

火山噴火後の遠隔調査システムの開発

Development the remote control survey system
under volcanic eruption condition

永谷 圭司 安藤 詳平 飯野 勝博 西 真佐人

Keiji Nagatani Shohei Ando Katsuhiko Iino Masato Nishi

1. はじめに

浅間山では、積雪期の火砕流による融雪型火山泥流や噴火後の土石流の被害によって、広範囲に社会経済的な影響が及ぶことが懸念されることから、利根川水系砂防事務所において、平成24年度より新規事業として浅間山直轄火山砂防事業に着手している。

今回は、火山噴火による緊急的な土砂災害対策に必要な降灰等の状況把握技術について、東北大学と関東地方整備局が共同で開発しており、本稿ではその進捗状況を10 紹介する。なお、開発にあたっては浅間山をフィールドとした試験を実施しながら進めている。

2. 浅間山について

浅間山(写真1)は群馬県と長野県にまたがる標高2,568
15 mの活火山であり、過去に何度も噴火を繰り返してきた歴史がある。特に有名なのは1783年の噴火活動(天明三年の大噴火)である。この噴火では、火砕流に伴い発生した土石なだれが北麓の鎌原村を直撃し、死者477名と
20 いう大災害となった。さらに泥流は吾妻川や利根川本川へ多量に流下し、合計で1,000人を超える死者をもたらしたとされている。また、近年においても平成16年に中規模な噴火が発生し、周辺では交通規制が行われた。その後平成20年、平成21年にも小規模な噴火が発生して
25 いる。

平成24年11月29日現在、気象庁が発表する噴火警戒レベルは1であり、火山活動は静穏な状態を保っている。



写真1 浅間山の火口部の様子(平成23年11月撮影)

30 3. 遠隔調査システム技術の必要性

利根川水系砂防事務所では、これまでも浅間山が噴火した場合のハザードマップの検討や、ロールプレイング方式による防災訓練を県や自治体と連携して実施してきた。平成24年度から実施している直轄砂防事業では、砂
35 防堰堤や導流堤のハード対策(図1)により融雪型火山泥流や噴火後の土石流から下流人家を保全し、監視・観測機器の整備によりソフト対策の充実を図るものである。今回行う事業は、火山噴火緊急減災対策砂防事業という事業で、ハード施設の整備については、平常時における
40 基幹的な施設の整備と、噴火の前兆が現れた際に行う緊急的な施設の整備から構成される。直轄砂防事業として対象とする噴火規模は中規模噴火(火砕流27万 m^3)とし、前兆現象からこの中規模噴火に至るまでは約3ヶ月と想定している。この間に緊急的な施設の整備や、既設堰堤
45 の除石等を行う。そのため、噴火活動による降灰状況等を把握することは、対策を講じる上で重要な情報となる。しかし、火山噴火の規模や被害予測は困難であり、噴火活動が始まると、火山周囲への立入が禁止されるため、現地調査どころか観測/観察機器を設置することもできない(浅間山では噴火警戒レベル3の状態です山頂から半径
50 4km以内が立入禁止となる)。そのため、火山周辺においても状況把握調査を可能とするため、活火山地域における遠隔調査を目的とした小型不整地移動ロボット技術の開発を東北大学と関東地方整備局との共同開発として行
55 っている。これは火山地域において不整地移動ロボットのフィールド試験を浅間山などで実施し、実用に耐える火山調査ロボットの技術開発を行うものである。平成24年には、9月から10月にかけて、浅間山でのフィールド試験を行ったところであり、本稿では現地での試験内容を
60 中心に紹介する。

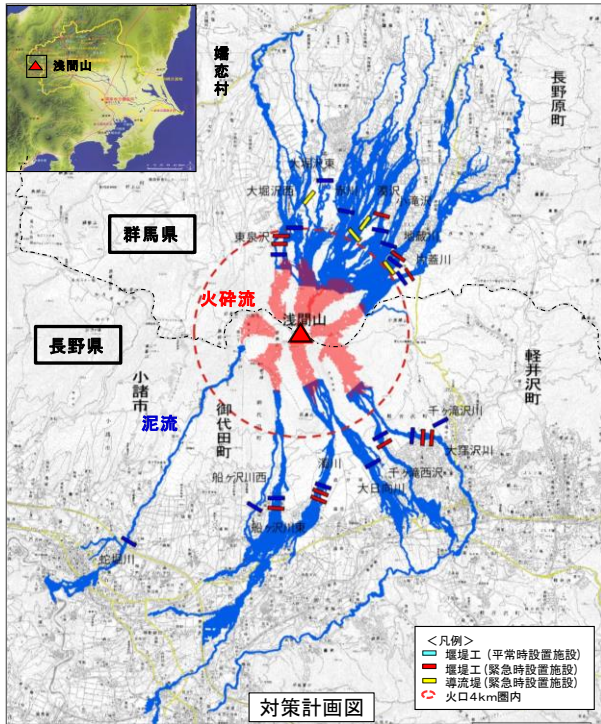


図1 浅間山直轄火山砂防事業対策計画図

4. 探査シナリオ

5 浅間山探査での調査項目については、土石堆積状況の映像取得と堆積厚さの計測の2つとし、以下の前提条件で、これを実現するためのロボットを用いた探査シナリオを構成する。

- ・ 噴火前には有人探査可能地域であること。
- 10 対象とする環境には、無線通信が不通となる不感地帯が存在しないこと。

これらの条件の下で、以下にシナリオを提示する。なお、これらのシナリオは単独でも機能するが、これらを組み合わせることで、火山灰の堆積に関するより詳細な

15 データを獲得することが可能となる。

1. 災害発生前の写真と災害発生後写真の比較

定点観測でよく採られる手法で、災害発生前と後の写真を比較し、噴火や火砕流による土石の堆積状況などの現場変状を確認する。あらかじめ平常時に写真とその撮影地点の座標を取得しておき、

20 ロボットをその地点までアプローチさせて写真を撮影する。

2. ポール等の土石の堆積厚さ確認施設の設置

施設が設置できるのであれば、厚さ確認用のポールなどの人工的なモノサシとなるものをあらかじめ設置しておき、災害発生時にロボットでその地点の厚さを確認する。ポール自体に被害がなければ、高い精度で現場における土石の堆積厚さを測定することができる。

3. ロボットに土石のサイズ／形状確認のための対象物を設置

砂防学会誌, Vol. 〇〇, No. 〇, p. 〇-〇, 2006
 ロボットには、カメラに映り込むモノサシを設置する。これにより、撮影した画像から、土石の大きさやサイズを確認することが可能となり、土石流発生予測の精度を上げることが可能となる。

35

5. アプローチ方法

人が立ち入ることができない環境において、無人調査を行うために最も効果的な方法は、空中を移動することである。その中でもホバリングが可能なヘリコプタは、有力な調査手段であるが、調査時間をそれほど長くとることができない。そこで本研究では、ヘリコプタと小型移動ロボットの複合手段で、火山の移動調査を行うことを考えることとした(図2)。

40

45 小型ロボットは、一般に不整地走行性能がそれほど高くないため、ヘリコプタによって調査地域より高い標高の地点に投下され、無線通信による遠隔操作によって、移動調査を実行する。

このアプローチで問題となるのは、ヘリコプタの飛行高度、

50

ロボットとの通信、電源、ロボットの移動性能である。以下にこれらの技術課題に対する解決手段を示す。



図2 調査手法のイメージ

5.1 ヘリコプタの飛行高度の問題と解決法

農業散布などに利用される内燃機関を利用する無人ヘリコプタは、比較的大きなペイロードを有するが、飛行高度については一般に1,000メートル以上の高地で運用することが困難と言われている。浅間山は火口から4km地点においても、標高1,400m程度であるため、農業用無人ヘリコプタを利用することができない。その主要原因は、エンジンに供給する空気密度低下により、燃焼がうまく行われず、エンジンの推力が低下するためであるといわれている。これをモータ駆動に代替することで、燃焼環境の制限が無くなり、この問題が解決すると考えられる。そこで、本研究では、飛行ロボット(モータ駆動のマルチコプタ)を利用して小型ロボットを搬送することとした。

55

60

65



写真 2 飛行ロボットのペイロード投下試験

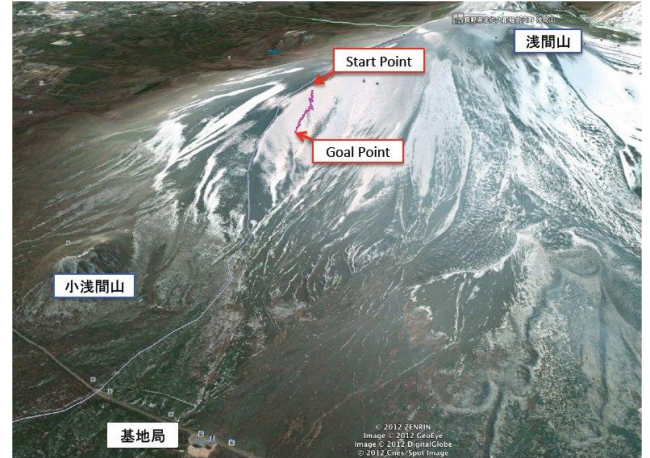


図 3 小型移動ロボット GeoStar の走行経路



写真 3 小型移動ロボット GeoStar 標高 2100m 地点

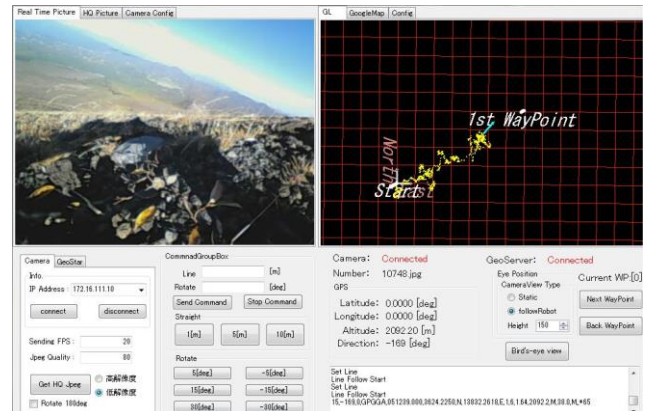


図 4 小型移動ロボット GeoStar 操作画面

5.2 ロボットの移動性能と電源の問題と解決法

飛行ロボットで搬送可能なペイロードの重量やサイズは、それほど大きく取ることができないため、投下する
 5 小型ロボットは、東北大学で開発した小型移動ロボット GeoStar の利用を想定することとした。このロボットは車輪型のロボットであり、急斜面の直登は困難であるが、斜面下方向に対する走行性能は比較的高い。また、全重量が現在 2.5kg 程度であるため、電動のヘリコプタによる
 10 搬送が可能であることが期待できる。なお、GeoStar の電源は、現状で 2 時間程度の運用が可能である。

5.3 通信に関する問題と解決法

非常時における移動ロボットの遠隔操作ための通信は、
 15 現在、200MHz 帯の公共ブロードバンド帯の利用に大きな期待が寄せられているが、現状では小型化まで至っていない。そこで本試験では、遅延も大きく通信レートも低下するが、広範囲で通信が可能な Docomo の FOMA を用いた通信モデムを GeoStar1 号機の通信に利用することとした。また、対象とする環境において、見通しがよく環境では、2.4GHz 帯の通信についても利用可能であると考えているため、GeoStar2 号機には 2.4GHz で長距離通信に実績のある Contec 社製の長距離通信モデムを利用することとした。
 20

25 6. フィールド試験

前節のアプローチ方法で示した飛行ロボットならびに、小型移動ロボットによる火山の遠隔監視ロボットシステムの研究開発を進めるため、平成 24 年 9 月 3 日～5 日、9 月 22 日～24 日、10 月 22 日～25 日に浅間山にてフィールド試験を行った。
 30

6.1 飛行ロボットに関するフィールド試験

飛行ロボットに求められる機能は、目的地まで飛行し、小型移動ロボットを切り離し、出発地点まで戻ってくることである。まず、標高が高く気圧が低い場所においてどの程度プロペラの推力低下が起るかを確認する必要があることから、9 月 3 日～5 日にかけて標高の異なる地点におけるプロペラの推力試験を行った。その結果、標高 2,100m 地点において推力はおおよそ 2 割減となることが判明し、ペイロードに余裕を持たせることで、標高の
 35 高い環境においても、小型移動ロボットを運搬することが可能であることが分かった。

次に、9 月 24 日には標高 1,800m 地点において、飛行ロボット「TOBI」を用いたペイロード切り離し試験を行った。TOBI はバッテリーを含む総重量が 5.6kg、バッテリーには LiFe5 セル 2 並列 4600mAh を 2 組使用した。試験は飛行ロボットをマニュアルで操作し、切り離し信号を
 45

送信することで、飛行ロボットに取り付けた 930g のペイロードを切り離すものであるが、目標通り切り離し動作に成功した (写真 2)。

- また、10月24日には、飛行ロボットの GPS ナビゲーションに関する試験を行った。この試験は飛行ロボット「ヘキサローター」を用いたもので、小浅間山の頂上 (標高 1,650m) から 100m 程度離れた目標地点を往復するものであり、微風はあったものの飛行試験には成功した。

6.2 小型移動ロボットに関するフィールド試験

- 10 小型移動ロボットに求められる機能は、飛行ロボットから切り離された後、予め GPS 座標が既知であるランドマークまで遠隔操作で走行し、その画像を取得することである。対象とする環境は、浅間山北東の斜面の標高 2,100m から標高 1,900m までの約 600m である。オペレータは、鬼押しハイウェイのパーキングエリアから遠隔制御を行う。通信については Docomo の FOMA を用いた通信手段と、2.4GHz 帯を用いた直接通信について試みる
- 15 こととした。前者は通信帯域が狭いが、ロボットの姿勢によらず通信を確立することができることが期待され、
- 20 一方後者は通信帯域は広いが、見通しの効かない環境やロボットの姿勢によっては通信が途絶えてしまうという問題がある。本試験では、通信方式の違いによる遠隔操作の操作感を比較するため、両方の通信方式で同一タスクの実行を行った。

- 25 写真 3 に 9 月 4 日に実施した走行試験の様子を、図 3 にそのときのロボットの走行軌跡ならびにオペレータとの位置関係、図 4 にオペレータの操作画面 (右上が、現在の GPS 座標と目標とするランドマークの相対位置関係、左上が、ロボットが獲得したカメラ画像、下が各種
- 30 データならびに制御盤) を示す。

- この走行実験中ロボットが転倒し、人手で姿勢を戻すといった事象が数回発生した。この転倒原因には、搭載したカメラから確認できないクレータに車輪をとられたことと、バック走行の際に従動輪がひっくり返ってしまったことが挙げられる。この問題に対処するため、転倒しても走行を継続可能な GeoStar の設計変更を行い、9月22日には、その走行試験に成功した。ただし、2.4GHz 帯を用いた通信では、ロボットの上下が入れ替わるとアンテナが隠され通信不能となるため、転倒しても走行可能な GeoStar は、FOMA による通信のみを実装した。
- 40 一方、通信方式の比較については、無線 LAN を用いた通信では、ほぼリアルタイムに高解像度の取得画像を表示することができたが、FOMA 回線を用いた通信では、同作業に 2.5 秒程度の遅延が発生することがわかった。

- 45 また、移動ロボットに搭載した GPS モジュールは、ロボットの上方が大きく開けていたにもかかわらず、位置計測に大きな誤差が生じたため、GPS を元にした走行は困難であった。この誤差は、GPS アンテナが地表近くにあり、山の斜面によって発生したマルチパスが原因で



写真 4 飛行ロボット TOBI による移動ロボット運搬試験

- 50 あると考えられる。

6.3 飛行ロボットによる移動ロボットの運搬試験

- 本アプローチ動作で最終的に目指すのは、飛行ロボットによる移動ロボットの運搬である。そこで、10月24日の試験では、GeoStar を軽量化した GeoStar-Mini と飛行ロボット TOBI を用いた移動ロボットの運搬ならびに切り離し試験を行った。GeoStar-Mini は重量 1.5kg の小型軽量移動ロボットで、GeoStar よりも車輪径が小さく、またトレッドも小さいため、不整地の走行性能が少し劣るが、
- 55 その他の機能は GeoStar と同一である。また、TOBI からの GeoStar-Mini の切り離しについては、テグスを熱で焼き切る機構で実現することとした。

- 10月24日に小浅間山のふもとで公開試験として移動ロボットの運搬試験を実施した。そのときの
- 65 GeoStar-Mini を搭載した飛行ロボット TOBI のフライトの様子を写真 4 に示す。残念ながらこのときのフライトは、モータの治具の一部がフライト中に破損し、ロボットは正常に飛行することができず、公開試験における切り離し試験は失敗した。しかしながら、翌 10 月 25 日には、飛行ロボットにより移動ロボットを運搬し切り離しを行う試験に成功した。

7. まとめと今後の課題

- 本研究では、人が立ち入るのが危険な火山の調査を行うことが可能な小型火山観測移動ロボットの研究開発を目指し、浅間山にてロボットのフィールド試験を行った。2012 年の試験の結果、シナリオ全体の通しの動作までには至っていないが、飛行ロボットが小型移動ロボットを運搬できるということ、飛行ロボットが GPS ナビゲーションできるということ、小型移動ロボットが対象環境を走行可能であることを実証することができた。
- 80 今後も不整地移動ロボットを用いた火山調査のための遠隔操作に関する研究を進めると共に、現場での実証実験を実施することで、火山噴火の際に現場で有用となる

- 85 火山探査ロボットの開発を進め、浅間山を含め実際に火

山噴火が起きた際には活用を図ってまいりたい。

参考文献

- 永谷圭司・木下宏晃・西村健志・小柳栄次・油田信一・久武経夫・森山裕二 (2010) : 小型クローラ移動ロボットの遠隔操作による火山活動区域の観察—浅間山での走行試験—, 第 11 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, pp.555–558,
- 永谷圭司・桐林星河・西村健志・吉田智章・小柳栄次・羽田靖史・油田信一・中里邦子・久武経夫・森山裕二 (2011) : 小型クローラ移動ロボットの遠隔操作による火山活動区域の観察—高出力の無線通信を用いた浅間山でのフィールド実験—, 第 12 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,, pp. 54–57, 2011
- 国土交通省関東地方整備局利根川水系砂防事務所 (2004) : 天明三年浅間焼け