

秋田駒ヶ岳火山西部地域における主成層火山形成期噴出物の岩石学的研究 Petrological study of main stratocone eruption products in the western field of Akita-Komagatake volcano

杉田 匠平^{1*}, 藤縄明彦², 長谷川健²
Syohei Sugita^{1*}, Akihiko Fujinawa², Takeshi Hasegawa²

¹ 茨城大学・院・理工, ² 茨城大学・理

¹Ibaraki Univ., ²Ibaraki Univ.

はじめに

秋田駒ヶ岳火山は秋田と岩手両県境に位置し、活動期はカルデラ形成を挟んで主成層火山形成期、後カルデラ活動期に二分できる。本火山ではソレライト系列マグマの噴出が卓越しているが、ほぼ同時期にカルクアルカリ系列マグマの噴出もわずかながら確認できる。その中で主成層火山形成期のソレライト系列マグマは、一見複雑な組成変化を示している(例えば、小畑他 2012 火山学会講演要旨)。

演者らは上記のマグマ活動について、従来研究より詳細な調査、分析を行い、時空解像度の高いマグマ変遷モデルを構築することを目的としている。本報告では、成層火山形成期西部地域を構成する噴出物から、ソレライト系列岩の岩石学的多様性を示し、その生成要因を考察する。

結果

地質学的特徴：当該活動期噴出物の分布は北西・南東方向に卓越しており、山麓部では溶岩流の舌状地形が良く保存されている。また、山頂部のカルデラ壁では本期溶岩流の成層構造が確認できる。対象地域の噴出物を岩相、岩質に基づき 24 噴出物に区分し、層序関係を明らかにした。また、再堆積物の狹在から、中位層準の噴出物間(男岳西方溶岩 1-A と下部田沢湖高原溶岩)に活動間隙が推測された。

岩石学的特徴：確認された 24 噴出物のうちソレライト系列が 21 噴出物、カルクアルカリ系列が 2 噴出物、さらに両系列の中間的性質を持つ噴出物が認められた。ソレライト、カルクアルカリ両系列の岩石はそれぞれ Low-K, Medium-K 領域に、中間領域のそれは境界線上にプロットされる。ソレライト系列岩は $\text{SiO}_2=51 \sim 61\text{wt}\%$ の幅を持つ。未分化な組成を示すソレライト系列岩は最下位層準、中位層準、上位層準の噴出物で確認でき、それぞれ $\text{SiO}_2=51\text{wt}\%, 52\text{wt}\%, 50 \sim 52\text{wt}\%$ の値を示す。これらの噴出物はいずれもカンラン石斑晶を多く含む。

考察

今回、層序的上位に向かって、より進化した組成に変化する一連の噴出物を一つの括り(ステージ)とし、未分化な組成に戻るところで区切った。この方針に基づくと本期ソレライト系列の噴出物は三分できる。最古のステージ 1 は $\text{SiO}_2=51 \sim 55\text{wt}\%$ 、ステージ 2 は $\text{SiO}_2=52 \sim 61\text{wt}\%$ 、ステージ 3 は $\text{SiO}_2=50 \sim 57\text{wt}\%$ の幅を持つ。ステージ 1, 2 はそれぞれ島弧型ソレライトに典型的な、シリカ増加に伴い、鉄に濃集する組成変化トレンドを示す。一方、上位のステージ 3 は K_2O の組成変化過程で $\text{SiO}_2=54 \sim 57\text{wt}\%$ の間に約 $0.3\text{wt}\%$ の増加を示し、これは結晶分化では説明できない著しい増加傾向である。従って、ステージ 1, 2 では同一起源マグマによる結晶分化作用が主な組成変化の要因であった可能性が高いが、ステージ 3 は結晶分化作用以外の組成変化過程が考えられる。それは例えば、(1) ステージ 1, 2 と同一起源マグマとその分化物より明らかに K_2O に富む珪長質マグマの混合、(2) ステージ 1, 2 と同一起源の未分化マグマ注入後、マグマと K_2O に富む壁岩の同化、混染、などである。

キーワード: 秋田駒ヶ岳火山, ソレライト系列マグマ, 全岩地球化学, 成層火山体形成期

Keywords: Akita-Komagatake volcano, tholeiitic magma, bulk-rock geochemistry, pre-caldera volcanism

新燃岳 2011 年噴火における火道流進化-安山岩質マグマの周期的な準プリニー式噴火と噴火様式推移のメカニズム

The mechanisms of cyclic sub-Plinian activity and shifting eruption style in the 2011 eruption of Shinmoe-dake

鈴木 由希^{1*}, 前野深¹, 長井雅史², 中田節也¹, 市原美恵¹

Yuki Suzuki^{1*}, Fukashi Maeno¹, Masashi Nagai², Setsuya Nakada¹, Mie Ichihara¹

¹ 東大地震研, ² 防災科研

¹ERI, Univ. of Tokyo, ²NIED

The climactic phase of the 2011 eruption of Shinmoe-dake is characterized by sub-Plinian eruptions (Jan 26-27) and lava accumulation in the crater (Jan 28-31), both of which accompanied vulcanian eruptions (Nakada et al., in review). Referring real-time observatory data on crater image, tremor and infrasound (Ichihara et al., in review) and tilt variation (e.g. Kozono et al., in review), a geological study (Maeno et al., in review) showed three sub-Plinian events (26PM, 27AM and 27PM, the most intense phase of each lasted 2.5-1.7 hours) occurred every 12 hours with a decrease of erupted magma volume and with a constant mass discharge rate.

This study reveals evolution of conduit flow through the climactic phase, by combining, a) records in groundmass microlite and vesicle textures and b) the above-mentioned, time-resolved observatory results. Based on a petrological result (Suzuki et al., in review JVGR), we judge that variable groundmass textures among the samples reflect different conditions in syneruptive magma ascent, not different characteristics of the magma at the reservoir. Although most ejecta (gray and brown ones as to pumice clasts) are products of magma mixing that resulted from syneruptive injection of basaltic andesite magma into a silicic andesite magma reservoir, the mixed magmas were homogeneous in the reservoir owing to constant mixing ratios (SiO₂ 57-58 wt.%, 30vol. % phenocrysts, 960-980C, 4wt. % H₂O).

The volcanological questions we would like to address after we reveal evolution of conduit flow through the climax phase are, 1) mechanisms that led to the cyclic sub-Plinian eruptions, including the triggering processes of each event, 2) timing and conditions of syneruptive magma ascent that are responsible for shifting eruption intensity and eruption style (explosive and effusive). We expect this groundmass textural study also helps us newly define a boundary between the 26PM and 27AM pumice deposits. The corresponding deposit exhibits reverse and normal gradings, as if it was generated in a single event (Maeno et al., in review; Nakada et al., in review). Regardless of that, the groundmass textures of the samples may record waxing and waning phases of conduit magma flow in each sub-Plinian event.

キーワード: 新燃岳, 火道流, 準プリニー式噴火, 溶岩定置, みかけ密度, 石基組織

Keywords: Shinmoe-dake, conduit flow, sub-Plinian eruption, lava emplacement, bulk density, groundmass texture

桜島南岳の噴火様式の推移と降下火山灰中塩素濃度、鉄の二価三価比変化 Chlorine content and ferric-ferrous ratio of volcanic ash emitted at Minamidake, Sakurajima in the sequence of eruption

佐藤 泉^{1*}, 野上 健治²

Izumi Sato^{1*}, Kenji Nogami²

¹ 東京工業大学地球惑星科学専攻, ² 東京工業大学火山流体研究センター

¹Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, ²Volcanic Fluid Research Center, Tokyo Institute of Technology

マグマ中の揮発性成分はマグマの地表への上昇・減圧に伴って脱ガスし噴火現象の原動力となるだけではなく、その発泡によってマグマの粘性や密度を急激に変化させ噴火様式を多様化させる。桜島火山は1955年から爆発的な噴火を繰り返す世界でも有数の活火山であり、その活動を的確に把握することが重要である。桜島は1970、80年代に南岳において大量の火山灰を放出する活発な活動を続けていたが、その典型的な噴火活動は、非爆発的なストロンボリ式噴火の後、爆発的なブルカノ式噴火が発生し、しばしば火山灰の連続的な放出へと移行するものであった。Nogami *et al.* (2006) は、桜島南岳のストロンボリ式噴火で放出された火山灰の塩素濃度はブルカノ式噴火、連続噴煙活動で放出されたものと明瞭な差があることを示したが、分析に用いた試料は一連の活動で採取されたものではない。揮発性成分が噴火様式間で異なる振る舞いを示すことは示されたが、桜島火山の一連の噴火様式の推移の中でどのように揮発性成分の振る舞いが変化していくのかを報告した例はない。そこで本研究では、1978、79年に桜島南岳から放出され継続的に採取されていた試料を用いて火山灰試料中に水に次いで多く含まれる揮発性成分の一つである塩素の定量を行い、噴火様式の推移に伴う火山灰中の塩素濃度変化を調べた。また、酸化還元状態の指標となる鉄の二価三価比についても定量を行った。これらの結果から、噴火様式とマグマ中の溶存揮発性成分量、酸化還元状態の関係について議論する。

試料には採取年月日は記されているが、放出された噴火の様式は記載されていない。そこで、ストロンボリ式噴火にはBL型地震の群発、ブルカノ式噴火には爆発地震、連続噴煙には連続微動が対応すると考え、桜島火山観測所に保管されている地震の煤書き記録から、それぞれの噴火様式に特徴的な地震波形との対応を用いて噴火様式を決定した。

ストロンボリ式噴火で放出された火山灰中の塩素濃度はブルカノ式噴火や連続噴煙で放出された火山灰のものよりも高く、ストロンボリ式噴火からブルカノ式噴火、連続噴煙という活動の推移に伴い塩素濃度が低下した。この変化から、揮発性成分に富むマグマが火口底まで上昇してストロンボリ式噴火を発生させ、揮発性成分の脱ガスに伴って噴火様式が推移していくことがわかった。また、火山灰中に含まれる鉄の二価三価比の定量結果から、ストロンボリ式噴火の際には還元性であったマグマが脱ガスの進行とともに噴火様式が推移すると酸化になる変化も捉えられた。火山灰中の塩素濃度変化と鉄の二価三価比の変化が対応することから、塩素がHClとして脱ガスする際に水素がマグマから取り去られることでマグマの酸化が生じている可能性があると考えられる。

キーワード: 桜島, 火山灰, 塩素, 鉄の二価三価比

Keywords: Sakurajima, volcanic ash, chlorine, ferric-ferrous ratio

桜島における目視に頼らない即時的な噴煙高度推定の試み Immediate Estimations of Volcanic Plume Heights without Visual Observations at Sakurajima Volcano

秋元 良太郎^{1*}, 鎌谷 紀子¹, 高山 寛美¹
Ryotaro Akimoto^{1*}, Noriko Kamaya¹, Hiromi Takayama¹

¹ 気象大学校, ² 気象大学校, ³ 気象大学校

¹Meteorological College, ²Meteorological College, ³Meteorological College

夜間や悪天候などで噴煙が確認できないときでも噴煙高度を即時的に推定できるようにするため、桜島の噴煙の最高高度と空振・爆発地震・地殻変動・噴煙の温度・高層風の間接関係を調べた。

解析期間は2012年4月6日～4月30日であり、この期間の噴火はすべて昭和火口からであった。噴煙の最高高度は、気象庁が設置している東郡元・牛根および大隅河川国道事務所が設置している重富の計3地点の遠望カメラ画像から、三角測量の原理を用いて読み取った。空振の最大振幅および振幅の積分値・地震の最大振幅(上下動成分)・振幅の積分値・傾斜変動量(火口方向成分)・ひずみ変動量(火口方向成分および火口と直交する方向の成分)は、大隅河川国道事務所が有村坑道に設置している観測機器のデータを用いて求めた。噴煙の最高温度は、大隅河川国道事務所が早崎に設置している赤外カメラ画像から読み取った。高層風の風速は、気象庁毎時大気解析での850hPa面の風速値のうち、桜島昭和火口に最も近いグリッドの値を用いた。

解析の結果、噴火のタイプは空振の最大振幅により3つに分類できることがわかった。ここでは便宜上、空振の最大振幅の大きさが20Pa未満の噴火をグループ1、20～100Paの噴火をグループ2、100Paより大きいグループ3と名付けることにする。グループ1は、噴煙高度によらず空振をほとんど伴わなかった。グループ2は中間的な空振の大きさで、目立った特徴は見られなかった。グループ3は、大きな空振を伴い噴煙高度と空振の最大振幅との間にゆるい正の相関が見られた。各々のグループについて重回帰分析を行った結果、グループ1は噴煙の最高温度・高層風の風速・地震波振幅の積分値が、重回帰モデルの説明変数として有意であった。つまり、これらのパラメータが噴煙の最高高度との相関が高いということを示している。同様に、重回帰モデルの説明変数として有意であったのは、グループ2は噴煙の最高温度・ひずみの火口と直交する方向の成分・空振の最大振幅、グループ3は、空振の最大振幅・ひずみの火口方向の成分であった。グループ1・グループ2については、自由度調整済み決定係数が0.9を超え、上記のパラメータを入力することにより、比較的高い精度で噴煙高度を推定することが可能であることがわかった。一方、グループ3については、自由度調整済み決定係数が0.4程度となり、課題が残る結果となった。

なお、各々のグループの重回帰式は以下ようになった。ここで、 H : 噴煙の最高高度[m]、 U : 地震波振幅の積分値[m]、 T : 噴煙の最高温度[°C]、 v : 850hPa面の風速値[m/s]、 P : 空振の最大振幅[Pa]、 ε_x : ひずみの火口方向の成分、 ε_y : ひずみの火口と直交する方向の成分である。

$$\text{グループ1} : H = 3.106 \times 10^5 U + 8.884 T - 120.8 v$$

$$\text{グループ2} : H = 13.06 P + 3.803 \times 10^{10} \varepsilon_y + 7.796 T$$

$$\text{グループ3} : H = 10.63 P + 2.812 \times 10^{10} \varepsilon_x$$

以上より、桜島昭和火口で噴火が発生した場合、以下の手順で噴煙の最高高度を即時的に推定できることがわかった。まず空振の最大振幅の大きさを求める。空振の最大振幅が20Pa未満の噴火については、(1) 赤外カメラに記録された噴煙の最高温度、(2) 前正時の850hPa面の風速値、(3) 地震波振幅の積分値を読み取りあるいは計算し、重回帰式に代入する。空振の最大振幅が20Pa～100hPaの噴火については(1) 噴煙の最高温度、(2) ひずみの火口と直交する成分の噴火直前からの収縮量、(3) 空振の最大振幅を、空振の最大振幅が100hPaより大きい噴火については(1) 空振の最大振幅、(2) ひずみの火口方向成分の噴火直前からの伸長量を読み取りあるいは計算して、各々の重回帰式に代入することで噴煙の最高高度を推定することができる。

キーワード: 噴煙高度, 桜島

Keywords: Volcanic Plume Height, Sakurajima Volcano

桜島北岳北斜面に分布する武テフラの産状 Occurrence of the Take tephra distributed in the northern flank of Kitadake, Sakurajima Volcano, Japan

平嶺 浩人^{1*}, 宮縁 育夫², 小林 哲夫¹
Hiroto Hiramine^{1*}, Yasuo Miyabuchi², Tetsuo Kobayashi¹

¹ 鹿児島大学大学院理工学研究科, ² 熊本大学教育学部

¹Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University, ²Faculty of Education, Kumamoto University

桜島火山は始良カルデラの南縁に位置し、歴史時代にも大規模噴火を繰り返し、現在も盛んに噴火を継続しており、わが国で最も活動的な火山である。同火山は北岳、南岳という2つの山体からなるが、本研究では約5000年前の北岳最後の山頂噴火に関する堆積物の現地調査を行なった。この堆積物は文明テフラ(1471~1476年)直下の厚さ1~2mの黒色土壌の下位に存在しており、北岳山頂から海岸まで分布している。その大半は軽石流堆積物であるが、降下軽石を挟在するため、本研究ではこの堆積物を武テフラと総称し、柱状図の作成と噴出物のサンプリングを行ない、粒度組成および構成物を明らかにした。得られた結果および層序関係や分析結果から北岳北麓に分布する武テフラをもたらしした噴火推移について検討した。

武テフラの堆積構造は、成層構造が顕著な部分と塊状の部分認められる。塊状相は谷埋め型の軽石流堆積物であり、沢の中では少なくとも8m以上の厚さがある。薄い降下軽石が挟在し、2つ以上のフローユニットが識別される場合もある。火口から約4km離れた海岸部でも弱溶結しており、北岳斜面の河床や谷壁では橙色~赤褐色をした溶結面が露出している。山頂付近は強溶結したアグルチネートとなっており、標高500m付近には溶結部の二次流動により舌状に膨らんだ溶岩末端崖状の地形が形成されている。一方、成層相は厚さが約1mで、尾根部にのみ存在するベニアタイプの堆積物である。降下軽石堆積物と火砕流堆積物が数cmから数十cmの厚さで互層しており、火砕流堆積物中には直径1cm程度の火山豆石も認められた。

代表的な露頭で、堆積物の粒度特性と構成物の分析を行なった。成層相は淘汰の良い降下軽石堆積物と淘汰の悪い細粒な軽石流堆積物に識別できた。塊状層は軽石流堆積物の本体であり、シルト~巨礫サイズの軽石・岩塊が含まれており淘汰が悪い。一部には成層相と同じ粒度特性を示す部分も存在する。また塊状相の一部には、岩片に富むblock-and-ash-flowに酷似した堆積物も認められた。

現地調査と分析結果より、武テフラを噴出した噴火の推移は次のように考えられる。噴火の規模は不明であるが、おそらく準プリニー式噴火であったと推定される。噴火の途中に複数回の火砕流が発生し、谷を埋め立てた部分は塊状相となり、尾根部には降下軽石と火砕流の周辺部が互層し成層相を形成した。塊状相では溶結現象が顕著であり、とくに山体上部で強溶結のアグルチネートとなり、部分的に二次流動現象が発生した。block-and-ash-flow状の堆積物は、強溶結の一部が崩れて集積した二次的な堆積物と判断される。

前述の通り本研究では、桜島北岳北斜面において文明テフラの下位に存在するテフラを武テフラと命名し、調査を行なった。現地で確認できた産状と粒度組成および構成物から層序関係を明らかにし、武テフラをもたらしした噴火推移について考察した。しかし、今回の調査では武テフラの基底が観察できなかったため、噴火初期の堆積物や全体の層厚は不明である。今後は武テフラのより正確な層序関係、分布および噴火推移を議論する予定である。

キーワード: 噴火推移, 火砕流, 桜島, テフラ

Keywords: eruption sequence, pyroclastic flow, Sakurajima, tephra

下門火砕流堆積物とそれに類似する南九州の諸火砕流堆積物と房総半島上総層群 Ks18 テフラとの対比の再検討

Re-examination of the correlation of pyroclastic deposits similar to Shimokado pyroclastic flow deposit and Ks18 tephra

西澤 文勝^{1*}, 鈴木 毅彦¹Fumikatsu Nishizawa^{1*}, SUZUKI, Takehiko¹¹ 首都大学東京¹Tokyo Metropolitan University

記載岩石学的特徴に基づき、中期更新世に噴出した下門火砕流堆積物とそれに伴う降下テフラ、およびそれらに類似する火砕堆積物の対比を検討した。比較に用いた記載岩石学的特徴は(1)火山ガラスの形態(2)鉱物組成(3)火山ガラス、普通角閃石、斜方輝石の屈折率(4)火山ガラス、普通角閃石、斜方輝石の主成分化学組成、の4つである。これらの基準で南九州に分布する9つの火砕流堆積物、および房総半島上総層群笠森層中の2枚の co-ignimbrite-ash fall と考えられる降下火山灰層を比較した結果、南九州では下門火砕流と明確に識別される4つの火砕流堆積物を認定し、房総半島では下門火砕流堆積物の co-ignimbrite-ash fall である Ks18 テフラと、これに類似する Ks10 テフラを識別した。

今回検討した火砕堆積物は、南九州に分布する下門火砕流(大木・早坂, 1970)、樋脇火砕流(荒牧, 1975; 荒牧・宇井, 1976)、桑の丸火砕流(佐藤ほか, 2000)、見帰凝灰岩(荒牧, 1969)、松山凝灰岩(木野・太田, 1984; 町田・新井, 2003)、加久藤火砕流下部層(荒牧, 1969)、麓火砕流(荒牧, 1975; 荒牧・宇井, 1976; 小林・露木, 1980)、二見火砕流 B(渡辺・村崎, 1988)小瀬田火砕流(町田ほか, 1977; Moriwaki et al. 2000)と、房総半島上総層群笠森層中の Ks18 火山灰(河井, 1952)、Ks10 火山灰(河井, 1952)である。これらの火砕堆積物はいずれも下門火砕流との対比や化学組成の類似性が指摘されている(渡辺・村崎, 1988; 宮地, 1992; 町田・新井, 2003 など)。

構成粒子の屈折率から下門火砕流堆積物とは異なる火砕流堆積物として判別されたのは、麓火砕流、二見火砕流 B、小瀬田火砕流の3つである。二見火砕流 B は火山ガラス・普通角閃石・斜方輝石の屈折率から、阿多島浜テフラに対比される可能性が高い。

構成粒子の主成分化学組成から、下門火砕流堆積物とは異なる火砕流堆積物として判別されたのは樋脇火砕流である。普通角閃石と斜方輝石の化学組成では両者の区別は困難だが、火山ガラスの主成分化学組成、とくに K₂O に着目すると、下門火砕流と樋脇火砕流は明瞭に区別できる。

房総半島上総層群笠森層において下門火砕流堆積物に対比される笠森層中の Ks18 火山灰(河井, 1952; 町田・新井, 2003)は、いずれの構成粒子の主成分化学組成についても下門火砕流堆積物とよく一致した。これまで Ks18 火山灰との化学組成の類似性が指摘されてきた Ks10 火山灰は(水野, 2001; 町田・新井, 2003)、火山ガラスの化学組成のうち Ca, K, Al の酸化物の三成分比や、普通角閃石の化学組成のうち Fe, Mg, Al のカチオン数の組成幅に着目すると、Ks18 テフラと明確に判別できる。

火山ガラス・普通角閃石・斜方輝石の主成分化学組成では下門火砕流堆積物と区別し難い火砕堆積物すなわち桑の丸火砕流、見帰凝灰岩、加久藤火砕流下部層、松山凝灰岩について、先行研究による層位と放射年代値、火山ガラスの形態を加味して対比の可能性を検討した。

これまで、下門火砕流の放射年代値はジルコンのフィッシュン・トラック年代測定により 0.61 ± 0.08 Ma が得られており(井村ほか, 2000)、この放射年代値は徳橋ほか(1983)により求められた 0.62 ± 0.14 Ma という Ks18 火山灰のジルコンのフィッシュン・トラック年代値に調和的である。

また、下門火砕流を含むこれら5つの火砕流堆積物の層位は、いずれも加久藤火砕流(0.33-0.34Ma, 町田・新井, 2003)より下位にあることが確認されている。さらに、桑の丸火砕流と松山凝灰岩は、笠森層中の Ks11 テフラに対比される小林火砕流(0.52-0.53Ma, 町田・新井, 2003)の下位にあることが確認されているため、Ks11 テフラより下位の Ks18 テフラに対比できるとして層位学的に矛盾がない。

また、火山ガラスの形態に着目すると、下門火砕流堆積物の火山ガラスは繊維型・スポンジ型が卓越する。このような火山ガラスの形態の特徴は、桑の丸火砕流、見帰凝灰岩、Ks18 テフラについて認められた。松山凝灰岩の火山ガラスはバブルウォール型のジャンクション部分が目立つが、有色鉱物の風化が激しいことを加味すると、火山ガラスのうち分厚いバブルウォール型のジャンクション部分のみが残存した可能性が考えられる。加久藤火砕流下部層に含まれる火山ガラスは平行型も多く存在し、褐色に着色しているため下門火砕流のそれとは異なる。

これらのことから、下門火砕流堆積物と記載岩石学的・層位学的に対比される可能性が高い火砕堆積物は、桑の丸火砕流、見帰凝灰岩、松山凝灰岩、Ks18 火山灰であることがわかった。

キーワード: 中期更新世テフラ, 下門火砕流, 火砕流堆積物, Ks18, Ks10, 笠森層

爆発的噴火における噴火様式ごとの火山灰構成粒子の特徴 Characteristics of grain composition of volcanic ash from each eruptive style

大石 雅之^{1*}, 下司 信夫¹, 篠原 宏志¹, 三輪 学央²
Masayuki Oishi^{1*}, Nobuo Geshi¹, Hiroshi Shinohara¹, Takahiro Miwa²

¹ 産業技術総合研究所 地質情報研究部門, ² 東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻

¹ Geological Survey of Japan, AIST, ² Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University

噴火様式, 噴出率や噴煙高度といった表面現象は, 噴火活動中にしばしば変化する。そのメカニズムを理解するためには, それら表面現象の推移と, マグマからの直接的証拠である火山灰の特徴の推移とを比較した検討を行うことが重要である。

霧島火山新燃岳 2011 年噴火の火山灰については, 粒子構成, 形態・組織, 石基組成の各解析を行った。その結果, 準プリニー式噴火とブルカノ式噴火ではどちらも, 火口直下でほとんど滞留・固化することなく下部から上昇してきた発泡マグマが噴出していたことが推定された。このように噴火様式ごとの火山灰の構成粒子の解析を行うことは, 噴火様式を決定するメカニズムを考えるうえで有益な指標になり得る。このためには, より多くのデータを集めることが重要である。そこで, 桜島火山昭和火口 (おもに 2012 年噴火), 諏訪之瀬島 (2012 年 11 月 9 日採取), 浅間火山 (2004 年噴火) の火山灰について, 新燃岳と同様, 火山灰構成粒子分析を行った。本発表では, そのデータについて示す。なお試料の大部分は, 気象庁より提供いただいた。

桜島火山の最近約 1 年間の噴出物を見ると, 新鮮で緻密な濃色ガラス質粒子が多く含まれる。発泡粒子量は多くても 10 % 程度である。この傾向に時系列変化はない。ブルカノ式噴火が継続しているなど噴火様式にも顕著な変化は見出されない。

また, 火口近傍から遠隔地に向かって, 火山灰の粒子構成が変化するかどうかを検討するため, 2011 年 11 月 16 日 13:22 噴火の火山灰について, 火口からの距離の異なる 5 地点で, 構成粒子を比較した。これによれば, 火口からの距離の違いによる構成粒子の変化は, 見出せなかった。

諏訪之瀬島の火山灰については, 石質岩片が豊富に含まれるのが特徴である。ただし, 濃褐色で発泡の良い, 新鮮なガラス質粒子が 15 % 程度含まれる。

浅間火山 2004 年噴火の火山灰では, 9 月 1 日噴火から 9 月 14 日噴火に向かって新鮮なガラス質粒子が減少していくが, 9 月 16 日噴火では, 発泡の良いガラス質粒子が多量に含まれている。この日から 3 日間程度, 連続的に噴煙を上げる活動に変化したことを考えると, 火山灰中の新鮮な発泡粒子量は噴火継続時間と何らかの相関を持っているのかもしれない。

以上のデータでは発泡粒子量と噴煙高度との相関はあまりないようである。一方, 発泡粒子量と噴火継続時間については, 相関があるのかもしれない。これらパラメータの相関をさらに検討するため, 今後も火山灰構成粒子のデータを蓄積していく予定である。

キーワード: 火山灰, 構成粒子, 桜島, 諏訪之瀬島, 浅間山

Keywords: volcanic ash, grain composition, Sakurajima, Suwanosejima, Asama

浅間火山山頂周辺の二酸化炭素拡散フラックス測定 Measurements of Diffuse Carbon Dioxide Flux around the Summit of Asama Volcano

森田 雅明^{1*}, 森 俊哉¹, 風早 竜之介²

Masaaki Morita^{1*}, Toshiya Mori¹, Ryunosuke Kazahaya²

¹ 東京大学大学院理学系研究科附属地殻化学実験施設, ² 九州大学大学院理学研究院附属地震火山観測研究センター

¹Geochemical Research Center, Graduate School of Science, The University of Tokyo, ²Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Sciences, Kyushu University

Carbon dioxide is one of the volatile species which exsolves in the early stage of magma degassing. Soil CO₂ flux measurements have been conducted at many volcanoes to understand magma degassing conditions and to catch primitive signals of volcanic activities. For example, an increase of CO₂ flux was observed as a precursor of the 2000 eruption at Usu volcano, Japan, followed by a sudden decrease in the flux (Hernandez et al., 2001). Asama volcano is one of the most active volcanoes in Japan with recent eruptions in 2004, 2008 and 2009. We here report results of the first diffuse CO₂ flux measurements at Asama volcano.

The measurements were carried out at 40 sites in the Maekake-yama crater on 26th October, 2012. The data were obtained by the accumulation chamber method using portable flux meter (West Systems, Inc.). The results showed that the soil CO₂ flux values were in the background level ($<10 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) in the western half of Maekake-yama crater including western flank of Kama-yama cone. In contrast, the east side of the Kama-yama cone had the fluxes more than several tens $\text{g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ with the highest value of $296 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. This high soil CO₂ flux area corresponds to the shallower highest conductive subsurface zone spreading beneath the eastern flank of Kama-yama cone (Aizawa et al., 2008). They interpreted this conductive zone as a hydrothermal system. Since the high flux area does not show any fumarolic activities or thermal anomalies, vapor in the hydrothermal fluid is probably condensing at subsurface and only dry residual gases including CO₂ are emanating from the area.

References

Aizawa, K., Ogawa, Y., Hashimoto, T., Koyama, T., Kanda, W., Yamaya, Y., Mishina, M., Kagiya, T. (2008) J. Volcanol. Geotherm. Res. 173, 165–177.

Hernandez, P.A., Notsu, K., Salazar, J.M.L., Mori, T., Natale, G., Okada, H., Virgili, G., Shimoike, Y., Sato, M., Perez, N.M. (2001) Science 292, 83–86.

キーワード: 火山, 浅間山, 拡散 CO₂ フラックス

Keywords: Asama Volcano, Diffuse CO₂ Flux

浅間山山頂域電磁気構造探査序報

Preliminary report of wide band MT survey in the summit area of Mt. Asama, Japan

小山 崇夫^{1*}, 相澤 広記², 辻浩¹, 神田 径³, 長谷 英彰¹, 山谷 祐介⁴, 渡邊 篤志¹, 橋本 武志⁵, 田中 良⁵, 高倉 伸一⁴, 小川 康雄³, 上嶋 誠¹, 長竹 宏之¹, 吉村 令慧⁶, 武尾 実¹

Takao Koyama^{1*}, Koki Aizawa², Hiroshi Tsuji¹, Wataru Kanda³, Hideaki Hase¹, Yusuke Yamaya⁴, Atsushi Watanabe¹, Takeshi Hashimoto⁵, Ryo Tanaka⁵, Shinichi Takakura⁴, Yasuo Ogawa³, Makoto Uyeshima¹, hiroyuki nagatake¹, Ryohei Yoshimura⁶, Minoru Takeo¹

¹ 東京大学地震研究所, ² 九州大学大学院理学研究院附属・地震火山観測研究センター, ³ 東京工業大学火山流体研究センター, ⁴ 産業技術総合研究所, ⁵ 北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター, ⁶ 京都大学防災研究所地震防災研究部門

¹Earthquake Research Institute, Univ. Tokyo, ²Volcano Research Center, Earthquake Research Institute, University of Tokyo,

³Volcanic Fluid Research Center, Tokyo Institute of Technology, ⁴National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, ⁵Institute of Seismology and Volcanology, Graduate School of Science, Hokkaido University, ⁶Earthquake Hazards Division, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

We conducted MT and AMT surveys in the summit area of Mt. Asama in September 2012 in order to elucidate the shallow structure beneath the crater summit including its conduit. The electromagnetic measurements were performed at 27 sites, the spacing of which is as short as about several hundred meters to detect the highly resolved structure.

The AMT measurements were conducted at all the 27 sites for several hours, and MT measurements were conducted at 9 sites for several days. The five-component MT and AMT data were collected using the Phoenix MTU system and the Metronix ADU system. However only telluric measurements were carried out at some sites because the summit area is very rocky and the surface is too hard to dig holes and install large magnetic sensors.

By estimating MT impedance tensors at some sites, the following facts were found:

1) At higher frequency as several hundred Hz, the sites at eastern side of the crater show low apparent resistivity as several ohm-m, while other sites show higher apparent resistivity beyond 100 ohm-m.

2) Low resistivity parts move to the center of the summit at middle range of frequency as 1 Hz, although the data error is relatively large due to the dead band of the EM source.

3) The center and western parts of the summit show the low apparent resistivity at lower frequency as 0.01 Hz.

The preliminary results will be shown in this presentation.

キーワード: 浅間山, 電磁気探査, 見かけ比抵抗

Keywords: Mt. Asama, MT survey, apparent resistivity

2011年阿蘇火山小規模噴火に伴う浅部比抵抗の時間変化について

The temporal changes of the shallower resistivity structure associated with a small eruptions at Aso Volcano, 2011.

宇津木 充^{1*}, 徳本 直明¹, 鍵山 恒臣¹, 小森 省吾², 浅野 剛¹, 小山 崇夫³

Mitsuru Utsugi^{1*}, Naoaki Tokumoto¹, Tsuneomi Kagiya¹, Shogo Komori², Tsuyoshi Asano¹, Takao Koyama³

¹ 京都大学理学研究科, ² 台湾中央研究院地球科学研究所, ³ 東京大学地震研究所

¹Graduate School of Science, Kyoto University, ²Institute of Earth Sciences, Academia Sinica, Taiwan, ³Earthquake Research Institute, University of Tokyo

阿蘇火山中岳第一火口では2011年5月に小規模噴火が発生した。我々はこの小規模噴火を挟んだ2011年4月~2012年4月に、ACTIVE観測システムを用いた繰り返し電磁探査を計5回行った。この観測から、噴火直後の深部における比抵抗低下、及び小噴火をもたらした活動が終息した後の浅部における比抵抗低下を示唆する観測結果が得られた。本発表ではこれらの観測結果を示すと共に、この結果から示唆される比抵抗構造の時間的な変化、及び地下熱水系の状態変化についての考察結果を示す。

阿蘇火山中岳第一火口では、これまでの研究から地下熱水分布に関する詳細な情報が得られている。例えば Kanda et al.(2008) による高密度 AMT 観測からは第一火口直下に低比抵抗域が局在する事が明らかになり、ここに熱水だまりが存在するとするモデルが提案されている。ところで近年、中岳火口では一時的に火山活動が活発化しすぐに終息する、という現象がしばしば生じている。こうした活動に伴う火山性流体の供給量変化により、この熱水だまりの領域が時間変化する事が期待される。こうした変化を浅部比抵抗構造の時間変化として捉える為に、本研究では ACTIVE 観測システム (Utada et al., 2007) を用いた繰り返し電磁探査を中岳火口周辺で行った。この観測では第一火口の北北西約 1km から人工電流を送信し、その応答として生ずる磁場を中岳第一火口の北、西、南西側と第三火口の計 4 点で観測した。全観測点でのレスポンス関数を求めた結果、第一火口南西の観測点については、低周波 (1~10Hz) で小規模噴火を挟んだ時期 (4月~7月) にレスポンス関数の値が低下、高周波 (100Hz~) では6月の梅雨期を挟んで低下、これに対し中間的な周波数 (10~100Hz) では全観測期間中で変化が非常に小さいという結果が得られた。1次元解析を行った結果、低周波帯は地下 200~300m、高周波帯は表層数十 m 程度の深度に対応することが分かった。先行研究と比較すると、地下 200~300m は Kanda et al.(2008) で示唆される熱水だまりの上端深度に対応する。レスポンス関数の低下は比抵抗の低下に対応することを考慮すると、この領域では火山活動が活発化する過程において深部からの火山ガス供給が増え、気相が卓越した状態となり高比抵抗を示していたが、小規模噴火発生後に火山ガス供給が減り液相卓越となって比抵抗が低下した可能性が示唆される。また浅部 (表層数十 m 程度の深度) で比抵抗が低下した期間は梅雨の豪雨を経て湯だまりが復活した時期に対応していることから、湯だまりの復活により火口周辺での浅部比抵抗が低下した事が考えられる。

キーワード: 比抵抗構造, 地下熱水系, 時間変化

Keywords: resistivity structure, hydrothermal system, temporal changes

噴煙中に含まれる水素分子の水素安定同位体比を指標に用いた阿蘇中岳噴気の遠隔温度推定

Remote temperature sensing on the fumarolic area in Aso Volcano using hydrogen isotopic compositions of plume H_2

小松 大祐^{1*}, 角皆 潤¹, 神村 奏恵², 中川 書子²

Daisuke Komatsu^{1*}, Urumu Tsunogai¹, Kanae Kamimura², Fumiko Nakagawa²

¹ 名古屋大学大学院環境学研究科, ² 北海道大学大学院理学研究院

¹Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, ²Graduate School of Science, Hokkaido University

【はじめに】

阿蘇火山中岳第1火口の南壁噴気地帯では、1993年から気象庁などによる赤外放射温度計を用いた表面温度測定がなされているが、その温度は最高でも500度程度である。また低い時には最高温度が100度を下回るなど、明瞭な時間変化も観測されている。一方、同噴気地帯では赤熱現象が頻繁に観測されており、噴気温度は赤外放射温度計によって得られた表面温度よりかなり高温となっている可能性が指摘されている。実際一部の高解像度の赤外放射温度計を用いた観測で、最高800度程度の表面温度が観測されたこともあるが (Saito et al., 2005) そこでもやはり明瞭な時間変化が観測されている (Furukawa, 2010)。他方、噴気プルームの CO/CO_2 組成や H_2/H_2O 組成、 SO_2/H_2S 組成などの遠隔観測から、同噴気ガスは800度前後の平衡温度を持つことが明らかにされており (Mori and Notsu, 2008; Shinohara et al., 2010) またこの平衡温度には目立った時間変化は認められていない。平衡温度は必ずしも噴気温度と一致するものではないが、一連の結果は相互に矛盾する可能性もあり、正確な噴気温度を求めるとともに、その時間変化の有無を確定する必要がある。そこで本研究グループでは、火山ガスプルーム中の H_2 の水素同位体比から噴気中の H_2 の水素同位体比を推定し、これを温度に換算することで噴気温度を遠隔から推定する水素同位体遠隔温度測定法 (HIRETS: Hydrogen Isotope Remote Temperature Sensing) を利用して、同噴気地帯の噴気温度を推定した。またその時間変化について報告する。

【方法】

プルーム試料の採取は2010年11月、2012年9月、2012年11月の3回行った。いずれも噴気地帯まで直線で150-300m程度の火口壁の上から、各回14-22試料程度のプルーム試料を内容積300mLの真空ガラス容器に大気圧まで分取して持ち帰り、開発した連続フロー型質量分析システム (Komatsu et al. 2011) を用いて H_2 濃度および水素安定同位体組成を分析し、噴気ガス中の H_2 の水素同位体比と噴気温度を推定した。

【結果・考察】

噴気プルームは、対流圏 H_2 のバックグランド濃度に近い0.54 ppmv から最高2.77 ppmv まで幅広く分布し、平均でも1.2 ppmv と高い H_2 濃度を示した。噴気プルーム中の H_2 濃度と水素同位体比の関係はいずれも明瞭な二成分混合線を示し、ここから推定した噴気ガス中の H_2 の水素同位体比は、2012年の二度の観測ではほぼ一致し、2010年11月 (-172±16 permil vs VSMOW) と誤差の中で一致した。ここから島弧火山のマグマ水の値 (-24±7 permil vs VSMOW) を噴気ガス中の H_2O の水素同位体組成として用い、同位体平衡から求めた噴気温度は2010年に866±96度となった。同噴気は、赤外放射温度計を用いた観測表面温度の長期変化や赤熱の有無とは無関係に、噴気ガスの平衡温度に近い高温状態でほぼ一定温度を保っている可能性が高い。

キーワード: 火山ガス, プルーム, 水素, 安定同位体, 同位体交換平衡, 遠隔温度測定

Keywords: fumarolic gases, volcanic plume, molecular hydrogen, stable isotopes, isotope exchange equilibrium, remote temperature sensing

阿蘇カルデラにおける水準測量 (2012年9月) Precise Leveling Survey in Aso Caldera(September, 2012)

大倉 敬宏^{1*}, 吉川 慎¹, 井上寛之¹, 横尾 亮彦¹, 松島 健², 藤田 詩織², Lawrence C. Banes³, 山本 圭吾⁴, 園田忠臣⁴, Kushendratno⁵, 安部 祐希¹, sofyan yayan¹, 諏訪 博之⁶, 二村 忠宏⁶, 堀田 耕平⁶, 佐藤佑輔⁷, 高橋温志⁷, 宇津木 充¹
Takahiro Ohkura^{1*}, Shin Yoshikawa¹, Hiroyuki Inoue¹, Akihiko Yokoo¹, Takeshi Matsushima², Shiori Fujita², Lawrence C. Banes³, Keigo Yamamoto⁴, Tadaomi Sonoda⁴, Kushendratno⁵, Yuki Abe¹, yayan sofyan¹, Hiroyuki Suwa⁶, Tadahihiro Nimura⁶, Kohei Hotta⁶, Yusuke Sato⁷, Atsushi Takahashi⁷, Mitsuru Utsugi¹

¹ 京都大学火山研究センター, ² 九州大学大学院理学研究院附属地震火山観測研究センター, ³ フィリピン火山地震研究所,
⁴ 京都大学防災研究所附属火山活動研究センター, ⁵ Center for Volcanology and Geological Hazard Mitigation, ⁶ 京都大学大学院理学研究科, ⁷ 京都大学大学院理学部

¹ AVL, Kyoto Univ., ² Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Sciences, Kyushu University, ³ PHIVOLCS, ⁴ Sakurajima Volcano Research Center, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, ⁵ Center for Volcanology and Geological Hazard Mitigation, ⁶ Graduate School of Science, Kyoto University, ⁷ Faculty of Science, Kyoto University

1. はじめに

阿蘇火山では、2011年5月15日から6月9日まで、ごく小規模な噴火が断続的に発生するなど、火山活動が活発化する兆候が見られる。我々は2012年9月に、阿蘇カルデラの地殻変動を検出する目的で一等水準測量を実施したので、その結果および近年の阿蘇火山の地殻変動について報告する。

2. 阿蘇火山の地殻変動

阿蘇火山周辺では、京都大学火山研究センターにより1937年から繰り返し水準測量が行われてきた。その結果として、中岳火口の西南西約2kmの地点を中心とした沈降が観測されている。そして、この沈降は中岳火口の西3km(草千里)の地下4-6kmを中心とする収縮力源により引き起こされたと考えられている(須藤・他、2006)。地震波トモグラフィの結果から、草千里の地下6kmには直径2-3kmの低速度領域が存在することが明らかにされている(Sudo and Kong, 2001)。この低速度領域の位置は収縮力源の位置とほぼ一致し、収縮力源がマグマ溜まりに対応すると考えられている(須藤・他、2006)。

大倉・他(2009)は2004年と2008年の水準測量の結果から、草千里周辺部では山麓部に比して最大で2.2cm沈降していること、この沈降を引き起こした変動源(Mogiソース)は、草千里直下の約5kmの深さに位置し、須藤・他(2006)が求めた位置より約1.6km北にずれていることを明らかにした。この変動源での収縮量は $3 \times 10^6 \text{ m}^3$ と見積もられ、2004年から2008年に火口から放出された火山ガスがマグマ中で占めていた体積とほぼ等しく、火道内マグマ対流により効率的に脱ガスが進んでいることが示唆されている。

3. 2012年の水準測量

今回の測量路線は、阿蘇登山道路坊中線、赤水線そして地獄温泉から吉田線であり、これらの総延長は45kmである。測量方法は、各水準点間の往復測量で、往復差および環閉合差が一等水準測量の許容誤差以内となるように実施した。

4. 結果

中央火口丘北麓のAVL-1を基準とし、計算された阿蘇登山道路坊中線の比高値を過去の測量結果と比較した。その結果、2008年から2012年にかけても草千里における沈降が観測された。しかし、その沈降量は最大で約1.2cmと2004年から2008年の沈降量とくらべて約6割に減少していた。

2004年から2012年の間に、火口からの火山ガス放出量に大きな変化がないことから、マグマ溜まりでの脱ガスによる体積減少量には変化がないと考えられる。したがって、沈降量すなわちマグマだまりの収縮量の減少は、草千里下のマグマ溜まりへの深部からのマグマ供給量が増加したことを示唆している。

キーワード: 阿蘇火山, カルデラ, 精密水準測量, マグマだまり

Keywords: Aso volcano, Caldera, Precise leveling survey, Magma chamber

開口型火道の減圧による 2008 年 2 月の桜島昭和火口噴火時の山体変形の解釈 An explanation of volcano deformation during an eruption at Sakurajima Showa crater: decompression of open conduit

養和 貴史^{1*}, 川口 亮平¹, 西村 太志¹

Takashi Minowa^{1*}, Ryohei Kawaguchi¹, Takeshi Nishimura¹

¹ 東北大学・理・地球物理

¹Geophysics, Science, Tohoku University

1. はじめに

火道内のマグマ流のダイナミクスを議論するためには、噴火に伴い観測される山体変形を及ぼす圧力源の時空間変化をとらえることが必要である。本研究では、噴火時のマグマ後退を移動圧力源としてとらえ、山体変形を数値的に求めてその特徴を調べる。さらに桜島で報告されている観測記録との比較を行い、マグマ後退の時空間変化を推定する。

2. 噴火時の移動圧力源モデル

ブルカノ式噴火は、マグマ最上部に“ふた”が形成され、その下にマグマが満たされており、ふたが取れて圧力が解放されることによって爆発が発生すると考える。マグマ最上部は急減圧を受けるためマグマ破碎が起こり、マグマ最上部は火山灰を放出しながら深部へ伝播する。この時火道壁にかかる応力は次のように考えられる。火道内マグマの噴出によってマグマヘッドの位置が下がり、火道壁に及ぼされていた法線応力が減少する。また、同時に下方からのマグマの上昇による動摩擦力が上向きに火道壁に加わり、その反作用の力が深部で働く。以上を考慮して、変動源をマグマの圧力変化による法線応力と、マグマの流れによって火道に働く動摩擦力とその反作用とする。一定の圧力勾配を持つ領域をマグマ最上部に設定し、その位置を火口から下方へ移動させる。そしてマグマ最上部より上の火道壁には大気圧を、一定の圧力勾配を持つ領域の火道壁にはマグマ圧の減圧と鉛直上向きの動摩擦力を加える。また動摩擦力の反作用を火道の底に加える。

3. 計算結果

数値計算には 3 次元の境界要素法を用いる。国土地理院の 10m メッシュ基盤地図情報数値標高モデルを基に桜島火山地形を再現し、昭和火口直下に半径 15m の円筒形火道を作成する。火道壁に上で述べたモデルに基づき応力を加え、地表面の歪、傾斜変動を計算する。

桜島の地殻変動観測点である、有村観測坑道(火口の南南東 2.1km)とハルタ山観測坑道(火口の北西 3.2km)直上の地表面における火口方向の傾斜、歪の、収縮源と動摩擦力による変化を調べる。マグマ最上部の初期位置は標高 650m とする。まず有村での法線応力による山体変形を説明する。マグマ最上部を標高 650m から下げていくと、傾斜は 0m までは顕著な変化は示さない。その後 0m 付近から火口方向の沈降を示し、-1300 m 付近で火口方向の隆起に転じる。火口方向の歪は、まず伸長を示し、マグマ最上部が -950 m 付近に達すると収縮に変化する。動摩擦力とその反作用は、噴火直後から火口方向を隆起させ、マグマ最上部が -1300m 付近に到達すると火口方向の沈降へと変化させる。また、歪は噴火直後から収縮、-950m 付近から伸長となる。ハルタ山でも同様の傾向を示すが、傾斜や歪が極大、極小となる深さは有村よりも数百 m 深い。以上のことは、傾斜や歪記録の極大、極小となる時間に注目することで、マグマ最上部の後退過程を調べることができることを示している。

4. 観測データとの比較

井口(2008)に報告されている、2008 年 2 月 6 日 11 時 25 分の昭和火口噴火の観測記録と計算結果の比較を行う。観測記録には、噴火開始から 10 分後に有村、ハルタ山両観測点において火口方向の歪記録が伸長から収縮への変化が示されている。法線応力による歪が伸長から収縮に変化する深さと比較すると、噴火開始から約 10 分後にマグマ最上部は -950m ~ -1150m 程度まで後退したと推定される。

マグマ最上部が -2000m 以深になると、法線応力による傾斜は火口方向の隆起を示す。しかし、観測記録には噴火が継続する中で沈降から隆起への変化は認められない。このことは -2000m 以浅で噴火が停止した、あるいは、より深部での収縮が同時に起きていることを示す。

傾斜記録に着目すると、噴火開始直後には火口方向の隆起が記録されている。これは火口浅部のマグマ上昇による鉛直上向きの動摩擦力によって説明できる。なおこの動摩擦力による歪への影響は比較的小さく、上述の推定には大きな影響を及ぼさない。

5. まとめ

噴火中のマグマ最上部の後退現象に伴って火道壁に及ぼされる圧力源をモデル化し、桜島における傾斜、歪変動を計算した結果、観測された歪や傾斜の時間的な変化をおおむね説明できることがわかった。

キーワード: 山体変形, 桜島, 開口型火道

Keywords: volcano deformation, Sakurajima, open conduit

地盤変動観測に基づく桜島火山のマグマ蓄積・移動過程の研究—1998～2005年— Study of magma accumulation and supply processes based on ground deformation at Sakurajima volcano from 1998 to 2005

堀田 耕平^{1*}, 大倉 敬宏¹, 井口 正人², 山本 圭吾²

Kohei Hotta^{1*}, Takahiro Ohkura¹, Masato Iguchi², Keigo Yamamoto²

¹ 京都大学大学院理学研究科, ² 京都大学防災研究所

¹ Graduate school of Science, Kyoto Univ., ² DPRI, Kyoto Univ.

桜島火山は、始良カルデラ南端に位置する活火山である。1955年以降の山頂噴火活動に伴う桜島および始良カルデラ周辺の地盤上下変動は、主に精密水準測量によって検出されてきた。1946年以降、その地盤は隆起を続けてきたが、火山噴火回数が増加し始めた1974年以降、隆起が停止し沈降が始まった。その沈降パターンは、始良カルデラ下約10 km（主圧力源）と南岳山頂直下約5 km（副圧力源）の2つの球状圧力源によってモデル化されてきた（江頭・中村, 1986; 江頭, 1989 など）。始良カルデラ周辺の地盤は、1993年以降沈降から隆起に転じ、1999年の一時的な噴火活動の増加を除いて噴火活動が減少した。桜島では2006年6月に昭和火口の噴火活動が再開した。本研究では、GPS観測により急激な膨張が検出され始めた1998年から昭和火口の噴火活動が再開する直前の2005年までのGPSデータを解析し、1999年の南岳爆発噴火活動の活発化や昭和火口の噴火活動再開に先行するマグマの蓄積・移動過程について考察した。

1998～2005年の桜島火山観測所のGPSデータと国土地理院のGEONETデータを用いて解析を行った。使用した観測点は、桜島から約30 kmの範囲に分布している。連続GPS観測から、地盤変動率は変化していることが分かった。変動率の小さい1998年1月～12月（Phase A）と1999年9月～2004年11月（Phase C）について、球状圧力源を仮定してグリッドサーチ法で圧力源の位置を求めたところ、深さは9.6～9.7 kmに求まった。Phase Cの圧力源は始良カルデラ内部に求まったことから、これまで始良カルデラ内部地下約10 kmに推定されてきた圧力源と同一のものであると考えられる。Phase Aについては桜島寄りであるが、位置決定誤差が大きいので、Phase Cで得られた圧力源と同一のものである可能性がある。これらの期間では、始良カルデラ下の主マグマだまりにマグマが蓄積されたと推定される。一方、地盤変動率の大きい1998年12月～1999年9月（Phase B）と2004年11月～2005年3月（Phase D）については、桜島北部深さ6～7 kmに決まり、Phase A, Cよりも浅い。Phase Bは1999年10～12月の南岳爆発噴火活動活発化の直前であり、Phase Dは2006年6月の昭和火口噴火活動再開に先行することから、これらの期間において、始良カルデラ下のマグマだまりよりも相対的に浅い場所である桜島北部の深さ6～7 kmにマグマが移動したことが示唆される。

体積変化については、Phase A, B, Dでは $0.95 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{year}$ と見積もられた。これは、桜島における平均的なマグマ供給率（ $1 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{year}$ ）とほぼ同じである。一方、1999年の噴火活動以降噴火活動が減少したPhase Cでは、 $0.5 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{year}$ と見積もられた。これは他のPhaseの約半分である。噴火活動の盛衰とマグマの供給率とに関係があることが示唆される。

キーワード: 桜島火山, 始良カルデラ, 地盤変動, GPS, 精密水準測量, 茂木モデル

Keywords: Sakurajima volcano, Aira caldera, ground deformation, GPS, precious leveling, Mogi's model

南九州始良カルデラ下の地殻構造

Velocity structure beneath the Aira caldera in southern Kyushu

宮町 宏樹^{1*}, ポール・カーソン・アラニス², 八木原 寛¹, 為栗 健³, 井口 正人³

Hiroki Miyamachi^{1*}, Paul Karson ALANIS², Hiroshi Yakiwara¹, Takeshi Tameguri³, Masato Iguchi³

¹ 鹿児島大学理工学研究科, ² フィリピン火山地震研究所, ³ 京都大学防災研究所

¹Kagoshima Univ., ²Philippine Institute of Volcanology and Seismology, ³Kyoto University

Associated with the Philippine Sea plate subduction, a nearly straight chain of active Quaternary volcanism runs almost parallel to Nankai Trough in the central part of southern Kyushu. In this region, there are four large calderas: the Kakuto, the Aira, the Ata and the Kikai calderas.

We applied the tomography method with a fine grid configuration to the P- and S-wave arrival times of 829 local earthquakes well observed at 101 stations in central and southern Kyushu, and revealed the detailed three-dimensional seismic velocity structure of the crust, especially the region beneath the Aira caldera.

In a shallow range from 0 to 10 km depth, low velocity zones (LVZs) are found in the eastern part of Kyushu, where basement rocks are made up of uplifted sedimentary marine terraces (Nakada et al., 2002). The LVZs are also distributed along the volcanic front between Kirishima volcano to Kaimon volcano. Meanwhile, the hypocenters occurred in the inland area are obviously concentrated in regions with a relatively higher velocity and a low Poisson's ratio at a depth of 10 km.

At 20 km depth, the most interesting feature is that a distinctly high Poisson's ratio zone is located exactly beneath the Aira caldera. This compacted zone also extends southward and connects the Aira caldera with the Ata caldera.

At 30 km depth, a small zone with high Poisson's ratio appears to remain beneath the Aira caldera. This small zone is assumed to be a portion of the distinctly high zone at 20 km depth. We also found that the velocity distribution in the western region (Satsuma Peninsula) is quite different from that in the eastern region (Osumi Peninsula): the western region is characterized by high P- and S-wave velocities, while the eastern region is characterized by the low velocities.

The anomaly with a very high Poisson's ratio at 20 km depth beneath the Aira caldera possibly suggests the presence of partial melts and the source of volcanism in the area. It is also found that LF earthquakes occur in the lower crust in and around the Aira caldera. A deeper part of the focal zone of these LF earthquakes appears to overlap the high Poisson's ratio zone observed at 30 km depth. These facts lead us to postulate that magma penetrating into the crust from the upper-most mantle may construct the high Poisson's ratio zone at about 30 km depth, and move upwards through the LF focal zone, and finally be stored at about 20 km depth.

Ishihara (1990) described the magma supply system of Sakurajima volcano wherein one magma reservoir is located at about 4 km depth just beneath Sakurajima volcano and another at 8 to 10 km depth beneath the Aira caldera. Although space resolution in our tomography is insufficient to distinguish these magma reservoirs in the upper-most crust, our result puts forward a possibility of the deeper magma reservoir supplying two shallow magma reservoirs previously found.

キーワード: 始良カルデラ, 桜島, 速度構造

Keywords: Aira caldera, Sakurajima, Velocity structure

桜島火山におけるアクロスを用いた能動的モニタリング -観測報告 2 - Active monitoring by using ACROSS in Sakurajima volcano - observation report 2 -

宮町 宏樹^{1*}, 八木原 寛¹, 山岡 耕春², 渡辺 俊樹², 國友 孝洋², 井口 正人³, 為栗 健³, 三ヶ田 均³, 清水 洋⁴, 竹中 博士⁴, 生田 領野⁵

Hiroki Miyamachi^{1*}, Hiroshi, YAKIWARA¹, Koshun, YAMAOKA², Toshiki, WATANABE², Takahiro, KUNITOMO², Masato, IGUCHI³, Takeshi, TAMEKURI³, Hitoshi MIKADA³, Hiroshi, Shimizu⁴, Hiroshi, TAKENAKA⁴, Ryoya, IKUTA⁵

¹ 鹿児島大学理工学研究科, ² 名古屋大学, ³ 京都大学, ⁴ 九州大学, ⁵ 静岡大学

¹Kagoshima University, ²Nagoya University, ³Kyoto University, ⁴Kyushu University, ⁵Shizuoka University

In March, 2012, we installed the ACROSS (Accurately Controlled Routinely Operated Signal System) composed of two vibrators at the western foot of active Sakurajima volcano (Yamaoka et al., 2012).

The first test operation was carried out during a period from June 12th from September 17th, 2012. The objectives of this operation were to construct the remote monitoring and control manipulation system, and to ascertain whether the seismic stations, belonging to JMA, Hinet, Kyoto Univ. and Kagoshima Univ., located in and around Sakurajima volcano could detect the ACROSS signals. We configured one vibrator with a constant signal frequency of 10.01Hz and the other with a signal frequency range of 12.50Hz +/- 2.50Hz in a linear sweep interval of 50 sec. We found that the signals successfully propagated through the volcanic area: the transfer functions at the seismic stations located in Sakurajima island can be clearly estimated by stacking seismic data during three to five days. On the other hand, the stations around the Aira caldera need to the seven days stacked data to obtain the transfer functions.

On September 19th, we have started the second test operation under synchronized control of two vibrators: one vibrator with a signal frequency range of 7.510Hz +/- 2.50Hz and the other with the range of 12.505Hz +/- 2.50Hz. We also deployed four temporary seismic stations so as to surround the summits of Sakurajima volcano. Our purposes in this operation were to estimate a transfer function in a wide signal range from 5Hz to 15Hz at each station, and to detect temporal change of the function.

At first, we estimated the daily transfer functions for each station by every 5 days stacked data during a whole period of the operation. We simply calculate the mean transfer function for each station from the estimated daily transfer functions, and evaluated the difference (DTF) between the mean transfer function and the daily transfer functions. The DTF in the early part of the daily transfer function, which is corresponding to P wave arrivals, is found to be generally small. On the other hand, the DTF in the later phases is large. We also found that the DTF at some stations clearly and temporally changes. We supposed that the phases with a large DTF possibly indicate the temporal change of the transfer function. To verify the temporal change, we evaluated the travel time change of the phases with a large DTF by applying the cross-correlation procedure. In the presentation, we will report the observation results in detail.

キーワード: 桜島, アクロス, 火山, 伝達関数

Keywords: Sakurajima, ACROSS, volcano, transfer function

霧島火山・新燃岳 2011 年マグマ噴火の先駆的噴火 Precursory eruptions of the 2011 Shinmoedake eruptions, Kirishima volcanoes

田島 靖久^{1*}, 筒井 正明², 長井 雅史³, 小林 哲夫⁴

Yasuhisa Tajima^{1*}, Masaaki Tsutsui², Masashi NAGAI³, Tetsuo Kobayashi⁴

¹ 日本工営, ² ダイヤコンサルタント, ³ 防災科学技術研究所, ⁴ 鹿児島大学

¹Nippon Koei Co., Ltd., ²Dia Consultants Co., Ltd., ³National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention,

⁴Kagoshima University

新燃岳では 2011 年 1 月の本格的なマグマ噴火に先行して、その前触れの噴火が 2 年半ほど前から発生していた。最初は 2008 年 8 月 22 日に発生した割れ目噴火である。噴出量が約 20 万トンとやや規模が大きかったが、マグマ物質は確認されなかった(下司・他, 2010)。その後、2010 年 3 月 30 日、4 月 17 日、5 月 27 日、6 月 27、28 日、7 月 5、10 日と水蒸気噴火が続く、2011 年 1 月 19 日にはマグマが関与する噴火が発生し、26 日の午後から本格的なマグマ噴火へと移行した。我々は 2010 年および 2011 年 1 月 19 日の噴出物調査を実施していたため、その概要を報告する。

2010 年 3 月 30 日の噴火はごく小規模で、その火山灰は火口の東および南の登山道沿いに極わずかな泥滴状の付着として認められた。火口南の気象庁カメラ付近で採取した火山灰量から、10 トン前後の噴出量と推定した。5 月 27 日には水蒸気爆発が発生し、火山灰は高千穂河原から中岳にむかう登山道沿いの葉上に小斑点状の付着物として認められた。火口に近づくにつれ降水量が増大し、噴出量を約 100 トンと推定した。その後に発生した 6 月 27、28 日の噴火の調査はできなかったが、火口の東約 10 km の地点でも降灰があった(火山活動解説資料(平成 22 年 6 月))と報告されており、5 月 27 日噴火より規模が大きかったと推定される。7 月 10 日の水蒸気爆発では小規模な火砕サージ(火山活動解説資料(平成 22 年 7 月))が発生したと報じられたが、爆発映像やテフラの分布等を総合的にとらえると火砕サージとの見解は誤認であったと判断される。

半年後の 2011 年 1 月 19 日に再び噴火が発生した(火山活動解説資料(平成 23 年 1 月))。テフラの分布は火口から南東に向かい、都城市街から日向灘にまで達した。当初、小規模な噴火といわれたが、噴出量は約 10 万トンであった。またマグマ物質が 10%以下含まれていた(鈴木・他, 2012)。この堆積物は、全体的に細粒であり、乾燥後の堆積物のみかけ密度は 1.0 g/cm^3 より小さかった。サブプリニー式やプリニー式噴火に伴う前駆噴火は桜島大正噴火、新燃岳享保噴火、浅間山天明噴火などで生じていたが、前駆噴火による堆積物のみかけ密度の報告はない。セントヘレンズでの前駆噴火として水蒸気噴火の $1.2 \sim 1.6 \text{ g/cm}^3$ のみかけ堆積密度が報告されている(Sarna-Wojcicki, et al., 1981)。新燃岳 2011 年 1 月 19 日はマグマが関与した噴火であり、小さなみかけ密度の降下火砕物が堆積したことはサブプリニー式噴火直前の噴火として特筆する現象と考えられる。また、本堆積物を 1 年以上経過した後確認したところ、灰色から黄白色に変化しいわゆる水蒸気噴火の堆積物と酷似した層相となっていた。

キーワード: 霧島火山, 新燃岳, 2011 年, 先駆的噴火, 火山灰, みかけ密度

Keywords: Kirishima volcanoes, Shinmoedake, 2011, Precursory eruption, ashfall, bulk density

霧島火山周辺の上部地殻内3次元地震波速度構造

Three-dimensional seismic velocity structure of the upper crust beneath Kirishima Volcanoes

米良諒麻¹, 八木原 寛^{2*}, 平野舟一郎², 中尾 茂², 後藤 和彦², 宮町 宏樹²

Ryoma Mera¹, Hiroshi Yakiwara^{2*}, Syuichiro Hirano², Shigeru Nakao², Kazuhiko Goto², Hiroki Miyamachi²

¹ 鹿児島大学理学部, ² 鹿児島大学大学院理工学研究科

¹ Faculty of Science, Kagoshima Univ., ² GSE, Kagoshima Univ.

霧島火山・新燃岳で2011年に発生した噴火開始前のマグマ蓄積期における山体の膨張について、中尾・他(2011)や Nakao et al. (2012, submitted) は、GPS データから地盤変動力源モデルを新燃岳の北西 5km の深さ約 10km に推定した。一方で、霧島火山の地震波速度構造の先行研究(例えば、山本・井田, 1994; 西・鍵山, 2002) では、いずれもこの深さを含む領域の S 波速度分布の情報が得られていない。そこで著者らは、中南部九州周辺で発生した地震の観測データを用いて 3 次元 P 波及び S 波地震波速度モデルを求め、霧島火山周辺の上部地殻内の速度構造について考察したので報告する。

2001~2012 年の期間に九州中南部で発生した地震のうち、深さ 50km 以浅、M2.5 以上の地震を対象として、鹿児島大学、九州大学、JMA、及び Hi-net の合計 67 観測点における地震波形データを用いて検出した。その結果、解析に用いた地震数は 305、P 波及び S 波の検出数はそれぞれ、15,221、及び 13,649 である。まず 3 次元速度解析の初期モデルを求めるために 1 次元地震波速度構造解析 (CROSSON, 1976) を行ったのち、得られた 7 モデルを平均して 3 次元解析の初期モデルとした。3 次元解析においては、対象領域に 3 次元のグリッドを設定 (THURBER, 1983) し、インバージョンの手法で未知パラメータ (V_p , V_s , 震源要素の補正量) を求めた。これを走時残差 rms が収束するまで繰り返し計算した。波線追跡には Pseudo-bending 法 (UM and THURBER, 1987) を用いた。またチェッカーボード解像度テストの結果とリゾリューション (解像度行列の対角要素) を比較し、解が信頼できる領域を抽出した。

解析の結果、霧島火山周辺下の深さ 5~15km の P 波、及び S 波の 3 次元速度モデルが得られた。霧島火山付近に設置された地震観測点数が少ないために、深さ 5km 以浅の速度モデルの信頼性は低い。解析の結果得られた、深さ 10km の速度構造の特徴は次のとおりである。(1) 解析領域の北西側と南西側の山麓下に速度偏差 10~13% の高 V_p 領域 (6.8~7.0km/s) が広く分布する。(2) 霧島火山群直下は全般的に速度偏差が 11%~15% の低 V_p 領域 (5.3~5.5km/s) である。さらに速度偏差が 10~26% の低 V_s 領域 (2.7~3.2km/s) が霧島火山群の北西領域下に存在することが分かった。

この明瞭な低 V_s 域は、その V_p/V_s が 1.9~2.1 と高い値を示し、かつ地盤変動力源 (Nakao et al, 2012) を含む。低 V_p 、低 V_s 、高 V_p/V_s の特徴は、この領域付近にマグマ溜りが存在することを示唆する。

謝辞

本研究を実施するにあたり、気象庁、防災科学技術研究所のデータを使用させていただきました。さらに、本研究は、東京大学地震研究所共同研究プログラムの援助を受けました。以上の各機関の皆様に謝意を表します。

キーワード: 霧島火山, 地震波速度構造

Keywords: Kirishima Volcanoes, Seismic velocity structure

霧島新燃岳火山 2011 年噴火前後の地殻変動とマグマだまりの推定

Estimation of magma chamber related to the 2011 eruption of Shinmoedake volcano, Japan

藤田 詩織^{1*}, 松島健²

Shiori Fujita^{1*}, MATSUSHIMA, Takeshi²

¹九州大学大学院理学府地球惑星科学専攻, ²九州大学大学院理学研究院附属地震火山観測研究センター

¹Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Sciences, Kyushu University, ²Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Sciences, Kyushu University

火山活動の特徴を理解し、将来予測に役立てるためにはマグマだまりの位置及び形状を推定することが重要である。地下のマグマだまりの膨張収縮に伴い地表に変位が生じる。この研究では、霧島新燃岳火山において、GPS の地表変位データを用いて 2011 年の噴火前後の地殻変動の解析を行い、新燃岳直下のマグマだまりの推定を行った。

新燃岳では 1959 年以来からの 52 年ぶりの噴火以降、火山性微動、小規模噴火が間欠的に起こっていた。2011 年 1 月 19 日の小規模噴火、26 日のマグマ噴火の発生に続き、27 日から爆発的噴火が起こるようになった。2011 年 2 月の爆発的噴火後は 2011 年 9 月まで噴火が間欠的に続いた。2012 年に入ると火山性地震は継続して観測されたものの、噴火は起こらなかった。

今回の研究で用いたデータは 2003 年から 2012 年までの国土地理院の GEONET の F3 解の GPS 変位データである。GEONET は地殻変動を観測するために設置された GPS による電子基準点の固定点で、日本全国におよそ 25~30km ごとに設置されている。今回、桜島の影響を含めて解析するため、新燃岳周辺の GEONET 観測点に加え、さらに南方の桜島周辺の観測点を含めて解析を行った。

観測期間を変位の変化の傾向の違いに着目して 5 つに分け、それぞれの期間に対して地殻変動の解析及びマグマだまり位置や形状、変化量の推定を行った。地下に複数のマグマだまりを仮定し、それぞれが変化すると考えると、観測された地表変位を説明できることがわかった。

雌阿寒岳における積雪期 GPS 観測とレドームの試作 Continuous GPS observation in snow season with a hand-made radome at Mt. Meakan-dake

森 済^{1*}, 奥山 哲¹, 村上 亮¹

Hitoshi, Y. Mori^{1*}, Satoshi Okuyama¹, Makoto Murakami¹

¹ 北海道大学理学研究院地震火山研究観測センター

¹ Institute of seismology and volcanology, faculty of science, Hokkaido university

雌阿寒岳において、2011 年 7 月から、非積雪期だけの GPS 連続観測を、既設の連続観測点が無い北麓から東麓にかけての 3 点 (FPS; 北麓、HKT; 北東麓、SMZ; 東麓) で開始した。また、十勝岳東斜面・山麓でも、2011 年 8 月から同様の観測を開始した。2011 年の観測結果については、2012 年の地球惑星科学連合大会で報告した。使用している機材は、受信機がトリンブル製 5700 型、アンテナがトリンブル製 Zephyr Geodetic である。

2012 年も、両火山において、引き続き観測を行った。雌阿寒岳の 2011 年 7 月～11 月と 2012 年 5 月～11 月の観測の比較を行ったところ、季節変動は、ほぼ同じ変化を示した。従って、現時点では雌阿寒岳については有意な火山性地殻変動は検知できていない。また、季節変化の原因については、冬季の積雪期の観測がないこともあって、明確になっていない。

今回、通年観測を行うことによって季節変化の問題を考えることを計画し、雌阿寒岳の 3 観測点のうち比較的積雪が少なく、冬季でもアンテナ柱が埋没しない東麓の SMZ 観測点において、アンテナに手製のアクリル製のレドームを被せて、冬期間の観測を試みることにした。データは受信機内蔵の CF カードに記録されるが、1 秒サンプリングで、4 月前半までは収録可能である。

レドームは直径 45cm の 3mm 厚のアクリル円盤と、その上に被せる、同じく 3mm 厚の直径 45 の半球とからなる。アンテナは整準台ともどもこの中に収納されている。SMZ 観測点には、積雪期には近づけないので、レドーム上に積雪するか、積雪があった場合どのような影響があるかを見るために、同じものを 2 個作製し、そのうちの 1 個を使って、札幌の北海道大学構内で試験観測を実施中である。

発表時には、雌阿寒岳の SMZ 観測点の通年 (2012 年 5 月～) の結果を示すとともに、札幌における試験観測による積雪の影響についても述べる。

キーワード: GPS, 雌阿寒岳, 連続観測, 雪

Keywords: GPS, Mt. Meakan-dake, continuous observation, snow

G P S 観測による三宅島 2000 年噴火以降の地殻変動について Crustal deformation of Miyakejima volcano, Japan since the eruption of 2000 using dense GPS campaign observation

福井 海世^{1*}, 松島 健², 弓取 なつみ¹, 及川 純³, 渡邊 篤志³, 奥田 隆⁴, 小澤 拓⁵, 河野 裕希⁵, 宮城 洋介⁵
Miyo Fukui^{1*}, Takeshi Matsushima², Natsumi Yumitori¹, Jun Oikawa³, Atsushi Watanabe³, Takashi OKUDA⁴, Taku Ozawa⁵, Yuhki Kohno⁵, Yosuke Miyagi⁵

¹九州大学大学院理学府地球惑星科学専攻, ²九州大学大学院理学研究院附属地震火山観測研究センター, ³東京大学地震研究所, ⁴名古屋大学環境学研究科地震火山・防災研究センター, ⁵独立行政法人 防災科学技術研究所

¹Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Sciences, Kyushu University, ²Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Sciences, Kyushu University, ³Earthquake Research Institute, University of Tokyo, ⁴Earthquake and Volcano Research Center, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, ⁵National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

三宅島は、東京から南へ約 175km に位置しており、直径約 8km ほぼ円形の主に玄武岩 (SiO₂ 50 ~ 56 %) からなる成層火山である。三宅島は、有史以降少なくとも 15 回噴火しており、過去 100 年間では約 20 年間隔で噴火を繰り返している。最新の噴火は 2000 年に発生した。この噴火では、約 2500 年ぶりに山頂部に陥没カルデラが形成されるとともに、長期間にわたって火山ガスを大量に噴出し、島民は 4 年半にわたり避難を余儀なくされた。この噴火様式は、過去 100 年の噴火と大きく異なっており、次の噴火がいつ、どのように起こるのかを予測することは大変難しい。

三宅島では、1995 年より東大・九大・名大の共同で稠密な GPS 観測網が構築され、毎年キャンペーン観測が実施されていた。2000 年噴火では、観測された変位量からマグマ貫入の様子が詳細に捕えられた。しかし、多量の火山性ガス噴出にともなう入域制限のため、2002 年 ~ 2010 年にかけて大学共同の GPS 観測は途絶えていた。そこで、2011 年から九大地震火山観測研究センターは、名大、東大、防災科研との共同で三宅島において GPS キャンペーン観測を再開した。本研究では、2000 年噴火以降の三宅島の詳細な地殻変動を把握するとともに、次の噴火活動研究の基礎となるデータを取得することを目的としている。

解析には、2011 年と 2012 年のキャンペーン観測で得られた 45 観測点のデータと、国土地理院の 4 点の電子基準点の連続観測データを使用した。観測データの基線解析は解析ソフトウェア RTKLIB(高須他、2007) を用い、IGS 精密暦を使用して行った。求められた座標値から 2011 年-2012 年の三宅島の地殻変動を推定した。また、山川・茂木モデル(山川 1955、Mogi 1958) を用いて三宅島の地下の球状圧力源の位置とその体積変化量を推定した。

水平変位からは、多少のばらつきはあるものの、島の中心から外側に放射状に伸長する動きがみられる。また、球状圧力源も膨張傾向にあると推定された。この結果から、三宅島では次の噴火につながるマグマ溜まりへのマグマの供給が始まっている可能性が考えられる。来年度も観測を継続し、膨張傾向が続くのかどうか調べる予定である。

キーワード: 三宅島, GPS, 地殻変動

Keywords: Miyakejima, GPS, Crustal Deformation

有限長流体亀裂振動に関する一考察 A study on the oscillation of finite-length fluid-filled cracks

山本 希^{1*}

Mare Yamamoto^{1*}

¹ 東北大学・理・地球物理

¹Geophysics, Science, Tohoku University

流体亀裂 (Fluid-filled crack) の振動は Chouet(1986) による数値解析以来、火山性長周期地震・火山性微動の振動源のひとつの有力なモデルとしてその振動特性の解明や観測記録への適用が行われてきた。特に流体亀裂の振動特性 (周波数・減衰) が亀裂内部の流体物性に大きく依存するため、観測地震記録から火山性流体の物性およびその時間変化を明らかにする試みも行われている。しかしながら、これらの流体亀裂の振動特性・境界波の分散関係については、無限長の亀裂 (二つの半無限媒質に挟まれた流体層; e.g., Krauklis, 1962, Ferrazzini and Aki, 1987) や 2 次元楕円体 (山本, 2007) に対する解析解は得られているものの、より現実的な有限長の薄い流体亀裂に対しては、差分法 (e.g., Chouet, 1986), 境界積分法 (Yamamoto and Kawakatsu, 2008), 有限要素法 (Frehner et al, 2008) といった数値解法のみが用いられてきた。本研究では、有限長流体亀裂の振動特性について、数値解法からの知見を解析的導出にフィードバックすることにより考察し、簡便な近似的解法を提唱するとともに数値解との比較を行う。

本研究では、2 次元無限弾性体中に置かれた非粘性流体を含む薄い流体亀裂の振動を考える。亀裂の厚さが長さ比べて十分に小さい場合、流体の運動は亀裂に沿った 1 次元運動として扱うことができる。また単純化のために、従来の多くの研究と同様に流体運動において移流項は無視する。このような設定のものでは、Yamamoto and Kawakatsu (2008) による数値解法によって示されたように、亀裂面の法線変位の分布は亀裂中央からの距離の関数で表される重み乗じた第 2 種チェビシェフ多項式を用いて効率的に展開することができる。ここで、流体亀裂振動の低次のモードを考える上では、ごく低い次数の第 2 種チェビシェフ多項式のみが支配的となる。これは Spence and Turcotte (1985) によって示されたように、静的な同様の問題に対しては空間一様な変化と線形変化する流体圧力に対応する食い違い変位がそれぞれ 0 次と 1 次のチェビシェフ多項式で表されることに対応している。一方、このような法線変位分布の表式が与えられると、亀裂内の流体運動は解析的に定式化・計算することができる。ここで更に、固液の弾性的相互作用が局所的に働くと仮定すると、山村 (1997) の方法を用いることによって流体の実効体積弾性率を得ることができ、有限流体亀裂の固有振動を求めることができる。

このようにして有限流体亀裂の運動を検討した結果、基本モードについては、固液相互作用は亀裂形状にほぼ支配される 1 次の第 2 種チェビシェフ多項式の寄与が他の高次のものに比べ桁以上大きいため、この単一次数を考慮して亀裂内流体の実効体積弾性率を求めることができ、得られる実効体積弾性率は真の流体体積弾性率のほぼ半分となることが示された。この結果は、数値解法による先行研究で示されたように有限長流体亀裂の基本モードに対する境界波の位相速度が内部流体の音速の約半分になることと整合的であり、この現象の物理的背景を明らかにするとともに、このような簡略化した計算方法が振動特性の推定に有効であることを示唆する。高次の固有振動に関しては、直接的にこの方法で計算することは困難であるが、短波長の極限で境界波位相速度が音速に漸近することを考慮すると、基本モードに対する位相速度から概算を行うことは可能である。

これらの結果は、これまで数値解法をもとに経験的に知られてきた有限亀裂振動の振動特性の特徴について物理的な背景を与えると同時に、実際の火山性長周期地震の観測記録の解析・解釈において流体物性推定などを効率的に行うことを可能にすると期待される。

キーワード: 流体亀裂, 固液相互作用, 長周期地震

Keywords: fluid-filled crack, fluid-solid interaction, long-period event

2013年1月以降の箱根火山における群発地震活動の精密震源分布 Detailed hypocenter distribution of the 2013 swarm activity in Hakone volcano

行竹 洋平^{1*}, 宮岡 一樹¹, 原田 昌武¹, 本多 亮¹, 伊東博¹, 吉田 明夫¹

Yohei Yukutake^{1*}, Kazuki Miyaoka¹, Masatake Harada¹, Ryou Honda¹, Hiroshi Ito¹, Akio Yoshida¹

¹ 神奈川県温泉地学研究所

¹ Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture

1. はじめに

箱根火山は、伊豆半島最北端に位置する第四紀火山であり、現在でも大涌谷周辺などで活発な噴気活動が続いている。箱根火山カルデラ内では、たびたび活発な群発地震活動が発生しており、最近では2001年、2006年、2008年～2009年に山体の膨張を示す地殻変動を伴う大規模な群発地震活動が発生した。2001年の群発地震活動の際には、傾斜計およびGNSSにより検知された地殻変動データから、大涌谷及び駒ヶ岳下の浅部に開口クラックが、駒ヶ岳下深さ7kmに球状圧力源が推定され（代田ほか、2009）、その後大涌谷北側斜面において新たな噴気域が形成された（棚田ほか、2005）。

2013年1月初旬から、箱根火山では再び地震活動が活発化している。2013年1月1日から2月14日現在まで、連続波形記録の目視により約5100個の地震が確認された。このうち、温泉地学研究所（以下、温地研）のルーチン解析により、約1400イベントの震源位置が決定されている。この期間内に発生した最大規模の地震は、2月10日13時15分到大涌谷の下深さ2km付近に発生したM2.3であった。さらに、一連の地震活動に同期して、カルデラ内に設置された傾斜計に山体の膨張を示唆する地殻変動が検知されている（宮岡ほか、2013、本大会）ほか、GNSS観測データからも山体の膨張を示唆する基線長変化が検知されている（原田ほか、2013、本大会）。一連の群発地震の発生原因及び地殻変動との関係を議論するためには、高い精度で震源を決定することが重要である。本研究では、Double Difference (DD) 法 (Waldhauser and Ellsworth, 2000) を用いて、群発地震の震源位置の高精度決定を行った。

2. データおよび手法

本研究では温地研により箱根カルデラ内およびその周辺に設置された定常地震観測点データに加えて、気象庁、東大地震研、防災科研 Hi-net の観測点データを使用した。2013年1月から2月12日17時までに発生した、約1400イベントについて再決定を試みた。DD法のための初期震源位置の決定には、Yukutake et al., (2010) により決定された一次元速度構造を用い、hypoDD法 (Hirata and Matsu'ura, 1987) によって初期震源位置を求めた。本研究では、イベントの走時差を相互相関処理ならびに検測走時から求め震源再決定に用いた。検測走時より求めた走時差データは12万ペア、相互相関処理から求めた位相差データは24万ペアである。

3. 結果

震源は全体的な特徴として、北は大涌谷の北側に位置する台ヶ岳から南は中央火口丘の駒ヶ岳にかけて南北に約3kmの長さわたって分布している。2月14日現在までの主要な地震活動域は、中央火口丘下（大涌谷から駒ヶ岳にかけての範囲）の深さ1kmより浅い領域（クラスターA）と、大涌谷から台ヶ岳にかけての深さ0.5～4kmの領域（クラスターB）の、2つの領域に分かれる。クラスターAでは、2013年1月9日から地震活動が始まり、マグニチュードが0以下の非常に規模の小さな地震が多く発生する傾向にある。クラスターBでは、2013年1月1日より地震活動が始まった。活動初期は、地震活動域は深さ3km付近であったが、1月中旬頃からバースト的な活動を繰り返しながら、浅い方向に地震活動域が拡大している。また、クラスターBにおける震源分布の特徴として、北西-南東あるいは北北西-南南東走向をもった鉛直な面上に震源が集中する傾向が見られる。2月10日に発生した最大地震（M2.3）は、この領域内の深さ1.9kmに震源が決定された。P波初動から求めたメカニズム解は、北西-南東方向にP軸を持つ横ずれ型であり、一つの節面走向と震源のトレンドは概ね一致する。

2001年の活動域と2013年1月以降の活動域を比較すると、2001年時の大涌谷周辺（クラスターB）での活動は、活動初期から深さ0～2km範囲の浅い領域で地震が活発に発生していたのに対して、2013年の活動は上記のとおり深さ3km付近から徐々に活動域が浅くなっている傾向が見られる。また、中央丘下の浅い領域（クラスターA）では、2001年時にはほとんど地震は発生していない。一方で、2001年時は、中央火口丘下1kmより深い領域で比較的初期の段階から地震が活発に発生していた。

発表では、今後の地震活動も含めて詳細な震源分布及び地震活動の時系列変化について報告する予定である。

謝辞：気象庁、東京大学地震研、防災科研 Hi-net より提供された地震波形データを使わせて頂きました。F. Waldhauser 博士から hypoDD プログラムコードを提供して頂きました。

Japan Geoscience Union Meeting 2013

(May 19-24 2013 at Makuhari, Chiba, Japan)

©2013. Japan Geoscience Union. All Rights Reserved.



SVC48-P23

会場:コンベンションホール

時間:5 月 19 日 18:15-19:30

キーワード: 群発地震, 箱根火山, 震源分布

Keywords: Swarm earthquake, Hakone volcano, Hypocenter distribution

2001年箱根群発地震活動以後に活発化した大涌谷北側斜面の新噴気について Geothermal activity around Owakudani at Hakone volcano: Recent growth and migrations of new vigorous steaming grounds

原田 昌武^{1*}, 寺田 暁彦², 小田原 啓¹, 代田 寧¹, 板寺 一洋¹, 行竹 洋平¹, 松沢 親悟¹

Masatake Harada^{1*}, Akihiko Terada², Kei Odawara¹, Yasushi Daita¹, Kazuhiro Itadera¹, Yohei Yukutake¹, Shingo Matsuzawa¹

¹ 神奈川県温泉地学研究所, ² 東京工業大学火山流体研究センター

¹ Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture, ² Volcanic Fluid Research Center, Tokyo Institute of Technology

大涌谷は箱根火山の中央火口丘の北側に位置し、従来より噴気活動が活発である。その主な噴気域は大涌沢であり、現在でも地表面から蒸気が上がっている。箱根火山では2001年6月から、温泉地学研究所による観測開始以来最大の群発地震が発生した。この群発地震活動の際には火山性の地殻変動が生じただけでなく、地表面の変化として2001年7月に大涌沢の蒸気井が暴噴し、その後、噴気域は大涌沢の尾根を越えて大涌谷の北側斜面（大涌沢の北西側）で新たな噴気を確認されている（辻内ほか, 2003）。

2001年箱根群発地震活動が発生して以来、大涌谷の北側斜面で新たに発生した新噴気域では、地表面温度の上昇によって、所々で樹木が枯れ、倒木が発生している（棚田, 2008）。これらの現象は2001年11月に辻内ほか（2003）によって最初に発見され、2010年頃までは大涌谷から北側の上湯場にかけて顕著に現れていた。拡大の一途をたどる新噴気域の状況を調査・監視する目的で、温泉地学研究所では2008年12月から3地点において火山ガス及び熱赤外カメラによる地表面温度の連続観測を開始した（原田ほか, 2010）。しかしながら2011年頃からは、さらに西側の山中で噴気活動が盛んになり、当初注目していた東側よりも高濃度のH₂Sが現地調査で観測されている。

このように、現在も新噴気域は拡大しないしは移動しており、既設の固定点による火山ガス・地温の連続観測や定点における繰り返し調査だけでは全体像の把握や監視が不十分であると思われる。そこで、我々は広域の地表面温度の監視を行うために、新噴気域が見渡せる箱根外輪山の尾根上から熱赤外カメラによる観測を2012年10月から開始し、定期的に調査を行っている。これまでの観測結果では、新噴気域の平均温度は周囲に比べて2~3 程度有意に高く、中でも現在地熱兆候が顕著な新噴気西側の地表面温度が高いことが明らかとなっている。

本発表では2001年以降に大涌谷で発生した新噴気域における地表面の変化の変遷や熱赤外カメラ観測などによる地温の変化と箱根火山における地震活動の関連性について議論する。

キーワード: 箱根火山, 噴気, 熱赤外カメラ観測, 地温, 地熱, 地表面変化

Keywords: Hakone volcano, streaming ground, infrared thermal camera observation, ground surface temperature, geothermal field, surface condition

2013 年箱根火山の群発地震活動に伴う地殻変動とその変動源の推定 Crustal Deformation According to Earthquake Swarm Activities and Estimation of the Volcanic Deformation Source at Hakone

宮岡 一樹^{1*}, 原田 昌武¹, 本多 亮¹, 行竹 洋平¹
Kazuki Miyaoka^{1*}, Masatake Harada¹, Ryou Honda¹, Yohei Yukutake¹

¹ 神奈川県温泉地学研究所

¹ Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture.

1. はじめに

箱根火山では、2013 年 1 月上旬から群発地震活動が始まり、これに同期するようにカルデラ内の傾斜計などで地殻変動が観測されている。箱根では発生する地震の規模は小さいものの、過去に度々群発的な地震活動が観測されてきている。2001 年 6 月から 10 月頃の活動の際には、マグニチュード 2.9 を最大に、観測された地震が 15000 個以上もの活発な地震活動が見られた (M の下限は概ね -0.5 程度)。その際、傾斜計や GPS などに、山体が膨張していることを示す明瞭な地殻変動が観測されたほか、活動の翌年頃から大涌谷の北側で新たな噴気・地熱地帯が現れた。その後、2006 年や 2008 年から 2009 年にかけても地震活動の顕著な活発化が見られ、深部での膨張を示す変動が GPS によって観測された。

神奈川県温泉地学研究所 (以下、温地研) では、箱根カルデラ周辺に傾斜計、光波測距儀、GPS 観測装置などを設置し、箱根火山の活動に伴う地殻変動の観測を行っている。2001 年の活動の際には、傾斜計および GPS 観測データをもとにした解析により、駒ヶ岳の深部 (7km) における球状圧力源での体積増加と、駒ヶ岳と大涌谷の浅部で開口割れ目が推定された (代田ほか, 2009 年)。

本発表では、今回の群発地震活動の概要及び、地殻変動データを基に推定される圧力源についての報告を行う。

2. 地震活動の概要

2013 年の地震活動は 1 月 3 日頃から始まり、M1.0 未満の地震が 1 日当たり数個程度発生していた。その後、1 月 10 日過ぎから、1 日当たり 10 個を超えるようになり、規模も M1.0 を超える地震が発生し始めた。1 月 17 日頃からはやや活発になり、1 日当たりの発生数が約 30 ~ 70 個となってきた。

1 月末現在までの主な地震活動域は、駒ヶ岳の山頂直下から大涌谷、台ヶ岳にかけての領域で、震央は北北西 - 南南東方向に約 4km の範囲に広がる。駒ヶ岳から大涌谷にかけての領域では、ほとんどの地震は海拔 0km 付近の浅い領域に分布している。この領域では、1 月 9 日から活動が活発化し始め、地震の規模が M0 を下回るごく微小な地震が多く発生する傾向が見られる。ただし、1 月 28 日に大涌谷直下の深さ 0km 付近で M1.3 の地震が発生し、温地研が大涌谷に設置している計測震度計で計測震度 2 が観測された。一方、その北側の大涌谷から台ヶ岳にかけての領域では、震源は深さ 1km ~ 4km の範囲に分布している。この領域では、1 月 3 日から深さ 3km 付近で活動が始まり、1 月 10 日頃から活動域が浅い方向に拡大している。

3. 傾斜変動及び推定される圧力源

傾斜計での変動は、1 月 10 日頃から観測され始めており、地震活動の活発化に同期していると考えられる。大涌谷から台ヶ岳にかけての地震活動域に最も近い小塚山観測点では、北北東もしくは北東方向に傾き下がる変動が観測されており、その量は 1.6 μ rad. となっている。また、そのほかの観測点でも、0.3 ~ 0.4 μ rad. 程度の変動が観測されている。これらの変動は、概ね、箱根山の中央火口丘である駒ヶ岳周辺を中心として放射状に広がる (傾き下がる) ベクトルを持っており、定性的には地下の体積膨張で説明できる。ただし、小塚山観測点でのみ、他の観測点の 4 ~ 5 倍もの大きな変動が観測されており、ひとつの球状圧力源ではこれらの変動を説明できないことから、この他にも浅部にローカルなソースがあるものと推察される。

なお、1 月末現在、地震活動は盛衰を繰り返しながらも、全体的にはほぼ一定ペースで発生している。また傾斜変動も、各観測点、成分で単調に変化している。現時点での傾斜計での変化量は、2001 年の際の総量のおおよそ 8 分の 1 程度である。この他、噴気活動等にも変化は見られていない。

キーワード: 箱根火山, 傾斜計

Keywords: Hakone Volcano, tiltmeter

箱根火山周辺の三次元比抵抗構造

Three-dimensional electrical resistivity structure around Hakone volcano, Japan

吉村 令慧^{1*}, 小川 康雄², 行竹 洋平³, 神田 径², 小森 省吾⁴, 後藤 忠徳⁵, 本多 亮³, 原田 昌武³, 山崎友也¹, 加茂正人¹, 安田陽二郎⁶, 谷 昌憲⁵

Ryokei Yoshimura^{1*}, Yasuo Ogawa², Yohei Yukutake³, Wataru Kanda², Shogo Komori⁴, Tada-nori Goto⁵, Ryou Honda³, Masatake Harada³, Tomoya YAMAZAKI¹, Masato KAMO¹, Yojiro YASUDA⁶, Masanori Tani⁵

¹ 京都大学防災研究所, ² 東京工業大学火山流体研究センター, ³ 神奈川県温泉地学研究所, ⁴ 台湾中央研究院, ⁵ 京都大学大学院工学研究科, ⁶ 鳥取大学大学院工学研究科

¹DPRI, Kyoto University, ²Volcanic Fluid Research Center, Tokyo Institute of Technology, ³Hot Springs Research Institute, Kanagawa, ⁴Academia Sinica, Taiwan, ⁵Graduate School of Engineering, Kyoto University, ⁶Graduate School of Engineering, Tottori University

東北地方太平洋沖地震の発生直後から、箱根火山周辺において地震活動が誘発的に活発化した。今回の誘発地震活動の大部分は、過去にこの地域で発生している群発地震活動域に重なる領域で発生しているものの、後に地震活動が低調であった丹那断層に延びる活動が見られたことは非常に興味深く、誘発活動域周辺の構造的特徴を把握することは、今後の箱根火山の活動や箱根 - 丹那断層の評価を行う上で重要だと考えられる。

箱根周辺では、2010年から2011年にかけて神縄・国府津 - 松田断層を対象とした広帯域 MT 観測が実施されている(小川他、2012)が、このデータを概観すると、箱根市街地の高ノイズ域であっても周期 1 秒までの MT 応答が得られていることが分かる。今回対象とする箱根地域では地震活動の下端深度が浅いことも考慮し、周波数帯域を可聴域 (10,400 ~ 0.35Hz) に絞った AMT 観測を計画・実施した。2011 年 12 月に、箱根カルデラを包括する領域において、39 観測点で夜間の電磁場データを取得した。3 次元比抵抗構造を推定することを目的に、面的に観測点を配置した。ノイズ低減のため、短周期側では調査領域内の相互参照、長周期側では岩手県沢内のデータを用いた遠地参照により、探査曲線の推定を行った。一部の観測点を除き、1Hz まで比較的良好な探査曲線が求まった。今回の AMT 観測データに、小川他 (2012) の広帯域 MT 観測データを加えて、51 観測点の MT 応答 (320 - 1.02Hz の 11 周期) を用いて 3 次元構造解析を行った。推定された 3 次元比抵抗構造には、震源分布との対比から以下の特徴が確認できる。(1) 誘発的地震活動は高比抵抗領域の境界付近に沿って見られ、(2) その上限より表層には低比抵抗領域が推定された。

本発表では、推定された 3 次元比抵抗構造の詳細を報告するとともに、2013 年 1 月に活発化した地震活動との対比も行う予定である。

キーワード: MT 法探査, 3 次元インバージョン, 比抵抗構造, 箱根火山, 誘発地震, 群発地震

Keywords: magnetotellurics, three-dimensional inversion, resistivity structure, Hakone volcano, triggered earthquake, earthquake swarm

2000年三宅島噴火初期のマグマの移動の推定(1)- 相似波形を用いた震源決定 Estimation of magma migration in the initial phase of the 2000 Miyakejima eruption (1)

松山 諒太郎^{1*}, 森田 裕一¹, 酒井 慎一¹
Ryotaro Matsuyama^{1*}, Yuichi Morita¹, Shin'ichi Sakai¹

¹ 東京大学地震研究所

¹ Earthquake Research Institute, the university of Tokyo

1. はじめに

2000年の三宅島噴火では、6月27日から7月1日までの期間に、震源が三宅島周辺から神津島・新島付近まで移動したことや、大きな地殻変動が観測されたことから大規模なダイク貫入が発生したことは明らかであり、地殻変動の観測などから様々なモデルが提唱されている。大規模ダイク貫入時のマグマ移動方向や速度は、ダイク貫入過程を解明するために必要な情報であるが、良く知られていない。震源の移動はこれらを推定するための重要な情報であるが、ダイク貫入時には地震計は三宅島、神津島、新島、式根島の島内陸上にしか設置されておらず、推定された震源の誤差は極めて大きく、震源の移動も不明瞭な描像しか得られていない。

一方、7月2日以降に震源域直上に海底地震計が設置され、その震源については精度良く求められている(Sakai et al. 2001)。本研究では、震源が精度良く推定された海底地震計設置後の地震(「参照地震」と呼ぶ)の波形と大規模ダイク貫入時の地震波形の相関を利用して、震源分布を精度良く推定することを試み、それにより大規模ダイク貫入現象の解明を目指している。

2. 解析手法

解析に用いた地震は、三宅島6観測点、神津島5観測点、新島4観測点、式根島1観測点の波形を記録した6月27日~7月1日までに発生した6695個の地震である。ルーチン観測で一応の初動の読み取りが終わっており、それによるとこの期間内に震源移動がすべて含まれる。最初に、ダイク貫入時の波形と海底地震計設置後の波形相関の度合いを調べた。P波初動部に1-8Hzのバンドパスフィルターをかけ、P波到達読み取り時刻の0.2秒前から1.5秒間の波形を-0.05秒から0.1秒まで0.01秒ずつずらしながら相関係数を計算し、最もその値が高い相関係数を用いた。6月28、29日の地震は震源が海域にあり、比較的広範囲に分布していて、数も多いので移動が追いやすいと考え、最初にこの2日間の地震を解析した。海底地震計設置後の波形としては、全体の活動のうち、海底地震計により精度のよい震源が推定され、顕著なバースト活動が見られた7月3日9-15時の144個の波形を用いた。この二つの時期について相関をとった結果、実際の波形を見て十分に波形の相関が良い相関係数が0.7以上の組み合わせが多かった三宅島の3観測点、神津島の1観測点、新島の1観測点、式根島の1観測点に注目した。

3. 解析結果

現在は解析の途中であり、海底地震計を用いて震源が推定されている参照地震と波形相関の良い地震が、大規模ダイク貫入時にどれだけあるかを調べている段階であるが、これまでの解析から、以下のことが明らかになった。

(1) 6月28-29日の地震総数2886個のうち、最大で2110個の地震が参照地震との相関係数が0.7以上であった。これにより、波形相関を用いてダイク貫入時の多くの地震の震源の再決定が可能であり、震源移動を精度良く推定できる可能性が高いことが示された。

(2) 三宅島と神津島の間点の深さ8-13kmで発生したと推定されている参照地震と波形相関が高い地震が、6月28-29日に継続的に発生していることが明らかになった。参照地震では、この領域は7月上旬のバーストの地震活動の開始場所にあたり、この後震源が浅くなる移動や、震源が水平方向に広がる様子が見られている。この領域は活動の力を握っている可能性が高く、ダイク貫入時の全体の震源移動の中でこの領域の地震活動がどのような活動をしたかを知ることが活動を理解するうえで重要な意味を持つと期待される。

(3) 震源が神津島に近い領域で発生した参照地震の波形と相関の良い地震が始まったのは6月28日7時以降であり、それ以前にはない。これは、震源が北西方向に進んだというこれまでの結果と矛盾しない。

4. 今後の展望

海底地震計設置以前の地震と設置後の地震波形の相関が良いことが分かったため、今後は相関係数を用いた震源の再決定を行い、ダイク貫入時の震源を精度良く推定したい。また、波形相関の参照にする参照地震を増やすため、解析が進んでいない時期の海底地震計の読み取りを行い、参照地震の領域と数を増やし、精度の良い震源再決定を行い、噴火初期のダイク貫入についての知見を深めたい。

キーワード: 三宅島火山, 相似地震, ダイク貫入, 2000年三宅島噴火, 震源移動

Japan Geoscience Union Meeting 2013

(May 19-24 2013 at Makuhari, Chiba, Japan)

©2013. Japan Geoscience Union. All Rights Reserved.



SVC48-P27

会場:コンベンションホール

時間:5月19日 18:15-19:30

Keywords: Miyakejima volcano, earthquake family, dike intrusion, the 2000 Miyakejima eruption, hypocentral migration

集中観測による伊豆大島の火山活動監視

The volcanic activity monitoring with the concentrated observation in Izu-Oshima Island

栗栖 悠貴^{1*}, 高野和友¹, 豊福隆史¹, 松村泰敬¹

Yuki Kurisu^{1*}, TAKANO, Kazutomo¹, TOYOFUKU, Takashi¹, MATSUMURA, Yasunori¹

¹ 国土地理院

¹ GSI of Japan

伊豆大島は、全国に110ある活火山の1つであり、火山噴火予知連絡会によって「火山防災のために監視・観測体制の充実等が必要な火山」として位置づけられている。20世紀以降ではおよそ30～40年間隔で中規模噴火が発生しており、前回の噴火(1986年)から30年近く経過していることを考慮すると、次回の噴火に備えておく必要がある。

国土地理院では、電子基準点をはじめとする6点のGNSS連続観測点を配置し、火山活動に起因する地殻変動を監視している。また、2002年に自動測距・測角装置を設置し、トータルステーションによりカルデラ周囲における変動の監視を実施している。

平成24年には、GNSS連続観測等による定常的な地殻変動の監視に加え水準測量および重力測量を実施することで、伊豆大島の集中観測を実施した。水準測量は、各水準点間に設置された固定点を水準点と見なすことで、空間密度の高い上下変動を高精度に把握した。その結果、平成20年と比較してカルデラ内の沈降および北東部と南西部の隆起がみられた。また、重力測量は、水準点及び電子基準点、絶対重力点において実施した。その結果、平成20年の各点の重力値と比較して、火口及び島西側の元町港と島南側の波浮港で増加の傾向、外輪山の東側と北側、島北部で減少の傾向であった。

本発表では、集中観測の概要とその結果に対する総合的な評価について報告する。

キーワード: 伊豆大島, GNSS連続観測, 水準測量, 重力測量, 自動測距・測角観測

Keywords: Izu-Oshima Island, GNSS Earth Observation, Leveling survey, Gravity survey, Automated distance and angle survey

伊豆大島の地殻変動上下成分から示唆される圧力源の形状 Geometry of pressure source beneath Izu-Oshima inferred from vertical component of volcanic deformation

山本 哲也^{1*}, 鬼澤 真也¹, 高木 朗充¹
Tetsuya Yamamoto^{1*}, Shin'ya Onizawa¹, Akimichi Takagi¹

¹ 気象研究所

¹ Meteorological Research Institute, JMA

伊豆大島火山では、1990年代からGPSによる地殻変動(山体変形)観測が行われており、全島的な膨張傾向が長期的に継続していることが知られている。鬼澤他(2012)は、2001年から2010年の期間について、アンテナ交換などに伴うデータの不連続がないGPS観測点のデータを選んで解析することにより、この期間の長期的な地殻変動(各観測点の変位)を明らかにした。また、その3成分の変位を標高補正を行った茂木モデルによって解析し、圧力源をカルデラ北部の深さ6.68kmに推定した。我々はこの長期的な地殻変動についてさらに調査を進めた。

圧力源からの水平距離と各観測点の変位との関係には次のような特徴があった。水平成分については、観測値、茂木モデルによる計算値とも、圧力源直上からの距離0km付近では水平変位がほとんど0であるが距離5km付近では水平変位が約5cmと最大になっており、両者は概ね一致する。それに対して上下成分をみると、観測値と計算値で分布が異なっている。計算値については、距離0kmで上下変位が最大、距離が大きくなるにつれて変位は小さくなるという分布がみられるのに対して、観測値では距離0~5kmの上下変位に距離に依存した明瞭な変化は見られず、むしろ、距離0km付近では距離2~3km付近に比べて上下変位は幾分か小さい。このように、伊豆大島の長期的地殻変動では、観測された上下成分の変位が茂木モデルでは十分に説明できなかった。すなわち、圧力源直上付近の上下変位には距離への依存性があり見られず、また、茂木モデルで期待されるものより小さい傾向があった。

実際の火山の地殻変動が、茂木モデルと差異を生じる要因としては、地形、地下構造、圧力源形状の球からのずれ、などが考えられる。伊豆大島の長期的地殻変動に対する理解を深めるためには、これらの要因も考慮した解析が必要である。ここでは、地殻変動の原因となる圧力源について、その形状を考慮するとともに、圧力源を中心とする軸対称の地下構造および地形を仮定して、有限要素モデルを用いた調査を行った。地形は伊豆大島の山頂部から北北東側山腹にかけての標高を国土地理院の数値地図50mメッシュから与えた。また海底地形についても同様に、海上保安庁が公開している500m間隔の水深データJ-EGG500から与えた。地下構造は長谷川他(1987)による山頂部を通る北北東-南南西方向の地震波速度構造を参照し、5層の構造(剛性率)を設定した。圧力源としては鉛直な軸を持つ回転楕円体を用い、形状のパラメータとして縦横比(鉛直半径と水平半径の比)を1.0から4.0の範囲で設定した。また、圧力源の中心の深さもパラメータとし、3.0kmから8.0kmの範囲で設定した。様々な圧力源のパラメータの組み合わせについて、地表の水平変位、上下変位を有限要素法によって計算した。

観測値に計算値が適合するものを探索したところ、中心の深さが約4km、鉛直半径/水平半径が3以上の場合に観測値と計算値が比較的良好な一致をみた。変位の上下成分が、距離0km付近で周辺よりもやや小さくなるという特徴も再現された。圧力源の深さをみると茂木モデル6.68kmに対して、有限要素モデルでは約4kmと有意に浅くなった。このような深さの違いは体積変化量にも影響し、茂木モデルでは $2.5 \times 10^7 \text{m}^3$ なのに対して、有限要素モデルでは $1.1 \times 10^7 \text{m}^3$ と半分程度になった。地下構造と圧力源形状のどちらが、このような計算結果に寄与しているかを調べるため、地下構造の影響がなくなるように第1層、第2層に第3層と同じ剛性率を与えた有限要素モデルについての計算を行ってみたところ、それほど顕著な差異はなかった。したがって、圧力源の形状の寄与がより大きいとみられる。

キーワード: 火山, 伊豆大島, 地殻変動, 有限要素解析

Keywords: volcano, Izu-Oshima, crustal deformation, finite element analysis

2012年10月と2013年1-2月の白山火山直下の地震活動

Seismic activity beneath the Hakusan Volcano in Oct. 2012 and Jan.-Feb. 2013

平松 良浩^{1*}

Yoshihiro Hiramatsu^{1*}

¹ 金沢大学理工研究域自然システム学系

¹ Department of Earth Sciences, Kanazawa University

白山では1659年の噴火を最後に表面的には火山活動は起きていない。しかし、火山灰層序学的研究や歴史資料に記載された過去の活動履歴から、白山は近い将来に火山活動を再開する可能性が指摘されている(守屋, 2000)。白山の山頂直下では地震活動の発生域が海面下0~1kmと浅く(高橋・ほか, 2003)、地震波トモグラフィーの解析から海面下10~14kmに顕著な低速度かつ高VP/VS領域が存在すること(高橋・ほか, 2004)が報告されている。2005年には4度の群発的な地震活動があり、Mj4.5の観測史上最大規模の地震が発生した。2008年8~9月、2009年1月にも白山直下において群発地震が発生している。本研究では、2012年10月に発生した群発地震および2013年1月の地震活動について報告する。

2012年10月27日21時から28日にかけて、白山直下で2009年1月以来となる最大マグニチュードM(Mj)の群発地震が発生した。WINシステム(ト部・束田, 1992)を用いて決定した震源位置は白山山頂(御前峰)から北約1kmの深さ0~1.5kmであり、2005年2月と8月の群発地震の震源域の南端にあたる。なお震源決定の際には高橋・ほか(2004)と同じく、速度構造は竹内(1978)の構造、マグニチュードの決定には渡辺の式(渡辺, 1971)を用いた。規模の大きな6つの地震についてP波極性から発震機構解を求めたところ、5つについては東—西から北西—南東を圧力軸とする横ずれ型の解であったが、1つは北西—南東に伸張軸をもつ正断層型の解であった。火山性微動や低周波地震は確認されなかったことから、これまでの群発地震と同様この地震活動はマグマ活動を示すものではないと考えられる。

2013年1月31日と2月1日には2005年以来となるM3を超える規模の地震が白山直下で発生した。これらの地震には多くの余震が伴った。震源位置は白山山頂から東約0.5kmの深さ1~2kmである。規模の大きい5つの地震は全て東—西から北西—南東を圧力軸とする横ずれ型の発震機構解を示した。なお、このときも火山性微動や低周波地震は確認されていない。

2005年の群発地震以降の白山直下の顕著な地震活動は全て2005年の群発地震の震源域の端もしくはその周辺で発生しており、2005年の群発地震の震源域の延長で応力の解放が進んでいることが考えられる。

謝辞: 本研究を行うにあたり、京都大学防災研究所、名古屋大学、防災科学技術研究所、気象庁の波形データを使用しました。記して感謝いたします。

キーワード: 白山, 群発地震

Keywords: Hakusan, swarm earthquakes

浅間山直下の深部低周波地震の自動震源決定 Automatic hypocenter determination of deep low-frequency earthquake beneath Mt. Asama volcano

松浦 侑^{1*}, 鎌谷 紀子¹, 三上 直也¹
Yu Matsuura^{1*}, Noriko Kamaya¹, Naoya Mikami¹

¹ 気象大学校

¹ Meteorological College

1. はじめに

火山直下の深部低周波地震活動は深部のマグマの挙動を反映していると考えられていて、1980 年台から解析事例がある。しかしながら、浅部の火山性地震ほど噴火等の表面減少との関連が明らかでないことなどから、解析事例の蓄積がまだ多くない。解析事例を増やすためにはより多くの深部低周波地震を検出することが必要である。気象庁ではルーチンの検測作業において深さ 10km 以深の低周波地震に低周波フラグを付けて、構造的な地震や浅い火山性地震と区別しているが、この作業において、火山性地震の観測のために火山体に設置された地震計は使われていない。また、火山体に設置された地震計は主に浅部の火山性地震の解析に使われており、深部低周波地震の解析には用いられていない。火山体に設置された地震計と周辺の地震観測網の両方の地震計を用いれば火山直下の深部低周波地震の検出能力の向上が期待される。そこで、本研究では浅間山における火山基盤観測網の地震計と周辺の高感度地震観測網の地震計によって得られた連続波形データを自動的に解析して、深部低周波地震を検出し、震源決定するプログラムの作成を試みた。

2. 解析

用いた観測点は気象庁地震火山部火山課が浅間山周辺に展開する 10 観測点、防災科学技術研究所が浅間山に設置している 2 観測点、及び近傍の Hi-net 観測点の 7 観測点である。

連続波形データから深部低周波地震を検出して、P 波・S 波の到着時刻を判定し、震源を決定するプログラムを作成した。連続波形データからシグナルを検出し、P・S 検測を自動的に行うのに MER(Modified Energy Ratio) 法 (Hang et al., 2010) を用いた。また、単独の地震観測点における地震以外の振動を取り除くために、いくつかの観測点で振動が同時に検出されていることを以って地震の発生を診断した。P・S 検測の結果を用いて震源計算プログラム hypomh(Hirata and Matsuura, 1987) により震源計算を行った。この内、浅間山周辺の深部に震源が定められたものを抽出した。

作成したプログラムは一元化震源カタログで低周波フラグの付いている地震が発生している時間帯の連続波形データを用いて、調整と動作確認を行った。その後、2009 年 2 月 2 日の噴火を含む期間である 2008 年 11 月 1 日から 2009 年 3 月 31 日の間の連続波形データにプログラムを適用して、その期間の深部低周波地震の発生を調べた。

3. 結果

一元化震源カタログで登録のある 2 つの深部低周波地震については、作成したプログラムにより、妥当と思われる位置に震源を決定することができた。

浅間山の噴火の前後の期間は、プログラムによって 69 個のイベントの震源が計算された。この中には、地震計のセンサーチェック信号を捉えてしまったものや、浅間山周辺以外の地域で発生した地震で偶然その震源が浅間山近傍の深部に計算されてしまったもの、あるいは不明瞭で P・S 検測結果に疑問のあるものを含む。これらの中で、波形、震源計算の誤差、浅間山周辺地域以外での地震の発生状況などから深部低周波地震の可能性が高いと思われる地震は 4 つ発見された。これらはいずれも一元化震源カタログに無いものである。これにより、火山体に設置された地震計の活用によって深部低周波地震の検知能力が向上したと言える。これら 4 つの地震の震源や、現在までに一元化処理によって捉えられた浅間山の深部低周波地震の震源の分布から、浅間山の深部 10km 以上では、山体南側にマグマの供給路が存在する可能性が示唆される。

キーワード: 浅間山, 深部低周波地震, 自動検測, 自動震源決定

Keywords: Mt. Asama, deep low-frequency earthquake, automatic detection, automatic hypocenter determination

1991-1995年雲仙岳溶岩ドーム成長期にみられた地震および傾斜変化の周期的活動 Cyclic activity of earthquakes and ground deformation observed during the 1991-1995 dome growth at Unzen Volcano, Japan

小宮 卓也^{1*}, 馬越 孝道¹, 岩野健之², 周藤奈苗², 山科 健一郎³, 松島 健⁴, 清水 洋⁴

Takuya Komiya^{1*}, Kodo Umakoshi¹, IWANO, Takeyuki², SUTO, Nanae², Ken'ichiro Yamashina³, Takeshi Matsushima⁴, Hiroshi Shimizu⁴

¹ 長崎大学大学院水産・環境科学総合研究科, ² 長崎大学環境科学部, ³ 東京大学地震研究所, ⁴ 九州大学大学院理学研究院
¹Grad. Sch. Fish. Sci. Env. Stu., Nagasaki Univ., ²Fac. Env. Stu., Nagasaki Univ., ³ERI, The University of Tokyo, ⁴Faculty of Sciences, Kyushu University

長崎県島原半島の雲仙・普賢岳は、1990年11月17日に噴火を開始、その約半年後の1991年5月20日に地獄跡火口にデイサイト質溶岩ドームを出現させた。ドームの成長は1995年2月初旬まで続き、噴出した溶岩の総量は約0.21km³に達した(Nakada et al., 1999)。またこの間、ドームの部分崩壊による火砕流が頻発した。

火口から西へ680mの傾斜観測点FG1では、溶岩ドームの出現直前からドーム成長のほぼ全期間に渡り、東西成分に1~3時間周期の傾斜振動が現れた。山科・他(1994)はその原因を高粘性マグマの間欠的な上昇による火道浅部の膨張と収縮の繰り返しと推定し、その傾斜振動の振幅の大きさから日毎の溶岩噴出量を求める式を導き出した。さらにこの傾斜振動が初めて現れた1991年5月の溶岩ドーム出現時では、この傾斜振動が火口直下の高周波(HF)地震の増減と同期して、傾斜が東上がり(火口上がり)の時に地震は増加し、東下がり(火口下がり)の時は低下した(Umakoshi et al., 2011)。しかしその後の期間については、地震活動に周期性があったかどうかを含め傾斜振動と地震の関係は、1994年10月からの溶岩尖塔隆起の時(Yamashina et al., 1999)を除いて調べられていない。そこで本研究では、溶岩ドーム成長全期間を対象に、地震活動の周期性および地震活動と傾斜振動との関連性を詳しく調べた。

傾斜データは、九州大学島原観測所にテレメータされていたFG1のデジタル記録を用いる。サンプリング間隔は1分である。ただし、1992年までのデータには伝送上等のトラブルが多く使用可能な期間は限られた。地震データは、火口南南西600~800mのFG3, FG4観測点の記録から作成したイベントリスト(Umakoshi et al., 2008)を用いた。

前後30分のデータを使って平滑化した10分ごとの地震回数と、10分毎に平均したFG1の東西成分の傾斜記録との間で、12時間分ずつ相関係数を求めていった。その結果、相関係数が比較的高くなる時期(0.7以上)が、1993年11月以降に3回現れた。いずれもHF地震活動の活発な時期である。しかし、その連動の仕方は1991年5月の時とは異なり、火口方向上がりの傾斜変化の時に地震回数が増加し、火口方向下がりに転じたあと地震が徐々に減少した。馬越・他(2002)の方法で波形の相似な地震グループを抽出して傾斜振動と比べると、同じグループの地震が火口方向上がり、火口方向下がりのいずれの時に発生していた。このことからHF地震の発生過程は、1991年5月と1993年11月以降とは異なっていたことが示唆される。一方、1991年6月~1993年10月のLF地震の活発な時期については、傾斜データの欠測期間が多く全期間の対応を調べることはできなかったが、周期的な地震活動が明瞭な時期はほとんどなく、傾斜振動との連動も見つかっていない。また1994年のHF地震の活発な時期の中には、傾斜振動との連動が認められない場合もあった。これらのことから、傾斜振動と地震活動が周期性を持って連動したのは、HF地震活動が活発な時期の一部のみであったと考えられる。

このほか地震活動の周期的変動として、火砕流の発生直前まで地震が徐々に増加し、火砕流の発生後に地震が一気に減少し、また徐々に地震が増えるという繰り返しがあった。また本研究では、1994年10月~1995年2月の溶岩尖塔隆起時の周期的地震活動と傾斜振動との関係についても、地震グループの抽出をおこない詳しく解析する。

キーワード: 溶岩ドーム, 傾斜振動, 周期的活動, 地震活動, 高周波地震

Keywords: lava dome, tilt oscillation, cyclic activity, seismicity, high-frequency earthquake

溶岩ドームの時間的地形発達について Geomorphological Growth of Lava Domes

森 貴章^{1*}, 大島 弘光²

Takaaki Mori^{1*}, Oshima Hiromitsu²

¹ 北海道大学地震火山研究観測センター (現在:株式会社パスコ), ² 北海道大学地震火山研究観測センター

¹Institute of Seismology and Volcanology, Hokkaido University (PASCO Corporation), ²Institute of Seismology and Volcanology, Hokkaido University

溶岩ドームは特徴的な火山地形の一つである。直径の平均は約 540m, 平均の高さは約 170m であり, アスペクト比の範囲は 0.125-0.35 と言われている。1900 年以降に溶岩ドームを形成した火山は, 世界にある約 1500 の活火山のうち 58 火山, 日本では 110 の活火山のうち樽前山・有珠山・雲仙普賢岳の 3 火山しか存在しない。そのため, 成長中の観察または観測記録は少ない。また, 少ないながらも, 個々の溶岩ドームに対する記載及び定量的なモデルの提案は行われているが, 溶岩ドームの時間的な成長過程に関する比較研究は行われていない。

可能な限り成長中の溶岩ドームの地形計測データを収集し, 高さ及び基底径を指標に, 地形発達の特徴を調べた。計測データのある 9 の溶岩ドームは, いずれも全成長期間の 5~20% にあたる初期に, 成長終息時の高さ及び直径の 50% 以上を超え, その後の成長率は次第に低下する傾向を示した。更に, 高さ及び半径の成長軌跡において, 成長率が低下し始めた時期から, 軌跡が 2 つの方向に分かれる傾向も認められた。それらの方向は, Blake (1990) が示した Peleean dome と Low lava dome の成長終息時の高さ及び半径の関係と整合的で, 分離後も遷移することなく成長することが確認された。

また, 崩壊しやすい形状のために保存されにくい Spine が調査した幾つかの Peleean dome で生じていた。この Spine の地形的な特徴についても調べた。事例は少ないが, そのアスペクト比および最大の高さに限界が認められ, アスペクト比の下限は 0.35, 上限が 3.0, 高さの限界値は約 300-350m と推定された。

結果として, 溶岩ドームの形成期間及び大きさを予測できる可能性, 場合によっては噴火活動の終息予測もできる可能性を示唆する。更に, 雲仙普賢岳のように溶岩ドームの崩壊によって, しばしば引き起こされる火砕流の発生予測においても役立つと考えられる。噴火活動における溶岩ドーム成長を迅速に捉え, 高さ及び直径だけでも測定する必要があるだろう。

キーワード: 溶岩ドーム

Keywords: Lava dome

周期的な噴火活動に対する積層型ミュオグラフィの適用可能性について Possible application of stroboscopic muography to monitoring periodic eruptions

田中 宏幸^{1*}

Hiroyuki Tanaka^{1*}

¹ 東京大学地震研究所

¹ Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

ミュオンを用いた巨大物体の透視法(ミュオグラフィ)の多くは、わずかの例を除いて(たとえば2009年の浅間山の噴火前後のイメージング; Tanaka et al., 2009)、性的な構造探査に適用されてきた。ミュオグラフィによる火山の短い時間間隔での実時間モニタリングが難しい理由は宇宙線ミュオンフラックスが低く、ミュオン透過イメージに十分なコントラストを得るまでに長い積分時間がかかるためである。しかしながら、対象が周期的な変化をする場合においては、このような問題は短い積分時間でとったフレーム(コマ)を大量に重ね合わせることで(積層型ミュオグラフィ)で、解決することが可能である。ここで、仮に400 m(水等量)の厚さを持つ山体に半径10 mの火道があったとする。この対象に対して、水平方向のミュオンの透過フラックスは完全にマグマでフィルされている状態に対して、 $5 \times 10^{25} \text{ sr}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、完全に空洞になっている場合には $7 \times 10^{25} \text{ sr}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ である。もし 4 m^2 、角度分解能 100 mrad の検出器が火道から200 m離れた位置に設置されると仮定すると、それぞれの条件に対して、それぞれ 0.02 and 0.03 s^{-1} の割合でミュオンを記録することが可能である。この数字は2500枚のフレームを重ね合わせることで、1秒間の観測で、 3σ の確証度でこれらの条件を分離できることを示している。Stromboliにおいて、2007年10月14日~17日の間に110回の噴火が観測されたこと(Goto et al., 2008)を考えると、2500回の噴火イベントはそれほど非現実的なものではないと考えられる。本研究では、総合的なモデルシステムを使うことでこのアイデアを評価した。モデルシステムは 0.16 m^2 の有感面積を持つミュオン検出器と周期的なシステムとしての直径15 mの電炉からなる。このテスト実験において、積分時間12時間のフレームを17枚重ね合わせることで、電炉内の12時間周期の密度変化を明瞭に捉えることに成功した。結果は周期的な噴火活動に積層型ミュオグラフィの適用可能性を示唆するものである。

キーワード: ミュオン, ラジオグラフィー, ストロボ

Keywords: muon, radiography, stroboscope