

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 23 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289203

研究課題名(和文) 覆屋とその周辺地盤が露出展示遺構の劣化に及ぼす影響に関する検討

研究課題名(英文) Influence of covering roof and peripheral ground on deterioration of remains exhibited in the excavation site

研究代表者

銚井 修一 (Hokoi, Shuichi)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・名誉教授

研究者番号：80111938

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,800,000円

研究成果の概要(和文)：柱跡などの土質文化財遺構を露出展示する場合、遺構を雨や日射などから保護するために覆屋がかけられることが多い。ただ、この覆屋の設置により、覆屋への結露により惹き起こされる遺構被害や、屋根に降った雨水が地盤に吸水された後に遺構に浸透するなどの二次的な影響を及ぼし劣化を惹き起こしていることが多い。

平城宮遺構展示館を具体的な対象として、文化財を保護しつつ公開するための施設が文化財に与える二次的な被害を分類・リストアップし、劣化の原因を定性的・定量的に明確にすることにより、適切な覆屋の設計法を提案した。

研究成果の概要(英文)：When remains of earthen cultural assets are displayed in an open exhibition, the enclosures are usually built to protect them from natural elements such as rain or solar radiation. However, these facilities often cause secondary deterioration, for instance, condensation on the enclosures, or damp ground around the remains, following a shower of rain.

The exhibition hall at the Heijyo-kyu palace site is the subject of this study. We itemized and classified the secondary deteriorations of the remains and then attempted to clarify the reasons for the deteriorations both qualitatively and quantitatively. Based on the results, we proposed a design method for the publicly accessible facilities to ensure the earthen cultural assets are effectively preserved.

研究分野：建築環境工学

キーワード：露出遺構 覆屋 劣化 地下水 塩 酸化鉄

1. 研究開始当初の背景

柱跡などの土質文化財遺構を露出展示する場合、遺構を雨や日射などから保護するために覆屋がかけられることが多い。ただ、覆屋の設置が、覆屋への結露の発生や屋根に降った雨水が地盤に吸水された後に遺構に浸透するなどの二次的な影響を及ぼし、劣化を惹き起こしている可能性がある。遺構を保存しつつ一般に展示するためには、その可能性の有無を明らかにし、さらには惹き起こされる劣化の抑制策を提示することが不可欠である。最終的には、覆屋の適切な設計法と建設後のメンテナンスのあり方を確立する必要があると考えられた。

2. 研究の目的

本研究では、平城宮遺構展示館を具体的な対象として、文化財を保護しつつ公開するための施設が文化財に与える二次的な被害を分類・リストアップし、劣化の原因と程度を定性的・定量的に明確にする。それらの知見を露出遺構の劣化に関する基礎的な資料とするとともに、適切な覆屋の設計法を提案することを目的とした。



遺構展示館外観



遺構展示館・北棟内観

3. 研究の方法

2.の目的を達成するために、以下の項目について検討を行った。

(1)劣化と周辺環境の現状把握

- ①定期的および集中的な目視観察により、遺構への水分流入、カビ・藻・苔の成長、塩の析出、土壌の浸食、赤錆などの劣化の性状を把握する。
- ②基礎情報として、展示館周辺の気象状況、展示館内部の温湿度および照度・日射量分布を観測する。

(2)劣化の原因究明

- ①遺構面および法面への水分流入の位置、直近の降雨などより、展示館周囲のどこからの流入水かを推定する。
- ②カビ、藻、苔の生育箇所・季節的变化と直近の降雨との関係、照度との関係を調べ、成長の原因を推定する。
- ③塩の析出箇所、その季節的变化と水分流入・降雨・日射量との相関を明らかにする。
- ④遺構面・法面の小さな窪みの形成・拡大および礫・小石の剥離の観察結果より、それらの形成過程を探る。
- ⑤赤錆の発生箇所と規模、その季節变化の観察結果と降雨、地盤温度との相関を調べ、その発生原因を推定する。

(3)解析モデルを用いた劣化の原因究明

- ①地盤内水分の流れ：地盤内水分流の解析モデルを作成し、測定値を再現する。
- ②塩の析出：地盤内水分・塩の流れと蓄積をシミュレーションし測定結果を再現する。
- ③土壌の浸食：展示スペースの温湿度も考慮した解析モデルにより、遺構面・法面での吸放湿量を算定し、土壌の劣化程度との関係を調べる。また、②の塩析出の解析に基づき、塩析出量と発生応力との関係について検討を行う。更に、昆虫・小動物による劣化の可能性をビデオ記録などにより調べる。以上の検討結果に基づき、土壌浸食の原因を明確にする。
- ④展示館内部の日射量・照度分布の測定と解析：各部の詳細な分布、ブラインドなどの日射遮蔽建具の設置や開閉による室内照度の変化をシミュレーションにより求め、草本類や藻類の成長、塩の析出との関連を調べる。
- ⑤酸化鉄発生メカニズムの解明：南棟雨落ち溝における赤錆の発生状況を再現する解析モデルを作成する。少量の水を雨落ち溝に流すことによる酸化鉄の除去可能性を調べる。

(4)露出展示のための施設の設計法とメンテナンス

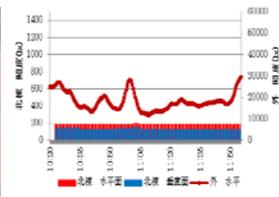
以上の結果をもとに、露出遺構の劣化を極力抑制する展示施設の設計法および建設後のメンテナンスのあり方を明確にする。

4. 研究成果

(1)劣化状況

本節では、遺構展示館でみられる劣化現象について目視観察の結果を整理し、現在の遺構展示館の温熱環境と劣化現象の関係を推定した。劣化現象として、1) 遺構土壌の崩落・クラックの発生、2) 遺構土壌の浸食、3) 蘚苔類の繁茂、4) 塩類の析出、5) 褐色沈殿物（南棟）が見られた。それらの状況について検討した結果を以下に列挙する。

- ①北棟の柱穴には蘚苔類が繁茂している箇所と繁茂していない箇所があった。両者において土壌含水率と照度を測定し、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を明らかにした。



柱穴での藻の繁茂(北棟) 北棟内の照度

- ②遺構表面で析出が認められた塩類をX線回折分析法により同定し、南北両棟においてGypsumが通年析出していること、冬期の南棟においてのみThenarditeが析出していることを確認した。後者は多くの既往研究において、多孔質材料の破壊におよぼす影響が極めて

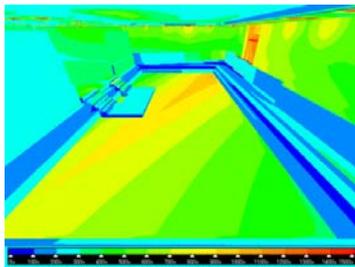


磚への塩の析出 遺構面の小さな窪み

て大きい塩であることが示されているものであり、実際遺構展示館においても磚や石材、および遺構土壌表面の粉状化が冬期に進行することを確認した。

③遺構面・法面の小さな窪みの拡大・形成の観察、礫・小石の剥離の観察結果よりそれらの形成原因を探り、昆虫による可能性が大きいという結論に到った。

④展示館内部の照度・日射量分布を測定し現状を把握し、それが藻の成長に及ぼす影響を明らかにした。さらに、展示館内部の日射量・照度分布の測定と解析を行い、その詳細な分布、ブラインドなどの日射遮蔽建具の設置や開閉による室内照度の変化をシミュレーションにより求めた。



北棟における照度分布の解析結果

⑤南棟における水の浸み出しと褐色沈殿物に関する調査：

南棟遺構面では、浸出水に溶存する鉄が遺構面に沈殿し著しい汚損を引き起こしているが、これらの水分流や褐色沈殿物の発生箇所は遺構内の一定箇所に着目している。そこで遺構面に浸出する水の挙動と褐色沈殿物が発生する箇所の分布、その量的変化の挙動を目視観察により調べ、褐色沈殿物の発生要因について検討し、以下の結果を得た。

1) 降雨時に、南棟遺構面南東隅では盛土と埋戻し土の層境界、および埋戻し土と遺構面の層境界の2箇所から、その他の箇所では後者の層境界からのみ水が流入している。

2) 褐色沈殿物は常に一定箇所において生じている。いずれの箇所においても、沈殿物は遺構面直上から流入する水においてのみ生じている。

3) 沈殿物の増減：強度の弱い雨が断続的に降る10月頃から翌年の4月頃までは地下水が遺構面へと緩やかに流入し続け、沈殿物は蓄積され続ける。その後、地下水位が低下する夏期には沈殿物量には顕著な変化は認められない。8月頃からの強い降雨により、ある一定以上の速度で遺構面北東方向へと流下し、それにともない沈殿物も移動する。それ

により遺構面南東隅では沈殿物が大幅に除去された。

4) 蛍光X線分析法およびX線回折分析法により、南棟の雨落溝の褐色の沈殿物がやや非晶質の含水酸化鉄であることを明らかにした。含水酸化鉄は遺構面に流入する地下水に溶存する鉄に由来すると推察され、発生要因として地下水の酸化還元環境が大きく影響を及ぼしていると考えられる。

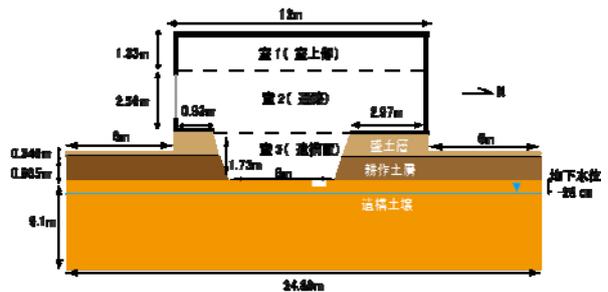
(2) 温湿度解析モデルによる遺構展示館の室内温湿度の再現

遺構展示館の北棟及び南棟の室内温湿度と地盤含水状態を、熱水分同時移動方程式を基礎とする解析モデルにより再現し、解析モデルの妥当性について検討した。

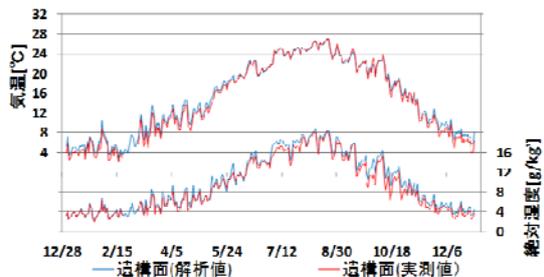
①解析モデルの妥当性：北棟については、夏の絶対湿度を除く館内温湿度の年変動をよく再現できた。南棟については、通路の気温変動および3月～5月の遺構面相対湿度が十分な再現には至らなかったが、それ以外の年間変動、日変動ともに概ね再現できた。特に硫酸ナトリウムの析出が見られた冬期の温湿度については良く再現できている。

②本解析モデルの解析結果を用いて地盤内部の含水状態について検討した。その結果、北棟および南棟ともに、館内法面表面の土壌の含水率は常に低い値を示すが、降雨時には含水率が増加し、法面内部では常に高い含水状態が維持されている。特に、南棟においては奥行き方向の含水率の変化が急激であり、屋外の地表面に浸透した雨水が館内の土壌の含水状態に影響を及ぼしている。

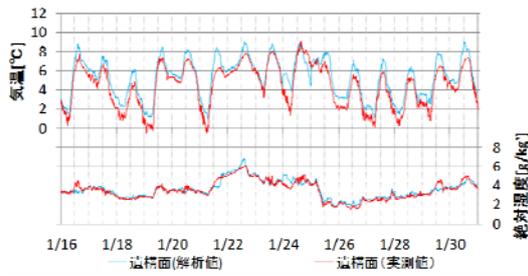
③これらの水が溶存状態の塩とともに屋内法面で蒸発することで、法面における塩析出が引き起こされていると考えられる。



展示スペース・地盤の解析モデル



展示スペース温湿度の比較 (通年)



展示スペース温湿度の比較（冬季）

(3) 遺構展示館周辺地盤における水分移動の再現と酸化還元環境の解析

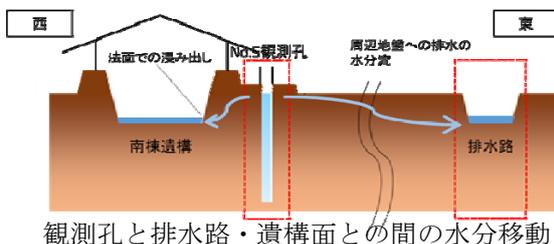
① 土壌中の鉄は、還元環境では2価の鉄イオンとして土壌間隙水中に溶存し、酸化環境では含水酸化物として褐色を呈する懸濁粒子あるいは沈殿物として存在する。遺構展示館南棟の雨落ち溝には褐色を呈する含水酸化鉄が沈殿、懸濁している。遺構面は大気と接触し常に酸化環境にあるため、含水酸化物によって生じる遺構面の汚損の多寡は、遺構面に浸出する水の量とそれに溶存する鉄の濃度に、従って遺構周辺地盤の酸化還元環境に依存していると言える。



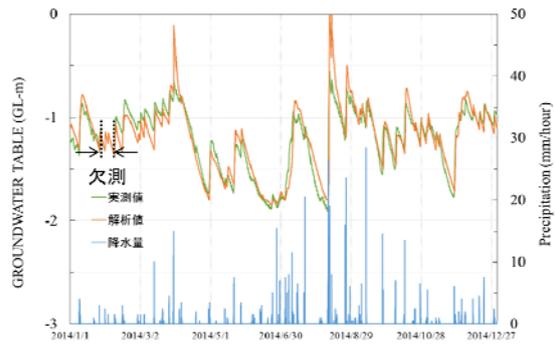
雨落ち溝を移動する懸濁状の褐色物質

② 一般的な地下水における酸化剤は溶存酸素 DO で、その濃度が地盤内の酸化還元環境の指標となる。DO は土壌中の微生物が有機物を酸化分解する際に減少し、雨水や地下水面からの溶け込みによって供給される。ここでは DO を土壌水の溶質として扱い、地盤内部の熱水分移動とともに DO の移動を解析し、地盤内の酸化還元環境をモデル化する。南棟覆屋付近の地盤を解析対象とする。

③ まず、周辺地盤の高低差と東側排水路との間の水分移動を考慮した水分移動計算をし、地下水位変化について実測値との比較を行った。地下水位の解析結果は、6月から8月にかけて実測値よりも若干高い値を示したが、その他の期間においては地下水位の低下速度や降雨時の応答などの地下水位の変動を大略再現できている。



観測孔と排水路・遺構面との間の水分移動



観測孔における地下水位変化の実測値と解析値の比較

④③の水分移動モデルに溶存酸素や溶存態および懸濁態鉄などの物質移動を合わせた計算をおこない、南棟南東隅で水の浸み出しが見られる2箇所、すなわち盛土と埋戻し土の層境界、および埋戻し土と遺構面の層境界に当たる深度の土中水中の物質濃度変化を推定した。その結果、溶存酸素濃度は地下水位位置によって律されており、地下水位よりも常に高い箇所に位置する盛土と埋戻し土の層境界では常に溶存酸素濃度が約5 [mg/L] を示し酸化的な環境にある一方で、夏期を除く期間では地下水位よりも低い箇所に位置する埋戻し土と遺構面の層境界では常に溶存酸素が枯渇した還元的な環境にあることが分かった。

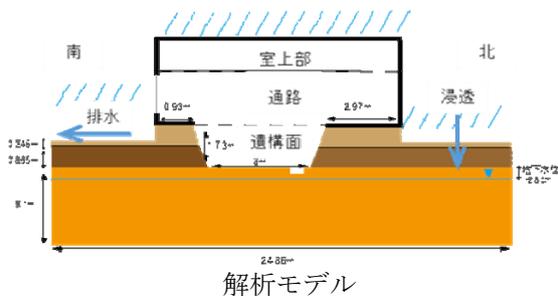
⑤したがって、遺構面から地下水が浸出する秋期から翌年の春期にかけては、地下水中に多量の溶存態の鉄が含まれており、遺構面に浸出した水から褐色沈殿物が生じて蓄積されるという観察結果と調和的な結果が得られた。

(4) 温湿度解析モデルによる室内環境設計の検討

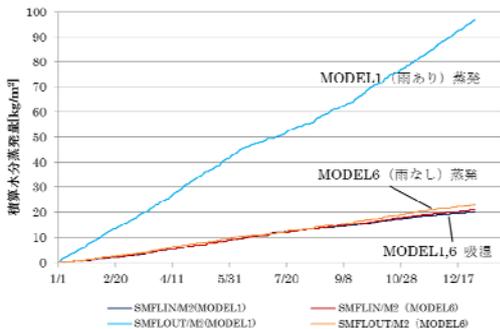
露出展示遺構の劣化現象、特に塩析出に着目して、その劣化を抑制する保存環境設計について検討した。地盤に関しては、遺構面からの水分蒸発量を減少させるために地下水位を制御した場合と地表面からの雨水の浸透量を制御した場合について、覆屋に関しては、館内の気温低下を抑制するために日射量を制御した場合と、外気との換気回数を制御した場合の効果について検討し、以下の結果を得た。

① 地下水位を低下させることにより、遺構面からの水分蒸発量は減少するが、遺構法面からの水分蒸発量は、水位を一定の深さ以上に下げないと減少しない。

② 南側屋外の地表面への雨水の浸透を防ぐことにより、遺構法面からの水分蒸発量は減少する。従って、周辺地盤において雨水を適切に排水することによって、覆屋内部の遺構への水分の流入を抑制し、遺構面からの水分蒸発量を減少させることができる。

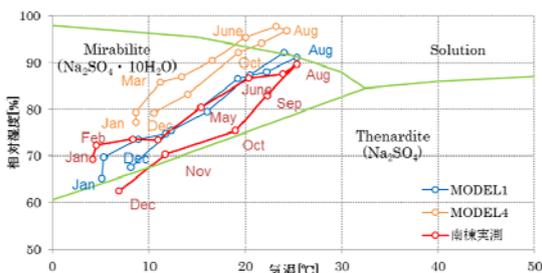


解析モデル

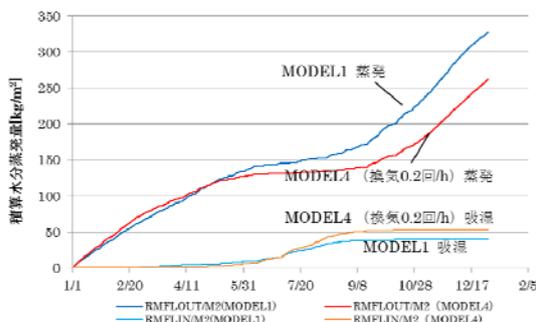


年間積算水分蒸発量 (南側法面)

③換気回数を抑制すると、覆屋内部の相対湿度が上昇するため、硫酸ナトリウムの相変化、すなわち 10 水和物 (Mirabilite) から無水物 (Thenardite) への相変化を抑制できる。同時に、遺構面からの年間積算水分蒸発量は減少するが、室内の気温の上昇により水分蒸発量が増加する期間が生じる。また、夏期には相対湿度が 90%を超え、カビや蘚苔類の生育が促進されるため、季節ごとの換気計画が必要となる。



塩析出と温湿度の関係



年間積算水分蒸発量 (遺構面)

④館内に入射する日射を完全に遮蔽すると、遺構面からの水分蒸発量はわずかではあるが減少する。日射の取り込み抑制は、同時に草本類の繁茂を抑制するため、遺構の劣化の進行抑制に寄与するものと考えられる。

⑤地表面となる保護盛土に使用される土壌の水分移動特性が、遺構からの水分蒸発量に影響を与える。水分伝導率が小さい土壌を保護盛土に用いると、遺構面からの水分蒸発量は減少する。

⑥以上の結果より、塩の析出以外の劣化の抑制に関して、展示施設の設計法および建設後のメンテナンスのあり方として、

- 1) 遺構面の照度を減らすことで蘚苔類の繁茂を抑制し得る。
- 2) 沈殿物が蓄積される秋期から春期にかけて、遺構面においてある一定の流速を有する水分移動を作り出すことで、沈殿物の蓄積を抑制し、現在生じている汚損を軽減し得るものと推察される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 14 件)

① 中嶋麻起子, 銚井修一, 小椋大輔, 建物外壁における藻類の生育状況に関する研究、日本建築学会環境系論文集、査読有、第 80 巻、2015、331-337

② 中嶋麻起子, 銚井修一, 小椋大輔, 仁和寺九所明神における藻類生育と周辺環境との関係、日本建築学会環境系論文集、査読有、第 80 巻、2015、575-582

③ 松岡 大介, 銚井 修一, 軒裏換気方式における冬期の換気口と通気層の小屋裏除湿効果 温暖地における木造住宅の小屋裏湿度形成に関する研究 その 2、日本建築学会環境系論文集、査読有、第 80 巻、2015、1053-1062

④ 中嶋麻起子, 銚井修一, 小椋大輔, 建物外壁に生育する藻類の増殖と死滅のモデル化に関する研究、日本建築学会環境系論文集、査読有、第 80 巻、2015、575-582

⑤ Soichiro Wakiya, Noriyoshi Kuwabara, Shuichi Hoko, and Daisuke Ogura, Deterioration of Remains Exhibited in the Excavation Site Exhibition Hall, Heijyo-kyu Palace Site, Advanced Materials Research, 査読有, Vol.1126, 2015, 39-52, doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.1126.39

⑥ Daisuke Matsuoka, Shuichi Hoko, and Hiroaki Saito, Hygrothermal Conditions in Attic Spaces of Wooden Houses with Eaves Ventilation during Winter in Japan with a Mild Climate, ASTM, STP, 査読有, DOI: 10.1520/STP159020150026 17-October, 2015

⑦ Chiemi Iba, Ayumi Ueda, and Shuichi Hoko, Field survey on frost damage to roof tiles under climatic conditions, Structural Survey, 査読有,

⑧松岡 大介, 銚井 修一, 軒裏換気方式における冬期の小屋裏温湿度の解析 温暖地における木造住宅の小屋裏温湿度形成に関する研究 その3, 日本建築学会環境系論文集, 査読有、査読有、第81巻、第725号、2016, 581-588

⑨榑藤尚、三原邦彰、大山雅彦、銚井修一、ガラスカーテンウォールスパンドレル部の設計用結露シミュレーションプログラムとその精度検証、日本建築学会環境系論文集、査読有、第81巻、第726号、2016, 687-696

⑩榑藤尚、三原邦彰、銚井修一、ガラス面結露対策のシミュレーション検討 ガラスカーテンウォールスパンドレル部の結露防止に関する研究 その2、日本建築学会環境系論文集、査読有、第81巻、第726号、2016, 697-706

⑪Kana Hagihara, Chiemi Iba, Shuichi Hokoi, Effective use of a ground-source heat-pump system in traditional Japanese “Kyo-machiya” residences during winter, *Energy and Buildings*, 査読有, Vol.128, 2016, 262-269

⑫梅野徹也, 銚井修一, 齋藤宏昭, 本間義規, 壁体内通気層における防露性能の実態に関する研究 その2 通気層内温湿度変動の実態把握、日本建築学会環境系論文集、査読有、第81巻、第729号、2016、951-959

⑬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、査読有、第81巻、第730号、2016, 1195-1104

⑭Shuichi Hokoi, Moisture Research in the Field of Architecture, Japan, *J. of the Human-Environment System*, 査読有, Vol.19, No. 2, 2017, 35-47

[学会発表] (計6件)

招待講演3件

① Makiko NAKAJIMA, Shuichi HOKOI, Daisuke OGURA, Algal Growth on the External Walls of Buildings -Relationship between Environmental Conditions and Algal Growth on the Exterior Walls at Kusyo Myojin Shrine, Ninna-ji Temple in Kyoto, First International Symposium on Building Pathology, March 25, 2015, Porto, Portugal (招待講演)

② Soichiro Wakiya, Noriyoshi Kuwabara, Shuichi Hokoi, and Daisuke Ogura, Deterioration of Remains Exhibited in the Excavation Site Exhibition Hall, Heijyo-kyu Palace Site, 2nd Frontiers of Architectural Research Symposium on Architectural Heritage Conservation Technology, 19 October, 2015, Nanjing, China. (招待講演)

③ Soichiro Wakiya, Noriyoshi Kuwabara, Shuichi Hokoi, and Daisuke Ogura, Deterioration of Remains Exhibited in the Excavation Site Exhibition Hall, Heijyo-kyu Palace Site, 2nd Frontiers of Architectural Research Symposium

on Architectural Heritage Conservation Technology, 19 October, 2015, Nanjing, China. (招待講演)

④ 桑原範好、銚井修一、脇谷草一郎、小椋大輔、平城宮跡遺構展示館における露出展示遺構の劣化に関する研究、日本建築学会近畿支部、2015年6月25日、大阪工業技術専門学校

⑤ 安井洋之、小椋大輔、銚井修一、脇谷草一郎、柳田明進、模擬古墳から検討した埋蔵環境下における遺物保存に関する研究 -微生物活動が石室内酸素・二酸化炭素濃度を与える影響-、日本建築学会近畿支部、2015年6月25日、大阪工業技術専門学校

⑥ 芥子円香、小椋大輔、銚井修一、釜尾古墳の装飾の保存に関する研究-古墳の熱水分解析による結露抑制対策の検討-、日本建築学会近畿支部、2015年6月25日、大阪工業技術専門学校

[図書] (計 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

銚井 修一 (HOKOI, Shuichi)

京都大学・大学院工学研究科・名誉教授

研究者番号：80111938

(2) 研究分担者

小椋 大輔 (OGURA, Daisuke)

京都大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：60283868

脇谷 草一郎 (WAKIYA, Soichiro)

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・主任研究員

研究者番号：80416411

(3) 連携研究者

(4) 研究協力者

()