

航空レーザ測量技術を用いた雲仙岳周辺の中長期地形変化の把握

山村 祥子・櫻井 由起子・安海 高明・藤本 拓史・江藤 稚佳子（朝日航洋株式会社）
田村 毅・宮脇 正彦・田中 聡（雲仙復興事務所）
植野 利康（多治見砂防国道事務所）・光武 久修（長崎県建設企画課）

1. はじめに

土砂災害対策の分野では、航空レーザ測量による数値標高モデルは地形再現性が高い等高線図としての利用のほか、複数時期の地形モデルの差分処理による地形変化の把握に利用されている^{1) 2) 3)}。

平成2年11月、198年ぶりに噴火した雲仙・普賢岳では、活発な火山活動によってマグマが冷え固まった溶岩ドームとよばれる巨塊群および平成新山が出現した（図1）。溶岩ドームの半分は成長過程で崩落したが、山頂に残る推定1億m³の溶岩ドームは現在も変動を続けており、地震等で大規模崩壊発生の危険性が示唆されている⁴⁾。

国土交通省雲仙復興事務所では、噴火終息後から現在まで長期に渡り航空写真撮影および航空レーザ測量を実施し溶岩ドームの監視を続けている。溶岩ドームの変位については、面的かつ3次元的な挙動把握が求められるが、現状では光波測距儀を用いた定点観測などの点的な観測が主体である。

そこで、本稿では3時期の航空レーザ測量と1時期の航空写真撮影の成果を用いて差分解析を実施し、噴火終息後およそ20年間の雲仙岳周辺（溶岩ドーム周辺）の面的な地形変化について検討した結果を報告する。

2章から4章は解析データの選定方法を示し、それらデータを用いた差分解析結果を5章に示す。

2. 解析候補年度の設定

雲仙復興事務所では平成5年4月の開設以来、図2に示すように平成7年から航空写真の撮影、平成15年から航空レーザ測量を継続的に実施している。そこで筆者らは、これらのデータを基礎資料として噴火終息直後から現在に至るまでの雲仙岳周辺の時系列変化を把握することを目的に、最新の計測である平成29年度を基準年として3時期、すなわち長期・中期・短期における差分を解析することとした。ここでの長期とは約20年、中期とは約10年、短期とは約5年の間隔とした。この3時期に該当する計



図1 溶岩ドームおよび平成新山

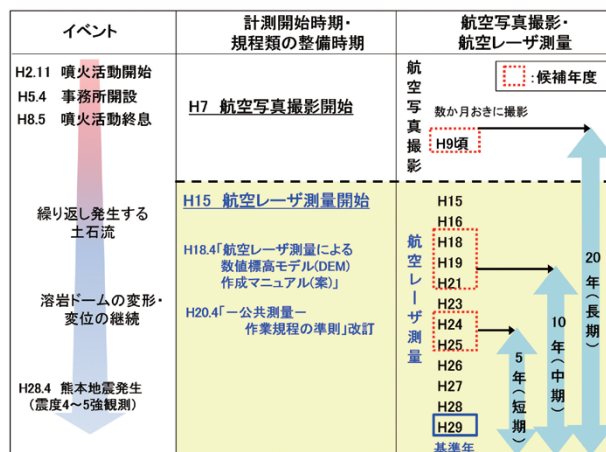


図2 各種計測開始時期と差分解析候補年度の対応表

表1 航空レーザ測量データの選定条件と結果

期間間隔	候補年度	採用年度	点密度※1		データ精度		地形再現性※4		
			オリジナル	グラウンド	鉛直※2	水平※3	礫	崖部	植生
中期（約10年）	平成18年度	—	×	×	○	○	×	×	○
	平成19年度	—	×	×	○	○	×	○	×
	平成21年度	採用	○	○	○	○	○	○	○
短期（約5年）	平成24年度	—	○	○	○	○	×	×	○
	平成25年度	採用	○	○	○	○	○	○	○
基準年	平成29年度	採用	○	○	○	○	○	○	○

※1 レーザ点密度は、溶岩ドーム範囲における5mメッシュあたりの平均点密度125点未満（5点/m²未満）を×とした。

※2 鉛直のデータ精度は、作業規程の準則に準じて25cm以内を○とした。

※3 水平のデータ精度は、数値地形図データ（地図情報レベル1000）の水平精度規定値70cm以内を○とした。

※4 地形再現性は、グラウンドデータが礫・崖部を正確に表現し、植生が除去されているものを○とした。

測データの選定は、計測開始時期および規程類の整備時期等を考慮し、図2の赤破線枠に示す複数の候補年度を設定した。

中期・短期の差分解析に用いるデータは、対象範囲周辺の航空レーザ測量成果を使用する。長期の差分解析は、雲仙岳での航空レーザ測量実施が平成15年度以降のため、航空写真を採用し、改めて航空写真から地形モデルを作成し差分解析に使用することとした。

詳細な地形変化把握のため、それぞれの解析候補年度のデータは3章および4章に示す方法により精査し、より精度の良好なデータを差分解析に使用することとした。

3. 中期・短期差分使用データ（航空レーザ）

中期・短期の差分解析に使用する航空レーザ測量データは、①レーザ点密度②データ精度③地形再現性という3つの選定条件について表1に示すように精査し、各解析候補年度から選定した。つぎに、それぞれの選定条件に関して詳述する。

3.1 航空レーザ測量データの選定条件

① 点密度（オリジナル・グラウンド）

「作業規程の準則」に基づく精度管理プロセスを経て鉛直25cm以内の精度が確保された航空レーザ測量成果においても、計測時期や対

象地形によってレーザの点密度に粗密がある。特に、フィルタリング処理後のグラウンドデータ点密度の不足は、地形モデルの地形再現性を著しく低下させる要因になり得る。

そこで、溶岩ドーム範囲におけるオリジナルデータおよびグラウンドデータを対象に、5mメッシュあたりの平均点密度を集計した。計測手法やフィルタリング手法の差異により、候補年度内でも点密度にばらつきがあり、中期の候補年度では平成21年度が、短期の候補年度では平成24年度および平成25年度が5点/m²以上の高密度を確保できていた。

② データ精度（鉛直精度・水平精度）

航空写真の持つ鉛直および水平のデータ精度は、飛行高度・計測機材の性能に依存する。候補年度内でも計測諸元が異なるため、データ精度に差が生じる可能性があった。

そこで、候補年度のグラウンドデータについて、鉛直方向には調整用基準点、水平方向には建物形状を使用し、精度検証を実施した。いずれの年度においても設定した規定値（鉛直：25cm、水平：70cm）以上のデータ精度が確保できていることが確かめられた。

③ 地形再現性（礫・崖部・植生）

溶岩ドームは岩塔や巨礫からなり、ドーム縁辺部は急激に落ち窪んだような地形（急崖）となっている。これら複雑な地形形状は自動フィ

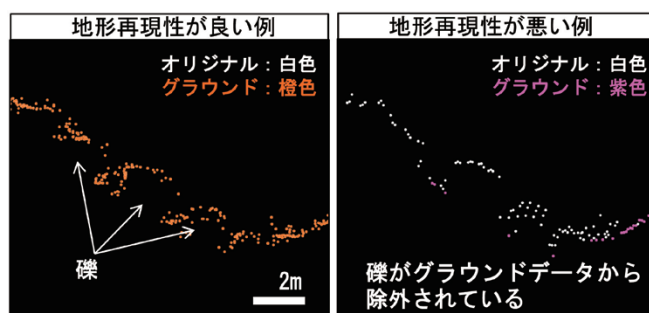


図3 フィルタリング前後の点群断面

表2 解析に使用した航空レーザデータの諸元

計測年度		平成21年度	平成25年度	平成29年度
計測日		平成21年4月19日	平成26年2月20日、24日	平成29年11月7～11日
メッシュサイズ		1m	1m	1m
機体		固定翼	固定翼	回転翼
計測諸元	対地高度	1,981m	1,828m	700m
	照射密度	1点以上/m ²	0.75m四方に1点	10.2点/m ² (溶岩ドーム部のみ)
	飛行速度	110kts (203.7km/h)	110kts (203.7km/h)	126km/h
	パルス頻度	47,790Hz	57,000Hz	100,000Hz
	スキャン角	20° (±10°)	20°	44°
	スキャン頻度	35Hz	37.8Hz	40Hz
	ビーム径	0.347mrad (≒0.687m)	0.22mrad (≒0.40m)	0.19m

ルタリングで除去されやすいほか、手動フィルタリングにおいても礫と植生の判別が困難であり、実際の地形とフィルタリング結果にずれが生じる可能性がある。

そこで、オリジナルおよびグラウンドの点群断面を比較し、フィルタリング後の地形再現性について確認した。候補年度の中には、フィルタリングにより過剰に礫が除去され、地形再現性の低い年度も含まれていた。図3にフィルタリングが地形再現性に及ぼす影響を示す。

これら3つの選定条件により、候補年度のうち最も高いレーザ点密度・データ精度・地形再現性を有していると判断して、平成21年度のデータを中期、平成25年度のデータを短期の変動比較対象に採用した(表2)。

4. 長期差分使用データ(航空写真)

平成29年度航空レーザ測量データと長期の差分解析を実施する対象は、平成8年の噴火終

息直後の航空写真とした。航空写真は、保管された密着写真が入手可能であったことから、候補となる写真群の中から4.1節の手法で地形モデル作成に適切な写真を選定した。

4.1 航空写真の選定手法

SfM/MVSによる三次元形状復元処理によって航空写真から地形モデルを作成する場合、写真内の白とびやブレ、重複度の不足が作成モ

表3 採用した航空写真の諸元

撮影計画機関	雲仙復興事務所
撮影年月日	平成9年(1997年)7月23日
コース番号	C1～C4
撮影高度	1,974m
撮影縮尺	1:8,000
カメラ	RC20
焦点距離	152.72mm
写真枚数	76枚*
オーバーラップ率	60%

*溶岩ドーム周辺では、撮影方向が異なる単コースが複数重なっている。

デルの精度低下の要因となる。溶岩ドーム周辺は、撮影条件による誤差要因の他に、地域特性による誤差要因に特に留意する必要があった。その留意すべき事項は、溶岩ドーム縁辺部の急崖地形に影が生じやすいこと、および噴火口から立ち上る噴煙などである。その影や噴煙は画像内の特徴点を減少させ良好なモデル作成を阻害するため、これらの誤差要因を含む写真群を避け、平成9年7月23日撮影写真を選定した(表3)。

4.2 噴火終息直後の地形モデル作成

選定した平成9年7月23日の航空写真から、SfM/MVS処理により噴火終息直後の溶岩ドーム周辺の地形データを再現した。航空写真から作成したモデルは、樹高および草丈を含むDSM(数値表層モデル)であるが、差分解析の対象となる溶岩ドーム周辺は裸地であり実質的にはDTM(数値地形モデル)であるため、実際の地表面形状が再現可能であった(図4)。

三次元形状復元処理にはBentley社の「ContextCapture」を使用し、相対的なモデリングを実施した後、画像内の対空標識13点を地上基準点として使用し縮尺の調整および測地座

標を付与した。その結果、地上画素寸法34cmの地形モデルが得られ、再投影誤差が基準点において0.03画素、自動タイポイントにおいて0.55画素であった。溶岩ドーム縁辺の急崖部では影の影響により多少TINによる内挿処理を生じたが、溶岩ドーム部の岩塔や礫形状などを詳細に再現できた。

この平成9年度地形モデルの精度確認のため、平成29年度レーザデータと平成9年度地形モデルの縦横断面図を作成し、断面形状を比較した。その結果、地形変化のない範囲において断面形状の一致が認められ、差分解析に使用できる精度を有すると判断した。差分解析の対象となる航空レーザ測量データのメッシュサイズと整合を図り、1mグリッドの点群を作成した。

5. 差分解析結果

5.1 標高差分解析

溶岩ドーム周辺部における中長期の地形変化を把握するため、平成29年度・25年度・21年度・9年度の地形モデル(1mメッシュ)を用いて標高差分解析を実施した。差分解析は、計測年度の新しい成果の標高から古い成果の標高を差し引いた。長期・中期・短期の差分解析結

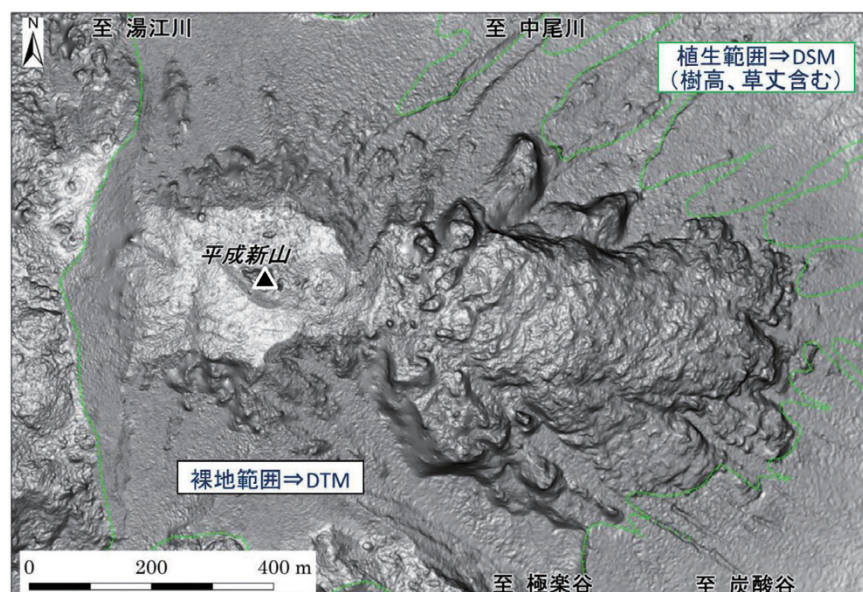


図4 作成した平成9年地形モデルの陰影表現

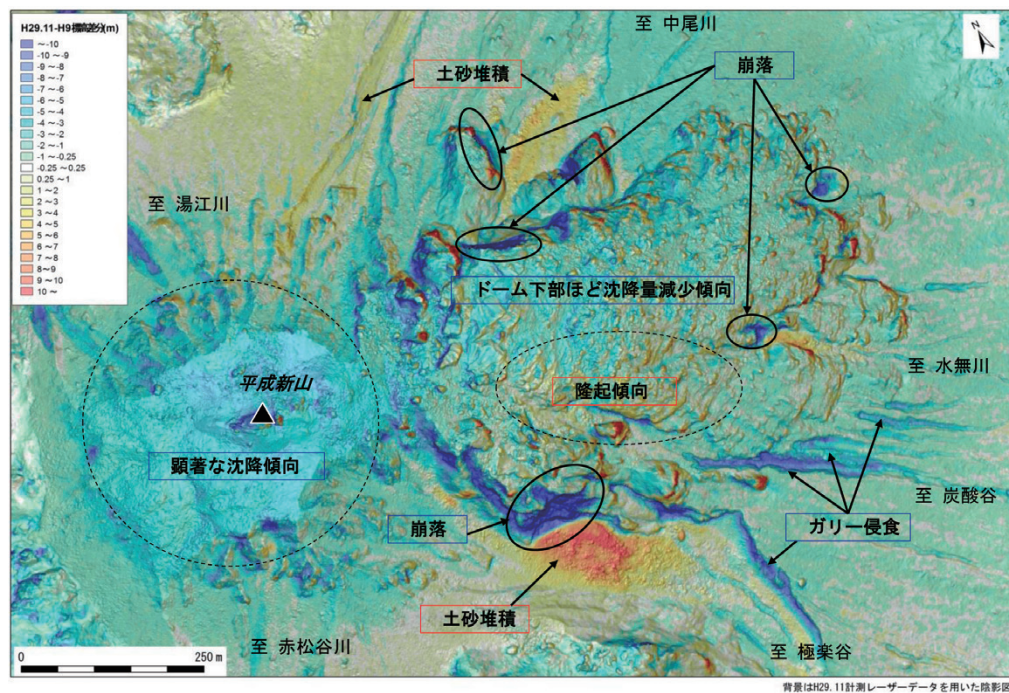


図5 長期の標高差分図

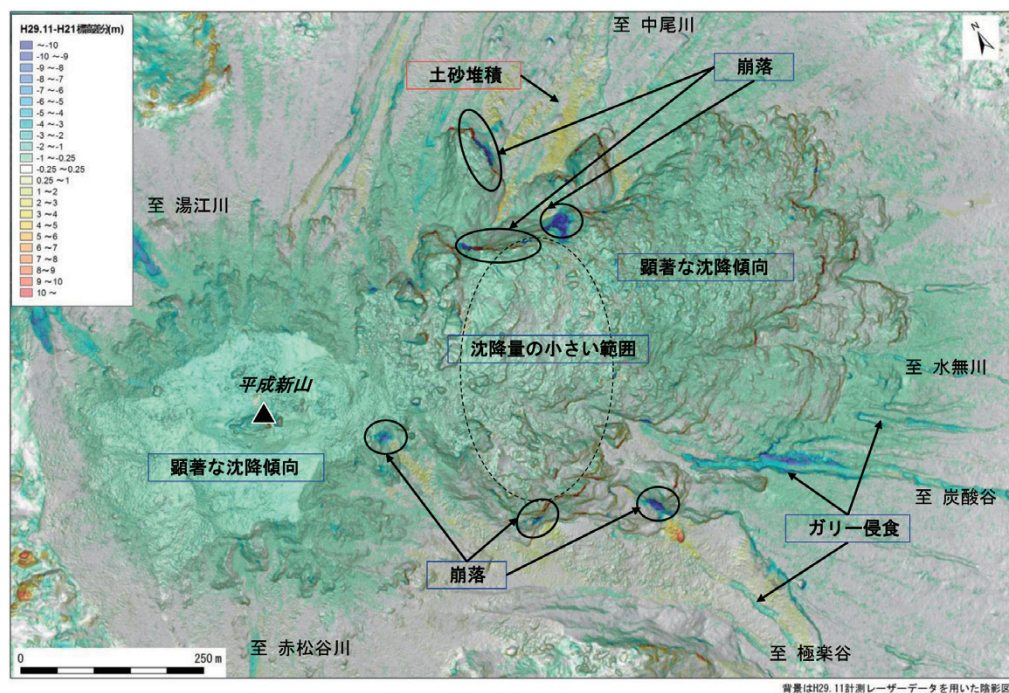


図6 中期の標高差分図

果を標高差分図として図5～図7に示す。標高差分図では、航空レーザ測量データの鉛直精度基準の±25cm以下の変位を非表示とし、プラスの差分は堆積または隆起、マイナスの差分は侵食または沈降の傾向を示している。

① 長期変動 (H29-H9)

溶岩ドーム部を拡大した長期の標高差分図(図5)から、平成新山山頂部において最大6m程度の顕著な沈降傾向が確認できる。溶岩ドーム部では、全体に沈降傾向が認められ、特に溶岩ドーム上部において沈降量が大きいという結果が得られた。また、溶岩ドーム縁辺部にお

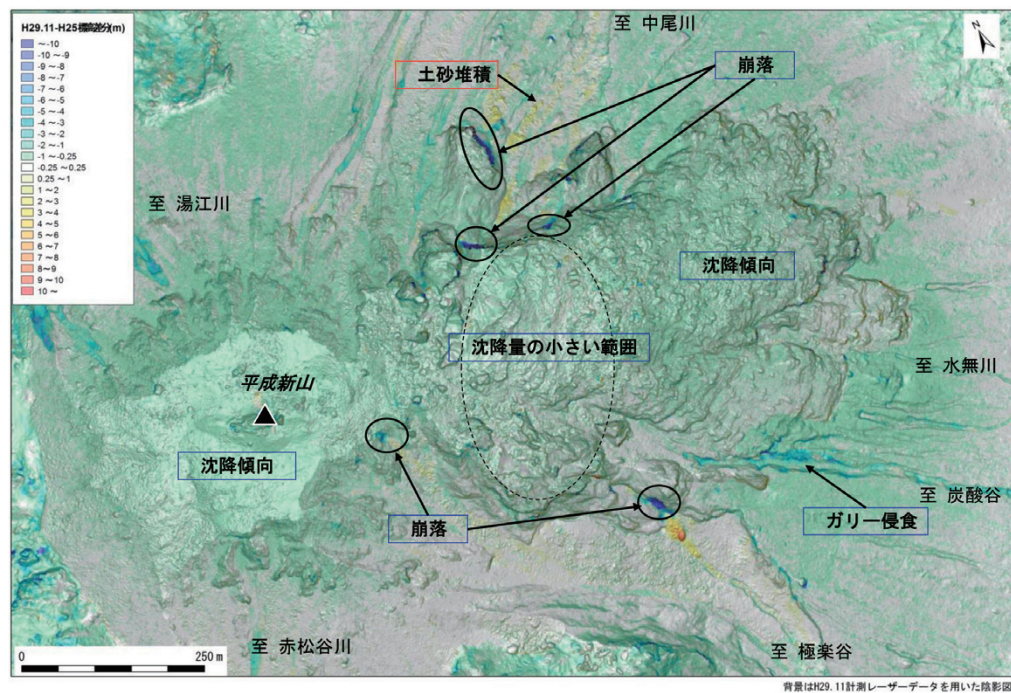


図7 短期の標高差分図

いて複数の崩壊が散見されるほか、炭酸谷や極楽谷においてガリーの侵食など土砂移動現象も確認することができた。

② 中期変動 (H29-H21)

中期の標高差分図(図6)から、平成新山山頂においてはおよそ1～2mの顕著な沈降傾向がみられ、溶岩ドーム部では特に下部で1m程度の沈降が確認できる。また、長期変動と同様に縁辺部における崩壊およびガリー侵食は継続していることが確認できた。

③ 短期変動 (H29-H25)

短期の標高差分図(図7)から、平成新山山頂部と溶岩ドーム下部で沈降傾向が確認できる。解析期間が短期間であっても、崩壊・ガリー侵食等の土砂移動現象は顕著な差分が確認できた。

長期～短期の標高差分解析結果として、平成新山および溶岩ドーム上に全体的に沈降傾向が認められた。また、このような溶岩ドーム全体の大規模な変化傾向のみならず、溶岩ドーム北側および南側の急崖部で全時期を通して複数の崩落発生が確認できることや、炭酸谷や

極楽谷へつながるガリーで今なお侵食が進んでいることなど、土砂移動現象も明らかにすることができた。

このように、標高差分析の結果を差分図として視覚的に表現することで、溶岩ドーム周辺における鉛直方向の変位傾向を面的に把握することができた。

5.2 鉛直方向の変化量算出

平成新山山頂と溶岩ドーム第11ロープ内において、より詳細な変化傾向の違いを把握するため、変化量を算出した。算出にあたっては、雲仙・普賢岳溶岩ドーム崩壊ソフト検討委員会資料の想定崩壊ブロック区分を参考にし、差分集計範囲を設定した(図8)。集計範囲内の平均差分値を求め、差分解析を実施した期間で割ることで、年平均変化量を算出した(表4)。

変化量の算出結果から、平成新山山頂部は全期間を通じて第11ロープと比べ大きく沈降しており、20年間で約5mの沈降であることがわかった。第11ロープ上部にあたるブロックNo.3およびNo.1上部は沈降量が大きく、20年間で1.5

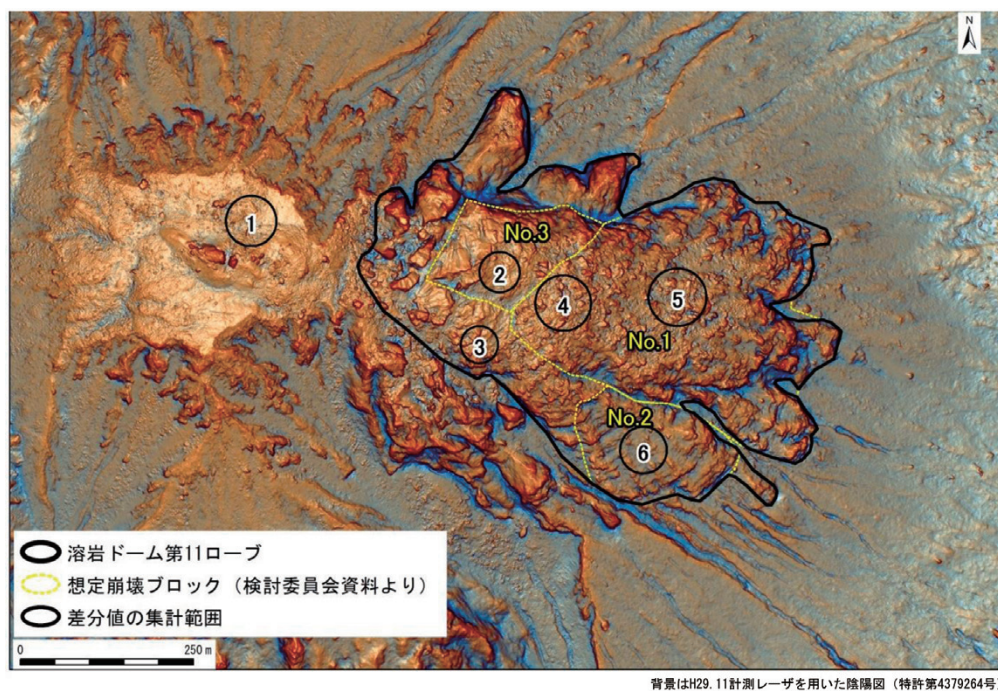


図8 年平均変化量の算出位置図

表4 鉛直方向の年平均変化量

集計範囲		鉛直方向の期間平均変化量 (m)				鉛直方向の年平均変化量 (m/年)			
		H21-H9	H25-H21	H29-H25	H29-H9	H21-H9	H25-H21	H29-H25	H29-H9
		期間1	期間2	期間3	長期	期間1	期間2	期間3	長期
		年数							
1	平成新山山頂部	-3.88	-0.56	-0.51	-4.95	-0.33	-0.12	-0.14	-0.24
2	ブロックNo.3	-1.26	0.01	-0.3	-1.56	-0.11	0	-0.08	-0.08
3	ブロックNo.3南側	0.34	-0.03	-0.26	0.04	0.03	-0.01	-0.07	0
4	ブロックNo.1上部 (P9周辺)	-1.36	-0.15	-0.35	-1.86	-0.12	-0.03	-0.09	-0.09
5	ブロックNo.1下部	-0.65	-0.19	-0.42	-1.26	-0.06	-0.04	-0.11	-0.06
6	ブロックNo.2	-0.52	-0.1	-0.21	-0.82	-0.04	-0.02	-0.05	-0.04

※年平均変化量は、計測月を考慮して算出した。

～2mの沈降が認められた。

また、それらの沈降は、噴火終息後から現在に至る20年間のうち、前半約10年間で急激に生じた可能性が考えられる。

5.3 水平方向の地形変化傾向

より詳細な変位傾向の把握のため、平成29年度・25年度・21年度・9年度のデータから地形断面図（メッシュ形式の地形モデルから作成）および点群断面図（ランダム形式のグラウンドデータから作成）を作成した。それら断面図から、水平方向の地形変化について確認し、光波測距プ

リズム等の観測結果と傾向比較をおこなった。

図9には光波測距プリズム設置点と各地形断面線位置を示す。

① 地形断面

平成新山および溶岩ドームを南東方向に縦断する断面線Aで確認された地形変化傾向について詳述する。図10の地形断面図は、溶岩ドーム中央部に位置するP9プリズムより上部A'～A"地点の地形断面図である。礫等の特徴的な地形断面形状に着目すると、溶岩ドームの沈降する動きのほか、南東方向への水平変位が認められ、この結果は光波測距プリズム観測結

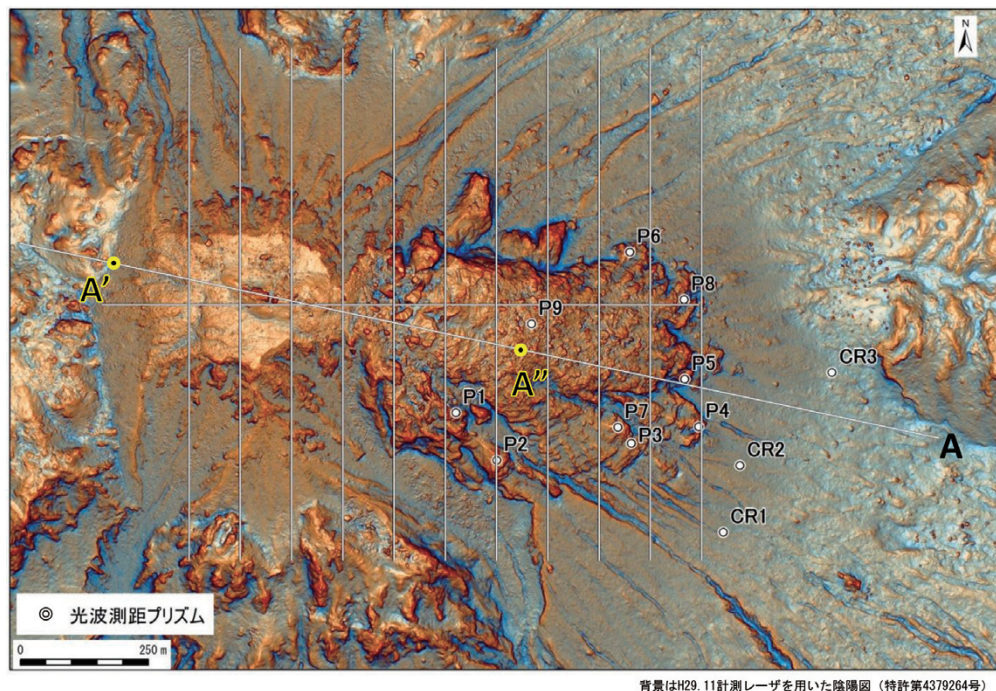


図9 地形縦横断面位置図

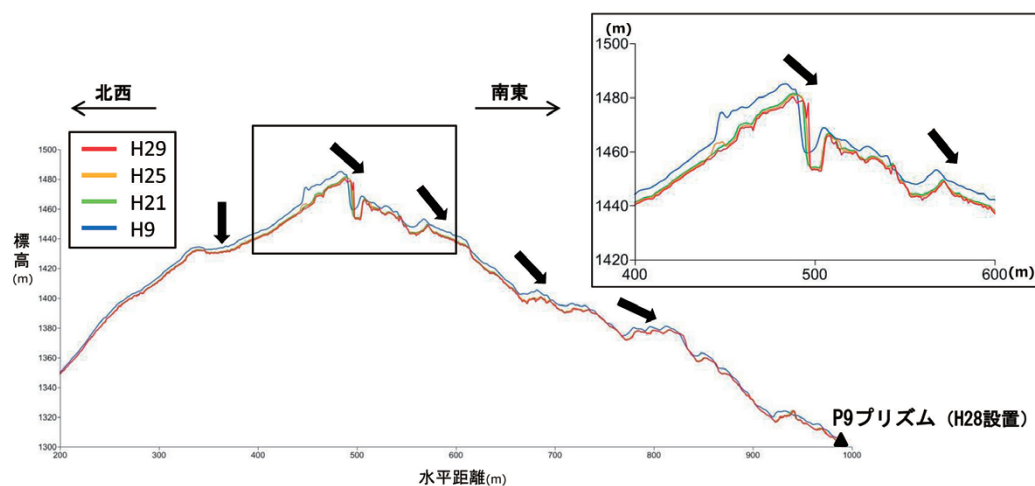


図10 断面線A'～A''における地形断面図（P9プリズム上部を記載）

果4)とも整合的である。

② 点群データ断面

光波測距プリズム設置点近傍における4時期の点群データ断面図を作成した。溶岩ドーム中央部に位置するP9プリズムでは他のプリズムに比べ水平変化速度が早いことが観測されており、点群断面図においても顕著な水平変位を示すことが確認できた(図11)。

比較として、溶岩ドーム辺縁部に設置されているP1～P8プリズムのうち、例としてP5プリズム

設置点近傍の点群データ断面図を示す(図12)。この点群データ断面図からは有意な水平変化が確認できなかった。これは、溶岩ドーム縁部において変位量が微小であることから、航空レーザ測量データを用いた差分解析では検出限界にあったためと推察される。

6. 本研究の成果まとめ

本稿では、噴火直後の航空写真測量成果から地形モデルを作成し、航空レーザ測量導入

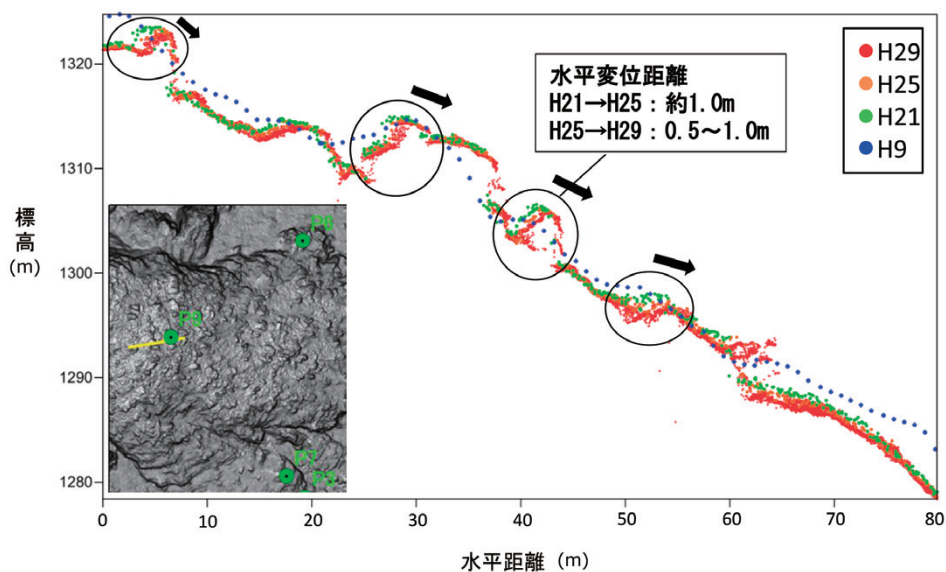


図11 光波測距プリズムP9設置点近傍の点群データ断面図

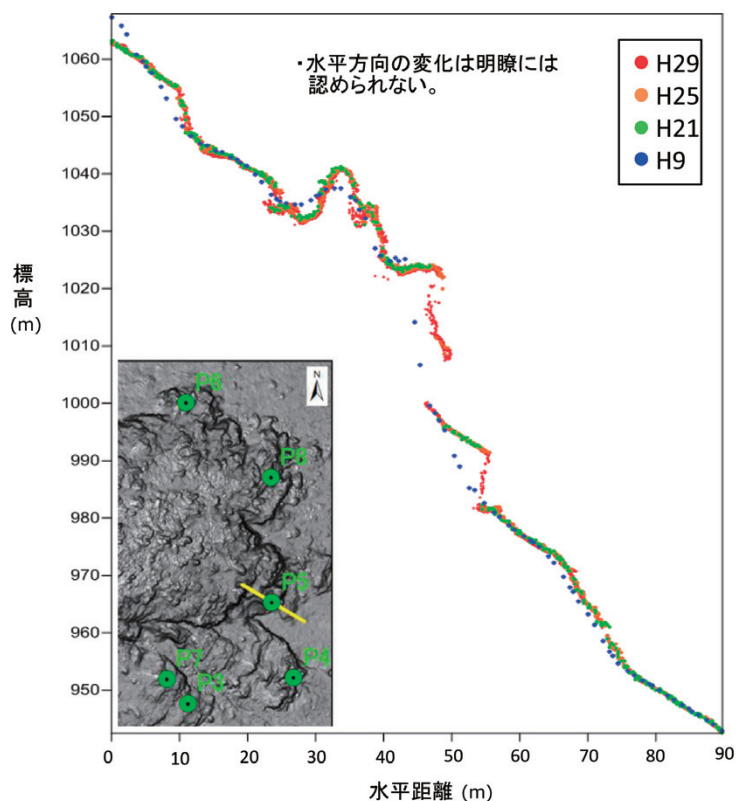


図12 光波測距プリズムP5設置点近傍の点群データ断面図

以前の過去地形と近年のレーザ地形モデルとの差分解析をおこなうことで、溶岩ドーム周辺の長期にわたる累積的な地形変化を把握できた。さらに、ガリー侵食や崩落といった、イベントに伴う土砂移動現象も把握することができた。

これまで点的な観測が中心であった溶岩ドーム周辺において、中長期的な地形変化傾向を面的に把握することができた本成果は、今後の溶岩ドームの崩壊対策の基礎資料として活用が期待できる。

航空写真を用いた地形モデルの差分解析は、発災直後の緊急撮影画像から作成した地形モデルと近年の航空レーザ測定の地形モデルとの差分解析により災害状況を把握するなど、早期対応が求められる場合にも有効である。ただし、撮影条件の悪い写真群から作成した地形モデルは誤差が大きく、公共測量作業規程に準拠し作成された航空レーザ測定の地形モデルとは性質と精度が異なるため、差分結果の解釈には十分留意が必要である。

7. 今後の利活用に向けて

航空レーザ測定データを用いた差分解析から、溶岩ドームの沈降といった年間数cm単位の微小な変位を抽出するためには、精度の良好なデータを選定し活用することが重要である。

また、把握したい変位・変動のレベルに応じて適するデータ精度を設定することや、その精度を確保する最適な計測・解析手法の採用も必要である。このためには、レーザ照射密度の増大などレーザ測定技術の向上に加え、対象地域の地形特性を考慮したデータ計測・解析手法の高度化や基準化が必要であると考えらる。

■参考文献

- 1) 仲野公章ら：2000年有珠山噴火時におけるヘリコプター搭載型レーザースキャナーによる地形変化測定、砂防学会誌、Vol.53, No.6, p.88-94, 2001
- 2) 平川泰之：航空レーザ測定における地形変化把握のための標高差分地の最適化、砂防学会誌、Vol.58, No.6, p.18-22, 2006
- 3) 松岡暁ら：LiDARデータの差分処理による流域土砂動態把握の試み、砂防学会誌、Vol.62, No.1, p.60-65, 2009
- 4) 国土交通省九州地方整備局雲仙復興事務所：第8回（平成29年度第2回）雲仙・普賢岳溶岩ドーム崩壊ソフト対策検討委員会討議資料(http://www.qsr.mlit.go.jp/unzen/committee/images/20160916_dome_soft_siryo.pdf)

■執筆者

山村 祥子（やまむら あきこ）

朝日航洋株式会社



（共著者）

櫻井 由起子（さくらい ゆきこ）

朝日航洋株式会社

安海 高明（あんかい たかあき）

朝日航洋株式会社

藤本 拓史（ふじもと たくじ）

朝日航洋株式会社

江藤 稚佳子（えとう ちかこ）

朝日航洋株式会社

田村 毅（たむら つよし）

雲仙復興事務所

宮脇 正彦（みやわき まさひこ）

雲仙復興事務所

田中 聡（たなか さとし）

雲仙復興事務所

植野 利康（うえの としやす）

多治見砂防国道事務所

光武 久修（みつたけ ひさのぶ）

長崎県建設企画課