

# 斜面の微地形と樹木の変形—平成 30 年豪雨による斜面崩壊地の例

MICRO-LANDFORM OF MOUNTAIN SLOPE AND DEFORMATION OF TREES:  
CASE STUDY OF A LANDSLIDE AREA CAUSED BY THE HEAVY RAIN IN 2018

黒木 貴一<sup>1</sup>・太田 岳洋<sup>2</sup>・山本 道輔<sup>3</sup>

Takahito KUROKI, Takehiro OHTA and Michisuke YAMAMOTO

<sup>1</sup> 関西大学文学部 (〒564-8680 吹田市山手町 3-3-35)

E-mail: kuroki0@kansai-u.ac.jp

<sup>2</sup> 山口大学大学院創成科学研究科 (〒753-8512 山口市吉田 1677-1)

E-mail: takohta@yamaguchi-u.ac.jp

<sup>3</sup> 株式会社オーエスエー (〒709-4622 津山市戸脇 494-7)

E-mail: yamamoto@osa-ct.co.jp

**Key Words:** laser measurement, point cloud data, tree, micro-landform, landslide, soil creep

## 1. はじめに

航空機や UAV からのレーザー計測で得られた点群データは、自然災害にかかわる地形を扱う理学や土木分野などの場面で活用されている<sup>1),2),3)</sup>。点群データの中でもグランドデータを用いて微地形を捉える研究が多い。点群密度の増加に伴い、研究視点は微地形から極微地形(10~100m)の域に進んでいる<sup>4),5)</sup>。一方、サーフィスデータからグランドデータ間の点群データは、森林研究で注目されてきた。平田(2007)<sup>6)</sup>によれば、林分材積をはじめ風害、雪害など気象災害の検出や積雪深の推定などに活用されてきた。またそのような点群データからは、樹木の形状把握や地形と樹木との関係を明らかにする取り組みも見られる<sup>7),8),9)</sup>。最近では、複層林の分析、樹種の判別、樹齢の推定、動植物の潜在生息域の推定などの生態学へ点群データ活用も進んでいる<sup>10)</sup>。

ところで斜面地形の探究は、谷底に近い遷急線、後氷期開析前線の認識<sup>11),12)</sup>に始まり、その発達は斜面崩壊や土層蓄積に関連付けて整理され、その水文特性も議論された<sup>13),14),15),16)</sup>。斜面は崩壊に至るまで、基盤岩の風化や生物の関与等で土層形成が継続し、一定期間の免疫性を持つ<sup>17)</sup>とされる。その間、

土層が基盤岩上をクリープする結果、樹木には根曲りが見られる<sup>18),19)</sup>。また大規模な地すべりでは、樹木が山側、谷側にその移動現象に合わせて傾動することも知られている<sup>20),21)</sup>。

点群データの利用が一般化した今日、地形と樹木を接続する研究は、谷側に樹木が若干傾斜する点に触れるもの<sup>7)</sup>や、想定より樹高が低めに検出される原因を斜面の樹幹傾動におくもの<sup>8)</sup>に見られる程度で、まだ少ない。そこで本研究では、点群データを用いて斜面地形と樹木形状(傾動量と傾動方向)との関係を明らかにし、山地斜面の姿を斜面の土層移動の量や方向から動的に明らかにする。

## 2. 研究方法

### (1) 研究対象地域

図-1 は、平成 30 年 7 月豪雨で斜面崩壊が多発した山口県東部の研究対象地域を示す。国土地理院の正射画像から、調査対象地域に 138 箇所の斜面崩壊が判読され、それらの方位、傾斜、標高、植生との関係が報告された<sup>22)</sup>。本地域は、中生代後期白亜紀の花崗岩で構成され<sup>23)</sup>、生物多様性センターHPの植生調査(1/2.5 万)都道府県別一覧によれば、アカマ

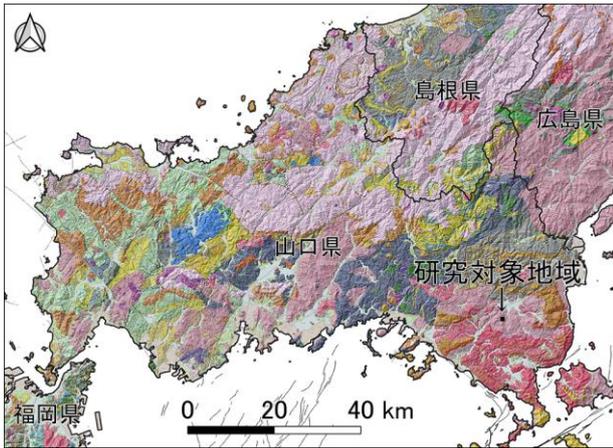


図-1 研究対象地域 背景は地理院地図と地質図 Navi

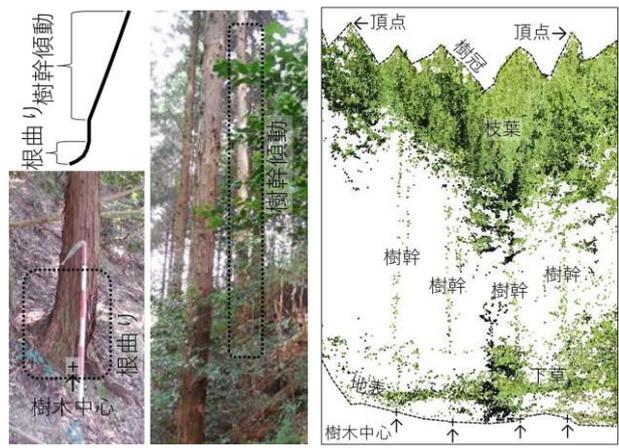


図-3 注目する樹木形状 図-4 点群データイメージ

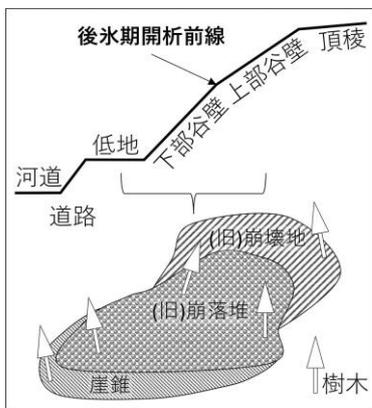


図-2 斜面地形と樹木のイメージ

ツ群落、スギ・サワラ・ヒノキ植林、伐採跡地群落が分布する。その南西部に計測範囲(365m×250m)を設定し、UAVにより点群データ(Phoenix社 ultra, 点群(X, Y, Z, R, G, B, Distanceほか)密度1200/m<sup>2</sup>)を得た。さらに樹木形状を検討する東西42m, 南北40mの範囲WとEを設定した(後述の図-6)。

## (2) 地形区分方法

オルソ空中写真と10cmDEMによる陰影図と等高線図から斜面地形の判読を行った。地形は、頂稜、上部谷壁、下部谷壁、低地に大区分した。後氷期開析前線にあたる上部谷壁と下部谷壁の地形境界の近傍で上部谷壁から低地の範囲に、旧崩壊地、旧崩落堆、崖錐を、さらに今回の豪雨による崩壊地と崩落堆を区分した(図-2)。

## (3) 樹木形状の確認と評価

樹木形状として、現地調査で傾動と根曲りが識別できた(図-3)。本研究では傾動に着目し、点群データから傾動の地理情報化を進め、傾動と斜面地形との関係を検討する。

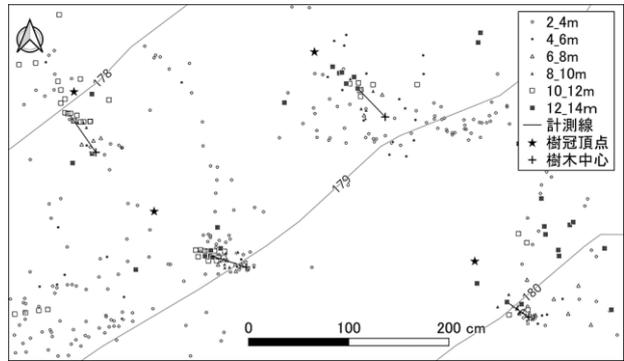


図-5 地表からの距離を2m毎に区分した点群データ

図-4はCloudCompareに投影した点群データである。樹冠、樹幹、枝葉からなる樹木形状と地表を確認できる。樹冠には頂点を、樹木上位に多くの枝葉を確認できる。樹幹は、樹冠に近い上位で枝葉と区別できず、地表に近い部位は下草と区別できない。枝打ちされた中位は、点群が樹幹形状を示すが、その下位では点群密度が低下し形状は読み取りにくい。このような点群データは、根曲りは難しいが、樹高を限定すれば樹木傾動は解析できる。そこで点群データを、Distance(地表からの距離)で2m毎に切り出し、点群の分布を検討した。またQGISのプラグインでDSM(Digital Surface Model)から、樹冠頂点のポイントデータを準備した。

図-5は研究対象地域の一部(標高179m付近)に関し、樹幹形状の識別できる地表から2m~14mの点群を2m毎に区分して表示した。点群区分の各中心は下位から上位に向かい樹冠頂点に近づく。樹冠頂点への点群区分の中心移動を参照しつつ、QGISにより2~6mの点群中心を樹木中心とし、8~12mの点群中心までの計測線を描いた。そして計測線の方位角で傾動方向を、その距離で傾動量を算出した。

## (4) 樹木形状による斜面の動態推定

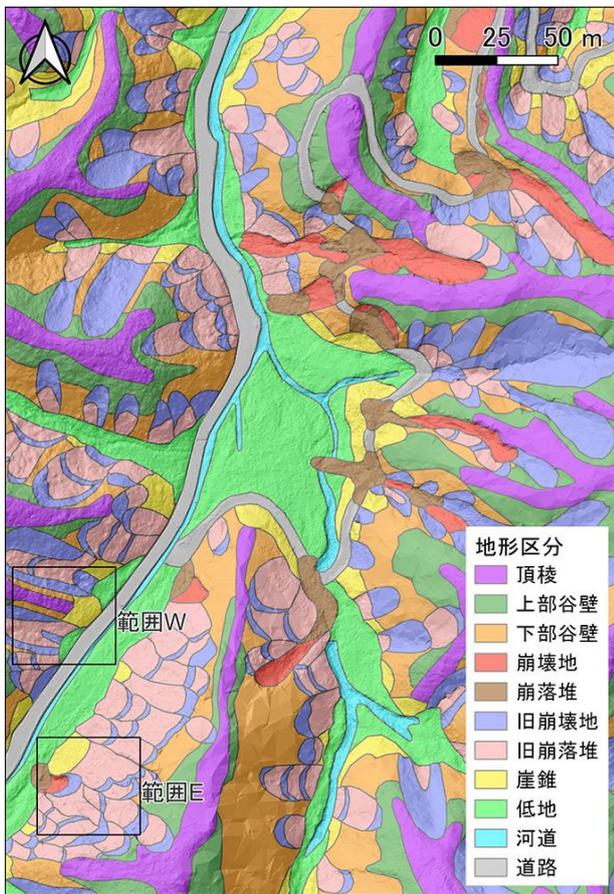


図-6 計測範囲の地形区分

地形区分を背景に傾動方向と傾動量の分布を示しその特徴を検討する. 10cmと1m解像度のDEM(Digital Elevation Model)を準備し, QGISで傾斜量と傾斜方位を樹木形状として求める. 次に地形区分に対する樹木形状を分析し, 地形別又は地形内の土層移動の量と方向の特徴を考察する.

### 3. 地形区分と傾動の分布

#### (1) 地形分布

図-6には計測範囲の地形区分を示す. それらは, 河道が2.1%, 頂稜が11.9%, 上部谷壁が13.7%, 下部谷壁が15.4%, 崩壊地が2.9%, 崩落堆が2.2%, 旧崩壊地が16.8%, 旧崩落堆が14.4%, 崖錐が4.5%, 低地が11.4%, 道路が4.7%を占める. 低地には段丘や微高地なども見られる. 頂稜は幅10~20mで細長く南北と東西に延びる. 低地は, 南北に主な延長があり約50mの最大幅を有するが, 支流内に分岐して延びている. その他の地形は, 頂稜と低地の間に分布し, 中でも下部谷壁の位置では, 新旧の斜面崩壊地形(崩壊地と崩落堆の対)が多い. 斜面崩壊は10ヶ所程度あり, 大半は下部谷壁の位置に生じたが, 一部の崩壊地は頂稜に達している. 斜面崩壊では,

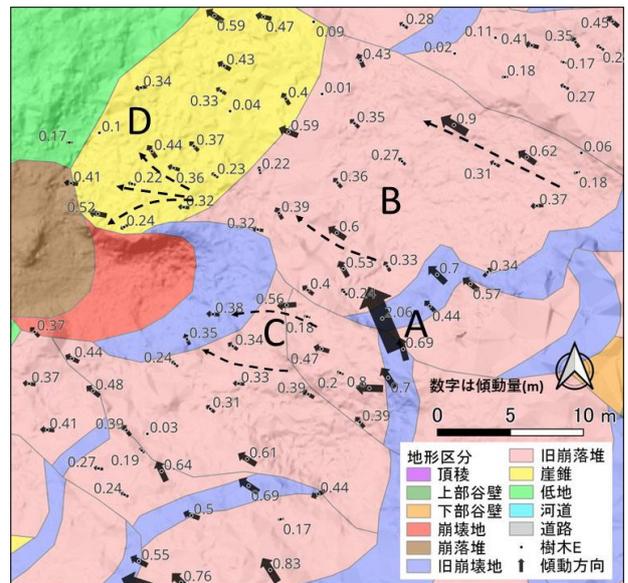


図-7 範囲Eの樹木の傾動量と傾動方向

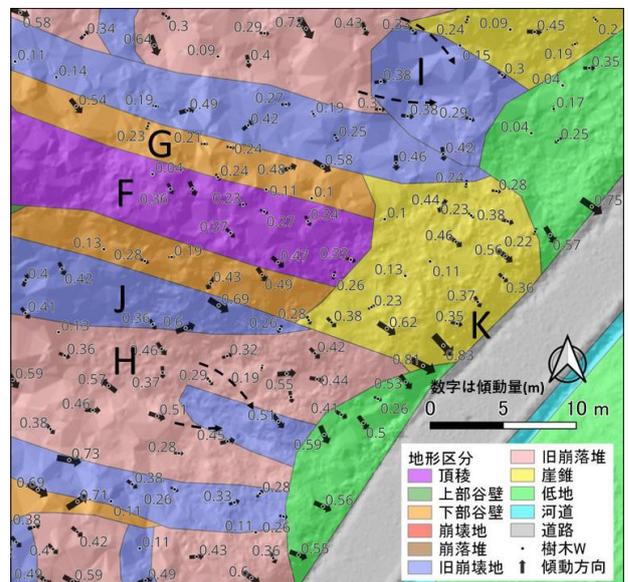


図-8 範囲Wの樹木の傾動量と傾動方向

花崗岩の基盤岩上にある最大層厚で約2mの風化砂礫中心の土層が崩落した<sup>24)</sup>.

#### (2) 樹木形状の分布と土層移動

図-7は範囲Eの樹木の傾動方向を示す矢印と, 傾動量を示す大小の矢印と数字(m)を, 地形区分図に重ねた. 傾動量は多様だが, 傾動方向は全体傾斜に調和し西北西を示す. 旧崩壊地では, A付近のように傾動量が大きく, 土層移動の量が多い. 旧崩落堆では, B付近のように傾動量の差が大きい. 一部狭い範囲で傾動量が近似し傾動方向に連続性があり, 破線矢印のように連続する土層移動が推定される. 崩壊地に接する旧崩壊地に近いC付近では, 傾動方向が漸移し, 破線矢印のように収束する土層移動が推定される. 崖錐では, 傾動方向は近いものが多い

が、傾動量の差は大きい。またD付近のように一部狭い範囲で傾動方向が漸移し、破線矢印のように発散する土層の動きも推定される。

図-8 は範囲 W の樹木の傾動量と傾動方向を図-7と同様に示した。傾動量は多様だが、傾動方向は全体傾斜に調和し東南東を示す。頂稜では、F 付近のように傾動量は比較的小さく、傾動方向がそろう。下部谷壁では、G 付近のように傾動量も傾動方向も差が大きい。この傾向は、崩落堆他にもある。例えばHやJ付近のように傾斜方位が180度近く逆を示す樹木もあり、地すべり状<sup>21)</sup>に進む土層移動が予想される。また旧崩壊地のI付近では、傾動方向が漸移し、破線矢印のように収束する土層移動が推定される。崖錐では、傾動方向は近いものが多いが、傾動量は差が大きい。そしてK付近のように、その末端で傾動量が極めて大きい。Kの南北の低地に同様の傾向が見られるため、道路敷設時の切土が斜面を不安定化させ、土層移動の量が増したことを示す。

このように、傾動量と傾動方向を点群データから求め地図表示できる。また、地図から樹木形状は、地形区分別に特徴があり、さらに地形区分よりも狭い範囲で土層移動の量と方向の評価ができる。

#### 4. 地形と傾動との関係

##### (1) 一般傾斜と樹幹傾動

図-9 は10cm及び1m(100cm)DEMによる傾斜量に対する傾動量を示す。またその近似直線を描き、近似式も示した。いずれも傾斜量の増加に対し傾動量も増加するが、双方とも、その $R^2$ 値は0.1未満で、相関は極弱い。また1m DEMはグラフ傾きも $R^2$ 値も高まるため、1mDEMで求めた傾斜量で樹木の傾動量は説明しやすい。この要因として、10cmDEMからの傾斜量が、より小さな樹木根やガリ等の自然現象に対応することが考えられる。そして樹木の傾動を誘導する土層移動現象を検討できる傾斜量は、1mDEMからのものがより適切であると思われる。

図-10 は10cmと1m(100cm)DEMによる傾斜方位に対する傾動方向を示す。またその近似直線を描き、近似式も示した。樹木情報は、範囲Eは傾斜方位の高い右側、範囲Wはそれが低い左側を中心に表される。いずれも傾斜方位に連動し傾動方向もほぼ対応しており、双方とも、その傾きは0.8以上、 $R^2$ 値は0.5以上なので、相関は極強い。また1mDEMは、グラフ傾きも $R^2$ 値も高まるため、1mDEMで求めた傾斜方位で樹木の傾動方向も説明しやすい。しかし、傾斜方位80度付近に対する傾動方向320度付近の樹

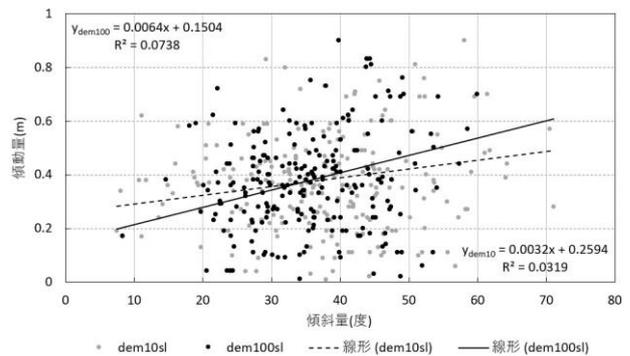


図-9 傾斜量に対する傾動量

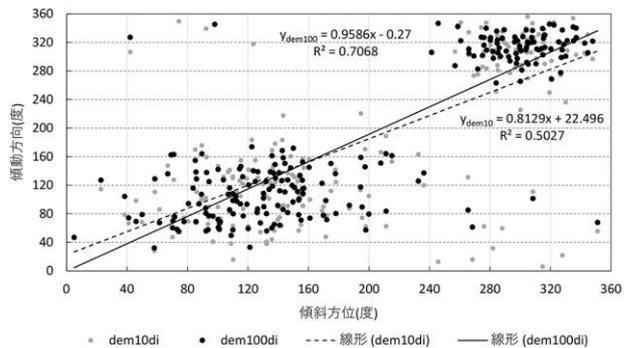


図-10 傾斜方位に対する傾動方向

木や、傾斜方位320度付近に対する傾動方向80度付近の樹木は全体分布から外れ、これらは傾斜方位とは逆に傾動する樹木の存在を示す。この結果は、地形区分より狭い範囲で、地すべり状に土層移動する一体的な場所があり、一部樹木が傾斜方位と逆に傾動した可能性を示す。

したがって、樹木の傾動は、土層移動の量に対応する傾動量がおおよそ傾斜量に対応し、土層の移動方向に対応する傾動方向が傾斜方位によく対応することが分かった。また土層移動は、一部地すべり状に進む場所があることも推定された。なお傾斜量と傾動量の相関の低い点と、傾動量やその方向の分析に適切なDEMサイズは今後の検討課題としたい。

##### (2) 地形区分と樹幹傾動

図-11 は1mDEMの傾斜量に対する傾動量を、土層移動が想定される頂稜、下部谷壁、旧崩壊地、旧崩落堆、崖錐の地形区分別に示す。上部谷壁のデータは得られなかった。その近似直線を描き、近似式も示した。

地形区分別の平均傾斜量は、高い方から、旧崩壊地41.1度、下部谷壁38.3度、旧崩落堆37.4度、頂稜32.2度、崖錐30.7度である。その標準偏差は、4.4度~10.6度である。一方、地形区分別の平均傾動量は、高い方から、旧崩壊地0.44m、旧崩落堆0.39m、下部谷壁0.35m、頂稜0.33m、崖錐0.31mで、平均傾

斜量と順序は似る。その標準偏差は、0.13m~0.3mである。つまり地形区分別に見ると、傾動量は傾斜量におおよそ対応するが全く同じではなく、傾動量のばらつきも少し異なる。そこでグラフで傾動量の地形区分別の特徴を詳しく見る。

グラフでは、傾きが0.01以上でR<sup>2</sup>値が約0.2の頂稜、下部谷壁、旧崩壊地と、傾きが0.005未満でR<sup>2</sup>値が0.1未満の旧崩落堆と崖錐に分けられる。元々の地質・土層で構成される前者は、傾斜量に応

下部谷壁、傾きが約-0.1でR<sup>2</sup>値が約0.3であり相関の見られない頂稜、である。

傾斜方位と傾動方向の相関が強い地形グループでは、傾斜方位に全体が向く土層移動があると思われる。ただ、図-11では、その量の感度が高く、土層全体が均一な量で移動しているだろう旧崩壊地に対し、旧崩落堆と崖錐のそれは小さかった。図-12を見ると、傾斜方位80度付近に対する傾動方向320度付近の樹木と、傾斜方位320度付近に対する傾動方向

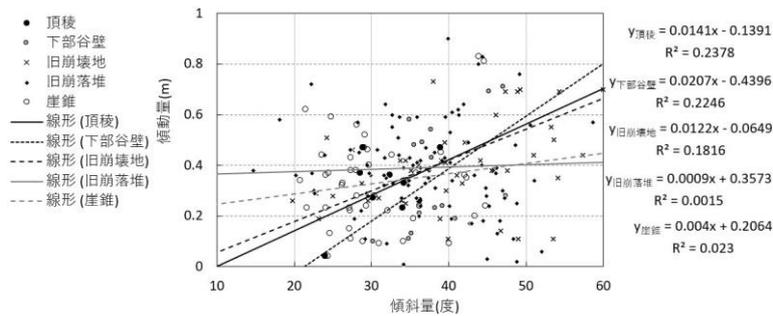


図-11 地形区分別の傾斜量に対する傾動量

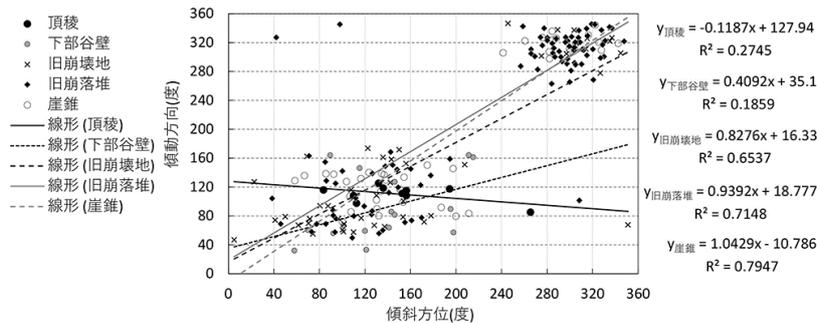


図-12 地形区分別の傾斜方位に対する傾動方向

じて傾動量は定まるが、近い過去に崩壊し再堆積した後者は、傾動量のばらつきが大きい。前者は、平均傾斜量の大小とグラフの傾きから、頂稜に始まる土層移動の量は、下部谷壁で増加し、旧崩壊地で減少する傾向も伺える。対して後者は、再堆積後の土砂移動の量は多様だが全体で見ると小さい。

したがって土層移動の量は、基本的には傾斜量に対応し頂稜、下部谷壁、旧崩壊地で大きく、旧崩落堆と崖錐で小さい。そしてその感度は、前者で高く、後方で低い。また頂稜から始まる土層移動の量は、下部谷壁で増加し、旧崩壊地で減少する傾向があり、崩落堆と崖錐ではばらつく。

図-12は1mDEMの傾斜方位に対する傾動方向を、地形区分別に示す。その近似直線を描き、近似式も示した。

グラフの傾斜方位に対する傾動方向の相関から、地形は3分される。それぞれ、傾きが1に近くR<sup>2</sup>値が約0.7で強い相関を持つ旧崩壊地、旧崩落堆、崖錐、傾きが約0.4でR<sup>2</sup>値が約0.2で弱い相関を持つ

80度付近の樹木は、旧崩落堆に多い。加えて図-6の頂稜から低地までの間は、旧崩壊地と旧崩落堆が繰り返される斜面であり、崖錐末端は道路敷設で不安定化する傾向にあった。つまり旧崩落堆や崖錐での土層移動は、大小のばらつきが大きく、一部地すべり状に進む傾向があることも考えられる。

一方、活発な土層移動が推定される下部谷壁や頂稜で、傾斜方位と傾動方向の関連が弱い理由として、地形に現れない基盤構造の影響や、傾斜方位の算出が難しい低角で平坦な地形特性などを現時点では考えているが、今後の検討を要する。

このように土層移動の方向は、基本的には傾斜方位で決まるが、傾斜方位に対する傾動方向の感度は、地形区分によって異なる。その方向の感度は旧崩壊地、旧崩落堆、崖錐で高く、次いで下部谷壁、頂稜である。傾斜量に対する土層移動の量の感度が低い旧崩落堆と崖錐では、傾動量や方向に影響する地すべり状に進む土層移動の存在が推定される。

## 5. まとめ

山口県東部の山地斜面を対象に、UAV で取得した点群データを用いて、微地形と樹木形状との関係を明らかにし、土層移動の量や方向を推定した。その結果、以下のように山地斜面の発達を動的に整理した。

- 1) 点群データから、樹幹傾動の量と方向を地理情報化し分布を示した。樹木形状の、地形区分別の特徴に加え、地形区分よりも狭い範囲での特徴を把握できた。つまり樹木の点群データは、斜面の土層移動の量と方向の評価が可能で、斜面崩壊を含む斜面地形の発達について検討しやすい。
- 2) 樹木形状として、土層移動の量に対応する傾動量はおおよそ傾斜量に対応し、その移動方向に対応する傾動方向は傾斜方位によく対応することを確認した。また土層移動は、識別できた地形区分より狭い範囲で地すべり状に進む場所があることも推定された。
- 3) 土層移動の量は、地形の傾斜量に影響を受けるが、頂稜、下部谷壁、旧崩壊地で大きく、旧崩落堆と崖錐で小さい。その感度は、移動量の大きい地形では高く、小さい地形では低い。また頂稜から始まる土層移動の量は、下部谷壁で増加し、旧崩壊地で低下する傾向があり、また旧崩落堆と崖錐ではその量はばらつく。
- 4) 土層移動の方向は、地形の傾斜方位に影響を受けるが、その感度は、地形区分により異なる。それは旧崩壊地、旧崩落堆、崖錐で高く、次いで下部谷壁、頂稜である。旧崩落堆と崖錐では、傾斜方位の分布から地すべり状に進む土層移動が示唆される。

## 謝辞

本研究は日本国土開発未来研究財団の支援による「定量化地生態学的手法による斜面災害危険度評価手法の開発(代表：太田岳洋)」の一環で実施した。記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 八木浩司, 檜垣大助, 吉松弘行, 相楽渉, 高木洋一, 内山庄一郎: 空中レーザー高精度地形図の地すべり, 微地形判読への応用, 地すべり, 39 巻 4 号, pp. 421-427, 2003.
- 2) 岩橋純子, 神谷泉, 山岸宏光: LiDAR DEM を用いた表層崩壊のアセスメントに適する勾配と凹凸度の計算範囲の推定, 地形, 30 巻 1 号, pp. 15-27, 2009.
- 3) 菊地輝行, 秦野輝儀, 千田良道, 西山哲: 三次元点群データを用いた急斜面の維持管理における変動解析, 日本地すべり学会誌, 55 巻 2 号, pp. 65-71, 2018.
- 4) 下河敏彦: 高精度地形情報の活用と防災, 応用地質,

59 巻 5 号, pp. 302-310, 2018.

- 5) 菊地輝行, 崎田晃基, 秦野輝儀, 西山哲: 航空レーザー計測データを用いた地すべり, 崩壊斜面における地形判読と地形変状規模の定量化, 情報地質, 31 巻 2 号, pp. 37-45, 2020.
- 6) 平田泰雅: 航空機レーザースキャナーによる森林計測とその動向, 森林計画誌, 41 巻 1 号, pp. 1-12, 2007.
- 7) 平田泰雅: 航空機レーザースキャナーデータを用いたヒノキ人工林における樹高と地形との関係, 日林誌, 87 巻 6 号, pp. 497-503, 2005.
- 8) 平田泰雅: 航空機レーザースキャナーを用いたスギ人工林計測におけるレーザー光の林冠透過率と地上照射密度の影響, 森林計画誌, 39 巻 2 号, pp. 81-95, 2005.
- 9) 青柳一翼, 矢嶋準, 森岡千恵, 瀬口栄作, 中嶋聡, 中尾浩康, 加藤薫, 杉山智治: 野洲川松林における 3 次元点群計測を活用したマツ類個体の形状寸法計測, 日本緑化工学会誌, 49 巻 1 号, pp. 145-148, 2023.
- 10) 加藤顕, 石井弘明, 榎木勉, 大澤晃, 小林達明, 梅木清, 佐々木剛, 松英恵吾: レーザリモートセンシングの森林生態学への応用, 日本森林学会誌, 96 巻 3 号, pp. 168-181, 2014.
- 11) 羽田野誠一: 山地の地形分類の考え方と可能性, 東北地理, 38 巻 1 号, pp. 87-89, 1986.
- 12) 吉永秀一郎: 十勝平野東部の段丘を開析する小流域の最終表記以降の斜面発達. 地理学評論, 63 巻 9 号, pp. 559-576, 1990.
- 13) Dalrymple, J. B., Blong, R. J. and Conacher, A. J.: A hypothetical nine unit landsurface model, Zeitschr. Geomorph., Vol.12, pp.60-76, 1968.
- 14) 田村俊和: 谷頭部の微地形構成, 東北地理, 26 巻 4 号, pp. 189-199, 1974.
- 15) 恩田裕一: 土層の水貯留機能の水文特性および崩壊発生に及ぼす影響, 地形, 10 巻 1 号, pp. 13-26, 1989.
- 16) 田村俊和: 微地形分類と地形発達—谷頭部斜面を中心に—, 水文地形学—山地の水循環と地形変化の相互作用—, 恩田裕一ほか編, 古今書院, pp. 177-189, 1996.
- 17) 小出博: 日本の国土 (下), 東京大学出版会, 556p, 1973.
- 18) 河上真一: 根曲がりに関する地理学的考察, 愛知教育大学地理学報告, 45 号, pp. 124-131, 1976.
- 19) 黒木貴一, 磯望, 後藤健介: 2003 年九州豪雨による太宰府市原川流域の斜面崩壊と谷壁斜面の地形・地質的特性, 応用地質, 48 巻 4 号, pp. 170-179, 2007.
- 20) Braam, R. R., Weiss, E. E. and Burrough, P. A.: Dendrogeomorphological analysis of mass movement, A technical note on the research method. Catena, Vol.14, pp.585-589, 1987.
- 21) 岡本有生, 檜垣大助: 地すべり活動を示す樹木の傾き—白神山地を例として—, 日本地すべり学会誌, 50 巻 3 号, pp. 28-34, 2013.
- 22) 黒木貴一, 太田岳洋, 木山拓海: 平成 30 年 7 月豪雨の斜面崩壊と微地形—岩国地区を例に—, 応用地質学会中国四国支部令和 4 年度研究発表会論文集, pp. 51-56, 2022.
- 23) 東元定雄, 濡木輝一, 原郁夫, 佃栄吉, 中島隆: 岩国地域の地質. 地域地質研究報告, 5 万分の 1 図幅, 高知 (13)第 24 号, 79p, 1983.
- 24) 黒木貴一, 太田岳洋, 山本道輔: 岩国地区の平成 30 年 7 月豪雨による斜面崩壊と微地形の形成, 日本地理学会発表要旨集, 103 号, p95, 2023.

(2024. 5. 31 受付)