

〔報告〕 結露が古墳壁画に及ぼす影響に関する基礎実験

犬塚 将英・大迫 美月*・佐藤 嘉則・稲田 健一**・
谷口 陽子***・矢島 國雄****

1. はじめに

茨城県ひたちなか市の前方後円墳である虎塚古墳第1号墳(以下、虎塚古墳)の後円部には、凝灰岩で構築された横穴式石室があり、その石室内側の壁面には白色粘土(凝灰岩風化物)による下塗りの上にパイプ状ベンガラ(赤色顔料)を用いて幾何学文と武器武具等が描かれている¹⁾。

虎塚古墳の横穴式石室は1973年に発見され、1974年に国の史跡指定を受けた。その後、1979年に設定された「勝田市虎塚古墳公開保存施設設置基本構想」に基づき、1980年には観察室、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²⁾。1980年秋から開始された一般公開は現在も続けられており、原則的には春・秋それぞれ8日間、1年で16日間の公開が行われている。2011年からは、公開保存施設の環境を良好に保つことを目的として、定期的に観察室における微生物調査と除菌清掃作業が行われている^{3,4)}。

ところで、近年、虎塚古墳壁画の彩色の一部が薄くなっているように見えてきており、劣化現象が進行している可能性が示唆されてきた⁵⁾。奥壁には2つの環状文が描かれているが、右側の環状文と比較すると、劣化が懸念されている左側の環状文の方が赤色顔料や白色下地層が凝集しているように見えることが顕微鏡画像(図1)から確認されてきた⁵⁾。このような劣化現象の原因を究明するために、現地では壁面からの落下物の調査⁶⁾や石室内温湿度・壁面含水量の計測⁷⁾を定期的実施している。また、虎塚古墳壁画を模した試験片を作成し、温度・湿度を大きく変化させて凝集化の再現を試みる基礎実験も行った^{5,6)}。これらの保存科学的調査研究により、壁画の構造と材料に関する多くの知見は得られたが、劣化現象のメカニズムの解明には至っていない。

この劣化現象の主な原因として、壁画表面における結露の発生や水分の移動が推測される。虎塚古墳の石室内は年間を通じて相対湿度がほぼ100%であるため^{5,7)}、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と言える。本研究では、結露が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。

2. 実験方法

本研究では、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。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。

*東京藝術大学大学院、**ひたちなか市生活・文化・スポーツ公社、***筑波大学、****明治大学

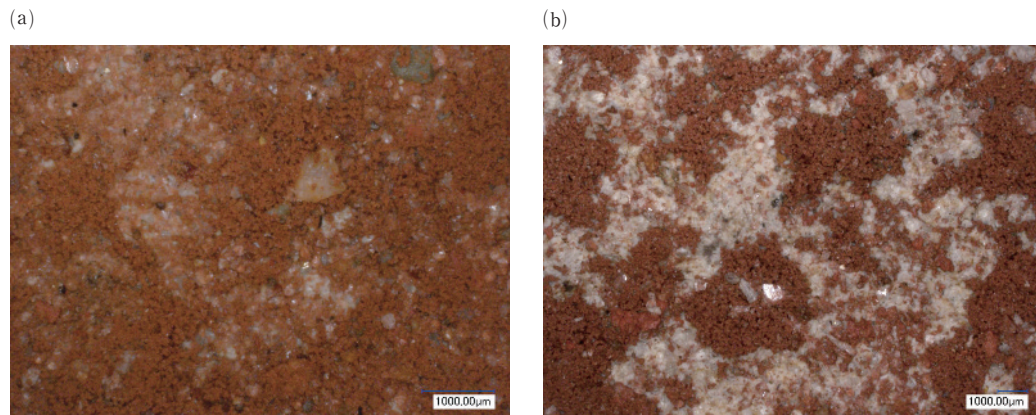


図1 虎塚古墳壁画のうち、奥壁に描かれている(a)右側の環状文と(b)左側の環状文の顕微鏡画像

2-1. 試験片の作成

虎塚古墳の石室の材料であり壁画の支持体である凝灰岩は近隣で採取できる部田野石と特徴が類似していること、白色下地層と部田野石の構成成分が類似していることが、先行研究で明らかにされている⁵⁾。また、虎塚古墳の近くの十五郎横穴墓群付近の湿地の泥に鉄バクテリアを含むものがあることが指摘されており、それが虎塚古墳壁画の赤色顔料の原料として用いられた可能性も示唆されている⁵⁾。これらの知見をもとに、以下に示す方法で実験に供する試験片の作成を行った⁵⁾。

試験片の基材として、8 cm × 8 cm × 1.5 cm 程度の大きさに切断した部田野石を使用した。風化して白色化した部田野石の粉末に水を加えて練ったものを白色下地層の材料とし、厚さが約3 mm となるように、石材の片面(8 cm × 8 cm の面)に塗った。赤色顔料の原材料として、上述の十五郎横穴墓群付近の湿地から泥を採取し、電気炉を用いて800 °C の条件下で約1時間焼成した。このように生成した赤色顔料を水に溶いて、太さが約5 mm の線を白色下地層の上に描いた。作成した試験片の例を図2に示す。

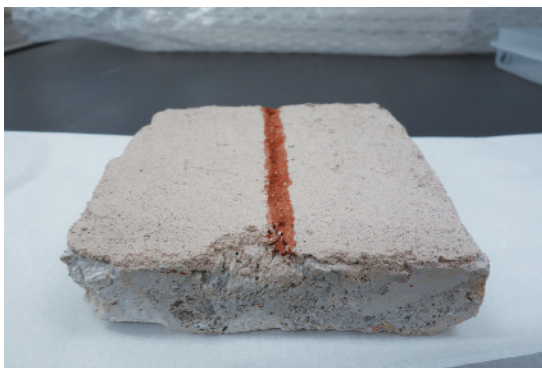


図2 作成した試験片

2-2. 実験セットアップと実験方法

実験の様子を図3に、模式図を図4に示す。上述(2-1.)の方法で作成した試験片2個をプラスチック製容器に入れて密封した。容器内には水をはったトレイも設置することにより、相対湿度がほぼ100%となるような高湿度環境を実現した。一方の試験片については、壁画表面の温度を露点よりも低くして強制的に結露を発生させるために、ペルチェモジュール(ジーマックス社製, FEC-1715NP)の上に乗せて裏面から冷却した。以上のように構築した実験系を用いて、以下の2通りの実験を行った。

2-2-1. 実験1

実験1では容器内に試験片を密封したまま、ペルチェモジュールをONの状態では約8時間、OFFの状態では約16時間のサイクルを3回繰り返し(表1)、試験片表面の白色下地層と赤色顔料に生じる変化の有無を調べた。

図4に示したように実験1では、サーミスタ温度センサーを用いて、各試験片の表面と裏面の温度を計測した。また、試験片表面における水分の移動を調べるために⁸⁻¹⁰⁾、各試験片の表面からの距離が約2mmと6mmの位置に温湿度センサー(センシリオン社製, SHT75)を

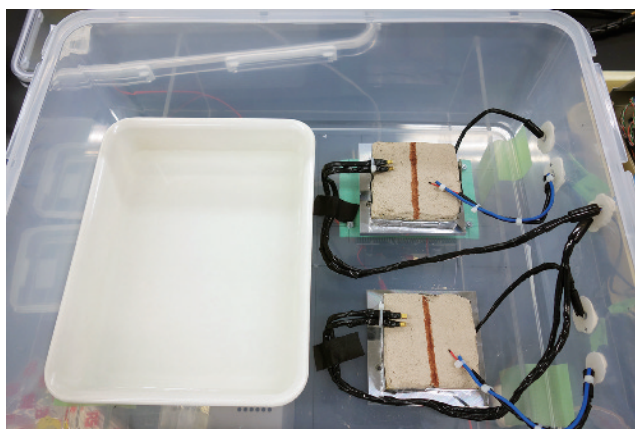


図3 実験の様子

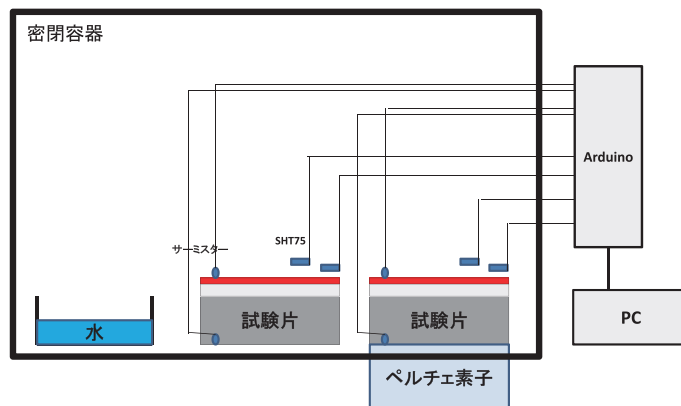


図4 実験の模式図

設置した。実験を開始する前に、NaCl, KCl, KNO₃の飽和塩水溶液を用いて検定を行ったところ、実験1に用いた4つの温湿度センサーの相対湿度は75%, 85%, 95%において±1%の精度で正しい値を示すことを確認した。よって、相対湿度の実測値に補正をせずに、3-1.に示すデータ解析を行った。これらのセンサーからの信号は入出力ポートを備えた制御基板であるArduinoを用いて処理し、実測データの記録を行った^{10,11)}。

表1 実験1における冷却時間

ペルチェ素子	時刻
ON(1回目)	1日目11:15~1日目16:00
OFF(1回目)	1日目16:00~2日目8:30
ON(2回目)	2日目8:30~2日目17:00
OFF(2回目)	2日目17:00~3日目8:15
ON(3回目)	3日目8:15~3日目16:50

2-2-2. 実験2

実験1では容器を密封したままの状態、試験片表面近傍における2つの温湿度センサーの測定値から試験片表面における水分の移動を調べる実験を行った。実験2では試験片を冷却することにより試験片表面に結露が生じたことを、より直接的に検証するために、ペルチェモジュールのON・OFFを切り替える時に一時的に容器を開封し、各試験片の重量と含水量の測定を行った。

実験2ではなるべく実験1の条件を再現するために、ペルチェモジュールをONの状態、約8時間、OFFの状態、約16時間のサイクルを3回繰り返した(表2の左から1列目と2列目)。

試験片の重量は電子天秤を用いて測定した。試験片表面の白色下地層及び赤色顔料部分における含水量を調べるために、ハンディ型赤外線水分計(ケット科学研究所社製, KJT-130)を用いて、赤外線吸光度の測定を行った^{5,12)}。

表2 実験2における冷却時間と重量・赤外線吸光度の測定結果

ペルチェ素子	時刻	試験片(ペルチェ有)			試験片(ペルチェ無)		
		重量(g)	赤外線吸光度		重量(g)	赤外線吸光度	
			白色下地層	赤色顔料		白色下地層	赤色顔料
ON(1回目)	1日目13:00~1日目17:40	170.27	0.3475	0.3319	181.31	0.3520	0.3034
OFF(1回目)	1日目17:40~2日目10:00	174.52	0.8562	0.8750	181.14	0.3423	0.2977
ON(2回目)	2日目10:00~2日目18:30	174.60	1.1403	1.0793	181.68	0.3953	0.3470
OFF(2回目)	2日目18:30~3日目10:45	183.30	1.7375	1.5853	181.17	0.3507	0.3017
ON(3回目)	3日目10:45~3日目16:00	183.53	1.5826	1.4558	181.71	0.3967	0.3515
		188.26	1.6129	1.5577	181.24	0.3582	0.3065

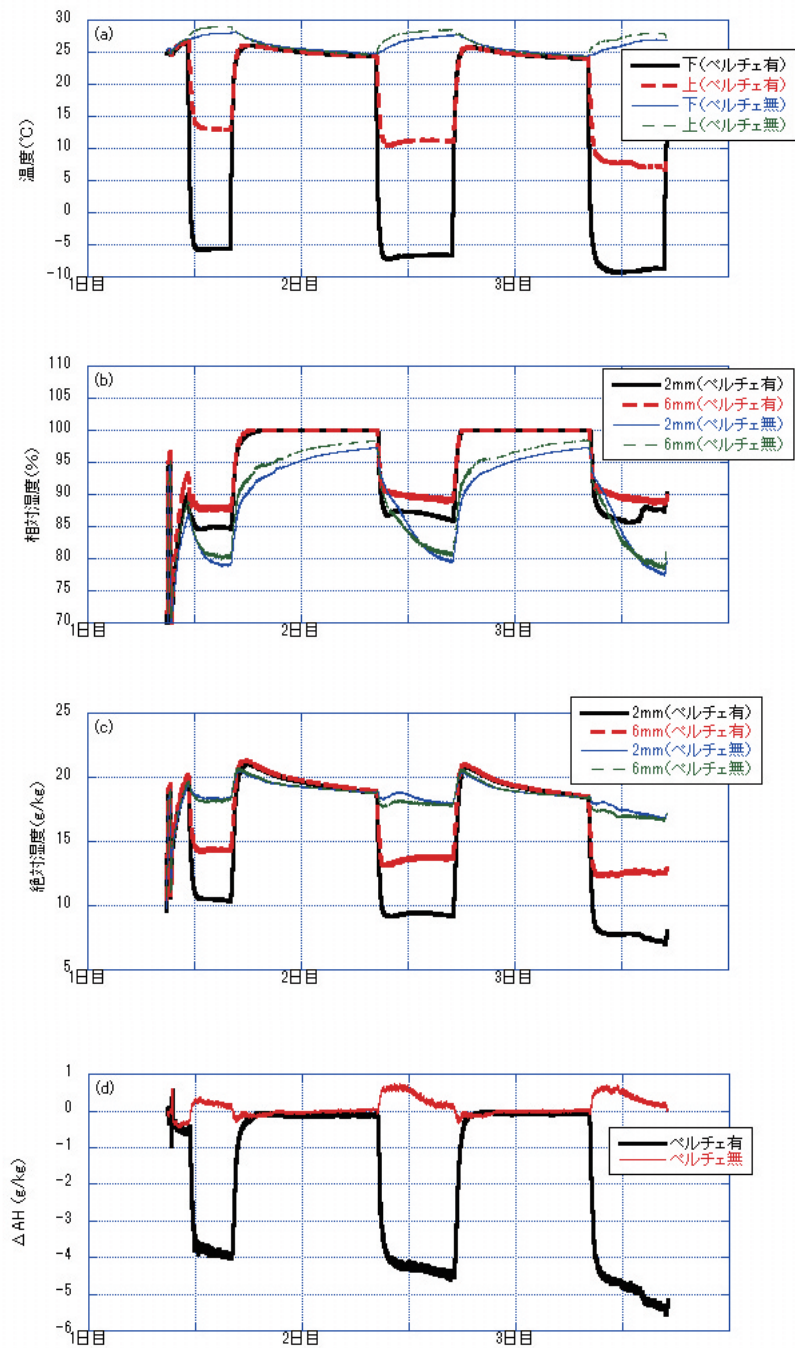


図5 実験1での測定結果：(a)試験片の表面と裏面での温度，(b)温湿度センサーで計測した相対湿度，(c)温湿度センサーで計測した温度と相対湿度から算出した絶対湿度，(d)上下の温湿度センサーから得られた絶対湿度の差。

3. 実験結果と考察

3-1. 実験1の結果

図5にサーミスタ温度センサーと温湿度センサーから得られた測定結果を示す。

図5(a)は、サーミスタ温度センサーを用いて各試験片の表面・裏面で測定した温度である。ペルチェモジュールがONの時、ペルチェモジュールに接している試験片の裏面では -10°C から -5°C となっており、それに伴って試験片の表面では 7°C から 13°C まで温度が下がっていた。一方、ペルチェモジュールがONの時、冷却をしなかった試験片については表面・裏面ともに約 27°C であった。

図5(b)は、温湿度センサーから得られた相対湿度の測定結果である。容器内に水をはったトレーを設置したにも関わらず、ペルチェモジュールがONの時に、冷却をしなかった試験片側の相対湿度が約80%にまで低下したのは、ペルチェモジュールによって冷却された試験片がコールドポイントとなったことが原因であると考えられる。温度が 27°C 、相対湿度が80%の空気の露点温度は約 23°C であることから、図5(a)で示されているように温度が 13°C に冷却されている試験片表面では結露が発生する条件であったことが確認できた。

図5(c)は、各温湿度センサーで計測した温度と相対湿度から算出した絶対湿度の値の時間変動である。冷却しなかった試験片と比較すると、冷却した試験片の表面からの距離が2 mmと6 mmの位置における絶対湿度の差が大きいことがわかる。

図5(d)に、各試験片について、表面からの距離が2 mmにおける絶対湿度から6 mm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、空気中から石材へ水分が移動したと考えられる¹⁰⁾。一方、冷却をしなかっ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大きな値となっていた。これは容器内の相対湿度が下がったことにより、試験片から水分が放出されたことが原因であると推測される。

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の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。

3-2. 実験2の結果

ペルチェモジュールのON・OFFを切り替える時における各試験片の重量と赤外線吸光度の測定結果を表2の右側(3列目~8列目)に示す。赤外線吸光度が高いほど、試験片表面における含水量が高いことを意味する^{5,12)}。

冷却をしなかった試験片の重量と赤外線吸光度には誤差の範囲で変化は見られなかったが、冷却を行った試験片についてはペルチェモジュールをONにすることによって重量と赤外線吸光度が増加していることが確認できた。

3-3. 実験1の写真の比較

実験1で冷却を行った試験片について、実験開始前・終了直後に撮影した写真をそれぞれ図6(a), (b)と図6(c), (d)に示す。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(図6(c), (d))、試験片表面において強制的に結露を発生させることには成功したと考えられる。このことは、冷却を行った試験片表面の温度が空気の露点温度よりも低くなったこと(3-1.), 冷却を行った試験片の重量と赤外線吸光度が増加したこと(3-2.)

からも検証することができた。

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、図6(c)の中央部分を拡大した画像を図6(e)に示す。画像中に見られる赤色顔料の線の太さは約5 mmである。図1(b)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。

(a)



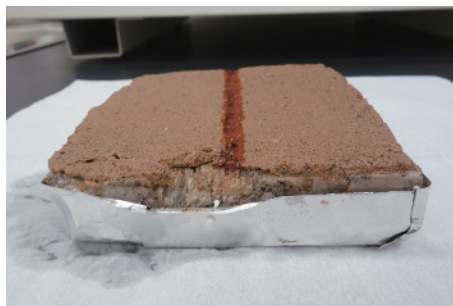
(b)



(c)



(d)



(e)



図6 実験1でペルチェモジュールを用いて冷却を行った試験片の実験前の写真 ((a), (b)) と実験直後の写真 ((c), (d))。 (e)は(c)を拡大した画像。

4. まとめ

近年示唆されてきた虎塚古墳壁画の彩色の一部が薄くなっているように見えるという劣化現象の原因を調べるために、本研究では結露が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。

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%とした密閉空間内で強制的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。この時に試験片表面が濡れていたため、結露が発生したことを確認した。また、試験片の重量、含水量、試験片表面における水分の移動を計測することからも結露が発生したことを検証することができた。

ペルチェモジュールのON・OFFを数回繰り返して、実験前後に撮影した写真で比較を行ったが、今回実施した実験の範囲内では、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観測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。

謝辞

本研究はJSPS 科研費 JP16K01186の助成を受けたものです。

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) 江本義理、門倉武夫、見城敏子、新井英夫：史跡虎塚古墳彩色壁画保存に関する調査研究 (受託研究報告 第51号)、保存科学、22、121-146 (1983)
- 3) 佐藤嘉則、犬塚将英、森井順之、矢島國雄、木川りか：虎塚古墳公開保存施設の管理方法変更による微生物汚染状況の推移、保存科学、54、121-131 (2015)
- 4) 佐藤嘉則、木川りか、犬塚将英、森井順之、矢島國雄：虎塚古墳石室の扉石表面に形成したバイオフィルムの微生物群集構造解析とその制御、保存科学、57、67-76 (2018)
- 5) 矢島國雄編、科学研究費補助金研究成果報告書『虎塚古墳の保存科学的研究』(2014)
- 6) 中村賢介、谷口陽子、犬塚将英、稲田健一、矢島國雄：虎塚古墳壁画表面の凝集化に関する検討、文化財保存修復学会第36回大会研究発表要旨集、148-149 (2014)
- 7) 虎塚古墳石室内の温湿度と壁面含水量の調査結果：犬塚将英、忽那敬三、稲田健一、谷口陽子、矢島國雄、文化財保存修復学会第36回大会研究発表要旨集、152-153 (2014)
- 8) 朽津信明、森井順之：土壁の水分吸収・放出に関する基礎的研究、保存科学、44、103-108 (2005)
- 9) 森井順之：莫高窟第53窟の内部環境調査、敦煌莫高窟壁画保存修復に関する日中共同研究2005、31-38 (2006)
- 10) 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、53、125-134 (2014)
- 11) Massimo Banzi 著、船田巧訳：『Arduinoをはじめよう 第2版』、オライリー・ジャパン (2012)
- 12) 朽津信明編、科学研究費補助金研究成果報告書『環境制御による古墳に繁茂する緑色生物の軽減法に関する研究』(2018)

キーワード：虎塚古墳 (Torazuka Tumulus)；顔料 (pigment)；試験片 (test piece)；結露 (dew condensation)；絶対湿度 (absolute humidity)；含水量 (water content)

Laboratory Experiment about the Influence of Dew Condensation on Mural Paintings

Masahide INUZUKA, Mizuki OSAKO^{*}, Yoshinori SATO,
Kenichi INADA^{**}, Yoko TANIGUCHI^{***} and Kunio YAJIMA^{****}

In recent years, it has been reported that the mural paintings of Torazuka Tumulus in Ibaraki prefecture might have faded. Dew condensation can be one of the reasons for this degradation phenomenon. In order to investigate the influence of dew condensation on mural paintings, laboratory experiments were conducted in the present study.

For the experiments, test pieces reproducing the structure of Torazuka mural paintings were prepared. A test piece was composed of a tuff stone, white substrate layer and red pigments. Two test pieces 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. Dew condensation on the surface of the test piece was identified by measuring weight and water content of the test piece as well as the water transfer in the vicinity of the surface of the test piece.

The influence of dew condensation on the substrate layer and pigment was investigated by comparing photographs taken before and after the experiments. However, no influence was recognized in these experiments.

^{*}Tokyo University of the Arts, ^{**}City of Hitachinaka, ^{***}University of Tsukuba, ^{****}Meiji University