

令和 2 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2019

課題番号：16K13872

研究課題名(和文)長周期火山性振動を解明するための新たなアプローチ

研究課題名(英文)An innovative approach to elucidate an excitation mechanism of volcanic oscillation

研究代表者

武尾 実 (Takeo, Minoru)

東京大学・地震研究所・名誉教授

研究者番号：00197279

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：火山性微動や長周期地震、傾斜変動等の火山性長周期振動はしばしば噴火活動と密接に関連して発生している。本研究では、火口近傍で観測されたデータから、振動の励起源の力学機構システムを制約する手法と位相幾何学的アプローチによる励起源の数理構造を推定する手法を開発し、2004年浅間山噴火や2011年霧島山新燃岳噴火の際に観測された火山性微動の解析に適用した。その結果、2004年浅間山噴火に先行する非線形な火山性微動は火道閉塞の進行で、2011年新燃岳噴火のハーモニックな火山性微動は火道浅部の局所的な流体流路の変動で、合理的に説明できることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発したアプローチは、観測されたデータからその励起源の定性的な数理構造を推定する手法を提供するものである。この数理構造は、その火山性振動現象と噴火活動がどの様に関係するか、もしくは、その火山性振動を生み出す火道内部状態がどの様なものであるか、を推定する手がかりを与えるもので、火山噴火を理解する上での新たな知見をもたらすことが期待される。さらに、多くの火山で噴火に先行して同じ特徴を持つ振動現象が観測されており、火山性微動・地震の波動特性から火道内部状態を推定する手法が確立されれば、火山噴火の予測精度の向上に貢献するものとなる。

研究成果の概要(英文)：Long-period volcanic oscillations, such as a volcanic tremor, a long-period event, and a tilt motion, are closely associated with a volcanic eruption. Using observed data recorded near an oscillation source, we developed innovative methods to get parameters of nonlinear dynamics and to construct a mathematical model based on a topological approach. We applied these methods to analyses of volcanic tremors recorded during the 2004 eruption at Asama volcano and the 2011 eruption at Shinmoe-dake volcano. In the result, it made clear that the non-linear volcanic tremor in Asama volcano is caused by a blockage in the conduit, and that the harmonic tremor in Shinmoe-dake volcano are excited by a nonlinear instability that arises when viscous fluid flows through a partially constricted flexible channel.

研究分野：火山物理学

キーワード：火山 数理物理 固体地球物理

## 様式 C-19, F-19-1, Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

火山性微動や長周期地震、傾斜変動等の火山性長周期振動はしばしば噴火活動と密接に関連して発生していることが知られている。例えば、浅間山では傾斜変動を伴う長周期地震(VLP)が多数観測され、火道浅部の割れ目への急激なガスの流入と緩やかな流出によって励起されるガス噴出イベントであることが解明されている[Maeda and Takeo, 2011]。また、2004年浅間山噴火前には非線形な波動特性を持つ微動や長周期地震が、噴火に先駆する火山活動が変化する時期に集中して発生しており、これらの長周期振動が火山活動において重要な意味を持っていることを示唆している。2011年霧島山新燃岳の噴火活動では、山頂火口内にマグマが湧出する活動に伴い、火口近傍で火道内部の膨張・収縮を示す傾斜変動とそれに同期したハーモニックな火山性微動が観測され[Takeo *et al.*, 2013]、これらの観測データから火道内部でのマグマ状態の変化を明らかにできる可能性がある。このように、火道内部で発生する火山性微動や長周期地震及び傾斜変動は、火道浅部での火山性流体(マグマ、熱水、火山ガス等)の動きを示す振動現象であり、火山活動を把握する上でその励起機構の解明は重要である。近年、火口近傍における広帯域地震観測や傾斜観測が可能となった結果、実験室において励起源の近くにセンサーをおいてシグナルを記録している状況と類似した、波動伝播や減衰・散乱の影響をほとんど受けていない火山性微動や長周期地震の観測データが得られるようになった。

### 2. 研究の目的

励起源の近傍で観測された長周期の振動データは、波動伝播による減衰・散乱と行った非線形な変換の影響が少ないため、励起源の情報をそのまま保持しているとみられる。この様なデータから振動を励起する機構を読み解く手法はまだ確立されていないが、本研究ではこれらのデータに非線形動力学や位相幾何学的なアプローチを適用して、その励起源の力学機構の微分方程式系を推定する手法を開発し、長周期火山性振動の火山活動における役割やその発生メカニズムを明らかにすることを目指した。

### 3. 研究の方法

本研究は当初、1) 観測された振動の非線形性の検証と力学機構の次元推定、2) 観測データから位相的な微分方程式系の数理構造を導き出す手法の確立、3) 観測データを定量的に再現するための方程式系の制御因子の定量化と物理モデルの構築、を柱として、2004年浅間山噴火、2011年霧島山新燃岳噴火の際に火口近傍で観測された火山性微動、火山性地震、傾斜変動のデータを解析対象として研究を開始した。その後、2016年度から2018年度の期間で実施した「遠隔操作の多項目観測による西之島形成プロセスの解明(基盤研究(A))」において、新たに誕生した西之島の火口近傍に設置した広帯域地震観測により得られた相似な波形を持つ長周期地震群と周期1.5~1時間の鋸波状

の傾斜変動も解析対象に加え、研究を進めた。

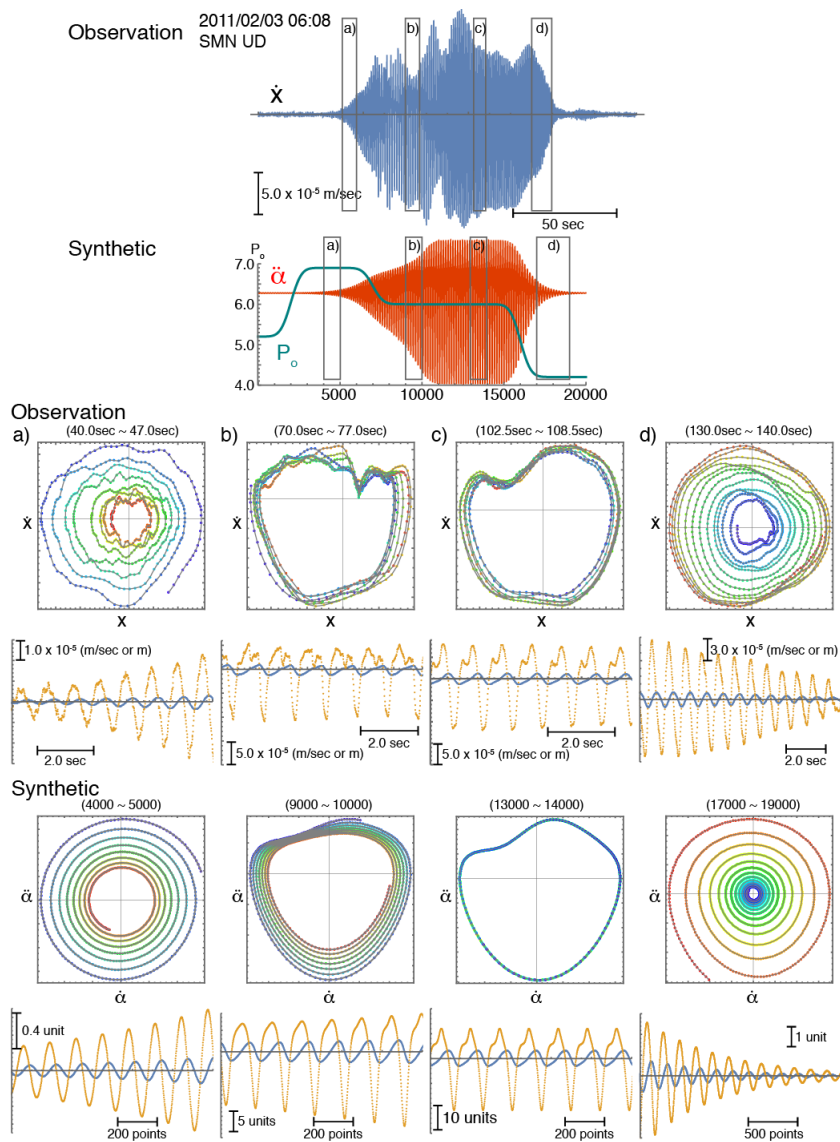
#### 4. 研究成果

火口近傍で観測された地震や微動のデータから振動の非線形性を検証する方法と励起源の力学機構のシステム次元を制約する手法の開発では、時間遅れの埋め込み座標系を用いてアトラクタ再構成を行い、埋め込み写像を実現する最小次元と再構成アトラクタの相関次元から力学機構のシステム次元の範囲に関する必要条件を求める方向で進めた。その結果、適切な時間遅れを推定する方法としては高次自己相関係数を用いる方法が、最小埋め込み次元を推定する方法としては Cao[1997]の方法が有効であることを、非線形な火山性微動モデルである Julian[1994]のモデルを使った数値シミュレーションで確かめた。また、微動の非線形性の検証にサロゲート解析が有効であることも、同様のシミュレーションで確認した。この手法を 2004 年浅間山噴火の前に発生した非線形な火山性微動と長周期地震に適用することで、その励起源のシステム次元が 3-7 の間にあることを明らかにした。さらに、サロゲート解析によりその波動の非線形性を検証し、火道浅部が流体回路モデルに類似できることを考慮して、この次元の範囲にあるモデルとして Control valve に因る流体制御の数理モデルを設定してシミュレーションを行った結果、非線形な微動も長周期地震も同じ数理モデルで説明可能であること、このようなシグナルは流路が閉塞する方向に変化することで励起されることを明らかにした。2004 年 9 月 1 日の噴火に至るまでの火山ガス噴出イベントの推移と地震活動・非線形微動活動を調べることで、これらの非線形微動が集中して発生した時期に、火道浅部における火道閉塞の進行を示していると考え、他の観測データと整合的であることを確認し、数理モデルから物理モデルに発展させる上での具体的手がかりを得ることが出来た。

火口近傍で観測された微動から振動現象の数理構造を推定するため、観測データの特徴的な振動を示す部分に適切な同相写像を施してその定性的な位相幾何学的特徴を抽出する手法を確立し、2011 年の霧島山新燃岳噴火の際に発生した調和振動的な特徴を持つ火山性微動(ハーモニックな火山性微動)や傾斜変動の解析を実施した。その結果、ハーモニックな火山性微動に倍周期分岐の特徴があることを明らかにした。さらに、これらの観測データに、本研究で開発した時間遅れの埋め込み座標系を用いたアトラクタ再構成手法を適用して、その相関次元やリアプノフ指数を求めることで、ハーモニックな火山性微動が非線形システムによるリミットサイクルに起因することを明らかにした。この研究成果に基づき、火道浅部で想定される流体制御の機構を組み込んだ数理モデルを構築し、観測されたハーモニックな火山性微動の特徴を再現できるかどうかの検証を進めた。この研究においては、従来の火山性微動の研究で取り込まれてきた微動の振幅スペクトルの特徴だけではなくその位相特性にも注目してハーモニックな微動の励起メカニズムを考察する点が、これまでの研究にない独創的な取り組みであ

る。特徴的な振動部分にもとづく局所的な位相幾何学的特徴の再現から、大域的な振動への切り替えの制御因子として、他の観測データや解析結果を参考にして、流体粘性、流路の幾何形状、流体供給源の圧力変動の因子を設定し、それらがどの様に振動の相図の軌道を変化させるかを調べた。その結果、供給源における圧力を変化させるだけで、観測された微動の相図上の軌道の時間変化を定性的に再現することに成功した。観測されたハーモニック微動と数理モデルから再現された振動を、図の上の部分に示してある。各波形に示した時刻【 a), b), c), d) 】に対応する振動にアフィン変換を施した相図を、観測データと理論波形に分けて、同じ図の下の部分に示してある。この振動の大域的

特徴を再現する制御因子である供給源の圧力変化は、緑色の実線で図の上の部分の理論波形に重ねて示してある。また、合理的な流体流路サイズを仮定することで、火道内部の流体速度や流路変化の定量的な推定を行い、現実的な物理量で観測事実を説明することも明らかにした。さらに、この非線形システムの大域的な挙動と自励振動のメカニズムを、同システムのヌルクラインと軌道の関係から解明した。2011年霧島山新燃岳噴火の際に発生したハーモニックな火山性微動に関するこれらの研究成果のうち、非線形システムのリミットサイクルに起因することを明らかにした論文は、すでに、欧文学術誌（Geophysical Journal of International）に公表されている。また、ハーモニックな火山性微動の成因を明らかにした研究成果は、現在、欧文学術誌（Geophysical Journal of International）に投稿中である。この火道浅部で



想定される流体制御の機構を組み込んだ数理モデルは、粘性流体の流動による非線形自励振動についても検討できるモデルとなっているため、2011年霧島山新燃岳噴火の溶岩流出に伴う周期1時間の傾斜変動や、新たに誕生した西之島の2017年4月18日の再噴火の溶岩流出に先行して観測された周期1.5~1時間の鋸波状の傾斜変動についても再現可能であるかの検証を進め、取り纏める予定である。

#### 【引用文献】

- Cao, L., 1997. Practical method for determining the minimum embedding dimension of a scalar time series, *Phys. D*, 110, 43-50.
- Julian, B.R., 1994. Volcanic tremor: Nonlinear excitation by fluid flow, *J. Geophys. Res.*, 99, B6, 11859-11877.
- Maeda, Y., and Takeo, M., 2011. Very-long-period pulses at Asama volcano, central Japan, inferred from dense seismic observations, *Gephys. J. Int.*, 185, 265-282.
- Takeo, M., Maehara, Y., Ichihara, M., Ohminato, T., Kamata, R., and Oikawa, J., 2013. Ground deformation cycles in a magma-effusive stage, and sub-Plinian and Vulcanian eruptions at Kirishima volcanoes, Japan, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 118, 4758-4773.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Natsume Yuki, Ichihara Mie, Takeo Minoru	4. 巻 216
2. 論文標題 A non-linear time-series analysis of the harmonic tremor observed at Shinmoedake volcano, Japan	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Geophysical Journal International	6. 最初と最後の頁 1768 ~ 1784
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/gji/ggy522	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 武尾 実, 大湊隆雄, 前野 深, 篠原雅尚, 馬場聖至, 渡邊篤志, 市原美恵, 西田 究, 金子隆之, 安田 敦, 杉岡裕子, 浜野洋三, 多田訓子, 中野 俊, 吉本充宏, 高木朗充, 長岡 優	4. 巻 24
2. 論文標題 西之島の地球物理観測と上陸調査	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 海洋理工学会誌	6. 最初と最後の頁 45-56
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 ナツメユウキ, 市原美恵, 武尾 実
2. 発表標題 A Nonlinear Time Series Analysis of the Harmonic Tremor Observed at Shinmoedake Volcano, Japan
3. 学会等名 日本火山学会2018年度秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Natsume, Y., M. Takeo, and M. Ichihara
2. 発表標題 Harmonic Tremors at Shinmoedake
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Takeo, M., Y. Maeda, and R. Kazahaya
2. 発表標題 Relation between long-period seismic signals and SO2 emission at Asama volcano from October 2003 to January 2017
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Takeo, M.
2. 発表標題 Long-period seismic signals and volcanic gas emission at Asama volcano, Japan
3. 学会等名 European Seismological Commission (ESC) - commission working group volcano seismology (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Takeo, M.
2. 発表標題 Volcanic eruption and ground rotational motion
3. 学会等名 IWGoRS 5th; International Working Group on Rotational Seismology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takeo, M., T. Ohminato, M. Ichihara, M. Shinohara, K. Baba, A. Watanabe, H. Sugioka, Y. Hamano, and N. Tada
2. 発表標題 Geophysical observations at a new volcanic island Nishinoshima, Ogasawara, Japan
3. 学会等名 IAVCEI 2017 Scientific Assembly (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----