

〔報文〕 日岡古墳の保存施設内における温熱環境の調査

犬塚 将英・森井 順之・石井 茉依*・吉田 東明*²

1. はじめに

福岡県うきは市の日岡古墳は6世紀前半に築造された前方後円墳であり、彩色壁画が確認されている¹⁾。後円部にある横穴式石室の長さは約4m、最大幅は約3mであり、羨道部は閉塞されている。日岡古墳の壁画の特色は、福岡県における彩色による図文表現の最古例であり、赤、白、緑、青の4色を用いて描かれている。石室の上半部は失われており、石室は地表面に向けて開口されている(図1左)。昭和39年(1964)に鉄筋コンクリート製の保存施設が建設され(図1右)、現在はこの保存施設の中で上から見下ろすような形で、石室内を見学することができる(図1左)。

日岡古墳の保存施設の模式的な断面図を図2に示す。この保存施設では、特に冬季において発生する大量の結露水が問題点として挙げられる。2012年12月までで結露量が最も多かった場所は西、北、東の壁面にある窓ガラスの表面であった。さらに、この窓からの光を遮っていた黒色のカーテンにカビが発生するという問題も生じていた。そこで、2012年12月にカーテンを取り外し、窓をプラスチック製のパネルで塞いだ(図3左)。また、壁面を伝って見学スペースの床面に落ちてきた結露水が石室へ侵入しないように、鉄柵の下部にプラスチック製の板を取り付けた(図3右)。これらの対策を施したことにより、遮光性は改善し、結露、カビの発生、ヤモリの侵入等の問題に対する一定の効果を上げてきた。しかし特に冬季において、天井面と壁面に発生する結露水は少なくなく、装飾への影響や見学スペースのメンテナンスという観点から、さらなる改善が求められている。

この保存施設の結露に関連して特記事項がある。聞き取り調査によると、以前は屋根に約10cmの土壌が堆積していたのだが(図2)、数年前の清掃作業の際にこの土壌は除去された。うきは市教育委員会によれば、その後に結露が起りやすくなったと報告されている。

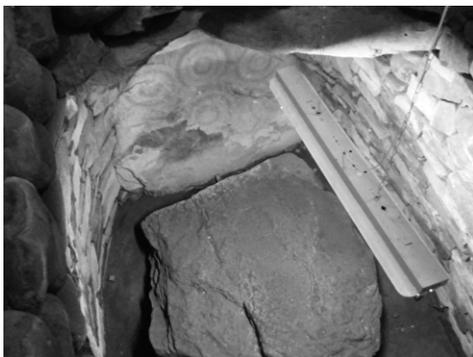


図1 地表面開口部から見た日岡古墳の石室内(左)と保存施設の外観(右)

*うきは市教育委員会

*²福岡県教育庁

本研究では、日岡古墳の保存施設内で結露が生じる原因の究明と対策の検討を目的として、実測による保存施設内の温熱環境の調査を行った。また、コンピューターシミュレーションによる解析を行い、土壌が屋根に堆積した場合に天井の表面温度と保存施設内の温度に与える影響を調べた。そして、これらの結果を踏まえて、今後の結露対策の方法の検討を行った。

2. 日岡古墳の保存施設内における温湿度及び壁面温度の測定

2-1. 測定方法

保存施設の天井面と壁面において結露が生じる原因を定量的に調べるために、屋外と見学スペースにおける温湿度、天井面と壁面の表面温度の測定を行った。これらの測定を行うためのデータロガーの設置個所を図4に示す。

屋外と見学スペースにおける温湿度測定のために、オンセット社製データロガー、ホボプロ v2 U23-001を設置した。また、オンセット社製データロガー、U12-014に銅-コンスタンタンの熱電対を外部入力として接続して、天井面と壁面の表面温度の測定を行った。表面温度の測定箇所は、東西の壁で1箇所ずつ、東西のそれぞれの窓の内側に貼られたパネルの表面で1箇所ずつ、天井で2箇所の合計で6箇所である。図5左には西側の壁面とパネル上におけるデータロ

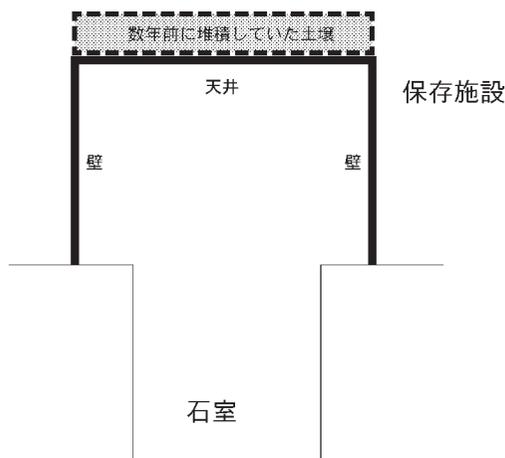


図2 日岡古墳保存施設の模式的な断面図



図3 結露対策として窓を塞いだプラスチック製のパネル（左）と鉄柵下部に取り付けた板（右）

ガーの設置状況を、図5右には天井におけるデータロガーの設置状況を示す。

これらのデータロガーの測定インターバルはいずれも1時間とし、2013年6月に測定を開始した。

2-2. 測定結果

ここでは2013年6月から12月までに得られた測定データの一部を紹介する。

図6(a)は保存施設内の温度と相対湿度のグラフである。保存施設内の温度は、日変動は小さいが、外気の季節変動に追随して推移していた。相対湿度は年間を通じて、ほぼ100%に近い値を示している。

保存施設内の温度と相対湿度から露点を計算して、2013年12月における天井の表面温度との比較を行ったのが図6(b)である。天井の表面温度は夜間に急激に下がり、保存施設内の空気の

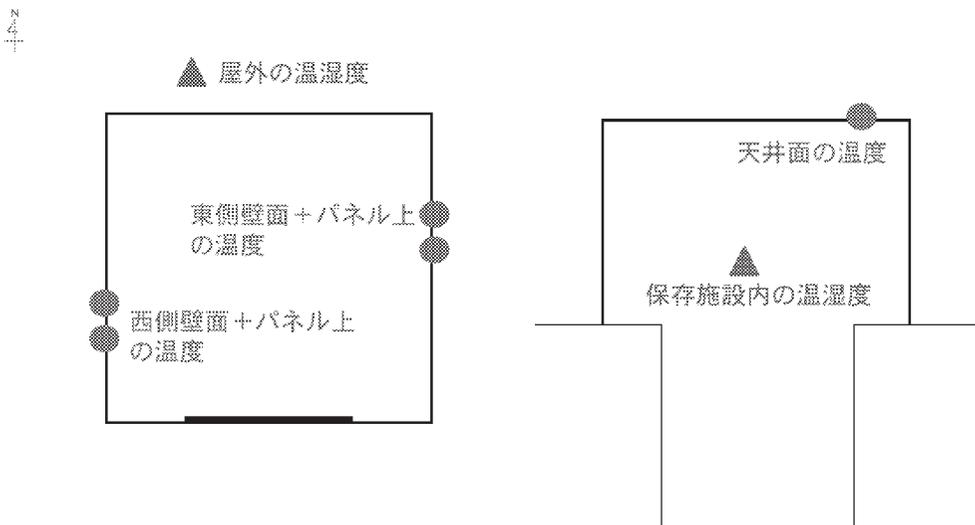


図4 温湿度と天井面、壁面温度の測定のためのデータロガー設置箇所
▲と●はそれぞれ温湿度測定用と表面温度測定用のデータロガーの設置箇所である。



図5 表面温度測定用データロガーの設置状況
左と右はそれぞれ西壁と天井における設置状況である。

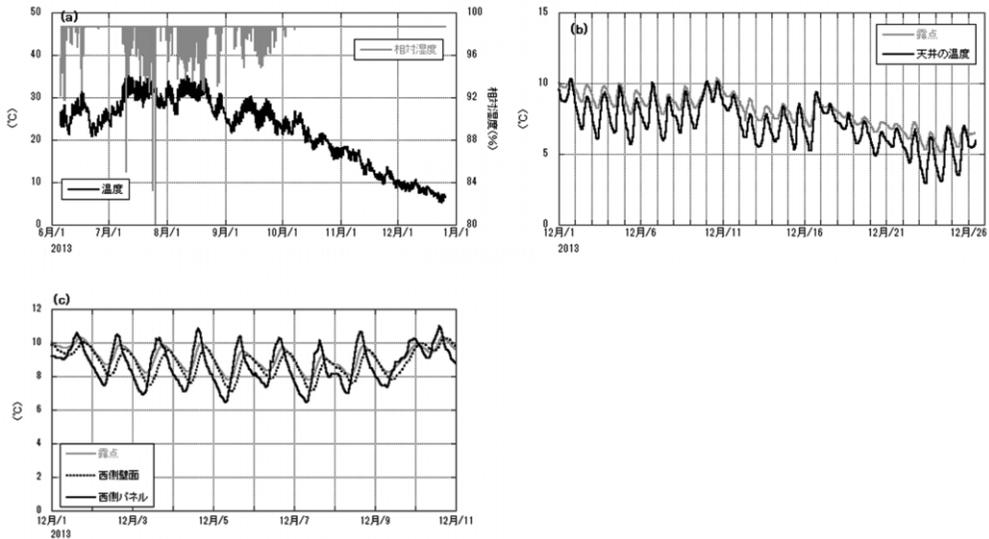


図6 保存施設内での測定結果。(a)保存施設内の温度と相対湿度，(b)保存施設内の露点と天井面の温度，(c)保存施設内の露点と西側壁面及びパネル表面の温度。

露点を下回っていた。

図6(b)と同様に，図6(c)では2013年12月上旬における西側壁面とパネル表面での温度と保存施設内の空気露点とを比較している。壁面よりもパネル表面における温度の日変動の方が大きかった。

3. コンピューターシミュレーションによる温熱解析

3-1. 熱・換気回路網計算プログラムを用いた解析モデル

保存施設の壁面及び天井面で発生する結露の主な原因は，天井及び壁の断熱性が充分でないことに起因すると考えられる。このことを定量的に検証し，今後の保存対策の具体的な方法の検討を行うために，コンピューターシミュレーションによる温熱解析を実施した。解析で用いたのは，清水建設技術研究所で開発された熱・換気回路網計算プログラム，NETSである²⁻⁴⁾。

図7は日岡古墳の保存施設をモデル化した熱回路網を示す。図7中の背景にある保存施設の平面図(左)と断面図(右)の上に，空間の空气に相当する節点や建築部材に相当する一般化コンダクタンスを配置し，お互いを接続することにより，熱回路網を構築して，2013年12月のデータを解析するためのモデル化を行った。

屋内は地表面の見学スペースの高さにある「保存施設内」と「石室内」の2つの空間から構成した。保存施設内の空間は南北方向が4.6m，東西方向が3.9m，高さ方向が2.8m，容積が50.2m³であり，石室内の空間¹⁾は南北方向が3.9m，東西方向が2.9m，高さ方向が3.0m，容積が33.9m³である。ここでは2012年12月1日の実測値に基づき，石室内の温度を11°C(一定)として，保存施設内の空間と接続した。

保存施設内の節点と外気節点との間は，保存施設を構成するコンクリートの情報を含む一般化コンダクタンスで接続した。実測結果から，天井と壁の厚さはそれぞれ15cm，24cmとした。コンクリートの主要な熱物性値は，熱伝導率を1.5W/mK，比熱を0.80kJ/kgK，比重を2400kg/m³とした²⁾。

外気節点には2013年11月21日から12月25日までに、朝倉で観測された風向、風速に関する気象庁のデータ、福岡で観測された日射量、雲量に関する気象庁のデータ、保存施設の脇で著者が実測をした気温、相対湿度に関するデータを入力した。天井面、壁面、保存施設内の温度の初期値は2013年11月21日の実測値に基づき 10°C とした。計算の初段階では計算値の変動が大きく不安定なため、最初の10日分は助走計算とした。

日岡古墳の保存施設では、数年前の清掃作業の際に屋根から土壌が除去された経緯があるが(図2)、このことが天井の表面温度と保存施設内の温度に与えた影響もNETSを用いて調べた(3-3)。この解析を行うために、図7中で保存施設内の節点と外気節点とを結ぶ天井を表す一般化コンダクタンス(厚さ15cmのコンクリート)に厚さ10cmの土壌に関する情報を追加することで、モデル化を行った。この時の土壌の主要な熱物性値は、熱伝導率を 0.93W/mK 、比熱を 1.3kJ/kgK 、比重を 1600kg/m^3 とした²⁾。

3-2. 計算結果と測定結果との比較

ここでは、NETSを用いて3-1で述べたようなモデルを構築して解析を行って得られた計算結果を実測値と比較する。

図8上では、NETSによる解析で得られた天井面における温度の計算値と測定(図5右)から得られた値との比較を示す。NETSを用いた解析により、実測値と良く一致した。

図8下では、NETSによる解析で得られた保存施設内における温度の計算値と実測値との比較を示す。NETSを用いた解析から得られた計算値は、比較した期間を通じて、実測値よりも約 1°C 低い値となったが、変動の傾向は良く一致した。

3-3. 土壌を取り除いた場合の計算結果

図9上では、土壌が無い場合と有る場合において、NETSで得られた保存施設内の温度の計算結果を示す。計算結果の比較からは、土壌の有無による保存施設内の温度への影響はほとんど見られなかった。

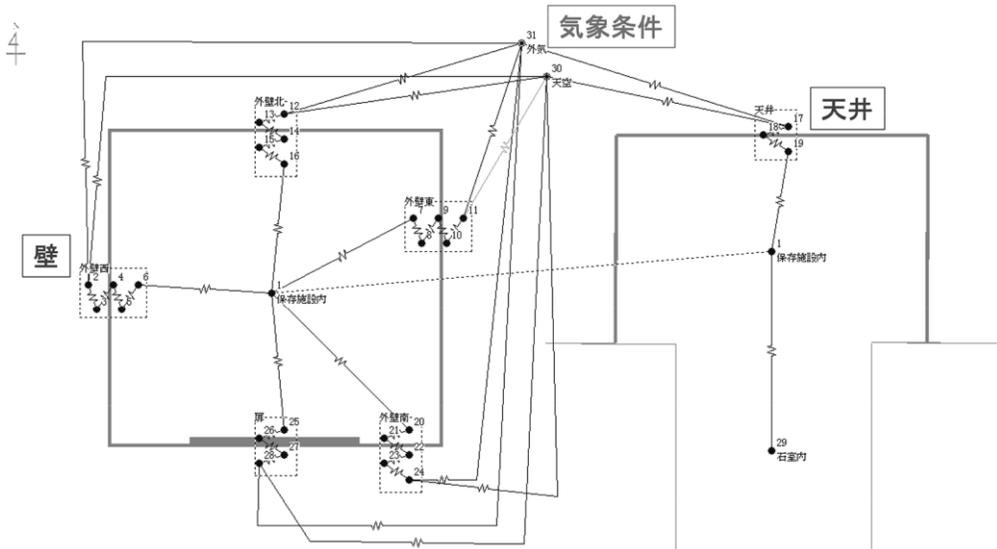


図7 NETSを用いて日岡古墳の保存施設をモデル化した熱回路網

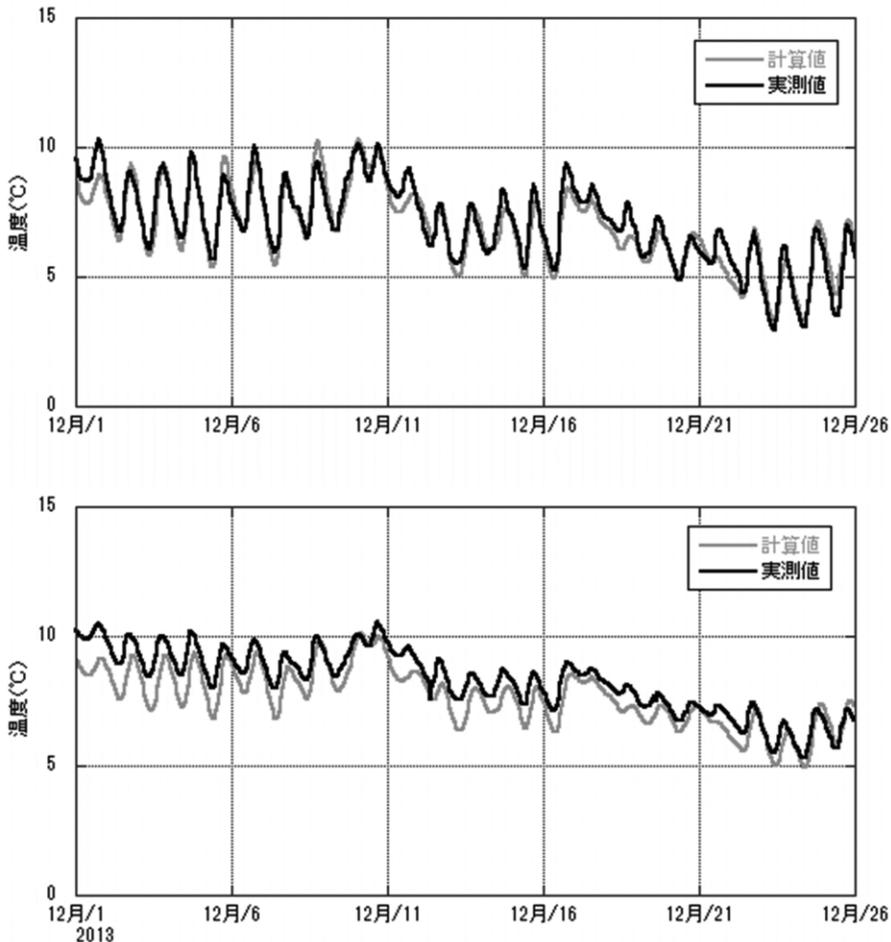


図8 NETSによる解析で得られた計算値と実測値との比較
上図では天井面の温度，下図では保存施設内の温度の比較を示す。

一方，図9下では，土壌が無い場合と有る場合において，NETSで得られた天井面の温度の計算結果を示す。追加した土壌の断熱効果により，天井面における温度変化が小さくなる結果が得られた。

次に土壌が無い場合と有る場合における保存施設内の温度と天井面の温度との比較を行った。図10上では，土壌が無い場合の，NETSで得られた保存施設内の温度と天井面の温度の計算結果を示す。夜間から明け方にかけて，天井面の温度が保存施設内の温度よりも急激に下がり，結露が生じやすい状況と見積もられた。

一方，図10下では，土壌が有る場合の計算結果を示す。追加した土壌の断熱効果により天井面における温度変化が小さくなり，夜間から明け方にかけての保存施設内の温度との差異が小さくなった。

4. 保存施設の断熱性と結露に関する考察

保存施設内の相対湿度は年間を通じて，ほぼ100%に近い値を示しているので（図6(a)），壁

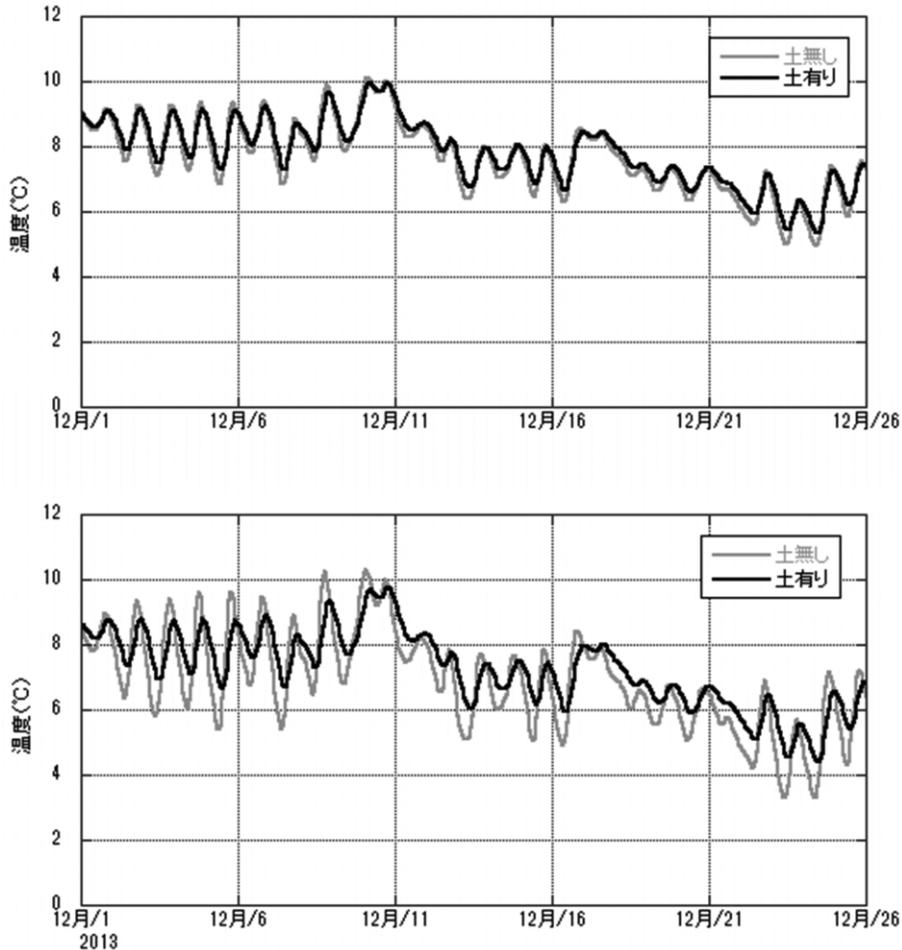


図9 屋根を覆っていた土壌の有無に関する比較
上図では保存施設内の温度，下図では天井面の温度の比較を示す。

面の温度が下がる冬季に結露が生じやすくなることがわかった。特に、天井の表面温度が急激に下がり露点を下回っていた夜間に(図6(b))，結露が起りやすい状況となっていたと考えられる。また、窓を塞いでいるパネル表面での温度の方が壁面温度よりも日地変動が大きかった(図6(c))原因として、断熱性の違いにより、パネルがある部分の方が屋外の気温の変化の影響を受けやすいことが挙げられる。つまり、特にパネル表面では夜間に結露が非常に起りやすい状況となっていると考えられる。

保存施設内と天井面の温度の実測値とNETSから得られた計算値が良く一致していたことから(図8)，今後の日岡古墳の保存対策を検討する上で、NETSを用いた解析が有用な調査手法であると評価することができた。

NETSを用いて屋根に土壌が堆積している場合の計算結果(3-3)から、土壌が堆積している場合の方が天井面での結露量は少なくなる、と推測できる。しかしこの解析結果から、保存施設の屋根の上に堆積していた土壌を除去するという行為が悪かった、という結論には結びつかないことに注意が必要である。屋根に土壌が堆積した状態だと、ヤモリや虫等の日岡古墳

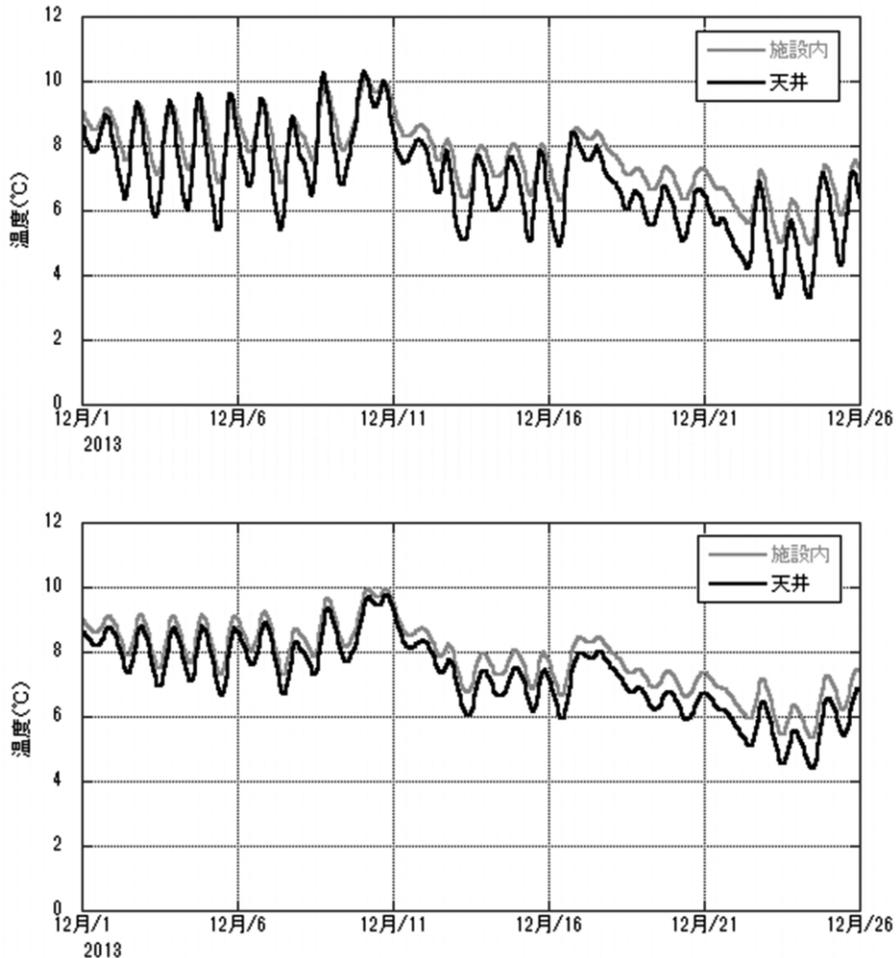


図 10 屋根を覆っていた土壌の有無に関する比較
 上図では土壌が無い場合の保存施設内と天井面での温度の比較、
 下図では土壌が有る場合の保存施設内と天井面での温度の比較を示す。

に影響を与えるかもしれない生物を誘因する可能性があるので、日岡古墳の活用及び保存環境の改善という観点から清掃作業は重要だからである。

以上の結果から、生物を誘因するリスクが小さい材料を用いて屋根の断熱性を向上すれば、天井面での結露量を減らすことができるであろう。例えば結露対策のためのひとつの案として、熱伝導率が低い発泡プラスチック系の断熱材を屋根の上に設置する方法が考えられる。

5. まとめ

日岡古墳での実測の結果から、保存施設内の相対湿度は年間を通じてほぼ100%であり、天井や壁面での表面温度が保存施設内の空気の露点を下回る冬季の夜間に結露が起りやすい状況となっていることがわかった。

また、コンピューターシミュレーションによる解析を行ったところ、屋根に土壌が堆積している場合の方が断熱性が高いので、天井面での結露量は少なくなることを示唆する結果が得ら

れた。しかし、日岡古墳の保存環境の改善という観点から、屋根に土壌を戻すという方法は採用し難い。

以上の結果に加えて、結露現象に対する管理者のメンテナンス業務の負担の軽減も考慮すると、結露対策のひとつの案として、熱伝導率が低い発泡プラスチック系の断熱材を屋根の上に設置する対策が考えられる。

参考文献

- 1) 『装飾古墳の世界 図録』, 国立歴史民俗博物館 (1993)
- 2) 奥山博康: 熱・換気回路網モデル計算プログラム NETS の検証, IBPSA-Japan 講演論文集, 15-22 (2002)
- 3) 犬塚将英, 龍泉寺由佳, 石崎武志: 石水博物館千歳文庫内の温湿度解析, 保存科学47, 69-78 (2008)
- 4) Masahide Inuzuka: Modelling temperature and humidity in storage spaces used for cultural property, Studies in Conservation, vol.59 supplement 1, pp52-54 (2014)

キーワード: 日岡古墳 (Hinooka tumulus), 結露 (condensation), 露点 (dew point), シミュレーション (simulation)

Investigation of Thermal Environment inside the Shelter for Hinooka Tumulus

Masahide INUZUKA, Masayuki MORII, Mai ISHII* and Tomei YOSHIDA*²

From the conservation point of view, one of the main problems in the shelter for Hinooka Tumulus is condensation on the ceiling and walls especially in winter. In order to understand the mechanism of the formation of condensation and to consider countermeasures to prevent it, the thermal environment inside the shelter was investigated by on-site measurements and calculations using a simulation program, NETS.

From the on-site measurements, it was found that the relative humidity inside the shelter is almost 100% throughout the year. During the night, particularly in winter, the temperature on the surface of the ceiling and walls drops rapidly and becomes lower than the dew point, resulting in the formation of condensation. The result of calculation obtained by NETS reproduced the measurement result reasonably well.

Assuming that 10cm of soil is stacked on the roof of the shelter, the thermal environment was recalculated by using NETS. As a result, the calculation predicted that the variation of temperature on the surface of the ceiling would be moderated because thermal insulation was increased. This analysis result indicates the possibility of reducing condensation by supplementing materials on the roof.

*Ukiha City Board of Education

**Fukuoka Prefecture Board of Education