

## 高松塚古墳墳丘部の生物対策としての冷却方法の検討

石崎 武志・三浦 定俊・犬塚 将英・カ Ril, マグディ\*

### 1. はじめに

高松塚古墳では、壁画発見より約30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、2004に恒久保存対策検討委員会が立ち上げられた<sup>1)</sup>。2005年6月に開催された国宝高松塚古墳壁画恒久対策検討会<sup>2)</sup>で、壁画の保存のために、石室を取り出して解体修理を行うことが決定された。しかし、恒久対策の実現までには、石材などの物性調査、工事が石室に及ぼす影響評価等、しばらくの時間を要すると考えられる。そこで、その間の被害の広がりを防ぐために暫定的な措置として当面の生物対策が必要である。カビを抑制するには、薬剤で殺菌する方法の他に、カビの生長を阻害する方法がある。すなわち、カビ（好気性のカビ）が成長するには、①栄養、②水分、③酸素、④温度が必要である。それぞれの方法について実効性を検討した結果、①栄養、②水分、③酸素の要素を取り除くのは、実質的には困難であり、④の温度を下げることによるカビの生長を阻害することがもっとも実現可能性があると考えられた。しかし低温にしても、全くカビが発生しなくなるわけではなく、また土壌中に多種多様なカビが存在して、長期間おいておくと、低温で生育するカビがいつかは発生するようになるので、恒久的な対策とはなり得ず、ここでは当面の対策としての冷却について検討した。石室内を低温にする方法について検討し、墳丘部を墳丘表面に設置した冷却管と石室下部の冷却管を用いて冷却することが決まった。冷却方法の検討内容、墳丘部の冷却の現状について以下に示す。

### 2. 石室の冷却方法

石室内の冷却方法について次の5つの方法を考え、その有効性および実現可能性に関して検討した。

- 1) 盗掘口から石室内を冷却する
- 2) 取合部を冷却することにより石室を冷却する
- 3) 墳丘部に冷却管を設置し、石室の外部から冷却する
- 4) 墳丘部に冷却シートを設置し、石室の外部から冷却する
- 5) 墳丘部表層部と石室の下部に冷却管を設置し、石室の外部から冷却する

#### 2-1. 盗掘口から石室内を冷却する

石室内の温度を、盗掘口部分にサーモモジュールを用いた冷却装置を用いて冷却する方法の効果を見る目的で、実物大の大きさの石室模型を用いて実験を行った。装置の写真を写真1に示す。今回行った実験のサーモモジュールの冷却能力は、100W程度のものであり、ファンを用いた場合は2.5℃程度温度の低下が見られたが、実際は、200W程度のもので設置可能と思われるので、5℃程度まで下げることが可能と考えられる。ただ、熱交換を良くするためには、石室内の風速を強くする必要があり、石室内の風速の増加が、漆喰表面に与える物理的な影響に関しては、その可能性を否定できないため、石室内の冷却に本方法を採用するのは、困難で

\*日本学術振興会外国人特別研究員

あると考えた<sup>3)</sup>。



写真 1. サーモモジュールを用いた石室模型内の冷却実験

### 2-2. 取合部を冷却することにより石室を冷却する

これは石室内の温度を取合部の温度を下げるにより低下させる方法である。取合部の温度をどのくらい下げたら石室の温度はどのくらい変化するかわからないと期待するカビ対策に結びつくかが判断できないし、冷却熱源容量、冷却装置の規模も見えてこない。そこで冷却効果を予測するために数値解析を行った。

数値解析結果より、取合部のみ15℃や18℃に温度を下げた場合でも、現状より顕著な温度低下が望めないこと、さらに水平方向に大きな温度差が発生し、結露が懸念されるため、冷却方法としては好ましくないことが分かった。

### 2-3. 墳丘部に冷却管を設置し、石室の外部から冷却する

石室の冷却は、図1の様に石室を取り囲むように冷却管を設置し、冷却設備により墳丘部を冷却し続ける。この方法により石室を取り囲む地盤の温度を徐々に低下させ、温度差をほとんど生じさせることなく石室内面を冷却することが可能である。

ただし、冷却管により石室部分を均一に冷やすためには、石室周囲に直径5 cmの冷却管を30本以上設置しなくてはならず、墳丘の版築部分を大きく損傷するためこの方法は採用されなかった。

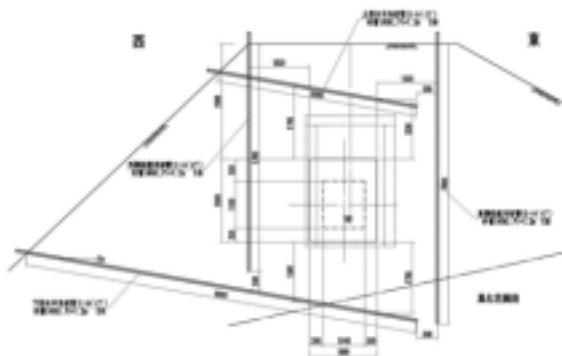


図 1. 墳丘部に冷却管を設置し、石室を冷却する場合の冷却管配置図

#### 2-4. 墳丘部に冷却シートを設置し、石室の外部から冷却する

これは墳丘上に冷却シートを設置し、上部から墳丘部を冷却する方法である。この方法でどの程度石室内の温度を下げるができるのか、数値解析を行った。数値解析では、墳丘部の冷却シートの温度を現状より5℃、3℃下げることにより石室の温度がどう変化するかを検討した。墳丘頂部より8m範囲を5℃冷却する場合がもっとも石室の冷却に効果があった。また、墳丘頂部より6mの範囲を5℃低下させる場合も、これに次ぐ効果があった。温度低下量は、現在の値を基準値とした場合、それより2℃程度下げることができることが分かった。しかし、この方法では、石室部分を15℃以下まで下げることは、難しいことが分かった<sup>4)</sup>。

#### 2-5. 墳丘部表層部と石室の下部に冷却管を設置し、石室の外部から冷却する

この方法は、写真2の様に墳丘表層部に冷却管を設置し、その上に断熱シートを設置し(写真3)、石室下部には図2に示したように冷却管を埋設し、石室周囲から冷却する方法である。この方法では、10℃以下まで石室部分を均一に冷却することが可能である。また、石室下部の冷却管は石室下の風化した花崗岩からなる地山部分に設置され、墳丘部の版築部分を通る部分は少ないため、版築部分の損傷は小さいと考えられる。これらの理由で2005年5月に開催された国宝高松塚古墳壁画恒久対策検討会<sup>4)</sup>で、石室冷却による当面の生物対策としてこの方法が採用された。これを受けて2005年7月に冷却工事が開始され、2005年9月に墳丘部の冷却が開始された。



写真2. 墳丘部表層部に設置した冷却管

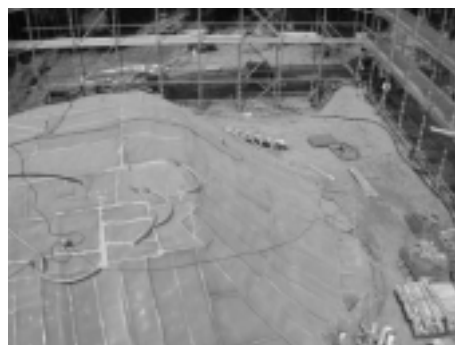


写真3. 墳丘部表層部の冷却管上に設置した断熱シート

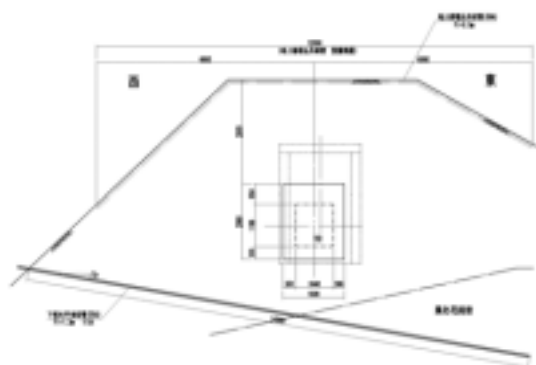


図2. 墳丘部表層部と石室の下部に冷却管を設置する方法の模式図

### 3. 墳丘部の地盤の物理的特性

墳丘部の冷却に伴う石室内の温度変化を予測するためには、墳丘部の版築部分の物理的特性および熱伝導率などの熱的特性を測定する必要がある。墳丘部の不攪乱の土試料は、ボーリングにより採取した<sup>5)</sup>。石室東側(B-3)の版築表面より1m下部分(標高111m)の版築の乾燥密度,土粒子密度,間隙率,重量含水比,体積含水率,飽和度はそれぞれ,1.25g/cm<sup>3</sup>,2.62 g/cm<sup>3</sup>,52.2%,21.6%,27.1%,56.7%であった。版築の層は,砂と粘性土の互層となっているため,乾燥密度や含水率は場所によって異なるが,以下の冷却進行に関する数値解析においては,墳丘部の物理的特性は一定とした。

土試料の熱伝導率は,デカゴン社製熱物性測定装置KD2を用いて測定した。KD2は,熱線源法(サーマルプローブ法)と呼ばれる測定原理によるもので,棒状のプローブを試料中に挿入し,プローブから一定の熱を発生し,その部分の温度上昇速度が,試料の熱伝導率により異なることを利用したものである。ボーリングにより得られた土試料の含水率を変化させ,試料の飽和度と熱伝導率の関係の測定結果を図3に示す。熱伝導率は,飽和度が増加するに連れて徐々に増加している。これは,土試料に含まれる水分量が増加すると熱伝導率が大きくなるためである。

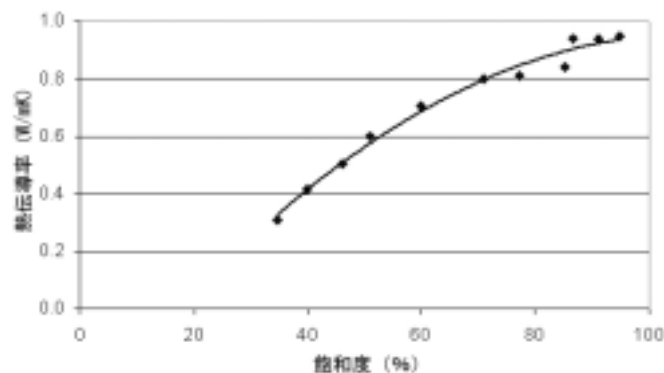


図3. 墳丘土の熱伝導率と飽和度の関係

### 4. 墳丘部の冷却による温度変化の数値解析

#### 4-1. 熱計算方法

- (1) 計算プログラム: 陽解法熱差分計算プログラム((株)精研 技術本部 松岡啓次氏作成),
- (2) 計算モデル: 実施工図の南北断面(図4)および東西断面での二次元モデル,
- (3) 計算メッシュ幅: 0.0475m,
- (4) 計算時間間隔: 0.05h,
- (5) 計算範囲(南北断面): 下部水平冷却管列から下方に約5m離れた面(下面)と,地上部埋込冷却管列の右方に5m離れた面(右側面)および前室内の面(左側面)までとした(図4)。
- (6) 境界条件: 計算範囲の両側面および石室内面を断面, 下面は17°C一定とした。また, 防熱材(30mm厚)を設置した地表面の熱貫入率 $\kappa$ を1.62W/m<sup>2</sup>Kとした。

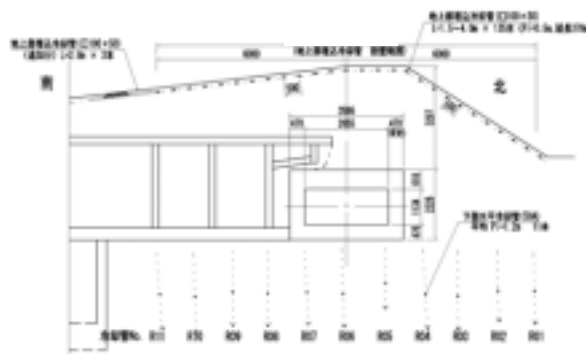


図4. 古墳墳丘部の南北断面

#### 4-2. 主な熱定数の推定

##### (1) 現地物理定数

土質調査結果（2005年1月）と、採取した版築の物理試験結果などから、版築の物理定数の平均値を求めた。その結果、版築は、間隙率 $n=53\%$ 、飽和度 $Sr=51\%$ 程度とした。石室は、ほぼ飽和状態にあるものと考え、 $n=20\%$ 、 $Sr=100\%$ と想定した。また、石室の下部の地盤については、十分な調査結果がないため、版築と同様の値を採用した。

##### (2) 初期地盤温度と外気温度

初期地盤温度は、冷却開始前の2005年8月30日の各位置の実測温度データを地表面からの深度について整理して決定した（図5）。

また、外気温度は2002年の奈良の月別平均気温を参考にして、冷却開始からの日数毎に変化させた。

##### (3) 熱伝導率

サーマルプローブ法により測定した値（図3）から、現地の飽和度に対応した版築の熱伝導率を仮定した。

以上の想定をもとに、熱計算では表1に示す値を用いた。

表1 熱計算で使用した主な熱定数

	間隙率	飽和度	熱伝導率	熱容量	初期温度
	$n(\%)$	$Sr(\%)$	$k(w/m^{\circ}C)$	$C(kjm^3^{\circ}C)$	$(^{\circ}C)$
石室	20	100	2.56	2900	18
版築（地盤）	53	51	0.64	2350	17~27.5

#### 4-3. 最適な冷却運転計画の検討

初期地盤温度が高く、石室までの距離も遠い地上部埋込冷却管に $2^{\circ}C$ の冷水を先に循環し、石室内面に生じる温度差を $3^{\circ}C$ 以下に保つような、下部水平冷却管の冷水循環開始時期と冷水循環温度の設定を探るために、繰り返し熱差分計算を実施した。

その結果、表2に示す温度の冷水を冷却管に循環させた場合、約240日間で石室内面温度を $10^{\circ}C$ に冷却することができ、またその後はこの温度が維持できるという南北断面での計算結果

が得られた(図6)。また,冷却中に石室内面に生じる温度差も最大1.8°Cで小さいと予想された。

表2 最適な冷水温度の設定

	(日)	0~45	45~110	110~150	150~210	210~330	330~510	510~600
地上部埋込冷却管	(°C)	2				8.5	8	8.5
下部水平冷却管	(°C)	—	10	7	4	9.5		

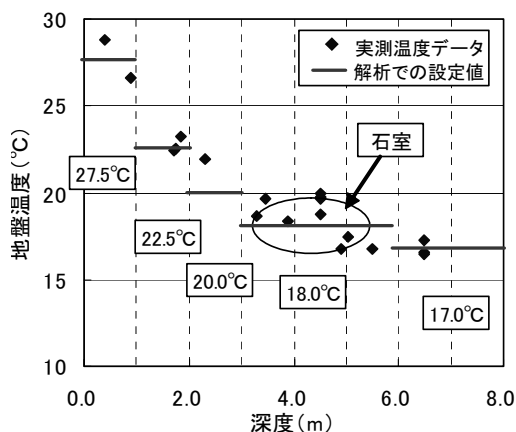


図5. 初期地盤温度の想定

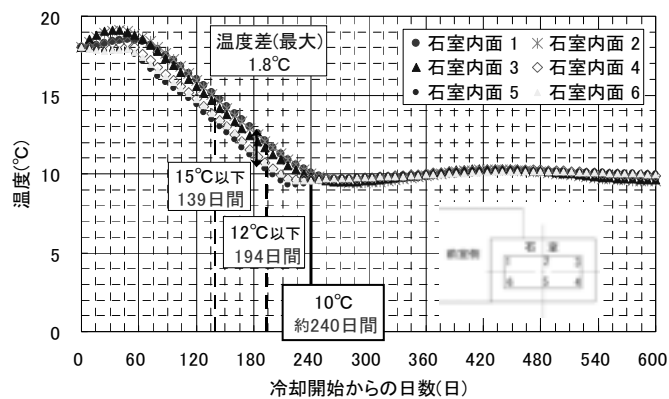


図6. 石室内面温度の計算結果

#### 4-4. 温度計測結果と予測計算との比較

墳丘冷却の温度管理は, 版築(地盤)内に20箇所以上の温度センサーを設置して, 1回/30分の頻度で各位置の温度を計測し, 1回/日グラフ化することで行っている。

ここでは, 熱差分計算の温度計算位置と計測された温度データを比較し, 墳丘および石室が順調に冷却されているかどうかを確認した。

##### 4-4-1. 温度の比較位置

図7(南北断面)と図8(東西断面)に事前予測結果と計測データの温度の比較位置を示す。

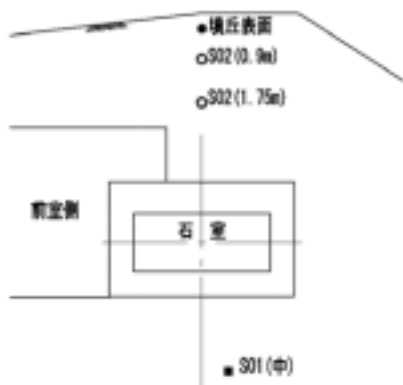


図 7. 温度の比較位置(南北断面)

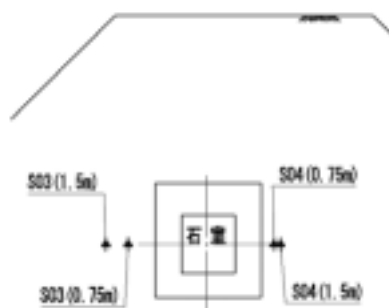


図 8. 温度の比較位置(東西断面)

各温度の比較位置の詳細は、以下のとおりである。

- ①墳丘表面；地表面から深度40cm,
- ②S02(0.9m)；地表面から深度90cmの位置,
- ③S02(1.75m);地表面から深度1.75mの位置,
- ④S01(中)；石室下側の2本の下部冷却管の中間位置,
- ⑤S03(0.75m),⑥S03(1.5m)；石室の西側部の位置,
- ⑦S04(0.75m),⑧S04(1.5m)；石室の東側部の位置

#### 4-4-2. 温度の比較結果

温度の比較結果を図9, 図10に示す。計測された墳丘表面の温度は、冷水循環開始当初は計算よりも低かったが、徐々に計算結果に近づきつつある。S02(0.9m),S02(1.75m),およびS01(中)の温度は、事前計算結果と良く合っており、石室の上下から順調に冷却されていることが分かる。

また、石室側部の近い位置にある墳丘水平S03(0.75), (1.5m), S04(0.75m), (1.5m)で計測された温度は、いずれも計算結果より0.5~1.5℃低い温度になっている。この要因としては、パネル系空調によって冷却している前室の温度が、石室温度よりも1℃程度低めになっていることなどが原因であると考えられる。

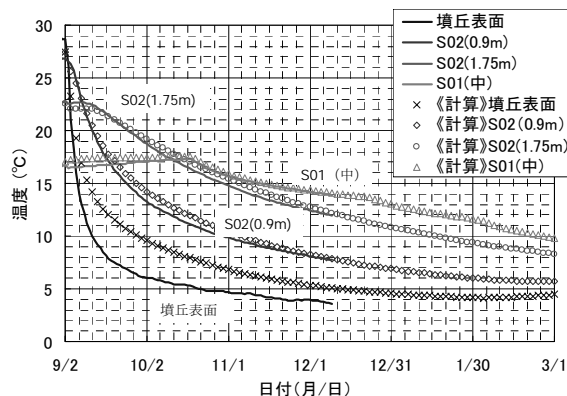


図 9. 温度の比較結果(南北断面)

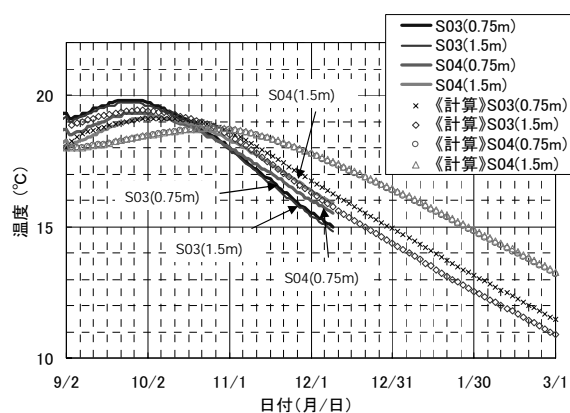


図10. 温度の比較結果（東西断面）

#### 4. まとめ

高松塚古墳石室内に発生したカビによる被害を防ぐために、石室内の温度を下げることを検討した。石室内の温度を下げる方法として、盗掘口から石室内を冷却するなど、5つの方法が検討された。それらの方法の内、石室部分の温度を均等に10℃以下まで下げることができるとや版築部分の損傷が少ないなどの理由で、墳丘部表層部と石室の下部に冷却管を設置し、石室の外部から冷却する方法が採用された。墳丘部のボーリングにより得られた土試料を用いた熱物性値の測定結果などから、冷却後の墳丘部の温度変化の数値解析を行った。墳丘部の冷却設備は2005年9月に完成し、墳丘部の冷却が開始された。現在までの墳丘部の冷却による墳丘内の温度変化の測定値は、数値計算による予測値とほぼ一致している。今後は、墳丘部の冷却の後に予定されている解体修理のための石室を取り出す際の、石室内の温湿度の解析を進めていく予定である。

#### 謝辞

高松塚古墳墳丘部の冷却による数値解析に関しては、(株)精研 吉田聡志、伊豆田久雄氏に多大なご協力を頂きました。ここに深く感謝申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 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)
- 2) 「国宝高松塚古墳壁画恒久保存対策検討会（第4回）資料」文化庁ホームページに掲載 (2005)
- 3) 犬塚将英、石崎武志：古墳石室内における温度・湿度制御のための基礎研究、日本文化財科学会第22回大会研究発表要旨集、300-301、(2005)
- 4) 「国宝高松塚古墳壁画恒久保存対策検討会（第3回）資料」文化庁ホームページに掲載 (2005)
- 5) 三村衛、石崎武志：高松塚古墳墳丘の現状とその地盤特性について、地盤工学会電子ジャーナル、(2006) 印刷中。



キーワード：高松塚古墳(Takamatsuzuka Tumulus), カビ(fungi), 壁画(mural painting), 保存  
(conservation) 冷却(cooling)

## Examination and Choice of Cooling Methods for the Mound of Takamatsuzuka Tumulus as Protective Measures against Fungi in the Stone Chamber

Takeshi ISHIZAKI, Sadatoshi MIURA Masahide INUZUKA and  
Magdi KHALIL\*

High humidity of the stone chamber of the Takamatsuzuka Tumulus and high water content of its lime plaster walls have caused fungi to appear on the walls inside the stone chamber of Takamatsuzuka Tumulus. It was decided finally to take out the stones for the restoration of the paintings on the lime plaster walls. But as a tentative measure, it was decided to cool the stone chamber in order to reduce fungal activities. Five methods were proposed for this, including sending cool air into the stone chamber. Among them, the method of installing cooling pipes on the mound and below the stone chamber was selected, because it allows uniform cooling and it does not damage the mound so severely. Undisturbed soil sample was obtained by boring and its thermal properties were measured. Based on these measurements, temperature changes were simulated by numerical simulation. After the cooling system was completed, the cooling of the mound was started in September 2005. The measured temperature profile corresponded well with the simulated results.

---

\*JSPS Postdoctoral Fellow