

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

－比叡山三塔山坊遺構の把握に向けて－

竹島喜芳^{*1}, 加藤薫^{*2}, 矢嶋準^{*2}, 松浦孝英^{*3}

早川紀朱^{*4}

The Feasibility Study to Detect Cornerstone using Intensity Data of LiDAR toward Comprehension of Lost Monasteries at Hieizan Enryakuji

Kiyoshi TAKEJIMA^{*1}, Kaoru KATO^{*2}, Jun YAJIMA^{*2}, Takahide MATUURA^{*3},

Noriaki HAYAKAWA^{*4}

(Received, February 21, 2022)

Established over 1200 years ago, Hieizan Enryakuji has played an important role in Japanese Buddhism. While there were once many temples and monks' houses in the mountainous forests, now most of them are abandoned or moved. Today, remnants of the temple's and house's earthwork remain under trees, though we do not know specifically where buildings were constructed on these tiered flat lands. One way to determine the locations of such buildings is to find their cornerstones. Since the area is vast, Lidar must be a useful tool for it. This study focuses on the intensity returns. To know the feasibility of Lidar intensity returns data for detecting cornerstones, two experiments were conducted. In the first experiment, the laser was directly irradiated to samples of cornerstones and soils in the lab. Through this experiment, the relationship between materials, their wetness, incident angle of the laser, and Lidar intensity was quantified. In the second experiment, the laser was directly irradiated to actual cornerstones and soils on site. As a result, it was found that cornerstones may be detected from the intensity data of Lidar when the cornerstone is dry, the soil conditions are wet enough, and the distance is constant.

1 背景と目的

比叡山延暦寺は開山以来、1200年以上にわたり多くの傑出した高僧を輩出してきた。著者らは、そのことと、かつて三塔十六谷三千坊と称えられた比叡山に配置された堂舎・山坊、そこに至る経路の空間的配置との関係解明を試みている。そして第一段階として細密航空レーザ測量図（地上分解能1m）を活用し、堂舎・

山坊が配置していた可能性のある比叡山山腹削平地（造成遺構）を古地図と比較しながら特定した（早川ら, 2020）。次段階として、削平地のうち、堂舎・山坊が存在した削平地を特定するため、削平地に今も残存する建物礎石の位置や配置を調査し、そこに存在した建築物の大きさ、用途、配置の推定を試みることにしている。しかし、全削平地を踏査・測量し、建築物の有無・配置を調査することは現実的ではない。一方、先行研究で用いた1点/m²の細密航空レーザデータでは、樹冠下且つ、林床の草本類に埋もれた尺角程度

*1 中部大学中部高等学術研究所

*2 ヤマハ発動機株式会社

*3 中部大学大学院創造エネルギー理工学専攻

*4 中部大学工学部建築学科

の礎石検出は不可能である。そこで、新たに超細密レーザ測量を実施することになっている。ところが、上空から照射するレーザの点密度を上げれば、測量される地表の凸凹から尺角程度の礎石検出は可能だと思われるが、地表面から辛うじて露出している礎石の検出漏れが見込まれる。したがって新たに超細密レーザ測量実施前に3次元情報以外を用いた礎石検出方法も検討しておく必要がある。そこで今回、特にレーザ測量で計測される3次元情報以外の反射強度に着目し、反射強度による礎石検出の可能性について検討した。

2 レーザ反射強度を用いた既往研究と本研究着眼

レーザ測量は、地物の3次元情報の取得を目的に利用されることが多い。しかし取得する情報は3次元情報以外にも、跳ね返ってきたレーザの反射強度を記録するものも少なくない。実際、この反射強度情報を用いて、土地被覆把握（長谷川, 2006）・樹種把握（中武ら, 2018; 朱ら, 2016; 坂田ら, 2016）・道路白線検出（長谷川ら, 2006）・遺跡調査（Challis et. al., 2011; Historic England, 2018）など、空から識別できる地物の属性把握が試みられている。しかし、空から確認できない、林床に散在する尺角程度の礎石を反射強度によって検出する技術の検討は未だ行われていない。ところが、著者らがレーザ測量技術改善を試行する過程で、図1のように、比叡山に類似したスギ人工林林床に残置した尺角サイズのレーザ測量用反射板（Timbertech社製 PFR-240L）は、樹冠かつ草本類に埋もれたものでも検出可能であることが分かった。このことから、礎石（花崗岩）と周辺土壌とレーザ反射強度との関係を調査することで、反射強度によって礎石の検出ができる条件や方法が見いだせる可能性がある。

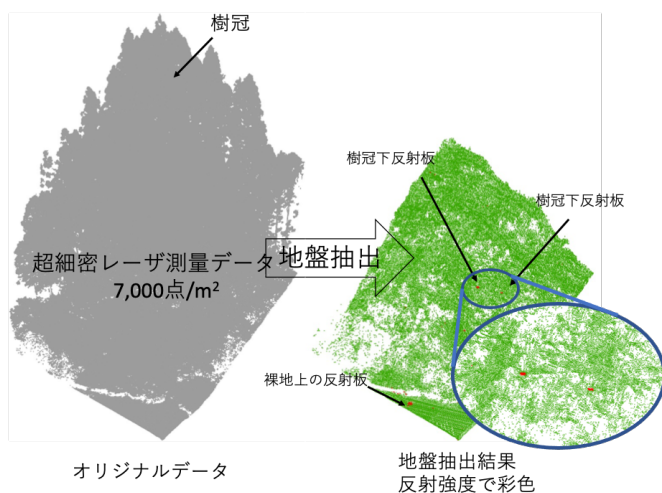


図1 樹冠下林床でも反射板は反射強度によって検出可能な様子

3 研究の流れ

レーザの反射強度と地物との関係を研究した前述試みは、実地のレーザ測量成果と現地状況とを突合し、反射強度と地物との関係を経験的アプローチによって結論づける方法で行われている。本研究ではそうした経験的アプローチを踏襲せず、以下の流れに従い、演繹的アプローチによる礎石検出法を検討する。具体的には以下の3ステップによって実施する。

第1ステップ：礎石（花崗岩：現地確認済み）や想定される比叡山土壌構成素材のレーザ光に対する基本的な反射強度の性質を把握するため、室内にて、実際のレーザ測量器からレーザを花崗岩サンプルや土壌サンプルに照射し、素材や素材の状態、そしてレーザの入射角との関係を把握する。以下、このステップを屋内実験と称す。

第2ステップ：礎石が残存する比叡山削平地に、第1ステップ同様の観測装置を設置し、実際の礎石や土壌・草本にレーザを照射し、礎石が検出可能か調査する。以下、このステップを屋外実験と称す。

第3ステップ：屋外実験の結果を、屋内実験の結果をもとに解釈し、少なくともどのような条件を満たせば、レーザ測量による反射強度から礎石が検出可能か、礎石検出の必要条件を考察する。

4 屋内実験・屋外実験の機材・試料及び実験方法

4-1実験装置

屋内実験：図2のように高さ2.7mの架台を制作し、架台上部に表1の仕様のレーザ測量器（Velodyne VLP-16）を固定した。レーザ測量器直下(0m)・1m・2m・3m・3.7mに試料を設置するための全長5.4mの床を型枠用塗装合板で用意した。今回レーザ測量器としVelodyneVLP-16を選定した理由は、当該機材が実際にドローンなどに搭載され、超細密レーザ測量に使われることがあるからである。VelodyneVLP-16が計測しデータは、機材に接続したパソコンに専用ソフトウェアで記憶される。

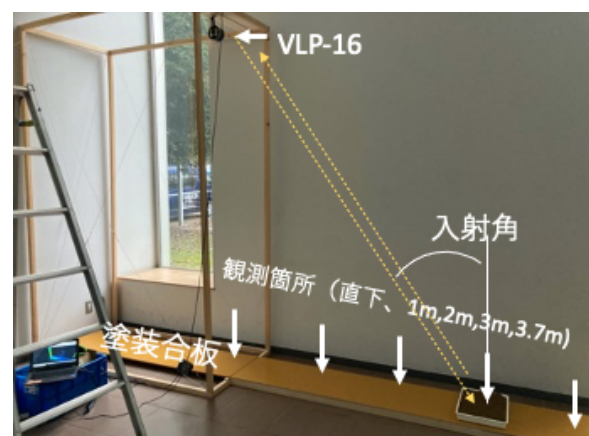


図2 屋内実験装置外観

表1 Velodyne社 VLP-16の主な仕様

レーザセンサ名	V L P - 1 6
センサータイプ	16個のレーザ+検出器
測定範囲	水平360° 全方位/垂直30° (+15° から-15°)
測定距離	0.5~100m
測定スピード	5~20 H Z
測定ポイント数	約300,000ポイント/秒
測定精度	±3 c m (1 σ @25m)
角分解能	水平0.1° ~0.4° /垂直2.0
多重サンプリング	Strongest, Last, Dualの3モード
レーザ波長	903nm

屋外実験：現在も複数の礎石が規則的に配列している比叡山削平地の任意礎石の直上2.7mに、レーザ測量器を固定するための架台を図3のように設置し、直下(0m)、2.1m、4.05mに配置している3つの礎石とその周辺地表と反射強度との関係が計測できるよう、架台の向きを調整し、実験機材を設置した。レーザ測量器及びその記録は屋内実験と同様である。

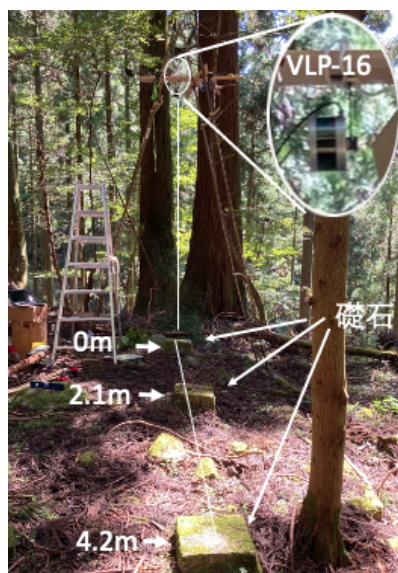


図3 屋外実験装置外観

4-2 試料

屋内実験：礎石素材として市販の尺角①御影石タイル（花崗岩：表面がざらついている仕上のもの）、考えられる比叡山土壌の構成素材として、市販の②腐葉土、③砂利、④真砂土（さば土；花崗岩が風化したもの）を使用した。なお、Velodyne VLP-16から照射されるレーザは近赤外領域の光であり、近赤外線は水によって吸収されることが知られていることから、①から④の素材は、それぞれ湿気が異なる状態でも計測することにした。湿潤状態は、御影石タイルの場合はレーザ照射直前に10秒間水に浸したものを使用し、その他の素材はビニールケースに保存されていた素材の開封直後のものを使用した。乾燥状態は、御影石は入

素材	御影石タイル	砂利（中粒）	真砂土	腐葉土
サイズ（mm）	300x300x12		300x450x40	
湿（水分量）	10秒間水に浸す	24.27%	37.01%	52.45%
乾（水分量）	（自然放置）	-	17.04%	-
試料 外観				

- 水分計（竹村電機製作所 DM-18）で計測不能（12.1%以下）

図2 屋内実験試料概要

手直後のもの、その他の素材は開封後約40日自然乾燥したものを使用した。なお、②③④の試料は30cm×45cmの厚さ45mmのプラスチック容器に容器厚と同厚の試料を入れて使用した。試料を表2にまとめた。

屋外実験：屋外実験は図4の矢印で示す削平地で行った。現地の礎石間隔は2.1mであった。室内実験と比べおよそ倍の間隔である。そこで、礎石と礎石の間に、室内実験で用いた御影石タイルを礎石代替試料として設置し、実験を行った。なお、現地は樹高が約20m程度のスギが成立本数約1,200本/haで生育し、林床は草本類が疎らに生え、現地の基岩を構成する堆積岩の岩が散在し、所々森林土壌が露出している状況であった。乾湿状態は、実験日の2日前に46mm、8-6日前に合計40mmの降雨があった（近隣大津市）が、実験日は雨水は地中に浸透し、地表表面は手で押しても水がにじまない程度に湿っていた（参考までに後日、同じような条件の日に水分量を計測したところ、水分量は53.1%（σ 4.65, n=13）であった、実験当日も同じような水分状況だと思われる）。

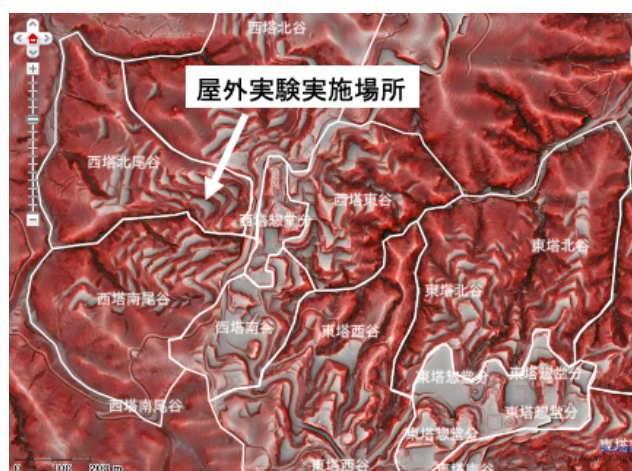


図4 屋外実験実施削平地位置（赤色立体図^{注1)} 上に表示）

4-3方法

データ計測方法

屋内実験では、試料の中心がレーザ直下から0m、1m、2m、3m、3.7mになるよう、試料を移動させながら、合計5回レーザ測量を行い、試料とレーザ反射強度を計測した。なおVelodyne VP-16の反射強度は0-255の数字の大小として強弱が記憶されるようになっている。

屋外実験では、礎石が2.1m間隔で3つ並んでいるが、間隔が広いと考え、直下から1.05m、3.15mの場所に御影石タイルを礎石代替として利用し実験を行った。まず、1度の計測で3つの礎石の反射強度を測定した。後に1.05m、3.15mの場所に御影石タイルを置き、それぞれの位置での御影石タイルの反射強度を計測した。

データ処理方法

屋内実験・屋外実験共に試料の位置は既知である。したがって、試料に当たった点群が特定可能である。そこで、屋内実験ではレーザに当たった点群の反射強度を全て集計し、反射強度の平均、最大、最小、第一四分位、第三四分位を計算し、素材とその乾湿、レーザ反射強度、入射角の違いを可視化した。屋外実験は、土壌や礎石が単一の素材で構成されていないため（土壌は森林土壌・落枝落葉・草本類が、礎石にはコケなどが付着しており）試料の状態が不均一であることから、屋内実験のような反射強度の定性評価は実施せず、礎石とその周辺土壌の定量的評価を反射強度で色分けした地図で行った。なお、入射角はレーザと試料の中心と床面とのなす角度を入射角とした。

5 結果

5-1屋内実験

素材が湿状態の実験は2021年9月7日午後3時から5時の間に、乾状態の実験は同年10月20日午後4時から6時の間に行った。

なお、各試料の反射強度特性比較のため、実験に先立ち反射板の反射強度を調査した。結果は図5のとおりである。反射板のレーザ反射強度は入射角約35°までは約200で推移し、35°を越えるあたりから減少傾向

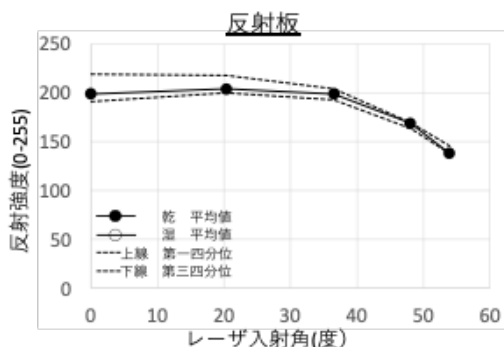


図5 反射板とレーザ反射強度との関係

向にあることが分かった。入射角度が50°を越えても反射強度は140程度あった。

・御影石と反射強度

御影石の入射角に対する反射強度を、乾湿それぞれ計測した結果、図6-(A)を得た。反射板の反射強度と比較すると、レーザ測量器直下の反射強度は反射板のその約25%であった。レーザ測量器直下では湿状態、乾状態ともに反射強度の平均はほぼ同じであった。しかし、入射角が大きくなるに従い反射強度は、乾湿それぞれ異なる減少傾向が見られた。その結果、反射強度は、入射角が20°を越えるあたりから、乾湿の違いで約2倍の開きが出るようになった。また反射強度のバラツキは、乾状態のほうが大きかった。

・砂利と反射強度

砂利の入射角に対する反射強度を乾湿それぞれで計測した結果、図6-(B)を得た。砂利の反射強度を反射板のそれと比較すると、湿状態の反射強度は直下で反射板の約7.5%、乾状態では約15%であった。また乾湿状態の違いで反射強度は約2.5倍違っていた。また、御影石の反射強度と異なり、入射角に伴う反射強度の減少傾向は御影石のそれに比べ緩やかであった。

・真砂土と反射強度

真砂土の入射角に対する反射強度は図6-(C)であった。真砂土の乾湿状態と反射強度との関係には、砂利と同じ傾向が見られた。湿状態の反射強度は直下で反射板の約7.5%、乾状態では約15%であった。また乾湿状態の違いで反射強度は約2.5倍違っていた。

・腐葉土と反射強度

腐葉土の入射角に対する反射強度を乾湿それぞれで計測した結果、図6-(D)を得た。反射板の反射強度と比較すると、湿状態の反射強度は直下で反射板の反射強度の4%、乾状態では10%であった。砂利・真砂土・腐葉土のうち腐葉土が最も反射強度の弱い素材であった。

5-2屋外実験

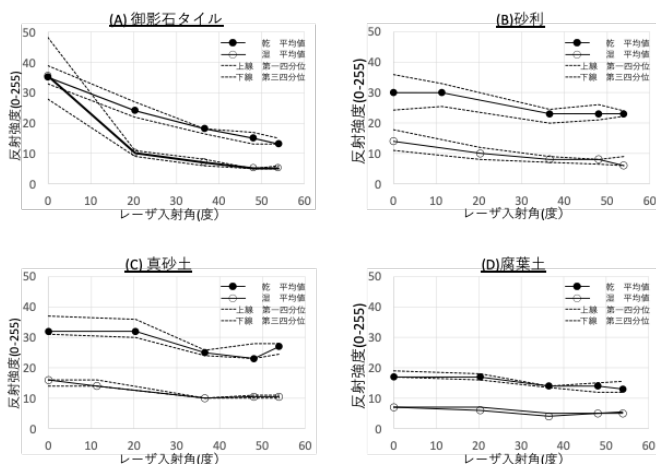


図6 各試料とレーザ反射強度との関係

・ 礎石と周辺地表

2021年9月13日、屋外実験を実施した。礎石・礎石代替(御影石タイル)、及びその周辺の地表の反射強度分布は図7の通りであった。入射角が 37° を越えるあたりから礎石の反射強度と周辺地表との反射強度の差異は無くなるが(図7)、入射角が 37° 程度以内であれば、礎石の反射強度は周辺の地表よりも反射強度が大きかった。即ち反射強度から礎石検出が可能ながことが示唆された。

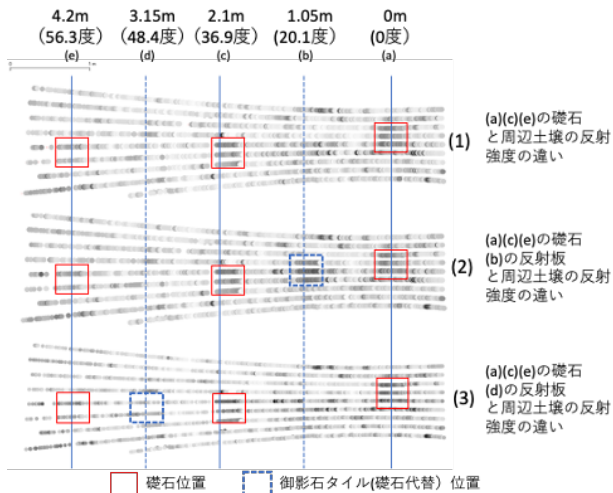


図7 実測した礎石と周辺土壌の反射強度の違い

6 考察：反射強度を用いた礎石検出法の検討

屋外実験結果と屋内実験結果(礎石は乾、土壌は湿)から、比叡山削平地の土壌は、概ね腐葉土と同等のレーザ光に対する反射特性を持つと考えられた。それを踏まえ、礎石検出の必要条件について考察する。

図6から、礎石が濡れ、土壌(腐葉土)が湿っていた場合、レーザ入射角が概ね 20° を越えると、両者の反射強度が同程度となるため、礎石の検出が難しいことが分かった。

一方、乾いた礎石と湿った土壌(腐葉土)との組み合わせならば、両者の反射強度は重なる部分がないことから、反射強度によって礎石検出の可能性があることが分かった。

以上により、比叡山削平地でレーザ測量データから礎石を検出するには、礎石が乾き、土壌が湿っているタイミングを狙って細密レーザ測量を実施し、入射角が少なくとも 37° (図7) 以内の点群の反射強度を利用すれば、反射強度から礎石を検出できる可能性があることが分かった。

なお、前述タイミングを具体的に表現すれば、乾燥注意報が出る時期の計測は避け、降雨や朝露・朝霜な

どの影響を受けない時間帯、可能なら、なるべく土壌の水分状況が高いとき、ということになる。

6 おわりに

今回、レーザ測量器と地物との関係を高さ2.7mから調べた。しかし、実際のレーザ測量では、少なくとも樹木の高さを超える位置から超細密測量を行うことになる。したがって、反射強度を用いた礎石検出法の汎化には、レーザ測量器と地物との間の関係を反映させた、高さが異なる実験を行う必要があるが、今回はそれを実施していない。そのような理由で今回の検討は、必ずしも超細密データの実測の必要十分条件には結びついていない。しかし、今回の検討でレーザ測量からの礎石検出の必要条件は見出せた。引き続き高さと反射強度、加えてレーザセンサーと礎石との間の植生の影響などを検討し、反射強度が比叡山に存在する礎石を残した建物遺構調査に使用できる必要十分な手段となり得るか検討を続けたい。

本研究で使用したレーザ測量器で使われたレーザは、903nmの波長の近赤外線だった。しかし、レーザ測量器には、1500nm付近の波長を利用する機材もある。このことから、今回の知見をレーザ測量の汎用的な知見にするには、今後も検討が必要であり、今回の知見の活用には注意が必要である。

謝辞

本研究の遂行にあたり、比叡山延暦寺管理部山口弘湛氏からは現地の状況に関し、多くの情報を頂いた。ここに感謝申し上げる。本研究は、科研費基盤研究(c)研究課題21K04458「細密なLiDAR反射強度データを用いた比叡山延暦寺十六谷の山坊遺構の把握」の一環として実施した。

注

注1) 本稿で用いた赤色立体図はアジア航測株式会社の赤色立体図作成手法(特許 3670274、特許 4272146)を使用し、国土交通省近畿地方整備局六甲砂防事務所、および国土地理院が作成したものである。

引用文献

- 1 早川紀朱, 宮島明里, 竹島喜芳, 2020. 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(2019), pp. 19-28.
- 2 長谷川裕之, 2006. 土地被覆分類に対する航空レーザ反射強度データ特性の評価, 国土地理院報告(53), pp. 43-50.

- 3 中武修一, 山本一清, 吉田夏樹, 山口温, 宇野目草太, 2018. 航空機LIDARによる単木樹種分類手法の開発, 日本森林学会誌100(5), pp. 149-157.
- 4 坂田健太, 力丸厚, 田子彰大, 2016. 航空機LIDARの反射強度を用いた単位照射領域における樹種別の樹冠葉面占有率把握に関する検討, 写真測量とリモートセンシング55(4), pp. 254-258.
- 5 朱林, チャタクリ スバス, 島村秀樹, 2016. 航空レーザ計測データによる林相分類手法の研究, 写真測量とリモートセンシング 55(5). pp. 303-313.
- 6 長谷川裕之, 都竹正志, 2006. LIDARデータを用いた道路領域抽出における反射強度の有用性, 写真測量とリモートセンシング45(4), pp. 26-34.
- 7 Challis, K., Carey C., Kincey M., Howard J. A., 2011. Airborne Lidar Intensity and Geoarchaeological Prospection in River Valley Floor, Archaeol. Prospect. 18, pp.1-13.
- 8 Historic England, 2018. Using Airborne Lidar in Archaeological Survey: The Light Fantastic, Swindon, Historic England. 95pp.