

デジタル技術による文化財情報の記録と利活用 XR・LiDAR・3D・デジタルアーカイブ・知的財産
権 7 号

石丁場の石材分布調査における航空レーザ測量 の有効性についてー現地測量データを用いた石 材の抽出と比較検証ー

小西 健三 (株式会社ジオテクノ関西)

Effectiveness of Airborne Laser Scanning for Stone Quarry Stone
Distribution Survey: Comparative Verification of Stone Extraction
Using Ground Survey Data

Konishi Kenzo (GEO Techno Kansai CO., Ltd.)

技法・技術 / 活用手法

航空レーザ測量 / 点群データ / フィルタリング処理 / 石丁場 / 文

化財調査 / 3次元計測

Airborne Laser Scanning / Point Cloud Data / Filtering

Processing / Stone Quarry / Cultural Property Survey / 3D

Measurement

石丁場の石材分布調査を事例として、航空レーザ測量における石材抽出の有効性を検証した。航空レーザ測量で得られた点群データから石材を抽出するには、適切なフィルタリング処理が不可欠である。本稿では、航空レーザ測量の概要とフィルタリング処理の手法を説明し、東六甲石丁場での石材抽出事例を紹介した。現地測量データとの比較検証の結果、航空レーザ測量による石材抽出精度は、石材周辺の状況や大きさの影響を受けることが明らかになった。特に、高密度な樹木の影響や1m未満の小型石材の形状取得は困難であった。一方で、航空レーザ測量のオープンデータ化や、iPhone-Lidar、Lidar-SLAM、SfM技術等の補完技術活用により、効率的な文化財調査が期待される。

1. はじめに

航空レーザ測量は、広範囲の地形データを短時間で取得できるため、文化財調査において山城や古墳の調査手段として用いられてきた。しかし、航空レーザ測量によって得られた点群データから、文化財の構成要素である石材や石垣、堀切、土塁、竪堀などの人工的な改変による地形形状を抽出するためには、適切なフィルタリング処理が不可欠である。本稿では、航空レーザ測量におけるグラウンドデータ作成の注意点と手法を紹介し、石丁場の石材分布調査のデータを用いた石丁場での石材抽出について検証する。検証にあたり現地測量データと航空レーザ測量により抽出した石材と比較し、抽出精度を評価し、石材の周囲の状況や大きさが石材の検出に与える影響を分析する。

2. 航空レーザ測量とフィルタリング処理について

航空レーザ測量の概要とフィルタリング処理の特徴や手法について説明する。

(1) 計測原理

航空レーザ測量とは、航空機に搭載されたレーザスキャナから地表面に向けてレーザ光を照射し、その反射光を受信することで、地表面の3次元形状を精密に計測する技術である。レーザパルスを発射し、その反射光が返ってくるまでの時間から、レーザが照射された点と航空機との間の距離を算出する。さらに、衛星測位システム（GPS）や慣性計測装置（IMU）などの測位システムと組み合わせることで、地表面の3次元座標を面的に取得することが可能となる。

(2) システム

航空レーザ測量システムは、大きく分けて以下の要素から構成される。

レーザ測距装置：地表面に向けてレーザパルスを発射し、反射光を受信する装置

GNSS：Global Navigation Satellite System

衛星測位システム 航空機の位置を人工衛星により測位する装置

IMU：Inertial Measurement Unit

慣性計測装置 航空機の姿勢（傾き、回転）を計測する装置

記録制御装置：上記の機器を制御し、取得したデータを記録する装置

(3) フィルタリング（点群データの分類）

航空レーザ測量で得られた点群データは、空気中のちりやごみ、雲、雨、水蒸気、樹木や植生、建物、橋梁など、あらゆる物体にレーザ光が反射して返ってきた点の全てが含まれる。また、地表面より低い位置に乱反射したエラー点が存在することがある。これらの点群データより、データの作成者が必要とする主題に応じて点群を分類するフィルタリングと呼ばれる工程を行う。通常、地盤にレーザ光を照射し地形情報を取得することが目的の為、地盤点と地盤点以外の点を分類して利用される。森林資源の解析を目的とする場合は、樹木の高さを抽出する際に支障となる鉄塔や送電線を分類し、利用する場合もある。文化財調査を目的とする場合は調査対象の形状を詳細に取得できるよう、特に注意深い分類が求められる。山城の地形や人工改变地、石垣分布の把握にも利用されている。

① TerraScanによる自動フィルタリングアルゴリズム

フィルタリングは、地盤点の抽出であれば、ある程度自動処理により分類ができるが、自動分類でどこまで地盤点が正しく分類できるかによって、自動フィルタリング後に行う手動フィルタリングの工程にかかる時間と手間、分類精度にも影響する。

処理のアルゴリズムは様々なものが研究されているが、航空レーザデータの処理に国内外で多く用いられているTerrasolid社の航空レーザデータ処理ツールのTerraScanで採用されている自動フィルタリングアルゴリズムを紹介する。

TerraScanは、航空レーザ点群データを処理し、地表面モデル（DEM）や表層モデル（DSM）を作成するソフトウェアとなる。TerraScanの自動フィルタリングアルゴリズムは、以下のステップで行われる。各パラメータ（グリッドサイズ、角度・距離の許容範囲など）の数値を変更することで地盤として分類される点や分類エラーの量を調整できる。

1. 初期点の選点

点群取得範囲について、地表面の概略形状を捉えるために、指定したグリッドサイズでレーザ計測データがすべて収まるようにグリッドが設定される。各グリッド内で一番標高が低い点を抽出していき、初期の地盤点として分類する。TerraScanのパラメータとしては、Max Building Sizeとして定義されている。パラメータ名の通り、作業範囲内で想定される建物の最大サイズを設定することで、設定したサイズ以下の建物が地盤点として分類されることを避けることができる。例えばMax Building Sizeを50mとした場合、40m x 40mの建物は50m x 50mのグリッドが当てはめてグリッド内の最下点を抽出した際に、グリッド内の最下点は建物周囲の地盤の点が最下点となる可能性が高いので建物が検出されることを防ぐことができる。

2. TINモデルの生成

初期の地盤点から三角形の面を張ってつないだTINモデルを生成する。TIN (Triangulated Irregular Network)モデルとは、地表面を三角形の集合で表現するデータ構造のことで、地形を表現するために用いられている。日本語では、不整三角網、不規則三角網とも呼ばれる。この時点では初期の地盤点からTINモデルを作成している為、実際の地盤より低い位置にTINモデルが生成される。

3. 地盤点の探索

作成したTINモデルから角度と距離の許容範囲を指定し、次に採用する点を探索する。ここで許容範囲内にある点の中から最も低い点を次の地盤点として採用する。

続いて、採用された地盤点を含めて再度TINモデルを生成して、この処理を繰り返し、地盤点の探索を繰り返すことで、地表面の点群の抽出を行う。

ここでの角度の指定は、次に検出する点にTINモデルを作成する条件として既に採用された点との角度の許容範囲で指定する。Terrain Angleというパラメータで指定することができる。地面の地形は急激に変化することは少なく、滑らかに地面がつながっていること、建物などの人工物は地面から垂直に立ち上がっていることが多いという特徴を利用して、角度が急激に変わる点は地面で無いとして採用されないように調整することができる。デフォルトの角度は88度となっており、ユーザーガイドでは範囲内に建物が無く自然物しかない場合は、想定される最大の地形傾斜に10度～15度を加えた値が推奨されている。

処理の終了条件は、TINモデルの辺の長さで指定でき、例えば3mを指定するとTINモデルの三角形の1辺の長さが3m以下になるまで地盤点の抽出を続ける。辺の長さを短く設定しておくことで抽出される点の量が多くなる為、利用目的に応じて出来るだけ多くの細かい地形形状を得たい場合は短くし、データを軽量化したい場合は長めに設定しておくことである程度取得する点の量をコントロールできる。また、短くした場合は不要な低い植生を取得してしまうリスクがあり、長くした場合は必要な起伏が失われる可能性がある。

② 手動でのフィルタリング

自動抽出では地盤点の抽出や点群の分類に限界があり、植生等の点が過剰に地盤点に分類される箇所や、地盤点に分類すべきところを地盤点として分類できていない箇所が発生する為、より高精度なデータが必要な場合は、手動で地盤点を抽出する必要がある。手動抽出に当たり、自動抽出後の地盤点データより、抽出された地形の状態を傾斜量や開度、陰影などを計算して作成した微地形表現図で地盤点の取得状況について検査を行い、手動での作業箇所を検討する。手動抽出は、航空写真オルソ画像や微地形表現図、点群を断面表示して確認した地形形状などを判断基準として、目視によりそれぞれのレーザ点がこういった箇所に当たった点か解釈して地盤点の抽出を行う。三次元の点群を直接確認して点群の抽出の良否を判断することは困難である為、いったん二次元で地形を表現した微地形表現図等を使用して判断することになる。そのため微地形の表現方法によりフィルタリングの精度も変わってくることとなる。周囲の点との傾きの量により色の濃淡を変化させて地形表現する傾斜量図は、ほとんどの微地形表現図で採用されている基本的な地形の特徴量となっている。突出点が1点だけある場合に有効となる

のは開度図で、開度図はある1点から指定した周囲の検索範囲内の視界の開き具合を計算し、その量により色の濃淡を変化させて地形表現する手法で、突出点や地形の凹凸が強調されるため、傾斜量図と重ねて使用することでフィルタリングの精度向上に有効である。

手動フィルタリングには、三次元CAD、点群処理ソフト、点群データを解釈するための地形形状の知識や経験などが必要となり、最終的に作成されるデータの品質に大きく影響するため、自動フィルタリングを補完する工程として重要な役割となる。

3. 航空レーザ測量を用いた石丁場の石材分布調査のデータを用いた石材抽出の有効性についての検証

(1) 東六甲石丁場の航空レーザ測量

西宮市で平成24年～平成28年度に実施された東六甲石丁場の航空レーザ測量を、現地で実施されたトータルステーション等による測量データと比較し、航空レーザデータの石材の検出状況について検証する。当時行われた航空レーザ測量では、石丁場の地形形状を得ることが主目的としており、個々の石材をすべて検出することは目的では無かった。そのため比較的大きな石材や概略位置を既に調査していた石材をフィルタリング時に検出し、その他の石材については現地測量で補完する方針で作業が行われていた。図1は航空レーザ測量の対象となった東六甲石丁場の航空写真オルソ画像と赤色立体図となる。対象範囲は樹木に覆われ、航空写真だけでは地表面が見えず、樹木下の地形情報を面的に取得できる手法の航空レーザ測量が有効なエリアとなっている。

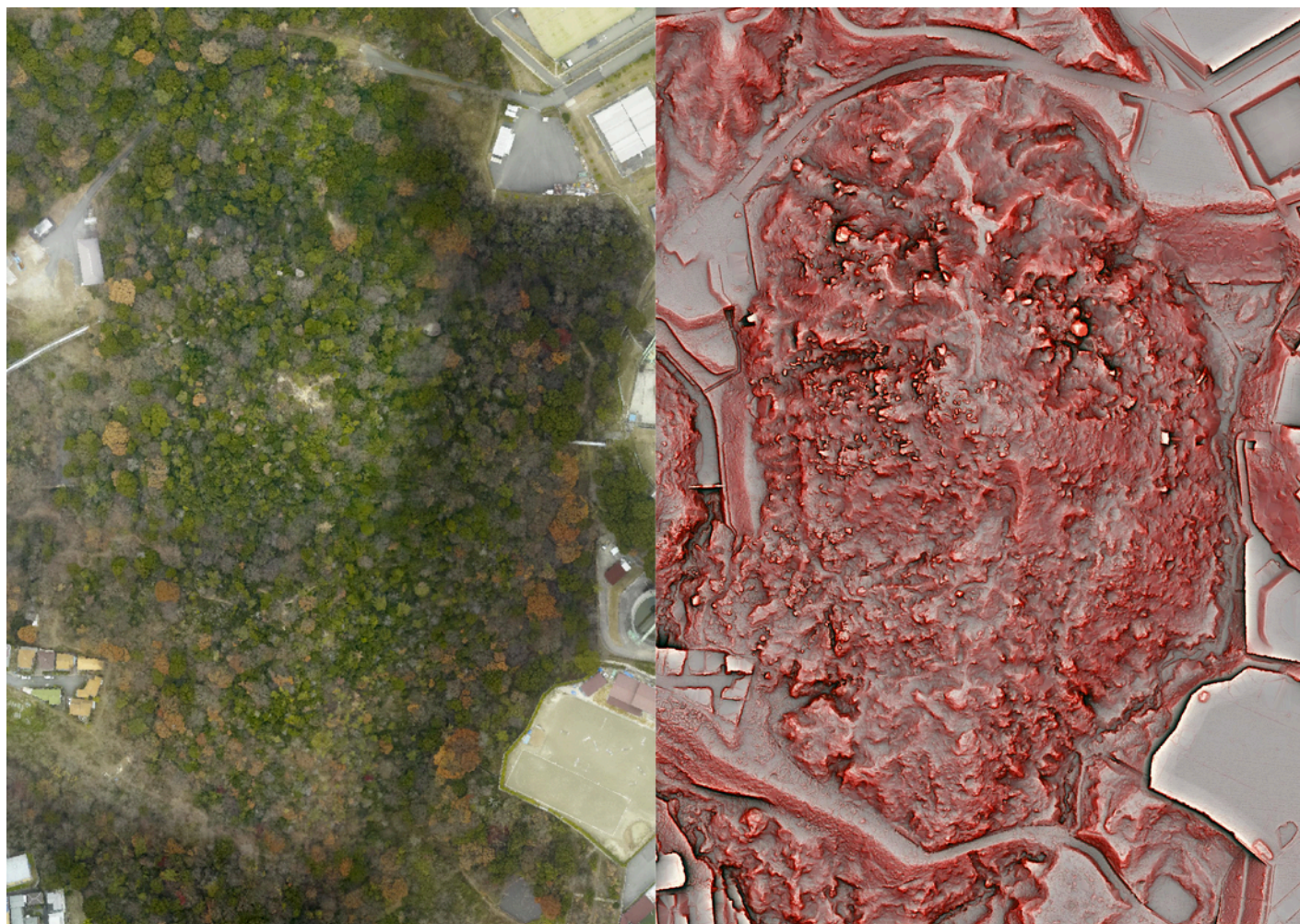


図1：東六甲石丁場調査範囲全体の赤色立体地図

本稿では、この調査で得られたデータを基に、航空レーザ測量データと現地測量結果を重ね合わせることで、当時検出できていなかった石材の再抽出を行い、航空レーザ測量でどの程度の石材が抽出できるか、潜在的な可能性を改めて評価したい。

地表面データの再抽出にあたっては、石材の現地測量結果の石材位置に石材を取得できている点群が無いかをCAD上で断面表示し、フィルタリングの良否を目視により確認を行った。石材だと判断できる点があった場合、点群を採用点として抽出した。また、既に点が取得できていた石材についても再度確認を行い、石材に照射されていると判断できる点をできるだけ多く抽出することとした。

図2に当時検出した石材を含む地盤点データから作成した赤色立体図と石材の再検出後の赤色立体図を並べた。山の中央付近、西側の谷沿いに新たに抽出できた石材が多く修正前からの変化が大きく出ることとなった。

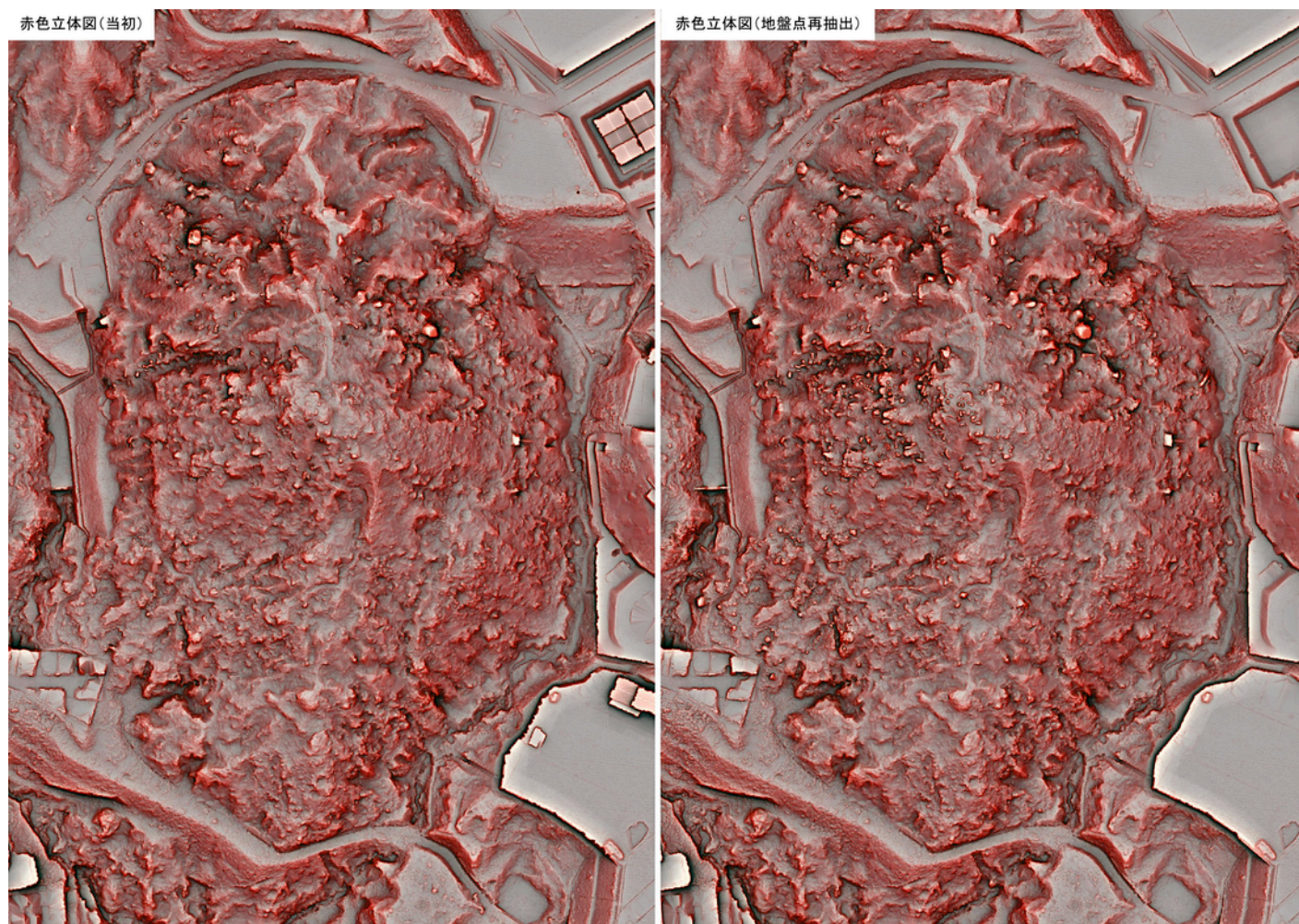


図 2：当初の赤色立体図と地盤点再抽出後の赤色立体図との比較（全体）

図 3 では該当箇所を拡大した結果を示す。画像中央部は石材の再検出により、新たに石材を検出できている箇所が多い箇所となった。

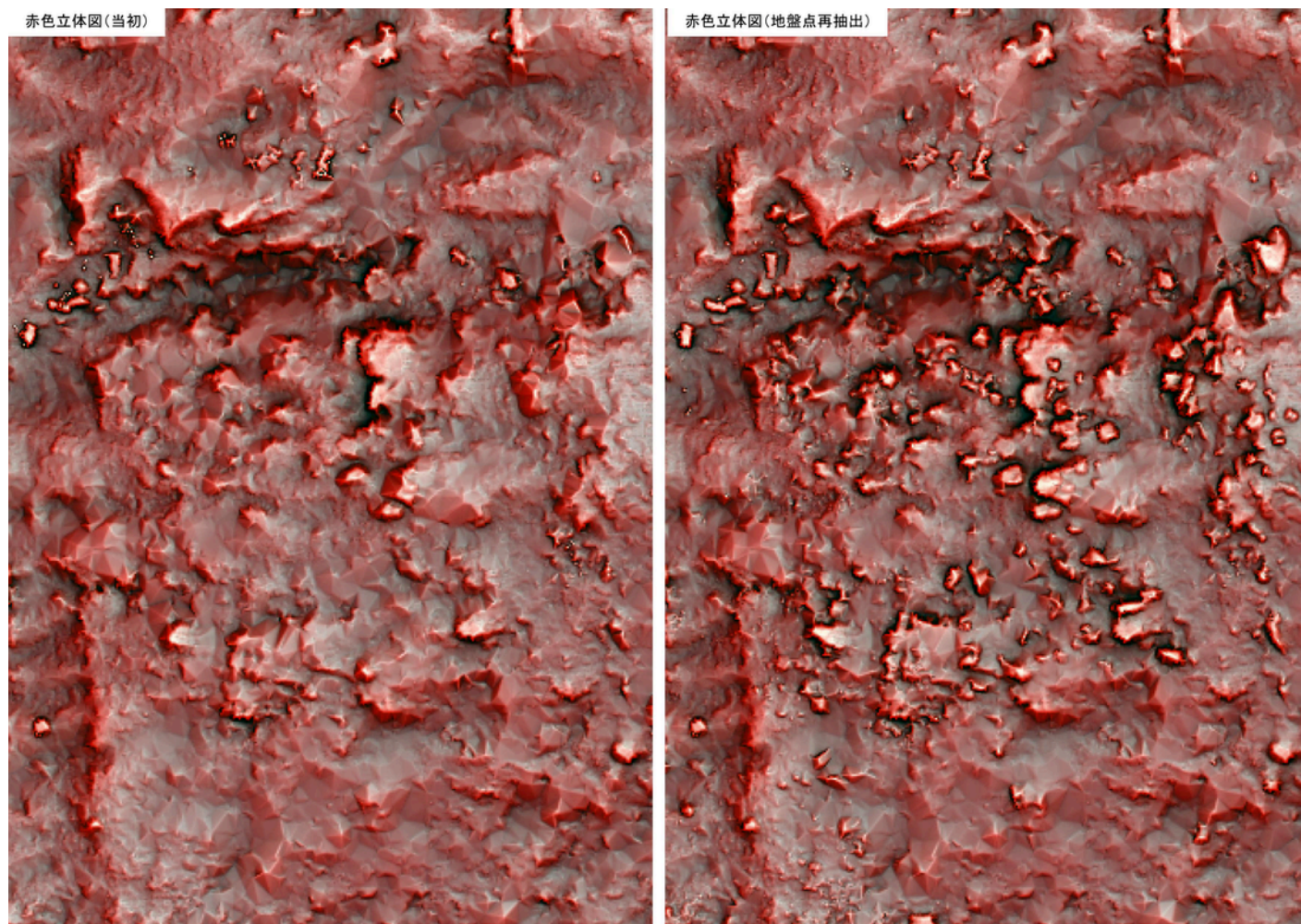


図3：当初の赤色立体図と地盤点再抽出後の赤色立体図との比較（拡大）

図4と図5は現地実測の石材データと地盤点再抽出後の赤色立体図を重ねたものを示す。図4は石材の検出率の高い箇所、図5は石材の検出率が低い箇所である。地面からの比高があり盛り上がっていて、大きさが大きいものが抽出できたが、小さめの石は点が取得できていない箇所が多い結果となった。

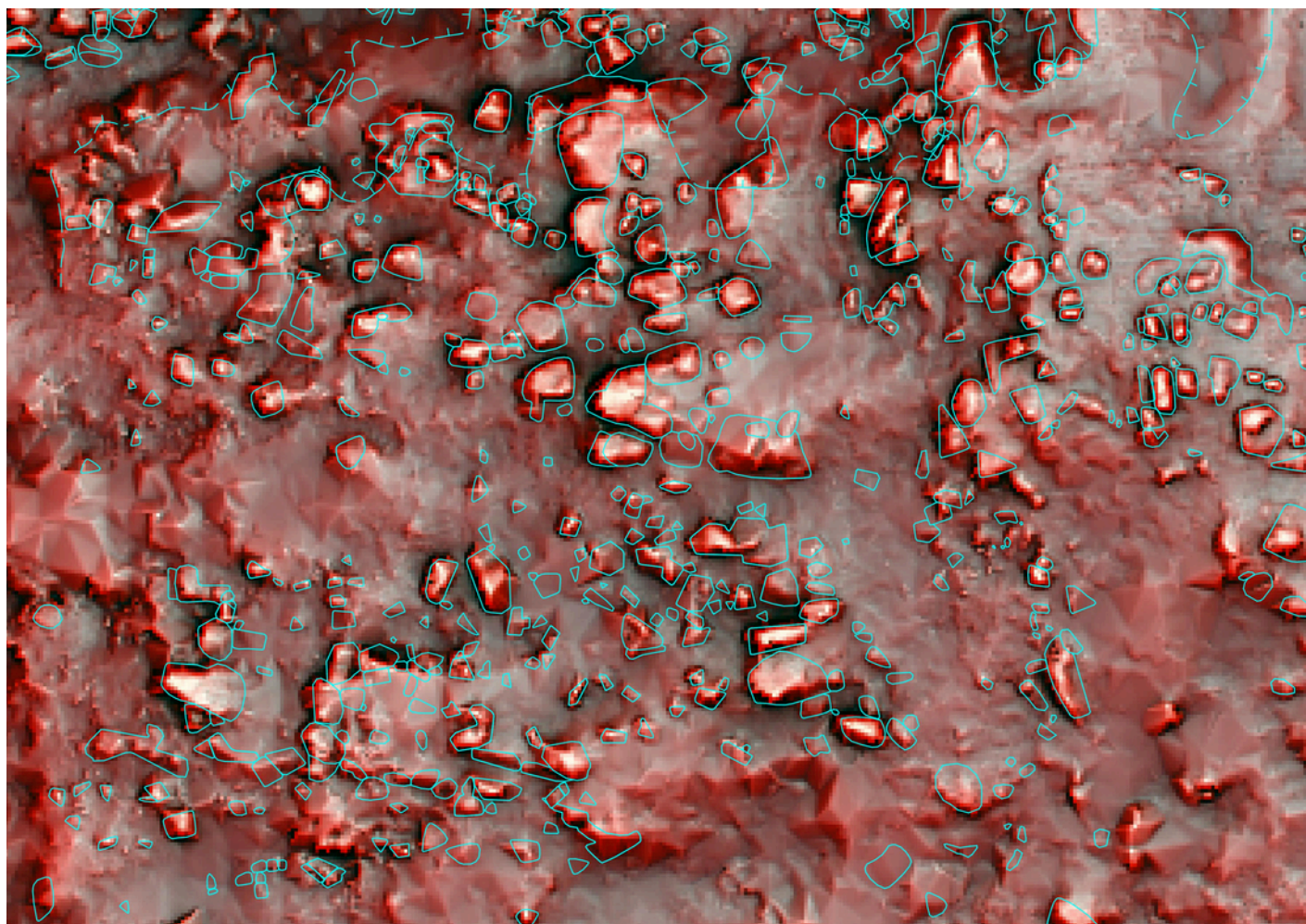


図 4：地盤点再抽出後の赤色立体図と現地実測データ（取得率の良い箇所）

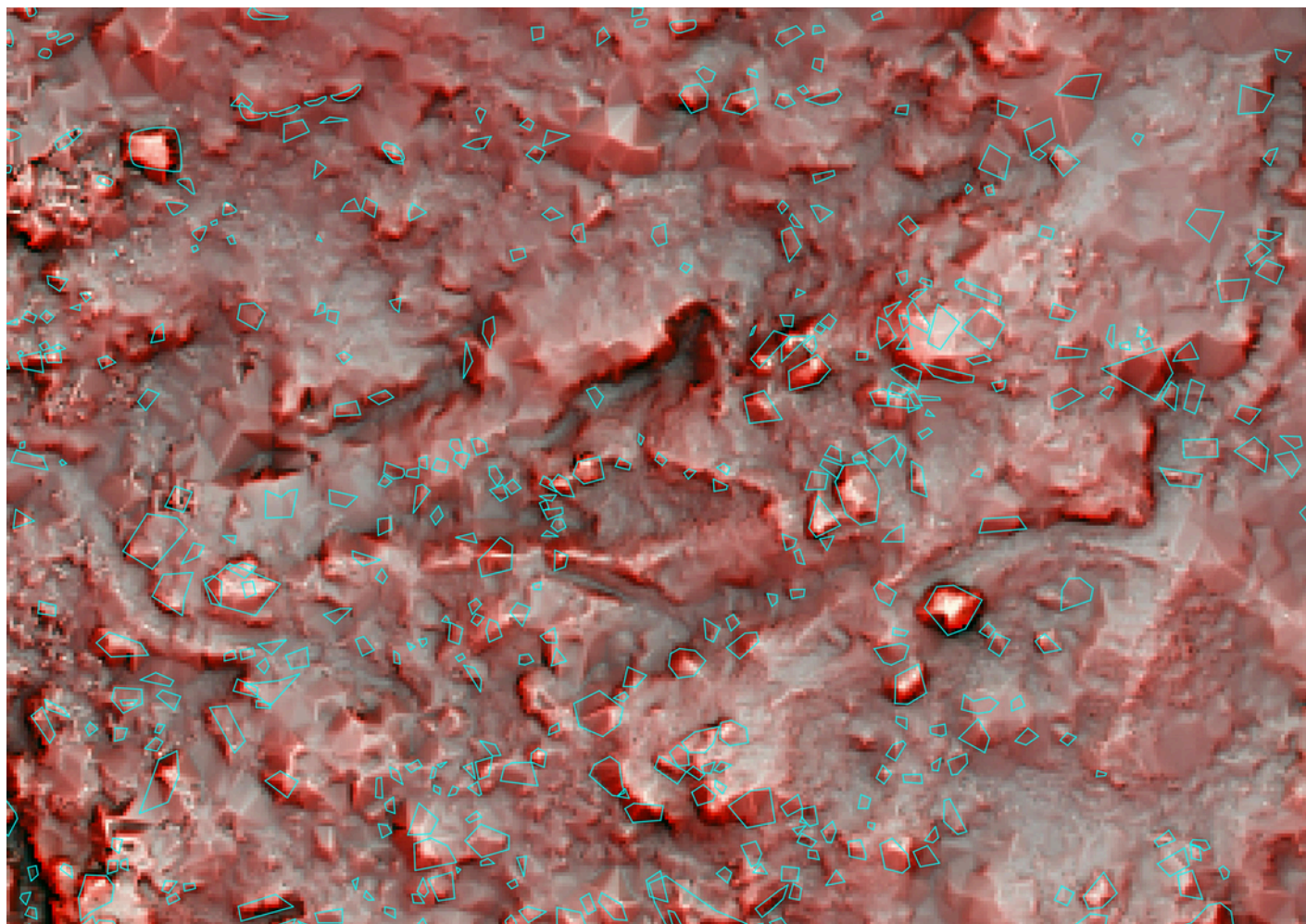


図5：地盤点再抽出後の赤色立体図と現地実測データ（取得率の悪い箇所）

次に個々の石材について、航空写真オルソ画像、赤色立体図、断面図を並べて表示し、石材の大きさと石材へのレーザ計測点の到達状況の違いについて分析した。図6～図10に状況を示した。

図6では、比較的一様な傾斜地で樹木の影響が少なく、密なレーザ計測点が取得できており、2.2m x 3.3mの石材が検出できていることが確認できた。

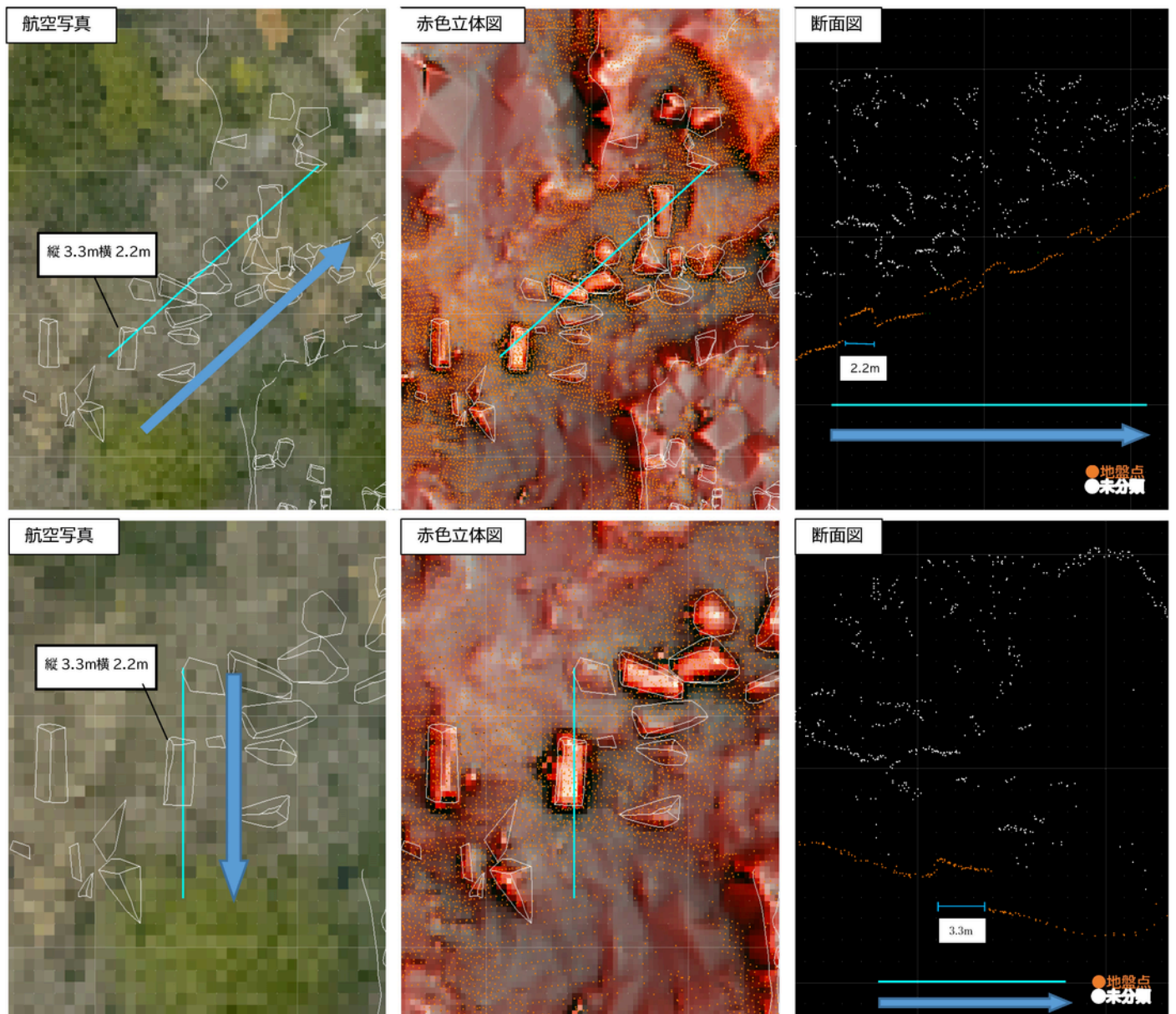


図6：石材の点群取得状況①（石材形状を詳細に取得できている箇所）

図7は比較的小さい石材になるが、石材の形状が比較的详细に取得できている箇所を示している。図7中段の石材では、0.9m x 1.4mの小型の石材が取得できている。航空写真を確認すると、該当箇所は樹木に覆われており、石材を確認することができないが、レーザ計測点が樹木の間隙を通過したことから、北西側の道路上には樹木が無い為、そちら側から斜めの照射角度で計測点が到達し、形状が取得できたと考えられる。

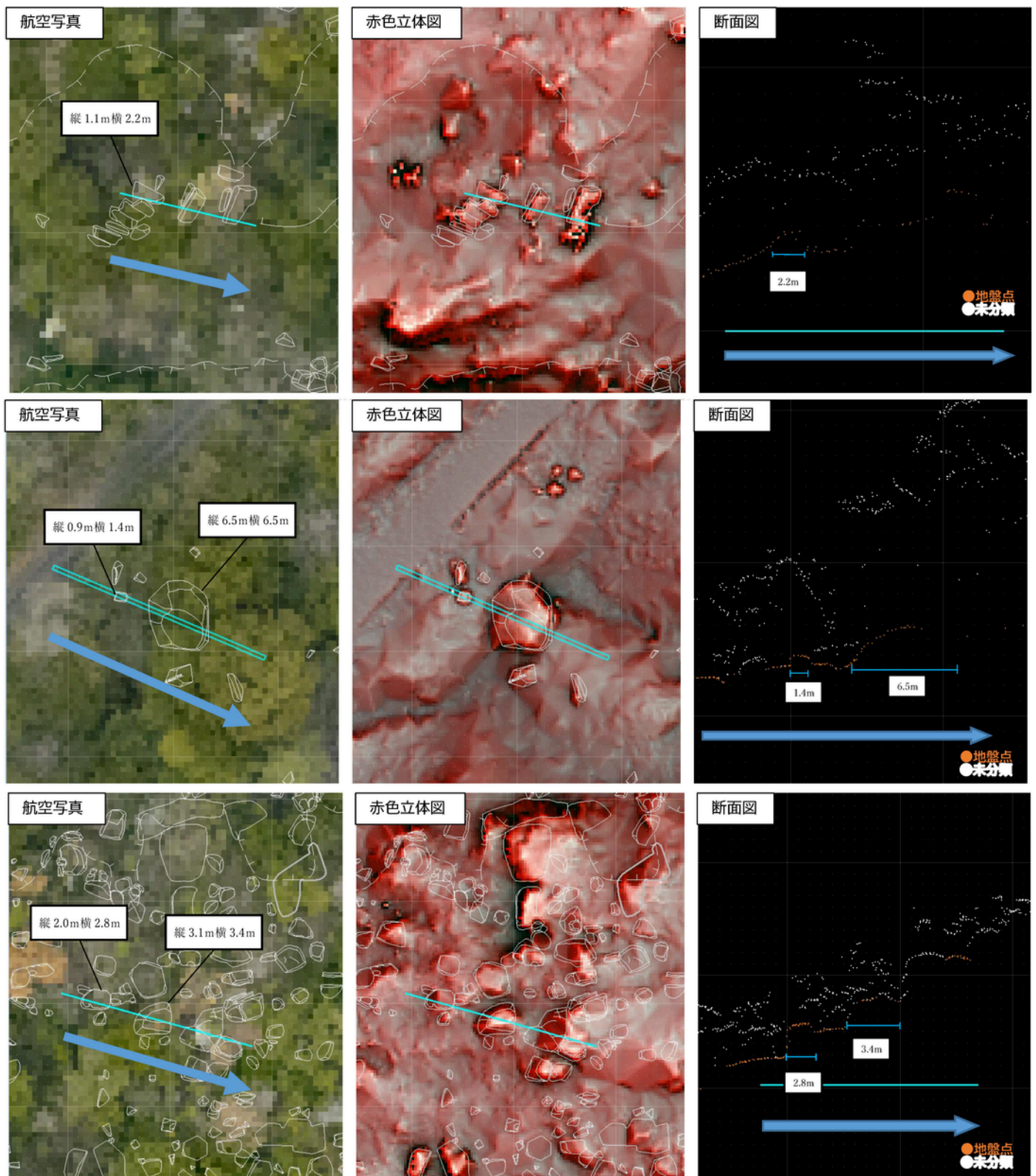


図 7：石材の点群取得状況②（比較的小さい石材の形状が取得できている箇所）

図 8 では、レーザ計測点が石材に全く到達しなかった箇所を示す。石材が小さいこともあるが、断面図から樹木の高さが周囲より高く、樹木の頂部でレーザ計測点が反射しその下には到達していないこと、航空写真から葉の密度が高くレーザ計測点が樹木下に抜けにくいことが確認できた。

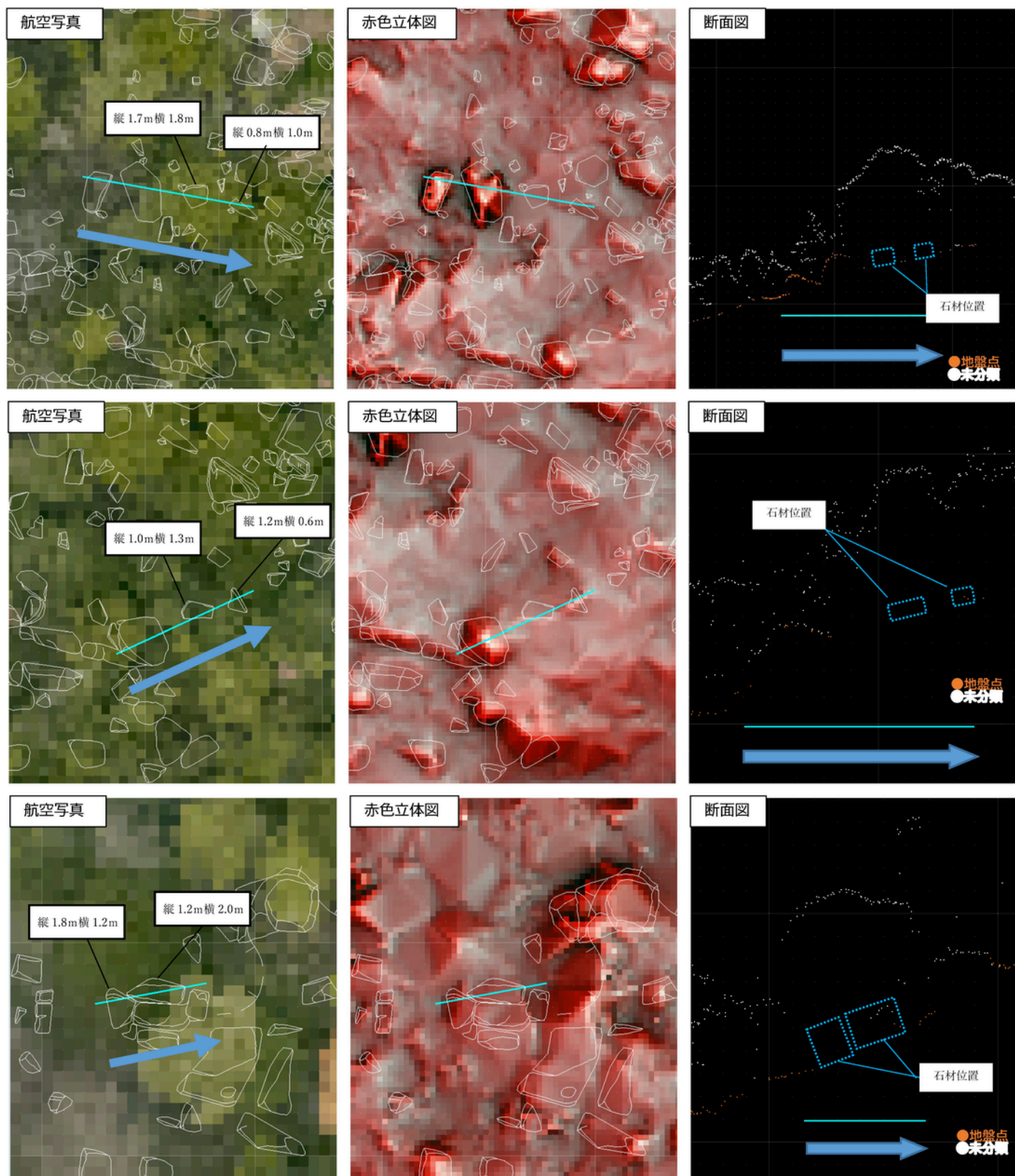


図8：石材の点群取得状況③（2m未満の小さい石材が取得できなかった箇所）

図9の2か所の石材は同程度の大きさになるが、上段はレーザ計測点が取得できており、下段はレーザ計測点が取得できていない結果となった。上段は地形が谷部で照射角度が限られ、樹木に覆われていて石材が確認できない為、一見すると石材形状が取得しづらい条件に見えるが、周囲の樹木高が比較的 low、航空写真上での樹木の色合いがグレーに写っていることから葉の密度が低いことで、レーザ光が地表面に到達しやすく、石材の形状が取得できていることがわかった。

下段の箇所については、周囲の樹木高が高い、航空写真から葉も多く、樹木の幹にも近くレーザ計測点が到達しにくい条件であることがわかる。

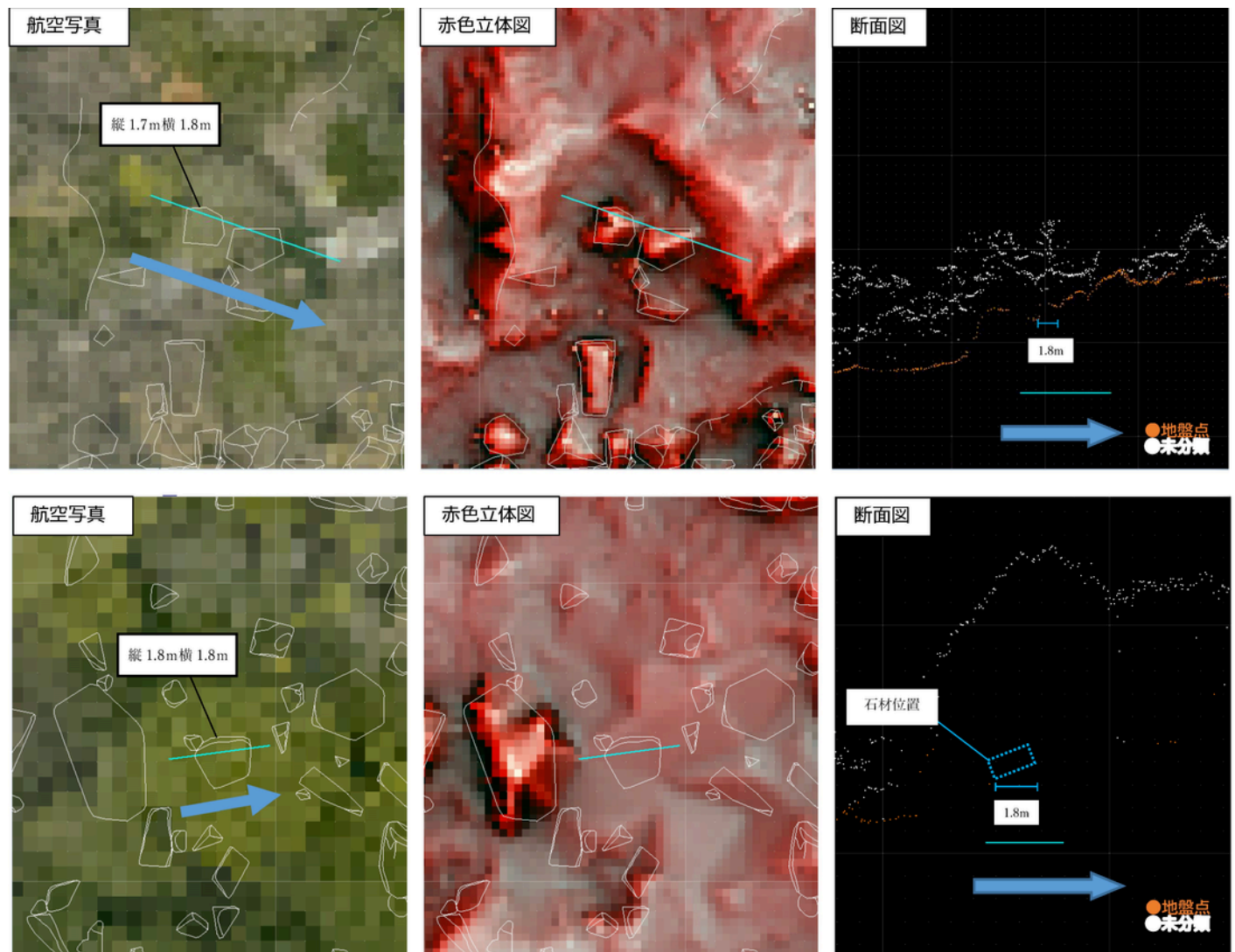


図9：石材の点群取得状況④（樹木の影響による比較）

図10は1m未満の石材の状況を示す。1m未満の石材はサイズが小さすぎてレーザ計測点が到達せず検出ができなかった。

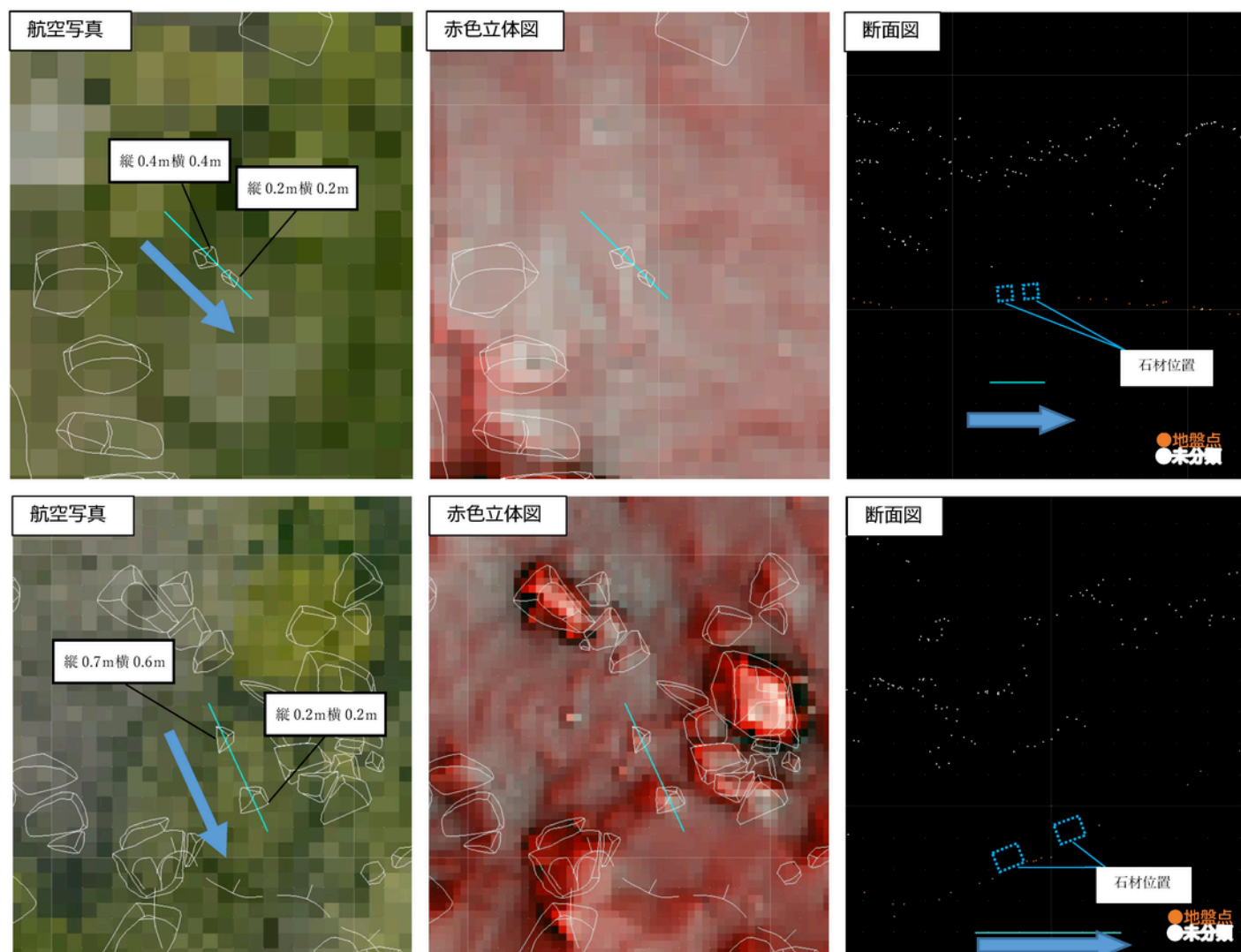


図10：石材の点群取得状況⑤（1m未満の石材）

(2) まとめ

本稿では、航空レーザ測量の概要を述べ、フィルタリング処理の手法や注意点、石丁場の石材分布調査における石材の検出精度について紹介した。また、東六甲石丁場の石材形状の復元状況から、樹木の影響や石材のサイズがレーザ計測点の密度に与える影響を示した。

東京都や静岡県など航空レーザ測量をオープンデータ化する事例があり、文化財調査のために航空レーザ測量を行わなくても、オープンデータ化された航空レーザ測量データを活用した調査も可能となった。しかし、航空レーザ測量の目的が多様であるため、取得されている点密度や位置精度もばらつきがある。そのため今後の検討事項として、どのようなデータが取得されており、どのような目的で活用で

きるかを検証していく必要がある。また、航空レーザ測量で抽出できないものを補うために、iPhone-LidarやLidar-SLAM、SfM技術などを活用することで、効率的な調査を行うことも有効であると考えられる。本稿が文化財調査における航空レーザ測量の活用の検討の参考となり、文化財調査における効率的な記録や研究に貢献できれば幸いである。

2025-03-03 「図1：東六甲石丁場調査範囲全体の赤色立体地図.jpg」 『文化財データリポジトリ 小西健三「石丁場の石材分布調査における航空レーザ測量の有効性についてー現地測量データを用いた石材の抽出と比較検証ー」『デジタル技術による文化財情報の記録と利活用7』』 奈良県 奈良文化財研究所
<https://sitereports.nabunken.go.jp/cultural-data-repository/99>

2025-03-03 「図2：当初の赤色立体図と地盤点再抽出後の赤色立体図との比較（全体）.jpg」 『文化財データリポジトリ 小西健三「石丁場の石材分布調査における航空レーザ測量の有効性についてー現地測量データを用いた石材の抽出と比較検証ー」『デジタル技術による文化財情報の記録と利活用7』』 奈良県 奈良文化財研究所 <https://sitereports.nabunken.go.jp/cultural-data-repository/99>

2025-03-03 「図3：当初の赤色立体図と地盤点再抽出後の赤色立体図との比較（拡大）.jpg」 『文化財データリポジトリ 小西健三「石丁場の石材分布調査における航空レーザ測量の有効性についてー現地測量データを用いた石材の抽出と比較検証ー」『デジタル技術による文化財情報の記録と利活用7』』 奈良県 奈良文化財研究所 <https://sitereports.nabunken.go.jp/cultural-data-repository/99>

2025-03-03 「図4：地盤点再抽出後の赤色立体図と現地実測データ（取得率の良い箇所）.jpg」 『文化財データリポジトリ 小西健三「石丁場の石材分布調査における航空レーザ測量の有効性についてー現地測量データを用いた石材の抽出と比較検証ー」『デジタル技術による文化財情報の記録と利活用7』』 奈良県 奈良文化財研究所 <https://sitereports.nabunken.go.jp/cultural-data-repository/99>

2025-03-03 「図5：地盤点再抽出後の赤色立体図と現地実測データ（取得率の悪い箇所）.jpg」 『文化財データリポジトリ 小西健三「石丁場の石材分布調査における航空レーザ測量の有効性についてー現地測量データを用いた石材の抽出と比較検証ー」『デジタル技術による文化財情報の記録と利活用7』』 奈良県 奈良文化財研究所 <https://sitereports.nabunken.go.jp/cultural-data-repository/99>

2025-03-03 「図6：石材の点群取得状況①（石材形状を詳細に取得できている箇所）.jpg」 『文化財データリポジトリ 小西健三「石丁場の石材分布調査における航空レーザ測量の有効性についてー現地測量データ

を用いた石材の抽出と比較検証一」『デジタル技術による文化財情報の記録と利活用7』』 奈良県 奈良文化財研究所 <https://sitereports.nabunken.go.jp/cultural-data-repository/99>

2025-03-03 「図7：石材の点群取得状況②（比較的小さい石材の形状が取得できている箇所）.jpg」 『文化財データリポジトリ 小西健三「石丁場の石材分布調査における航空レーザ測定の有効性について一現地測定データを用いた石材の抽出と比較検証一」『デジタル技術による文化財情報の記録と利活用7』』 奈良県 奈良文化財研究所 <https://sitereports.nabunken.go.jp/cultural-data-repository/99>

2025-03-03 「図8：石材の点群取得状況③（2m未満の小さい石材が取得できなかった箇所）.jpg」 『文化財データリポジトリ 小西健三「石丁場の石材分布調査における航空レーザ測定の有効性について一現地測定データを用いた石材の抽出と比較検証一」『デジタル技術による文化財情報の記録と利活用7』』 奈良県 奈良文化財研究所 <https://sitereports.nabunken.go.jp/cultural-data-repository/99>

2025-03-03 「図9：石材の点群取得状況④（樹木の影響による比較）.jpg」 『文化財データリポジトリ 小西健三「石丁場の石材分布調査における航空レーザ測定の有効性について一現地測定データを用いた石材の抽出と比較検証一」『デジタル技術による文化財情報の記録と利活用7』』 奈良県 奈良文化財研究所 <https://sitereports.nabunken.go.jp/cultural-data-repository/99>

2025-03-03 「図10：石材の点群取得状況⑤（1m未満の石材）.jpg」 『文化財データリポジトリ 小西健三「石丁場の石材分布調査における航空レーザ測定の有効性について一現地測定データを用いた石材の抽出と比較検証一」『デジタル技術による文化財情報の記録と利活用7』』 奈良県 奈良文化財研究所 <https://sitereports.nabunken.go.jp/cultural-data-repository/99>