

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 13 日現在

機関番号：82620

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24650592

研究課題名(和文)古墳壁画表面における含水量の非接触測定システムの開発

研究課題名(英文)Development of Non-invasive Measurement Systems for Water Content on the Surface of Mural Paintings

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・保存修復科学センター・主任研究員

研究者番号：00392548

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円、(間接経費) 810,000円

研究成果の概要(和文)：高湿度環境下にある古墳壁画等の壁面では、壁画の顔料の剥離、塩類の析出、カビの発生等が懸念される。このような問題に対処するために、本研究では古墳壁画表面における水分蒸発量や含水量、及びそれらの時間的変化を計測するための非接触測定法を開発することを目的としている。

本研究では、超小型温湿度データロガーを用いて測定システムを構築し、温度上昇に起因する石材表面における水分の蒸発を捕えることができた。さらに、高湿度環境下においても計測を行うために、耐湿性に優れた温湿度センサーと制御基板から構成される測定システムのプロトタイプを製作した。そして、この測定システムの動作を基礎実験から確認することができた。

研究成果の概要(英文)：It is important to understand the water content and evaporation on the surface of mural paintings in order to prevent from exfoliation of pigments, deposition of salts, fungi growth and so forth. However, there have not been many researches because non-invasive measurements in high-humidity environment are difficult.

In this study, a measurement system was first constructed using two small data-loggers. Evaporation on the surface of the stone was identified from the gradient of absolute humidity calculated from measured values of temperature and relative humidity. One of the drawbacks of this method is that the data-logger is poor in humidity resistance. Temperature and humidity sensors, which have better humidity resistance, were selected to develop a new system for application at humid sites. It is composed of a control board Arduino Mega 2560, which controls the digital signals from sensors and records the data on a micro SD card. A prototype system was evaluated in this study.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：文化財科学

キーワード：壁面含水量 蒸発量 非接触 自動計測 絶対湿度 赤外線

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 我国では1972年に奈良県の高松塚古墳で、1973年に茨城県の高塚古墳で壁画が発見された。その後これらの古墳壁画は現地での保存が行われていたが、2002年以降、高松塚古墳壁画ではカビの発生が問題となり、修理を目的とした石室解体に至った(2007年)。高湿度環境下において、カビの問題への対策を検討するためには、壁画を取り巻く空気のみならず、壁画表面における含水量及びその変動を測定することは重要である。高松塚古墳では、赤外線吸収度を非接触で測定することにより、壁画面の水分量の分布が調べられたが、連続的な自動計測は行われなかったため、季節変動や天候の変化が壁画の水分量に与える影響はわからなかった。

(2) 一方、研究代表者が史跡保存対策委員となっている高塚古墳では、これまでのところ、幸いカビは発生していないが、水分の移動による壁画の物理的な劣化の有無を定量的に検証するためには、壁画表面における含水量の自動計測を非接触な手法で行う必要がある。

(3) このような測定は古墳壁画に限らずあらゆる文化財の保存を考える上で重要であるが、東京文化財研究所が敦煌莫高窟第53窟で実施した簡易的な水分蒸発量の測定を除けば、調査例はとてども少なかった。文化財の調査では非接触な調査手法が求められる特殊性と、以上のような背景を鑑みた結果、壁画表面における含水量の自動計測システムの構築という着想に至った。

### 2. 研究の目的

(1) 本研究では壁画の含水量を接触せずに調べるために、(i)超小型温湿度データロガーを用いた水分蒸発量の測定と(ii)近赤外の反射率を調べることにより壁画表面における含水量の測定、の2種類の自動計測システムの開発研究を行うのが目的である。

(2) そして、本研究で開発を行った測定システムを用いて現地調査を行うことにより、その有用性を評価する。

### 3. 研究の方法

(1) 高湿度環境下にある古墳壁画等の壁画における水分蒸発量や含水量、及びそれらの時間変動を現地で測定するためには、様々な課題がある：(i) 壁画に対して非接触な測定法である、(ii) 高湿度環境(ほぼ100%の相対湿度)でも耐湿性を有する、(iii) 水分蒸発量・含水量の季節変化や天候による影響の調査、(iv) 電源の確保、(v) 測定システム全体の大きさが小型であること。これらの課題があるために、古墳壁画等の壁画における水分蒸発量や含水量の測定は困難であり、これま

で調査の事例は数少なかった。

(2) 本研究では、水分蒸発量と含水量の自動計測を行うために、以下のような原理に基づいた2つの測定方法の開発を行っている。

(3) 1つ目の方法は、以下のような測定原理を用いる。すなわち、図1左に示すように、複数個の超小型温湿度データロガーまたは温湿度センサーを壁画の前面に距離を変えて設置する。それぞれのデータロガーまたはセンサーで計測される温度と相対湿度から絶対湿度を算出し、絶対湿度の勾配を調べることにより、壁画における水分蒸発量の時間変動を調べる。

(4) 2つ目の方法は、図1右に示すように、小型の赤外ランプと赤外センサーを用いて、赤外線(1~2 $\mu\text{m}$ の波長領域)の反射率を観測することにより、壁画における含水量の時間変動を調べる方法である(水分子は1.20、1.45、1.94 $\mu\text{m}$ の赤外線を吸収する)。

本研究では、光源と検出器の選定を行い、プロトタイプを作成し、基本的な性能の評価実験を行った。

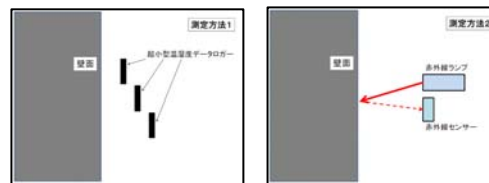


図1 測定原理

### 4. 研究成果

(1) 本研究では主に、図1左の測定原理に基づいた水分蒸発量の測定方法の開発等についての成果報告をする。ここでは、2通りの実験を行った。超小型温湿度データロガーを用いて屋外に置いてある石材の水分蒸発量を測定した実験(実験A)と耐湿性に優れた温湿度センサーを組み込んで構築した測定システムを用いて屋内に置いてある石材の水分蒸発量を測定した実験(実験B)である。

(2) 実験Aでは、KNラボラトリーズ社製のボタン電池型の超小型温湿度データロガー「ハイグロクロン温湿度ロガー」を用いて測定システムを構築した。この測定器は直径が17.4mmであり、文字通り、超小型のデータロガーである。リチウム電池を内蔵しているので、別途電源を用意する必要が無い。長期にわたっての自動計測ができるので、季節変化や天候による影響の調査が可能である。本実験では図2左に示すように、データロガーを固定した専用フォルダーを厚さ2mmの亚克力板を挟んで固定をして、測定システムとした。そして、図2右に示すように、試

料表面からデータロガーまでの距離をそれぞれ 2mm、4mm となるように設置して、測定を行うことにした。



図 2 測定システム (実験 A)

実験 A では、熊本県立装飾古墳館のご協力のもと、同館の中庭に置かれている石材に図 2 で示した測定システムを設置して、石材表面における水分蒸発量の計測を試みた (図 3)。今回の実験で用いた石材は、熊本県立装飾古墳館が製作した阿蘇熔結凝灰岩製の装飾古墳レプリカである。この石材は装飾古墳の部材と同程度の硬度を有する。計測期間中、この石材はひさしの下に置かれていたため降雨に直接がさらされることはなかったが、周囲の温湿度、及び日射の影響は受けていた。データを記録する時間間隔を 1 時間となるように超小型温湿度データロガーの設定を行った。2013 年 1 月 31 日に測定システムを設置して計測を行い、同年 4 月 25 日までのデータが記録された。



図 3 水分蒸発量の測定 (実験 A)

図 4 に、2013 年 4 月 7 日と 8 日の測定結果を示す。図 4 (a)、(b) はそれぞれ石材からの距離が 2mm、4mm における温度と相対湿度の測定結果である。これらの測定値から絶対湿度を計算し、それらの差をグラフ化したのが図 4 (c) である。これらの結果を見てみると、気温が上昇している時に (図 4 (a))、石材に近い場所における絶対湿度の方が大きな値になっていることがわかる (図 4 (c))。つまり、この測定により、温度が上昇した時に石材表面から水分が蒸発したことを捕えたのだと考えられる。

実験 A の測定システムは全体の大きさがコンパクトであること、長期にわたった計測が容易であること、外部電源を必要としないことなどの利点がある半面、改良すべき課題

もある。

1 つ目の課題は設置方法である。今回測定の対象とした石材の表面は上を向いているので、測定システムの設置は比較的容易であった。しかし、実際に水分の状態の調査を行いたい古墳壁画等では、調べたい面が地面に対して垂直であることが多い。測定期間中に壁面から数 mm 程度の距離を保持したまま安定して測定システムを固定できるような設置方法を検討する必要がある。

2 つ目の課題は耐湿性である。本研究の目的は、高湿度環境下にある古墳壁画等の壁面における水分蒸発量を自動計測することにあるが、実験 A で用いた超小型温湿度データロガーは、相対湿度が 90% を超えるような高湿度環境下では測定精度が悪くなることがわかっている。しかし、相対湿度が高くなりすぎない遺跡や建造物への応用は十分に考えられる。

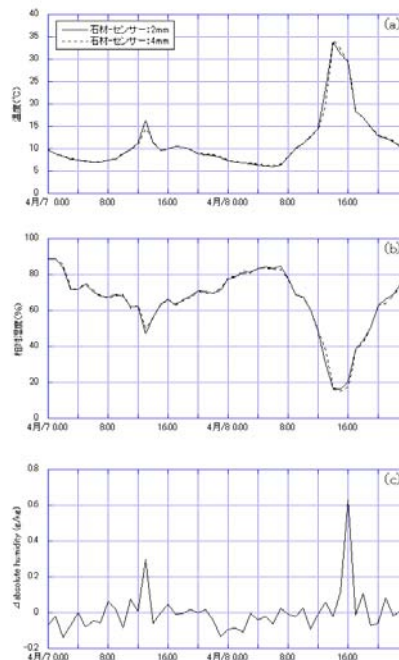


図 4 測定結果 (実験 A)

(3) 耐湿性や測定精度を考慮すると、相対湿度が 100% に近い高湿度環境における温度の自動計測は容易ではない。実験 B では、耐湿性に優れているセンシリオン社製の温湿度センサー-SHT75 を用いて (図 5)、測定システムを構築することにした。

測定システムを構築するためには、温湿度センサーから送られてくるデジタル信号を適切に処理し、温湿度データの記録を行うような信号の制御が必要である。この目的のために、入出力ポートを備えた制御基板である Arduino Mega 2560 を用いて測定システムの制御を行った (図 5)。

図 6 は測定システム全体の概念図である。2 個の温湿度センサーからの入力信号を処理し、温湿度データを micro SD カードへ記録するような制御プログラムを PC 上で作成

した。このプログラムを、USB ケーブルを介して制御基板へアップロードし、測定システムが温湿度の自動計測を行うようにした。また、電源の供給が難しい現地調査を想定し、9V 型のアルカリ乾電池を外部電源として、測定システム全体の駆動を試みた。



図5 温湿度センサーと制御基板（実験B）



図6 測定システム（実験B）の概念図

このように構築したプロトタイプの測定システムの動作確認をするために、大きさが約100mm×100mm×10mmの凝灰岩試料を用いて、図7、8に示すような実験を行った。ここで用いた凝灰岩試料は茨城県で採取された辺田野石である。実験Aと同様に、2個の温湿度センサーと石材との距離はそれぞれ、2mm、4mm となるように設置した(図7)。この実験では、(i) 測定システムが正常に動作して、2個の温湿度センサーからのデータが microSD カードに記録されること、(ii) 図8のように石材を入れた容器に水を供給した時に、石材上面から水分が蒸発する現象を測定システムで捕えることができるか、の2点を確認することが目的である。

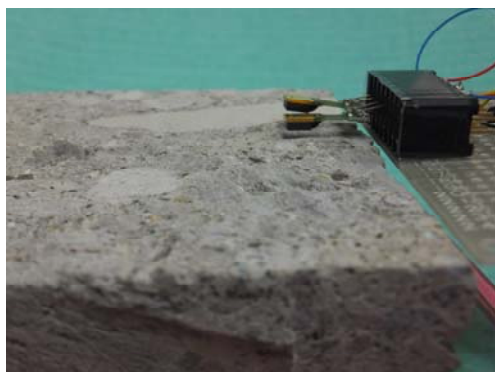


図7 水分蒸発量の測定（実験B）

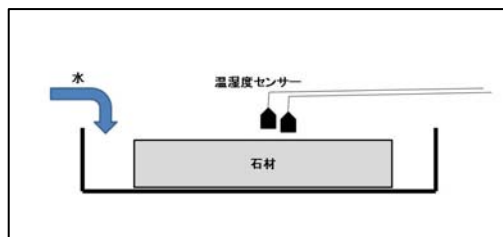


図8 実験Bの概念図

実験Bではデータの記録の間隔を1分と設定し、2日間測定を行ったところ、2個の温湿度センサーから送られてくるデータは正しく microSD カードに記録されていることが確認できた。この実験で得られた結果の一部を図9に示す。図9(a)、(b)はそれぞれ石材からの距離が2mm、4mmにおける温度と相対湿度の測定結果である。図4と同様に結果と同様に、温度と相対湿度の測定値から絶対湿度を計算し、それらの差をグラフ化したのが図9(c)である。図9(a)には試料に水を供給した時刻を示す。図9(c)を見ると、試料に水を供給してから約10分経過した頃に、石材に近い場所における絶対湿度の方が大きな値になっていたため、石材表面から水分が蒸発したことを捕えたのだと考えられる。

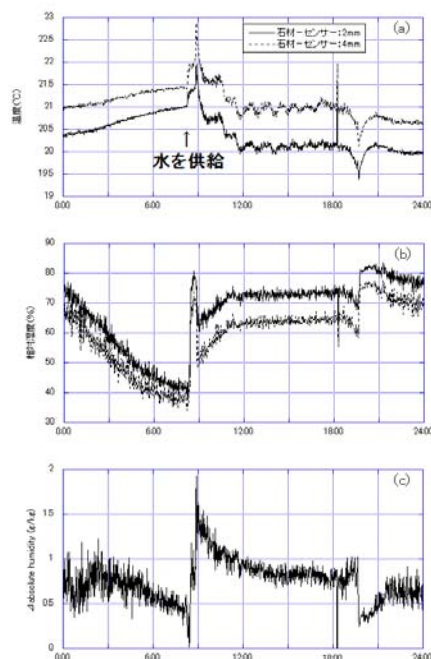


図9 測定結果（実験B）

実験Bのために作成した測定システムは、基本動作を検証するためのプロトタイプであったが、古墳壁画等の調査現場で活用できるように、全体を小型化した実機の製作を行う必要がある。また、実験当初は9V型のアルカリ乾電池を外部電源としたが、制御基板の消費電力の都合上、このような方法では1日程度しか計測を継続できない（本実験では、

途中で、電力の供給源を PC に切り替えた)。電力の供給方法を再検討する必要がある。

以上の問題点を克服すれば、文化財の調査において、汎用性の高い測定システムとなると考えられる。古墳壁画等の調査に加えて、実験 A の測定システムと同様に、他の遺跡や建造物への応用も検討を開始している。

(4) 本研究では、高湿度環境下にある古墳壁画等の壁面における水分蒸発量や含水量、及びそれらの時間的変化を計測するための非接触測定法を開発することを目的としている。

超小型温湿度データロガーを用いて測定システムを構築し、熊本県立装飾古墳館の石材に設置をして計測を行ったところ、温度上昇に起因する石材表面における水分の蒸発を捕えることができた。

さらに、高湿度環境下においても計測を行うために、耐湿性に優れた温湿度センサーと制御基板から構成される測定システムのプロトタイプを製作した。そして、この測定システムの動作を基礎実験から確認することができた。今後の課題は、さらなる小型化と電源の供給方法である。

#### 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)

① 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、査読有、53、2014、125-134

〔学会発表〕(計 1 件)

① 犬塚将英、古墳壁画表面における含水量の非接触測定システムの開発、日本文化財科学会第 30 回大会、2013 年 7 月 6 日・7 日

〔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：

出願年月日：

国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年月日：

国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

犬塚将英 (INUZUKA, Masahide )

東京文化財研究所・保存修復科学センター・主任研究員

研究者番号：00392548

##### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

##### (3) 連携研究者

岡田健 (OKADA, Ken )

東京文化財研究所・保存修復科学センター・センター長

研究者番号：40194352

森井順之 (MORII, Masayuki)

東京文化財研究所・保存修復科学センター・主任研究員

研究者番号：30342942

矢島國雄 (YAJIMA, Kunio)

明治大学・文学部・教授

研究者番号：70130838