

鳥取県西部に発生する深部低周波地震の現状

大見士朗・廣瀬一聖・James J. MORI

要 旨

平成12年(2000年)鳥取県西部地震の震源域では、本震前から深部低周波地震(DLF)が発生しており、本震後に活動が活発化した。これらのDLF地震は、震源断層の深部延長上に位置しており、断層の非地震性下部延長上で発生している可能性がある。地震波速度構造や非抵抗構造などからは、この領域には水等の流体が存在すると予想され、これが断層下部延長部の非地震性すべりや、上部地殻への応力蓄積に影響を与えている可能性がある。DLF地震はそれらの流体の活動の指標のひとつとして重要であろう。

キーワード: 深部低周波地震, 地震断層の下部延長, 流体移動

1. はじめに

深部低周波地震は、これまでの研究では主に火山周辺のマグマ活動に関連して議論されてきた(たとえば Hasegawa and Yamamoto, 1994; 鶴川・小原, 1993 など)。しかしながら、日本列島の背弧側には、火山とは離れた地域で深部低周波地震が発生する活断層がある。西南日本では、鳥取県西部や京都府中部をはじめとしていくつかの地域でそのような報告がある(たとえば, Ohmi, 2001)。これらのイベントは、活断層深部で発生するこれまで知られていなかった新しい種類の低周波地震であると考えられる。それらのうち、平成12年鳥取県西部地震の震源域付近では、本震の発生前から複数の深部低周波地震が発生しており、その活動は本震後も続いている。2003年4月には、これまでの最大規模の活動が発生した。本報告では、これらの鳥取県西部地震の震源域の深部低周波地震を中心に報告する。

2. 鳥取県西部地域の深部低周波地震活動

鳥取県西部地域では、2000年10月6日に、 $M_w6.7$ の地殻内地震である鳥取県西部地震(Fig. 1)が発生した(たとえば, Ohmi et al., 2002を参照)。この地震の震源域の深さ30km付近で低周波地震が観測されている。Fig.2aに、気象庁の震源リストによる、1999年1月から2004年3月31日までの震源分布を

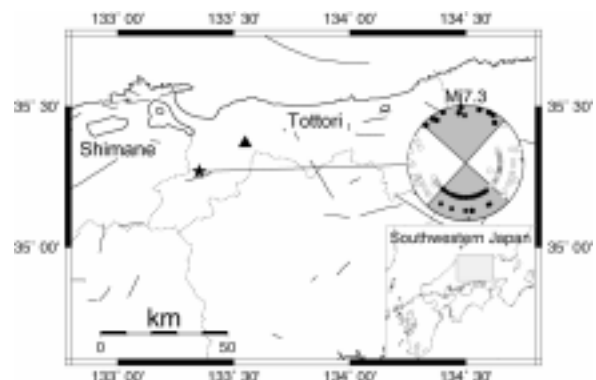


Fig. 1 Index map of Tottori prefecture and surrounding region. Dotted lines show the prefecture borders and thick lines represent the active faults. Daisen volcano, which is a Quaternary volcano, is denoted by a solid triangle. Epicenter of the 2000 Western Tottori Earthquake is shown by a star. Focal mechanism of the mainshock obtained from first motion of P-waves is also shown. Polarities of first motion are denoted by solid (up) and open (down) circles.

示す。これによれば、2000年10月6日の鳥取県西部地震本震発生までの期間に、本震震央の西約8kmの深さ30km前後に震源が決められた地震が4個あり、これらはすべて深部低周波地震(以下、DLFとよぶ)であった。これらの発生時期は、1999年6月に2個、

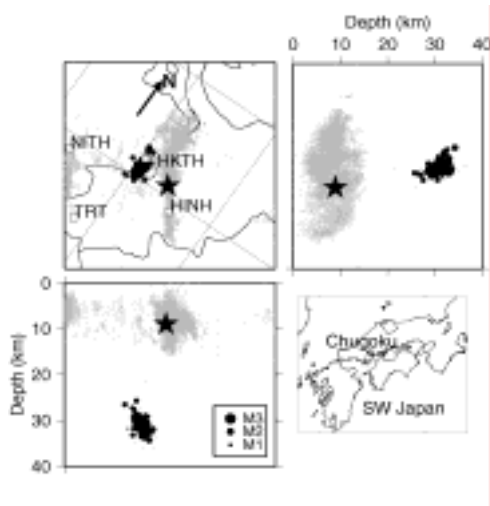


Fig. 2(a): Hypocenter distribution of the deep low-frequency earthquakes (solid) together with shallow earthquakes (grey). Hypocenters from the catalogue of the Japan Meteorological Agency (JMA) from January 1999 to March 2004 are plotted. Star denoted the hypocenter of the 2000 Western Tottori earthquake. Seismic station (open square) TRT is operated by the Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University (DPRI), while HKTH, HINH, and NITH are operated by National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention (NIED) as a part of the Hi-net (High Sensitivity Seismograph Network Japan). High sensitivity accelerometers (tiltmeters) are also installed in the above Hi-net stations.

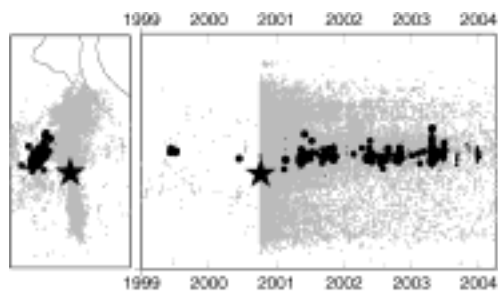


Fig. 2(b): Space-time plot of the DLF earthquakes from January 1999 to March 2004. For explanation of symbols, see Figure 2a.

1999年7月に1個，そして2000年6月に1個である。当地域では，本震発生後もDLFの発生が続いており，本震後3年半以上が経過した後もDLFの定常的な発生が見られる (Fig.2b)。なお，DLFの発生場所には特段の変化は見られない。時空間分布(Fig.4)を見ると，冬季に発生数が減少するように見受けられるが，これは季節風等によるノイズレベルの増大によ

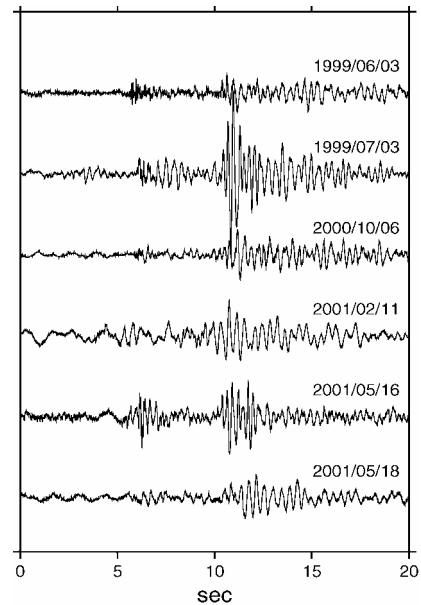


Fig 3(a): Vertical component waveforms of the DLF earthquakes observed at station TRT. Magnitude of these DLF earthquakes are up to 1.5.

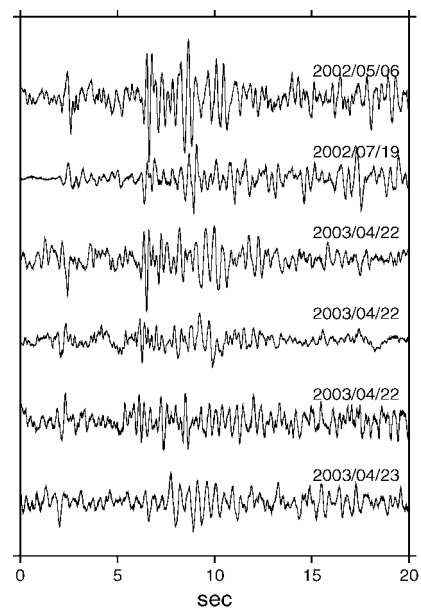


Fig.3(b): Waveforms of larger DLF earthquakes. Vertical component seismograms observed at station HKTH are shown. Magnitude of these events are larger than 2.0.

り検知能力が低下するためではないかと考えられる。

Ohmi and Obara (2002)による，これらのDLFの波形の特徴は以下のようなものである。(1)卓越周波数は2Hzから4Hzである。しかし，単色的な地震ではない。(2)P波，S波ともに認められるが，一般にS波の方が大き

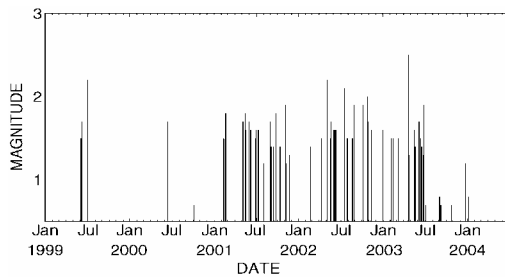


Fig 4: Magnitude-time diagram of the DLF earthquakes from January 1999 to March 2004. Number of larger DLF earthquakes ($M > 2.0$) increased since May 2002.

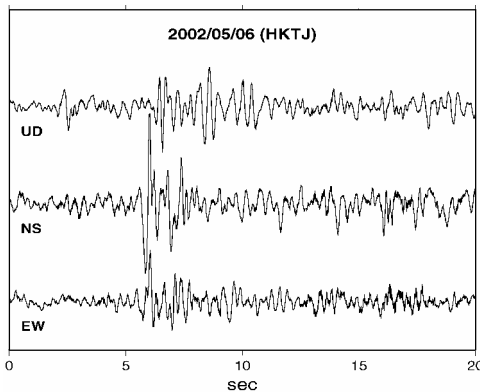


Fig. 5(a): Three components seismograms of a DLF earthquake of M2.2 observed at station HKTH.

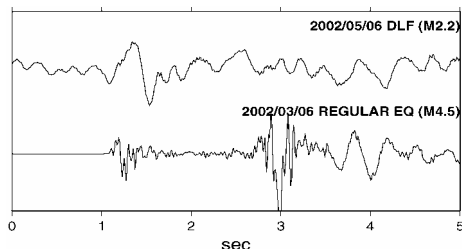


Fig. 5(b): Comparison of the P-wave onset portion of the DLF earthquake of M2.2 with that of regular earthquake of M4.5 which occurred in the western Tottori region. Vertical component seismograms observed at station HKTH are shown. Amplitudes are normalized using maximum amplitude of each trace.

な振幅を持つ。(3)振動の継続時間は一分程度であるが、まれに数分継続することがある。(4)メカニズム解析の結果によれば、ダブルカップル型力源よりもシングルフォース力源を仮定すると、S波とP波の振幅比やS波の振動方向をよりよく説明できるイベントがある。シングルフォース型力源は水やマグマなどの流体の移動を示唆するものである。観測された地震波形の例をFig.3に示す。

鳥取県西部地震の本震から約3年半の間に、400個

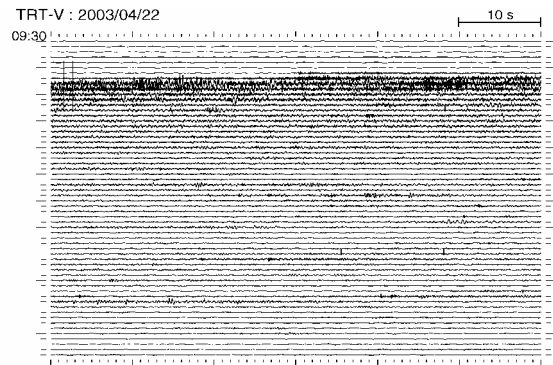


Fig 6(a): Vertical component seismogram of the continuous tremor-like events observed at station TRT. Continuous seismogram from 2003/4/22 09:30 to 10:30 JST is shown.

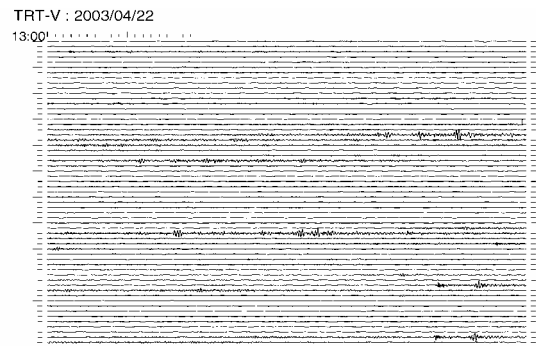


Fig 6(b): Vertical component seismogram of the continuous occurrences of the isolated events observed at station TRT. Continuous seismogram from 2003/4/22 13:00 to 14:00 JST is shown.

以上のDLFイベントが検知された。これらのマグニチュードは、高々1.5程度であるが、MTダイアグラムによれば、2002年前半より、それまでに比較して若干大きめの、マグニチュード2クラスのDLFが散発するようになったことが認められた (Fig.4)。これらの「大きめ」のイベントは、それ以外の小さなイベントに比べて、P波の立ち上がり部分のパルス長が明瞭に長いという特徴を持つ (Fig.3bおよびFig.5)。Fig.5(b)は、このようなDLF地震と、通常M4.5の地震のP波立ち上がり部分を比較した図である。DLF地震のマグニチュードは2.2である。この図から明らかのように、DLF地震のP波の立ち上がり部分は、マグニチュードが2以上大きな通常の地震のそれよりも長い。これは、これらのDLFイベントが、通常の地震の、マグニチュードと震源時間のスケール則から予想されるものよりは長い震源時間関数を持つことを示唆しており、DLF地震の震源過程が通常の地震のそれとは異なることを示すものと考え

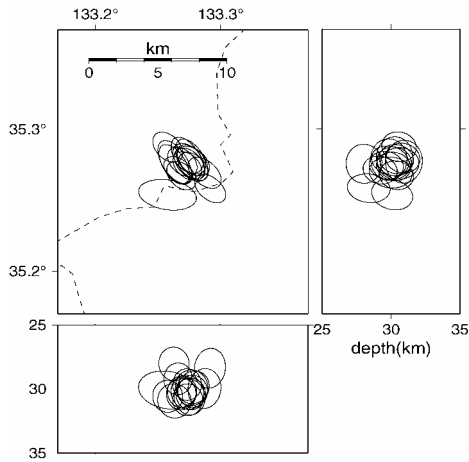


Fig.7(a): Relocated hypocenters of M2 class DLF earthquakes. Hypocenter distribution of DLF earthquakes represented by error ellipsoids.

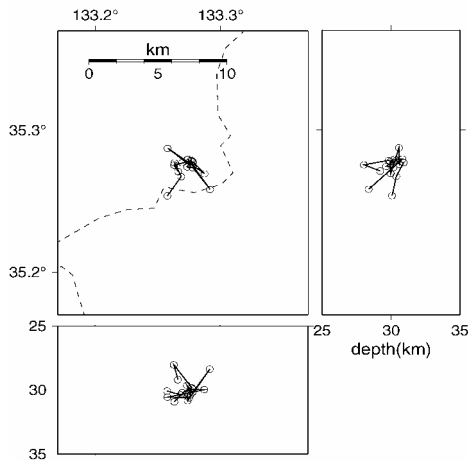


Fig.7(b): Relocated hypocenters of M2 class DLF earthquakes. Time-sequence of the occurrence of the M2 class DLF earthquakes is shown.

られる。

3. 2003年4月の群発的活動

2003年4月22日から25日ごろにかけて、これまでで最大規模のDLFの群発活動が発生した。これは4月22日の9時半ごろから発生し、消長を繰り返しながら4月25日の未明まで続いた。特徴的なこととしては、これまでの本地域のDLF活動は、基本的に孤立型のイベントが主であったのに対し、今回の活動は、連続微動タイプのイベントが多く見られたことである。たとえば、4月22日9時半ごろのイベント(Fig.6a)は、45分以上にわたり振動が継続した。

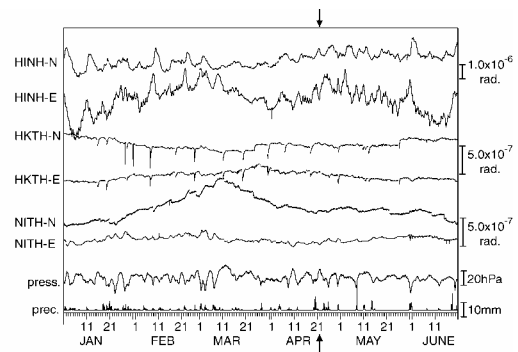


Fig 8: Tilt change in the western Tottori region from January 2003 to June 2003. High sensitivity accelerometer (tiltmeter) records obtained at stations HINH, HKTH, and NITH were analyzed. Tidal effect and response of the atmospheric pressure were removed using the BAYTAP-G program. Arrows indicate the period when the continuous tremor-like seismic signal was observed.

さらに孤立型イベントの連続発生という形態のものも見られる(Fig.6b)。これまでの最大の継続時間を持つイベントは、2000年6月のもので、約7分から10分程度であったが、今回のものは遥かにそれを凌ぐ規模の活動である。

気象庁によって、孤立型イベントとして震源を決められたもののうち、M2を超えるものは約10個あり、比較的規模の大きいイベントが含まれていたことがわかる。これらの比較的大きめのイベント約20個について、観測点補正値を評価して震源の再決定を行なった(Fig.7)。Fig.7(a)は、震源分布を計算時の誤差楕円で表現したものであり、Fig.7(b)はこれらの震源位置を時間順に結んだものである。これらの結果を見る限り、震源位置は誤差の範囲でほぼ同じで、短時間での震源移動はないように見える。長期間での震源移動の有無の検証はこれからの課題である。

西南日本では、南海トラフに沿って発生する深部低周波微動が報告されている(Obara, 2002)。さらに、この低周波微動に連動してプレート境界面でスロースリップが発生することも報告されている(たとえば、小原・廣瀬, 2004)。また、北米のCascadia地域でも同様の現象が発生することがある(Rogers and Dragert, 2003)。そのため、鳥取県西部地域でも活発な連続微動活動に伴う地殻変動の有無を確認するために、Hi-net観測点に併設された高感度加速度計(傾斜計)データ(小原, 私信)の解析を行った。Hi-net観測点のうち、HKTH, NITH, HINHの3点(Fig.2a

参照)の傾斜計記録を, BAYTAP-G (Tamura et al., 1991)で解析した。結果を Fig.8 に示すが, 10^{-7} radian 程度以上の変動は検知できなかった。

4. 議論と結論

地震波トモグラフィ解析の結果 (Zhao et al., 2003) によれば, 鳥取県西部地震震源域では, 下部地殻から上部マントルにかけての領域に低速度領域が認められる。また, 比抵抗構造にも, 低比抵抗領域が認められる (Oshiman et al., 2003)。これらは, いずれもこの領域に流体が存在することを示唆している。さらに, Ohmi and Obara (2002)が示すように, DLF 地震の中にはシングルフォース型力源を呈するものもあることから, これらの DLF 地震は, その震源域に流体が存在する直接的な証拠であることが考えられる。

最近の研究には, 地震を発生させる断層には, 下部地殻に伸びる延長部があり, その部分が非地震性のすべりを起こしていて, これがロックしている上部地殻に地震発生に必要な応力を蓄積する原因であるとするものがある (たとえば, Iio and Kobayashi, 2002)。本小論で報告した鳥取県西部地域に発生する DLF 地震は, 浅い余震の分布の延長上に位置しており (Fig.2a), Iio and Kobayashi 等の提唱するように, 下部地殻内部に断層の非地震性延長部が存在して, その部分で発生している可能性がある。断層の非地震性下部延長部やそこに存在するかもしれない流体の挙動は, 断層の下部延長部の非地震性すべりに影響を及ぼし, 結果として上部地殻への応力蓄積や地震発生のプロセスに影響を及ぼしている可能性がある。したがって, 活断層深部の DLF 地震の発生様式やその地域の特徴等を調べることで, 当該活断層の活動度の把握の一手段となる可能性も考えられる。

謝 辞

今回の解析では, 防災科学技術研究所の Hi-net データを利用させていただいた。また, 気象庁の速報震源データも参照させていただいた。記して感謝する。

参考文献

鷓川元雄・小原一成 (1993) : 関東地方の火山フロント付近のモホ面周辺に発生する深部低周波地震, 火山, **38**, pp.187-197.
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**, pp. 233-252.
Iio, Y. and Kobayashi, Y. (2002): A physical understanding of large intraplate earthquakes, *Earth, Planets and Space*, **54**, pp. 1001-1004.
Obara, K. (2002): Nonvolcanic deep tremor associated with subduction in southwest Japan, *Science*, **296**, pp. 1679-1681.
Obara, K. and Hirose, H. (2004): Episodic deep low-frequency tremor and slow slip in southwest Japan, *Abstracts, Japan Earth and Planetary Science Joint Meeting*, J078-021.
Ohmi, S. (2001): Deep low-frequency earthquakes associated with active faults in southwest Japan, *Eos Trans. AGU*, **82**, 871.
Ohmi, S. and Obara, K. (2002): Deep low-frequency earthquakes beneath the focal region of the Mw 6.7 2000 Western Tottori earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, **29**, No.16, 10.1029/2001GL014469.
Ohmi, S., Watanabe, K., Shibusaki, T., Hirano, N., and Nakao, S. (2002): The 2000 Western Tottori Earthquake - Seismic Activity Revealed by the Regional Seismic Networks -, *Earth, Planets and Space*, **54**, pp. 819-830.
Oshiman, N, Aizawa, K. and Shiozaki, I. (2003): Deep crustal resistivity structure in and around the focal area of the 2000 Tottori-ken Seibu Earthquake, Japan, *IUGG2003*, JSA10/30P/D-005.
Rogers, G. and Dragert, H. (2003): Episodic tremor and slip on the Cascadia subduction zone: The chatter of silent slip, *Science*, **300**, pp. 1942-1943.
Tamura, Y., Sato, T., Ooe, M. and Ishiguro, M. (1991): A procedure for tidal analysis with a Bayesian information criterion, *Geophys. J. Int.*, **104**, pp. 507-516.
Wessel, P. and Smith, W. H. F. (1998): New, improved version of the Generic Mapping Tools released, *Eos Trans. AGU*, **79**, 579.
Zhao, D., Tani, H. and Mishra, O. P. (2003): Crustal heterogeneity in the 2000 Tottori earthquake region: Effect of fluids from slab dehydration, *Phys. Earth Planet. Inter.*, in press.

Deep-low Frequency Earthquakes on the Downward Extension of the Seismogenic Fault of the 2000 Western Tottori Earthquake

Shiro OHMI, Issei HIROSE, and James J. MORI

Synopsis

Deep low-frequency (DLF) earthquakes have been discussed in association with fluid (magma) activity around volcanoes. In this paper, however, we will show another example of DLF activity beneath active faults in the western Tottori region where a Mw6.7 earthquake occurred on October 2000. DLF earthquakes had been observed prior to the mainshock and the activity was increased after the mainshock. They are distributed around 30 km depth and seem to be located at the downward extension of the seismogenic fault. Seismic tomography analysis and the resistivity structure both indicate the fluid activity in the focal region of the DLF events. One of the DLF earthquakes exhibits the single-force type source mechanism, which indicates the transport of fluid such as water or magma. Therefore, these DLF earthquakes are probably the direct evidence of the fluid activity of the downward extension of the seismogenic fault.

Keywords: deep low-frequency earthquake, downward extension of seismogenic faults, fluid