

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01491

研究課題名(和文)文化財建造物の障壁画の保存公開における環境調整に関する研究

研究課題名(英文) Study on environmental control for the conservation and exhibitions of wall paintings in cultural properties

研究代表者

小椋 大輔 (Ogura, Daisuke)

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号：60283868

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,700,000円

研究成果の概要(和文)：文化財建造物の内部環境は、博物館の収蔵庫環境の様に一定環境ではなく、温湿度や日照等の変動は大きく、例えば襖として使用されている障壁画は、隣り合う空間の環境の影響をそれぞれ受ける。本研究は、文化財建造物内部で保存・公開されている障壁画の物理的劣化、化学的劣化の環境条件を明らかにすることと、建造物内部の障壁画の温湿度などの環境予測に基づき、適切な保存公開のための環境調整を評価するための手法を開発することを目的とする。ここでは、今後公開が予定されている元離宮二条城本丸御殿を対象に、上記の課題について調査研究を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で得られる成果は、世界遺産である二条城は元より、我が国に多数存在する文化財建造物内で障壁画の保存・公開を実施する上で、個々の障壁画の適切な環境条件と、障壁画の修復材料の適切な選定方法として、広く一般的に活用可能な技術に発展できるものと考えられる。またここで開発される技術は、中国、韓国などの東南アジア諸国に存在する同様の障壁画の保存公開においても応用可能と考えられる。

研究成果の概要(英文)：The indoor environment of cultural heritage buildings is not a constant environment like that of museum storerooms, and fluctuations in temperature, humidity, sunlight, etc. are significant. This study aims to clarify the environmental conditions for physical and chemical deterioration of wall paintings preserved and exhibited inside cultural heritage buildings, and to develop a method for evaluating environmental adjustments for appropriate conservation and exhibition based on environmental predictions such as temperature and humidity of wall paintings inside buildings. Research on the above issues was conducted on the Honmaru-goten Palace of Niijo-jō Castle, which is scheduled to be opened to the public in the future.

研究分野：建築環境工学

キーワード：障壁画 文化財保存 変形解析 紙の劣化 変褪色 曝露試験 温湿度 シミュレーション

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ここでは、二条城本丸御殿を対象に京都市文化市民局元離宮二条城事務所の協力の元で調査研究を行う。研究対象は、戸襖、襖、腰障子である。戸襖は、変動の大きい外気環境を大きく受け、襖は、隣り合う室の利用条件によって温湿度環境が大きく異なりその影響を受けることが考えられる。

障壁画の劣化は、本紙の亀裂や破れ、顔料層の剥離、剥落といった物理的劣化、日照等紫外線による変褪色といった化学的劣化、またカビによる汚損、虫による食害といった生物的劣化が考えられる。物理的劣化は、部材やその接着剤の温湿度環境変化による膨張・収縮が大きく関係しており、化学的劣化には日照に含まれる紫外線と、日射にともなう熱吸収が劣化の要因になりうると考えられる。また、例えばカビは成育しやすい高湿環境と関係しており、虫は文化財に使われる接着剤や、発生したカビも関係している。ここでは、主に環境条件が大きく影響を及ぼす物理的劣化と化学的劣化に着目する。なお、生物劣化は高湿環境によるカビ発生等の観点からの検討にとどめる。

一方、戸襖の障壁画は、修復時に絵の描かれている本紙の裏にある支持材の交換が必要であり、障壁画の変形などの影響がなく、耐久性の高い裏板が求められているが、温湿度等の環境条件の違いで戸襖やその各部材がどのように変形するかは明らかとなっていない。また、保存公開における室の使い方によっては、襖を閉じてある部屋だけ空調運転をすることも想定されているが、その際の内外の温湿度と襖の変形についても不明である。また、公開にあたっては、二之丸御殿では紫外線の透過を抑えたアクリル雨戸を用いて、屋外からの光を取り込み見学における光環境をつくっているが、日射の熱量の抑制は出来ておらず室内の高温化による閲覧環境の悪化とそれが襖絵に与える影響が懸念されている。さらに本丸御殿では、屋外の日の当たりやすい襖の室内側、つまり裏面で木部のヤケ等が発生することも確認されている。

2. 研究の目的

本研究は、障壁画の物理的劣化、化学的劣化の環境条件を明らかにすることと、建造物内部の障壁画の温湿度などの環境予測に基づき、適切な保存公開のための環境調整を評価するための手法の開発を目的として以下について検討を行った。

温湿度環境と戸襖、襖等の変形挙動のメカニズムの解明

日照・日射環境が壁画の変褪色に及ぼす影響の検討

- 1) 模擬障壁画を用いた物理環境条件と変褪色の関係の検討
- 2) 本丸御殿の修理時に取り外された部材を対象とした場所毎の劣化状態の評価
障壁画内の温湿度挙動の把握とシミュレーション開発、公開時の対策の検討
本丸御殿内の温湿度挙動の把握とシミュレーション開発、公開方法の検討

3. 研究の方法

3.1 温湿度環境と戸襖、襖等の変形挙動のメカニズムの解明

- 1) 模擬的な障壁画として戸襖、襖等を作成し、二条城本丸御殿に設置し、周囲の温湿度環境と戸襖等の内部の温湿度の関係を調べる。
- 2) 模擬的な戸襖及び襖を作成し2室の異なる環境条件を与えた実験室実験から、周囲の温湿度環境と戸襖等の内部の温湿度の関係を、環境条件と材料の変形の間を明らかにする。
- 3) 戸襖の各部位の温湿度と材料の変形の間を用いて、汎用有限要素法解析ソフト(Abaqus)による戸襖の変形解析を行う。

3.2 日照・日射環境が壁画の変褪色に及ぼす影響の検討

- 1) 支持体構造の異なる複数の模擬障壁画の暴露実験を行い、顔料ごとの変褪色挙動を把握する。
- 2) 本丸御殿の修理時に取り外された部材を対象とした場所毎の紙の劣化状態と変褪色状態を評価し、物理環境条件との関係を考察する。

3.3 障壁画内の温湿度挙動の把握とシミュレーション開発、公開時の対策の検討

- 1) 障壁画を含む壁の温湿度解析を行う3次元モデルを作成する。
- 2) 建物内の一部の空間に空調設備が導入された場合を想定し、空調室、非空調室の間に障壁画を有する壁の温湿度シミュレーションを行う。
- 3) シミュレーションの結果を元に障壁画に生じる亀裂の発生リスクとその抑制方法について検討を行う。

3.4 本丸御殿内の温湿度挙動の把握とシミュレーション開発、公開方法の検討

- 1) 二の丸御殿に設置されており本丸御殿に設置が予定されている透明雨戸の日照・日射の透過特性や熱湿気挙動を把握し、数値モデルを作成する。
- 2) 本丸御殿の温湿度シミュレーションモデルを作成し、過去の本丸御殿の公開時の通年の環境測定値を用いて再現性に関する検討を行う。
- 3) 再現性を確認したシミュレーションモデルを用いて、透明雨戸の有無を考慮した公開方法の検討を行う。

4. 研究成果

4.1 温湿度環境と戸襖、襖等の変形挙動のメカニズムの解明

二条城の戸襖(図1、2)を対象に、実験室実験と解析により、表と裏が異なる温湿度の定常状態に置かれた条件下において汎用有限要素法解析ソフト(Abaqus)による戸襖の変形解析を行い、予測が可能であることを確認した(図3)。また、戸襖を構成する各部材の力学的な役割として、

外枠および横棧による反り抑制効果が大いこと、横棧は外気側に反るときに効果があることを明らかにした。合板支持体は室内側に反るときに限り反りを抑制する効果があるという結果を得た。また、襖の反りおよび紙の亀裂メカニズムを解明することを目的とし、二室型環境試験室を用いた実験を行なった。襖や紙の変形は襖の構造に起因するものであること、新品の襖では乾湿の繰り返しによる紙の残留ひずみはほとんど見られないことを明らかにした。

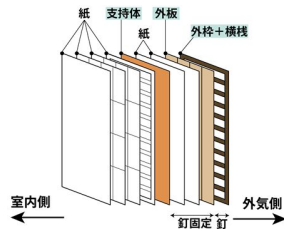


図1 戸襖構成要素の概要

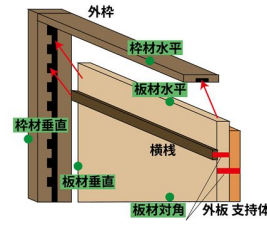


図2 戸襖構成要素の詳細

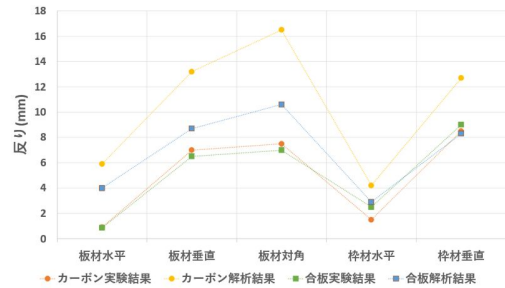


図3 実験結果と解析結果の比較

4.2 日照・日射環境が壁画の変褪色に及ぼす影響の検討

1) 模擬障壁画の暴露実験について

二条城の障壁画については、環境条件と壁画の劣化の関係について明らかにすべく暴露試験を実施し、環境条件と変褪色の測色を実施した(図4)。丹や鎌倉朱極赤の色の変化が大いこと、色差の変化量は年間を通じて一定ではなく、季節変化がある傾向を確認した(図5)。特に丹は1年周期的に変化をしており、年間の温度変化と負の相関を確認した(図6)。一方、天然群青10番など一部の顔料は、梅雨頃である2021年の6月ごろから急激な色の变化を示しており、湿度が顔料の色の变化に影響を及ぼしている可能性があることを確認した(図5)。



図4 暴露試験体における顔料の構成

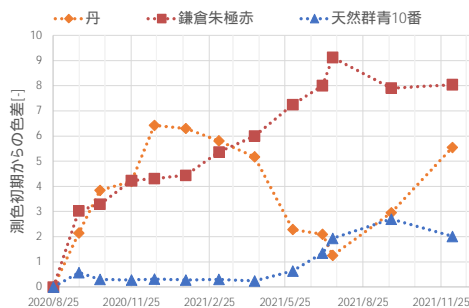


図5 普通合板における色差の変化

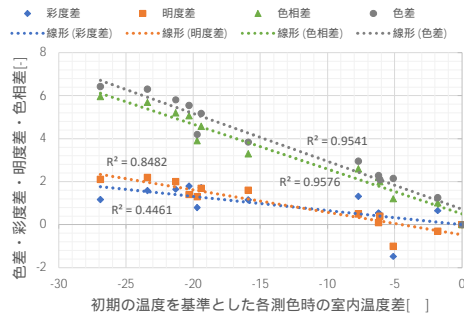


図6 丹の色と温度の関係(普通合板)

2) 修理の取り外し部材の紙の劣化状態と変褪色状態の分析

障壁画を含む襖の構造は、室内空間に面した本紙があり、その裏側には、本紙の下地として、下貼紙が施されており、下地の補強、下地材のヤニの吸収、下地と本紙の伸縮の差を吸収し損傷を食い止めるなど、多くの役割をもつ。本紙の劣化の状態を検討するにあたり、紙の劣化評価については資料採取による分析は難しいため、障壁画の解体修理にあたり取り除かれた下貼紙の分析から、障壁画本紙の保存性を検討した。

二条城御常御殿・二の間の障壁画の解体修理時に除去された旧下貼紙の一部を分析し、紙の pH、明度、セルロース分子量測定の結果、障壁画本紙のヤケと下貼紙の劣化は相関があるとし、本紙の劣化を間接的に評価できる可能性を示した。また、多重の下貼紙は、下地骨に近い層で劣化が進行していた。一方、二条城本丸御殿御書院に設置の旧唐紙の変色評価から、設置時の廊下側では室内側より変色が大きいこと、面内でも端が変色しやすい傾向を明らかにした。

また、二条城本丸御常御殿に同一の仕様の紙が広範囲に使用されている唐紙を対象として状態の比較を行い、御常御殿の建具表面に張られた紙の劣化の特徴を定量的に明らかにすることで、劣化に影響を与えた要因を検討した。唐紙の多くに胡粉地にカビによる着色が観察され、画像解析から御茶所室内は廊下と比較してカビが生育しやすい環境にあったと考えられる(図7)。また、廊下では板戸と比較して襖の方が多くカビが発生しており、襖と板戸では唐紙の温湿度に差があった可能性を明らかにした。

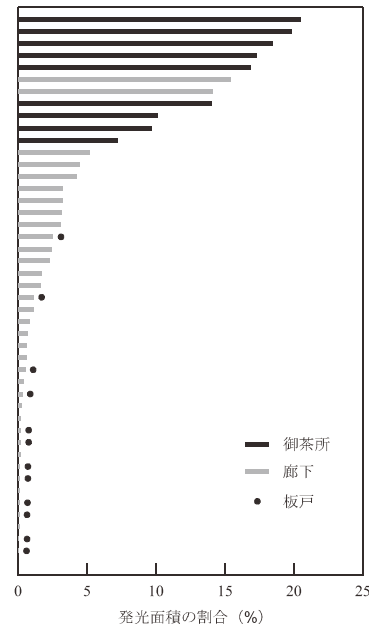


図7 紫外線照射で発光した面積の割合

4.3 障壁画内の温湿度挙動の把握とシミュレーション開発、公開時の対策の検討

文化財建造物内部で保存・公開される壁貼り付けの障壁画の適切な保存・公開方法を明らかにすることを目的とし、建物内の一部の空間に空調設備が導入された場合を想定し、障壁画に生じる亀裂の発生リスクとその抑制方法について、障壁画を含む壁の3次元モデルを対象とした熱水分同時移動解析により検討を行った。

二条城本丸御殿御書院春の間を対象に、春の間の廊下側に空調設備が導入され、夏季に冷房運転がなされた場合を想定し、空調空間では温度25℃、相対湿度90%一定、廊下の間仕切りより北側および障壁画のある春の間の非空調空間は温度32℃、相対湿度60%RH一定とした解析を行った。

現状の壁構造を基準モデルとし、界壁の廊下側空間に断熱材を付加した場合を断熱モデルとして解析結果の比較を行い、基準モデルでは本紙表面で最大で約1.5℃の温度差、約5.2%の相対湿度差が生じ、断熱モデルでは本紙表面での温度差が約0.3℃、相対湿度差が約1.5%にまで低下できることを確認し、亀裂発生リスクを低減出来る可能性を示した(図8,図9)。

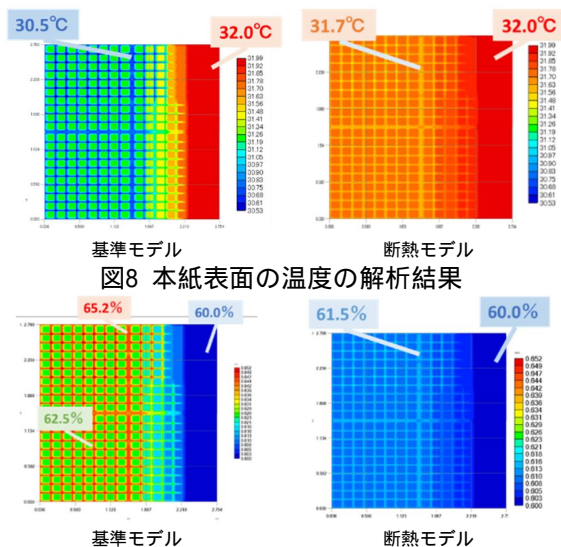


図9 本紙表面の相対湿度の解析結果

4.4 本丸御殿内の温湿度挙動の把握とシミュレーション開発、公開方法の検討

本丸御殿の御常御殿における障壁画の公開時・非公開時の温湿度環境に着目し、二の丸御殿の透明雨戸を御常御殿に設置する場合の環境の予測とその調整方法について検討を行った。本丸御殿の御

常御殿における公開時・非公開時における各室の温湿度を再現するために多数室温湿度解析のモデルを作成し、秋季公開時（公開期間 2004 年 9 月 18 日~27 日）の一の間における解析結果が温湿度ともに実測結果を概ね再現できていることを確認した（図 10）。

次に御常御殿の一般公開に向けた検討として、本解析モデルを用いて、透明雨戸を設置した場合の解析を行い、障壁画を鑑賞するとともに庭を観覧するため、障子を開放し透明雨戸のみを設置し、公開を行った場合は、日射が廊下に入り込むことによって温度が上昇し、絶対湿度、相対湿度ともに変動が大きくなることを確認した(図 11,図 12)。

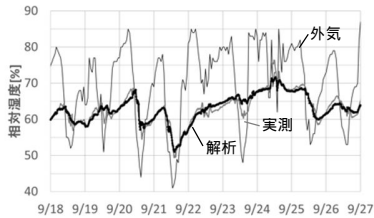


図 10 相対湿度の解析値と実測値の比較

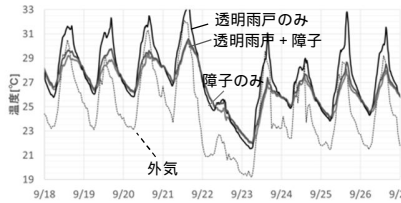


図 11 公開時における一の間温度

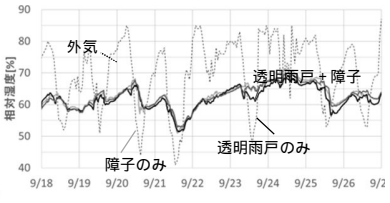


図 12 公開時における一の間相対湿度

また温度および相対湿度を調整する方法として、人数制限および透明雨戸の透過率を下げることの効果を確認し、後者については日射透過により室温が上昇していることから、透明雨戸の日射透過率を 0.85 から 0.5 に変更した場合、室温の上昇を抑えられることがわかった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計20件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 小椋大輔、米田昌弘、伊庭千恵美、高取伸光、岡村知明
2. 発表標題 文化財建造物の障壁画の保存・公開時における環境調整方法に関する研究 二条城御常御殿の温湿度環境予測に基づく公開方法の検討
3. 学会等名 日本文化財科学会第39回大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 乙守倫太郎、高取伸光、小椋大輔、岡村知明、高林弘実、貴田啓子
2. 発表標題 文化財建造物における障壁画の保存・公開に関する研究 実環境下における障壁画の熱湿気性状を考慮した絵具の変褪色要因の検討
3. 学会等名 日本文化財科学会第39回大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小椋大輔、陶器美詠、岡村知明、伊庭千恵美、高取伸光
2. 発表標題 文化財建造物における障壁画を有する戸襖の材料変形に 屋内外温湿度が及ぼす影響
3. 学会等名 日本文化財科学会第38回大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高取伸光、岡村知明、小椋大輔
2. 発表標題 文化財建造物における障壁画の保存・公開に関する研究 実環境下に暴露された顔料の変褪色傾向の測定
3. 学会等名 日本文化財科学会第38回大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高取伸光、岡村知明、小椋大輔
2. 発表標題 文化財建造物における障壁画の保存・公開に関する研究 実環境下に暴露された顔料の変退色傾向の測定
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小椋大輔、乙守倫太郎、高取伸光、岡村知明、高林弘実、貴田啓子
2. 発表標題 文化財建造物における障壁画の保存・公開に関する研究 その2 実環境下における障壁画の熱湿気性状を考慮した絵具の変退色要因の検討
3. 学会等名 日本建築学会近畿支部研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 乙守倫太郎、高取伸光、小椋大輔、岡村知明、高林弘実、貴田啓子
2. 発表標題 文化財建造物における障壁画の保存・公開に関する研究 その3 日本画顔料の色の見え方の湿度依存性
3. 学会等名 日本建築学会近畿支部研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小椋大輔、乙守倫太郎、高取伸光、岡村知明、高林弘実、貴田啓子
2. 発表標題 文化財建造物における障壁画の保存・公開に関する研究 その2 実環境下における障壁画の熱湿気性状を考慮した絵具の変退色要因の検討
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岡村知明、小椋大輔、高取伸光、高林弘実、貴田啓子
2. 発表標題 文化財建造物における障壁画の保存・公開に関する研究 その3：文化財障壁画に用いる下地材料からの化学物質放散量に関する考察
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小椋大輔、乙守倫太郎、高取伸光、岡村知明、高林弘実、貴田啓子
2. 発表標題 文化財建造物における障壁画の保存・公開に関する研究 その4 日本画顔料の色の見え方の湿度依存性
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 乙守倫太郎、高取伸光、小椋大輔、岡村知明、高林弘実、貴田啓子
2. 発表標題 文化財建造物における障壁画の保存・公開に関する研究 模擬障壁画の表面温湿度変動の数値解析による検討
3. 学会等名 日本建築学会近畿支部研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 伊豆藏菜莉、高取伸光、小椋大輔、岡村知明
2. 発表標題 文化財建造物における障壁画の保存・公開環境に関する研究 温湿度環境に起因する戸襖の反りメカニズムの検討
3. 学会等名 日本建築学会近畿支部研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 伊豆蔵菜莉、高取伸光、小椋大輔、岡村知明
2. 発表標題 文化財建造物における障壁画の保存・公開環境に関する研究 温湿度環境に起因する戸襖の反りメカニズムの検討
3. 学会等名 2023東アジア文化遺産保存国際シンポジウム（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 乙守倫太郎、高取伸光、小椋大輔、岡村知明、高林弘実、貴田啓子
2. 発表標題 文化財建造物における障壁画の保存・公開に関する研究 模擬障壁画の表面温湿度変動の数値解析による検討
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 伊豆蔵菜莉、高取伸光、小椋大輔、岡村知明
2. 発表標題 文化財建造物における障壁画の保存・公開環境に関する研究 温湿度環境に起因する戸襖の反りメカニズムの検討
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高取伸光、乙守倫太郎、小椋大輔、岡村知明、高林弘実、貴田啓子
2. 発表標題 文化財建造物における障壁画の保存・公開に関する研究 - 二条城二の丸御殿における模擬障壁画周辺の温湿度環境の実態把握 -
3. 学会等名 日本文化財科学会第40回記念大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 伊豆藏茉莉、高取伸光、小椋大輔、岡村知明
2. 発表標題 文化財建造物における障壁画の保存・公開環境に関する研究 温湿度環境に起因する戸襖の反りメカニズムの検討
3. 学会等名 日本文化財科学会第40回記念大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高林弘実、貴田啓子、乙守倫太郎、岡村知明、小椋大輔、高取伸光
2. 発表標題 障壁画の劣化の定量的評価に関する研究 -カビによる着色の分布解析
3. 学会等名 日本文化財科学会第40回記念大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 貴田啓子・高林弘実・乙守倫太郎・岡村知明・高取伸光・小椋大輔
2. 発表標題 障壁画の劣化の定量的評価に関する研究 -変褪色と設置位置の相関性
3. 学会等名 日本文化財科学会第40回記念大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 貴田啓子・高林弘実・岡村知明・高取伸光・小椋大輔
2. 発表標題 障壁画下貼紙の層構造と劣化について
3. 学会等名 文化財保存修復学会第45回大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

本研究成果は、京都市元離宮二条城保存整備委員会の建物部会の委員を務める研究代表者である小椋大輔によって、元離宮二条城本丸御殿の障壁画の修復並びに公開において情報提供を行っており、今後の本丸御殿の保存公開に活用されてきている。

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	伊庭 千恵美 (Iba Chiemi) (10462342)	京都大学・工学研究科・准教授 (14301)	
研究分担者	貴田 啓子 (Kida Keiko) (20634918)	東京藝術大学・大学院美術研究科・准教授 (12606)	
研究分担者	高林 弘実 (Takabayashi Hiromi) (70443900)	京都市立芸術大学・美術学部 / 美術研究科・准教授 (24301)	
研究分担者	高取 伸光 (Takatori Nobumitsu) (70880459)	京都大学・工学研究科・助教 (14301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------