

西南日本内陸の活断層に発生する深部低周波地震

大見士朗

要 旨

西南日本には、深部低周波地震が発生する内陸活断層系が存在する。鳥取県西部地域のほか、数ヶ所で同様の観測例があり、これらの地域には下部地殻から上部マントル領域に地震波の低速度領域が存在する。これは、断層深部の流体の存在を示唆しており、地震発生に至る過程の解明に重要な知見を与える観測例となるだろう。

キーワード：深部低周波地震，内陸活断層，流体移動

1. はじめに

これまでの研究では、深部低周波地震(以下 DLF と称する)は、主に活火山や第四紀火山の周辺で観測されることが報告されている。日本国内では、関東地方の火山フロント周辺における観測例(鶴川・小原, 1993)や、東北日本弧における詳細な観測報告(Hasegawa and Yamamoto, 1994)などがある。

鶴川・小原(1993)では、関東地方の火山フロント周辺での DLF 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ない、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いだした。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など、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。

ところで、2000 年 10 月 6 日に発生した鳥取県西部地震の震源域では、地震発生前から DLF が発生していたことが報告されている(Ohmi and Obara, 2002)。これは鳥取県西部地震の本震発生前から震

源域深部に流体が存在したことを示唆しており、地震発生層の流体の挙動と関連して興味を持たれている。そのような観点で、中部、近畿、中国地方の地震活動を概観したところ、火山の有無にかかわらず、DLF が観測されている活断層系があることがわかった。本報告では、鳥取県西部地震の震源域をはじめとして、西南日本の内陸活断層に関連して発生している DLF 地震の例について報告する。

2. 鳥取県西部地震震源域の低周波地震

2.1 震源分布と発生の時系列

平成 12 年(2000 年)10 月 6 日 13 時 30 分頃、鳥取県西部を震源とする $M_w=6.7$ の地震が発生し、気象庁により「平成 12 年鳥取県西部地震」と命名された。本震の震源域では、1997 年 10 月から本震発生までの 3 年間に、本震震央の 8km 程度西側で、断層面の深部延長上と思われる深さ 30km 前後の場所に震源が決められた地震が 4 個あり、これらはすべて DLF 地震であった。これらの発生時期は、1999 年 6 月に 2 個、1999 年 7 月に 1 個、そして 2000 年 6 月に 1 個である。これらの地震のマグニチュードは 1.5 から 2.2 の範囲に決められている。なお、本地域の通常の地震の深さは 20km 程度までであり、これらの低周波地震の識別は比較的容易である。

Fig.1 に、気象庁の速報震源リストに基づく、鳥

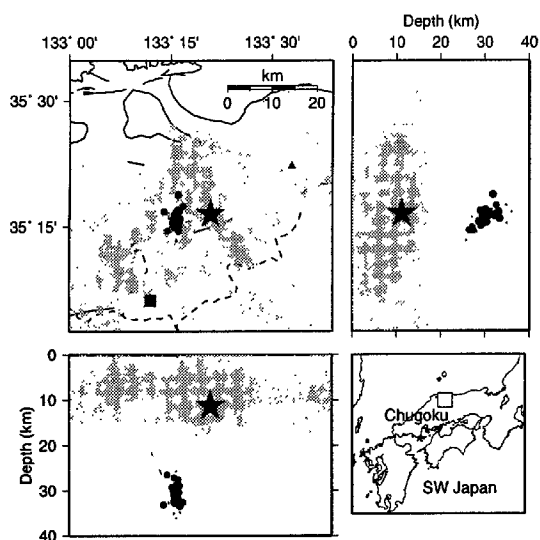


Fig. 1 Hypocenter distribution of the deep low-frequency earthquakes (solid) together with ordinary earthquakes (grey). Hypocenters from the earthquakes catalogue of the Japan Meteorological Agency (JMA) from January 1999 to October 2001 are plotted. Star denotes the hypocenter of the 2000 Tottori-ken Seibu earthquake ($M_w=6.7$). Station TRT (solid square) is operated by the Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University (DPRI). A Quaternary volcano, Mt. Daisen (triangle), is located about 30 km away from the mainshock. The area of the shaded inset is enlarged.

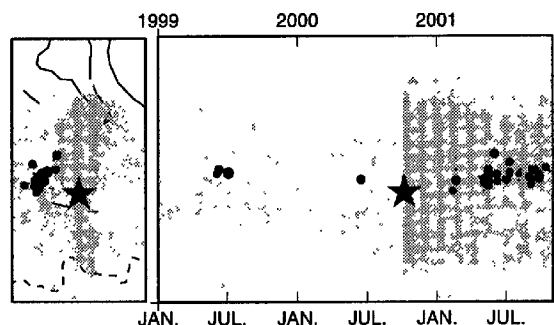


Fig. 2 Space-time plot of the DLF earthquakes from January 1999 to October 2001. For explanation of symbols, see Fig.1

取県西部地震の余震分布と、DLF地震の震源分布を示し、Fig.2には、同じ震源リストに基づく、DLF地震発生の時系列を示す。本震の発生前には、前述のように4個のDLF地震が検知されたのみであったが、本震発生後にはその活動は活発化し、本震発生後の約1年間に、50個を越すDLF地震が検知さ

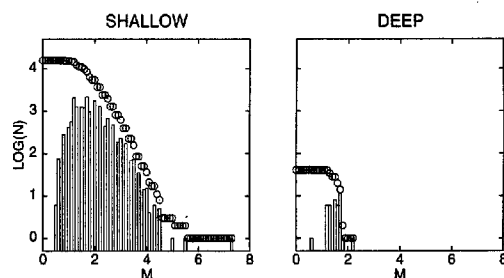


Fig. 3 Magnitude - frequency diagram of the aftershocks of the Western Tottori Earthquake (left) and that of the deep low-frequency earthquakes beneath the focal region of the Western Tottori Earthquake (right).

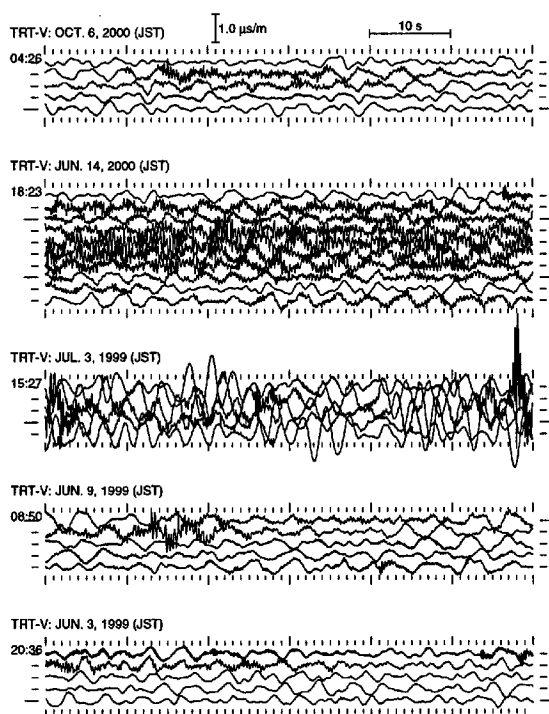


Fig. 4 Vertical component waveforms of the DLF earthquakes observed at station TRT. These earthquakes occurred before the 2000 Western Tottori earthquake.

れている。

なお、本震発生前数日間の京都大学防災研究所附属地震予知研究センター鳥取観測所（以下、鳥取観測所と記す）のTRT観測点（Fig.1参照）の連続記録を精査したところ、本震に先行する約9時間前の2000年10月06日04時27分（JST）頃にも同地域でDLF地震の発生が認められた。その震源も、過去の4個と同様の位置に求められた。

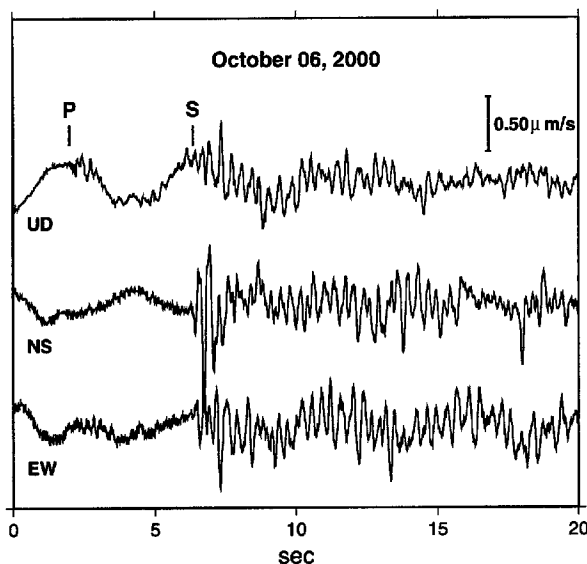


Fig. 5 Three-component seismogram of the DLF event that occurred 9 hours before the main-shock, which is observed at station TRT. Nature period of the seismometer installed at TRT is 10 sec.

2.2 規模別頻度分布

Fig.3 に、鳥取県西部地震の余震と、DLF 地震の、それぞれの規模別頻度分布図を示す。通常の余震は、Gutenberg-Richter の式に従うような分布をしているのに対し、DLF 地震のマグニチュードは最大 2.3 程度で、Gutenberg-Richter の式からは外れている。これは、DLF 地震の発生機構が通常地震のそれと異なることを示唆している。

2.3 波形の特徴

鳥取観測所の TRT 観測点 (Fig.6 参照) における、これらの DLF 地震の波形例を Fig.4 に示す。また、Fig.5 には、TRT 観測点における、2000 年 10 月 6 日 4 時 27 分のイベントの 3 成分波形を示した。この地震のマグニチュードは 0.8 である。これらの地震の卓越周波数は、2Hz - 4Hz 付近にあるが、単色的な地震ではない。また、P 波、S 波の識別は比較的容易であるが、P 波に比べて S 波の励起が格段に良いという特徴がある。さらに、P 波の初動部分に高周波成分が重畳することがあるなどの特徴が見られた。これらは、主に 1 分程度の継続時間を持ち、微動のような振動波形を呈しているが、さらに長い継続時間を持つものも認められる。特に、2000 年 6 月のイベントはこの傾向が顕著で、振動継続時間は 5 分を超え、この中で複数のイベントが連続して

発生しているように見受けられる。なお、前者のタイプを孤立型、後者のタイプを連続型と呼ぶことにする。

2.4 発生メカニズムの考察

ここでは、Ohmi and Obara (2002) の結果に基づいて、鳥取県西部地震の震源域に発生した DLF 地震の発生メカニズムの考察結果について述べる。

観測された DLF 地震は、マグニチュードが小さいために、モーメントテンソルインバージョンなどの、波形を用いた震源過程の考察が困難である。そのため、Ohmi and Obara (2002) では、この DLF 地震の、P 波と S 波の振幅比、および S 波の振動方向の解析によって発生メカニズムの考察を行なった。この方法は、Ukawa and Ohtake (1987) の論文において、伊豆大島火山に発生した単色の低周波地震の発生メカニズムの解析に用いられた方法と同じである。

Ohmi and Obara (2002) では、鳥取県西部地震の震源域で発生した DLF 地震のうち、本震の約 9 時間前の 2000 年 10 月 06 日 04 時 27 分 (JST) に発生したイベントの解析を行なった。このイベントを選んだ理由は、これが (1) 本震の発生の直前に発生したこと、(2) 震源域周辺で防災科学技術研究所の高感度微小地震観測網 (Hi-net) が稼働を始めてから後の最初の孤立型 DLF 地震であり、10 点を越す観測点で良好な記録が得られていること、などによる。Fig.6 に、解析に使用した微小地震観測点の分布を示す。

Fig.7 に、P 波と S 波の振幅比の分布を示す。同図は、各観測点における地震波形の、P 波の最大振幅 A_p と S 波の最大振幅 A_s の比 A_s/A_p を方位角に対してプロットしたものである。 A_p は、地震波形の上下動成分から求めた。 A_s は、SH 波と SV 波の振幅から $A_s = \sqrt{A_{SH}^2 + A_{SV}^2}$ によって計算を行なった。SH 波と SV 波の振幅については、地震波形の水平動成分の transverse および radial の 2 成分から、自由表面における反射係数の補正を行なって求めた。その際の表層の地震波速度構造については、Hi-net 観測点については地震計を設置した孔井の検層図が公開されているのでそれを用い、そうでない点については、鳥取観測所で震源決定に用いている速度構造を便宜上用いた。同図には、震源メカニズムとして、tensile-crack、single-force および double-couple を仮定した際の、震源球上で期待される振幅比の平均の理論値 (Aki and Richards,

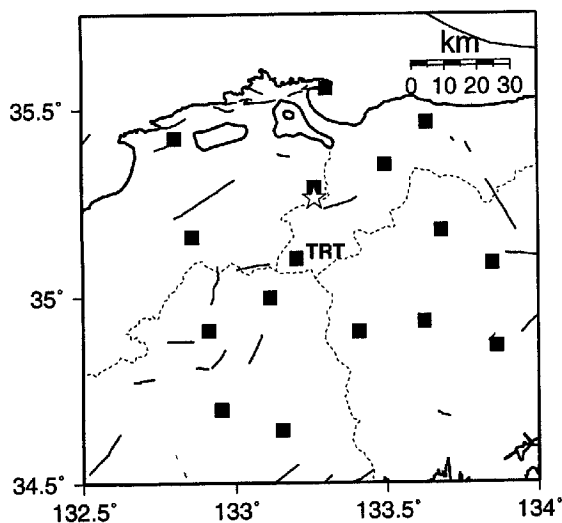


Fig. 6 Distribution of seismic stations used for the focal mechanism analysis of the DLF earthquake that occurred on October 6, 2000. Star denotes the epicenter of the DLF earthquake.

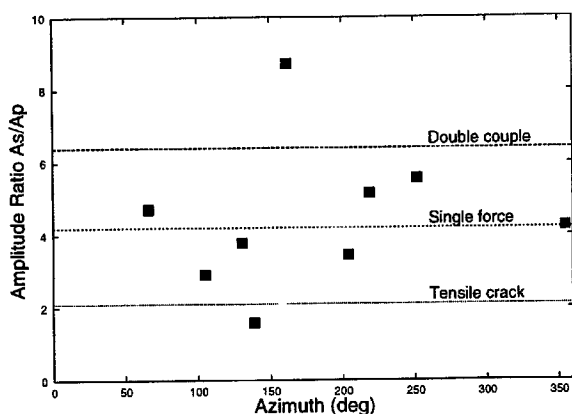


Fig. 7 The amplitude ratios of the S-waves to the P-waves as a function of azimuth for the DLF event shown in Fig.2(b). Seismograms recorded at Hi-net stations, which are installed at the bottom of 100 - 200 m boreholes, were used.

1980) を示している。観測された振幅比は、全般に tensile-crack 型から期待されるものよりは大きな値を示し、single-force 型と double-couple 型の中間の震源メカニズムを示唆する結果となった。

振幅比の考察から類推されたメカニズムを検証するために、次に S 波の振動方向の空間的な分布の解析を行なった。まず、S 波の初動部分の粒子軌跡を計算し、 $\tan^{-1}(SH/SV)$ で定義される振動方向を測定した。SH と SV 波の振幅については、前節と同じ方法で求めた。次に、観測された振動方向を、

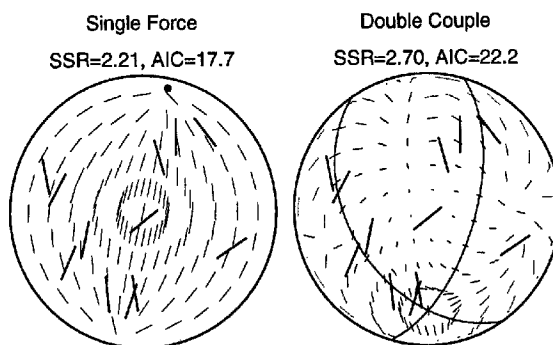


Fig. 8 Polarization directions of the S-waves and the best fit models for a single-force source model (left), and a double couple source model (right). Solid circle on the left plate shows the axis of the force. Bold and thin bars represent observed and theoretical polarization directions, respectively.

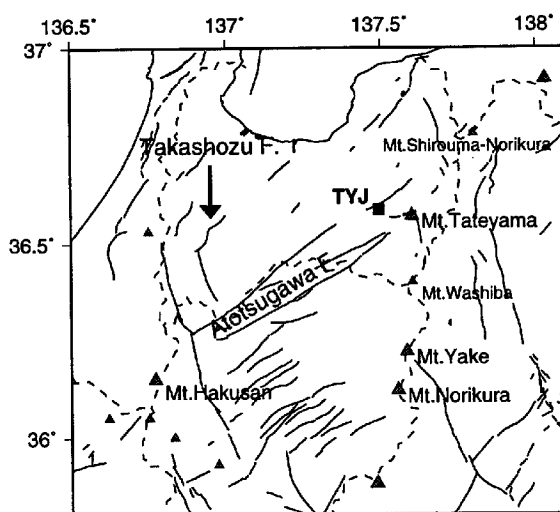


Fig. 9 Distribution of active faults and volcanoes in central Japan. Solid lines represent active faults. Large and small triangles denote active and Quaternary volcanoes, respectively.

single-force 型と double-couple 型の震源メカニズムを仮定した際に期待される S 波の振動方向と比較した。それぞれの震源メカニズムモデルにおける最適解は、 $SSR = \sum R_i^2$ で定義される残差自乗和を最小にするという条件で求めた。ただし、ここで R_i は、 i 番目の観測点での振動方向の残差である。最適解は、震源球上を 1° きざみのメッシュに切り、グリッドサーチによって求めた。

Fig.8 に、それぞれのモデルにより最適解を示す。single-force 型と double-couple 型では、最適解を求

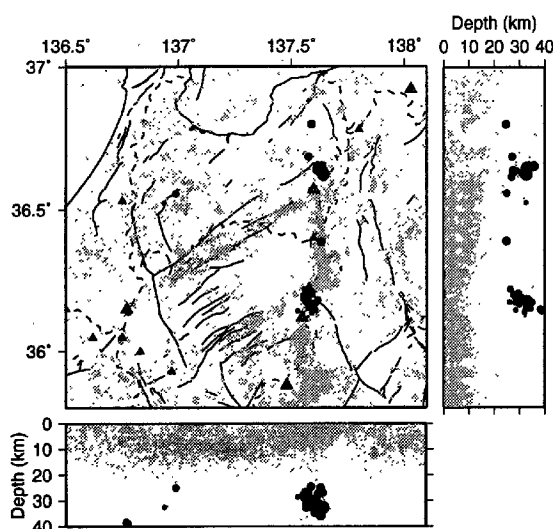


Fig. 10 Distribution of DLF earthquakes in Central Japan. DLF events are mainly observed along the axis of Hida mountain range between Mt. Yake and Mt. Shirouma-Norikura. DLF's are also detected at north-eastern part of the Atotsugawa fault system, beneath the Takashozu fault, and beneath Mt. Hakusan. DLF's are denoted by circles together with ordinary shallow activity from the catalogue of the Kamitakara Observatory, DPRI.

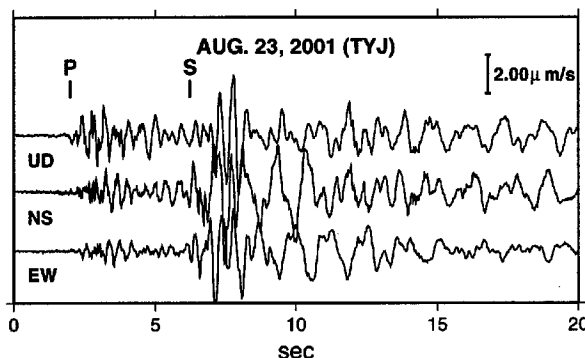


Fig. 11 An example of three components waveform of a DLF at the northeastern part of the Atotsugawa fault observed at station TYJ.

める際の未知数の数が異なるため、単純に残差を比較することでは最終的な最適解を求めることはできない。そこで、ここでも Ukawa and Ohtake (1987) に従い、AIC (Akaike's Information Criteria) を用いて最終的な解の選択を行なった。両モデルでの AIC の差が 2 より大きければ、モデルの差は有意であるとされる。single-force 型と double-couple 型の最適解に対する AIC はそれぞれ 17.7 および 22.5

となり、single-force 型の震源メカニズムが確かしいという結果になった。

3. 西南日本の活断層に発生する 深部低周波地震

西南日本では、小原 (2001) によって、フィリピン海プレート上面の前弧側の等深線に沿って帯状に発生する低周波微動が報告されているが、そのほかに DLF が孤立して発生する内陸活断層系がある。上述の鳥取県西部地域はその一例であるが、それ以外に京大防災研の微小地震観測網で DLF が検知されていたのは、京都府中部の三峠 (みとけ) 断層帯、富山県西部の清水断層、跡津川断層北東端周辺、さらに白馬乗鞍岳にかけての地域などがある。京大防災研の震源ファイルでは、それぞれの地域について、1978 年、1999 年 3 月、1997 年 9 月、1998 年 5 月ごろからの DLF 発生の記載がある。

これらの中で跡津川北東端から白馬乗鞍岳付近の DLF 活動には、飛騨山脈中軸部の火山との関連を否定しきれないものもあるが、それ以外の DLF は火山とは無関係の地域で発生している。なお、京大の震源ファイルにこれらの DLF の観測例が現れ始める時期は、観測網の検知能力が増強された時期にも符合するので、それ以前の長期にわたる発生履歴は残念ながらよくわからない。

観測される波形の特徴は地域ごとにことなり、鳥取県西部の DLF は前節で述べたようなものであるのに対し、清水断層や跡津川断層北東端付近の DLF は、P 波も S 波も明瞭に認識できる、などの差がある。しかしながら、これらの DLF の規模別頻度分布は各地域でほぼ共通で、どの地域でも、最大マグニチュードは 2 弱であり、明らかに通常の地震とは発生様式が異なっている。

以下に、中部地方と、近畿地方京都府中部の DLF について、震源分布と波形例を示す。

3.1 中部地方

中部地方で DLF 活動が顕著なのは、飛騨山脈周辺であり、焼岳周辺から白馬乗鞍岳にかけての地域に多く分布する。Fig.9 に中部地方の活断層と火山の分布を示し、Fig.10 に同地方の DLF 分布を示す。Fig.10 には、京大防災研上宝観測所で比較的高精度に震源決定された浅い地震と、確認された DLF 地震を示している。焼岳周辺の DLF は、1998 年夏から始まった同地域の群発地震活動後に一時活発化し

たもので、焼岳深部のマグマ活動との関連が示唆されている(大見ら, 2001)。

Fig.10 で明らかなように、跡津川断層系東北端に位置する早乙女岳断層(確実度2)周辺には一群のDLF活動がある。この地域は立山(活火山)から10km程度の距離の地域にあたる。これらの深さは25~35kmで、DLFとしては比較的大きなものも発生し、 $M_j=2.3$ 程度の地震が発生することもある。同断層東端付近から白馬岳にかけての地域にもDLFが散在している。

Fig.11 に立山観測点(TYJ)で観測された、跡津川断層東北端付近のDLFの3成分波形例を示す。鳥取県西部地域で発生するDLFと異なり、P波、S波ともに明瞭に識別可能である。さらに、富山県西部の清水断層(確実度1)にもDLFが発生している。この地域には活火山、第四紀火山ともに存在は認められていない。なお、白山(活火山)直下にも数は少ないがDLFが観測されている。

3.2 京都府中部

京都府中部の三峠(みとけ)断層帯は、西北西-東南東方向の走向を持ついくつかの活断層から構成されている(Fig.12)。この地域では、京大阿武山観測網によると1998年ごろからDLFが観測され始め、気象庁速報震源によれば2001年8月末までに15個程度が観測されている。なお、その後の調査で、1978年と1995年にもそれぞれ一個づつが検知されていることがわかった(片尾, 私信)。これらのDLFは三峠断層帯の弓根-笠峠断層の西端付近に集中している。この地域は、兵庫県南部地震の余震域に連なる、いわゆる丹波山地の群発地震活動領域の北西のはずれにあたる。地震の深さは30kmから35kmの範囲でマグニチュードは最大1.6程度である。この地域には、活火山や第四紀火山は存在していない。Fig.13に近畿地方のDLF分布を、Fig.14に京都府中部に発生するDLFの3成分波形の例を示す。

3.3 西南日本のそのほかの活断層に発生する深部低周波地震

京大の微小地震観測網では検知されていないが、気象庁の震源リストによれば、さらに西南日本の他の活断層でのDLF観測例がある。それらは、有馬高槻構造線、大阪湾断層帯、福井県越前岬沖の海底活断層などである。Fig.15に気象庁の震源リストに基づく西南日本のDLF分布を示す。

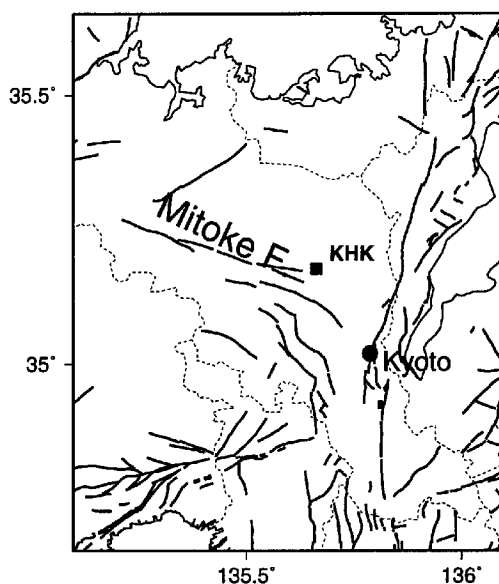


Fig. 12 Distribution of active faults in Kinki district, Japan. Solid lines represent active faults.

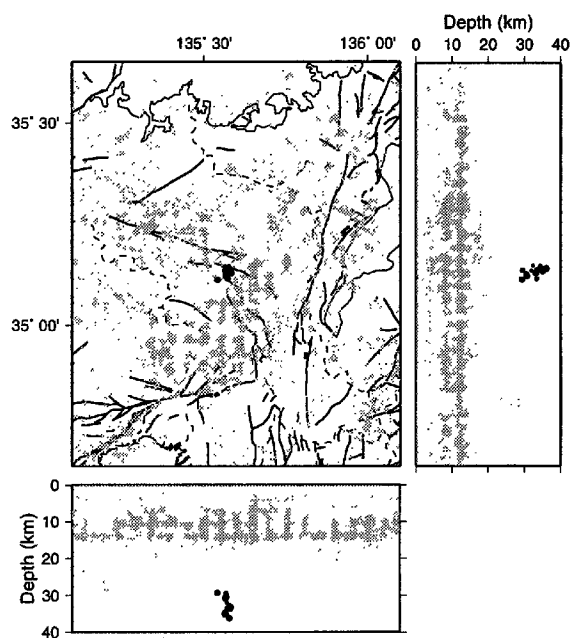


Fig. 13 Distribution of DLF earthquakes in Kinki district, Japan from the catalogue of JMA together with shallow ordinary earthquakes.

4. 考察

第2章で述べたように、鳥取県西部地震の震源域に発生するDLF地震は、single-force型の震源メカニズムを呈することがわかった。single-force型のメカニズムは、流体等が移動する際にも出現するもので、火山地域でのDLF地震の解析では、マグマ

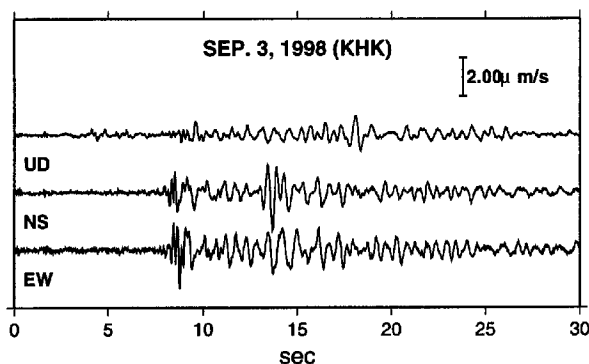


Fig. 14 An example of three components waveform of a DLF at the Mitoko fault system observed at station KHK.

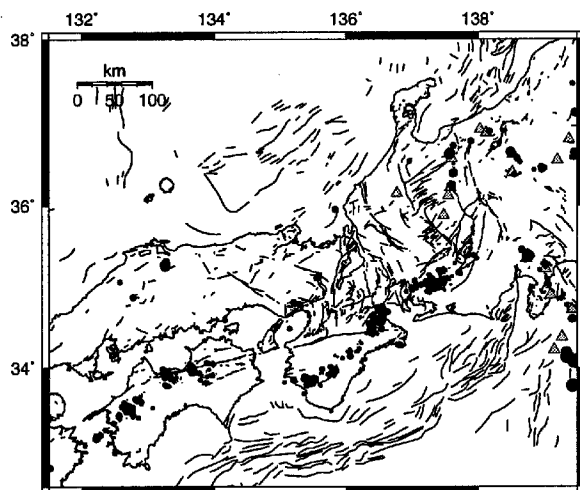


Fig. 15 Distribution of DLF earthquakes from the catalogue of JMA from June 2000 to February 2002. Solid circles denote the DLF's. There are several other inland active faults where DLF earthquakes are observed. Solid lines represent active faults while grey triangles show the active volcanoes.

活動に関連した事象として解釈されることがある。たとえば、Ukawa and Ohtake (1987) が解析した伊豆大島の DLF 地震も single-force 型の震源メカニズムを呈し、これは伊豆大島火山のマグマ活動に関連するものであるとされている。

鳥取県西部地震の震源域には、活火山は存在していない。ただし、本震の震央から 30km ほど離れたところに第四紀火山である大山火山が存在している。しかしながら、今回観測された DLF 地震を大山火山のマグマ活動に結び付けて考えるのには少々無理があるように思われる。地震波速度構造トモグラフィの結果によると、鳥取県西部地震の震源域の深部の下部地殻から上部マントルにかけての領域は、

地震波の低速度領域の周縁部となっている [たとえば、Zhao et al., 2000]。地震波の低速度領域は、火山の近傍や周縁部だけでなく、内陸のマントルウェッジ内部に見られる例もあり、これらはその深部に存在する沈み込むスラブからの脱水等による流体がイメージされているものであるという解釈もなされている (Zhao et al., 2000)。このような観点から考察すると、鳥取県西部地震震源域の DLF 地震は、深部のマグマ活動に限定して考えるよりも、スラブから供給された流体の挙動に基づくものだと考える方が理解しやすい。

活断層に存在する流体は、断層面の法線応力を低下させ、その破壊を起こしやすくする可能性が指摘されている [たとえば、長谷川ら, 2001]。鳥取県西部地震の震源域で本震発生前に観測された DLF 地震が流体の移動に伴うものであるとすれば、これにより震源断層の破壊開始を促進した可能性も否定できない。

なお、震源域での DLF 発生数は、本震発生後に増加している。これは、本震の発生による応力解放により、震源域深部のクラック密度の変化があり、これが流体の移動量変化に結び付いたような可能性が考えられる。

鳥取県西部地震の震源域では、1980 年代の後半からしばしば M5 クラスの地震が発生してきた [たとえば、梅田ら, 2001]。本稿で報告した DLF 地震は、発生が 1999 年以降に限られているが、これは当地域の地震検知能力が 1997 年 10 月の、大学・気象庁・他機関等の地震観測データの一元化以降、格段に向上したことに負う部分が大きいと考えられる。今後は、1997 年以降のデータにも遡って、当地域に再三発生した M5 クラスの地震と DLF 地震の時系列についても調査する必要がある。

鳥取県西部以外の地域でも、DLF が発生する活断層は、その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存在していることが多い。これは火山の有無にかかわらず共通して見受けられることである。DLF 発生地域が、火山の分布よりもむしろ地殻深部の低速度領域とよく符合することから、DLF は上部マントルから下部地殻にかけて流体の存在が予想される場所での普遍的な現象なのかもしれない。

気象庁の観測結果による DLF 分布を見ると、中部地方西部から中国地方西部にかけての西南日本の内陸活断層における DLF 発生例は、他地域に比較して多いようにも見受けられる。また、小原 (2001)

で報告された前弧側の低周波微動群もこの地域に特徴的な現象である。これらのイベントの全国的な検知能力の問題を議論する必要は残されているが、このような現象を規定する要因として、西南日本に特有の「低角で沈み込む若いフィリピン海プレートの存在」が挙げられるかもしれない。中部地方西部から中国地方西部にかけての地域では、脱水反応が活発なプレートが低角に沈み込んで他地域よりも比較的浅部に存在することにより、ウェッジマントル部分への流体の供給の影響が下部地殻に及びやすいということがあるのかもしれない。

DLF は一般に流体の移動に伴うものであるという解釈がなされるが、DLF 発生深度での流体の移動メカニズムをはじめ、その流体の組成（マグマか超臨界水か）などは現有の地震データからは明らかではない。また、前弧側の帯状の低周波微動の発生様式と内陸活断層の孤立した DLF のそのの差異等、多くの明らかにすべき課題がある。また、長谷川ら (2001) でも述べられているように、活断層下に存在する流体はその破壊開始を促進する可能性がある。DLF が発生する活断層は、その深部に流体が存在する可能性が高いことから、他の手段を併用した活動度の検証も必要であると考えられる。

5. 謝辞

本報告では、気象庁の観測網、および独立行政法人防災科学技術研究所の高感度地震観測網 (Hi-net) によって取得された波形データのほか、気象庁による速報震源リストを使用させていただいた。記して謝意を表す。なお、一部の図面の描画には、Wessel and Smith (1998) による描画ソフトウェア GMT 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.
- 梅田康弘・松村一男・澁谷拓郎・大見士朗・片尾浩 (2001) : 2000 年鳥取県西部地震 - 前駆的群発地震・本震・余震 -, 自然災害科学, 19-4, pp. 501-512.
- 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 2, 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.
- 小原一成 (2001) : 西南日本で発見された地殻底部低周波微動, 日本地震学会講演予稿集 2001 年度秋季大会, P137.
- 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.
- 長谷川昭・海野徳仁・堀修一郎 (2001) : 長町-利府断層周辺の地震活動と地殻不均質構造, 月刊地球, 23, pp.313-320.
- Aki, K. and Richards, P. G. (1980) : *Quantitative Seismology*, W. H. Freeman, San Francisco, CA., pp. 50-84,
- 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.
- 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.*, in press.
- Ukawa, M. and Ohtake, M. (1987) : A monochromatic earthquake suggesting deep-seated magmatic activity beneath the Izu-Ooshima volcano, Japan, *J. Geophys. Res.*, 92, pp. 12649-12663.
- Wessel, P. and Smith, W. H. F. (1998) : New, improved version of the Generic Mapping Tools released, *EOS, Trans. AGU*, 79, pp. 579.
- Zhao, D., Ochi, F., Hasegawa, A., and Yamamoto, A. (2000) : Evidence for the location and cause of large crustal earthquakes in Japan, *J. Geophys. Res.*, 105, pp. 13579-13594.

**Deep Low-frequency (DLF) Earthquakes
Associated with Active Faults in Southwest Japan**

Shiro OHMI

Synopsis

There are several examples of DLF 's that are associated with active faults in southwest Japan. Seismic tomography analysis indicates the existence of a low-velocity body at depths from the lower-crust to the upper-mantle in the focal region of these DLF's. The distribution of DLF activities corresponds well to the low-velocity region rather than to the distribution of volcanoes. The DLF occurrences are probably direct evidence of fluid activity in the seismogenic zone, which might be injected from the lower-crust beneath active faults.

Keywords: deep low-frequency earthquake, inland active faults, transport of fluid