

# 〔報文〕過去の高松塚古墳石室内の温湿度変動解析 保存施設稼働時の気象条件の影響と、発掘直後の 仮保護施設の影響

著者	小椋 大輔, 銚井 修一, 李 永輝, 石崎 武志, 三浦 定俊
雑誌名	保存科学
号	48
ページ	1-11
発行年	2009-03-31
URL	<a href="http://id.nii.ac.jp/1440/00003735/">http://id.nii.ac.jp/1440/00003735/</a>

# 〔報文〕 過去の高松塚古墳石室内の温湿度変動解析 —保存施設稼働時の気象条件の影響と、発掘直後の仮保護施設の影響—

小椋 大輔\*・銚井 修一\*・李 永輝\*・石崎 武志・三浦 定俊

## 1. 目的と検討方法

過去の高松塚古墳の石室周囲の環境や内部作業などが、石室内の温湿度変動にどのような影響を与えてきたのかについて明らかにすることは、壁画の劣化の要因を検討する上で重要な情報を与えてくれるものと考えられる。本研究では、上記を目的として、高松塚古墳石室内の温湿度変動の測定値<sup>1)</sup>や記録<sup>2)</sup>などを元に、影響を与える要因を取り上げて、数値シミュレーションを用いて推定する。検討にあたって墳丘、保存施設等を考慮した石室の温湿度解析モデルを作成し、それぞれの要因について条件を設定する。なおモデル化や境界条件などの設定には、過去の石室周囲の環境や内部作業などに関する測定値、記録を可能な範囲で考慮し、不明な点は推定を行う。

## 2. 検討を行う過去の保存環境

以下の二つの期間の石室内の温湿度変動について検討を行う。

### 2-1. 古墳発掘から保存施設の稼働までの石室内の温湿度変動

1972年の発掘に伴う壁画発見から、1976年の保存施設の空調設備の稼働まで、石室は南側の封土の多くが取りのぞかれ、そこを覆う仮保護施設や保存施設の前室に露出される状況に置かれていた。この間における石室内の温湿度変動を検討する。前室に露出されている石室の南端は、調査時以外は覆土で覆われていたが、石室の乾燥が懸念されたため、覆土の散水や、入室時の湿度低下を抑制するための前室の高湿環境維持のための対処が行われた<sup>3)</sup>。

本報告では、まず発掘前と発掘後の石室の南側に仮保護施設が設けられた後の石室内温湿度について推定を行う。なお今回は、石室の入室は考慮しておらず、今後検討し、報告を行う予定である。

### 2-2. 保存施設の稼働から石室解体前までの石室内の温湿度変動

1976年の保存施設の稼働から、2005年の石室解体が決定し地盤冷却が行われる前までの石室内の温湿度環境について検討を行う。まず過去の石室内の温度測定値の特徴について把握し、主たる検討課題を明確にする。

図1に、保存施設を設置している期間の外気(奈良市)<sup>注1)</sup>、石室内、前室の温度測定値<sup>1)</sup>の年平均値の変動を示す。図中に外気、石室内及び前室の温度変動について最小二乗法により求めた線形近似曲線も示している。外気と石室内の温度について線形近似曲線から求めた勾配を比べると、石室内は0.11であり、外気の0.046より約2倍大きい。この傾きから求めた1979年から2004年の26年間の温度上昇は、外気は約1.2℃、石室内は約2.9℃である。また前室の温度も、石室と同様に約3.1℃上昇している。つまりこの期間における石室内の温度上昇は、外気温の上昇より約1.7℃大きい。この要因について検討を行うことを主たる課題とする。石室内の温度上昇に影響を与える要因としては、以下が考えられる。

\*京都大学大学院

- 1) 気象条件の影響
  - ・外気温の上昇など。
- 2) 前室・準備室の温度制御の影響
  - ・パネル系冷水温度が夏期に、石室や地中温度より高かったこと<sup>1)</sup>など。
- 3) 保存施設の躯体熱移動の影響
  - ・躯体の南側は外気に露出し、そこに日射が直接あたることなど。
- 4) 機械室内の温度変動の影響
  - ・空調の廃熱や、夏期の高温の外気と換気を行っていることなど。
- 5) 石室への入室の影響
  - ・入室時の石室内温度の上昇など。
- 6) 墳丘の被覆状況の影響
  - ・竹林など植物の墳丘被覆状況の変化や、竹林の伐採、遮水シートの設置など。

本報告では、まず、1) 気象条件の影響 について検討を行う。その他の要因については、今後検討を行い報告する予定である。

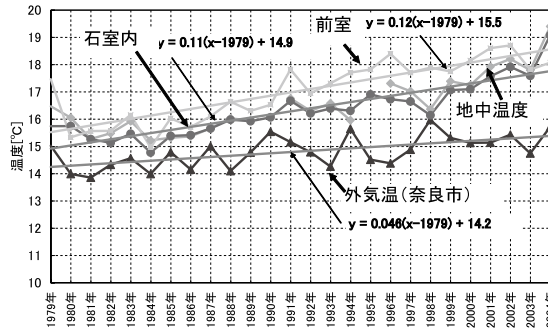


図1 石室内と外気の温度の年平均値の変化 (1979年~2004年)

### 3. 保存施設の稼働から石室解体前までの石室内の温湿度変動

#### 3-1. 解析方法

解析に用いる基礎方程式は、以下に示す多孔質材料内の熱と水分の移動を取り扱う熱水分同時移動方程式<sup>5)</sup>である。墳丘の土壌、石室の石材、保存施設の躯体コンクリートなど多くの材料は、材料内部に空隙を持つ多孔質材料であり、これらの熱と水分の移動について、この方程式を適応する。なお式の記号は、本報告の最期で説明を行っている。

$$\text{熱} : (c\rho)_{op} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot [(\lambda + r\lambda'_{rg}) \nabla T + r\lambda'_{rg} \nabla \mu] \quad (1)$$

$$\text{水分} : \rho_w \frac{\partial \psi}{\partial \mu} \frac{\partial \mu}{\partial t} = \nabla \cdot [\lambda'_\mu (\nabla \mu - g\mathbf{n}) + \lambda'_T \nabla T] \quad (2)$$

石室など室内の空気については、室空気を1質点で代表させ以下の熱水分収支式を用いる。

$$\text{熱} : c\gamma V \frac{\partial T_r}{\partial t} = \sum_{j=1}^n S_j \alpha_j (T_j - T_r) + c\gamma V N_v (T_o - T_r) + Q_r \quad (3)$$

$$\text{水分: } c'\gamma V \frac{\partial p_r}{\partial t} = \sum_{j=1}^n S_j \alpha'_{mj} (p_j - p_r) + c'\gamma V N_v (p_o - p_r) + J_r \quad (4)$$

水分化学ポテンシャルと水蒸気圧の関係は下式から得られる。

$$\mu = R_v T \ln(p/p_{sat}) \quad (5)$$

外気と接する地盤表面での境界条件は、竹林による蒸散を考慮に入れる<sup>10)</sup>。竹林は、植物の層と地盤表面の層を合わせて単層として取り扱う簡易なモデルとする。このモデルは、植物の日射吸収や蒸散を考慮しており、それらの石室内環境に対する影響の程度は十分に検討が可能であると考えられる。以下に、それぞれ外気と接する地盤表面での熱・水分境界条件及び蒸散量に関する式を示す。

外気と接する地盤表面の熱境界条件

$$\begin{aligned} (\alpha + b \cdot r \alpha'_T)(T_o - T_s) + b \cdot \alpha'_\mu (\mu_o - \mu_s) + q_{sol} - q_{noc} - rE \\ = -(\lambda + r\lambda'_{Tg}) \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_s - r\lambda'_{\mu g} \left. \frac{\partial \mu}{\partial n} \right|_s \end{aligned} \quad (6)$$

外気と接する地盤表面の水分境界条件

$$b \cdot [\alpha'_\mu (\mu_o - \mu_s) + \alpha'_T (T_o - T_s)] + J_s = -\lambda'_\mu \left( \left. \frac{\partial \mu}{\partial n} \right|_s - g\mathbf{n} \right) - \lambda'_T \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_s \quad (7)$$

蒸散量<sup>11)</sup>

$$E = a\beta C_H U / P (p_{sat}(T_s) - p_o)$$

ここで、 $a$ は、蒸散のパラメータとして地表面の面積を1としたときの植物（竹林）の面積の比率、 $b$ は、地表面の面積を1としたときの植物のない面積の比率、 $\beta$ は蒸発効率、 $C_H$ はバルク輸送係数である。地盤からの蒸発面積は墳丘が裸地のときと比較して30%をとる。なお蒸散の水分は、簡便のため墳丘全体から一様に取り去られるものとしている。解析モデルは、図2に示す様に、石室の南北方向の断面を取り出した2次元系として取り扱う。保存施設では、前室の温度は設計方針どおりに石室内温度と等しくなるように制御されるもの<sup>4)</sup>とし、機械室の排熱や石室内の入室はないものとした。表1に気象条件、計算に用いる熱物性値等を示す。表2に保存施設等の設定条件を示す。

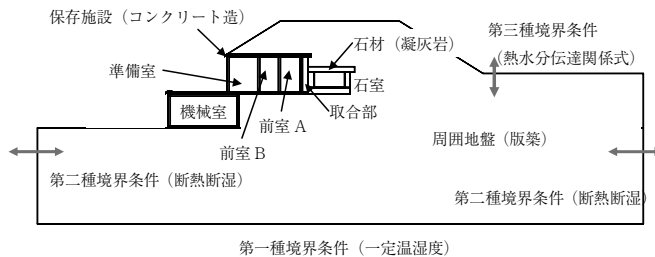


図2 解析対象

表1 計算条件

気象条件	奈良気象台観測値（1975年～2005年） <sup>6)</sup> 外気温, 外気相対湿度, 水平面全天日射量 <sup>*1</sup> , 降雨量, 雲量 <sup>*2</sup>
熱・水分物性値	地盤：版築土 高松塚古墳墳丘の版築土の平衡含水率 <sup>7)</sup> を元に推定 <sup>8)</sup> 地表面近傍は砂質土 <sup>9)</sup> とする。 凝灰岩：文献値 <sup>12-14)</sup> を元に推定 <sup>8)</sup> 漆喰：文献値 <sup>15)</sup> を使用 保存施設コンクリート：文献値 <sup>16)</sup> を使用 保存施設断熱材：押出発泡ポリスチレンフォーム 文献値 <sup>17)</sup> を使用（非透湿）
計算方法	前進型有限差分法
計算期間	1979年1月1日から2005年12月31日 (1975年から4年間の助走計算)

※1：水平面全天日射量は、直達日射量（Bouguerの式）、天空日射量（Berlageの式）に分離して、墳丘の南側、北側の斜面では、斜面の勾配を考慮して日射量を与えた<sup>18)</sup>。  
※2：夜間放射量は、Bruntの式に雲量補正を行った式を用いた<sup>18)</sup>。

表2 保存施設等の設定条件

前室・準備室の温度制御	機械室内	石室内	墳丘表面
<ul style="list-style-type: none"> <li>石室温度と等しくなるように制御</li> <li>取合部との換気はなし</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>熱水分発生なし</li> <li>外気との換気はなし</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>熱水分発生なし</li> <li>石室と取合部との換気はなし</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>植生を一様に分布</li> <li>被覆条件は時間的に変化なし</li> </ul>

### 3-2. 気象条件の影響の検討

図3～6に、石室内の温度変動の解析結果と測定結果の比較を示す。図3, 4, 5, 6はそれぞれ1979～2004年, 1979～1987年, 1988～1996年, 1997～2004年の結果である。

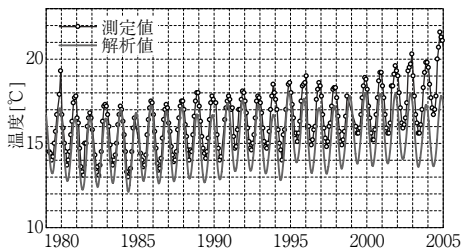


図3 石室内の温度変動の比較  
(1979年から2004年)

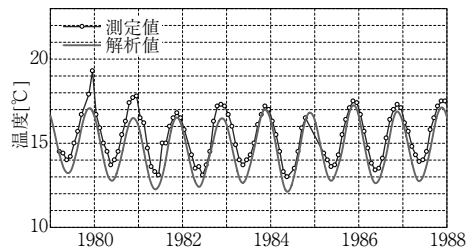


図4 石室内の温度変動の比較  
(1979年から1987年)

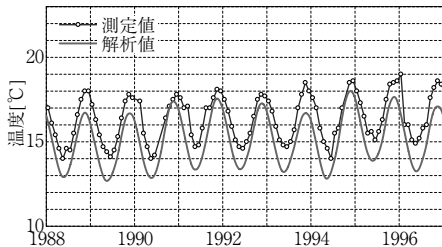


図5 石室内の温度変動の比較  
(1988年から1996年)

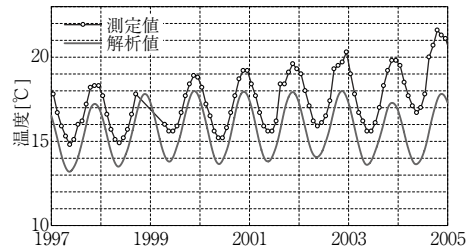


図6 石室内の温度変動の比較  
(1997年から2004年)

図4～6より、石室内温度の解析値は、1980年代中頃までは年最高値を除いて測定値に近い値で変化をしているが、1980年代後半から、測定値ほど温度上昇をせず、両者の値の差が徐々に大きくなり、2005年頃にはその差は最も大きくなる。全期間で見ると図3より、測定値の26年間の温度上昇に対して、解析値の上昇は緩やかである。

図7に石室内の温度年平均値の解析結果と測定結果の比較を示す。図中に最小二乗法により求めた線形近似曲線も示している。図より解析結果の温度変動は、測定結果の変動より、外気温の変動に近く、線形近似曲線の勾配は、解析値は0.052と測定値の0.11の約半分であり、外気温の0.046に近い。これらを用いて26年間の変化を求めると約1.4℃の上昇であった。これは前述の外気温の年平均値の上昇幅の約1.2℃と近く、石室内の温度上昇幅の約2.9℃より1℃以上小さい。

従って、気象条件の変化は、この間の温度上昇の主たる要因の一つといえるが、それだけでは温度上昇を完全に説明しきることができない。これ以外の要因としては前節で述べた、1) 前室・準備室の温度制御、2) 保存施設の躯体熱移動、3) 機械室内の温度変動、4) 石室への入室、5) 墳丘の被覆状況 といったことが考えられる。

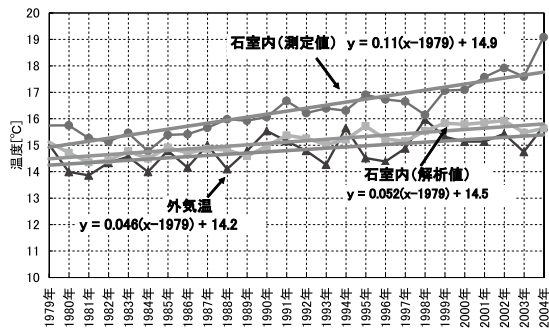


図7 石室内温度の年平均値変化の比較（1979年～2004年）

## 4. 古墳発掘から保存施設の稼働までの石室内の温湿度変動

### 4-1. 解析方法

用いる基礎方程式、計算方法は前節と等しい。解析モデルは、文献<sup>19)</sup>を参考にして、図8に示すように発掘前、発掘後の墳丘の状況を考え、前節と同様の石室の南北方向の断面の2次元系とする。発掘後は、石室南側が仮保護施設に露出する場合（以後、覆土がない場合）と石室南側が覆土50cmで覆われた場合（以後、覆土がある場合）を考える。仮保護施設は、内部での熱水分の発生は考慮せず、石室内の入室もここでは考慮しない。表3に発掘後の条件の概要を示す。なお計算結果は、発掘前では周期的定常状態の結果を、発掘後では発掘前を初期条件として3年目の結果をそれぞれ示す。

表3 発掘後の条件

仮保護施設	石室内
<ul style="list-style-type: none"> <li>・室内の熱水分発生なし（作業なし）</li> <li>・石室と仮保護施設の間での換気を考慮</li> <li>・仮保護施設と外気の間での換気を考慮（5回/h）</li> <li>・屋根、壁は1次元の熱移動（非透水、非透湿）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・熱水分発生なし（作業なし）</li> <li>・石室と仮保護施設の間での換気を考慮（0.5回/h）</li> </ul>

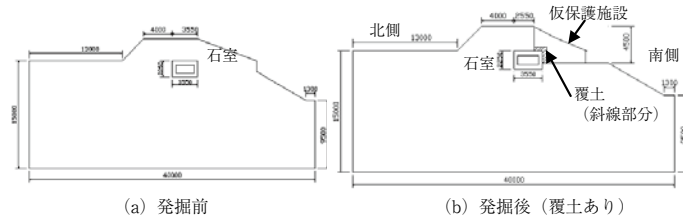


図8 解析対象

#### 4-2. 発掘直後の仮保護施設の影響の検討

図9, 10にそれぞれ発掘前と発掘後の石室内の年間の温湿度変動を示す。図9より, 発掘前の石室内の温度は, 年間変動が小さく安定しているが, 発掘後では年間の振幅がやや大きくなっている。これは, 発掘により石室南側の封土が取り除かれたことにより, 外気の影響を受けやすくなったためと考えられる。また覆土がある場合より, ない場合の方が, 振幅が大きく, 変動の位相は外気に近づく。図10より石室内の相対湿度は, 発掘前では年間を通じて100%に近い値で維持されているが, 発掘後では覆土がない場合は約98%, 覆土がある場合は約99%まで若干低下している。これは, 石室の南側が乾燥することと仮保護施設との換気があることによると考えられる。石室の調査時には覆土を取りのぞき, それ以外では覆土していたことを考えると, 同様の現象が起きていた可能性は高いと考えられる。

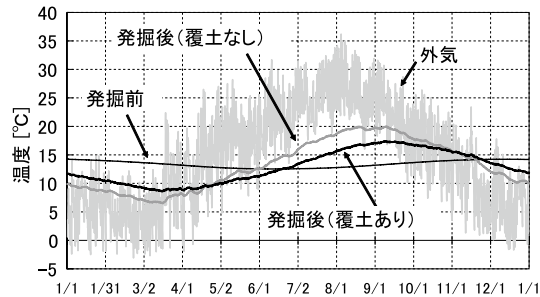


図9 発掘前と発掘後の石室内の温度変動

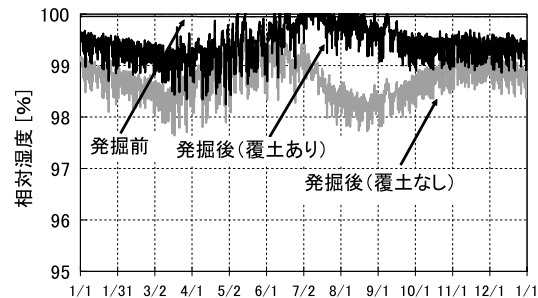


図10 発掘前と発掘後の石室内の相対湿度変動

次に, 図12~14にそれぞれ発掘前と発掘後(覆土なし, 覆土あり)の石室内表面の相対湿度分布を示す。図は北側天井隅角を原点として図11に示すような方向で, 石室の室内側表面の分布を示したものである。図12より発掘前の石室内表面の相対湿度はいずれの部位, またいずれ

の時期も100%に近い状態である。一方、発掘後は、図13より、冬期から春期にかけては全面で98%以上であり南側壁面とその近くの天井付近の湿度が100%近くになるが、夏期には、南側壁面とその近くの天井付近の湿度が90%まで低下している。これは、石室南側が外気に近い状態にある覆屋内に面しており、その影響を受けて、夏期には、石室南側が他の部位より温度が高くなるため湿度が低下し、冬期には、同じ部位が他の部位より温度が低くなるため高湿となっていると考えられる。図14より、覆土がある場合は、夏期の湿度低下は同様に生じているものの低下が抑制されている。以上の結果をまとめる。発掘前は、石室内相対湿度は年間を通じて100%近くを維持し、石室内表面も同様であったと考えられる。発掘後の仮保護施設が設けられた状態で、石室内の温湿度は、発掘前より温度の振幅がやや大きくなり、湿度は100%に近い値から若干低下したと考えられる。また石室の南壁とその近くの天井付近で夏期に室内側表面の湿度が100%に近い値から低下し、やや乾燥していた可能性がある。調査時以外に行われていた石室南側の覆土は湿度低下の抑制効果があったと考えられる。

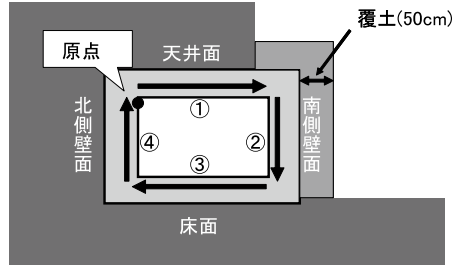


図11 石室内表面の分布図の補足

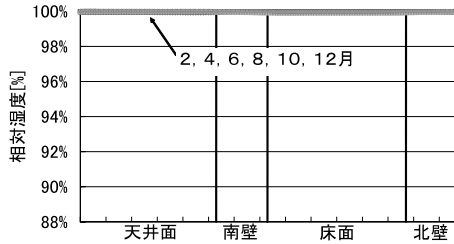
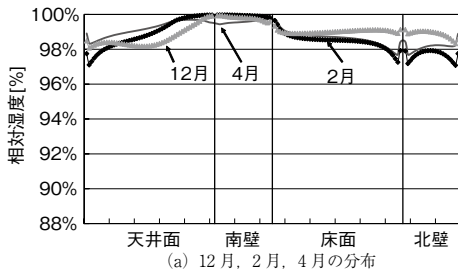
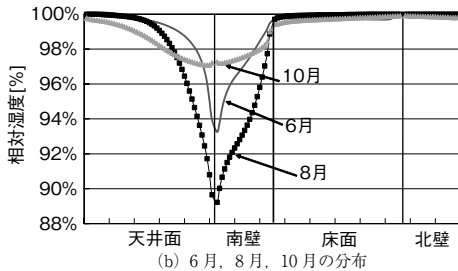


図12 発掘前の石室内表面の相対湿度分布

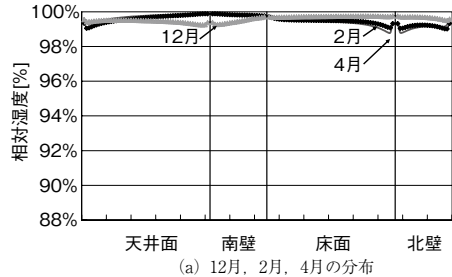


(a) 12月, 2月, 4月の分布

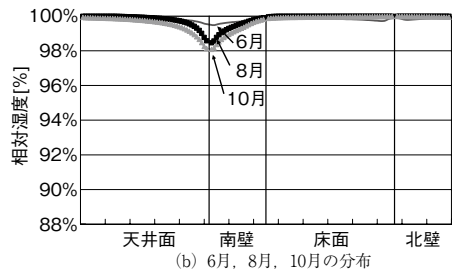


(b) 6月, 8月, 10月の分布

図13 発掘後(覆土なし)の石室内表面の相対湿度分布



(a) 12月, 2月, 4月の分布



(b) 6月, 8月, 10月の分布

図14 発掘後(覆土あり)の石室内表面の相対湿度分布



## 5. まとめ

過去の高松塚古墳の石室周囲の環境が、石室内の温湿度変動に及ぼす影響について測定値や記録などを元に、影響を与える要因を取り上げて数値シミュレーションを用いて推定を行った。検討は、1) 保存施設稼働から石室解体前までと、2) 発掘から保存施設稼働までの二つの期間に対して行うこととした。1) については、まず石室内の温度測定値の分析を行い、この期間の石室内の温度上昇は、外気温の上昇より大きいことを確認し、この要因の検討を行うことを主たる課題とした。

本報告では、まず保存施設稼働時の気象条件の影響と、発掘直後の仮保護施設の影響について検討を行った。以下に結果をまとめる。

### 5-1. 保存施設の稼働から石室解体前までの期間における気象条件の影響

- 1) 保存施設稼働後の約30年間の気象条件の変化は、この間の石室内の温度上昇の主たる要因の一つといえるが、それだけでは温度上昇を完全に説明することはできない。
- 2) 石室内の温度上昇に影響を与える他の要因としては、①前室・準備室の温度制御、②保存施設の躯体熱移動、③機械室内の温度変動、④石室への入室、⑤墳丘の被覆状況が考えられる。
- 3) 今後は、これら諸要因の寄与の度合いなどについて更に検討を加える必要がある。

### 5-2. 古墳発掘直後の仮保護施設の影響

- 1) 発掘前は、石室内相対湿度は年間を通じて100%近くを維持し、石室内表面も同様であったと考えられる。
- 2) 発掘後の仮保護施設が設けられた状況で、石室内の温湿度は、発掘前より温度の振幅がやや大きくなり、湿度は100%に近い値から若干低下したと考えられる。
- 3) 発掘後の仮保護施設が設けられた状況で、石室の南壁とその近くの天井付近で夏期に室内側表面の湿度が100%に近い値から低下し、やや乾燥していた可能性がある。
- 4) 調査時以外に行われていた石室南側の覆土は湿度低下の抑制効果があったと考えられる。
- 5) 今後は、発掘直後の石室が開けられた状態や入室の影響などについて検討を加える必要がある。

### 記号説明

$a$ : 地表面の面積を1としたときの植物の面積の比率 [-]	$U$ : 風速 [m]
$b$ : 地表面の面積を1としたときの植物のない面積の比率 [-]	$V$ : 石室内容積 [ $m^3$ ]
$C_H$ : バルク輸送係数 [-]	$a$ : 総合熱伝達率 [ $W/(m^2 \cdot K)$ ]
$c\gamma$ : 空気の容積比熱 [ $J/(m^3 \cdot K)$ ]	$a'_m$ : 室内側表面の湿気伝達率 [ $kg/(m^2 \cdot s \cdot Pa)$ ]
$c'\gamma'$ : 空気の湿気容量 [ $kg/(m^3 \cdot Pa)$ ]	$a'_T$ : 温度勾配に関する水分伝達率 [ $kg/(m^2 \cdot s \cdot K)$ ]
$(c\rho)_{ap}$ : 材料の見かけの熱容量 [ $J/(kg \cdot K)$ ]	$a'_\mu$ : 水分化学ポテンシャル勾配に関する水分伝達率 [ $kg/(m^2 \cdot s \cdot (J/kg))$ ]

$E$ : 蒸散量 [kg/(m <sup>2</sup> s)]	$\beta$ : 蒸発効率 [-]
$g$ : 水分 1 kg に作用する重力 (= 9.8) [m/s <sup>2</sup> ]	$\lambda$ : 熱伝導率 [W/(m · K)]
$J_r$ : 室内水分発生量 [kg/s]	$\lambda'_{Tg}$ : 温度勾配に関する水分伝導率 [kg/(ms · K)]
$J_s$ : 降水量 [kg/(m <sup>2</sup> s)]	$\lambda'_{Tg}$ : 温度勾配に関する気相水分伝導率 [kg/(ms · K)]
$M_w$ : 水蒸気の分子量 (=18.016)[kg/kmol]	$\lambda'_{\mu}$ : 水分化学ポテンシャル勾配に関する水分伝導率 [kg/m · s(J/kg)]
$N_v$ : 石室と外気間の換気回数 [1/s]	$\lambda'_{\mu g}$ : 水分化学ポテンシャル勾配に関する気相水分伝導率 [kg/m · s(J/kg)]
$n$ : 鉛直下向きベクトル [-]	$\mu$ : 水分化学ポテンシャル [J/kg]
$P$ : 大気圧 (=101325) [Pa]	$\rho_w$ : 水分密度 [kg/m <sup>3</sup> ]
$p$ : 水蒸気圧 [Pa]	$\rho$ : 空気密度 [kg/m <sup>3</sup> ]
$p_o$ : 外気水蒸気圧 [Pa]	$\psi$ : 含水率 [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]
$p_{sat}$ : 飽和水蒸気圧 [Pa]	添字
$Q_r$ : 室内発熱量 [W]	i : 固体表面
$q_{s(s)}$ : 熱流 [W/m <sup>2</sup> ]	o : 外気
$q_{sol}$ : 日射量 [W/m <sup>2</sup> ]	r : 室内
$q_{noc}$ : 夜間放射 [W/m <sup>2</sup> ]	j : j 番目の壁面位置
$R_v$ : 水蒸気のガス常数 ( $R_v = R/M_v$ ) [Pa · m <sup>3</sup> /(kg · K)]	n : 壁面の分割数
$R$ : 一般ガス常数 (=8316.96) [Pa · m <sup>3</sup> /(kmol · K)]	l : 液相
$r$ : 相変化熱 [J/kg]	g : 気相
$S$ : 壁面面積 [m <sup>2</sup> ]	s : 固体表面
$T$ : 温度 [K]	sat : 飽和

注 1) 2003 年 11 月より高松塚古墳で行われていた外気温測定値と奈良地方気象台の測定値が非常に近いことを確認しており、外気温にこの値を用いる事は妥当と考えられる。

### 引用文献

- 1) 石崎武志：過去の高松塚古墳石室内の温湿度について，高松塚古墳壁画劣化原因調査検討会，第 4 回，資料 4 (2008)
- 2) 文化庁：『国宝高松塚古墳壁画 —保存と修理—』，第一法規出版 (1987)
- 3) 前掲 2)，pp.23, pp.28-32
- 4) 前掲 2)，pp.96
- 5) 松本衛：新建築学大系 10『環境物理』 3. 湿気，彰国社 (1983)
- 6) (財) 気象業務支援センター：気象データベース地上観測，CD-ROM (2007)
- 7) Magdi KHALIL and Takeshi ISHIZAKI: Moisture Characteristic Curves of the Soil of Takamatsuzuka Tumulus, 保存科学, 46,13-20 (2006)
- 8) 多羅間次郎：古墳壁画保存に関する研究 —石室解体時の墳丘部の形状変化が石室の熱水分性状に与える影響—，京都大学大学院工学研究科建築学専攻 修士論文 (2008)
- 9) Jury, W.: Simultaneous transport of heat and mass through a medium sand, Ph. Thesis, University of Michigan (1973)

- 10) 多羅間次郎, 銚井修一, 石崎武志, 小椋大輔: 古墳壁画保存に関する研究 - 石室内温湿度と結露性状の検討 -, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.427-428 (2006.9)
- 11) 近藤純正編著: 水環境の気象学 — 地表面の水収支, 熱収支 —, 朝倉書店, 208-239 (1996)
- 12) 林為人, 高橋学: 水銀圧入式ポロシメータおよび岩石内の内部空隙寸法分布の測定への適用, 地質ニュース, 549, 61-68 (2000)
- 13) 小鯛桂一: 岩盤透水係数性のグラフ表示, 地質調査所月報, 第35号, 第9号, 419-434 (1984)
- 14) 北野晃一, 新晃一, 木下直人, 奥野哲夫: 高温岩石の力学特性, 熱特性に関する文献調査, 応用地質, Vol.29, No.3, 242-253 (1988)
- 15) 日本建築学会編: 『建築設計資料集成 I 環境』, 丸善, pp.176 (1978)
- 16) 小椋大輔, 三野誠士, 松下敬幸, 水畑雅行, 松本衛: 完全埋設型地下室及び周辺地盤の熱・湿気性状の解析, 日本建築学会計画系論文集, 第539号, 15-21 (2001)
- 17) 日本熱物性学会編: 『熱物性ハンドブック』, pp.218 (2000)
- 18) 田中俊六, 武田仁ほか共著: 『最新建築環境工学改訂2版』, 井上書院, pp.91-99 (1999)
- 19) 橿原考古学研究所編: 『壁画古墳高松塚 調査中間報告』, 奈良県教育委員会・奈良県明日香村 (1973)

キーワード: 高松塚古墳 (Takamatsuzuka Tumulus); 温湿度 (temperature and relative humidity); 壁画 (mural painting); 数値解析 (numerical analysis); 気候変化 (climatic change)

# Analysis of Temperature and Humidity Variation in the Stone Chamber of Takamatsuzuka Tumulus from Its Discovery until Its Dismantlement - The effect of outside air temperature change during the operation of the conservation facility, and the effect of the temporary shelter set up immediately following excavation -

Daisuke OGURA\*, Shuichi HOKOI\*, Yonghui LI\*, Takeshi ISHIZAKI  
and Sadatoshi MIURA

In order to investigate the causes of the deterioration of the mural paintings of Takamatsuzuka Tumulus, it is very important to clarify temperature and humidity variations in the stone chamber. We estimated how the environmental condition surrounding the stone chamber and the work conducted inside the chamber affect temperature and humidity there by making use of a numerical simulation. The simulation was based on the measurement data and records of Takamatsuzuka Tumulus in the past. We made an analytical model taking into account the mound and the conservation facility and set up each condition in terms of factors which influence temperature and humidity in the stone chamber. We considered records of the past as far as possible to make the model and set up the boundary conditions. The following two periods were investigated:

- 1) The period from the discovery of the mural paintings to the beginning of the operation of the conservation facility, hence from 1972 to 1976
- 2) The period from the beginning of the operation of the conservation facility to before the dismantlement of the stone chamber, hence from 1976 to 2005

As the first step, we investigated the effect of the temporary shelter set up immediately following the excavation of the tumulus in the former period and the effect of outside air temperature change on temperature and humidity in the stone chamber during the operation of the conservation facility in the latter period.

The obtained main results are as follows:

1. Outside air temperature change was one of the main causes of temperature rise in the stone chamber for 30 years.
2. Other causes that affect temperature rise in the stone chamber are as follows: 1) controlling of the temperature of the antechamber and preparation room, 2) heat transfer of the building frame of the conservation facility, 3) temperature variation in the mechanical room, 4) people entering and exiting from the stone chamber and 5) mound condition.
3. Before the excavation, relative humidity in the stone chamber was nearly 100% throughout the year.
4. By setting up the temporary shelter after the excavation, amplitude of temperature in the stone chamber became larger than it was before the excavation, while relative humidity in the stone chamber slightly decreased from nearly 100 %.
5. By setting up the temporary shelter after the excavation, the inside surface relative humidity of the south side wall and ceiling decreased and the south side wall and ceiling dried slightly.

Future tasks are to investigate other causes of temperature rise in the stone chamber during the operation of the conservation facility and the influence of entering and conducting works on temperature and humidity in the stone chamber from the time of its excavation to before its dismantlement.