュレーションにより検討を行い、以下の結果を得た。

- 6) 屋外表面を覆わない状態では、壁体内部の含水率が低くなる時期は8～10月であり、高くなる時期は11月、1月～4月であった。
- 7) 降水量が少なく、壁体内部の含水率が最も低くなる時期（8～10月）に、屋外側表面を防水することで、屋外表面の防水措置後の壁体内の含水率を低く保ち、屋内側表面からの水分蒸発を抑制することができる。

謝辞

本研究は、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)の助成を受けたものである。記して感謝申し上げます。

注

- 1) 壁面の放射率は、同一材料であればほぼ等しいと考えられる。熱画像撮影は、レンガと接合モルタルを対象としており、レンガの部位だけの比較や接合モルタルの部位の比較を行う場合、熱画像の温度の比較は十分可能である。
- 2) 直達日射があたり高温となる面や、隅角部など気流が小さく、2、3次元的な熱移動により他と異なる温度となる面の検討は避ける。また、表面が同じ材料でも背後に隙間がある面とない面では、隙間のある面の方が周辺空気温の影響を大きく受けることに注意が必要である。
- 3) ここで内壁面の結露は、壁表面の温度が室空气の露点温度を下回り、壁表面の相対湿度が95%以上となる状態として定義した。
- 4) 数値シミュレーションに用いた2010年11月の降水量は、少なかったことが、計算結果に影響を与えている。平均的には11月も降水量が多いので、12月の壁体内含水率は11月と同様に高い値となる可能性が高いと考えられる。

参考文献

- 1) 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**，23-24（2011）
- 2) 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（2011）
- 3) 松本衛，『新建築学大系10 環境物理』第3章湿気（1984）彰国社
- 4) 伊庭千恵美：多孔質建築壁体における水分の凍結・融解過程に関する研究，京都大学大学院工学研究科修士論文（2002）

キーワード：ハギア・ソフィア大聖堂 (Hagia sophia)；温度 (temperature)
；湿度 (relative humidity)；劣化 (degradation)；塩の析出 (salt crystallization)
；剝離 (flaking)；雨水の浸透 (infiltration of rainwater)
；熱水分同時移動 (coupled heat and moisture transfer)
；シミュレーション (simulation)

Deterioration on the Wall and Indoor/Outdoor Environmental Condition in Hagia Sophia, Istanbul, Turkey (2)

**- Survey on Moisture Content Profile and Thermography,
and Numerical Simulation of Moisture Behavior of the Wall -**

Daisuke OGURA*, Takeshi ISHIZAKI, Masaru ABUKU*²,
Keigo KOIZUMI*³, Juni SASAKI, Kenichiro HIDAKA*⁴
and Ayako HAYASE*

In order to propose measures for the future preservation of the interior of Hagia Sophia, it is necessary to clarify the causes of deterioration. In the present study, thermal imaging and moisture content distribution measurement were conducted during field survey in September 2012. Moisture transfer in the wall was analyzed by using the indoor and outdoor temperature and humidity measured in September 2010. In addition, the appropriate time to cover the outside wall in order to prevent evaporation of accumulated water at the inside surface of the wall was examined by numerical simulation.

The main results obtained are as follows.

- 1) From the measurement of moisture content, it was found that the wall in all directions of the second cornice has moisture content of more than 20%. Especially the northwest side of the indoor wall surface of the second cornice has the highest average moisture content.
- 2) The location of water flow on the wall can be identified from thermal image survey. At the location of the water flow, there is large peeling of the mortar joint.
- 3) Numerical simulation shows that moisture content of the inner wall surface rises because of the penetration of rainwater at the outer wall surface.
- 4) Numerical simulation shows that appropriate time to cover the outer wall is summer because the moisture content in the wall then is lower than in the other seasons.

*Graduate School of Engineering, Kyoto University **Faculty of Architecture, Kinki University

**Graduate School of Engineering, Osaka University

**Graduate School of Comprehensive Human Sciences, University of Tsukuba