

## 墳丘発掘，石室解体時の石室の温湿度環境予測と対策

京都大学大学院工学研究科建築学専攻 小椋大輔，銚井修一

### 1. はじめに

今後の墳丘発掘調査，石室解体時における壁画及び石室の劣化防止のため，主に高湿度環境維持（壁画剥落防止）と結露防止（カビ発生抑制）を目的として，石室の周囲の土が取り除かれた以降における石室内の温・湿度性状と結露性状について予測を行い，そこで生じる問題点とその対策について検討した。

### 2. 墳丘発掘，石室解体スケジュール

現時点では，以下のスケジュールで墳丘発掘，石室解体が行われる予定となっている。

2005年9月～2006年9月

墳丘上部，墳丘下部の冷却により石室の温度を10℃に制御

2006年10月初め～中旬

墳丘上部の冷却管の撤去

2006年10月中旬から2007年1月中旬まで墳丘部の発掘

最後の3週間で，石室周囲の土を掘削，石室周囲に，1mの空間が出来る。

この時，墳丘下部の冷却管には，冷水を循環する。

2007年1月中旬から2月中旬まで，石室外部の調査

2月中旬に，修理施設竣工

2007年2月中旬から4月中旬まで，石室の解体

### 3. 墳丘発掘，石室解体時期の外気条件について

ここでは，古墳保存施設で測定されている2004年から2005年にかけての外気温湿度を用いて，墳丘発掘，石室解体時期の外気条件について検討を行う。2004年10月から2005年4月にかけての外気測定結果を図1に示す。この1～3月の月平均気温は，それぞれ3.7, 4.4, 7.6℃であり，奈良の平年値<sup>1</sup>の3.8, 4.0, 7.2℃と比べると2, 3月は平年より高く，やや暖かかったと考えられる。この図より外気温の日平均値は11月の後半から，石室の冷却温度の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。このことから1,2月は石室の外気に接する部位の温度が床面より低下し，3月には外気に接する部位の温度が床面より上昇すると考えられる。図2に，この期間における外気露点温度と，石室内相対湿度の概算値を示す。ここで石室内相対湿度の概算値とは，外気絶対湿度と石室内絶対湿度が平衡しており，石室内温度が10℃に保たれていると仮定して求めた相対湿度の値である。図より，外気露点温度は11月末から2月にかけて10℃を下回り，3月に10℃を上回る。石室が10℃に維持されるとしたら，3月以降に結露が頻繁に発生すると考えられる。また図より石室の相対湿度が1,2月に50%を下回っており，3月に40%から100%まで急激に変化している。石室の隙間による換気あるいは解体に伴う開放が，石室内相対湿度を大きく変化させており，結露によるカビの発生，低湿化

<sup>1</sup> 国立天文台編，理科年表 第78冊，(2004)

による壁面の剥離の可能性がある事を示唆している。この空間の湿度制御が必要である事が分かる。ただし、石室内温度は、外気の影響をうけて変化するため、その影響を含めた詳細な検討が必要である。次節では数値解析により石室内温湿度と結露性状について検討を行う。

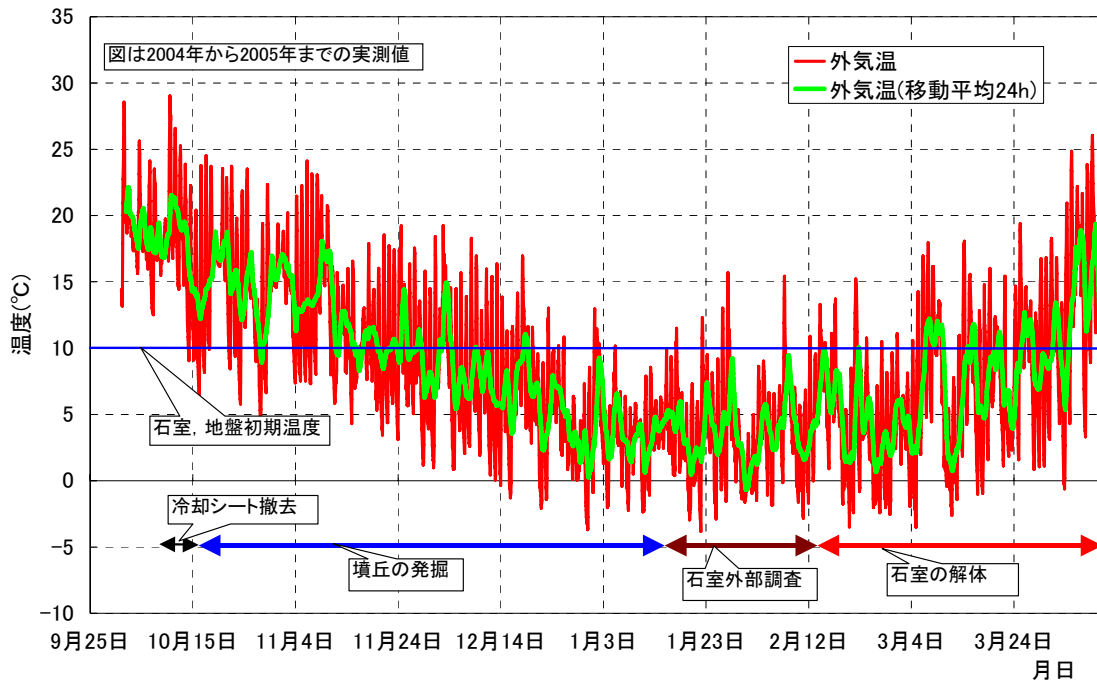


図1 墳丘発掘、石室解体時の外気温度変動

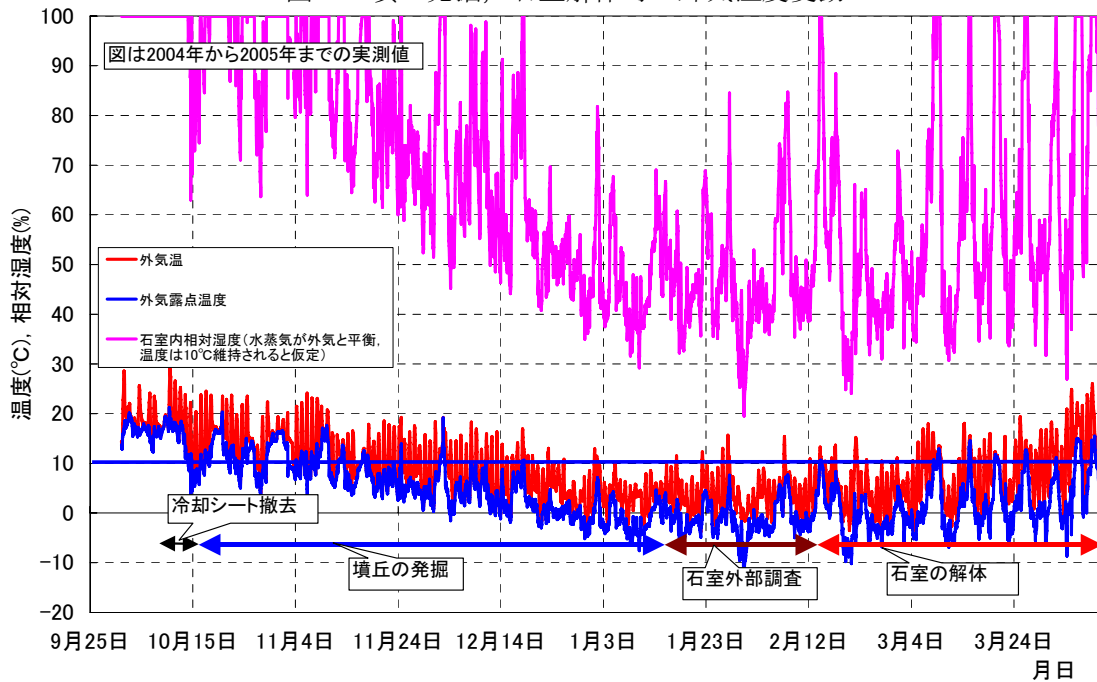


図2 墳丘発掘、石室解体時の外気露点温度変動

#### 4. 石室解体時の石室内温湿度変動の予測

ここではより詳細に石室の温湿度性状と結露性状を数値解析により明らかにする。

##### 4.1 計算方法と計算条件

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、隙間による漏気を換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、換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、地盤底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。

換気回数：隙間面積の測定結果<sup>2</sup>(600mm<sup>2</sup>)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(300mm<sup>2</sup>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。

初期条件：10℃一様

境界条件：外気温湿度条件：1月1日から3月31日まで（日射、夜間放射、降雨は考えない。）

地盤底部条件：石室床の底面から1.5mの位置で10℃一定（冷却パイプによる温度制御）

熱物性値：石室、地盤、断熱材については表1を、石室内側、外側の熱伝達率については表2に示す。

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。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、結果は大きくは異ならなかった。

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

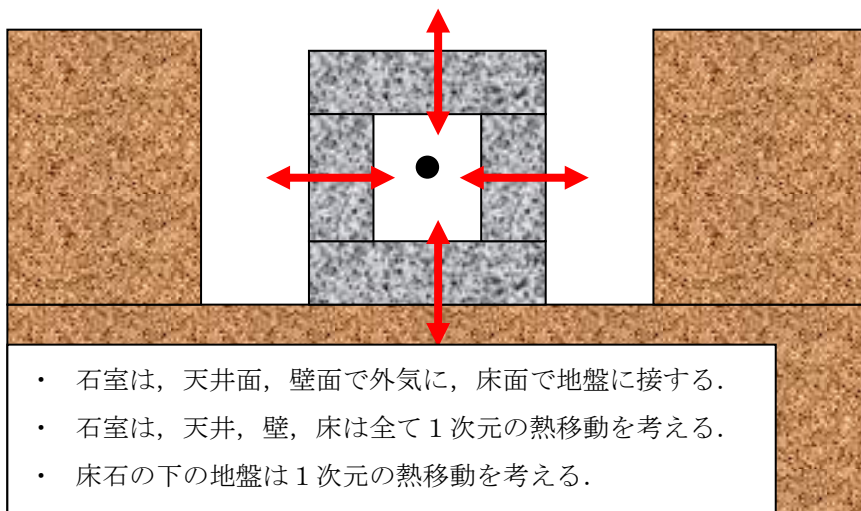


図3 計算対象

<sup>2</sup> 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)

表1 各種材料の熱物性値

	熱伝導率 (W/mK)	比熱 (kJ/m <sup>3</sup> 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 <sup>2</sup> K)
石室内側	9.3
石室外側	23

## 4.2 計算結果と考察

図4～6に石室内温湿度変動，石室内表面の結露性状，石室外側表面の結露性状をそれぞれ示す。

まず石室内の温湿度性状，結露性状について検討する。図4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5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4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4)に追従するように変動しており(図5)，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，これには隙間を通し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7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7)，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6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。

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，漆喰及び石の劣化の観点から問題点が多い。

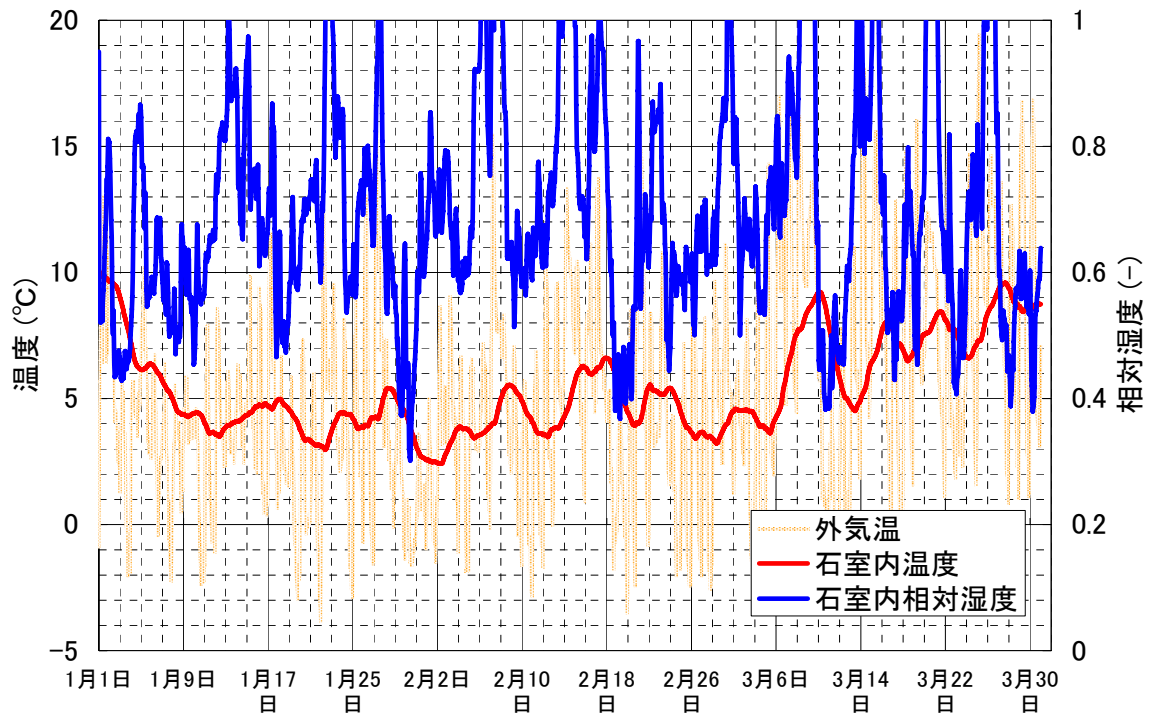


図 4 石室内温湿度変動

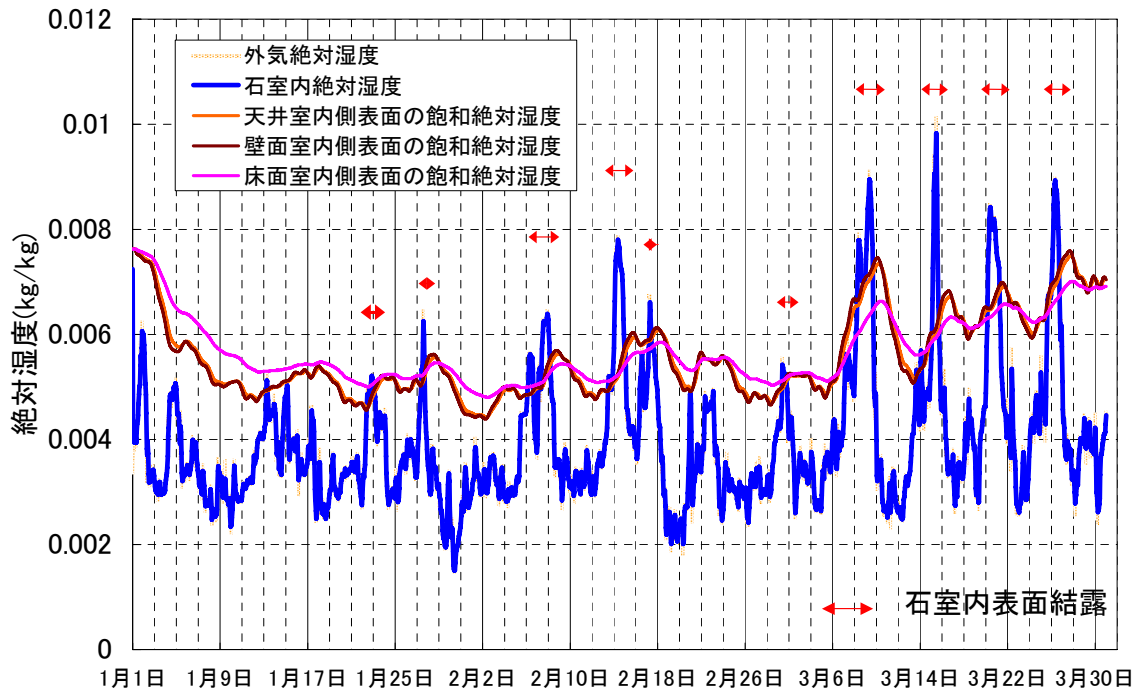


図 5 石室内表面の結露性状

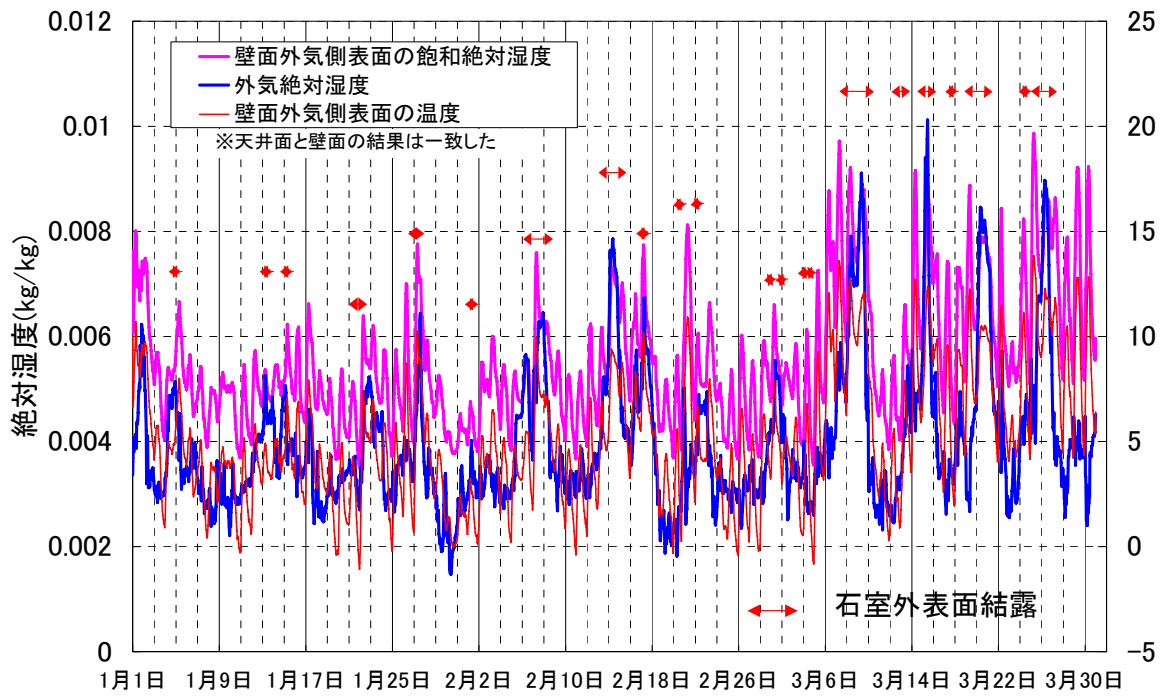


図6 石室外側表面の結露性状

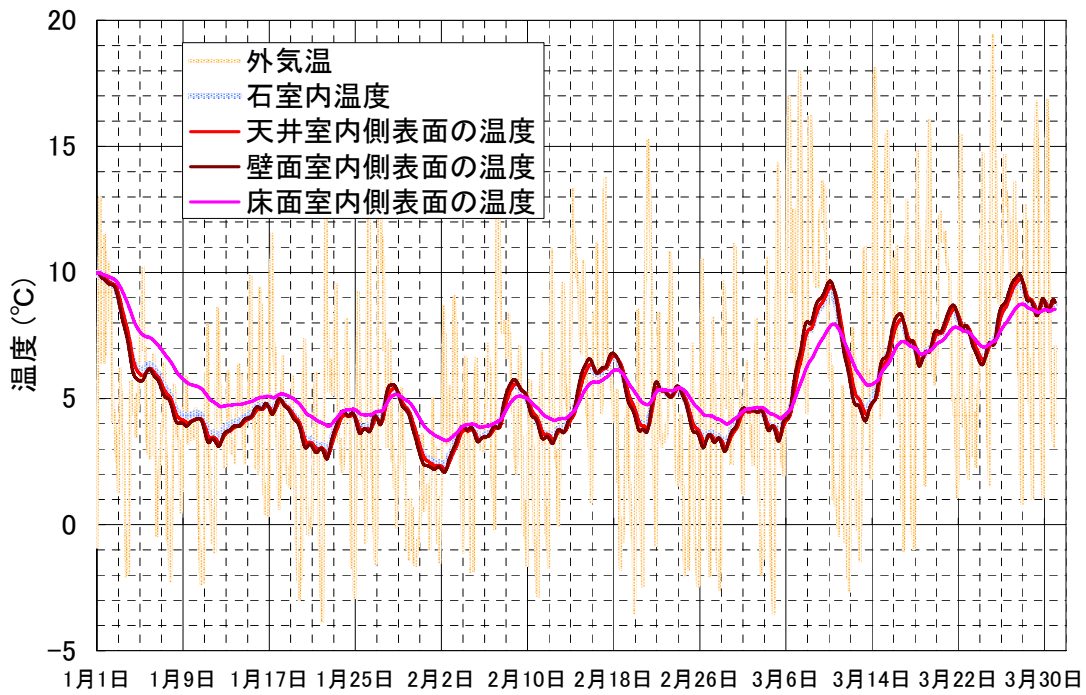


図7 石室内側表面の温度変動

## 5. 石室解体時の石室及び壁画の劣化防止の対策について

石室周囲の土が取り除かれて以降の、石室の温湿度性状、結露性状について検討した結果、地盤の冷却管のみで他に何も施さない場合には、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。以下ではその対策について検討する。

石室の高湿環境維持と結露防止の観点からは、**まず考えられる建築的な対策手法としては、気密化、断熱化と室内空間の温湿度制御である。**

しかし、以下の問題点が考えられるため、**この方法は困難である。**

- 1) 石室を解体していく過程で、石室の隙間を広げたり、開放したりする状況は避けられず、問題が起きない開放時間は外気条件に依存して変化すると考えられる。これは高度な判断が要求されるため実現可能性が低い。同時にこれは作業スケジュールに大きな影響を与えるため、設定された冬期の期間内に作業を終える事が困難と考えられる。
- 2) 精度が要求される気密化、断熱化を解体の工程の中に組み込む事を考えると作業者の労働が非常に煩雑となる。またそれが十分行われておらず問題が発生した場合の対応が困難である。
- 3) これまで石室を閉じることで周囲地盤からの水分により、高湿環境が維持できていたが、周囲地盤が無くなる事による石の水分状態の変化が予想され、石及び漆喰の吸放湿による高湿環境維持が十分行えるのかどうか疑わしい。そのため石室内の空調制御、特に湿度制御の検討が必要と考えられる。その際には、カビの菌を新たに持ち込まないようにする事、室内気流により壁画の剥離を促進しない事、また室内カビ胞子の攪拌をしない事、精度よく湿度維持ができるかどうか機器の性能を評価する事、この機器のトラブルが発生した場合の対策を用意する事の検討がそれぞれ必要である。これは今までとられていない対応策であり、制御した結果が、直接壁画に影響を与えるため、その可否について十分な知見が必要だが、上記の通り検討すべき課題が多くある。従って、この制御方法をとることは困難だと考えられる。

### **次に考えられるのが、石室周囲の温湿度環境を制御する方法である。**

この方法により、基本的には上記の1),2)はクリアできると考えられる。3)の制御の問題については、以下の検討すべき課題がある。

空調制御は、室内で行わないため、上記3)でのカビ胞子の持ち込みの抑制、室内気流による壁画の剥離防止、菌の攪拌防止は可能である。しかし、湿度制御については、周囲地盤が無くなった事による石の水分状態の変化が予想され、石及び漆喰の吸放湿による高湿環境維持が十分行えるのかどうか不明であることと、隙間からの換気(これにはカビ胞子の流入の可能性は確実に回避はできない)の水分流出入の程度が大きく影響することから、両者を含めて十分に検討する必要がある。

またこのシステムにおけるフェイルセーフを考えると、石室周囲の温湿度制御装置の故障が起きるなど、温湿度制御ができなくなるトラブルが発生した場合の対策を検討する必要がある。

その対策の一例としては、気密化、断熱化を行うことが考えられる。万が一石室周囲の温湿度の制御が出来なくなった場合に、石室がその影響を受けるまでに時間をかけることができる。これについては、前述の通り作業の繁雑さもあるので、要求される精度を落として簡略なものとするなどを考慮して、十分に検討する必要がある。

この方法をより具体化するためには、上記の通り課題がいくつかあるが、今後、検討を進めることで解決可能と考えられる。

以上から、石室周囲の温湿度環境を制御する方法は、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。

## 5. 石室周囲の温湿度環境制御の熱負荷算定と空調方法の提案

ここでは、前節の石室周囲温湿度の制御を行う際の簡易な熱負荷算定及び空調方式の検討を行った。

### 5.1 温湿度環境制御空間の概要と計算条件

前述の通り、石室の解体時に石室周囲の空調制御が必要となると考えられるため、簡易な熱負荷計算を行う。石室周囲の環境の維持には、解体工事で用いるクレーンの構造体を用いて空間を構成する事を考え、構造体の隙間を断熱材で覆うこととする。

計算条件を以下で述べる。

石室及びクレーンを覆う空間は、工事原案を元に幅 6.0m，奥行き 6.6m，高さ 6.0m とする。

石室及び地盤は制御したい温度，湿度環境に維持されているとし，そこでの熱移動，水分移動がないものとする。断熱材は厚さ 10cm のウレタンフォームを用いる。

熱負荷の算定は，室内での熱，水分発生を考慮せず，換気と壁体からの熱損失のみを考えた以下の定常熱移動計算式を用いる。顕熱負荷  $Q$ ，潜熱負荷  $rW$  を下式で求める。

$$Q = KA(\theta - \theta_o) + c\gamma nV(\theta - \theta_o)$$

$$rW = r\gamma' nV(X - X_o)$$

ここで、 $Q$ : 顕熱負荷 (W)， $rW$ : 潜熱負荷 (W)， $\theta$ : 室温 (石室周囲空間) ( $^{\circ}\text{C}$ )， $\theta_o$ : 外気温 ( $^{\circ}\text{C}$ )， $K$ : 熱貫流率 ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ )， $A$ : 壁，天井表面積 ( $\text{m}^2$ )， $c\gamma$ : 空気の容積比熱 ( $\text{J}/\text{m}^3\text{K}$ )， $n$ : 換気回数 ( $1/\text{s}$ )， $V$ : 室容積 ( $\text{m}^3$ )， $r$ : 水の相変化熱 ( $\text{J}/\text{kg}$ )， $\gamma'$ : 乾燥空気密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )， $X$ : 室内絶対湿度 ( $\text{kg}/\text{kg}$ )， $X_o$ : 外気絶対湿度 ( $\text{kg}/\text{kg}$ )

計算に用いた各パラメータの数値は表 3 の通りである。

表 3 計算パラメータ

計算条件	
体積 $V(\text{m}^3)$	237.6
表面積 $A(\text{m}^2)$	190.8
断熱材厚さ $L(\text{m})$	0.1
断熱材熱伝導率 $\lambda(\text{W}/\text{mK})$	0.027
隙間換気回数 ( $1/\text{h}$ )	5
空気の容積比熱 $c\gamma(\text{J}/\text{m}^3\text{K})$	1256
乾燥空気の比重 $\gamma'(\text{kg}'/\text{kg})$	1.16
熱貫流率 $K(\text{W}/\text{m}^2\text{K})$	0.259
潜熱 $r(\text{J}/\text{kgK})$	2383969

外気条件：1月1日から3月31日（2005年の実測値）

### 5.2 計算結果

図 8，9 に顕熱負荷，潜熱負荷の変動を示す。

換気回数 1 回/h の場合，顕熱負荷は最大で，1.4kW 程度，平均で 0.64kW であり，潜熱負荷は最大で，



1kW程度、平均で0.6kWであった。換気回数5回/hの場合、顕熱負荷は最大で、5kW程度、平均で2.2kWであり、潜熱負荷は最大で、5.2kW程度、平均で3kWであった。換気回数10回/hの場合、顕熱負荷は最大で、9.4kW程度、平均で4.2kWであり、潜熱負荷は最大で、10kW程度、平均で6kWであった。

換気量が減る事で熱負荷が減ることから、できるだけ隙間を減らす事が望ましい。

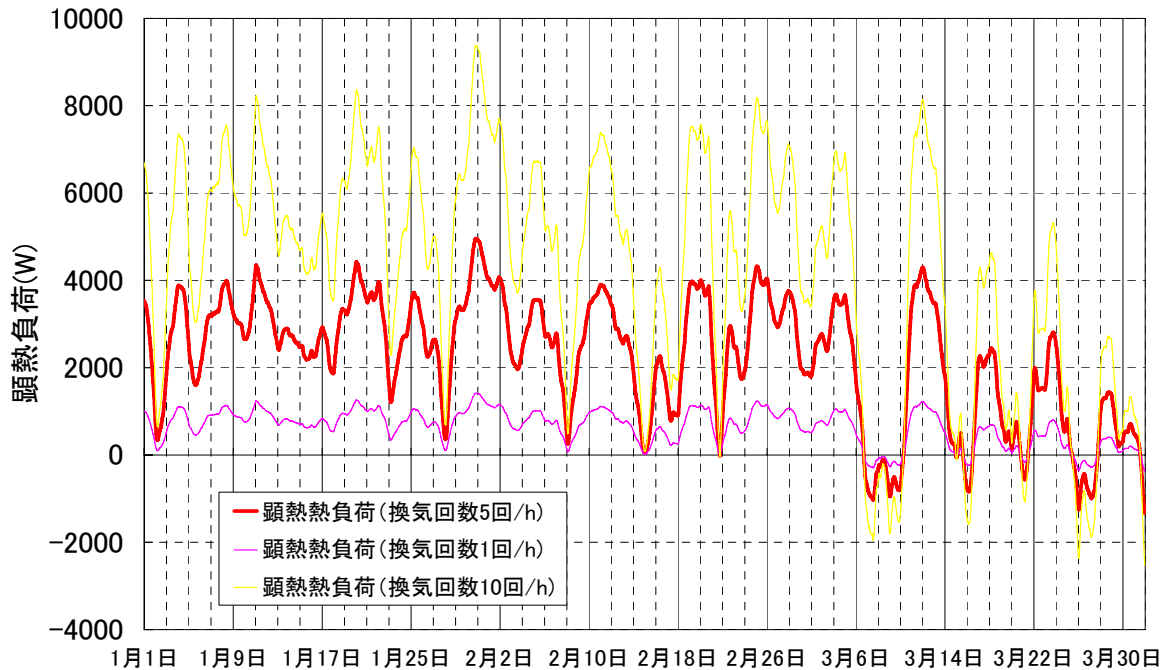


図 8 顕熱負荷変動

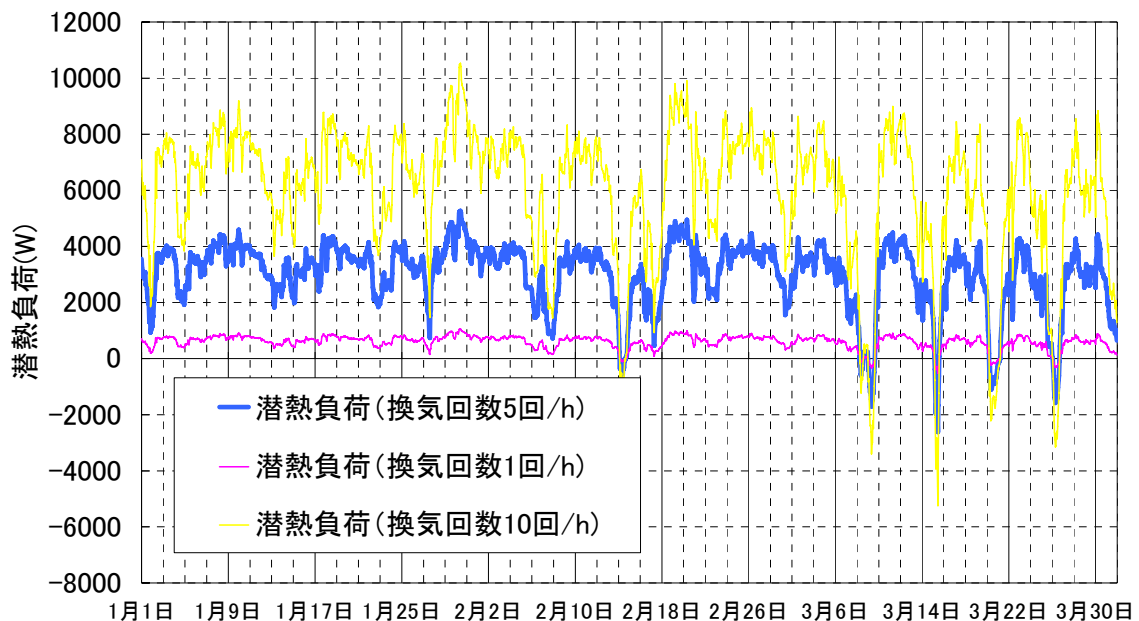


図 9 潜熱負荷変動

### 5.3 空調方法の提案

温度、湿度調整システムは既存のシステム（冷水供給用のチラー）を用いることも想定して以下のシステムを提案する。湿度調節には①の方法を、温度調節には②、③の方法を用いる。

#### ①温度調節された水＋スクラバ

気液接触式で温湿度調整（および空気清浄）を行う。

恒温槽または恒温水循環装置を用いて温度調節された水（またはブライン）をスクラバ内で気液接触させた後、吹き出す。

#### ②温度調節された水＋ファンコイル

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。

温度調節された現地に設置されている10℃冷水供給用チラーの水をそのまま使う場合と新たに恒温槽または恒温水循環装置を用いる場合の二通りが考えられる。

#### ③温度調節された水の流れるパイプを覆い（囲い）の内面に取り付ける

断熱材等を用いた簡易の覆い（囲い）の内側（石室側）に銅パイプまたはビニールホースなどを取り付け、その管内に既存のチラーより供給された水を流すことで覆いの中を温度調節する。

ただし、現地の冷水供給用チラーは加熱がほとんどできないため、これにヒーターを取り付けるなどの対策が必要である。

## 6. まとめ

今後の墳丘発掘、石室解体時における石室及び壁画の劣化防止のため、石室の周囲の土が取り除かれた以降における石室内の温・湿度性状と結露性状について予測を行い、そこで生じる問題点とその対策について検討した。

検討結果から、石室内の湿度変動を小さくするため、石室周囲の温湿度環境を制御することが有効であることが分かった。また、石室周囲の温湿度制御に必要な熱負荷を算定し、その制御方法を検討した。