

平成 22 年 6 月 8 日現在

研究種目： 基盤研究 (C)

研究期間： 2007 ~ 2009

課題番号： 19540441

研究課題名 (和文) 非線形な波動特性を示す微動発生源の数理モデル構築

研究課題名 (英文) Mathematical model of non-linear volcanic tremors

研究代表者

武尾 実 (MINORU TAKEO)

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)：

火口直上に設置した広帯域地震計を含む稠密地震観測網の観測により、2004年9月の浅間山噴火に先行する地震活動の中に、噴火に先行する特異な地震・微動が発生していることが明らかになった。同様な火山性地震・微動は浅間山を含む他の安山岩質火山でも過去に観測されており、単に今回の噴火活動に限られたものではなく安山岩質火山におけるより一般的な現象と考えられる。そこで、本研究では、非線形な波動特性を持つ微動の観測データから、その背後にひそむ微動励起の数理モデル及びその制約条件の導出を目指す。この数理モデル及びその制約条件は微動発生の物理プロセスを解明する上での大きな知見を与える。さらに、個々の微動発生の物理プロセスについては、それらが発生する場についての物理環境を考慮して個別にモデル化を進めることが可能となる。

2004年6月23日には非線形な波動特性を持つ微動が約6時間おきに3個発生した。まず、これらの3つの微動を対し、時間遅れ座標系への埋め込み写像を実現するための最小の埋め込み次元の推定とGP法による相関次元推定、及びサロゲートデータ解析による波動の非線形性検証を行った。微動の高周波成分はかなりランダムな特性を有しているため、微動の低周波成分に対して埋め込み次元と相関次元の推定を行った。埋め込み次元を求めるための最適な時間遅れ値の推定は、高次の自己相関係数を用いる方法を採用し、3つの微動に7~8次元というほぼ同一の最小埋め込み次元が推定された。また、この埋め込み次元を使って再現したアトラクターから求めた相関積分は、1オーダー以上の範囲で同一の傾きを持ち、安定に相関次元を推定することが出来た。さらに、この解析手法の妥当性を検証するため、Julianの非線形微動モデルを使って微動をシミュレートし、その中のある1次元のデータから最小埋め込み次元と再構成したアトラクターから相関次元の推定を行ったが、それらの値が元の力学系の次元と合致しこの手法が有効であることを確認した。

KM₂O-Langevin 方程式論に基づく非線形予測手法を用いるという別のアプローチからの解析も試みた。再構成状態空間へのアトラクター再構成による解析で用いた微動に対しても、非線形項を加えた KM₂O-Langevin 方程式論に基づく非線形予測を試み、ある特定の非線形項を加えたときに予測値が大きくなる事を明らかにした。また、KM₂O-Langevin 方程式理論を使った地震波初動や孤立した位相を同定するアルゴリズムを作り、実際の観測データに適用して良好な結果を得た。さらに、微動の周波数構造を解明する目的で KM₂O-Langevin 方程式論を拡張した「平均散逸スペクトル」という新しい解析手法を開発し、四国西部に発生する極めて

微弱なシグナルである深部低周波微動にこの手法を使うことにより、初めて 1Hz~5Hz の間に 0.5Hz 間隔のスペクトルのピークを持つという微動の周波数構造を明らかにした。

当初、本研究計画では、非線形な波動特性を持つ微動のみを解析対象として考えていたが、研究の進展の中で、継続時間の長い非線形な長周期地震も、微動と同様な非線形なダイナミクスに関する制約条件を持つことが明らかになった。そこで、非線形な微動・長周期地震を統一的に説明する数理モデルの検討を行い、火道浅部での流体の噴出率係数をコントロールパラメータとした数理モデルで、微動と継続時間の長い長周期地震が統一的に説明できる可能性を示した。対象とした非線形な微動と長周期地震は一見非常に異なる波形を示しているが、周期 1 秒以上の長周期成分に注目して、時間遅れの埋め込み座標系を用いた再構成状態空間へのアトラクター再構成による力学系システムの次元推定を行うと、同じ範囲の次元を持つ非線形ダイナミクスであることが明らかになった。そこで、推定される次元範囲の最小次元の元で、すき間流モデルとコントロール・バルブモデルをベースに検討を行った結果、微動・長周期地震両者の波形的特徴を説明できる流体の噴出率係数をコントロールパラメータとした数理モデルの構築に至った。流体噴出率係数を変化させたときのバルブの動きと微動・長周期地震の波形を比較をすると、バルブの動きは観測された波動特性をきわめてよく再現している事が確認できた。この数理モデルが、本申請の研究課題で基礎と成る数理モデルと成っている。

研究成果の概要 (英文) :

On September 1, 2004, a middle-scale eruption occurred at Mt. Asama. Before the eruption, we observed three long-period tremors with singular waveforms, which occurred at 4:25, 11:30, and 20:30 on June 24, 2004. The common characteristic of these tremors is that the tip of the waveform is sharp. This sharp-pointed waveform may suggest a non-linear dynamics of the source process. In addition, these singular tremors occurred at intervals of 7 to 9 hours on the same day, suggesting that the source process of these tremors is in common. In this paper, the dynamical structure and characteristics of these tremors are investigated by employing some reliable and robust techniques in the estimation of geometrical and dynamical parameters.

Embedding by the method of time delays has become the standard procedure in non-linear dynamical system analysis of a single time series. The first step for the nonlinear analysis of a single time series is to reconstruct a topologically equivalent attractor to the original in a relatively low-dimensional delay-coordinate space. The key questions are how the minimum embedding dimension can be determined for reconstructing the original dynamics, and how we select the delay time. We employed some reliable and robust techniques in the estimation of optimum delay time and minimum embedding dimension. Concretely, we used higher-order correlations to select an optimum delay time (Albano et al., 1991). A practical method for determining minimum embedding dimension proposed by Cao (1997) was used in this paper. To verify this approach, we applied this method to Julian's non-linear tremor model, obtaining suitable embedding dimension and correlation dimension for Julian's system.

To select the long-period component, we employ a FIR low-pass filter with a cut-off frequency of 0.4Hz. For the tremor occurred at 4:25, the optimum time lag of 0.24 sec and the minimum embedding dimension of 8 were obtained by employing these methods. We succeed in reconstructing an attractor of the tremors using these dimension and time lag. Then, we calculated a correlation integral curve of the reconstructed attractor, founding a scaling region over one decade with the correlation dimension of 2.04

plus minus 0.17. The correlation dimension converges a certain value as increasing the embedding dimension. This suggests that the time series is not random data and the correlation dimension is estimated correctly. We analyzed two other tremors and revealed the non-linear dynamics of long-period tremors using the embedding method of time delays and the surrogate data analysis, and made clear that there existed a deterministic non-linear dynamics in the tremor excitation, which could be modeled with the system dimension between 3 to 7 (prospective dimension 3 or 4).

We also applied a non-linear prediction approach based on the theory of KM₂O-Langevin equation to evaluate a contribution from non-linearity of the system. In addition, we developed a new method for detecting and picking P- and S-wave signals automatically. Compared to methods currently in use, our method requires less assumption with properties of the data time series. We also developed a new approach for analysis of frequency structure of tremor based on the theory of KM₂O-Langevin equation. We applied the new algorithm to obtain a frequency structure from highly noisy data of deep low-frequency tremors occurred in western Shikoku, Japan, and reveal the characteristic frequency structure of deep low-frequency tremors with peaks lined up from 1 to 5 Hz at intervals of 0.5 Hz.

In next step, we apply the embedding method of time delays to the long-period long-lasting earthquakes and estimate geometrical and dynamical non-linear parameters of them to constrain the dynamics in the excitation. Embedding by the method of time delays has become the standard procedure in non-linear dynamical system analysis of a single time series. The waveforms of the long-period long-lasting earthquakes were similar to each other, so we selected a typical event that occurred at 12:34 on June 12, 2004. We employed a FIR low-pass filter with a cut-off frequency of 1 Hz to omit high frequency component. The optimum time lag of 0.24 sec and the minimum embedding dimension of 7 were obtained by employing these methods. We succeed in reconstructing the attractor of the long-period earthquakes, and got a correlation integral curve of the reconstructed attractor, founding a scaling region over one decade with the correlation dimension of 2.04 plus minus 0.11. This result indicates that the source process of long-period long-lasting earthquake could be modeled on a non-linear dynamics with a system dimension between 3 to 6, which is similar dimension range with the source process of long-period tremors. Another way of saying, the apparent waveform characteristics of long-period earthquakes and long-period tremors are quite different, however the both correlation dimensions calculated from the reconstructed attractors are almost same values.

Modifying a hydraulic control valve model with the system dimension of 4, we succeeded to simulate a long-period oscillation resembling with the long-period earthquakes and with the long-period tremors based on a same mathematical model. These two long-period oscillations are sharply distinguished by a discharge coefficient of vent. The remaining problem is how to excite seismic waves from the simulated valve oscillations.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
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・固体地球惑星物理学

キーワード： 地震現象

1. 研究開始当初の背景

火山性微動はしばしば、噴火活動と密接に関連して発生している。また、その波動特性は、調和振動的な様相を示すものから様々な周波数成分を含む複雑な様相を示すものまで多岐にわたり、その発生機構として線形の共鳴振動から非線形の自励振動まで数多くのモデルが提唱されている。その中でも Chouet (1986) の流体で満たされたクラック振動モデルは、線形の調和振動的な微動に対しては一定の成功を収めつつあるが、非線形な振動特性を示す微動に対しは、観測データに基づく有効なモデルは未だ出されていない。その要因としては、観測された微動に対する震源過程と波動伝播の効果を分離することのむずかしさ、非線形ダイナミクスを解析する手法や観測データからの情報抽出手法が未成熟であったこと、観測データから求められる力学系システムに関する情報を物理プロセスの解明に結びつける方法が確立されていないことなどが挙げられる。しかし、火山噴火に先行して非線形な波動特性を示す微動がしばしば観測されており、この現象を解明することは、噴火に至るプロセスを解明し噴火予測の精度を向上させる上で極めて重要な課題である。

申請者らは、2004年9月の浅間山噴火に

先行する地震活動を、火口直上に設置した広帯域地震計を含む稠密地震観測網で観測を続け、噴火に先行する特異な地震・微動の観測データを得ることに成功した。さらに、申請者らの先行する研究[山本・他(2005), Takeo et al. (2006a)]で、これらの地震・微動は今回の噴火活動でマグマが噴出した火道内浅部で発生していることが明らかにした。また、同様な火山性地震・微動は浅間山を含む他の安山岩質火山でも過去に観測されており、単に今回の噴火活動に限られたものではなく安山岩質火山におけるより一般的な現象と考えられる。特に、図1に示す長周期微動は、マグマが火道浅部(海拔約1km程度)まで上昇したと推定される2004年5月～6月に集中して発生しており[Takeo et al. (2006a)], その物理過程の解明は浅間山の噴火プロセスを理解する上でも欠かせない課題である。

1990年代初めには、非線形力学分野で当時使われ始めた「時間遅れ座標系を用いた解析手法」を、微動の波動特性を解明する目的で適用した研究が数多く行われた[例えば, Moon (1987), Chouet and Shaw (1991)]. しかし、この当時は、当該研究分野でも実データにその解析手法を適用する際の問題点の解明が不十分であり、微動解析において出さ

れた結果もそのほとんどは信頼性の低いものであった。また、観測された微動の特定の特徴に注目して物理プロセスを推定しても、同様の特性を持つ波動を作り出す別のプロセスも否定しがたく、モデルの構築にもなかなか決め手に欠けていた。

2. 研究の目的

本研究では、非線形な波動特性を持つ微動の観測データから、その背後にひそむ微動励起の数理モデル及びその制約条件の導出を目指す。この数理モデル及びその制約条件は微動発生の物理プロセスを解明する上での大きな知見を与える。さらに、個々の微動発生の物理プロセスについては、それらが発生する場についての物理環境を考慮して個別にモデル化を進めることが可能となる。

3. 研究の方法

具体的には、以下の手順でこの研究目的を達成する。

1. 観測された微動データから、その時系列の非線形性を検証する。

2. 非線形な波動特性を持つ微動に対し、埋め込み定理に基づき時系列データからアトラクターの再構成を行い、そのシグナルを発生させた力学系システムのダイナミクスの幾何構造、力学構造、安定・不安定性を明らかにする。さらに、非線形予測手法を用いた別のアプローチからも非線形ダイナミクスの構造を検証し、結果の信頼性を高める。

3. 非線形な微動発生源となりうる幾つかの物理プロセスを想定して、その数理モデルを設定する。このとき、観測データの非線形ダイナミクス解析から得られるシステムの次元に関する情報と整合するモデル設定を行う。

4. 設定された数理モデルで微動をシミュレートし、観測データから得られるダイナミクスの幾何的・力学的構造と比較して、適切な数理モデルの絞り込みを行う。さらに、発生場の物理環境を考慮した物理量を用いて数理モデルのパラメータ範囲を抑え、観測デ

ータの再現を試みる事により、発生源の物理プロセスの解明を目指す。

4. 研究成果

2004年6月23日には非線形な波動特性を持つ微動が約6時間おきに3個発生した。これらの3つの微動を対し、時間遅れ座標系への埋め込み写像を実現するための最小の埋め込み次元の推定とGP法による相関次元推定、及びサロゲートデータ解析による波動の非線形性検証を行った。1Hz以上の高周波成分はかなりランダムな特性を有しているため、微動の低周波成分に対して埋め込み次元と相関次元の推定を行った。埋め込み次元を求めるための最適な時間遅れ値の推定は、高次の自己相関係数を用いる方法を採用し、3つの微動に7~8次元というほぼ同一の最小埋め込み次元が推定された。これらの微動はわずか1日の間にほぼ同じ場所で発生することから見て、同一の励起メカニズム(物理過程)により発生している可能性が高く、最小の埋め込み次元と最大の相関次元から、微動を励起している力学系システムの次元は3~7次元の範囲であることが明らかになった。当初、当該研究課題では、非線形な波動特性を持つ微動のみを解析対象として考えていたが、研究の進展の中で、継続時間の長い非線形な長周期地震も、微動と同様な非線形なダイナミクスに関する制約条件を持つことが明らかになった。そこで、非線形な微動・長周期地震を統一的に説明する数理モデルの検討を行い、火道浅部での流体の噴出率係数をコントロールパラメータとした数理モデルで、微動と継続時間の長い長周期地震が統一的に説明できる可能性を示した。対象とした非線形な微動と長周期地震は一見非常に異なる波形を示しているが、周期1秒以上の長周期成分に注目して、時間遅れの埋め込み座標系を用いた再構成状態空間へのアトラクター再構成による力学系システムの次元推定を行うと、同じ範囲の非線形ダイナミクス次元が求められた。そこで、推定される次元範囲の最小次元の元で、すき間流モデル

とコントロール・バルブモデルをベースに検討を行った結果、微動・長周期地震両者の波形的特徴を説明できる、流体の噴出率係数をコントロールパラメータとした数理モデルの構築に至った。流体噴出率係数を変化させたときのバルブの動きと微動・長周期地震の波形は、微動や長周期地震に地震計の特性がかかっていることを考慮して比較をすると、バルブの動きは観測された波動特性をきわめてよく再現している事が確認できた。この数理モデルが、本申請の研究課題で基礎と成る数理モデルと成っている。

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 2 件)

Nakamura, S., and M. Takeo, Frequency structure of deep low-frequency tremors occurring in western Shikoku region, Japan, *Geophysical Journal International*, 169, doi:10.1111/j.1365-246X.2010.04500.x, 2010.

Nakamura, S., and M. Takeo, Automatic seismic wave arrival detection and picking with stationary analysis: Application of the KM2O-Langevin equations, *Earth Planets Space*, 59, 567-577, 2007.

[学会発表] (計 4 件)

Takeo, M., Non-linear dynamics of singular long-period volcanic tremor observed at Mt. Asama, IUGG, Perugia, Italy, July 11, 2007.

Takeo, M., Non-linear dynamics of singular long-period volcanic tremor observed at Mt. Asama, AGU 2007 Fall Meeting, San Francisco, CA, USA, December 6, 2007.

Takeo, M., Non-linear dynamics of singular long-period long-lasting volcanic earthquakes observed at Mt. Asama, AGU 2009 Fall Meeting, San Francisco, CA, USA, December 15, 2009.

武尾 実, 浅間山で観測される特異な長周期地震・長周期微動の非線形ダイナミクスについて, 地球惑星科学連合同大会, 幕張, 2010年5月24日, 2010.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

武尾 実 (MINORU TAKEO)

研究者番号 : 00197279