火山性地震の発生過程

— 定量化に関する最近の成果 —

防災科学技術研究所*

熊谷博之・中野 優

Recent Advances in Quantification of the Sources of Volcano-seismic Signals

Hiroyuki KUMAGAI and Masaru NAKANO

National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, 3-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-0006, Japan

(Received March 28, 2008; Accepted June 17, 2008)

We review recent advances in quantification of the sources of volcano-seismic signals. Since the 1990s, there have been remarkable advances in quantitative understanding of the sources of volcano-seismic signals. These were made by integrated contributions from observation, analysis, and modeling studies in volcano seismology. We focus on the following topics in this review paper: Broadband seismic observations on active volcanoes, waveform inversions of volcano-seismic signals, and source models based on resonances of a fluid-filled crack, bubble dynamics, and repeated fracture and healing of magma. Broadband seismic observations revealed the general existence of very-long-period seismic signals with oscillation periods longer than a few seconds beneath active volcanoes. Development of waveform inversion methods enabled us to estimate source mechanisms of volcano-seismic signals, which indicate that crack geometry is the most common in volcano-seismic sources. Source models have been successfully used to interpret dynamic interactions between volcanic fluids and the surrounding solid rock. Quantitative studies of volcano seismology are now reaching a mature stage, and links with geological and geochemical studies will be important future directions to achieve a better understanding of magmatic and hydrothermal processes beneath active volcanoes.

Key words: Broadband observation, Waveform inversion, Crack, Bubble, Magma particle

§ 1. はじめに

火山では、マグマおよび熱水性流体と、まわりの固体や大気との複雑な相互作用によってイベントが発生し、多様な地震波形が観測される。火山地震学の黎明期には、我が国において、大森房吉や佐々憲三らによって先駆的

な観測研究が進められた。その後も、水上武による火山性地震の分類 [Minakami (1960)] や安芸敬一らによる微動モデル (クラックモデル) の提唱 [Aki *et al.* (1977)] など、日本人研究者が火山地震学の進展に中心的な役割を果たしてきた。

本特集号が対象とする 1990 年代以降は、火山地震学において歴史的な進展を遂げた時代と言えるだろう。この進展は、観測・解析・モデリングの 3 分野の総合的な進歩の結果である。観測分野においては、広帯域地震計が火山観測に導入され、短周期地震計では捉える事ができなかった、数秒より長い周期における多様なシグナルの存在が明らかにされた。解析分野においては、波形インバージョン手法の開発・導入が進み、火山性地震のメカニズムの定量的な推定が進んだ。モデリング分野においては、クラックモデルの開発・改良、気泡成長のダイナミクス、さらにマグマの脆性破壊・癒着過程に基づく地震発生メカニズムの物理的な解釈が進められた。特に、広帯域地震観測の導入により、構造の影響をあまり受けていない、より長周期でかつ比較的単純な波形記録を示す現象を研究対象と出来たことが、定量的な解析とモデリングを可能とし、火山地震学の進展に大きく貢献した。

本稿においては、これらの 1990 年代以降の火山性地震の発生過程の定量化に関する成果をレビューするとともに、今後の展望について述べる。

§ 2. 火山における広帯域地震観測

火山地震学で用いられる周期帯の分類には様々なものがあるが、ここでは、Chouet (1996) に従い、特徴的な周期 T を用いた以下の分類を用いる。(1) $T = 0.1$ s, 短周期 (short period, SP), (2) $T = 1$ s, 長周期 (long period, LP), (3) $T = 10$ s, 超長周期 (very-long period, VLP), (4) $T = 100$ s, 極長周期 (ultra-long period, ULP)。この分類は、一般的な地震学で用いる分類とは異なっており、火山観測には主に固有周期 1 秒の地震計が用いられてきた、という火山地震学の歴史的な背景の影響を受けている。

1980 年代後半から進んだ可搬型の広帯域地震計を用いた火山における地震観測は、周期数秒以上の領域 (特に VLP 帯) に、多様なシグナルが一般的に存在することを明らかにした。可搬型の広帯域地震計が開発される以前においても、据置型の長周期地震計により、数秒よりも長いシグナルの存在は知られていたが [例えば, Sassa (1935)], 可搬型の広帯域地震計の導入により、比較的簡便に広帯域地震観測が可能になり、多くの火山の観測を通して VLP シグナルが一般的に存在することと、その波形の多様性が示されることとなった。また据置型では困難であった、火山体近傍での高密度観測が可搬型によ

*〒305-0006 つくば市天王台 3-1

り可能となり、後述する震源メカニズムの定量化にも大きく貢献することとなった。

日本および世界各地の火山における地震観測波形の特徴は、森田・大湊 (2005)、西村・井口 (2006) および Kawakatsu and Yamamoto (2007) に詳しく記載されているので、ここでは重複を避ける。様々な火山での観測事例から VLP シグナルに関しては、(1) 類似した波形で繰り返し発生し、(2) 噴火等の表面現象を伴うものと、(表面現象のない) 内部過程に伴うものが存在する、ということが分かってきた。Fig. 1 (a) と 1 (b) にキラウエア火山 [Dawson *et al.* (1998)] および三宅島 [Kumagai *et al.* (2001)] で観測された VLP シグナルを示す。どちらの観測例においても、類似した波形が、繰り返し発生していることが分かる。Fig. 1 (c) と 1 (d) には、浅間山のブルカノ式噴火 [Ohminato *et al.* (2006)] と八丈島の群発地震活動 [Kumagai *et al.* (2003)] に伴う VLP シグナルを示した。噴火に伴う波形はインパルス的な特徴を示す一方で、群発地震に伴う波形は、減衰振動を示している。キラウエアと八丈島では表面現象は現れなかったが、浅間山と三宅島では、それぞれ噴火とカルデラ陥没という表面現象を伴っていた。

これらの例だけからも、火山で観測される VLP シグナルは、多様な震源過程によって発生していることが推察できる。さらに LP 帯においても、継続的に振動を続ける微動や、減衰振動を示す LP イベントがこれまで活動的な火山で一般的に観測されてきた (Fig. 2)。これらのシグナルの震源の定量化が火山地震学における大きなターゲットの 1 つである。断層運動に伴う地震が、すべりという統一的な力学的概念で説明されるのとは異なり、火山で発生する地震は、固体と相互作用する流体の流れ・振動・相変化といった様々な物理過程を考慮しな

ければならない。

§ 3. 波形インバージョン

震源の定量化のためには、観測された波形を用いて震源メカニズムを推定することが必要である。断層運動による地震では、ダブルカップルに対応するモーメントテンソルを仮定できるが、火山性地震に関しては、モーメントテンソル 6 成分とシングルフォース 3 成分を用いたより一般的な震源表現が必要となる。また震源時間関数 (モーメント関数) に関しても、断層運動の場合のステップ状の関数ではなく、膨張・収縮も含む複雑な時間関数を推定する必要がある。このような状況に合う波形インバージョン手法の開発とその応用が火山地震学の分野では進められてきた。

3.1 インバージョン手法の開発

点震源のシングルフォース (F_j) とモーメントテンソル (M_{jk}) による i 成分の変位波形 (u_i) は、以下のように記述できる [例えば、Aki and Richards (2002)]。

$$u_i(t) = \int_{-\infty}^{\infty} [F_j(\tau)G_{ij}(t-\tau) + M_{jk}(\tau)G_{ijk}(t-\tau)]d\tau \quad (1)$$

ここで G_{ij} と G_{ijk} はそれぞれグリーン関数とその空間微分である。この式を以下のように書き換える。

$$u_i(t) = \int_{-\infty}^{\infty} m_j(\tau)\Gamma_{ij}(t-\tau)d\tau \quad (2)$$

ここで

$$m_j = [F_1, F_2, F_3, M_{11}, M_{22}, M_{33}, M_{12}, M_{23}, M_{31}] \quad (3)$$

$$\Gamma_{ij} = [G_{i1}, G_{i2}, G_{i3}, G_{i1,1}, G_{i2,2}, G_{i3,3}, G_{i1,2} + G_{i2,1}, G_{i2,3} + G_{i3,2}, G_{i3,1} + G_{i1,3}] \quad (4)$$

である。さらに $m_j(t)$ を基底関数 $s(t)$ を用いて以下のよ

Fig. 1. Very-long-period seismic signals observed at various volcanoes: (a) Kilauea, Hawaii, on February 1, 1996 [Dawson *et al.* (1998)], (b) Miyakejima, Japan, in July-August, 2001 [Kumagai *et al.* (2001)], (c) Asama volcano, Japan, on September 23, 2004 [Ohminato *et al.* (2006)], (d) Hachijojima, Japan, on August 26, 2002 [Kumagai *et al.* (2003)].

Fig. 2. (a) Long-period event observed at Kusatsu-Shirane volcano, Japan, on September 14, 1992. (b) Tremor observed at Guagua Pichincha volcano, Ecuador, on February 19, 2003.

うに表わす.

$$m_j(t) = \int a_j(\tau) s(t-\tau) d\tau \quad (5)$$

ここで a_j は基底関数の係数である. (2) 式を (3)~(5) 式を用いて離散化した式を観測方程式として, 残差を最小化する線形自乗法 [例えば, Menke (1989)] により, $m_j(t)$ を求める [Ohminato *et al.* (1998), Nakano *et al.* (2003)]. 基底関数としては, 振動やステップも柔軟に表現できる以下の one-cycle cosine 関数が用いられる場合が多い.

$$s(t) = \frac{1}{2} \left[1 - \cos \left(\frac{2\pi t}{t_p} \right) \right], 0 < t < t_p \quad (6)$$

震源位置は空間のグリッドサーチにより推定される. このインバージョン手法は, シングルフォース 3 成分とモーメントテンソル 6 成分を, 独立して時間関数として推定できるという点で, 火山性地震の複雑な震源過程を表現できる. しかしながら, 安定して解を求めるためには, 震源を囲む多くの観測点 (10 点以上) が必要となることや, (2) 式で表わされる巨大なマトリックスを解く必要性から計算に時間がかかるという問題点がある.

これらの問題点に関しては, 以下の解決策が示されている. Nakano and Kumagai (2005a) は, クラックあるいはパイプといった震源の形状として可能性があるものを仮定した上でインバージョンを行い, それぞれの形状の妥当性を情報量基準 (AIC) [Akaike (1974)] により評価するという手法を提案した. これにより, 少ない観測点からでも安定して解を推定することが可能である. ただし, 震源が完全なクラックやパイプで表わされるとは限らないので, この手法は, 十分な観測点からのデータがない時に, 最もありそうな解を推定するために使う実際的なものとみなすべきである. 一方, Auger *et al.* (2006) は, 周波数領域でのインバージョンを行うことにより, 大幅に計算時間を短くできることを示した. 時間領域ではコンボリューションで表わされる (2) 式は, 周波数領域では掛け算となり, 各周波数成分は独立となる. これにより各周波数成分は小さな行列を解くことによって推定できるので, 時間領域での巨大な行列を解く必要がなくなる. また震源時間関数は, 推定された周波数成分の逆フーリエ変換によって直接求められるので, 時間領域のインバージョンで用いた基底関数を導入する必要がない. これらにより, 周波数領域でのインバージョンは, 時間領域のそれに比べ, 200 倍程度高速化できる [Auger *et al.* (2006)].

火山性地震の有限震源に対するインバージョン手法の開発は, Nakano *et al.* (2007) により行われた. この手法では, クラック面上に点震源を配置し, 各点の震源関

数を, まわりの解との平滑化制約とともに周波数領域のインバージョンにより推定する. 平滑化パラメータは, ベイズ型情報量基準 (ABIC) [Akaike (1980)] により評価する. この手法により, 励起や振動の時空間変化が推定できることが数値実験から示されている.

3.2 グリーン関数

波形インバージョンにより適切な解を得るためには, グリーン関数を正しく計算する必要がある. 火山においては, 急峻な地形や不均質構造を考慮しなければならず, 水平成層構造のための離散波数法 [例えば, Chouet (1982)] は限られた状況にしか用いることができない. 一方, 有限差分法 [Ohminato and Chouet (1997), Ripperger *et al.* (2003)] は地形と不均質構造を同時に扱えることから, 火山地震学におけるグリーン関数の計算に用いられてきた.

有限差分法は火山地震学におけるグリーン関数の計算にとっては大変有効な手法であるが, 大量のメモリーを必要とするとともに, 計算に時間がかかるという欠点がある. Ohminato and Chouet (1997) は, 波形計算精度を保つために, P 波の 1 波長に対して最低 25 グリッド含むグリッドサイズを使うという基準を示している. これは, 周期 10 秒の波形に対して, P 波速度を 3500 m/s とした場合に, 1400 m となるが, グリーン関数としてはさらに短周期 (短波長) まで必要となるため, 数百 m 以下のグリッドサイズを用いなければならない. さらに計算領域の境界での反射波による影響を除くためには, 波長より 10 倍程度大きい領域が必要となる. この場合, 必要なメモリーは数 G バイトで, 計算時間はグリーン関数の 1 ノードポイントの 1 成分を計算するのに数時間である (Intel Xeon 3 GHz を用いた場合). このような計算を, グリッドサーチのための多くのノード点において行うことは, 限られた CPU だけでは現実的な時間では実行できない.

この問題は, 相反定理 [例えば, Aki and Richards (2002)] を用いることにより, ある程度解決することが可能である. 相反定理を用いることにより, 各観測点を震源とした場合のシングルフォース 3 成分の波動場から, 境界を除いた全領域でのグリーン関数とその空間微分を求めることができる [例えば, Chouet *et al.* (2005)]. これにより, 計算時間は大幅に短縮できるが, それにしても, 1 観測点 (3 成分) に対してのべば 1 日程度の計算時間が必要であり, 仮に観測点が 10 点ある場合はその 10 倍であるため, 複数の CPU を用いないと現実的には困難を伴う.

3.3 波形インバージョンによるメカニズム推定

可搬型広帯域地震計による火山体における高密度地

震観測が可能になったこと、さらに火山地震学に適した波形インバージョンおよびグリーン関数の計算手法の開発が進んだことにより、多くの火山で波形インバージョンを用いた震源メカニズムの推定が行われるようになった。阿蘇 [Kaneshima *et al.* (1996), Kawakatsu *et al.* (2000), Legrand *et al.* (2000)], キラウエア [Dawson *et al.* (1998), Ohminato *et al.* (1998)], ストロンボリ [Chouet *et al.* (1999), Chouet *et al.* (2003)] には、10~20 点の広帯域地震観測点が配置され、VLP シグナルの波形インバージョン解析が行われた。また LP イベントにも波形インバージョンが適用された [例えば, Kumagai *et al.* (2002a), Nakano *et al.* (2003)]。

波形インバージョンの例として, Chouet *et al.* (2003) による, ストロンボリ火山の VLP シグナルの結果を紹介する。彼らは, 点震源を仮定した時間領域の波形インバージョン手法 [Ohminato *et al.* (1998)] により, 18 台の広帯域地震計で観測された VLP シグナルを用いて, モーメントテンソル 6 成分とシングルフォース 3 成分の時間関数を推定した。グリーン関数は, 40 m のグリッドサイズでメッシュ化された地形と均質速度・密度構造を用いて計算された。観測された VLP シグナルの卓越周期は 10 秒であり, その波長は 10 km を超えるため, 不均質構造の影響は無視できる。推定された時間関数を Fig. 3 に, モーメントテンソルの固有ベクトルを Fig. 4 に示す。なお震源はグリッドサーチにより, 火口の下 220 m と決まった。モーメント時間関数 (Fig. 3) は, 体積変化成分が卓越し, 膨張・収縮・再膨張という時間変化を示している。さらにこの体積変化に伴い, 上下方向のシングルフォースが卓越している。モーメントテンソルは, 固有ベクトルの振幅比が 1 : 1 : 2 となり, その最大ベクトルの方向は鉛直から 63° 傾斜している (Fig. 4)。この振幅比は, ポアソン比 (ν) が 1/3 の場合の開口クラッ

Fig. 3. Source-time functions of six moment tensor and three single force components estimated by waveform inversion of VLP signals observed at Stromboli volcano, Italy [Chouet *et al.* (2003)].

クに対応する [Ohminato *et al.* (1998)]. 融点近傍の岩石においては $\nu = 1/3$ となる。よって, これらの結果から, Chouet *et al.* (2003) は, 傾斜したダイク内でのマグマの移動に伴う体積変化によって, VLP シグナルが発生したと考えた。

世界各地の火山での VLP および LP シグナルの波形インバージョン結果を Table 1 にまとめた。噴火に伴う VLP および LP シグナル (Table 1 では EX と表記) を除いては, 多くの震源でクラックを示すモーメントテンソルが推定されており, VLP および LP シグナルの震源として, クラックメカニズムが重要な役割を果たしていることが分かる。さらに, クラック内の流体としてはマグマおよび熱水が推定されている。シングルフォースは, 噴火に伴う VLP シグナルにおいて推定されている。これは, 噴火による物質の放出に伴う下向きの反作用として解釈できる [Kanamori *et al.* (1984)]。また, 物質の放

Fig. 4. (a) Plot of eigenvectors for the moment tensor solution shown in Fig. 3. No distinction is made between expansion and contraction. (b) The three eigenvectors obtained from measurements of the maximum peak-to-trough amplitudes in the individual moment tensor components in Fig. 3 [Chouet *et al.* (2003)].

Table 1. Summary of source processes of volcano-seismic signals. In “Event type”, EX represents VLP and LP events associated with eruptions.

Event type	Volcano	Period (s)	Mechanism	Moment (Nm)	Force (N)	Geometry	Fluid	Reference
VLP	Usu, Japan	10	MT	10^{13}		Isotropic	Magma	Yamamoto <i>et al.</i> (2002)
VLP	Miyake, Japan	50	MT	10^{17}		Crack	Magma	Kumagai <i>et al.</i> (2001)
VLP	Hachijo, Japan	10	MT	10^{17}		Crack	Magma	Kumagai <i>et al.</i> (2003)
VLP	Kilauea, Hawaii	10	MT+SF	10^{14}	10^9	Crack	Magma	Ohminato <i>et al.</i> (1998)
VLP	Stromboli, Italy	10	MT+SF	10^{12}	10^8	Crack	Magma	Chouet <i>et al.</i> (2003)
VLP	Merapi, Indonesia	10	MT	10^{11}		Crack	Magmatic gas	Hydayat <i>et al.</i> (2002)
VLP	Popocatepetl, Mexico	50	MT+SF	10^{13}	10^8	Cracks (dike and sill)	Magma	Chouet <i>et al.</i> (2005)
VLP	Aso, Japan	10	MT	10^{11}		Isotropic and Crack	Hydrothermal	Yamamoto <i>et al.</i> (1999) Legrand <i>et al.</i> (2000)
VLP	Iwate, Japan	10	MT	10^{13}		Crack	Hydrothermal and/or magma	Nishimura <i>et al.</i> (2000)
VLP	Satsuma-Iwojima, Japan	5	MT+SF	10^{11}	10^7	Crack	Hydrothermal	Ohminato (2006)
VLP	St. Helens, USA	10	MT+SF	10^{12}	10^8	Cracks (dike and sill)	Magma	Waite <i>et al.</i> (2008)
LP	Kilauea, Hawaii	2	MT+SF	10^{12}	10^9	Crack	Hydrothermal	Kumagai <i>et al.</i> (2005)
LP	Asama, Japan	1	MT	10^{18}		Crack	Hydrothermal	Aoyama and Takeo (2001)
LP	Kusatsu-Shirane, Japan	1	MT	10^{10}		Crack	Hydrothermal	Kumagai <i>et al.</i> (2002a)
LP	Etna, Italy	2	MT	10^{12}		Crack	?	Lokmer <i>et al.</i> (2007)
LP	St. Helens, USA	2	MT+SF	10^{13}	10^{10}	Crack	Hydrothermal	Waite <i>et al.</i> (2008)
EX	Asama, Japan	2	MT+SF	10^{13}	10^{10}	Isotropic	Magma	Ohminato <i>et al.</i> (2006)
EX	Sakurajima, Japan	2	MT	10^{11}		Isotropic and cylinder	Magma	Tameguri <i>et al.</i> (2001, 2002)
EX	Sakurajima, Japan	10	MT	10^{13}		Cylinder	Magma	Uhira and Takeo (1994)

出を伴わない内部プロセスによるシグナルからも、シングルフォースが推定されている。震源領域で物質の移流がある場合には、シングルフォースが発生することが理論的に示されており [Takei and Kumazawa (1994)], 推定されたシングルフォースはマグマあるいは熱水の流れによるものと解釈されている。

§ 4. モデリング

火山性地震の観測波形や推定されたメカニズムを定量的に解釈するために、これまでに、様々なモデルの構築が進められてきた。ここでは、その中で重要と考えられる3つのモデルを述べる。それらは、流体と固体の相互作用がある系の振動、マグマ内での気泡成長過程、さらに気泡成長に伴うマグマの圧力上昇による脆性破壊・癒着過程に関するモデルである。

4.1 クラックモデル

Aki *et al.* (1977) は、LP イベントや微動に見られる振動波形は、震源にある流体に満たされたクラックの振動によって発生すると考えた。さらに彼らは、固体中にある流体に満たされたクラックの運動を、有限差分法を用いて解くというアプローチを示した。当時、まだ十分な観測と解析結果が得られていない段階で、震源としてクラックを考えたこと、さらに差分法を使うという具体的手法まで提示したことは、その後の研究に大きな影響を与えた。しかしながら、Aki *et al.* (1977) では、流体の運動方程式を解いていなかったため、彼らの結果は不十分なものだった。その後、流体の運動方程式を解く3次元のクラックモデルが Chouet (1986, 1988, 1992) により確立された。Chouet の数値計算や、Ferrazzini and Aki (1987) による理論的考察から、固体中の流体に満たさ

れたクラックでは、流体の音速よりも遅い波が存在することが分かった。そしてこれは、クラック波と呼ばれた。LP イベントや微動の振動周波数を、球状のマグマや熱水だまりの音波の振動によって解釈すると、とてつもなく大きな共鳴体を考えなければならないが、このゆっくりとしたクラック波により、現実的な共鳴体のサイズで観測周波数を説明できることが指摘された。

クラックモデルでは、固体中の有限の大きさの流体に満たされたクラックを考え、固体の運動方程式と構成方程式、流体の運動方程式と連続の式をカップルさせて、固体-流体系の運動を解く（クラックモデルの理論に関しては Kumagai (2009) によるレビューが詳しい）。Chouet (1986, 1988, 1992) は、この問題を有限差分法に基づき数値的に解く手法を開発した。さらに Kumagai and Chouet (1999) は、Chouet のクラックモデルを用いて、世界各地の火山で観測される LP イベントの Q 値の大きなばらつきが、クラック内の流体の種類の違いにより説明できる可能性があることを示した。この考えに基づき Kumagai and Chouet (2000, 2001) は、様々なマグマ・熱水性の流体に満たされたクラックの振動特性を系統的に調べた。Kumagai (2006) は、Chouet (1986) のクラックモデルを拡張し、クラック内の流体の音速および密度が不均質な場合の計算手法を示した。また、Yamamoto and Kawakatsu (2008) は、境界積分法に基づき、差分法よりも正確でかつ高速なクラック振動の計算手法を開発した。

クラックモデルに基づく観測データの解釈は、90 年代から進められていたが [例えば Chouet *et al.* (1994), Gil Cruz and Chouet (1997)], 当時はまだ LP イベントの震源としてクラックが適切かどうかの議論が続いていた。その後、波形インバージョンに基づく研究により、LP および VLP イベントの震源としてクラックが適当であることが示されたこと、また先に述べたクラックモデルの振動特性の解明が進んだことにより、様々な火山での LP および VLP イベントの観測データについて、クラックモデルに基づく解釈が進められた。その例として、エクアドル・トングラワ火山で観測された LP イベントの研究を紹介する [Molina *et al.* (2004)]. Fig. 5 には、トングラワ火山の LP イベントから推定された周波数と Q 値の時間変化を示した。周波数は 3.5 Hz から 2 Hz へと徐々に減少する一方で、 Q 値は百から数百の間で大きくばらつくものの、増加する傾向を示している。 Q 値がこのような大きな振動は、クラックモデルに基づく、クラック内の流体として微細粒子を含む噴霧流体しか実現できない [Kumagai and Chouet (2000)]. Fig. 5 に示されたように、噴霧流体を含むクラックモデルから予測さ

れた周波数と Q 値は、ガスの体積分率を徐々に減少させることにより、観測された周波数と Q 値の時間変動を説明できることが分かる。このような解析・解釈が多く火山で進められた結果、クラック内の流体としては、噴霧流体の他に、熱水性流体 [Kumagai *et al.* (2002b), Nakano and Kumagai (2005b), Yamamoto (2005)] や玄武岩質マグマ [Kumagai *et al.* (2003), Kumagai (2006)] といった様々な種類の流体が関与していることが示された。このことは、火山において、クラック振動が、どのような流体においても発生する基本的な現象であることを示唆している。

4.2 気泡成長のダイナミクス

波形インバージョンの結果が示すように、VLP イベントのメカニズムの多くはクラック状のマグマ溜まりや熱水系の体積変化、特に体積膨張であると考えられる (Table 1)。このような震源における圧力源としてマグマ中の気泡の成長のダイナミクスをモデル化し、VLP イベントの震源プロセスを解釈する研究が行われている。Prousevitch *et al.* (1993) は発泡流体における泡の膨張の問題について、マグマシステムに適用できる形での定式化を行った。発泡流体として、揮発性成分に飽和したメルトと泡から構成されるマグマを考える (Fig. 6a)。泡との境界におけるメルト中の揮発性成分の濃度 C_w は、泡の内部の圧力 P_{gas} を用いてヘンリーの法則により次の式で表される。

$$C_w = (K_h P_{gas})^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

ここで K_h はヘンリー一定数である。減圧や温度上昇、結

Fig. 5. Temporal variations in frequency and Q determined for LP events at Tungurahua, Ecuador. The solid lines show the best fits of frequency and Q calculated for a crack containing ash-gas mixture at various pressures between 25 and 75 MPa [Molina *et al.* (2004)].

晶の晶出などによってメルトが揮発性成分に過飽和になると、揮発性成分はメルトから泡へと流出し泡が膨張する (Fig. 6b)。メルト中の揮発性成分は濃度勾配に応じて拡散するが、泡の膨張によって周囲のメルトは半径方向に縮むために濃度勾配が大きくなるため、揮発性成分の泡への流出が加速される。このような効果によって膨張する泡の bulk viscosity (体積粘性率) は負になり [Lensky *et al.* (2002)], 泡の膨張は加速度的に進行する。メルトが揮発性成分を十分に放出して過飽和状態を解消すると泡の膨張は終了する (Fig. 6c)。

Prousevitch *et al.* (1993) はマグマが自由に膨張できる場合を仮定したが、Nishimura (2004) および Shimomura *et al.* (2006) はより現実的な状況として、クラック状のマグマ溜まりに封入されたマグマの膨張について考えた。減圧によって泡が膨張するとマグマ溜まりの圧力は回復し、容易に減圧前よりも高くなる。従ってこの圧力増加による体積膨張が VLP シグナルとして観測されると考えられる。Chouet *et al.* (2006) は同様の問題設定において泡の膨張の時間変化を計算し、VLP シグナルの観測波形との比較を行った。このような泡の膨張のタイムスケールと回復する圧力は、初期状態における泡のサイズや数密度、揮発性成分の濃度、メルトの粘性率などのパラメータに大きく依存する。したがって、これらの理論と VLP シグナルの観測データを比較することで、震源におけるマグマのパラメータを推定することができると期待される。一方、泡の膨張のタイムスケールは数十秒から 1000 秒程度の値をとるので [Shimomura *et al.* (2006)], より広帯域の観測が必要である。なお、発泡性流体のダイナミクスとその火山物理への応用に関しては Ichihara and Nishimura (2009) によるレビューが詳しい。

4.3 マグマの脆性破壊・癒着過程

高温で延性的なマグマにおいて、地震波を励起する急激な (instantaneous) プロセスを起こすことは、パラドックス的な問題である。これに対して、Goto (1999) は、マグマの流れに伴い脆性破壊が起こる可能性を指摘した。延性的なマグマといえども、歪速度が大きく粘性が高い場合は、強度を超えて脆性破壊が起こり得る。歪速度を $\dot{\epsilon}$ 、粘性率を η とする時に、 $\dot{\epsilon} \times \eta$ が $10^7 \sim 10^8$ Pa 以上で脆性破壊が起こることが実験的に知られている [Webb and Dingwell (1989, 1990)]。Goto (1999) は、1991～1995 年の雲仙火山の噴火について、マグマの噴出率から推定した火道内の歪速度を用いて、脆性破壊が起こるマグマの粘性率として $10^{11.5}$ Pa s を得た。さらに雲仙の噴火から得られたサンプルの実験室での測定から、この粘性率が火道内のマグマで十分あり得る値であること

Fig. 6. A model of bubble growth. The upper drawings are schematic views of a bubble in the melt. The lower graphs show schematic diagrams of volatile concentration in the melt. (a) Initially, the bubble is small with a radius R_0 . The volatile concentration in the melt is uniform at a saturation level (c_0). (b) When bubble growth begins after a sudden decompression, the volatile becomes supersaturated in the melt. Accordingly, the volatile in the melt exsolves into the bubble and the bubble grows. Throughout bubble growth, the melt is stretched with a constant volume. (c) Finally, the volatile concentration in the melt and the gas pressure in the bubble reach equilibrium, and the bubble stops growing. [modified after Prousevitch *et al.* (1993)].

を示した。

その後この考えを支持する結果が、フィールド調査から得られた。Tuffen *et al.* (2003) および Tuffen and Dingwell (2005) は、アイスランドで見つかった、6 万年前の流紋岩質マグマの火道の露頭からサンプルを採集し、その組織を調べた。その結果、マグマ内で繰り返し破壊が起こり、それらが癒着している構造が見られることが分かった。さらに破壊の跡であるベインは、マグマ起源の細粒な粒子に満たされていた。このことから、Tuffen らは、マグマ内で脆性破壊が起こり、破碎により微細粒子が形成されたと考えた。さらにマグマの延性変形により破断面の癒着が起こることで、脆性破壊が繰り返し発生すると考えた。そして、このマグマの脆性破壊・癒着過程が、LP イベントなどを繰り返し発生させるメカニズムである可能性を示した。

マグマ起源の微細粒子とガスからなる噴霧流体が、LP イベントの振動源の流体として関与していることは、Gil Cruz and Chouet (1997) や Molina *et al.* (2004) (Fig. 5) により指摘されている。さらに Tuffen *et al.* (2003) は、ベインを埋める粒子サイズが、Kumagai and Chouet (2000) により推定された継続的なクラック振動を起こす粒子サイズとよく合うことを指摘している。Gil Cruz and Chouet (1997) や Molina *et al.* (2004) は、マグマの破碎によって生じた噴霧流体が、マグマの外側にある割れ目の振動を引き起こすと考えた。一方 Neuberg *et al.* (2006)

は、マグマの脆性破壊によって、火道全体の振動が励起されると考えた。このマグマの脆性破壊・癒着過程は、マグマシステムでのLPイベント等の励起過程として、有力なメカニズムと考えられる。

§ 5. 議 論

ここまで見てきたように、90年代以降の火山地震学においては、観測（広帯域地震計の導入）・解析（波形インバージョン手法の開発）・モデリング（物理モデルの進展）の3分野が相互にリンクして、VLPおよびLPシグナルの震源の定量化が大きく進んだ。この3分野すべてに、多くの日本人研究者が本質的に貢献していることは特筆すべきであろう。波形インバージョンの結果は、震源として体積変化を伴うクラックが多くの火山で示されている。VLPおよびLPシグナルは多様な波形の特徴を示すが、その震源がクラックの体積変化という単純なメカニズムで説明できることは興味深い。古くから、振動体の形状に関して、クラックの他、球体[Crosson and Bame (1985), Fujita *et al.* (1995), Sakuraba *et al.* (2002)]やパイプ[Chouet (1985)]などが提唱され、様々な議論があったが、近年の震源の定量化がこの議論にある程度の決着を付けたと言えるだろう。地震学においても、地震の発生メカニズムが断層すべりであるという統一的概念が確立するまでに長年の論争があったが、火山地震学においても、近年の研究の進展により、クラックの体積変化という統一的概念が確立しつつあると言えるだろう。

VLPおよびLPシグナルの発生メカニズムが、クラックの体積変化である程度説明できる一方で、その震源に関与する流体はマグマや熱水など様々な種類が推定されている。このことは、火山で発生する地震が、マグマ活動だけでなく、熱水活動、あるいはそれらの相互作用によって発生していることを示している。マグマ・熱水流体において、体積変化を起こすプロセスとしては、液相から気相への相変化および揮発成分の離溶が重要な役割を果たしていると考えられる。相変化や揮発成分の離溶を起こすために、組成が変化しないと仮定すると、温度・圧力条件の変化が必要である。マグマにおいてはその上昇による圧力低下、熱水においてはマグマからの高温ガスの流入による温度上昇が、相変化および離溶を起こす基本的なプロセスと考えられる。マグマの主要な揮発性成分は水であり、4.2で見たように、マグマに溶け込める水の量はヘンリー則で表わされる圧力依存を持つため、発泡が起こる深さは、マグマの組成と初期含水量に依存して変化する。よって、マグマが関与するVLPやLPシグナルが発生する深さは、マグマの組成と初期含

水量と深く関係していると考えられる。マグマの組成が岩石学的に推定できるとすれば、VLPやLPシグナルが発生する深さから、マグマの初期含水量を推定できる可能性がある。マグマの初期含水量は、マグマの上昇速度とともに、噴火に至る破砕プロセスを決める重要な物理量である。

波形インバージョンから推定されたメカニズムと震源時間関数は、震源プロセスを解明するための制約を与えている。震源時間関数を解釈するための気泡成長のダイナミクスに基づいた定量的なモデルが構築されつつあるが、数多くのパラメータが存在し、その値には不確定性が高い。これらのパラメータの値に制約を与えるためには、高温・高圧下におけるマグマの物性測定などの実験的なアプローチが不可欠であり、今後、この分野との連携が必要である。また、メカニズムに関しては、モーメントテンソルは、多くがクラックの体積変化を示すのに対して、シングルフォースは不明な点が多い。噴火に伴う地震を除いて、シングルフォースが観測波形を説明する寄与は10%程度と小さい上に、シングルフォースは、震源の誤位置や構造の不確定性の影響を受けやすく[例えば Ohminato *et al.* (1998)], 見かけ上の成分として現れる可能性がある。そのため、シングルフォースが震源過程においてどの程度の役割を果たしているのか、まだ分からない点が多く、今後さらに研究を進める必要がある。

LPおよびVLPシグナルの調和減衰振動波形の解析とクラックモデルに基づく解釈からは、流体の種類と組成およびクラックの大きさの推定が可能なが示されている。クラック振動には様々なモードがあることや、クラックモデルのパラメータにはトレードオフがあるため、組成や形状を一意に決めることは困難である。しかしながら、これまでの研究は、クラック振動に関与する流体は様々なものがあり、サイズも数百mから数kmまでと、このような振動が普遍的なものであることを示している。特に、振動特性から流体の種類と組成が推定できることの意義は大きい。上述のマグマの初期含水量の推定の可能性と合わせて、これらは、地震学が、マグマや熱水の化学情報を直接推定できる可能性を示しており、岩石学や地球化学的研究との有機的な連携を可能とするからである。なお、クラックモデルの適用は、VLPおよびLPイベントの中でも、比較的単純な波形の特徴を示すものに限られており、微動などの複雑な波形の特徴を示すものにも適用可能なのかは、今後の研究が必要となっている。

VLPおよびLPシグナルの定量化は進んだが、短周期波形については、グリーン関数の計算に微細地形や不均

質構造を考慮しなければならず、波形インバージョン手法に基づく研究は筆者らが知る限りない。そのため、発生メカニズムに関しては不明な点が多い。短周期波形の解析に関しては、アレーデータ [例えば Almendros *et al.* (2001a, 2001b), Metaxian *et al.* (2002)] や振幅 [例えば Battaglia and Aki (2003)] を用いた手法により、立ち上がりの読み取りが困難な波形に関しての震源位置の推定が行われている。震源の時空間分布と、火山体構造や噴火活動との比較を通して、現象面から発生プロセスに関する制約を進めていく必要があろう。また微動は、短周期から超長周期帯まで幅広く観測されるが、その理解は十分に進んでいない。微動の発生モデルとして、流体の流れによる非線形振動 [Julian (1994)] や気液二相流の振動 [Fujita *et al.* (2004), Iwamura and Kaneshima (2005)] などが提唱されており、今後の検証が必要な段階である。

上述のように、火山の地下で起きる熱水やマグマの活動を地震波から定量的に推定することが可能となったことにより、地質学・岩石学や地球化学との連携の道が切り開かれた。今後、これらの分野からの結果の相互検証を通して、マグマの移動や噴火過程、さらには熱水活動に関する総合的な描像を構築していくことが重要である。また火山の観測に関しては、高密度・広帯域・高ダイナミックレンジでの地震観測とともに、GPS・傾斜計・空振計・ガスセンサー等を用いた多項目観測を進めていくことが必要である。GPS・傾斜計から推定される中長期のマグマの移動・蓄積過程や、空振計・ガスセンサーにより推定される噴火過程や揮発性成分の変動など、多項目の観測データの解析・解釈を通して、火山地震学によるモデルの検証と理解をさらに進めることが可能となる。さらに定量解析手法を火山モニタリングの高度化に活用することは、すでにいくつかの火山で進んでいるが [Dawson *et al.* (2004), Auger *et al.* (2006), Kumagai *et al.* (2007)], これは、火山災害軽減に向けた火山地震学が積極的に取り組むべき課題である。経験や現象の変化に頼るだけでなく、現象の理解を含めた監視がより適切な予測へと繋がると考えられる。例えば、観測された活動が、熱水なのかマグマによるものかが分かることは、その後の活動予測に大きな制約を与えることができるだろう。この方向で今後火山地震学が果たす役割は大きい。

文 献

- Akaike, H., 1974, A new look at the statistical model identification, *IEEE Trans. Autom. Contr.*, **9**, 716-723.
- Akaike, H., 1980, Likelihood and the Bayes procedure, in "Bayesian Statistics", ed. by J. M. Bernardo *et al.*, Univ. Press, Valencia, Spain, 143-166.
- Aki, K. and P. G. Richards, 2002, *Quantitative Seismology*, 2nd ed., University Science Books, Sausalito, 700 pp.
- Aki, K., M. Fehler, and S. Das, 1977, Source mechanism of volcanic tremor: fluid-driven crack models and their application to the 1963 Kilauea eruption, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **2**, 259-287.
- Almendros, J., B. Chouet, and P. Dawson, 2001a, Spatial extent of a hydrothermal system at Kilauea Volcano, Hawaii, determined from array analyses of shallow long-period seismicity 1. Method, *J. Geophys. Res.*, **106**, 13565-13580.
- Almendros, J., B. Chouet, and P. Dawson, 2001b, Spatial extent of a hydrothermal system at Kilauea Volcano, Hawaii, determined from array analyses of shallow long-period seismicity 2. Results, *J. Geophys. Res.*, **106**, 13581-13597.
- Aoyama, H. and M. Takeo, 2001, Wave properties and focal mechanisms of N-type earthquakes at Asama volcano, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **105**, 163-182.
- Auger, E., L. D'Auria, M. Martini, B. Chouet, and P. Dawson, 2006, Real-time monitoring and massive inversion of source parameters of very long period seismic signals: An application to Stromboli Volcano, Italy, *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L04301, doi:10.1029/2005GL024703.
- Battaglia, J. and K. Aki, 2003, Location of seismic events and eruptive fissures on the Piton de la Fournaise volcano using seismic amplitudes, *J. Geophys. Res.*, **108**, 2364, doi:10.1029/2002JB002193.
- Chouet, B., 1982, Free surface displacements in the near field of a tensile crack expanding in three dimensions, *J. Geophys. Res.*, **87**, 3868-3872.
- Chouet, B., 1985, Excitation of a buried magmatic pipe: A seismic source model for volcanic tremor, *J. Geophys. Res.*, **90**, 1881-1893.
- Chouet, B., 1986, Dynamics of a fluid-driven crack in three dimensions by the finite difference method, *J. Geophys. Res.*, **91**, 13,967-13,992.
- Chouet, B., 1988, Resonance of a fluid-driven crack: Radiation properties and implications for the source of long-period events and harmonic tremor, *J. Geophys. Res.*, **93**, 4375-4400.
- Chouet, B., 1992, A seismic model for the source of long-period events and harmonic tremor, in: "Volcanic Seismology", ed. by P. Gasparini, R. Scarpa, and K. Aki, Springer, New York, 133-156.
- Chouet, B. A., 1996, New methods and future trends in seismological volcano monitoring, in "Monitoring and Mitigation of Volcano Hazards", ed. by R. Scarpa and R.I. Tilling, Springer, Berlin, 23-97.
- Chouet, B. A., R. A. Page, C. D. Stephens, J. C. Lahr, and J. A. Power, 1994, Precursory swarms of long-period events at Redoubt Volcano (1989-1990), Alaska: Their origin and use as a forecasting tool, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **62**, 95-135.
- Chouet, B., G. Saccorotti, P. Dawson, M. Martini, R. Scarpa, G. De Luca, G. Milana, and M. Cattaneo, 1999, Broadband measurements of the sources of explosions at Stromboli Volcano, Italy, *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 1937-1940.
- Chouet, B., P. Dawson, T. Ohminato, M. Martini, G. Saccorotti, F. Giudicepietro, G. De Luca, G. Milana, and R. Scarpa,

- 2003, Source mechanisms of explosions at Stromboli Volcano, Italy, determined from moment-tensor inversions of very-long-period data, *J. Geophys. Res.*, **108**, 2091, doi:10.1029/2002JB001919.
- Chouet, B., P. Dawson, and A. Arciniega-Ceballos, 2005, Source mechanism of Vulcanian degassing at Popocatepetl Volcano, Mexico, determined from waveform inversions of very long period signals, *J. Geophys. Res.*, **110**, B07301, doi:10.1029/2004JV003524.
- Chouet, B., P. Dawson, and M. Nakano, 2006, Dynamics of diffusive bubble growth and pressure recovery in a bubbly rhyolitic melt embedded in an elastic solid, *J. Geophys. Res.*, **111**, B07310, doi:10.1029/2005JB004174.
- Crosson, R. S. and D. A. Bame, 1985, A spherical source model for low frequency volcanic earthquakes, *J. Geophys. Res.*, **90**, 10237-10247.
- Dawson, P. B., C. Dietel, B. A. Chouet, K. Homma, T. Ohminato, and P. Okubo, 1998, A digitally telemetered broadband seismic network at Kilauea Volcano, Hawaii, U. S. Geol. Surv. Open File Report, **98-108**, 1-121.
- Dawson, P., D. Whilldin, and B. Chouet, 2004, Application of near real-time radial semblance to locate the shallow magmatic conduit at Kilauea Volcano, Hawaii, *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L21606, doi:10.1029/2004GL021163.
- Ferrazzini, V. and K. Aki, 1987, Slow waves trapped in a fluid-filled infinite crack: Implication for volcanic tremor, *J. Geophys. Res.*, **92**, 9215-9223.
- Fujita, E., Y. Ida, and J. Oikawa, 1995, Eigen oscillation of a fluid sphere and source mechanism of harmonic volcanic tremor, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **69**, 365-378.
- Fujita, E., M. Ukawa, and E. Yamamoto, 2004, Subsurface cyclic magma sill expansions in the 2000 Miyakejima volcano eruption: Possibility of two-phase flow oscillation, *J. Geophys. Res.*, **109**, B04205, doi:10.1029/2003JB002556.
- Gil Cruz, F. and B. Chouet, 1997, Long-period events, the most characteristic seismicity accompanying the emplacement and extrusion of a lava dome in Galeras Volcano, Colombia, in 1991, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **77**, 121-158.
- Goto, A., 1999, A new model for volcanic earthquake at Unzen Volcano: Melt rupture model, *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 2541-2544.
- Hidayat, D., B. Chouet, B. Voight, P. Dawson, and A. Ratdomopurbo, 2002, Source mechanism of very-long-period signals accompanying dome growth activity at Merapi Volcano, Indonesia, *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 2118, doi:10.1029/2002GL015013.
- Ichihara, M. and T. Nishimura, 2009, Pressure impulses generated by bubbles interacting with ambient perturbation, in "Encyclopedia of Complexity and Systems Science", ed. by W. H. K. Lee, Springer, Berlin, in press.
- Iwamura, K. and S. Kaneshima, 2005, Numerical simulation of the steam-water flow instability as a mechanism of long-period ground vibrations at geothermal areas, *Geophys. J. Int.*, **163**, 833-851.
- Julian, B. R., 1994, Volcanic tremor: Nonlinear excitation by fluid flow, *J. Geophys. Res.*, **99**, 11859-11877.
- Kanamori, H., J. W. Given, and T. Lay, 1984, Analysis of seismic body waves excited by the mount St. Helens eruption of May 18, 1980, *J. Geophys. Res.*, **89**, 1856-1866.
- Kaneshima, S., H. Kawakatsu, H. Matsubayashi, Y. Sudo, T. Tsutsui, T. Ohminato, H. Ito, K. Uhira, H. Yamasato, J. Oikawa, M. Takeo, and T. Iidaka, 1996, Mechanism of phreatic eruptions at Aso volcano inferred from near-field broadband seismic observations, *Science*, **273**, 642-645.
- Kawakatsu, H. and M. Yamamoto, 2007, Volcano seismology, in "Treatise on Geophysics, vol. 4", ed. by H. Kanamori, Elsevier, Amsterdam, 389-420.
- Kawakatsu, H., S. Kaneshima, H. Matsubayashi, T. Ohminato, Y. Sudo, T. Tsutsui, K. Uhira, H. Yamasato, H. Ito, and D. Legrand, 2000, Aso94: Aso seismic observation with broadband instruments, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **101**, 129-154.
- Kumagai, H., 2006, Temporal evolution of a magmatic dike system inferred from the complex frequencies of very long period seismic signals, *J. Geophys. Res.*, **111**, B06201, doi:10.1029/2005JB003881.
- Kumagai, H., 2009, Quantification of the sources of volcano-seismic signals, in "Encyclopedia of Complexity and Systems Science", ed. by W. H. K. Lee, Springer, Berlin, in press.
- Kumagai, H. and B. Chouet, 1999, The complex frequencies of long-period seismic events as probes of fluid composition beneath volcanoes, *Geophys. J. Int.*, **138**, F7-F12.
- Kumagai, H. and B. A. Chouet, 2000, Acoustic properties of a crack containing magmatic or hydrothermal fluids, *J. Geophys. Res.*, **105**, 25,493-25,512.
- Kumagai, H. and B. A. Chouet, 2001, The dependence of acoustic properties of a crack on the resonance mode and geometry, *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 3325-3328.
- Kumagai, H., T. Ohminato, M. Nakano, M. Ooi, A. Kubo, H. Inoue, and J. Oikawa, 2001, Very-long-period seismic signals and caldera formation at Miyake Island, Japan, *Science*, **293**, 687-690.
- Kumagai, H., B. A. Chouet, and M. Nakano, 2002a, Waveform inversion of oscillatory signature in long-period events beneath volcanoes, *J. Geophys. Res.*, **107**, 2301, doi:10.1029/2001JB001704.
- Kumagai, H., B. A. Chouet, and M. Nakano, 2002b, Temporal evolution of a hydrothermal system in Kusatsu-Shirane Volcano, Japan, inferred from the complex frequencies of long-period events, *J. Geophys. Res.*, **107**, 2236, doi:10.1029/2001JB00653.
- Kumagai, H., K. Miyakawa, H. Negishi, H. Inoue, K. Obara, and D. Suetsugu, 2003, Magmatic dike resonances inferred from very-long-period seismic signals, *Science*, **299**, 2058-2061.
- Kumagai, H., B. A. Chouet, and P. B. Dawson, 2005, Source process of a long-period event at Kilauea volcano, Hawaii, *Geophys. J. Int.*, **161**, 243-254.
- Kumagai, H. *et al.*, 2007, Enhancing volcano-monitoring capabilities in Ecuador, *EOS, Trans. Am. Geophys. Union*, **88**, 245-246.
- Legrand, D., S. Kaneshima, and H. Kawakatsu, 2000, Moment tensor analysis of near-field broadband waveforms observed at Aso Volcano, Japan, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **101**,

- 155-169.
- Lensky, N. G., V. Lyakhovsky, and O. Navon, 2002, Expansion dynamics of volatile-supersaturated liquids and bulk viscosity of bubbly magmas, *J. Fluid Mech.*, **460**, 39-56.
- Lokmer, I., C. J. Bean, G. Saccorotti, and D. Patané, 2007, Moment-tensor inversion of LP events recorded on Etna in 2004 using constraints obtained from wave simulation tests, *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L22316, doi:10.1029/2007GL031902.
- Menke, W., 1989, *Geophysical data analysis: Discrete inverse theory*, Academic Press, London, 289 pp.
- Metaxian, J.-P., P. Lesage, and B. Valette, 2002, Locating sources of volcanic tremor and emergent events by seismic triangulation: Application to Arenal volcano, Costa Rica, *J. Geophys. Res.*, **107**, 2243, doi:10.1029/2001JB000559.
- Minakami, T., 1960, Fundamental research for predicting volcanic eruptions, Part 1, *Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo*, **38**, 497-544.
- Molina, I., H. Kumagai, and H. Yepes, 2004, Resonances of a volcanic conduit triggered by repetitive injections of an ash-laden gas, *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L03603, doi:10.1029/2003GL018934.
- 森田裕一・大湊隆雄, 2005, 火山における地震観測の発展と成果, *火山*, **50**, S77-S100.
- Nakano, M. and H. Kumagai, 2005a, Waveform inversion of volcano-seismic signals assuming possible source geometries, *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L12302, doi:10.1029/2005GL022666.
- Nakano, M. and H. Kumagai, 2005b, Response of a hydrothermal system to magmatic heat inferred from temporal variations in the complex frequencies of long-period events at Kusatsu-Shirane Volcano, Japan, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **147**, 233-244.
- Nakano, M., H. Kumagai, and B. A. Chouet, 2003, Source mechanism of long-period events at Kusatsu-Shirane Volcano, Japan, inferred from waveform inversion of the effective excitation functions, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **122**, 149-164.
- Nakano, M., H. Kumagai, B. Chouet, and P. Dawson, 2007, Waveform inversion of volcano-seismic signals for an extended source, *J. Geophys. Res.*, **112**, B02306, doi:10.1029/2006JB004490.
- Neuberg, J. W., H. Tuffen, L. Collier, D. Green, T. Powell, and D. Dingwell, 2006, The trigger mechanism of low-frequency earthquakes on Montserrat, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **153**, 37-50.
- Nishimura, T., 2004, Pressure recovery in magma due to bubble growth, *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L12613, doi:10.1029/2004GL019810.
- 西村太志・井口正人, 2006, 日本の火山性地震と微動, 京都大学学術出版会, 242 pp.
- Nishimura, T., H. Nakamichi, S. Tanaka, M. Sato, T. Kobayashi, S. Ueki, H. Hamaguchi, M. Ohtake, and H. Sato, 2000, Source process of very long period seismic events associated with the 1998 activity of Iwate Volcano, northeastern Japan, *J. Geophys. Res.*, **105**, 19135-19417.
- 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. and B. A. Chouet, 1997, A free-surface boundary condition for including 3D topography in the finite-difference method, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **87**, 494-515.
- Ohminato, T., B. A. Chouet, P. Dawson, and S. Kedar, 1998, Waveform inversion of very long period impulsive signals associated with magmatic injection beneath Kilauea Volcano, Hawaii, *J. Geophys. Res.*, **103**, 23839-23862.
- Ohminato, T., M. Takeo, H. Kumagai, T. Yamashina, J. Oikawa, E. Koyama, H. Tsuji, and T. Urabe, 2006, Vulcanian eruptions with dominant single force components observed during the Asama 2004 volcanic activity in Japan, *Earth Planets Space*, **58**, 583-593.
- Prousevitch, A. A., D. L. Sahagian, and A. T. Anderson, 1993, Dynamics of diffusive bubble growth in magmas: Isothermal case, *J. Geophys. Res.*, **98**, 22283-22307.
- Ripperger, J., H. Igel and J. Wasserman, 2003, Seismic wave simulation in the presence of real volcano topography, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **128**, 31-44.
- Sakuraba, A., J. Oikawa, and Y. Imanishi, 2002, Free oscillations of a fluid sphere in an infinite elastic medium and long-period volcanic earthquakes, *Earth Planets Space*, **54**, 91-106.
- Sassa, K., 1935, Volcanic micro-tremors and eruption-earthquakes, *Mem. Coll. Sci., Kyoto Imp. Univ. Series A*, **18**, 255-293.
- Shimomura, Y., T. Nishimura, and H. Sato, 2006, Bubble growth processes in magma surrounded by an elastic medium, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **155**, 307-322, doi:10.1016/j.jvolgeores.2006.04.003.
- Takei, Y. and M. Kumazawa, 1994, Why have the single force and torque been excluded from seismic source models?, *Geophys. J. Int.*, **118**, 20-30.
- Tameguri, T., M. Iguchi, and K. Ishihara, 2001, Reexamination of moment tensors for initial motion of explosion earthquakes using borehole seismograms at Sakurajima volcano, Japan, *Earth Planets Space*, **53**, 63-68.
- Tameguri, T., M. Iguchi, and K. Ishihara, 2002, Mechanism of explosive eruptions from moment tensor analyses of explosion earthquakes at Sakurajima volcano, Japan, *Bull. Volcanol. Soc. Jpn.*, **47**, 197-215.
- Tuffen, H. and D. Dingwell, 2005, Fault textures in volcanic conduits: evidence for seismic trigger mechanisms during silicic eruptions, *Bull. Volcanol.*, **67**, 370-387.
- Tuffen, H., D. B. Dingwell, and H. Pinkerton, 2003, Repeated fracture and healing of silicic magma generates flow banding and earthquakes?, *Geology*, **31**, 1089-1092.
- Uhira, K. and M. Takeo, 1994, The source of explosive eruptions of Sakurajima volcano, Japan, *J. Geophys. Res.*, **99**, 17775-17789.
- Waite G. P., B. A. Chouet, and P. B. Dawson, 2008, Eruption dynamics at Mount St. Helens imaged from broadband seismic waveforms: Interaction of the shallow magmatic and hydrothermal systems, *J. Geophys. Res.*, **113**, B02305,

- doi:10.1029/2007JB005259.
- Webb, S. L. and D. B. Dingwell, 1989, The onset of non-Newtonian rheology of silicate melts, *Phys. Chem. Min.*, **17**, 125-132
- Webb, S. L. and D. B. Dingwell, 1990, Non-newtonian rheology of igneous melts at high stresses and strain rates: Experimental results for rhyolite, andesite, basalt, and nephelinite, *J. Geophys. Res.*, **95**, 15695-15701.
- Yamamoto, M., 2005, Volcanic fluid system inferred from broadband seismic signals, 東京大学博士論文, 104 pp.
- Yamamoto, M. and H. Kawakatsu, 2008, An efficient method to compute the dynamic response of a fluid-filled crack, *Geophys. J. Int.*, **174**, 1174-1186.
- Yamamoto, M., H. Kawakatsu, S. Kaneshima, T. Mori, T. Tsutsui, Y. Sudo, and Y. Morita, 1999, Detection of a crack-like conduit beneath the active crater at Aso Volcano Japan, *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 3677-3680.
- Yamamoto, M., H. Kawakatsu, K. Yomogida, and J. Koyama, 2002, Long-period (12 sec) volcanic tremor observed at Usu 2000 eruption: Seismological detection of a deep magma plumbing system, *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 1329, doi:10.1029/2001GL013996.