

浅間火山 2003年2月6日噴火の火山性微動

小林 知勝*・及川 純*・辻 浩*・小山 悦郎*

(2003年5月8日受付, 2003年9月19日受理)

Volcanic Tremor Associated with the Asama Volcano Eruption on February 6, 2003

Tomokazu KOBAYASHI*, Jun OIKAWA*, Hiroshi TSUJI* and Etsuro Koyama*

We observed volcanic tremor associated with the Asama volcano eruption on February 6, 2003. The seismic activity of the Asama volcano began to increase at about 3:00, and the eruption occurred at 12:00. The volcanic tremor was preceded by one earthquake having large amplitude, and was followed by another. The source of the tremor, which is estimated by using amplitude decay with distance, is below the vent. Moreover, the tremor contained harmonic oscillation having a dominant frequency of 1.4 Hz. Amplitude of the harmonic oscillation increased just after the first large quake, and decreased just before the second one. Particle motions of the harmonic tremor point to the vent. We interpret the source mechanism of the harmonic tremor as a resonance of gas in the conduit.

Key words: Asama volcano, eruption on February 6, 2003, volcanic tremor, Helmholtz resonance

1. はじめに

浅間火山は、長野県と群馬県の境に位置する安山岩質の活動的な活火山で、数年から十数年ごとに小噴火を繰り返してきた。ここ数十年は噴火活動がなかったが、日に数個から数十個の火山性地震は発生しており、時折群発的な地震活動を見せる。2003年2月6日12時01分、1990年の微噴火以来約13年ぶりに極小規模な噴火が発生した。気象庁の監視カメラは、山頂火口から少量の灰白色の有色噴煙が火口縁上300mまで上昇して南東側に流れた様子を捉えた(気象庁地震火山部, 2003)。この噴火の際、継続時間が約2分の火山性微動が観測された。我々はこの噴火に伴って発生した火山性微動の解析を行ったので、その結果をここに報告する。

2. 観測概要

Fig. 1に示すように、東京大学地震研究所浅間火山観測所では浅間火山の山頂火口を中心として山腹に地震観測網を設置し、火山性地震・微動の連続観測を行って

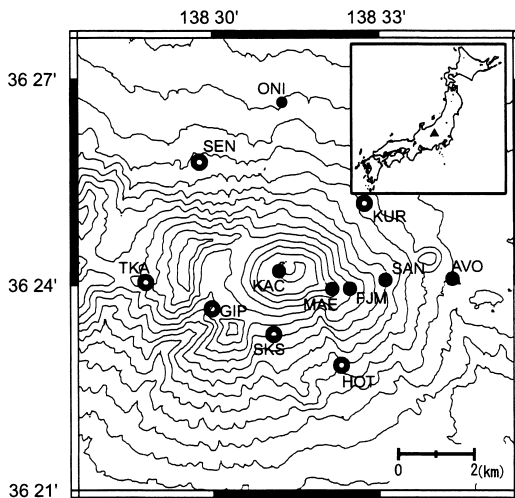


Fig. 1. Seismic stations around Asama volcano. In our study, we used 3-component seismograms observed at 6 stations, which are indicated by solid circles. All seismometers are short-period type (1 Hz).

* 〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1

東京大学地震研究所

Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 1-1-1 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0032, Japan.

Corresponding author: Tomokazu Kobayashi

e-mail: tkoba@eri.u-tokyo.ac.jp

る(辻・他, 1998)。観測に使用された地震計は固有周期1秒の速度型地震計で、データは浅間火山観測所まで伝送される。減衰定数は0.7、サンプリング周波数は120 Hzである。Fig. 1に示す12観測点のうち、白丸で示す6観測点は欠測のためデータを使用することができなかつ

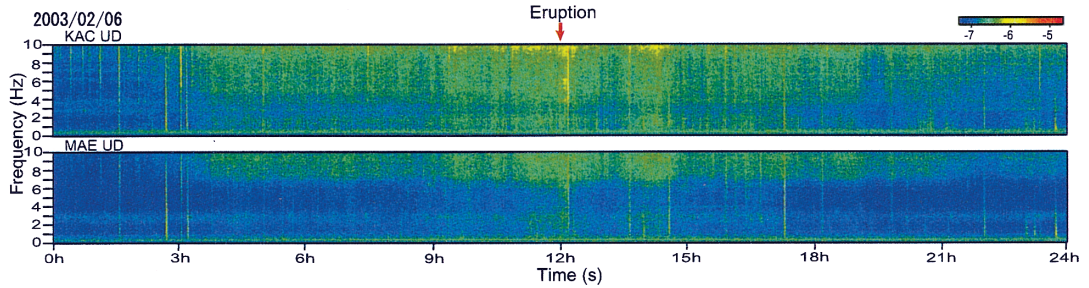


Fig. 2. Running spectrograms of vertical velocity seismograms at KAC and MAE, respectively. Warm colors correspond to high-amplitude spectral components, and Cold ones are to low-amplitude ones.

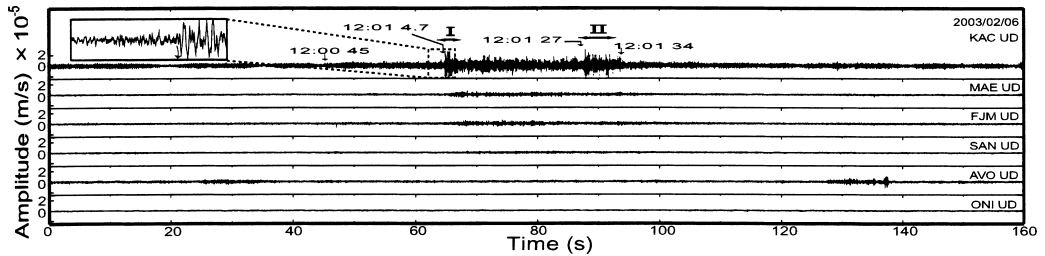


Fig. 3. Volcanic tremor accompanied with the eruption on February 6, 2003. These records are vertical-component velocity seismograms at 6 stations. The inset shows the initial motion of “quake I” at KAC. The arrow in the inset means that the initial motion is dilatational. Origin time on the horizontal axis corresponds to 12:00 00 (JST).

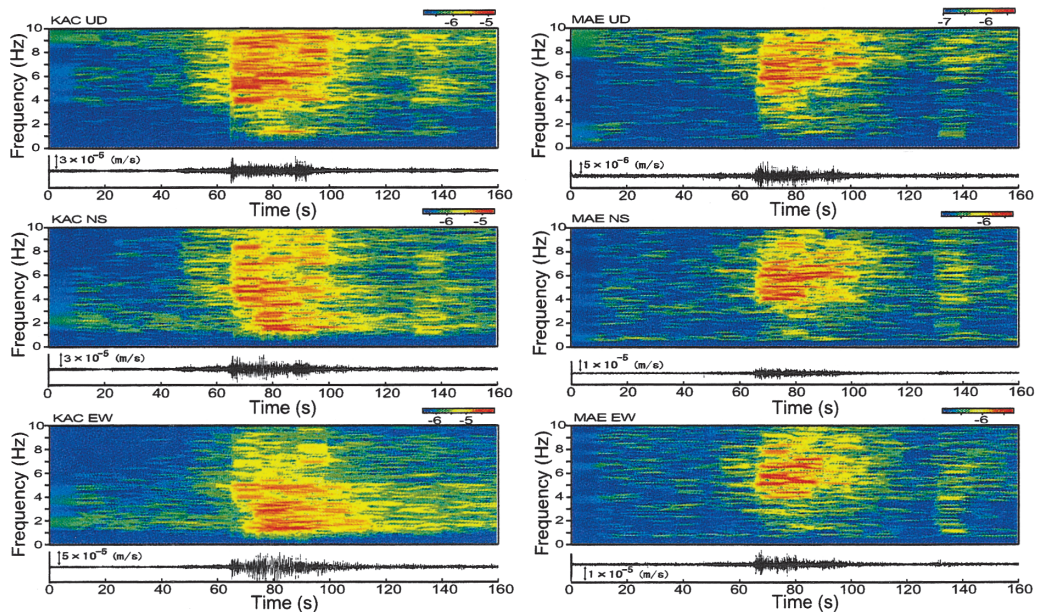


Fig. 4. Running spectrograms of 3-component velocity seismograms at KAC and MAE. Warm colors correspond to high-amplitude spectral components, and Cold ones are to low-amplitude ones. Origin time on the horizontal axis corresponds to 12:00 00 (JST).

たことから、本論文における解析には、黒丸で示す6観測点におけるデータを利用した。

3. 2003年2月6日の地震活動

噴火当日を含む前後数日間に、地震回数の増加、火口底温度の上昇、噴煙量の増加などの顕著な変動は見られ

なかった(気象庁地震火山部, 2003)。そこで我々は噴火が発生した 2 月 6 日の地震記録を詳細に調べた。Fig. 2 は KAC, MAE 観測点の上下動成分の波形記録から得られた 0 時から 24 時までの 1 日分のランニングスペクトルである。15 秒間のウィンドウを 5 秒ずつ移動して、各ウィンドウごとに FFT によって振幅スペクトルを求めた。暖色系になるほど振幅が大きいかを示す。振幅スペクトルの表示スケールは両観測点で同一である。その結果、3 時過ぎより振幅が増加しはじめたことが確認できる。さらに、9 時頃になると振幅がさらに増加し、12 時の噴火に至ることがわかる。そして、14 時過ぎから振幅は次第に減少し始める。

4. 波形の特徴

先述したように、2 月 6 日噴火の際に、約 2 分間の継続時間をもつ火山性微動が観測された。はじめに、微動の時系列について詳細に述べる。噴火に前後して発生した火山性微動の速度波形記録(上下動成分)を Fig. 3 に示す。時間軸の原点は、12 時 00 分 00 秒(JST)に一致させている。山頂火口中心から 200m 付近にある KAC 観測点では、火山性微動が明瞭に認められるものの、その他の観測点では不明瞭である。KAC 観測点の波形記録を詳細に調べると、以下のような経過をたどる。12 時 00 分 45 秒付近から火山性微動の振幅が増加し始める。その振幅は徐々に増大していき、12 時 01 分 4.7 秒に引きで始まるパルスが発生し振幅が急増する(以後「波形 I」と呼ぶ)。01 分 27 秒から再び振幅の大きなパルスが発生しはじめ(「波形 II」と呼ぶ)、01 分 34 秒頃には 01 分 4.7 秒以前の振幅レベルに戻り、微動は徐々に終息していく。

さらに、火山性微動をより詳細に調べてみる。Fig. 4 に、KAC, MAE 観測点で記録された微動の 3 成分のランニングスペクトルを示す。Fig. 2 と同様の方法で、10 秒間のウィンドウを 0.5 秒ずつ移動して振幅スペクトルを求めた。微動は 4~8 Hz 付近を中心として広い帯域の成分をもっていることがわかる。この帯域を詳細に調べると、波形 I から始まる微動は 4~8 Hz の広い帯域の振幅が大きい、波形 II は 4~5 Hz 付近の振幅が相対的に減少していることがわかる。さらに特徴的と思われるのは、1.4 Hz 付近の低周波部分にスペクトルピークが現れることである。このピークは、KAC 観測点以外では振幅が非常に小さい。

Fig. 5 は KAC 観測点で記録された上下動成分の波形記録とバンドパスフィルタをかけた波形を示している。Fig. 5(b) は帯域 3~6 Hz のバンドパスフィルタをかけた波形記録である。波形 II はこの帯域に大きな振幅を

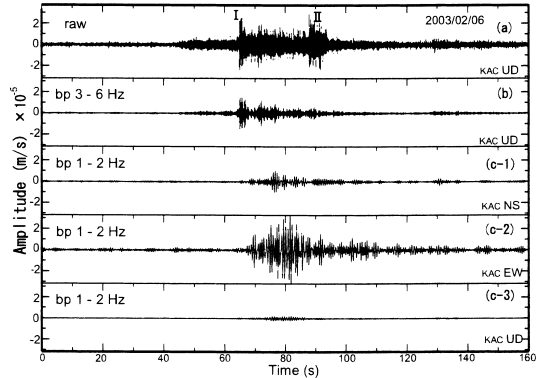


Fig. 5. (a) Vertical-component of the velocity seismogram at KAC. (b) Band-pass filtered seismogram (3~6 Hz). (c) Band-pass filtered 3-component seismogram (1~2 Hz). Origin time on the horizontal axis corresponds to 12 : 00 00 (JST).

持たないことが確認できる。Fig. 5(c) は、1.4 Hz 付近にスペクトルピークをもつ波形を詳細に見るために、帯域 1~2 Hz のバンドパスフィルタをかけた波形記録である。波形 I の発生直後から、振幅が徐々に増大し、波形 I と波形 II のほぼ中間の時間帯にその振幅が最大になる。その後、振幅が漸減し、微動が発生し始めたときの振幅レベルに減少するとほぼ同時に波形 II が発生している。

5. 微動の震源域

観測された微動は P, S 波が不明瞭なため、各観測点の走時差を用いて震源を決定することができない。そこで、各観測点での振幅の距離減衰を考慮した震源の決定を試みた。振幅が震源との距離の n 乗に比例した距離減衰をずるとして理論値と観測値の残差が最も小さくなるような震源、比例係数、および n を最小二乗法により求めた。このとき、微動の発生時間帯(波形 I~II)の RMS 振幅を各観測点での微動の振幅とした。また、火口中心下に微動発生源があると仮定して震央を固定して計算した。以上の方法によって得られた最適の理論振幅曲線を Fig. 6 に示す。ONI 観測点は微動が確認できなかったので計算に使用していない。このときの n は -0.98 である。震源は海拔 2220 m の位置に求まった。このことは震源域が火口底付近および火口底直下であることを示唆する (Fig. 7)。

6. 1.4 Hz 微動の発生メカニズムについて

噴火に伴う火山性微動において特徴的と思われるのは、微動の初期と終息期に振幅の大きい波形 I, II を伴う点、およびそれら波形 I, II の間に 1.4 Hz 微動が卓越し

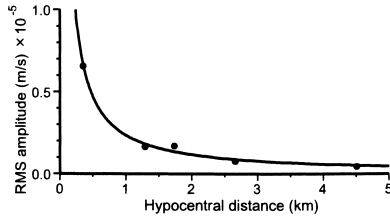


Fig. 6. The relationship between the RMS amplitude of tremor and the hypocentral distance. The solid line represents the least squares fit to the data (solid circles).

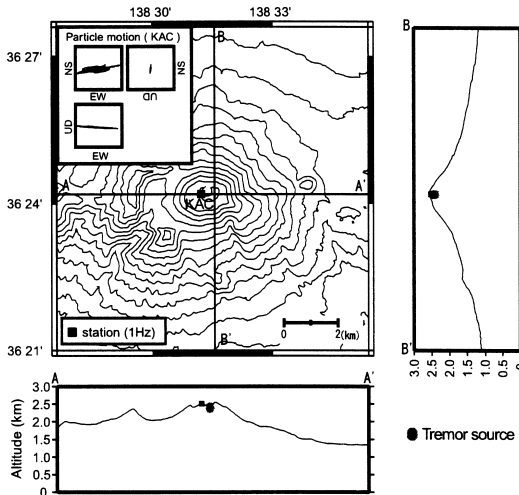


Fig. 7. Shaded area shows the source region of volcanic tremor. The inset shows particle motions of the band-pass filtered (1–2 Hz) velocity seismograms at KAC.

て発生している点である。これらの特徴は、噴火の物理過程を議論する上で重要な情報をもつと我々は考える。この章では 1.4 Hz 微動に焦点を置き、その物理過程を考察する。

KAC 観測点で得られた 3 成分の波形記録に Fig. 5(c) と同様に 1~2 Hz のバンドパスフィルタをかけて、1.4 Hz 微動の particle motion を得た (Fig. 7)。ほぼ直線軌跡を描き、その軌跡の延長線は火口底表面もしくは火口下のごく浅部を指している。まずはじめに、1.4 Hz 微動の発生メカニズムを火口下に存在する円柱もしくは球の radial 方向の共鳴振動と仮定して、その共鳴体のサイズの推定を試みた。推定には、Fujita and Ida (2003) で考察された円柱および球の共鳴モデルを利用した。計算にあたり、1.4 Hz のスペクトルピークの半幅値から求めた減衰定数 0.02727 を用いた。また、共鳴体の周囲の弾性体の P 波速度を 2500 m/s (沢田・他, 1983)、および密度を 2200 kg/m³ と仮定した。Fig. 8 は、これらの値を用

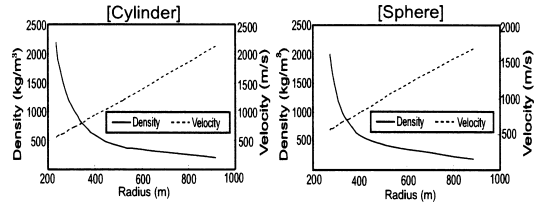


Fig. 8. Density (solid line) and sound velocity (broken line) in the resonator (left : cylinder, right : sphere) as functions of radius according to Fujita and Ida (2003). Left axis indicates density and right axis indicates sound velocity.

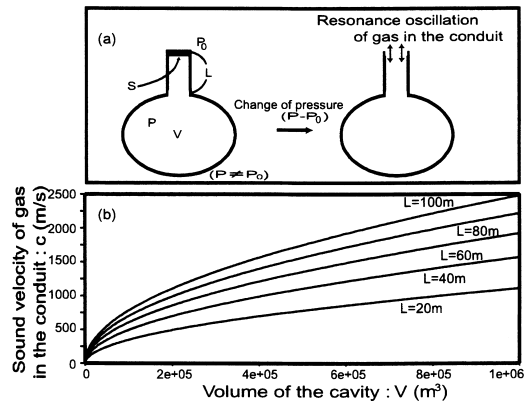


Fig. 9. (a) A conceptual model of a helmholtz resonance. V , L , S , P , and P_0 are the volume of the cavity, the length of conduit, the cross-sectional area of conduit, the pressure within the cavity and conduit, and the pressure of the atmosphere, respectively. The change of pressure in the conduit and cavity, which is initiated by removing the lid, causes the gas in the conduit to oscillate. (b) The relationship between the cavity volume and the acoustic velocity of gas in the conduit. They are calculated every 50 m over the length of conduit.

いて計算された共鳴体の半径と共鳴体内の媒質の密度および音速の関係である。ただし、1.4 Hz を共鳴の基本モードとしている。共鳴体内の媒質の物性を一意に決定することは困難であるが、噴煙の様子や噴火の規模などから、水蒸気もしくは水蒸気と水の混合相が主体であったと考えられる。水の密度 1000 kg/m³ を考慮すると、円柱、球ともにその半径が 300 m 以上になる。しかし、山頂火口は半径が 150 m であること、また、もしこれほどの大きさの共鳴体が存在すれば、MAE や FJM 観測点などでも 1.4 Hz 微動が KAC 観測点と同程度の振幅で現れると思われることから、計算から求められた半径の値

は現実的ではないと思われる。そこで我々は、先のモデルより小さな発生源でかつ火口表面付近で発生していることを考慮して、1.4 Hz 微動をヘルムホルツ共鳴（小橋, 1969 など）による共鳴振動と考えた。Fig. 9(a) のように、ある体積 V の空洞容器に、長さ L 、断面積 S の管がつながっている。管口の蓋がはずれるなどの理由で、外部と圧力差ができて管内の気体に流れが生じる。このとき火道内の気体が共鳴振動する。今、噴火に伴って火口底が開くことで、圧力変化がもたらされてヘルムホルツ共鳴が起こったと考える。このときの気体の振動数は

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{VL}} \quad (1)$$

と表せられる。ここで、 f は共鳴振動数、 c は気体の音速である。下鶴・他 (1982) より、1973 年噴火時に火口底に出現した溶岩ドームの半径が 70 m であることから、その下につながる火道はそれより小さいと判断し、本研究では火道を半径 20 m の円柱として計算する。Fig. 9 (b) は L を 20 m ごとに固定して計算した体積 V と音速 c の関係である。ヘルムホルツ共鳴の発生条件より次式が成立する。

$$\sin\left(\frac{2\pi f}{c}\right) \approx \frac{2\pi f}{c} L \quad (2)$$

前述のように、噴煙画像からその主成分は水蒸気、もしくは水蒸気と水との混合相が主体であると考えられることから、 c は水の音速 1500 m/s より大きな値をとることはない。このような仮定のもと (2) 式を踏まえると L は数十 m の範囲となる。今仮に $L = 30$ m、 $c = 500 \sim 1000$ m/s とすると、空洞部の体積はおおよそ $1 \sim 5 \times 10^5$ m³ となる。

これまでの N 型地震に関する研究から、浅間火山の山体下にクラック状および球状の共鳴体が存在することが指摘されている (Aoyama *et al.*, 2001; Fujita and Ida, 2003; Sakuraba *et al.*, 2002)。Fujita and Ida (2003) や Sakuraba *et al.* (2002) で見積もられた体積はそれぞれ $3 \sim 9 \times 10^6$ m³、 5.6×10^6 m³ であり、見積もられた空洞体積はこれらよりほぼ 1 桁小さい。また、Aoyama and Takeo (2001) で見積もられた共鳴体は体積 5×10^5 m³ で、火口底から 300~1300 m の深さに存在すると指摘され、見積もられた空洞部とほぼ同じ体積であるが、共鳴体の深さに相違点がある。

1.4 Hz 微動は、波形 I の直後から振幅が漸増する。ヘルムホルツ共鳴モデルでは、気体の共鳴振動の振幅は空洞部の圧力に比例する。このことから、空洞部へのガスの流入量の変化が空洞部の圧力の変化をもたらし、それに伴って共鳴振動の振幅が変化すると我々は考えている。

7. 考 察

以上の解析結果から、我々は 2 月 6 日噴火を以下のように考察した。2 月 6 日の午前 3 時過ぎから、浅間火山体下の活動が活発化し、同日 9 時にはさらにその活動度を高め、12 時の噴火に向けての準備がなされたと考えられる。噴火の開始時刻は正確に見積もられていないが、波形 I の発生時刻と噴煙の放出時刻が対応していると仮定すると、噴火の初期段階は次のように推察される。12 時 00 分 45 秒付近から噴気量が増大し始めると同時に火山性微動が起こり始める。噴気量が増大するとともに火山性微動の振幅が大きくなり、01 分 4.7 秒に噴気が通り抜けていた火口底の一部が壊れて有色噴煙が放出され始める、と同時に、火口底の崩壊に伴い火道内に急激な減圧が生じて引きで始まる波形 I が励起される。このとき、火口底が開くことにより、火道および火口底下数十 m に存在する空洞部とその外部に圧力差が生じる。その圧力差により火道内の水蒸気と水の混合相に流れが生じ、火道内の混合相が共鳴振動を起こして 1.4 Hz 微動が発生する。その後、12 時 01 分 27~34 秒の間に、噴出物の流量が減る過程で、噴火によって脆弱化した火口周辺の岩体が崩落して（波形 I）火道が閉じ噴火が終了する。同時に 1.4 Hz 微動も、火道の蓋が閉じることで共鳴振動を終える。12 時 01 分 34 秒には波形 I 発生直前の状態になり微動が終息に向かう。

8. ま と め

2003 年 2 月 6 日噴火に伴う地震記録の解析を行った。その結果、以下のことがわかった。

(1) 2 月 6 日の 3 時過ぎより火山体内部での地震活動が高まりはじめ、12 時の噴火に至った。その後、14 時過ぎからその活動度は次第に減少しはじめた。

(2) 小さな振幅で開始した微動は、その約 20 秒後に大きな振幅（波形 I）を伴ってその活動を活発にした。さらに、20 秒後に再び大きな振幅を（波形 II）伴い終息に向かった。

(3) 微動の震源域は火口底付近に求められる。

(4) 波形 I の発生直後、1.4 Hz が卓越する振動が現れる。その後、振幅を増大させた後、波形 I の発生直前で微動が終息する。

(5) 1.4 Hz 微動の particle motion は直線状で、その軌跡の延長線は火口底付近を指す。

(6) 1.4 Hz 微動は、火道やマグマ溜りの radial 方向の共鳴振動ではなく、火道内の気体の共鳴振動によるものと考えられる。

謝 辞

共鳴振動の議論におきましては、防災科学技術研究所の藤田英輔博士に多大なる助力と有益な助言をいただきました。ここに厚くお礼申し上げます。また、本稿編集担当の京都大学火山研究センターの大倉敬宏氏、北海道大学地震火山観測研究センターの青山裕氏および1名の匿名査読者の方には、粗稿改善に有益な助言をいただきました。以上の方々に深謝の意を表します。

引用文献

- Aoyama, H. and Takeo, M. (2001) Wave properties and focal mechanisms of N-type earthquakes at Asama volcano. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **105**, 163–182.
- 気象庁地震火山部 (2003) 火山活動解説資料 (平成 15 年 2 月号).
- Fujita, E. and Ida, Y. (2003) Geometrical effects and low-attenuation resonance of volcanic fluid inclusions for the source mechanism of long-period earthquakes. *J. Geophys. Res.*, **108**, 10.1029/2002JB001896.
- 小橋 豊 (1969) 基礎物理学選書「音と音波」. 裳華房, 107–110.
- Sakuraba, A., Oikawa, J. and Imanishi, Y. (2002) Free oscillations of a fluid sphere in an infinite elastic medium and long-period volcanic earthquakes. *Earth Planets Space*, **54**, 91–106.
- 沢田宗久・行田紀也・長田 昇・小山悦郎・辻 浩・鍵山恒臣・宮崎 務 (1983) 浅間山の P 波速度構造. *火山*, **28**, 301–304.
- 下鶴大輔・行田紀也・鍵山恒臣・小山悦郎・萩原道徳・辻 浩 (1982) 1982 年 4 月 26 日の浅間山の噴火. *震研彙報*, **57**, 537–559.
- 辻 浩・行田紀也・小山悦郎・及川 純・井田喜明 (1998) 浅間火山の山頂地震観測. *地震研究所技術研究報告*, **2**, 135–140.

(編集担当 大倉敬宏)