

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月14日現在

機関番号：82620

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16K01186

研究課題名（和文）虎塚古墳壁画の材質と保存環境に関する研究

研究課題名（英文）Research on the Materials Used on the Wall Paintings and the Conservation Environment in the Torazuka Tumulus

研究代表者

犬塚 将英（Inuzuka, Masahide）

独立行政法人国立文化財機構東京文化財研究所・保存科学研究センター・室長

研究者番号：00392548

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：茨城県ひたちなか市の虎塚古墳では、近年、壁画の一部に劣化現象が進行している可能性が示唆されてきた。本研究では、虎塚古墳壁画の保存環境に関する現状を把握するために、石室内の温湿度環境の調査、石室内で採取された落下物の調査を行った。虎塚古墳と類似した装飾古墳との比較を行うために、国指定史跡・中田横穴の現地調査も実施した。

また、結露が虎塚古墳壁画表面に及ぼす影響を調べるための基礎実験を行った。高湿度環境下において、虎塚古墳壁画を模した試験片を冷却し結露を発生させた。このような実験系で冷却を数回繰り返し、実験前後における写真を比較することにより、白色下地層と赤色顔料層の状態の変化の有無を調べた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、虎塚古墳壁画の材質や石室内の温湿度環境を把握することができた。また、石室内で採取した落下物の調査から、現在の壁画の状態を確認することができた。

壁画に影響を与える主な要因として、壁面における水分の移動が挙げられるが、本研究での結露を発生させる実験条件では、虎塚古墳に見られる劣化現象が起こらないことを確認した。同実験は非接触な手法による含水量の計測システムの開発も兼ねており、他の遺跡や建造物等の含水量測定への適用が期待できる。

研究成果の概要（英文）：In recent years, it has been reported that the mural paintings of Torazuka Tumulus in Ibaraki prefecture might have faded. In order to understand the present status of conservation environment, the investigation of temperature, humidity and the falling objects inside the stone chamber was conducted. For comparison, the site investigation of Nakata-yokoana tumulus was also conducted because the structure of mural paintings is similar to that of Torazuka tumulus.

In order to understand the influence of dew condensation on mural paintings, laboratory experiments were conducted. Two test pieces reproducing the structure of Torazuka mural paintings were set in a closed space where the relative humidity was kept at 100%, and one of the test pieces was cooled by using a Peltier module device to make dew condensation occur on its surface. The influence of dew condensation on the substrate layer and pigment was investigated by comparing photographs taken before and after the experiments.

研究分野：保存科学

キーワード：虎塚古墳 湿度 結露 試験片 含水量

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

茨城県ひたちなか市の虎塚古墳群の中の前方後円墳である第1号墳（以下、虎塚古墳とする）では、1973年に発掘調査が実施され、後円部南側に開口する横穴式石室が発見された。石室は凝灰岩で構築されており、壁面には白色粘土（凝灰岩風化物）で下塗りされた上にパイプ状ベンガラと考えられる赤色顔料を用いて幾何学文と武器器具等が描かれている^①。このような装飾古墳である虎塚古墳は1974年に国の史跡指定を受けた。一方、虎塚古墳の発見当初の発掘調査と保存科学的な調査の結果を受けて、保存の基本方針が定められた。1978年には公開保存施設設置基本構想が設定され、1979年と80年の2か年において、観察室、前室、前々室の3室構造を有する公開保存施設が建設された。1980年以降は年2回の一般公開が実施されており、現在も続けられている。

しかし近年、壁画の一部の劣化現象が進行している可能性が示唆されてきた^②。例えば、奥壁に描かれている左側の環状文が薄くなっているように見え、劣化現象が進行している可能性が示唆されてきた。平成23年度～25年度に採択された基盤研究（B）（課題番号：23300326）では、この現象のメカニズムを調べるために、様々な保存科学的な調査が行われた^②。

壁画に影響を与える主な要因として、石室内の温湿度環境や壁面における水分の移動が挙げられる。平成25年度までの研究^②では、1995年から蓄積されてきた温湿度データの整理、石室内落下物の収集と観察、壁画を構成する材質の分析と壁画の断面構造の調査、壁画を模した試験片の製作と強制劣化試験等が行われた。この研究では、壁画の詳細な断面構造が明らかになった。支持体である凝灰岩は近隣の露頭から採取できる部田野石と岩石的な特徴が類似していること、白色下地層の構成成分は支持層の構成成分と類似していることが明らかになった。また鉄バクテリアを含むと思われる虎塚古墳に近接する湿地の泥が、赤色彩色層の原材料として用いられた可能性を見出した。一方、膠着剤が使われた痕跡は確認することができなかった。このような知見をもとに製作した試験片に対して急激な温湿度変化を与えたところ、条件によっては壁画に見られた劣化現象に近い現象が見られたのだが、虎塚古墳壁画に見られる劣化のメカニズムを明確に特定するには至っていない。この壁画の劣化のメカニズムの解明は急務である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、虎塚古墳壁画のより良い保存環境の設定を検討するために、壁画の劣化のメカニズムを明らかにすることである。検討事項としては、壁画の劣化と（1）壁画面周辺の温湿度環境と壁画表面における水分の移動、（2）壁画表面における微生物の存在と影響の有無との関連の2つに論点を絞って研究を進めた。

（1）虎塚古墳壁画に見られる問題の主な原因として、壁画表面における結露の発生や水分の移動が挙げられる。虎塚古墳の石室内は年間を通じて、相対湿度がほぼ100%である。つまり小さな値であっても石室内に温度分布があれば、壁画表面において結露水が発生しやすい環境である。石室内の温度測定結果から、結露水発生リスクを診断する。また、壁画に対して非接触な手法を用いて、壁面の水分量の自動計測を行う方法の開発も同時に行う。

虎塚古墳石室内では現在も継続的に落下物の採取が行われている。この落下物の内容、重量、採取箇所の分布、季節変動などの分析を行い、これらのデータから劣化の現状を解析する。

平成25年度までの調査研究^②では、赤色彩色層の原材料として、近接する湿地の泥が用いられたという仮説を立てた。しかし、赤色の発色の度合いや顔料の強度は、泥から顔料を生成する際の温度に異存すると考えられるので重要である。本研究では、様々な条件で赤色顔料を生成し、その顔料を用いて試験片を製作して、主に結露に注目し、劣化現象を再現するための試験に供した。

（2）事前調査により、茨城県水戸市近辺に分布する装飾古墳の中では、石室内に生物が繁茂し、その表面に水滴が付着している現象を確認している。これらの着生生物と水分との関係を調べるための調査を実施した。これらのデータも参照して、虎塚古墳石室内で採取される落下物の分析を行うことにより、虎塚古墳壁画表面における微生物の存在、その壁画に与える影響の有無を検証した。

3. 研究の方法

（1）虎塚古墳壁画の保存環境に関する現状を把握するために、石室内の温湿度環境の調査、石室内で採取された落下物の調査、落下物の微生物群集構造解析を行った。

虎塚古墳では、公開施設設置以降、石室内の温湿度は自動計測システムによって計測されてきたが、同時に、石室内に温湿度データロガーを設置して計測をしている。設置箇所は石室内東壁に沿って奥側（北側）と手前側（南側）の2箇所である。これらのデータを用いて、石室内の温湿度環境の確認を行った。

また、虎塚古墳では2013年春の一般公開後からは壁面からの落下物の調査も実施してきた。落下物の調査を行うために、A4サイズのポリカーボネート製シート16枚を壁面に沿って一般公開後の点検時に敷き、次の一般公開後の点検時にこれらのシートを回収し、落下物の顕微鏡観察、重量測定を行ってきた。次章では、得られた結果の一部を紹介する。

2016年秋の一般公開後の点検時に回収した落下物の一部からDNAを抽出し、定量PCR法、最近の群集構造解析及び次世代シーケンス解析に供した。

(2) 虎塚古墳と類似した装飾古墳との比較を行うために、白色下地層にベンガラによる彩色が施されている福島県いわき市の国指定史跡 中田横穴の調査を実施した。

また、虎塚古墳近辺にある古墳として、茨城県那珂市の権現山横穴、茨城県常陸太田市の幡バツケ横穴 日立 11 号墓と直牒堂の 3 箇所にて、保存環境等の調査を実施した。

(3) 結露が虎塚古墳壁画表面に及ぼす影響を調べるために、基礎実験を行った。虎塚古墳壁画を模した試験片を作成し、相対湿度をほぼ 100%とした密閉空間内に 2つの試験片を設置した。一方の試験片の表面に結露を発生させるために、ペルチェモジュールを用いて冷却した(図1)。この時に、試験片表面での結露の発生を確認するために、試験片の重量、含水量、試験片表面における水分の移動^③の計測を行った。このような実験系を用いて、ペルチェモジュールの ON・OFF を数回繰り返し、実験前後における写真を比較することにより、白色下地層と赤色顔料層の状態の変化の有無を調べた^④。

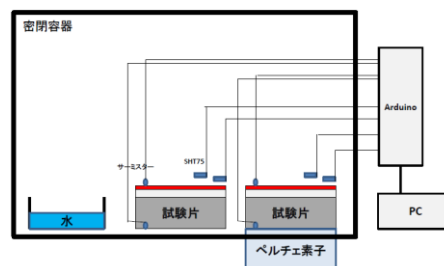
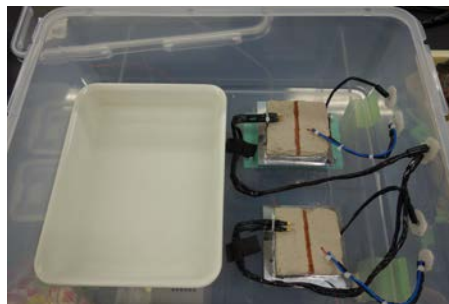


図1 実験セットアップと模式図

4. 研究成果

(1) 虎塚古墳石室内の奥と手前に設置したデータロガーから得られたデータによると、いずれの箇所においても相対湿度の計測結果は年間を通じて約 100%であった。2017 年度における温度の計測結果を図 2 に示す。石室は土中にあることから、石室内の温度の季節変動は屋外と比較すると約 3 ヶ月遅れて推移する。屋外の方が気温が高い(低い) 夏季(冬季)は、石室内奥と比較すると手前側の温度の方が高い(低い) 傾向が見られた。石室内では最大 0.3℃ くらいの温度勾配が生じていることがわかる。このことから 6 月くらいでは石室内奥側で、11 月くらいでは石室内手前側の方で結露が発生しやすい条件になると考えられる。

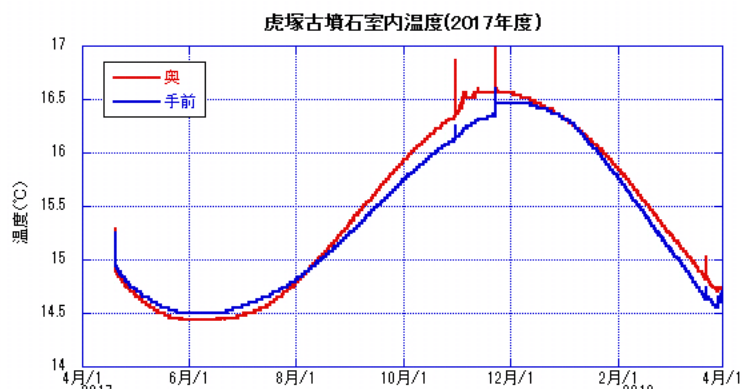


図2 虎塚古墳石室内、奥と手前における温度の測定結果 (2017 年度)

石室内に設置したポリカーボネート製シート上から採取した落下物を顕微鏡で観察すると、赤色及び白色の落下物が確認された。赤色と白色の物質はそれぞれベンガラと白色下地層から落下したのと考えられる。当初、彩色が薄くなったとしてマクロな視点から認識された劣化現象は、赤色顔料層のみの劣化ではなく、白色下地層の剥落とも密接な関連があることが推測される。また、採取した落下物からはダニの抜け殻、トビムシやクモの死骸、カタツムリの殻等も確認した。

落下物のうち、2016 年秋に採取された試料の一部は微生物の分析調査に供した。分析の結果、菌類よりも細菌の存在量が多い可能性が示唆された。詳細な解析結果は研究成果報告書^⑤を参照されたい。

(2) 虎塚古墳壁画との比較をするために、白色の材料に赤色顔料が彩色されている国指定史跡 中田横穴の調査を 2017 年 10 月 13 日に実施した。壁画の保存状態が良好なことを確認することができた。しかし観察の結果、中田横穴で用いられている白色・赤色の材料はともに、虎塚古墳で用いられている白色下地・赤色顔料とは異なる材料であると推測された。中田横穴の

赤色顔料には、虎塚古墳壁画のように凝集しているように見える箇所は見つからなかった。

茨城県内の権現山横穴、幡バツケ横穴、直牒堂では、それぞれの石室奥と入口付近に温湿度データロガー設置し、温湿度環境の調査を実施した。また、データロガー付近には、虎塚古墳を模した試験片（次節参照）も合わせて約1年間設置した。これらの試験片表面では乾燥が進んでいたが、菌類や藻類等の着生は確認することができなかった。

(3) 結露が虎塚古墳壁画表面に及ぼす影響を調べるために行った基礎実験の結果は以下の通りである。

試験片表面における水分の移動を調べるために、各試験片の表面からの距離が 2mm と 6mm の位置に温湿度センサーを設置した（図1）。各温湿度センサーで計測した温度（図3(a)）と相対湿度（図3(b)）から算出した絶対湿度の値の時間変動を図3(c)に示す。図3(d)に、各試験片について、表面からの距離が 2mm における絶対湿度から 6mm における絶対湿度を引いた値を示す。冷却をした試験片については、試験片に近い場所における絶対湿度の方が小さな値になっており、空气中から石材へ水分が移動したと考えられる^③。以上の測定結果から、ペルチェモジュールを ON にした時に冷却を行った試験片表面の温度が空気露点温度よりも低くなったこと、水分の移動が空気から試験片表面に向かったことがわかった。

冷却を行った試験片については、冷却を行ったことにより試験片表面が濡れたことを確認することができたため、試験片表面において強制的に結露を発生させたことには成功したと考えられる（図4）。試験片表面の状態を詳細に調べた時に用いた画像の一例として、実験後の試験片を拡大した画像を図5に示す。画像中に見られる赤色顔料の線の太さは約 5mm である。虎塚古墳壁画で見られるような白色下地層と赤色顔料が凝集したような現象を含むミクロな形状の変化を確認することはできなかった。よって、本研究のような結露を発生させる条件では、虎塚古墳壁画に見られる劣化現象が起こらないことを確認することができた。

劣化現象の再現に至らなかったのは、結露回数の不足等の実験条件によるものか、あるいは結露以外の要因があるのか、などのさらなる検討が必要である。

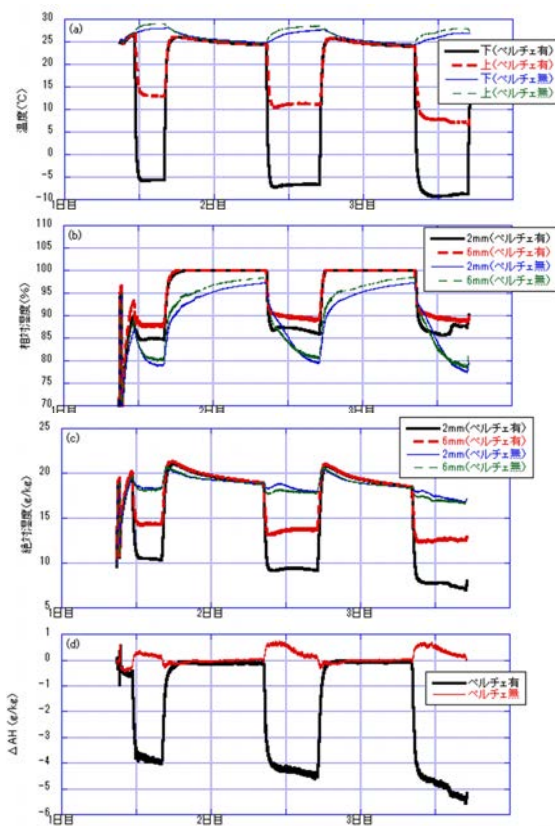


図3 測定結果

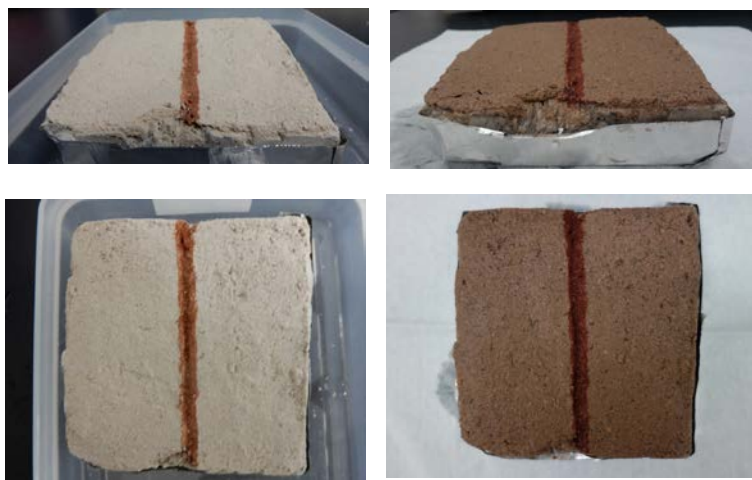


図4 ペルチェモジュールで冷却を行った試験片の実験前の写真（左）と実験直後の写真（右）



図5 図4右下の拡大画像

<参考文献>

- ①勝田市史 別編I『虎塚壁画古墳』、勝田市史編さん委員会（1978）
- ②日本学術振興会科学研究費補助金研究成果報告書 基盤研究（B）課題番号：23300326 「茨城県ひたちなか市虎塚壁画古墳の保存に関する総合的研究」研究期間：平成23年度～25年度、研究代表者：矢島國雄
- ③犬塚将英：文化財の表面における水分蒸発量の非接触測定システムの開発、『保存科学』第53号、125-134（2014）
- ④犬塚将英、大迫美月、佐藤嘉則、稲田健一、谷口陽子、矢島國雄：結露が古墳壁画に及ぼす影響に関する基礎実験、『保存科学』第58号、73-82（2019）
- ⑤日本学術振興会科学研究費補助金研究成果報告書 基盤研究（C）課題番号：16K01186 「虎塚古墳壁画の材質と保存環境に関する研究」研究期間：平成28年度～30年度、研究代表者：犬塚将英

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 1件）

- ①犬塚将英、大迫美月、佐藤嘉則、稲田健一、谷口陽子、矢島國雄：結露が古墳壁画に及ぼす影響に関する基礎実験、『保存科学』第58号、査読有、73-82（2019）

〔学会発表〕（計 2件）

- ①犬塚将英、大迫美月、佐藤嘉則、稲田健一、谷口陽子、矢島國雄：結露が古墳壁画に及ぼす影響に関する基礎実験、日本文化財科学会 2019
- ②犬塚将英、大迫美月：結露が古墳壁画に及ぼす影響に関する基礎実験、文化財保存修復学会 2018

〔図書〕（計 0件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0件）

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

出願年：

国内外の別：

○取得状況（計 0件）

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年：

国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：佐藤嘉則

ローマ字氏名：Yoshinori Sato

所属研究機関名：東京文化財研究所

部局名：保存科学研究センター

職名：室長

研究者番号（8桁）：50466645

研究分担者氏名：谷口陽子
ローマ字氏名：Yoko Taniguchi
所属研究機関名：筑波大学
部局名：人文社会系
職名：准教授
研究者番号（8桁）：40392550

研究分担者氏名：矢島國雄
ローマ字氏名：Kunio Yajima
所属研究機関名：明治大学
部局名：文学部
職名：専任教授
研究者番号（8桁）：70130838

(2)研究協力者

研究協力者氏名：稲田健一
ローマ字氏名：Kenichi Inada

※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、研究者個人に帰属されます。