

焼岳火山の深部地震活動

大見士朗・和田博夫・伊藤 潔

要 旨

北アルプス脊梁部に位置する焼岳火山周辺では、1998 年 8 月に発生した活発な浅部の群発地震活動の後、深部地震活動が観測されている。1999 年 6 月には、深部低周波地震の群発活動が発生した。その後、孤立型の深部低周波地震が散発していたが、2002 年 1 月頃から、高周波成分に富む、微動的な波形を呈する深部地震が観測されるようになっていく。これらの深部地震活動は、焼岳火山の深部マグマ活動が活発化した指標の可能性もあり、今後の地震活動を注視する必要があると考えられる。

キーワード： 焼岳火山， 深部低周波地震， 微動， マグマ活動

1. はじめに

飛騨山脈の上高地周辺では、1998 年 8 月に顕著な群発地震活動が発生し、その活動は約 1 年半の間続いた（たとえば、和田ら、1999、2000 など）。和田ら（2000）によれば、この活動は、京都大学防災研究所が同地域で微小地震観測を開始した 1969 年以降、活動期間、最大地震 ($M_j=5.4$) とともに最大のものであった。

飛騨山脈には、御岳山、乗鞍岳、焼岳、立山（弥陀ヶ原）の活火山のほか、鷲羽岳や白馬乗鞍岳（白馬大池）等いくつかの第四紀火山が分布している（Fig.1）。1998 年の群発地震活動はそのうちの焼岳近傍で発生したこともあり、地震活動と火山活動の関連が注目される状況となった。

Fig.2 に、1998 年 8 月から 2001 年 4 月までの同地域で精度よく震源が決まった地震の震源分布を示すが、Fig.1 と合わせて見ると、1998 年 8 月からの群発地震の活動域は焼岳から立山にかけての地域に位置することがわかる。

火山深部のマグマ活動に関係すると考えられる地震活動のひとつとして、火山周辺での深部低周波地震活動があげられる。大見ら（2001）は、2001 年 4 月までの記録の調査により、1999 年 6 月に焼岳深部

で発生した深部低周波地震の群発活動を見出した。その後も DLF 地震の散発的な発生は続いていたが、2002 年初頭よりそれまでの DLF 地震に加え、微動的な波形を呈するイベントが発生するようになった。本報告では、これらを含めた、焼岳火山深部の地震活動について述べる。

2. 焼岳周辺の深部低周波地震活動

1997 年 4 月から 1999 年 8 月までの期間に、京都大学防災研究所上宝観測所のトリガイイベント方式の観測で検知された低周波地震と思われるイベントは約 80 個であり、そのうち飛騨山脈周辺に震源が求められた地震は 40 個弱であった。これらの震源の深さは、15km 程度から 35km 程度までに求められ、いわゆる、深部低周波地震 (Deep Low-frequency Earthquake, 以下 DLF 地震と称する) であることがわかった。Fig.2 に認められる 25km 程度よりも深い地震は、上宝観測所の定常観測処理で比較的高精度に震源決定された DLF 地震で、それらは焼岳周辺のほか、鷲羽岳や立山の周辺にも位置している。DLF 地震のうち、焼岳周辺の地殻深部からモホ面付近を震源とすると考えられる地震については、後に示すように 1998 年の群発地震の後に発生数が増加して

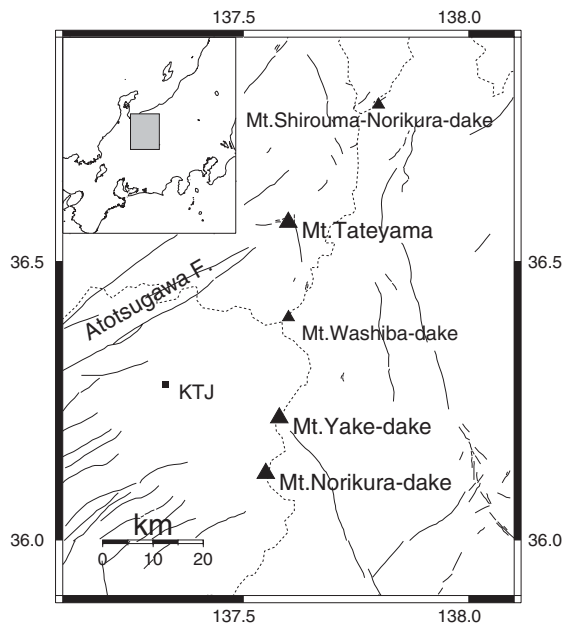


Fig. 1 Map showing the studied area. The area of the shaded inset is enlarged. Solid lines represent the active faults. Large triangles show active volcanoes while small ones show other Quaternary volcanoes.

いるように見受けられた。特に、群発地震発生から約 10ヶ月後の 1999 年 6 月には、DLF 地震と考えられるイベントのトリガ数が多かった。本章では、1998 年の群発地震後の焼岳周辺の深部低周波地震活動に焦点をあてる。

2.1 1999 年 6 月の群発的深部低周波地震活動

本節では、大見ら (2001) の結果を基に、1998 年の群発地震後に発生した、焼岳深部の群発的な低周波地震活動について述べる。大見ら (2001) の調査では、群発地震発生時期を含む、1998 年 1 月から 1999 年 12 月までの 2 年間の、上宝観測所の蔵柱観測点 (KTJ, Fig.1) のペン書き連続波形記録を調査し、目視による DLF 地震の再検出を行なった。なお、2000 年 1 月以降は、常時 KTJ 観測点の連続記録を監視している。Fig.3 に、連続記録上における、DLF 地震と通常の地震の記録例を示す。後述のように、両者は波形の特徴が大きく異なり、記録上での識別は比較的用意である。

Fig.4 に、大見ら (2001) の調査による、DLF 地震の発生数の変化を、Fig.2 の矩形で囲んだ範囲の 20km よりも浅い地震の発生数変化とともに示す。この調査によると、1998 年 9 月に群発地震発生後初めてのやや大きめの DLF 地震 2 個が観測されて

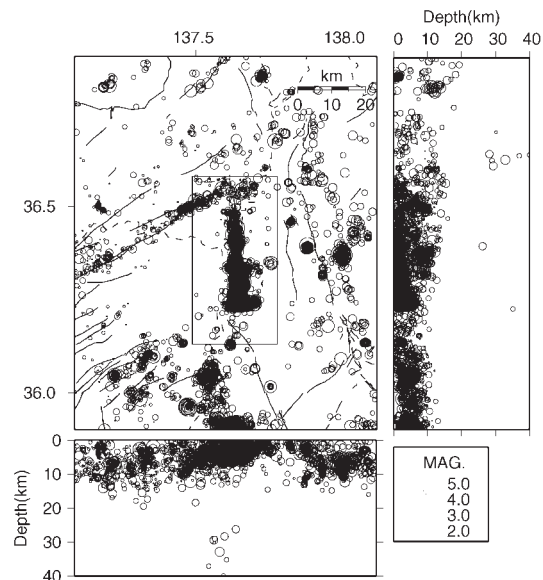


Fig. 2 Hypocenter distribution of earthquakes occurring in the period from August 1998 to April 2001. An intense swarm activity took place in the rectangular region in August 1998 and lasted for about 18 months.

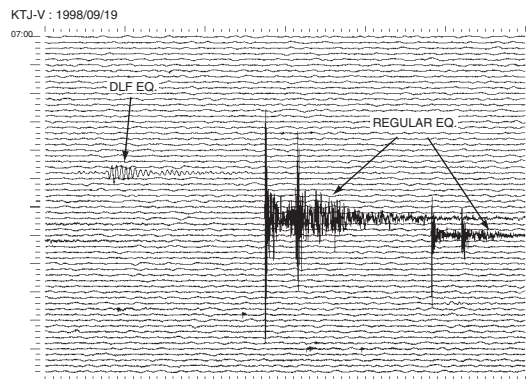


Fig. 3 Example of DLF and regular earthquakes on a continuous seismogram recorded at station KTJ. One DLF earthquake and two regular earthquakes are recognized. Seismogram on September 19, 1998 is shown.

いる。これらの振幅マグニチュードは 1.6 および 1.3 であった。その後、1998 年 10 月下旬になり、小規模な群発的な DLF 地震活動が発生した。この活動では、10 月 30 日未明から 31 日昼ごろにかけて、40 個強の DLF 地震の発生が認められた。1998 年 10 月の活動の後、目立った活動は認められなかったが、1999 年 6 月になり、再び DLF 地震の群発的な活動が観測された。1999 年 6 月の 1ヶ月間には、当地域

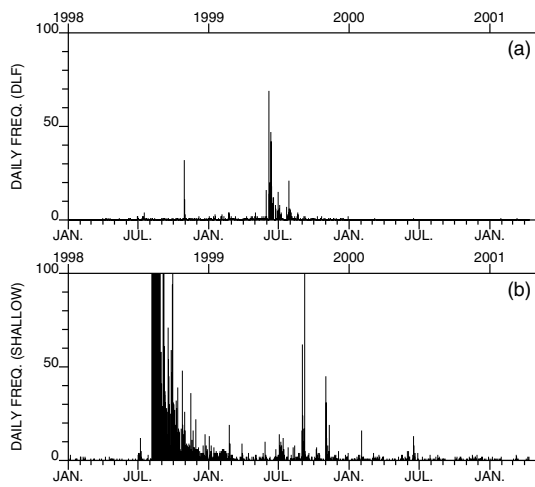


Fig. 4 Daily frequency of the deep low frequency (DLF) earthquakes observed at KTJ and located around the Yake-dake volcano (a), together with that of shallow swarm activity (b). The earthquakes within the rectangle in Figure 2 and shallower than 20 km are counted.

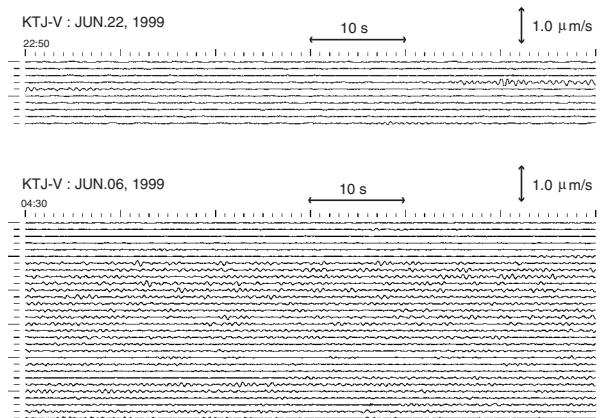


Fig. 5 Examples of DLF earthquakes beneath the Yake-dake volcano on continuous seismogram records. Vertical components observed at station KTJ are shown. (Upper) Isolated type events on June 22, 1999. (Lower) Continuous occurrence of DLF's on June 6, 1999 that lasted more than 30 minutes.

の DLF 地震発生数は 400 個を越えた。個々の地震は振幅の小さいものが多く、必ずしも震源決定が可能ではないが、それらのうち多数は、焼岳近傍に震源が決定された DLF 地震と波形が類似していることから、焼岳近傍のイベントである可能性が高いと考えられた。

このように、焼岳周辺の DLF 地震は定常的に発生するのではなく、群発的に発生する傾向が見られる。1999 年 6 月には、6 月 5~7 日、11~13 日、22

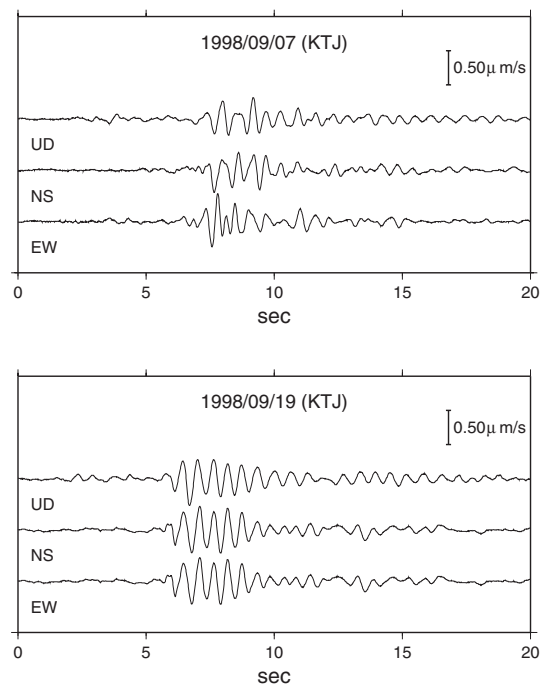


Fig. 6 Three component seismograms of the DLF events in September 1998. Seismograms observed at station KTJ are shown.

~23 日に活動のピークが見られる。6 月 22 日~23 日にかけては、比較的振幅の大きな孤立したイベントが多いが、6 月 5 日~7 日にかけては振幅が小さく個別に検測して震源決定を行なうのが困難なイベントが多い。特に、6 月 6 日には、計数が困難なほどのイベントが発生しており、早朝には約 30 分にわたり、連続的に DLF が発生する状態が観測された。Fig.5 には、1999 年 6 月 22 日の孤立して発生したイベントと、1999 年 6 月 6 日未明の連続して発生したイベントの連続記録上の波形例を示す。1999 年 6 月以降は静穏な状態が続き、後述のように孤立した DLF 地震の発生は認められるが、群発的な発生は 2003 年 4 月現在までは観測されていない。

Fig.6 に、KTJ で観測された 1998 年 9 月の DLF 地震の 3 成分波形を示す。また、Fig.7 に、これらの 2 イベントの、上下動成分の速度振幅スペクトルを示す。これらから明らかなように、波形の特徴としては、2 Hz 付近にピークを持つ単色のな波形を呈すること、P 波に比較して S 波の励起が非常に良いことなどがあげられる。これらのイベントは、今回の調査期間中最大級のイベントで、KTJ における最大振幅は両振幅でいずれも $5.5 \times 10^{-7} m/s$ を超える。これら 2 個以外のイベントはすべて最大振幅 $3.0 \times 10^{-7} m/s$ 程度以下の比較的小さなもので

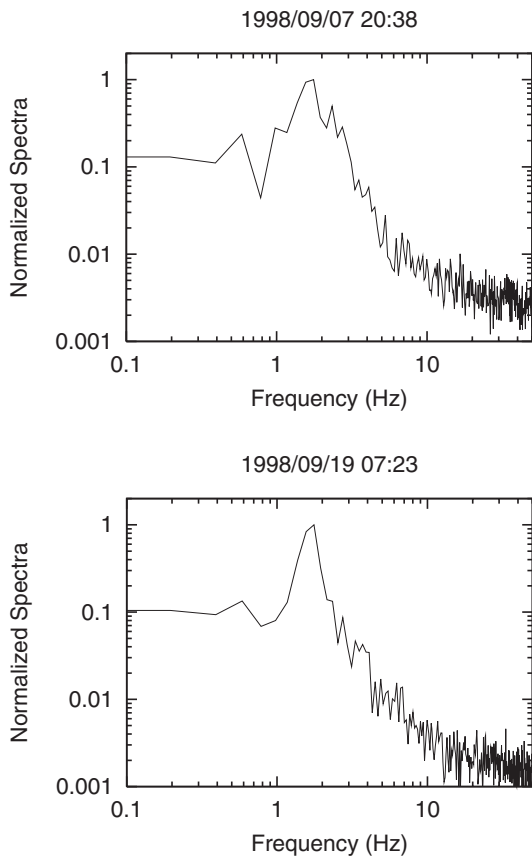


Fig. 7 Velocity amplitude spectra of the two DLF earthquakes presented in Figure 6. Spectrum of vertical component seismograms are shown.

ある。最大級の2個のイベントを含めたこれらのマグニチュードは再決定震源に基づく、0.6から1.7の間に求められた。

ここでは、1998年9月に発生したDLF地震2個、および1999年6月23日に発生したイベントを中心にした合計29個のDLF地震の震源決定を試みた。

前者は、振幅が大きいために、個別の検測をおこなった。一方、1999年6月に発生したDLF地震は、前者に比べると振幅が小さいために個別の波形の検測は困難であった。しかし、波形の相似性が高いことから波形の比較により各観測点でのPおよびS波の到着時刻を測定することは可能である。Fig.8に、KTJ観測点における、1999年6月22日から23日にかけてのDLF地震の上下動成分の波形例を示す。比較的検測が容易な6月23日04:15の地震の波形を基準に、波形の比較により他の地震のPおよびS波の到着時刻を検測した。震源計算に使用する観測点と相(PまたはS)の組み合わせは、すべての地震で共通にした。検測に使用した観測点と相の組

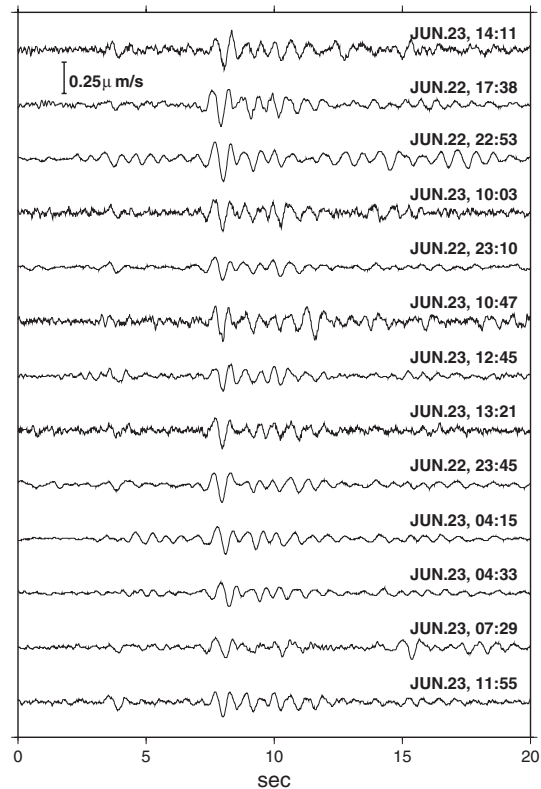


Fig. 8 Examples of waveform of the DLF's whose hypocenters are located. Thirteen waveforms out of 29 located DLF's are shown. They are vertical components observed at station KTJ. The waveforms are similar to each other. P- and S-wave arrival times used for the location are also indicated by solid circles.

み合わせをFig.9に示す。まず、これらの検測値を使用して個別の震源決定を行い、震源計算結果のPおよびS波走時の観測点ごとの走時残差の平均値を求めた。次にこの走時残差の平均値を各観測点の観測点補正值として使用して再度震源決定を行った。これは、震源域と観測点の間の媒質の不均質の影響を小さくし、相対的な震源精度を向上させるためである(たとえば、Hasegawa and Yamamoto, 1994)。震源決定に用いた速度構造は、上宝観測所における定常観測処理で使用している構造である(Fig.10)。なお、S波速度構造については $V_p/V_s=1.73$ を仮定している。

その結果、震源は、焼岳(Fig.1)の南側4~5kmの、焼岳と乗鞍岳(Fig.1)の間の深さ25km~35km付近に密集して求まることがわかった。Fig.11(a)に震源分布を、Fig.11(b)に誤差楕円の分布を示す。Fig.11には、1998年9月に発生した2個の比較的大きなイベントの震源も合わせて示しているが、こ

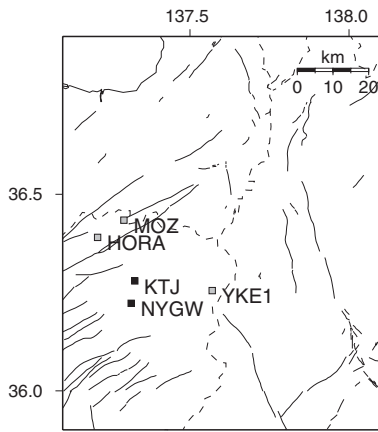


Fig. 9 Distribution of stations used for the hypocenter determination. Both P and S-wave arrival times are read from the seismograms at stations KTJ and NYGW (solid squares), while only S-wave arrival times are read at stations MOZ, HORA, and YKE1 (gray squares).

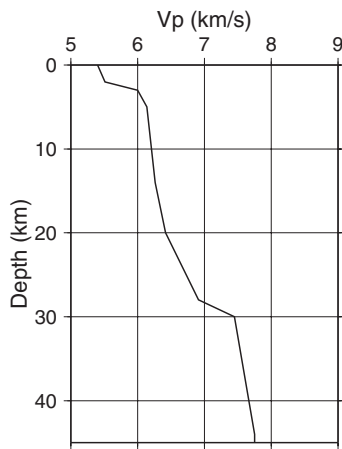


Fig. 10 P-wave velocity structure model used for the hypocenter determinations. $V_p/V_s=1.73$ is assumed for the S-wave velocity structure.

これらの震源も同様の位置に求められた。また、今回の解析では、時間的な震源の移動などは検出されなかった。

2.2 1999年6月以降の深部低周波地震活動

前節で述べた1999年6月の群発的なDLF地震活動の後、焼岳深部の地震活動は静穏な状態が続いていたが、2001年4月になって約2年半ぶりに1998年9月のイベントに匹敵する振幅を持つDLF地震が発生した。その後、2002年から2003年にかけても散発的にDLF地震が観測されているが、時間とともに波形に変化が見られる。

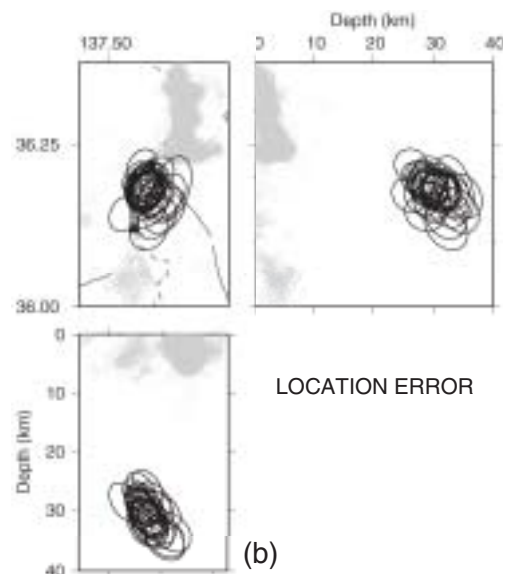
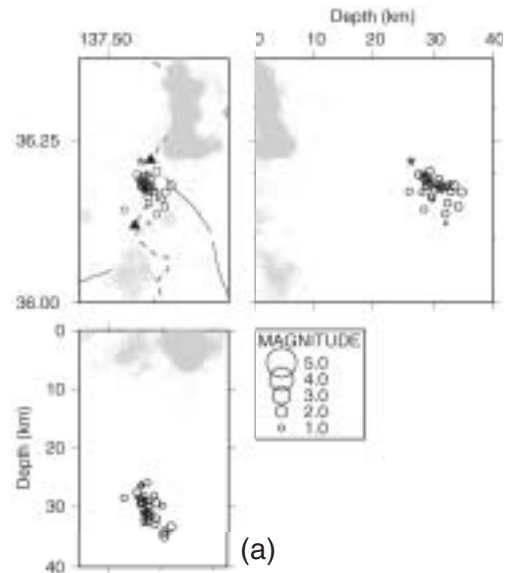


Fig. 11 (a) Hypocenter distribution of DLF events together with shallow swarm events. Open stars represent the hypocenters of the largest class DLF events shown in Figure 6, while open thick circles denote the hypocenters of the other DLF events. Gray circles show the shallow swarm events during the period from January 1998 to April 2001. Yake-dake (north) and Norikura-dake (south) volcanoes are also shown by solid triangles. (b) Location errors in the hypocenter calculation of the DLF events are represented by the projection of error ellipsoids.

Fig.12に、2001年4月から2002年9月までに発生したDLF地震の波形例を示す。さらに、Fig.13にこれらのイベント波形の速度振幅スペクトルを示す。これらとFig.6やFig.7を比較すれば明らかな

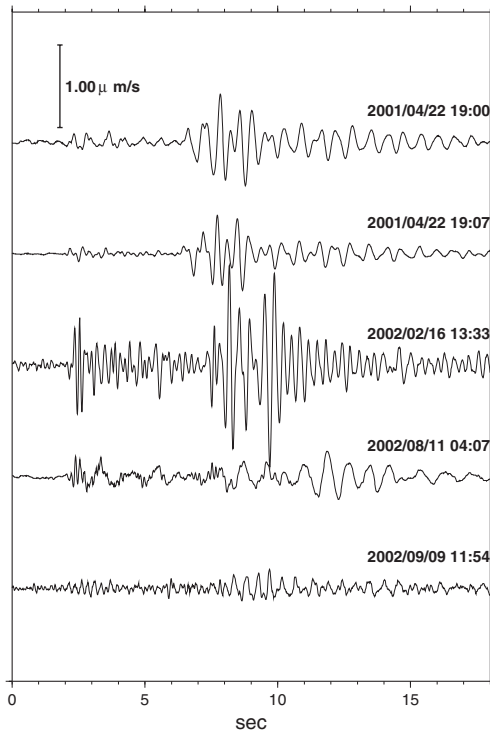


Fig. 12 Examples of waveform of the DLF earthquakes that occurred after April 2001. Vertical components observed at station KTJ are shown.

ように、2001年4月以降、次第にDLF地震の波形に高周波成分が重畳してきている。ただし、それぞれのイベントの卓越周波数は過去のイベントと同様、2Hz付近である。これらのイベントの発生メカニズムは、従前と同様の発生メカニズムに、高周波成分を発生させる機構が重畳したような発生機構をもつのではないかと予想される。しかしながら、具体的な物理モデルの描像は明らかではない。

これらのDLF地震の震源決定を行なったところ、2001年のDLF地震はそれまでのものと大差のない場所に震源が決まるが、2002年2月のDLF地震はこれよりも有意に深い場所に震源が求まることがわかった。

3. 微動的なイベントの発生

上述のように、2001年以降、孤立型のDLFイベントの散発的な発生が続き、その波形に変化が認められていたが、2002年初頭より、高周波成分を主とする微動のようなイベントが発生していることが判明した。これらのイベントは、2002年1月から3月にかけて数回の観測記録が得られている。

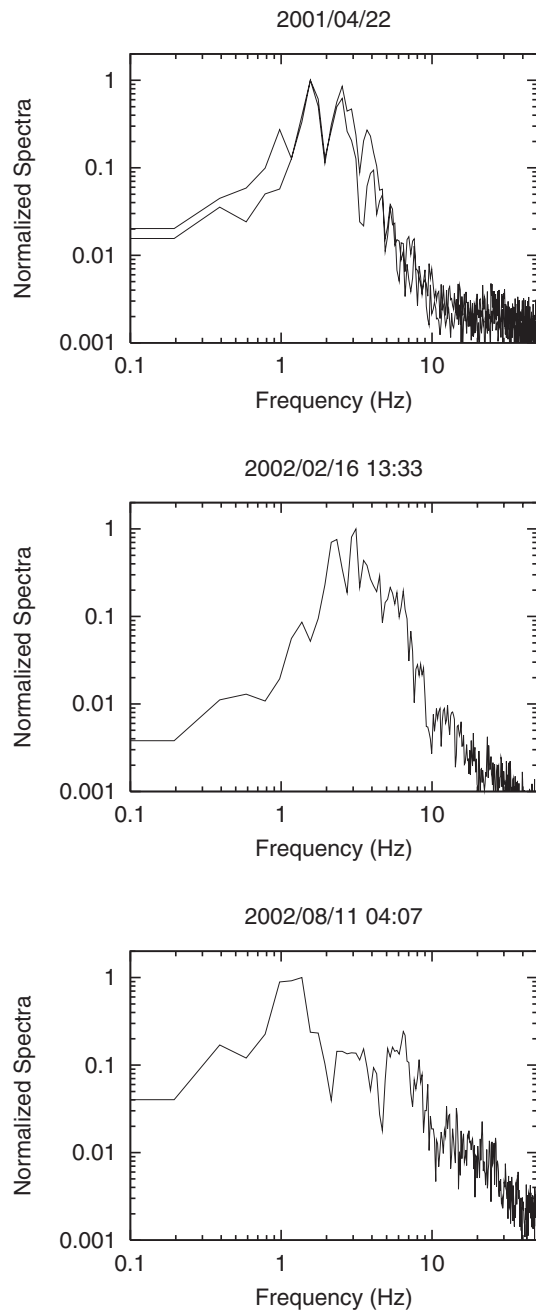


Fig. 13 Velocity amplitude spectra of the DLF earthquakes that occurred after April 2001. Spectrum of vertical component seismogram observed at station KTJ are shown.

Fig.14に、それらのうちの2002年2月19日に発生した微動的イベントの、KTJおよびNYGW観測点（Fig.17参照）での連続記録上での波形例を示す。これらのイベント波形は、単独の観測点での波形のみに着目した場合には、一見地動ノイズと見違えるようなものであるが、複数観測点の記録を同時にチェックすることで自然現象であることが識別可

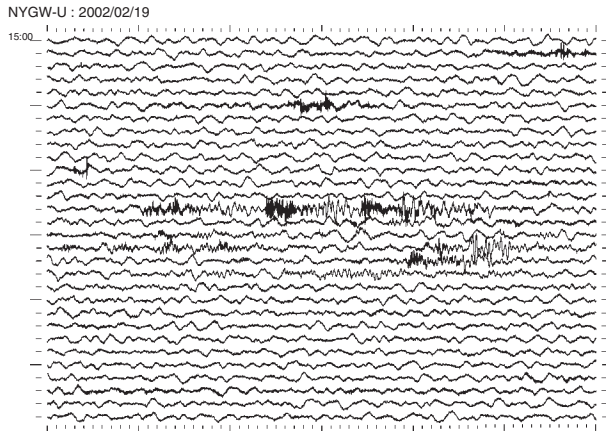
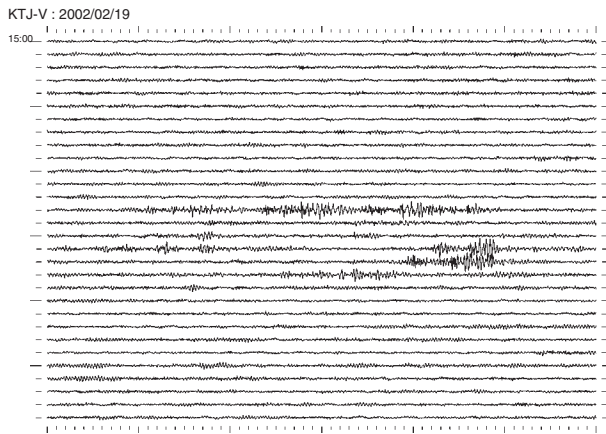


Fig. 15 Velocity amplitude spectra of a tremor-like event shown in Fig.14. Spectrum of vertical component seismogram observed at station KTJ is shown.

Fig. 14 An example of tremor-like events that occurred on February 19, 2002. Continuous records of the vertical component seismograms observed at stations KTJ (upper) and NYGW (lower) are shown.

能となる。また, Fig.15にKTJ観測点における波形の速度振幅スペクトルを示す。Fig.13等と比較すると, 明らかに高周波成分が重畳しており, また, 特定の卓越周波数は認められないことが見てとれる。

ここでは, これらの微動的イベントの震源を決定することを試みた。個別の波形を検測することは, DLF地震のそれにも増して困難であることから, 複数観測点の包絡線(エンベロープ)波形を利用して検測を行なった。Fig.16に, 2002年2月19日15:10からの10分間のエンベロープ波形を示す。ここでは, 各観測点の南北動成分のエンベロープ波形を示している。なお, ここに示した観測点の分布はFig.17のとおりである。Fig.16では, 複数観測点で対応して観測されるイベントの識別が容易で, Fig.14等に比較して多くのイベントを認識できることがわかる。それぞれの観測点のエンベロープ波形

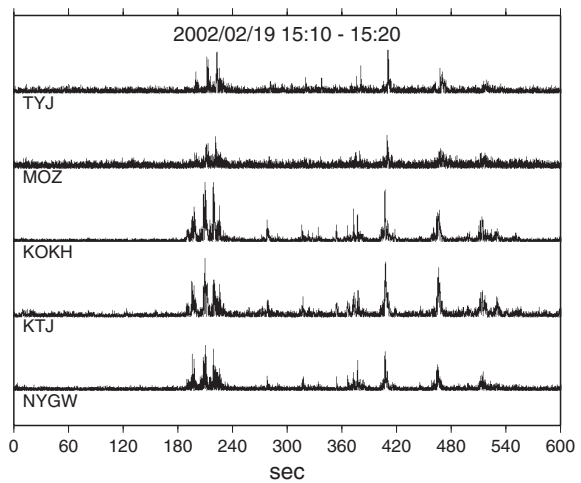


Fig. 16 Envelope waveform of a tremor-like event occurred on February 19, 2002. Waveform of NS component seismograms are shown.

の上で, 対応するピークの時刻を検出し, これがS波速度で伝搬してくる信号であると仮定して通常の方法で震源決定を行なった。

Fig.18に, 決定された微動的イベントの震源分布を示す。ここには, 1999年6月の群発性のDLF地震や, 2001年以降の孤立型のDLF地震の震源も同時に示している。これによれば, 微動的イベントの震源は, 通常の浅部の地震とDLF地震の中間の深さに求められることがわかった。ただし, 微動的イベントの震源は, エンベロープ波形から検出したS波到着時刻だけから決定したものであるため, その精度は必ずしも高くない。微動的イベントの震源を正確に決定することは今後の課題である。

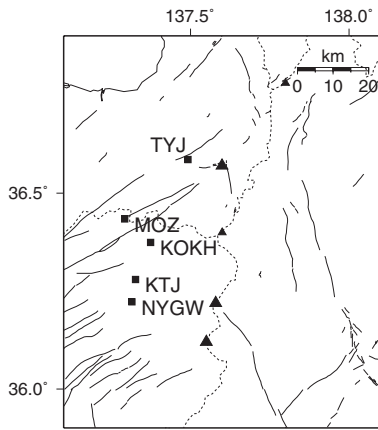


Fig. 17 Distribution of stations used for the hypocenter determination of tremor-like events. Solid triangles and squares represent volcanoes and seismic stations, respectively.

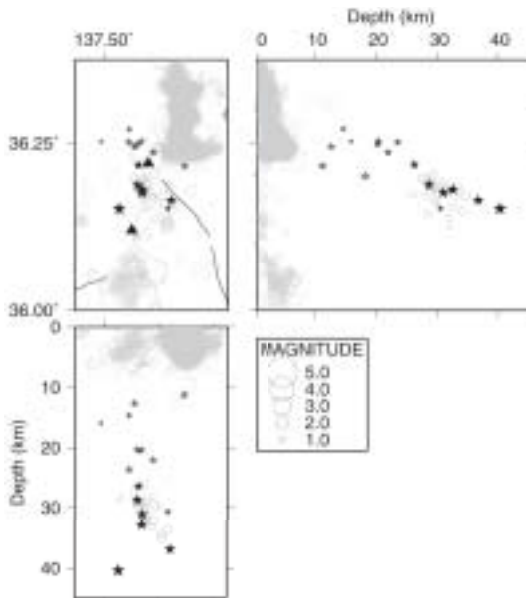


Fig. 18 Hypocenter distribution of the tremor-like events. Open stars represent the tremor-like events that occurred during the period from January 2002 to March 2002. Solid stars shows the DLF earthquakes after April 2001. Gray circles indicate shallow earthquakes and swarm activity of DLF earthquakes described in chapter 2. For other symbols, see Figure 11

4. まとめと今後の課題

1998年8月に始まった飛騨山脈の群発地震に引き続いて、焼岳周辺での深部地震活動が活発化したことが明らかになった。

群発地震開始から10ヶ月後の1999年6月には、

深部低周波地震の群発活動が観測された。地殻深部のモホ面付近に発生するDLF地震については、これまでも火山フロントや活火山周辺での活動が報告されている。たとえば、鶴川・小原(1993)では関東地方の火山フロント周辺での深部低周波地震活動が報告されており、西富・武尾(1996)は、それらのうちの栃木県西部地域で発生するDLF地震の詳細な調査を行なった。Hasegawa and Yamamoto(1994)は、東北日本弧のDLF地震の綿密な調査を行い、それらが活火山の深部やP波速度の低速度領域周辺に位置することを見出した。岡田・長谷川(2000)は、そのうち鬼首地域のDLF地震の発震機構を調べ、それらに非ダブルカップル成分が有意に含まれることを示した。いずれの報告でも、地殻深部のDLF地震はマントルから地殻へのマグマ上昇の反映の可能性等、地下深部のマグマ活動に関連するものであることが示唆されている。

焼岳近傍に発生するDLF地震に見られる特徴は、その発生深度が25 kmから35 kmと深いこと、卓越周波数が2 Hz付近であること、群発性を呈することがあること、など、西富・武尾(1996)や、岡田・長谷川(2000)などが解析したDLF地震とも共通点が認められ、今回のDLF活動も焼岳の深部マグマ活動に関連している可能性が考えられる。

1999年6月の群発的な深部低周波地震活動の後、孤立的な低周波地震の発生は続いていたが、その後2002年の初頭から、微動のような波形を呈するイベントが観測されるようになった。これらのイベントは、比較的高周波成分までを含んでおり、これまでの深部低周波地震とはことなるメカニズムで発生していることが予想される。これらのイベントの震源決定は困難で、必ずしも精度は高くないが、通常の浅い地震と深部低周波地震の中間的な深さに震源が求まることがわかった。

今後は、これらの地震の発生メカニズムの解析や、時間的な活動の推移について調査を行なっていく必要がある。飛騨山脈では、1998年の群発地震活動の他にも、過去に群発地震活動が発生している。それらは、1990年の焼岳、烏帽子岳、上高地周辺の一連の活動、1993年の穂高岳、槍ヶ岳周辺の活動などである(和田ら, 1994; 和田ら, 1999など)。これらの群発地震活動についても、同様の深部地震活動が連動したのかを調査することも、今回の活動の特徴を把握し、火山活動との関連を考察するためにも重要であると考えられる。

謝 辞

今回の調査にあたっては、京都大学の微小地震観測点のほか、名古屋大学の焼岳観測点 (YKE1)、気象庁の岐阜丹生川観測点 (NYGW)、および Hi-net の神岡観測点 (KOKH) の地震波形記録も参照させていただいた。記して謝意を表す。一部の図の作成には、GMT (Wessel and Smith, 1998) を使用した。

参考文献

- 鶴川元雄・小原一成 (1993) : 関東地方の火山フロント下のモホ面付近に発生する低周波地震, 火山, 38, pp. 187-197.
- 大見士朗・和田博夫・伊藤 潔 (2001) : 1998 年飛騨山脈群発地震後の深部低周波地震群発活動, 地震, 54, pp. 415-420.
- 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, pp. 47-63.
- 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, pp. 43-59.

- 和田博夫・伊藤 潔・小泉 誠 (1994) : 飛騨山地の地震活動 - 1993 年槍ヶ岳付近の活動 -, 京都大学防災研究所年報, 第 37 号 B-1, pp. 365-380.
- 和田博夫・伊藤 潔・大見士朗・岩岡圭美・池田直人・北田和幸 (1999) : 1998 年飛騨山脈群発地震活動, 京都大学防災研究所年報, 第 42 号 B-1, pp. 81-96.
- 和田博夫・伊藤 潔・大見士朗 (2000) : 飛騨山脈の群発地震 (その 2) - 周辺活動域への影響 -, 京都大学防災研究所年報, 第 43 号 B-1, pp. 115-121.
- Hasegawa, A. and Yamamoto, A. (1994): Deep, low-frequency microearthquakes in or around seismic low-velocity zones beneath active volcanoes in northeastern Japan, *Tectonophys.*, 233, pp. 233-252.
- Wessel, P. and Smith, W. H. F. (1998): New, improved version of the Generic Mapping Tools released, *EOS Trans. AGU*, 79, 579.

Deep Seismic Activity around Yake-dake Volcano, Central Japan.

Shiro OHMI, Hiroo WADA, and Kiyoshi ITO

Synopsis

Deep seismic activities possibly triggered by an intense shallow swarm activity have been observed around Yake-dake volcano, central Japan. On August 1998, an intense shallow swarm activity took place along the major axis of the Hida mountain range near the Yake-dake volcano. On June 1999, a swarm activity of deep low-frequency earthquakes was observed beneath the Yake-dake volcano at the depths of 25 km - 35 km. DLF earthquakes have been observed after the swarm of DLF events with the slight changes of the waveforms. Since January 2002, tremor-like earthquakes, that contains the higher frequency components, have been observed. They were located at the intermediate depth between shallow and DLF earthquakes. These deep seismic activities are probably related to the magma activity of the Yake-dake volcano.

Keywords: Yake-dake volcano, deep low-frequency earthquake, tremor, magmatic activity