

キトラ古墳保護覆屋内の環境について — 温度・湿度と炭酸ガス濃度 —

佐野 千絵・犬塚 将英・吉田 直人・森井 順之
加藤 雅人・村上 隆・高妻 洋成・降幡 順子
肥塚 隆保・石崎 武志・三浦 定俊

1. はじめに

キトラ古墳は、高松塚古墳（奈良県高市郡明日香村）の南約1.2kmの場所にある二段築成の墳丘をもつ円墳で、下段の径は13.8m、上段径は9.4m、高さは3.3mと高松塚古墳よりいくらか小さい古墳である。墳丘内部には凝灰岩切石を組み合わせた石室があり、その大きさはほぼ高松塚古墳石室と同じ大きさの幅約1m長さ約2.6m高さ約1.3mである。天井部には約17cmのくり込みがあるため、石室内に入るとほんのわずかではあるが高松塚古墳よりも広く感じられる。その築造形式から7世紀末から8世紀初に作られたと推定されている。

1983年のファイバースコープによる内部探査（飛鳥古京顕彰会，NHK）で北壁に玄武が描かれていることが確認され、98年の小型カメラによる写真撮影（明日香村，NHK）など数回にわたる調査の結果、石室内には天井に天文図、壁面には古代中国の方位の守護神獣四神、青竜・白虎・玄武・朱雀があることがわかっていった。しかし漆喰面が石面から浮き上がっており壁面が脱落することも予想されたため、緊急に保存処置が必要と判断した文化庁は2001年7月、『特別史跡キトラ古墳の保存・活用等に関する調査研究委員会』（文化庁文化財部記念物課，平成13年度～，文化庁ホームページ<http://www.bunka.go.jp>から入り「文化財の保護」項目の中に各議事および関係資料掲載あり）を開催し、現在も保存活動の方向を模索している。

キトラ古墳壁画の調査・壁画処置については、一括して独立行政法人文化財研究所が受託しており、奈良は主に発掘（藤原宮蹟発掘調査部）と保存処置（埋蔵文化財センター）を、東京は主に保存管理（保存科学部）と壁画処置（修復技術部）を担当し、東京・奈良の両調整官の下、関係研究者を集めた検討会を開催して手法の適否や手順について検討している。

本報告では、平成16～17年度の発掘準備から壁画の取り外しに至る間の、保護施設覆屋内の環境制御の方針から実際の管理状況を報告する。

2. 経緯

平成13年には石室内の温湿度調査、二酸化炭素濃度調査、ガイドパイプから導入する小型デジタルカメラによる内視調査、石室位置の確認調査などの予備調査が奈良文化財研究所の担当で行われた。その後、キトラ調査研究委員会では保存施設の設計が検討された。

古墳壁画の保存においては、墳丘土→石材→漆喰への水分移動が起らないように制御することが重要である。これは、水とともに移動してくる塩分が表面で結晶化して壁画を毀損する塩類風化を抑制するためである。また、保存処置にあたって乾燥した外気が石室内に入り込んだ場合、漆喰表面が乾燥収縮して壁画が剥落するおそれがある。漆喰の含水率は相対湿度90%台で急激に変化するため、石室に隣接する空間の相対湿度は開封時には90%を下回らないように制御できなければならない。そのため特別史跡キトラ古墳仮設保護覆屋施設では、現地での発掘と保存処理を行う施設という設定で、石室に隣接する区画について、温度を任意に調整で

き相対湿度を100%に保つことのできるよう空調設計された（設計：空間文化開発機構，RC造一部S造 地下1階，地上1階，延床面積約152m²，工期：2003年2月～2003年3月，受注：鹿島建設株）。

図1に保存施設の平面図および立面概念図を，写真1に前室から見こんだ石室を示す。保護覆屋施設は，大きく分けて4つの空間で構成されている。一般大気から切り離すための風除室を経て準備室に入り，ここでクリーンルーム用の使い捨て防塵作業衣・ラテックス手袋・防塵マスクを装着する。その後，シャワールームを経由して作業室に入り，保存処置用の道具・器材を整える。この2室の空調はユニット式エアコンで温調しかできないが，前室等に対して外界からの熱負荷を小さくすることのできる空間である。通路を経由して前室，小前室（高松塚古墳壁画保存施設の取り合い部にあたる）とつながるが，これらの空間は撥水処置したコンクリートで囲まれ内装はない。小前室は名前と異なり前室よりも大きな空間となっているが，これは発掘に伴う搬出作業を速やかに行うためである。小前室には発掘前の遺構が露出しており，多量の土壌で空間が占められている。これら土壌はクリーンな環境を造るには不利であるが，調湿能力は高く，小前室内相対湿度変動の抑制には有効である。発掘終了後の壁画処置時には，小前室はクリーンな環境に保ちやすい内装仕上げの2室に分割される予定であった。

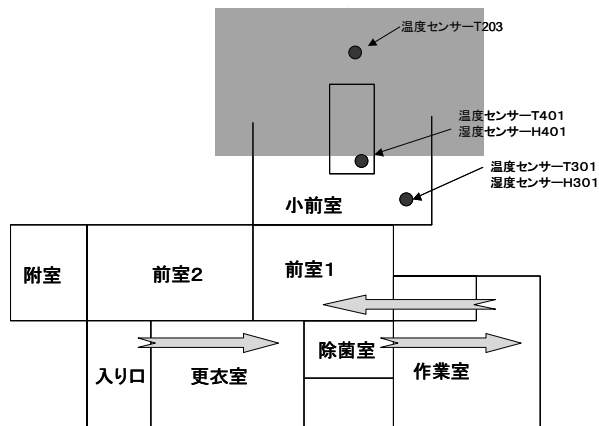


図1 キトラ古墳壁画保護覆屋



写真1 小前室より石室を望む

小前室の温度調節は、パネル系と呼ばれる温度調整ユニットと、空調系と呼ばれる100%に加湿した空気を小前室に送り込む装置に分かれている。コイル系は設定温度に調整した冷温水を銅製パイプに循環させるユニットで、小前室に一部の石材が露出している石室を地温に等しく制御する目的で設置された。24時間運転で稼働しても、厳寒期、盛夏には外界からの熱負荷をうち消すほどの能力はなく、小前室の温度は実際には外界の影響を受ける。このコイル系は小前室を取り囲む壁と前室、通路にも設置されている。一方、空調系は保存処置に伴う作業からの発熱や炭酸ガス増加を抑える目的で設置され、外気を100%相対湿度に調整してHEPAフィルターを通して小前室に送り込む。温度設定は手動で自由に変更できる。100%加湿は、目的の温度に調整された水を発泡素材に含ませ、この中を空気を通過させて作り出している。小前室にはリターンダクトもあり、小前室からの汚染物質を除去するためのHEPAフィルターを組み込み、空調機本体の汚染を防いでいる。また小前室を前室に対して正圧にし、汚染物質の室内流入を避けるよう配慮されている。室内の温度調節を、空気に含ませた水分からの熱移動に依存しているため、温調は単独では行えない。空調系はこれまで述べたように、作業時のみ稼働させることを計画して設計されている。

今後の調査・処置活動を支える重要な設備として、環境ステーションも設置された。稼働開始は2003年11月末、測定項目は石室内の温度、相対湿度、炭酸ガス濃度、小前室内の温度、相対湿度、炭酸ガス濃度、地中温度、墳丘の異なった場所や深さの地中温度、土壌水分量などで、その他、風向、風速、雨量、日照量なども墳丘上で測定している(図2)。測定したデータは1時間ごとに文化財研究所(東京、奈良)と文化庁に転送され、常時監視できる。

保存活動には多数の研究者・作業者が関わり、その多数の関係者間に速やかに、また確実に情報を伝達しなければ長期プロジェクトは立ちゆかない。2004年8月の取り外し作業開始以降、作業室内コンピュータに当日の作業記録を打ち込み、保存活動に係わる多数の関係者間での情報を共有するシステムを取っている。

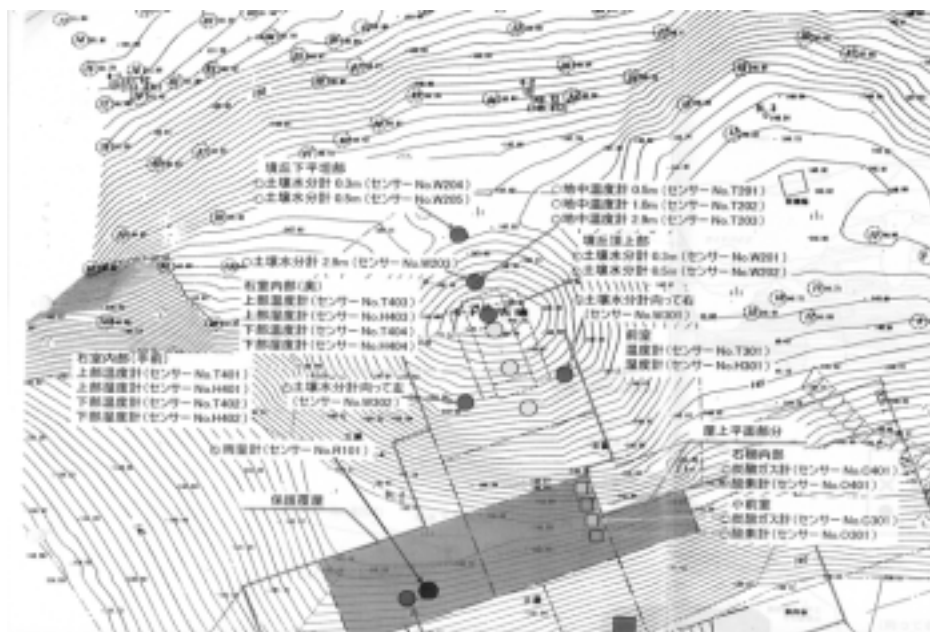


図2 キトラ古墳 センサー設置場所

3. 温度湿度・炭酸ガス濃度の制御状況

図3に発掘前の石室内の月平均温度湿度変化を示す。これは過去の調査で石室を埋め戻す際に石室内へつながらるガイドパイプを埋め、ここにセンサーを設置して計測したものであり、2004年1月の発掘とともに撤去された。図4、5に2004年発掘以降の環境ステーション出力を基にした月平均温度、湿度を示す。なお、小前室温度、湿度測定開始は2004年6月3日、石室内の測定開始は2004年6月17日である。

キトラ古墳石室内はすでに報告されている通り、図3～4に見られるように、外気温の動きに対して約2ヶ月の遅れをもって追従し、2004年発掘以降もその点には変化はない。もっとも深く石室北側近傍に埋設された地温測定用センサーT203出力を見ると、2004年秋には20℃を越えていたのに対して2005年秋には20℃を下回り、猛暑であった2004年夏の影響が石室内環境に大きな影響を及ぼすおそれがあったことが窺える。全体的な動きとして2004年当初から6月頃までは石室近傍の発掘作業、その後は、壁面の取り外し作業があったために、石室内の湿度に乱れが生じたが、作業が一段落した後は空調を安定して運転できたので、小前室の湿度も90%以下に下がることはなかった。なお、2005年6月の異常は湿度センサーが壊れたためである。各センサー類は3ヶ月に1度の校正が望ましいが、このような高湿度下での作動は大変不安定であり、特に高分子膜の湿度センサーまでカビが生え、頻繁に清掃、校正が必要であった。温度センサー、湿度センサーは、最終的に2005年11月に交換した。

以下に経時順に、起こった事象ごとの詳細を記述する。

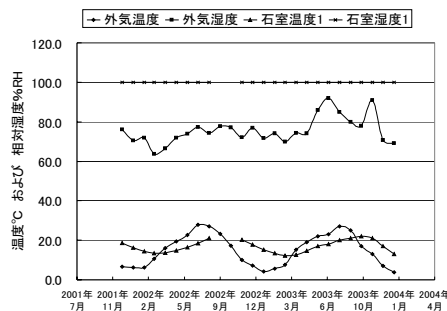


図3 発掘開始前の石室内の温度湿度

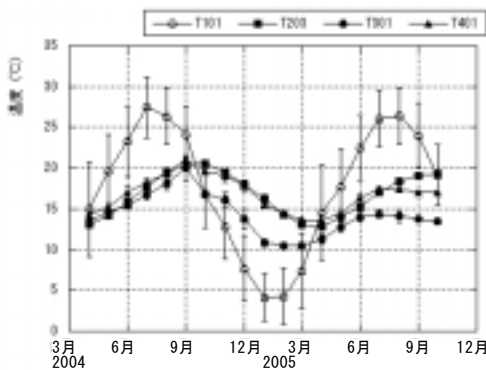


図4 発掘開始後の月平均温度変化
T101：外気 T203：地温
T301：小前室 T401：石室内

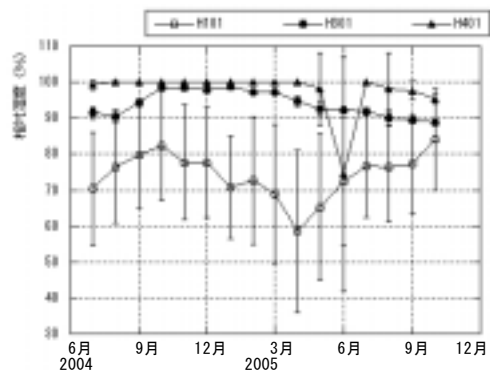


図5 発掘開始後の月平均相対湿度変化
H101：外気 H301：小前室
H401：石室内
2005年6月の異常値はセンサーが壊れたため

3-1. 発掘・壁画取り外しと環境

2004年7月第2週までにはほぼ発掘も終了し、その後は写真記録等の作成作業、壁から浮き上がり崩落の危険性の大きかった白虎（2004年8月4日）、青龍（8月11日）壁画取り外し、と重要な作業が続いた。

発掘においても、小前室内の作業者の人数を5名以内に制限し、また石室内温度が1℃上がるたびに30分間作業を休止し、温度の復位を待ったが、この時点では石室内換気設備はなく、石室内での作業による温度上昇を抑制するために、小前室の空調温度の設定を地温センサーT203出力より低めに設定した。空調系は作業開始と共に稼働させるため、毎朝小前室温度は下がり、その日の作業終了と共に空調系を停止させるので小前室温度が上昇するという現象が見える（図6）。それでも、発掘日程の終了まぎわでは、作業中の温度上昇を抑制しきれず、石室内相対湿度も100%RHではなく、いくらか減少が見られた。



写真2 2004年7月 床面発掘終了時の状況

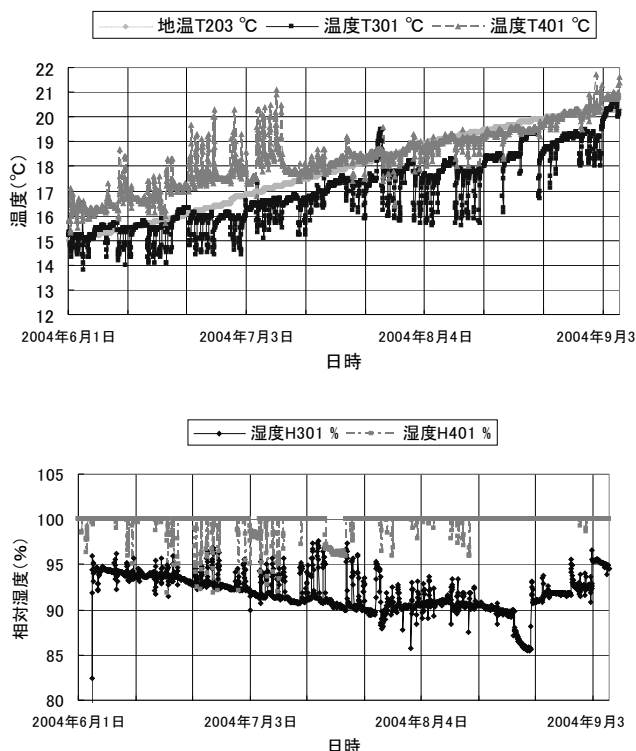


図6 発掘中～白虎（8月4日）、青龍（8月11日）壁画取り外し中の温度湿度制御状況（2004年6～8月） T301/H301：小前室 T401/H401 石室内

石室内の気温は外気温の上昇とともに上がり、2004年9月初めには20℃を超えた。取り外し作業は長時間の石室内作業を要するため、石室内の炭酸ガスを取り除き、また溶剤等からの放散ガスを除去する目的で、前後にHEPAフィルターを組み込んだ活性炭を通して小前室内空気を石室内に強制的に循環させる換気装置（写真3 侵入口右手に見えるダクト）を設置した。しかし、作業者からの放熱を取り除く目的で小前室の空調温度の設定を石室内温度より低めに設定していたために加湿量が不足し、最終的には、小前室の空気が石室内に入って暖められて100%より乾いた空気になり漆喰が乾き気味になった。この乾燥を抑制するため、換気装置の送風ダクトの途中に調湿ボードを用いた加湿装置を取り付け（写真3）、また、作業中のみ空調設定温度を石室内温度から2℃低い設定とし、夜間は地温と等温にして空調を稼働し、加湿量の不足を補った。この結果、小前室の湿度が上がり、また加湿装置の効果もあって石室内の乾燥は起こらなくなり（図7）、状況は改善された。



写真3 加湿装置 (矢印)

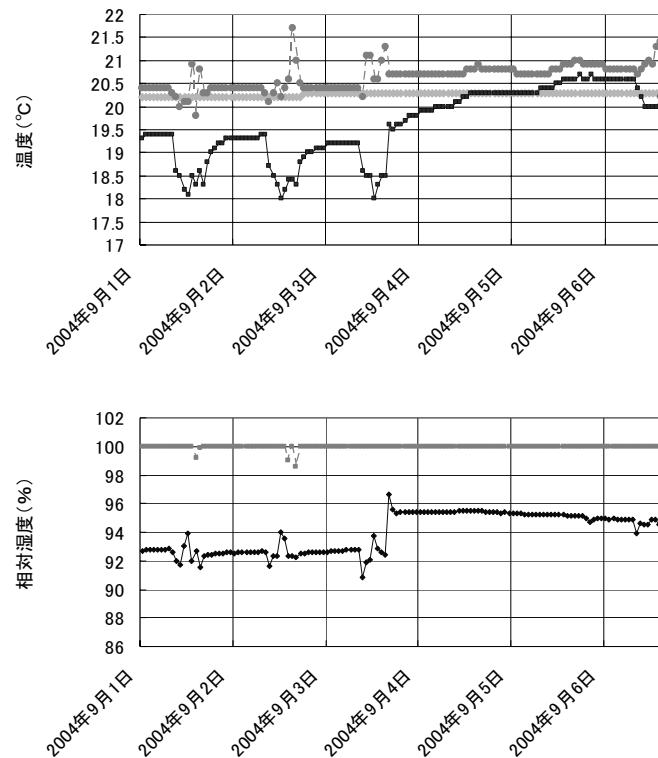


図7 漆喰乾燥抑制のための設定温度変更と加湿
 (上) ■: 小前室温度 T301 ●: 石室内温度 T401 ◇: 地温 T203
 (下) ◆: 小前室湿度 H301 破線: 石室内湿度 H401

3-2. 小前室でのカビ等微生物の繁殖抑制

石室内の気温は秋に一番高くなる（図8）。小前室でのカビ発生が顕著となり、点検時のカビ除去や滅菌作業のほか、ポリシロキサン系樹脂の追加施工など、考えられるあらゆる手法を用いても、22℃にもせまる室温ではカビの繁殖速度が速く、抑制が困難な状況になった。また9月までは、1日の作業後から次の作業開始までに石室内温度がほぼ地温と等温に回復していたが、小前室温度の上昇のためか、地温より石室内温度が高くなる状況が続き、作業のない日にも地温に比較して石室内温度が上昇していく傾向が顕著になった。地温と石室内、小前室間に温度差を作らないことをこれまでの制御方針としていたが、9月24日以降、石室の蓋を閉めた状態で、小前室の空調温度を石室内に対して約4℃下げて空調系を連続運転して、石室内の気温がさらに上がることを防ぐように制御方針を変更した。

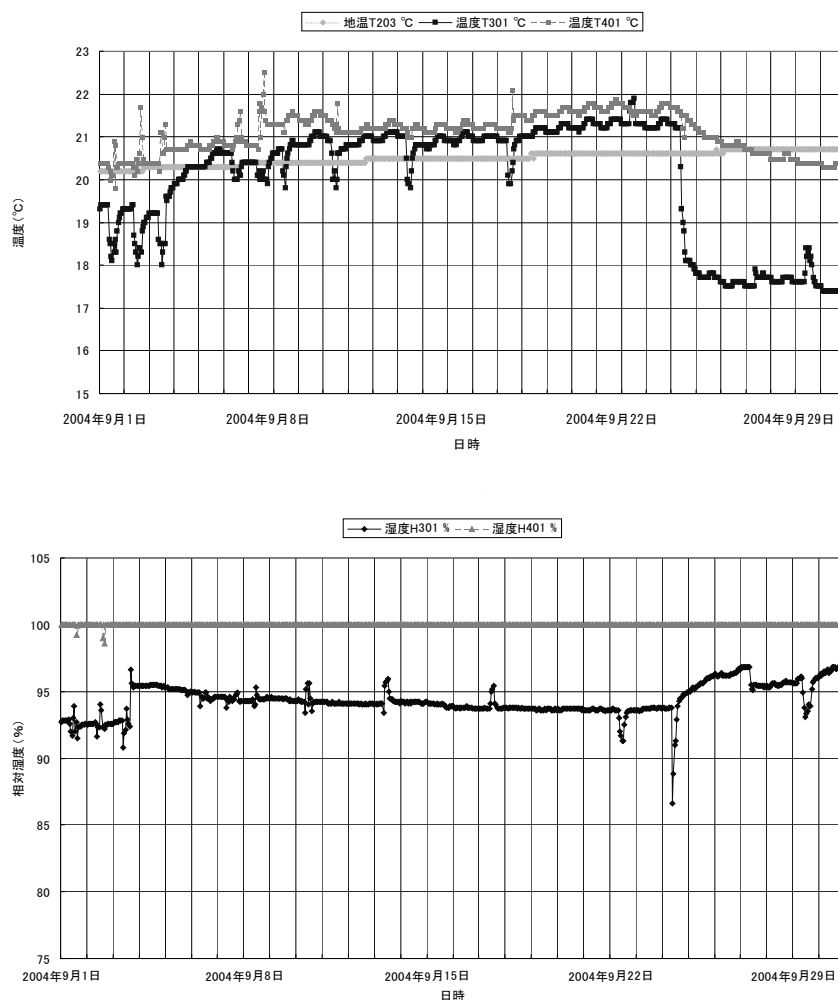


図8 温度制御方針の変更（2004年9月）

(上) ■：小前室温度 T301 □：石室内温度 T401 ◇：地温 T203
 (下) ◆：小前室湿度 H301 △：石室内湿度 H401

図9に、炭酸ガス濃度計測結果を示す。炭酸ガス濃度は、空調系を稼働させるたびに新鮮外気の取り込みが始まり、急激に室内炭酸ガス量が減少する。炭酸ガスの発生源は好氣的生物すべてであり、炭酸ガス濃度は小前室温度と生物活動の活発さに関連があると考えられる。9月24日の温度設定変更以降、急激に炭酸ガス量が低下したことがわかる(図9下の図)。

9月29日には、小前室側の閉塞石や天井石に生えていた剛毛をもつカビの除去を行うため総計6名が入室し、一時的に炭酸ガス濃度の上昇が見られる。なお、2004年7月初に設置した炭酸ガス計測用センサーは、半年程度で感度低下を起し、最終的には2005年3月に石室内センサーが、7月に小前室センサーが壊れた。このような高湿度下での寿命は、長くて1年であるが、炭酸ガス量の測定結果から生物活動の活発さを推定できる可能性があり、その設置は有用であろう。

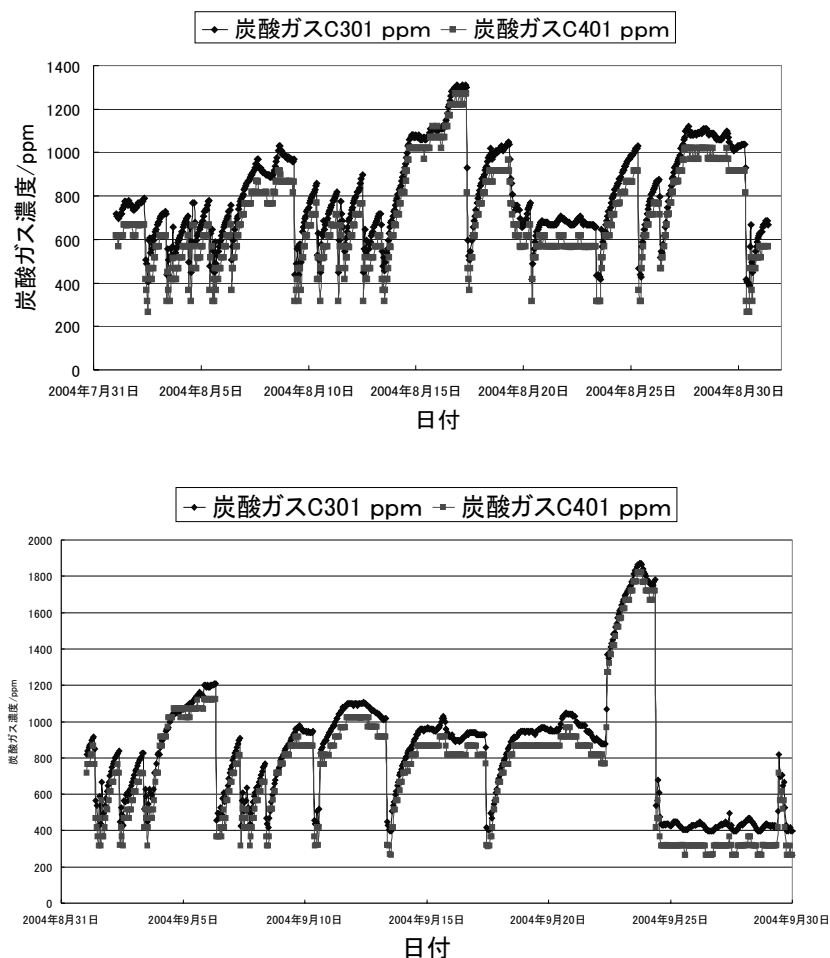


図9 発掘終了～壁画取り外し中の炭酸ガス濃度 (2004年7～9月)
 C301: 小前室 C401: 石室内

3-3. 報道公開日の状況

2004年11月26日に報道各社に対して、石室内を公開した。代表取材が2名、その他15社の入室申込みがあったため、石室内への影響を考え、石室入口よりのぞく形で各3分、小前室に最大5名を1グループとして待機する、各グループの見学終了ごとに15分の入室停止とした。代表取材2名(13:30～)→5社(14:00～)→5社(14:40～)→5社(15:30～)というスケジュールとなった。小前室内相対湿度のわずかな減少と炭酸ガス量の増加はあったが、計測値を見る限り、石室内への影響はあまりなかったと考えている。

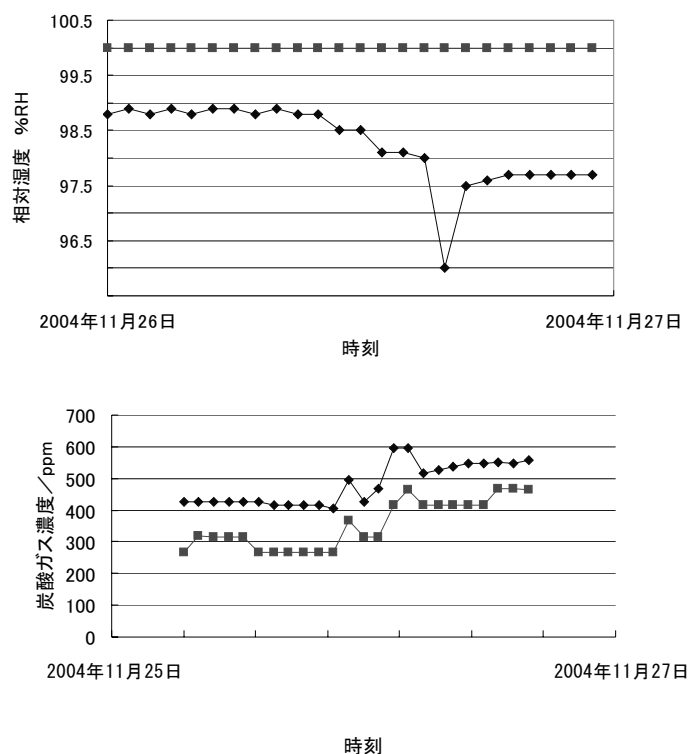


図10 報道公開日(2004年11月26日)の状況
◆:小前室 ■:石室内

3-4. 冬季の結露対策

キトラ古墳保護覆屋は仮設で、傾斜地にすえた形に設置されているため、外気に面した部分と地面に埋設された部分があり、建物としてもともと、温度むらを生じやすい。図11に2005年1月21日に撮影した熱赤外線画像を示すが、図の右(方位の東にあたる)から左(方位の西にあたる)にかけて約0.5℃の温度差が認められる。停止していた空調を当日に動かしても、数時間の稼働時間では温度差は解消されないことが、この時の観測でわかった。100%に調整された空間ではわずかな温度差でも結露を生じるため、建物内の温度むらはないことが望ましい。図の右手側、小前室東寄りの天井と側壁には絶えず結露が生じ、カビ等の発生を抑制しにくい

状況である。壁画の取り外し作業では、漆喰を柔らかい状態にしておき、漆喰ごと壁画を薄いナイフで取り外すという工程があるが、これを安全に遂行させるために、高湿度に保つことが必要であった。しかしわずかでも乾燥させない限り、わずかに温度差のある現覆屋では天井で絶えず結露する状況避けることができない。保存対策として、特に天井結露抑制のために、断熱補強を計画している。

図12に石室に蓋をした状態で、内部から小前室を見込んで撮影した熱赤外線画像を示す。右手が西、左手が東となる。天井石と閉塞石の間は温度差のある空間が広がっており、また東南端天井寄りには、比較的大きな熱流入口があることがわかる。小前室と石室内温度に差がある場合には、この位置から熱流入があり、南面の保護を急ぐ必要があることがわかった。

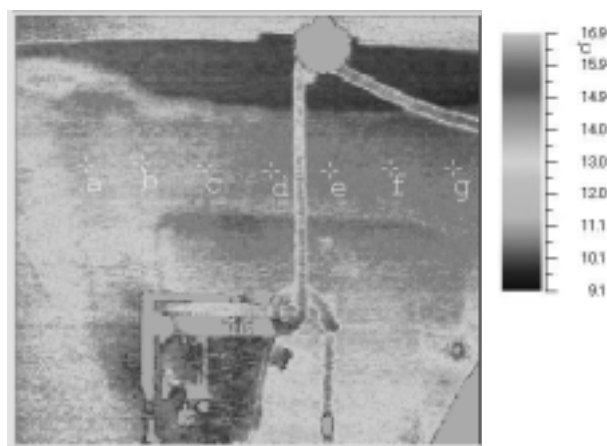


図11 熱赤外線画像 小前室より石室を望む

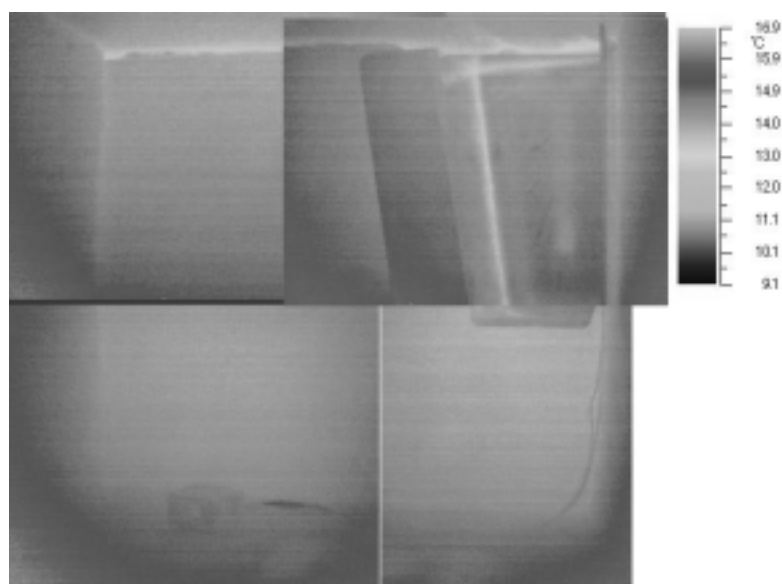


図12 熱赤外線画像 石室内より小前室を望む 南壁
→は石室の蓋である。

3-5. 2005年の状況概括

2005年には5月24日の白虎前肢取り外しに始まる一連の作業が進められてきたが、6月には小前室炭酸ガス濃度の上昇、小前室および石室内温度が地温を超えて制御不能になるなど、生物活動の活発化を疑わせる事象が続き、最終的に、7月15日に空調系の温度設定を石室内温度より2℃下げて、連続運転とした。生物活動は全般的には抑制される方向にはなったが、小前室温度が石室内温度よりも低く南面で結露を生じやすい環境条件でもあり、これが原因でバクテリア等の繁殖に適した石室内環境となった可能性もある。高湿度下での漆喰壁画保存の限界とも考えられ、根本的な保管環境の変更を、取り外し作業工程の見直しと同時に進めている。

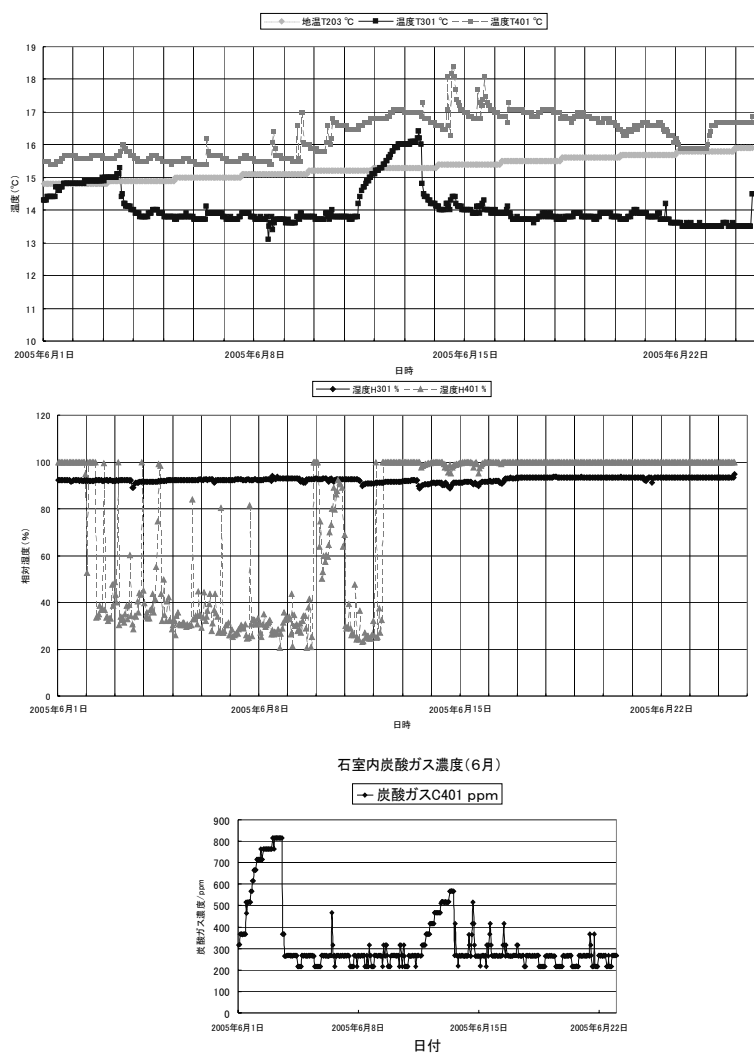


図13 2005年6～7月の状況

(上) ■：小前室温度 T301 □：石室内温度 T401 ◇：地温 T203

(中) ◆：小前室湿度 T301 △：石室内湿度 H401

(下) ◆：小前室炭酸ガス濃度

相対湿度センサー-H401は6月前半壊れており異常値を示しているので注意。
炭酸ガスセンサーも感度が低下しているため、絶対値は正しくない。

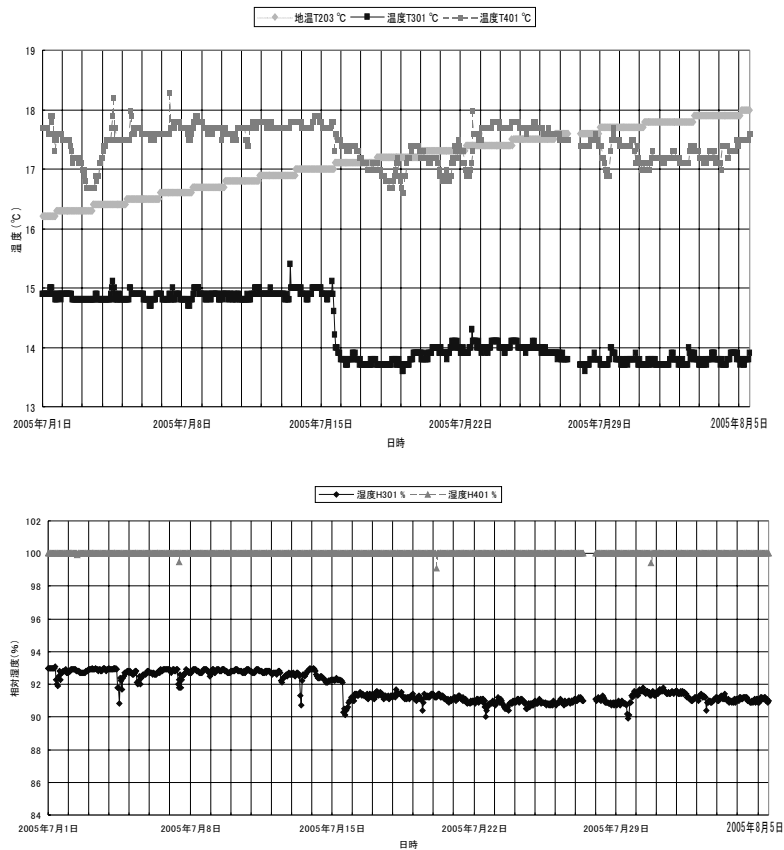


図14 2005年7月の状況

(上) ■：小前室温度 T301 □：石室内温度 T401 ◇：地温 T203
(下) ◆：小前室湿度 H301 △：石室内湿度 H401

4. おわりに

本稿では、平成16年1月の発掘開始に始まるキトラ古墳保護覆屋内の環境について、制御の方針とその変更理由とともに述べた。平成17年夏以降の生物被害状況の拡大により、キトラ古墳壁画は次々と取り外されたが、取り外しの難しい朱雀については、石室内の環境を適切に変更してできる限り生物被害を受けにくい環境に整えていかなければならず、制御の難しい状況になっている。取り外し作業のない時にも、週に2回の体制で奈良と東京の研究者が赴き、カビ点検等の処置(図15)、環境制御条件の変更などを行っている。多数の関係者に変更を周知させるのはたいそう難しく、保護覆屋内のいたるところに指示書・連絡書が掲示されており、作業日誌とともに情報交換に役立っている。

古墳の管理において、温度・湿度の計測は大変重要であるが、高湿度下でセンサーの寿命は著しく短くなるため、十分に余裕をもってセンサーの取り替えや校正などを行い、正確なデータを得られるよう努力が必要である。表1にパブリックコンサルタント(株)、(株)KGエンジニアリングによってまとめられた点検報告書の一部を掲載する。特に通常と異なる変化をできる限り早期に発見するには、温度の監視はもとより、他の計測用センサーと組み合わせて適切な情報

を常時得て監視する体制が必要である。本古墳においては微生物活動の監視に対して、温度センサーと炭酸ガスセンサーの組み合わせが有効であった。

本稿が壁画の安全な保管の資となり、また各地に点在する遺跡の保存活動のための基礎資料となれば幸いである。

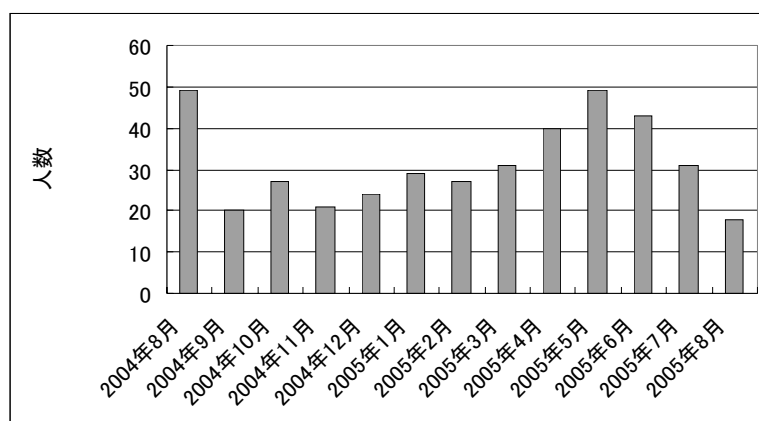


図15 2004年8月～2005年8月の作業日誌から推定した月別石室内作業員数 (2004年11月の取材17名を含まず)

表1 環境ステーション使用のセンサー種類と状態等 (2005年11月16日現在)

センサー種類	型番・製造等	設置状況	現況等
土壌水分計	池田計器 ML-2	埋設	出力値のふらつきなし
土壌水分計	池田計器 ML-2	検出部を土壤に挿入	
温度計	共和電業 BTS-100AT	小前室・石室、フィルター付き収納盤内	収納盤フィルターにカビ発生*
湿度計	共和電業 KHL-210	小前室・石室、フィルター付き収納盤内	収納盤フィルターにカビ発生*、感度低下、交換
湿度計	共和電業 KHL-210	石室、フィルター付き収納盤内	収納盤フィルターにカビ発生*、素子不良、交換、交換頻度多し
酸素計	チノー MG-6000	小前室、乾燥剤にて封入	内部にカビ発生、撤去
酸素計	チノー MG-1200	石室	シリコンガスによるプローブ部の素子不良発生、撤去、再設置にはフィルター機能が必要
炭酸ガス計	理研計器 UM280L	小前室	吸引ホース、フィルター内に水が侵入、センサー破損、撤去
炭酸ガス計	理研計器 UM280L	石室	感度低下*、吸引ホース、フィルターの定期交換が必要

謝辞

本稿をまとめるにあたり、発表をご許可いただいた文化庁文化財部記念物課および美術学芸課に感謝いたします。加湿装置の設置にあたり、日本インシュレーション（株）若木和雄氏にご尽力いただきました。環境ステーションの放置にあたり、計測機器類の選定などパブリックコンサルタント㈱にご尽力いただきました。記して衷心より感謝いたします。キトラ古墳の発掘および保存にたずさわるすべての方々、お見守りくださったすべての皆様に感謝します。

キーワード：キトラ古墳(Kitora tumulus)；温度(temperature)；相对湿度(relative humidity)；
炭酸ガス(carbon dioxide)；微生物被害(biodeterioration)

Environmental Conditions of Kitora Tumulus in 2004-2005

Chie SANO, Masahide INUZUKA, Naoto YOSHIDA, Masayuki MORII,
Masato KATO, Ryu MURAKAMI, Yohsei KOHDZUMA, Junko FURIHATA,
Takayasu KOEZUKA, Takeshi ISHIZAKI and Sadatoshi MIURA

Kitora Tumulus is located in Asuka-mura, Nara prefecture and is thought to have been founded in the late 7th century. It is famous for its decoration with paintings of Chinese god beasts and animal servants on the walls of its stone chamber. Excavation started in 2004 and the relocation of paintings are now being executed. In this article, the environmental conditions in the conservation work of 2004-2005 are reported. Methods for controlling the environment of the buffer zone next to the stone chamber are also documented.

It was made clear that sensors to measure humidity and carbon dioxide concentration did not have long life under especially high humid conditions of approximately 100% RH. However, it was found that a carbon dioxide sensor might detect the threat of explosive growth of microorganisms at an early stage.

