

# マルチロータ機を用いた無人火山観測システムの開発 —2016年 雲仙普賢岳におけるフィールド試験—

永谷圭司 (東北大学) ○谷島諒丞 (東北大学) 桐林星河 (東北大学)

伊豆智幸 ((株) エンルートラボ) 金井 啓通 (国際航業 (株)) 金崎裕之 (国際航業 (株))

皆川淳 (国際航業 (株)) 島田徹 (国際航業 (株)) 森山 裕二 (国際航業 (株))

## 1. はじめに

日本国内の活火山の活動は、西之島の噴火、口永良部島の噴火、御嶽山の噴火など、近年活発化している傾向にある。非常に近い将来、日本国内において、大規模な火山噴火が発生する可能性も小さくない。

火山噴火により、災害を引き起こす要因になると懸念されるものとして、噴石・降灰、火砕流、火山泥流、土石流等がある。この中でも、土石流は、火山岩塊や火山灰が降り積もった斜面に雨が降り、火山灰や火山岩塊を押し流すもので、その下流に大きな被害をもたらす。例えば、島原市は、雲仙普賢岳の1990年から1995年の噴火において、土石流による大きな被害を被った [1]。このことから分かる通り、火山噴火の際には、人的被害を最小限とするため、土石流の発生予測を行うことが求められている。

土石流の発生予測を精度良く行うためには、(A) 地形形状、(B) 降灰厚、(C) 火山灰の性質、(D) 雨量を直接計測することが望ましいとされている。しかしながら、活動中の火山は、火口周辺に立入制限区域が設定されるため、これまで、火口付近の火山堆積物に関する情報収集を行うことができなかった。そこで筆者らは、2014年から2015年度に実施したNEDOの委託研究ならびに、2016年度から2017年度にかけて現在実施中のNEDOの研究助成の下で、無人飛行ロボットを利用した「土石流予測を目的とした火山災害地域のリアルタイムデータベースを実現するセンシング技術の開発」を進めてきた [2]。具体的には、ドローンという名称で広く浸透しているマルチロータ機に、カメラや土砂採取装置などを搭載し、立入制限区域内における(A)~(D)の情報を取得することで、土石流予測を行うというものである。筆者らは、この研究開発を進めるにあたり、国土交通省の協力を得て、浅間山や雲仙普賢岳、桜島など、実火山環境において、開発したシステムのフィールド試験を実施してきた。

本稿では、現在開発中の下記3つの技術ならびに、2016年11月に実施した雲仙普賢岳におけるそれぞれの技術に関するフィールド試験について報告する。

1. 降灰厚を測定するための投下型スケールの開発
2. 表面流計測デバイスの開発
3. 雨量センサ等のセンサを搭載可能な小型移動ロボットの運搬と回収

また、この試験で得られた知見 (Lessons Learned) についても紹介する。

## 2. 降灰厚測定用投下型スケール

### 2.1 降灰厚測定手法の提案

精度の高い土石流シミュレーションのためには、降灰厚の情報が重要である。しかしながら、マルチロータ機から取得した現場の画像情報だけでは、降灰厚の推定は困難である。仮に、目盛のついた垂直ポールが環境内に設置されていれば、降灰後、マルチロータ機が取得する画像情報からその目盛を読むことで、降灰厚を推定することが可能となる。しかしながら、そのようなポールを環境内に予め設置することは困難である。

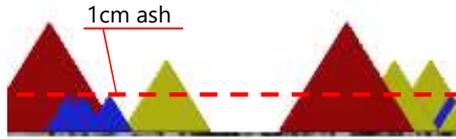
そこで、本研究では、噴火後の降灰厚を取得するため、ピラミッド形状の投下型スケールのプロトタイプを開発した。火山活動が始まった直後、または、火山噴火の兆候が観測された後に、マルチロータ機を用いてこの投下型スケールを立入制限区域内に投下する。降灰が観測された後に、カメラを搭載したマルチロータ機を同一場所に飛行させ、上空より、投下型スケールの画像情報を取得する。スケールの色に応じたサイズは既知であるため、画像中の見えているスケールを確認することで、降灰厚を推定することが可能となる。

### 2.2 投下型スケールならびにスケール投下機構の開発

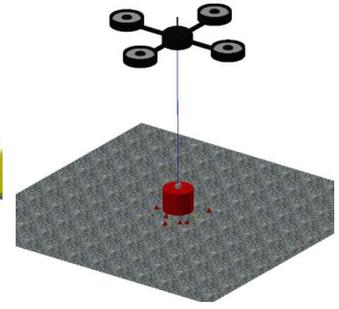
投下型スケールのプロトタイプとして、大きさや色の異なる三角錐形状のスケールを三種類製作した。なお、材質には、緊急時に汎用的な材料で製作することを考慮し、3Dプリンタで取り扱える生分解プラスチックを採用した。図1-(a)に、スケールのプロトタイプを示す。降灰厚が1cm未満の場合、マルチロータ機に搭載したカメラによって、全てのスケールが認識可能である。また、降灰厚が1cm以上2cm未満の場合、1cmのスケールは灰で埋もれて見えなくなるため、認識可能な最小スケールは、2cmと3cmのスケールとなる。また、降灰厚が2cm以上3cm未満の場合、認識可能なスケールは、3cmのスケールのみとなる。この手法による降灰厚推定のイメージを図1-(b)に示す。また、マルチロータ機で立入制限区域内にスケールを配置するため、本研究では、スケール投下機構を開発した。図1-(c)に、開発した装置の動作イメージを示す。スケール投下機構内部は、3つの部屋に分かれており、それぞれにスケールが格納される。マルチロータ機が目的地に到達し、装置が地面に着地すると、3つの部屋の底の1つが解放され、中の投下型スケールが地上に蒔かれる。これを用いることで、一度のフライトで3カ所に投下型スケールを投下することが可能となる。



(a) Developed pyramid-type scales.



(b) Concept image of the use of the proposed scales (side view). In case of 1cm ash fall, the blue scales cannot be seen from the air.



(c) MUAV suspends a drop-down Device.

図1 (a) 投下型スケールのプロトタイプ, (b) 測定イメージ, (c) 投下機構のイメージ.



Flight Altitude = 100m



Flight Altitude = 75m



Flight Altitude = 50m

図2 マルチロータ機の異なる飛行高度から取得した投下型スケールの画像.

### 2.3 投下型スケールのフィールド試験と得られた知見

スケールが、上空のマルチロータ機から認識可能かどうかを確かめるため、マルチロータ機を用いたスケール認識試験を実施した。地面に、1cm サイズの高さを持つ赤色、黄色、青色のスケールを設置し、マルチロータ機を用いて、異なる高度からカメラを用いて撮影を行った。なお、カメラの画素は4000 × 6000、また、解像度は350dpiで撮影を行った。

図2に、取得画像を示す。この結果より、50mより低空から取得した画像であれば、1cmサイズの投下型スケールを認識することができることが分かった。また、スケールの色は、(1)黄色、(2)赤色、(3)青色の順で認識が容易であるという結果を得た。ただし、背景色、たとえば植生がある場所などでは、特に黄色のスケールは認識が困難となった。一方、青色のスケールは、50m上空からは認識することができなかった。なお、各スケールに対し、人為的に火山灰を振りかけたところ、スケール上方の頂点は隠れることなく、期待通りの動作となった。

また、雲仙普賢岳では、投下型スケールの投下試験ならびに画像取得試験を実施した。この試験により、期待通り、投下型スケールの自動設置ならびに画像取得ができることを確認した。

この試験により、以下の知見を得ることができた。

1. 三角錐型の投下型スケールは、設置が容易であり、また、降灰後も上空から認識できるため、降灰厚測定に有用である。
2. カメラの視野角とマルチロータ機の高度ならびにマルチロータ機の位置誤差の関係は、スケールの画像取得を行う上で、十分に注意する必要がある。
3. 投下型スケールの色と環境の背景色の関係により、認識精度は大きく変動する。そこで、実ミッションのシナリオは、以下のように考えると考えられる。
  - (1) 地形情報取得のためのマルチロータ機が対象環境を飛行し、取得した複数の画像より、三次元地図を生成。この情報を元に、オペレータは、投下型スケールの敷設地点とスケールの色の選定を実施。
  - (2) スケール投下機構を吊下げたマルチロータ機を計画した敷設位置まで飛行させ、投下型スケールを設置。
  - (3) 降灰後、スケール敷設位置の上空まで、カメラを搭載したマルチロータ機のフライトを行い、画像情報を取得。この情報より降灰厚を測定。

今後の予定では、実フィールドにて上述の測定シナリオを実施し、提案するシステムの有用性を検証する予定である。

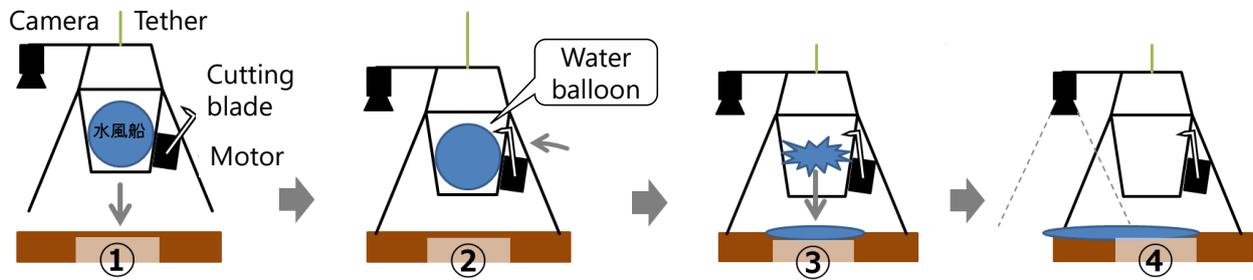


図3 表面流計測装置の動作イメージ。

### 3. 表面流計測装置

土石流予測を行う際、降灰厚と共に重要となるのが、火山灰の透水性の情報である。山体斜面が火山灰に覆われると、地面の透水性が低下することが多い。このような状態で降雨が発生すると、山体斜面では、雨水が地面に浸み込まず、地表に表面流が発生する。これによって地表が削られ、リルやガリーのような溝状の地形が形成されると、活火山の麓の地域に甚大な被害を与える土石流の発生につながる。このため、噴火に伴い降灰が発生した際には、迅速に透水性を調査することが必要である。しかしながら、一般の透水試験は、時間や人手、大きな装置が必要であり、立入制限区域内で実施することは不可能である。

そこで、本研究では、土石流が発生する前に、立入制限区域内の透水状況を応急的に、無人でかつ迅速に調査することを目的とし、カメラを用いて地上の表面流の発生状況を調査するマルチロータ機搭載型表面流計測装置を開発した。装置の詳細については、[3]で紹介したので、ここでは、装置の概要と試験結果を中心に述べる。

#### 3.1 表面流計測装置の動作原理

開発した計測装置は、貯水部に搭載した水風船を割り、大雨を模擬して水を一度に地表面に流し、それをカメラで撮影することで、透水性能を確認するものである。装置のサイズは、縦横 350 mm、高さ 320 mm で、貯水部と制御部は直径約 100 mm の円筒である。なお、水は 500 ml 程度搭載できる。また、貯水部の円筒の側面には、カッターの刃が付いたアームを回転させるサーボモーターが取り付けられており、これで水風船を割ることで水を投下する。図3に、その動作の概要を示す。

#### 3.2 初期試験ならびにフィールド試験の結果と得られた知見

まず、マルチロータ機による運搬を行わずに、採取した3つの火山灰（樽前山、雲仙普賢岳、桜島山）の上で装置の動作試験を行い、画像取得を行った。その結果、透水性の高い火山灰（樽前山、雲仙普賢岳）の場合、水は土壌に速やかに浸透し、土はクレータ形状を形成した。一方、低透水性の火山灰の場合、水の落下と同時に火山灰が舞い、表面流が発生した。これらの現象は、装置に取り付けられた広角ビデオカメラ（GoPro）によって観察することができた。

次に、上記の火山灰に対し、対象試料の透水係数を屋内試験で測定したところ、

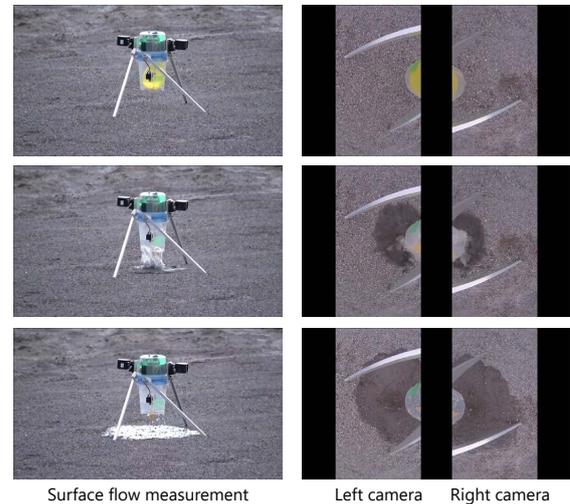


図4 表面流計測デバイスの動作試験の様子。

- 樽前山 :  $6.31 \times 10^{-4}$  (m/s)
- 雲仙普賢岳 :  $7.96 \times 10^{-5}$  (m/s)
- 桜島山 :  $1.34 \times 10^{-5}$  (m/s)

という結果が得られた。これは、提案した表面流量測定装置によって予想された透水性能と定性的に一致する。

さらに、雲仙普賢岳において、マルチロータ機による装置の動作試験を行った。装置は、マルチロータ機によって吊下げられ、目標位置上空に運搬された。その後、装置は地上に着陸し、期待通り表面流の動画像を得ることができた。図4に、そのときの動作の様子ならびに、左右のカメラで取得した土壌表面の様子を示す。

上記の試験によって、以下の知見を得ることができた。

表面流計測装置は、厳密な透水性の測定を行うことはできないが、樽前タイプや桜島山タイプといった、土壌の透水性の分類は可能であることが分かった。そこで、土石流シミュレーションを行う際には、それぞれのタイプに応じた、典型的な数値を使用することが可能となる。そのため、今後は、異なる土壌における試験結果を積み上げる必要がある。

また、装置の改良も必要であることが判明した。特に、フィールド試験において、マルチロータ機のフライト時、カメラの突起部分がテザーに絡まり、正常な動作を妨げた事例が見受けられた。また、現状では、水風船を利用しているが、これをデバイスに設置する際に割れるという問題も複数生じた。

今後は、装置の改良ならびに、異なる火山灰を用いた試験を数多く実施する予定である。

#### 4. マルチロータ機運搬型小型移動ロボット

土石流予測においては、降雨量を測定する雨量計や土石流発生を検知するワイヤセンサなど、継続して観測することが必要なセンサも重要である。しかしながら、立入制限区域内に予め設置されたセンサは、火山噴火の影響で使えなくなる可能性も大きい。1990年代の雲仙普賢岳の火山噴火では、噴火の影響で、予め設置されたセンサのほとんどが、初期の段階で機能を失った。そこで、本研究では、移動ロボットにセンサを搭載し、この移動ロボットをマルチロータ機で運搬する小型移動ロボットシステムを開発することとした。このシステムでは、マルチロータ機が移動ロボットを搭載した運搬機構を紐で吊して運搬し、立入制限区域内にて小型移動ロボットのみを着陸させる。オペレータは、無線通信を用いて伝送された画像情報を元に小型移動ロボットの遠隔操作を行い、センサの測定に適した地点までこれを移動させ、定点観測を行う。一定期間が過ぎた後（例えば2週間）、小型移動ロボットを回収するため、再び運搬機構を紐で吊したマルチロータ機を飛ばし、小型移動ロボットを回収する。なお、運搬機構については、底面に網を用いた三角錐型のものを利用することとした。

雲仙普賢岳におけるフィールド試験では、光学雨量計 GR-11 (HYDREON corporation)、雷センサ（デバイスは Austria micro systems の AS3935 を利用）、MEMS 利用の気圧計（村田製作所のプロトタイプ）を内包したセンサモジュールを小型移動ロボットに搭載し、運搬動作ならびに回収動作の動作試験を実施した。図5に、回収動作の様子を示す。この図からも分かる通り、本システムにより、小型移動ロボットを回収することに成功した。

このフィールド試験より、小型移動ロボットの運搬動作ならびにロボットの回収動作の可否は、特定の時間内に運搬機構の中心に移動させることができるかどうかによって依存することが分かった。現状では、小型ロボットの遠隔操縦に、携帯電話回線の4G/LTEで電送する画像情報を利用しており、通常の通信状況では、640×480の画像を約4fpsで送信することが可能である。しかしながら、雲仙普賢岳では、地表付近の無線通信の状況は悪く、ブロックノイズを伴う非常に圧縮された粗い画像で遠隔操作を行うこととなった。今回ロボットは、運搬機構の中心にうまく走行でき、回収動作が成功したが、地面付近の通信は、深刻な問題であることを確認した。

#### 5. まとめと今後の課題

本稿では、土石流予測を行うためのマルチロータ機を用いた無人測定技術を紹介し、雲仙普賢岳などで実施したフィールド試験の結果紹介を行った。特に、1) 降灰厚を得るための投下型降灰厚測定装置、2) 透水性を予測するための表面流量測定装置、3) センサを搭載可能な小型移動ロボットの運搬機構について試験を行い、そこで得られた知見を紹介した。

本研究の最終ゴールは、高精度の土石流シミュレーションの実現である。今後、ここで紹介した技術の改良を進めると共に、マルチロータ機で取得した情報を土石流シミュレーションに統合し、現実に即した土石



図5 雲仙普賢岳で実施した小型移動ロボットの回収動作の様子。

流シミュレーションを実現することが課題である。

謝辞：本研究は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の「インフラ維持管理・更新等の社会課題対応システム開発プロジェクト」からの研究助成により行われたものです。

#### 参考文献

- [1] Setsuya Nakada and Toshitsugu Fujii. Preliminary report on the activity at Unzen Volcano (Japan), November 1990-November 1991. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, ORNL/TM-12410:310-333, 1993.
- [2] 永谷 圭司, 伊豆 智幸, and 金井 啓通. 土石流予測を目的としたセンシング技術とリアルタイム災害データベースの開発. In 第34回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pages 1Y3-01, September 2016.
- [3] 谷島 諒丞, 渡辺 敦志, 永谷 圭司, 皆川 淳, and 金井 啓通. 土石流の発生予測を目的とした uav 搭載型自動透水性試験装置の開発. In 第17回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集, pages 0677-0680, December 2016.