

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 27 日現在

機関番号：84604

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25750108

研究課題名(和文) 装飾古墳を安定に保存するための環境制御法の開発に関する研究

研究課題名(英文) Examination of a Method for Controlling the Environment inside the Stone Chamber for the Preservation of Mural Paintings

研究代表者

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・研究員

研究者番号：80416411

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では装飾古墳の保存、すなわち装飾が描かれた石材表層の保存のために、石材の劣化要因である石材表面での結露の発生を抑制することを環境解として、墳丘封土の被覆状況が古墳内部での結露性状におよぼす影響について検討した。また、実際に整備が進められているガランドヤ1号墳では、既に墳丘封土が失われていることから、外界気象条件の変化に応じて石室内空気と外気の間で換気を実施するなどして、熱の取り込みや石室内部で発生した水蒸気の排出をおこない、石室内部での結露発生を抑制する環境の制御法について検討したものである。

研究成果の概要(英文)：As for the most of the decorated kofun, paintings or carving are applied directly on the surface of the soft and fragile stone and tuff stone which is often used for the stone chamber deteriorates easily due to condensation. Hence, for the preservation of these decorations, we examined the influence of the covering condition of the tumulus mound upon the condensation inside the stone chamber. Furthermore, we examined an environmental control methods by numerical analysis to inhibit the condensation upon the stone chamber. It is suggested that with the shelter which covers the stone chamber and by the appropriate ventilation to exhaust the moisture generated from inside the stone chamber, condensation inside the stone chamber would be reduced effectively.

研究分野：保存科学

キーワード：装飾古墳 結露 温湿度 換気 乾湿風化

1. 研究開始当初の背景

日本にはおよそ 12 万基におよぶ古墳が存在するが、このうち、これまでに装飾古墳と確認されているものはおよそ 600 基にとどまる。これらは希少な存在であるだけでなく、その成立、その後の発展は東アジアの影響を受けつつも、多様な幾何学文様や、粘土由来の顔料が主としてもちいられるなど、日本独自の発展がみられることから、非常に貴重な存在であり、その保存はきわめて重要と言える。

未開口の石室内部の環境は一般に外気と比較して 1) 炭酸ガス濃度が高い、2) 恒常的な高湿度環境にある、3) 温度変化の振幅が小さい、4) 温度変化は約 3 ヶ月の位相の遅れがあり、外気と大きく異なる。したがって、石室内へ外気が侵入することで、急激な環境の変化が生じることを回避すべく、装飾古墳は外気から遮断された、“密閉保存”されるのが一般的である。事実その状態において良好な状態を維持している古墳も存在する一方で、石室内の石材表面に多量の結露が認められる例も少なくない。

本研究において、申請者が研究対象とする装飾古墳は、石材に直接絵画が描かれたものである。ここでもちいられている顔料は、鉱物由来のものであり、化学的に安定である。また、装飾古墳でしばしば問題となるカビは、汚損にとどまり、石材の物理的劣化を引き起こすものではない。したがって、装飾の保存においては、顔料が付着する石材表層の物理的劣化(剥落など)を抑制することが最重要と言える。石室内において石材の物理的劣化を引き起こす要因としては、1) 乾湿繰り返し、2) 塩類析出、3) 溶解、水和などの化学的風化が主たるものとして挙げられ、いずれも液相の水を介して生じる劣化である。すなわち結露の防止こそが、装飾古墳保存法の解と考えられる。

日田市には先述のガランドヤ 1 号墳と隣接するガランドヤ 2 号墳の他に、さらに 2 基の装飾古墳が存在する。これらはいずれも石室石材、およびマクロな気象条件は共通で、現在概ね密閉状態にあるが、墳丘の状態および微気象条件は異なる。すなわち、法恩寺山 3 号墳は山林に位置し、墳丘封土は竹林に被覆されており、石室内の結露および石材の劣化が軽微である。一方で、穴観音古墳は台地上に位置し、墳丘封土直上に覆屋を伴っている。この古墳では封土が塑性を失ったため封土の劣化が進行しており、石室内の結露の発生頻度は高く、石材に白色析出物と石材表層の剥落が認められる。

本研究では、これら 3 基の微気象観測、および墳丘における熱水分同時移動解析をおこない、墳丘の状態が結露の発生におよぼす影響について検討するとともに、結露抑制の具体的な手法について提案をおこなう。

2. 研究の目的

本研究では、装飾古墳における主な劣化原因は、石室内石材表面における結露と考え、これを抑制することを目的とする。先述の通り、日田市には諸条件を概ね等しくするものの、微気象条件と、墳丘および石材の劣化の状態が大きく異なる装飾古墳、すなわちガランドヤ 1 号墳、穴観音古墳、および法恩寺山 3 号墳の 3 基が存在する。本研究では、穴観音古墳および法恩寺山 3 号墳において、微気象観測(外気温湿度、墳丘表面における日射量、降水量)と石室内の環境調査(温湿度および石室内側の石材表面温度)を実施した。得られた結果と、申請者らが先行して実施しているガランドヤ 1 号墳における環境調査(外気および石室内)の結果をあわせて検討することで、

1) 墳丘周辺および表面の植生が、墳丘に供給される熱(日射)・水分量(降雨)を軽減する作用について

2) 封土による断熱効果について

上記、2 点に特に着目して、墳丘の構造(土質、層厚)とその表面の植生、および周辺の植生が作り出す微気象条件が、石室内の結露発生頻度に与える影響について検討した。また、あわせて墳丘における熱・水分同時移動について数値解析のモデルを構築し、現在日田市によって整備が進められているガランドヤ古墳において、結露の発生頻度を軽減する具体的な改善策を提案する。

3. 研究の方法

3.1 石材に関する調査

3 基の古墳はいずれも阿蘇山の噴火によって作られた火山岩で構成されている。そこで、ガランドヤ 1 号墳の石室周辺に散乱していた石材のうち、元位置が不明なことから積み直しが困難と判断された掌大の石材から薄片試料を作成し、偏光顕微鏡による観察から石材の劣化状態と主たる劣化要因について検討した。

3.2 各古墳の墳丘直上の微気象観測と石室内温熱環境に関する実測調査

ガランドヤ 1 号墳付近において日田市の外界気象条件を測定するとともに、各古墳の墳丘直上において微視的な気象観測を実施した。穴観音古墳では外気温湿度と日射量を、法恩寺山 3 号墳では外気温湿度、日射量、および雨量について実測した。また、各古墳の前室、玄室内において温湿度の測定を実施した。

3.3 ガランドヤ 1 号墳保存環境に関する検討

ガランドヤ 1 号墳は大正年間に封土を失い、以降石室が露出した状態にあった。そこで、石室内への雨水の流入を抑制すべく、昭和 60 年から石室を防水シートで覆ってきた。しかし、石室内部での結露が頻発したことから、その後、石室内空気の換気をおこなえる

覆屋を設置し、その内部において石室の保存を図ってきた。ここでは、墳丘および石室周辺地盤における熱水分移動解析から、これらの各状態下での結露性状について定量的な評価をおこない、結露抑制のための覆屋の要件について検討した。

解析モデルは奥壁と平行な玄室の横断面（2次元）で、下記の2通りの状態について検討した（以下、モデル1、2と表記）。解析条件を表1に示す。

- 1) 石室を防水シートで覆った状態。石室周辺の地盤には雨水が供給される。
- 2) 仮設覆屋を設置した状態。施設内の範囲では地盤への雨水の供給は断たれ、石室内空気は換気される。

表1 解析条件

基礎方程式	土壌、石材内部：熱水分同時移動方程式
外界気象条件	石室内、躯体内：室空気を1質点で代表した熱水分収支式 現地気象観測値 モデル2では覆屋内空気温湿度
熱・水分移動の物性値	土壌：実測値 石材：コンクリートの文献値
計算方法	前進型有限差分法
計算期間	2011/7/12-2012/7/12(モデル1) 2013/1/1-2014/1/1(モデル2) (周期的定常状態を得るまで反復計算)

4. 研究成果

4.1 石材に関する調査

ガランドヤ1号墳に使用されている石材は灰色を呈する中硬質の火山岩で、斑状に斜長石と黒色を呈する柱状の有色鉱物を含む。薄片試料を偏光顕微鏡下で観察したところ、班晶として中・細粒の斜長石、斜方輝石、単斜輝石および磁鉄鉱が認められ、これらを埋間状石基が埋める安山岩であると考えられた（図1）。特に斜長石は核部がCa成分に、縁部はNa成分に富む曹灰長石で、比較の変質しやすい核部が既にモンモリロナイトへと粘土鉱物化したものが散見された（図2）。

一般に溶岩は地表付近で冷却される過程で収縮し、その際に岩体内部にクラックが生じる。今回薄片試料を作成した石材では平行なクラックが認められたことから、板状節理が発達している石材と考えられた。本試料においては、厚さ1 cm から2 cm 間隔で開口した節理面が配列しており、さらに各節理面から深さ3~4 mm の箇所に小規模なクラックが付随し、その内部を褐鉄鉱が薄く充填していた（図3）。また、基質や班晶内のクラックも褐鉄鉱によって褐色化しており、これらの褐鉄鉱は本試料に多数含まれる磁鉄鉱

に由来するものと推察される。クラックに沿った褐鉄鉱の沈殿は液水の移動があったことを示唆しており、本石材における風化層の発達、潜在的に存在する節理面に水分が浸入することを起点としているものと推察さ

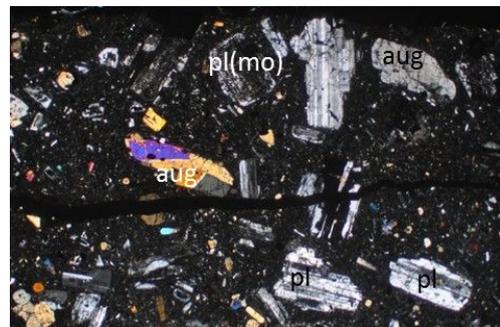
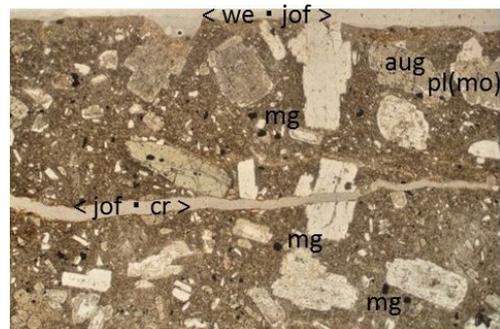


図1：斑状組織と節理、内部のクラック（上：単二コル、下：直交二コル、×15）

pl：斜長石，aug：普通輝石，mo：モンモリロナイト，mg：磁鉄鉱，we：風化組織，jof：節理面，cr：クラック

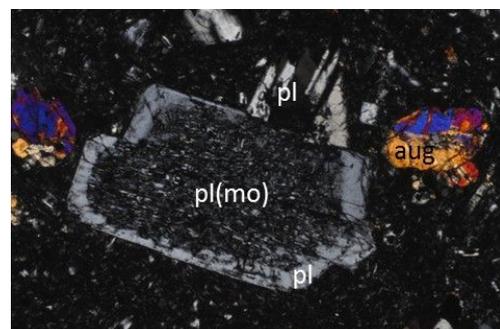


図2：斜長石の粘土鉱物化（上：単二コル、下：直交二コル、×60）

pl：斜長石，aug：普通輝石，mo：モンモリロナイト，mg：磁鉄鉱

れる。

また、斜長石の中には核部がモンモリロナイトへと変質したものや、不規則なクラックを

生じているものが多数認められた。モンモリロナイトは膨潤性が高い粘土鉱物のため、乾湿を繰り返すことでクラックの発生や抜け落ちて斜長石の消失を招いていると推察される。さらに、潜晶質の斜長石や輝石からなる石基が石材表面に露出すると、微小なクラックから浸入する液水によって乾湿の繰り返しを生じ、やがては石材表面の捲れ上がりを生じるものと推察される。

以上のことから、ガランドヤ1号墳の奥壁などで認められる石材の劣化は、板状の節理面に付随する小規模なクラックの開口、そして斜長石の変質から生じたモンモリロナイトや、潜晶質の石基が乾湿を繰り返すことで生じていると考えられる。したがって、顔料粒子をとまなう奥壁表面の剥離を抑制するためには、液水によって石材表面が濡れの状態となることを回避することが重要と考えられる。

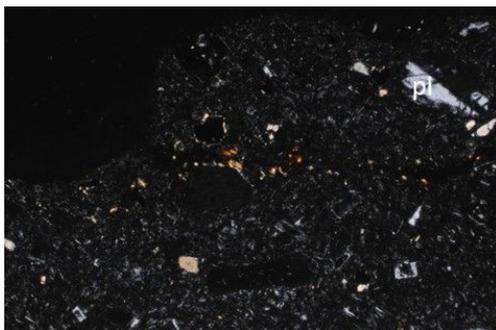


図3：節理面にとまなう小規模なクラック(上：単ニコル、下：直交ニコル、×60)
pl：斜長石，hy：紫蘇輝石，mg：磁鉄鉱，lim：褐鉄鉱，wep：風化生成物，we：風化組織，jof：節理面

4.2 各古墳の墳丘直上の微気象観測と石室内温熱環境に関する実測調査

穴観音古墳の墳丘直上と石室内の気温および絶対湿度、墳丘直上と水平面全天の日射量の測定結果をそれぞれ図4から図6に示す。また、法恩寺山3号墳の墳丘直上と石室内の気温および絶対湿度、墳丘直上と水平面全天の日射量および降水量の測定結果を図7から図10に示す。

図4から、穴観音古墳の石室内気温は日周期の変化を示さないが、外気温の日平均の変化に応じてわずかに変化する様子が認められた。図5から、石室内の絶対湿度は外気の

ものと比較して、夏期に低く冬期に高い値を示した。したがって、石室内空気と外気との間の換気はやや抑制された状態にあり、冬の絶対湿度には石室内床面からの水分蒸発による寄与が大きいと考えられる。また、図6から、穴観音古墳では覆屋によって日射が大幅に遮蔽されており、太陽高度が低くなる冬期においてのみ、覆屋による遮蔽がなされないために、墳丘直上の日射量と全天日射量が概ね等しい値となることが示唆された。

図7、8から、法恩寺山3号墳では穴観音古墳と比較して、気温、絶対湿度の年周期の変化において、さらに外気との位相差が大きく、また振幅が小さいことが明らかとなった。これは石室内空気と外気との換気量が法恩寺山3号墳の方が小さいこと、さらに雨水の供給があるため、墳丘封土は一定量の含水状態を維持しており、墳丘封土の熱量量が大きなものとなっていることによると考えられる。図9、10から墳丘表面の植生によって、日射が大幅に遮蔽される一方で、雨水は大幅に減ることなく墳丘直上に到達し得るこ

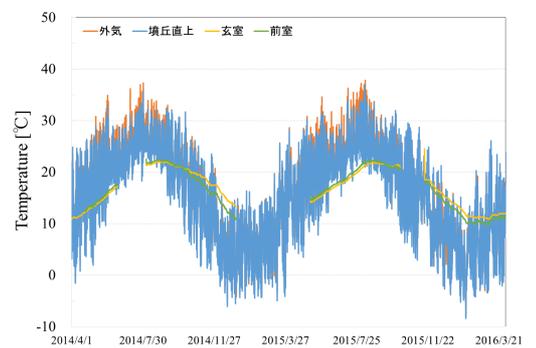


図4 穴観音古墳の気温比較

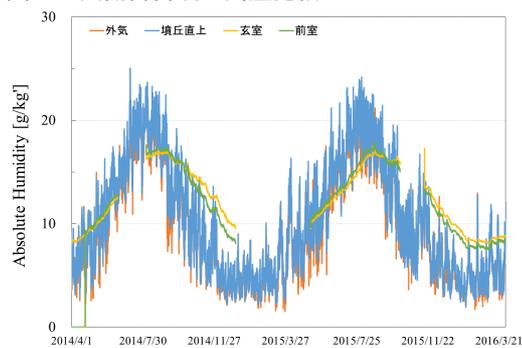


図5 穴観音古墳の絶対湿度比較

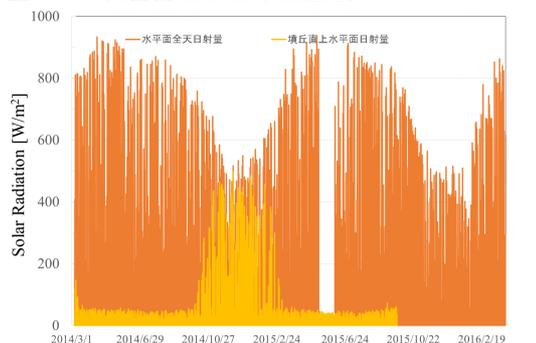


図6 穴観音古墳墳丘直上の日射量

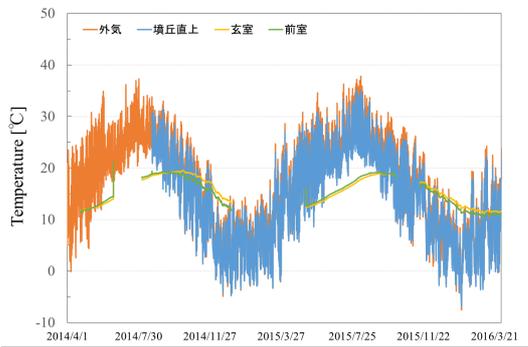


図7 法恩寺山3号墳の気温比較

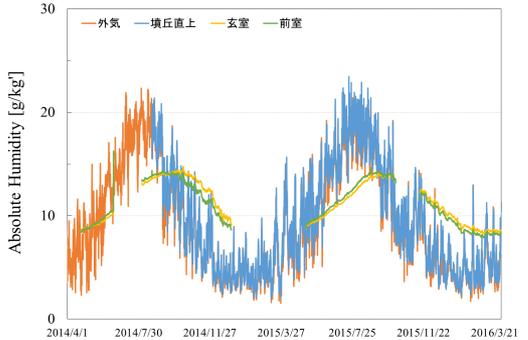


図8 法恩寺山3号墳の絶対湿度比較

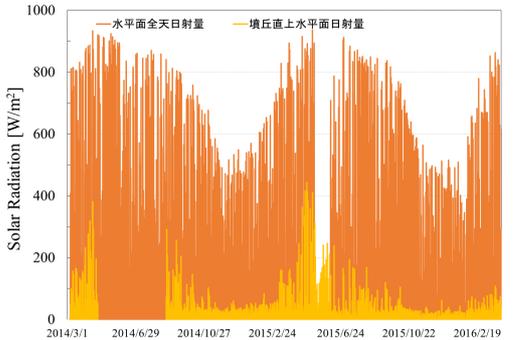


図9 法恩寺山3号墳墳丘直上の日射量

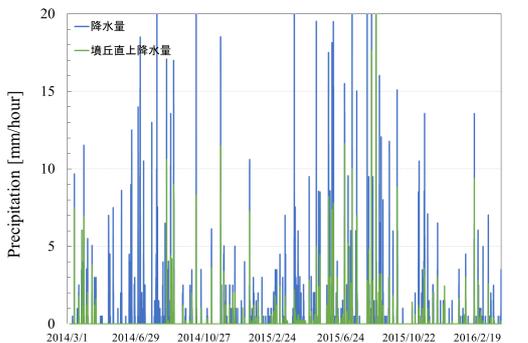


図10 法恩寺山3号墳墳丘直上の雨量

とが示唆された。

湿気の供給源は季節に応じて変化し、夏期は湿度が高い外気が、冬期は石室内の土壌表面から蒸発する水分が供給源と考えられる。したがって、換気が抑制された状態にある穴観音古墳と法恩寺山3号墳の湿度は、外気と比較して夏期は低く、冬期は高い値を示した

と考えられる。さらに、法恩寺山3号墳の測定値は、欠測期間があるため推測の域を出ないが、穴観音古墳と比較して石室内気温は冬期では高く、反対に夏期は低い傾向を示しており、3基の古墳の中でもっとも温熱環境が安定した状態にあると推察される。法恩寺山3号墳では墳丘を覆う植生の影響で、日射が一定程度遮蔽される一方で、雨水が墳丘土に供給されるため、1) 墳丘土が塑性を維持して極端な流出を免れていること、2) 墳丘土が一定程度の含水状態にあるため、墳丘自体が熱容量の大きな材料となっていること、3) 墳丘表面に到達した日射の一部は潜熱として移動し、その結果夏期において石室内空気の温度上昇が抑制され得るものと考えられる。穴観音古墳では、墳丘土に雨水が供給されないため墳丘土の含水状態が極めて低く、1) 墳丘土の熱容量が土としては非常に小さなものへと変化していること、2) わずかに到達した日射が潜熱として移動することなく、夏期に石室内空気の温度上昇を引き起こしていること、3) 塑性を失った墳丘土が崩落することで墳丘封土に間隙が生じ、石室内空気と外気との間の換気が生じており、特に夏期に外気由来の湿気が侵入し、結露の発生要因となっていると考えられる。

以上の結果から、墳丘を風雨から保護するために、墳丘直上に覆屋を設置した場合、かえって石室内温熱環境は年周期変動の振幅が大きくなるだけでなく、墳丘封土が塑性を失って崩落し、墳丘に間隙が生じるまでに至ることが想定され、この場合夏期に外気由来の結露が一層生じることになると考えられる。一方で、墳丘表面を植生によって被覆した場合、墳丘地表面に到達する日射量を大幅に減少させ得るだけでなく、雨水の浸透は許容するため、墳丘の熱容量が大きなものとなり、石室内の温熱環境は安定することが示唆された。

4.3 封土を失った古墳の場合の保存環境に関する検討

先述の2基の古墳における実測調査で示されたように、結露水の起源は夏期では外気中の湿気が換気によって石室内に侵入したもので、冬期では石室床面からの水分蒸発によるもので、それぞれの時期の低温箇所、すなわち夏期では側壁下部で、冬期では天井石側で結露が発生していた。ここでは墳丘封土をすでに失っているガランドヤ古墳において、結露抑制を目的とした保存環境について熱水分移動計算から検討した。すなわち、石室に覆屋をかけて夜間放射による冬期の天井石の低温化を抑制するとともに、覆屋内部で石室内空気の換気を積極的に起こさない、冬期には石室床面土壌から蒸発した水分を排出し、夏期には移流による熱の供給によって石室内部の材料表面温度の上昇を図り、結露抑制を試みた。

モデル1と2における、日毎の場所別結露

発生時間数をそれぞれ図 11、図 12 に示す。ただし、モデル 1 と 2 では石室内空気の換気回数をそれぞれ 0 回/時、5 回/時とした。図 11 から、防水シートに覆われた以前の状態では、年間を通して結露は頻発しており、夏期は側壁の下部で、冬期は石材表面が露天に曝されている天井部を中心に結露が発生していたことが示唆された。一方、図 12 から、仮設覆屋内では外気絶対湿度が高い梅雨時のみ、側壁の下部で結露が発生することが示唆された。ここで得られた結果は実測調査から得られた結果からも仮設覆屋の設置によって結露の発生回数は大きく減少することが示唆された。

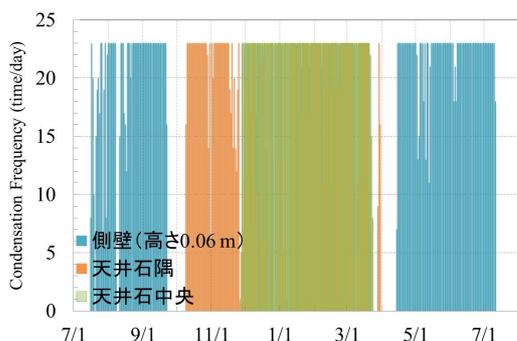


図 11：結露発生箇所と頻度（防水シートあり）

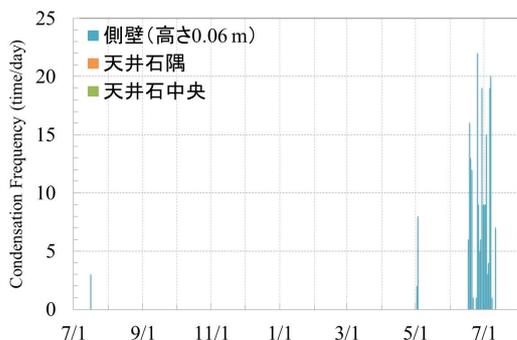


図 12：結露発生箇所と頻度（覆屋内）

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 2 件）

脇谷草一郎、高妻洋成、史跡ガランドヤ古墳の保存に関する研究 2 - 結露抑制の手法に関する検討 -、奈良文化財研究所紀要 2014、査読無、2014、pp.40-41
脇谷草一郎、高妻洋成、史跡ガランドヤ古墳の保存に関する研究 - 石室保護施設の設置による結露性状変化の検討 -、奈良文化財研究所紀要 2013、査読無、2013、pp.72-73

〔学会発表〕（計 3 件）

脇谷草一郎、小椋大輔、史跡ガランドヤ

1号墳の保存環境に関する研究 - 仮設覆屋による結露抑制方法の検討 -、日本建築学会学術講演会、2016年8月24日、「福岡大学（福岡県福岡市）」
脇谷草一郎、小椋大輔、高妻洋成、史跡ガランドヤ古墳の保存に関する研究-結露の抑制方法に関する検討-、日本文化財科学会第31回大会、2014年7月6日、「奈良教育大学（奈良県奈良市）」
脇谷草一郎、小椋大輔、高妻洋成、墳丘の被覆条件が石室内の温熱環境に与える影響に関する検討、日本文化財科学会第31回大会、2014年7月6日、「奈良教育大学（奈良県奈良市）」

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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・研究員
 研究者番号：80416411