

〔報告〕 キトラ古墳保護覆屋内の環境について (2) — 土壌水分量推移と環境管理 —

佐野 千絵・犬塚 将英・間渕 創・木川 りか・吉田 直人・
森井 順之・加藤 雅人・降幡 順子・石崎 武志・三浦 定俊

1. はじめに

キトラ古墳壁画の保存活動は、『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』（主務：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）を通して決定される。平成18（2006）年11月15日に開催された第10回委員会では，これまでの薄いへらを使った方法だけではなく，ワイヤーソーを使う新手法で壁画を順次取り外していくことについても承認され，現地では慎重に作業が進められている。

キトラ古墳壁画の調査や管理・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，手法の適否や手順について検討し，文化庁の了解のもと各種作業を実施している。また得られた成果についてはすみやかに公表¹⁾している。

本報告では，平成18年度のキトラ古墳保護覆屋内の環境制御状況を報告する。

2. 保護覆屋中の環境制御と監視

図1に平成15（2003）年8月末引き渡しの保護覆屋の平面概略図を示す。石室に隣接する区画（小前室と呼称）には，温度を10℃から26℃の範囲で任意に調整できる温度管理された水で満たされたスポンジ状のものの中を通過させて，相対湿度100%まで加湿できる清浄空気が供給される。小前室を前室に対して正圧にして，汚染物質の室内流入を避けるよう配慮されており，この制御は設計通り実行されていることは，浮遊菌量の推移から確認できている²⁾。

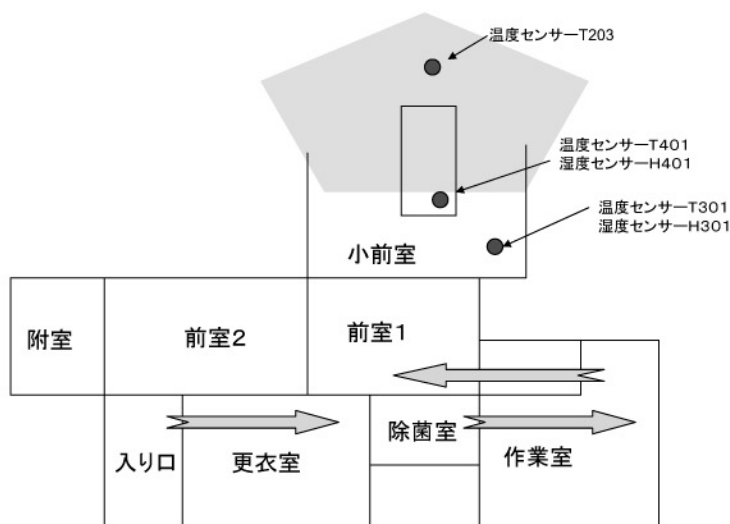


図1 キトラ古墳壁画保護覆屋

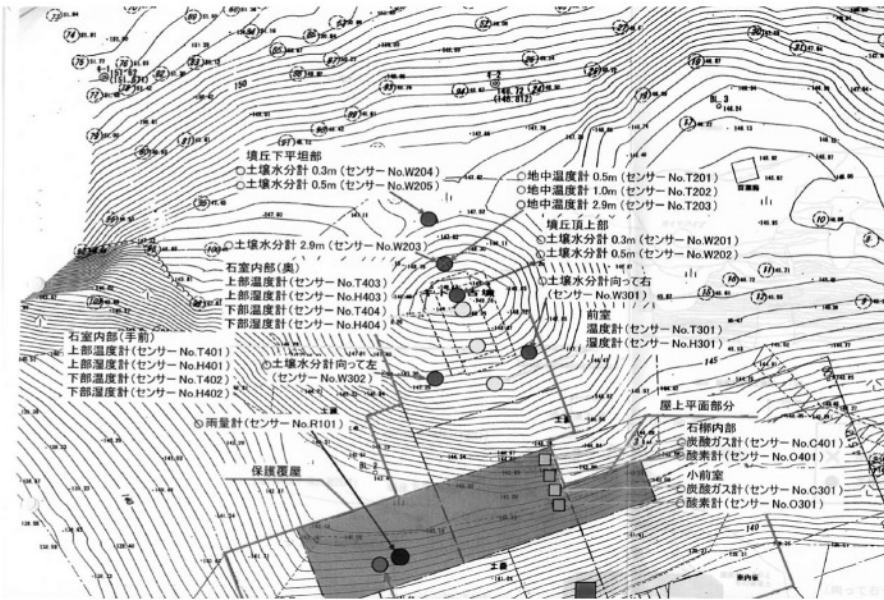


図2 キトラ古墳 センサー設置場所

環境ステーションの設置は平成15(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、墳丘上の風向、風速、雨量、日照量である(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)に転送され、常時監視できる。

3. 温度湿度・土壌水分および雨量の制御状況

図3, 4, 6に平成16(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、相対湿度、土壌水分量の月平均を示す。エラーバーは各月の標準偏差である。図7は月別降雨量である。

3-1. 温度・相対湿度

図3の通り、地温は、外気温に対して約2ヶ月遅れで追隨している。

当初設計では、内部で作業等がある場合にのみ空調系を稼働し、作業終了時には空調系を停止する運用が想定されていた。小前室温度T301については、平成16(2004)年度は、石室内と小前室間に湿度差がつかないように、石室内温度が地温とほぼ等しくなるように空調系温度を設定していたが、小前室でのカビ繁殖が著しくなったことから、9月末から石室内温度より小前室温度を低く設定してカビの繁殖速度を下げるように計画し、その結果、石室内温度も地温に対して低めに制御した結果となった。そのために空調系を連続で運転していたが、1月には再び空調系連続運転を中止した。

平成17(2005)年度については、前年の結果から判断してカビ繁殖抑制のため、5月に小前室空調系の連続運転を開始し、石室内温度が地温に対して高くないよう、石室内温度に対して低めに空調系温度を設定した。しかし壁面取り外し作業の続いた7月には地温に対して石室内温度がより高くなり、カビの繁殖速度をより抑制する目的で、石室内温度に対してさらに

低めに空調系温度設定を変更した。

空調系の連続運転は、周辺地域への落雷による停電等の一時的な中断を除き、平成18(2006)年1月まで行った。試験的に低温期の2月に空調系を停止させたところ、施設内の浮遊菌量が増加し、空調停止による気流不足から施設の微生物汚染が進むことが明らかになったため、3月以降は空調系を再稼働し、施設内の微生物汚染防止のために空調系を連続運転する運用に変更した。

相対湿度(図4)については、石室内は95%以上、小前室は90%以上という高湿度に保たれているため、高分子膜で構成されている湿度センサーにカビが生えてしまうなどの原因で、測定結果が大変不安定な時期があった(H401センサー、平成17(2005)年8月~11月)。小前室に設置されたH301センサーの出力も不安定であり、平成18(2006)年10月~11月にかけて、飽和塩類水溶液を利用して測定値の校正をおこなった。使用した飽和塩類は以下のとおりである: 臭化ナトリウム(59% RH)、塩化ナトリウム(76% RH)、塩化カリウム(86% RH)、硝酸カリウム(95% RH)、表記した相対湿度はいずれも15°Cでの値。

その結果、一部のセンサーの不具合と、各センサーの系統的な出力値ずれが見つかった(図5)。その他、経年による歪みもあることから、センサー種類の変更も含めて検討中である。

3-2. 土壌水分量と降雨量

異常乾燥は封土の収縮を呼ぶことから、墳丘の保全のためには適度な土壌水分量の維持が重要と考えられている。そのため遮水シートの導入にはこれまでも議論があるが、環境を制御するためには突発的な水の流入を防ぎ、定常的な水分や湿気の移動を監視する必要があると考えている。

平成16(2004)年度5月の多量の降雨に際し(図7)、小前室西側天井際から雨水が小前室に侵入したため、緊急対策として墳丘に遮水シートを設置した。墳丘頂上下0.5m地

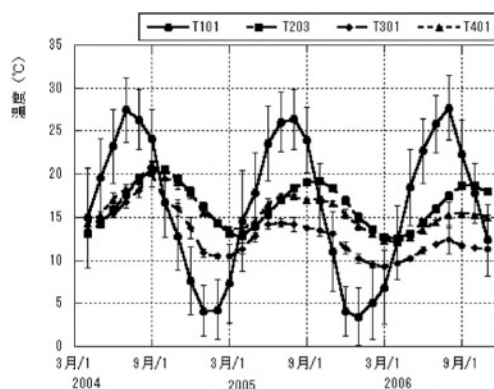


図3 月平均温度変化
T101 外気 T203 地温 T301 小前室 T401 石室内

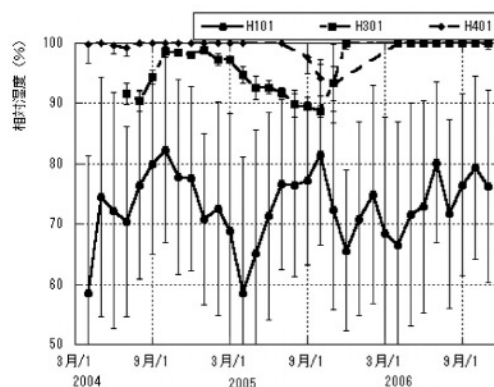


図4 月平均相対湿度変化
H101 外気 H301 小前室 H401 石室内
H301, H401ともに2005年11月より異常値を示している状態

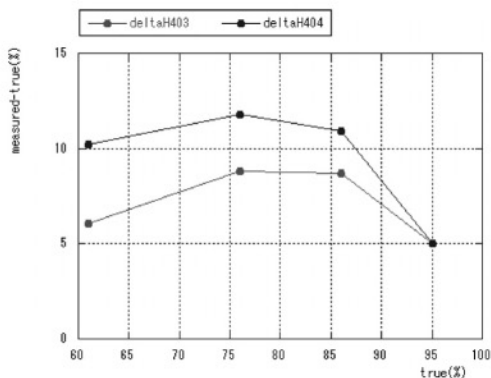


図5 センサー校正結果
H401は使用不能を確認
H403, H404センサーの正しい値からのずれを検定

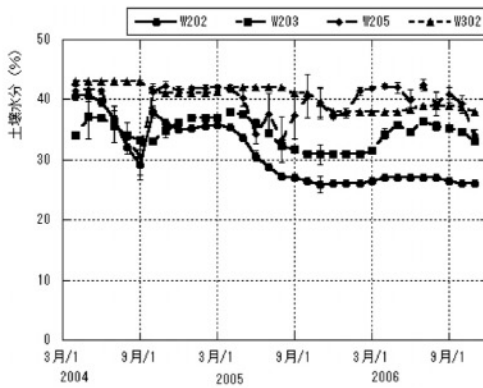


図6 月平均土壌水分量変化

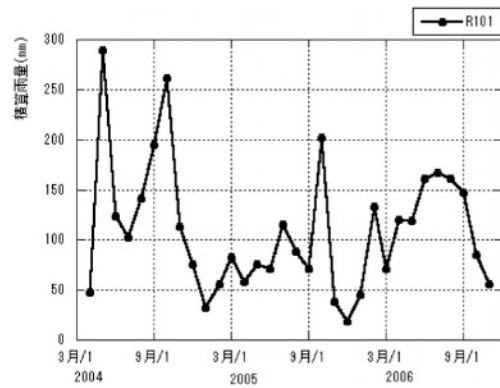


図7 月別降雨量

点は表層から浅く降雨の影響を受けやすいが、その地点での土壌水分量は(図6)、9月までは墳丘周辺の水分量が減少する傾向にあった。遮水シートを墳丘上面から8月20日に除去したところ、図7に示されている通り、10月の降雨に対応してすみやかに土壌水分量が上昇した。平成17(2005)年前半に再びシートを被せたため、10月くらいまでにかけて再び土壌水分量は減少し、やや乾燥気味の状況にある。

同じく浅い位置に埋め込まれている墳丘北側平坦部0.5m地点についても、同様に降雨量の増大や遮水シート設置の影響を受けて、その土壌水分量は大きな変動がある。平成16(2004)年10月の降雨、平成17(2005)年10月の降雨に対応して、土壌水分量はすみやかに増加し、北側にかけて地面高さが上がり水が流れ込みやすい地形のため、水分量の高い時期が多い。

墳丘北側中腹2.9mの地点は、遮水シートに常に守られる位置にあり、石室北壁背面にもっとも近い測定箇所である。他のセンサーより深い位置にあるため、センサー出力値の変動は緩やかであるが、いくらかの遅れを持って、遮水シート設置や降雨量増大の影響を受けていると思われる動きをしている。平成18(2006)年4～8月の降雨量については、総量としては平成16年とほぼ同じであるが、集中的に降雨のあった平成16(2004)年と異なり、平成18(2006)年は持続的に降雨があり、その影響が出て深部の土壌水分量も増大したと考えられる。防水シートについては紫外線による経年劣化が大きく、定期的なメンテナンスが必要で、平成18年度も小規模の張り増しなどを行った。

盗掘口左側(西側)の測定ポイントは、小前室の制御方法の影響を受けていると思われる。前報にも述べたとおり、キトラ古墳保護覆屋は仮設であり、傾斜地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、建物として元来、温度むらを生じやすい。100%に調整された小前室では冬季には冷えた天井面や東側壁に絶えず結露が生じており、これが直接墳丘版築等に余剰水を供給している。そのため土壌の飽和水分量を超えた状態に常になっているが、その量は、小前室の温度制御方針を変えるたびに余剰水が減る方向に変化している。たとえば、平成16(2004)年9月に小前室を地温に対して低めに制御する変更をしているが、これは小前室環境をやや乾燥させる方向で働き、いくらかの遅れをもって盗掘口左側の土壌水分量はやや低下した。また1月に空調を停止した時点でまた土壌水分量が増加している。平成17(2005)年については、5月から空調を連続運転とし、また7月からよりいっそうの温度差をつける制御を行った影響か、土壌水分量はほぼ飽和水分量までその量を下げている。

石室内でのカビの発生はやはり土壌水分量の影響を受けると推定され、カビ点検者の実感と

して、降雨後数日間にはカビ等の繁殖が見られることが多い。今後も、盗掘口左側や墳丘北側中腹2.9mの土壌水分量の推移を監視して、墳丘の管理をおこなっていく予定である。

平成18(2006)年には天井結露抑制のために、小前室天井断熱補強と結露を散らす目的での擬土付けを行った。工事仕様概略を表1に示す。その性能評価のため、平成19年1月16日に熱画像撮影をおこなった。使用器材等は前報のとおりである。結果として、小前室北側天井、墳丘なども含めて温度差は観察されず、機器精度の限界0.5℃の範囲内で、工事部分については一様に温度制御できるようになったことが判明した。

表1 キトラ古墳小前室天井等結露対策工事 処理工程

工程-1	養生作業 石室・遺構面全体をポリエチレンフィルム等にて十分に養生を施す。
工程-2	滅菌処置作業 塩化ベンザルコニウム 1000ppm 水溶液による滅菌処置を、天井・側壁のコンクリート部分に対して施す。
工程-3	素地調整作業 天井等に付着している粉塵、カビ等をブラシ等を用いて入念に除去する。
工程-4	発泡ウレタン断熱吹きつけ 難燃型発泡ウレタンを所定の厚さに入念に吹き付けて(厚さ約50mm)、断熱処理を施す。硬化後、防腐剤を吹き付けて、ウレタン表面の防かび施工をする。
工程-5	防かび・防菌擬土処理 発泡ウレタン表層に、ポリシロキサン樹脂/キトラ古墳同質擬土で修復仕上げを施す。硬化後、防腐剤を吹き付けて、擬土表面の防かび施工をする。
工程-6	原状に復する。

3-3. その他の管理状況

3-3-1. ポリシロキサン樹脂追加施工

小前室には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が、100%RHに近い空間では土壌由来の微生物繁殖を抑制するのは難しく、遺構も含めて土壌表層をポリシロキサン系樹脂(商品名ピフォロン)で年3~4回処理(樹脂追加施工)し、見た目のカビコロニー形成を抑止している。

ポリシロキサン系樹脂ER-002およびピフォロンは親水性樹脂で、カビの利用可能な水分量を調節することでカビ発生を抑止できる。しかし、親水性のため水に溶けて移動しやすく、キトラ古墳保護覆屋のように100%RHに加湿している空間では、常に結露水などもあり、版築土や擬土表面に樹脂が定着しないため、通年とおして、樹脂追加撒布などのメンテナンスが必要である。この処理により、小前室の浮遊菌量を低減させることもできる。

3-3-2. 施設除菌清掃

施設内は一般的に、使用年数を経るにつれ微生物汚染は飛躍的に増大する。この増加を抑制するには、除湿と気流設計も含めての換気が有効であるが、保護覆屋については古墳壁画の保存のため高湿度で維持されており、施設管理として除菌清掃が欠かせない。引き渡し後の使用期間も3年を越え、特に前室、通路など高湿度で維持されている空間での浮遊菌量が増加していることから、小前室天井結露受け、通路・前室の壁・床・天井また各種配管に対して、塩化

ベンザルコニウム水溶液（1000ppm）で除菌清掃を行った（一般清掃委託：（株）鹿島建物，通路前室等高所除菌清掃委託：イカリ消毒株式会社，写真1）。

清掃後の評価として，作業をおこなった部分と未作業の部分で滅菌水で濡らした滅菌綿棒による一定面積（5 cm x 5 cm）の拭き取り調査を行った。また高所除菌清掃においては，委託先イカリ消毒株式会社により，コンタクトスライドYM（品番06-CT0200，Biotest社，取り扱いGSIクレオス）による除菌清掃評価があった。滅菌綿棒採取試料については，その後，MA培地表面全体にまんべんなく植え，室温にて培養した。いずれも培養後に生育したコロニー数で評価した。

培養後の写真とコンタクトスライドYMによる計数結果を以下に示す（表2，写真2）。清掃後は，いずれも生菌数は減少した。特に，これまで2ヶ月に1度の割合で除菌清掃を行っていた範囲については，確実に除菌できた。しかし通路天井など高所やこれまで一度も除菌清掃を行ってこなかった場所については，配管等が複雑であったり，元来，浮遊菌調査から判断した汚染度がたいそう高い状況であったため，1回の限られた時間内での除菌清掃では，完全な滅菌にはいたらなかった。しかし，今回の清掃方法で十分に付着菌数を低減させることが可能である

表2 除菌効果検証 単位 CFU（コンタクトスライドYM，Biotest社）

	作業前		作業後	
小前室	天井 100 以上	床 100 以上	天井 2	床 1
前室	天井 100 以上	床 59	天井 0	床 1
通路	天井 100 以上	床 28	天井 100 以上	床 0



写真1 清掃作業の様子

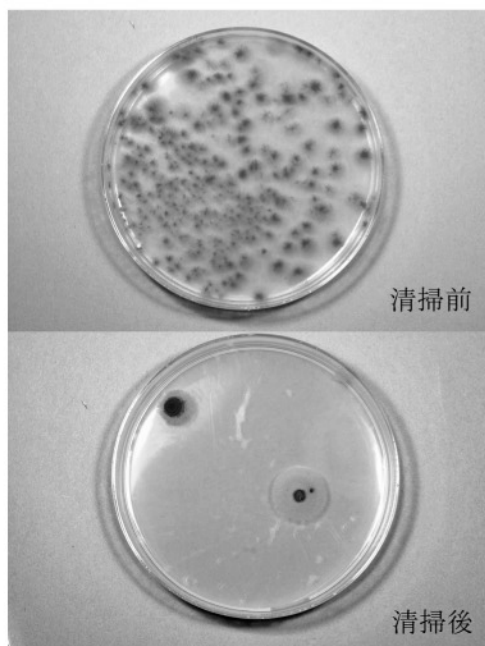


写真2 滅菌水で濡らした滅菌綿棒による一定面積拭き取り試料培養結果/MA培地
上:除菌清掃前の壁面 下:除菌清掃後の壁面

ことがわかったため、今後も、定期的に壁の汚染状況を把握しながら、時期をみて除菌清掃で施設内清浄度管理を推進する予定である。

4. おわりに

本稿では、平成16(2004)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述べた。平成18(2006)年11月にはダイヤモンド微粉末をつけたワイヤーソーで漆喰と石材の間を切り離す取り外し方法も始まり、12月には残っていた寅も無事石室内から運び出すことができた。

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、正確なデータでなければその記録に意味がない。常に監視し、異常値について早期に気づくようなシステムを構築することが重要と考えている。

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。

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。除菌清掃評価データを提供いただいた(株)イカリ消毒に感謝いたします。

引用文献

- 1) 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: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－, 保存科学, 45, 79-92(2006)
- 2) 間瀬 創, 佐野千絵:浮遊真菌調査を用いた動的な室内環境評価法の検討－特別史跡キトラ古墳仮設保護覆屋をモデルとして－, 保存科学, 46, 27-38 (2007)

Environmental Conditions of Kitora Tumulus in 2006 – Water Content in Soil –

Chie SANO, Masahide INUZUKA, Hajime MABUCHI, Rika KIGAWA,
Naoto YOSHIDA, Yoriyuki MORII, Masato KATO, Junko FURIHATA,
Takeshi ISHIZAKI and Sadatoshi MIURA

Kitora Tumulus is located in Asuka-mura, Nara prefecture and is thought to have been built in the late 7th century. It is famous for the paintings of Chinese god beasts and animal servants on the walls of its stone chamber. Excavation started in 2004 and the relocation of paintings is now being executed. In this article, environmental conditions during conservation work of 2006 are reported. In addition to data presented in previous reports, change in the water content of the soil of the mound during 2004-2006 is also documented.