

火山噴火後におけるUAVによる流域状況調査手法の開発

熊井教寿・瀧川健一・黒木 隆

1. はじめに

火山は、一旦噴火すれば広範囲に被害をもたらす恐れがある。被害をもたらす現象の1つとして火山灰の堆積による土石流の発生（以下「降灰後土石流」という。）があげられる。噴火活動が継続している中であっても、土石流発生の原因となる降灰量とその堆積範囲を安全かつ迅速に把握し、降灰後土石流を対象としたハザードマップを更新することが重要となる。ハザードマップの更新のため、リアルタイムハザードマップシステム¹⁾が開発され、大規模な火山活動によって地形が変化する場合でも、地形等を編集・変更した条件で氾濫シミュレーションを行い、被害想定区域を迅速に地図上に示すことができる。その結果を活用することで、従来よりも迅速に噴火中の住民の安全確保や噴火終息後の復旧・復興を図ることが可能となる。そこで、国土交通省九州地方整備局九州技術事務所は、噴火活動が継続する中でも安全、迅速に降灰量を計測する手法を現在開発中である。本報告では、開発の内容とその成果を紹介する。

2. UAVによる調査ユニットの開発

2.1 UAVによる調査内容の検討

九州技術事務所では、降灰後土石流を対象とし

リアルタイムハザードマップを更新する際の調査手法として、地上踏査や有人機による調査手法を検討中であるが、UAVを活用した調査を実施することで、より安全かつ効果的に必要なデータを取得できると考えている。特に、UAVによる調査の有効性として、土石流の発生源である流域源頭域など、調査地点が接近困難な場所であっても活動が可能である点や、小型・軽量のため機動性に優れている点等がある。

これまでに、火山噴火時に立ち入り可能地域における降灰分布調査が行われてきたが、さらに立ち入り困難地域の降灰状況や浸透能の変化についての時間分解能の高い情報を得るために、UAVで当該領域に観測機器を設置し、遠隔観測する方法を検討した。UAVによる調査ユニット（図-1 左写真）として運搬する観測機器は、火山噴火に起因する土石流の発生等、土砂災害防止法に基づく緊急調査で求められる調査内容を考慮し、降灰量観測、浸透能の把握及び降灰堆積状況を把握できるものとした。

2.2 調査ユニットの開発

降灰量観測について、UAVによる運搬及び遠隔連続計測が可能な圧力センサー・距離センサーを用いた降灰量調査ユニットを開発した（図-1中央上・中）。この調査ユニットが堆積した火山灰

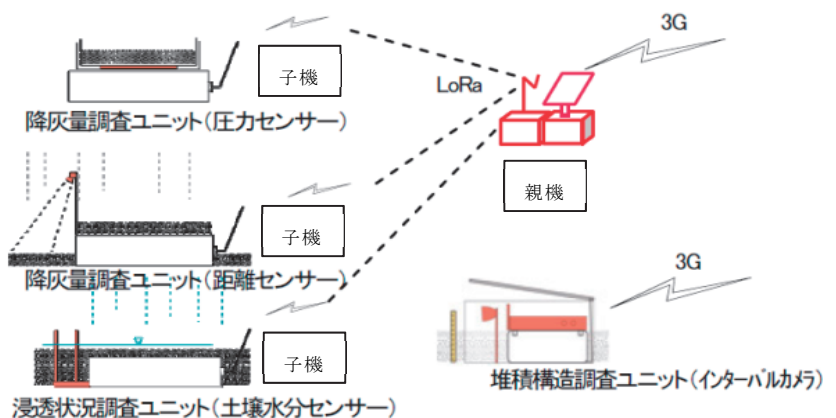
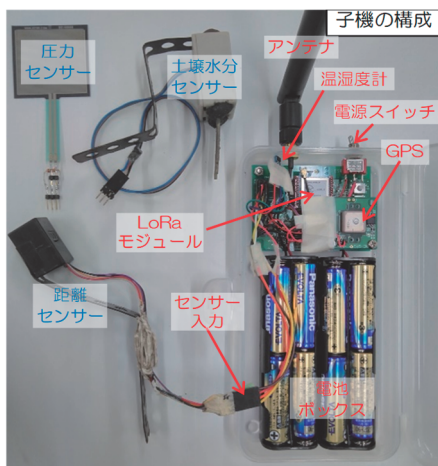


図-1 調査ユニットの構成

の重量もしくは厚さを計測することで降灰厚0.5cm程度の精度で測定することが可能である。また、土壤水分センサーを用いた浸透状況調査ユニット(図-1 中央下)及びインターバルカメラを用いた堆積構造調査ユニットを開発した(図-1 右下)。

降灰量及び浸透状況調査ユニットは、データを取得する子機とデータを収集・伝送する親機で構成される。子機から親機の通信はLPWA(LowPowerWideArea)通信の1つであるLoRaを採用した。これにより、4km程度の通信距離が確保でき、1ヶ月程度メンテナンスフリーでの稼働が可能となった。これらは、一般的なUAVでも運搬が可能になるよう各調査ユニットの重量を300~500g程度まで軽量化した。また、堆積構造調査ユニットは、地表面への火山灰の堆積状況を遠隔監視する手法である。

2.2.1 降灰量調査ユニット

土砂災害防止法に基づく緊急調査において、最も基本的な情報である「降灰厚1cm以上の範囲」を危険区域内でも安全に把握するため、UAVで運搬可能な降灰量調査ユニットを開発した。

堆積した火山灰を観測するためには、その厚さを直接的に測定する手法と重量等から間接的に推定する手法がある。調査ユニットは、圧力センサーに加え、距離センサー方式の調査ユニットについても試作した。

圧力センサー方式は、降下中の火山灰を計測箱に捕捉して堆積する火山灰の重量を圧力として測定してその量を推定する。噴火の規模等によって堆積した火山灰の単位厚さあたりの重量が異なることがあるため、観測対象火山毎に想定される火山灰をもとにキャリブレーションを行う必要がある。計測箱には降雨等により水が貯まる可能性があるが、堆積した火山灰の計測は圧力センサーの計測値の時系列的な変化から推定するため、降雨と降灰が同時に発生した場合を除き、火山噴火と関係のない重量変化は除外することで対応できる。

距離センサー方式は、センサーと地面との距離を測定することで、堆積した火山灰の厚さを時系列で測定する。センサーの特性上測定している間に赤外線を発するため、圧力センサーと比較して消費電力が多くなる傾向にある。センサーは赤外線の反射で測定する距離センサーを使用した。セ

ンサーの照射対象は、 $\pm 5^\circ$ の範囲になるため、10cm程度の距離を取れば半径約1cm程度の範囲の面を測定することになる。また、センサー自体が降灰分布に影響を与えないように、センサーを 30° 程度傾けて斜め前方の面を測定することとした。

2.2.2 浸透状況調査ユニット

火山灰が堆積すると降雨が地下に浸透しにくくなることで土石流が発生しやすくなることが知られている。その場合において、降雨時に災害発生が予測される状況で発表する防災情報として、土砂災害緊急情報があるが、どのくらい浸透能力が低下するか把握することが重要である。そこで、土砂災害緊急情報の発表内容に関わる降雨の浸透能低下状況の把握のため、浸透状況調査ユニットを開発した。

堆積した火山灰層表面における降雨の浸透状況を観測するために、土壤水分センサーで地表面の水分状況を把握する。土壤水分が増加するにしたがい、センサー間の抵抗値が小さくなり電圧が大きくなるが、土壤の性質や間隙水の電気伝導度によって値は変化するため、正確に土壤水分を測定することは困難である。そこで、降雨により表面流が発生している状況、つまり地表面に水面が発生している状況を検知することを目標とした。

2.2.3 堆積構造調査ユニット

降下する火山灰が堆積していく状況をインターバル撮影し、高画質画像から堆積層毎の粒径を把握することで堆積構造を推定する堆積構造調査ユニットを開発した。使用するカメラは、スマートフォン、Webカメラ、通信機能付きドライブレコーダなどで試作した。スマートフォンは電力消費が早いとため、モバイルバッテリーと太陽光パネルによる充電機能を付加し、通信制御のアプリケーションを使用し、電力消費を抑制することで長期利用を目指したが、電波環境の悪い箇所での動作安定性や耐久性に課題があった。Webカメラ、通信機能付きドライブレコーダは1ヶ月以上安定して画像を送送できたが、バッテリーやタイマー等の構成物が多く重量が1.5~2kg程度となった。

2.3 把持装置の製作

UAVにより調査ユニットを運搬するため、把持装置を製作した。把持装置は調査ユニットとUAVの機体との接続ができるようにし、箱形の調査ユニットを掴まえるタイプである掴み型(写真-1)

及びユニットの形状に自由度を持たせるためにフックで吊り下げるタイプである吊り下げ型（写真-2）の装置を製作した。把持装置は様々な機体で活用できるようにアーム長などを調整可能かつUAVが着陸すると同時に調査ユニットを自動的にリリースするよう設定し、特別な操作を行わずとも目標地点に飛行、着陸、帰還という操作のみで設置できるように工夫した。



写真-1 把持部の構造（掴み型）

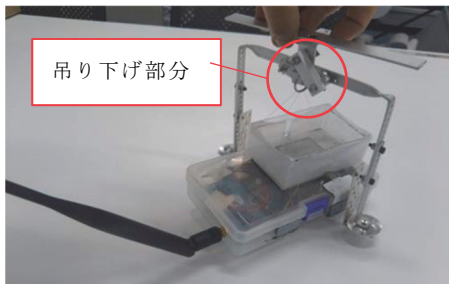


写真-2 把持部の構造（吊り下げ型）

3. 運搬・観測手法の留意点の検討

3.1 UAVによる調査ユニットの運搬・観測手法の留意点

調査ユニットをUAVにて運搬・設置するにあたり、調査ユニット設置候補地点とUAV発着点及び飛行ルートを選定の留意点について検討した。

調査ユニット設置候補地点は、斜面の勾配、地表面の形状、植被状況及び見通しについて考慮する必要がある。特に、センサー誤差を小さくするために急勾配箇所を避ける必要がある。

UAV発着点は、地形、地表面の状態及び目的地との高度差について考慮する必要がある。特に、地形は緩斜面を有する尾根部のような見通しが良く高い場所が良い。

飛行ルートは、設置目標地点と発着点との間の地形及び支障物の有無を確認し、必要に応じて迂回路を設定する必要がある。

3.2 適用可能箇所の拡大に向けた検討

調査ユニットの設置候補地点は、設置箇所が必ずしも十分に上空が開放しておらず、地表面が平坦でない場合も想定される。そこで、UAVが飛行状態のまま調査ユニットを設置できる手法として、ウィンチを活用した方法を検討した。これにより、着陸する必要がなく上空があまり開放していない裸地や凹凸地でも適用可能であり、着陸時の機体転倒等のリスクが小さくなる。しかしながら、ウィンチ機構を搭載するためには、物理的な取り付けだけでなく、電源、操作システムの変更も必要になってくる。

立ち入り規制範囲が4km程度になる場合、長距離飛行に対応したUAV運用は、調査ユニットのアンテナの高さを調整することによりUAV電波到達距離を延伸し、対応が可能となる。

4. 実証実験

4.1 実験内容

火山噴火時による立入規制区間を4km程度と想定すると、長距離飛行時の操作電波の伝送及び機体の監視が必要である。また、調査ユニット設置については、凹凸や植生等着陸が困難な箇所でも設置できることが必要である。そこで、UAV自体を遠距離監視する実験、UAVからの電波伝送実験、調査ユニット設置実験及び調査ユニットの継続監視実験を鹿児島県桜島黒神川地獄河原において行った。

4.2 UAV遠距離監視手法実験

使用したUAVは、中型の業務機（TarotXS690）及び小型の汎用機（DJI Phantom4）であり、高度140m、距離1.2kmで水平飛行し、地上から各種スコープ（フィールドスコープ、高倍率望遠ビデオカメラ、双眼鏡等）によりどこまで視認、追尾可能であるかを検証した。最も遠距離監視ができたのはフィールドスコープを直視で監視する手法であり、1.2km以上監視可能であることを確認した。背景の状態によっては機体に高輝度LEDを取り付けることも有効であることを確認した。

4.3 電波伝送実験

高所作業車を使用して、アンテナ高を人の胸高さから地上高10mまで上げることで、中型の業務機（TarotXS690）のテレメトリ情報電波の到達距離の変化を検証した。地上からの操縦では1,000m

程度から断続的に途絶していたが、高所作業車（地上高10m）では1.2km程度の試験飛行範囲では安定して受信することができた。

4.4 UAVによる調査ユニット設置実験

UAVによる調査ユニット設置箇所の拡大に向けて、UAVの着地が容易な平坦地に加えて、着陸が不可能な凹凸地を対象に調査ユニットの設置手法を検討した。凹凸地での設置は、UAV搭載用ウィンチを使用した。平坦地においては、着陸式の把持装置により調査ユニットの遠隔設置が可能であり、凹凸地においてもウィンチを適用することで対応できることを確認した。なお、凹凸地で設置した場合には傾いて調査ユニットが設置されている可能性があるが、傾きに応じた補正を行い、誤差を軽減できることを確認した。

4.5 調査ユニットの継続監視実験

降灰量調査ユニット（距離センサー）、浸透状況調査ユニット（土壌水分センサー）及び堆積構造調査ユニット（インターバルカメラ）について、火山地域での継続監視試験を実施した（写真-3）。設置箇所は、火山灰が降下する可能性が高く、撤去作業が安全に実施できるように規制区域外のアクセス性の良い箇所とした。

各調査ユニットの観測は、2018年12月20日から2019年1月22日まで連続稼働を確認した。12月20日から12月28日までの期間、SIMカード不具合によりクラウドへのアップロードができなかったが、SDカードに蓄積したデータにより補完することができた。

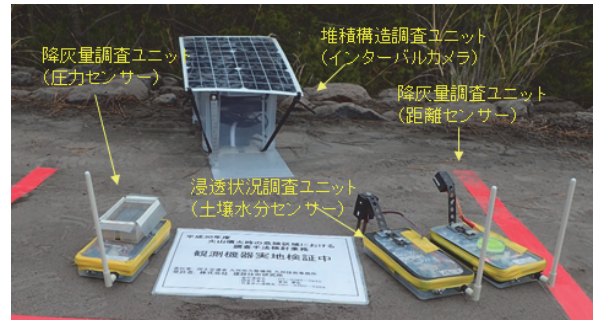


写真-3 設置した調査ユニット

5. まとめ

UAVで運搬する調査ユニットによって、立入困難地域において、リアルタイムハザードマップの更新に必要なデータの取得が可能であることを確認した。

今後は、近年、活発な噴火活動が見られ降灰が観測されている阿蘇山・霧島山等での耐久性検証の実施も検討している。また、調査ユニットを用いた調査手法のマニュアルを作成するとともに、他の調査手法と連携し、より広い視点での火山噴火時のUAV調査計画の考え方をとりまとめていく必要がある。

謝 辞

本業務を進めるにあたり、国立研究開発法人土木研究所土砂管理研究グループ火山・土石流チームの方々には、調査ユニット開発当初から一貫してご指導を賜った。ここに改めて謝意を表します。

参考文献

- 1) 城ヶ崎正人：火山噴火対策に伴う土砂災害対策について、砂防と治水、Vol.51、No.3、pp.7～12、2018

熊井教寿



国土交通省九州地方整備局
九州技術事務所火山防災減災課長
Norihisa KUMAI

瀧川健一



国土交通省九州地方整備局
九州防災・火山技術センター 専門員
Kenichi TAKIGAWA

黒木 隆



国土交通省九州地方整備局
九州技術事務所火山防災減災課火山対策係長
Takashi KUROGI