

第3部

横穴墓の非破壊調査研究

はじめに

第3部では、東京都大田区で実施した2遺跡3基の横穴墓のGPR探査（レーダー探査）、STMおよび三次元計測の成果を報告する。対象とする遺跡は、2013年度に本発掘調査を実施した新井宿横穴墓群、および2015年度に本発掘調査を実施した山王横穴墓群である。調査は大田区教育委員会が主体となり、開発行為に伴う事前の発掘調査として実施した。

両遺跡については2017年10月現在、大田区教育委員会が整理作業を進めており、2018年度末に『大田区の埋蔵文化財』シリーズの第24集として刊行する予定である。したがって、発掘調査の概要、出土人骨の分析、遺構の年代的位置付けや歴史的評価など、一連の成果はそちらで総括するものとし、ここでは、デジタル技術を用いた遺構計測における複数手法の選択とその結果について、早稲田大学文学部考古学コースが調査協力した内容に限定して、報告を行う。

第1章 大田区の地理的特徴と横穴墓の様相

1-1 大田区の地理的環境

東京都の南部に位置する大田区は、北は品川区・目黒区、北西は世田谷区、西から南にかけては多摩川を介して神奈川県川崎市と接し、東は東京湾に面している。地形的には、区域の北側は多摩川左岸に発達した武藏野台地の南東端、南側は沖積低地、東側は幕末に始まる東京湾の埋立地に大別される（図1）。

大田区の地形で特徴的なのは、多摩川支流の春川など、中小河川によって開析された小支谷が複雑に入り組み、樹枝状に張り出した狭小な舌状台地が発達している点である。台地上を中心に、旧石器時代から近世に至るまで、23区内でも2番目に多い236箇所の周知の埋蔵文化財包蔵地（遺跡）が登録されている。

1-2 大田区内における横穴墓の様相

大田区内の横穴墓は、これまでに58箇所が発見・調査されており、全遺跡の約25%を占めている（大田区教育委員会編2017）。そのほとんどが、古墳時代の終わりから奈良時代にかけて、多摩川の段丘崖をはじめ、台地の縁辺部や開析谷の斜面などに開東ローム層をトンネル状に掘削して構築されているが、単独で存在することは珍しく、群集する傾向を示す。

区内の古墳が、田園調布や鶴の木など、多摩川をの

ぞむ狭小な舌状台地上に集中して築造されているのに対して、横穴墓は斜面地に広範にわたって分布している。区内に展開する横穴墓は、かつて菊池義次によって地域的な分布状況のあり方から、10群に分類されている（菊池1974）が、今回の報告で取り上げる新井宿横穴墓群・山王横穴墓群は、「山王・新井宿群」とした範囲に含まれており、2003年の時点で46基（野本2003）の存在が知られるなど、密集地帯として知られている。

分布の特徴として、山王地区をはじめ、西馬込・南馬込・上池台・仲池上一带に展開する塙越横穴墓群（大田区遺跡番号64）のように、前代に古墳の存在が確認できない地域でも盛んに築造される点が挙げられる。なかには塙越14号横穴墓のように、金銅装頭椎大刀・同円頭大刀や馬具など、古墳と遜色ない副葬品を有する横穴墓も存在し（松崎・深澤ほか1994）、被葬者の位置付けが問題となっている。しかし、大田区内では、古墳時代以降の集落跡の調査事例は極めて少なく、母胎となる集団の居住域はほとんど判明していないのが現状である。

古墳から横穴墓へと墓制が変化する過程において、横穴式石室との形態的特徴の類似性や構築技術の比較、造営集団の系譜の検討、また追葬に伴う被葬者の血縁関係と家族構成の追究など、今後の研究において解明されるべき課題は多い。

1-3 横穴墓の各部位名称（図2）

大田区内における横穴墓は、古墳時代後期半にあたる6世紀末から7世紀初頭にかけて築造が開始され、おおむね8世紀前半に至るまでの期間、爆発的に盛行する。横穴墓は家族墓的な性格が強い追葬可能な埋葬施設とされ、基本的な構造は横穴式石室とほぼ同じである。なかには、玄室の形態や棺座の存在から、明らかに横穴式石室の影響を受けるか、その系譜に連なると考えられるものも存在する。

しかし、大田区で発見される横穴墓の多くは、全体的に構築技術の簡略化が進んでおり、今回の報告対象とした3基の横穴墓についても同様である。実際には、玄室と羨道に明確な境界をもたない構造の横穴墓が多いことから、本報告における遺構の説明では、松崎元樹・深澤靖幸が示した基準（松崎・深澤ほか1994）に照らして、図2に提示した各部位名称を用いることにする。また、横穴墓における左右の呼称は、奥壁から漢門に向かっての左右とする。

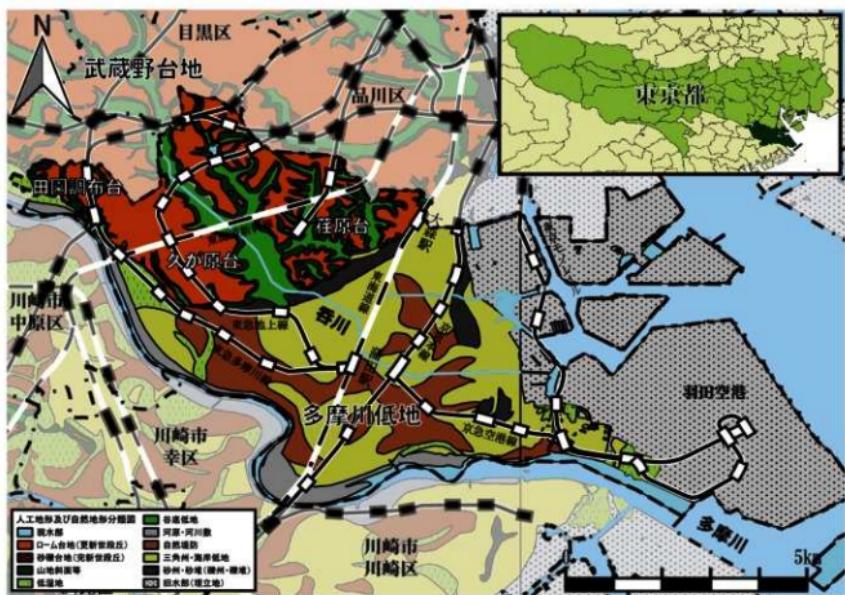


図1 大田区の地理的特徴

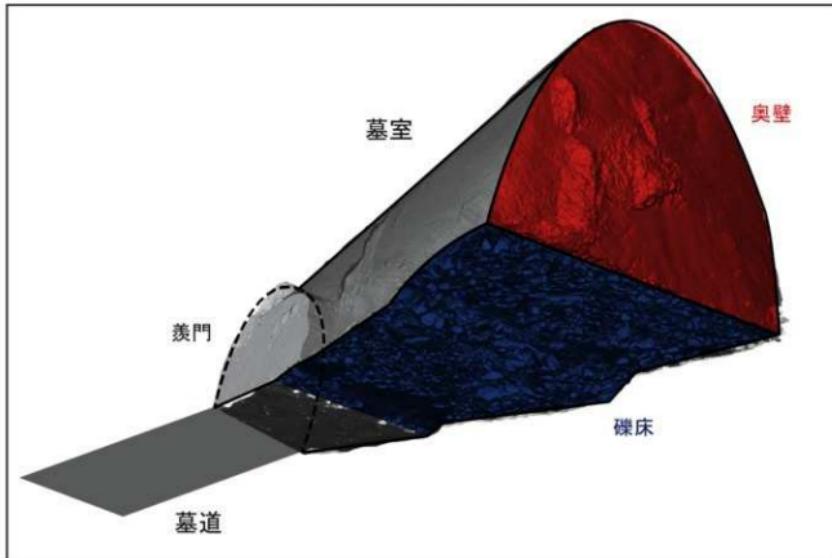


図2 横穴墓の各部位名称

第2章 対象遺跡の概要と調査の体制

2-1 新井宿横穴墓群（図3）

新井宿横穴墓群は、大田区山王四丁目1～3・6・7・21・23・25・26・29～31番にかけて所在する。JR大森駅の西南西約500m地点を頂部とし、西向きの馬蹄形を呈する谷部の南側斜面に沿って展開している。場所の特定が難しいものもあるが、古くは明治時代（[和田1905](#)）をはじめ、1960～70年代にかけては、菊池義次を中心として複数基の調査が行われている（[菊池1974](#)、[松崎・深澤ほか1994](#)）。

今回調査対象となった山王四丁目1番地点は、谷津が南側へ回り込む最奥部近くに位置しており、標高は約18mである。敷地内から横穴墓1基が検出された。西側隣接地において、1984年に4基の横穴墓が発見・調査されている（[野本・深澤ほか1986](#)）ほか、本調査地点の西北西約100m地点（山王四丁目2番地点）でも、1990年および1992年に計4基の横穴墓が発見され、うち3基の発掘調査が行われている（[野本2003](#)）。

2-2 山王横穴墓群（図3）

山王横穴墓群は、大田区山王一丁目26～28・30番にかけて所在する。JR大森駅の北西約500m、南向きに円弧を描く台地斜面に展開する。こちらも1960～70年代にかけて複数基の横穴墓の調査が行われている（[加藤1978](#)、[松崎・深澤ほか1994](#)）が、直近では、遺跡の東端にあたる区立山王小学校内（山王一丁目26番地点）で、2000年に横穴墓1基が発見・調査され、人骨のほか、須恵器・土師器が出土している（[小林2003](#)）。

今回調査地点となった山王一丁目30番地点は、横穴墓群のほぼ中央に位置し、標高は約18mである。敷地内の中央および西端から、横穴墓2基が検出されている。

いずれの横穴墓群も埋葬人骨以外の出土品に乏しく、形成過程や構築時期に不明な点が多いものの、形態的特徴などから、7世紀代を中心としておおむね8世紀前半までの年代が考えられている（[松崎・深澤ほか1994](#)）。

2-3 調査の体制

早稲田大学文学部考古学コースによる調査内容と実施日、および参加者を以下に記す（参加者の所属は調

査当時）。

新井宿横穴墓群（大田区遺跡番号125）

【所在地】東京都大田区山王四丁目1番。

【調査内容および実施日】1号墓のSFM（2014年2月10日）。

【参加者】ナワビ矢麻（早稲田大学大学院修士課程）。

山王横穴墓群（大田区遺跡番号132）

【所在地】東京都大田区山王一丁目30番。

【調査内容および実施日】GPR探査（2015年10月3日）、1号墓のSFMおよび三次元計測（2015年10月18日）、2号墓のSFMおよび三次元計測（2016年1月10・11日）。

【指導】

城倉正祥（早稲田大学准教授）。

【参加者】

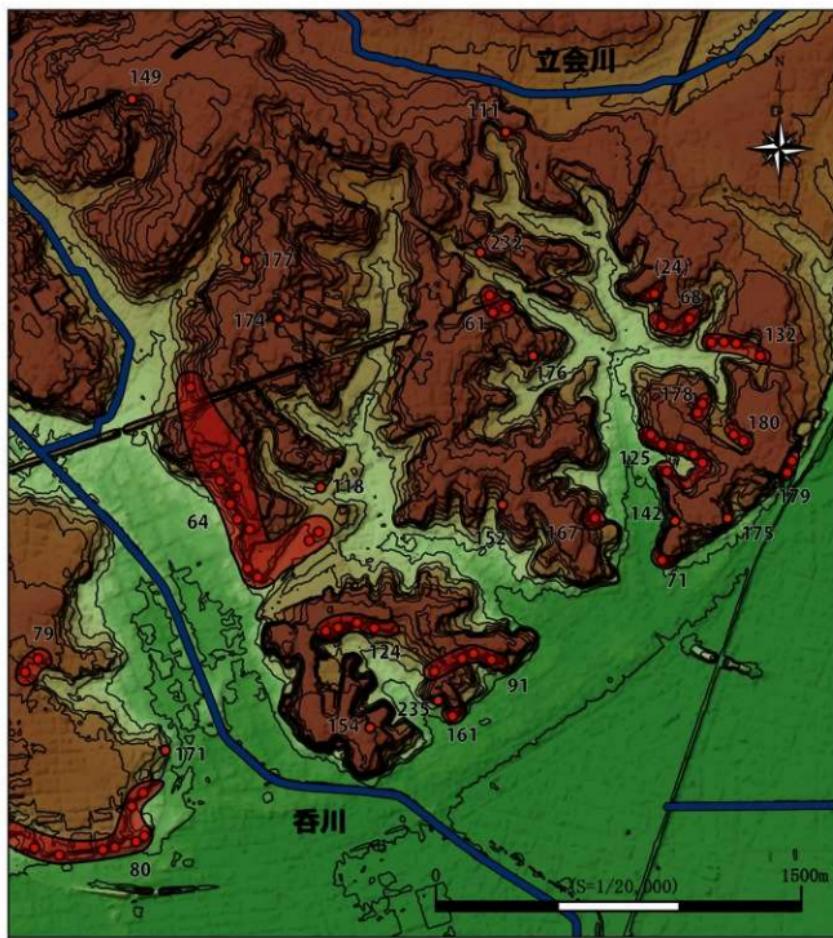
ナワビ矢麻（早稲田大学大学院博士後期課程）、今城未知（総合研究大学院大学博士後期課程）、渡邊玲・佐藤悠登（早稲田大学大学院修士課程）、石井友菜・小林和樹（早稲田大学学部生）。

第3章 横穴墓の三次元計測の現状と課題

本章では、現在までの横穴墓の調査において三次元計測、およびGPR探査が実施された事例について取り上げる。近年、考古学における三次元計測の導入はますます盛んになっており、遺物のみならず遺構を対象とした計測事例も増加している。また、GPR探査の利用も自治体の調査で多く見られるようになってきている。

千葉県長生郡長柄町に所在する長柄横穴群は、高壇式と呼ばれる特殊な形態や、精巧な家形天井および線刻画を持つ横穴墓として著名であり、1995年に国史跡に指定されている。翌年には『史跡長柄横穴群保存整備基本構想報告書』が作成され、以降保存整備事業が進められてきた。その保存整備にあたり、墓前域と墓道を確認する目的で発掘調査が実施され、レーザー三次元計測による実測が行われた（[長柄町教育委員会2013](#)）。報告書内では第1号墓の点群データが掲載されたのみであるが、横穴墓の復元データとしての有用性が示されている（図4）。

茨城県ひたちなか市に所在する十五郎穴横穴墓群は、国指定史跡の虎塚古墳に隣接する。現在までに計300基を超える横穴墓が確認されており、東日本で最大級の横穴墓群であると推定されている。2008～



- | | | |
|-------------------|--------------------|------------------------|
| 61 南馬込一丁目横穴墓群(3基) | 125 新井宿横穴墓群(18基) | 175 山王三丁目37番横穴墓 |
| 64 塚越横穴墓群(40基) | 132 山王横穴墓群(8基) | 176 久保横穴墓 |
| 68 山王一丁目横穴墓群(2基) | 142 山王四丁目33番横穴墓 | 177 上池上横穴墓 |
| 71 熊野神社付近横穴墓群(6基) | 149 小池横穴墓 | 178 大森射の場跡横穴墓群(2基) |
| 79 久が原四丁目横穴墓群(3基) | 152 南馬込四丁目27番横穴墓 | 179 元八景園裏横穴墓 |
| 80 久ヶ原横穴墓群(70基) | 154 法養寺裏横穴墓 | 180 山王二丁目14-24番横穴墓(2基) |
| 91 桐ヶ谷横穴墓群(15基) | 161 長勝寺裏横穴墓群(2基) | 232 堂寺横穴墓 |
| 111 東馬込一丁目2番横穴墓 | 167 平張横穴墓群(2基) | 235 中央六丁目4番横穴墓 |
| 118 西馬込二丁目2番横穴墓 | 171 久が原五丁目17番横穴墓 | (24) 品川区大金子山横穴墓群(2基) |
| 124 本門寺裏横穴墓群(9基) | 174 中馬込三丁目2・11番横穴墓 | |

図3 新井宿横穴墓群・山王横穴墓群の位置と周辺遺跡

2014年にかけて三次元測量が実施され、定間隔計測を基本とした数量分類計測と、現地で地形構成要素を評価・観察し、属性ごとに分類する属性分類計測の2種類の測量が行われた（三井2016）。トータルステーションを使用した微地形の三次元測量のほか、開口横穴墓の中で特に重要と判断されたものについては、トータルステーションを用いた墓前域から玄室内までの詳細三次元計測、写真計測による人骨・遺物の計測、およびSFMによる横穴墓内部の立体的計測記録を行った（図5）。

さらに館出支群I区第35号墓については、三次元レーザースキャナーによる工具痕計測、および近赤外線・色彩付赤外線を使用した特殊光撮影による写真計測を併せて実施している。図化解析された地形図や遺構図は、計測点群・遺構・遺物の線画も三次元化させ、あらゆる角度の視点での三次元表示と計測検証を可能としている。地形測量調査時に行った考古学的分布調査と微地形測量調査による特異な地形のマーキングによって、地形と横穴墓の関係性が明確となり、横穴墓群の造営範囲の推定や、虎塚古墳および笠谷古墳群との地理空間における位置関係が明示された。

そのほか、学術調査の一環として写真測量が実施された事例として、福島県西白河郡泉崎村の泉崎横穴墓（2009年）、福島県南相馬市原町区の羽山横穴墓（2009年）、大阪府柏原市の高井田横穴墓群（2010年）、熊本県山鹿市の小原大坂横穴墓群（2008年）、同市の小原浦田横穴墓群（2008年）などが挙げられる（青木2017）。これらの調査から公開には自治体や博物館が連携して取り組んでおり、計測成果はインターネット上で閲覧することが可能である（[装飾古墳データベース HP](#)）。

また2015年には、東京外かく環状道路の施工に伴う、東京都世田谷区の東名ジャンクション（仮称）予定地において行われていた建設工事の最中に計17基の横穴墓が不時発見され、殿山横穴墓群と命名された。工事区域内のため、発掘調査終了後に遺構は破壊されたが、その際に事業者によって三次元測量が実施されている。2016年以降、不定期で開催されている「東名ジャンクション（仮称）殿山横穴墓群に関する活用検討会」では、地域の教育的・文化的資源としての殿山横穴墓群の活用の方向性が示されており、そこでは3Dデータを用いた横穴墓のビジュアル化についても議論された（「東名ジャンクション（仮称）殿山横穴墓群に関する活用検討会とりまとめ HP」。世田谷区

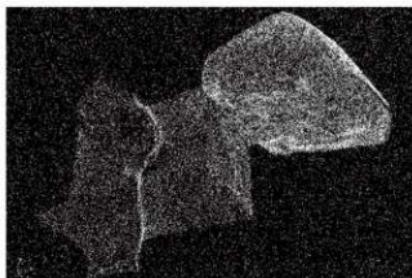


図4 長柄横穴群第1号墓点群データ

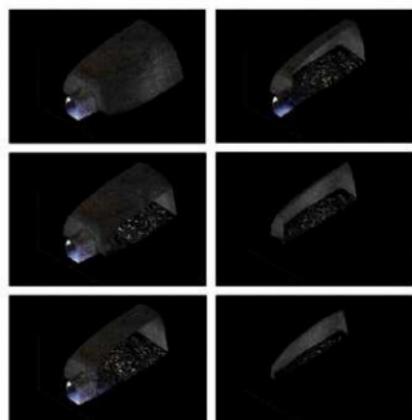


図5 館出支群第III区第5号墓解析図

が取り組むデジタルミュージアムでの展示や、区や外環事業者のホームページでの情報提供の可能性が検討されている。

横穴墓を対象としたGPR探査の事例としては、三鷹市での一連の調査が注目される。武藏野台地の武藏野面と立川面を分ける国分寺崖線には多数の横穴墓が造営されている。三鷹市域においても崖線に沿って高密度な分布を示しており、現在までに計7群の横穴墓群が確認されている。それらの分布状況の確認調査に際して、三鷹市教育委員会および三鷹市遺跡調査会がGPR探査を活用している。

1989～1990年には、調査が行われておらず横穴墓の分布の空白地帯であった国立天文台構内においてGPR探査が実施された（三鷹市教育委員会1990）。反応地点を順にA～Mと設定し、探査の結果、C・D・G・H地点で横穴墓の可能性が高い明瞭な空洞の反応が確

認された。E・F・K・L地点では防空壕と推定される空洞の反応が確認されている。また、J地点においても横穴墓と思われる反応がみられたが、I地点で反応した防空壕にその一部を破壊されている可能性を考えられている。M地点では不明瞭な反応ながら、比較的深い位置に空洞の存在が確認された（図6）。

大沢二丁目に所在する出山横穴墓群では、明治以降複数基の横穴墓が発見されている。なかでも、1993年に発見された8号墓は墓門に石積みが施された特徴的な形態を有しており、翌年に東京都史跡に指定された。この指定に伴う保存整備事業構想の実施に向けた具体的な動きを受け、GPR探査による横穴墓群全体の把握が計画されることとなった（三鷹市教育委員会・三鷹市遺跡調査会 1997）。探査の結果、8号墓の西側で新たに10号墓の存在が確認され、ほかに3箇所で空洞反応を得た。10号墓程の明瞭な反応はなく、すでに内部が崩落した横穴墓の存在が予想されている。現在、8号墓には保存施設が建設され内部を一般に公開しており、10号墓前には位置表示板が設置されている。

このほか、大沢四丁目に所在する羽根沢台横穴墓群

では、1977年から行われた宅地造成に伴う調査において1～3号墓、および4～6号墓の墓前域の一部が発掘された。1993年には新たな開発工事が行われ、その際に実施された探査で新たに8基の横穴墓が地中に存在することが確認された。うち7号墓は崩落の危険性があるため、発掘調査が行われた（三鷹市教育委員会・三鷹市遺跡調査会 1996）。大沢二丁目に所在する坂上横穴墓群は、国際基督教大学によって3～4基が調査されていたが、1994年の探査によって新たに5基が地中に存在することが確認された（三鷹市史編纂委員会 2000）。

2000年代以降、横穴墓を対象とした三次元計測の事例は着実に増加しつつある。しかし、横穴式石室および横口式石室の三次元計測事例（青木 2017）と比較すると、その件数はいまだ少ないと言わざるを得ない。史跡保存整備や緊急発掘に伴って実施された三次元計測に限しても、あくまでも実測図作成の補助として利用されているにとどまるものもあり、それらは最低限の公開しか行われていない。

一方で、前述した十五郎穴横穴墓群の事例が示すように、手法の異なる三次元計測を組み合わせることに

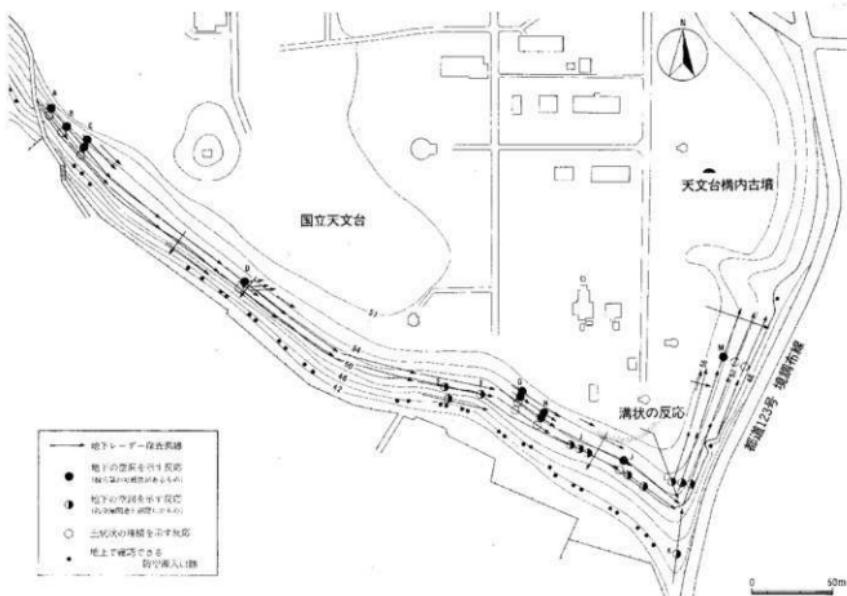


図6 國立天文台構内の地中レーダー探査結果解釈図 ($S=1/3,000$)

よって、従来の測量では難しかった細部の観察、および地理空間における位置関係を明らかにすることが可能となった。また、装飾古墳データベースや殿山横穴墓群の事例のように、三次元計測データをデジタルミュージアム構想の一環として活用することは、教育・普及活動の観点から考えても非常に有意義である。

さらに、横穴墓を対象としたGPR探査は、横穴墓の地中分布を把握するうえでも有効となる。三鷹市をはじめとした東京都内では、横穴墓は開発工事の際に不時発見される場合が多い。事前に非破壊での探査を実施することによって、完存する状態で横穴墓の調査を行うことが可能となる。開発事業者側も、事前に埋蔵文化財の存否を把握することにより、スムーズに工事計画を策定することができ、GPR探査のさらなる活用が期待されている。



写真1 GPR探査使用機材

※ MALA Geoscience 社ProEx System、250MHz アンテナを使用。

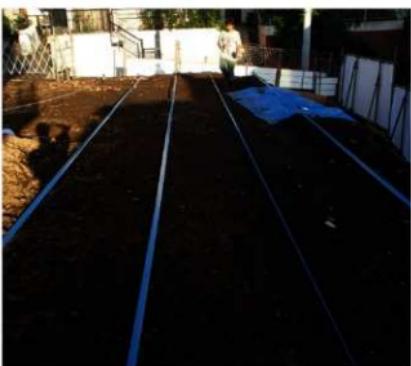


写真2 山王横穴墓群 GPR探査区（西から）

第4章 GPR探査および三次元計測の方法

4-1 GPR探査の方法

GPR探査の概要と使用機材 GPR探査（レーダー探査）とは、発掘調査など堆積した土の移動という形で破壊を伴う手法とは異なり、非破壊で地中に埋没した遺構の状況を把握する物理探査の手法の一つである。送信アンテナから電磁波を地中に向けて放射し、誘電率の異なる境界面に当たった反射波を、同じ箱内に收められた受信アンテナで計測するという原理である。実際に走査した距離はアンテナに接続した車輪（エンコーダー）で計測され、反射波の計測データと合わせてリアルタイムで確認することができる。取得した反射波を測線に沿って並べると、発掘調査でいうセクション図ができる。これをProfileと呼ぶが、Profileを探査区で走査した順に並べ、同じ深さごとに平面状に切ったものをTime-Sliceと呼ぶ。この2つのデータに表れる反射面の強弱や形状、深さや探査区内での位置から、地中状況の判読を行う。解釈の際には、GPR探査の成果のほかに測量や地形の観察、過去の調査歴や他の探査手法と組み合わせることが望ましい（Conyers 2013a, Conyers 2013b）。

非破壊で地中の情報の把握が可能という点が大きな利点であるが、データ取得の迅速性や解像度の高さ、レーダーの地中を進む速度から対象物までの深度も把握可能である点で、他の物理探査より優れている（独立行政法人国立文化財機構奈良文化財研究所 2013）。一方で、探査成果の解釈には経験が必要である。多様

な地下状況での探査の蓄積と、実際の層序との比較を行い、フィードバックすることで、探査成果の精度は向上する（Nawabi 2016）。

早稲田大学文学部考古学コースでは、2011年に高田2号墳（千葉県山武郡芝山町）で実施した測量・GPR探査を端緒に、考古学的調査への探査の導入を積極的に推進している（城倉ほか 2012）。2012年には殿塚・姫塚古墳（千葉県山武郡横芝光町）、2014年には下総龍角寺（千葉県印旛郡栄町）、2016年には山室姫塚古墳（千葉県山武市）を対象に、三次元測量と合わせてGPR探査を実施している（城倉ほか 2014、城倉 2015、城倉編 2016）。古墳では含水率の高い土が堆積しやすい周溝や、石で築造されることの多い埋葬主体部、古代寺院では金堂や塔、回廊などの建造物

の基礎の把握を可能にし、非破壊で遺構の情報を最大限取得することに成功している (Nawahi 2016)。上記のような成果の蓄積の結果、古墳や古代の遺構以外を対象としても積極的に使用されつつあり、様々な地域や年代の遺構を対象に GPR 探査が実施されている。本調査においても、早稲田大学文学部考古学コース所有の MALA Geoscience 社の ProEx System, 250MHz アンテナ (写真 1) を使用した。取得したデータから Profile や Time-Slice を作成する解析用ソフトには、Geophysical Archaeometry Laboratory 社の GPR-SLICE (v7.0) を使用した。

対象地と探査区 今回は、大田区に位置する山王横穴墓群を対象に探査を実施した。新井宿横穴墓群では、調査期間などの都合から探査は実施していない。調査においては、山王横穴墓群 1 号墓の三次元計測に先立って、①調査区内における複数基の横穴墓の有無の確認と、②横穴墓（地下空洞）の反応のデータ取得を目的とした。時系列を整理すると、1 号墓発見→調査区での GPR 探査の実施→1 号墓三次元計測→2 号墓発見→2 号墓三次元計測という順序である。

当地域に限らず、横穴墓は崖面や斜面に並列して横穴墓群を形成する傾向にある。1 号墓が発見された時点で、調査区内に並んで横穴墓が存在する可能性が考えられた。そこで、1 号墓が検出された斜面上の平坦地に南北 4m × 東西 15m の探査区を設定し、GPR 探査を実施した (写真 2)。探査区は、トータルステーションで直角や距離を測り、正確な長方形になるように設定した。また、安全に十分配慮しつつ、可能な限り斜面の際まで測線を設定した。測線方向は東西方向、間隔は 25cm とした。成果は本稿「5-4 GPR 探査の成果」で詳述する。

4-2 SFM

SFM (Structure from Motion) - MVS (Multi View Stereo : 多視点ステレオ) とは、複数箇所から撮影した一連の画像からカメラ位置と対象物の三次元形状を復元・生成する技術を指す (以下 SFM) (写真 3)。オープンソースソフトの Visual SFM や、商用ではあるが廉価の Agisoft Photoscanなどの解析ソフトが手に入れやすくなり、また必要となる機材がカメラだけという導入の容易さから、近年普及が進んでいる手法である (内山ほか 2014)。今回対象とした 3 基の横穴墓はいずれも SFM による三次元モデル化を行っている (ナビ 2015)。



写真 3 写真撮影作業風景

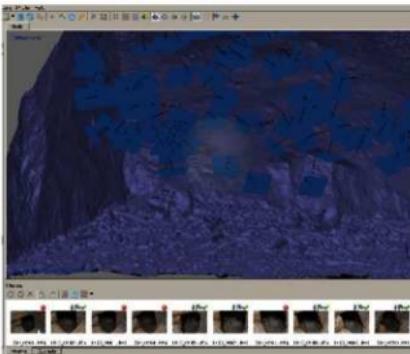


写真 7 SFM 解析作業風景

※青いプレートが復元された写真撮影時のカメラ位置。

図は新井宿横穴墓群 1 号横穴墓、ソリッド表示。

撮影には、NikonD5000 (新井宿横穴墓群 1 号墓) および NikonD700 (山王横穴墓群 1・2 号墓) を使用し、解析用ソフトウェアには Agisoft PhotoScan を使用 (図 7)、画像出力には QGIS を用いた。NikonD700 は早稲田大学文学部考古学コースより借用した。以下調査の時系列に沿って、実際に行った SFM の方法について説明する。

2014 年 2 月、新井宿横穴墓群 1 号墓の SFM を実施した。写真の総枚数は 253 枚であり、このうち 235 枚がアライアン (カメラ撮影位置の復元) した。この時、調査実施者は SFM という手法を認知してから日が浅く、基本的な原則以外は習熟していなかったため、生成されたモデルに欠落部分が生じてしまった。さらに

横穴墓の単なる三次元モデル構築を目的としていたため、地理情報を有した釘やマーカーの写し込みを行っていない。スケールを写し込んでいたためモデルの縮尺は正確であるが、方位や地球上での位置は従来の方法で作成された平面図や断面図を基に合わせる必要があった。

2015年10月、山王横穴墓群1号墓におけるSfMでは、釘の写し込みを行った。釘は現地にてXYZの情報を記録し、Photoscan上のMarkerによるReference機能を用いて位置合わせを行った。釘は横穴墓の床面に4本、写真上で判別がしやすいように白く着色したものを使用した。この工程は三次元モデルへの地理情報の付与とともに、スケール合わせも兼ねている。なお撮影枚数は406枚で、404枚のアラインに成功している。

2016年1月には、山王横穴墓群2号墓のSfMを実施した。写真的総枚数は614枚中599枚がアラインした。2号墓のSfMの際には、調査区全体についても併せて撮影し、1号墓のSfMと同様、釘の写し込みから、遺構の位置のReferenceを行った。

横穴墓のSfMを実施する際に問題となるのが光源不足である。地下の密閉空間に構築されるという遺構の性格上、自然光のみで横穴墓内の空間が明るくなることは稀である。また時間帯によっては、一部に自然光が当たり過ぎることで色のムラが発生しやすい。写真的位置復元は、複数写真間での色相の違いを基に行われるため、時間帯による色相の変化は極力避けて、撮影を行った。横穴墓内は非常に暗いため、手持ちの撮影は手ブレが多く発生する恐れがあった。そこで横穴墓内の撮影はなるべく三脚に据え、シャッター押下時のブレをなくすため、セルフタイマー機能を用いて撮影した。新井宿横穴墓群1号墓は不時発見であったため、本来の横穴墓の入口の反対側（奥壁側）に開口する形となった。開口部からの光のみでは、徐々に狭くなっていく羨門の撮影には不十分な露光であった。そのため、光源となるライトを借用し、羨門付近に設置した。色の再現性や露光量の差異、三次元モデルへのライトの写り込みなど解決すべき課題は多いが、遺構の性格に合わせた方法や機材の選択が必要である。

4-3 三次元計測

本調査においては、カメラを用いたSfMによる三次元モデルの作成のほかに、三次元スキャナーを用いた計測を実施した。



写真4 三次元計測作業風景（山王横穴墓群1号墓）



写真5 三次元計測作業風景（山王横穴墓群2号墓）

後述するが、SfMを使用し生成された新井宿横穴墓群1号墓のモデルでは、奥壁付近に敷かれた疊の輪郭が明瞭ではなく、個体の識別が困難であった。その解決策として、疊床の微細な凹凸まで記録するために三次元スキャナーを使用した。

使用したスキャナーはカナダ・Creafom社のEXAscanで、ハンディタイプのものである（重さ約1.5kg）（写真4）。今回報告する横穴墓の調査では、山王横穴墓群の2基について三次元スキャンを行った。

考古学調査における三次元計測の選択肢として、FARO社が製造するLaser Scanner Focus3Dのような据え置き型も広く使われている。据え置き型の特徴として、比較的短い時間で多くの測点を計測できる点が挙げられる。計測データの合成や整理に時間は割かれ

るが、計測作業自体は簡便であり、現場での労力や時間のコストはSFMによるモデリングと同等、またはそれ以下である。しかし弱点として、死角が多い点が挙げられる。据え置き型レーザースキャナーの宿命であるが、機器を据えた三脚の範囲（スキャナーの直下）のデータを取得することは不可能である。そのため、複数の設置場所に機器を据え替え、死角を最小限にしながら欠落部の少ないモデルを作成する必要があるが、横方向（水平方向）あるいは上方向に比べて、下方向に対するデータの取得には不向きであると言わざるを得ない。

一方、ハンディタイプのスキャナーは、その機動性の高さに最大の利点があるといえる。スキャナーの大きさにもよるが、狭小な構造や複雑な形状の遺物の計測に最適である。早稲田大学が実施した殿塚・姫塚古墳出土の埴輪の三次元スキャンでも、その有効性が示されている（城倉編 2017）。対象が横穴墓の場合、多くは側壁面と床面が形成する角度は銳角を成すため、任意の角度から計測できるハンディタイプのスキャナーが有効である。

計測により取得したデータはサーフェスデータとして記録され、接続したPCのモニターでリアルタイムに確認できる。計測時には専用ソフトウェア VXEelement を使用し、機器のキャリブレーションや計測密度の設定などを行った。EXAscan では専用のターゲットシールを対象物あるいはその周囲に貼ることで、スキャナー本体の位置を認識させている。そのためシールを貼付した箇所のデータは記録されない。

対象物が大きくなればなるほど生じやすいノイズや、時間の経過とともにシールが動いたり剥がれることで生じるスキャナー位置の誤認識など、解決すべき課題も多い。特に、横穴墓は関東ローム層を掘り込んで構築されているため、壁面や天井面に直接ターゲットシールを貼付することは困難であった。本調査では、ターゲットシールを貼付した画鉛を壁面や天井面に刺して固定することで、この問題を克服した（写真5）。屋外での遺構計測の際、バッテリー駆動が主流の据え置き型に対し、PCのモニターを常に確認しながら計測を行う EXAscan は、電源の確保の問題も考える必要がある。計測の手法にいくつか選択肢がある場合、対象遺構の状況や取得したいデータ量、作業可能な時間などを総合し、検討する必要がある。

第5章 東京都大田区新井宿・

山王横穴墓群の調査成果

5-1 新井宿横穴墓群1号墓

遺構の概要（写真6～11） 新井宿横穴墓群1号墓は、宅地造成工事が行われていた敷地のほぼ中央で検出された（図8）。所在は大田区山王四丁目1番であり、西向きの馬蹄形を呈する谷部の南側最奥部付近に位置している。発見当時、新井宿横穴墓群に隣接していたが、周知の埋蔵文化財包蔵地（いわゆる遺跡）の範囲には入っていなかった。しかし、1号墓検出の西側に隣接する敷地内において、1980年代に4基の横穴墓が発見されていることから、同一の横穴墓群に含まれるものとして、調査後に遺跡範囲の修正を行った。

1号墓は北北東に主軸方位をもち、南西側に開口する。発見の経緯としては、造成工事に伴う掘削作業中に、重機が墓室の北西側の一部を損壊して開口したことによるが、墓室内部の遺存状態は比較的良好であった。奥壁の直上に開口したため、これを出入口として一連の計測作業を行った。

墓室の法量は、全長約4.46m、奥壁幅2.80m、奥壁高1.62mをはかる。墓室の平面形態はいわゆる楕形（半裁徳利形）で、両側壁部はゆるやかにカーブしているが左右対称ではない。羨門幅0.62m、高さ0.76mをはかる。アーチ状の天井をもち、奥壁の頂部は滑らかな弧を描いている。墓室の床面には1段の段差が設けられ、墓室入口から奥壁に向かって傾斜をもって徐々に高くなる。墓室内での境界を示すような仕切りは認められないが、奥壁側の段差には砾床が敷設されていたため、遺体を安置する空間として特別な意味を持たせていたと考えられる。

埋葬人骨は遺存状態が比較的良好であり、3個の頭蓋骨が検出された。埋葬された人数もまた、3体であったと推定され、鑑定結果も同様であった。墓室の入口は切り出したロームブロックを2段に積み重ねて閉塞している。墓室内から発見された遺物は人骨と川原石による砾床のみで、土器や副葬品は検出されていない。**SFMによる三次元モデル生成** 1号墓では、遺構全体のモデリングを目的にSFMを実施した。使用したカメラはNikonD5000、墓室内の光が届かない暗部には光源となるライトを設置し撮影を行った。今回報告する大田区内の3基の横穴墓のうち、SFMという単一の手法のみで三次元モデルを生成している唯一の事例であ

る。SfM のための写真撮影には約 2 時間を要し、現場撤収後、Agisoft PhotoScan を使用しモデルを生成した。

図 9 は SfM で生成したモデルを各面で切り取り、展開したものである。床面・両側壁・奥壁・羨門は、SfM を使用して作成した Ortho 画像 70% 透過と DEM の合成図である。床面プランを見ても、左右非対象で大きく歪んでいる。右側壁は、砾床の範囲を区切る段差付近に内側に折れる屈曲部をもつが、左側壁は逆に外反するように開く。砾床の空間と 1 段下がった空間とでは異なる中心線を有している可能性が指摘できる。

展開図を作成するにあたって、横穴墓の主軸は、奥壁と羨門それぞれの中心を結んだ線で設定しているが、主軸の歪みが意図的なものであったかどうかの判別は難しい。後述する山王横穴墓群の 2 基の横穴墓は、比較的左右対称の平面プランを有しており、様相が異なっている。奥壁では加工痕を明瞭に観察することができたほか、側壁にも同様の痕跡が残されていた。

本調査当時は、SfM という手法への理解が不十分で

あり、位置情報をもった被写体を墓室内に設置していない。そのため位置合わせは従来の方法で取られた平面図や断面図を基にしており、方位や傾きも本来 Agisoft PhotoScan で得られるべき精度を保持できていない。

SfMによるモデル生成の利点と課題 SfM は、現在誰もが容易に導入できる手法となり、様々な遺構・遺物を対象に選択されている手法である。SfM には多くの利点があるが課題もあり、使用に際して注意を必要とする。以下、今回 SfM を実施した 1 号墓を例に、SfM の利点と限界について述べる。

大きな利点としては、短い時間での三次元モデルの生成が挙げられる。横穴墓のように不時発見されることが多い遺構の場合、その記録保存にかけられる時間は比較的少ない。横穴墓の外形や砾床の範囲程度の情報の取得が目的であれば、SfM は最も効率的な手法である。写真を基にモデル生成するため、色情報が得られるという利点もある。内部形状の整形過程で施された加工痕の把握についても、その単位が粗いため明瞭

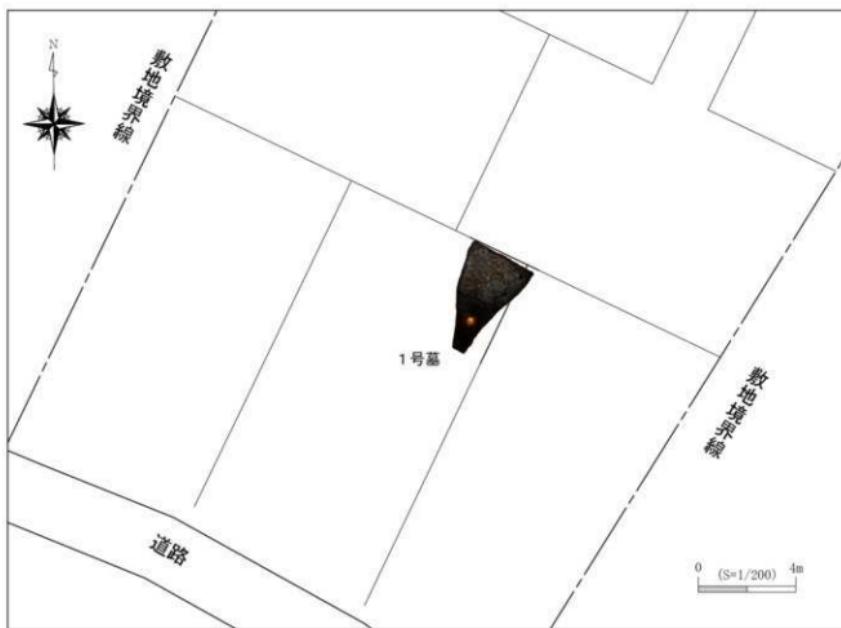


図 8 新井宿横穴墓群（山王四丁目 1 番地点）遺構配置図



写真6 新井宿横穴墓群1号墓 発見時の入口



写真7 新井宿横穴墓群1号墓 墓室床面



写真8 新井宿横穴墓群1号墓 羔門閉塞状況
(大田区教育委員会提供)



写真9 新井宿横穴墓群1号墓 碓床と奥壁



写真10 新井宿横穴墓群1号墓 奥壁の工具痕

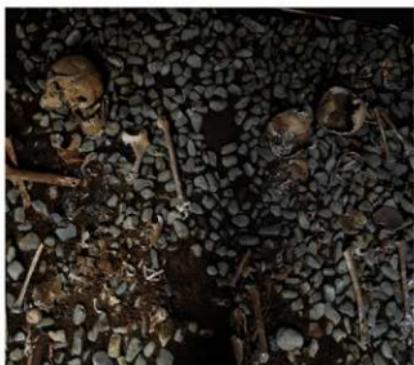


写真11 新井宿横穴墓群1号墓 碓床と人骨



図9 新井宿横穴墓群1号墓展開図（SFM）

床面・両側壁・奥壁・奥門閉塞部はSFMを使用して作成したortho画像とDEMの合成図（orthoは30%透過、DEMはQGIS上で陰影図処理をかけた）。

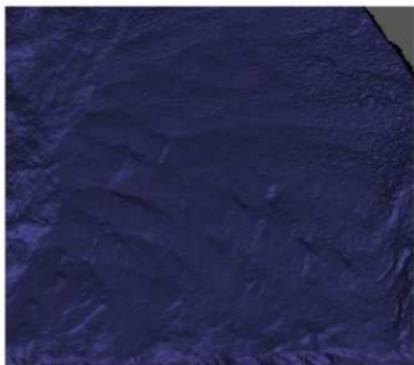


図 10 新井宿横穴墓群 1号墓 SFM モデル奥壁
(左 : solid・右 : texture)

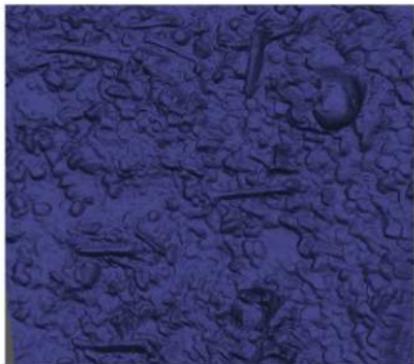


図 11 新井宿横穴墓群 1号墓 SFM モデル床面
(左 : solid・右 : texture)

に観察できる（図 10）。ただし、これは撮影時のライティングによって大きく結果が変わり得るので、撮影時間や光源の設定にも注意を要する。

奥壁に施されたような大きな工具痕ではなく、両側壁面に残された微小な工具痕については、データに反映されていない。また、礫床を構成する川原石の一つ一つの形状については、三次元データからは識別が困難であり、ortho 画像を重ねることで初めて個体の判別が可能となる（図 11）。礫の撮影方法にも左右される部分ではあるが、細かな形状のモデリングは難しい。本調査では、横穴墓の羨門付近が暗く撮影が困難であると判断したため、工事用のライトを使用した。ライ

トはモデルにも反映されているが、墓室内の光量が一定でなかったため、やや不自然な色調となっている。色のついたモデル生成が可能である反面、その再現性をどのように保持するかも検討すべき課題の一つである。

1号墓では、調査当時の手法の選択肢が少なかったことや作業の迅速性が求められていたため、実施できたのは SFM による記録のみであった。短い時間で色情報を持った三次元モデルを作成できるという点で SFM は有効であるが、光源や位置情報の付与など、作業過程上の問題や手法としての限界があるのもまた事実である。横穴墓の三次元データの作成にあたっては、遺

構の発見状況や墓室内の環境によって、複数ある方法の中から最も適切な手段を選択し、組み合わせる必要がある。

5-2 山王横穴墓群 1号墓

遺構の概要 (写真 12~17) 山王一丁目 30 番に所在する山王横穴墓群で、SfM および三次元計測を実施した 1 号墓の計測の成果を報告する。当横穴墓は、住宅建設工事に先立つ既存擁壁の解体工事中の 2015 年 9 月に不時発見され、同年 10 月に大田区教育委員会によって記録保存のための緊急発掘調査が実施された。

はじめに、今回三次元計測を行った山王横穴墓群の遺構配置について、図 12 に示した。1 号墓の西北西約 1m には 2 号墓が隣接しており、横穴墓群を構成している。1 号墓は N-25°—E に主軸を持つ一方、2 号墓は N-12°—W に主軸を持ち、両者の主軸は一致していない。周辺は住宅地であり、現在は造成工事によって盛土が行われているため自然地形をとどめいないが、斜面南側に位置する旧道が弧状を呈することから、当時の崖線の形状に沿って、横穴墓群が形成さ

れたと考えられる。

SfM および三次元計測の概要 図 13 は SfM と三次元スキャナーを組み合わせた 1 号墓の三次元計測図である。床面・両側壁・奥壁・手前壁は SfM を使用して作成した ortho 画像と DEM の合成図で、礎床の範囲のみに、三次元スキャナーで取得したデータを元にして作成した DEM を重ね合わせている。スキャナーの Surface の解像度は 2.0 mm である。三次元計測によって得られた三次元データは、PC 上で自由に回転させて観察することができるとともに、正確なデータの長さを計測することが可能である。本項での横穴墓の各計測距離は、いずれも三次元データで計測を行ったものを記載している。

1 号墓は傾斜面の関東ローム層を掘り込んで構築されている。平面形態は明確な前壁を持たない擬形（半裁徳利形）で、比較的左右対称を保ち、整った形状を有する。羨門から奥壁までの全長は 3.28m、最大幅は奥壁付近の 2.18m、最小幅は羨門の 0.55m である。天井はアーチ状を呈する。天井高は羨門から奥壁に向かって高くなり、最も高い部分では奥壁の 1.47m、低

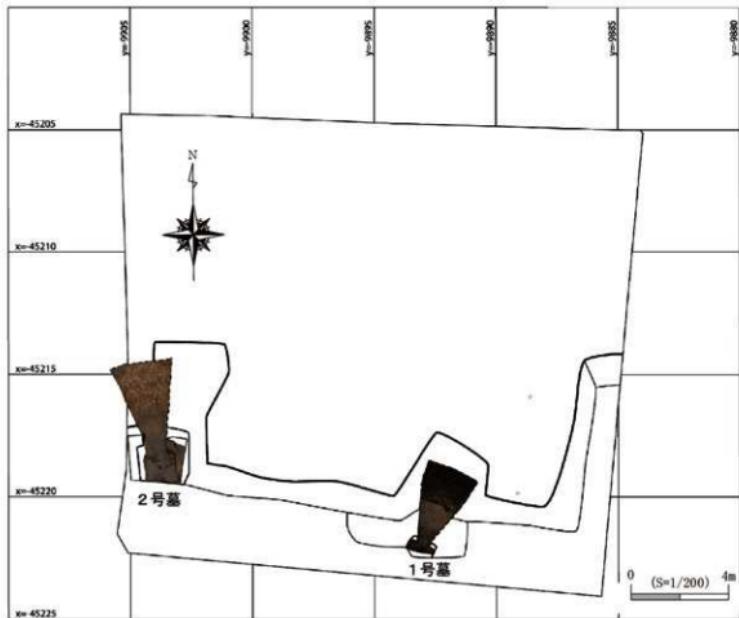


図 12 山王横穴墓群（山王一丁目 30 番地点）遺構配置図

表1 山王横穴墓群の基準点一覧

点名	X	Y	Z	備考
T1	-45305.327	-9789.487	14.674	
T2	-45273.183	-9825.568	12.144	
T3	-45260.218	-9862.679	12.840	
T4	-45245.254	-9891.080	12.606	
T5	-45230.588	-9885.070	16.371	
T6	-45224.215	-9885.165	17.307	
T7	-45220.575	-9884.589	17.857	
T8	-45201.395	-9882.877	19.604	
IA008A	-45195.690	-9730.463	20.603	
IA009	-45205.606	-9673.560	20.003	
IA017	-45316.396	-9788.718	15.158	
IA730	-45345.704	-9747.651	18.016	
K1	-45223.157	-9887.561	17.103	
K2	-45222.946	-9893.280	16.567	
K3	-45214.665	-9885.452	18.472	
K4	-45222.160	-9894.000	16.439	
K7	-45223.055	-9892.286	16.547	
K11	-45222.207	-9898.337	18.543	
K12	-45218.874	-9897.843	18.633	
K13	-45216.187	-9904.449	18.804	
K14	-45220.951	-9903.306	16.281	
K15	-45219.538	-9903.841	16.281	
K16	-45217.790	-9904.645	16.809	
K17	-45218.476	-9903.743	15.313	
K18	-45217.578	-9904.049	15.290	
K19	-45219.251	-9903.470	15.637	
K20	-45220.773	-9903.295	16.278	
PN11A	-45219.173	-9891.832	15.547	1号墓三次元計測用ポイント
PN11B	-45220.025	-9892.232	15.548	1号墓三次元計測用ポイント
PN11C	-45219.354	-9892.686	15.549	1号墓三次元計測用ポイント
PN11D	-45219.834	-9891.791	15.551	1号墓三次元計測用ポイント
PN11B002-A	-45215.782	-9904.214	15.388	2号墓三次元計測用ポイント
PN11B002-B	-45216.136	-9903.664	15.389	2号墓三次元計測用ポイント
PN11B002-C	-45216.535	-9904.106	15.389	2号墓三次元計測用ポイント
PN11B002-D	-45216.223	-9904.547	15.389	2号墓三次元計測用ポイント
PN99K1	-45219.871	-9889.116	18.794	GPR探査の基準杭
PN99K2	-45215.898	-9888.614	18.924	GPR探査の基準杭
PN99K3	-45218.493	-9903.904	18.830	GPR探査の基準杭
PN99K4	-45214.600	-9903.586	18.777	GPR探査の基準杭
PN99K5	-45214.359	-9904.619	18.826	GPR探査の基準杭
PN99K6	-45205.148	-9904.462	19.053	GPR探査の基準杭