

遺跡や歴史的建物における文化財保存のための環境制御

京都大学大学院工学研究科 教授 小椋 大輔



1. はじめに

博物館・美術館に収蔵・展示される美術工芸品等の可動文化財は、例えばIIC (国際文化財保存学会)、ICOM (国際博物館会議)、ICCROM (文化財保存修復研究国際センター) などで室内温湿度の環境のガイドライン^{1),2)}が設定され、国内では保存施設に関する文化庁の指針³⁾があり、環境制御は温湿度の目標の値を定めて一般に空調設備を用いて行われていることが多い。しかし、外界気象や周辺地盤の影響を大きく受けやすい遺跡や歴史的建物といった不動産文化財は、その保存のための環境の基準は特に設けられていない。従来、遺跡の保存対策として、化学的保存処置である合成樹脂で固めることが多く行われてきた⁴⁾。

現在、文化財の保存では「予防的保存 (preventive conservation)」が重要視されており、まず文化財である資料に手を加えない保存環境作りが中心におかれ、手を加えないと資料が保存できない場合に修理を行う考え方になってきている⁵⁾。

この考え方は博物館等にある可動文化財が対象であることが多いが、近年、不動産文化財である遺跡の保存において、この理念や技術が採用されつつある。即ち「環境を制御する保存」を出来るだけ採用しようとする考え方に変わってきている⁴⁾。

遺跡や歴史的建物で生じる劣化現象に、外界や周辺地盤の物理環境がどういうメカニズムで影響を及ぼしているかを理解するためには、その物理環境を理解し、その要因となる熱や水分等の輸送現象を踏まえた劣化メカニズムを明らかにする必要がある。この劣化メカニズムを知ることによって、適切な対策を検討することが出来るようになる。

文化財の保存や修復に関わる学術分野である保存科学分野では、これまで文化財の劣化の進行を抑えるため樹脂で固めたり、薬剤を塗布するといった修理が行われ、

それらの効果を現地に模擬的な材料を設置するなどして経験的に検討がなされてきており、上記のような物理現象を定量的に評価する研究が非常に少ないため^{6),7)}、劣化メカニズムを踏まえた対策の検討やその効果の定量的な評価を実践している例は未だ少ない。

今後、遺跡や、歴史的建物の中にある文化財を対象として「予防的保存」即ち「環境を制御する保存」による対策の検討の必要性は、気候変動問題を考えると益々高まると考えられる。ここでは、筆者がこれまで遺跡や歴史的建物の文化財の保存における環境制御に関して実施してきた研究成果をいくつか紹介する。

(1) 遺跡の文化財保存における環境制御

- ・高松塚古墳の石室解体時の環境制御
- ・高松塚古墳石室の過去の温湿度環境の推定
- ・敦煌莫高窟第285窟の壁画の劣化に環境が及ぼす影響
- ・模擬古墳を用いた石室環境と遺物の保存
- ・釜尾古墳の装飾壁画の保存のための環境設計
- ・元町石仏の塩類風化抑制のための覆屋による環境調整

(2) 歴史的建造物の文化財保存における環境制御

- ・ハギア・ソフィア大聖堂の壁体の雨水浸透が壁画に及ぼす影響
- ・法隆寺金堂壁画収蔵庫における壁画の保存・公開

2. 遺跡の文化財保存における環境制御

2.1 高松塚古墳の石室解体時の環境制御^{8),9)}

高松塚古墳の壁画は、1972年の発掘調査により発見され、現地保存が決定された。その後、1974年から1976年頃にかけて石室の全面に石室内外の環境が発掘以前の安定した状態に保たれることを目的として保存施設が建設された。約26年後の2002年に壁画近傍に黒色のカビの発生が確認され、2005年に壁画保存のために石室を解体し壁画を修理することが決定し、2007年

に石室解体が実施された。この解体の実施にあたって、墳丘発掘、石室解体時における石室及び壁画の劣化防止のため、石室の温湿度環境を維持する方法について、事前に実大実験及び数値解析により検討を行った。

まず事前の石材内部の熱水分移動を考慮した数値解析により、石室を囲む墳丘が発掘により取り除かれることで、石室内部では高湿・結露によるカビ等微生物の成長、乾燥による壁画の剥離・剥落といった問題が生じる可能性が大きくなることを確認し、墳丘を覆う既設の覆屋の中に石室を囲む高断熱性の覆屋（内部断熱覆屋と呼ぶ）を設け、石室周囲の空調を行うことにより石室内部の環境を間接的に制御する必要性を確認した。

石室周囲の温湿度の目標は、高湿・結露によるカビや微生物の成長を抑制し、乾燥による漆喰層の剥離を防止するため、10℃、相対湿度85～90%が定められた。図-1に示すように空調システムは、石室下部の地盤は冷水管を地盤に挿入し冷凍チラーで10℃になるように制御し、石室周囲の高湿度かつ狭い範囲の湿度制御にはスクラパーを用い、温度制御はファンコイルと埋設冷却管により行い、前室にも粗い温度制御を行った。カビなどの飛散や、温度むらを極力抑制するため、地盤と石室には空調の吹き出し口の気流が直接当たらないようにして、石室の上部空間の温湿度を制御することとした。

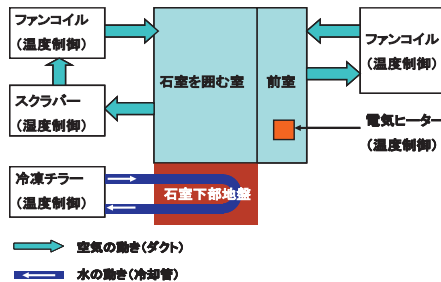


図-1 空調システムの概要

実大実験結果との比較から妥当性を確認した石室解体時の内部断熱覆屋内の数値流体解析モデル（図-2）を用いて、事前に解体時に想定される石室の結露と温度上昇の問題とその対策について検討結果（図-3）を踏まえて提案し、内部断熱覆屋設置後の石室解体時にはそれら対策が実施された。

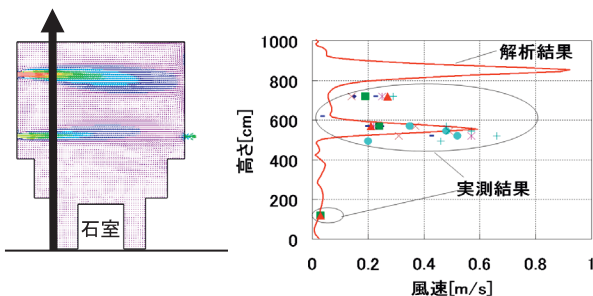


図-2 風速の実測結果の解析結果の比較

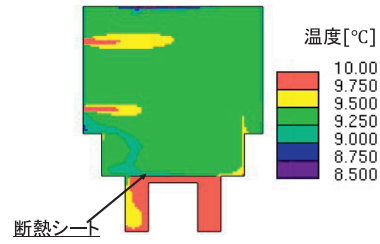


図-3 石室上の断熱シート有りの温度分布

発掘解体時の空調期間は2007年1月末から9月までであり、石材の取り上げは4月から8月下旬までであった。空調制御の目標値は、壁画のある天井石、壁石の全てを取り出すまでは、温度10℃、相対湿度90%であり、6月26日以降は、発掘者の作業性を考慮して、空調の設定の温度を上げ、湿度を下げて保つこととした。石室解体時の内部断熱覆屋内の空調制御は外気の温度変化等により目標温度より高くなる部分もあるが、平均してほぼ設定通りに、1月末から9月にかけて、一度も停止することなく運転でき、発掘・解体期間中の石室内の温湿度は平均的に目標値を維持するように制御が行うことができた（図-4）、壁画の結露の防止及び乾燥の抑制ができた。

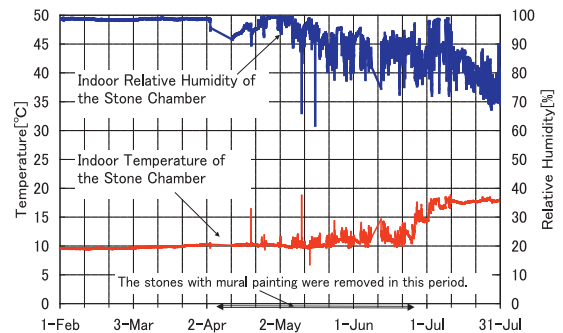


図-4 石室内温湿度変動

2.2 高松塚古墳石室の過去の温湿度環境の推定^{10), 11), 12), 13)}

高松塚古墳の保存施設による現地保存時において、後述の様に石室内温度上昇が大きくなった。カビは温度が高いほど成長がしやすく、カビの発生と石室の高温化は相関があることから、石室内温度の上昇に影響を与える要因について検討を行った。

保存施設は、壁画の点検や、壁画の剥落止めといった石室内作業を安全に行うことを目的として設置された施設であり、1976年から稼働し、図-5に示すように石室と前室は、小空間（取合部）によって連結され、3つの前室（前室A、前室B、準備室）で構成されている。こ

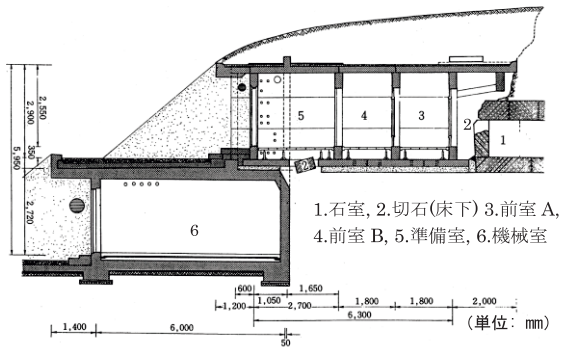


図-5 高松塚古墳の保存施設断面図¹⁴⁾

れら石室の環境が発掘以前の安定した状態に保つことを目的として環境が制御され、前室の温度制御は、天井・床・側壁に設置された銅管の吸放熱パネルを用い、その送水温度は、取合部の土中温度と等しい温度となるように制御が行われた。前室に人が入る場合は、事前に空調機により、温度は取合部の土中温度と等しい値に、湿度は飽和に近い値で、前室に空気を吹き出すように制御が行われた。図-6に外気(奈良市)、石室内、前室の温度測定値の年平均値の変動を示す。図中に外気、石室内及び前室の温度変動について最小二乗法により求めた線形近似曲線も示している。外気と石室内の温度について線形近似曲線から求めた勾配を比べると、石室内は0.11であり、外気の0.046より約2倍大きい。この傾きから求めた1979年から2004年の26年間の温度上昇は、外気は約1.2℃、石室内は約2.9℃である。また前室の温度も、石室と同様に約3.1℃上昇している。つまりこの期間における石室内の温度上昇は、外気温の上昇より約1.7℃大きい。この石室内の温度上昇に影響を与える要因を挙げて、測定値の分析や熱水分同時移動方程式を用いて保存施設を考慮した石室内温湿度解析モデル(図-7)を作成し、数値シミュレーションを行った結果の比較検討から、主に以下の結果が得られた。

1) 気象条件の影響

- 保存施設稼働後の約30年間の気象条件の変化は、この間の石室内の温度上昇の主要な原因の一つといえるが、それだけでは温度上昇を説明することはできない。

2) 墳丘の被覆状況の影響

- 2004年末頃の石室内の温度上昇の要因の一つとして、2003年9月に、竹林を伐採し防水シートを設置したことが影響している可能性が高い。
- 2004年9月の仮設覆屋の設置は、防水シート設置のみの状態を継続するより石室内の温度を低くしたと考えられる。

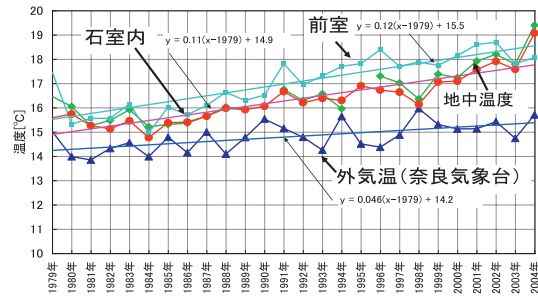


図-6 石室内と外気の温度の測定値の年平均値

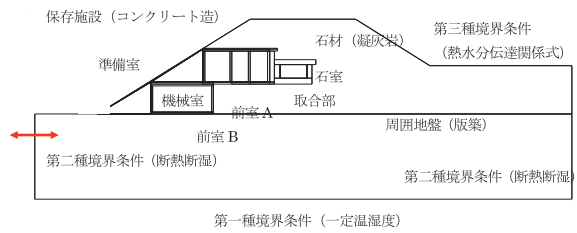


図-7 高松塚古墳の解析モデル

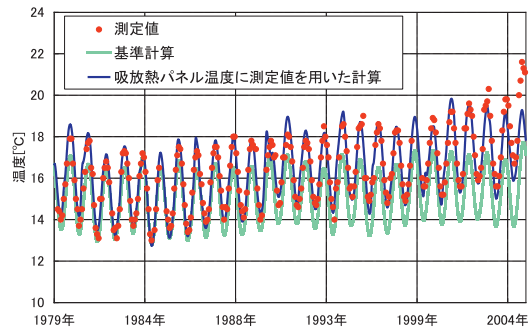


図-8 石室の温度の測定値と解析値の比較

- 保存施設稼働時の(年)平均的な石室の温度上昇は、気象条件の影響や被覆条件の変化だけでは十分説明できない。

3) 送水冷水温度の影響(前室・準備室の温度制御)

- 吸放熱パネルへの送水温度は土中温度に等しくなるように制御することになっていたが、測定値では土中温度より高温となっていた年が多い。この測定値を用いた解析による石室温度は、2002~2004年を除いて測定値とかなり良く一致する(図-8)。すなわち、保存施設稼働後の約30年間の石室温度の上昇は、この間の気象条件の変化と送水冷水温度の変化を考慮すると大略説明できる。

- 2002~2004年の石室温度の急激な上昇は、以上の解析でも十分説明できない。

4) 入室の影響

- 連続した入室があった後には、石室温度はやや高めに推移する。石室の高温化の要因の一つと考えられる。

・石室温度、入室人数とカビの繁殖との間には相関がある。

以上の数値シミュレーションにおいて可能な限り測定値、記録、物性測定値などを用いたが、推定した事項も多い。従って、それらの状況を考慮した上で、現時点でその可能性がもっとも高いと考えられる結果を示したものである。これらは、高松塚古墳壁画劣化原因調査検討会（2008年5月～2010年3月）において報告を行い、石室の温湿度解析モデルを使用したシミュレーション結果は、本委員会報告書の一部としてまとめられている¹⁵⁾。

2.3 敦煌莫高窟第285窟の壁画の劣化に環境が及ぼす影響^{16), 17)}

敦煌莫高窟は、中国の内陸部の砂漠地帯に位置し、鳴沙山の崖沿いに南北約2kmにわたり700超の窟が上層、中層、下層に存在し492個の窟内に壁画と彩色塑像が現存する（図-9）。その中で第285窟は最も重要な窟の一つである。壁画の色の変化やひび割れなどの劣化は、物理的な環境要因によるものである。

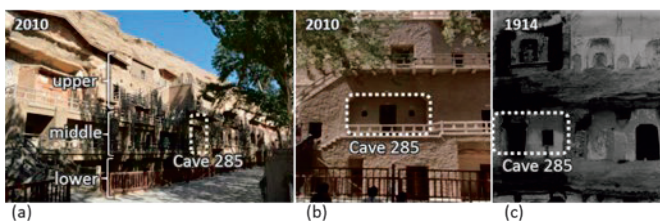


図-9 莫高窟の概観 ((a), (b) : 2010年, (c) : 1914年¹⁸⁾)

本研究では、第285窟（図-9）の壁画の劣化要因となった環境の影響を明らかにし、制作期（530年代後半）から現在までの壁画の劣化過程を推定することを目的として行ってきた内容を述べる。なお研究成果は、美術史学において壁画が制作当初にどのような姿をしていたかを検討する際に利用可能となる基礎情報とすることを意図した。ここでは、主に第285窟の前室が崩壊した時期（図-9(c)）に焦点を当て、壁画の劣化に及ぼす温湿度環境、光環境、風環境の影響について、模擬壁画を用いた実験、現地調査、数値解析により検討を行った。

1) 模擬壁画を用いた劣化実験

乾燥実験、壁画制作時に含まれていた塩の影響を検討する実験、紫外線照射実験により顔料、染料ごとに劣化の進行の違いを明らかにした（図省略）。

2) 光シミュレーションによる自然光が壁画の劣化に及ぼす影響

壁画の劣化に及ぼす光の影響を調べるために、前室が

崩壊した時期の自然光下での照度シミュレーションを行い計算結果と壁画の目視観察を比較した。その結果、壁画の変色や層の色の変化の多くは、年間積算照度の大きさが関係していることを明らかにした（図省略）。

3) 風で飛ばされる砂が壁画の劣化に及ぼす影響

高レイノルズ数型k- ϵ 乱流モデルを用いて、莫高窟周辺および第285窟内の気流と砂の移動を数値流体解析モデルを用いたシミュレーションを行い、日射の影響が少ない第285窟の東壁に風で飛ばされた砂が付着したことによる剥離・剥落の影響を検討した。莫高窟周辺よりも第285窟内の気流を詳細に計算するために、第285窟を中心にネスティング領域を設定し解析を行い、壁画の剥離や剥落による最も深刻な劣化は、風で飛ばされた砂によるものである可能性が高いことと（図-10）、砂の付着により、上方に傾いた壁では絵画が変褪色していることを明らかにした。

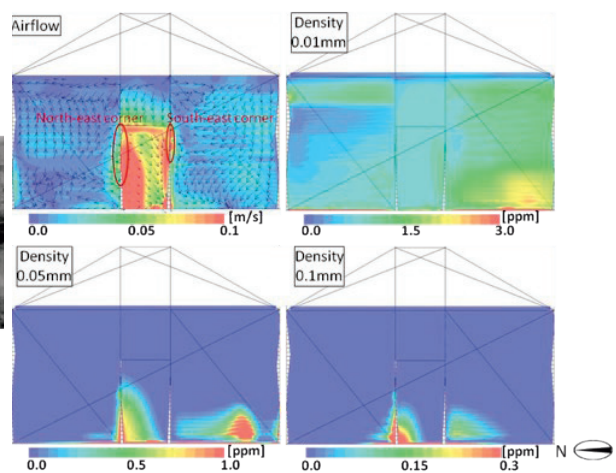


図-10 東壁から5mmの鉛直断面の気流と砂の濃度分布

2.4 模擬古墳を用いた石室環境と遺物の保存¹⁹⁾

日本には多くの未盗掘古墳があり、そのほとんどが遺物とともに埋葬されている。このような古墳における遺物の保存を考える場合、外部環境の変化が内部環境にどのような影響を与え、その環境の変化が石室に埋葬された遺物の劣化にどのような影響を与えるのかを理解することが不可欠である。本研究では、京都大学桂キャンパス内の丘陵地の林内に、未盗掘古墳の環境



図-11 模擬古墳の概観

を再現し、内部環境の変化が遺物の劣化にどのような影響を与えるのかを調べることを目的とした。

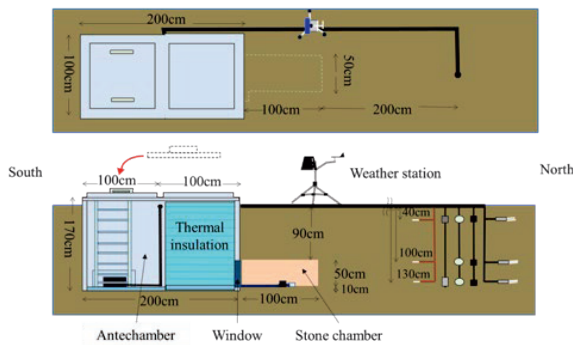


図-12 模擬古墳の平面図と断面図

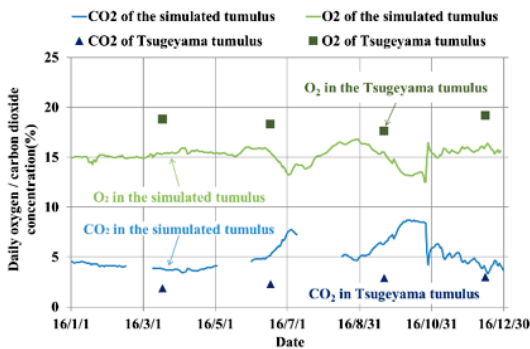


図-13 模擬古墳と鬮鶏山古墳の石室O₂、CO₂濃度 (図中の線の空白部分は欠測)

を模擬した地下空間（以下、模擬古墳）を2013年12月に構築し、模擬古墳の石室内の温湿度、含水率、酸素・二酸化炭素濃度、金属腐食試験などの長期モニタリングを実施した（図-11、図-12）。環境モニタリングの測定結果を分析した結果、石室内の温湿度、酸素、二酸化炭素、石室内表面の部位別の濡れに関する挙動を明らかにし、模擬古墳は未盗掘の古墳（鬮鶏山古墳）の温湿度・酸素・二酸化炭素環境とおおむね同じ特徴を持っていることがわかった（図-13）。模擬古墳から得られた研究結果は、他の未盗掘古墳をある程度代表するものであると考えられる。

模擬古墳の石室内の温湿度、酸素、二酸化炭素濃度の挙動の再現が可能となる解析モデルの構築と妥当性確認については、謝華栄氏の学位論文¹⁹⁾に、石室内の金属遺物を想定した腐食実験については、共同研究者の柳田明進氏の学位論文²⁰⁾にまとめられている。

模擬古墳を用いた研究は、考古学分野において着目され、考古学研究会の会誌である考古学研究で4回に亘って連載が組まれ、ここで得られた研究が紹介された²¹⁾。遺跡形成論等の考古学の研究活動に模擬古墳の成果が今後活用できる可能性について議論が行われている²²⁾。

2.5 釜尾古墳の装飾壁画の保存のための環境設計²³⁾

古墳石室内の石材表面に彩色や彫刻が施されている特徴を持つ「装飾古墳」は4～7世紀を中心に造られた古墳の一形態であり、全国で約600基存在し、これらは現地保存され、いくつかの装飾古墳は定期的に公開されている。熊本県熊本市釜尾町に位置する釜尾古墳は、1769年に発見され、6世紀に築造されたと推定される装飾古墳である（図-14）。古墳内の石室には鮮やかに彩色された装飾壁画があり（図-15）、1921年に国の史跡に指定された。



図-14 釜尾古墳の外観



図-15 石室内の様子

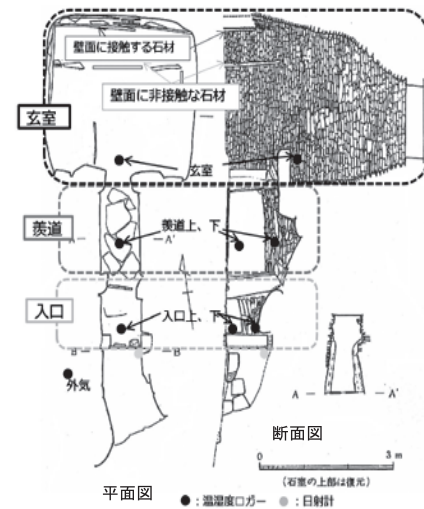


図-16 釜尾古墳の保存施設の平面図と断面図

この古墳は天井石や積石の崩落が生じたことから、1967年に改修工事が行われ、コンクリートドームで墳丘が再現され、入口に金属扉が設置され現在の姿となった（図-14、図-16）。以前は一般公開を行っていたが、装飾壁画の劣化の危惧により熊本市教育委員会が判断して一時的に閉鎖状態にある。劣化の原因は長期的に結露水の流下や浸透雨水の落下が生じることによる顔料の流出と考えられる。

ここでは、釜尾古墳石室内の装飾の劣化原因と推定される装飾表面の濡れのメカニズムを明らかにした上で、今後の釜尾古墳において保存・公開の面から保存施設の

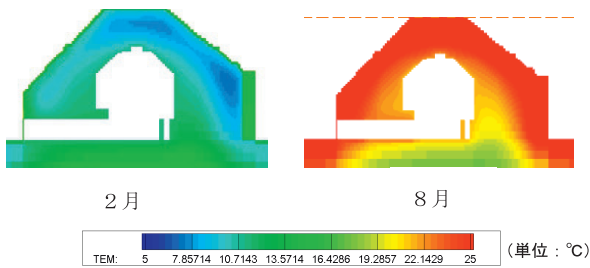


図-17 釜尾古墳の石室内温度分布

改修方法の提案を行うことを目的とした。まず現地調査における石室内の濡れ性状を確認し、3次元の熱水分移動解析モデルにより、石室内温湿度性状と濡れ性状の再現性を確認し、結露の発生メカニズムを明らかにした。さらに3次元解析と同様の結果をもたらす2次元解析モデルを用いて、玄室内の結露抑制方法の検討を行い(図-17)、外気との換気の有無の違いにより、それぞれ以下に示す改修方法の提案を行った。

- 1) 外気との換気を行う場合、玄室内の結露を最も抑制できる保存施設の改修方法は、玄室天井部の防水処理に加え、外気が乾燥している時期に積極的に換気を行い、鉄扉の日射遮蔽を行い、墳丘部を断熱する方法である。
- 2) 外気との換気を行わない場合、最も適当な改修方法は、玄室天井部の防水処理に加え、鉄扉の日射遮蔽を行い、墳丘部を断熱する方法である。なお、結露防止に石室内に空調を用いる効果と注意すべき点も確認した。

本研究成果は、筆者らから釜尾古墳を維持管理している熊本市の担当者に対して2016年3月に報告した。また、筆者は釜尾古墳以外にもいくつかの古墳内の温湿度環境調査に取り組んでおり、文化庁の古墳壁画の保存活用に関する検討会 装飾古墳ワーキンググループ(2012年7月~2014年3月)の委員を務め、2014年3月にまとめられた報告書の装飾古墳の保存・管理の在り方の石室等の保存環境の調整の執筆を行った²⁴⁾。

この釜尾古墳は、熊本地震(2016年)で被災した。熊本市は「古墳の復旧方法等に対する意見聴取委員会」を2017年4月に立ち上げ、釜尾古墳をはじめとした熊本市内の被災古墳の復旧について検討が進められている。筆者はその委員を務め被災時における一時保存を含めた今後の保存対策の検討を現在もやっている。

2.6 元町石仏の塩類風化抑制のための覆屋による環境調整^{25), 26)}

元町石仏は1934年に国指定史跡となった大分市を代



図-18 元町石仏(左:覆屋(改修前)、右:石仏)

表する磨崖仏である。磨崖仏は岩壁に直接彫られた仏像であるため、空間側の影響だけでなく岩盤を通じた熱や地下水の影響も受ける。磨崖仏では特に水による問題が指摘されており、元町石仏では石仏表面における塩析出やそれに伴う主に硫酸ナトリウム(Na_2SO_4)による塩類風化、藻類や蘚苔類の繁茂が懸念されている。

元町石仏では、石仏を保護するため木造瓦葺きの覆屋がかけられている(図-18)。覆屋には雨水や直達日射の遮蔽、外気温湿度の影響を緩和する効果があるが、覆屋内環境が磨崖仏の劣化に与える影響に関して、石仏内部の熱水分性状の変化と劣化プロセスの進行の点から検討した例は少ない。本研究は、元町石仏において懸念される塩の析出や塩類風化を出来る限り抑制する保存環境の制御方法を定量的に検討することを目的として以下で述べる検討を行った。ここの塩類風化の由来は、主に硫酸ナトリウム(Na_2SO_4)である。 Na_2SO_4 は周囲の温度と相対湿度条件によって、無水和物(Thenardite (Na_2SO_4))と十水和物(Mirabilite ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$))の2相状態を取り、Thenarditeとして析出した塩がMirabiliteへと相変化する際に非常に大きな圧力が生じる。このことを考慮し、 Na_2SO_4 の相図上に石仏の各部位の温湿度の解析結果を重ねて相状態を推定することで相変化の有無について検討を行った。

(1) 元町石仏内部の熱水分挙動の把握

後述の改修する前の覆屋内の中央に位置する薬師如来像を対象に2次元解析モデルを作成し、熱水分同時移動解析を行い、以下の主な結果を得た。覆屋内環境として

温度低下に伴う溶解度の減少、直達日射や閉鎖状態からの扉の開放に伴う換気、蒸発面の後退の影響により秋季から冬季は表面近傍で塩の析出しやすい環境にあると考えられることや、凸部である膝では秋季から冬季にかけて蒸発が大きく含水率が低下し塩が析出しやすく、冬季から春季にか

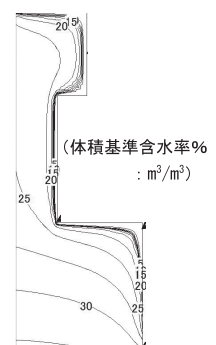


図-19 石仏内部の含水率分布

けて Na_2SO_4 の相変化が生じやすい環境にあるため塩類風化が進行しやすいと考えられることを明らかにした(図-19)。

(2) 覆屋の改修による塩類風化抑制効果の検討

2015年11月に覆屋内温湿度環境を調整することで塩類風化を抑制することを目的として改修が行われた。この覆屋改修が石仏の塩類風化に与える影響を明らかにすることを目的として、元町石仏を含む崖面を2次元で、覆屋壁体を1次元でそれぞれモデル化を行い、これらを連成して覆屋内温湿度を算出する熱水分移動を考慮した数値解析モデルを構築した。この解析モデルによる覆屋内温湿度の再現性について覆屋改修時期を含む2014年11月から2017年10月までの期間において確かめた。本解析モデルを用い、覆屋の改修を断熱改修・気密性向上・日射遮蔽の3要素に分けそれぞれの要素について検討を行い、以下の主な結論が得られた。

- 1) 本改修では断熱改修・気密性向上・日射遮蔽全ての要素で石仏からの水分蒸発量を抑制することができたものと考えられる。
- 2) 全ての改修を行った場合(改修後)では、塩の析出量および塩の相変化が大幅に低減され、塩類風化のリスクが抑制されたものと考えられる。

以上の得られた成果は、筆者が委員を務める大分市の大分元町石仏保存整備委員会にて報告を行っており、現状また今後の保存管理について助言を行っている。

3. 歴史的建造物の文化財保存における環境制御
 3.1 ハギア・ソフィア大聖堂の壁体の雨水浸透が壁画に及ぼす影響^{27), 28), 29), 30)}

トルコ・イスタンブールにあるビザンチン建築を代表する組積造の建物であるハギア・ソフィア大聖堂では、建物の内壁にモザイクやペイントといった壁画が描かれ

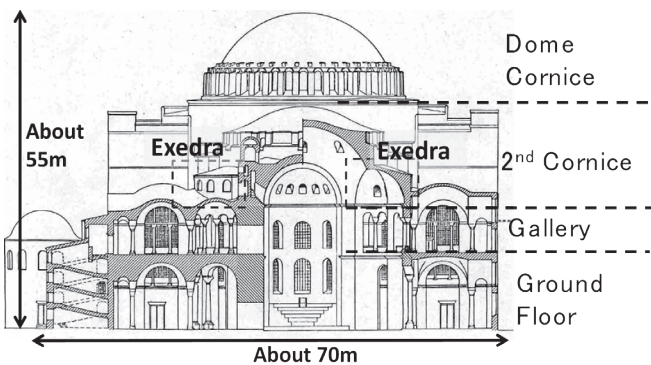


図-20 ハギア・ソフィア大聖堂の断面図 (Mainstone (1988)³¹⁾ の図を元に作成)

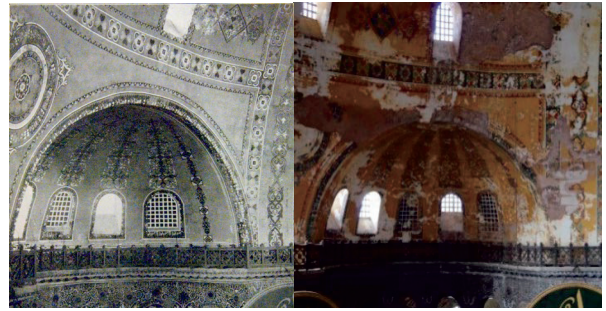


図-21 第2コーニスの北西エクセドラの壁画の劣化の進行 (左: 1907年 (Antoniades 撮影)³²⁾, 右: 2012年 (著者ら撮影))

ているが、建物上層の特定の部位で塩類風化による壁画の劣化が生じている。本研究では、雨水浸透が壁画の劣化に及ぼす影響を明らかにし、その保存対策を提案することを目的として、塩の結晶化に大きく影響する壁内の水分の蓄積や蒸発など、壁体内の熱湿気挙動に及ぼす環境因子や壁体構成の影響について検討した。第2コーニス(図-20, 図-21)の壁の含水率を測定したところ、建物形状の凹部となる部位で含水率の高く、方位による違いもあること、また含水率と劣化の程度に高い相関関係があることがわかった。測定されたエクセドラ壁の材料物性と壁構成を考慮した、熱と水分の同時移動の2次元数値解析モデルを作成し、大きな屋根に降った雨の壁面流下や吹き降り雨が壁体含水率に及ぼす影響を定量的に検討した。数値解析の結果、当初の施工者が現代のモルタルよりも水分拡散率の大きい接合モルタルを使用していたため、浸入した雨水が溜まりやすく、また、壁の形状によっては壁の下部に溜まった水が排水されにくいこと(図-22)がわかった。北西のエクセドラでは、吹き降り雨による水の蓄積への影響が、上階の屋根からの雨水の流出と同様であり、これが広い範囲で劣化を引き起こしていると考えられる。また、2013年に実施した西壁外面の張り替えによる劣化抑制策の効果を検証するとともに、数値解析モデルを用いて適切な水の浸透抑制策を検討し、水蒸気の透過を変えずに液水の浸入を抑制できる材料が最も適切な対策となることを提案した。研究

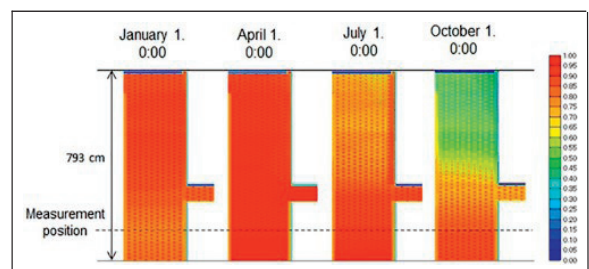


図-22 北西側エクセドラの壁体内の水の飽和度の変化

で得られた成果は、ここを維持管理するアヤソフィア博物館（2020年まで）に定期的に報告を行い、ここの修復を検討するにあたっての参考資料として博物館で共有されている。

3.2 法隆寺金堂壁画収蔵庫における壁画の保存・公開^{33), 34), 35)}

1949年に法隆寺金堂は火災に見舞われ、堂内壁画の多くが焼損した。1954年に金堂収蔵庫が竣工し、焼損壁画、焼損した柱梁、小壁画等が保存された。現在、収蔵庫は一般公開されておらず、空調設備はないが、今後一般公開を行うことを検討している。庫内ではカビ・文化財害虫の発生が懸念されており、保存環境の改善や公開時の人の入室を考慮した温湿度制御の方法が必要とされている。法隆寺金堂壁画活用委員会の下で2016年に発足した保存環境WG（筆者も委員を務めている）で実施している研究では、収蔵庫の温湿度環境を改善し、カビおよび文化財害虫等による文化財への被害を抑制するための建築的対策・環境調整方法の提案をすることについて検討を進めている。まず法隆寺金堂収蔵庫の壁画の置かれている室だけでなく、全体の温湿度予測を目的として、多数室換気回路網と、壁体の熱水分同時移動を考慮した数値解析モデル（図-23）を構築し、年間の温湿度変動や、退室後の室内の二酸化炭素濃度の減衰結果の予測の再現性を確認した。

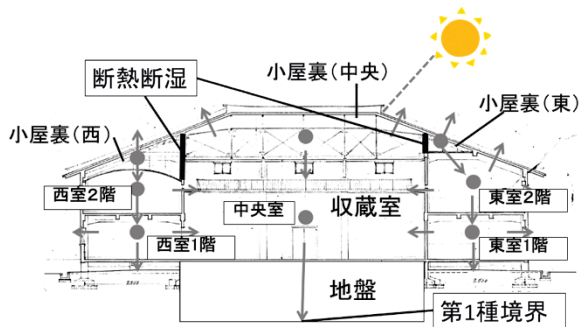


図-23 法隆寺金堂壁画収蔵庫の解析モデルの概要

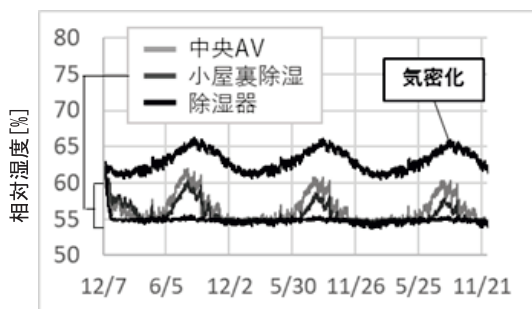


図-24 除湿対策の違いによる中央室の相対湿度の変動

次に夏季に70%程度とやや高湿になりがちな収蔵庫の湿度環境を、小屋裏の吸放湿を用いた室の除湿により環境調整を行うことを目的として、上記解析モデルを用いて、数値解析により検討を行った。小屋裏を利用した除湿方法を検討するにあたって日射熱を利用して小屋裏での除湿を行う Aremit et al.³⁶⁾ が用いた方法と同様の方法を用いた。屋根裏空間と天井に設置された換気扇の動作を提案し、様々な除湿ケースを検討した結果、主に以下の結論が得られた。

- 1) 屋根裏空間の絶対湿度が外気よりも高い場合は、屋根裏の換気扇で湿気を抜き、屋根裏空間の絶対湿度が外気・中央の書庫よりも低い場合は、天井のファンで屋根裏と書庫の空気を混合する。湿度の高い空気を排出し、残った空気を乾燥した空気と混合することで、年間を通して庫内の相対湿度を下げるができる（図-24）。
- 2) 外気を取り込んで室内の湿度をコントロールすると、平均して庫内の相対湿度を下げるができる。しかし、その変動幅は小さくない。屋根裏空間の吸湿能力が高めることで、室内の相対湿度をさらに安定させることができる可能性がある。

また現状の収蔵庫において壁画の公開方法について法隆寺からの依頼を受け、2021年度の収蔵庫の限定公開の実施に関して数値解析モデルを用いて公開時期、時間、人数等公開方法についてシミュレーションを用いた検討を行い（図-25）、コロナ感染リスクおよび壁画劣化リスクが十分小さくなるように秋の公開方法を提案した。

観覧者と壁画にとって安全な限定公開の環境を実現でき（図-26）、2022年度、2023年度の限定公開の実施においても同様の検討を行い、安全な限定公開の環境を実現出来ている。

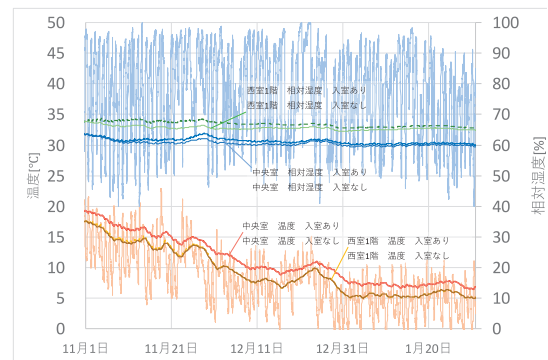


図-25 シミュレーションによる限定公開時の室内温湿度変動

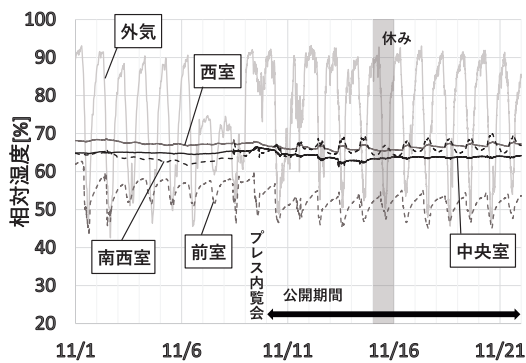


図-26 2021年度限定公開時の収蔵庫の相対湿度の測定値

4. まとめ

本寄稿は、古墳などの遺跡や、歴史的建物等の文化財を対象として「予防的保存」即ち「環境を制御する保存」を行うことを目的として、個々の文化財の劣化現象の発生メカニズムの解明とそれに基づいた対策の検討として現在まで行ってきた研究成果のいくつかを紹介したものである。これまで遺跡などの文化財の修復や保存に関する学術分野である保存科学では、劣化進行を抑制するために複雑な条件の元で経験的な対策が中心であったが、建築環境工学分野で用いられる熱・水分同時移動理論、数値流体力学などを環境要因による文化財の種々の劣化現象が生じるメカニズムの解明に応用し、その劣化を抑制する環境制御に関する提案と一部の実践を行ってきた。

現在、遺跡などの文化財の修復や保存に関する学術分野である保存科学分野では建築環境工学的（建築物理学的）な方法を応用することは国内外問わず着目されており、遺跡などの文化財保存の環境制御の実践的検討が進んできつつあるといえる。

今後は、さらに個々の文化財の劣化現象で不明である発生メカニズムを明らかにすることに加えて、被災文化財の保存対策や、今後の気候変動を踏まえた建物特性を考慮した文化財保存のための省エネルギーで実現可能な環境制御方法の提案等、人類共通の財産である文化財を未来に継承するための研究を発展させていく所存である。

謝辞

本研究を実施する過程で多くの方のご指導やご支援を頂きました。一連の研究は、京都大学・銚井修一先生にご指導を頂き開始してきたものです。東北芸術工科大学・石崎武志先生、奈良大学・岡田健先生、奈良文化財研究所・高妻洋成先生、元東京文化財研究所・佐野千絵先生、トータルシステム研究所・北原博幸代表をはじめとする多くの先生方、研究者の方々にはご指導・ご支援

を頂きました。当時研究室の学生であった中国・東南大学・李永輝先生をはじめとする多くの学生の皆さんには、共に研究に取り組む中で様々なご協力を頂きました。

神戸大学・故松本衛先生には、基礎理論を含めて面白い研究の世界へ導いて頂き、元神戸大学・松下敬幸先生には、理論を応用展開する様々な手法をご指導頂きました。

本研究の遂行には、文化庁、敦煌研究院、東京文化財研究所、奈良文化財研究所、熊本市、大分市、アヤソフィア博物館（当時）、法隆寺、朝日新聞をはじめとする多くの関係の皆様のご協力を頂きました。心より感謝を申し上げます。

【参考文献】

- 1) Julian Bickersteth : IIC and ICOM-CC 2014 Declaration on environmental guidelines, *Studies in Conservation*, pp.12-17, 2016.08.
- 2) Gaël de Guichen : *Climate in museums. Measurement*, ICCROM, 1984.
- 3) 文化庁：文化財（美術工芸品）保存施設，保存活用施設設置・管理ハンドブック，2015.03.
- 4) 建石徹：「模擬古墳」遺跡・遺物の保存と活用を考えるための実験的取り組み（1）史跡の現地保存と遺跡の露出展示—取り組みの理念と歩み—，*考古学研究*，第67巻，第1号，pp.12-15，2020年6月.
- 5) 三浦定俊，佐野千絵，木川りか：文化財保存環境学，序文，朝倉書店，2004.
- 6) D. Lacanette, S. et.al, An Eulerian/Lagrangian method for the numerical simulation of incompressible convection flows interacting with complex obstacles, Application to the natural convection in the Lascaux cave, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 52, pp.2528-2542, 2009.
- 7) X. Luo et.al, Environmental control strategies for the in situ preservation of unearthened relics in archaeology museums, *Journal of Cultural Heritage*, 16, pp.790-797, 2015
- 8) 小椋大輔，石崎武志，銚井修一，北原博幸，犬塚将英：多羅間次郎，木下舞子，高松塚古墳石室解体時の空調方法の検討，*保存科学*，第46号，pp.1-11，2007年3月.
- 9) 小椋大輔，犬塚将英，銚井修一，石崎武志，北原博幸，多羅間次郎：高松塚古墳石室解体時の壁画保存のための温湿度環境の制御，*保存科学*，第47号，pp.1-9，2008年3月.
- 10) 小椋大輔，銚井修一，李永輝，石崎武志，三浦定俊：過去の高松塚古墳石室内の温湿度変動解析—保存施設稼働時の気象条件の影響と，発掘直後の仮保護施設の影響—，*保存科学*，第48号，pp.1-11，2009年3月.
- 11) 小椋大輔，銚井修一，李永輝，石崎武志：過去の高松塚古墳石室内の温湿度変動解析（2）墳丘部表面の植生等の変化が石室内温度変動に与える影響，*保存科学*，No.49，pp.73-85，2010年3月.
- 12) 小椋大輔，銚井修一，李永輝，石崎武志：過去の高松塚古

- 墳石室内の温湿度変動解析 (3) 吸放熱パネルへの送水温度および入室が石室内温湿度変動に与える影響, 保存科学, No.49, pp.87-96, 2010年3月.
- 13) Daisuke Ogura, Shuichi Hokoi, Takeshi Ishizaki, Yonghui Li : Analysis of Temperature and Humidity Variation in the Stone Chamber of Takamatsuzuka Tumulus from Construction of the Conservation Facility to Before the Dismantlement of the Stone Chamber, *Case Studies in Building Construction, Building Pathology and Rehabilitation*, Vol.15, pp.13-30, Springer, Cham., 2020.09. https://doi.org/10.1007/978-3-030-55893-2_2
 - 14) 文化庁：国宝高松塚古墳壁画 -保存と修理-, p.78, 1987
 - 15) 高松塚古墳壁画劣化原因調査検討会：高松塚古墳壁画劣化原因調査報告書, pp.43-44, 2010年3月
 - 16) D. Ogura, T. Hase, Y. Nakata, A. Mikayama, S. Hokoi, H. Takabayashi, K. Okada, B. Su, P. Xue: Influence of Environmental Factors on Deterioration of Mural Paintings in Mogao Cave 285, Dunhuang, *Case Studies in Building Construction, Building Pathology and Rehabilitation*, Vol.13, pp.105-159, Springer Cam., 2020.07. https://doi.org/10.1007/978-3-030-49202-1_6
 - 17) Akane Mikayama, Shuichi Hokoi, Daisuke Ogura, Ken Okada, Bomin Su: The effects of windblown sand on the deterioration of mural paintings in cave 285, in Mogao caves, Dunhuang, *Journal of Building Physics*, Vol.42, Issue 5, pp.652-671, 2019.03. <https://doi.org/10.1177/1744259118782540>
 - 18) Ji Xianlin, Toshio Nagahiro, Chang Shuhong, Duan Wenjie et al.; Mogao Cave in Dunhuang 1, Heibonhsha Limited Publishers, in Chinese, 1980.
 - 19) 謝華榮：模擬古墳を用いた埋蔵環境下における遺物の保存に関する研究, 京都大学博士学位論文, 2020年5月
 - 20) 柳田明進：埋蔵環境下における金属製遺物の腐食に関する研究, 京都大学博士学位論文, 2018年1月
 - 21) 小椋大輔, 脇谷草一郎, 柳田明進, 謝華榮, 模擬古墳：遺跡・遺物の保存と活用を考えるための実験的取り組み (2) 模擬古墳を用いた研究の紹介とそこから見えてきた現状と課題, *考古学研究*, 第67巻, 第2号, pp.10-14, 2020年9月.
 - 22) 脇谷草一郎, 小椋大輔, 建石徹, 富井真, 模擬古墳：遺跡・遺物の保存と活用を考えるための実験的取り組み (4) 座談会：現状・課題・展望, *考古学研究*, 第68巻, 第1号, pp.17-21, 2021年6月.
 - 23) 芥子円香, 小椋大輔, 銚井修一：釜尾古墳における装飾壁画の保存のための環境設計, *日本建築学会環境系論文集*, 第81巻, 第730号, pp.1095-1104, 2016年12月. <https://doi.org/10.3130/aije.81.1095>
 - 24) 古墳壁画の保存活用に関する検討会 装飾古墳ワーキンググループ：古墳壁画の保存活用に関する検討会 装飾古墳ワーキンググループ報告書, pp.34-54, 2014年3月
 - 25) 高取伸光, 小椋大輔, 脇谷草一郎, 安福勝, 桐山京子：覆屋内温湿度変動が磨崖仏の塩類風化に及ぼす影響の数値解析 - 元町石仏の保存に関する研究 その1 -, *日本建築学会環境系論文集*, 第82巻, 第733号, pp.215-225, 2017年3月. <https://doi.org/10.3130/aije.82.215>
 - 26) 高取伸光, 小椋大輔, 脇谷草一郎, 安福勝, 桐山京子：覆屋の改修が石仏の塩類風化に与える影響の熱水分移動解析による評価 - 元町石仏の保存に関する研究 その2 -, *日本建築学会環境系論文集*, 第85巻, 第768号, pp.137-147, 2020年2月. <https://doi.org/10.3130/aije.85.137>
 - 27) 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*, 第51号, pp.59-76, 2012年3月.
 - 28) 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：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 -, *保存科学*, 第52号, pp.27-42, 2013年3月.
 - 29) 水谷悦子, 小椋大輔, 石崎武志, 安福勝, 佐々木淑美：ハギア・ソフィア大聖堂の壁体の雨水の浸透が壁画の劣化に与える影響, *日本建築学会環境系論文集*, 第80巻, 第716号, pp.1001-1011, 2015年10月. <https://doi.org/10.3130/aije.80.1001>
 - 30) Etsuko Mizutani, Daisuke Ogura, Takeshi Ishizaki, Masaru Abuku, Juni Sasaki: Influence of wall composition on moisture related degradation of the wall surfaces in Hagia Sophia, Istanbul, *Journal of Building Physics*, Vol.45, Issue 3, pp.271-302, 2021.11. <https://doi.org/10.1177/1744259121996017>
 - 31) Mainstone RJ : HAGIA SOPHIA Architecture, Structure and Liturgy of Justinian's Great Church, Thames & Hudson, 1988.
 - 32) Antoniadēs EM, Ekphrasis tēs Hagias Sophias: ētoi meletē synthetikē kai analytikē hypo epopsin architektonikēn, archaiologikēn kai historikēn tou polythrylētou temenous Kēnstantinoupoleēs, VOL 3. Leipzig: Kommissionsverlag von B.G. Teubner, 1909.
 - 33) 和田拓也, 小椋大輔, 銚井修一, 伊庭千恵美：法隆寺金堂収蔵庫における壁画の保存・公開に関する研究 - 数値解析による小屋裏の吸放湿を用いた室の除湿による環境調整方法の検討 -, *日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 I*, pp.981-982, 2020年9月.
 - 34) Takuya Wada, Daisuke Ogura, Chie Sano, Shuichi Hokoi, Chiemi Iba: Study of the conservation and exhibition of burned wall paintings in the main hall of the treasure house at Horyu-ji Temple, *Proceedings of 12th Nordic Symposium on Building Physics*, pp.979-986, 2020.06. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017215005>
 - 35) 小椋大輔, 和田拓也, 木川りか, 和田浩, 吉田直人, 秋山純子, 佐藤嘉則, 藤井義久, 銚井修一, 伊庭千恵美, 森井順久：法隆寺金堂収蔵庫における壁画の保存・公開に関する研究 - 収蔵庫の限定公開時と建具隙間の気密化を考慮した非公開時の環境調整方法の検討 -, *日本文化財科学会第38回大会研究発表要旨集*, pp.212-213, 2021年9月.
 - 36) N. Areemit, Y. Sakamoto : Numerical and experimental analysis of a passive room-dehumidifying system using the sorption property of a wooden attic space, *Energy and Buildings*, 39, pp.317-327, 2007.