

〔報文〕 高松塚古墳石室解体時の空調方法の検討

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

1. はじめに

高松塚古墳の壁画は、1972年に発掘調査が行われた際に発見され、現地保存が決定された。その後、1974年から1976年頃にかけて石室の前面に石室内外の環境が発掘以前の安定した状態に保たれることを目的として保存施設が設置された¹⁾。

その後、約26年経過した2002年に壁画近傍に黒色のカビの発生が確認され、壁画への影響が懸念されたため、2003年に緊急保存対策委員会²⁾、2004年に恒久保存対策検討委員会が立ち上げられた。そして、2005年6月に開催された恒久保存対策検討委員会にて、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³⁾。

本報告では、墳丘発掘、石室解体時における石室及び壁画の劣化防止のため、石室の温湿度環境を維持する方法について検討を行った結果を報告する。

まず、石室の周囲の土が取り除かれた以降における石室の温湿度性状の解析を行い、問題点を明らかにし、それらの対策を検討し、その結果、石室周囲の温湿度環境制御の必要性が明らかとなった。次に、そのために設けられた空調システムのある断熱覆屋について実大実験を行い、温湿度環境の制御性能と問題点について把握を行い、その対策を検討した。

2. 石室解体時の石室の温湿度環境の予測とその対策⁴⁾

2-1. 目的

ここでは石室解体時の石室の温湿度環境の解析を行い、温湿度および結露性状について検討し、石室周囲の空調の必要性を確認した。

2-2. 墳丘発掘、石室解体時期の外気条件

石室は、解体までの劣化の抑制のため、地盤の上部、下部より冷却管を用いて、10℃一定に冷却されている⁵⁾。これを踏まえて、古墳保存施設の2004年から2005年にかけての外気温湿度測定値から、墳丘発掘、石室解体時期の外気条件について検討を行う。図1に外気測定値を示

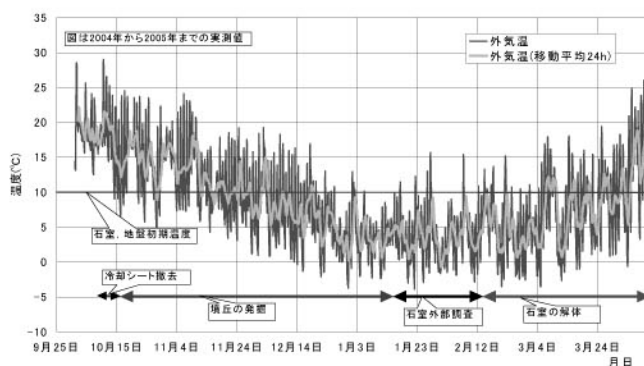


図1 墳丘発掘、石室解体時の外気温度変動

す。図中に墳丘発掘から石室解体までの期間を示している^{註1)}。この1～3月の月平均気温は、奈良の平年値⁶⁾と比べるとやや高い。図より外気温の日平均値は11月の後半から、10℃を下回る日があることが分かる。特に石室周囲の土がなくなる1月初旬から2月下旬までは、常に日平均で10℃を下回っており、3月に10℃を上回る日が出てくることが分かる。

2-3. 石室解体時の石室内温湿度変動の予測

2-3-1. 計算対象と計算条件

図2に計算対象を示す。石室は、天井、壁、床共に1次元の熱移動を考える。石室内部空気は1質点とし、周壁による熱移動、隙間からの漏気による熱収支を考える。水分については、石室、漆喰層の吸放湿は無視し、漏気による水分の出入りのみを考える。結露発生による水分蓄積及びこれの蒸発は考えない。計算は前進型有限差分法を用いる。

計算は、地盤冷却に用いている石室下部の冷却管は利用するが、他には何の対処も行わない条件を想定して行う。計算における各種条件は以下の通りである。

- 1) 漏気による換気回数：隙間面積の測定結果⁷⁾(600mm²)から、開口部を石室天井高さと同床面高さに均等に割り振り(300mm²ずつ)、温度差換気を考え室内外の圧力差を温度差5℃として求め換気回数0.14回/hを得た。ただしこの測定は、石室の南壁以外が全て地盤に接しているため、石室の周囲の土壌が取り除かれた後には、他の壁面、天井面の隙間の分だけ隙間面積が大きくなると考えられる。それを考慮するため測定結果を南壁の隙間面積とみなし、単位壁面積当たりの隙間面積を求め、外気に接する総面積に対する隙間総面積を求めた。その際、換気量は1.4回/hとなり、計算ではこれを用いた。また解体時には漆喰層を石に併せて切断するため換気量はさらに増える可能性があるが、以下の検討で得られている定性的な結果に影響しないことを確認している。
- 2) 初期条件：10℃一様
- 3) 境界条件：覆屋が存在するため外界条件は日射、夜間放射、降雨を考えず、外気温湿度条件のみ与えた。
- 4) 地盤底部条件：既設の地盤冷却パイプによる温度制御を考慮し、石室床の底面から1.5mの位置で10℃一定とする。
- 5) 熱物性値：石室、地盤、断熱材は表1の通りとし、石室内側、外側の熱伝達率は表2の通りとする。石室の熱伝導率、比熱は飽和含水状態を想定したものである。含水状態の変化により物性は変化する。なお含水が小さくなった状態を想定し比熱、熱伝導率を1/2にして計算を別途行ったが、結果は大きな差は生じなかった。
- 6) 石室寸法：内法 幅 1.04m、奥行き 2.66m、高さ 1.13m、天井厚さ 0.6m、壁厚さ 0.5m、床厚さ 0.5m
- 7) 計算期間は、1月1日から3月31日までである。

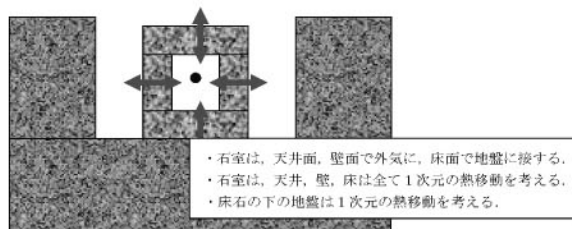


図2 計算対象

表1 各種材料の熱物性値

	熱伝導率 (W/mK)	比熱 (kJ/m ³ K)	間隙率 (%)	飽和度 (%)
石室	2.56	2900	20	100
地盤	0.64	2350	53	51

表2 熱伝達率

	熱伝達率 (W/m ² K)
石室内側	9.3
地盤外側	23

2-3-2. 計算結果と考察

図3～5に石室内温湿度変動, 石室内側表面の結露性状, 石室外側表面の結露性状, 石室内側表面の温度変動をそれぞれ示す。

まず石室内の温湿度性状, 結露性状について検討する。図3より, 石室内温度は常に10℃を下回っている。2月初旬に約3℃まで低下する。一方, 石室内の相対湿度は大きく変動し, 期間を通じて100%となる日数が15日程度, 60%を下回る日数は1ヶ月近くもある。石室の高湿化による結露発生, 低湿化による壁画の剥離が懸念される。石室内低湿乾燥化における塩の析出は, 期間が数ヶ月と短い事から問題視する必要性はあまりないと考えられる。

図4より, 石室の各部で15日程度, 表面結露が発生しており, 2日以上結露が発生し続ける場合も少なくない。発生は概ね全部位で生じている。図3と比較すると, 室内相対湿度が100%に達する場合には必ず表面結露が生じている。この結露発生は, 下記の通り石室の熱容量が大きく影響している。外気絶対湿度は, 外気温の変動(図3)に追従するように変動しており(図4), 温度上昇時に絶対湿度が上昇している。この外気温上昇に対して, 石室は遅れて温度上昇する。そこに高い絶対湿度の外気が石室内に流入し, 温度上昇が遅れて低い温度である石室の室内側表面で表面結露が生じていると考えられる。

これらに対して石室の壁体の吸放湿性を考慮する事でどのようなようになるのかを以下で考察する。室内の相対湿度変動は, 高湿と低湿の変動の振幅は抑えられる傾向になると考えられる。ただし, これには隙間を通じた換気の影響も大きいため, その傾向は量的には大きくないと考えられる。結露性状については, 図5に示すような温度分布ができるため, 吸放湿性を考慮する事により高温部で放湿し乾燥し, 低温部で吸湿し湿潤すると考えられる。従って結露の発生の頻度は必ずしも抑えられない。また時期により低温となる部位が異なるため(図5), 結露発生部位は時期により異なる可能性が高い。壁画の漆喰層のカビ発生や乾燥収縮による剥離の問題が懸念される。

図4より, 石室外側表面でも結露が頻繁に生じている事が分かる。また室外側表面の温度が0℃以下に達する日数も10日程度存在する。結露蓄積した水分が凍結・融解し, 石の劣化に影響を与える可能性が考えられる。また, 石室がなんらかの形で開放されてしまう状況を想定すると, 漆喰における結氷も想定され, 壁画の劣化にも影響を与える可能性がある。

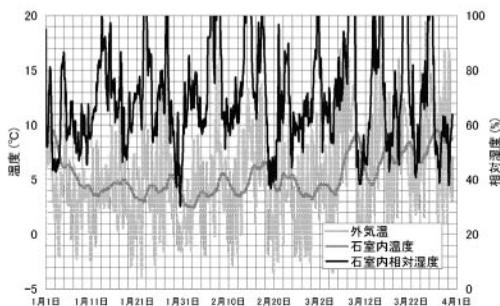


図3 石室内温湿度変動

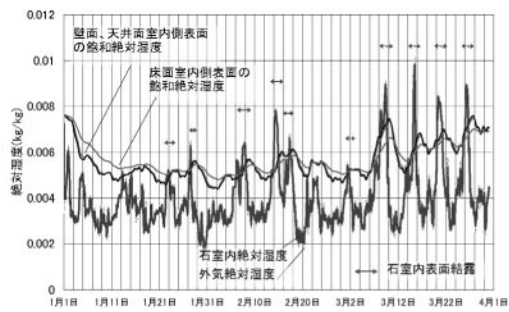


図4 石室内表面の結露性状

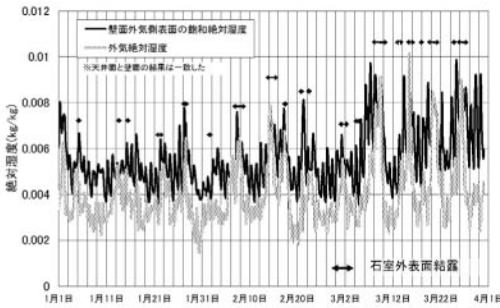


図5 石室外側表面の結露性状

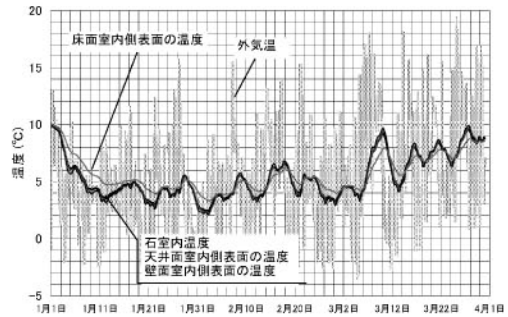


図6 石室内側表面の温度変動

以上から、石室の環境制御を石室の下側の冷却管のみに頼る場合には、石及び漆喰の劣化の観点から問題点が多い。

2-3-3. 石室解体時の石室及び壁画の劣化防止の対策について

前節より、外気条件が石及び漆喰壁画の劣化に与える影響は非常に大きいことが分かった。その対策について検討した結果をまとめると以下のとおりである。

- 1) 石室の気密化、断熱化と室内空間の温湿度制御を行うことは、困難である。
- 2) 石室周囲の温湿度環境を制御することが、前節で述べた外気条件に由来する多くの問題を回避できる最も有効な方法と考えられる。

3. 石室解体時の空調制御に関する実大実験

3-1. はじめに

前章の検討結果から石室周囲の温湿度環境制御の必要性が確認された。空調制御については空間構成、空調システムについて検討を行い、次節で示すような構成とした。この石室解体時における石室周囲の空調制御については、事前に制御の性能を評価し、壁画劣化防止に対する安全性を確保・検証する必要がある。そのために実大実験場において空調制御実験を行った。ここでは、そこで得られた結果について報告する。

3-2. 石室解体時の空調空間と空調システムの概要

石室解体時の空調空間の断熱覆屋の平面と立面の概要を、図7, 8にそれぞれ示す^{注2)}。断熱覆屋は、石材の取り上げを行う無軌条クレーンを支える鉄骨架工物を覆うような形で造られ、

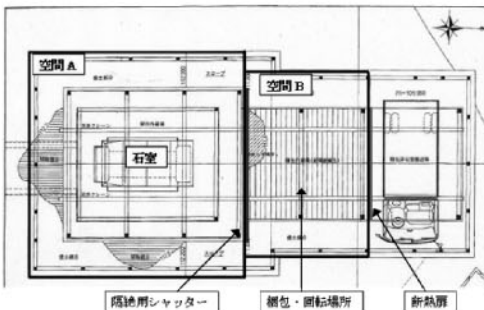


図7 断熱覆屋の平面図

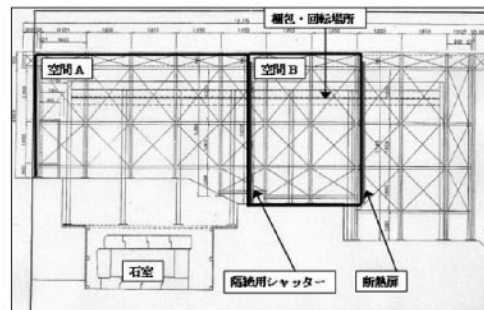


図8 断熱覆屋の立面図

石室の取り上げを行う室（空間A）と取り上げた石材を梱包・回転する室（空間B）から構成される。環境調整は、空間Aでは温湿度の空調制御を行い、空間Bでは外気との緩衝ゾーンとして温度のみの空調制御を行う。

断熱覆屋の壁体構成は、表3の通りで、内部に10cm厚の断熱材が挿入されている。また壁面及び天井面にアクリル製の採光窓を設け、断熱性を高めるため二重となっている^[注3)]。空間AとBの間に開閉可能な隔絶用シャッターを、空間Bと外気の間には断熱扉を設け、できるだけ気密化をはかり、漏気による熱負荷をできるだけ小さくする。

表3 壁体構成

外側からの構成	単位 (mm)
トタン波板	30
外側下地材	30
鉄骨	125
内側下地材	30
押出法ポリスチレンフォーム	100
内装下地材	30
内装（合板）	6

空間Aの温度、湿度調整システムは、湿度及び温度調節はそれぞれ①、②の方法を用い、それらを組み合わせる。空間Bは②と温風ヒータを組み合わせる温度調節を行う。

①恒温水循環装置を用いて温度調節された水をスクラバ内で気液接触させた後、吹き出して湿度調節をする。②恒温水循環装置と現地に既設の10℃冷水供給用チラーで温度調節された水と空気を、熱交換器を介して接触させ空気の温度調節をする。

石室周囲の温湿度の制御目標は、石材及び石室内壁面の劣化防止を目的として、周囲室温10℃、周囲相対湿度80-95%である。また同様の理由で石室内外の結露発生や、他部位で発生した結露が石室に落下をできるだけなくし、空調制御によって生ずる気流が、石室周囲では無風に近い状態になっている必要がある。

図9、10に空間Aの空調用の吹き出し口及び吸い込み口の平面図と立面図をそれぞれ示す。図に示すように吹き出し口4つ、吸い込み口3つの構成となっている。

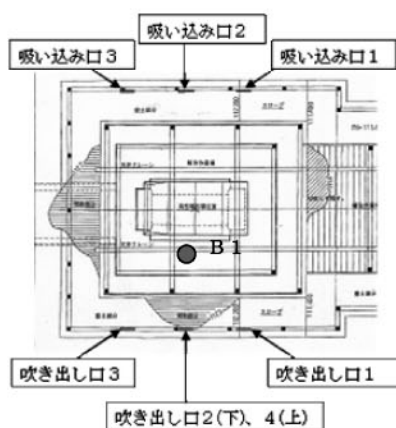


図9 吹き出し口、吸い込み口位置平面図

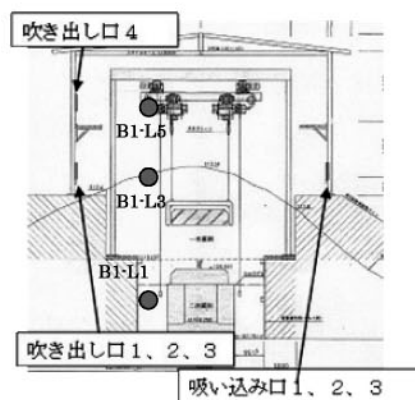


図10 吹き出し口、吸い込み口位置立面図

3-3. 実大実験場における実験概要

実大実験場における空調実験は、2006年9月26日から10月13日まで行った。実験の目的は以下を検討することである。

1) 温湿度制御の性能の検証

実験場では、高松塚の現地と以下の条件が異なり、限定的な性能確認となる。

- ・石室上部の地盤冷却に用い、発掘、解体時には不必要な既設チラーを冷房増強に用いる予定だが、それを使うことが出来ず冷房能力が小さい。
- ・梱包室（空間B）とトラック搬入口の間の断熱扉がなく、空調も行わない。
- ・石室下部の地盤冷却が行われていないため、下部地盤はなりゆきである。

このような状況から、空間Aは、気密性、断熱性の小さいシャッターを介して、外気に相当する空間Bに接しており熱負荷が大きくなることと、石室は20℃前後の実験場の周囲地盤に接していることから、制御目標として10℃は困難であることは明らかである。従って、上記を考慮して制御目標は、温度は20℃、湿度は80～95%の範囲とした。

2) 適切な吹き出し風向，風量の検討

空間内の風向，風速分布の計測を行いつつ，吹き出し風向，風量を変化させ，適切な風向，風量を決定する。

3) 結露対策の検討

内部覆屋において温度が低下しやすい，つまり結露発生しやすい部位の確認

夜間，休日時に使用する石室上に設置する断熱シートの性能の検討

4) 長期無人運転での信頼性の検証

4) については，エラー発生は生じなかった。

以下では，上記の1)，2)，3) について得られた結果の概要を示す。

3-4. 実験概要

実大実験場における空調実験は、2006年9月26日から10月13日まで行った。実験スケジュールと測定項目と測定点はそれぞれ表4，5の通りである。

3-5. 覆屋内温度，湿度の分布性状

3-5-1. 覆屋内風速分布

吹き流しと手動風速の測定結果から，吹き出し口からの気流は，石室周囲に直接吹き込むことなく上部をうまく流れている様子が確認できた。風速は，石室の上部では，吹き出し口高さ位置で最大0.8m/sで，石室周囲は0.1m/s以下のほとんど無風に近い状態であり，吹き出し口の風向，風量は適当であったといえる。また連続運転時の吹き出し風速，吸い込み風速の測定結果から安定した吹き出し風量が得られている状況が確認できた。

3-5-2. 空調システムの吹き出し口の温湿度性状

10月4日から13日までの吹き出し口と空間内の温度及び相対湿度の変動をそれぞれ図11，12に示す。図中のB1-L1，L3，L5は高さごとのセンサー位置をあらわし，石室周囲高さがB1-L1に，石室上部の吹き出し口1～3とほぼ同じ高さがB1-L3に，吹き出し口4とほぼ同じ高さがB1-L5に，それぞれ該当する。それぞれの位置を図9，10中に示す。図11より，吹き出し口温度は，前半の空調運転期間(10/4-6)では，日中は外気温変動に追従し高い時に24℃近くまで上昇しているが，夜間は概ね20℃一定であり，後半の期間(10/10-13)では，同様の変動を示すが，夜間

表4 実験スケジュール

月 日	曜日	空調関係	実測関係
9月26-29日	火	装置設置 試運転	測定装置設置
10月2日	月	運転	測定装置設置, 吹き出し風量調整, 風速分布測定, 温湿度, 風速の実測
10月4日	水	連続運転	風速分布詳細測定, 温湿度測定, 地盤, 石室含水率測定, サーモグラフィ撮影
10月5日	木	連続運転	風速分布測定, 温湿度測定
10月6日	金	連続運転	風速分布詳細測定, 温湿度測定, 石室上に断熱シート設置 (全閉)
10月10日	火	連続運転	断熱シート設置, 空調再開時の温湿度測定
10月11日	水	連続運転	シート一部開放, 風速分布詳細測定, 温湿度測定
10月12日	木	連続運転	風速分布詳細測定, 温湿度測定
10月13日	金	運転停止	測定装置撤去

表5 測定項目と測定点

表面温度	
表面温度センサー	20点
サーモグラフィ	室内から壁, 天井など各面撮影
室空間内温湿度	
無線式温湿度センサー	44点
風向・風速	
超音波風速計 (風向, 風速)	2点 (吹出口前, 吸込口前)
多点風速計 (無指向性熱線風速計)	12点
手動風速測定 (無指向性熱線風速計)	20~30点
吹き流し (風向)	40点程度

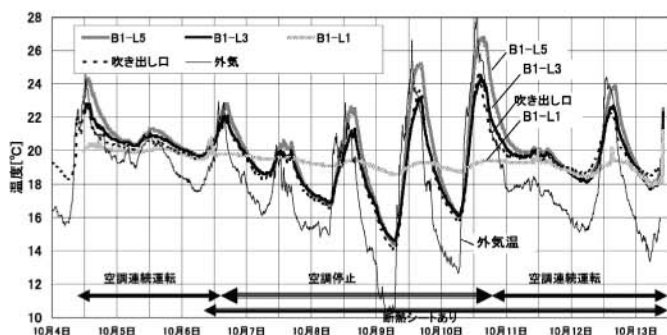


図11 吹き出し口と空間内の温度変動

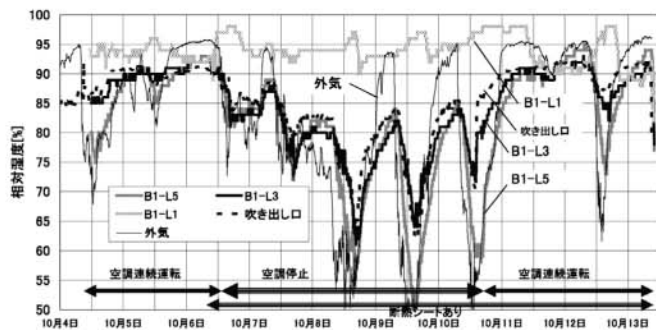


図12 吹き出し口と空間内の相対湿度変動

は18°C近くまで下がる。吹き出し口温度が、夜間より日中の変動が大きくなる理由は、実験場での空調システムでは冷房能力が小さいためである。後半の期間の夜間に、吹き出し温度がやや低下するのは、外気温の低下が大きいためと、空間B側が外気に近く、そこの境界が断熱、気密が不足しているためである。現地より安定した温度制御を行うためには、地盤冷却用に用いた既設チラーを冷房能力の増強に用い、空間Bの十分な断熱、気密化を行った上で空調制御を行うことが必要といえる。

図12より、空調の全期間で吹き出し相対湿度は、日中相対湿度がやや低下し最低で85%にまで達するが、夜間は90%前後と安定した湿度である。日中の湿度低下は吹き出し温度が上昇したためであり、夜間の湿度制御がよいのは、温度制御が十分に行えているためと考えられる。

3-5-3. 断熱覆屋内温湿度分布

10月5日から6日の午前9時頃までは石室上にシートを被せない状態での空調運転を、それ以降はシートを被せた状態での空調運転を行っている。測定結果から覆屋内空間の水平の温湿度分布は小さかったため上下分布のみを検討する。図11, 12より、石室周囲の温湿度は、空調運転時、停止時のどちらでも、それぞれ18~20°C, 92~100%の値で変動している。また図11, 12より、石室上部空間(B1-L3)の温湿度は、空調時は、前節の吹き出し口の温度変動と等しい性状を示し、空調停止時は、外気温湿度に大きく追従する。

空調運転時、停止時のどちらでも石室周囲温度が、ほぼ18~20°C程度となるのは、石室周囲の地盤及び石室の熱容量と断熱シートが影響しているためと考えられる。空調運転の有無に関わらず、石室周囲相対湿度が、やや高いが安定した高湿度を維持するのは、地盤や石室からの吸放湿があること、石室周囲温度が安定して推移していること、また断熱シートが上部との空気流動・熱移動を抑えていることが作用しているためと考えられ、石室周囲の温湿度の安定化に地盤、石室そのものが大きく寄与しているといえる。その一方で、石室周囲の湿度がやや高い傾向があるため、その抑制には、地盤からの放湿部位にシートを被せるなどが考えられる。

3-5-4. サーモグラフィの夜間撮影による天井周辺の結露性状

夜間の外気温低下と夜間放射により、内部覆屋天井や鉄骨等が冷却され、それら部位に結露が生じ、石室に水滴が落ちる可能性がある。ここでは温度低下の大きい晴れの日の夜間のサーモグラフィ撮影により温度性状を把握し、結露の発生しやすい部位を明らかにし、その対策を検討する。図13, 14にそれぞれ内部覆屋天井の概要とサーモグラフィによる温度解析部位を示す。

晴れの日の夜間は温度低下が大きく、翌朝の温度上昇も大きいため、部位ごとの温度低下と、翌朝の外気温上昇に対する、部位ごとの温度上昇の遅れとが、結露発生の大きな要因となると考えられる。図15に晴れの日の各部位の温度変動を示す。なおサーモグラフィ解析の温度は、天井付近に設置した天井の表面温度センサーで校正した。

図より、天井板温度を基準として各部位の温度をみると、最も温度低下が大きいのは、窓、シャッターであり最大3°C程度低くなっている。次に、クレーン最低温度が最大1~2°C程度、シャッター上の鉄骨構造物は0.5°C程度、天井より低くなっている。

また図より、露点温度との比較を行うと、窓、シャッターは、21~22時頃から翌朝8時まで露点温度以下であり、クレーンは翌朝の6時から8時すぎまで露点温度以下である。

以上より、結露が発生しやすいのは窓、シャッターであり、次にクレーン、シャッター上の鉄骨構造物であると考えられる。翌日の目視確認では明確な結露水は確認できなかったが発生している可能性が高いと考えられる。窓、シャッターは温度低下がしやすい部位であるため結

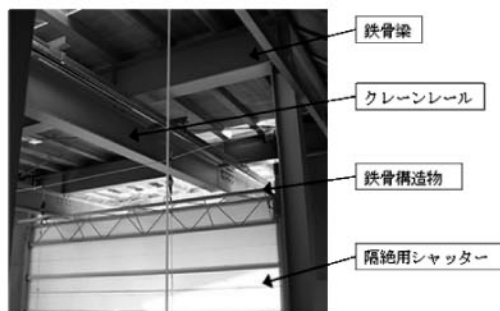


図13 室内から見た天井と隔絶用シャッター

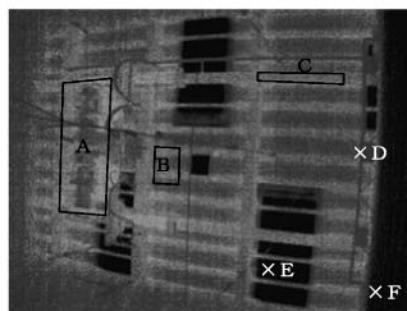


図14 サーモグラフィによる温度解析部位

- A…クレーン（領域の平均温度, 最高温度, 最低温度を示す）
- B…天井板（領域の平均温度）
- C…クレーンレール（領域の平均温度）
- D…隔絶用シャッター上の鉄骨構造物
- E…窓
- F…隔絶用シャッター

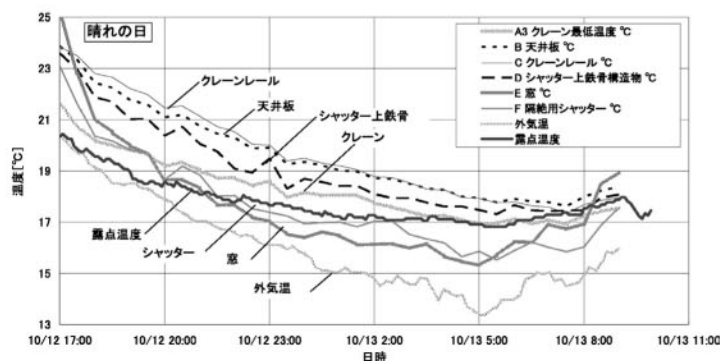


図15 天井各部位の夜間温度変動（晴れの日）

露発生がしやすく、クレーンは熱容量が大きいことから、夜間の温度低下の後に、周囲の温度上昇に追従するのが遅れるため結露発生がしやすいと考えられる。

これらの結露の対策として以下が考えられる。現地ではシャッターの外には空間Bがあり、温度制御を行うため、シャッター、シャッター上の鉄骨構造物にこれほどの温度低下は生じないものと考えられる。また窓については実験場では1重であったものを2重にする予定であり、温度低下は抑制されると考えられる。クレーンについては、解体時を除き石室上部に置かない方がよいと考えられる。また万が一にそなえ、夜間は、石室上に断熱シートを被せるなどの対策が有効と考えられる。ただし、断熱シートを被せた場合でもシート自身の温度低下が大きい場合、石室周囲は高温なため、シートの石室側で結露する可能性があるため、上部空間の温度低下には十分に注意しなければならない。

4. まとめ

石室の周囲の土が取り除かれた以降における石室の温湿度性状の解析を行い、問題点を明らかにし、それらの対策の検討を行い、以下の結果を得た。

- 1) 石室の温湿度環境制御を下部冷却管のみに頼る場合、石及び漆喰の劣化の観点から問題点が多い。

2) 上記対策として、石室周囲の温湿度環境を制御することが、最も有効な方法である。

次に、空調システムを設けた断熱覆屋について実大実験を行い、温湿度環境の制御性能と問題点について把握を行い、その対策の検討を行い、以下の結果を得た。

- 1) 吹き出しからの気流が、石室周囲に直接吹き込むことなく上部をうまく流れており、石室周囲は気流が十分小さい。
- 2) 石室周囲の温湿度は、地盤及び石室の熱容量、水分容量が大きく影響し、非常に安定した変動をする。
- 3) 石室上部の温湿度は、晴れた日の日中を除き、夜間は比較的安定した状態で制御可能である。現地でもより安定した温湿度制御を行うためには、地盤冷却用に用いた既設チラーを冷房能力の増強に使い、空間Bの十分な断熱、気密化を行った上で空調制御を行う必要がある。
- 4) 晴れた日の夜間の天井周辺の温度測定から、天井窓、シャッター、クレーンの順に結露が発生しやすい事を確認した。これら結露の対策として、天井窓は2重にし、シャッターは空間Bの空調制御を行うことにより、結露発生抑制が行えること、またクレーンは石室上には置かないことが考えられる。夜間には、石室上に断熱シートを被せるといった対策を行うことが有効である。

注

注1) 図中の発掘、解体期間は、検討当時(2005年12月)の予定をそのまま記載している。解体期間が当初から一ヶ月程度延長する可能性がある。

注2) 図は実験場の図面であり、現地では詳細が異なる。

注3) 実験場では、天井の採光窓は1重であったが、現地では2重とする。

参考文献

- 1) 文化庁編：『国宝・高松塚古墳—保存と修理—』，第一法規出版（1987）
- 2) 文化庁美術学芸課：高松塚古墳壁画の現状について，国宝高松塚古墳壁画恒久対策検討会資料の理解のために，月刊文化財，平成17年11月号，33-40（2005）
- 3) 文化庁ホームページ，<http://www.bunka.go.jp/>，国宝高松塚古墳壁画恒久保存対策検討会（第5回）（2005）
- 4) 文化庁ホームページ，<http://www.bunka.go.jp/>，国宝高松塚古墳壁画恒久保存対策検討会 第5回会議 資料9-2，（2005）
- 5) 国立天文台編：『理科年表』第78冊，（2004）
- 6) 石崎武志，三浦定俊，犬塚将英，カビル 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，45，56-98（2006）
- 7) 文化庁ホームページ，<http://www.bunka.go.jp/>，国宝高松塚古墳壁画恒久保存対策検討会 第3回会議 参考資料6（2005）

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

Investigation of the Air Conditioning Method for the Conservation of Takamatsuzuka Tumulus during the Dismantlement of Its Stone Chamber

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

The indoor heat and moisture behavior of the stone chamber of Takamatsuzuka Tumulus were investigated for the conservation of the mural paintings when its surrounding soil is removed by exposure to outdoor air during excavation.

As a result, it was confirmed that air conditioning of the surroundings of the stone chamber was needed.

Next, the capability of air conditioning to control the surrounding air temperature and humidity was investigated by actual-size experiment.

The main results are as follows:

- 1) Temperature and humidity of the surrounding of the stone chamber are stable because of the heat, the moisture capacity of the surrounding ground, and the stone itself.
- 2) The air conditioning system has sufficient capability to control the air temperature and relative humidity around the stone chamber if a chiller is added to the air conditioning system at the site and the covered room is well insulated and airproofed.