

比叡山に存在した堂舎・山坊探索の試み ―ドローンレーザ測量の可能性評価

正会員 ○ 竹島 喜芳 1*
同 早川 紀朱 2**比叡山延暦寺 史跡調査 レーザ測量
ドローン 微地形図

1. 背景と目的

比叡山延暦寺は、日本史上、多くの傑出した高僧を排出し、我が国の政や仏教の普及に多大な影響を与えてきた。最盛期の延暦寺は、三塔十六谷三千坊と称されるほど多くの堂舎・山坊で構成されていたが、1200 年の歴史の中、信長の焼き討ちや明治の廃仏毀釈等の災難で、その多くが廃絶し、今ではそれらの分布すら分からなくなっている。急斜面の森林内に棚田のように存在する削平地が往時の栄華を彷彿とさせるが、振り返る者も少なく、衆徒たちが人生をかけて臨んだ修行の場は、徐々に自然に還りつつある(図 1)。そのような中、著者らは、堂舎・山坊の空間特性や相互ネットワークが、そこで修行する僧たちの感性や思想に影響を与え、永きにわたり高僧を産み出し続けてきた背景にあるのではないかと考え、かつて三塔に存在した堂舎・山坊の空間配置とその構造解明に取り組んでいる。その緒として、国土交通省六甲砂防事務所が行った航空レーザ測量(2014 年)から整えられた微地形図を活用し、比叡山山中に存在する削平地の把握を行った¹⁾。そして次の段階として、記録に残っている堂舎・山坊と削平地とを突合し、それらの相互ネットワークの解明に取り組むことにしている。しかし、起伏の激しい山岳地帯での全山踏査は現実的ではないうえ、先に使用した 2014 年取得の航空レーザ測量データでは、情報量が少なく、堂舎・山坊と削平地の対応付けは難しいように思われた。そこで著者らは、レーザ測量機器をドローンに搭載し、新たに計測を行うことにした。こうした背景の中、本研究では、今回取得したドローンレーザ測量データが、堂舎・山坊の空間構造の解明にどれほど有効であるかを検討する。

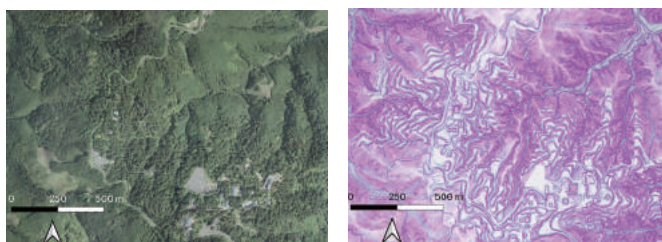


図 1. 比叡山延暦寺(東塔・西塔周辺)の様子

左: 空中写真(電子国土基本図)

右: 微地形図(六甲砂防事務所所管 2014 年航空レーザ測量より作成)

2. 方法

比叡山延暦寺三塔(東塔・西塔・横川)を構成する主要範囲約 570ha で実施したドローンレーザ測量データから地盤を検出し、DEM(Digital Elevation Model)を作成する。その DEM から微地形図を作成し、微地形図から視認できる削平地(堂舎跡)や山道が、実際のよう状況であるかを

現地踏査で確認し、航空レーザ微地形図と比較しながら、ドローンレーザ微地形図で視認可能な堂舎跡や山道がどのようなものであるか整理する。

3. 試料

3.1 データ計測

Phenix LiDAR System 社の Ranger LR レーザ測量機を Yamaha 発動機 FAZAR R に搭載し、2021 年 10 月 25 日～29 日、11 月 30 日、12 月 1 日で計測を実施した。計測は自動航行によって行った。航路は対地高度 110m を保って飛行し、取得点密度が 3,500 点/㎡となるよう設定した。

3.2 微地形図加工

ドローンレーザの点群は、TerraSolid 社の TerraScan に実装された地上抽出アルゴリズムによってフィルタリングした。その結果、概ね 9 点/㎡が地上に到達していたとされた。この 9 点が 1㎡に均一に分布すると仮定すれば、得られる地上分解能は 30cm 程度になる。それをふまえ、ドローンレーザデータから地上分解能 20cm で DEM を作成した(航空レーザは 1.81 点/㎡で 75cm 分解能に相当するが、一般的に同等仕様のレーザ測量では 0.5m 分解能の DEM が作成されている)。点群データとフィルタリングによって抽出した地盤データの概要を表 1 に示す。

表 1. 取得データ概要

	ドローンレーザ			(参考) 航空レーザ
	東塔	西塔	横川	西塔・東塔周辺抜粋
平均取得点密度 (点/㎡)	4130.08	3816.71	3406.88	49.38
平均地盤到達点密度 (点/㎡)	9.08	8.87	9.88	1.81
平均レーザ地盤到達率 (%: 1σ当換算で算出)	0.81	0.57	0.56	3.82
対象面積(ha)	214.99	172.10	187.77	24

その DEM から計算した傾斜図(ピンク)を透過率 50% として、開度図(青)2)に重ね、微地形図を作成した。

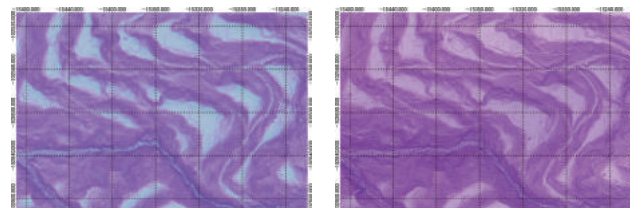


図 2. 航空レーザとドローンレーザの盛土視認性の比較

左: 航空レーザ微地形図、右: ドローンレーザ微地形図
図中の座標は、世界測地系平面直角座標系 6 系座標(格子間隔 60m)

4. ドローンレーザ微地形図と航空レーザ微地形図との比較

4.1 盛土

堂舎・山坊が存在していたことを示すエビデンスとし

て、微地形図の削平地上でときおり確認できる盛土に着目した。ドローンレーザ（2021 年本研究チーム計測）と航空レーザ（2014 年国土交通省砂防事務所計測）の微地形図から視認できる盛土の差異は以下のものであった。

ドローンレーザでは、人工的な形状の盛土が明瞭に視認できた。盛土は 10cm ～ 40cm 程度であった。一方、図 2 のように航空レーザでは、盛土と思われる箇所も確認できるが、盛土が不明瞭で、自然地形なのか人工地形なのか判別が難しい箇所もあった。

4.2 山道

二人が余裕を持ってすれ違うことができる幅員 2 m 程度の山道なら、図 3 左の航空レーザでも図 3 中のドローンレーザでも明瞭に識別できるが（例えば、図 3 中の箇所 A）、同じ幅員でも航空レーザでは識別が難しくなる場所も見られた。その結果、山道が途中で断絶したように見られる箇所も出現し、山道ネットワークを特定し難くなる箇所もあった（例えば、図 3 中の箇所 B）。さらに、余裕をもって二人がすれ違うことができない幅員が 0.5 m 以下の山道では、例えば図 4 左の航空レーザのように視認できない箇所もあった。

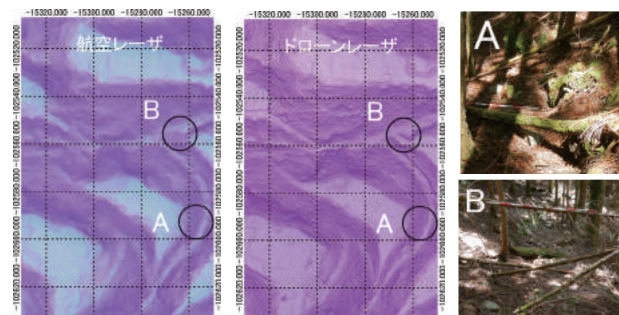


図 3. 航空レーザ・ドローンレーザでの山道視認性の違い

図中の座標は、世界測地系平面直角座標系 6 系座標（格子間隔 20m）

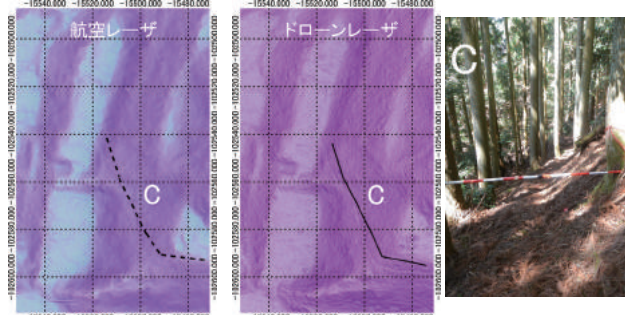


図 4. 航空レーザでは不明瞭な山道

図中の座標は、世界測地系平面直角座標系 6 系座標（格子間隔 20m）

5. ドローンレーザによる堂舎・山坊探索の可能性

超細密な測量が可能なドローンレーザから作成した微地形図は、盛土や山道のネットワークを効果的に探索するツールであることが分かった。そのみに留まらず、航空レーザからは分からない、図 5 中の箇所 D のような数段の石積や、石垣のような急激な傾斜変化点を明瞭に示している箇所も確認でき、人手をかけ維持しようと努めた建物や、建物の格に結びつく情報が得られることも分かった。

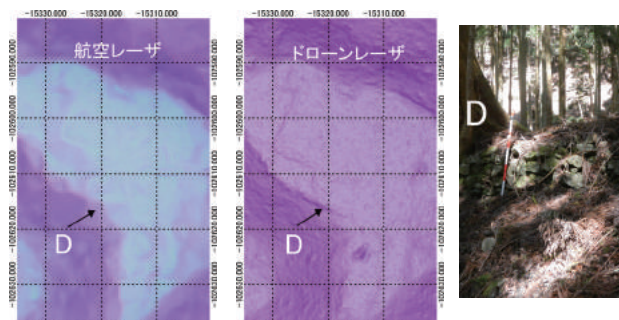


図 5. ドローンレーザから把握可能な削平地空間構造

図中の座標は、世界測地系平面直角座標系 6 系座標（格子間隔 20m）

ところで、表 1 のレーザの地上到達率が航空レーザとドローンレーザでは一桁違っている。そして、その解釈には注意が必要だと思われる。一般的にレーザの地上到達率は、フットプリントサイズやレーザの出力によって異なるが、今回の地上到達率の違いは、こうした違いより、むしろ両者の点密度が 100 倍近く違うことが原因だと思われる。即ち、点密度が低い航空レーザは、その点密度が低いゆえ、地面以外の石・草・落枝などに当たった点も、近隣に比較すべき低い点がないため、地面上の点と判断される。一方、点密度が極めて高いドローンレーザでは、近隣に比較できる計測点が多くあるため、地面とそれ以外の点を効果的に分別でき、石・草・落枝などは地面として抽出されない。その結果、見かけ上、地上到達率が低くなったと思われる。図 3B の幅員が 2m 以上あるにもかかわらず、山道として検出できていないのは、B を横断して横たわる倒木にしかレーザが当たらなかったためだと思われる。このことは、ドローンレーザ測量によって地面付近に大量に落ちる点群は、盛土という地面の起伏に関する情報以外に、地面近辺の地物に関する情報を包含していると考えられる。そうした情報をうまく引き出すことができれば、例えば、建物礎石や石仏、石柱等、盛土以外の削平地の属性を表す情報を得られる可能性がある。

6. 今後の展開

今回の知見を元に、地上分解能 30cm の微地形図で三塔の盛土調査を行う一方、盛土以外の削平地の属性を探索するデータ加工法を開発し、より精度と確度の高い比叡山山中に於て存在した堂舎・山坊の把握に努めたい。

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。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。本研究は、JSPS 科研費 JP21K04458 の一部として実施した。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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

*1 中部大学国際 GIS センター 准教授・農修

**2 中部大学工学部 准教授・工博

*1 Associate Prof., International Digital Earth Applied Science Center, Chubu Univ., M.Agr.

**2 Associate Prof., Faculty of Eng., Chubu Univ., Dr. Eng.