

令和 4 年 6 月 15 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01689

研究課題名(和文) 無人航空機による速度可変型貫入観測装置の開発と桜島昭和噴火口直近での実証観測

研究課題名(英文) Development of a penetrator observation system with variable penetration velocity using unmanned aerial vehicle (UAV) and demonstration observations in the vicinity of Sakurajima's Showa Crater

研究代表者

田中 智 (Tanaka, Satoshi)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・教授

研究者番号：30249932

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は立ち入り困難、もしくは不可能とされる噴火活動現場付近に無人航空機から投下貫入させて観測を行うデバイスの開発を行っている。本課題ではこれまでの成果を発展させ、火口付近の土壌にも対応可能なように貫入深度を調整可能なペネトレータ観測システムの開発に成功し実用化をさらに進めることに成功した。さらに活火山の現場での比較的長期間の観測運用にはじめて成功した。本システムによる観測可能時間、データ取得量なども得ることができ、今後の観測計画を具体的な設計するための指針を得ることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで非常に困難とされた、火口直近での火山ガスの観測を可能にし、天候要因に左右されない観測点設置を可能にした点での学術的意義を有する。また、火山災害で定常的な観測点が逸失した場合の緊急設置にも貢献可能で、今後の火山災害時のインフラ開発に貢献した点で社会的意義を有する。

研究成果の概要(英文)：This research is developing a device that can be dropped from an unmanned aerial vehicle into the vicinity of an eruption site, which is considered difficult or impossible to enter, to make observations. In this project, we have succeeded in developing a penetrator observation system with an adjustable penetration depth that can be applied to soil near a crater, and have further advanced its practical application. In addition, we have succeeded for the first time in operating a relatively long-term observation system at the site of an active volcano. We were also able to obtain information on the time available for observation and the amount of data acquired by this system, and obtained guidelines for designing a concrete observation plan for the future.

研究分野：惑星科学、防災科学

キーワード：ペネトレータ 火山噴火モニタ 無人航空機 火山ガス観測

1. 研究開始当初の背景

日本学術審議会(測地学分科科会)において平成29年「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画に関する外部評価報告書」が発行された。本報告書では災害の軽減に貢献することを意識した研究の推進が十分とは言えないと評価され、観測機器の高精度化、信頼性の向上のための開発の促進の必要性が提言されている。火山災害の軽減に貢献し、精度の高い観測を行う本質的な解決方法の一つは、火山活動が生じている直近現場において活動状況を継続的に把握することである。特に、噴出ガスの化学組成、火口付近の地殻変動や温度、磁場などを火口に極力近い場所でデータを取得することが観測データを質的に向上させることに寄与する。

我々は、これまでに月の内部構造の解明を目指して地震計と熱流量計を搭載したペネトレータと呼ばれる高速貫入型観測装置を開発してきた。ペネトレータは平成22年度にはすでに開発が完了しており、今後の月惑星探査機への搭載を検討中である。このスピンオフとしてペネトレータの地球での利用についてもこれまでに雲仙岳や南極域において開発実績がある。我々が先に行った基盤研究(A) (「無人機を用いた落下貫入型火山観測プローブの開発および西之島新島での実証観測」(15H01793))では100km以上離れた遠隔地からでも無人観測点を設置できる技術の開発に成功した。しかしながら、実用化に到るまでには解決すべき課題残している状況であった。本課題においてはこれらの課題を克服し、さらなる実用化にむけた基礎開発を行うのが本研究当初の背景である。

2. 研究の目的

火山活動状況を把握する手法として、本課題が提案する観測手法(火山ガス、磁場、測位など)は噴火メカニズムと因果関係が深く噴火予知において有用である。これらの観測データが火山噴火口から極力近接して得ること、それを継続して行うことが本質的に重要である。本提案課題は、立ち入り困難、もしくは不可能とされる噴火活動現場付近に直接アクセスし、長期間連続した定点観測データを取得することを可能にするインフラの開発を目的とする。これにより火山噴火メカニズムの解明が飛躍的に進むだけでなく、確度の高い予知情報につながると期待される。なお、本課題は上述したように本課題は平成27-29年度で実施した基盤研究(A)「無人機を用いた落下貫入型火山観測プローブの開発および西之島新島での実証観測」(15H01793)に継続して行う課題である。この基盤研究(A)(以下このことを「先行研究」と呼ぶことにする)では無人航空機に搭載した火山地域のペネトレータの実証試験を成功させた。この成果をベースにし、さらに火口付近に確実にかつ高い信頼性で観測点を設置、観測を可能にすることが本研究課題の目的である。

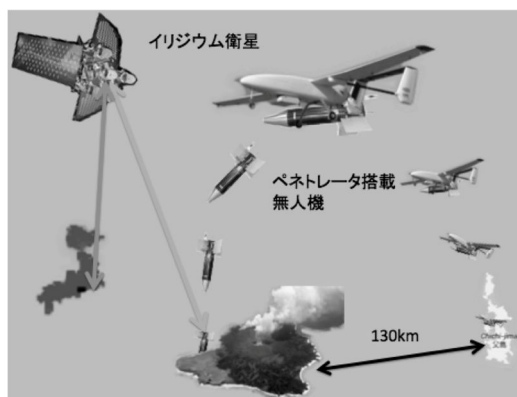


図1：無人機を用いた火山観測システムのイメージ図

3. 研究の方法

本研究では、観測機器である投下型貫入プローブ(ペネトレータ)の開発と無人機からプローブを投下するシステムの開発に大別される。「先行研究」においていずれも所定の成果が得られているが、本課題ではさらなる実用化にむけた基礎開発を行う。

(1) 観測プローブ(ペネトレータ)の貫入深度をコントロール可能な装置の開発

無人航空機に搭載したペネトレータを対地高度400-500mから投下した時に地面に貫入する速度は秒速70-100mに達する。この条件で火山地帯の比較的硬い地盤に対しても十分に貫入し設置可能であることが実証された。これに対し噴火口付近は火山灰、噴石などが混在し、想定よりも土壌が柔らかいことがわかった。ペネトレータが深く貫入しすぎて通信アンテナが地中に埋設された状態では通信回線確立に障害をきたすため、貫入深度を適切にコントロールする必要がある。これを実現するために観測プローブが必要以上の深度に貫入しないしくみを開発する。具体的には、投下後にパラシュートを展開して貫入時の速度を低減することやペネトレータ自体に抵抗物を装着し、高速で貫入しても適切な深度で停止する機構などである。

(2) 観測機搭載用火山ガスセンサーの開発

これまでに地震観測を中心としたセンサーの開発を行ってきたが、連携協力者などとの議論により、火口付近での火山ガスの直接観測が有用であるとの結論に至った。火口から離れると風などの気象的な要因でかならずしも有用な定量データが得られないからである。我々は「先行研究」において、市販センサーを試験したがペネトレータ貫入時の3000G程度の衝撃で性能が大きく

変化することがわかっており、課題として残された。本課題では貫入による衝撃に十分耐えうるガス検知センサー（ SO_2 、 H_2S 、 CO_2 ）を開発する。

(3) ペネトレータ搭載観測制御装置（コンピュータ）の改良

「先行研究」では機能的、性能、および消費電力の観点、そしてペネトレータ特有の耐衝撃性の観点から TI 社の MSP432 を用いて観測制御システムを開発した。性能的、機能的には十分な仕様を有するマイコンであるが、開発が困難であるために、十分な機能を搭載することができなかった。マイコンは近年需要が非常に高いために市場でも開発が進められている。本課題では開発の容易さも考慮した制御コンピュータの見直しを行う。

(4) 新たな投下装置の開発

有翼の無人航空機（UAV）による投下システムは「先行研究」において開発を完了した（図 2 参照）。UAV は翼長 5m におよぶ大型の機体であり、高価かつ我々自身が操縦を行うのは困難である（「先行研究」では無人航空機メーカーに請負）。このために試験実施にコストがかかる。さらに、離着陸のためにある程度広い場所（学校のグラウンド程度）を要する。この課題を克服するために、我々自体が操縦できる機体を開発する。具体的にはペネトレータ搭載および投下試験が可能な回転翼機体（ドローン）の設計開発を行う。



図 2：ペネトレータを搭載した有翼無人航空機

(5) 火山地域でのフィールド実地試験

本研究の開発を総括的に達成したことを確認するために活火山地域におけるフィールドにおいてペネトレータの投下試験および貫入設置後の観測を行う

4. 研究成果

(1) 貫入深度を制御する装置の開発

技術的な検討を行った結果、ペネトレータ機体に抵抗体を装着することによって貫入深度を緩和（制御）する方式を採用した。図 3 にペネトレータに実装した時の外観を示す。貫入時にはステム部分が屈曲して抵抗となり、貫入深度を低減させるメカニズムである。図 4 に対地高度 150m から投下実験した時の状況を示す。貫入時にステム部分が屈曲、破壊して抵抗力として機能しており、通信用アンテナが装着されるペネトレータ後端部分が表面に十分露出させることを可能にした。

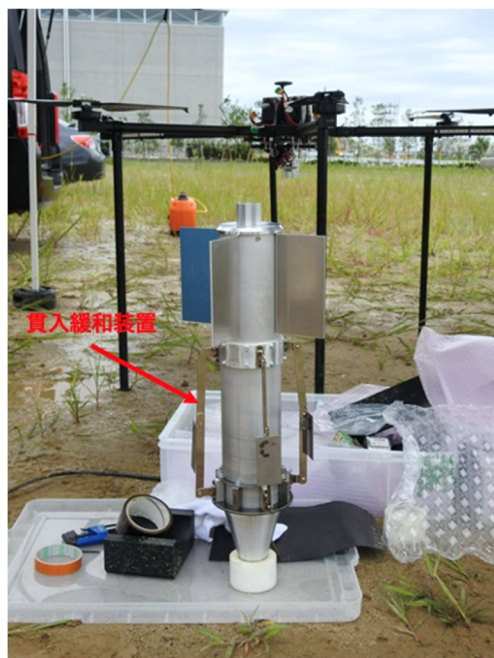


図 3：貫入緩和装置を装着したペネトレータ機体



図 4：貫入緩和装置を用いてペネトレータ投下試験を行った時の状況

(2) 火山ガス検知用センサの開発

火山ガス（ SO_2 、 H_2S ）は市販品である光明理化学工業社製の定電位電解式センサー KHS-5P（ H_2S ）および KTS-512（ SO_2 ）を「先行研究」で試用したが、貫入衝撃で数十％程度の性能変化が見られた。そこで原理的には同じだが、ガス検知部分の構造強度を高くしたものを開発した。図 5 に外観を示す。3000G 程度の衝撃試験を実施した結果、性能変化が認められないことを確認した。

なお、 CO_2 センサーは市販品である、FIGARO 社製 CDM7160 が衝撃振動に対して十分に耐性を有することが確認されたので付加的な加工をすることなく使用した。

(3)観測制御システムの開発

観測制御コンピュータとしては、開発が容易なラズベリーパイ（ZERO）を採用した。消費電力の観点からはTI-MSP432には劣るが開発環境が格段に容易になり、観測制御をコマンド制御（イリジウム通信を通して制御コマンドを発行し、観測シーケンスを制御する）の実装にも成功した。またトータル消費電力を低減するためにRTCを搭載したプログラマブルスイッチ回路を搭載し、観測を行わない期間CPUをOFFする機能を追加することで消費電力の問題を解決した。

(4) ペネトレータ投下用ドローンの開発

ペネトレータ投下試験を容易にかつ低コストで行うことができ、さらに、火口近傍付近まで立ち入ることができる状況（目視範囲内程度）で実地での投下実験を可能にするために、回転翼式のドローンを開発した。図6に外観を示す。本機体は翼長2200mm、高さ900mm程度の比較的大型のドローンであり、約10kgのペネトレータを2-3kmの距離を搬送することが可能である。対地高度は400m以上実現可能で、「先行研究」で開発済みの固定翼からの投下システムと遜色がない。

また、ドローンはあらかじめ飛行ルートを緯度経度情報でプログラムすることが可能であり、目的地に性格に到達することができる。目的地到着後は操縦者側のスイッチで投下させることができる。投下地点は目標地点に対して2-3m程度の精度であることを確認した。

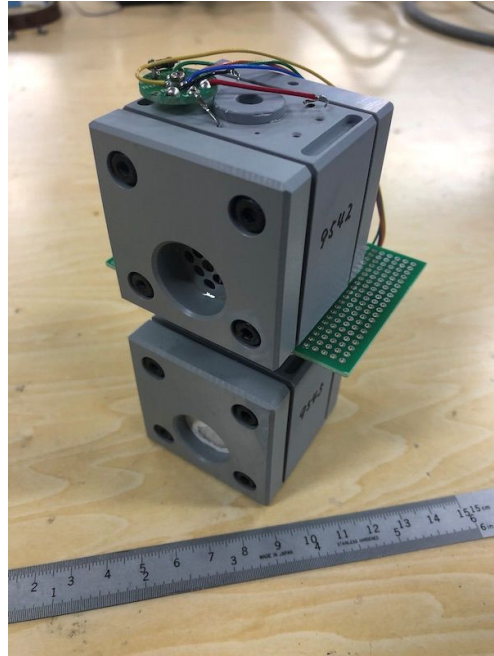


図5：ガス検知センサー（SO₂およびH₂S）



図6：ペネトレータを搭載した回転翼ドローン



図7：ペネトレータ投下用ドローンからペネトレータを切り離した瞬間（対地高度150m）

(5)火山地域でのフィールド実地試験

上記(1)-(4)で得られた成果、貫入緩和装置、ガスセンサー、制御装置の改良、そして投下用ドローンの開発を終え、これらの達成状況を総括的に確認するために活火山での実地試験を計画した。実地試験場所としては開発したドローンが実地検証できることと、「先行研究」で課題を残した部分が適切に対処されていることを確認する目的として当初計画した桜島から鹿児島県諏訪之瀬島に変更した。

しかしながら、COVID-19の影響で実地の試験が困難になり、約1ヶ年研究期間を延長して試験実施できる機会を伺った。2022年8月には諏訪之瀬島への渡航は可能になったものの火山活動が活発化して警戒レベルが3に引き上げられたために試験実施遂行が困難になった。火山の静穏化の機会を待ったが、結果的には活動状況は変わらず、実地での投下試験を断念せざるを得ない状況となった。

この代替試験として、神奈川県箱根町大湧谷での試験観測を実施した。観光地であるためにドローンによる投下試験は許容されなかったが、大湧谷に設置されている定点観測地点近傍にペネトレータを設置して2022年2月より約2ヶ月にわたる継続観測を行うことができた。図8に現地に設置されたペネトレータの状況を、図9にイリジウム通信により伝送されてきたペネトレータが観測したガス濃度データ例を示す。本観測実施中に、観測時間間隔や観測項目を適宜変更する運用なども試験することで総合的な性能を確認した。

これらのほか CO₂、気象データ（気温、湿度、気圧）も良好に取得されており、理学的な知見から相関関係などを詳細に解析する予定である。



図 8：神奈川県箱根町大湧谷に設置したペネトレータ観測装置

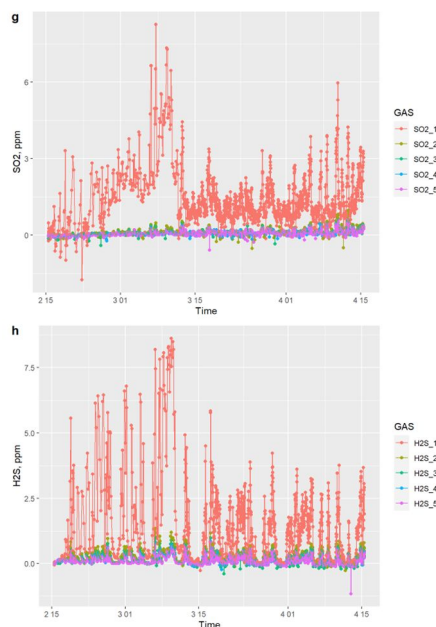


図 9：神奈川県箱根町大湧谷で観測した SO₂、H₂S プロファイル

(6)まとめ

本研究全体をまとめて以下に示す成果が得られた；

「先行研究」での課題（貫入深度の課題、センサーの耐衝撃性の課題）を概ね克服することができ、災害地域（ここでは火山地域）に観測装置を設置するペネトレータ観測システムの実用化をさらに進めることに成功した。

可搬型で比較的容易に操縦可能なペネトレータ投下用ドローンの開発に成功した。今後の開発試験を容易かつ低コスト化を実現しただけでなく、比較的近傍でも立ち入りが困難な場合（たとえば火口のカルデラ外輪までは立ち入ることが可能な場合など）では実地の観測装置の投下にも供することが可能である。

活火山の現場での比較的長期間の観測運用にはじめて成功した。本システムによる観測可能時間、データ取得量なども得ることができ、今後の観測計画を具体的な設計するための指針を得ることができた。

なお、COV-19 の影響で、最終的な確認試験の変更を余儀なくされ、かつ実施時期が大幅に遅れた。さらに成果発表の機会も著しく損なわれた。今後、試験結果を早急に分析し、関連学会や論文発表を通して成果を順次報告する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 田中智、白井慶、白石浩章、山田哲哉、早川雅彦、後藤健、山田竜平、村上英記、佐伯和人、井口正人
2. 発表標題 火山火口投下貫入型観測システムの開発
3. 学会等名 日本火山学会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	山田 哲哉 (Yamada Tetsuya) (10280554)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・准教授 (82645)	
研究分担者	白石 浩章 (Shiraishi Hiroaki) (10353418)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教 (82645)	
研究分担者	佐伯 和人 (Saiki Kazuto) (50292363)	大阪大学・理学研究科・准教授 (14401)	
研究分担者	村上 英記 (Murakami Hideki) (10166259)	高知大学・教育研究部自然科学系理工学部門・教授 (16401)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	後藤 健 (Goto Ken) (40300701)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・教授 (82645)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	井口 正人 (Iguchi Masato) (60144391)	京都大学・防災研究所火山活動研究センター・教授 (14301)	
連携研究者	篠原 宏志 (Shinohara Hiroshi) (80357194)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・活断層火山研究部門・主席研究員 (82626)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関