

〔報文〕 ハギア・ソフィア大聖堂の屋内外環境と劣化状態

小椋 大輔*・石崎 武志・小泉 圭吾*²・佐々木 淑美・
日高 健一郎*³・河田 慧*

1. はじめに

ハギア・ソフィア大聖堂のレンガ造壁体および壁面の劣化は、壁面の結露や壁体内の水分量の変化などが影響していると考えられる。この壁体の水分量は、建物内外の温湿度環境の影響を大きく受ける。ハギア・ソフィアの地上階部分では、北面で壁面の劣化と夏期の結露を確認しており、南面でも夏期に結露が生じるとの報告を受けている。またギャラリー階や第2コーニス部分では、特に西側壁面の剥離が顕著である。

一方、外壁面は、西側は、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面が外壁に露出しており、これと内部の劣化の原因についても十分分かっていない。過去にハギア・ソフィア大聖堂の環境調査が行われ^{1),2)}、結露の可能性や観光客が堂内微気候に及ぼす影響について検討が行われているが、壁面の劣化との関係について研究は行われていない。本研究は、このような場所による結露や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する。

本報告では、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る。

2. 環境計測方法と劣化状態調査

2-1. 環境計測

建物内外に、無線式温湿度センサーを21個、および温湿度データロガーを15個、合計36個配置し、ハギア・ソフィア内部の温湿度分布を継続して計測した。また、建物の外部の気象条件を測定するために、気象観測装置を設置した。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。聖堂内の空間全体（鉛直および水平方向）の温湿度環境を把握するために、北西、北東、南西、南東ピアに沿って身廊の縦方向に各階4箇所計16台設置した。加えて、東西方向の温湿度環境を把握するために、ギャラリー階のバルコニーに東西各1箇所、および第2コーニスの東西各1箇所にそれぞれ設置した。これら20箇所についてはそれぞれが建築構造の対象軸線上に位置し、また鉛直方向に位置が重なるよう配置し、地上階の外気近くの環境を計測するための1箇所と合わせて合計21箇所観測を行うこととした。またこれら以外に、温湿度データロガーを、外気に近い玄関廊、側廊、階段室、収蔵庫、外気に合計15個設置した。図1～4に設置位置を示す。図は文献³⁾に掲載されている平面図を基に、筆者らが作成した。また図中のWは無線式センサーを、Hはデータロガーを表す。これら測定データを基に、ハギア・ソフィア内部の温湿度環境の解析を行う。

*京都大学大学院工学研究科

*2大阪大学大学院工学研究科

*3筑波大学大学院人間総合科学研究科

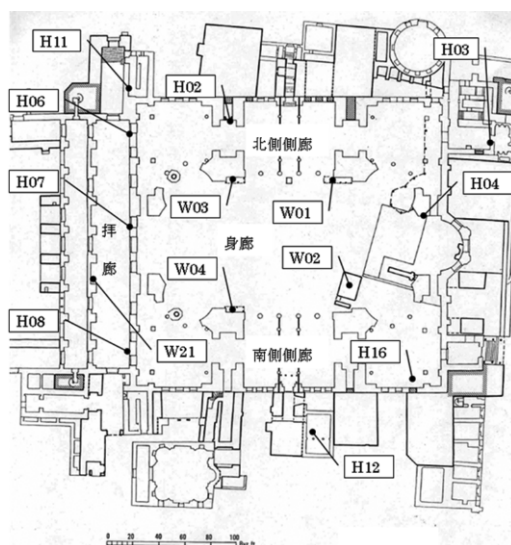


図1 温湿度センサー設置位置（地上階）

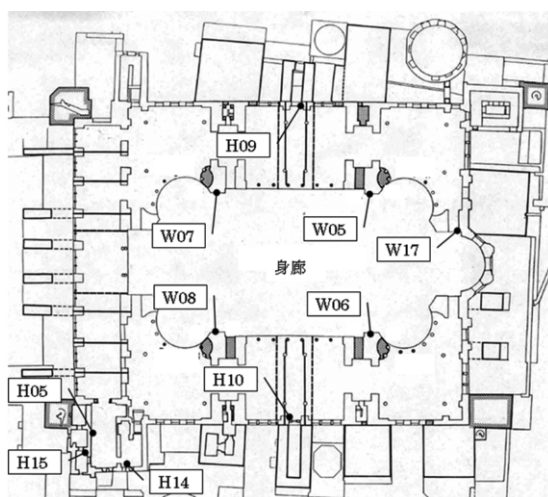


図2 温湿度センサー設置位置（ギャラリー階）

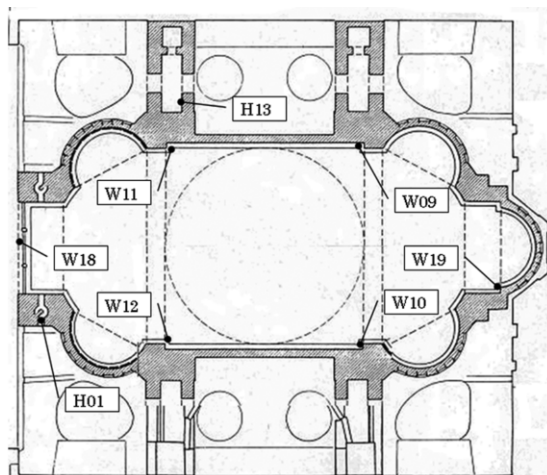


図3 温湿度センサー設置位置（第2コーニス）

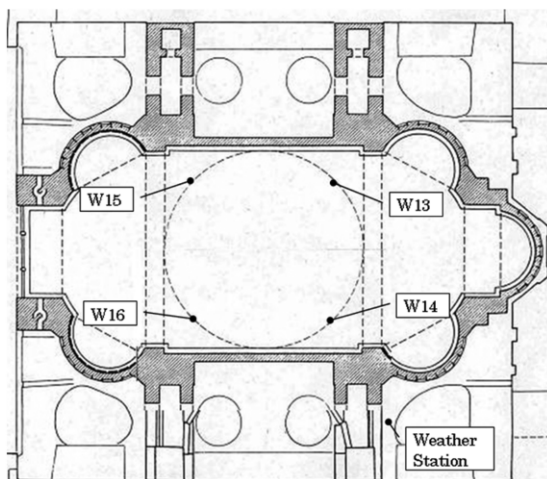


図4 温湿度センサー設置位置（ドームコーニス）

2-2. 含水率計測と劣化状態調査

第2コーニスの室内側壁面が劣化の進行が速いと考えられることから、この壁面の含水率測定と、劣化状態の目視調査を2011年9月の調査時に行った。含水率測定は、TDR水分計（TRIME-RM: IMKO）用い、壁面下部の絵が描かれていない漆喰面で測定を行った。図5に第2コーニスの測定箇所を示す。図は文献³⁾に掲載されている平面図を基に、筆者らが作成した。西側壁面は外壁の漆喰が剥がされ、東側壁面は外壁の漆喰が残っている。

3. 環境計測結果とその考察

3-1. 温湿度の年間変動について

温湿度の年間変動について、身廊、身廊と側廊の比較、鉛直方向の分布を以下で検討する。図6、7に2010年9月29日から2011年9月16日までの身廊地上階の温度、相対湿度の日平均値の年変動を示す。図6から、温度は、外気より身廊の年変動が小さいこと、また、身廊1階の

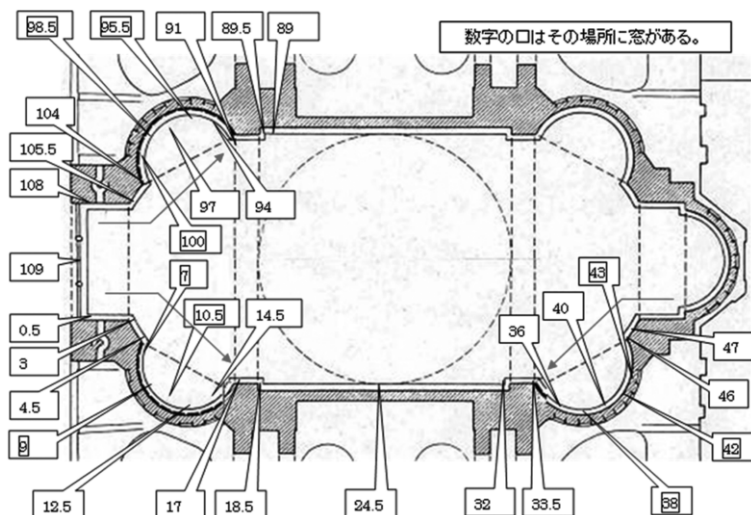


図5 第二コーニスの含水率測定ポイント

4地点の温度分布は非常に小さいことが分かる。図7から、相対湿度は、側廊では、5月中旬から6月にかけて最も高くなっており、身廊地上階では、5月下旬から6月にかけて最も高くなっている。身廊では、日平均相対湿度が85%を上回することは少なく、4地点の分布は小さい。また、絶対湿度分布も非常に小さかった(図省略)。2010年9月29日から2011年9月9日までの平均値を年平均値とみなすと、外気温度と絶対湿度の平均値は、それぞれ14.9℃、8.1g/kgであり、身廊地上階(W01)の温度と絶対湿度の平均値は、それぞれ17.5℃、9.3g/kgである。身廊地上階の温湿度は共に外気より高く、この特徴は堂内の他の場所も同様である。この理由として観光客による熱水分発生や日射射入による熱発生の影響が考えられる。ギャラリー階、第2コーニス階、ドーム階の身廊の全てにおいて温湿度の水平分布は小さかった(図省略)。

図8、9に1階の身廊と側廊の温度、相対湿度の日平均値の年変動を示す。図8から、温度は、北側側廊(H02)において冬期に身廊と近い値で、夏期には身廊より低い値で変化している。南側側廊(H16)において冬期に身廊と近い値で、夏期には身廊より低い値で、北側側廊より高い値で変化している。南側が北側より高い理由として日射の影響が考えられる。図9から、相対湿度は北側側廊(H02)において、冬期に平均的に身廊より高い値で変動し、夏期も同様である。北側側廊(H02)は、5月後半から8月後半まで、90%を超える高湿な時期がある。南側側廊(H16)は、北側側廊(H02)と似た変動となっているが、平均的には、北側側廊より低く、身廊よりは高い値で推移している。この時期に北側側廊の壁面で結露が発生する可能性が高い。北側、南側の側廊の湿度が高くなる理由は、この場所の温度がこの時期やや低いことによる。身廊と側廊の絶対湿度の差は小さい(図省略)。最も高湿となるのは、東側階段室(H03)であり、夏期には、94%(日平均)に達し、年間を通じて、北側身廊(W01)より高湿な時期が非常に多い。

図10、11に、身廊の鉛直方向の温度、相対湿度の日平均値の年変動を示す。図10から、温度は、夏期にはドームコーニス、第2コーニスが高く、ギャラリー階、地上階が低い。冬期には第2コーニス、ドームコーニスが高く、地上階、ギャラリー階が低い。図11より、相対湿度は、夏期にはギャラリー階(W05)、地上階(W01)の湿度が高80%を超えており、絶対湿度の鉛直分布は小さく(図省略)、これは上記場所(W05、W01)の温度が低いことによる。冬期には、

ドームコーニス (W13) や地上階 (W01) の湿度がやや高いが80%以下である。これは上記場所 (W13, W01) の温度が低いことによる。以上より夏期に相対湿度が最も高くなる位置は地上階やギャラリー階であり、それより上階は日平均的により低湿となっている。

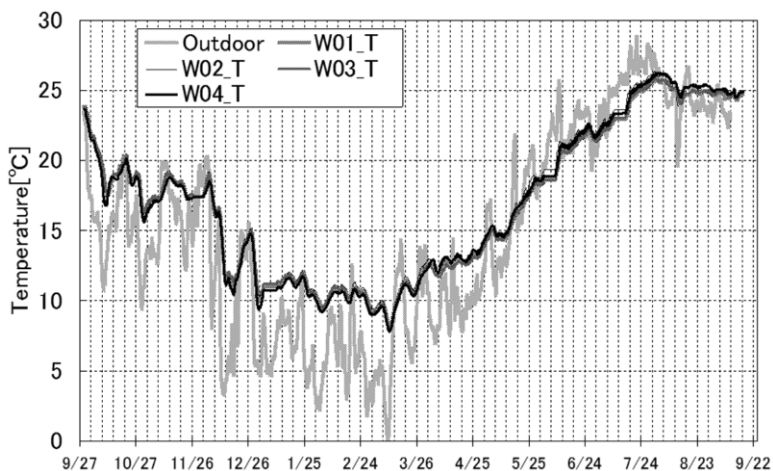


図6 身廊地上階の温度年変動

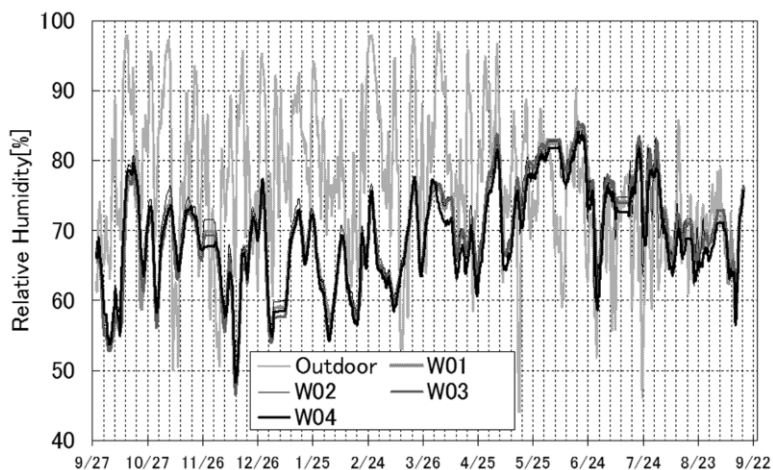


図7 身廊地上階の相対湿度年変動

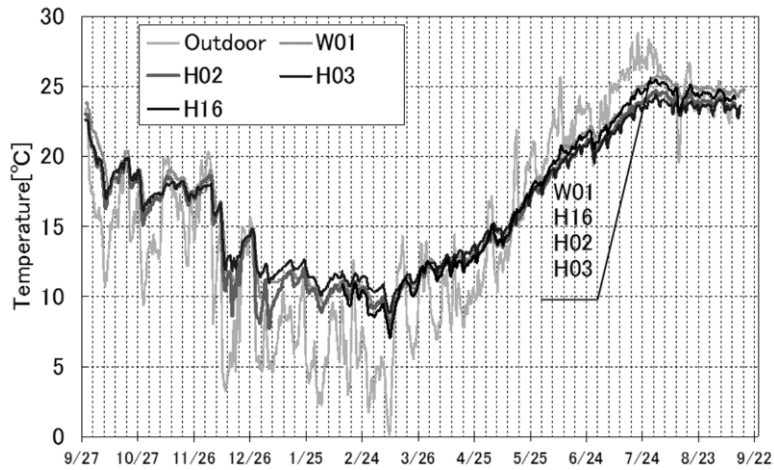


図8 地上階の身廊と側廊の温度年変動の比較

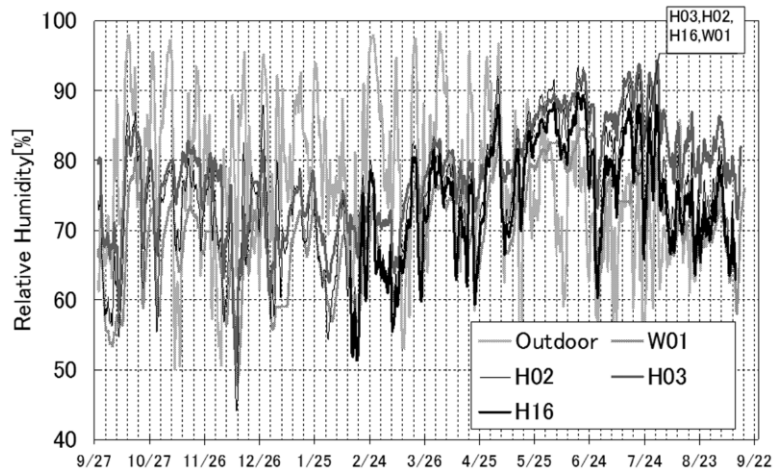


図9 地上階の身廊と側廊の相対湿度年変動の比較

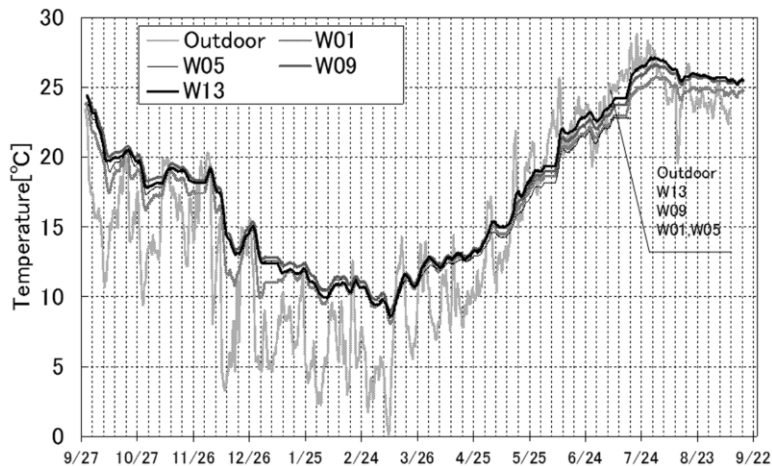


図10 身廊の温度年変動の鉛直方向の比較

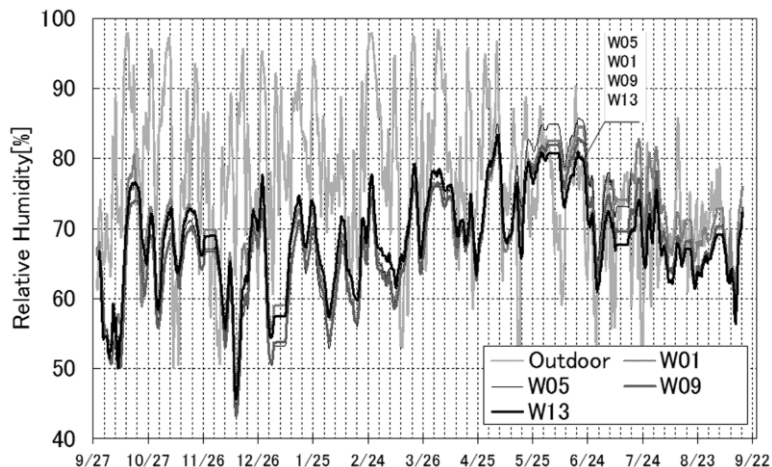


図11 身廊の相対湿度年変動の鉛直方向の比較

3-2. 冬期と夏期の温湿度の日及び週間変動について

図12～14に2011年2月の室内外の相対湿度，温度，絶対湿度の変動を示す。図15～17に2011年7月の室内外の相対湿度，温度，絶対湿度の変動を示す。いずれの図も，休館日の月曜から1週間の変動を示している。

図12，15から外気相対湿度は，2月，7月ともに日中に低下し，夜間に上昇する。一方，室内の相対湿度は，2月，7月ともに外気より安定しており，一日の変動は小さい。図13，14，16，17から室内の温度・絶対湿度の日変動が外気よりも小さいことから，相対湿度の変動幅も小さくなっている。外気の変動を緩和する室空気及び壁体の熱容量と湿気容量の影響が大きいといえる。

次に入館者数が非常に少ない休館日である月曜日と多数の入館者数があるそれ以外の日の温湿度変動を比較すると，いずれも明確な差が認められなかった。これも室空気及び壁体の熱容量と湿気容量が影響していると考えられる。ただし，1週間においては明確な差は認められ

ないものの、上述の通り年振幅や年平均については、室内外の温度、絶対湿度の差は大きく、年間を通じては影響を与えているといえる。

図15から、相対湿度は、7月に北側側廊（H02）が高い。図12、14、15、17から、東側階段室（H03）では、相対湿度と絶対湿度の両方が夏冬通じて高い。北側側廊（H02）の相対湿度が高い理由は、その空間の温度が他の空間より低くなっているためである。東側階段室（H03）は、床の土の部分が湿っている状態が調査時（2010年9月、2011年2月、9月）に確認されていることから、絶対湿度が高くなる理由は、地下水が上がってきている影響が考えられる。

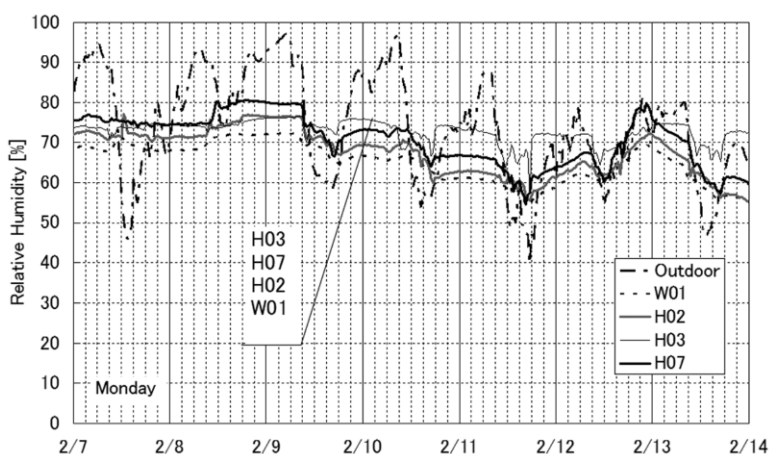


図12 2月の室内外の相対湿度変動

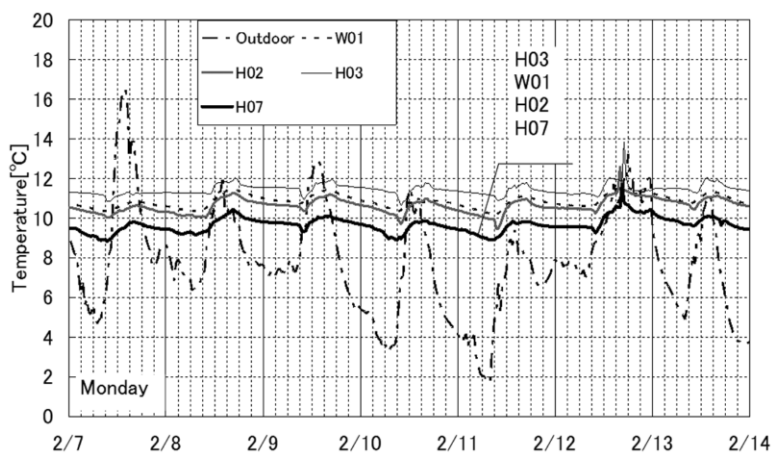


図13 2月の室内外の温度変動

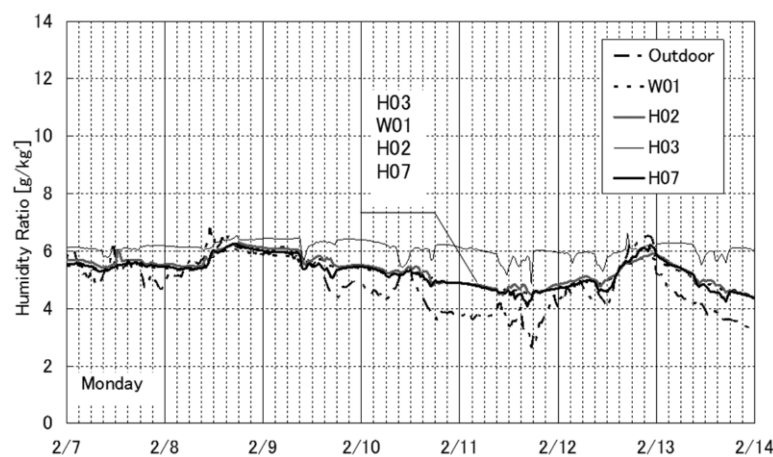


図14 2月の室内外の絶対湿度変動

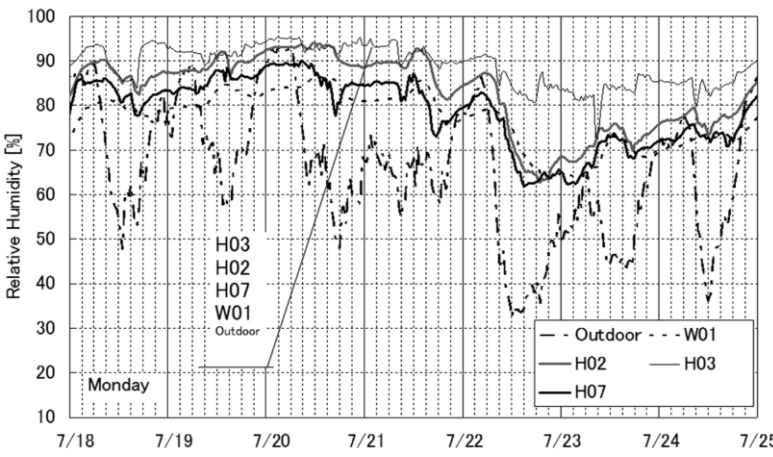


図15 7月の室内外の相対湿度変動

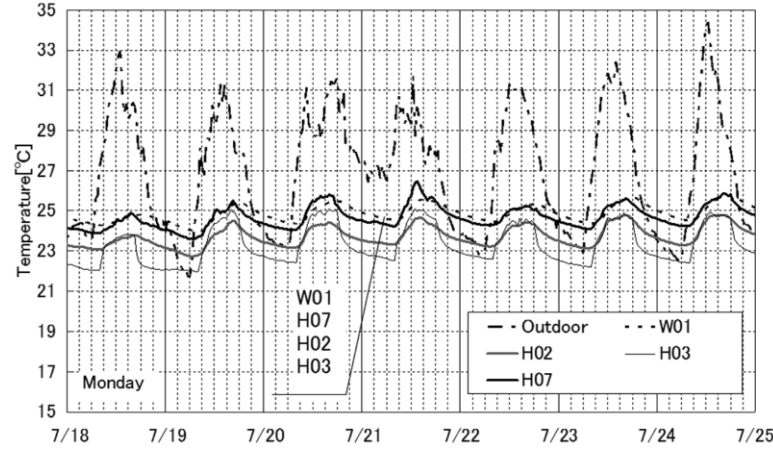


図16 7月の室内外の温度変動

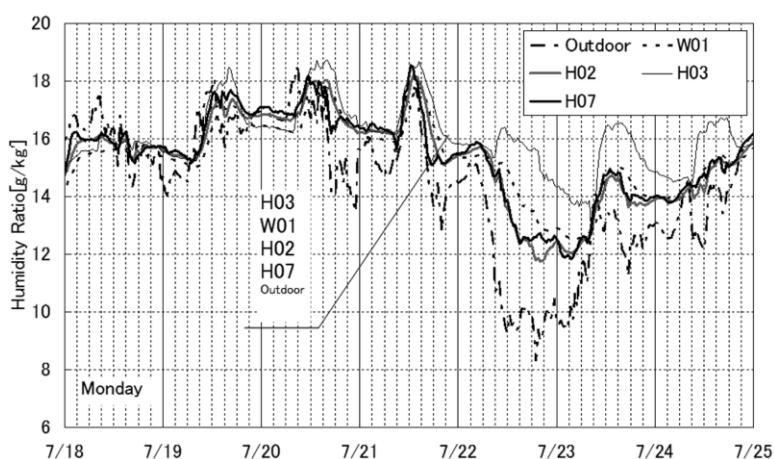


図17 7月の室内外の絶対湿度変動

4. 含水率分布計測と劣化状態調査の結果とその考察

4-1. 第2コーニスの含水率分布

(1) 第2コーニスの北側と南側の比較

図18, 図19に北側（北西のみ）と南側の第2コーニスの室内側壁面の含水率分布を示す。測定位置は、図5に示している通りである。北側は、104から90の部分が他の場所より高い。特に、93～90の値が最も高い。南側は、4.5～6と11.5～17と33.5～46が高い。特に支柱部分とその周辺の半ドーム（12～17, 33.5～42）の壁の値は、他の場所より高い。場所により含水率が高くなる理由は、外壁からの雨水の浸透、室内からの吸湿に伴う結露の影響が考えられる。南側18.5～32の外壁は壁面の上に大きな庇が掛かっており、雨水が壁面に当たりづらく、それ以外の北西、南西、南東の半ドームは壁面上部に屋根があり、庇も小さいため、雨が当たりやすい状況にある。南側18.5～32の含水率が低いことは雨が当たりづらいことが理由として考えられる。

(2) 第2コーニスの北西、南西、南東の比較

図20, 21にそれぞれ第2コーニスの南西、南東の含水率分布を示す。

図18より、北西では108～107の含水率が高く、107.5から105が低く、105.5から高くなる。図20より、南西では0.5～6の含水率の変動が、北西の東西軸の対照の位置で同様の値となっている。第2コーニスの平均含水率を表1に示す。北西が最も高く、南西がその次に高い。また、外壁の漆喰がある南東と、漆喰がない北西、南西では、顕著な差が認められない。以上から、外壁の漆喰の有無がこの含水率の差に影響を与えているとは言えない。

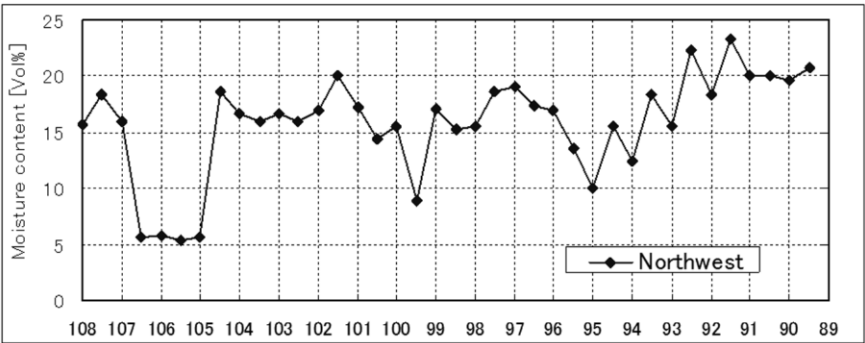


図18 第2 コーニスの北側（北西のみ）壁面の含水率分布

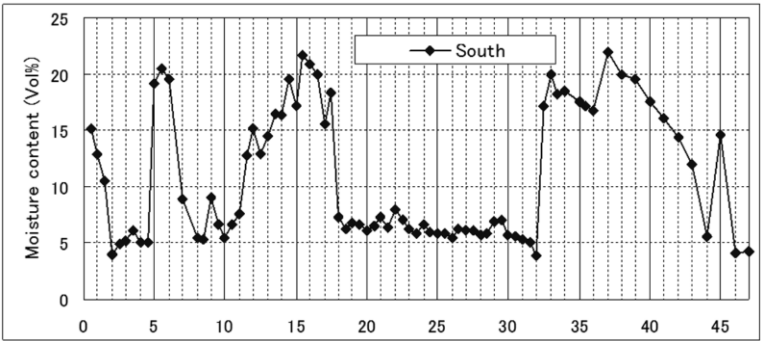


図19 第2 コーニスの南側壁面の含水率分布

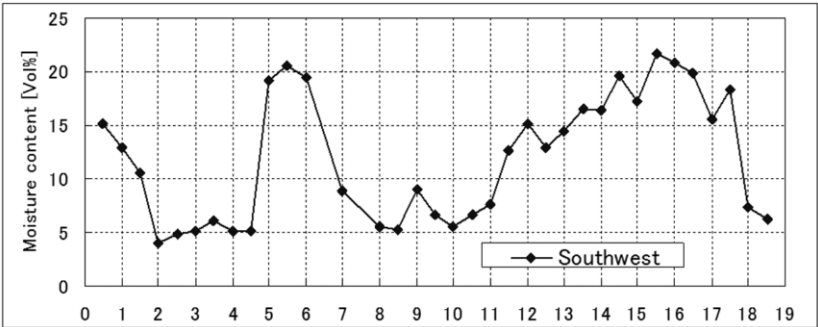


図20 第2 コーニスの南西壁面の含水率分布

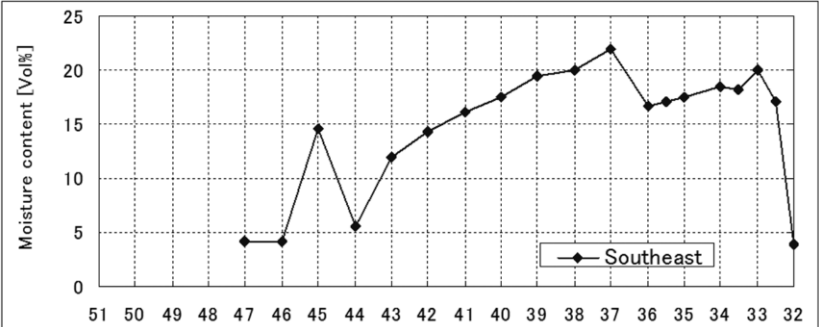


図21 第2コーニスの南東壁面の含水率分布

表1 各壁面の平均含水率

	場所	平均含水率 [Vol%]
南西	0-19	11.8
南東	32-50	14.7
北西	89-108	15.5

4-2. 第2コーニスの壁体室内側表面の劣化状態

劣化状態の調査は、第2コーニスの床面から高さ2m弱まで範囲の目視観察とした。ここでは劣化状態の程度を評価するために、壁の室内側表面の目視観察結果をもとに劣化の程度を定義する。0：表面で劣化が確認できない，1：塗装の剥落がある（部分剥落含む），2：表面漆喰の剥落がある（部分剥落含む），3：表面漆喰が補修されている，4：補修漆喰が剥落している（部分剥落含む）。なお，これら剥落の現象が生じている場所では，塩の析出が確認されており，剥落の主な原因として塩の析出が考えられる。この塩の由来については別途検討を行っている⁴⁾。上記定義を元に，目視観察結果をまとめたものを表2に示す。

図22から24に，上の定義を用いて表した北西，南西，南東の室内側壁表面の劣化程度を示す。図22より，第二コーニスで顕著に劣化している場所は，補修漆喰が剥落しているのが確認できた北西壁面である。図24より，南東壁面は，同様の劣化が確認できているが，北西壁面より劣化の程度は小さく，図23より南西壁面は最も劣化の程度が小さい。

表2 室内側表面の劣化状態

劣化状態	位置
表面で劣化が確認できない	108, 89.5, 89, 2.5 - 4.5, 8 - 10, 46, 47
塗装の剥落がある（部分剥落含む）	107-105.5, 0.5-2, 10.5-15, 32, 44, 45
表面漆喰の剥落がある（部分剥落含む）	107.5, 105-100.5, 99-96, 92.5-90, 5-7, 15.5-18.5, 30.5-31, 33-35, 39-43
表面漆喰が補修されている	100, 99.5, 31.5, 36-39
補修漆喰が剥落している（部分剥落含む）	95.5-93

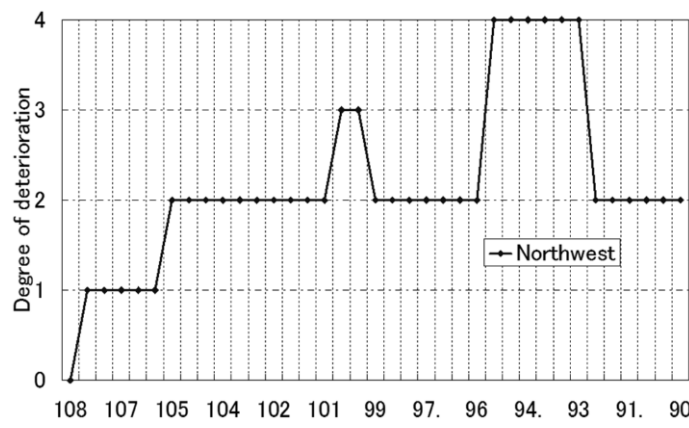


図22 第2コーニスの北西壁面の劣化程度

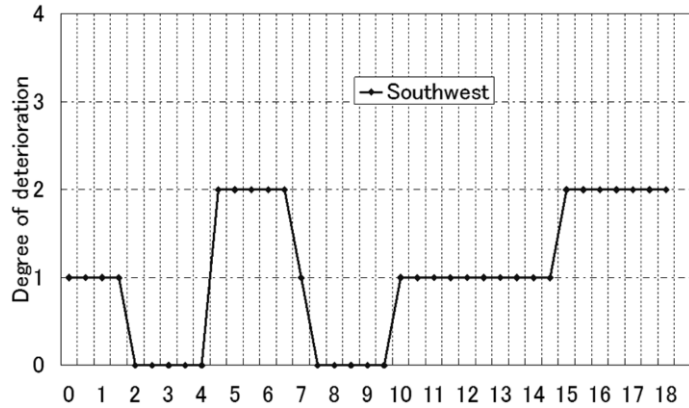


図23 第2コーニスの南西壁面の劣化程度

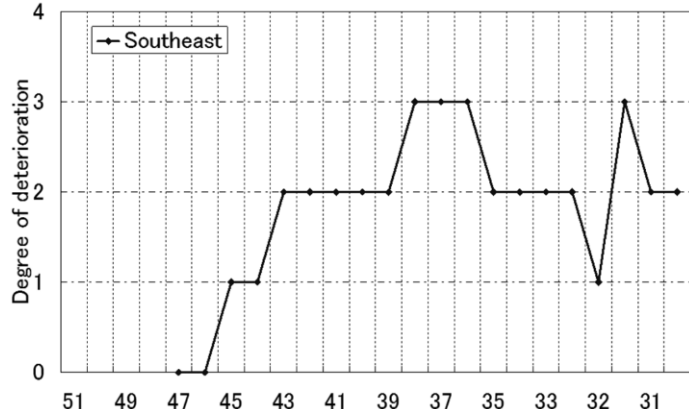


図24 第2コーニスの南東壁面の劣化程度

4-3. 第2コーニスの外壁の状態

雨水の浸透のしやすさや、壁面の劣化状態を調べるため、第2コーニスの外壁の目視観察を行った。表3, 4, 5に、北西, 南西, 南東の壁面の外壁の上部, 中央部, 底部の状態を目視観察した結果を示す。なお、表中の数字を囲む□は、その位置に窓があることを示す。表より、北西部の外壁の上部と下部で多くの隙間が確認され、また、南東の壁面についても部分的な隙間が多く確認できた。さらに、壁面で雨水が多量に流れた結果、藻、苔など植物が生育している場所が、北西の94から101と、南西の6で確認できた。東南36から42でも、同様に雨水の流れたであろう後に藻が生育していた。

4-4. 室内側表面の含水率と室内外の状態との関係に関する考察

含水率と劣化の関係を明らかにするために、含水率と劣化状態の相関関係を検討する。図25に両者の相関関係を示す。図から、含水率の高い位置が劣化状態の程度も大きいことが概ねみてとれる。相関係数は大きくはないが含水率は、劣化の程度と正の相関があるといえる。

次に、含水率と外壁の関係を明らかにするために、含水率分布と外壁の状態の比較を行う。北西外壁のレンガの剥落や隙間の多い部分の室内側壁面が高い含水率となっている。南東の含水率の高い位置でも同様の傾向が確認できる。一方、南西外壁では隙間が少ないものの、室内側の壁の含水率が高い位置もある。

従って、壁の含水率上昇の主要因は、雨水の浸透である可能性が考えられる。特に、壁と屋根の間の隙間を埋めることは、外壁からの水分の浸透を抑える上で有効と思われる。ただ、現時点では、外壁の漆喰がないことが、雨水の浸透を大きくしているかどうか、また室内側壁面での結露の影響の程度については不明である。

壁面の劣化抑制のための適切な対策を検討する上では、降水の浸透のルートを明らかにする必要がある。上の対策を検討するためには、壁体の水分の浸透と結露の現象について、シミュ

表3 第二コーニスの北西外壁の状態調査結果

位置	下部	中央	上部
94	修復あり：隙間が漆喰で埋められている	藻と植物が成長	隙間あり。レンガの剥落あり。
	修復あり：隙間が漆喰で埋められている	修復あり	隙間あり。レンガの剥落あり。
□95.5	窓枠下に隙間あり：植物が隙間で成長している。	修復あり。レンガの剥落あり。	小さい隙間あり
		レンガの目地漆喰の剥落	小さい隙間あり
97	小さい隙間あり。隙間で植物が成長	壁に2つ穴あり	-
	隙間で、漆喰の剥落あり		-
□98.5	隙間で、漆喰の剥落あり	窓上端で漆喰の剥落	-
			-
□100	モルタル下で植物が成長	窓下の左右端部で漆喰の剥落	-
	隙間で漆喰の剥落あり	藻と植物が成長(101)	-

表4 第2コーニスの南西外壁の状態調査結果

位置	下部	中央	上部
0.5	修復あり：隙間が漆喰で埋められている		-
4.5	修復あり：隙間が漆喰で埋められている	藻と植物が成長(6)	-
[7]		窓上端で漆喰の剥落	-
	漆喰剥落あり。隙間あり		-
[9]	修復あり：隙間が漆喰で埋められている	窓上端で漆喰の剥落	-
	-		-
[10.5]	-	窓上端で漆喰の剥落	隙間あり
	修復あり：隙間が漆喰で埋められている		隙間あり
12.5	修復あり：隙間が漆喰で埋められている	窓左右端部で漆喰の剥落	隙間あり
	修復あり：隙間が漆喰で埋められている		小さい隙間あり
14.5	修復あり：隙間が漆喰で埋められている		隙間あり

表5 第2コーニスの南東外壁の状態調査結果

位置	下部	中央	上部
36	隙間あり。漆喰剥落あり	藻が成長	隙間あり。 漆喰剥落あり。
[38]	修復あり：隙間が漆喰で埋められている	窓周囲の壁で藻が成長	
40		表面漆喰の剥落	
		藻が成長	
[42]	窓枠下の漆喰剥落あり		
		藻が成長	
[43]	窓枠下の漆喰剥落あり		

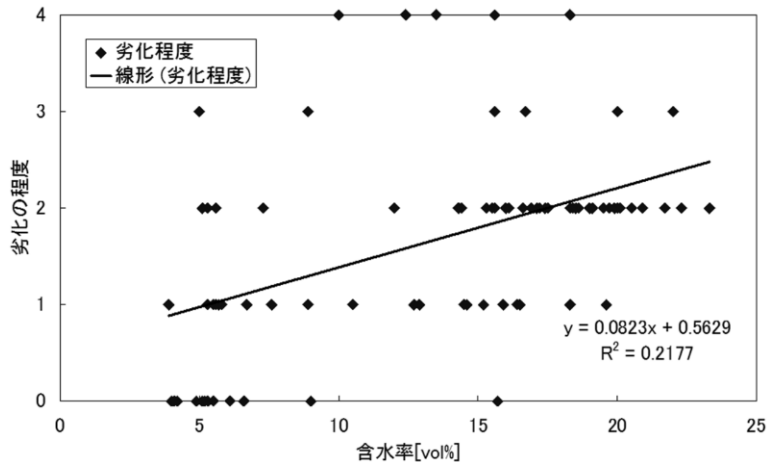


図25 含水率と劣化の程度の関係

レーションを用いた検討が非常に有効であると考えられる。

今後、ここで得られた結果を元に、シミュレーションを用いた検討を進める。

5. まとめ

本研究は、ハギア・ソフィア大聖堂内部の結露や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、本報告では、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。

得られた主な結果は以下の通りである。

- 1) 堂内において最も高湿となる場所は、地上階の北側側廊と東側階段室であり、夏期に両者とも90%を超える。これらの場所で結露の可能性が高い。両者の相対湿度が高くなる理由は、温度が他の空間より低くなっているためであり、特に東側階段室では、絶対湿度も他より高く、地下水が上がってきている可能性がある。
- 2) 堂内は、外気より年平均温度と絶対湿度が共に外気より、約2℃、約1 g/kg程度高かった。日射による熱発生と、観光客による熱水分発生の影響などが考えられる。
- 3) 第2コーニスの室内側壁面の平均含水率は、北西、南西、南東の順に高い。
- 4) 第2コーニスにおいて西側の漆喰で外壁が覆われている壁と、東側のそうでない壁で含水率の明確な差異は確認できなかった。
- 5) 第2コーニスの室内側壁面で顕著に劣化している場所は、補修漆喰が剥落していることが確認できた北西壁面である。南東壁面も、同様の劣化が確認できているが、南西壁面は劣化の程度が小さい。
- 6) 第2コーニスの外壁は、北西部の外壁の上部と下部で多くの隙間が確認され、また、南東の壁面についても部分的な隙間が多く確認できた。雨水が壁面で流れたと考えられる植物や藻が成長している場所が、北西、南西、南東で確認された。
- 7) 第2コーニスの室内側壁面の含水率は、室内側壁面の劣化の程度と正の相関がある。
- 8) 北西の外壁のレンガの剥落や隙間の多い部分の室内側壁面が高い含水率となっている。南

東の含水率の高い位置でも同様の傾向が確認できた。一方、南西外壁では隙間が少ないものの、室内側の壁の含水率が高い位置もあった。

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。

参考文献

- 1) Güleç, A., “Ayasofya Müzesinde İklim Araştırmaları: Pilot Çalışma”, *III. Müzecilik Semineri Bildiriler Kitabı*, İstanbul, 24-26 Eylül 1996, 216-232 (1996)
- 2) 高山仁志・花里利一・日高健一郎, 環境モニタリングによる調査 ハギア・ソフィア大聖堂調査報告 (その8), 日本建築学会大会梗概集, F-2分冊, 23-24 (2001)
- 3) R. J. Mainstone, *Hagia Sophia: architecture, structure and liturgy of Justinian's great church*, Thames and Hudson, London (1988)
- 4) 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)

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 (deterioration)；塩の析出 (salt crystallization)；剝離 (flaking)；雨水の浸透 (infiltration of rainwater)

Deterioration on the Wall and Indoor and Outdoor Environmental Conditions in Hagia Sophia, Istanbul, Turkey

Daisuke OGURA*, Takeshi ISHIZAKI, Keigo KOIZUMI^{*2}, Juni SASAKI,
Kenichiro HIDAKA^{*3} and Kei KAWATA*

In Hagia Sophia, the deterioration of the lime plaster wall and side walls are considered to be caused by the condensation of water on the wall surface and water migration inside the side walls. On the ground level, deterioration of the wall surface is more severe in the north part than in the south part. In the second cornice, wall surface deterioration is more severe than on other floors.

As the first step in clarifying the causes of these damages and developing appropriate measures, the following topics were examined:

- 1) Measuring the precise temperature and humidity profile in Hagia Sophia;
- 2) Identifying the deteriorated parts inside and outside the walls;
- 3) Measuring the moisture content on the inside surface of the walls.

Main results obtained are as follows:

1. Relative humidity in the north aisle and the staircase on the ground level is the highest especially in summer when it reaches over 90%. Condensation might occur on the wall in these areas.
2. Moisture content of the northwest area is the highest and that of the southeast is second highest.
3. Significant deterioration of the second cornice is found on the northwest semi-dome where exfoliation of the repaired plaster is confirmed. The southeast semi-dome is also deteriorated but the southwest semi-dome is less deteriorated than elsewhere.
4. One of the major causes for the high moisture content in the walls is possibly rainwater penetration. Especially, sealing the gap between the walls and roof seems to be effective in preventing moisture penetration at the exterior walls. Condensation on the walls is also considered as another cause.

*Graduate School of Engineering, Kyoto University

^{**2}Graduate School of Engineering, Osaka University

^{**3}Graduate School of Comprehensive Human Sciences, University of Tsukuba