

転石調査のための高密度航空レーザ計測による斜面の可視化

高山国道事務所 増田 仁 正会員 ○田近真悟
岐阜大学工学部 国際会員 沢田和秀
中日本航空株式会社 正会員 小野貴稔

1. はじめに

高山国道事務所が管理する国道41号は、急峻な山岳道路斜面に多数の岩塊が存在する地域を南北に縦断し、毎年のように落石事故が発生するなど災害の珍しくない道路である。平成25年7月7日には、岐阜県飛騨市神岡町船津地内で大きさ2m×1.5m×1.5mの落石が発生し、国道41号を走行中の軽トラックの車両前部に落石が衝突した。これは降雨により表層崩壊が発生し、これに伴って道路から比高400mの地点にあった岩塊が崩落したと考えられている¹⁾。このような落石の対策には、高標高部の浮石や転石を広域かつ効率的に把握することが喫緊の課題であるが、現地調査によってこれら浮石や転石を把握するには膨大な時間を要するとともに、急峻な斜面における調査には安全性の確保も要求される。そこで、高標高部斜面の浮石や転石のごく小規模な微地形を可視化するため、岐阜県下呂市三原地内において高密度航空レーザ計測を実施した²⁾。斜面全体の形状に加え、グラウンドデータと計測されたオリジナルデータの下層点群データとを再処理することにより、浮石・転石や微地形の可視化を試み、国道41号から比高約80mまでの現地調査を行い、可視化データを確認した。

2. 調査概要

2.1 調査対象地域と机上段階での確認

高標高部の斜面の転石を確実に把握できるかどうかを確認するために、既往防災カルテと今回実施したレーザ計測データによる立面図を見比べ、点検ルートや転石・露岩の状況などを机上確認した。

図-1は、今回の成果品であるオルソフォト上に、調査対象となる斜面の範囲を示したものであり、図-2は現地踏査中に、国道から比高50m付近における点検ルート上での調査者の視点から見た斜面の状況である。調査対象斜面は、濃飛流紋岩が広く分布する国道41号沿いの飛騨川右岸の東向き斜面であり、国道41号から尾根までの比高は最大で約300mとなっている(図-3)。斜面中腹(国道からの比高約160m)から下方の植生は落葉広葉樹が主であり、上方は針葉樹が主となっている。国道から比高約50m以上の斜面において転石の発生源となる浮石や露岩が確認でき、斜面勾配は40度前後である。それより下方は平均勾配30度~40度の崖錐地形を呈しており、径数十cm~1m程度の礫が堆積している。



図-1 調査対象位置図



図-2 斜面の状況

Visualization of slope for rockfall investigation using high density LiDAR data : H. Masuda and S.Tadika (Takayama Office of National Highways, MLIT), K. Sawada (Gifu University) and A.Ono (Nakanihon Air Service Co. Ltd)

高密度航空レーザ計測の目的は、高標高部の防災点検が労力的、コスト的そして安全性の確保という点で困難であるためこの代替方法として実施したものである。ここでは、防災点検で転石等の状況が把握されている斜面において、可視化された浮石・転石等の現地検証を実施した。

図-3は、当該斜面の国道から尾根までの範囲を、S-DEMによる起伏図(3.1.1で詳述)から作成した立面図である。この斜面のうち、図-3における左半分の国道から比高80mの高さの範囲で防災カルテが作成され(M041A246落石、M041B143岩石崩壊)、防災点検(定期的な調査)が実施されている。図-4は、防災カルテの管理図面として現地調査員によって記載された位置図であり、不明瞭な文字や範囲は追加表示する等加工したものである。この調査による識別番号などが、斜面に点在する転石には記されている。また、参考までに防災カルテ作成範囲をS-DEMによる起伏図で表現した立面図を、図-5に記載した。今回、高標高部の斜面の転石を確実に把握できるかどうかを確認するために、既往防災カルテと立面図を見比べ、点検ルートや転石・露岩の状況などを机上確認した。

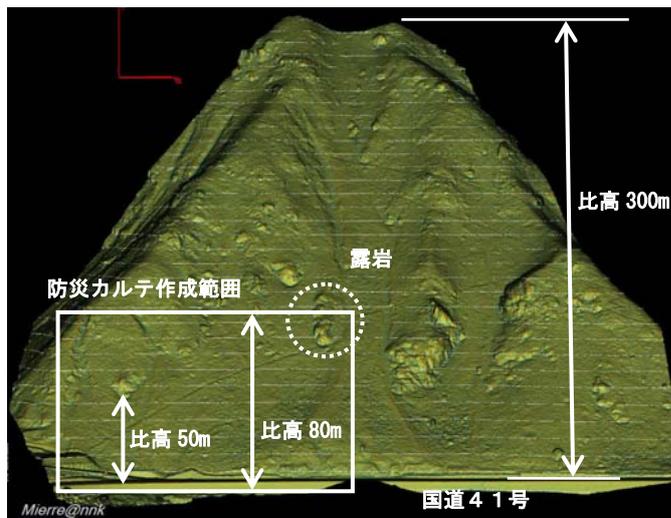


図-3 斜面全体図

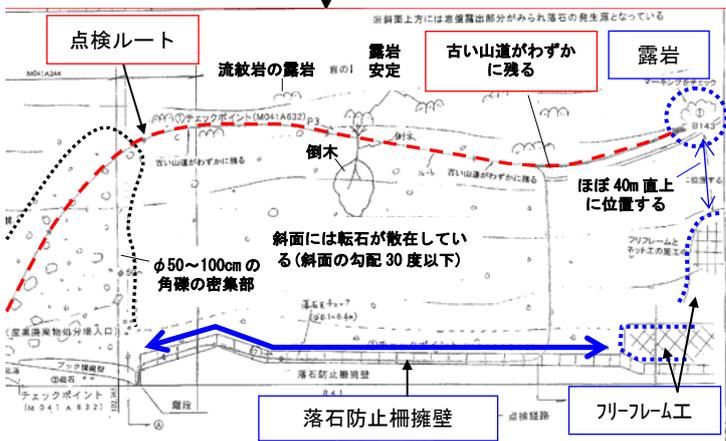


図-4 防災カルテの管理図面 (M041B143)

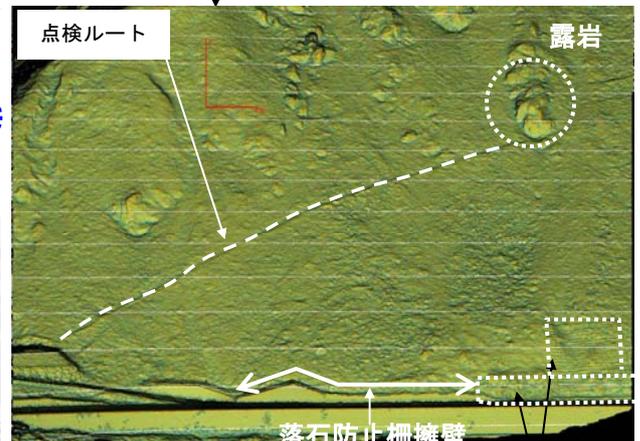


図-5 防災カルテ作成範囲の立面図

表-1 航空レーザ計測の諸元

項目	諸元
プラットフォーム	回転翼(エアロスペース社製AS350B)
使用機材	SAKURAIV
計測時対地飛行速度	100km/H
計測時対地飛行高度	450m
レーザ発射数	180,000Hz
計測密度	8点/m ² 以上(2方向以上から照射) 正射投影上に含まれる植生・転石等の地物や地盤面に照射されるレーザの点数(マルチリターンは考慮せず)

2.2 計測諸元

本計測では、ごく小規模な平坦地や管理用歩道等の地形に加え、転石や植生、倒木などの地物の形状を表現するため、回転翼飛行機からのレーザ計測において連続波形記録方式の航空レーザ計測システムを採用した。

計測諸元を表-1に整理する。また、植生の影響や斜面の方向を考慮し、地表面に対し2方向からのレーザが照射されるよう計測を計画した。ここでの計測密度とは、回転翼飛行機に搭載したレーザ計測機から照射されるレーザで、最終結果として実現すべき密度である。計測は平成26年1月に実施した。今回の計測のように、落葉期におけるレーザ計測は、照射されるレーザが樹木の葉や地盤面付近の草本類により阻害される要因が少ないため、転石・浮石等を含む地盤面により多く到達するというメリットがある。

3. 斜面の可視化と現地検証

3.1 斜面の可視化

3.1.1 可視化（下層モデル）の考え方

一般的に、レーザ計測データから地形モデルを作成するためには、グラウンドデータをメッシュ化し、地形モデルを作成する。図-6は、オリジナルデータのうち、グラウンドデータから作成される地形モデルの凹凸を表現した断面図（模式図）である。しかし、この場合浮石や転石のような細かい凹凸は「平均化」され、再現できない。

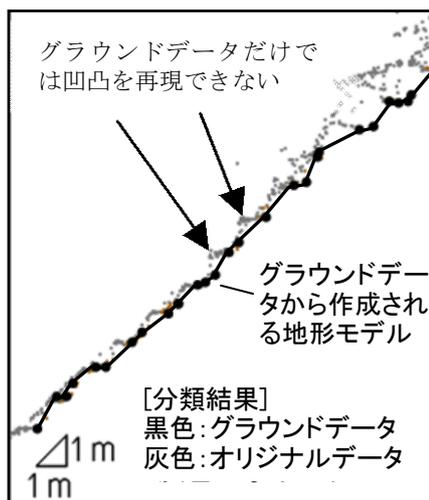


図-6 一般的な地形モデル

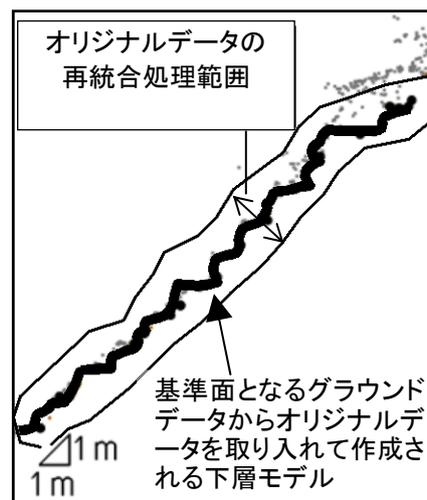


図-7 下層モデル

そこで、グラウンドデータを

基準面として、任意の距離範囲に位置する点群だけを抜きだし、それらの最下層面のみを用いた補間陰影処理を行って下層モデル（S-DEM：Substratum Digital Elevation Model）の斜面の起伏図を作成した³⁾。図-7は、その基準面となるグラウンドデータから作成した起伏図で作成される下層モデルの凹凸を表現した断面図（模式図）である。下層モデルは、図-6の一般的な地形モデルよりもより地盤面の詳細な凹凸を表現している。

ここで、図-8はグラウンドデータをメッシュ化（0.1mメッシュ）して作成した起伏図、図-9は同一範囲においてS-DEMから作成した起伏図、そして図-10は転石及びその周辺の状況を現地で撮影した写真であり、これらが比較できるよう併記した。図-8及び図-9で表現される地形（地物）の起伏について、転石形状（凸形状）を示しているかどうかの判断は、輪郭が濃い陰影を呈していることが一つの目安となる。これは、その地物の側面が「急勾配で露出している」ことを示しているためである。

この転石A及び転石Bの表現に着目して比較すると、図-8では転石Aは濃い陰影を呈して可視化されているが、転石Bは陰影がほとんどなく可視化が弱い。一方、図-9では転石A、転石Bともに濃い陰影を呈しており、よく可視化されていることが分かる。また、斜面全体の表現においても、図-9が現地の角礫が堆積している状況をよく表しており、斜面の微妙な凹凸や平坦地などが可視化されていることが分かる。

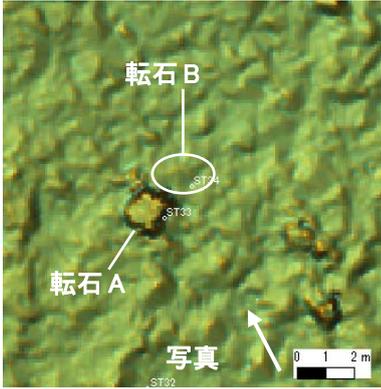


図-8 グラウンドデータをメッシュ化して作成した起伏図

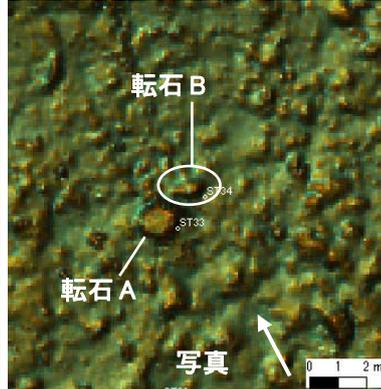


図-9 S-DEM から作成した起伏図



図-10 斜面の現地の状況 (大小礫が堆積している)

3.1.2 斜面の可視化 (S-DEMによる起伏図の作成) と特徴

前項で整理した S-DEM により起伏図を作成した。図-11 が立面図 (斜め) で図-12 が平面図である。立面図は現地調査前の机上概査として斜面全体の地形を読み取り、平面図は主に現地調査に利用する。立面図では、斜面下部から尾根に至る斜面全体の形状や発生源となる浮石の状況、そして崖錐地形の範囲など、斜面全体の構成を視覚的に把握することができる。また、平面図は GIS ソフト等により、あらかじめ踏査ルートや施設の位置情報等を表示し、現地調査の支援図面として利用することができる。

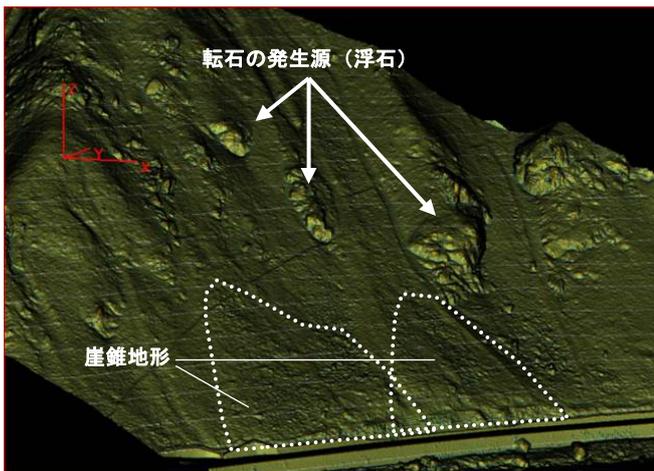


図-11 S-DEM による起伏図 (立面図 (斜め))

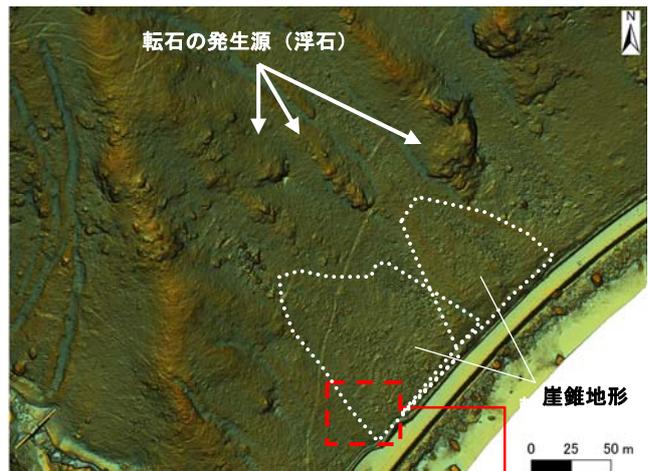


図-12 S-DEM による起伏図 (平面図)

図-13 は、S-DEM による平面図を拡大し、代表的な陰影を抽出したものである。これは、可視化された斜面の状態を机上で把握するときに着目するものであり、以下の地形が想定される。

- ①明らかに濃い側部を伴う陰影
露岩、転石、凸状に堆積している微地形。
- ②平坦な陰影
微地形 (平坦地)、表層の移動痕。
- ③線状の陰影 (凸地形)
倒木。線状に配置された地物。
- ④線状の陰影 (平坦地形)
獣道、作業道、杣道。



図-13 SDEM による起伏図 (平面図 (詳細))

3.2 現地調査による可視化データの確認

図-14は、現地調査用図面として、S-DEMによる起伏図に1m間隔の等高線を表示した平面図(1/500)である。起伏図上に表現されている凹凸が、現地において浮石・転石なのか、または植生(広葉樹や針葉樹)の幹や根曲がりの影響を受けた陰影なのかを現地において目視確認した。現地では正確な位置を把握するため、明瞭な構造物や地物の相互の距離を簡易レーザ計測器により計測した。加えて、調査対象とした浮石・転石の正確な位置を把握するため、トランシット測量を実施した。

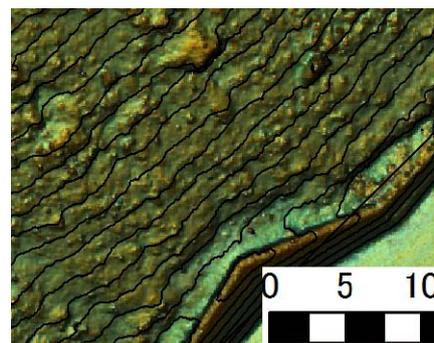


図-14 現地調査用図面

3.3 現地踏査による比較の結果

現地では、前項で整理した代表的な陰影を確認するとともに、崖錐地形や森林土により安定した斜面、現地で新たに確認した転石や浮石、倒木などがS-DEMによる起伏図上にどのように表現されているかを確認した。また、現場におけるいくつかの特徴的な地形について事例を紹介する。

① 崖錐地形の確認

図-15は、現地で確認した角礫が堆積する崖錐地形の状況写真である。擁壁端部からの水平距離と比高から起伏図上に表現されている斜面の状況とを比較した。図-16は、当該地点のS-DEMによる起伏図(平面図)であり、写真の撮影方向と図-17のA-B断面の幅の中心線、そして起伏図上で角礫と思われる範囲を表示した。起伏図には堆積している角礫と思われる細かな起伏(凹凸)が表現され、斜面全体の状況としては角礫の崖錐地として可視化されていることを現地において確認した。また、図-17は、幅1mの点群データの断面図であり、A-B断面上の写真のポールのおおよその位置を表示した。なお、同図の点群データについて、オレンジ色はグラウンドデータ、緑色はグラウンドデータ以外のデータである。地表面の点群はあるものの、崖錐地形における径50cm程度の特定までは困難であった。



図-15 崖錐地の状況

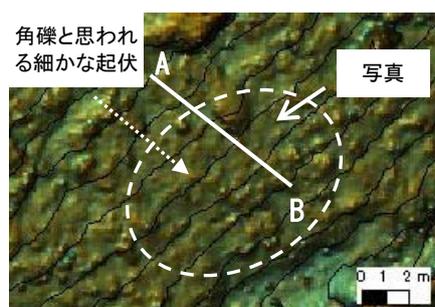


図-16 起伏図(平面図)の状況

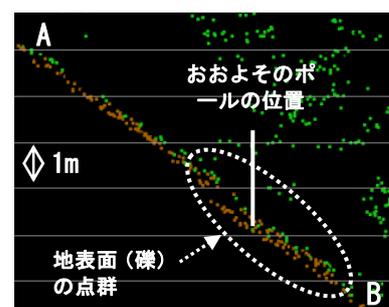


図-17 点群データの状況

② 転石の確認

図-18は、径10~30cm程度の礫が堆積している斜面において確認した「明らかに浮いている」転石である。図-19は、当該転石のS-DEMによる起伏図(平面図)であり、写真の撮影方向と図-20のA-B断面の幅の中心線、そして明らかに浮いている転石の陰影の位置を表示した。起伏図上の転石の位置の判断は、以下のような順番で特定をした。

- 起伏図上に表現されている擁壁の端部から転石までの比高を計測
- 転石は左右が露出していることから、起伏図上の陰影も左右が露出している
- 転石周辺の微地形(局所的な平坦地)と起伏図上の陰影が一致しているか確認

図-20 は、幅 1m の点群データの A-B 断面である。断面図上の中心には「明らかに浮いた」転石の形状が表現されている。また、点群データの状況では背面の樹木の影を認識することができた。



図-18 転石の状況

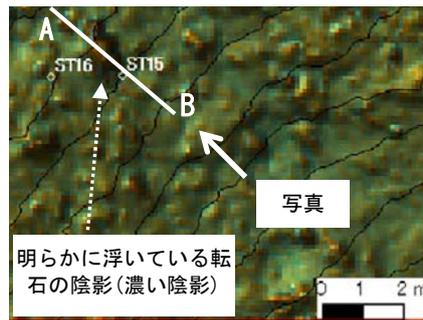


図-19 起伏図(平面図)の状況

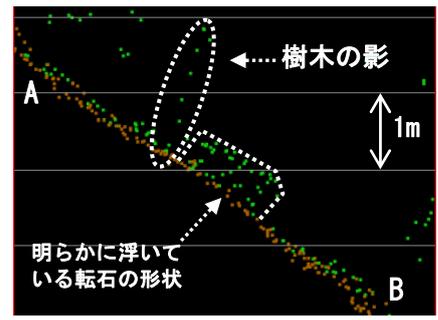


図-20 点群データの状況

③斜面が主に森林土となっている斜面の状況

図-21 は、斜面上に礫がなく森林土が主な斜面を斜面下方に向かって撮影した写真である。図-22 は、当該斜面の S-DEM による起伏図であり、写真の撮影方向と図-23 の A-B 断面の幅の中心線、そして礫のない斜面の範囲を表示した。起伏図上の位置の確認は、撮影位置の付近には倒木が 2 本あり、それが起伏図上に表現されていたことから、倒木からの距離を計測することによって把握した。図-23 は、幅 1m の点群データの A-B 断面である。断面図に表現されている点群データの状況では、地表面の点群はほぼ一様になっていた。



図-21 斜面の状況

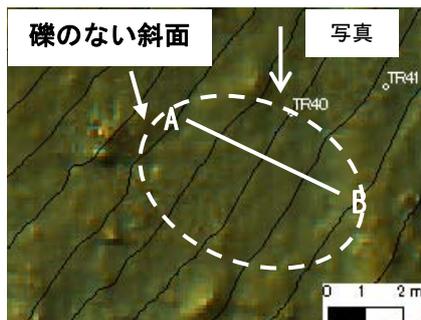


図-22 起伏図(平面図)の状況

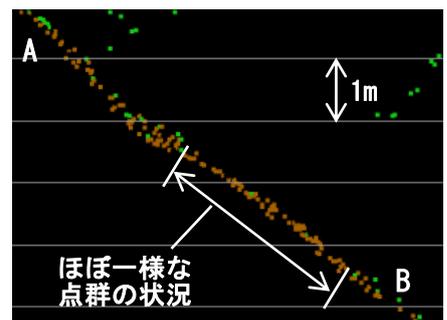


図-23 点群データの状況

④転石又は露岩と同様の陰影を示す植生

図-24 は、現地で確認した落葉広葉樹(直径 30cm)である。図-25 は、S-DEM による起伏図であり、写真の撮影方向と図-26 の A-B 断面の幅の中心線、そして強い陰影を呈している範囲を表示した。図-25 には、落葉広葉樹の陰影が、露岩と同様な陰影(全体に凸地形を示し斜面下方の陰影が強い)となって表現されている。これは、樹木の幹に加え根の直下がやや落ち込んでいるという、樹木の生育状況と微地形の影響によるものであることが分かった。また、起伏図上の「凸地形」ではやや「尖った」陰影を示しており、これが樹木の幹に相当する陰影となっている。図-26 は、幅 1m の点群データの A-B 断面である。断面図には、落葉広葉樹とその直下の地形による形状が表現されている。しかし、断面図上においては、露岩との違いを読み取ることはできなかった。



図-24 斜面の状況

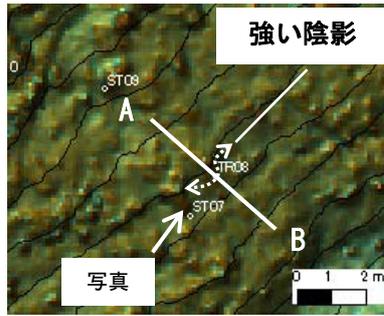


図-25 起伏図(平面図)の状況

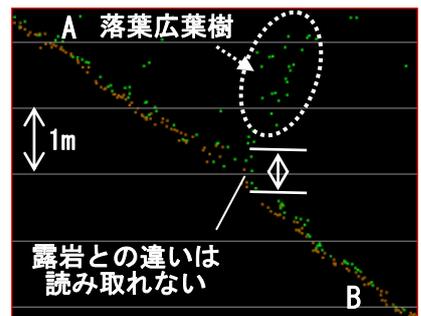


図-26 点群データの状況

⑤植生によって止まっている転石

図-27は、転石(0.6m×0.6m×1.2m)が落葉広葉樹(直径50cm)の背面に止まっている状況の写真である。図-28は、S-DEMによる起伏図の落葉広葉樹とその周辺の陰影であり、写真の撮影方向と図-29のA-B断面の幅の中心線、倒木の位置、そして対象としている陰影の大きさを表示している。起伏図における転石の位置は、起伏図上に表現されている倒木からの距離を計測することによって把握した。起伏図上では、長さ幅ともに1m強の転石または浮石という陰影を明瞭に示しており、転石と広葉樹とが一体となって表現されている。図-29は、幅1mの点群データのA-B断面である。断面図上においては、樹木は把握できるが、背面の転石を表す点群は、樹木と一体となっているため転石としての判別は困難であった。



図-27 斜面の状況

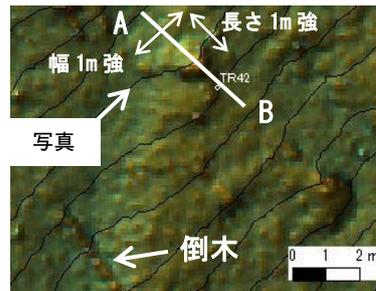


図-28 起伏図(平面図)の状況

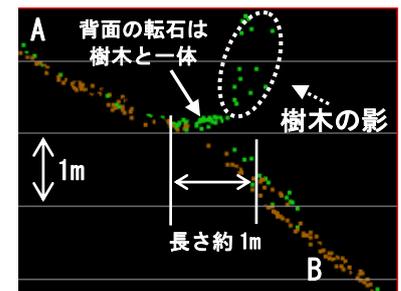


図-29 点群データの状況

⑥転石と一体となって露岩と同様の陰影を示す植生

図-30は、転石の横で大きく根分かれした落葉広葉樹の写真である。斜面に向かって右方向5~6m先には、局所的な平たん地があり、この地形との位置関係から当該地点を把握した。図-31は、S-DEMによる起伏図の落葉広葉樹の陰影であり、写真の撮影方向と図-32のA-B断面の幅の中心線を表示した。起伏図上では濃い陰影部が3m程度の円弧状に表現されており「露岩」と読み取れるが、現地踏査の結果、広葉樹と隣接する転石とが一連の地形として起伏図に表現されていることが分かった。図-32は、幅1mの点群データのA-B断面である。断面図上においては、広葉樹の幹は明瞭に表現されているが、転石との判別は困難であった。



図-30 斜面の状況

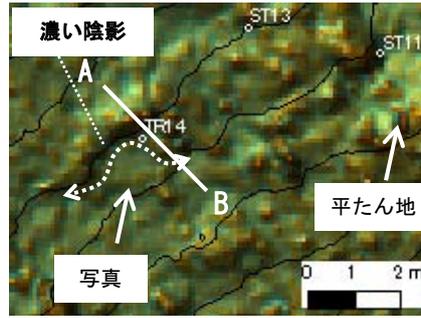


図-31 起伏図(平面図)の状況

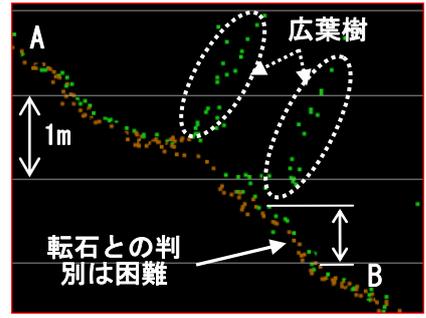


図-32 点群データの状況

⑦一つの凸地形としての陰影を表現する樹木（複数）

図-33 は、直径 20~30cm の落葉広葉樹や針葉樹が密生している状況の写真である。図-34 は、S-DEM による起伏図であり、写真の撮影方向、図-35 の A-B 断面の幅の中心線、そして落葉広葉樹の陰影の範囲を表示した。起伏図上では一つのまとまりのある凸地形を示しているが、これらの密生した樹幹が影響し全体としてやや盛り上がった陰影として表現されたと思われる。なお、起伏図上には、細かな錘状の陰影が表現されており、これが樹木の幹に相当する陰影であると思われる。図-35 は、幅 1.5m の点群データの A-B 断面である。断面図上においては、密生している樹木の陰影に相当する広葉樹の幹が表現されているが、複雑な点群の分布となっており、複数の樹木が密生しているという状況を把握することは困難であった。また、地盤面付近の点群は微妙な凹凸を示しており、点群データのみでは転石の判断は困難であった。



図-33 斜面の状況

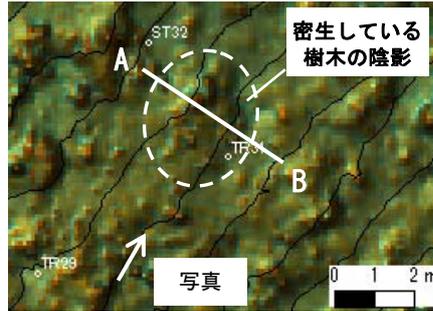


図-34 起伏図(平面図)の状況

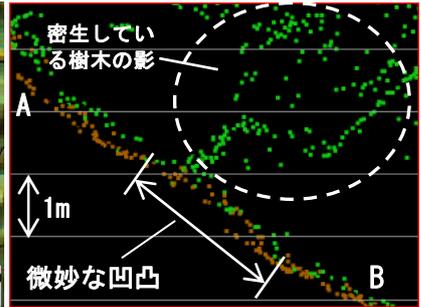


図-35 点群データの状況

4. まとめ

可視化された S-DEM による起伏図からは、転石や浮石のほか、直径が大きい樹木や根曲がりの大きな植生、倒木などの「地物」も表現していることが確認できた。また、これらの組み合わせにより、机上で「地形」を表現することも確認した。起伏図上での傾向としては、「円錐」状に表現されているものや、輪郭はある程度しっかりしているものの凸部分の全体がぼやけている陰影は、植生であることが多いことが確認できた。点群断面の断面図上においては、樹木に照射された点群があれば植生、点群によって明瞭な「輪郭」が表現されていれば転石・浮石といった判断ができる。しかし、植生と転石とが近接している場合は、植生の点群に転石の存在がまぎれてしまい、転石を認識できないケースもあった。

これらのことから、植生による影響はあるものの、S-DEM による起伏図や点群の断面図は、現地調査の前に、転石や浮石を机上でスクリーニングしておくには、有効なツールとなり得ると言える。また、奥行き 1 m 程度のごく小規模な平坦地や、幅数十 cm の管理用歩道、倒木などが表現されており、現地での自己位置の把握が容易であったことから、現地調査用図面としても有効であることが確認できた。

今回は落葉広葉樹を主とした斜面での現地検証を実施したが、今後は常緑広葉樹や、針葉樹などの環境下で調査を行い、S-DEM による起伏図における植生の可視化の相違を把握する必要がある。また S-DEM による起伏図は地形の凹凸を強調しているため、コンター図と S-DEM による起伏図とを使い分けるなどの、調査手法の確立が必要である。そして、高標高部における斜面毎の転石・浮石の密度について、机上スクリーニングと現地調査という密度検証を進めていきたいと考えている。

参考文献：

- 1) 第 1 回中部防災技術専門委員会（中部地方整備局）
- 2) 航空レーザ測量による災害対策事例集（公益財団法人 日本測量調査技術協会 2013）
- 3) 千田・高野：転石・岩盤斜面調査を目的とした航空レーザ測量の課題改善 日本写真測量学会学術講演会発表論文集 2013 P85-88