

立入規制区域内の火山灰堆積状況を 無人で調査するデバイスの開発 ～火山噴火に伴う土石流の予測と対策のために

きたはらりょう た かないひろみち みながわじゅん しまだとおる ながたなおみ
北原 遼 太¹・金井啓通¹・皆川 淳¹・島田 徹¹・永田直己¹

¹国際航業株式会社東京事業所（〒183-0057 東京都府中市晴見町2-24-1）

火山噴火により細粒の火山灰が地表面を覆う（以下「降灰」という）と、雨水が表面流出しやすくなり、降灰などを押し流し土石流の発生を招く。この対策として2011年に土砂災害防止法が改正され、厚さ1cm以上の降灰が、保全対象10戸以上を有する溪流の半分以上を覆った場合、国交省が降灰状況を調査し、土石流の発生時期と影響範囲を自治体に通知することになった。この調査で厚さ1cmの精度を得るには現地調査が必要である。しかし、噴火中は現地への立ち入りができない。そこで、UAVを用いた直接計測や、サンプリングのための調査デバイスの研究開発と現地検証・改良を進め、その活用を検討してきた。本稿ではこれについて報告する。

Key Words : 火山灰, 土石流, UAVの活用, 降灰厚や質の直接計測, 現地検証, 実用化に向けた改良

1. 研究開発の目的

火山噴火によって、火山灰が山腹・山麓の斜面に堆積し地表面を被覆すると、雨水が地盤に浸透する能力（浸透能）が低下して表面流が増える。そのため少ない雨量でも土石流が発生しやすくなる。例えば、1991年の雲仙普賢岳噴火では、降灰後に何度も土石流が発生し、大きな被害が発生した（写真-1）。



写真-1 雲仙普賢岳で発生した降灰後の土石流¹⁾

2011年の土砂災害防止法改正にもとづき、国交省が降灰状況を調査する際には、A降灰範囲、B降灰

の厚さ、C降灰の質（粒度や概略的な浸透能など）を知る必要がある。このうち、Aは人工衛星や航空機から概要を知ることができるが、BやCを知るには、現地調査が必要となる。しかし噴火時には、危険回避のため、現地への立ち入りが制限される。

そこで、現地調査に代えて、UAVによる直接計測や降灰試料の採取などを実現すべく、研究開発に着手した。

2. 研究開発と検証の計画

火山噴火は、1度のイベントで終息することが少ない。その場合、現地への立入規制が解けぬまま、現地状況が変化するため、噴火局面に応じた無人作業を繰り返す必要がある。

そのため、火山噴火の継続期間に無人調査を行うには、いつ、何をすべきか、火山災害対策の経験から条件を整理した。具体的には、まず、噴火事例を分類整理し、噴火の進展に伴う土石流の発生と対策に必要な情報を噴火対応シナリオとしてまとめた（図-1）。これより、噴火の各局面で対策に必要な要求性能や、調査手順を整理し、調査デバイスなどの開発計画を具体化した。なお、噴火が継続する場合は、調査を繰り返すことを想定し、大規模噴火は対象外としている。

静穏期：	降灰厚スケール 投下ポイント選定	本発表対象=初動期 降灰調査技術活用で 影響範囲予測精度向上
前兆活動期： 地震や噴煙増	降灰厚スケール投下 比較用画像取得/三次元モデル作成	
小規模噴火期： 噴火・降灰発生 土石流発生リスク の増加 (数日間)	空撮画像から概略降灰範囲把握 降灰厚スケールによる降灰厚測定 各デバイスで降灰採取，表面流確認 ↓ 土石流シミュレーション精度向上	
小規模噴火期： 噴火継続(数ヶ月)	雨量・土砂移動検知センサ等設置	
大規模噴火：	対象外	

図-1 噴火対応シナリオと現地調査の具体化

開発では、降灰の厚さと質を把握するため、①投下型降灰厚スケール、②降灰サンプリングデバイス、③表面流確認デバイスを試作した。さらに、雲仙岳や浅間山の活火山で、模擬的に火山灰を散布して計測・採取などの実証実験を行い、改良を重ねた。

また、現地調査の結果を土石流シミュレーションに反映する方法を併せて検討した。

3. 開発と検証の詳細

(1) 投下型降灰厚スケールで降灰厚を観測する

立入規制区域内の降灰厚さを計測するための調査用機器として、投下型降灰厚スケールと投下装置を開発した。図-2に示すように、色・大きさの異なる正四面体のスケールと、それを現地に投下するデバイスを製作した。スケールを噴火の前兆期にUAVから投下しておく、降灰があった場合、小型のものから降灰に隠れる。それを降灰後にUAVから撮影し、隠れたスケールから厚さを推定するものである。

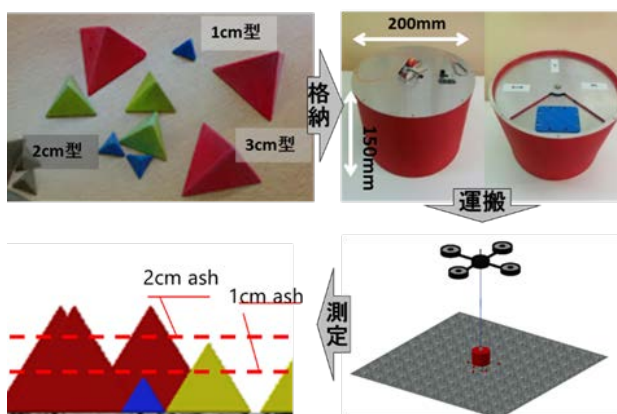


図-2 投下型降灰厚スケールで降灰厚を観測

現地での検証では、対地高度50m程度からの撮影で降灰厚さ1cmを確認することができた。

(2) 降灰サンプリングデバイスで降灰を採取する

降灰の質（粒度や透水性）を直接的に把握するた

めに、降灰サンプリングデバイスを開発した。このデバイスでは、逆回転する2本のローラで降灰を巻き込んで採取する。また、UAVに懸架されたデバイスが接地すると、懸架した紐の緩みを検知して自動的に降灰を採取し、格納する仕組みとした（図-3）。

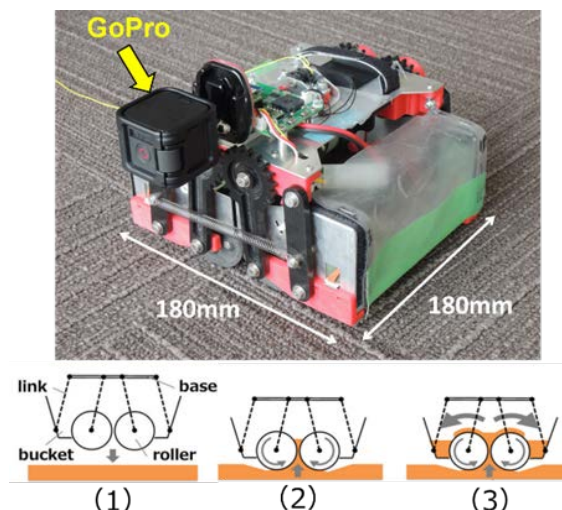


図-3 降灰サンプリングデバイスで降灰を採取

現地検証の結果、100g程度の降灰を採取することができた。この降灰について、粒度試験を行ったところ、人が採取した場合と比べて、粒度組成が概ね同じであることが確認された。

なお、現地検証の経験から、降雨時用の防水型のデバイスを追加して開発した。

(3) 表面流確認デバイスで表面流の発生状況を知る

前出のデバイスで降灰を採取することはできるが、現地で、実際にどれほど浸透が阻害され、表面流が発生しているかは把握しづらい。そこで、直接散水して、状況を観察するために、表面流確認デバイスを開発した（図-4）。

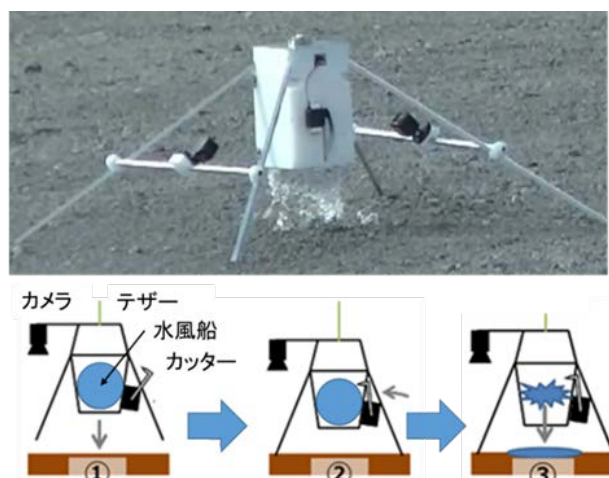


図-4 表面流確認デバイスから直接散水する

このデバイスには、水を入れたゴム風船を収めて

おり、デバイスが着地すると、風船を自動的に割り、一定量の水を地表に散布する。このとき装置脚部のビデオカメラで録画することで、水が地表に浸透、または拡散の様子を記録し、表面流の発生状況を確認するものである。

現地検証の結果を図-5に示す。これより、降灰が細粒の場合は、水がすぐには浸透せず表面流が発生して不定形な痕跡を示した（図右）。一方、降灰が粗粒の場合は、すぐに浸透するため、表面流が発生することがなく、クレーター状の痕跡を示した（図左）。前者は表面流が発生しやすい状況を、後者はしづらい状況を観察できたものとする。

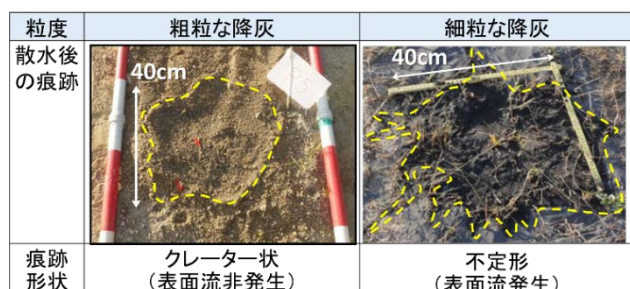


図-5 降灰の粒度の違いによる表面流発生状況の相違

(4) 土石流シミュレーションへの反映

上記の技術により、火山噴火の継続期間でも無人化による現地調査を実現することができた。この調査から得られる降灰の厚さや質から土石流の発生や流下範囲の予測精度向上することが期待される。

しかし、取得した現地データは定性的な部分もあり、土石流シミュレーションに直接反映することは現状では難しい。そこで、リードタイム確保のため、降灰の粒度組成や表面流発生状況から事前に分類定義した降灰状況を参照して、迅速にシミュレーションの条件を選択する方法を考案した（図-6）。

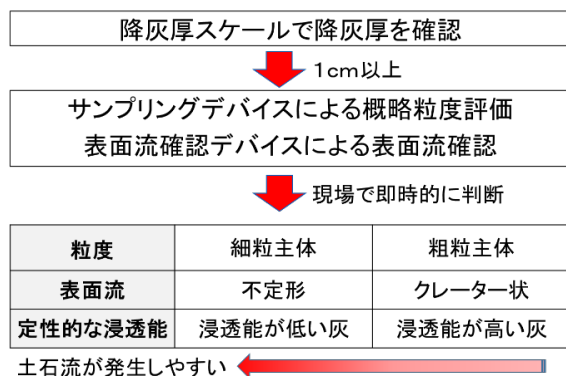


図-6 取得データの迅速評価

4. 開発した技術の改良

(1) 調査方法の課題

開発を進めた結果、2点の課題が生じた。1点は、無人化調査に適した地点の選定、もう1点は投下型

降灰厚スケールの利用にあった。

そこで、前者については、地形情報を取得して分析する手法を考案し、後者については、直接計測する代替方法を開発した。詳細を以下に述べる。

(2) 無人化調査の適地選定方法の考案

既往の実証実験²⁾により、無人化調査の障害要素として、樹木や低木などの植生の有無、斜面勾配、地表の凹凸などが影響することが分かっていた。

そこで、地形や地上の被覆状況（植生）を細密に把握することとした。具体的には、UAVから撮影した画像をもとに、SfMを用いて地形モデルを作成し、これより障害要素を選別した。図-7には、適地選定のための作業フローを示す。

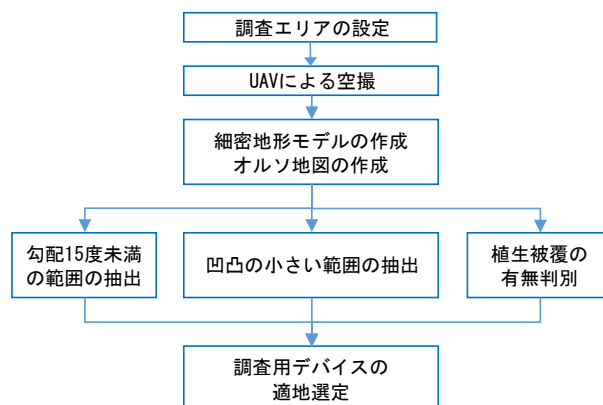


図-7 適地選定のフロー

(3) 降灰厚を直接計測する新たなデバイスの開発

投下型降灰スケールを活用するには、噴火前にスケールをUAVで設置し、降灰後に2回目のUAV空撮が必要となるほか、国立公園の環境保全や地権者調整など、撒布時期・地点の見極めに課題を残した。

そのため、新たにUAVに懸架し、1回で直接的に降灰厚を計測するデバイスを開発した。これは、3次元距離センサで、デバイス接地後の地表面までの距離を一旦計測後、ブラシを用いて降灰を除去し、再度地表面までの距離を計測することで、前後の距離の差分から降灰厚が分かる。

なお、3次元距離センサのほかにも、周辺降灰状況を確認のための全方位カメラ、計測地点の位置情報を得るためのGPSなどを併せて搭載した（図-8）。

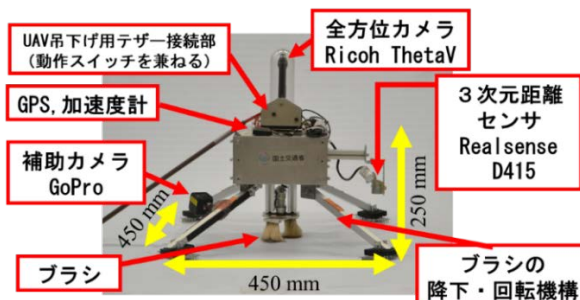


図-8 降灰厚の直接計測デバイス

(4) 改良結果の検証

調査適地の選定方法と降灰厚計測デバイスの効果の現地検証を、浅間山山麓の片蓋川流域で実施した。

a) 調査適地選定方法の検証結果

はじめに、UAV空撮画像から作成した25cmメッシュの細密3次元地形モデルから、デバイスを安定して設置できる ①勾配が15°未満であって、②標高値の標準偏差が6cm以下で凹凸が小さい地点を適地として抽出した。

また、植生については、永谷ら²⁾の方法で導いた点群データの色情報が無彩色の部分に適地とした。

この方法で適地選定した事例を図-9に示す。

適地として抽出された地点を現地で確認した結果、適地条件を概ね表現しており、適地選定の手法としては妥当と判断した。

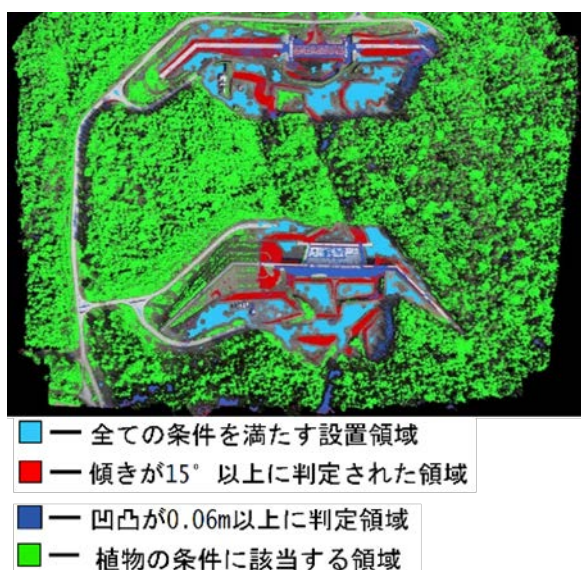


図-9 適地選定の事例（片蓋川1号・2号堰堤付近）

b) 降灰厚の直接計測デバイスの検証結果

降灰厚の直接計測を改良デバイスで行う現地実験を19回行ったところ、18回で正常動作を確認した。

さらに、3次元距離センサで、2cm厚の灰を除去した範囲を計測したところ、平均値が2.20cm、標準偏差が0.09cmと、誤差1割程度で降灰厚を計測することができた（図-10、11）。

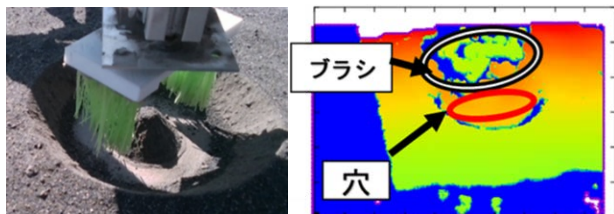


図-10 降灰厚計測デバイスの計測事例

左：降灰をブラシで除去した状況

右：3次元距離センサで直接計測した画像

穴部分の3次元形状

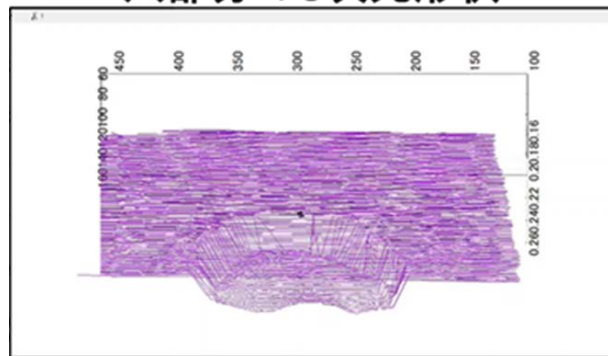


図-11 降灰除去部分の3次元計測事例

なお、降灰を除去するためのブラシは、複数の材質で試験をした結果、湿った灰に対応できるポリプロピレン製を採用した。

5. 結論と今後の展望

火山噴火に伴って火山山麓で頻発化する土石流の対策のため、降灰状況の調査用デバイスを開発し、現地検証などで得られた知見をもとに、さらに改良を施した。

近年は激甚災害が毎年のように発生している。そのため、火山噴火だけでなく災害現場での情報収集を効率的に行う技術への要求は高いと考える。

そこで、災害時に迅速な調査を実現できるように、様々な現地で実用化の試験を重ね、機器などの改良や手順の見直しを図りたい。

また、実用に向けたわかりやすい操作インタフェースや、降灰厚計測の精度向上などについて、検討する他、それらの経験をもとに、噴火時を想定した作業手順書の作成を進めたい。

謝辞：

開発段階では、研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の助成を受けた。国土交通省からは現地検証試験用のフィールドを提供して頂いた。さらに、国土交通省などの、多くの方との議論を通じて、実用化への課題を解決することができた。研究への協力ならびに議論を通じて開発を支援してくださった皆様に感謝いたします。

参考文献

- 1) 防災の取り組みと過去の災害 主な災害の概要，国土交通省九州地方整備局HP.
- 2) 永谷圭司，清水寛子，銭谷彰，金崎裕之，島田徹，皆川淳，森山裕二，田村圭司，杵淵新一，篠原幸夫，高橋忍，栢木敏仁，小林拓也，金井啓通，飛行ロボットで運搬する観測カメラの設置点計画と設置試験，第19回建設ロボットシンポジウム，p.14，2019.