

## 古墳の保全に向けた地盤工学の役割 ～高松塚古墳を例として～

京都大学防災研究所・三村 衛

## 高松塚古墳・壁画の発見

- 昭和47年3月1日発掘調査着手
- 昭和47年6月に史跡指定
- 昭和48年4月に特別史跡に昇格
- 昭和49年4月に壁画が国宝に、出土遺物が重要文化財に指定
- 保存施設として空調用機械室、石室との間の前室を建設

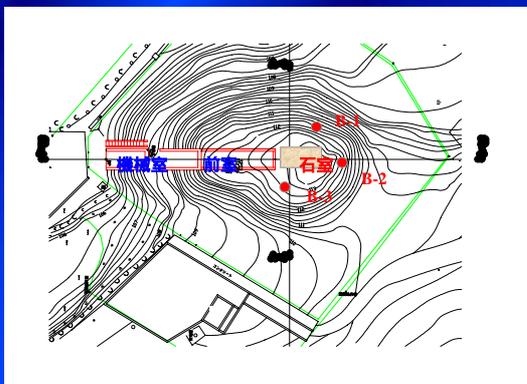
高松塚古墳全景（平成15年4月撮影）



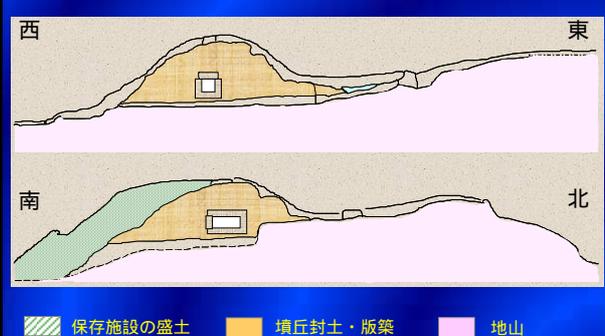
墳丘上の樹木、竹伐採後の高松塚古墳

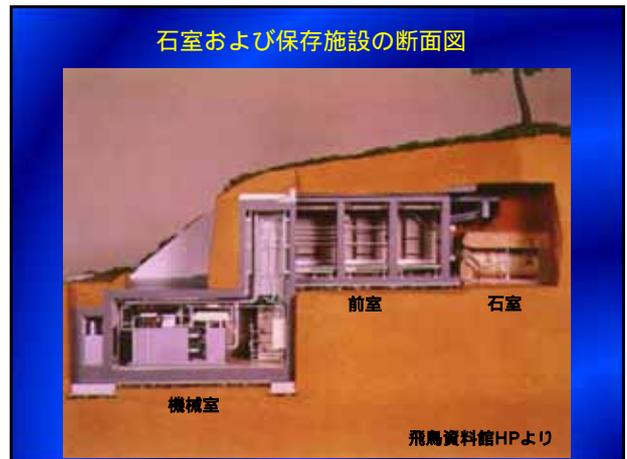
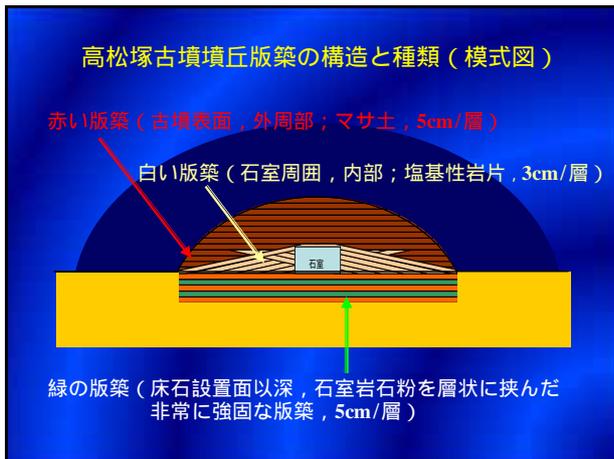


高松塚古墳墳丘および石室の平面図



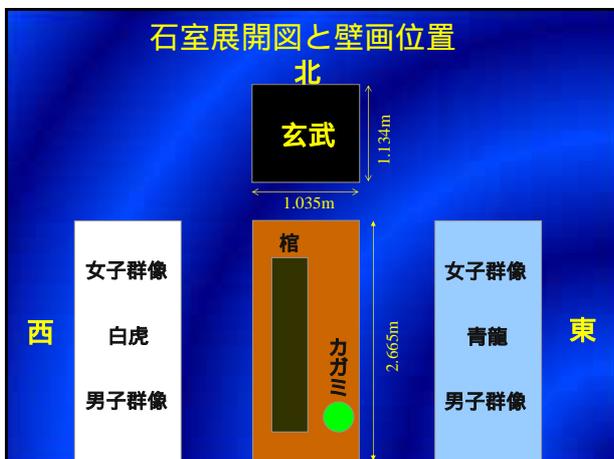
高松塚古墳墳丘および石室の断面図

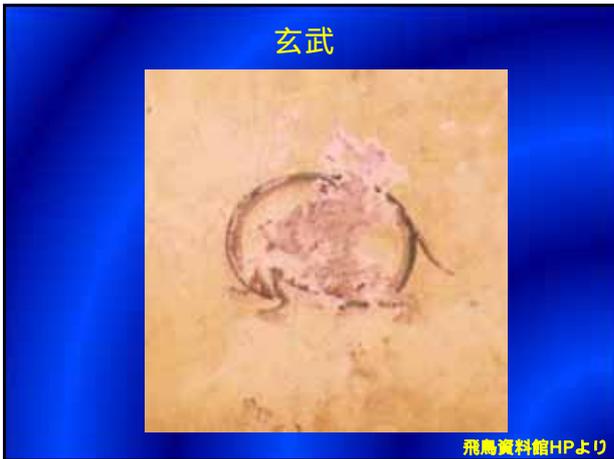




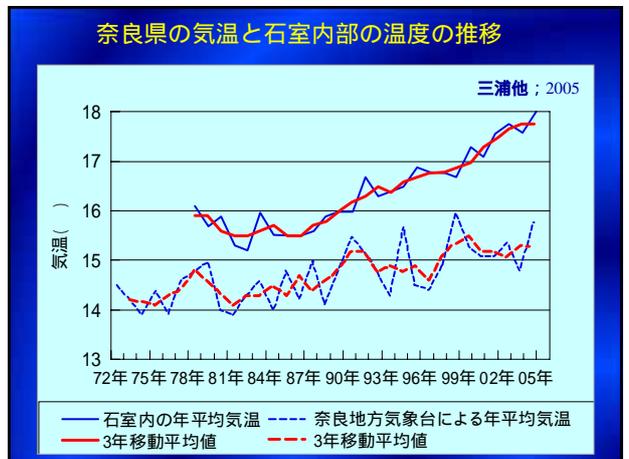
- ### 古墳と壁画の概要
- ・ 下段直径23m，上段直径18m，高さ5.4mの二段円墳
  - ・ 南向き斜面上に築造されており，墳頂下約2.5mの位置に凝灰角礫岩（二上山起源）を組み合わせた石室（内法寸法：長さ2.66m，幅1.03m，高さ1.13m）があり，内部には漆喰が施され，漆喰層上に壁画が描かれている
  - ・ 石室周囲は土を数センチ前後の厚さに撒きだして突き固めた版築と呼ばれる層で覆われている

- ### 石室内部の壁画
- ・ 北壁：玄武
  - ・ 西壁：白虎・月像、男女子群像
  - ・ 東壁：青龍・日像、男女子群像
  - ・ 天井：星宿図
  - ・ 南壁：盗掘孔があり，一部損壊しており，本来存在しているはずの朱雀は残存していない

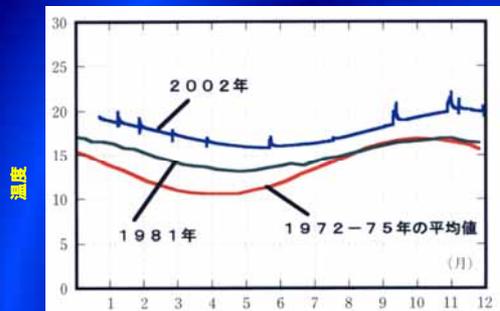




- 石材・漆喰の今後の変化について
- 石材は二上山起源の凝灰角礫岩であり、漆喰同様、風化が進んでいる
  - 風化現象は時間とともに単調に進行する（力学特性が改善されることはあり得ない）
  - 亀裂の発生と進展、粉状化の危険性がある

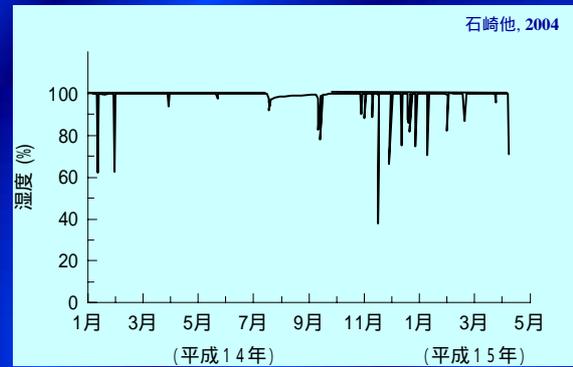


### 石室内温度の年変動の比較



文化庁 国宝高松塚古墳壁画より

### 石室内部の湿度の推移



石崎他, 2004

### 検出されているカビについての現状認識

- 土の中に生息している土壌菌が検出、家カビとは別種のものである
- 石室内は飽和状態であり、カビの菌については1300年間平衡状態にあった
- 発見による環境変化、近年の温度上昇（約2°）によって大繁殖した
- 薬剤に耐性を有し、適応した寿命の長い胞子が生産されている可能性がある

### 石室内におけるカビの状況

- カビに対する影響要因は、温度、湿度、酸素、養分である
- 一般的には10～15°という人間生活温度では繁殖しにくく、15°以上になると加速度的に繁殖する
- カビを食する虫類、ダニの存在、その死骸にカビが養分を得て繁殖し、それを求めて虫類とダニが石室に侵入（連鎖の環境が形成）する悪循環に陥っている

### 壁画を傷める要因についてのまとめ

- 風化による石材、漆喰の物理的劣化
- カビや虫類による生物学的要因

種類の異なる大きな2種類の要因が複合的に作用している

### 高松塚古墳・壁画の恒久保存に向けて

- 現況の把握（物理的劣化と生物的要因の複合作用による傷み）
- 壁画の修復が必要（現在の石室内環境で有効に行えるか？）
- 恒久対策着手までの時間と緊急対策

最適解を見つける



### 石室内部の湿度をコントロールできる？

- ・石室まわりは不飽和とはいえ、含水比15%程度の版築で覆われており、内部空間の蒸気とは平衡状態を保っている。周囲の土の含水比を少し落としたところで、石室内部の湿度が低下するものではない（周囲の水分による新たな平衡状態）。
- ・石室内部の湿度が低下するレベルまで版築の含水比を落とす方法はない。

↑  
地盤工学からの提言

現在の状態で石室内の温度・湿度をコントロールできたとしても、壁画とカビ対策で相反する措置をとらなければならない。

### 石室内の低酸素化、例えば窒素ガス封入による生物対策

- ・カビに対しては極めて有効である。
- ・調査結果によると、石室の空隙は600mm<sup>2</sup>存在しており、酸素0.1%状態を創出するのは無理である。
- ・隙間密閉のために薬剤でシールすると、相対的に弱い漆喰層が剥落する可能性がある。
- ・修復作業時には作業者の安全の確保のため、外気状態を回復する必要がある。
- ・その他のガスを使用する場合、壁画顔料への影響が懸念される。

### 石室を解体し、壁画を外部で修復

- ・石室・壁画が原位置を離れるため、古墳としての価値が喪失する懸念がある。
- ・解体、吊り上げ、輸送時のリスク
- ・壁画を上向きにして修復できるので、作業効率、精密度が格段に向上する。
- ・温湿度を完全に管理できる室内に保存できるので、生物対策、漆喰の劣化対策が確実に実施できる。
- ・凝灰角礫岩の背面まで強化でき、将来原位置に戻す際にも強度的な不安が払拭できる。
- ・地震など不測の事態による壁画の破損を防止できる

### 墳丘内部の地盤情報の必要性

- ・カビの発生 水分の供給ルートとしての水みち、墳丘の水分含有状態の把握の必要性
- ・壁画の保存対策 関連する作業を実施するにあたり、地盤の剛性や強度に関するデータが必須
- ・長期的には地震時の安定性を確保するための仕組みを考える必要があり、そのための動的特性把握の必要性

↓  
サンプリングとサウンディングを実施

### ボーリング仮設足場遠景と作業

マシンの騒音・振動による漆喰表面壁画への影響防止  
吊り足場（仮覆屋の基礎から単管組上げ方式による）  
ディーゼルエンジンではなく電気によるボーリング



### エアーパーリング法の採用

不飽和で墳丘内部に地震痕跡と思われる亀裂が多数あるので泥水の使用が不可

↓  
泥水の代わりに圧力空気を送る

透明アクリルサンプラーの採用  
（外から採取試料が目視できるように）

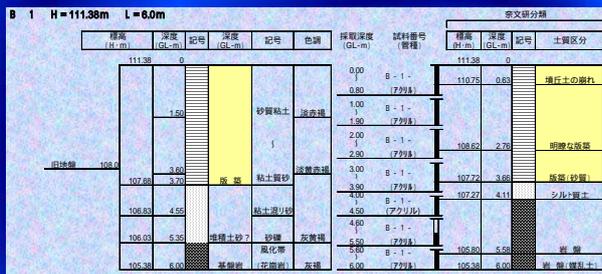
### 採取試料一覧と土種分類

ボーリング地点	試料番号	採取深度 (GL-m)	管種	概略採取率 (%)	填丘土区分 (奈文研)
B-1		0 - 0.80	アケル	100	填丘土の崩れ - 明瞭な版築
		1.00 - 1.90	アケル	100	明瞭な版築
		2.00 - 2.90	アケル	100	明瞭な版築 - 版築(砂質)
		3.00 - 3.90	アケル	100	版築(砂質) - シルト質土
		4.00 - 4.50	アケル	100	シルト質土 - 岩盤
		4.60 - 5.50	アケル	50	岩盤
B-2		0 - 0.90	アケル	100	填丘土の崩れ1 - 填丘土の崩れ?
		1.00 - 1.90	アケル	100	填丘土の崩れ? - 明瞭な版築
		2.00 - 2.90	アケル	100	明瞭な版築 - 層厚い版築 - 灰色粘土
		3.00 - 3.90	アケル	100	灰色粘土 - シルト質土 - 岩盤
B-3		0 - 0.95	VU	100	
		1.00 - 1.95	VU	100	
		2.00 - 2.95	アケル	100	明瞭な版築
		3.00 - 3.95	アケル	100	明瞭な版築 - 層厚い版築 - 炭混り灰色粘土 炭混り灰色粘土 - シルト質土 - 岩盤

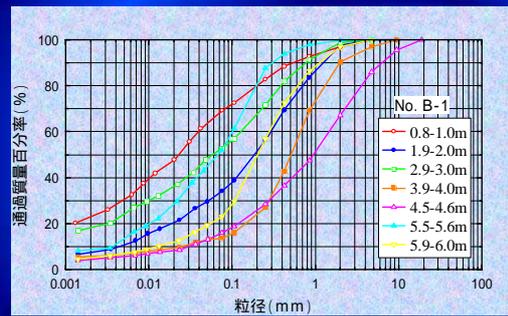
### 版築層の360°写真



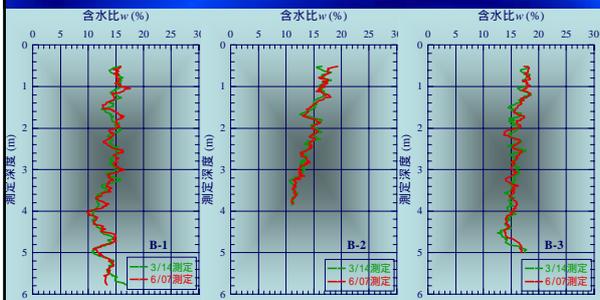
### 填丘西側ボーリング孔 (B-1) 部柱状図



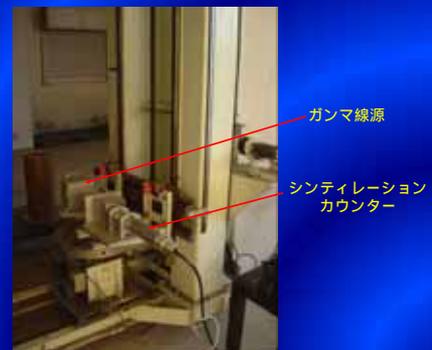
### 填丘西側ボーリング孔 (B-1) 試料 粒径加積曲線



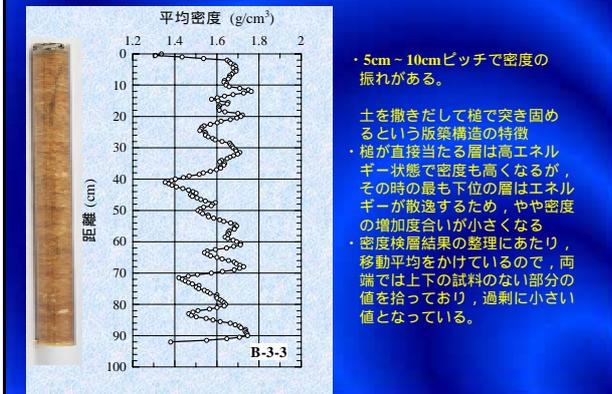
### 石室周囲3孔における土中含水比分布検層結果



### RIコア密度測定器

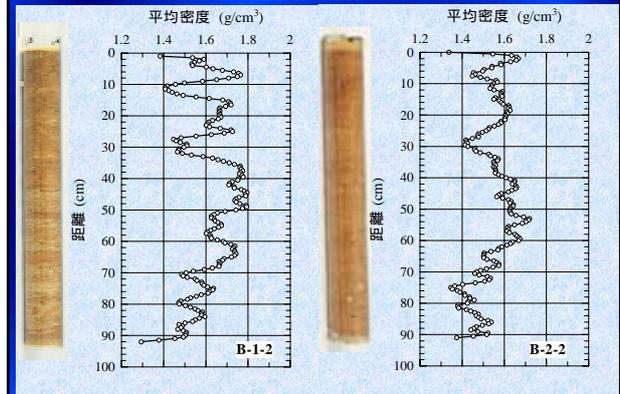


### 採取されたコア試料のRI密度測定結果

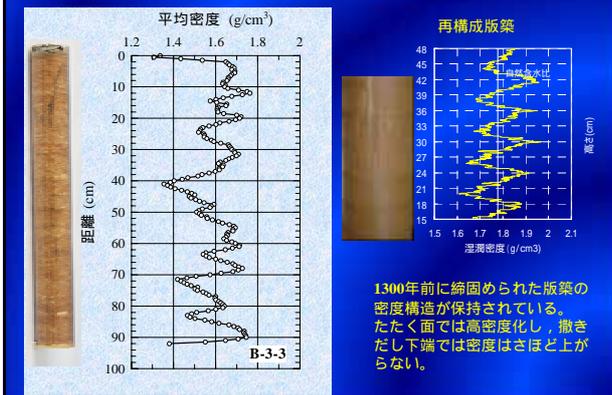


- ・ 5cm - 10cmピッチで密度の振れがある。
- ・ 土を撤きだして槌で突き固めるといふ版築構造の特徴
- ・ 槌が直接当たる層は高エネルギー状態で密度も高くなるが、その時の最も下位の層はエネルギーが散逸するため、やや密度の増加度合いが小さくなる
- ・ 密度検層結果の整理にあたり、移動平均をかけているので、両端では上下の試料のない部分の値を拾っており、過剰に小さい値となっている。

### 採取されたコア試料のRI密度測定結果

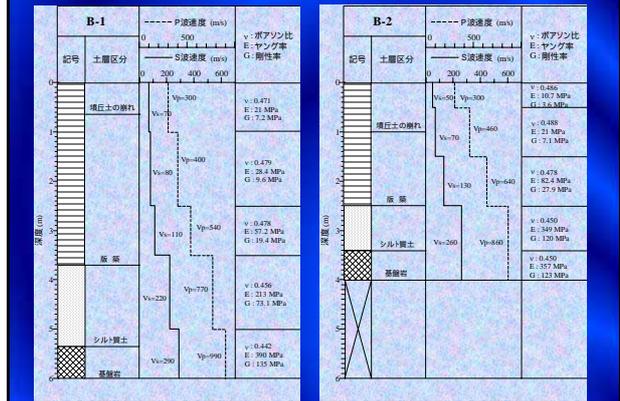


### 高松塚古墳版築コアと再構成版築の湿潤密度分布

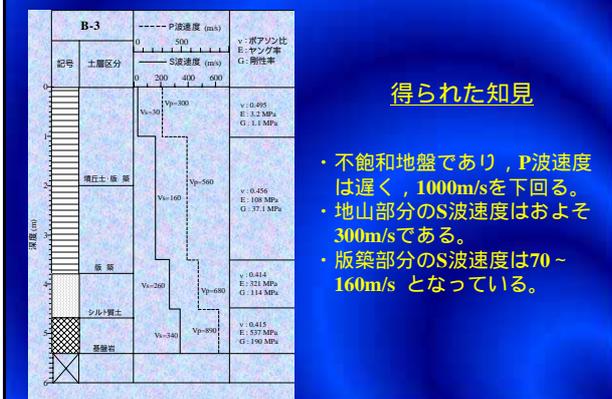


1300年前に締固められた版築の密度構造が保持されている。たたく面では高密度化し、撤きだし下端では密度はさほど上がらない。

### 墳丘のPS速度検層結果 (1)



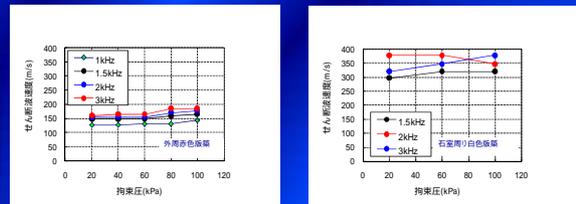
### 墳丘のPS速度検層結果 (2)



#### 得られた知見

- ・ 不飽和地盤であり、P波速度は遅く、1000m/sを下回る。
- ・ 地山部分のS波速度はおよそ300m/sである。
- ・ 版築部分のS波速度は70 ~ 160m/s となっている。

### ベンダーエレメント試験による健全な試料のS波速度測定結果



- ・ 外周赤色版築土では150 ~ 200m/s
- ・ 石室周りの白色版築土では300 ~ 400m/s
- ・ 現地PS検層による値 (赤色版築) に比べて大きい

### 墳丘上部のトレンチ（2006年10月26日撮影）



左：もちの木の根が地震による地割れを選択して墳丘奥深くまで侵入  
右：江戸時代に描かれていた松の木の根の跡が炭化した状態で存在

### 墳丘奥部の白い版築（2006年12月8日撮影）



左：石室上部80cm地点で上部版築内部に円錐状に白い版築層が出現  
右：白い版築層の拡大写真 マサ土ではなく、塩基性の鉱物を中心、二上山の畑安山岩+屯鶴坊凝灰岩？

白い版築は周囲を形作るマサ土による赤い版築に比べて硬くて強い

### 白い版築面で確認した筵地模様（2006年12月8日撮影）



左：白い版築層表面で確認された筵地模様  
右：拡大写真

締め固め層厚が3cm内外と薄くなっているため、撤きだした後に突き棒で締め固める際に突き棒に土がくっつくのを防止するために繊維質の筵のようなものを敷いて締め固め工程を行ったものと考えられる。

### 白い版築の発掘調査（2007年、解体建屋建設後）



左：畦部分を撤去した白版築表面の全景（2007年1月30日撮影）

右：掘り下げて白版築表面を拓本取り（2007年2月14日撮影）

### 石室直上10cm地点の白い版築（2007年2月28日撮影）



左：石室直上の白版築の全景 石室の形が亀裂の形から想像できる  
右：地震亀裂の様子（南東側トレンチ）

石室がボックスカルバート、墳丘が道路盛土と考えれば、地震地にボックスカルバートが残り、盛土が地割れとともに周囲へと滑り落ちる現象と同じことが墳丘内部で起こったと考えられる。

### 石室天井石と石材間漆喰の状態（2007年3月7日撮影）



左：石室の天井部分が現れる。白版築が石室を円錐形に覆っている。  
右：石材間は漆喰で接合されているが、木の根が侵入している。

石材インタクト部自体は比較的良好な状態で保存されている。石材間を接合している漆喰は劣化が進んでおり、木の根が至るところに侵入している。

### 石室天井石全景と側壁の一部（2007年3月22日撮影）



左：石室の天井部分4石が完全に露出。最も北奥の天井石は他石に比べて小さい。  
右：東側側壁の上端が現れる。

### 石室天井石の構造と作業痕跡（2007年4月3日撮影）



左：石室の天井には合欠きがあり、南から北へ順番に設置したことがわかる。取り外しは北側から行う。  
右：のみで削った跡や、榫穴が認められる。

石室の組み上げ方と構造が明らかとなった。天井石は合欠きの状態から、組み方の順序が南・北であり、周囲を削って形を整えた鑿の痕跡や、移動させる際に使用した梃を突っ込む榫穴の存在も確認された。

### 壁画石材除去後の床石



左：床石と周辺部分、丸い土柱は水秤用杭打設孔跡  
右：床石下の版築層、緑に見える縞は石材を削ったと思われる凝灰岩の粉、全部で13層確認されている。

床石からは赤い顔料（丹か？）が見つかった。絵画を描く時に絵師が落としたりしたのではないかとされている。

### 床石下の版築層の断面と平面



左：床石下の版築層の断面写真、3cm程度ごとに緑色の縞となっている層が認められる。  
右：緑色の層で削いだ平面、丸は水秤を設置する際に打設した木杭孔

石室の基礎を支える版築は、緑色の層が13枚挟まれている。側壁や天井石を現場で最終整形した際に出る凝灰岩の粉である。何故そうしたのかは不明。

### 版築層を支える地山の確認（8月30日撮影）



左：床石下の版築層と地山と思われる花崗閃緑岩風化層  
右：地山の平面写真（地域地盤環境研究所・北田氏による確認）

石室の基礎を支える版築構造とは明らかに異なる花崗閃緑岩風化層が現れた。明日香村一帯に広く分布する地層とも一致したため、地山と判定し、発掘を終了した。

### 適用する試験法

- 非破壊試験法であること
- 迅速な試験であること
- 衝撃や振動を与えない試験法であること

**針貫入試験：**

先端貫入針を対象土に貫入させ、その時の貫入量と貫入力から一軸圧縮強度に換算する。

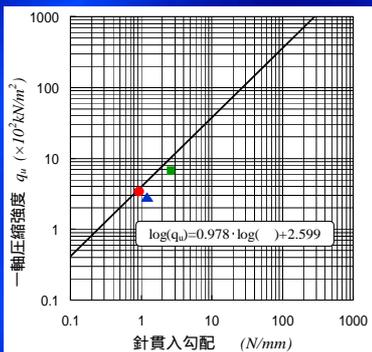
表面透過型 R I 密度水分計・表面散乱型 R I 密度計：密封線源から放射されるガンマ線、中性子線を地表部に設置する検出管で探知し、地盤の密度と含水比を求める試験である。

キャスボル（簡易支持力試験器）：45cmの高さから4.5kgの重錘を落下させ、地盤面に当たった時の衝撃加速度値から地盤の強度を算定する試験法である。針貫入試験が表層1cmの領域に対する強度値を求めるのに対し、キャスボルでは地盤内部20～30cmの部分までの範囲の平均的な強度が求められる。

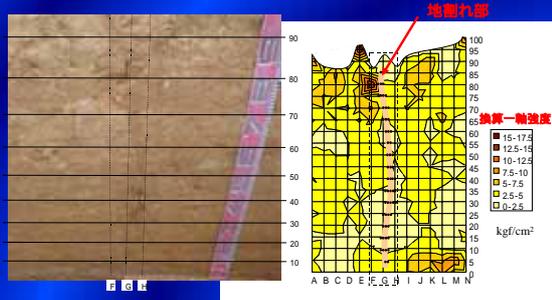
**針貫入試験機と古墳内部での実験実施状況**



**針貫入試験機の構成曲線と高松塚版築土による検証**

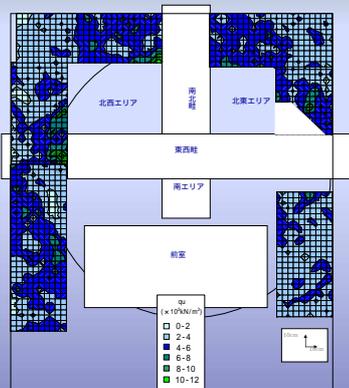


**トレンチ内針貫入試験による強度比較**

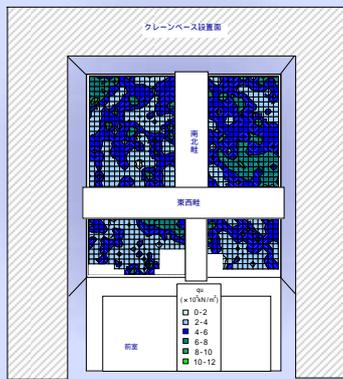


周囲版築に比べて地震痕跡と思われる割れ目内部の強度は低い

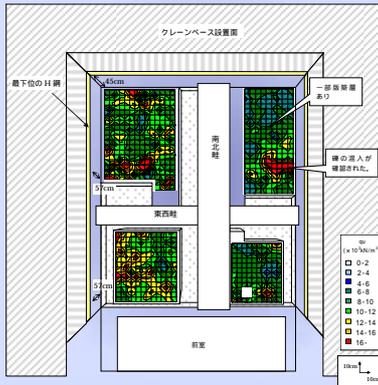
**クレーンベースにおける換算一軸圧縮強さ**



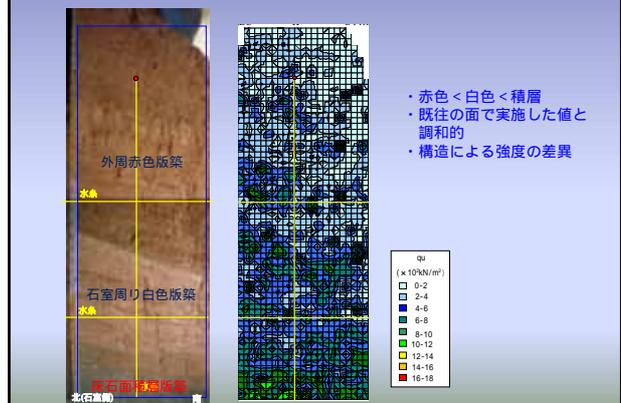
**石室天井から10cm地点における換算一軸圧縮強さ**



### 床石接地面における換算一軸圧縮強さ



### 2001年2月1日南側墓道部東壁で実施した異種版築同時調査結果



### 墳丘版築に関して得られた知見

- クレーンベース設置面の針貫入試験による換算一軸圧縮強さ  $q_c$  の値はほとんどの領域で  $2 \sim 6 \times 10^2 \text{ kN/m}^2$  で、墳丘中心から離れるほど小さくなる傾向が見られた。クレーンベースの安定性照査には平均値の  $4 \times 10^2 \text{ kN/m}^2$  を用いた。
- 石室から  $10 \text{ cm}$  上面の版築掘削面の針貫入試験による換算一軸圧縮強さ  $q_c$  の値は  $4 \sim 8 \times 10^2 \text{ kN/m}^2$  であり、クレーンベースの値よりもやや大きな強度を有している。
- 床石設置面の針貫入試験による換算一軸圧縮強さ  $q_c$  は、ほとんどの領域で  $8 \sim 12 \times 10^2 \text{ kN/m}^2$  で、上位の版築層より大きく、地山の強度に近い値を有することが確認された。

### 石室解体時の地盤・石材の安定性評価

- 原位置・室内土質試験結果に基づく強度定数の決定
- 墳丘壁面土圧・クレーン設置に伴う支持力検討
- 石材の吊り上げ時における安全性の検討

### 墳丘版築の強度定数の設定と支持力算定

- クレーンベース版築のRI密度検層平均値を適用  
単位体積重量  $\gamma = 16.43 \text{ kN/m}^3$
- 版築をc材料として原位置針貫入試験値をベースに強度定数を設定（採取試料による室内一面せん断試験結果参照）
- 追加ケースとして簡易支持力測定試験のインパクト値から  $c$  および  $\phi$  を設定
- 石室吊り上げ時にフレームの柱体一本あたり最大4.5トンがベースプレートにかかる 敷き鉄板（幅93cm）で受けて支持するとして外力を設定  
 荷重圧  $q_{\text{max}} = 44 \text{ kN/m}^2$
- 上界法によって許容支持力を算定

発掘面底部から墳丘発掘部の側壁内部に向かって45°の破壊線を仮定し、図中に土塊1、土塊2で示した土塊が滑動するという滑動モードを想定する。

$$W_{\text{ext}} = \left[ q_0 \cdot d + \gamma_1 \cdot \left\{ (h-d) \cdot d + \frac{1}{2} d^2 \right\} \right] \cdot V_0 = \left\{ q_0 + \gamma_1 \cdot \left( h - \frac{1}{2} d \right) \right\} \cdot d \cdot V_0$$

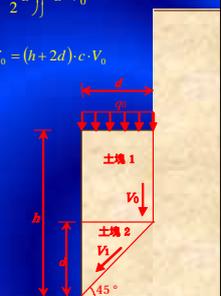
$$W_{\text{int}} = (h-d) \cdot c \cdot V_0 + d \cdot c \cdot V_0 + \sqrt{2} d \cdot c \cdot V_1 = h \cdot c \cdot V_0 + 2d \cdot c \cdot V_0 = (h+2d) \cdot c \cdot V_0$$

$$W_{\text{ext}} = W_{\text{int}}$$

$$\left\{ q_0 + \gamma_1 \cdot \left( h - \frac{1}{2} d \right) \right\} \cdot d \cdot V_0 = (h+2d) \cdot c \cdot V_0$$

$\gamma_1 = 16.43 \text{ kN/m}^3$ ,  $c = 100 \text{ kN/m}^2$ ,  $d = 0.93 \text{ m}$ ,  $h = 2.7 \text{ m}$   
を代入して、許容応力  $q_0$  を算定すると、

$$q_0 = 453.6 \text{ kN/m}^2$$



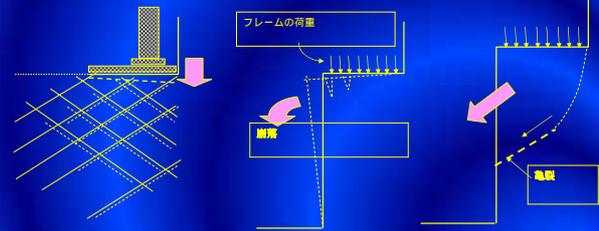
### クレーンベース支持力検討結果

$$F_s = q_0 / q_{\max} = 453.6 / 44 = 10.3$$

石材吊り上げ時のクレーン基礎地盤の安定性には問題なし

### 版築構造に起因する不確定要因

版築内部亀裂による基礎ごと 石材吊り上げによって版築壁面の 土圧が増大し、発掘空洞内部への バランスは倒壊につながる  
 版築内部亀裂の方向 がいわゆる流れ蓋的 に存在する可能性



### 墳丘下段部の壁面支保工の状態

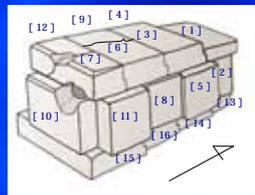


左：西壁，南壁のアルミ板矢板と板矢板，H鋼腹起し。これらを鋼盤を敷いた小段部に固定されたL型H鋼で抑え込む形で補強している。  
 右：矢板下端部は打ち込めないで，壁面を床面より先行して発掘していただき（矢板の幅だけ），記録を取った後に矢板先端を差し込み，土を隙間に詰めて根入れとしている。さらに下端部にH鋼で井桁を組み，矢板先端部の変位を封じ込める補強を実施している。

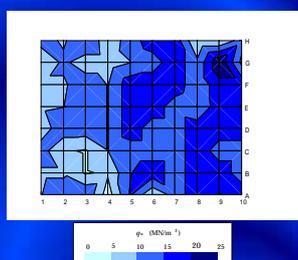
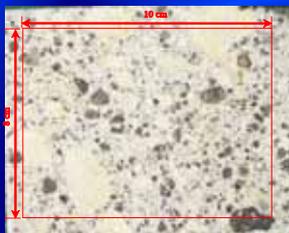
### 石室石材諸元と解体時の取り出し順序

石材名称	質量(kN)	取出順序	備考
天井石1	13.7	[ 7 ]	亀裂有り
天井石2	15.0	[ 6 ]	星宿図，亀裂
天井石3	14.0	[ 3 ]	星宿図
天井石4	11.1	[ 1 ]	
北壁石	11.9	[ 2 ]	玄武
南壁石	8.2	[ 10 ]	
東壁石1	8.1	[ 11 ]	男子群像
東壁石2	6.4	[ 8 ]	日像，青龍
東壁石3	6.7	[ 5 ]	女子群像
西壁石1	8.5	[ 12 ]	男子群像
西壁石2	7.4	[ 9 ]	月像，白虎
西壁石3	5.1	[ 4 ]	女子群像
床石1	11.2	[ 15 ]	
床石2	10.8	[ 16 ]	
床石3	10.0	[ 14 ]	
床石4	7.6	[ 13 ]	

自然状態の密度 $\rho_n$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.303
表乾状態の密度 $\rho_{sa}$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.595
絶対状態の密度 $\rho_a$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.274
含水比 (%)	2.315
吸水率 (%)	25.2
有効間隙率 (%)	32.1
飽和度 (%)	9.2

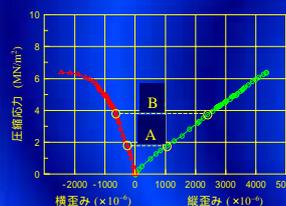


### 凝灰角礫岩テストピースに対する針貫入試験



・白い斑島部分：低強度 (5MN/m<sup>2</sup>)，黒い岩石部分：高強度 (5MN/m<sup>2</sup>)  
 ・石室天井：5.6MN/m<sup>2</sup>，石室南壁：7.0 MN/m<sup>2</sup>，同東壁：7.5 MN/m<sup>2</sup>

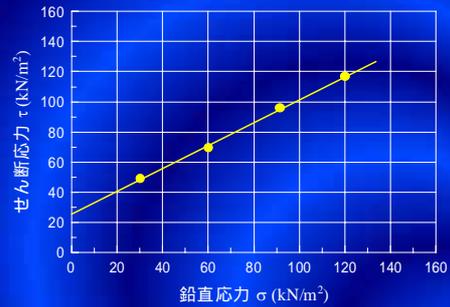
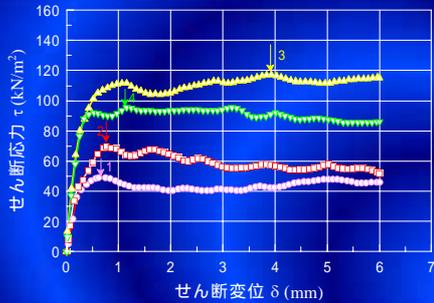
### 凝灰角礫岩の一軸圧縮試験



一軸圧縮強度	6.39MN/m <sup>2</sup>
変形係数E <sub>0</sub>	1.46E+03MN/m <sup>2</sup>
静ポアソン比ν <sub>s</sub>	0.279
圧裂引張強度	1.06MN/m <sup>2</sup>
P波速度	1.99 km/s
S波速度	0.90 km/s
動弾性係数E <sub>d</sub>	2.90E+03MN/m <sup>2</sup>
動ポアソン比ν <sub>d</sub>	0.373

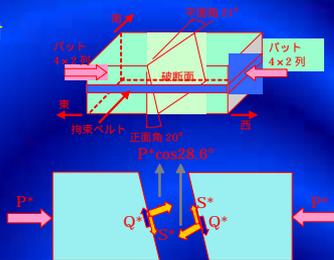
亀裂面の強度定数を求めるための一面せん断試験

2枚の供試体を重ねて接触面でせん断させる



$c = 25 \text{ kN/m}^2, \phi = 37.5^\circ$

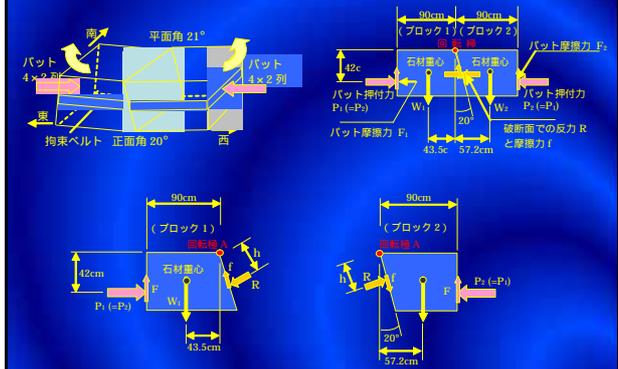
水平面内の滑りの検討



$S^* = P^* \times \sin 28.6^\circ = 0.478P^*$   
 $Q^* = P^* \times \cos 28.6^\circ \times \tan 37.5^\circ = 0.662P^*$   
 $F_s = Q^*/S^* = 0.662P^*/0.478P^* = 1.385 > 1$

つり上げ時に水平面内で滑りは生じない

鉛直面内の滑りと回転の検討



水平、鉛直方向の力の釣合 + A点周りのモーメント釣合条件

$P_1 - R \cos \theta - \mu' R \sin \theta = 0$

$F_1 - W_1 - R \sin \theta + \mu' R \cos \theta = 0$

$F_2 - W_2 + R \sin \theta - \mu' R \cos \theta = 0$

$42 P_1 + 43.5 W_1 - 90 F_1 - h R = 0$

$-42 P_2 - 57.2 W_2 + 90 F_2 + h R = 0$

$P_1 = P_2 = 29.322 \text{ kN}, W_1 = 8.161 \text{ kN}, W_2 = 6.383 \text{ kN}, \theta = 20^\circ$

求める変数:  $R, \mu', F_1, F_2, h$

解:  $R = 27.447 \text{ kN}, \mu' = 0.375, h = 32.0 \text{ cm}$

$h = 32.0 \text{ cm} < 62/\cos 20^\circ = 66 \text{ cm}$  となって石材内部に存在する  
鉛直面内での回転は生じない

$\mu' = 0.375 \tan 20.6^\circ$  となって石材間摩擦係数  $37.5^\circ$  以下である  
亀裂面に沿って鉛直方向に滑らない

ウレタンパッドと石材間の摩擦力  $\mu_1 = F_1/P = 7.873/29.322 \quad 0.27$   
 実値は  $\mu = 0.8$   $\mu_2 = F_2/P = 6.671/29.322 \quad 0.23$

石材両端をおさえるウレタンパッドの位置で滑らない

つり上げ時に鉛直面内で滑り破壊も回転破壊も生じない。  
ウレタンパッドと石材間での滑りは生じない

## 支保工部材の安全度評価

背面の土圧算定:  $c=0, \phi=35^\circ$  (得られている物性値の中で最も不利な仮定)

版築土の湿潤密度  $\gamma=16.43\text{kN/m}^3$  (原位置RI密度測定に基づく)

石材	土留め工の状態	矢板の曲げ応力	腰起こしの曲げ応力	L型補強H鋼の曲げ応力
		許容曲げ応力 (kN/m <sup>2</sup> )	許容曲げ応力 (kN/m <sup>2</sup> )	許容曲げ応力 (kN/m <sup>2</sup> )
		足場板矢板: $8.50 \times 10^5$	$1.63 \times 10^5$	$1.63 \times 10^5$
		軽量矢板: $6.00 \times 10^5$		
天井石 4	なし	-	-	-
北壁石		$6.13 \times 10^5$	$4.33 \times 10^5$	$8.51 \times 10^5$
天井石 3	足場板矢板 1.6m	$6.59 \times 10^5$	$4.86 \times 10^5$	$9.59 \times 10^5$
西壁石 3	L型補強H鋼 1.4m	$4.93 \times 10^5$	$3.34 \times 10^5$	$6.49 \times 10^5$
東壁石 3		$5.19 \times 10^5$	$3.58 \times 10^5$	$6.97 \times 10^5$
天井石 2		$1.98 \times 10^5$	$5.11 \times 10^4$	$1.16 \times 10^5$
西壁石 2		$2.00 \times 10^5$	$5.16 \times 10^4$	$1.17 \times 10^5$
東壁石 2	軽量矢板 2.5m	$1.79 \times 10^5$	$4.58 \times 10^4$	$1.02 \times 10^5$
天井石 1	L型補強H鋼 1.4m	$1.84 \times 10^5$	$4.73 \times 10^4$	$1.06 \times 10^5$
南壁石	L型補強H鋼 2.0m	$1.70 \times 10^5$	$4.34 \times 10^4$	$9.56 \times 10^4$
西壁石		$1.90 \times 10^5$	$4.90 \times 10^4$	$1.10 \times 10^5$
東壁石		$1.88 \times 10^5$	$4.83 \times 10^4$	$1.08 \times 10^5$

石室解体と石材取り出しの様子



仮保存施設に格納された壁画石材



## 地盤工学ができる貢献 (まとめに代えて)

- 古墳構造の解明を進め、その力学特性、水理特性を明らかにする。考古学や保存科学に協力できる体制を作り、学術的価値、復元など整備計画への情報提供が行えるシステムを構築する。
- 石室を戻す時に版築を当時の手法できちっと再現できるようにする (例えば21世紀の版築)。
- 同種の歴史的な地盤構造物 (古墳や土塁など) が発掘された場合、その恒久保存に向けて、浸透、蒸発散特性をシミュレートし、内部の温湿度環境、墳丘、漆喰の土質・水理特性を数値解析によって評価できる枠組みを確立する。
- 一般公開や恒久保存に対する環境整備に必要な情報を提供する 昼飯大塚古墳における実践