

火山ペネトレーターの開発について

村上英記（高知大学）、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（宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所）、
山田竜平（会津大学）、及川 純（東京大学）、山崎 明（気象庁）

Development of Penetrator Probe for Observation of Volcanic Activity

Hideki Murakami¹, Hiroaki Shiraishi², Kei Shirai², Yoshiaki Ishihara², Masahiko Hayakawa²,
Takahide Mizuno², Ken Goto², Masanobu Ozaki², Kazuhiko Yamada², Satoshi Tanaka²,
Ryuhei Yamada³, Jun Oikawa⁴, Akira Yamazaki⁵

1: Kochi University, 2: Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace
Exploration Agency, 3: Aizu University, 4: University of Tokyo, 5: Japan Meteorological
Agency

Abstract

We have developed a penetrator probe for observation of volcanic activity. A developed probe, with 8 kg in weight and 60 cm in length, is equipped with geophysical instruments (e.g., seismometer, accelerometer, microphone, GPS, magnetometer). It is difficult for humans to install sensors around a volcanic crater just after a volcanic eruption and/or during eruptive activity. We can safely install sensors around a volcanic crater using the penetrator probes and an unmanned autonomous aircraft. The developed system could make a round-trip flight autonomously on an isolated or uninhabited volcanic island located at a long distance of more than 100 km. In this paper, we report the specification of penetrator probe and results of impact test of onboard sensors and their supporting equipment.

1. はじめに

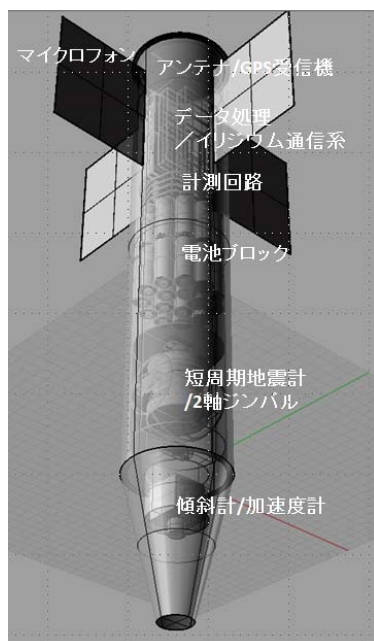
火山噴火により既存の観測施設が被害を受け活動を監視するためのデータを得ることが困難になったり、噴火直後は立ち入り規制のために既存設備の修復が困難になったりする場合がある。さらには、陸域から離れた火山島の場合にはアクセスに日数を要するなど、噴火直後のデータを得ることが困難である。このような場合に、迅速に観測機器を設置展開する手段として、無人自立航空機を利用して設置する投下型プローブ（火山ペネレーター）の開発を進めている。火山ペネレーターを噴火直後に設置することで、既存の施設が復旧するまでの期間、または噴火の状況に応じて噴火口周辺に新たな観測点を設置してデータを得ることが可能となる。過去には同様な発想で、谷口ほか(1992)による火砕流サージの温度・圧力・粒子速度を計測するためのペネレーターが開発され設置された例があるが、取得データは後日ペネレーターを回収してデー

タを取得するという方式であり、リアルタイムでのデータ取得ではなかった。

本研究では、月の内部構造を探るための LUNAR-A 計画において開発された地震計と熱流量計を搭載したペネトレーター（田中ほか,2011）を基に、無人自立航空機に搭載可能なサイズ・重量に小型化、火山観測に有用なセンサー搭載の検討を進めている。さらに、近年技術開発のめざましい無人自立航空機に、100km 以上離れた遠隔地への投下設置が可能となる航続距離の延長やペネトレーターを搭載し切り離すための軽量・簡便なランチャー機構の開発も実施している。

2. 火山ペネトレーターの概要

本研究で開発を進めている観測機器を搭載する火山ペネトレーターの概略図を第 1 図に示す。また、火山ペネトレーター及び無人自立航空機の諸元を第 1 表に示す。



第 1 図 火山ペネトレーター

Fig.1 Penetrator probe for volcano observation

ペネトレーター構体については、月探査計画 LUNAR-A の開発で得たノウハウを基に無人航空機に搭載できるサイズ・重量に小型化する検討をおこなっている。また、月探査用のペネトレーターは完全に月面に貫入させるために尾翼はなかったが、分離から貫入までのペネトレーターの姿勢を安定させるために尾翼を取り付ける方式を検討している。搭載機器については、LUNAR-A 計画にて開発してきた短周期地震計（上下動）と回転機構を中心に、ペネトレーターの姿勢を把握するための加速度計と傾斜計、さらに MEMS 地震計（3 軸）や空振を観測するためのマイクروفोन、GPS、磁力計を検討している。電源系として 1 次電池のみでは 2 ヶ月程度の運用であるが太陽電池パネルを取り付けることで 1 年以上の運用ができないかを検討している。通信系としてイリジウム衛星電話網を利用することで 100km 以上の遠隔地であっても制御ができるシステムを検討している。

月探査計画 LUNAR-A の開発段階から、地球上でのペネトレーター利用の有用性を認識し、雲仙普賢岳（九州大学）、浅間山（山田ほか，2006）、南極（渋谷ほか，1992，2005;Shibuya et al.,1993）での試験を実施してきた。これらの試験では有人のヘリコプターを用いて投下を実施していたが、有人ヘリの場合には飛行制限区域の設定などにより投下地域に制限があり、また飛行のための準備に期間を要するなどのため機動性に欠ける。また、無人ヘリコプターの場合には、操縦者の目視できる範囲でないと運用が難しいという制約がある。そのため、本研究では無人自立航空機を利用した方式を検討している。陸域から離れた火山島への設置も考慮し航続距離を往復 200km 程度まで伸ばすことやペネトレーターを切り離すための軽量なランチャーの検討なども合わせておこなっている。

第 1 表 火山ペネトレーター及び無人自立航空機の諸元

Table 1 Specifications of Volcano penetrator and unmanned autonomous aircraft

火山ペネトレーターの諸元 (案)	無人自立航空機の諸元	無人機からの分離・投下条件
重量 ~8kg・外径 90mm×全長 600mm	全長：2570mm	全備重量：~10kg (ランチャー含む)
電源系：1 次電池/2 次電池併用	全幅：4360mm	巡航速度：100~110km/h
通信：イリジウム衛星 (ショートバースト方式)	全高：830mm	高度 400m 以上から水平方向に分離
耐衝撃性：~3000G	機体乾燥重量：42kg	設置時の速度：~90m/sec
搭載機器はエポキシ樹脂で充填モールド	巡航速度：100~110km/h	
	エンジン：250cc 2 サイクルガソリンエンジン	
	ペイロード：10kg (搭載燃料により変化)	

3. 火山ペネトレーター搭載機器の耐衝撃試験

現在までに、搭載可能な観測機器、データ処理系、通信系、電源系機器の耐衝撃性試験を実施し、衝撃を与える前と与えた後での動作に相違がないかを比較し、機器の動作に支障がないことを確認済みである。

衝撃試験として、(独)宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所内の落下試験棟にて 3000G の衝撃を与える試験、そして実際に無人自立航空機にペネトレーターを搭載して高度 400m から投下する試験を実施した。宇宙科学研究所内での落下衝撃試験を実施するにあたり、観測機器を衝撃から守るためにエポキシ樹脂で充填モールドをおこなったものを落下試験用の容器に入れ落下させ 3000G の衝撃を負荷し、試験後に容器から取り出したものについて動作確認を行い正常に動作することを確認した。次に、鹿部飛行場 (北海道茅部郡鹿部町) にて 2016 年 9 月 15 日から 17

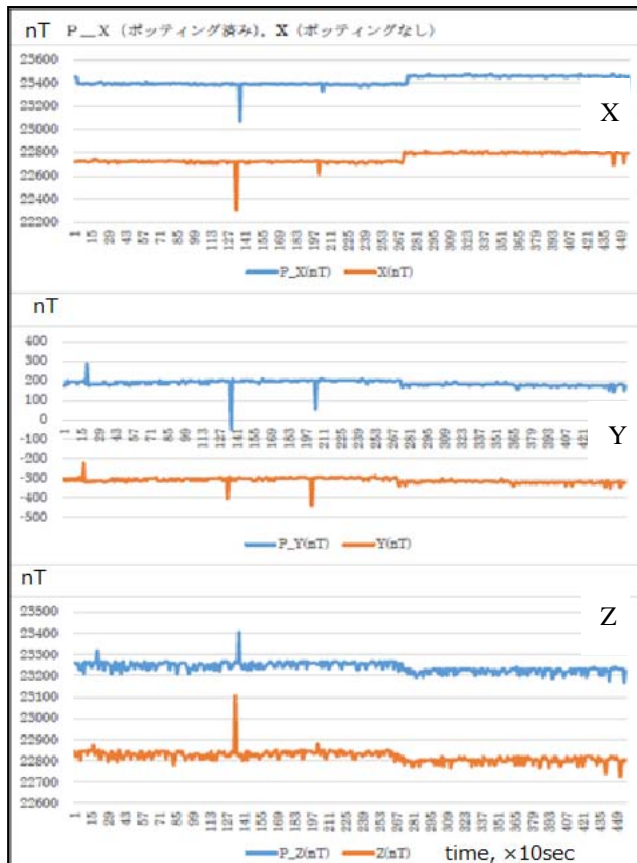
日の期間に、ペネトレーター構体に観測機器、データ処理系、通信系、電源系の機器を搭載して第 2 図に示す無人自立航空機を使い高度 400m からの落下試験を実施した。回収後に搭載機器の動作試験を実施し概ね動作することを確認した。



第 2 図 無人自立航空機とペネトレーター

Fig.2 Unmanned autonomous aircraft and penetrator probe

衝撃試験の結果の一例として磁力計の結果について紹介する。使用した磁力計は Honeywell 社の HMR2300 という磁気抵抗センサーを使用したデジタル出力の 3 軸の磁力計で、計測範囲は $\pm 2 \times 10^5$ nT で、分解能が 6.7nT である。船木(2011)により南極での空中磁気測定に使用された実績がある。第 3 図にエポキシ樹脂を充填した後に 3000G の衝撃を負荷した磁力計と衝撃を与えていない磁力計の 2 台を並行観測した結果を示す。3 軸とも同様の変化をしており衝撃による相違は見られない。パルス的な変動の振幅に違いが見られるが、これはデータ取得に別々の装置を使用しているためにサンプリングのタイミングがわずかに異なっているためと考えられる。



第 3 図 衝撃を与えた磁力計（青）と衝撃を与えない磁力計（橙色）との比較

Fig.3 Comparison between the shocked magnetometer (blue) and the non-shocked magnetometer (orange color)

3000G の衝撃に耐えられることが検証できたので、噴火直後の火口周辺に無人自立航空機を使い磁力計を設置することで火山活動に伴う熱消磁過程を計測することが期待できる。熱消磁の検出には、この磁力計の分解能では不足するケースも想定されるが、大規模あるいは熱源が浅部まで上昇して来たような場合には数 nT から数十 nT の熱消磁 (Harada et al.,2005) が観測される場合があるので、その場合には計測が可能性である。なによりも、噴火口の直近での磁力測定の場合にはあまりないので貴重なデータを得ることができると考えられる。

4. おわりに

本研究では、人が立ち入ることの難しい火山噴火口の近くや、アクセスに時間のかかる火山島などに迅速に観測機器を設置するための手段として無人自立航空機を使いペネトレーターを投入するシステムを開発している。ペネトレーターに搭載する機器の個別の耐衝撃性については確認できたと考えている。

今後の開発予定として、計測回路、データ処理系、電源回路の全系の噛み合わせ試験、観測機器のフィールド試験、観測運用のシミュレーションを予定している。また、火山ガス成分を分析可能なガスセンサーの搭載可能性についても検討をおこなう予定である。これらの検討をすすめ、実際の火山地域への投下設置及び観測実験をおこないたい。

本研究は科学研究費補助金『基盤研究 (A) 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』(代表 田中 智：課題番号 15H01793) によりおこなわれている。

文献

- 船木 實, 南極観測用小型無人飛行機“Ant-Plane”と空中磁気観測, 地質ニュース, 677号, 40-47, 2011
- Harada Makoto, J.P.Sabit, Y.Sasai, P.K.B.Alanis, JJ.M.Cordon Jr.,E.G.Corpuz, J.Zlotnicki, T.Nagao and Jnae T.Punongbaya, Magnetic and electric field monitoring of Taal volcano, Philippines PartI: Magnetic measurements, Proc. Japan Acad., 81, Ser.B,261-266, 2005
- 九州大学, インターネット博物館「雲仙普賢岳の噴火とその背景」4-5:ペネトレーターー地震計の開発, <http://museum.sci.kyushu-u.ac.jp/part4/p45/penetrator.html>
- 渋谷和雄・神沼克伊・早川雅彦・藤村彰夫・水谷 仁・山田功夫・小山順二・笠原 稔・伊藤 潔・金沢敏彦, 南極人工地震観測用ペネトレーターの開発, 南極資料, vol. 36, NO. 2, 310-340, 1992
- Shibuya,K., M.Kasahara, M.Hayakawa, A.Fujimura, J.Koyama, K.Kaminuma, and H.Muzutani, Application of GPS differential positioning for the development of the Antarctic penetrator, J.Phys.Earth, 41, 291-304, 1993.
- 渋谷和雄, 南極ペネトレーターのインターフェイス・ソフトウェアの開発, 南極資料, 49 (3), 292-308, 2005
- 田中 智・白石浩章・早川 基・藤村 彰夫, LUNAR-A 中止後のペネトレーターー, 日本惑星学会誌「遊星人」, 20(3), 208-210, 2011
- 谷口宏充・鎌田桂子・中田節也・三軒一義・鎌田浩毅, ペネトレーター方式による火砕サージの温度, 圧力, 粒子速度測定を試み: 雲仙岳における投下実験, 火山, 37(3), 147-151, 1992
- 山田功夫・仮屋新一・宮島力雄, ヘリコプター投下型 GPS 観測システムの開発-浅間山投下試験-, 日本地球惑星科学連合大会予稿集(CD-ROM), V101-022,2006