

装飾古墳の現地保存

～保存と公開のための環境調整～

京都大学大学院工学研究科 小椋大輔

発表内容

1. 装飾古墳の環境調整の目的
2. 装飾保管空間*の環境に影響を与える因子
3. 装飾保管空間の温湿度の特徴
4. 装飾保管空間の環境と劣化現象
5. 装飾古墳のための環境調整
6. 今後の課題

* 装飾保管空間: 装飾が保管されている空間(玄室・羨道・前室・保存室等)を総称したもの。

1. 装飾古墳の環境調整の目的

装飾古墳の環境調整の目的

保存と公開について以下が満たされるように、環境調整を行う。

1. 保存

装飾古墳の劣化の進行が加速されない。

2. 公開

保存を前提として、

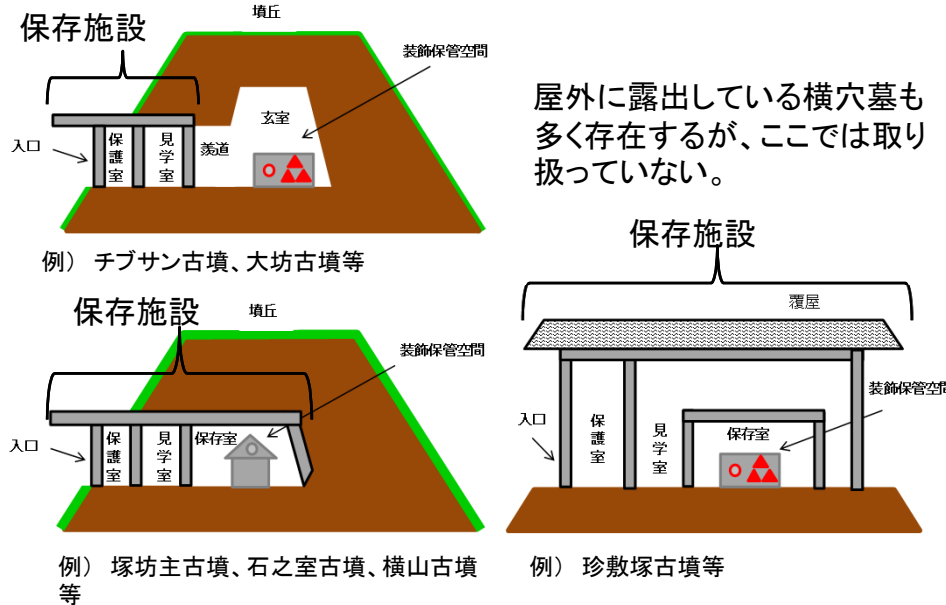
維持管理者・見学者の健康が害されず、
装飾等の観覧ができる。

保存と公開における制御対象

対象	制御の目的	関係因子
人	温熱環境、 空気質の維持	温湿度、CO ₂ 濃度等、浮遊菌等
装飾	劣化進行抑制	温湿度、結露、栄養、光等
	見え方	結露・乾燥状態、光等
装飾以外の 遺構(石材、 盛土等)	劣化進行抑制	温湿度、結露、栄養、光等

2. 装飾保管空間の環境に影響 を与える因子

本発表で用いる装飾古墳とその保存施設の名称と 主に対象とする装飾古墳の形態



装飾保管空間の温湿度環境に影響を与える因子

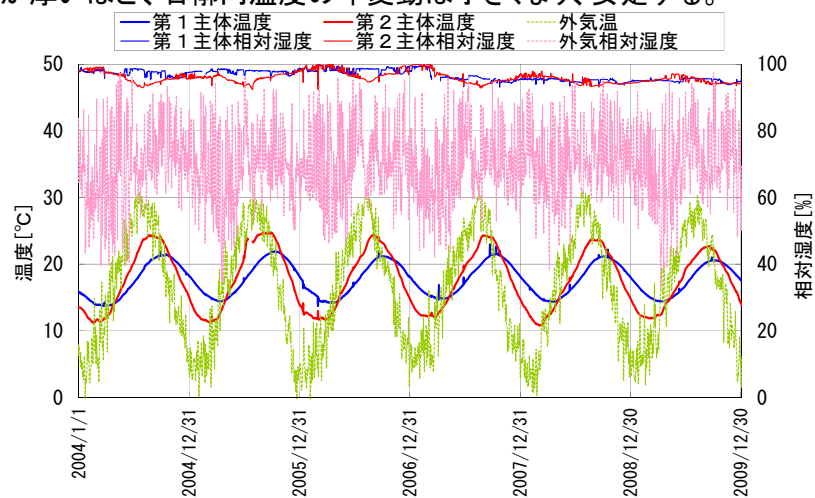
空間・場所	影響因子
周辺環境	気象条件(気温、湿度、日射量、降雨量、風向・風速)、周辺の建物・植栽
墳丘	墳丘の有無、被覆条件、断熱・熱容量(土厚、断熱の有無) 墳丘の排水、防水層の有無、地下水位、土の種類・構成
覆屋	覆屋の有無、覆屋の構造、大きさ、屋根・壁・窓・床の構成、断熱性、気密性、換気口、換気扇の有無、空調の有無
入口	方位、庇、外扉(材料、断熱性、気密性)
保護室(見学室の前室)	保護室の有無、保護室の構造、大きさ、見学室との高低差、内装、照明、空調の有無、保護室の内扉(材料、断熱性、気密性)、入室
見学室	見学室の有無、見学室の構造、大きさ、内装、照明、空調の有無、見学室の窓・扉・間仕切り(大きさ、材料、断熱性、気密性)、入室
羨道・前室	羨道・前室の有無、大きさ、照明、入室
装飾保管空間(玄室・羨道・前室・保存室等)	大きさ、照明、入室

本表は、屋外に露出している装飾のある横穴墓を除く

3. 装飾保管空間の温湿度の特徴

墳丘の土厚

闘鶏山古墳：第1主体(天井まで深度約2m)、第2主体(天井まで深度約1m)
土厚が厚いほど、石槨内温度の年変動は小さくなり、安定する。



出典：木村、小椋、銚井：闘鶏山古墳の石槨内部発掘調査に伴う空調制御方法に関する研究：(その2)
石槨内空気質の予測法の提案、日本建築学会大会要覧集 D2、pp.155-156 (2011)

墳丘の被覆

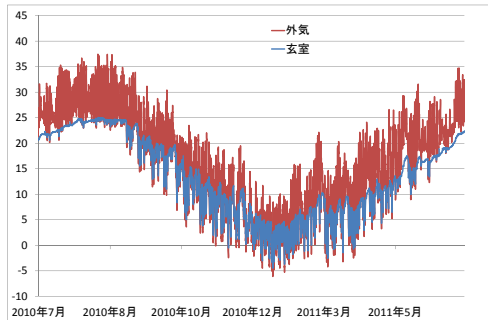
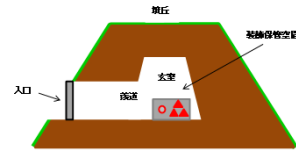
- ・ 植生のみで覆われた古墳
- ・ 井寺古墳 温度年平均值(2010年7月～2011年6月)

玄室下部: 13.5℃

外 気: 16.2℃



玄室内の年平均温度は外
気より2.7℃低い。



井寺古墳玄室の温度年変動



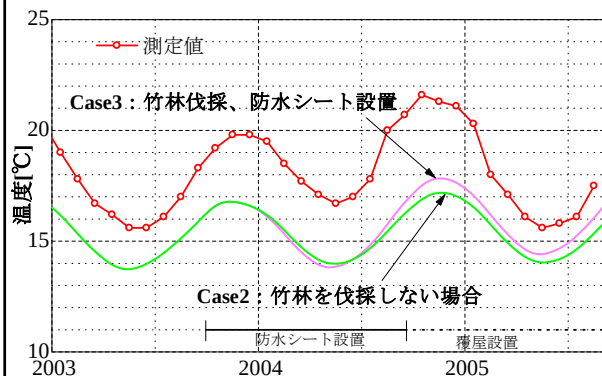
井寺古墳全景

池田朋生、菊川知美: 装飾古墳の博物館資料化に向けた取組み～装飾古墳保護施設の保存環境について～、
熊本県立装飾古墳館研究紀要第9集

墳丘の被覆

高松塚古墳におけるシミュレーションを用いた検討

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。



竹林を伐採しない場合と、竹林伐採後防水シートを
設置した場合の石室温度の比較

出典: 小椋大輔, 鈴井修一, 李 永輝, 石崎武志: 過去の高松塚古墳石
室内の温湿度変動解析(2), 保存科学, No.49, pp.73-85, 2010



竹林がある時の高松塚古墳



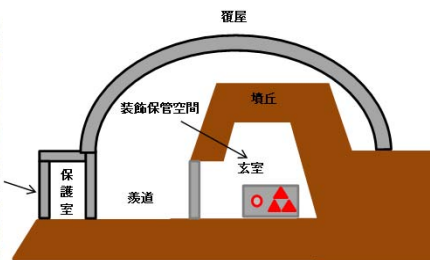
防水シート設置時の高松塚古墳

墳丘等の被覆

- 浸透性、保水性が小さいソイルセメントで覆われた古墳
- 永安寺西古墳、横山古墳

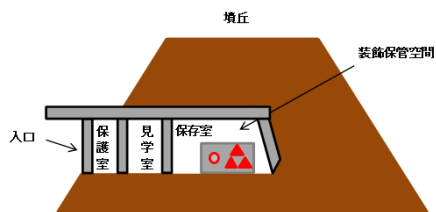


永安寺西古墳



墳丘等の被覆

- 浸透性、保水性が小さいソイルセメントで覆われた古墳
- 永安寺西古墳、横山古墳



横山古墳

墳丘等の被覆

- ・ ソイルセメントで覆われた古墳(永安寺西古墳、横山古墳)

永安寺西古墳(2010年)の年平均値 横山古墳(2011年)の年平均値

玄室: 21.3°C

外気温: 16.6°C

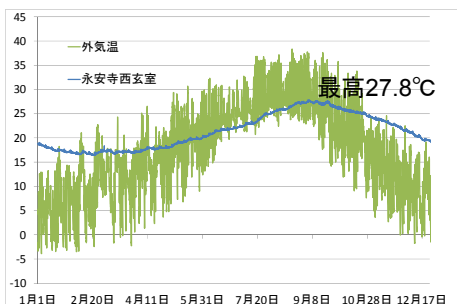
↑ 4.7°C高い

玄室: 17.5°C

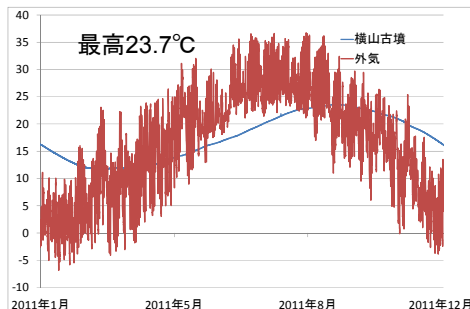
外気温: 16.0°C

↑ 1.5°C高い

いずれも外気温の年平均値より1°C以上高い



永安寺西古墳の玄室温度

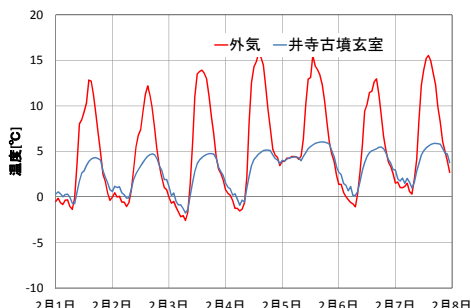
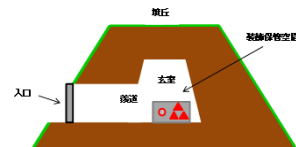


横山古墳の玄室温度

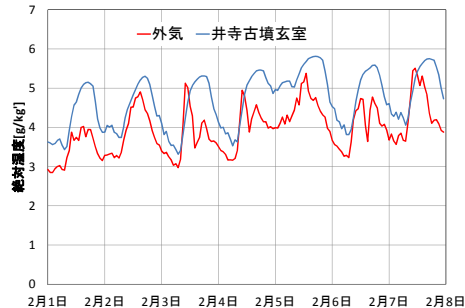
池田朋生、菊川知美: 装飾古墳の博物館資料化に向けた取組み～装飾古墳保護施設の保存環境について～、熊本県立装飾古墳館研究紀要第9集

気密性

- ・ 玄室から外扉までの気密性が低い場合、外気温湿度の日変動の影響を玄室は大きく受ける。
- ・ 井寺古墳の外気と玄室の温湿度変動(下図)



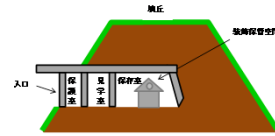
温度変動(2011年2月1日～7日)



絶対湿度変動(2011年2月1日～7日)

池田朋生、菊川知美: 装飾古墳の博物館資料化に向けた取組み～装飾古墳保護施設の保存環境について～、熊本県立装飾古墳館研究紀要第9集

見学室の結露



1. 冬期:

- 見学室の窓面の保管空間側で結露発生
→保管空間の窓以外の部位で蒸発した水分を由来とする。
- 見学室の外扉で結露発生
→見学室と保管空間の窓等の隙間を通じた水蒸気の移動、見学室内壁の吸放湿、人の発湿



2. 夏期

- 保管空間内の窓以外の部位で結露
- 見学室の窓面の見学室側で結露発生
→外扉の隙間からの高湿な外気の侵入、見学室内壁の吸放湿、人の発湿

石之室古墳(2012年11月)

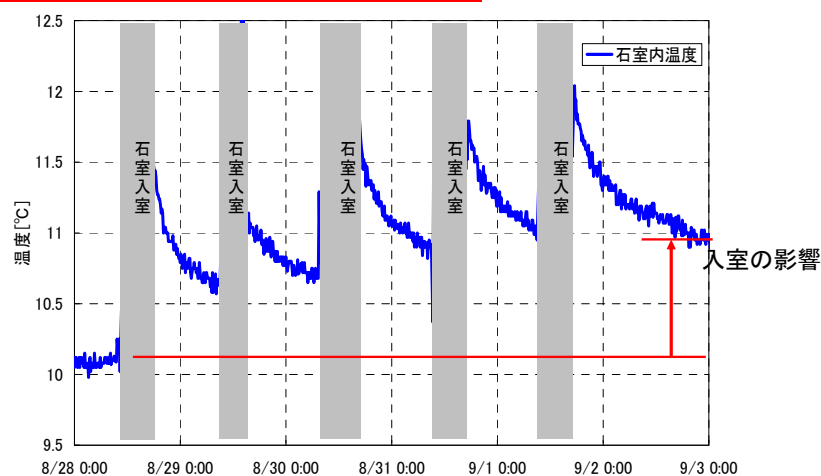
窓の保存室側で結露発生し、窓の隙間を通して見学室側に流下している。

保管空間内で年間を通じて部位を変えて乾燥・湿潤が生じ、毎年それが繰り返される。

入室

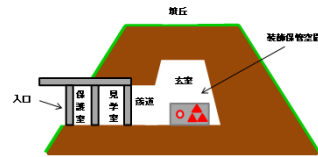
高松塚古墳の石室解体直前の5日間連続した入室があった場合の石室内温度の測定値(2006年8月)

前日の温度上昇の影響が加算され蓄積していく

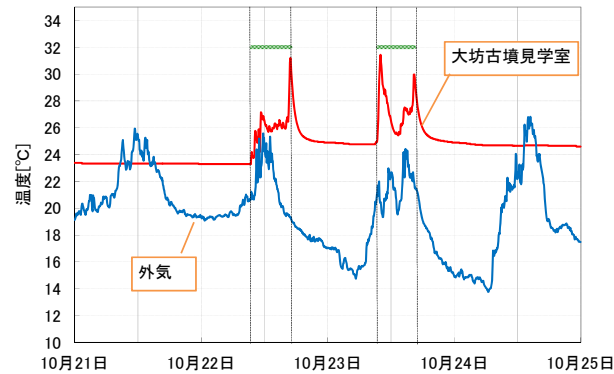


出典: 小椋大輔, 銚井修一, 李 永輝, 石崎武志: 過去の高松塚古墳石室内の温湿度変動解析(3), 保存科学, No.49, pp.87-96, 2010

入室



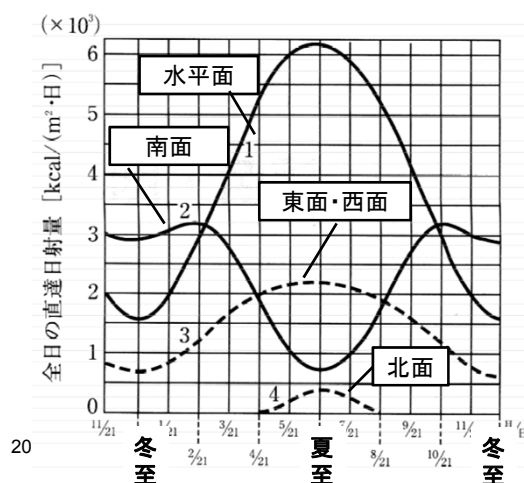
- 大坊古墳(2011年)秋期一斉公開
- 公開時の見学室の入室は見学室の温度を上昇させる。これは窓を通して、保管空間に影響を与える。



出典: 肥後古代の森協議会: 平成23年度 肥後古代の森 古代への旅 活動報告文集、2012

気象条件(日射の特徴)

- 水平面および各方位の鉛直面の受ける日積算直達日射量
- 夏期には水平面、**東・西鉛直面**、南面の順に日射が大きい。
- 冬期には南面、水平面、東西面の順に日射が大きい。



保存施設等の
入口の方位に対して
適切な日射遮蔽等の
対策を講じる必要があ
る。

出典:
松浦 邦男、高橋大武共著・エース建築環境工学
〈1〉日照・光・音、朝倉書店(2001)

4. 装飾保管空間の環境と劣化現象

装飾の劣化現象と温湿度の関係

現象	要因
亀裂, 浮き, 剥離	湿潤膨張・乾燥収縮, 熱膨脹・収縮, 塩類析出, 凍結・融解
カビ等微生物による汚損	温湿度条件, 結露, 栄養(虫死骸等), 入室によるカビ等微生物の持ち込み
藻類・地衣類・蘚苔類による汚損	温湿度条件, 水, 結露, 栄養, 光(照明、日照)
植物根による汚損	植物根の付着
動物・虫による汚損*	糞等の付着
土砂等の流入による汚損	結露水・浸透雨水の流下・落下に伴う土中成分の付着
顔料の流出	結露水・浸透雨水の流下・落下
変色**	
損傷*	人・動物・物等の接触
濡れと乾燥による見え方の変化***	湿潤・乾燥

* : 温湿度とは直接関係しない。

** : 個々の彩色・石材の変色について、事象の整理と要因の分析が必要がある。

*** : 必ずしも劣化とは言えない。慎重に分析する必要がある。

装飾以外の石材の劣化現象と温湿度の関係

現象	要因
亀裂, 浮き, 剥離	湿潤膨張・乾燥収縮, 熱膨脹・収縮, 塩類析出, 凍結・融解
カビ等微生物による汚損	温湿度条件, 結露, 栄養(虫死骸等), 入室によるカビ等微生物の持ち込み
藻類・地衣類・蘚苔類による汚損	温湿度条件, 水, 結露, 栄養, 光(照明、日照)
植物根による汚損	植物根の付着
動物・虫による汚損*	糞等の付着
土砂等の流入による汚損	結露水・浸透雨水の流下・落下に伴う土中成分の付着
損傷*	人・動物・物等の接触
濡れと乾燥による見え方の変化**	湿潤・乾燥

* : 温湿度とは直接関係しない。

** : 必ずしも劣化とは言えない。慎重に分析する必要がある。

遺構の盛り土等の劣化現象と温湿度の関係

現象	要因
亀裂, 浮き, 剥離	湿潤膨張・乾燥収縮, 塩類析出, 凍結・融解, 植物の根
カビ等微生物による汚損	温湿度条件, 結露, 栄養(虫死骸等), 入室による持ち込み
藻類・地衣類・蘚苔類による汚損	温湿度条件, 水, 結露, 栄養, 光(照明、日照)
植物根による汚損	植物根の付着
動物・虫による汚損*	糞等の付着
流出・浸食	浸透雨水・結露水の流下・落下
粉状化	乾燥収縮, 塩類析出
石の隙間からの落下	乾燥収縮, 塩類析出
損傷*	人・動物・物等の接触

* : 温湿度とは直接関係しない。

墳丘・保存施設の劣化現象と装飾保管空間への影響

墳丘・保存施設の水対策が重要である。

	現象	装飾保管空間への影響
墳丘	亀裂	雨水侵入、熱容量・断熱性の低下、隙間による外気の影響、動物・虫等の侵入経路
	削れ、流出	雨水侵入、熱容量・断熱性の低下、隙間による外気の影響、動物・虫等の侵入経路
	防水層の劣化	雨水侵入
	断熱材の劣化	断熱性低下
	植物の成長	根による墳丘の亀裂、防水層の破れ、装飾保管空間への侵入、墳丘温度の上昇の抑制と促進
保存施設	扉（入口等）の隙間	雨水侵入、断熱性低下、隙間による外気の影響、動物・虫等の侵入経路
	断熱材の劣化	断熱性低下
	金属の腐食	雨水侵入、断熱性低下、隙間による外気の影響、動物・虫等の侵入経路
	構造体の劣化（木材腐朽、コンクリート中性化等）	雨水侵入、断熱性低下、隙間による外気の影響、動物・虫等の侵入経路
	空調設備の劣化	入室による発熱、水分発生等の装飾保管空間への影響の緩和効果の低下、（見学室を通して）カビ等の飛散

5. 装飾古墳のための環境調整

保存と公開における制御対象

対象	制御の目的	関係因子
人	温熱環境、 空気質の維持	温湿度、CO ₂ 濃度等、浮遊菌等
装飾	劣化進行抑制	温湿度、結露、栄養、光等
	見え方	結露・乾燥状態、光等
装飾以外の 遺構(石材、 盛土等)	劣化進行抑制	温湿度、結露、栄養、光等

人に対する室内環境の目標値

- ビル衛生管理法: 空気調和設備を設けている場合の空気環境の基準

浮遊粉じんの量	0.15 mg/m ³ 以下
一酸化炭素の含有率	100万分の10以下(=10 ppm以下) ※特例として外気がすでに10ppm以上ある場合には20ppm以下
二酸化炭素の含有率	100万分の1000以下(=1000 ppm以下)
温度	(1) 17℃以上28℃以下 (2) 居室における温度を外気の温度より低くする場合は、その差を著しくしないこと
相対湿度	40%以上70%以下
気流	0.5 m/秒以下
ホルムアルデヒドの量	0.1 mg/m ³ 以下(=0.08 ppm以下)

人に対する室内環境の目標値 微生物(細菌、真菌)

日本建築学会環境基準AIJES-A0001-2013 微生物による室内空気汚染に関する設計
および維持管理規準の提案値 より抜粋

対象建物	設計規準(細菌)		設計規準(真菌)		設計規準(微生物)		備考
事務所 ¹⁾	浮遊 (cfu/m ³)	200 以下	浮遊 (cfu/m ³)	20 以下			維持管理規準として 細菌500,真菌50 cfu/m ³ 以下
学校 ²⁾	浮遊 (cfu/m ³)	10,000 以下	浮遊 (cfu/m ³)	2,000 以下			維持管理規準としても 使用
	落下 (cfu/5分・皿)	10 以下	落下 (cfu/5分・皿)	10 以下			
住宅	規模、工法、住まい方 等で既存データにバラ ツキが見られ規準値の 策定が困難		維持管理規準 浮遊(cfu/m ³) 1,000以下				真菌濃度が 1,000cfu/m ³ 以上の 場合、 I/O比は2以下
高齢者 福祉施設 ¹⁾	居室、食堂・談話室、デイルーム・機能訓練室と も				浮遊 (cfu/m ³)	200 以下	維持管理規準として 500cfu/m ³ 以下

注 1) 空調設備有、2) 授業中の教室

点検・公開にあたって考慮する必要がある。

装飾保管空間の環境の目標値は？

・装飾における劣化現象と要因の例

現象	要因
亀裂、浮き、剥離	湿潤膨張・乾燥収縮、塩類析出、凍結・融解
カビ等微生物による汚損	温湿度条件、結露、栄養(虫死骸等)、入室による カビ等微生物の持ち込み
藻類・地衣類・蘚苔類による 汚損	温湿度条件、水、結露、栄養、光(照明、日照)

■ 劣化現象の要因となる温湿度、結露、光などの環境については、

その制御に関する閾値や目標値を明確にいうのは難しいが、

どの方向で環境を調整すべきかは言えよう。

→ 装飾保管空間内が高湿で維持されなければならないとすれば、

・結露や乾燥を抑えるため保管空間内温度分布を小さくする。

・カビ等微生物活動の活発となる温度域を避ける。

・日照侵入を抑えるため外扉の隙間をなくし、照明点灯時間を制御する。

温湿度や光以外の条件としては

・雨水や虫の侵入を抑えるため、装飾保管空間内の隙間をなくす(植物根をとることも含む)。

環境調整手法

- 土木・建築的対応
 - 保存施設
 - 墳丘の被覆状態
 - 周辺環境(植生等)
- 設備的対応
 - 空調制御 等
- 運用的対応
 - 点検・公開による入室の頻度、方法
 - 紫外線照射等による生物対策

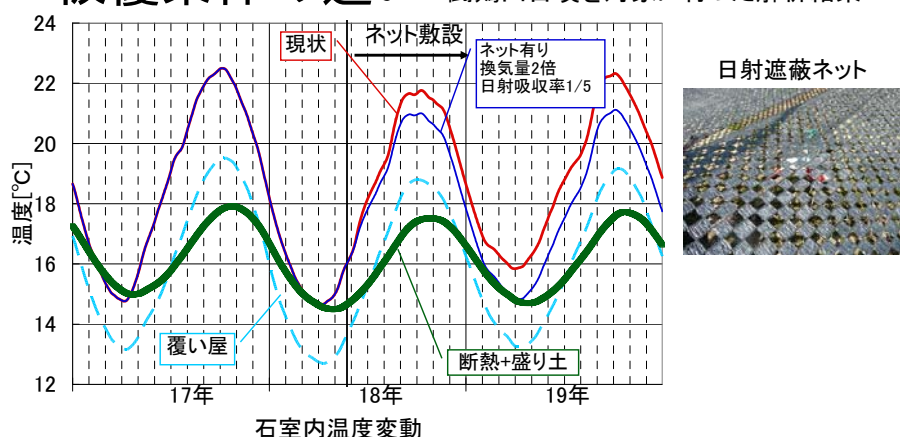
土木・建築的対策の例 ー1

- 亀裂, 浮き, 剥離を抑える
(石室内が高湿である状態を前提とすると)
 - 湿潤膨張・乾燥収縮, 熱膨脹・収縮, 塩析出, 凍結融解現象を抑える
 - 結露・乾燥を抑える ため温度分布を小さくする
 - 温度変動を小さくし、零下とならないようにする
 - 1) 周りを十分断熱する
 - 2) 保存施設入口等の日射遮蔽を行う
 - 3) 気密性を上げ外気の侵入を抑える

土木・建築的対策の例 ー2

- カビ等微生物による汚損を抑える。
(石室内が高湿である状態を前提とすると)
 - 結露の発生を抑える。
 - 結露・乾燥を抑えるため温度分布を小さくする
 - カビ等の生育を抑えるため温度上昇を抑える
 - 1) 墳丘被覆は保水性の小さい材料(ソイルセメント等)を避け、
保水性の大きい植生等で被覆を行う(植生は根の成長に注意)
 - 2) 周りを十分断熱する
 - 3) 日射遮蔽を行う
 - 4) 気密性を上げ外気の侵入を抑える

被覆条件の違いー關鷄山古墳を対象に行った解析結果



- 1) ネットの日射反射率と中空層の換気の増加⇒約1°C低下
- 2) 覆い屋の設置⇒最大値は約3°C低下、平均値は18.6°Cから16°Cまで低下
- 3) 地表面を断熱し盛り土⇒最大値は約4°C低下、平均値は16.2°Cに

出典: 鈴井、小椋、前川: 關鷄山古墳の保存環境に関する研究: (その3) 日射遮蔽ネットの影響と地表面被覆条件の改善策、日本建築学会大会梗概集 D2, pp.301-302 (2009)

亀裂, 浮き, 剥離と、カビ・微生物による汚損を抑えるため
土木・建築的対策のみ(主として断熱・気密)で万全か？

- 結露・乾燥の頻度を抑えたり、年平均温度を下げたり、
温度変動を抑えるのには効果的である。

- 年平均温度が下がる } 見学室から保管空間へ
- 入室 } 熱、水分が供給される。

- 見学室と保管空間の間の扉・窓等の断熱、気密を完全
にしないと熱、水分が保管空間に入ることになる。

⇒ 完全に断熱・断湿とするか、設備が必要

- 種々の劣化現象への対応は、古墳の特性、装飾の
材料の特性を踏まえて考える必要がある。

6. 今後の課題について

環境調整の状況と各種状態の把握 のための点検・モニタリング

環境調整の状況と各種状態の把握のため、関係する因子の点検・モニタリングを行う。

- ・ 装飾、装飾以外の遺構の状態
- ・ 墳丘の状態
- ・ 保存施設(空調設備含む)の状態
- ・ 装飾保管空間や屋外の環境

これらを行う際の、項目のリストアップ、適切な点検間隔、モニタリングに用いる機器と測定方法の整理が必要である。

モニタリング

定期的な空間温湿度、表面温度、表面含水量、測色といった物理量の計測、表面状態の目視・写真比較等による観測・分析など

モニタリングの目的:

- 1) 定期的に現状をおさえる。
温湿度等の物理量の年変化の特徴の把握。
目視・写真の年変化の特徴の把握。経年変化の分析
 - 2) 劣化現象につながる事象を把握し、その原因を明らかにし、対策を講じ、劣化現象の発生を未然に防ぐ。
例: 温度が高すぎる。表面の含水率が低すぎる。
 - 3) 劣化現象を発見し、対策を講じる。
例: 塩が析出している。亀裂が生じている。
- 劣化現象につながる事象、劣化現象の発生メカニズムの分析が必要。情報公開を行い、多くの人が検討できるようにすることも考えられる。

適切なモニタリング手法と結果の分析方法の確立の必要性

壁画の見え方と状態

- 季節ごとの濡れと乾燥により、壁画の見え方は変化する。
- 温湿度形成、見え方の変化のメカニズムの解明
- 変化する壁画の見え方を適切にモニタリングする手法の開発¹⁾が行われている。



釜尾古墳 夏期の濡れた石材(2012.8.14) 冬季の乾燥した石材(2013.1.30)

1) 池田朋生、菊川知美、最上敏、朽津信明：熊本県内における装飾古墳保存施設を対象としたモニタリング、文化財保存修復学会第32回大会(2010)

環境調整の観点からみた装飾古墳の 類型化に向けて(案)

1. 墳丘、保存施設・覆屋、装飾保管空間、装飾等遺構の類型化
2. 装飾古墳ごとの温湿度環境の特徴の把握
3. 用いられている材料の物理的特性(熱湿気特性など)の把握
4. 装飾古墳ごとの温湿度環境の形成のメカニズムの解明(シミュレーション等を用いる)
5. 装飾古墳ごとの温湿度特性の整理と類型化

環境調整の観点からみた装飾における劣化現象とその対策について(案)

1. 材料ごとの劣化現象の整理
2. 材料ごとの物理的・化学的特性の把握
3. 材料ごとの劣化現象のメカニズムの整理・解明
4. 古墳ごとあるいは類型化された古墳の環境の特徴の把握
5. 古墳の環境の特徴を考慮した材料の劣化現象の予測(実験、シミュレーション、等を用いる)
6. 短期的、長期的な保存対策の検討と提案
(自然災害(地震、大雨、洪水など)も想定し、
保存施設の継続的利用のための保守、改修方法を含む)
7. 装飾古墳ごとの適切な公開時期・方法の検討と提案

屋外に露出している装飾のある横穴

- 屋外に露出している横穴は、外壁面に、彫刻や彩色があるものもある。
- これらの保存には、**磨崖仏の環境管理と保存対策が参考になると**考えられる。



石貫ナギノ横穴



鍋田横穴

謝辞

- 熊本県立装飾古墳館 坂口 圭太郎氏、池田朋生氏をはじめとする熊本県及び市町村の多くの方々に、熊本県内の装飾古墳の状況や温湿度データについて多く情報をご提供いただいた。
- 高槻市教育委員会文化財課 高橋公一氏をはじめとする高槻市の方々には、闘鶏山古墳の調査や計測データ提供において、多くご協力いただいた。
- 頂いた協力が装飾古墳の今後の保存活用の大きな礎となることを確信するとともに、心より感謝申し上げます。