

研究資料 (Research record)

写真測量による伊豆大島三原山北西斜面における 近年の植生高変化の復元

大丸 裕武^{1)*}

要旨

2013年10月の豪雨によって東京都伊豆大島の元町地区では大規模な表層崩壊によって多量の流木を伴う土石流が発生して市街地に多くの被害を与えた。今回の災害で多量の流木が発生した背景を明らかにするため、過去の空中写真を用いて写真測量を行い、過去と現在の植生高を比較した結果、1976年から2013年の間に元町地区上方の斜面では多くの場所で樹高が3~6mも増加し、2倍程度になったことが明らかになった。伊豆大島の森林は薪炭生産等のために古くから強い利用圧を受けてきたことが知られている。写真測量から明らかになった樹高の増大は主として樹木の成長によるものであり、とくに広葉樹林については1960年代以降に進行した燃料革命による薪炭生産の終結が大きく影響していると推定される。

キーワード：土石流、表層崩壊、樹木成長、GIS、航空機レーザー測量、デジタル写真測量

1. はじめに

伊豆大島では2013年10月の豪雨によって、10月16日未明に元町地区で大規模な表層崩壊と土石流が発生し、多数の死者を含む甚大な被害をもたらされた。この災害についてはこれまでに多くの研究が行われており、13世紀頃に噴出した元町溶岩の上に堆積したレス層と火山砂層の境界がすべり面となるなど、大島火山の地形や地質の特性が表層崩壊の発生に大きく影響したことが明らかになりつつある(小山・鈴木2014)。一方、今回の災害の発生に植生が与えた影響については現在でも不明の点が極めて多い。崩壊発生斜面に成立していたハチジョウイヌツゲやヒサカキを主とする常緑広葉樹林の根系深度が浅いことが指摘されてはいるものの(村上ら2016)、森林の蓄積量がとくに小さいわけではなく、植生からはこの斜面の災害リスクがとくに高いことを事前に予測することは困難であったと考えられる(伊東ら2016)。一方で、今回の災害では多量の流木を伴った土石流が大きな被害をもたらしており(田中2014, 石川ら2014, 稲垣2015)、近年の森林の変化が今回の災害に与えた影響について検討することは重要な課題である。しかし、流木災害につながった森林蓄積の増加を裏づける、近年の植生変化に関する定量的なデータが不足しているため、詳細な議論を行うことが出来なかった。

森林の状態の時代的な変化を定量的に評価する方法として、過去の空中写真による写真測量が挙げられる。伊豆大島では1976年に国土地理院によって、撮影高度が低く写真測量に適した空中写真が撮影されており、これを用いることで過去の樹冠面の高度を推定できる可能性

がある。また、植生高の推定に必要な地表面データについても、伊豆大島では航空機レーザー測量技術によって取得された高精度のデータが利用可能であり、写真測量で得られた樹冠面の高度との差分を取ることで過去の植生高を推定できると期待される。本研究では過去の空中写真と近年の航空機レーザー測量で取得されたデータを解析して、1976年と現在の植生高の比較から、今回の災害で崩壊が発生した斜面周辺の樹高の変化を復元し、今回の災害に大きな影響を与えたと考えられる近年の森林蓄積の変化について考察したい。

2. 研究地域

本研究では、2013年の豪雨によって幅約400mに及ぶ崩壊が発生した元町地区上方の標高80m付近から450m付近にかけての西向き斜面に注目する(Fig. 1)。Fig. 1のオルソ写真に見られる裸地は一見すると単独の崩壊地に見えるが、裸地の中に最大傾斜方向に伸びを持つ半島状の森林域が残されていることから、複数の崩壊地が複合したものとみなされる。この斜面にはつづら折り状に御神火スカイラインと呼ばれる観光道路が整備されている。今回発生した表層崩壊はこの御神火スカイライン上を流下しているが、道路自体をほとんど破壊していないことから、崩壊のすべり面は極めて浅く根系を含むマット状の表層土壌が剥離した形で発生したと考えられる(稲垣2015)。

今回の豪雨で崩壊が発生した元町地区の上部斜面は、明治期以降共有林として利用されてきたと考えられる(井上2014)。国内各地の共有林と同様に、伊豆大島の

原稿受付：平成28年4月15日 原稿受理：平成28年6月17日

1) 森林総合研究所森林防災研究領域

* 森林総合研究所森林防災研究領域 〒305-8687 茨城県つくば市松の里1

共有林も古くから大きな利用圧を受けてきた。大島諸島略誌の記述によると、伊豆大島では古くから山林に燃料を得る製塩によって生計を立てていたが、延享年代（西暦 1744～1747）頃より江戸への薪の出荷に切り替わり、薪生産も大正末期より衰退した後、炭焼き業が盛んになったとされる（大島町史編さん委員会 2001）。大正期以降の薪生産の衰退は濫伐によると考えられており、元村（現在の元町地区）では明治 30 年前には、三尺と呼ばれる長さ約 90cm の薪で年間 1,600～1,700 万本の生産量があったが昭和 8 年には約 350 万本に減じていることから、この間に森林利用によるきわめて顕著な森林植生の衰退が起きたことが推定されている（山口 1936）。薪生産が衰退した後は炭が主要な林産物となり、大島の製炭量は昭和 31 年度には 219,462 表に達した（福宿 1959）。しかし、この炭の生産も 1960 年代以降急速に拡大した家庭用燃料としての化石燃料の普及によって縮小し、近年では薪炭採取の山林への影響はきわめて小さなものになったと考えられる。2013 年の豪雨災害では、比較的密な常緑広葉樹林で表層崩壊が発生し、多量の流木を伴う形で土石流が発生するなど、森林の特徴が災害の今回の災害の発生形態に大きな影響を与えていると考えられる。なかでも、国内各地の里山林に見られる家庭用燃料の石油への転換が急速に進行して炭生産が縮小した 1960 年代以降の森林の変化（有岡 2004）が、現在の伊豆大島の植生を成立させた環境変化として注目される。

3. 研究方法

本研究では写真測量によって過去の植生高を復元し現在の植生高との比較を行う。空中写真によって植生高を

推定する研究は、これまでも林学や工学分野中心に行われてきた（例えば、福士ら 2008, 田口ら 2009）。ステレオ写真による写真測量自体は、写真の撮影条件や GCP の精度が良好であれば、1m 以下の精度で地物の高度を特定できるため、成長速度が大きな樹木については、樹冠面を含む表面の高度（以下 DSM）の経年変化を追跡することが十分に可能である。また、地盤高データ（以下 DEM）の精度が十分高ければ、DSM と DEM との差分を求めることで、植生高を推定することが可能になる。本研究では 1976 年に国土地理院によって撮影された 3 枚のカラー空中写真（Table 1）を 800ddpi でスキャンした画像を用いて二組のモデルを作成し、空中三角測量を行って 1976 年当時の DSM を推定した。空中写真の解析には（株）アジア航測製の図化ソフト「計測名人」を用いた。空中三角測量に用いる GCP（ground control point）は、東京都によって取得された 2013 年のオルソ画像と DEM の陰影図を 1976 年の空中写真と照合しながら 12 点の同一点を抽出し、その xyz 座標を 2013 年の DEM から推定した。このようにして取得した GCP を用いた外部評価の RMS エラーはいずれも 5m 未満であり、現地測量を行わない写真測量としては比較的良好な結果が得られた。空中三角測量で得られた DSM を元に、5m サイズのラスターデータを作成し GIS（ESRI 社の ArcGIS10.2）上で 2013 年の DEM とオーバーレイして解析を行った。

日本全域をカバーする DEM としては従来から国土地理院の数値地図 50m メッシュ標高や、数値地図 10m メッシュ標高が最もよく利用されてきた。しかし、これらのデータは写真測量で作成された 2 万 5 千分の 1 地形図

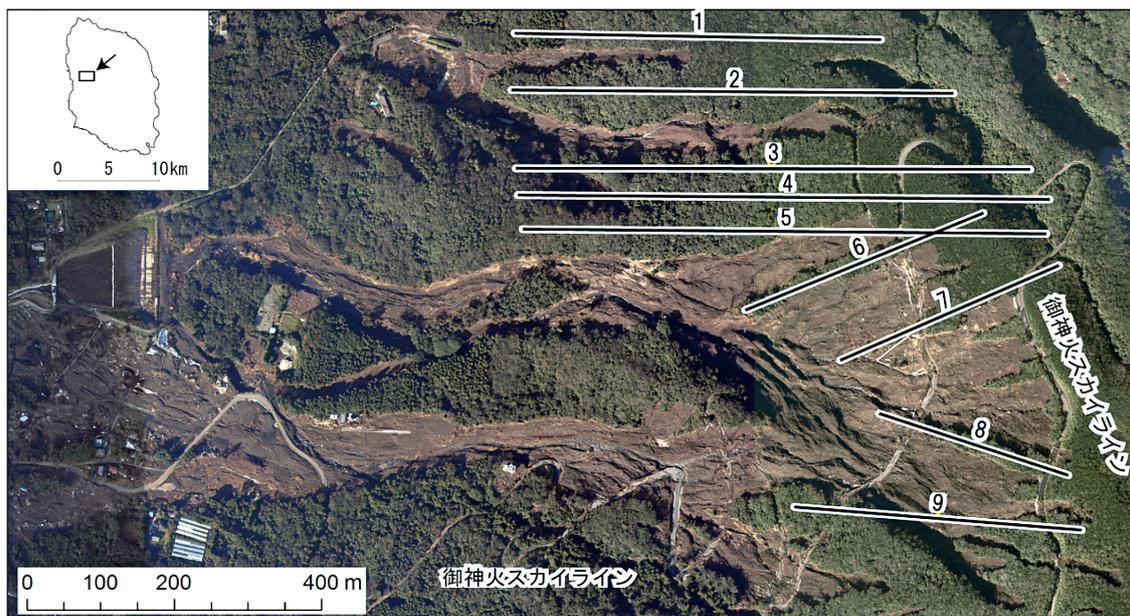


Fig. 1. 調査地域の崩壊後のオルソ写真（2013 年 10 月 27 日撮影）
左上地図の矢印はオルソ写真の位置を示す。1～9 のラインは Fig. 7 の断面の位置を示す。

を元データとしており、地表面が密な森林に覆われている場合には、一定の植生高を仮定して地盤高を推定しているため誤差が大きく、植生高の推定に用いるには不適である。近年登場した航空機レーザー測量技術によって作成された地形データは、膨大な点群の中からフィルター処理で地表面に到達した点群を抽出して作成しているため、一般に写真測量による DEM よりも高精度である。本研究では、災害発生2日後の2013年10月18日に国際航業株式会社によって計測された東京都の航空機レーザー測量データを用いた。このデータは計測点間隔が約1.2mのオリジナル点群データをフィルター処理して作成された1mメッシュのDSMとDEMとからなり、DEMの精度は約1cmである。以上のようにして作成した1976年のDSMおよび2013年のDSMとDEMをGISで解析して1976年と2013年の植生高の分布を明らかにするとともに (Fig. 2)、9本の測線 (Fig. 1) を設定して標高と植生高との対応関係について解析を行った。植生高の変化から、実際の森林の蓄積量の変化を推定するには、地上における蓄積量の調査データが必要となる。今回、解析を行った元町地区の斜面においては、一部で植生調査が行われ、幹・枝葉・地下部の現存量が報告されている (伊東ら 2016)。伊東ら (2016) が報告した植生プロットのうち、5か所のプロット (伊東ら 2016 の調査地点 1, 2, 3, 4, 7) は、本研究の解析エリア内にあることから、上記の5か所のプロットについて断面図を

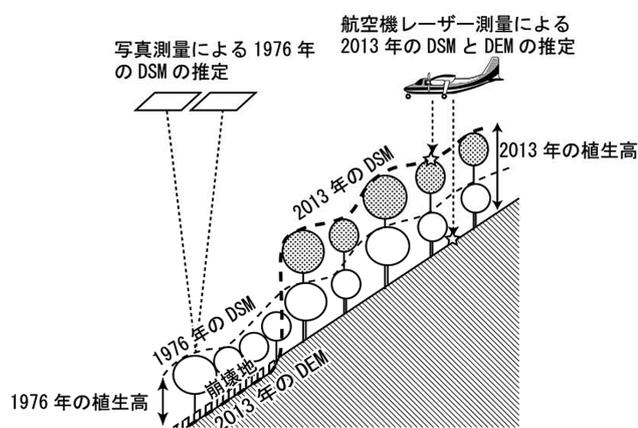


Fig. 2. 本研究で使用した地表面モデル (DEM) と地表面モデル (DSM) の高度データの概念図

Table 1. 本研究で用いた空中写真

整理番号	コース	写真番号	撮影者	撮影年月日	撮影高度 (m)
CKT-76-5	C10	C10-2	国土地理院	1976年9月23日	1700
CKT-76-5	C10	C10-3	国土地理院	1976年9月23日	1700
CKT-76-5	C10	C10-4	国土地理院	1976年9月23日	1700

作成して1976年と2013年の植生高を比較した。

4. 結果

東京都の航空機レーザー測量データは植生を含む地物の点群データと、フィルター処理を行って植生の点群を除去して地表面の高度を推定した1m解像度のDEMとからなる。植生を含む点群データから1m解像度の表面モデル (DSM) を作成し、1m解像度のDEMとの差分から2013年10月18日時点での植生高を推定した (Fig. 3下の図)。これによると、植生高が1m未満の白色のエリアは2013年に発生した表層崩壊の裸地域にほぼ一致している。斜面上方東側の尾根付近では植生高が6m内外の場所が多い。植生高が10mを超える森林は解析地域の西側の山麓緩斜面上に集中しており、主としてスギなどの人工林からなると思われる。

1976年の空中写真から空中三角測量で作成したDSMは当時の植生表面の標高を表現している。本研究では、2013年に東京都が航空機レーザー測量で取得したDEMとの差を計算することで、より精度よく1976年当時の植生高を推定することを試みた (Fig. 2)。こうして、1976年の植生高を推定したのが Fig. 3 の上の図である。ただし、2013年のDEMは崩壊発生後の10月18日の測量結果を元に作成されているため、崩壊地の部分については、崩壊による表層土層の消失で、崩壊発生前の地表面の高度よりも低い値となっている (Fig. 2)。元町地区の崩壊地の深度は概ね数10cm程度と考えられており (石川ら 2014)、場所によっては土石流によって1m以上の侵食を受けている。このため2013年のDEMを元に過去の崩壊植生高の推定を行う場合には、崩壊地付近については最大で1m程度、ガリー付近ではそれ以上に植生高を過大に推定する可能性に留意する必要がある。

5. 考察

5.1 1976年の植生面高度の推定精度

Fig. 3には写真測量から推定した1976年当時の植生高と、航空機レーザー測量データから推定した2013年の植生高の分布を示した。1976年の植生高の推定精度を検証するため、植生高がほぼゼロでDSMとDEMがほぼ一致すると予想される御神火スカイライン沿いに10m間隔の検証点を設定して、写真測量から推定したDSMの値と航空機レーザー測量によるDEMの値を比較した (Fig. 4)。

Fig. 4によると写真測量から推定した1976年のDSMは、2013年のDEMとほぼ一致しているが、2013年のDEMよりも数m程度大きい場所も見られる。Fig. 5はFig. 4にプロットした御神火スカイライン沿いの10m間隔の検証点における、1976年のDSMと2013年のDEMの差の頻度を示したものである。1976年のDSMの高度が道路面を表現していればDSMとDEMの差は0m付近にピークを持つ対象型の分布になるはずであるが、実際

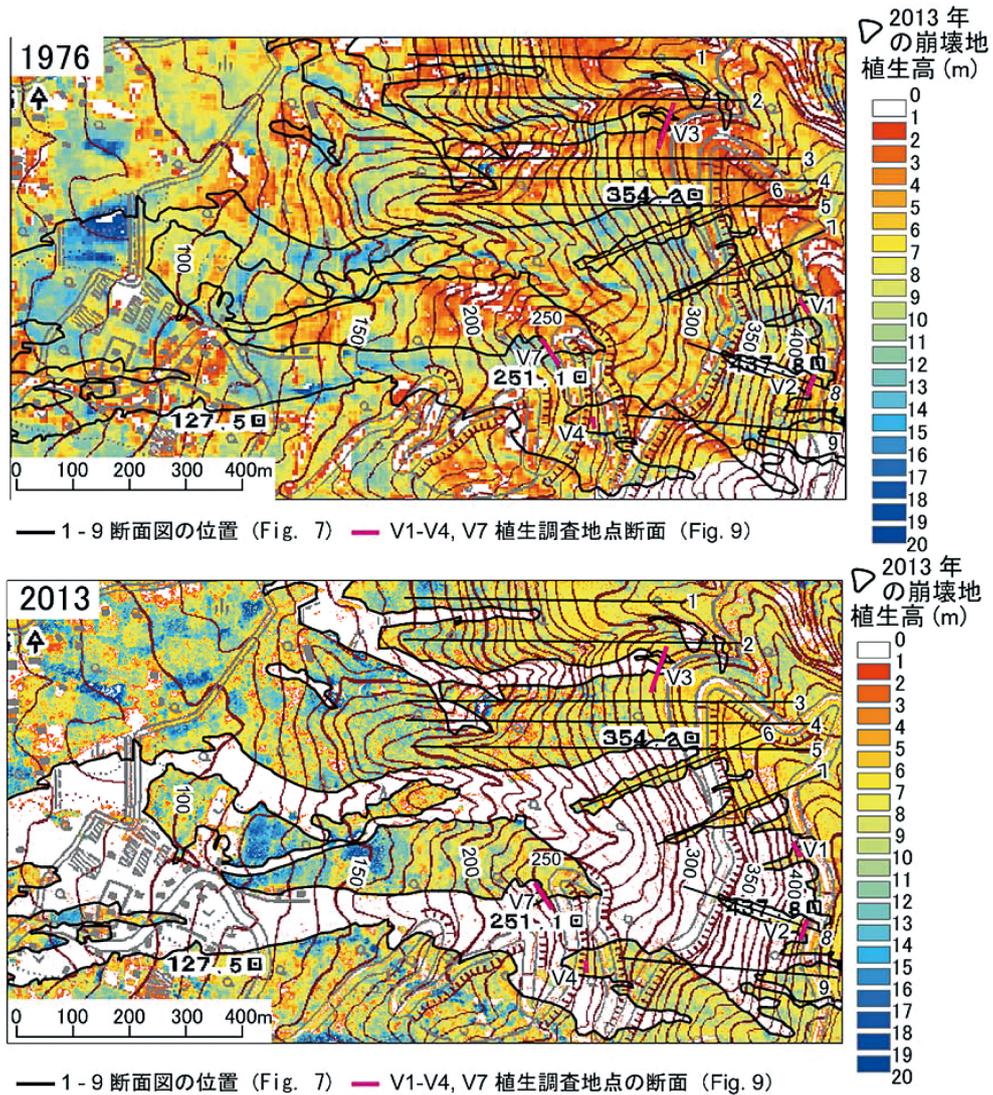


Fig. 3. 1976年と2013年の植生高の分布
地形図は国土地理院の2万5千分の1地形図を使用。1～9のラインは Fig. 7 の断面の位置を示す。

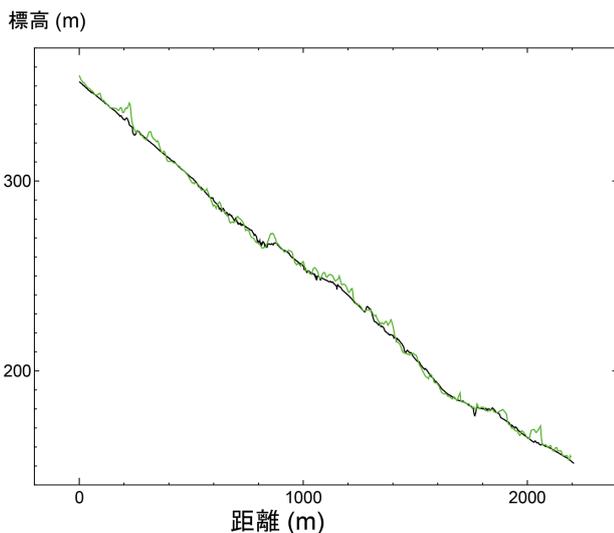


Fig. 4. 御神火スカイラインに沿った地表面 (黒色線；2013年のDEM) と写真測量から求めた1976年の地表面 (緑色線；1976年のDSM) 計測点の間隔は10m。

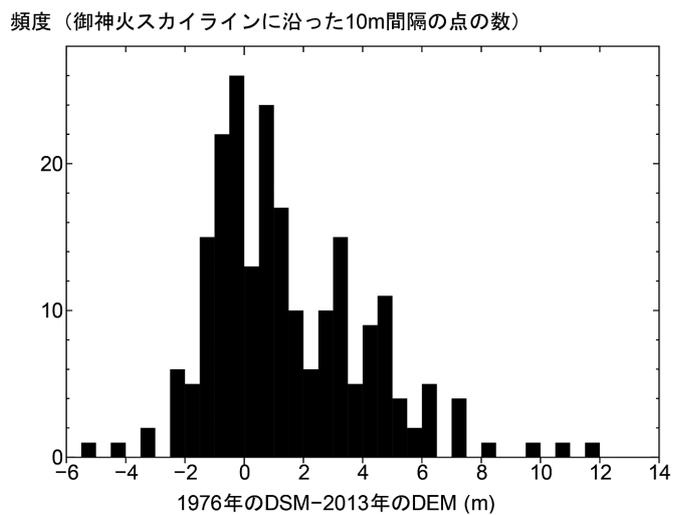


Fig. 5. 御神火スカイラインに沿った1976年のDSM (Fig. 4の緑色線) と2013年のDEM (Fig. 4の黒色線) との差の頻度分布

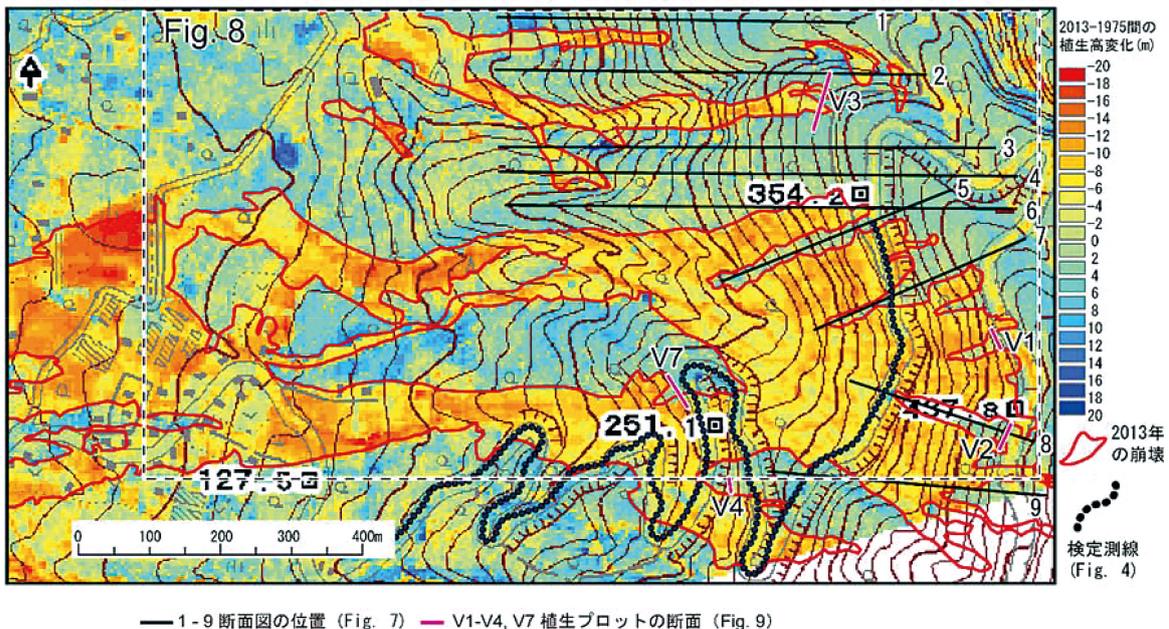


Fig. 6. 1975年から2013年にかけての植生高の変化
1976年の空中写真の解析から作成したDSMと2013年10月18日の航空機レーザー測量で取得されたDSMの差分計算の結果から推定した。1～9の黒色の線はFig. 7の断面図の位置を、ピンク色の線はFig. 9の断面図の位置をそれぞれ示す。破線で囲まれた範囲はFig. 8のデータを取得した範囲を示す。地形図は国土地理院の2万5千分の1地形図を使用した。

には正の値の方が大きい非対称型の分布になっている。このように1976年のDSMの高度がDEMを上回る場所があるのは、樹木の枝が道路上にかかる場所があり、写真測量の際に道路面ではなく植生面をデジタル化したためと考えられる。このような、道路上の植生をとらえたと思われる場所を除外すれば、Fig. 5に見られるDSMとDEMの差は大部分が±3mの範囲内に収まっていることから、1976年の空中写真の写真測量によるDSMは3m程度の誤差の範囲で1976年当時の樹冠面を再現していると推定される。

5.2 植生高変化量の分布とその背景

次に、1976年から2013年にかけての植生高の変化について考察する。前述したように、2013年の崩壊地の範囲内のDEMは厳密には2013年より前の地表面とは一致しないので、以下では崩壊地以外の場所に注目する。まず、Fig. 3の東側の北西・南東方向に走る尾根付近の植生高は1976年の段階ではオレンジから赤色で示した3m未満の場所が多いが、2013年になると黄色で示した6m以上の場所が多くなっている。このことから1976年～2013年の間に、この尾根付近の植生高が顕著に増大したことがわかる。

Fig. 6は1976年から2013年にかけての植生高の変化量を示したものである。2013年のDSMは崩壊地の部分では植生高の情報が欠落しているため、崩壊地付近にあった植生高の変化を面的に推定することは出来ないが、崩壊後も植生が残存した場所については、1976年と2013年の植生高を比較することが可能である。Fig. 6

をみると2013年に発生した崩壊地を除けば、大部分の場所では2013年の植生高の方が高く、植生高が増大していることがわかる。また、Fig. 7は2013年の崩壊後も植生が残存した場所の周辺に断面を設定して、1976年の植生高と2013年の植生高を比較したものである。この断面においても、崩壊地や道路上以外の大部分の場所では、青色で示した2013年の植生面は1976年の植生面よりも高くなっている。

Fig. 8はFig. 6に破線で示した方形内の崩壊地以外の部分について10m間隔の格子点を設定して各点における1976年～2013年間の植生高の変化量を取得し、標高帯毎にその頻度分布を示したものである。これによると、全体としては1976年～2013年の間に植生高が2～7m程度増大した場所が多く、6m以上植生高が増大した場所の割合は低標高域よりも高標高域の方が大きい。一方、植生高が低下した場所は標高200m以下の低標高域に多い。これは森林を農地や宅地に転換した場所が低標高域に多いためと考えられる。

次に、植生調査が行われた場所における植生高の変化について検討する。Fig. 9には、伊東ら(2016)が植生調査を行った元町地区の5箇所の調査地点(伊東ら2016の調査地点1, 2, 3, 4, 7; Fig. 3, Fig. 6のラインV1～V4およびV7)を横断する植生高の断面図を示した。崩壊発生源と同じ標高帯に位置するV1、V2およびV3(伊東ら, 2016の調査地点1, 2, 3に対応する)では1976年～2013年の間に林冠ギャップの部分以外の植生高が3～6m程度増大し、おおよそ1.5～3倍程度になったと推定される。このうち、調査地点1, 4, 7について

は2013年12月から2014年7月にかけての植生調査で現存量が推定されており、現在の生重量(幹・枝葉・地下部)はそれぞれ371t/ha, 455t/ha, 363t/haと推定されている(伊東ら2016)。1976年からの平均樹高の変化は、調査地点1で6.2mから7.7mに、調査地点4では5.8mから7.3mに、調査地点7では8.1mおよび11.3mと変化したと推定されており、この樹高の変化を想定すると、ヘクタール当たりの現存量は調査地点1では、299tから371tに、調査地点4では361tから455tに、調査地点7では260tから363tに増大したと推定されている(伊東ら2016)。このような30%近い蓄積量の増大は主としてこの間の樹木の成長によるものと考えられる。とくに広葉樹については、1960年代以降の家庭用燃料の転換が急速に進んだことを考慮すると、薪炭生産の低下によってもたらされた可能性が高い。

以上のように、元町地区上方の斜面では1976年以降、植生高が3~6m程度増大した場所が多い。このような崩壊発生斜面における植生高の増大は2013年の豪雨災害で多量の流木が発生したことにつながったと推定される。一方、樹木の成長は一般的には地下部のバイオマスの増大につながるため、森林の崩壊防止機能の向上をもたらすと期待されている(例えば、阿部1997)。しかし、元町地区の崩壊地の根系深度を調査した結果からは、樹木根系は多くの場所ですべり面より上位の火山砂層中に集中し、下位のレス層での分布は相対的に少ないことが指摘されており、地質的な制約によって森林の蓄積が斜面強度の増大に直結しなかった可能性がある(石川ら2014, 稲垣2015, 村上ら2016)。この点については、今後表層土層の構造と根系分布の対応関係を考慮した考察を行い明らかにする必要がある。

6. まとめ

2013年10月の台風で表層崩壊と多数の流木を伴う土石流が発生した伊豆大島元町地区の斜面の近年の植生変化を復元するため、1976年の空中写真の写真測量を行うとともに、2013年の航空機レーザー測量データを解析した。その結果、表層崩壊が発生した元町地区上部斜面では1976年~2013年の間に、植生高が顕著に増大したことが明らかになった。とくに崩壊が発生した元町地区上部斜面では、古くから広葉樹林が共有林として利用され薪炭生産が活発であったことを考慮すると、近年の樹高の増大は1960年代以降の燃料革命による薪炭生産の急速な縮小に起因すると推定される。

引用文献

- 阿部 和時(1997) 樹木根系が持つ斜面崩壊防止機能の評価方法に関する研究. 森林総研研報, 373, 105-181.
- 有岡 利幸(2004) ものと人間の文化史 118- II 里山 II. 法政大学出版局, 265pp.

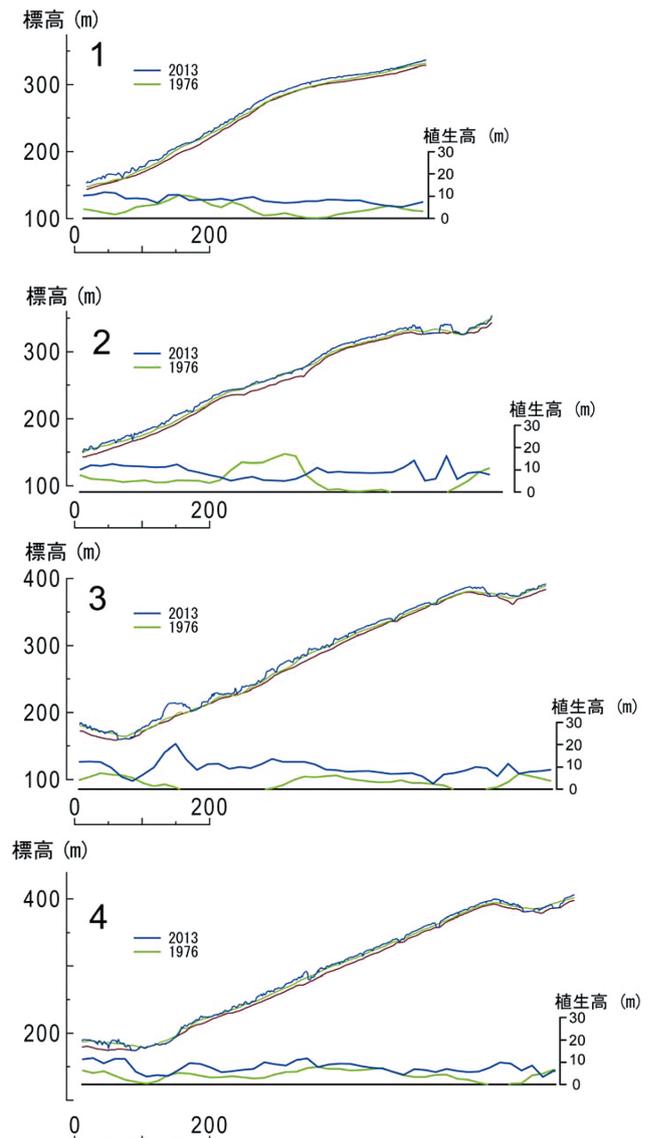


Fig. 7. 地形断面に沿った1976年(緑色線)と2013年(青色線)の植生高
地形断面の位置は Fig. 1, 3, 6 に示した。

- 福士 亮太・小熊 宏之・米 康充・鈴木 恵一・岡野 哲郎・藤沼 康実(2008) 高解像度デジタル航空写真とLiDARデータによるDTMを組み合わせたカラマツ林の現況推定. 日本森林学会誌, 90, 297-305.
- 福宿 光一(1959) 伊豆諸島における製炭時期とその特色 大島・八丈島・青ヶ島の事例. 人文地理, 11, 498-509.
- 稲垣 秀輝(2015) 激甚化する気象現象に係わる火山地域での豪雨災害などの特徴と課題. 応用地質, 55, 279-289.
- 井上 公夫(2014) 伊豆大島・元町の土砂災害史. 地理, 59(2), 10-19.

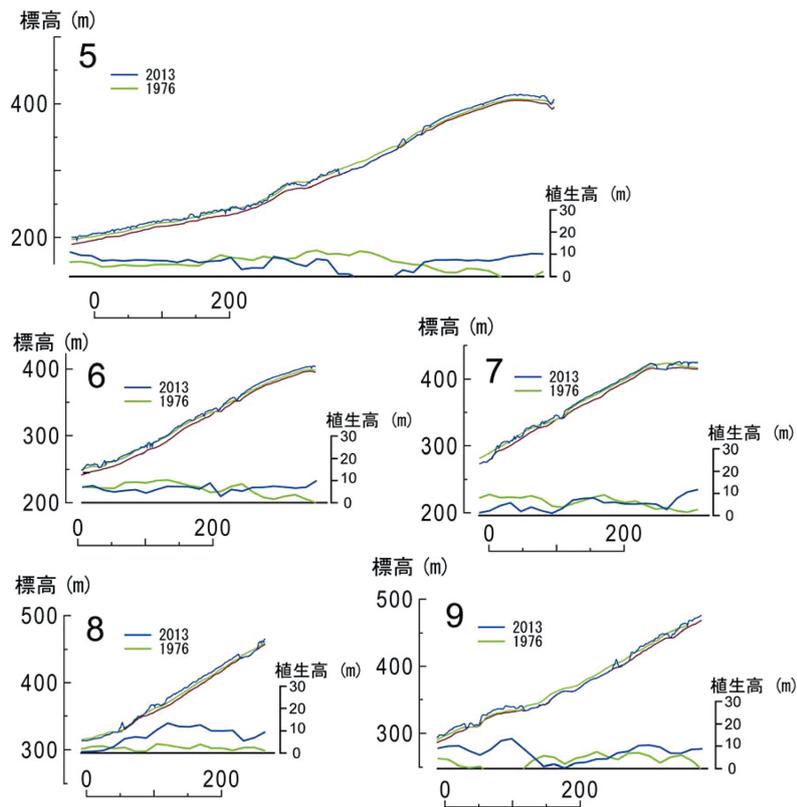


Fig. 7. 続き

伊東 宏樹・松井 哲哉・飛田 博順・五十嵐 哲也・
小川 明穂・松浦 陽次郎 (2016) 伊豆大島 2013
年 10 月 16 日斜面崩壊発生地点周辺の樹木の現存
量. 森林総研研報, 15, 21-30.

石川 芳治・池田 暁彦・柏原 佳明・牛山 素行・林
真一郎・森田 耕司・飛岡 啓之・小野寺 智
久・宮田 直樹・西尾 陽介・小川 洋・鈴木 崇・
岩佐 直人・青木 規・池田 武穂 (2014) 2013
年 10 月 16 日台風 26 号による伊豆大島土砂災害.
砂防学会誌, 66, 61-72.

村上 亘・小川 明穂・小川 泰浩・大丸 裕武 (2016)
2013 年台風 26 号により伊豆大島で崩壊が発生した
崩壊斜面頭部の樹木根系の分布状況について. 森
林総研研報, 15, 31-38.

小山 真人・鈴木 雄介 (2014) 伊豆大島の噴火史から
みた 2013 年 10 月の火山泥流災害. 地理, 59 (5), 34-

41.
大島町史編さん委員会 (2001) 東京都大島町史資料編,
東京都大島町, 420-421.

田口 仁・古川 邦明・遠藤 貴宏・沢田 治雄・安
岡 善文 (2009) 多時期の空中写真から作成した
Digital Canopy Model による森林キャノピーのモニ
タリング. 写真測量とリモートセンシング, 48 (1),
4-14.

田中 則夫 (2014) 流木の生産・流出特性. 土木学会・
地盤工学会・日本応用地質学会・日本地すべり学
会平成 25 年 10 月台風 26 号による伊豆大島豪雨
災害緊急調査団編, “平成 25 年 10 月台風 26 号に
よる伊豆大島豪雨災害調査報告書”. 53-58. [http://
committees.jsce.or.jp/report/system/files/20140526.pdf](http://committees.jsce.or.jp/report/system/files/20140526.pdf)

山口 貞夫 (1936) 伊豆大島図誌, 地人社, 193-194.

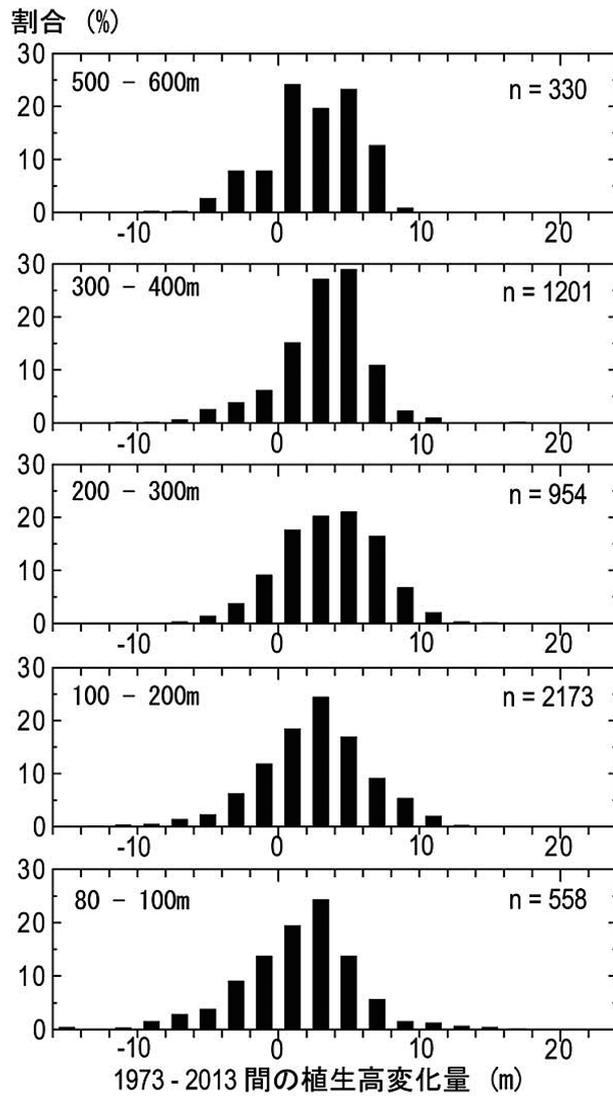


Fig. 8. 標高帯毎の1973年～2013年間の植生高変化量の頻度分布

Fig. 6 に破線で示した方形区内に10m 間隔の格子点を設定し、崩壊地以外の点について1973年～2013年の植生高の変化量を取得して、標高帯別に出現頻度を示した。nは各標高帯で植生高を抽出した格子点の数を示す。

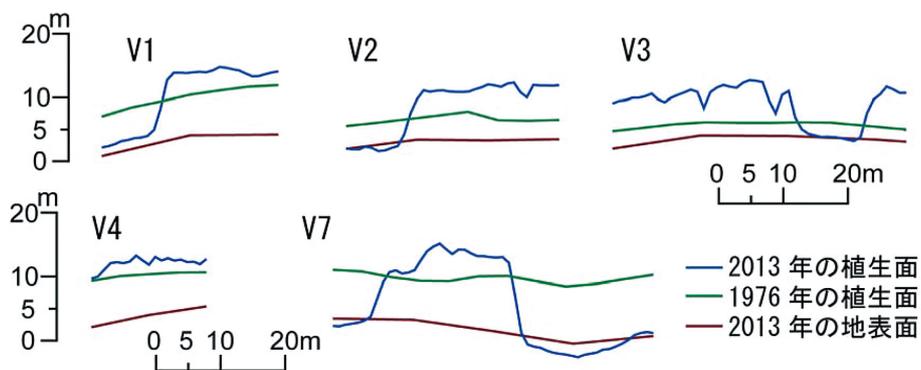


Fig. 9. 伊東ら(2013)の5箇所の方形区における植生高の変化

V1, V2, V3, V4, V7はそれぞれ伊東ら(2016)調査地点1, 2, 3, 4, 7に対応する。

Reconstruction of the recent vegetation height change by photogrammetry on the northwestern slope of Mt. Mihara in Izu-Oshima Island, eastern Japan

Hiromu DAIMARU^{1)*}

Abstract

2013 Typhoon Wipha has brought serious landslide and debris-flow hazard on the northwestern hillside of Mt. Mihara which caused 36 deaths in Motomachi District in Izu-Oshima Island. This debris flow was accompanied by copious amount of driftwood that accelerated the debris flow damage. This study has reconstructed recent change in tree height around the landslide area by using aerial photogrammetry and airborne LiDAR data to clarify background of the hazard. A digital surface model (DSM) was produced from three air photos taken in 1976 by Geological Survey Institute (GSI). The 2013 DSM and digital elevation model (DEM) were surveyed by the airborne LiDAR on the second day after the landslide. Vegetation height was calculated from the difference between 1976 DSM and 2013 DEM derived from the airborne LiDAR by Tokyo Metropolitan Government. Comparison between 1976 and 2013 DSM clarified that tree height around the landslide area has increased 50 – 100% over the past 37 years. This tree growth would be mostly induced by tree growth and decrease of charcoal production due to the fuel revolution since 1960's.

Key words : debris flow, shallow landslide, tree growth, GIS, air borne LiDAR, digital photogrammetry

Received 15 April 2016, Accepted 17 June 2016

1) Department of Disaster Prevention, Meteorology and Hydrology, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

* Department of Disaster Prevention, Meteorology and Hydrology, FFPRI, 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki, 305-8687 JAPAN
e-mail: daimaru@affrc.go.jp