

## 冷却パイプ用冷水の温度および入室が石室内温湿度変動に与える影響の解析

京都大学大学院工学研究科 小椋大輔、銚井修一  
東京文化財研究所 石崎武志

### 1. はじめに

過去の高松塚古墳の石室周囲の環境や内部作業などの要因が石室内の温湿度変動に与える影響を、墳丘、保存施設等を考慮した石室の温湿度解析モデルを作成し、高松塚古墳石室内の温湿度変動の測定値<sup>1)</sup>や記録<sup>2)</sup>などを元に、シミュレーションにより推定する。モデル化や境界条件などの設定には、過去の石室周囲環境の測定値や内部作業などに関する記録を可能な範囲で考慮し、不明な点は推定を行う。

これまでの報告<sup>3)4)5)</sup>では、保存施設稼働時および稼働前の気象条件の影響、墳丘の被覆状況の影響について検討を行い、以下の結果を得た。

- 1) 保存施設稼働後の約 30 年間の気象条件の変化は、この間の石室内の温度上昇の主要因の一つといえるが、それだけでは温度上昇を説明することはできない。
- 2) 2004 年末頃の石室内の温度上昇の原因の一つとして、2003 年 9 月に竹林を伐採し防水シートを設置したことが影響している可能性が高い。
- 3) 2004 年 9 月の仮設覆屋の設置は、防水シートを継続して使用するより、石室内の温度を低くするように作用したと考えられる。
- 4) 保存施設稼働時の(年)平均的な石室の温度上昇は、気象条件や被覆条件の変化だけでは十分に説明できない。これらに加え、①前室・準備室の温度制御、②保存施設の躯体熱移動、③機械室内の温度変動、④石室への入室 などの影響が考えられ、これらを明らかにする必要がある。

本報告では、以上の検討に引き続き、

- ①冷却パイプへの給水温度（前室・準備室の温度制御）
- ②保存施設の躯体における熱移動
- ④石室への入室

が、石室内温度変動に与える影響について検討を行った結果について述べる。

最後に、これまでの検討結果に基づき、種々の要因が石室内温湿度環境に与える影響について要約する。

### 2. 解析方法と解析条件

用いる基礎方程式、気象条件、計算期間等を表 1 に示す。地表面被覆については、竹林<sup>i)</sup>、防水シート、仮設覆屋で覆われている 3 期間（条件）を考慮する。竹林で覆われている場合は、植生の熱・湿気抵抗、日射遮蔽などが考慮可能な竹林と地表面の 2 層に分けた植生モデルを導入する。また防水シートは、実際使われたシートの日射反射率の測定を行い、その結果を用いる。

解析対象は、図 1 に示す石室の南北方向の断面を取り出した 2 次元系である。防水シートについては、当時の図面及び写真を参考にして、図中の墳丘上部の青色の部位に設置し、仮設覆屋は防水シートと同じ領域に防水シートを撤去して設置する。

<sup>i)</sup> 竹以外にモチノキ等があるが、墳丘上の植生は竹林と総称する。

表 1 解析方法<sup>4)</sup>

|         |  |
|---------|--|
| 基礎方程式   | 地盤・石室壁体内部：熱水分同時移動方程式<br>室内：室空気を1質点で代表させる熱水分収支式   |
| 気象条件    | 奈良気象台観測値(1975年～2005年)<br>外気温、外気相対湿度、水平面全天日射量、降雨量、雲量  |
| 熱・水分物性値 | 地盤：版築土 高松塚古墳墳丘の版築土の平衡含水率を元に推定<br>地表面近傍は砂質土<br>凝灰岩：文献値を元に推定<br>漆喰：文献値を使用<br>保存施設コンクリート：文献値を使用<br>保存施設断熱材：押出発泡ポリスチレンフォーム 文献値を使用（非透湿） |
| 計算方法    | 前進型有限差分法   |
| 計算期間    | 1979年1月1日から2005年12月31日<br>(1975年から4年間の助走計算)  |

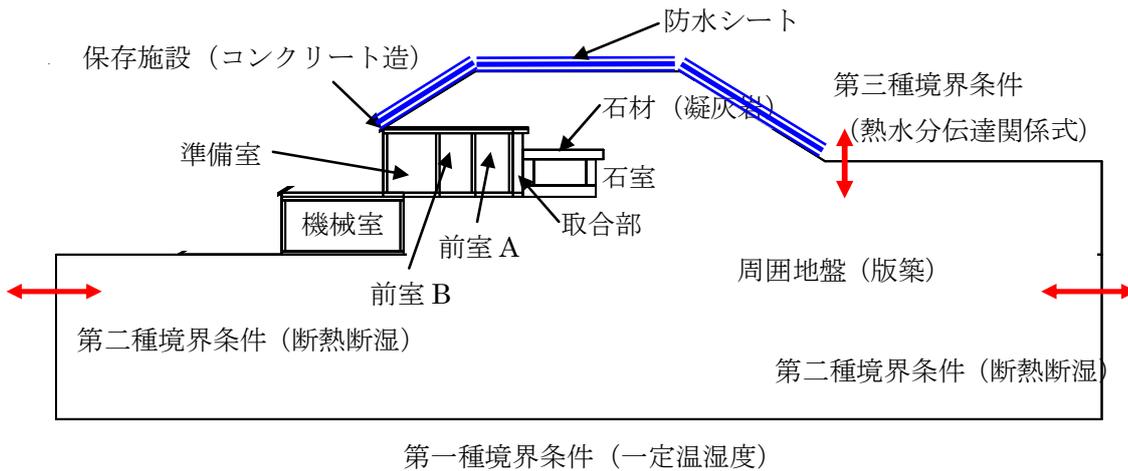


図 1 解析対象（防水シート設置時）

### 3. 冷却パイプへの給水温度に実測値を用いた場合の石室内温度

冷却パイプに供給される冷水の温度に記録値を用い、冷却パイプにより準備室、前室が冷却される状況を想定して、前室、地盤、石室の温湿度を計算した。このモデルでは、保存施設（準備室、前室）の壁体における熱移動を考慮している。但し、石室への入退室は考慮しておらず、次節で検討する。また、ここで用いた冷却パイプのモデル化と妥当性については、付録1を参照のこと。

解析における入力として用いた冷水温度（緑）を前室（青）、地中温度（赤）とともに図2に示す。冷水温度は地中温度に等しくなるように制御することになっているが、地中温度より高温となっている年（○で囲んでいる）が多い。

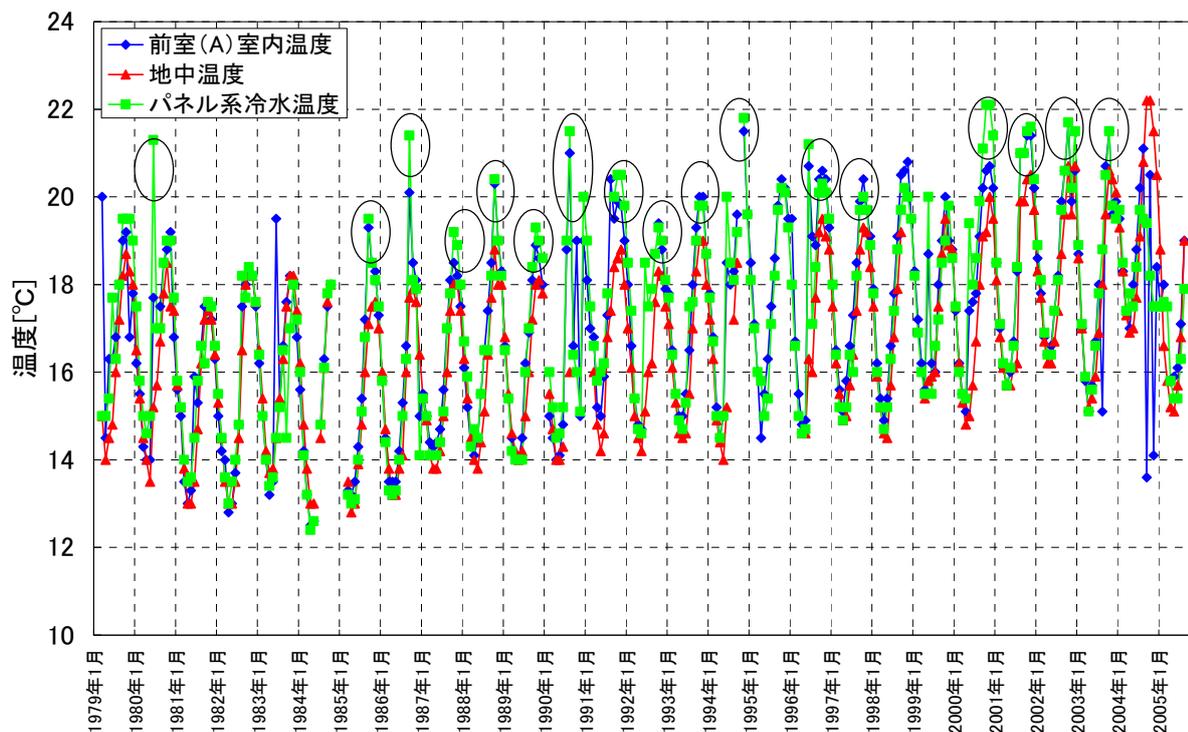


図2 冷水温度、前室温度、地中温度の測定値

解析結果の石室温度（緑）を、実測値（赤丸）とともに図3に示す。基準解析値として示した曲線（青）は、前室温度が石室室温（計算値）に等しくなるように制御されるとして計算した結果（2009年9月1日発表の解析結果）である。1979年から2004年に至る長期の温度変化傾向を良く表しており、定量的にも実測値との一致は良い。ただ、2002～2004年は、測定値の方が高い。2003年の竹林伐採、2003～2004年の防水シート設置はすでに考慮した結果であり、他の要因が関係していると考えられる。

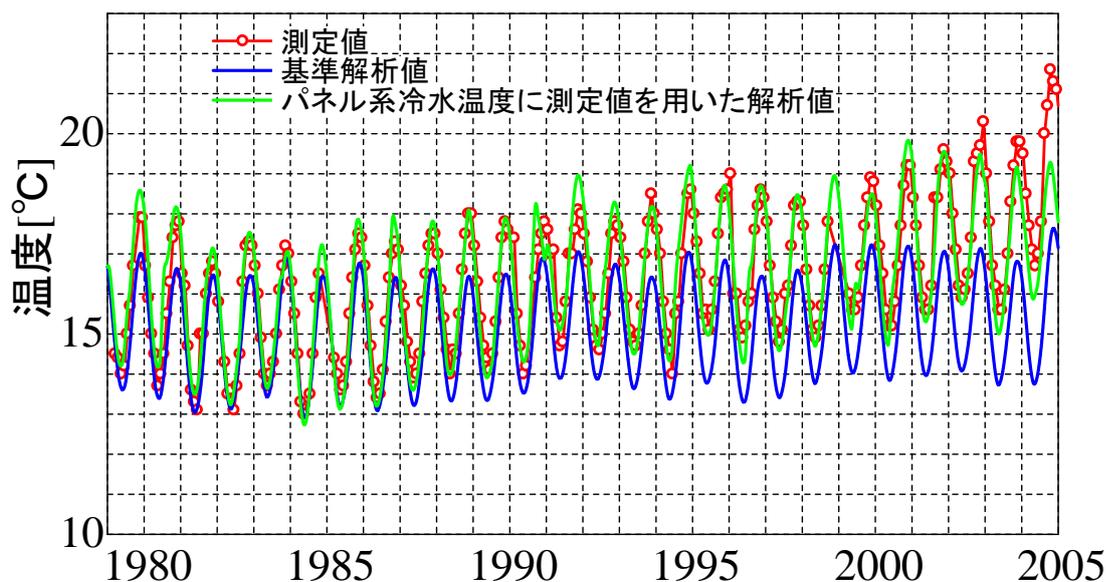


図3 1979～2004年の石室温度の変化：実測値と冷水温度測定値を用いた計算値との比較

#### 4. 石室への入退室の影響

##### 4.1 石室への入退室前後の石室内の温湿度変化（2006年）

2006年の石室解体直前で、石室への入室があった際の石室温度の測定値を図4に示す。（入室時はセンサーによる石室内温湿度の測定が行われていないため、石室入室時のデータは省略している。）これは7月13日に約4時間の入室があった場合の結果である。入室直前は10℃であったが、退室直後には10.5℃に上昇している。退室後4時間程度で10.3℃程度まで低下するが、温度上昇の影響は1週間程度継続する。

このような入退室が5日間続いた場合の温度を図5に、絶対湿度を図6に示す。前日の温度上昇、絶対湿度上昇の影響が加算されていく様子が見て取れる。

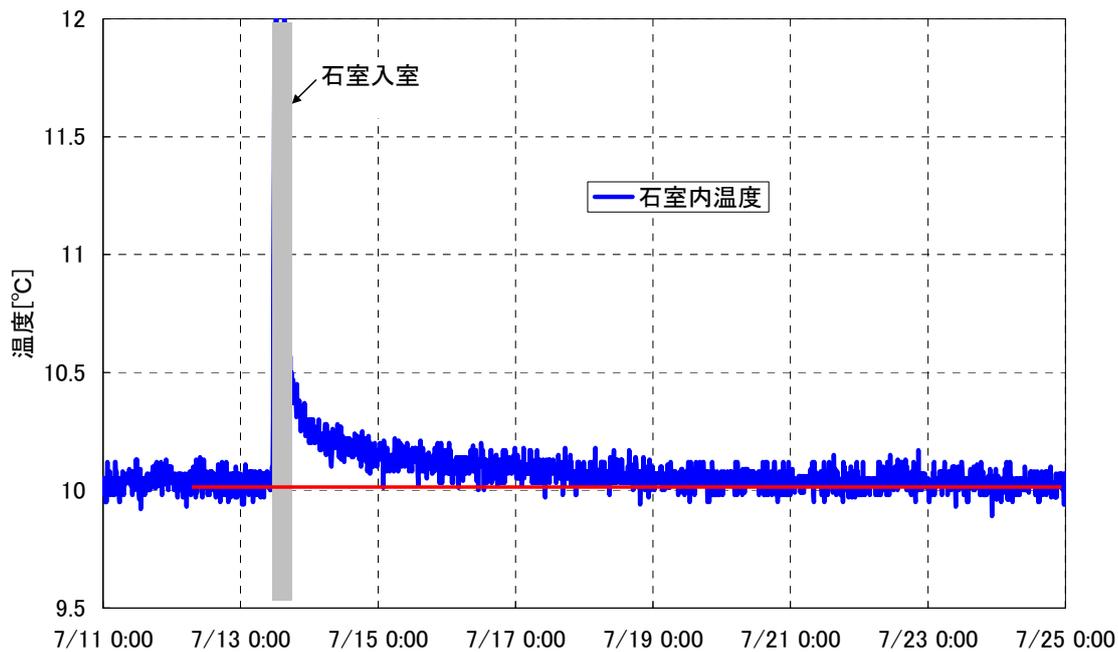


図4 2006年解体前の石室入室前後の石室温度（2006/07/11-25）

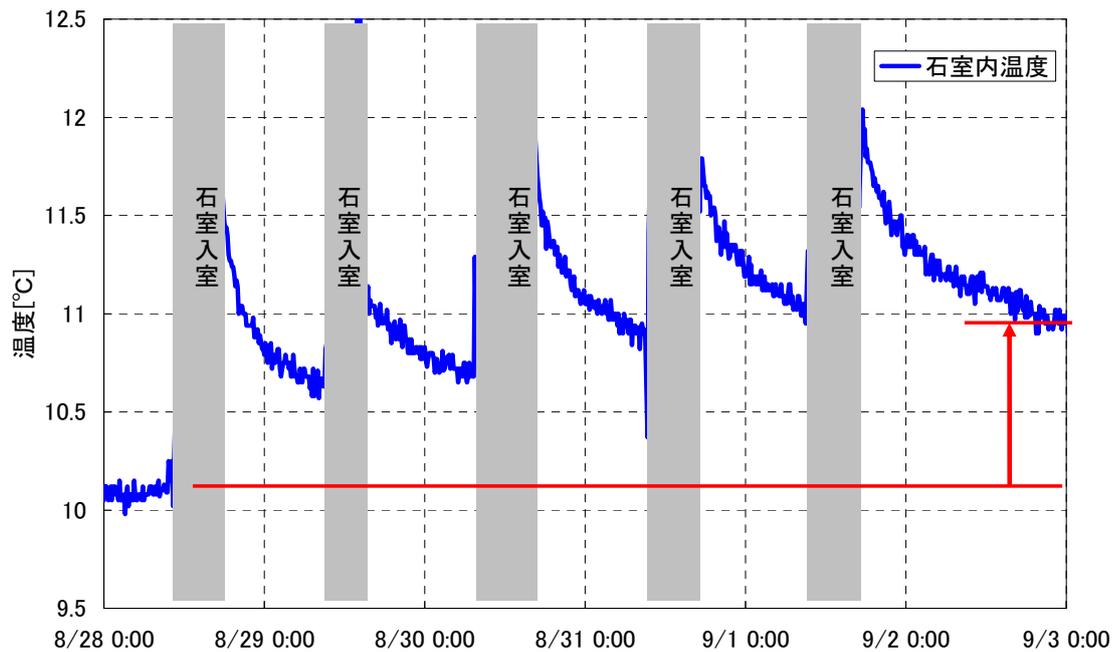


図5 2006年解体前の石室入室前後の石室温度（2006/08/28-9/3）

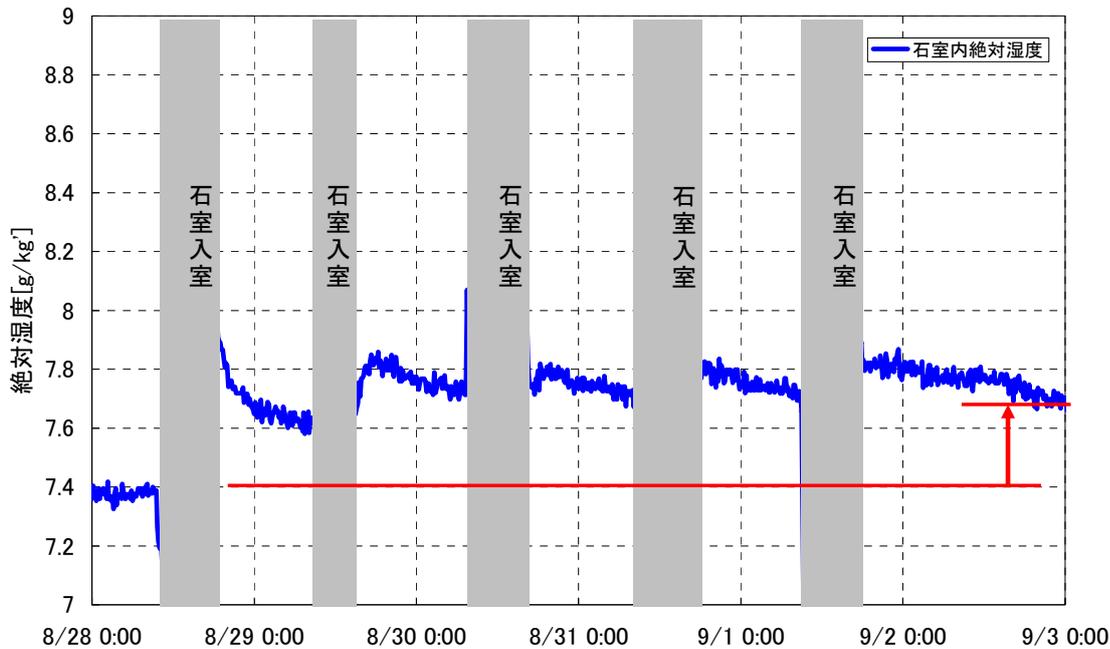


図6 2006年解体前の石室入室前後の石室内絶対湿度 (2006/08/28-9/3)

#### 4.2 石室への入退室を考慮した場合の石室内温湿度の解析

石室への入退室を考慮した解析を、以下の条件の下に行った。

- ・冷水の送水は連続的に行い、銅管表面温度を送水温度と一致するものとする。  
ただし、冷水温度は取合部下の地盤温度に一致するように制御する。
- ・入室時は、表2のスケジュールと条件に従う。ただし、一日の入室回数については、修理時は回数が分かっている時はその数値を、不明なときには3回とした。調査・点検時は2回とした。

結果を図7に示す。石室入室を考慮すると(緑)、修理で石室入室が多い時期(1979~81年)や、2001年以降の点検の多い時期は、石室の温度は基準解析による結果(青)より上昇している。

表2 石室入室時の条件<sup>iii</sup>

|      |         | 閉室 | 一日の最初の石室入室前30分 および<br>一日の最後の石室退室後30分                                  | 入室(修復作業時)<br>(1回の入室時間45分)       | 入室(調査・点検時)<br>(1回の入室時間45分)      | 休憩時間(通常1時間、<br>昼休み2時間) |
|------|---------|----|---|---------------------------------|---------------------------------|------------------------|
| 石室   | 熱発生     | なし | なし  | 照明(10W)<br>十人2人発熱(141.2W)       | 照明(10W)<br>十人1人発熱(70.6W)        | なし                     |
|      | 水分発生    | なし | なし  | 修復水分(10g/h)<br>十人2人発湿(139.4g/h) | 消毒水分(10g/h)<br>十人1人発湿(139.4g/h) | なし                     |
| 取合部  | 熱発生     | なし | なし  | 人1人発熱(70.6W)                    | 人1人発熱(70.6W)                    | なし                     |
|      | 水分発生    | なし | なし  | 人1人発湿(69.7g/h)                  | 人1人発湿(69.7g/h)                  | なし                     |
| 前室A  | 熱発生     | なし | 照明(20W)   | 照明(20W)                         | 照明(20W)                         | なし                     |
|      | 水分発生    | なし | なし  | なし                              | なし                              | なし                     |
| 前室B  | 熱発生     | なし | 照明(20W)+人1人発熱(70.6W)  | 照明(20W)                         | 照明(20W)                         | なし                     |
|      | 水分発生    | なし | 人1人発湿(69.7g/h)  | なし                              | なし                              | なし                     |
| 準備室  | 熱発生     | なし | 照明(20W)   | 照明(20W)                         | 照明(20W)                         | なし                     |
|      | 水分発生    | なし | なし  | なし                              | なし                              | なし                     |
| 開口条件 | 石室と取合部  | 閉鎖 | 開放、石室から60m <sup>3</sup> /hの<br>前室Bへの排気<br>取合部から同量の給気<br>(空気清浄機の設置を想定) | 開放、石室給気は同左                      | 開放、石室給気は同左                      | 開放、石室給気は同左             |
|      | 取合部と前室A | 閉鎖 | 開放  | 開放                              | 開放                              | 開放                     |
|      | 前室Aと前室B | 閉鎖 | 開放  | 開放                              | 開放                              | 開放                     |
|      | 前室Bと準備室 | 閉鎖 | 閉鎖  | 閉鎖                              | 閉鎖                              | 閉鎖                     |
| 空調条件 | 運転      | 停止 | 運転  | 運転                              | 運転                              | 運転                     |
|      | 給気温度    | —  | 取合部下の地盤温度   | 同左                              | 同左                              | 同左                     |
|      | 給気湿度    | —  | 95%RH   | 同左                              | 同左                              | 同左                     |
|      | 給気場所    | —  | 前室A、前室B、準備室   | 同左                              | 同左                              | 同左                     |
|      | 給気量     | —  | 290m <sup>3</sup> /hを前室A:前室B:準備室で、<br>それぞれ5:3:2の配分で給気                 | 同左                              | 同左                              | 同左                     |

<sup>ii</sup> 昭和女子大学 増田勝彦教授(当時:東京文化財研究所)の高松塚古墳壁画修理作業日誌(昭和51~55年)を参考にした。

<sup>iii</sup> 文献2)と昭和女子大学 増田勝彦教授(当時:東京文化財研究所)から伺った当時の状況を参考にした。

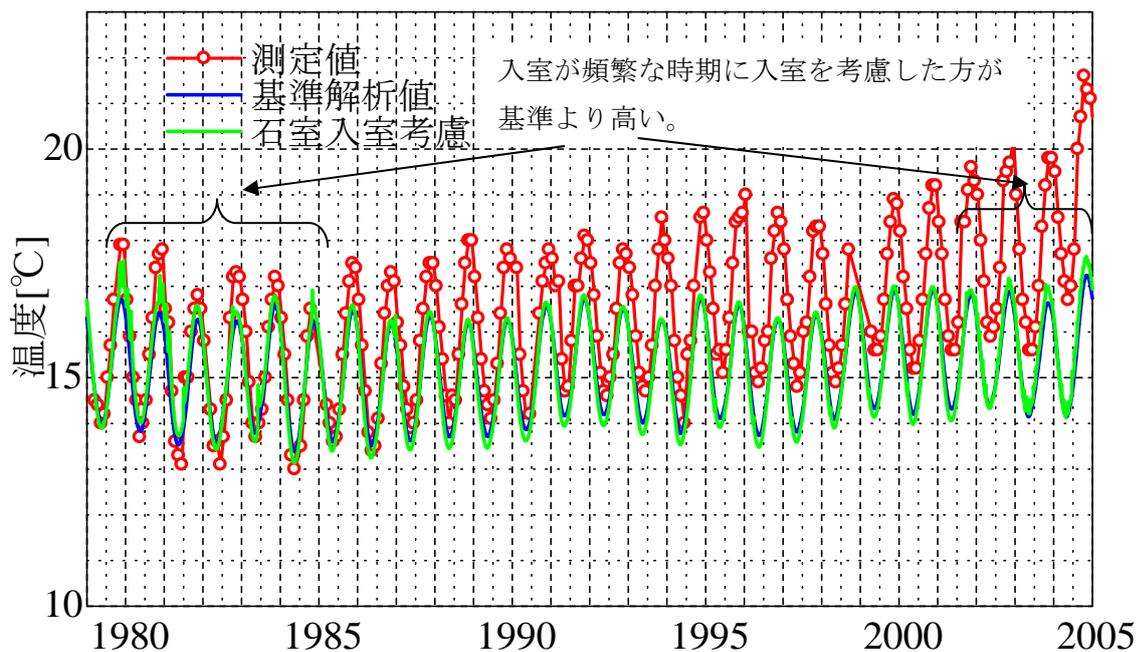


図7 入室を考慮した場合の石室温度と測定値

### 5. 機械室の温度が石室内温湿度に及ぼす影響

機械室の温度計測値の例を図8に示す。石室解体前に地盤を冷却し石室を10℃に冷却していた時期の1年間のみ記録であるが、年間を通して25～30℃と地盤温度に比して高温となっている。地盤を10℃に冷却すると同時に、前室からも10℃に冷却を行うという、それ以前より冷却量を大きく増加させた条件下における結果であり、過去の状態がこのような高温環境となっていたか不明であるが、傾向として地盤を高温に向かわせたことは確かであろう。これについては、今後詳細に検討する必要がある。

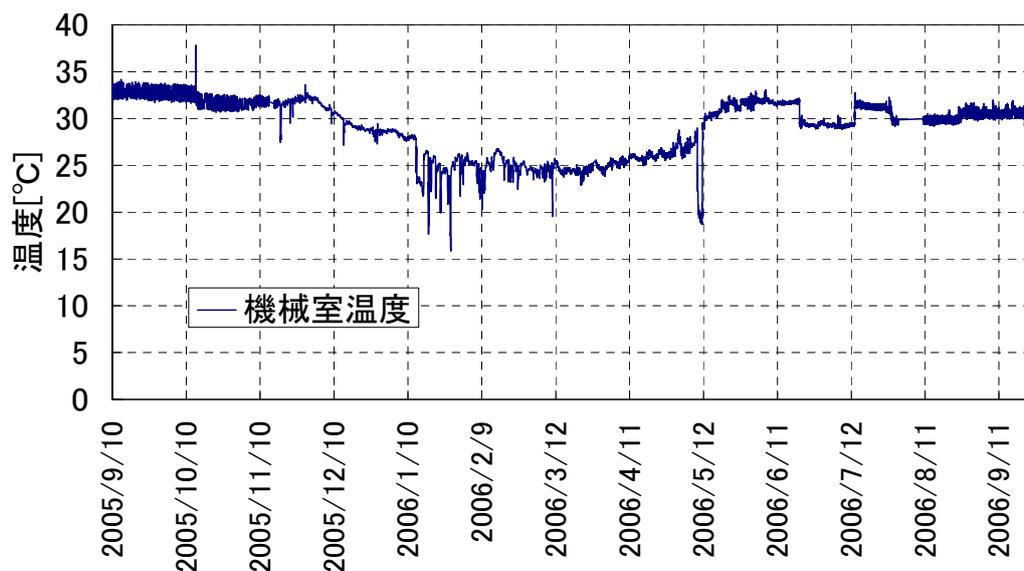


図8 石室解体前の機械室温度(2005/9/12～2006/9/26)

## 6. 保存施設の躯体における熱移動が石室内温湿度に及ぼす影響

1979年から2005年の準備室、前室、石室温度の計測値を図9に示すが、準備室の温度は年間を通して前室温度より高い。これには、準備室南面に当たる日射および準備室下の機械室温度が高かったことの影響が考えられる。準備室南面には植生が無く降雨の影響も小さいため、日射により年間を通して高温になっていた可能性は高いと考えられる。なお、これまでの解析結果においては、以上の保存施設躯体を通しての熱移動は考慮されている。

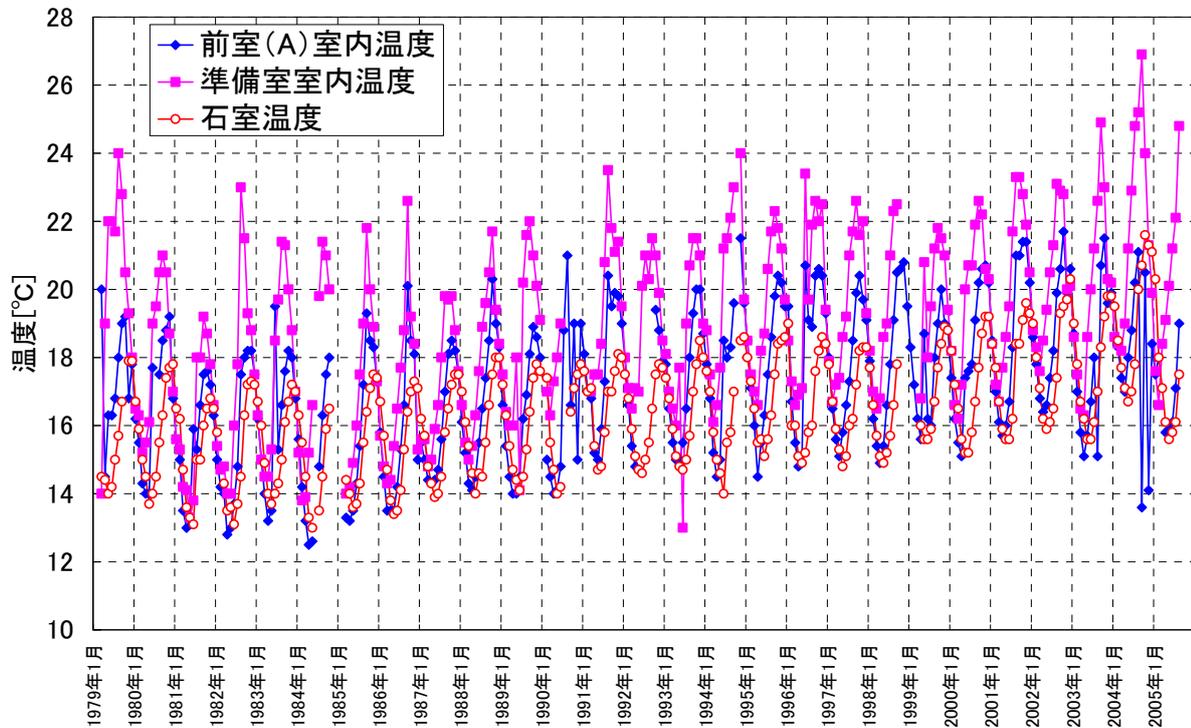


図9 準備室、前室、石室温度の測定値

## 7. 石室内温湿度に及ぼす影響（まとめ）

これまでに行った解析により得られた主な結果を以下に列挙する。

### 7.1 古墳発掘から保存施設の稼働までの期間における仮保護施設の影響

- 1) 発掘前は、石室内相対湿度は年間を通じて100%近くであり、石室内表面も同様と考えられる。
- 2) 発掘後の仮保護施設が設けられた状況で、石室内温度は発掘前より振幅がやや大きくなり、湿度は100%に近い値から若干低下したと考えられる。
- 3) 発掘後の仮保護施設が設けられた状況で、石室の南壁とその近くの天井付近で夏期に室内側表面の湿度が100%に近い値から低下した可能性がある。
- 4) 調査時以外に設置された石室南側の覆土は、湿度低下を抑制する効果があったと考えられる。

### 7.2 保存施設の稼働から石室解体前までの期間における気象条件の影響

- 1) 保存施設稼働後の約30年間の気象条件の変化は、この間の石室内の温度上昇の主要な原因の一つといえるが、それだけでは温度上昇を説明することはできない。

### 7.3 墳丘の被覆状況の変化が石室内温度変動に与える影響

- 1) 2004 年末頃の石室内の温度上昇の要因の一つとして、2003 年 9 月に、竹林を伐採し防水シートを設置したことが影響している可能性が高い。
- 2) 2004 年 9 月の仮設覆屋の設置は、防水シート設置のみの状態を継続するより石室内の温度を低くしたと考えられる。
- 3) 保存施設稼働時の（年）平均的な石室の温度上昇は、気象条件の影響や被覆条件の変化だけでは十分説明できない。

### 7.4 送水冷水温度の影響

- 1) 冷水パイプへの送水温度測定値を用いた解析による石室温度は、2002～2004 年を除いて測定値とかなり良く一致する。すなわち、保存施設稼働後の約 30 年間の石室温度の上昇は、この間の気象条件の変化と冷水温度の変化を考慮すると大略説明できる。
- 2) 2002～2004 年の石室温度の急激な上昇は、以上の解析でも十分説明できない。

### 7.5 入室の影響

- 1) 石室温度、入室人数とカビの繁殖との間には相関がある可能性がある（付録 2）。
- 2) 連続した入室があった後には、石室温度はやや高めに推移する。石室の高温化の要因の一つと考えられる。

### 7.6 機械室温度の影響

- 1) 冷却開始後一年間の測定値からの判断であるが、機械室の温度は年間を通して高い。それが過去 30 年間近くについても同様であったとすると、長期間にわたる影響で準備室に近い地盤の温度が上昇した可能性がある。今後検討が必要である。
- 2) 準備室の高温化にも機械室室温が影響している可能性は考えられる。

### 7.7 保存施設の躯体における熱移動の影響

- 1) 準備室の温度は年間を通して前室より高温となっており、これには準備室南面に当たる日射が大きく影響していると考えられる。従って、保存施設の躯体を通しての熱移動が、保存施設の温熱環境に影響していると考えられる。
- 2) これまでの解析において保存施設躯体を通しての熱移動は考慮されているが、躯体物性値の検討や 3 次元のモデルによる詳細な解析が必要と考えられる。

以上の解析においては、可能な限り測定値、記録、物性測定値などを用いたが、推定した事項も多い。従って、今回の結果はそれらの状況を考慮した上で、現時点でその可能性がもっとも高いと考えられる結果（の一つ）を示したものである。

## 参考文献

- 1) 石崎武志：過去の高松塚古墳石室内の温湿度について、高松塚古墳壁画劣化原因調査検討会、第4回、資料4(2008)
- 2) 文化庁：国宝高松塚古墳壁画 一保存と修理一、第一法規出版(1987)
- 3) 小椋大輔、銚井修一、李永輝、石崎武志、三浦定俊：過去の高松塚古墳石室内の温湿度変動とその要因について、高松塚古墳壁画劣化原因調査検討会 第5回、資料5、(2008.12.11)
- 4) 小椋大輔、銚井修一、李永輝、石崎武志、三浦定俊：過去の高松塚古墳石室内の温湿度変動解析 一保存施設稼働時の気象条件の影響と、発掘直後の仮保護施設の影響一、保存科学、第48号、pp.1-11(2009)
- 5) 小椋大輔、銚井修一、石崎武志：墳丘部表面の植生等の変化が石室内温度変動に与えた影響の解析、高松塚古墳壁画劣化原因調査検討会、第10回、資料3-2、(2009.9.1)
- 6) 文化庁：国宝高松塚古墳壁画保存管理の経緯(昭和47年～平成18年9月)、文化庁HP [http://www.bunka.go.jp/takamatsu\\_kitora/hekiga\\_hozonkanri.html](http://www.bunka.go.jp/takamatsu_kitora/hekiga_hozonkanri.html)
- 7) 文化庁：高松塚古墳壁画劣化原因調査検討会(第3回)資料、資料3-2(2009)
- 8) 木川りか・佐野千絵・石崎武志・三浦定俊：高松塚古墳の微生物対策の経緯と現状、保存科学、第45号、pp.33-58(2006)
- 9) 高鳥浩介：高松塚古墳から採取されたカビ・酵母の発育温度試験、国宝高松塚壁画恒久対策検討会(第4回)資料、資料2-1(2005)
- 10) 阿部恵子：高松塚古墳から採取されたカビ・酵母の発育調査、国宝高松塚壁画恒久対策検討会(第4回)資料、資料2-2(2005)
- 11) 高鳥浩介：高松塚古墳石室から分離されたカビの生理試験、高松塚古墳壁画劣化原因調査検討会(第10回)資料、資料5-3(2009)

## 付録1 冷却パイプを用いた前室、準備室の制御

前室、準備室の温度を、冷却パイプ（銅管パイプ）を使って温度制御する場合の解析方法について、以下で説明する。冷却パイプは以下のようにモデル化した。

- ・冷却パイプの表面温度は制御温度に等しく、熱伝達により部屋の空気に熱が移動する。

表 A-1 に示すように冷却パイプの表面積は、銅管の外径(B1:28.58mm)と各室における管の長さ(図面、写真から算出) から計算した。熱伝達率の基準値を  $9.3[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$  とする。

表 A-1 銅管表面積（基準値）

|         | 銅管表面積 $[\text{m}^2]$ |
|---------|----------------------|
| 前室A,B共通 | 7.1                  |
| 準備室     | 10.6                 |

以上の条件で、冷却パイプの温度を石室温度に等しくなるように制御する。前室、準備室の室温を、以下の2ケースについて計算した。ケース1は管表面積、熱伝達率を上述の基準値とした計算、ケース2は管表面積、熱伝達率ともに基準値の1/2倍とした場合である。ただし、いずれも石室への入室は無いものとしている。

図 A-1 に、以上の解析結果を、前室を石室温度と等しくなるように制御した場合の結果と併せて示す。前室を石室温度と等しくなるように制御した場合の結果との差はほとんどなく、冷却パイプにより、前室の温度が十分制御できている。表面積を1/2とし熱伝達率を1/2としたケース2の場合には、年間の振幅が少し大きくなるが、ほぼ同様の結果となっている。冷却パイプにより石室温度は十分制御できていることが分かる。

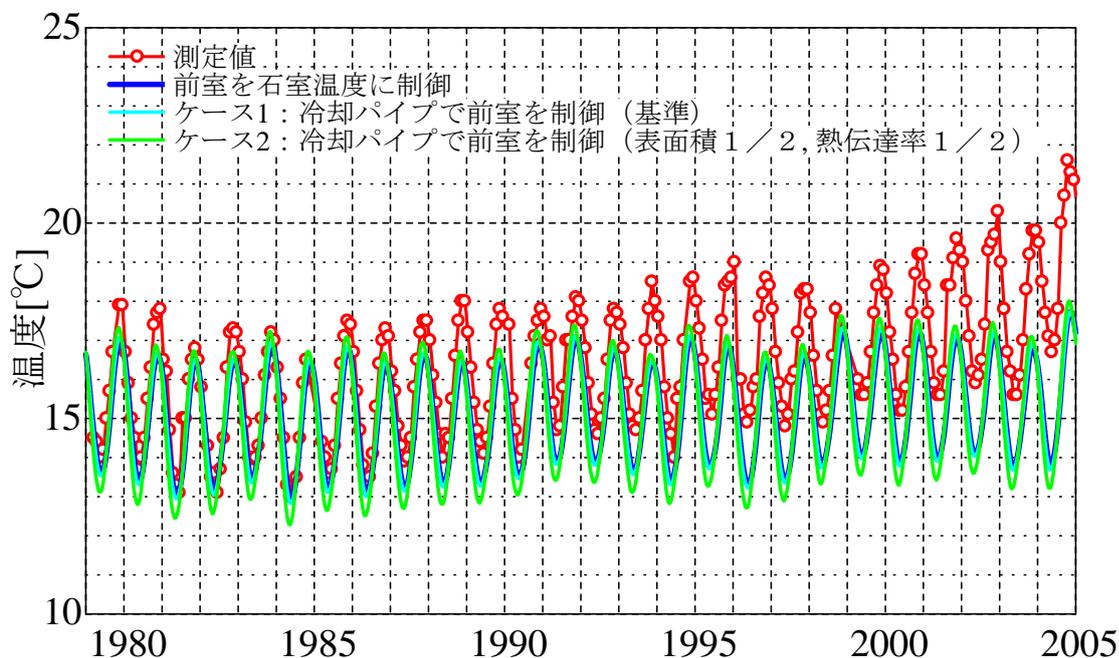
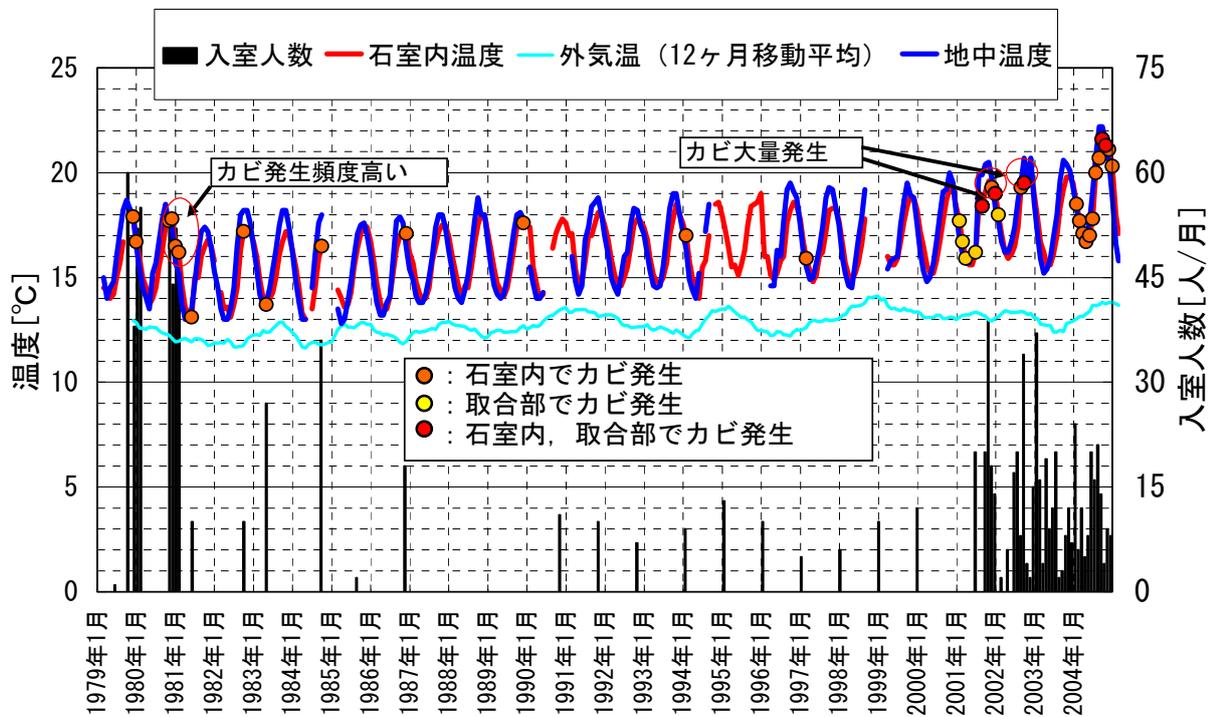


図 A-1 冷却パイプで前室、準備室を制御した場合の石室温度

## 付録2 カビ発生状況と入室状況、石室内温度の状況

カビ発生状況、石室温度、石室入室状況を1979年から2005年まで時系列で検討した。図A-2に、石室温度、カビ発生状況、石室入室状況を示す。なお、石室及び取合部におけるカビ発生状況は、国宝高松塚古墳壁画保存管理の経緯（昭和47年～平成18年9月）（文化庁HP）<sup>6)</sup>から読み取り、カビの点検を行った時点に○印でプロットしている。石室入室状況は、高松塚古墳壁画劣化原因調査検討会（第3回）資料3-2<sup>7)</sup>を用いた。

1979～1981の入室が多い時期（修理時期）に石室温度が高くカビの発生頻度が高いこと、また2001年以降の入室が多く石室温度が高い時期にカビの大量発生が起きている。2001年以降については、木川ら<sup>8)</sup>により石室温度上昇とカビ発生の頻度の関係が指摘されており、さらに高松塚古墳のカビの成長と温度の関係が、高鳥、阿部による発育温度試験により検討され、20℃近傍で成長速度が大きいという結果が示されている<sup>9-11)</sup>。また石室入室による温度上昇は第4章で示している通りである。これらは相関がある可能性が高いと考えられる。



図A-2 カビ発生状況と入室状況、石室内温度