

平成 30 年 5 月 8 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K17741

研究課題名(和文)非爆発的噴火から爆発的噴火への遷移を再現する火道流・地殻変動統合数値モデルの開発

研究課題名(英文)A numerical modeling of conduit flow and crustal deformation during transition from effusive to explosive eruptions

研究代表者

小園 誠史 (Kozono, Tomofumi)

東北大学・理学研究科・准教授

研究者番号：40506747

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)：火山噴火の推移予測や火山防災において考慮すべき重要な噴火過程である非爆発的噴火から爆発的噴火への遷移過程について、その遷移過程をもたらす火道流のダイナミクスに関する数値モデルを高度化した。さらに、遷移過程を観測によって捉えるうえで有用となる、火道周辺における地殻変動過程に関する数値モデルを構築した。最終的に、これら二つのモデルを統合することで、観測に基づく噴火遷移メカニズムや噴火遷移条件の実証的な解明を可能にする、火道流と地殻変動の定量的な関係を求めることができる噴火遷移数値モデルを開発することに成功した。

研究成果の概要(英文)：In this study, a numerical model of conduit flow dynamics was developed in order to reproduce a transition from effusive to explosive eruptions which is a key process for eruption forecasting and disaster mitigation. Furthermore, a numerical model for calculating crustal deformation around the conduit system was developed, which is useful for detecting the eruption transition from geodetic observations. Combining the above two models enabled us to obtain the quantitative relationship between the conduit flow and the crustal deformation, leading to the understanding of the transition mechanism and conditions.

研究分野：火山物理学

キーワード：火山噴火 噴火遷移 火道流 地殻変動 数値モデル

1. 研究開始当初の背景

火山噴火現象のタイプには非常に幅広い多様性があり、その多様性が一連の噴火過程でも生じ得ることから、それが噴火の推移予測を困難にする最大の要因となっている。特に、溶岩ドームや溶岩流をもたらすような非爆発的噴火から巨大な噴煙や火砕流を形成するような爆発的噴火への遷移過程は、噴火強度の急激な変化を伴うため、火山防災の観点などからもそのメカニズムの解明が重要視されている。

噴火の遷移過程は、火道内における発泡と脱ガスの競合を伴うマグマ上昇過程（火道流）のダイナミクスに強く支配されているが、その直接観察は不可能であるため、観測に基づくメカニズムの検証が難しいという問題を抱えている。一方、火道流などの地下におけるマグマ移動過程は周囲地殻への変動をもたらすことがあるため、傾斜計やGPS、SARなどによる地殻変動過程の高精度な観測に基づき、地下のマグマの挙動に関する情報を詳細に得られる可能性がある。従って、火道流のダイナミクスと地殻変動過程の間の定量的な関係を明らかにすれば、地殻変動観測から火道流のダイナミクスや噴火遷移のメカニズムに十分な制約を与えることができる。

2. 研究の目的

本研究では、非爆発的噴火から爆発的噴火への遷移過程に着目し、観測に基づいてその遷移過程を検知することを可能にする「火道流と地殻変動を統合した噴火遷移数値モデル」の開発を目的として、以下の各課題に取り組んだ。

(1) 噴火遷移に伴う火道流の時間発展変動を正確に、かつ広範なパラメータ領域のもとで再現できる火道流数値モデルを構築・高度化する。このモデルの解析によって、マグマ物性・地質条件と、地殻変動の力源となる火道内物理量の巨視的変動パターンを系統的に明らかにする。

(2) 噴火遷移中の火道流の変動を力源とする地殻変動数値モデルを構築する。火口近傍の地殻変動に大きな影響を与える火山体地形の効果を考慮し、またマグマ溜まりの圧力変化による地殻変動への影響を評価するために、マグマ溜まりから火口まで火道に沿って分布する力源に対する応答を正確に再現できるモデルを開発する。

(3) 上記の二課題で構築した火道流と地殻変動のモデルを統合する。火道流モデルから得られる火道内物理量の変動パターンを、地殻変動モデルの力源として入力することで、最終的に地表での地殻変動パターンを求める。この統合モデルによって、マグマ物性・地質条件に依存して多様に変化する火道流における非爆発的噴火から爆発的噴火への遷移過程が、観測可能な地殻変動パターンに与える影響を系統的に明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 気・液・固混相マグマによる火道流を圧縮性流体力学に基づいて一次元流として数値モデル化し、発泡や脱ガス、結晶化などの火道流を支配する重要な物理過程を考慮しつつ、非爆発的噴火から爆発的噴火への遷移に伴う火道流の変動過程を広範な地質条件・マグマ物性パラメータ領域のもとで再現する。地殻変動の主要因となる火道及びマグマ溜まり内の圧力変動に着目し、その変動パターンとパラメータの関係を系統的に整理し、データベース化する。

(2) 火道及びマグマ溜まり内の圧力変動が周囲の弾性体にもたらす変位量を厳密に直接計算することができる、有限要素法に基づく地殻変動数値モデルを開発する。火山体地形の効果を考慮した二次元軸対称の計算領域を設定し、火口近傍から山腹、遠方に至る任意の地表面における傾斜や歪を出力する。

(3) 上述の(1)で火道流数値モデルの解析に基づいて構築したマグマ物性・地質条件と火道流の圧力変動パターンに関するデータベースを、(2)で構築した地殻変動数値モデルの力源として使用することで、その結果得られる地殻変動パターンを系統的に整理する。これによって、非爆発的噴火から爆発的噴火への遷移過程を検知できる地殻変動の観測精度や観測点の場所に関する条件を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 火道流数値モデルの開発および解析においては、定常火道流におけるマグマ溜まり圧力(P)とマグマ噴出率(Q)の関係に着目することで、非爆発的噴火から爆発的噴火への遷移過程を系統的なパラメータ解析によって再現することに成功した。火道流のシステムでは、脱ガス・結晶化によるマグマ上昇中のマグマ密度・粘性変化の効果によって、PとQの関係が負の相関領域($dP/dQ < 0$)を伴うS字型になる場合がある(図1a)。このとき、低・高噴出率側の $dP/dQ > 0$ の領域は火道流が安定である一方で、 $dP/dQ < 0$ の領域は不安定であるため、これが噴出率の急増を伴う火道流の遷移過程をもたらす(図1aの0-3)。

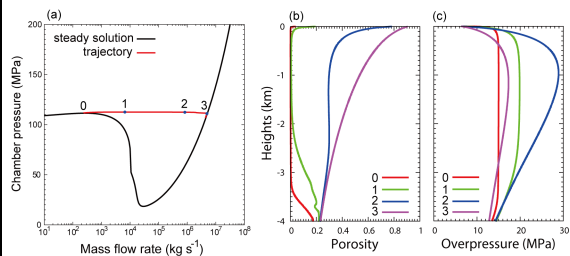


図1 火道流数値モデルによって再現された非爆発的噴火・爆発的噴火の遷移過程（初期含水量0.05、火道径20m）

この遷移過程は、火道内マグマ発泡度の急増(図1b)を伴うことから、非爆発的噴火から

爆発的噴火への遷移過程をみなすことができる。そこで本研究では、このS字型のP-Q関係によって生じる火道流の遷移過程について、広範なマグマ物性・地質条件に基づく解析結果のデータベースを構築した。

さらに、上述の遷移過程では、火道内のマグマ過剰圧が火道浅部で局所的に増加する特徴が生じることがわかった(図1c)。この火道内の圧力変化は、マグマ溜まりの圧力変化と併せて地殻変動にも影響を与え得ることから、その時間変化を詳細に調べたところ、噴出率が増加していく遷移過程においてまずマグマ溜まり圧力が最大値に達し(図2aの1)、その後火道浅部の過剰圧の「最大値」が最大となり(図2bの2)、直後に噴出率が最大となる(図2cの3)ことがわかった。従って、爆発的噴火への遷移の直前検知という観点からは、火道内過剰圧の変化を観測によって捉えることが重要となる。

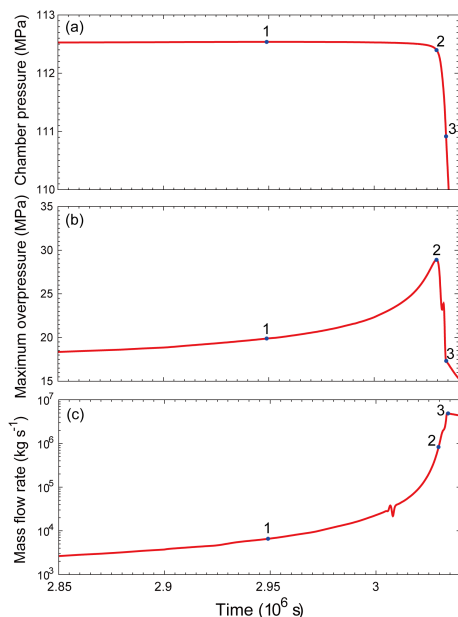


図2 噴火遷移中におけるマグマ溜まり圧力(a)、火道内過剰圧の最大値(b)、噴出率(c)の時間変化。

そこで本研究では、火道浅部の過剰圧増加が生じるメカニズムを火道流モデルに基づき解析的に調べた。その結果、過剰圧が急増している状態(図1c、図2bの3)は、マグマ上昇中の脱ガスや結晶化を伴わない、揮発性成分の離溶による発泡とメルト粘性変化のみが促進された火道流によって近似的に記述できることがわかった。このことは、爆発的噴火直前の火道内過剰圧の急増量は、脱ガス浸透率や結晶成長速度などのマグマ上昇過程に関するマグマ物性よりも、初期揮発性成分量などのマグマ溜まりにおける蓄積条件により強く依存することを示唆しており、実際の火道流モデルの解析においても、この依存性の違いを確認することができた。例えば、初期揮発性成分量が低い場合、火道

内のマグマ発泡量は相対的に低くなることで、火道浅部の増圧量は減少する。

(2) 地殻変動数値モデルの開発においては、図1, 2で示された火道及びマグマ溜まり内の圧力の複雑な時系列変化を反映した地殻変動過程を計算できるモデルを完成させることに成功した。地殻弾性体に包囲された火道及びマグマ溜まりを設定し、特に火道浅部の過剰圧が火口近傍にもたらす地殻変動を高精度で計算するための有限要素法における要素設定を行った。また、火道流モデルのパラメータである火道径、マグマ溜まり体積は、地殻変動モデルにおいても変動量を支配する重要なパラメータであることから、火道流モデルで設定した火道径、マグマ溜まり体積のパラメータ範囲に対応できるように、地殻変動モデルを整備した。

(3) 火道流モデルと地殻変動モデルを統合して完成させた数値モデルの解析の結果、図2で示された火道及びマグマ溜まり内の圧力変化によって生じる地殻変動過程の特徴を明らかにすることができた。(1)で計算した火道流の遷移過程における圧力変化を、(2)で開発した地殻変動モデルに入力し、火口からの任意の距離における地表面での変位量を計算したところ、図1c、図2bの3で示された火道内過剰圧最大値の急増が、傾斜および火口直交方向の歪の変化によって捉えられていることがわかった(図3)。特に歪については、火道浅部の増圧が水平変位を顕著にもたらすことを反映して、広域で火道内過剰圧変化を検知できることがわかった(図3b)。

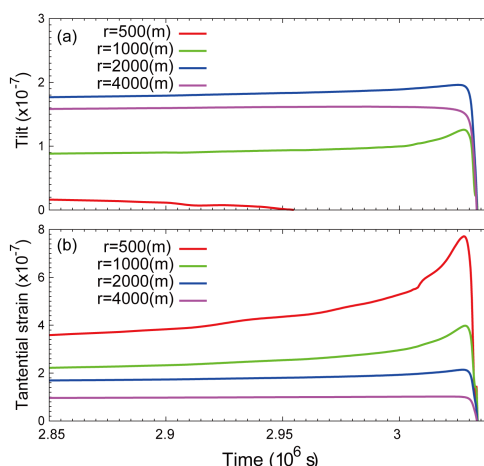


図3 噴火遷移中における火道およびマグマ溜まり内の圧力変化がもたらす傾斜(a)及び歪(b)の時間変化。r: 火口からの距離。

一方で、上述したように、火道流モデルの解析から火道浅部の増圧量は初期揮発成分量などのマグマ蓄積条件に依存することが示されており、また火道径やマグマ溜まり体積などの地質条件も地殻変動をもたらす歪エネルギーに関連するため、図3のような地

殻変動パターンのパラメータ依存性を明らかにすることが重要になる。そこで本研究では、傾斜や歪が時間変化において最大となる時点と、火道内過剰圧の最大値やマグマ溜まり圧力が最大となる時点と比較し、初期含水量や火道径に依存してその関係がどのように変化するかを調べた。図4は、傾斜あるいは歪が時間変化において最大化するタイミングを、火道内過剰圧の最大値とマグマ溜まり圧力が最大化する時点間の差(図2における2と1の差)で規格化した時間を示しており、規格化時間=0の場合はマグマ溜まり圧力の最大化と一致し、1の場合は火道内過剰圧最大値の最大化と一致することを示している。

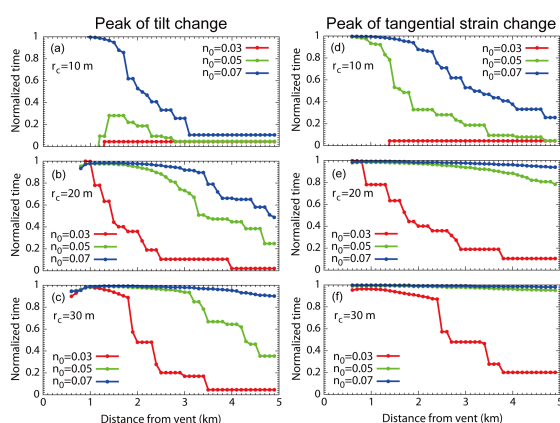


図4 傾斜(a, b, c), 火口直交方向歪(d, e, f)が時間変化において最大化する規格化時間の火口距離依存性 (r_c : 火道径, n_0 : 初期含水量)

解析の結果、初期含水量が低い場合 ($n_0=0.03$)は火道浅部の増圧量が抑制される効果によって、火道内過剰圧最大値の最大化、すなわち爆発的噴火遷移の検知が火口近傍域に限定され、火道径が小さい場合 ($r_c=10$ m)には火道増圧による歪エネルギーが減少する効果も相乗され、検知不可能になることがわかった。一方で、 $n_0>0.05$, $r_c>20$ mの条件では、特に歪計を活用することによって、爆発的噴火遷移の検知が広域の観測でも可能になることが示された。

本研究の結果、非爆発的な噴火から爆発的噴火への遷移過程における火道流がもたらす地殻変動の特徴を系統的に明らかにし、特に爆発的噴火の直前検知のための観測条件を提示することができた。火道流が地殻変動に及ぼす影響についてはこれまで数例報告されているが、急激な噴火の遷移を伴うような複雑な火道流と地殻変動の関係は明らかにされていなかったため、本研究の新たな成果は今後の噴火推移予測研究に活用されることが期待される。

近年、火山観測網の整備により、2014年御

嶽山噴火、2015年口永良部島噴火、2018年草津白根山噴火、最近の桜島噴火などで、噴火直前の山体膨張が高精度の地殻変動観測によって捉えられるようになってきている。今後は、本研究で開発した数値モデルを実際の噴火現象に適用することで、より実証的に噴火遷移のメカニズムを明らかにしていく予定である。

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)

Okumura, S., and Kozono, T. (2017), Silicic lava effusion controlled by the transition from viscous magma flow to friction controlled flow, *Geophys. Res. Lett.*, 44, 3608-3614, 査読有 DOI:10.1002/2017GL072875

Folch, A., Barcons, J., Kozono, T., and Costa, A. (2017), High-resolution modelling of atmospheric dispersion of dense gas using TWODEE-2.1: application to the 1986 Lake Nyos limnic eruption, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 17, 861-879, 査読有 doi: 10.5194/nhess-17-861-2017

小園誠史 (2017), マグマ溜まりから火山噴煙: 観測と数理モデル, *火山*, 61(2), 2016, 295-310, 査読有 DOI:10.18940/kazan.61.2_295

Kozono, T., Kusakabe, M., Yoshida, Y., Ntchantcho, R., Ohba, T., Tanyileke, G., and Hell, J. (2016), Numerical assessment of the potential for future limnic eruptions at Lakes Nyos and Monoun, Cameroon, based on regular monitoring data, *Geol. Soc. London Special Publication (Geochemistry and Geophysics of Active Volcanic Lakes)*, 437, 2016, 査読有 DOI:10.1144/SP437.8

〔学会発表〕(計6件)

小園誠史, 地下・地上現象の同時観測による噴火ダイナミクスの理解, 日本火山学会 2017年秋季大会, A1-01, 熊本大学, 2017/9/21

Kozono, T., Ueda, H., Ozawa, T., Koyaguchi, T., Fujita, E., Tomiya, A., and Suzuki, Y.J., The dynamics of the 2011 Kirishima-Shinmoe-dake eruptions, Japan, revealed by tiltmeter, satellite, and weather radar observations, IAVCEI General Assembly 2017, PE12C-2, Portland, USA, 2017/8/14 (招待講演)

Kozono, T., Conduit flow dynamics

during high-flux lava effusion events at Sakurajima volcano, Japan, JpGU-AGU Joint Meeting 2017, SVC46-P01, Makuhari-Messe, Chiba, 2017/5/24

小園誠史, 噴火遷移中の火道・マグマ溜まりの圧力変化をもたらす地殻変動, 日本火山学会 2016 年秋季大会, B3-32, 富士吉田市民会館, 2016/10/15

小園誠史, 小屋口剛博, 脱ガスによるマグマ密度変化を考慮した火道流の力学系, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, SVC49-04, 幕張メッセ・千葉, 2016/5/24

Kozono, T., Ueda, H., Shimbori, T., and Fukui, K., Correlation between magma chamber deflation and eruption cloud height during the 2011 Kirishima-Shinmoe-dake eruptions, IUGG 2015, 4731, Prague, Czech, 2015/6/29 (招待講演)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小園 誠史 (KOZONO, Tomofumi)

東北大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号: 40506747