

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 30 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K17747

研究課題名(和文) 宇宙線ミュオンを用いたカナリア諸島地滑り断層面の調査

研究課題名(英文) Investigation of a large land slide fracture by using cosmic-ray muons in Canary Islands

研究代表者

宮本 成悟 (MIYAMOTO, Seigo)

東京大学・地震研究所・助教

研究者番号：80402444

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：スペインカナリア諸島の一つ、ラパルマ島にて、大規模な山体崩壊の兆候であると予測されている亀裂または断層の形状・空隙率の観測を試みた。厚さ1mmの鉛板とのサンドイッチ構造で10層積み重ねられ、雑音に強い仕様の観測器を平成28年度初旬にラパルマ島の亀裂/断層露頭の目の前に設置した。平成28年6月には全ての写真乾板の回収を終え、有効面積0.75平米・観測期間3ヶ月の観測を無事終えることが出来た。一部を除いて乾板中のミュオンの飛跡再構成が完了した。現在論文投稿に向けて、最終結果をまとめている段階である。

研究成果の概要(英文)：We attempted to observe the shape and porosity of fracture or faults predicted to be a sign of massive mountain collapse on one of the Spanish Canary Islands, La Palma. Ten pieces of emulsion films and nine of 1mm-thick lead plates were stacked with sandwich structure. This type of detector have strong noise reduction power. This was installed in front of the fracture/fault outcrop of La Palma Island in January, 2016. In June, we completed collection of all the films, we were able to successfully finish the observation with an effective area of 0.75 m<sup>2</sup> and observation period 3 months. The image analysis and reconstruction of muon track was done except some amount of emulsion films. We are under summarizing the last results for submit this to the academic journal.

研究分野：地球惑星科学

キーワード：山体崩壊 断層 ミュオン ミュオン 原子核乾板 ラジオグラフィ 火山

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 西アフリカ西岸に位置するカナリア諸島は、火山活動によって形成された群島である。そのうちの一つ、ラパルマ島において、1949年の火山活動によって、南北に伸びるリフトに沿って長さ5kmにわたり、幅1mの亀裂または断層(以下、「亀裂/断層と記す」)が形成された(図1)。Day et al.(1999, 文献[1])の地質学的調査と考察に基づく研究によると、ラパルマ島西部山体の大規模崩壊の兆候である可能性があるという。亀裂/断層はラパルマ島西側山体の不安定性から生じた地滑りに起因する可能性が同論文により示唆された。

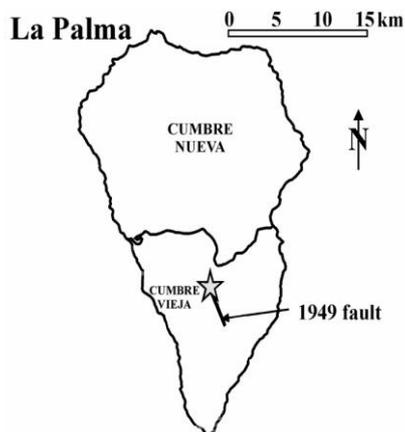


図1: ラパルマ島と1949年に出現した亀裂/断層の位置関係。星印は、ミュオン検出器設置サイト

(2) さらに島西側にて大規模な山体崩壊が起きれば、高さ10~25メートルの津波がアメリカ大陸に届くという試算がWard and Day (2001) (文献[2])によって示された。この可能性が示唆されてから、学問的にも、社会的にも、世界から大きな注目が集まった。地質学の視点からの調査だけでなく、その他様々な物理探査を用いてこの断層を精密に調査し、可能性を検討する必要がある。

### 2. 研究の目的

(1) 亀裂/断層の詳細がどのようなものであるか、より多様な視点から物理探査を行い、山体崩壊の可能性を評価する必要がある。申

請者はこの亀裂/断層に対し、宇宙線ミュオンを用いた密度構造調査を行い、浅部の密度と形状(幅, 深さ)に対する情報を得る。

(2) 上記物理探査手法をラパルマ島の亀裂/断層に適用すれば、地すべりによる断層が本当にあるかどうか判断でき、実際に存在した場合、岩石破碎による低密度断層面の幅・深さ・長さなどの形状と空隙度の相関を測定することができる。

### 3. 研究の方法

(1) 宇宙線ミュオンは、空から地球表面の至る所にも降り注ぐ自然放射線である。ミュオンは、電荷は電子と同じ、質量は電子の約200倍の素粒子であり、高エネルギーの光子であるX線, ガンマ線, あるいは高エネルギー電子線に比べ、より長い減衰長を持ち、物質中を直線的に進む。宇宙線ミュオンは岩盤2kmを貫通する高い運動エネルギーを持つものも含まれている。高エネルギー素粒子物理学で高度に発達したミュオン検出器を用い、ミュオンが到来する方向ごとに宇宙線ミュオン減衰率を測定することができる。減衰率はミュオン経路の密度長と一意に関係し、経路に沿った平均密度を求めることができる。Tanaka et al.(2007)の研究成果以来、この物理探査手法を用いた火山などの内部構造の研究は著しく進歩している(文献[3-15])。

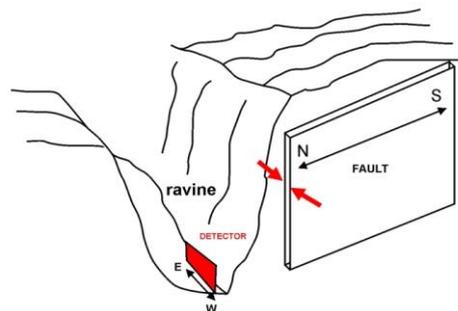


図2: 亀裂/断層とミュオン検出器の位置関係の概念図。

(2) 亀裂/断層の露頭に、電源が不要で、非常に空間分解能の高いミュオン検出器である原子核乾板を設置し、様々な方角から入射するミュオン数の減衰率を測定することで、各方向の平均密度を決定する。亀裂・断層の破碎面は低密度になっている可能性が高い。この特徴を用いて形状の測定を行う(図2)。また図3に、期待される感度を深さと空間分解能の変数で表現したものを示す。

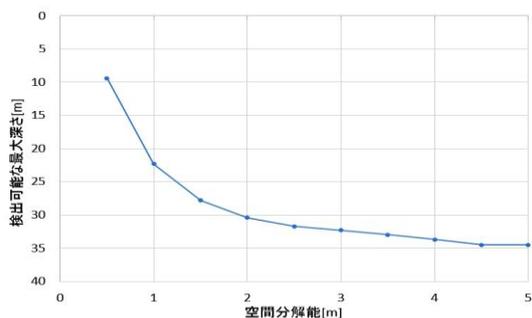


図3：有効面積 1.0 平米、照射期間 110 日、岩石の密度を 2.3g/cc で一様、低密度面の空隙率を 20% と仮定した場合の期待される感度。横軸が空間分解能、縦軸が地表から検出可能な最大深さ、実曲線より上のエリアが 95% 以上の統計的有意性で密度以上を検出可能な領域を示す。

#### 4. 研究成果

2015, 2016 年度に行ったことは、主にミュオン検出器である原子核乾板の製造、多層型乾板検出器の現地への輸送・設置・回収、研究協力機関と並行して行う画像解析、飛跡再構成効率誤差のクロスチェック・キャリブレーション、大面積画像解析、飛跡再構成、密度異常探査である。

(1) 2015 年、名古屋大学にて 7.5 平米の写真乾板を製作した。製作作業には研究協力者である名古屋大学の設備と森島特任助教の力を借り、2 週間かけて行われた。1 週間後、X 線を照射されないこと、冷蔵で輸送・保管されることを手配した業者によって、日本からカナリア諸島へ輸送された。

(2) 2016 年 3 月、スペイン人研究者の協力のもと、金属フレームの中に原子核乾板と鉛板を交互に挟み込む実装が、ラパルマ島の谷底で行われた。原子核乾板は非常に感度の高い銀塩フィルム的一种であるため、可視光にも強い感度を持つ。そのため、谷底に簡易テントで暗室を設置する作業から始められた(図3, 4)。前もって建物の中に暗室を用意し、金属フレームの中に乾板を入れる作業ができない理由は次の通りである：原子核乾板は製造直後からミュオンにたいして感度を持ち、現像されるまでそれらの飛跡を記録し続ける。このような意味では原子核乾板は製造から現像までの積分された時間情報しか持たない。ミュオンは乾板製作後、輸送中も、実装待機中も建物などを通過し、乾板に飛跡を残し続ける、観測直前に複数枚の乾板を重ね、現像・画像解析の後に、積み重ねた乾板全てを貫通する飛跡を選ぶことで、観測中に入射したミュオンを選ぶことができる。

これらの乾板は、厚さ 1mm の鉛板とのサンドイッチ構造で 10 層積み重ねられ、雑音(低エネルギー粒子の混入)に強い仕様で設置された(図5, 6)。この雑音排除能力は、岩石の厚い深い部分をイメージングするために必要不可欠な技術である。



図4：亀裂/断層の露頭近辺に設置された簡易暗室の写真。30分程度で完璧な遮光が施された。



図4：簡易暗室内でスペイン人研究者と申請者が作業準備をする写真。

(3) 2016年4月、金属フレームユニットの一部を取り外し、内部の乾板を回収し、現像を行った。この金属フレームユニットの方向は、真上から降ってくるミュオンをとらえるように設置されていた。目的はミュオン飛跡検出効率のキャリブレーション用である。岩盤を通過せずに空気のみを通過してきたミュオンフラックス、特に天頂角=0度のミュオンフラックスは非常によく調査され、その値につく誤差が非常に小さいためである。



図5：露頭近辺に設置されたミュオン検出器。手前右から奥左に向かって、亀裂/断層を通ったミュオンが通過する。

(4) 2016年6月、3ヶ月間に渡って設置された有効面積 0.75 平米の乾板検出器を回収

した。乾板は回収後、イタリアのグランサッソ国立研究所にて現像された。

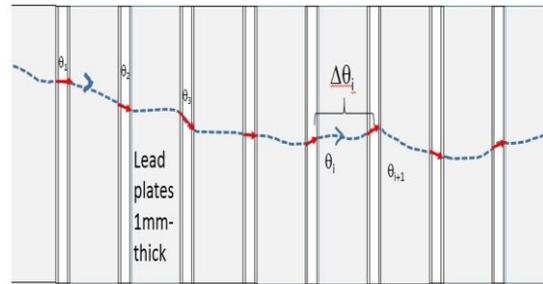


図6：写真乾板と鉛板(厚さ1mm)のサンドイッチ構造の概念図。低エネルギー粒子が鉛板を通過する時、多重クーロン散乱の効果により、ランダムな方向に散乱される。写真乾板はミクロンの位置精度を持つため、これら微小な散乱角を検出が可能である。これによって、およそ1GeV以下の低エネルギー粒子の混入によるノイズを識別することが出来る。

(5) 得られた原子核乾板ネガの総面積は7.5平米に渡る。このネガに記録された飛跡を全て読み取るためには、東京大学の持つ飛跡読み取り装置だけでは時間がかかりすぎ、結果のフィードバックが遅くなるため、東京大学、名古屋大学、伊ナポリ大学、伊サレルノ大学が並行して読み取り装置を用い画像解析を行った。ここで言う画像解析とは、乾板のネガに記録されたミュオンの飛跡画像を読み取り装置で直線的な飛跡データとしてデジタル化する作業である。具体的には、乾板を一枚ずつ自動飛跡読み取り装置に設置し、乾板中に記録された直線的なミュオンの飛跡だけを画像処理で選び出し、10枚の乾板に渡って繋がるミュオンの飛跡だけを選び出す。物質量の多い鉛板を挟んで隣の乾板に直線的に繋がるかどうかの判定を行い、雑音粒子を除去した。

(6) 一部の乾板を除いて、画像解析が終わり、各方向から来るミュオンフラックスの差からその方向にある物質量を大雑把に求

めた。現段階では、図3で示した簡単な感度プロットの範囲では、密度異常は何も検出されなかった。非常にデリケートなところであるため、もう一度データを精査し、論文出版に向けて最終な結果をまとめている段階である。

(7) スペインの研究協力者で行った観測で、亀裂/断層と直角な方向に沿った地表から出るラドンガスの量を調べたところ、断層付近でそれ以外の場所と比べて余剰が観測された。将来展望として、このようなデータと合わせた地球科学的解釈を行うことでより有意義な成果を得られる可能性がある。

#### <引用文献>

- [1] S. Day, *Volcanol Geotherm Res* 94:135–167, 1999.
- [2] S. Ward, S. Day, *Geophys Res Lett* 28:3397–3400. doi:10.1029/2001GL013110, 2001.
- [3] H. Tanaka et al., *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.*, A555, 164-172, 2005.
- [4] H.K.M. Tanaka et al., *Geophys. Res. Lett.*, 34, L22311, doi:10.1029/2007GL031389, 2007a.
- [5] H. Tanaka et al., *Earth Planet. Sci. Lett.*, 263, 104-113, 2007b.
- [6] H.K.M. Tanaka et al., *Nuc. Instr. Meth. Phys. Res.*, A575, 489-497, 2007c.
- [7] H.K.M. Tanaka et al., *Geophys. Res. Lett.*, 36, L01304, pp. 1-5, 2009a.
- [8] H.K.M. Tanaka et al., *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 36, L17302, pp. 1-4, Sept., 2009b.
- [9] H.K.M. Tanaka et al., *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, VOL. 115, B12332, doi:10.1029/2010JB007677, 2010.
- [10] H.K.M. Tanaka et al., *Earth Planet. Sc. Lett.*, 306, 156–162, 2011.
- [11] N. Lesparre et al., *Geophys. J. Int.*, 190, 1008–1019, 2012.
- [12] K. Jourde et al., *Geophys. Res. Lett.*, 40, 6334–6339, doi:10.1002/2013GL058357, 2013.
- [13] C. Cârloganu et al., *Geophys. J. Int.* 196, 633–643, 2014.
- [14] R. Nishiyama, S. Miyamoto, and N. Naganawa, *Geosci. Instrum. Method. Data Syst.*, 3, 29–39, 2014.
- [15] H.K.M. Tanaka et al., *Nature Communications*, 5, 3381, 1, 2014

#### 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 3件)

① S. Miyamoto, J. Barrancos, C. Bozza, L. Consiglio, C. De Sio, P. Hernandez, R. Nishiyama, G. Padilla, E. Padrón, C. Sirignano, S. Maria Stellacci, H. K.M. Tanaka, V. Tioukov, 「Muography of 1949 fault in La Palma, Canary Islands, Spain」, *ANNALS OF GEOPHYSICS*, Vol.60, 1, 2017.

DOI: <http://dx.doi.org/10.4401/ag-7385>

査読有り

② P. Hernández, S. Miyamoto, V. Tioukov, J. Barrancos, C. Sirignano, R. Nishiyama, H. Tanaka and N. Pérez, 「a challenging application to investigate deeper volcanic structures in Canary Islands, Spain」, *Near Surface Geophysics*, 14, 5, 391--401, 2016.

DOI: 10.3997/1873-0604.2016022

査読有り

③ R. Nishiyama, S. Miyamoto, and N. Naganawa, 「Application of Emulsion Cloud Chamber to cosmic-ray muon radiography」, *Radiation Measurements*, Vol. 83, Pages 56–58 2015.

DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2015.04.013>

査読有り

[学会発表] (計 2件)

① 宮本成悟, 「宇宙線ミュオンによる火山透視：原子核乾板技術の活躍」, 2016年度日本写真学会 原子核乾板技術研究発表会, 2017年2月15日, 名古屋大学(愛知県名古屋市)

② Seigo Miyamoto, 「The imaging of

internal density structure for  
geo-scientific target with cosmic-ray  
muons」, The 1st International  
Conference on Advanced Imaging,  
National Center of Science (Hitotsubashi  
memorial Hall 1F, 2F, 東京都千代田区),  
17th-19th, June, 2015

〔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

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

宮本 成悟 (MIYAMOTO, Seigo)  
東京大学・地震研究所・助教  
研究者番号：80402444

### (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

森島 邦博 (MORISHIMA, Kunihiro)  
名古屋大学大学院・理学研究科・助教

Pedro Hernandez, (ペドロ, ヘルナンデス)  
スペイン再生エネルギー技術研究機構・主任  
研究員