

無人ヘリによる火山近傍観測の進展

大湊隆雄¹・金子隆之¹・小山崇夫¹・渡邊篤志¹・安田敦¹・武尾実¹・青木陽介¹・
柳澤孝寿²・本多嘉明³・梶原康司³・神田径⁴・為栗健⁵・風早竜之介⁶・篠原宏志⁶

1 東京大学地震研究所、2 JAMSTEC、3 千葉大学環境リモートセンシング研究センター、
4 東京工業大学、5 京都大学防災研究所、6 産業技術総合研究所

Recent advances in proximal observations at active volcanoes using unmanned autonomous helicopter

Takao Ohminato¹, Takayuki Kaneko¹, Takao Koyama¹, Atsushi Watanabe¹, Atsusi Yasuda¹,
Minoru Takeo¹, Yosuke Aoki¹, Takatoshi Yanagisawa², Yoshiaki Honda³, Koji Kajiwara³,
Wataru Kanda⁴, Takeshi Tameguri⁵, Ryunosuke Kazahaya⁶, Hiroshi Shinohara⁶

1 ERI, University of Tokyo, 2 JAMSTEC, 3 CEReS, Chiba University,

4 Tokyo Institute of Technology, 5 DPRI, Kyoto University, 6 AIST

Abstract

Observations at active volcanoes using unmanned vehicles are very important from various viewpoints. From a scientific point of view, it is important to conduct observations in the close vicinity of active vent without risking his/her life. From a view point of volcano hazard mitigation, re-installing and recovering techniques for damaged sensors is indispensable to maintain observation networks around an active volcano when existing monitoring stations are damaged by the intense activities of the volcano. Installation of volcano monitoring sensors using unmanned vehicle is the most promising way to recover damaged stations without spending any risk of human lives.

In 2005, we started a project, in which risk-free volcano observation tools are developed. For this project, we adopted using unmanned autonomous helicopter RMAX-G1 manufactured by Yamaha-Motor Co., Ltd. We spent first several years in developing an aeromagnetic survey system using this helicopter with a cesium magnetometer. This system has gradually been improved and has been applied to Izu Oshima, Sakurajima, Kirishima, Kuchinoerabujima and others. Our aeromagnetic surveys at active volcanoes have revealed magnetization structures of these target volcanoes with high spatial resolution. We also started developing observation modules that require direct ground contact such as seismic and GPS observation modules. We had to start from developing a winch that is attached underneath the helicopter and is used to install sensors in the target area near active volcanic vents. Observation modules have to be light weight, compact size, and solar powered. We have been maintaining seismic observations at Sakurajima summit area since 2009, and GPS observations at Sakurajima since 2011.

When Kuchinoerabujima island, southern Kyushu erupted in 2014 and 2015, we adopted UAV-based observation techniques so far developed. We recovered the damaged seismic network at the summit area. We also conducted multi-parameter observations including aero-magnetic survey, visual and infrared imagery, and volcanic gas sampling. We also applied the observation system for observations of newly formed volcanic island Nishinishima, 130km west of Chichijima, Ogasawara.

1. はじめに

火山を理解すること、また、火山災害に関する情報を的確に発信するためには火山近傍での観測が不可欠である。火山の火口近傍では火山の活動を示す様々な情報が高い SN で得られることから、地震観測、地殻変動観測、電磁気観測、画像、熱観測などの地球物理学的観測や火山ガス観測などの火山化学的観測を火口近傍で実施することにより火山内部の様々な現象の理解が進むことが期待される。

一方、火山の火口近傍での観測は危険を伴い、一旦火山活動が活発化すると、火口周辺に立ち入り禁止区域が設けられるために近傍観測が困難になることが多い。火山を理解する上で、また火山の防災上も、噴火開始時の情報だけではなく噴火継続中の様々な情報を得ることが重要である。最初の噴火で火口近傍の観測網が被災したことによりその後の活動推移を捉えることが難しい事例も見られる。噴火は長期に継続することが多いが、噴火継続中は被災した観測点を復旧することは難しく、不十分な情報で防災対応等の判断を迫られることもある。

本研究グループでは、火山の火口近傍で安全に火山観測を実施するための手段として、ヤマハ発動機の開発した産業用無人ヘリコプター（以下、無人ヘリ）を用いた火山観測システムの開発を進めている。当初は空中磁気測量への応用から始まり、伊豆大島、三宅島、霧島新燃岳、口永良部島などで繰り返し観測を行うまでになった。また、地震観測モジュールや地殻変動観測用モジュールの開発も進めており、桜島や霧島でモジュールの設置、回収を実施している。画像撮影や火山ガス採取も実施しており、最近では、2014、2015年に噴火した口永良部島において火口近傍の多項目観測を実施した。また、2013年に活動がはじまった西之島における画像撮影や試料サンプリングも実施している。本報告では、火口近傍観測手法の進展のレビューと、本グループによる無人ヘリ観測システム開発を振り返るとともに、最近の成果を簡単に紹介する。

2. 火口近傍無人観測機の開発の歴史

陸上移動型については、1990年代前半には既にキャタピラ移動式の火山無人観測機の構想があった（下鶴、1999）。1994年頃には NASA とカーネギーメロン大学が歩行型探査機 Dante II を開発した（Bares and Wettergreen, 1999）。これは火星などの惑星探査を目指して開発されたものであるが、テストフィールドとして厳しい環境であるアラスカのスプール火山で実験が行われ、火山ガスの採取に成功した。1995年の雲仙噴火時には無人化施工技術が開発され（松井、1994）無人重機の無線操作技術が進んだ。2002年には無線操縦型ショベルカーをベースとした遠隔操作型無人観測装置 MOVE が開発され、伊豆大島等でテストが行われた（後藤他、2012）。また、イタリアにおいては ROBOVOLC プロジェクトにより、火山観測を目指す様々なタイプの不整地走行型ロボットが作成された（<http://www.robovolc.dees.unict.it>）。陸上移動型はペイロードが大きく様々な観測装置を搭載することが可能であり、車体を頑丈に作ることで耐熱・耐衝撃性を高めることも可能であることから、爆風観測や試料サンプリング、観測点設置など様々な応用が想定されるが、実際の火山で応用するためには火口近傍に接近できるルートの確保が必要があるなど、運用上の厳しい条件もある。

一方、飛翔体による火口近傍観測手法の開発も徐々に進められてきた。2000年の有珠山噴火時には、ヤマハ発動機の無人ヘリによる空中からの泥流域の調査が実施された（ヤマハ、2000）。これはオペレーターから 100m 程度の有視界の範囲で行われた。三宅島噴火後の 2001年には無人ヘリが三宅島の鉢巻林道付近まで接近し住居の被害状況などの画像撮影を行った（ヤマハ、2001）。同じ 2001年には気象庁

も無人ヘリによる火口観測を試みている（気象庁、2006）。2007年にはイタリアのブルカノ火山においてペイロード 3 kg程度のラジコンヘリを用いて SO₂ フラックスや CO₂/SO₂ 比の測定が行われた（McGonigle et al., 2007）。

3. ヤマハ自律型無人ヘリコプター

我々のグループでは、飛行体による観測手法が実際の火山への応用の近道と考え、2005年からヤマハ発動機製の無人ヘリを用いた観測手法開発を開始した。火山観測における無人ヘリの使い方は大きく2つに分けることができる。一つは、観測装置や試料の運搬手段としての使い方、もう一つは無人ヘリに観測装置を搭載し、空中から観測を実施するという使い方である。地震計やGNSS装置の火口近傍への設置、火山灰・火山ガス・スコリア等のサンプリングが前者にあたり、空中磁気測量、可視や赤外面像撮影、火山ガス測定、レーザープロファイラによる地形計測が後者に相当する（Fig.1）。

ここで、我々が2008年以降観測で用いているヤマハ発動機の自律型無人ヘリコプターRMAX-G1を紹介する（Fig.2）。この機体は農薬散布用に開発された機体に自律機構を追加したもので、3軸ジャイロを用いた姿勢制御とGPSを用いた速度・位置制御により、目標位置への自律飛行や事前にプログラムされた経路に沿った自動自律飛行ができる（鈴木、2005）。機体の全長は3.6m、重量84kgであり、基地局に置かれたラップトップPCから機体を操作する。Table 1に機体のスペックをまとめた。ペイロードは約10kgであるが燃料の量に依存して変動する。Differential GPSを用い、事前にプログラムされた飛行経路を自律飛行する際の相対精度は1m程度である。飛行範囲は基地局からの電波の到達距離によって決まり、概ね3km程度である。飛行中に機体に取り付けたカメラからの画像、機体の位置、速度や傾き、残燃料などの飛行情報をリアルタイムで基地局から確認することができる。また、機体カメラは基地局からの操作で向きの変更やズームが可能である。

無人ヘリ観測グループが目指すもの ⇒無人ヘリによる火口近傍観測システムの構築

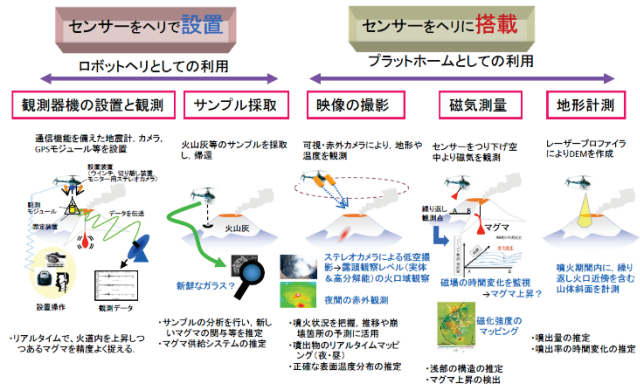


Fig.1 Various applications of UAV to volcano observation

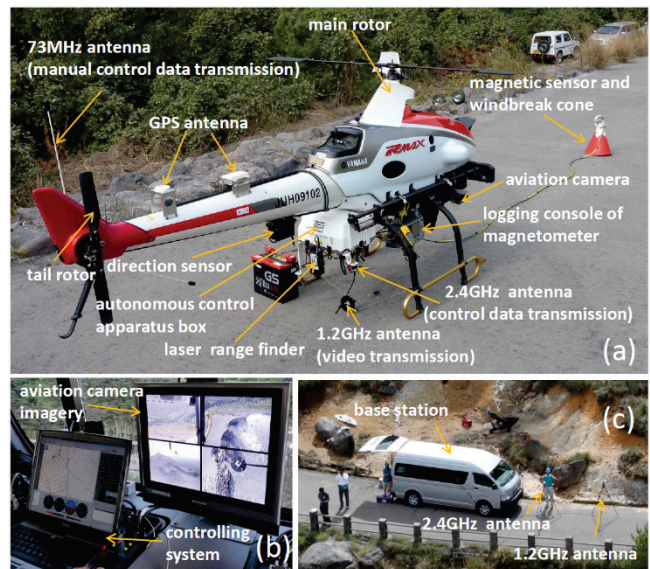


Fig.2(a)Yamaha UAV, RMAX-G1 with magnetometer, (b)Controlling system, (c) Base station and antennas for communication

Table 1
Helicopter capabilities

Maximum payload	10 kg(1atm, 20° C)
Maximum flight time	90 minutes
Radius of action from the base-station	5 km
Maximum speed	20 m/s
Operating temperature range	-10 ~+45° C
Maximum permissible wind speed	10m/s(average), 15m/s(instantaneous)

Helicopter specifications

Total length	3.63 m
Maximum width	0.72 m
Total height	1.22 m
Weight	84 kg (including fuel and camera system)
Fuel tank capacity	11 liters
Engine maximum power/torque	15.4kW / 2.6kgm
Engine type	water-cooling, two-strokes, two-cylinder horizontally opposed
Radio frequency for autonomous control and data transmission	2.4 GHz

4. 無人ヘリによる空中磁気探査

4-1. 磁力計取り付け手法の開発

先に述べた無人ヘリの火山観測への2種類の応用の内、観測装置や試料の運搬手段としての使用法においては、運搬する観測装置やサンプラーの開発が必要であり技術的ハードルがやや高い。それに比べ無人ヘリに観測装置を搭載し空中探査を実施する場合は搭載装置に関する開発要素が少ないため比較的取り組み易い。そこで空中磁気探査を無人ヘリコプターの火山観測への最初の応用事例とした。

無人ヘリコプターによる空中磁気探査を開始した当初は千葉大学環境リモートセンシング研究センターの所有する自律型 RMAX を用い、機体への磁気センサー搭載方式について試行錯誤を繰り返した。センサーは米国 Geometrics 社製の光ポンピングセシウム磁力計 G-858 を使用している。無人ヘリの機体は磁性体の金属部品が使われており、その影響を 10nT 以下に抑えるためには機体からセンサーを少なくとも 3m 離す必要がある (Kaneko et al., 2011)。有人機ではセンサーをケーブルで釣り下げるバード方式が主流だが、無人ヘリコプターについては離発着時のケーブルの巻き込みが懸念されたことから、スティンガー方式でスタートした。始めは非磁性のアルミ製のアングルの片側にセンサーを取り付けアングルの反対側にバランスをとるための錘を取り付ける方式を試みた (Fig.3 left)。しかし、2005 年 10 月に浅間山で実施した飛行試験において機体が大きくぶれてバランスを崩したためにアングルが折れ、あわや墜落かという状況となったためこの方式を断念した。次に、より軽量で強度が高いカーボンロッドを用いたスティンガー方式を採用し、2006 年 7 月に伊豆大島で自律 RMAX による初めての空中磁気測量を実施した (Fig.3 middle)。その後、長距離型の自律無人ヘリコプター RMAX-G1 が開発されたため、2008 年 3 月と 11 月に伊豆大島で実施した空中磁気探査においては RMAX-G1 を使用した。当初スティンガー方式を採用する予定であったが、長距離型機体の姿勢制御系に悪影響を及ぼすことがわかり、バード方式に切り替えた (Fig.3 right)。ケーブルの巻き込みについては、離発着時の工夫で避けられることが分かった。その後に実施した空中磁気測量はすべてバード方式で実施している。これまでに、伊豆大島、霧島新燃岳、三宅島、口永良部島において繰り返し空中磁気探査を実施しており、以下ではその結果の概要を紹介する。

4-2. 伊豆大島山頂カルデラ内の微細磁化構造

伊豆大島の山頂カルデラを観測対象として、2008 年 3 月と 11 月に空中磁気探査を実施した。飛行経路の水平間隔は概ね 50m である。飛行速度は 5m/s、データサンプリング間隔は 10Hz であった。2008 年 3 月の探査ではカルデラ内の北半分をカバーし、高い空間分解能で磁化分布を測

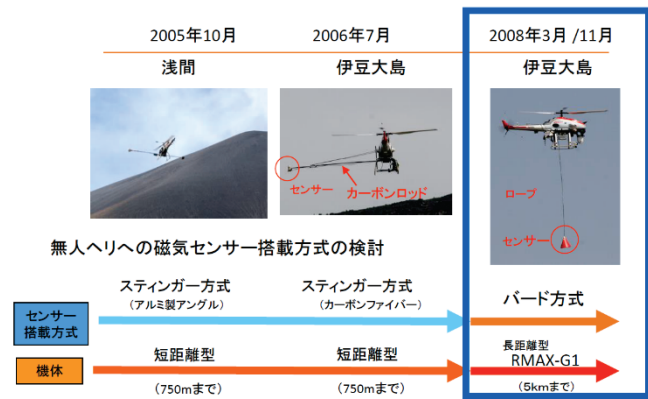
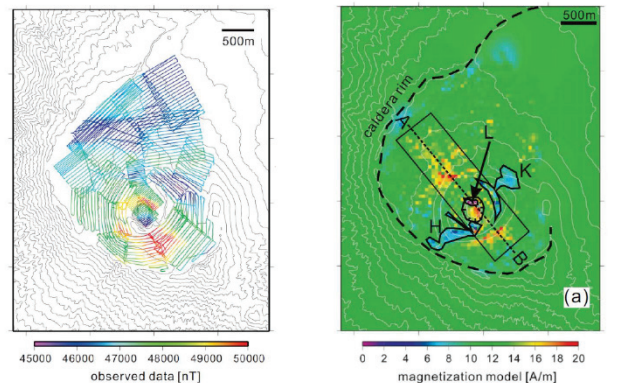


Fig.3 Progress in magnetometer installation to UAV



伊豆大島 山頂カルデラにおける飛行経路色は磁気強度を表す。

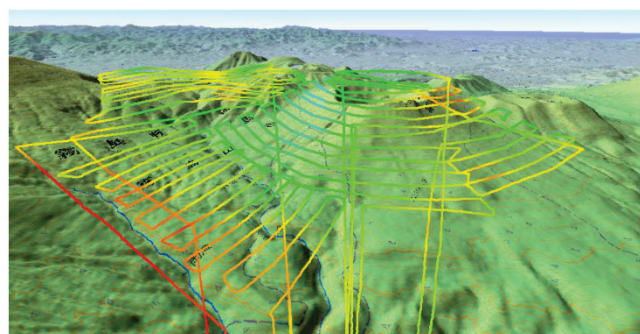
北西-南東に延びる高帯磁域噴気等を示唆する低帯磁域の分布を捉えた。

Fig.4 Flight path of aero-magnetic survey at Izu-oshima (left). Magnetization model (right)

定することができた。その結果、1986年の割れ目噴火位置に対応した高磁化領域やカルデラリムの噴気に対応する低磁化領域を検出することができた (Kaneko et al., 2011)。2008年11月にはカルデラ南部を対象に探査実施し、3月の結果と合わせてカルデラ全体の磁化強度分布を得ることができた。低い対地高度、狭い飛行経路間隔、高サンプリングレートにより、従来の有人機による測定結果と比較してはるかに高い空間分解能の結果を得ることができた (Fig.4)。

4-3. 霧島新燃岳における溶岩の冷却過程

霧島新燃岳は2011年1月に300年ぶりのマグマ噴火を開始し、3度の準プリニー式噴火を経て、流出したマグマが山頂クレーターを満たした。その後はブルカノ式噴火を繰り返し、2011年9月以降は活動が低下した。しかしその後もマグマ蓄積は継続し、2017年10月に6年ぶりに噴火が発生した。我々は2011年の噴火時に山頂クレーターを埋めた溶岩の冷却過程を把握することを目的としてこれまでに2011年5月、2011年11月、2013年11月、2014年11月、2015年11月、



対地高度: 100m 飛行経路の間隔: 100m
飛行速度: 10m/s 飛行総距離: 85km

Fig.5 Flight path of aero-magnetic survey at Shinmoedake

2017年11月の6回、繰り返し磁気探査を実施した。Fig.5に典型的な飛行経路を示す。基地局を新潟付近に置き電波が届く範囲で山体西側と溶岩に満たされた山頂クレーター上空を飛行する。対地高度、飛行経路の水平間隔はそれぞれ約100m、飛行速度は10m/s、データサンプリング間隔は10Hzである。

データ処理は(1)データから火山起源の成分を抽出、(2)山体を鉛直プリズムの集合で表現し平均磁化を推定、(3)磁化の水平分布の推定、という標準的な処理を行った (Koyama et al., 2013)。次に、1回目の観測データから推定された磁化分布を用いて2回目以降の探査時の飛行経路における全磁力値を計算し、観測値との差分を取った。Fig.6は、山頂クレーターを満たした溶岩が冷却により磁化を得たと仮定した時の全磁力変化と、観測された全磁力変化を比較したものであり、観測値が良く説明できていることがわかる。その後も1-2年おきに測定を繰り返し、溶岩の得た平均磁化を推定したところ、冷却が時間の平方根に比例する結果が得られた。これは火口を埋めた溶岩の冷却においては熱拡散過程が支配的であることを示す。

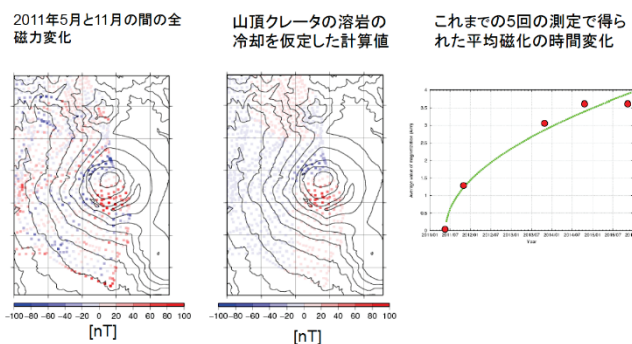


Fig.6 Cooling of the lava filling the summit crater of Shinmoedake

4-4. 三宅島の全磁力変化

三宅島は2000年の噴火後、活動が徐々に低下していたが、山体深部の変化を示すGNSS観測の長基線長は2006年頃から伸びに転じ、山体浅部の変化を示す短基線長も2016年頃から収縮が停滞している (気象庁、2017)。三宅島は20年程度の間隔で噴火を繰り返しており、次の噴火に向けた準備過程を捉えることは重要である。

マグマの上昇などによる山体内部の温度変化を反映する磁気構造を把握することを目的として、2014年5月と2016年11月に繰り返し磁気探査を実施した。飛行経路、磁化分布、解像度をFig.7に示す。飛行経路は鉢巻林道の内側であり山頂カルデラ上空は避けている。これはカルデラ内は対地高度が大きいために測定精度が落ちるからである。基地局を北、南西、南東の3ヶ所に起き1-2日で測定は完了した。2014年と2016年の2度の測定を比較した結果、北が負、南が正の全磁力変化が見られ、変化量はpeak-to-peakで100nTであった。この期間の三宅島の活動は低調で、地震や地殻変動などの観測値にマグマの上昇を明確に示すものは見られないことから、観測された全磁力変化が火山活動に起因するか否かは断定できなかった。今後も観測を継続し、全磁力の時間変化を注視する必要がある。

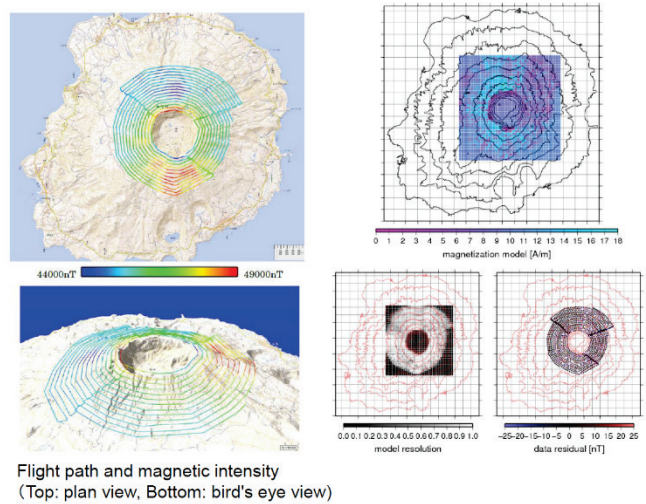


Fig.7 Aeromagnetic survey at Miyakejima in 2014 and 2016

5. 無人ヘリによる観測装置の設置・回収および試料サンプリング

無人ヘリによる空中磁気探査手法が徐々に確立してきたことから、2009年からは観測装置や試料サンプルの運搬手段として無人ヘリを応用することに向けた開発を開始した。無人ヘリを機器運搬に活用する上で重要な点の一つはウインチの開発である。Fig.8に観測装置の設置手順を示す。1) 観測装置は無人ヘリの胴体下部に取り付けたウインチに吊るされ目的地上空に運ばれる。2) 目的地上空に到達するとホバリングで無人ヘリの位置を保ちつつウインチで観測装置をゆっくり降下させる。3) 観測装置が着地し動作確認ができたならワイヤーを切り離して巻き上げる。4) ケーブルの巻き上げ完了後無人ヘリは基地局へ帰投する。これら一連の作業を実施するためには無人ヘリ経由で基地局から無線で操作することができるウインチとワイヤー切り離し装置を開発することが不可欠である。

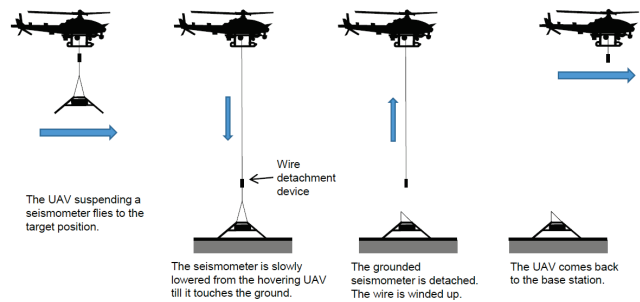
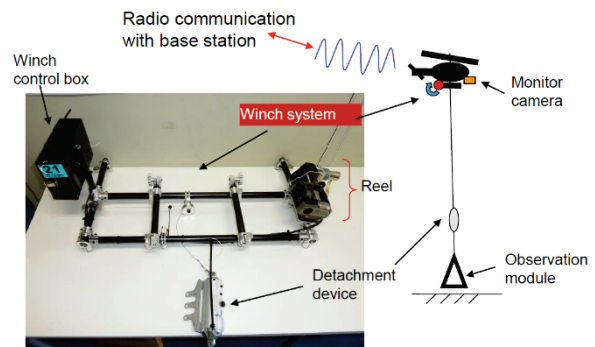


Fig.8 How to install observation modules by using UAV

5-1. ウインチと切り離し装置の開発

Fig.9にウインチと切り離し装置を示す。無人ヘリを用いて機器を設置するためのウインチは5kgの重量を十分な速さで巻き上げ巻き下ろしができる強度と速度を実現しつつ、ウインチ自身は数kg程度まで軽量でなければならない。強度・速



We have developed a remote-controlled lightweight winch system. It weighs approximately 3kg.

Fig.9 Winch and detachment apparatus

度と軽量化は相反する条件であり、両者を満足するウインチの開発は容易ではない。切り離し装置も十分な強度をもちつつ小型軽量の容器内部に通信装置・切り離し機構・駆動用電池を収める必要がある。

ウインチのフレームは、軽量かつ強度の高いカーボンファイバー製のパイプを軽量のアルミ金具で組み合わせて作成した。ワイヤーの巻き上げ、巻きおろし装置については、ワイヤーをリールに均等に巻く（整列巻き）ために必要となる部品であるリードカムの作成が難しかったため、釣り用のリールを改造して作成した。リールには直径 0.8 mm のステンレスワイヤーを巻いた。ワイヤーが地表で引っかかった時には、無人ヘリを安全に離脱させるため、ワイヤをリールから全て吐き出す必要があり、むやみに長くすることはできない。設置時の標準的なホバリング高度は対地 40m 程度なので、ワイヤー長は 60m に設定した。ウインチは 3 セル 11.1V、2000mAh の容量を持つリチウムポリマー電池で駆動し、モーターに供給する電流の符号をリレーで切り替えることで巻き上げ巻き下げを切り替える。モーターとリール間の最適なギア比の決定や様々な問題点の洗い出しのため、5 kg の負荷を掛けて巻き上げ巻き下げを繰り返すテストを実施した。過電流防止のヒューズが飛んだり、逆にヒューズ容量が大きすぎてモーターを焼くこともあった。また、市販のリールでは内部のプラスチック製のギアなどが負荷に耐えられずに破損した場合は可能な限り金属製の自作部品に置き換えた。ウインチ制御基板のはんだが飛行時の振動で剥がれるトラブルに対しては除震用のゴム製ダンパーの追加で対応した。最終的に、重量 3 kg で、巻き上げ巻き下げ速度 20m/分のウインチが実現した。設置時の標準的な高度は対地 40m 程度なので、2 分程度で観測装置を降下させることができる。切り離し装置も 300g 程度に収めることができた。ウインチや切り離し装置の通信と動作にはラジコン用の受信機とサーボモータを用いており、基地局からの制御信号を無人ヘリ経由で中継するための通信基板はヤマハが作成した。

5-2. 無人ヘリ設置用観測モジュールの開発

無人ヘリのペイロードは 10 kg 程度であるが、ウインチの重さや、気象状況の変化に対応するための余力を残すことを考慮すると、観測モジュールの重量は 5 kg 程度に収める必要がある。観測モジュールはセンサーと計測基板に加えて電力・通信機能を備える必要があり、重量制限の中ですべてを実現することは容易ではない。これまでに様々なタイプを試作したが、典型的なモジュールの重量内訳は次のとおりである。アルミフレーム 880g、ソーラーパネル(36W) 800g、ニッケル水素バッテリー (7Ah、現在は 11Ah) 1500g、防水ケース 660g (底板 200g を含む)、センサー 300g、AD・通信基板 600g、配線ケーブルやネジ類 200g の計 4940g。このうちソーラーパネルについては、もともと 1600g ある市販品について、パネル素材を中空にしたものをメーカーに開発してもらい 800g の重量削減を達成した。防水ケースについては、市販品は 1 kg を超すものがほとんどで大きさの自由度も少なかったため、塩ビ板とアルミアングルで軽量ケースを自作した。

これらの軽量化に伴い犠牲にした点もいくつかある。最たるものは耐久性の低下である。防水ケースは 1.5mm 厚の塩ビ板とアルミアングルで作成したが、紫外線に晒されると 2 年ほどで劣化する。また熱に極めて弱く、高温の噴石があたるとごく小さなものであっても溶けて穴が開き浸水した。ソーラーパネルについては、最適な方向にパネルを向けることができないため、実効容量は半分程度であり、安定した連続観測の実施には十分でない。特に GPS 観測モジュールについては 24 時間観測の電力を供給できず、1 日 12 時間しか計測できないため精度が出ない。バッテリー容量は 2-3 日の無日照には耐えられるが、それ以上無日照が続くと欠測する。更に、軽量のため風に飛ばされやすく、霧島新燃岳や桜

島の観測では吹き倒されたり、飛ばされて行方不明になったものもある。

5-3. 桜島および霧島新燃岳での設置テスト

始めて設置に成功したのは 2009 年 10 月の桜島での観測である。火口から 2 km 以内の 3 ヶ所 (A2, A3, A4) に 4 台の地震観測モジュールを設置することに成功した (Fig.10)。しかし中岳東斜面の A2 に設置した機器は設置後すぐ風で倒されてしまった。また、この年に設置した機器は動作が安定せず十分なデータが取れずに終わった。

当初は、設置機器を無人ヘリで回収することは困難と考えていたが、その後試験を繰り返したところ、

風況などの条件が整えば回収できることがわかった。2010 年 11 月に桜島で実施した 2 度目の設置実験では回収を実際に試み、前年に設置した機器 4 台の内 3 台を回収することができた。回収できなければ機器の不具合は原因不明のままになり開発の遅れにつながる。回収する技術を確立したことで、不具合の原因解明が進み、観測装置開発が大幅に加速した。また設置のやり直しが効くことで設置作業を余裕を持って実施できるようになった。2010 年の観測においては 4 ヶ所 (A1, A2, A3, A4) に 5 台の地震観測モジュールを設置した。

2011 年 1 月に霧島新燃岳が噴火したことを受けて無人ヘリによる緊急調査を行った。地震観測モジュール 4 台と GPS 観測モジュール 3 台を新燃岳火口周辺に設置し、火口周辺の地震データ及び地殻変動データを取得することに成功した。この観測では装置の多くが強風で吹き倒され観測は長く続かなかったが、新燃岳と獅子戸岳の間の鞍部に設置した GPS 観測装置は 2015 年 3 月まで 4 年ほど動作した。

2009 年から 2011 年 5 月までに設置した機器は風に弱く、電力不足で動作が不安定になることも多かった。これを教訓として 2011 年 11 月までに、観測モジュールの形状を大きく変更した。それまでは、アルミ棒で組んだ三脚状のフレームの上に直方体の防水ケースを乗せた形状であった。防水ケースの各面にソーラーパネルを張り付け、中には計測基板、通信装置、バッテリー、センサーの全てが収められた。そのため、重心が高くかつ風を受ける面積の広い部分が構造の上部にあるため、風で吹き倒されたり飛ばされたりする原因となっていた。しかも、ソーラーパネルの枚数が限られ、かつ半分のパネルは常に日照が当たらないという状態であり、電力不足の主因となっていた。そこでまず、バッテリーを 3 つに分けてそれぞれ 3 本の脚の下部に取り付けることによって重心を下げた。また、センサーは防水ケース内でなく脚の先端に取り付けた。更に、ソーラーパネルの配置を変えて三脚を覆うようにしてパネルの枚数を増やすと共に、どのパネルにもある程度日が当たるようにし



Fig.10 Seismic stations at Sakurajima (red circles)

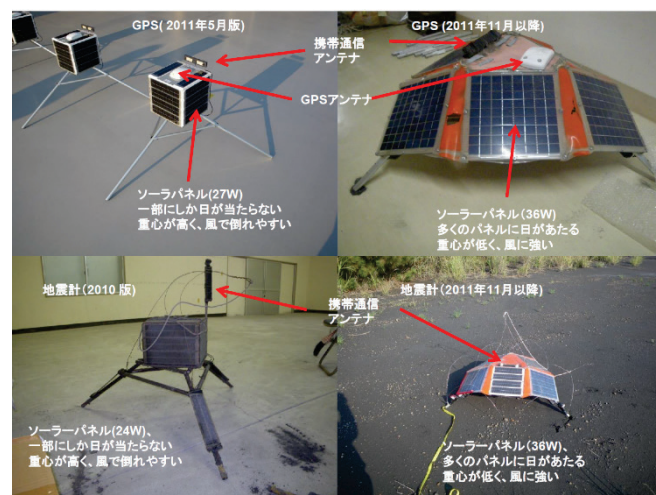


Fig.11 Progresses in observation module design. Left: old type, Right: new type

た (Fig.11)。この改良によりソーラーパネルが増え、パネルの多くに日が当たり、重心が下がり、風を最も受ける面の位置を下げることで耐風性が大幅に向上した。

2011年11月の観測では、桜島においては前年に設置した5台の内3台を回収し4ヶ所に地震観測モジュール、2か所にGPSモジュールを設置した (Fig.12)。霧島新燃岳においては2011年5月に設置した地震観測モジュール4台中2台とGPSモジュール3台中2台を回収し、地震観測モジュールとGPS観測モジュール1台ずつを設置した。2011年11月を最後に、霧島への機器設置を終了し、この時設置した機器は立ち入り禁止規制が縮小された2015年以降に徒歩で回収した。

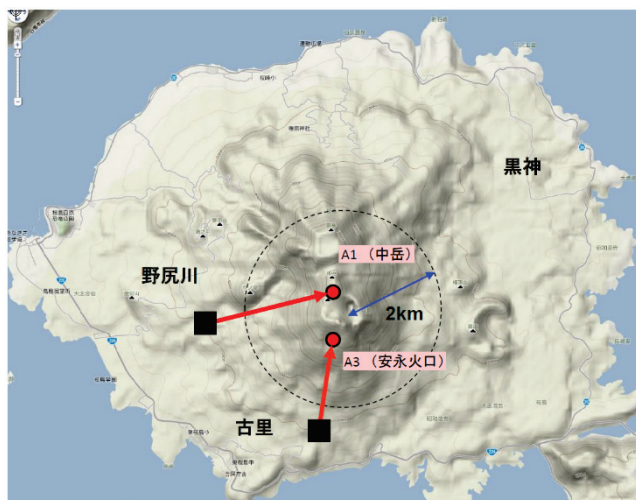


Fig.12 GPS stations at Sakurajima (red circles)

2012年以降は地震・GPS観測モジュールの設置・回収は桜島のみで実施している。設置・回収数は毎年3-4点である。回数を重ねるにつれて設置・回収技術が向上し、当初は1-2週間はかかっていた設置・回収が近年は3-4日で済むこともある。また、当初は通信時の電力を十分に賄えないことから、データの一部を携帯通信網を介して手動で回収するのみであり、メディアに保存された残りの連続データは観測モジュールごと回収するしかなかった。しかし2015年4月には、ドコモのユビキタスモジュールを通信に使用した新基板を口永良部島での観測向けに開発し大きな成功を収めたことから、2015年10月以降の桜島観測においても同じ観測基板を採用した。これにより、連続データを準リアルタイムで回収することが可能になっている。

5-4. サンプル装置の開発

火山灰の採取装置の開発も行った (Fig.13)。内部にモーターで駆動する回転ブラシとバッテリーを備え、底部に押しボタン式のスイッチがついている。この回収装置をホバリングする無人ヘリからウインチで降下させる。地面に接するとスイッチが入り、回転ブラシが火山灰や小石等を内部に取り込む。また、引き上げるとスイッチが切れてブラシの回転が止まる。

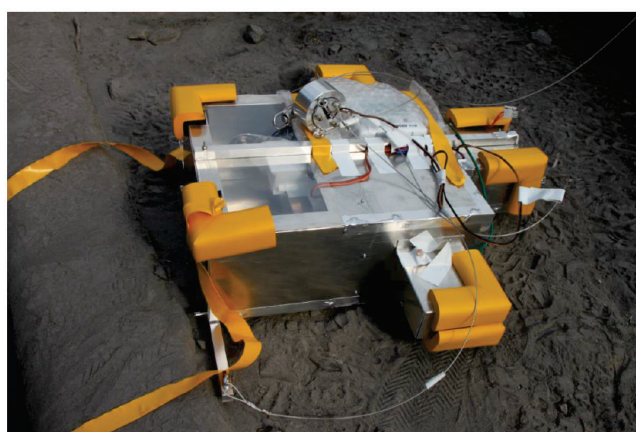


Fig.13 Ash sampler

2009年に桜島の西斜面で動作確認テストを実施したところ平らな面に積もった火山灰についてはある程度の回収が可能だが、実際の火山の表面は急斜面が多くかつ凸凹であり、装置の小型化や回収部分の形状の改良が必要であることがわかった。

6. 桜島および新燃岳における地震・GPS観測結果

Fig.14 に新燃岳におけるGPS観測の結果を示す。解析にはGIPSY-OASIS IIを用い、測地座標系

ITRF2008 を基準とする座標変化を表示した。K1-G と K3-G が動作した期間はそれぞれ 1 ヶ月半と 5 ヶ月と長くは無いが、2 点とも東南東へ 2-3 cm/年程度の速度で動いている。また K5-G は 2011 年 5 月の設置から 2015 年 3 月に徒歩で回収するまでの約 4 年間動作し、南東へ 3 cm/年程度の速度で動いた。火山活動に起因する変動を抽出するためには広域場の変動を取り除く必要がある。K5-G は設置後初めの 1-2 年に 10 cm 程度の沈降を示し、その後は安定した。回収時の状態から判断すると、数 cm 程度のモジュール脚の沈降はあり得るが 10 cm の沈降は大きすぎると思われることから、下降量の一部は火山体の沈降を表していると考えられる。

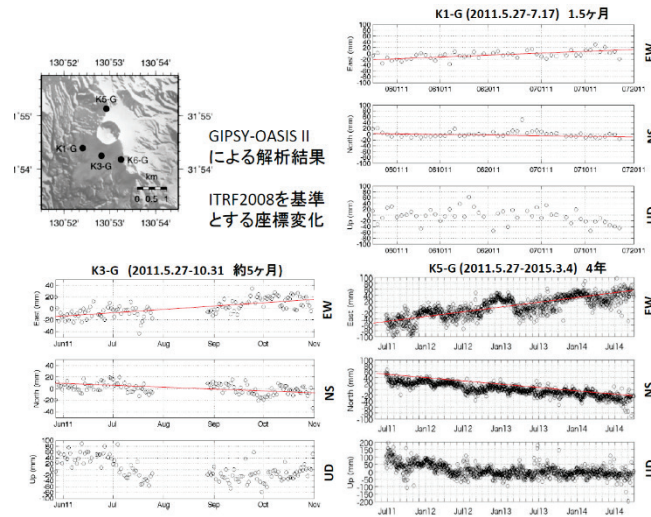


Fig.14 Location changes of the three GPS stations installed at Shinmoedake

Fig.15 は桜島の中岳と南斜面に設置した 2 か所の GPS 観測点の座標変化である。解析に用いたプログラムや基準座標は霧島と同様である。機器トラブル等の欠測はあるが、5 年以上連続してデータが得られている。置き換え時のオフセットは概ね 1m 以内である。設置回収時にモジュール位置が動くことは避けられないが、置き換えが短時間で完了することから、その間変動は無いとみなして補正をしている。霧島の GPS 点と同様、桜島の GPS 点も南東へ 2-3 cm/年程度で動いている。A1-G の南北成分には 2015 年 8 月のダイク貫入に伴う北向き数 cm の変動が捉えられており InSAR 解析から期待される変動量と調和的である。

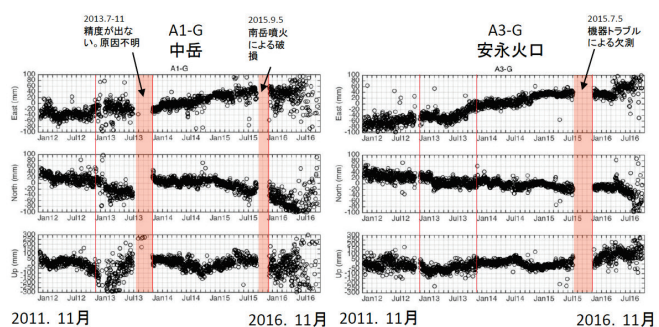


Fig.15 Location changes of the two GPS stations installed at Sakurajima

霧島新燃岳、桜島いずれにおいても座標値の繰り返し誤差は水平方向が 1-2 cm、上下方向が 2-3 cm 程度と通常の GPS 観測に比べ 2-3 倍程度大きい。この原因として 1) アンテナ高が 50 cm 程度と低く地面からのマルチパスの影響を取り除けていない 2) 電力不足で 1 日当たり 8-12 時間の測定時間となっており軌道周期で現れるノイズの影響を取り除けていない、等の原因が考えられる。

7. 口永良部島 2014、2015 年噴火への対応

口永良部島は屋久島西方約 14 km に位置する火山島であり、山体は活発な活動を繰り返す新岳と近年は噴気活動のみが認められる古岳から構成される。目撃記録の残る 19 世紀後半以降の噴火は全て新岳山頂火口とその周辺で発生しており、1980 年の新岳山頂東側の割れ目からの噴火を最後に静穏な状態が続いていた。2014 年 8 月 3 日に 34 年ぶりの噴火が発生し、島民は島内西方の高台である番屋ヶ峰や島外に避難した。気象庁は噴火警報レベル 3 を発表し火口から 2 km を立ち入り禁止とした。

京大防災研など各機関が展開していた観測網のうち山頂に近い観測点は全て被災し、山頂付近の地震活動を十分な精度で観測することができなくなった。そのため、無人ヘリによる山頂観測網の再構築と山頂火口周辺での多項目観測を目的とする観測を 2015 年 4 月に実施した。しかし 2015 年 5 月 29 日

に2014年8月の噴火を上回る規模の噴火が発生し、4月に設置したばかりの地震観測点はすべて被災した。この噴火は居住地域に達する火砕流も伴ったため、全島民が島外へ避難せざるを得なかった。噴火から4ヶ月後の2015年9月に無人ヘリでの地震計設置と多項目観測を再び実施した。無人ヘリによる一連の観測の詳細は、大湊 他 (2016) や Ohminato et al. (2017) に詳しい。

4月に設置した地震観測網では噴火直前の山頂付近の地震活動の変化が捉えられた。また4月と9月の多項目観測結果を比較することにより、山頂付近の活動状態に関する重要な知見が得られた。以下、それぞれの観測項目で得られた結果を紹介する。

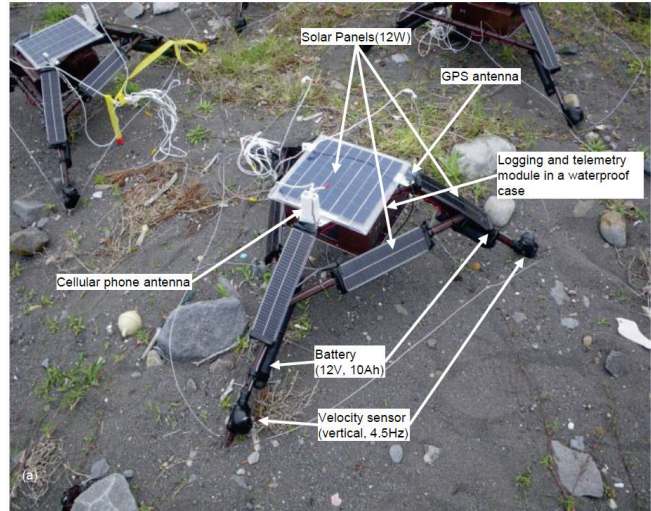


Fig.16 Seismic observation module used at Kuchinoerabujima

7-1. 地震観測

口永良部島は台風が勢力を保ったまま通過することが多いことを考慮し、風に飛ばされにくいようにソーラーパネルの枚数を大幅に減らした地震観測モジュールを制作した (Fig.16)。この観測モジュールでは、通信部にドコモのユビキタスモジュールを採用し、通信モジュールの電源を小まめにオフオンすることで消費電力を大幅に減らしつつ準リアルタイムで全データを送信することを可能にしている。センサーは電力消費のないムービングコイル型 4.5Hz 速度計とした。

口永良部島では2014年8月の噴火で京大防災研などが運用する山頂観測点が失われ山頂付近の地震活動はほとんど捉えられなくなっていた (Fig.17 left)。山頂観測網の再構築を目的として、2015年4月に新岳山頂付近4か所に地震観測装置を設置した。無人ヘリコプターで再構築した観測網では活発な地震活動が捉えられており (Fig.17 right)、特に5月29日の噴火直前には地震数の急増・急減が捉えられている (Fig.18)。

設置後まもない2015年5月29日に山頂噴火が再び発生し4つの地震観測点はすべて被災した。そのため、活動の低下を待って、2015年9月に再度、無人ヘリコプターによる地震計設置を実施し、5観測点による地震観測を開始した。この地震観測網により、噴火後の山頂付近の地震活動を継続的にモニターすることができ、気象庁などが山頂付近の観測点を再建するまでの地震活動データを得ることができた。原稿執筆時点の2018年1月において2ヶ所の地震観測モジュールが動作中である。

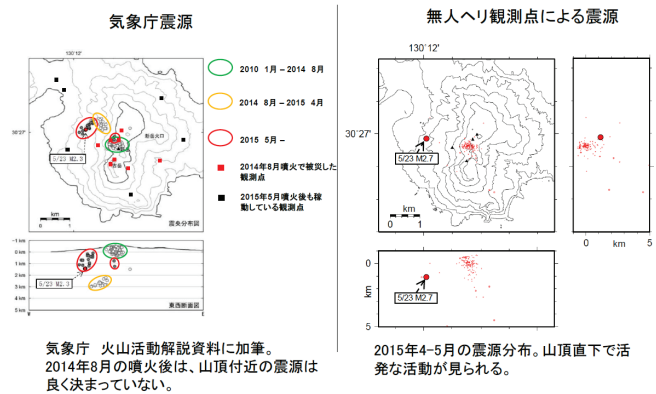


Fig.17 Hypocenter distributions with(right) and without(left) summit stations

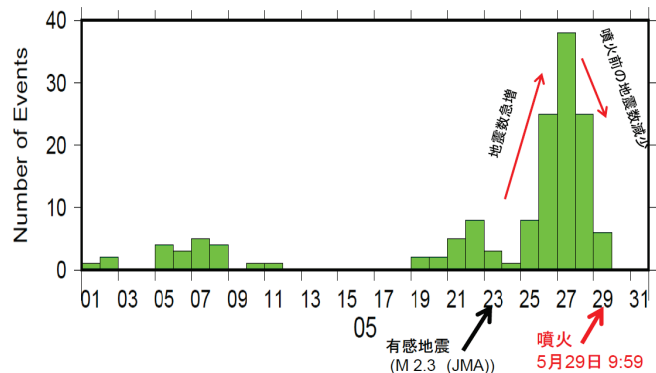


Fig.18 Changes in daily number of earthquakes just before the eruption

7-2. 空中磁気探査

2015年4月と9月に空中磁気の繰り返し観測を実施した。Fig.19に口永良部島における空中磁気探査の飛行経路を示す。上が2015年4月実施時、下が2015年9月実施時のものである。緑の四角は無人ヘリが離発着した基地局の位置、経路の色は全磁力の強度を表す。2015年4月の測定結果を2001年に有人機を用いて実施した結果と比較すると、新岳・古岳間を中心とした北側正、南側負の変化が認められ、噴火前に山体内で熱消磁が進行していたことが示唆された。

一方、2015年の4月と9月の測定結果を比較すると明瞭な差異が見られた。この差異は山頂付近極浅部が冷却により帯磁したと仮定することで説明できる。Fig.20に観測された磁場強度の変化および、表面の堆積物と山体内部合わせて $5 \times 10^5 \text{m}^3$ の体積が冷却により帯磁したと仮定した時に期待される磁場変化を示す。両者はよく一致している。推定された帯磁体積は2015年5月29日の噴火時に山頂付近に堆積したと推定される噴出物の体積よりも多いことから、表面の堆積物ばかりでなく山体内部でも同程度の体積が冷却し帯磁する必要がある。即ち4月と9月の観測結果の比較からは、山頂浅部で温度低下による帯磁が進んでいることが示唆された。

7-3. 火山ガス測定

2015年4月と9月の2度の多項目観測において火山ガス測定を実施した。無人ヘリの胴体下部にガスセンサー (Multi-GAS, Shinohara, 2005) を取り付けて火口付近の高濃度火山ガス中の CO_2 、 H_2O 、 SO_2 、 H_2S 濃度を測定するとともに、S、Cl、Fを吸着するアルカリフィルターパックを搭載してガス採取を行い実験室で分析した。その結果、ガス成分の濃度比と火山ガスがマグマから分離する際の温度の目安となる見かけ平衡温度の推定値が得られた。口永良部島では2014年8月噴火以降、有人セスナ機と無人ヘリによるガス測定を繰り返し実施したが、無人ヘリによる測定では有人セスナ機に比べてより近くに接近して高いガス濃度での測定や採取を行う事が可能であり、より精度の高い測定値を得ることができた。無人ヘリによる火山ガス観測手法の開発は2012年の桜島観測から始まり、桜島での観測のたびに火山ガス観測装置のテストも繰り返し、少しずつノウハウを蓄積した。その結果が口永良部島での観測に繋がった。機体へのガスセンサーの取り付け方や解析方法については、Ohminato et al. (2017)

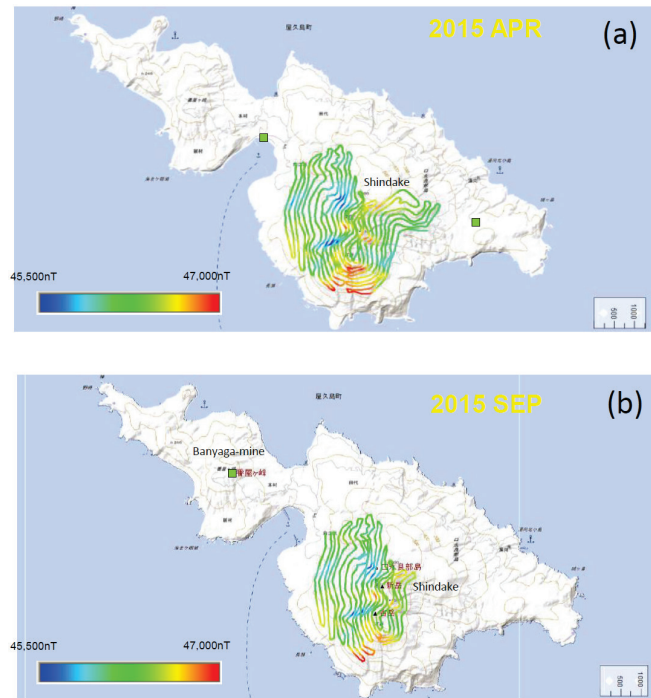


Fig. 19 Flight path of the aero-magnetic survey at Kuchinoerabujima

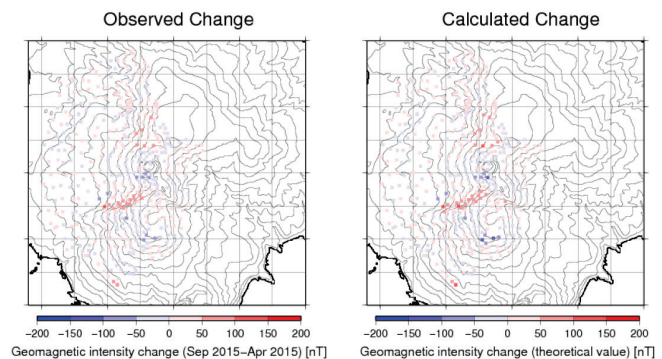


Fig.20 Geomagnetic intensity change at Kuchinoerabujima

と Kazahaya et al. (査読中) に詳細な記述がある。

7-4. 可視画像・赤外画像

無人ヘリの胴体下部に可視カメラと赤外カメラを取り付け、2015年4月と9月の2度山頂付近の撮影を行った。Fig.21は4月に撮影した赤外画像である。火口周辺は全体に温度が高く、ところどころ高温の噴気が見られる。火口内の西壁には300°Cを超える点があるが、撮影範囲内での最高温度が得られた地点は火口内ではなく火口外の西斜面であり379°Cに達していた。これらの高温地点を可視画像で見ると、4月の時点ではいずれも激しい噴気が立ち上っていた。しかし、9月に撮影した可視画像を見ると噴気活動は大幅に低下しており、特に4月撮影時に最高温度を示した西斜面では噴気が収まり最高温度も71°Cに低下していた。4月に314°Cを示した火口内西壁も9月には189°Cに低下し噴気の勢いも低下していた。一方火口底南部の噴気孔の温度は4月の250°Cから9月には285°Cとやや上昇していた。

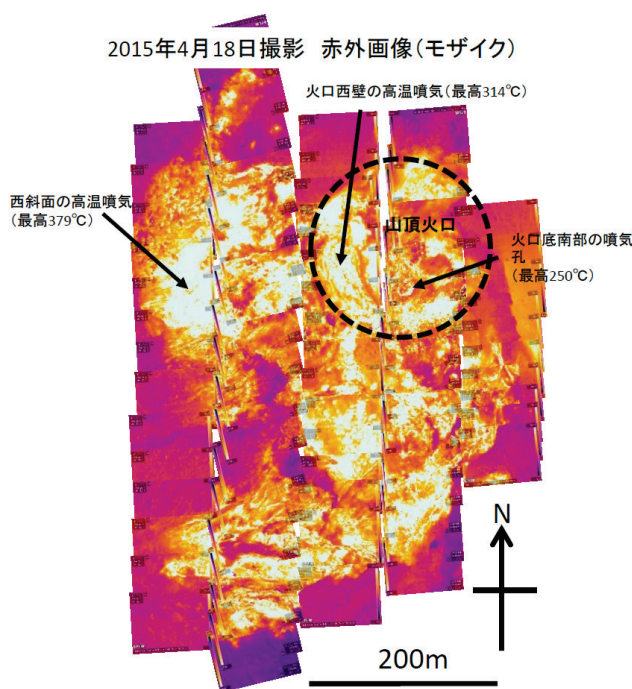


Fig.21 Infrared image of the summit area

火山ガス分析結果によると、マグマから脱ガスする際の温度の目安となる見かけ平衡温度は4月と9月の測定いずれにおいても400°Cを超えていた(Kazahaya et al., 査読中)。見かけ平衡温度に大きな変化が見られなかったにも関わらず、表面での噴気の分布やその温度に大きな変化が見られた点に関しては以下のように解釈することが可能である。マグマヘッドの後退により、9月の観測時には4月に比べて高温の火山ガス流量が低下した。そのため火山ガスの供給源に近い火口内の噴気孔には高温ガスの供給がcausing続き高温が保たれていたものの、西斜面や火口西壁ではガス流量の低下に伴い熱供給が低下し噴気活動や噴気温度が低下した。

8. 西之島における画像撮影および試料サンプリング

2013年11月に西之島が噴火を開始した。西之島は小笠原諸島父島の西方約130kmに位置する火山島であり1973-74年には新島を形成する噴火が発生した。約40年ぶりとなる今回の噴火ではストロンボリ式の溶岩噴泉を伴って大量の溶岩が噴出し、2015年末までには直径約2km、中央火口丘の標高150mの火山島が形成されて旧島部分の大半は溶岩に覆われた。成長の様子は航空機からの観察や衛星画像により詳細に捉えられている(Maeno et al., 2016)。2015年末には溶岩流出による拡大が止まったが、噴火の危険から2016年8月までは中央火口から半径1.5kmは立ち入り禁止とされ、上陸はできなかった。そこで我々は、2016年6月に気象庁の気象観測船啓風丸で西之島に接近し、船上から無人ヘリを離発着させて岩石試料の採取および高解像度の4K画像撮影を行った。

船上からの無人ヘリを離陸させ、観測を実施する上で、陸上とは異なる条件がいくつかある。一つは、

船上から離陸する際、無人ヘリの慣性装置を初期化するために基準となる安定した水平面を用意する必要がある点。もう一つは、基地局と無人ヘリの間の通信において、海面での電波の反射を考慮しなければならない、という点である。

常に揺れ動く船上で慣性装置の基準となる水平面を得るために 2 軸のジンバルを採用した。船のピッチングとローリングによる揺れをキャンセルすることで水平面を実現し慣性装置の初期化を行うことができる。電波の海面反射に対しては、アンテナアレイを用いることで対応した。無人ヘリと基地局との間の通信において、直達波と海面で反射してから到達する反射波には距離の差による位相差が生じる。高さを変えた 2 つのアンテナを用いて通信する場合、直達波については 2 つのアンテナからの電波がほぼ同位相で到達するのに対し反射波についてはアンテナの高さの差に応じた位相差が生じる。反射波に関して生じる位相差が半波長になるようにアンテナ間隔を調整することにより、反射波は弱め合い、直達波のみが強め合うようにすることができる (Fig.22)。

岩石サンプリングの実施にあたり、3.5 kg の錘に粘着テープを巻いたものを岩石採取装置として用いた。様々な粘着テープによる回収テストを事前に行い、回収成績が最もよい粘着テープを採用した。事前テストでは大きさ数cm程度のサンプルを回収できることを確認している。無人ヘリは岩石採取の目的地上空まで飛行し、ホバリングした状態でウインチを用いて採取装置を地面に降ろす。無人ヘリ搭載カメラで採取装置の着地を確認後、ウインチを巻き上げ、無人ヘリは船に戻る。2 軸ジンバル上の離発着台は狭く、また船上には様々な構造物があり、ワイヤーが伸びた状態で着陸することは危険である。そのためデッキに採取装置を受け止めるネットを広げ、採取装置ネット上に落下させて回収した後、身軽になった無人ヘリを離発着台に着地させる、という手順を踏んだ (Fig.23)。

4 K 画像撮影においては、無人ヘリの振動がカメラに伝わることで画像が劣化することを避けるため、無人ヘリに 3 軸フルデジタル高性能カメラジンバル (MoVI M5) を取り付け、これ

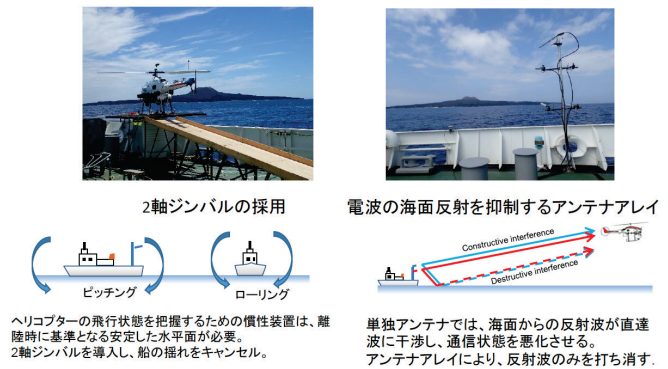


Fig.22 Special apparatus used for shipboard UAV operation



Fig. 23 Various apparatus used for rock sampling at Nishinoshima



Fig. 24 Summit area of the central cone of Nishinoshima island

に4Kカメラをマウントして海岸沿いの溶岩流の先端や、中央火口丘の撮影を行った (Fig.24)。撮影に際しては、基地局でモニター画面を確認しながら撮影場所を選択し、画角を調整した。

2016年10月には、東京大学地震研、産総研、富士山研、森林総研、環境省で構成された研究チームが、東京大学大気海洋研究所の学術研究船「新青丸」により、西之島の火山活動や生物相に関する上陸調査を初めて実施した (前野 他 2017)。短かい上陸時間に地質調査、噴出物採取、地震・空振観測装置の設置、海鳥などの生態調査等を効率よく実施するためには上陸時の調査経路を事前に十分検討することが不可欠である。2016年6月に無人ヘリから撮影された画像は事前検討資料として活用された。

9. まとめと今後の展望

無人ヘリ観測グループでは、「安全に」、「火口近傍を観測する」ことを目標として、小型無人ヘリコプターによる観測技術開発を進めつつ、様々な火山で観測を実施してきた。空中磁気測量においては、伊豆大島、三宅島、霧島新燃岳、口永良部島などで繰り返し観測を実施し、地下の温度変化を捉えることに成功した。地震計・GPS 観測に関しては、桜島・霧島・口永良部島においてセンサーを設置し、観測を行っている。特に、口永良部島においては、噴火で失われた地震観測網を再構築し、噴火直前の活動変化や火山活動の終息に伴う地震活動の低下を捉えることができた。画像撮影を各火山で実施し、特に西之島においては、船上からの離発着による島内および火口近傍の高解像度画像を得た。サンプリングに関しては、桜島や口永良部島において多成分ガスサンプリングを実施し、火道内のマグマプロセスに関する知見を得つつある。また、西之島においては採取したスコリアの分析からマグマの組成分析を行った。

2016年からはペイロードや飛行高度が向上した新型無人ヘリの運用が始まっている。無人ヘリの性能が上がったことで、適用火山な火山が増えるとともにこれまで観測機器に課されていた重量制限が緩和されてより高度な観測装置の搭載が可能になる。今後、重量制限の緩和を生かした高機能観測モジュールの開発を進める予定である。

謝辞

無人ヘリによる様々な研究を進める上で、開発の初期段階に地震研の所長裁量経費をいただき、機器開発が大きく進展しました。伊豆大島、三宅島などでの空中磁気探査の実施にあたっては関係自治体の方々の支援をいただきました。2011年の霧島新燃岳の観測は防災科学研究所が主導した緊急研究の中で実施しました。桜島の観測においては鹿児島市に観測準備用の作業スペースを提供していただき、京都大学防災研究所桜島観測所からは桜島の活動状況など様々な情報をいただきました。西之島の観測においては気象庁の啓風丸を使用させていただきました。無人ヘリに関する技術的な点はヤマハから全面的に支援をしていただきました。また観測モジュールの通信に関しNTTドコモに電波状態の調査など様々な技術的アドバイスをいただきました。その他、多くの方々の支援により本研究は進展してきました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

Bares, J. E. and D. S. Wettergreen : Dante II: Technical description, results and lessons learned, Int. J. Robotics Res., 18, 621-649, 1999.

- 後藤章夫・谷口宏充・市原美恵：無人火山探査車 MOVE の開発とその運用課題，日本惑星科学会誌，21, 103-110, 2012.
- Kaneko, T., T. Koyama, A. Yasuda, M. Takeo, T. Yanagisawa, K. Kajiwara, and Y. Honda：Low-altitude remote sensing of volcanoes using an unmanned autonomous helicopter: an example of aeromagnetic observation at Izu-Oshima volcano, Japan, *Int. Jour. Remote Sensing*, **32**, 1491-1504, 2011.
- Kazahaya, R., H. Shinohara, T. Ohminato, T. Kaneko：Airborne measurements of volcanic gas composition during eruption stage at Kuchinoerabujima volcano, Japan, *Earth Planet Space* (査読中).
- 気象庁：無人ヘリコプターによる火口観測，平成12年（2000年）三宅島噴火及び新島・神津島近海の地震活動調査報告，気象庁技術報告，128, pp38-39, 2006.
- 気象庁：三宅島の火山活動解説資料（平成29年11月），2017.
- Koyama, T., T. Kaneko, T. Ohminato, T. Yanagisawa, A. Watanabe, M. Takeo：An aeromagnetic survey of Shinmoe-dake volcano, Kirishima, Japan, 2011 eruption using an unmanned autonomous helicopter, *Earth Planets Space*, **65**, 657-666, 2013.
- Maeno, F., Nakada, S. and Kaneko, T.：Morphological evolution of a new volcanic islet sustained by compound lava flows. *Geology*, **44**, 259-262, doi:10.1130/G37461.1, 2016.
- 前野深，中野俊，吉本充宏，大湊隆雄，渡邊篤志，川上和人，千田智基，武尾実：新火山島の初上陸調査－西之島（東京都小笠原村）－，*地学雑誌*, **126**, N1, 2017.
- 松井宗広：雲仙普賢岳における無人化施工について，*新砂防*, **47**, 51-53, 1994.
- McGonigle, A. J. S., A. Aiuppa, G. Giudice, G. Tamburello, A. J. Hodson, and S. Gurrieri：Unmanned aerial vehicle measurements of volcanic carbon dioxide fluxes, *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L06303, doi:10.1029/2007GL032508, 2008.
- 大湊隆雄，金子隆之，小山崇夫，渡邊篤志，神田径，為栗健：無人ヘリによる口永良部島火口周辺域における地震観測点の再構築、京都大学防災研究所年報，第59号B, pp.76-83, 2016.
- Ohminato, T., T. Kaneko, T. Koyama, A. Watanabe, W. Kanda, T. Tameguri, R. Kazahaya：Observations using an unmanned aerial vehicle in an area in danger of volcanic eruptions at Kuchinoerabu-jima Volcano, southern Kyushu, Japan, *Journal of Natural Disaster Science*, **38**, pp85-104, 2017.
- 下鶴大輔：火山活動モニタリングと火山探査ロボット，地球惑星科学関連学会合同大会予稿集, Av-015, 1999.
- Shinohara, H.：A new technique to estimate volcanic gas composition: Plumemeasurements with a portable multi-sensor system, *J. Volcanol Geotherm Res.*, **143**, 319-333, 2005.
- 鈴木弘人：監視用 UAV RMAX-G0-1, *Technical Review*, ヤマハ発動機, 2005-3, 39, 2005.
- ヤマハ発動機：有珠山周辺泥流対策のための GPS 自律飛行無人ヘリコプターによる観測について，報道発表資料（2000年4月24日発表）
- ヤマハ発動機：ヤマハ自律制御型無人ヘリコプターによる 三宅島・雄山周辺泥流観測について，報道発表資料（2001年2月28日発表）