

平成 30 年 6 月 18 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H01793

研究課題名(和文)無人機を用いた落下貫入型火山活動観測プローブの開発および西ノ島新島での実証観測

研究課題名(英文)Development of penetrator probe for volcano monitoring deployed from unmanned aerial vehicle

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・准教授

研究者番号：30249932

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 29,600,000円

研究成果の概要(和文)：我々は火山観測機器を100km以上離れた場所から無人航空機で搬送し、数百メートル上空から投下して地中に貫入させ後、数ヶ月以上観測できるシステムを開発した。地面に貫入する際の衝撃に十分耐えられる地震、温度、磁場、測地計測が可能な観測プローブ(ペネトレータ)および、無人航空機から投下して目標地点の半径20m以内に設置できる投下システムを確立した。また、鹿児島県諏訪之瀬島噴火口付近にて投下試験を行い、活火山の現場での実用性を示した。本研究の成果により、火山噴火が発生した直後、立ち入り不可能な噴火口近傍場所などに機動的でかつ安全に観測点を設置でき、火山活動の正確な把握を可能にした。

研究成果の概要(英文)：Our goal is to develop supplemental method that will allow to monitor volcano activities considering both volcanic surveillance and safety concerns capable to be deployed from an unmanned aerial vehicle (UAV). To achieve this goal, we developed a penetrator probe for monitoring the volcanic activity. The probe is designed to remotely operate for prolonged period of time (more than 3 months) in remote, acquiring data after penetrating into the ground dropped from by a fixed-wing UAV in a free-fall manner. The probe equips geophysical/geochemical instrumentation (e.g., seismometer, magnetometer and so on). The UAV is fixed-wing airplane, capable in making a round-trip to a distant up to 100 km autonomously. We succeeded to develop the penetrator probe which will withstand the impact shock (speed to ground: 90 m/sec) through actual drop experiments. And we succeeded to demonstrate this system by deploying this penetrator probe to Suwanose-jima Volcano, Ryukyu Islands.

研究分野：惑星科学

キーワード：ペネトレータ 無人航空機 火山観測 防災 地震観測 磁場観測

1. 研究開始当初の背景

日本学術審議会（測地学分科会）において平成 25 年「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究の推進」について審議された。これまでの火山噴火予知計画に基づき地震の発生予測につながる地震や火山現象に関する理解が一層深化している。しかし現状では、噴火の規模や様式、活動推移の予測に成功するまでには、火山噴火現象の理解は進んでいない。この問題を解決するための「中長期的な展望」の一つに、「地震や火山噴火の発生直後に、地震動や津波、火砕流や降灰、溶岩流などを予測することにより避難に役立てることが挙げられている。これを着実に遂行するためには、発生直後における活動状況を把握することが非常に重要である。近年において国内では無人機等を用いた上空からのリモートセンシング調査技術の開発が進められており、「活動状況を外から見ること」については迅速な状況把握が可能になりつつある。これは海外においても同様の状況で、イギリスにおいて無人機による飛行中のガス採集から火山噴火予知が試みられている。一方、「活動状況を内から見ること」、つまり地震や磁場、測地観測などについては、日本が先進的であり、無人ヘリコプターを用いた観測装置の設置研究が進められている。しかし、この方法では有人の基地局を観測点から 5km 内に設置することが必要であること、ヘリコプターの飛行条件は気象条件に対してロバストでないことから必ずしも迅速性、機動性に富んでいるとは言えない。活動火山内部の調査を迅速かつ遠距離から実施する手段の獲得は上記の「中長期的な展望」を実現するためにも必須かつ緊急の課題である。我々は、これまで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を開発してきた（参考論文）。ペネトレータは平成 22 年度に開発が完了し、今後の月探査機への搭載を提案中である。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において開発実績があるが、有人ヘリコプターからの投下であり、有人での立ち入り区域制約があること、データ通信のために通信中継局を設置しなければならないことなどの理由から実用的なシステムにまでは発展させるには至っていなかった。しかしながら、近年の無人航空機、および衛星通信などの通信技術の進展によりこれらの問題点を解決すべく、「遠距離から迅速に火山災害地域に観測装置を設置するシステム」の開発可能性が高くなってきた。これらの社会的ニーズと技術的進展を背景として本研究開発を実施した。

2. 研究の目的

本研究では、地震、温度、磁場、測地（GPS）観測などを 100km 程度離れた場所から無人飛行機で搬送し、数ヶ月以上観測可能な投下型観測プローブ（ペネトレータ）を開発する。こ

れにより火山活動状況把握など防災上緊急に必要な時に迅速、機動的でかつ安全に観測できるシステムを確立することが目的である。観測プローブは月探査用に開発した「ペネトレータ」技術をベースにして小型軽量（機体全体の最大重量 10kg 程度）化、そして搭載機器のモジュール化による部品交換および再利用を可能にすることで実用に資するものを完成させる。さらに、現在でも周辺に立ち入ることができない火山地域への設置をし、活動状況の把握や今後の活動予測に関するデータを得ることで本課題の有用性を実証することを目的とする。

本研究で達成するシステムの概要を図 1 に示す。

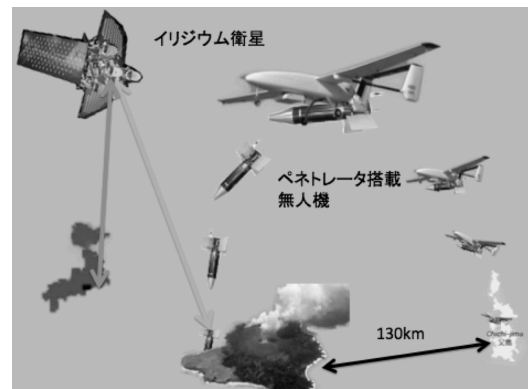


図 1：無人機を用いた火山観測システムのイメージ図

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。

(1) 観測プローブ（ペネトレータ）の開発

宇宙科学研究所が 1980 年代から開発を行ってきた「月ペネトレータ」と呼ばれる、探査機から投下する高速貫入型観測プローブの成果をベースにして本研究開発を行った。搭載センサーには、火山火口付近の観測として重要な、地震計、音波計、磁力計、火山ガス分析を選定した。技術上の最重要ポイントはプローブが地面に貫入する時（秒速約 90m 程度）に受ける 3000G 程度の衝撃に対して、観測センサーや機器、電源等が機能、性能上十分耐えることができる搭載機器を開発することである。これまでの開発の経験と知識を活かしてセンサーや搭載機器の設計、製作と検証実験を行った。具体的には衝撃耐性を有する機器の選定（設計、製作）し、予備的な衝撃試験（落下試験）を行いスクリーニングする。その後、無人航空機からの投下試験を実施し、試験後（衝撃印加後）の機器性能調査によって搭載性の確認を行った。

(2) 無人航空機による観測プローブ投下システムの開発

搭載センサーや必要な機器を搭載したペネトレータの重量を 10kg 程度と概算し、その条件で 100km 以上航行可能であること、GPS を用いた航法誘導が確立しており、任意の地点上空まで到達できる無人航行システムを有することを前提とした。技術開発上の課題は無人航空機にペネトレータを安全に搭載して飛行して目標設置地点まで運搬すること、設置地点付近に高い精度(目標としては 10-20m 程度)で貫入させるための投下シーケンスを確立することである。搭載装置については上述したペネトレータを無人航空機胴体下部に取り付けるランチャーを設計製作し、不意に落下しないための安全装置を検討した。また、投下シーケンスの確立については、航空機からの落下試験を通して落下タイミングと落下地点の関係について気象条件(風速、風向)を加味した上で確立し、地上からの無線司令によって適切なタイミングで投下させるシステムを構築した。

(3) 無人航空機を用いたテスト飛行およびペネトレータ投下試験

ペネトレータおよび投下システムの開発を確認するための試験を北海道茅部郡鹿部町の鹿部飛行場、および静岡県静岡市の三保飛行場にて行った。飛行場周辺を周回飛行させて、搭載性の確認を行い、飛行場敷地内に投下させて、落下タイミングの妥当性、落下タイミングと設置地点の位置関係の情報取得、落下高度とペネトレータ貫入状況の情報取得を行った。試験用ペネトレータに姿勢モニターを搭載し、投下から貫入に至るまでのダイナミクス分析用のデータも取得した。

また、センサーや通信機など搭載して貫入させることで実際の衝撃を印加させた後、性能を評価し、実搭載性の確認を行った。

(4) 火山地域でのフィールド実地試験

本研究の最終的な確認、および科学データの取得を目的として活火山地域におけるフィールドで実際にペネトレータの投下試験を行った。本研究提案時においては西之島新島を想定していたが、本試験実施時においては活動がほぼ停止していたこと、その状況下で科学的成果のあるデータ取得が困難になったこと、世界遺産に指定されている地域に人工物を設置することをできるだけ避けるべきという点を考慮したこと、さらに、西之島新島では機器の設置状況確認が困難であり技術確立の検証できないことなどを鑑み、活火山として定期的に活動を続けており、アクセシビリティも比較的良好な鹿児島県鹿児島郡十島村の諏訪之瀬島に変更した。諏訪之瀬島には臨時飛行場が存在しており、無人航空機の発着も島内から可能である点も、観測システムの確認の目的においては大きなメリットである。

4. 研究成果

(1) 観測センサーの選定と耐衝撃性確認

火山観測モニターのために選定したセンサーについて、予備的な衝撃試験として約 1m から地面への落下試験を実施し、約 3000G の衝撃(ただし継続時間は 0.2msec 程度)を加えてスクリーニングを行った。この試験で問題のない機器については無人航空機に搭載して上空から落下、貫入させた後に、性能試験を実施することで実搭載性の判定を行った。

特に我々が独自に開発を行ったのは短周期地震計(図 2)と設置後の軸調整のための回転機構(ジンバル)(図 3)である。月探査用ペネトレータ開発およびこれらは雲仙普賢岳用に開発した地震計測システムをベースに再設計して小型軽量化を実現した。実機には上下動地震計 1 成分を 2 軸駆動パッシブ動作ジンバルに搭載する。貫入前の状態ではロックピンでジンバルが固定され、貫入の衝撃で外れることにより自由回転する仕組みである。また、ジンバル上部にシリコンオイルの貯蔵タンクを設け、衝撃でジンバル内に注入されることで、ダンパーとして機能する。衝撃前後での変化は誤差の範囲内で変化しないことを確認した。



図 2: 短周期地震計(上下動)の外観。直径 50mm。固有周波数は約 3 Hz

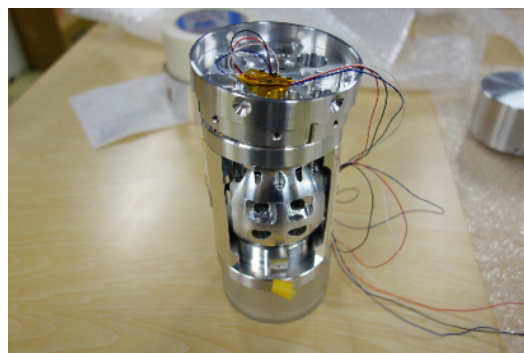


図 3: 地震計回転機構外観

その他の搭載センサーについては、センサ性能、搭載可能な大きさ(重量)、構造的な検討で耐衝撃性が見込まれるかどうかを検討し、市販品から選定した。選定した上で上述の衝

撃試験を実施し、前後での性能比較を行って搭載可能性を判断した。選定したセンサーは下記の通り：

- a) MEMS 短周期地震計：AKASHI 社製 V407
- b) 磁力センサー：ハウエル社製 HMR2300
- c) 火山ガス：明理化学工業社製の定電位電解式センサーKHS-5P(H₂S)およびKTS-512(SO₂)
- d) 低周波音波センサー（マイクロフォン）PCB 社製 377A12+426A07（プリアンプ）
- e) 貫入時の衝撃を計測用加速度センサー：endeveco 社製 7270
- f) 傾斜センサー：Colibrys-TS9001

(2) バスシステム

センサーのデータ処理装置、通信装置、電源装置、電源が「バスシステム」に相当する。これらについてもセンサーと同様、予備的な衝撃試験を経て上空からの貫入試験後の性能調査を行って搭載性を判断した。衝撃耐性の低いと考えられる部品については耐衝撃性が確認されている部品に交換するなどの対策を行った。データ収集システムには ARM コンピュータを搭載することで、多様なセンサー出力インターフェースと柔軟なデータ取得方法ができるように対応し、データの送受信はイーサネット通信（ショートバースト）を用いることで世界中の至る所で通信できるのが特徴である。また、電源としては電流密度の高いリチウム電池（一次電池）を搭載して長期観測（数か月以上）を可能にした。

(3) 耐衝撃構造と機体のアセンブリ

貫入時の耐衝撃性を保証する方法として、月ペネトレータ開発では搭載機器を基本的に硬質の樹脂でモールドする手法を採用してきた。本研究においても原則としては同様にエポキシ樹脂でモールドした。貫入速度が今回の場合より数倍高速（300m/s）である月ペネトレータの場合はこれらの機器全体をさらにモールドした上で、構体の側面へも接着することで衝撃荷重を構体に流す設計にしているが、上空からの投下で受ける衝撃レベルでは、機器間および側面接着をしなくても衝撃耐性が保証されることを実験結果から得た。このために、ブロック間の交換が容易にでき、使用目的や必要な観測に応じて搭載機器を変更してアセンブリ可能にすることができた。完成したプローブの外観を図4に示す。

(4) ペネトレータ投下システムの開発

無人航空機はフジインバック社が保有する機体（W2A 型など）を使用した。本機は翼長さが約5m、胴体長3m程度のプロペラ機である。可搬性もあり、分解してライトバン程度に収納できる。また、安全のために補助プロペラと不測の事態に備えてパラシュートを装備し、万が一墜落した場合においても高速で地面に激突しないなどの対策が施されている。機体



図4：投下貫入型ペネトレータ観測プローブ（直径10cm 全長60cm）

にGPSを搭載し、地上コントローラーからの設定で目的地まで自動航行できるシステムを持っており、父島から西之島新島の往復実績を有している。

本機体の胴体下部にペネトレータ取り付けランチャーを設計、製作した。取り付けに際しては、ケブラー繊維を用いて2重に固定し、不意に繊維が外れ（切れ）た場合においても観測プローブが落下しないように安全策をとった。ペネトレータをランチャーに装着させた状況を図5に示す。



図5：ペネトレータを搭載した無人航空機

(5) テストフィールドでのペネトレータ投下試験

本研究では、ペネトレータ観測プローブと投下システムの開発進捗を鑑み、2015年から2017年に3期にかけて投下試験を実施した。各期における試験概要と成果を示す、

① 第1期：2015年8月20-21、9月15-17（北海道鹿部飛行場）

およそ1/2サイズのペネトレータを用いて無人航空機へのプローブ搭載性の確認、投下タイミングとペネトレータ設置位置の情報を取得した。この試験で搭載ランチャーの妥当性が確認され、投下タイミングと設置位置、風向風速の関係を定式化することで、投下タイミングを決定した。

② 第2期：2016年9月15-17日

(北海道鹿部飛行場)

実搭載機サイズのペネトレータを搭載し、投下試験を実施した。ペネトレータにはセンサー、データ取得装置、通信装置などを搭載し、投下貫入での衝撃試験を実施した。搭載機器の機能性能試験を実施した結果、搭載予定の機器に問題ないことが確認された。

③ 第3期：2017年6月10-11日, 9月25日
(計3機) (静岡県三保飛行場)

火山地域での実地試験前の最終確認試験としての位置づけでの投下試験を実施した。通信機器を動作させて貫入後にデータ通信が可能なることを確認し、実地フィールド試験の遂行を進めることとした。

(6) 活火山地域 (鹿児島県諏訪之瀬島) での
フィールド実地試験 (2017年10月3-10日)
(4機投下試験実施)

設置位置を確認するための投下試験機体2機 (これには通信機とGPSを搭載) と科学観測装置を搭載した科学観測用機体2機、合計4機の投下試験を実施した。

テスト機体は2機体とも回収することができた。この結果から、実際に火山フィールドにおいても目標設置位置に対する誤差は20m程度であること、設置地点に貫入して固定されていることが確認された。



図6：諏訪之瀬島火口近傍に貫入させてペネトレータプローブ (テスト機)

科学観測用機体としてはガス-磁力観測機体(S1)と地震観測機体(S2)を製作した。S1機については人が立ち入り不可能な火口直近を目標とした。投下後データ通信が取れない状況となった。投下地点付近から目視にて探索したが、機体を見出すことができなかった。データ不通状況になった原因は明確ではないが、火口付近の地盤が想定よりも柔らかく、ペネトレータが貫入しすぎて地中に埋設したためではないかと推定している。一方、S2機体については、衛星回線でデータ取得に成功したが、貫入設定目標地点から約70m離れており、傾斜データからは横転していると推定

され、地震データは取得できなかった。本機体の投下時は非常に強い追い風条件であり、想定外に投下位置がずれたと思われる。本機については、回収可能な地点であるために、今後機体を回収して状況を把握し、科学観測を試みる予定である。

(7) 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と考えている：

- ① 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開発に成功した。本研究を通して、地震、音波、磁力、ガス成分定量観測の開発に成功した。さらにデータ取得装置、データ通信装置の開発についても成功し、実用に資するレベルで開発に成功した。
- ② 活火山地域においても無人航空機を飛行させ、概ね目標位置にペネトレータ観測装置を貫入させることに成功した。貫入後も正常に動作することを確認できた。このことから、冒頭に述べた「遠距離から迅速に火山災害地域に観測装置を設置するシステム」の開発に成功した。無人航空機を用いることにより、数十~100km以上離れた場所から災害場所へのアクセスも可能であり、将来の災害対策 (例えば、噴火などで観測点が消失した場合の臨時観測など) に威力を発揮できる。
- ③ 本システムを応用することにより、火山災害だけでなく、緊急に設置を要する観測、例えば、地震、地滑り、雪崩などの災害予測、防止にも可能である。

また、本研究を通して、以下に示す課題を見出した：

- ① 火口付近などは予測できない地盤状態であり、今回の投下システムでは適切に設置できない可能性がある。これに対応するために、設置時に地中深くに貫入しない仕組みが必要と考えられる。
- ② 開発した搭載センサーにおいて衝撃対して性能が変化するもの (ガスセンサー) が見出された。火山観測としては非常に重要性が高く、これらについての耐衝撃性を保証する対策が必要である。
- ③ 予備試験を通じて、投下タイミングと設置地点の関係は、実際のフィールドにおいても概ね妥当であることが確かめられたが、風速や風向が大きい (おそらく15m/s以上) の場合はさらなる補正が必要である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者は下線)

[雑誌論文] (計0件)

[学会発表] (計6件)

- ① 石原吉明、白石浩章、白井慶、早川雅彦、水野貴秀、後藤健、尾崎正伸、山田和彦、田中智、山田竜平、及川純、

村上英記、無人航空機から投下させる貫入プローブ(ペネトレータ)を用いた火山島観測実験、日本地震学会秋季講演会、かごしま県民交流センター、鹿児島市、2017年10月25日-27日

- ② 白石浩章、白井慶、石原吉明、早川雅彦、水野貴秀、後藤健、尾崎正伸、山田和彦、田中智、山田竜平、及川純、村上英記、無人航空機を用いた投下型プローブの火山島観測実験、日本火山学会秋季大会、熊本大学、熊本県熊本市、2017年9月21日-24日
- ③ K. Shirai, H. Shiraishi, S. Tanaka, H. Murakami, J. Oikawa, Y. Ishihara, M. Hayakawa, T. Mizuno, K. Goto, M. Ozaki, K. Yamada, R. Yamada, Development of penetrator probe for volcano monitoring deployed from unmanned aerial vehicle, International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior, Portland state university, Portland Oregon USA, 2017
- ④ 白石浩章、白井慶、石原吉明、早川雅彦、水野貴秀、後藤健、尾崎正伸、山田和彦、田中智、山田竜平、及川純、村上英記、無人航空機を用いた投下型火山観測プローブの開発について、日本火山学会秋季大会、富士吉田市民会館、山梨県富士吉田市、2016年10月12日-16日
- ⑤ 石原吉明、田中智、白石浩章、白井慶、後藤健、早川雅彦、尾崎正伸、水野貴秀、山田和彦、村上英記、山田竜平、及川純、無人航空機から投下させる貫入プローブ(ペネトレータ)による観測システムの開発、日本地震学会秋季講演会、名古屋市国際会議場、愛知県名古屋市、2016年10月5日-7日
- ⑥ 田中智、白石浩章、白井慶、石原吉明、後藤健、早川雅彦、尾崎正伸、水野貴秀、山田和彦、村上英記、山田竜平、及川純、UAVから投下させる貫入プローブ(ペネトレータ)による観測システムの開発、日本地球惑星科学連合大会2015年大会、幕張メッセ(千葉県幕張)、2016年5月22日-26日

[図書] (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 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・准教授

研究者番号：30249932

(2) 研究分担者

村上英記 (MURAKAMI, Hideki)

高知大学・教育研究部自然科学系理学部門・
教授

研究者番号：10166259

白石浩章 (SHIRAIISHI, Hiroaki)

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

研究者番号：10353418

及川 純 (OIKAWA, Jun)

東京大学・地震研究所・助教

研究者番号：40262084

後藤 健 (GOTO, Ken)

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

研究者番号：40300701

水野貴秀 (MIZUNO, Takahide)

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

研究者番号：50270442

尾崎正伸 (OZAKI, Masanobu)

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

研究者番号：90300699

(3) 連携研究者

早川 基 (HAYAKAWA, Hajime)

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：90167594

山田 功夫 (YAMADA, Isao)

中部大学・共通教育部・教授

研究者番号：60022670

早川雅彦 (HAYAKAWA, Masahiko)

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

研究者番号：40228557

(4) 研究協力者

白井慶 (SHIRAI, Kei)

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・招聘研究員