

航空レーザデータを用いた地形変化点の機械抽出

室井 翔太（国際航業株式会社）

1. はじめに

我が国では近年、自然災害が頻発・激甚化し、甚大な被害が発生している。このような状況に対し、平成25年に国土強靱化基本法が公布・施行され、強くしなやかな国民生活の実現を図るために事前防災・減災や迅速な復旧・復興等に資する施策が取り組まれてきた¹⁾。このような枠組みの中で、令和2年6月18日に決定した「国土強靱化年次計画2020」では、航空レーザ測量等による高精度地形情報の整備・活用による山地災害発生のおそれがある箇所の的確な把握等が推進されている²⁾。年次計画の推進事項を実現するために、航空レーザデータから復元した細密な地形モデルを用いて微地形判読を実施し斜面の危険度を評価する手法があるが、近年の計測精度の向上から現地踏査および現地調査を実施する前に机上でかなり詳細な情報を得ることが可能となった。

しかし、微地形判読を実施するうえで、①地形学に精通した熟練判読者の確保およびそれにかかるコストや労力、②異なる判読者による記載量や解釈等の個人差、③特に広範囲を判読する場合、同じ判読者でも地域による記載内容および解釈の変化、判読漏れ、といった問題が生じる。実際に、個人差の低減を目的として判読作業を二段階に分け、複数の技術者が同範囲に対し同地形種の判読を試みた結果、一定の低減は認められたものの第一段階で既に個人差や判読漏れ等が生じた事例もある³⁾。これらの問題を解決するためには、特に熟練判読者が減少傾向にある現状も踏まえ、判読の機械化が必要不可欠である。

そこで本稿では、航空レーザデータから作成した数値標高モデル (Digital Elevation Model: DEM) を用いて、傾斜が急変する遷急点や遷緩点、斜面変動域と不動域の境界部である滑落崖といった地形が空間的に不連続に変化する地点 (以後、地形変化点という) を機械的に抽出する手法⁴⁾ の適用を試み、その有効性評価を行った。これまで、地形表現の鮮明化を目的とした数値解析による成果は多々あるが、判読の機械化を目的として考案された手法は無く、近年になってAI技術を用いた判読の機械化が試行されてはいるものの、計算過程がブラックボックス化しており成果に対する解釈が難しい。それに対し本手法は、教師データを明確な計算過程に基づき適用することでブラックボックス化を防ぎ、成果に対する解釈や教師データの改良等が容易である利点を有する。

2. 機械抽出手法

2.1 機械抽出手順

本手法の機械抽出手順を図1に示す。本手法

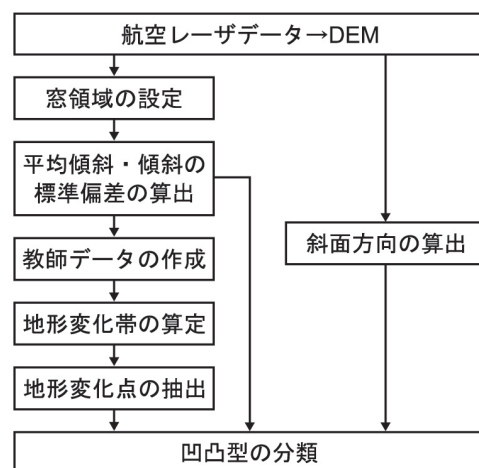


図1 機械抽出手法の手順

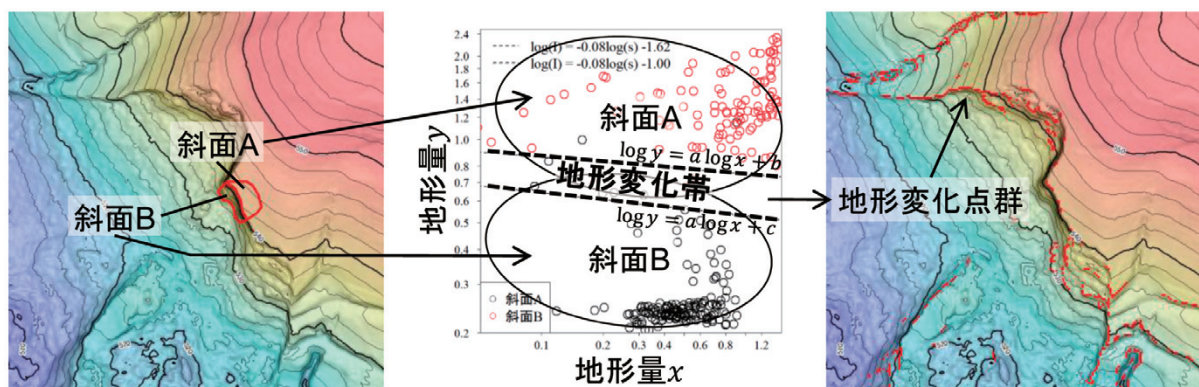
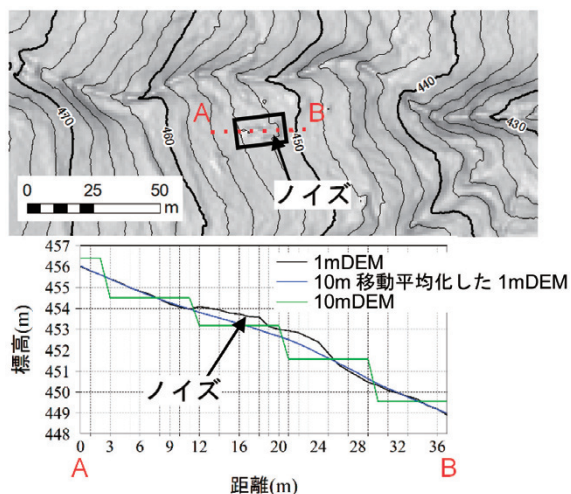


図2 機械抽出手法のイメージ

はまず、対象とする地形変化箇所を含む隣接する2つの斜面領域（以後、教師データという）を準備する（図2の左）。次に、教師データの境界付近をDEMから求めた複数の地形量から算定（以後、地形変化帯という）する（図2の中央）。なお本稿では、地形量 x を「傾斜の標準偏差」、地形量 y を「平均傾斜」としている。これらの算出手法の詳細は⁴⁾の文献を参照されたい。最後に、全範囲の格子点のうち、地形変化帯内の地形量の組合せをもつ点を抽出し地形変化点とする（図2の右）。

2.2 窓領域の設定

地形量を算出する際に、本手法ではDEMの1つの格子点に対する計算範囲（窓領域）を設定する。これは、細密な地形モデルの復元により

図3 窓領域設定によるノイズ除去
(上：断面位置、下：断面図)

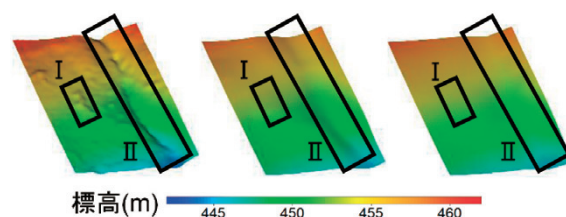
微地形の表現が可能となった一方でノイズも少なからず存在するDEMに対し、微地形表現の分解能を維持しつつノイズの影響を低減させるためである。窓領域の有効性を示すために、図3に各種地表面モデルの断面比較結果を示す。1m格子間隔のDEMを10mの窓領域で移動平均化して復元した地表面モデルの場合、1mDEMで存在していたノイズが除去されており、かつ10mDEMよりも斜面が細密に表現されている。

2.3 地形量

2.3.1 平均傾斜

地形変化点を求める地形量のひとつとして、本稿では平均傾斜を採用した。なお、本稿での「傾斜」は、勾配(%)を割合(無次元量)で表したものとし、角度(°)を示す場合は「傾斜角」と表記する。

平均傾斜は、格子点における最も簡易な差分近似である傾斜と最も単純な平滑化計算処理手法である平均化を組み合わせたものである。平均傾斜を用いることで、図4の範囲Iに分布するノイズや抽出対象よりも微細な地形が除

図4 平均傾斜やDEM格子間隔による地形の違い
(左：1mDEM、中央：平均傾斜、右：10mDEM)

去できる一方、範囲Ⅱの様なある程度の空間スケールを有するガリー地形（水に起因する侵食でできた溝）は保持できることから、その有効性が認められる。

2.3.2 傾斜の標準偏差

もうひとつの地形量の指標として、傾斜の標準偏差を採用した。傾斜の標準偏差は、曲率や尾根谷度、ラプラシアン等の斜面型を値の正負で区別する指標に対し、地表面の凸凹度を正負の区別なくひとつのレンジで表現することが可能である。

ここで、DEMから復元される地表面モデルの面的な違いを単一の指標のみで表現することは難しい。例えば、図5に示す地表面形状の異なる2つの斜面について、同面積（458.7m²）の矩形A・B内に分布する1mDEMの傾斜角の平均が同等の値を示すことから、これらの斜面を傾斜角の平均値のみで区別することは困難である。一方で、傾斜角の標準偏差は異なる値を示すため、区別することが可能となる（表1）。これは、矩形AがBよりも風化作用の影響が大きく、地表面の凸凹度が顕著であるため、傾斜の標準偏差による表現が有効であることを

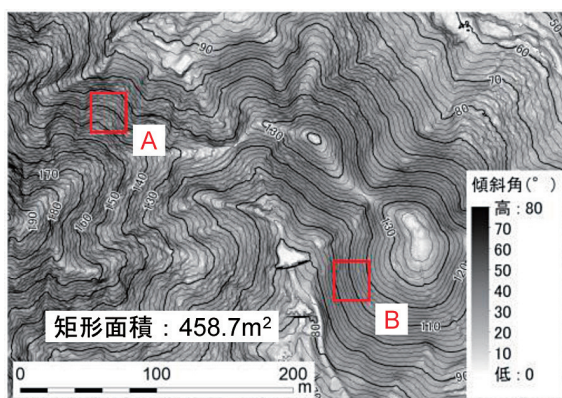


図5 地形量の比較対象斜面

表1 図5の矩形A・Bの地形量

矩形	傾斜角の平均 (°)	傾斜角の標準偏差 (°)
A	38.9	6.9
B	38.5	2.7

意味する。この様なパターンは、地表面および地層の傾斜が同一方向である流れ盤と、それとは反対に交差する受け盤構造に基づく地表面形態の違いや、岩石の硬軟による侵食速度の違いによって形成されるケスタ地形等の差別侵食地形で確認できる。

3. 適用事例

3.1 対象エリア

本手法の有効性について評価するために、熊本県阿蘇郡南阿蘇村の阿蘇大橋付近を対象として適用した（図6）。対象エリアでは、平成28年4月14日に熊本地震の前震（Mw6.2）が、16日には本震（Mw7.0）が発生し⁵⁾、地震動による建物倒壊のほか、土砂災害によっても甚大な被害が生じた（図7）。特に、阿蘇大橋西方の山地斜面では、崩壊長約700m、幅約200m、崩壊土砂量約50万m³にも及ぶ大規模な斜面崩



図6 対象エリアの位置

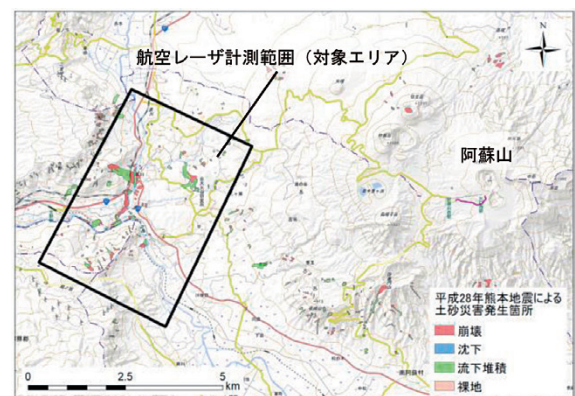


図7 航空レーザ計測範囲および土砂災害発生箇所



図8 阿蘇大橋西方の山地斜面で発生した斜面崩壊

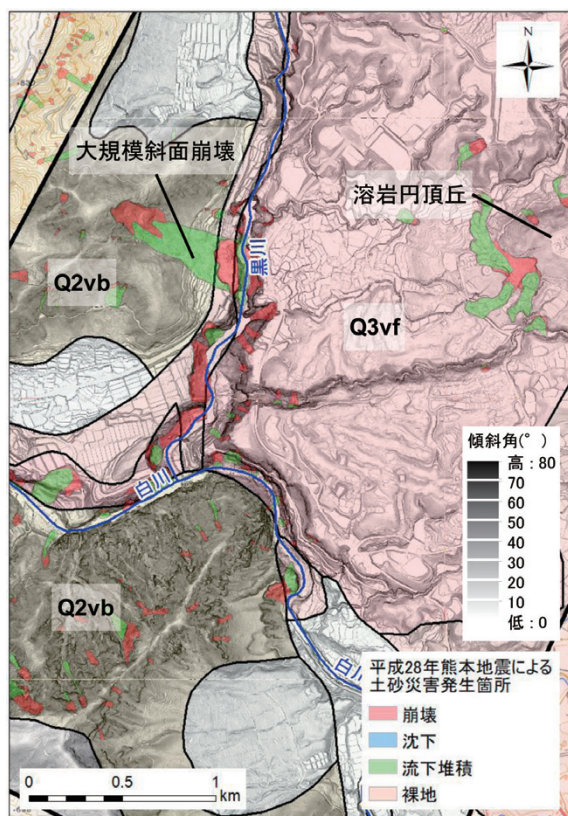


図9 対象エリアの地形地質状況

所の20万分の1シームレス地質図での呼称を引用し、西側を「Q2vb」、東側を「Q3vf」と呼ぶこととする(図9)^{7) 8)}。「Q2vb」は、先阿蘇火山岩類・塔ノ坂安山岩と呼ばれる新生代第四紀中期更新世に噴火した火山の岩石で構成された阿蘇カルデラ壁が分布し、地震後に発生した大規模斜面崩壊もこれに含まれる。一方、「Q3vf」は、阿蘇山の中央火口丘群であり、新生代第四紀後期更新世に噴火した流紋岩質の溶岩流で構成された阿蘇カルデラ内の火山体斜面が分布する。これらの地質構造の違いは、1mDEMから作成した図9の傾斜分布図にも表れており、「Q2vb」は「Q3vf」に比べて全体的に急傾斜であり起伏も大きい。また、「Q2vb」分布域内でも、東西を流れる白川を境に、北側は谷があまり発達しておらず滑らかな斜面であるのに対し、南側は露岩や開析谷の発達が顕著であるといった違いがある。これは、地質図が小縮尺のために一括されているが、厳密には地質構造が異なる可能性を示唆する。

3.2 教師データの準備

対象エリアは「Q2vb」と「Q3vf」で地表面形態が大きく異なるため、「Q2vb」で準備した教師データを用いて「Q3vf」で地形変化点を抽出した場合、その適用性は低いと考えられ、逆の場合でも同様である。そのため、「Q2vb」および「Q3vf」の分布域それぞれで教師データを

壊が発生した(図8)⁶⁾。

国際航業(株)では、本震発生直後の17日に図7に示す対象エリア約18km²を計測密度4点以上/m²で航空レーザによる自社計測を実施しており、本稿では本計測結果から生成した1mDEMを用いることとした。

対象エリアの地質は、熊本県中北部を流れる一級水系の白川および黒川を境に大きく東西で区分される。本稿では、産業技術総合研究

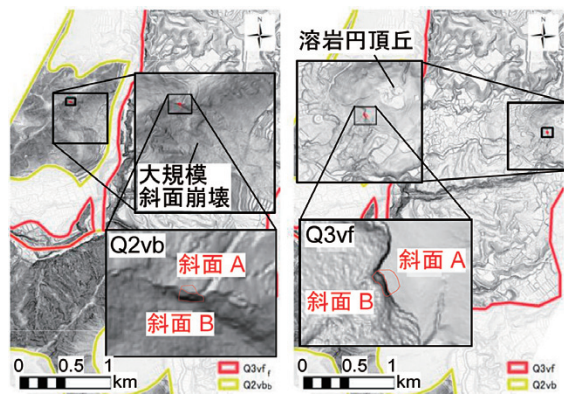


図10 準備した教師データ(左: Q2vb、右: Q3vf)

準備し、各分布域でのみ適用することとした。「Q2vb」では、大規模斜面崩壊の滑落崖（側方崖）を地形変化箇所とした前背面に広がる隣接する斜面領域（斜面AおよびB）を教師データとし、「Q3vf」では、地震後に溶岩円頂丘（粘性の高い溶岩によって形成されたドーム状の地形）で発生した斜面崩壊の滑落崖を教師データとした（図10）。

3.3 地形変化帯の算定

教師データの斜面領域内に分布する1mDEMから算出した平均傾斜および傾斜の標準偏差の関係を図11に示す。なお、窓領域は、3m×3m～11m×11mの範囲で平均傾斜および傾斜の標準偏差を算出した後、地形変化点の抽出まで行い比較・検討した結果、その明確さならびに抽出対象の最小規模を考慮して3mとした。平均傾斜および傾斜の標準偏差を説明変数、隣接する斜面AおよびBを目的変数として、線形判別分析を行い、線形判別関数係数を求めた。その結果、Kappa統計量に基づいて算出した分類正誤率が、「Q2vb」および「Q3vf」いずれも90%以上と高い値を示した（表2）。線形判別関数係数から求めた線形判別式の直線付近に分布する1mDEMの点群は、平均傾斜および傾斜の標準偏差の2指標より表現される教師データの斜面AおよびBの境界付近（＝地形変

表2 教師データの分類正誤率

分布域	分類正誤率 (%)
Q2vb	93.33
Q3vf	93.88

化箇所）であるため、線形判別式の直線に一定量の幅をもたせた範囲を地形変化帯とした。

ここで、一定量の幅について本稿では、線形判別分析において誤判定された点のうち、線形判別式の直線から最も離れた点までの距離の1/10としている。この1/10という値は、抽出される地形変化点の妥当性（連続性や地形との対応性等）から経験的に決定づけた基準である。

なお、線形判別式は多項式からなり、地形変化帯が水平ではなく斜めの線を描いていることが分かる。これは、平均傾斜という1つの指標のみでは地形変化箇所を詳細かつ厳密に求めることが困難であり、傾斜の標準偏差と組み合わせる必要性を示している。

3.4 地形変化点の抽出結果

線形判別分析により算定した地形変化帯は、図11に示す教師データの領域内だけでなく、「Q2vb」あるいは「Q3vf」分布域において、地形特性が類似する地形変化箇所にも適用可能と考えられる。このことから、「Q2vb」あるいは「Q3vf」に分布する全DEM格子点のうち、各地

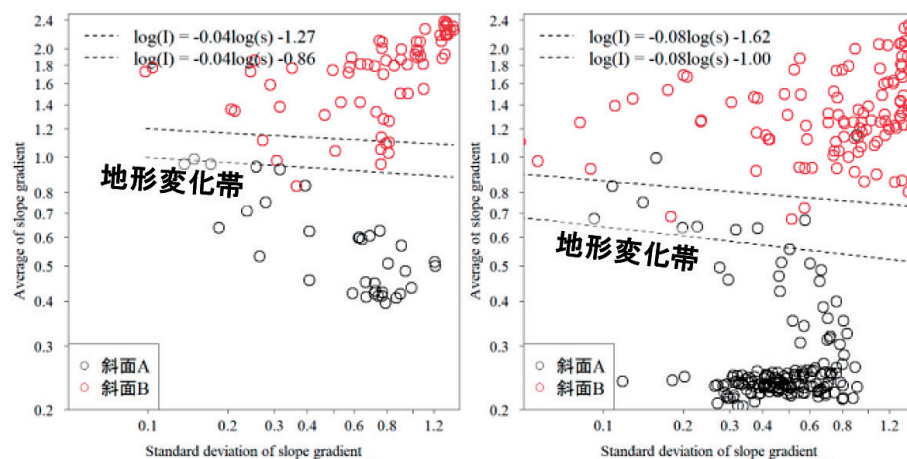


図11 地形量の関係 (左: Q2vb、右: Q3vf)

形変化帯内に分布する点をそれぞれ抽出し、地形変化点とした。なお、各地形変化帯の対象範囲は、図11の外側にも延長させた半無限状の範囲とした。

3.5 凹凸型の分類

本稿で採用した傾斜の標準偏差は、斜面型を判別することが困難であるため、抽出した地形変化点は、滑落崖や急崖等の遷急点と、崩土が下部斜面に堆積して形成される崖錐や山麓等の遷緩点が一括して存在する。そこで、地形変化点と斜面方向に位置する格子点の平均傾斜を比較し、地形変化点の方が小さければ凸型、大きければ凹型とすることで分類した。なお、斜面方向は、対象の格子点の周囲に位置する8格子点のうち、最も低い平均標高を示す点の方向とした。平均標高は、平均傾斜と斜面

方向の空間スケールを合わせる必要があるため、平均傾斜と同じ窓領域3mを設定して算出した。また、対象の格子点と周囲8格子点間の水平距離について、斜め方向ではXY方向の $\sqrt{2}m$ となるため、XY方向に位置する格子点と同じ水平距離1mでの平均標高を算出し、これを用いることとした。

以上の手順によって抽出した地形変化点(凸型)を図12および図13に示す。「Q2vb」では、大規模斜面崩壊の滑落崖や側方崖、末端崖が抽出されている。また、平成28年熊本地震では崩壊しなかったが、阿蘇カルデラ壁形成以降、繰り返し侵食崩壊したと推定される急崖の落ち残り部分も抽出されている。一方で、崩壊斜面背後に存在する亀裂は抽出されていない。これは、当該亀裂の様な地形変化箇所を教師データとしなかったためである。このことから、

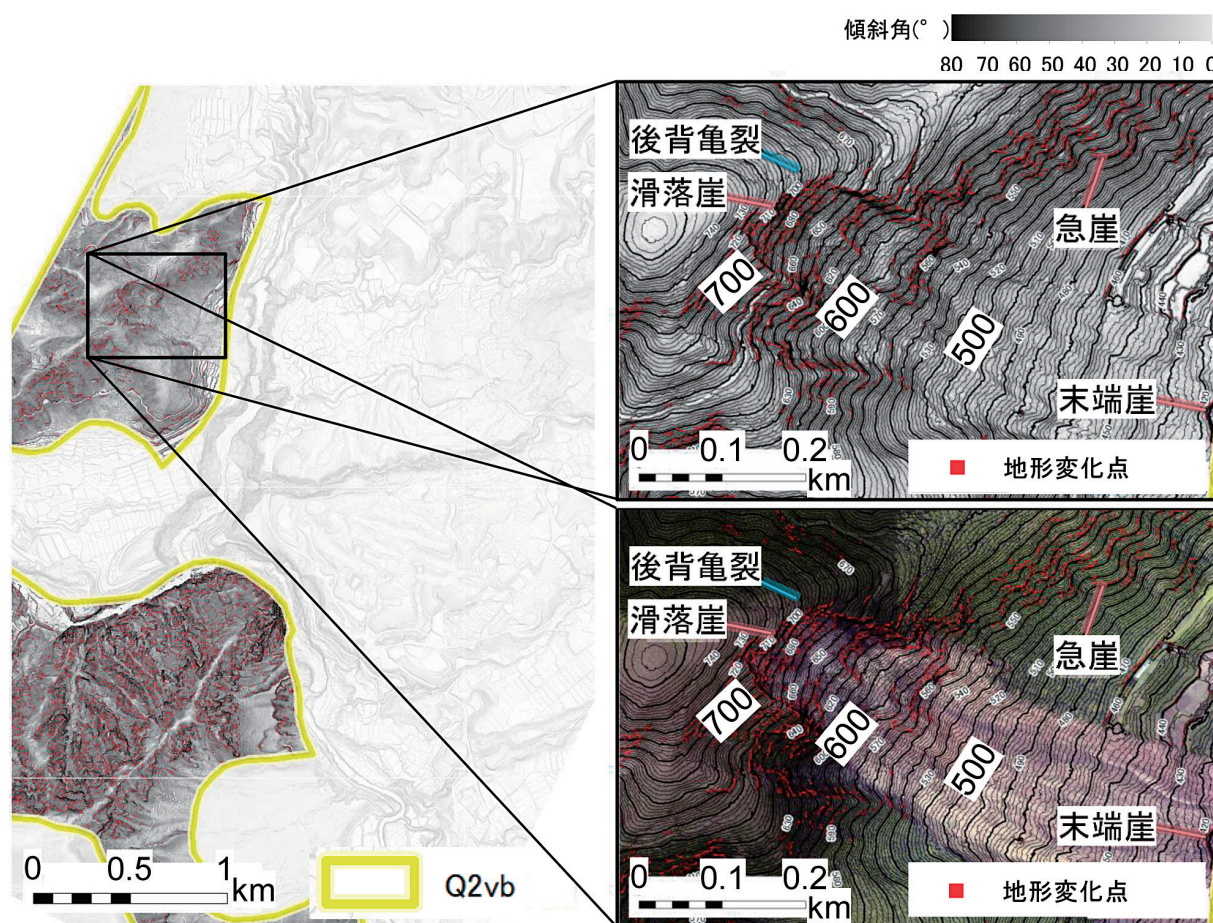


図12 地形変化点(凸型)の抽出結果(Q2vb) (右上背景: 傾斜角、右下背景: オルソ画像)

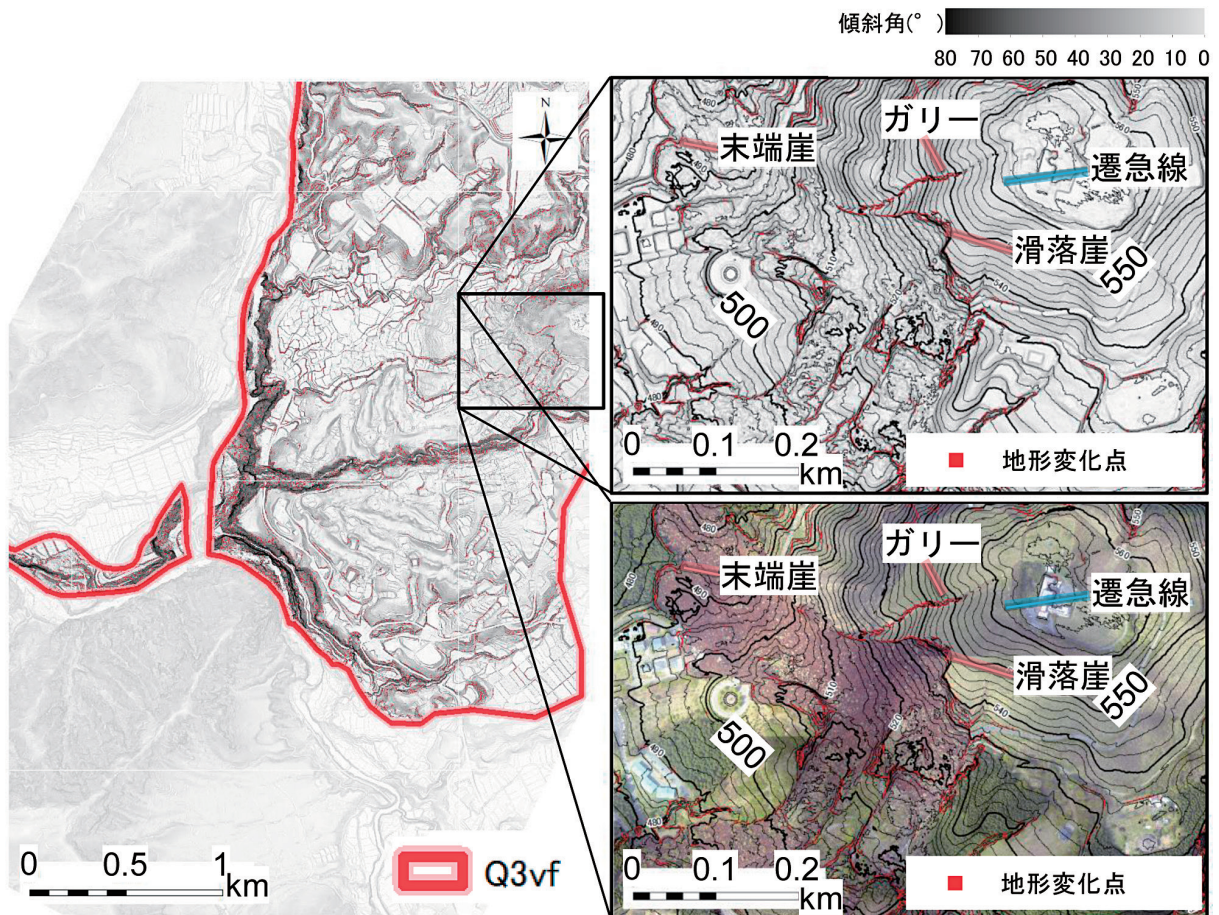


図13 地形変化点(凸型)の抽出結果(Q3vf) (右上背景: 傾斜角、右下背景: オルソ画像)

本手法は目的に応じた地形変化点のみ抽出が可能であるといえる。「Q3vf」では、斜面崩壊の滑落崖や末端崖、崩壊斜面北方のガリー地形が抽出されている。一方で、溶岩円頂丘の頂部平坦面と側方斜面を隔てる遷急線は抽出されていない。これは、当該箇所のような滑らかで徐々に変化する地形変化箇所を教師データとしなかったためである。

この様に、教師データおよびその適用範囲について、地表面形態が異なる「Q2vb」と「Q3vf」の地質帯で分けたことで、斜面崩壊の滑落崖や崩落箇所等を抽出することができた。

4. まとめと今後の展望

国土強靱化に資するために開発した地形変化点の機械抽出手法について、平成28年熊本地震の本震発生直後に阿蘇大橋付近で計測さ

れた航空レーザデータに対し適用した。本手法の特長は、単なる数値解析ではなく抽出結果に判読者の知見を反映している点、地形の違いを複数の地形量の組合せで表現している点が挙げられる。また、地表面形態は地質や地質構造の違いによって異なることから本稿では、地質帯別に教師データの準備および地形変化点の抽出を行った。その結果、溶岩円頂丘や阿蘇大橋西方の山地斜面で発生した斜面崩壊の滑落崖や側方崖、末端崖等を抽出することができた。

本手法は、本稿で対象としたエリアと異なる地形発達過程や地質をもつエリアでも適用可能と推定される。ただし、他エリアで適用する場合、改めて窓領域の選定や教師データの準備を行う必要がある。また、本対象エリアであっても、DEM格子間隔が異なるデータを用いる

場合や空間スケールの異なる地形変化点を抽出する場合も同様である。今後、目的とする地形変化点や地表面形態（地形地質）、DEM格子間隔、窓領域等の条件に合わせた教師データが整備できれば、機械抽出の完全自動化が可能となる。また、現時点では判読の機械化に完全移行するものではなく判読補助図に留まっているが、例えば任意メッシュあるいは単元斜面での地形変化点の密度分布に基づく斜面危険度評価など、地形変化点の発展した活用が期待できる。

■参考文献

- 1) 内閣官房国土強靱化推進室：防災・現在、国土強靱化のための3か年緊急対策のパンフレット (https://www.kantei.go.jp/jp/singi/jyuyouinfura/pdf/pamphlet_3.pdf)
- 2) 内閣官房国土強靱化推進室：国土強靱化年次計画2020 (https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/kokudo_kyoujinka/pdf/nenji_keikaku2020_02.pdf)
- 3) 小野ら：航空レーザデータによる地形表現図を用いた微地形判読の個人差について、平成27年度砂防学会研究発表会概要集B、pp.342-343, 2015
- 4) 室井ら：LiDARデータを用いた数値解析に基づく地形判読補助図の作成、日本地すべり学会誌、Vol.55, No.1, pp.25-34, 2018
- 5) 気象庁：CMT解 (https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/mech/cmt/cmt_201604.html)
- 6) 国土交通省九州地方整備局：阿蘇大橋地区復旧技術検討会（第1回） (<http://www.qsr.mlit.go.jp/n-topics/h28/160520/data/shiryou3>)
- 7) 産業技術総合研究所：20万分の1地質図幅「熊本」(https://www.gsj.jp/data/200KGM/PDF/GSJ_MAP_G200_NI5211_2004_D.pdf)
- 8) 産業技術総合研究所：20万分の1地質図幅「大分（第2版）」 (https://www.gsj.jp/data/200KGM/PDF/GSJ_MAP_G200_NI5205_2015_D.pdf)

■執筆者

室井 翔太（むろい しょうた）
国際航業株式会社

