

火山性地震の波形解析に基づく流体移動と噴火過程の研究

前田 裕太*

(2016年1月14日受付, 2016年2月29日受理)

Fluid Movements and Eruption Processes Inferred from
Waveform Analyses of Volcano-seismic Signals

Yuta MAEDA*

1. はじめに

本稿は日本火山学会研究奨励賞受賞に伴う著者のこれまでの主な研究の紹介である。いずれの研究も火山浅部で発生する長周期地震のソースプロセス解明を目標としたものであり、後述する「波形インバージョン」と「クラックモデル」が2本柱となっている。長周期地震の多くは火山浅部の流体プロセスによって発生すると考えられており、具体的にはマグマで満たされた火道内の巨大な気泡の上昇 (Chouet *et al.*, 2003), 浅部熱水系での地下水の急激な沸騰 (Ohminato, 2006) など気相の生成・移動に伴う体積変化として解釈された研究例が多い。気相の生成・移動は噴火の発生や爆発性を左右する火山学的に重要なプロセスであり、これを知るための手がかりが長周期地震から得られると期待される。なお本稿を通して「長周期地震」は long period (LP) イベント (卓越周期 0.2-2 秒) と very long period (VLP) イベント (卓越周期 2-100 秒) の総称として用いることにする。

波形インバージョンは観測波形全体の最小二乗フィットにより地震の力源を推定する解析手法である。力源の重心位置 (ソース位置), 力の組合せ (発震機構), 力の大きさの時間変化 (震源時間関数) を推定できる (*e.g.*, Ohminato *et al.*, 1998; Nakano and Kumagai, 2005)。初動が不明瞭なイベントにも適用でき、センブルンス解析等の他手法と比較して波動伝播の効果をより正確に取り込める利点がある。波形インバージョンを用いた研究例を一つだけ挙げると, Chouet *et al.* (2003) はストロンボリ噴

火に伴う VLP イベントを波形インバージョンにより解析し, 構造的に開きやすい向きのクラックが火道内の巨大な気泡の上昇に伴って開いたという結果を得た。このほかにも波形インバージョンを用いた研究は多数に上り, Chouet and Matoza (2013) のレビュー論文にまとめられている。著者のこれまでの長周期地震研究ではいずれも波形インバージョンを用いてきたが, 中でも浅間山の VLP イベントの研究 (第2章) では波形インバージョン手法自体の発展に寄与したのでそれについて紹介する。

長周期地震の多くはスペクトルピークを持つことから共鳴体の振動と解釈され, 中でも観測ピーク周波数を現実的な大きさの共鳴体で説明でき多くの波形インバージョン結果とも整合する流体で満たされたクラックの共鳴振動モデル (Chouet, 1986; Kumagai and Chouet, 2000) が有力な解釈の一つとなっている。本稿ではこれを略してクラックモデルと呼ぶ。クラックモデルでは弾性体中の薄い空洞 (クラック) 内部を流体で満たし, 圧力擾乱を与えてクラック壁面の共鳴振動を発生させる。流体の密度・音速とクラックサイズに応じて共鳴振動のピーク周波数が決まり, これを長周期地震の観測ピーク周波数と比較することで流体物性やクラックサイズを推定できる (*e.g.*, Kumagai *et al.*, 2002)。クラックモデルは流体圧力擾乱が生じた後の共鳴振動の周波数を予測するモデルであって, 最初に静かな状態から擾乱を起こすプロセス (振動の励起) には言及していない。またクラックモデルの解析解は知られておらず, 周波数を予測するには多

*〒464-8601 名古屋市千種区不老町 D2-2 (510)
名古屋大学大学院環境学研究科附属地震火山研究センター
Earthquake and Volcano Research Center, Graduate
School of Environmental Studies, Nagoya University,

D2-2 (510) Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8601,
Japan.

e-mail: maeda@seis.nagoya-u.ac.jp

数のパラメータを与えて数値計算を行う必要があった。本稿ではクラックモデルを解釈に用いつつ別の解析と組み合わせる振動の励起過程に言及したフィリピン・タール火山のLP イベントの研究 (3-1 節) と、クラックモデルのピーク周波数の解析式を経験的に見出した研究 (3-2 節) を紹介する。

2. 波形インバージョンの研究 (浅間山 VLP イベント)

地面の運動には地面が平行移動する「並進運動」とある軸の周りに回転する「回転運動」がある。水平軸まわりの回転運動が傾斜変動である。マグマの貫入等に伴う山体膨張を例にとると GNSS で並進運動が、傾斜計で傾斜変動が観測され、これらは同時に起きると期待される。すなわち山体は膨らみながら傾く。地震計は並進運動を記録するための機器であるが傾斜変動も描いてしまう (Rodgers, 1968)。というも傾斜変動によって生じる重力加速度と並進運動に伴う真の加速度を地震計が区別できないからである。地震計で記録される傾斜変動シグナルは (1) 水平動成分にのみ現れる、(2) 長周期のシグナルとして現れる、という特徴をもつ (e.g., 青山, 2008)。水平動にのみ現れるのは上下動の重力変化が小さいからで、長周期のシグナルとなるのは山体膨張が停止した後も重力は半永久的に作用し続ける (長周期の重力変動となる) ことによる。

Fig. 1 は浅間山の VLP イベントの典型的な波形である。上下動に見られる 10 秒程度の幅のパルス (Fig. 1a) がこの VLP イベントの特徴で、水平動においても同じ時間帯にこのパルスが見られる。ところが水平動成分にのみこのパルスに引き続いて遥かに長いシグナルが記録されている (Fig. 1b)。これが傾斜変動のシグナルである。多数の観測点の記録を調べてみると浅間山の VLP イベントも山体が膨らみながら傾く動きになっていることが分かる。すなわち並進運動と傾斜変動は共通の膨張ソースによって同時に起きていていると考えられる。

このように並進・傾斜の混在するシグナルの解析は従来は困難であった。波形インバージョンにおいて観測波形が並進運動によるものと仮定されていたからである。観測波形を並進・傾斜の寄与に分離する手法がいくつか提案されてきたが (e.g., Wielandt and Forbriger, 1999; Graizer, 2006)、分離に用いる仮定の妥当性は定かではない。

著者らは観測波形を並進・傾斜の寄与に分離するのではなく、両者の混在するシグナルをそのまま用いて直接に力源を推定する波形インバージョン手法を提案した (Maeda *et al.*, 2011)。この手法では観測波形のフーリエスペクトルが

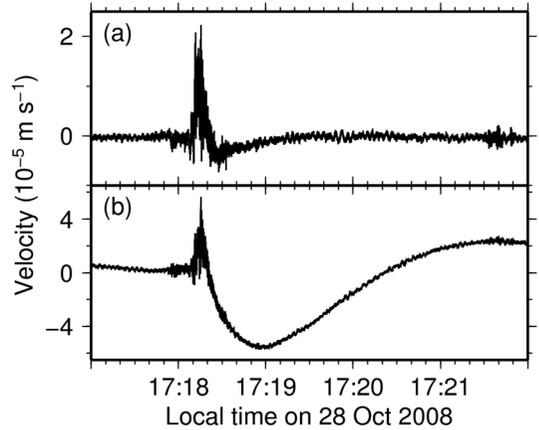


Fig. 1. A typical VLP event at Asama volcano recorded by station KAE on the eastern rim of the summit crater. (a) UD component, (b) EW component. Response to the Guralp CMG-3 T (360 s) seismometer is not corrected. Modified from Fig. 6 of Maeda and Takeo (2011).

$$U(\omega) = M(\omega)[G^{\text{trans}}(\omega)I^{\text{trans}}(\omega) + G^{\text{tilt}}(\omega)I^{\text{tilt}}(\omega)] \quad (1)$$

と表されることを利用する。ここで $M(\omega)$ は震源時間関数のスペクトル (知りたい量)、 $G^{\text{trans}}(\omega)$ 、 $G^{\text{tilt}}(\omega)$ はそれぞれ並進・傾斜のグリーン関数、 $I^{\text{trans}}(\omega)$ 、 $I^{\text{tilt}}(\omega)$ はそれぞれ並進・傾斜に対する地震計の応答特性を表す。本来は成分に関する和も含むがここでは簡単のため省略した。(1) 式の [] 内全体を理論計算で求めてしまえば観測波形を並進・傾斜に分離することなく直接に $M(\omega)$ を求められる。この手法における仮定は並進・傾斜が共通のソースによって生じるというもので、浅間山の VLP イベントに関しては妥当な仮定と見なせる。

著者らは同手法を用いて浅間山 VLP イベントの解析を行った (Maeda and Takeo, 2011)。山頂近傍の 14 観測点のデータから火口北部における開口クラック・円筒の急激な膨張とゆっくりとした収縮から成る震源時間関数が推定され (Fig. 2a)、ソースへのガスの流入・流出と解釈した。震源時間関数のスペクトルとその誤差レベルを Fig. 2b に示す。10-500 秒という広い周期帯において誤差レベルを上回る震源時間関数が得られたことが分かる。従来の手法では狭帯域のバンドパスフィルターを用いて並進運動のみを取り出して解析するしかなかったが、この場合にはせいぜい数十秒程度以下の短周期側の震源時間関数しか求まらない。すなわち Fig. 2a の震源時間関数は並進・傾斜の両方の寄与を込みにして解析することによってはじめて得られたものである。

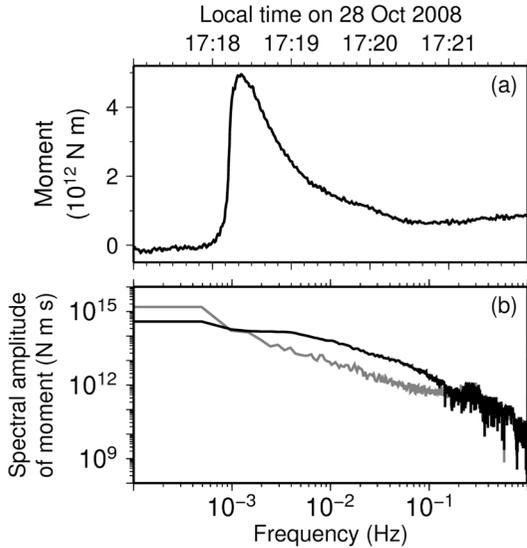


Fig. 2. (a) Source time function (N-S dipole component) of the VLP event of Fig. 1. (b) Fourier spectrum of the source time function (black) and the error of the spectrum estimated from the noise level of the data (gray). Modified from Fig. 11 of Maeda and Takeo (2011).

3. クラックモデルの研究

3-1 振動の励起過程の研究 (タール火山)

タール火山はフィリピンで最も活発な活火山の一つであり、日本・フィリピン共同チームにより観測網の強化が行われた (Inoue and Solidum, 2015)。この観測網によってピーク周波数 0.8 Hz の、互いに波形が極めて相似な LP イベントが 2010–2011 年にかけて 1 日あたり数百回という頻度で観測された (Fig. 3)。

著者らはこれらのイベントをスタッキングすることによって S/N 比を向上させた上で解析を行った (Maeda *et al.*, 2013)。波形インバージョンからは火口や既知のガス放出孔の近傍ではなく山体北斜面の表面現象が知られていないエリアにソースが推定された。ソース位置近傍に未知のガス放出孔が無いが、Landsat 衛星の熱画像を用いて調べてみた。熱画像には既知のガス放出孔が高温異常域として明瞭にイメージングされたが、LP イベントのソース位置近傍には高温異常域は見られなかった。

波形インバージョンで推定された発震機構は傾いた開口クラック解であり、そのソース深度は 200 m と求まった。また LP イベントの波形はたかだか数回以内の振動ののちにノイズレベル以下まで減衰してしまう (Fig. 3b)。これらの観測事実は温度 600 K の水蒸気で満たされたクラックの共鳴振動によって整合的に説明できるこ

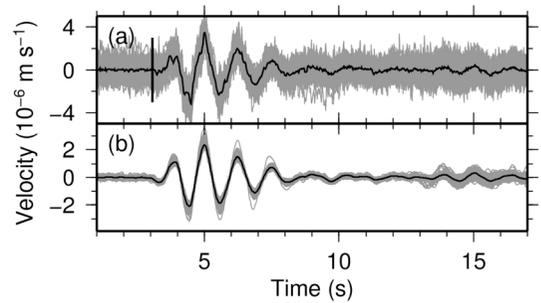


Fig. 3. Individual (gray) and stacked (black) waveforms of the LP events at Taal volcano recorded by the UD component of station VTDK on the crater rim. (a) Raw waveforms, (b) band-passed (0.5–2 Hz) waveforms. The bar represents a manually picked *P*-wave arrival time. Modified from Fig. 2 of Maeda *et al.* (2013).

とがクラックモデルから推定された。

この温度 600 K はソース深度 (200 m) において水蒸気を取りうる温度の下限 (沸点) に近い。またマグマだまりから離溶した水蒸気が亀裂を通じて等エントロピーで深さ 200 m まで上昇するモデルを考えると断熱冷却によって沸点付近まで温度が低下することが予想される。Landsat 衛星の熱画像でソース近傍に高温異常域が見られないことも水蒸気が低温であることの傍証となりうる。これらの観測事実に加え、ソースモデルを考える上での決め手となったのはスタックした生波形がソースよりも高所の観測点において下向きの初動を持つことであった (Fig. 3a)。このことは LP イベントが引きの初動で開始することを意味する。これらのことを整合的に説明するモデルとして、マグマから離溶、亀裂内を上昇する間に沸点付近まで断熱冷却した水蒸気が低温の地下水層に接触することによって急冷され、突発的に凝縮を起こすことによってクラックの共鳴振動が励起されるというモデルを提案した (Fig. 4)。クラックの共鳴振動の励起過程の候補として水蒸気の凝縮を提起したのは本研究が初である。引きの初動はアメリカ St. Helens 火山やメキシコ Popocatepetl 火山などタール以外の火山の LP イベントにおいても観測されており (Matoza and Chouet, 2010; Arciniega-Ceballos *et al.*, 2012)、本研究で提案したモデルはこれらの LP イベントに対しても有力な説明の一つとなりうるものである。

3-2 共鳴振動の周波数を表す解析式

クラックモデルでは密度 ρ_s 、P 波速度 α 、S 波速度 $\alpha/\sqrt{3}$ の弾性体内部に長さ L 、幅 W 、厚さ $d (\ll L, W)$ の直方体の空洞 (クラック) を考え、これを密度 ρ_f 、音速 a

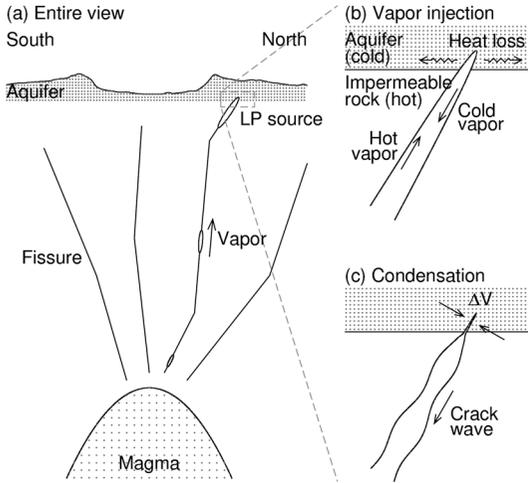


Fig. 4. Conceptual source model of LP events at Taal. Modified from Fig. 17 of Maeda *et al.* (2013).

の完全流体で満たす。クラック壁面を挟んで固体側と流体側でトラクション・法線変位が連続であるとし、時刻 $t=0$ に突然の圧力変化を流体内の一部分に与えるとクラック壁面の振動が生じる。この振動の解析解は知られておらず、 L/d , W/L , ρ_f/ρ_s , a/a の4つの無次元パラメータを与えて差分法 (Chouet, 1986) または境界積分法 (Yamamoto and Kawakatsu, 2008) により数値計算を行わなければならない。

Kumagai (2009) は流体側の運動方程式のみを考え、流体圧力とクラック壁面の法線変位が比例するという仮定を置くことによって波長 $\lambda=2L/m$ (m : 整数) のモードの固有周波数 f_m^L が次式で表されることを予想した。

$$f_m^L = ma/2L\sqrt{1+2\epsilon C}, \quad C = (3\rho_r a^2 L)/(\rho_s a^2 d) \quad (2)$$

ここで ϵ は流体圧力とクラック壁面の法線変位の間の比例定数を無次元化したパラメータで、 C は crack stiffness と呼ばれる。

著者らは Chouet (1986) の数値計算コードにおいて4つの無次元パラメータのうちの3つを固定して1つだけを細かい間隔で変えていく計算を行い、ピーク周波数のパラメータ依存性を調べた。その結果は明らかに (2) 式とは異なるものであった。そこで式の形を計算結果に合うように試行錯誤した結果、

$$f_m^L = (m-1)a/2L\sqrt{1+2\epsilon_m^L C} \quad (3)$$

という形の式が数値計算と非常によく合うことを見出した (Fig. 5; Maeda and Kumagai, 2013)。ここで ϵ_m^L は振動モードごとに異なるが C にはよらない定数である。(3)

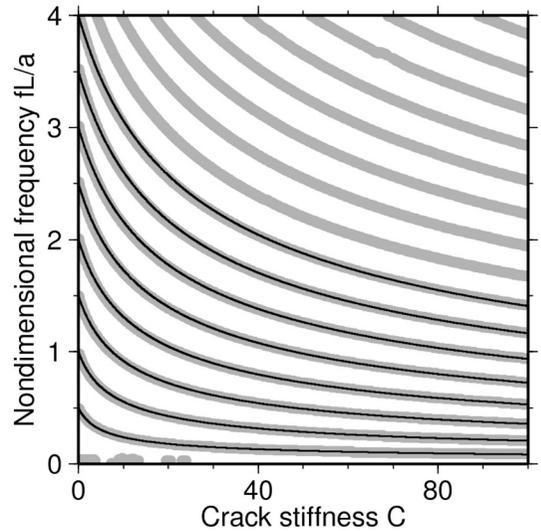


Fig. 5. A comparison of the peak frequencies of the crack model computed by a numerical code of Chouet (1986) (gray) and those calculated by Eq. 3 for 2–9 (black). Modified from Fig. 1 of Maeda and Kumagai (2013).

式からは周波数の流体物性・クラックサイズ依存性が明白であり、(3) 式を用いれば観測に合うパラメータ組合せを系統的かつ容易に推定できると期待される。なお (3) 式の理論的な導出は得られていない。また実データへの適用も今後の課題である。

4. 最近の研究と今後

著者は波形インバージョンとクラックモデルを2本柱として研究を進めてきたが、これらを適用できる地震には条件がある。波形インバージョンに適するのは VLP イベント (卓越周期2秒以上) であり、これよりも周期の短い LP イベントや微動の場合には仮定する地下構造の影響が大きく波形インバージョンによって安定な解を推定するのが難しい (Bean *et al.*, 2008)。クラックモデルを適用できるのは一定周波数で減衰振動するイベントであり、一つのイベント内で周波数が時間変化したり振幅が複雑に変化するイベントには適用できない。

最近、著者が直接的な関わりを持つ火山において3つの噴火が相次いで発生した。1つ目はフィリピン・マヨン火山2013年水蒸気噴火である。噴火前後の地震活動は低調であり、爆発地震がこの噴火に関連する唯一の地震シグナルであった。この爆発地震は長周期 (0.1–0.6 Hz) に富んでおり、波形インバージョンによって噴火過程を推定できた (Maeda *et al.*, 2015a)。2つ目は同じマヨン火

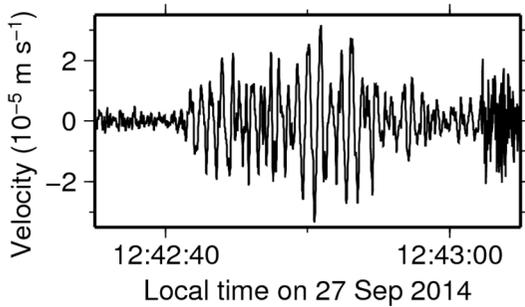


Fig. 6. A typical LP event at Mt. Ontake (station V. ONTA, UD component) observed after the onset of a phreatic eruption at 11:52 on 27 Sep 2014.

山で翌年に発生した溶岩ドーム噴火で、微動などが観測されたものの波形インバージョンやクラックモデルに適したイベントは観測されなかった。そして3つ目が御嶽山2014年噴火である。波形インバージョンによって噴火直前のVLPイベントを解析できたが(Maeda *et al.*, 2015b)、噴火中・噴火後に多数発生したLPイベントと微動はいずれもやや高周波(1-5 Hz)のため波形インバージョンに適さず、波形が複雑なためクラックモデルの適用も困難であった(Fig. 6)。

このように噴火の解析に携わってみて、波形インバージョンやクラックモデルを利用できるのが一部のイベントに限られることを実感した。一連の噴火前後に特に多く見られたのが卓越周期1-5 Hz付近のLPイベントや微動であった。これらを解析できるようになれば地震波から引き出せる情報が大幅に増加し、噴火過程の理解に寄与することになると期待される。今後はJulian (1994)など別のモデルの適用可能性の検討、高周波の解析手法として近年急速に発展している振幅震源決定法(Battaglia and Aki, 2003; Kumagai *et al.*, 2010)の応用なども視野に入れてこうしたLPイベントや微動の解析に重点を置いて取り組んでいきたい。

謝 辞

本稿で紹介した研究成果は東京大学地震研究所の武尾実教授、名古屋大学大学院環境学研究所の熊谷博之教授をはじめ、著者の学生時代からの多くの皆様のご指導により為し得たものである。関係機関の皆様には研究に必要なデータを快く提供いただいた。査読者である京都大学の中道治久准教授、北海道大学の橋本武志教授からのコメントにより本稿は改善された。ここに記して謝意を表する。

引用文献

- 青山 裕 (2008) CMG40 T 地震計の傾斜応答に関する簡易試験. 火山, **53**, 35-46.
- Arciniega-Ceballos, A., Dawson, P. and Chouet, B. A. (2012) Long period seismic source characterization at Popocatepetl volcano, Mexico. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L20307, doi: 10.1029/2012GL053494.
- Battaglia, J. and Aki, K. (2003) Location of seismic events and eruptive fissures on the Piton de la Fournaise volcano using seismic amplitudes. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **108**, 2364, doi: 10.1029/2002JB002193.
- Bean, C., Lokmer, I. and O'Brien, G. (2008) Influence of near-surface volcanic structure on long-period seismic signals and on moment tensor inversions: Simulated examples from Mount Etna. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **113**, B08308, doi: 10.1029/2007JB005468.
- Chouet, B. (1986) Dynamics of a fluid-driven crack in three dimensions by the finite difference method. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **91**, 13967-13992, doi: 10.1029/JB091i11p13967.
- Chouet, B. A. and Matoza, R. S. (2013) A multi-decadal view of seismic methods for detecting precursors of magma movement and eruption. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **252**, 108-175, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2012.11.013.
- Chouet, B., Dawson, P., Ohminato, T., Martini, M., Saccorotti, G., Giudicepietro, F., De Luca, G., Milana, G. and Scarpa, R. (2003) Source mechanisms of explosions at Stromboli Volcano, Italy, determined from moment-tensor inversions of very-long-period data. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **108**, 2019, doi: 10.1029/2002JB001919.
- Graizer, V. (2006) Tilts in strong ground motion. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **96**, 2090-2102, doi: 10.1785/0120060065.
- Inoue, H. and Solidum Jr., R. U. (2015) Enhancement of earthquake and volcano monitoring and effective utilization of disaster mitigation information in the Philippines. *J. Disast. Res.*, **10**, 5-7.
- Julian, B. R. (1994) Volcanic tremor: Nonlinear excitation by fluid flow. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **99**, 11859-11877, doi: 10.1029/93JB03129.
- Kumagai, H. (2009) Source quantification of volcano seismic signals. In *Encyclopedia of Complexity and Systems Science* (Meyers, R. A. eds), 9899-9932, Springer, New York.
- Kumagai, H. and Chouet, B. A. (2000) Acoustic properties of a crack containing magmatic or hydrothermal fluids. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **105**, 25493-25512, doi: 10.1029/2000JB900273.
- Kumagai, H., Chouet, B. A. and Nakano, M. (2002) Temporal evolution of a hydrothermal system in Kusatsu-Shirane Volcano, Japan, inferred from the complex frequencies of long-period events. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **107**, 2236, doi: 10.1029/2001JB000653.
- Kumagai, H., Nakano, M., Maeda, T., Yepes, H., Palacios, P., Ruiz, M., Arrais, S., Vaca, M., Molina, I. and Yamashina, T. (2010) Broadband seismic monitoring of active volcanoes using deterministic and stochastic approaches. *J. Geophys.*

- Res. Solid Earth*, **115**, B08303, doi: 10.1029/2009JB006889.
- Maeda, Y. and Takeo, M. (2011) Very-long-period pulses at Asama volcano, central Japan, inferred from dense seismic observations. *Geophys. J. Int.*, **185**, 265–282, doi: 10.1111/j.1365-246X.2011.04938.x.
- Maeda, Y. and Kumagai, H. (2013) An analytical formula for the longitudinal resonance frequencies of a fluid-filled crack. *Geophys. Res. Lett.*, **40**, 5108–5112, doi: 10.1002/grl.51002.
- Maeda, Y., Takeo, M. and Ohminato, T. (2011) A waveform inversion including tilt: method and simple tests. *Geophys. J. Int.*, **184**, 907–918, doi: 10.1111/j.1365-246X.2010.04892.x.
- Maeda, Y., Kumagai, H., Lacson Jr., R., Figueroa II, M. S. and Yamashina, T. (2013) Source process of long-period seismic events at Taal volcano, Philippines: Vapor transportation and condensation in a shallow hydrothermal fissure. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **118**, 2832–2846, doi: 10.1002/jgrb.50205.
- Maeda, Y., Kumagai, H., Lacson Jr., R., Figueroa II, M. S., Yamashina, T., Ohkura, T. and Baloloy, A. V. (2015a) A phreatic explosion model inferred from a very long period seismic event at Mayon Volcano, Philippines. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **120**, 226–242, doi: 10.1002/2014JB011440.
- Maeda, Y., Kato, A., Terakawa, T., Yamanaka, Y., Horikawa, S., Matsuhira, K. and Okuda, T. (2015b) Source mechanism of a VLP event immediately before the 2014 eruption of Mt. Ontake, Japan. *Earth Planets Space*, **67**, 187, doi: 10.1186/s40623-015-0358-0.
- Matoza, R. S. and Chouet, B. A. (2010) Subevents of long-period seismicity: Implications for hydrothermal dynamics during the 2004–2008 eruption of Mount St. Helens. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **115**, B12206, doi: 10.1029/2010JB007839.
- Nakano, M. and Kumagai, H. (2005) Waveform inversion of volcano-seismic signals assuming possible source geometries. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L12302, doi: 10.1029/2005GL022666.
- Ohminato, T. (2006) Characteristics and source modeling of broadband seismic signals associated with the hydrothermal system at Satsuma-Iwojima volcano, Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **158**, 467–490, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2006.08.004.
- Ohminato, T., Chouet, B. A., Dawson, P. and Kedar, S. (1998) Waveform inversion of very long period impulsive signals associated with magmatic injection beneath Kilauea volcano, Hawaii. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **103**, 23839–23862, doi: 10.1029/98JB01122.
- Rodgers, P. W. (1968) The response of the horizontal pendulum seismometer to Rayleigh and Love waves, tilt, and free oscillations of the Earth. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **58**, 1384–1406.
- Wielandt, E. and Forbriger, T. (1999) Near-field seismic displacement and tilt associated with the explosive activity of Stromboli. *Annali di Geofisica*, **42**, 407–416.
- Yamamoto, M. and Kawakatsu, H. (2008), An efficient method to compute the dynamic response of a fluid-filled crack. *Geophys. J. Int.*, **174**, 1174–1186, doi: 10.1111/j.1365-246X.2008.03871.x.

(編集担当 橋本武志)