

モバイルスキャンによる迅速な遺構計測と埋蔵文化財調査への効果 —東京都小金井市平代坂横穴墓の事例—

野口 淳（金沢大学）・中島 将太（NPO 法人井草文化財研究所）・高木 翼郎（小金井市教育委員会）

Improving the Effectiveness of Mobile Scan Applying to Quick Field Measurements of
Archaeological Features and Structural Remains in Excavation Work for Preventive
Archaeology: A Case Study of the Heidai-zaka Yokoanabo (tunnel tomb) in Koganei City, Japan
Noguchi Atsushi (Kanazawa University), Nakajima Shota (Igusa Cultural Property Institute)
and Takagi Yokuro (Koganei City Board of Education)

・モバイルスキャン／Mobile scan・遺構計測／Archaeological field measurements
・横穴墓／Yokoanabo (tunnel tomb)・迅速性／Quickness・事前調査／Preventive archaeology

1. 概要

多くの場合、開発行為に伴い現地保存が困難な遺跡・遺構を記録として保存することを目的とする埋蔵文化財の発掘調査では、調査完了後に失われる状況・状態の計測と記録は最も重要な任務である。一方で、調査期間や人員には限りがあるので、必要な品質や内容を保ちつつ効率よく記録を残すことが要請される。

新しい計測手段として注目される、LiDAR センサーを搭載したモバイル端末¹⁾は、小型で取り回しやすく、専用の計測機器に比べると精度、解像度の点で見劣りするものの廉価である。これを埋蔵文化財の発掘調査における計測、記録に用いることができれば、作業の大幅な効率化が期待される。本稿では、宅地造成に先立ち発掘調査が行なわれた小金井市平代坂遺跡で、未盗掘の横穴墓の検出から完掘までの過程におけるモバイル端末を用いた LiDAR スキャン（以下モバイルスキャン²⁾）の導入、活用事例を紹介するものである。試行段階ではあるが、計測・記録の効率化による調査期間の短縮に一定の成果を挙げたと考えられるため、さらなる検討と議論の素材とするべく共有するものである。

なお本稿は、1、4 (1)、(3)、5 (2) を野口、2 を高木、3、4 (2)、5 (1) を中島が分担執筆した上で、3 人の議論にもとづき全体を野口がまとめたものである。（野口）

2. 平代坂遺跡の概要と今回調査の経緯

平代坂遺跡は東京都のほぼ中央部に位置する小金井市内に所在する。市内は、古多摩川の浸食で形成された崖の連なり（国分寺崖線）によって北と南で地形が大きく変わる。現在、国分寺崖線に沿うように古多摩川の名残である野川が東流する。

本遺跡は国分寺崖線のノッチを直角に切通した平代坂の両側に東西約 300m、南北約 150m に広がっている。本遺跡は 1970 年代以降、平代坂以西の範囲で旧石器時代・縄文時代・古墳時代（横穴墓）・中世の遺構・遺物が発見されてきた（小金井市史編さん委員会編 2019）。

1970 年に国分寺崖線の斜面上における下水道工事中に横穴墓（前原横穴墓）が発見、緊急調査されている。しかしながら、これ以降、市域内では国分寺崖線の斜面における調査が行なわれなかったこともあり新たな横穴墓が検出されることはなかった。

今回、当該遺跡内における開発工事に伴って事前の発掘調査が 2022 年 2 月から 7 月にかけて行なわれることとなった。今回調査地点である（仮称）前原町 3-32 分譲住宅地区は、平代坂より東側のこれまで調査実績のない未調査範囲であり、初の調査となる³⁾。

本地区は、南北に長い敷地を有しており、国分寺崖線を跨ぐ形で武蔵野面（高位面）から立川面（低位面）にかけて広がる。比高は約 15m を測る（図 1）。

[illegible]

3. 調査の経過と成果

6/7～6/15 前庭部掘削→南北セクション記録
6/15～6/17 ベルト掘削→前庭部個体土器検出→前
庭部完掘・3D
6/18～6/21 閉塞石検出・記録・3D→閉塞石全除去
6/22～6/24 羨道部閉塞石検出・記録・3D
6/29 玄室内の現状3D記録（写真1）
6/30～7/7 玄室天井除去

このうち、モバイルスキャンでは、前庭部、閉塞石、羨道、玄室でそれぞれ記録を行なった。前庭部から羨道にかけて積まれている閉塞石は、追葬による石の積み直しの可能性を考慮して、十数回にわたり記録した。玄室は、閉塞石除去直後の現況を記録し、屋根除去後に人骨検出状況、礫床検出状況、掘方検出状況についてそれぞれ記録を行なった。



A photograph showing a rectangular pit lined with smooth, rounded stones. Inside the pit, several human bones are visible, including a long, light-colored femur (thigh bone) and a smaller, darker bone, possibly a humerus or radius. The bones are arranged in a way that suggests they are part of a skeleton. The pit is dug into the earth, and the surrounding soil is a light brown color.

34 デジタル技術による文化財情報の記録と利活用5

遺構は黒ボク土中で検出され、はじめに前庭部の調査を開始した。前庭部となる範囲はプランも大きく、黒ボク土が厚く埋積していることが予想されたため、「キ」の字状に掘削して土層断面の記録を行なった。その際に閉塞石を検出し、横穴墓である可能性が高いことが示唆された。前庭部の土層断面の記録を終え、ベルトの掘削を行なうと、ベルト内よりほぼ完形品である須恵器の甕が出土した。

閉塞石の記録・除去後は、羨道の確認、さらに玄室の確認を行なった。玄室は、天井の一部が自然に崩落していた以外はほぼ旧状を保っており、礫床の上に2体分の人骨が残されていた。なお玄室内に副葬品は無かった。

なお本稿執筆時点では整理作業の途上であり、発掘調査成果の詳細については今後刊行される報告書において公表する予定である。(中島)

4. モバイルスキャンによる計測記録

(1) 使用機材・アプリ

今回の調査記録については、その大部分を、Apple社製 iPad pro 10.2 インチ 第4世代と Scaniverse⁴⁾により実施した。モバイルスキャンの導入検討および精度検証には、Apple社製 iPhone 13pro と Scaniverse、および Metascan⁵⁾も使用した。(野口)

(2) 遺構検出状況の計測記録

前庭部の完掘～閉塞石検出の段階で、試験的に

iPhoneによる3D記録を実施した(図2)。これによりモバイルスキャンの有効性を確認し、調査の効率化を求めて実際の調査記録に導入することとした。そこで早急にiPad proを用意し、閉塞石の検出からモバイルスキャンの記録を行なうこととした。結果として、従来は写真と光波測量機を併用した写真実測で記録を行なう予定であったところ、モバイルスキャンにより記録時間の短縮が顕著となった。

自然石が積み上げられた閉塞石は、1面だけの平面・立面記録とせずに、石を取り外すごとに3D記録を行ない、追葬による積み直しの可能性も視野に入れた記録を行なうことができた。羨門手前の閉塞石については3日間で10面、羨道内の閉塞石については半截しながら3日間で11面の平面・立面記録がそれぞれ得られた。

閉塞石除去後におけるモバイルスキャンの利用は、玄室に近い羨道部分から玄室全体の形状を記録することを目的とした。羨道の形状は約60cm四方と狭く、玄室内も約2m四方の狭さに加え、2体の人骨が埋葬されていることもあり、人が中に入って記録することが困難であった。こうした困難な記録作業をスムーズに行えたことも利点といえる。モバイルスキャンによる羨道から玄室内の現状記録は、半日と経っていない。一方で、狭く暗い玄室内の記録において、機器を玄室内に入れるためのポールや、明るくするためのライトなど、記録を行える環境を作るための器材が必要となる。



図2 前庭部検出状況の3D計測 (iPhone13 pro+Scaniverse)



図3 平代坂横穴墓玄室内検出状況：カラーテクスチャ表示 (Scaniverseにより計測、DETAILモードで処理)

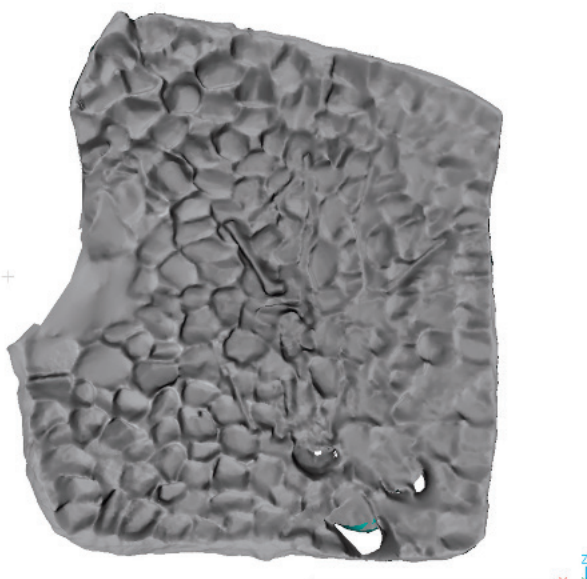


図4 平代坂横穴墓玄室内検出状況：メッシュ表示 (図3と同一データ)

天井除去にあたっては、人骨に影響しないよう単管パイプおよび土留め板で養生し、天井となるロームを掘削した。天井の土量が多いこともあり、天井の除去に約一週間かかった。天井除去後、玄室内の記録は光波測量機および写真を用いた微細記録を行ないつつ、モバイルスキャンおよび3D写真計測 (Metashapeを使用) による3D記録も併用した。3D記録にあたっては、①人骨検出時、②磔床検出時、③掘方検出時の3段階でそれぞれ行なった。人骨検

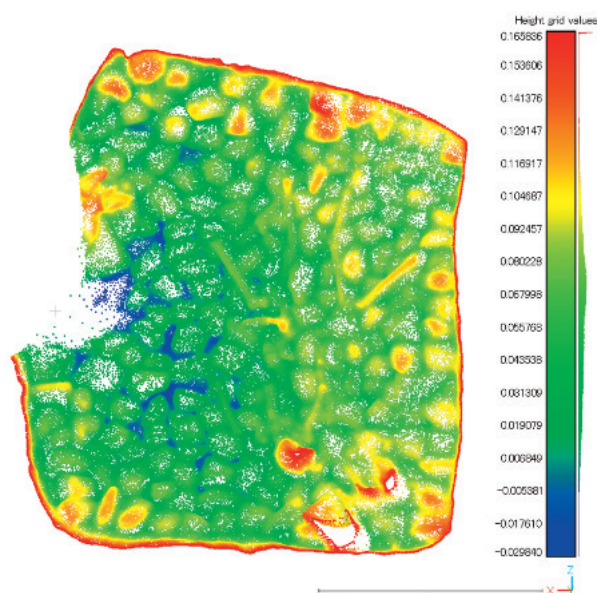


図5 平代坂横穴墓玄室内検出状況：点群表示 (標高段彩、図3と同一データ)

出作業から完掘記録まで、7月7日から7月12日の実質5日間 (日曜日除く) で行うことができた。

このほか、閉塞石として利用されていた円礫についても、除去後、1個体ずつをiPad proとScaniverseにより計測している。(中島)

(3) 計測結果と評価

開放状態の前庭部ではモバイルスキャンによる計測記録は容易に行なうことができた。しかし羨道～玄室にかけての計測記録にはいくつかの困難があった。

モバイルスキャンは、計測時に機器がつねに移動しているため、自己位置推定を行なう必要がある。iPhone/iPadのモバイルスキャンの基礎技術であるARKit⁶⁾は、カメラ画像とモーションセンサー情報を利用するVIO (Visual-Inertial Odometry) によって自己位置推定と環境マッピング (SLAM) を行なっている⁷⁾。このため暗所では、カメラ画像から基準となる床面 (平面) の検出をすることが困難になり、スキャンが開始しなかったり、位置合わせが破綻しやすくなる。

実際にiPhone単体でのスキャンでは、天井除去前の玄室内について十分な記録を取ることができなかった。そこで、ビデオ撮影用の両手保持型のリグ

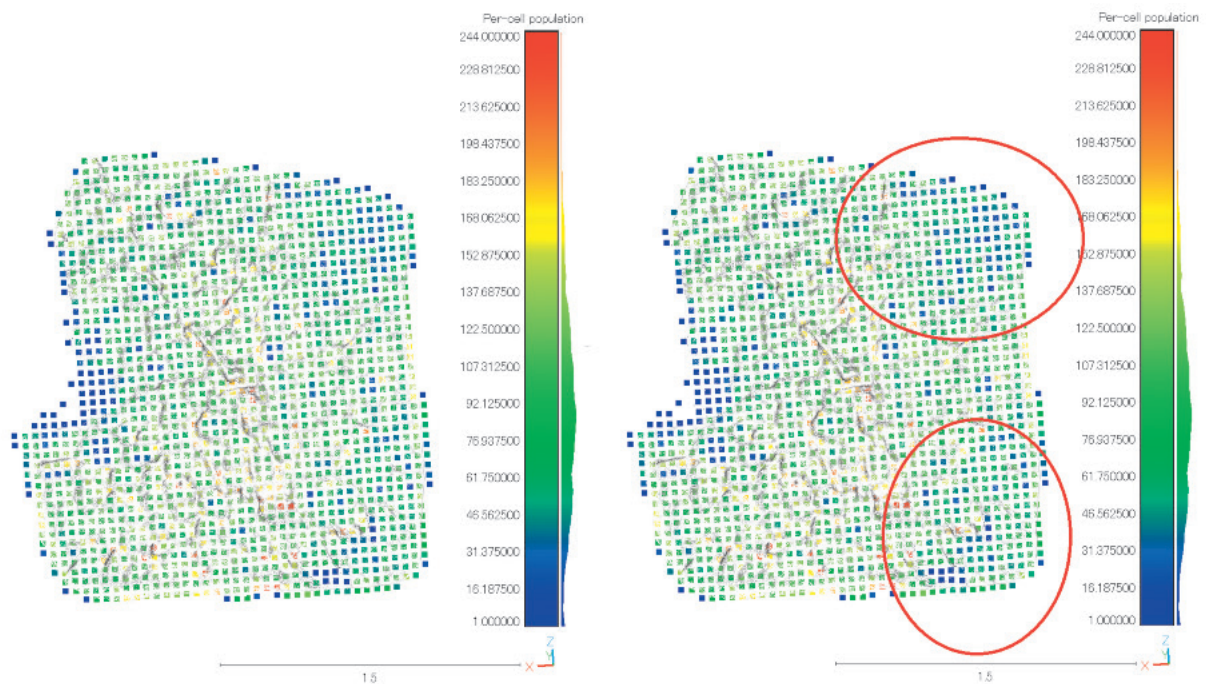


図6 5cmグリッド単位の点群密度 (CloudCompareにより作成)

に大型のリングライト⁸⁾を装着、バッテリーにより点灯することで必要な照度を確保し、スキャンすることができた。

もう一つの課題はスキャン角度による精度の低下である。モバイル端末に搭載されているLiDARの照射部はきわめて小さい。そこから対象に向けて赤外線のパターンが投射されるのだが、対象に正対した時、すなわちスキャン角度が0度の時にもっとも精度が高くなる一方で、スキャン角度が大きくなると精度が低下する。

天井除去前の玄室の計測では、大人1人が横臥した状態で辛うじて前進または後退ができる大きさの羨道から、モバイル端末を玄室内に突っ込み、床面～壁の低い部分を腹ばい状態で、さらに壁の高い部分～天井については体を回転させて仰臥状態でスキャンを行なった。ただし第一段階では羨道を原状のまま床面を保護するために土嚢を敷いた状態で玄室内の記録を試みたが作業空間が狭すぎ著しく困難だったため、羨道部の計測記録を行なった後に、入り口部側を一部開削した状態で再度玄室内の計測を実施した(写真1参照)。それでも、玄室の奥側については推奨されるスキャン角度30度以内⁹⁾を保つ

ことは困難であった。

図3～5には、上述の状態でスキャンした玄室床面の計測結果を示した。iPhone/ iPadによるモバイルスキャンでは、内蔵カメラの性能が高いこともあり、高精細なカラーテクスチャ情報が取得される。このため礫床と人骨がかなり鮮明に記録された。比較のために、天井部の除去後に撮影した検出状況を写真3として示しておく。検出時点で同等の記録を行なえることが確認できたことは、調査手順・工程を検討する上で大きな意義がある。

しかし点群・メッシュ表示に切り替えると奥壁側の情報が手前側より疎であることが一目瞭然となる。この点について確認するために、図6に5cmグリッド単位の点群密度を図化した。緑色のドットはスキャン範囲内で平均的な点群密度(5×5cmあたり50～120点程度を示し、黄色～赤色はそれよりも高密度、濃緑色～青色は低密度な範囲を示す。奥壁側左右で特に点群が疎である状況(図6右赤丸内の範囲)が見て取れる。

この問題については、結果的に天井除去後の追加計測により補うことができた。今後、十分な照明を確保しつつ、機材を手持ちする状態では適切な角度

を保ち難い範囲を精確にスキャンするための延長ロッドなどを検討する必要がある。

一方で、前庭部や閉塞石、天井除去後の玄室内部など、十分に明るく、かつ作業スペースを確保できる場面では、そうした問題は生じない。工程、対象とあわせて、作業条件と環境も予め考慮することで、効率よく、かつ十分な精度を保った計測記録を行なうことができると考える。(野口)

5. モバイルスキャン計測の効果と可能性

(1) 調査工程の観点から

モバイルスキャンを用いた効果としては、作業時間の短縮化が挙げられる。3Dによる記録は、精度と効率化のバランスに優れており、短い時間で効果的な記録を可能とした。

実質、3D記録を行う時間は、記録範囲が1m四方未満の場合においてスキャンから合成完了まで、おおむね5分程度である。こうして記録時間を削減することで、より詳細な観察と記録を行なう時間を作出することが可能となった。また、記録作業自体が

容易であるため、調査経験の少ない調査者であっても記録を行うことができる点は、発掘調査全体で見れば作業の効率化が顕著であった。

また、閉塞石除去後の玄室の調査を始めるにあたっては、屋根崩落の危険性があることから、安全性を確保するために事前に天井を除去する必要がある。一方で、それにより玄室の形態が記録できなくなる弊害もはらんでいたが、天井除去以前にモバイルスキャンを用いて玄室内の記録を行うことで、記録と安全性の両立が可能となった。埋蔵文化財の記録と安全性の確保は、ともに調査を行う上で必要不可欠な事項であるが、実際の発掘調査においては時として安全性を確保する代わりに記録を諦めざるを得ないことも生じており、モバイルスキャンによって両立することができた点は大きな成果であったといえる。(中島)

(2) 記録の公開・利活用の観点から

前節(2)のとおり、モバイルスキャンの導入により、これまでより多くの機会・回数、遺構の計測記



図7 前庭部・羨道・玄室 3D計測結果の合成表示 (iPhone 13pro+Scaniverse)

録を行なうことができた。これらは全て、計測時点から一貫してデジタルデータ（ボーンデジタル）である。異なるタイミングで記録されたデータは、基準点、あるいは点群自身による位置合わせによって連結、一体的に可視化することができる。

図7には、前庭部、羨道、玄室とそれぞれ別個に計測記録した結果を統合して示した。羨道と玄室については、内部から計測したものの「裏側」が見えていることになる点に注意が必要である。そして図7（下）には、統合結果を東西に分割した片側を示した。

実際の発掘調査では、羨道～玄室の天井を残して断ち割り半裁をするのではなく、天井部の除去を選択したため、図示したような半裁状況をリアルに記録することはできなかった。しかしひとたびデジタルデータとして記録されると、任意の箇所でも半裁分割したり、連結または分離することも容易にできる。また面的な記録のため、現地において実際に計測した箇所以外でも任意のラインで断面図を作成することもできる。

詳細の図示は報告書で行なわれる予定なので、ここではその可能性だけを提起しておく。従来の記録方法より短時間で、しかし十分な計測記録を行なうことができ、かつ一回のスキャン結果から多様な図化・可視化ができる点が、この手法の最大の利点である。今後さらに、具体的な活用事例を重ねて、より有効な利用方法を提示していきたい。（野口）

【註】

- 1) スマートフォン、タブレット等、容易に携帯可能な小型端末
- 2) モバイルスキャンについてはモバイルスキャン協会の

マニュアル等を参照：

モバイルスキャン協会 <https://mobilescan.jp/>
(2022/10/30閲覧)

モバイルスキャン協会 (2023)「モバイル端末によるデジタルアーカイブ手法と利活用」(本報告)

- 3) 小金井市「平代坂遺跡の遺跡見学会を開催しました」
<https://www.city.koganei.lg.jp/smph/kankobunka/bunkazai/oshirase/heidazakaisekihokoku.html>
小金井市教育委員会生涯学習課編 2022『平代坂遺跡 遺跡見学会資料』 <https://www.city.koganei.lg.jp/kankobunka/bunkazai/oshirase/heidazakaisekihokoku.files/heidazakashiryō.pdf> (いずれも 2022/10/30閲覧)
- 4) Scaniverse <https://apps.apple.com/jp/app/scaniverse-3d-scanner/id1541433223> (2022/10/30閲覧)
- 5) Metascan <https://apps.apple.com/jp/app/metascan-3d-scanner/id1472387724> (2022/10/30閲覧)
- 6) Apple「ARKit」<https://developer.apple.com/jp/documentation/arkit/> (2022/10/30閲覧)
- 7) @kboy「ARKitはどうやって自己位置推定と環境マッピングを行なっているのか」<https://qiita.com/kboy/items/1de8e9ed1260834d02af> (2022/10/30閲覧)
- 8) 今回は F&V R300SE を利用。距離 1m 以内で 2205 ルクスの照度が得られる (カタログ値) <https://www.fvlight.com/r300-r300s-se> (2022/10/30閲覧)
- 9) 註2に同じ

【引用文献】

小金井市史編さん委員会編 2019『小金井市史 資料編 考古・中世』小金井市教育委員会 <http://id.ndl.go.jp/bib/029744841>