

## マagma供給系の構造と噴火機構のモデル化

—地球物理観測からのアプローチ—

清水 洋\*

## Magma Supplying System and Modeling of Eruption Mechanism

—Approach from Geophysical Observations—

Hiroshi SHIMIZU\*

## 1. はじめに

火山噴火予知計画に基づく観測網の整備により、雲仙、有珠、三宅島など、最近の主な噴火に対しては、確実に前兆現象をとらえて事前に情報発信することができるようになった。しかし、噴火開始以降の活動推移予測は、依然として容易ではない。特に、2000年三宅島噴火のように活動が過去の事例から逸脱して新たな展開を見せた場合、経験的予測手法では限界があり、マagmaの物理・化学モデルに立脚した定量的な予測手法の開発が必要である。

ここでは、火山活動の定量的予測の基礎となる火山体およびマagma供給系の構造と噴火機構のモデル化について、地球物理観測に基づく最近の研究成果のうち地震学的手法によるものを中心に概観し、課題と展望を述べる。

## 2. マagma供給系の構造

火道やマagma溜りなどのマagma供給系の構造解明を主目的として、火山体構造探査実験が第5次計画から年次的に実施されてきた。その結果、火山体下で高速度域が浅く盛り上がるという伊豆大島や磐梯山で見出された特徴(植木, 1990)が、他の火山においても確かめられ(たとえば、筒井・他, 1996; Tanaka *et al.*, 2002)、多くの火山に共通の特徴であることが明らかになった。これらは過去にマagmaが浅部に向けて上昇・固化した貫入岩体で

あると解釈されるなど、深さ3 km程度より浅部の基本的・一般的な火山体内部構造モデルが得られた。また、これらの探査と並行して、火山体のように強度に不均質な媒質に適用可能なトモグラフィー手法(Nishi, 2001)が開発されて雲仙火山に適用され、地殻変動から推定された圧力源の一つ(A-Source)に対応する低速度域が見出された(Nishi, 2002)。この圧力源は、噴火活動にともなって発生した孤立型微動の震源域(清水, 1992)とも一致している。岩手山においては、3次元速度構造を用いた震源決定法が開発が行われ、トモグラフィーで得られた構造を用いて震源再決定を実施したところ、地震活動が高速度の貫入岩体の周辺に集中的に発生している様子が明らかになった(Takana *et al.*, 2002) (Fig. 1)。これらの結果は、地震や微動の発生がマagma供給系と密接に関係していることを示しており、これらの地震・微動の発生機構の解明とそれに基づく噴火機構の研究の進展につながるものとして注目される。このように、これまでの火山体構造探査実験を通じて、火山体浅部における比較的長波長の不均質構造のイメージング手法が確立され、不均質構造とマagma活動との関連性が議論できるようになったことは、火山性地震・微動・爆発などの発生場の解明に向けて大きな進歩であった。

しかし一方で、本来の目的であったマagma供給系の構造解明という点では、問題点や課題も明らかになった。第一はイメージングの分解能の不足である。初動走時を用いた屈折法やトモグラフィーでは分解能は1 kmが限界であり、径数10 m~数100 m程度と推定される火道のイメージングはきわめて困難である。今後は、回折波や反射・散乱波などの波形を用いた探査および解析手法の開発に取り組み、イメージングの空間分解能を向上させる必要がある(Mikada *et al.*, 1997)。

第二は、探査深度の不足である。これまでの地球物理

\* 〒855-0843 島原市新山2-5643-29  
九州大学大学院理学研究院附属地震火山観測研究センター

Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Sciences, Kyushu University, Shin'yama, Shimabara 855-0843, Japan.

e-mail: shimizu@sevo.kyushu-u.ac.jp

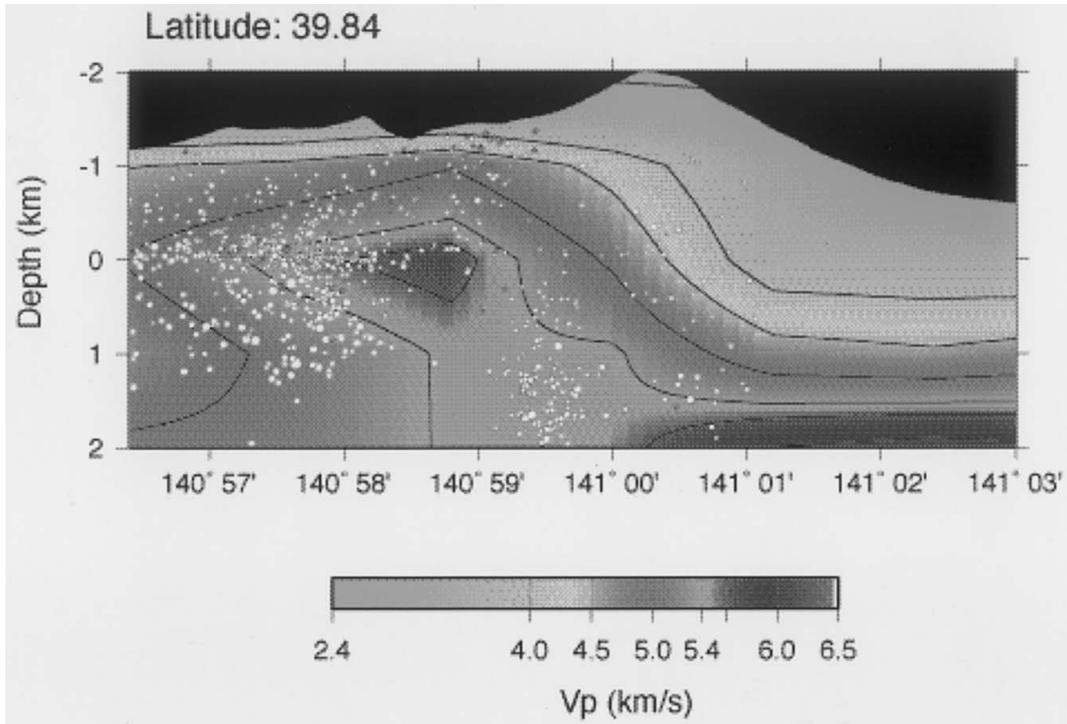


Fig. 1. East-west cross section of P-wave velocity structure and hypocenter distribution at Iwate Volcano (provided by Tanaka).

諸観測によれば、多くの火山においてマグマ溜りは5～10 kmの深さに存在すると推定されるが、現在の火山体構造探査の規模では人工地震の初動（直達波，屈折波）は約3 km程度しか潜らず、想定されるマグマ溜りの深度に到達しない。探査規模（測線長）を100 km程度に拡大することが最も直接的な解決策であるが、現有の装備、マンパワー、経費などを考えると実現は容易ではない。したがって、初動だけではなく反射波などの後続波も用いた探査を検討する必要がある。また、上部マントルまで含めたより深部のマグマ供給系の解明には自然地震の利用が不可欠であるが、現状では分解能が不足しており、Hi-netなどの広域地震観測網の活用や、人工地震探査の結果を用いて浅部構造をはぎ取る等の工夫が必要であろう。

雲仙火山では平成11年度から振興調整費による「雲仙科学掘削プロジェクト」が進行しており、平成14年度からは、山腹から斜め掘りして海水準付近で火道を掘り抜く作業に着手することになっている。この火道掘削のためには火道の位置について事前に正確な情報が必要であることから、2001年12月に火道検出を主目的とした人工地震探査が実施された。この探査では、反射法を主体とし、分解能をできる限り上げることと少なくとも10

km以上の探査深度を得ることを試みた。そのため、大型パイプレータ3台を用いて1点あたり34回の発震を行ってS/N比を上げるとともに、発震点と受振点間隔をそれぞれ50 mと25 mとして空間分解能を上げた。その結果、測線のほぼ全域にわたって良好な記録が得られ、反射法処理によって求められた深度断面から、深さ約3 kmまでの地溝帯の構造のほか、火道に対応すると考えられる構造がイメージされた。また、下部地殻からの反射波も検出された。このことは、反射波の利用が分解能と探査深度の向上にきわめて有効であることを示すものであり、今後の火山体構造探査の方策について一つの指標を与えるものであると考えられる。

第6次計画では火山の静的な構造の把握に加え、マグマの移動など火山体の状態変化を構造の時間変化としてとらえる試みもなされた。岩手山では、1999年～2001年に人工地震を用いた探査が同じ場所で4回繰り返し実施され、地震波線が通過する山体浅部にはこの間有意な速度変化がなかったことが確認された。しかし、1998年9月に岩手山の南西で発生したM6.1の地震の前後で、爆破地震動グループなどによる人工地震探査が実施され、岩手山周辺域の地震波速度が最大1%減少していることが後続波の位相遅れから確認された(Nishimura *et al.*,

2000a). さらにこの地震の前後で散乱体の位置も変化していることがアレイ観測によって検出された (Matsumoto *et al.*, 2001) (Fig. 2). これらのことから、人工地震探査とアレイ観測による後続波解析が構造の時間変化を把握するための標準的な地震学的手法になるものと予想される。

このほか、火山性流体の移動を検知するためには、絶対重力観測と相対重力観測を組み合わせたハイブリッド重力観測がきわめて有効であることが、2000年三宅島噴火の際に実証された (古屋・他, 2001). 今後、ハイブ

リッド重力観測は火山性流体の変動を捉えるための最有力手法の一つになると考えられる。さらに、観測井の中に電極を多数設置して電場の鉛直成分の鉛直勾配を測定する「時間領域鉛直電場勾配法」も、深部の比抵抗変化にきわめて高感度であることから、深部マグマ溜りなどの時間的な状態変化を捉えることができると期待される (鍵山・清水, 2000), 現在雲仙火山の科学掘削坑を利用した試験観測が始まっている。

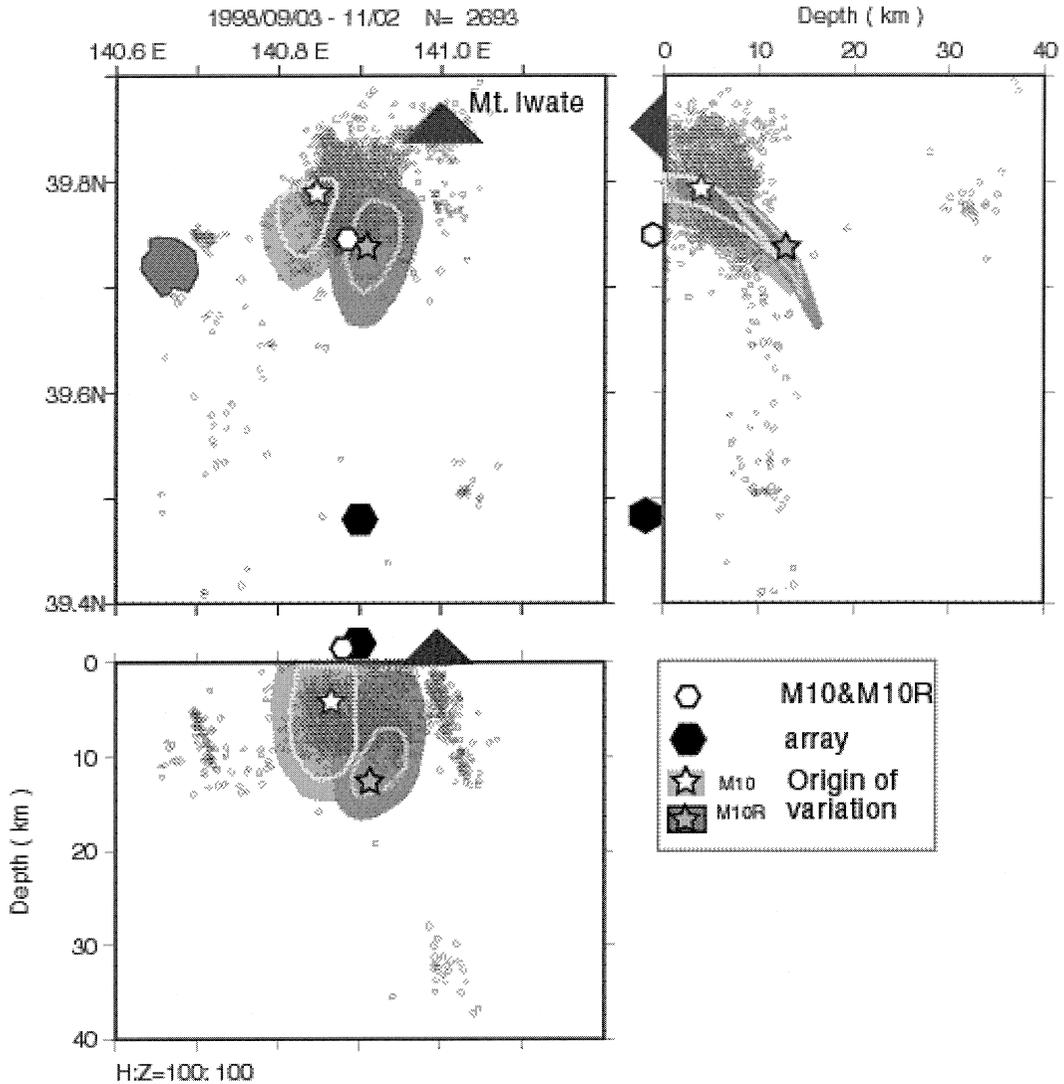


Fig. 2. Temporal change of the scatterer location associated with the  $M6.1$  earthquake near Iwate volcano (after Matsumoto *et al.*, 2001). Open star shows location of the scatterer before the earthquake. Solid star shows that after the earthquake. M10 and M10R indicate the shot before and after the earthquake, respectively. Small open circles show seismicity in and around Iwate volcano.

### 3. 噴火機構のモデル化

噴火の発生機構のモデル化のためには、マグマや熱水系などの火山性流体の性質と挙動、マグマと地下水の相互作用、マグマからの脱ガス過程などを明らかにすることが必要である。地震学的手法からは、火山性地震・微動の発生機構解析を通じて、マグマなどの火山性流体の移動と物性、流体存在域（共鳴体）の大きさ・形状を明らかにすることができると思われる。また、爆発地震および爆発にともなう地盤変動の解析から、火道浅部での脱ガスの進行と爆発的噴火の発生過程について知見が得られるはずである。

近年、広帯域地震観測や観測井を用いた高精度地殻変動観測により、いくつかの火山において火山活動にともなう長周期地震動が検出され、それらの発生機構としてさまざまなモデルが提出されている。たとえば、有珠山の長周期微動や岩手山の深部低周波地震については、マグマ溜りから上部火道やクラックへマグマが急速に流動するモデルが提出されており (Yamamoto *et al.*, 2001; Nakamichi, 2000)、岩手山西部の長周期地震については、

2つのマグマ溜りが交互に膨張・収縮を繰り返すモデルが提案されている (Nishimura *et al.*, 2000b)。また、三宅島の長周期パルスや阿蘇山の長周期微動に対しては、流体で満たされたクラックが開口・振動するモデルが考案されている (大湊・熊谷, 2001; Yamamoto *et al.*, 1999)。これらのモデルは、震源形状や振動の周期などは個々に異なっているが、いずれも地震動が火山性流体の運動・移動によって励起されている点で共通している。これらの研究成果は、火山性流体の挙動解明に長周期地震動の観測がきわめて重要であることを示しており、今後さらに多くの火山において広帯域観測網を整備し観測事例を増やす必要がある。また同時に、さまざまな火山において比較研究を推進して、マグマタイプ・噴火様式による火山性流体の挙動の違いやそれらに依存しない普遍的特徴の抽出を試みる必要があるであろう。これらの比較研究を促進するうえで、観測事例のデータベースを作成することも有効であると思われる。

また、爆発的噴火の発生過程についても研究が進み、桜島のブルカノ式噴火では、爆発地震の初動から主要動

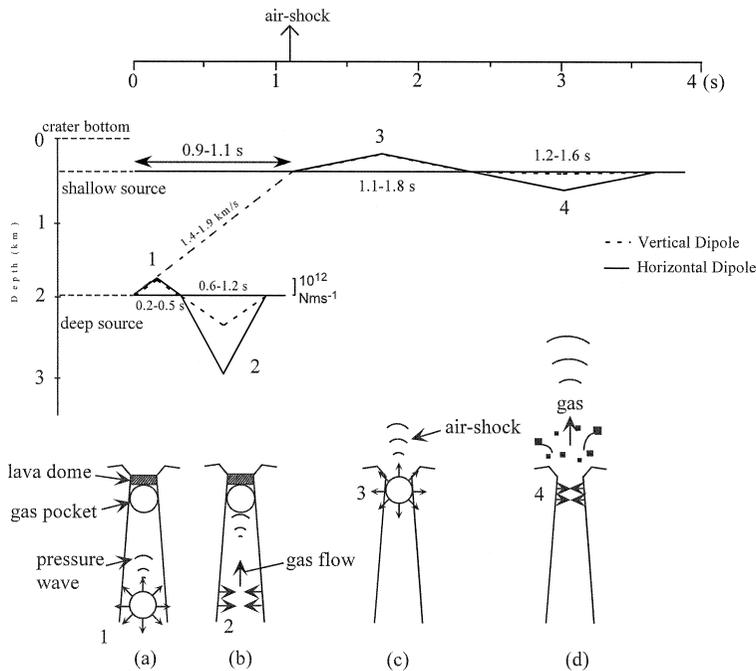


Fig. 3. Time sequence of the source of explosion earthquake at Sakurajima Volcano (after Tameguri *et al.*, 2002).

- An isotropic expansion occurs at a depth of 2 km beneath the crater.
- A cylindrical contraction is generated by pressure decrease of the source region due to escape gases upward in the conduit.
- Outbreak of gas pocket beneath a lava dome is started by shallow expansion, which is excited by a pressure wave propagating from the deep source.
- Gases are released from the uppermost part of conduit. Horizontal contraction starts 1–2 s after the beginning of expansion.

に至る phase の注意深い波形解析により、深部火道内で発生した等方膨張によって励起された圧力波が浅部ガス溜りの破裂をトリガーするというプロセスが明らかになってきた (Tameguri *et al.*, 2002) (Fig. 3). 一方、鉛直火道内で圧力不平衡が生じた場合の火道内の圧力変動と地殻への地震波の放出・伝播が、数値計算により求められ、流体の移流項に起因する急激な増圧現象やそれに引き続く長周期の減圧現象が火道内を伝播すること、それらを火道近傍の観測点で地震波動として検知できることなどが示された (西村, 2001). したがって、火口近傍 (約 1 km 以内) に 1 km 級の観測井を掘削し、その中に地震計や歪計などのセンサーを複数設置して鉛直アレイを構成することにより、火道内の圧力波の伝播を高精度に捉えることができ、Tameguri *et al.* (2002) の爆発モデルの検証のほか、爆発過程や脱ガス過程について重要な知見が得られると期待される。活動的な火口近傍に観測井を設けることは一般には困難であるが、阿蘇山などのように静穏期であれば可能な火山もあると思われるので、検討する価値はあると考えられる。

しかし、これらの研究はいずれも火山性流体の力学的取り扱いにとどまっており、今後は物質科学的知見を物理モデルに如何に取り込んでいくかが課題である。現時点ではこの課題の解決は容易ではないが、長周期地震の減衰波形の周波数と減衰定数から共鳴体内部の物性 (マグマか、水か、ガスかなど) を推定する研究が進みつつあり (Kumagai and Chouet, 2000)、地震学的研究と物質科学的研究との接点を示唆する研究として注目される。

また、これまで地震学的手法に基づく研究について紹介してきたが、噴火機構の研究には電磁気学的手法も不可欠である。電磁気学的データは低比抵抗である液体の存在や山体内部温度に敏感であるため、マグマや熱水の分布や移動を把握するのに適しているからである。爆発的噴火の発生時には火山性流体の急激な移動を伴うと考えられるため、爆発発生過程の解明のためには、火口近傍において時定数の小さい電磁気学的変動の検出をめざす必要があると思われる。

#### 4. おわりに

これまでの火山体構造探査により山体浅部の高精度の地震波速度構造が明らかになり、火山性地震・微動・爆発などの諸現象の発生場についてわれわれは最も基礎的かつ重要な情報をようやく手に入れつつある。噴火機構の解明にとってこれらの発生場の理解は不可欠であることから、今後も構造探査を推進し、特に将来噴火活動が予測される火山においては事前に (静穏期のうちに) 山体構造を明らかにしておくことが望まれる。

一方、マグマ供給系の構造解明という観点からは、未解決の課題があることも事実であり、特に「探査深度と分解能の向上」については、反射・散乱法を主体とした探査・解析手法の開発・改良や火山探査に特化した観測装置の開発などを推進する必要があると考えられる。そのためには、これらの課題に専念できる若手研究者の確保も必要である。

地球物理観測に基づく噴火機構の研究も着実に進んでおり、特に近年の地震観測の広帯域化により、地震・微動・爆発などの定量的な発生機構モデルが作られるようになった。しかし、それらはいずれも力学的なモデルであり、今後は地球電磁気学や物質科学的な研究成果も取り込んだ総合的なモデルの構築に取り組むべきである。

雲仙火山で平成 14 年度から開始される火道掘削では、噴火活動中に観測された微動の震源域、圧力源および低比抵抗層などを掘り抜く計画になっており、マグマと地下水の相互作用や地震・微動の発生機構、脱ガス機構などについて、地球物理・物質科学両面から総合的な研究が行われることになっている。このように、噴火時の諸現象に関する各種データや発生機構モデルがある火山において、掘削による実証的かつ総合的研究を実施することも有意義であり、噴火機構研究のモデルケースになると期待される。

#### 引用文献

- 古屋正人・大久保修平・田中愛幸・孫 文科・渡辺秀文・及川 純・前川徳光 (2001) 重力の時間変化でとらえた三宅島 2000 年火山活動におけるカルデラの形成過程. *地学雑誌*, **110**, 226-244.
- 鍵山恒臣・清水 洋 (2000) 雲仙火山の物理構造. *月刊地球*, **22**, 252-257.
- Kumagai, H. and Chouet, B. (2000) Acoustic properties of a crack containing magmatic or hydrothermal fluids. *J. Geophys. Res.*, **105**, 25493-25512.
- Matsumoto, S., Obara, K., Yoshimoto, K., Saito, T., Ito, A. and Hasegawa, A. (2001) Temporal change in P-wave scatterer distribution associated with the M6.1 earthquake near Iwate volcano, northeastern Japan. *Geophys. J. Int.*, **145**, 48-58.
- Mikada, H., Watanabe, H. and Sakashita, S. (1997) Evidence for subsurface magma bodies beneath Izu-Oshima volcano inferred from a seismic scattering analysis and possible interpretation of the magma plumbing system of the 1986 eruptive activity. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **104**, 257-269.
- Nakamichi, H. (2000) Deep magmatic activity inferred from low frequency earthquakes and fine S wave velocity structure beneath Iwate Volcano, Japan. Doctoral thesis, Tohoku Univ., 199 pp.
- Nishi, K. (2001) A three dimensional robust seismic ray tracer for volcanic regions. *Earth Planets Space*, **53**, 101-

- 109.
- Nishi, K. (2002) Three-dimensional seismic velocity structure beneath Unzen Volcano, Kyushu, Japan inferred by tomography from experimental explosion data. *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, **47**, 227–241.
- Nishimura, T., Uchida, N., Sato, H., Ohtake, M., Tanaka, S. and Hamaguchi, H. (2000a) Temporal changes of the crustal structure associated with the M6.1 earthquake on September 3, and the volcanic activity of Mount Iwate, Japan. *Geophys. Res. Lett.*, **27**, 269–272.
- Nishimura, T., Nakamichi, H., Tanaka, S., Sato, M., Kobayashi, T., Ueki, S., Hamaguchi, H., Ohtake, M. and Sato, H. (2000b) Source process of very long period seismic events associated with the 1998 activity of Iwate Volcano, northeastern Japan. *J. Geophys. Res.*, **105**, 19135–19147.
- 西村太志 (2001) 火山長周期地震の発生過程に関する一考察. 京都大学防災研究所研究集会「マグマ活動と火山性地震・微動」(<http://www.dpri.kyoto-u.ac.jp/~kazan/13k02/nishimura.pdf>).
- 大湊隆雄・熊谷博之 (2001) 2000年三宅島噴火活動でみられた長周期地震波パルスについて. 京都大学防災研究所研究集会「マグマ活動と火山性地震・微動」(<http://www.dpri.kyoto-u.ac.jp/~kazan/13k02/ohminato.pdf>)
- 清水 洋 (1992) 雲仙火山モニタリング. 物理探査, **45**, 458–466.
- Tameguri, T., Iguchi, M. and Ishihara, K. (2002) Mechanism of explosive eruptions from moment tensor analyses of explosion earthquakes at Sakurajima Volcano, Japan. *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, **47**, 197–215.
- Tanaka, S., Hamaguchi, H., Nishimura, T., Yamawaki, T., Ueki, S., Nakamichi, H., Tsutsui, T., Miyamachi, H., Matsuwo, N., Oikawa, J., Ohminato, T., Miyaoka, K., Onizawa, S., Mori, T. and Aizawa, K. (2002) Three-dimensional P-wave velocity structure of Iwate volcano, Japan from active seismic survey. *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 10.1029/2002GL014983.
- 筒井智樹・鍵山恒臣・他 67名 (1996) 人工地震探査による霧島火山群の地震波速度構造—はざとり法による解析—, 火山, **41**, 227–241.
- 植木貞人 (1990) 地震探査による活火山直下の浅部地殻構造調査. 火山, **34**, S67–S81.
- Yamamoto, M., Kawakatsu, H., Kaneshima, S., Mori, T., Tsutsui, T., Sudo, Y. and Morita Y. (1999) Detection of a crack-like conduit beneath the active crater at Aso volcano, Japan. *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 3677–3680.
- Yamamoto, M., Kawakatsu, H., Yomogida, K. and Koyama, J. (2002) Long-period (12 sec) volcanic tremor observed at Usu 2000 eruption: seismological detection of a deep magma plumbing system. *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 10.1029/2001GL013996.