

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 11 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22540431

研究課題名（和文） 微動・長周期地震・空振の統合的理解による火道内部状態の解明

研究課題名（英文） Research for internal state of a volcanic conduit based on volcanic tremors, long-period earthquakes, and infrasonic signals

研究代表者

武尾実（TAKEO MINORU）

東京大学・地震研究所・教授

研究者番号：00197279

研究成果の概要（和文）：

本研究は、比較的単純な噴火形態を繰り返す火道システムの確立した火山を対象に振動現象の観測データから、火道浅部の内部状態を推定する方法を確立し、一連の噴火活動中での噴火様式変化の推定に結びつけることを目的とした。本研究期間中に、2011年霧島新燃岳の噴火が発生し、準プリニー式噴火、マグマ湧出、ブルカノ式噴火という異なる噴火に対する火口近傍で地震、地殻変動、空振という多項目の観測データを得ることに成功した。これらのデータを解析することで、ブルカノ式噴火に先行する傾斜変動の時間的変化と傾斜変動継続時間の関係から、火道内部でブルカノ式噴火の直前に進行するプロセスを解明した。また、微動と空振が同じ励起源から発生するメカニズムを、粘性の異なるアナログ物質を用いた実験により再現した。さらに、微弱な火口活動のシグナルを検出する手段を確立し、火山活動のモニターリングのレベル向上を図った。

研究成果の概要（英文）：

The purpose of this research is estimation of eruption style variation establishing a new method relating to oscillation data and an internal state of a shallow part of a conduit. During the early period of volcanic activity at the Shinmoe-dake volcano in 2011, various kinds of activities, such as sub-Plinian eruptions, a magma effusion, and Vulcanian eruptions, occurred sequentially. We succeeded in obtaining multi-items data, such as broadband seismograms, tilt motions, and infrasonic signals, nearby the summit crater during these three different eruption styles. In the Vulcanian stage, almost all Vulcanian eruptions were preceded by trapezoidal inflations followed by various time sequences of tilt motions, which became increasingly more complicated throughout the frequent Vulcanian eruptions. In spite of the complicated time sequences of the preceding inflations, we have found clear linearity between the preceding duration versus elapsed time. These observations can be consistently explained based on the assumption that a Vulcanian eruption is induced by a catastrophic rupture of the strongest closed, solid magma frame in a conduit due to magma degassing overpressure, and the degassing from the magma declines exponentially with time. Switching between seismic-only harmonic tremor and seism-acoustic harmonic tremor has been reported during Shinmoe-dake eruption

activity. Switching was simulated in a laboratory experiment. At lower fluid stiffness, a stable, open conduit was produced, and the harmonic signals generated within the experimental apparatus were efficiently transmitted into the atmosphere. We established a simple method to distinguish infrasonic signals from wind noise, demonstrating that it effectively detects not only main eruptions, but also minor activity generating weak infrasound hardly visible in the wave traces.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2012年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星科学

キーワード：火山現象，数理モデル，実験

1. 研究開始当初の背景

火山の噴火活動が爆発的噴火となるか連続微噴火や「噴火未遂」に終わるかは、マグマの供給率や火道内部の状態によって左右されると考えられる。中長期的なマグマの供給率は火山体及びその周辺に展開した地殻変動観測網のデータから、的確に捉えられるようになってきた。海外の火山でも、観測網が整備されたフィールドでは中長期的なマグマ供給の実態が地殻変動により捉えられている。一方で、一連の噴火活動の中でも、同程度の地震・地殻活動が観測されながら噴火に至らない「噴火未遂」の事例もしばしば記録されている。この噴火様式の変化や「噴火未遂」の要因については未解明の部分が多いが、それを明らかにすることは火山の噴火機構を理解する上で重要である。

本研究では、マグマ供給系が安定していて火道がしっかり形成され、山頂火口からの噴火を繰り返す比較的噴火機構の単純な火山を対象にして、その噴火活動の多様性を支配

する要因の解明を目指す。特に、火道内部で発生する微動・長周期地震と空振は、火道浅部での火山性流体の動きを示す振動現象であり、これらを統合的に理解することにより火道内部の状態を推測することが可能となる。

2. 研究の目的

本研究では、まず火口近傍での観測データの豊富でかつ、微動・長周期地震の数理モデルへの理解が進んでいる浅間山をテストフィールドにして、地震動や空振などの種々の振動現象から火道内部の状態の推定する手法の開発を目指した。さらに、観測データが豊富な浅間山における火道内部状態の推定からスタートするが、それに留まることなく、確立した火道システムを持つより広範な火山への適用を視野に入れ、有効な火道長、流体の噴出率、火道への流入する流体圧等に注目した室内実験も行い、より一般的に火道内部の状態と期待される振動現象との関係

を明らかにする事により、この研究課題の達成を目指した。

上記の当初の研究目的に加え、2011年霧島新燃岳噴火では、准プリニー式噴火、マグマ湧出期、ブルカノ式噴火という一連の異なる噴火活動に際し、火口近傍において微動、長周期地震、傾斜変動、空振という各種の観測データを得ることに成功した。これらのデータは、本研究の課題を達成するためにきわめて貴重なデータであり、このデータ解析から火道内部状態の推定する事を目指した。

3. 研究の方法

本研究の目的は、比較的単純な噴火形態を繰り返す火道システムの確立した火山を対象に振動現象の観測データから、火道浅部の内部状態を推定する方法を確立し、一連の噴火活動中での噴火様式変化の推定に結びつけることである。この研究目的を達成するため、1) 微動・長周期地震を統一的に説明する数理モデルをベースに、火道が閉塞状態及び開放状態であったときの微動・長周期地震を見直し、火道浅部での流体の噴出率と微動・長周期地震活動との関係を明らかにする、2) 確立した火道システムを持つより広範な火山への適用を視野に入れ、火道長、流体噴出率、火道への流体圧に注目した室内実験を行い、より一般的に火道内部の状態と期待される振動現象との関係を明らかにする、という2つのアプローチを実施し、この研究課題の達成を目指した。さらに、異なる噴火様式に対する火口近傍の微動、長周期地震、空振データを取得することが出来た霧島新燃岳噴火も研究対象に加え、噴火様式の変化と噴火に先行する火道内部状態の推定を、傾斜変動、地震動と空振の励起効率の違いなどから推定する事を目指した。

4. 研究成果

微動、長周期地震動の数理モデルを解明する課題では、初年度から進めてきた観測データを用いて励起に関わる非線形微分方程式の形式に関する情報を直接推定する手法の開発を進めた。火口近傍の観測データは、その波長によっては伝搬の影響をほとんど無視することが可能で、微動等の励起を表現する微分方程式系の解と見なすことが出来る。そこで、この観測データを適切な時間長に切断して、各長さの上でこれらを微分方程式系の解と近似的に見なして相図を作成しポテンシャルの状況を定め、これらのポテンシャルを時間軸上でつなぐことで全体像を推定する。また、微動励起の具体的な物理モデルを想定し、その微分方程式系が描く相図と比較することにより、励起源モデルを解明する。このアプローチを2011年新燃岳噴火の際に観測されたハーモニック微動に適用し、その微動の相図の特徴を再現することに成功した。図1にこの微動の定常的な振動部分で観測された相図(図1の上)と、火道の一部が

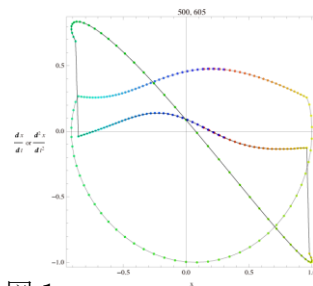
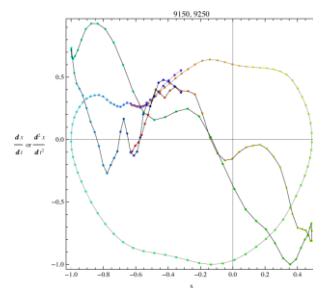


図1

く再現しており、火道内部の一部が収縮・膨張することでこのような微動が励起されていることを示唆している。この数理モデルでは、火道深部の圧力パラメータを変え

チョーク状態でそこが収縮・膨張する物理構造を仮定した数理モデルから計算された相図(図1の下)

の比較を示す。モデルから得られた相図は観測された相図の特徴をよ

ることで、この微動が徐々に停止していく振動の相図も再現することに成功した。

さらに、このアプローチを 2011 年 11 月から 12 月かけて浅間山で集中的に発生した継続時間の長く単調に振幅が減衰する特徴を持つ特殊な地震の特徴を明らかにするために適用した。その結果、基本モードと高調波モードの間での位相ずれが時間とともに変化するものがあることが判明した。これまで、この地震の励起モデルとして提唱されている流体を含むクラックの振動ではこのような位相ずれの特徴を説明することは必ずしも簡単ではなく、別の励起源モデルを考える必要性を示唆した。

また、浅間山の噴火形態や火道浅部での内部状態を推定する上でも、上部地殻から火口までどのような経路でマグマが上昇してきているかを理解することは重要である。地震活動と人工地震探査による既往の研究に併せて、脈動を用いた地震波干渉法による構造解析で、浅間山のマグマ溜まりは火道直下にあるのではなく、山頂から西に約 8 km の海拔下 5 km~10 km に位置することが明らかにした。

霧島新燃岳の准プリニー式噴火、マグマ湧出期、ブルカノ式噴火の 3 つの異なる噴火活動の際に火口近傍で観測された広帯域地震記録、傾斜記録、空振記録を解析することにより、これらの噴火活動に関連した火道内部状態の推定に成功した。

ブルカノ式噴火が頻発した 2011 年 2 月 1 日から 2 月 7 日にかけて、22 このブルカノ式噴火が発生したが、そのすべての噴火に先行して火口側が隆起し噴火に伴って元に戻る傾斜変動が観測された。この傾斜変動の時間変化はブルカノ式噴火が繰り返し発生していくうちに徐々に複雑な変化を示すようになったが、一方で、傾斜変動の継続時間は

2 月 1 日のブルカノ式噴火活動開始以降、きわめて系統的な変化を示していることが判明した。ブルカノ式噴火は火道内部の閉塞し

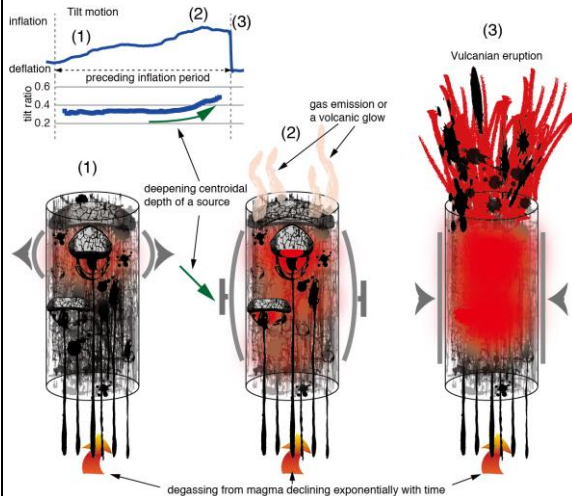


図 2

た最も強度の強いマグマ組織が壊れることによりトリガーされること、および、火道深部から浅部に供給される火山ガスは一定の割合で指数関数的に減少していることで、これらの事実を統一的に説明する事が出来る。さらに、ブルカノ式噴火に先行して火道内部の圧力源の位置が深部に移動する観測事実も合わせることで、図 2 に示すような、ブルカノ式噴火に先行する火道浅部の内部状態を推定することに成功した。

さらに、マグマ湧出期（2011 年 1 月 28 日～1 月 31 日）には火道方向に向いた 1 時間周期の膨張・収縮とこの傾斜変動に同期した微動の発生が観測された。また、微動の周波数構造は膨張期と収縮期で異なっていることを明らかにした。これらの観測事実を合理的に説明するモデルの構築にはまだ至っていないが、火道内部状態の変遷を推定する上で重要な観測データである。

今回の新燃岳の噴火活動では、マグマ湧出期からブルカノ式噴火期のはじめにかけて、活発な微動活動が観測された。この微動活動の初期には、比較的複雑な周波数構造を持つ

微動が発生し、それに同期した空振記録は微動とはかなり異なる波形を示していた。しかし、この活動期の後半ではハーモニックな微動活動が活発化し、これに合わせて、空振にも同じ周波数構造を持つハーモニックな微動が記録されるようになった。このメカニズムを検討するために、異なる粘性を持つアナログ物質を用いた実験を行い、粘性の高い場合は安定で定常的な火道が形成され、ハーモニックな振動が空気中にも発せられることが明らかになった。

以上のように、本研究により、ブルカノ式噴火のような爆発的噴火に先行して火道内部で進行している現象の解明が進んだと同時に、微動発生のメカニズムへも一定のあたり意思地券を売ることが出来た。これらの研究は噴火機構の変遷を解明する上で大きな成果と言える。

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4件)

M. Ichihara, M. Takeo, A. Yokoo, J. Oikawa, and T. Ohminato, Monitoring volcanic activity using correlation patterns between infrasound and ground motion, *Geophysical Research Letters*, 査読あり, 39, 2012, L04304, DOI 10.1029/2011GL05042

Y. Nagaoka, K. Nishida, Y. Aoki, M. Takeo, and T. Ohminato, Seismic imaging of magma chamber beneath an active volcano, *Earth and Planetary Science Letters*, 査読あり, 333-334, 2012, 1-8, DOI 10.1016/j.epsl.2012.034

M. Ichihara, J. Lyons, J. Oikawa, and M. Takeo, Acoustic waves in the atmosphere

and ground generated by volcanic activity, *NONLINEAR ACOUSTICS State-of-the-Art and Perspectives*, AIP Conf. Proc., 査読無し, 1474, 2012, 327-330, DOI 10.1063/1.4749361.

J. Lyons, M. Ichihara, A. Kurokawa, and J. Lees, Switching between seismic and seismo-acoustic harmonic tremor simulated in the laboratory: Insights into the role of open degassing channels and magma viscosity, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 査読あり, 118, 2013, 277-289, DOI 10.1002/jgrb.50067.

[学会発表] (計11件)

M. Takeo, Source process of long-period seismic pulses, and non-linear dynamics of long-period volcanic tremors observed at Mt. Asama, ESC Working Group “Earthquakes and Volcanoes” Annual Workshop 2010, 22 September, 2010, Massif Central, France

武尾 実, 四方義啓, 非線形な火山性微動の相図と微分方程式系の構造推定, 地球惑星科学関連連合大会, 2011年5月22日, 幕張メッセ 千葉.

市原美恵, 及川 純, 大湊隆雄, 武尾 実, 空振と地震の相関解析から見た霧島新燃岳2011年噴火の推移, 地球惑星科学関連連合大会, 2011年5月23日, 幕張メッセ 千葉.

長岡 優, 西田 究, 青木陽介, 武尾 実, 脈動記録を用いた浅間山の地殻内速度構造の推定, 地球惑星科学関連連合大会, 2011年5月23日, 幕張メッセ 千葉.

武尾 実, 及川 純, 大湊隆雄, 市原美恵,

渡邊篤志, 辻 浩, 森 健彦, 阿部英二, 新燃岳周辺の広帯域地震・空振観測網の展開と噴火推移の把握, 日本火山学会 2011 年秋季大会, 2011 年 10 月 2 日, 旭川.

前原祐樹, 大湊隆雄, 及川 純, 武尾 実, 新燃岳の噴火に伴う傾斜変動, 日本火山学会 2011 年秋季大会, 2011 年 10 月 3 日, 旭川.

市原美恵, ライオンズ・ジョン, 地震と空振に見られる調和型微動の発生に関するモデル実験, 日本火山学会 2011 年秋季大会, 2011 年 10 月 4 日, 旭川.

前原祐樹, 武尾実, 大湊隆雄, 市原美恵, 及川純, 2011 年新燃岳噴火の準プリニー式噴火, ブルカノ式噴火, 溶岩流出に伴う傾斜変動, 地球惑星科学関連連合大会, 2012 年 5 月 24 日, 幕張メッセ 千葉.

武尾実, 鎌田林太郎, 四方義啓, 2011 年 11 月~12 月に発生した浅間山 N 型地震の震源と周波数構造の特徴, 日本火山学会 2012 年秋季大会, 2012 年 10 月 14 日, エコール御代田 御代田町.

青木陽介, 武尾実, 大湊隆雄, 長岡優, 西田究, 地震および地殻変動観測から求められた浅間山におけるマグマ供給経路, 日本火山学会 2012 年秋季大会, 2012 年 10 月 14 日, エコール御代田 御代田町.

鎌田林太郎, 武尾実, 霧島新燃岳における火口底への溶岩蓄積時の火山性微動周波数構造解析, 日本火山学会 2012 年秋季大会, 2012 年 10 月 14 日, エコール御代田 御代田町.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

武尾実 (TAKEO MINORU)
東京大学・地震研究所・教授
研究者番号: 00197279

(2) 研究分担者

市原美恵 (MIE ICHIHARA)
東京大学・地震研究所・助教
研究者番号: 00376625

(3) 連携研究者

なし