

平成 30 年 6 月 12 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K21092

研究課題名(和文) 防水・撥水材の水分移動特性と屋外文化財への適用可能性

研究課題名(英文) Moisture characteristics of water repellent materials and their applicability to outdoor cultural properties

研究代表者

伊庭 千恵美 (Iba, Chiemi)

京都大学・工学研究科・助教

研究者番号：10462342

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：建築物の劣化に大きな影響を与える水分の浸透を制御する手法として、防水・撥水材による表面処理に着目した。ガンマ線含水率測定装を用いた吸水実験と透湿実験により処理層の水分特性を把握した上で、材料内の空気圧変化を考慮した水分移動モデルを提案し、実験時の水分移動の様子を数値解析により明らかにした。

また、屋外に設置した木材・石・焼成材に数種の撥水材を塗布した試験体を約2年半にわたって観察し、変色やカビ発生の抑制効果を確認した。屋外文化財への撥水剤の適用を検討するため、脆弱な凝灰岩で構成されたトルコ・カッパドキアの岩窟教会と同質の小岩体に撥水剤を塗布し、定期的な観察を行ったが顕著な効果は認められなかった。

研究成果の概要(英文)：In this study, surface treatment by water repellent agents was focused on as a measure to control moisture penetration which affects the deterioration of building materials. First, the moisture characteristics of treated layer of the material were examined by water-absorption experiment using gamma-ray attenuation method and vapor permeability measurement. Moisture transfer analysis model considering the air pressure change in the material was proposed based on the experimental results.

Some specimens with different kind of water-repellent agents were exposed to outdoor environment over two years and the dirt condition or discoloration of them was regularly observed.

In addition, an outdoor exposure test was launched to evaluate the effectiveness and durability of consolidation by surface treatment agents for tuff rocks in Cappadocia, Turkey. So far a remarkable protective effect has been not observed. A follow-up examination will be performed focusing on the frost resistance.

研究分野：建築環境工学

キーワード：撥水剤 含浸 相変化 屋外環境 水分浸透実験 ガンマ線 屋外文化財 空気圧

## 1. 研究開始当初の背景

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量が関係する。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。

材料への水分浸透を制御する方法の一つとして防水・撥水材による表面処理がある。これは、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、強度の向上、遮熱等の機能を兼ねたものもある。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、表面保護はその選択肢の一つとなる。

コンクリートの分野では、表面保護工法による劣化の修復や予防保全を図る手法がまとめられてきている。一方、石造遺跡や煉瓦造建造物では、主な劣化要因である岩石の凍結破砕や煉瓦の塩類風化を軽減・防止することを目的として、樹脂による処置が検討されてきたが、適切な評価や予測方法はいまだ提案されておらず、不適切な表面保護により劣化が促進された事例もある。

このように種々の防水・撥水材が施工された材料の水分移動に関しては、主に液水を対象とした透水係数や接触等の測定、劣化促進試験などの実験的検討がなされている。しかしながら、実使用環境下にある材料内で生じる、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は検討がされていない。様々な水分による劣化の予測や対策方法の検討を行うため、周囲の変動する環境条件と材料物性を考慮した数値解析により、材料内水分移動・蓄積の様子を明らかにする必要がある。

また、表面仕上げ層がある材料の透水性を実験的に検証する際、試験方法によっては材料内の空気の圧力が上昇し、透水性を過少評価する可能性が既往研究で指摘されているが、防水・撥水材を施工した建築材料で水分移動の際に空気圧を考慮した例はなく、適切な評価方法・測定条件を整理することは重要であるといえる。

さらに、現場での処置が前提となる屋外文化財においては、撥水材の不十分な施工や施工後の乾燥収縮等により表面仕上げに欠損が生じる可能性がある。また、文化財では施工による濡れ色等の外観変化も問題となる。防水・撥水材を適用することで別の劣化が引き起こされるといった懸念により、適用が見送られる場合もある。対象となる地域・材料・問題に応じて適切な防水・撥水材を選択する必要がある、事前にその効果を予測・検証できることが求められる。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は以下の4点である。

### (1) 防水・撥水材の基本特性の把握

近年防水・撥水を主目的として開発された数種の表面処理材を多孔質材料に施工した際の液水及び水蒸気移動に対する影響を、透水抵抗、透湿抵抗の測定により明らかにする。

(2) 防水・撥水処理された各種材料における材料内水分移動と蓄積の定量化

防水・撥水材の有無による各種材料内への水分浸透、水分蓄積の違いをガンマ線による含水率測定装置を用いて定量的に把握し、数値解析により再現を行う。測定時における材料内空気圧の影響についても検討する。

(3) 防水・撥水処理された各種材料の屋外暴露による変化の観察

数種の防水・撥水材を施工した材料と施工していない材料を用意し、屋外暴露時の外観観察を行う。研究期間内では経年による影響ではなく、主に初期的な変化（変色、汚れの付着、表面のひび割れ・剥離等）に着目する。

### (4) 屋外文化財への適用可能性検討

凍結破砕による表面の風化が進行しているトルコ・カッパドキアの岩窟教会をケーススタディの対象として、外界気象や地下水の状況等をふまえ、防水・撥水材を施工した際の保護効果やリスク、施工における注意点、効果的な施工部位等を明確にする。

## 3. 研究の方法

本研究では、近年劣化抑制と美観維持の目的で開発されたフッ素ポリマー・シリコーン系被覆材と無機系（アルコキシシラン系）の含浸封孔材を主たる対象とし、比較のため一般的な有機系被覆材や含浸材も取り扱う。防水・撥水材を施工する試験体の基材としては、歴史的建造物や屋外文化財を想定し、木材・石材・土・レンガ等を対象とする。

### (1) 防水・撥水材の基本特性の把握

- ・実務者に防水・撥水材へのニーズ、使用状況に関するアンケートを行う。
- ・撥水材を施工したレンガの透湿抵抗と透水抵抗、水分吸着特性を測定する。
- ・数値解析モデル作成の基礎情報とする

### (2) 防水・撥水処理された各種材料における材料内水分移動と蓄積の定量化

- ・撥水材を施工したレンガを用い、外部からの降雨水の浸透や地下水の吸上げなどを想定した異なる水分供給条件を与えた吸水実験を行う。ガンマ線含水率測定装置により、吸水過程の含水率分布の経時変化を非破壊で測定する。
- ・吸水実験を再現する数値解析モデルを作成し、実験結果と比較しモデルの妥当性検証を行う。

### (3) 防水・撥水処理された各種材料の屋外暴露による変化の観察

- ・木材、石材、焼成材の試料に異なる種類の防水・撥水材を塗布し、まず塗布による色の変化を確認する。その後、防水・撥水材

を塗布した試料と無塗布の試料を大学校舎屋上に、南向き・北向きに設置し、変色や汚れの経時変化を観察する。

- ・京都市内のモデル住宅において、土塀に種類の異なる撥水材を塗布し、塗布による変色や撥水性の確認を行う。

#### (4) 屋外文化財への適用可能性検討

- ・脆弱な凝灰岩で構成されたトルコ・カップドキアのレッドバレー内の岩窟教会を対象とし、現地での気象データや地盤水分データを取得し、環境条件を分析する。
- ・現地で採取した岩石の透水性、透湿性の測定を行う。
- ・岩窟教会の単純なモデル化を行い、現地で測定している気象データを用いて、数値解析により外壁岩石の温度と含水率分布の予測を行う。
- ・現地での施工実験を行い、経過観察、表面状態の変化の計測を行い、防水・撥水材を適用するリスク検討を行う。

### 4. 研究成果

#### (1) 防水・撥水材の基本特性の把握

- ・2015年9月19日に京都市内で建築実務者を対象としてアンケート調査を行った（回答22人）。調査結果より、表面処理材はコンクリート系に限らず木材や石材、漆喰、土壁のように様々な材料に使用されていること、表面処理材に期待する効果は汚れや白華の防止といった外観変化に関することであることがわかった。
- ・レンガを対象としたカップ法による透湿抵抗の測定から、含浸系撥水材による処理の有無が透湿抵抗に影響を与えないことを確認した。
- ・デシケータ法によりハイグロスコピック領域の平衡含水率を測定し、撥水層も吸着水を保持すること、低湿域では基材と変わらない含水率となるが高湿域では基材より平衡含水率が小さくなることを示した。
- ・円筒形に近似した細孔で毛管凝縮が起こる相対湿度と、水との接触角および細孔半径の関係を示す Kelvin 式を用いて、高湿域での撥水層の平衡含水率曲線の予測を行い、撥水性の材料には水圧が加わり自由水基準の水分化学ポテンシャルが正の範囲で大きい値をとらない限り液水が浸入しないことを示した。

#### (2) 防水・撥水処理された各種材料における材料内水分移動と蓄積の定量化

##### ① 吸水実験における含水率分布の測定

シラン系表面含浸材で処理した材料内の水分の移動・蓄積・相変化の様子を明らかにするため、表1に示す3種類の一次元吸水実験を行った。実験には側面を断湿し底面の片面を表面処理したレンガを用い、実験中はガンマ線減衰法（材料内水分によるガンマ線の吸収量から非破壊で含水率を求める手法）を用い、図2のように試験体にガンマ線を照

表1 吸水実験条件

	Case 0	Case 1	Case 2	Case 3
吸水面	処理なし	処理面	処理面以外	
	上面	上面	下面	上面
処理後の養生期間	—	5日	1週間以上	3-1)2日 3-2)1週間以上

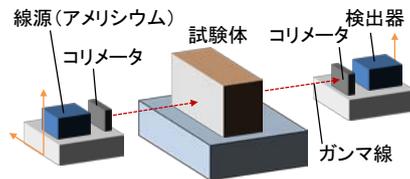


図1 ガンマ線含水率測定装置の模式図

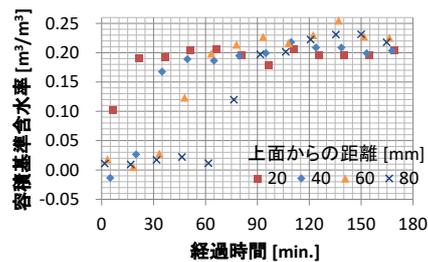


図2 Case 0の含水率経時変化

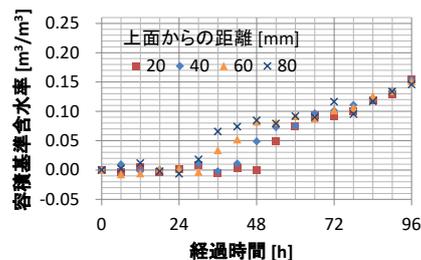


図3 Case 1の含水率経時変化

射して含水率分布の連続測定を行った。

まず、含浸材の吸水防止効果を確認するため、降雨のように処理面に外部から水分が供給される状況を想定し、処理なし（Case 0・図2）と処理あり（Case 1・図3）の場合について、上面からの吸水を行った。処理なしの場合、90分ほどで試料全体が水で飽和したが、Case 1では含浸材により材料内への水分の浸入が大きく減ぜられ、実験開始から24時間は含水率の増加が測定されなかった。撥水層が水蒸気を通すものの液水は通しにくいことが確認できたが、このことは撥水層と非含浸箇所境界で蒸発が起こりやすいことを意味しており、水分が塩を含んでいる場合は析出が集中して起こることで、材料内部の劣化が促進される可能性があるといえる。

次に、地下水の吸い上げや、表面含浸材の防水効果が十分でなく材料内に水分が浸入した場合を想定し、表面処理をしていない側から吸水を行った。この実験では、重力の影響を確認するために下面（Case 2）と上面（Case 3-2）それぞれから吸水を行った。処理面以外から水分の浸透があった場合、撥水層内の含水率が撥水層以外の含水率と比べ大幅に小さくなることが示された。隣接した部位での含水率の大きな違いは、温度低下時

の凍結により撥水層の剥離を生じさせることが懸念される。

本実験で用いた含浸材は塗布後1週間の養生期間を設けることが製造業者により定められている。Case 3では、養生が不十分な場合の材料内の水分移動・蓄積・相変化の様子を確認するために2種類の養生期間で実験を行った (Case 3-1、3-2)。養生が不十分な場合 (Case 3-1)、処理面以外からの水分浸入が明らかに遅くなることが示された。養生が十分でない撥水層は水分だけでなく空気の移動を妨げ、結果的に水分浸透を遅らせた可能性があることが示唆された。

### ②撥水層の水分移動モデル作成と吸水実験に対応する水分移動解析

図4のように吸水実験に対応した解析モデルを作成し、試料内の水分収支を有限差分法を用いて解析した。空間については中心差分、時間については前進差分として基礎方程式を離散化した。

液水の移動係数については、高湿域で急激に増加する性質を考慮した関数形で近似し、それぞれの実験 Case で処理なしの試験体を用いた実験に対応する数値解析から近似式の係数を同定した。撥水層は図5に示すように処理を行った表面から6mmの深さに形成されているとし、透湿係数は処理により変化がないとした。シラン系表面含浸材が基材表面に一樣の撥水性を与えた場合、かなり大きな水圧が加わらない条件下では撥水層は液水を保持しないが、本実験で吸水面に加わる水圧は10mmから30mmの範囲であり比較的小さいことから、撥水層での液相の水分伝導率を無視した。

処理なしのCase0では解析結果が実験結果とよく一致した。Case1では、24時間経過後も上面から水分が浸透せず、含水率が低く保たれる様子は再現できた。処理面の反対側から水を吸い上げるCase2では、図6に示すように、解析結果が実測結果とよく一致した。図7はCase3-1の解析結果であるが、解析では実測よりも速く材料内に水分が浸透した。上面からの水分浸透に伴い撥水層から抜けにくい空気が圧縮され、試料内部の空気圧が上昇し、水分浸透が遅れたものと考えられる。

### ③試料内空気の影響を考慮した実験と水・空気同時移動数値解析

正確な水分移動の予測のために空気圧の変化を考慮した水分移動モデルを構築する必要がある。材料内の空気圧の変動が水分移動に及ぼす影響を検討するため、側面のみを断湿・気密処理したレンガ (Case 4) と、側面に加え下面を断湿・気密処理したレンガ (Case 5) を用いて吸水実験を行い、試験体の吸水面以外から空気が抜けにくいCase5では吸水が明らかに遅くなることを確認した。

次に、Case4を再現する数値解析を行い水

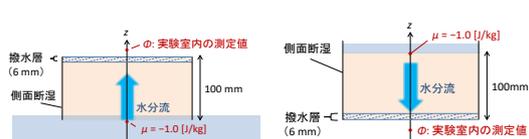


図4 吸水実験に対応した解析モデル (左: Case 2, 右: Case 3)

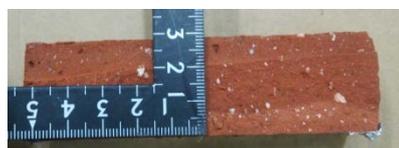


図5 含浸深さの測定

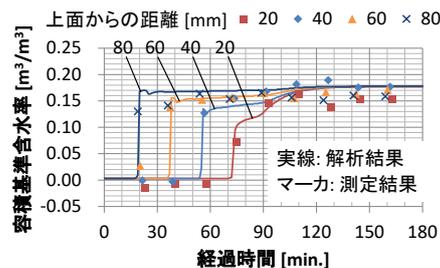


図6 Case 2に対応した解析結果

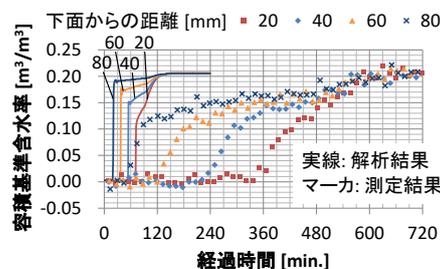


図7 Case 3-1に対応した解析結果 (空気の影響を考慮しない)

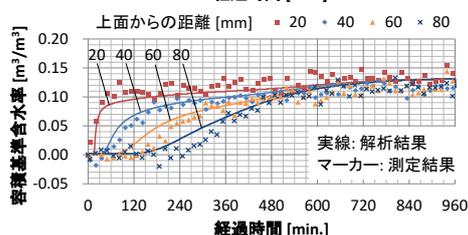
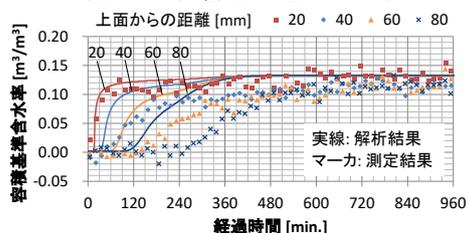


図8 Case 5に対応した解析結果

(上: 空気の影響なし、下: 空気の影響を考慮)

分の移動係数を同定した。その後、既往研究を参考に、液水収支式と空気収支式を基礎式とした水・空気同時移動解析モデルを提案し、Case5を再現する空気・水分同時移動解析を行った。Case5において空気の移動や試料内部の空気圧変化を考慮すると、図8下のように解析結果が実測結果とよく一致したことから、空気が抜けにくい条件下では空気圧の影響は無視できないことを明らかにした。

### (3) 防水・撥水処理された各種材料の屋外暴露による変化の観察

表面処理材の効果や問題点の検討例が少ない木材(杉板)、焼成材料(素焼き板)、石材(花崗岩)を用いた屋外暴露試験を2015年11月から継続して行っている(図9)。本実験ではまず、処理前後の観察と明度・色度の測定を行い、表面処理材には顔料が含まれていなくても、処理によって材料の明度を小さく(暗く)彩度を大きくし、外観を著しく変えるものがあることを明らかにした。

次に、暴露中の定期的な観察と、質量と明度・色度の測定から屋外気象条件下での表面処理材の効果と問題点を検討した。まず、木材に用いた表面処理材は試験体への水分侵入を妨げ、色あせやカビの繁殖による色合いの変化を抑制した。焼成材料と石材では処理を行わなかった試験体の外観の変化が小さく、本実験の範囲では表面処理材が暴露による外観の変化を抑制する効果は確認できなかったが、質量の測定結果から表面処理材が降雨による質量増加を大幅に妨げることが示された。また一方で、含まれる成分が暴露により黄変を起し、木材と石材の変色をかなり大きくした表面処理材もあった(図10)。

さらに、京都市内のモデル住宅において土塀に種類の異なる撥水材を施工し、撥水材自体による変色や、撥水の程度を定期的に観察した(図11)。



図9 屋外暴露試験体  
(左から杉板、素焼き板、花崗岩)



図10 花崗岩試験体の経時変化  
(左から撥水材塗布前、塗布後、暴露2週間後)



図11 土壁への撥水材施工と散水実験

### (4) 屋外文化財への適用可能性検討

トルコ中央部に位置する奇岩地帯である世界遺産カッパドキアにおいて、特に、脆弱な凝灰岩からなる岩窟教会の構造体の崩落やそれに伴う内部壁画の損失を防止するという観点から、外壁の劣化抑制は急務である。

この地域においても岩石の劣化には水分が大きく影響すると考えられるため、劣化抑制策として、撥水性を有する表面処理材を表面に施工する対策が検討されている。ここでは、現存する岩窟教会であるウズムル教会を対象として、教会外壁の劣化メカニズムとその要因を明確にし、教会外壁への表面処理材の適用可能性を検討した。

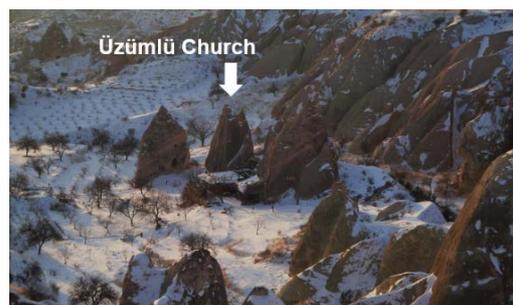


図12 対象としたカッパドキアの岩窟教会

最初に現地での気象条件、教会内温湿度や周囲地盤の温度・水分の測定を開始した。これらの結果から、教会外壁は凍結による表面の粉状化や剥離が生じる可能性があることが明らかとなる一方、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・降雪が見られ、これ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。

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。

本試験施工においては、撥水剤として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。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。

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13の(a)は何も塗布しないもの、(b)は撥水材を全面に塗布したものである。



図13 屋外暴露試験体  
(a) 無処置 (b) 撥水処理あり

凝灰岩体の風化の度合いを定量化するために、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デジタルノギスで測定することとした。

この測定は、現地の協力者によって数週間ごとに行われている。施工から8カ月経過後には、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。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。そこで、1年経過後に行われた現地調査においては、元の撥水材を改良したものを、新たな小岩体に試験的に施工した。施工後24時間経過しても新しい撥水材で処理した岩体では濡れ色はあまり見られなかった。日本国内での実験と比較しカッパドキアでの実地試験で濡れ色が強い理由については、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予定である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

- ①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、査読有、83巻、743号、2018、39-47、<https://doi.org/10.3130/aije.83.39>

〔学会発表〕(計14件)

- ①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 -ピンホールの形状と吸水速度の関係-、日本建築学会大会、2018.9.04-06、東北大学(仙台市)
- ②Kazuma Fukui, Chiemi Iba, Shuichi Hokoi, Moisture behavior inside building materials treated with silane water repellent, 11th Nordic Symposium on Building Physics, 2017.6.12-14, Trondheim (Norway)
- ③ Chiemi Iba, Kazuma Fukui, Shuichi Hokoi, Moisture characteristics of water-repellent consolidants and their applicability to existing buildings, Thermophysics 2016, 2016.10.12-14,

Terchova(Slovakia)

- ④ 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, 3rd Central European Symposium on Building Physics, 2016.9.14-16, Dresden(Germany)
- ⑤ Chiemi Iba, Yoko Taniguchi, Keigo Koizumi, Kunio Watanabe, Katsuhiko Sano, Chunze Piao, Mizuho Yoshioka, Environmental Monitoring and Surface Treatment Tests for Conservation of the Rock-hewn Church of ÜZÜMLÜ, Cappadocia, 13th International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone, 2016.9.6-10, Paisley(Scotland)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

伊庭 千恵美 (IBA, Chiemi)  
京都大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号： 10462342