

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 6 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K13871

研究課題名(和文)火山の高解像度断層撮影を目指した空中ミュオグラフィ測定法の開発

研究課題名(英文)Development of airborne muography towards the 3D visualization of a volcano

研究代表者

田中 宏幸(Tanaka, Hiroyuki)

東京大学・地震研究所・教授

研究者番号：20503858

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：医学分野において既に実用化されているX線断層撮影法と同じく、火山の断層撮影には多方向からの観測が必須であるが、観測装置の設置場所、輸送経路、また商用電源の確保などの観点から火山周囲にミュオグラフィ観測点を多数展開することは極めて困難であった。本研究では、(1)並列ミュオグラフィ観測システムの航空機への実装、(2)空中ミュオグラフィ観測の実施、(3)飛行位置精度の確認を通して、空中ミュオグラフィ撮影法を開発することで、これまで、地上展開するのが困難であった多点ミュオグラフィ観測を実現し、新たな火山3次元透視イメージング技術へとつなげる。

研究成果の概要(英文)：Producing precise 3 dimensional muographic volcano images, of a type similar to medical CAT scans, are fraught with challenges. Finding appropriate locations for placement of detectors on rough terrain, securing pathways for installation and obtaining commercial electric power are some of the difficulties researchers will find when attempting to conduct multi-directional, land-based muography experiments. Airborne muography was conceived to address these problems and make efficient muographic multi-directional images, taking advantage of a helicopter's capacity to position the detector precisely and with relative ease at positions closer to the target volcano. The current study followed 3 stages: (1) customization of the parallel muography system to fit the requirements of the aircraft, (2) implementation of airborne muography observations, and (3) confirmation of the positional accuracy of the flight in order to realize the goals of this 3 dimensional volcano imaging trial.

研究分野：高エネルギー素粒子地球科学

キーワード：ミュオグラフィ 火山

1. 研究開始当初の背景

本研究は我が国が世界をリードする「素粒子ミュオンによる巨大物体の透視技術(ミュオグラフィ)」を発展させ高解像度3次元断層撮影へとつなげる「空中ミュオグラフィ観測法」を開発するものである。医学分野において既に実用化されているX線断層撮影法と同じく、火山の断層撮影には多方向からの観測が必須であるが観測装置の設置場所、輸送経路、また商用電源の確保などの観点から火山周囲にミュオグラフィ観測点を多数展開することは極めて困難である。本研究では、ヘリコプター内部のような、角度や位置が常に変動する限られた形状・サイズの空間でも実施可能な空中ミュオグラフィ撮影法を開発することで、これまで、地上展開するのが極めて困難であった多点ミュオグラフィ観測を実現し、新たな火山3次元透視イメージング技術へとつなげる。

研究の学術的背景： 本研究は我が国が世界に先駆けて発展させてきた「素粒子ミュオンを用いた巨大物体の透視技術(ミュオグラフィ)」を素地に火山の高解像度3次元断層撮影(トモグラフィ)を最終的に可能にする基礎観測技術を開発するものである。我が国は、2006年世界で初めてミュオグラフィの実証観測に成功した後も目覚ましい成果を上げ続けているため、この分野では、現在のところ世界をリードする立場を堅持している。今後も引き続き、世界が我が国の成果に追従するという地位を確保していくためには、我が国オリジナルの研究成果をベースにさらに魅力的な研究成果を次々と創出し続けていかなければいけない。本研究において開発される基礎技術はこれまで、火山体という厳しい環境下では、観測装置の設置場所、搬入経路、また電源の確保などの観点から地上展開するのが極めて困難であった多点ミュオグラフィ観測を実効的に実現させるために対地高度が極めて低い空中から火道近傍をホバリングとタクシングを繰り返すことで、周回観測を行う新たな技術を開発する。

2. 研究の目的

ミュオグラフィは、素粒子ミュオンの強い透過性を用いて、X線レントゲン写真を撮影するように、火山内部を透視する技術である。近年、レントゲン撮影術が2次元から3次元へと進化したのと同様に、ミュオグラフィも3次元へと進化することが望まれている。そのためには、医学分野で用いられる断層撮影術と同様、多方向から透視画像を何枚も撮影し、それを数学的に重ね合わせる必要がある。しかし、これまで、世界で行われてきたミュオグラフィにおいては、観測点の数はせいぜい2点が限界であった。たとえば2010年に申請者らのグループが行った浅間山観測や2012年にフランスのグループが実施した、スフリエール火山観測などが例である。これは一般的に地形や環境が厳しい火山

周囲では、100 kgを超える装置を搬入する経路や設置場所の確保また、商用電源や、巨大なソーラーパネルの利用が一点ですら困難なことによる。また、火口近傍になると斜度が30度を超えるようになり、観測装置の設置はほぼ不可能である。

「空中ミュオグラフィ測定法」はこれまでに、必要だった観測時間を大幅に短縮する。火口近傍における、ミュオグラフィの位置分解能は測定装置の角度分解能と火口までの距離である。距離が1/3になれば、角度分解能を立体角換算で一桁落としても同等の位置分解能が得られる。観測点を自由に選べる「空中ミュオグラフィ測定法」では、従来と比較して火口までの距離を1/3以下にすることは容易である。次に、距離を近づけることによる、シグナルノイズ比(ここでは火道直径と岩盤の総厚の比)の向上である。図1に示されるように麓で観測する場合と、上空で観測する場合では、同じ深さの火道(マグマの通り道)を観測する際において、ミュオンが透過すべき岩盤の厚みが倍以上変化する。火道の直径はほとんど変わらないから、シグナルノイズ比が単純に倍加する。また、ミュオンの透過強度(岩盤を通り抜けた後のミュオンの積分フラックス)は岩盤の厚みが半分になると一桁増える。つまり、角度分解能を下げられる効果と岩盤の厚みが半分になる効果で測定時間を大幅に短縮できるため、限られた時間で空中ミュオグラフィ測定が実施できる。

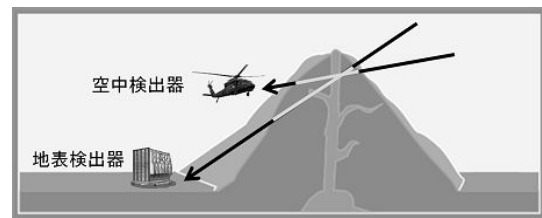


図1. ミュオグラフィにおける地上観測と空中観測の違い。観測ターゲットまでの距離が異なると同時に透過すべき岩盤の厚みが異なる。

火山のミュオグラフィは百メートルを超える岩盤を透過するわずかな数のミュオンの到来方向と数を測定して、対象内部を透視する技術である。したがって、得られる透視画像の解像度はミュオグラフィ装置の口径(検出面積)に比例する。これまで、形状・サイズが限られているヘリコプター内部の空間で、十分な口径を確保することは難しかった。しかし、複数の小型装置を空間形状に合わせて自由に配することで、スペースを有効的に活用し、かつ実効的に検出面積を向上させる並列ミュオグラフィテレスコープが実用段階に入ってきている。本研究では、並列ミュオグラフィテレスコープが検出面の形状を自在に変えられる性質を応用して、へ

リコプター内部のような限られた形状・サイズの空間でも実行可能な空中ミュオグラフィ撮影に必要な基礎技術を開発することを目的とする。具体的には、次の3つの開発、測定を実施する。ヘリコプター機体内部の形状に合わせた並列小型軽量ミュオグラフィ検出器の開発、リアルタイムに変動する機体の位置に応じたミュオグラフィデータ補正の確認、一点からの空中ミュオグラフィ測定の実施。

3. 研究の方法

本研究は技術開発及び野外観測で進める。並列ミュオグラフィテレスコープシステムを製作し、全地球測位システム(GPS)等で得られる時間情報、位置情報、のデータ収集システムを用い、実際の火山を対象として、一点からの空中ミュオグラフィ測定を実施し、並列ミュオグラフィ観測の検証試験を行う。その際、このテスト観測において、ヘリコプターホバリング中における燃油減少等の重心移動に起因する、ピッチ角の増大効果を鉛バラストなどの配置により抑え、機体の水平を保つ手法を確立する。本観測で想定する中型ヘリコプター機内で使用できる電力量は400ワット以上であり、測定装置の運用には問題はない。このデータを基に、空中ミュオグラフィ測定手法を改良し、観測手法の最適化を図る。

4. 研究成果

(1) 並列ミュオグラフィ観測システムの航空機への実装。図に示すように、特殊な形状を持つ矮小空間にフィットするように2台のミュオグラフィ観測装置を配置し、有感面積を最大限活用できるシステムを実現した(図2)。

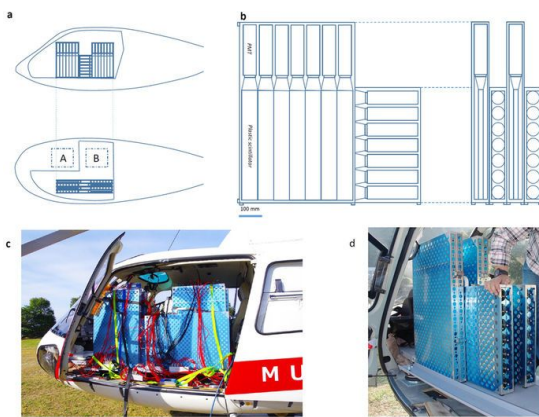


図2. 航空機に実装された並列ミュオグラフィ観測システム。a 側面図及び、上面図、b 用いられたミュオグラフィ観測装置の概念図。c 並列ミュオグラフィ観測システムの写真 d ミュオグラフィ観測装置の写真。

(2) 空中ミュオグラフィ観測の実施。

並列ミュオグラフィ観測システムを実装した航空機を雲仙普賢岳閉栓新山南東部において低空飛行させた。山頂からの距離はおよそ200mである。図3に示すように、観測は2回行い、1回目は左舷を山体方向へ向け、2回目は右舷を三体方向へ向けた。この観測により、効率よくリファレンスデータを得る方法が確立された。

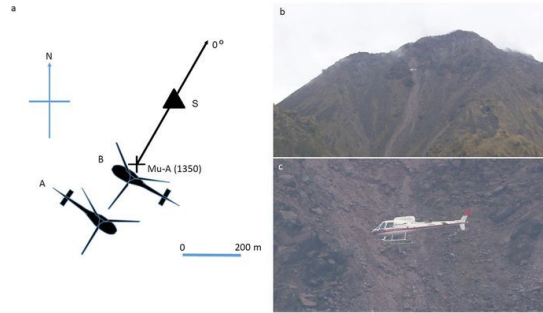


図3. 空中ミュオグラフィ観測方法。a 観測セットアップ。b 観測の様子を示す写真。(上) 遠景、(下) 近景。

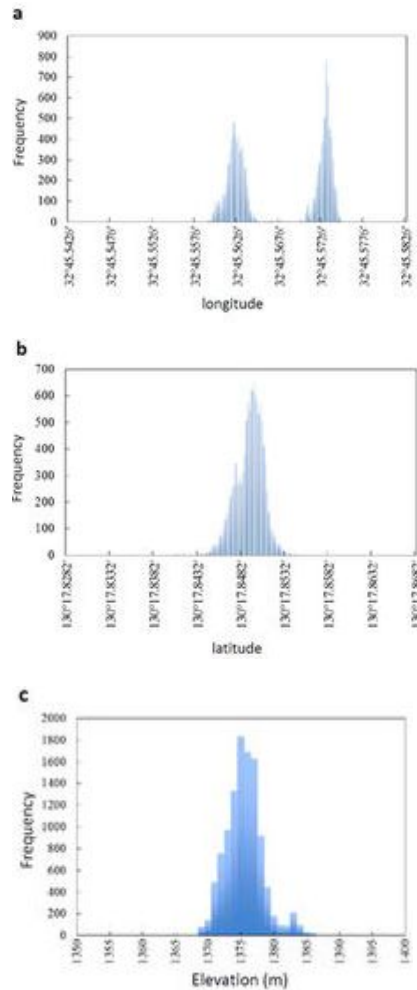


図4. 観測期間中にGPS観測により得られた航空機の位置精度。a 経度、b 緯度、c 高度。

(3) 飛行位置精度の確認。観測期間中 GPS を用いた飛行位置精度の確認を行った。図 4 に示されるように、観測期間中、航空機は X, Y, Z 方向いずれにおいても $\pm 3\text{m}$ の範囲内に入っており、本研究で目指すミュオグラフィ画像の空間分解能 (90m) より十分小さいことが確認された。図 4a に示される 2 つのピークは給油前と給油後で同じ位置を再現できなかったことを示すが、この差 15m についても、目指すミュオグラフィ画像の空間分解能より小さいとして、解析では無視することとした。

(4) 観測結果。図 5 に異なる仰角における平成新山方向から到来したミュオン透過率の方位角分布を示す。この結果は 2.5 時間の飛行観測で得られた結果である。この図より、標高 1400m 以上の平成新山の浅部バルク密度は $0.5 \pm 0.07 \text{ g/c m}^3$ と求められた。一方で、同じ浅部領域でドームの中心方向に対しては、 $0.62 \pm 0.12 \text{ g/c m}^3$ と求められ、ドームの中心に高密度領域が存在することが確認された。

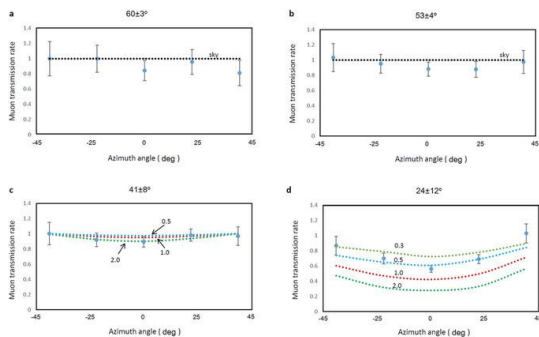


図 4. 平成新山方向から到来したミュオン透過率の方位角分布。図は異なる仰角に対してプロットされている。a $60 \pm 3^\circ$, b $53 \pm 4^\circ$, c $41 \pm 8^\circ$, and d $24 \pm 12^\circ$ 。データに付随する縦棒は 1 のエラーバーを示す。

図 5 には平成新山の密度分布を示す。ドーム周囲より中央部の密度が相対的に高い。この高密度領域は 1994 年の噴火で貫入したスパインの貫入想定図と調和的である。

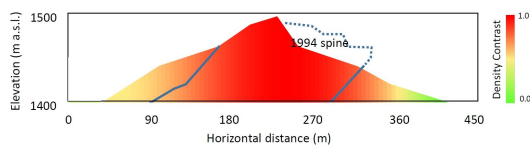


図 5. 空中ミュオグラフィ観測で得られた平成新山の密度分布。点線は 1994 年の噴火で貫入したスパインの貫入想定図。

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 0 件)

〔学会発表〕(計 2 件)

(1) Hiroyuki K. M. Tanaka Global Trends of Muography MUOGRAPHERS 2017: Hungary-Japan Bilateral Muography Workshop Osaka, Japan 16 January 2017.

(2) 田中宏幸 ミュオグラフィによる火山研究 光・量子ビーム科学連携推進室 第 5 回ワークショップ 光・量子ビームを用いた地球惑星科学の新展開 宮城県仙台市 1 月 5 日(火) ~ 6 日(水) 2016

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

(1) 研究代表者
田中 宏幸 (TANAKA, Hiroyuki)
東京大学・地震研究所・教授
研究者番号：20503858

(2) 研究分担者
()

研究者番号：

(3) 連携研究者
()

研究者番号：

(4)研究協力者

大湊隆雄 (OHMINATO, Takao)

篠原宏志 (SHINOHARA, Hirohi)

清水洋 (SHIMIZU, Hiroshi)

草茅太郎 (KUSAGAYA, Tarou)

内田智久 (UCHIDA, Tomohisa)

VARGA, Dezso

SARACINO, Giulio