

# 水蒸気・水・氷－湿気と熱の問題に関する研究事例の紹介 Vapor, Water, Ice – Study on moisture and thermal problem

京都大学大学院工学研究科 建築学専攻 伊庭 千恵美

Chiemi IBA, Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Graduate School of Engineering, Kyoto University

キーワード：熱水分同時移動（Simultaneous heat and moisture transfer）、凍害（Frost damage）、  
調湿（Moisture buffering）、耐久性（Durability）、撥水（Water-repellent）

## 1. はじめに

建築材料や空間の熱湿気挙動を解析する手法は、土壌物理学や熱力学の分野を基礎として確立されてきた。水蒸気の移動に着目した室内調湿や結露防止の検討に加え、近年では液水の浸透による建築材料の劣化やその対策についても研究が進んでいる。本稿では、最初に湿気に関する最近の研究を概観した後、筆者がこれまで行ってきた研究の中から液水浸透および水分の凍結による建築物の劣化に関する2つの事例を取り上げ、それぞれ現地調査で明らかとなったこと、実験による検証、熱湿気解析による劣化予測や撥水剤等による劣化抑制対策の可能性について紹介する。

## 2. 湿気に関するさまざまな研究

### 2-1. 湿気による建築物の害に関する研究

限りある資源やエネルギーの有効活用の観点から、建築分野では建築物の長寿命化や建築材料の耐久性向上は極めて重要な課題である。外界気象条件下に曝される建築物においては、熱や水分、化学物質等様々な要因によって、材料の劣化が進行する。

中でも水分が建築材料の劣化に与える影響は大きく、雨水の浸透や壁内結露による断熱材の性能低下、壁内に滞留した水分による構造木材の腐朽や金属のサビ、塩の析出による汚れや剥離、室内におけるカビの発生など様々な被害を引き起こす。これらの現象の多くは水分だけではなく熱の移動、相変化にも関係する複雑なものであり、原因の解明と対策が難しいものも多い。水分による劣化・性能低下の具体的な事例や分類は「建物における湿害の診断と対策に関する規準・同解説 日本建築学会環境基準 AIJES-H0003-201」<sup>1)</sup>にまとめられており、そちらを参照されたい。

このような問題に対して、水蒸気移動だけではなく液水の移動性状をより明確にするため、

- ・高含水率域での物性値の測定方法（サクシオンカーブや飽和付近の透水係数）の検討<sup>2)</sup>
- ・非破壊での連続的な含水率測定方法（ガンマ線(図1)、エックス線、NMR等)<sup>3)4)</sup>
- ・降雨が建築物に当たる量を定量的に求める手法（実験・理論解析）<sup>5)6)</sup>

といった研究が行われている。さらに、木材腐朽の予測<sup>7)8)</sup>や塩の移動・析出・破壊の予測<sup>9)10)</sup>など、様々な問題に対応する解析モデルの構築が進められている。このような問題の1つに、凍結による劣化がある(図2)。この問題については、本稿の後半で2つの研究事例を紹介する。

### 2-2. 室内湿度の調整－吸放湿性の評価に関する検討例

室内の湿度に目を向けると、近年、乾燥感<sup>11)12)</sup>や健康<sup>13)14)</sup>など人間と湿気の関係も注目されてきている。室内・屋外の湿度を適切にコントロールする手法として、吸放湿材を用いた室内調湿<sup>15)</sup>や機械による加湿・除湿、生活による発湿<sup>16)</sup>、またそれらの組み合わせ<sup>17)18)</sup>、蒸発冷却効果を期待する打ち水<sup>19)</sup>、緑化<sup>20)</sup>等の研究はこれまでも数多く行われてきた。

調湿については特に、居住者や設計者から、わかりやすい設計法や評価方法が求められることが多

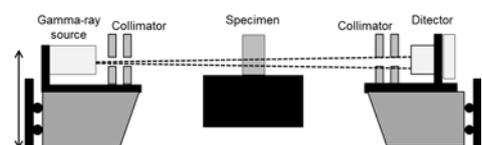


図1 ガンマ線測定装置



図2 表面塗膜の裏で凍結し剥離した外装の例

い。研究の観点では、対象とする吸放湿材の熱湿気物性値を測定し、住宅のモデルと住まい方の条件を決定し、地域を設定すれば、熱湿気移動解析を用いて室内の温度・絶対湿度・相対湿度の変動を予測するいくつかの手法が提案されている<sup>21)</sup>。しかしながら、熱湿気物性値の測定には時間がかかること、材料の吸放湿を考慮して室内の湿度を予測する汎用プログラム（住宅設計者が気軽に利用できるもの）がほとんどないことが課題として残っている。

換気や室内水分発生による室内湿度変動が、吸放湿材によりどの程度抑えられるかという点に着目し、材料を半無限固体と仮定し、温度外乱の影響がないという仮定のもと、周波数応答により調湿効果を簡易に評価する手法<sup>22)23)24)</sup>が提案されているものの、評価を行うためには吸放湿特性値  $\kappa$ 、 $\nu$  などの材料物性値が必要である。

測定時間と汎用性の問題を解決するために、吸放湿材の JIS 試験結果を利用した簡易評価手法の提案を試みた<sup>25)</sup>。簡易評価には、湿気浸透率  $b_m$  という指標を用いる<sup>26)</sup>。 $b_m$  は表面湿気伝達抵抗が 0 である半無限固体を仮定した試験体に対して求められる値であり、式(1)右辺第 1 項により、湿気伝導率  $\lambda$  と吸放湿特性値  $\kappa$  を用いて求められる。一方、JIS A 1470-1「建築材料の吸放湿性試験方法-第 1 部：湿度応答法」は恒温条件下でステップ変化する湿度に応じた材料の質量変化を測定するものであり、基本的には 24 時間で測定が終了する。試験時の吸放湿量  $G(t)$  と経過時間の平方根をグラフにプロットし、回帰直線の傾きを  $C$  とすると、 $b_m$  は式(1)右辺第 2 項の形でも表現できる。 $\Delta X$  は試験時の絶対湿度差である。

$$b_m = \sqrt{\lambda \times \kappa} = C \times \sqrt{\pi / 2 \Delta X} \quad (1)$$

温度が一定であり、湿気浸透率がほぼ一定値と見なせるような条件下では、湿気浸透率を用いて材料への吸湿量を計算することができる。文献25では、室内の湿度発生や換気の内容を考慮し、表計算ソフトを用いて必要な吸放湿材面積を求める簡易手法を示した。しかし本手法では換気量を過大に見積もる傾向があり、解析結果よりも相対湿度が約10%程度低い結果となった。実務で利用するためには計算精度を向上させること、適用範囲を明確にすることが課題である。

### 3. 研究事例①：屋根瓦の凍結による劣化調査

寒冷地では、低温環境下で材料内部に蓄積した水分が凍結・融解を繰り返すことにより、外装材表面の剥離・亀裂、更には壁体の剥落など甚大な被害を生じることがある。ここからは、このような凍結による劣化に着目して 2 つの研究事例を紹介する。

#### 3-1. 研究の背景

建築物の外装の中でも屋根は日射や夜間放射の影響を受けやすく、外壁よりも過酷な環境条件に曝される。冬季の平均外気温が 0℃ を下回らない温暖地においても住宅や寺社の屋根瓦等の屋根材に凍害が生じることが屋根施工者の間ではよく知られており、「瓦が凍てる」などの言い方もされる。一方、建築物の使用者や居住者にはあまり知られていない。凍結融解が原因と推察される屋根材の劣化性状は、ひび割れや剥離、欠けなど様々なものがあり、裏面の剥離など外見上は気づかれず、雨漏りが生じてから発覚するような事例もある。

瓦等の焼成材料の凍害については、材料強度、破壊性状等に着目した検討が行われてきたが、製造技術が進歩し、劣化メカニズムの研究が進んだ現在においても凍害はしばしば生じており、施工から数年足らずで劣化することがある。材料内への水分の浸入経路や周囲の温湿度変動等の環境要因の影響については、材料メーカーや施工者においても情報が不足しており、適用可能か否かは経験による判断がなされることが多い。

#### 3-2. 京都市内における寺院の塀瓦の劣化調査

##### (1) 調査概要

実際にどのような環境でどのような劣化が生じているかを把握するため、京都市内の寺院の塀瓦を対象に劣化調査を行った。2013 年 10 月から 2016 年 3 月まで、1～2 ヶ月に 1 回程度、目視観察と写

真記録を行い、劣化の進行状況を把握した。対象の瓦は、炭素膜を表層仕上げとしたいぶし瓦である。

塀は社殿の四周を囲むように配置されており、各方位に面した瓦の裏面温度（葺き土との境界面）を継続的に測定した（図3）。調査対象地には気象観測装置を設置し、瓦の温度と外気温や日射等の環境条件との対応を検討した。また、冬季には塀の一部について、定点カメラで5分間隔のインターバル撮影を行い、雨水の流れ方や積雪の状況を確認した。測定対象の塀瓦は図4のように上から棟瓦（丸瓦）、のし瓦2段、棧瓦、軒瓦、葺き土、下地板という構成になっており、温度の測定は瓦と葺き土の境界部分で行った。測定結果は瓦と葺き土両方の温度の影響を受けていると考えられる。

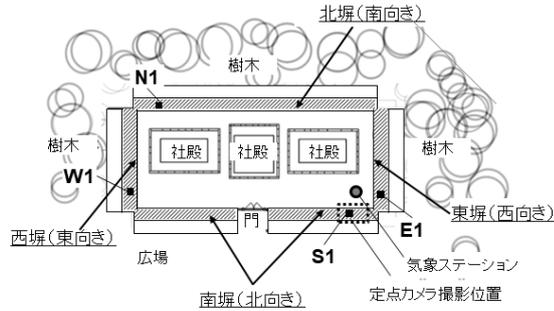


図3 調査対象の塀（平面図）と塀の様子

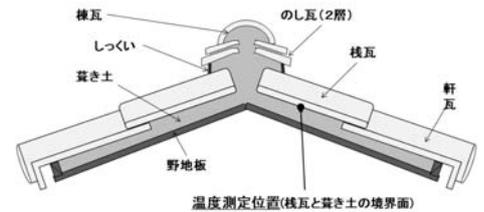


図4 塀の構成と温度測定位置

## (2) 調査結果－凍結による劣化性状

各瓦の特徴的な劣化の様子を図5に示す。棧瓦で大きな亀裂や層間剥離、棟の丸瓦で何層にも重なるような層状剥離が多く見られた。さらに、瓦裏面へ雨水が回り込まないように、防水の役目を果たす棟部分の漆喰の浮きあがりや剥離も見られ、葺き土への水分浸入が認められた。

2014年1月20日の調査においては、凍結と凍結により劣化が生じる様子を観察できた。なお、観察時の外気温は約1℃であった。図6に凍結により劣化が進行する様子を示す。表面が剥離している箇所ですぐに氷柱が生成され、氷に持ち上げられるようにして生じた剥離、軒瓦の垂れの模様部分の剥離、瓦の厚さ方向中心における大きな割れが確認できた。さらに2月10日の調査では、凍っていた部分が剥離し、内部の素地が露出している様子が観察された。これらの観察結果から、瓦内部での含水率の分布に着目し観察結果から劣化のメカニズムの考察を行った（図7）。多孔質材料内部の水は、細孔の径に応じた毛管力を受けるため、同じ温度の自由水と比べて化学ポテンシャルが小さくなり、凝固点降下現象が生じる。松本ら<sup>27)</sup>は、熱力学の観点から、水分化学ポテンシャルと凝固点降下度の関係を導出した（式(2)）。

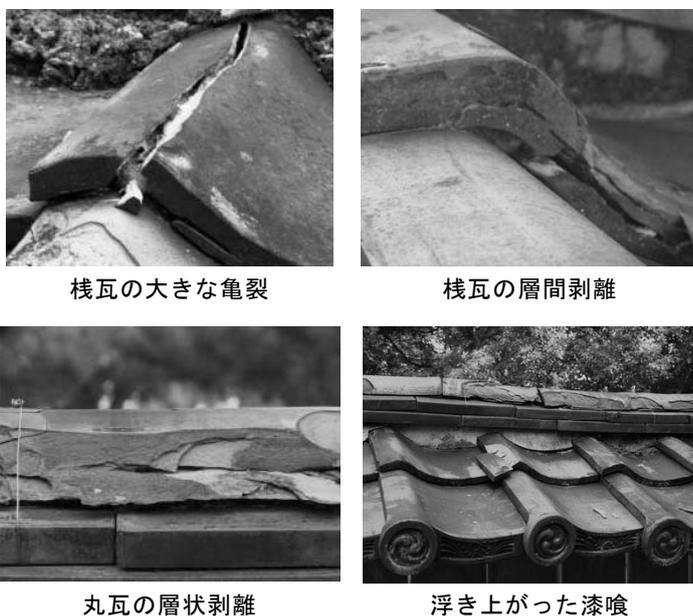


図5 特徴的な瓦の劣化

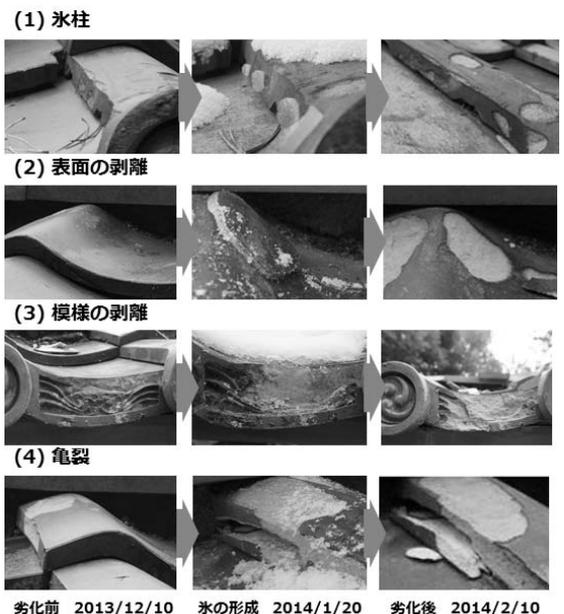


図6 塀瓦における氷の生成と劣化の進行

$$\mu_f = H_{li} \ln \left( \frac{T_f}{T_0} \right) \quad (2)$$

ここで、 $\mu_f$ は含水率に対応した水分化学ポテンシャル[J/kg]であり、 $T_f$ は凝固点降下を考慮した $\mu_f$ に対応した結氷温度[K]である。材料が水分で飽和している時は $\mu_f=0$ であり、結氷温度は $T_f=T_0=273.16$ [K]である。乾燥していればいるほど $\mu_f$ は負の大きな値をとり、結氷温度はより低い値をとる。

図7(a)のように微細な亀裂に水分が浸透して凍結が生じると、水分の膨張により亀裂を広げる方向に力が働く。(b)のように結露や降雨により水分が瓦内部に浸透する場合、表面付近の含水率が局所的に高くなる。葺き土に含まれていた水分が浸透する場合は(c)のように瓦内部の含水率は裏面付近で高くなる。夜間放射により表面から温度が低下すると、温度と含水率が(2)式の結氷条件を満たす位置で氷が形成される。結氷が生じた部分では水分化学ポテンシャルが低下するため、水分が集まり、結氷量が増加し、剥離や亀裂が生じると考えられる。(d)は端部の割れや欠けについて考察したもので、瓦の重ね部分は浸透した水が蒸発しにくく含水率が高い状態が継続する。一方で、上に重なった瓦の端部は葺き土の熱容量の影響を受けにくく低温になりやすいため、他の部位に比べて結氷のリスクが高い部位であるといえる。

### (3) 調査結果－温度

表1に、三度の冬期間における調査対象地の気候の特徴を示す。冬期の期間平均外気温はいずれの年も5℃を上回っており、期間最低外気温度も約-2.5℃で年による違いはあまり見られない。一方、日最低外気温度が0℃を下回る冬日の日数は年によって大きく異なり、2012年度と2013年度には3日に一度以上の頻度で冬日となっていたことがわかる。

図8は、2015年2月13～16日の各方位の瓦裏面温度の推移である。瓦の温度を決定する環境要因としては、夜間放射、日射、対流熱伝達による熱移動および積雪が考えられる。調査対象地では2月中旬までは樹木に遮られてあまり日射が当たらないが、この時期になると方位によって日中の日射による温度上昇の違いが明確になる。東向きと南向きの瓦では、午前中に直達日射が当たるため、温度が急激に上昇する。一方、北向きと西向きは温度の上昇が遅れる。2月14日から15日にかけての夜間は北向き・西向きでは外気が0℃に近づくと瓦の裏面（または葺き土）で結氷が生じるため、一晩中温度がほぼ0℃となっている。東向きと南向きは夜間放射の影響で外気よりも温度が低下するが、ともにある時刻に急激に0℃付近まで温度が上昇する。これは、瓦裏面付近の未凍結水が凍結したためと考えられ、より遅く凍結が生じた南向きでは含水率がより低かったことを示唆している。凍結は外気

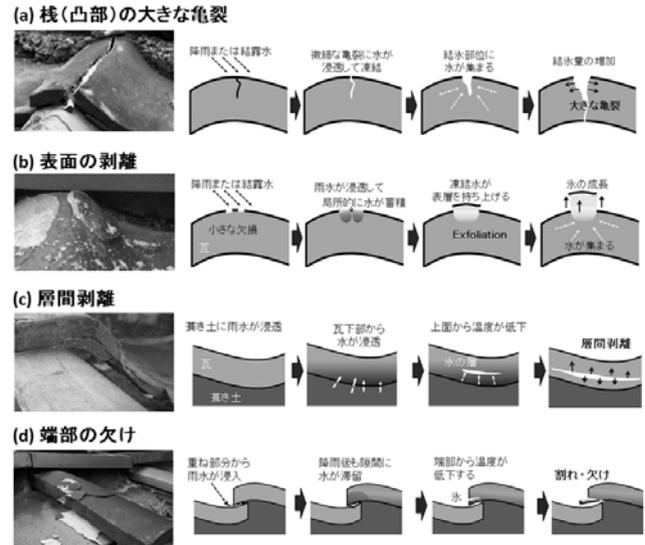


図7 凍結による劣化メカニズムの推定

表1 三度の冬期間（12～2月）における気候の特徴

	2012年12月～ 2013年3月	2013年12月～ 2014年3月	2014年12月～ 2015年3月
冬日日数 (日最低外気温度<0℃)	55	42	29
期間平均外気温度	5.18℃	5.35℃	5.35℃
期間最低外気温度 (生じた日時)	-2.7℃ (AM 6:00, 2/17)	-2.4℃ (AM 7:00, 1/20)	-2.1℃ (AM 3:00, 1/3)
降水日数 (日積算値≥0.5mm)	39	41	53
期間積算降水量	311.0 mm	434.0 mm	427.4 mm

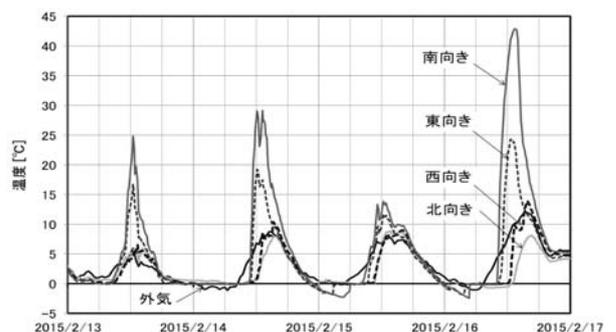


図8 方位による瓦裏面温度の違い

温が最も低下する深夜から早朝にかけて生じることが多いが、東向きは朝早くから日射が当たるため凍結が生じたとしても融解しやすく、北向き・西向きは凍結が持続しやすい。また、日中に日射が当たる南向き・東向きでは瓦に含まれる水分も蒸発しやすく、凍結のリスクも低くなる。実際に東向きよりも北向き・西向きで劣化が多く観察されたが、凍結の持続時間が長く結水量が増えやすい条件であったことも一因といえる。

#### (4) 調査のまとめ

京都市内での瓦の温度測定と劣化性状の調査から、凍結により劣化が進行する様子が観察でき、その劣化のメカニズムについて検討した。劣化部位の傾向から、温度低下しやすく、雨水や結露水の滞留がある位置で劣化が生じやすいと推察できる。また、温度変化の様子から凍結の有無や凍結水分の量の比較ができる可能性があることがわかった。特に外気温の低い午前中に直達日射が当たることが、凍結劣化の起こりにくさに大きく影響を与えていることがわかった。

### 3-3. 粘土瓦の凍結融解試験

材料の耐凍害性を確認する従来の凍結融解試験は、凍結時は低温空気に暴露し、融解時は全体を水中に浸漬するというもので、実環境下で観察されるものとは異なる劣化が生じることが、以前より指摘されてきた<sup>28)</sup>。本研究では、定点観測を行った塀の軒瓦を用いて、実験室で凍結融解実験を行った。その際、軒瓦の施工状況を再現するため、一部は葺き土に接し、一部は外気に露出するように試験体を恒温槽内設置した(図9)。

初期的に葺き土と瓦に十分に含水させ、1サイクルを12時間とし、 $-10^{\circ}\text{C}$ から $+10^{\circ}\text{C}$ まで恒温槽内の空気温度を変化させた(実験後半は装置へ着霜が生じ、最低温度は $-4^{\circ}\text{C}$ 程度となった)。瓦の表裏面と葺き土内部の温度、葺き土内部の水分化学ポテンシャルを測定した(測定結果は省略)。

調査地での施工状態を再現し、初期的に十分な水分を与えて凍結融解実験を行った結果、実地調査で観察されたものに近い性状の劣化が確認された(図10)。葺き土に接している部位では、葺き土の熱容量と葺き土に含まれる水分の凍結による凝固熱の発生により瓦自体の温度が低下しにくく、ごく薄い表層剥離が生じたのみであったが、葺き土に接しない部分では温度が低下しやすく、現地調査で見られたような大きな剥離やえぐったような欠けが生じた。葺き土は水分の供給源である一方、その熱容量により瓦の温度低下を緩和させる効果があることが確認できた。

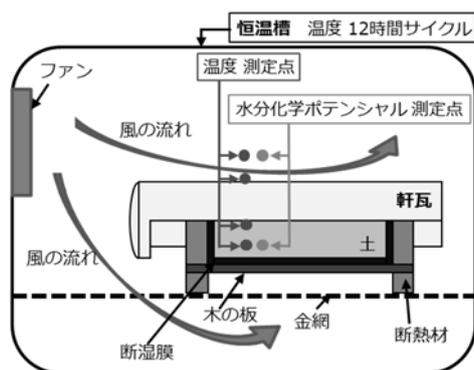


図9 軒瓦を想定した凍結融解実験の概要

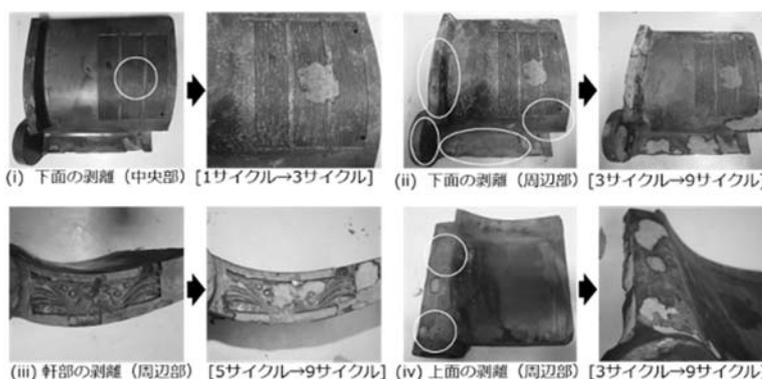


図10 凍結融解実験による瓦の劣化の進行

### 3-4. 屋根瓦の凍結による劣化調査のまとめ

京都市内の塀瓦の劣化調査を行い、冬期の平均外気温が $5^{\circ}\text{C}$ 程度の温暖地であっても瓦の凍害が生じること、方位や施工の状態(葺き土に接する、瓦が重なっているなど)によって温度や水分の状況が異なり、凍害の性状も異なることを示した。

また、日本国内で瓦の生産が多い愛知県と島根県、兵庫県において、製造工程の見学と粘土瓦の製造者・技術者に対するヒアリング調査を行ったところ、製造時のプレス圧の強さや瓦の形状によって瓦内部で強度に分布が生じていること、特に手作業で作られる部分は強度が低い可能性があること、製造された年代によって内部の粗密に差が生じ、強度や水の浸透しやすさに違いがあることがわかつ

た。屋根材が実際に使用される環境条件や材料物性値をふまえて、凍結による被害が生じるか否かを予測することができれば、設計時の材料選択や材料開発にも役立つと考えられる。現在のところ、数値解析により瓦内部の温度・含水率・含氷率の分布は概ね予測できるようになった<sup>29)</sup>ため、今後は結氷により材料内で作用する応力の予測が課題である。

#### 4. 研究事例②：カッパドキアの岩窟教会の劣化調査と保存対策の検討

##### 4-1. 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>30)</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あるが、それらの支持体となる教会の構造体は、環境要因や地震による深刻な劣化と崩壊を生じている。カッパドキアの独特の風景は軟らかく脆弱な凝灰岩によって構成される。この凝灰岩は、風雨による侵食と日射による熱応力を受け、表面の粉状化や剥離、その他の劣化を生じている。特に冬期間は、かなりの量の降雨と降雪があり（図11）、凍結融解やその他の深刻な表面劣化を生じさせる可能性がある。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>31)</sup>。

これまで、実際に適用可能な撥水剤が提案されてこなかったため、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>32)</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12に示すように、界面への水の浸透や日射による熱衝撃などによりしばしば界面での剥離が生じている<sup>33)</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ため、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っていないのが現状である。

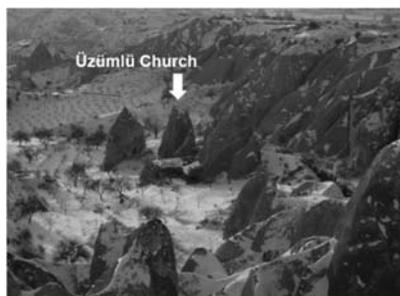


図11 積雪したカッパドキア  
(レッドバレー)



図12 不適切な保存処置の例  
(左：錆びた金属メッシュの露出、右：被覆材のはがれ)

##### 4-2. 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それぞれ専門とする分野が異なる、谷口陽子氏（筑波大学・文化財科学）、小泉圭吾氏（大阪大学・地盤工学）、渡辺晋生氏（三重大学・土壌物理学）、佐野勝彦氏（㈱ディ・アンド・ディ・撥水剤開発）、朴春澤氏（ハイテック株・地盤工学）、伊庭千恵美・吉岡瑞穂氏（京都大学・建築環境工学）である。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た。

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あるウズムル教会（聖ニキタス聖堂）（図13）を検討対象とした。本教会では、環境や、岩質、地殻運動および生物活動や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。カッパドキアで見られるような表面の崩壊や凍結による破碎の抑制には、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、石造文化財では表面処理剤の塗布が行われることがある<sup>34)</sup>。しかし多孔質材料内の凍害発生の有無や発生箇所は外界の気象条件や材料物性、水分環境など様々な要因に影響される。図14に示すように、外壁に表面処理剤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、表層での物性値

が変化するによって、現在とは異なる箇所で劣化が発生・進行する懸念がある。

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」な方法することによって、侵食速度を遅らせることに本プロジェクトは重点を置いている。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。

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には、岩石内の熱と水分の移動を知る必要があるため、2014年9月からウズムル教会の基礎部分の土壌と岩石内の温度と水分挙動、および教会内外の微気候の観測が開始された。

### 4-3. 現地における劣化状態と環境調査

ウズムル教会周辺の外気温度、相対湿度、降水量、風向・風速と日射量を測定するため、気象ステーション(Onset HOB0 U30-NRC)を設置した(図15)。また、教会内の温湿度を測定するため、入口付近(図16:入口側)と最奥の室3(図16:室内)の2か所のアルコールに温湿度データロガー(HOB0 U23)を設置した。土壌内の温度と水分の測定を行うため、教会の南側(日向)と北側(日陰)の2か所に15cm角の小さな穴を掘り、図16に示すように、地表から深さ方向50、100、300mmの3か所に土壌含水率計(Decagon 5TE)と水ポテンシャル計(Decagon MPS2)を地盤に水平に挿入した。その後、穴は元の土壌で埋め戻した。各測定において、データの記録インターバルは10分とした。

#### (1) 外気・室内・地盤の温度

図17に、外気・室内・地盤(日向・300mm深さ)の温度と全天日射量を示す。外気温の日変動は約10℃と大きい、教会内温度の日変動は1~3℃であり、非常に小さい。入口付近の室温は外気の流入・流出により外気温の影響を受け、かつ外壁が強い直達日射に曝されるため、北側にある室3よりも変化が大きい。室3では岩窟の熱容量が大きいので年間の温度変動も小さい。

福田による既往の研究<sup>35)</sup>では、岩石が飽水状態で温度が-4℃を下回ると、凍結による破壊が生じやすいとされている。凍結が生じやすい夜間、岩石表面温度は放射冷却のため外気温よりも低下する傾

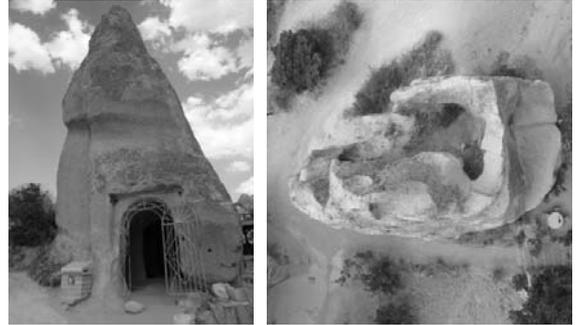


図13 ウズムル教会外観 (左:入口側から、右:上から)

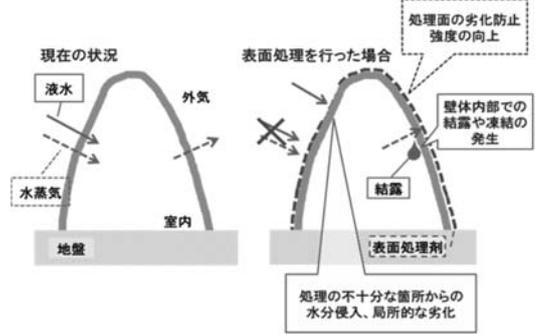


図14 表面処理による劣化の懸念

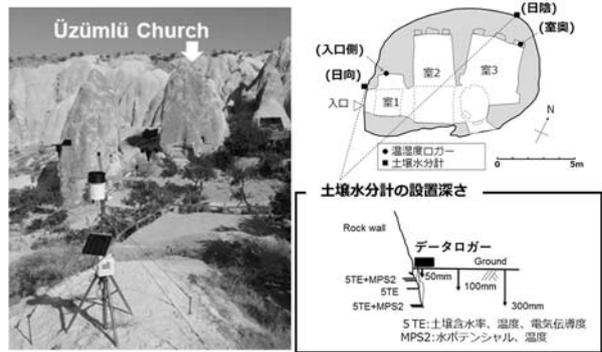


図15 気象ステーション 図16 センサー設置位置

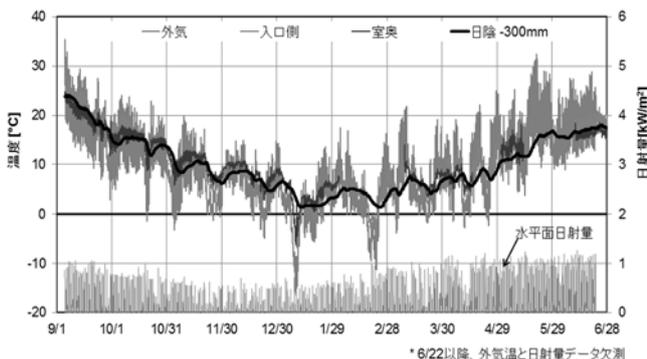


図17 外気・室内・地盤温度(2014年9月~2015年6月)

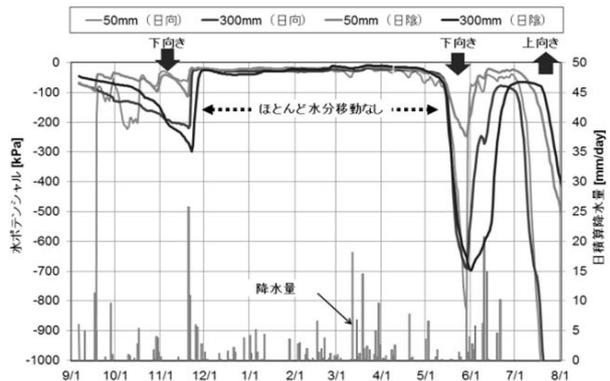


図18 地中の水ポテンシャル(2014年9月~2015年7月)

向にあるが、仮に外気温が $-4^{\circ}\text{C}$ を下回る状況を凍結による破砕が生じやすい条件とすると、2014～2015の冬期間、ウズムル教会付近の外気温がその条件を満たした回数は予想を大きく下回り、わずかに4回であった。一方、地中温度は、最寒期の日陰であっても、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、日向の方が図17に示した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、地盤内部での凍結はほとんど生じないといえる。

## (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（ $2.0\text{ mm}/10\text{ min.}$ ）が降る時にも風速は大抵 $1.5\text{ m/s}$ 以下である。したがって、風向・風速が降水による土壌や岩石の浸食および凍害に与える影響は無視できるといえる。

## (3) 地盤の水分と温度

図18は、日向と日陰における、地表面からの深さ50mmと300mmの土壌の水ポテンシャルと、気象ステーションで観測された10分間積算降水量を示したものである。土壌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。

2014年11月の終わりまで、日向・日陰ともに水分移動は下向きであり、11月末の大量の降雨の後、すべての測定点において、水ポテンシャルが急激に上昇した。冬期間（12～2月）、各深さにおける水ポテンシャルは、定期的な少雨により高い値で維持されており、深さ方向でのポテンシャル勾配はほぼ0であった。4月以降は、地表面からより深いところでポテンシャルが低下し始め、下向きの水分移動が生じたと推定される。6月には激しい降雨のためまず50mm深さのポテンシャルが急激に上昇し、遅れて300mmでもゆっくりと上昇した。夏の間、地表面付近では蒸発が支配的となり、水分移動は上向きとなった。日向でも日陰でも同様の傾向がみられた。これらの結果から、この地域では日射強度に関係なく、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く、逆に、時々激しい降雨・降雪が脆弱な凝灰岩の浸食を引き起こしていると考えられる。したがって、撥水性を与える材料を塗布し、構造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。

### 4-4. 撥水剤の小岩体への試験施工

環境計測の結果に基づき、凝灰岩への撥水剤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) 撥水剤の特徴

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、撥水剤としてPermeate HS-360（D&D Corp.）<sup>36)</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。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撥水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。

なお、撥水剤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（平均厚さ19.1mm）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、撥水剤なしの場合が $5.64 \times 10^8$  [ $\text{m}^2\text{sPa}/\text{kg}$ ]、撥水剤ありの場合が $5.69 \times 10^8$  [ $\text{m}^2\text{sPa}/\text{kg}$ ]であり、このことから撥水剤塗布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。

## (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19の(a)は何も塗布しないもの、(b)は Permeate HS-360 を全面に塗布したものである。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20(a)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さについては、図20(b)のようにデジタルノギスで釘の左右を測定した。

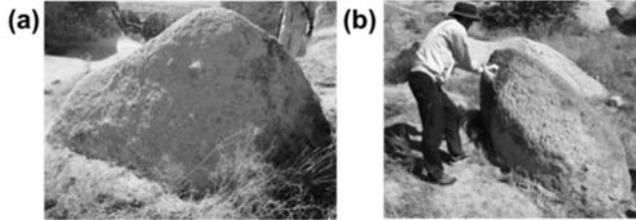


図19 屋外暴露試験体  
(a) 無処置 (b) 撥水処理あり

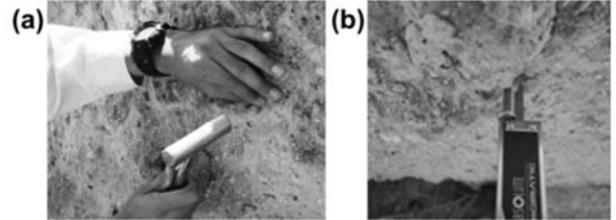


図20 風化の度合いの定量化  
(a) ステンレス釘の打込み (b) 釘の長さ測定

この測定は、現地の協力者によって数週間ごとに行われている。施工後8カ月が経過し、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、撥水剤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い。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。局所的に水分が蓄積した部分で、冬期にこのような劣化が生じたものと考えられる。さらに、現地協力者からの定期報告によると、撥水処理後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する理由については、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を検討する必要がある。今後も継続的に測定観察を実施し、色の変化とともに凍害等の劣化抑制効果について検証を行う。

### 4-5. 撥水剤の影響と気象条件を考慮した熱水分移動解析

現地での暴露試験と並行して、撥水剤が外壁内部の熱水分移動性状や凍結の発生に与える影響を明らかにすることを目的として、凍結融解過程を考慮した三相系熱水分移動解析を行った。

#### (1) 熱水分移動の基礎方程式

本研究では、松本<sup>27)</sup>が示した凍結融解を考慮した熱水分同時移動方程式(水分収支式(3)式・エネルギー収支式(4)式・結氷条件式(前述の(2)式))を用いて数値解析を行う。

$$\left(\frac{\partial \rho_i \psi_i}{\partial \mu}\right) \frac{\partial \mu}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda'_{\mu} \frac{\partial \mu}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda'_{T} \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\partial \rho_i \psi_i}{\partial t} \quad (3)$$

$$c \rho \psi \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + H_{gl} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda'_{Tg} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda'_{\mu g} \frac{\partial \mu}{\partial x} \right) \right\} + H_{li} \frac{\partial \rho_i \psi_i}{\partial t} \quad (4)$$

$$\text{ただし、 } c \rho \psi = c_m \rho_m \psi_m + c_l \rho_l \psi_l + c_i \rho_i \psi_i$$

#### (2) 解析に用いた材料物性値

熱水分物性値については、実験室で平衡含水率関係と湿気伝導率を、現地で飽和透水係数と熱伝導率の測定を行った。また測定結果に基づき、不飽和時の液相水分伝導率と、熱伝導率の水分依存性を推定した<sup>37)</sup>(図省略)。凝灰岩の乾燥密度は1400 [kg/m<sup>3</sup>]、比熱は1200 [J/kg・K]とした。

#### (3) 解析モデル・計算条件

計算モデルの概要を図21に示す。厚さ1000mmの凝灰岩単一層からなる南北に面した傾斜角80°の

外壁を検討対象とし、それぞれ一次元の熱水分同時移動解析を行う。降雨については外部風向と降雨の落下速度を用いて、壁体表面が受ける降雨流をその傾斜角・方位角に応じて計算する。

本解析では撥水剤の塗布が壁体内部の熱水分性状に与える影響を検討する。撥水剤は塗布面から2mm~5mm 深さまで含浸して硬化し、含浸部分の透湿性を失わずに撥水性を与えるという特徴を持つ。よって撥水剤ありの場合には、含浸部分の液水移動および表面からの液水浸入がないものとした。また含浸深さは外気側表面から3.5mmとした。外壁の外気側と室内側の境界条件は、ウズムル教会近傍の外気と室内空気の温度と相対湿度、日射量、降水量の測定結果を使用した(図22・図23)。壁体内部の初期条件は、温度と相対湿度ともに各表面はそれぞれ外気、室内空気の初期値と等しいとし、内部を直線分布とした。境界面での熱水分流の計算に用いた係数は表2の通りである。



図21 解析モデル

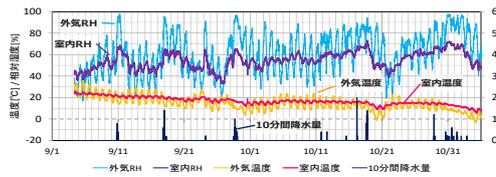


図22 外気・室内空気の温湿度、降水量

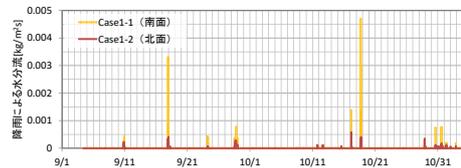


図23 各壁体表面が受ける降水量

表2 境界面での計算に用いた係数

		外気	室内空気
熱伝達率 [W/m²K]	対流	8.6	4.1
	放射	-	4.65
湿気伝達率 [kg/m²s (kg/kg⁻¹)]		0.0184	0.0184
		壁体	地面
日射吸収率		0.8	0.6
長波長放射率		0.9	0.9

### (3) 解析結果

計算期間は2014年9月4日から11月5日である。はじめに塗布なしの条件で壁体の方角が壁体内部の熱水分性状に与える影響を検討する。図24、25に外気側表面と表面から1mm深さ、3mm深さ、4mm深さおよび10mmにおける両Caseの液水含水率の経時変化を示す。両方位面ともに水分移動が盛んであるのは外気側表面から3mm深さまでの範囲で、壁体内部は常に比較的乾燥している。これは外気側表面での劣化が顕著であるという観察結果と矛盾しない。壁面に入射する降雨量は南面の方が大きいですが、含水率は南面の方が低くなる傾向にある。11月3日から5日にかけて両者で凍結が発生したが、発生範囲・量ともに北面が南面を上回る。これは日射によって南面の方が高温となるためである。

次に撥水材を塗布した場合を検討する。南北両面で、塗布ありのほうが含水率・含氷率が低減される傾向にあった。例として図26に全ての条件について11月3日から5日にかけての含水率変動を示す。この結果より、外気側表面に一樣に塗布した場合では水分の浸透と凍結に由来する劣化の抑制に対して効果的であるといえる。

### 4-6. まとめと今後の課題

カッパドキアにおける非常に脆弱な凝灰岩の急速な風化の原因と要因を知るために、特に岩体と地中の熱と

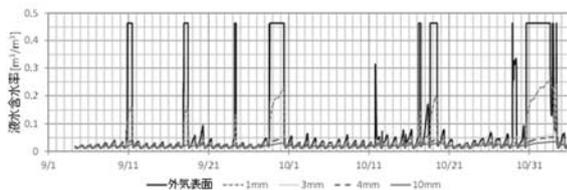
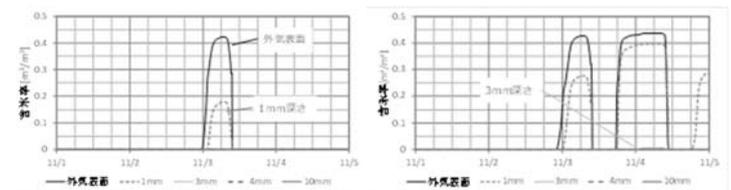


図24 南面・塗布なし 含水率変動



a) 南面・塗布なし

b) 北面・塗布なし

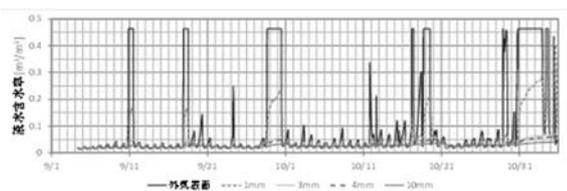
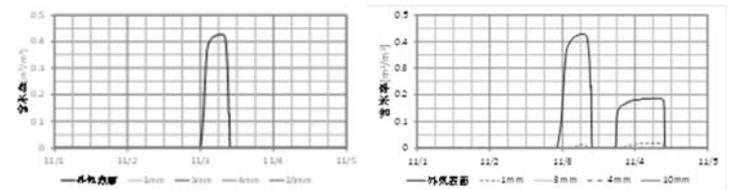


図25 北面・塗布なし 含水率変動



c) 南面・塗布あり

d) 北面・塗布あり

図26 11月1日から5日における各条件の含水率変動

水分の移動に着目し、環境測定を行った。外気温から凍結融解サイクルはそれほど頻繁には生じないこと、冬期間は地下水の吸い上げによる構造体への水分供給はほとんどないことから、外部から構造体への降雨水と融雪水の浸透を抑制することが、本プロジェクトにおいて最も適切な対策であると結論付けた。水分浸透抑制の手段として撥水剤の使用を考え、その効果と耐久性を検証するため、現地でも屋外暴露試験が開始された。今のところ、撥水剤は少なくとも劣化を遅らせる効果があるといえるが、今後も引き続き風化の度合いを定量的に評価する必要がある。また、外壁付近の熱水分性状を検討する数値解析によっても、撥水処理が効果的であることは確認できた。今後は、処置をすることによって、別の損傷を引き起こしたり、劣化を促進したりしないかどうかを数値解析や実験室実験により検証する。まだ道半ばではあるが、ウズムル教会におけるケースはこれまで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。

## 5. まとめと現在興味をもっていること

本稿では、材料劣化や耐久性、室内湿度調整に関わる湿気の諸問題を概観し、主に材料の凍結融解による劣化に関する研究事例を紹介した。これらをふまえて、現在2つの課題に興味を持って取り組んでいる。

1つは凍結融解時に材料に作用する応力の予測である。熱水分移動解析による材料内温度・水分分布が把握できるようになってきたため、今後は作用応力を求め劣化を予測するモデルの構築を行う。もう1つは、カッパドキアの事例でも用いた撥水剤等の表面処理剤である。特に含浸系の撥水剤は、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ものが多いが、空気の透過性<sup>38)</sup>や含浸層内での相変化による水分移動と蓄積の状況など、定量的に把握できていない部分を明らかにしていきたいと考えている。

## 謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費（課題番号：24101014 及び 15K21092；研究代表者 伊庭千恵美および課題番号：24101014；研究代表者 谷口陽子）の助成を受けた。本稿で引用した研究事例は、卒業生の植田あゆみさんの瓦の凍害に関する研究、卒業生の吉岡瑞穂さん凝灰岩の劣化に関する研究によるところが大きい。また、カッパドキアの調査研究は、筑波大学 谷口陽子准教授、大阪大学 小泉圭吾助教、三重大学 渡辺晋生教授、ハイテック(株) 朴春澤氏、(株)ディ・アンド・ディ 佐野勝彦氏と共に行ったものであり、現地での調査にあたっては特に、ネブシェヒル地域保存修復研究所長の Hatice Temur 氏、研究所の Ayça Baştürkmen 氏、Uğur Yalçınkaya 氏、Mustafa Toptepe 氏、ネブシェヒル博物館 Murat Ertugrul Gülyaz 館長、ニーデ博物館 Fazıl Açıköz 館長、Ibrahim Sakınan 氏とそのご家族には多大なるご協力を頂いた。また、凍害に関する調査研究について、京都大学 鉾井修一名誉教授と小椋大輔教授にご指導、ご助言をいただいた。ここに、記して皆様に感謝申し上げます。

## 注記

本稿は、北方建築総合研究所経常研究報告書 No. 316、科学研究費研究成果報告書（24101014）および「カッパドキア岩窟教会外壁の劣化と保存対策、東北芸術工科大学文化財保存修復研究センター紀要、pp. 89-93, 2017」ならびに「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」を加筆・修正・再構成したものです。

**記号**  $t$ : 時間[s],  $c$ : 比熱[J/kgK],  $\rho$ : 密度[kg/m<sup>3</sup>],  $T$ : 温度[K],  $\mu$ : 自由水基準の水分化学ポテンシャル[J/kg],  $g$ : 重力加速度[m/s<sup>2</sup>],  
 $\varphi$ : 容積基準含水(氷)率[m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>],  $H$ : 相変化熱[J/kg],  $T_0$ : 自由水の結氷温度 (= 273.16) [K],  $\lambda$ : 熱伝導率[W/mK],  
 $\lambda'_\mu$ : ポテンシャル勾配による水分伝導率[kg/ms(J/kg)],  $\lambda'_T$ : 温度勾配による水分伝導率[kg/msK],  $n$ : 鉛直下向き単位ベクトル

**添字**  $g$ : 水蒸気  $l$ : 液水  $i$ : 氷  $m$ : 材料実質部  $w$ : 水分  $sat$ : 飽和

## 参考文献

- 1) 建物における湿害の診断と対策に関する規準・同解説 日本建築学会環境基準 AIJES-H0003-201, 日本建築学会, 2013
- 2) 伊庭千恵美, 和中龍, 鉾井修一, 小椋大輔: 仕上げ層をもつ屋根瓦の水分移動特性に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, Vol. 74, No. 640, pp. 693-699, 2009 など
- 3) 小椋大輔, 鉾井修一: ガンマ線含水率測定装置を用いた発泡系断熱材の結露性状, 日本建築学会学術講演梗概集 環境工学II, pp. 385-386, 2005
- 4) 中村暢, 岸本嘉彦, 濱幸雄, 鉾井修一, 小椋大輔:  $\gamma$ 線照射装置を利用した建築壁体の非正常含水率測定法に関する研究, 日本建築学会学術講演梗概集 環境工学II, pp. 181-182, 2011 など
- 5) Masaru Abuku, Hans Janssen, Jean Poesen, Staf Roels: Impact, absorption and evaporation of raindrops on building facades, Building and Environment, Vol. 44, No. 1, pp. 113-124, 2009
- 6) 山岸久範, 岸本嘉彦: 風雨に曝される建築壁体の壁面方位別含水率分布変動に関する研究, 日本建築学会学術講演梗概集 環境工学II, pp. 289-290, 2015 など

- 7) Hiroaki Saito: Application of the Wood Degradation Model to an Actual Roof Assembly subjected to Rain Penetration, *Energy Procedia*, Vol.132, pp.399-404, 2017
- 8) 永井久也, 鈴木大陸, 北谷幸恵, 岩前篤, 小南和也, 坂本雄三: 日本建築学会環境系論文集, Vol.74, No.638, pp. 457-463, 2009 など
- 9) 安福勝, 小椋大輔, 鉾井修一: 塩を含むALCの平衡含水率の測定とモデリング, 日本建築学会環境系論文集, Vol.79, No.700, pp.499-506, 2014
- 10) E. Mizutani, D. Ogura, T. Ishizaki, M. Abuku, J. Sasaki: Measurement of salt solution uptake in fired clay brick and identification of solution diffusivity, *Proceedings of SWBSS 2017. Fourth International Conference on Salt Weathering of Buildings and Stone Sculptures*, pp.65-73, 2017 など
- 11) 高田暁: 乾燥感と室内温熱環境条件に関する基礎的研究, 日本建築学会環境系論文集, Vol.78, No.693, pp.835-840, 2013
- 12) 開原典子, 高田暁, 松下敬幸: 室内湿度変化に対する皮膚含水率の非定常応答のモデル化, 日本建築学会環境系論文集, Vol.79, No.697, pp.233-239, 2014 など
- 13) 青木哲, 水谷章夫: 岐阜地域の幼稚園における冬季の保育室内湿度環境の実態とその改善に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, Vol.82, No.739, pp.821-830, 2017
- 14) 林基哉, 開原典子, 金勲, 大澤元毅, 阪東美智子, 小林健一: 高齢者施設における室内環境と健康性に関する調査 (第7報) 小型加湿器による居室の湿度改善に関する試行, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp.105-108, 2016
- 15) 小椋大輔, 宇野朋子: 吸放湿材の利用の諸条件と評価 研究の現状と可能性, 日本建築学会 第35回熱シンポジウム 湿気研究の実用的展開, pp.77-84, 2005 に既往研究が多数まとめられている
- 16) 山下絢也, 佐藤真奈美: 室内発生水分を用いた湿度環境調整に関する研究:洗濯干しを利用した室内湿度調整性能, 日本建築学会環境系論文集, Vol.76, No.665, pp.595-600, 2011 など
- 17) 巽佑介, 荻野登司, 小椋大輔, 三浦尚志: 室内の吸放湿性を考慮したルームエアコンの冷房・除湿による温湿度調整に関する研究: (その2)吸放湿材の利用が室内温湿度性状および空調負荷に及ぼす影響の検討, 日本建築学会学術講演梗概集 環境工学II, pp.247-248, 2015
- 18) 安達拓真, 高橋光一, 岸本嘉彦: 寒冷地用エアコンと吸放湿材を併用した空調システムの調湿効果と暖房負荷に関する研究, 日本建築学会学術講演梗概集 環境工学II, pp.191-192, 2017
- 19) 吉本衣里, 伊庭千恵美, 鉾井修一: 打ち水が京町家の奥庭および室内の温熱環境へ及ぼす影響, 日本建築学会学術講演梗概集 環境工学II, pp.519-520, 2015
- 20) 藤堂香織, 小椋大輔, 鉾井修一, 甲谷寿史: 壁面緑化による室内及び屋外の熱環境への負荷低減効果の予測に関する研究, Vol.73, No.631, pp.1109-1116, 2008
- 21) 池田哲朗, 小林康彦, 土橋芳郎, 今仲雅之: 吸放湿材貼付時の実大戸建住宅内における室内温湿度予測, 日本建築学会計画系論文集, Vol.59, No.464, pp.21-29, 1994 など
- 22) 鉾井修一: 吸放湿材の評価法 -外乱の変動と吸放湿特性-, 日本建築学会 第26回熱シンポジウム, pp.63-72, 1996
- 23) 小椋大輔, 松下敬幸: 周期的定常解析による壁体の調湿効果の簡易評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集 環境工学II, pp.309-310, 2001
- 24) 岸本嘉彦, 鉾井修一, 小椋大輔: 周波数応答による調湿効果の簡易評価手法 適用範囲に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 環境工学II, pp.237-238, 2009
- 25) 高い吸放湿性を有する材料を用いた室内調湿の設計手法に関する研究, 地方独立行政法人北海道立総合研究機構北方建築総合研究所 経常研究報告書, No.316, 2012
- 26) JIS A 1470-1 建築材料の吸放湿性試験方法-第1部:湿度応答法 附属書C 湿気浸透率の計算方法, 2014
- 27) 松本衛, 高揚: 多孔質材料の凍結と融解過程の解析-基礎方程式とその解法-, 日本建築学会近畿支部研究報告集 平成3年度, pp.113-116, 1991
- 28) Chiemi Iba, Shuichi Hokio: Frost Damage in Roof Tiles in Relatively Warm Area in Japan: -Water Absorption and Freezing-Thawing Experiments-, *Proceedings of 9th Nordic Symposium on Building Physics*, Vol.1, pp.231-238, 2011
- 29) 植田あゆ美, 伊庭千恵美, 鉾井修一, 小椋大輔: 温暖地における屋根瓦の凍結劣化に関する研究 (その5) 実環境条件が塀瓦の含水率分布に与える影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集 環境工学II, pp.1375-1376, 2016
- 30) UNESCO, 1985, *Structural conservation of Göreme. Göreme, land of fairy chimneys*. Ministry of Culture and Tourism, Turkey. General Directorate of Antiquities and Museums.
- 31) Erguler, Z.A., 2009, Field-based experimental determination of the weathering rates of the Cappadocian tuffs, *Engineering Geology*, 105, 186-199.
- 32) 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.
- 33) Yorulmaz, M., Ahunbay, Z. 1995, 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)*, 135-142. Rome: ICCROM, 1995.
- 34) 福田正巳, 三浦定俊西忠輝松憲知: 石造遺跡の凍結破砕と樹脂によるその防止効果実験 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 (I), *保存科学*, 22, 1-14, 1983 など
- 35) 福田正巳, 1985, 小樽手宮洞窟壁面遺跡の凍結破損防止にかかわる基礎研究, *低温科学 物理編*, 43, 171-180.
- 36) 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.
- 37) 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
- 38) 福井一真, 伊庭千恵美, 鉾井修一, 小椋大輔: 多孔質建築材料内の空気圧が水分移動に与える影響の検討, 日本建築学会環境系論文集, Vol.83, No.743, 2018 掲載予定