

# 埋蔵文化財 データベース

保存科学研究集会 遺跡保存に関する最近の動向



## はじめに

近年、保存科学研究集会では金属製品や木製品などの遺物保存に関する研究、あるいは同位体比分析やイメージング技術といった分析手法に関する研究をテーマとして取り上げて参りました。これらのテーマと並んで奈良文化財研究所にとって重要な研究テーマとなるものが、古墳、摩崖仏や土遺構などの遺跡の保存です。これらは主に石や土壌などの材料で構成されておりますが、一口に石や土壌といっても、例えば水の流れやすさなど遺跡の劣化に対して影響をおよぼす性質が遺跡ごとに大きく異なります。また、遺跡は現地で保存されることが原則ですので、周辺の環境条件もやはり遺跡ごとに大きく異なっており、画一的な保存方法というものを提示することは極めて困難といえます。そのため、遺跡の保存では、遺跡ごとに周辺の微気象や周辺地盤の水分状態など、環境条件に関するデータを取得するとともに、その環境の中で遺跡にどのような劣化の発生・進行が想定され、それらの劣化を抑制する保存処理ならびに環境調整法とはどのようなものか十分に検討する必要があります。

また、近年、日本各地で頻発する豪雨災害や地震被害によって、遺跡もまた大きな被害を受けています。たとえば熊本地震によって多数の古墳で石室石材が崩落する、あるいは墳丘に大きなクラックが発生するなどの深刻な被害が発生しており、現在もその復旧方法が検討されています。このように遺跡保存においては、日常の維持管理方法だけではなく、突発的に起こる自然災害へのリスクマネジメントも近年ますます重要な課題となってきております。

このような課題に対して、奈良文化財研究所では建築環境工学や地盤工学の専門の方々と連携して研究を進めております。とりわけ、日本建築学会では学会傘下の湿気小委員会内部に“文化財の保存と活用のための熱湿気環境解の検討WG”が設置され、文化財の保存を研究対象としている建築環境工学と文化財保存の専門家が、屋外に位置する遺跡から博物館の展示環境に至るまで共同で視察をおこない、文化財の劣化進行を抑制する環境について議論を重ねて参りました。そこで、今年度の保存科学研究集会では日本建築学会のご協賛を賜り、文化財の保存と活用のための熱湿気環境解の検討WGの委員の方々に、遺跡保存に係る研究についてご講演頂けるよう準備を進めて参りました。しかし、諸般の事情により研究集会の開催を延期することと致しましたので、本号の埋蔵文化財ニュースでは延期となりました保存科学研究集会の研究報告概要をまとめることと致しました。



## 研究集会プログラム

旧甲子園ホテルの外装材として使用される凝灰岩の保存に関する研究 — 環境と材料物性からみる劣化要因— . . . . .	4
宇野朋子 [武庫川女子大学]	
材料の表面撥水処理による劣化抑制の可能性 — トルコ・カッパドキアの岩窟教会を例として— . . . . .	12
伊庭千恵美 [京都大学]	
外壁面での気生藻類の生育に関する研究 — 藻類生育と周辺環境条件との関係および生育防止策の検討— . . . . .	18
中嶋麻起子 [神戸大学]	
土遺構の保存における環境調整 . . . . .	24
脇谷草一郎 [奈良文化財研究所]	
高瀬石仏の保存環境予測と整備事業評価 . . . . .	34
安福 勝 [近畿大学]	
結露が古墳壁画に及ぼす影響に関する基礎研究 . . . . .	40
犬塚将英 [東京文化財研究所]	
古墳の保存のための環境調整について — 装飾壁画保存のための環境設計と地震被災後の一時的対策の検討— . . . . .	46
小椋大輔 [京都大学]	

# 旧甲子園ホテルの外装材として使用される凝灰岩の保存に関する研究 —環境と材料物性からみる劣化要因—

武庫川女子大学建築学科

UNO Tomoko  
宇野 朋子

京都大学大学院工学研究科

IBA Chiemi  
伊庭 千恵美

YAMADA Koki  
山田 皓貴

## 1：はじめに

F.L.ライトの帝国ホテルに使用された大谷石（栃木県産）のように、近代建築には内・外装材に凝灰岩が用いられることがある。凝灰岩は、比較的柔らかく加工がしやすいことから、高い装飾性の表現にふさわしい材料だったと考えられる。

旧甲子園ホテル<sup>1)</sup>（竣工：1930年、設計：遠藤新）は、F.L.ライト式の近代建築であり、国の近代化産業遺産ならびに登録有形文化財である（図1）。旧甲子園ホテルには、内・外装材として凝灰岩の日華石（石川県産）が使用され、豊かなレリーフが施されている。さらに、修復工事の過程で、竜山石（兵庫県産）<sup>註1)</sup>や大谷石も採用されてきた。これらの凝灰岩のうち、とくに外装材には、剥離や欠損といった劣化が進行している<sup>2, 3)</sup>。

石材のうち劣化の著しいものは、取り換えることにより、歴史的な建築物を継承してきてはいるが、近年では、資源量が限られることや採算が合わないなど、新しい石材の採掘が減少してきている<sup>4)</sup>。現在建物に残っている石材の劣化を抑え、長く使用するための対策も求められている。

本研究は、建築物の外装材として使われる石材（凝灰岩）の保存のために、適切な環境管理と保存修復処置の方法を検討することを目的としている。凝灰岩は、多孔質であり吸水率が高く、水の浸透や乾湿の繰り返しによって、凍結破砕や塩類の析出など、致命的なダメージを受けることも多く、対処が求められている石材である<sup>4, 5)</sup>。本報では、旧甲子園ホテルの外装材に使用される凝灰岩を例に、劣化の状況、周辺環境、

材料物性の点から、劣化の要因を推定した。

## 2：石材の特徴と既往研究

建築に使用される天然産の石材は、圧縮強さ、吸水率、見掛比重により分類され、凝灰岩は軟岩に区分される<sup>6)</sup>。凝灰岩は、多孔質であるため吸水率が高く、比重が低い<sup>7)</sup>。一般的に吸水率の高い材料は、水の浸透や乾湿の繰り返しによって、凍結破砕や塩類の析出など致命的なダメージを受ける事例が多い<sup>4)</sup>。

同じ凝灰岩に分類される石材でも、産地や種類により、圧縮強さや吸水率、比重が異なる<sup>8)</sup>が、さらには石材の空隙の状況などにも差がみられる。石崎らは、凍害に関する研究において、凍害の劣化の状況が石材を構成する要素や緻密さにより異なる<sup>9)</sup>ことを示しており、また、吉田らは、石材の等級や種類によって劣化の状況が異なる<sup>10)</sup>ことを示している。

本研究で対象としている2種類の凝灰岩（日華石と竜山石）も外観が異なり、日華石（図2左）には数ミリ程度の孔部が多くあるのに対して、竜山石（図2右）は非常に緻密である。そして、5章で示す劣化の状況も大きく異なっている。そのため、一般的に把握される物性以外にも、石材の多孔質部分の構成や透水・透湿性などの水分の移動に関係する物性の差が、劣化の差異の要因となることが考えられる。



図1 旧甲子園ホテル 外観



図2 旧甲子園ホテルの外装材に使われる石材  
（左：日華石、右：黄龍山石）

そのため、本研究では、石材（凝灰岩）のおもに水分特性の面から、物性を把握すること、また、それらと劣化の状況や過程との関係を明らかにする。

### 3：対象建物の概要

研究対象は、旧甲子園ホテルの外装材として使用されている凝灰岩である。旧甲子園ホテルは兵庫県西宮市にあり、地上4階地下1階建て、建築面積約2000㎡、延べ床面積約6000㎡の鉄筋コンクリート造の建造物である。

旧甲子園ホテルは1930年にホテルとして開業し、1943年までホテルとして使用される。1944年に海軍病院や米軍将校の宿舎に転用され、1957年から大蔵省により管理されていた。1965年に武庫川学院が譲り受け、以降、学舎として利用される。2006年には、建築学科（2020年より建築学部）が開設され、学科の教室やスタジオ、研究室に転用される。近代建築として建物が保存されると同時に、現在も活用されている貴重な事例となっている。

旧甲子園ホテルの内外のレリーフやひさしの線型、笠木石、階段石などには凝灰岩の日華石が使われている。日華石は、緻密で柔らかく細かな細工が可能であったことから採用されたといわれている。1930年の建設当時は日華石が使用された箇所において、その後の改修工事の際や補修の際に、凝灰岩の竜山石（黄竜山石）に取り替えられた箇所があり、また、一部の外構には、大谷石も使われている。

### 4：過去の修復履歴

旧甲子園ホテルでは、その時代にに応じて保存修復の措置がなされてきた。大規模な工事は、1965～1966年と1990年に行われている。

1990年の改修工事では、屋上スラブの防水や外壁タイルの浮き止めと撥水処理、ひさし部の補強と防水などがなされた<sup>1)</sup>。外装材に対しては、洗浄、浮いた石のアンカーピンニングとエポキシ樹脂による固定、欠損部のモルタルによる補修などがなされるとともに、激しく傷んだ日華石は取り替えられた。

石材の保存修復は、建築学科が開設された2006年前後やそれ以降にも行われており、テラス笠木石や階段石などで、洗浄、含侵剤および撥水剤の塗布が部分的になされている<sup>註2)</sup>。また、傷んだ日華石の取り替えも何度かなさ

れている。新しい石材に取り替えた場合でも、同じ箇所が劣化する状況もある。

## 5：石材の保存状態と環境

石材の保存状況を目視観察し、立面図および平面図に記録を行った<sup>註3)</sup>。本報では2013年に行った調査記録<sup>2、3)</sup>をもとに、石材の種別や劣化の状況について、2020年1月時点で確認した事項を加筆した。さらに、特徴的な記録が見られた箇所について、劣化の分布を調査した。目視調査による保存状態を表1に示す。また、図3に石材の種類と状態、図4に劣化がみられる日華石および竜山石を示す。

外装材で日華石が使用されている箇所は、ひさし、窓台、笠木、巾木、3階テラス階段、1階南テラスの東階段、レリーフ、柱など、外装の石材部のほとんどである。竜山石は、1階南テラスの西階段、東スタジオ西側の階段、正面玄関の階段部である。

旧甲子園ホテルの凝灰岩の劣化の特徴は、藻類繁茂、黒ずみ、欠損（厚さ数十ミリ以上）、剥落（厚さ数ミリ程度）、塩の析出とそれによる剥落であった。

表1 劣化の分類<sup>2)</sup>

種類	劣化のみられる箇所	状態
黒ずみ	建物周囲のひさし線型の先端、東西面が顕著	黒ずんでいる。雨が上がり、水の流れがある箇所。図4左上
藻類繁茂	屋上階段石と笠木石、西ウイングテラス前の床敷石など	著しく黒ずんでいる。雨が直接あたる箇所に多い。建物の影になりやすい、木陰になりやすいなど、直達日射があたりにくい箇所には藻やコケが繁殖。図4左上・右上
欠損	2階・3階屋上笠木石と階段石、1階南テラス柱下、西ホール南テラス階段石、屋上テラス外壁の装飾など	厚み十数ミリ程度、大きさは数センチから十センチの欠損。水平面に多く見られる。西ホール南テラス柱の下方の剥落箇所には塩が析出。欠損の多くはモルタル補修されている。藻類による黒ずみがみられる。図4左中・右中
剥落	1階正面玄関階段、ロビー南テラス西階段	数ミリ厚の剥落。水平面、鉛直面の両方にみられる。発生範囲が限定している。雨がかりが少ない。図5
塩の析出	1階南テラス列柱、2階・3階屋上テラス巾木など	表面に塩の結晶が付着。3階巾木から採取した塩の分析では硫酸ナトリウムが検出された。裏面からの水分の浸透が想定される。図4左下・右下

(1) 黒ずみ、藻類繁茂

黒ずみ(図4右上)は藻類によるものとみられ、日華石にも竜山石にもみられた。日華石では、ひさしの先端、窓台、笠木、敷石、階段部分などの石材の水平面で見られ、敷石では全面を覆うように藻類が繁殖していた。また、木の陰になる場所にある笠木やひさし(図4左上)の部分の黒ずみが著しく、コケ類も繁殖していた。

竜山石では1階南テラスの西階段、東ウイングの東スタジオの西側の階段に藻類繁茂による黒ずみがある。1階北側の正面玄関の階段部には見られなかった。

日華石も竜山石ともに、藻類繁茂が見られた箇所は、いずれも直接雨がかりがある箇所であり、黒ずみは雨だれが流れる箇所であった。上部にひさしがあり雨がかりが少ない箇所(図4右上の左部分)では、ほとんど藻類繁茂も黒ずみも見られなかった。

(2) 欠損、剥落

日華石では、3階屋上テラスの笠木石と階段石、1階西ホール南テラス階段石に、厚さが1cmを超える大きな欠損が見られた。また、1階南テラス柱(図4左下)、屋上テラス外壁の装飾などには、割れや欠損(図4右下)があり、同じ個所で塩類の析出も見られた。

日華石に欠損が見られた箇所は、藻類の繁茂同様に雨がかりがある箇所であった。図4右中のように、大きな欠損が見られた箇所は、屋上テラスに降った雨が染み出す箇所

所であり、降雨後のしばらくの間は、高い含水状態が続く箇所であった。TDRによる含水率<sup>註4)</sup>は、降雨前でも20%近い含水率であり、降雨後は24%とほぼ飽和に近い含水率であった。また、上部が開けており、日射や夜間放射の影響を大きく受ける箇所であった。



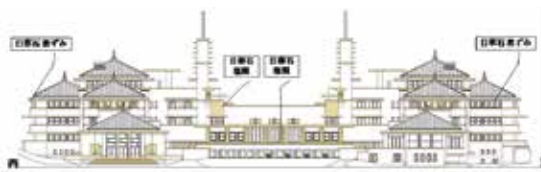
図4 日華石の石材状態(左上:ひさしの黒ずみ、右上:南テラス東階段の藻類繁茂、左中:屋上テラスの笠木の欠損と充填、右中:屋上テラス階段石の表面の割れ、左下:南テラス柱の塩類の析出、右下:屋上レリーフ部の塩類の析出が見られた箇所の欠損)



図5 竜山石の石材状態(1階南テラス西階段 ひさし下の剥落)



旧甲子園ホテル1階平面図(2020年現在)



南立面図

図3 石材の種類と保存状態(網掛は石材が使用された箇所。コメントは石材表面の保存状態)

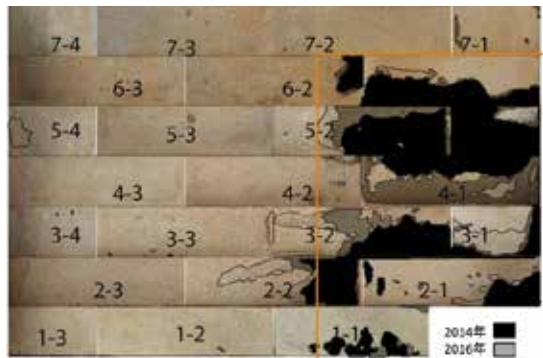


図6 1階南テラス西階段(2014年と2016年の剥落箇所、ラインは上部のひさしの先端部)

竜山石では、1階南テラスの西階段、1階北側の正面玄関の階段部に層状の剥落がみられた。1階南テラスの西階段の剥離（図6、2014年と2016年の調査結果）は、上部にひさしが出ており、雨がかりが少ない箇所に集中している。TDRで測定した含水率は、降雨前では階段下部が8～15%、階段上部で3～13%であり、降雨後では階段下部で14～18%、階段上部で10～15%と、階段上部での含水率の上昇が大きく、降雨前に乾燥していた部分の含水率も上昇していた。一方、ひさしがなく雨がかりがある東スタジオ西側の階段には、同じ竜山石でも目立った剥落は観察されていない。

### (3) 塩類の析出

塩類の析出は日華石にみられ、3階のレリーフの部分、3階の巾木、1階南テラス柱のレリーフ部分（図4左下）<sup>註5)</sup>であった。3階のレリーフは、欠損部がモルタルにより補修されていたが、日華石が粉化しモルタルが剥落した箇所も見られた。竜山石には、結晶化した塩類は見られなかった。

塩類の析出が見られた箇所は、比較的雨がかりの少ない箇所であり、しかし、上部や隣接する部分からの水分供給が考えられる箇所であった。

## 6：気象条件

石材の劣化の要因としては、寒冷地では凍結による事例が多くみられる。本章では外界気象要件から、凍結の可能性について検討する。年間の温湿度と降水量を図7と図8に示す。

温湿度は、武庫川女子大学上甲子園キャンパス内において1時間ごとに測定された2015年10月から2017年8月までの日別平均気温・平均相対湿度であり、降雨量は兵庫県西宮市の「西宮市雨量情報システム」<sup>12)</sup>において2016年12月より一般公開されている10分ごとの測定値のうち、旧甲子園ホテルにもっとも近い観測点である「西宮市鳴尾支所」（旧甲子園ホテルより南南西に約2km）の2018年一年間の測定値を参照している。また、図9には、2017年2月の1時間ごとの温湿度と降雨量の測定結果を示す。

日平均気温は、夏季に30℃前後まで上昇し冬季に5℃程度まで下降する。また、相対湿度は年中を通しておおむね50～90%の範

囲に収まっており、夏季に多湿、冬季に乾燥する傾向がある。

雨量は夏季に多く、冬季には一日あたりの降水量も降雨日の頻度も少ない。

2017年2月の測定値を見ると、2月9日に10mm弱の降雨があるが、その後11日から12日には、外気温が3℃を下回っており、また、2月25日の降雨後の27日も3℃程度まで低下している日がある。日華石の欠損は、屋上テラスの階段部や笠木の水平面で生じているが、それらの部分は天空に対して開けた状態かつ北側に面する部分であり、天空放射（夜間放射）による影響を受け温度低下がしやすい箇所と考えられる。仮に、外気温が3℃程度であっても、放射による4℃程度の温度低下<sup>13)</sup>があると、石材表面付近の水分が結氷する可能性があり、ある程度含水した日華石内部では凍結が生じる環境にあるといえる。また、たとえ降水量が多くなくとも、降雨後は3階屋上テラスの日華石の階段部には水の染み出しが見られており、屋上テラス全体に降った雨水が石材の背面から、数週間にわたり供給されている状況にある。そのため、温度が下がる日が降雨の数日後であっても凍結の危険はある。

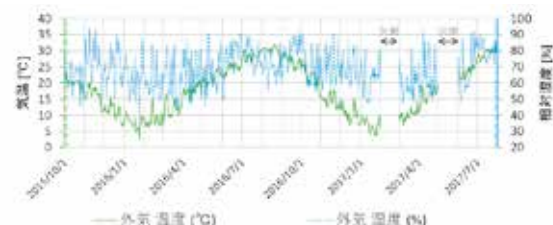


図7 旧甲子園ホテル 日平均外気温湿度

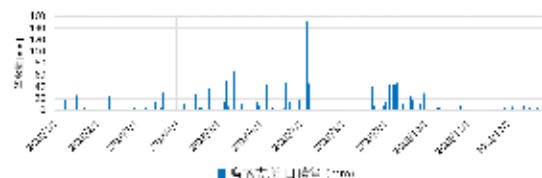


図8 西宮市鳴尾支所 日積算雨量

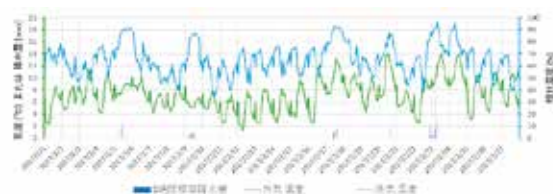


図9 外気温湿度・1時間積算雨量（2017年2月）



一方、竜山石の使用された場所で、降雨の影響を受けかつ、天空に比較的開けた部分として、南側の東テラス西側の階段石の部分があるが、藻類繁茂による黒ずみがあるのみで、大きな欠損には生じていない。

## 7：凝灰岩の物性

本章では、日華石および竜山石の物性値をまとめる。基本的な物性値として、絶乾密度、吸水率、真空吸水率と熱伝導率、細孔径分布、湿気伝導率、透水係数、平行含水率を調査した。

### (1) 絶乾密度・含水率・熱伝導率

絶乾密度は、日華石と竜山石それぞれ3つの試料<sup>註6)</sup>を、105℃に設定した乾燥機に入れ、質量変化が全体質量の0.5%以内となった後の状態で測定した質量と、それぞれの体積から密度を求め、3つの平均値を算出した。

石材の吸水状況に対しては、毛細管飽和含水率と真空飽和含水率を測定した。不整形の試料も含まれていることから、絶乾密度を求めた試料の密度を用いて、それぞれの含水率を算出した。いずれも3つ以上の試料の平均値である。

熱伝導率は、気乾および湿潤の試料について、熱線法<sup>14)</sup>により求めた。

絶乾密度は、日華石の方が竜山石よりも小さく、日華石はレンガ<sup>15)</sup>と比べても小さい。真空吸水率を空隙率とみなせば、日華石は竜山石よりも空隙が6倍多い。日華石では毛細管飽和含水率と真空飽和含水率の差は0.018 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>だが、竜山石では0.007 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>であり、日華石の方が、水が入りにくい、あるいは、大きな孔の累積容積が大きいと考えられる。

乾燥状態の熱伝導率は空隙の多い日華石は竜山石の4分の1程度であるが、湿潤状態では、含水率の大きな日華石の方が大きい。

### (2) 細孔径分布

日華石と竜山石の平均細孔半径と累積細孔容積を表3に、試料の細孔径分布を図10に示す。日華石では試料1つ、竜山石では試料2つについて、水銀圧入法<sup>16)</sup>により測定した。

日華石の細孔半径は、0.2μm前後に、竜山石の細孔半径は0.06～0.07μm付近に集中しており、日華石は竜山石よりも大きな孔が多く、また、全体の空隙率（累積細孔容積）も大きい。

### (3) 湿気伝導率

湿気伝導率は、透湿抵抗をカップ法<sup>17)</sup>により

測定することで求めた（表4）。測定は23℃に設定した恒温室内のデシケータ内で行い、カップ内（高湿側）は相対湿度85%（KCL飽和塩溶液）、カップ外（低湿側）は相対湿度53%（Mg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>・6H<sub>2</sub>O飽和塩溶液）に調節した。

湿気伝導率は、日華石が竜山石の3.8倍となった。湿気を通しやすい大きな孔が多いことによるといえる。竜山石は、コンクリートと同程度の湿気伝導率であった<sup>18)</sup>。

### (4) 透水係数

透湿係数は、簡易に不飽和透水係数を測定する方法として土壌分野で利用される負圧浸潤計<sup>19)</sup>（Mini Disk Infiltrometer、METER Group.社製）を用いて測定した。

表2 日華石と竜山石の密度・含水率・熱伝導率

物性値	日華石	竜山石	
絶乾密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	1180	2260	
毛管飽和含水率 [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	0.467	0.077	
真空飽和含水率 [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	0.485	0.084	
熱伝導率 [W/mK]	乾燥	0.481	2.025
	湿潤	1.144	2.832

表3 平均細孔半径と累積細孔容積

物性値	日華石	竜山石
平均細孔半径 [μm]	0.035	0.027
累積細孔容積 [mL/g]	0.35	0.065
累積細孔容積 [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	0.412	0.147

表4 透湿抵抗と湿気伝導率

物性値	日華石	竜山石
透湿量 [kg/s]	1.37×10 <sup>-8</sup>	3.79×10 <sup>-9</sup>
透湿抵抗 [m <sup>2</sup> sPa/kg]	6.35×10 <sup>8</sup>	2.39×10 <sup>9</sup>
湿気伝導率 [kg/msPa]	2.56×10 <sup>-11</sup>	6.76×10 <sup>-12</sup>

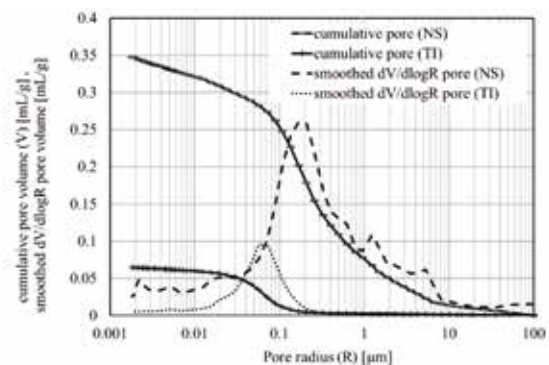


図10 試料の細孔径分布

負圧浸潤計による不飽和透水係数（図11）において、日華石は竜山石よりも、飽和付近で透水係数が大きく、水分化学ポテンシャル（ $\mu$ ）が $-2.5\text{J/kg}$ 付近よりも低い値では、竜山石の透水係数が大きくなった。このことは、異なる測定方法による結果<sup>3)</sup>でも $\mu = -0.4\text{J/kg}$ 付近に表れていることが示されており、日華石と黄竜山の透水係数の傾向を示しているといえる。竜山石は、日華石にくらべて細い細孔を多く持つことから、低い水分化学ポテンシャルにおいて透水係数が日華石よりも大きくなったと考えられる。また、日華石は、竜山石よりも累積細孔容積・平均細孔半径が大きいために、飽和に近いところでは、日華石の透水係数が大きくなったと考えられる。さらに、水分化学ポテンシャルが低くなるほど、日華石と竜山石の透水係数の差は大きくなる。以上のことから、日華石は、水分化学ポテンシャルの低下に対する透水係数の低下率が大きい石材といえる。また、比較的乾燥した状態では、竜山石の方が液水を通しやすいといえる。

一般に、多孔質材料が高含水率時ほど液水をよく通す理由は、多孔質材料の固体実質部に吸着された水蒸気の水分子が集まり、液水の滴となるためである。つまり、固体実質部どうしの距離が小さい緻密な孔では、低含水率でも、空隙を挟んで固体実質部の表面に吸着された水分どうしが接触し結合するため液水の滴になりやすい。これに対して、大きな孔は材料に水分が吸着されても固体実質部どうしが離れており、ある程度の高含水率にならなければ吸着された水分が液水の滴にならず、透水係数も上がらない。

したがって、ここで得られた日華石と竜山石の透水係数の傾向の違いは、(2)節で示した細孔分布の差の影響を受けているといえる。

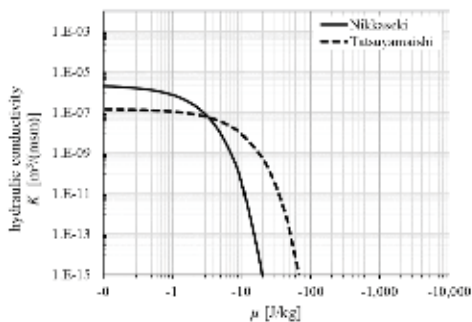


図11 透水係数 測定結果と文献値

## (5) 平衡含水率

高含水率域での放湿過程における平衡含水率関係を加圧板法<sup>20)</sup>註7)と定容法（ガス吸着法）により、また、94, 85, 75, 53, 33%に対応する吸湿過程の平衡含水率を恒温室（設定 $23^\circ\text{C}$ ）内にてデシケータ法<sup>21)</sup>註8)により測定した。デシケータ法による測定には、日華石と竜山石それぞれについて、各相対湿度に対し2つの試料を用い、その平均値を求めた。

測定で得られた日華石と竜山石の平衡含水率関係を、定容法（ガス吸着法）による吸湿過程の平衡含水率と合わせて図12に示す。

日華石は $\mu \approx -10\,000 \sim -1\,000\,000\text{ J/kg}$ において結果にばらつきがみられた。とくに、デシケータ法とガス吸着法では、いずれも吸湿過程であるが、含水率は大きく異なった。ガス吸着法では、かなり細かく砕いた試料を用いて測定するため、試料作成時に破断面での細孔半径が大きくなることによると考えられる。

## 8 : 石材の水分特性と劣化状況の関係

日華石の欠損は、夜間放射の影響を受けやすく、雨がかりがあり十分な水分が供給される、3階屋上テラスや笠木で著しい。また、水分化学ポテンシャル低下に伴う透水係数の低下が著しいことを踏まえると、材料に水分が滞留しやすく、材料が結氷温度に達し、表面付近の水分が凍結し、水が氷に状態変化する際の体積増加から石の欠損が引き起こされると考えられる（図13）。

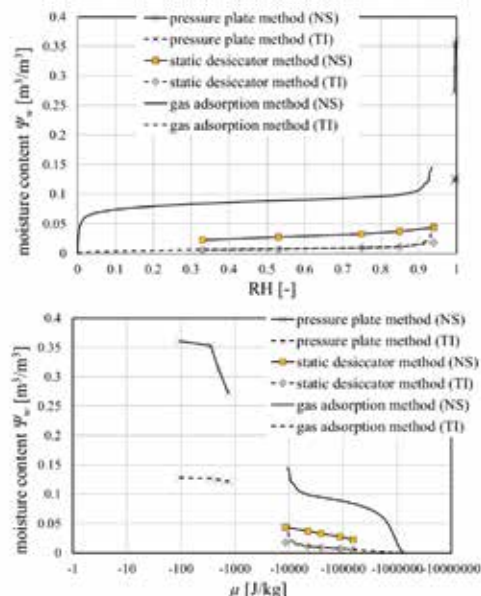


図12 平衡含水率  
(上：相対湿度、下：水分化学ポテンシャル)

これに対して、竜山石は雨がかりの少ない箇所、かつ、隣接する部分に雨がかりがあり、もしくは背面から水分供給があるような場所において、剥落が著しい。竜山石は日華石に比べると、降雨により岩石周囲が含水した際など、液水が石材内を水平にも移動しやすいと考えられる。降雨のない部分では、常に乾燥が促進されやすい状況となるため、ひさし下などの過剰な乾湿繰返しを受ける場所で、剥落が発生していると考えられる(図14)。同じひさし下でも、日華石では細かな剥落は起こりにくい可能性がある。

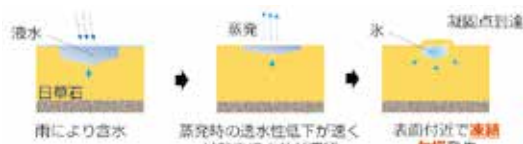


図13 推定される日華石欠損のメカニズム

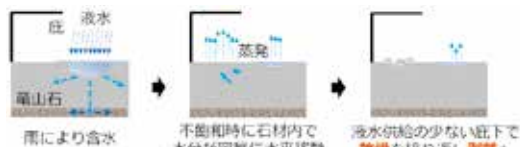


図14 推定される竜山石剥離のメカニズム

## 9: おわりに

本研究では、旧甲子園ホテルでの外装材として使用された凝灰岩について、その劣化の過程を推定するために、周辺環境の分析と、熱水分に関する物性値を測定し、水分特性の劣化への影響を考察した。今後は引き続き数値解析により透水係数の同定を行う。また、測定した熱水分物性値一式を用いて現地環境を模した数値解析や暴露実験による劣化の予測・再現により、推定した劣化の過程の検証を行う。

### 註

- 1) 竜山石には、石色により黄竜山石、青竜山石、赤竜山石がある。旧甲子園ホテルに使われているのは、黄竜山石である。本論文では、竜山石と表記した。
- 2) 中村石材工業株式会社：武庫川女子大学甲子園会館 石材強化工事 施工報告書，中村石材工業株式会社，2009
- 3) 2013年に行った記録である<sup>2)</sup>。文献2では、調査した外装材を日華石として記録していた

が、その後、南テラスの西側階段、東スタジオ西側階段、正面玄関階段には、竜山石が使われていることが判明した。

- 4) 修理の際に取り外された石材を用いて吸水状態を観察したところ、TDRによる含水率の最大値は23.4%であった。
- 5) 南テラスのレリーフ部分には、背面に雨水排水管が通っており、その配管が欠損していたことが判明した。
- 6) 試料サイズは、日華石が約5cm×5cm×15cm、竜山石は約4.6cm×4.8cm×12cmである。
- 7) 試料サイズは、厚さ約5mm、約5cm四方である。
- 8) 試料サイズは、厚さ約5～6mm、2.5cm四方である。

### 参考文献

- 1) 武庫川女子大学甲子園会館リーフレット，2015
- 2) 野口佳奈：日華石の劣化に及ぼす環境要因の調査—甲子園会館を対象として—，武庫川女子大学修士論文，2014
- 3) 宇野朋子，安福勝，伊庭千恵美，脇谷草一郎：旧甲子園ホテルの外装材に使用される石材の保存に関する研究 - その1 石材の現状調査，日本建築学会大会学術講演梗概集，環境，工学II，pp.239-240，2017
- 4) 中山寛：新版 石と建築 材料と工法，p.8-11，111-125，鹿島出版会，2014
- 5) Siegfried Siegesmund, and Rolf Snethlage (Eds): Stone in Architecture, Properties, Durability, 5th Edition, pp.225-316, 2014
- 6) 日本工業規格：JIS A5003 石材，1995
- 7) 平山嵩：新編建築学ポケットブック，株式会社オーム社，1984
- 8) 西山理沙，太田征志，宇野晴彦，金谷賢生，谷和夫：軟岩の一軸引張り強さの基本特性に関する実験的研究，土木学会論文集C(地圏工学)，74(2)，pp.225-233，2018
- 9) 石崎武志，松尾隆士，菅野拓，田中享二：旧小樽新聞社の凍害を受けた外壁石材の鉱物学的特徴，日本建築学会学術講演梗概集，pp.465-466，2009
- 10) 吉田俊介，永井香織，松井 勇：大谷石の凍害による劣化現象の把握，大会学術講演会研究発表論文集，日本建築仕上学会，2012
- 11) 株式会社大林組：武庫川学院第三学舎 外装改修工事施工写真，1991

- 12) 西宮市雨量情報システム：<http://nishinomiya.tenki.ne.jp/>
- 13) 銚井修一，新田勝通，池田哲朗：エース建築環境工学〈2〉熱・湿気・換気II，朝倉書店，2002
- 14) 日本工業規格：JIS-R2251-2 耐火物の熱伝導率の試験方法—第2部：熱線法（平行法），2007
- 15) 水谷悦子，小椋大輔，安福勝：歴史的組積造建築物の塩類風化による劣化メカニズムとその予測（その2）ボルツマン変換による焼成煉瓦の塩溶液拡散係数の同定とその低下要因の考察，日本建築学会近畿支部研究報告集 環境系，2019
- 16) 日本工業規格：JIS-R1655 ファインセラミックスの水銀圧入法による成形体気孔径分布試験方法，2003
- 17) 日本建築学会：湿気物性に関する測定基準・同解説，第1版，丸善，pp.5-55，2006
- 18) 日本建築学会：建築材料の熱・空気・湿気物性値，第1版，丸善，pp. 10-14，2001
- 19) 取手伸夫，渡辺晋生，坂井勝：土中への水の浸潤（1）フラックス境界と圧力境界条件，土壌の物理性，第113号，pp.31-41，2009
- 20) ASTM C1699-09 Standard Method for Moisture Retention Curves of Porous Building Materials Using Pressure Plates (2015)
- 21) 日本工業規格：JIS A 1475 建築材料の平衡含水率測定方法，2004

# 材料の表面撥水処理による劣化抑制の可能性 —トルコ・カッパドキアの岩窟教会を例として—

京都大学大学院工学研究科

IBA Chiemi

伊庭 千恵美

## 1: はじめに

建築材料の耐久性には多くの要因が関係しているが、中でも水分の影響は大きく、木材の腐朽やコンクリートの中性化の進行、屋根瓦や外壁材料の凍結劣化にも材料内の水分が関係する。水分の供給源としては、降雨水や融雪水、表面及び材料内部での結露水、地下水などが考えられ、それぞれの経路に応じた対策をとる必要がある。このような水分による劣化への対策の一手法として撥水性をもつ表面処理材の利用が検討されている<sup>1)</sup>。

表面処理材は新築建物のみならず、既に外界に曝されている既存建物や材料にも施工できる利点があり、表面近傍に浸透し表面を化学的に改質するものや、強度を向上させるものもある<sup>2)</sup>。特に屋外文化財では材料自体に文化的価値があるものが多く、外界気象下で風化が進む中、外観への影響を極力抑えた有効な保存対策が求められており、表面処理材はその選択肢の一つとなる。しかしながら、現場での処置が前提となる屋外文化財においては、不十分な施工により表面仕上げに欠損が生じ、そこから水分が浸透する可能性がある。そのような欠損箇所からの浸透や地下水の吸い上げなど意図しない部分から水分が供給されるような場合は表面処理材の使用が逆効果となり、劣化が大きくなる例も報告されている<sup>1) 3)</sup>。

対象となる地域・材料・問題に応じて適切な処理材を選択する必要があり、数値解析等により事前にその効果を予測・検証できることが求められるものの、材料の表面処理された部分の熱や水分の移動特性、強度等については明らかでない部分も多い。

本稿ではトルコ・カッパドキアに位置する岩窟教会外壁を対象とした事例を通して、表面撥水処理による屋外文化財保存の可能性と課題について考察する。

## 2: 表面処理材の種類

建築材料の表面処理に関する規格類として、国内では土木学会が定める「表面保護工法設計施工指針(案)<sup>2)</sup>」があり、国外では欧州規格であるBS EN 1504 - 2 Surface protection systems for concrete<sup>4)</sup>が存在する。

「表面保護工法 設計施工指針(案)」では、コンクリート構造物の劣化の進行の抑制を主目的とした「表面処理工法」を、コンクリート構造物の表面に被覆を施す「表面被覆工法」と表面に表面含浸材を含浸させる「表面含浸工法」に分類している。表面含浸工法に用いられる含浸材はコンクリート表層部に吸水防止層を形成して水分や劣化因子の侵入を抑制するシラン系と、コンクリートへのアルカリ付与や表層部、ぜい弱部などの強化あるいは緻密化を主目的としたけい酸塩系に大別される。一方、EN 1504-2では表面保護材として、コンクリート表面に撥水性を付与する撥水性表面含浸材、空隙率を減じて表層部を強化する表面含浸材、表面上に連続した保護層を形成する表面被覆材を挙げている。

表面含浸工法は表面被覆工法にみられる塗膜の割れや剥離を起こさず、材料表面の外観を著しく損なわないという特徴がある<sup>2)</sup>。中でもシラン系表面含浸材はコンクリートに限らず木材や焼成材料、石材、土壁に対しても使用できるものが多く、外観の変化が許容されにくい文化財保存の分野でも使用が広く検討されている<sup>5) 6)</sup>。本稿で扱う表面処理材は、このシラン系表面含浸材である。

## 3: トルコ・カッパドキアの岩窟教会における劣化調査と保存対策の検討

### 3-1. 研究の背景

カッパドキアは1985年、ユネスコの世界遺産(複合遺産)に「ギョレメ国立公園とカッパドキアの岩石遺跡群」として指定された<sup>7)</sup>。この地域には、ビザンティン時代に彫られた、歴史的価値の高いレリーフと壁画を内部にもつ数多くの岩窟教会が存在する。それらの支持体となる教会の構造体は軟らかく脆弱な凝灰岩によって構成され、カッパドキアの独特の風景を形成する一方、地震による部分的な崩壊や、風雨による侵食、日射による熱応力を受け、表層では粉状化や剥離等の劣化を生じている。



図1：積雪時のカッパドキア・レッドバレー



図2：不適切な保存処置の例  
(左：錆びた金属メッシュの露出、右：被覆材の剥離)

特に冬期間は、かなりの量の降雨と降雪があり（図1）、凍結融解やその他の深刻な表面劣化が生じる可能性がある。表面の急速な風化は0.4～2.5mm/年という速さにもなるという報告もある<sup>8)</sup>。

これまで、凝灰岩表面上の深刻なひび割れや侵食は、一般にライムセメントベースの被覆材で処理されてきた<sup>9)</sup>。被覆材と凝灰岩の境界に鋼製のメッシュを使った試みも行われたが、図2に示すように、界面への水の浸透や日射熱などによりしばしば界面での剥離が生じている<sup>10)</sup>。いったん過度な処置を行うと将来的に再処置をすることが不可能となり、継続的な保存活動を行うことが困難になるが、凝灰岩の侵食を遅らせる効果的な表面処理や被覆の方法が見つからないのが現状である。

### 3-2. 保存対策プロジェクトの概要

カッパドキアの貴重な遺構を保存するため、脆弱な凝灰岩の構造の寿命を延ばす適切な方法を提案することを目的としたプロジェクトが2014年に開始された。プロジェクトのメンバーは、文化財科学、地盤工学、土壌物理学、材料科学、建築環境工学とそれぞれ専門とする分野が異なる。また、現地のネブシェヒル地域保存修復研究所とも共同で調査を行っている。

本プロジェクトでは、カッパドキア・レッドバレー内に単体で建っている岩窟教会で



図3：ウズムル教会の外観と遠景

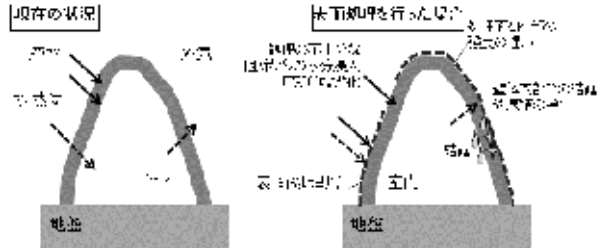


図4：表面処理により懸念される劣化の模式図

あるウズムル教会（聖ニキタス聖堂）（図3）をまず検討対象とした。本教会では、環境作用による風化や、地殻運動および生物活動、継続的なヴァンダリズムのような人間活動によって生じた、深刻なひび割れ、表面の崩壊や剥離という劣化現象が見られる。

表面の崩壊や凍結による破碎等の水による劣化の抑制には、水分の浸入防止や材料の空隙率の低減が効果的であるとされるため<sup>6)</sup>、表面処理材による保存処理の検討が行われた。本プロジェクトでは、オリジナルの凝灰岩と化学的に親和性が高い材料を適用し、少なくとも10年周期で「再処置可能」な方法とすることによって、侵食速度を遅らせることに重点を置いている。ウズムル教会の構造体はこれまで一度も保存処置をされたことがなく、プロジェクトの目的に合致している。

しかし図4に示すように、外壁に表面処理材を適切に施工できていない場合、地下水の吸い上げや塗布が不十分な箇所からの水分の浸入、表層での透水性や強度等の物性値が変化することなどによって、現在とは異なる箇所で劣化が発生・進行する懸念がある。そもそも、教会表面の劣化のメカニズム自体も明らかになってはいない。

そこで本プロジェクトでは、岩石の風化メカニズムと岩窟教会構造の保存を考えるため、2014年から現地で気象データと地盤水分データを取得し、劣化を生じさせると

考えられる水分の供給経路の特定を試みた。さらに、現地で表面処理材の施工実験を行い、経過観察を続けながら処理のリスク検討を行った。

2019年9月からは検討対象を増やし、やはり独立して建つパシャバー地区の聖シメオン教会においても同様の測定・施工実験を開始した。パシャバー地区の岩質はレッドバレー地区とは異なると考えられるため、岩質と微気候の影響による劣化性状の違いを考慮して、適切な表面処理材の選択・施工条件を検討する。

### 3-3. 現地における劣化状態と環境調査

ウズムル教会から少し離れた丘の上に気象ステーションを設置し、外気温度、相対湿度、降水量、風向・風速と日射量の測定を行った(図3右)。また、教会内の温湿度および教会近傍2か所(日向・日陰)で深さ方向に2~3点ずつ、地盤内温度・含水率・水ポテンシャルの測定を行った(図5)。

#### (1) 外気・室内・地盤の温度

図6に、2014年9月~2015年10月の外気・地盤(日向・日陰、各50mm・300mm深さ)の温度と全天日射量を示す。2014~15年の最低気温は $-15.5^{\circ}\text{C}$ 、氷点下を記録した日は51日であり、日向の地温は日陰に比べ日振幅が大きかった。また、最寒期の日陰であっても地中温度は地中50mmより深い部分で $0^{\circ}\text{C}$ を下回ることではなく、地中300mm深さでは、日向の方が日陰よりも平均して $2\sim 3^{\circ}\text{C}$ 温度が高くなった。このことから、放射冷却を考慮しても、凍結融解を生じうる温度になる範囲は表面近傍に限られ、地盤内部ではほとんど生じないことが確認できた。

#### (2) 風向・風速

風向・風速に着目すると、秋と春では日中は主に南から、夜間は主に北からの風が吹いており、冬は時間による差はあまりない。1日の中で風向が変化する理由の一つとして、レッドバレーの地形の影響が考えられる。日中はウズムル教会背後(北側)の斜面が日射により暖められ上昇気流が生じ、南側からの風を誘発する。夜間は放射冷却によりその逆の現象が起こる。

この地域ではたいてい風速は穏やかで、時々日中に南から比較的強い風が吹く。秋から冬にかけてやや強い雨(2 mm/10 min程度)が降る時にも風速は大抵 $1.5\text{ m/s}$ 以下で

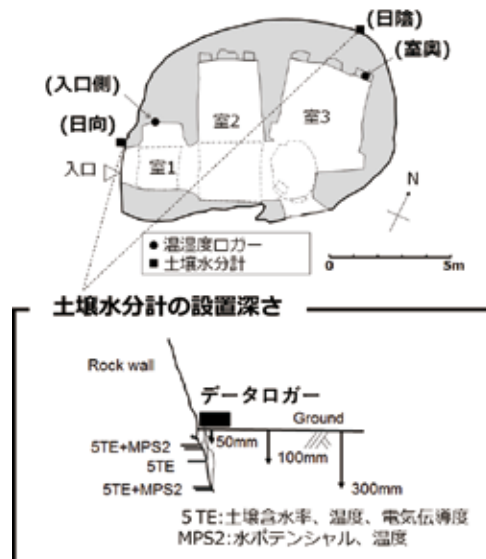


図5: センサー設置位置

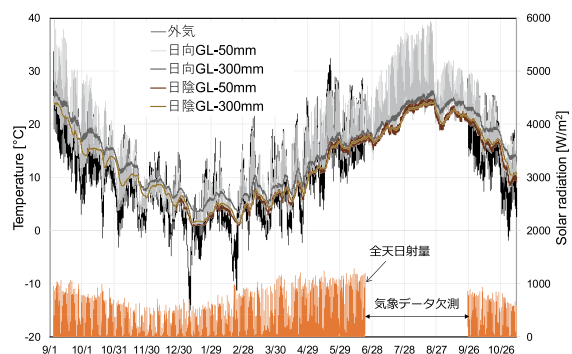


図6: 外気・室内・地盤温度(2014年9月~2015年6月)

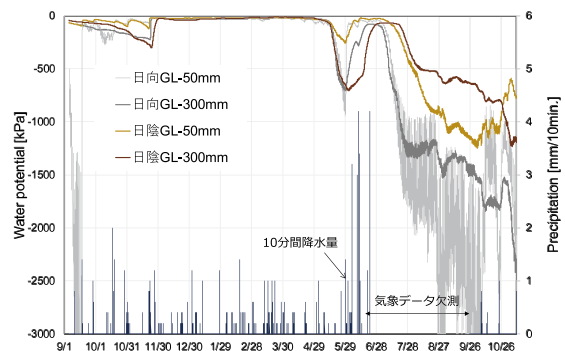


図7: 地中の水ポテンシャル(2014年9月~2015年7月)

ある。したがって、吹き降り雨による地盤や岩体への浸食は大きくないと考えられる。

#### (3) 地盤の水分と温度

図7は、日向と日陰における、地表面からの深さ50mmと300mmの地盤の水ポテンシャルと、10分間積算降水量を示したものである。降水は1~6月に多く、小雨が多勢を占めたが、2 mm/10 min以上の降水も年数回みられた。何れの深さでも降水に応答した含水率の微少な増減は見られたが、1~6月の多雨期にはほぼ一定値を推移し、6~12月

の少雨期には緩やかに減少した（図省略・詳細は文献11）。

地盤内の水分移動はポテンシャル勾配により生じるため、地中の水分移動の方向は地表面からの深さ50mmと300mmでの水ポテンシャルの差から推測できる。1～6月の含水率がほぼ一定の期間中5～30cm深のポテンシャル勾配は概ね0であり、6～12月の含水率が徐々に減少する期間は上方への水分移動が卓越した。日向でも日陰でも同様の傾向がみられた。地表の凍結に伴う上方への水分移動はほとんど見られなかった。

### 3-4. 岩窟教会の劣化と環境要因に関する考察

調査地周辺では例年12月下旬までは降水が少なく気温が低下しても岩体の含水率が低いこと、また氷晶析出を示す水分移動が見られないことから、亀裂に溜まった水の凍結を除き、凍結に伴う岩体の大きな破碎の可能性は低いと考えられる。一方、夜間の結露・凝結に伴う乾湿の繰り返しや、積雪水の凍結融解は遺跡表面から数ミリ深さまでの脆弱化、粉状化や微細な剥離の一因となりうる。

これまでの測定結果から、教会を構成する岩石は継続的に多量の地下水を吸い上げることはないことが確認できたため、撥水性を与える材料を塗布し、岩体への水分浸透を抑制することが、劣化対策として効果的であると考えた。

### 3-5. 表面処理材の小岩体への試験施工

環境計測の結果に基づき、凝灰岩への表面処理材施工効果と耐久性を検証するため、現地での暴露試験を開始した。

#### (1) 表面処理材の特徴

本試験施工においては、これまでの凝灰岩の保護に適した薬剤の研究結果から、表面処理材として無機系含浸封孔剤Permeate HS-360 (D&D Corp.)<sup>12)</sup>を選択した。Permeateはメチル基およびフェニル基を含むアルキルアルコキシシランを基剤としている。アルキルアルコキシ基が大気中の水分を取り込んで加水分解することによって重合していく。重合した後、3次元のSi-O-Si構造をとり、対象物内の隙間を強固に固めることで、体積強度を向上させる。さらに、重合後もメチル基またはフェニル基は残存する。



図8：屋外暴露試験体（左）無処置（右）表面処理



図9：風化の度合いの定量化  
（左）ステンレス釘の打ち込み（右）釘の出しの長さ測定

これらの基は疎水性なので、養生後の物質は撥水性をもつ。このアルキルアルコキシシランベースの含浸封孔剤は多孔体の表面に膜を形成せず、数ミリ深さまで浸透して層を成して固まる。

水蒸気は撥水層を透過できるが、液水は浸入できない。加水分解による硬化が終了するには24時間以上の時間が必要である。基材への規定塗布量は100[g/m<sup>2</sup>]である。

なお、表面処理材の塗布による透湿抵抗への影響を把握するため、事前に現地凝灰岩を用いて透湿抵抗を測定した。測定方法はカップ法で、湿度条件は高湿側85%RH、低湿側53%RHとした。凝灰岩の透湿抵抗は、処理材なしの場合が $5.64 \times 10^8$  [m<sup>2</sup>sPa/kg]、処理材ありの場合が $5.69 \times 10^8$  [m<sup>2</sup>sPa/kg]であり、このことから表面処理による透湿抵抗の変化は非常に小さいことが確認できた。

また、透水性の比較を行ったところ、表面の処理により透水速度は1/20から1/40程度に減少しており、明らかな吸水防止効果がみられた。

#### (2) 暴露試験体と試験方法

ウズムル教会の近くで2つの小岩体を選択し、試験に供した。図8（左）は何も塗布しないもの、（右）はPermeate HS-360を全面に塗布しているところである。小岩体試験においては、凝灰岩体の風化の度合いを定量化するために、図9（左）に示すように岩表面にステンレス釘を打ち込み、岩から出ている部分の長さを定期的に測定することとした。岩体の各方位に2か所ずつ（上部と下部）とさらに上面の計9か所に釘を打ち込んだ。岩の表面から出ている釘の長





図10：岩体表面の剥離

さについては、図9（右）のようにデジタルノギスで釘の左右を測定した。

この測定は、現地の協力者によって数週間ごとに行われた。施工後8カ月で、無塗布の試験体においては、岩体の足元に風化した凝灰岩の粉が堆積し、9本中6本の釘が抜け落ちてしまったが、表面処理した岩体においては、風化堆積物は非常に少なく、釘の抜け落ちは見られなかった。ただし、処理された岩体では、ある厚さを伴った剥離が数か所見られた（図10）。表面処理材が硬化する際の収縮率が大きかったことも一因と考えられる。また、撥水層では液水の移動がほとんどないと考えられるため、塗布が完全でない箇所などから内側に浸透してしまった水分が撥水層と基材の界面に蓄積し、凍結した可能性もある。

さらに、現地協力者からの定期報告によると、撥水处理後1年を経過しても濡れ色が残り、時間とともに濡れ色が強くなっていることがわかった。日本国内で行った予備実験では時間とともに濡れ色が薄れていったが、カッパドキアでの実地試験では濡れ色が継続した。これについては、現地の岩の温度や気温によって有効成分の蒸散速度が異なるなど、現象との相関関係と施工方法の改善策も検討する必要がある。また、現地の岩石の組成や密度、細孔分布等の特性に応じた表面処理材の種類と配合の最適化も必要と考えられる。

現在も継続して観察を続けており、色の変化とともに剥離抑制効果について検証を行う。

### 3-6. パシャバー地区での試み

聖シメオン教会のあるパシャバー地区は「妖精の煙突」とも呼ばれるキノコ型の岩が特徴的な景観を形成している(図11)。レッドバレーとは岩質や微気候が異なると考えら



図11：パシャバー地区の聖シメオン教会



図12：パシャバー地区での小岩体試験体(左)と風化度合いの測定の指導(右)

れ、まずは水分の浸透経路の特定、現地での小岩体での表面処理施工実験を通して、同様の保存処置が可能かどうかを検証する。

レッドバレーでは表面処理材施工試験において、風化の度合いを定量化するために、小岩体に打ち込んだ釘の長さを経時的に測定する手法をとったが、打ち込んだ釘の周辺が脆くなっておりノギスで測定する際に表面が崩落する可能性が高かった。今回も図12に示すように、表面処理・未処理の小岩体に対し同様に風化度合いの定量化を試みるが、打ち込んだ釘の影響が出ないように、離して埋め込んだ2本のアンカーボルトの頂部にジグを渡し、その中心からの距離をノギスで測定することとした。

## 4：まとめと今後の課題

本稿では、非常に脆弱な凝灰岩の風化が進むカッパドキアの事例を基に、表面処理による劣化抑制の可能性と課題について述べた。

外部からの液水の浸透が主な劣化要因である場合、撥水性を持つ表面処理を適切に行うことができれば、劣化抑制には非常に有効であると考えられる。小岩体での試験施工結果から、表面処理は少なくとも劣化を遅らせる効果があることは確認できたが、

その耐久性および別の問題が生じるかどうかを、今後も引き続き検証していく必要がある。

一方、劣化のメカニズムを検討し、表面処理材の効果を検証・予測するために数値解析は有効な手段である<sup>13)14)</sup>。しかしながら、水蒸気は透過させるが液水は浸入させないという特徴をもつ含浸系の表面処理材の水分移動性状については、適切なモデル化が必要である。

解析を行うことで、実使用環境下にある材料に表面処理材を適用した場合の、材料中での温度変化に伴う水蒸気の凝縮や液水の蒸発、凍結融解などの相変化を伴う複雑な水分移動について詳細に理解することができ、施工むらの影響や適切な含浸深さなどについても事前に検討・予測を行うことができる。

まだ道半ばではあるが、ウズムル教会や聖シメオン教会における取組みはこれまでの保存手法とは技術的に異なったチャレンジであり、カッパドキア地域全体においても新しいアプローチの劣化抑制策を提案できる可能性があると考えている。

#### 謝辞

本研究の一部は、JSPS科研費(15K21092, 24101014, 19H05036)の助成を受けた。また、カッパドキアの調査研究は、筑波大学 谷口陽子氏、大阪大学 小泉圭吾氏、三重大学 渡辺晋生氏、ハイテック(株) 朴春澤氏、(株)ディ・アンド・ディ 佐野勝彦氏、当時京都大学大学院生 吉岡瑞穂氏、現京都大学4年生内田隆介君と共に行ったものである。ここに、記して皆様に感謝申し上げます。

#### 引用・参考文献

- 1) 遠藤裕丈ら: シラン系表面含浸材による寒地コンクリート構造物の耐久性向上効果, 土木学会論文集E2(材料・コンクリート構造), Vol. 67, No. 1, pp. 69-88, 2011 など
- 2) コンクリート委員会 表面保護工法研究小委員会編: コンクリートライブラリー 119表面保護工法 設計施工指針(案), 土木学会, 2005
- 3) 谷本文由ら: 表面改質材を塗布したコンクリートの凍結融解作用による剥離促進メカニズムに関する考察, コンクリート工学年次論文集, Vol. 32, No. 1, pp. 1853-1858, 2010
- 4) BS EN 1504-2: 2004. Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures Definitions, Requirements, Quality Control and Evaluation of Conformity. Surface Protection Systems

- for Concrete, 2004
- 5) 朽津信明, 早川典子: 文化財の保存を目的とした煉瓦の樹脂処理効果に関する研究, 保存科学, No. 40, pp.35-46, 2001
- 6) 福田正己ら: 石造遺跡の凍結破壊と樹脂によるその防止効果の実験-石造文化財の凍結-融解による劣化とその防止法に関する研究(1)-, 保存科学, No. 22, pp. 1-14, 1983
- 7) UNESCO, 1985, Structural conservation of Göreme. Göreme, land of fairy chimneys. Ministry of Culture and Tourism, Turkey. General Directorate of Antiquities and Museums.
- 8) Erguler, Z.A.: Field-based experimental determination of the weathering rates of the Cappadocian tuffs, Engineering Geology, Vol. 105, pp. 186-199, 2009
- 9) Idil, A, Ç., 1995, Testing three products in Göreme valley, Cappadocia, In The Safeguard of the Rock-Hewn Churches of the Göreme Valley (Proceedings of an International Seminar, Ürgüp, Cappadocia, Turkey, 5-10 September 1993), 143-149. Rome: ICCROM, 1995.
- 10) Yorulmaz, M., Ahunbay, Z.: Structural consolidation of El Nazar Church, in the safeguard of the rock-hewn churches of the Göreme Valley (Proceedings of an International Seminar, Ürgüp, Cappadocia, Turkey, 5-10 September 1993), pp. 135-142. Rome: ICCROM, 1995
- 11) 渡辺晋生<sup>1</sup>・小泉圭吾<sup>2</sup>・伊庭千恵美<sup>3</sup>・谷口陽子<sup>4</sup>・朴春澤<sup>5</sup>・佐野勝彦, カッパドキア岩窟教会の凍結環境の調査, 土壤物理学会, 2017
- 12) Sano, K. and Mizukoshi, S., 2015, II-5 Preliminary aging tests (outdoor environment) of consolidants for tuff rock samples, in Scientific Studies on Conservation for Üzümlü Church and its Wall Paintings in Cappadocia, Turkey, Taniguchi, (ed.), Annual report on the activities in 2014, University of Tsukuba, 37-41.
- 13) 吉岡瑞穂ら: カッパドキア岩窟教会外壁での表面処理による劣化防止に関する研究—数値解析による外壁表面近傍の水分分布性状の検討—, 日本建築学会学術講演梗概集, 環境工学II, pp. 235-236, 2017
- 14) Mizuho Yoshioka, Chiemi Iba, Kunio Watanabe, Yoko Taniguchi, Keigo Koizumi, Katsuhiko Sano, Chunze Piao: Effects of Water Repellent on Frost Damage in Outer Walls of Rock-hewn Churches in Cappadocia, Turkey, Proceedings of 3rd Central European Symposium on Building Physics, pp.277-284, 2016

# 外壁面での気生藻類の生育に関する研究 —藻類生育と周辺環境条件との関係 および生育防止策の検討—

神戸大学大学院工学研究科

NAKAJIMA Makiko  
中嶋 麻起子

MASUEDA Daisuke  
益枝 大輔

TAKADA Satoru  
高田 暁

東南大学

HOKOI Shuichi  
鉾井 修一

京都大学大学院工学研究科

OGURA Daisuke  
小椋 大輔

IBA Chiemi  
伊庭 千恵美

## 1 : はじめに

我々の身の回りの建物外壁面を観察すると、黒色や緑色に変色している現象が多く見られる。これらは大気中で生育可能な藻類である気生藻類の付着・生育が原因であることは既往の研究で示されている<sup>1)2)3)</sup>。気生藻類の発生による汚れは日本だけではなく世界各地でも報告され問題となっている<sup>4)</sup>。このような藻類汚れに対しては、清掃や再塗装などの対応が取られることが多いが、一度藻類が発生した部位では再び発生する可能性が高く、根本的な防止策は現在のところ発見されていない。藻類の発生しにくい塗料も開発されているものの、全ての建物において使用できるわけではなく、経年劣化による性能低下も考えられる。

本研究では、外壁面での気生藻類の生育条件の定量化を目的とし、藻類が生育する建物での周辺環境と汚れ状態を測定した。さらに、気生藻類の発生防止策として熱処理法を提案し、処理温度・処理時間・含水状態に関する条件の定量化を行った。

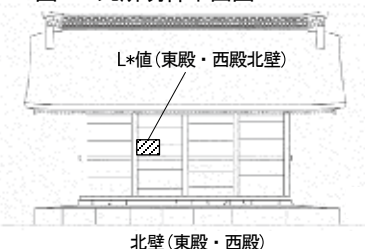
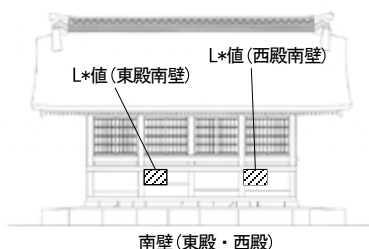
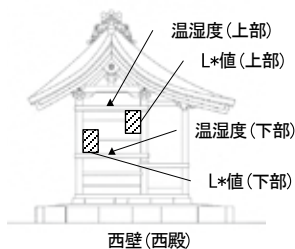


図3：九所明神立面図

## 2 : 気生藻類の生態

藻類とは、酸素発生型光合成を行う生物のうちコケ植物、シダ植物、種子植物を除いた残りすべての生物であり、陸上の岩や樹皮、コンクリート塀などの表面に生育する藻類は気生藻類と呼ばれる<sup>5)</sup>。気生藻類の生育には、温度(適温)・水分・光・空気・栄養(主に無機成分)が必要とされる。この外壁面では光と空気は十分に供給され、栄養は雨水や大気中に含まれる塵埃から補給される。そのため、藻類の生育は外壁面の温度と水分の状態に強く依存する。

藻類・地衣類などのpoikilohydrous (poikilohydric plant)は高温への耐性が低い性質を持つ<sup>6)</sup>。ほとんどの藻類が40～50℃の高温に数十分間暴露された後に生存率が大きく低下し、暴露温度が高くなるほど、また暴露時間が長くなるほど生存率の低下は大きいことが示されている<sup>7)</sup>。一方、乾燥に対しては強い耐性を持ち、乾燥後も水分が供給された際には急激に活性化し生長を始める性質を持つ<sup>8)</sup>。

## 3 : 九所明神での環境測定

### 3.1. 測定対象

測定対象は、京都市右京区御室の仁和寺境内にある九所明神である。敷地の北側・東側・西側は樹木に囲まれ、南側は参道となっており開けている。北側は小高

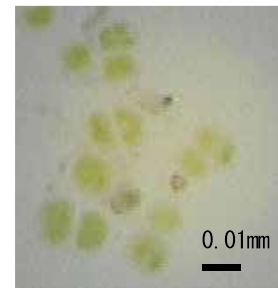


図1：藻類の細胞

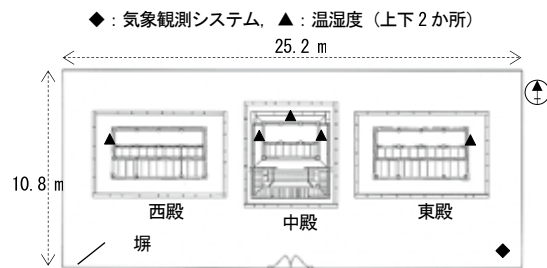


図2：九所明神平面図

い丘であり、主に北側からの水分流入により地盤は湿潤状態である。以前から外壁の変色が確認されており、平成15～18年の建物修理の際に除去されたが、平成25年にはすでに、白い外壁表面の一部が薄い黒色に変色していた。外壁面の変色をマイクロスコープにより観察したところ、微粒子状物質の他に藻類の細胞が観察された(図1)。

### 3.2. 測定概要

測定は2011年10月から2015年9月まで実施した。

#### (1) 外気温湿度・外壁表面温湿度の測定

気象観測システム(Weather Bucket, (有)アグリーウェザー)を用いて建物周辺の外気温湿度の測定を、温湿度計(RTR-53A, T&D Corp.)を用いて外壁表面近傍の温湿度測定を行った。測定機器の設置場所を図2, 3に示す。

#### (2) 外壁の変色状態の測定

外壁の変色状態について、写真(目視)とL\*a\*b\*表色系の明度であるL\*値により評価した。測定には土色計(SPAD-503, コニカミノルタ)を用い、南壁と北壁(西殿、東殿)は各1か所ずつ、東壁(東殿)と西壁(西殿)では上下2か所の計8か所において測定した(図2, 3)。

### 3.3. 測定結果

#### 3.3.1. 外壁各部位の変色と劣化の状態

##### (1) 目視による調査

北壁(西殿)(写真1)：嵌板全体が黒色に変色していた。特に腰長押上部の嵌板が濃い黒色に変色していた。中殿・東殿も同様であった。

南壁(東殿)(写真2)：西殿と東殿の嵌板にはほとんど変色は見られず白いままであり、全体に細かいひび割れが発生していた。中殿・西殿にも同様であった。



写真1：北壁(西殿)

写真2：南壁(東殿)



写真3：西壁(西殿)

写真4：東壁(東殿)

西壁(西殿)と東壁(東殿)(写真3, 4)：庇により影になる長押・虹梁周辺の嵌板が黒色に変色していた。比較的日射が良く当たる腰長押周辺の嵌板はほとんど変色しておらず白いままであった。

#### (2) L\*値による変色状態の評価

2013年8月6日～2014年2月19日の部位ごとの平均のL\*値を図4に示す。南壁(西殿、東殿)のL\*値が最も大きく、北壁(西殿、東殿)が最も小さい。西壁(西殿)と東壁(東殿)はその中間程度であるが、東西壁では壁下部よりも壁上部の方がL\*値が小さい。

このように、外壁の変色状態の目視による調査結果と、L\*値による評価はよく対応している。したがって、目視により簡易な評価が可能である。ただし、汚れ程度の時間変化は目視での評価は難しいためL\*値が必要となる。

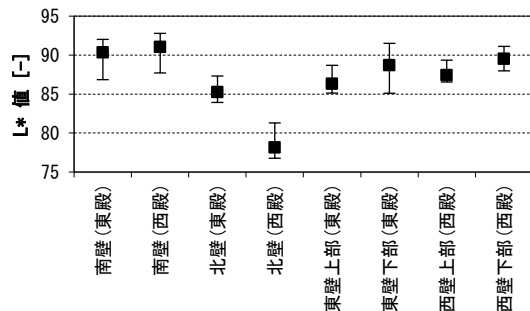


図4：各部位の平均L\*測定値

#### 3.3.2. 九所明神周辺の外気温湿度

九所明神周辺で測定した外気温湿度と京都地方気象台で観測された2013年の日平均外気温湿度を図5に示す。

九所明神周辺の外気温は京都地方気象台での観測値とほぼ等しいが、相対湿度は気象台よりも10～20%高い。これは九所明神

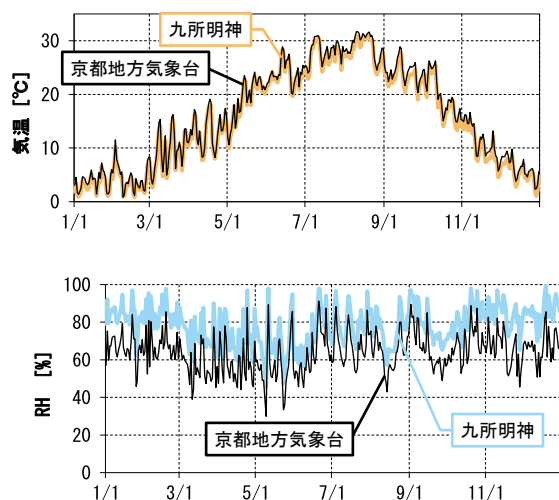


図5：外気の日平均温度・相対湿度(九所明神での測定値と京都地方気象台での観測値)

の北側と東西が樹木に囲まれていること、北側斜面からの水分流入により地盤が湿潤状態になりやすいことが原因と考えられる。

### 3.3.2. 環境条件と変色状態との関係

気生藻類は高温に暴露されると生存率が大きく低下する。死滅した藻類細胞は白色や透明、褐色に呈色、あるいは空洞または形が崩壊して見える。以下では、気生藻類が死滅しやすい40℃以上の温度に注目し、外壁の変色状態との関係について検討を行う。

#### (1) 中殿北壁

北壁表面温湿度については中殿でのみ測定を行ったため、西殿北壁、東殿北壁の変色状態についても中殿北壁の温湿度を用いて考察を行う。中殿北壁の2013年の日最高温度を図6に示す。壁上部と壁下部の日最高温度はほぼ等しく、40℃以上の温度は年間を通してほとんど発生していない。また、次に示す西殿西壁上部に比べて、日最高温度が30℃以上に達する日数も少ない。

北壁には直達日射がほとんど当たらず高温になりにくいいため、藻類が死滅しにくい環境となっている。したがって、外壁に付着した藻類は、高湿度などの環境になった場合には生長し、それ以外の期間でも死滅することなく生存することができるため、壁表面は黒く変色していると考えられる。

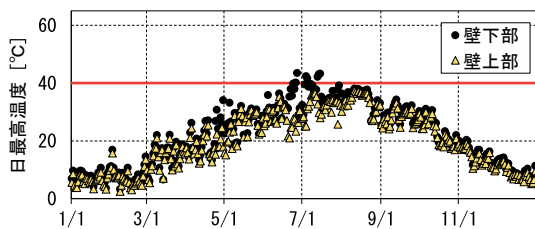


図6：中殿北壁の日最高温度(2013年)

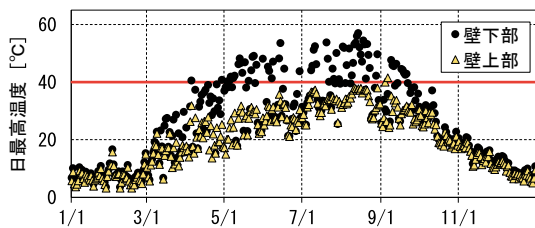


図7：東殿東壁の日最高温度(2013年)

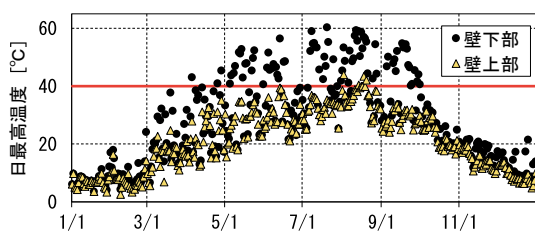


図8：西殿西壁の日最高温度(2013年)

#### (2) 東殿東壁・西殿西壁

東殿東壁と西殿西壁の2013年の日最高温度を図7, 8に示す。1～2月、10～12月は、壁上部と壁下部の日最高温度はほぼ等しい。4～9月に壁下部では40℃以上になる時間帯が生じている。1回の継続時間は長い場合には90分以上に達する。壁上部では8～9月の間にわずかに生じるのみで、継続時間も壁下部に比べて短い。東殿東壁でも同様の傾向が見られた。よって、西殿西壁および東殿東壁の上部では、直達日射がほとんど当たらないため表面温度が40℃以上になりにくく藻類が死滅しにくい。壁下部では、4～9月に壁表面温度が40℃以上に達し藻類が死滅しやすい環境となっている。これらは、西殿西壁、東殿東壁で壁上部よりも壁下部のL\*値が大きいことと対応している。

## 4：気生藻類の加熱処理実験

藻類・地衣類を含むPoikilohydric Plantと呼ばれる生物は、乾燥状態では高い耐熱性をもつが、湿潤状態では熱感受性が増加し、高温に暴露された場合死滅しやすい。本章では、屋外外壁で採取した気生藻類を用いた熱処理実験を行い、処理温度・処理時間・含水状態と藻類の死滅率との関係について検討する。

### 4.1. 熱処理実験の概要

実験には神戸大学構内のコンクリート壁に発生していた藻類を用いた。外壁に水を流しながらブラシでこすりとり藻類を採取した。採取した藻類を培養液内に入れ藻類懸濁液を作成し、その懸濁液を非透湿性の膜材(7×7cm)上に接種し試料を作成した。作成した試料は温度・相対湿度を一定に保つため、飽和食塩水を入れたプラスチック密閉容器内に入れ、恒温室内に設置した。

試料は恒温槽内で標準状態に保ち、数日間培養した。標準状態は、温度26℃、相対湿度80%とした。照明は14時間点灯、10時間消灯の24時間を1サイクルとして繰り返す。水分供給は連続する5日間は水を噴霧、2日間は水を噴霧しないと、この7日間を1サイクルとし繰り返す。

プラスチック密閉容器内の温湿度変化の一例を図9に示す。培養期間中、温度は25～27℃の間で、相対湿度は80～90%に保たれていた。一部、温度と相対湿度が大きく変化しているのは、水の噴霧のため恒温槽から取り出した密閉容器の蓋を開けたためである。

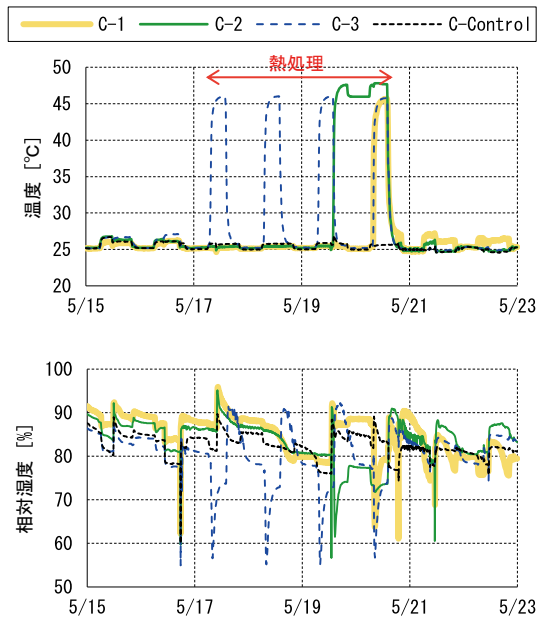


図9：実験C(温度：45℃)の密閉容器内の温湿度変化

#### 4. 2. 熱処理実験の条件

熱処理の温度・時間・含水状態を変えて複数回実験を行った。熱処理条件を表1に示す。処理中に藻類を湿潤状態に保つ場合、試料に水を吹きかけラップで覆い熱処理を行った。藻類を乾燥状態として熱処理を行う場合、処理の2日前から水を与えず、処理中もラップで覆わず加熱した。各実験において、対照実験として熱処理を行わず標準状態で培養し続けたControlの試料を用意した。

表1 熱処理実験の条件

		処理温度	含水状態	処理時間
実験A	Case 1	35℃	湿潤	6時間
	Case 2			24時間
	Case 3			6時間×4回
	Control	熱処理無		
実験B	Case 1	40℃	湿潤	6時間
	Case 2			24時間
	Case 3		乾燥	6時間
	Case 4			24時間
	Control	熱処理無		
実験C	Case 1	45℃	湿潤	6時間
	Case 2			24時間
	Case 3			6時間×4回
	Control	熱処理無		

#### 4. 3. 藻類の死滅率の測定方法

藻類の生存と死滅については、目視による観察と、PAM法(Pulse Amplification Modulation, パルス増幅変調法)を用いたIMAG-K6(WALZ社)によって測定されたクロロフィル蛍光強度を用いた。

藻類を含む酸素発生型光合成生物はクロ

ロフィルと呼ばれる光合成色素を持つ<sup>9)10)11)</sup>。クロロフィルは光エネルギーを吸収し、3つの方法でそのエネルギーを伝達する。第1は、光合成と呼ばれる光化学系の反応中心へのエネルギー伝達であり、エネルギーは光化学反応として消費される。第2は、熱としての放散である。第3は、クロロフィル蛍光と呼ばれるものである。クロロフィル蛍光とは、励起状態にあるクロロフィルが外部に放出した光のことである。クロロフィル蛍光は波長680nm付近にピークを持つ光であり、その放出エネルギーは一般に吸収エネルギーの0.5～3%程度である。エネルギーとしては弱くそれほど重要な意味を持たない。しかし、クロロフィル蛍光は光合成系の状態によって変化するため、光合成の状態を知るのに有効な指標の1つである。藻類が死滅している状態ではクロロフィルも機能せず、光を吸収・伝達できないため、結果として蛍光も放出されない。

各試料の5つの領域で蛍光強度を測定し、その5つの領域の平均値を各試料の結果として示す。光合成を活性化させるため測定の前には藻類を湿潤状態とした。

#### 4. 4. 熱処理実験の結果

##### 4. 4. 1. 目視による評価

実験CのCase 2(温度：45℃, 時間：24h, 含水状態：湿潤)とControl(熱処理無)試料の変化の様子を写真5, 6に示す。撮影日は、熱処理前・熱処理直後・1日後・2日後・4日後・8日後である。

Controlの試料は、実験開始から8日後も濃い緑色であるのに比べ、Case 2の試料は熱処理の2日後から徐々に茶色に変色した。目視での観察では、その差はより顕著に見られた。熱処理を行った試験体はいずれも、加熱後に茶色に変色した。また、測定時の試料の持ち運びや、水の噴霧のため、藻類が試料表面を移動していることがあった。特に熱処理を行った試験体は付着力が弱くなり、藻類が移動し表面に散らばりやすかった。

##### 4. 4. 2. クロロフィル蛍光測定による評価

実験CのCase 2(45℃, 24h, 湿潤)とControl(熱処理無)試料のクロロフィル蛍光画像を図10, 11に示す。また、実験A～Cのクロロフィル蛍光強度の変化を図12～14に示す。図12～14は、各試料の熱処理前の蛍光強度を1として基準化した蛍光強度である。

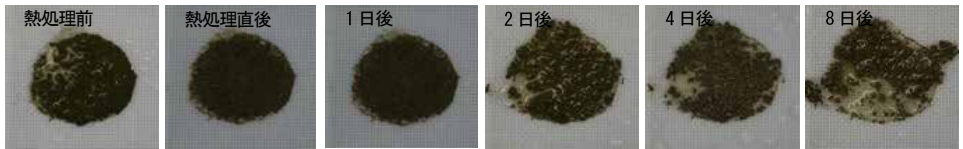


写真5：実験C-Case 2 の変化の様子

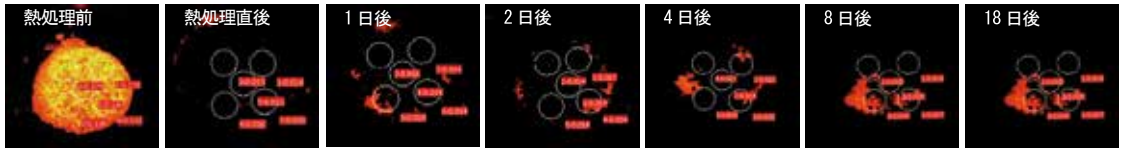


図10：実験C-Case 2 のクロロフィル蛍光の変化

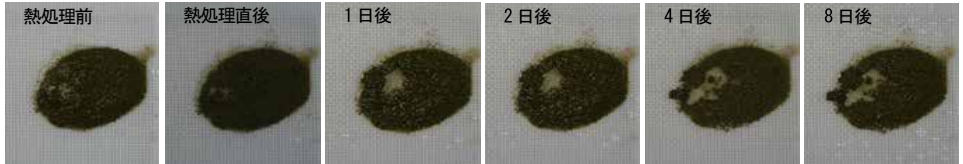


写真6：実験C-Control の変化の様子

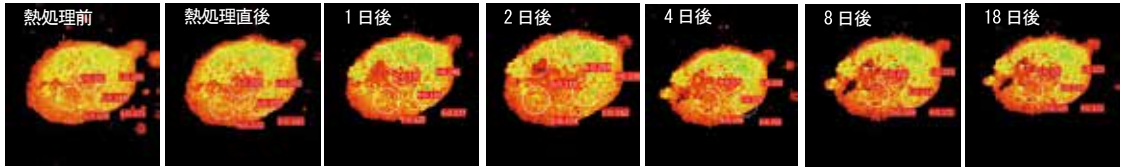


図11：実験C-Control のクロロフィル蛍光の変化

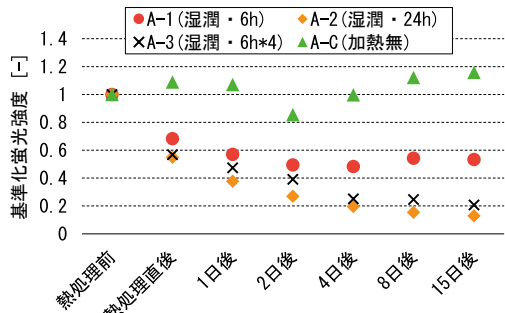


図12：実験A (温度: 35°C) の基準化蛍光強度変化

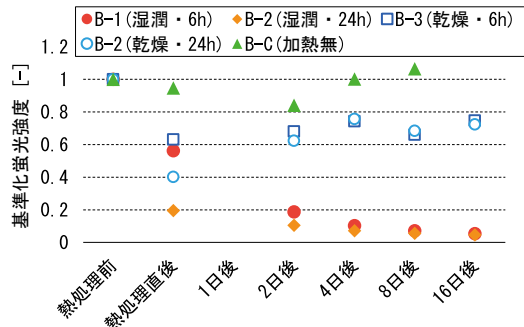


図13：実験B (温度: 40°C) の基準化蛍光強度変化

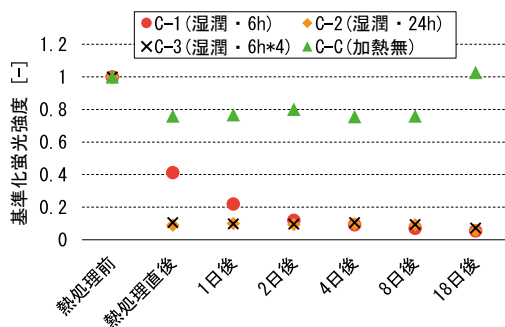


図14：実験C (温度: 45°C) の基準化蛍光強度変化

### (1) 実験A (熱処理温度: 35°C)

Case 1(35°C, 6h, 湿潤)では、熱処理直後から4日後まで蛍光強度は徐々に低下したが、8日後、15日後にはわずかに回復した。Case 2(35°C, 24h, 湿潤)では、熱処理直後から蛍光強度はゆっくりと低下し、4日後以降は画像では判定できない約0.2以下となった。Case 3(35°C, 6h×4, 湿潤)では、Case 2と同様に、処理直後から蛍光強度はゆっくりと低下し、4日後以降は約0.2となった。

Controlでは、処理の2日後にわずかに低下したがその後回復し、蛍光強度の値は0.8～1.2の間にあった。

### (2) 実験B (熱処理温度40°C)

Case 1(40°C, 6h, 湿潤)では熱処理後、蛍光強度は実験A-Case 1, 2と同様にゆっくりと低下し、4日後以降は0.15以下となった。Case 2(40°C, 24h, 湿潤)では、処理直後に蛍光強度は急激に低下し、2日後以降に0.15以下となった。

Case 3(40°C, 6h, 乾燥)は、熱処理直後に蛍光強度は約0.6まで低下したが、2日後以降はゆっくりと回復し、16日後には約0.7～0.8となった。Case 4(40°C, 24h, 乾燥)は、熱処理直後に蛍光強度は約0.4まで低下したが、2日後以降はゆっくりと回復し、4日後以降にはCase 3とほぼ同じ値となった。

Controlは、2日後に蛍光強度は約0.8まで低下したが、その後は増加し16日後には熱処理前の値より大きい1.6まで増加した。

### (3) 実験C (熱処理温度45°C)

Case 1(45°C, 6h, 湿潤)は熱処理後、蛍光強度はゆっくりと、4日後以降は0.15以下となった。Case 2(45°C, 24h, 湿潤)は、熱処理直後に蛍光強度は急激に低下し0.15以下となった。Case 3(45°C, 6h×4, 湿潤)は、Case 2と同様に、熱処理直後に蛍光強度は急激に低下し0.15以下となった。

Controlは、熱処理直後から8日後までは0.8に低下したが、18日後には熱処理前とほぼ同じ値となった。

## 5 : まとめ

本研究では、気生藻類の生育条件の定量化のため、藻類が発生していた仁和寺九所明神での周辺環境と壁表面の汚れ状態を測定した。その結果、以下の結論を得た。

・ 目視による汚れ調査とL\*値による変色状態(明るさ)の評価はよく対応し、L\*値による外壁の変色程度の評価は可能である。

・ 九所明神周辺は北側と東西が樹木に囲まれていることと、北側斜面からの水分流入により地盤が湿潤状態になりやすいことから、相対湿度が高く藻類が生育しやすい環境にある。

・ 壁表面温度が40°C以上に達する頻度が大きい部位ほど変色程度が小さくL\*値が大きい。壁表面温度が40°C以上に達する部位では、例え藻類が付着したとしても死滅しやすいため外壁が変色しにくいと考えられる。熱処理による気生藻類の死滅可能性について検討するため、異なる処理温度・処理時間・含水状態の下で実験を行い、以下の結論を得た。

・ 目視による観察では、熱処理後、藻類の色が茶色に変化することが確認された。しかし、その変化程度からの死滅率の判定は難しい。

・ クロロフィル蛍光測定の結果、藻類を湿潤状態とした場合、35°C, 6時間の熱処理では処理直後に一時的に藻類の生存率も低下したが、その後回復した。しかし、それ以上の温度・時間の熱処理では生存率は低下し、再び回復することはなかった。

・ 乾燥状態で熱処理された藻類は、一時的に生存率が低下するが、その後回復する。しかし、熱処理前の値まで回復することはなかったため、乾燥状態での熱処理は、湿潤状態に比べ効果は低いが、藻類が死滅する可能性はある。乾燥状態においても熱処理時間が増加すると、処理直後の死滅率も

増加する。

・ 熱処理を連続的、あるいは断続的に行った場合、藻類の死滅率の変化傾向に差はなかった。藻類への熱処理の効果は暴露された総時間数に依存する。

### 謝辞

本実験を行う上でご尽力いただいた三宅親弘教授、和田慎也助教(神戸大学大学院農学研究科)に深謝いたします。

### 引用・参考文献

- 1) 半田信司: 気生藻類, 堀輝三, 大野正夫, 堀口健雄編「21世紀初頭の藻学の現況」, 日本藻類学会, 山形, pp. 81-84, 2002
- 2) 橘高義典: 建築物外壁面の汚染の調査及び基礎的考察 建築物外壁仕上材料の汚染の評価方法に関する研究(その1), 日本建築学会構造系論文報告集, 第370号, pp.11-18, 1986. 12
- 3) 辻本吉寛ら: 外壁面に発生する藻類の同定および藻類汚染方法の検討 建築物の外壁面における藻類汚染に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第433号, pp. 11-17, 1992. 3
- 4) Miller, A.Z. et al.: Bioreceptivity of building stones: A review, *Sci. Total Environ.* 426, pp. 1-12, 2012
- 5) 千原光雄編: バイオディバーシティ・シリーズ3, pp. 2, 174, 裳華房, 1999
- 6) Gupta, S. et al.: Vegetative Survival of Some Wall and Soil Algae under Stress Conditions, *Folia Microbiol.*, 53 (4), pp. 343-350, 2008
- 7) Tretiach, M. et al.: Heat shock treatments: A new safe approach against lichen growth on outdoor stone surfaces, *Environ. Sci. Technol.* 46, pp. 6851-6859, 2012
- 8) Häubner, N. et al.: Aeroterrestrial Microalgae Growing in Biofilms on Facades – Response to Temperature and Water Stress, *Microbial Ecology*, Volume 51, pp. 285-293, 2006
- 9) 秋本誠志: 蛍光, 低温科学, 第67巻, pp. 449-452, 2009
- 10) 園池公毅: クロロフィル蛍光と吸収による光合成測定, 低温科学, 第67巻, pp. 507-524, 2009
- 11) 高見常明, 遠藤剛: 二次元解析, 低温科学, 第67巻, pp. 539-543, 2009



## 土遺構の保存における環境調整

独立行政法人国立文化財機構  
奈良文化財研究所

WAKIYA Soichiro  
脇谷 草一郎

### 1：はじめに

発掘調査をおこなった遺跡は記録保存や埋め戻して保存されるのが一般であるが、歴史的価値が著しく高い遺跡についてはそれらを一般に公開しつつ保存が図られる。このように実物の遺構地盤を露出して展示保存する場合では、日射や風雨などの気象条件を緩和するために覆屋と呼ばれる保護施設が設置され、その内部で露出展示保存が図られることが多い。このようにそれまで土中に埋没していた遺構が露出展示されることで、遺構地盤が直接大気と接することになり、また多くの保護施設は屋根を伴っているため雨水の供給が断たれることが多く、したがって遺構の保存環境は遺構地盤面において水分蒸発が卓越する環境へと大きく変化する。このような遺構地盤の露出展示保存を実施している例は全国に多数見られ、長期の公開にもかかわらず良好な状態を維持している遺構が認められる一方で、劣化が著しく進行している例も少なからず認められる。このように露出展示遺構の保存状態が様々である原因は、それらの遺構地盤に対する保存処理として使用された薬剤の差異によるところもあるが、むしろ遺構地盤を取り巻く気象条件や、遺構地盤に浸透する水分条件、さらには遺構を構成する材料の水分移動性状の差異によるところが極めて大きいと言える。したがって、遺構地盤の露出展示保存においては画一的な手法の提示は困難であり、それぞれの遺跡ごとに微気象や地盤の水分状態など環境条件に関するデータ取得や、遺構を構成する土壌や石材などの熱水分移動性状に関する検討が不可欠のものとなる。

本報告では、奈良時代の遺構地盤を露出展示している平城宮跡遺構展示館（以下、遺構展示館と表記する）を取り上げ、ここで実施した環境調査項目およびその測定結果について紹介する。さらに、地盤遺跡を

構成する材料として土壌や磚（レンガ）を取り上げ、それらの劣化メカニズムを概観し、その劣化に対して遺跡周辺の環境条件がおよぼす影響についておこなった検討結果を報告する。

### 2：遺構展示館の概要

奈良盆地北端に位置する平城宮は、奈良山丘陵から続く緩斜面上にあるため北から南に向かって傾斜している。本稿で対象とする遺構展示館は平城宮の北端、旧地形の谷筋に位置する。その北側には広大な水上池や巨大な濠を伴う古墳が隣接しており、遺構展示館周辺地盤へ水分が供給されていると考えられる。遺構展示館周辺の地盤は、当初堆積していた耕作土と保護盛土で発掘調査の後に埋め戻されており、したがって3種の土壌から構成される不連続な土層構造となっている（図1）。現在、地盤遺構の露出展示は南北2棟の施設内部で実施されており、それぞれの施設は仕様が大きく異なっている。北棟は空調設備を備えた（2009

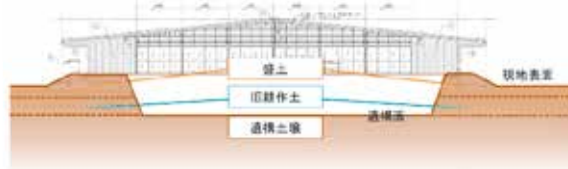


図1 周辺地盤の土層構造<sup>1)</sup>



図2 北棟内観（南西から）



図3 南棟外観（南西から）

年設置) 開口部が少ない構造で、内部では柱穴の遺構が展示されている(図2)。一方、南棟は空調設備が備わっておらず開口部が多い。また、南北壁の上半はルーバー状の開口部のため外気との通気量が多い構造となっており(図3)、内部では基壇周辺の雨落ち溝が展示されている。

### 3: 遺構展示館の劣化状態調査

遺構展示館で展示されている遺構を構成する材料は土や石、および磚と呼ばれるレンガで、いずれも多孔質材料である。これらの材料中を熱や水分、塩などの可溶性物質が移動することで様々な劣化が生じると考えられる。ここでは遺構展示館の劣化状態調査を通して、地盤遺構で見られる劣化現象を概観するとともに、その要因について述べる。

#### 3-1. 土壌の崩落、クラックの発生

遺構展示館の土壌表面を観察した結果、北棟では柱穴の周縁部で土壌粒子や礫の崩落が生じ(図4)、平坦面ではクラックが観察された(図5)。また、南棟では年間の大部分の時期において湛水状態にある遺構面では土壌の崩落は認められなかった。一方で、法面上方の盛土層では土壌粒子の崩落が認められた(図6)。クラックの発生や土壌粒子の崩落には土壌の含水状態が大きく影響している。土壌粒子同士の接着を担保している粒子間の水分が過度に減少することで粒子間の結合力が失われ崩落が進行する。とりわけ、柱穴周縁部では水平面と比



図4 土壌粒子の崩落 図5 遺構面のクラック



図6 南棟法面の土壌粒子の崩落  
(左: 法面全体、右: 左図破線箇所の拡大)

較して水分の蒸発速度が速く、鉛直面は構造的に不安定であるため、土壌の乾燥にもなって土壌が塑性を失い崩落したと考えられる。また、水分蒸発にもなう体積収縮によって団粒間の間隙が拡大し、クラックの発達へとつながったと考えられる。

#### 3-2. 蘚苔類等の繁茂

遺構面の一部や法面の土層境界部を中心に蘚苔類やカビの生育が認められた。これらは遺構の物理的な劣化を引き起こしているものとは考えにくいですが、観覧に供するという目的を鑑みると汚損と言える。



図7 土層境界部の蘚苔類  
(左: 法面全体、右: 境界部拡大)



図8 柱穴に繁茂する蘚苔類。陰となる領域では繁茂が認められない。(左: 柱穴全体、右: 境界部拡大)



図9 柱穴の土壌含水率



図10 柱穴の照度

北棟では主に法面の盛土と埋戻し土の層境界を中心に蘚苔類の繁茂が見られた。特に、北側と西側法面の土層境界部では白色を呈する析出物も顕著に認められたことから、他の箇所と比較して土壌の含水状態が高い箇所と考えられる(図7)。また、南西隅では柱穴周辺に蘚苔類が繁茂している様子が認められ、その分布領域が照明の当たる箇所に限定される様子が認められた(図8)。蘚苔類が繁茂する条件として灌水頻度と光条件が重要と指摘されていることから<sup>2)</sup>、地盤遺構において蘚苔類が生育する環境条件としては土壌含水率と照度が大きく影響をおよぼすと考えられる。そこで、上記の北棟の2つの柱穴において蘚苔類が生育する箇所と生育していない隣接箇所において土壌含水率と照度を測定し、蘚苔類繁茂の有無を分けた環境の差異を検討した。土壌含水率と照度の測定結果をそれぞれ図9と図10に示す。

図9に示した結果から、柱穴1(蘚苔類なし)は他と比較して常に高い含水状態にあるものの、他の3箇所も比較的高い含水状態を維持しており、蘚苔類の有無と含水率の差異について相関は認められなかった。一方、図10に示した照度の測定結果では、蘚苔類が繁茂する箇所と繁茂していない箇所で測定した照度はあきらかに異なっており、それらの照度は概ね一定値を示した。北棟は開口部が少なく、本測定箇所で観測される照度は開館日の照明設備に由来するためと考えられる。したがって、北棟の蘚苔類の繁茂に対しては照度が大きく影響をおよぼしていると考えられ、開口部が少なく照明設備由来の照度が殆どである北棟では、照明設備に対して人感センサーを導入することによって、蘚苔類の繁茂を現状よりも抑制し得ることが示唆された。

### 3-3. 塩の析出

目視観察の結果、北棟の遺構面周囲の法面では、盛土と旧耕作土の境界部(図11)や旧耕作土と遺構面境界(図12)、および遺構面の柱穴縁部において析出物が認められた。いずれの箇所においても析出物は白色を呈する殻状のもので、季節性的変化は認められなかった。しかし、夏期の豪雨時には遺構面が濡色を呈したり、柱穴に水がわずかに溜まる様子が観察され、これらの箇所では析出物がわずかつ増加している様子が観察された。

南棟では、北棟同様に遺構周囲の法面土層境界において白色を呈する殻状の析出物が認められた。また、12月頃から4月頃にかけて、雨落ち溝沿いの一部の磚と石材表面、および遺構面土壌において白色を呈する針状の析出物が観察された。これらの針状の析出物が認められた磚や一部の石材表面では、材料表面が粉状化し、剥離している様子が観察された(図13、図14)。

一般にレンガは焼成温度が高くなるほど平均空隙径が微細となる。したがって、焼成温度の差異によって透水性状に個体差が生じ、比較的透水性の高い磚においてのみ析出物が観察されたと考えられる。また、針状結晶の析出物が様々な材料表面で見られたことから、その起源は材料内の成分が溶出したのではなく、材料に浸透した水に溶存する成分と考えられる。この析出物が北棟では一切認められず、南棟においてのみ認められたことについては、南北の室内の温熱環境の差異が大きく影響をおよぼしていると考えられる。

遺構展示館において毎月の塩析出箇所の分布、析出量の変化について目視観察をおこなうとともに、析出物を採取してX線回折分析法によりその同定をおこなった。X



図11 北棟、盛土-旧耕作土層境界の析出物(南から撮影)



図12 北棟、旧耕作土-遺構面層境界の析出物(東から撮影)



図13 南棟、雨落ち溝沿い磚表面の析出物(2月撮影)



図14 南棟、磚表面の析出物(拡大)(2月撮影)

線回折分析に用いた装置はRigaku社製SmartLabで、集中ビーム法で測定を実施した。測定条件を表1に示す。

図11や図12に示した塩のように、その消長が季節変動を示さず、材料表面を殻状に覆う析出物は、すべてGypsum（硫酸カルシウム二水和物）と同定された。Gypsumは中溶性の塩であるため、その飽和塩溶液はほとんど蒸気圧降下を示さない。したがって、Gypsumのみが溶存している場合は、その飽和塩溶液が平衡する空気の相対湿度は常温で99.96%である<sup>3)</sup>。したがって、Gypsumが析出している箇所は、屋外から水分が流入して地表面まで概ね水分飽和した状態にあり、遺構展示館内で水分蒸発が生じることでGypsumが析出し続けていると考えられる。

一方、図13や図14に示したように、冬期にのみ確認された針状結晶はThenardite（無水硫酸ナトリウム）と同定された。硫酸ナトリウムには、本調査で検出されたThenardite（無水物）とMirabilite（十水和物）の2つの安定相と、七水和物の準安定相が存在することが知られている<sup>4)</sup>。安定相であるThenarditeとMirabiliteの相図を図15に示す。雰囲気温度が32.4℃以上の場合は溶液から前者が、同温度以下の場合は後者が析出する。

また図16に示したように、Thenarditeの溶解度温度依存性は負であるのに対して、

表1 X線回折法測定条件

管電圧 [kV]	40
管電流 [mA]	100
ターゲット	Cu (K $\alpha$ 線)
スキャン速度 [°/min]	2
測定範囲 [°]	5 - 80

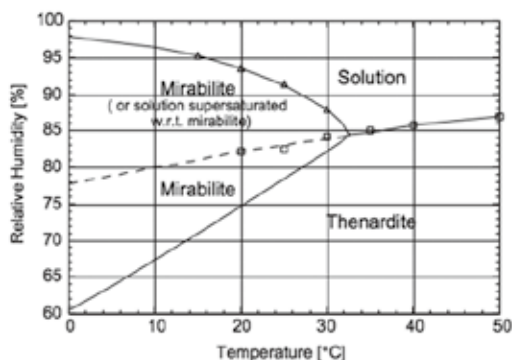


図15 硫酸ナトリウムの相図<sup>5)</sup>

Mirabiliteは正の相関を示し、温度低下にともない急激に溶解度が減少する。磚、石材、および土壌表面では水分蒸発にともない、濃縮による溶質の濃度増加が生じる。さらに、南棟は空調を備えておらず、ルーバーを介して外気と通気しているため、冬期の館内気温の低下にともない、溶解度の温度依存性が大きい硫酸ナトリウムが材料表面に析出したと考えられる。一方で、空調を有する北棟では冬期の館内気温の低下が抑制されるため、硫酸ナトリウムの析出には至らなかったと推察される。

図15の相図に示した通り、硫酸ナトリウムは温湿度条件によってThenarditeとMirabiliteの相変化を生じる。この際、その相変化は速やかで、体積の変化率が315%に達することから、多孔質材料の破壊に及ぼす影響が最も大きな塩の一つと考えられている<sup>3)</sup>。本調査ではThenarditeのみが検出されたが、これは採取した塩が実験室の温湿度条件に応じて相変化したため、冬期の南棟館内では磚、石材、および土壌表面近傍で相変化を繰り返し生じており、図14に示したように、材料表面の粉状化を引き起こしていると考えられる。

#### 4：遺構展示館の環境条件調査とそれらが遺構の劣化におよぼす影響に関する検討

##### 4-1. 外界気象条件と遺構展示館内温熱環境調査

平城宮跡遺構展示館の北棟と南棟の間に位置する中庭に気象観測装置を設置し、遺構展示館の外界気象条件について実測調査を実施した（図17）。測定項目は外気温度、相対湿度、大気圧、風向・風速、水平面全天日射量、降水量である。

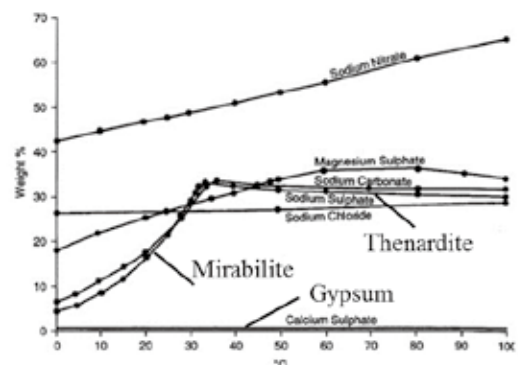


図16 様々な塩の溶解度温度依存性<sup>3)</sup>



図17 気象観測および地下水位観測実施箇所

また、遺構展示館内の温熱環境調査として、北棟、南棟室内の温湿度測定を実施した。測定には、温湿度データログTandD社製、TR-72Uを使用し、10分間隔で気温及び相対湿度の測定を実施した。北棟の測定箇所は館内通路と遺構面直上、および天井部に設置された空調設備からの吹き出し口である。一方、南棟の温湿度測定箇所は館内通路と遺構面直上とした。北棟と南棟の気温および絶対湿度をそれぞれ図18から図21に示す。

遺構展示館内の温湿度測定結果から、北棟の室内温熱環境は年周期、日周期いずれの変化においても振幅が抑えられている一方で、南棟の館内温熱環境は概ね外気と同様の挙動を示した（図18から図21）。これらの差異は空調設備の有無と換気量の差異に起因すると考えられた。先述の通り、硫酸ナトリウムは溶解度の温度依存性が高い塩であることから、冬期に外気同様に気温が低下する南棟においてのみ、硫酸ナトリウムが観察されたと考えられる。また、北棟の遺構面直上の絶対湿度は館内通路の絶対湿度と比較して高い値を示したことから、遺構面において水分蒸発が生じていることが示唆された（図19）。

#### 4-2. 遺構展示館周辺地盤の水分環境調査

遺構展示館周辺地盤の水分環境を調べるため、図17に示す遺構展示館周辺の5カ所においてボーリング調査をおこなうと同時に、地下水位観測孔を設けて地下水位実測調査を実施した。測定に使用した機器は応用地質社製のS&DL miniである。さらに、遺構表面で析出する塩の起源について検討するため、地下水中の溶存成分分析を実施し

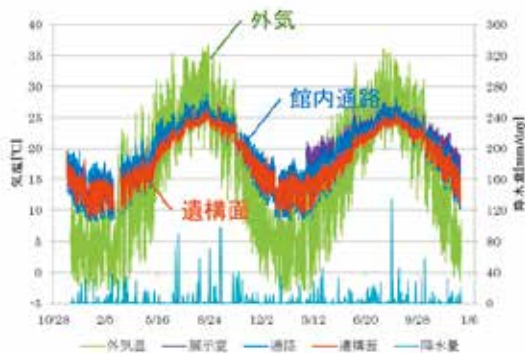


図18 北棟室内気温

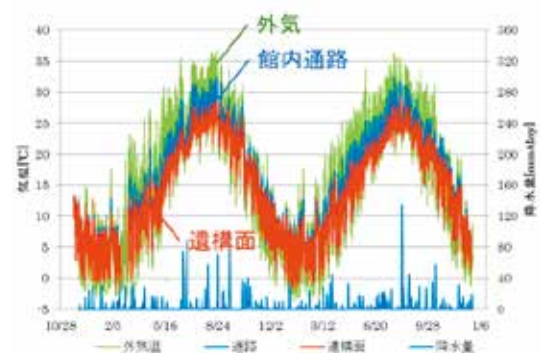


図20 南棟室内気温

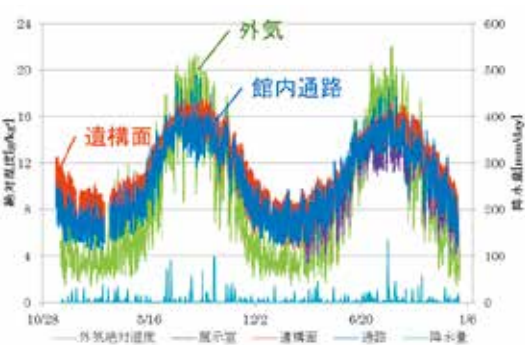


図19 北棟室内絶対湿度

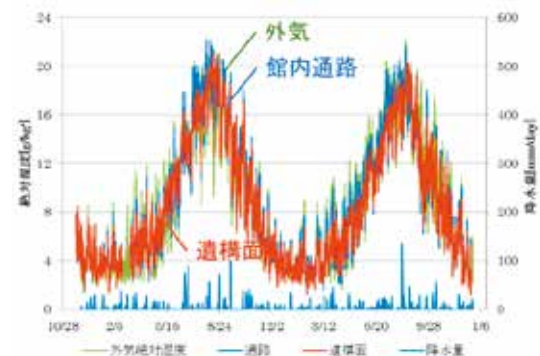


図21 南棟室内絶対湿度

た。試料水はテフロン製採水容器をもちいて地下水位観測孔から毎月1回採取した。採取した地下水は孔径0.2 μmのヌクレポアフィルターをもちいて速やかにろ過をおこない、懸濁粒子を除去した。その後、ろ液に対してDIONEX社製イオンクロマトグラフィICS-1000を用いて、陽イオンはLi<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup>について、陰イオンではF<sup>-</sup>、Cl<sup>-</sup>、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>、Br<sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>について定量分析をおこなった。

また、遺構展示館内の地盤水分環境調査として、南北両棟の法面および北棟の柱穴埋め戻し箇所において、水分化学ポテンシャルと土壌含水率の測定を実施した。北棟、南棟の測定箇所をそれぞれ図22、図23に示す。測定にもちいた水分化学ポテンシャル計と土壌含水率計はDecagon device社製のそれぞれWPS-2と10HSで、水分化学ポテンシャルセンサーの測定上限値は-10 kPaである。ただし、本稿では紙面の都合上、南棟の結果についてのみ述べることとする。

遺構展示館周辺の5地点の地下水位観測孔のうち、ここでは南棟東側に隣接する観測孔No.5の結果を図24に示す。観測の結果、いずれの観測孔も同様の傾向を示し、地下水水面は4月下旬から8月上旬にかけて低下し、その他の期間では概ね遺構面よりも高い位置で推移することがあきらかとなった。南棟法面での土壌含水率の測定結果を図25

に示す。盛土と旧耕作土の層境界では降雨時に一時的に含水率が増加し、その後速やかに含水率が再び低下した一方で、旧耕作土と遺構面層境界では常に高含水状態を示した。これらの観測結果から、図26に示すように盛土と旧耕作土層境界では、降雨時に屋外地盤に浸透した雨水の一部が館内へ流入する一方で、旧耕作土と遺構面の層境界からは地下水が常に遺構面へと流入していることが示唆された。また、本稿では詳細には触れないが、これら2つの層境界から浸入する水はそれぞれ雨水と地下水由来と考えられることから、それらの水質は溶存酸素濃度、すなわち酸化還元環境という点において異なると考えられる。

地下水に溶存する成分分析の結果を図27、図28に示す。地下水の溶存成分として、陽イオンではCa<sup>2+</sup>と次いでNa<sup>+</sup>が、陰イオンではSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>が他に比べて多量に含まれることが

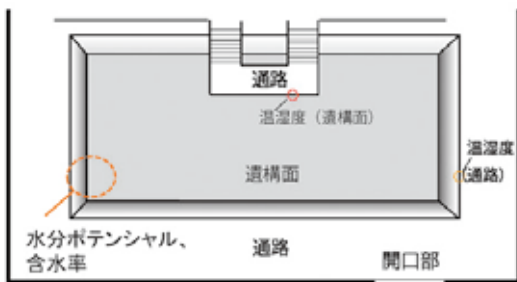


図22 土壌水分状態測定箇所（北棟）



図23 土壌水分状態測定箇所（南棟）



図24 地下水位変化（図17中No.5にて測定）

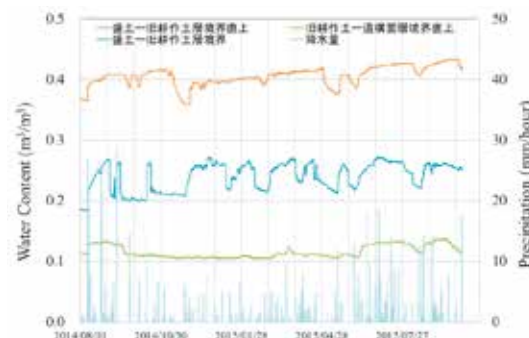


図25 南棟東側法面の含水率変化

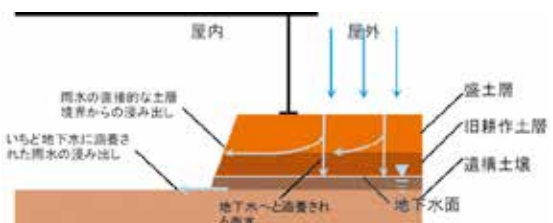


図26 遺構展示館内への水の浸入経路

示された。また、電気的中性を保つため、陰イオンについては測定対象のものに加え、炭酸イオンが含まれていると考えられる。これらは遺構面で観察された塩の種類とも調和的な結果であり、地下水が塩の供給源となっていると考えられた。一方で、その濃度変化に明確な季節変動が見られなかったことから、硫酸ナトリウムの季節性の析出については、先述の通り、南棟の温熱環境が大きく影響をおよぼしていると考えられる。

## 5：遺構展示館の保存環境に関する解析的検討

ここでは遺構展示館で認められた劣化現象の中でも、特に南棟の塩析出によるものに着目して、遺構展示館内の温熱環境と遺構地盤の水分移動に関してモデル化をおこない、解析からその進行を抑制する方策を検討した。

### 5-1. 解析モデルについて

遺構展示館南棟の解析モデルを図29に示す。解析では熱・水分同時移動方程式を用いて<sup>6)</sup>、前進型有限差分法により計算した。差分格子の形状は遺構法面に対しては三角形を、その他については長方形で近似した。

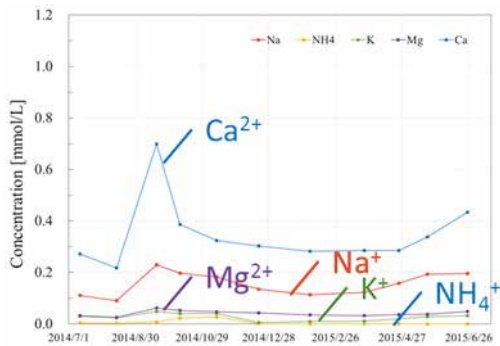


図27 地下水溶存成分（観測孔No.5、陽イオン）

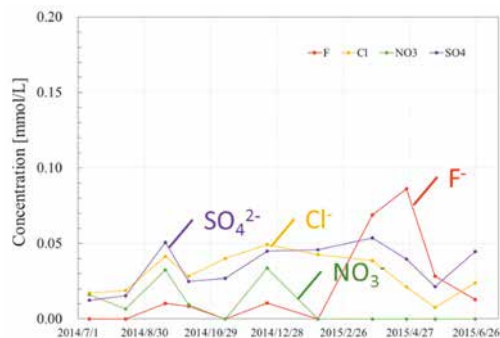


図28 地下水溶存成分（観測孔No.5、陰イオン）

解析に用いた環境条件のうち、外気温湿度および降水量には現地実測値を与えた。日射量については水平面全天日射量の実測値から直散分離計算を行い、各壁面への鉛直面日射量を算出した。直散分離計算にはBouguerの式とBerlageの式を用い<sup>7)</sup>、夜間放射量はBruntの式から算出した。南棟の室内空間は図29に示したように室上部、通路、遺構面の3質点で代表し、周囲の壁面および遺構地盤との熱水分流、および各空間の換気から計算した。また、3層の土壌の熱・水分移動特性については、遺構展示館から土壌試料を採取することができなかつたため、他の遺跡から得た不攪乱試料に対して求めた物性値を、その圧密の程度を考慮して充てることとした。体積含水率と水分化学ポテンシャルの関係式、および体積含水率と水分伝導率の関係式には、van Genuchten-Mualemモデルを採用し<sup>8),9)</sup>、不攪乱試料に対してマルチステップ法と蒸発法を適用した逆解析から、モデル式のフィッティングパラメータを推定した<sup>10)</sup>。

### 5-2. 解析モデルによる劣化抑制方策の検討

遺構の破壊、汚損を引き起こす塩の遺構表面への移動および析出は、遺構表面での水分蒸発によって引き起こされる。したがって、ここでは塩析出を抑制するため、とりわけ中溶性で遺構の汚損を引き起こすGypsumへの対策を念頭に、遺構面での水分蒸発量を減少させる方策を第一に検討する。さらに、磚や石材の表面を物理的に破壊するThenardite（あるいはMirabilite）については、冬期における南棟の気温低下がそれらの析出を促進していること、そして温湿度条件によってThenardite-Mirabilite相変化が引き起こされ、その際の体積変化が材料の破壊を引き起こしていると考えられること

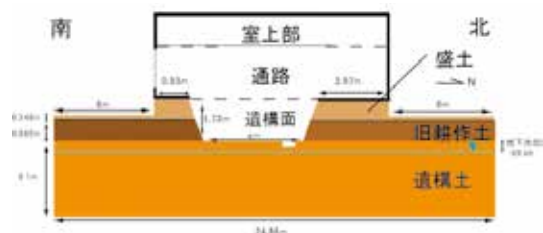


図29 南棟解析モデル（南北断面）

から、冬の南棟の気温低下を抑制すること、および硫酸ナトリウムの相変化を抑制する温湿度環境の維持を保存環境の目標とする。ここでは現状をModel 1として、次の3パターンの検討結果について述べる。

### 5-2-1 換気回数に関する検討 (Model 4)

冬の南棟気温低下は建物上半の開口部における通気の影響が大きいと考えられる。そこで現状 (Model 1) に対して開口部での通気を抑制することを想定して、表2のように換気回数を低減した場合 (Model 4) の南棟館内温熱環境について検討する。硫酸ナトリウムの相図にModel 4の温湿度 (月平均値) をプロットしたものを図30に示す。換気回数が減少することで冬の気温低下が抑制されていること、さらに遺構面の相対湿度が高くなり、Thenardite-Mirabilite間の相変化が抑制される環境へと変化することが示唆された。図31に遺構面における年間積算水分蒸発量を示す。Model 4では年間の積算水分蒸発量は減少するものの、冬の気温が上昇することで、この時期の水分蒸発量が増加することが示唆された。したがっ

て、水分蒸発量の点では塩析出が助長されることとなり、正味の効果については今後検討を要する。

### 5-2-2 周辺地盤からの水分流入抑制に関する検討 (Model 6)

南棟では磚積み基壇の北半は館内で展示しつつ、南半は屋外で復元展示している。屋外に位置する復元基壇部、すなわち雨水が浸透する面は遺構面と比較して有意に高い。したがって、ここでは復元基壇表面からの雨水の浸透抑制が、覆屋内部の温熱環境および遺構地盤の含水状態に与える影響について検討する。図32に解析モデルを示す。屋外基壇表面では雨水が完全に排水されると仮定し、屋外基壇表面における雨水の供給量を $0 \text{ kg/m}^2\text{sec}$ とする (Model 6)。

図33に示した南棟南側法面の年間積算水分蒸発量に関する計算結果から、Model 6ではModel 1と比較して水分蒸発量が大幅に減少することが示唆され、法面で見られるGypsumによる汚損の進行速度を低減し得ることが示唆された。

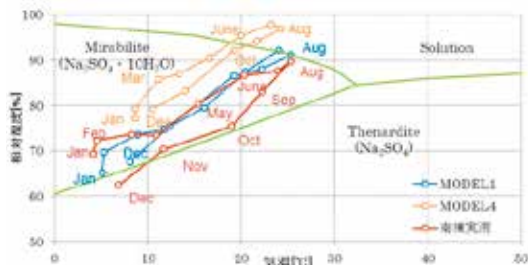


図30 硫酸ナトリウム相図と南棟温湿度変化(Model 4)

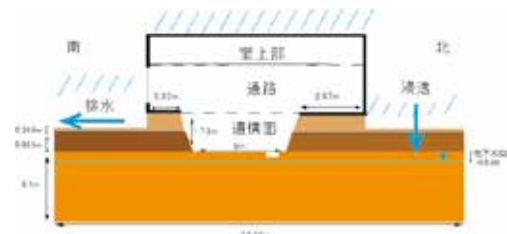


図32 解析モデル (Model 6)

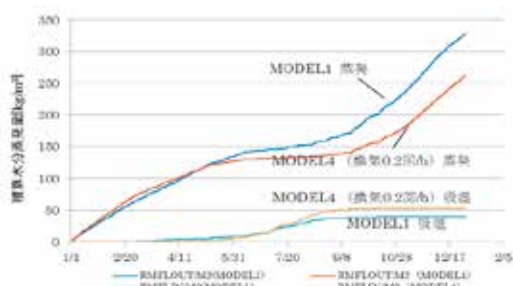


図31 遺構面年間積算水分蒸発量 (Model 4)

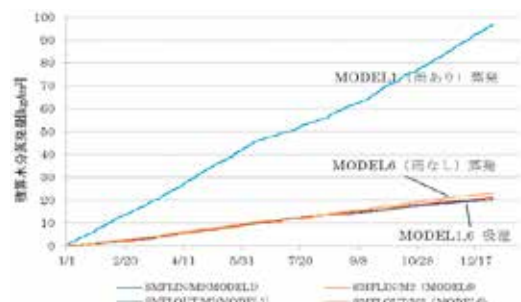


図33 南側法面年間積算水分蒸発量 (Model 6)

表2 室上部一外気の換気回数条件

	1～4月	5～7月	8月	9～10月	11月	12月
Model 1	35回/h	18回/h	8回/h	18回/h	8回/h	18回/h
Model 4	0.2回/h					



### 5-2-3 周辺地盤盛土層の水分伝導率がおよぼす影響に関する検討 (Model 7)

遺構展示館周辺地盤の地表面となる盛土は、遺構の養生を目的としたものである。したがって、遺構保存という目的に対して適切な物性値をもつ盛土を選定することも、検討すべき課題と考える。ここでは、盛土に使用される土壤の透水性状が遺構の保存環境にどのように影響するのか検討することを目的として、盛土の水分化学ポテンシャル勾配に関する液相水分伝導率をModel 1の100分の1とした場合を検討した (Model 7)。土壤の物性値は図34のようになる。

遺構面および南側法面表面での年間積算水分蒸発量をそれぞれ図35、図36に示す。図の結果から、遺構面および南側法面いずれにおいてもModel 7はModel 1と比較して水分蒸発量が減少する結果を得た。一般に地盤遺構は周辺地盤よりも低位に位置しており、その露出展示を実施した場合に遺構面から蒸発する水分量に対して、遺構周辺地盤に浸透する雨水は少なからぬ影響をおよぼしていることをこの解析結果は意味して

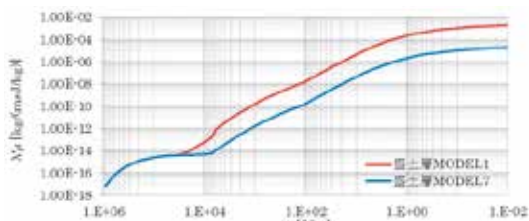


図34 盛土層の水分伝導率比較 (Model 7)

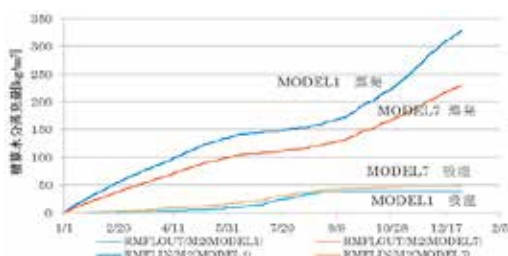


図35 遺構面年間積算水分蒸発量 (Model 7)

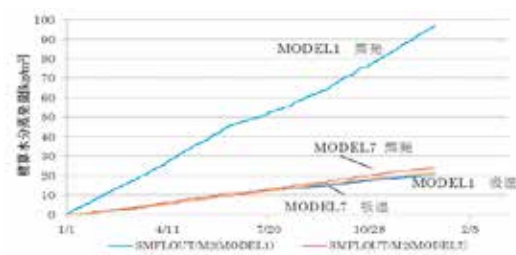


図36 南側法面年間積算水分蒸発量 (Model 7)

いる。遺跡整備に際しては、遺構面における塩析出抑制のために、周辺地盤の水分移動性状に関する検討も重要であると言える。

## 6 : 結論

以上、本稿では平城宮跡遺構展示館で露出展示されている奈良時代の地盤遺構を調査対象として、遺構で生じている劣化現象について整理し、周辺環境がそれらの発生・進行におよぼす影響をあきらかにした。特に塩析出による遺構の破壊、汚損に着目し、その劣化進行のメカニズムを検討するとともに、劣化抑制策を提案することを目的とした。本研究の成果は以下のように要約される。

- 1) 平城宮跡遺構展示館の露出展示遺構において生じている劣化は、a)湿潤・乾燥の繰り返しによる土壤の崩落、b)蘚苔類による汚損、c)塩析出による多孔質材料の破壊が主たるものである。
- 2) 北棟の柱穴において蘚苔類が繁茂している箇所と繁茂していない箇所において土壌含水率と照度の測定を実施した結果、繁茂の有無に対しては照度が大きく影響をおよぼしていることが示唆された。したがって、北棟では人感センサーを導入するなどして照明の運用方法を変更し、遺構面への照度を減らすことで、現状よりも蘚苔類の繁茂を抑制し得ることが示唆された。
- 3) 遺構面で析出する塩は $\text{CaSO}_4$  (Gypsum) と $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (Thenardite) で、前者は南北両棟で通年認められたのに対して、既往研究から多孔質材料の破壊におよぼす影響がきわめて大きいことが知られる後者は、冬期に南棟でのみ析出が認められた。南北両棟は空調設備の有無、換気量の多寡が異なり、南棟の館内気温は概ね外気と同様の推移を示すことから、 $\text{Na}_2\text{SO}_4$ の析出に対しては南棟の冬期の気温低下と、換気によって遺構土壌からの水分蒸発が促進されることが大きく影響していると考えられた。
- 4) 展示館内の温熱環境と遺構土壌の水分移動に関してモデル化をおこない、解析により塩析出を抑制する方策を検討した結

果、周辺地盤に浸透する雨水の量を低減すること、南棟の換気回数を低減することで、塩析出による遺構の劣化を大幅に抑制し得ることを示した。

一方、本稿では塩析出による遺構の劣化を抑制する方策について解析的検討をおこなったが、これらは現時点ではあくまで予測であり、今後は現地において実際に改善策を施した場合にもたらされる環境の変化、遺構の劣化状態の変化について実測調査をおこない、改善策の有効性について検証することが不可欠と考える。

#### 謝辞

本研究の一部は、JSPS科研費（課題番号26289203 研究代表者：銚井修一）の助成を受けた。また、平城宮跡遺構展示館を対象に実施した一連の調査研究は、京都大学 銚井修一教授にご指導いただき、当時京都大学大学院生 桑原範好氏と共におこなったものである。その実施にあたっては、文化庁記念物課 中井將胤氏をはじめとする方々にご協力いただいた。ここに、記して感謝申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 特別史跡平城宮跡遺構展示館等その他改修工事 完成図 (2010)
- 2) 小林恭子・勝野武彦・藤崎健一郎：コケシートからの3種のコケの生育と栽培条件、日本緑化工学会誌、27 (1)、pp.197-200 (2001)
- 3) Goudie, A. and Viles, H. : Salt Weathering Hazards, John Wiley & Sons, Ltd., 1997
- 4) Rodriguez-Navarro, C., Doehne, E., Sebastian, E.: How does sodium sulfate crystallize? Implications for the decay and testing of building materials, Cement and Concrete Research, 30, pp.1527-1534, 2000
- 5) Flatt, R. J.: Salt damage in porous materials: how high supersaturations are generated, Journal of Crystal Growth, 242, pp.435-454, 2002
- 6) 松本衛：新建築学大系10 環境物理 3.湿気、彰国社、1984
- 7) 松浦邦男・高橋大弐：エース建築環境工学I ー日照・光・音一、朝倉書店、2001
- 8) Mualem, Y. : A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, Water Resources Research, 12(3), pp.513-522, 1976
- 9) van Genuchten, M. Th. : A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Science Society of America Journal, 44, pp.892-898, 1980

- 10) Šimůnek, J., Wendroth, O., van Genuchten, M.Th. : Parameter estimation analysis of the evaporation method for determining soil hydraulic properties, Soil Science Society of America Journal, 62, pp.894-905, 1998

# 高瀬石仏の保存環境予測と整備事業評価

近畿大学建築学部  
ABUKU Masaru  
安福 勝

## 1：はじめに

### 1.1 研究の背景

高瀬石仏<sup>1)</sup>は12世紀より現存し、昭和9年に国指定史跡となった大分市を代表する磨崖仏である。磨崖仏は自然の岩盤や岩壁に直接彫刻された石仏であるため、気候要素の影響に加えて岩盤を通じた熱や地下水の影響も受ける。高瀬石仏をはじめとした歴史的石造文化財は、熱・水分負荷に起因する劣化が顕著であり、乾湿繰り返しによる風化や塩類風化、生物風化などが懸念されている。高瀬石仏では雨や日射に加え、植生の生育による劣化が問題になったため、2008年より保存整備事業が実施されてきた<sup>2)</sup>。岩盤に生育された植生を除去し、さらに建設された覆屋によって、雨や日射は遮蔽され、外気温湿度の影響も緩和されたため、保存環境は改善したと考えられている。ただし現在、起こりうる劣化や保存環境について定量的な評価が行われていない。今後の保存対策の検討や、文化財保存の知見のためにも、保存整備事業による効果を評価することが求められている。

### 1.2 高瀬石仏

本研究対象である高瀬石仏(図1, 2)は、凝灰岩の丘陵に掘られた石窟の奥壁に彫刻されており、5体の仏像で構成される磨崖仏である。石窟は、寸法4.4m × 2.3m × 1.8mで、内壁には赤や黄色の彩色やのみ跡が鮮明に残っている。石窟を形成する岩盤は、多くの鉱物と空隙を有する非常に不均一な凝灰岩で構成されており、軽い衝撃や被水により剥離やひび割れが生じるほど脆弱である。天井の亀裂や石窟内表面で苔やカビの発生、石質剥離などの経年劣化を抑制するため、岩盤上部の防水工事や覆屋の建設、地下水路の変更などの保存整備事業が行われてきた。

高瀬石仏と同じ大分県に現存する磨崖仏(例えば元町石仏、臼杵石仏など)では、塩類風化による激しい劣化が顕著である。一方、高瀬石仏では塩類風化は観測されず、他に深刻な劣化も確認されていないため、保存状態は良好であると考えられている。

### 1.3 研究の目的と方法

本研究の目的は、熱・水分負荷による風化が懸念されている高瀬石仏の保存環境を定量的に評価することである。現在の保存環境を把握するだけでなく、過去に実施された保存整備事業前後による保存環境の変化を比較することで、保存整備事業の効果を評価する。周辺環境や劣化状態の把握を目的とした現地調査、数値解析に必要な物性値の測定を行う。さらに、それらの結果を用いて、石仏を中心とした岩盤を対象に2次元モデルを作成し、熱・水分移動の数値解析を行う。

本研究では、脆弱で不均一という特徴である高瀬石仏を構成する凝灰岩の水分移動特性を、X線照射による毛管吸水実験を行うことで測定する。その結果、目視で確認できる岩盤の層に対応する物性の異方性が明らかとなった。したがって、液水拡散係数の異方性を考慮した熱・水分移動の数値解析に基づいて、保存整備事業の効果を定量化する。



図1 高瀬石仏の石仏群



図2 石窟を含む岩盤および覆屋の外観

## 2：周辺環境と劣化状態調査

### 2.1 周辺環境

高瀬石仏は石窟開口部を覆屋で覆われているが、石窟では外気に伴う換気、地面で反射された日射や低い太陽高度の日射流入、岩盤の上部や背面からの雨水の浸透、地下水の毛細管力による水分上昇など周辺環境の影響を受ける。

高瀬石仏とその周辺に設置された環境実測機器の配置を図3に示す。石窟の周辺には温湿度、風向・風速、全天日射量を測定する気象観測装置と地下水位計が2つ、石窟内には温湿度計と含水率計が設置されている。気象観測装置と温湿度計は10分間隔で、地下水位と含水率は30分間隔で測定している。測定は2016年5月（含水率測定のみ2019年7月）に開始し、現在も継続している<sup>3,4)</sup>。

外気と石窟内の温湿度の測定結果を図4に示す。石窟内は外気に比べて、温湿度の変動が年間を通して緩やかであることがわかる。地下水位と1時間の積算降雨量を図5に示す。地下水位はボーリングマシンで削孔した観測孔2点で水圧式水位計を用いて測定し、標高15m地点を水位0mとし鉛直上方向を正とした値で示す。降雨に伴って地下水位が変動すること、梅雨や台風による影響で6, 9月に水位は特に高くなることわかる。2孔間は平面で約4mの距離であるにもかかわらず、水位差は2m以上もあるため、No.2孔では漏水が懸念される。図4, 5は、測定期間2016年5月20日～2017年5月19日の値である。気象観測装置で測定された風は、ほとんどが平均風速1m/s以下で、南北方向に吹くことが観測されている。含水率計は水ポテンシャルセンサーと土壤水分センサーを石窟内2箇所それぞれ測定しており、測定結果は4章の解析結果と比較して示す。

## 2.2 劣化状態調査

高瀬石仏で行われたイオンクロマトグラフィによる地下水のイオン分析、蛍光X線分析およびX線回折分析による石窟内壁面で採取された析出物の元素分析について、結果と考察を述べる。

地下水のイオン分析の結果では、塩類風化で大きな破壊を引き起こすナトリウムイオンや硫酸イオンが検出された。高瀬石仏は、地下水の上昇によって塩類風化が起こる可能性があるといえる。

石窟内壁面で採取された析出物の元素分析では、多くの析出物サンプルから鉄とGypsum（硫酸カルシウム二水和物）が検出された。析出物の赤色部分では、特に多くの鉄が検出されたため、鉄の酸化物の生成が推測される。また、Gypsumは一般に難溶性の塩とされているため、析出箇所には一定の水分供給があり、高含水率状態であることが考えられる。



図3 高瀬石仏と観測装置の配置図

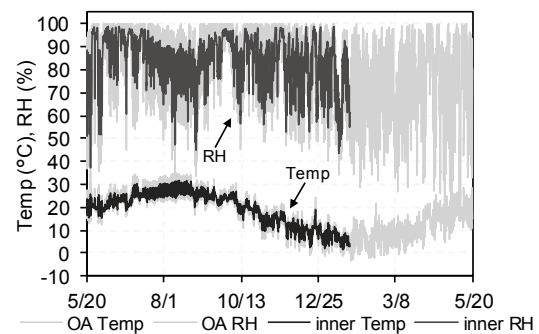


図4 外気と石窟内の温湿度

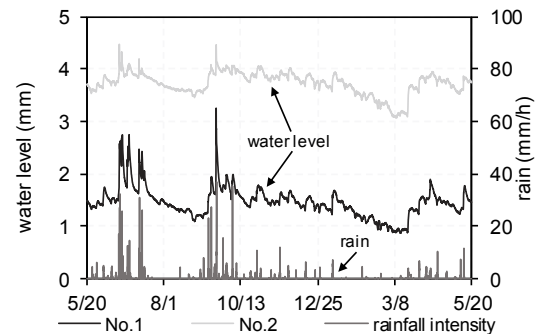


図5 降雨量と2孔の地下水位

## 3 : X線照射による液水拡散係数の測定

高瀬石仏の凝灰岩における液水拡散係数を求めるため、X線照射による毛管吸水実験を行う。試験体内を液水が毛細管現象で上昇する過程を断続的にX線で透過撮影する。X線吸収量と含水率の関係から、試験体内の含水率の経時変化を求め、それにボルツマン変換法<sup>5)</sup>を用いて、液水拡散係数を求める。

### 3.1 測定原理

X線は放射線の一種で物質を透過する。X線源とディテクタの間に設置された試験体に、入射し透過させたX線強度からX線吸収率を測定することができる（図6）。物体を

通過する線源の透過の関係を表式(1)に示す。

$$I = I_0 \exp(-\mu d) \quad (1)$$

ここで、 $I_0$  : X線入射強度、 $I$  : X線透過強度、 $\mu$  : X線吸収係数、 $d$  : 材料厚である。乾燥時と飽和時の試験体におけるX線吸収量の差と質量の差から、X線吸収量と含水率の関係が求まる。この関係を用いて、乾湿前後のX線吸収量の差から試験体内の含水率分布を求める。

液水拡散係数 $D_l$  ( $m^2/s$ ) は、吸水過程の含水率分布の経時変化にボルツマン変換法を用いて求める。この方法では、等温・1次元液水移動の微分方程式に変数  $\lambda$  ( $\lambda = x/t^{0.5}$ ,  $x$  : 座標 (m),  $t$  : 時間 (s)) を与えると、常微分方程式を得、その解として $DI$ を得る<sup>5)</sup>。

X線CT撮影は、試験体を周囲360度からX線透過させ、透過量を逆解析すると試験体内部のX線吸収係数の空間分布がCT値として得られる。CT値は、試験体の密度と化学組成に応じて決まり、高エネルギー線源の場合は密度のみに依存する<sup>6)</sup>。本研究ではCT値が密度のみに比例するとし、CT値から試験体内部の密度分布を求める。

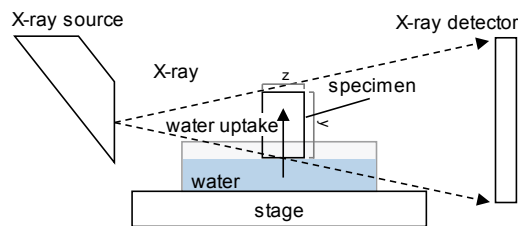


図6 測定原理と実験概要

### 3.2 実験概要

近畿大学東大阪キャンパスにある理工学部コンクリート実験室のX線CT装置<sup>7)</sup>を用いて実験を行う。X線の撮影条件を表1に示す。

表1 X線の撮影条件

項目	透過撮影	CT撮影
X線管電圧 (kV)	160	160
X線管電流 ( $\mu A$ )	20	100
プロジェクション数	1	2000
撮影速度 (回/秒)	0.5	4
解像度 (mm)	0.0613	0.0613

試験体は高瀬石仏で採取した凝灰岩で、目視で表層の特徴が異なる2つを試験体A, Bとする。試験体の写真を図7に、物性値を表2に示す。試験体A, Bの寸法 ( $x \times y \times z$ ) は、概ね68mm  $\times$  73mm  $\times$  44mm、65mm  $\times$  80mm  $\times$  35mm

である。吸水試験の1次元性を確保するため、試験体側面をボンドで断湿した。

表2 試験体の物性値

試験体	飽和含水率 (kg/m <sup>3</sup> )	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	室乾 (g)	湿潤 (g)
A	496.7	1378	324.0	430.9
B	363.4	1423	299.8	370.4

表層の様子やCT撮影結果から異方性をもつ試験体Bは3方向 ( $B_{xy}$ ,  $B_{zy}$ ,  $B_{xz}$ ) に、異方性をもたない試験体Aは1方向 ( $A_{xy}$ ) に液水を吸水させた実験をそれぞれ行う。ここで、試験体 $B_{xy}$ と試験体 $B_{zy}$ は層に対して水平方向、試験体 $B_{xz}$ は直行方向を示す。また、試験体BにおいてX線の透過面が $x \times y$ で吸水方向が $y$ の場合、試験体 $B_{xy}$ と表記する。

毛管吸水実験は以下の手順で実施した。

- ①X線CT装置内に室乾状態の試験体を設置する。
- ②その試験体をX線CT撮影する。
- ③試験体下端に水を供給し、毛細管力により試験体上部に液水が上昇する過程を断続的にX線透過撮影を行う。

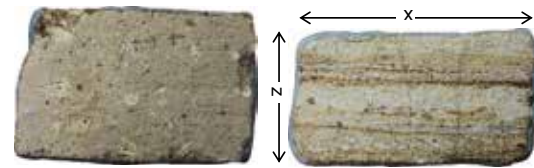


図7 試験体表層の写真(左: 試験体A, 右: 試験体B)

### 3.3 実験結果

CT撮影から得られた密度分布を図8に示す。試験体Aは大きな鉱物や間隙による密度分布があるのに対し、試験体Bは層状に密度分布があることがわかる。試験体A, Bの密度分布には相違が見られるが、平均密度は大きな違いがない。

毛管吸水実験で撮影した吸水過程の透過画像と、その透過画像から算出した飽和度分布を図9に示す。いずれも試験体 $A_{xy}$ で60分毎の画像である。透過画像はディテクタで測定されるX線透過強度を示しており、飽和度分布に算出すると水分移動を十分に捉えられていることがわかる。

飽和度分布の経時変化にボルツマン変換法を用いて求めた液水拡散係数を図10に示す。試験体 $A_{xy}$ と試験体 $B_{xz}$ 、試験体 $B_{xy}$ と試験体 $B_{zy}$ の2つに分類して考察する。層に水平方向への吸水実験結果である試験体 $B_{xy}$ と試験体 $B_{zy}$ は、同じ液水拡散係数である。

試験体Axyと試験体Bxzの液水拡散係数は飽和含水率付近では異なるが、それ以外の低含水率領域はほとんど一致することがわかる。したがって、凝灰岩の層に対して液水移動が水平方向の場合と、直行方向および層を有しない場合では、液水拡散係数は約10倍の差があることがわかる。これを液水拡散係数の異方性として4章の数値解析を行う。

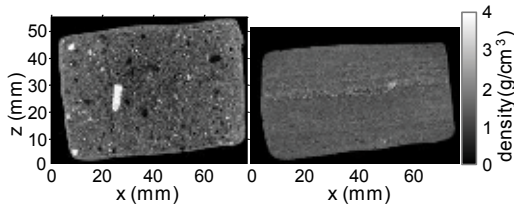


図8 試験体断面のCT画像(左:A,右:B)

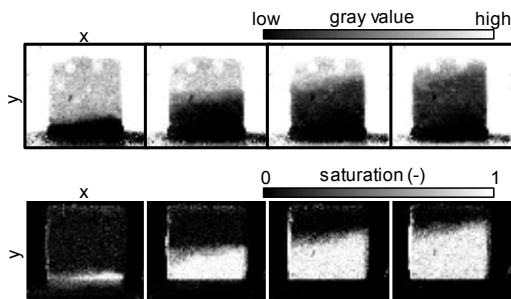


図9 毛管吸水実験(上:透過画像,下:飽和度分布)

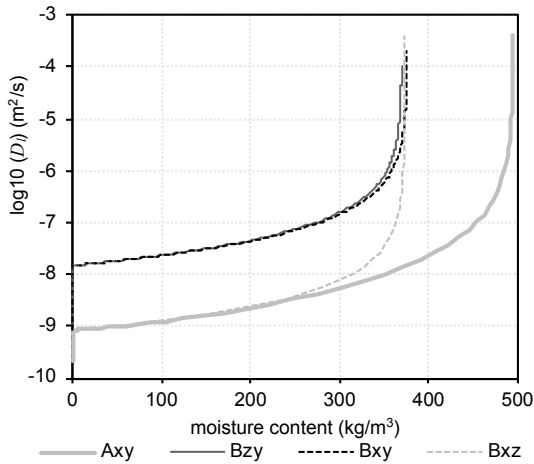


図10 液水拡散係数 $D_l$ と含水率の関係

#### 4: 岩盤内熱・水分移動の数値解析

##### 4.1 解析対象

解析対象は図11に示すように高瀬石仏を中心に、地表面より約5m以下地点から岩盤上部までの岩盤一体を含め、東西方向を断面とした2次元モデルである。背面は地表面に対して斜面であるが、鉛直として近似した。

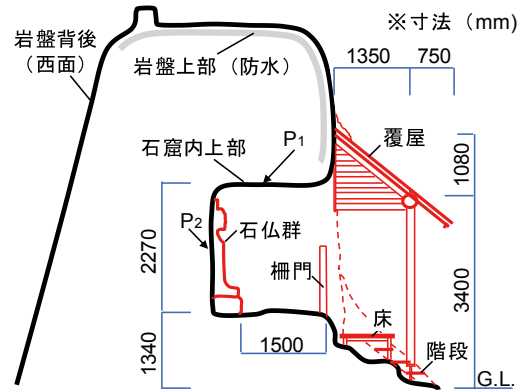


図11 高瀬石仏の断面図

##### 4.2 基礎方程式

石仏内部の熱・水分性状を解析する基礎方程式については、解析対象である石仏を含む岩盤が3章に示すような不均一な多孔質材料であるので、通常の熱・水分同時移動方程式<sup>8)</sup>に液水拡散係数の異方性を考慮して用いる。

##### 4.3 解析条件

解析手法には前進型有限差分法を用いた。差分スケールは50~100mmとし、差分格子の形状は全て長方形で近似した。時間刻みは最大0.8秒で計算する。石仏を含む岩盤全体は凝灰岩で構成されているとし、水分物性には、前章で測定した液水拡散係数と蒸発法(HYPROP<sup>9)</sup>の測定値を近似した平衡含水率関係(図12)を用い、飽和度から化学ポテンシャルの値を求めた。熱・湿気伝達率は、外部風速を考慮した方法で計算する。さらに高瀬石仏の凝灰岩は、目視で観察できる表層の様子と火山灰が堆積して形成されたことを考えると、鉛直上方向に直行な層を形成していると推定できる。したがって、2種類の液水拡散係数を用いた解析を行う。防水工事に用いた擬岩(非透水性)の熱抵抗は0とする。

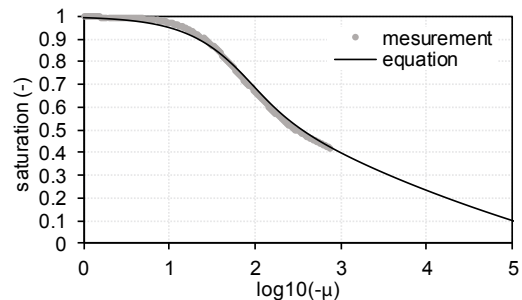


図12 飽和度と化学ポテンシャル $\mu$ の関係

境界条件として、外気・石窟内温湿度は外気温湿度の実測値を用いる。降雨量と日射量は、全天日射量・水平面降雨量・風速・風向の実測値から算出した各面に応じた値

を用いて、日射反射率は分光光度計で測定した値（30%）とする。地下水位は2孔間の値を用いて直線近似し、水位以下は飽和度（=体積含水率/空隙率（0.392 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>））を1とする。実測値は2016年5月20日～2017年5月19日に測定された値である。地上部を除き、空気に曝されない面は、対象境界条件を適応する。

石窟内上部は、明瞭に残るのみ跡と、岩盤に多くの鉄分が含有されていることから、水を通さないと仮定した。熱・湿気伝達率は、外部風速を考慮した方法で計算する。

ここでは境界条件と物性値が異なる3つのケースの解析を行う。3つの計算ケースの境界条件の違いを表3に示す。岩盤上部と岩盤前頭部の防水が石仏部位の熱・水分性状に与える影響を明らかにするため、整備事業前を示すモデルをCase1、整備事業後の現状を示すモデルをCase2とする。また、今後の対策を想定したCase3では、雨の侵入が懸念されていた岩盤背後を防水とする。

表3 計算ケースごとの境界条件

項目	岩盤上部と岩盤前頭部	岩盤背後
Case1	防水なし	防水なし
Case2	防水あり	防水なし
Case3	防水あり	防水あり

解析開始時の岩盤内温度・含水率は、以前に高取ら<sup>10)</sup>と同じ凝灰岩の物性値を用いて行った数値解析により得られた周期定常解を用いた。

#### 4.4 本論の保存環境と評価方法の考え方

次に示す結果の考察の基本となる、本研究における保存環境の評価に関する考え方を以下に述べる。岩盤内部と石仏表面における含水率は、大きな値を保持する方が、また変動の激しい方が劣化を引き起こしやすいと考えられる。含水率が大きくなると材料の強度は下がり、含水率変動は乾燥収縮による応力が発生するためである。水分が発生する結露も、同様の理由で発生しない方がよいと考えられる。

#### 4.5 解析結果と考察

高瀬石仏の周辺環境が石仏内部と表面の熱・水分性状に与える影響について、結果と考察を以下に示す。

石仏を含む岩盤内部の含水率分布を図13に示す。地下水の毛細管力で上昇する水分の影響により地下水位面から地表面上部まで含水率は大きくなり、石仏表面付近でも、わずかに影響を受け含水率が大きくなるのがわかる。3ケースの含水率を比較すると、石仏表面付近では同じ値であるが、岩盤内部ではCase1、Case2、Case3の順に大きくなるのがわかる。防水面が増えると岩盤内部へ水分流入は抑制されるが、地下水から上昇する水分が空間側に蒸発できなくなり、岩盤内の含水率が全体的に高くなると考えられる。Case1は岩盤上部からの雨水侵入により、一時的に岩盤上部付近の含水率は大きくなるが、その後速やかに蒸発されるため、石仏付近までは影響しないことがわかった。

石窟内床下における温度と水ポテンシャル（water potential）の測定値と解析値を図14に示す。水ポテンシャルの測定は、2019年7月5日から行われている。実測において、センサーに覆い被せた、濡れた土壌が10月に乾燥し、岩盤の水ポテンシャルと同程度の値になった。測定値と解析値を比較すると、温度と水ポテンシャルの変動は同じ傾向なので、今回の数値解析により高瀬石仏の熱・水分性状を再現できているといえる。ただし、水ポテンシャルの測定は、極めて地表に近い位置で行っており、ほとんど外気の影響に依存していることに留意する必要がある。また、冬季の温度低下に対して、水ポテンシャルは、10<sup>7</sup>付近を変動しながら上昇していることから、含水率は低い値を保ちながら外気の絶対湿度に応じて変動していることがわかる。

石窟内上部と石仏表面の相対湿度を図15に示し、現地調査で観察された石窟内上部の結露について検討する。石窟内上部は、石仏表面に比べて相対湿度の変動が大きく、冬季には頻繁に結露がある。一方、石仏表面では結露しない結果となった。石窟内上部は非透水としたのに対し、石仏表面は湿気が吸放出されるため結露しなかったと考えられる。なお、図14, 15の解析値は、各ケースの差異がないため1本で示している。すなわち、石窟内表面付近において、保存整備事業の防水によって保存環境は変わっていないことがわかる。

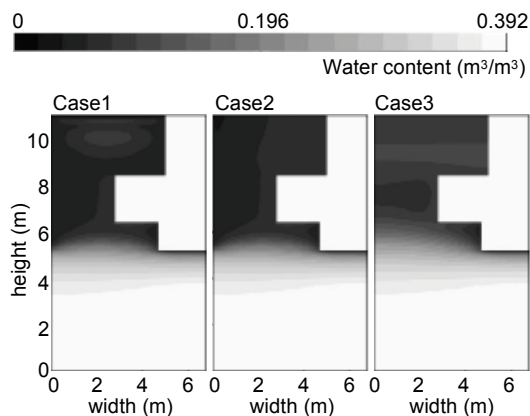


図13 石仏含む岩盤内部の含水率分布

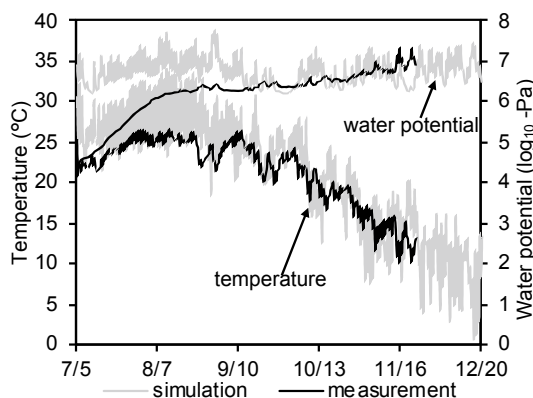


図14 石窟内床下における測定値と解析値の比較

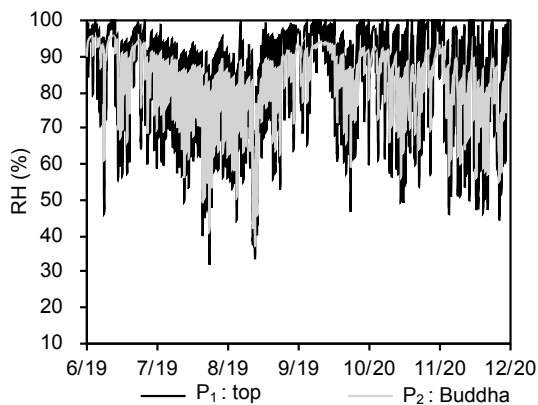


図15 石窟内上部と石仏表面の相対湿度

## 5 : まとめ

熱・水分負荷による風化が懸念されている高瀬石仏の保存環境の定量的な評価を目的とし、実測調査、物性値測定を行った。また、それらの結果を用いて、石仏を中心とした岩盤を対象に2次元モデルを作成し、液水拡散係数の異方性を考慮した熱・水分移動の数値解析を行った。実測値との比較から、解析結果の検証を行うとともに、保存整備事業を評価した。解析結果から、岩盤表面の防水対策は、岩盤内部の含水率分布には大きく影響するものの、その石仏付近の含水率分布への影響は極めて限定的であるといえる。高瀬石仏

のような防水による保存整備事業は、降雨が当たる面と、対象の文化財、地表面、地下水位の関係により、材料内部の含水率が上昇する場合と降雨を抑制できる場合があるので、対策前には十分な検討を行う必要がある。

## 謝辞

本研究はJSPS科研費・基盤研究(B)(18H01596) および挑戦的研究(開拓)(19H05511)の助成を受けた。本研究は、脇谷草一郎博士(奈良文化財研究所)、小椋大輔教授(京都大学)、麓隆行准教授(近畿大学)、平沼柊哉氏(近畿大学大学院修士課程)、大分市教育委員会文化財課、および関係者各位の協力を得て実施された。記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) K. Hamada. 1925. Studies on the rock-cut Buddhist images in the province of Bungo, Report upon archaeological research, in the department of literature, The Kyoto Imperial University, IX, 6-8.
- 2) 大分市教育委員会, 2011, 「国指定史跡高瀬石仏」保存整備事業報告書, 57p.
- 3) 奥田吏司, 安福勝, 脇谷草一郎, 小椋大輔, 桐山京子, 高取伸光. 2017. 大分市高瀬石仏の保存環境分析と対策の評価, その1) 実測と数値解析に基づく現状分析, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 環境系, 57, 45-48.
- 4) 平沼柊哉, 安福勝, 脇谷草一郎, 小椋大輔, 桐山京子, 高取伸光, 奥田吏司. 2017. 大分市高瀬石仏の保存環境分析と対策の評価, その2) 防水工事の影響を考慮した2次元熱・水分移動の数値解析, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 環境系, 57, 45-48.
- 5) J. Carmeliet, H. Hens., S. Roels, H. Brocken, O. Adan, Z. Pavlik, R. Cerny, C. Hall, K. Kumaran, and L. Pel. 2004. Determination of the liquid water diffusivity from transient moisture transfer experiments, Journal of Thermal Env. & Bldg. Sci., 27(4), 277-305.
- 6) 中野司, 中島善人, 中村光一, 池田進. 2000. X線CTによる岩石内部構造の観察・解析法, 地質学雑誌, 106(5), 363-378.
- 7) 麓隆行. 2013. 新しい機構のX線CTの開発とポリマーコンクリートの圧縮試験への適用, JSCE E2, 69(2), 182-191.
- 8) 松本 衛. 1978. 建築壁体における熱・水分の同時移動および水分蓄積に関する研究, 京都大学博士論文.
- 9) T. Pertassek, A. Peters, W. Durner. 2011. HYPROP Data Evaluation Software User's Manual, V.1.0, UMS GmbH, Gmunder Str. 37, 81379 München, Germany, 47p.
- 10) 高取伸光, 小椋大輔, 脇谷草一郎, 安福勝, 桐山京子. 2017. 覆屋内温湿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, 82(733), pp. 215-225.



## 結露が古墳壁画に及ぼす影響に関する基礎研究

独立行政法人国立文化財機構  
東京文化財研究所

INUZUKA Masahide  
犬塚 将英

### 1 : はじめに

博物館・美術館の展示室・収蔵庫等の屋内環境における文化財の保存と比較すると、より過酷な環境下に置かれている遺跡の保存を検討する際には、より多くの困難に直面する場合がある。特に、塩類の析出、凍結、緑色生物の繁茂等の水分や周辺の温湿度環境と密接に関連する課題も多い。そこで、虎塚古墳壁画の保存環境を念頭に置き、著者らが行った結露が古墳壁画に及ぼす影響に関する基礎実験の結果について発表を行う。今回の発表は、2019年3月に国立文化財機構東京文化財研究所が発行した『保存科学』第58号に掲載された論文<sup>1)</sup>に基づき、修正を行ったものである。

### 2 : 虎塚古墳壁画

茨城県ひたちなか市の前方後円墳である虎塚古墳の後円部には、凝灰岩で構築された横穴式石室があり、その石室内側の壁面には白色粘土（凝灰岩風化物）による下塗りの上にパイプ状ベンガラ<sup>2)</sup>の赤色顔料を用いて幾何学文と武器武具等が描かれている<sup>2)</sup>。

虎塚古墳の横穴式石室は1973年に発見され、1974年に国の史跡指定を受けた。その後、1979年に設定された「勝田市虎塚古墳公開保存施設設置基本構想」に基づき、1980年には観察室、前室、前々室の3室構造を有する公開保存施設が建設された<sup>3)</sup>。1980年秋から開始された一般公開は現在も続けられており、原則的には春・秋それぞれ8日間、1年で16日間の公開が行われている。2011年からは、公開保存施設の環境を良好に保つことを目的として、定期的に観察室における微生物調査と除菌清掃作業が行われている<sup>4, 5)</sup>

ところで、近年、虎塚古墳壁画の彩色の一部が薄くなっているように見えてきており、劣化現象が進行している可能性が示唆されてきた<sup>6)</sup>。奥壁には2つの環状文が描かれているが、右側の環状文と比較すると、劣化が懸念されている左側の環状文の方が赤色顔料や白色下地層が凝集しているように見えることが顕微鏡画像（図1）から確認されてきた<sup>6)</sup>。

このような劣化現象の原因を究明するために、現地では壁面からの落下物の調査<sup>7)</sup>や石室内温湿度・壁面含水量の計測<sup>8)</sup>を定期的実施している。また、虎塚古墳壁画を模した試験片を作成し、温度・湿度を大きく変化させて凝集化の再現を試みる基礎実験も行った<sup>6, 7)</sup>。これらの保存科学的調査研究により、壁画の構造と材料に関する多くの知見は得られたが、劣化現象のメカニズムの解明には至っていない。

この劣化現象の主な原因として、壁画表面における結露の発生や水分の移動が推測される。虎塚古墳の石室内は年間を通じて相対湿度がほぼ100%であるため<sup>6, 8)</sup>、小さな値であっても石室内に温度分布があれば、壁画表面において結露が発生しやすい環境であると言える。本研究では、結露が古墳壁画表面に及ぼす影響を調べるための基礎実験を行った。

### 3 : 実験方法

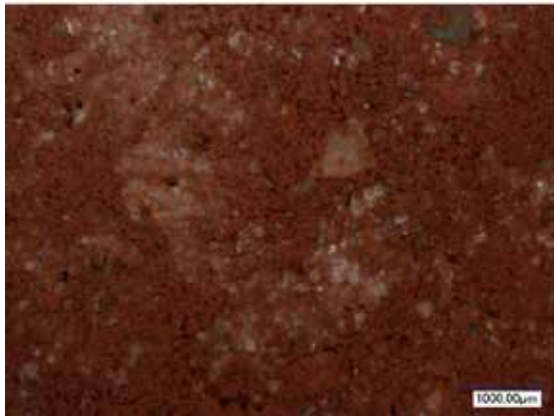
本研究では、結露が虎塚古墳壁画表面に及ぼす影響を調べるために、基礎実験を行った。虎塚古墳壁画を模した試験片を作成し、相対湿度をほぼ100%とした密閉空間に2つの試験片を設置した。一方の試験片の表面に結露を発生させるために、ペルチェモジュールを用いて冷却した。この時に、試験片表面での結露の発生を確認するために、試験片の重量、含水量、試験片表面における水分の移動の計測を行った。このような実験系を用いて、ペルチェモジュールのON・OFFを数回繰り返して、実験前後における写真を比較することにより、白色下地層と赤色顔料層の状態の変化の有無を調べた。

#### 3-1. 試験片の作成

虎塚古墳の石室の材料であり壁画の支持体である凝灰岩は近隣で採取できる部田野石と特徴が類似していること、白色下地層と部田野石の構成成分が類似していることが、先行研究で明らかにされている<sup>9)</sup>。また、虎塚古墳の近くの十五郎横穴墓群付近の湿地の泥に鉄バクテリアを含むものがあることが指摘されており、それが虎塚古墳壁画の赤色顔料の原料として用いられた可能性も示唆されている<sup>9)</sup>。これらの知見をもとに、以下に示す方法で実験に供する試験片の作成を行った<sup>9)</sup>。

試験片の基材として、8 cm × 8 cm × 1.5 cm 程度の大きさに切断した部田野石を使用

(a)



(b)

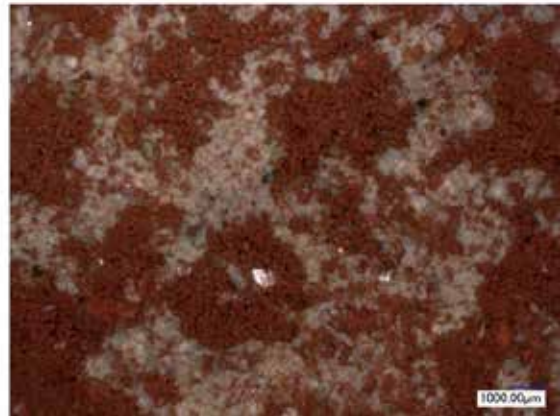


図1 虎塚古墳壁画のうち、奥壁に描かれている(a)右側の環状文と(b)左側の環状文の顕微鏡画像



図2 作成した試験片

した。風化して白色化した部田野石の粉末に水を加えて練ったものを白色下地層の材料とし、厚さが約3 mmとなるように、石材の片面(8 cm×8 cmの面)に塗った。赤色顔料の原材料として、上述の十五郎横穴墓群付近の湿地から泥を採取し、電気炉を用いて800℃の条件下で約1時間焼成した。このように生成した赤色顔料を水に溶いて、太さが約5 mmの線を白色下地層の上に描いた。作成した試験片の例を図2に示す。

### 3-2. 実験セットアップと実験方法

実験の様子を図3に、模式図を図4に示す。上述(3-1.)の方法で作成した試験片2個をプラスチック製容器に入れて密封した。容器内には水をはったトレーも設置することにより、相対湿度がほぼ100%となるような高湿度環境を実現した。一方の試験片については、壁画表面の温度を露点よりも低くして強制的に結露を発生させるために、ペルチェモジュール(ジーマックス社製、FEC-1715NP)の上に乗せて裏面から冷却した。以上のように構築した実験系を用いて、以下の2通りの実験を行った。

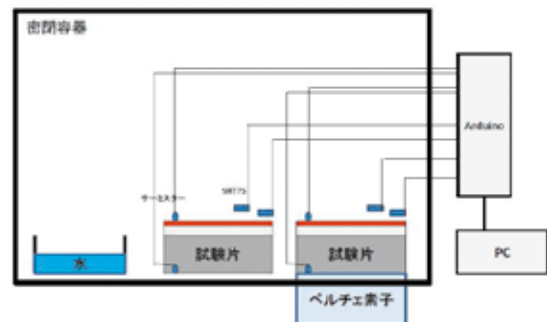


図3 実験の様子

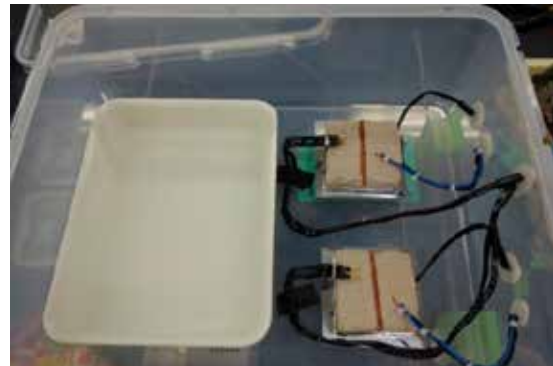


図4 実験の模式図

#### 3-2-1. 実験1

実験1では容器内に試験片を密封したまま、ペルチェモジュールをONの状態です約8時間、OFFの状態です約16時間のサイクルを3回繰り返す(表1)、試験片表面の白色下地層と赤色顔料に生じる変化の有無を調べた。

図4に示したように実験1では、サーミスタ温度センサーを用いて、各試験片の表面と裏面の温度を計測した。また、試験片表面における水分の移動を調べるために<sup>9-11)</sup>、各試験片の表面からの距離が約2 mmと6 mmの位置に温湿度センサー(センシリオン社製、SHT75)を設置した。実験を開始する前に、NaCl、KCl、KNO<sub>3</sub>の飽和塩水溶液を用いて検定を行ったところ、実験1に用い

表1 実験1における冷却時間

ペルチェ素子	時刻
ON(1回目)	1日目11:15~1日目16:00
OFF(1回目)	1日目16:00~2日目8:30
ON(2回目)	2日目8:30~2日目17:00
OFF(2回目)	2日目17:00~3日目8:15
ON(3回目)	3日目8:15~3日目16:50

た4つの温湿度センサーの相対湿度は75%、85%、95%において±1%の精度で正しい値を示すことを確認した。よって、相対湿度の実測値に補正をせずに、4-1. に示すデータ解析を行った。これらのセンサーからの信号は入出力ポートを備えた制御基板であるArduinoを用いて処理し、実測データの記録を行った<sup>11, 12)</sup>。

### 3-2-2. 実験2

実験1では容器を密封したままの状態、試験片表面近傍における2つの温湿度センサーの測定値から試験片表面における水分の移動を調べる実験を行った。実験2では試験片を冷却することにより試験片表面に結露が生じたことを、より直接的に検証するために、ペルチェモジュールのON・OFFを切り替える時に一時的に容器を開封し、各試験片の重量と含水量の測定を行った。

実験2ではなるべく実験1の条件を再現するために、ペルチェモジュールをONの状態約8時間、OFFの状態約16時間のサイクルを3回繰り返した(表2の左から1列目と2列目)。

試験片の重量は電子天秤を用いて測定した。試験片表面の白色下地層及び赤色顔料部分における含水量を調べるために、ハンディ型赤外線水分計(ケツト科学研究所社製、KJT-130)を用いて、赤外線吸光度の測定を行った<sup>6, 13)</sup>。

## 4. 実験結果と考察

### 4-1. 実験1の結果

図5にサーミスタ温度センサーと温湿度センサーから得られた測定結果を示す。

図5(a)は、サーミスタ温度センサーを用いて各試験片の表面・裏面で測定した温度である。ペルチェモジュールがONの時、ペルチェモジュールに接している試験片の裏面では-10℃から-5℃となっており、それに伴って試験片の表面では7℃から13℃まで温度が下がっていた。一方、ペルチェモジュールがONの時、冷却をしなかった試験片については表面・裏面ともに約27℃であった。

図5(b)は、温湿度センサーから得られた相対湿度の測定結果である。容器内に水をはったトレーを設置したにも関わらず、ペルチェモジュールがONの時に、冷却をしなかった試験片側の相対湿度が約80%にまで低下したのは、ペルチェモジュールによって冷却された試験片がコールドポイントとなったことが原因であると考えられる。温度が27℃、相対湿度が80%の空気露点温度は約23℃であることから、図5(a)で示されているように温度が13℃に冷却されている試験片表面では結露が発生する条件であったことが確認できた。

図5(c)は、各温湿度センサーで計測した温度と相対湿度から算出した絶対湿度の値の時間変動である。冷却しなかった試験片と比較すると、冷却した試験片の表面からの距離が2mmと6mmの位置における絶対湿度の差が大きいことがわかる。

図5(d)に、各試験片について、表面からの距離が2mmにおける絶対湿度から6mmにおける絶対湿度を引いた値を示す。冷却をした試験片については、試験片に近い場所における絶対湿度の方が小さな値になっており、空気中から石材へ水分が移動したと考えられる<sup>10)</sup>。一方、冷却をしなかった試験片については、試験片に近い場所における絶対湿度の方が大きな値となっていた。これは容器内の相対湿度が下がったことにより、試験片から水分が放出されたことが原因であると推測される。

以上の測定結果から、ペルチェモジュールをONにした時に冷却を行った試験片表面の温度が空気露点温度よりも低くなったこと、水分の移動が空気から試験片表面に向かったことがわかった。

### 4-2. 実験2の結果

ペルチェモジュールのON・OFFを切り替える時における各試験片の重量と赤外線吸光度の測定結果を表2の右側(3列目~8列目)に示す。赤外線吸光度が高いほど、試験片表面における含水量が高いことを意味する<sup>6, 13)</sup>。冷却をしなかった試験片の重量と赤外線吸光度には誤差の範囲で変化は見られなかったが、冷却を行った試験片についてはペルチェモジュールをONにすることによって重量と赤外線吸光度が増加していることが確認できた。

表2 実験2における冷却時間と重量・赤外線吸光度の測定結果

ペルチェ素子	時刻	試験片(ペルチェ有)			試験片(ペルチェ無)		
		重量(g)	赤外線吸光度		重量(g)	赤外線吸光度	
			白色下地層	赤色顔料		白色下地層	赤色顔料
ON(1回目)	1日目13:00~1日目17:40	170.27	0.3475	0.3319	181.31	0.3520	0.3034
OFF(1回目)	1日目17:40~2日目10:00	174.52	0.8562	0.8750	181.14	0.3423	0.2977
ON(2回目)	2日目10:00~2日目18:30	174.60	1.1403	1.0793	181.68	0.3953	0.3470
OFF(2回目)	2日目18:30~3日目10:45	183.30	1.7375	1.5853	181.17	0.3507	0.3017
ON(3回目)	3日目10:45~3日目16:00	183.53	1.5826	1.4558	181.71	0.3967	0.3515
		188.26	1.6129	1.5577	181.24	0.3582	0.3065

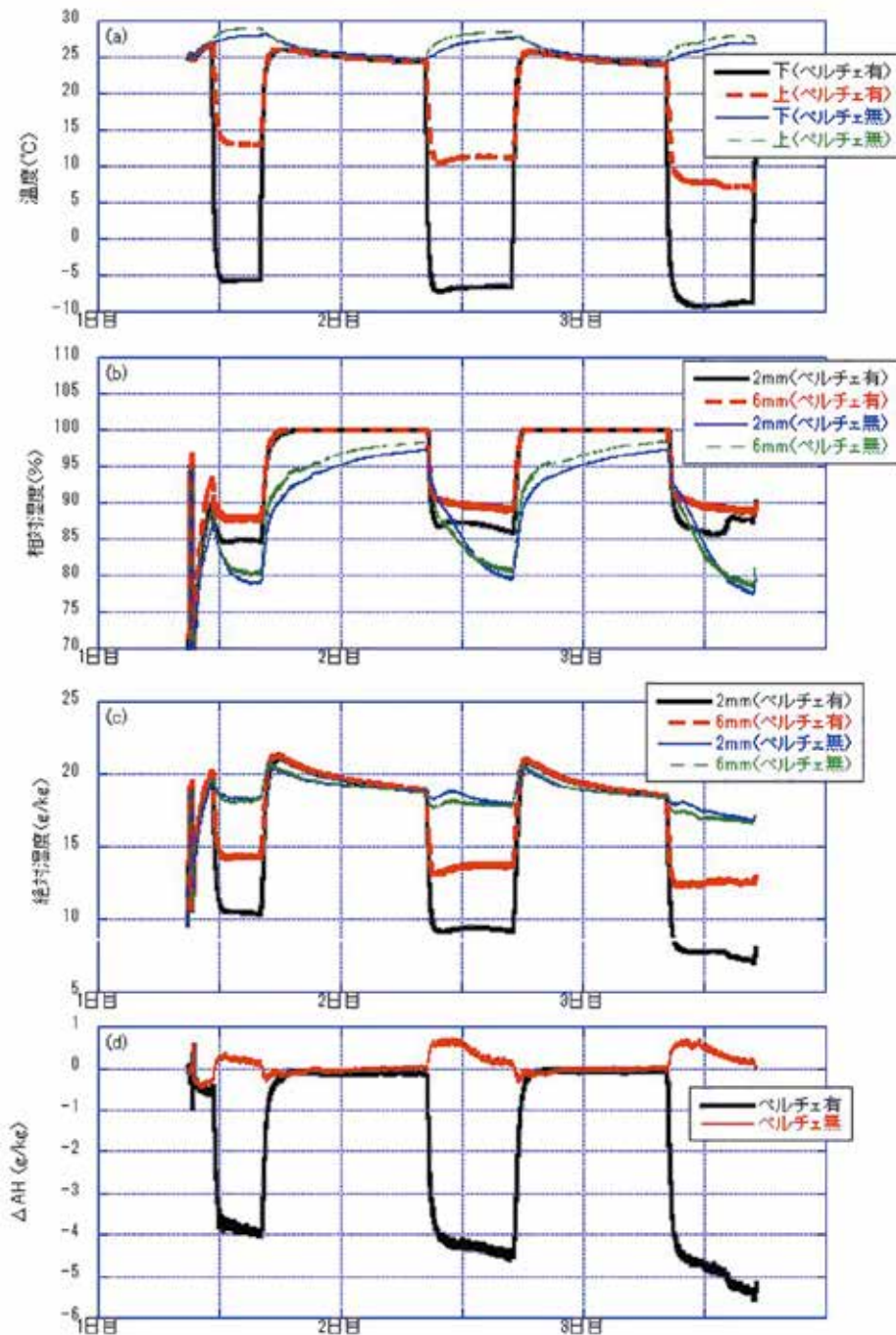


図5 実験1での測定結果：(a)試験片の表面と裏面での温度、(b)温湿度センサーで計測した相対湿度、(c)温湿度センサーで計測した温度と相対湿度から算出した絶対湿度、(d)上下の温湿度センサーから得られた絶対湿度の差。

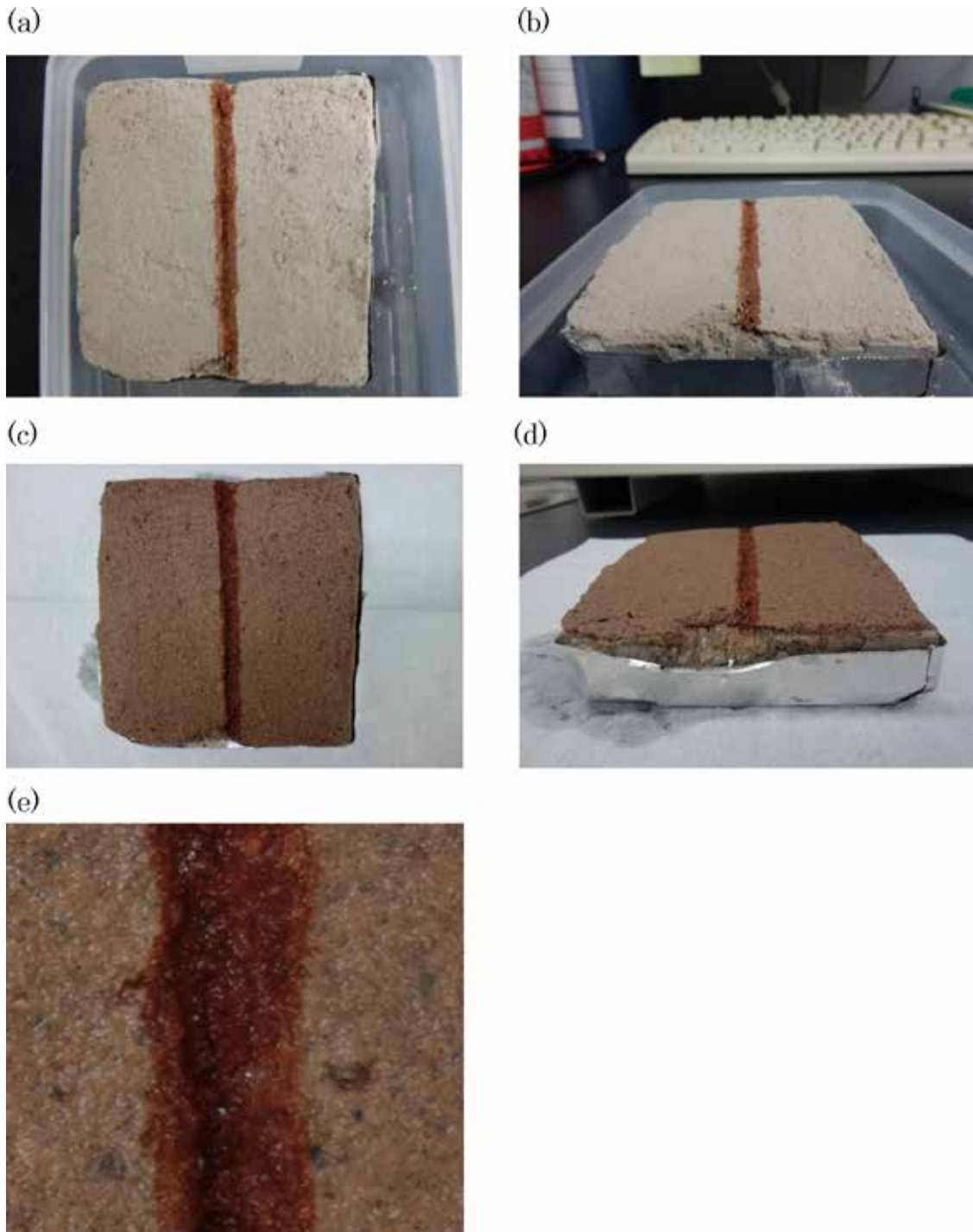


図6 実験1でペルチェモジュールを用いて冷却を行った試験片の実験前の写真 ((a)、(b)) と実験直後の写真 ((c)、(d))。 (e)は(c)を拡大した画像。

#### 4-3. 実験1の写真の比較

実験1で冷却を行った試験片について、実験開始前・終了直後に撮影した写真をそれぞれ図6(a)、(b)と図6(c)、(d)に示す。冷却を行ったことにより試験片表面が濡れたことを確認することができたため(図6(c)、(d))、試験片表面において強制的に結露を発生させることには成功したと考えられる。このことは、冷却を行った試験片表面の温度が空気の露点温度よりも低くなったこと

(4-1.)、冷却を行った試験片の重量と赤外線吸光度が増加したこと(4-2.)からも検証することができた。

試験片表面の状態を詳細に調べた時に用いた画像の一例として、図6(c)の中央部分を拡大した画像を図6(e)に示す。画像中に見られる赤色顔料の線の太さは約5mmである。図1(b)で見られるような白色下地層と赤色顔料が凝集したような現象を含むミクロな形状の変化を確認することはできなかつ

た。よって、本研究のような結露を発生させる条件では、虎塚古墳壁画に見られる劣化現象が起こらないことを確認することができた。

## 5. まとめ

近年示唆されてきた虎塚古墳壁画の彩色の一部が薄くなっているように見えるという劣化現象の原因を調べるために、本研究では結露が古墳壁画表面に及ぼす影響を調べるための基礎実験を行った。

虎塚古墳壁画を模した試験片を作成し、相対湿度をほぼ100%とした密閉空間内で強制的に結露を発生させるために、ペルチェモジュールを用いて冷却した。この時に試験片表面が濡れていたため、結露が発生したことを確認した。また、試験片の重量、含水量、試験片表面における水分の移動を計測することからも結露が発生したことを検証することができた。

ペルチェモジュールのON・OFFを数回繰り返して、実験前後に撮影した写真で比較を行ったが、今回実施した実験の範囲内では、白色下地層と赤色顔料が凝集したような現象を含むミクロな形状の変化を観測することはできなかった。よって、本研究のような結露を発生させる条件では、虎塚古墳壁画に見られる劣化現象が起こらないことを確認することができた。

劣化現象の再現に至らなかったのは、結露回数の不足等の実験条件によるものか、あるいは結露以外の要因があるのか、などのさらなる検討が必要である。

## 謝辞

本研究はJSPS科研費JP16K01186の助成を受けたものです。

## 参考文献

- 1) 犬塚将英、大迫美月、佐藤義則、稲田健一、谷口陽子、矢島國雄：結露が古墳壁画に及ぼす影響に関する基礎実験、保存科学、58、73-81 (2019)
- 2) 勝田市史 別編I『虎塚壁画古墳』、勝田市史編さん委員会 (1978)
- 3) 江本義理、門倉武夫、見城敏子、新井英夫：史跡虎塚古墳彩色壁画保存に関する調査研究(受託研究報告 第51号)、保存科学、22、121-146 (1983)
- 4) 佐藤嘉則、犬塚将英、森井順之、矢島國雄、木川りか：虎塚古墳公開保存施設の管理方法変更による微生物汚染状況の推移、保存科学、54、121-131 (2015)

- 5) 佐藤嘉則、木川りか、犬塚将英、森井順之、矢島國雄：虎塚古墳石室の扉石表面に形成したバイオフィルムの微生物群集構造解析とその制御、保存科学、57、67-76 (2018)
- 6) 矢島國雄編、科学研究費補助金研究成果報告書『虎塚古墳の保存科学的研究』(2014)
- 7) 中村賢介、谷口陽子、犬塚将英、稲田健一、矢島國雄：虎塚古墳壁画表面の凝集化に関する検討、文化財保存修復学会第36回大会研究発表要旨集、148-149 (2014)
- 8) 虎塚古墳石室内の温湿度と壁面含水量の調査結果：犬塚将英、忽那敬三、稲田健一、谷口陽子、矢島國雄、文化財保存修復学会第36回大会研究発表要旨集、152-153 (2014)
- 9) 朽津信明、森井順之：土壁の水分吸収・放出に関する基礎的研究、保存科学、44、103-108 (2005)
- 10) 森井順之：莫高窟第53窟の内部環境調査、敦煌莫高窟壁画保存修復に関する日中共同研究2005、31-38 (2006)
- 11) 犬塚将英：文化財の表面における水分蒸発量の非接触測定システムの開発、保存科学、53、125-134 (2014)
- 12) Massimo Banzi著、船田巧訳：『Arduinoをはじめよう 第2版』、オライリー・ジャパン (2012)
- 13) 朽津信明編、科学研究費補助金研究成果報告書『環境制御による古墳に繁茂する緑色生物の軽減法に関する研究』(2018)

# 古墳の保存のための環境調整について — 装飾壁画保存のための環境設計と 地震被災後の一時的対策の検討 —

京都大学大学院工学研究科

OGURA Daisuke

小椋 大輔

## 1: はじめに

古墳石室内の石材表面に彩色や彫刻が施されているという特徴を持つ「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。そのうちのひとつ、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(写真1)。古墳内の石室には鮮やかに彩色された装飾壁画があり、1921年に国の史跡に指定された(写真2)。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、現在の姿となった(図1)。以前は一般公開を行っていたが、現在は、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。古墳・洞窟のように地盤・岩盤に囲われた空間内の結露や熱水分性状について理論解析的にいくつか研究が行われている。Lacanette<sup>1)</sup>はフランスのラスコー洞窟の壁画を対象として、数値流体解析を行うことで、洞窟内の気流性状と温湿度性状の把握を行い、その結露発生メカニズムについて検討を行っている。李<sup>2)</sup>は高松塚古墳の石室の古墳壁画を対象に、発掘時の結露、乾燥のメカニズムについて熱水分同時移動の数値解析による検討を行った。小椋<sup>3)</sup>は、鬮鷄山古墳を対象に石郭内の遺物の取り上げを想定した発掘調査時に、石郭周辺の適切な温湿度・空気質環境の制御方法を熱水分同時移動及び空気質予測の数値解析による検討を行うことで、明らかにした。ただし、石室内の結露発生メカニズムは、個々の文化財の周辺地盤の形状や厚さ、外界条件、空間構成、外部との接続など種々の要因が影響を与えており、その熱水分挙動を適切に把握するためには、個々の文化財を対象とした検討が必要となる。本研究の対象である釜尾古墳においては、池田<sup>4)</sup>が年間単位の温湿度測

定及び、測色、水分量測定を行い、石室内の温湿度や結露等濡れの挙動について調査結果をまとめているが、石室内の装飾壁画及び石室内壁表面の濡れのメカニズムについて、十分な検討がなされていない。

一方、釜尾古墳は2016年4月の熊本地震で被災し、墳丘の亀裂や土砂流入の被害を受けてブルーシートで被う対策が取られたが、その後、墳丘に乾燥の兆候とみられる変化が現れた。乾燥化の進行により墳丘が崩壊する可能性があるため、湿潤化が必要と考えられるが、湿潤化することに伴う結露が内部の装飾の劣化に影響を与えるため、保存施設及び内部装飾の両方を考慮した修復までの適切な一時的保存方法の検討が望まれている。

以上を踏まえて本研究では、釜尾古墳の保存を目的として、以下の2つの検討を行う。まず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・公開の面から適切であると考えられる保存施設の改修方法の提案を行う。次に、被災後の古墳を対象として、上述の解析モデルを用いて釜尾古墳における乾燥化のメカニズムを明らかにし、適切な一時的保存方法の検討を行う。

## 2: 研究対象の概要

### 2.1 釜尾古墳現保存施設の概要

現在の保存施設は、南面の開口に鉄扉を有し、幅0.8m×高さ1.0mの羨道を通り抜けて、装飾壁画のある玄室を直接見学できるタイプのものである。発見当初から崩壊していた玄室上部は、直径6.4m、高さ2.7mのコンクリートドームで覆い、その頂上に天井石を据え、厚さ1.3mの火山灰土壌で覆った構造である(図2)。コンクリートドームの内側はセメントを接着剤として安山岩の割石を小口積みに築いている。



写真1 釜尾古墳保存施設外観



写真2 玄室(石室内)の様子

### 2.2 玄室内装飾壁画の概要と劣化状況

玄室内では図3の装飾A～Hの位置に壁画を有する。装飾壁画は、赤、白、灰色(藍色)

の3色で安山岩に直接彩色を施したものである。装飾Aの現況の写真(写真3)と約100年前に模写された絵(図4)を比較すると、写真の点線枠部分において約100年前は鮮明に同心円文が見えるが、現況では左半分の白色部が損色し、黒ずんでいる。彩色が損色する原因としては、水が石材表面を流れ落ちることによる顔料の流出が考えられる。

### 3 : 石室内の温湿度性状及び装飾壁画の濡れ性状に関する調査

#### 3.1 石室内の温湿度環境

図6・7・8に石室内及び外気の温度と日射量、相対湿度、絶対湿度を示す<sup>注1)</sup>。計測位置は図1の通りであり、日射量は南側に面する鉄扉の鉛直面に設置した。また、温湿度ロガーはOnset社のHOBO U23 pro v2を使用し、日射計は小糸工業社のMES-136を使用した。図6より、石室内空気の温度は外気温の影響を受け、緩やかに変動している。最も変動が大きいのは入口温度であり、羨道、玄室と徐々に年較差、日較差ともに小さくなっていく。入口は日中、高温となっており、これは鉄扉に日射が当たるためである。図7より、玄室の相対湿度は年間を通じてほぼ100%に近い値を示している。図8より、絶対湿度についても、温度と同様の傾向となっている。

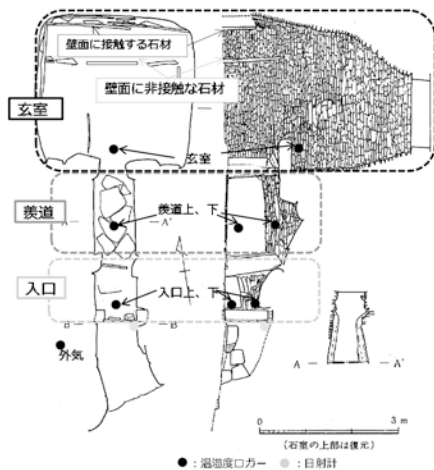


図1 保存施設平面図及び南北断面図

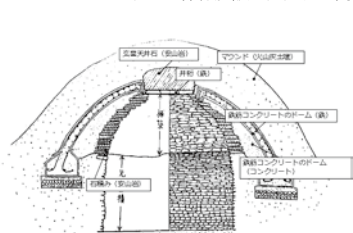


図2 保存施設玄室部の構造(東西断面)<sup>5)</sup>

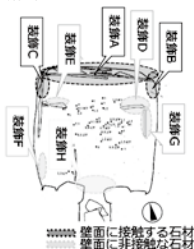


図3 玄室内装飾位置



写真3 現況の装飾A

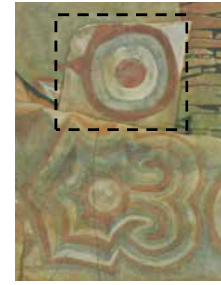


図4 約100年前の装飾A(模写)<sup>6)</sup>



写真4 現況の装飾E



図5 約100年前の装飾E(模写)<sup>6)</sup>

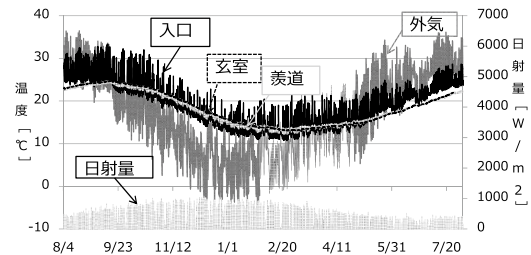


図6 石室内外の温度、日射量(2012年8月から2013年8月)

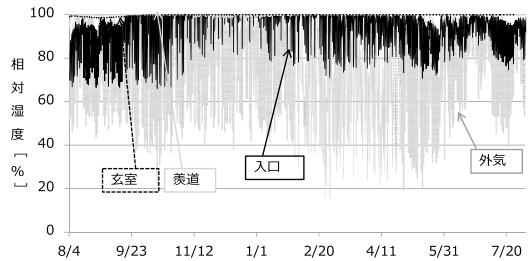


図7 石室内外の相対湿度(2012年8月から2013年8月)

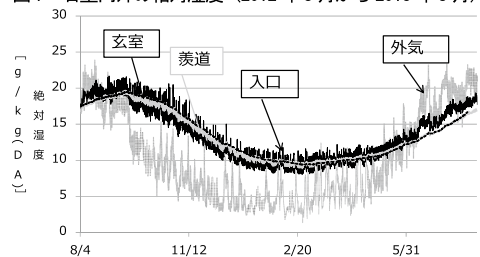


図8 石室内外の絶対湿度(2012年8月から2013年8月)

#### 3.2 装飾壁画の濡れ性状

玄室内の装飾壁画は、玄室壁面に接触しているものと非接触のもの2種類に分かれる。2012年8月から2015年9月までの調査時の目視観察結果から、それぞれの年間の濡れ性状は異なっておりその性状を以下で述べる。I)北側壁面に接触する装飾石材 玄室北側壁面に接触する装飾石材の年間の濡



れの変動を図9に示す。装飾の位置は図3の装飾A～Cである。図より、北側壁面に接触する石材は冬期に乾燥、夏期に濡れを示し、特に6月下旬から8月上旬にかけては、石材の表面を水が流れ落ちるほど濡れている。II)壁面に非接触な装飾石材 どの壁にも接触していない石材の年間の濡れの変動を図10に示す。装飾の位置は図2の装飾D～Gである。図より壁面に非接触な石材は、冬期に乾燥し、夏期に濡れ色を示す。また、夏期、冬期間わらず1年中濡れている部分がある。1年中濡れを示す要因としては、冬期、夏期間わらず天井面からの水の落下が確認されていることから、天井面からの水の落下の影響が考えられる。天井部の年間の濡れ状況を図11に示す。図より玄室天井部は1年中濡れている。濡れは天井部から北側壁面に広がっている。



図9 北側壁面に接触する装飾の濡れの推移 (目視観察)



図10 壁面に非接触な装飾の濡れの推移 (目視観察)

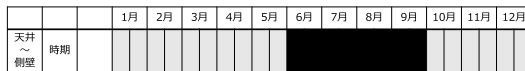


図11 天井～側壁の濡れの推移 (目視観察)

## 4: 熱水分解析モデルによる装飾の濡れのメカニズムの検討

### 4.1 基礎式<sup>7)</sup>と解析モデル

本解析では、熱水分移動の駆動力として温度と水分化学ポテンシャルを用いる熱水分同時移動方程式を用いる<sup>7)</sup>。以下に基礎方程式を示す。記号の説明は本文の最後に記載している。

熱収支式:

$$c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot [(\lambda + r\lambda'_{Tg})\nabla T + r\lambda'_{\mu g}(\nabla\mu - \mathbf{ng})] \quad (4.1)$$

水分収支式:

$$\rho_w \frac{\partial \psi}{\partial \mu} \frac{\partial \mu}{\partial t} = \nabla \cdot [\lambda'_{\mu}(\nabla\mu - \mathbf{ng}) + \lambda'_{T} \nabla T] \quad (4.2)$$

石室空間の熱収支式:

$$c_V V_r \frac{\partial T_r}{\partial t} = \sum_{j=1}^{m1} S_j \alpha_r (T_j - T_r) + c_V V_r N_r (T_b - T_r) + Q_r \quad (4.3)$$

石室空間の水分収支式:

$$c'_{V_r} V_r \frac{\partial P_{V_r}}{\partial t} = \sum_{j=1}^{m1} S_j \{ \alpha' (P_{V_j} - P_{V_r}) \} + c'_{V_r} V_r N_r (P_{V_b} - P_{V_r}) + J_r \quad (4.4)$$

屋外側表面の熱境界条件:

$$\alpha_o (T_o - T_s) + r\alpha'_o (P_{V_o}(\mu, T) - P_{V_s}(\mu, T)) + q_{sol} - q_{noc} = -(\lambda + r\lambda'_{Tg}) \frac{\partial T}{\partial x}|_s - r\lambda'_{\mu g} \frac{\partial \mu}{\partial x}|_s \quad (4.5)$$

屋外側表面の水分境界条件:

$$\alpha'_o (P_{V_o}(\mu, T) - P_{V_s}(\mu, T)) + J_s = -\lambda'_{\mu} \frac{\partial \mu}{\partial x}|_s - \lambda'_{T} \frac{\partial T}{\partial x}|_s \quad (4.6)$$

ただし、ここで用いる、及びは墳丘部の植生を考慮した総合熱コンダクタンス、及び湿気コンダクタンスである<sup>8)</sup>。

石室内表面の熱境界条件:

$$\alpha_r (T_r - T_s) + r\alpha'_r (P_{V_r}(\mu, T) - P_{V_s}(\mu, T)) = -(\lambda + r\lambda'_{Tg}) \frac{\partial T}{\partial x}|_s - r\lambda'_{\mu g} \frac{\partial \mu}{\partial x}|_s \quad (4.7)$$

石室内表面の水分境界条件:

$$\alpha'_r (P_{V_r}(\mu, T) - P_{V_s}(\mu, T)) = -\lambda'_{\mu} \frac{\partial \mu}{\partial x}|_s - \lambda'_{T} \frac{\partial T}{\partial x}|_s \quad (4.8)$$

本解析で用いるモデルを図12に、計算条件を表1に示す。解析に用いる外気の温湿度は2012年8月5日～2013年8月5日に釜尾古墳の南側屋外で測定した値を用いた。降雨量は、熊本地方気象台で同時期に測定された値を用いた。日射量は釜尾古墳の南側で同時期に測定した垂直面日射量の値から、直散分離計算を行い、そこからさらに方位による壁面への鉛直面全天日射量及び水平面全天日射量を算出した。なお直散分離計算は、Bouguerの式とBerlageの式を用い<sup>9)</sup>、南鉛直面全天日射量の測定値に一致するように大気透過率を補正することにより行った。夜間放射量はBruntの式を用いて算出した。石室内空気は入口、羨道、玄室上下の4質点とし、周囲の壁体と隣室との換気による熱水分流の収支から算出する。各室間の換気量はベルヌーイの式から算出した<sup>注2)</sup>。また鉄扉の隙間を介して生じる外気との換気量は入室後の内部のCO2の濃度減衰と温度の測定を行い、計算結果が実験値と一致するように鉄扉の隙間面積を同定した。墳丘を構成する材料の熱水分物性値は文献値を用いた<sup>2)</sup>。墳丘を構成する材料は、南側鉄扉

は鉄の物性値、墳丘の盛り土及び地盤は版築土の物性値、玄室上部のコンクリートドームで覆った部分はコンクリートの物性値、装飾石材及び石室表面の安山岩は凝灰岩の物性値を用いた。外気側の総合熱コンダクタンス、湿気コンダクタンス、及び石室内空気側の総合熱伝達率、湿気伝達率を表2に示す。結露発生の判定は材料表面の水分化学ポテンシャルが0 [J/kg] (材料表面の相対湿度が100 [%]) かつ、水分流の向きが空気から材料表面である時とした。

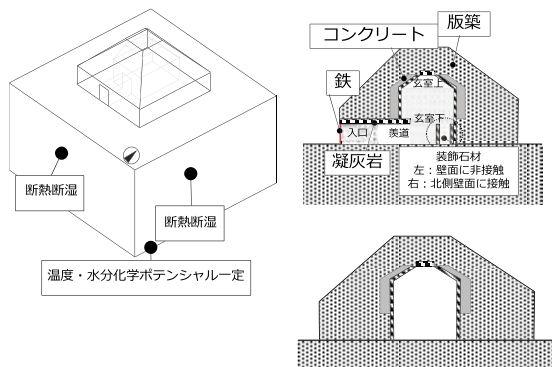


図12 (左)3次元解析モデル(右上)南北断面図(右下)東西断面図

表1 解析条件

解析領域	墳丘(9.54m×9.54m×6.0m)と周辺地盤(29.54m×29.54m×10m)	
境界条件	地盤の東西南北方向	第2種境界条件(断熱断湿)
	地盤(下)	第1種境界条件(地下10mで一定温度【温度17.5℃ 水分化学ポテンシャル-7J/kg】)
	地表面及び石室内表面	第3種境界条件(石室内湿度は解析値、外界気象条件は測定値及び熊本市気象台の測定値を使用)
計算方法	前進型有限差分法	
空間刻み	125(X南北方向)×125(Y東西方向)×70(高さ方向)	
石室内空間の質点	入口、羨道、玄室(上)、玄室(下)の4質点	

表2 空気側の熱水分伝達係数

外気側総合熱コンダクタンス $\alpha_o$	11.65[W/m <sup>2</sup> K]
外気側湿気コンダクタンス $\alpha_{o,p}$	2.2×10 <sup>-6</sup> [kg/m <sup>2</sup> sPa]
石室内空気側総合熱伝達率 $\alpha_r$	6.4[W/m <sup>2</sup> K]
石室内空気側湿気伝達率 $\alpha_{r,p}$	2.8×10 <sup>-6</sup> [kg/m <sup>2</sup> sPa]

## 4.2 モデルの再現性の確認と玄室内濡れ要因の検討

### 4.2.1 モデルの再現性の確認

図13～16に玄室、入口の温度と絶対湿度の実測値と解析値の比較を示す。図より、石室内湿度の解析値は実測値を大略再現できている。以下では、このモデルを用いて、石室内の濡れのメカニズムについて検討を行う。

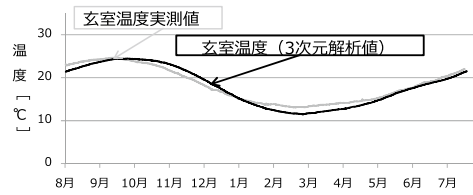


図13 玄室温度の解析値と実測値の比較



図14 入口温度の解析値と実測値の比較

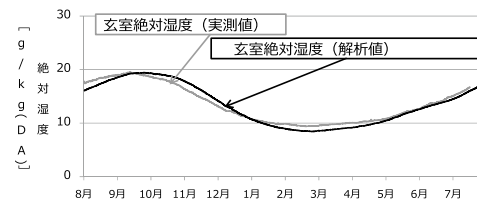


図15 玄室絶対湿度の解析値と実測値の比較



図16 入口絶対湿度の解析値と実測値の比較

### 4.2.2 玄室内濡れ要因の検討

図17～図22に1月と8月の結露位置と温度分布(南北断面と平面)の解析結果を示す。図より、結露は、冬期は天井面で、夏期は北側壁面下部で発生している。玄室内の相対湿度は1年中100%に近い値であるため、玄室壁面で相対的に温度の低い位置で結露が発生する。これより冬期に天井面で結露が生じるのは、外気が地盤よりも温度が低く墳丘が冷やされるため、相対的に天井面の温度が低くなるからであり、夏期に北側壁面下部で結露が生じるのは、外気が地盤よりも温度が高く、また北側壁面が最も日射による受熱量が小さいため、相対的に北側壁面の温度が低くなるからである。

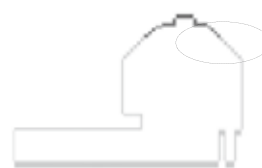


図17 1月の結露位置



図18 8月の結露位置

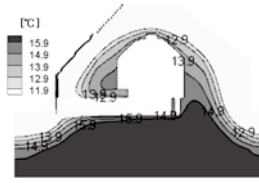


図19 1月5日の温度分布  
南北断面図

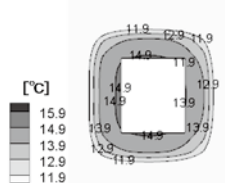


図20 1月5日の温度分布  
平面図 GL+3.0m

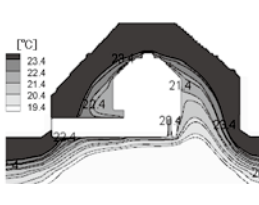


図21 8月5日の温度分布  
南北断面図

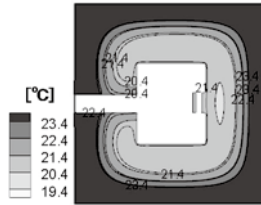


図22 8月5日の温度分布  
平面図 GL+0.5m

(I)北側壁面に接触する装飾、(II)壁面に非接触な装飾、(III)天井面の水分化学ポテンシャルの年変動(1月1日～12月31日)を図23～25に示す。図23～25の解析結果と図9～11の装飾の濡れの目視観察の結果の比較より、それぞれの濡れと乾燥の時期と位置の対応関係を以下で検討する。図9と図23より、(I)の北側壁面に接触する装飾において夏期に濡れが生じ、冬期に乾燥するという点で実測と解析の結果は一致する。図10と図24より、(II)の壁面に非接触な装飾において夏期に濡れ色を示し、冬期に乾燥するという点で実測と解析結果は一致する。図11と図25より、(III)の天井面において、冬期に濡れるという点では解析と実測の結果は一致するが夏期の濡れは、解析では再現できていない。石室内空気の相対湿度は1年中100%に近く結露が発生しやすい環境にあるが、夏期の石室壁面の温度分布としては、天井部が高く、北側壁面下部が低いいため、夏期の結露は北側壁面下部で発生する。そのため、夏期の天井部の濡れは結露以外が要因であると考えられる。結露以外の濡れ要因として天井部コンクリート層の劣化による墳丘上部からの浸透雨水の影響が考えられ、以下ではこれを考慮した解析による検討を行う。解析モデルは、天井部の一部に幅10cmのひび割れ層を作り、ひび割れ層の重力方向の透水係数を10000倍とする変更を行って計算を行った。コンクリートにひび割れ層がない場合をCASE1、ひび割れ層がある場合をCASE2とした。図26に解析結果を示す。CASE2では、天井ひび割れ部で1年中水分化学ポテンシャルは飽和に達している。従って天井面の濡れの要因は、夏期は天井上部の水の浸透、冬期は天井上部の水

の浸透と石材表面の結露であることが考えられる。なお、CASE2の石室内温湿度と他の部位の結露性状はCASE1と殆ど差が生じなかった。従って、コンクリートのひび割れ層を考慮することで石室内の温湿度と濡れ性状は本モデルで十分再現できているといえる。

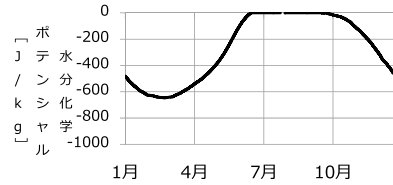


図23 北側壁面に接触する装飾の水分化学ポテンシャルの年変動

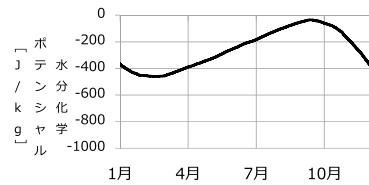


図24 壁面に非接触な装飾の水分化学ポテンシャルの年変動

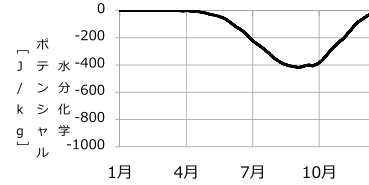


図25 玄室天井部の水分化学ポテンシャルの年変動

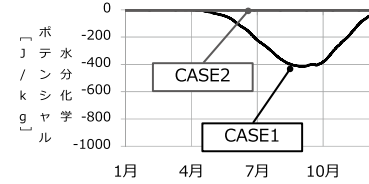


図26 コンクリート層のひび割れの有無による玄室天井部の水分化学ポテンシャルの年変動の比較

次にコンクリート層のひび割れが無いCASE1の場合の玄室内の結露の挙動を検討する。図27、28に換気による水分移動量の解析結果を示す。図より、夏期に入口から玄室へと水分が持ち込まれ、冬期に玄室から入口へと水分が持ち出される挙動を示す。つまり、換気によって夏期は加湿、冬期は除湿されている。次に図29に玄室全壁面からの蒸発量、図30に玄室天井面と床面の蒸発量の解析結果を示す。図29より玄室内は夏期に凝縮傾向、冬期に蒸発傾向である。これは、入口から玄室への換気による水分の持ち込みの影響が大きい。また図30より夏期は天井面で蒸発し床面で凝縮し、冬期は床面で蒸発し天井面で凝縮している。図31に外気からの水分流入量と入口壁面の蒸発量を示す。図31より、夏期において外気からの水分流入と入口付近の壁面からの蒸

発が生じている。これより夏期に入口付近が高湿になる要因は、外気からの水分流入と入口付近の壁面からの蒸発であり、入口付近の壁面からの蒸発の方が外気的水分流入量より大きい。また、冬期においては外気への水分流出と入口付近の壁面への凝縮が生じている。冬期に入口付近が乾燥する要因として、乾燥した外気が流入すること、鉄扉が低温になることによって扉の内側で結露が生じ入口付近の空気が除湿されることが影響しているといえる。以上から考えられる玄室内の装飾の結露抑制方法は、夏期の結露に対しては、①入口の温度上昇に伴う水分発生を抑制し玄室への加湿を抑えること②外気との換気によって玄室が加湿される期間は外気との換気量を極力少なくすること③玄室内での蒸発・凝縮傾向を抑制するために玄室壁面の上下及び東西南北の温度差を小さくすること、の3点が考えられる。冬期の結露に対しては、①入口及び鉄扉の温度低下を促進し、玄室の除湿を促すこと②外気との換気によって除湿される期間は、外気との換気量を増やすこと③玄室内での蒸発・凝縮傾向を抑制するために玄室壁面の上下及び東西南北の温度差を小さくすることの3点が考えられる。

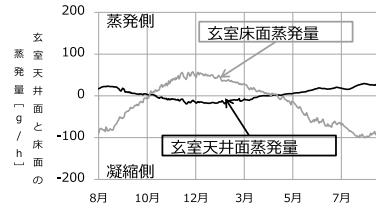


図30 玄室天井・床面の蒸発量(解析値)

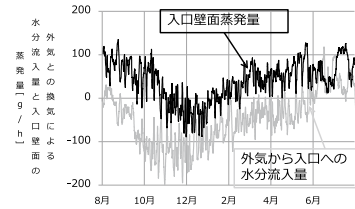


図31 外気との換気による水分流入量と入口壁面の蒸発量(解析値)

## 5：釜尾古墳の適切な保存施設の検討

### 5.1 2次元モデルと3次元モデルの比較

本節では釜尾古墳の現保存施設の適切な改修方法の検討を行う。再現性を確認した3次元モデルでは、計算が煩雑となるため、墳丘を南北で切断した2次元モデルを作成し、3次元モデルと比較しその温湿度及び結露の挙動を確認した後、本章の検討を行う。2次元の解析モデルは図12(右上)と同じ形状を用いた。なおモデルはコンクリート層のひび割れはないものである。図32、33に玄室の温度と絶対湿度の3次元モデルと2次元モデルの解析結果の比較を示す。図より、2次元モデルは3次元モデルよりも年較差がやや大きくなり、夏期の最大となる時期がやや速くなる傾向があるが、その挙動は一致した。続いて図34、35に装飾面の年間の結露量と天井面の年間の結露量の3次元モデルと2次元モデルの解析結果の比較を示す。図より、北壁面及び天井面の結露量は2次元と3次元の解析値において、量的には差が生じるが、結露時期や結露量の増減の性状は一致している。従って、石室内温湿度と結露性状を把握する上で2次元モデルにおいても十分検討が可能と言える。

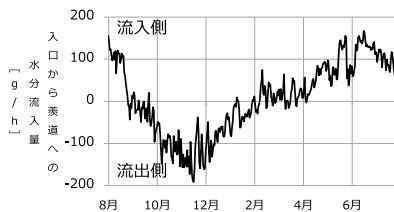


図27 換気による入口から羨道への水分移動量(解析値)

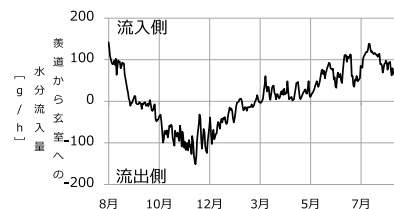


図28 換気による羨道から玄室への水分移動量(解析値)

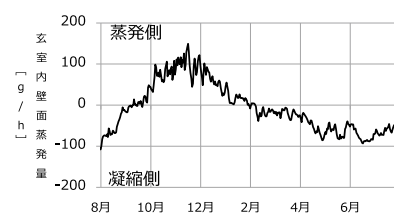


図29 玄室内壁面の蒸発量(解析値)

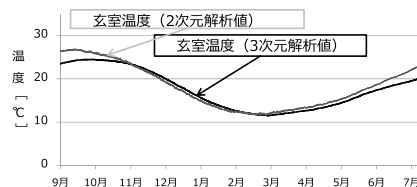


図32 玄室温度の3次元と2次元の解析値の比較

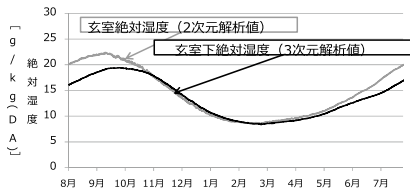


図33 玄室絶対湿度の3次元と2次元の解析値の比較

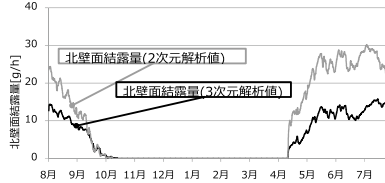


図34 玄室北壁面結露量の3次元と2次元の解析値の比較

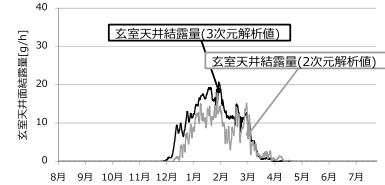


図35 玄室天井面結露量の3次元と2次元の解析値の比較

## 5.2 結露抑制方法の検討

4章までの検討から考えられる結露抑制対策として、CASE A：外気との換気量に関する対策、CASE B：夏期の入口付近の温度上昇に関する対策、CASE C：玄室内での温度差の抑制に関する対策の3つのケースに分類できる。表3に示すように、CASE A～CASE Cのそれぞれの条件について個別に解析を行い、装飾の劣化要因となる北側壁面に接触する装飾石材表面と玄室天井面における結露発生期間や結露量を比較した（図37～39）。CASE B、CASE Cで用いた断熱材は非透湿とし、熱伝導率は $0.037 [W/m \cdot K]$ であり墳丘の断熱の際には厚みは $0.1[m]$ のものを用いた。CASE C-1は図36のように断熱した。得られた結果は以下の通りである。

①CASE Aについて：図37に示す様に、外気の方が石室空気よりも乾燥している時期は積極的に換気を行い、外気の方が湿潤な時期は扉を密閉し換気を行わない方法(CASE A-4)で最も結露を抑制することができた。特に冬期の玄室天井の結露に対して抑制効果が高い。

②CASE Bについて：図38に示す様に、鉄扉は日射遮蔽を行うと、夏期及び冬期の結露に対して抑制効果がある。鉄扉を断熱した場合、夏期のピーク時の結露は抑制できるが、冬期の結露は助長する傾向にある。

③CASE Cについて：図39に示すように、墳丘部を断熱した場合、夏期及び冬期の結露に対して抑制効果があった。これ

は、石室内の石材表面の温度差が小さくなり、石室内での蒸発が抑制されたことと、断熱材が非透湿材であるため、石室の壁や天井からの水分供給が抑制されたためである。一方墳丘部の日射を遮蔽した場合、結露発生を助長する結果となった。図40、図41はCASE Aにおいて装飾石材表面の温度と相対湿度の比較を行ったものである。図より、外気の乾燥時期に外気との換気を積極的に行った場合、石材の冬期の相対湿度が最低98.2%まで低下する。従って、外気との換気を行う場合、乾燥による塩の析出や彩色の剥離など、別の劣化を引き起こす可能性があり、注意が必要である。

表3 結露抑制対策の検討条件

- CASE A 外気との換気量の検討
  - A-1. 開口0にした場合
  - A-2. 開口3倍にした場合
  - A-3. 開口40倍にした場合
  - A-4. 開口40倍にした場合（外気A H ≥ 入口空気 AH の場合密閉）

- CASE B 夏期の温度上昇抑制の検討
  - B-1. 扉の日射遮蔽を行った場合
  - B-2. 扉の断熱をした場合（断熱材 2cm）
  - B-3. 扉の断熱をした場合（断熱材 10cm）
  - B-4. 扉の日射遮蔽+断熱をした場合（断熱材 2cm）
  - B-5. 扉の日射遮蔽+断熱をした場合（断熱材 10cm）

- CASE C 玄室内の温度差抑制の検討
  - C-1. 墳丘を断熱した場合
  - C-2. 墳丘の日射遮蔽を行った場合

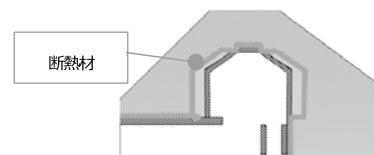


図36 CASE C-1

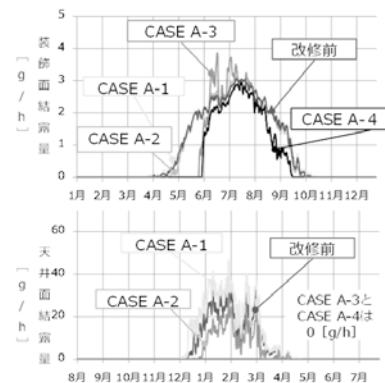


図37 CASE Aの結露量の比較（上：装飾面結露量、下：天井面結露量）

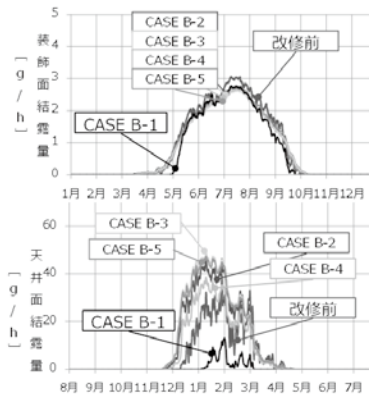


図38 CASE Bの結露量の比較（上：装飾面結露量、下：天井面結露量）

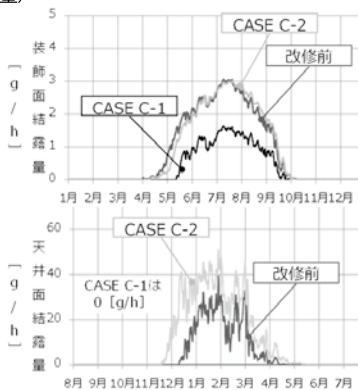


図39 CASE Cの結露量の比較（上：装飾面結露量、下：天井面結露量）

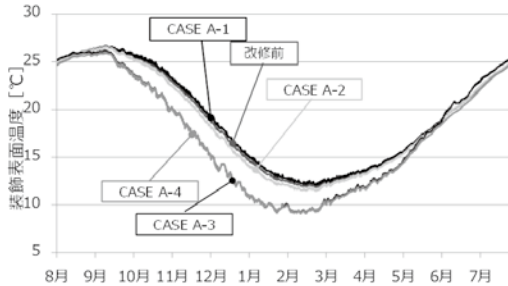


図40 CASE Aの装飾石材表面温度の比較

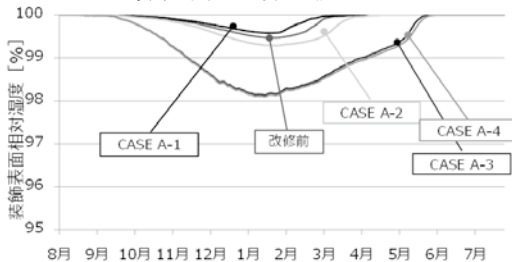


図41 CASE Aの装飾石材表面相対湿度の比較

### 5.3 最適な改修方法の決定（外気との換気を積極的にを行った場合）

5.2節の検討結果を踏まえて、保存施設の最適な改修方法の決定を行う。本節では結露量の抑制のみを目的とし、外気との換気を積極的にを行う方法も検討の対象とする。このとき、入口の改修方法についてはCASE AとCASE Bが互いに影響を及ぼしあうため、まずCASE AとCASE Bを組み合わせただ中で、年間結露量を最も抑制できる方法を決定す

る。検討したケースは表4の5条件である。図42は各条件における年間の結露量を比較したものである。図より、外気の乾燥時期に積極的に換気を行い、鉄扉の日射を遮蔽する条件であるCASE A-4+B-1の場合で最も結露を抑制することができた。以上よりこれを入力改修方法として決定した。墳丘部の改修方法は5.2節より、墳丘部を断熱する方法が最も適切であるため、これらを複合した場合の解析を行った。図43に年間の結露量を示す。図より、改修後の結露量は玄室天井、装飾石材の両方で0 [g/m<sup>2</sup>]となっている。これより、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、墳丘部を断熱することで結露抑制効果が非常に大きいといえる。

### 5.4 最適な改修方法の決定（外気との換気を行わない場合）

5.3節で、外気の乾燥時期に積極的に換気を行うことで、玄室内結露量を抑制できることを示した。しかし、外気との換気は、虫やカビの持ち込み、乾燥による塩の析出や彩色の剥離といった別な劣化要因が懸念される。そこで本節では、外気との換気を行わない場合における改修方法の検討を行

表4 入口の改修方法の検討条件

CASE A-4	開口面積40倍（外気A H≧入口空気AHの場合密閉） ⇒冬期の天井面結露抑制に有効
CASE B-1	入口鉄扉の日射遮蔽 ⇒冬期の天井面+夏期の装飾石材結露抑制に有効
CASE B-5	入口鉄扉の日射遮蔽と断熱(断熱材10cm) ⇒夏期のピーク時の結露抑制に有効
CASE A-4+B-1	開口面積40倍（外気A H≧入口空気AHの場合密閉） + 入口鉄扉の日射遮蔽（鉄扉に当たる日射量を0Wとした場合）
CASE A-4+B-5	開口面積40倍（外気A H≧入口空気AHの場合密閉） + 入口鉄扉の日射遮蔽と断熱(断熱材10cm)

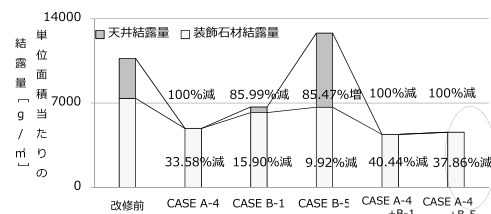


図42 年間の結露量の比較

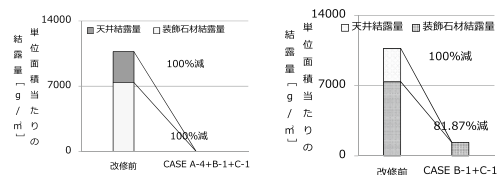


図43 年間の結露量の比較（外気との換気を積極的に行った場合）

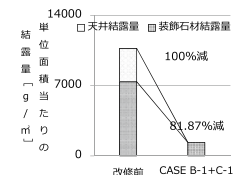


図44 年間の結露量の比較（外気との換気を行わない場合）

う。5.2節での検討より、外気との換気を行わない場合に最も結露量を抑制できるのは、入口鉄扉の日射遮蔽を行い、墳丘部を断熱する方法である(CASE B-1+C-1)。年間の結露量の解析結果を図44に示す。改修後、天井面の結露量は0 [g/m<sup>2</sup>] となったが、夏期の装飾石材の結露は未だ発生している。そこで次節では、この夏期の装飾石材の結露を抑制するために除湿機などの設備を用いた場合、結露発生量や石室内温度がどのような挙動を示すか検討を行う。

### 5.5 空調設備を用いた場合の検討

検討した条件は表5に示す4通りである。CASE D-1は5.4節で決定した改修方法であり、CASE D-2～CASE D-4はCASE D-1の条件下で設備を用いた場合である。CASE D-2は玄室内の装飾石材の表面温度における飽和水蒸気圧が、玄室空気の水蒸気圧の解析値を下回った場合に、除湿機を稼働させた場合であり、CASE D-3は玄室内の装飾石材の表面温度における飽和水蒸気圧が、玄室空気の水蒸気圧の解析値を下回った場合に、冷房除湿を行った場合である。またCASE D-4は装飾石材の表面温度における飽和水蒸気圧が、玄室空気の水蒸気圧の解析値を下回った部位に対し、20 [W/m<sup>2</sup>] の放射暖房を行った場合である。なお、CASE D-2の除湿運転は、除湿した際の凝縮熱を顕熱として玄室空間に与えた場合を想定し、CASE D-3の冷房除湿運転は、除湿した際の凝縮に伴う発熱分を冷房により取り去るとした場合を想定している。CASE D-2～CASE D-4の詳細な条件は表6に示す通りである。

表5 設備を用いた場合の検討条件

CASE D-1	墳丘断熱+日射遮蔽
CASE D-2	CASE D-1+ 夏期に除湿を行った場合
CASE D-3	CASE D-1+ 夏期に冷房除湿を行った場合
CASE D-4	CASE D-1+ 夏期に石材表面に放射暖房を当てた場合

表6 CASE D-2～D-4 の詳細な条件

	$J_y = \alpha'_i \times S \times (P_{v_i} - P_{v_{sat}})$
CASE D-2	$P_{v_i} > P_{v_{sat}}$ のときに除湿機を稼働させる。除湿量 $J_y$ に対する凝縮熱は、顕熱として玄室空間に与える。 $\alpha'_i$ : 玄室内の湿気伝達率(=2.8×10 <sup>8</sup> ) [kg/m <sup>2</sup> sPa] S: 除湿部分の面積(=1.0) [m <sup>2</sup> ] 玄室空気の水蒸気圧 [Pa] $P_{v_{sat}}$ : 除湿面の飽和水蒸気圧 [Pa] (除湿面の温度は0℃) $P_{v_a}$ : 北側装飾石材の温度における飽和水蒸気圧 [Pa]
CASE D-3	$J_y > 0$ のときに除湿機を稼働させる。冷房除湿運転では除湿による凝縮熱分を冷房する。
CASE D-4	玄室空気の水蒸気圧が装飾石材表面の飽和水蒸気を上回った時に、20の放射暖房を装飾石材に当てる。

図45に年間の結露量の比較を示す。図より年間の結露量はCASE D-2～CASE D-4において、ほぼ0 [g/m<sup>2</sup>] となり、抑制できている。従って装飾の結露時期に玄室空間を除湿や冷房除湿、あるいは石材表面に放射暖房を当てることで結露を抑制できる。図46にCASE D-2、D-3における機械の除湿量を示す。図より、少ない除湿量で効果的に装飾の結露を抑制できるのはCASE D-3の冷房除湿を行った場合である。これは、夏期の玄室空間の温度上昇を抑制することで、壁面からの蒸発量を抑制できるためである。図47～50は、CASE D-1とCASE D-4の夏期の温度分布と水分化学ポテンシャル分布を比較したものである。図より放射暖房を行った場合、北側壁面の装飾壁画での結露は抑制できているが、相対的に温度の低い、北側壁面中央部で結露が発生している。これより、装飾自体を暖めることで、装飾自体の結露は抑制できるが、別の場所で結露し、その結露水が落下する危険性が考えられる。従って、夏期の装飾石材の結露を、放射暖房を用いて抑制する場合には、他の部位での結露発生に注意が必要である。

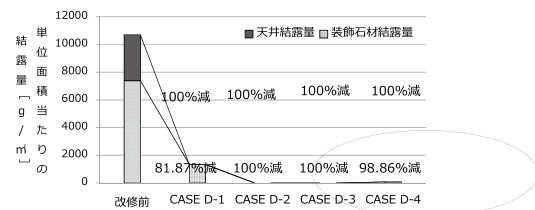


図45 年間の結露量の比較

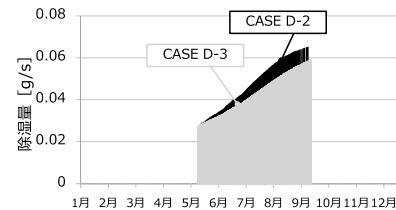


図46 機械の除湿量の比較

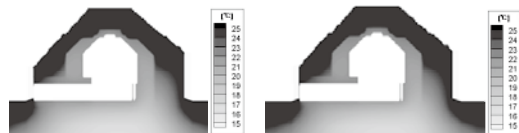


図47 CASE D-1の8月の温度分布 図48 CASE D-4の8月の温度分布



図49 CASE D-1の8月の水分化学ポテンシャル分布 図50 CASE D-4の8月の水分化学ポテンシャル分布 [J/kg]

## 6：地震被災後の一時的対策の検討

### 6.1. 被災への対策による影響と原因

#### (a) 地震後の状態とその対策による影響

釜尾古墳では地震後にブルーシートで覆った後で主に2つの変化が生じていることを確認している。一つ目は墳丘の砂状化である。このまま進行すれば間隙水が失われて墳丘が崩壊してしまうリスクがあるため対策が必要である。二つ目は結露水の減少である。2018年8月29日及び2019年2月11日の古墳内調査における目視観察結果と第3章の調査結果を比べると石室内部の表面の結露状態は両時期ともに減少していた。装飾顔料の劣化原因を結露水と推測し、その抑制を検討していたため、結露抑制はよいといえるが、乾燥に伴う塩の析出の進行は懸念される。

#### (b) 乾燥化の原因

これら乾燥の原因は、ブルーシートの非透水性によって雨水が浸透せず流れ去り、水供給が抑えられたためであると考えられる。そこで液水を透過するシートの使用を検討する。以降、このシートを透水シートと称する。本研究では、ブルーシートによる墳丘の乾燥化と、その抑制策として透水シートを用いることの効果について、数値解析による検討を行う。

### 6.2. ブルーシート、透水シートの日射吸収率

シートの日射吸収率は入射日射量や地面の日射反射率を用いて算出できる<sup>11)</sup>。2018年10月25日から12月19日の期間に、京都大学桂キャンパスの建物屋上にて乾燥状態と湿潤状態で測定を行い、日射吸収率を算出した(表3.1)。数値解析では濡れの有無にかかわらず一定値とし、ブルーシートで0.66[-]、透水シートで0.95[-]とした(表7)。

表7 日射吸収率

表面状態	ブルーシート		透水シート	
	乾燥	湿潤	乾燥	湿潤
日射吸収率	0.684	0.662	0.949	0.949

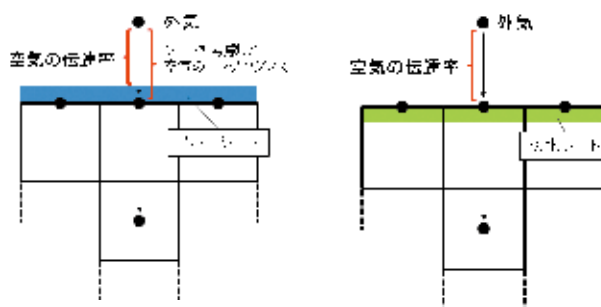
### 6.3. 数値解析による一時的保存方法の検討

#### 6.3.1. 解析モデル化

解析には、第4章<sup>10)</sup>で示した熱水分同時移動方程式を用いた二次元モデルにシートを考慮したものに拡張したものを使用する。扉に対する日射遮蔽は現地での対策と同様にシートの被覆と同時に開始したものとした。初期条件にはある初期条件から15年間

計算して得たものを用いた。

墳丘を被覆するシートのモデル化の概要を図51に示す。ブルーシートは降水の浸入がない(液水移動が0)が水蒸気の移動はあるものとし、外気側表面のコンダクタンスにブルーシートのものを考慮した。熱コンダクタンスは材質をポリエチレン、厚みを0.3mmとし、ポリエチレンの熱伝導率は文献値<sup>12)</sup>を用いた。湿気コンダクタンスは、ブルーシートの湿気伝導率の測定値がないため第4章で用いた値を1/2倍とすることで、シートに湿気移動が妨げられる程度を考慮した。透水シートは降水の浸入や水蒸気移動が共にあるものとし、熱水分物性値については透水係数のみ試験値<sup>13)</sup>を用い、それ以外は版築<sup>14)</sup>とグラスウール<sup>15)</sup>の物性値を元に推定を行った。具体的には解析プログラムに使用している版築の飽和含水率、比熱等の熱水分物性をグラスウールの値に合わせて定数倍した。



a) ブルーシートのモデル

b) 透水シートのモデル

図51 シートのモデル化

#### 6.3.2. 適切な一時的保存方法の検討

検討にはブルーシートと透水シートをそれぞれ使用した場合について解析を行い比較する。なお、一時的保存方法の効果を評価する上で、以下の点に留意した。

- ・墳丘における乾燥化を示す墳丘の含水率
- ・装飾の顔料流出を引き起こす天井面及び北面装飾での結露量の程度
- ・装飾を汚損させる塩析出に關係する水分蒸発量の程度

また本格的な改修を5年後と想定し、それまでにより安定した環境を保持できる保存方法をより適切とする。

図52に6年目8月の元の墳丘(シートなし)、ブルーシート、透水シートに対して得られた含水率分布を示す。図よりブルーシートの場合、乾燥化を大きく進行させてしまうが、透水シートを使用すればシートなしと



おおよそ同程度の水分状態が保持できることが分かる。図53, 54に北面装飾表面及び、玄室天井での結露量分布を示す。透水シートはシートなしとほぼ同等の推移を示す一方、ブルーシートではシートなしと比較して北面装飾において減少し、玄室天井において4年目は高いが、5年目は減少した。後者はブルーシートの日射吸収率が低いことで冬期の温度が低下し、墳丘の水分が抜

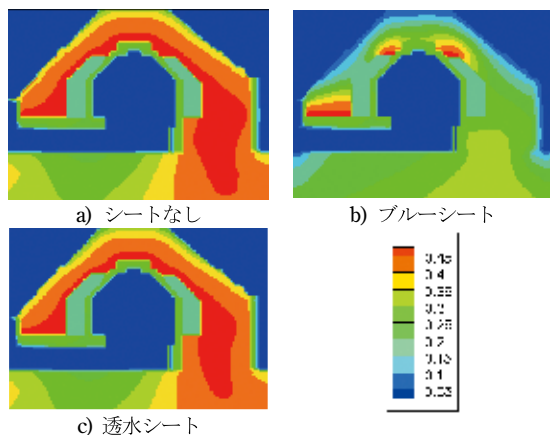


図52 墳丘含水率分布(6年目8月)

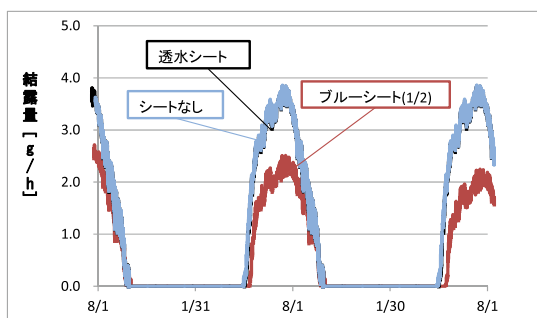


図53 北面装飾における結露量(4年目8月～)

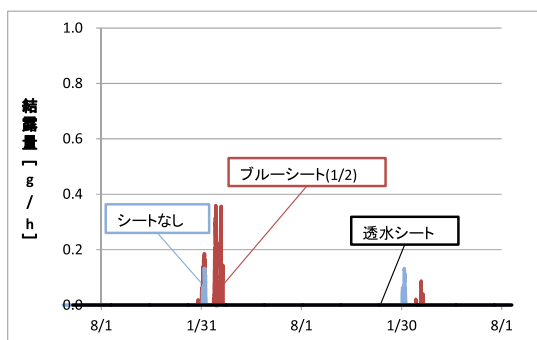


図54 玄室天井における結露量(4年目8月～)

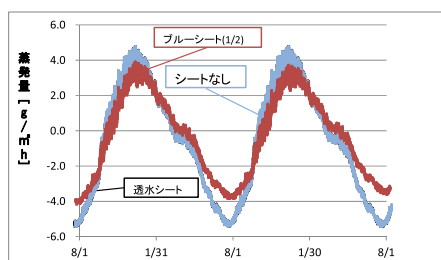


図55 北面内側における蒸発量(4年目8月～)

けていく過程でこのような挙動を示したと考えられる。図55に北面内側表面における蒸発量を示す。図より透水シートはシートなしとほとんど差がなく、ブルーシートは減少している。

ブルーシートを使用すると、墳丘内側における蒸発量を抑制し結露量を減少させるため、塩の析出と結露水の流下による装飾の劣化を抑制することができる。ただし、本解析ではその差がほとんど確認できていないがブルーシートにより乾燥化が進むことで石室内の相対湿度が低下し、それに伴う塩の析出につながる可能性が懸念されるので注意が必要である。透水シートを使用すると、多少の変化はあるものの、シートなしとほとんど変わらないという結果が得られた。

得られた結果について評価をおこなったものを表8に示す。表より改修までの一時的保存にはより安定した結果の得られる透水シートが適切であると考えられる。

表8 乾燥抑制に関する検討結果のまとめ

原因	墳丘の乾燥		装飾の劣化	
	雨水遮断/水分蒸発	塩の析出	液水の落下流下	結露量
判断基準	墳丘の含水率	蒸発量	結露量	
時期/位置	夏季	冬季	夏季/装飾	冬季/天井
透水シート	維持	維持	維持	少し改善
ブルーシート	悪化	悪化	少し改善	改善

## 7. 結論

本研究では、釜尾古墳を対象として、壁画の劣化要因と推定される装飾の濡れのメカニズムを明らかにすることと、その上で、現保存施設の適切な改修方法の提案を行うことを目的として以下の検討を行った。まず現地調査における石室内の濡れ性状の分析より、以下のことが分かった。

- (1) 北側壁面に接触する装飾石材は冬期に乾燥、夏期に石材表面全体が濡れている。
  - (2) 壁面に非接触な石材は冬期に乾燥し、夏期に濡れ色を示す。また、夏期、冬期間問わず1年中濡れている部分がある。
  - (3) 玄室天井部は1年中濡れており、濡れは天井部から北側壁面に広がっている。
- 次に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、以下のことが分かった。
- (4) 石室内の濡れの要因として以下が分かった。I) 北側壁面に接触する装飾石材は、夏期において、外気温が地盤温度よりも高く、また墳丘の北側で日射による受熱

量が最も小さいため、北側壁面下部の温度が相対的に低くなることが要因となって、結露が発生する。Ⅱ)壁面に非接触な装飾石材は、夏期に石材の温度が相対的に低くなるため、含水率が上昇し濡れ色を示す。Ⅲ) 玄室天井部は、夏期は天井上部コンクリート層からの水の浸透、冬期は水の浸透と天井部での結露が影響し、1年中濡れている。

- (5) 夏期の結露発生に対する主な水分供給源は①入口部の高温化により蒸発した水分や高湿な外気が換気により玄室に持ち込まれることと②玄室内の上下温度差による高温部の蒸発した水分である。冬期の結露発生に対する主な水分供給源は玄室内の上下温度差による高温部である床近傍で蒸発した水分である。また年間を通じて天井の浸透雨水の供給も一部含まれる。

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、以下が分かった。

- (6) 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、鉄扉は日射遮蔽を行い、墳丘部を断熱する方法である。

- (7) 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。この方法でも結露が発生する夏期の装飾に対しては、玄室空間に対し冷房除湿（あるいは除湿のみ）を行うか、石材表面に対し放射暖房を行うことで、結露を抑制することができる。ただし、放射暖房を用いた場合には、他の部位での結露発生に注意が必要である。

また、地震被災後の釜尾古墳において懸念されている乾燥化のメカニズムを明らかにし、適切な一時的保存方法を数値解析により検討した結果以下が明らかとなった。

- (8) 墳丘の乾燥化は、ブルーシートの非透水性と透湿性によって降雨による給水が抑えられる一方で、墳丘表面から外気への蒸発は一部しか抑えられないことが原因だと考えられる。

- (9) 雨水を浸透させる透水シートで墳丘を覆うことによる一時的保存は、結露では一概には言えないが、ブルーシートで墳丘を覆う場合より墳丘の乾燥化を進行させず、総合的により適切であると考えられる。

今後の課題として、今回簡易にモデル化を行って数値解析を行った被災後の墳丘の保護のための透水シートの透水性に関して物理的特性をより詳しく調べる必要がある。現在その検討を行っており、墳丘への適切な水分保持との関係も含めた検討を行う必要がある。

#### 謝辞

本研究の実施にあたり、熊本県立装飾古墳館・学芸課長：坂口圭太郎氏、熊本市役所文化振興課・三好栄太郎氏をはじめとする方々にご協力いただいた。また、本研究の一部は、平成27年度科学研究費補助金基盤(B)(課題番号26289203 研究代表者：銚井修一)の助成を受けた。記して感謝申し上げます。

#### 注

- 1) 外気温湿度は、2013年1月31日～2013年4月26日の期間は、欠測したため熊本地方気象台の観測値を用いた。
- 2) 開口は南面の鉄扉の単一の開口であるため、風力換気の影響は極めて小さいと考え、重力換気の影響のみを考慮した。玄室上・下間の換気量は、羨道と玄室間の換気量 $M[m^3/s]$ を元に玄室下温度の実測値に一致するように同定を行った。この時、玄室上温度 $<$ 玄室下温度の場合は、 $M \times 3.5 [m^3/s]$ とし、玄室上温度 $\geq$ 玄室下温度の場合は、空気は成層化し、重力換気が生じにくいことを考慮し、 $M \times 0.5 [m^3/s]$ とした。

#### 参考文献

- 1) D. Lacanette, S. Vincent, A. Sarthou, P. Malaurent, J.P. Caltagirone: 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, Issues 11-12, pp.2528-2542, 2009.5
- 2) 李永輝, 小椋大輔, 銚井修一, 石崎武志: 高松塚古墳の発掘前後の石室内温湿度環境変化と応急保存対策の効果の解析, 日本建築学会環境系論文集, 第658号, pp.1041-1050, 2010.12
- 3) 小椋大輔, 銚井修一, 高橋公一, 木村奈津子: 闘鶏山古墳の石槨内部発掘調査時の空調制御方法に関する研究, 保存科学, No.50, pp.23-33, 2011

- 4) 池田朋生：装飾古墳石室内での温湿度、彩色の見えを対象としたモニタリングシステムの構築 研究報告書、熊本県立装飾古墳館発行、2010
- 5) 文化財保護委員会監修：装飾古墳の修理—熊本県釜尾古墳—月刊文化財、昭和42年10月号、1967
- 6) 濱田耕作、梅原未治、島田貞彦：「九州に於ける装飾ある古墳」、京都帝国大学文学部考古学研究報告、第3冊、1919
- 7) 松本衛：新建築学大系10 環境物理 3.湿気、彰国社、1984
- 8) 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.
- 9) 松浦邦男、高橋大次：エース環境工学I—日照・光・音—、朝倉書店、2001
- 10) 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、81巻第730号、pp.1095-1104、2016
- 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) 一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、p73-85、2010
- 12) 国立天文台：理科年表、丸善、2007
- 13) 前田工織株式会社よりデータ提供
- 14) 李永輝：発掘時における古墳壁画の保存環境に関する研究、京都大学博士論文、2010
- 15) 日本建築学会：建築材料の熱・空気・湿気物性値、丸善、2001

式中で用いた記号

$c$ :比熱[J/kg·K]、 $\rho$ :密度[kg/m<sup>3</sup>]、 $T$ :絶対温度[K]、 $\mu$ :水分化学ポテンシャル [J/kg]、 $t$ :時間 [s]、 $x$ :材料内質点間の距離 [m]、 $\lambda$ :熱伝導率 [W/(m·K)]、 $\lambda'_{rg}$ :温度勾配に関する気相水分伝導率 [kg/(m·s·K)]、 $\lambda'_{\mu g}$ :水分化学ポテンシャル勾配に関する気相水分伝導率 [kg/(m·s·(J/kg))]、 $r$ :相変化熱 [J/kg]、 $n$ :鉛直下向きベクトル[-]、 $g$ :重力加速度 (=9.8) [m/s<sup>2</sup>]、 $\rho_w$ :水の密度 [kg/m<sup>3</sup>]、 $\varphi$ :体積含水率 [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]、 $\lambda'_\mu$ :水分化学ポテンシャル勾配に関する水分伝導率 [kg/

(m·s·(J/kg))]、 $\lambda'_T$ :温度勾配に関する水分伝導率 [kg/(m·s·K)]、 $\gamma$ :空気密度[kg/m<sup>3</sup>]、 $V_r$ :石室の容積[m<sup>3</sup>]、 $T_r$ :石室空気の絶対温度 [K]、 $m_1$ :石室表面の質点の数 [-]、 $S_j$ :石室表面の面積 [m<sup>2</sup>]、 $\alpha_r$ :石室空気の熱伝達率 [W/(m<sup>2</sup>·K)]、 $T_j$ :石室壁表面の絶対温度 [K]、 $N_r$ :換気回数 [-]、 $T_b$ :隣室空気の絶対温度 [K]、 $Q_r$ :石室内での発熱量 [W]、 $c'$ :空気の湿気容量 [kg/(m<sup>3</sup>·Pa)]、 $P_{Vr}$ :石室空気の水蒸気圧 [Pa]、 $\alpha'_r$ :石室空気の湿気伝達率 [kg/(m<sup>2</sup>·s·Pa)]、 $P_{Vj}$ :石室壁表面の水蒸気圧 [Pa]、 $P_{Vb}$ :隣室空気の水蒸気圧 [Pa]、 $J_r$ :石室内での水蒸気発生量 [kg/s]、 $\alpha_0$ :外気側熱コンダクタンス [W/(m<sup>2</sup>·K)]、 $\alpha'_0$ :外気側湿気コンダクタンス [kg/(m<sup>2</sup>·s·Pa)]、 $T_0$ :外気の絶対温度 [K]、 $T_s$ :材料表面の絶対温度 [K]、 $P_{V0}$ :外気の水蒸気圧 [Pa]、 $P_{Vs}$ :材料表面の水蒸気圧 [Pa]、 $q_{sol}$ :日射量 [W]、 $q_{noc}$ :夜間放射量 [W]、 $J_s$ :降水量 [kg/m<sup>2</sup>s]、 $\alpha_r$ :石室内空気側熱伝達率 [W/(m<sup>2</sup>·K)]、 $\alpha'_r$ :石室内空気側湿気伝達率 [kg/(m<sup>2</sup>·s·Pa)]

---

2020年3月31日発行  
埋蔵文化財ニュース179号

保存科学研究集会  
遺跡保存に関する最近の動向

独立行政法人国立文化財機構 奈良文化財研究所 埋蔵文化財センター  
〒630-8577 奈良市二条町2-9-1  
お問い合わせ先:0742-30-6733

---

