

古墳石室の長期温度計測と再現解析に基づく遺構展示の影響評価

熱伝導解析 結露 実測

京都大学 正会員 ○谷 珠美令
 東京工業大学 国際会員 澤田 茉伊
 (一財)GRI 財団 国際会員 三村 衛

1. 背景と目的

近年、遺構は保存するだけでなくその価値を共有するために展示公開することが重要視されているが、手法によっては遺構の損傷や劣化を招く可能性がある。古墳石室においては、損傷の多くは温度・結露に密接に関係するため、内部環境への寄与が大きい墳丘の熱的性質を考慮して、展示手法を構築する必要がある。

本研究では、奈良県の中尾山古墳を対象に、将来の展示に向けて、石室内の温度を長期計測し、数値解析で再現・検証した。さらに、石材の表面温度および結露量を予測し、結露量を指標に部分的な墳丘の除去を伴う石室展示法の内部環境への影響を評価した。

2. 墳丘・石室の長期温度計測

中尾山古墳(図1)では発掘調査時に墳丘と石室内に熱電対を設置し、埋め戻し後の2021年3月26日から、毎時連続的に温度を測定している。図2に石室の天井と床の計測結果を示す。図中には奈良市の外気温を併記するが、墳丘の断熱効果によって、石材の表面温度の日変化はほとんどなく、年変化は天井では15度、床では10度である。また、外気温と比べて天井では20日、床では40日程度の位相遅れがみられる。

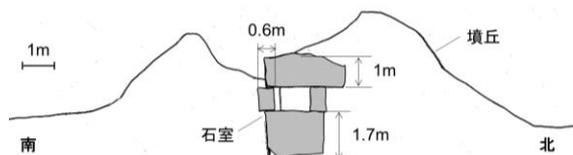


図1 中尾山古墳の断面図

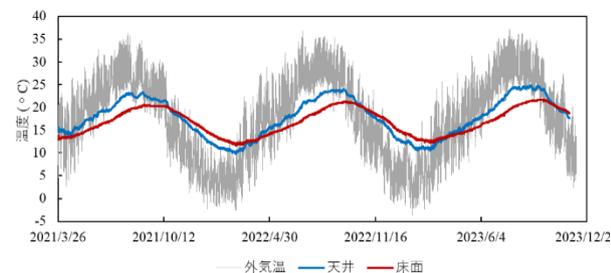


図2 天井と床の温度計測データ

3. 応答係数法¹⁾を用いた石室内の温度予測

応答係数法は、多層壁体の一次元熱伝導方程式の理論解を重ね合わせることで、非定常の熱移動を評価す

る手法である。理論的解法であるため、近似的解法に比べてモデルの作成が容易で計算コストが低い。三次元の年単位の解析にも対応できる。図3は応答係数法の概要を示している。三角波の単位温度変化に対して壁を通過する一次元の熱流を応答係数と呼ぶが、壁の外側または内側への熱伝達の応答係数は理論的に求めることができ、壁の各層の厚さと熱物性に支配される。非定常の外気温変化や室温変化は様々な高さの三角波の重ね合わせで表すことができるため、壁を通る熱流は三角波の温度変化に対する応答係数の重ね合わせで求めることができる。石室を図4のようにモデル化することで、室外側の温度が既知であれば、6つの壁を通して室内に流入する総熱量が平衡状態に保たれているとして、石室内の温度が求められる。さらに、室外側の温度と石室室温を境界条件として、石材の表面温度が計算できる。

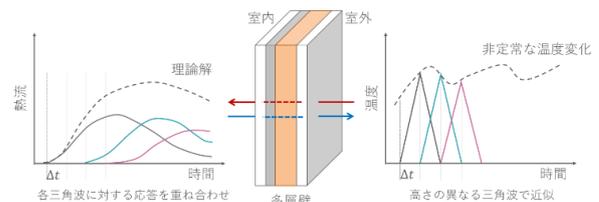


図3 応答係数法の概要

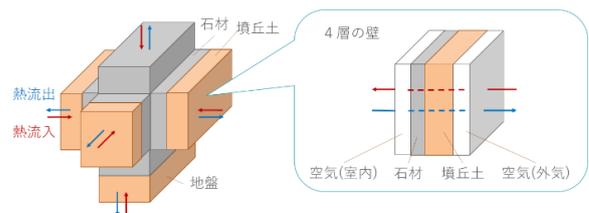


図4 石室のモデル化

墳丘の層厚は図1から読み取り、上方は0m、側方は5mとし、高さ方向の平均的な値とした。なお、下方については地盤10m以深が不易層であることから10mと設定し、地盤底部は年平均気温の16.3度に保たれているとした。墳丘の熱拡散係数、体積熱容量、熱伝導率は、室内試験と慣用値をもとに、 $0.32\text{mm}^2/\text{s}$ 、 $2402\text{kJ}/\text{m}^3/\text{K}$ 、 $0.77\text{W}/\text{m}/\text{K}$ とした。石材は、石崎ら²⁾が高松塚古墳の温度解析で使用した凝灰岩の熱物性値を採用した($0.88\text{mm}^2/\text{s}$ 、 $2900\text{kJ}/\text{m}^3/\text{K}$ 、 $2.56\text{W}/\text{m}/\text{K}$)。

Effects of the exhibition on tumulus stone chamber via long-term temperature measurement and numerical prediction

Sumire Tani*, Mai Sawada** and Mamoru Mimura***
 *Kyoto University, **Tokyo Institute of Technology, ***Geo-Research Institute

本解析では、外気からの熱伝導だけでなく、地盤表面での日射と蒸発による熱の流出入も考慮するため、Wilson-Penman 式³⁾を用いて、日射・蒸発の影響を含む地表面温度を算出し墳丘表面に与えた。必要となる日平均気温、日最高気温、日最低気温、日照時間、全日日射量および風速は気象庁奈良天文台奈良市の公開データを用いた。

4. 検証および展示時の温度・結露環境

(1) 実測値との比較による検証

石材表面温度の解析値と実測値との比較を図5に示す。実測値と解析値はよく一致しており、実測値をもとにした解析値の標準偏差は天井で0.80度、床で0.27度であった。日射・蒸発の影響を考慮しない既報⁴⁾に比べて、精緻に再現できており、本手法では石室内の温度環境を精度よく再現できることが示された。

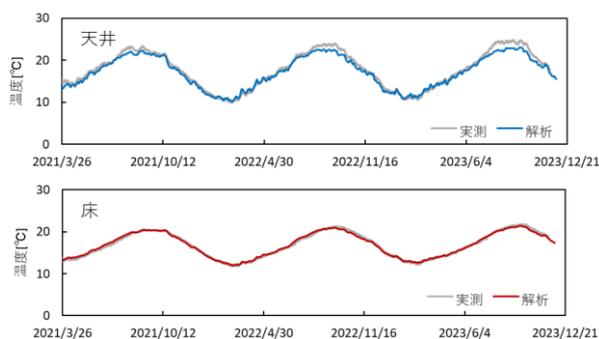


図5 石材表面温度の解析値と実測値の比較

(2) 結露量を指標にした内部環境の評価

石室石材の結露は、乾湿繰返しに伴う石材の塩類風化を促進し、特に装飾がある場合は顔料の流出やカビによる汚損の要因となるため、石室環境の評価指標のひとつになる。結露量の実測は不可能なため、石室室温の計算結果をもとに、理論的に予測した。結露は水蒸気を含んだ空気が低温部に移動し、移動先での飽和水蒸気圧を超えたとき、一部の水蒸気が凝縮することで発生する。室内から石材表面に向かう水蒸気流 q_v は $q_v = \alpha'(f_r - f_w)$ で表される。 f_r は室の水蒸気圧、 f_w は壁面の水蒸気圧である。 α' は湿気伝達率で、慣用値として $16.7\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mm Hg})$ が用いられている。石室内の湿度は100%であることを実測で確認しているため、 f_r 、 f_w はそれぞれ室と壁面の温度における飽和水蒸気圧とした。(1)で求めた室温および石材表面温度を用い、結露量 q_v を求めた。

図6(a)に天井、床、側壁の各面の単位面積・単位時間あたりの結露量を示す。結露は室温よりも石材表面温度が低い場合に発生するため、冬季に外気の影響を受けやすい墳丘に覆われていない天井で発生量が多くなっている。1年間あたりでは、石室内の総結露量は148kgと予測された。

中尾山古墳は、将来は南側の墳丘を取り除いて石室を展示する計画がある。そこで、側方1面の墳丘を0mとして温度と結露を計算して展示の影響を評価した。合わせ

て、影響を緩和する対策のひとつとして、墳丘の断熱性を補完するために天井に2mの覆土する場合の解析を行った。図6(b)と(c)に、対策がない場合とある場合の結果を示す。対策なしの場合は、墳丘の部分除去により側壁の結露量が現状に比べ増大している。この傾向は対策をしても変わらないが、対策をすることで天井の結露は減り、年間の総結露量は対策なしでは210kgであるが、覆土時は156kgになる。対策をすることで現状との差を10kg以内に収められることがわかった。

対策をした場合も、墳丘を除去した展示面で冬季に集中して結露が発生する点に対処が必要である。既往の実践的な方法では、石材に和紙を貼り、その上で塩析させることで石材表面保護する方法が石仏等に適用されている。他に、展示面付近に周囲よりも温度が低くなるコールドポイントを設置し、結露を発生させることで石材での結露を回避する方法が挙げられる。

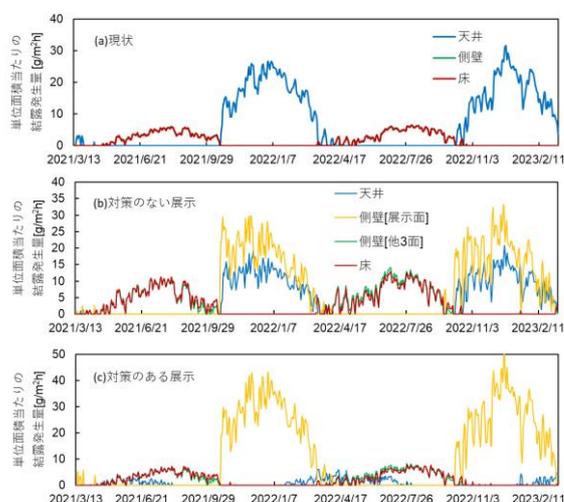


図6 各状況の結露発生面と発生量

5. 結論

本研究では、石室の温度を実測と解析で定量評価し、結露量を指標に、展示が内部環境に与える影響を考察した。石材表面温度の実測値との比較から、解析値の妥当性が確認された。展示の際は、展示面以外に覆土を追加することで結露量を維持できるが、展示面に集中した結露の影響を回避する方法の併用が必要と考えられる。

参考文献

- 1)中村ら：新建築学大系 10 環境物理，彰国社，31-103，1984.
- 2)石崎ら：高松塚古墳墳丘部の生物対策としての冷却方法の検討，保存科学，No. 45，59-68，2006.
- 3)北村ら：不飽和土質力学，森北出版，2022.
- 4) Sawada et al.: Predicting Hydro-Thermal Environment Characteristics in Underground Spaces of a Tumulus Mound. In International symposium on Construction Resources for Environmentally Sustainable Technologies, 221-230.

謝辞：温度計測では明日香村文化財課の協力を賜った。本研究の一部は土科学センター財団の助成を得て遂行されたものである。