S-DEMデータを利用した地すべり地における変動ベクトル解析技術の開発

菊地輝行*・秦野輝儀**・千田良道***・西山 哲****

要 旨

航空機によるレーザ計測は、地形の3次元データを精度よく取得できる測量技術として確立しており、最近では、多時期の計測結果を用いて大規模な地すべりや河川・砂防分野における土砂量の算定などに活用されている。しかしながら、数センチメートルオーダーでの緩慢な地すべりの変動を精度よく把握することは難しいのが現状である。そこで本研究は、グラウンドデータから任意の距離に位置する点群だけを抜き出した下層モデル（S-DEM：Substratum Digital Elevation Model）を利用した微地形を判別する手法および高精度で斜面の変動量を解析する手法を開発し、地すべり地内で発生した岩屑すべりの変動状況を詳細に推察できる成果を得たので報告する。

Key words：地すべり landslide, 斜面動態モニタリング monitoring of slope movement, 航空レーザ計測 airborne laser, 数値標高データ Digital Elevation Model

1. はじめに

近年、異常気象や大規模地震などに伴う災害が多発しており、今後も深層崩壊や表層崩壊など様々な規模・形態の斜面災害が発生する可能性が高まっている。現在これらの斜面変動を事前に把握し、災害の発生を予防することは、対象とする斜面の範囲が広くかつ箇所数が多いこと及び発生前の変動現象が十分に把握できていないことから困難な状況にある。このため、変動現象が顕在化してから計測が開始されることが多い。しかし、災害後の計測は、豪雨後の地下水上昇や余震が発生する不安定な時期と重なるため、二次災害の危険性が高い。特に、多数の地すべりや崩壊が同時に発生した場合には、通常的地表伸縮計や傾斜計で地すべりの動きを監視することは資材及び費用の確保の点でも不可能である。こうしたことから、広域の複数箇所を簡便かつ同時にモニタリングする手法開発が望まれる。

航空機によるレーザ計測は、精度よく地形情報を含む3次元点群データを取得できる測量技術として確立している。最近では同一場所の多時期の取得データから、変動する斜

面を定量的にモニタリングできるため、大規模な地すべり地の差分解析や地形画像解析を応用した3次元変位量解析手法が開発され、防災対策や研究に活用されている。しかしながら、植生が繁茂する中でのセンチメートルオーダーでの地すべり等の斜面変動を把握することは難しいのが現状である。一方、最近の小型無人航空機（UAV：Unmanned aerial vehicle）の普及及び高精度かつ安価なレーザ計測装置の開発の進展により3次元点群データの取得がより容易になり、活用機会の増加と利用の高度化が期待できる。そこで本研究は、地すべり地内で発生した岩屑すべりにより活発化した地すべりブロックを対象とし、崩壊発生前後を含めた三時期に取得した同レベルの精度を持つ航空レーザ計測結果を用いて、岩屑すべり及びその周辺地すべりブロックの変動量を地表面だけではなく、植生や転石を含めた下層モデルであるS-DEMを用いて精度よく解析・把握する手法を構築し、その変動過程を考察するとともに、今後の変動の予測につながる成果を得た。これにより航空レーザ計測を用いた斜面変動モニタリングの一つとして普及すると期待される。

2. 航空レーザ計測の活用事例と課題

2.1 3次元点群データの活用

航空レーザ計測は、1990年代後半から活用された手法であり、航空機に搭載したレーザスキャナを用いてレーザ光を地上に照射し、地上で反射するレーザ光との時間差より得られる地上までの距離と、GNSS（全地球航法衛星システム）および、IMU（慣性計測装置）から得られる航空

* (株)開発設計コンサルタント JP Design Co., Ltd. (会員)

E-mail: kikuchi-t@jpde.co.jp

** 電源開発(株) Electoric Power Development Co., Ltd. (会員)

*** 中日本航空(株) Nakanihon Air Service Co., Ltd.

**** 岡山大学大学院 Okayama Univ., Graduate School of Environmental and Life Sciece. (会員)

機の位置情報より、地上の標高や地形の形状を精密に調べる測量手法である。植生の枝葉の隙間を通過したレーザ光により、航空写真では確認できない植生下の地形を詳細に把握できることから、地すべり地調査をはじめ砂防分野の崩壊地の抽出¹⁾などに利用されてきた。また数値標高データ（以下DEMと呼ぶ。DEM：Digital Elevation Model）が取得できるようになったことで、多数の地形解析手法が開発され文献²⁾に整理されている。近年では、最大400kHzのパルスレーザを有する波形記録型のレーザ機器の開発やGNSSの高精度化などにより高密度な3次元点群データが取得できるようになり、微地形判読の精度も向上している³⁾など。また、斜面の傾斜量と開度を組み合わせた表現方法が開発されている^{4)~6)}など。

航空レーザ計測は、測量作業の手順や精度基準に基づき一定の品質の管理がなされているため、繰り返し計測による二時期あるいは多時期のデータを処理することで地形の変化を把握することが検討されてきた。例えば、二時期のDEMから平面上、同一座標地点の標高較差を計算することで地形変化量を算出し、土砂変動マップやボリューム計算が行われている⁷⁾。地すべりやマスマーブメントの解析の活用は2008年の岩手・宮城内陸地震においてDEMを用いた数値地形画像マッチングにより3次元ベクトル変位量を算出している⁸⁾。さらに2011年東北地方太平洋沖地震に関わるものとして、地表地震断層のDEMを用いた解析により平野を含む山地部の広い範囲において数10cmの変位量が報告されている⁹⁾。またDEMの他にもオリジナルデータから表層のデータを活用したDSM（Digital Surface Model）を用いて樹木表面の二時期間での変位量を抽出し、迅速かつ空間解像度の高い傾動分布図を得ることが可能¹⁰⁾となり、幅広い活用が進んでいる。

以上のように、航空レーザ計測を利用した地形の3次元点群データに基づく変位量解析の事例は、増加しているが、明瞭かつ顕著な地形変動の発生箇所についての報告が主体であり、将来の崩壊を予測可能な地表伸縮計や傾斜計に相当する役割を果たしているとは言えない。今後、斜面変動の初期に見られる植生繁茂下における10cm程度以下の微小な変動を把握することができれば、航空レーザ計測の活用範囲は大きく広がると考えられる。新たに滑動する可能性のある箇所の抽出や滑動初期の微地形の変化を的確に捉えるためには、計測および解析の精度向上に向けた取り組みが必要である。

2.2 変動量解析における精度向上のための課題

航空レーザ計測における変動量解析のために精度を向上させるためには、取得した二時期のデータ間で同一の地形的特徴を有する地物の位置を精度よく正確に同定して対比する方法を構築することが求められる。精度よく地表面形状を把握するためには、レーザ計測時期は、植生の繁茂が

少ない時期に限定することが望ましい。さらに、レーザ照射密度を高くすることや航空機と地表面の距離を短くすること及び波形記録方式のレーザ計測システムを用いることで、植生繁茂の著しい地域においてもある程度の品質向上を図ることができる。このような方法での精度の向上は、機材の運用やコストなどに大きく影響するが、ハードウェア面での向上に留まる。そこで、得られたオリジナルデータの処理段階において効率的に植生繁茂下の特徴的な地物を際立たせる新たな手法の開発が課題となった。

次に二時期計測データを用いた変動解析としては、数値地形画像マッチング¹¹⁾が既存手法として用いられている。これは、点群データからグリッドデータを作製し画像化を行い、変位の水平成分を算出する方法である。抽出される変位量や抽出精度は、検索領域全体の相関係数の解析およびサブピクセル解析を用いることにより、計測点自体の精度が粗くても、より微小な変位を算出が可能となっている。しかし、植生が濃い場合やオーバーハング地形などグラウンドデータ取得の点群の密度が低く、フィルタリング作業時に正確に地表面を抽出できない場合、離散的な計測点から構築されたTIN（Triangular Irregular Network）モデルは、本来の地表面と離れたものとなり、実際の変位以外の影響が混在することになる。

そこで本研究では航空レーザ測量で得られるオリジナルデータと、これを処理して得られるラストショットである地表面データ（以後、これをグラウンドデータとする）の計測精度を向上させ、地形的に特徴を持つ地物を際立たせる新たな解析手法を試行しながら変動量解析に必要な二時期における同じ地表面形状の検出が容易となるような計測・解析方法の確立を目指した。その研究結果を以下に考察するものである。本手法により得られる斜面の変動は、単に水平方向あるいは鉛直方向を示す変位量ではなく、実際の3次元の変動方向も把握することができるため、変動ベクトル解析として実施した。

3. 解 析 手 法

本研究の変動ベクトル解析は、図-1に示すフローにより実施した。本解析では、グラウンドデータから作製されたDEMと比較して特徴的な地物の情報を持つ下層モデル（S-DEM：Substratum Digital Elevation Model）作製を用いて実施した。なお、本解析における航空レーザ計測機器の諸元を表-1に示す。

3.1 特徴的な地形の抽出手法

一般的なレーザ計測においてオリジナルデータからフィルタリングされたグラウンドデータは、植生の影響を除去した比較的単調な地形面の情報となる。この通常の処理の場合は、図-1に示す一般的な解析手法のように3次元座標点からTINモデルを作製し、メッシュ状のデータとなった

図-1 本研究における解析フロー

表-1 航空レーザ計測の諸元

項目	諸元
レーザ発射回数	240,000 Hz
計測方式	タイムオブフライト方式
スキャン角度	±30°
飛行速度	100km/h
対地高度	450m

図-2 グラウンドデータと等高線図による滑落崖の表現例
(a) : 1ピクセル10cmの解像度で作製した地形画像, (b) : 1m等高線図
(a) は、約100年前に発生した地すべりに隣接する新規の約200mの連続性の良い高さ20cm小崖である。(b) は、等高線化することにより凹凸が明瞭になり、滑落崖の規模を判断することが容易である。ただし等高線間隔よりも小規模な起伏や、小崖の連続性については不明瞭となる。

DEMを地形画像として処理を行う。図-2には、古期崩壊地に隣接した新規の滑落崖を計測したDEMを1ピクセル10cmの解像度で補間陰影処理した画像と1m間隔の等高線処理した画像の例を示す。なお、補間陰影処理とは、各計測点を座標変換した時、自然な見え方となるように、視点からの距離に応じた点の重ね合わせ、死角になる点の非表示と補間処理、さらには視点からの距離に応じた影や色付けを行うものである。1m間隔の等高線図では小崖が一部不連続となり、末端部が不明瞭となっている。表現力は等高線の間隔に依存するものの、小崖の延長が詳細に表現されているとは言えない。一方DEMの地形画像では、等高線の表現よりも良く滑落崖連続性を判読することができ約250mの延長の高さ20cmの小崖として判読が可能となった。

しかしながらラストパルスだけを抽出したグラウンドデータを正射投影する方法でTINモデル化したDEMによる地形画像では転石やオーバーハングしている箇所は、詳細な地表面の凹凸を表現できないことが指摘されてきた^{(12), (13)}。そこで図-3に示すように、オリジナルデータが持っている複雑な地表面近傍の凸凹形状の3次元点群データを活かすためにグラウンドデータから任意の距離に位置する点群だけを抜きだし、補間陰影処理を行うことでオリジナルデータの有するノイズや植生として除去された転石、樹幹などの点群を含む情報を抽出し、それをS-DEMとした⁽¹⁴⁾。補間陰影処理で実施する下層処理の範囲すなわちグラウンドデータの表面からの距離は対象地点で推定される転石や崖の高さや植生の種類によって変更する。このS-DEM処理は、中日本航空(株)によって開発された3次元ビューワ“Mierre”を使用した⁽¹⁵⁾。同じオリジナルデータを用いたDEMとS-DEMの地形画像を地形・地質別に実施し示した。

図-3 3次元点群データを用いたS-DEM作製の概要

DEMは、グラウンドデータのみからTINモデルの作製を行っているが、S-DEMは、グラウンド付近の点群を含むため、多くの3次元点群データを扱ってTINモデル作製ができる。

図-4 A地点におけるDEMとS-DEMの表現例

浸食が進んでいる谷地形と緩斜面である。(a) DEMに比較してS-DEMでは、転石や植生が表現され山道も明瞭化している。(b) 拡大-1は水路内の転石や木橋も明瞭に表示されている。実際の現場では現地状況写真に示すように水路内の転石の詳細な形状やφ約50cmの転石分布が確認できた。(c) 拡大-2の植生が多い箇所は、DEM画像ではグラウンドへの到達率が低いことにより部分的な緩斜面が表現されるにとどまっているが、S-DEMでは植生と山道も明瞭に表現できている。

図-4に示すA地点は、中古生層の砂岩・泥岩が分布し浸食が進んで谷地形の中の崩壊地や滑落崖が明瞭となった箇所である。ここではコンクリート構造物により水路が改修されているが、水路内および水路の両岸には土砂や転石が多く認められる。グラウンドデータから作製したDEMによる地形画像（以下、DEMとのみ表記）に比較してS-DEMでは、水路内の転石群が明瞭となった。広く緩やかな傾斜地形を示す箇所においては、歩道は表現されにくいだがS-DEMでは、転石や樹幹などの植生の一部が再現され山

道も明瞭に表現できている。次に図-5に示すB地点は、中生代の黒色片岩分布地域でありトップリング崩壊が進行している。抽出した箇所は、トップリングによる滑落崖と移動岩体に挟まれた幅5mほどの凹状地が点在している。DEMでも起伏のある地形が認められるが、S-DEMでは、凹地の形状や溝状地形に加え、滑落崖に下の平坦地のφ50cm～1mの転石が表現された。

以上のようにグラウンドデータのみを用いたDEMでは、線的な滑落崖を明瞭にし、起伏感も良く表現されているが、

図-5 B地点におけるDEMとS-DEMの表現例

対象地は、トッピング崩壊が進行している片岩地帯である。(a) DEMと比較してS-DEMでは、トッピングの窪地地形や転石が詳細に表現された。(b) では、窪地形状や規模について正確に表示されており現地状況写真とも整合する。(c) では滑落崖下に、DEMでは認識できなかった直径50cm程度の転石が認められる。

グラウンドデータおよびその直上のデータを有するS-DEMを用いることでDEMでは不明瞭である数10cmの起伏や窪地、約50cmの転石を陰影で表現できた。このように2種類の地形モデルを用いながら微地形判読を行うことで地形地質情報をより有効に活用することが可能になると考える。またS-DEMは、後述する通り高精度な変動解析に必要な地表面の地形的特徴点を多く有しており、変動解析を行うための情報として適していることが明らかになった。

3.2 S-DEMによる変動ベクトル解析手法

変動ベクトル解析ではグラウンドデータを用いたDEMから作製した傾斜度図をピクセルセットの画像相関解析を用いて変位量計算が活用されている⁸⁾。本研究では、グラウンドデータを用いたDEMとは異なり地表面近傍の特徴的な地物を表現することができるS-DEMの特性を生かすこととした。これまで地表面近傍のノイズとして除去された点群をメッシュデータに再活用することが、グラウンドデータのための点群より図化に反映できる数が増え起伏に富んだ情報を有することになった。メッシュの平面は、斜面の形状に合わせた任意の座標設定が可能であり、その大きさは、取得された点密度により任意に設定するが、本解析手法ではS-DEMの空間解像度を0.1mに設定した。

具体的な手法としては、図-6に示すように二時期目データの任意地点を中心とした任意のピクセルセットから相関が良い地点を一時期目データから探索する。相関に使用するパラメータは①傾斜角、②狭い領域（考慮距離5ピクセル）における凹凸度、および③広い領域（考慮距離25ピクセル）における凹凸度、の3つのパラメータとする¹⁰⁾。

次にパラメータのマッチング処理を行う。マッチングは3成分ごとに5cmずつ移動させ、画像相関法により変動後の対応点を探索し、その変動量を算出した。解析では、マッチングによる初期値の推定と、CPUの並列処理などのアルゴリズム導入により短い計算時間で変動量を推定する工夫を行っている。同定された地点間の3次元座標から変動量の三次元ベクトルを計算し、これを隣接する地点に

連続して実施し変動ベクトル図を作製する。

本手法の適応性を確認するために従来のDEMとS-DEMを用いた手法の比較を行った。検証は地表踏査により斜面変動が発生している可能性のある場所をテストエリアとして100m×50mの範囲を選択した。図-7(a)には、通常のDEM画像を上方投影したうえで、変動ベクトル解析を行った解析結果を示す。DEM画像による斜面変動量は、変動していないと考えられる0.0mから最大で1.5mの変動量を示している。1m以上斜面変動が認められる箇所がブロック状に抽出することができた。次に本研究で提唱したS-DEM画像を用いた結果を図-7(b)に示す。全体的な傾向はDEM画像の結果と同じトレンドを示しているが、斜面変動量は0.5~1.1mを示し、DEM画像を使用した場合では抽出できなかった0.1m単位の斜面変動量の検出が可能となった。特に0.0mと1.0mが隣接するような箇所において、段階的に数値が変化することができており、課題であった隣接するグリッドのエッジ部分における不明瞭化を解消し詳細な斜面変動量を抽出することが可能となった。

4. 変動ベクトル解析の地すべり地への適用

4.1 適用対象地の概要

変動ベクトル解析の適用を行った対象地点は、静岡県西部の赤石山地の南縁部に位置する。この付近の山地は、天竜川及びその支流沿いの急傾斜な谷壁斜面とその上方の緩傾斜な小起伏地からなり、谷壁斜面と小起伏地を境とす

図-7 変動ベクトル解析の実施例

(a) はグラウンドデータを、(b) 下層点群をTINモデルからメッシュを作製したもの。(a) (b) ともに1ピクセル0.1m解像度で処理を行った。ただし下層点群は、グラウンドデータよりも多くの点群を含んでいるため地形画像が詳細に表現されている。

図-6 変動ベクトル解析手法の概要

る遷急線は、標高800m前後にあり、全体として幼年期の地形を呈する。天竜川は、山地の中を北から南に流下し、天竜川と小起伏地の比高は700mに達する。対象地を含む谷壁斜面には、多くの地すべり地や崩壊地が分布している。

この地すべり地は、天竜川の支流に接しており、図-8の鳥瞰図に示す通り三つの変動ブロックから構成される。そのブロックの規模は、幅260m、長さ810m、比高450mであり、変動ブロックの最上端と最下端を結んだ平均傾斜角は約33度である。これらのブロックが崩壊し道路や天竜川へ流下する可能性が考えられることから、斜面変動を把握する必要が生じた。

地すべり地の基盤岩は、西南日本外帯の三波川帯の結晶片岩より構成されている。この結晶片岩は、剥離性に富み、表層の緩みと風化により著しく脆弱化している。地すべりの斜面下部には塩基性片岩、斜面上部には泥質片岩が分布している。片理面の走向・傾斜は、NE-SW、傾斜は40° -

60° NWを示す。調査地の片理面は、斜面に対して受け盤構造である。

この地すべり地において、2014年9月30日午後1時10分に2haの範囲で山腹崩壊が発生した。レーザ計測によって得られたグラウンドデータを用いたDEMによる等高線図をもとに微地形判読および地表地質踏査を行い地すべりブロックおよび地質分布図を作製し図-9に示した。崩壊箇所は、三つあるブロックのうち下部のⅠブロックの西側エリアの標高380mから220mにかけての傾斜約40度の急斜面に位置し、崩壊物は岩屑を主体とすることから、いわゆる岩屑すべりである。規模は、幅90m、長さ250m、最大深さ13m、崩壊土量約3万m³であった。この崩壊は、降雨（天竜観測所：累計降雨量166mm）から4日経過してから発生した。

この地すべりの脚部は、天竜川の支流によって常に削刻を受けていることから、脚部浸食の進展が崩壊の原因の一つと考えられる。この崩壊後2か月の間に、崩壊斜面上方の標高490m付近の林道において数十cmの下方への変位が進行した。Ⅰ及びⅡブロックの斜面変動が活発化した状態になったため、緊急地すべり防止事業として、集水井（6基）の設置工事が行われ、2016年3月に竣工している。なお、標高510mより上部のⅢブロックは、水抜きボーリングとアンカーによる対策工事も並行して実施されている。

4.2 計測データの品質検証

解析対象地点で実施したレーザ計測の諸元を表-2に示す。点密度とは、1m²中のレーザ照射点を示す。グラウンド点密度とは、同様の範囲において、自動および手動のフィ

図-8 岩屑すべり発生後の地形起伏図⁶⁾とオルソ画像

図-9 地すべりブロックおよび地質分布図

表-2 レーザ計測の諸元一覧

計測回数と時期	1回目 2012/11/5	2回目 2015/1/20	3回目 2015/12/28
全データ点密度 (/m ²)	100	138	87
グラウンド点密度 (/m ²)	5.2	12.5	13.1
グラウンド到達率 (%)	5.2	9.1	15.0

表-3 不動箇所の変動量の検討

	1時期目	2時期目
計測点数	102	91
最小変位量 (m)	0.00	0.00
最大変位量 (m)	0.32	0.40
平均値 (m)	0.14	0.13
標準偏差	0.09	0.10

図-10 地すべりブロックと変動ベクトル解析図

(a) 1 時期目 (2012/11/5～2015/1/20) の806日間の変動量。背景図は第2回計測による起伏図を掲載している。ベクトルの表示がない範囲は第1回計測において計測範囲外であり、変動解析ができていない。(b) 2 時期目 (2015/1/20～2015/12/28) の342日間の変動量。背景図は第3回計測による起伏図を掲載している。いずれも赤四角は現地で実施されている地表伸縮計の設置位置を示している。

ルタリングを行って、地表面に到達したとみなしたデータの密度を示す。これによると到達率は、第1回と第2回よりも第3回目の方が良好であるが、この理由は飛行計画および機材の違いによるものである。この検証により本計測で概ね20cm四方に分布する開口部や段差を検出することが可能であると判断した。

4.3 不動エリアの評価と有意な斜面変動量の設定

変動ベクトル解析における変動量の検証は、計測期間内において変動が生じないと考えられる箇所（不動エリア）における変動量の算出を行い、その値を検出の限界と判断する。表-3には、地すべり地の下流にある道路上の平坦地（図-10参照）および地すべりブロック外側の尾根付近を中心とした範囲における変動ベクトル解析の変動量を整理した。この結果最小値は0m、最大値は、2時期目を比較した0.40mの差異が認められた。平均値は1時期目に比べて2時期目が小さくなったが、レーザのグラウンド到達率の向上に関係している可能性がある。標準偏差は、1時期目よりも2時期目が大きい類似した値となっており同じ精度の解析であると考え、本研究では平均値を変動ベクトル解析の誤差を含めた検出限界とする。すなわち0.14mよりも大きな変状を示す場合については、有意な検出と判定する。本研究では地すべりブロックが明瞭であり、変動エリアの区分設定が容易であったが、今後滑動量が不明な場合は標準偏差も考慮した検出限界を設定する必要がある。

なお、2時期のレーザ地形データを画像化して変位量を求める場合、広域地殻変動も考慮する必要がある。本研究の対象地域における国土地理院の長期の地殻変動情報によれば2011年11月から2016年11月の5年間に0.07~0.08mほど東に変位しているが、これは2011年東北太平洋沖地震の余効変動量と考えられる。ただし、本研究における調査範囲内は不動領域と考え、近隣の国土地理院の電子基準点測量データを用いて各時期の座標値を求めた。なお不動エリアの解析結果から得られた検出限界0.14mに比較すると、余効変動量は十分に小さいので無視できると考える。

4.4 地すべりブロック変動量と変動ベクトル量の整合性

以上の検討結果をもとに図-9に示す地すべりブロックⅠ及びⅡ及びその周辺の変動ベクトル解析を実施した。まず1時期目、すなわち2012/11/5~2015/1/20の806日間の解析結果を図-10(a)に示す。地すべりブロックⅠの変動ベクトルは2014年に崩壊した岩屑すべりの東側に隣接する側方崖に沿って南向（最大傾斜方向）に4~5mの変動が認められ日変動量にすると5~6mmの変動量である。この変動域は地すべりブロックⅠの上半部に顕著に認められる。特に変動量が3m以上のエリアは地すべりブロックⅠの滑落崖周辺に分布していることから、大きな変状が進行していると考えられる。一方、ブロックⅠの下半部の緩斜面では上位に比べて少ないものの変動量1~2mの範囲が面的

に広がっている。地すべりブロックⅠより下方では変動量は1m以下で明瞭な変動が認められていない。また地すべりブロックⅡにおいては南南東と南方向、すなわち最大傾斜方向に1m以下の変動が認められた。一方、地すべりブロック以外で1m以下の変動量を示す箇所はランダムであることから、地すべりブロックⅡの1m以下の変動量は、地すべり滑動に伴うものと推測できる。次に2時期目である2015/1/20~2015/12/28の342日間の解析結果を図-10(b)に示す。全体的な変動範囲は変化していないが地すべりブロックⅠの中央部を中心に変動量は1~3mで日変動量にすると3~8mmである。なお2014年に崩壊した岩屑すべりの北側に側方崖が新たに崩壊したことが認められた。前回計測時に変動量の大きいエリアは2時期目においても顕著に認められており、継続性があることが判明した。

以上のようにS-DEMに基づく面的な変動ベクトル解析を行うことで、斜面全体が一様に変動するわけではなく、同じ地すべりブロック内でも場所により異なった斜面変動を示していることが判明した。

5. 考察

5.1 地すべり地表伸縮計と変動ベクトル量の検証

解析対象地は静岡県西部農林事務所天竜農林局治山課により地すべり調査および地すべり対策と監視が継続的に行われている。12孔の調査ボーリング、7箇所の地表伸縮計の設置のほか、6基の集水井による水抜き対策工事が既に実施されている。本研究ではこのうち現在稼働中で変動ベクトル解析を実施した範囲と重複する4箇所の地表伸縮計の値を用いて整合性の検証を行った。地表伸縮計の設置箇所の事例を写真-1に示す。地表伸縮計S-2とS-7は、2014年の崩壊ブロックに隣接している箇所である。またS-3とS-6は、地すべりブロックⅡの中段に位置する。表-4には地表伸縮計の変位量と変動ベクトル解析結果による地表伸

写真-1 S-3地表伸縮計設置箇所

地すべりブロックⅡとⅢが接する滑落崖に設置されている。林道の路肩には亀裂が確認されている。地表伸縮計の長さは約7m。

表-4 地表伸縮計の計測値と変動ベクトル量

地表伸縮計は有効数字3桁で算出。変動ベクトル解析の変位量は、有効数字2桁で表示。

No.	計測手法	開始期間	終了期間	経過日数 (day)	変位量 (mm)	日変位量 (mm/day)
S-2	地表伸縮計	2014/10/5	2015/1/20	107	110	1.03
	変動ベクトル解析	2012/11/5	2015/1/20	806	1300	1.6
S-3	地表伸縮計	2015/1/20	2015/12/28	342	501	1.47
	変動ベクトル解析	2015/1/20	2015/12/28	342	500	1.5
S-6	地表伸縮計	2015/1/20	2015/12/28	342	104	0.30
	変動ベクトル解析	2015/1/20	2015/12/28	342	300	0.9
S-7	地表伸縮計	2015/1/20	2015/7/7	168	259	1.54
	変動ベクトル解析	2015/1/20	2015/12/28	342	300	0.9

縮計末端部付近の変動ベクトル量を日変動量に換算して比較した。この結果、観測期間が等しいS-3とS-6については、概ね類似した傾向が認められた。しかしながらS-7は、2015年7月7日の崩壊により計測不可となっているため観測期間が異なることから移動量の差が大きくなっている。S-2については、経過日数が大きく異なるものの、日変位量では類似した傾向を見せている。以上のように地表伸縮計と変動ベクトル解析の結果からは日変位量は計測期間が異なることや互いの計測地点が完全に同一でないために差が認められ、詳細な評価については今後の課題と考える。

5.2 変動ベクトル量から推定される地すべりメカニズム

上述した通り、地表面における変動ベクトルの分布が明

らかとされているため、地すべり主断面と変動ベクトルを用いて変動が活発化した地すべりブロックⅠおよびⅡについて斜面変動のメカニズムと今後の進行について検討を実施した。森脇¹⁶⁾は、地表面ひずみについて崩壊発生前兆・予兆領域が、0.003～0.006、破壊領域が0.006～0.02の間にあると考えた。図-11によれば地すべりブロックⅠの頭頂部の滑落崖付近において活動が活発化して以降すなわち2時期を合計した変動ベクトル量1.9mが斜面変動量として確認できる。一方、地すべりブロックⅠの斜距離は、傾斜36°、350mであることからひずみ量は0.005となる。このひずみ量は、現状で崩壊が発生していないという点で、整合している。ただし変動ベクトル量の計測期間以前にも緩

図-11 地すべりブロックと変動ベクトル量

慢な変形が進行していると考え、現状ですでに破壊領域に含まれる可能性がある。

さらに、変動ベクトルを詳細に観察すると、地すべりブロックⅠの標高250m付近における小崖が多い区間において鉛直成分が卓越している。一方で地すべりブロックⅠの末端部の標高225m付近では沈下が認められず水平成分が卓越している。これらの傾向は円弧すべり状の変動を示していると推定できる。これらの傾向をまとめると地すべりブロックⅠにおいて、全体的な滑動が発生している可能性とともに、末端部において局所的に円弧すべりを示す小ブロックが存在して変動が進んでおり圧縮部となっていることを示唆する。地すべりブロックⅡでは全体的に0.5~1.0mの変動が認められる。地すべりブロックⅠとⅡの境界付近では、その変動量の差から引張部の領域が形成されていることを示している。

これらの情報を集積することで、対策工が施工された後においても面的に斜面の動きを監視することができ、今後の経過を総合的に判断する資料として活用できると考えられる。

6. 結 論

本研究では、グラウンドデータの到達率を十分に管理した高精度な航空レーザ計測により得られた3次元点群をS-DEM解析により解像度の高い地形画像を作製し変動ベクトル解析に適用した結果、これまで困難であった植生下での20cm程度の斜面変動量を広い範囲において詳細に把握することができた。また変動ベクトル解析により斜面変動の量と方向を解析することにより斜面崩壊メカニズムや変形の状況あるいは不安定領域の詳細を明らかにすることができた。本解析手法は、大規模な斜面変動が明瞭となっている山地斜面への適用で、数10cm程度の変動量を示す不安定斜面の抽出および変動量の評価への活用が大いに期待できる。また、変動量がほとんど見られない箇所に観測機器が設置されている場合は、観測機器による斜面変動のモニタリングから、本解析手法による斜面変動のモニタリングに変更できる可能性がある。これによって、観測機器の維持管理費軽減と安全性向上を図ることができる。

今後の課題としては、我が国の特性である濃い植生下においてもレーザ計測が今回と同程度の精度で可能となる計測手法の開発や変動ベクトル解析手法において微地形の特性をさらに有効に活用できる点群を直接比較するアルゴリズムの活用などの改善で、数センチオーダーの地すべり等の斜面変動に適応を図ることが重要である。

現時点では本手法を適用できる機材や回転翼機が限定され、計測費用も高価なため、繰り返し行う多時期の計測ではコスト高となっている。そこで近年技術開発が活発なUAVを用いたレーザ計測では、150m以下の低高度でレー

ザ計測することで、位置精度、植生下の地表面への到達密度が向上することによる高密度の3次元点群データからセンチオーダーの変位を抽出する技術へ拡張できると考えられる。今後の技術開発により、単位面積当たりの計測コストも低下させることができることから、変動ベクトル解析のさらなる発展が期待される。

謝辞 本稿を執筆するにあたって、静岡県西部農林事務所天竜農林局治山課には解析の対象地点である地すべり地に関するボーリングデータ、地表伸縮計データを提供いただくなど便宜を図っていただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 高 泰朋, 守岩 勉, 五島直樹, 前海真司, 鈴木隆司, 尾崎順一, 金俊之 (2006): 航空レーザ計測を利用した崩壊地の自動抽出, 砂防学会誌, Vol.63, No.4, pp.26-29, 2010.
- 2) 太田岳洋, 八戸昭一 (2006): 数値標高モデルによる地形計測の現状と応用例, 応用地質, No.46-6, pp.347-360.
- 3) 高見智之 (2015): 細密DEMを活用した地形解析に基づく重力変形斜面の類型化, 応用地質, No.56-5, pp.210-218.
- 4) 千葉達朗, 鈴木雄介 (2004): 赤色立体地図—新しい地形表現手法—, 応用測量論文集, Vol.15, pp.81-89.
- 5) 佐々木寿, 向山 栄 (2009): 地形判読を支援する新しい地形表現方法の開発とその利用, 応用地質, No.49-6, pp.318-330.
- 6) 公益財団法人 日本測量調査技術協会 (2013): 航空レーザ測量による災害対策事例集, pp.42-43.
- 7) 平川泰之 (2006): 航空レーザ計測による地形変化把握のための標高差分値の最適化, 砂防学会誌, Vol.58, No.6, pp.18-22.
- 8) 向山 栄, 江川真史 (2009): 二時期の細密DEMから作製した地形画像解析により推定した平成20年(2008年)岩手・宮城内陸地震における荒砥沢ダム周辺の地表変動: 応用地質学会平成21年度研究発表会講演論文集, pp.3-4.
- 9) 品川俊介, 阿南修司, 佐々木靖人, 向山 栄, 本間信一, 小林容子 (2013): 二時期の航空レーザ計測による地表地震断層周辺の変位量分布の推定2011年4月11日福島県浜通りの地震に伴う事例, 応用地質Vol.53, No.6, pp.271-281.
- 10) 下河敏彦, 稲垣秀輝, 千田良道, 松田匡司, 鈴木浩二 (2013): 航空レーザ計測のDSMで抽出された地すべり危険斜面の現地検証, 日本地すべり学会誌, Vol. 50, No.4 pp.176-182.
- 11) Sakae Mukoyama (2011): Estimation of ground deformation caused by the Earthquake (M7.2) in Japan, 2008, from the Geomorphic Image Analysis of high resolution LiDAR DEMs, Journal of Mountain Science, Vol.8, No.2, pp.239-245.
- 12) 笠原克夫, 土志田正二, 江藤史哉 (2012): 航空レーザ計測による斜面崩壊の前兆としての微地形判読図の抽出, 地すべり学会誌vol.49, No.3, pp.47-51.
- 13) 千田良道, 高野正範 (2013): 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, pp.85-88.
- 14) 増田 仁, 田近真悟, 沢田和秀, 小野貴稔 (2014): 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, 地盤工学会中部支部第23回調査設計施工技術報告会1-2.
- 15) 中日本航空㈱: 点群ビューワMierre (ミエール): <http://www.nnk.co.jp/research/product/software/mierre.html>
- 16) 森脇 寛 (2001): 地表面移動量を指標とする地すべり斜面の崩壊危険度評価, 地すべり vol.38, No.2, pp.115-122.

(2016年8月8日受付, 2017年1月20日受理)

Jour. Japan Soc. Eng. Geol., Vol.57, No.6 pp.277-288, 2017

Development of Analytic Method for Landslide Measurement by Movement Vectors Using S-DEM Data Obtained from Airborne Laser Point Clouds

Teruyuki KIKUCHI, Teruyoshi HATANO, Yoshimichi SENDA and Satoshi NISHIYAMA

Abstract

Airborne laser measurement has been widely known as a surveying technique for acquiring topographic data with a high accuracy, and it has been lately utilized as a differential analysis for evaluating the amount of the sediment caused by a large-scale landslide. However, it is impossible to detect landslide behavior at speed of a few centimeters using aerial laser measurement. In this study, we have developed the analytic method to evaluate landslide variation amount with a high accuracy by discriminating characteristic land features from digital elevation model, which is called S-DEM or Substratum Digital Elevation Model, using laser point clouds at the position shifted from the ground with an arbitrary distance. We also describe the result that it is possible to predict the movement of debris slide occurred in the area of landslide using the method we developed.

Key words : landslide, monitoring of slope movement, airborne laser, Digital Elevation Model