

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 15 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560694

研究課題名(和文)古墳壁画の保存・公開における環境制御手法に関する研究

研究課題名(英文) Study on environmental control method in public and conservation of decorated stone chamber in tumulus

研究代表者

小椋 大輔 (Ogura, Daisuke)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：60283868

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円、(間接経費) 1,260,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、装飾古墳の石室内壁画の保存と公開を考慮した環境制御手法の構築のための基盤技術を作成することにある。まず、入室を行って見学を行う釜尾古墳を対象として、顔料流出の原因として懸念される結露発生の主要因を空気流動解析により明らかにし、その対策を提案した。次に濡れによる装飾の見え方の変化を明らかにするために、水膜を介した石材と顔料の間での多重反射を考慮した見え方の予測モデルを提案し、弁柄が濡れにより彩度が低下する理由を明らかにした。また、劣化原因の一つである塩害を検討するため、塩溶液の濃度と塩の結晶化の度合いを考慮して塩が含まれる材料の平衡含水率を予測するモデルを提案し妥当性を確認した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to develop the fundamental techniques for environmental control method in public and conservation of decorated stone chamber in tumulus on site. We measured and investigated annual variation of the appearance of the decorated stone and temperature and humidity, condensation on site. We analyzed moisture flow in the stone chamber in order to clarify mechanism of condensation and proposed the counter measure to prevent the condensation. Next, we proposed a model to change of appearance of decorated stone by wetting considering multi refractions of light and stone as the material background and clarified the change of appearance by wetting. Finally, we investigated sorption isotherm of the material which includes salt caused salt weathering and propose a model to predict the sorption isotherm considering concentration of salt and its crystallization.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学，建築環境・設備

キーワード：古墳壁画 保存 公開 劣化 結露 温湿度 見え方 塩析出

1. 研究開始当初の背景

日本国内には、高松塚古墳、キトラ古墳のように石室内面の漆喰の上に描かれた写実的な壁画を有する古墳の他に、装飾古墳と呼ばれる線刻画や幾何学模様で彩色を施された壁画を有する古墳が、約 600 基存在する。2007 年に高松塚古墳壁画は、壁画の修理のため、現地保存を断念し、石室を解体した。また、キトラ古墳も壁画保存のために壁画のはぎ取りが行われた。これら古墳壁画は漆喰の下地の上に描かれた壁画であるが、いわゆる装飾古墳は、石材の表面に直接、絵が描かれており、下地の劣化性状は大きく異なる。上記漆喰はカビ等微生物の汚損や乾燥収縮の剥落による劣化の危険度が大きかったが、石材は、カビ等微生物による汚損より、結露水による顔料流下、塩類風化などの劣化の危険性の方が大きい。現在、装飾古墳は、茨城県の虎塚古墳、福岡県の王塚古墳、熊本県のチブサン古墳など、現地で保存されつつ、公開が行われているものが多く存在する。

上記の古墳は、壁画保存のため窓ガラス越しに壁画を観察することができる保存施設が設けられており、例えば虎塚古墳や王塚古墳は壁画保存のため、内部の一般公開は春と秋の年 2 回の公開となっている。同様の古墳はこれ以外にも多く存在している。

一方で、石室内に直接入室することで壁画の公開を行っている装飾古墳も存在する。福岡県の対馬塚古墳や、最近まで公開を行っていた熊本県の釜尾古墳などである。これら古墳は常時公開しているものが少なくない。以上のように、保存・公開方法の異なる装飾古墳が存在するが、公開時以外には、石室の密閉性を高くし、高湿かつ安定した温度環境を維持することが壁画保存のためによいというのが、基本的な考え方であり、それぞれの古墳の保存過程で培われた経験的判断により、保存・公開がなされていると考えられる。適切な古墳壁画の保存・公開には、壁画の保存環境の定量的把握と劣化危険度の評価が重要と考えられるが、これらは十分明確にはなっていない。また、壁画の公開は、劣化を抑える環境の維持が重要な事というまでもないが、入室時の見学者等の健康性・快適性や壁画の見え方にも十分な配慮が必要となると考えられる。

公開が可能な石室内の温湿度環境には、以下の問題が存在している。石室内は、周囲の地盤の影響により温度は年間を通じて安定しているが、点検・見学のための前室など保存施設は外部に通じることで熱的影響を石室に与え、石室内の年間温度変動及び石室内の温度むらを大きくする要因となり、低温部での結露発生や、高温部での乾燥による塩類析出などの要因となる可能性がある。

一方で、石材表面に顔料で描かれる壁画の見え方は、石材の湿潤状態が影響を与える事が分かっている。例えば、釜尾古墳では、年間で石材は湿潤する時期が存在し、その時期

には壁画が見づらくなることが確認されている(写真1)。これら石室内の温湿度、壁画の見え方を定量化し、壁画保存と入室者の健康への影響を考慮し、保存施設と入室管理により、保存・公開を行う環境制御手法は、これまで提案されていない。多くの装飾古墳壁画の保存・公開を継続的に行うためには、経験的判断だけに頼るのではなく、こういった手法を確立することが急務と考えられる。

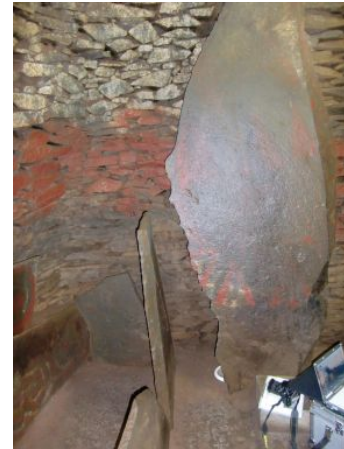


写真1 石材の濡れによって装飾壁画が見えづらくなる (右側の石板、釜尾古墳)

2. 研究の目的

本研究の最終的な目的は、装飾古墳の石室内壁画の保存と公開を考慮した環境制御手法の提案を行うことである。ここでは、古墳石室内へ最も影響が大きいと考えられる入室を行って見学を行う状況を考慮して、石室内の温湿度、結露や装飾の見え方の現地調査による実態把握と、劣化現象の一つの大きな要素である塩を含んだ材料の水分特性の把握を行い、それらの挙動についてモデルを用いた解析を行い、物理的なメカニズムの解明を行う。

その結果、壁画や石材などの保存と見学者の健康性・快適性の観点から、古墳の保存施設と入室管理による環境制御手法構築のための基盤となる技術の蓄積を行う。

3. 研究の方法

直接入室するタイプの装飾古墳である釜尾古墳を対象として以下の検討を行った。現地調査により石室内温湿度の計測や現地調査中に結露の分布の計測を行い、内外の空気の流動を考慮した年間の性状を明らかにする。

また、装飾の含水率と測色値の測定結果を元に、実験室実験により、顔料、石材の濡れと色の見え方の変化について明らかにし、モデルによりその挙動の説明を行う。

さらに、見学室から装飾を閲覧できるタイプの装飾古墳である大坊古墳を対象として、公開時の見学室への蓄熱を抑える手法について実際の公開時に実験を行い、その効果の検討を行う。

最後に、壁画の劣化現象の一つである塩類析出を考える上で、基礎的な検討となる塩を含んだ材料の平衡含水率の挙動を実験によ

り明らかにし、モデル化を行う。

4. 研究成果

4.1 釜尾古墳の結露発生要因とその対策

熊本市に位置する国指定史跡の釜尾古墳は、石室内の装飾壁画の劣化の危惧により、一時閉鎖状態にある。劣化の原因として結露の落下・流下による顔料の流出が懸念されている。今後の装飾古墳の保存・公開を行うためには、石室内の結露の生じるメカニズムを明らかにする必要がある。図1に示す様に、釜尾古墳の温湿度等の測定を2012年8月より開始し、温度と絶対湿度の石室内分布の比較から空気の流動について検討を行い、濡れと乾燥の状態変化の目視観察結果や石材の測色との関係について検討を行った。その結果以下を明らかにした。釜尾古墳内は、夏期には入口扉の隙間を通して、入口上部から外気が流入し、羨道の天井を伝って玄室まで侵入する一方で、羨道下から入口下部を通して外へ内部空気が流出していると考えられること、冬期には入口下部から外気が流入し羨道の床を伝って玄室まで侵入する一方で、羨道上から入口上部を通して内部空気が外へ流出していると考えられる。釜尾古墳の玄室の装飾を含めた内壁は、夏期には全面が濡れており、秋期から、床に近い壁面や装飾から乾燥が進んでいくことが目視で確認されており、測色値は明るくなっている。秋期から冬期にかけて、床に近い壁面や装飾から乾燥が進む要因として、絶対湿度の低い外気が床面近くから玄室まで侵入し、下部から徐々に壁面や装飾を乾燥させていっていると考えられる。

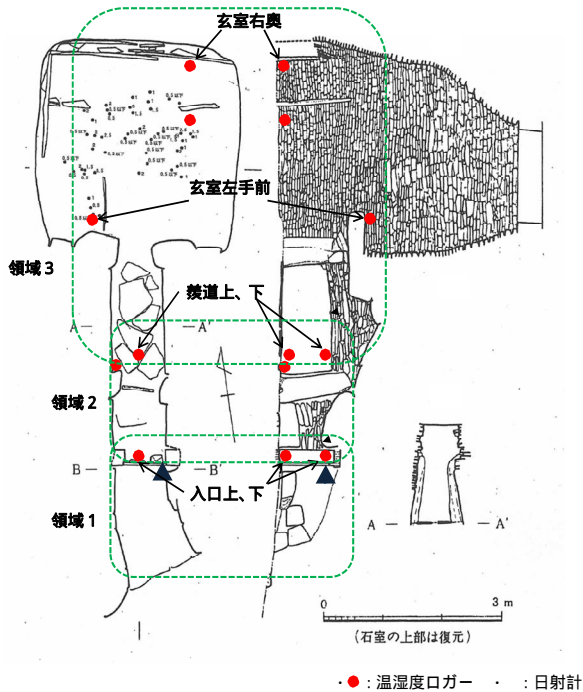


図1 釜尾古墳の測定器設置場所

次に、装飾のある玄室での結露発生の主要

因を明らかにすることを目的として、釜尾古墳の石室を3室に分け、各室間の温度差による換気と壁面での水分蒸発や結露を考慮して室内の絶対湿度に一致するように入口扉の隙間を2mmと同等し(図2)そこから外気の隙間や、室間の水分移動量を求めた(図3)。水分移動量の算定結果から夏期に結露が発生しやすく、冬期に乾燥する傾向にあること、夏期の結露発生の主要因は入口周辺の室内表面での蒸発であり、冬期の乾燥の主要因は入口扉での結露凝縮であることを明らかにした。夏期の結露発生抑制対策として、扉の日射遮蔽や断熱、扉の気密化といったことを明らかにした。

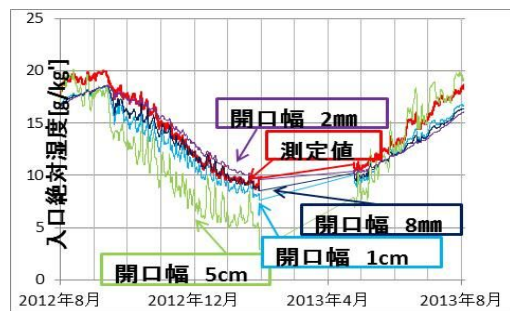


図2 入口の絶対湿度の測定値と計算値の比較

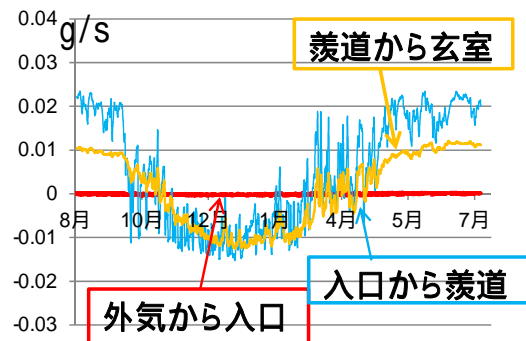


図3 古墳石室内の水分移動量の年変動

4.2 装飾の濡れによる見え方変化の予測

装飾の背景となる石材の含水量の変化による顔料の色の見え方の変化に着目し、石材(安山岩)と顔料の湿潤状態(含水量)の変化に対する $L^*a^*b^*$ 値の変化について実験を行い、顔料の見えやすさを石材と顔料の色差でとらえ、水分状態と色の見えやすさの関係について検討を行った。弁柄の色差は、乾燥状態(状態)から濡れる(状態)と値が下がった(図2)。他の材料についても同様の検討を行った結果、安山岩を背景とした顔料の色差は、濡れると、瑠璃と白土に関しては大きくなり、黄土と弁柄に関しては小さくなる。瑠璃と白土は濡れているの方が、黄土、弁柄は乾いている方が色の区別しやすいと考えられることを明らかにした。

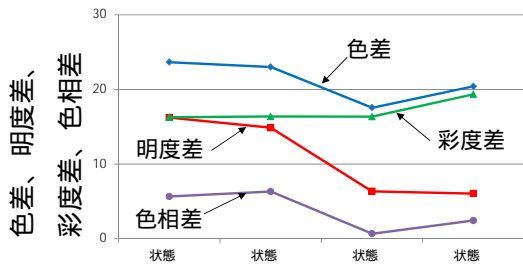


図4 試験体3の弁柄の色差

さらに、水膜を介した石材と顔料の間での多重反射を考慮した石材を背景とした顔料の予測モデル(図5)を用いて、弁柄の濡れ状態に対して分光反射率の再現を行い、濡れによる彩度の変化は多重反射の増減により説明可能であることを明らかにした(図6,7)。
また、釜尾古墳装飾の顔料に対して、同モデルを適用した結果、背景の石材による多重反射が影響して、濡れによる彩度が低下した可能性が高いことを示した(表1)。

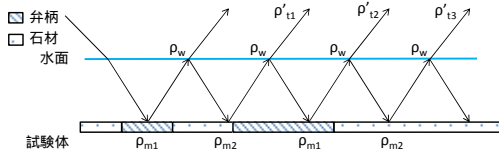


図5 濡れ状態の多重反射のモデルの概要

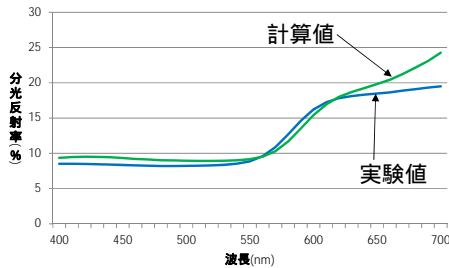


図6 乾燥状態の石材を背景にした弁柄の分光反射率の実験値と計算値の比較

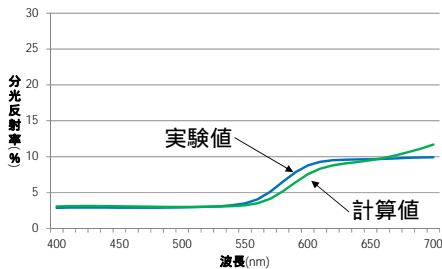


図7 濡れ状態の石材を背景にした弁柄の分光反射率の実験値と計算値の比較

4.3 空調施設を有しない古墳の公開方法の検討

見学者の環境改善と壁画のある装飾古墳内部への影響を軽減することを目的として、玉名市の国史跡・大坊古墳を対象として2013年春の公開時に、見学室の扉の開放することによる石室内への影響の軽減効果について

表1 釜尾古墳の装飾の弁柄と計算値の比較

	計算値		実測値	
	乾燥状態	濡れ状態	乾燥状態	濡れ状態
L*	34.60	22.14	38.80	27.70
a*	14.71	13.25	12.20	12.50
b*	9.45	8.50	13.00	8.90
彩度	17.49	15.74	17.83	15.34

検討を行った(図8,9)。なお、比較として2011年秋の公開時に見学室の扉を閉鎖した場合の結果を用いた。その結果、公開前後の見学室の温度差が2013年の公開時の方が小さく蓄熱が軽減される効果が確認された。さらに効果を得るためには換気設備等の対策の必要性があることも明らかとなった。

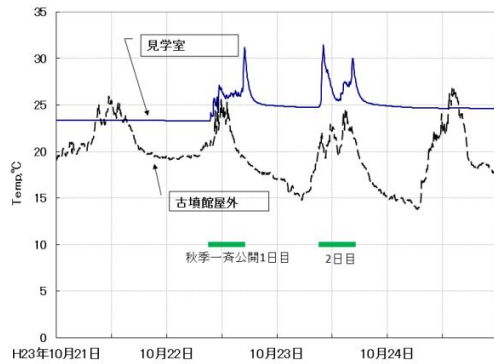


図8 2011年秋季一斉公開の温度

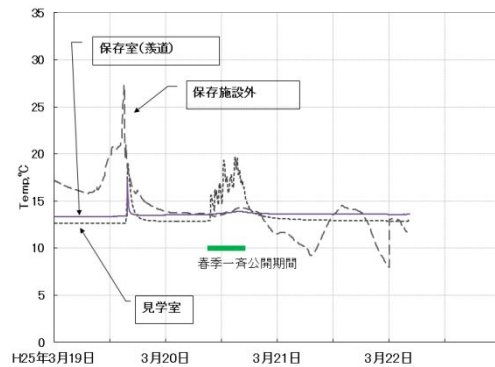


図9 2013年春季一斉公開の温度

4.4 塩を含む材料の平衡含水率の変化の予測モデル

塩が含まれる材料の平衡含水率は塩溶液の濃度のみならず塩の結晶化の度合いに応じて、純水を含む材料の含水率と大きく異なる事が確認された。次に、蒸気圧降下と塩溶液の密度を考慮して平衡含水率を近似する既存モデルにより、塩濃度が飽和溶解度より低い場合には、実験結果とよく一致したが、塩が結晶化するような状況では大きな差が見られた。そこで、塩の結晶化の程度を考慮

して平衡含水率を近似する修正モデルを提案し、これにより塩が結晶化する場合の実験結果をよく再現できた(図 10)。

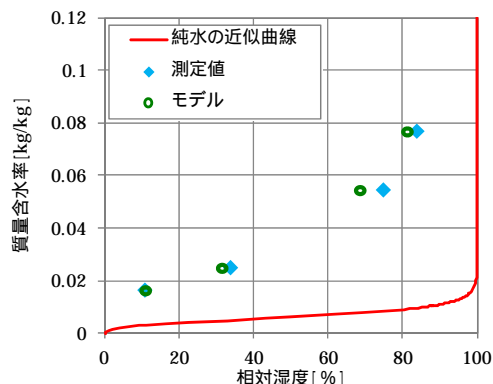


図 10 モデルによる平衡含水率の予測値と測定値の比較 (MgCl₂ (C_i = 0.0084))

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 1 件)

安福勝、小椋大輔、銚井修一：塩を含む ALC の平衡含水率の測定とモデリング、日本建築学会環境系論文集、査読有り、79 巻、2014 年、pp.499-506

〔学会発表〕(計 10 件)

小椋大輔、銚井修一、木村奈津子：闘鶏山古墳の石槨内部発掘調査時における石槨内温湿度・空気質の制御方法の検討 - 石槨内空気質予測方法の提案 - 予測法の提案、日本文化財科学会第 28 回大会、2011 年 6 月 11 日、筑波大学

木村奈津子、小椋大輔、銚井修一：闘鶏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 2) 石槨内空気質の予測法の提案、日本建築学会近畿支部研究発表会、2011 年 6 月 19 日、大阪工業技術専門学校

木村奈津子、小椋大輔、銚井修一：闘鶏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 2 石槨内空気質の予測法の提案、日本建築学会大会学術講演会、2011 年 8 月 25 日、早稲田大学

小椋大輔、森田直樹、銚井修一：含水量による古墳壁画の見え方変化の予測に関する研究、日本文化財科学会第 29 回大会、2012 年 6 月 23~24 日、京都大学

森田直樹、小椋大輔、銚井修一：含水量による古墳壁画の見え方変化の予測に関する研究、日本建築学会大会学術講演会、2012 年 09 月 12 日、名古屋大学

有本一樹、安福勝、小椋大輔、銚井修一、長谷隆秀：塩の影響を受けた多孔質材料の平衡含水率の測定とモデリング、日本建築学会大会学術講演会、2012 年 09 月 12 日、名古屋

大学

森田直樹、小椋大輔、銚井修一：含水量による古墳壁画の見え方変化の予測に関する研究 その 2：色差を考慮した顔料・石材の見え方の変化、日本文化財科学会第 30 回大会、2013 年 7 月 6~7 日、弘前大学

小椋大輔、銚井修一、森田直樹、坂口圭太郎、池田朋生、中里伸明：装飾古墳内部の温湿度と壁面の濡れの挙動の関係の検討、日本文化財科学会第 30 回大会、2013 年 7 月 6~7 日、弘前大学

坂口圭太郎、池田朋生、未永崇、小椋大輔：空調設備のない保存施設を有する装飾古墳の公開方法について ~ 熊本県玉名市所在・国史跡大坊古墳での試み ~、日本文化財科学会第 30 回大会、2013 年 7 月 6~7 日、弘前大学

森田直樹、小椋大輔、銚井修一：含水量による古墳壁画の見え方変化の予測に関する研究 その 2：色差を考慮した顔料・石材の見え方の変化、日本建築学会大会学術講演会、2013 年 9 月 30 日、北海道大学

〔図書〕(計 1 件)

文化庁：古墳壁画の保存活用に関する検討会装飾古墳ワーキンググループ報告書、2014 年 3 月 (小椋大輔：分担執筆)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

銚井修一 (HOKOI SHUICHI)
京都大学・工学研究科・教授
研究者番号：80111938

(3) 連携研究者

安福勝 (ABUKU MASARU)
近畿大学・建築学部・講師
研究者番号：20581739