

福島県清戸迫横穴の高精細 3次元計測

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

藤沢 敦^{*}・鹿納 晴尚^{*}・吉野 高光^{**}・小池 雄利亜^{***}

^{*}東北大学総合学術博物館 ^{**}もと双葉町教育委員会 ^{***}シン技術コンサル

○ *Atsushi Fujisawa**, *Harumasa Kano**, *Takamitsu Yoshino*** and *Yuria Koike****

^{*}*The Tohoku University Museum*, ^{**}*The Board of Education of Futaba Town (Former Staff)*,

^{***}*SHIN ENGINEERING CONSULTANT CO. LTD.*

Abstract: Kiyotosakuouketsu tunnel tomb, located in Futaba Town, Fukushima Prefecture, has mural-paintings of spiral pattern, human and animal figures. Was constructed in the seventh century. Because of its importance, it is designated as a national historic site.

The accident at TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant following the Great East Japan Earthquake in 2011 resulted in evacuation orders being issued for a wide area, including the all of Futaba Town. Kiyotosakuouketsu tunnel tomb also became difficult to manage on a regular basis, as entry was prohibited except with special permission.

The Tohoku University Museum has been performing a 3D digital archiving project of the remains of the Great East Japan Earthquake since 2013. As a part of this effort, 3-D measurements of Kiyotosakuouketsu tunnel tomb were performed in 2017. Because tool marks were found on the wall, we used the SmartSCAN-HE, an optical, non-contact, high-end 3D scanner manufactured by AICON (Germany), 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. Based on the data, images with ridge contrast enhancement processing are presented. We also report on examples of utilization of the 3D data, such as movie generation, model making with a 3D printer, and VR experiences.

1. はじめに

福島県の太平洋沿岸の双葉町に所在する清戸迫横穴墓群 76号墓は、彩色による壁画が描かれた装飾横穴墓である。壁画には渦巻き文に加えて、人物や動物などの具象的題材を描いている。その重要性から「清戸迫横穴」として国史跡に指定されている¹⁾。

2011年の東日本大震災に伴う東京電力福島第一原子力発電所の事故によって、双葉町全域を含む広範囲に避難指示が出された。清戸迫横穴は、日常的な管理が難しい状況が続くこととなり、その保全が課題となっていた。

東北大学学術資源研究公開センター総合学術博物館では、東日本大震災の震災遺構の3Dデジタルアーカイブ事業を、2012年度から展開してきた(鹿納ほか2018)。岩手県・宮城県震災遺構の計測に続き、福島県では、原発事故被害区域を中心に、関係自治体や「ふくしま震災遺産保全プロ

ジェクト」と連携・協力し、地域の核となる建造物などにも3Dデジタルアーカイブ事業を広げてきた。このような取り組みの一環として、清戸迫横穴について、万一の事態に備えることと、取得したデータを活用することを目的に、詳細な3次元計測を実施することとなった。計測は2017年2月に実施し、そのデータを利用したVR(バーチャル・リアリティ)体験などを行ってきた。このような活用事例を含めて、ここで報告する²⁾。

2. 清戸迫横穴について

清戸迫横穴墓群については、装飾横穴発見の契機となった1967年の発掘調査の成果を取りまとめて、1985年に調査報告書が刊行されている(西ほか1985)。主に同報告書に依って、清戸迫横穴墓群と装飾横穴である76号墓の概要について、最初にまとめておきたい。なお図2～図6は、



図1 清戸迫横穴の位置（国土地理院電子地形図を加工して作成）

同報告書からの引用である。

清戸迫横穴墓群は、福島県双葉郡双葉町新山清戸迫に所在している。発見の契機となった双葉南小学校以外の区域は、山林となっている。双葉町の中心部から、南に1km弱のところにあたる。東京電力福島第一原子力発電所からは、北西方向に約3kmの場所である（図1）。

福島県の太平洋側には、阿武隈山地が南北に連なる。阿武隈山地の東側は、双葉断層に伴う双葉破砕帯で画されている。双葉断層より西側の阿武隈山地側は、標高500～700mの山地となっている。東側は、標高200m以下の低平な丘陵および段丘となっている。これらの丘陵は、新第三紀の地層からなり、河川の浸食によって、樹枝状の地形をなしている。清戸迫横穴墓群は、これらの樹枝状の低丘陵に立地しており、ほとんどが標高50m以下である。周辺の地層は新第三系の大年寺層で、砂質泥岩から泥質砂岩である。双葉町域には、前田川流域に沖積平野が広がるが、清戸迫横穴墓群が立地する丘陵は、前田川流域の平野の南側に接するところに位置する。

清戸迫横穴墓群が関心を引くようになったのは敗戦後の昭和20年代であったとのことである。敗戦により、神話に基づく歴史が否定され、考古学への関心が広がった時期である。静岡県登呂遺跡の発掘調査成果が大々的に報道され

社会的関心を集めていたこともあり、全国で郷土の遺跡への関心が広がり、高等学校の郷土部などによる調査が多数実施された。その中で、「民家のすぐ西側にあった8号墳は、昭和25年に発掘され土師器片・鉄製頭椎大刀・直刀・鉄斧・挂甲小札数10点、曲玉数点を採取したとしている（西ほか1985・21頁）。この資料については、『福島県史』で紹介されている（梅宮1964）。近年、横須賀倫達氏によって、図化と検討が行われている（横須賀2017a・b）。

1960（昭和35）年8月から行われた福島県教育委員会による県下一斉の遺跡調査では、「横穴墓24基と山上墳3基」が確認されていた。

1967（昭和42）年には、双葉南小学校が建設されることとなり、記録保存のための発掘調査が行われることとなった。当時は、地方自治体に文化財専門職員が配置されていないことが一般的であったため、福島県文化財専門委員の渡部晴雄氏を調査担当者、県立原町高等学校教諭西徹雄氏と県立双葉高等学校教諭相馬胤道氏を調査員として調査が実施された。1960年に確認された24基に続けて、25～77号墓の53基が建設予定地で発見され、調査が実施された。彩色壁画がある76号墓は、調査の終盤に発見されている。塚状の遺構も、8号まで確認され、6～8号の3基について調査が行われている。



(調査報告書より、一部改変)

図2 清戸迫横穴墓群分布図(1)

1979(昭和54)年には、双葉町教育委員会等の要請を受け、渡部一雄氏、山田廣氏、大竹憲治氏による調査団によって分布調査が実施され、清戸迫横穴墓群全体の分布状況が把握された。1983(昭和58)年には、双葉町史編さん事業に伴い、A群7号墓などの、線刻壁画がある町内の横穴墓の調査が実施されている。1984(昭和59)年には、双葉町内所在遺跡の写真撮影に伴い、清戸迫横穴墓群でも写真撮影と基数の点検が行われ、分布調査に補正が加えられた。これらの調査成果は、報告書に全体分布図が掲載されているほか、『双葉町史』で紹介されている(渡部・西ほか1984)。

清戸迫横穴墓群は、これらの調査で303基が確認されている。東北地方太平洋側の宮城県・福島県は、全国的に見ても横穴墓が多数築造されている地域であるが、その中でも有数の規模の横穴墓群であると評価できる。

報告書掲載の清戸迫横穴墓群の全体分布図は、南を上として示されているため、ここでは北を上に戻したものを図2に示した。図3は、1967年の調査対象となった横穴墓の分布図である。図2と図3の対応関係は、α群がⅢ群、β群がⅣ群、Σ群がⅤ群に相当する。図3には示されていないが、Y群はⅠ群、Z群はⅡ群に相当すると考えられる。1950年に遺物が出土した8号墓は、Ⅰ群の中の横穴墓と推

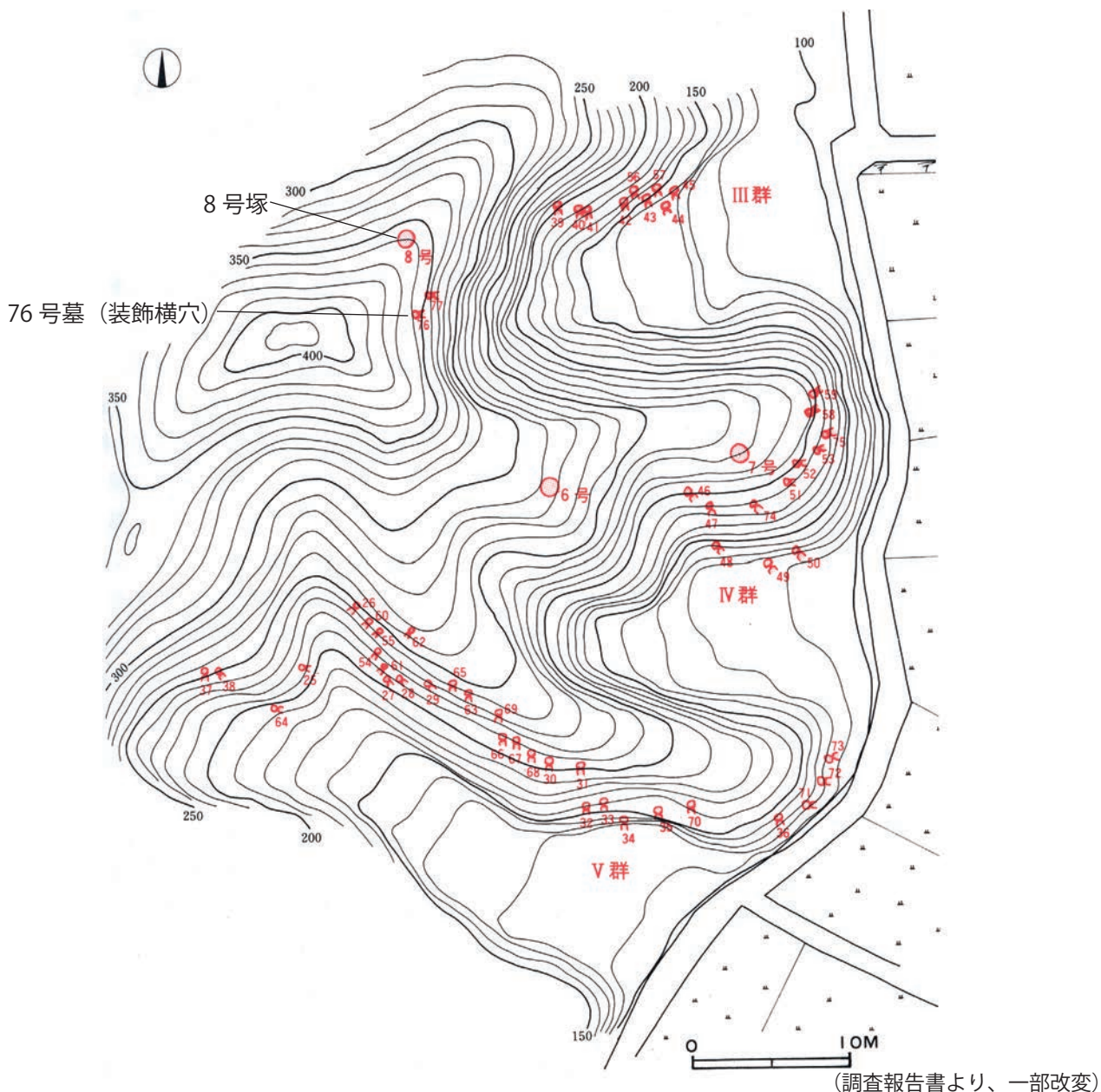


図3 清戸迫横穴墓群の分布(2)

定されているが、どの横穴墓が特定できていない。

先述のように、清戸迫横穴墓群では1967年に双葉南小学校建設に伴い、9月23日から11月14日の期間で発掘調査が実施された。調査も終盤を迎えた10月31日からは、重機による整地作業が開始された。11月3日に、ブルドーザーによる整地作業中、76号墓の玄門付近が開口し、奥壁に彩色壁画があることが判明した。

76号墓の北東側には、4mほど低い位置で77号墓が発見されている。この2基の横穴墓は、図3の分布図で明ら

かなように、III群の他の横穴墓から少し離れた、谷の奥に位置し、標高もかなり高い場所に造られている。76号墓・77号墓とも、2～3mの表土に覆われていたとされており、他の横穴墓と離れた立地と相まって、掘削工事による発見となったと思われる。両横穴墓とも、緊急の調査が実施されることとなった。

76号墓は、発見時の工事によって、「前庭部、羨道部、玄門部の一部が破壊され」ており、図4に示した実測図の玄門部近くの落ち込みは工事による破壊部分である。床面

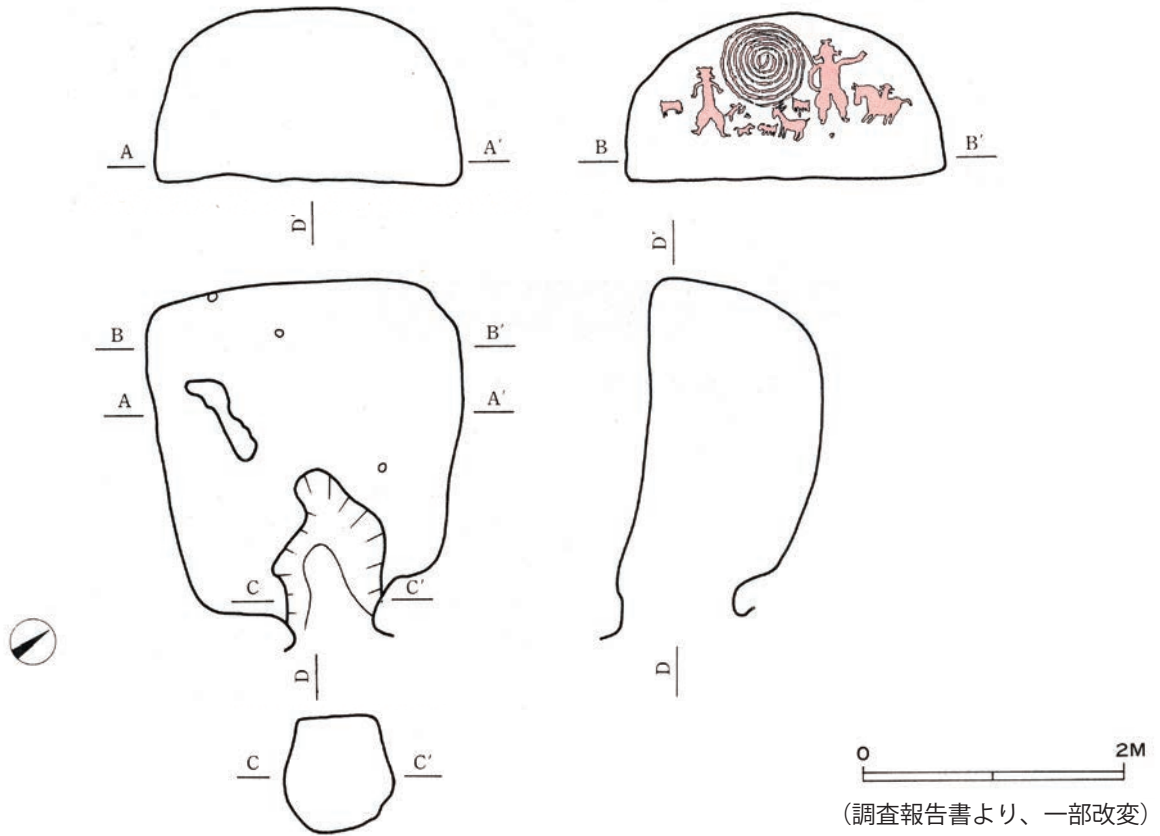


図4 清戸迫横穴墓群 76号墓実測図



図5 清戸迫横穴墓群 76号墓壁画実測図

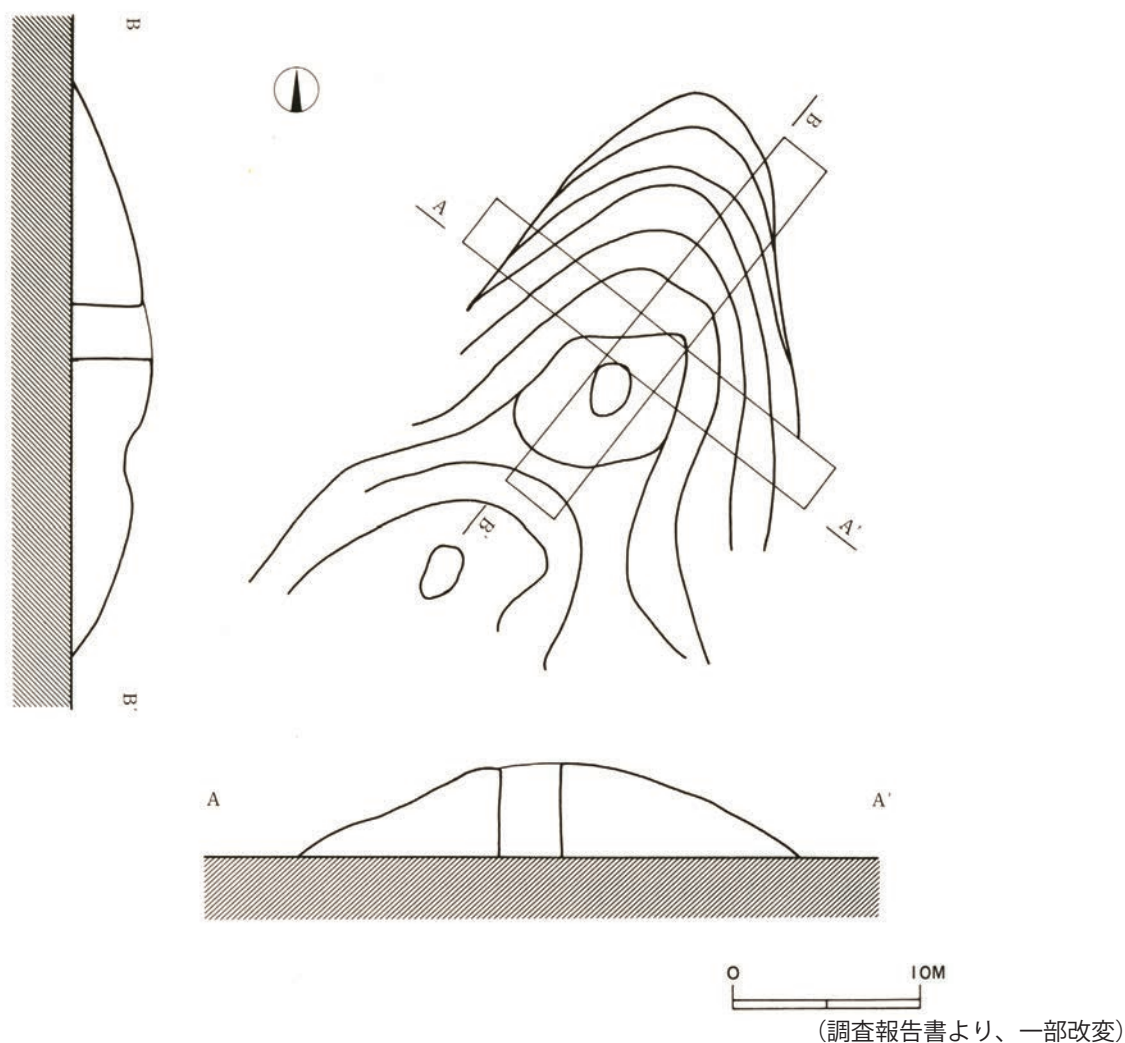


図6 清戸迫横穴墓群8号塚

の報告に記載された法量などは、次のとおりである。「玄室床面入口巾2.34メートル、中央部巾2.77メートル、奥壁巾2.84メートル、玄室中央部高さ1.56メートル、玄門部入口より奥壁までの奥行3.15メートル、玄門部巾0.97メートル、高さ1.02メートル。」希有な壁画が描かれた横穴墓であるが、規模の面では、特に大規模とは言えない。壁面の保存状態は極めて良好で、工具痕跡が明瞭に残っている。ただし、床面に近い高さでは地層が砂質となっており、保存状態はあまり良くない。玄室内には土が10cmほど堆積していたが、遺物は発見されなかった。床面の実測図に記されている不定形のは、地層中に含まれたノジュールで、硬質のため掘り残されたものと考えられる。副葬品が出土していないため、築造時期を詳細に検討することは難しいが、壁画の内容等から7世紀代と考えられる。

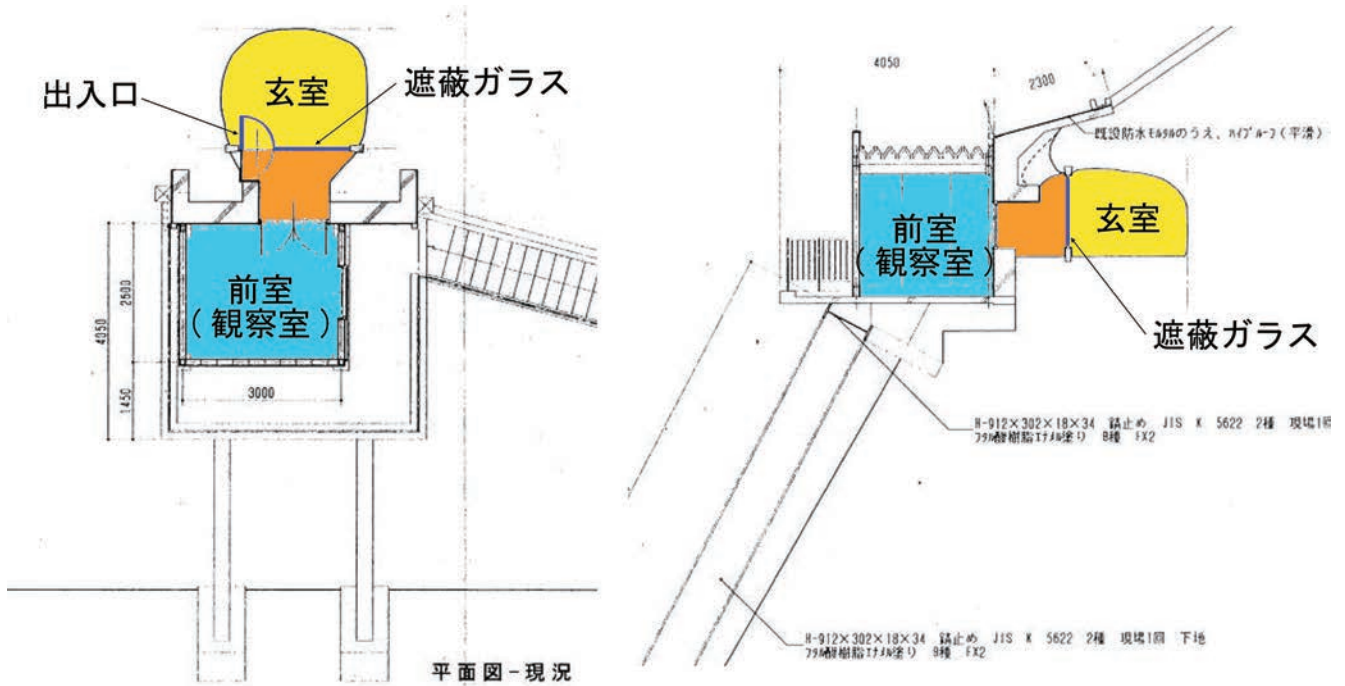
奥壁にはほぼ一面にわたって、赤色顔料で壁画が描かれ

ていた(図5)。使用された顔料は、ベンガラと推定されている。中央左寄りに大きな渦巻き文様を描き、その両側に大きく人物を描く。右端には馬に乗った人物が描かれる。渦巻きの下には、弓で矢を放つ人物と鹿と思われる動物があり、犬と思われる動物が鹿に向かい合わせに描かれる。他にも動物が描かれている。人物や動物を具象的に描く装飾古墳は、全国でもきわめて限られる希少なものである。その重要性は明らかであり、保存に向けた取り組みが進められることとなり、翌1968年5月には、「清戸迫横穴」として国史跡に指定された。

史跡指定の翌年の1969年から1970年にかけて、保存施設の整備工事が実施された。墓前域の踊場・階段と、玄室前を閉鎖する施設などが整備された。これらの施設を太い鉄骨で支える、特殊な構造となっている。様々な条件を踏まえて整備が行われ、学校校舎裏の法面に、玄室だけが残



草に覆われた保存施設（2016年6月撮影）



保存施設の平面図・断面図（双葉町教委提供・一部改変）

図7 清戸迫横穴の保存施設



南から



東から

図8 清戸迫横穴の現況空撮写真（ドローンによる空撮・2023年1月）

される形となっている。1986年には、前室が増築され、現在の形となった(図7)。

清戸迫横穴墓群76号墓の後ろの丘陵の尾根上には、「8号塚」とされた塚状の高まりが確認されている(図6)。76号墓よりは、やや北側にずれた位置にあたる。調査対象区域で発見された、6号塚・7号塚・8号塚の3基は、トレンチが設けられ調査が行われたが、いずれにおいても遺構・遺物は発見されなかった。8号塚も、1.5m幅のトレンチを十字に設けて調査が行われたが、「中央部で深さ1.5メートルで岩盤に到達し」遺構・遺物は発見されていない。6号塚と7号塚は工事により破壊されたが、8号塚は工事範囲から外れて残っている。

現在では、主要な横穴墓には、後背墳丘が存在する場合もあることが知られてきており、76号墓にも後背墳丘が存在した可能性が指摘されている。しかし、清戸迫横穴墓群の発掘調査が実施された1967年段階では、横穴墓に伴う後背墳丘についての知見は、ほぼ無かった時期である。今日的な観点から、76号墓の後ろ側の丘陵については、8号塚も含めて、あらためて詳細な調査と検討が必要である。

3. 東日本大震災に伴う原発事故と清戸迫横穴

2011年3月11日に発生した東日本大震災では、福島県の沿岸地域にも大きな津波が押し寄せた。この津波で全電源を喪失した東京電力福島第一原子力発電所は、原子炉の冷却機能を失い、運転中の1～3号機で炉心溶融がおき、1・3・4号機は水素爆発に至った。格納容器内の圧力を下げるために行われた排気操作や水素爆発などにより、大量の放射性物質が放出され、福島県沿岸部から内陸部にかけて、深刻な放射能汚染をもたらすこととなった。放射性物質が放出された時の風向きとの関係で、第一原発から北西方向に、汚染が激しい区域がひろがることとなり、双葉町はとりわけ大きな影響をうけることとなった(双葉町2017)。

震災当日の19時3分、政府は原子力災害対策特別措置法に基づき、「原子力緊急事態宣言」を発令した。福島県は20時50分に、原発から半径2kmの範囲に独自に避難指示を発令する。政府は、21時23分に、半径3km圏内の避難、3～10km圏内の屋内退避を指示した。清戸迫横穴に隣接する双葉南小学校は指定避難所ではなかったが多数の住民らが避難しており、3km圏内にあたるとして、双葉中学校へ移動することとなった。これ以降、双葉南小学校に、生徒たちが戻ることはなくなってしまった。小学校通用口には、生徒たちのランドセルや、学年末に持ち帰る図画工作の作品などが、持ち帰ることができないまま残された。

震災翌日の3月12日5時44分、政府は第一原発から半径10km圏内に避難指示を出した。情報が錯綜し混乱する中、全町民が西の川俣町へ向けて避難を始める。午後、風向きが変わり町役場の放射線量計の数値が急上昇し、町長は14

時頃に役場の閉鎖と退避命令を出す。前代未聞の、全ての役場機能を含む、全町避難が始まることとなった。同日18時25分には、政府は避難指示の範囲を、第一原発から半径20km圏内に拡大した。

事故が深刻化していくなか、双葉町役場と住民は、3月19日に埼玉県さいたま市のさいたまスーパーアリーナへ、3月30日には埼玉県加須市の旧騎西高校へ移り、自治体が役場機能ごと県外へ避難することとなった。2013年6月に、いわき市東田町に、双葉町役場いわき事務所が設置されるまで、役場機能の県外避難が2年以上つづくこととなった。

放射能汚染の状況が徐々に明らかとなり、原発が危機的な状況を脱するに伴い、規制は変更されていく。2011年4月22日には、福島第一原発から20km圏内が「警戒区域」、その外側で放射線量が高い地域が「計画的避難区域」、それ以外の20～30km圏内が「緊急時避難準備区域」とされた。20km圏内の「警戒区域」は立ち入りが禁止され、双葉町は全域が「警戒区域」となった。翌2012年4月1日には、「警戒区域」と「計画的避難区域」の一部が、年間積算線量の状況に応じて、「避難指示解除準備区域」「居住制限区域」「帰還困難区域」の3つに再編成された。前2者は規制解除に向けた取り組みが進められることとなったが、「帰還困難区域」では、引き続き避難の徹底と立ち入りの禁止が継続することとなった。その後、除染作業の進展とともに、規制は段階的に解除されていったが、双葉町は北東部の中野地区を除く全域が、「帰還困難区域」となっていた。

「帰還困難区域」は、将来にわたって居住を制限するとされてきたが、各市町村の中心部やJR常磐線の駅付近などについて、避難指示を解除し、居住を可能とするために、2017年5月に「特定復興再生拠点区域」が定められるようになった。市町村が作成した計画を国が認定し、計画に基づく除染やインフラ等の整備を実施し、避難指示を解除するものである。双葉町では、中心地や駅周辺などが「特定復興再生拠点区域」となり、2022年8月30日にこの区域の避難指示が解除され、双葉町役場も町内に戻った。清戸迫横穴の所在する地区も「特定復興再生拠点区域」に入り、11年半近くの間を経て避難指示が解除された。

清戸迫横穴は、双葉町教育委員会が管理にあたってきた。双葉町には歴史民俗資料館があり、図1の位置図に示したように、横穴から直線距離でほぼ1kmの近距離にある。資料館には、埋蔵文化財担当の専門職員が配置され、清戸迫横穴の日常的な管理にあたってきた。

福島第一原発の事故で全町が避難し、役場機能が県外に避難する中で、清戸迫横穴の管理は困難な状況に直面することとなった。町役場は2013年6月に県内に戻ったが、事務所がおかれた福島県いわき市東田町は、清戸迫横穴からは60km離れており、高速道路を利用して1時間以上の時間を要する。清戸迫横穴も規制区域に入っていたため、立ち入りには事前に許可をとる必要がある。このような状

が、気候の安定する時期に限定公開が行われてきた。震災前には、「福島県装飾横穴墓一斉公開」が行われ、4横穴墓が同じ日時に一斉に公開されてきた。これらの機会を利用すると、保存施設のガラス越しではあるが、一般の方も身近に観察することが可能であった。原発事故は、このような清戸迫横穴の公開・活用を、全て不可能とすることとなった。規制区域への立ち入りは、公益目的で許可を得る必要があり、一般に広く公開することができない状態が、長期間に渡って継続することとなった。

4. 調査の目的

東北大学学術資源研究公開センター総合学術博物館では、東日本大震災の震災遺構の3Dデジタルアーカイブ事業を、2012年度から展開してきた。岩手県・宮城県の震災遺構の計測に続き、福島県では、原発事故被害区域を中心に、関係自治体や「ふくしま震災遺産保全プロジェクト」と連携・協力し、地域の核となる建造物などにも3Dデジタルアーカイブを広げてきた（鹿納ほか2018）。双葉町では、原子力標語看板や双葉町海の家（マリーンハウスふたば）の3次元計測を、2015年10月に実施している。

2016年5月9日には、双葉町の伊澤史朗町長以下、関係機関の担当者が、震災遺構の3Dデジタルアーカイブ事業やバーチャル・リアリティ体験などの視察のため、東北大学総合学術博物館を訪問された。その際、清戸迫横穴の現状と課題、3次元計測の有効性やデータを利用したVR体験などの可能性などについて、意見交換がなされた。2016年6月15日には、文化庁の建石徹古墳壁画対策調査官が視察に入られる機会を利用して、藤澤・鹿納も清戸迫横穴の現状を視察した。その際、建石調査官、双葉町教委吉野、東北大学藤澤・鹿納の4名で、3次元計測を実施する必要性について意見交換を行うことができた。この際、建石調査官からは、有益なアドバイスを多数いただいた。

以上のような経緯と検討を踏まえ、東北大学学術資源研究公開センター総合学術博物館では、詳細な3次元データを確保し将来の万一の事態に備えることは、貴重な文化財の継承のために極めて重要であると考え、震災遺構等の3Dデジタルアーカイブ事業の一環として、3次元計測を実施することとした。清戸迫横穴の置かれた状況を踏まえ、調査の目的を、以下の3項目に整理した。

- ・清戸迫横穴の詳細な3次元データを確保し、将来の万一の事態に備える。
 - ・3次元デジタル測量による記録と3次元バーチャル展示方法によって、帰還困難区域にある清戸迫横穴の公開・活用を行う。
 - ・現地での調査研究に大きな制約がある中で、新たな研究のための基礎データとする。
- 調査に必要な経費は、東北大学平成28年度総長裁量経費

「福島原発事故被災地域復興のための3次元記録を用いた地域の記憶継承・活用プロジェクト」を利用し、東北大学総合学術博物館が事業主体となり、双葉町・同町教育委員会の協力を得て実施することとした。

5. 調査の方法

横穴は、玄室部分のみが残されており、玄室長約2.6m、奥壁幅約2.6mで、前面には前室（観察室）が設けられている。前室から横穴へ出入りする扉のさらに内側の、玄室に入った部分に遮蔽ガラスが設けられ、その一部が開くようになっている（図7）。現地の視察を踏まえ、計測にあたっては、以下の条件を満たすことが必要と考えた。

- ・横穴墓壁面の工具痕跡による凹凸を詳細に記録できる精度を有すること。
- ・色調を正確に記録し再現できること。
- ・壁画への悪影響を避けることができる方法であること。
- ・スペースの限定される横穴墓内で安全に作業できること。

これらの条件を検討した結果、AICON（アイコン・独）社製の光学式非接触ハイエンド3DスキャナであるSmartSCAN-HEを使用することが最適と判断した³⁾。

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。筐体が非常にコンパクトで一般の三脚に設置でき、狭い横穴内での計測作業に適している。震災復興事業に伴う、宮城県亶理郡山元町の合戦原遺跡の横穴墓群の調査において、この機器が使用されており（山田ほか2022）、その実績も踏まえ、適した計測方法であると判断した⁴⁾。

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。照射による温度上昇も無いと判断されるが、作業者が発する熱による玄室内の温度上昇については、留意する必要がある。そのため、玄室内に入って作業する人数は1名だけとし、温湿度センサーで温湿度の変化をチェックし、作業開始時点から2度以上上昇した場合には、作業を中断することとした。

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ため、高精度な3Dデータを作成できる。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。計測機器を移動しながら、全体をカバーするように計測する。壁面の凹凸によって陰となり、同機器から計測が難しい一部の範囲については、デジタルカメラを用いた画像解析を併用した。本スキャナでは、搭載された8Megapixelのカラーセンサーにより、色情報を同時に獲得できる。ただし、テクスチャーの表現力に限界があることも予想されたため、

画像解析用を兼ねてデジタルカメラでの撮影も行うこととした。また床面は、壁面のような細かな工具痕跡が残っていないため、作業時間の短縮も兼ねて、デジタルカメラを用いた SfM (Structure from Motion) 法による画像解析で計測することとした。デジタル写真解析用の撮影では、カメラ本体はソニー α 7s II、レンズは ZEISS Batis2.8/18 を使用した。RAW 現像ソフトはアドビシステムズ社製の Light Room。画像解析用のソフトは、Agisoft 社製 Photo Scan (現 Metashape) である。

玄室内の計測に加えて、保存施設も含めた現地の状況を記録し、周辺状況を含めたデータとして活用することを想定し、玄室外についても計測を実施することとした。玄室より外側は、震災遺構の計測で経験が豊富な、据置型レーザー計測器を使用することとした。東北大学災害科学国際研究所の災害文化アーカイブ研究分野に備えられている FARO 社製 Focus3D を借用した。その際、同分野の柴山明寛准教授には、多大なご協力をいただいた。

6. 調査経緯

調査に先立つ 2017 年 1 月 18 日に、現地での検討と事前打ち合わせを実施した。3D スキャナを利用した玄室内の計測は、横穴墓での実績のある株式会社シン技術コンサルに委託した。事前打合せには、同社の小池ら技術者も参加し、現地の諸条件を確認し準備を進めることとした。

現地での 3 次元計測作業は、2017 年 2 月 9～10 日の 2 日間で実施した (図 11)。9 日の午前は設営作業に充て、同日午後から計測を実施した。9 日には、朝日新聞と読売新聞の本社文化部から取材が入っており、午前中は取材対応にもあたった。保存施設外部の据置型レーザー計測器での計測は、10 日に鹿納が担当して実施した。保存施設前室の計測は、9 日の作業開始前に、最初に実施している。なお、6 月の視察、1 月の事前準備、2 月の計測の 3 回とも、規制区域への立ち入り許可を得て行っている。

現地は電気が途絶えたままであったため、保存施設の踊り場に発電機を設置して電源とした。3D スキャナを据えた三脚の下には、小さく切った養生シートをはさんで、床面を保護した。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、前室に設置したノート PC に接続してデータを収集した。玄室内で作業する人数は 1 名に限定し、カビの胞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。玄室内の作業をサポートする人員は、遮蔽ガラスと前室の間で、必要な作業を行った。遮蔽ガラスの内側には、温湿度センサーを貼り付け、ケーブルを伸ばし前室でチェックするようにした。作業時間が長くなると、玄室内の温度が、開始時より 2 度以上上昇することが、複数回あったが、作業を中断して外に待避すると、短時間でもとの温度に低下した。計測が厳寒期であり、岩盤が冷えて

いたため、すぐに低下したものと思われる。

清戸迫横穴周辺の放射線量は、落ち着いた状況が続いていることを確認して計測を実施したが、念のため放射線量計を携帯し、被爆線量を計測した。朝に東北大学を出発し、夜に戻るまでの 12 時間程度の積算線量は、 $2.5 \mu\text{SV}$ 程度であった。ただし 2 日目は鹿納が屋外でのレーザー計測を実施しており、常に屋内で作業していた藤澤が $2.544 \mu\text{SV}$ であったのに対して、鹿納は $3.978 \mu\text{SV}$ と、6 割以上多くなっていた。場所によって放射線量が大きく変わることを示しており、注意が必要なことを示すものと言える。

7. 調査成果と計測データの加工

3D スキャナ (デジタイザー) による計測は、1 ショットのデータ量約 650 万点、計測ショット数 212 ショット、合成点群数約 14 億点となった。デジタル画像解析用に撮影した撮影数は、276 カットであった。これに地上レーザー計測器によるデータを加えて、図 12 の行程でデータの合成を行った。

- ・メッシュデータ位置合わせ、アライメント (詳細位置合わせ) : デジタイザー計測の各ショットの配置を確認し、調整を行った。
- ・画像解析調整基準点抽出、標定及び三次元データ構築 : 撮影データの解析には、デジタイザー計測のデータから標定用座標 (任意) の抽出データを用いアライメント及び三次元データの構築を行った。
- ・メッシュデータから点群作成 : デジタイザー計測のメッシュデータから点群データへの変換を行った。間引きを行わない形で点群データの作成を行った。
- ・デジタイザーデータと画像解析データの色調整合成 : 玄室内データを任意座標系の状態で合成して、色の合わせを行った。
- ・地上レーザーデータノイズ除去 : レーザー計測データのノイズを除去した。
- ・全データ合成・成果とりまとめ : レーザー計測データに形状合成で玄室内三次元データを合成処理した。

今回は、横穴の規模が大きくないことから、大きなずれは出ないことが想定されたことと、現地での作業スペースが限られることから、現地で標定点を設定し測量することは行っていない。3D スキャナのデータを合成し、それを基準としてデジタル写真解析データを合成している。さらに、レーザー計測データを接合する形となっている。ここまでの作業を委託し、2016 年度末に成果品が納入された。

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データを保存するために、 $X \cdot Y \cdot Z$ 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。当初は、大量の点群データを扱い、バーチャル・リアリティ体験に活用するための処



計測時の保存施設・電気は復旧していない



計測作業状況・三脚の下には小さく切った養生シートを敷いて床面を保護



計測作業状況・複数のパターンを照射して計測を行う



計測機からのケーブルはビニールを巻いて養生し前室に設置した PC に接続



遮蔽ガラス内側に温湿度センサーを設置しケーブルを伸ばし前室でチェック



外側は地上レーザー計測・FARO 社製 Focus3D を使用

図 11 清戸迫横穴の計測作業状況

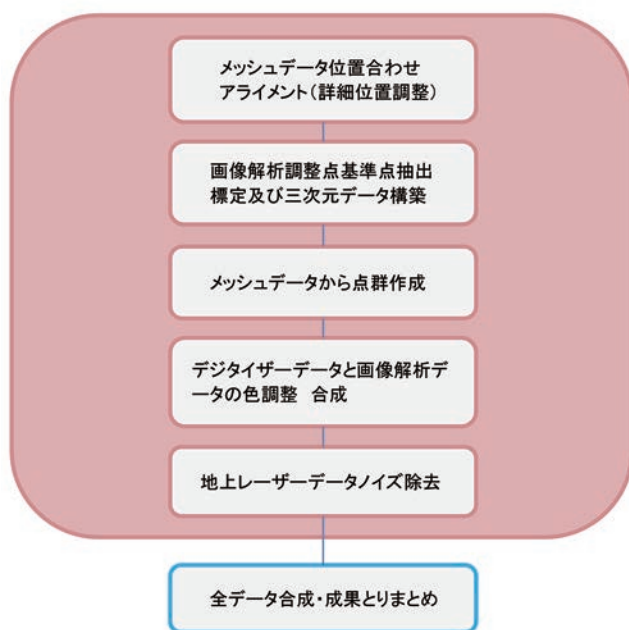


図 12 清戸迫横穴計測データの処理工程

理に苦慮していた。2014年度から、エリジオン社の大規模点群加工ソフトである InfiPoints を導入し、合成処理、ノイズ処理、軽量化処理などの各種加工を行っている。納品された清戸迫横穴のデータも InfiPoints に読み込み、次の 8. で報告するような、動画の作成や VR 体験などの活用のためのデータ加工を行い、活用事業を行った。

一方、考古学的データとして、学術的検討に供する方法は、現在も 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。3次元データを、そのまま学術的検討に利用する方法は、まだ充分実用化されていない。2次元データとするにあたっては、正射投影画像として出力しそのまま利用する場合もあれば、それをもとにトレースし図化する場合もある。清戸迫横穴は、壁面の工具痕跡が明瞭に残されており、これをいかに判りやすく表現するかという点が重要であると考えられたため、様々な方法を検討し、稜線強調処理を試みることにした。

2020年3月には、新型コロナウイルス感染症第1波の拡大に伴い、3月に予定していた企画のほとんどが中止となった。そのため余裕が生じた総合学術博物館の予算を使用して、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、その画像に稜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て示すものである（千葉・横山 2017）。

委託にあたっては、床面の正射投影画像を利用して軸線を設定し、それを基準に、奥壁、左右の壁、天井の4面について PEAKIT 処理を行った⁵⁾。床面については、細かな工具痕跡は残されていないため、PEAKIT 処理は行っていない。処理後の画像を検討した結果、色情報を含むテクスチャーを付加した表示、凹凸のみを示すためにレリーフのみ、レリーフと稜線強調の合成、稜線強調データのみ、4種類を提示することとした。それぞれに長所と短所があることが見て取れるであろう。

3次元計測データは、一般向けの活用では、スケールを合わせておけば、特に公共座標に位置付いていなくても差し支えない。しかし、学術資料として報告するには、正確な位置関係が明らかになっていることが望まれる。計測を実施した際には、別事業で行われた保存施設周辺の測量成果から、公共座標に位置づけることを計画していた。しかし、結果的に座標データを得ることができなかつたため、公共座標に位置づけられない状態となっていた。

保存施設とその周辺まで計測を実施し、データを合成していたため、保存施設や階段の特徴的な点を選択し、改めて公共座標を測量することで、計測データを公共座標上に位置づけることとした。2020年度からは、藤澤が研究代表者となった科学研究費補助金（基盤研究A）による「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」が採択され、5ヶ年の計画で始まった。清戸迫横穴の計測データも、この科研費での研究での検討素材として用いることとなった。そのため、この研究の一環として、清戸迫横穴の公共座標測量を実施することとした。しかし新型コロナウイルス感染症による制約で、科研費事業も大幅に遅延や繰り越しを余儀なくされ、現地におもむいた測量は、なかなか実施することができなかつた。ようやく2022年度には、科研費の繰り越しも解消でき、清戸迫横穴周辺の公共座標測量を実施できた。現地に基準点を設け、GPS測量で公共座標を測量し、これら基準点からトータルステーションを用いて、保存施設や階段の特徴的な点を測量した。これら測量と、既存計測データの公共座標転換は、シン技術コンサルに委託した。

このような経緯を経て、ようやく本論で、清戸迫横穴の計測成果を報告することができるようになった。図13から図31に、正射投影図を示す。図13の展開配置図が縮尺50分の1である他は、全て縮尺20分の1にそろえている。壁面の工具痕跡を示すことを考慮すると、この縮尺が限界であろうと思われる。

図13に、各面の正射投影図を配置したものを示す。色情報を含むテクスチャーを付加した表示である。天井は見上げとなるため、座標が裏返っていることに留意されたい。各面で、色調が異なっている。また、一つの面でも、途中で色調が異なっているものもある。このような違いは、撮影した際の取得データのばらつきから生じたものと考えら

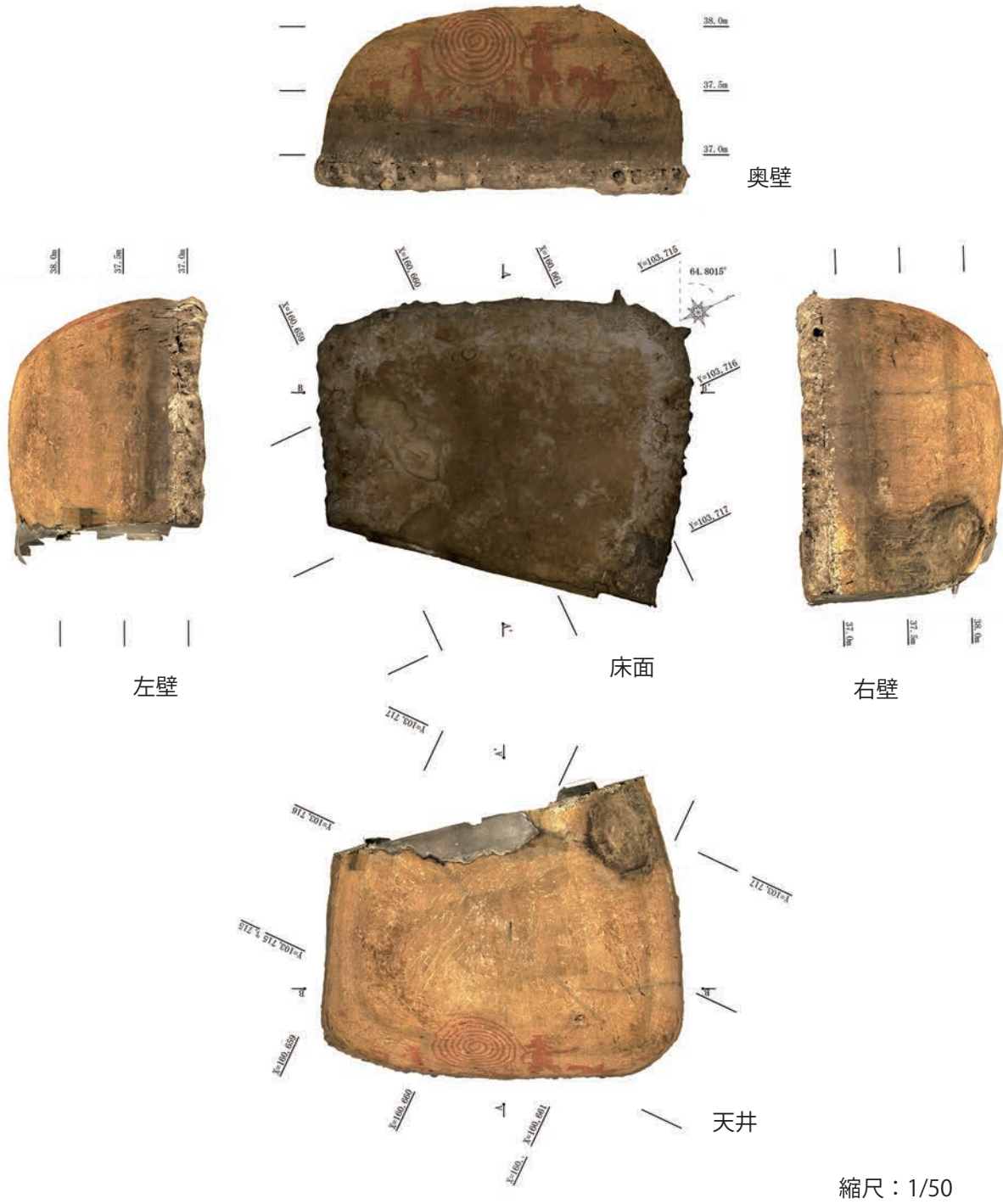


図 13 清戸迫横穴各面の展開図（テクスチャー）

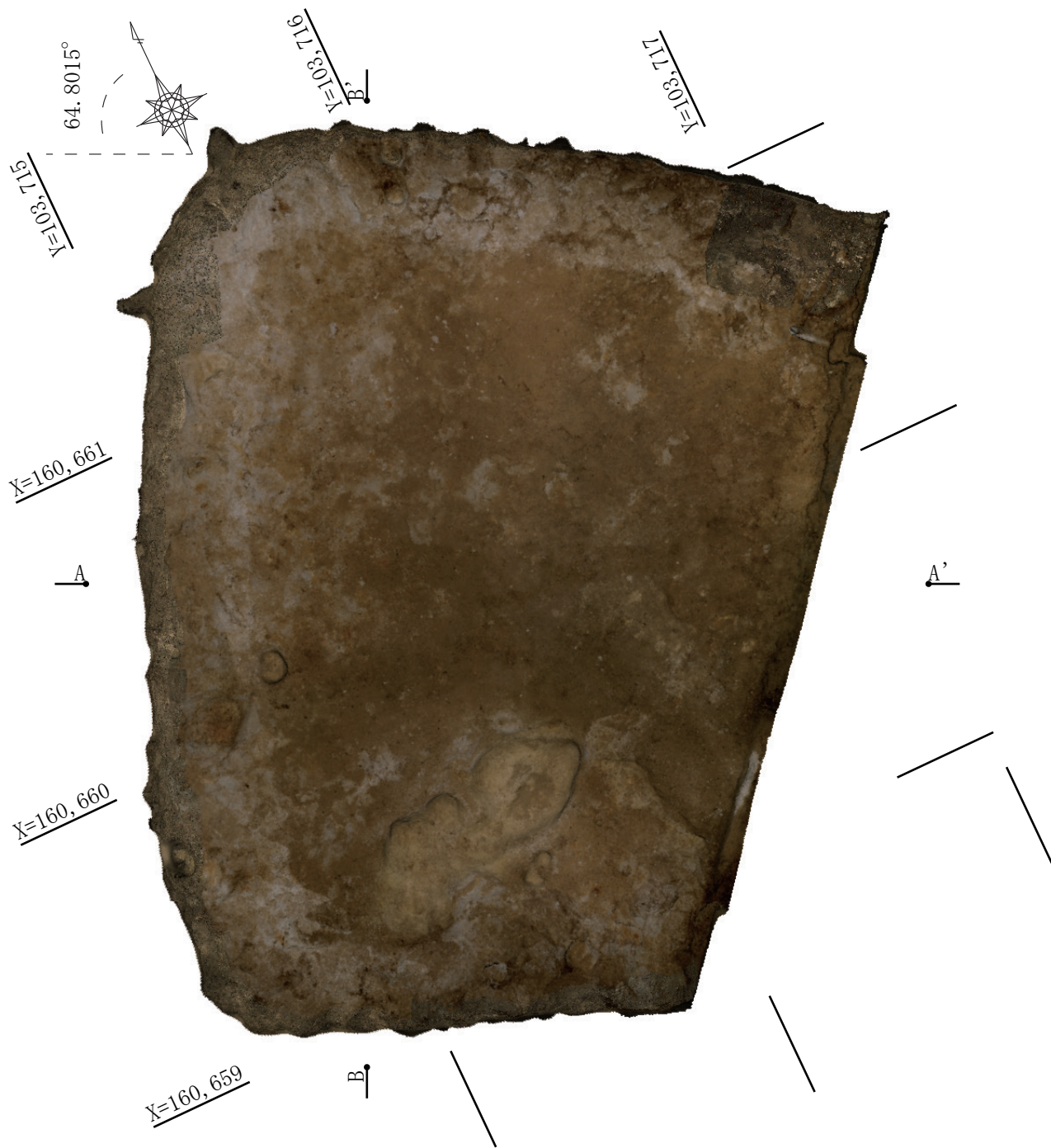


図 14 清戸迫横穴床面正射投影図 (テクスチャー)

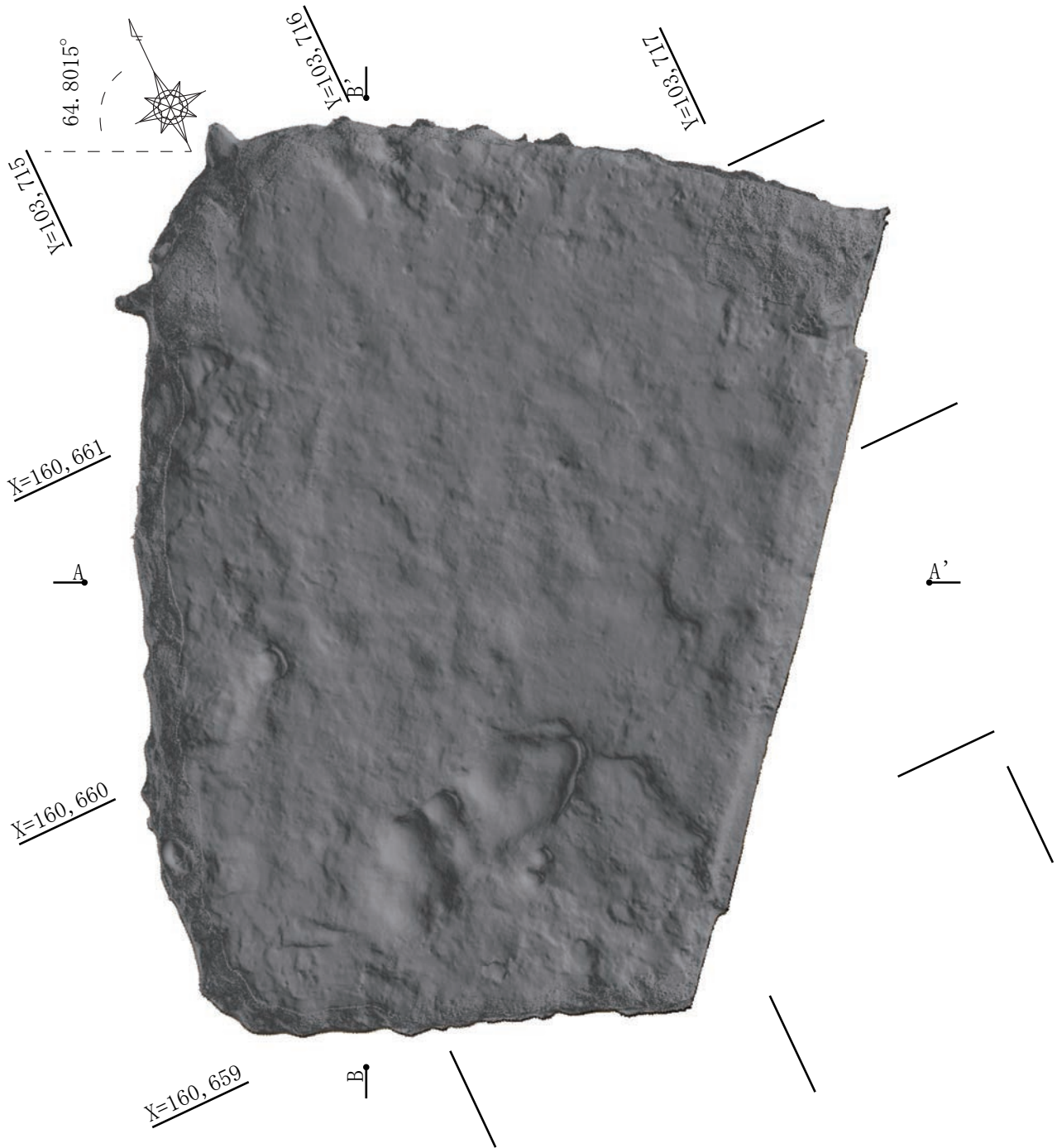


図 15 清戸迫横穴床面正射投影図（レリーフ）



図 16 清戸迫横穴奥壁正射投影図 (テクスチャー)



図 17 清戸迫横穴奥壁正射投影図 (レリーフ)



図 18 清戸迫横穴奥壁正射投影図（レリーフ・稜線強調）



図 19 清戸迫横穴奥壁正射投影図（稜線強調）



図 20 清戸迫横穴右壁正射投影図 (テクスチャー)



図 21 清戸迫横穴右壁正射投影図 (レリーフ)



図 22 清戸迫横穴右壁正射投影図（レリーフ・稜線強調）



図 23 清戸迫横穴右壁正射投影図（稜線強調）



図 24 清戸迫横穴左壁正射投影図 (テクスチャー)



図 25 清戸迫横穴左壁正射投影図 (レリーフ)



図 26 清戸迫横穴左壁正射投影図（レリーフ・稜線強調）



図 27 清戸迫横穴左壁正射投影図（稜線強調）



図 28 清戸迫横穴天井正射投影図 (テクスチャー)



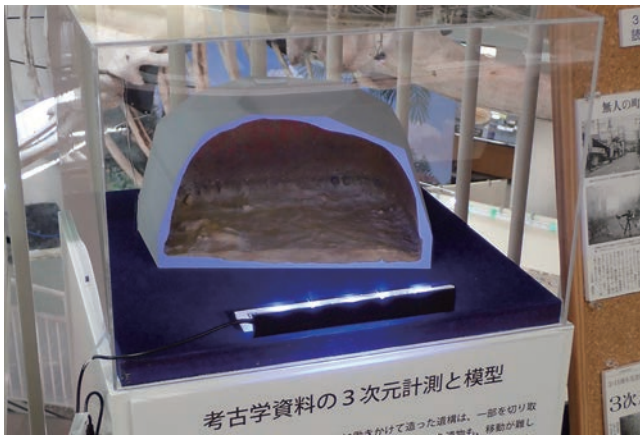
図 29 清戸迫横穴天井正射投影図 (レリーフ)



図 30 清戸迫横穴天井正射投影図（レリーフ・稜線強調）



図 31 清戸迫横穴天井正射投影図（稜線強調）



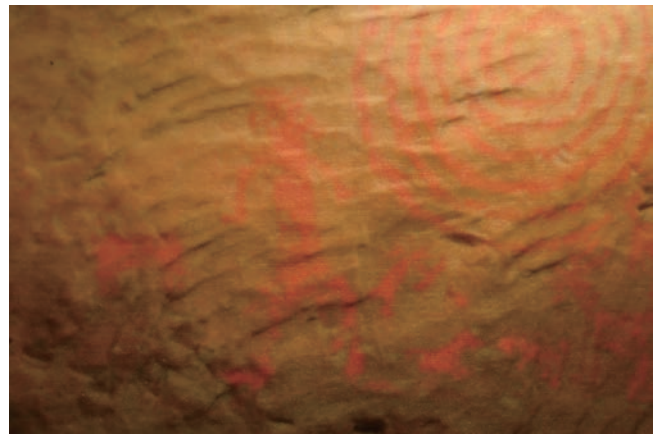
展示状況



模型全景



彩色壁画と掘削痕の表現（奥壁右側～右側壁）



彩色壁画と掘削痕の表現（奥壁左側）

図 32 3D プリンターによる清戸迫横穴の模型

れる。特に床面は、SfM 法での画像解析で作成しており、他の面が 3D スキャナで画像を取得していることと異なるため、より違いが大きく出ているものと考えられる。

図 14・15 は床面である。床面は PEAKIT 処理を行っていないため、テクスチャーとレリーフのみである。壁からところどころに三角状の突出部があるが、これは床面近くの壁に開いた孔である。地層が砂質で弱い部分が、地下水などで流れ出してえぐられたものと考えられる。

図 16 以降は、各面ごとに、テクスチャー、レリーフ、レリーフと稜線強調の重ね合わせ、稜線強調のみの、4 種類の画像を、それぞれこの順番で提示した。工具の痕跡が、明瞭に読み取れる。工具痕跡は、床面に近くなるほど不明瞭となるが、基盤の地層の違いが反映したものである。工具痕跡から、作業の方向や手順、作業単位などを検討することが可能であると思われるが、この点は今後の課題としておきたい。

奥壁の彩色がある部分を詳細に観察すると、彩色のある部分が、凹凸が少なくなっている部分がある。馬に人物が乗っている場所などで判りやすい。顔料が塗られた分、凹凸が埋められた状態を示す可能性がある。

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、工具痕跡も詳細に再現できており、当初の目的を果たせたと言えるであろう。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。

8. 3次元データの活用

取得した 3次元データを用いて、一般向けの活用のために、動画の作成、3D プリンターでの模型製作、VR（バーチャル・リアリティ）体験などを行ってきた。

3次元データがあれば、自由な位置を移動しながら、

自由な方向を見た形で動画を作成できる。動画のファイル形式を一般的な形式としておけば、様々な場所で上映が可能である。東北大学総合学術博物館で使用している点群加工ソフトのInfiPointsは、このような動画作成もできるため、これを利用して作成した。今回の計測では、横穴の立地と現状が判るように、保存施設の外側までレーザー計測を行った。それを活用し、保存施設に登る階段の下から、階段を登って保存施設の前室に入り、さらに玄室内に入って壁画を見渡すルートで、動画を作成した。データは軽量化して作成したため、ある程度は粗くなることはやむを得ないが、様々な機会、場所で上映して活用している。

次に述べる小中学生向けのバーチャル・リアリティ体験の際に、遺跡の状況を理解しやすくなるように、3Dプリンターで縮尺10分の1の模型を製作することとした。宮城県村田町に所在する墳長90mの前方後円墳である愛宕山古墳の3次元測量を実施した際に、3Dプリンターで縮尺500分の1の模型を作成し、その有効性を確認したことがある(藤沢ほか2019)。この愛宕山古墳の模型は、墳丘形態を立体的に観察することが目的であったため、灰色の単色で造形した。今回は、色も出力することを試みた。合同会社アイオフィスの岩部吉成氏に造形用のデータ編集を依頼し、そこを通じて造形を実施業者ピースルーに委託した。造形に使用した機器は、3Dシステム社(アメリカ)のProjet3Dプリンターで、石膏系混合粉を材料とし、粉末積層方式で造形するものである。造形ピッチは100ミクロンである。図32に示すが、壁面の工具痕跡も再現できている。色調については、テストピースで確認して出力したが、壁画の色がやや明るくなったように思われる。色調の正確な再現には、人間の感覚に頼るだけでは限界があり、色調の測定方法を考える必要がある。

清戸迫横穴は、原発事故で現地見学が不可能となったため、バーチャル・リアリティ体験で、横穴の姿を見ていただくことは、今回の計測の重要な目的であった。2018年2月21・22日に、双葉町立双葉南小学校・北小学校、双葉中学校において児童・生徒向けの体験会を実施し、3月18日には双葉町役場いわき事務所において一般向けの体験会を実施した(図33)。

東北大学総合学術博物館では、震災遺構の3Dデジタルアーカイブ事業で、キャノンのMR(Mixed Reality)システムを用いた体験を行ってきた。MR(複合現実)システムは、現実世界の形状とデジタル映像を合成して体験できるものである。体験者がヘッドマウントディスプレイ(HMD)を装着し、その位置と見ている方向を、床と周囲に設置したマーカーで読み取って、体験者の動きに合わせてHMDに映されたデジタル画像が動いていく。当システムでは、比較的広い範囲で体験者が動くことができる点は長所であるが、装置が大がかりとなることと、高価である点は短所である。この時点で、ゲームなどに利用する汎用品の

ヘッドマウントディスプレイである、オキュラス・リフト(Oculus Rift)を利用したVR体験が実施できるようになっていたため、こちらも使用した⁶⁾。図33の教職員への事前説明で、右側で体験しているのがMRシステム、左側のノートPCの前で体験しているのがオキュラスである。

双葉町立の小中学校も、全町避難の中で休校となったが、2014年4月に、いわき市錦町の仮校舎で再開された。同年8月には、いわき市錦町に仮設校舎が落成し、ここには、ふたば幼稚園、双葉南小学校、双葉北小学校、双葉中学校の、すべての町立学校などが入ることとなった。

小中学生向けの体験会は、この仮設校舎で実施した。21日に設営を行い、教職員向けに事前説明と体験を行った。22日は、小学生低学年、同高学年、中学生の3グループに分けて、事前学習と体験を行った。双葉町教育委員会の担当者である吉野が事前学習を担当し、清戸迫横穴についての基礎的な知識を解説した上で、VR体験を行った。ただし低年齢層には、ヘッドマウントディスプレイの使用は推奨されていないことから、3D動画として映し、3D用メガネを装着し鑑賞する形をとった。

双葉町役場いわき事務所での一般向けの体験会では、特に講義などは行わず、随時体験していただき、体験中に説明する形をとった。

双葉町での体験会以降も、震災遺構のVR体験とともに、様々な機会に清戸迫横穴のVR体験を行っている。また、清戸迫横穴の3Dプリンターで製作した模型は、東北大学理学部自然史標本館の常設展示で展示しているほか、企画展示等の依頼に応じて、貸し出して展示している。

9. おわりに

清戸迫横穴の3次元計測と、そのデータの活用は、震災と原発事故という特殊な状況の中で、文化財をいかに保全し活用していくかという問題意識から始まった事業であった。開始当初に、見通しが充分得られていたわけではなく、手探りで事業を進めてきたのが実態である。膨大なデータの取得はしたが、その活用のための加工には多大な労力が必要で、新たな試みを依頼するにも予算も確保しなければならず、迅速に進められた訳ではない。コロナ禍で思うように進められなかった時期もある。そのため、計測実施から、本稿で報告するまで、思いがけない時間を要してしまった。2022年8月には、清戸迫横穴も避難指示が解除された。新たな町役場も双葉町内で業務を始め、町づくりへの取り組みが進められている。清戸迫横穴の3次元計測の成果が、今後活用されることを期待し、本報告を終えたい。

※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



教職員への事前説明



3D プリンター模型を使用した学習



教育委員会職員による事前学習



低学年向けの3D 動画視聴による体験



生徒によるMR 体験

図 33 小中学校での VR 体験等の実施状況

代表者藤沢敦)による研究成果を含みます。

謝 辞

清戸迫横穴の計測から活用に至る過程では、多くの機関・個人のご協力を得た。各種業務を担当していただいた株式会社シン技術コンサル、株式会社ラング、合同会社アイオフィスには、社会貢献としての意義を認識していただき、採算を度外視したような業務を引き受けていただいた。エリジオン社にも格段のご配慮をいただいた。ここにあらためて感謝したい。

註

- 1) 横穴墓の呼称は、「横穴」「横穴墓」の両方が使用されており、読み方も「おうけつ(ぼ)」「よこあな(ぼ)」がある。清戸迫横穴の調査報告書では「清戸迫横穴墓群」との呼称が使用されている。一方、史跡指定の際の名称は「清戸迫横穴」である。本報告では、横穴墓群を取り上げる際には、「清戸迫横穴墓群」との呼称を使用する。その中で個々の横穴墓を指す場合には、「清戸迫横穴墓群 76 号墓」という形で呼称する。計測対象とした 76 号墓を示す場合には、史跡名称でもある「清戸迫横穴」との呼称を使用する。なお地名の読み方は、文化遺産オンラインでは「きよとさくおうけつ」との読みを付している。それに対して双葉町史では、「きよとさく」とふりがなを付けており、「きよど」と濁る。地元住民の発音では、やや濁ったように聞こえる点から、このような記載となったようである。本論では、「きよとさく」との読みを採用し、英文もこれに合わせて記載した。
- 2) 清戸迫横穴の3次元計測については、これまでに以下の学会や講演で成果を紹介してきた。これらは、その時点での取り組み状況を報告・紹介したものであり、本報告を正式の報告としたい。なお計測成果を活用した、横穴掘削作業手順の解析などは、今後の課題である。計測データは、東北大学総合学術博物館で保管しており、学術目的の利用については公開している。データ容量が膨大となるため、利用にあたっては総合学術博物館に連絡していただきたい。
藤沢敦・鹿納晴尚・吉野高光・小池雄利亜(2017/6/10)「福島県清戸迫横穴の高精細3次元計測—原発事故帰還困難区域所在文化財の保全と活用—」日本文化財科学会第34回大会(東北芸術工科大学)
藤沢敦・鹿納晴尚・吉野高光・小池雄利亜(2017/11/25)「福島県清戸迫横穴の高精細3次元計測」福島県考古学会第59回大会(福島県立博物館)
藤沢敦(2018/10/13)「原発事故帰還困難区域所在の文化財の継承と3D技術の活用」文化財科学会公開講演会—文化遺産と科学「文化財継承と3D技術I」(龍谷大学)
藤沢敦・鹿納晴尚(2021/9/18)「文化財保全のための3次元計測の活用」日本文化財科学会第38回大会特別

セッション—災害による文化財被害と3D計測(岡山理科大学・オンライン併用)

藤沢敦(2022/7/30)「国史跡清戸迫横穴の3次元計測と活用」考古学研究会第57回東京例会(オンライン)

藤沢敦(2023/1/22)「横穴墓・横穴室石室の三次元計測—福島県での計測事例を中心に」令和4年度福島県考古学会第64回大会講演(福島大学)

- 3) 現在は、HEXAGON AB(スウェーデン)社が、AICON SmartScan-HEとして取り扱っている。
- 4) SmartSCAN-HEによる計測の精度やデータの特徴については、SfM法による画像解析との比較を含めて、小池が検討している(小池2019・2022)。
- 5) 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。ここでは、玄門側から奥壁を見た際の方向で、左右を表すこととする。
- 6) Oculus社は、後にFacebookなどを運用するメタ・プラットフォームズ(アメリカ)に買収された。機器の名称もOculus Riftから、Oculus Questへと変わり、現在はMeta Questとなっている。

引用・参考文献

- 梅宮茂1964「清戸迫横穴古墳群」『福島県史6 考古資料』図版846～853、福島県
- 鹿納晴尚・西弘嗣・藤澤敦・佐々木理・高嶋礼詩・根本潤2018「東日本大震災遺構3次元クラウドデータアーカイブ構築公開事業中間報告」『東北大学総合学術博物館紀要』17、139～183頁、東北大学総合学術博物館
- 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
- 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・永原智輝・今西純菜2019「宮城県愛宕山古墳の3次元計測」『東北大学総合学術博物館紀要』18、65～87頁、東北大学総合学術博物館
- 双葉町2017『双葉町東日本大震災記録誌』福島県双葉町宮城県教育委員会1973『山畑装飾横穴古墳群発掘調査概報』宮城県文化財調査報告書第32集
- 山田隆博ほか2022『合戦原遺跡』山元町文化財調査報告書第22集
- 結城慎一1985『宮城県仙台市愛宕山装飾横穴古墳発掘調査報告書』仙台市文化財調査報告書第85集
- 横須賀倫達2017a「双葉郡清戸迫8号横穴出土遺物の研究I」『福島考古』第58号、1～20頁、福島県考古学会
- 横須賀倫達2017b「双葉郡清戸迫8号横穴出土遺物の研究II」

『福島考古』第59号、31～42頁、福島県考古学会
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
渡辺一雄・西徹雄ほか1984『双葉町史・第二巻 原始・古代・中世資料』双葉町
渡辺一雄・馬目順一ほか1971『中田装飾横穴』いわき市史別巻、いわき市