

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2022

課題番号：18K03781

研究課題名(和文) 火山構造性地震によるマグマ貫入量と噴火時刻の推定手法の確立に向けての試み

研究課題名(英文) An attempt to establish a method for estimating the magma intrusion volume and the timing of eruption from volcano tectonic earthquakes

研究代表者

中道 治久 (Nakamichi, Haruhisa)

京都大学・防災研究所・准教授

研究者番号：00420373

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：火山構造性地震はマグマの貫入による周囲の岩石の応力変化によって引き起こされる脆性破壊によって発生する。マグマ貫入によって火山構造性地震が群発し、地殻変動が引き起こされる。地殻変動源の体積変化量と地震のモーメント(エネルギー)について経験式を導出し、火山性構造性地震の観測からマグマ貫入量の推定手段を構築した。また、マグマ貫入の一形態であるダイクの成長に伴う応力変化によって岩石の破壊強度を超えることにより、火山構造性地震の群発が浅部から深部へ進展していく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

貫入したマグマの全てが噴火によって放出されるわけではないが、貫入マグマの量は放出しうるマグマ量の上限を規定する。噴火による放出量は災害の規模に関わるため、放出量の上限を事前に想定する意義がある。そのため、貫入マグマ量を推定することは重要であるが、地殻変動観測が不十分な発展途上国の火山であっても最低限は地震観測が行われているため、本研究成果の地震からのマグマ貫入量の推定手法の構築は意義がある。

研究成果の概要(英文)：Volcano tectonic earthquakes originate from brittle fracture caused by stress changes in surrounding rocks due to magma intrusion. Magma intrusion causes not only a swarm of volcano tectonic earthquakes and but also significant crustal deformation. An empirical equation is derived for the volume change of the deformation sources and seismic moment (energy) of volcano tectonic earthquakes. Using this empirical formula, we can estimate the volume of magma intrusion from observations of volcano tectonic earthquakes. The growth of a dike, a form of magma intrusion, increases the stress in the surrounding rocks, and the stress exceeds the fracture strength, which explains the occurrence process of volcano tectonic earthquakes. It is also revealed that a cluster of volcano tectonic earthquakes progressed from shallow to deep depths with the growth of the dike.

研究分野：地球物理学

キーワード：火山構造性地震 群発地震 地震エネルギー 噴火時刻 地殻変動 体積変化量 応力場 噴出量

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

火山構造性地震は岩石の脆性破壊によって発生し、マグマ貫入による周囲の岩石の応力変化によってトリガーされる。また、火山構造性地震は火口直下の数 km の深さの場所だけでなく、火口から水平方向に数 km 以上離れた場所においても発生し、噴火に前駆して発生する地震や微動においては最初に発生することが多い。マグマ貫入にともなって火山周辺において地殻変動が観測され、地殻変動源の体積変化量が推定され、マグマ貫入量の議論が行われてきた。貫入したマグマが全て噴火で放出するわけではないが、マグマ貫入量は噴火における噴出量の上限推定の基準となる。地殻変動観測からの体積変化量の推定には複数箇所のデータが必要であるが、火山によっては複数箇所からのデータ取得が困難である場合がある。一方、地震は1つの観測点のみであっても、大凡の発生場所と規模を特定することが可能である。マグマ貫入にともなって地震と地殻変動が同時に観測されることが多く、地震モーメント(エネルギー)と体積変化量には比例関係が見出されている。そこで地震から体積変化量を推定することが可能になれば、噴出量といった噴火の規模に関わる量を噴火前に予測する道筋が見えてくる。

2. 研究の目的

マグマ貫入時に群発する火山構造性地震のモーメントもしくはエネルギーの時間変化に着目して、噴火開始時間や地殻変動による体積変化量との関係を調べる。また、モーメント・エネルギーの変化率の増加を用いた噴火時刻の推定を試みる。そして、噴火規模を決めるマグマ貫入量を地殻変動から推定される体積変化量とみなすことで、火山構造性地震のモーメント・エネルギーからマグマ貫入量を見積もるための経験式の導出を目的とする。また、マグマ貫入によって群発する火山構造性地震の発生過程を明らかにすることで、経験式の物理的背景の理解につなげることも目的とする。

3. 研究の方法

(1) 噴火に前駆した火山構造性地震の波形から地震モーメント(エネルギー)を計算する。そして、積算地震モーメントの変化率の増加を破壊力学から導出された関数にフィッティングさせることによって、噴火開始時刻の予測と検証を行う。実際の噴火との時刻差について議論をする。

(2) 日本を中心として海外の火山について火山構造性地震の積算モーメントを噴出量体積もしくは地殻変動から推定された体積変化量との関係をプロットすることで、火山性構造性地震のモーメントからマグマ貫入量もしくは噴出量の予測をするための経験式を作成する。

(3) マグマ貫入にともなって群発した火山構造性地震を波形の相関から分類ならびに地震間のP波とS波の到達時刻差を求める。そして、人工地震探査から得られた地震波速度構造を用いて火山構造性地震の震源を高精度にて推定して、震源分布の時空間変化を求める。さらに、P波とS波の振幅比とP波初動極性を用いて可能な限り多数の火山構造性地震の発震機構解を求める。そして、マグマ貫入による火山構造性地震の発生過程を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 噴火に前駆した火山構造性地震の地震エネルギーの変化率の増加による噴火開始時刻予測

インドネシア・ケルト火山の2007年と2014年噴火に前駆した火山構造性地震の地震エネルギーを求めた。2007年噴火の地震エネルギーは $3 \times 10^8 \text{ J}$ で、2014年噴火の地震エネルギーは $2.2 \times 10^9 \text{ J}$ であった。前駆地震のエネルギーは両者の噴火による噴出量の差を反映している。地震エネルギーの変化率の増加について試料破壊予測法(MFFM)を用いた関数フィッティングにて破壊開始時刻(噴火開始時刻)の推定を行った。2007年噴火の地震エネルギーは噴火に近づくにつれて増加率は減少しており、MFFMが示す地震エネルギー変化率の増加傾向からは外れており、実際の噴火よりも1日早い予測となった。一方、2014年噴火の地震エネルギーは噴火に近づくにつれて増加率は増加しており、MFFMが示す地震エネルギー変化率に沿っている。図1に示す通り、関数フィッティングの時間窓を変化させて噴火開始時刻の予測をおこなったところ、予測時刻は実際の噴火開始時刻の3時間後となった。よって、MFFMが噴火開始時刻の予測に使える場合とそうでない場合が明

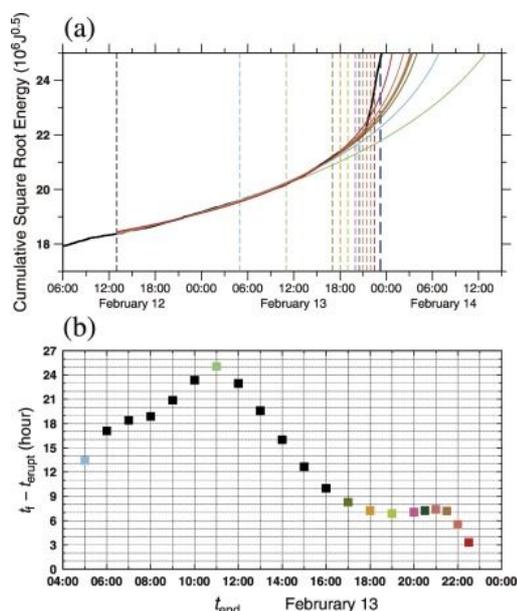


図1. (a)地震エネルギー変化(太黒線)とフィッティング(色線)(b)実際の噴火開始時刻と予想との時刻差

らかになった。なお、地震エネルギーの変化率の時間変化は2007年噴火が溶岩ドーム噴火であり、2014年がプリニー式(爆発的)噴火に関係しており、前者が爆発性の低い噴火であり、その前駆地震のエネルギーの増加が抑制され、後者は爆発性の高い噴火であり、その前駆地震のエネルギーの増加が加速することと対応している。

(2) 火山構造成地震のモーメントとマグマ噴出量もしくはマグマ貫入量との関係

White and McCausland (2016)などの文献をコンパイルすることで、世界中の火山噴火もしくはマグマ貫入事象の際に観測された地震のモーメントと噴出量(Extruded volume)や地殻変動源の体積変化量(Intruded volume)との関係をプロットした(図2)。また、桜島の2015年8月15日のマグマ貫入時の群発地震について連続波形の積分により積算モーメントを計算し、その時の地殻変動源の体積変化量(Hotta et al., 2016)との関係もプロットした(図2)。そして、地震モーメント(N-m)とExtrudeおよびIntrudedの体積(m³)の関係を表す関係式を求めたところ以下の通りとなった。

$$\log_{10} V = 0.35 \log_{10} M + 1.64$$

1914年桜島大正噴火に前駆した地震はOmori (1920)によって震度とともにリストアップされている。そこで震度から地震モーメントに変換して前駆地震の積算モーメントを計算したところ $2.6 \times 10^{18} \text{Nm}$ となった。そこで、上記の関係式から体積変化量を求めるとおよそ 10^9m^3 となった。この体積変化量はHashimoto and Tada (1992)が推定した桜島直下の地殻変動源の体積変化量である $2.1 \times 10^8 \text{m}^3$ と大まかに一致する。しかし、大正噴火の溶岩量 $1.3 \times 10^9 \text{m}^3$ と火山砕屑物量の $5 \times 10^8 \text{m}^3$ の合わせた噴出量より1桁小さい。したがって、噴出量と前駆地震モーメントとの関係についてはさらなる検討が必要である。

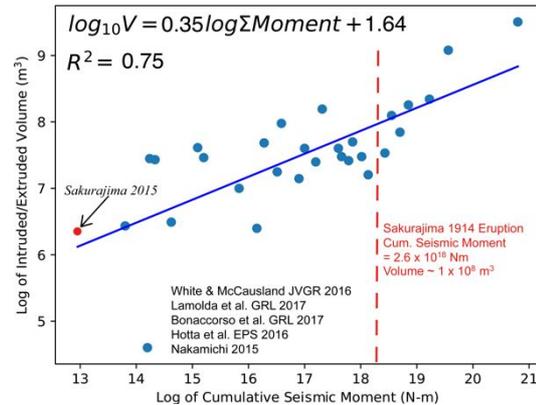


図2. 地震モーメントと噴出量及び体積変化量との関係

(3) 桜島群発地震におけるマグマ貫入にともなう火山構造成地震の発生過程

2015年8月15日に発生した群発の火山構造成地震の震源と発震機構の時空間変化から、地殻の岩石強度が温度及び封圧の関数にて浅部から深部へ増大することを考慮してマグマ貫入に伴うダイクの膨張過程と地震の発生過程を議論した。ダイクの膨張の初期段階では地震は浅部で発生し、発震機構は広域応力場と調和的であるが、ダイクの膨張が加速し終息する過程において、浅部だけでなく深部において地震が発生し、広域応力場と調和的な地震だけでなく、広域応力場と調和的なP軸やT軸の方向と直交するP軸やT軸を持つ地震が発生するモデルを提示した(図3, Koike and Nakamichi, 2021)。これは、ダイクの膨張によって応力場が変化し、応力場が岩石の破壊強度を超えることで地震が発生するというモデルであり、火山構造成地震の発生過程をシンプルに説明していることに意義がある。

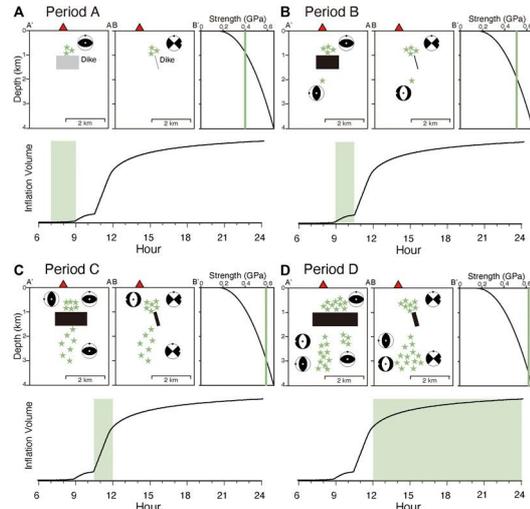


図3. ダイクの成長に伴う火山構造成地震に震源分布と発震機構の変化モデル

引用文献:

- Hotta et al. 2016. Rapid dike intrusion into Sakurajima volcano on August 15, 2015, as detected by multi-parameter ground deformation observations. Earth Planet Space, 68, 68.
- Omori, F. 1920. The Sakura-jima eruptions and earthquakes. V. Seismographical observations of the fore-shocks, after-shocks, and after-outbursts of the great Sakura-jima eruption of 1914. Bull. Imp. Earthq. Inv. comm.
- Hashimoto, M., Tada, T. 1992. A model for crustal deformations associated with the 1914 great eruption of Sakurajima volcano, Kagoshima, Japan. Tectonophys. 205, 427-436.
- White, R., McCausland, W. 2016. Volcano-tectonic earthquakes: A new tool for estimating intrusive volumes and forecasting eruptions. J. Volcanol. Geotherm. Res., 309-139-155.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Koike Midori, Nakamichi Haruhisa	4. 巻 8
2. 論文標題 Dike Inflation Process Beneath Sakurajima Volcano, Japan, During the Earthquake Swarm of August 15, 2015	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Frontiers in Earth Science	6. 最初と最後の頁 600223
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/feart.2020.600223	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Nakamichi Haruhisa, Iguchi Masato, Triastuty Hetty, Hendrasto Muhamad, Mulyana Iyan	4. 巻 382
2. 論文標題 Differences of precursory seismic energy release for the 2007 effusive dome-forming and 2014 Plinian eruptions at Kelud volcano, Indonesia	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Volcanology and Geothermal Research	6. 最初と最後の頁 68 ~ 80
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jvolgeores.2017.08.004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Iguchi Masato, Nakamichi Haruhisa, Tanaka Hiroshi, Ohta Yusaku, Shimizu Atsushi, Miki Daisuke	4. 巻 14
2. 論文標題 Integrated Monitoring of Volcanic Ash and Forecasting at Sakurajima Volcano, Japan	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Disaster Research	6. 最初と最後の頁 798 ~ 809
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20965/jdr.2019.p0798	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 井口 正人、為栗 健、平林 順一、中道 治久	4. 巻 64
2. 論文標題 マグマ貫入速度による桜島火山における噴火事象分岐論理	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 火山	6. 最初と最後の頁 33 ~ 51
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.18940/kazan.64.2_33	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Nakamichi Haruhisa, Iguchi Masato, Triastuty Hetty, Kuswanto Hery, Mulyana Iyan, Rosadi Umar, Gunawan Hendra, Suantika Gude, Aisyah Nurnaning, Budi-Santoso Agus, Nandaka I Gusti Made Agung	4. 巻 14
2. 論文標題 A Newly Installed Seismic and Geodetic Observational System at Five Indonesian Volcanoes as Part of the SATREPS Project	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Disaster Research	6. 最初と最後の頁 6~17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20965/jdr.2019.p0006	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Iguchi Masato, Nakamichi Haruhisa, Miyamoto Kuniaki, Shimomura Makoto, Nandaka I Gusti Made Agung, Budi-Santoso Agus, Sulistiyani, Aisyah Nurnaning	4. 巻 14
2. 論文標題 Forecast of the Pyroclastic Volume by Precursory Seismicity of Merapi Volcano	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Disaster Research	6. 最初と最後の頁 51~60
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20965/jdr.2019.p0051	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計3件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 中道治久
2. 発表標題 2015年8月15日桜島群発火山構造性地震の発生過程
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 永江航也・中道治久
2. 発表標題 機械学習を用いた桜島における火山性地震の分類
3. 学会等名 日本火山学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中道治久
2. 発表標題 深部低周波地震の発生と火山深部のマグマ供給との関係について
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 一般社団法人 日本家政学会 住居学部会	4. 発行年 2021年
2. 出版社 丸善出版	5. 総ページ数 742
3. 書名 住まいの百科事典	

1. 著者名 日本自然災害学会	4. 発行年 2022年
2. 出版社 丸善出版	5. 総ページ数 806
3. 書名 自然災害科学・防災の百科事典	

〔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
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------

インドネシア	エネルギー・鉱物資源省地質庁火山地質災害軽減センター			
--------	----------------------------	--	--	--