

機関番号：14301
 研究種目：基盤研究(C)
 研究期間：2008～2010
 課題番号：20560549
 研究課題名(和文) 古墳壁画の保存に関する研究 ―周辺熱水分環境の影響とその対策―
 研究課題名(英文) Study on Preservation of Mural Paintings in Tumulus
 - Investigation of Influence of Thermohygric Environment
 on Mural Paintings and Its Control -

研究代表者
 小椋 大輔 (OGURA DAISUKE)
 京都大学・大学院工学研究科・准教授
 研究者番号：60283868

研究成果の概要(和文)：本研究では、古墳壁画の保存を目的として、高松塚古墳の石室の発掘後から、現地保存され解体前までに行われた保存対策や環境制御と環境条件の変化が石室内温湿度環境に与えた影響について明らかにし、より適切な保存対策や環境制御方法の提案を行った。また、今後発掘調査を実施し副葬品等を取り出すことが検討されている鬮鷄山古墳を対象に、発掘調査時に、遺物、遺構の劣化進行を抑えるための空調制御手法について提案を行った。

研究成果の概要(英文)：In this study, in order to preserve mural paintings in tumulus, we clarified effects of preservation measures, controlling environment and variation of the environment of Takamatsuzuka tumulus. Being based on the obtained results, we proposed other appropriate measures and method for controlling the environment to preserve the mural paintings. In addition, we proposed a method for controlling the air conditioning to reduce the risk of progressive deterioration on artifacts and remains of Tsugeyama tumulus.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：建築環境工学

科研費の分科・細目：建築学・建築環境・設備

キーワード：古墳、保存科学、温湿度、熱水分同時移動、高松塚古墳、鬮鷄山古墳、文化財

1. 研究開始当初の背景

1972年に発見された高松塚古墳壁画は、保存施設が石室に隣接する形で建設され、現地で保存されてきた。しかしカビ等を主な原因とする壁画の劣化のため発見後30年数年で解体・修理することになった。石室の解体は2007年8月に終わり、現在修復作業が行われつつある。これら国宝である絵画の劣化は著しく、文化庁を中心とした対策検討会において、そのカビの発生原因と今後の保存対策の策定に関する検討が継続されている。その中で、今後の保存対策の方針として、将来的に

は、カビ等の影響を受けない環境を確保し、現地に返すことが提言されている。

古墳や洞窟内部は湿度が非常に高く、微妙な環境の変化によりカビ等が発生する危険に晒されている。一方、カビを抑えるために湿度を下げると、特に漆喰壁画の場合、乾燥収縮による剥離や、乾燥面での塩類析出といった別な問題が発生する可能性が出てくる。

高松塚古墳においては、乾燥剥離に対して問題のない湿度域が未知のため、湿度を下げる対策はとられず、石室解体の前には出来る

だけカビの発生を抑制させるために、周辺地盤の温度を下げ、解体時には、石室を断熱された覆屋で囲い空調により低温・高温条件で制御し、壁面の結露、カビ、乾燥剥離の発生を抑える対策がとられた。

2. 研究の目的

本研究においては、高松塚古墳を対象として発掘時から解体までの石室内部の温湿度環境を周辺地盤の熱・水分状況とあわせて把握することにより推定し、壁面の劣化に対して危険となる温湿度がどのような影響を受けて形成された可能性が高いのかを明らかにすることを主な目的とする。その上で今後の現地保存において壁面の劣化を出来るだけ抑制する方法の検討を行い、今後発見されるであろう同様の古墳や洞窟遺跡において、このような問題を生じさせないために、発掘時点から始まる適切な保存対策手法を確立することをもう一つの目的とする。

さらに、上記研究とは別に、未盗掘で石槨内に副葬品等の遺物が残存する鬮鷄山古墳を対象として、夏期の温度上昇抑制のための手法の検討と、古墳の石槨内遺物を取り出す場合に、遺物、遺構の劣化進行を抑制する空調制御方法の検討を行う。

3. 研究の方法

高松塚古墳に関する検討については、石室内の温湿度変動の測定値や記録などを元に、影響を与える要因を取り上げて、墳丘、保存施設等を考慮した石室の温湿度解析モデルを用いて推定する。なおモデル化や境界条件などの設定には、過去の石室周囲の環境や内部作業などに関する測定値、記録を可能な範囲で考慮し、不明な点は推定を行った。

検討については、発掘直後と、現地保存を行うために設置された保存施設が稼働していた期間の2つの期間について行った。

鬮鷄山古墳に関する検討については、まず、温度上昇抑制を期待して墳丘に敷設された日射遮蔽ネットの効果を検討するため、現地でネットの日射特性の測定を行い、ネットを考慮した石槨内温湿度の解析モデルを作成し、それを用いて検討を行った。

また、石槨内の遺物の劣化の進行と、発掘調査時の作業者の安全の観点から、石槨内部発掘調査時の石槨内空気質環境の制御方法を明らかにすることを目的として、石槨内の $O_2 \cdot CO_2$ の予測モデルの作成を行った。

4. 研究成果

(1) 高松塚古墳の発掘直後の温湿度と保存対策の効果と改善策

発掘直後に行われた保存対策(図1)の効果を確認するために数値解析による検討を行った。得られた結果を以下でまとめる。

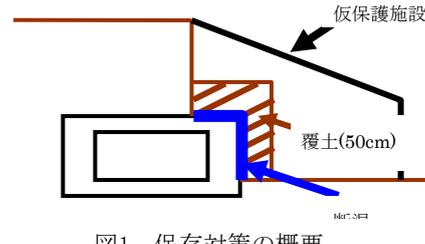


図1 保存対策の概要

- ① 発掘前の石室内相対湿度は年間を通じて100%近くであるが、結露発生時間は短かったと考えられる。
- ② 発掘後に何も保存対策を講じなければ、夏期に石室温度は約22°Cまで上昇し(図2, Case0), 南側壁面とその近くの天井の湿度は90%を下回る程に乾燥し(図3), 石室内では年間200日以上結露が発生したと推定される。
- ③ 露出された石室に覆土を行う対策(Case2)が、仮保護施設を設ける対策より、石室内温度上昇の抑制と室内表面の乾燥抑制に対する効果が大きい(図4)。
- ④ 石室の外気に露出された部位に断湿と覆土を行い仮保護施設で覆う場合が、石室の最高温度が最も低く(図2, Case3), 石室内側表面の湿度低下が最も低かった。これは現実に行われた対策に相当する。
- ⑤ 検討を行った保存対策では、夏期の北側床面の高湿化と結露発生を抑えられない。この時期の結露抑制のために別な対策の検討が必要である。

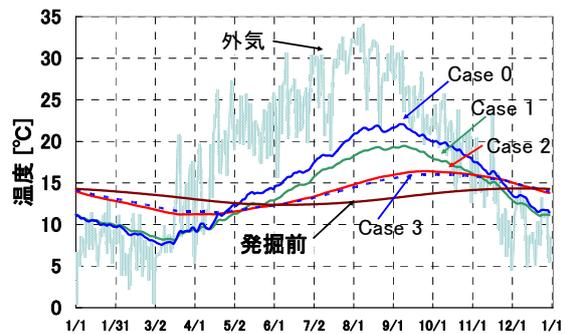


図2 石室内温度の年変動(計算値)

(Case 0 : 仮保護施設, 覆土を設けない, Case 1 : 仮保護施設のみ設ける, Case 2 : 仮保護施設と覆土を設ける, Case 3^{*} : 仮保護施設と防湿層を有する覆土を設ける。 ※実際に行われた保存対策に相当する)

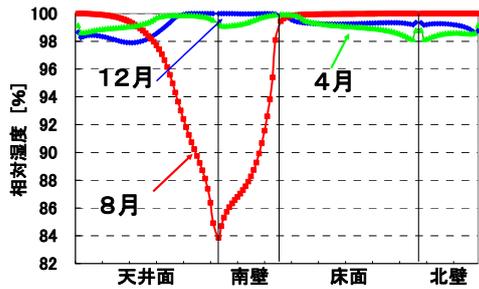


図3 石室内表面の相対湿度分布 (Case0)

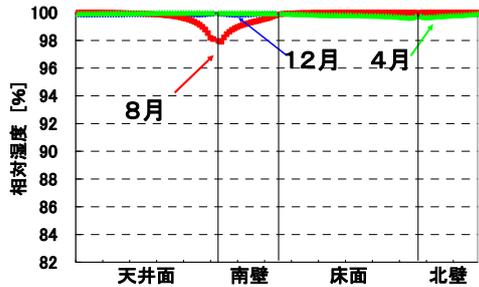


図4 石室内表面の相対湿度分布 (Case2)

また、上記⑤の結果を踏まえ、高松塚古墳を対象に、発掘直後の応急保存対策として発掘部位への断熱材設置の効果について検討を行い、以下の結果を得た。

- ①発掘部位に設置すべき断熱材面積には適切な値があり、断熱材の熱抵抗が大きいほど壁画劣化の抑制に効果がある。
- ②熱容量の違いは壁画劣化抑制に与える影響が小さい。
- ③ここで対象としている高松塚古墳では、発掘部位の鉛直面と水平面方向にそれぞれ0.5m, 1.0m程度、覆土と断熱材を拡張して設置するのが適当であり、乾燥の抑制に対しては $10[\text{m}^2\text{K/W}]$ 以上(図5)、結露蓄積の抑制には $15[\text{m}^2\text{K/W}]$ 以上(図6)の熱抵抗があればよい。

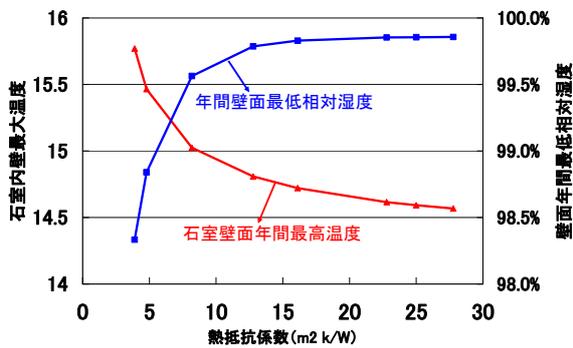


図5 壁面年間最低相対湿度と年間最高温度と熱抵抗の関係

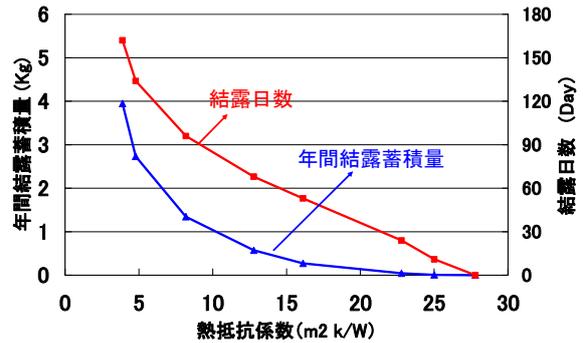


図6 結露日数、年間結露蓄積量と熱抵抗の関係

(2) 高松塚古墳の保存施設稼働から石室解体直前までの検討

保存施設は、壁画の点検や、壁画の剥落止めといった石室内作業を安全に行うことを目的として設置された。石室の南側に3つの前室(前室A, 前室B, 準備室)が設けられ(図7)、前室の温度制御は、天井・床・側壁に設置された銅管の吸放熱パネルにより行われた。この銅管内の送水温度は、取合部の土中温度と等しい温度となるように制御が行われた。施設は1976年から稼働し、2007年の石室の解体時まで運転が行われた。

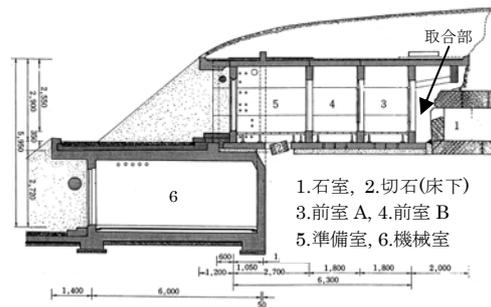


図7 保存施設断面図

保存施設稼働時には、石室内の温度が上昇し、その上昇は、外気温より大きく(図8)、2001年以降のカビの大発生の一因と考えられることから、この要因の検討を行うことを課題とした。

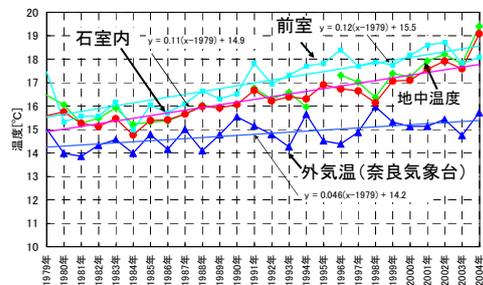


図8 石室内と外気の温度の測定値の年平均値

検討により得られた結果は以下の通りである。

- ①保存施設稼働後の約 30 年間の気象条件の変化は、この間の石室内の温度上昇の主たる要因の一つといえるが、それだけでは温度上昇を完全に説明することはできない。
- ②2004 年末頃の石室内の温度上昇の要因の一つとして、2005 年 9 月に、竹、木を伐採し防水シートを設置したことが影響している可能性が高い。しかしながら、保存施設稼働時の一年当たりの平均的な石室の温度上昇は、気象条件の影響や被覆条件の変化だけでは十分に説明することができない。
- ③保存施設の温度制御用の吸放熱パネルへの送水温度測定値を用いた解析により得られた石室温度は、2002 年から 2004 年を除いて測定値とかなり良く一致する。すなわち、保存施設稼働後の約 30 年間の石室温度の上昇は、この間の気象条件変化と送水温度の変化を考慮すると大略説明できる(図 9)。しかし、2002 年から 2004 年の石室温度の急激な上昇は、以上の解析でも十分に説明することはできない。
- ④石室内点検作業等に伴い、石室内への人の出入りが多かった時期(第一次修理～第三次修理, 2001 年以降)に石室温度が高く、カビの発生頻度も高いこと(図 10)を踏まえ、入室による温度上昇を検証すると、特に連続した入室があった後には、石室温度がやや高めに推移した。これも石室の高温化の要因の一つと考えられる。

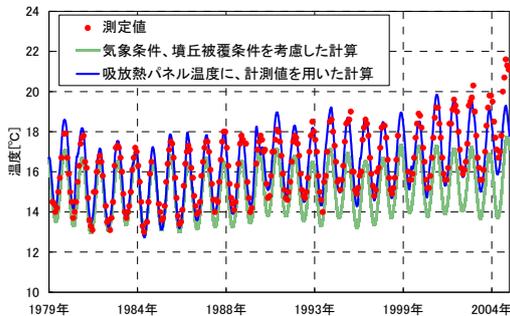


図 9 石室内温度の測定値と数値解析結果の比較

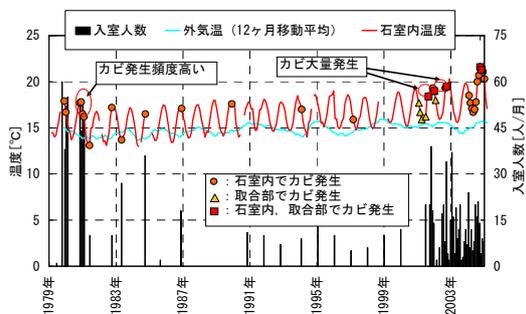


図 10 カビ発生状況と入室状況、石室内温度
(3) 鬮鷄山古墳の日射遮蔽ネットの影響と地表面被覆条件の改善策

平成 18 年 5 月から後円部に設置された日射遮蔽ネットの効果を含めて明らかにするため石槨内温湿度解析モデルを用いて、主に夏期の石槨内温度上昇抑制について検討し、以下の結果を得た。

- ①ネット敷設により石槨内温度の夏期の上昇は 0.2℃程度抑えられる。
- ②ネットの日射反射率と中空層の換気の増加により、石槨内温度は約 1℃低下する可能性がある(図 11)。
- ③地表面を断熱し盛り土を行うことにより、石槨内温度の最大値は夏期に約 4℃低下し、振幅も抑えられ、その効果は大きい(図 11)。

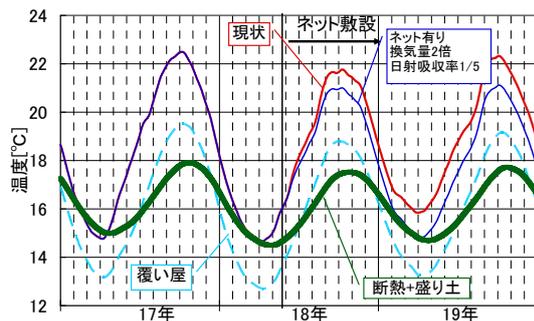


図 11 各種対策を施した場合の石槨内温度の比較

(4) 鬮鷄山古墳の石槨内部発掘調査時の空調制御方法

発掘調査時の鬮鷄山古墳の石槨周辺の温湿度制御方法を明らかにするため、第 1 主体を対象とし、発掘調査開始時期を 9 月として、石槨及び地下室を含む地盤の解析を行い、以下の結果を得た。

- ①地表面を断熱すると石槨内温度の年振幅及び石槨壁面間の温度分布を抑えることができる。
- ②発掘調査前の、4 月 1 日から地盤表面に覆土がある断熱材を設置することにより、その後の石槨内の最高温度と年平均温度を最も低くすることができる。
- ③石槨の上部の地盤表面を全長 10m の断熱材で覆うことにより、地盤全面を断熱材で覆う場合と同程度の石槨内温度の年平均値と振幅、表面温度分布が得られる。
- ④発掘調査時に、石槨内温度をほぼ一定に保ち、温度分布を小さくするには、事前に地盤表面に覆土がある断熱材を施し、石槨に隣接する発掘部位空間の壁面に断熱を施さず、その空間の温度を石槨年平均温度に近い値で一定に保つ(図 12) が必要である。

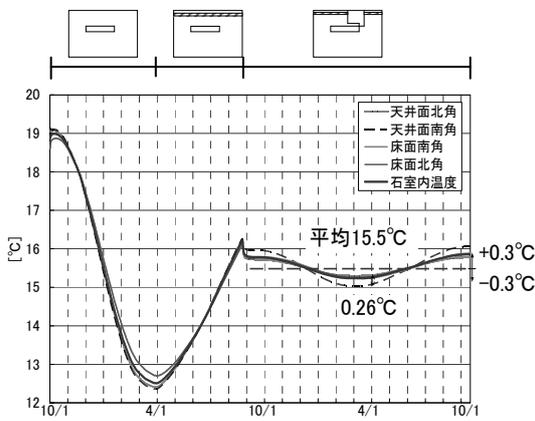


図 12 石槨空気及び内壁面温度変動

次に、關鷄山古墳の石槨内部発掘調査時の適切な温湿度・空気質環境の制御方法を明らかにするため、現状の石槨内 O_2 ・ CO_2 の挙動の再現を目的とした。石槨内空気質予測モデルを構築し、植物根等の生物活動と大気からの拡散の両者を考慮し、石槨内温湿度の予測と組み合わせることで測定値の変動を十分再現できることを示した。(図 13, 14)

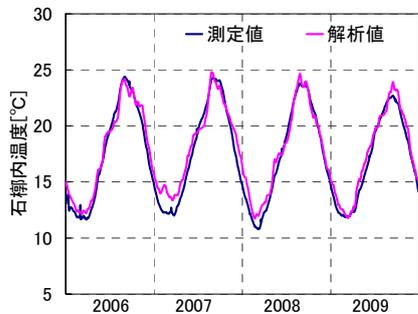


図 13 植物根を考慮した場合の石槨内温度の測定値と解析値の比較

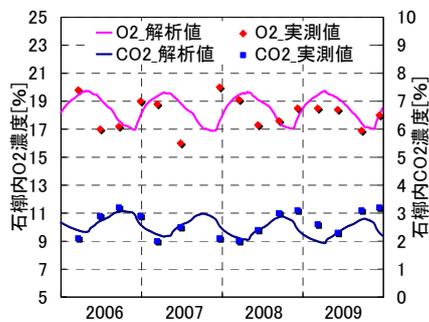


図 14 植物根を考慮した場合の石槨内の O_2 ・ CO_2 濃度の測定値と解析値の比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5 件)

- ① 小椋大輔, 銚井修一, 高橋公一, 木村奈津子: 關鷄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, 査読有, No. 50, pp. 23-33, 2011
- 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, 査読有, 第 658

号, pp. 1041-1050, 2010

- ③ 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 (3) 吸放熱パネルへの送水温度および入室が石室内温湿度変動に与える影響, 保存科学, 査読有, No. 49, pp. 87-96, 2010.
- ④ 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, 査読有, No. 49, pp. 73-85, 2010
- ⑤ 小椋大輔, 銚井修一, 李永輝, 石崎武志, 三浦定俊: 過去の高松塚古墳石室内の温湿度変動解析 — 保存施設稼働時の気象条件の影響と, 発掘直後の仮保護施設の影響 —, 保存科学, 査読有, 第 48 号, pp. 1-11, 2009.

〔学会発表〕(計 20 件)

- ① Daisuke Ogura, Shuichi Hokoi, Kohichi Takahashi, Natsuko Kimura, Study on the method of control on air conditioning in the stone chamber with excavation of Tsugeyama Tumulus, National Research Institute of Cultural Heritage, Korea, 2010. 12. 7
- ② Daisuke Ogura, Shuichi Hokoi, Takeshi Ishizaki, Yonghui Li, Simulation Analysis of Temperature and Humidity Variation in the Stone Chamber of Takamatsuzuka Tumulus, The 32th International Conference of the Korean Society of Conservation Science of Cultural Heritage, Lotte Puyo Resort, Korea, 2010. 10. 8
- ③ 木村奈津子, 銚井修一, 小椋大輔: 關鷄山古墳の石槨内部発掘調査に伴う空調制御方法に関する研究 その 1 石槨周辺の温湿度制御方法の検討, 日本建築学会大会学術講演会, 富山大学, 2010 年 9 月 11 日
- ④ 李永輝, 小椋大輔, 銚井修一, 石崎武志: 古墳壁画の保存環境に関する研究 その 4 発掘直後の石室の保護材料の設置方法の検討, 日本建築学会大会学術講演会, 富山大学, 2010 年 9 月 11 日
- ⑤ 小椋大輔, 銚井修一, 石崎武志, 李永輝, 赤坂瞳: 古墳壁画の保存環境に関する研究 その 3 吸放熱パネルへの送水温度および入室が石室内温湿度変動に与える影響, 日本建築学会大会学術講演会, 富山大学, 2010 年 9 月 11 日
- ⑥ 木村奈津子, 小椋大輔, 銚井修一, 高橋公一: 關鷄山古墳の石槨内部発掘調査に伴う石槨周辺の温湿度制御方法の検討, 日本文化財科学会第 27 回大会, 関西大学, 2010

年 6 月 27 日

- ⑦ 李永輝, 小椋大輔, 銚井修一, 石崎武志 : 発掘直後の古墳壁画保存のための石室保護材料の設置方法の検討, 関西大学, 2010 年 6 月 26 日
- ⑧ 李永輝, 小椋大輔, 銚井修一, 石崎武志 : 保存施設稼働時の高松塚古墳石室内の温湿度変動の解析 ~ 墳丘部表面の植生等の変化が石室内温湿度変動に与える影響~, 日本文化財保存修復学会第 32 回大会, 岐阜市長良川国際会議場, 2010 年 6 月 12 日
- ⑨ 小椋大輔, 李永輝, 銚井修一, 石崎武志 : 保存施設稼働時の高松塚古墳石室内の温湿度変動の解析 ~ 吸放熱パネルへの送水温度および入室が石室内温湿度変動に与える影響~, 日本文化財保存修復学会第 32 回大会, 岐阜市長良川国際会議場, 2010 年 6 月 12 日
- ⑩ 銚井修一, 小椋大輔, 前川昶和 : 鬮鷄山古墳の保存環境に関する研究 その 3 日射遮蔽ネットの影響と地表面被覆条件の改善策, 日本建築学会大会学術講演会, 東北学院大学, 2009 年 8 月 26 日
- ⑪ 李永輝, 小椋大輔, 銚井修一, 石崎武志 : 古墳壁画の保存環境に関する研究 その 2 発掘直後の仮保護施設の影響, 日本建築学会大会学術講演会, 東北学院大学, 2009 年 8 月 26 日
- ⑫ 小椋大輔, 銚井修一, 石崎武志, 李永輝 : 古墳壁画の保存環境に関する研究 その 1 保存施設稼働時の気象条件の影響, 日本建築学会大会学術講演会, 東北学院大学, 2009 年 8 月 26 日
- ⑬ 小椋大輔, 李永輝, 銚井修一, 石崎武志 : 保存施設稼働時の高松塚古墳石室内の温湿度変動の解析 ~ 気象条件の影響~, 日本文化財保存修復学会第 31 回大会, 倉敷市芸分館, 2009 年 6 月 13 日
- ⑭ 前川昶和, 銚井修一, 小椋大輔 : 鬮鷄山古墳の保存環境に関する研究 その 2 熱水分同時移動解析による石槨内湿度の検討, 日本建築学会大会学術講演会, 広島大学, 2008 年 9 月 18 日
- ⑮ 銚井修一, 小椋大輔, 前川昶和 : 鬮鷄山古墳の保存環境に関する研究 その 1 石槨及び周辺地盤の環境実測, 日本建築学会大会学術講演会, 広島大学, 2008 年 9 月 18 日
- ⑯ 李永輝, 小椋大輔, 銚井修一, 石崎武志 : 古墳壁画の保存に関する研究 その 5 古墳壁画発見時の熱性状解析, 日本建築学会大会学術講演会, 広島大学, 2008 年 9 月 18 日
- ⑰ 多羅間次郎, 小椋大輔, 銚井修一, 石崎武志, 北原博幸 : 古墳壁画の保存に関する研究 その 4 石室解体時における墳丘部

の形状変化が石室の熱水分性状に与える影響, 日本建築学会大会学術講演会, 広島大学, 2008 年 9 月 18 日

- ⑱ 小椋大輔, 多羅間次郎, 銚井修一, 石崎武志, 北原博幸 : 古墳壁画の保存に関する研究 その 3 石室解体時の温湿度環境制御, 日本建築学会大会学術講演会, 広島大学, 2008 年 9 月 18 日
- ⑲ 小椋大輔, 前川昶和, 銚井修一, 高橋公一 : 史跡鬮鷄山古墳の保存環境の実態調査 ~ 石槨及び周辺地盤の熱水分に関する環境実測~, 日本文化財保存修復学会第 30 回記念大会, 太宰府市中央公民館, 2008 年 5 月 17 日
- ⑳ 小椋大輔, 前川昶和, 銚井修一, 高橋公一 : 熱水分同時移動解析による史跡鬮鷄山古墳の保存環境の検討, 日本文化財保存修復学会第 30 回記念大会, 太宰府市中央公民館, 2008 年 5 月 17 日

〔図書〕 (計 2 件)

- ① 小椋大輔, 銚井修一, 李永輝, 石崎武志, 三浦定俊 : 高松塚古墳壁画の保存対策 3. 高松塚古墳と石室の温湿度環境, 地盤工学会誌, 第 58 巻, 628 号, pp. 41-48, 2010
- ② 石崎武志, 銚井修一, 小椋大輔 : 環境調査の概要 (特集 高松塚古墳壁画の劣化原因調査), 月刊文化財, No. 563, pp. 26-28, 2010

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小椋 大輔 (OGURA DAISUKE)
京都大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号 : 60283868

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし