

## 報告書概要

①技術研究開発テーマ名	活火山地域における無人調査を目的とした小型不整地移動ロボット技術の研究開発
②研究代表者	
氏名	所属・役職
永谷 圭司	東北大学 大学院 工学研究科・准教授
③共同研究者	
氏名	所属・役職
吉田和哉	東北大学 大学院工学研究科・教授
油田 信一	筑波大学 大学院機能工学研究科・教授
小柳 栄次	千葉工業大学 未来ロボット研究所・副所長
吉田 智章	千葉工業大学 未来ロボット研究所・上席研究員
羽田 靖史	工学院大学 工学部・准教授
久武 経夫	株式会社 インロッド・ネット
④背景・課題	
<p>浅間山などの活火山が噴火活動を始めると、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。この場合、緊急的な施設の整備や、既設堰堤の除石等を行う必要があるが、その際、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、さらに噴火活動が始まると、火山周囲への立ち入りが禁止されるため、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。例えば、浅間山では、噴火警戒レベル3の状態です。図1に示すように、火口から半径4 km 以内が立入禁止となる。このような状況の中で、<b>人の代わりに立入禁止区域内の状況を把握する機器の開発</b>が強く求められている。</p>	
	
<b>図 1 浅間山噴火レベル3の立入禁止区域</b>	
⑤技術研究開発の目的	
<p>④で示した背景の下、本研究では、遠隔操作にて火山の不整地を走行し、火山活動現場付近を近距離から調査することが可能な、小型の火山調査移動ロボットの研究開発を目指すこととした。この種のロボットを実現するために重要となるキーテクノロジーは、不整地走行、通信、遠隔操作の3点であり、これらのロボット技術の開発を進める上では、現場における試験とそれに基づく検討が、必要不可欠である。そこで、本研究では、現在開発を進めている不整地移動ロボットを利用し、火山地域におけるフィールド試験を実施することとした。この<b>フィールド試験を繰り返し行うこと</b>により、不整地走行、通信、遠隔操作に関する技術課題を明らかにし、<b>実用に耐える火山調査ロボット実現のための技術開発を行い、火山噴火時における調査技術向上を図ることが</b>、本申請研究の目的である。</p>	

本研究では、主に長野県の浅間山を実験フィールドとして想定した。浅間山は、現在活動中の火山であり、このような環境において、遠隔操作による移動ロボットを用いた火山環境の調査に成功した例は、これまで皆無である。本研究では、この環境において、遠隔操作による不整地走行試験を繰り返し行い、その結果に基づき、現有の移動ロボットの改良を進めつつ、必要な不整地走行、通信、遠隔操作の技術を開発し、評価する。これにより、実用に耐えうる技術レベルを達成し、実用的な小型の火山調査移動ロボットの設計を可能とする。

## ⑥技術研究開発の内容・成果

### 6-1) 探査シナリオ

本研究では、浅間山探査での調査項目を土石堆積状況の映像取得と堆積厚さの計測の2つとし、以下の前提条件において、これを実現するための移動ロボットを用いた探査シナリオを構成した。

- ・ 噴火前には有人探査可能地域であること。
- ・ 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、以下に探査シナリオを提示する。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く、移動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く、災害発生時に移動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。図2は、2011年に噴火した新燃岳に隣接する中岳山頂の噴火前の写真、図3は、2013年に取得した噴火後の写真である。この写真の比較から、中岳山頂において、どの程度の火山灰が堆積したかどうかを推定することができる。この例に示すように、事前に、噴火前の画像を取得しておくことで、噴火後の火山灰の堆積量を推定することが可能となる。



図 2 霧島 中岳山頂の噴火前の写真



図 3 霧島 中岳山頂の噴火後の写真

#### 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

移動ロボットには、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。

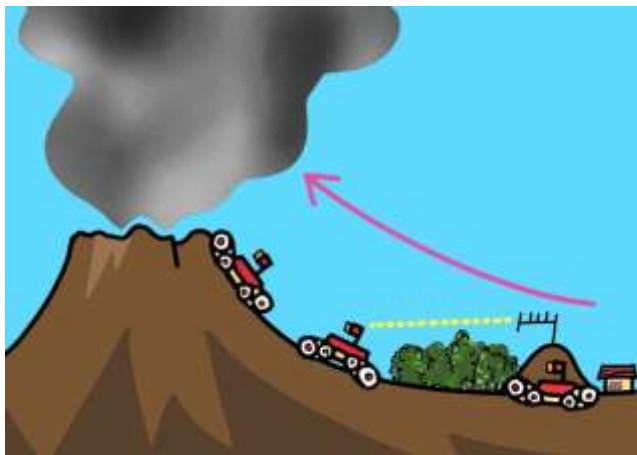


図 4 探査シナリオ 1: 地表移動による探査



図 5 探査シナリオ 2: 空中移動による探査

前ページの探査シナリオを実現する上で必須となるのが、人が立ち入ることができない環境での無人調査である。そこで、本研究では、上図に示すような、小型移動ロボットを用いた2つの探査シナリオを設定し、それらの実現を目指すこととした。

【探査シナリオ1】本研究では、無線通信による遠隔操作によって地表を移動して、立入禁止区域内の探査を行うシナリオをシナリオ1と設定した。図4は、そのシナリオのイメージ図である。この場合の小型移動ロボットの移動は、数キロメートルの斜面登坂を想定している。

【探査シナリオ2】短時間で無人調査を行う効果的な方法は、空中移動方式である。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、シナリオ2として、ヘリコプタと超軽量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5は、そのシナリオのイメージ図である。なお、超軽量移動ロボットは、一般に不整地走行性能がそれほど高くない。そこで、このシナリオでは、ロボットは、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行う。この場合のロボットの移動は、300m程度の下り走行を想定している。

本研究では、上記の2つのシナリオに対し、我々が、現在開発を進めている小型移動ロボットを利用した火山地域におけるフィールド試験の実施を行った。以下に、シナリオ別に実施した試験ならびに、得られた知見と成果を述べる。

## 6-2) 探査シナリオ1：地表移動に関するフィールド試験

地表移動を行う小型移動ロボットを実現するために必要となる課題として、1) 軟弱凹凸不整地走行、2) 長距離無線通信、3) 遠隔操作の3つが挙げられる。それぞれの課題に対し、我々が有するテクノロジーがどの程度適用可能かどうかを確かめるため、フィールド試験を行ってきた。以下に、実施したフィールド試験の報告と、そこから得られた知見について述べる。

### ● 2011年10月12日 浅間山でのフィールド試験（小型移動ロボットQuince改の遠隔操作試験）

本試験で利用する小型移動ロボットは、Quince改とした。このQuinceは、地下街やビル内において、地震やテロなどが発生した場合に、人に替わって現場を探索することを目的としたクローラ型レスキューロボットの実証機であり、サイズは、縦×横×高さが、480mm×1120mm×420mm、重量は約26kgである。このロボットは、その不整地走行性能の高さから、福島第一原子力発電所の事故調査などにも利用されてきた。このロボットの前後には、サブクローラと呼ばれる可動式のクローラが4つ搭載されており、段差や岩場など、通常のクローラ機構では走行できないような環境においても、高い走行性能を有する。また、ワイヤレスLANを用いた遠隔操作により、ロボットが見えない遠隔からも、このロボットの操作を行うことが可能である。



図 6 小型移動ロボット Quince 改



図 7 Quince とオペレータ間の通信システム

このロボットを火山探査用に改良したバージョンであるQuince 改 (図6) は、2010年10月の浅間山での走行試験においても、すでに高い走行性能を確認している。このロボットの本体には、前後ならびに、俯瞰カメラが搭載されており、オペレータは、画像情報を用いた遠隔操作によって、このロボットを操縦することが可能である。また、クローラには、比較的大きなグロースー（爪のようなもの）が取り付けられており、軟弱な土壌においても、しっかりと地面をとらえて走行することが可能である。

次に、このQuince改とオペレータとの遠隔通信についてであるが、本試験では、無線通信システムを、以下に示す機器で構成することとした。

1. Contec社製無線通信装置親機：FX-DS540-LNKM-S
2. Contec社製無線通信装置子機：FX-DS540-STDMS
3. ARGtek Comm. 社製ブースタ：ARG1205
4. 八木アンテナ親機：FX-ANT-A5
5. パラボラアンテナ親機：CRB90-24
6. 無指向アンテナ子機：FX-ANT-A7

Contec社製の無線通信装置は、我々が2009年に桜島にて実施したフィールド試験において、八木アンテナを利用した900mの小型移動ロボットの遠隔操作を実現した実績がある。また、上記の八木アンテナとパラボラアンテナは、基地局用のもので、比較実験を行うために2種類準備した。移動局側（ロボット側）のアンテナは、無指向性アンテナを使用することとした。なお、関東総合通信局が許可できる最大の出力が600mWであるため、各通信機には、4W のブースタに減衰器を取り付け、出力を減衰させることとした。パラボラアンテナを採用した際の、無線通信装置の構成を図7に示す。なお、八木アンテナを利用する場合には、この図中のパラボラアンテナと置き換えることとなる。ちなみに、八木アンテナの利得は19.0dBiであり、パラボラアンテナ(25dBi)とは、6dBi の差がある。利得だけで見ると、パラボラアンテナの方が有利であるが、半値角が約9度と狭く、小型移動ロボットの制御のためには、より頻繁にアンテナ調整を行う必要があるため、小型移動ロボットの遠隔操作に有用であるかどうか、本試験の一つの確認事項であると言える。なお、この構成で取得した免許の電波型式は、38MOD1D、周波数は、2432MHz、出力は、600mW である。

2011年10月12日、小浅間山の山頂に基地局を設置し、Quince改の遠隔操作を行った。なお、この基地局の位置と浅間山の登山道との間には、障害物が存在しない。小浅間山の山頂とロボットの初期位置は、見通しで約400m程度であった。ロボットは、遠隔操作で走行を開始したが、400mほど走行した地点で、ロボットの駆動系のマシントラブルのため、走行試験を中止した。その間の遠隔操作試験については、路面もそれほど起伏が大きくなかったため、順調に走行を行うことができた。



図 8 遠隔操作試験の走行経路



図 9 遠隔操作試験の様子(左)と基地局(右)

10月12日に行った試験における基地局の位置ならびに、ロボットの遠隔走行試験を行った走行経路(水色)を図8に、また、走行試験のスナップショットを図9(左)、基地局に設置したパラボラアンテナと八木アンテナの写真を図9(右)に示す。

以上のフィールド試験により、我々が現有する小型移動ロボットの遠隔操作手法により、**遠隔操作については、十分に対応可能**であることが分かった。

● 2011年10月13日 浅間山でのフィールド試験 (小型移動ロボットQuince改の長距離走行試験)

次に、2011年10月13日に実施した長距離走行試験の結果について述べる。ロボットは、オペレータが目視できる距離で操作し、登山道を移動した。まず、標高1,650m地点から走行を開始し、標高2,140m付近まで登り走行を行った。さらに、そこから、標高1,400mの東大の地震研までの下り走行を実現した。標高2,140mで折り返したのは、走行不可能となったためではなく、試験時間と天候の制約があったためである。この間、のべ走行距離は、登り1.7km、下り3.5kmの合計5.2kmであり、これを、6時間で走行した。走行時のGPSログをGoogle Earth上にプロットした図を図10に示す。これにより、既存のロボットのハードウェアで、登山道沿いに、浅間山の山頂近くまで走行することが可能であることが判明した。ただし、この間、バッテリーについては、3セット(1セットにつき14.4V6.15Ahのバッテリーを4本)を使用した。



図 10 Quince 改の長距離走行試験

以上の試験により、**軟弱凹凸不整地走行については、我々が現有する小型移動ロボットの走行性能で、十分に対応可能**であることが分かった。しかしながら、**電源の確保については、大きな問題があることが判明**した。

● 2011年10月13日 浅間山でのフィールド試験 (通信試験)

2011年10月13日、より現実的な問題設定によるフィールド試験を行うため、小浅間山の頂上ではなく、鬼押しハイウェイの六里ヶ原に位置するパーキングエリア内の駐車場に基地局を設置して実験を行った。なお、試験時間の制約により、ロボットの走行試験と通信試験をそれぞれ独立に並行して行った。

通信試験の基地局を設置した駐車場は、火口から4kmの場所に位置しており、レベル3の噴火が起こった際にも、基地局として使用することが可能である。また、この基地局の位置と浅間山の登山道との間には、障害物が存在しない。なお、10月12日の試験結果から、(1) パラボラアンテナの方が明らかに利得を稼ぐことができる、また、(2) それほど頻繁に方向修正を行う必要がない、ということが判明したので、この日の試験は、パラボラアンテナのみを利用することとした。



図 11 通信試験の様子:通信機を担いで登山道を移動する様子(左)と駐車場に設置した地上局(右)

この、長距離無線通信試験の結果について述べる。移動局は通信機とIPカメラで構成し、人がキャリアで背中に担いで登山道を移動した。移動局側の無指向性アンテナの地上高はおよそ1.6mに設定した。移動局側の通信試験開始位置は、浅間山の標高1,700m付近で、その際の直線距離は、およそ2.5km、電界強度は、-89dbmから-86dbm程度であったが、TCP/IPが安定して確立しなかったため、このセットによる試験は、この地点で終了となった。図11(左)は、移動局を人が運搬している様子、図11(右)は、駐車場に設置した基地局の概観である。

本試験の結果、2.4GHz帯の600mWの通信によって、2.0km程度の比較的遠距離の通信が可能であることを確認したが、浅間山における火山探査のための遠隔操作を行う上では、**無線装置の出力が十分でない**ことを確認した。

また、2012年度にも、別の小型移動ロボットを利用した長距離移動試験を実施し、十分な走行性能が発揮できていることが判明したが、**電源の確保については、依然、大きな問題があることが判明**した。現在は、無人化施工機械などによってロボットを運搬し、探査を進めるような手法を考えている。

### 6-3) 探査シナリオ2：空中移動に関するフィールド試験

空中移動を行うロボットシステムを実現するために必要となる課題として、1) 飛行ロボットの推力、2) 超軽量移動ロボットの不整地走行、3) 長距離無線通信、4) 遠隔操作が挙げられる。それぞれの課題に対し、我々が有するテクノロジーがどの程度適用可能かどうかを確かめるため、フィールド試験を行ってきた。以下に、実施したフィールド試験の報告と、そこから得られた知見について述べる。

#### ● 2011年10月13日 浅間山でのフィールド試験（超軽量移動ロボットGeoStarの走行性能試験）

本試験で利用する超軽量移動ロボットは、GeoStarとした。このロボットは、車輪型の移動ロボットであり、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2kg程度であるため、電動のヘリコプタによる搬送が可能であることが期待できる。なお、GeoStarの電源は、2時間程度の運用が可能である。次ページの図12に、そのGeoStarの走行の様子を示す。

次に、2011年10月13日に実施したGeoStarの長距離走行試験の結果について述べる。ロボットは、オペレータが目視できる距離で操作し、登山道を山頂付近(2,400m)からふもとの東大地震研まで走行することとした。図13に、ロボットが走行した経路を示す。このロボットは、のべ走行距離にして、6.2kmの下り走行を3時間20分で実現した。この間、バッテリーについては、搭載したバッテリーを交換せずに、全行程を走行することができた。

本試験の結果、**超軽量移動ロボット GeoStarを利用することで、下り走行であれば、長時間の探査を十分に行うことができる**ことが明らかとなった。



図 12 超軽量移動ロボット GeoStar

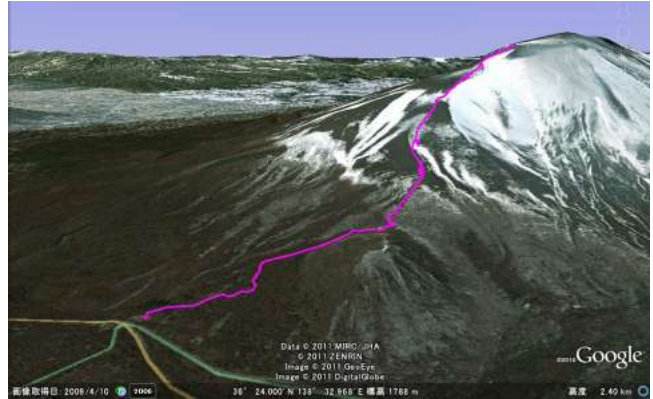


図 13 GeoStar の走行経路

● 2012年6月25日 吾妻山でのフィールド試験（高標高における飛行ロボットのフライト試験）

農薬散布などに利用されるガソリンエンジンを搭載した無人ヘリコプタは、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。浅間山の標高は、2,568mであり、レベル3の噴火で人が立ち入り禁止となる境界の火口から4km 地点も、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の密度低下により、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ロータ機）を利用して超軽量移動ロボットを搬送することとした。

図14に、2012年6月25日、福島県の吾妻山で実施した電動マルチロータ機の飛行試験の様子を示す。この試験は、標高およそ1,500m地点で実施されたが、4枚羽根のマルチロータ機が、数百グラムのペイロードをこの標高において搬送可能であることを確認することができた。

本試験の結果、ペイロードとバッテリー容量を適切に選択することで、**高標高における飛行ロボットが活用可能である**ことを確認することができた。



図 14 高標高における電動マルチロータ機のフライト試験

● 2012年9月3日～ 高標高における飛行ロボットの推力試験

標高が高い環境において、大気条件が回転翼の推力に及ぼす影響を評価するため、本研究では、標高1,000[m] までの複数地点で推力測定実験を行った。推力測定を行う実験装置を図15に示す。この装置は、回転翼、翼を回転させるDC モータ、DCモータを駆動するための出力可変電源、電流/電圧測定器、推力を測定する秤、翼の回転数を計数する光学式回転数計から成る。

まず、DCモータに電流を流して回転翼を回転させる。次に、光学式回転数計で回転数を計測し、回転数が安定したところで秤を用いて推力を測定する。なお、実験中は、回転翼によって翼の下側（推力発生方向と反対）に強い流れが生じるが、この流れと地面との干渉を防ぐため、推力発生方向は、秤を押し方向（地面方向）に設定した。



図 15 翼の推力試験器

標高の異なる地点において実施した推力測定試験について、直径330mmの回転翼に関する結果を図16に示す。ただし、ここで扱うデータは、サンプル1の大気密度が最も高く、サンプル2、サンプル3と数字が増えるにしたがって大気密度が順に低くなり、サンプル5の大気密度が最も低い。この図より、対象とする回転翼では、回転数との増加とともに推力が増加していることが分かる。また回転数に対する推力の増加の割合は、高回転数になるにつれて大きくなっている。次に、各サンプルの推力を比較すると、最も大気密度の小さいサンプル5で推力が最小になった。ただし、サンプル1からサンプル4については、大きな推力差は認められなかった。さらに、回転数6,000[rpm]に着目して推力の大きさを比較すると、サンプル5の推力は、サンプル1の推力より約20%低いことが分かった。

本試験の結果、高標高における推力低下は、1000m付近で、約20%低下することが分かった。推力に多少の余裕を見ることで、**電動マルチロータ機により、高標高において活用が可能である**ことを確認することができた。

● 2012年9月24日～ 浅間山における飛行ロボット「TOBI」のペイロード投下試験

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。右図は、TOBIがペイロードを切り離した瞬間の写真である。

本試験の結果、**電動マルチロータ機に搭載予定の超軽量移動ロボットを、高標高において切り離すことが可能である**ことが確認できた。

● 2012年9月4日、25日 浅間山における超軽量移動ロボット GeoStar-II の遠隔操作試験

超軽量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。そこで、2012年9月4日のフィールド試験では、超軽量移動ロボットGeoStar-IIの遠隔操作に関する試験を行った。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ことにした。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できることが期待され、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。本フィールド試験では、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。

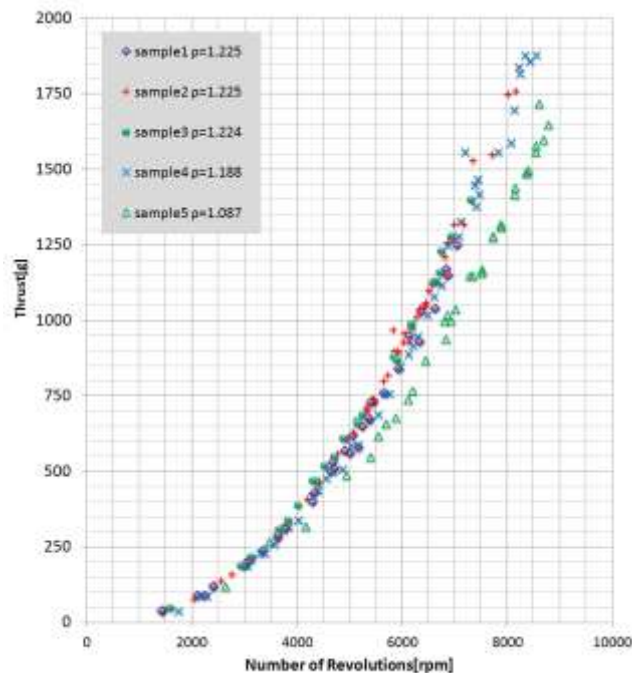


図 16 大気密度が翼の回転数と推力に与える影響のグラフ



図 17 TOBI のペイロード切り離し試験の様子



9月4日に実施した走行試験の様子を、図18に、そのときのロボットの走行軌跡ならびにオペレータの位置関係を図19に、オペレータの操作画面を図20に示す。ただし、オペレータの操作画面中、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、下が各種データならびに制御盤である。

この走行実験中、ロボットが転倒し、手で姿勢を戻すといった事象が数回発生した。もちろん、実際のミッションであれば、この時点でミッションが終了してしまう状況である。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-II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、転倒により、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、その後の動作が継続できなくなってしまう。そこで、転倒しても走行可能なGeoStar-IIの通信系については、FOMAによる通信のみを実装した。

また、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。さらに、画像の表示については、秒間約1枚と、操作が非常に困難となる映像であった。しかしながら、画像の見え方が同一であったためか、無線LANを用いた高解像度の画像によるオペレーションで転倒した回数は、FOMA回線を用いた場合の転倒回数とほぼ同一であり、担当したオペレータも、「FOMA回線で操作が可能である」と結論づけた。

一方、超軽量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あると考えられる。近年の、携帯電話に搭載することを目的とした小型GPSモジュールは、感度が非常に高いため、今回、それが災いした。現在は、再度GPSの選定を行い、上記に示す大きな誤差が発生しないものを利用しているため、今後、このような問題は起こらないと考えられる。

以上のフィールド試験の結果、**FOMAを用いた無線通信による超軽量移動ロボットの遠隔操作による探査が十分に可能**であることが分かった。



図 18 GeoStar-II 浅間山での走行試験の様子

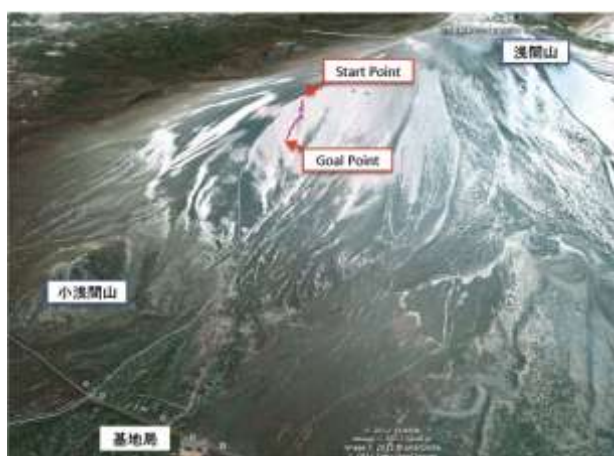


図 19 GeoStar-II の走行軌跡 (GPS ログ)



図 20 GeoStar-II の操作画面



図 21 浅間山における公開フィールド試験

● 2012年10月24日 浅間山における公開試験

2012年9月までのフィールド試験により、シナリオ1について、以下に示す事項が明らかとなった。

シナリオ1：

- ・ 軟弱凹凸不整地走行については、我々が現有する小型移動ロボットの走行性能で十分に対応可能
- ・ 2.4GHz 帯の 600mW では、浅間山における遠隔操作を行う上では、無線装置の出力が十分でない
- ・ 電源の確保については、大きな問題がある

以上より、シナリオ1については、無人化施工機械などによって小型移動ロボットを運搬し、探査を進める手法が考えられるが、実現の目処が立っていないことが現状である。

一方、シナリオ2については、以下に示す事項が明らかとなった。

シナリオ2：

- ・ 電動マルチロータ機は、高標高においても活用が可能
- ・ 電動マルチロータ機に搭載予定の超軽量移動ロボットを、高標高において切り離すことが可能
- ・ FOMA を用いた無線通信による軽量の超軽量移動ロボットの遠隔操作による探査が十分に可能

以上より、シナリオ2については、確認できた要素技術を組み合わせることで、目標とする無人探査ができることが期待できる。そこで、我々は、10月24日に浅間山にて公開フィールド試験を設定し、シナリオ2の実現を目指した3つのフィールド試験を実施することとした。各試験を行う際の、浅間山の主要地点を図21に示す。なお、図中のC9斜面と記述されたエリアが、実際に火山灰が堆積すると土石流を起こす懸念のある斜面であり、火山灰の堆積量や粒径などの調査を必要とする場所である。また、ブルーベリー駐車場と記述された場所が、鬼押しハイウェイのパーキングエリアであり、今回、基地局を設定した場所である。

## 試験1 小浅間山におけるミニシナリオ試験

飛行ロボットによって投下される超軽量移動ロボットによる探査システム全体の検証を行うため、この試験では、小浅間山を浅間山に見立てたミニシナリオ試験を実施することとした。対象環境は、小浅間山斜面とした。利用する飛行ロボットは、7ページで紹介したTOBI、超軽量移動ロボットは、1.5kgのGeoStar-Miniである。

試験の流れは、以下の通りである。図21に示した小浅間山のふもとにおいて、超軽量移動ロボットGeoStar-Miniを搭載した飛行ロボットTOBIを遠隔制御し、小浅間山の斜面でホバリングさせる。次に、高度を安定させたところで、切り離し信号を送信し、超軽量移動ロボットGeoStar-Miniを落下させる。その後、TOBIについては、遠隔制御で小浅間山のふもとまで帰還させる。また、GeoStar-Miniについては、カメラ情報を用いた遠隔操作で小浅間山の斜面の下り走行を行い、小浅間山のふもとまで帰還させる。この一連の流れを実現し、システム全体の確認を行うことが、試験1の目標である。

10月24日の公開試験では、TOBIのモータの留め具が飛行中に破損し、TOBIが墜落したため、上記のシナリオについて、実施することができなかった。しかしながら、翌10月25日のフライト試験（標高1,100mの広場）では、目標通り、GeoStar-Miniを切り離すことに成功し、GeoStar-Miniの遠隔操作まで確認することができた。このときの、切り離しの瞬間の写真を図22に示す。これにより、シナリオ2を実行するシステムが高標高の環境においても動作可能であることが確認できた。

## 試験2 GPSナビゲーション試験

飛行ロボットを自動制御し、GPS座標で指定された飛行経路に沿ってナビゲーションする自動航行試験を実施した。対象環境は、小浅間山付近であり、浅間山方向に向かう飛行経路を設定した。このフライト試験では、離陸を手動で行い、ある程度の高度に達した後、予め指定されたGPS座標にしたがって飛行を行う。最後に、離陸地点上空まで帰還した後、手動で着陸を行う。このテクノロジーは、標高の低い環境においては、すでに数多くのフライト実績があったが、1500mを超える高標高でのフライト実績は非常に少なかったため、本フィールド試験において実施した。

10月24日当日は、非常に風が強く、試験実施も危ぶまれたが、離陸から目標軌跡（片道100m程度）を追従して離陸地点まで戻る動作を実現した。右下図に、フライト経路を指定するソフトウェアの操作画面サンプルを示す。これは、GNU Lesser GPL softwareというライセンスのArducopterというソフトウェアに内包されるソフトウェアであり、グラフィカルユーザインタフェースにより、フライト経路を入力することができる。以上の試験により、本研究で今後も利用予定のArducopterというソフトウェアにより、高標高環境においても、GPSナビゲーションが有効に働くことが実証された。



図 22 TOBI による GeoStar-Mini 投下試験



図 23 飛行ロボット GPS ナビゲーション設定画面



図 24 火口から4km 地点に設置された基地局と移動ロボットの位置関係

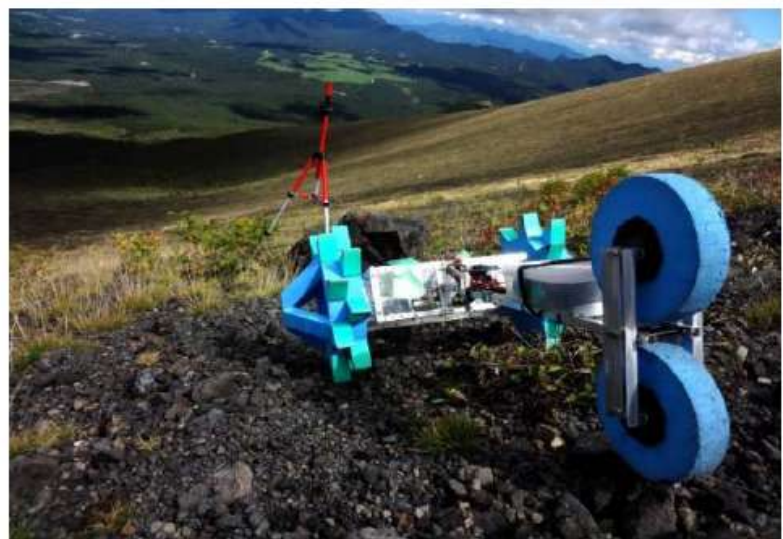


図 25 GeoStar-II と観測対象であるマーカー

### 試験3 超軽量移動ロボットの遠隔操作試験

飛行ロボットによって投下される予定の超軽量移動ロボットの遠隔制御を行う。対象環境は、標高2,100m地点から始まる図21中のC9斜面とする。利用するロボットは、GeoStar-IIである。試験の流れを以下に示す。

標高2,100m地点に人手で運搬されたGeoStar-IIは、ブルーベリー駐車場に設置した基地局より、GeoStar-IIに搭載したカメラ画像を用いて遠隔操作を行い、C9斜面を走行する（図24）。ここでのミッションは、C9斜面に設置したマーカー（三脚）の観測である。C9斜面には、5台のマーカーを設置しており、そのマーカーのGPS座標は既知である。そこで、各マーカーの近傍までGeoStar-IIを遠隔操作で走行させ、各マーカーの状況を搭載カメラで観察する。これを、斜面を下りながら、全てのマーカーについて確認する。

10月24日の公開試験では、目標とするマーカーを全て巡り、2100m地点から1900m地点までの走行に成功した。その間、トータルで600mの遠隔操作走行を実現することができた。図25に、GeoStar-IIと、観察対象であるマーカーの写真を示す。これにより、**シナリオ2を実行するための通信システムの最低限として、FOMAが利用可能である**ことが確認できた。ただし、現状では、1秒間に1枚程度の画像情報しか送ってこないため、遠隔操作を行うオペレータには、大きな負担がかかっていたことも事実である。

#### ● 2013年2月11日 株式会社 エンルートにおける屋内セパレーション試験

2012年10月に行ったフィールド試験により、シナリオ2の実現が可能であることが確認できたが、電動マルチロータ機のペイロードは、1.5kg程度と小さく、また、GeoStar-Miniについては、不整地の走行性能が十分でなかった。そこで、本研究では、ペイロードが大きい新型のZionPro 800という6枚羽根の電動マルチロータ機（図26：株式会社エンルート社製）を採用することとした。この飛行ロボットは、直径800mm、高さ300mmの筐体で、バッテリーを含めた重量が3.8kgである。そのバッテリーは、22.2V、8000mA/hのリチウムポリマー電池であり、モータは、600Wのものを利用する。これにより、標高2000m地点において、推定で10kgのペイロードを15分間運搬することが可能である。



図 26 ZionPro 800

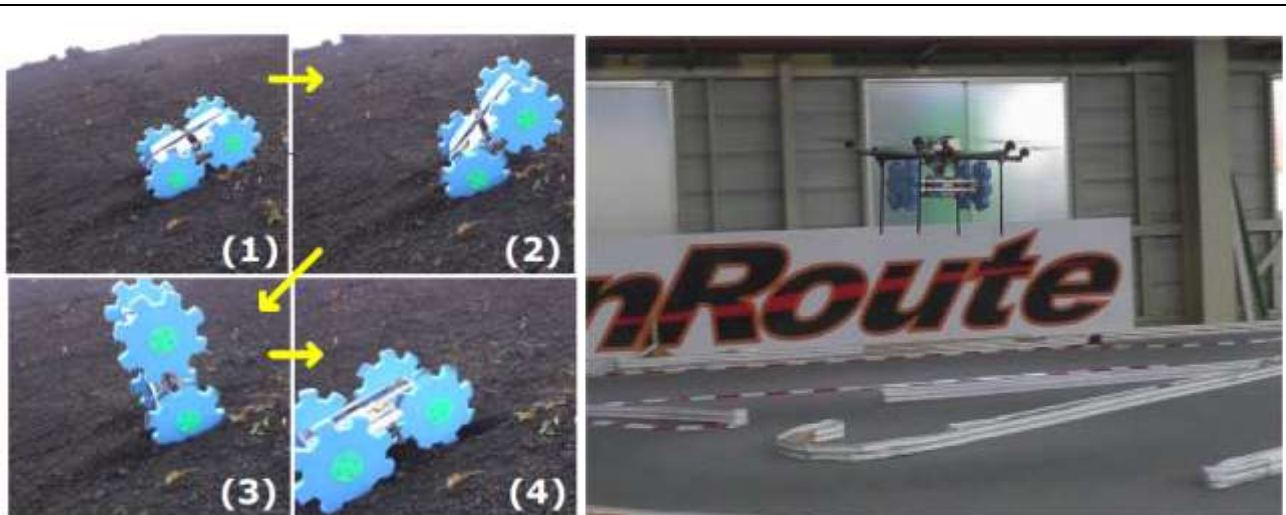


図 27 CLOVER の転倒に対する頑強性

図 28 屋内フィールド試験

また、搭載する超軽量移動ロボットとして、GeoStarの後継機である四輪型の不整地走行ロボット CLOVER (Compact and Light-weight teleOperation robot for Volcano ExploRation) の開発を行った。このロボットは、全長450mm、幅360mm、高さ220mmの4輪型差動ステアリング方式のロボットで、車輪直径も220mmである。重量は、バッテリーを含めて2.5kgであり、コントローラや通信方式については、GeoStarと同様のものを搭載している。

このCLOVERは、上面と下面は対称構造であり、転倒しても問題は無い。この転倒に対する頑強性を確認するため、軟弱土壌において実施した動作試験の様子を図27に示す。

また、電動マルチロータ機からCLOVERを切り離す機構については、TOBIに搭載したテグスの熱切断方式ではなく、サーボモータを用いた切り離し方式を採用することとした。

開発したシステムの動作を確認するため、2013年2月11日に、株式会社エンルートが有する屋内フィールドにおいて、切り離し試験を実施した。このフィールドは、ラジコンカーの走行を行うために設置されたものであるが、本試験では、フライト試験用途として利用させていただいた。図28は、そのときのフライトの様子を示している。

このフライト試験において電動マルチロータ機は、最初のセパレーション動作を行った後に墜落した。その原因は、切り離し動作により、電動マルチロータ機の重量が大きく低下したために、急激に上昇動作を行い、オペレータが出力をカットしてしまったためである。この問題を回避するため、切り離し動作時、高度計を用いて電動マルチロータ機の高度を自動制御する機能（自動高度維持機能）を組み込み、再度切り離し試験を行った。その結果、切り離し後も電動マルチロータ機は一定高度を保ちつつ、切り離されたCLOVERは、遠隔操作による走行を実行することができた。以上より、切り離し動作については、自動高度維持機能が不可欠であることが分かった。

この一連の屋内実験により、重量2.5kgの超軽量移動ロボットを運搬し、確実に切り離し動作を行うシステムを実現することができた。

## 研究報告

[Journal papers]

- 永谷 圭司, 安藤詳平, 飯野勝博, 西真佐人, “火山噴火後の遠隔調査システムの開発”, 砂防学会誌 Vol.65, No.6, pp.56-60 (2013-03)
- 永谷 圭司, 大木 健, Nathan Britton, 佐藤 毅一, 野寄 敬博, 高橋 悠輔, 山内 元貴, 秋山 健, 吉田 和哉, “伊豆大島における不整地移動ロボットの走行試験および自己位置推定試験”, 日本惑星科学会誌 Vol. 21, No. 2, pp.121-129 (2012-03)

- Keiji Nagatani, Hiroaki Kinoshita, Kazuya Yoshida, Kenjiro Tadakuma, Eiji Koyanagi, "Development of leg-track hybrid locomotion to traverse loose slopes and irregular terrain", Journal of Field Robotics, Volume 28, Issue 6, pp.950-960 (2011-11)

[Conference papers]

- Keiji Nagatani, Ken Akiyama, Genki Yamauchi, Hikaru Otsuka, Takuma Nakamura, Seiga Kiribayashi, Kazuya Yoshida, Yasushi Hada, Shini'chi Yuta, Kenichi Fujino, Tomoyuki Izu, Randy Mackay, "Volcanic Ash Observation in Active Volcano Areas using Teleoperated Mobile Robots -- Introduction to Our Robotic-Volcano-Observation Project and Field Experiments --", IEEE/RSJ Int. Conference on Intelligent Robots and Systems 2013, 査読中
- Keiji Nagatani, Takahiro Noyori, Kazuya Yoshida, "Development of multi-D.O.F. tracked vehicle to traverse weak slope and climb up rough slope", IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems 2013, 査読中
- K.Nagatani, H.Kinoshita, K.Yoshida, K.Tadakuma, E.Koyanagi, "Development of leg-track hybrid locomotion to traverse loose slopes and irregular terrain", Proceedings of the 2010 IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics (2010-07)
- 山内元貴, 秋山健, 高橋悠輔, 永谷圭司, 吉田和哉, 羽田靖史, "車輪型軽量火山探査ロボットの開発と遠隔操作試験", 第13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.652-654 (2012-12)
- 永谷圭司, 西村健志, 吉田智章, 小柳栄次, 羽田靖史, 油田信一, 多田隈建二郎, "小型移動ロボットの遠隔操作による火山活動区域の観察 --浅間山における 2012 年フィールド試験--", 第13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.648-651 (2012-12)
- 永谷圭司, "火山噴火による災害と対応について", 第30回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2A1-1, (2012-09)
- 永谷圭司, 秋山健, 吉田和哉, 西田信一郎, "揺動サイドクローラを有する移動ロボット TrackWalker II による不整地走行実験 --三原山裏砂漠と中田島砂丘における走行試験--", 日本機械学会 2012 年度年次大会予稿集, J192011 (2012-09)
- 高橋悠輔, 須藤真琢, 永谷圭司, 吉田和哉, "軟弱砂利フィールドを対象とした車輪型軽量移動ロボットの斜面走行性能に関する研究", 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 ROBOMECH2012, 1A2-I11 (2012-05)
- 野寄敬博, 永谷圭司, 吉田和哉, 小柳栄次, "クローラ接地角変化による不整地移動ロボットの斜面横断走行性能の向上", 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 ROBOMECH2012, 1P1-G11 (2012-05)
- 野寄敬博, 高橋悠輔, 山内元貴, 永谷圭司, 吉田和哉, "広域屋外環境の探査を目的とした超小型移動ロボットの開発とフィールド実験", 第12回 計測自動制御学会 SI 部門 講演会 論文集, pp.1005-1008 (2011-12)
- 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, "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 (2011-12)
- 秋山健, 永谷圭司, 吉田和哉, 西田信一郎, "軟弱かつ急斜面の不整地走行を目的とした揺動サイドクローラを有する移動ロボットの開発- 浅間山で実施したフィールド試験から学んだこと-", 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.1001-1004 (2011-12)
- 永谷圭司, 秋山健, 吉田和哉, 西田信一郎, "揺動サイドクローラを有する移動ロボット TrackWalker II による火山環境での不整地走行実験", 日本機械学会 2011 年度年次大会予稿集, J192022 (2011-09)
- 野寄敬博, 永谷圭司, 吉田和哉, 小柳栄次, "火山環境走行用ロボットの開発とモーションシミュレーション", 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 ROBOMECH2011, 1P1-K01, 1-4 (2011-05)
- 秋山健, 木下宏晃, 永谷圭司, 吉田和哉, 多田隈建二郎, 西田信一郎, "軟弱かつ急斜面の不整地走行を目的とした単純脚・クローラハイブリット型移動ロボットの開発", 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 ROBOMECH2011, 2A2-L14, 1-4 (2011-05)

[新聞報道]

2012/10 公開フィールド試験について：読売新聞 長野版, 日経新聞, 信濃毎日新聞

2012/12 先端人：日経産業新聞

[TV 報道]

2011/11 火山探査ロボットについて紹介：夢の扉 Plus (TBS テレビ)

2012/10 公開フィールド試験について：ニュース報道 (日本テレビ, NHK, 長野放送)

[Webpage] [http://www.astro.mech.tohoku.ac.jp/~keiji/Research/research\\_Volcano.html](http://www.astro.mech.tohoku.ac.jp/~keiji/Research/research_Volcano.html)

⑦今後の課題・展望（本技術研究開発で得られた成果を踏まえ、成果のさらなる発展や砂防行政への活用に向けた、今後の課題・展望等を具体的に記載ください）

利根砂防と共に進めてきた本研究開発では、平成24年10月のフィールド試験において、⑥で示した通り、「電動ヘリコプタを用いて超軽量移動ロボットを運搬し、このロボットによる火山斜面の遠隔調査を行う」というシナリオの各要素技術を実現した。これにより、電動ヘリコプタと超軽量移動ロボットを利用することで、浅間山の立ち入り禁止区域内における火山灰の無人調査の実用化に目処を立てることができたが、今後、**システム全体の実証**を行う必要がある。また、この研究開発で取得可能となった火山斜面の画像情報を解析し、**火山灰の降灰量を推定する手法の実証**を行うことも、次の課題である。さらに、これまでのフィールド試験において明らかとなった遠隔操作技術に関する課題として、**環境情報を操作者に効果的に伝える技術の更なる研究開発**が求められる。上述の3つの課題について、今後、各分野の専門家を共同研究者として新たに加えることで、これらの問題の解決を図る。

具体的には、目標シナリオを「電動ヘリコプタを用いて超軽量移動ロボットを運搬し、このロボットによる火山斜面の調査を行うこと」に設定し、(1)浅間山における無人調査システム全体の実証を行う。これを行うためのシステム開発は、東北大学、芝浦工業大学、土木研究所 先端技術チーム、株式会社エンルート、株式会社 JapanDronesが協力して行う予定である。なお、フィールド試験としては、下記の3回を予定している。

- ・長野県 浅間山 2013年 7月に2日間程度
- ・長野県 浅間山 2013年 9月に2日間程度
- ・長野県 浅間山 2013年 10月に4日間程度

無人調査システム全体が実現した次のステップとしては、(2)火山灰の降灰量推定手法の実現が必要である。そこで、取得した画像情報を解析することで降灰量を推定する手法を確立し、フィールド試験で得られた画像情報を用いて、この手法の実証を行う。この研究開発テーマについては、東北大学、土木研究所 土砂管理研究グループならびに、国際航業株式会社が協力して行う予定である。

また、2012年のフィールド試験では、通信の伝送量の問題だけでなく、通信遅れの問題、山斜面におけるGPS信号の反射による位置誤差の問題、視覚センサによる凹地形の認識誤認などが発生した。このため、現状のシステムでは、超軽量移動ロボットの操作に高い技量が求められる。そこで、操作者の負担を軽減し、効率の良い探査を実現するため、(2)環境情報を操作者に効果的に伝える技術の研究開発を進め、浅間山のフィールドにて、この技術の実証試験を実施する予定である。なお、この技術の研究開発は、東北大学、信州大学、大阪大学、工学院大学、(株)インロッド・ネットが協力する予定である。