

〔報文〕高松塚古墳石室解体時の壁画保存のための 温湿度環境の制御

小椋 大輔*・犬塚 将英・銚井 修一*・石崎 武志
北原 博幸**・多羅間 次郎*

1. はじめに

2005年6月に開催された国宝高松塚古墳恒久保存対策検討会にて、高松塚古墳は壁画保存のために、石室を解体し壁画を修理することが決定された¹⁾。石室解体のための発掘で石室周囲の地盤が取り払われると、石室を囲む石材は基本的に乾燥過程が継続し、外気温湿度の変動の影響を大きく受け、石室内部では高湿・結露によるカビ・微生物の成長、乾燥による壁画の剥離といった問題が生じる可能性が大きくなる。既報²⁾では、石室内温湿度解析を行い、これら問題の可能性が大きくなることを述べ、これらを避ける方法として、既設の覆屋の中に石室を囲む高断熱性の覆屋（内部断熱覆屋と呼ぶ）を設け、石室周囲の空調を行うことにより石室内部の環境を間接的に制御する必要性を述べた。さらに、その方針の元で空調方法を検討し、実大実験により温湿度環境制御の性能と問題点を把握し、その対策を検討した。本報告では、既報を前提として、まず実大実験の気流・温度分布を数値流体解析で再現し、それをを用いて実施時期に懸念される点について検討を行った結果について述べる。次にこれら検討結果を踏まえて行われた発掘・解体時の温湿度環境制御とその結果について報告する。

2. 環境制御の目標

高湿・結露によるカビや微生物の成長を抑制し、乾燥による漆喰層の剥離を防止するため、石室内温度10℃、相対湿度85-95%が目標として定められた。発掘・解体に先立ち、カビ・微生物を抑えるため墳丘部表面と石室下部地盤に設置された冷却管により石室内温度が10℃となるように運転が行われており、温度は、この設定値に一致させたものである。

3. 環境制御施設と空調システム

図1, 2に内部断熱覆屋^{註1)}と空調システムの概要をそれぞれ示す。内部断熱覆屋は、解体用クレーンなどとの関係で隙間の多い構造とならざるを得なかったため、石室を囲む室とその前室で構成した。石室周囲の高湿度かつ狭い範囲の湿度制御にはスクラバーを用い、温度はファンコイルと埋設冷却管により行い、前室にも粗い温度制御を行った。カビなどの飛散や、温度むらを極力抑制するため、地盤と石室には空調の吹き出し口の気流が直接当たらないようにして、石室の上部空間の温湿度を制御した。

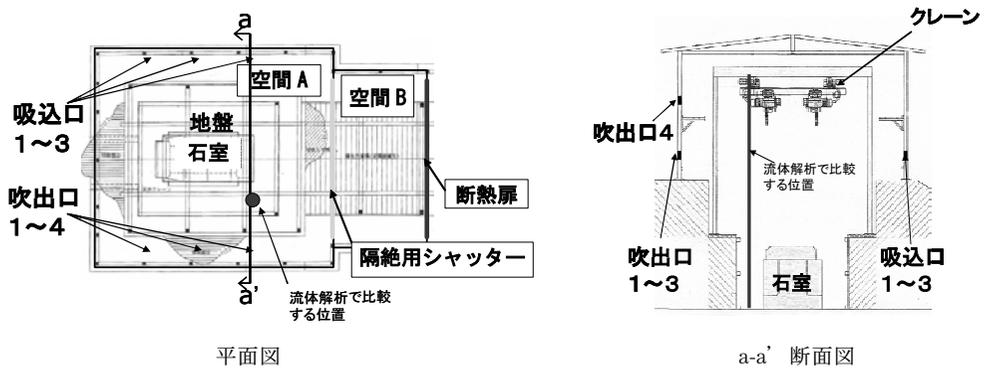
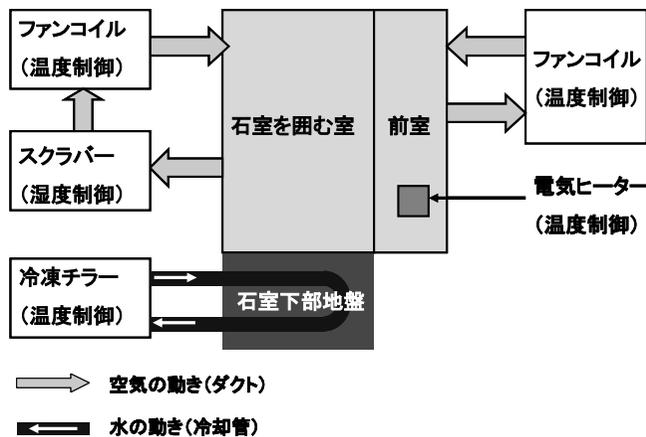
図1 内部断熱覆屋の概要^(注1)

図2 空調システムの概要

4. 実験時の断熱覆屋内の気流・温度分布の解析

実験は、実大実験場において、2006年9月26日から10月13日まで行った。実験の詳細は、文献2)を参照頂きたい。

4-1. 解析方法と条件

解析対象は図3に示す様な実大実験場の石室を囲む室のみを考える。解析モデルは標準k- ϵ 型2方程式モデルを用い、計算は汎用コードのCDAJ社製STAR-CDにより行った。境界条件は表1のように与えた。

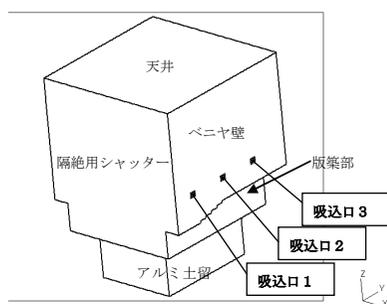


図3 解析対象

表1 計算条件

流入面（吹出口）	風速：吹出口ごとの測定 平均値の一様分布 温度：測定値の平均
流出面（吸込口）	自然流出
壁面 (天井, 壁, 石室など)	風速：No Slip 温度：表面温度測定値 対流熱伝達：ユルゲスの式

4-2. 解析結果と考察

図4, 5にそれぞれ風速, 温度の実測結果^{注2)}と解析結果の比較を示す。図1に比較を行った位置を示す。図4より石室周囲は, 両者とも0.1m/s以下の状態と一致しており, 吹き出し高さ近傍についても実測結果のばらつきに対して解析結果は大略一致している。図5より, 覆屋内温度については全体的によく一致している。図示していないが別途行った夜間の解析結果においても, 全体的によく一致した。以上より気流, 温度ともに本解析モデルは妥当な解を与えるといえる。

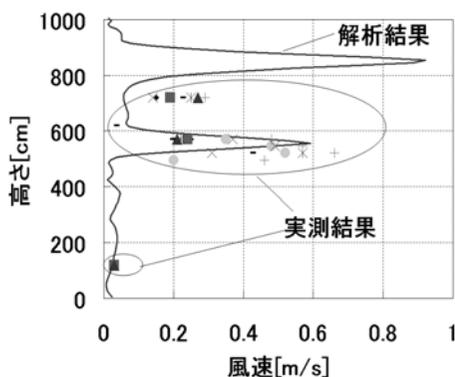


図4 風速の実測結果と解析結果の比較

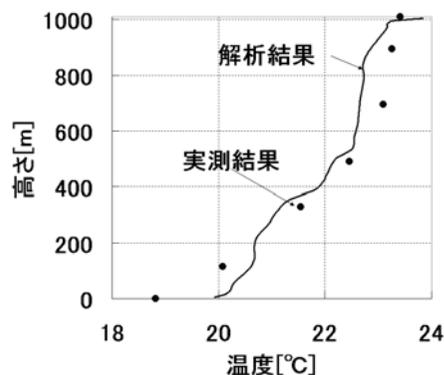


図5 風速の実測結果と解析結果の比較

5. 石室解体時の気流・温度の数値解析

前章で精度が確認された数値解析手法を用いて解体時に想定される, 夜間の冷氣生成や作業時の発熱が石室周囲の温度, 気流性状への影響を検討する。壁面の劣化防止の観点より, 石室周囲の温度むらは石室内の温度むらの原因となり高湿な石室内の結露の危険性が高まるためできるだけ避け, 石室内の温度上昇もカビ抑制のためできるだけ避けた方がよい。

5-1. 解析条件

- 1) Case1：外気温度が低下した場合：外気温を0℃とし、外気に接する天井や壁体には外気温と壁体の熱抵抗を与え、その他の石室周囲等の境界で表面10℃一定とした。
- 2) Case2：石室の上に断熱シートを設置した場合：断熱シートを石室上に被せた場合の効果を検討する。石室の30cm上に熱抵抗のある長方形のシートを設置し、シート周囲に20cmの隙間があるものとする。他の条件はCase1と等しい。
- 3) Case3：覆屋内に人がいる場合：石室の発掘・解体作業時の人や照明器具等発熱の影響を検討する。解析には石室の西側のすぐ近くに数人の人を想定した直方体(170×150×40[cm])を設置し、表面を35℃一定とした。

5-2. 解析結果と考察

5-2-1. 断熱シートの影響

図6にCase1(断熱シート無し)とCase2(断熱シート有り)の温度分布を示す。図よりCase1,2ともに天井面の窓と壁面の下部で温度が低い部分(薄い灰色)があり、冷気が生成していることが分かる。既報²⁾で示したのと同様、天井面の窓で結露が発生しやすく結露水の石室への落下が懸念される。Case1では、図の左側の吹き出し口に近い側の石室周囲で温度低下が大きく温度むらが生じており、石室周囲は全体的に10℃を下回っている。Case2では、全般的に石室周囲の温度は10℃に近く、吹き出し口側の石室周囲が若干温度低下するが温度むらは小さい。断熱シートの設置は、冷気の下降への対策として有効であると言え、隙間をさらに抑えることでより温度低下と温度むらが抑えられると考えられる。またこれにより天井面の結露水が直接石室へ落下することも抑えられる。ただし、冷気が断熱シート上にたまるため、断熱シートの石室側での表面結露の発生を抑える必要がある。石室と断熱シートの間に隙間ができないように断熱シートを被せるなどが考えられる。

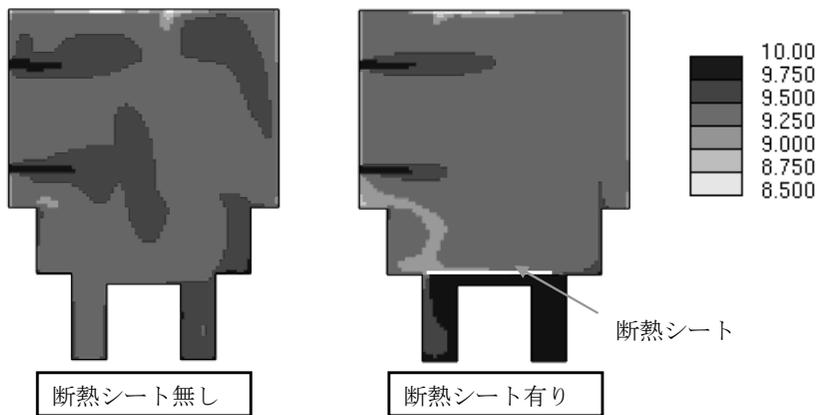


図6 断熱シートの影響の検討

5-2-2. 作業時の発熱の影響

図7にCase1（作業による発熱無し）とCase3（作業による発熱有り）の温度分布の比較を示す。図よりCase3は発熱体の上部で温度の高い領域が上部に天井にかけて伸びており、Case1より覆屋内全域が温度上昇している。発熱体に近い石室周囲空間も温度が上昇しており、石室周囲へ気流を吹き込めないため空調による全ての除去は難しく石室の温度上昇と温度むらが生じる可能性が高い。これらの抑制のため、作業時の石室周囲の上限温度を設ける事や、作業のため覆屋内に入室する人を出来るだけ制限し、石室の周囲で発熱を伴う機器の使用時間を短くする事などの対策が必要と考えられる。

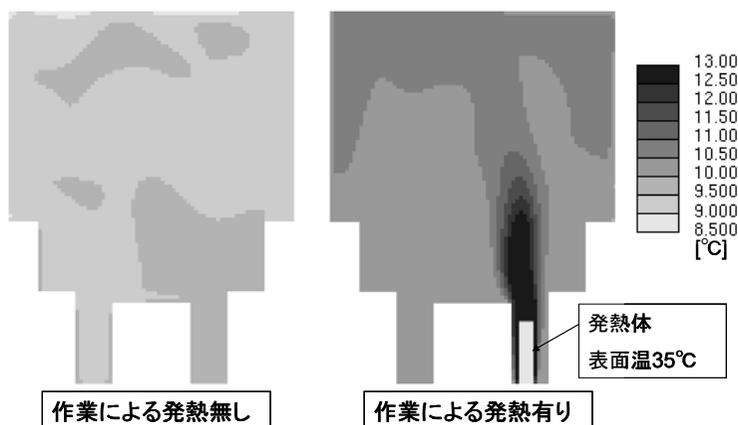


図7 作業者の発熱の影響

6. 現地における環境制御

6-1. 空調制御の目標

壁画のある天井石、壁石の全てを取り出すまでは、空調制御の温湿度の目標値は10°C、90%であり、6月26日以降は、発掘者の作業性を考慮して、空調の設定の温度を上げ、湿度を下げて保つこととした。空調期間は2007年1月末から9月までであり、石材の取り上げは4月から8月下旬までであった。空調は3月までは暖房が、それ以降は冷房が中心となった。空調制御は吸い込み口の温湿度が、目標値に近づくように行った。これらの制御には、夏季の実大実験²⁾や前章の検討結果を踏まえて行った。

6-2. 環境制御の監視と対策

石室内や内部断熱覆屋内の温湿度及び空調制御状況はオンラインで遠隔監視した。また、前章で検討した断熱シートの設置や、石室周囲での作業人数の制限、発熱機器の使用時間の短縮については、発掘・解体に携わる方々に協力をお願いし、実行していただいた。石室解体時の石材を取り上げたあとの開口は、断熱材で覆って環境を維持できるようにし、外気温が上がるに従って地盤・石室への結露発生の危険性が増大したため、6月に冷却管の運転を停止した。写真1に石室開口部（北壁のあった部位）を断熱材で覆った様子を示す。



写真1 石室開口部を断熱材で覆った様子

6-3. 環境制御の結果

図8,9に内部断熱覆屋内の温湿度変動を示す。RAは吸い込み空気を表しており、断熱覆屋内の代表値とみなせる。空調による制御は外気の温度変化等により目標温度より高くなる部分もあるが、平均してほぼ設定通りに、1月末から9月にかけて、一度も停止することなく運転できた。図10に石室内温湿度の変動を示す。石室内温度は5月前半までは、10℃近傍で比較的安定しているが、それ以降は、変動がやや大きくなっている。これは4月以降に石の取り上げによる作業があり、日中にセンサーを石室の外へ取り出したり、石室を開放したりしたことが影響していると考えられる。6月27日以降は、温度が急激に上昇しているが、空調制御条件の変更の影響である。石室内湿度は、2,3月は98~99%で推移しており、4月中旬以降92%まで低下している。これは天井石の取り出しによる石室周囲空気の流入の影響による。この石室内の湿度低下を抑えるため、開口を断熱材で覆ったところ、4月末には上昇し100%に達した。これは石材内に保持された水分の影響によると考えられる。この結露を防ぐために、断熱材の一部を開けて、石室周囲空気を一部流入させるようにすることで90%程度を中心として変動するようになった。6月27日以降に湿度が低下しているが空調制御条件の変更による。このようにして、遠隔監視により測定値に多少でも懸念がある場合には、迅速に現場でのチェックと調整を行なった。それらの結果として、発掘・解体期間中の石室内の温湿度は平均的に目標値を維持するように制御することができ、結露の防止及び乾燥の抑制ができた。

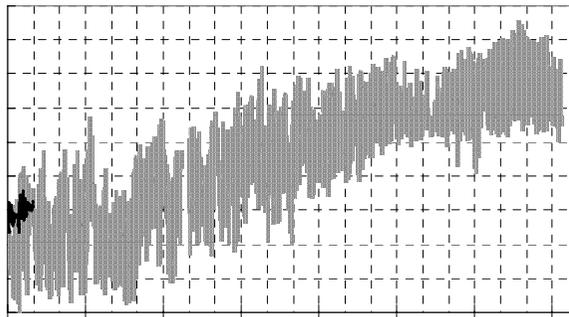


図8 断熱覆屋内の温度変動

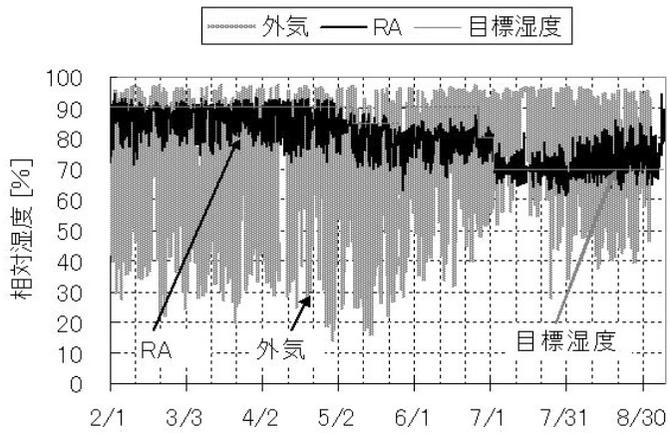


図9 断熱覆屋内の湿度変動

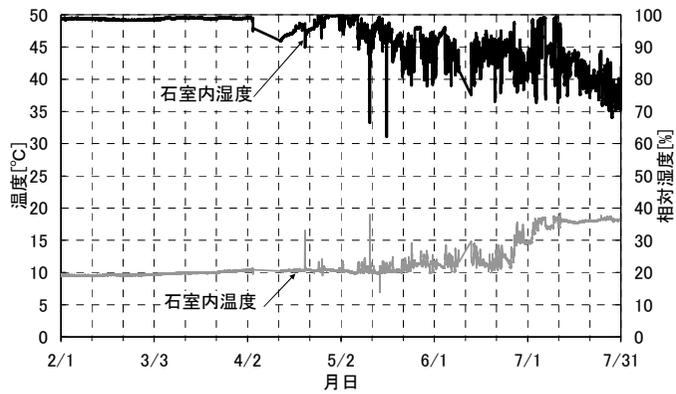


図10 石室内温湿度の変動

7. まとめ

本報告では、まず、石室解体時の断熱覆い屋内の数値流体解析を行い、実大実験と比較から精度の確認を行い、解体時に想定される石室の結露と温度上昇の問題とその対策について検討を行い以下の結果を得た。

- 1) 寒冷な時期の夜間における石室周囲への冷気の影響により石室の温度低下と温度むらが生じる。断熱シートの設置は、冷気の影響及び天井面の結露水の石室への落下の対策として有効である。
- 2) 石室周囲での作業により石室周囲および空間全体の温度上昇が生じ、石室の温度上昇と温度むらが生じる。この抑制のためには、作業時の石室周囲の上限温度を設け、作業のため覆屋内に入室する人を出来るだけ制限し、石室の周囲で発熱機器の使用時間を短くするなどの対策が必要と考えられる。

次に、これまでの検討結果を踏まえて行われた現地での石室発掘・解体時の環境制御についての結果について述べた。

- 1) 空調による制御は外気の温度変化等により目標温度より高くなる部分もあるが、平均してほぼ設定通りに、1月末から9月にかけて、一度も停止することなく運転できた。
- 2) 石室内及び周囲の温湿度の遠隔監視により測定値に多少でも懸念がある場合には、迅速に現地でのチェックと調整を行った。
- 3) 発掘・解体期間中の石室内の温湿度は平均的に目標値を維持するように制御が行うことができ、また結露の防止及び乾燥の抑制ができた。

注

注1) 図は実大実験時の断熱覆屋の図面である。現地では、形状及び寸法が若干異なる。また現地では2月に、内部断熱覆屋の窓面を断熱材で覆った。

注2) 温度分布は小型温湿度センサーを空間内につるしたロープにくくりつけて測定し、風速分布は熱線式風速計を伸縮可能な棒の先端に据え付けて、手で位置を特定し測定を行った。

参考文献

- 1) 文化庁, <http://www.bunka.go.jp/>, 国宝高松塚古墳壁画恒久保存対策検討会(第4回)(2005)
- 2) 小椋大輔, 石崎武志, 銚井修一, 北原博幸, 多羅間次郎, 木下舞子, 高松塚古墳石室解体時の空調方法の検討, 保存科学, 46, 1-11 (2007)

キーワード: 高松塚古墳 (Takamatsuzuka Tumulus) ; 解体 (dismantlement) ; 壁画 (mural painting) ; 保存 (conservation) ; 空調 (air conditioning)

Control of Temperature and Humidity Surrounding the Stone Chamber of Takamatsuzuka Tumulus during Its Dismantlement

Daisuke OGURA^{*}, Masahide INUZUKA, Shuichi HOKOI^{*}, Takeshi ISHIZAKI,
Hiroyuki KITAHARA^{**} and Jiro TARAMA^{*}

First, in order to investigate the accuracy of a CFD model, results of CFD analysis of the indoor air in the thermally insulated facility of Takamatsuzuka Tumulus was compared with those of the actual-size experiment which was carried out as a preliminary investigation of the dismantlement of Takamatsuzuka Tumulus. Countermeasures against problems such as condensation and temperature elevation of the stone chamber were investigated using the CFD model. The results are as follows.

- 1) During the cold season, cold downward draft of air and temperature distribution of the stone chamber occur. Setting a thermal insulation sheet is quite effective in avoiding problems.
- 2) Temperature surrounding the stone chamber increases and its distribution becomes large because of heat generated by workers and other factors in the facility. Maximum temperature and number of workers need to be limited, and the time during which the heat generating machine is at work in the facility needs to be shortened in order to prevent problems.

Secondly, temperature and humidity surrounding the stone chamber were controlled based on previous investigations. The results are as follows.

- 1) Temperature and humidity in the stone chamber had been maintained at an average of 10°C and 90%RH, and condensation and drying was avoided during dismantlement.
- 2) When there was fear of condensation or drying in the stone chamber in terms of data observed by remote monitoring, the situation was quickly examined and adjustments were made on the spot. These countermeasures were probably the first reason that the environment in the stone chamber could be maintained in safety.