

Ⅲ 関連調査

1 旧地形の地質構造

高松塚古墳が築造されている基盤の地質について述べる。明日香村一帯は奈良盆地の平地部のように氷河時代以降の完新統が分布せず、領家式花崗岩類の上に部分的に更新統（更新世に堆積した地層）が不整合に重なる。このような現象は桜井市の栗原、倉橋、外山、針道、明日香村の島庄、橿原市の新沢千塚などの発掘現場でも観察されている。奈良盆地の南縁部では更新統が散点的にしか分布しないが、金剛山地の東麓・馬見丘陵・矢田丘陵の南麓から東麓・平城山丘陵・奈良市から天理市にかけての東麓と奈良盆地を西から東に取り囲むように周辺部に分布する。今回の調査でも墳丘が築造されている基盤に更新統が確認された。表土に覆われているため調査時にしか詳細については観察することができないが、この層の下部の礫層の続きは、当古墳西方の尾根部の路傍の崖面にみられる。

A 更新統について

高松塚古墳が築造されている下方の旧水田面付近に更新統の基盤をなす風化した閃緑岩が分布し、これを不整合に覆う更新統が丘陵の尾根部に礫層・砂層・シルト層・砂層と重なる。閃緑岩と礫層とは不整合で接するが、礫層・砂層・シルト層の境には不連続が認められず、整合である。各単層はほぼ水平に堆積している。

基盤の閃緑岩 当古墳付近の基盤をなす閃緑岩は、飛鳥地方に分布する石造物・亀石・鬼の俎雪隠・石舞台古墳・小谷古墳・丸山古墳等に見られるような角閃石黒雲母石英閃緑岩が風化したものである。この石は飛鳥地方で石造物あるいは建築用材として多量に使用されたためか、露岩として平地や山地に殆どみられない。しかし、道路拡幅のために消滅したが、菖蒲池古墳の南西方の小川沿いには明治～大正時代にかけての頃の石切場跡があり、丸山古墳南方の小川には露岩がみられた。また、益田岩船に登る途中の左手の檜林中には明治～大正時代にかけての頃の石切場跡がみられる。このように基盤をなす角閃石黒雲母石英閃緑岩は、風化していない露岩がみられる場所もある。高松塚古墳付近では、西側のトレンチや当古墳西方の尾根部の崖面にみられるように風化している。

〔角閃石黒雲母石英閃緑岩〕暗灰色を呈し、黒色でレンズ状をなす変輝緑岩の捕獲岩を伴う。石英・長石・黒雲母・角閃石が噛み合っている。石英は無色透明、粒径が

3～4mm、量が僅かである。長石は灰白色、粒径が3～5mm、量が非常に多い。黒雲母は黒色・金色、板状で、粒径が2～4mm、量が僅かである。角閃石は黒色、柱状で、粒径が3～5mm、量が僅かである。

礫層 基盤をなす閃緑岩との不整合面は墳丘西端に設けられたトレンチでみられ、ほぼ水平に礫層と重なる。礫の長径は不整合面付近のものが大きく、上部になるにつれて小さくなる基底礫層の産状を示す。下部の礫種は片麻状黒雲母花崗岩・石英閃緑岩・斑糲岩・変輝緑岩が多く、僅かに細粒黒雲母花崗岩・粗粒黒雲母花崗岩等からなり、風化しているものが多い。粒形は亜角～亜円で、稀に、角が少し円くなった角礫もみられ、礫の長径は5～30cmのものが多い。基質は粗粒の閃緑岩質砂からなる。上部になると礫種は変輝緑岩と斑糲岩が多くなり、石英閃緑岩・黒雲母花崗岩が僅かで、アプライト・砂岩が稀となる。礫の長径は2～7cm、粒形が亜角～亜円で、風化しているものが多い。基質は粗粒～中粒の閃緑岩質砂である。

〔構成砂粒〕構成粒は花崗岩・石英・長石・黒雲母・角閃石からなり、粒形が角である。花崗岩は灰白色、粒径が0.3～2mm、量の中である。石英・長石・黒雲母が噛み合っている。石英は無色透明、粒径が0.2～1mm、量が僅かである。長石は灰白色、粒径が0.2～1mm、量の中である。黒雲母は黒色・金色、粒状で、粒径が0.2～0.5mm、量が僅かである。角閃石は黒色、粒径が0.2～0.5mm、量が僅かである。

下位の砂層 礫層から砂層への変化は、調査地の西側ではほぼ水平で、礫が減少し、粗粒砂から中粒砂へと漸移するが、東側のトレンチではかなり明瞭に区分され、層面は南西方向に微かに傾斜する。上部では部分的に斜交層理（クロスラミナ）がみられる。斜交層理から判断すれば、砂の供給は北方からなされている。砂粒は閃緑岩質砂からなる。上位のシルト層とはほぼ水平に重なるが、明瞭な境が認められない。

〔構成砂粒〕構成粒は花崗岩・石英・長石・黒雲母・角閃石からなり、粒形が角である。花崗岩は灰白色、粒径が0.3～2mm、量の中である。石英・長石・黒雲母が噛み合っている。石英は無色透明、粒径が0.2～0.7mm、量が僅かである。長石は灰白色、粒径が0.2～0.7mm、量の中である。黒雲母は黒色・金色、粒状で、粒径が0.2～

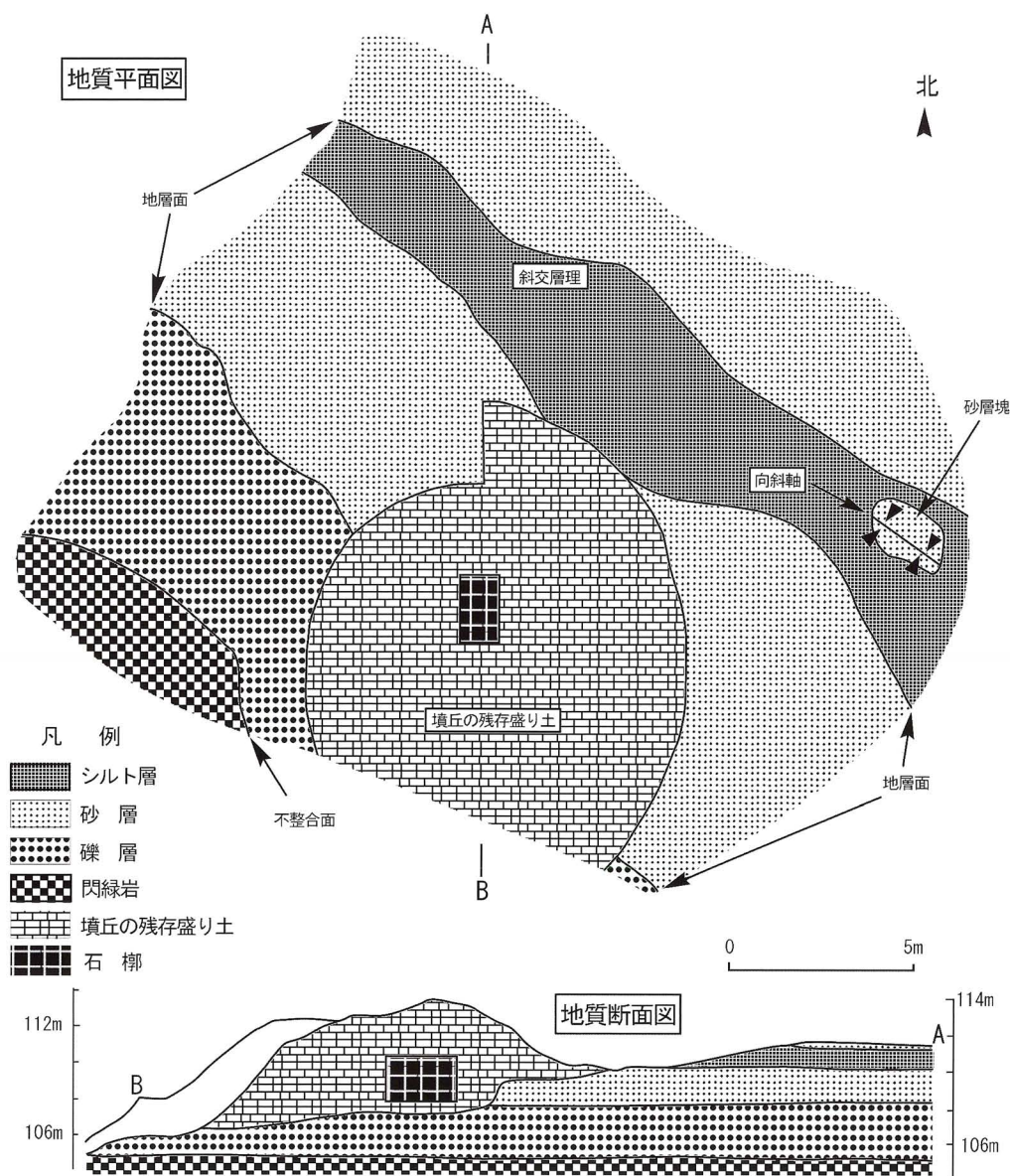


Fig.34 高松塚古墳墳丘付近の基盤の地質図

0.5mm、量が僅かである。角閃石は黒色、粒径が0.2～0.5mm、量が僅かである。

シルト層 色は黄灰色で、層理が認められない。シルト中には砂粒が含まれることから砂質シルトである。東方のトレンチではこのシルト層中にスランプ褶曲をもつ幅が2m程の砂層塊がみられる。砂層塊の褶曲軸が南東－北西で、南側ではこの単層の末端が欠如している。層理面には褐鉄鉱が沈着して、縞模様をなす。砂粒は中粒～粗粒の閃緑岩質砂からなる。砂層塊の形状から北東方向からの供給が推定される。

〔シルト中の砂粒〕構成粒は石英・長石・黒雲母・角閃

石からなり、粒形が角である。石英は無色透明、粒径が0.2～0.5mm、量が僅かである。長石は灰白色、粒径が0.2～0.7mm、量が非常に多い。黒雲母は黒色・金色、粒状で、粒径が0.2～0.5mm、量が僅かである。角閃石は黒色、粒径が0.2～0.5mm、量がごく僅かである。

上位の砂層 下位の粘土層とほぼ水平に重なる。層理が顕著で、層理面に褐鉄鉱が沈着し、縞模様をなす。砂粒は中粒～粗粒の閃緑岩質砂からなる。

〔構成砂粒〕構成粒は花崗岩・石英・長石・黒雲母・角閃石からなり、粒形が角である。花崗岩は灰白色、粒径が0.3～2mm、量が中である。石英・長石・黒雲母がか



Fig.35 領家式花崗岩類の基盤を不整合に覆う礫層

み合っている。石英は無色透明、粒径が0.2～0.7mm、量が僅かである。長石は灰白色、粒径が0.2～0.7mm、量の中である。黒雲母は黒色・金色、粒状で、粒径が0.2～0.5mm、量が僅かである。角閃石は黒色、粒径が0.2～0.5mm、量が僅かである。

東方のトレンチにみられるスランプ褶曲をもつ砂層塊は、砂粒構成・層理・褐鉄鉱の沈着の様子が上位の砂層と似ていることから、上方の砂層の一部が水底で地入りしたと考えられる。一部からの判断でしかないが、更新統の砂層と粘土層の境がほぼ水平であり、盛り土後に形成された断層はみられるが、それ以前には地殻変動による変形がないと考えられることから、スランプ堆積物は構造的上位の砂岩が堆積している柔らかい時に形成されたと考えられる。

B 墳丘下の旧地形

墳丘の盛り土と基盤の接触部は、西側では礫層と盛り土の粘土質土、北側や東側では砂層と盛り土とが接しており、この境に炭質物層や旧表土のクロボク層などが認められない。旧表土が認められないことから、旧地形の表土は削られていると推定される。古墳の築造時期は異なるが、都賀野の三陵墓西古墳では旧地形の上面に形成されたクロボク層、その上面に灌木の炭片が混じる層があった。焼土層の上面に墳丘の盛り土がなされていた。墳丘を築造する時に生えている灌木等を焼いたことが窺え、表土を剥ぐことなく、盛り土が積まれている。当古墳に近いマルコ山古墳やキトラ古墳では、風化した角閃石黒雲母石英閃緑岩と墳丘の盛り土が直接接していることから、高松塚古墳と同様に旧地形の表土を削っていると推定される。周濠部は盛り土面よりも低くなるため、旧地形を掘削していることは言うまでもないことである。



Fig.36 更新統の礫層と墳丘の盛り土

C 旧地形の地質

更新統の礫層の礫種には変輝緑岩や斑礫岩が多く含まれる。当古墳は高取川流域に位置し、この流域には斑礫岩や変輝緑岩が殆ど分布しない。また、東方の飛鳥川流域や西方の曾我川流域にも斑礫岩が分布しない。近辺で斑礫岩や変輝緑岩が広く分布する地域としては、桜井市の音羽山から高家付近にかけての地域があげられる。また、礫層中の斑礫岩・変輝緑岩礫はこの地域に分布する斑礫岩・変輝緑岩の岩相に似ていることから、桜井市の南部付近から礫が供給されたと推定される。また、斜交層理から判断すれば、古流向は北方からの流れが考えられる。現在の地形では南方から河川により土砂が供給されているが、大阪層群が形成されていた更新世（IUGS2004によれば180万6千年～11,500年前）の前期には、東方からの河川の流れがあったと推定される。更新世後期となれば奈良盆地に湖が生じ、田原本町付近を中心に泥炭層（25,000年前頃）が形成されている。また、河川の流れも現在とほぼ同じ方向であったと推定される。

高松塚古墳の墳丘は丘陵の傾斜地を利用して築造されている。この基盤をなす旧地形は人為的に削られている可能性は十分に推測されるが、削剥の量については推測しがたい。今回の調査で更新統と閃緑岩の不整合面は比高的に当古墳の南方で耕作されていた田の面の少し上方に相当することが明らかになった。

高松塚古墳が築造されている丘陵には、領家式花崗岩類に属する角閃石黒雲母石英閃緑岩が風化した基盤を不整合に覆う更新統の礫層－砂層－シルト層－砂層がほぼ水平に堆積している。このような地質構造の地に高松塚古墳の墳丘が築造されている。

（奥田 尚）

2 墳丘の土質・地盤調査

A. 不攪乱試料の採取と墳丘土の土質特性

古墳壁画の緊急および恒久保存対策に向けて、古墳墳丘土の力学特性を把握するために、Fig.37に示す石室まわり3ヶ所において、石室周辺の墳丘土および版築の不攪乱試料採取を実施した。緊急保存対策の一つとして、雨水の浸透を防ぐ目的で行われた遮水シート設置のために、墳丘一面に繁茂する竹を伐採した。したがって試料採取時点では、墳丘上は植生の全くない状態になっていた。通常のボーリングであればマシンを地面に置き、場合によってはアンカー等で反力の増大を図ることもあるが、今回は版築や封土などの遺構面上への重量機材の設置による遺構損傷の可能性と、ボーリングマシン動作時の振動が漆喰の剥落を誘起する可能性を勘案して、以下に示すような非常に特殊な方法で作業を進めた。

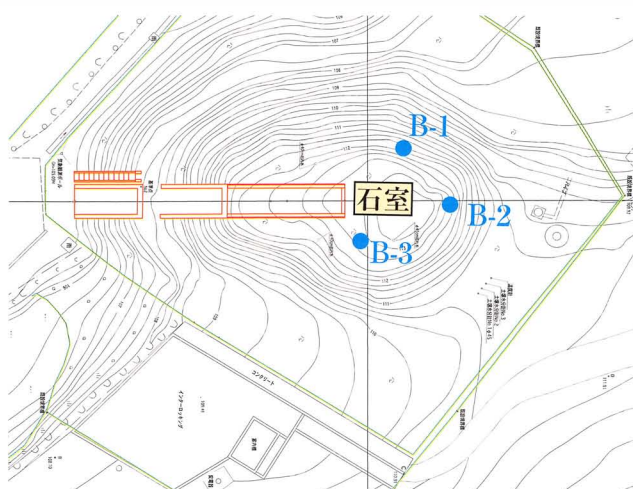


Fig. 37 高松塚古墳の平面図と試料採取位置

鋼製単管パイプ組構造で構築された屋根付きの仮覆屋から鋼製単管を仮覆屋基礎支柱から組み上げ、所定の位置に一般土木資材として用いられる35mm×250mm×3000mmの鋼製足場板を片持梁型に構築し、試料採取用のボーリングマシンをその足場上に設置した。つまり、ボーリング作業時に必要とするすべての反力を、仮覆屋の大屋根を支える支柱から得る構造とし、墳丘地山とは全く接しないようにした (Fig.38)。このようにして、サンプリング時の重機による墳丘への直接的なダメージを防止する措置を講じた。

試料採取にあたり、版築が土質分類上、細粒分混じりの砂質土であることから、三重管式サンプラーを使用し、



Fig. 38 試料採取に向けた足場の設営状況 (墳丘と石室への影響を避けるために古墳全体を覆う仮覆屋基礎から組み上げている)

外管によって掘削しながら内管に試料を収める方法を採用した。また、掘削時のマシンの振動による漆喰の剥落を防止するため、通常用いられるディーゼルエンジン式ではなく、電気モーター式のマシンを使用した。さらに、墳丘内部の水みちの存在を考慮して、掘削にあたり、泥水に代えてエアコンプレッサーによる圧縮空気を用いることとした。掘進速度は遭遇する土質にも依存するが、2.0～3.5cm/秒であり、掘削時の空気圧の大きさはおよそ147kPaであった。サンプラーは掘削口径がφ105mmの三重管タイプのものを使用し、試料を採取する内管にはφ65mmの塩化ビニル管およびφ75mmの透明アクリル管を用いた。

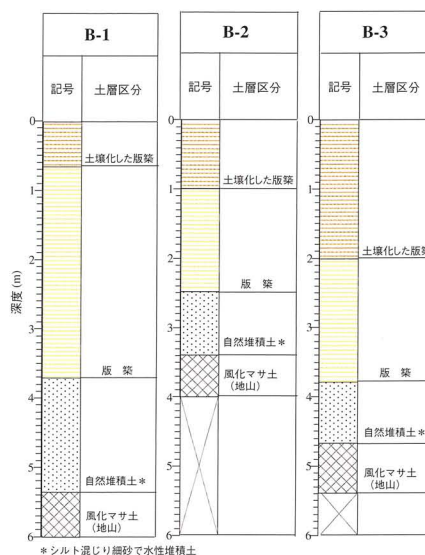


Fig. 39 採取試料から作成した各孔の土質柱状

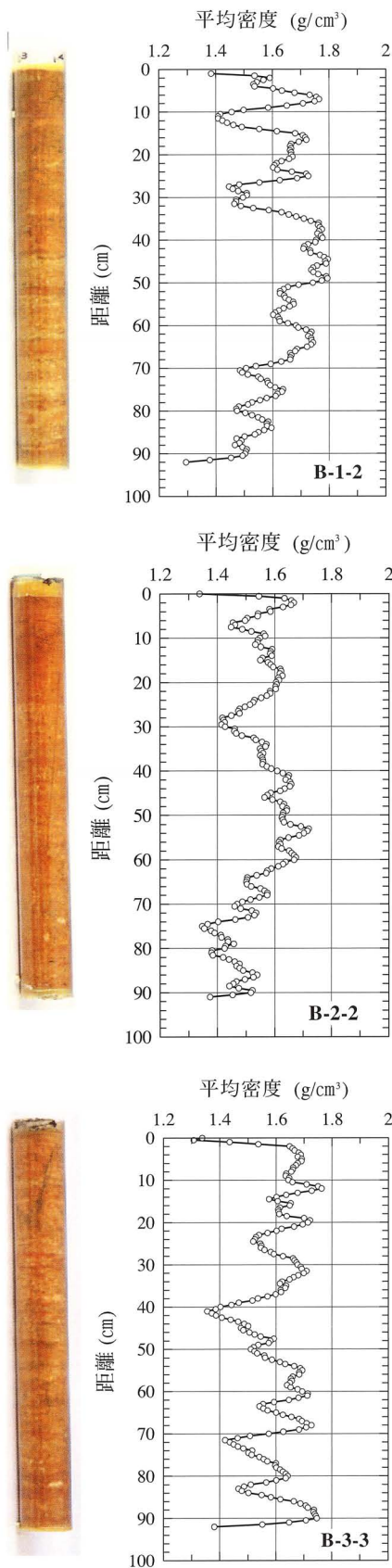


Fig.40 墳丘から採取した版築部の試料とその密度スキャン
結果 (B-1-2: B-1孔版築試料、B-2-2: B-2孔版築試料、
B-3-3: B-3孔版築試料)

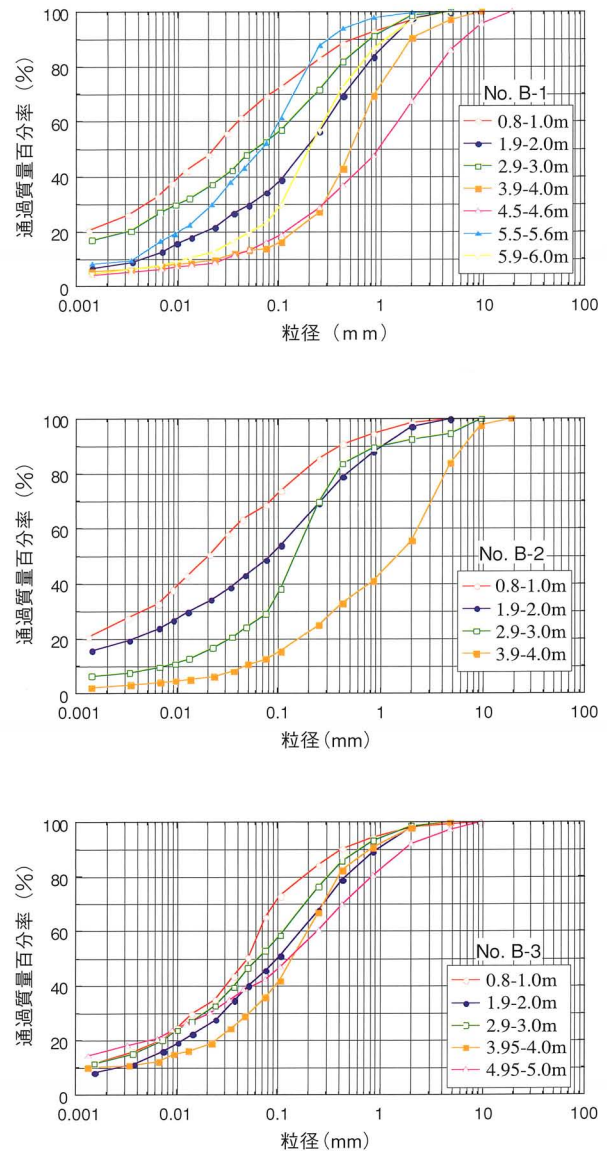


Fig.41 墳丘から採取した試料の粒径加積曲線

Fig.37においてB-1、B-2、B-3で示す3ヶ所から採取した試料の目視観察によって作成した柱状図をFig.39に示す。すべての孔で版築層の下位に存在する地山層（風化花崗岩層）を確認している。地山は北東から南西に傾斜しており、北側のB-2孔では版築層厚が小さく、標高の下がる谷側に設置されたB-1孔では墳丘層厚が大きくなっている。各孔から採取した代表的な版築層のコア試料をFig.40に示す。3孔ともにFig.39において「版築」に分類された部分を取り出して示してあるが、色調の違いが層状に現れており、数センチ厚に撒き出した土を突

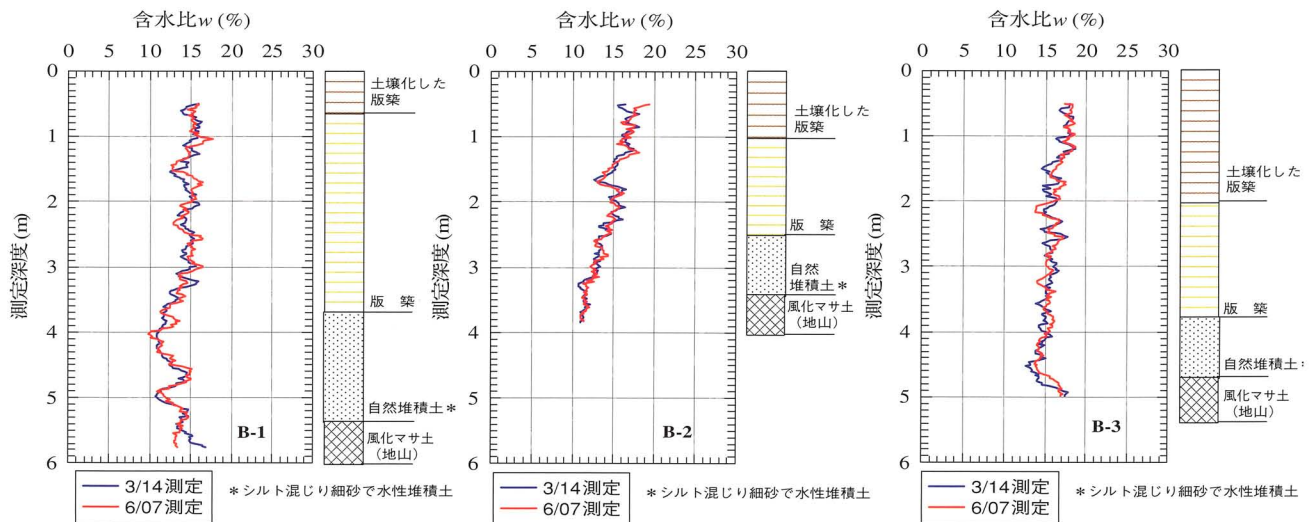


Fig.42 墳丘部におけるRI含水比検層結果

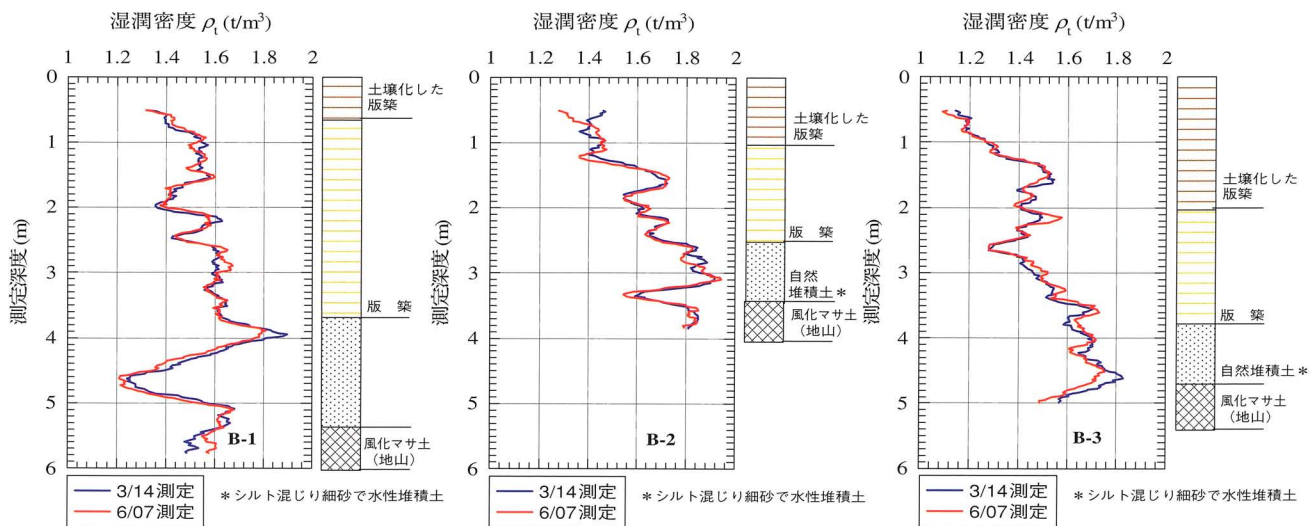


Fig.43 墳丘部におけるRI湿潤密度検層結果

き固めたことによって生じる版築の縞模様が明確に判別できる。それぞれの写真に試料をRI密度スキャンした結果を併せて示しているが、約5cmごとの密度の変化が深度方向に繰り返して現れていることがわかる。これは、撒きだした土を突き固めている際に分級化を起こしたことによって密度差が生じたためと考えられている。一方、版築構築時における突き固めエネルギーの深さ方向への伝播の不均質の影響も考えられ、古墳の版築構造のメカニズムについて今後の検討が必要である。

1mごとの採取試料の先端部分の土を用いて実施した

粒径加積曲線をFig.41に示す。既にFig.40において明らかのように、同一の版築層であっても密度に高低があり、Fig.41に示したものが必ずしも1mのコア全体を代表するという位置づけではないが、各孔各深度ごとの土のおよその粒度を知ることができる。版築に使用された土は細粒分を多く含み、突き固め、乾燥によって固結度を増して墳丘の安定に寄与しているものと考えられる。いずれの試料も「版築」に分類される上部深度から採取されたものに細粒分含有率が多く含まれる傾向があり、B-1やB-2では75 μ m以下の含有率は20%を超

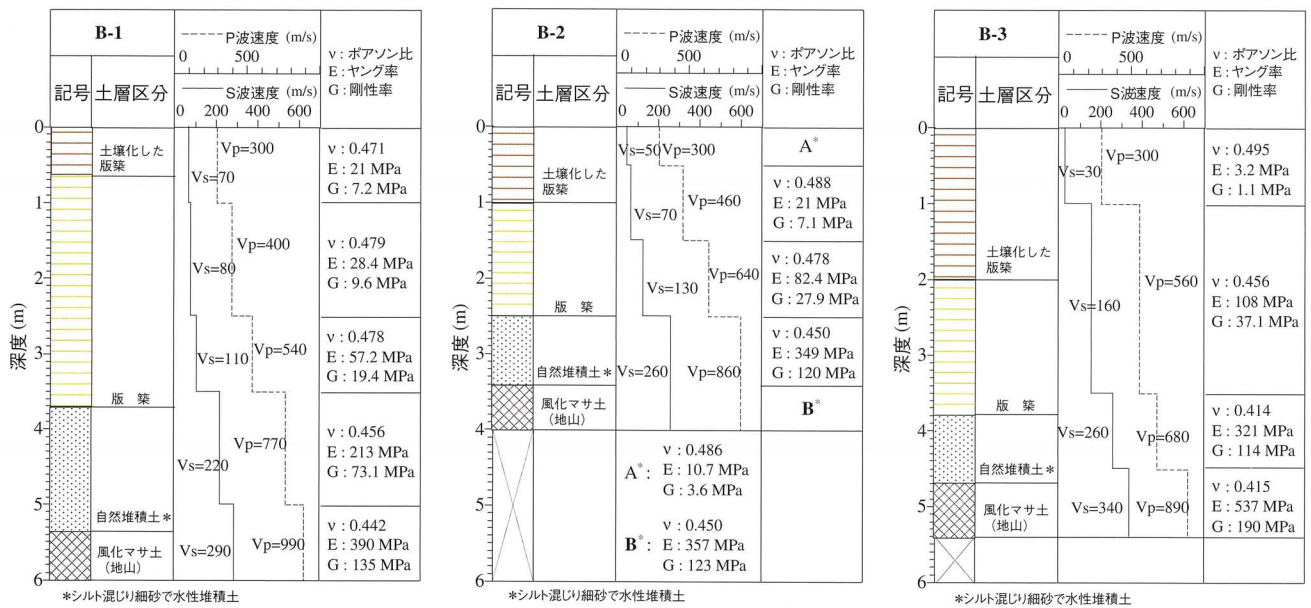


Fig. 44 墳丘におけるPS速度検層試験結果

えている。一方、深度が増して地山近くなると風化花崗岩系の砂分が卓越する材料になってくる。

B. 墳丘の地盤物性を調査する原位置試験

墳丘の原位置含水比測定 前項で説明したように、石室の東、北、西側の3ヶ所で試料を採取した。その孔を用いてRI水分計による墳丘の含水比のモニタリングを実施した。試料採取点B-1、B-2、B-3に外径114mmの塩化ビニル管（VP-100）を設置し、同孔を利用してつり下げ式のRI水分計による墳丘の原位置含水比、および湿潤密度の検層を実施した。高松塚古墳のある地点の地下水位は低く、塩化ビニル管の内部には孔内水位は認められない。したがって、検層プローブは全工程にわたって非水浸状態で測定が行われた。Fig.42に各ボーリング孔ごとの墳丘の含水比の深度方向分布を、Fig.43に同孔の湿潤密度分布を示す。青線は発掘終了に伴って行われた墳丘の埋戻時（2005年3月14日）に実施された検層結果であり、赤線は入梅直前の2005年6月7日に実施された結果を表している。各孔ともに墳丘浅部で含水比が相対的に高く、深くなるにしたがってその値が漸減する傾向を示している。当然、湿潤密度については含水比と全く逆の傾向を示し、深部ほど高密度状態となっていることがわかる。

いずれの孔も含水比は10～20%の範囲に、湿潤密度は

1.2～1.8t/m³に収まっており、平均的な含水比は15%前後であることがわかる。また3月から6月までの3ヶ月間の含水比はほぼ一定に保たれており、変化していない。

PS速度検層試験 今回の発掘調査によって古墳内部に地震の痕跡と思われる多数の地割れが見つかったことから、高松塚古墳の恒久保存対策の一部に、耐震性という要因を加えないといけないことがわかった。

このため、RI水分量検層に用いたボーリング孔を利用してPS速度検層を実施し、墳丘内を伝播する弾性波（P波、S波）速度の震度方向分布を測定し、RI検層によって測定した密度値を用いて地盤の剛性率とポアソン比を求めた。弾性波の発生は、P波については地面に置いた鋼板を垂直に打撃することにより、またS波については板叩き法によって行った。PS速度検層試験によって得られた結果をFig.44に示す。

高松塚古墳の周囲の地下水位は風化花崗岩の地山内部にあるので、墳丘全体は地下水位以上にあり、不飽和状態となっている。このため、Fig.43に示したP波の値は不飽和の影響で非常に小さくなっている。一方、S波についても、3孔ともに風化花崗岩の地山部でかろうじて200m/sを記録するが、版築部では70～160m/sとかなり低い値を示すことがわかる。

（三村 衛・石崎武志）

3 地震の痕跡について

平成16年度に実施した高松塚古墳の発掘調査において、墳丘を刻む複数の亀裂が発見された (Fig.45)。この中で、断割トレンチの西壁、および南壁で確認された亀裂をFig.46～48に示した。

トレンチ西壁では、最大幅5cmの亀裂が少なくとも1m25cmの深さまで観察された (Fig.47)。このうち上部の深さ30cmまでは、亀裂の形態が不明瞭だが、それより下方では墳丘版築層との境界が鮮明で、亀裂の内部は版築層上部から流れ込んだと考えられる柔らかいシルト (わずかに極細粒砂を含む) で満たされていた。

Fig.47にみるように、この亀裂はトレンチ底面ではほぼ東西方向にのび、壁面から40cmの位置で消滅する。またこの亀裂に雁行して西北西―東南東方向にのびる最大幅7cmの亀裂があり、この断面をFig.48に示した。Fig.48の版築層は、上からシルト層 (層厚8cm以上)、層厚3cmで細礫を含む粗～中粒砂層、層厚5cmの粗～中粒砂、層厚7cmのシルト層、層厚5～6cmの粗～中粒砂、層厚14cmのシルト層、層厚最大3cmで東に向かって薄くなるシルト～極細粒砂、シルト層 (層厚11cm以上) となるが、亀裂を境にして南西側の地層が相対的に約3cm低下している。亀裂の内部は、Fig.47と同様に柔らかいシルト (わずかに極細粒砂を含む) で満たされている。

一方、昭和47・49年におこなわれた発掘調査時にも、Fig.49の写真 (昭和49年撮影) にみるように、墓道東壁の版築土層を引き裂く明瞭な地割れの痕跡が認められている。当時の土層断面図を参考にしてFig.50を作成したが、地割れの上端は幅1.4m、そこから2.5m下の床面付近では幅約60cmと、下に向かってやや狭くなっている。Fig.49での版築層は、上半分 (Ⅰ層とする) が褐色のシルト、下半分 (Ⅱ層) が白～薄褐色のシルトで、両者の境界は写真からも区分が可能である。Ⅱ層上端の食い違いから判断すると、地割れの内部で版築層が約30cm低くなっている。地層が2カ所で切断されて地割れが形成され、内部が陥没したものと思える。この陥没は墓道に直交するように東西方向に続き (Fig.51)、調査区西壁の土層断面に至る (猪熊兼勝「特別史跡 高松塚古墳保存施設設置に伴う発掘調査概要」『月刊文化財』第143号、1975年)。

その他、石室天井石の南第1石と南第2石については、南北に亀裂が生じて2つに割れていることがわかっている (文化庁『国宝高松塚古墳壁画―保存と修理―』1987年)。

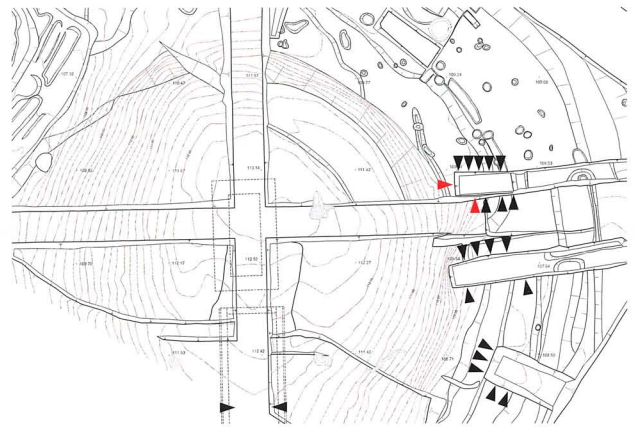


Fig. 45 亀裂の確認地点 (赤矢印の部分でFig.47・48を作成)

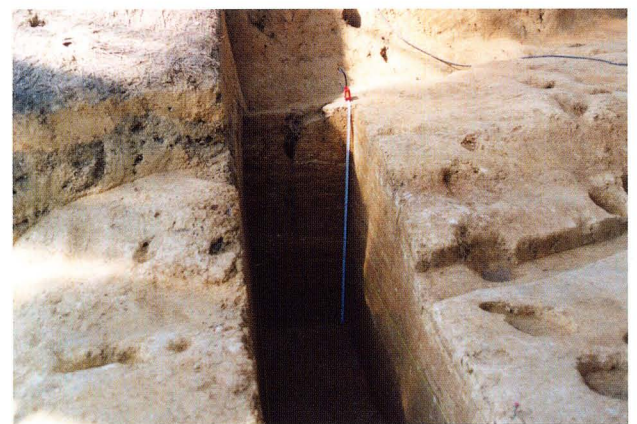


Fig. 46 断割トレンチの亀裂の遠景

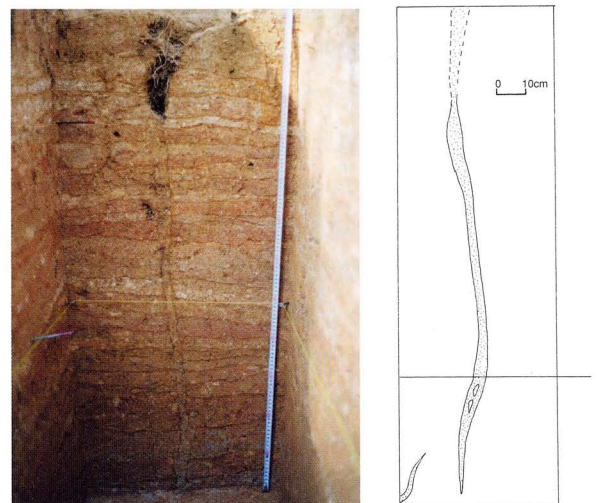


Fig. 47 トレンチ西壁における亀裂とその断面・平面図



Fig. 48 トレンチ南壁における亀裂とその断面図

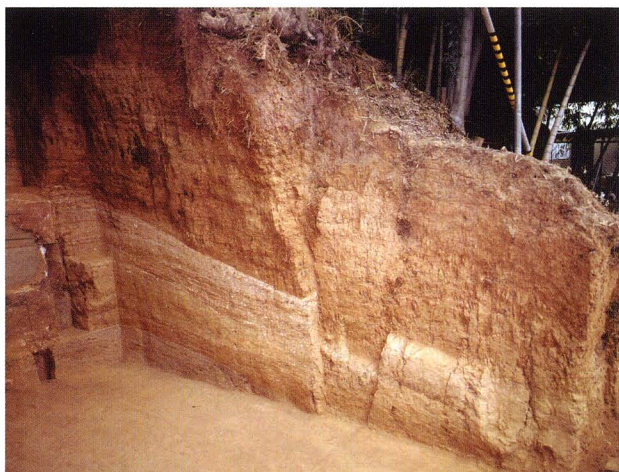


Fig. 49 墓道部の東壁写真（昭和49年撮影）

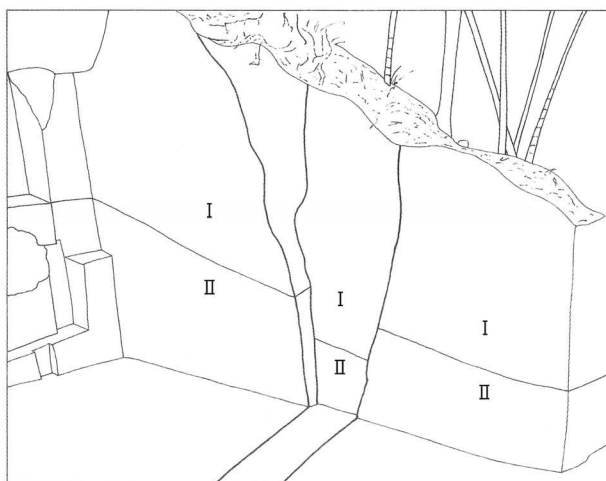


Fig. 50 墓道部東壁の地割れの痕跡
（太線に沿って地層が切断されている）

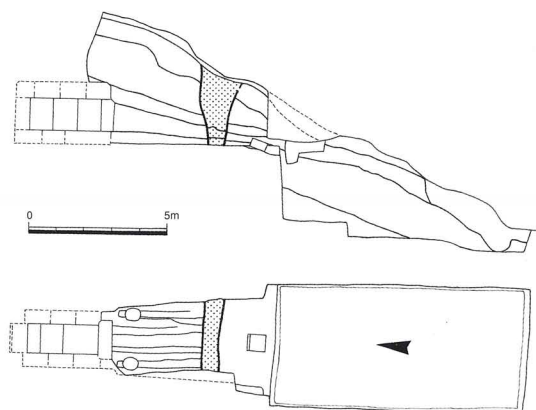


Fig. 51 墓道部の地割れの断面・平面模式図
（地割れの内部をドットで表示）

原因となった地震

高松塚古墳の墳丘に地割れ・亀裂が刻まれた原因として、最も可能性が高いのが地震に伴う激しい揺れである。古墳のような高まりに強い地震動が加わった場合、墳丘の盛土が引き裂かれて地割れや亀裂が生じることが多い。さらに地変が進むと、墳丘の一部が地滑りによって滑り落ちる。

高松塚古墳が位置する奈良盆地の南部は、高松塚古墳が築かれてから現在にいたるまでにも、地震による強い揺れを数多く蒙っている。特に、日本列島の太平洋海底に位置するプレートの境界（南海トラフ）から発生する巨大地震である南海地震・東南海（東海）地震によって、気象庁の震度階級で5強から6弱程度の地震動を繰り返して受けている。

記録からわかる南海地震の発生年代は、昭和21年（1946）、嘉永7・安政元年（1854）、宝永4年（1707）、慶長10年（1605）、正平16年（1361）、承德3・康和元年（1099）、仁和3年（887）、そして『日本書紀』に記された天武13年（684）である。東南海（東海）地震については、昭和19年（1944）、1854年（南海地震の前日）、1707年、1605年、明応7年（1498）、嘉保3・永長元年（1096）に発生している。

最近では、遺跡で検出される地震痕跡を用いた「地震考古学」の成果から、これまで南海地震の記録が無かった明応7年（1498）頃や西暦1200年前後にも南海地震が存在したことが示されている。また、古墳・弥生時代にも南海地震・東南海（東海）地震の可能性のある地震痕跡が認められている（寒川 旭「地震考古学 遺跡が語る地震の歴史」中公新書、1992年。同「地震考古学に関する成果の概要」『古代学研究』150号、2000年。同「地震 なまずの活動史」『日本を知る』大巧社、2001年。埋文関係救援連絡会議・埋蔵文化財研究会編「発掘された地震の痕跡」1996年など）。それを年表にまとめたのがFig.52である。

これまでの多くの事例から考えると、南海地震は東南海（東海）地震と連動する形で、ほぼ同時、または2年以内に発生する可能性が高い。その中で、南海地震が小さいときには東南海地震と、大きいときには東南海地震・東海地震と連動する傾向がある。ちなみに最近の場合では、1946年の南海地震は地震規模がM（マグニチュード）8.0と小さく、1854・1707年の南海地震（M8.4前後）

は地震規模が大きかった。とりわけ、1707年は東海～南海地震が全く同時に発生し、1854年は安政東海地震（12月23日）の翌日に安政南海地震が発生している（江戸時代以前では東海地震と東南海地震を合わせて東海地震と表現することが多い）が、この2例の場合、高松塚古墳周辺での震度は6弱に達する可能性が高い。

一方、有史以降に関西を襲った内陸地震の中で最大規模である文禄5・慶長元年（1596）の伏見地震は、大阪平野の北縁を限る有馬 - 高槻構造線活断層系や淡路島の東浦・野田尾・先山などの活断層（おそらく六甲断層系の全部または一部も含めて）が活動したもので、M8近い地震規模を持つため、京阪神・淡路地域には顕著な地変と被害が生じている（地質調査所「平成7年度活断層研究調査概要報告書」『地質調査所研究資料集No259』1996年）。しかし、震源域から少し離れた高松塚古墳周辺地域では震度5程度の揺れとなっている（宇佐美龍夫『最新版 日本被害地震総覧[416]-2001』東京大学出版会、2003年）。

このため、年代は特定できないが、高松塚古墳が築造されてからの南海地震（東海地震も含めて）によって、墳丘の地割れ・亀裂が刻まれた可能性が高い。

地震で変形を受けた古墳

奈良県内でも、古墳で地震の痕跡が検出された事例がある。

天理市の黒塚古墳では、石室を構成する石材の一部が放物線を描くような形で石室の空間に落下しており、水平方向の大きな揺れが加わったことが考えられる。この原因として、南海地震（東海地震）が考えられるが、鎌倉時代に盗掘が試みられた際に既に大量の石材が落下していたので、それ以前に発生した地震による崩落である（奈良県立橿原考古学研究所『黒塚古墳』学生社、1998年）。

天理市の赤土山古墳の場合、墳丘が複数の地滑りによって崩れ落ちており、後円部が四角く見えるほど墳丘の形態が変化している。また、地滑りで滑り落ちた側に位置する朝顔形および円筒埴輪列も、本来の位置よりはるかに低い位置で検出されている。発掘調査の結果、鮮明な滑り面（そこを境にして滑り動いた境界線）が見られ、墳丘には多くの亀裂が生じていた。地滑りは複数回発生しているが、最初の大きな地滑りは、古墳が築かれた古墳時代前期末なので、当時の南海地震（東海地震）による可能性が高い（天理市教育委員会『史跡赤土山古墳 第4

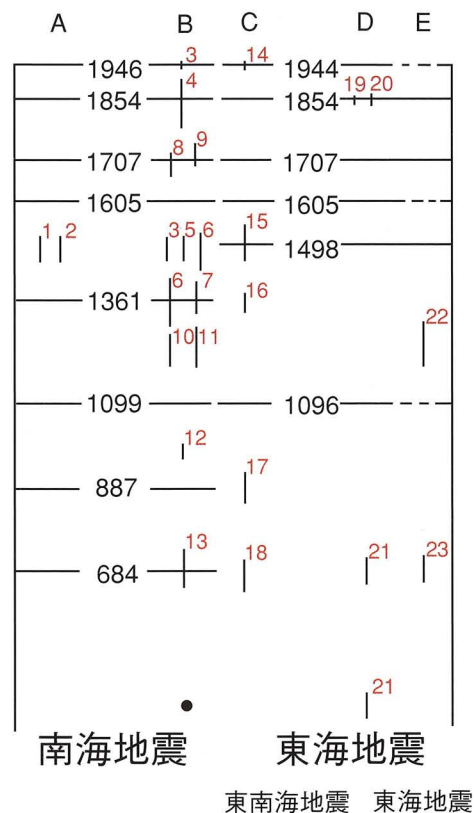
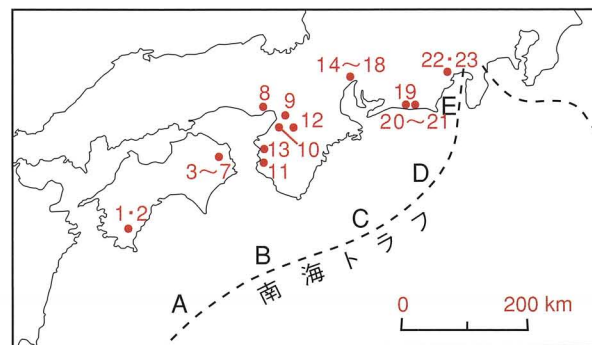


Fig.52 南海地震と東海地震の発生年表
（西暦は史料から求めた発生時期。縦線は遺跡から検出された地震跡の年代幅を示す。1～23は遺跡名）

1アゾノ 2船戸 3宮ノ前 4神宅 5古城 6中島田
7黒谷川宮ノ前 8小阪邸跡 9池島福万寺 10石津太神社
11藤並 12箸尾 13川辺 14東畑廃寺 15尾張国府跡
16門間沼 17地藏越 18田所 19御殿二之宮 20袋井宿
21坂尻 22上土 23川合 年表中の●印は赤土山古墳



Fig.53 カツヤマ古墳の地割れ跡
（石室の床面が引き裂かれ、手前側が下降している）

次～第8次発掘調査概要報告書』2003年)。

その他、明日香村の酒船石遺跡では、齊明天皇が築いた石垣が、達磨落としのように崩れ落ちた状態で検出された。滑り落ちた石垣の背後には花崗岩の地山に達する地割れ(最大幅7cm、深さ3m以上)が検出された。崩れ落ちた年代は、『日本書紀』に書かれた天武13年(684)12月の白鳳南海地震による可能性が高い(相原嘉之「飛鳥地域における地震の痕跡 酒船石遺跡と白鳳南海地震」『古代学研究131』1995年)。

2005年度には、明日香村教育委員会が実施したカヅマヤマ古墳の発掘調査で、墳丘が石室の南半分も含めて大きく崩れ落ちた顕著な地滑りの痕跡が検出された(Fig. 53)。これは13世紀頃の大規模な盗掘後の南海地震(1361年の正平南海地震)による可能性が高い。

最近では、活断層から発生した大地震による古墳の変形も確認されている。有史以降最大規模の内陸地震で、大阪平野の北縁を限る有馬・高槻構造線活断層系から発生した1596年の伏見地震では、今城塚古墳や西求女塚古墳の墳丘が大きく崩れ落ちたことが発掘調査によって明らかにされた(寒川 旭・宮崎康雄「今城塚古墳で認められた地滑りの痕跡」『日本文化財科学会第18回大会研究発表要旨集』2001年。高槻市教育委員会『史跡・今城塚古墳 平成12年度・第4次規模確認調査』2001年。神戸市教育委員会『西求女塚古墳 発掘調査報告書3』2004年)。

現代の地震については、1927年に丹後半島を襲った北丹後地震で、震源となった活断層(郷村断層)周辺の丘陵上に築かれた京丹後市網野町のスガ町古墳群や大宮町通り古墳群の墳丘が、地滑りや地割れ(Fig.55)で変形

したことが、京都府埋蔵文化財調査研究センターの発掘調査で明らかになっている。

これから起きる大型地震

南海地震は21世紀前半に発生すると考えられている。今回は東海地震・東南海地震・南海地震が連動する可能性が高く、地震規模が比較的小さかった昭和南海地震(M8.0)をはるかに上回ると考えられている。つまり、1854年の安政南海地震・1707年の宝永地震のように地震の規模がM8.4～8.6となり、高松塚古墳の周辺地域も最大で震度6弱程度の揺れを蒙る可能性がある。

また、南海地震～東海地震が発生する前の数10年前後の期間は、様々なタイプの地震(兵庫県南部地震のように活断層から発生する地震など)が多く発生する「地震の活動期」と言われている。近畿地域も兵庫県南部地震を皮切りに、この時代に入っており、既に10年が経過している。このため、南海地震が発生するまでも、高松塚古墳の近隣で比較的小さな内陸地震(M6クラス以下)が起きる可能性も否定できない。

日本の誇る大切な文化遺産である高松塚古墳の保存を考えるにあたって、これから地震が多くなり、南海地震などの巨大地震の発生が確実視されているので、地震への備えを十分に考える必要がある。また、巨大地震発生の場合、奈良県南部も含めて広い範囲で水平方向の大きな揺れが長く続くことが予想されるが、高松塚古墳だけの問題でなく、多くの市民の生活を守るという観点からも、これまでに検出された地震の痕跡を地震災害の軽減に向けて十分に生かすことが大切である。

(寒川 旭)



Fig. 54 西求女塚古墳の地滑り跡(石室の右半分が約2m低下)



Fig. 55 スガ町古墳群の地割れ跡(主体部が引き裂かれている)

4 石室の測量調査

I. 調査目的

高松塚古墳の石室については、壁画発見時の昭和47年の実測図が唯一のものであったが、これは平面直角座標系第Ⅵ系（日本測地系）を用いた実測ではなかったため、保存施設建設による墳丘の変容と当時の基準点の亡失により、石室の位置関係が不分明となり、正確な石室位置を特定できないという問題点が生じていた。

平成15年に実施した文化庁の墳丘測量では、この問題を解消すべく、トータルステーションを用いて石室北壁の一部を計測し、石室位置と方位を求める測量調査をおこなっている（日本測地系）。しかしながら、盗掘坑の正面から北壁をのぞき込み、石室位置と北壁両端の短い計測点を結んで石室設置方位を求めざるを得ないという制約があったため、石室閉塞石の位置や石室設置方位等については課題として残った。

先述したように、平成14年の改正測量法の施行に伴い、今回の発掘調査では世界測地系を採用することになった。既設基準点（日本測地系）の改測作業により、座標変異量を確定したが、壁画の恒久保存対策を検討する上では正確な石室位置の確定作業が必須となっていた。

石室の位置と標高に関するより詳細な測量データを得る目的で、発掘調査に引き続いて、石室の測量調査を実施した。この作業は、昭和40年代の発掘調査成果を、現在の測量成果で確認し、継承するための作業である。

II. 調査年月日

調査は文化庁美術学芸課の担当官の監理のもと、奈良文化財研究所飛鳥藤原宮跡発掘調査部が、アジア航測株式会社との協力を得て、平成17年5月13日に実施した。

III. 調査方法

計測は、保存施設前面に設置している基準点（文化庁No.2＝奈文研No.224）から、保存施設の内部を通って取り合い部まで基準点を移動し（開放トラバース）、そこにノンプリズム、mm単位での計測可能なトータルステーションを設置し、盗掘坑から内部の計測をおこなった。計測に際しては、できるだけ側壁の長い距離を計測することで、正確な石室施工方位が求められるように心がけた。

計測点は、石室内部については北壁の四隅、東壁・西壁・床・天井の一部、石室前面では天井石の前面、閉塞石の前面、東側壁東南隅の各点であり、その位置と高さのデータを取得した（Fig.58）。

IV. 計測成果

A 石室内部

石室方位 石室内部の東壁について、南辺（109）と北辺（101・104）を計測することができた。これから東壁の振れを求めると、109と北壁東下隅（104）を結ぶと北で西に1° 15′、同じく北壁東上隅（101）と結ぶと北で西に1° 46′の振れとなる。また109と同じ位置関係になるように、101の下に天井から9cm下の点を想定すると、東壁の振れは北で西に1° 44′となる。

西壁については、南第1石の中央上部の点（112）と北辺（102・103）を計測することができた。これから西壁の振れを求めると、112と北壁西下隅（103）を結ぶと北で西に1° 24′、同じく北壁西上隅（102）と結ぶと北で西に1° 41′の振れとなる。112と同じ位置関係になるように、102の下に天井から31.6cm下の点を想定すると、西壁の振れは北で西に1° 36′となる。

北壁については、床に接する東西両隅（103・104）で見ると、西で南に1° 34′の振れをもつ。

以上が石室方位に関する測量成果であるが、漆喰の厚さが均等とは限らず、また計測誤差も考慮するならば、石室の主軸方位を分単位まで確定するのは難しく、北で西に約1°振れると理解するのが適切であろう。

石室内部の傾き 北壁は、四隅（101～104）を計測することができたが、その位置と高さをみると、天井・床面と接する部分はともに西に約1°（約2%）傾斜している。また東壁と西壁に接する部分についても垂直ではなく、西に約0.5～1°傾き、北壁全体が反時計回りに約1°回転した形になっている。

天井をみると、北東隅101とその南西部の113が、南西に約2.8%の傾斜で下がっている。また床面も、東壁との境の104・106間が、約1°（約2%）の勾配で南へ下がり、石室北東隅の104とその南西部の114が、南西に約2.6%傾斜することが明らかになった。

以上のように、これまで水平であると考えられてきた石室床面が、南西に大きく傾く事実が判明したため、この計測結果を検証すべく、調査後に改めて水準器を使用して再計測をおこなった。その結果、石室北東隅の床面高を基準にすると、北西隅が1.8cm、南東隅が5.6cm、南西隅が7.1cm、それぞれ下降している事実が明らかになった。



Fig.56 基準点No.2における計測風景

B 閉塞石

閉塞石の方位 閉塞石前面の010・011は、石室内部の方位とほぼ同じく、西で南に $1^{\circ}22'$ の振れをもつ。

C 東側石

東側石の厚さ 東壁の南端部で、露出した側石の南東隅を2ヶ所計測することができた(008・009)。石室内部との東西方向での座標数値差は、側石上部(008・109間)で48.4cm、側石中程で51.7cmで、計測点の高さが近い前者が側石の厚さを示している可能性が高い。しかしながら008と009は、47.3cmの高低差で西へ3.3cm、約 4° の傾きを生じていることになる。北壁でみた東壁の傾きは西へ約 1° であったことから、東側石の厚さが均一でなく、上部でわずかに狭くなっている可能性もなくはない。また計測点が欠損部であった可能性もあり、現時点では、東側石の厚さを約51cmとみておく。

D 天井石

天井石南辺の方位 閉塞石の上部に位置する南端の天井石南辺(002・007間)の方位は、石室内部の方位よりも振れが小さく、西で南に $0^{\circ}41'$ 振れる。

天井石南辺の傾き 南端の天井石の上面は、南東隅(006)とその西側(004)でみると、 $1^{\circ}29'$ (2.5%)、天井石南東隅上端(007)と南西隅上端(002)でみると、 $0^{\circ}50'$ (1.5%)西に傾斜し、北壁とほぼ同じ傾きをもつ。

天井全体の傾き 石室内の北壁東上隅(101=天井北東隅)の標高は109.385mであった。『壁画古墳高松塚調査中間報告』(奈良県立橿原考古学研究所編、1972年)によると、天井石の厚さは0.618m、稜部は0.113m下がった位置にあると報告されている。

そこで、石室が水平に構築されていると仮定すると、天井石稜部の南西隅、すなわち002の標高は、 $109.385\text{m} + 0.618\text{m} - 0.113\text{m} = 109.890\text{m}$ となるはずである。ところが、実際の計測点の標高は109.802mであり、0.088m下がっていることになる。



Fig.57 保存施設内の基準点移動作業

002と天井北東隅の101の平面位置は、南北方向で3.018m、東西方向で1.346m離れている。そこで先にみた床面、天井の傾きに準じて、南へ2%、西へ2%の勾配で傾斜していると仮定すると、 $3.018\text{m} \times 0.02 + 1.346\text{m} \times 0.02 = 0.087\text{m}$ となり、想定される沈下量とほぼ一致する。このように天井石も水平ではなく、石室全体が上記の勾配で傾斜していることがわかった。

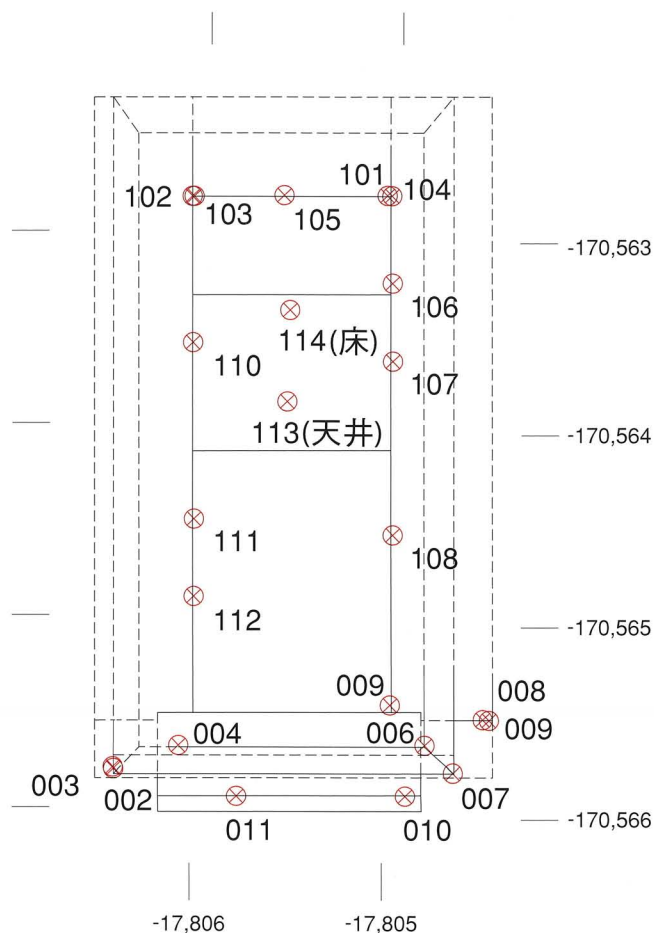
昭和47・49年調査成果の補正 天井石の上面南東隅006の標高は109.937mであるが、昭和47・49年の石室実測図におけるレベルは110.23mである。これより、当時の測量データから29cmを引くと、ほぼ現在の測量成果に一致することになる。これは002・007の測点でも追認され、昭和47・49年の測量成果の補正が可能になった。

V. 石室測量調査のまとめ

以上のように石室の計測結果から、明らかになった諸点を箇条書きにすると以下ようになる。

- ①石室の主軸方位は、北で西に約 1.6° の振れをもつ。
- ②石室は水平、垂直ではなく、全体が西に約 1° (2%)、南に約 1° (2%)傾き、さらに南西方向に $1.3 \sim 1.6^{\circ}$ (2.6~2.8%)傾く。
- ③これまで不明であった東壁の側石の厚さは、約51cmと推測できる。
- ④標高に関しては、昭和47・49年に実施した発掘調査成果から29cm引くと、現在の測量成果に整合する。

なお、今回の計測データと、後述する三次元レーザースキャナーを用いた石室内部測量の北壁四隅のデータを比較すると、Y座標値のみ6cm程度の差が生じている。この差の原因は、保存施設前面の基準点(文化庁No.2=奈文研No.224)から取り合い部への基準点移動の際に、準備室、前室A・Bを隔てる扉を一度に開放できず、短距離の移動を繰り返さざるを得なかったこと、また基準点を足場の不安定なスノコの上に設置しなければならなかったことが影響したと思われる。(内田和伸)



測定成果表

測点名	測点位置	X	Y	H
002	天井石南西隅上端	-170,565.789	-17,806.409	109.802
003	天井石南西隅下端	-170,565.780	-17,806.412	109.297
004	天井石上面南辺西部	-170,565.660	-17,806.075	109.904
006	天井石上面南東隅	-170,565.628	-17,804.795	109.937
007	天井石南東隅上端	-170,565.768	-17,804.645	109.830
008	東側石南東隅上部	-170,565.486	-17,804.497	109.219
009	東側石南東隅中部	-170,565.489	-17,804.464	108.746
010	閉塞石前面東	-170,565.894	-17,804.890	108.473
011	閉塞石前面西	-170,565.915	-17,805.768	108.464
101	石室北壁東上隅 (天井北東隅)	-170,562.771	-17,805.063	109.385
102	石室北壁西上隅 (天井北西隅)	-170,562.800	-17,806.077	109.362
103	石室北壁西下隅 (床面北西隅)	-170,562.800	-17,806.067	108.244
104	石室北壁東下隅 (床面北東隅)	-170,562.772	-17,805.039	108.262
105	石室床面北辺中央付近	-170,562.783	-17,805.600	108.251
106	石室床面東辺北部	-170,563.227	-17,805.024	108.254
107	石室東壁北目地	-170,563.633	-17,805.012	108.506
108	石室東壁南目地	-170,564.537	-17,804.990	108.776
109	石室東壁南辺	-170,565.423	-17,804.981	109.242
110	石室西壁北目地	-170,563.561	-17,806.054	108.920
111	石室西壁南目地	-170,564.479	-17,806.025	108.960
112	石室西壁南部	-170,564.882	-17,806.016	109.004
113	石室天井中央付近	-170,563.856	-17,805.556	109.352
114	石室床面北部	-170,563.380	-17,805.554	108.241

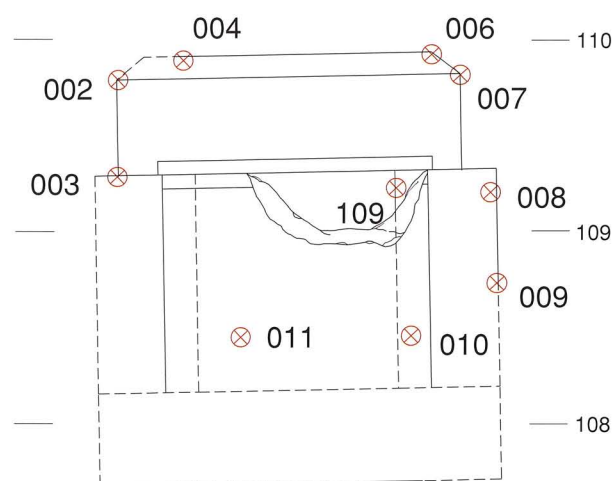
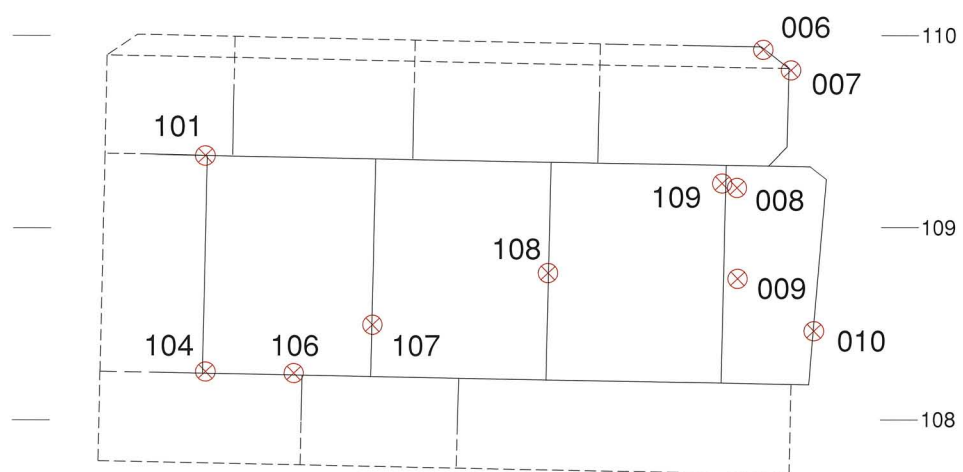
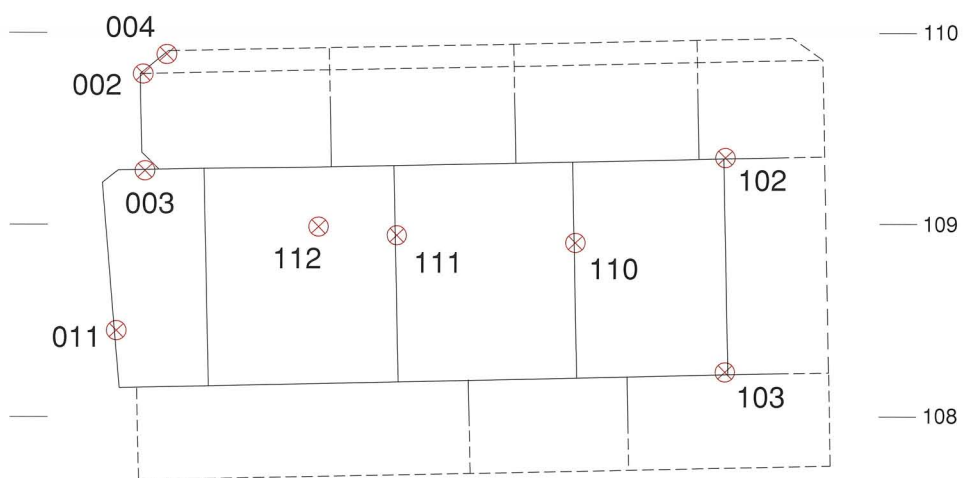


Fig.58 石室測点位置図

5 3次元レーザースキャニングシステムを用いた石室内部の実測調査

I. 調査目的

前節のトータルステーションを用いた石室の実測調査により、石室の歪みや傾きの現状が明らかになったが、その計測点は、トータルステーションを設置した取り合い部から直接見る事ができる範囲に限られていた。すなわち、石室閉塞石の内壁などは計測できなかったのである。

恒久保存対策を検討する上で、石室の歪みや傾きを反映した精密な石室の実測図が必要となり、壁画の保存環境に影響を与えぬよう、迅速かつ効率的な方法で石室を測量することが求められた。そこで各種測量方法を検討した結果、3次元レーザースキャニングシステムを用いた実測調査を実施することとした。

このシステムは、対象物にレーザー光を照射、反射して戻ってきた光で対象物までの距離を計測し、同時に照射方向を記録して、対象物との位置関係を数値化する方法である。この測量法によって採取したデータから、3次元CADモデルを生成し、分析・加工をおこない、図面とアニメーションを作成した。

II. 調査年月日

調査は文化庁美術学芸課の担当官の監理のもと、奈良文化財研究所飛鳥藤原宮跡発掘調査部が、株式会社共和の協力を得て実施した。

本調査に先立ち、高松塚壁画館で展示されている実物大の石室レプリカを利用して、平成17年8月8日にシミュレーションをおこない、機材搬入の作業手順、作業時間、安全性などを確認の上、平成17年12月28日に本調査を実施した。

III. 現地作業概要

(1) 3次元レーザースキャナーとターゲットの設置

石室内に測量作業が入り、中央奥寄りにスキャナーとターゲット2基を設置。スキャナーから盗掘坑を通して確認できる保存施設前室の壁面にも2基ターゲットを設置 (Fig.59)。

(2) ターゲットの計測 スキャニングしたデータを国土座標系にのせるため、取り合い部に設置したトータルステーションを用いてターゲットの位置を計測 (Fig.60)。

(3) 1回目スキャニング

(4) スキャナーの移動・再設置 スキャナーの死角をなくすため、スキャナーを南壁寄りに移動し、再設置。

(5) 2回目スキャニング

(6) 細部スキャニング

(7) 温湿度管理

スキャニング中は石室前の扉を閉塞し、作業者は前室Aに待機、そこでパソコンを用いてスキャナーを操作した (Fig.61)。スキャナーは内蔵モーターにより水平・鉛直方向を回転。その稼働による発熱が石室内の温湿度へ変化を与えぬように、作業中は機械室と頻繁に連絡を取り合い、温湿度の変化に注意した。

IV. スキャニング

使用機器 ライカ社製 HDS3000

- ・レーザータイプ：半導体レーザー、波長532mm (緑)
- ・レーザースポット径：6mm以下
- ・スキャニング範囲：水平360°、鉛直±135°

写真撮影 本体内蔵のデジタルカメラによる撮影。計測データにイメージの色彩を着けるためにおこなうものである。床面に小型蛍光灯式懐中電灯を置いて照明とした (Fig.59)。

スキャニング密度 石室全体を機械本体から1m離れた所で5mmピッチでおこない、石室のコーナーや亀裂部分を対象に、再度2～3mmピッチでおこなった。

観測時間 1回目、2回目スキャニングは各約60分、細部スキャニングは約20分を要した。

採取データ数 スキャニングで採取したデータ数は約174万点で、ノイズ除去後のデータ数は約147万点である。PL.13上段は第1回目スキャニングで採取した点群データを輝度表示し、ビジュアル化したもので、PL.13下段は石室内部の全点群データとその外側に想定される石材を表示したものである。

V. データ編集

上記のデータ取得と変換、分析等の編集はライカ社製の専用ソフトウェアCycloneを使用した。

(1) 世界測地系国家座標による点群データの合成 採取した点群データと、トータルステーションで観測したターゲットの座標データを合成し、点群データを国土方眼座標に変換する。

(2) ノイズの除去・レイヤー分け 合成したデータの中からスキャニング時に生じたノイズの除去をおこない、各面ごとのレイヤーに分ける。

(3) メッシュ作成 点群データを各パーツ (壁面・天

井・床面)ごとにメッシュ加工をおこなう(PL.14)。これにより、点群データから面データになり、解析が可能になる。PL.14上段では、石材の隙間や割れ目に照射された部分が突出した状態で表示されている。

Ⅵ. データ分析

立体モデル・線データの作成 上記作業により、立体モデル・線データが作成される。立体モデルを用いると、石室天井南西隅などの点が、天井東北隅などに比べてどの程度沈下しているのか、パソコン内であらゆる方向から計測できることになる。また壁面下端を基準に、壁面の傾斜の程度をコンターラインを使って示すことができるようになる。

石室保存状況 石室の歪みと各面の傾斜量をPL.16上段に示した。東壁および西壁の設置方位を床面でみると、北で西にともに $1^{\circ}19'$ であった。Fig.62は四方の壁の垂直方向・水平方向からの傾きを実測値と角度で示したものである。Fig.63は石室各壁の傾斜量をコンターラインを用いて表示したものである。特にPL.16下段は床面の北東隅を基準に、床面の南西への傾斜量、北壁の南への傾斜量、東壁の西への傾斜量を図示したものである。

PL.15は石室と同規模の仮想石室を、床面北東隅を基準にして、水平・垂直に表示し、石室内部の現状と比較したものである。これにより、天井や床面の歪み量が具体的に明らかとなり、天井の南西隅では水平な状況から79mm下がり、西へ21mm、南へ12mm傾いていることがわかった。Fig.64は各面の現状と想定位置を重ねて表示したものである。

Ⅶ. おわりに

今回の3次元レーザースキャナーを用いた実測により、解体前の石室内部の保存状況を計測データとして記録することができた。石室の解体修理時に石室外壁を同様の方法で計測し、データを合成すれば部材の形状を正確に記録することができ、解体修理前の石室の形状を3次元のデジタル情報にして後世に残すことが可能となる。

また壁画に対して垂直なデジタルオルソ写真を作成し、この空間データと合成すれば、解体前の石室をパソコン内でリアルに再現でき、展示などの活用にも期待できる。

(内田和伸)

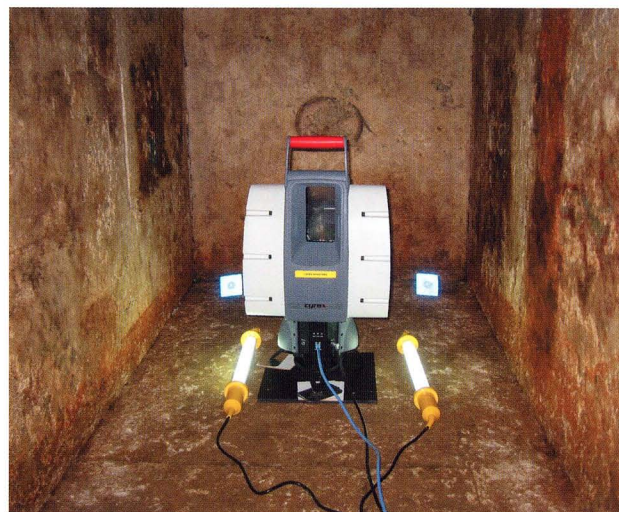


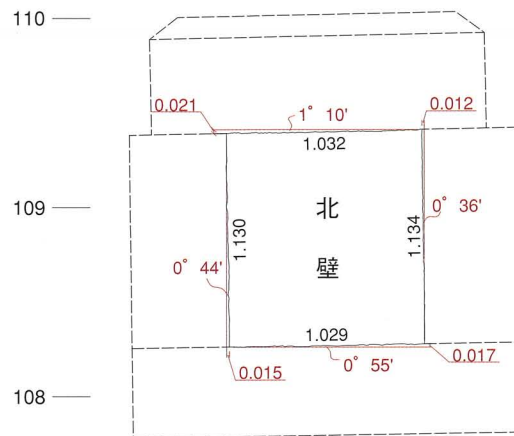
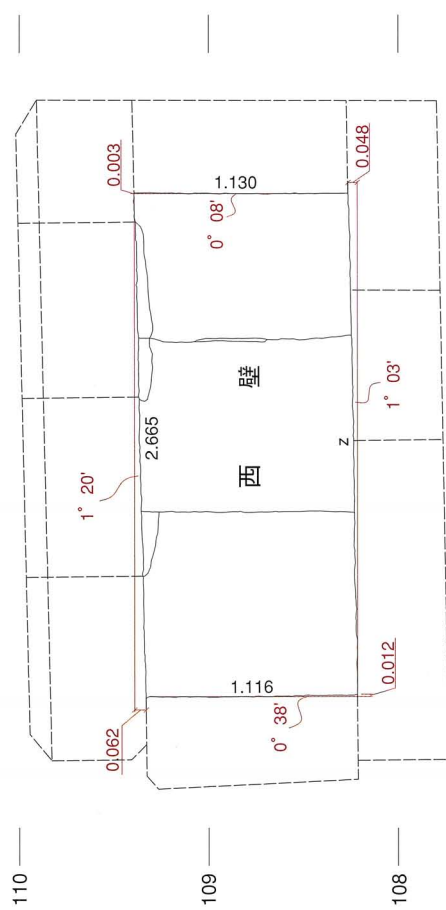
Fig.59 3次元レーザースキャナーの設置



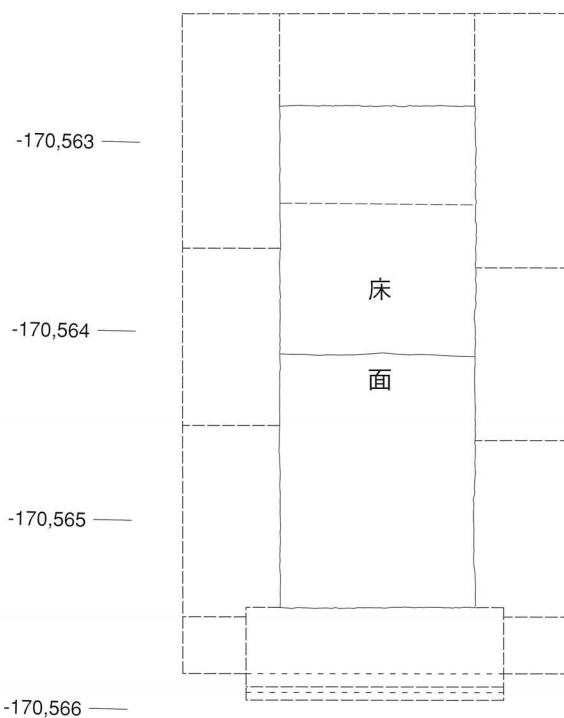
Fig.60 石室内ターゲットの計測



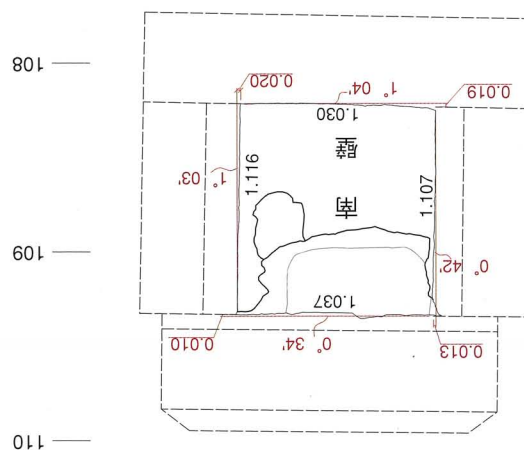
Fig.61 前室Aでのスキャナーの操作



-17,806 -17,805



-17,806 -17,805



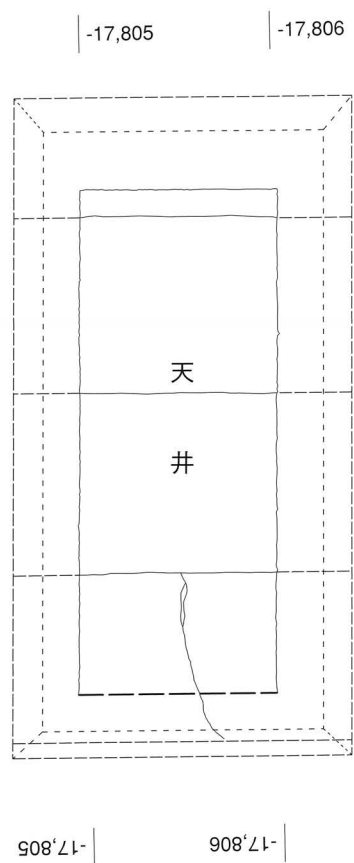
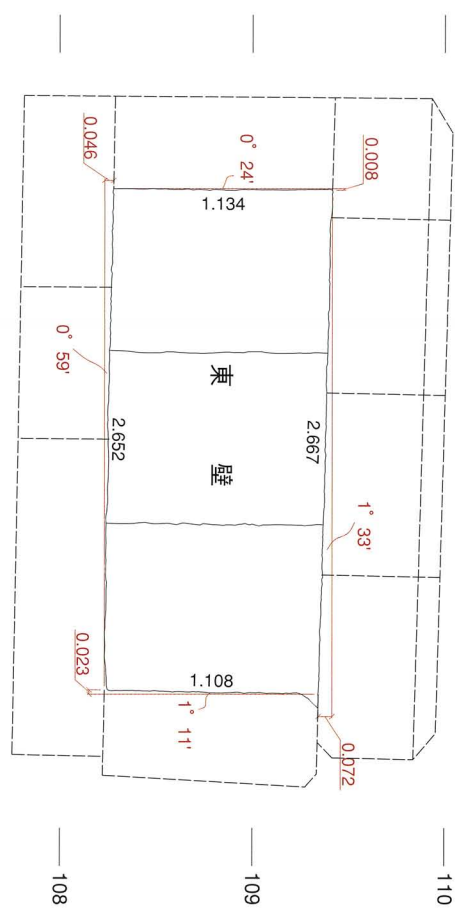
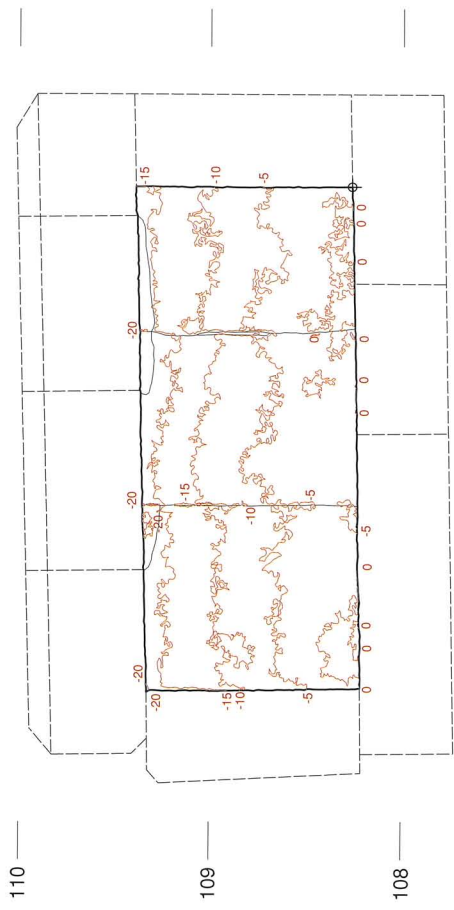
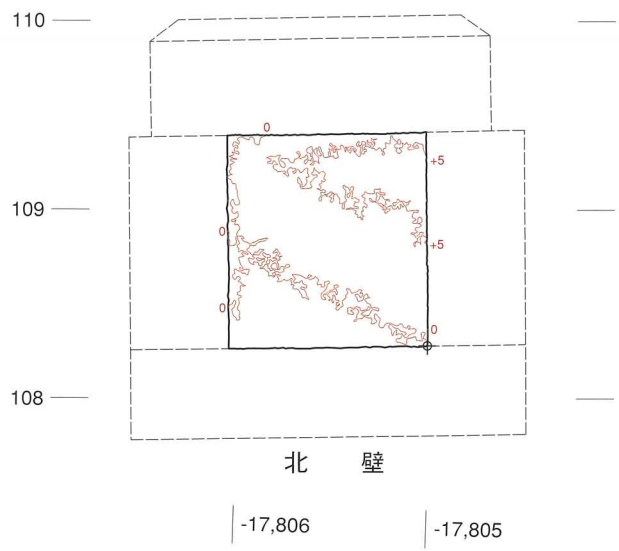


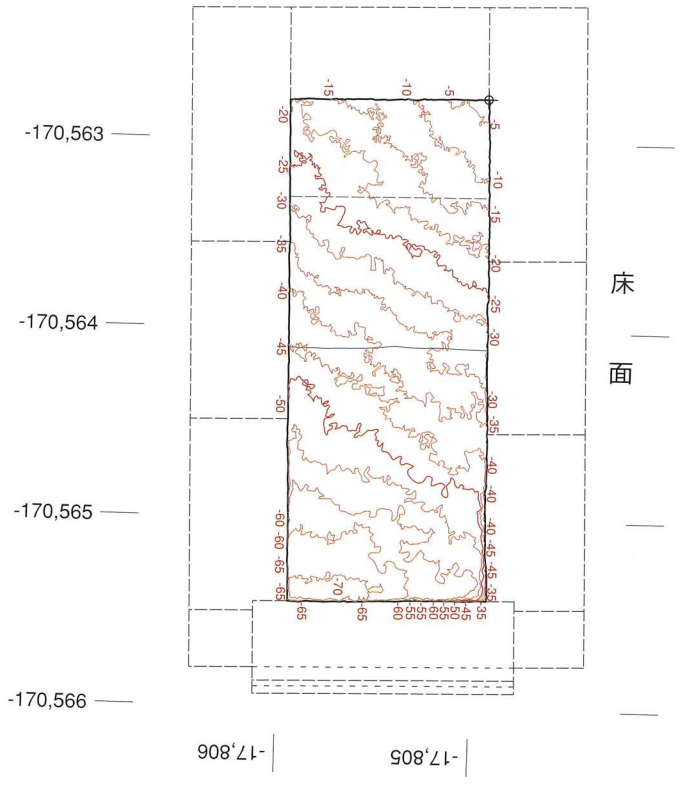
Fig.62 石室実測図



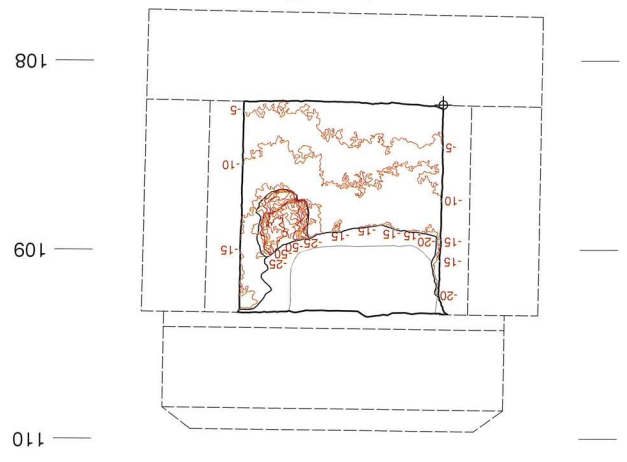
西壁



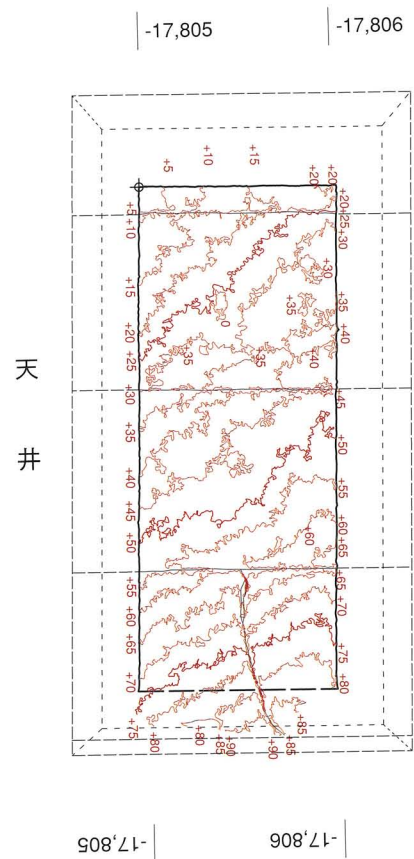
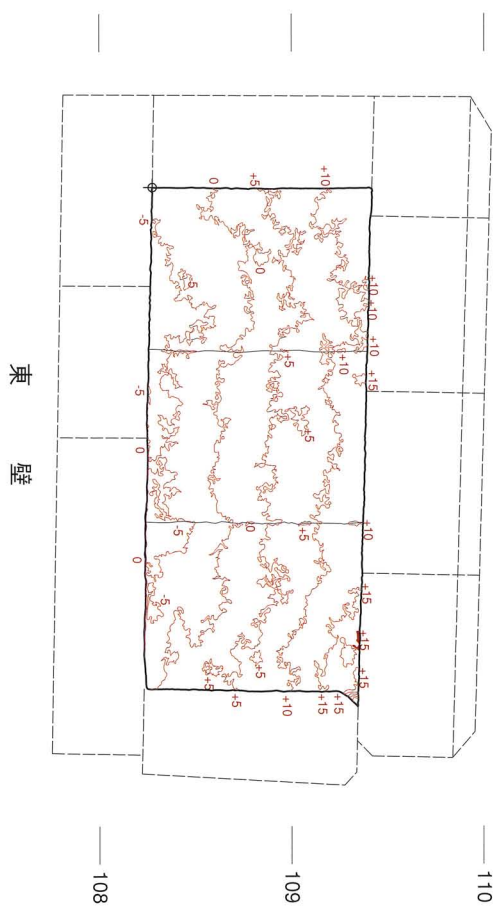
北壁



南壁



床面



⊕ . . . 基準ポイント
等高線間隔 5mm
傾斜量単位 (mm)

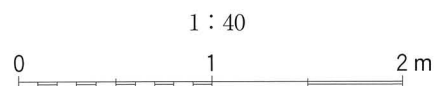
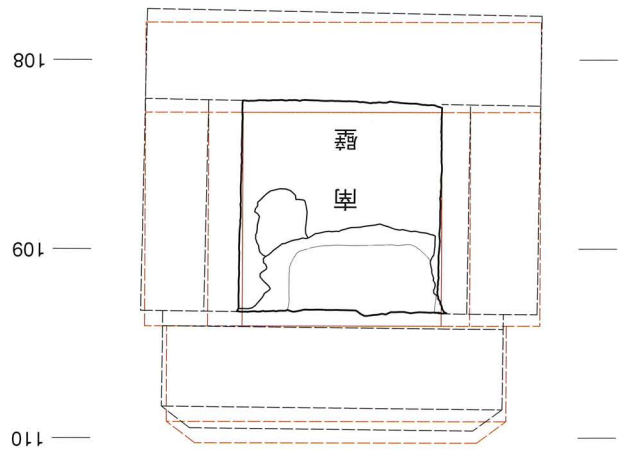
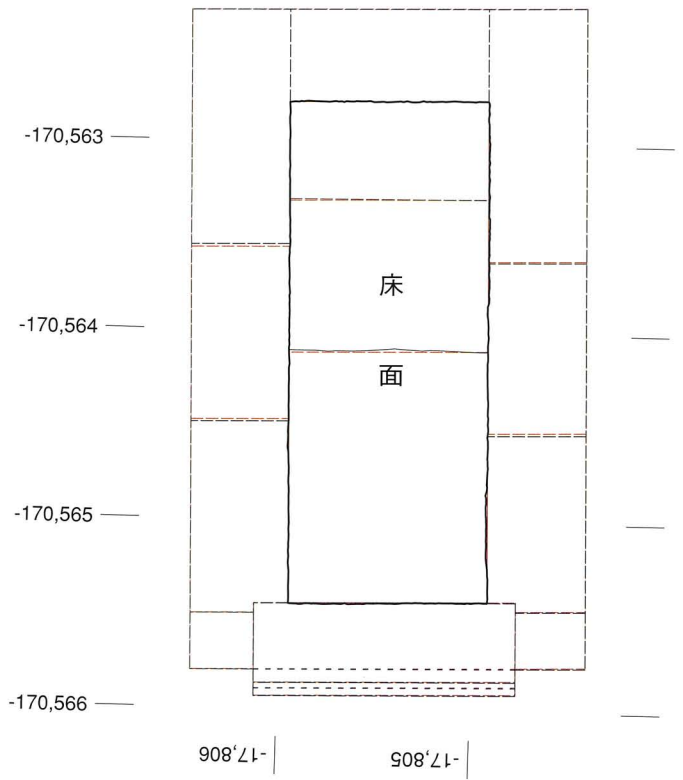
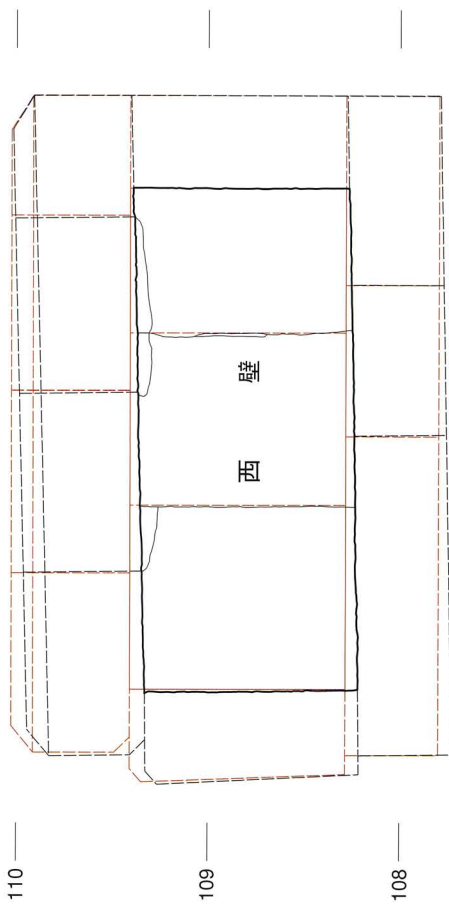
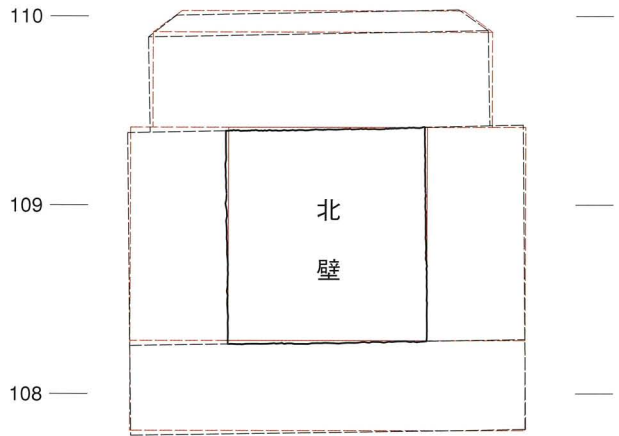
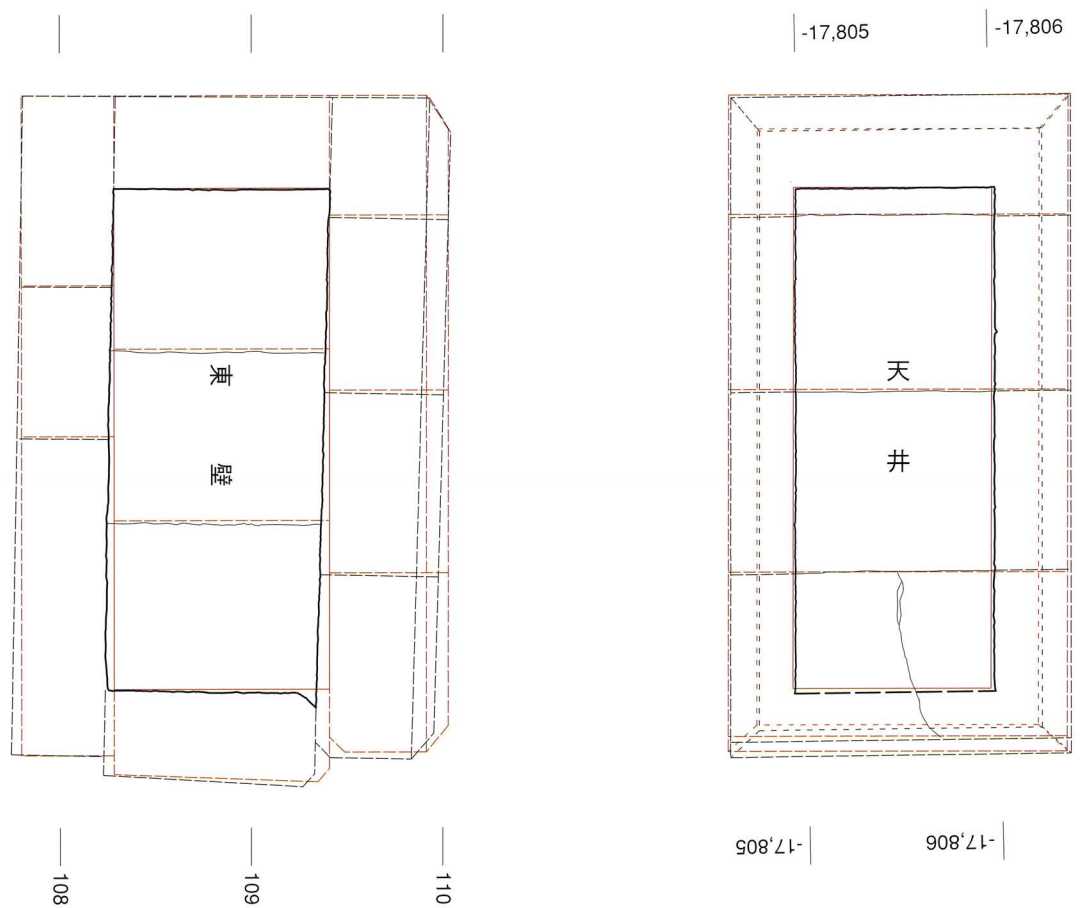


Fig.63 石室傾斜量図





赤 : 想定
黒 : 現況



Fig.64 石室位置の想定と現況の相異図