

地下式横穴墓調査の効率化と安全性の確保について ～国富町本庄で発見された地下式横穴墓の調査～

東 憲章・留野優兵
(宮崎県埋蔵文化財センター)

1 はじめに（本稿の目的）

地下式横穴墓は、南九州に特有の古墳時代墓制の一つであり、地表面から垂直方向に2～3mの穴を掘り（竪坑）、その後に横方向の通路（羨道）と遺体を葬る空間（玄室）を掘り抜く構造である。埋葬後は羨道やその入り口（羨門）を石や土塊、板等で塞ぎ、竪坑は掘削土によって埋め戻されるため、玄室は地中に空洞として保たれることとなる。一部地域では、竪坑上部を板石により塞ぐタイプも存在し、その場合は竪坑、羨道、玄室の全てが空洞として残される。

既に存在する高塚古墳の墳丘裾部や周溝内に竪坑をおき、墳丘下部や周溝外側にむけて羨道・玄室を穿つものや、地下式横穴墓を中心的埋葬施設として墳丘を構築するものも認められるものの、一般的には地上に顕著な構造を持たないことから、地表からその存在を把握することは困難である。そのため、地下式横穴墓の発見の多くは天井が陥没することによる不時的なものであったが、近年は、地中探査の利用により事前に存在を把握することも可能となっている。

玄室が陥没する前に発見された地下式横穴墓の調査においては、その構造的特徴から遺構内部に支保工などの安全対策を講ずることが困難であり、遺構の情報を極力損なうことなく記録に残すためには、調査員が地中の空洞に潜り込んで精査や図化を行うこととなる。しかし、この調査方法は、人命にも関わる危険性をはらんでいることが従前より指摘されてきた。

今回、国富町本庄で発見された地下式横穴墓について、地中レーダー探査とフォトグラメトリを活用した調査を実施したので、今後の地下式横穴墓調査の方向性を探る一つの取り組みとして紹介するものである。

2 発見の経緯と概要

令和5年4月、宮崎県東諸県郡国富町大字本庄字北神ノ原の、駐車場として利用されていた私有地において病院建設が計画され、既設のアスファルトの除去と表土の掘削作業中に、玄室天井の一部が陥没したことで地下式横穴墓が発見された（2023-1号墓）。

発見された場所は、国指定史跡本庄古墳群の分布する範囲内で、当該地から東に約60mの位置には、本庄38号墳（剣の塚）が存在する。今回の工事計画範囲内に、古墳の痕跡や他の地下式横穴墓が存在する可能性も予想されたことから、国富町教育委員会の依頼により、宮崎県教育委員会が地中レーダー探査を実施した（令和5年5月）。探査の結果、陥没発見された地下式横穴墓以外に、さらに4～5基が存在する可能性が高いことが判明した。

この結果を受けた国富町教育委員会では、事業者との間で計画を継続するか否かの協議を進めているが、既に玄室天井の一部が陥没して人骨の存在が明らかである2023-1号墓については、国富町教育委員会が主体となり発掘調査を実施することとなった。

3 地中レーダー探査

国富町教育委員会の依頼を受け、宮崎県教育委員会（西都原考古博物館、埋蔵文化財センター）が令和5年5月9日に地中レーダー探査を実施した。使用した機材は、GSSI社パルスレーダーシ

ステム SIR-3000 と 270MHz アンテナ（西都原考古博物館所有）である。解析は、GPR-SLICE（Dean Goodman 氏開発）を使用した。

探査は、駐車場のアスファルト舗装が除去され、一部の表土掘削が行われた範囲について、任意のグリッド（東西 23m、南北 47m）を設定して行った。南北方向（Y 方向）にアンテナを走査し、50 cm ずつ西から東に平行移動した。アンテナの総走査距離は 2085m である（第 1 図）。

探査の結果は第 2 図の通りである。玄室が陥没した 2023-1 号墓以外にも、4 ヶ所で地下式横穴墓に特徴的な双曲線状の強い反射を確認し、更に 1 ヶ所でも近似する反射が認められた。仮にこれらを 2023-2 ～ 6 号とした。

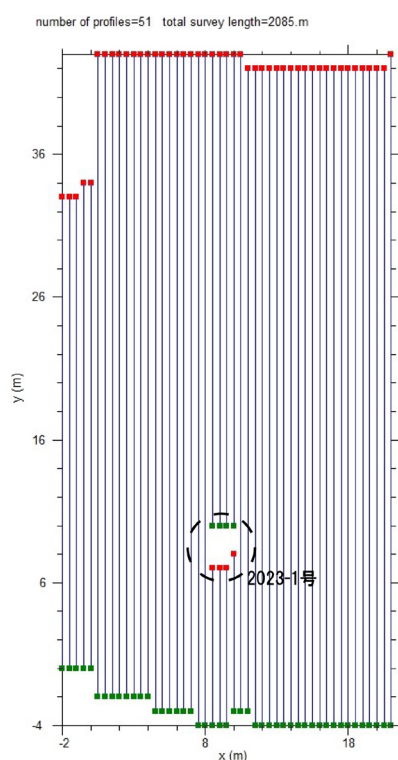
2023-2 号は、仮座標の $X=0.5\text{m}$ 、 $Y=27\text{m}$ を中心とする位置にあり、地表からの深さ 1.4m から反射が認められた（第 3 図①）。

2023-3 号は、仮座標の $X=4\text{m}$ 、 $Y=17\text{m}$ を中心とする位置にあり、地表からの深さ 2m から反射が認められた（第 3 図②）。

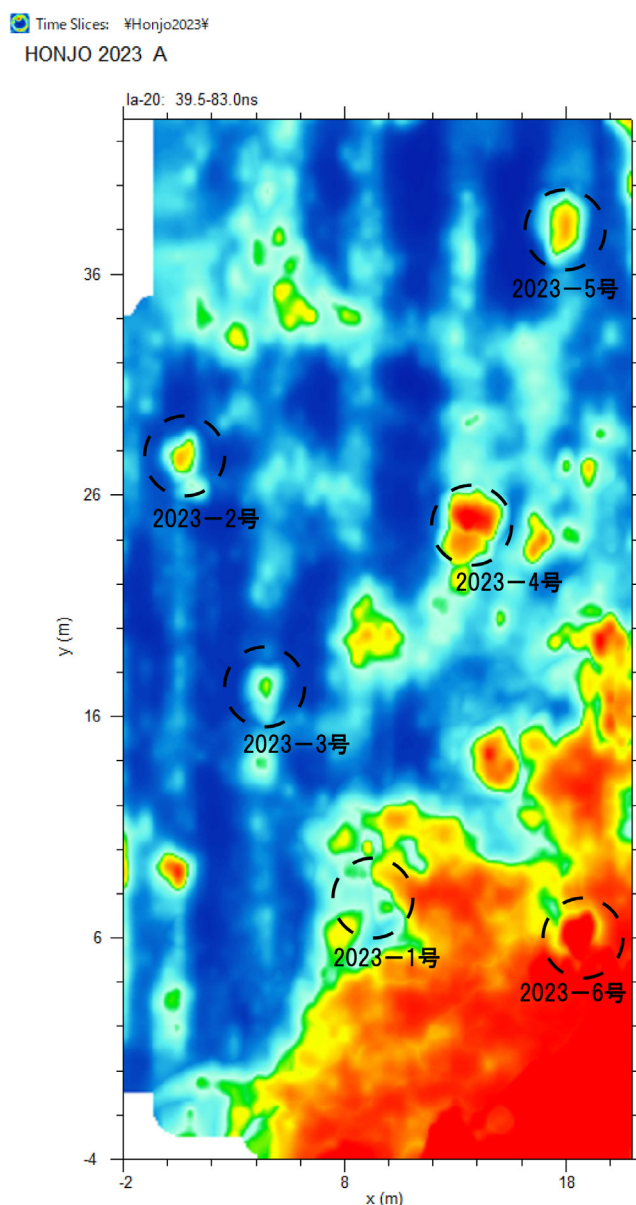
2023-4 号は、仮座標の $X=13\text{m}$ 、 $Y=25\text{m}$ を中心とする位置にあり、地表からの深さ 1.3m から反射が認められた（第 3 図③）。

2023-5 号は、仮座標の $X=18\text{m}$ 、 $Y=38\text{m}$ を中心とする位置にあり、地表からの深さ 2.2m から反射が認められた（第 3 図④）。

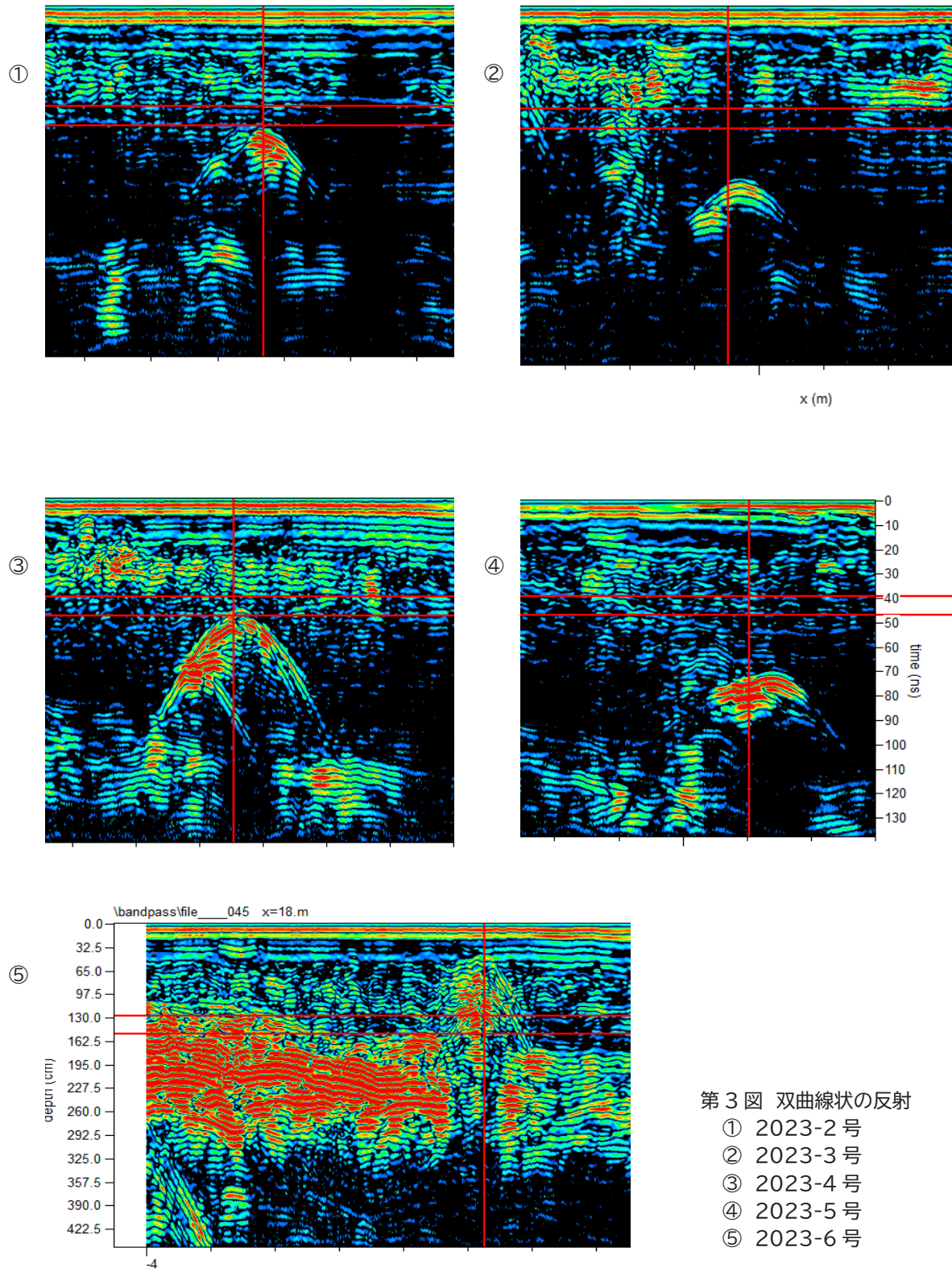
2023-6 号は、仮座標の $X=18\text{m}$ 、 $Y=6\text{m}$ を中心とする位置にあり、地表からの深さ 0.5m から反射が認められた（第 3 図⑤）。



第 1 図 アンテナ走査図



第 2 図 国富町本庄地下式横穴墓群 地中レーダー探査結果



4 発掘調査の工程

2023-1 号の発掘調査は、国富町教育委員会が主体となり実施し、宮崎県埋蔵文化財センターが協力した。玄室天井の一部が陥没していることから、構造的に不安定な遺構内への立ち入りを極力減らしつつ、遺構の構造や情報を出来る限り記録するための方法を検討した結果、発掘調査の工程において、遺構実測図の作成についてはフォトグラメトリの技術を利用して進めることとした。

調査の工程は次の通りである。

- ① 陥没坑周辺の精査を行い、竪坑を検出。竪坑を半裁し、土層断面の記録を行う（実測図、写真）。
- ② 竪坑の完掘と羨道への流入土の除去。
- ③ 3D モデル作成のためのデジタル写真撮影（1 回目）。(6 月 7 日)
～竪坑、羨道、玄室上半部～
- ④ 羨道部と玄室天井の一部を掘削し除去。天井崩落土を除去し玄室床面を精査。
- ⑤ デジタル写真撮影（2 回目）(6 月 21 日)
～玄室下半部、床面、人骨～
- ⑥ 人骨の取り上げ。屍床（礫床）の精査。
竹中正己教授（鹿児島女子短期大学）による人骨の調査（6 月 22 日）
- ⑦ デジタル写真撮影（3 回目）(6 月 27 日)
3 回分のデジタル写真を用いて、3D モデルを生成。
- ⑧ 副葬品の取り上げの後、砂による遺構内部の埋め戻し、調査終了。

5 フォトグラメトリの利用による遺構の記録

(1) 調査の進捗と撮影のタイミング

今回の記録作業では、都合 4 回、現地での作業を行った。日程は 6 月 1、7、21、27 日である。6 月 1 日は現地での打ち合わせ、簡易 LiDAR(iPhone) を用いた予備的な全形の計測を行った。フォトグラメトリのための撮影作業を行ったのは、他の 3 日間である。6 月 7 日は、崩落した天井から玄室へ流れ込んだ土砂の状況を含めた状態で地下式横穴墓を構成する竪坑・羨道・玄室の全形の撮影を行った。6 月 21 日は、玄室内の土砂及び羨道・玄室の天井部を取り除いた状態で、玄室内の人骨の出土状況を記録するための撮影を行った。6 月 27 日は、人骨の取上げと屍床（礫床）の清掃・精査が終わった段階で、屍床と遺物の出土状況を記録するための撮影を行った。

(2) 現地作業の内容と留意点

6 月 7 日（1 回目）の撮影

撮影箇所：地下式横穴墓全形 撮影時間：55 分 撮影枚数：1633 枚 作業人数：撮影者 1 名、補助・待機者 5 名

地下式横穴墓を構成する竪坑・羨道・玄室の全形を撮影した。作業時には、複数の補助・待機者が遺構の周辺に居る状況で、撮影者は羨道部分に上半身を潜り混ませ、頭部と肩にかけて玄室内まで入り込んで撮影を行った。この時、玄室前壁右側に土砂が流入しており、土砂の奥側はカメラを片手で保持する不安定の姿勢で撮影しなければならなかった。また、暗所・閉所での撮影だったため、補助の照明を陥没口から差し入れながら撮影した。

カメラの設定は、絞り値 5.6、ISO 感度 800 ～ 1600、シャッタースピード 1/10 ～ 1/25 の間で調整した。

本来、ISO 感度はノイズを抑えるために、より低い数値で撮影することが望ましいが、暗所・閉所の玄室内の撮影においてシャッタースピードの長さに起因する手ブレを防止するため、やむを得ず高めに設定した。また、被写界深度を確保するためには、絞りも F8 ～ 11 を目安に絞った方が望ましいが、これもシャッタースピードとの兼ね合いで F5.6 を基準とした。

撮影枚数は多いが、不安定な姿勢・長いシャッタースピードのため、手ブレした写真も多数含まれている。過剰とも思える枚数ではあるが、撮り逃しの防止と画像間の重複率の確保のためにやむを得ないものであった。

6 月 21 日（2 回目）の撮影

撮影箇所：地下式横穴墓玄室床面 撮影時間：40 分 撮影枚数：581 枚 作業人数：撮影者 1 名、補助・待機者 3 名

羨道及び玄室の天井部を除去した状態で、主に玄室床面の人骨の出土状況を撮影した。撮影者はカメラを手に持って内部に入って撮影を行った。既に天井部が除去されていたことから自然光で撮影したが、必要に応じてカメラに装着したストロボを発光させた。カメラの設定は絞り値 8、ISO 感度 200、シャッタースピード 1/250 を目安とし、人骨と見えていた遺物の詳細な記録のため接写の画像も意識的に撮影した。

6 月 27 日（3 回目）の撮影

撮影箇所：地下式横穴墓玄室床面 撮影時間：40 分 撮影枚数：735 枚 作業人数：撮影者 1 名、補助・待機者 3 名

玄室床面の屍床（礫床）と遺物の出土状況を記録した。撮影環境、カメラの設定は 2 回目とほぼ同様であった。遺物は玄室内での出土位置だけではなく、検出時の傾きや玉類の孔の向きが 3D モデル上でも分かるようにするため、接写の画像を意識的に撮っている。また、礫の間に落ち込んだ管玉は、ストロボを発光させて撮影を行った。

（3）外部作業での共通事項

今回の記録作業では、3 回の撮影の全てで写真が接合するかどうかの確認を現地で行った。この時 Metashape のアライメント精度の設定は、低または最低、画像データは jpg 形式を用いて、確認の為に処理時間の短縮を図った。撮影地付近に座標点が無く、トータルステーションなどの準備もなかったため、L 字形のスケール（30cm）を基準として 3D モデル内に取り込んだ。位置合わせや、今回のように遺構の全形を復元するために 3D モデルの合成を前提とする場合は、遺構外に複数の座標点を設けて管理することが望ましい。

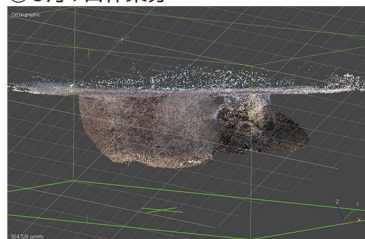
（4）室内作業の内容と留意点

Metashape での 3D モデルの生成は、写真のアライメント→深度マップ・高密度クラウドの生成→メッシュの生成→テクスチャの生成と進行していく。今回の記録作業では、現地から戻った翌日に室内作業を行った。

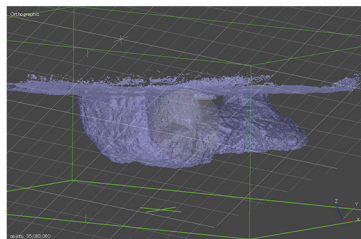
地下式横穴墓の全形を記録したのは 1 回目のみで、2・3 回目の撮影では玄室床面中心に竪坑と羨道の壁面から構成した。2 回目と 3 回目のモデルの玄室床面を、1 回目の全形の 3D モデルに合成して遺構全体の 3D モデルとした。合成には Cloud Compare を使用した。今回は、各撮影日での変化がなかった竪坑部分の特徴点を基準として位置合わせをし、合成を行った。

今回の成果物は、①検出状況の 3D モデル、②人骨出土状況の 3D モデル、③遺物出土状況の

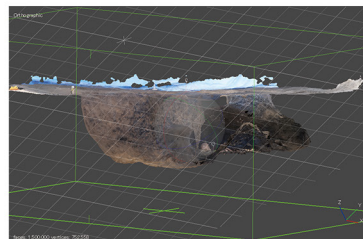
①6月7日作業分



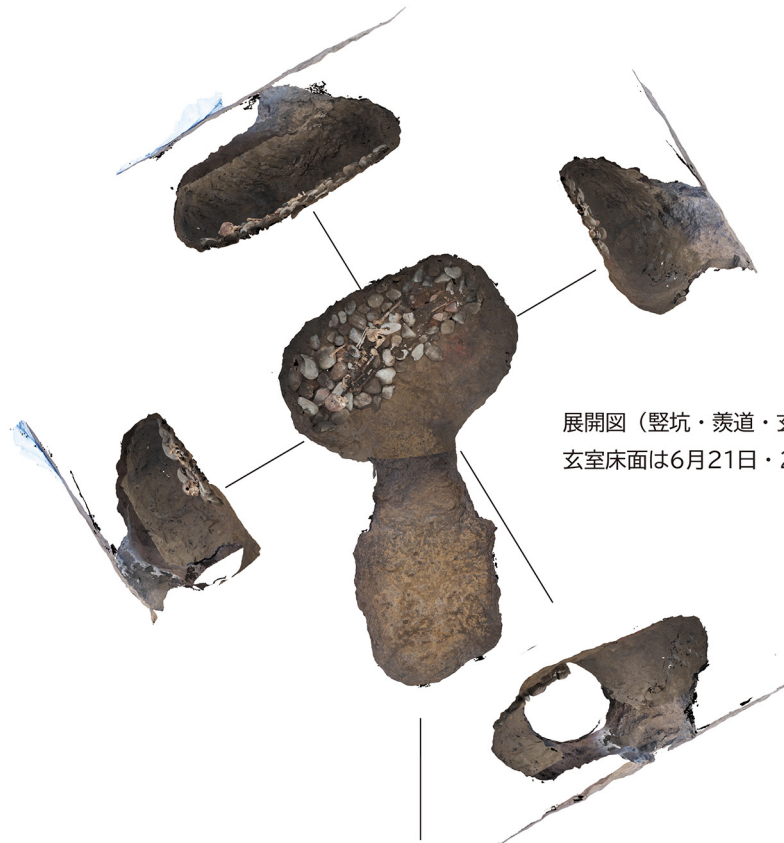
タイポイント



高密度クラウド

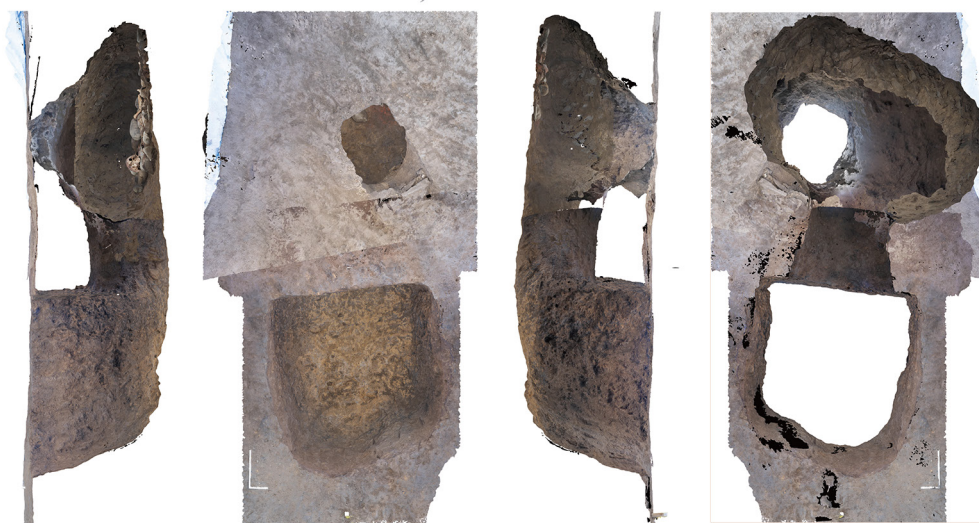


完成



展開図（竪坑・羨道・玄室天井部分は6月7日撮影分、
玄室床面は6月21日・27日撮影分をそれぞれ合成）

0 2.0m



第4図 作業工程と展開図



人骨出土状況



遺物出土状況

第 5 図 部分図

3D モデルとなる。全てのモデルは自由視点で観察可能で、②と③のモデルを重ね合わせることで、土砂の流入で記録の難しかった人骨と遺物の位置関係を把握できる。また、玉類の出土位置や孔の方向を調査後も確認可能であることから、調査完了後の再検討も可能である。

6 おわりに

本稿では、国富町本庄で発見された地下式横穴墓に関して、調査の効率化・迅速化と安全性の観点から、フォトグラメトリの利用による 3D モデルの作成を組み合わせた調査について報告した。現時点では、3D モデルの作成までの段階であるが、次年度以降に予定されている発掘調査報告書に向けて、従来の遺構実測図としての線画を作成する必要がある。

従来の調査では、遺構実測図の作成において遺構内部での作業に数日を要したのに対し、今回の方法では 3D モデルを作成するためのデジタル写真撮影は極めて短時間で終了できた。しかし、3D モデルをベースに実測図としての線画を作成するためのデジタルトレースには時間と経験が必要となる。また、その作業の時点で遺構そのものが残されていない場合、直接目視による補正ができないという弱点が指摘される。

今回は、玄室天井の一部が陥没した状態からの調査であったが、天井部や玄室上半部の撮影においては、短時間とはいえ玄室内部に体を差し入れての作業が必要であった。ポールなどを利用して全く立ち入らずに撮影する方法も考えられるが、精度の高い 3D モデルの生成に必要な質とアングルを確保した写真撮影を行うためには、経験と工夫が必要であろう。今後の課題である。

幸いなことに、これまでに宮崎県内の地下式横穴墓の調査において、陥没等による調査中の人身事故が発生したという話は耳にしていない。しかし、発掘調査における安全衛生の確保は避けることのできない大きなポイントであり、埋蔵文化財の保護、高精度の記録作成との両立について、更なる検討を続けなければならない。特に、南九州の古墳時代を考える上で非常に重要な意味を持つ地下式横穴墓が分布する地域においては、安全かつ精度の高い調査方法の模索は最重要課題である。

本稿の執筆は、1～4、6 を東が、5 を留野が担当した。なお、本稿の作成と公表は、国富町教育委員会の許可を得た。



写真 1 地下式横穴墓の発見の状況



写真 2 陥没坑から覗く玄室内部



写真 3 地中レーダー探査の実施状況



写真 4 豎坑の完掘状況



写真 5 デジタル写真撮影(1回目)



写真 6 羨道・玄室の天井部を除去した状況



写真 7 天井を除去した後の玄室



写真 8 デジタル写真撮影(2回目)



写真 9 崩落土を除去した玄室内部の状況



写真 10 人骨調査の状況



写真 11 副葬品の出土状況



写真 12 人骨取り上げ後の玄室内部（屍床と副葬品、赤色顔料の状況）