

地震波速度構造と震源メカニズムによる深部低周波地震の 発生機構—岩手山と富士山の例—

中道 治久*

Source Mechanism and Seismic Velocity Structure of Source Region of Deep Low-frequency Earthquakes beneath Volcanoes: Case Studies of Mt. Iwate and Mt. Fuji

Haruhisa NAKAMICHI*

1. はじめに

岩手山と富士山を対象にして深部低周波地震の震源分布や発震機構、および地震発生域の地震波速度構造の詳細を明らかにし、深部低周波地震の発生過程を議論したことを評価していただき、平成19年度日本火山学会研究奨励賞（研究課題「地震波速度構造と震源メカニズムによる深部低周波地震の発生機構の解明」）を頂いた。今回、この研究奨励賞の受賞を機に、筆者が進めてきた研究を簡単に紹介する。

火山深部では、上部マントルでのメルトの生成や上昇、物質密度境界であるモホ面付近におけるマグマの停留、浮力の再獲得によるマグマの地殻内での上昇や火山浅部における再停留、マグマ結晶分化などによる浮力獲得による再上昇など、多くのプロセスを経てマグマは上昇していくと考えられている (Fig. 1)。これまで、上部地殻から火山へのマグマの供給や蓄積の過程は、火山性微動や地殻変動の観測などの各種観測によりその詳細が明らかにされてきた (Fig. 1) が、モホ面近傍といった火山深部におけるマグマの供給や蓄積過程を示唆する地球物理的観測事象は少なく、モホ面付近や下部地殻におけるマグマ停留や上昇のプロセスはあまりよく分かっていない。そこで、筆者は、火山直下のモホ面近傍や下部地殻で発生する深部低周波地震に着目し、研究を進めてきた (Fig. 1 中の星印)。

本稿では、岩手山と富士山を対象として、大まかに2

種類の解析手法による深部低周波地震の研究を紹介する。一つ目は、深部低周波地震の震源位置やメカニズム解の解析で、二つ目は、深部低周波地震の発生域の地震波速度構造の解析である。岩手山と富士山に共通なのは、充実した地震観測網にて数多くの深部低周波地震が観測されたことである。噴火活動においても共通点があり、例えば、ともに噴火間隔が数百年と非常に静穏期が長い火山である点が挙げられる。相違点は、地震観測が行われている期間において、岩手山では火山活動が活発化し、噴気活動が見られて、噴火未遂となったが、富士山では火山活動の活発化が見られなかったことである。そこで、ここでは岩手山と富士山を比較しながら、深部低周波地震の解析結果の説明と議論をする。

2. 深部低周波地震とは

火山性地震や火山性微動は、活動的な火山で観測され、世界中の観測例の約60%が何らかの形で噴火活動に関連しているといわれている (McNutt, 1994)。火山性地震はおおまかに火山構造性地震（高周波地震）と低周波地震に分類される。前者は火山以外で発生する微小地震と同様の波形の特徴を持ち、後者は火山特有の現象で地震の規模から予想される卓越周波数よりも有意に低周波の振動が卓越する。火山性微動と低周波地震の多くが火口周辺の深さ0-5 kmといった火山浅部で発生していることが報告されている（例えば、McNutt, 1994）。一

* 〒464-8601 名古屋市千種区不老町
名古屋大学大学院環境学研究科地震火山・防災研究センター

Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8601, Japan.

e-mail: nakamichi@nagoya-u.jp

平成19年度日本火山学会研究奨励賞受賞

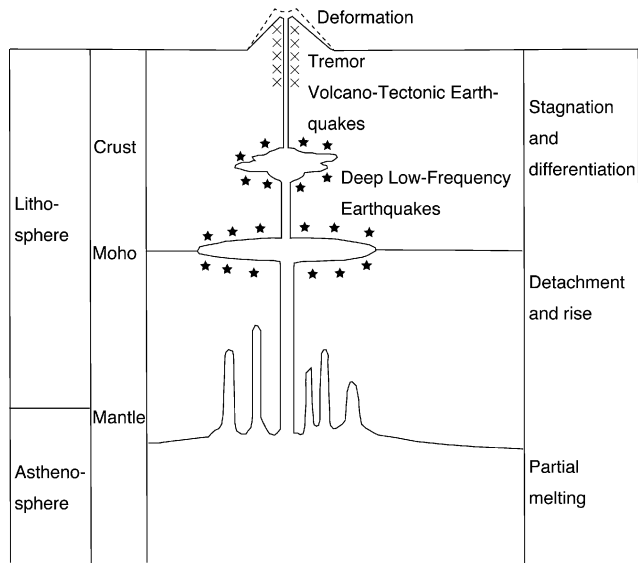


Fig. 1. Schematic volcano-magma system. Solid stars show locations of deep low-frequency earthquakes. Crosses show locations of volcanic tremors and volcano-tectonic earthquakes. Dashed line shows deformation of volcano edifice.

方、火口周辺に発生する低周波地震に対して、深部低周波地震と呼ばれる火山地域の下部地殻から最上部マントルにかけて発生する低周波地震がある。深部低周波地震は、1980～1990年代にかけて日本をはじめ、アメリカやフィリピンなどの海外の火山地域において発生事例が報告されてきた（例えば、Hasegawa and Yamamoto, 1994; Pitt and Hill, 1994; White, 1996）。震源の深さによる厳密な定義は無いが、これまでに見つかった深部低周波地震の震源の深さから、10 km 以深、50 km 以浅の地震を対象としている。日本では、火山直下のモホ面近傍（20–40 km）で深部低周波地震が発生している（例えば、Hasegawa and Yamamoto, 1994）。大多数の火山において、深部低周波地震の発生数は年間数個である。また、深部低周波地震の規模は小さく、マグニチュード 2 以上の地震が観測されることは少ない。深部低周波地震の波形には、P 波と S 波が明瞭に見られ、卓越周波数は数 Hz である。浅部の低周波地震と異なるのは、明瞭な S 波が見られることである。深部低周波地震の発生する下部地殻や最上部マントルは、温度・圧力の条件から通常では地震が発生しないとされ（嶋本, 1989）、そのような条件下において、なぜ上記の特徴を持つ低周波地震が発生するのか謎である。

そこで、深部低周波地震の発生機構を明らかにして、下部地殻や最上部マントルにおけるマグマのダイナミクスを明らかにすることが、深部低周波地震の研究目的の

一つである。

3. 深部低周波地震の活動と震源分布

3-1 岩手山

岩手山においては、南山麓と北東山麓の直下の深さ 25–40 km にて深部低周波地震が年間数個の割合で観測されてきた（Hasegawa and Yamamoto, 1994）。Fig. 2 に 1997 年 12 月から 2000 年 6 月に発生した岩手山の深部低周波地震の震源を示す（Fig. 2 の黒丸）（Nakamichi *et al.*, 2003）。このうち Fig. 2 中の I で示す震源の低周波地震をやや深部低周波地震とする。やや深部低周波地震は岩手山の東山腹の直下の深さ 5–12 km に鉛直に棒状に分布している（Fig. 2 中の I）。一方、深部低周波地震の震源は、岩手山の山頂から 10 km 南の深さ 31–34 km (A)、山頂から北東 10 km の深さ 32–36 km (B)、同じく北東 7 km の深さ 37 km (C) の 3 カ所に分布している。この付近のモホ面の深さは 34 km と推定されており（Nakajima *et al.*, 2002）、深部低周波地震のうちグループ A と B はモホ面より上で、C はモホ面より下で発生している。

岩手山においては 1995 年 9 月 15 日に火山性微動が観測された（植木・他, 1996）。その後、1998 年 2 月から 8 月に岩手山の西側浅部の高周波地震活動が活発化し、同時に GPS 連続観測にて山体膨張センスの変動が観測された（Miura *et al.*, 2000; Tanaka *et al.*, 2002）。この 1998 年の岩手山の火山活動活発化と同時期に、深部低周波地

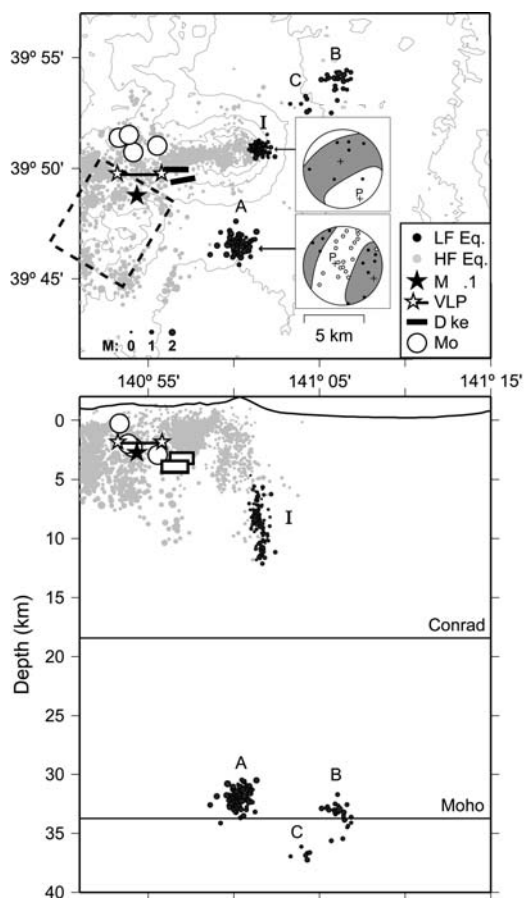


Fig. 2. Epicenters and cross-sections of hypocenters of intermediate-depth and deep low-frequency earthquake (solid circles) and high-frequency earthquakes (light grey circles) of Mt. Iwate in the period from December 1997 to June 2000. 'A', 'B' and 'C' show groups of deep low-frequency earthquakes. 'I' shows a group of intermediate-depth low-frequency earthquakes. The focal mechanisms of the largest deep low-frequency earthquake (M 1.9) and the largest intermediate-depth low-frequency earthquake (M 1.6) are also shown. Lower focal hemispheres are shown in equal-area projection, with compressional fields shaded. Open and solid circles on the source mechanism indicate inward motion and outward motion, respectively. The solid star marks the initial rupture point of the M 6.2 earthquake. The dashed rectangle shows the focal area of the M 6.2 earthquake. The locations of very-long-period events (Nishimura *et al.*, 2000), dikes and Mogi sources estimated from GPS data (Miura *et al.*, 2000) are also shown. The Conrad and Moho depths are shown with solid lines (Nakajima *et al.*, 2002). Elevation contours (dotted lines) are at 300 m intervals. The cross-section is free of any vertical exaggeration.

震活動が活発になった (Nakamichi *et al.*, 2003). 1998 年の 1 年間の発生回数は約 200 回あり、普段の 10 倍以上であった。浅部高周波地震と深部低周波地震はともに、1998 年 4 月下旬から発生頻度が急増していたが、深部低周波地震の発生頻度が増加し始めた 5 日後に浅部高周波地震の発生頻度が増加し始めた (Nakamichi *et al.*, 2003).

これらのことから、浅部地震活動と地殻変動がマグマ貫入やそれに付随する火山性流体の挙動によって引き起こされたと言える。さらに、深部低周波地震活動とほぼ同期し、かつ深部低周波地震活動が先行していることは、火山活動の元となったマグマが下部地殻や最上部マントルから上昇してきた可能性を示唆している。

3-2 富士山

富士山の深部低周波地震の活動についての詳細は Ukawa (2005) や鶴川 (2007) が詳しいのでそちらを参照してほしい。ここでは、Nakamichi *et al.* (2004) で得られた精密な深部低周波地震の震源分布について紹介する。

2000 年 9 月～12 月と 2001 年 4 月～5 月に観測史上最大の富士山の深部低周波地震活動があり、これらの期間での深部低周波地震の発生数は普段の 10 倍であった (Ukawa, 2005; 鶴川, 2007)。しかし、深部低周波地震活動の活発化以外は特に目立った浅部地震活動や地殻変動などはなかった。したがって、深部低周波地震が富士山の現在の火山活動を知る数少ない手がかりの一つとなった。

Nakamichi *et al.* (2004) は防災科学技術研究所、東京大学地震研究所、気象庁の観測波形データを結合して、P 波と S 波の初動走時の読み取りを行い、精密震源再決定した。対象としたのは 1998 年から 2003 年の期間である。初動走時の読み取りを行った後、比較的 SN 比の高い深部低周波地震 80 個を選び出して、震源再決定した。この個数はこの期間に発生した深部低周波地震全体の 16% に相当する。

富士山の深部低周波地震の再決定後の震源分布を Fig. 3 に示す。富士山山頂から北東に 3 km のところを中心として、深さ 11–16 km に縦板状に分布している。富士山にある側火口は山頂を中心として主に北西山麓と南東山麓に向かって放射状に分布している (津屋, 1971)。側火口の山頂火口からの放射状の分布は一般的にダイクの走行を表しており、最大圧縮応力の方向に対応している (Nakamura, 1977)。したがって、深部低周波地震の縦板状の震源分布と側火口分布が北西–南東方向に一致していることは、両者ともにマグマ貫入プロセスに関係した現象であることを示唆している。

4. 深部低周波地震の震源メカニズムについて

これまでに火山の深部低周波地震の震源メカニズム解

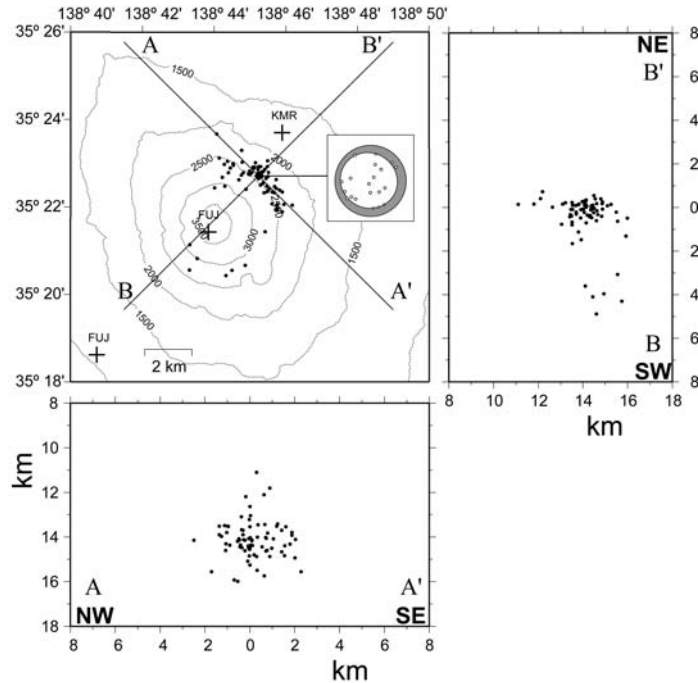


Fig. 3. Hypocentral distributions (black dots) of deep low-frequency earthquakes of Mt. Fuji. (a) Map view. The source mechanism of the largest deep low-frequency earthquake (M 2.3) is also shown. Lower focal hemisphere is shown in equal-area projection, with compressional fields shaded. Open circles on the source mechanism indicate inward motion. (b) Cross-section A-A' in (a). (c) Cross-section B-B' in (a). Cross-sections A-A' and B-B' include hypocenters projected from 10 km either side of the cross-section line.

析が行われた事例はそれほど多くない。震源メカニズム解析には十分な数の観測点数が必要だからである。Ukawa and Ohtake (1987) は、伊豆大島噴火の一年前に発生した深部低周波地震について S 波の振動方向と P 波・S 波振幅比からメカニズムを議論しており、ダブルカップルモデルよりもシングルフォースモデルの方が適切であるとした。西富・武尾(1996)と岡田・長谷川(2000)は、波形インバージョン法にて深部低周波地震から、それぞれ日光白根山と鳴子火山について横ズレ断層型と非ダブルカップル型の震源メカニズム解を得た。このように、深部低周波地震の解析事例は少ないため、系統的な震源メカニズムのモデルは存在しない。

ここでは、岩手山と富士山で発生した深部低周波地震の震源メカニズム解析の結果を紹介する。以前の同様な研究に比べ数多くの観測点データに基づいた解析結果である。

4-1 岩手山

Nakamichi *et al.* (2003) は、遺伝的アルゴリズムと P 波と S 波のスペクトル比を用いたモーメントテンソル・インバージョン法を開発し、低周波地震の震源メカニズ

ムを推定した。Nakamichi *et al.* (2003) では比較的規模の大きかった深部低周波地震 7 個とやや深部低周波地震 4 個の解析を行ったが、ここではその中最大規模の深部低周波地震 (M 1.9) とやや深部低周波地震 (M 1.6) のメカニズム解を Fig. 2 に示す。ここで示した深部低周波地震 (M 1.9) のメカニズム解においては、65% の Compensate Linear Vector Dipole (CLVD, Knopoff and Randall, 1970) 成分が含まれている。やや深部低周波地震 (M 1.6) のメカニズム解においては、55% の CLVD 成分が含まれている。解析した他の深部低周波地震とやや深部低周波地震のメカニズム解についても同様に、有意な CLVD 成分が見られた。深部低周波地震のメカニズム解については中には 20% もの体積変化成分を持つものがあつた。一方、やや深部低周波地震のメカニズム解には有意な体積変化成分は見られなかった。

4-2 富士山

Nakamichi *et al.* (2004) は岩手山と同様の手法 (Nakamichi *et al.*, 2003) を用いて、1998 年から 2003 年に発生した富士山の深部低周波地震の最大地震 (M 2.3) について震源メカニズム解を求めた。Fig. 3 にメカニズム解を

示す。最大低周波地震のP波の初動極性はP波初動極性すべて引き (Fig. 3) で、ダブルカップル (DC) では震源メカニズムは説明できないことがわかる。この震源メカニズムのモーメントテンソルの成分を分解するとCLVD成分が72%、体積変化成分が21%となり非常に大きな非ダブルカップル成分がある。

岩手山と富士山の深部低周波地震のメカニズム解に有意な非ダブルカップル成分 (CLVDと体積変化) がある。このことは、これらの深部低周波地震がマグマや揮発性流体といった火山性流体にて引き起こされた可能性を示唆している。

5. 地震波速度構造と深部低周波地震の震源

深部低周波地震の発生機構や発生場を理解するために、深部低周波地震の震源域やその周辺の地震学的構造の情報が有用である。例えば、東北地方では、深部低周波地震は地震波速度低速度域内もしくはその周辺域で発生していることが明らかにされている (例えば、Hasegawa *et al.*, 1991)。これらの研究にて、深部低周波地震は火山直下の下部地殻やマントル最上部におけるマグマ活動と関連して発生していると指摘されている。ただし、微小地震観測網の観測点間隔は火山の速度構造を見るには広がったため、1つ1つの火山に対して地震波速度構造の分解能はそれほど高くなかった。そこで、火山において稠密地震観測網が展開され、数多くの深部低周波地震が観測された岩手山と富士山について、地震波速度構造と深部低周波地震の関係について述べる。

5-1 岩手山

Nakamichi *et al.* (2002) は、岩手山に展開された稠密地震観測データを用いて、レーンバー関数と地震の走時からS波速度構造を推定した。推定されたS波速度構造と低周波地震の震源分布を Fig. 4 に示す。深さ5-12 kmのやや深部低周波地震は高速度異常域内に分布しているのに対して、深さ30-37 kmの深部低周波地震は低速度異常域内にて分布していることがわかる。このように、岩手山のやや深部低周波地震と深部低周波地震では、速度構造においてそれぞれ高速度域内と低速度域内と大きな違いがある。やや深部低周波地震が高速度域内にある理由の一つとして、マグマの経路が細いため低速度異常として検出できなかったことが考えられる。しかし、これについてはより高解像度の地震学的構造にて議論する必要がある。

5-2 富士山

2000年秋から2001年春にかけてにあった富士山の深部低周波地震の活発化を受け、富士山の総合的な研究が行われた。富士山周辺において稠密自然地震観測が2002

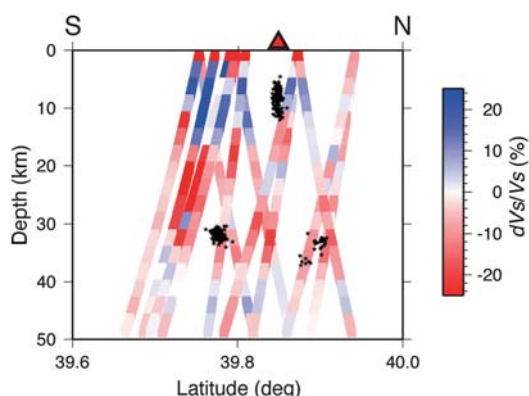


Fig. 4. S wave velocity perturbations obtained by the receiver function analysis, which are projected onto the south-north cross-section at a longitude of 141° E, crossing Mt. Iwate. Velocity perturbations are relative the standard velocity model of Tohoku district. Projection is along ray paths of P-to-SV converted waves. Stars show locations of intermediate-depth and deep low-frequency earthquakes. Red triangles denote the location of Mt. Iwate.

年9月から2005年4月の約2年半の期間で行われた。この稠密地震観測データを用いて、Nakamichi *et al.* (2007) と中道 (2007) は富士山周辺の詳細な地震波速度構造を明らかにした。富士山をおおよそ東西に横切る断面での地震波速度構造を Fig. 5 に示す。特に、深部低周波地震の発生域はP波速度とS波速度が同じ深さの周囲よりも低く、かつP波速度とS波速度の比 V_p/V_s が低いため、超臨界状態の揮発性成分 (水・二酸化炭素) が蓄積しておりそれが深部低周波地震の発生に関与していることを見いだした。また、深部低周波地震発生域の直下に、マグマの存在を示唆する低速度かつ高 V_p/V_s 領域を見いだした。

6. 深部低周波地震と火山活動の関係

深部低周波地震の活動と噴火活動との関係をここで紹介する。噴火活動や火山浅部へのマグマの上昇といった火山浅部の火山活動に先立って深部低周波地震が発生した事例がいくつか報告されている。

たとえば、2000年三宅島噴火においては、2000年6月の噴火に先立ち、1999年4月から2000年4月にかけて深さ18 km から24 km 付近で低周波地震活動がやや活発化したことが報告されている (藤田・鶴川, 2000)。噴火といった火山活動の活発化に先行して、深部低周波地震が多発した例がある。最も顕著な例として、1991年のピナツボ火山大噴火の前駆的な深部低周波地震活動が挙げ

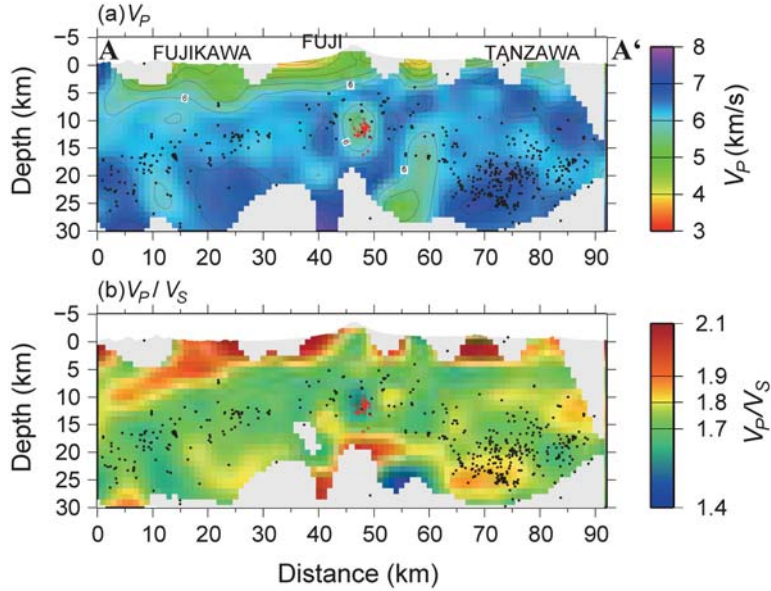


Fig. 5. Vertical cross-sections of (a) P wave velocity (V_P) values and (c) ratio of P and S wave velocity (V_P/V_S) values crossing Mt. Fuji. Contour interval for V_P is 0.5 km/s. Tectonic earthquakes within ± 20 km of the section are plotted as black dots. Red dots show the locations of deep low-frequency earthquakes.

られる (White, 1996). ピナツボ火山では 1991 年 4 月に噴気活動が始まり、その後噴火活動が活発化して同年 6 月 15 日に二十世紀最大級の噴火が発生した。この大噴火の 1 週間から 2 週間前に 400 個もの深部低周波地震が発生していた。この際に発生していた深部低周波地震の最大規模はマグニチュード 3.7 であり、これは現時点で報告されている深部低周波地震の規模では世界最大である。この深部低周波地震の活発化と噴火については、地下 30–40 km から新たな玄武岩質マグマが上昇してきて浅部マグマ溜まりに供給されて、これが刺激となって 6 月 15 日の噴火に至ったと解釈されている (White, 1996)。

また、噴火には至らなかったが、深部低周波地震活動と同時期に噴火未遂に至った例として、前述の 1998 年の岩手山の火山活動が挙げられる。噴火には至らなかったが、地殻浅部へのマグマの上昇と深部低周波地震が関連して発生したことが指摘されている (Nakamichi *et al.*, 2003)。

これらの報告は深部低周波地震と噴火との関係を指摘し、マントル最上部から火山浅部へのマグマ貫入過程を示唆している。しかし、深部低周波地震の発生が必ずしも浅部の火山活動や噴火と関係しているわけではない。むしろ、噴火活動と深部低周波地震の活動に明瞭な相関がないことの方が多い。例えば、キラウエア火山では深部低周波地震と噴火は 1960 年代より数多く観測されてい

るが、両者に明瞭な関係は見られない (Aki and Koyanagi, 1981)。また、富士山では 2000 年 10 月から 2001 年 5 月に深部低周波地震の活動が急速に高まり、その間の地震発生数は過去 21 年間の総地震数を超えた (Ukawa, 2005)。しかし、現時点においては火山浅部での活動を示すような地震活動や地殻変動は観測されておらず、噴火もしていない。したがって、深部低周波地震が火山活動の予測につかえるかどうかはまだ不明である。

ここで事例を紹介したように、深部低周波地震は噴火活動など浅部の火山活動と関連して発生する場合もある。したがって、火山深部におけるマグマ移動が深部低周波地震発生のきっかけとなっているようである。しかし、深部低周波地震活動と火山活動の関連性については、事例がまだ少ないためはっきりしたことは言えない。したがって、深部低周波地震と火山活動の関係を明らかにするには、今後火山活動が活発化した火山においては、火山活発化の以前から活発な時期における深部低周波地震活動を把握しておく必要がある。

謝 辞

本稿は、平成 19 年度日本火山学会研究奨励賞の受賞を機に執筆の機会を与えていただいたものである。受賞にあたり、東京大学地震研究所の渡辺秀文教授及び日本火山学会の関係者の皆様には大変お世話になりました。

大学院在籍中に火山の深部低周波地震の研究に導いてくださった浜口博之東北大名誉教授に感謝いたします。また、受賞対象となった研究の遂行にあたり、西村太志准教授、田中 聡博士、鶴川元雄博士、大湊隆雄准教授をはじめ、数多くの方々にご指導や議論を通じてお世話になりました。山中佳子准教授には原稿に目を通して頂き、コメントを頂いた。記して感謝いたします。研究の遂行において、科学研究費補助金特別研究員奨励費（課題番号 14020147）や科学研究費補助金若手研究（スタートアップ）（課題番号 18840025）などの研究費を使用しました。記して感謝いたします。

引用文献

- Aki, K. and Koyanagi, R. (1981) Deep volcanic tremor and magma ascent mechanism under Kilauea, Hawaii. *J. Geophys. Res.*, **86**, 7095–7109.
- 藤田英輔・鶴川元雄 (2000) 三宅島で発生した深部低周波地震. *火山*, **45**, 295–299.
- Hasegawa, A. and Yamamoto, A. (1994) Deep, low-frequency microearthquakes in or around seismic low-velocity zones beneath active volcanoes in northeastern Japan. *Tectonophysics*, **233**, 233–252.
- Hasegawa, A., Zhao, D., Hori, S., Yamamoto, A. and Horiuchi, S. (1991) Deep structure of the northeastern Japan arc and its relationship to seismic and volcanic activity. *Nature*, **352**, 683–689.
- Knopoff, L. and Randall, M. (1970) The compensated linear-vector dipole: a possible mechanism for deep earthquakes. *J. Geophys. Res.*, **75**, 4957–4963.
- McNutt, S.R. (1994) Volcanic tremor from around the world: 1992 update. *Acta Vulc.*, **5**, 197–200.
- Miura, S., Ueki, S., Sato, T., Tachibana, K. and Hamaguchi, H. (2000) Crustal deformation associated with the 1998 seismo-volcanic crisis of Iwate Volcano, northeastern Japan, as observed by a dense GPS network. *Earth, Planets and Space*, **52**, 1003–1008.
- Nakajima, J., Matsuzawa, T. and Hasegawa, A. (2002) Moho depth variation in the central part of northeastern Japan estimated from reflected and converted waves. *Phys. Earth Planet. Int.*, **130**, 31–47.
- 中道治久 (2007) 富士山と南部フォッサマグナの地震活動と速度構造. 富士火山, 荒牧重雄・藤井敏嗣・中田節也・宮地直道編集, 山梨県環境科学研究所, 151–159.
- Nakamichi, H., Tanaka, S. and Hamaguchi, H. (2002) Fine S wave velocity structure beneath Iwate volcano, northeastern Japan, as derived from receiver functions and travel times. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **116**, 235–255.
- Nakamichi, H., Hamaguchi, H., Tanaka, S., Ueki, S., Nishimura, T. and Hasegawa, A. (2003) Source mechanisms of deep and intermediate-depth low-frequency earthquakes beneath Iwate volcano, northeastern Japan. *Geophys. J. Int.*, **154**, 811–828.
- Nakamichi, H., Ukawa, M. and Sakai, S. (2004) Precise hypocenter locations of midcrustal low-frequency earthquakes beneath Mt Fuji, Japan. *Earth, Planets and Space*, **56**, e37–e40.
- Nakamichi, H., Watanabe, H. and Ohminato, T. (2007) Three-dimensional velocity structures of Mount Fuji and the South Fossa Magna, central Japan. *J. Geophys. Res.*, **112**, doi: 10.1029/2005JB004161.
- Nakamura, K. (1977) Volcanoes as possible indicators of tectonic stress orientation — principle and proposal. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **2**, 1–16.
- Nishimura, T., Nakamichi, H., Tanaka, S., Sato, M., Kobayashi, T., Ueki, S., Hamaguchi, H., Ohtake, M. and Sato, H. (2000) Source process of very long period seismic events associated with the 1998 activity of Iwate Volcano, northeastern Japan. *J. Geophys. Res.*, **105**, 19135–19147.
- 西富一平・武尾 実 (1996) 栃木県西部地域モホ面付近に発生する低周波地震の活動とその発震機構. *火山*, **41**, 43–59.
- 岡田知己・長谷川昭 (2000) 東北地方地殻深部に発生する低周波微小地震の活動とモーメントテンソル解. *火山*, **45**, 47–63.
- Pitt, M. and Hill, D (1994) Long-period earthquakes in the Long Valley Caldera region, eastern California. *Geophys. Res. Lett.*, **21**, 1679–1682.
- 嶋本利彦 (1989) 岩石のレオロジーとプレートテクトニクス. *科学*, **59**, 170–181.
- Tanaka, S., Hamaguchi, H., Ueki, S., Sato, M. and Nakamichi, H. (2002) Migration of seismic activity during the 1998 volcanic unrest at Iwate volcano, northeastern Japan, with reference to P and S wave velocity anomaly and crustal deformation. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **113**, 399–414.
- 津屋弘達 (1971) 富士山の地形・地質, 富士山総合学術調査報告書. 富士急行株式会社, pp149.
- 植木真人・森田裕一・浜口博之 (1996) 1995年9月と10月に岩手火山で発生した火山性微動について. *東北地域災害科学研究*, **32**, 285–292.
- Ukawa, M. (2005) Deep low-frequency earthquake swarm in the mid crust beneath Mount Fuji (Japan) in 2000 and 2001. *Bull. Volcanol.*, **68**, 47–56.
- 鶴川元雄 (2007) 富士山の低周波地震. 富士火山, 荒牧重雄・藤井敏嗣・中田節也・宮地直道編集, 山梨県環境科学研究所, 161–172.
- Ukawa, M. and Ohtake, M. (1987) A monochromatic earthquake suggesting deep-seated magmatic activity beneath the Izu-Oshima volcano, Japan. *J. Geophys. Res.*, **92**, 12649–12663.
- White, R.A. (1996) Precursory deep long-period earthquakes at Mount Pinatubo: spatio-temporal link to a basalt trigger. In *Fire and Mud Eruptions and Lahars of Mount Pinatubo, Philippines* (Newhall, C.G. and Punongbayan, R.S. eds), 307–327, Philippine Institute of Volcanology and Seismology.