# 超細密レーザ測量データを用い た比叡山延暦寺西塔北尾谷堂舎・ 山坊基礎遺構検出法の検討

竹島喜芳 ——— \*1 早川紀朱 ——— \*2

キーワード: ドローン LiDAR,盛土,礎石,基礎遺構,地表状況図, 比叡山延暦寺

### Keywords:

Drone LiDAR, Earth mound, Foundation stone, Building base remains, Ground surface roughness map, Hieizan-Enryakuji

# 1 はじめに

比叡山延暦寺は1200年以上の歴史の中で、日本仏教各宗各派の高 僧を輩出した「考える場、思考を鍛える場」であった。しかし、その 祖師方が思索を磨いた十六の「谷」と、三千を数えたといわれる堂舎・ 山坊の存在はあまり知られていない。「谷」は比叡山延暦寺にとって 行政区であり、地形・眺望・生活・教学上の流儀・墓などを共有する コミュニティであった。我が国仏教界の祖師方も、谷の山坊で住まい、 学び、有弁につき、得度し、修行している<sup>1)</sup>。このことから、著者ら は、谷の空間特性や相互のネットワークが、祖師方の思索に少なから ぬ影響を与えていたのではと考え、三塔に存在した近世堂舎・山坊の 空間構造の解明に取り組むことにした。ところが、明治以後、多くの 堂舎・山坊が廃絶し、その分布すら不明となっており<sup>2)</sup>、現在は堂舎・ 山坊跡と推定される削平地のみが棚田のように残り、ある削平地は樹 冠で覆われた森林に埋没し、別の削平地は土砂に埋まったり、浸食さ れたりし、自然に還りつつある。一方、その1200年にわたる比叡山 の歴史を明らかにする試みが、武<sup>1)2)</sup>、海野ら<sup>3)</sup>により広範囲にな されてきたが、堂舎・山坊が構成していた空間特性や谷相互のネット ワークの解明には至っていない。そこで著者らは近年、地形測量や BIM (Building Information Modeling) などで利用されてきているレー ザ測量技術を使って、三塔に存在した近世堂舎・山坊の解明に取り組 んでいる。

### 2 背景と目的

著者らは、先に堂舎・山坊造成遺構の把握に細密航空レーザ測量<sup>注1)</sup> が有効であることを示した<sup>4)</sup>。そして次の課題として、削平地のうち、 堂舎・山坊を配していた削平地を特定し、そこに存在した堂舎・山坊 の大きさ・形・方位などの把握を試みることにしている。そこで今回、 堂舎・山坊遺構として削平地に現存する盛土・礎石に着眼し、超細密 LIDAR データによってそれらをどの程度検出できるか、データ解析及 び現地確認によって、その技術の可能性を検討した。

比叡山脈に属する地塁上に現存する近世の建築事例から、浄土院拝

# EXAMINATION OF DETECTION BUILDING BASE REMAINS USING ULTRA-FINE LIDAR DATA ON HIEIZAN-ENRYAKUJI

Kiyoshi TAKEJIMA — \* 1 Noriaki HAYAKAWA - \* 2

Hieizan-Enryakuji has played an important role in Japanese Buddhism. While there were once many temples and monks' houses in the mountainous forests. But now, most of them are abandoned or moved. To unveil the location of temples and monks' houses, Ultra-Fine Lidar data - average point density is about 7,000 points per square meter, was used for the detection of them focusing of Earth Mound and Foundation Stone. We could confirm that Ultra-Fine topographic roughness map and Ultra-fine ground surface roughness map could be the useful tools for the detection of them.

殿(万治4年~寛文2年、1661~1662年)<sup>5)</sup>と曼殊院書院(明暦2年、 1656年)<sup>6)</sup>の基礎形式を図1に示す。双方ともに、縁束と側柱の中 間から盛土を設けている。例として寸法を示すと、曼殊院書院では柱 礎石天端は縁束礎石天端よりも3.8寸(約11.4cm)高くなっており、 その高さ分だけ盛り土されている。盛土の高さや平面的な位置、葛石 や地覆石、狭間石、溝の有無などのディテールは多様なものの、同時 期の比叡山上の堂舎・山坊も、こうした盛土により雨水の床下への侵 入を防いでいたものと考えられる。盛土・礎石の検出が出来れば、存 在した堂舎・山坊の大きさ・形・方位などをある程度把握することが 可能であると考えている。



図 1. 左図:浄土院拝殿、右図:曼殊院書院

# 3 方法

先行研究で使用した 50 点 /m<sup>2</sup>程度の細密航空レーザ測量データから作成した空間分解能 50cm の微地形図では、図2のような礎石の



自然石の分布の様子

<sup>\*&</sup>lt;sup>1</sup> 中部大学国際 GIS センター 准教授・修士(農学)

<sup>(〒487-8501</sup> 愛知県春日井市松本町1200)

<sup>\*2</sup> 中部大学工学部建築学科 准教授・博士 (工学)

<sup>\*&</sup>lt;sup>1</sup> Assoc. Prof., International Digital Earth Applied Science Center, Chubu Univ., M.Aer.

<sup>\*&</sup>lt;sup>2</sup> Assoc. Prof., Faculty of Engineering, Dept. of Architecture, Chubu Univ., Dr.Eng.

検出は明らかに不可能である。更に高密度な細密レーザ測量が必要と なる。そこで今回、ドローンにレーザ測量機を取り付け、比叡山の一 部で予備調査を実施し、スギ樹冠に覆われた多くの削平地でも、レー ザが地上に 30cm 四方に1点以上到達するデータ計測仕様の目安を得 て、三塔の計測を実施した。そして、そのデータから比叡山西塔北尾 谷部分を切り出し、特に礎石が明瞭に配置されていることから、先行 研究<sup>1)</sup>より着目してC削平地と称してきた削平地(図2)を詳細に検 討しながら、必要に応じて西塔北尾谷全体を対象に範囲を拡張し、盛 土・礎石の検出の可能性を整理する。図3に今回着目した場所を国土 交通省六甲砂防事務所所管赤色立体図上に示す。



図 3. 比叡山北尾谷及び B、C、Z 削平地位置図 (枠外数字は緯度経度 EPSG=4326)

### 3.1 盛土の検出方法

ドローン・レーザ測量データをフィルタリング(分類)して作 成する地面標高点群から作成する①TIN(Triangulated Irregular Network)、②超細密 DEM(Digital Elevation Model)、それを加工した ③超細密微地形図によって盛土の検出を試みる。ここで扱う超細密微 地形図は、超細密 DEM から傾斜を計算したものと、超細密 DEM か ら開度<sup>8</sup>を計算したものとを、地面の起伏を視認し易いように、配色 を試行・検討して着色したものをいう。

# 3.2 礎石の検出方法

前述ドローン・レーザ測量データを更にフィルタリングして加工した超細密地表状況図と、レーザ反射強度<sup>注2)</sup>をBernhard et.al.,<sup>9)</sup>らが 試した Luzum の手法<sup>注3)</sup>によって補正したデータの2つと、C削平地 の、林内でのドローン空撮から作成した正射投影図に、トータルステー ションを使って測量した礎石等の位置(礎石は4隅が測量対象だが、埋 没した角は非測量対象とした)を重ねたもの(図4:グランド・トルー ス<sup>注4)</sup>)とを突合し、礎石検出の可能性を検討する。

なお、ここで扱う超細密地表状況図とは、ドローン・レーザ測量デー タをフィルタリングして抽出した地面の高さから 50cm 以内の点群を 地表データとして更にフィルタリングし、この両者を礎石が視認可能 な地上分解能になるよう出力した画像データを加工して作成したもの をいう。50cm と区切ったのは以下の理由からである。C 削平地では、 礎石が地上から 20cm 以上突出していることはない。従って 20cm で フィルタリングすれば足るが、それだと礎石と立木等が見分けがつか なくなる可能性がある。そこで今回 50cm とした。DEM では草本や 岩などが除外されるが、超細密地表状況図では草本、岩、倒木などが 検出されることが期待できる。



(枠外数字は平面直角座標系 EPSG=2448 座標)

## 4 試料・データ加工

# 4.1 レーザ測量データ

今回計測したレーザ測量データは、Phenix LiDAR System 社の Ranger LR レーザ測量機(表1)を、ドローン<sup>注5)</sup>に搭載し、表2 の仕様で取得した。そのデータから、本検討の対象とした西塔北尾谷、 C 削平地のデータを切り出し使用した。

衣 レーリ別里倣江1	表 1.	レーザ測量	機仕権
------------	------	-------	-----

シュティタ	Phenix Lidar Systems		
シスプム石	Ranger LR		
レーザ光波長	1,350	nm	
測定距離(@60%反射率)	1,350	m	
パルスレート	750,000	点/秒	
精度(RMS@150m)	25	mm	
ビーム径	0.5	mrad	

表2. 観測日時・取得データ概要

計測日	2021年10月25日-29日、11月30日、12月1日		
天候	曇り または 晴れ		
平均飛行高度	110m(90m~140m)		
平均取得点密度 約7,000点/m^2			
フットフ゛リントサイス゛	4.5cm/5.5cm/7.0cm		
高度(90 m/110m/140m)			

レーザ測量では、照射されたレーザが、所定のビーム径で空間を通 過する間、複数箇所で地物にあたり、その位置データが計測される。 最初に返ってくるものは First Pulse、最後に返ってくるものは Last Pulse、途中で返ってくるものは Intermediate Pulse と呼ばれており、 1回の照射で1つの反射しか返ってきていなければ、Only Pulse とし て記録される。本対象地で計測された点群のオリジナルデータの一部 を図5に示す。上空に遮蔽物がないところは、1発のレーザ照射によっ

<ul><li>First</li><li>Intermediate</li></ul>			
<ul> <li>Last</li> <li>Only</li> </ul>			Å
- Only			
			in an the second s
			an a
The second se	Na she shift a companya (Marana (M	Å.	
		A CONTRACTOR OF THE OWNER OWNER OF THE OWNER	and the second

図 5. 樹冠を透過したレーザ点群のパルスの様子

て地面近くの1点が計測されるだけだが(図中赤点)、樹冠に覆われたところでは、1発の照射で、葉、幹、など複数の点の高さが計測されていることが分かる。

## 4.2 データ加工

## 超細密微地形図

得られた点群を、TerraSolids 社の TerraScan に 実装された Axelesson<sup>10)</sup>の地上点抽出アルゴリズムに6回かけ、全点群から地面 をフィルタリング(分類)した。処理に用いたパラメーターは森林地 帯の解析であることから、max building size(樹冠のサイズと読み替 えた)を10mとした以外は、Axelessonのアルゴリズムで推奨され ているパラメーターを用いた。その結果、図3の北尾谷全体では概ね 7,000 点 /m<sup>2</sup> で点群が計測され、そのうちの 12 点 /m<sup>2</sup> が地面に到達 していると分類された。一方、ドローンの飛行間隔を狭め、かつ十字 に飛行させ詳細に計測を行った C 削平地では、37,000 点 /m<sup>2</sup> の点群 が計測され、このうち23点/m<sup>2</sup>が地面に到達したと分類された。こ うした地面に到達した点群が、1m<sup>2</sup>に均等に分布していたと仮定す れば、1 点はおよそ 20cm から 30cm の地上分解能に相当する。そこ で、地上分解能 20cm の DEM を北尾谷全体で作成した。そして、そ の DEM から GIS ソフトウェアである QGIS で地面の傾斜を計算した。 また、DEM から GIS ソフトウェアである SAGA の機能の1つである Topographic Openess を 15(Radial limit)/ Sectors(方法)/3 (マルチ スケール係数)/8(セクターの数)のパラメーターで開度を計算し、 そこで生成された正の Openness 画像とを図6のように合成し、超細 密微地形図を作成した。





## 超細密地表状況図

前述 DEM の作成元となった地面の点群(図7赤点)から地上 50cm 以内の点群(図7緑点)を、全点群から全て抜き出したところ、 北尾谷全体では156点/m<sup>2</sup>が、詳細な計測を行ったC削平地では 4,555点/m<sup>2</sup>が、地面から50cm 以内の点群として抽出された。そこ でまずC削平地で、図7の緑点と赤点とを合わせた点群を地上分解 能3cm のラスターデータに出力し、そのデータから地物を含んだ地 表の傾斜を計算し、微妙な地面の起伏を視認し易かったピンク色のグ ラデーションで配色して超細密地表状況図を作成した。なお、点群を 3cm の DEM に出力する際、3cm 四方の空間には、標高の異なる複数 の点群が存在することがあるが、今回、3cm 四方に含まれる点群の



図 7. 点群の分類結果(地面と地面から 50cm 以内の点群) 標高の最高値を用いて作成した。

# 5 結果

# 5.1 盛土の検出

作成した超細密微地形図を一部拡大したものが図8である。下図に 白線で示したよう、削平地に人工的な形状をした盛土の形跡が確認で きた。



図 8. 上図: 超細密微地形図、下図: 視認できる盛土の位置・形状 (枠外数字は平面直角座標系 EPSG=2448 座標)

また DEM は、地上分解能を決めて作成するため、実測標高値が 計算値で置き換わることが多い。一方、TIN は実測値が使われ地面 の起伏が明瞭になる。そこで、C 削平地の微妙な地面の起伏を把握 するため、C 削平地で地面と分類された点群を抜き出し、ESRI 社の ArcMap10.8 で作成した TIN で、そうした起伏が表現できるよう、配 色に配慮し図 9 を作成した。その結果、C 削平地の盛土は二段で成り 立っている可能性があることも確認できた。

## 5.2 礎石の検出

C削平地の超細密地表状況図と礎石等の位置とを重ねたものが図 10である。例えば図中1、2、5、6、7、8等などでは、礎石の存在 を示唆する形状が見られ、グランド・トルースから、それらが10cm 程度地面から突出している礎石であることが確認できた。一方、図中



図 10. 超細密地表状況図から確認できる礎石 (枠外数字は平面直角座標系 EPSG=2448 座標)

に矢印で示した7に隣接している赤丸や11に隣接している赤丸は、 形状は礎石に似ているが、実際は近くの斜面から移動してきたと思わ れる自然石であった。また、15、16、17、18、21、28、27等は埋 没した礎石であり、形状から検出することはできなかった。

そこで、先行研究<sup>11)</sup> でレーザの反射強度が、地面を構成する素材 の状態によって異なることを確認していたことから、Luzumの手法<sup>注</sup> <sup>3)</sup> を用いて反射強度を補正し、礎石と思われる形状の地物から礎石を 検出しようと試み、図 11を得たが、礎石の絞り込みが可能なデータ とはならなかった。むしろ補正前では礎石の中心に、周りと比べて反 射強度が若干強いと思われる箇所(図 11 左図矢印部分)があったが、 反射強度を補正することで反射強度の差がなくなり、礎石の検出に使 える情報になり得なかった。

# 5 堂舎・山房遺構検出法に関する整理と考察

# ・盛土

盛土の検出は地上に到達する点群が2点/m<sup>2</sup>程度の航空レーザから作成する地上分解能50cmの微地形図でも把握可能なものもあるが、図12で比較するよう、地上分解能50cmでは、盛土の立ち上がりが鮮明に描画できず、盛土に気づき難いうえ、気づいたとしても盛土が小さめに表現される。また、右図Bのような人工的な造形に見える矩形の窪みは、地上分解能50cmでは描画しきれない。更に、右図のCは、自然石を積み上げた高さ20cm程の石垣だが、左図では、



図 11. 反射強度の補正結果(左:前、右:後) (枠外数字は平面直角座標系 EPSG=2448 座標)



図 12. 航空レーザによる微地形図(左)とドローンレーザに よる微地形図との盛土視認性の違い

そのような特徴的な地形は認識できない。このように、地上分解能が 50cmより20cmの微地形図を用いたほうが、当然だが、削平地の人 工物をより正確に捉えることができている。また20cm分解能で作成 したDEMから削平地のデータだけを抜き出せば、風化や崩壊が軽微 なら、図9のように盛土高、縁側や本堂の形状等などの盛土の構造も 特定できることが示唆され、古文書に形状の記述のない堂舎・山坊で も、その建物構造を理解する手がかりが得られる可能性があることが 分かった。

## ・礎石

超細密レーザ測量データから作成する超細密地表状況図を使えば、 地表から突出してさえいれば、たとえ樹冠下に埋没する礎石でも、形 状から図 10 のように検出可能であることがわかった。しかし、形状 だけでは、立木・岩・切株等なども礎石候補として検出される。その ことを承知で現地踏査を行えば、礎石発見に有効な手法となり得るが、 今回対象としている比叡山三塔を対象として広範囲に散在する削平地 上の礎石を、踏査によって特定することは現実的ではない。こうした ことから、踏査の効率を向上させるため、礎石候補からレーザの反射 強度を利用した絞り込みに期待をしていたが、森林に埋没した礎石の 検出では今回の反射強度補正法は有効ではなかった。このことは、レー ザが樹冠をすり抜ける間に、レーザ機器のセンサーでは感知できない 微小な枝葉によるレーザの減衰があるためだと思われる。この手法は、 レーザー機器と地物との間にレーザを遮るものが何もない場合にだけ 利用できる手法のようである。

そこで超細密地表状況図から視認できる礎石候補の地物から、反射 強度によらず、礎石の可能性の高いものを特定する方法として以下の

## 方法を試みた。

図10と図4と現地踏査から、超細密地表状況図で地表から尺角程 度の大きさで突起していると考えられる地物は、概ね礎石、自然石、 植生であることが分かっている。そのうち一部の自然石は、それを活 かし、礎石の代替物として使用することも考えられる。このことから、 超細密地表状況図の礎石候補から、植生部分を除外することができれ ば、効果的な礎石や礎石代替の自然石の絞り込みになり得る。この前 提に基づき以下の処理を行った。

礎石や礎石代替自然石は、地上 50cm 以下に収まっている。計測された点群のうち 0.5 ~ 1m の範囲に存在する点は、樹木の幹だと思われる。樹木は当然 0 ~ 50cm でも点が計測される。以上を考慮し、点群から地上 0.5 ~ 1m の部分を抜き出し、超細密地表状況図と重ねた。その結果が図 13 である。黒の部分が樹木と考えられる場所であることから、黒部分周辺を無視して残った突起物として認識できるものが、礎石や礎石代替自然石と考えて良さそうである。図 10 と図 13 とを比較すると図 13 のほうが礎石候補を視認し易くなっている。



図 13. 超細密地表状況図の上に地上 0.5 ~ 1m に存在する点群とを 重ねたものと、礎石や自然石の分布との比較

この方法が、他削平地でも適用可能か検討するため、西塔北尾谷で 他に礎石の存在が知られている<sup>3)</sup>C削平地上部のB削平地(図3参 照)で同様の方法で礎石候補の絞り込みを試みた。図14に超細密地 表状況図、図15に、図14上に地上0.5~1mの間に存在する点群 位置を重ねたものを示す。B削平地はC削平地と異なり、花崗岩を正 方形に加工した礎石は少ない。代わりに、尺角程度の大きさの自然石 を、その平らな面を上に向け並べたものが多い。図14だけでは、そ



図 14. B 削平地の超細密地表状況図の比較



図 15 B 削平地の超細密地表状況図と地上 0.5 ~ 1m に存在する点群と を重ねたものと踏査による礎石・自然石の確認結果

表 3. 各対象地のレーザー点群密度と作成した

地形図等の地上分解能概要

	点密度(点/m^2)		地上分解能		
	全	地上 (A)	地上から50cm 以内 (B)	超細密微地形図 (√ (1/A))を目安に設定)	超細密地表状況図 (2x√(1/B)を目安に設定)
C削平地	37,029	24	4,555	0.2m	3cm
B削平地	32,703	23	3,254	0.2m	3cm
Z削平地	6,871	12	156	0.2m(C,B に準じた)	15cm
<ul> <li>(参考)</li> <li>先行研究で使用した</li> </ul>	47	1.8		0.5m	



図 16. 西塔北尾谷で平均的な点密度で計測を行った Z 削平地での超細 密地表状況図と地上 0.5 ~ 1m に存在する点群を重ねたもの

うした自然石や礎石が判別しづらいが、図15のような図として示さ れれば、自然石・礎石と思われるものを超細密地表状況図から絞り込 むことができそうである。しかしながら、C削平地もB削平地も表3 のような高密度なレーザ測量を行っているため、こうした結果が得ら れた可能性がある。そこで、北尾谷で平均的な計測を実施した図3の Z削平地にも、上記手法を適応し、手法の汎用性を確認した。その結 果が、図16である。

図16のZ削平地は、C削平地やB削平地同様のスギ植林地だが、 両者と比較し、樹木が小さく立木本数が2つの削平地よりも多いとい う特徴がある。どれが礎石・礎石代替自然石なのか、立木と混在して いるため、判断に迷う地物が多く、もし地上0.5~1mに存在する地 物位置が、図のように示されていなければ、その削平地に多くの礎石、 あるいは自然石があるかに見える。こうしたことから、Z削平地でも この処理は、礎石・自然石の検出に有効な手段となり得るようである。

ところが、図中赤丸で示したところは、形から礎石と判別できるが、 踏査の限り、この削平地には礎石はなかった。こうした誤認は、デー タの点密度の違いによるものと思われる。すなわち、レーザ計測の点 密度が低くなるに従い、①樹木の幹に当たる点が減少し、地上0~ 50cmでは点が当たるものの、地上0.5~1mのところで当らなかっ たという状況と、②作成する超細密地表状況図の地上分解能も荒くし ていることから、礎石を構成する超細密地表状況図の画素数が数画素 (図16の場合、2x2画素)になり、礎石のような矩形の形状を発生さ せ易くしたのだと思われる。図中の赤マルをよく見ると、矩形の角が 不自然なほど東西南北方向で整っていることから、そういったことが 推定できる。

以上から、超細密地表状況図と地上 0.5 ~ 1 mに存在する点群 の位置を重ねれば、今回の場合、単位面積あたりのデータ点密度が 30,000 点 /m<sup>2</sup>以上あれば、礎石・自然石・植生から、礎石・礎石代 替自然石を絞り込むことができそうだが、7,000 点 /m<sup>2</sup> 程度の点密度 の計測ではそうした絞り込みは望めないことが分かった。

# 6 おわりに

超細密微地形図と超細密地表状況図では、図16のように検出でき るものが違う。前者を使えば盛土が、後者と地上0.5~1mに存在す る点群位置を重ねれば、堂舎・山坊が存在した場所を特定するヒント になる礎石や礎石代替自然石の位置候補を得られそうである。



図16. 超細密微地形図と超細密地表状況図が描画する地形の違い

一方、検出したい礎石や自然石のサイズと微地形図や地表状況図の 地上分解能、更には植生などの地上の被覆の状況とデータ計測条件に ついては更なる検討を行いたい。今回は様々な制約の中でそれらをア ドホックに決めてきた。しかし特に、超細密地表状況図の地上分解能、 すなわち取得された点群の密度と礎石候補を検出可能な地上分解能と の関係は、今後類似の調査に重要な知見を与えると思われ、特に定量 的な検証をする必要がある。また各種地図の配色や合成法なども多分 に改善の余地がある。それら課題については今後も引き続き検討して いきたい。

### 謝辞

比叡山延暦寺管理部山口弘湛氏には、貴重な文化遺産や多くの往来 がある世界遺産の比叡山でのドローン調査への理解を賜り、多くの便 宜をいただいた。また、ヤマハ発動機㈱森林計測部ソリューション開 発グループには厳しい条件でのドローン計測に理解・協力をいただ いた。国土交通省近畿地方整備局六甲砂防事務所からは航空レーザ測 量データの提供を受けた。ここに感謝申し上げる。なお、本報告は、 JSPS 科研費 JP21K04458 の助成を受け実施した。

## 参考文献

1) 武覚超:比叡山諸堂史の研究,法蔵館,2008.3

- 2) 武覚超:比叡山三塔諸堂沿革史,叡山学院,1993.3
- 3) 国立文化財機構奈良文化財研究所編:比叡山延曆寺建造物総合調查報告書, 比叡山延曆寺,2013.3
- 4) 早川紀朱,宮島明里,竹島喜芳:細密航空レーザ測量図を用いた比叡山三塔 造成遺構の把握の試み,中部大学工学部紀要,55巻,pp. 19-28,2020.3
- 5) 叡山延曆寺:比叡山延曆寺 建造物総合調查報告書,2013.3
- 6) 京都府教育庁文化財保護課:重要文化財曼殊院書院修理工事報告書,便利 堂,1953.3
- 7) 栗東市文化体育振興事業団編集:近江における山寺の分布:報告集,栗東市 文化体育振興事業団,(栗東市出土文化財センター講座,平成18年度忘れ られた霊場を探る:講演・報告会3),2008.3
- 8) 横山隆三, 白沢道生, 菊池祐: 開度による地形特徴の表示, 写真測量とリモー トセンシング, Vol.38, NO.4, pp. 26-34, 1999
- Bernhard Hofle, Norbert Pfeifer: CORRECTION OF LASER SCANNING INTENSITY DATA:DATA AND MODEL-DERIVEN APPROACH, Journal of Photogrammentry and Remote Sensing, Vol62, pp415-422, 2007
- Peter Axelsson: DEM GENERATION FROM LASER SCANNER DATA USING ADAPTIVE TIN MODELS, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol33, ISPRS, Amsterdam, pp. 110-117, 2000
- 11) 竹島喜芳,加藤薫,矢島準,松浦孝英,早川紀朱:レーザ測量の反射強度情報を用いた建物礎石検出法の検討-比叡山三塔山房遺構の把握に向けて-, 中部大学工学部紀要,57巻,pp.31-36,2022.3
- Luzum, B.J., Starek, M., Slatton, K.C.: NORMALIZING ALSM INTENSITIES, Geosensing Engineering and Mappint Center Report NO. Rep 2004-07-001, pp. 1-8, 2004.7

#### 注

- 注 1) 1m<sup>2</sup> 当たり合計およそ 50 点の地物の位置情報が計測され、比叡山ではそ のうち 2 点程度が樹冠を通過し地面に到達していた。
- 注2)地上に向けて照射されたレーザは、地物にぶつかり、レーザ測量機に戻っ てくる。レーザ測量では、そうして計測される地物の絶対座標が最も重要 なデータだが、レーザ測量機器によっては、レーザが返ってきときのレー ザのエネルギーの強さを座標と共に記録しているものもある。エネルギー の強さは、反射強度と呼ばれる。
- 注3) Luzum<sup>12)</sup>は、照射されたレーザが、途中の地物に遮られることがなく、照 射面が均一素材に同じ角度で当たったと仮定したとき、距離の二乗に反比 例して反射強度が弱くなると考えられることを利用し、反射強度の補正法 を提案している。本試みでは、Luzumが用いたレーザ測量機が異なるばか りか、計測対象や地物を取り巻く環境、計測目的が異なるため、全く同じ 方法を採用できないが、C削平地において、計測された点群のうち、パル スの種類が ONLY だけを点群から抽出し(途中に遮るものがないと読み替 え)、且つプラットフォームから地上への照射角度が 20° 以内のものだけ <sup>11)</sup>を対象に Luzum が行った反射強度の補正を試みた。
- 注4) C 削平地に散在する礎石と樹冠の間をドローン (DJI 社 Mavic Pro) の手 動操作によって空撮し (108 枚の画像)、Agisofot PhotoScanVerl.4.1 に てオルソフォトを作成した。このオルソフォトと、ドローン・レーザから 作成した超細密微地形図とを、ArcMap10.8 のジオリファレンス機能によ り相互参照し、オルソフォトの幾何補正及びジオコーディングを行った。 あわせて現地で、礎石は四隅、自然石は中心1点を、トータルステーショ ンで測量 (放射測量) し、そのうち超細密微地形図から現地測量と対応が とれた礎石の隅座標 (EPSG コード 2448)を使って相対座標であった測量成 果に、絶対座標を付与した。このオルソフォトとトータルテーションによ る測量成果をグランド・トルースとした。
- 注5)今回、比叡山山中200ha 以上の計測をするためには長時間飛行が必須条件 であることから、長時間飛行ができる本体重量80kgのガソリンエンジン を動力としたシングルローター(ヘリコプター)ドローンYAMAHA発動機 のFAZAR Rを使用した。

[2023年2月5日原稿受理 2023年8月14日採用決定]