

〔報告〕 キトラ古墳保護覆屋内の環境について（４） — 周辺風環境の解析および覆屋内環境監視 —

森井 順之・犬塚 将英・佐野 千絵・石崎 武志

1. はじめに

特別史跡キトラ古墳（奈良県高市郡明日香村）は奈良盆地の南東部にある二段築成の墳丘を持つ円墳である。墳丘内部には凝灰岩製の石室があり、その内部は漆喰上に天文図・四神像・十二支像が描かれている。しかし、東壁白虎像で漆喰面の浮き上がりが見られるなど現状保存は困難であったため、文化庁では『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』を組織し壁画取り外しを決定、平成20年11月末までに四神像、十二支像（戌・午・丑・亥・子・寅）および天井天文図を取り外した¹⁾。

現地に残る古墳壁画の劣化を抑えるためには石室内の環境制御が必要である。キトラ古墳では仮設保護覆屋内の空調設備によりその制御を行うとともに、環境計測システムを構築し遠隔地での常時監視を行っている。本報は第四報として、環境計測システムの観測値のうち前報^{2~4)}から新しく得られた結果および、古墳周辺環境に関して考察した結果を報告する。

2. 温湿度および土壌水分の制御状況

仮設保護覆屋では小前室の温湿度制御を、コイル系（冷水循環による温度制御）および空調系（調湿空気を流入）の二系統で行っている。現在は、主な壁画劣化要因であるカビ等微生物の生育を抑制するため常時低温に設定しており、両系統ともに連続運転を行っている。また、温度・湿度・土壌水分などのセンサーを各所に設置し観測を継続している（図1）^{2~4)}。なお、観測値はインターネット回線により遠隔監視ができると共に、1時間毎の値についてダウンロードが可能である。

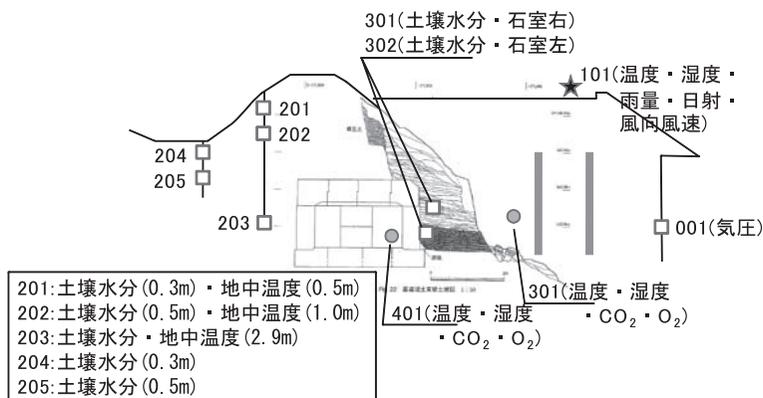


図1 キトラ古墳環境計測 センサー設置箇所（文化庁ら⁵⁾に加筆）

図2～5に、2007～08年の月平均温度、月平均相対湿度、月平均土壌水分量、月間降水量の推移を示す。各図のエラーバーは各月の標準偏差を示す。

2008年は7月の気温が最も高く、地中温度および石室内気温もそれを反映した結果となった。しかし、2007年8月のような猛暑にはならず、小前室空調機器の能力超過に伴う措置は行わずに済んだ。なお、小前室（T301）にて2008年7月にエラーバーが目立つのは、7月10日および30日に空調機器が自動停止、復旧まで時間がかかり小前室気温が上昇したためである。また、相対湿度（図3）は石室内・小前室ともに高湿度に保たれるとともに、急激な変化も観測されなかった。

土壌水分量の推移（図4）からは、墳丘北側（W205）に比べて墳頂部（W202, 203）の変化が小さく、墳頂部の遮水シートの効果があらわれたものと考えられる。しかしながら、日射や乾湿繰り返しなどにより遮水シートは劣化しやすく、土壌水分量を安定させるためには定期的ななかけ直しが必要であると考えられる。

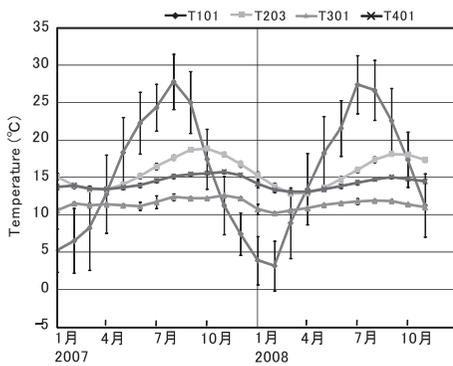


図2 温度推移（2007～08年）

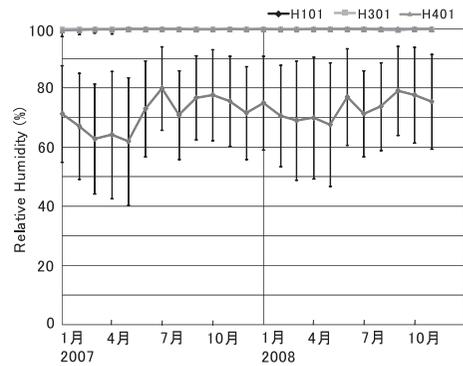


図3 相対湿度推移（2007～08年）

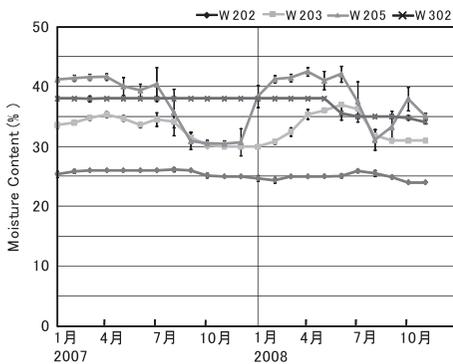


図4 土壌水分推移（2007～08年）

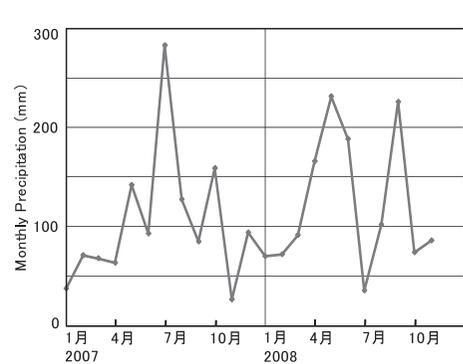


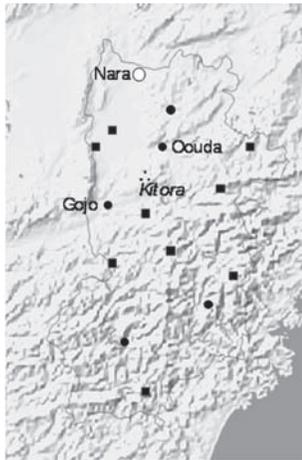
図5 月間降水量（2007～08年）

3. キトラ古墳の周辺環境

漆喰の保護やカビ等微生物の繁殖抑制のため、仮設保護覆屋では空調により石室内を低温多湿で安定させている。しかし墳丘は屋外に露出しており、日射による地中温度上昇や降雨による背後地の水位上昇など周辺環境の影響を強く受ける。

また、奈良盆地南東部に位置する明日香村は内陸性気候である。奈良県内に気象庁が設置した観測所で最も近いものは五條・大宇陀であるが（図6）、標高や地形が影響しキトラ古墳の測定値と多少のずれがある（表1）。そこで、キトラ古墳では仮設保護覆屋の屋上に気象ステー

ションを設置し（写真1），外気温・相対湿度・気圧・降水量・日照時間・風向風速について観測を行っている。



- 地方気象台
- AMeDAS 地域気象観測所
- AMeDAS 地域雨量観測所

図6 奈良県内の気象観測所
（気象庁 HP から引用）



写真1 屋外気象ステーション

表1 キトラ古墳周辺の気象庁観測所測定値

	位置	年平均気温 ($^{\circ}\text{C}$, 2007)	年降水量 (mm, 2007)
キトラ古墳	34° 27' 4" N 135° 48' 28" E H : 145m	15.6	1250
奈良	34° 41' 36" N 135° 49' 36" E H : 104.4m (d =26.97km)	15.3	1109.5
大宇陀	34° 29' 18" N 135° 55' 54" E H : 349m (d =12.07km)	13.4	1465
五條	34° 22' 48" N 135° 43' 48" E H : 190m (d =10.65km)	14.7	1189

3-1. キトラ古墳の周辺環境

キトラ古墳は前述の通り周辺環境の影響を受けやすい。周辺環境影響のうち石室内環境に関わるものは、熱および水分の移動であると考えられる。水分移動に関しては、降雨と土壌水分量に相関があることを前章で述べた。

熱の移動に関しては、正味放射量（日射+大気放射+地球放射）と顕熱輸送量、潜熱輸送量、地中伝導熱に関して熱収支式が成立する。まずは、外部から石室への熱の移動について外気温と小前室気温の関係から考察を行った。図7は2007年8月の外気温および仮設保護覆屋・小前室気温の推移、図8は同じ月の日照時間の推移である。2007年8月は、9日、10日、20日に空調が異常停止、23日に温度調整範囲を $\pm 2^{\circ}\text{C}$ から $\pm 5^{\circ}\text{C}$ へ再設定したときであった³⁾。

日照時間は直達光が地面を照射した時間であり日射を直接測るものではないが、2007年8月の外気温と比較すると強い相関関係が見られる。また、外気温および小前室で最高気温を記録したのは、16日15時(36.6℃)、20日14時(14.2℃)であり、約4日のずれが観測された。他のピーク値も同様の傾向が見られ、外部の熱は4日程度の遅れをもって石室へ到達していたことが明らかとなった。

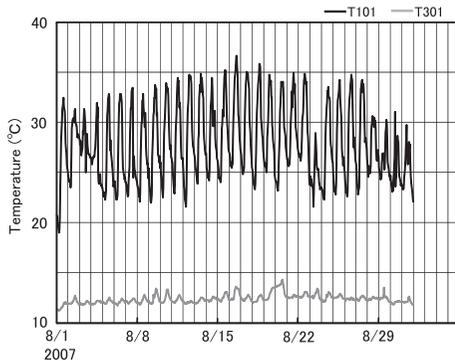


図7 外気温と小前室気温 (2007年8月)

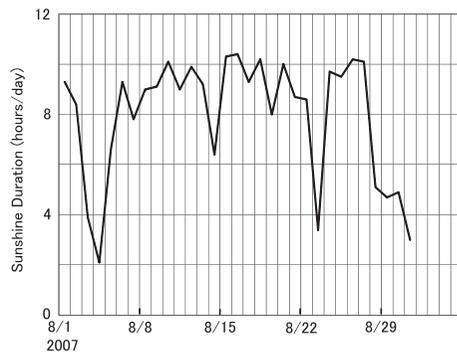


図8 日照時間 (2007年8月)

熱の移動を考えた場合、潜熱輸送・顕熱輸送も重要な項目である。特に顕熱輸送については、同様の観測を行っている臼杵磨崖仏において風向が周辺地形の影響を強く受けているとともに、冬期の冷風浸入が磨崖仏表面の凍結破砕を引き起こすことが明らかとなる⁶⁾など、重要な検討項目である。そこで、キトラ古墳に設置した気象ステーションの風向風速から考察を行った。

図9は、2007～08年に観測された最大風速の推移である。キトラ古墳で得られたデータについては時間毎最大風速を実線で、参照として奈良地方気象台の月毎最大風速値を点線で表示した。また、矢印は奈良において月毎最大風速を記録したときの風向である。キトラ古墳の推移をみると、最大風速3 m/s以上を観測した回数が2007年で544回に対し、2008年(11月30日まで)で272回であった。5 m/s以上となると、2007年に72回観測したのに対し、2008年11月末までに4回しか観測していない。従って、2007年と比較して2008年の風速は比較的穏やかであったと言える。また、奈良の月毎最大風向風速と比較すると、たとえば2007年2月や2008年8月など、奈良において南よりの風がその月最大となる場合はキトラ古墳でも強風を観測したのに対し、2007年11月や2008年4月など東よりの風がその月最大となる場合、キトラ古墳では目立った動きがなかった。上記の結果はおそらく、奈良地方気象台とキトラ古墳の地形条件に違いがあることに起因すると推定される。

また、2007年および2008年のキトラ古墳周辺の卓越風向(図10)は、どちらも南南東および西北西であり、3 m/s以上の強風に関してはほとんどが南南東風であった。南南東風は南側の鷹取山からの吹き下ろし、西北西風に関しては飛鳥川を沿って流れる風が巻き込んだものと見られ(図11)、キトラ古墳の風向は周辺地形の大きな支配を受けていると考えられる。

さらに、外気温(図7)と2007年8月の風速推移(図12)を比較したところ、悪天候により強風と低温が同時に観測された例があるものの、風速変化と気温変化の相互相関係数は0.1とそれほど大きくなく、全体的には外気温に対して大きな影響を与えていなかったと考えられる。

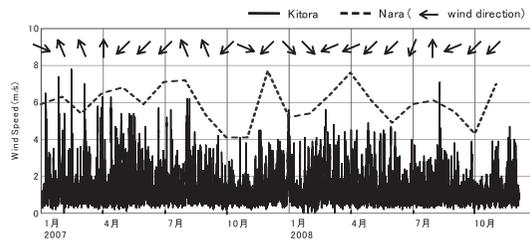


図9 気象ステーションにおける風速推移（2007～08年）

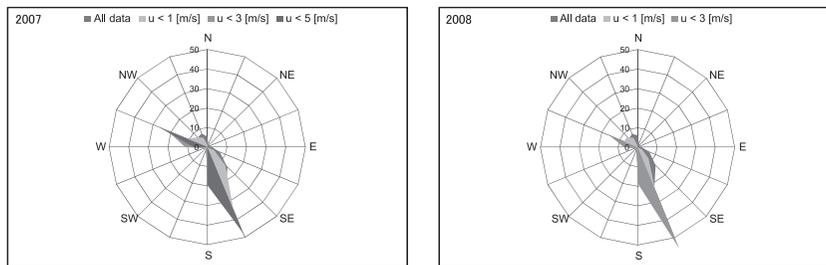


図10 風配図（2007～08年）

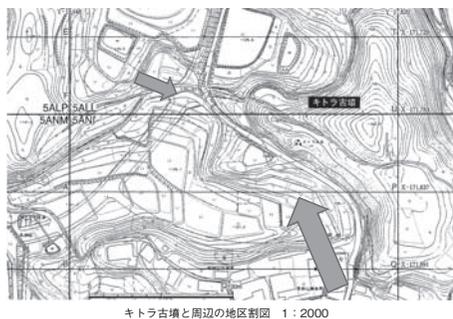


図11 キトラ古墳周辺地形図
（文化庁ら⁵⁾に加筆）

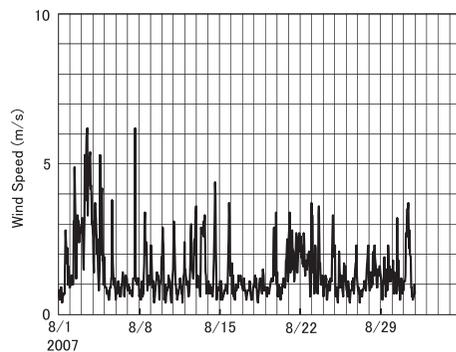


図12 風速推移（2007年8月）

3-2. キトラ古墳環境計測システムの危機管理

仮設保護覆屋内の小前室空調設備は低温設定で連続運転しているが、落雷による停電（2008年7月）や空調設備からの漏水（2007年7月）など、自然災害や設備自身の劣化による空調の異常停止が何度かあり、また復旧までに多くの時間を要した。

そのため、壁画取り外し時など関係者が仮設保護覆屋に長時間留まるときには、1日1回の機械室点検を行うとともに、落雷による停電など突発的な事故に対処するために警報装置（写真2）を電話回線に取り付け、停電が確認されたときは電話回線を用いて担当者へ自動通報を行うよう改良を行った。

以上の通り、空調の異常停止に関しては早期発見および復旧により壁画への重大な影響を未然に防ぐ対策を講じている。



写真2 停電時通報装置

4. おわりに

本報では、キトラ古墳仮設保護覆屋の環境についてこの1年の経過を報告した。2007年8月は、気温上昇により空調制御能力が超過し機器が異常停止した³⁾が、2008年にはそのような気温上昇は観測されず、小前室内気温は比較的安定していた。また、墳頂部に施工した遮水シートが墳丘部の土壤水分量を安定させることが確認できたとともに、定期的なかけ直しの必要性についても述べた。

また、仮設保護覆屋の屋上に設置した気象ステーションの観測結果をもとに、周辺環境に関する考察を行った。その結果、石室内への熱輸送は放射が主であり、風速に関しては比較的弱く顕熱輸送の影響が小さいことを確認した。

仮設保護覆屋の運用から5年経過した現在、低温設定での連続運転など空調機器のハードな使用もあり、設備劣化による異常停止が確認されはじめた。壁画保護のためには、それらの事象を早期発見し、復旧することが重要である。本報では、現在講じられている対策についていくつか紹介した。

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申し上げます。

引用文献

- 1) 文化庁：古墳壁画保存活用検討会（第3回）資料（2008）
- 2) 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，45，77-91（2006）
- 3) 佐野千絵、犬塚将英、間瀬創，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：キトラ古墳覆屋内の環境について（2）—土壤水分量推移と環境管理—，保存科学，46，235-242（2007）
- 4) 佐野千絵、犬塚将英、間瀬創，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：キトラ古墳覆屋内の環境について（3）—カビ点検報告記録の解析—，保存科学，47，135-171（2008）
- 5) 文化庁，奈良文化財研究所，奈良県立橿原考古学研究所，明日香村教育委員会編：特別史跡キトラ古墳発掘調査報告（2008）
- 6) 森井順之：白柘磨崖仏保存調査—劣化と環境—，日韓共同研究報告書2003，33-42（2004）

キーワード：キトラ古墳 (Kitora Tumulus)；覆屋 (conservation facilities)；環境制御 (environmental control)；気象観測 (meteorological observation)

Environmental Conditions of Kitora Tumulus in 2008 -Wind Analysis and Control of Environment-

Masayuki MORII, Masahide INUZUKA, Chie SANO and Takeshi ISHIZAKI

This paper reports the environmental conditions in the conservation facilities of Kitora Tumulus in 2008.

In 2008, the air temperature at the antechamber was more stable than that of 2007. The moisture content of the mound was also more stable probably due to the impermeable sheet laid on the mound.

Since the climate data obtained at Kitora was quite different from the nearest weather station of Japan Meteorological Agency, the weather station of Kitora is important to understand the environmental conditions of Kitora Tumulus. The climate data shows that solar radiation caused the increase of the temperature at the antechamber, but the increase at the stone chamber seemed to be very small due to the air-conditioning system of the conservation facilities, which means that the air-conditioning system is indispensable for maintaining a stable condition of the stone chamber.

