Studies on Evaluation Method of Volcanic Activity

火山活動評価手法の開発研究

Seismology and Volcanology Research Department, MRI

地震火山研究部

平成13年度から開始した「火山活動評価手法の開発研究」は、昭和58年度まで実施された「火山噴火現象 監視に関する研究」以来、約20年ぶりに企画された気象研究所における火山関係の特別研究である。気象庁 は、全国の火山活動を監視し、防災のための各種情報を発表する責務を負っており、平成12年に発生した有 珠山及び三宅島噴火においては、わが国における火山防災の重要性と、特に気象庁の発表する情報の重要性 が再認識された。気象庁がその任務を着実に遂行するためには、最近の火山学の知見を取り入れた火山活動 の評価手法を開発する必要がある。そのような背景のもとに本特別研究は開始された。特に、マグマの挙動 を直接的に反映する地殻変動の観測及び評価は、火山活動を評価する上で最も重要な要素のうちの一つであ り、本研究では地殻変動観測を中心に据え、力学的シミュレーション手法を用いた地殻変動等の火山活動評 価手法、そしてそれを具体的な火山で適用する観測的研究を2本の柱として研究を進めてきた。本報告書は、 これらの研究成果をまとめたものである。

この5年間に、気象庁は、全国4箇所に火山監視・情報センターを設置し、火山観測データの集約及び集中 監視体制を進めるとともに、GPS連続観測を主要な火山で開始するなどの常時観測体制の強化を図った。 また、火山機動観測についても全面的な見直しを行い、GPSや全磁力の繰り返し観測を新たに導入するな ど、気象庁の火山観測体制は飛躍的に進歩した。それらの充実した観測網から得られるデータを解析し火山 活動評価につなげるために、本特別研究では、地殻変動や電磁気等をモデリングするための力学的シミュレー ション手法を用いた火山活動評価手法を開発し、独自の観測データに気象庁のデータを加えて具体的な火山 でモデリングを行った。研究期間中噴火が発生した浅間山では、観測強化によって、噴火に先駆するマグマ の上昇に伴う地殻変動を検出した。

本研究で得られた観測成果は,随時火山噴火予知連絡会等を通じて公表され,火山防災のための情報発信 に役立つとともに,本研究で開発した地殻変動や電磁気観測結果をモデリングする「火山用地殻活動解析支 援ソフトウェア」は,全国の火山監視・情報センターに配布され,活用されるとともに,気象庁以外の研究 機関においても活用されている。

気象研究所では、本研究をさらに発展させ、マグマ活動を定量的に把握し、それに基づく火山活動度の判 定を高度化するための研究を平成18年度から開始している。

これまでの研究で得られた成果が、今後の研究の推進に結びつくばかりでなく、今後の火山噴火予知研究 の推進や、気象庁の火山監視業務の改善に寄与することを期待するとともに、研究を遂行し成果をとりまと めるにあたり、気象庁内外の多くの方々のご協力や励ましを頂いたことに感謝する。

平成20年3月

気象研究所 地震火山研究部長

森 滋 男

概要

本報告は,特別研究「火山活動評価手法の開発研究」(平成13年~17年度)において得られた成果を,数 値シミュレーション手法を用いた火山活動評価手法の開発,及びその火山活動評価手法を具体的な火山の観 測データへ適用した研究という2つのテーマに分けてまとめたものである。

第1章では、力学的シミュレーション手法を用いた火山活動評価手法について報告する。火山における地 殻変動解析においては,半無限弾性体を仮定し,小さい球状圧力源があるモデル(いわゆる茂木モデル)や 板状の圧力源(ダイク)モデルを用いることが多い。しかし、これらの解析のもとになっているモデルは、 単純化したモデルであるため、現実の複雑な火山体構造や圧力源の形状によっては、精度には限界があると 考えられる。この点を改善するために,本研究では,地形,地下構造などを取り込んだ火山体の有限要素モ デル(力学的な数値モデル)を構築し、火山の地殻変動や応力変化をモデルで再現し解析する手法を開発し た。最初に,茂木モデルを有限要素モデルで再現して解析的に得られている解との比較を行うことにより, 有限要素法による地殻変動計算におけるモデルの設計方法、モデル領域の大きさや境界条件が計算精度にお よぼす影響を評価した。その結果,充分高い計算精度を実現するために必要なモデルサイズや境界条件を明 らかにした。その上で,火山体など地形の影響によって地殻変動のふるまいがどのように変わるか,様々な 形状の圧力源があった場合の地殻変動の変化について、有限要素法による数値計算を行った、その結果、従 来用いてきたモデルの適用限界を明らかにした。また,標高差のある観測網で観測された地殻変動をモデル 計算する手法として,観測点の標高を加味して式を変形した「標高補正茂木モデル」を考案し,それを有限 要素法による数値計算結果と比較検討することで,その有効性とともに限界を調べた。また,火山体内の圧 力変化がもたらすピエゾ磁気効果についても、有限要素法を適用して、火山体地形の影響を評価した。以上 の結果をふまえて、本研究では、火山の GPS、傾斜計、地磁気データなどを総合的に解析、変動源を抽出 することができる地殻活動解析支援ソフトウェア(MaGCAP-V)を作成,開発した。このソフトウェアに おいては、地殻変動について、標高補正茂木モデルを採用し、各種の形状の変動源を仮定でき、また、実地 形や構造を考慮した有限要素計算データベースを組み込んで、それを地形図上に表示したり、最適モデルを 選択したり、変動源を内挿推定する機能を組み込んだ。

第2章では、第1章で報告した力学的シミュレーション手法を具体的な火山に適用した研究成果について 報告する。本研究では、火山活動評価手法を適用する重点火山として、霧島山を選び、GPSや傾斜、地磁 気の連続観測を行い、繰り返し観測を実施した。霧島山では、研究期間中、噴火は発生せず、GPSや地磁 気データには明瞭な変化は捉えられなかったが、傾斜計でわずかな活動の高まりを捉えることができた。御 鉢火口では、2003年12月、火山性微動の発生とともに、新しい噴気孔が現れ、小規模な土砂噴出が発生した。 新燃岳でも振幅のやや大きな火山性微動が見られるなど活動に高まりがあった。霧島山の火山活動の高まり に伴う火山性微動の発生に際して、本研究で設置した傾斜計に傾斜変化が捉えられた。御鉢火口の場合では 火口方向が下がる傾斜変化が検出され、これは、火口浅部の圧力減少を示し、熱水活動の活発化と物質の移 動によるものであることを推定した。一方、有限要素法による解析結果では、傾斜変化は地下の構造に強く 依存することがわかり、地下構造を知ることが非常に重要であることがわかった。また、本研究期間中、浅 間山で活動の高まりが検知されたことから、GPS 及び光波測距観測を強化し、観測を行った。その結果、2004 年9月の噴火に先だって、7月下旬に山体が膨らむ地殻変動が GPS 観測によって捉えられた。解析の結果、 火口浅部と深部に圧力源が推定され、マグマの上昇に伴い山体が噴火前に膨張したことがわかった。光波測 距観測結果からは、噴火活動に伴ってマグマが火道を上昇し火口底に新しい溶岩が出現した時期に火口近傍 が膨らむ変化を捉えた。これは有限要素法による解析によって、火口底に蓄積したマグマの荷重では説明で きず、火口直下浅部の圧力増加がその原因であることを明らかにした。この間、気象庁の数値予報グリッド 気象データを用いて光波測距のデータに気象補正を施す手法も開発した。また、伊豆大島では、噴火準備過 程における地殻変動を GPS 観測によって捉え、地下深いところの球状圧力源と北北西 – 南南東の板状圧力 源によって説明するモデルを提案した。また、三宅島においては、前述の数値シミュレーションによる解析 によって、地下の構造が地殻変動源の推定に大きく影響することを示し、現実に近い地下構造を仮定するこ とによって脱ガスによって収縮していると考えられている圧力源の深さが従来考えられていたより深いこと を示した。一方、1999~2000年に山体の膨張と熱消磁が観測された樽前山の観測データを前述の地殻活動解 析支援ソフトウェアによって解析し、溶岩ドーム直下での圧力増加と熱消磁を同時に説明することができた。

Summary

This document reports research results obtained from a comprehensive research study entitled "Development of a volcanic activity evaluation method," which was conducted from April 2001 until March 2006 (five years). This document divides the results into two chapters, "Development of a volcanic activity evaluation method with dynamic numerical simulation" and "Application of the method to data obtained from actual volcanic activities."

Chapter 1 reports a "volcanic activity evaluation method with dynamic numerical simulation" developed in the research.

When analyzing crustal deformation for volcanic activity, we conventionally adopt the volcanic pressure source models that have a spherical shape (the Mogi model) or a thin layer shape (the Dike model). assuming that the concerned area has a half-infinite elastic body. We should, however, understand the limitations in the accuracy of these models when adapting them to volcanoes with complicated edifices and/ or with any complicated shapes of pressure sources. In order to reduce these limitations, we established another volcanic pressure source model called the Finite-Element (FE) model or the Dynamic Numerical model, which is a volcanic pressure source model that incorporates actual topography, underground structure, and other related elements with the use of the Finite-Element Method (FEM). Thus, we developed a method that should simulate and analyze crustal deformations and stress changes with the newly established model in this comprehensive research. We took the following steps. (1-1) First, we reproduced the Mogi model with the new model and compared the solution (or crustal deformation) obtained from the new model with the one analytically obtained from the Mogi model. (1-2) Next, through the comparison, we evaluated the general design of the model using the FEM for crustal deformation calculation, and we evaluated the effects of "modeling area size" and "boundary conditions" on solution accuracy. (2) As a result, we found the area size to be incorporated into the model and boundary conditions that should make the solution accuracy sufficient for our purpose. (3) In addition, we conducted numerical calculations of crustal deformations caused by various shapes of the pressure sources with the FEM in order to understand the dependency of the deformations on the topographic features of the volcanic edifice and on other related elements. (4) With the results, we found conditions necessary for properly applying the conventionally used models.

Furthermore, we developed a modified Mogi model with altitude compensation by modifying the original formulas of the Mogi model with the inclusion of the effect of altitudes of the observation locations. By comparing solutions obtained from the modified Mogi model and the ones obtained from the new FE Model, we confirmed the usability of the modified Mogi model and determined the conditions for using it properly.

In addition, we evaluated the topographic effects on the piezomagnetic field using the FEM.

Based on the above results, we developed software for analyzing crustal activity in volcanoes, called the Magnetic and Geodetic Computer Analysis Program for Volcano (MaGCAP-V). This software can comprehensively handle data obtained from GPS, tiltmeter, magnetometer, and other such equipment; it is thus able to estimate the source locations of observed deformations. The MaGCAP-V adopts the modified Mogi model for analyzing crust deformation and is able to handle various shapes of pressure sources. Furthermore, we incorporated an FE calculation database that has actual topographies and volcano edifices so that the software can (1) display them on a screen, (2) select the best pressure source model, and (3) estimate deformation sources through interpolation.

Chapter 2 reports the results obtained from applying the above volcanic activity evaluation method

with dynamic numerical simulation to actual volcanoes.

We selected Kirishima volcano (Kirishimayama) as the volcano to which we would apply the method. We conducted continuous observations with GPS, tiltmeter, and magnetometer during this study. Since no eruption occurred during the research period there, we did not detect clear phenomena in the data of the GPS and the magnetometer. However, we did find a slight rise of volcanic activity in the data of the tiltmeter.

At Ohachi crater, a new fumarole emerged along with volcanic tremors in December 2003. A smallscale sand boil also occurred there. Furthermore, volcanic tremors of slightly large amplitude were observed at Shinmoedake; the activity of the volcano became higher than the usual state throughout the month there.

When those tremors occurred due to the slight rise of volcanic activity, the tiltmeters we installed for our research detected some tilting. Around Ohachi crater, one of the tiltmeters detected tilting toward the crater; we inferred that phenomenon indicated a pressure decrease at a shallow depth beneath the crater, and that it was caused by both the rising activity of heated water and the movement of substances. In addition, the result obtained from FEM analysis revealed that tilting depended strongly on underground structures beneath the volcano; thus, it was necessary to understand the structures in order to evaluate observed phenomena correctly.

During the research period, a rise of volcanic activity was detected on Asama volcano (Asamayama); therefore, we conducted observations using the GPS and the electronic distance meter (EDM). With the GPS, we detected a crustal-deformation-like expansion of the volcano's body at the end of July 2004, before the eruption in September 2004. Analysis of the GPS data indicated pressure sources located at both shallow and deep depths beneath the crater, and magma-associated expansion of the volcano's body before the eruption. In addition, the EDM detected expansion of the vicinity of the crater when new lava emerged at the bottom of the crater after the ascent of the magma through a conduit as one of the eruption activities. FEM analysis of this phenomenon revealed that the expansion was not caused by a load of magma accumulated at the bottom of the crater, but by an increase of pressure at shallow depth beneath the crater. Through these analyses, we also developed a method for correcting EDM data by using the meteorological numerical grid data of the Japan Meteorological Agency (JMA).

Using GPS on Izu-Oshima volcano, we detected a crustal deformation, which we inferred was a preparation processes for the next eruption. We proposed a model to explain the phenomenon with two pressure sources: one that had a spherical shape and was located at deep depth, and one that had a dike shape with a NNW-SSE strike.

Using the volcanic activity evaluation method mentioned above, we found that the underground structure influenced the estimation of the source of crustal deformation in Miyakejima volcano. In addition, by introducing a nearly accurate underground structure, we demonstrated that the source location of a contraction (NB: We estimated that the contraction should be caused by the escape of gas.) was deeper than we had initially thought.

On Tarumae volcano (Tarumaesan), where expansion of the mountain body and thermal demagnetization were observed from 1999 until 2000, we analyzed data obtained from the volcano using MaGCAP-V. We succeeded in explaining two phenomena comprehensively: the increase of pressure underneath the lava dome and the thermal demagnetization.

第1章 火山活動評価手法の開発 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	1
1. 1 力学的数値シミュレーション手法の開発 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	1
1. 1. 1 有限要素法による火山性地殻変動計算手法の確立 –茂木–山川モデルの再現– ・・・・・	1
1. 1. 2 実地形と構造を有限要素モデルに組み込む手法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	17
1. 1. 3 周辺の大気圧や海水荷重が及ぼす影響の評価 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	20
1. 2 様々な火山の構造を仮定した力学的数値シミュレーション ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	23
 1. 2. 1 円錐山体が地殻変動に及ぼす影響 ······ 	23
 2.2 火口地形が地殻変動に及ぼす影響 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	28
 2.3 低速度表層が存在する場合の地殻変動 ······ 	35
1. 2. 4 地形の影響を考慮した茂木モデルによるピエゾ磁気効果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	51
1. 3 様々な圧力源を仮定した力学的数値シミュレーション ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	68
 3.1 円柱圧力源が存在する場合の地殻変動 ····· 	68
1. 3. 2 回転楕円体圧力源による地殻変動 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	73
1. 3. 3 深さに比して相対的に大きな半径を有する球状圧力源による地表面変位	
-有限要素法による計算- ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	82
1.3.4 近接した2つの球圧力源による地殻変動 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	97
1. 4 標高補正茂木モデルの有効性と適用範囲 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	105
1. 5 火山用地殻活動解析支援ソフトウェアの開発 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	123
第2章 火山活動評価手法の観測データへの適用 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	141
2.1 霧島山	141
2. 1. 1 霧島山における研究観測 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	141
2. 1. 2 霧島山における GPS 観測 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	144
2. 1. 3 霧島山における傾斜観測 ・・・・・	155
 1.4 霧島山における地磁気観測結果 	175
2. 2 浅間山	189
2. 2. 1 浅間山における研究観測 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	189
2. 2. 2 地殻変動から推定される 2004 年浅間山噴火前後の浅部マグマ供給系 ・・・・・・・・・・	202
2. 2. 3 気象格子点データを用いた光波測距データの補正手法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	216
2. 3 伊豆大島	223
2. 3. 1 伊豆大島における研究観測 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	223
2.3.2 伊豆大島における地殻変動観測結果とマグマ供給系	233
2.4 三宅島 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	276
2. 4. 1 地形及び地下構造を考慮した三宅島の地殻変動の評価 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	276
2.5 樽前山 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	286
2. 5. 1 樽前山における地殻変動および地磁気観測データを組み合わせた解析 ・・・・・・・・・・	286

目 次