

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 5 月 23 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26287103

研究課題名(和文) 火口近傍観測による火道内物理プロセスの解明 - 無人ヘリによるアプローチ -

研究課題名(英文) Investigation on the physical process in the volcanic conduit by proximal observations proximal to the volcanic vent - application of unmanned aerial vehicle (UAV) -

研究代表者

大湊 隆雄 (Ohnato, Takao)

東京大学・地震研究所・准教授

研究者番号：70322039

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 5,800,000円

研究成果の概要(和文)：活動的火山において、マグマの上昇経路である火道内の物理プロセスを解明し噴火予測精度を上げることは火山防災上極めて重要である。しかし研究者が火口近傍に近づいて観測を行うことは噴火の危険があるために困難である。そこで、自律型無人ヘリコプター(無人ヘリ)をベースに、空中からの映像撮影や磁場などのデータ収集、地震計などの観測装置の設置、火山灰などの試料採取を遠隔操作で行うことのできる「無人ヘリ火山観測システム」の開発を行った。活発な活動を繰り返す桜島や近年噴火した霧島、口永良部島および小笠原諸島の西之島を主実験場として無人ヘリ観測手法の改良・高度化を行った。

研究成果の概要(英文)：In active volcanoes, it is extremely important for volcanic disaster prevention to increase the accuracy of the eruption forecasting by elucidating the physical processes in the volcanic conduit along which magma ascends from deep reservoir to the ground surface. However, it is difficult for researchers to approach the active volcanic vent and to pursue observations because of the danger of eruptions. Therefore, we developed a volcano observation system based on an autonomous unmanned helicopter. In that system, it is possible to remotely control the image taking from the air, data collection such as magnetic fields, installation of observation devices such as seismographs, sampling of volcanic ash etc. We have improved and advanced the observation method by using active volcanoes, such as Sakurajima, Kirishima, Kuchinoerabujima and Nishinoshima, as the main experiment sites.

研究分野：火山物理学

キーワード：無人ヘリコプター 火山噴火 火口近傍観測 災害軽減 火山性地震 空中磁気 地殻変動 赤外画像

## 1. 研究開始当初の背景

火山噴火や土砂災害、さらには原発事故など、人間が発生源に近づけない災害がしばしば発生する。このような災害では、発生源で起きている現象の把握と理解が事態の推移を予測する上で重要な鍵となる場合が多い。本研究はこの代表的事例である火山噴火を対象とし、無人ヘリコプターを用いる独自の方法により、この火口近傍観測を実現しようとするものである。

噴火はマグマが地下深部から上昇し、地表へ噴出する現象である。この際、上昇に伴う減圧により火道浅部でマグマ中のガス成分が分離する。この分離が効率的であれば静穏な噴出的噴火に、そうでなければ爆発的噴火になる。しかし、火口近傍での観測の困難さが一因となり、マグマの火道浅部上昇の詳細なプロセスと実際の噴火の関係について観測面からの裏付けは十分とは言えない。諏訪之瀬島・桜島等において、火道に蓄積した火山ガスの一部が漏れて火道内が減圧することによって過飽和状態のマグマが発泡を開始し、急膨張から爆発へ発展するモデルが提唱されている。例えば、このようなモデルを念頭に、火道浅部と火口表面を併せて観測し、火道浅部でのマグマの動きを捕捉しつつ、蓄積された火山ガスの放出を注視することで、直前の噴火予測が可能となると考えられる。

このような火口近傍観測の重要性から、かねてより火口近傍へのアプローチが課題となってきた。車両や飛行体に搭乗したとしても、人間が噴火の可能性のある火口近傍に近づくことはきわめて危険であることに変わりはない。このため、地上走行型の無人口ボット(例、Dante II / NASA・カーネギメロン大、MOVE / 東北大学)が開発された。しかし、噴火に際して半径数km程度の立入禁止区域が設定される中、火山の急斜面をよじ登り、地上から火口近傍まで達することは不可能に近い。他方、無人飛行体による観測も試みられているが、空中から観測できる項目に限られ、地震や地殻変動観測等は実現できていなかった。

## 2. 研究の目的

背景で述べたように、火山の火口近傍は観測上の重要地点にもかかわらず、噴火の危険性により観測上の空白域となってきた。本研究は、既存の自律型無人ヘリをベースに、空中からの映像やデータ収集に加え、センサー設置や試料採取を遠隔操作で行える「無人ヘリ火山観測システム」を開発し、火口近傍へ安全かつ自在にアクセスできる方法確立し、火口近傍でのデータを得ることによって、火道内の物理プロセスの解明と噴火予測精度の向上を目指す。収集した火口表面/直下のデータを用い、火道浅部のマグマプロセスの解明とその状態変化の分析を進める。そのために、活発な活動を繰り返す桜島や近年噴

火した霧島、口永良部島、西之島を主たる実験場としてアクセス手法の改良・高度化を進める。

## 3. 研究の方法

### (1) 無人ヘリ観測システムの開発

本研究は、商用の自律型無人ヘリ、ヤマハ RMAX G1 をベースに、空中からのデータ収集に加え、火口近傍での観測機器設置や試料採取を遠隔操作で行うことができる「無人ヘリ火山観測システム」の開発を目指す。このシステムを噴火の多項目観測実施のために機動的に投入することにより、火口近傍の重要なデータの収集が可能となる。RMAX G1 は、最大積載重量が 10kg、行動半径 5km で、位置精度 1m 以下の自律飛行が可能であり、事前に用意する飛行プログラムに応じて自動的に飛行し、目標地点での自律ホバリングや異常発生時の自動帰還機能など、ロボットヘリと呼べるほどの機能を有する。本研究では、ヘリ基地局から無線操作できるウインチを用いた「設置システム」と、地震計・カメラ等のセンサーを組んだ「観測モジュール」の改良・開発を行い、各種観測機器を活動的火山の火口近傍へ設置する。観測モジュールにはデータ伝送装置を組み込み、準リアルタイムで観測データを得る。

これまでの研究で、ウインチ装置と地震計あるいはGPSを組み込んだ観測モジュールを作成し、桜島と霧島新燃岳への設置を行い、観測データの伝送に成功している。他方、RMAX G1 をプラットフォームとして利用した空中磁気観測、映像撮影等を伊豆大島や樽前山で行い、実用度の更なる高度化も進めている。本研究では、設置モジュールの改良および、画像や空振センサーなど新たな観測センサーを組み込んだ火山灰観測モジュール製作等の新規開発も行う。

### (2) 活火山における実証実験

開発したシステムは、学術あるいは防災分野において実用に耐え得るものでなければならぬ。このために、開発したシステムの長期実証実験を行い、開発した装置の改良と機能強化を進める。本研究の重要な目的は、開発したシステムを用いて収集したデータにより、火山の火道浅部で起きているマグマの物理・物質科学的プロセスを解明し、噴火予測に利用することにある。実証実験では、本システムを用いて試料採取を行ったり火口近傍に地震・地殻変動観測モジュールを設置することにより、震源域の動きや地殻変動を捉え、浅部でのマグマの動きの把握を試みる。同時に、空震計を組み込んだ観測モジュールを火口近傍に設置することにより、マグマの動きに対応したガスの放出や爆発現象の観測を行う。得られたデータは、定期的に火山噴火予知連等にも報告し、広く実利用を図る。

#### 4. 研究成果

研究期間3年間の成果を順を追って以下にまとめる。また、最後に、無人機を用いた火山観測の課題について考察する。

(1) 初年度の平成26年度においては、無人ヘリ火山観測システムを構成する「設置システム」と「観測モジュール」の開発・改良を進めた。「設置システム」の主要部であるウインチ装置の耐久性と部品可換性を向上させるために、構成部品における市販品の利用率を減らし、自ら制作した部品の割合を増やした。また、観測モジュールの設置・回収時の操作性向上と時間短縮を目的として、装置全体の軽量化とモータの交換による巻き上げ速度の向上を図った。センサーとデータ収録装置、データ伝送装置、電源装置から構成される「観測モジュール」については、電力の不足とモジュール全体の機械的共振によるノイズの発生という問題点を改善するため、電源部の改善と共振ノイズの低減に重点を置いた地震観測モジュール改良を進めた。センサー及びバッテリーを地面に近い脚部に移し、共振ノイズを低減し、強風による転倒を避けるため、重心が低く、横風に強いモジュールを開発した。

(2) 同じ平成26年度に桜島において火口近傍への地震観測モジュールの設置実験を行った。実験は、気候が安定する10月下旬に実施した。過去に設置した地震計モジュールと空振計モジュールの回収し、地震計を再設置した。また、平成23年に噴火した霧島・新燃岳の山頂付近において空中磁気観測を行い、山頂火口を満たしているマグマが噴火後順調に冷却を続けていることを示す結果を得た。

(3) 平成26年度までに開発した観測モジュールの伝送システムは通信速度不足と大きな消費電力のために、一部のデータを間欠的に送ることしかできず、リアルタイム性が不十分であった。平成27年度には、この欠点を克服するため以下の2つの改造を施した。データ基板を改良し、組み込み型の携帯通信チップを用いることで、低消費電力化と通信の高速化を実現した。低消費電力化した地震計は桜島観測で使用した。上下動記録のみを必要とする観測においては、消費電力の大きい加速度計でなく、電力を消費しないムービングコイル型の速度センサーを使用する。これにより、低消費電力型基板よりも更に消費電力を抑えることができる。必要となる太陽電池パネルの数を減らすことができるため、風にあおられて飛ばされる危険が大幅に減少した。

(4) 平成26年8月に口永良部島でマグマ水蒸気噴火が発生し、山頂付近の観測網が失

われ、活動状態をモニターすることが困難になった。この状態を改善するために平成27年4月に、口永良部島の山頂付近に地震計の設置を行った。また、空中時期測量、画像撮影、ガスサンプリングの多項目観測を実施した。5月29日にふたたびマグマ水蒸気噴火が発生し、4月に設置した観測装置が失われたが、噴火直前の地震活動の変化を捉えることができた。平成27年9月に再度地震計の設置を行うとともに、4月と同じ山頂他項目観測を実施した。その結果、10月以降に火山活動が鎮静化したことを確認することができた。

(5) 平成27年11月には桜島において地震観測モジュールの再設置を行った。前年に設置した地震計モジュールを回収し、新規に開発した低消費電力型地震観測モジュールに置き換えることで、連続観測データを準リアルタイムで得ることが可能になった。

(6) 平成27年度までに開発した観測基板では、通信部分にコピキタスモジュールを用いて低消費電力化と準リアルタイムでのデータ転送が可能となっている。平成27年秋以降、桜島および口永良部島において観測を行っている。平成29年4月現在も安定した観測が継続できており、新たに開発した基板の信頼性が確認された。また、ムービングコイル型センサーの水平動成分を使用するために必要となるジンバルのプロトタイプを作成した。

(7) 小笠原諸島西之島では、平成25年末から噴火を開始し、溶岩流により大きく成長した。西之島噴火は火山島の成長過程の研究にとって極めて貴重な機会であったが、活動中の活発期は火口から6kmの立ち入り禁止域が設定されており、無人ヘリを用いても観測実施は困難であった。平成28年に入り、立ち入り禁止区域が1.5kmに縮小されたことから、平成28年6月に無人ヘリを用いた観測を実施した。立ち入り禁止域のすぐ外側に待機した船から無人ヘリを飛ばし、高解像度の静止画・動画の撮影とスコリアの採取を行った。ヘリコプターが船上から離発着する時の船の揺れをキャンセルする特殊な離発着台や、電波が海面に反射することによる通信への影響を避けるアンテナアレイの導入など、船上離発着では地上における離発着とは異なるノウハウが必要であり、西之島の調査を通じて必要なノウハウが得られた。撮影された高解像度の静止画及び動画からは、西之島の成長に伴い島の表面を覆った溶岩流の複雑な形態の詳細が捉えられ、採取したスコリアサンプルからはマグマ組成の情報が得られた。

(8) 近年、電動の小型ヘリコプター（いわゆるドローン）が国内外の様々な分野で利用

され始めており、火山観測においても画像撮影やガス観測等への応用例が多数報告されている。しかし、電池駆動のドローンは、飛行時間短くしかも運搬可能重量（ペイロード）が限られているため、我々が目標とする火口近傍観測には十分に対応できない。例えば、地震計を火口近傍に設置する場合、5 kg程度の観測装置を吊るした状態で1時間以上連続飛行できること、機体に搭載されたカメラからの画像を用いてリアルタイムで飛行をコントロールできること、などの条件が必須となるが、現状でこれらの条件を同時に満たすことのできる電動駆動ドローンは存在しない。一方、我々が使用しているガソリンエンジン機はこれらの条件を満たしているものの、機体のオペレーションには専門の技術者が3-4名程度必要になることや経費が高額である点から、運航における自由度がドローンよりかなり低い。従って、火山観測での応用を考えた場合、ガソリンエンジンの無人ヘリコプターと電動ドローンのどちらが優れているか、という議論ではなく、局面に応じて両者を有効に使い分けるにはどのようにすべきか、という議論をすべきである。

現行の無人ヘリの最高到達高度は海拔1500-1600m程度であり、2014年に噴火して大きな被害をもたらした御嶽山のように3000mを超える火山には使用できない。また、5 kgというペイロードの制限により、観測装置の軽量化が必要になるが、機器の軽量化は観測精度の低下や観測期間の制限につながる。火山防災における無人ヘリコプターの重要性が広く認知され、将来は更なる高高度・大ペイロードを有する機体の開発が進むことに期待したい。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計2件)

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, Journal of Natural Disaster Science (in press), 査読有, 38, 2017.

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、査読無、59B、2016、pp.76-83

[学会発表](計11件)

小山 崇夫、金子 隆之、大湊 隆雄、渡邊 篤志、繰り返し空中磁気測量による三宅島雄山周辺の磁場変化の検出、

JpGU-AGU Joint Meeting 2017、5月20日-25日、2017、幕張メッセ 国際会議場(千葉県・千葉市)

Ohminato, T., UAV observation of newly formed volcanic island, Nishinoshima, Japan, from a ship, American Geophysical Union 2016 Fall meeting, Dec 12-16, 2016, San Francisco(USA)

Ohminato, T., T. Kaneko, T. Koyama, A. Watanabe, Summit observation at Kuchinoerabu-jima island, Japan, by using an unmanned small helicopter, Cities on Volcanoes 9, Nov 20-25, 2016, Puerto Varas (Chile)

風早 竜之介、篠原 宏志、大湊 隆雄、金子 隆之、口永良部島火山における空中火山ガス組成観測、日本火山学会秋季大会、10月13日 15日、2016、富士吉田市民会館・ふじさんホール(山梨県富士吉田市)

金子 隆之、大湊 隆雄、武尾 実、小山 崇夫、前野 深、安田 敦、中田 節也、渡邊 篤志、高木 朗充、長岡 優、無人ヘリによる西之島の観測(1): 試料採取と4K画像の撮影、日本火山学会秋季大会、10月13日 15日、2016、富士吉田市民会館・ふじさんホール(山梨県・富士吉田市)

安田 敦、金子 隆之、大湊 隆雄、前野 深、中田 節也、外西 奈津美、武尾 実、高木 朗充、無人ヘリによる西ノ島の観測(2): 採取試料の岩石学的特徴、日本火山学会秋季大会、10月13日 15日、2016、富士吉田市民会館・ふじさんホール(山梨県・富士吉田市)

Ohminato, T., T. Kaneko, T. Koyama, A. Watanabe, W. Kanda, T. Tameguri, R. Kazahaya, Observations at

Kuchinoerabu-jima volcano, southern Kyushu, Japan, by using unmanned helicopter, American Geophysical Union 2015 Fall meeting, Dec 14-18, 2015, San Francisco(USA)

大湊 隆雄、金子 隆之、小山 崇夫、渡邊 篤志、神田 径、為栗 健、風早 龍之介、口永良部島における無人ヘリ観測(序報)、日本火山学会秋季大会、9月28日 - 30日、2015、富山大学(富山県・富山市)

小山 崇夫、金子 隆之、大湊 隆雄、渡邊 篤志、武尾 実、柳澤 孝寿、本多 嘉明、2014年霧島新燃岳無人ヘリ空中磁気測量、日本地球惑星科学連合2015年大会、5月24日 - 28日、2015、幕張メッセ 国際会議場(千葉県・千葉市)

小山 崇夫、金子 隆之、大湊 隆雄、田中 伸一、渡邊 篤志、武尾 実、柳澤 孝寿、本多 嘉明、無人ヘリコプターを用いた三宅島雄山における空中磁気測量、日本火山学会秋季大会、11月2日 - 4日、2014、福岡大学(福岡県・福岡市)

Ohminato, T., Seismic observation in the close vicinity of active summit crater of Sakura-jima volcano, Japan, using compact seismic modules installed by using unmanned radio controlled helicopter, Cities in Volcanoes 8, Sep 9-13, 2014, Yogyakarta(Indonesia).

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

大湊 隆雄 (OHMINATO, Takao)  
東京大学・地震研究所・准教授  
研究者番号：7 0 3 2 2 0 3 9

### (2)研究分担者

井口 正人 (IGUCHI, Masato)  
京都大学・防災研究所・教授  
研究者番号：6 0 1 4 4 3 9 1

安田 敦 (YASUDA, Atsushi)  
東京大学・地震研究所・准教授  
研究者番号：7 0 2 2 2 3 5 4

金子 隆之 (KANEKO, Takayuki)  
東京大学・地震研究所・助教  
研究者番号：9 0 2 2 1 8 8 7

### (3)連携研究者

( )

研究者番号：

### (4)研究協力者

( )