

既存の航空レーザ測量データを用いた
埋蔵文化財の把握に係る利用マニュアル
【第2部】

令和7年3月31日

埋蔵文化財発掘調査等技術検討委員会
文化庁文化財第二課

第2部 目 次

第2部 微地形表現図を用いた現地調査の実践と様々な測量・計測技術	1
1. 計測密度や地上解像度等の空間解像度	2
1.1. 計測密度とは	2
1.2. グリッド間隔と微地形表現図の解像度	3
1.3. 微地形表現図の解像度と判読できる埋蔵文化財の規模	3
2. CS 立体図のパラメータによる表現の違い	4
【コラム】 微地形表現図を「文化財総覧 WebGIS」で閲覧する	6
3. GIS を用いた各種地図の重ね合わせ	7
3.1. GIS を用いる上で重要な座標系の設定	7
3.1.1. 座標参照系 (CRS)	7
3.1.2. EPSG コード	7
3.1.3. QGIS での CRS 設定方法について	8
3.2. GIS 上で重ね合わせを行う手順	9
3.2.1. 新規レイヤの作成	9
3.2.2. レイヤの管理 (グループ化)	10
3.2.3. レイヤの一括表示/非表示	10
3.2.4. その他の地図の重ね合わせ機能	10
4. 微地形表現図を用いた現地踏査の実践	15
4.1. 現地踏査の準備	15
4.1.1. 調査対象とした地域と遺跡	15
4.1.2. 現地調査に用いた微地形表現図 (CS 立体図)	15
4.2. CS 立体図の判読	16
4.2.1. CS 立体図で判読できた古墳と確認を要する表現	16
4.2.2. 古墳の判読例	17
4.2.3. CS 立体図による古墳の表現に関する現地検証	24
4.2.4. 重ね合わせ図と現地における検証	26
4.2.5. 山城の判読と注意点	29
4.2.6. CS 立体図による山城の表現に関する現地検証	32
4.3. 検証結果－既存の航空レーザ測量データを使用する場合の注意点	39
4.3.1. 植生の影響	39
4.3.2. オーバーハング地形	41
4.3.3. 局所的な地形変化	41
4.3.4. ため池などの水域	42
【コラム】 微地形表現図の判読に際して注意を要する地形	43

4.4. 現地踏査の計測作業で用いるデジタル機器	45
4.4.1. 廉価版 GNSS 機器 (Droger)	45
4.4.2. カンタンマップ	46
4.4.3. Qfield	51
4.4.4. SmartSOKURYO POLE	54
4.4.5. 微地形表現図をスマートフォン等に取り込める無料アプリ①	55
4.4.6. 微地形表現図をスマートフォン等に取り込めるその他の無料アプリ②	57
【コラム】 現地調査での参考のための 3D メッシュモデル化	58
5. 航空レーザ測量では捕捉できない地形の計測	72
5.1. 現地での計測を要する埋蔵文化財の例	72
5.2. 手持ちレーザスキャナ計測の実践	79
5.3. 背負い型レーザスキャナ計測の実践	83
6. 埋蔵文化財の現地踏査で活用できる三次元計測	87
6.1. 概要	87
6.2. 手持ちレーザスキャナの計測事例	87
6.2.1. 計測機材と計測手法の概要	87
6.2.2. 手持ちレーザスキャナ (ZEB Horizon) の作業手順	92
6.3. 背負い型レーザスキャナの計測事例	97
6.3.1. 計測機材と計測手法の概要	97
6.3.2. 背負い型レーザスキャナ (LiGrip H120) の作業手順	101
6.4. GNSS 測量の活用	104
6.4.1. GNSS 機器による計測事例	104
6.4.2. 廉価版 GNSS (Droger) の活用	107
6.4.3. 使用上の注意点など	110
【コラム】 スギ人工林における Droger の精度検証	112
7. 様々な測量成果の活用	113
7.1. 空中写真	113
7.1.1. 空中写真に現れる埋蔵文化財の痕跡	113
7.1.2. 空中写真の閲覧・入手	115
7.1.3. 空中写真の選定に当たっての留意点	117
7.1.4. 空中写真の使用上の注意	118
7.2. SfM-MVS (Structure from Motion Multi View Stereo)	119
用語解説	121

第2部 微地形表現図を用いた現地調査の実践と様々な測量・計測技術

ここでは、令和5・6年度の「発掘調査のイノベーションによる新たな埋蔵文化財保護システムの構築に関する調査研究事業」で実施した調査研究、実証実験の成果について述べる。内容は次のとおりである。

- 1 埋蔵文化財の把握に係る航空レーザ測量データの精度に係ること
- 2 埋蔵文化財の把握に適したCS立体図の表現に係ること
- 3 GISでの微地形表現図と各種地図の重ね合わせに係ること
- 4 微地形表現図を用いた現地踏査の実践に係ること（準備～踏査～検証）
- 5・6 現地での三次元計測作業の係ること
- 7 空中写真等の活用に係ること

1. 計測密度や地上解像度等の空間解像度

第1部では、航空レーザ測量データの入手や微地形表現図を用いた地形判読や現地踏査の手順について解説した。本章では微地形表現図の詳細度に影響する計測密度や地上解像度について解説する。また、計測密度や微地形表現図の解像度と判読可能な埋蔵文化財の規模について述べる。

1.1. 計測密度とは

計測密度とは 1 m^2 あたりのレーザ照射密度であり、数値が高いほど多くの計測点があり地物を表現する解像度が高い（図 2-1-1）。計測点間隔、計測点密度とも呼ばれる。

航空レーザ測量の計測密度は、微地形表現図の空間解像度に影響する。例えば計測密度が平米あたりに 1 点照射されるような場合、微地形表現図は 1.0 m 解像度（1 セルが地上の $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ ）となり、計測密度が平米あたり 4 点の場合、（厳密には $0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m} = 0.25\text{ m}^2$ に 1 点照射されているわけではないが）微地形表現図は 0.5 m 解像度となる（図 2-1-2）。

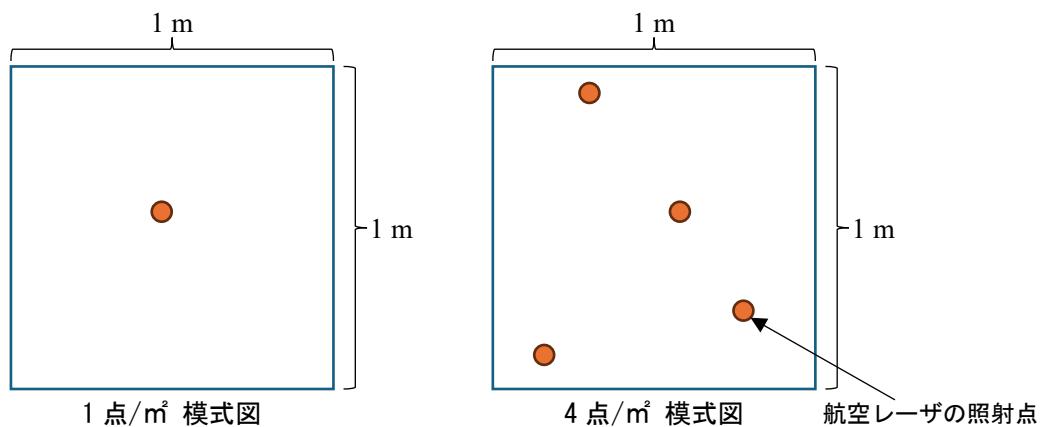


図 2-1-1 計測密度

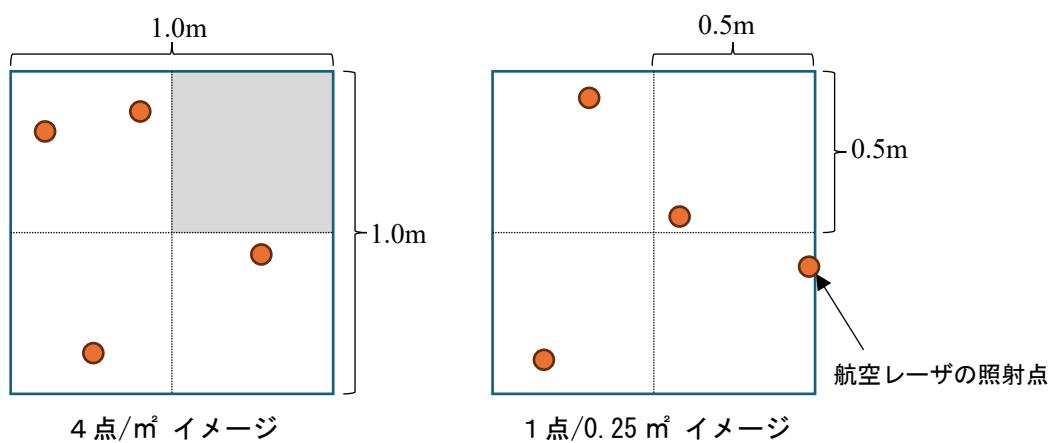


図 2-1-2 4 点/ m^2 と 1 点/ 0.25 m^2 のイメージ

1.2. グリッド間隔と微地形表現図の解像度

航空レーザ測量データポータルサイトでは、計測密度を 1 m^2 あたりで表記しているが、同じ計測密度であっても実際には、より詳細なデータである場合がある。図 2-1-2 の 2 つの図は、ともに計測密度は 4 点であるが、右図は $0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m} = 0.25\text{ m}^2$ に 1 点レーザ照射されているため、より詳細な解像度となる。実際の計測密度は、航空レーザ測量の業務成果に付属する報告書等を確認することで確認できる。計測密度が 4 点/ m^2 または 1 点/ 0.25 m^2 の航空レーザデータのグリッドデータは、 0.5 m 間隔で作られている場合が多く、微地形表現図も同様に 0.5 m 解像度で作成することが望ましい。

1.3. 微地形表現図の解像度と判読できる埋蔵文化財の規模

文化庁が令和 5 年度に実施した調査研究事業の中で、埋蔵文化財を把握する上で必要な精度について、 0.5 m 、 1.0 m 、 2.0 m 、 5.0 m の解像度の微地形表現図を用いて、地表に顕在化した埋蔵文化財を判読する実証実験を行った。その結果、微地形表現図の解像度の概ね 6 ～ 7 倍の規模の埋蔵文化財であれば判読が可能（判読誤差率の許容 20%）であると結論づけられた（表 1-1）¹。つまり、対象とする埋蔵文化財のおおよその規模が想定される場合、把握に必要な微地形表現図の地上解像度（及びそれに付随する航空レーザ測量の計測点密度）が分かることになる。反対に、使用している計測密度や微地形表現図の地上解像度が判ればどれくらいの規模の埋蔵文化財であれば検出が可能か、ある程度想定することができる。

なお、航空レーザ測量システムは近年飛躍的な性能向上が見られ、2010 年頃までは計測点密度が 1 ～ 2 点/ m^2 が一般的であったが、現在では 4 ～ 10 点/ m^2 の高密度計測が増えており、公共測量においても [地図情報レベル*500](#) の成果作成が求められることが多くなっている。そのため、測量成果の計測時期についても確認しておくことが重要である。

文化庁が実施した調査研究によると、 0.5 m 解像度と 1.0 m 解像度との間で判読性に大きな差は見られない。それは対象とした遺跡の直径または一辺の長さが最小でも 6 m 程度あつたからだと考えられる。令和 5 年度の調査研究では、 0.5 m 解像度で検出可能な最小の遺跡規模については検証されていないため、計算上の値として記載している。

表 2-1-1 埋蔵文化財の規模と計測点密度・地上解像度との関係

判読可能な埋蔵文化財の規模	計測密度	微地形表現図の地上解像度
3 ～ 4 m 以上（計算上）	4 点/ m^2	0.5 m
6 ～ 7 m 以上	1 点/ m^2	1.0 m
12 ～ 14 m 以上	1 点/ 4 m^2	2.0 m

¹ 文化庁文化財第二課埋蔵文化財部門・公益財団法人日本測量調査技術協会「令和五年度発掘調査のイノベーション事業の調査成果について『月刊文化財』8、2024 年、12-17 頁。

2. CS 立体図のパラメータによる表現の違い

CS 立体図は、その作成範囲や DEM の傾斜・曲率の違いによって、同じパラメータを使用しても出来上がりの色合いや濃さ・陰影が異なる。したがって、地表に顕在化した埋蔵文化財を把握するためには、適当なパラメータの設定が必要である。ここでは、設定パラメータと設定値の違いによる CS 立体図での見え方の変化について示すとともに、地形的な変化が捉えやすい、すなわち埋蔵文化財の把握に適していると考えられる数値を推奨値として示すこととする。

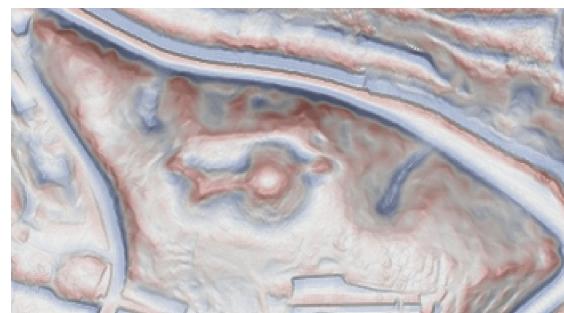
第1部 2.2 の【手順2】②で、高度なオプションにチェックを入れると各パラメータの値が設定でき最適な色合い等に調整可能である。パラメータには、以下の3つがあり、それぞれの設定値を変更することによる見え方の違いを示す。

- ・ Gaussian filter size : 画像を滑らかに表現するためのフィルターサイズ
- ・ Gaussian filter sigma : 画像表現の強調度を調整する値
- ・ Curvature filter size : 曲率のフィルターサイズ

○設定値変更による違い

<デフォルト>

Gaussian filter size = 12
Gaussian filter sigma = 3
Curvature filter size = 1

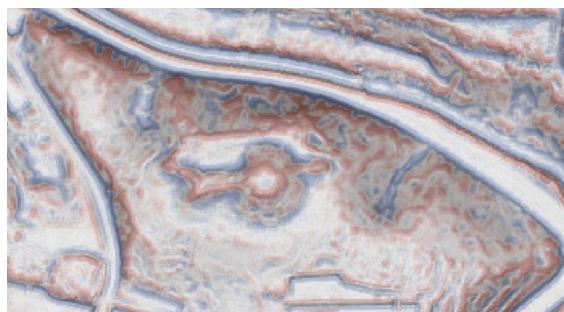


① Gaussian filter size を変更した場合

・ 12→5 減

Gaussian filter size = 5
Gaussian filter sigma = 3
Curvature filter size = 1

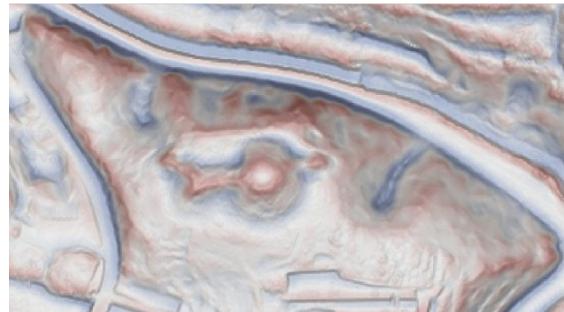
平滑フィルターサイズが
小さくなることにより、
凹凸が強調された表現に
なる



・ 12→20 増

Gaussian filter size = 20
Gaussian filter sigma = 3
Curvature filter size = 1

サンプルの 1 mDEM の場合
デフォルト値と変化なし

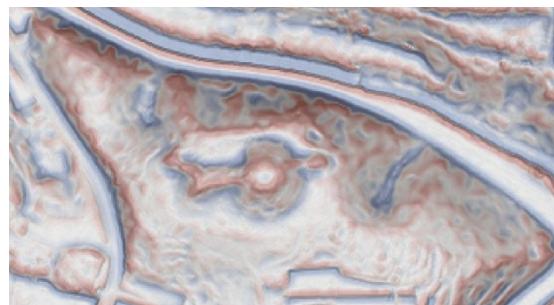


②Gaussian filter sigma を変更した場合

・3→2 減

Gaussian filter size = 12
Gaussian filter sigma = 2
Curvature filter size = 1

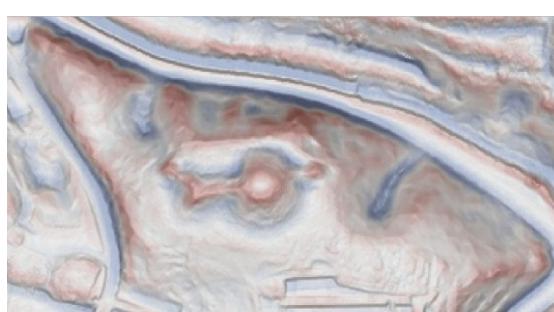
値を減らすと、
・凹凸が細かくなる
・赤青の強調が強くなる



・12→20 増

Gaussian filter size = 12
Gaussian filter sigma = 20
Curvature filter size = 1

値を増やすと、
・凹凸が滑らかになる
・赤青の強調が弱くなる



③Curvature filter size を変更した場合

・1→2 增

Gaussian filter size = 12
Gaussian filter sigma = 3
Curvature filter size = 2

値を1増やすと、
赤青が薄くなる



・1→3 增

Gaussian filter size = 12
Gaussian filter sigma = 3
Curvature filter size = 3

値を2増やすと、
さらに赤青が薄くなり
白色に近づく

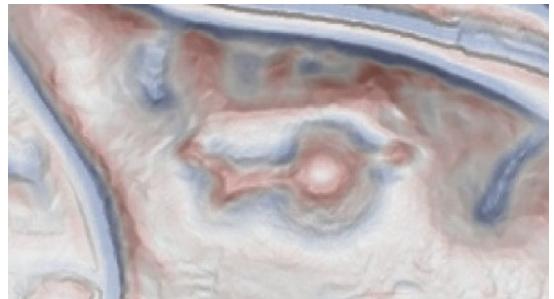


○今回の事例における推奨値

Gaussian filter size = 12

Gaussian filter sigma = 20

Curvature filter size = 1



【コラム】 微地形表現図を「文化財総覧 WebGIS」で閲覧する

独立行政法人国立文化財機構奈良文化財研究所が運営する「文化財総覧 WebGIS²」上で、一部の県が公開する CS 立体図を閲覧することができる。

操作手順：地図データ追加 > 地図 > 土地の凹凸 > (いくつかの地域で CS 立体図が表示できる)

その他の機能として、csv データの取り込みや 3D 表示ができる。サンプルデータ csv は同サイトからダウンロードが可能で（図 2-2-2）、現地で取得したポイントデータを csv 形式で取り込み、三次元表示することで判読・分布調査に利用することができる。



図 2-2-1 文化財総覧 WebGIS での CS 立体図表示

名称	時代	所在地	lat	lon
木造薬師如来坐像		奈良県奈良市登大路	34.683079	135.838007
絹本着色熊野曼荼羅図		奈良市登大路町50	34.68308	135.838002
覚禪鈔 164巻		奈良市	34.685117	135.804995
木造扁額 頽文「海住山寺」 1面		奈良市	34.685117	135.804995
西田家住宅内蔵	昭和	奈良県大和郡山市箕	34.6445	135.7787
海龍王寺西金堂	奈良	奈良県奈良市法華寺	34.69271	135.8053
春日大社攝社若宮神社	江戸	奈良県奈良市春日野	34.67987	135.849

図 2-2-2 サンプルデータ csv の一例

² <https://heritagemap.nabunken.go.jp/>

3. GIS を用いた各種地図の重ね合わせ

作成した微地形表現図を遺跡地図等への反映するためには、既存の複数の地図との重ね合わせが必要になる。今回は、無償で利用可能なオープンソースの GIS ソフト「QGIS」を使用して重ね合わせを行う手順を記す。

3.1. GIS を用いる上で重要な座標系の設定

3.1.1. 座標参照系 (CRS)

各種データを重ね合わせる際は、まず収集した各種データの座標参照系 (CRS: Coordinate Reference System) を確認する必要がある。

座標参照系は大きく分けて、「地理座標系」と「投影座標系」の 2 種類がある。「地理座標系」は地球を球体とみなして緯度経度で位置を表す。一方、「投影座標系」は地球の狭い範囲の一部を平面へ投影し、ある原点からの X 方向と Y 方向の距離で位置を表すものである。

GIS データを重ね合わせるためには、どのような座標系に基づいてそのデータが作成されているかを把握する必要があり、それを知ることにより原点や座標の単位が異なる座標系の GIS データ同士でも重ね合わせることが可能となる。

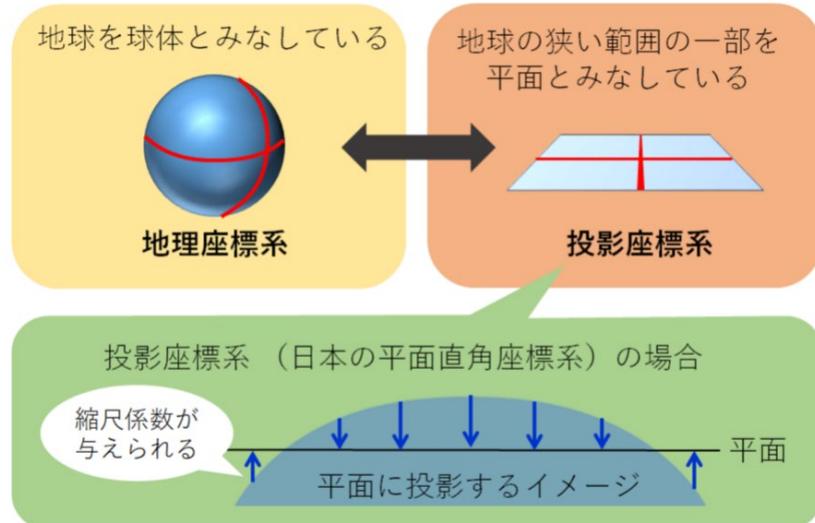


図 2-3-1 地理座標系と投影座標系の概念³

3.1.2. EPSG コード

QGIS で座標参照系 (CRS) を設定する際、"EPSG XXXX" という表記がみられる。これは、「EPSG (European Petroleum Survey Group) コード」と呼ばれるもので、各国の様々な測地系や投影法に対して一意に識別可能な ID 番号を振り分けたものである。EPSG コードは重複がないため、よく使う座標参照系の EPSG コードを把握しておくと便利である。

³<https://www.aeroasahi.co.jp/fun/column/19/>

表 2-3-1 EPSG コードの例

EPSG コード	座標参照系 (CRS)	単位
4326	WGS 84	度
6668	JGD2011	度
3857	WGS 84 / Pseudo-Mercator	メートル
6677	JGD2011/ <u>平面直角座標系</u> * 第IX系	メートル

3.1.3. QGIS での CRS 設定方法について

QGIS での座標参照系 (CRS) の設定は、大きく分けて「データ (レイヤ) の CRS」と、「プロジェクトの CRS」の 2 つがある。

「データ (レイヤ) の CRS」は、レイヤプロパティのソースより設定することが可能である。なお、データにとって誤った CRS を選択した場合には、本来データが作成された範囲とは異なる場所に表示されてしまうため、注意を要する。

QGIS の場合、「プロジェクトの CRS」は「データ (レイヤ) の CRS」と違い、これが正解というものはないが、設定する「プロジェクトの CRS」によって見かけ上の距離や面積に差異が生じる。図 2-3-2 にその事例を示す。例示 A は平面直角座標系のプロジェクト CRS で例示 B は地理座標系のプロジェクト CRS である。地理座標系は楕円体に投影するため平面のディスプレイで表示すると横に間延びしているように見える。QGIS 上の見え方が異なってはいるが、どちらの「プロジェクトの CRS」と「データの CRS」も間違っていない。

	プロジェクト CRS	座標の単位	データ CRS	座標の単位	表示例
A	JGD2000 / 平面直角座標系 第IX系 (投影座標系)	m	JGD2000 / 平面直角座標系 第IX系 (投影座標系)	m	
B	JGD2000 (地理座標系)	度	JGD2000 / 平面直角座標系 第IX系 (投影座標系)	m	

上図の A と比較して境界データが少し違った形に見える

図 2-3-2 「プロジェクトの CRS」の違いの例（見え方はプロジェクトの CRS に依存する）⁴

⁴ <https://www.aeroasahi.co.jp/fun/column/23/>

3.2. GIS 上で重ね合わせを行う手順

3.2.1. 新規レイヤの作成

GIS 上には新規レイヤを作成して、作図することができる。GIS では、点（ポイント）、線（ライン）、面（ポリゴン）で地物を表現するものをベクタと呼び、それぞれの点や頂点は座標値を持つ。また、レイヤに属性を設定すれば、各地物についての様々な情報を付与することも可能である。

QGIS でベクタレイヤを作成する際には、「レイヤ」→「レイヤを作成」より追加することができる。ジオメトリ型では、点（ポイント）、線（ライン）、面（ポリゴン）のいずれかを選択し、必要な分の属性項目を追加する。属性項目は「データ型」によって、格納できるデータ内容が異なる（表 2-3-2）。

表 2-3-2 データ型の例

データ型	内容	例
テキスト (string)	文字列を扱うためのデータ型。	“ABC”、“日本”
整数 (integer)	整数值を表すデータ型。 正の数、負の数、ゼロを含むすべての整数を扱うことができる。	0、1、100、-123
実数 (real)	小数を含む値を扱うデータ型。	1.23、3.14、-99.9
日付 (Date)	日付や時刻を表すデータ型。	2024-04-15

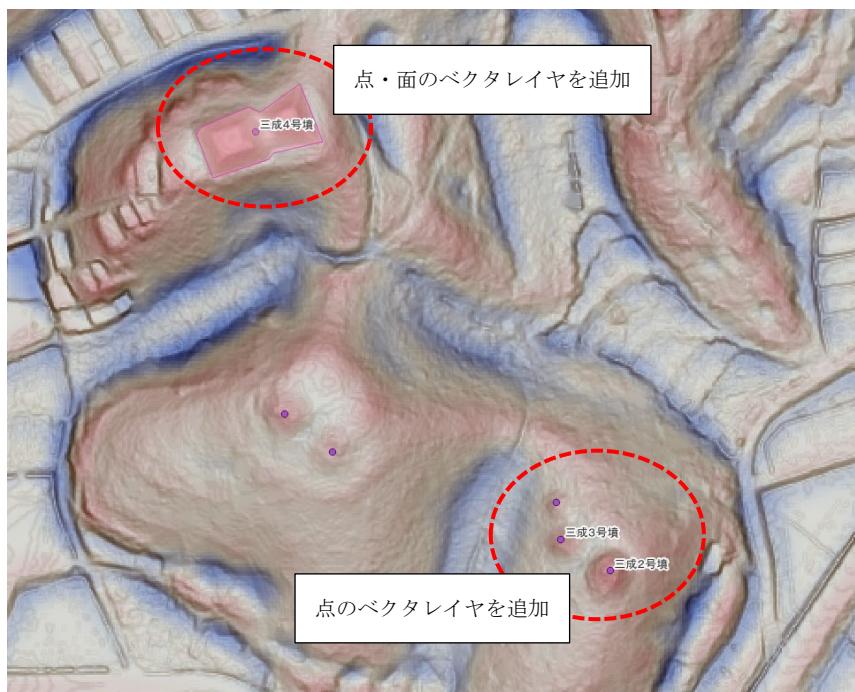


図 2-3-3 ベクタレイヤ追加例 (QGIS の例)

3.2.2. レイヤの管理（グループ化）

GIS 上では各種データはレイヤで管理される。図面を複数使用している場合は、レイヤをグループで整理すると扱いやすい。また、グループ名を変更しておくと把握しやすい。

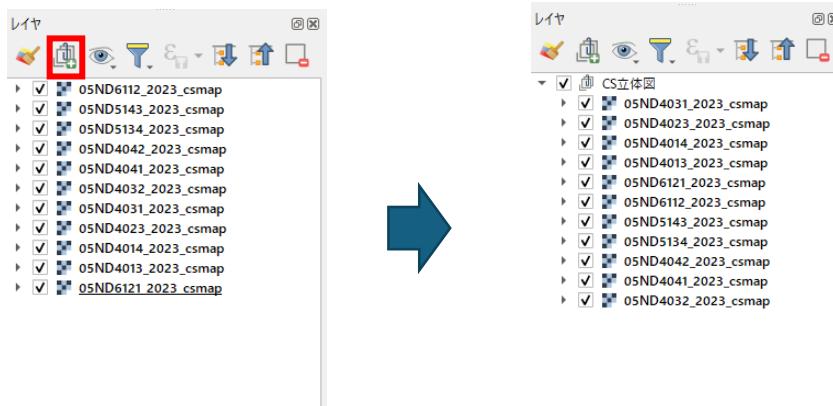


図 2-3-4 レイヤのグループ化 (QGIS の例)

3.2.3. レイヤの一括表示/非表示

QGIS では、複数レイヤを一括表示／非表示することが可能である。Ctrl キーを押しながらレイヤを複数選択し、Ctrl+Space キーを同時に押すことで、レイヤの一括表示／非表示を行うことができる。

3.2.4. その他の地図の重ね合わせ機能

1) 地図タイルの活用

その他の地図の重ね合わせには、国内で公表されている地図タイルの配信サービスの利用が想定される。代表的な地図タイル配信サービスとして、「地理院タイル」や「20 万分の 1 日本シームレス地質図 V2 Web API」、「G 空間情報センター」などがあげられる（図 2-3-6）。

地図タイルの URL は通常末尾が「{z}/{x}/{y}.png」や「{z}/{x}/{y}.jpg」となっている。例えば、国土地理院の電子地形図（タイル）淡色地図の例では、

<https://cyberjapan.gsi.go.jp/xyz/pale/{z}/{x}/{y}.png> と表示される。

地図タイルは、インターネットにつながっている PC であれば QGIS で簡単に読み込むことができる。QGIS でタイルを読み込むには、ブラウザパネルの XYZ Tiles を右クリックして「新規接続」を選択する。次に XYZ 接続というポップアップが立ち上がる所以、「URL」にタイルの URL、「名前」に任意の名称を記載し「OK」をクリックする。ブラウザパネルの XYZ Tiles のプルダウンメニューに先ほど入力したタイルが追加されているので、これをダブルクリックすると地図にタイルが追加される（図 2-3-5）。なお、QGIS ではレイヤプロパティからシンボルのレイヤレンダリングを、混合モードで乗算 (Multiply) に設定すると、タイル画像が半透明となるため、重ね合わせした際に各種画像が見やすくなる。

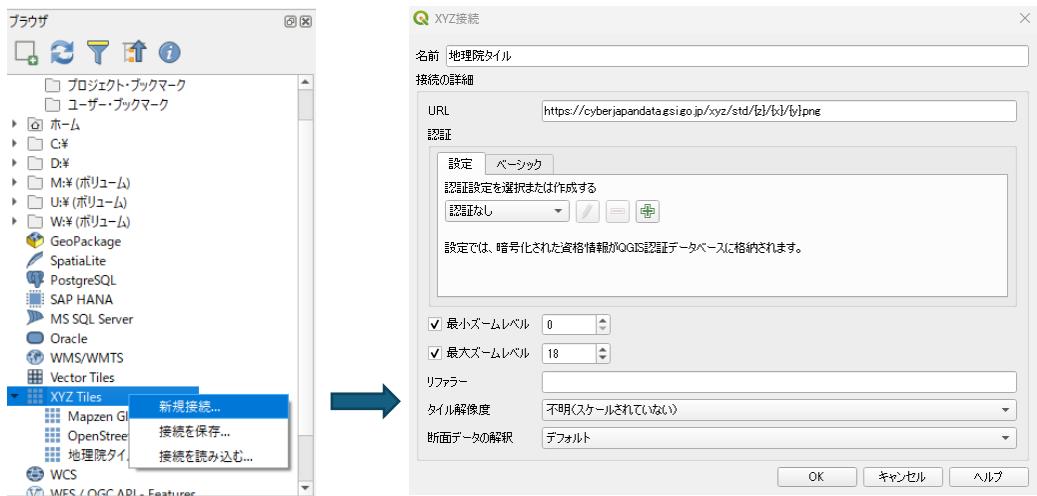


図 2-3-5 地図タイルの読み込み設定 (QGIS の例)

地理院タイル (外部サイト)

国土地理院の測量成果をはじめとして各種の地形図や戦前からの空中写真、主題図、災害対応などの情報が幅広く公開されている国内最大のタイル配信サービス。先ずはこちらから。

<https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html>

20万分の1日本シームレス地質図 V2 Web API (外部サイト)

産業技術総合研究所 地質調査総合センターの提供する20万分の1地質図のタイル。地質図凡例の種類ごとの情報の取得も可能。

<https://gbank.gsj.jp/seamless/v2/api/1.2/#tiles>

G 空間情報センター (外部サイト)

G 空間情報センターは、自治体から民間企業、NPO 法人など、様々な機関の保有する情報をタイル配信している。

※リンクは G 空間情報センターでタイルデータを絞り込み検索している。

https://www.geospatial.jp/ckan/dataset?q=&res_format=XYZ&sort=views_recent+desc

図 2-3-6 国内の代表的な地図タイル配信サービス

2) ポイントデータの読み込みと表示

ポイントデータは GIS に取り込んで表示することができるポイント (点) 状のデータで、データ形式やデータの種類がいくつかあるため、代表的なものを次に示す。

表 2-3-3 ポイントデータの形式・種類

データの形式	<ul style="list-style-type: none"> ・シェープファイル形式 (~.shp .shx .dbf 等の複数ファイルでひとまとまり) ・csv 形式 ・txt 形式
データの種類	<ul style="list-style-type: none"> ・現地調査のためのポイントデータ ・航空レーザ測量のポイントデータ (グリッドデータ、グラウンドデータなど)

<ポイントデータを GIS 等での読み込む際の注意点>

本書で取り扱うデータの種類は、主に現地調査のためのポイントデータと、航空レーザ測量のポイント（点群）データがある。現地調査のためのポイントデータは、事前に踏査候補地点をピックアップしたデータや、踏査で取得したデータ等がある。点数は点群データと比較して格段に小さくなる。

一方、グリッドデータやグラウンドデータといった航空レーザ測量のポイント（点群）データは膨大な点数になるため、取り込みや表示には時間がかかり PC に負荷がかかることが想定される。

<ポイントデータの GIS 等での読み込み方法>

シェープファイル形式のポイントデータを QGIS に取り込む方法は単純で、フォルダ内の .shp という拡張子のデータを、QGIS にドラッグ＆ドロップすればよい。

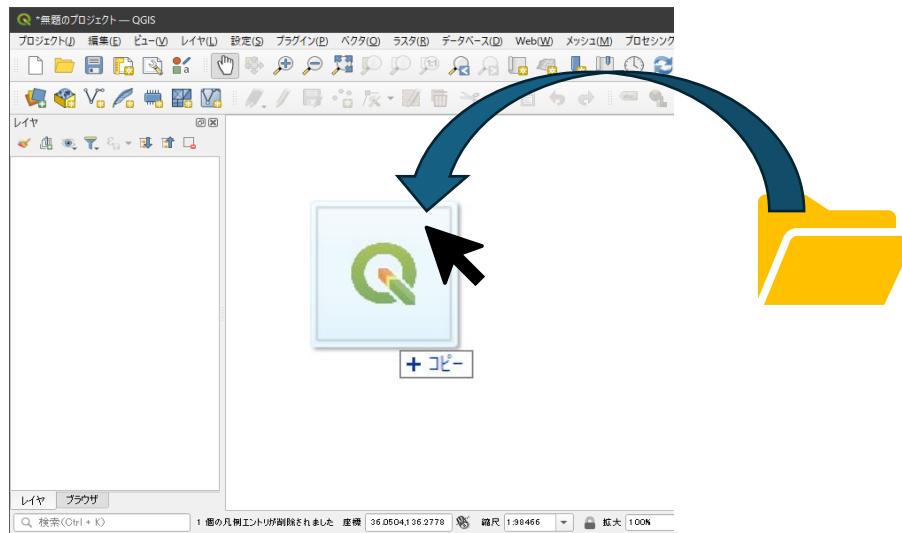


図 2-3-7 シェープファイルの QGIS への取り込み方法イメージ

csv 形式や txt 形式のデータを取り込む際には、以下の手順で行う。

- ① 「レイヤ」ツールバー > 「レイヤを追加」 > 「CSV テキストレイヤを追加」

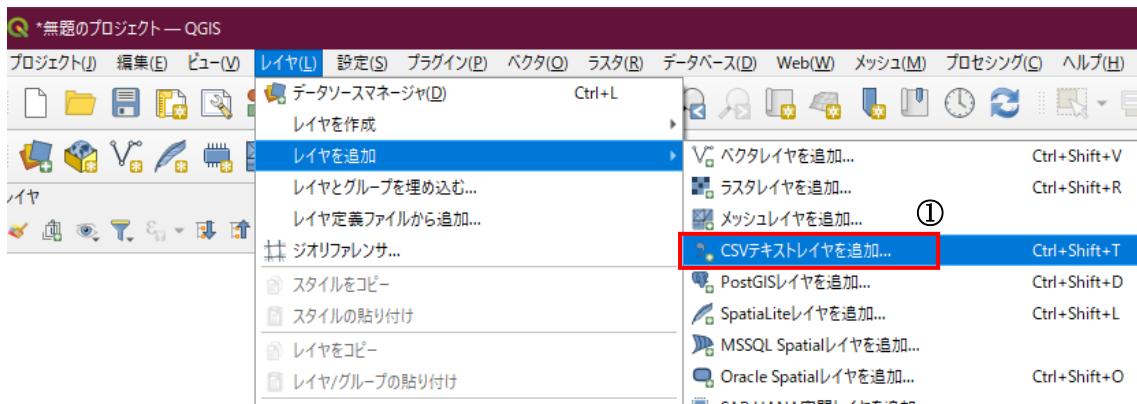


図 2-3-8 CSV テキストレイヤの追加方法

- ② 「データソースマネージャ|CSV テキスト」がポップアップする
- ③②の「ファイル名」右端の「…」から取り込む csv 形式または txt 形式を選択
- ④ 「レコードフィールドのオプション」をデータに合わせて設定する
- ⑤ 「ジオメトリ定義」をデータに合わせて設定する
- ⑥ 「サンプルデータ」を確認して問題が無ければ「追加」を選択し QGIS に取り込む

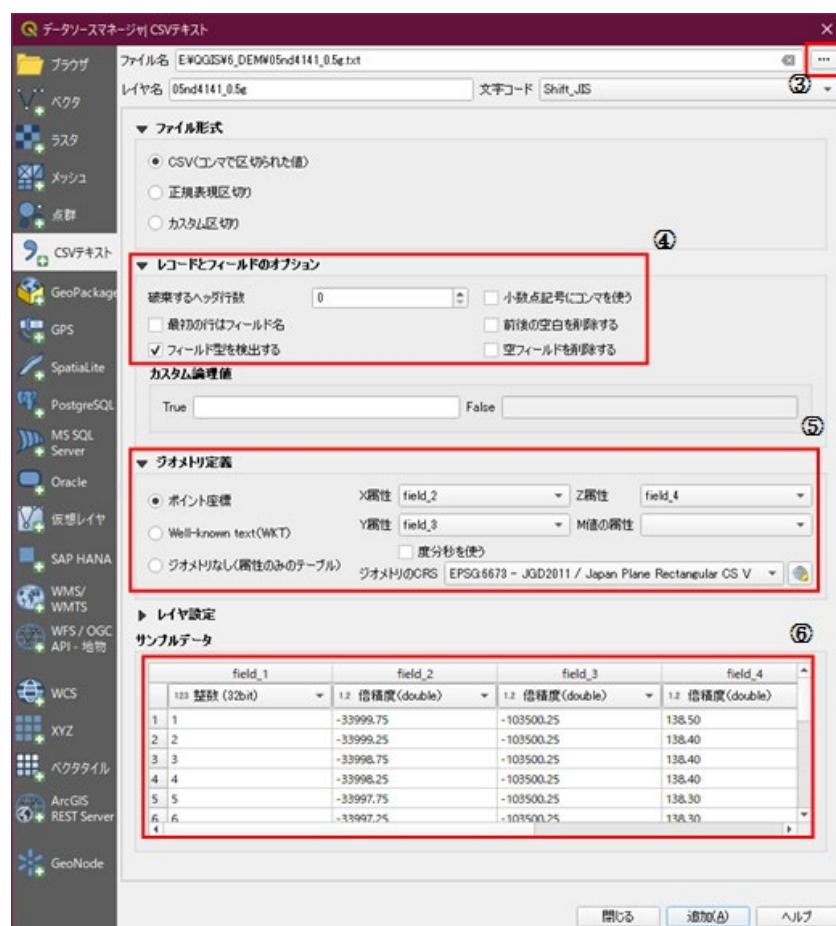


図 2-3-9 データソースマネージャ|CSV テキスト

もし取り込んだポイントデータが全く違う場所に表示された場合、まずは座標系の設定に誤りがないかを確認する。座標系に問題がなければ、データソースマネージャの「ジオメトリ定義」でX座標とY座標を入れ替えて再度取り込んでみる。なお、QGISに間違えて取り込まれたシェープファイル（を右クリック）>「レイヤの削除」を行っても、QGIS上から削除されるだけで、元のデータが消去されるわけではない。

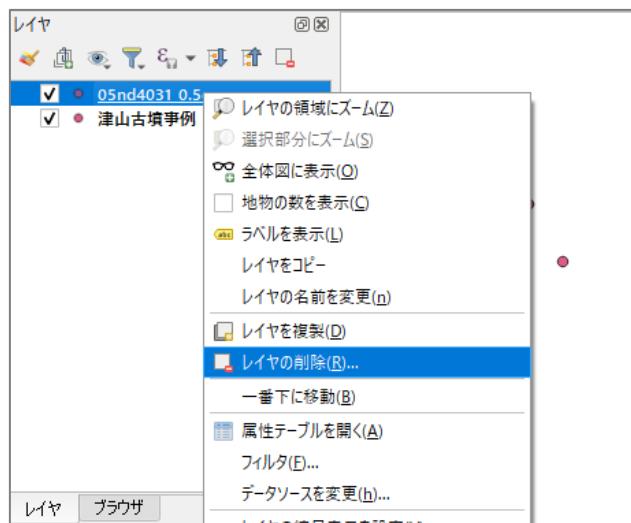


図 2-3-10 QGIS の「レイヤの削除」

<ポイント（点群）データの活用事例>

重ね合わせ図にグラウンドデータを重ね合わせると、実際に取得された計測密度の疎密が明らかになる。航空レーザ測量の性質上、樹木が繁茂する場所や崖面などではデータ取得率が低いため点密度が低くなる。このような計測密度が低い場所は、微地形表現図での地形再現性が低いため、現地踏査では特に注意しておく必要がある。

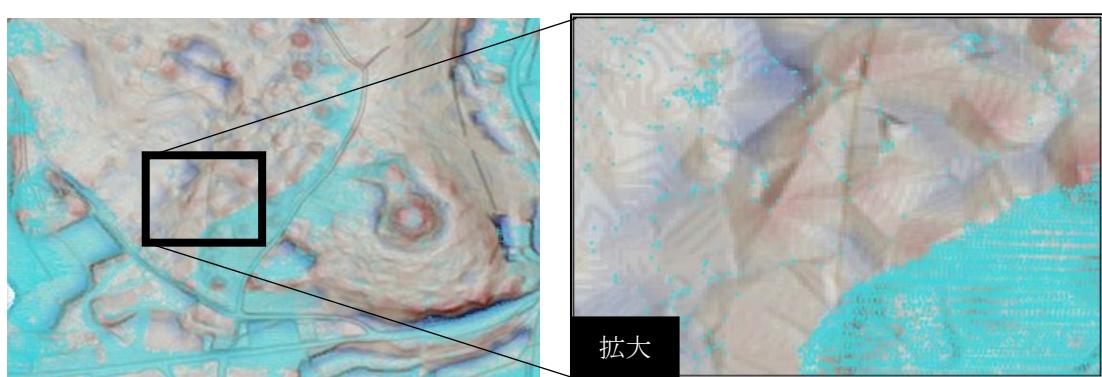


図 2-3-11 地理院タイル・微地形表現図・グラウンド点の重ね合わせ例

(図中の水色点が、グラウンド点を示す)

4. 微地形表現図を用いた現地踏査の実践

本章では調査研究事業（令和6年度）で行った現地踏査の実践例を紹介する。微地形表現図と各種地図（地理院地図、航空写真地図）及び、現地の写真・計測結果との比較によるケーススタディの紹介と埋蔵文化財の判読事例をまとめ。また、現地で追加の三次元計測を行う際の機器や、現地踏査において調査者の現在地や埋蔵文化財の位置情報を得るための機器についても紹介する。

4.1. 現地踏査の準備

4.1.1. 調査対象とした地域と遺跡

ケーススタディとして取り上げるのは、岡山県津山市に所在する古墳（日上畠山古墳群、美和山古墳群、久米三成古墳群）と山城（岩屋城跡）である。前者には、主に前方後円墳や円墳が含まれ、規模は100m以上のものから10m未満のものまで多様である。これらの古墳が微地形表現図上でどのように表現されているのかを、実物の見え方や形状について写真や測量図等と比較することで説明する。後者は、山城を構成する遺構ごとに微地形表現図上の見え方と実際の見え方・形状を対比させて示す。

4.1.2. 現地調査に用いた微地形表現図（CS 立体図）

CS立体図は、航空レーザ測量成果の地形解析で算出する曲率（Curvature）と傾斜（Slope）との組み合わせ画像により作成する微地形表現図の一種である。尾根などの凸地形は赤、谷などの凹地形は青で表現し、急斜面は濃い色、緩斜面は淡い色で表現する。したがってやせ尾根は濃い赤で、緩やかな尾根は薄い赤となり、深い谷は濃い青、浅い谷は薄い青となり平坦地は白っぽく表現される（図2-4-1）。

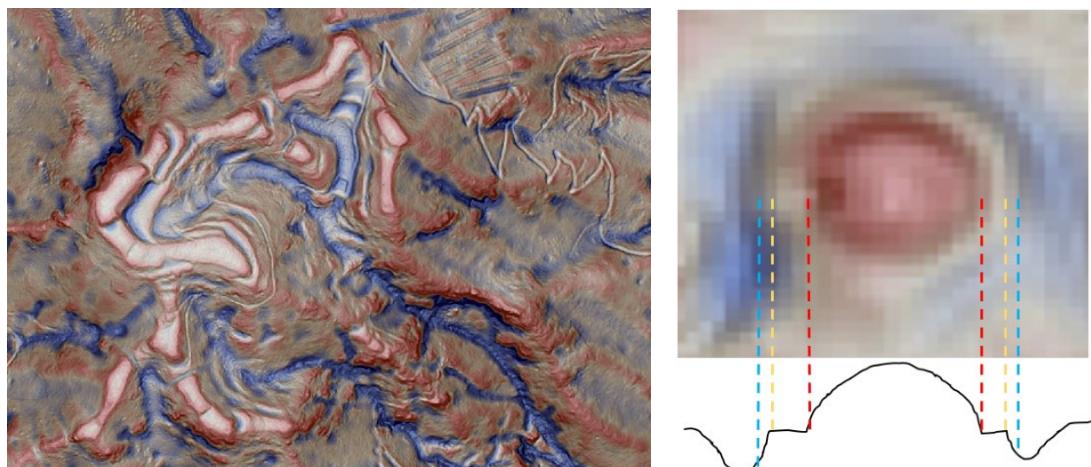


図2-4-1 CS立体図による山城の事例と円墳の色の表現イメージ

4.2. CS 立体図の判読

4.2.1. CS 立体図で判読できた古墳と確認を要する表現

CS 立体図での古墳の特徴は、平面形が前方後円形、前方後方形、円形、方形等をなす凸状の地形であり、裾部では濃い赤を呈し、墳頂にうつるにつれ赤が薄くなる。墳頂部では傾斜が緩いため白っぽく表現される。下の図は美和山古墳群の美和山 2 号墳の CS 立体図と CS 立体図の模式図である。裾部において周溝があるように青で示されているが、現地写真では確認できないため現地踏査で確認を要するポイントである。

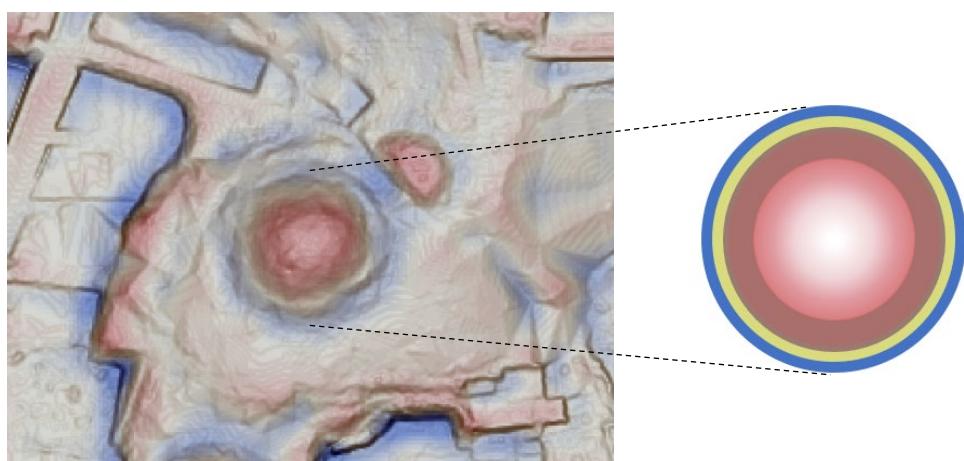


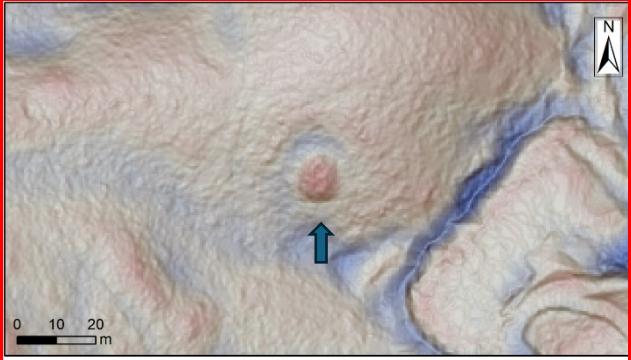
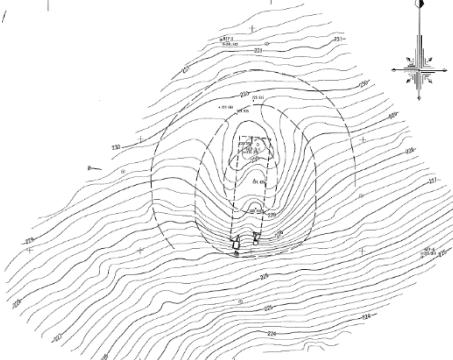
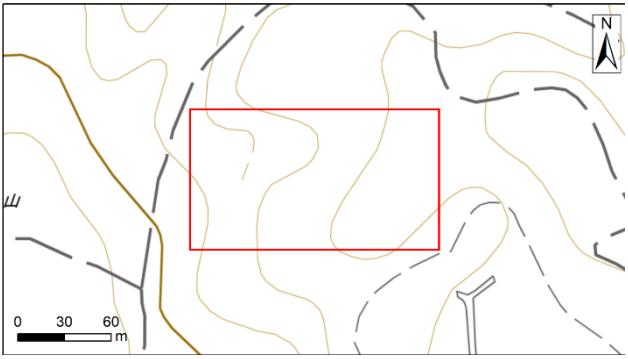
図 2-4-2 微地形表現図 (CS 立体図) による表現 (美和山 2 号墳)



図 2-4-3 美和山 2 号墳の現況

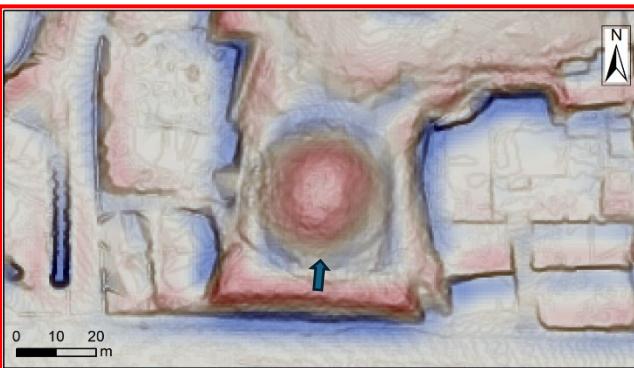
4.2.2. 古墳の判読例

ここでは、墳形や規模が異なる古墳の判読事例について、CS 立体図と国土地理院地図、航空写真、墳丘測量図それぞれの見え方を対比して示す。

大沢古墳 5 号墳	
微地形表現図（縮尺：1/1,000）	墳丘測量図（津山市提供）
	
地理院地図・写真（縮尺 1/2,500）	地理院地図・淡色地図（縮尺 1/2,500）
	
墳丘測量図添付の現地写真（津山市提供）	<p>概要：</p> <p>大沢 4 号墳の東隣。径 9 m の円墳。横穴式石室。石室残存長 3.7m、幅 1.4m。</p> <p>（出典：岡山県全県統合型 GIS・埋蔵文化財）</p>
	

美和山3号墳

微地形表現図（縮尺：1/1,000）



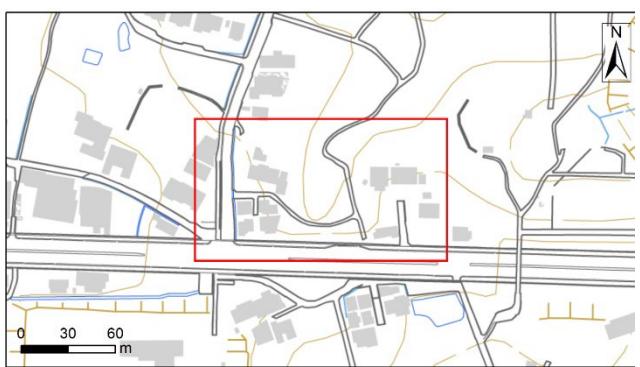
墳丘測量図（津山市提供）



地理院地図・写真（縮尺 1/2,500）



地理院地図・淡色地図（縮尺 1/2,500）



現地写真



概要：

2号墳の南尾根上。径36m、高さ6.5mの円墳。葺石、埴輪を伴う。

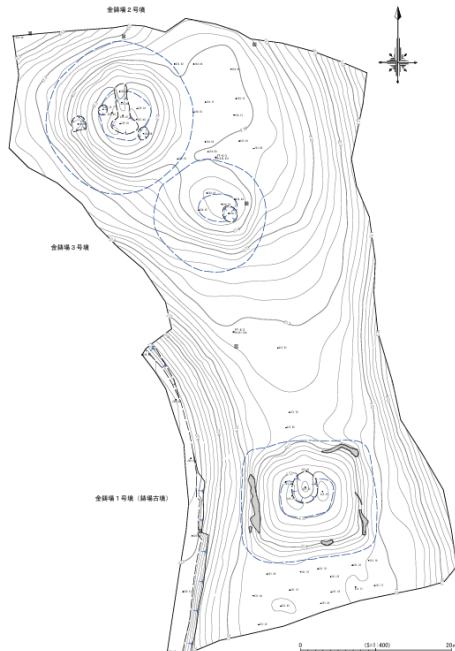
（出典：岡山県全県統合型GIS・埋蔵文化財）

鋳場古墳

微地形表現図（縮尺：1/2,000）



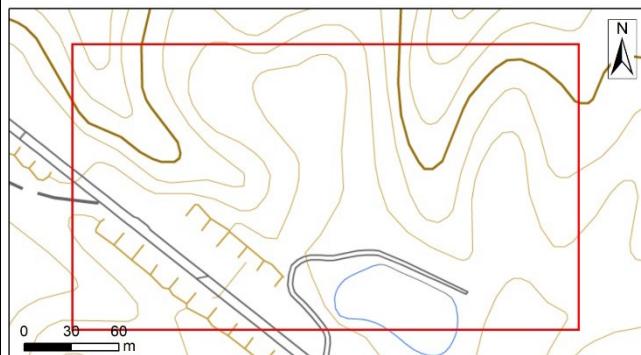
墳丘測量図（津山市提供）



地理院地図・写真（縮尺 1/2,500）



地理院地図・淡色地図（縮尺 1/2,500）



現地写真⁵



概要：

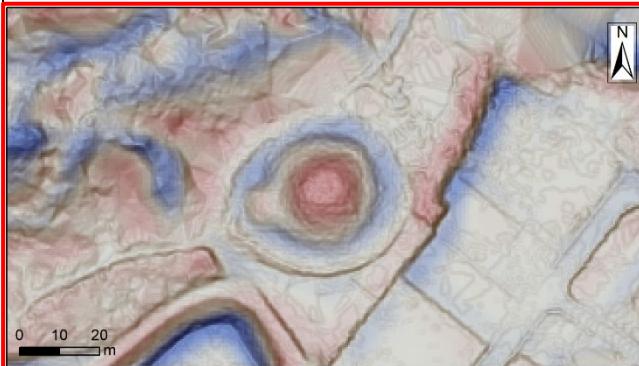
- 【1号墳】金鋳場池西側尾根頂部。一辺 16m、高さ 2m の方墳。
- 【2号墳】1号墳に北接。径 11m、高さ 1.5m の円墳。葺石と思われる石材が散乱。
- 【3号墳】1・2号墳の北側、尾根のやや北側。径 9m、高さ 1m の円墳。

(出典：岡山県全県統合型 GIS・埋蔵文化財)

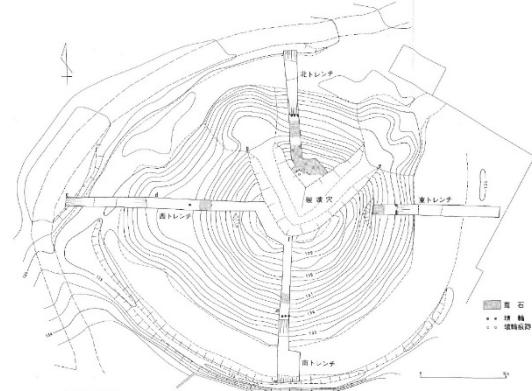
⁵ 津山市教育委員会編 『年報津山弥生の里』22号、2015年、25頁

井口車塚古墳

微地形表現図（縮尺：1/1,000）



墳丘測量図（津山市提供）



地理院地図・写真（縮尺 1/2,500）



地理院地図・淡色地図（縮尺 1/2,500）



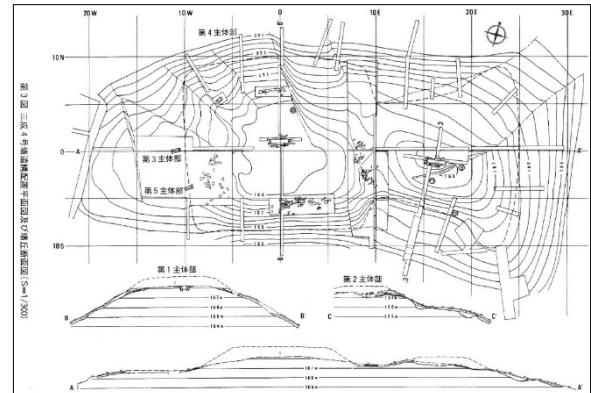
概要：全長 35m、円丘部径 30m、高さ 5 m の帆立貝形の古墳。馬蹄形に周溝がめぐる。二段築成で葺石、埴輪が伴う。造出し部分の周溝内から形象埴輪が多数出土。（出典：岡山県全県統合型 GIS・埋蔵文化財）

久米三成古墳 4号墳

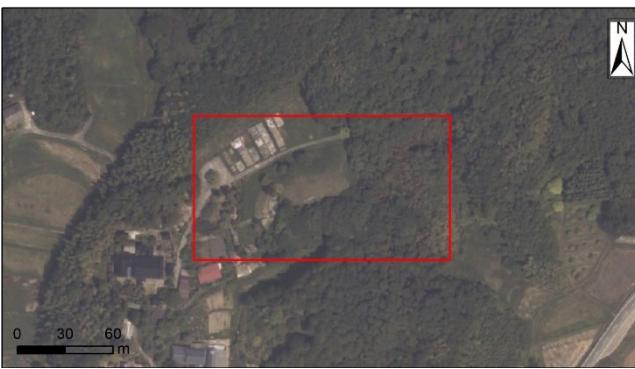
微地形表現図（縮尺：1/2,500）



墳丘測量図（津山市提供）



地理院地図・写真（縮尺 1/2,500）



地理院地図・淡色地図（縮尺 1/2,500）



現地写真



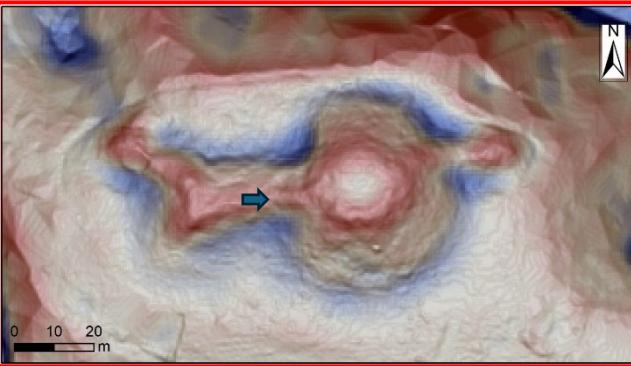
概要：

丘陵先端頂部。全長 35m の前方後方墳。昭和 52 年の墓地造成工事中に発見。発掘調査実施。前方部・後方部墳頂および後方部墳端に箱式石棺。後方部に葺石をもつ。

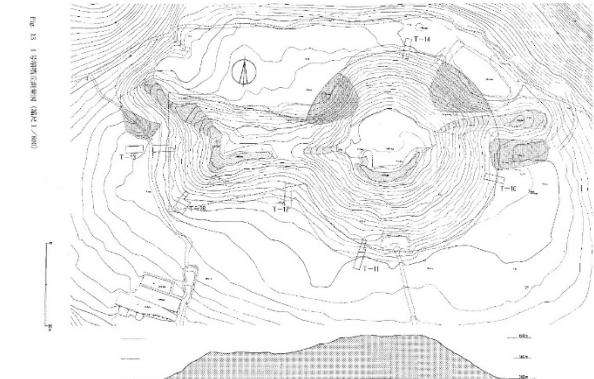
（出典：岡山県全県統合型 GIS・埋蔵文化財）

美和山 1 号墳

微地形表現図（縮尺：1/1,000）



墳丘測量図（津山市提供）



地理院地図・写真（縮尺 1/2,500）



地理院地図・淡色地図（縮尺 1/2,500）



現地写真



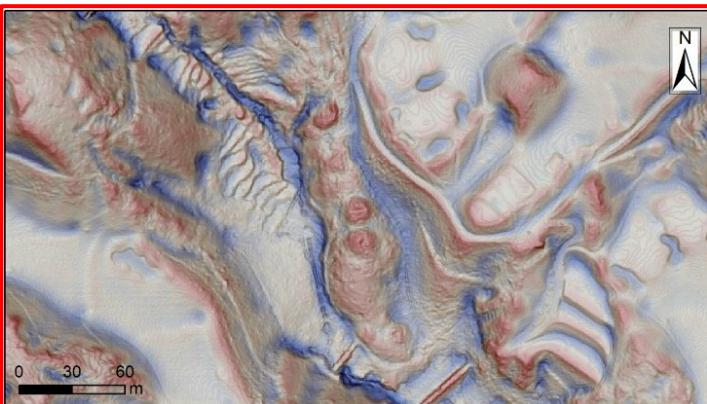
概要：

丘陵頂部にある全長 80.5m、後円部径約 48m、高 10.4m の前方後円墳。葺石、埴輪を伴う。後に城に利用されたため、墳丘の一部が削平されている。

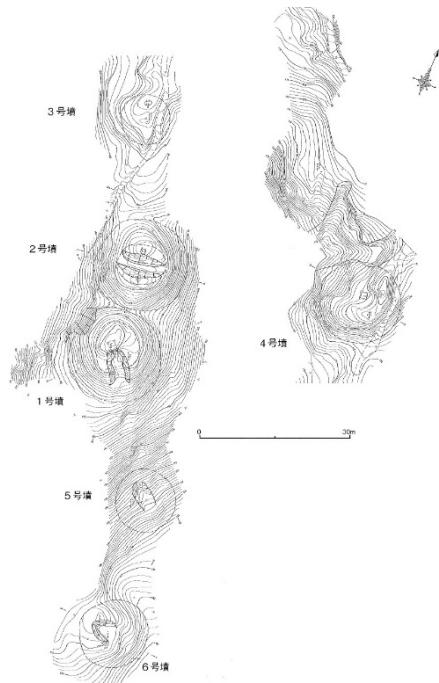
（出典：岡山県全県統合型 GIS・埋蔵文化財）

七つ塚古墳群

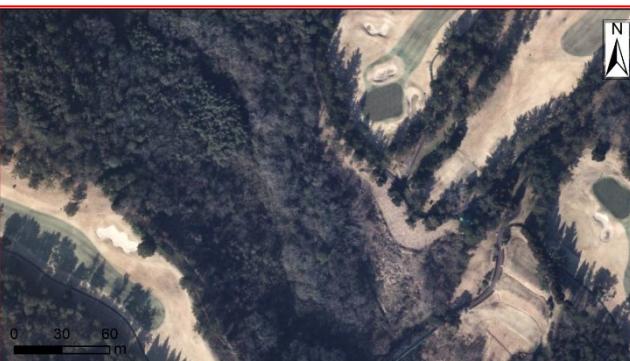
微地形表現図（縮尺：1/2,500）



墳丘測量図（津山市提供）



地理院地図・写真（縮尺 1/2,500）



地理院地図・淡色地図（縮尺 1/2,500）



現地写真⁶



概要：

- 【1号墳】 稲山遺跡と同一丘陵南斜面下方。径 18m の円墳。横穴式石室。
 - 【2号墳】 1号墳の北隣。径 18m の円墳。横穴式石室をもつ可能性あり。
 - 【3号墳】 2号墳の北隣。径 10m、高さ 1.7m の円墳。
 - 【4号墳】 3号墳の北隣。径 16m の円墳。横穴式石室をもつ可能性あり。
 - 【5号墳】 1号墳の南側斜面下方。径 9m、高さ 1.5m の円墳。
 - 【6号墳】 5号墳の東隣。径 12m の円墳。横穴式石室。
- （出典：岡山県全県統合型 GIS・埋蔵文化財）

⁶ 津山弥生の里文化財センター編『年報津山弥生の里』23号、1994年、29頁

4.2.3. CS 立体図による古墳の表現に関する現地検証

日上畠山古墳群は、津山市街地の南東の畠山丘陵南端に位置し、前方後円墳である日上天王山古墳と、その北側から西側にかけて平均直径 10m程度の円墳群からなる。

図 2-4-4 は、日上天王山古墳の CS 立体図および地表面付近から計測した手持ちレーザスキャナによる三次元点群の断面図である。前方後円形の凸地形が明瞭に確認でき、CS 立体図でも前方後円墳であると推定でき、現地でも前方後円墳であることを確認した。一方、CS 立体図で古墳周囲に青色で表現されている周濠状の表現は、現地の地表面観察では確認できなかった。そこで、CS 立体図にみえる凹凸表現の実態を知るため、手持ちレーザスキャナによる計測と横断図作成を行った。その結果、後円部の比高が 5 m で、これが赤色で表現されていること、周囲の青色の表現は、実際には凹地形ではなく、地形の曲率を計算していることから急傾斜から平坦地に変化する地形が青色で表現されていることが分かった。

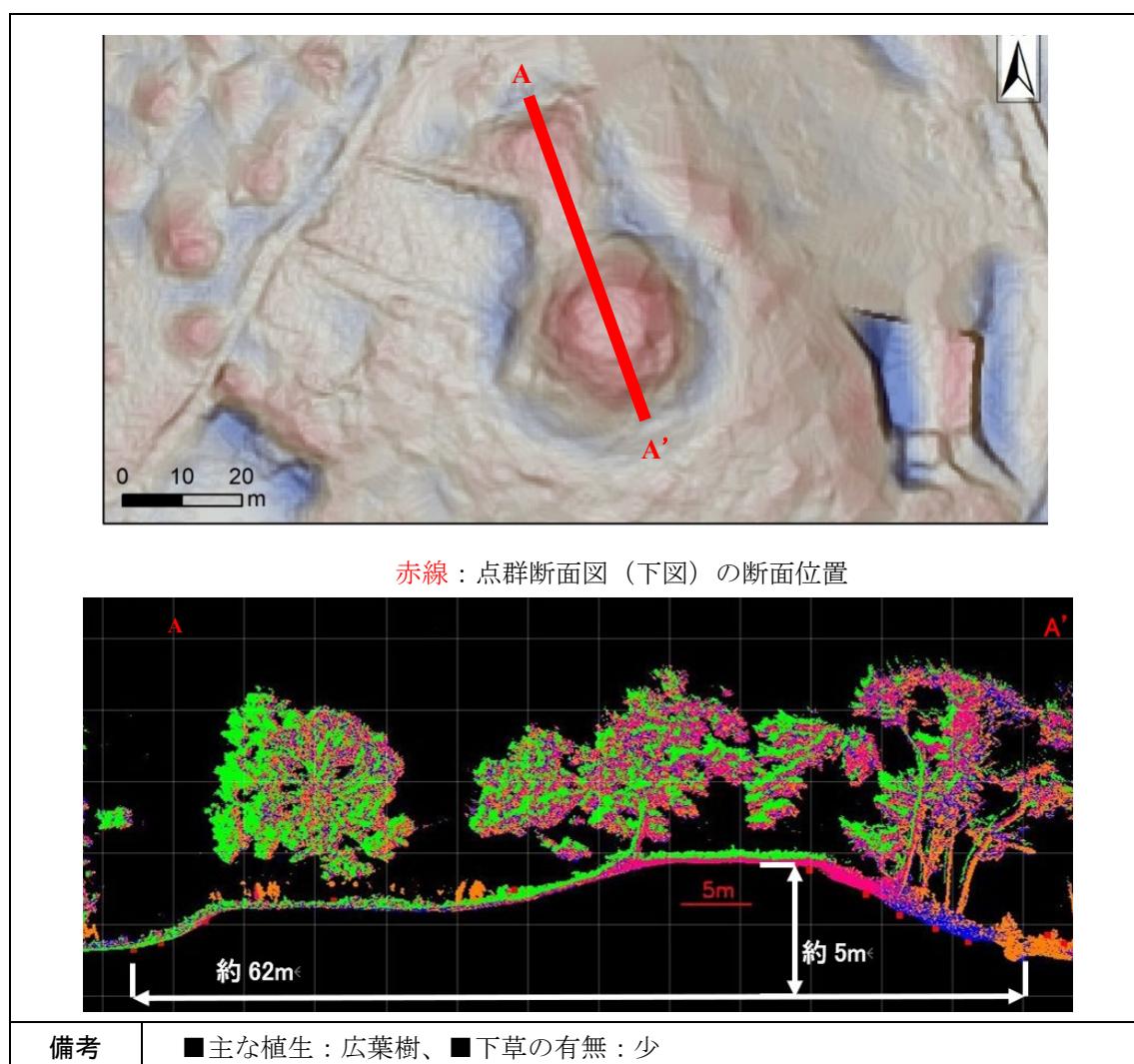
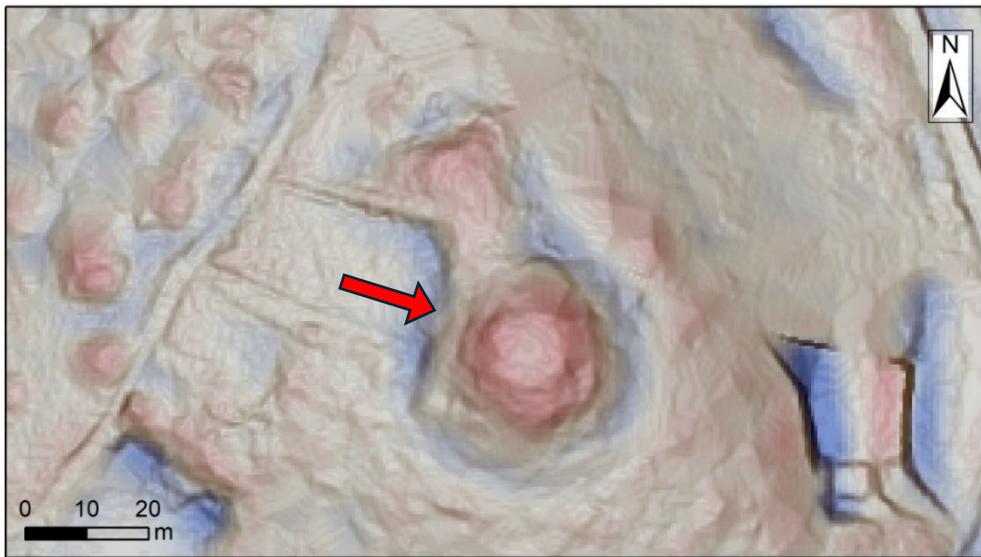


図 2-4-4 CS 立体図に表現された地形の検証①（日上天王山古墳）

（上：CS 立体図（縮尺：1/1,000）、下：手持ちスキャナによる三次元点群の断面図）



備考	<ul style="list-style-type: none"> ■主な植生：広葉樹、■下草の有無：少 ■その他：CS立体図の特性上、斜面直下の平坦地は実際に平らでも青く（窪んだように）表現されてしまうことがある。
----	---

図 2-4-5 CS立体図に表現された地形の検証②（日上天王山古墳）

（上：CS立体図（縮尺：1/1,000）、下：後円部裾部の現地写真）

4.2.4. 重ね合わせ図と現地における検証

図2-4-6に、日上畠山古墳群でのCS立体図と測量調査図、およびそれらをGIS上で重ね合わせた図を示す。CS立体図で赤く表現されている箇所は凸形状の地形で、墳丘である可能性が高い。特に周囲に樹木が生えておらず下草が茂っていない箇所であれば航空レーザが地形を比較的忠実に再現していると思われる。一方で林内や下草が生い茂っている箇所では、本来なら墳丘が存在するにも関わらずCS立体図では表現されなかつたり(図2-4-7)、倒木や下草等の植生を誤って凸状の地形として表現されてしまつたり(図2-4-8)する場合があるため、判読の際には注意を要する。特に埋蔵文化財の目的でない航空レーザ測量成果では、作業の工程の中で意図せず土塁や曲輪などの遺構に關わるレーザ点群が除去(建物や樹木を取り除く際に一緒にフィルタリング)されている場合がある。

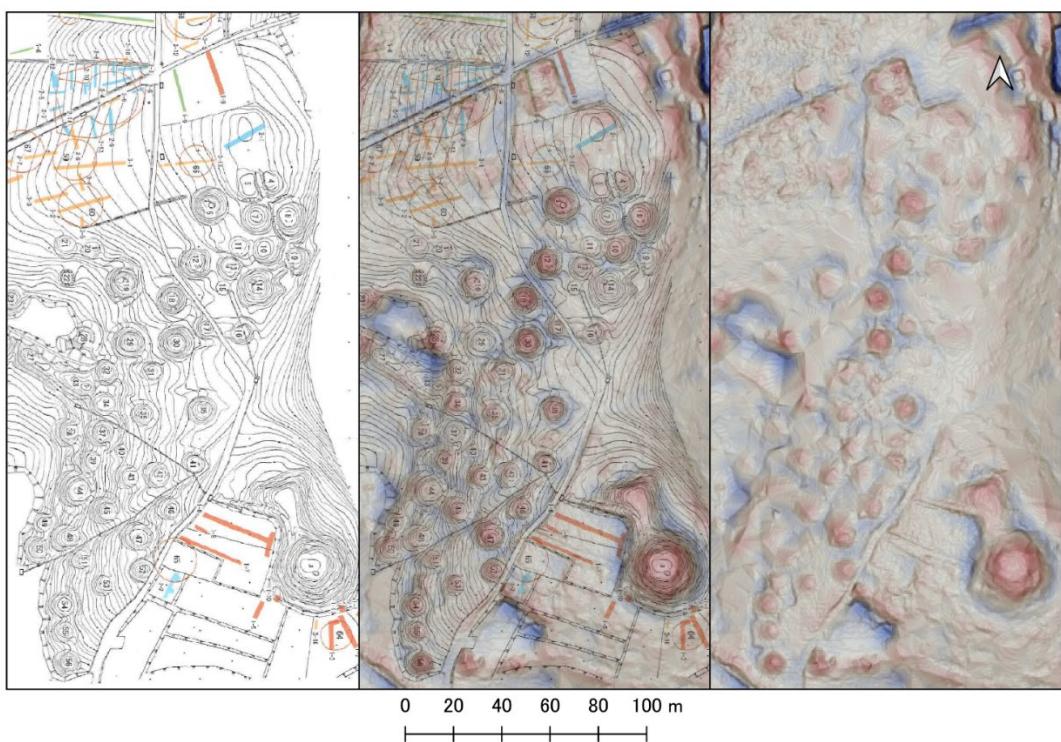


図2-4-6 古墳群の測量図⁷と微地形表現図との重ね合わせ(日上畠山古墳群)

(左:測量図のみ、中央:測量図+微地形表現図の重ね合わせ、右:微地形表現図のみ)

⁷ 津山市教育委員会『日上畠山古墳群』津山市埋蔵文化財発掘調査報告78、2007年。

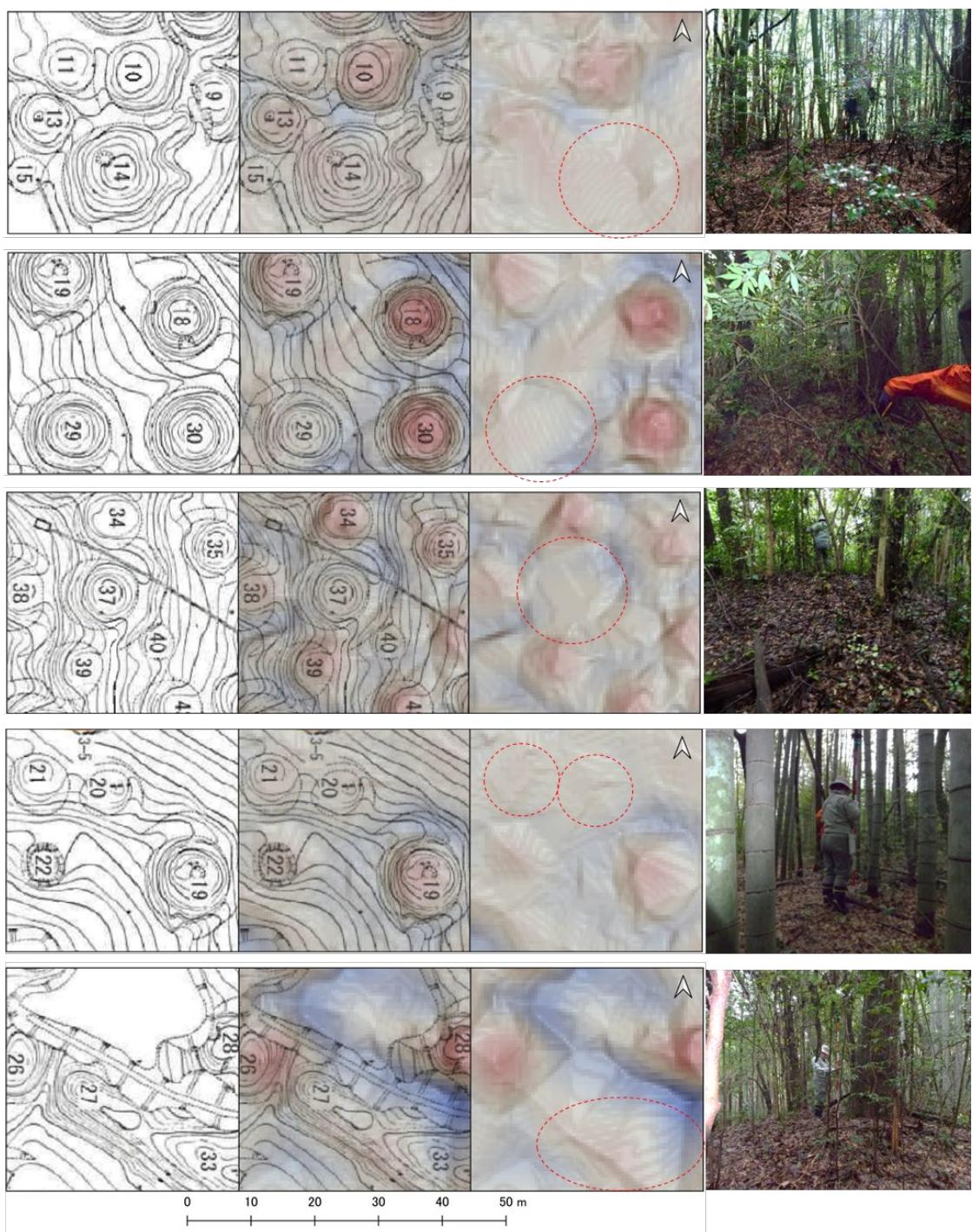


図 2-4-7 墳丘が存在するものの微地形表現図では表現されないケース

(左から、測量図、測量図+微地形表現図の重ね合わせ、微地形表現図のみ、現地写真を対比)

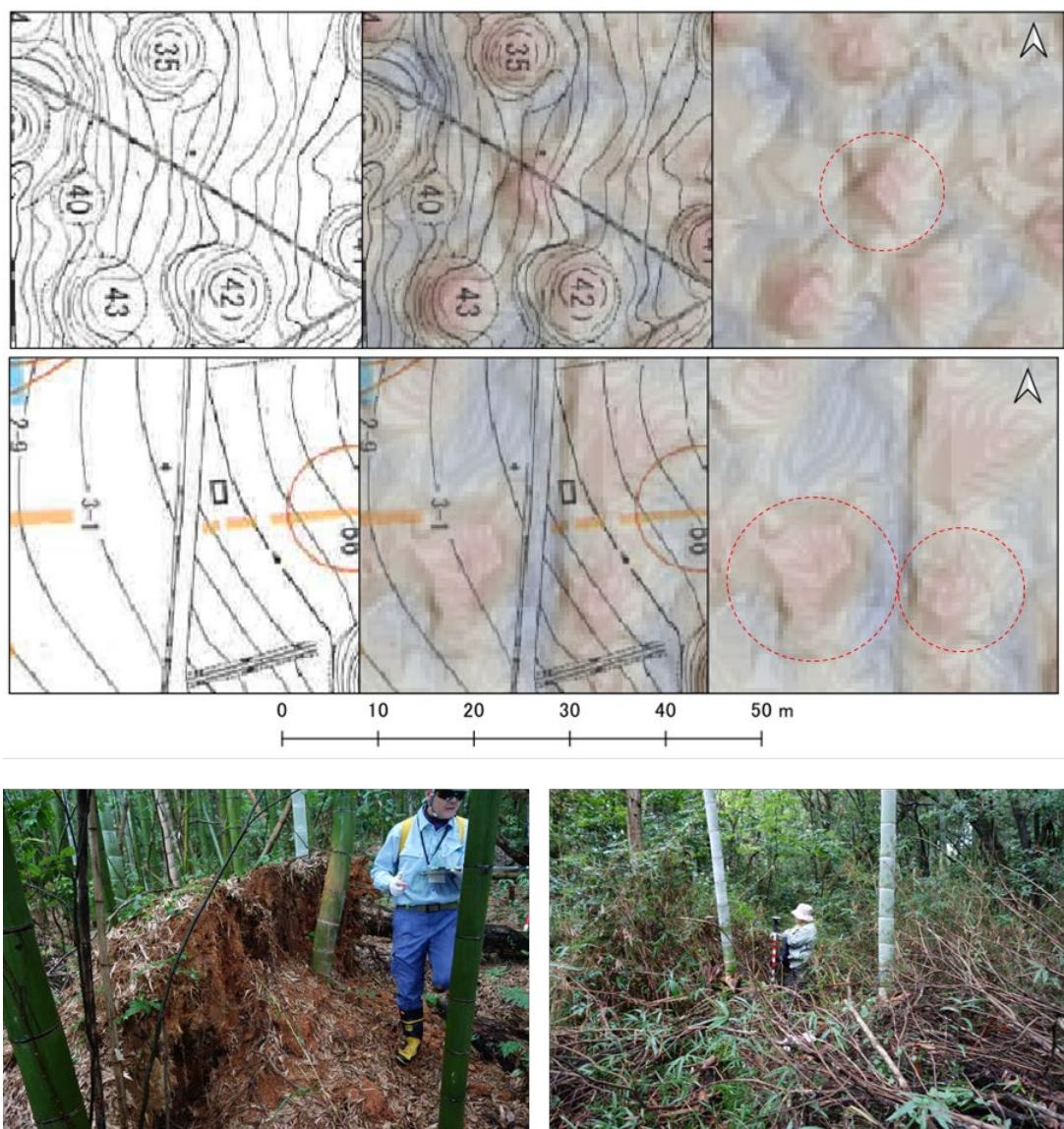


図 2-4-8 植生等によって凸状の地形として表現されたケース

(上段左から：測量図、測量図と微地形表現図の重ね合わせ、微地形表現図、下段：現地の状況)

4.2.5. 山城の判読と注意点

山城は、尾根や谷を掘削したり、盛土することにより構築される（図4-9）。その構造は、地域や地形に応じて多様であるが、曲輪等の平坦面や堀切の地形の凹凸が微地形表現図によく表現される。

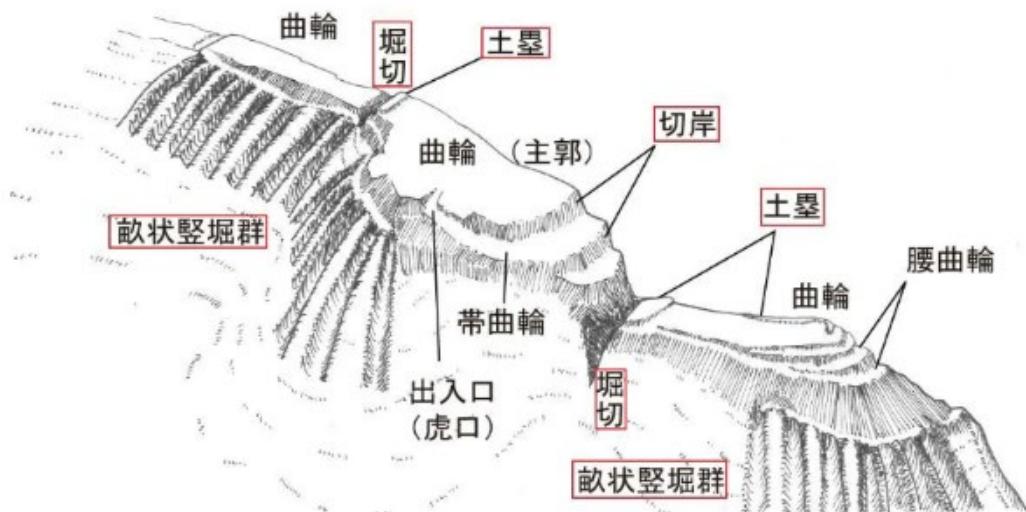


図2-4-9 山城の構造⁸

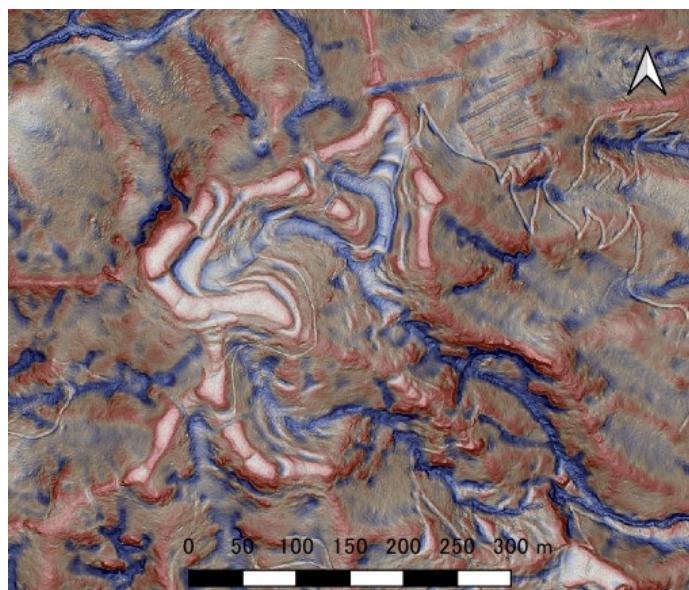
CS立体図の場合、曲輪や土塁は赤色で、堀切は青色で表現される。また、曲輪のような緩傾斜地は明るく、堀切のような急傾斜地は暗く表現される。ただし、CS立体図作成時のパラメータ設定により、色表現は変わるために注意を要する。

本マニュアルの事例をして取り上げるのは、岡山県津山市中北上、岩屋川と明谷川に東西を挟まれた標高約482mの岩屋山山頂を中心に展開する岩屋城跡と、その南側に位置する荒神ノ上砦跡である。城の周囲には陣城が築かれ、包囲戦を受けたことでも知られている。また、城域の北東部には巨大な敵上豊堀群（通称「てのくぼり」）があり、微地形表現図上でもその存在を容易に確認することができる。

⁸ <https://www.pref.okayama.jp/site/kodai/628817.html>

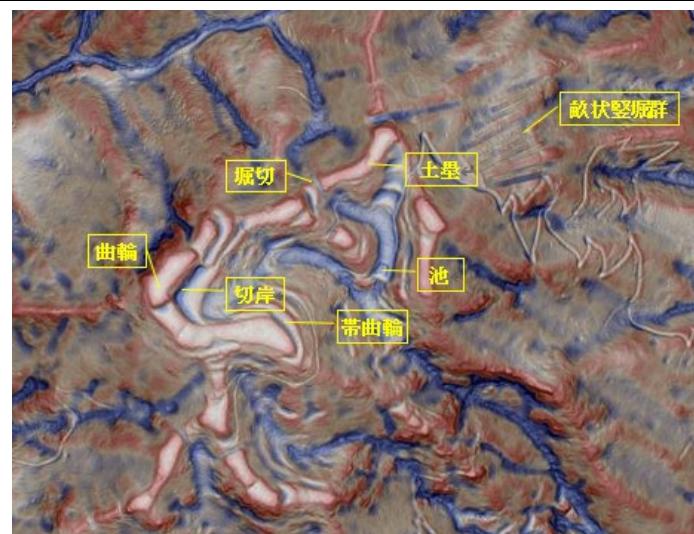
岩屋城跡

微地形表現図

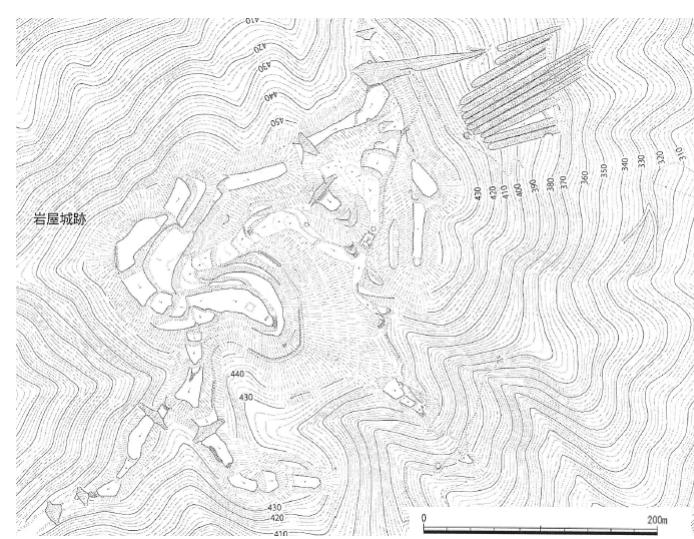


表現図

(注釈を追記)

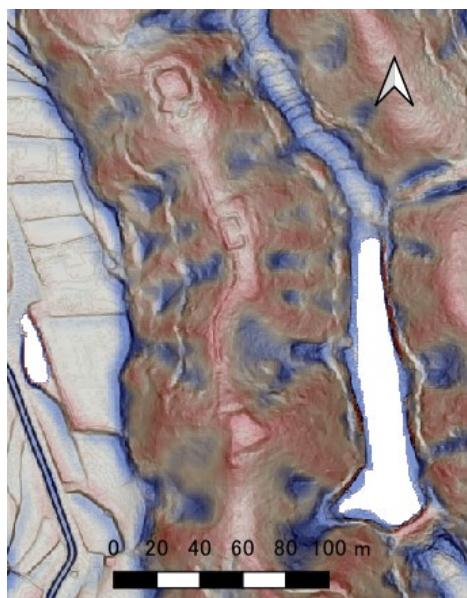


縄張り図 (津山市提供)

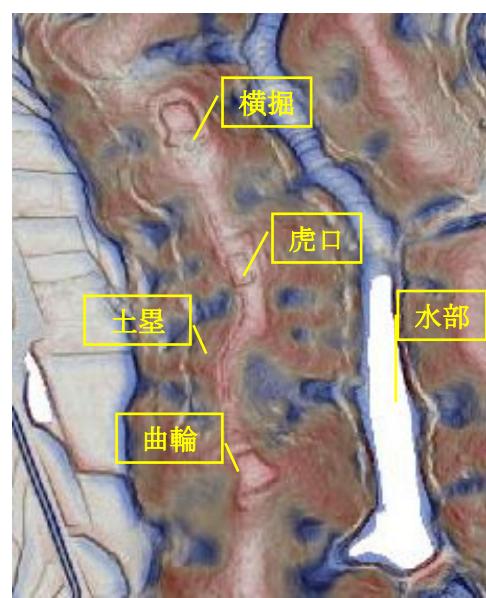


荒神ノ上砦跡

微地形表現図



微地形表現図（注記）



縄張り図（津山市提供）



4.2.6. CS 立体図による山城の表現に関する現地検証

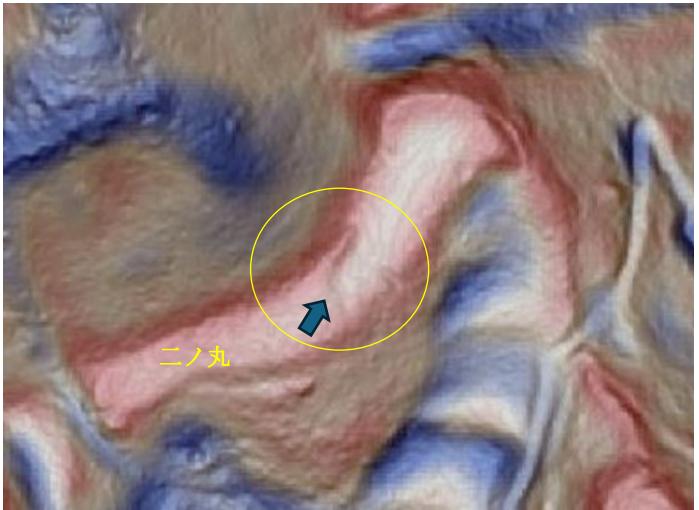
①曲輪・切岸

岩屋城跡（曲輪・切岸）	
微地形表現図	縄張り図（津山市提供）
赤色立体地図	<p>現地所見：</p> <p>本丸の切岸と本丸下段の曲輪部分を CS 立体図で見ると、曲輪の一部が青くなっているように見える。しかし、現地を確認すると凹地形にはなっておらず、CS 立体地図を作成する時のパラメータ設定に依存していることが分かる。</p> <p>赤色立体地図との比較では、黄丸箇所について曲輪の欠けが見られるが、現地ではそのような凹みは確認できなかった。</p>
現地写真(本丸切岸付近)	

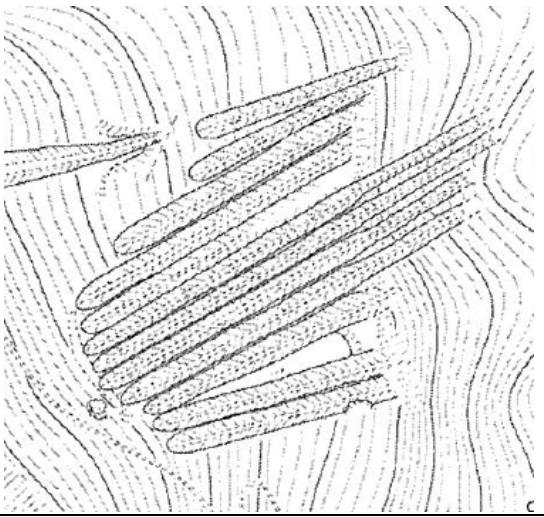
②堀切

岩屋城跡（堀切）	
微地形表現図	縄張り図（津山市提供）
現地写真	<p>現地所見：</p> <p>本丸東堀と二ノ丸を分断する堀切。現地で確認したところ、幅約 6 m、高さ約 2 m であった。</p>

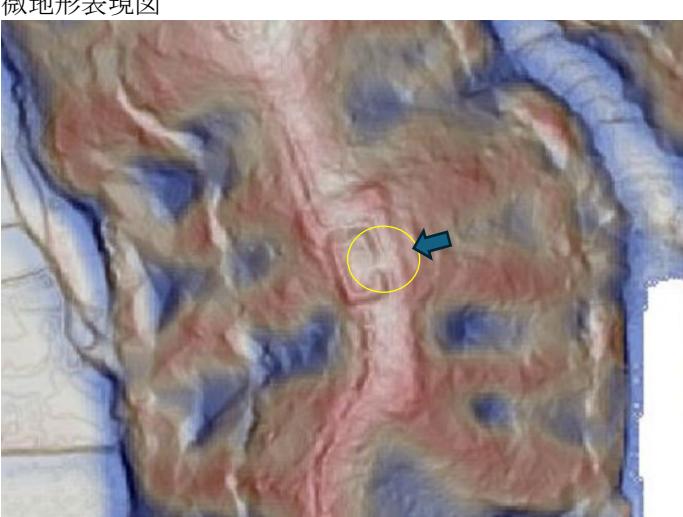
③土壘

岩屋城跡（土壘）	
微地形表現図 	縄張り図（津山市提供） 
現地写真 	現地所見： 曲輪の外周の土壘が残存しており、現地で高さを確認したところ、約1mであった。

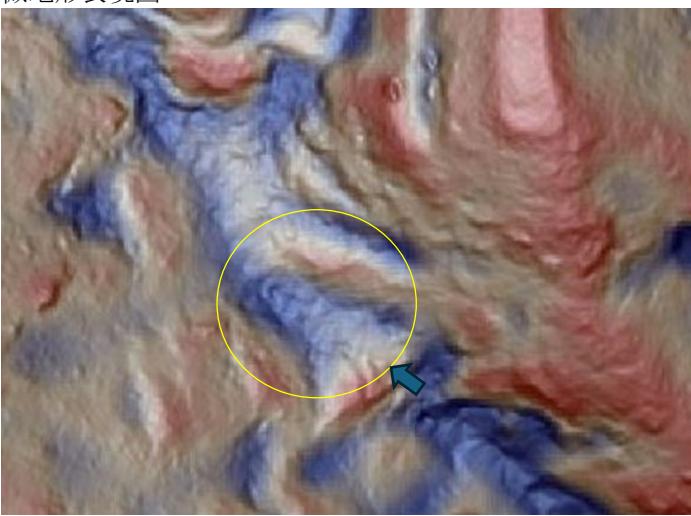
④畝状堅堀群

岩屋城跡（畝状堅堀群）	
微地形表現図	縄張り図（津山市提供） 
現地写真① 	現地所見： 岩屋城跡の畝状堅堀群は、12条の堅堀が並行して掘られている。遺構の状態が良好であり、土壠と堅堀をしっかりと確認することができる。
現地写真② 	

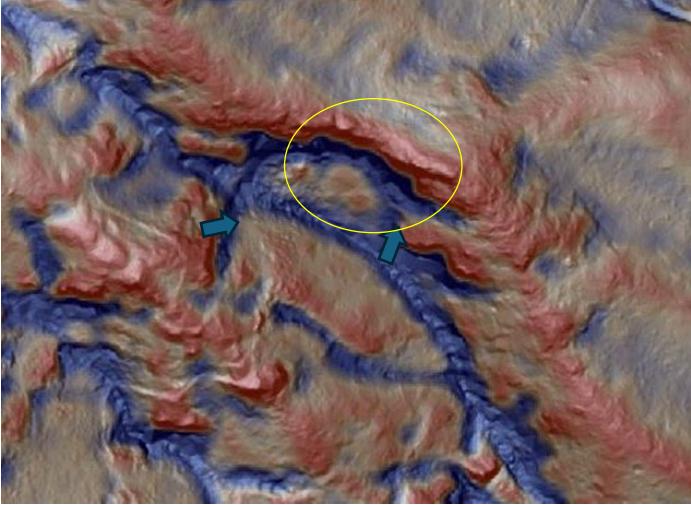
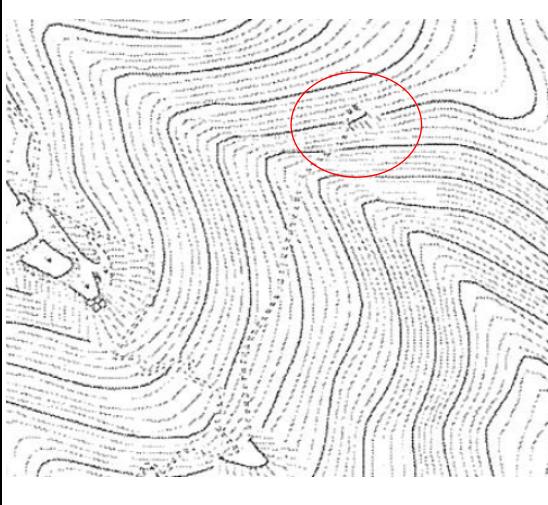
⑤虎口

荒神ノ上砦跡（虎口）	
微地形表現図 	縄張り図（津山市提供） 
現地写真 	現地所見： 曲輪の周囲に土塁が築かれているが、虎口部分の土塁が開口しており、平虎口であることが確認できる。

⑥門跡

岩屋城跡（伝岩屋城跡大手門付近）	
微地形表現図	縄張り図（津山市提供）
	
現地写真	現地所見： 写真は伝岩屋城跡大手門付近であるが、門の周囲の土壘や石積み等の遺構が残っておらず、樹木が繁茂しており、遺構の確認が困難であった。遺構がはっきり残存していない場合、微地形表現図においても確認することはできない。

⑦その他

岩屋城跡（岩陰地形：山王宮跡）	
微地形表現図	縄張り図（津山市提供）
	
現地写真①	現地所見： 航空レーザは上空から直下に向かってレーザ光を照射するため、洞窟のようなオーバーハングした地形があると、その中を確認することはできない。
	
現地写真②	
	

4.3. 検証結果－既存の航空レーザ測量データを使用する場合の注意点

ここまで、古墳と山城跡について微地形表現図（CS 立体図）での表現と現地での実際の見え方についての事例を示した。航空レーザ測量データを用いた微地形表現図では数mの標高差を有する段差等の地形を表現でき、一定の規模をもつ埋蔵文化財の存在や形状を確認できる。一方、植生の影響を受ける箇所では、特に小規模な地形変化を捉えることができない。これは、上空からレーザ光照射を行う航空レーザ測量の欠点とも言え、地表の植生や地形の状況により、得られる測量成果に影響が生じる。

本節では、航空レーザ測量の精度や微地形表現図に影響を及ぼす植生や地形について、解説する。

4.3.1. 植生の影響

航空レーザ測量は空中写真と異なり、植生下の地表面にレーザ光を照射し標高を計測できる利点がある。しかし、地表面を覆う植生の種類や繁茂状況によっては、航空レーザ測量で得られる地形形状に影響が生じる。

具体的には、植生が繁茂した範囲では、上空から発したレーザ光が地表面に到達する前に葉や枝に遮られてしまい、地表面への到達率が下がるため、グラウンドデータの計測密度が裸地と比べて著しく減少する。グラウンドデータが不足した状態で微地形表現図を作成すると、図 2-4-10（右下）のように鋭利な地形として表現されることが多い。これは、計測点

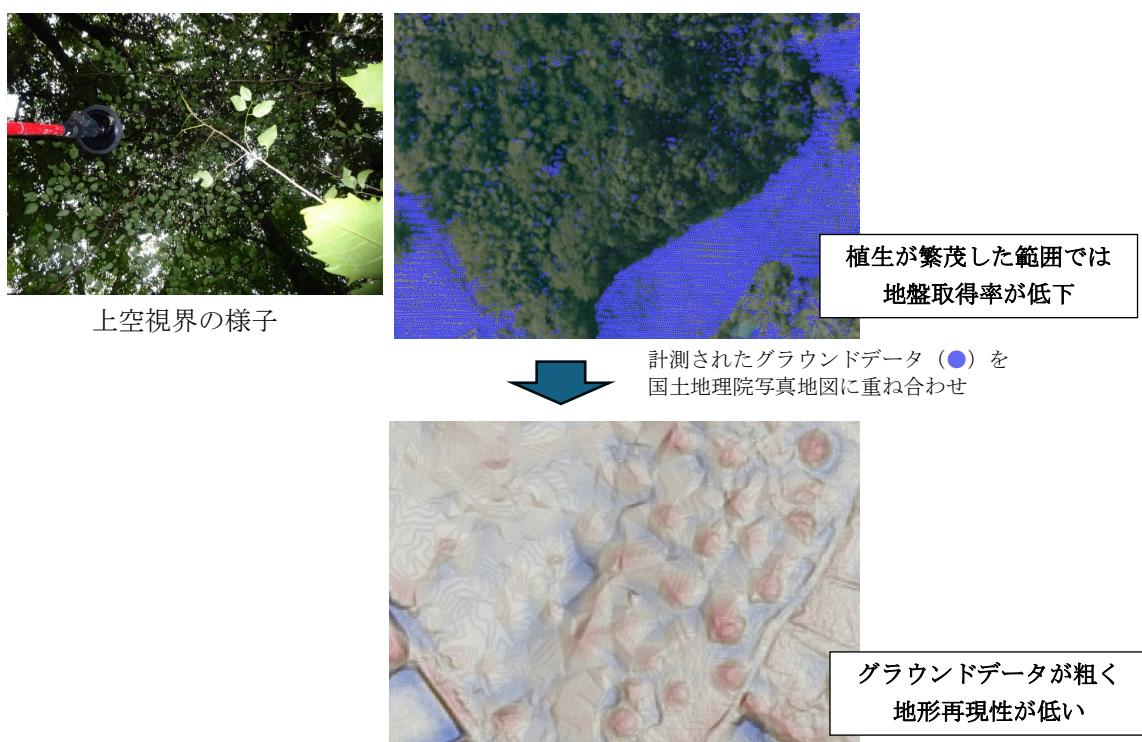


図 2-4-10 繁茂した広葉樹林の範囲の CS 立体図

同士の補間に用いる TIN*と呼ばれる三角形形状の地形再現手法が大きく表れた状態を示している。実際の地形と異なる可能性が高く、地形再現性が低いといえる。

実際の地形測量図と CS 立体図の比較事例を図 2-4-11 に示す。左の地形測量図では等高線によって明確に古墳の形状が描かれており、5 基の古墳が明確に認識されている。一方、CS 立体図では、地形の凹凸が見られることはからうじて認識できるものの、古墳としての形状を判読することは困難である。この原因として、古墳の上空を遮る広葉樹により、地表にレーザ光が十分に届いていないことが考えられる。

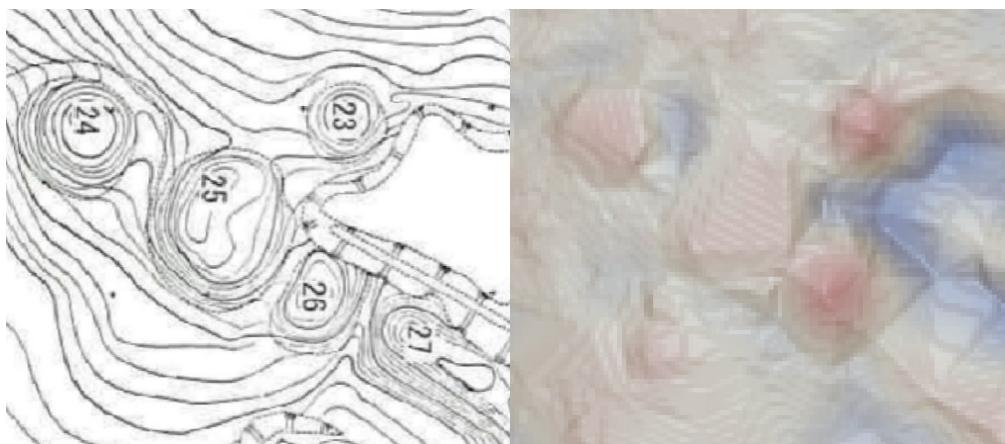


図 2-4-11 古墳群の地形測量図と CS 立体図の比較

また、広葉樹林に限らず竹林や、地表付近に繁茂する草本類等の植生もレーザ光の遮蔽となることが知られており、微地形表現図上の地形再現性に影響を与える（図 2-4-12）。



図 2-4-12 レーザ光の遮蔽となる植生の例

このように植生（主にササや落葉前の広葉樹）による航空レーザ測量の欠点を補うためには、現地での測量を加えるなどの対応が考えられる。また、航空レーザ測量は植生が少ない冬季や落葉期に計測を行うことで、レーザ光が地表面に到達しやすくなることが知られており、使用する航空レーザ測量の計測時期等を事前に確認しておくことが望ましい。

4.3.2. オーバーハング地形

オーバーハングとは、岸壁の上部に張り出した地形のことを示す。このような地形において、航空機を用いて上空から計測を行う航空レーザ測量では、その下部がレーザ光の死角となる。上空から視認できない地形の計測はできないため、微地形表現図では判読できない。

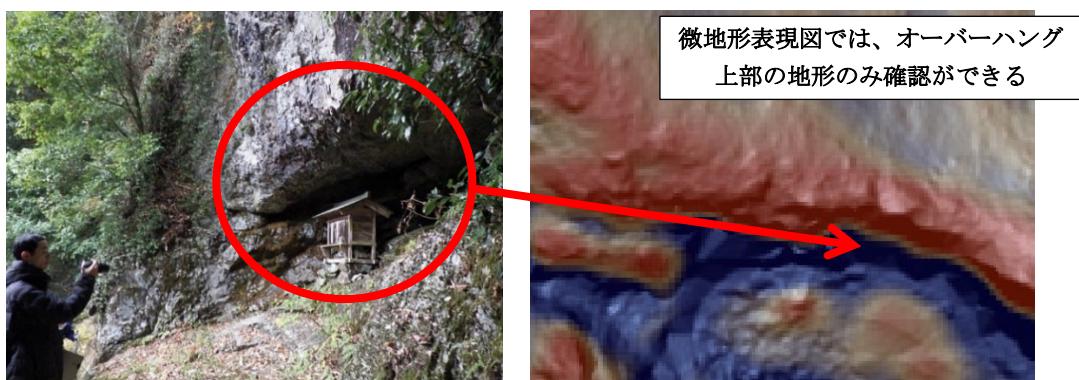


図 2-4-13 オーバーハングの事例（岩陰）

4.3.3. 局所的な地形変化

局所的（あるいは小規模）な地形変化箇所に関する判読の可否は、図 2-4-14、図 2-4-15 に示すように、航空レーザ測量の計測密度と、微地形表現図の解像度に大きく依存する。グラウンドデータの計測密度が十分でも、微地形表現図の解像度の概ね 6～7 倍の規模の地形変化ないと判読が困難である。使用する航空レーザ測量の計測密度と微地形表現図の解像度を事前に確認し、判読可能な規模を理解しておくことが重要である。

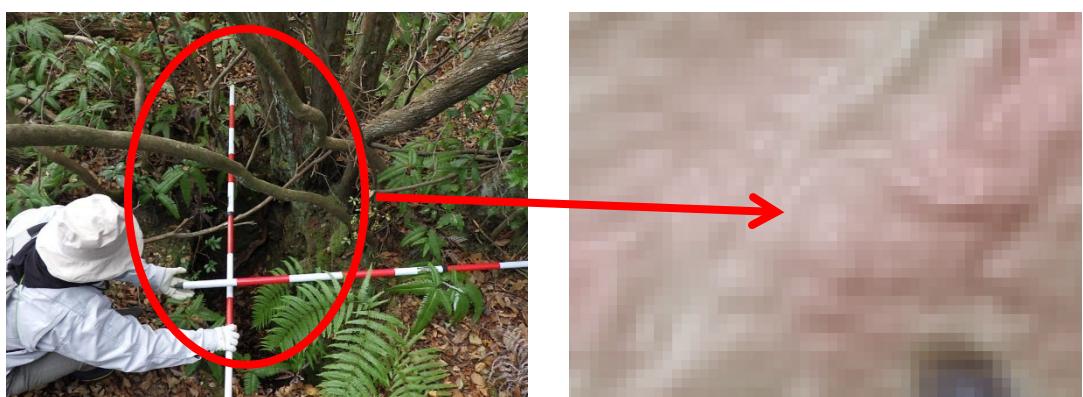


図 2-4-14 局所的な凹地形



図 2-4-15 局所的な凸地形

4.3.4. ため池などの水域

航空レーザ測量のレーザ光は近赤外線であり、レーザ光が水面に吸収または鏡面反射するため、水域では未計測または周囲の標高データから補完した水面高が標高情報として扱われることが多い。したがって、微地形表現図上で表現される地形は、水底の地形ではないことに留意する必要がある。また、表現される水域は、整地された地形に類似して表現される可能性がある（図 2-4-16）。そのため、既存の航空レーザ測量成果に、一緒に格納されている空中写真や水部ポリゴンと呼ばれる水域を示す GIS データを確認することが望ましい。



図 2-4-16 ため池

【コラム】 微地形表現図の判読に際して注意を要する地形

微地形表現図を用いて判読を行う場合、通常、埋蔵文化財として取り扱わない人工地形を誤判読する可能性がある。特に以下の地形は判読の際に注意を要する。判読が難しい場合は、空中写真や地形図等の資料を利用するほか、現地踏査による目視確認が欠かせない。

1) 山城（自然地形と人工地形の違い）

微地形表現図を用いた埋蔵文化財の把握手法は、目視による地形判読によるものである。広範囲に広がる自然地形の中から、人工地形（埋蔵文化財を含む）の抽出を行うことが前提となるが、山城跡は複雑な構造を含み、自然の地形を巧みに利用するため、山城廃絶後に造成された宅地や耕地、墓地等を城跡の一部と認識してしまう場合もある。そのため、山城の施設全体の範囲は専門家でもその形状の判読が難しい場合がある。

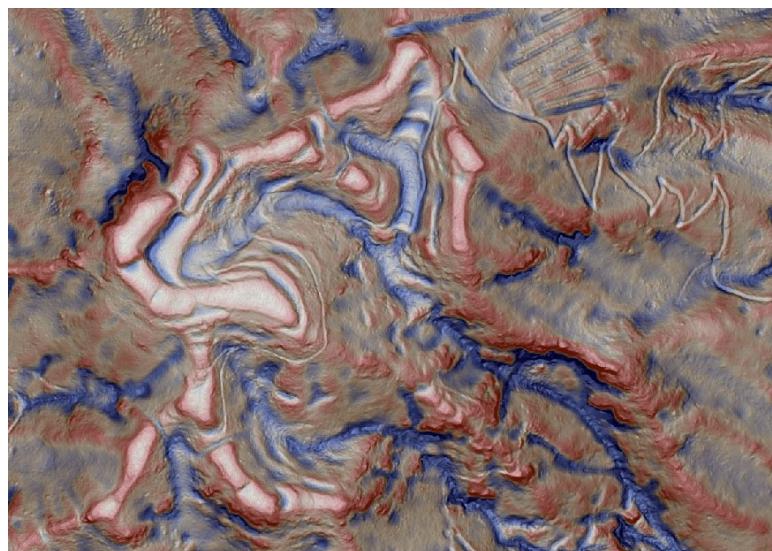


図 2-4-17 山城の CS 立体図（岩屋城跡）

2) 棚田・段畑

山城跡等、尾根や山腹に平坦面を構築する遺構に関連して注意すべき地形として、棚田や段畑が挙げられる。微地形表現図上において、傾斜地の階段状地形として表現される棚田は、山城における曲輪等の構造と類似する状況がある。棚田の特徴として、山城のように山頂付近に構成されることは一般的に無いため、周辺地形の状況を確認する必要がある。また、空中写真や地形図も参考になるため、微地形表現図とともに複数の情報を合わせ、総合的に確認する必要がある。

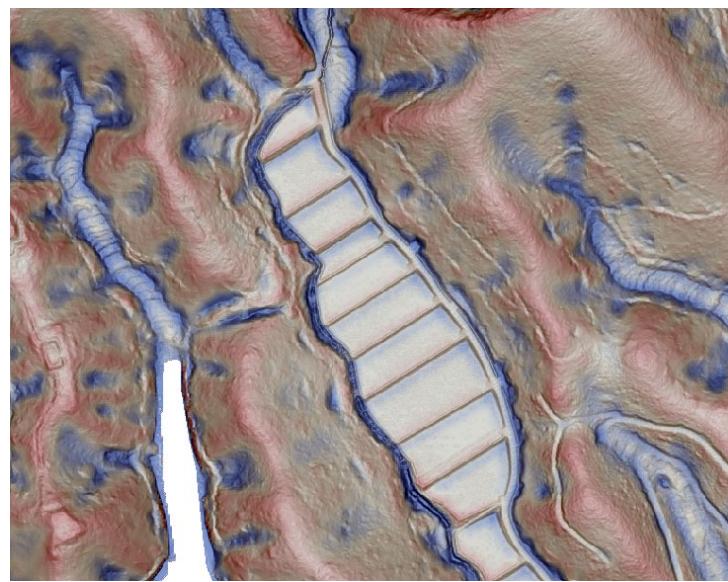


図 2-4-18 棚田の CS 立体図での表現

3) 遷緩線 (CS 立体図)

微地形表現図の中で様々な分野で活用されている CS 立体図は、凸地形は赤色、平坦な地形は白色、凹地地形は青色で表現し、地形を直感的に理解することができる。しかし、CS 立体図の特徴として配色の設定によっては遷緩線も青色で表現されており、必ずしも凹地でないので注意を要する。

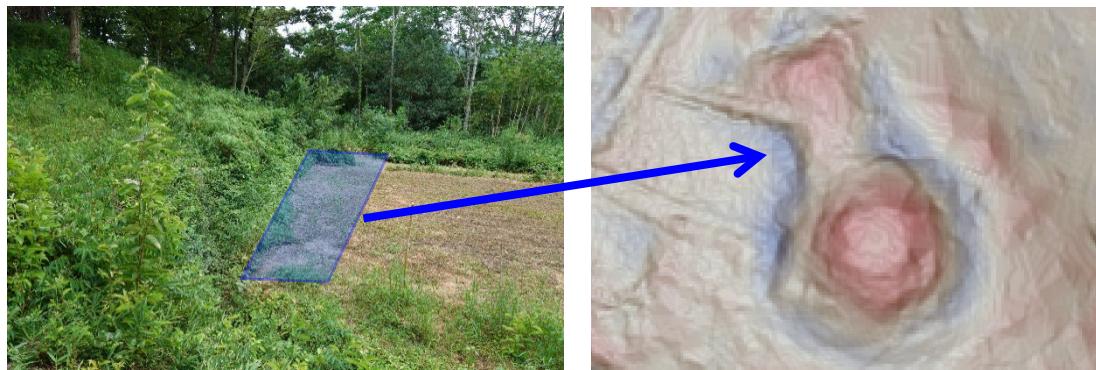


図 2-4-19 遷緩線における CS 立体図の表現

4.4. 現地踏査の計測作業で用いるデジタル機器

現地踏査では、紙媒体の地図や微地形表現図を持参し、そこに現地での所見を記載することが考えられる。一方で、スマートフォンやタブレット端末を用いることで、現地踏査の記録の収集や整理に係る作業の効率化を図ることができる。こうした観点から、スマートフォンやタブレット端末に微地形表現図を取り込み、持参することを推奨する。また、それらのGPS機能やGNSS測量機器を併用することで、微地形表現図上に自己位置や移動ルートを表示することできるため、発見した遺跡の位置を一定の精度で記録できるとともに、山中でも自らの位置を見失うことはないというメリットがある。

本節では、現地踏査の実践において利用した廉価版GNSS機器の「Droger」、現在地の確認や情報入力を行うことができるアプリ「カンタンマップ」、「QField」、そしてそれと同等の機能をもつ機器を紹介する。

4.4.1. 廉価版GNSS機器 (Droger)

特に森林内での現地踏査では、微地形表現図上での自らの位置が認識しづらく、目的とする対象地形に到達できないことも想定される。また、現地踏査ルートを地形図や空中写真上に表示させようとしてもフリー手で描くだけで曖昧な内容となる。そこでGNSSとスマートフォンやタブレットとの連携が効率的な現地踏査に有効である。

「Droger⁹」は安価かつ、cmオーダーの高精度GNSS測量を実施することのできる機器として一般向けに販売されている。



図2-4-20 Droger Xパッケージ（左）、Droger Pパッケージ（右）

1) 機能

- ・無料アプリで、自己位置を表示するとともに地理院地図などを背景に表示
- ・移動軌跡の記録、指定した地点への誘導、任意地点での位置情報や名称の記録
- ・Drogerの観測結果を出力し、現地調査ツールでの位置情報を表示

⁹ <https://www.bizstation.jp/ja/droger/>

2) 操作

Droger GPS アプリガイド¹⁰を参照

3) 費用

Droger P パッケージ価格¹¹ : ¥89,800 (税込¥98,780)

4.4.2. カンタンマップ

カンタンマップは iPad または iPhone 上で動作する地図アプリである。iPad で取得した位置情報を用いて、現地踏査時の位置確認や調査結果の記録、現地写真を取得することができる。また、事前に準備した地図画像を背景に使用することも可能である。

1) 機能

- iPad で取得した位置情報を用いて自己位置を確認
- 現地踏査時の調査記録や写真を位置情報付きで取得
- 事前に準備した地図画像を背景として使用

2) 操作

現地踏査時に使用する背景地図、調査項目を準備する。

①背景地図の準備

GIS を使用し現地作業で用いる地図画像 (CS 立体図等) をタイル単位で出力する。画像形式は、jpg、png、gif に対応している。

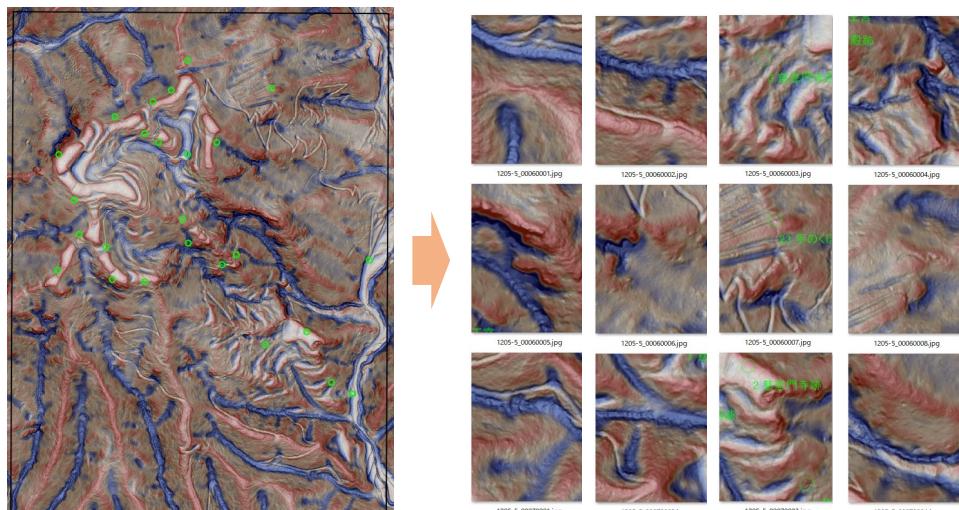


図 2-4-21 「カンタンマップ」の背景地図出力イメージ

¹⁰ https://droger.hatenadiary.jp/entry/droger-gps_app_guide

¹¹ https://www.bizstation.jp/ja/droger/rtk_package_index.html?tab=rwp (2025/02/28 時点)

②調査項目の準備

現地踏査時に確認する位置情報、写真枚数、名称、説明、等の項目を準備する。調査項目の設定ファイルは csv 形式と xml 形式で準備する。

```
<?xml version="1.0" encoding="shift_jis" ?> ↓
<xml>↓
<memo>現地踏査120506</memo> ↓
<mapImageLimit>1000</mapImageLimit> ↓
<othersPinUse>false</othersPinUse> ↓
↓
<table>↓
  <name>現場メモ</name> ↓
  <tableName>genchitousa</tableName> ↓
  <fileName>genchitousa.csv</fileName> ↓
  <startID>0001</startID> ↓
↓
<define>↓
  <primaryKey>現場メモID</primaryKey> ↓
  <lat>緯度</lat> ↓
  <lng>経度</lng> ↓
  <title>現場メモID</title> ↓
  <subTitle>現場メモID</subTitle> ↓
  <pinID>判定</pinID> ↓
  <image>写真1</image> ↓
  <image>写真2</image> ↓
  <image>写真3</image> ↓
  <image>写真4</image> ↓
  <update>更新日時</update> ↓
  <ichiranTitle>現場メモID</ichiranTitle> ↓
  <ichiranSort>現場メモID</ichiranSort>↓
  <ichiranOption>メモ</ichiranOption> ↓
  <ichiranOption>id</ichiranOption> ↓
  <ichiranOption>調査箇所1205</ichiranOption>↓
  <ichiranOption>坑道</ichiranOption> ↓
  <ichiranOption>説明</ichiranOption> ↓
</define>↓
```

図 2-4-22 「カンタンマップ」調査項目の例 (xml 形式)

準備した地図画像、調査項目を iTunes により、iPad に取り込む。

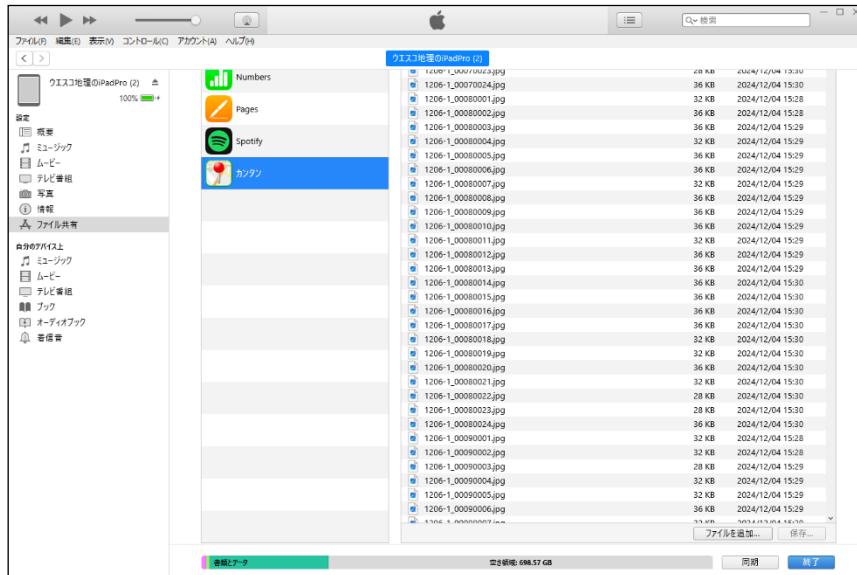


図 2-4-23 iTunes によるデータ取り込み

③現地作業

iPad 取得の位置情報により、カンタンマップ上で現在位置を確認する。地図上の現位置にピンを作成し、ピンに写真や調査内容を入力する。



図 2-4-24 「カンタンマップ」を用いた現地踏査の様子

④調査結果の整理

調査結果は、属性情報は sqlite 形式、撮影画像は jpg 形式で保存される。sqlite 形式は、GIS ソフトに読み込み可能で位置の確認や汎用的な shape 形式、csv 形式への変換を行う。

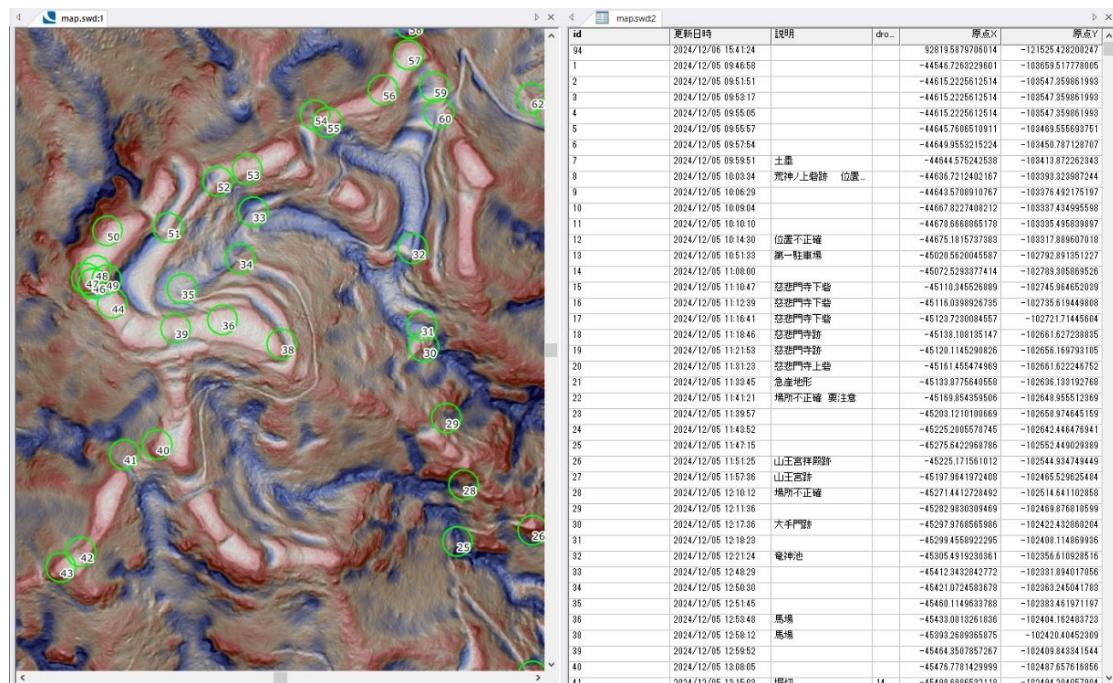


図 2-4-25 GIS による調査情報表示の一例

⑤調査成果

調査の結果や現地写真を位置情報付きで取得することができる。

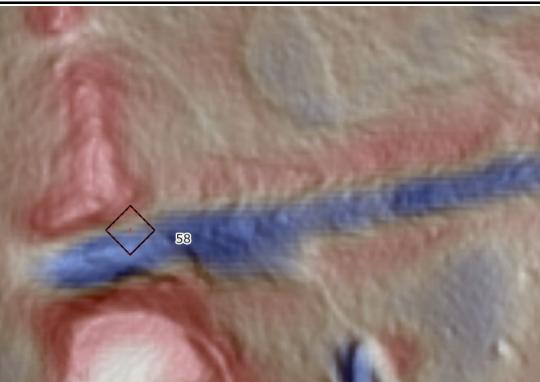
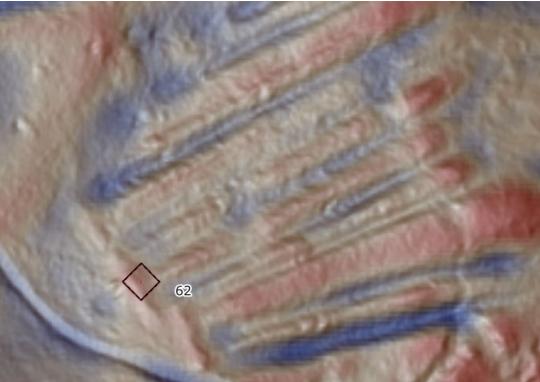
箇所名	大堀切跡	
GIS 表示 画面		
現地 写真		
箇所名	てのくぼり跡	
GIS 表示 画面		
現地 写真		

図 2-4-26 調査成果の一例

⑥留意事項

位置精度は、iPad が取得する位置情報の精度に依存しており、数m以上の位置ずれを生じる場合がある。特に樹木の繁茂する場所では、位置ずれも大きくなりやすい(図 2-4-27)。

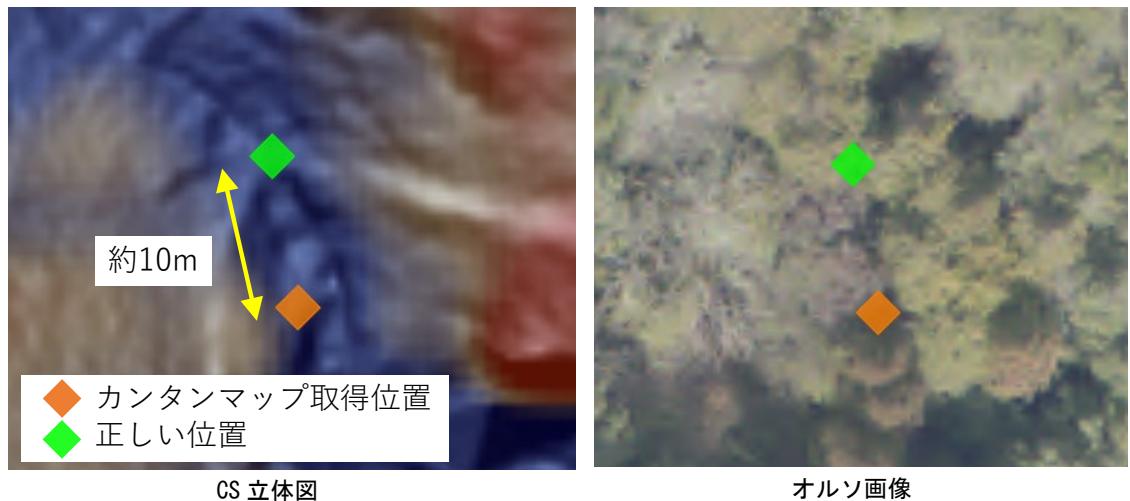


図 2-4-27 「カンタンマップ」の位置ずれ

3) 費用

表 2-4-1 「カンタンマップ」の価格¹²

初期費用	200,000 円	
月額利用	25,000 円～ ※ 5 ライセンス利用の場合の月額料金	最小 5 ライセンスから 追加 1 ライセンス 5,000 円/月
別途 Kintone スタンダード版が必要		

4) 推奨スペック

- ・ iPhone・iPad に対応
- ・ Android 端末には未対応

¹² <https://www.kantanmap.com/price> (メーカーHP サイト : 2025/1/15 時点)

4.4.3. Qfield

QField は QGIS と連携できるスマートフォン向けのアプリである。QGIS で作成したデータの現地確認や、スマートフォンに保存した現地調査結果を QGIS で表示可能である。

1) 機能

- ・スマートフォンで取得した位置情報を用いて自己位置を確認
- ・現地踏査時の調査記録や写真を位置情報付きで取得
- ・事前に準備した地図画像を背景として使用

2) 操作

①事前準備

QGIS で、現地作業で用いる地図画像 (CS 立体図等) や調査箇所の情報を取り込んだプロジェクトを作成する (図 2-4-28)。

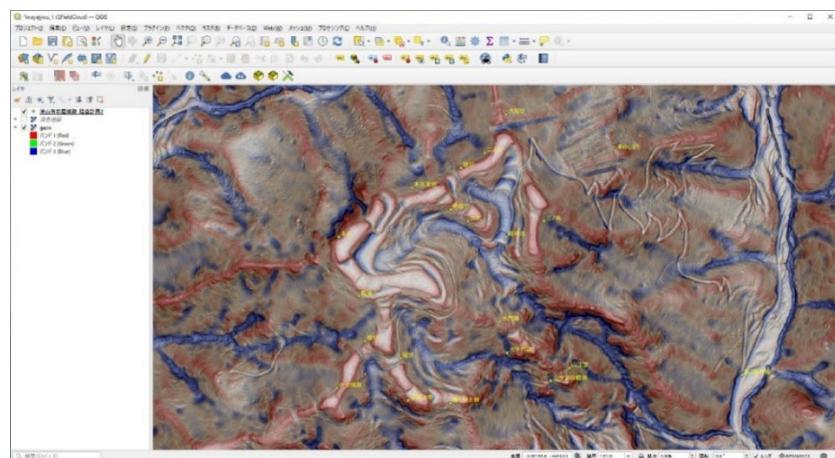


図 2-4-28 QGIS によるプロジェクトの作成

作成したプロジェクトは、QGIS のプラグイン QFieldSync により、QFieldCloud にアップロードする (図 2-4-29)。

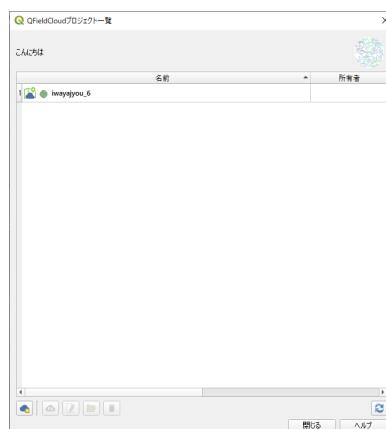


図 2-4-29 QfieldSync によるプロジェクトのアップロード

②現地作業

- ・QfieldCloud からスマートフォンにプロジェクトを取り込む。
- ・スマートフォンや Drogger で取得した位置情報を用いて微地形表現図や地理院地図を背景として、自己位置を確認する。
- ・Qfield で調査箇所の情報や写真を入力する。

③調査結果の整理

現地で取得した情報は QFieldCloud に保存されるため、PC からダウンロードすることができる。

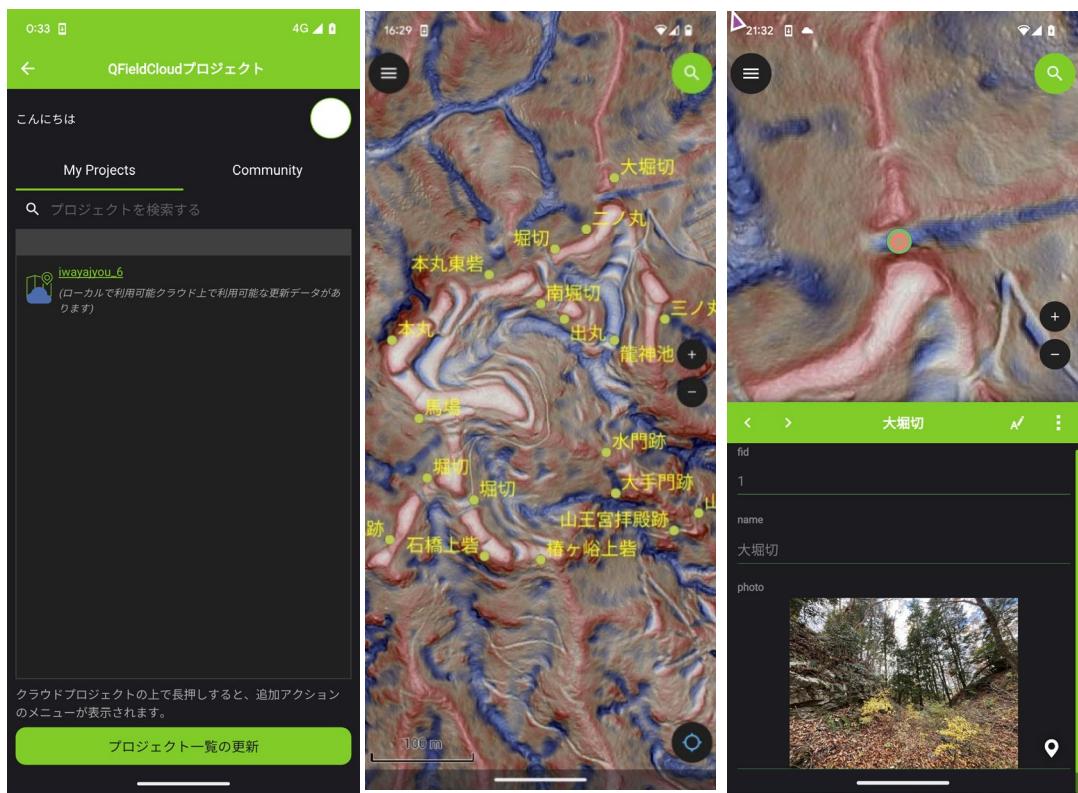


図 2-4-30 QFieldCloud の表示画面

(プロジェクトの取り込み (左)、微地形表現図の表示 (中)、調査情報の入力 (右))

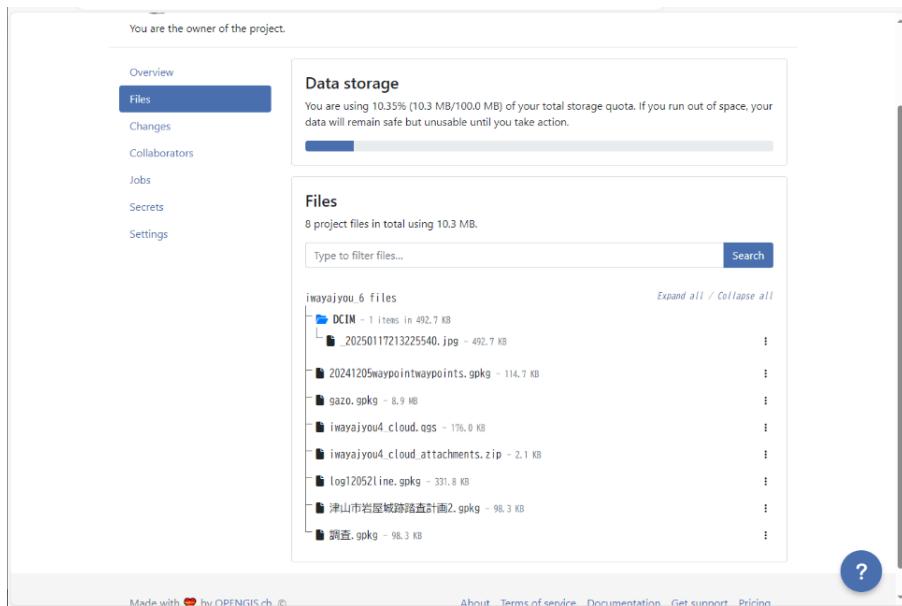


図 2-4-31 QFieldCloud によるデータの確認

3) 費用

オープンソースのため、無料。

4) 推奨スペック¹³

- Android : Android5 以上のバージョンに対応。Android9 以上のバージョンを推奨。
- iOS : ベータ版のみ利用可能。

¹³ <https://qfield.org/docs/ja/install/index.html> (2025/1/15 時点)

4.4.4. SmartSOKURYO POLE

SmartSOKURYO POLE は Android のスマートフォン上で動作する森林内での現地調査ツールである。これはソフトバンク社の高精度測位サービス「ichimill (イチミル)」のサービスを用いて測位しており、インターネットに接続可能で、GNSS 観測が良好な環境下では、誤差数cmの測位がリアルタイムで可能である（図 2-4-32）。

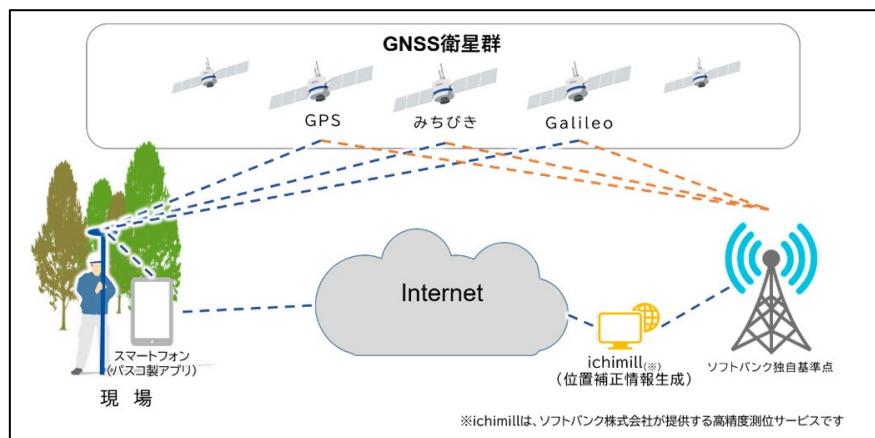


図 2-4-32 「ichimill (イチミル)」のサービス概要図

1) 機能

- RTK 測位で取得した位置情報を用いてスマートフォンに自己位置を表示
- 現地調査時の調査記録や写真を位置情報付きで取得
- 事前に準備した地図画像を背景として使用
- オンライン地図が使用できる
- Shape 形式が搭載でき GIS と連携できる
- ナビゲーション機能がある
- 位置情報付きの微地形表現図やオルソフォトが取り込み可能

2) 操作

現地踏査時に使用する背景地図、調査項目を準備する。

①背景地図の準備

GIS を使用し現地作業で用いる地図画像（CS 立体図等）をタイル単位で出力する。画像形式は、jpg、tiff に対応。

②調査項目の準備

- 現地踏査時に確認する位置情報等の項目を準備する。
- 調査項目の設定ファイルは Shape 形式で準備する。

③現地作業

アンテナとスマートフォンを Bluetooth で接続し、スマートフォン上で現位置を確認する。GNSS 観測手法や誤差の許容値を設定し、観測直後に結果判定を行い座標記録する。



図 2-4-33 SmartSOKURYO POLE による調査情報表示イメージ

④調査結果の整理

- ・調査結果は、属性情報は Shape 形式、撮影画像は jpg 形式で保存される。
- ・sqlite 形式は、GIS ソフトに読み込み可能で位置の確認や汎用的な shape 形式、csv 形式への変換を行う。

3) 費用¹⁴

本体、スマートフォンとアプリ、通信サービスとソフトウェア、故障時の代替機貸与、サポートサイトなどをすべてまとめた定額サービス

契約期間は、1年または3年から選択

- ・1年契約の場合、価格は 70 万円（税別）
- ・3年契約の場合、価格は 140 万円（税別）

4.4.5. 微地形表現図をスマートフォン等に取り込める無料アプリ①

Avenza Maps（アベンザマップス）は、スマートフォンやタブレット用の地図表示アプリケーションである。地図上で自分の位置が確認可能で、山中などのオフライン環境下でも使用できるツールである。また、国土地理院が整備する地理院地図が使用でき（要ダウンロード）、位置情報付きの PDF ファイル（GeoPDF 形式）や位置情報付きの画像ファイル（Geotiff 形式）を見ることができる。

1) Avenza Maps の特徴

Avenza Maps は GeoPDF、Geotiff 形式の位置情報データ付きの主題図を読み込みが可能である。従って、CS 立体図等の微地形表現図やオルソフォトなども事前にスマートフォンに

¹⁴ <https://www.pasco.co.jp/press/2022/download/PPR20220809J.pdf> (2025/1/15 時点)

取り込んで、現地で確認しながら埋蔵文化財の調査が可能である。自己位置はスマートフォン等の内蔵 GNSS に加えて外部の GNSS による位置情報も参照できる。その他の Avenza Maps の機能や特徴を以下に示す。

- ・GeoPDF、Geotiff 形式の地図の読み込み
- ・アプリ内のマップストアを通した高品質の地図の購入・ダウンロード
- ・GNSS を使った移動経路のトラッキングと、軌跡の保存やエクスポート (KML 形式)
- ・地図マーカーの入力と保存、エクスポート機能 (KML 形式、GPX 形式、csv 形式)
- ・地図マーカーを使ったデータ収集フォームの作成と、フォームの共有・インポート
- ・地図マーカーへの写真の追加
- ・座標値の表示
- ・地図内のランドマークや場所の検索と検索結果の保存
- ・地図上の距離と面積の計測

2) Avenza Maps の表示イメージ

Avenza Maps の表示イメージを図 2-4-34 に示す。このイメージでは、あらかじめインターネット上で公開されている地理院地図と微地形表現図を重ね合わせた図をダウンロードし、インポートした表示結果を示す。Avenza Maps は紙の地図をアプリ上で確認できるイメージである。



図 2-4-34 Avenza Maps の微地形表現図と地理院地図の重ね図の表示例

4.4.6. 微地形表現図をスマートフォン等に取り込めるその他の無料アプリ②

Geographica は Avenza Maps と同様にスマートフォンやタブレット用の地図表示アプリケーションである。初期段階で表示される地図は地理院地図であり、普段から見慣れている場合は Geographica の方が親しみやすい。

1) Geographica の特徴

Geographica は登山用に開発されたアプリケーションである。地図はスマートフォン内にキャッシュとして保存するため、通常ではインターネット環境が必要な地理院地図を一度表示しておけば通信圏外でも再度表示することができる。自己位置はスマートフォン等の内蔵 GNSS を参照するため、森林などの GNSS 観測条件が不良な地域では精度が低くなることがある。その他の Geographica の機能や特徴を以下に示す。

- ・Geotiff 形式の地図の読み込み
- ・GNSS を使った移動経路のトラッキングと、軌跡の保存やエクスポート (KML、GPX)
- ・地図マーカーの入力と保存、エクスポート機能 (KML、GPX)
- ・座標値の表示
- ・地図内のランドマークや場所の検索と検索結果の保存
- ・地図上の距離と面積の計測
- ・複数の主題図の重ね合わせ

2) Geographica の表示イメージ

Geographica の表示イメージを図 2-35 に示す。地理院地図を表示するスマートフォン内に地図が表示される。Geographica はレイヤ構造を有しており複数の画像を重ねて表示できる。

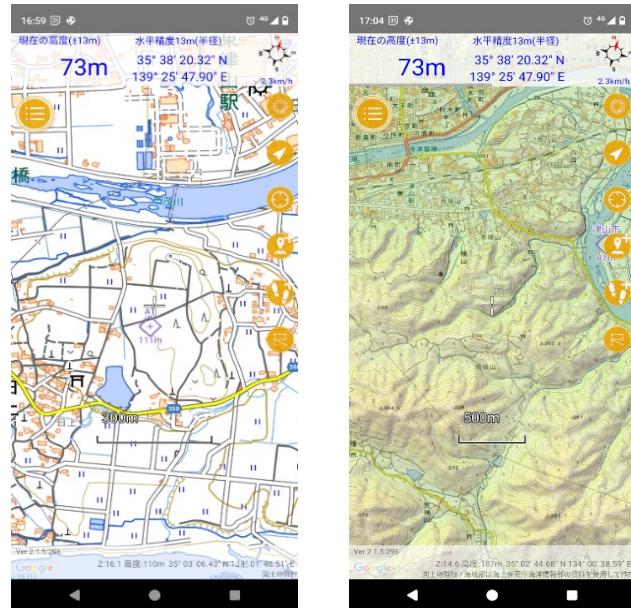


図 2-4-35 Geographica による表示例
(地理院地図(左)と地理院地図と標高段彩図の重ね図(右))

【コラム】 現地調査での参照のための3Dメッシュモデル化

航空レーザ測量は、対象物の三次元構造をXYZの座標値からなる点群データとして取得する。この点で、コンピュータ上で3Dモデルを作成する3Dモデリングの一種といえる。3Dモデルとは、立体物の形状を点・辺・面・色情報などで構成するデータ¹⁵で、点群モデルやメッシュモデル（立体物をポリゴン（多角形の面）の集合で表現したモデル。以下同じ）を含む。これらは、PCやスマートフォンのビューアで自由な視点からインタラクティブに観察できる。

ところで、本マニュアルの用途である地表”面”の形状把握を目的に3Dモデルを用いる場合、隙間のある点群モデルではなく、文字通り”面”で構成されるメッシュモデルが適している。しかし一方で、航空レーザ測量業務では、点群のメッシュモデル化やデータでの納品は含まれていない。点群データの2D画像への変換は、得られた情報の逸失でもあるとの観点からすると、点群からメッシュモデルの生成方法やその利活用について検討する余地は十分にあるといえる。

上記から本コラムでは、現地調査に伴う利活用を想定し、点群データ、特にグリッドデータからメッシュモデルを作成し、観察する方法を説明する。

1) 点群データのメッシュモデル化

①点群データのメッシュモデル化の意義

点群データをメッシュモデル化することで、地形や構造物を立体的に観察でき、二次元の地図では見えにくい特徴も把握できる。特に、以下の効果が見込まれる。

- ・一部の微地形表現図では把握しにくい比高差が容易に把握できる。
- ・メッシュの形状に基づく色付けや陰影表示により、立体的な微地形表現ができる。
- ・高さ方向だけの変形もできるため、地形のイメージが容易になる。

②メッシュモデル化の方法

点群データのメッシュモデル化とは、点座標をもとに2点の頂点を結ぶ「辺」と、三つ以上の辺からなる「面」（polygon / face）を生成する処理である。

この処理では、使用するソフトウェアや手法により、既存の頂点のみを使用して面を作成する場合と頂点間に新たな頂点を補間して面を作成する場合とがある。

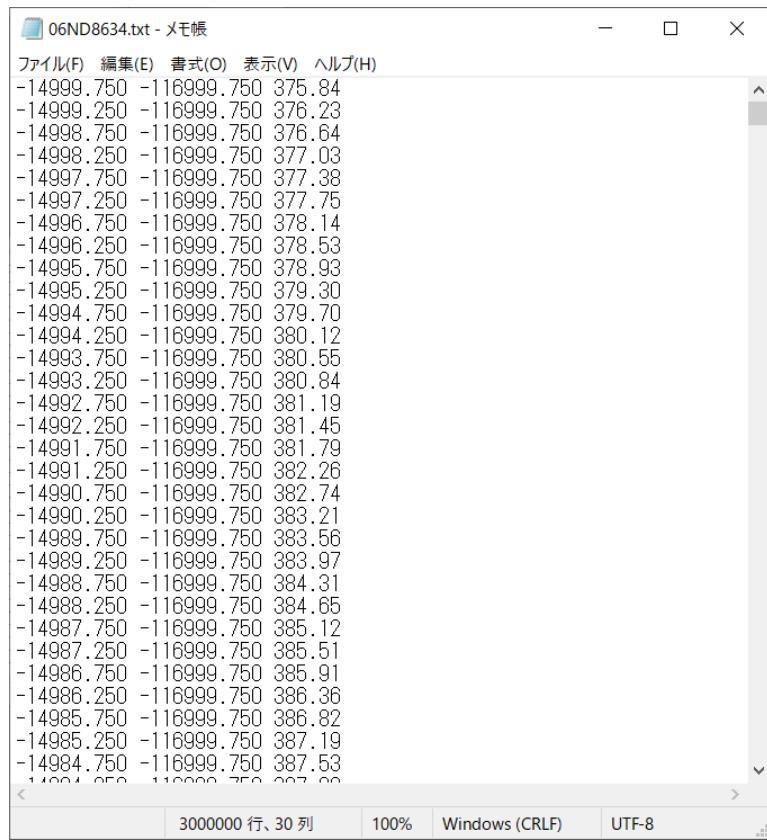
メッシュモデル化のもととなるグリッドデータは、地物を除去したグラウンドデータから規定の密度で点群を規則的に補間・配置したデータである。テキスト形式で作成され、点ごとにXYZの順で座標値（X=経度・Y=緯度・Z=標高）が記述されている（図2-4-36）。

このような点群データをメッシュモデル化するには専用のアプリケーションが必要となる。ここでは、有償3Dソフト、無償3Dソフトに加え、テキストエディタから直接加

¹⁵ 本章では、主にOBJ形式・GLB形式・FBX形式などのデータを想定する。

工する3つの方法を紹介する。

なおここで扱う点群データは、京都府城陽市域のデータで、京都府建設交通部砂防課が令和5年度に実施した航空レーザ測量の成果品の提供を市が受けたものである。



```
06ND8634.txt - メモ帳
ファイル(F) 編集(E) 書式(O) 表示(V) ヘルプ(H)
-14999.750 -116999.750 375.84
-14999.250 -116999.750 376.23
-14998.750 -116999.750 376.64
-14998.250 -116999.750 377.03
-14997.750 -116999.750 377.38
-14997.250 -116999.750 377.75
-14996.750 -116999.750 378.14
-14996.250 -116999.750 378.53
-14995.750 -116999.750 378.93
-14995.250 -116999.750 379.30
-14994.750 -116999.750 379.70
-14994.250 -116999.750 380.12
-14993.750 -116999.750 380.55
-14993.250 -116999.750 380.84
-14992.750 -116999.750 381.19
-14992.250 -116999.750 381.45
-14991.750 -116999.750 381.79
-14991.250 -116999.750 382.26
-14990.750 -116999.750 382.74
-14990.250 -116999.750 383.21
-14989.750 -116999.750 383.56
-14989.250 -116999.750 383.97
-14988.750 -116999.750 384.31
-14988.250 -116999.750 384.65
-14987.750 -116999.750 385.12
-14987.250 -116999.750 385.51
-14986.750 -116999.750 385.91
-14986.250 -116999.750 386.36
-14985.750 -116999.750 386.82
-14985.250 -116999.750 387.19
-14984.750 -116999.750 387.53
1000 1000 1100000 750 227 00
```

図 2-4-36 点群データの記述

i. 有料 3D ソフトを用いた点群のメッシュ化 (Agisoft Metashape)

3D モデルを扱う有償ソフトのうち、Agisoft 社の Metashape2.0 を用いたメッシュモデル化を紹介する。

Agisoft 社の Metashape は三次元写真測量 (SfM/MVS。本書では 7.2 参照) に用いられるソフトウェアで、考古学・埋蔵文化財分野でも遺跡発掘調査や遺物の計測等で使用される。Metashape では、点群データのインポートと点群からのメッシュモデル作成が可能である。

＜点群データのインポート方法＞

Metashape では、テキスト形式の点群データを直接インポートできないため、PLY 形式に変換する。変換するには、グリッドデータのテキストファイルをテキストエディタで開き、以下のヘッダ情報を先頭に記述する (図 2-4-37)。《頂点数》に記述する数値はテキストファイルの行数 (図 2-4-36 の場合「3000000」) を記述する。

```

ply
format ascii 1.0
element vertex 《頂点数》
property float x
property float y
property float z
end_header

```

図 2-4-37 PLY ファイルのヘッダ

上書き保存を行い、テキストエディタを閉じる。拡張子を「.txt」から「.ply」に書き換える（図 2-4-38）。



図 2-4-38 拡張子を.txt から.ply に書き換え

Metashape を起動し、「ファイル」→「インポート」→「ポイントをインポート」を選択し、.ply ファイルを選択する（図 2-4-39）。

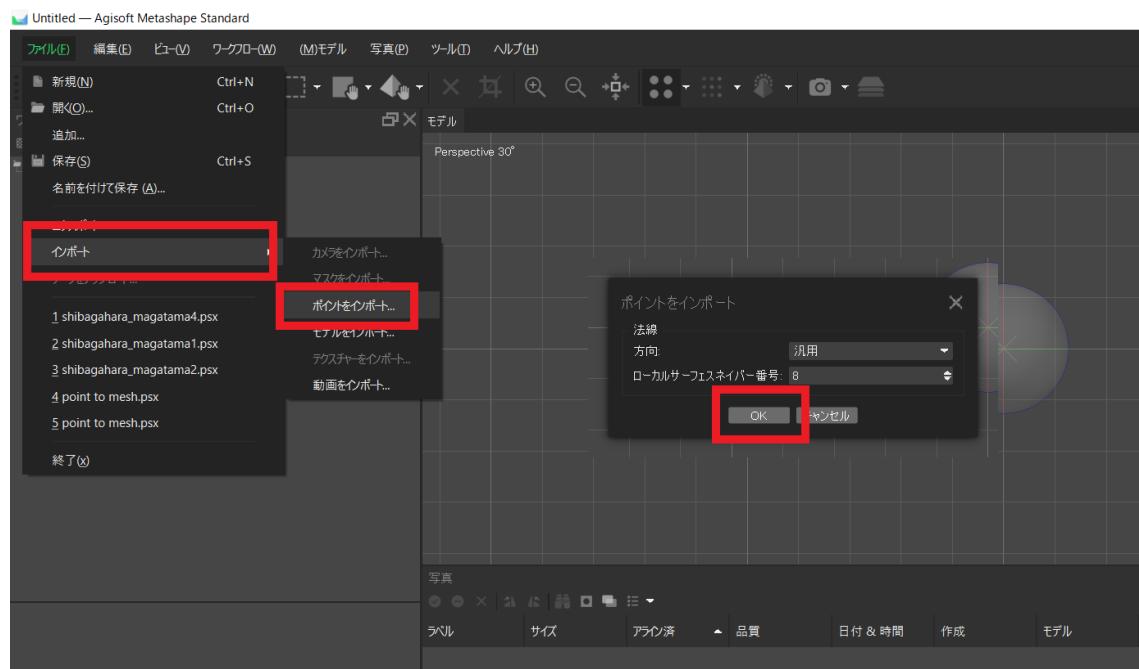


図 2-4-39 Metashape への点群データのインポート

<メッシュモデルへの変換方法>

「ワークフロー」 – 「メッシュ構築」を選択。ソースデータに「高密度点群」を選択する。ポリゴン数は「高」を選択し「実行」をクリック（図 2-4-40）。

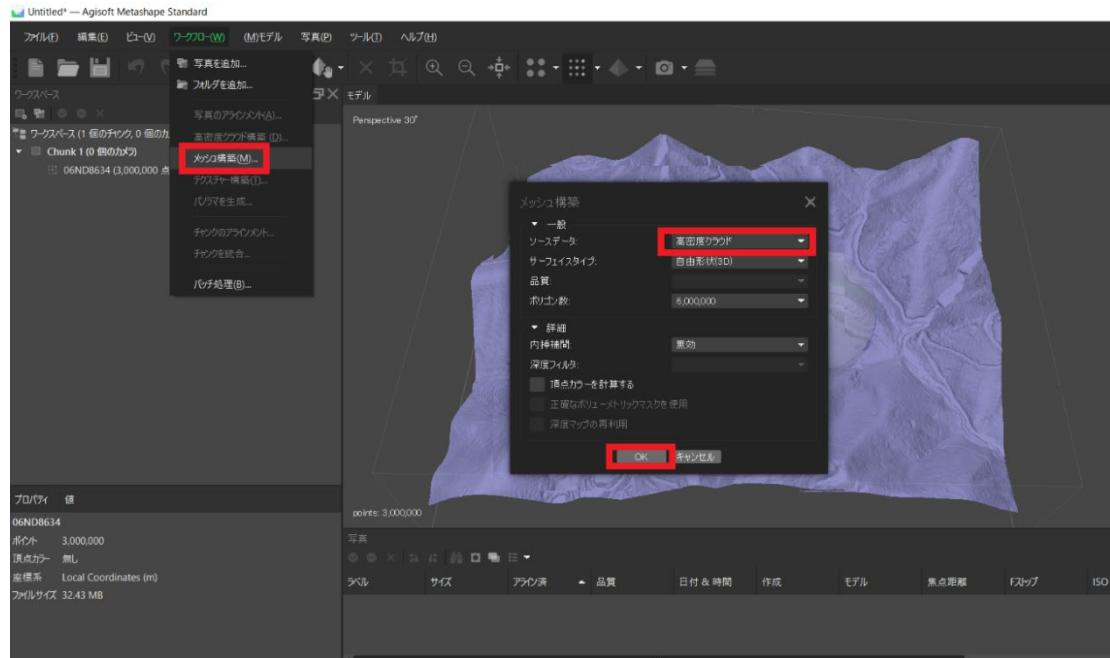


図 2-4-40 Metashape でのメッシュモデルへの変換

グリッドを基本にしたメッシュモデルが表示される（図 2-4-41）。

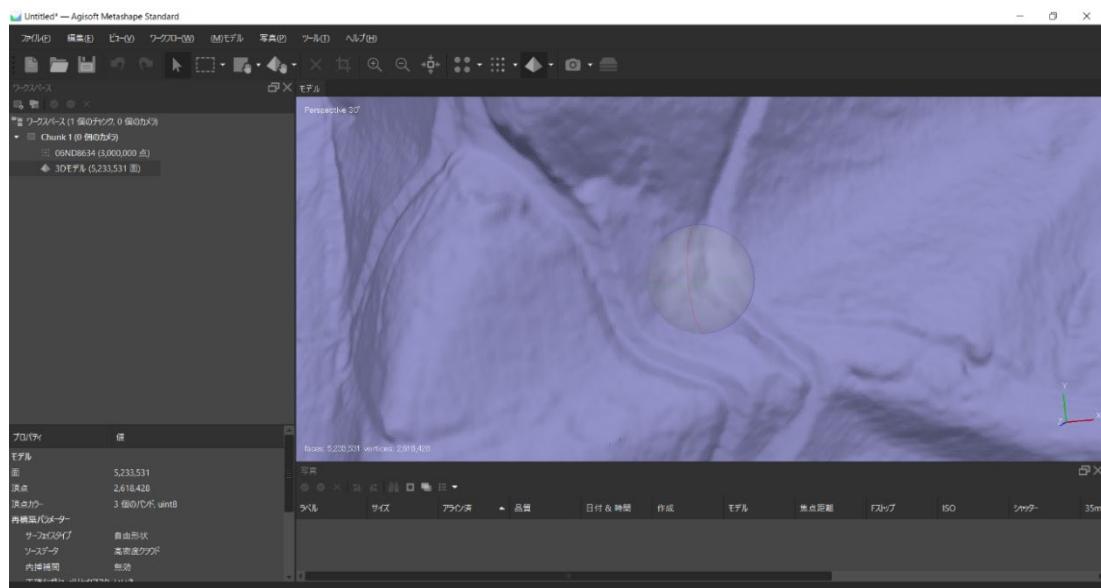


図 2-4-41 Metashape で変換されたメッシュモデル

<エクスポート方法>

メッシュモデルが生成されるので、3D モデルとしてエクスポートするには、「ファイ

ル」 – 「エクスポート」を選択し、ファイル名とデータ形式を選択する（図 2-4-42）。なお、エクスポートするデータ形式の選択には表 2-4-3 を参照のこと。

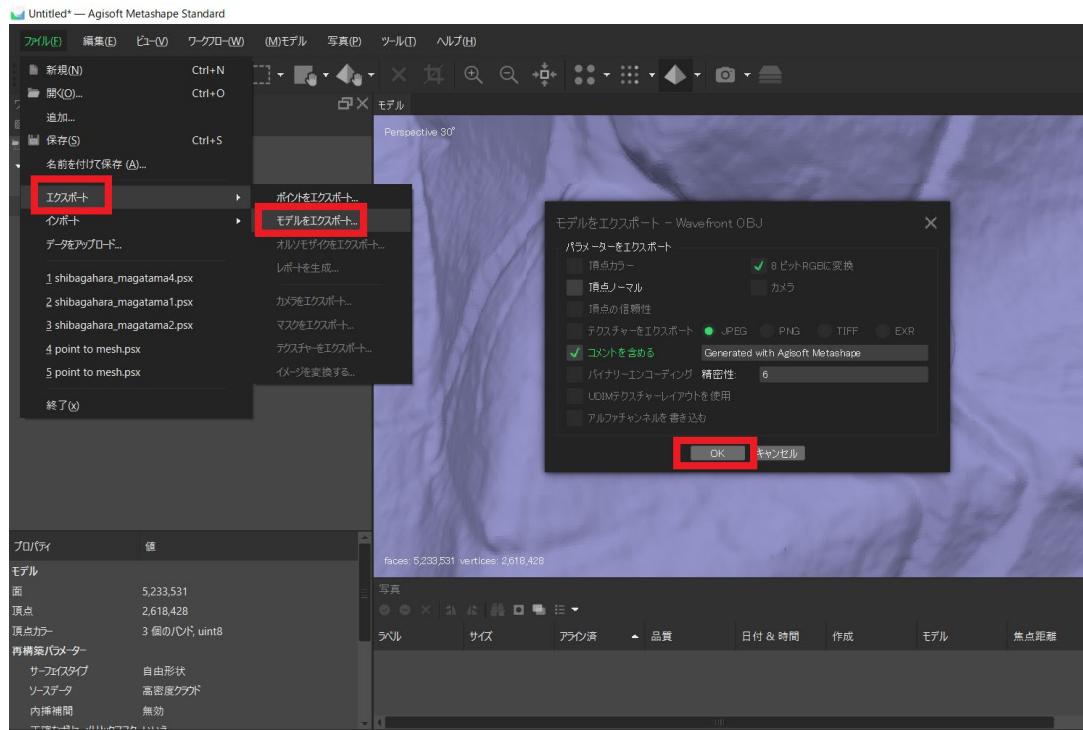


図 2-4-42 Metashape でのメッシュモデルのエクスポート処理

ii. 無料 3D ソフトを用いた点群のメッシュ化 (CloudCompare)

＜点群データのインポート方法＞

CloudCompare を起動し、画面上に点群データをドラッグ & ドロップする（図 2-4-43）。

CloudCompare のバージョンは 2.10 である。

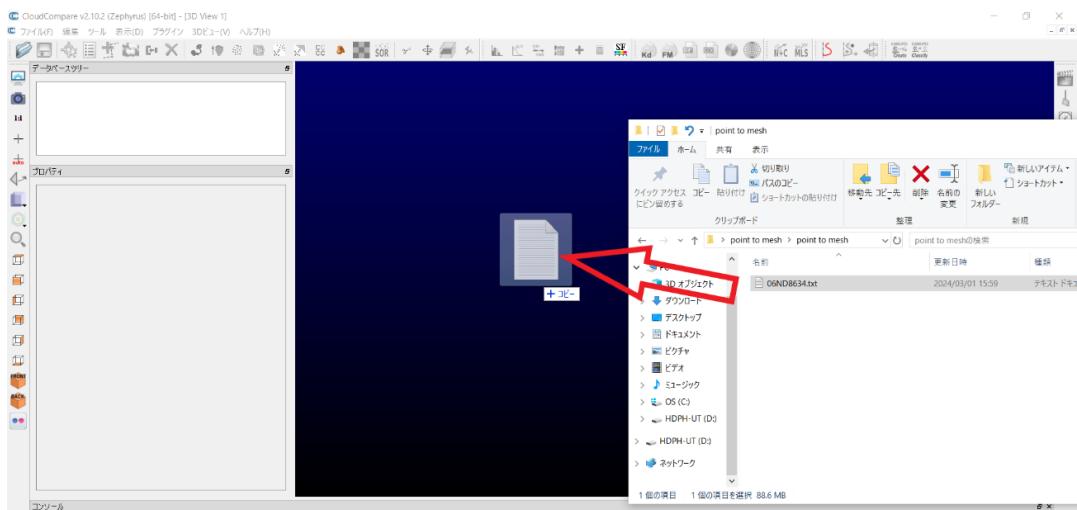


図 2-4-43 CloudCompare への点群データのインポート

インポート時の選択を行う（図 2-4-44）。

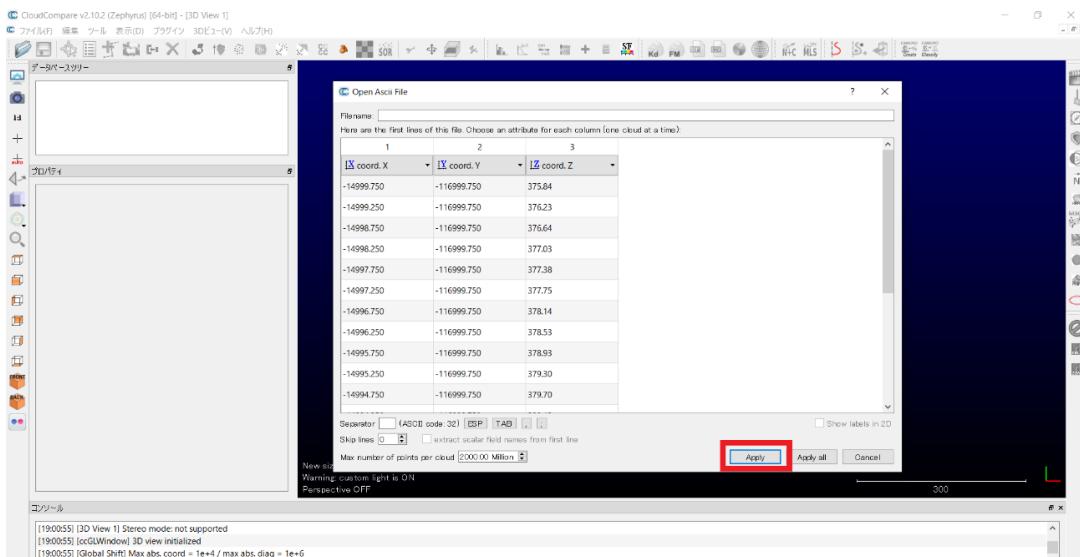


図 2-4-44 CloudCompare での点群データのインポート設定

<メッシュモデルへの変換方法>

「編集」－「メッシュ」－「ドロネー2.5D (XY 平面)」を選択。「OK」をクリックする（図 2-4-45）。

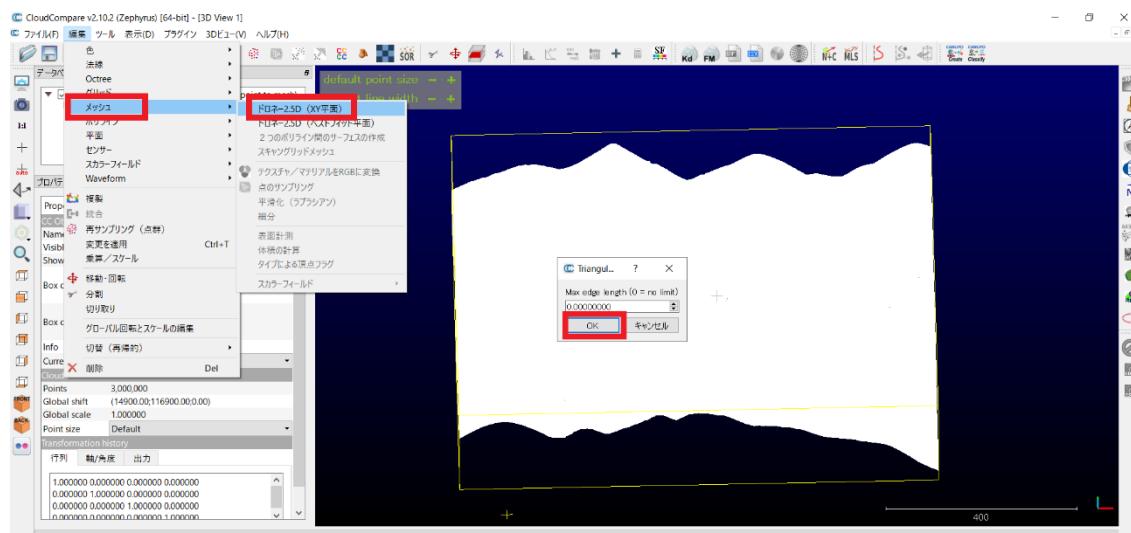


図 2-4-45 CloudCompare でのメッシュモデルへの変換

グリッドに基づく三角形ポリゴンが生成される（図 2-4-46）。

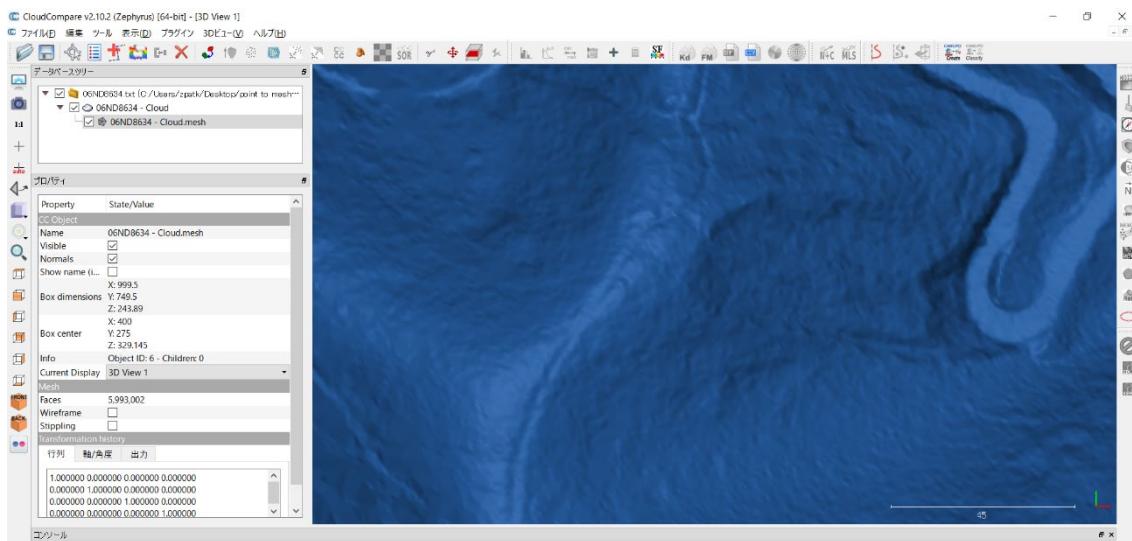


図 2-4-46 CloudCompare で変換されたメッシュモデル

＜エクスポート方法＞

画面右上のツリーから、生成されたメッシュモデルを選択し、保存のアイコンをクリックする。データ形式を選択し、「OK」をクリックする（図 2-4-47）。

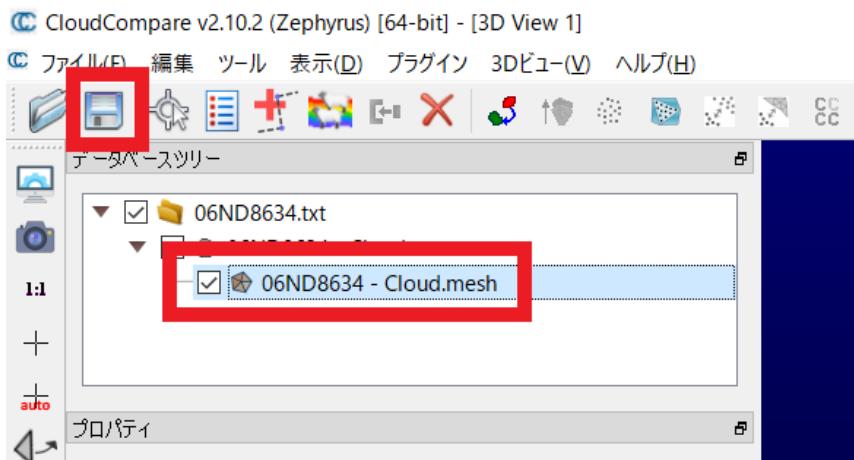


図 2-4-47 CloudCompare でのメッシュモデルのエクスポート処理

iii. テキストエディタを用いた点群のメッシュ化

メッシュモデルのデータ形式のうち OBJ 形式は、点（頂点）や点法線の座標、面の色情報、面の情報等が記述されたデータで、各行の先頭に特定のアルファベットを記述してデータを表現する。例えば、「v」は頂点（vertex）の XYZ 座標を示し、「f」は 1 つの面（"face"）を構成する頂点の行番号を指定する。

ここでは、グリッドデータが点ごとの XYZ 座標値を羅列したテキストファイルで、点

の記述順は規則的¹⁶であることを利用し、以下の手順でグリッドデータを OBJ 形式のメッシュモデルデータの記述方式に書き換えることで、隣接する 4 点のクアッド（四角形）ポリゴンからなるメッシュモデルを作成する。

なお、この手法が採用できるのは、図郭が長方形または正方形のグリッドデータのみである。その他の形状には採用できない点に注意を要する。また使用するビューアによってはクアッドポリゴンを描画できないものもある。この場合、先に示した Metashape 又は CloudCompare を用いた手法を採用すること。

＜点群データの書き換え＞

グリッドデータのテキストファイルをテキストエディタで開く。

各行の先頭に頂点を示す「v」を記述するため置換機能を用いる。データは半角スペース区切りのため、以下のようになる。

例：（置換前） -12345.67 -23456.78 12.34

（置換後） v -12345.67 -23456.78 12.34

点群データの頂点数は膨大なため、1 点ずつ手作業で行うことは現実的ではない。よって図 2-4-48 の例のようにテキストエディタの置換機能を用いると処理が容易である。

なお、座標値の関係で置換が適切にできない場合、拡張子を.csv に書き換え、Excel で先頭行に「v」を挿入することも可能である。点群の数（=行数）が Excel の表示可能な行数（1,048,576 行）を超える場合、テキストファイルを事前に分割しておく必要がある。



図 2-4-48 テキストエディタでの置換処理例

¹⁶ 本コラムで使用しているグリッドデータの1行目は図郭の南西端の点の座標で、2行目はその東隣の点…となる。図郭の南東端の点の座標の次の行は、1点目の北隣の行となっている。

<ポリゴンを構成する点の指定>

1つのポリゴンを構成する4点を指定するには、頂点を記述した「v」行の最後の行に続き、「f」行の挿入が必要となる。「f」行には、「v」行の行番号を記述する。

例：図郭が2,000m×1,500mのグリッドで50cmグリッドの場合、以下となる。

```
f1 2001 2002 2
f2 2002 2003 3
f3 2003 2004 4
f1999 3999 4000 2000
f2001 4001 4002 2002...
f2997999 2999999 3000000 2998000
```

Pythonを使った以下のコード（図2-4-49）で、このテキストファイルが作成可能である。Pythonが使えない環境であっても上記文字列をプロンプトとして用いることでAIがテキストファイルを生成する¹⁷。

```
1 # Generate formatted mesh vertex data for a 2000x1500 grid
2
3 num_points_x = 2000
4 num_points_y = 1500
5
6 # Function to get the vertex number based on row and column index
7 def get_vertex_number(row, col):
8     return row * num_points_x + col + 1
9
10 # Writing to file with space-separated values and correct vertex ordering
11 output_file_path = "/mnt/data/formatted_mesh_quads_2000x1500.txt"
12 with open(output_file_path, "w") as file:
13     for row in range(num_points_y - 1):
14         for col in range(num_points_x - 1):
15             # Get vertex indices for the current cell in the correct order
16             v1 = get_vertex_number(row, col)
17             v2 = get_vertex_number(row + 1, col)
18             v3 = get_vertex_number(row + 1, col + 1)
19             v4 = get_vertex_number(row, col + 1)
20
21             # Write formatted quad data with the required structure
22             file.write(f"f {v1} {v2} {v3} {v4}\n")
23
24 output_file_path
```

図2-4-49 「f」行を記述するためのコード例

生成したテキストを「v」行の下にコピー＆ペーストし、上書き保存を行う。ファイル拡張子を.objに書き換えることで、隣接する4点を頂点とするポリゴンで構成されたメッシュモデルができる（図2-4-50）。

¹⁷ ChatGPT 4oを使用して確認済み（2025年2月19日確認）。

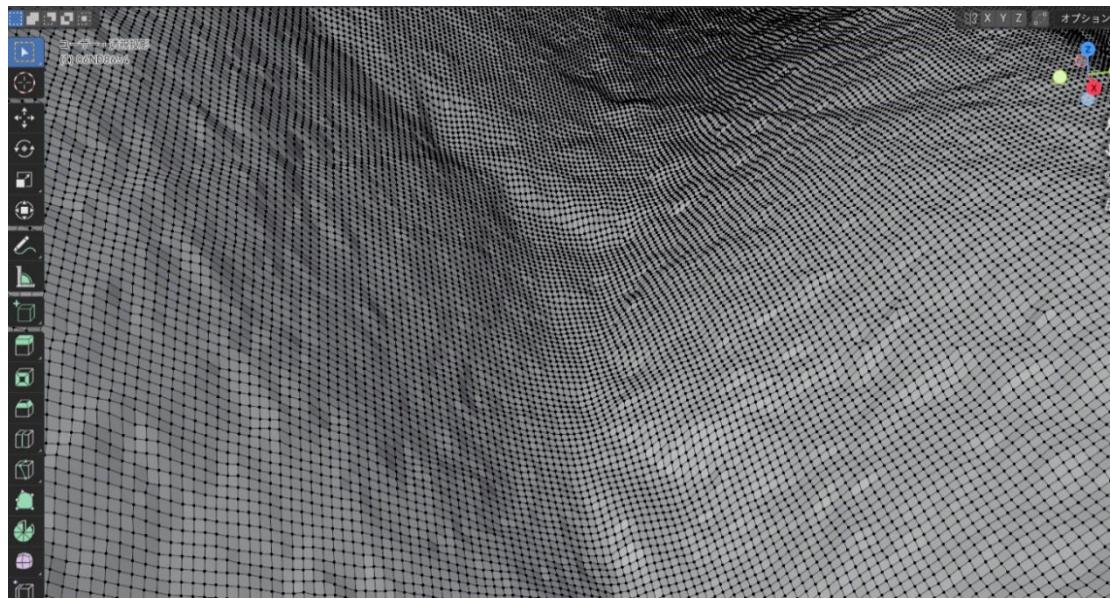


図 2-4-50 生成された四角形（クアッド）ポリゴン

2) メッシュモデルの陰影表示方法

①3D モデルのビューアを用いた表示

3D モデルの陰影表示は、基本的にビューアに備えられた機能に依存するため、あるビューアでの表示設定を異なるビューアに引き継ぐことはできない。

ビューアによる陰影表示の例を以下に示す。

i. Windows 3D viewer (図 2-4-51) … Windows に標準搭載されたビューアによる表示。色や光源の調整が可能。

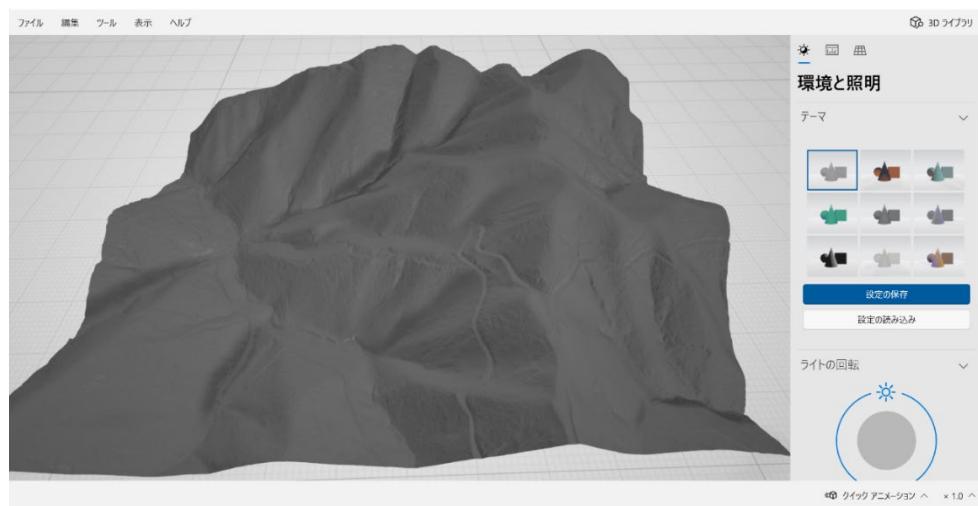


図 2-4-51 Windows 3D viewer を用いたメッシュモデルの表示

ii. CloudCompare (図 2-4-52) · · · 陰影表示が可能。

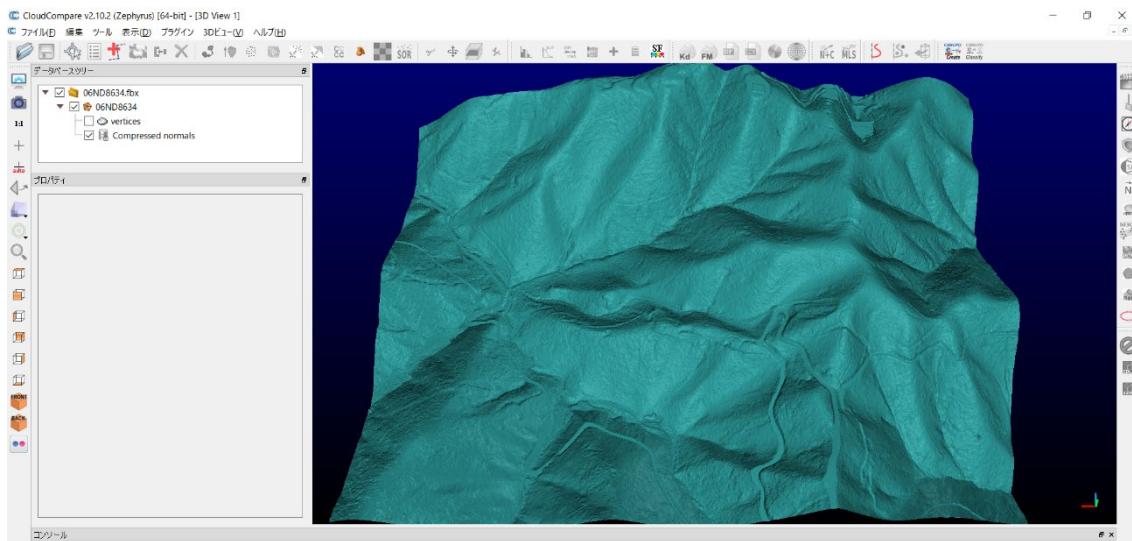


図 2-4-52 CloudCompare を用いたメッシュモデルの表示

iii. Blender (図 2-4-53) · · · オープンソースソフトウェア。様々な陰影表示が可能。

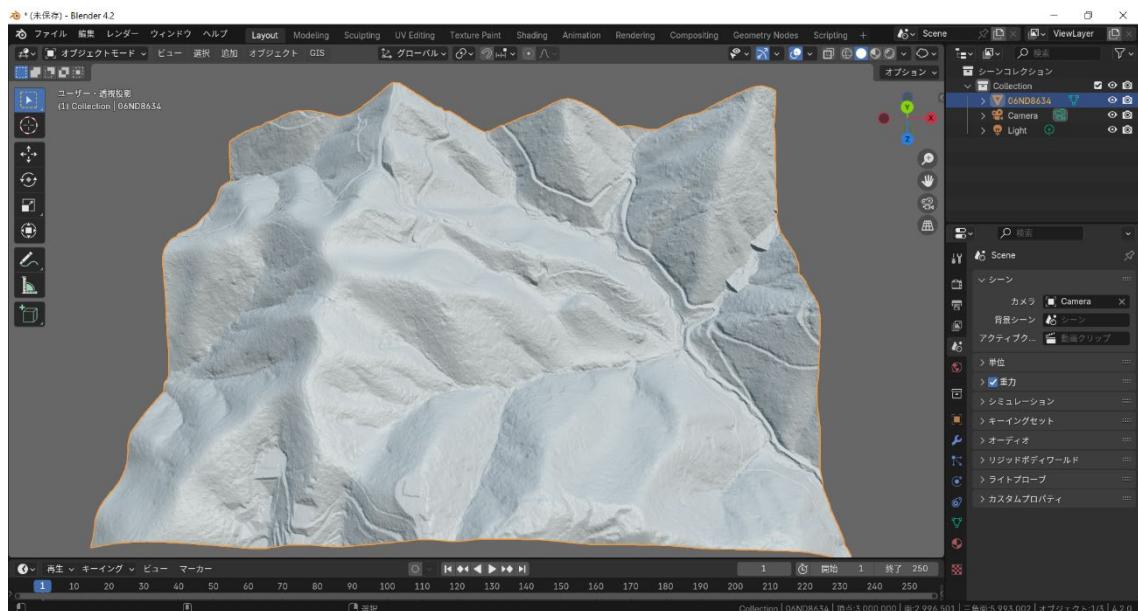


図 2-4-53 Blender を用いたメッシュモデルの表示

iv. Sketchfab (図 2-4-54) · · · 3D モデルの公開共有サイトである Sketchfab にアップロードすることで、端末のスペックに依存せずに 3D モデルを確認できる。なお、データのアップデートにはアカウント（無料で取得可能）が必要である。インターネット環境が確保できれば現地踏査時にもスマートフォン等で閲覧が可能となる。

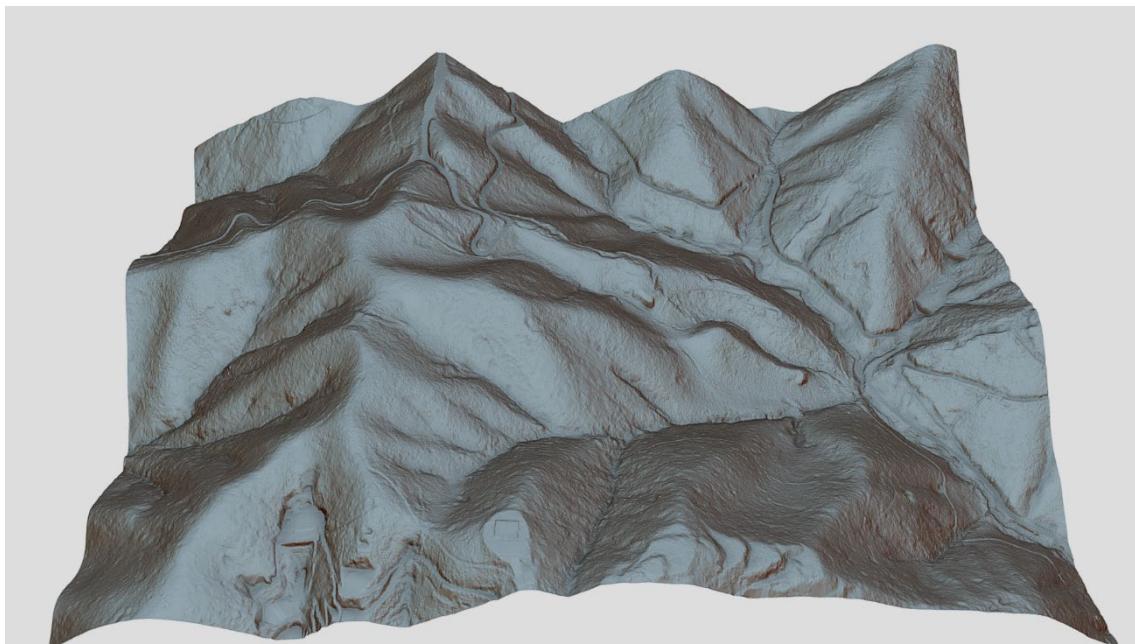


図 2-4-54 Sketchfab 上でのメッシュモデルの表示

②より複雑な陰影表示

3D メッシュモデルでは、面の法線ベクトル（各ポリゴンに対して垂線な方向を示す三次元ベクトル）や曲率（表面の湾曲の度合い）、アンビエント・オクルージョン（周辺光の遮蔽を表現する手法）、エッジ情報（輪郭線）などに基づく陰影表示が行うことができ、これにより、よりリアルな立体表現が可能となる。

これらの複雑な陰影表示には、以下の理由からオープンソースソフトウェアの Blender が適している。

- ・プログラムをブロック化した「ノード」を接続する直感的な操作が可能。
- ・3D モデルの UV 展開（メッシュを U 軸・V 軸からなる二次元平面に展開する処理）とテクスチャのベイク（焼き付け）処理を行えば、他のアプリケーションでも同じ見え方の陰影表示が可能。

陰影表示を行うシェーダープログラムの設定例と、結果を示す（図 2-4-55）。なお、Blender の基本操作はここでは省略する。

- ・面の向きが真上方向に近づくにつれて赤～白色に変化
- ・凹部分の色を青色系で、凸部分の色を赤色系で着色
- ・遮蔽の度合いを青色系で着色

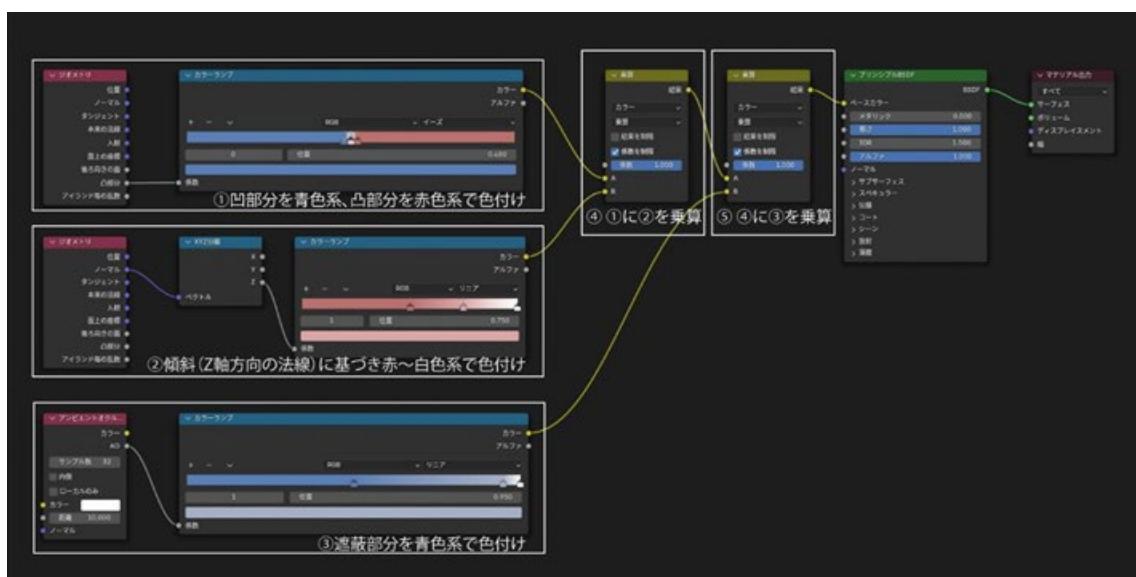
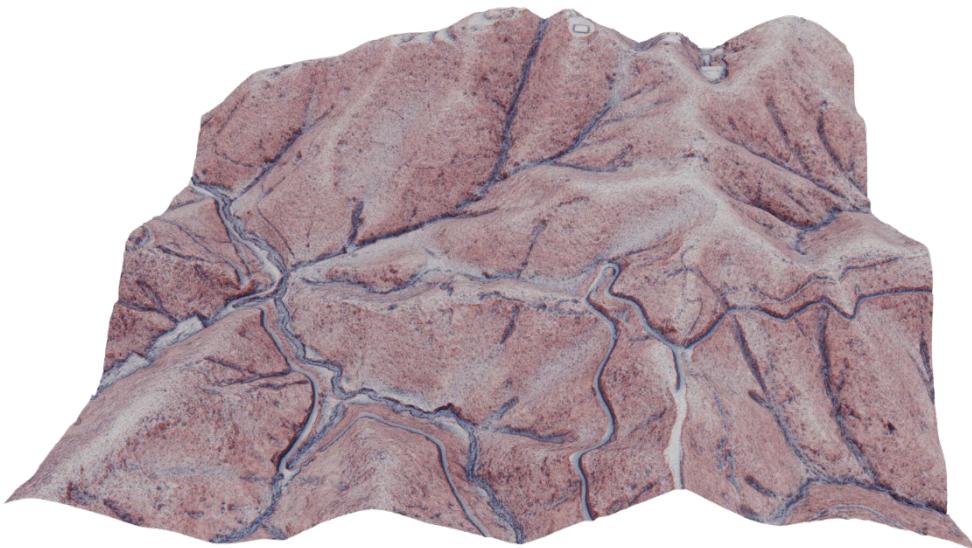


図 2-4-55 Blender を用いた陰影表示（上）とノードの設定例（下）

3) メッシュモデル化処理に適した機材・データ形式

以上のメッシュモデル化や 3D モデル表示に必要な PC 等の機材スペックを表 2-4-2 に示す。なお CloudCompare は、動作要件が明示されていないため省略したが、Blender と同等のスペックで動作する。また、そのデータ形式については表 2-4-3 のとおりである。

表 2-4-2 メッシュモデル化に必要な PC 等の機材スペック（カッコ内は推奨）

	Metashape	Blender
OS	Windows 7 SP1 以降 64bit Mac OS X Mojave 以降	Windows 8.1 以降 64bit MacOS 11.2
CPU	4~12 コア Intel, AMD, Apple M1/M2, 2.0GHz 以上	4 コア以上 (12 コア以上)
メモリ	16GB 以上 (32GB 以上)	8GB 以上 (32GB)
GPU	GeForce RTX 2060 または Radeon RX 5600M と同等 (GeForce RTX 3080 または Radeon RX 6800)	2GB VRAM (8GB VRAM)

表 2-4-3 メッシュモデルのデータ形式比較

データ形式	概要	扱いやすさ	データサイズ検証 ¹⁸
GLB	Khronos Group が提唱する GLTF (GL transmission Format) のバイナリ版。3D シーンやモデルのアニメーション、複雑なテクスチャなどにも対応。	○ <ul style="list-style-type: none">Windows の標準 3D ビューアでサポートされているMetashape, Blender で書き出し可能Metashape, Blender, Sketchfab で読み込み可能テクスチャ (表面の色情報) 等を埋め込めるので、外部参照ファイルが不要	○ データサイズは OBJ よりも小さくなった。
FBX	Autodesk が所有するデータ形式。3D モデルを用いた映像やゲームに使用される。三次元構造アニメーションやカメラ、複雑なテクスチャ表示などに対応。	△ <ul style="list-style-type: none">Windows の標準 3D ビューアでは非推奨Metashape, CloudCompare, Blender で書き出し可能Metashape, CloudCompare, Blender, Sketchfab で読み込み可能3D モデルを活用した映像や VR などのコンテンツ制作で使用されることが多い	◎ 他の二つのデータ形式に比べて出力時のデータサイズが最も小さくなつた。
OBJ	Wavefront Technologies 社が開発した、三次元構造をテキストベースで記録したフォーマット。	◎ <ul style="list-style-type: none">Windows の標準 3D ビューアでサポートされているテキストエディタで判読可能Metashape, CloudCompare, Blender で書き出し可能Metashape, CloudCompare, Blender, Sketchfab で読み込み可能マテリアル (表面の質感) や テクスチャ (表面の色情報) の描画には外部ファイル (.mtl) が必要	△ 三つの中でデータサイズが最も大きくなつた。

¹⁸ 検証は、CloudCompare と Metashape でメッシュデータを出力し、各形式での出力結果を比較した。設定やデータによっては異なる結果が得られる可能性もある。

5. 航空レーザ測量では捕捉できない地形の計測

5.1. 現地での計測を要する埋蔵文化財の例

4.3.1 で述べたように、樹木等が繁茂している箇所では、航空レーザ測量成果の地表面点群データ（グラウンドデータ）の密度が低くなる。この場合、微地形表現図から埋蔵文化財を判読することも困難となる。こうした箇所では、手持ちレーザスキャナ計測等の別の手法によって、埋蔵文化財の微地形を把握するのが望まれる。

ここでは日上畠山 25 号墳での実践事例を示す（図 2-5-1～図 2-5-6）。

1) 微地形表現図（CS 立体図）の状況

航空レーザ測量成果を基に作成された微地形表現図（CS 立体図）では、当該箇所の埋蔵文化財（円墳）の微地形表現が不明瞭であることを確認できる（図 2-5-1、図 2-5-2）。

2) 現地の目視と植生状況

CS 立体図では不明瞭であったが、現地の目視では、日上畠山 25 号墳は明瞭に墳丘を確認できた。現地の当該箇所の植生は、竹林を主（一部、広葉樹）とした植生となっており、下草は少ない状況であったが、落ち葉が堆積していた（図 2-5-3、図 2-5-4）。

3) 航空レーザ測量成果の状況

CS 立体図の元データである航空レーザ測量成果によると、当該箇所はグラウンドデータの計測密度が低い状況にあった（図 2-5-5、図 2-5-6）。この要因として、前述の現地の植生状況の影響が想定される。

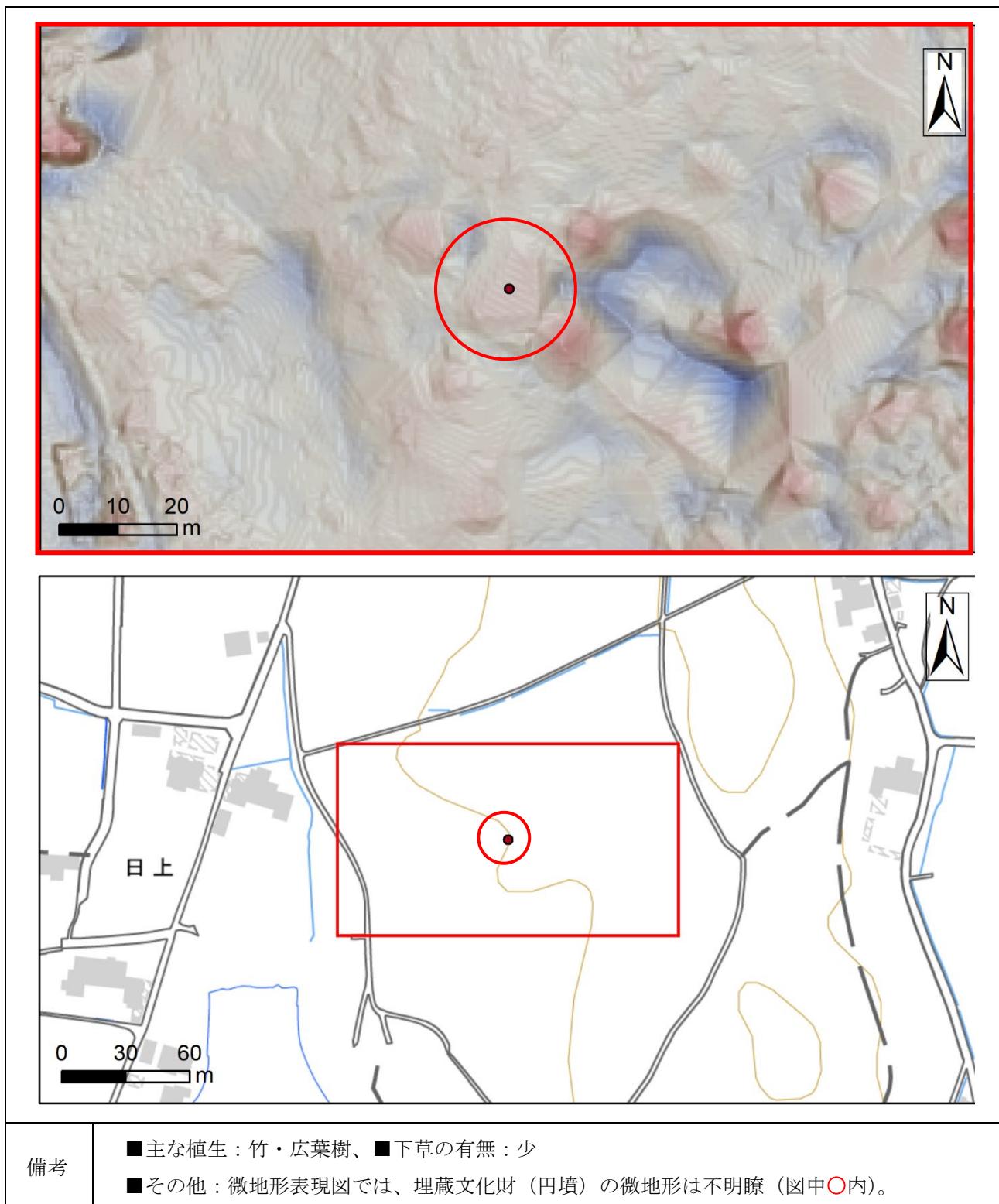
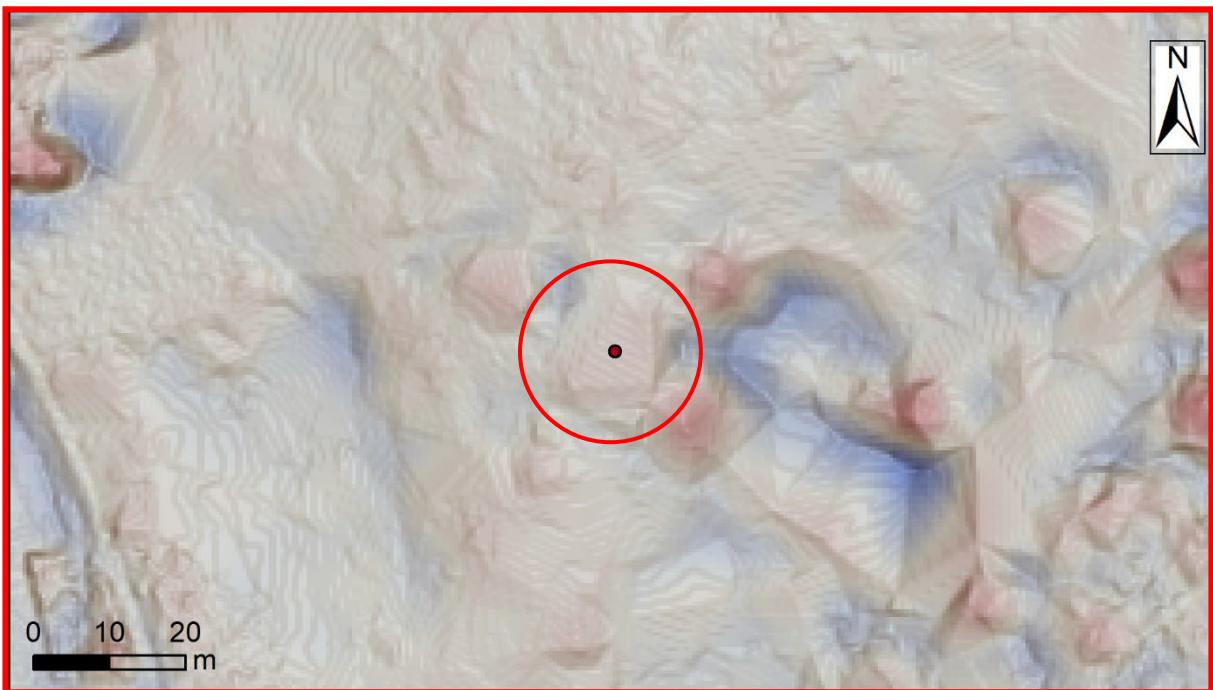


図 2-5-1 CS 立体図には表現されない竹林内の古墳の実例（日上畠山 25 号墳）

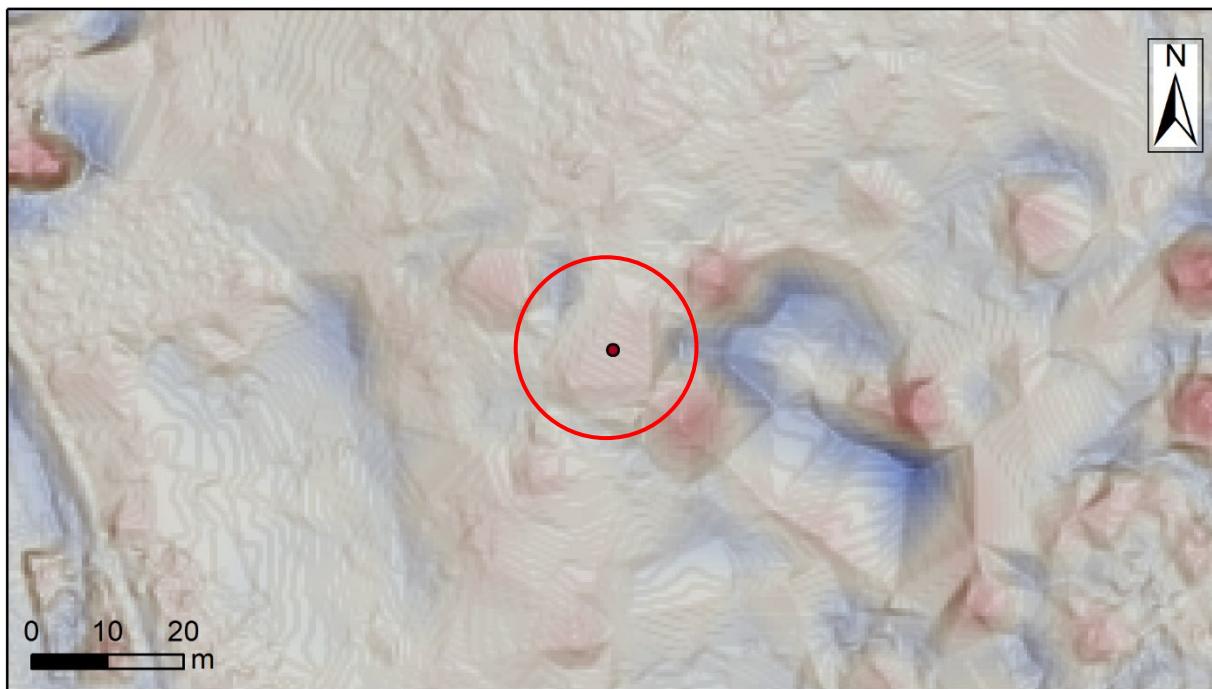
（上：CS 立体図（縮尺：1/1,000）、下：地理院地図・淡色地図（縮尺 1/2,500））



備考	<ul style="list-style-type: none"> ■主な植生：竹・広葉樹、■下草の有無：少 ■その他：微地形表現図では、埋蔵文化財（円墳）の微地形は不明瞭（図中○内）。
----	--

図 2-5-2 CS 立体図には表現されない竹林内の古墳の実例（日上畠山 25 号墳）

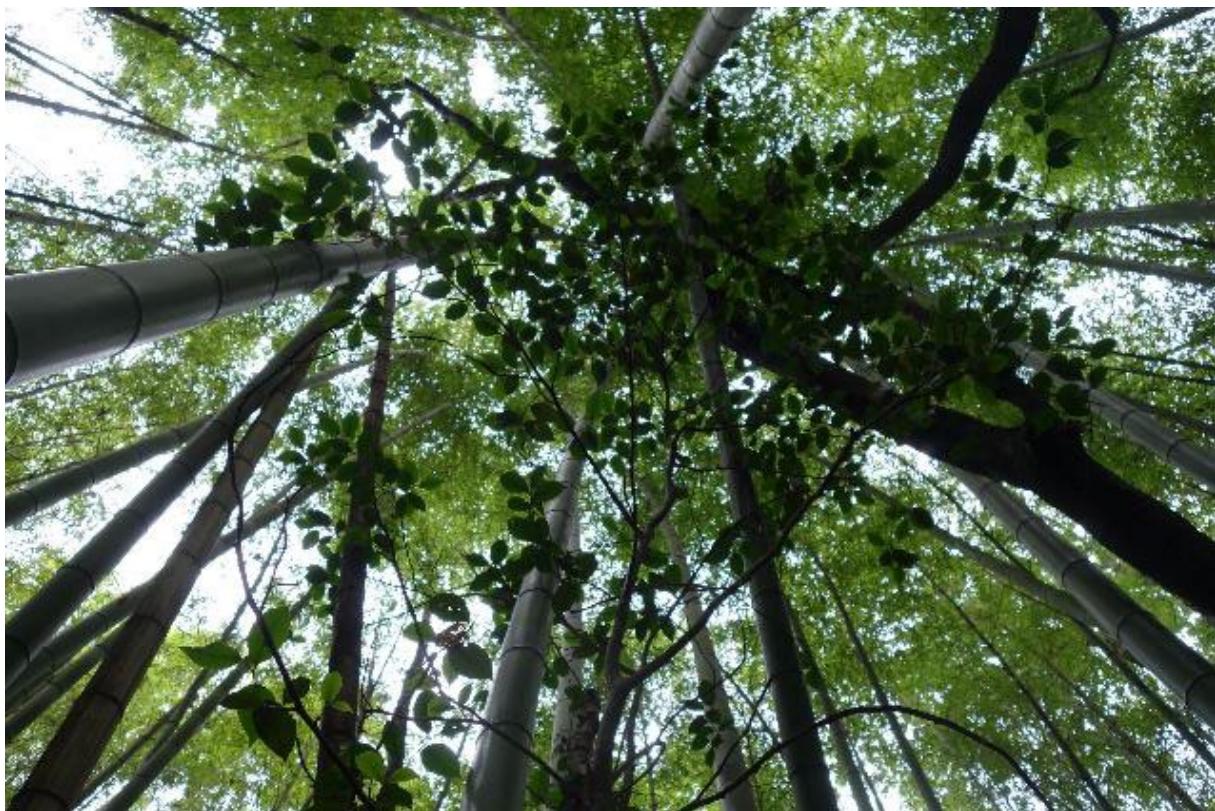
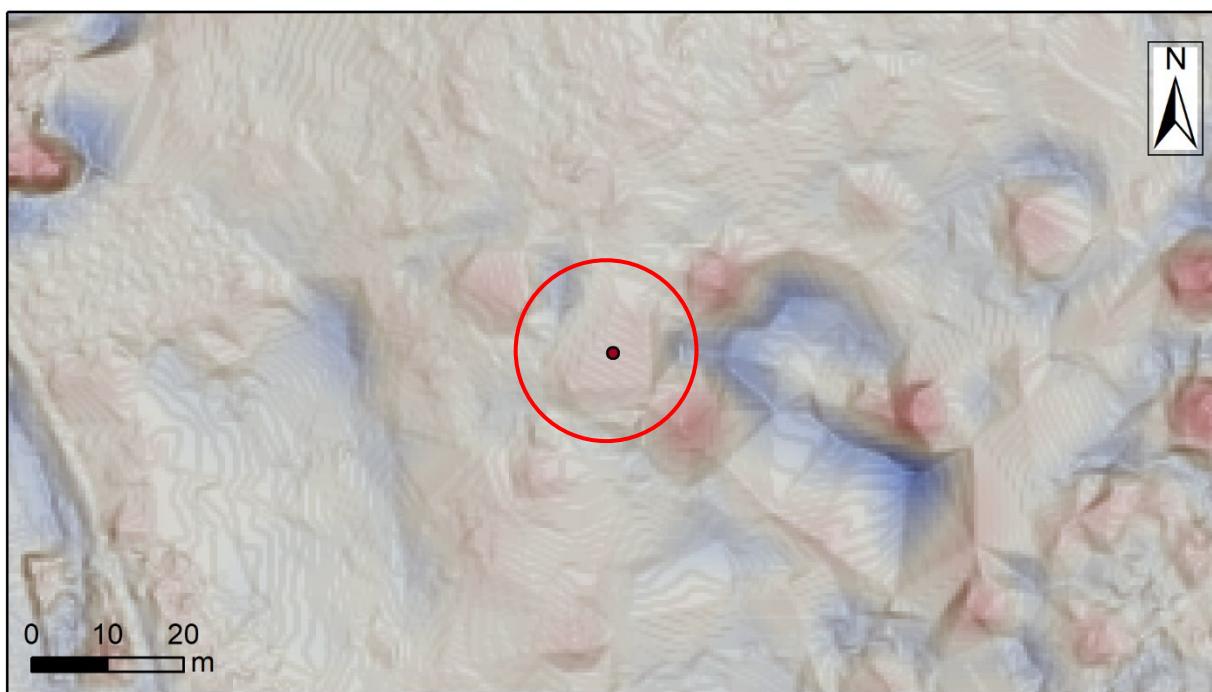
（上：CS 立体図（縮尺：1/1,000）、下：地理院地図・写真（縮尺 1/2,500））



備考	<ul style="list-style-type: none"> ■主な植生：竹・広葉樹、■下草の有無：少 ■その他：微地形表現図では、円墳の微地形は不明瞭（図中○内）。
----	---

図 2-5-3 CS 立体図には表現されない竹林内の古墳の実例（日上畝山 25 号墳）

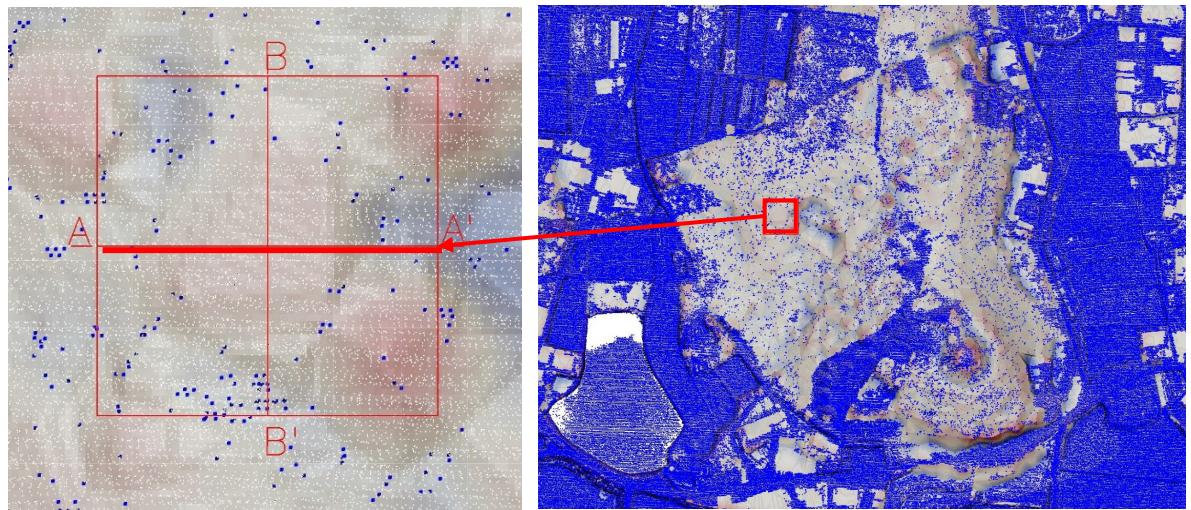
（上：微地形表現図（縮尺：1/1,000）、下：現況）



備考	<ul style="list-style-type: none"> ■主な植生：竹・広葉樹、■下草の有無：少 ■その他：微地形表現図では、円墳の微地形は不明瞭（図中○内）。
----	---

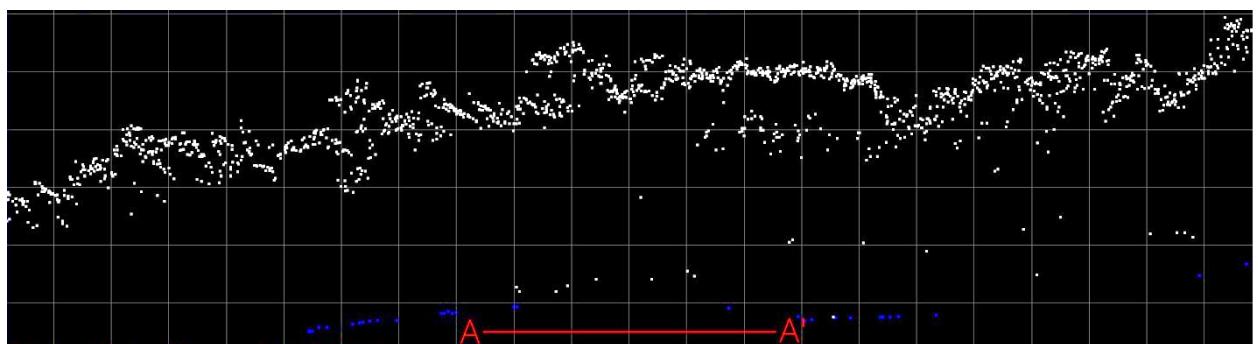
図 2-5-4 CS 立体図には表現されない竹林内の古墳の実例（日上畠山 25 号墳）

（上：微地形表現図（縮尺：1/1,000）、下：古墳の上空視界）

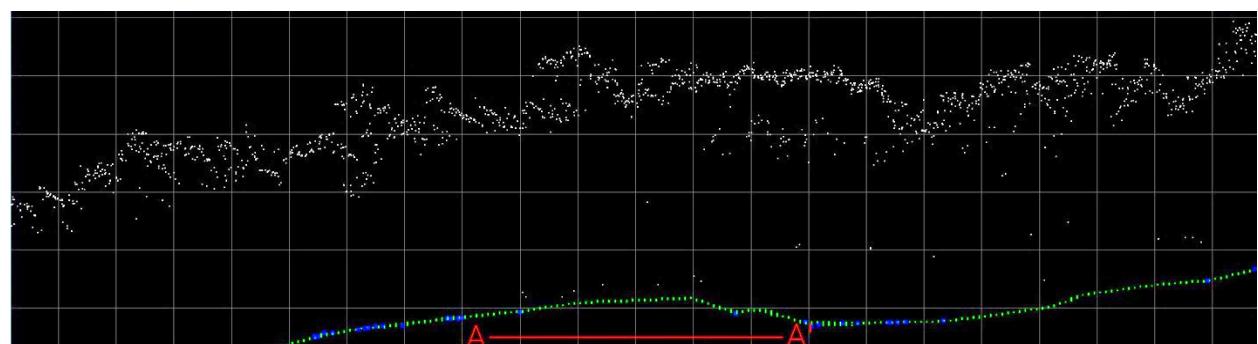


平面図、背景：微地形表現図、●：取得できたグラウンドデータ

墳丘部分のグラウンドデータが著しく粗であることが分かる。



点群断面図 (A-A' 断面)、●：グラウンドデータ、○：それ以外

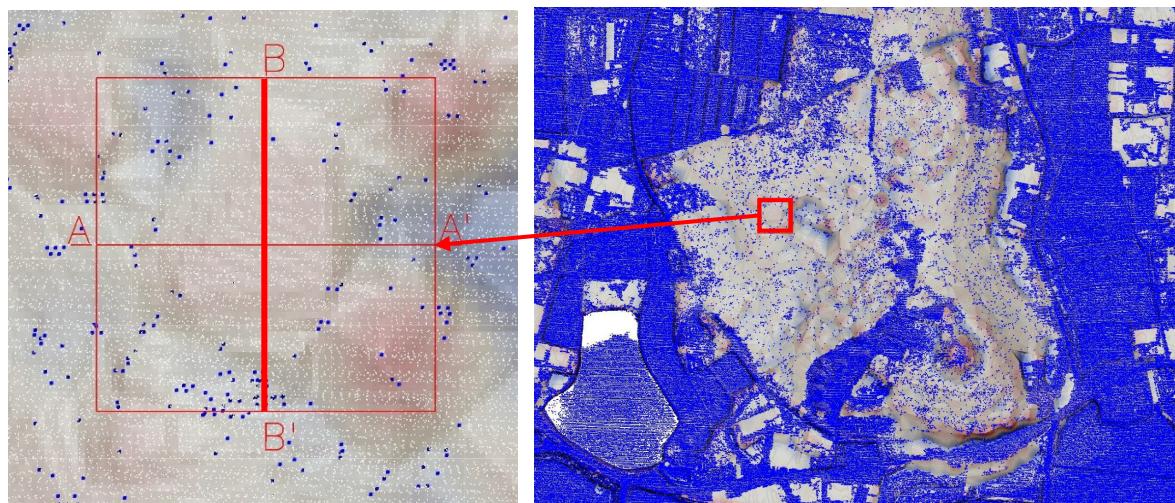


点群断面図 (A-A' 断面) ●：グラウンドデータ、○：それ以外

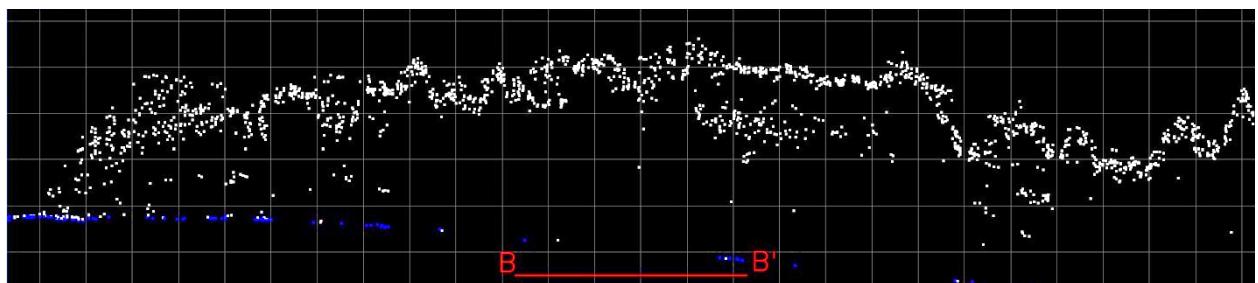
●：グラウンドデータから作成された 0.5m グリッドデータ

備考	<ul style="list-style-type: none"> ■主な植生：竹・広葉樹、■下草の有無：少 ■その他：微地形表現図では、円墳の微地形は不明瞭。
----	---

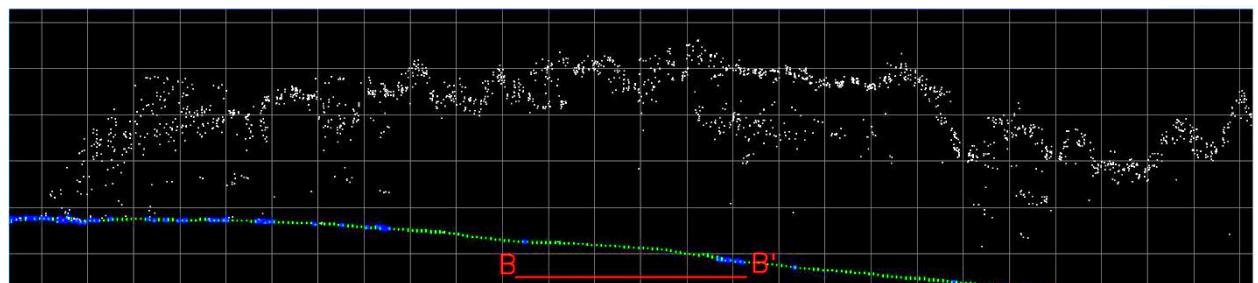
図 2-5-5 竹林内の古墳の航空レーザ測量データの取得状況



平面図、背景：微地形表現図、●：グラウンドデータ



点群断面図（B-B' 断面）、●：グラウンドデータ、○：それ以外



点群断面図（B-B' 断面）●：グラウンドデータ、○：それ以外

●：グラウンドデータから作成された 0.5m グリッドデータ

備考

- 主な植生：竹・広葉樹、■下草の有無：少
- その他：微地形表現図では、円墳の微地形は不明瞭。

図 2-5-6 竹林内の円墳の航空レーザ測量データの取得状況

5.2. 手持ちレーザスキャナ計測の実践

1) 古墳の現況と作業概要

日上畠山 25 号墳における、手持ちレーザスキャナでの計測事例を以下に示す。なお、当該古墳付近は植生（竹林等）の影響で GNSS の受信が困難だったため、目標物の設置等による絶対座標の付与は実施していない。

このため、手持ちレーザスキャナ計測による三次元点群データは、相対座標データとなっている。絶対座標を付与していない三次元点群データの場合、水平位置及び高さの情報が任意座標となっているほか、三次元的な傾きの誤差も含まれている（2 地点間の高低差に誤差が発生する）可能性がある。

表 2-5-1 三次元点群データ取得の作業量（参考）

計測対象	日上畠山 25 号墳
計測日	2024 年 8 月 20 日
計測面積	約 1,250 m ² (半径 20m 範囲)
作業人数	3 次元計測：1 人 標定点設置：2 人 計 3 人

表 2-5-2 三次元点群データ取得の所要時間

項目	標定点を設置しない場合	標定点を設置する場合
準備	20 分	45 分
標定点の設置	—	10 分 (カラーコーン 4 点を想定)
標定点の観測	—	15 分 (TS・VRS の併用を想定)
手持ちレーザスキャナによる計測	10 分～15 分	10 分～15 分
解析処理	60 分～150 分 (点群処理に 60～120 分、色情報付与に 60 分)	60 分～150 分 (点群処理に 60～120 分、色情報付与に 60 分)
座標付与処理	—	15 分
フィルタリング処理	約 2 時間※	約 2 時間※

※ただし PC スペックに依存（上記はノート PC を想定）

2) 微地形表現図との比較

手持ちレーザスキャナで取得した三次元点群データ(色付き)の鳥瞰図を図2-5-7に示す。微地形表現図で表現されていなかった墳丘が、手持ちレーザスキャナでは確認できる。



図2-5-7 手持ちレーザスキャナによる三次元点群データ（色付き）の鳥瞰表示

手持ちレーザスキャナ取得データ（0.1mグリッドデータ）を基にした微地形表現図（地形起伏図）を図2-5-8の左図に、CS立体図を同右図に示す。

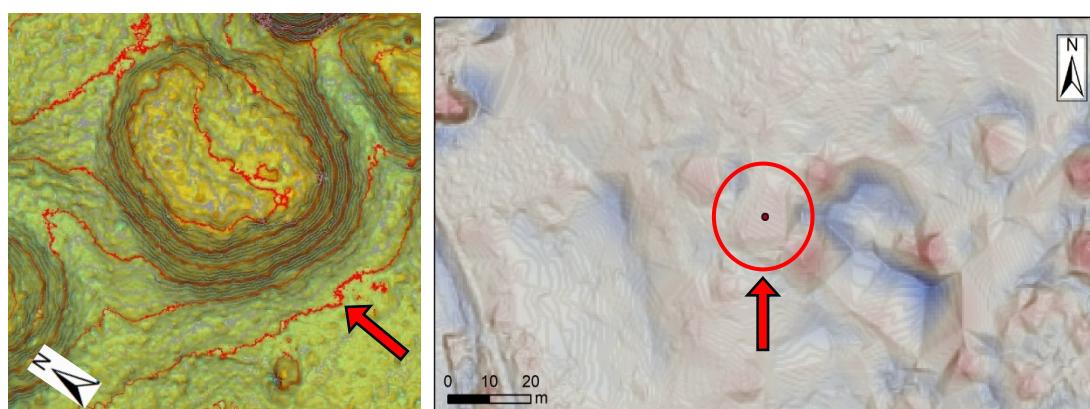


図2-5-8 微地形表現図の比較

(左：手持ちレーザスキャナ（地形起伏図、0.1mグリッド）、赤線：0.5m間隔等高線、
灰色線：0.1m間隔等高線、右：航空レーザ測量（CS立体図、0.5mグリッド）)

3) 古墳の地形測量図との比較

古墳の地形測量図（1/500）を図 2-5-9（左）に示す。手持ちレーザスキャナをもとに作成された微地形表現図（地形起伏図、図 2-5-9 の中央図）と古墳測量図（1/500）の等高線図の比較から、手持ちレーザスキャナ計測は、古墳の測量調査成果と同程度以上の品質（ただし相対位置）の情報が得られていることを確認できる。

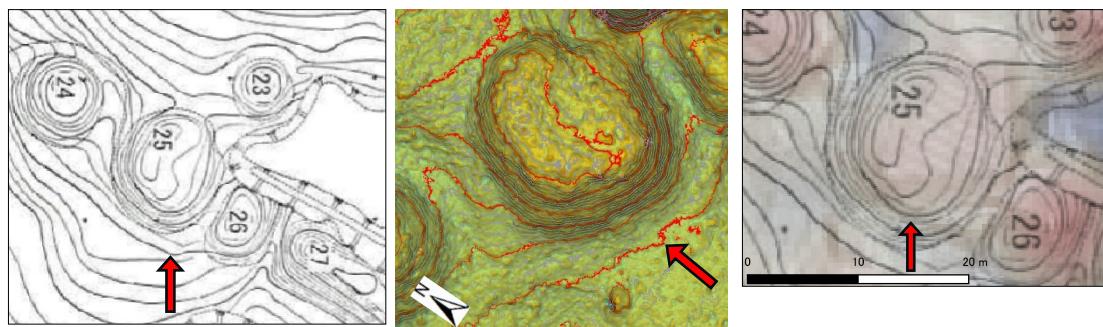


図 2-5-9 墳丘等高線図と手持ちレーザスキャナ計測による微地形表現図（1/500）

（右は航空レーザ測量成果をもとにした微地形表現図と墳丘測量図の重ね合わせ図）

4) 精度の検証

手持ちレーザスキャナで取得した三次元点群データの内、自動フィルタリング処理により抽出された地表面付近の点群の断面図を図 2-5-10 に示す。当該円墳の南北方向の断面（A-A'断面）では、墳丘頂部において高低差 0.2m 程度のくぼ地を確認できる（図 2-5-10 の中段図）。また、東西方向の断面（B-B' 断面）では、墳丘頂部において東西方向に高低差 0.5m 程度の傾斜を確認できる（図 2-5-10 の下段図）。ただし、当該データは相対位置のため、高低差や傾きには誤差が含まれる可能性がある。

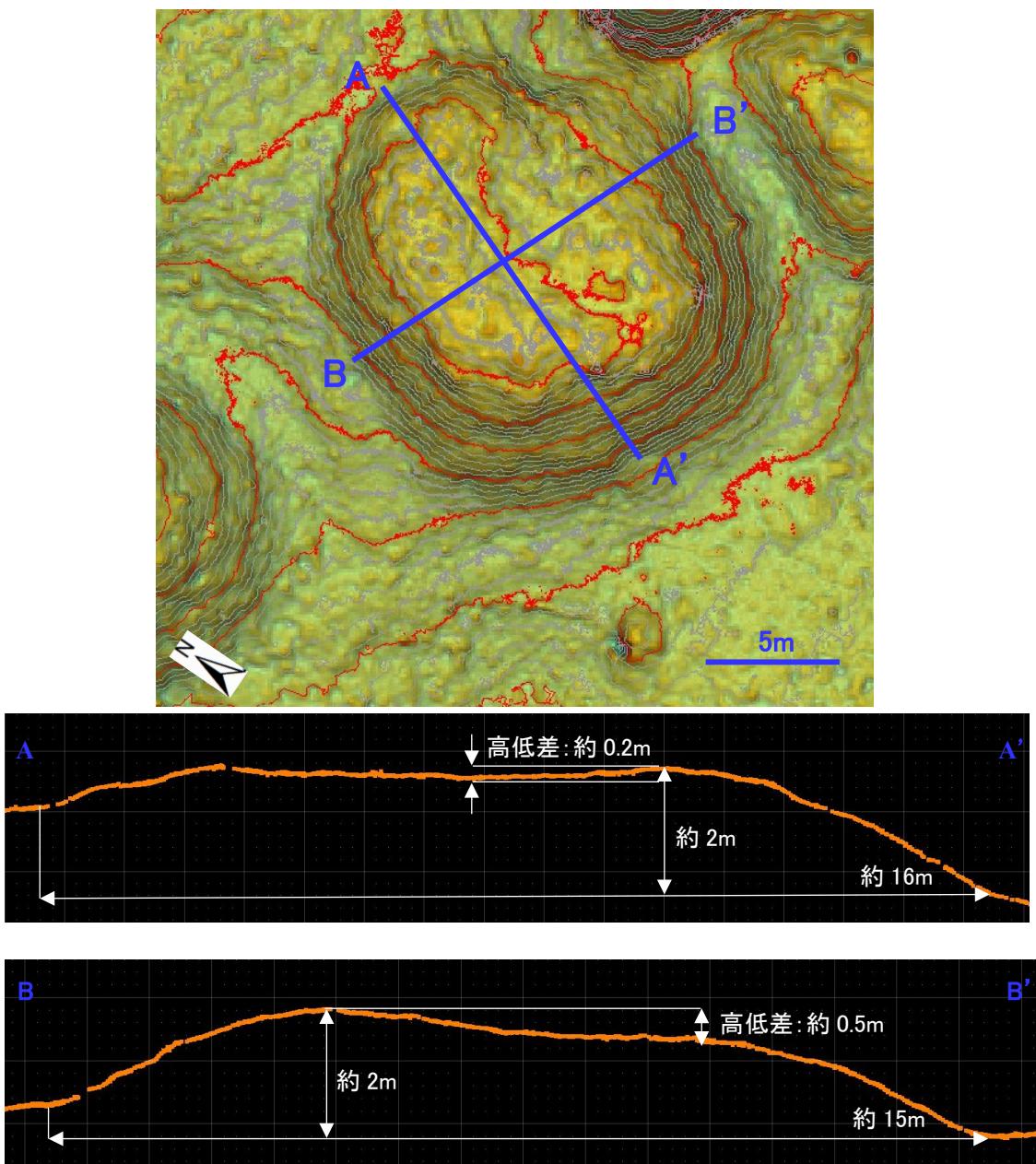


図 2-5-10 手持ちレーザスキャナ計測による三次元点群データ事例：点群断面図（相対座標）
 (●：自動フィルタリング処理により抽出した地表面付近の点群データ)

5.3. 背負い型レーザスキャナ計測の実践

1) 作業概要

手持ち型レーザスキャナと同様に、古墳等のより詳細な地形形状等を三次元的に取得する手法の一つに、背負子型レーザスキャナがある。今回は、美和山古墳群と久米三成古墳群で、その精度等に関する実証実験を行った。

表 2-5-3 三次元点群データ取得の作業量（参考）

計測対象	美和山 1 号墳
計測日	2024 年 10 月 8 日
計測面積	約 3,900 m ²
作業人数	3 人

表 2-5-4 三次元点群データ取得の所要時間

項目	標定点を設置しない場合	標定点を設置する場合
準備	5 分	10 分
標定点の設置	—	10 分 (対空標識 4 点を想定)
標定点の観測	—	15 分 (TS・VRS の併用を想定)
背負い型レーザスキャナによる計測	20 分	20 分
解析処理	20 分 (点群処理に 15 分、色情報報付に 5 分)	20 分 (点群処理に 15 分、色情報報付に 5 分)
座標付与処理	—	15 分
フィルタリング処理	100 分※	100 分※

※ただし PC スペックに依存（上記はノート PC を想定）

※標準的な時間。特にフィルタリングは、自動フィルタリングで取り切れないノイズや植生の影響があると、手動フィルタリングに数日要することもある。

2) 微地形表現図との比較

背負い型レーザスキャナで取得した三次元点群データ（色付き）の鳥観図と微地形表現図との比較を下図に示す。

①美和山 2 号墳

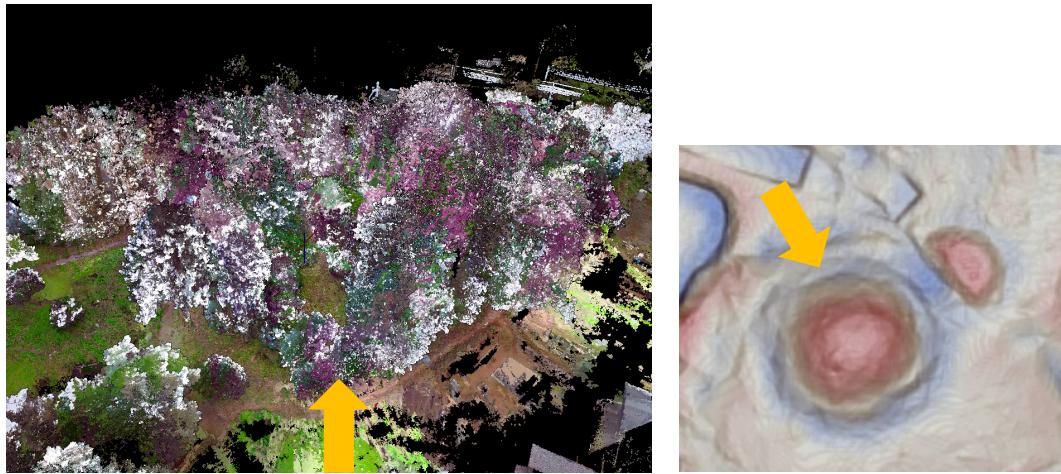


図 2-5-11 LiGrip H120 による三次元点群データ事例 (美和山 2 号墳)

(左 : 色付き点群の鳥瞰図、右 : 平面図 (微地形表現図))

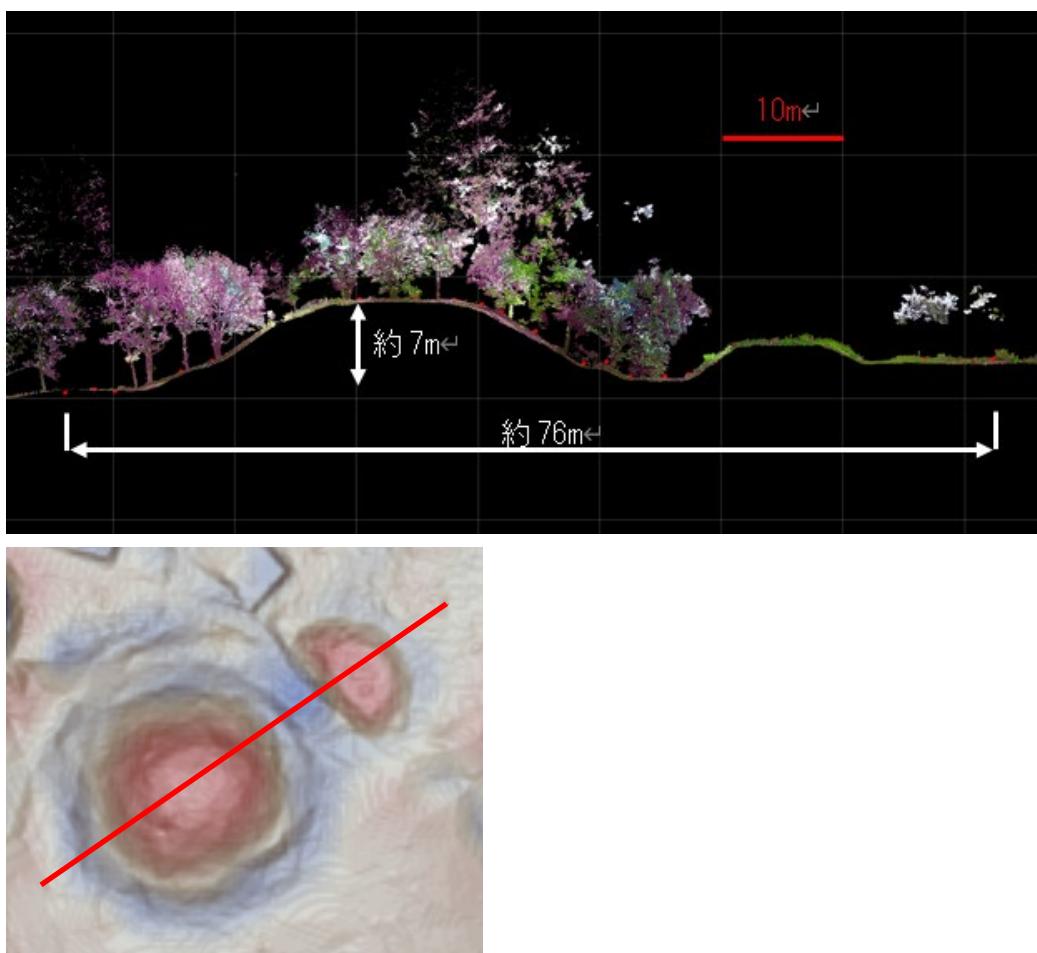


図 2-5-12 LiGrip H120 による三次元点群事例 (美和山 2 号墳)

(上 : LiGrip H120 の点群断面図、下 : 平面図 (微地形表現図)、— : 点群断面位置)

②久米三成 2号墳

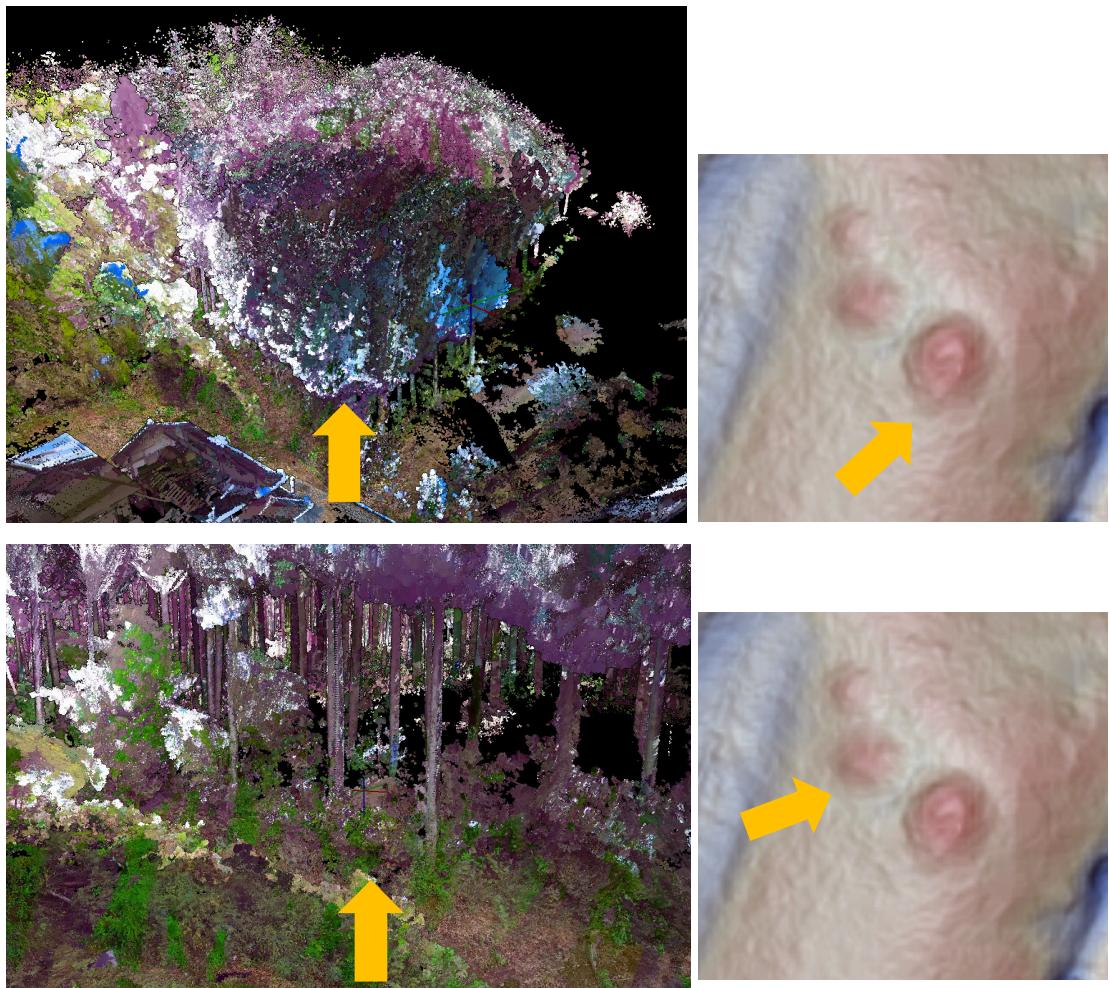


図 2-5-13 LiGrip H120 による三次元点群データ事例（久米三成 2号墳）

（左：色付き点群の鳥瞰図、右：平面図（微地形表現図））

③久米三成 4 号墳

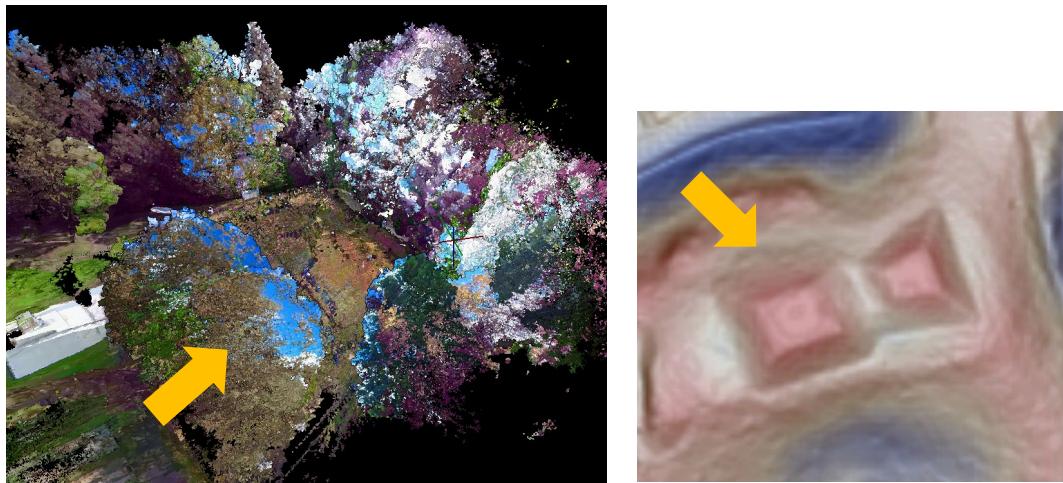


図 2-5-14 LiGrip H120 による三次元点群データ事例 (久米三成 4 号墳)

(左 : 色付き点群の鳥瞰図、右 : 平面図 (微地形表現図))

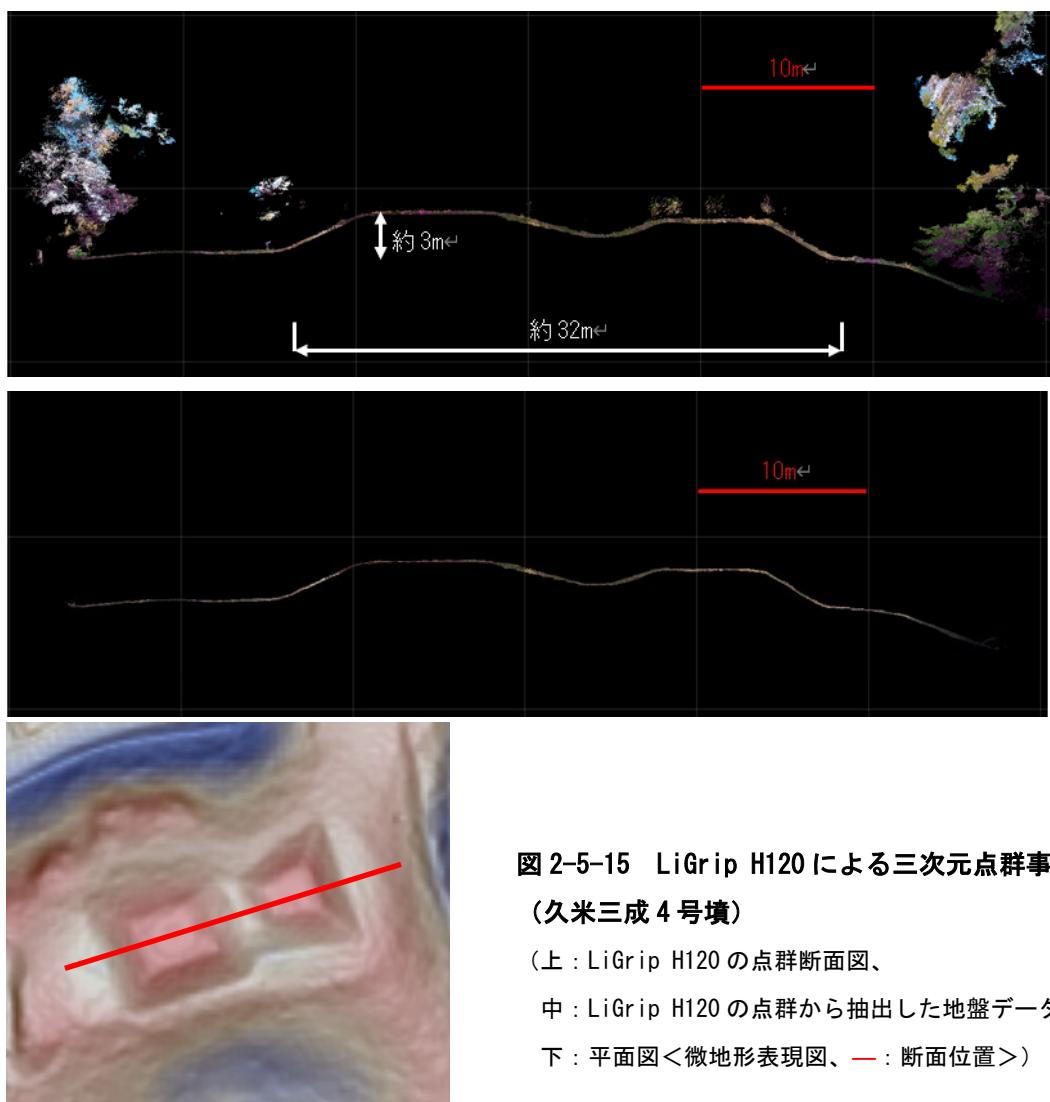


図 2-5-15 LiGrip H120 による三次元点群事例
(久米三成 4 号墳)

(上 : LiGrip H120 の点群断面図、
中 : LiGrip H120 の点群から抽出した地盤データ、
下 : 平面図 <微地形表現図、— : 断面位置>)

6. 埋蔵文化財の現地踏査で活用できる三次元計測

6.1. 概要

ここでは、先に紹介した手持ち型レーザスキャナと、背負子型レーザスキャナを用いた作業手順について紹介する。

紹介する2つのレーザスキャナは計測者が計測対象物の周囲を計測しながら移動する。最小で数ミリ間隔の計測を可能とし、結果として詳細な地形形状を把握できる。データの分解能は移動速度や計測回数に依存する。一方で地表に樹木や岩などの阻害物の影となる部分は、回り込む等の計測が必要となるため、注意を要する。

6.2. 手持ちレーザスキャナの計測事例

6.2.1. 計測機材と計測手法の概要

手持ちレーザスキャナ「ZEB Horizon」の機材特性、機材概観、機材使用を以下に示す。



図2-6-1 手持ちレーザスキャナ (ZEB Horizonの機材一式)



図2-6-2 現地(古墳)でのZEB Horizon計測作業風景

表 2-6-1 ZEB Horizon の仕様¹⁹

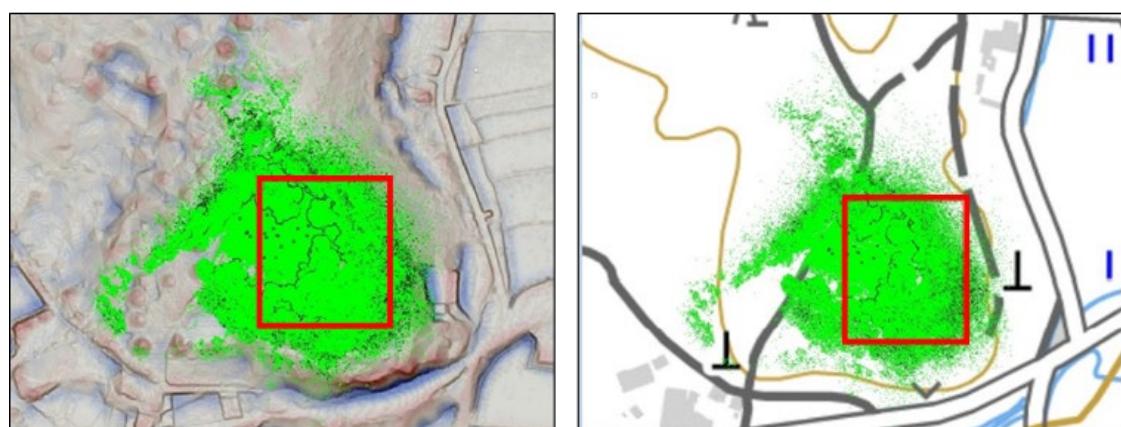
レーザセンサ	Velodyne VLP-16、16 個のレーザ送受信センサ内蔵 (Class 1 Eye Safe)
スキャン範囲	0.5m～100m (計測最適距離 : 50m 以内)
防塵・防水規格	IP54
ZEB-CAM の画角	130°
データロガーで使用の HDD	100GB SSD。残存容量が 30GB になると最初のファイルデータは上書きされる。
スキャナの重量	1.3kg
スキャンポイント/秒	300,000 ポイント／秒
センサ数	16 センサ
ドローンへの搭載	UAV マウントを使用し Matrice300、Matrice600 に搭載可能
相対精度	6mm 以下
バッテリー使用時間	最長 3.5 時間、ただし、1 回のスキャニング操作は 30 分以内を推奨。
計測における留意点	<ul style="list-style-type: none"> 対象物の周囲を歩行しながらレーザを全方向に照射 SLAM (自己位置推定) 技術により三次元点群データを取得 1 回の計測はおよそ 30 分以内が推奨 標定点を同時に計測することで絶対座標への変換も可能 計測作業は 1 人で対応可能。 周囲の計測を行うためデータ量は膨大な容量となる 樹木や草などの不要なデータを除去するためのフィルタリング作業が必要

手持ちレーザスキャナによる三次元計測の計測軌跡及びデータ取得範囲の事例を図 2-6-3 に示す。1 回の計測作業 (約 15 分) でかなり広範囲 (100m 程度) まで計測可能だが、メーカー推奨の計測距離は、計測地点から 50m までとなる。

¹⁹ https://www.cybernetech.co.jp/product/3dcyber_geoslam_03-2/ (メーカーHP サイト 2024/12/5 時点)



□:計測対象、—・—・—:計測軌跡、背景図(左):CS 立体図、背景図(右):地理院地図



●:計測点、□:計測対象、背景図(左):CS 立体図、背景図(右):地理院地図

図 2-6-3 手持ちレーザスキャナ (ZEB Horizon) の計測軌跡及び計測範囲事例
(日上天王山古墳)

また、手持ちレーザスキャナは全周囲を計測するため、取得したデータは樹木などのデータも含むことになる（図 2-6-3）。

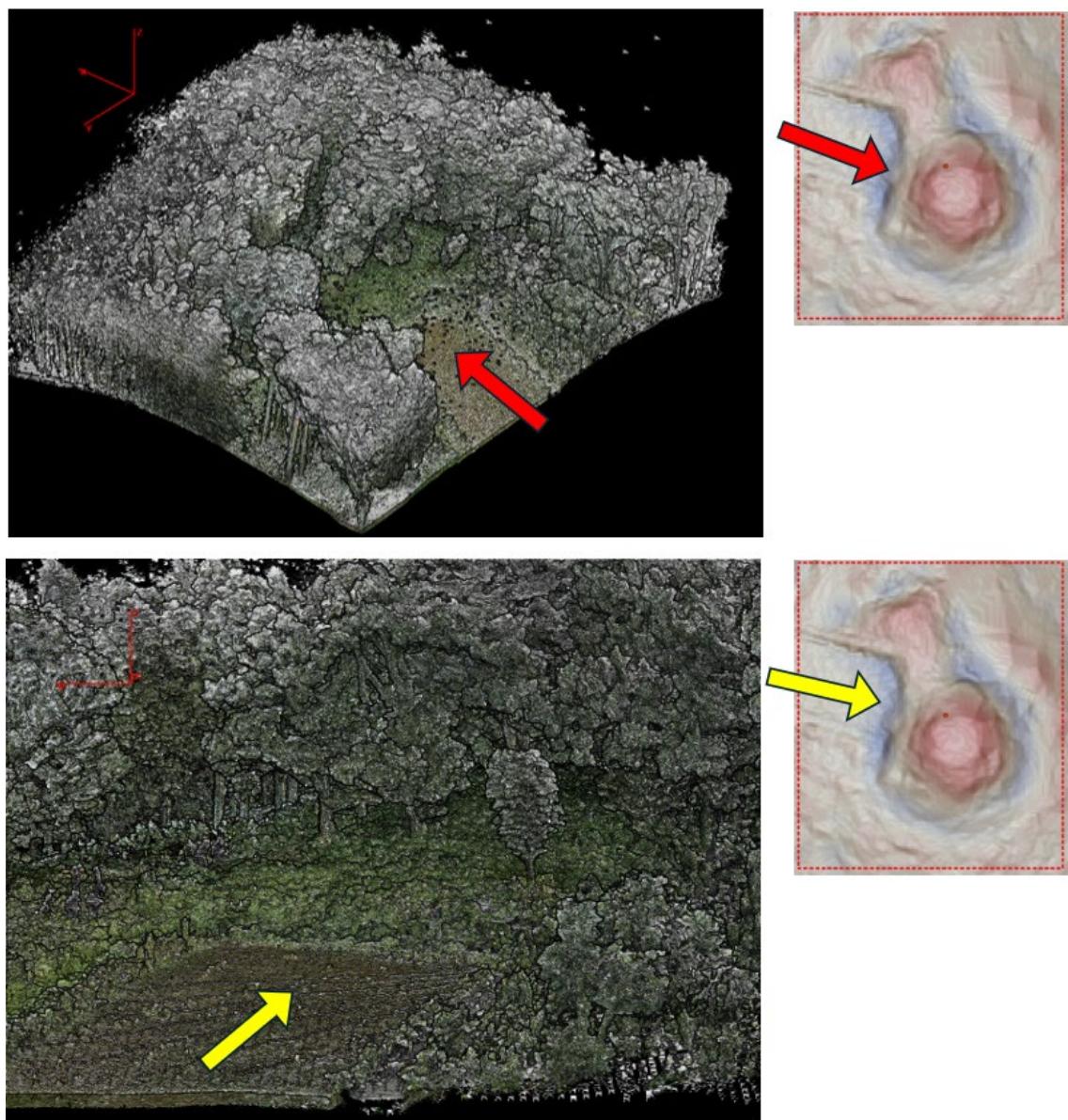


図 2-6-4 手持ちレーザスキャナ計測による三次元点群データ事例（日上天王山古墳）

（左：色付き点群の鳥瞰図、右：平面図（微地形表現図））

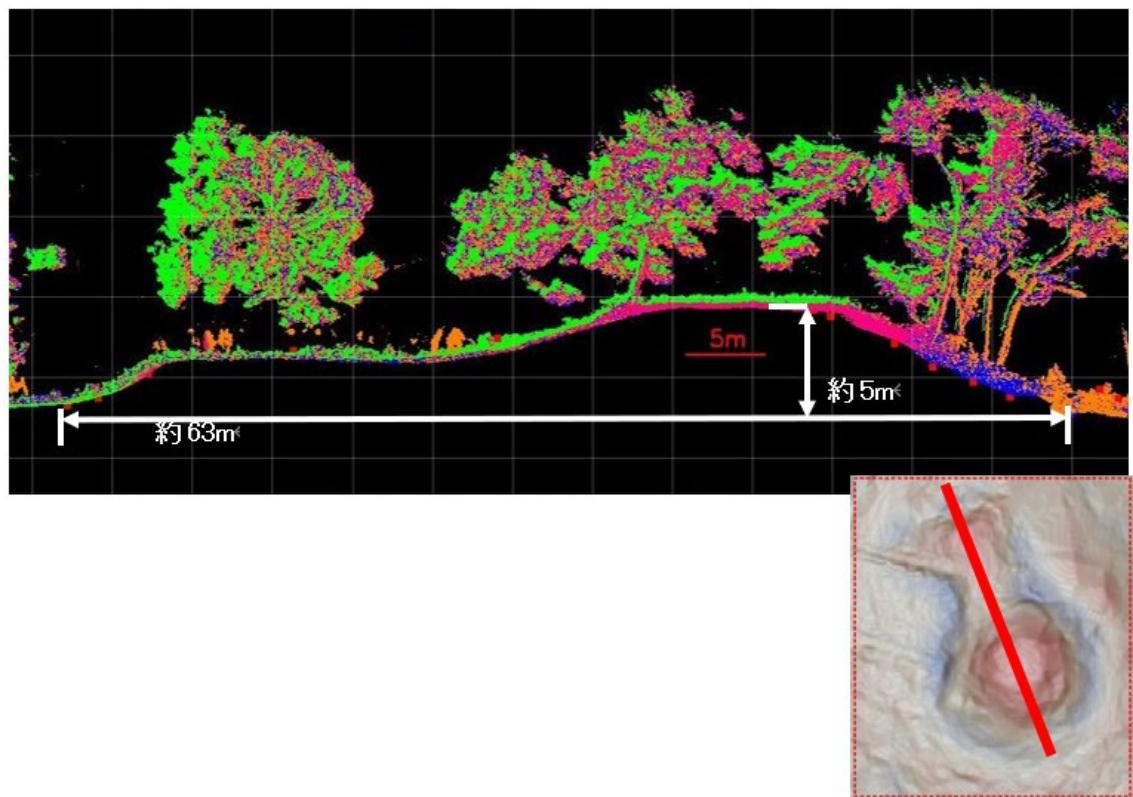


図 2-6-5 手持ちレーザスキャナ計測による三次元点群事例（日上天王山古墳）

(上：手持ちレーザスキャナの点群断面図、3回分の計測データの合成（●、○、○）

下：平面図（微地形表現図、—：点群断面位置 ※幅±1m）

6.2.2. 手持ちレーザスキャナ（ZEB Horizon）の作業手順

1) 準備～現地での作業

ZEB Horizon の計測作業手順を以下に示す。

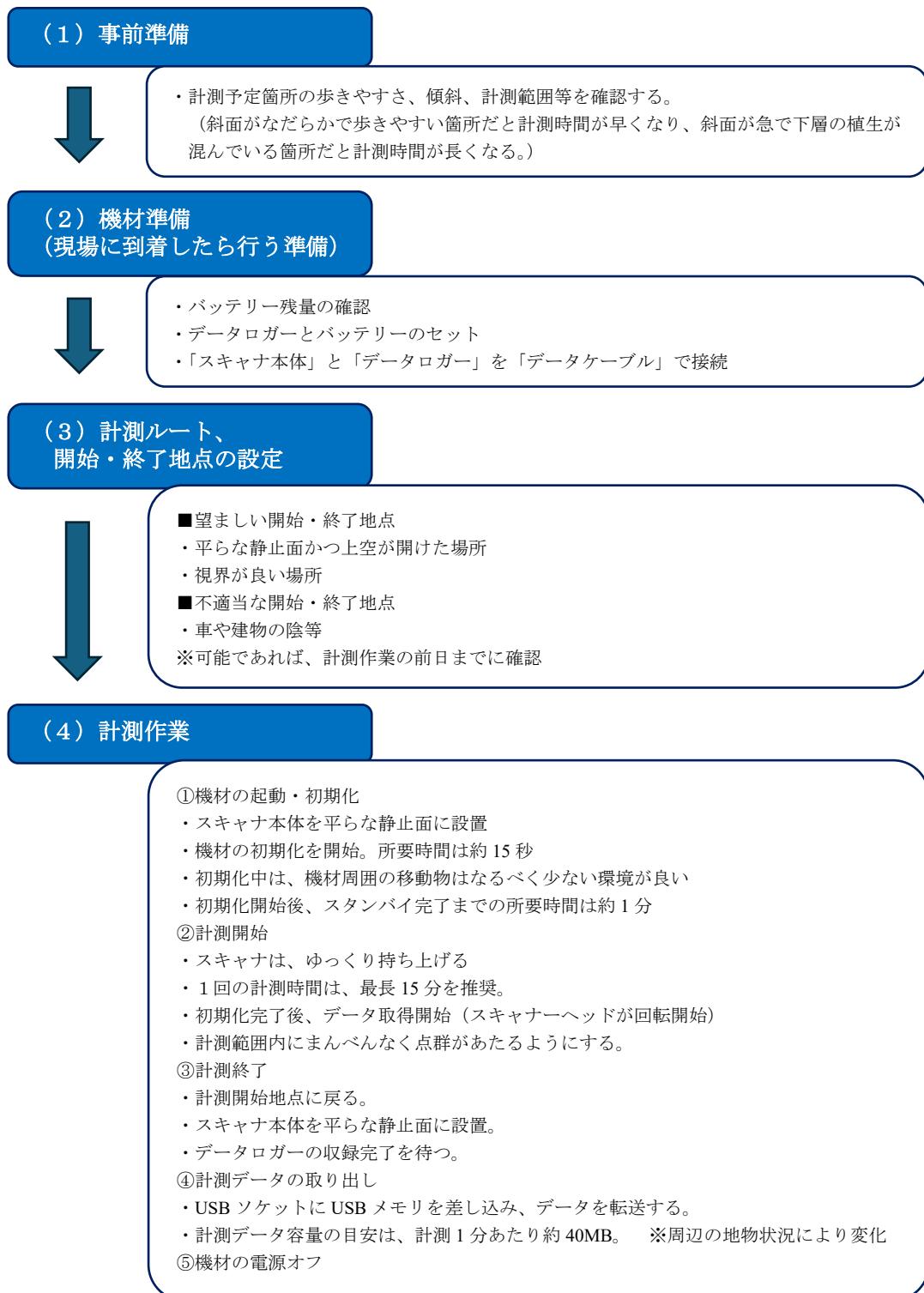


図 2-6-6 ZEB Horizon の計測作業手順

2) データ処理作業

ZEB Horizon のデータ処理作業手順を以下に示す。

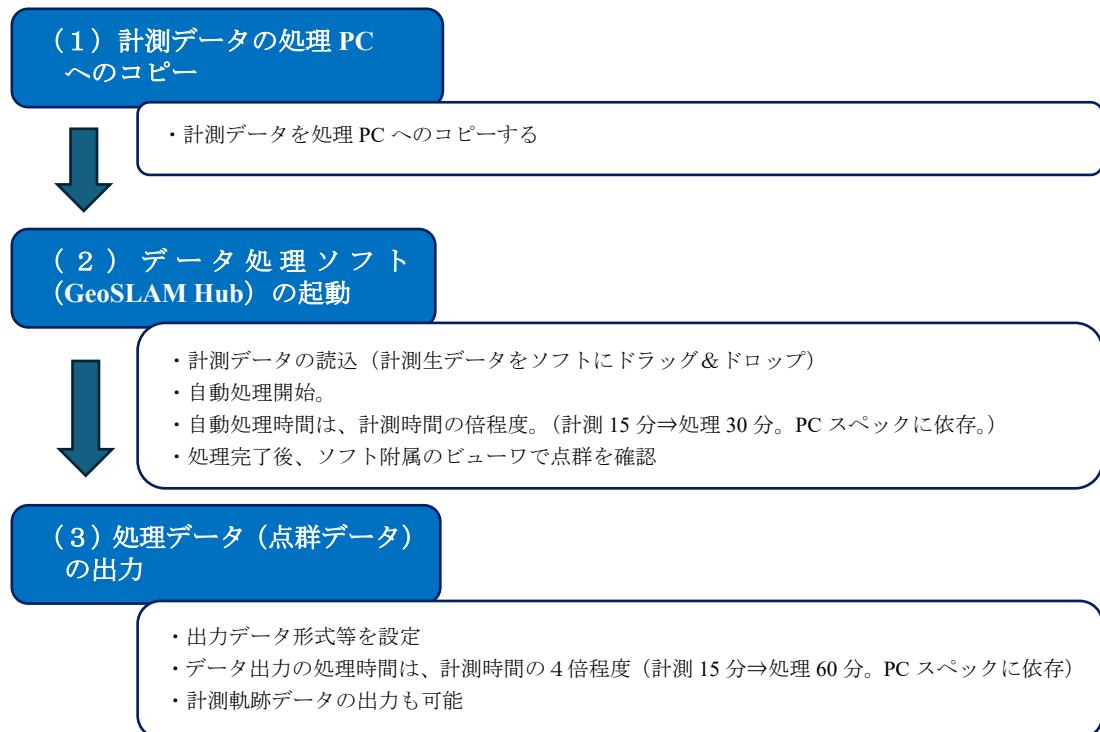


図 2-6-7 ZEB Horizon のデータ処理作業手順

3) 位置情報の付与

絶対位置情報 (GNSS 等で測位する緯度経度などの位置情報) を同時に取得できない手持ちレーザスキャナ機材 (ZEB Horizon 等) の場合、位置の絶対座標が分かっている目標物の位置座標を計測し、その座標を基に三次元点群データに位置の絶対座標を付与する。

① 現地での作業

- ・手持ちレーザスキャナで位置座標を取得できる目標物(事例は折り畳みコーンを使用)を現地に設置する。
- ・目標物は、1 計測地点に 4 ~ 5 箇所(最低 3 箇所)設置する。
設置例：中心位置付近 1 箇所、計測範囲の四隅に各 1 点、等
- ・設置した目標物の位置情報を GNSS 測量等で取得する。



図 2-6-8 座標付与用の現地目標物の例：折り畳みコーン

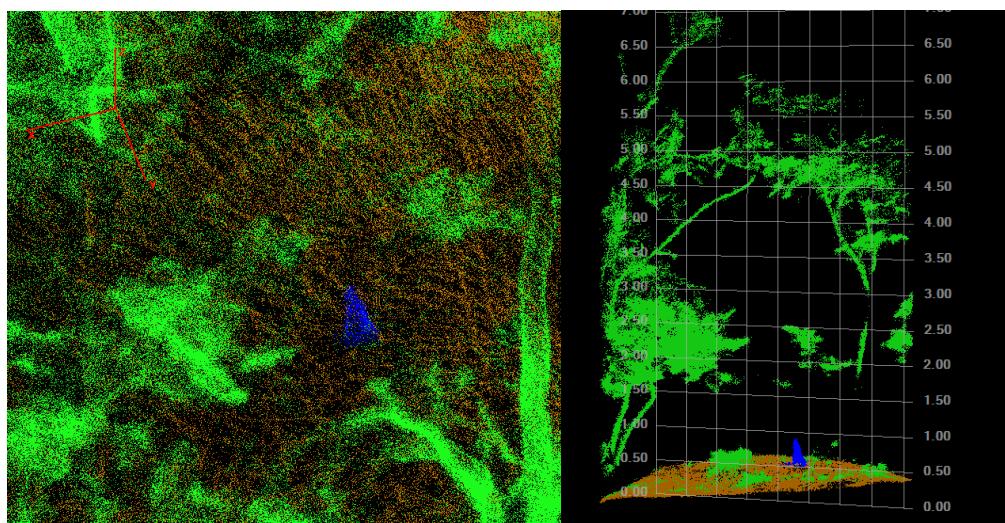


図 2-6-9 座標付与用の現地目標物の計測例：折り畳みコーン（図中の青色）

②絶対座標の付与作業

三次元点群データへの絶対位置座標付与作業は、有償・無償を含む様々なソフトウェアで可能だが、ここでは、CloudCompare という無償ソフトでの作業手順例を示す。

i. CloudCompare の概要

- ・点群データの閲覧、切り出し、結合、間引き、データ形式の変換等が可能
- ・ソフト公開サイト：<https://www.danielgm.net/cc/> (2024.12月時点) (無料)

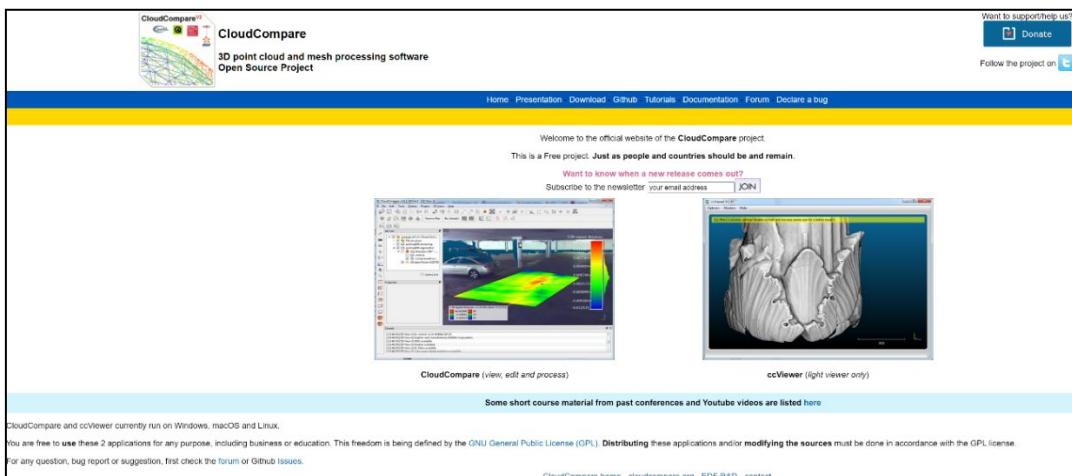


図 2-6-10 CloudCompare ホーム画面

ii. 事前準備

- ・三次元点群を閲覧できるソフト等により、目標物の点群の相対座標値を確認する。
- ・GNSS 測量等で取得した目標物の絶対位置座標を整理する。

iii. 絶対位置座標付与の手順

- ・Cloud Compare でデータ処理後の三次元点群データをインポートする。
- ・「Tools」 ⇒ 「Registration」 ⇒ 「Align(point pairs picking)」を選択する。

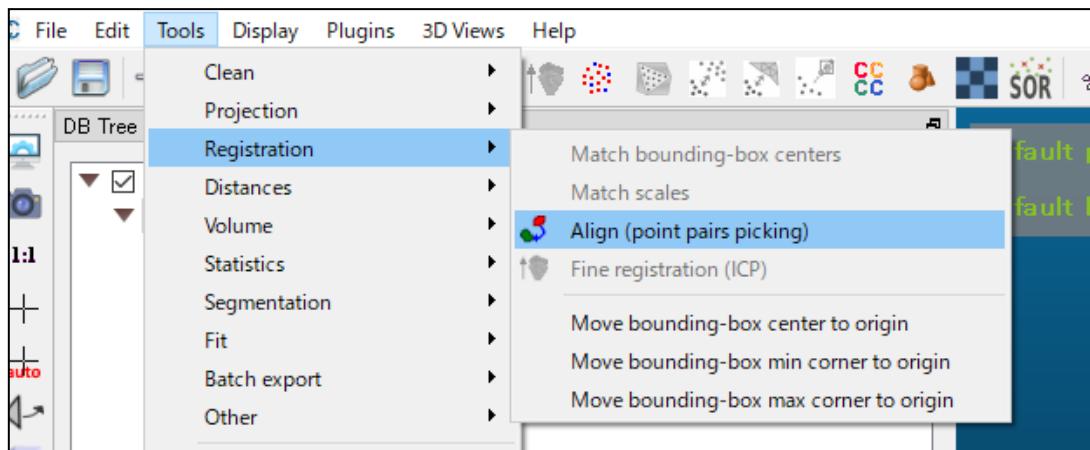


図 2-6-11 CloudCompare 「Align(point pairs picking)」画面

- ・「show “to align” entities」（上段）に、確認した目標物の相対座標値を入力する。
- ・「show ”reference” entities」（下段）に、整理した目標物の絶対座標値を入力する。
- ・「align」をクリックする。（三次元点群に絶対座標を付与）
- ・「✓」をクリックして座標調整メニューを終了する。
- ・点群を保存する。

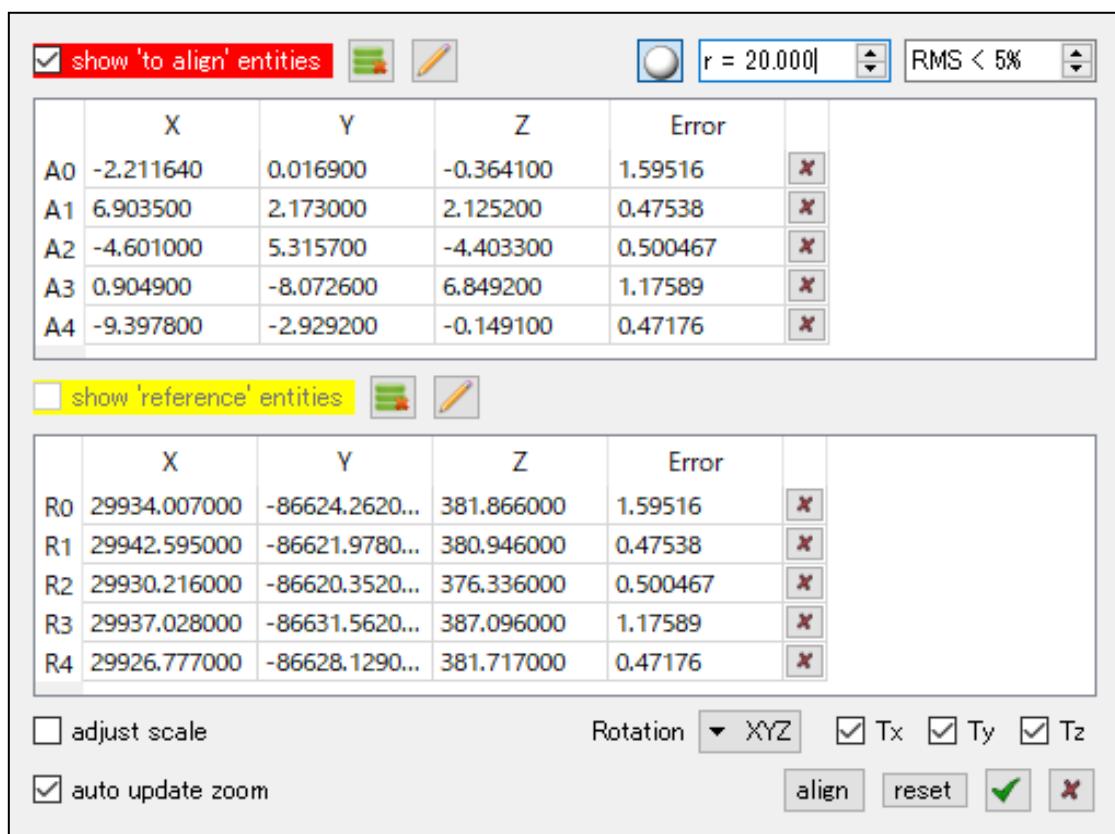


図 2-6-12 CloudCompare 座標値入力画面

4) 作業上の留意点

ZEB Horizon を用いて、古墳等の現地埋蔵文化財の位置や形状を三次元的に取得する場合の作業上の留意点を以下に示す。

①現地作業

- ・樹木や下草等の遮蔽物がある場合、現地埋蔵文化財の形状を計測することは困難。
- ・斜度がかなり急な箇所、下層植生が非常に多い箇所は計測が困難。
- ・標定点等の現地位置が分かる地物を同時計測しないと、絶対位置情報を付加できない。
- ・1回の計測作業は、最大で約30分程度。

②データ処理

- ・点群データは自動処理で作成可能だが、処理時間を要するため、現地での確認は不向き。
- ・複数回に分けて計測した場合、手動でのデータ統合処理が必要。ただし、標定点等で位置の絶対座標を付与した場合は不要
- ・三次元点群データには、計測対象以外の地物や、一定数のノイズデータも含まれるため、必要に応じて、点群データの抽出や削除作業（フィルタリング作業）が必要

6.3. 背負い型レーザスキャナの計測事例

6.3.1. 計測機材と計測手法の概要

背負い型レーザスキャナ「LiGrip H120」の機材特性、スペックを以下に示す。LiGrip H120では、対象物の周囲を歩行しながらレーザ光を全方向に照射し、SLAM（自己位置推定）技術により三次元点群データを取得することができる。背負い型であるため、一人で計測を行うことができ、1回の計測時間はおよそ15分以内が推奨されている。バックパックを使用してGNSS測位が可能で、GNSS測位には電子基準点観測データ、または固定観測できる地上固定局が必要となる。電子基準点が計測対象地から遠方に存在する場合は、地上固定局を計測対象地周辺に設置することで三次元点群データの位置精度向上が期待できる。なお、周囲の計測を行うためデータ量が膨大になる点や、樹木や草などの不要なデータを除去するフィルタリング作業が必要になる点に注意を要する。



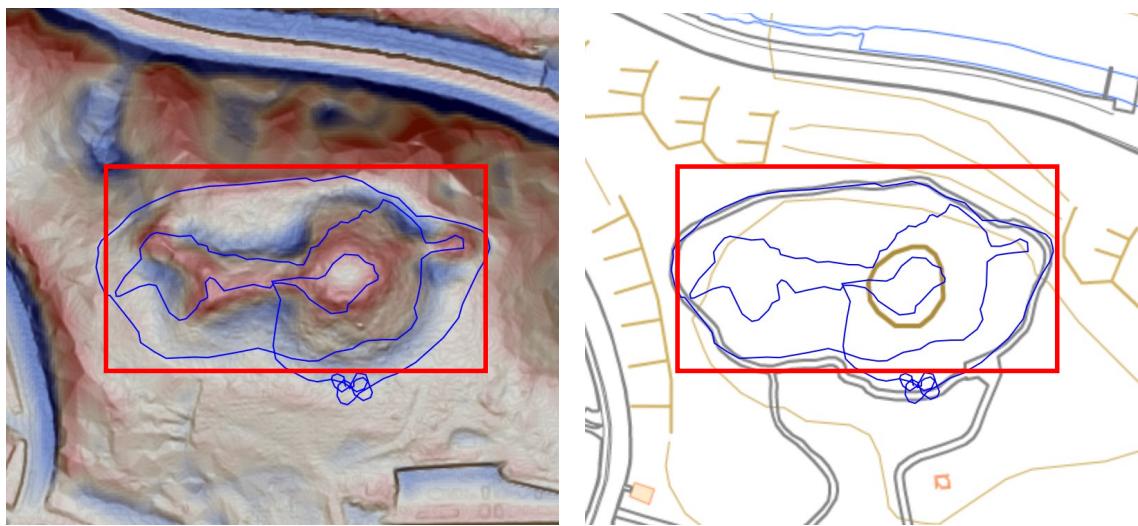
図2-6-13 背負い型レーザスキャナ「LiGrip H120」

表 2-6-2 LiGrip H120 の仕様²⁰

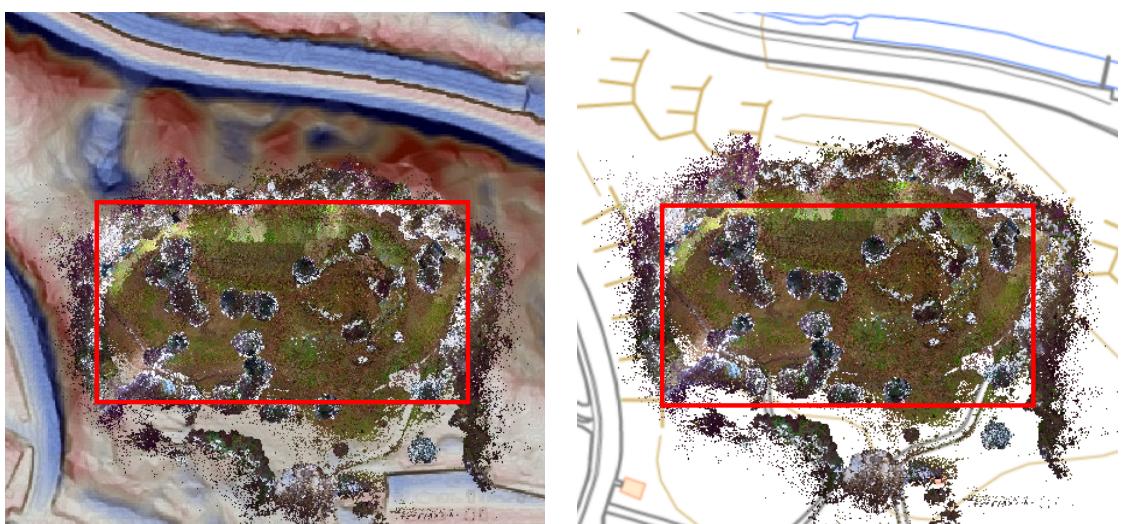
システム製造元	GreenValley International 社
スキャン範囲	0.05m ~ 120m
相対精度	≤ 3 cm
絶対精度	≤ 5 cm
視野角(FOV)	水平 280° ／ 垂直 360°
最大移動速度	約 7 km/h
内部ストレージ	256GB
通信ポート	USB/Ethernet
バッテリー容量	5870mAh
稼働時間	約 4 時間
サイズ	L204xW130xH385(mm)
重量	1.74kg(ハンドベルト部)
スキャンレート	320,000pt/s
LiDAR レンジング精度	± 3 cm
レーザークラス	Class1
ビデオ解像度	5760×2880(360 パノラマ)
GNSS システム	GPS/GLONASS/GALILEO/QZSS/BeiDou
GNSS ポジショニング精度	1cm+1ppm PPK (後処理キネマティック)
GNSS 解析ソフトウェア	LiBackpack-LiNav
地上 GNSS 基地局	GNSS Base Station
軌跡解析ソフトウェア	RiDAR 360 MLS

LiGrip H120 による三次元計測の計測軌跡及びデータ取得範囲の事例を図 2-6-1 に示す。概ね 120m 程度まで計測可能だが、実用上の計測距離は、計測地点から 80m 程度である。

²⁰ <https://tpks.co.jp/products/lidar-slam/ligrip-h120/> (メーカーHP サイト 2024/12/24 時点)



□：計測対象、—：計測軌跡、背景図（左）：CS立体図、背景図（右）：地理院地図



●：計測点、□：計測対象、背景図（左）：CS立体図、背景図（右）：地理院地図

図 2-6-14 LiGrip H120 の計測軌跡及び計測範囲事例（美和山 1 号墳）

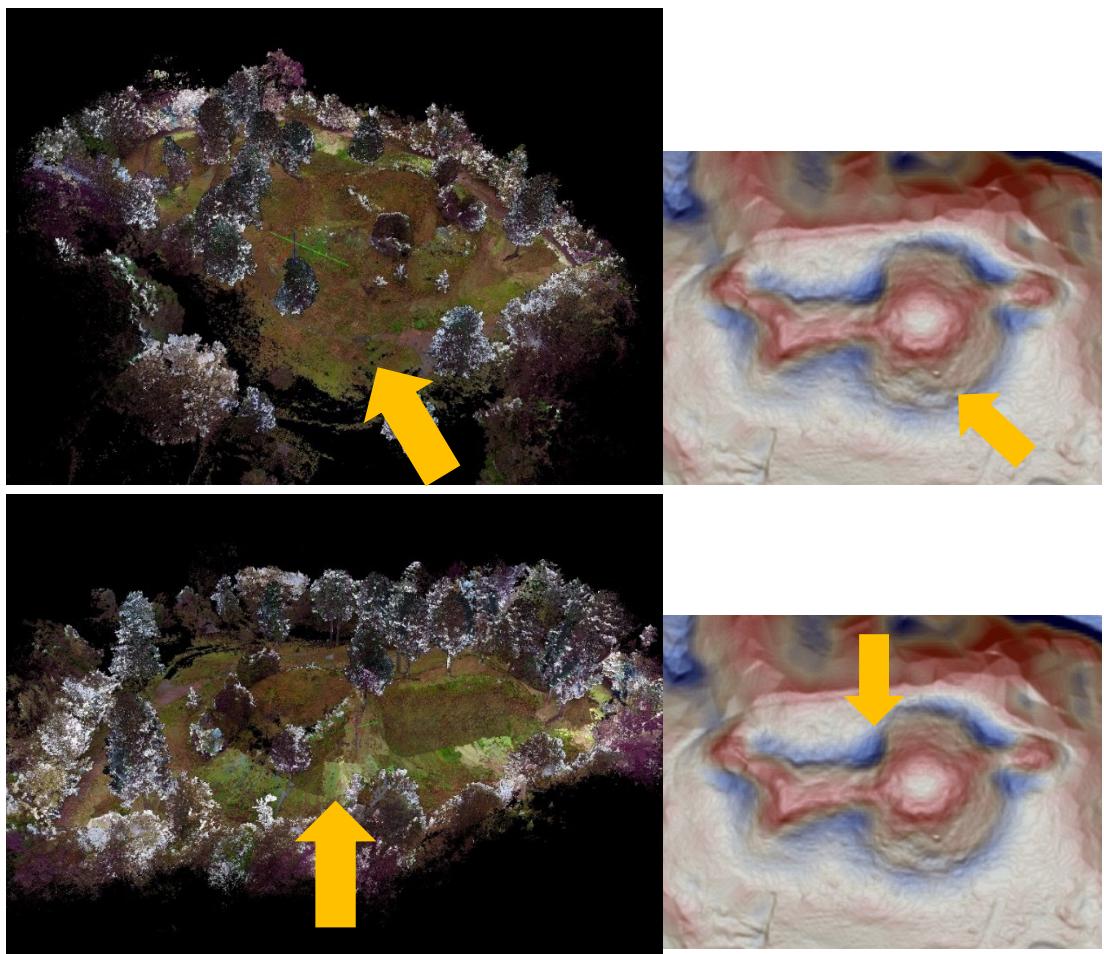


図 2-6-15 LiGrip H120 による三次元点群データ事例 (美和山 1号墳)

(左 : 色付き点群の鳥瞰図、右 : 平面図 (微地形表現図))

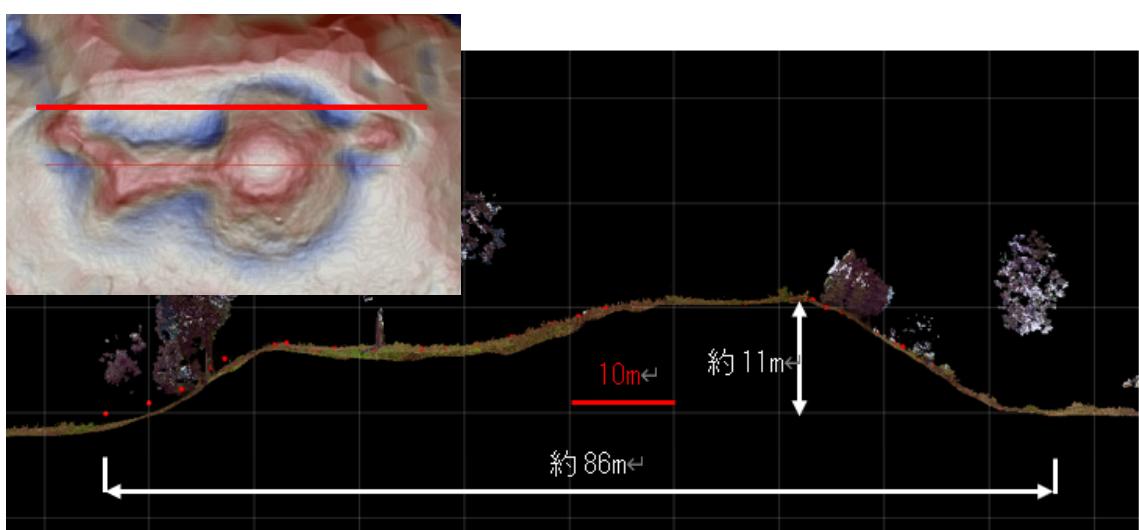


図 2-6-16 LiGrip H120 による三次元点群事例 (美和山 1号墳)

(上 : LiGrip H120 の点群断面図、下 : 平面図 (微地形表現図)、— : 点群断面位置)

6.3.2. 背負い型レーザスキャナ (LiGrip H120) の作業手順

1) 準備～現地での作業

LiGrip H120 の計測作業手順を以下に示す。

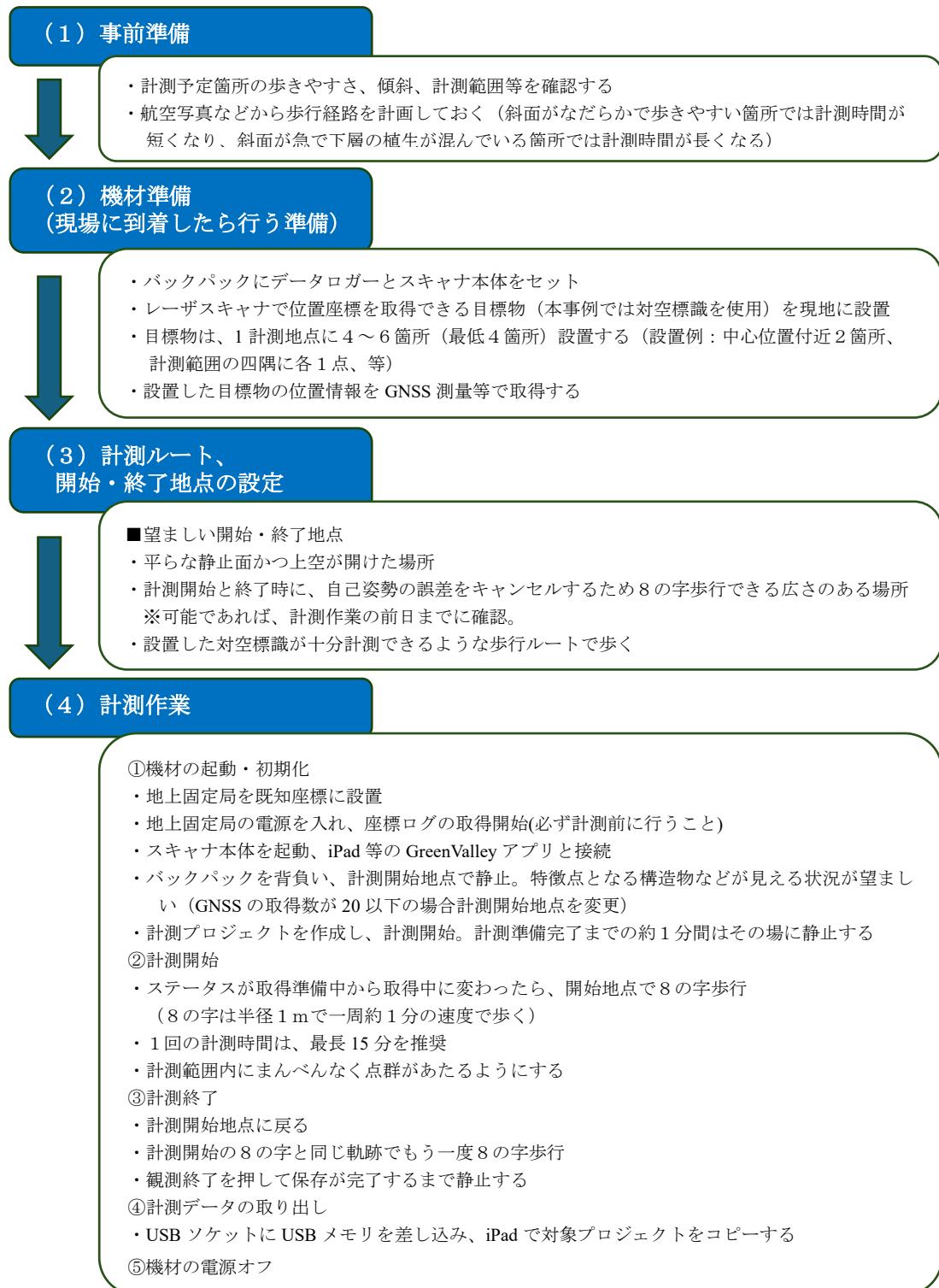


図 2-6-17 LiGrip H120 の計測作業手順

2) データ処理作業

LiGrip H120 のデータ処理作業手順を以下に示す。

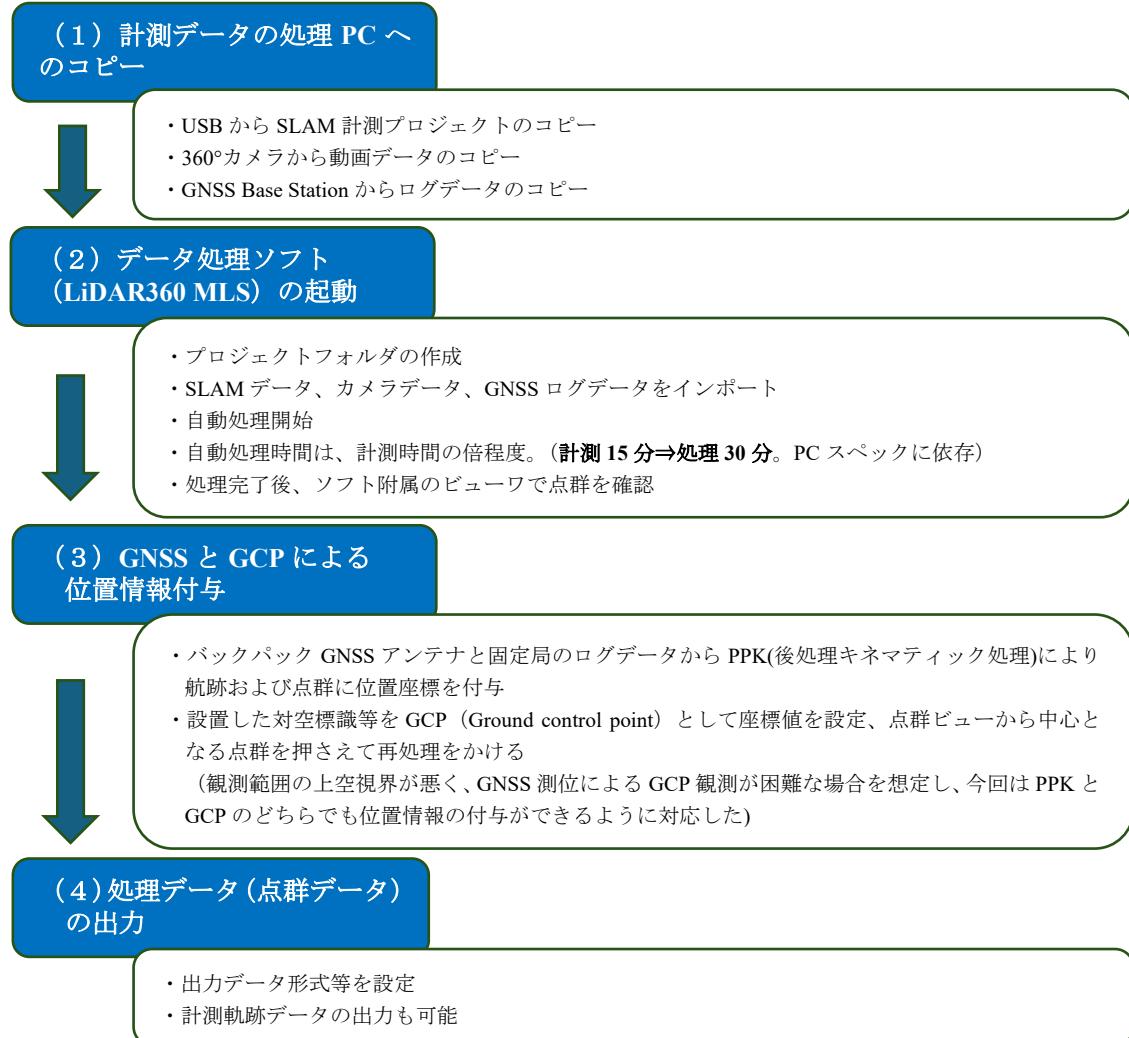


図 2-6-18 LiGrip H120 のデータ処理作業手順

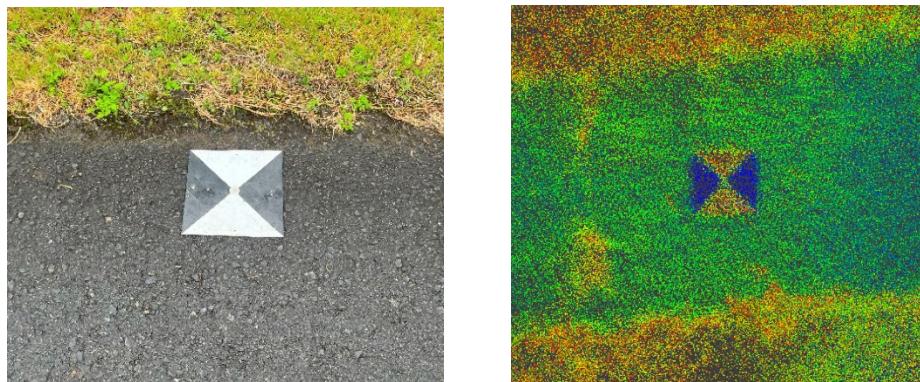


図 2-6-19 座標付与用の現地目標物の例：対空標識（左：実際の表示、右：反射強度表示）

3) フィルタリング処理

TREND-POINT を用いた点群のフィルタリング作業について以下に示す。

①福井コンピュータ製点群処理ソフト「TREND-POINT」の概要

- ・点群データの閲覧、点群編集、変換、三角網作成、ビューア吐き出しなどが可能
- ・製品公式サイト：

<https://const.fukuicompu.co.jp/products/trendpoint/index.html> (2024.12月時点)

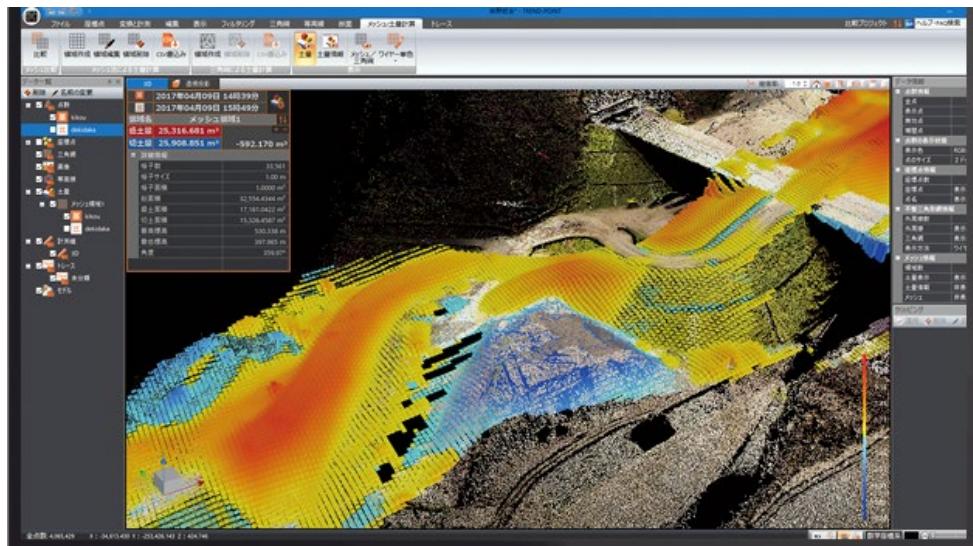


図 2-6-20 「TREND-POINT」の表示例

②TREND-POINT を用いた点群フィルタリング処理の手順

- ・LiDAR 360 MLS から出力した点群を読み込む。
- ・ノイズフィルタリングコマンドで空中に浮いたノイズ点をフィルタリングする。
- ・地表面フィルタリングコマンドで地表面以外の点をフィルタリングする。
- ・表示形式やクリッピングを使いながら、点の編集コマンドで自動処理しきれなかった点を手動でフィルタリングする。

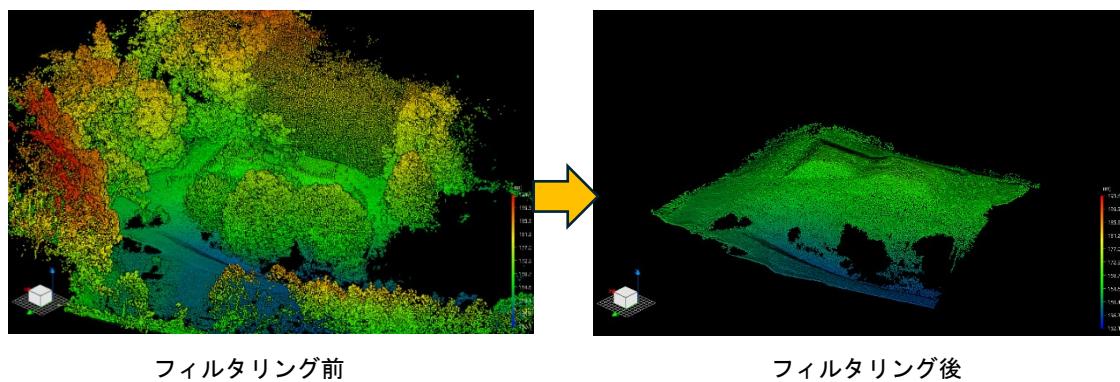


図 2-6-21 現地（古墳）点群のフィルタリング

4) 作業上の留意点

LiGrip H120 を用いて、古墳等の現地埋蔵文化財の位置や形状を三次元的に取得する作業上の留意点を以下に示す。

①現地作業

- ・斜度がかなり急な箇所、下層植生が非常に多い箇所は計測が困難。
- ・標定点の観測とバックパックのアンテナは共に GNSS を使用するため、上空視界の悪い箇所では位置精度が低下、もしくは位置情報の付加ができない。
- ・1回の計測作業は、最大で約 20 分程度。

②データ処理

- ・点群データは自動処理で作成可能だが、処理に時間が必要なため、現地でのデータ確認は向き (iPad 側で点群リアルタイム表示は見られる)。
- ・複数回に分けて計測した場合、手動でのデータ統合処理が必要。

三次元点群データには、計測対象以外の地物や、一定数のノイズデータも含まれるため、必要に応じて、点群データの抽出や削除作業 (フィルタリング作業) が必要。

6.4. GNSS 測量の活用

山林内での現地調査は自己位置の把握が困難である。山林内での自己位置を把握し、埋蔵文化財の現地調査を効率化するには GNSS による位置座標の取得が有効である。

ここで事例として紹介する Drogger は、マルチ GNSS*による RTK 測位*により、高精度な位置情報 (cm 誤差) を取得する測量機材である。従来の GNSS 測量機材に比べ、安価に購入が可能である²¹。

6.4.1. GNSS 機器による計測事例

1) 小規模遺構の現地での位置確認と計測

Drogger 等の GNSS 機器は安価ではあるが、高精度な計測が可能である。そのため、計測したデータとタブレット端末などで表示させた微地形表現図をあわせて確認することで、正確に自己位置を把握できるほか、微地形表現図では視認が難しい小規模遺構の把握と計測にも有効である。図 2-6-では、直径 2 m 未満の坑道跡について、現地の状況と CS 立体図とを比較したものである。

²¹ アンテナ、ケーブル、レシーバを最も廉価なもので揃えるとおよそ 10 万円程度である。



図 2-6-22 小規模遺構（坑道跡）のCS立体図と現地の状況

2) 古墳等の起伏のある遺跡・遺構での断面形状を計測

古墳等で地形の傾斜変化点ごとに観測し、観測点を結線することで古墳等の断面形状を作成することができる。

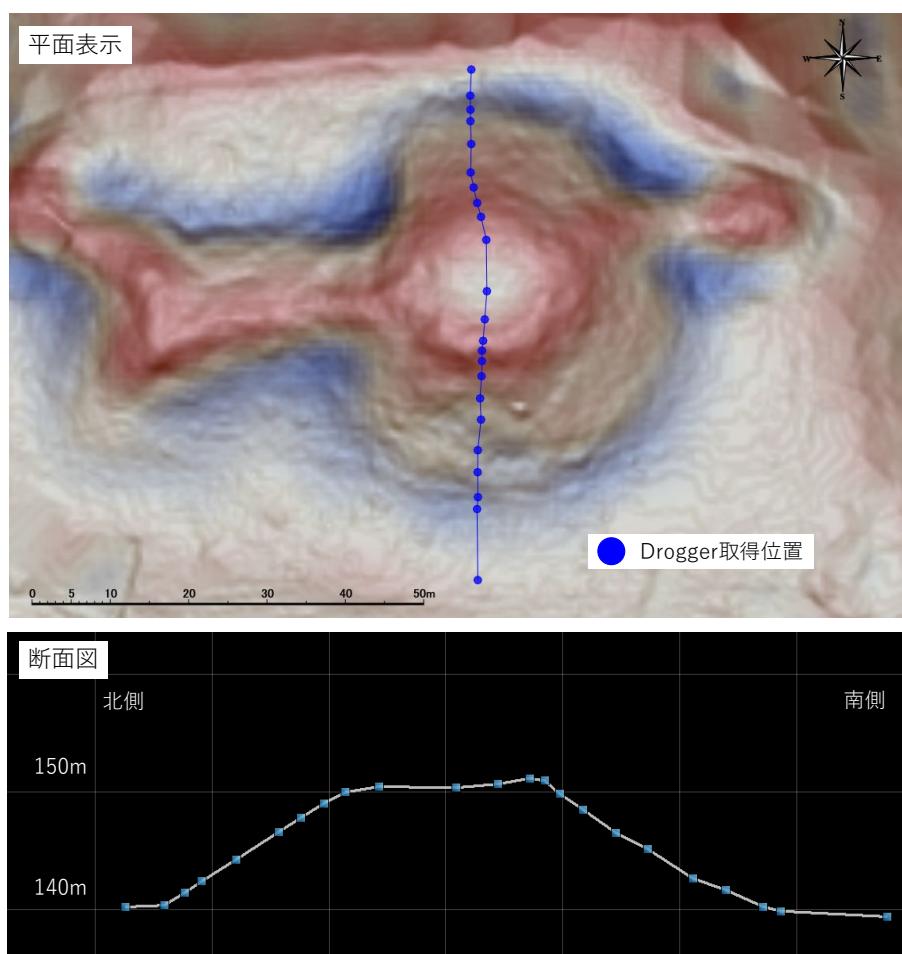


図 2-6-23 航空レーザ測量のDEMとGNSS測量標高点の比較（美和山1号墳）

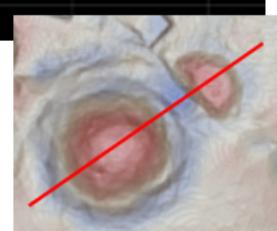
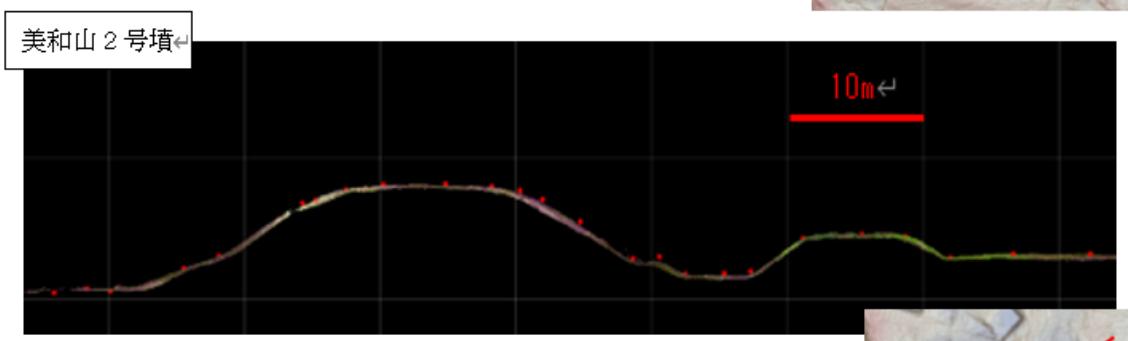
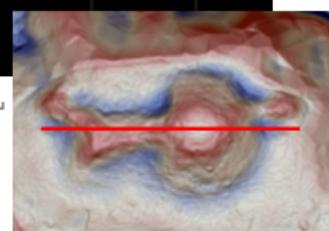
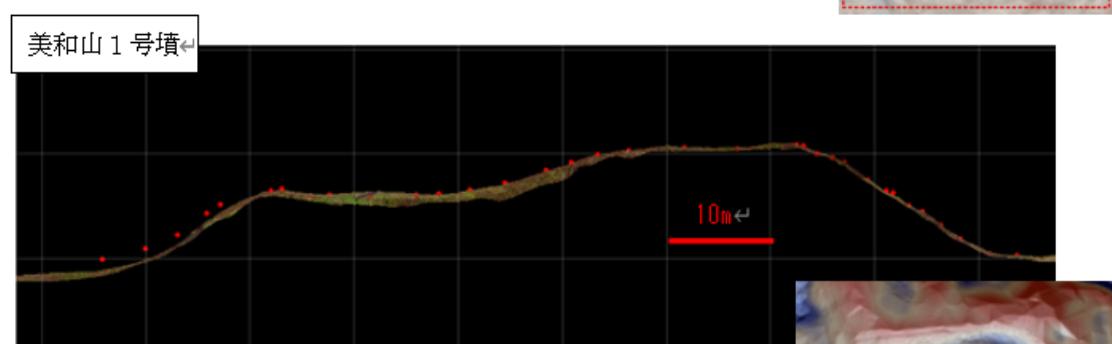
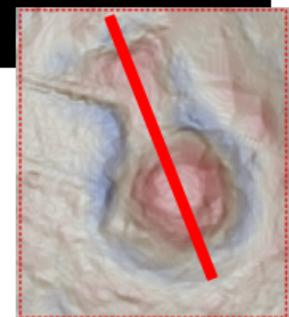
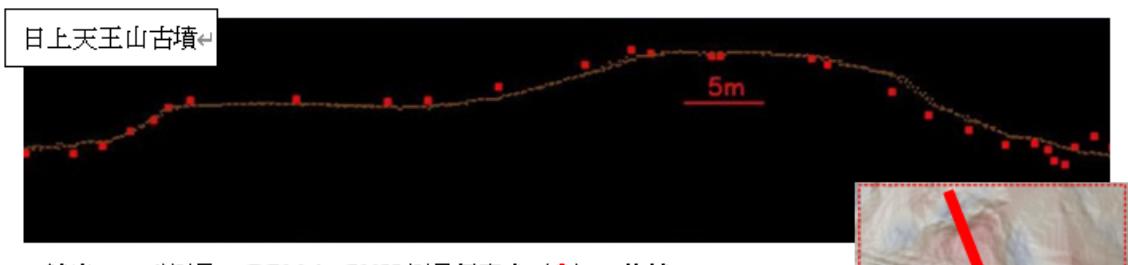


図 2-6-24 DEM・三次元点群と GNSS 測量標高点との比較

3) トラッキングLOGにより、現地踏査ルートを整理

トラッキングLOGは、目標となる地物の無い山地等の現地踏査結果を整理する際の参考として有効と考える。

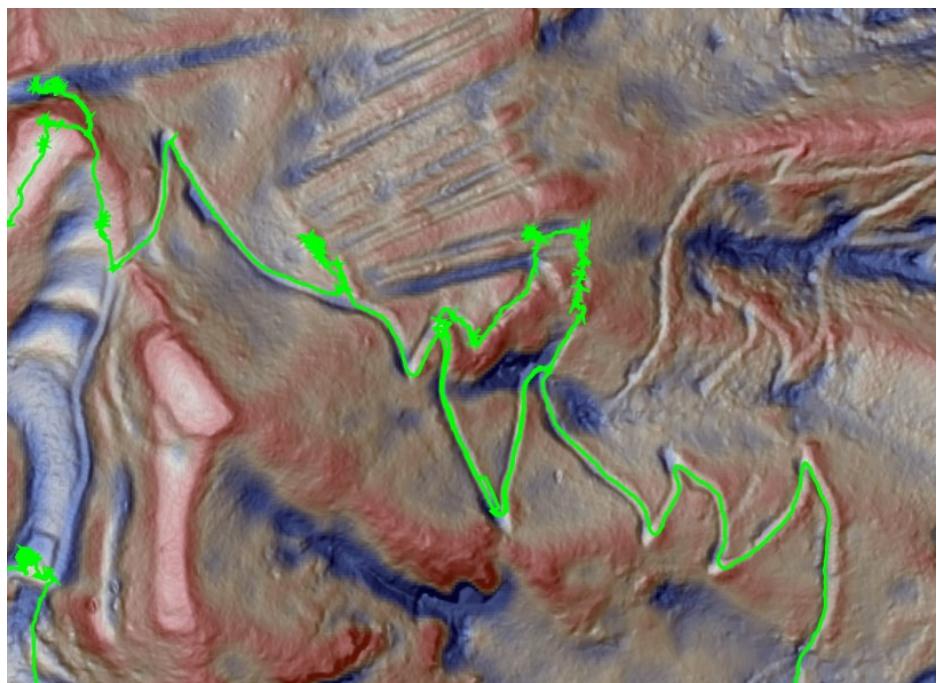


図 2-6-25 トラッキングLOGの例

6.4.2. 廉価版GNSS (Droger) の活用

1) 機能

機材の構成・機能を図 2-6-2、表 2-6-3 に示す。



図 2-6-26 Droger の構成

表 2-6-3 Drogger の機能 ²²

型式	DG-PRO1RWS
品名	RTK W-band bluetooth GNSS receiver
本体寸法 (WDH (mm)) *1	50×48.5×10.8
電源ケーブル	100mm
本体重量	40g
カラー	ブラック
電源電圧	DC 4.5V ~ 7.2V
消費電流	190mA
Bluetooth	4.2 Class1
WiFi	802.11 b/g/n WPA/WPA2/WPA2-エンタープライズ
DMP	加速度・ジャイロ・磁気センサ 各 3 軸 DMP プロセッサ
Android OS	5.0 以上
耐衝撃・防水・防塵	IP67
アンテナコネクタ	SMA x 1
動作温度	-20°C to +65°C
原産国	日本
GNSS 仕様	GPS/GLONASS/GALILEO/QZSS/BeiDou
精度(RTK Fix 時)	<ul style="list-style-type: none"> ・水平位置精度 1cm+1ppm CEP ・垂直精度 1cm+1ppm CEP
使用ソフト	Drogger-GPS
Android OS	5.0 以上

²² https://www.bizstation.jp/ja/drogger/rtk_rcv_index.html?tab=spec#fnref_spec_6 (2025/1/15 時点)

2) 操作

Dropper による位置の取得方法には、箇所ごとに観測する方法と常時観測を行う方法がある。

- ・箇所ごとの観測方法は、位置情報を取得したい箇所に Dropper を設置し Dropper-GPS により観測を行う（図 2-6-27）。
- ・常時観測を行う方法（トラッキング LOG の取得）は、Dropper-GPS によりデータ取得間隔を設定した状態で観測を開始する。
- ・データ取得間隔は、1秒や10秒などの時間を設定する。
- ・取得した位置情報は、箇所ごとのデータは gpx 形式、常時観測は csv 形式で取得される。また、位置情報は経緯度・平面直角座標系で出力可能である。



図 2-6-27 Dropper を用いた観測の様子

3) 費用

Dropper の購入費用の一例を以下に示す。

表 2-6-4 Dropper の購入費用の例²³

購入費用	100,000 円～500,000 円程度（機材の構成により異なる）
※ 補正位置情報取得のため、補正情報配信サービスの契約が必要	
※ 携帯電話通信会社との契約が必要	

²³ <https://www.bizstation.jp/ja/dropper/shop/> メーカーHP サイト（2025/1/15 時点）

6.4.3. 使用上の注意点など

GNSS 衛星の信号を受信しにくい樹木下では、位置精度（特に高さ）が低下しやすい。図 2-6-6 に日上畠山 47 号墳の事例を示す。ここでは紫円の箇所が樹木下に相当し、高さに 1 m 程度のずれが見られる。また、図 2-6-6 の久米三成 2 号墳でも植生の影響で GNSS 測量時に取得衛星数が十分でなく、FLOAT 解*となり、高さ精度が著しく低下した。

その他、携帯電話の通信を使用して基準局の補正位置情報を取得するため、事前に携帯電話の通信状況を確認する。ただし、携帯電話の通信圏外でも観測を行ったうえで、後処理で解析を行うことで位置を求ることはできる。

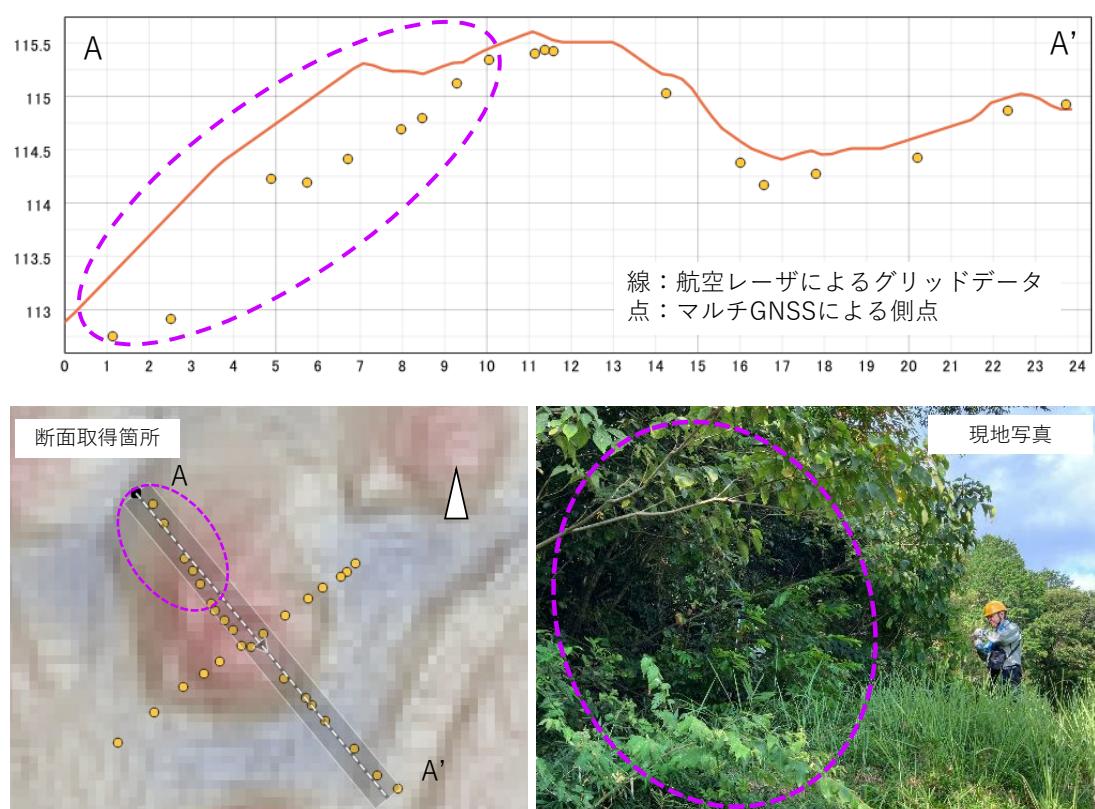


図 2-6-28 植生による精度低下の例（日上畠山 47 号墳）

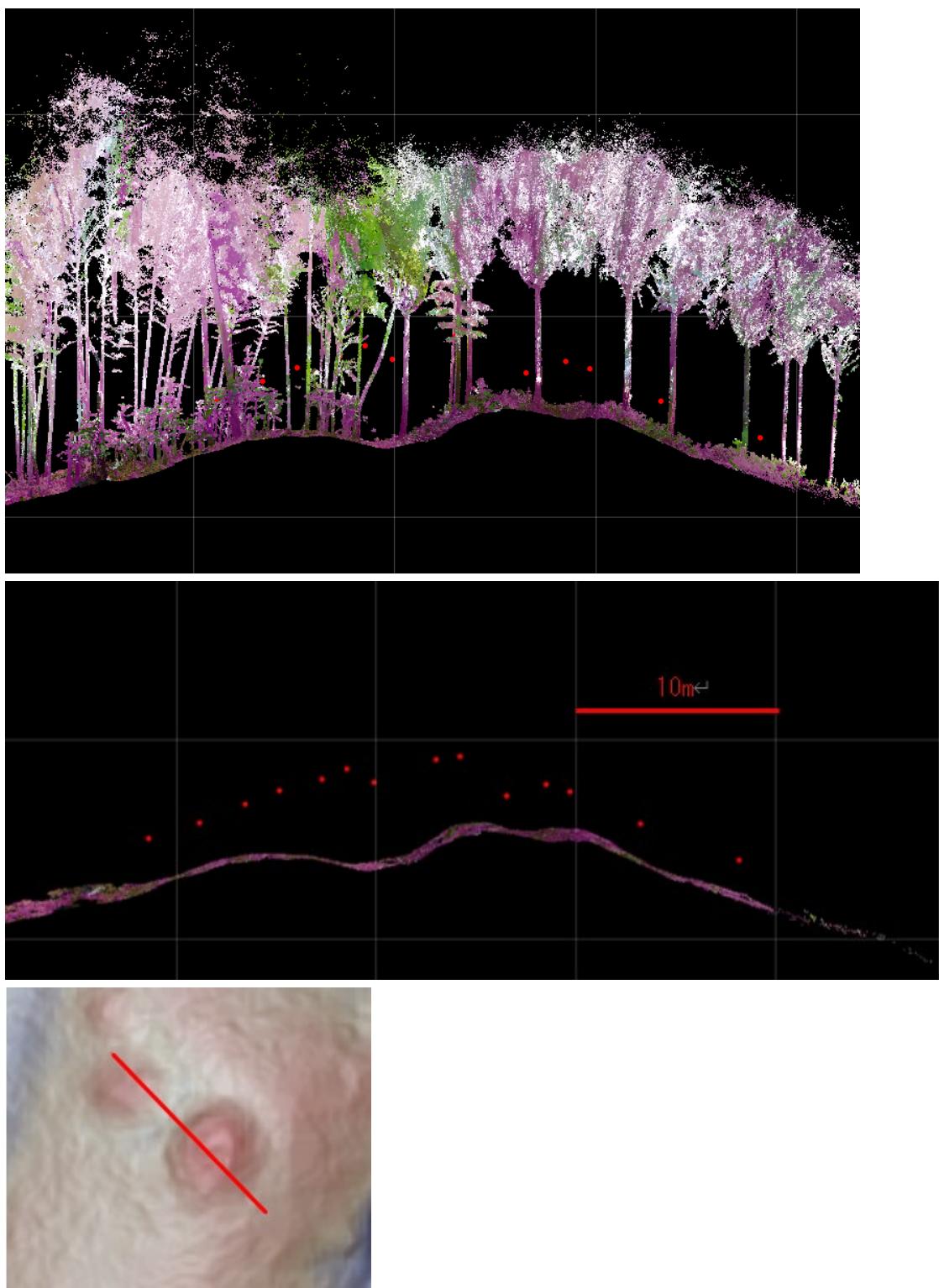


図 2-6-29 LiGrip H120 による三次元点群事例 (久米三成 2号墳)

(上 : LiGrip H120 の点群断面図、中 : 三次元点群から抽出した地盤データと GNSS 測量標高点 (●) の比較、下 : 平面図 (微地形表現図、— : 点群断面位置)

【コラム】スギ人工林における Drogger の精度検証

精度の参考として、スギ人工林における Drogger の精度検証結果を下記に示す²⁴。

表 2-6-5 Drogger の精度

精密度誤差 (m)	正確度誤差 (m)	2DRMS (m)
0.27	0.9	1.99

精密度誤差：反復された観測値の平均値に対する近接性を示す。

$$P = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$$

$$\sigma_x^2 = \frac{\sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2}{n}$$

$$\sigma_y^2 = \frac{\sum_{k=1}^n (y_k - \bar{y})^2}{n}$$

P は精密度誤差 (m)、 n は測位回数、 k 番目の測点の X 座標は x_k 、 Y 座標は y_k 、 \bar{x} は x_k の平均、 \bar{y} は y_k の平均である。

正確度誤差：複数の観測値の真の値に対する近接性を示す。

$$A = \sqrt{(x_{true} - \bar{x})^2 + (y_{true} - \bar{y})^2}$$

A は正確度誤差 (m)、 x_{true} , y_{true} はそれぞれ真の座標値の X 座標と Y 座標、 \bar{x} , \bar{y} はそれぞれ各測位における X 座標と Y 座標の平均値である。

2DRMS：測位誤差が典型的な分布をする場合には誤差のうち 95% が ± 2DRMS の範囲に入るものである。

$$2DRMS = 2\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$$

$$\sigma_x^2 = \frac{\sum_{k=1}^n (x_k - x_{true})^2}{n}$$

$$\sigma_y^2 = \frac{\sum_{k=1}^n (y_k - y_{true})^2}{n}$$

n は測位回数、 k 番目の測点の X 座標は x_k 、 Y 座標は y_k 、 x_{true} 、 y_{true} はそれぞれ真の座標値の X 座標と Y 座標である。

²⁴ https://www.jstage.jst.go.jp/article/ijfes/37/4/37_37.183/_pdf スギ人工林における低コスト 2 周波 GNSS 受信機による RTK 測位の精度評価

7. 様々な測量成果の活用

7.1. 空中写真

7.1.1. 空中写真に現れる埋蔵文化財の痕跡

埋蔵文化財の範囲や分布調査において、空中写真判読は一般的な手法として用いられている。国土地理院では測量等を目的として昭和20年代より空中写真を整備しており、だれでも容易に入手することができる。空中写真は、撮影時の国土の現況を忠実に写すため、現在では開発等で失われた埋蔵文化財の様子や植林する前の埋蔵文化財を当時の写真から把握することができる。

空中写真判読は、航空機や人工衛星などから撮影された地表面の写真を使用して地形や地物を識別することである。空中写真に写った地物は、色や形状、縞模様などのパターンの違いによって識別することができる。

1) ソイルマークとクロップマーク

上空から撮影された空中写真は、地表面の光の反射の状態を捉えており、地表が草木に覆われていなければ、地表の色が忠実に写り込む。地表を覆う土壤が同質なら、土の色は含まれる水分量によって濃淡が変化する。したがって、空中写真に写った地表の濃淡は地下の凹凸を反映している可能性がある。例えば地下に溝状の窪地が埋もれていれば、その部分が低いため周囲の水が集まり、地表の土の色が濃く（黒っぽく）なる。逆に地下に周囲より高い部分があれば、土の色は薄く（白っぽく）になる。こうした地下の凹凸が土の色に現れたものが「土壤痕」（ソイルマーク）と呼ばれるものである。

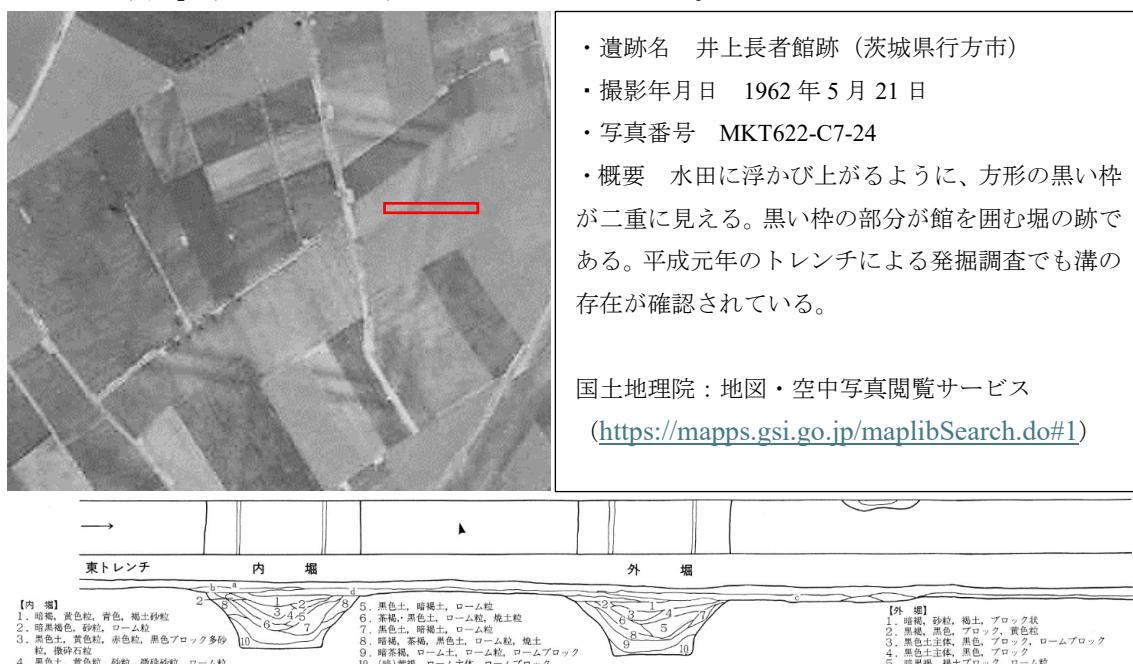


図2-7-1 作物痕の例（下段はトレンチ調査の断面図（写真の赤枠位置））

また、地下の水分の違いは、作物の成長にも影響を及ぼす。例えば稻のように同じ作物が面的に植えられている場合、地中の水分量が稻の成長の差となって航空写真に写りこむことがある。これが「作物痕」（クロップマーク）である（図 2-7-1）。このように、地表に現れた痕跡から地下にある埋蔵文化財の存在を推察することができる。この写真には、二重の方形区画が黒線として鮮明に写る。これにほぼ直行させて実施されたトレンチ調査では、深さ約 1.3m の溝状遺構（内堀と外堀）が実際に検出された²⁵。

2) 土地の形状に現れる痕跡

規模の大きい埋蔵文化財では、耕作地のパターンにその形が現れていることがある。平城京は、現在の都市化前には水田に覆われていた。都市化前の空中写真を見ると、小規模な水田一枚一枚の組み合わせによるパターンから道路や条坊の形を読み取ることができる（図 2-7-2）。平城宮の東に同じ幅の水田が南北に連なっているのが東一坊大路であり、これに直交する畦畔から当時の条坊の区画が読み取れる²⁶。

また、奈良県橿原市にある史跡丸山古墳は、残存する墳丘から古くは円墳と考えられることもあったが、空中写真を見ると周囲の田圃に前方部や周濠の形が現れており、大規模な前方後円墳であることがよく分かる（図 2-7-3）。

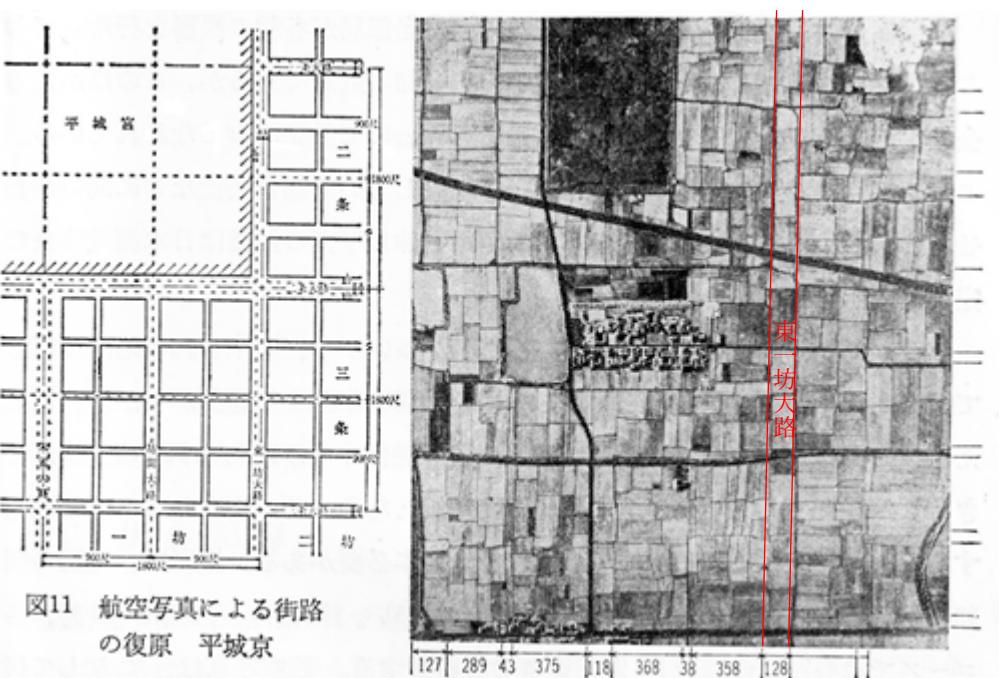


図 2-7-2 水田の区画によるパターンから平城京の街路を復元

²⁵ 玉造町教育委員会『行方郡井上長者館跡確認調査報告書』1990 年、図 2-7-1 の下図は「第 5 図 東、西（第 1・2）、南、北トレント検出遺構実測図」より転載。

²⁶ 文化庁文化財部『埋蔵文化財発掘調査の手引き』1975 年、財団法人国土地理協会発行、27 頁、図 11 を転載。

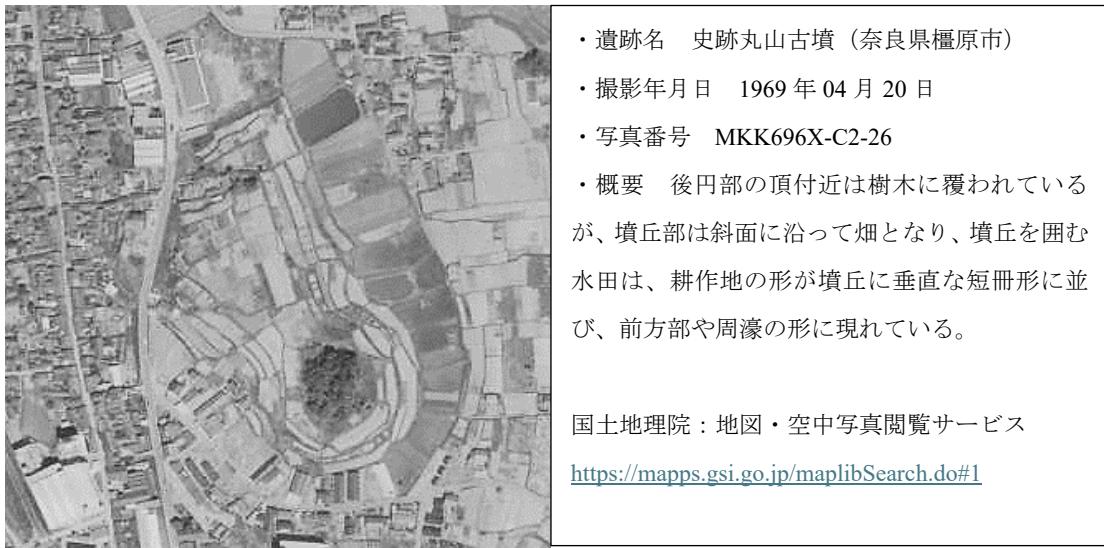


図 2-7-3 土地利用パターンの例

このように、空中写真を注意深く見れば埋蔵文化財の痕跡が見つかる可能性があるが、全国の空中写真を隅から隅まで見ることは現実的にむずかしい。また、土壤痕や作物痕は地表付近の土壤が単純であることや水分が多い場所でないと地表に現れにくい。空中写真から埋蔵文化財を見つけるには、こうした地表の条件を考慮するとともに、立地条件や史料等から埋蔵文化財の存在が疑われる場所に範囲を絞って丹念に空中写真を判読する必要がある。

7.1.2. 空中写真の閲覧・入手

国土地理院のウェブサイトから過去に撮影された全国の空中写真が閲覧できる。

1) 地理院地図（年代別の写真）：<https://maps.gsi.go.jp>

年代別の空中写真をシームレスに拡大縮小して閲覧できる。

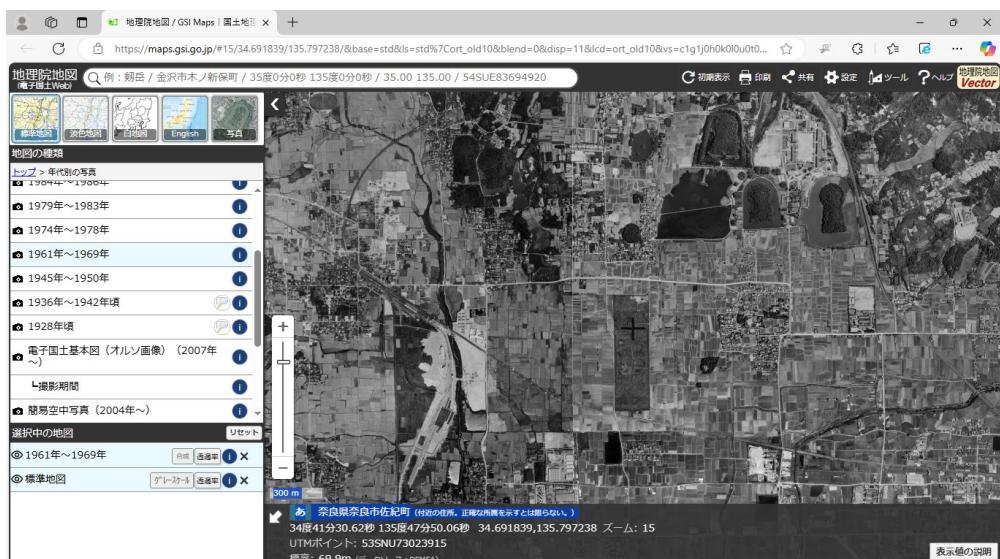


図 2-7-4 地理院地図（年代別の写真）

・図 2-7-4 の画面左：地図の種類選択画面

画面上部に基本的な地図のアイコンが並んでいる。「地図の種類」のパネルから「年代別の写真」を選択すると、上図のメニューが表示される。閲覧を希望する年代をクリックすると、右側の地図表示画面に選択した年代の空中写真が表示される。

・図 2-7-5 の画面右：地図表示画面

上部のアイコンから、地図の操作、表示、画像のダウンロード、地理情報の作成等の機能が使用できる。下部のダイアログには、表示している地図や写真の位置が地名や経緯度等で表示される。

(操作マニュアル：<https://maps.gsi.go.jp/help/pdf/GSIMaps.pdf>)

2) 地図・空中写真閲覧サービス：<https://maps.gsi.go.jp/maplibSearch.do#1>

地理院地図（年代別写真）より古い写真を閲覧でき、写真単位で 400dpi の精細な画像データをダウンロードすることもできる。

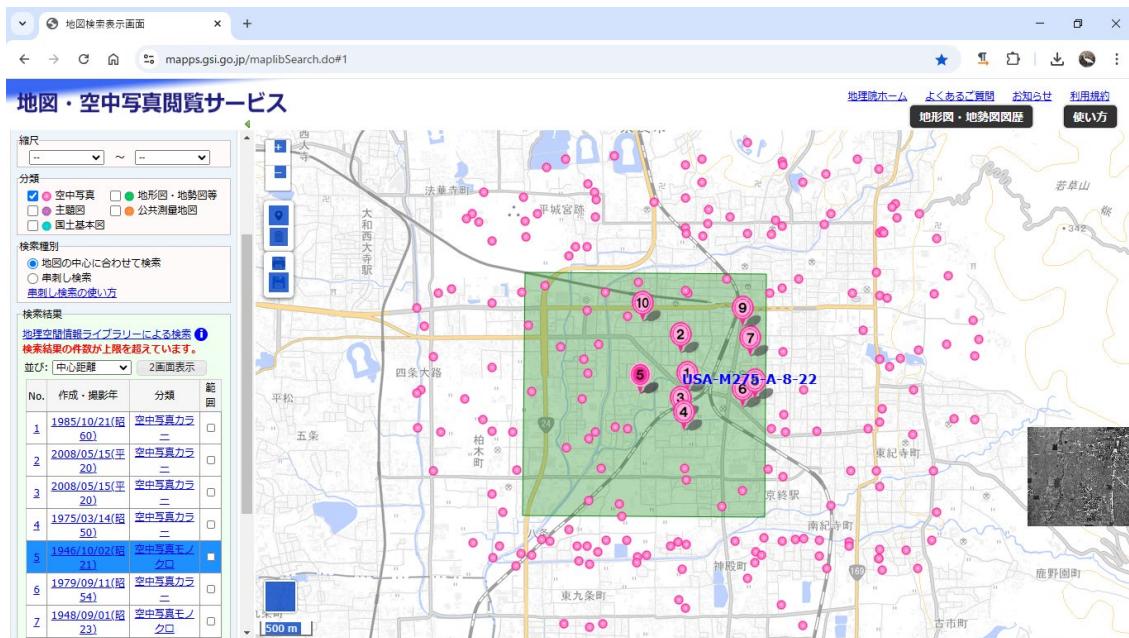


図 2-7-5 地図・空中写真閲覧サービス

・図 2-7-5 の画面左：リストによる地図・空中写真の選択画面

縮尺、地図・空中写真の種類、検索方法を選択すると、検索結果の欄に表示されている範囲の閲覧可能な空中写真の情報が表示される。

・図 2-7-5 の画面右：地図による地図・空中写真の選択画面

地図上に表示された写真中心点をクリックすると、該当する写真の情報と写真が表示される（図 2-7-6）。

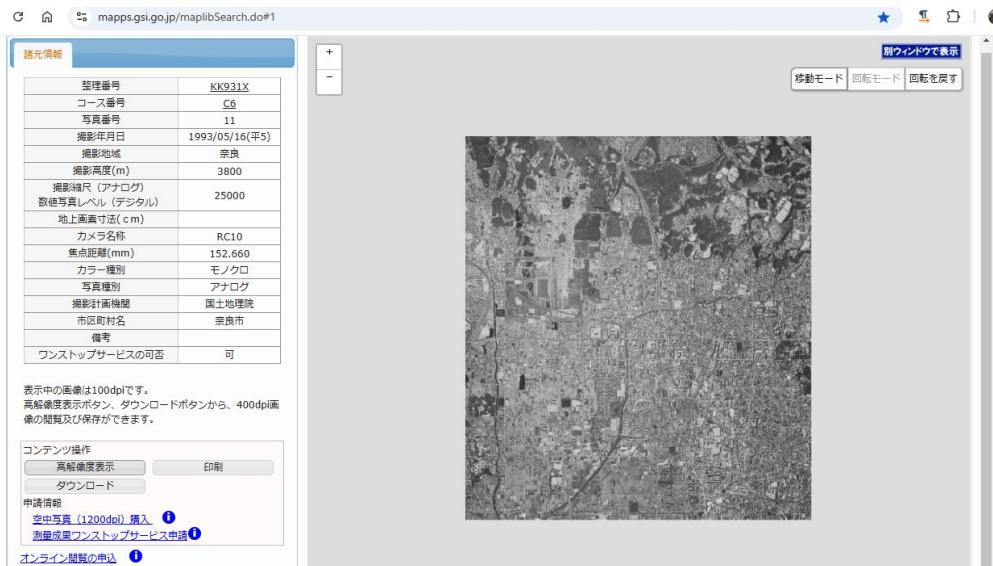


図 2-7-6 空中写真の情報

・図 2-7-6 の画面左：空中写真の諸元情報

上部に写真の番号、撮影年月日、地域、写真の縮尺、カメラの情報など写真に関する諸元が表示され、下部に右画面に表示された写真の高解像度表示、印刷、ダウンロードの操作や使用申請手続きの申請先の情報がある。

・図 2-7-6 の画面右：選択した空中写真画像

左画面に示された諸元の空中写真が表示される。

右画面下の高解像度表示を選択すると 400dpi の精細画像が表示され、その画像データをダウンロードすることができる。

3) 地図センター Net Shopping : <https://net.jmc.or.jp/imagedata/aerialphotograph.html>

400dpi 以上の高解像度 (1200dpi) データは一般社団法人日本地図センターから販売されている。

7.1.3. 空中写真の選定に当たっての留意点

埋蔵文化財の判読に使用する空中写真を選定する場合は、以下の点に注意する。

- ・年代：地形改変や圃場整備等が実施される前の古い年代のもの。
- ・縮尺：埋蔵文化財の規模にもよるが、一般的に低高度で撮影した大縮尺のもの。
- ・カラー・モノクロ：同年代・同縮尺でカラーとモノクロが存在する場合は、カラーのもの。
- ・撮影時期：土壤痕は作物が少ない秋から冬季、作物痕は春から夏季のもの。
- ・土壤痕が出現しやすい場所：面的に均質であること、地下水位が高いことなどから水田に出現しやすい。
- ・撮影時間：影が大きくなる太陽高度が低い早朝、夕方に撮影されたもの。

7.1.4. 空中写真の使用上の注意

国土地理院が提供している空中写真等を報告書等に引用する場合は、一般的な出典明示でよいが、空中写真を使って地図を作るなどの測量をする場合には使用手続きが必要になることがあるので、注意を要する。

国土地理院の測量成果の利用手続については以下の URL を参照されたい。

<https://www.gsi.go.jp/LAW/2930-index.html#sec7>



国土地理院の測量成果の利用手続について

このページでは、国土地理院の地図・空中写真の利用手続について記載しております。基準点の利用手続は、[測量標・測量成果の使用承認申請のページ](#)をご覧ください。

■系統の対象となる地図・空中写真(基本測量成果)

国土地理院が行う、提供する紙地図、数値地図、空中写真、電子地形図、基盤地図情報、地理院タイルの一部(標準地図、淡色地図等)が対象となります(基本測量の測量成果)。

※旧版地図(陸地測量標条例(明治23年3月26日施行)制定以後の地図)も対象です。

- 地図・空中写真等の刊行物・提供物
- 基本測量成果に該当する地理院タイル(標準地図、淡色地図等)

■測量成果に該当しないコンテンツ(国土地理院ウェブサイトで公開している情報)

- 地図・空中写真閲覧サービス(ダウンロードした空中写真)
- 技術資料(デジタル標高地形図等)
- 基本測量成果以外の地理院タイル(白地図、写真等)
- 地理院地図vector(試験公開)(ベクターフィル)
- 古地図コレクション

などは、[国土地理院ウェブサイト利用規約](#)に従ってご利用ください。

【よくあるご質問】
[承認申請Q&A「利用対象について」](#)

1. 国土地理院の測量成果を利用するには？

- 測量法第29条(複製)、第30条(使用)に基づき国土地理院への承認申請が必要な場合
- 申請は不要で[出典の明示](#)だけで利用できる場合

図 2-7-7 測量成果の利用手続について (国土地理院 HP)

7.2. SfM-MVS (Structure from Motion Multi View Stereo)

重複して撮影した2枚1組の空中写真を左右別々の眼で見ると、地形を立体的に把握できる。これを実体視と言う。実体視は肉眼で行う方法と実体鏡を用いる手法がある。どちらの手法においても事前に情報がない状態から写真をくまなく探し埋蔵文化財を見つける作業は非常に労力を要する。

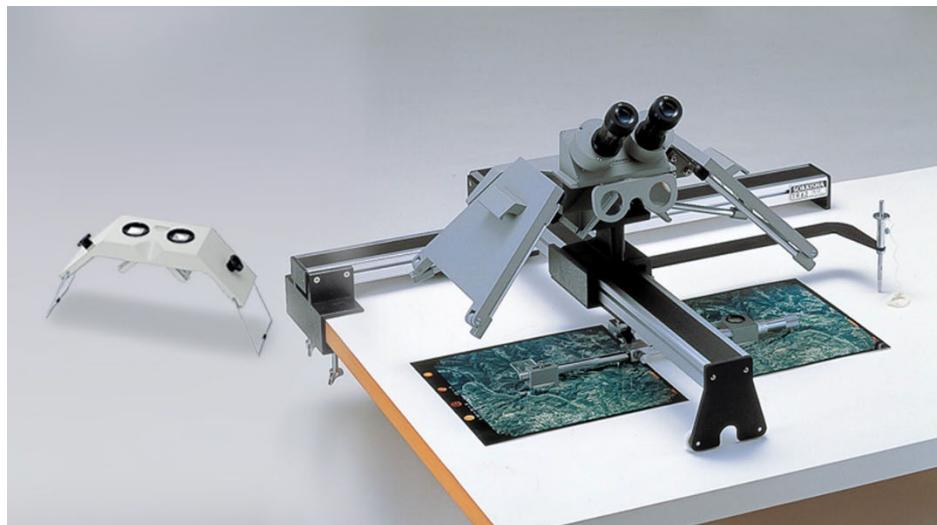


図2-7-8 反射実体鏡（トプコンソキアポジショニング²⁷⁾

こうした人力による実体視ではなく、複数の写真を用いて三次元点群化する技術が SfM-MVS 技術である。この技術では、複数の写真に写った同じ場所と特定できる箇所を特徴点として自動的に探索し、その位置関係からカメラの位置や姿勢を求め、3次元空間内での位置から3次元点群を生成する手法である。SfM-MVS で作成した点群データはピクセル単位で作成するため、高密度な点群を生成できる。こうした技術を用いることによって、地形復元を行うことが可能である。過去の空中写真を用いて作成したオルソ画像および数値表層モデルを図 2-7-9 に示す。近年ではその汎用性から、埋蔵文化財の発掘調査の記録作成手法としても一般的になりつつある。

ただし、SfM-MVS で生成した点群データは地盤面（DEM*）だけを捉えているのではなく、森林などの植生の表層や構造物等の地物を含んだ表層の標高（DSM*）なので使用にあたっては注意を要する。また、SfM-MVS に用いる空中写真の撮影縮尺や画像の鮮明度に影響して誤差が生じることも注意したい。

²⁷ <https://www.topconpositioning.asia/jp/ja/products/brand/sokkia/ms27-ms16/>

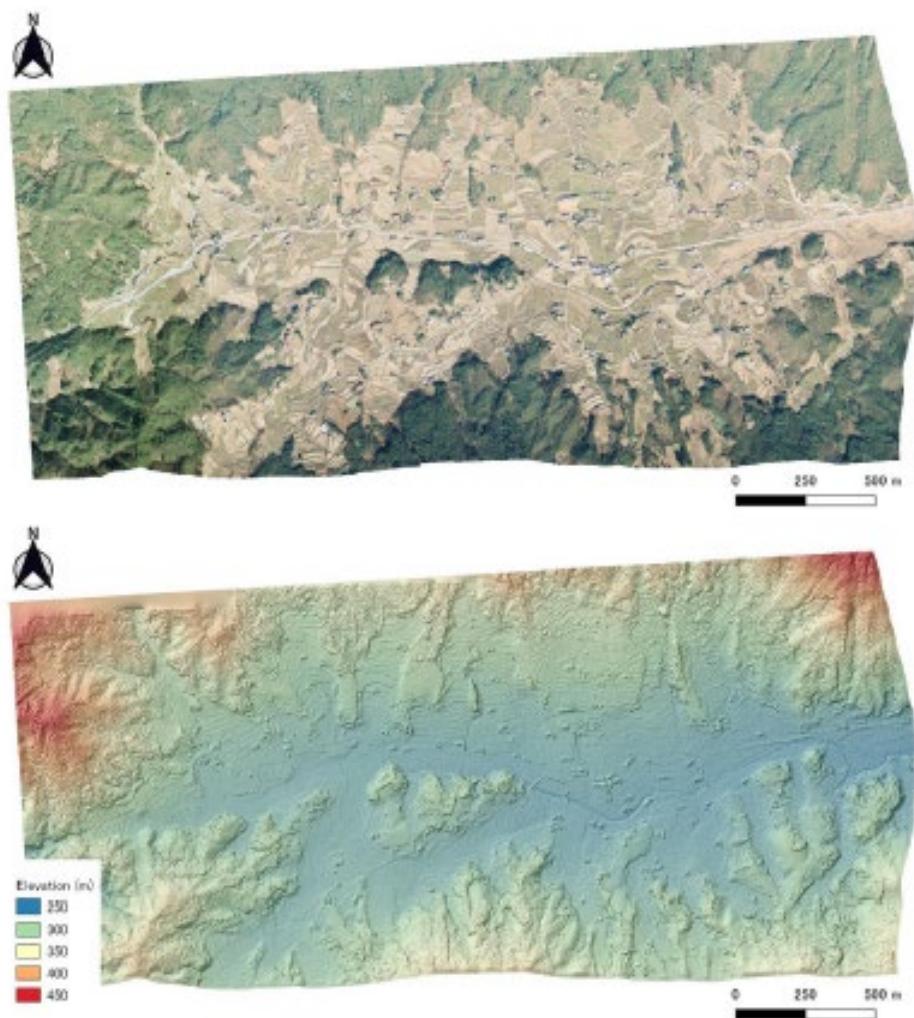


図 2-7-9 空中写真より復元されたオルソモザイク画像（上）および数値表層モデル（下）²⁸

²⁸ 農研機構 HP (https://www.naro.go.jp/project/results/4th_laboratory/warc/2019/warc19_s05.html)

用語解説

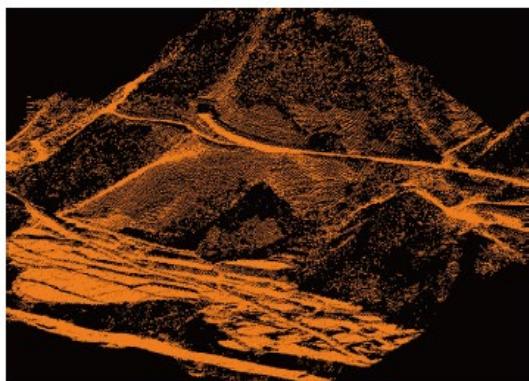
(アルファベット順)

◆CS 立体図

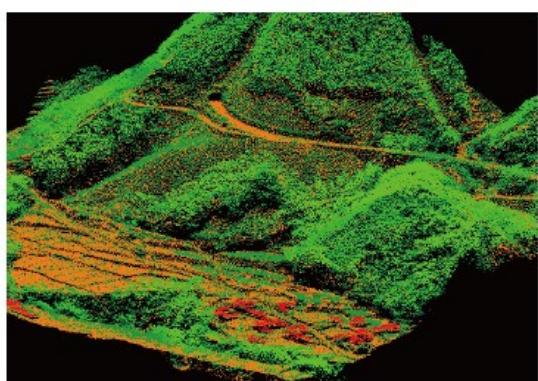
CS 立体図は、航空レーザ測量成果の地形解析で算出する曲率 (Curvature) と傾斜 (Slope) との組み合わせ画像により作成する地形表現図の一種である。尾根などの凸地形は赤、谷などの凹地形は青で表現し、急斜面は濃い色、緩斜面は淡い色で表現する。従ってやせ尾根は濃い赤で、緩やかな尾根は薄い赤となり、深い谷は濃い青、浅い谷は薄い青となり平坦地は白っぽく表現される。

◆DEM / DSM / DTM (Digital Elevation Model / — Surface — / — Terrain —)

それぞれ、数値標高モデル (DEM)、数値表層モデル (DSM) 及び数値地形モデル (DTM) という。DSM は、地表面とすべてのフィーチャー (植生・地物等) の標高からなるグリッド状に配列した標高データであり、DEM は、地表面のみの標高モデルである。DTM は、DEM 同様に地表面の標高のみからなるグリッドデータだが、ブレークラインを用いて重要な地形の特徴を取り込み、特徴的な地形をより明確に表現して正確な地形に近づけた地形モデルである。なお、DEM と DTM は国や地方自治体、指定公共機関により同義として取り扱われるなど、区別があいまいな場合がある。本書ではこれらの区別はせず DEM や DTM はグリッドデータと表現している。下段の図の出典は脚注参照²⁹。



(a)地表面 DEM データ



(b)樹冠 DSM データ

²⁹ 公益財団法人 日本測量調査技術協会『改訂版 図解航空レーザ計測 基礎から応用まで』2023年、143頁、(ISBN 978-4-600-01397-4)

◆FLOAT 解

RTK（リアルタイムキネマティック）GNSS 測位において、バイアスを整数値で求めることができた解を FIX 解と呼ぶ一方で、電波受信が中断するとバイアス値が失われ、再び初期化が必要となる。初期化するまでの解を FLOAT 解と呼び、精度は数十 cm～数 m とされる³⁰。

◆GNSS 測位（GNSS Positioning）

GNSS 測位とは人工衛星から発する電波を用いて地上の位置を計測するためのシステムである。GNSS 測位の原理は、4 基以上の GNSS 衛星（米国の GPS やロシアの GLONASS、日本の QZSS 等）から受信機（観測点）に届く測位電波（搬送波）の同一時刻における距離を算出（単独測位）、または GNSS 衛星の位置を基準とし、2 台以上の受信機で 4 基以上の GNSS 衛星から届く搬送波位相を観測して、2 点間の相対的な位置関係を算出（相対測位）する測位手法である。航空レーザ計測では、航空機に搭載した GNSS 移動局（受信局）と地上に固定された GNSS 基準局（電子基準点）の間で相対測位を行い、航空機の飛行軌跡やレーザ光照射時のレーザ測距装置の向き、付属デジタルカメラの写真撮影位置を後処理解析する。

◆IMU（Inertial Measurement Unit）

IMU とは、水平 2 軸及び垂直 1 軸の計 3 軸に配置されるジャイロ（角速度計）と加速度計で構成する装置のことで、慣性計測装置とも言う。この装置を用いて航空機や UAV 等の角速度と加速度を検出し、通常 1 秒間に 50～200 回の頻度で方位を算出する。一般に航空測量では、位置を測定する GNSS 装置と統合した GNSS/IMU システムを用いてレーザ光照射時及び付属デジタルカメラによる空中写真撮影時の正確な位置と方位を算出する。

◆LAS 形式

LAS 形式とは三次元点群データの共通ファイルフォーマット（形式）である。座標・標高の他に反射強度や点群のクラス分類、RGB などの情報を格納することができる。これまで点群データの成果は csv 形式での作成が多かったが、地上点群測量などが増え点群編集装置の普及により LAS 形式が基準規格となってきた。基本測量では 2023 年度より LAS 形式での成果品作成が追加されている。

³⁰ 『RTK-GPS による移動体測位の特性に関する基礎的研究』 土木情報利用技術論文集 vol.17 2008 佐田達典・江上翔悟・村山盛行

◆LiDAR (Light Detection and Ranging)

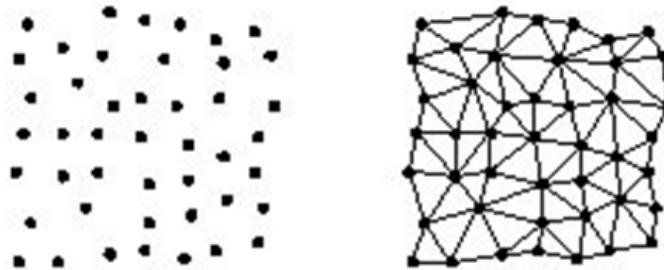
一般的に言えば、レーザ光を照射し、その反射光の往復時間から物質の空間分布を計測する装置である。レーザ・レーダ (Laser Radar) ともいう。海外ではレーザよりもライダーと呼ぶのが普通である。LiDAR のほか LIDAR や Lidar とも表記される。

◆RTK 測位

測位衛星システムから得られた位置情報に加え、地上に設けられた基準局の補正位置情報を加味することで位置情報の精度を向上させる技術。なお、補正位置情報の取得には、別途費用が必要となる。

◆TIN (Triangulated Irregular Network)

TIN は、ランダムやグリッド状に配置された点を任意の三角形で構成する三角形の集合（不規則三角網あるいは不整三角網という）に変換して連続的な地表面を表現（サーフェス）する地形再現手法である。三次元の点群データから地形を可視化してリアルに再現する場合に利用される。TIN モデルは、谷や尾根、堤防や崖、微小な起伏等の地形の特徴の正確な位置をモデル内に保持することが重要な場合には、DEM よりも優れたモデルとなるがデータ容量が大きくなりハンドリングが難しい。段の図の出典は脚注参照³¹。



◆アーカイブデータ

国内の調査や研究などに使用できる空間情報を、国、地方公共団体及び民間企業が独自に収集したデータのこと。航空レーザデータ、人工衛星画像及び航空写真などが整備されており、WEB 等から入手できる。

◆ウェーブフォーム (Wave Form)

航空レーザシステムでは、レーザパルスの反射波形全体を非常に高いサンプリングレート（例えば 1GHz=1 ナノ秒）で受信し、デジタル信号処理で完全に波形に近い形で記録している。高い時間分解能で計測対象物の高さ分解能を向上させるため、特に垂直構造物に関する

³¹ [TIN | 地理空間情報技術ミュージアム Museum of GIS Technology](#)

る情報の抽出に有用である。この記録方式をウェーブフォーム方式あるいは全波形記録方式という。ただし、この方式は記録されるデータ量と後処理に要する時間が大幅に増加するため、すべての利用目的に対して必ずしも有益であるとは限らない。

◆オリジナルデータ（Original Data）

オリジナルデータとは、航空レーザ計測で取得した点群データ（三次元計測データ）を統合解析し、ノイズなどのエラー計測部分のデータを取り除いたうえで、各種精度点検と調整を行った後のランダム点群であり、樹木や構造物等の高さデータも含む。

◆オルソフォト画像（Orthophoto Image）

オルソフォト画像は、航空カメラで撮影した画像に対して、カメラの姿勢（傾き）やレンズ歪み、被写体までの距離（地形の起伏に起因する標高差など）を幾何学的に補正して均一な縮尺になるように変換した画像である。オルソフォト画像は GIS や CAD で地図データと重畠することができ、距離や面積計測にも用いられる。またオルソフォト画像を接合するモザイク処理を行えば、撮影対象地域全体を含むシームレスなオルソフォト画像が作成可能である。オルソ画像や写真地図とも言う。なお、航空レーザ測量の作業で作成するオルソフォトは、計測時の現地状況の確認を目的に簡略化した手順で作成しているため「航空レーザ用写真地図」とされている。

◆基本測量

すべての測量の基礎となる測量で、国土地理院が行う測量を指す。

◆キャリブレーション（Calibration）

航空レーザシステムの構成機器を最適化するための調整作業をキャリブレーションとい。IMU、レーザスキャナ、デジタルカメラの各 3 軸（基準軸）間のオフセット角（ミスマライメント角あるいはボアサイト角ともいう）を正確に測定する。公共測量として航空測量に従事する測量作業機関は定期的（日本では半年ごと）に航空レーザシステムのキャリブレーションを実施し、測量成果精度の維持に努めている。

◆近赤外レーザ（NIR Laser）

航空レーザシステムでは、近赤外域のレーザ光を採用しており、波長 1064nm または波長 1550nm の機材が国内では多い。近赤外域のレーザ光は水への吸収率が高いため、水面下の計測は不可能である。一方で航空レーザ測深は、異なる波長のレーザ光を用いるため、適応条件下において水面下の地形（水底）が計測できる。

◆グラウンドデータ (Ground Data)

グラウンドデータとは、オリジナルデータから、フィルタリング処理によって地表面の遮蔽物（地表面以外の地物）を取り除き、地表面のみを抽出したランダム点群データである。測量作業規程の準則では、交通施設（道路施設、鉄道施設、移動体等）、建物（建物、付属施設等）、小物体（送電線など）、水部（水部に関する構造物など）、植生（樹木、竹林、生垣）、その他（工事現場などの一時的な地表形状）を取り除く対象としている。

◆グリッドデータ

規則的な間隔で標高値を持つデータのこと。航空レーザ測量ではグリッドデータはグラウンドデータを内挿して作成し、地表面の標高値を等間隔に示す DEM データの事を指す。なお、内挿手法には TIN や最近隣法、Kriging（クリギング）法などがある。

◆計測密度

計測密度とは 1 平方メートルあたりのレーザ照射密度であり、数値が高いほど多くの計測点があり地物を表現する解像度が高い。

航空レーザ測量では、一般的に地表に植生などの障害物がない裸地のよう地点におけるレーザ照射数を指す。計測点間隔、計測点密度と同義で使われる。

◆公共測量

基本測量以外の、測量に要する費用の全部または一部を国・地方公共団体が負担して行われるすべての測量及び行政庁の許認可や補助・貸付等を受けて行われる事業のための測量をいう。

◆航空レーザ測量システム (Airborne Laser Scanning System)

航空機に搭載したレーザ測距装置からパルスレーザを照射して、地表面の三次元形状を面的に計測するシステムである。GNSS/IMU システムから求めるレーザ測距装置の位置・姿勢情報をもとに地表面に照射したレーザ光の位置を算出し三次元データを得る。一回のレーザ照射でレーザ光の経路上にある複数の地物から反射波（マルチパルス）を得る。例えば、レーザ光が樹冠の隙間を通過して地表面に到達した場合には、樹冠の枝や葉と地表面の少なくとも二つの情報を取得できる。ただし、霧や雲等によるレーザ光の反射（散乱）や建物間の多重反射、水面などの吸収体の影響で計測できない場合もある。

◆航空レーザ測深（Airborne Lidar Bathymetry）

航空レーザ測深とは、航空機に搭載したレーザ測距装置からパルスレーザを照射して、水面下の三次元形状（河床面、海底面など）を面的に計測する技術のことである。ALB 測深や ALB 計測と略称される場合もある。システムの構造は、陸域対象の通常の航空レーザシステムと基本的に同じだが、水中に貫入できる波長のレーザ（波長 532nm、515nm 等）を使用する点から“グリーンレーザ測深”と呼ばれることがある。このシステムには、グリーンレーザの 1 波長で水面と水底の両方を計測するものと、近赤外レーザと組み合わせた 2 波長で水面の検出効率を高めたシステムの 2 種類が商用化されている。前者は UAV 搭載型のシステムに、後者は有人航空機搭載型のシステムに多く使用される傾向がある。

◆航空レーザ測量データポータルサイト

公益財団法人日本測量調査技術協会が運営する全国の航空レーザ測量実施状況を取りまとめたウェブサイト（<https://sokugikyo2.com/laser/>）¹⁰。2002 年以降の基本測量、公共測量およびアーカイブデータの整備範囲を網羅しており、データ管理者、測量期間、計測密度*などの情報を簡便に確認することができる。ポータルサイトに登録されている情報は、協会の会員企業が実際に測量を実施して登録しているため、正確性は高い。また、各測量を実施した地理的な範囲を視覚的に確認することができる。2023 年度末時点で、航空レーザ測量データポータルサイトの整備済みの面積は 314,780 km²（国土面積の 83%）で、ポータルサイトと重複しない国土地理院の整備範囲を合わせると 325,270 km²（86%）である。また、計測密度が 4 点／m²以上の整備面積は 203,789 km²（53%）である。

◆作業規程の準則

作業規程の準則とは、公共測量における標準的な作業方法や基準を示すものであり、地方公共団体などが公共測量作業規程を定める際の規範として利用されている。具体的には、地形測量、写真測量、三次元点群測量、水準測量の基準と方法を詳しく解説している。改正により最新情報を反映し、高品質な測量データの取得を支援する。

◆スキャン角度（Scan Angle）

スキャナで走査されるレーザパルス光軸がとる方向角。スキャナの走査中心（基準軸）に対する角度（ $\pm \theta^\circ$ ）で表す。レーザ照射点の三次元座標の算定に使用される。航空レーザ計測における計測諸元では最大角が表示され、最大角度がスキャン幅、計測幅となる。

◆スキャン周波数 (Scan Frequency)

往復運動タイプのスキャナの場合、1秒間に往復運動する回数。1スキャンは、2本1組の走査線からなり、それぞれをハーフスキャン (half scan) という。回転 (ロータリー) タイプでは、1秒間の回転数にミラー数を乗じた本数をスキャン速度と称している。呼び名は統一しておらず、レーザ周波数、スキャン回数、スキャンレートとも言う。

◆スキャンパターン (Scanning Pattern)

レーザパルスの反射点 (フットプリント) が描く軌跡。スキャナのタイプにより、ジグザグ状、ライン状、円状、あるいは楕円状の走査線が描かれる。一軸で往復運動タイプのスキャナの場合、進行方向の点間隔はスキャン周波数と飛行速度に、走査幅はスキャン角度と対地高度に依存する。

◆測地成果 2000 と測地成果 2011

日本が現在採用している測地系は、GNSSなどの宇宙技術を利用して定めた「日本測地系 2011」(JGD2011) である。平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震に伴い、大きな地殻変動が観測され、平成 13 年の測量法改正時に採用された「日本測地系 2000」(JGD2000) を改正した。平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震以前の航空レーザデータを用いる際には座標変換を要する。

なお、令和 7 年 4 月 1 日から、全国の基準点の標高値 (高さ) が改定される (測地成果 2024)。緯度経度や平面直角座標の数値は改定されない。

◆測量座標系と数学座標系

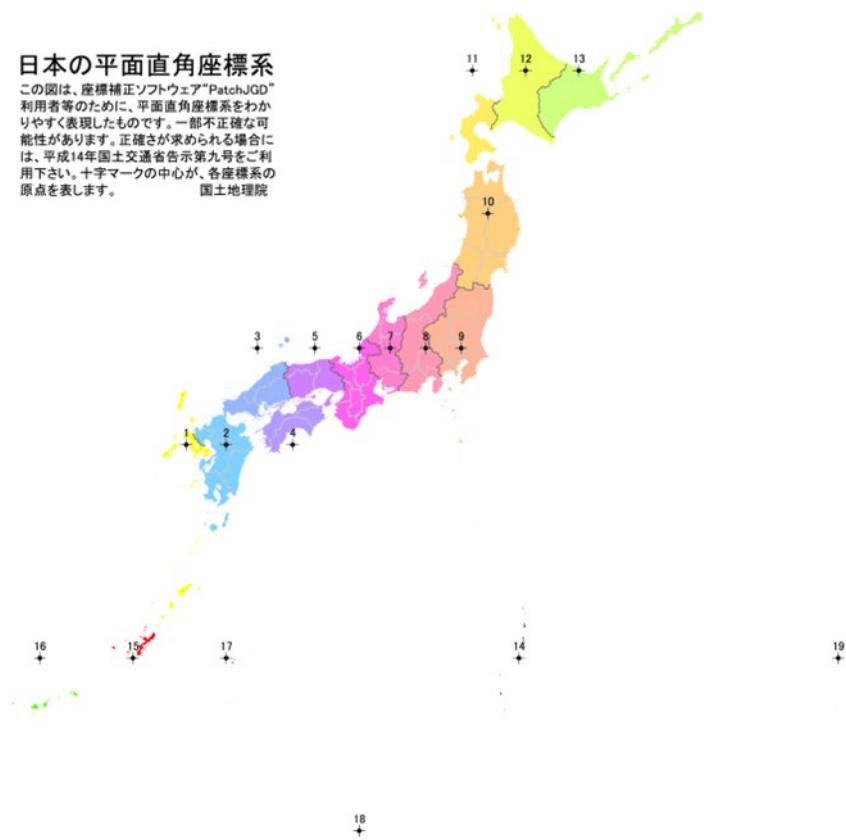
測量の座標系とは、地球上での位置を測るための基準のことを指す。一般的に航空レーザ測量の座標系は「日本測地系 2011」(JGD2011) の平面直角座標系、高さは東京湾平均海面からの高さで整理されている。なお、GNSS 等の測量成果は X 軸を座標系原点において子午線に一致する軸とし、真北に向う値を正とし、座標系の Y 軸は、座標系原点において座標系の X 軸に直交する軸とし、真東に向う値を正とする。すなわち縦軸が X 軸で横軸が Y 軸である。一般的に航空レーザ測量では横軸が X 軸、縦軸が Y 軸の数学座標系で示される。

◆地図情報レベル

航空レーザ測量の成果の地図表現精度を表し、値が小さいほど詳細なデータである。

◆平面直角座標系

平面直角座標系は、下の図に示すように全国を 19 のエリアに分割し、ガウス・クリューゲル (Gauss-Krüger) 図法によって平面に投影された座標系である。座標系の X 軸は、座標系原点において子午線に一致する軸とし、真北に向う値を正とし、座標系の Y 軸は、座標系原点において座標系の X 軸に直交する軸とし、真東に向う値を正とする、いわゆる測量系の座標軸である。下段の図は脚注参照³²。



◆パルスレート (Pulse Rate)

レーザ測距装置から照射される 1 秒間あたりのパルス総数のこと。正確には繰り返し周波数 (Pulse Repetition Frequency) と呼ばれる。例えば、1 秒間に 100 万個のパルスが生成される場合、パルスレートは $1,000,000\text{Hz} = 1\text{MHz}$ となる。パルスレートが高ければ計測点の密度 (地表面における計測点間隔または計測密度) を高めることができ、非常に高いパルスレート (2023 年現在では、1 台のレーザ測距装置が最大 2.6MHz =毎秒 260 万回のレーザ照射) が達成されている。しばしば航空レーザシステムの性能 (データ収集効率) を決定する究極のパラメータと考えられているが、実際にはこの理解は正確ではない。これはレーザ測

³² わかりやすい平面直角座標系 | 国土地理院 (<https://www.gsi.go.jp/sokuchikijun/jpc.html>)

距装置に加えられるエネルギー総量には上限があるため、パルスレートを上げすぎると1照射パルスあたりのエネルギー量が低下して反射波も弱くなり、地表面を検出できなくなる恐れがある。従って、通常レーザ機器仕様には、最大パルスレート (Hz) と表記されている。航空レーザ計測では、航空レーザシステムごとに最適なパルスレート (パルス繰り返し周波数) を設定しておくことが重要である。

◆微地形表現図

地形の起伏を詳細にわかりやすく表現した主題図（特定の事象を強調した図）のこと。

◆フィルタリング

グラウンドデータの取得を目的に地表面以外の点群を取り除く作業をいう。一般的な手法では自動フィルタリングした後に、そのエラーを修正する手動フィルタリングを行う。

◆フットプリント／レーザ反射点（Foot Print）

レーザパルスのビームが地表面に描く投影パターン、あるいはビームスポット径。ビーム拡散度、センサの対地高度及びスキャン角度によって、大きさと形状が異なる。

◆マルチ GNSS

GPS（アメリカ）、GLONASS（ロシア）、Galileo（欧州）、BeiDou（中国）、QZSS（日本）などの各国の測位衛星システムが送信する信号をまとめて利用し、測位する技術。

◆レーザ反射強度（Laser Intensity）

レーザ反射パルスの相対的な信号強度。レーザビームの後方散乱に係わる物質の反射率や地表面粗度の影響を受ける。PMT（光電子増倍管）やAPD（光デバイス）がレーザ光による光電子を增幅した時の電気信号の強弱を示す。原理的には受信光子数を意味する。ただし、表示される数値は、レーザ測距装置のタイプによって異なる。