

〔報文〕 鬮鷄山古墳の石槨内部発掘調査時の 空調制御方法に関する研究

小椋 大輔*・銚井 修一*・高橋 公一*²・木村 奈津子*

1. はじめに

鬮鷄山古墳は大阪府高槻市に立地する古墳時代前期（4世紀前半）に築かれた全長88mの前方後円墳であり、平成14年の確認調査によって後円部から未盗掘の堅穴式石槨2基（第1及び第2主体）が発見された（図1、2）。本古墳は当時の埋葬儀礼を知る上で重要な古墳であるとして、同年国史跡に指定され、恒久的な保存が図られた。

平成18年に実施した石槨内画像調査では、発見当初の内視鏡映像では確認されていなかった結露の状況や菌糸束の広がり、カビ菌類の繁殖が認められ、人骨や三角縁神獸鏡をはじめとする副葬品ならびに粘土棺床といった遺構への影響が危惧されることから、これらの保存方法が課題となっている¹⁾。特に夏場の温度上昇が遺物に与える影響が危惧されたため、温度上昇抑制を期待して平成18年5月からは後円部に日射遮蔽ネット（以下ネット）が敷設されている。

一方で、発掘調査を実施して副葬品等を取り上げる方法は有力な選択肢の一つとして検討が行われており、外気の影響を極力抑えるため、覆屋の設置と空調システムの構築が不可欠と考えられている。しかし、発掘部位など石槨周辺空間の空調条件や、石槨内部での作業によって、副葬品などの遺物や遺構が結露・乾燥し劣化が進行する危険性も十分考えられる。そのような事態を生じさせないためには、石槨内部での作業時間等を考慮しつつ、石槨周辺の温湿度を適切に制御していく必要がある。



図1 第1主体内部¹⁾



図2 第2主体内部¹⁾

そこで本研究では、まず石槨周辺の適切な温湿度制御方法を明らかにすることを目的とし、まず、空調制御の方針を考え、数値解析による検討を行う。なお筆者らは、これまで鬮鷄山古墳の石槨及び周辺地盤の温湿度環境について地表面境界の被覆条件を考慮した数値シミュレーションを用いた検討を行い、現状の石槨内温湿度の測定結果の再現性^{注1)}を確認した上で、ネット敷設や、断熱と覆土の効果を明らかにしている^{2~4)}。ここでは、これら成果を前提として検討を行う。

*京都大学大学院工学研究科

*² 高槻市教育委員会文化財課

2. 解析モデルと解析方法

2-1. 解析モデル

用いる熱水分移動に関する基礎式⁵⁾を表1に、墳丘部の解析モデルの概要³⁾を図3に示す。地表面境界の熱収支は、外気との熱伝達、蒸発潜熱、日射、夜間放射と地盤の熱伝導を考慮し、水分収支は外気との水分伝達、地盤の水分拡散を考慮する。石槨及び発掘によりできる石槨に隣接する空間（以下、地下室）の空気については、室空気を1質点で代表させる。石槨から水平方向に十分離れた地盤境界は断熱・断湿とし、底部境界では温度・水分化学ポテンシャルを固定する。

表1 熱水分移動の基礎式

材料中の熱収支式	$(c\rho)_{ap} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot [(\lambda + r\lambda'_{Tg})\nabla T + r\lambda'_{\mu g}\nabla\mu]$ …(1)
材料中の水分収支式	$\rho_w \frac{\partial \psi}{\partial \mu} \frac{\partial \mu}{\partial t} = \nabla \cdot [\lambda'_{\mu}(\nabla\mu - g\mathbf{n}) + \lambda'_T\nabla T]$ …(2)
室空気の熱収支式	$c\gamma V \frac{\partial T_r}{\partial t} = \sum_{j=1}^n S_j \alpha'_{rj} (T_j - T_r) + c\gamma V N_v (T_o - T_r) + Q_r$ …(3)
室空気の水分収支式	$\gamma V \frac{\partial X_r}{\partial t} = \sum_{j=1}^n S_j \alpha'_{rj} (X_j - X_r) + \gamma V N_v (X_o - X_r) + J_r$ …(4)
地表面の熱流	$\alpha_o (T_o - T_s) + r \alpha'_o (X_o - X_s) + Q_{solar} - Q_{night}$ …(5) $= -(\lambda + r\lambda'_{Tg}) \frac{\partial T}{\partial x} - r\lambda'_{\mu g} \frac{\partial \mu}{\partial x}$
地表面の水分流	$\alpha'_o (X_o - X_s) + J_{rain} = -\lambda'_{\mu} \left(\frac{\partial \mu}{\partial x} - g \right) - \lambda'_T \frac{\partial T}{\partial x}$ …(6)
<p>式中で用いた記号 T: 温度 [°C], μ: 水分化学ポテンシャル[J/kg], α: 熱伝達率[W/(m²·K)], Q_{night}: 夜間放射量[W/m²], Q_{solar}: 日射吸収量[W/m²], X: 絶対湿度[kg/kg_{dry air}], α': 絶対湿度差による湿気伝達率[kg/(m²s(kg/kg_{dry air}))], r: 水の気相から液相への相変化熱[J/kg], λ'_{Tg}: 温度勾配に関する気相水分伝導率[kg/(msK)], $\lambda'_{\mu g}$: 水分化学ポテンシャル勾配に関する気相水分伝導率[kg/(ms(J/kg))], λ'_T: 温度勾配に関する水分伝導率[kg/(msK)], λ'_{μ}: 水分化学ポテンシャル勾配に関する水分伝導率[kg/(ms(J/kg))], J_{rain}: 降雨量 [kg/(m²s)], g: 重力加速度[m/s²], \mathbf{n}: 鉛直下向きの単位ベクトル[-], $(c\rho)_{ap}$: 材料の見かけの容積比熱 [J/(m³·K)], ρ_w: 水密度[kg/m³], c: 空気の比熱[J/(kg·°C)], γ: 空気密度 [kg/m³], γ': 乾燥空気密度 [kg_{dry air}/m³], S: 壁表面積[m²], j: 壁表面番号, n: 壁表面の分割数, N_v: 換気回数[1/s], V: 石槨の容積 [m³], Q_r: 室内発熱量[W], J_r: 室内水分発生量 [kg/s], $\nabla = \mathbf{i}\partial/\partial x + \mathbf{j}\partial/\partial y + \mathbf{k}\partial/\partial z$</p> <p>下添字 o: 外気, r: 室, T: 温度, μ: 水分化学ポテンシャル, j: 壁表面番号</p>	

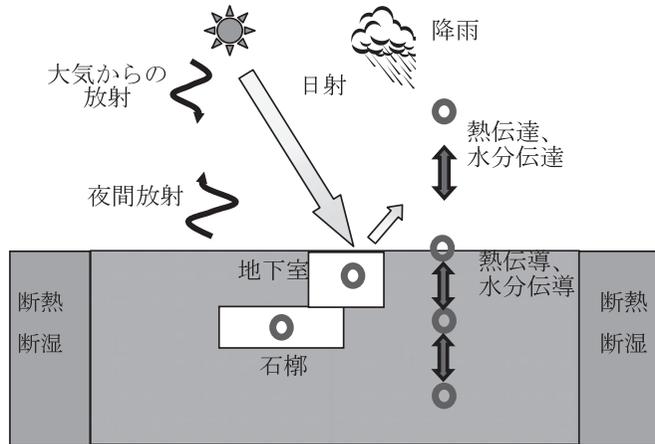


図3 解析対象

2-2. 解析方法

石槨と地下室を含む地盤の計算領域の概要を図4に示す。解析対象は、第1主体を含む古墳墳丘部で、石槨の長辺方向の断面を切り出し、水平方向17m×鉛直方向15mの2次元とした。石槨は深度2mの位置に天井がくるようにし、水平方向6m×鉛直方向1mとした。その上に3m×2mの地下室を配置する。土壌は粘土質土壌であり、高松塚古墳墳丘について得られた物性値を用いた⁷⁾。粘土質土壌の平衡含水率、熱伝導率を図5に示す。またここでは石槨の石材は考慮していない^{注2)}。石槨と地下室の間は厚さ10cmの土で仕切られているものとし、両者の間での換気はないものとする。地盤底部の温度は外気の年平均温度である17.4℃を、水分化学ポテンシャルは飽和に近い値 -5.0J/kg を与えた。この水分化学ポテンシャルの値は、その近傍の位置で常水位が存在することに相当する。これまでの調査で地下水位は見つかっていないため、石槨から十分深い位置で常水位を設定した。

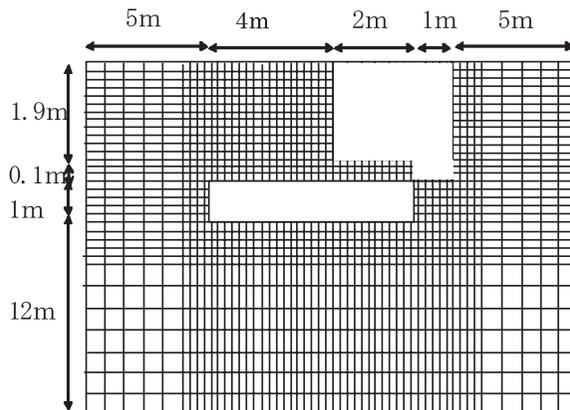
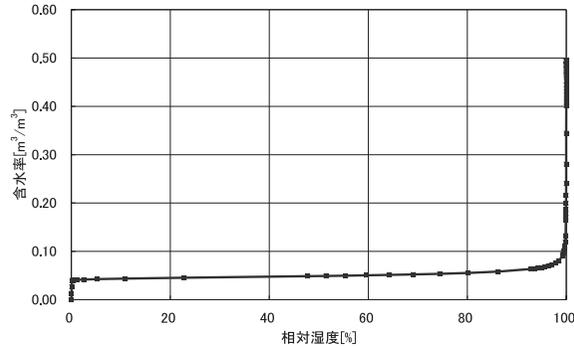
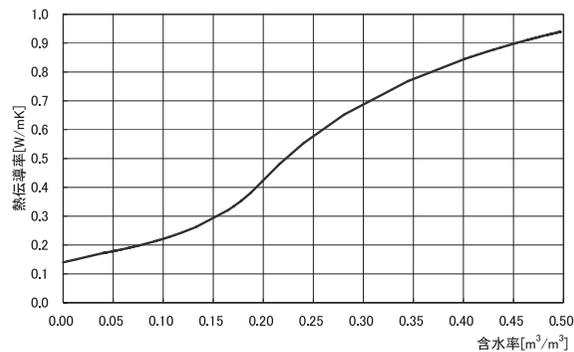


図4 石槨と地下室を含む地盤の計算領域の概要



(a) 平衡含水率曲線



(b) 熱伝導率

図5 粘土質土壌の物性値

外界条件は1年間のものを与える。これは、2004年1月1日から2007年12月31日までの4年間の現地の気象計測値（温度、相対湿度、日射量、降水量）を各日時にわたって平均をとったものを用いる。計算の初期条件は、この外界条件が繰り返された場合の周期的定常状態の結果を用いる。後述の様に、地表面に厚さ10cmの断熱材（熱伝導率0.042W/mK、比熱1470J/kgK、密度40kg/m³）を置き、その上に厚さ10cmの盛り土を施した場合を想定する。断熱材は断熱性の維持のため透湿性の低いものが必要であり、ここでは材料中の水分移動はないものとしている。また、盛り土は、土の保水性による蒸発冷却効果を利用するためのものである。

2-3. 空調制御の方針

図6に平成20年度の外気と石槨内空気の温湿度の計測値^{注3)}を示す⁵⁾。図に示すように石槨内温度は最高で22℃程度、湿度は95%以上となっている。遺物・遺構の保存の観点から、現状の石槨内の高温化や低温化を抑制することと、空調システムの制御可能な温湿度範囲を考慮して、現時点での設計温湿度条件は「20℃以下・RH90%程度」と設定されている。しかし、石槨内は風速が小さいことや周囲地盤の温度分布に影響を受け、石槨内で温度分布が生じ、その結果、部分的な結露が発生する危険性がある。さらに、入室を考慮すると、地下室（空調室）と石槨内温湿度が大きく異なる場合、結露・乾燥の危険性が生じる。上記を考慮し、部位による結露・乾燥を抑制するためには、周囲地盤の温度分布をできるだけ小さくする必要があり、そのためには、その温度変動も抑える必要がある。従って、発掘調査時に石槨内温湿度をでき

るだけ一定に保つことが望ましく、これを空調制御の方針とする。

石槨内温度分布を小さくし、その変動を抑えるには、墳丘表面を断熱することが有効であることから、次章では地盤表面の断熱材の効果、断熱材の最適な設置時期、さらに断熱の効果を得るために必要な面積について明らかにする。その上で、地下室（空調室）における適切な断熱部位について検討を行う。なお、発掘調査時期は現時点で9月と想定されているため、その時期を固定して検討を行う。

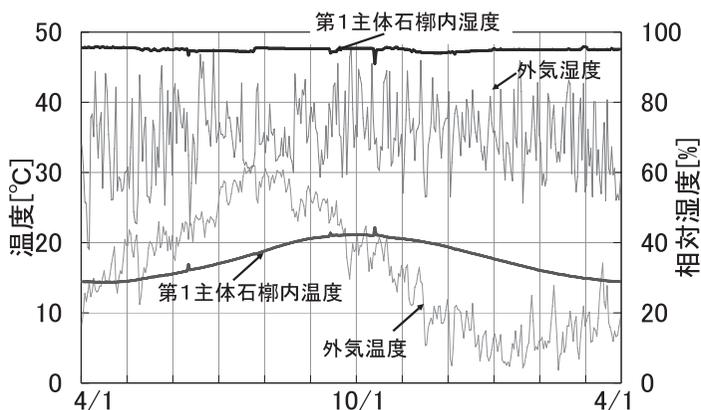


図6 平成20年度の外気及び石槨内温湿度計測値

3. 解析結果と考察

3-1. 地盤表面の断熱材の効果と設置時期

断熱の効果と、石槨を発掘する何ヶ月前から地盤表面を断熱すると発掘開始予定の9月からの石槨内温度の年振幅と年平均温度を抑制することができるのかを明らかにするため、地下室がない場合の1, 4, 7, 10月（10月のみ発掘開始後になる）のそれぞれ1日から断熱した場合の計算を行った。解析対象は、図3において地下室がない場合である。断熱材は地表面全面に設置する。図7に、断熱をしない自然状態^{注4)}の場合と1, 4, 7, 10月から断熱を開始した場合の結果を示す。また図8に、各出力点の位置を示す。なおここでは石槨の対称性を考慮して南角の値だけ示している。図より、地表面を断熱することで、時期によらず石槨内温度の年振幅は約半分に抑制できることがわかる。また石槨内の表面温度は、いずれも3月に天井面南角が石槨内より低く、9月に床面南角が低くなっている。自然状態の場合、表面温度差は3月に最大0.5℃近くあるが、断熱材を設置することで0.2℃程度まで小さくなる。表面温度差が小さくなるほど低温部位での結露発生の抑制されることから、地表面の断熱により結露発生が抑えられていることが分かる。また、年平均温度は1, 4月から設置した場合は抑制できるが、7, 10月からでは高くなった。年振幅、年平均値共に最も小さくできるのは、4月1日から断熱した場合で、それぞれ1.5℃、15.5℃であった。これは、図9の地盤表面の鉛直方向熱流束（表1（5）式）の年変動に示すように、9月後半から3月後半までは地盤から外気へ熱が流出し、3月後半から9月後半は外気から地盤へ熱が流入しており、4月1日から断熱した場合が、地盤内部の熱を放出し終わった直後から断熱材を設置する場合に相当している。

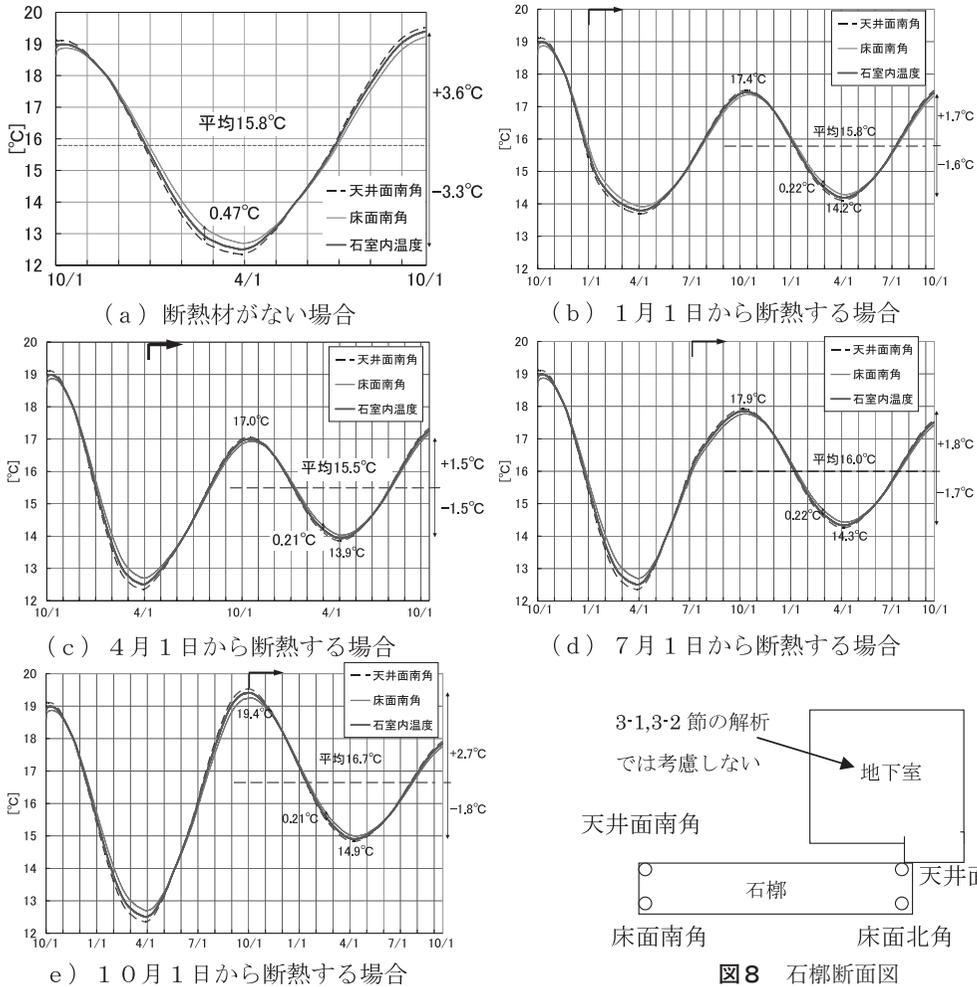
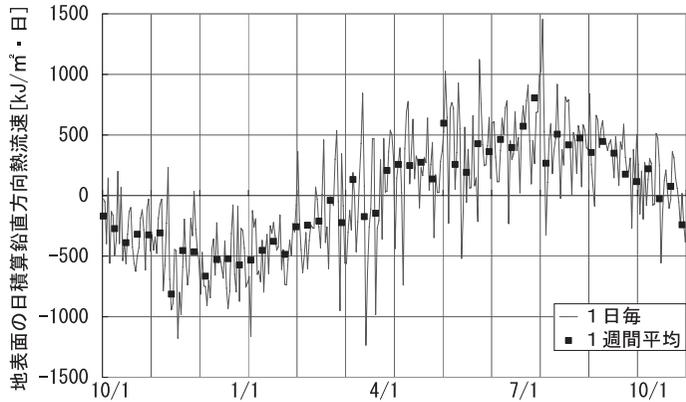


図7 断熱する時期が異なる場合の石槨内温度の比較



3-2. 地盤表面に施す断熱材面積

次に、断熱効果を得るために必要な地表面断熱面積を明らかにするため、断熱を開始する時期は4月1日からとし、図10に示すように地表面の断熱材の長さを全長6m、10m、14m、18m、地表面全面（前節の検討条件）と変化させて計算を行った。解析領域は、全長が10m、14m、18mの場合は、断熱材の水平の左右両端より5m分、計算領域を広げ、その地表面は裸地となるようにした。それ以外は、前節と等しい。この結果を表2に示す。表より、断熱材が長くなるほど、地表面全面を断熱とした場合の結果に近づき、石槨の平均温度は低く、振幅は小さくなる。また、空調制御がない場合において、地表面全面を断熱とした場合と同程度の効果を得るには、石室上部とさらに左右2m以上の距離を断熱する必要があることが分かる。

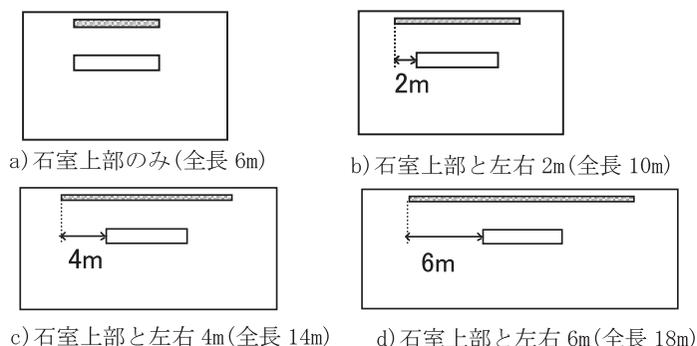


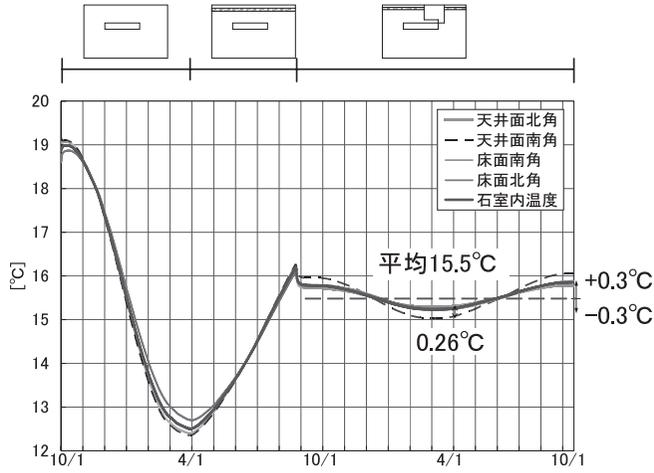
図10 地表面の断熱材の設置位置

表2 異なる地表面の断熱材長さにおける石槨内温度年平均・年振幅の比較 [°C]

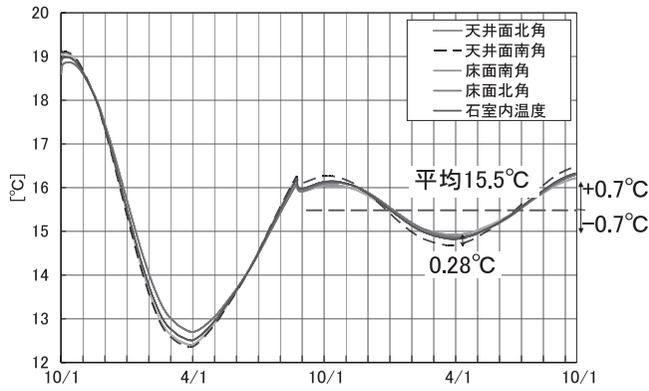
断熱材長さ	6m	10m	14m	18m	地表面全面
年平均	15.7	15.6	15.6	15.5	15.5
年振幅	2.4	1.7	1.6	1.5	1.5

3-3. 地下室の断熱部位

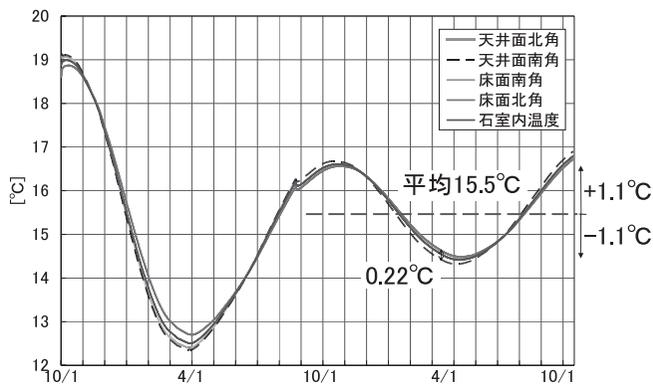
4月から地表面全面に断熱材を施し、9月から地下室を設け温湿度を制御する場合の検討を行う。解析対象は、図3に示す通りである。このとき、地下室の設定温度は、断熱時の年平均温度から15.5°C一定とした。地下室の断熱は、図11に示すように設定した。Case1は地下室に全く断熱を施さない場合、Case2は地下室の側面全てと石槨上部ではない床面を断熱した場合、Case3は地下室の全面を断熱とした場合である。なおここでは石槨や地盤から地下室への放湿を抑制することを考え、地下室は室内側表面で断湿としている。結果を図12に示す。地下室に断熱を全く施さない場合（Case1）、空調開始後1年間の平均温度は、空調制御を行わない場合と同じ15.5°Cで、振幅は0.3°Cと非常に小さい。石槨内の表面温度は、いずれのケースでも天井面南角で、変動が最も大きく、3月に石槨内より最も低くなる。表面温度差は0.26°C以内で3.1節の発掘調査がない場合の0.21°Cよりわずかに0.05°C大きくなっただけであった。これは、地下室に全く断熱を施さないことで、地下室空気と周囲地盤との熱移動により、周囲地盤の温度変動を抑え、結果として石槨内温度変動も抑制できたためである（図省略）。これに対し、地下室を、石室天井面と近接している部分以外を断熱とした場合（Case2）、平均15.5°C、振幅0.7°C、表面温度差は0.28°C以内となる。また、地下室を全面断熱とした場合（Case3）、平均15.5°C、振幅1.1°C、表面温度差は0.22°C以内となる。以上より、15.5°C一定の空調制御をする場合、石



(a) Case1 の場合



(b) Case2 の場合



(c) Case3 の場合

図12 地下室の断熱部位の違いによる石室内温度の比較

室内温度振幅を最も抑えることができるのは、地下室に断熱を全く施さない場合であり、 0.3°C あった。表面温度差が最も小さくなるのは、地下室を全面断熱とした場合で 0.22°C であり、断熱を全く施さない場合でも、温度差は 0.26°C 以内であり、いずれも自然状態の場合より温度分布は小さくなっている。

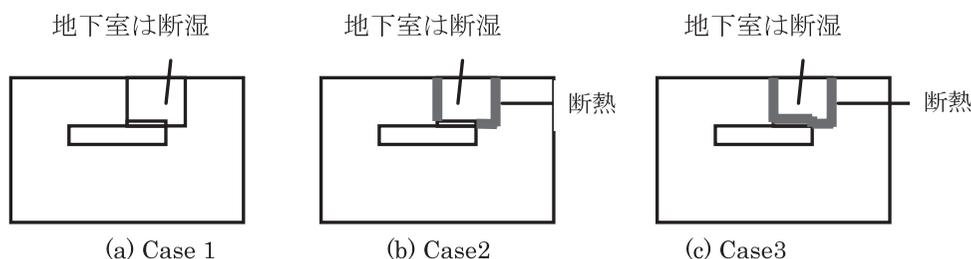


図11 地下室の断熱部位

4. まとめ

発掘調査時の闘鶏山古墳の石槨周辺の温湿度制御方法を明らかにするため、第1主体を対象とし、発掘調査開始時期を9月として、石槨及び地下室を含む地盤の解析を行った。得られた結果を以下に記す。

- 1) 地表面を断熱すると石槨内温度の年振幅及び石槨壁面間の温度分布を抑えることができる。
- 2) 発掘調査前の4月1日から地盤表面に覆土がある断熱材を設置することにより、その後の石槨内の最高温度と年平均温度を最も低くすることができる。
- 3) 石槨の上部の地盤表面を全長10mの断熱材で覆うことにより、地盤全面を断熱材で覆う場合と同程度の石槨内温度の年平均値と振幅、表面温度分布が得られる。
- 4) 発掘調査時に、石槨内温度をほぼ一定に保ち、温度分布を小さくするには、事前に地盤表面に覆土がある断熱材を施し、石槨に隣接する発掘部位空間（地下室）の壁面に断熱を施さず、その空間の温度を石槨年平均温度に近い値で一定に保つことが必要である。ただし、地下室部位の断湿の有無の影響は今後、検討が必要である。

今後の課題は、石槨内への人の入室時の遺物の保存や作業者の安全を考慮した温湿度と空気質の環境制御方法の構築である。

注1) 石槨内湿度の解析結果は、測定結果よりやや高湿となり、やや再現性が悪かった。これについては、石槨の石材が十分考慮できていないことが考えられ、別途検討を進めている。

注2) 注1でも述べたように石材の影響を別途検討している。石槨内温度や表面温度分布の検討において、石材の有無が与える影響は小さいと考えられる。

注3) 測定は、Campbell社製の気象観測ステーションにより行われたものであり、温湿度プローブは、CS500-L6を使用している。

注4) 現状は地表面でネット敷設をしているが、ここでいう自然状態は、地表面を裸地として

おり、測定値の再現モデル⁴⁾では考慮しているネットや地表面近傍のみ砂質土壌とすることは考慮していない。これらの考慮の有無は、全ての解析結果の平均温度や振幅がずれるだけで、断熱材設置の条件の違いの比較には影響を及ぼさないと考えられる。

謝辞

本研究の一部は、高槻市教育委員会の委託を受けて行われた。また平成21年度科学研究費補助金基盤研究(C)(課題番号20560549 研究代表者 小椋大輔)の補助を受けた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 高槻市教育委員会：鬮鷄山古墳石槨画像・環境調査報告書(2007)
- 2) 鉦井修一，小椋大輔，前川越和：鬮鷄山古墳の保存環境に関する研究(その1)石槨及び周辺地盤の環境実測，日本建築大会学術講演梗概集 D-2, 265-266 (2008)
- 3) 前川越和，鉦井修一，小椋大輔：鬮鷄山古墳の保存環境に関する研究(その2)熱水分同時移動解析による石槨内温湿度の検討，日本建築大会学術講演梗概集 D-2, 267-268 (2008)
- 4) 鉦井修一，小椋大輔，前川越和：鬮鷄山古墳の保存環境に関する研究(その3)日射遮蔽ネットの影響と地表面被覆条件の改善策，日本建築大会学術講演梗概集 D-2, 301-302 (2009)
- 5) 松本衛：『新建築学体系 10. 環境物理』，第3章 湿気，彰国社，pp.105-130 (1984)
- 6) 環境総合テクノス：平成20年度史跡鬮鷄山古墳保存環境調査業務委託報告書(2009)
- 7) 李永輝，小椋大輔，鉦井修一，石崎武志：高松塚古墳の発掘前後の石室内温湿度変化と応急保存対策の効果の解析，日本建築学会環境系論文集，第658号，1041-1050 (2010)

キーワード：鬮鷄山古墳 (Tsugeyama tumulus)；温度 (temperature)；湿度 (relative humidity)；空調制御 (air conditioning control)；断熱 (thermal insulation)；発掘 (excavation)

Study on the Method of Controlling Air Conditioning in the Stone Chamber during the Excavation of Tsugeyama Tumulus

Daisuke OGURA^{*}, Shuichi HOKOI^{*}, Kohichi TAKAHASHI^{*2}
and Natsuko KIMURA^{*}

Tsugeyama Tumulus is an 88 m keyhole-shaped tumulus located in Takatsuki city in Osaka prefecture. Two stone chambers, which have not been looted, were discovered in the circular portion of the tumulus in 2002. The tumulus was designated as a national historic site in the same year and became subject of permanent preservation.

However, in the photo image survey of the stone chamber in 2006, condensation and fungi growth were found. Human bones and funerary goods such as mirrors, on the reverse sides of which designs of gods and animals are carved, are threatened by the impact of condensation, fungi and other factors. Thus, a method for taking out the funerary goods by excavation has been investigated as a workable alternative to continuing preservation on site. During excavation, construction of a shelter and installation of an air conditioning system seemed to be essential because of the risk of progressive deterioration due to drying or occurrence of condensation on excavated artifacts.

In this study, we aimed to clarify the proper method of controlling temperature and humidity around the stone chamber. We clarified the principle for controlling air conditioning and investigated the results of numerical analysis considering heat and moisture transfer in the stone chamber and its surrounding ground. One of the main results is that in order to keep temperature in the stone chamber constant and reduce temperature distribution during excavation, it is necessary to maintain a constant temperature and humidity of the space adjacent to the stone chamber and not to insulate the walls of the space.

In the future, we plan to propose a method to control temperature, humidity and air quality so that they will be good for the conservation of the funerary goods and the health of the workers when they enter the stone chamber.

^{*} Graduate School of Engineering, Kyoto University

^{*2} Cultural Properties Division, Takatsuki Board of Education