

## 福島県中田横穴の高精細 3 次元計測

# High-resolution 3-D measurement of Nakata tunnel tomb in Fukushima Prefecture

藤沢 敦\*・鹿納 晴尚\*・菊地 芳朗\*\*・志村 将直\*\*\*

\* 東北大学総合学術博物館 \*\* 福島大学 \*\*\* シン技術コンサル

○ *Atsushi Fujisawa\**, *Harumasa Kano\**, *Yoshio Kikuchi\*\** and *Masanao Shimura\*\*\**

*\*The Tohoku University Museum, \*\*Fukushima University, \*\*\*SHIN ENGINEERING CONSULTANT CO. LTD.*

**Abstract:** Nakata tunnel tomb, located in Iwaki City, Fukushima Prefecture, has mural-paintings of continuous triangular pattern. It was constructed in end of the 6th century. In view of its importance, it has been designated as a national historic site. As part of our Grant-in-Aid for Scientific Research project, 3D measurements of Nakata tunnel tomb were conducted in 2021. Because tool marks and thin line engravings were found on the wall, we used the SmartSCAN-HE, an optical, non-contact, high-end 3D scanner, to obtain detailed data. The floor inside the tomb was measured by photo analysis of the Structure from Motion (SfM) method, and the outside of the tomb was measured with a terrestrial laser scanner. These three types of data were merged. High-resolution measurements allowed us to identify detailed features.

## 1. はじめに

東日本大震災以降も、相次ぐ地震や水害で、日本各地で文化財の被害が続いている。特に古墳石室や城郭石垣などの石材で構築された文化財では、被害が目立つ。これらの文化財が被災した場合、3次元計測データがあると、被害状況の把握、被災後の修復・復元の際に、大きな威力を発揮する。様々な特質を有した石材で構築された文化財を対象に、保全を目的とした3次元計測の標準を確立することを目的として、藤沢が研究代表者となり、2020年度から文部科学省科学研究費助成事業（基盤研究（A）・2020-2024年度）「石材構築文化財の保全のための3次元デジタルアーカイブの標準化の研究」を実施している<sup>1)</sup>。この科研費による研究の一環として、2021年度に計測を実施した、福島県いわき市に所在する中田横穴の計測成果を報告する<sup>2)</sup>。当該科研費での研究で計測を実施した遺跡の報告は、準備が整ったものから、順次行うこととしている<sup>3)</sup>。

なお本論は、1. 3. 6. 7. を藤沢、2. を菊地、4. を鹿納・藤沢、5. を志村・鹿納・藤沢が分担して執筆した。

## 2. 中田横穴について

### 横穴の構造

中田横穴（以下「本横穴」）は、福島県いわき市平沼ノ内に所在する。いわき市中心部の南東約8km、現海岸線の西約1km、海岸沿いに延びる低丘陵の西斜面に位置する（図1）。周辺には重要文化財「天冠埴輪」等が出土した神谷作101号墳、多数の優れた副葬品が出土した八幡横穴群、古代磐城郡衙である根岸遺跡など、古墳時代後期から奈良・平安時代の重要遺跡が集中し、この地がいわき地域のみならず東北部・北関東における拠点地域の一つであったことが容易に推察される。

本横穴は、1969年1月、道路工事中に偶然確認され、ただちに発掘調査が行われた。北西向き斜面に掘られた6基以上からなる横穴群の1基（1号横穴）であり、群中で最も低い位置に構築され、一部に礫岩を挟在する細粒の凝灰質砂岩からなる新第三系高久層群下高久層（須貝ほか1957）に掘り込まれている。

本横穴の最も大きな特徴は、整美な装飾壁画をもつことであり、これにより「中田装飾横穴」の名でも知られる。東日本では数少ない装飾古墳の一つであり、調査後間もない1969年5月に国史跡に指定された。現在は横穴の入口外側にガラス扉と保護室が設置され、横穴内部に直接日光や



(いわき市埋蔵文化財調査報告第180冊第5図を参照し国土地理院電子地図を加工して作成)

図1 中田横穴の位置と周辺の古墳・横穴墓



外気が入り込まない措置が取られている。

本横穴は、副室構造をもち、装飾壁画や副葬品のみならず、構造と規模においても非常に優れたものである（図 2）。羨門部端から後室奥壁までの全長が 6.67 m をはかり、主軸は N64° W で西北西に入口を向ける。以下それぞれの空間の記述において、報告書にしたがい、奥側から順に「後室」、「前室」、「羨門部」、「前庭部」と呼称する（渡辺ほか 1971）。各部の規模と形態は、つぎのとおりである。

後室：長さ 2.6m、最大幅 2.8m、高さ 2.28 m、平面隅丸正方形、天井ドーム形

前室：長さ 2.0 m、最大幅 2.2 m、高さ 1.85 m、平面奥側の広い不整形、天井アーチ形

羨門部：長さ 1.1m、最大幅 1.8m、平面逆台形（天井の高さ・形状不明）。

前庭部：長さ 1.3m、幅 6.8 m 以上、羨門部床面から 1.1m 下位に設けられ、地山上に下から順に人頭大の凝灰質砂岩礫、拳大の河原石、木炭、灰が敷かれる。

各室の間は、幅と高さを減じて門状になっており、その外側に板石を用いて閉塞するための溝が掘られている。ただし、不時発見により閉塞の状況は不明確であった。また、後室門（玄門）と羨門部の中央には排水用とみられる溝が掘られ、後室には壁面全面の上半部に 30 個以上の小孔がみられる。後者の小孔は壁画完成後に穿たれ、壁画上方に布を張って天井を装飾した際の痕跡と推定されている。

横穴は一般に主軸に対称となる平面形状をもつが、本横穴は入口側からみて後室が右側（南側）に偏る特異な形状を呈する<sup>4)</sup>。これは、後室左壁（北壁）の予定箇所に表面が茶褐色の大きさが数 10 cm～1 m 程のコンクリーション（周囲の地層と異なる組成により球状に硬く発達したもの・ノジュールとも言う）が存在したため、やむなく掘削が変更された結果であり、当初から意図されていたものではないと考えるのが自然である。

### 壁画の特徴

本横穴の壁画は、後室のみにあり、四周の壁面全面に描かれる。主要なモチーフは、水平に引かれた 4 本の赤線の間で赤色顔料で 3 段に描かれた連続三角文である。各段の三角形はほぼ同大であるが、詳細に見ると正三角形のもの、二等辺三角形のもの、頂点がないものなど様ではない。

上段の三角文は下向き、中段と下段は上向きに描かれ、さらに奥壁では、赤彩されていない部分の三角形の上段と中段に白色顔料が塗られ、白色の連続三角文となっている。のちの分析により、赤色顔料はベンガラ、白色顔料は白土（カオリナイト）と判明している（江本 1975）。後室床面にも赤色顔料が認められるものの、部分による濃淡の差が大きく、その意図やモチーフは明確でなかった。

中段と下段の赤彩三角文は、頂点と下辺の位置を揃えているが、上段の赤彩三角文は、中段の赤彩三角文と頂点の

位置を一致させず、中段三角文の下辺端にあたる場所に上段の三角形の頂点が位置するよう、ずらして描かれている。これにより赤彩されない上段と中段の三角文が鋸歯文に見えるようになり、特に奥壁では白色顔料が塗られたことでコントラストが鮮明となり、高い視覚的効果が与えられることになっている。

後室入口上部には、以上と異なる表現の壁画が認められる。玄門天井に接して 4 個（あるいは 5 個）の大小の上向き赤彩三角文が描かれ、さらにその上に 2 本の赤色弧線が引かれ、弧線間に赤線による鋸歯文が充填されている。三角文と鋸歯文どうしに特段の部位の一致は認められない。

壁画の基本的構成は以上のとおりだが、各所に不統一や乱れがみられる。顕著なのは白色顔料で、奥壁の上段と下段の三角形のみに塗られ、奥壁下段とその他の壁にはみられない。また、下段の赤彩三角文は壁面を全周しておらず、奥壁と北壁では三角の輪郭線のみが引かれるものや、線が辺の途中までしか引かれていないものがある。北壁ではコンクリーションにより三角の形が十分に表されていない箇所が目立つ。さらに、多くの箇所では彩色三角文の輪郭と一致して刻線による三角文が書かれており、彩色に先立って刻線で文様の割付けが行われたことを推測させるが、線刻が書かれない部分や重複して書かれた部分がある。

以上の壁画構成からは、本横穴の壁画が任意で描かれたのではなく、あらかじめ用意された設計企画をもとに制作されたものであることを強く推測させる。一方で、上記の不統一や乱れは、実際の横穴掘削と描画にあたり、状況に応じて臨機応変に当初設計を変更したことや、描画者の迷い・混乱のようなものもうかがうことができる。この規格性と随意性が、逆に壁画の芸術性や呪術性を高めることにつながっているとみることもできるであろう。

### 出土遺物と被葬者

本横穴では、ほぼ全範囲から多種・多数の遺物が出土し、その内容は同時期の大型前方後円墳の副葬品に匹敵する。ただし、遺物の大半は本来の形状をとどめず、位置や全部品が揃わないバラバラの状態出土し、その意味は十分に明らかになっていない。遺物の種類・数は、つぎのとおりである。

装身具：勾玉 32、管玉 1、棗玉 10、ガラス玉 336、銅釧 2、耳環 3

鏡：珠文鏡 1

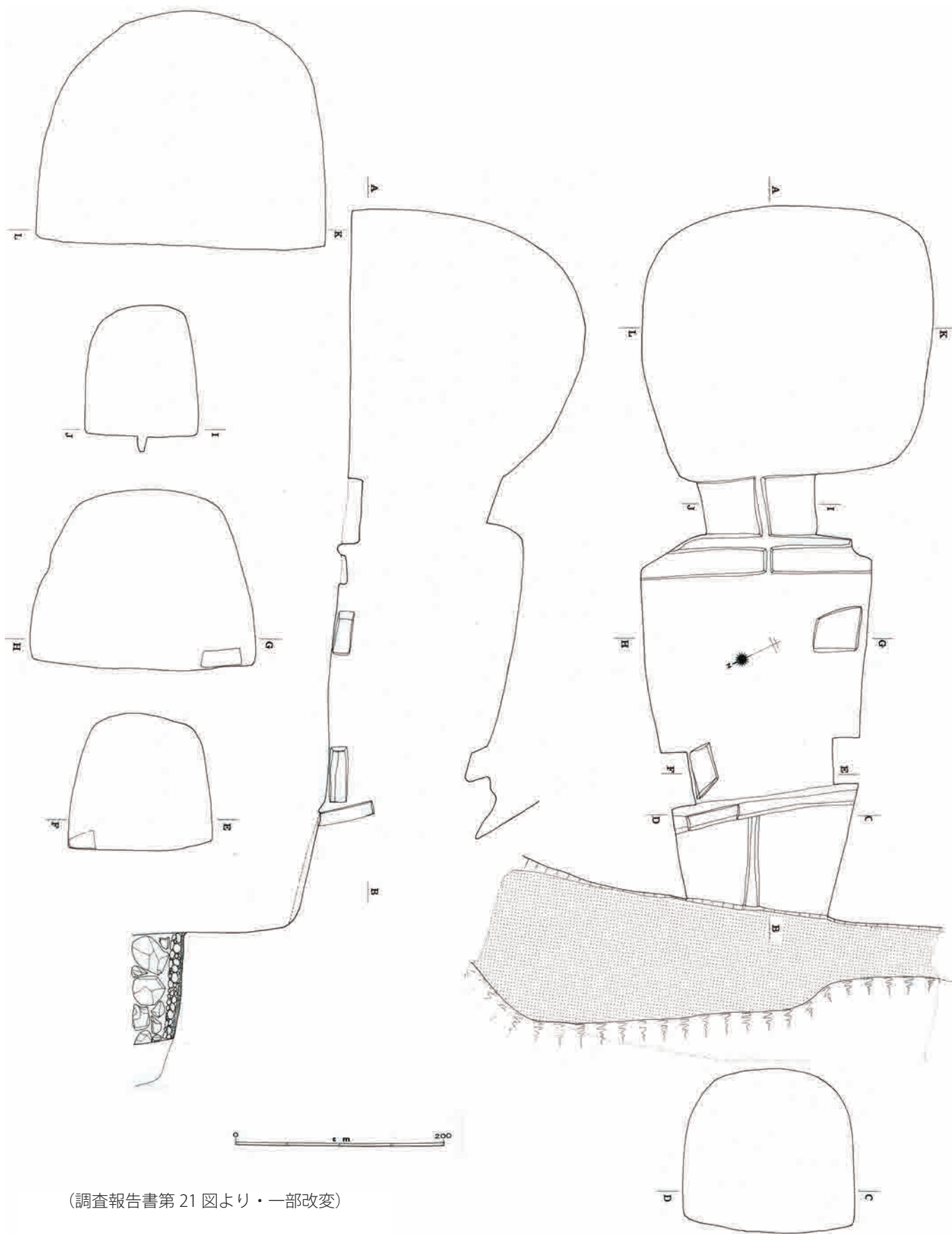
武器・武具：大刀 2 ないし 3、鉾 2、弓、鉄鏃 65 以上、刀子 10、札甲 1 組、他

馬具：金銅装馬具 1 組？

土器：土師器片 5、須恵器提瓶 1、須恵器甕 2

その他：銅鏡蓋 1、砥石 1、紡錘車 1、木片

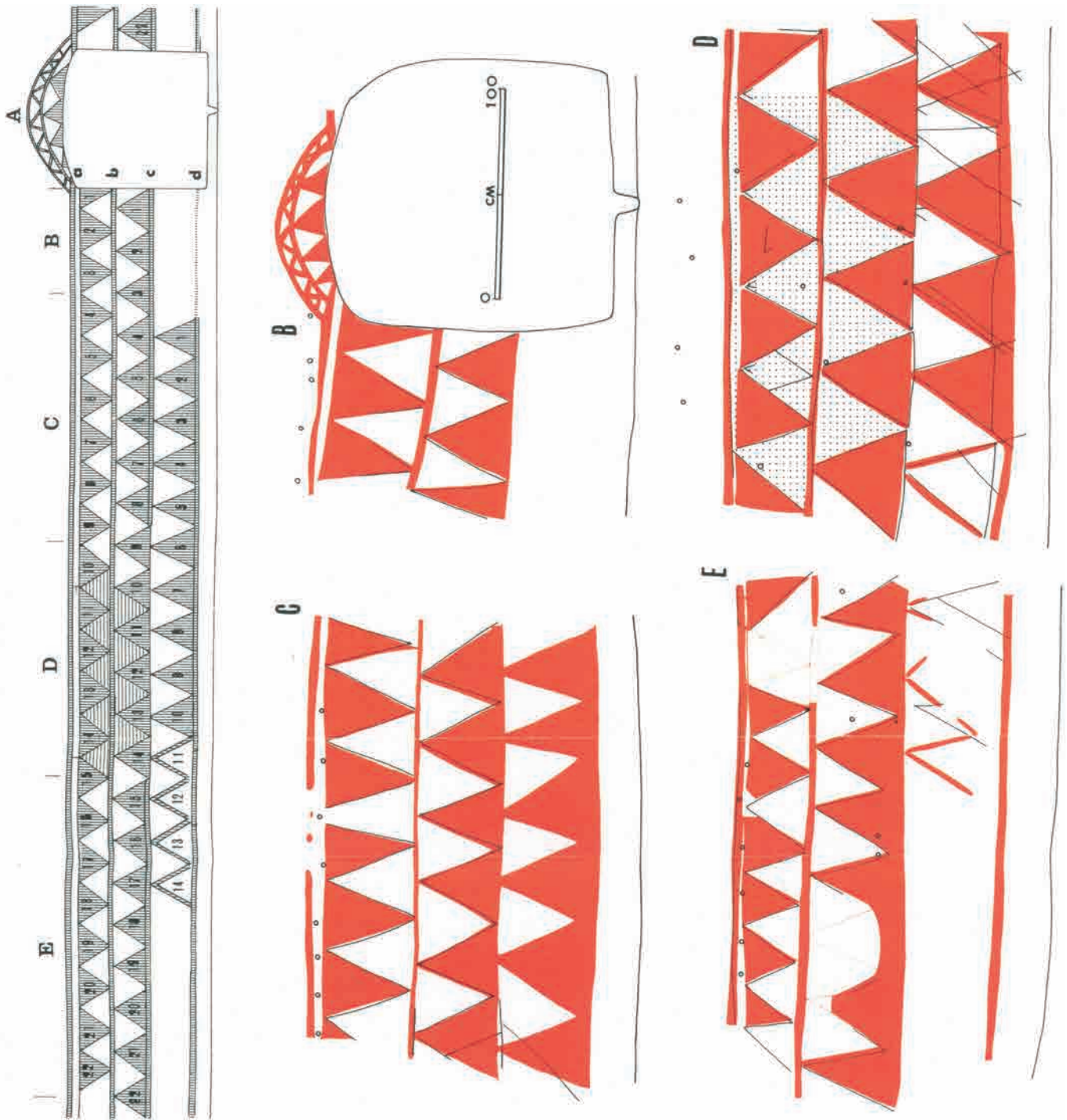
これらは、東北のみならず日本列島の横穴全体でみても非常に豊富な副葬品群といえ、後期大型前方後円墳のそれ



(調査報告書第 21 図より・一部改変)

図 2 中田横穴実測図





中田横穴 1 号の後室に描かれた裝飾意匠文

上段は模式図：A～Eは壁面の仮称

縦線は赤色塗布，横線は白色塗布（但し，Bのdは未確認）

下段は実測図：各壁のコーナーは曲面を有する為，中央の三角文と比べると多少の違いが生じている。

（調査報告書第 27 図より・一部改変）

図 3 中田横穴壁画実測図

と共通することとあわせ、高位の人物がここに葬られたことを物語る。

副葬品の乱れが大きかったことや、人骨がごくわずかししか出土しなかったことにより、被葬者の正確な数は判明していないが、報告書では1人と推定されている。副葬品の数と組み合わせは、1人の被葬者にともなうものとみても矛盾はない。一方で、副葬品の著しい乱れは、埋葬・副葬後にこれらが大きく動かされたことをしめしており、追葬と関係があるか否かが問題として残されている。

### 横穴についてのまとめ

本横穴の年代は、副葬品をもとにすると古墳時代後期後～末葉（紀元後6世紀末）と考えるのが妥当であり、東北では古い段階の横穴の一つに数えられる。横穴そのものの規模の大きさ、副葬品の高い質と数、装飾壁画という本横穴の特徴に匹敵する内容をもつ横穴は、いわき地域のみならず東北・関東にも認められず、極めて高位の人物がここに葬られたことが明らかである。

本横穴の主要な壁画モチーフである連続三角文は、神谷作101号墳出土埴輪などいわき地域の形象埴輪に採用されるとともに、茨城県ひたちなか市虎塚古墳（墳長57mの前方後円墳）等の装飾壁画にも認められる。このことは、古墳時代後期のいわき～茨城県北部（常磐地域）において、連続三角文を高位の人物の墓の要素として採用する心的共通性や葬送儀礼が存在したこととともに、この地域が一定の政治的・社会的なまとまりを有していたことを示唆する。

いわき地域では、本横穴と同時期の墳丘をもつ古墳、とりわけ優れた内容をもつものが十分に把握されていないという問題も残るが、以上をふまえると、本横穴の被葬者は、6世紀後半に活躍した常磐地域の最有力首長であり、間もなく成立する古代磐城郡に向かう政治的・社会的変化を主導する役割を果たした人物と推定するのが適当と考えられる。

## 3. 調査の目的

本科研費での研究では、計測方法の検討を目的として、各年度に数ヶ所の計測を実施している。計測対象遺跡の選定は、計測方法の検討に合致することを基本としている。それに加えて、近年の自然災害によって被害を受けた遺跡や、今後の保全が懸念される遺跡を優先するとともに、被災した自治体を支援することも目的として、計測対象を選択してきた。

東北地方の中でも福島県と宮城県は、6世紀末から7世紀にかけて、極めて多数の横穴墓が築造された地域である。それらの中には、彩色や線刻で装飾を施すものが比較的集中することが知られているが（図4）、横穴墓全体の数から見ると、極めて限られた割合にとどまる。線刻による横穴墓が過半以上を占めることから、彩色による装飾を有する

ものは、極めて希少である。

これら東北地方の彩色による装飾を有する横穴墓のほとんどは、単純な直線・円文・珠文などを描くものである。それらの中にあつて、福島県内陸部の泉崎村泉崎横穴（福島1983）、沿岸部の南相馬市羽山横穴（渡辺ほか1974）と双葉町清戸迫横穴（西ほか1985）の3ヶ所の横穴墓は、人物や動物など、具象的な題材を含むものとして特徴的である。これらに加えて中田横穴は、後室壁面のほぼ全面に三角文を描いており、横穴墓の規模が大きいこともあわせて、傑出した特徴を有する。これら4ヶ所の彩色で装飾された横穴墓は、その希少さと重要性から、いずれも史跡に指定され、保護施設が設けられるなどして、比較的安定して保護されてきた。東日本大震災以前は、気候が安定した時期に、一斉公開も行われてきた（図5）。しかし東日本大震災と東京電力福島第一原子力発電所の事故によって、公開は中断したままのものもある。保護施設に被害を受けた横穴墓もあり、清戸迫横穴は原発事故に伴い長期間にわたって立入が禁止されていた。

泉崎横穴と羽山横穴については、以前に九州歴史博物館によって3次元計測が実施されている。清戸迫横穴については、筆者ら東北大学総合学術博物館が計測を実施し、本科研費でデータ整理を行い報告している（藤沢ほか2023）。中田横穴の3次元計測データを得ることができれば、これら福島県内の主要な彩色を持つ4ヶ所の横穴墓のデータがそろふこととなる。東日本大震災以降、一般公開が難しくなっており、それを補填する意味においても、中田横穴の3次元計測の必要性が高いと判断し、本科研費で計測することとした。

## 4. 調査の方法と経緯

2020年秋に、別件で藤沢がいわき市を訪問した際に、中田横穴の計測について打診したところ、快諾をいただき計測を実施することとなった。しかし、新型コロナウイルス感染症が拡大していったことから、2020年度の実施は見送らざるを得なくなり、経費は翌年度に繰り越すこととなった。

2021年度は、早々にも計測を実施する方向で調整を進めていたが、新型コロナウイルス感染症の感染動向で延期を重ね、ある程度落ち着いた秋以降に、ようやく準備を進めることができるようになった。2021年10月11日に、藤沢がいわき市役所を訪問し、現地での検討の日程等を協議した。11月11日には、計測を委託したシン技術コンサルの担当者も含めた現地での検討を、いわき市文化スポーツ室・観光交流室文化振興課の担当者の立ち会いのもと実施し、調査方法や基準点の設置場所、調査の手順などを確認した（図6-1）。

3次元計測には様々な方法があり、計測対象と必要とされる精度を踏まえ、計測方法を選定することが重要である。現地視察と打合せを踏まえ、彩色を伴う装飾古墳であるこ





図4 東北地方の主要な装飾古墳

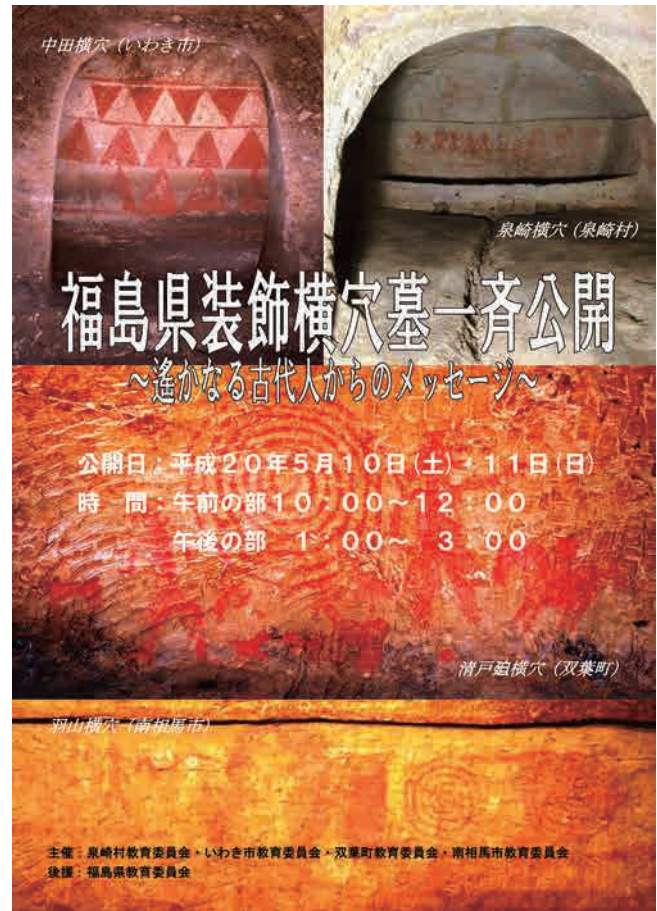


図5 福島県装飾横穴墓一斉公開のポスター

と、壁面の細かな凹凸や線刻による下書きを明瞭に記録する必要があることから、光学式非接触ハイエンド3Dスキャナ（ストラクチャードライトスキャナ）とSfM法を併用することとした。これは、福島県双葉町の清戸迫横穴で実施した方法と、同じ方法となる。

横穴内は、床面を除いて、AICON（アイコン・独、現在はXEGON）社製の光学式非接触ハイエンド3DスキャナであるSmartSCAN-HEを使用した。SmartSCAN-HEは、白色LEDで複数のパターンを連続して照射し、それを2台のCCDカメラで撮影して3Dデータを取得する。スキャナ本体の光源は白色LEDを使用しており、照射時間は数秒程度と短い。そのため、計測対象、特に顔料へのダメージは無いと考えられる。SmartSCAN-HEはレンズを換えることによって、解像度や計測範囲を変えることができる<sup>5)</sup>。今回の計測では、525×400mmの範囲を計測して、159μmのピッチで計測可能なM-650を使用した。スキャンデータを合成するため、計測データが周囲と一部が重なるように、計測

機器を移動しながら、全体をカバーするように計測した。

形状が複雑で3Dスキャナでは計測が難しい部分と床面については、デジタルカメラを用いたSfM(Structure from Motion)-MVS(MultiView-Stereo)法（以下SfM法と略）による計測をおこなった。床面は、日常的な管理で歩かざるを得ないことから、詳細な表面形状を記録する必要性は少ないことから、計測時間の短縮も兼ねて、SfM法を併用した。入口に設けられている保護施設とその周囲については、据え置き型レーザー計測器で計測した。

計測作業は株式会社シン技術コンサルに委託し2021年の12月20～24日の5日間で実施した。作業にあたっては、いわき市文化振興課の担当者に、保護施設の開閉を行っていただき、藤沢・鹿納・菊地の3名が、交替で現地に常駐して作業を管理した。横穴内の温度上昇には留意する必要があるため、羨門右上の、モルタル部分に温湿度センサーを設置し（図6-2）、ケーブルを前室に伸ばしてチェックできるようにした。清戸迫横穴では、作業者の発する熱によつ



て温度上昇が見られた場合もあったが、中田横穴は規模が大きいため、作業中の温度上昇は、ほとんど見られなかった。

計測成果を公共座標に位置づけるため、GNSS 測量を用いて横穴の周辺に基準点を 2 点設けた（図 6-3）。この 2 点の基準点から、保護施設内の横穴内を視準できる場所まで基準点を移動し（SP1 ～ SP4）、SP4 からトータルステーションによって横穴内に標定点を設定した（図 6-4）。国の史跡に指定されているため、マーカーを設置することができないため、特徴点を標定点として計測した（表 1）。

保護施設には照明用の電気は引かれていたが、容量が不足するため、保護施設の外側に発電機を設置して電源とした。スキャナから伸びるケーブルには、ビニールを巻いて養生し、保護施設内に設置した PC に接続してデータを収集した（図 6-6）。横穴内で作業する人数は 1 名に限定し、カビの孢子などを持ち込まないように、タイベックスーツを着用した（図 6-5）。

12 月 20 日の作業開始後、最初に基準点・標定点計測、保護施設のレーザー計測を実施し、その後に 3D スキャナ計測用の PC などの機器を保護施設内に設置し、横穴内の計測に進んだ。床面の排水用の溝など形状が複雑な部分では、3D スキャナでの計測が難しい場所もあり、作業が難航した局面もあったが、予定どおり 24 日夕刻に作業を終了することができた。

3D スキャナ（SmartScan）による 3 次元データの頂点数は 21 億点となった。これに、SfM 法による画像解析によって作成したデータを合成し、3 次元データの頂点数の合計は 25 億点となった。上述した基準点測量によって、計測データは公共座標に位置づけた。これらの成果は、2021 年度末に納品された。

5. 計測データの加工

東北大学総合学術博物館では、特定のソフトウェアに依

存しない形で 3 次元データを保存するために、X・Y・Z の座標値と RGB データによる、色付き点群データとして保存し利用する方法を採用している。一方、考古学的データとして、学術的検討に供する方法は、本報告を含めて、2 次元の図面として調査報告を作成することが一般的である。そのため、3 次元データをもとに、正射投影画像を作成する必要がある。3 次元計測データから正射投影画像を作成する作業は、今回のように点群数が多い場合、かなりの手間と時間を要し、PC の能力も高いものが要求される。そのため、2023 年度の科研費経費を利用して、調査報告用の正射投影（オルソ）画像の作成と、画像の配置等の作業を、株式会社シン技術コンサルに委託した。同じく 2023 年度事業として、株式会社ラングに、稜線強調処理の一種である PEAKIT 処理を委託した。

オルソ画像の作成

床面、天井面、左右側面、奥壁面、後室見返し、前室奥、前室見返し、入口の計 9 面のオルソ画像を作成した。

頂点数が多いため、カラーオルソ作成に必要なメッシュの頂点数は 100 万点程度に調整し、陰影図は(株)ラングの PEAKIT 処理にて対応した。

オフセット原点（112,195.5/100,880.5/8）を起点に、SPA が図上の縦軸と平行に、SPB ～ F が横軸と平行になるように 106.909 度回転をかける。

床面と天井面は、標高 8.6 m のポイントでカットして作成した。

SPA の両側面はセクションラインと片面を合わせた立方体に対して A-A' は交差でカット、A'-A は差分でカットして作成。SPB も同様に 3 次元モデルをカットし、3 次元モデルのテクスチャ空間の大きさとカメラのサイズを合わせて正射投影でカラーオルソ画像を撮影した。

C'-C ライン、D-D' ライン、E'-E ライン、F-F' ラインは、セクションラインのアングルで撮影する際に裏側が見えて

表 1 中田横穴基準点・評定点測量成果

| 世界測地系・第 IX 座標系 |      |            |            |        |                  |
|----------------|------|------------|------------|--------|------------------|
| No             | 点 名  | X 座標       | Y 座標       | Z 座標   | 備 考              |
| 1              | R3K1 | 112244.797 | 100868.398 | 5.428  | 基準点（県道脇・GNSS 測量） |
| 2              | R3K2 | 112416.669 | 100925.716 | 4.598  | 基準点（県道脇・GNSS 測量） |
| 3              | SP1  | 112210.361 | 100857.843 | 5.496  | レーザースフィア         |
| 4              | SP2  | 112219.167 | 100875.427 | 5.645  | レーザースフィア         |
| 5              | SP3  | 112188.890 | 100872.051 | 5.839  | レーザースフィア         |
| 6              | SP4  | 112196.201 | 100875.981 | 7.298  | レーザースフィア         |
| 7              | 1    | 112194.651 | 100880.187 | 10.006 | 横穴内標定点           |
| 8              | 2    | 112195.402 | 100880.561 | 9.816  | 横穴内標定点           |
| 9              | 3    | 112196.016 | 100880.546 | 8.786  | 横穴内標定点           |
| 10             | 4    | 112194.990 | 100883.384 | 9.021  | 横穴内標定点           |
| 11             | 5    | 112195.124 | 100882.972 | 9.676  | 横穴内標定点           |
| 12             | 6    | 112195.414 | 100880.418 | 8.493  | 横穴内標定点           |



1. 中田横穴保護施設の外観（2021 年 11 月）



2. 温湿度計の設置状況（矢印・羨門右外側のモルタル部分）



3. 基準点 R3K1 での GNSS 測量作業状況



4. トータルステーションを用いた横穴内の標定点の測量作業状況



5. 3D スキャナを用いた計測作業状況  
（ケーブルはビニールを巻いて養生）



6. 計測データは横穴外に設置した PC にケーブルで接続して送信

図 6 中田横穴の現状と作業状況



しまうため、裏側として見えている部分をカットして撮影した。

### Illustrator 配置

撮影したオルソ画像をアングルごとに illustrator へ埋め込み配置し、床面、天井面には座標値を、各種展開面は標高値の入力を行った。

### カラーオルソ画像作成手法

本資料のオルソ画像はフリーソフトウェアの Blender を使用して書き出しを行っている。

撮影するカメラのサイズとオブジェクトのテクスチャ空間のサイズを一致させることで余白のないオルソ画像を書き出している。また、背景部分を透過に設定することによりオブジェクトが写っていない箇所を透明にしている。

### 中田横穴のデータ加工について

本資料作成において最大の課題となった部分は、中田横穴の取得データ量の多さである。20 億点を超えるデータは解析や結合など一つ一つの動作に非常に時間がかかり、1 日かかった末に失敗などということもあった。詳細データは記録保存には適しているが、オリジナルデータのまま活用するのはコスト的にも作業時間的にもおすすめしない。

しかし詳細データがあれば様々な用途で活用することができる。

詳細点群を形状の特徴を失わない程度に間引き、メッシュ化を行い形状の特徴をノーマルマップに焼き付けて、さらにリトポロジーを行ったメッシュにベイクすることで低ポリゴンでありながら、疑似的に形状特徴を再現したデータを作ることができる(図7)。

中田横穴の後室のように側壁から奥壁にかけて文様が連続している場合であれば、土器の展開図の要領で 3 次元モデルから内部の展開写真を作ることでもできる(図8)。

PLATEU や OSM などの公開地形データを利用し、横穴や

古墳と座標位置を合わせることで、どのような地形条件下に遺跡が存在するのかを視覚的、直感的に確認することができる。Blender 上に設置したカメラを移動したり、メッシュにアニメーションを付けたりして解説動画を作成することもできる。

このように様々な 3 次元データの活用方法がある中で、作図する人の主観が入ってしまう図面を報告書として用いるよりも、PEAKIT 処理のような客観的のデータに専門家が必要に応じて注釈を入れる手法が今後の主流になっていくのではないだろうか。

## 6. 計測成果について

上記のような作業を行って作成した正射投影画像を、図9から図40に示す。3次元データから投影図を作成する場合、断面のラインの外側に、後ろの壁の裏面が見える場合があるため、断面ラインの外側は全て消去して示している。

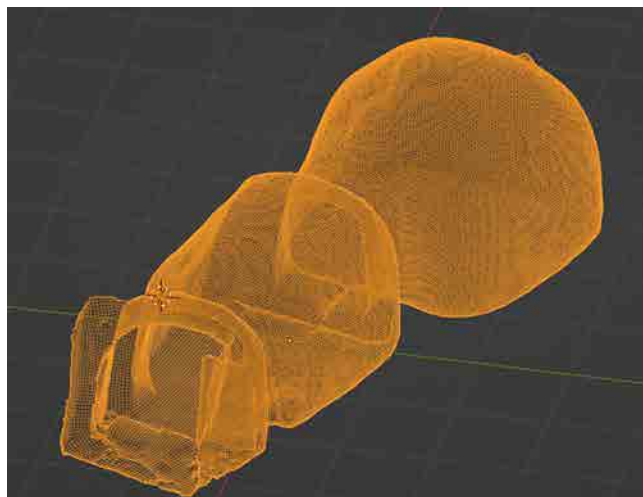


図7 リトポロジー後データ 8 万メッシュ



図8 3次元データによる奥室壁面展開写真

その際、床面形状が正確に示せない場合があることに留意する必要がある。3次元計測データから床面の正射投影図を作成する際、ある一定の高さで切断し、そこから下側を投影した図を作成することが、もっとも簡単である。その際、床面の一番高い所に、切断面を合わせる必要があるが、切断面と床面の低い部分との高低差が大きいと、床面形状が正確に示せないことが多くなる。壁面の傾斜がある場合は、床面の輪郭が切断面の断面ラインより外側まで出ることがあるが、その部分は示せないこととなる。この問題を解消するには、切断する高さを細かく変化させながら作成するか、床面のラインを手作業で拾うなどの作業が必要となり、非常に多くの手間を有することとなる。今回は、床面の輪郭が大きく変わらないため、切断面から下側を投影した図を示している。

上述のように稜線強調処理は、株式会社ラングに PEAKIT 処理を委託した。ラングでは、主に考古遺物、特に石器の図化のために、3次元データから正射投影画像を作成し、その画像に尾根線などを強調する加工を行っている。これは、投影する面を指定し、地上開度（尾根）、地下開度（谷）、レリーフ（起伏陰影図）、距離段彩の4種類の画像を作成して、注目したい形状特徴に合わせて重ね合わせて示すものである（千葉・横山 2017）。

委託にあたっては、シン技術コンサルに委託して設定した投影面と対応する形で、9面について PEAKIT 処理を行った。色調を示すためにテクスチャ、凹凸のみを示すためにレリーフのみ、レリーフと尾根線の合成、尾根線データのみ、4種類を提示することとした。この4種類の提示は、清戸迫横穴の報告と同じ方法である。

図9と図10は、縮尺50分の1で作成した展開図で、各面の正射投影図を配置したものである。断面図のポイントなどは、この展開図に示した。天井を見上げた図面は、公共座標値が裏返った状態となるので、ご留意いただきたい。この両図では、シン技術コンサルで作成した正射投影図（オルソ画像）を利用した。図11以降のラングによる PEAKIT 処理を施したものと、色調が若干、異なっている。3D スキャナで取得した色データと、SfM 法で使用したデジタルカメラの画像データでも色調が異なっており、色調を正確に再現することには課題が残っている。

図11から図36までは、各面の正射投影図を、縮尺25分の1で示した。壁面の凹凸などを示すためには、本来は20分の1より大きな縮尺の方が望ましいが、紙幅の関係で、やむを得ず25分の1とした。PEAKIT 処理を行って作成した、テクスチャ、レリーフ、レリーフと尾根線の重ね合わせ、尾根線のみ、4種類の画像を、各面ごとにこの順番で提示した。壁面の保存状態が良い部分では、工具の痕跡が読み取れる。基盤の地層の状態が、下位ほど良くないため、工具痕跡などは、床面に近くなるほど不明瞭となっている。

図11から図14に示した床面の図面では、後室と前室の

壁に近い部分に、多角形のラインが見える。このラインは、3D スキャナで撮影した範囲と、デジタルカメラ画像から SfM 法で3次元化した範囲の境界である。両方で解像度が異なるため、スムーズに接続できない結果となっている。また、両方で色調が異なっている部分も多い。使用した機器の違いによって、取得データのばらつきから生じたものと考えられる。

図37から図40には、縮尺10分の1で、後室の壁面を詳細図として示した。図の下側が標高8.5m、上側が9.2mの位置で切っている。左右は、線刻が認められる範囲が入るように切っている。考古学の実測図では、通常は尾根線を太く、谷線を細く表現する。中田横穴の線刻は、表面の保存状態の関係もあり、尾根線は不明瞭な部分が多い。一方で谷線は、かなり鋭い道具で行ったものと考えられ、明確に認識できる。そのため、尾根線と谷線を合わせて示すと、谷線が強調される形となるため、図11から図36の図面では、尾根線だけを示したものを提示した。図37から図40の詳細図では、線刻をより明確に表現するため、レリーフ・尾根線・谷線の、3種類のデータを重ね合わせて表現した。それぞれの表現について、比較して見ていただきたい。

## 7. まとめ

今回の計測では、光学式非接触ハイエンド3D スキャナを用いて、高精細な計測を目指したが、工具痕跡や線刻もほぼ再現できており、おおむね当初の目的を果たせたと言えるであろう。それでも、特に細かな線刻の部分などでは、点の密度をさらに高くした方が、より明瞭に表現できる可能性がある。一方で、膨大すぎるデータの取り扱いには、多大な課題も残っている。実際の活用にあたっては、活用目的にあわせて、点の数を間引いて減らすことや、画像を分割して容量を減らすなどの操作が必要である。今回の報告では、計測成果の報告を中心としたため、下書きの線刻と実際の彩色の関係、壁面の加工痕跡の検討、後室内に多数認められている小孔の用途など、さまざまな課題については検討できていない。今後、このデータを活用した、詳細な検討が進むことが期待される。

※本論には、日本学術振興会（JSPS）科研費 20H00019「石材構築文化財の保全のための3次元デジタルアーカイブの標準化の研究」（基盤研究A・2020～2024年度・研究代表者藤沢敦）による研究成果を含みます。

## 謝辞

今回の計測では、いわき市文化スポーツ室・観光交流室の文化振興課の各氏には、多大なご協力をいただいた。現地での計測作業と、計測データの加工を担当いただいた株



式会社シン技術コンサル、PEAKIT 処理を担当していただいた株式会社ラングには、膨大なデータ量を扱うこととなり、様々な面倒な依頼にも丁寧な対応をしていただいた。ここにあらためて感謝したい。

## 註

- 1) 本科研費での研究については、WEB ページを作成し、その概要を紹介しているので参照されたい。  
<https://webdb1.museum.tohoku.ac.jp/index.html>
- 2) 中田横穴の呼称は、調査報告書では「中田装飾横穴」とされているが、史跡指定名称は「中田横穴」となっている。本来は、横穴墓と呼ぶことが望ましいと考えているが、本論では史跡指定名称である「中田横穴」を使用する。
- 3) 本科研費で計測した成果で、これまでに報告しているのは、次のとおりである。
  - ・福島県双葉町清戸迫横穴：東北大学総長裁量経費を利用して 2016 年度に計測。光学式非接触ハイエンド 3D スキャナである SmartSCAN-HE を使用。計測成果の整理等に本科研費を利用。藤沢・鹿納・吉野・小池 2023。
  - ・東北大学正門・小川記念園：2020 年度に SfM 法で計測。鹿納・藤沢 2021。
  - ・宮城県名取市経の塚古墳出土長持形石棺：2021 年度シン技術コンサルの協力で計測。藤沢・大橋 2023。
  - ・福島県須賀川市前田川大塚古墳石室：2022 年度計測の成果を菊地ほか 2023 で報告。2023 年度に SfM 法で再計測。再計測成果は、菊地ほか 2024 で報告。
  - ・福岡県朝倉市湯の隈古墳石室：2022 年度に SfM 法で計測。藤沢・鹿納・田尻・志村 2024
- 4) 横穴式石室などでは、奥から玄門側を見て、左右を示すことが一般的である。一方、入口側から奥壁側を見た際の方向で表現した方が記載しやすい場合もある。中田横穴は、おおむね西側に開口しており、今回は、奥壁側を見た方向を基準に、北側となる側を左壁、南側となる側を右壁とする。
- 5) SmartSCAN-HE による計測の精度やデータの特性については、SfM 法による画像解析との比較を含めて、小池雄利亜が検討している（小池 2019・2022）。

## 引用・参考文献

- 江本義理 1975 「中田横穴の顔料及び石材劣化に関する調査報告」『中田横穴保存状態調査研究報告書』いわき市教育委員会
- 鹿納晴尚・藤沢敦 2021 「小型ドローンを利用した SfM 法による屋外構造物の 3 次元計測」『Bulletin of the Tohoku University Museum』No. 20、67～78 頁、東北大学総合学術博物館
- 菊地芳朗ほか 2023 『前田川大塚古墳 1・大仏古墳群 1』福島大学考古学研究報告第 16 集
- 菊地芳朗ほか 2024 『前田川大塚古墳 2・大仏古墳群 2』福島大学考古学研究報告第 17 集
- 小池雄利亜 2019 「3 次元計測について」『西迫横穴墓群（3 次調査）』261～270 頁、南相馬市埋蔵文化財調査報告書第 30 集
- 小池雄利亜 2022 「合戦原遺跡横穴墓の 3 次元計測について」『合戦原遺跡』第 2 分冊、329～354 頁、山元町文化財調査報告書第 22 集
- 木幡成雄・千田一志・山崎京美・矢島敬之 2017 『神谷作古墳群』いわき市埋蔵文化財調査報告第 180 冊、いわき市教育委員会
- 小林行雄編 1964 『装飾古墳』平凡社
- 須貝貫二・松井寛・佐藤茂・喜多河庸二・河内英幸 1957 『日本炭田図 1 常磐炭田地質図、1:5000 並びに説明書』地質調査所
- 千葉史・横山真 2017 「第 2 部第 2 章 PEAKIT 処理による横穴式石室の画像処理」『デジタル技術を用いた古墳の非破壊調査研究』早稲田大学東アジア都城・シルクロード考古学研究所調査研究報告第 4 冊、41～44 頁
- 西徹雄ほか 1985 『清戸迫横穴墓群』福島県双葉町教育委員会
- 福島雅儀 1983 『七軒横穴群』矢吹町文化財調査報告書第 6 集
- 藤沢敦・鹿納晴尚・吉野高光・小池雄利亜 2023 「福島県清戸迫横穴の高精細 3 次元計測」『Bulletin of the Tohoku University Museum』No. 22、7～38 頁、東北大学総合学術博物館
- 藤沢敦・大橋葵 2023 「経の塚古墳と東北の埴輪」『国家形成期におけるヤマト政権と地域権力の相互関係の再定義 - 東北地方を中心に -』科研費報告書、35～44 頁、福島大学行政政策学類
- 藤沢敦・鹿納晴尚・田尻義了・志村将直 2024 「福岡県湯の隈古墳の高精細 3 次元計測」『Bulletin of the Tohoku University Museum』No. 23、7～38 頁、東北大学総合学術博物館
- 渡辺一雄ほか 1971 『いわき市史別巻 中田装飾横穴』いわき市
- 渡辺一雄ほか 1974 『羽山装飾横穴発掘調査概報』原町市教育委員会

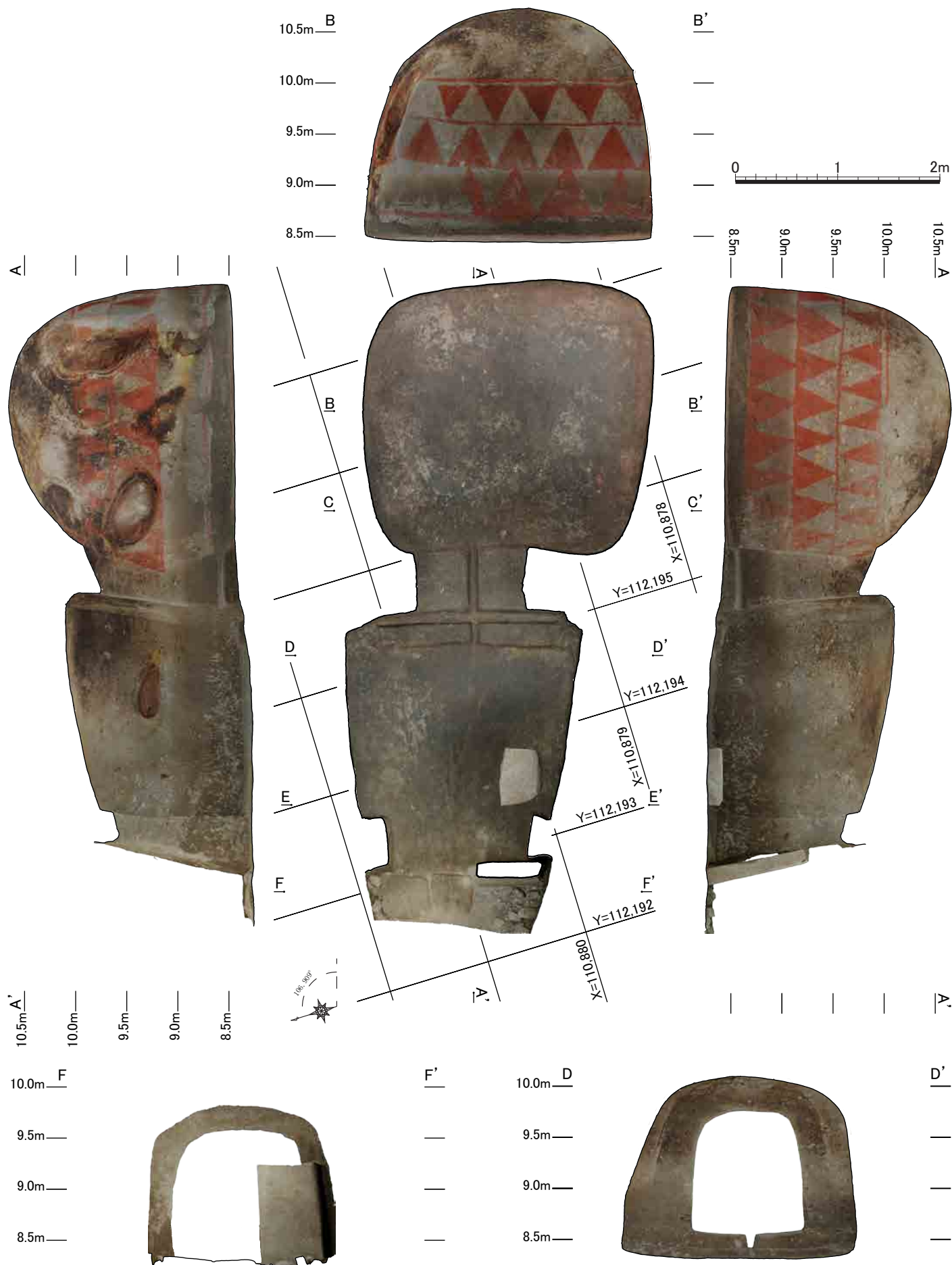


図9 中田横穴各面の展開図（1）



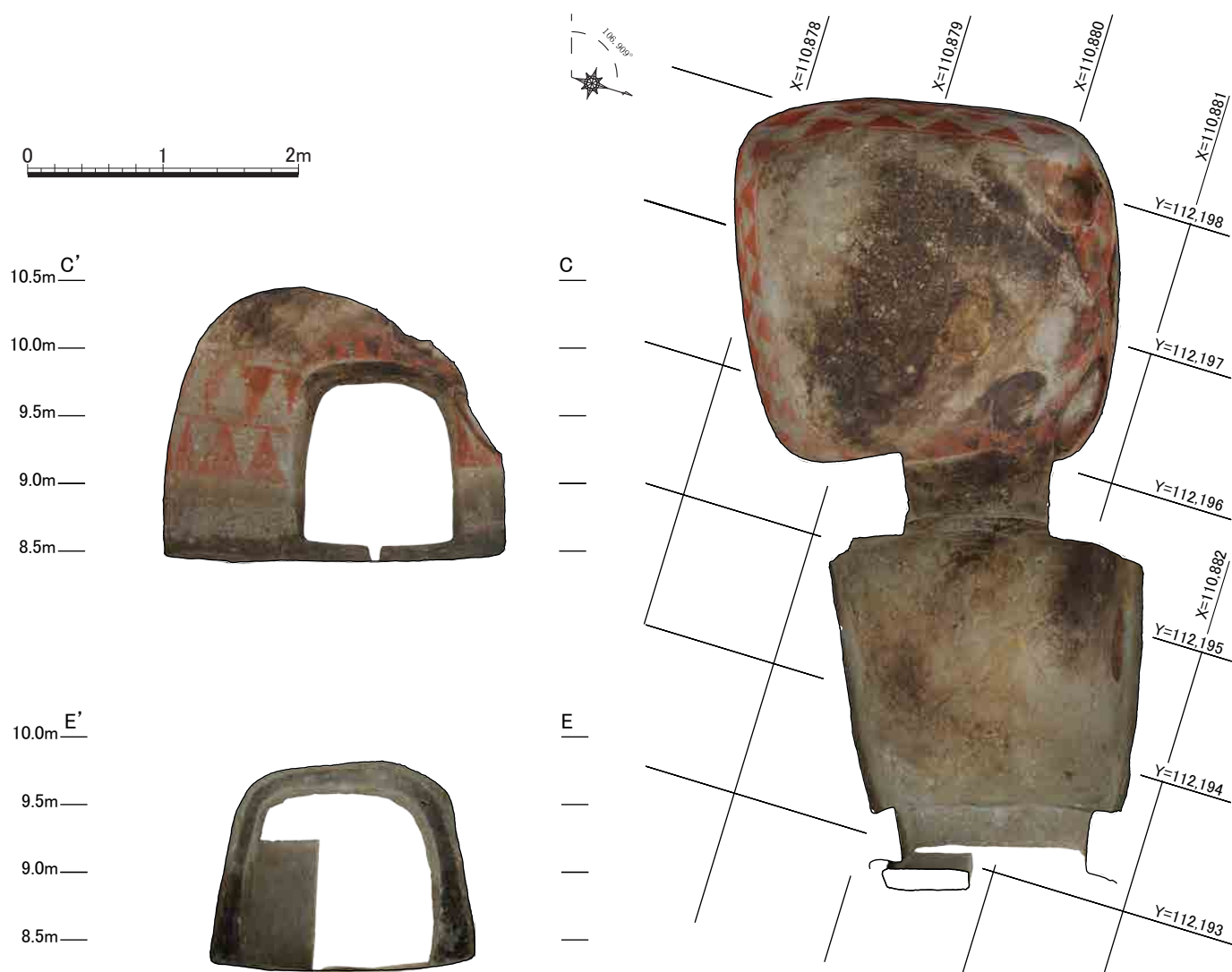


図 10 中田横穴各面の展開図 (2)



図 11 中田横穴床面正射投影図  
(テクスチャー)

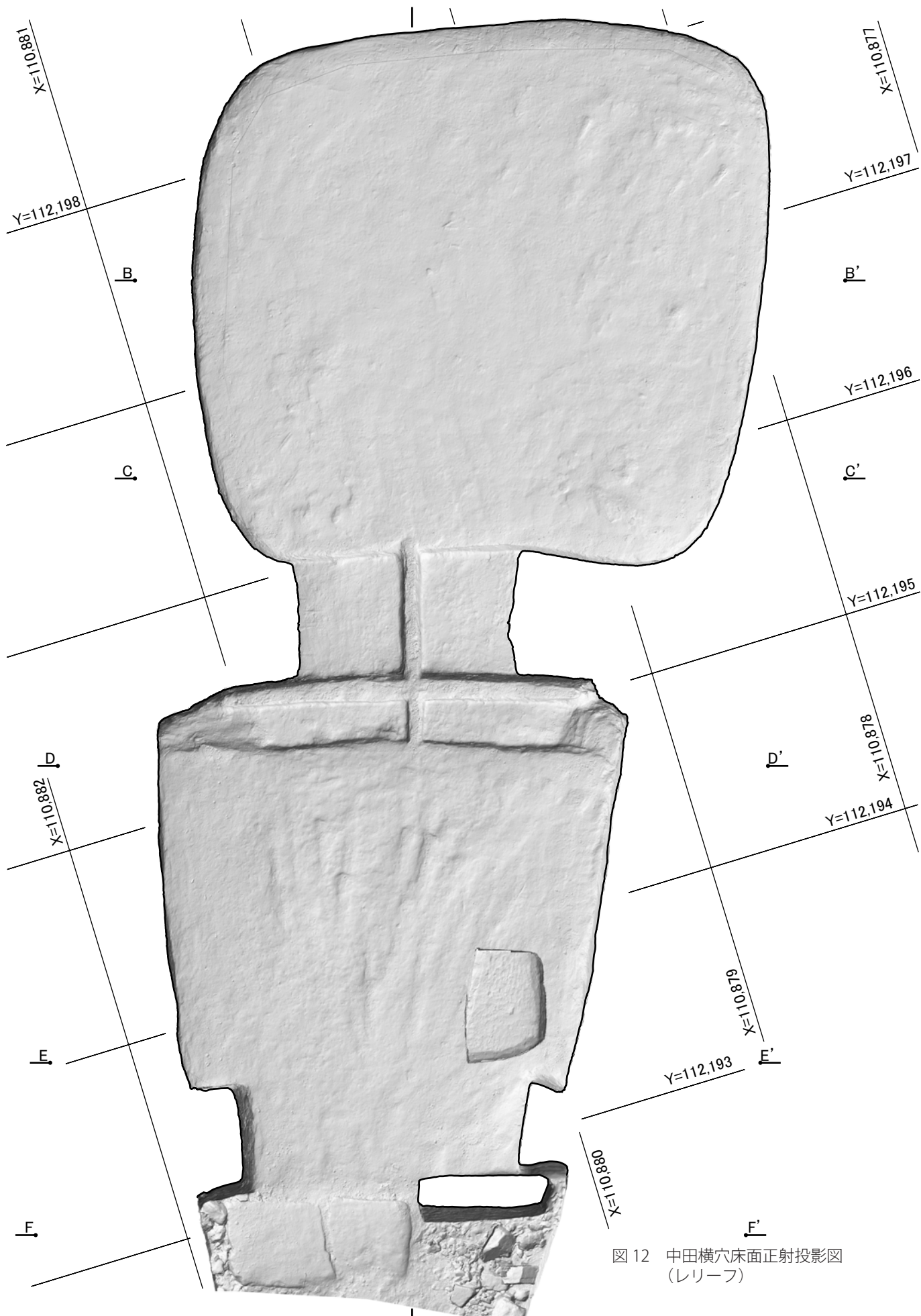


図 12 中田横穴床面正射投影図  
(レリーフ)



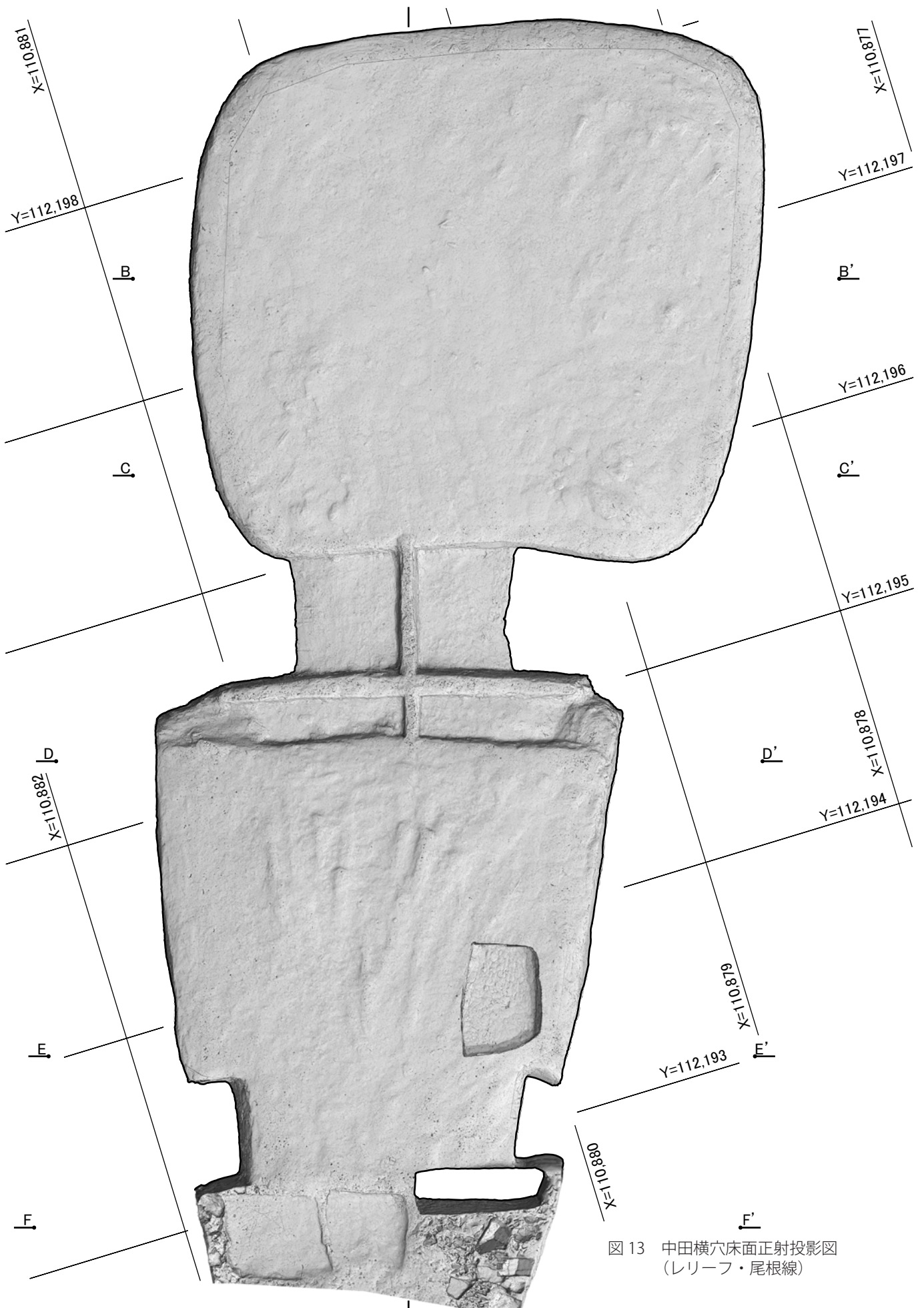


図 13 中田横穴床面正射投影図  
(レリーフ・尾根線)

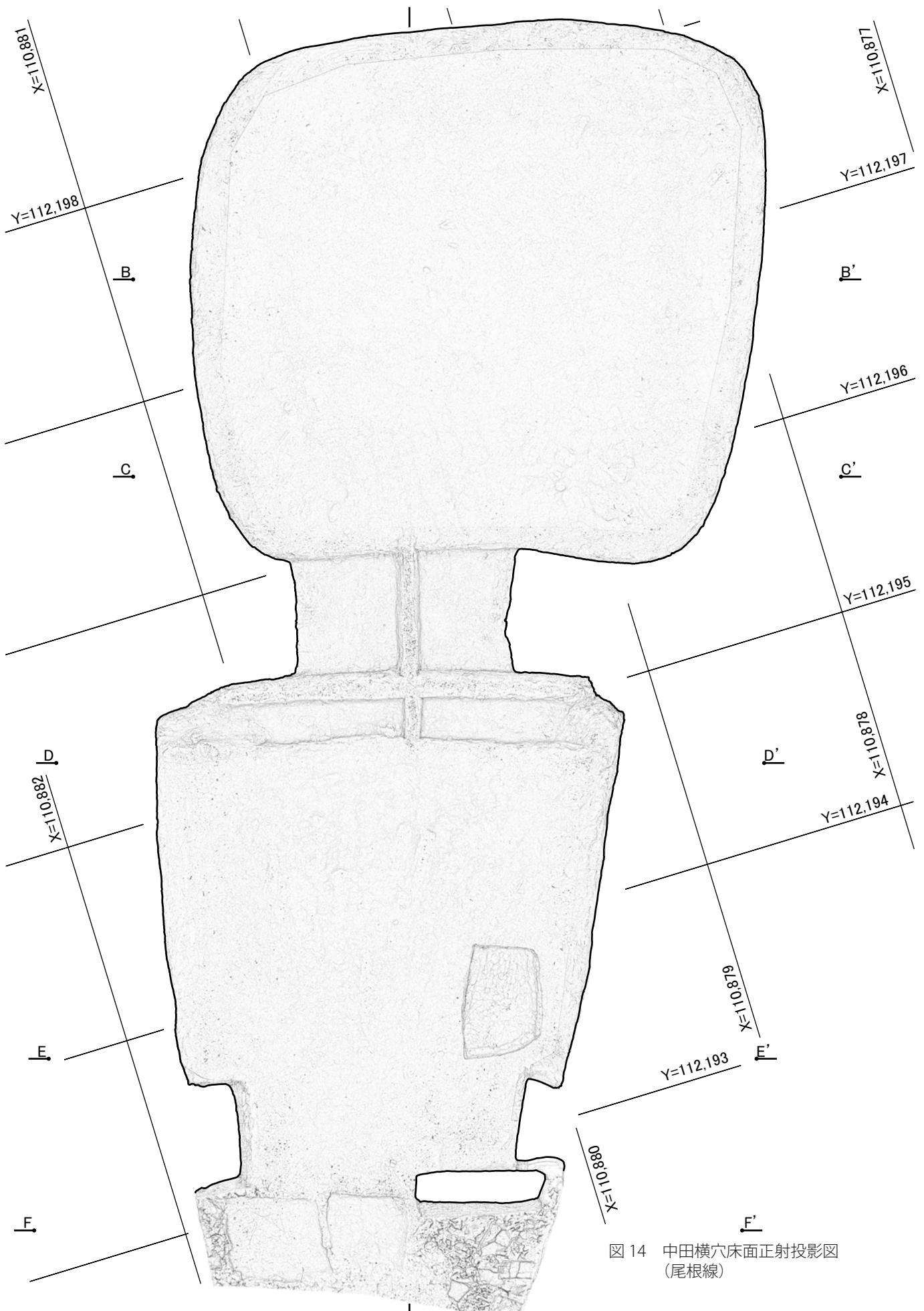


図 14 中田横穴床面正射投影図  
(尾根線)





図 15 中田横穴天井正射投影図（テクスチャー）





図 16 中田横穴天井正射投影図（レリーフ）



図 17 中田横穴天井正射投影図（レリーフ・尾根線）





図 18 中田横穴天井正射投影図（尾根線）



A'

11.0m

10.0m

9.0m

8.0m

A



図 19 中田横穴北側壁正射投影図 (テクスチャー)

A

A'

11.0m

10.0m

9.0m

8.0m

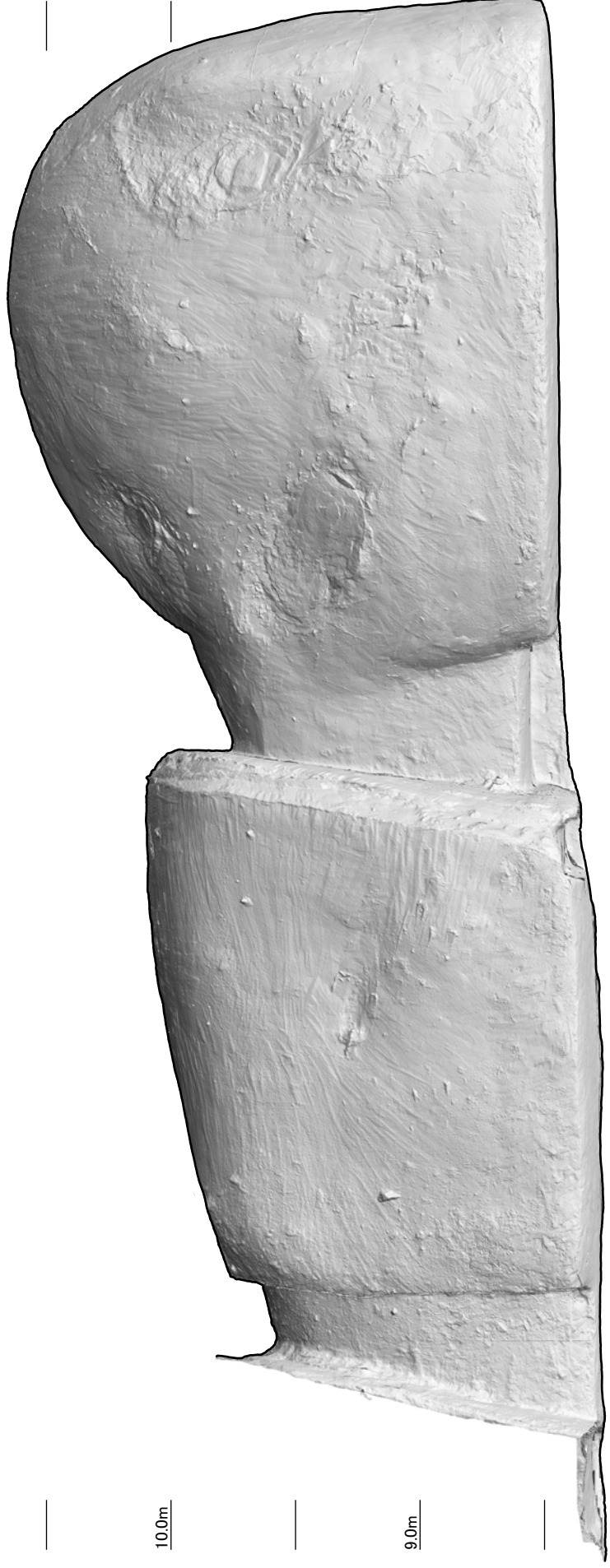


図 20 中田横穴北側壁正射投影図（レリーフ）

A

A'

11.0m

10.0m

9.0m

8.0m



図 21 中田横穴北側壁正射影図（レリーフ・尾根線）



A

A'

11.0m

10.0m

9.0m

8.0m

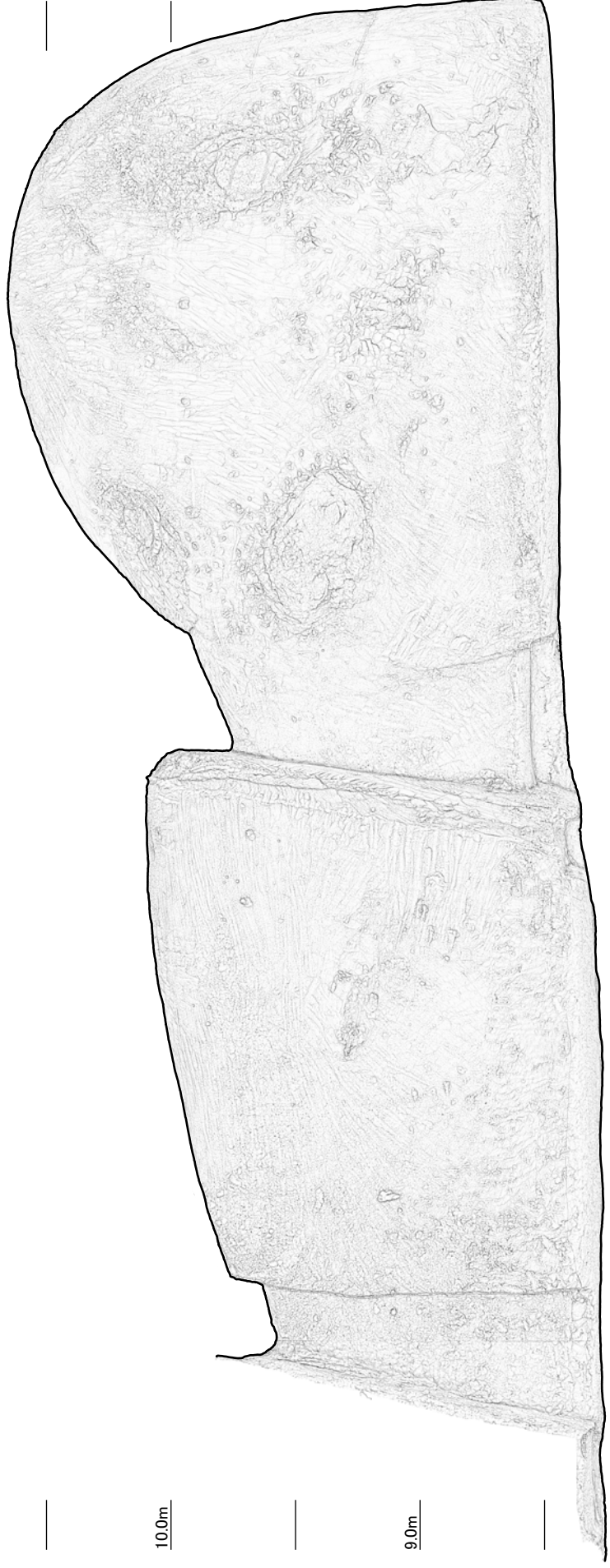


図 22 中田横穴北側壁正射投影図（尾根線）

A  
11.0m

A'



10.0m

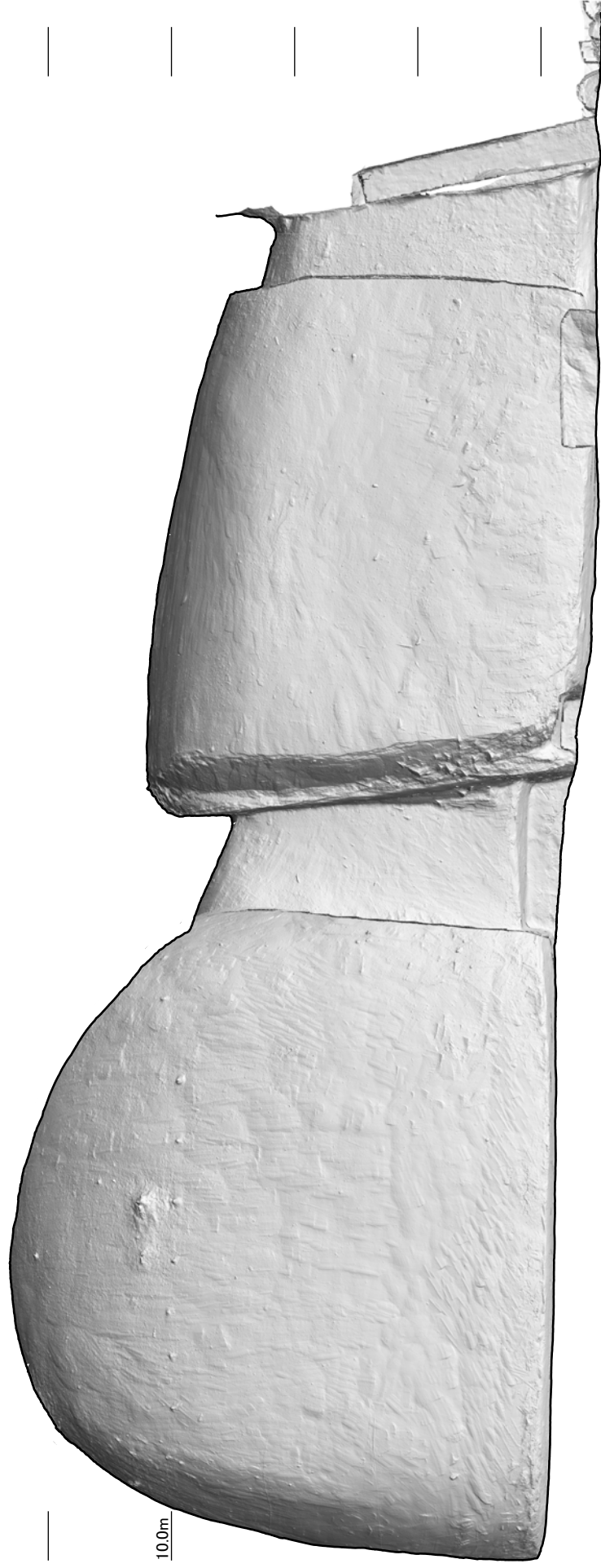
8.0m



図 23 中田横穴南側壁正射投影図 (テクスチャー)

A  
11.0m

A'



10.0m

8.0m



図 24 中田横穴南側壁正射投影図（レリーフ）



A  
11.0m

A'



10.0m

8.0m



図 25 中田横穴南側壁正射投影図（レリーフ・尾根線）

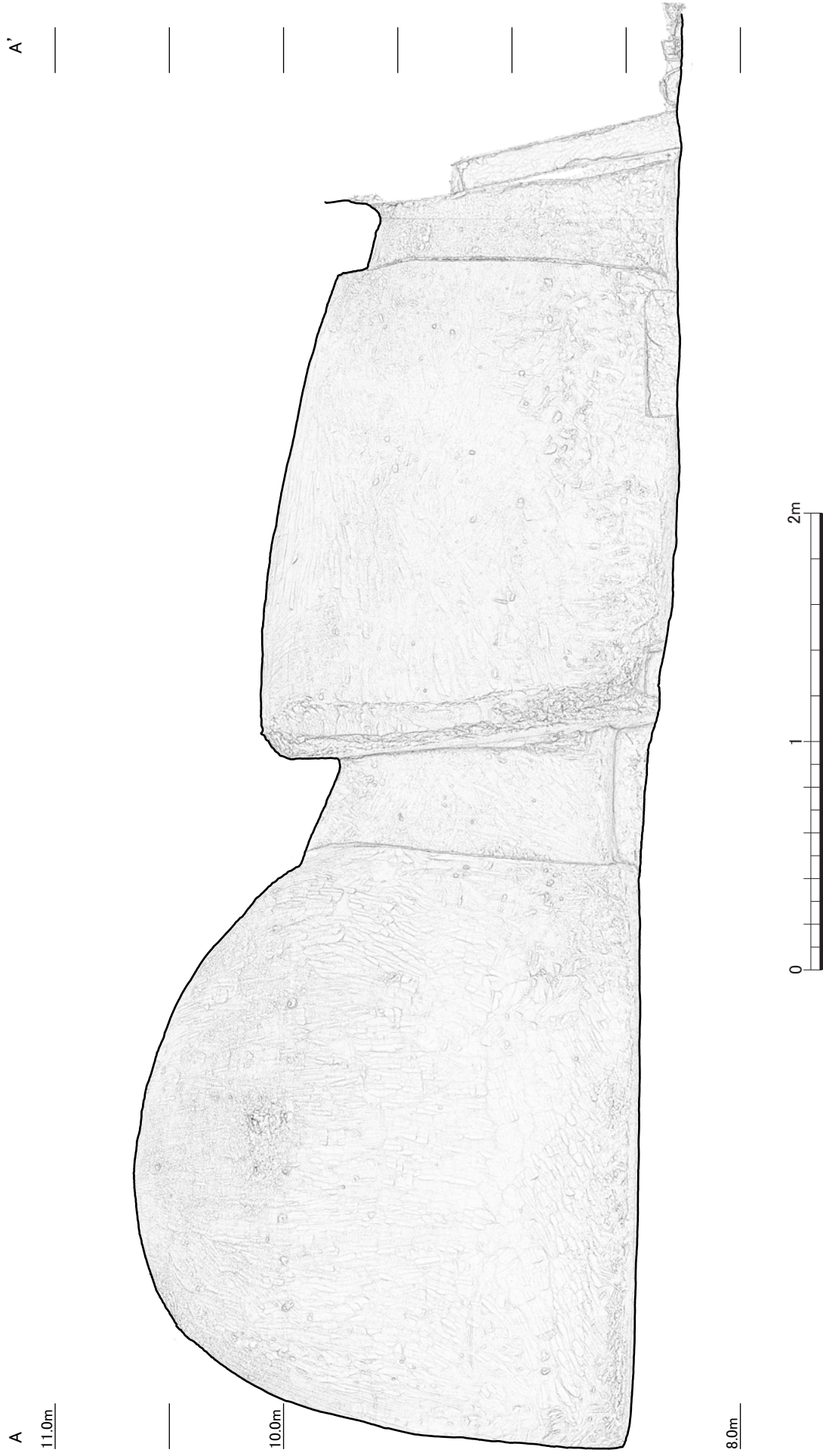


図 26 中田横穴南側壁正射投影図 (尾根線)

11.0m — B

B' —

10.5m —

—

10.0m —

—

9.5m —

—

9.0m —

—

8.5m —

—



テクスチャー

11.0m — B

B' —

10.5m —

—

10.0m —

—

9.5m —

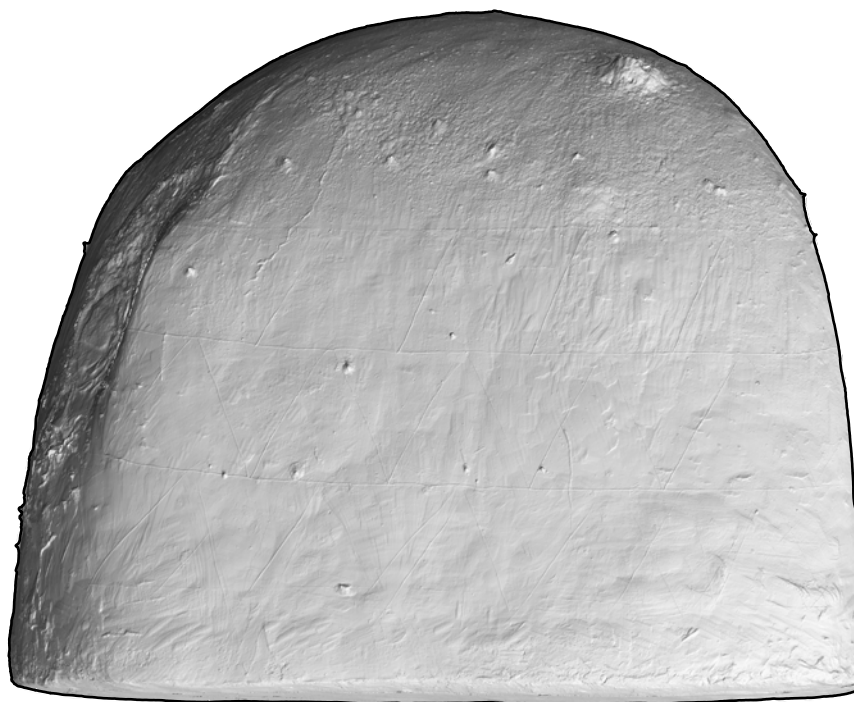
—

9.0m —

—

8.5m —

—



レリーフ



図 27 中田横穴後室奥壁正射投影図（1）



11.0m — B

B'

10.5m —

10.0m —

9.5m —

9.0m —

8.5m —



レリーフ・尾根線

11.0m — B

B'

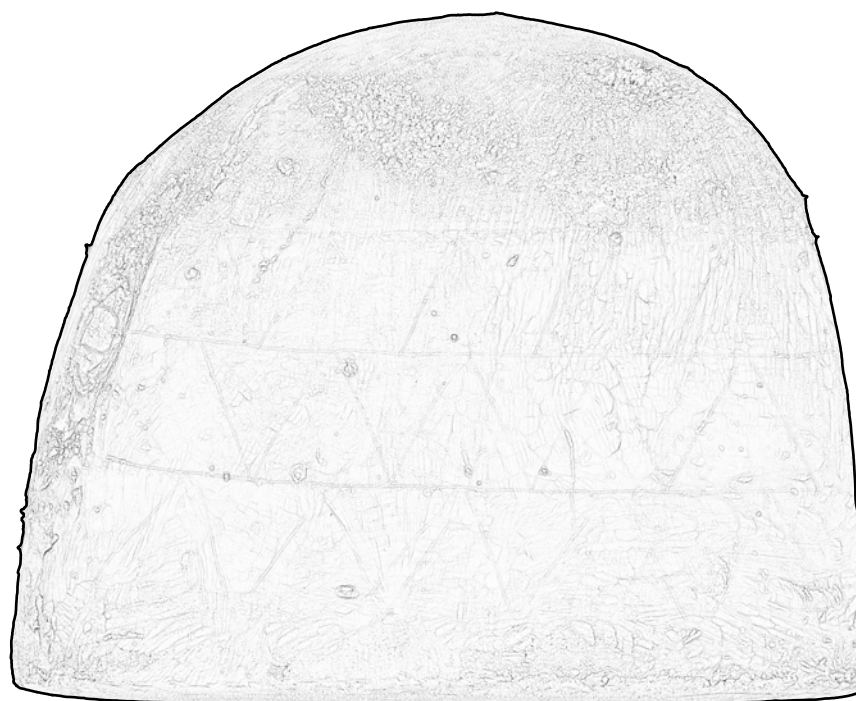
10.5m —

10.0m —

9.5m —

9.0m —

8.5m —



尾根線

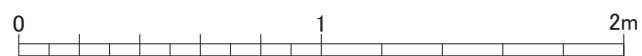
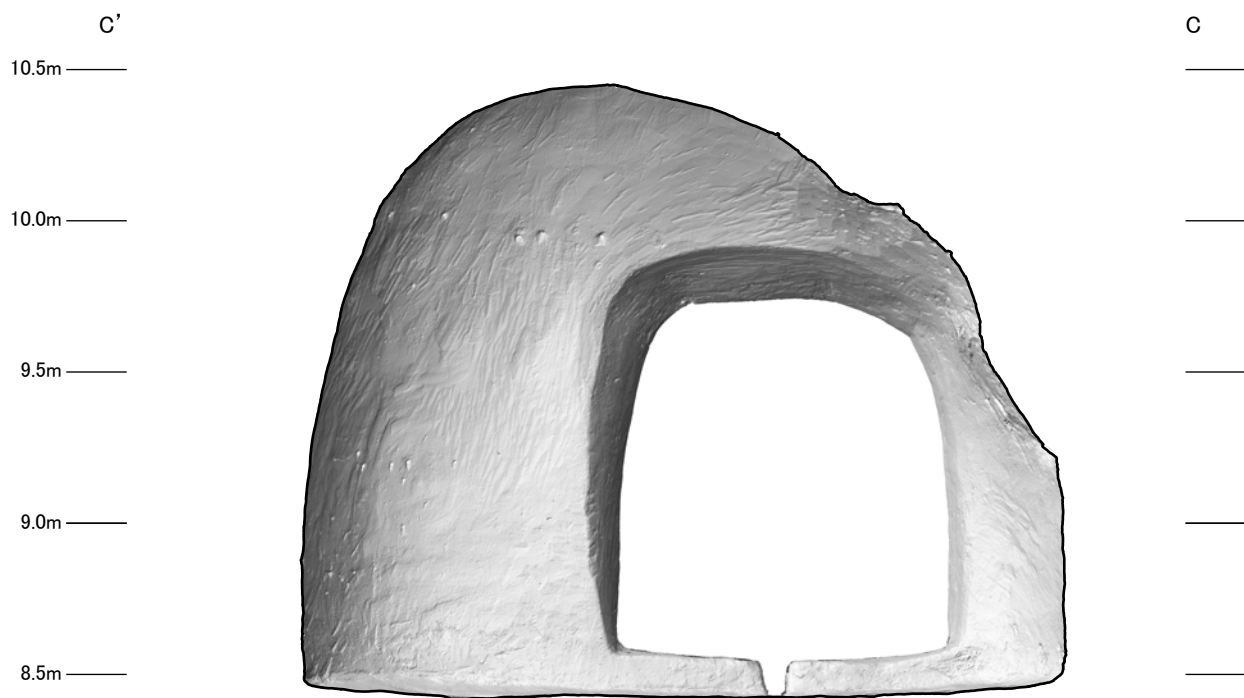


図 28 中田横穴後室奥壁正射投影図（2）



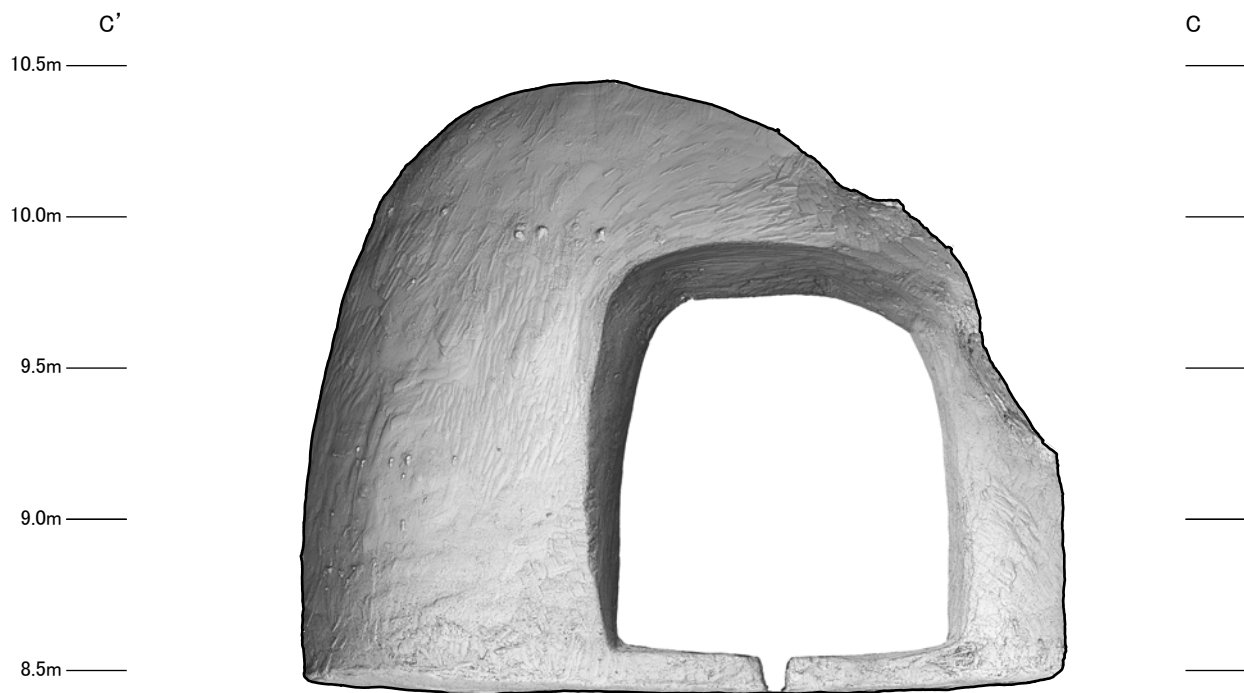
テクスチャー



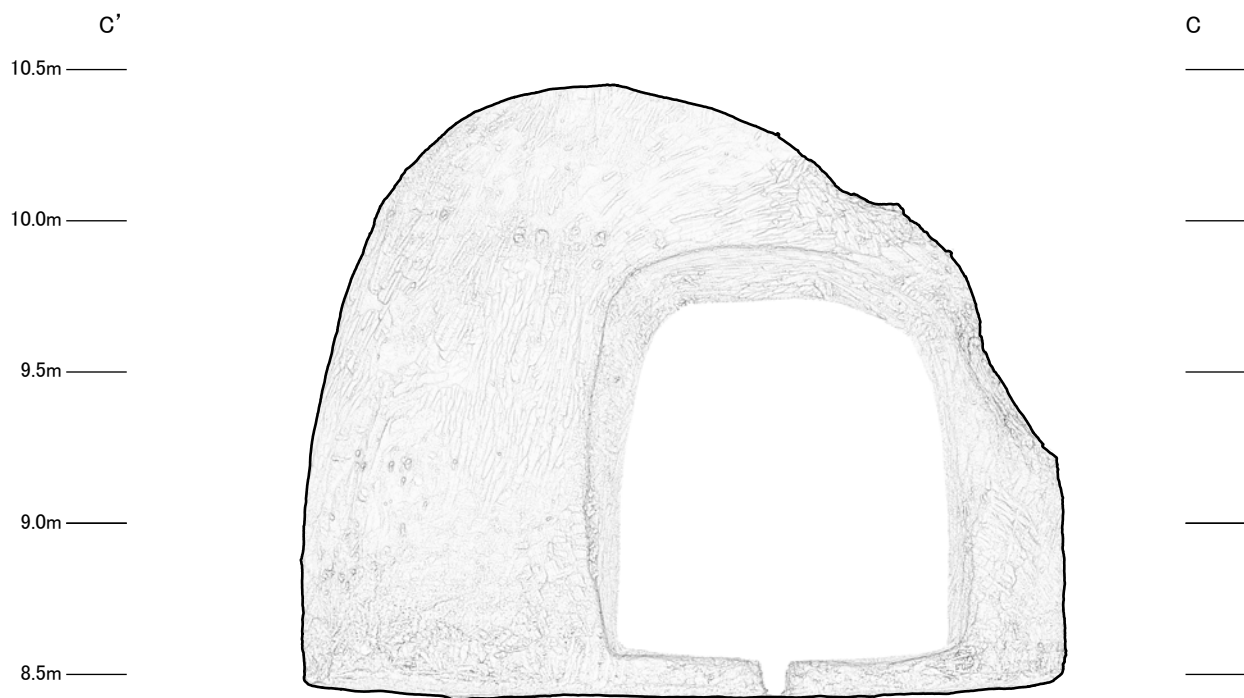
レリーフ



図 29 中田横穴後室入口側正射投影図（1）



レリーフ・尾根線



尾根線



図 30 中田横穴後室入口側正射投影図（2）



10.5m — D

D' —

10.0m —

9.5m —

9.0m —

8.5m —



テクスチャー

10.5m — D

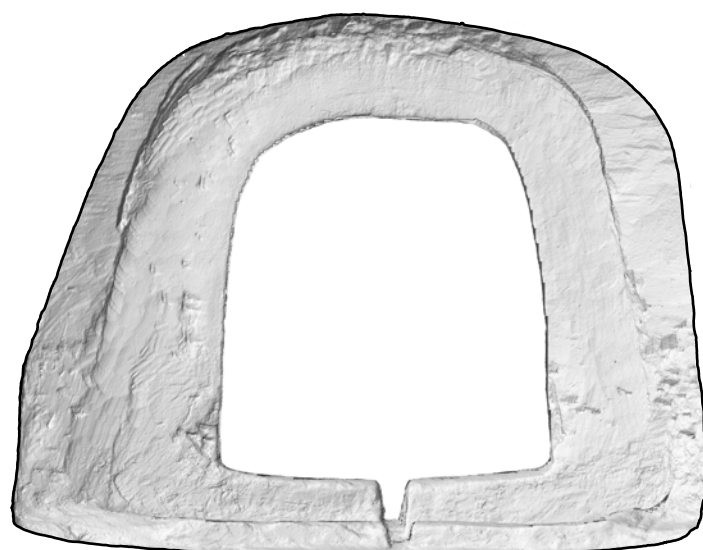
D' —

10.0m —

9.5m —

9.0m —

8.5m —



レリーフ

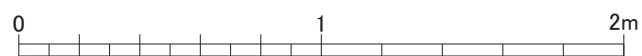


図 31 中田横穴前室奥壁側正射投影図 (1)

10.5m — D

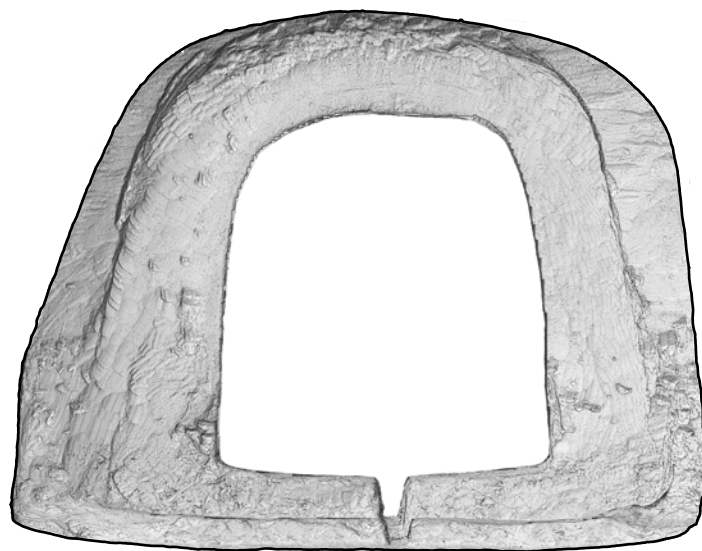
D' —

10.0m —

9.5m —

9.0m —

8.5m —



レリーフ・尾根線

10.5m — D

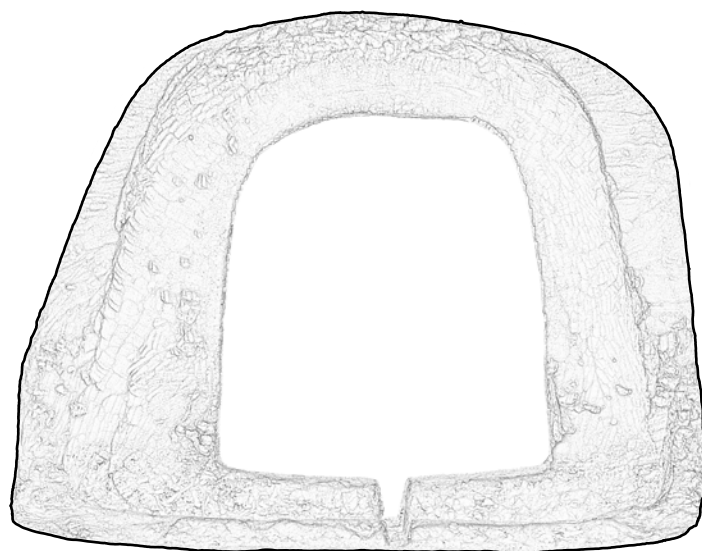
D' —

10.0m —

9.5m —

9.0m —

8.5m —



尾根線



図 32 中田横穴前室奥壁側正射投影図（2）

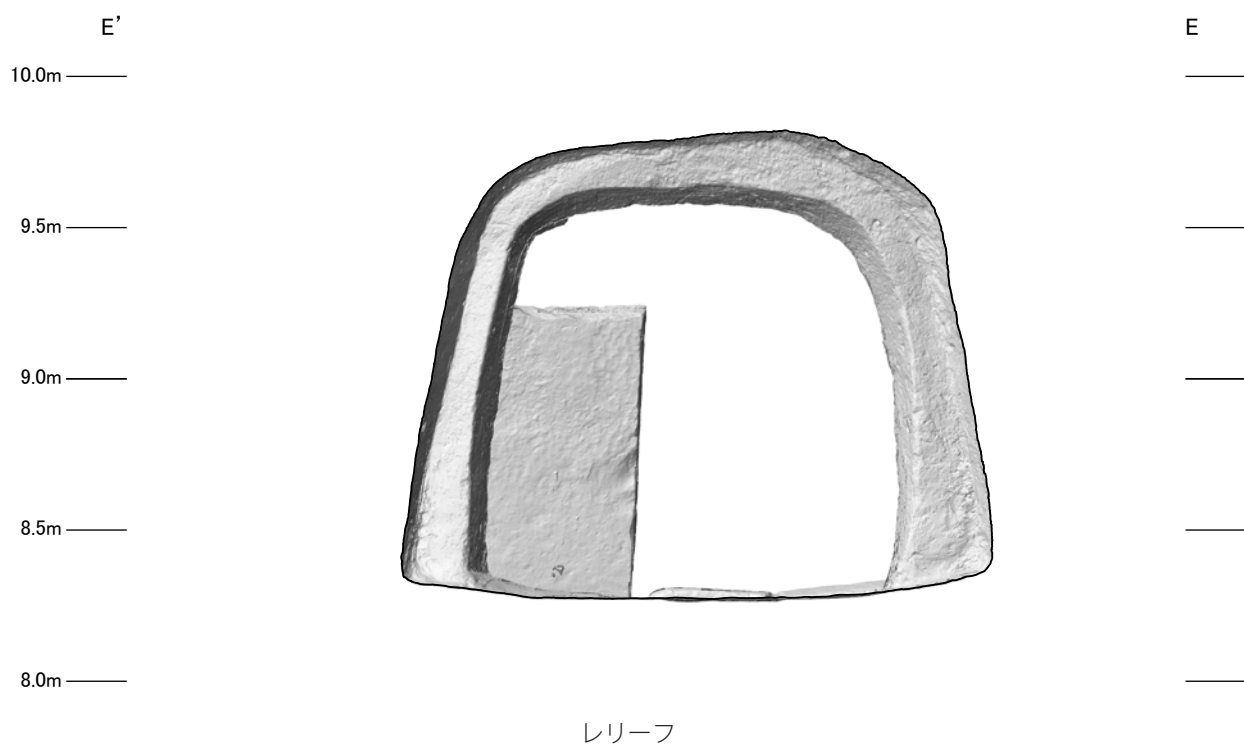


図 33 中田横穴前室入口側正射投影図（1）



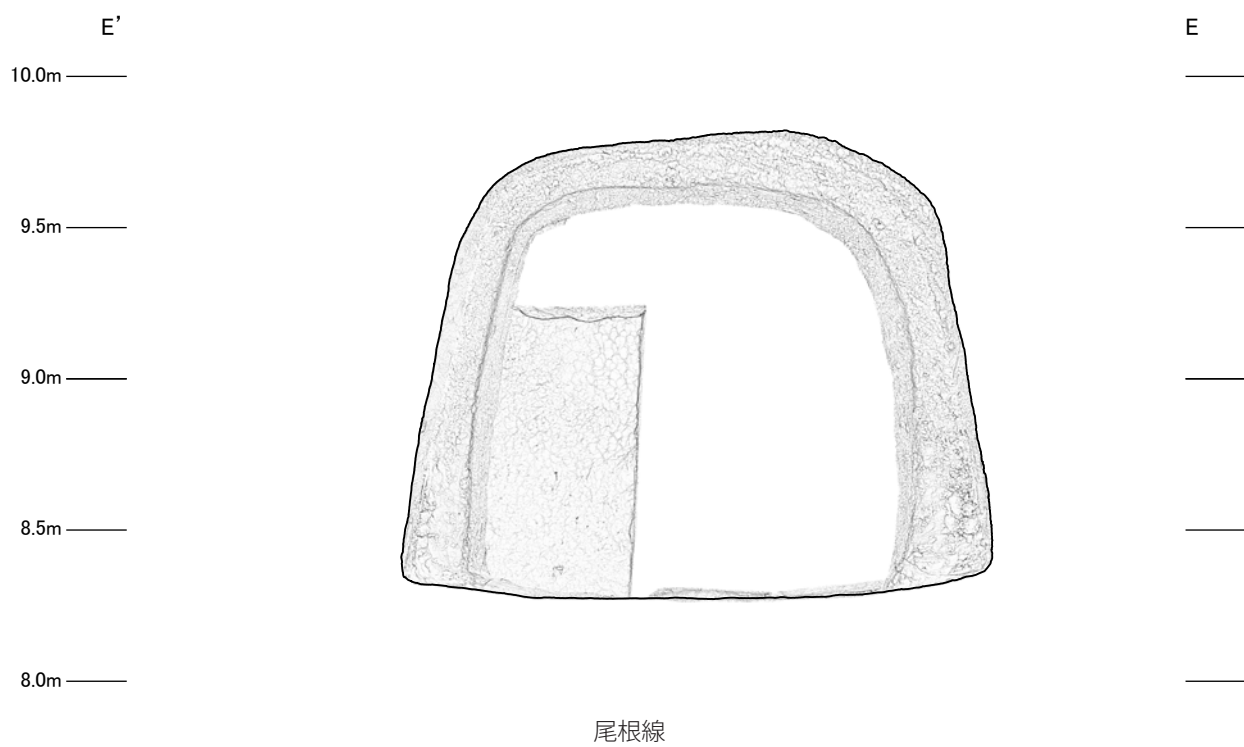
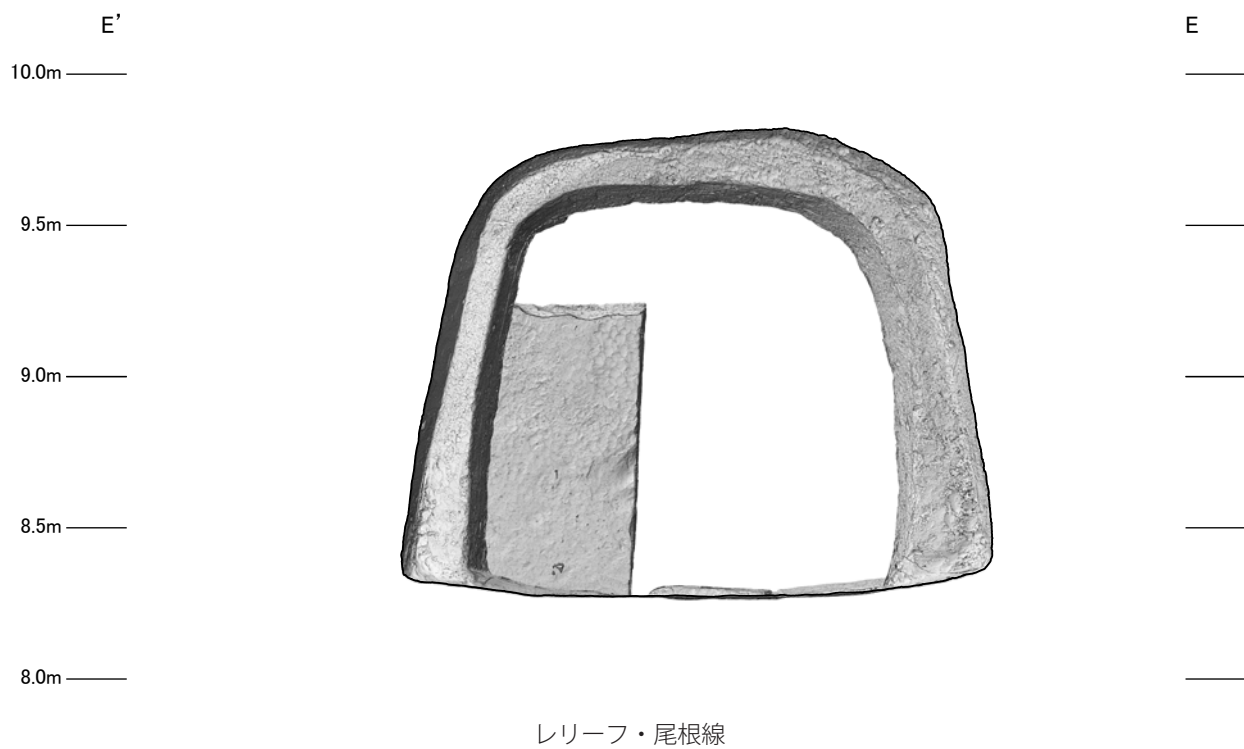


図 34 中田横穴前室入口側正射投影図（2）

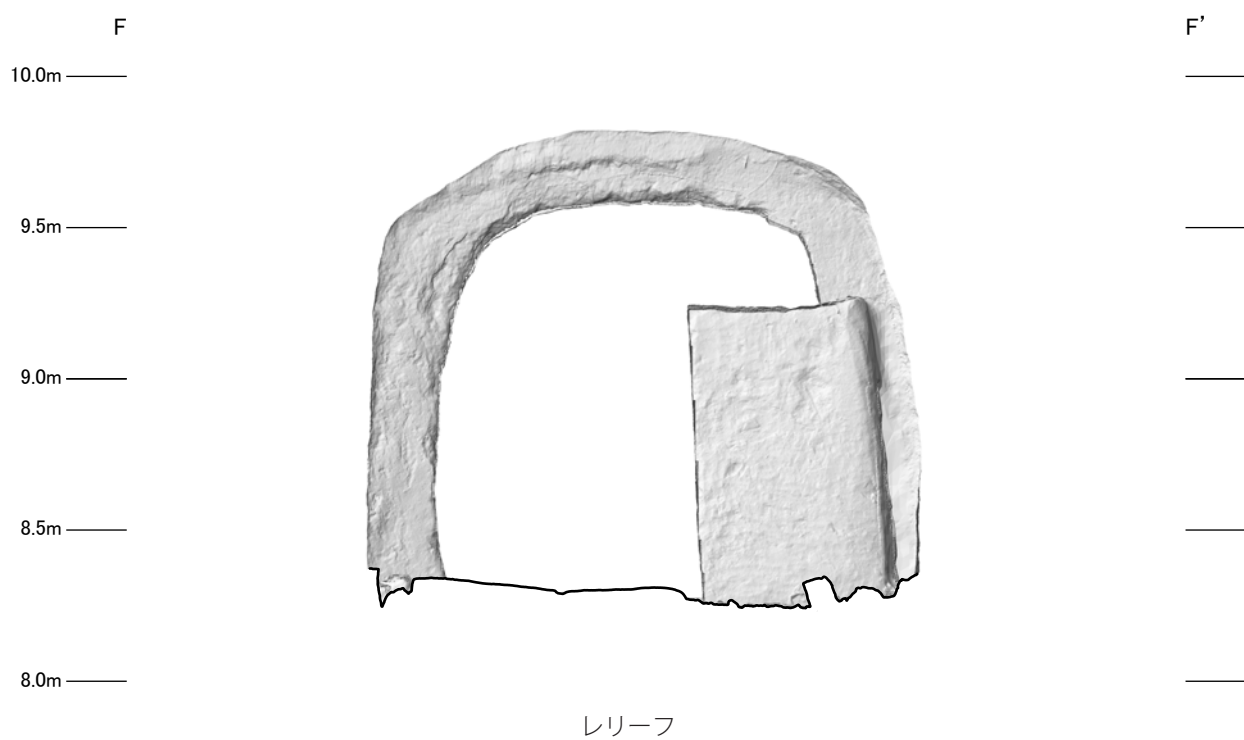


図 35 中田横穴羨門正射投影図（1）

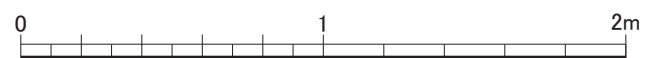
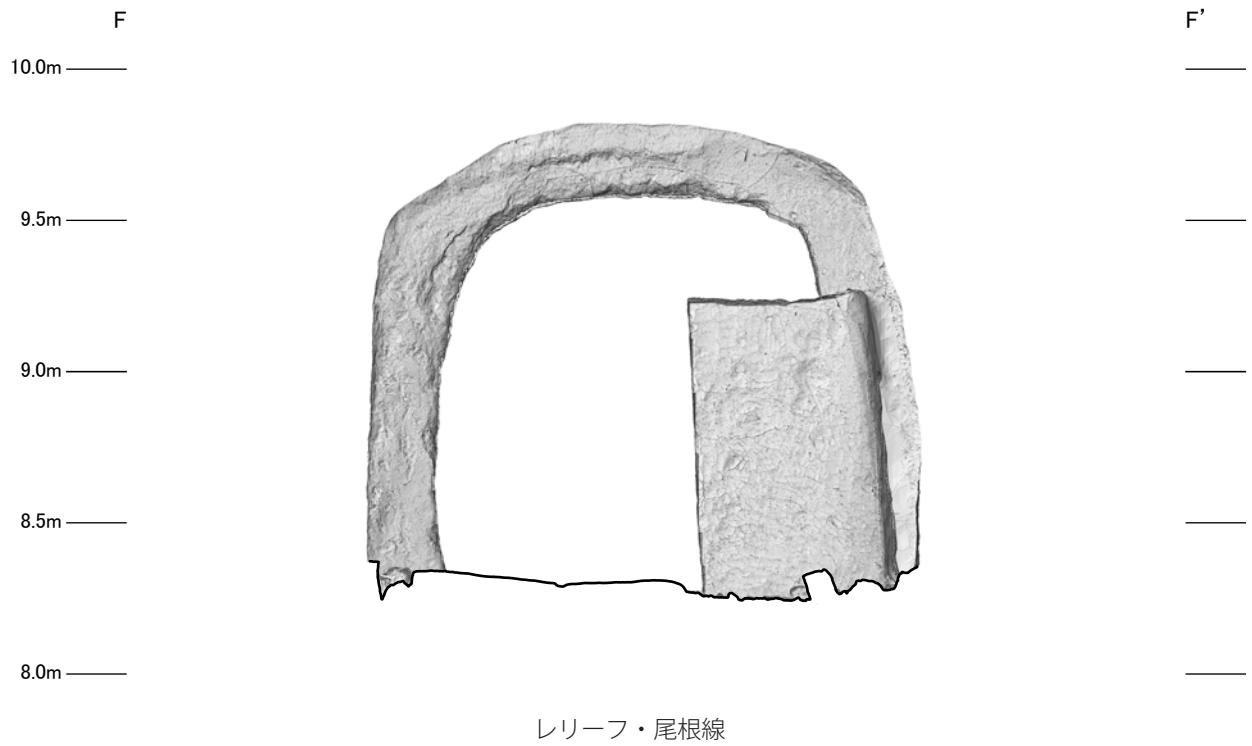


図 36 中田横穴羨門正射投影図（2）





図 37 後室入り口側詳細図（レリーフ・尾根線・谷線）





図 38 玄室北側壁詳細図（レリーフ・尾根線・谷線）





図 39 玄室奥壁詳細図（レリーフ・尾根線・谷線）





図 40 玄室南側壁詳細図（レリーフ・尾根線・谷線）