

# 〔報告〕 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

犬塚 将英

## 1. はじめに

本研究では、文化財の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。ここでは、測定を実施したい対象として高湿度環境下にある古墳壁画等の壁面を想定して開発を行った結果を報告する。

高湿度環境下にある古墳壁画等の壁面では、季節や一日の環境変化による影響を受けて含水量が激しく変化すると、劣化要因となりうる。例えば、壁面における水分の吸収や放出が繰り返されることによって、彩色が施されている壁画の顔料に物理的な損傷を引き起こす場合がある。周囲の相対湿度が低くなり、壁面における水分の蒸発が促進されると、塩類の析出が懸念される。高湿度環境下においては、カビの発生が問題になることもあるが、壁面に接する空気の相対湿度のみならず壁面における含水量やその変動も発生の要因を考える上で重要である。

文化財の調査ではしばしば非接触な手法が求められる<sup>1)</sup>。壁面の含水量の非接触測定の例として、高松塚古墳での調査が挙げられる<sup>2,3)</sup>。この調査では、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、連続的な自動計測が行われなかったため、季節変動や天候の変化が壁面の水分量に与える影響はわからなかった。自動計測を行った事例としては、東京文化財研究所が土壁の水分吸収・放出に関して行った基礎研究<sup>4)</sup>や、敦煌莫高窟第53窟で実施した水分蒸発量の測定の測定<sup>5)</sup>などが挙げられる。しかし、これらの調査事例を除けば、文化財の壁面における水分の状態を非接触で自動計測した調査例は多くない。

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ると、壁画表面における水分蒸発量や含水量の自動計測を行うための新しいシステムの構築には意義があると考えられる。そして、このような測定方法を確立できれば、全国の装飾古墳等での現地調査が可能となるので、大きな波及効果も期待できる。

## 2. 水分蒸発量・含水量の非接触測定法

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、及びそれらの時間変動を現地で測定するためには、様々な課題がある：(i)壁面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、古墳壁画等の壁面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。

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。

1つ目の方法は、参考文献<sup>4,5)</sup>で示されている方法と同様の測定原理を用いる。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面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、壁面における水分蒸発量の時間変動を調べる。

2つ目の方法は、図1右に示すように、小型の赤外線ランプと赤外線センサーを用いて、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、壁面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）。

本稿では、1つ目の測定原理に基づいた方法の開発、実測の結果、今後の課題について次節以降で報告する。

### 3. 石材表面における水分蒸発量の測定

本稿では、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、及び実測を行った結果を説明する。このために、本研究では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。この節では、それぞれの実験の測定方法、測定対象、測定結果、測定システムの課題について説明する。

#### 3-1. 測定方法

##### 3-1-1. 実験A

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のアクリル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。

##### 3-1-2. 実験B

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湿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ロン社製の温湿度センサー

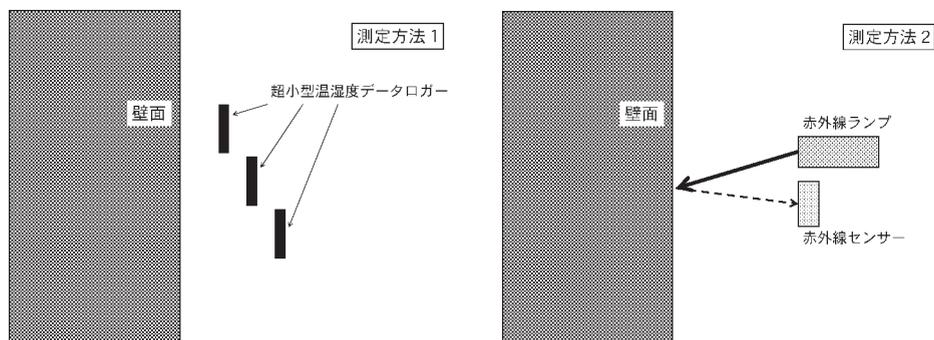


図1 本研究で開発を行っている水分蒸発量（左図）と含水量（右図）の測定原理

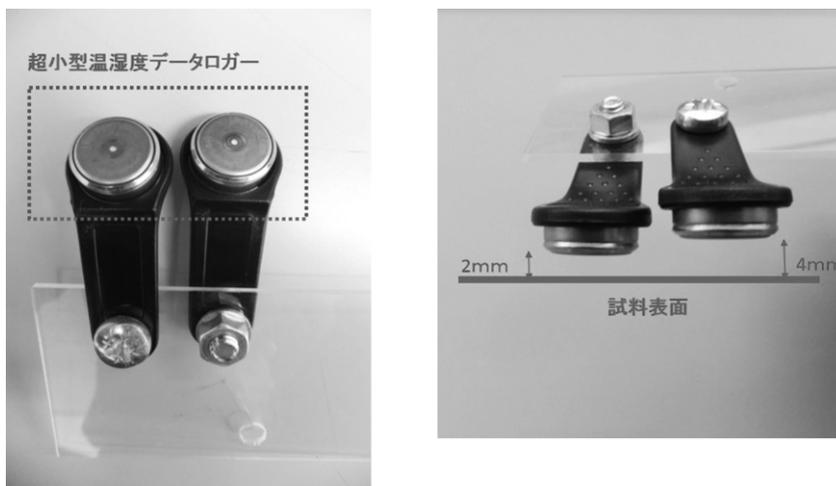


図2 壁面における水分蒸発量を計測するための測定システム

SHT75を用いて (図3), 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<sup>6)</sup> (図3)。

図4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 (後述する通り、実験の途中で、電力の供給源を PC に切り替えた)。

### 3-2. 測定対象

#### 3-2-1. 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3-1-

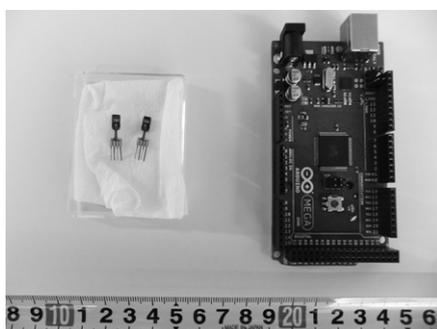


図3 温湿度センサーSHT75 (左) と制御基板 Arduino Mega 2560 (右)

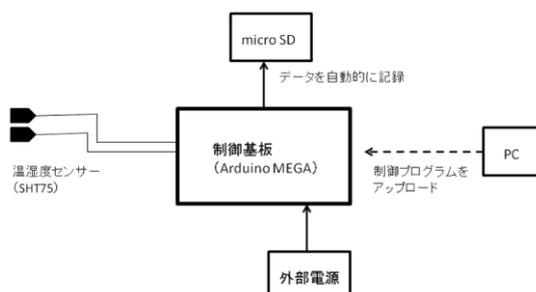


図4 測定システムの概念図

1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5)。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<sup>7,8)</sup>。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ので降雨に直接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。

### 3-2-2. 実験B

3-1-2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6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(3-1-1)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6右)。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micro SDカードに記録されること、(ii)図6左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5 レプリカ石材表面の水分蒸発量の測定

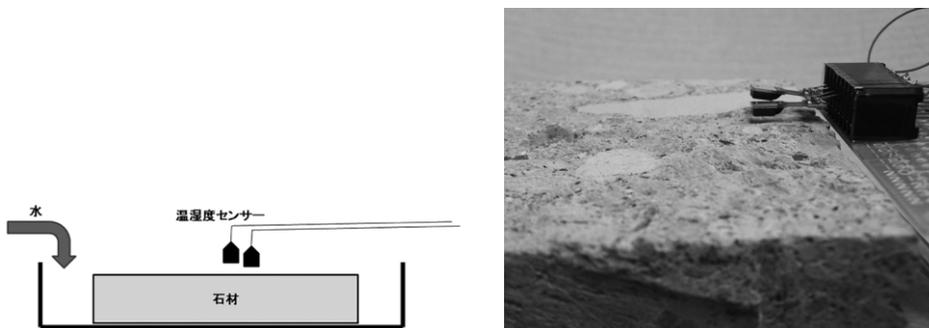


図6 実験の概念図(左)と石材表面に設置した測定システムの温湿度センサー部(右)

### 3-3. 測定結果

#### 3-3-1. 実験A

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(図5)、同年4月25日までのデータが記録された。

図7に、2013年4月7日と8日の測定結果を示す。図7(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7(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7(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7(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。

#### 3-3-2. 実験B

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micro SC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8に示す。図8(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7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8(c)である。図8(a)には試料に水を供給した時刻を示す。図8(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。

### 3-4. 測定システムの課題

#### 3-4-1. 実験A

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反面、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。

#### 3-4-2. 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。

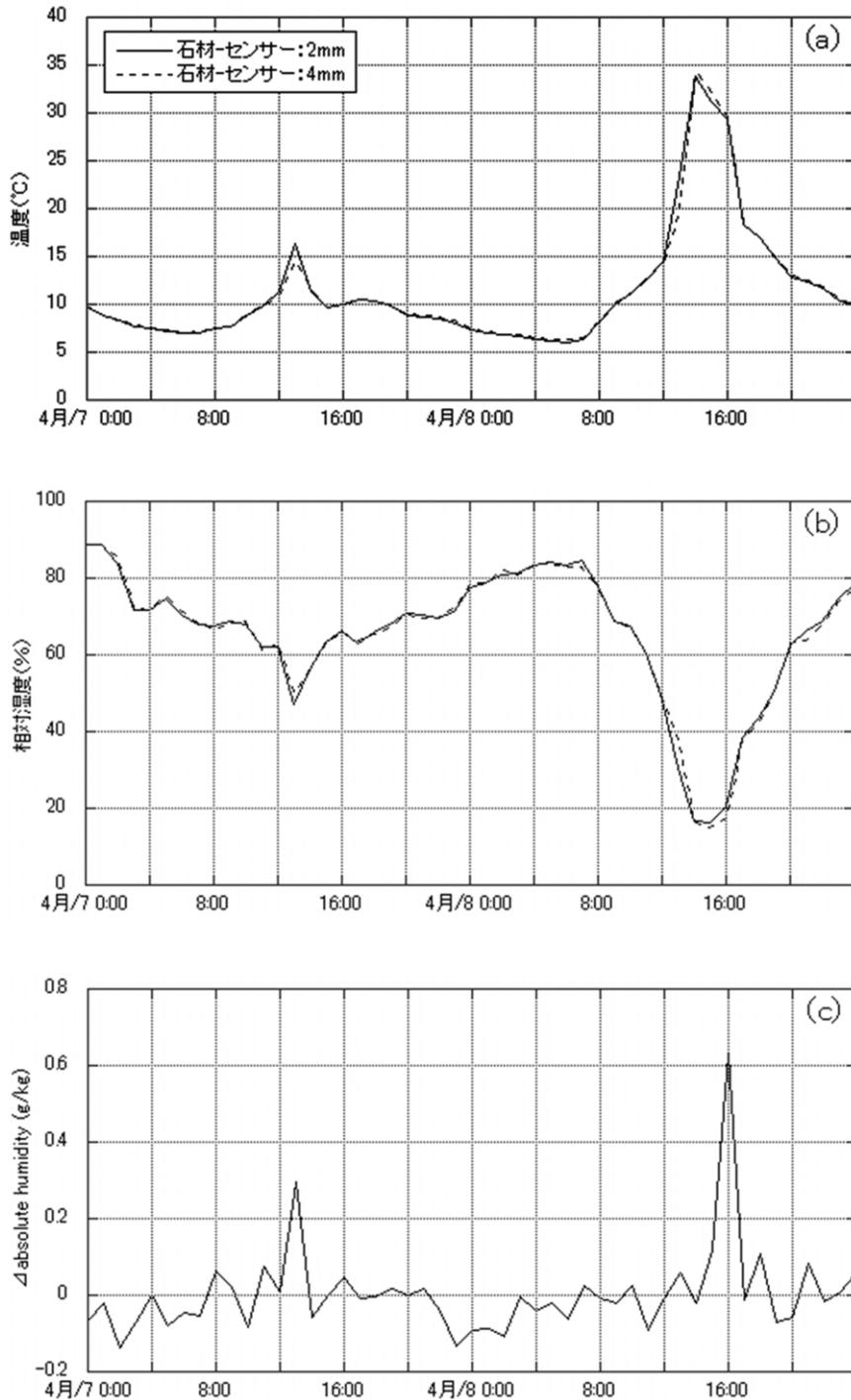


図7 測定結果。(a)石材からの距離が2mm(実線), 4mm(破線)における温度の測定値,(b)同様に相対湿度の測定値,(c)計算から得られた絶対湿度の差(絶対湿度(2mm)-絶対湿度(4mm))

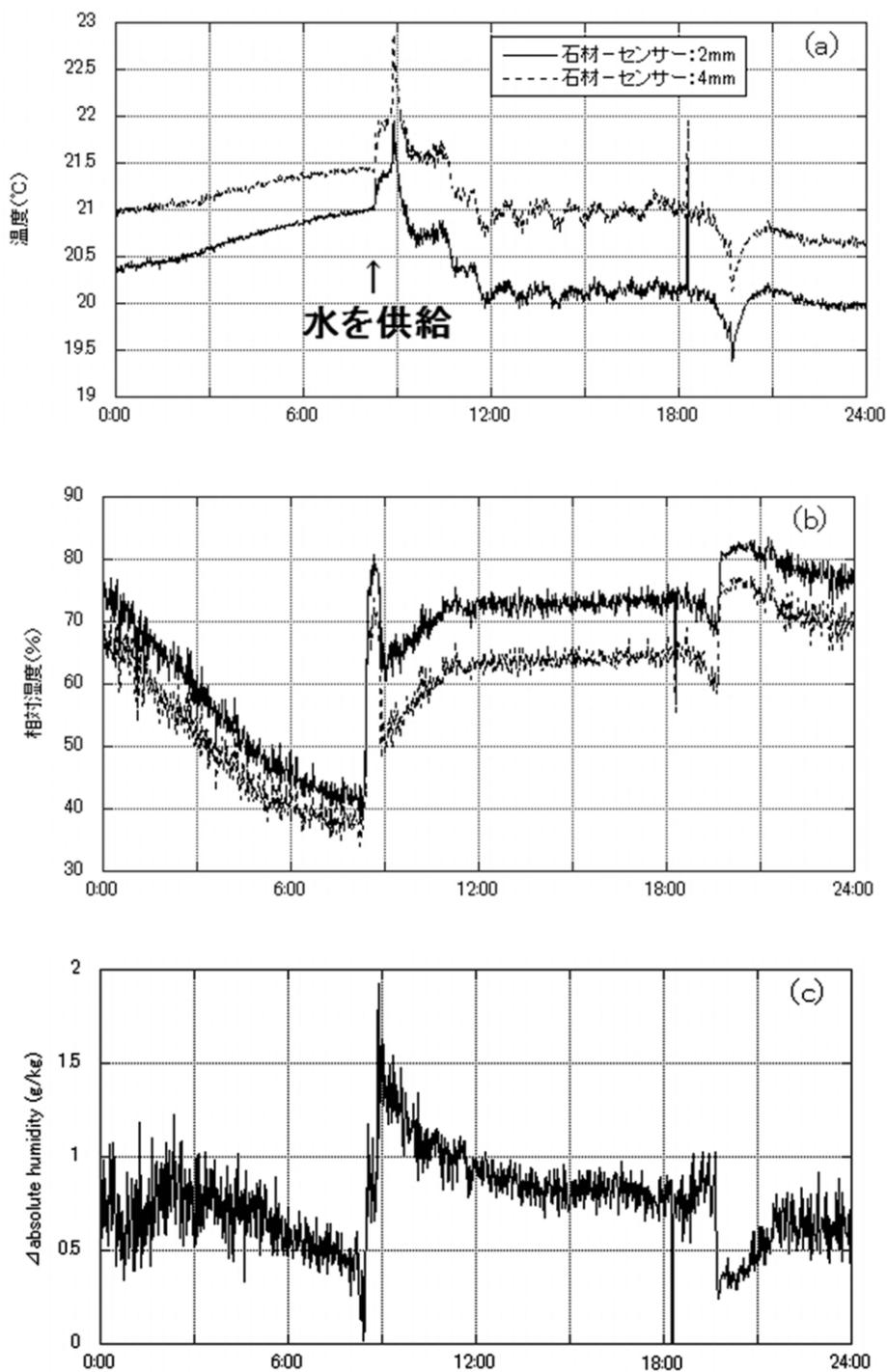


図8 測定結果。(a)石材からの距離が2mm(実線), 4mm(破線)における温度の測定値,(b)同様に相対湿度の測定値,(c)計算から得られた絶対湿度の差(絶対湿度(2mm)-絶対湿度(4mm))

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. まとめと今後の予定

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。

本稿では、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、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。

水分蒸発量の測定に加えて、壁面における含水量の測定方法(図1右)についても測定システムの開発、実測及び性能評価も開始している。

#### 謝辞

本研究は学術研究助成基金助成金・挑戦的萌芽研究「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」(平成25年度)によるものである。また、レプリカ石材を用いた測定にあたり、熊本県立装飾古墳館の坂口圭太郎氏と池田朋生氏には多大なるご協力をいただきましたので、ここに記して感謝致します。

#### 参考文献

- 1) 三浦定俊：『古美術を科学する』，廣済堂出版，(2001)
- 2) 文化庁：『国宝 高松塚古墳壁画』，中央公論美術出版，(2004)
- 3) 石崎武志，佐野千絵，三浦定俊：高松塚古墳石室内の温湿度および墳丘部の水分分布調査，保存科学 43 87-94 (2004)
- 4) 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)
- 5) 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)
- 6) 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)
- 7) 池田朋生，朽津信明，菊川知美：装飾古墳彩色の見え方の変化，文化財保存修復学会第31回大会研究発表要旨集 258-259 (2009)
- 8) 『阿蘇の灰石展 解説図録』，熊本県装飾古墳館 (2006)

キーワード：水分蒸発量(evaporation)，含水量(water content)，非接触測定(non-invasive investigation)，絶対湿度 (absolute humidity)

## **Development of Non-invasive Measurement Systems for Evaporation on the Surface of Cultural Properties**

Masahide INUZUKA

It is important to understand the water content and evaporation on the surface of mural paintings in order to prevent exfoliation of pigments, deposition of salts, fungi growth and so forth. However, there have not been many researches on such measurements because non-invasive measurements in high-humidity environment are difficult.

In this study, a measurement system was first constructed using two small data-loggers. Measurements were conducted on the surface of the stone at Kumamoto Prefectural Ancient Buried Mound Museum. 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 and inaccurate in a high-humidity environment.

Temperature and humidity sensors which have better humidity resistance were selected to develop a new measurement system for application at humid sites. The new measurement system 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 constructed and evaluated in this study.