

第Ⅲ部門

応答係数法を用いた土中空間の温度・結露環境の評価と古墳石室への適用

京都大学大学院
 京都大学大学院
 京都大学大学院

学生会員 ○谷 珠美令
 正会員 澤田 茉伊
 フェロー 三村 衛

1. はじめに

地盤浅部に空間を有する構造物では、水分移動や変形に加えて、土中空間の温度環境の考慮を要する場合がある。特に、温度変化に敏感な埋葬品や壁画を内包する古墳群等の地盤遺跡では、温度環境の評価と制御は重要な課題である。本研究では、奈良県明日香村の中尾山古墳を対象に、壁体の非定常熱移動の理論的解法である応答係数法¹⁾を用いて、石室内の温度を計算し、実測値と比較することにより、手法の適用性を評価する。また、温度の計算値を用いて、石材の劣化の要因となる結露量を予測する。

2. 石室温度の解析方法と実測値との比較

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により、非定常の熱移動を評価する手法である。

図1は、外気温変化に伴い、壁を通して室内に貫流する熱応答を評価する場合を示している。応答の理論解を求められる三角波で外気温変化を近似すれば、任意の非定常の外気温変化に対する貫流熱を求めることができる。室温変化に対して壁が吸収する熱流も同様である。石室を空気-土-石でできた6枚の壁で囲まれた空間と捉えれば、外気と石室との間の熱移動を三次元的に評価できる。外気温が既知で石室室温が未知であるとき、壁を通して室内に貫流する熱量と壁が吸熱する熱量が常に平衡状態であるとして、室温を求める。さらに、外気温と室温がともに既知となれば、石材の表面温度を内挿できる。本手法は、理論的解法であるため、近似的解法に比べてモデル作成が容易で、計算時間が短い利点がある。

中尾山古墳の断面図を図2²⁾に示す。石室上方は、石材が露出しているため墳丘の層厚は0mであるとする。また、石室側方の墳丘の層厚は方角や深さによって5~15mと幅があるが、ここでは10mとする。なお、層厚と室温の解析を予備的に調べたところ、層厚が5m以上の場合は、室温はほぼ一定値に収束する。以上の条件と石材の厚さを示した解析モデル図を図3に示す。

ここで、熱伝達層は壁体付近の空気の流れと放射による熱伝達を表す層である。

墳丘表面の熱伝達層の温度を外気温とし、過去の奈良気象台のデータを参考に、年平均15.2℃、振幅11.8℃の正弦波とした。地盤は10m以深が不易層であることを考慮し、年平均気温15.2℃に保たれているものとする。また、墳丘と石材の熱物性値を表1に示す。墳丘の熱物性値は、原位置の乾燥密度と飽和度に対応した供試体を用いて、シリンダー法^{3,4)}で測定した。石材については、石崎ら⁵⁾が村内の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する。初期条件は、地盤の温度は年平均気温の15.2℃が一様に分布したが、周期定常状態になるまで長期間解析し、石室室温の年変化を求めた。

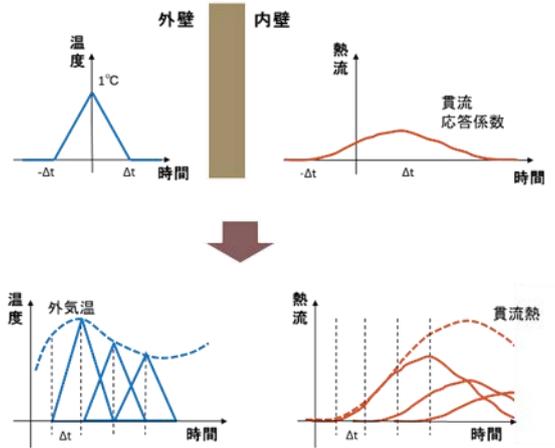


図1 応答係数法の概要

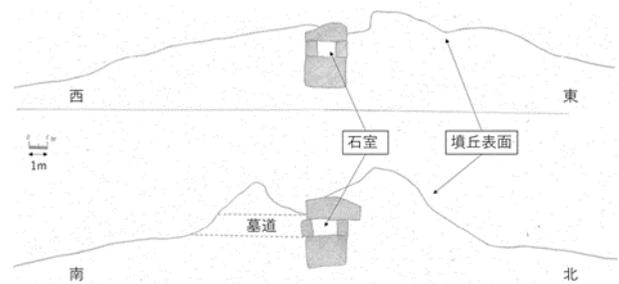


図2 中尾山古墳の断面図

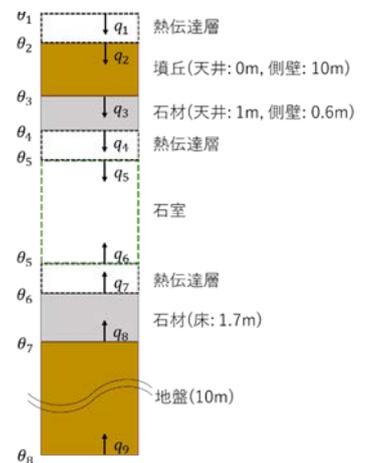


図3 解析モデル

図4に石材の表面温度における実測値（2021年3月より開始）と解析値の比較を示す。ここでは、実測値と解析値のそれぞれにおいて、年平均気温との差分を比較している。実測開始地点では、石室は埋め戻し作業中であったため、初期の一定期間は、本来の土中にある状態よりも高い温度を示すため、解析値とのずれが大きい。以降は、天井の温度の比較では、温度下降期に多少のずれはみられるが、天井・床ともに解析値の振幅や位相は実測値のものとよく合っており、温度変化の挙動を定量的に表せていることから、本手法の適用が適切であると考えられる。

3. 結露量の計算

石室室温の計算結果をもとに、実測での評価ができない室内の結露量を予測する。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 $16.7\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg})$ 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に対応し、 q_v は石材表面の温度が室温より低い場合に石材表面で発生する結露量に相当する。よってこれを評価する。

図5に各石材表面における結露の発生量を示す。外気温の影響を受けやすい露出した天井では、冬季に表面温度が室温よりも低下し結露が発生する。一方、層厚が厚い側壁や床では夏季に結露が発生している。また、単位面積当たりの発生量は、天井が突出して多い。これは、断熱性の高い土で覆われておらず、外気温変化の影響を直接的に受けるため、室温と表面温度の差が大きいことが原因であると考えられる。

4. 結論

応答係数法を用いて、中尾山古墳の石室室温を解析し、実測値との比較を行ったところ、年変化の挙動を定量的に表しており、本解析方法は有効な手段であることが確認できた。また、石室室温の解析結果をもとに、季節ごとに変化する室内の結露の発生場所と量を評価した。文化財は保全と同時に、広く公開して活用することが求められている。石室の温度・結露環境の予測をもとに、土の断熱性を活かして、環境保全と活用を両立する方法を研究する予定である。

参考文献 1) 中村泰人, 松尾陽, 松本衛, 土屋喬雄, 橘秀樹, 宮田紀元: 新建築学大系 10 環境物理, 彰国社, pp. 31-103, 1984. 2) 奈良県明日香村中尾山古墳環境整備委員会: 史跡中尾山古墳環境整備事業報告書, 1975. 3) 登尾浩助, 徳本家康, 向井田善朗: シリンダーに充填した土壌の熱拡散係数を簡易に推定する方法, 土壌の物理性, 101, pp.5-10, 2005. 4) R. J. Parikh, J. A. Havens and H. D. Scott: Thermal diffusivity and conductivity of moist porous media, Soil Society of America Journal, 43 (5), pp.1050-1052, 1979. 5) 石崎武志, 三浦定俊, 犬塚将英, カリル・マグディ: 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, pp. 59-68, 2006.

表1 解析に用いた熱物性値

墳丘または地盤				
部位	層厚 (m)	熱拡散係数 α (mm^2/s)	熱伝導率 λ (W/mK)	熱容量C (kJ/K)
天井	0	0.32	0.77	24016.2
側壁	10			
床	10			
石材				
部位	層厚 (m)	熱拡散係数 α (mm^2/s)	熱伝導率 λ (W/mK)	熱容量C (kJ/K)
天井	1	0.88	2.56	2900
側壁	0.6			1740
床	1.7			4930

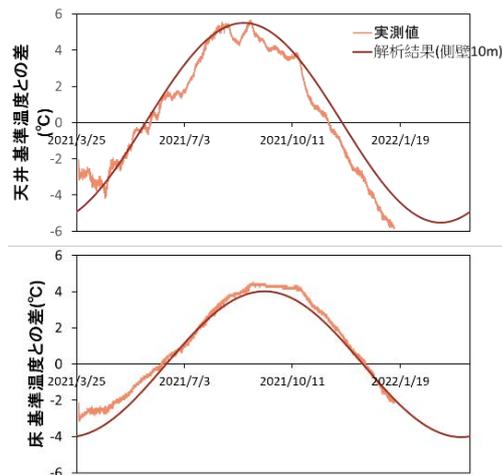


図4 実測値と解析値の比較

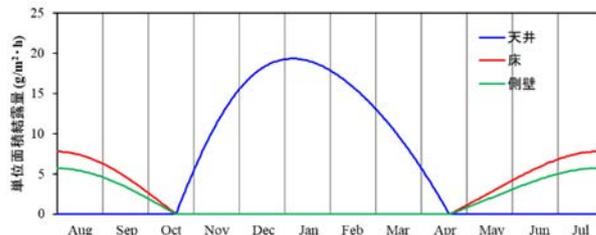


図5 石室内で発生する結露量