

## 附章Ⅱ 3次元計測について

株式会社シン技術コンサル 小池 雄利亜

### 1 はじめに

西迫横穴墓群は、斜面地に構築された横穴墓で、各遺構は立体的な変化を伴う形状である。基盤層には、遺構構築時の状態が良好に保存されており、壁面に残されていた掘削工具の痕跡も観察が可能であった。これらの横穴墓は開発に伴い取り壊されるため、遺構全体の構造や工具の痕跡など、大小様々な形状を現場にて記録する必要があった。

現地では、主に3種類の3次元計測器と、デジタルカメラを用いた3次元画像解析(Structure from Motion 以後:SfM)を、目的とする観察規模の大小(以後:観察レベル)に合わせ、使い分けもしくは併用して記録を行った。

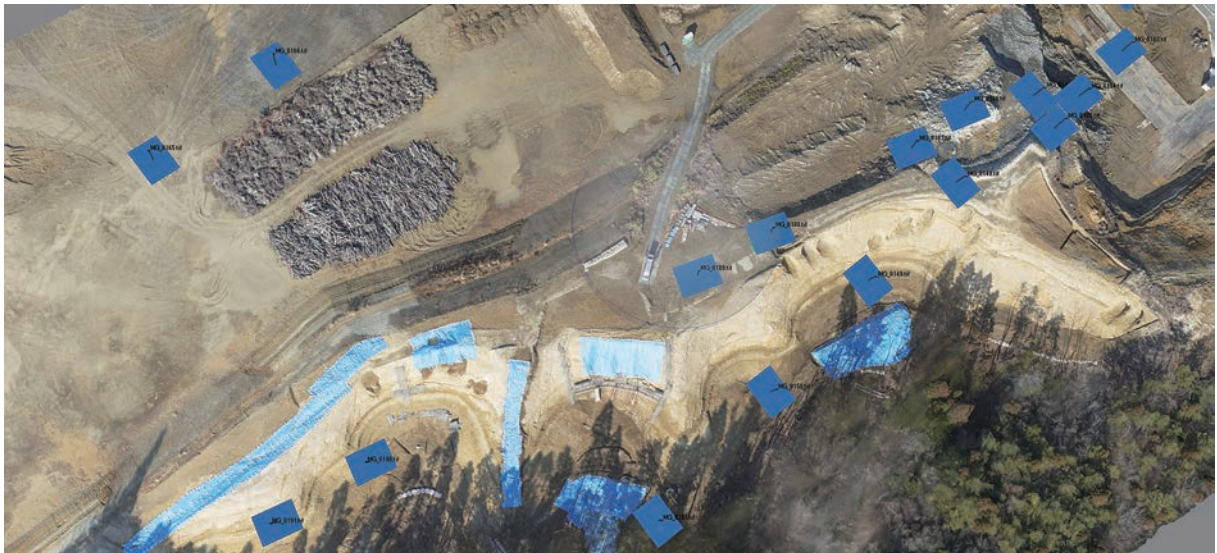


写真 26 調査区 ドローン搭載のデジタルカメラによる SfM 解析ソフトキャプチャ画像

### 2 3次元計測に関して

これまでの調査においても、遺構の形状記録には、光波測距儀を用いた実測により3次元の記録は行われている。遺構形状の変化を観察して、3次元(X,Y,Z 値)の点として記録を行い、点と点を結線し、線分として補完する事で、形状の記録を行っている。

現地において実測をするメリットは、実際の遺構を観察しながらデータの抽出ができる事である。



図 155 3次元メッシュデータ俯瞰画像

一方、デメリットは、記録される情報量が極めて限定される事である。現地で実物を観察する事は、調査における大事なプロセスだと考えるが、限られた取得情報からの再検証は容易ではない場合がある。

計測においても、横穴墓の立体的な構造により 1 箇所から全体を計測することが出来ないため、観測位置の移動を何度も行う必要があり、誤差の累積は避けられない。また、全体を俯瞰して観察する事が難しいため、図化に必要な形状変化の判断や、計測者の主観による観察のバラつきが生じ、正確さを欠く可能性もある。

今回の調査は、震災復興事業の一環として実施された側面もあり、現場作業における記録の緻密さと即時性の相反する要求があった。そのため、発掘調査の記録に関しては、観察に必要な精度と分解能を判断して、面的に網羅する形で大量の 3 次元データを取得した。図化にあたっては、3 次元座標を持つ点の集合体（以後：点群データ）から面（メッシュデータ）を構築して、可視化したコンピュータグラフィックス（以後：CG）を作成し、後日改めて観察や図化を行い本報告書に用いた。

### 3 本調査に用いた 3 次元計測の各機器や手法の特徴

#### 【SfM】

SfM は考古資料のデータ化において、効率化や客観性の向上など非常に有用な手法である。近年、ドローンの登場により、遺跡発掘の現場でも利用が進んでいる。

市販されているデジタルカメラでデータ取得が可能のため、導入も容易で、目的とする観察レベルに合わせた設定も、撮影範囲のコントロールで可能となる。3 次元データの構築には、市販されている専用ソフトによる後

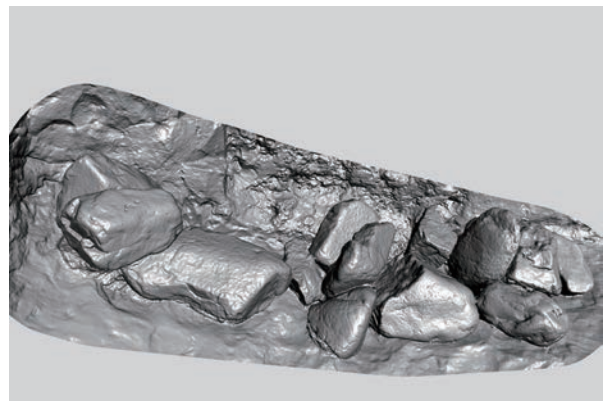


図 156 SfM 閉塞石メッシュデータ

処理で実施する。

カメラ取得のカラーデータがメッシュデータに適用可能なため、高精細なビジュアルモデルデータが得られ、CG などに用いる事が可能となる。また、遠近差の無い正射投影画像（オルソ画像）を生成する事で、被熱範囲や土層断面の分層などの図化にも利用が可能となるが、RGB 分解が不可能な、均一なテクスチャ（磁器など）や撮影位置によって見え方が変わる対象（低地の水たまりや、濡れた木材など）では利用が難しく品質や信頼性が低くなる。また、後述する専用のハードウェアを用いたデータと比較すると、データ量に対して精度が低く、工具痕の形状を観察可能な 3 次元データを構築するためには、横穴墓 1 基毎に数千枚の写真データの取得が必要となり、それらのデータを 3 次元データ化するには、コンピューターによる膨大な計算時間を要する。

本調査では、調査区全体や遺構データのカラー化、遺物出土状況の微細図作成などに用いた。



### 【非接触光学式 3 次元計測器】

主に工業製品の設計や検査での利用を目的に販売されている計測機器で、これまでも、博物館資料のレプリカ作製などでの利用実績があり、型取りなどでは資料を損傷する可能性がある場合などに利用している。

左右についたカメラでデータを記録する際に、プロジェクターから投影される格子（パターン投影）の形状変化を計算に加味する事により、各算出点の精度を向上させている。また、レンズを交換する事で、最大で 0.008mm の精度で 0.02mm ピッチでの計測が可能となる。

本調査では、工具痕や線刻などの微細形状や工具の方向などを詳細に観察する事を目的に利用し、0.042～0.085mm の精度で 0.159～0.324mm のピッチで、データ取得を行った。ただし、複数の格子パターンを投影する間、静止した状態で据え置く必要があり、足場の悪い所ではオペレートが不可能となった。また、壁際に掘り込まれた排水溝は、観測位置に機械を据え置くことが難しく、この様な計測が不可能な部分に関しては、ハンディースキャナを用いた。



写真 27 非接触光学式 3 次元計測器



写真 28 非接触光学式 3 次元計測器 格子投影

### 【ハンディースキャナ】

上記非接触光学式 3 次元計測機器と原理は同じであるが、左右カメラの基線が短く 3 次元データに用いる画像データはビデオカメラの様に一定のレートで撮影をし続ける。計測範囲の形状やカラーを認識してトラッキングし続ける事で、移動しながら一定範囲の計測が可能となる。

機器の特徴から、広範囲を記録すると全体の寸法誤差が大きくなるため、基準となるデータへブロック毎に誤差を分配する形で再編集する必要がある。すなわち、精度と分解能が異なるデータは、それぞれ公共座標へシフトして管理を行う必要がある。

本調査では、壁際で非接触光学式 3 次元計測器が設置出来ない箇所や、人骨の出土状況など、三脚の設置が困難な範囲の記録に用い、公共座標への各データのシフトは、地上型レーザ計測器の点群データを用いて行った。



写真 29 ハンディースキャナ 計測状況

### 【地上型レーザー計測器】

土木や建築での利用を前提とした計測機器で、発掘調査現場に限らず近代遺産などの建築物の記録においても実績のある手法である。レーザー光を照射し、計測対象からの時間と波形の位相差によって、高精度な距離観測を水平垂直に連続的に行う。ハードウェアや編集に用いるソフトは、公共座標の桁数の大きなデータの扱いも考慮されている。

本調査では、各遺構全体と周辺地形における信頼性の高いデータの取得を行い、様々なデータを統合する位置情報の基準や参照として用いた。



写真 30 左) 地上型レーザー計測器・右) 計測状況及び取得点群データ段彩表示

## 4 3次元データの分解能と精度に関して

分解能とはデータの密度であって、3次元データにおいては点群の点間ピッチのことで、計測対象により、使い分けが必要となる。

例えば、10cm ピッチでの等高線を目的とする全体地形測量のデータを、1mm ピッチで取得して処理を行うと、現地作業及びその後の編集にも多くの時間を要し、工期やコストを考えると課題が生じる。一方、1mm ピッチで高分解能といっても、計測したい形状の変化が 1mm 程度のものでは全く再現性を得る事が出来ない。

3次元計測における精度の高さとは、正確さと確度の事で、真値に近い値をバラつき無く再現する必要がある。分解能が高くても精度の低いデータでは、必要な再現性を得られるとは限らない(図 158)。

均一に良好な画質で撮影データを取得する事が可能であれば、SfM でも高い密度で良好なデータ取得も可能となる。そのためには、マクロ撮影が必要なため、被写界深度の確保に必要な光量の確保、ブレに関して非常にシビアな対策を行う必要がある。玄室内の工具痕を網羅するには、専用のハードウェアに比較して多くの作業量が必要となる。



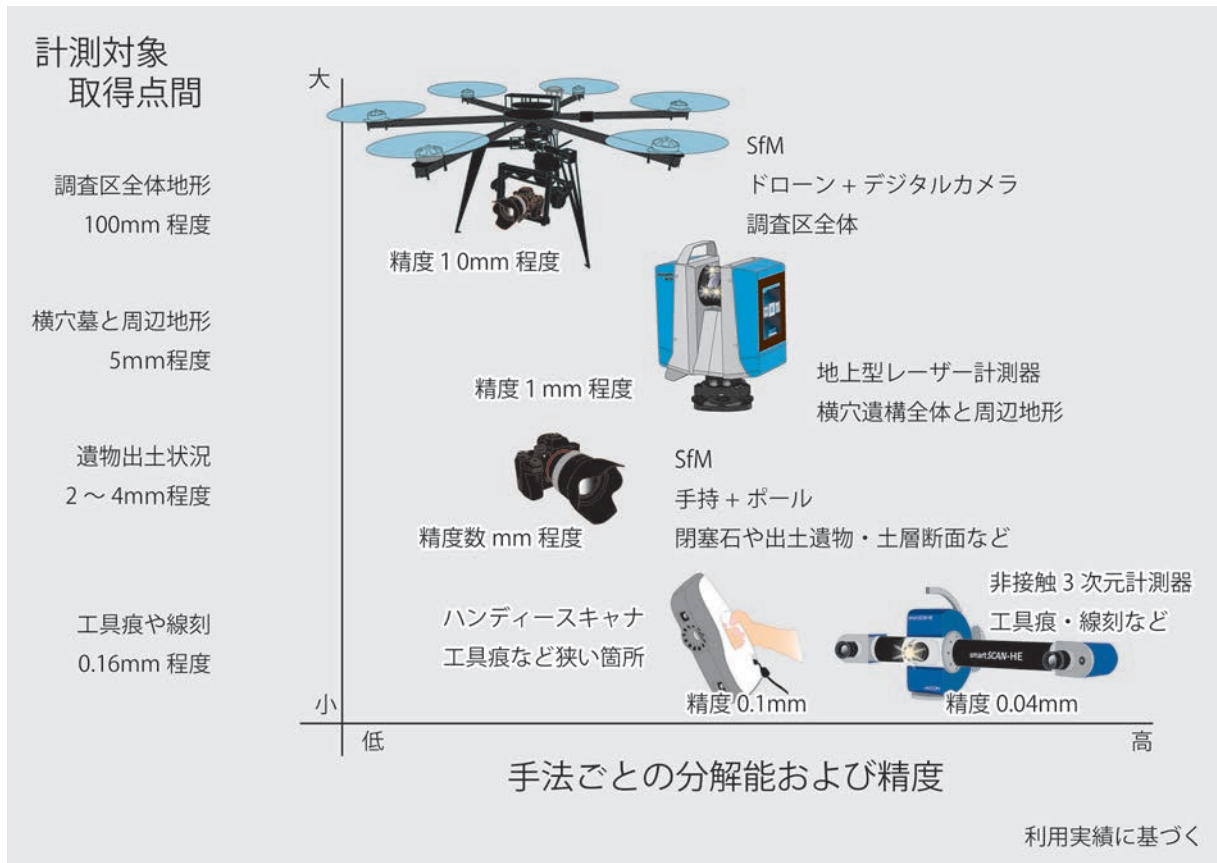
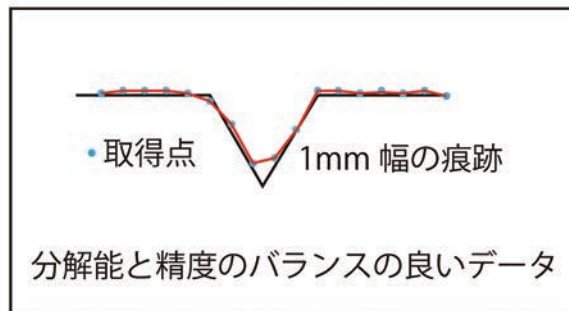
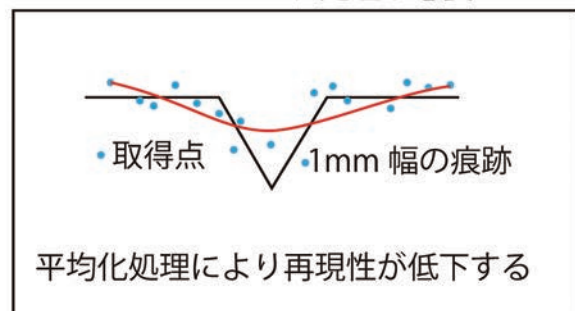
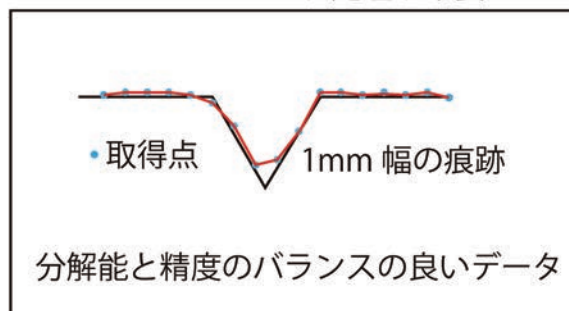
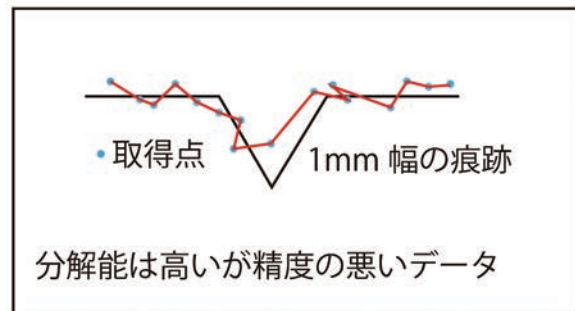


図 157 手法使い分けのイメージ

### 非接触光学式 3 次元計測



### SfM



※機器や手法によって、精度は異なり得られる再現性は異なる

図 158 分解能と精度

以下、本調査における同一箇所（工具痕）の手法毎の再現性を比較した。

図 159：非接触式光学式 3 次元計測器では、表面も荒れる事無く工具幅などの形状を綺麗に再現している。

図 160：ハンディースキャナも、同等レベルの再現を得られているが表面には本来存在しない波打った形状が出ている。

図 161：地上型レーザー計測器も工具の凹凸を再現しているが、曖昧さが残り図化の際には判断に時間を要し、工具痕の再現には不足が生じる。

図 162：3 次元画像解析（SfM）に関しては、様々な要件により成果の違いはあるが、1pixel が 1mm 程度の撮影分解能で撮ったデータでもノイズが多く工具痕の形状再現には難がある。

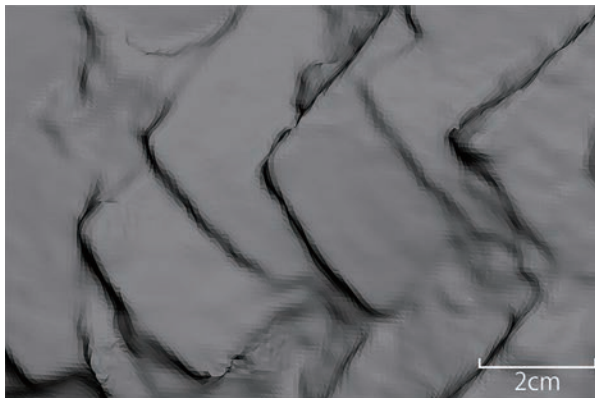


図 159 非接触光学式 3 次元計測器

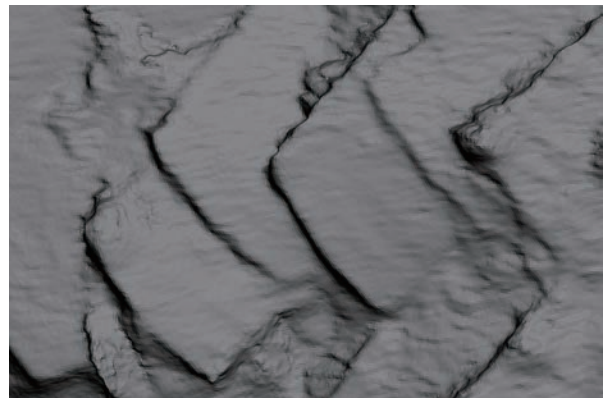


図 160 ハンディースキャナ

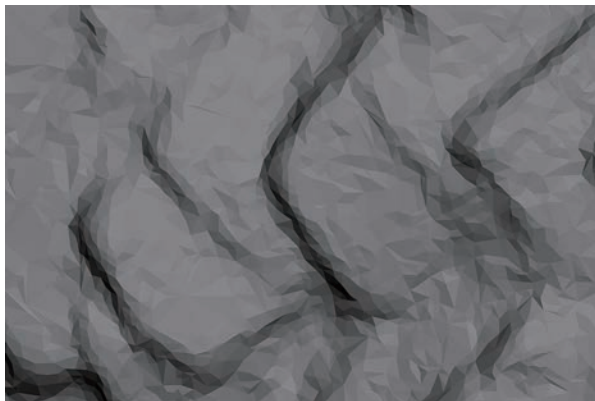


図 161 地上型レーザー計測器

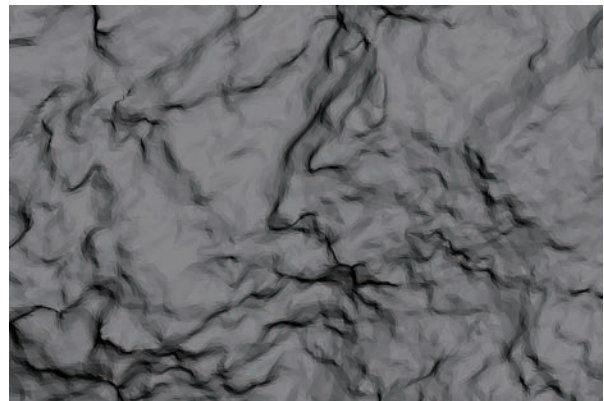


図 162 画像解析スムージング処理なし



図 163 画像解析スムージング処理あり



図 164 SfM による 10 円玉表面の形状データ



図 163：3次元画像解析（SfM）はソフトウェアのフィルター設定で、通常はスムージングを行い滑らかな形状に修正する仕組みとなっているため、それらを見越した撮影分解能でデータ取得を行う必要がある。

図 164：10円玉の表面再現は、スタジオ内で行った3次元画像解析（SfM）の実験結果であり、条件を整える事で細かな再現も可能となる。起伏の多い玄室内での応用は、工期やコストを考えると課題が生じる。

## 5 まとめ

3次元計測による記録では、取得すべき形状や実施環境を前提とした手法選定が必要となる。工具痕などの微細な記録が不要な現場であれば、SfMのみでも十分な成果を得られる。

デジタルのデータは、記録メディアの保存性や共有環境の整備など課題もあるが、これまでと異なる利便性もある。研究者の間で、実物を見るのに近い形で情報を共有する事もネットワークを通じてより容易に可能となり、これまでとは異なる視点から観察する事で新たな発見につながる。

3次元計測が普及していく事で、新たな取組が様々に行われていく事になるが、目的を持ったデータ取得と観察結果を共有するプロセスには変わりはない。

得られたデータを用いて復元や再現も可能で、コンピューター上で扱うデータには重量やスペースの制約が無い。

一般に向けて分かりやすく図示する事は、拡大や縮小を含め、データでは簡単に可能であり、VR（バーチャルリアリティ）やAR（オギュメントリアリティ）などのツールにデータを取り込む事で、様々な公開資料の作成も可能となる。

本調査では、遺物の3次元計測は実施していないが、14号横穴墓出土の遺物に関して参考までに掲載する。

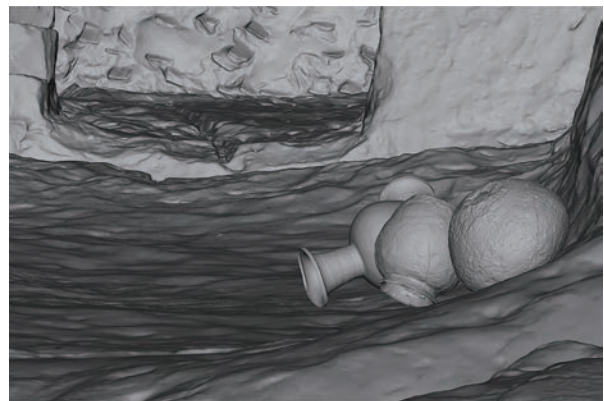


図 165 土器の接合後データを出土状況に合成した例

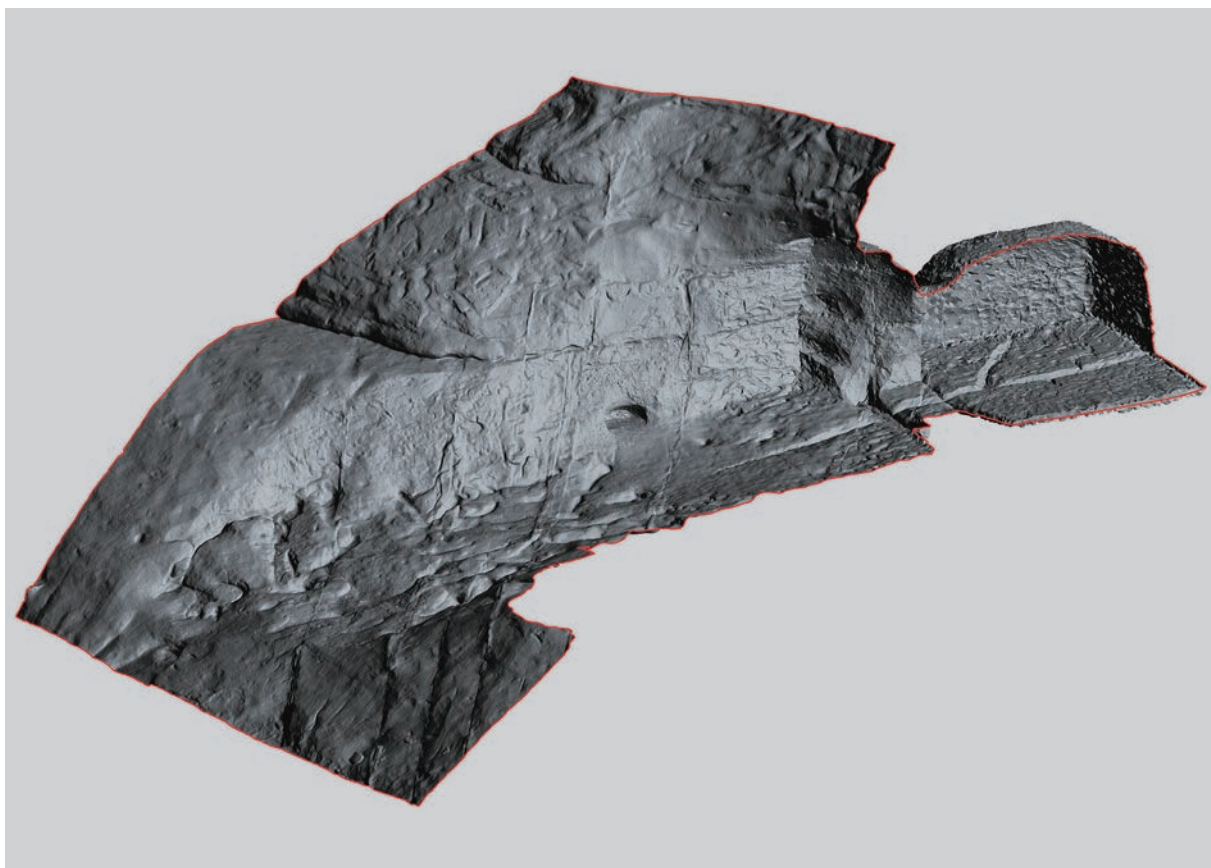


图 166 6号横穴墓

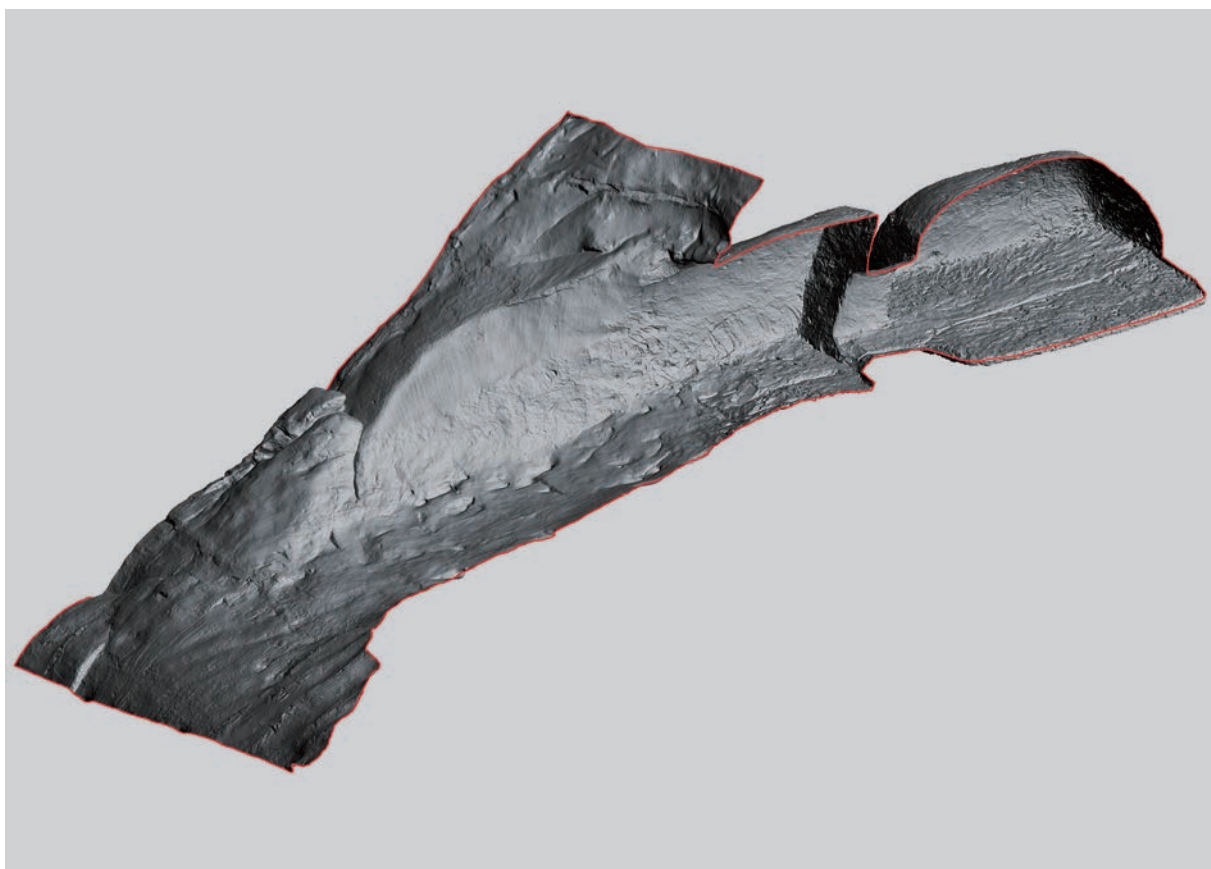


图 167 16号横穴墓



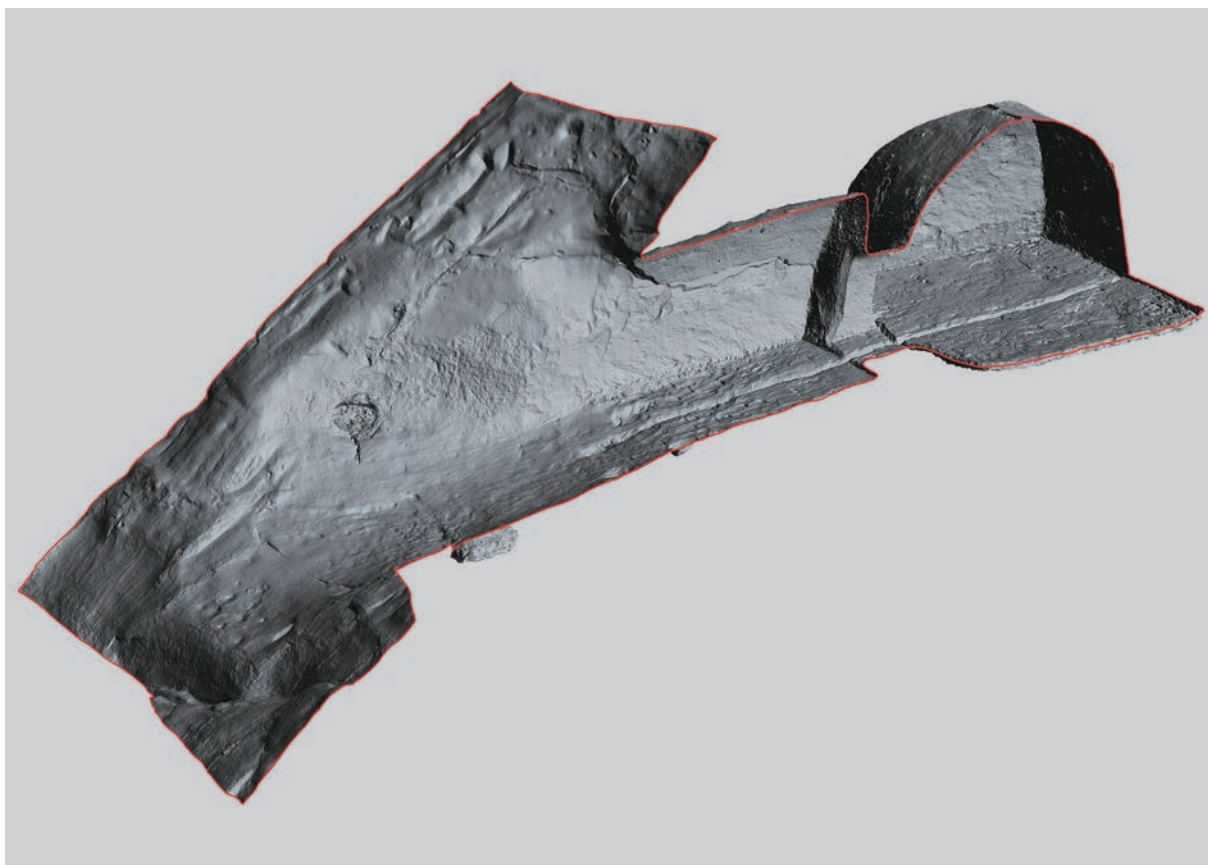


図 168 17号横穴墓

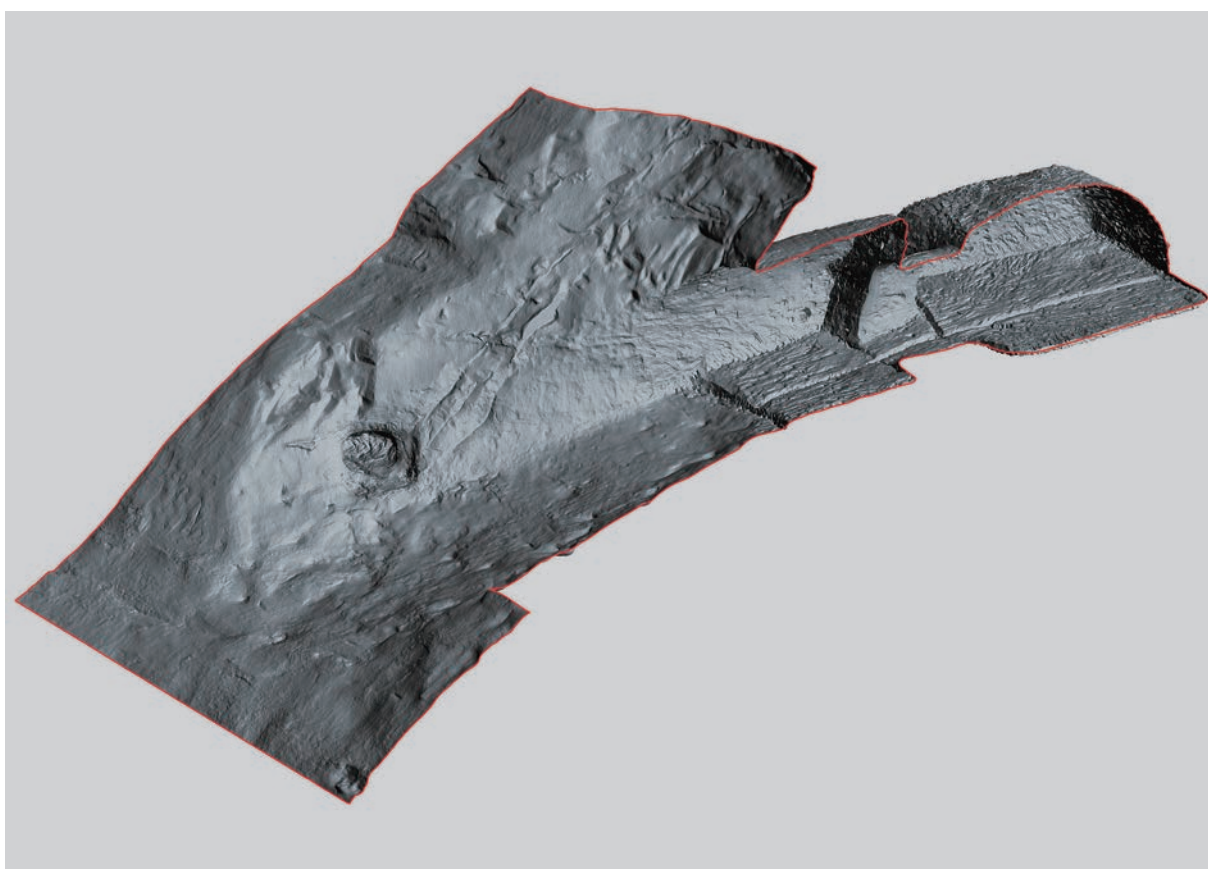


図 169 18号横穴墓



図 170 17号横穴墓 光源による違い