

岩手山の深部低周波地震の発生機構

中道治久

東京大学地震研究所 火山噴火予知研究推進センター

Source Mechanisms of Deep Low-Frequency Earthquakes beneath Iwate volcano

Haruhisa Nakamichi

Earthquake Research Institute, University of Tokyo

Abstract

During the 1998-1999 volcanic unrest at Iwate volcano, 350 deep low-frequency (DLF) earthquakes were observed by a dense seismic network deployed in and around Iwate volcano, Japan. The DLF earthquakes are located within three concentrated regions at depths of 32 km about 10 km south of the summit and those of 33 and 37 km about 10 and 7 km northeast of the summit, respectively. A new moment tensor inversion method using P, SV and SH spectral ratios elucidated that the source mechanisms of DLF earthquakes have significant double couple (DC) and compensate linear dipole (CLVD) components and some of them also have volumetric components. However, no characteristic orientation of them is appeared. A model of a tensile crack coupled with a shear crack or an oblate spheroid (magma chamber) is proposed to generate DLF earthquakes with dominant DC and CLVD mechanisms. The tensile faulting is caused by the injection of magma into a tensile crack. We believe that complex magma movements at the concentrated regions cause the DLF earthquakes.

1 はじめに

多くの活動が活発な火山において地震や微動が観測される。大半が浅部で発生する地震や微動である。低周波地震や火山性微動はマグマなどの動きを直接反映したものであると考えられている。そのため、浅部の低周波地震や微動について詳細な研究がなされ発生機構が解明されてきた。また、近年の広帯域地震観測にて長周期地震のモーメントテンソルインバージョンが行われ、マグマなど火山流体の動きが分かってきた(例えば, Ohminato et al., 1998; Nishimura et al., 2000)。しかし、深部低周波地震の研究は火山で発生するイベントの中でも研究が遅れている。報告事例が少ないだけでなく、その解析にいたっても震源決定やスペクトル解析など初歩的なものに留まっている。発震機構を推定した例(西富・武尾, 1996; 岡田・長谷川, 2000)もあるが解析されたイベント数が非常に少なく、発生機構モデルまで議論されたのは Ukawa and Ohtake (1987)のみであった。このように、火山性地震・微動の中では最も研究が遅れているといっても過言ではない。原因としては、イベントが少なかったことや地震の規模が小さく SN 比の良いデータが得られなかったことや卓越周波数が数 Hz のため波形インバージョン解析がしにくかったことなどが挙げられる。ここでは、深部低周波地震の研究が詳細に行われた岩手山の例を述べる。

2 岩手山の深部低周波地震活動

1970年代から岩手山の深部低周波地震が観測されている(清水, 1981)。東北大学では, 1981年に岩手山・秋田駒ヶ岳・秋田焼山を対象とした広域火山観測網による地震観測を開始し, 1994年11月に岩手山の北東と南東山麓の2ヶ所, 1997年12月に南西山麓に1ヶ所, それぞれ深さ300 mの観測井を用いた観測点を設置してきて岩手山の定常観測網を強化した。このような観測体制のもとで, 1995年9月に1981年以降初めて火山性微動を観測した(植木・他, 1996)。その後, 微動の活動は低下したが, 1997年に深部低周波地震が13個とやや多く観測された(田中・他, 1999)。これを受けて1997年秋から岩手山周辺の観測をさらに強化した。観測を強化した結果, 1998年からの岩手山の火山活動が的確に捉えられたのは記憶に新しい(例えば, Tanaka et al., 2001)。また, 1997年10月から1999年5月まで東北脊梁山地合同地震観測(長谷川, 1998)が行われていた。こうして, 岩手山を取り囲む高密度地震観測網(Fig. 1)にて1998-1999年に約350個という多数の深部低周波地震が観測された。つまり, 深部低周波地震を研究するのに絶好の機会が得られたのである。

深部低周波地震は通常の自動処理にてトリガー収録されているのは全体の3分の1である。そこで残りの低周波地震は全て連続記録を精査することで検出した。トリガー及び連続記録から検出された低周波地震についてP波とS波の初動走時を読み取り, JHD法(Pujol, 1988)にて震源決定を行った。そして, 120個の深部低周波地震の震源が求まった(Fig. 2)。震源は3グループに分類され, グループAは岩手山からやく10 km南の深さ32 kmにあり, グループBとCはそれぞれ岩手山の北東へ10 kmの深さ33 kmと北東へ7 kmの深さ37 kmにある。なお, グループAとBは時期によらず発生していたのに対し, グループCは99年3月中旬にのみ発生した。同時期にやや深部低周波地震が観測され震源は岩手山直下の深さ5-12 kmにあり, 鉛直パイプ状に分布している。

次に, Fig. 3にグループAの深部低周波地震2例を示す。両者とも共通しているのはP波とS波が見られることである。S波が不明瞭な浅部低周波地震とは異なっている。また, 低周波地震ではしばしば相似地震が見られる(Nishimura et al., 1992; 西富・武尾, 1996)が岩手山の深部低周波地震では見つからなかった。例えば, 同じグループAの地震でも波形が大きく異なっている。1 Hzのコーダ波が卓越しているイベントa(1998/7/24 23:32)と卓越周波数4-5 Hzのイベントb(1998/8/6 1:37)を比較する。まず, S波のコーダの長さはイベントaの方が長い。P波とS波の振幅の出方を見るとイベントaでは観測点によって大きな違いが見られないのに対し, イベントbでは観測点によって振幅の出方は大きく異なっている。イベントaとbでは震源過程が異なることを示しており, また低周波地震の波形の特徴はサイトやパスの影響よりも震源の影響を多く受けていることも示している。

3 岩手山の深部低周波地震の発生機構

低周波地震のP波の初動極性が不明瞭であることが多いので, 初動極性から発震機構を推定するのは難しい。一方, 低周波地震の卓越周波数は数Hzなので, 波形インバージョンから発震機構を推定するのも難しい。そこで, ここでは発震機構の推定にスペクトル比を使用する。スペクトル比は1988-1999年十勝岳噴火の際に観測された火山性微動の発震機構の推定に使用され, 震源時間関数を考慮せずに発震機構を推定できる特徴がある(Nishimura et al., 1995)。よって, 図3に示したような震源時間関数が単純でない想定される地震の発震機構が推定できる。

スペクトル比によるモーメントテンソルインバージョンについて簡単に説明する．地震のサイズが解析に使用する地震波の波長に比べて十分小さいと仮定する．また，全てのモーメントテンソル成分が同じ形状の震源時間関数を持つとすると，位置 \mathbf{x} における変位の n 方向成分は

$$u_n(\mathbf{x}, t) = \sum_{p,q} M_{pq} S(\tau) * G_{np,q}(\mathbf{x}, t; \tau), \quad (1)$$

と表せる．ここで， M_{pq} はモーメントテンソルの pq 成分， $S(\tau)$ は震源時間関数， $G_{np,q}(\mathbf{x}, t; \tau)$ はグリーン関数の np 成分である．ここで P 波，SV 波，SH 波の変位を $u_v^p(t)$ ， $u_r^{sv}(t)$ ， $u_t^{sh}(t)$ とし，それぞれの比を取ると，

$$\begin{aligned} R^{sv/p}(\omega) &= \frac{u_r^{sv}(\omega)}{u_v^p(\omega)} = \frac{\sum_{p,q} M_{pq} G_{rp,q}^{sv}(\omega)}{\sum_{p,q} M_{pq} G_{vp,q}^p(\omega)}, \\ R^{sh/p}(\omega) &= \frac{u_t^{sh}(\omega)}{u_v^p(\omega)} = \frac{\sum_{p,q} M_{pq} G_{tp,q}^{sh}(\omega)}{\sum_{p,q} M_{pq} G_{vp,q}^p(\omega)}, \\ R^{sh/sv}(\omega) &= \frac{u_t^{sh}(\omega)}{u_r^{sv}(\omega)} = \frac{\sum_{p,q} M_{pq} G_{tp,q}^{sh}(\omega)}{\sum_{p,q} M_{pq} G_{rp,q}^{sv}(\omega)}, \end{aligned} \quad (2)$$

となる．ここで， v, r, t はそれぞれ上下方向，動径方向，接線方向をしめす． $R^{sv/p}$ ， $R^{sh/p}$ ， $R^{sh/sv}$ は各成分間でのスペクトル比を示し，震源時間関数に依存しない．スペクトル比を書き直すとあ

$$R^{l/m}(\omega) = A^{l/m}(\omega) \exp[i\theta^{l/m}(\omega)], \quad (3)$$

ここで， $A^{l/m}(\omega)$ と $\theta^{l/m}(\omega)$ はそれぞれ振幅比と位相差を表す．また， l と m は波の種類(P 波，SV 波，SH 波)を示す．振幅比と位相差について観測値と計算値の残差が最小となるモーメントテンソル成分の組み合わせを推定する．計算値は水平成層構造を仮定して求めた．式(2)はモーメントテンソルに対してスペクトル比は非線形なので推定の際には非線形インバージョンに有効なアルゴリズムの一つである遺伝的アルゴリズムを使用した．あわせる周波数の範囲はそれぞれの地震の卓越周波数を含む範囲に設定した．また，振幅比と位相差でのウエイトは 1:0 ~ 1:0.05 の範囲にて設定した．なお，P 初動極性を最も良く満足させるときのウエイトを採用した．

まず，深部低周波地震の中でマグニチュード 1.3 以上，SN 比が良い観測点が南側の深部低周波地震では 16 点以上，北東側では 11 点以上の地震を選別した．また，SN 比の良い観測点分布がなるべく均一になっている地震をさらに選別したところ，南側 5 イベント，北東 2 イベントが選別された．Fig. 4 に得られたメカニズム解を示す．これらのイベントの中で 1998/8/6 のイベント（前述のイベント b に対応）は 3 1 観測点での P 波初動の極性が得られており，求めたモーメントテンソル解と矛盾していない．よって，メカニズム解を推定する手法が有効であるといえる．Fig. 5 に振幅比の計算値と観測値の比較の例を示す．観測値と計算値は一部の観測点を除いて合っているといえる．得られたメカニズム解はそれぞれ異なっている．これは，相似地震がほとんど見られなかったことから支持される．メカニズム解の特徴を明らかにするために，モーメントテンソル解を体積変化成分，ダブルカップル(DC)成分，CLVD 成分の 3 成分に分

解した。Fig. 6 はイベント a と b のモーメントテンソル解を成分分解した例である。イベント a のモーメントテンソルには体積変化成分が 31%、DC 成分が 23%、CLVD 成分が 46%含まれている。このようにイベント a には非ダブルカップル成分が有意に含まれているといえる。ほぼ水平方向に収縮する方向に力が働き、ほぼ鉛直方向に膨張する力が働く解である。これは、上下方向への流体の搾り出しを示唆している。イベント b のモーメントテンソルには体積変化成分が 1%、DC 成分が 34%、CLVD 成分が 65%含まれている。イベント b にも有意な非ダブルカップル成分が含まれている。しかし、イベント a とは異なり、体積変化成分がほとんど無い。他のイベントについても同様にモーメントテンソルの成分分解を行ったところ、体積変化成分は 1-31%、DC 成分は 21-80%、CLVD 成分は 18-65%となった。このように、モーメントテンソル解には共通して DC と CLVD 成分が含まれていが、体積変化成分については有意に存在するのとは異なる。また、DC や CLVD の力の方向はイベントごとに違っていることが分かった。

次に、CLVD 成分の成因について考える。CLVD が現れるメカニズムとしては tensile-shear crack モデル (Shimizu et al., 1987)が挙げられる。Hill (1977)のモデルのように tensile クラックと断層が連結している震源を想定している。Hill モデルでは断層のみが運動するが、tensile-shear crack モデルでは tensile クラックも同時に運動する。tensile クラックと断層が同時に運動すると、このような系を示すモーメントテンソルには体積変化成分、DC 成分、CLVD 成分の 3 成分とも含まれる。どの成分が卓越するかは tensile クラックと断層の寄与の割合に依存する。例えば、tensile クラックの寄与を大きくすると体積変化成分と CLVD 成分が大きくなる。ところで、深部低周波地震のメカニズム解ではほとんど体積変化が無いものもある。tensile-shear crack モデルではこのことは説明できない。そこで、まず CLVD のみを説明させるモデルを考える。Chouet (1996)にて示されるような球状のチャンパーと tensile クラックが接続しているモデルを考える。ここで、チャンパーから tensile クラック内へ流体が一瞬のうちに流れるとすると、両者がほぼ同時に運動することになる。このとき、開口する tensile クラックと収縮するチャンパーを表すモーメントテンソルの割合をうまく調節すると、トータルのモーメントテンソルは完全な CLVD を示す (Chouet, 1996)。現実的には完全な CLVD を示すような両者の割合にはならないであろう。チャンパーが球状ではなく回転楕円体状であると、DC 成分がみられる。また、チャンパーの寄与が大きかったりすると体積変化成分が出てきたりして、岩手山の深部低周波地震のモーメントテンソルを説明できる。

ここで示したようにモーメントテンソルがマグマの運動を表していると考え、力の向きや割合が地震によって異なることはマグマの運動が複雑であることを示す。Fig. 2 に示したような各領域の狭まった震源域にてマグマが複雑に運動して低周波地震が発生しているのであろう。また、イベント a のようなモノトニックな継続したコーダ波を持つイベントに体積変化成分が見られることは、マグマの振動体が存在していることを示唆している。

4 まとめ

1998-1999 年に約 350 個という多数の深部低周波地震が岩手山の周りの高密度地震観測網にて観測された。深部低周波地震の震源は 3 グループに分類され、岩手山の南側の深さ 32 km と北東側の深さ 33 km と 37 km にある。スペクトル比によるモーメントテンソルインバージョンを 7 個の深部低周波地震に適用したところ、有意に DC 成分と CLVD 成分が含まれていて、地震毎に力の向きや割合が異なることが分かった。これらのモーメントテンソル解は、局在した領域にてマグマが複雑に運動することで深部低周波地震が発生していることを示唆している。

参考文献

- Chouet, B. A., New methods and future trends in seismological volcano monitoring in *Monitoring and Mitigation of Volcano Hazards*, edited by R. Scarpa and R. Tilling, Springer-Verlag, Berlin, pp.23-97, 1996.
- 長谷川 昭, 1997年東北日本合同地震観測・構造探査実験, 1998年地球惑星科学関連学会予稿集, 360, 1998.
- Hill, D. P., A model for earthquake swarms, *J. Geophys. Res.*, 82, 1347-1352, 1977.
- 西富一平・武尾 実, 栃木県西部地域モホ面付近に発生する低周波微小地震の活動とその発震機構, *火山*, 41, 43-59, 1996.
- Nishimura, Y., H. Mori, H. Okada, Earthquake families observed at Tarumai volcano, Hokkaido, Japan, during January and February, 1988, *J. Fac. Sci. Hokkaido Univ.*, 9, 289-302, 1992.
- Nishimura, T., H. Hamaguchi, and S. Ueki, Source mechanism of volcanic tremor and low-frequency earthquakes associated with the 1988-1989 eruptive activity of Mt. Tokachi, Hokkaido, Japan, *Geophys. J. Int.*, 121, 444-458, 1995.
- Nishimura, T., H. Nakamichi, S. Tanaka, M. Sato, T. Kobayashi, S. Ueki, H. Hamaguchi, M. Ohtake, and H. Sato, Source process of very long period seismic events associated with the 1998 activity of Iwate volcano, northeastern Japan, *J. Geophys. Res.*, 105, 19135-19147, 2000.
- Ohminato, T., B. A. Chouet, P. Dawson, and S. Kedar, Waveform inversion of very long period impulsive signals associated with magmatic injection beneath Kilauea volcano, Hawaii, *J. Geophys. Res.*, 103, 23839-23862, 1998.
- 岡田知己・長谷川昭, 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, 2000.
- Pujol, J., Comments on the joint determination of hypocenters and station corrections, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 78, 1179-1189, 1988.
- 清水 洋, 岩手山の地球物理学的研究, 東北大学修士論文, 122pp., 1981.
- Shimizu, H., S. Ueki and J. Koyama, A tensile-shear crack model for the mechanism of volcanic earthquakes, *Tectonophysics*, 144, 287-300, 1987.
- 田中 聡・中道治久・浜口博之・植木貞人, 1998年の岩手山における地震活動, *月刊地球*, 21, 273-279, 1999.
- Tanaka, S., H. Hamaguchi, S. Ueki, M. Sato, and H. Nakamichi, 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, in press *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 2001.
- 植木貞人・森田裕一・浜口博之, 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, 1996.
- Ukawa, M. and M. Ohtake, A monochromatic earthquake suggesting deep-seated magmatic activity beneath the Izu-Oshima volcano, Japan, *J. Geophys. Res.*, 92, 12649-12663, 1987.

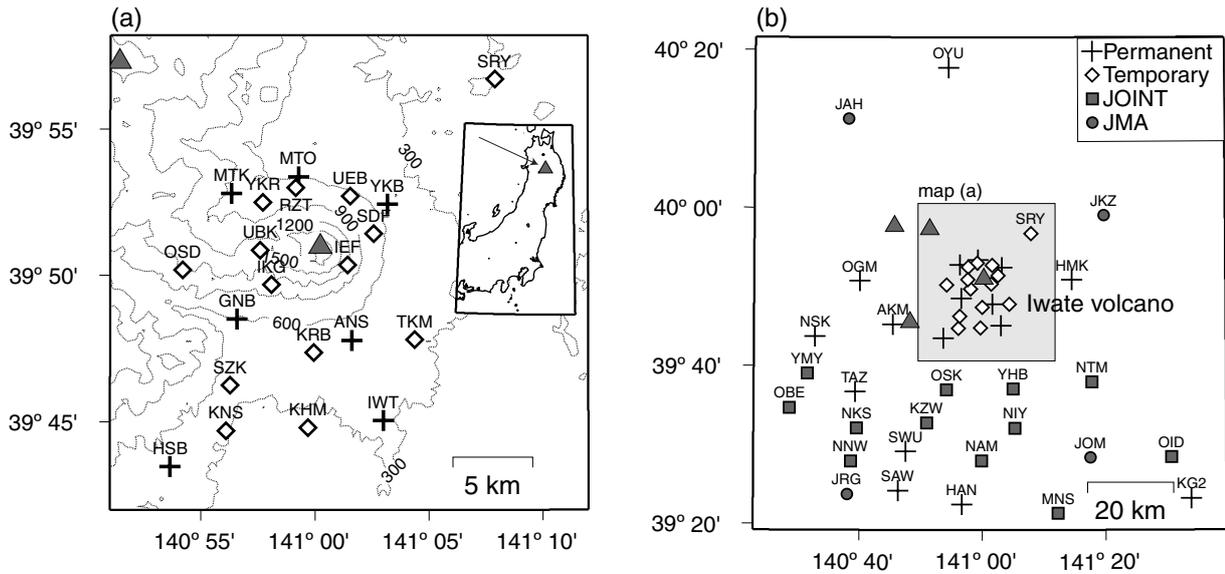


Fig. 1. Location map of the seismic stations. (a) Stations near Iwate volcano and location of Iwate volcano (insert map). (b) Stations around the volcano. Each symbol in the figure denotes a type of station: Crosses: permanent stations maintained by Tohoku University; diamonds: temporary stations maintained by Tohoku University; Squares: temporary stations maintained by the joint seismic observation by Japanese Universities (JOINT); solid circles: stations maintained by the Japan Meteorological Agency (JMA). Triangles denote active volcanoes. Dotted lines in (a) show elevation contours in 300 m intervals.

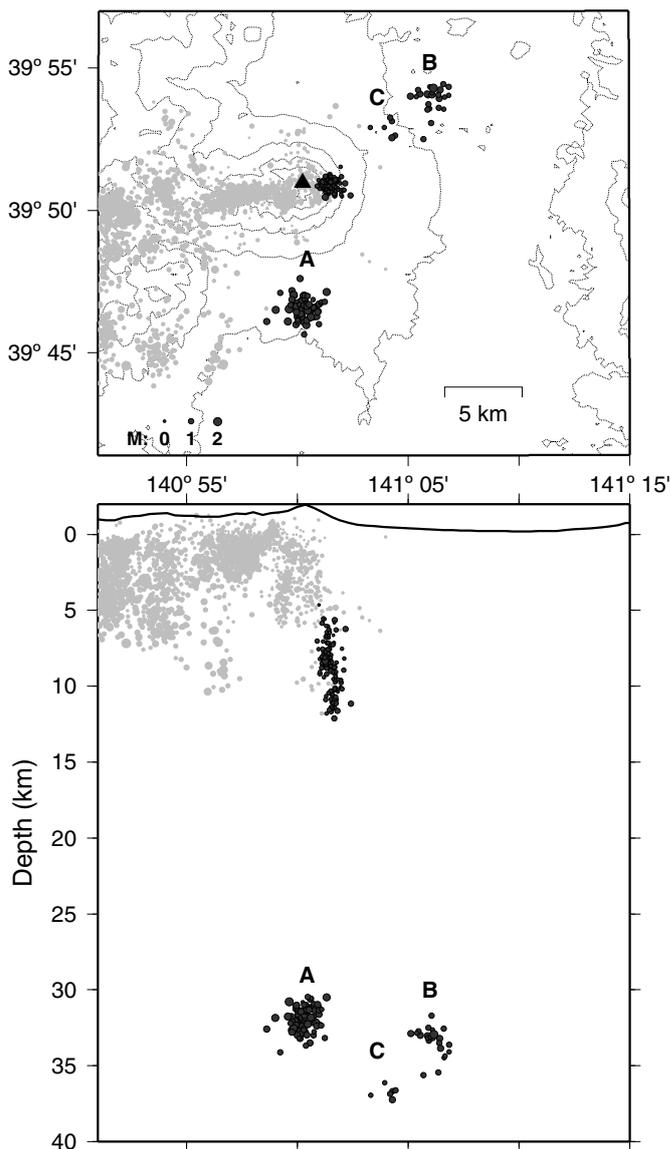


Fig. 2. Epicenters and cross-sections of hypocenters of DLF and ILF events (solid circles), as determined by the JHD method. High-frequency events (light gray circles) are also shown. The magnitudes of DLF and ILF events range from 0.5-2.1 and 0.0-1.6, respectively. The hypocenters of DLF events are separately located within the three regions: group A, B and C. The ILF events define a pipe-like distribution. A triangle indicates the location of the summit of Iwate volcano. Elevation contours (dotted lines) are in 300 m intervals. In cross-sections, vertical and horizontal scales are the same

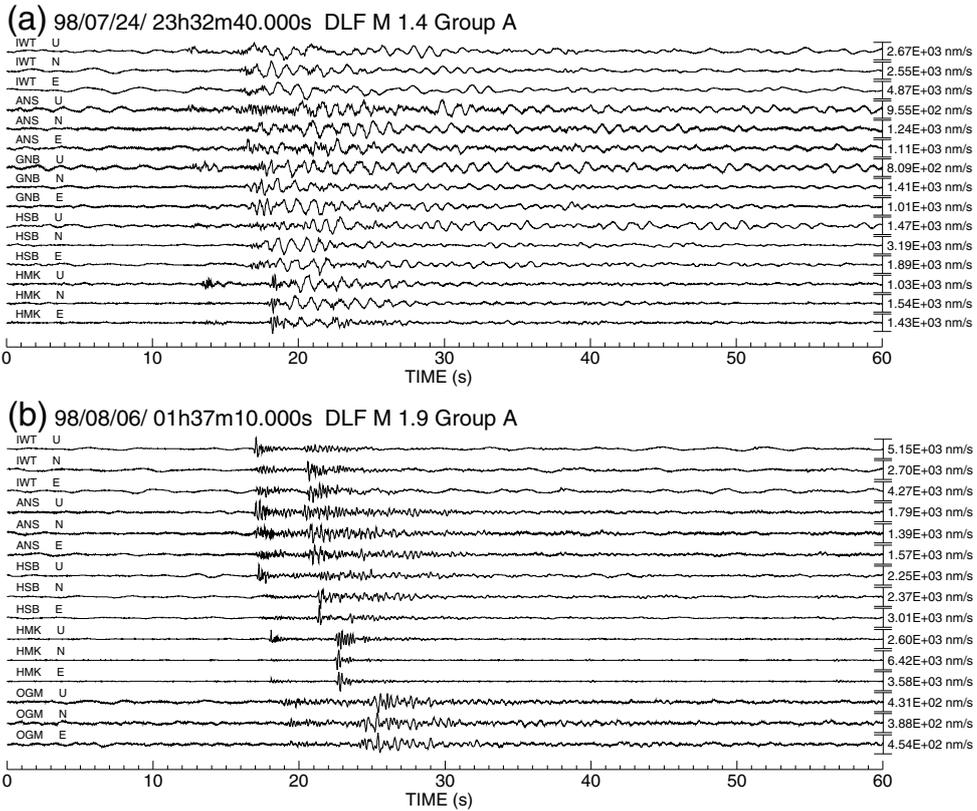


Fig. 3. (a) An example of three-component waveforms for the south DLFs which occurred at 23:32 JST on July 24, 1998. This event is characterized by high-frequency onsets and monotonic coda waves. (b) Same as (a) for the event at 01:37 on August 6, 1998. This DLF event has the best signal-to-noise ratio we have observed since 1981. The S to P wave amplitude ratios differ from station to station.

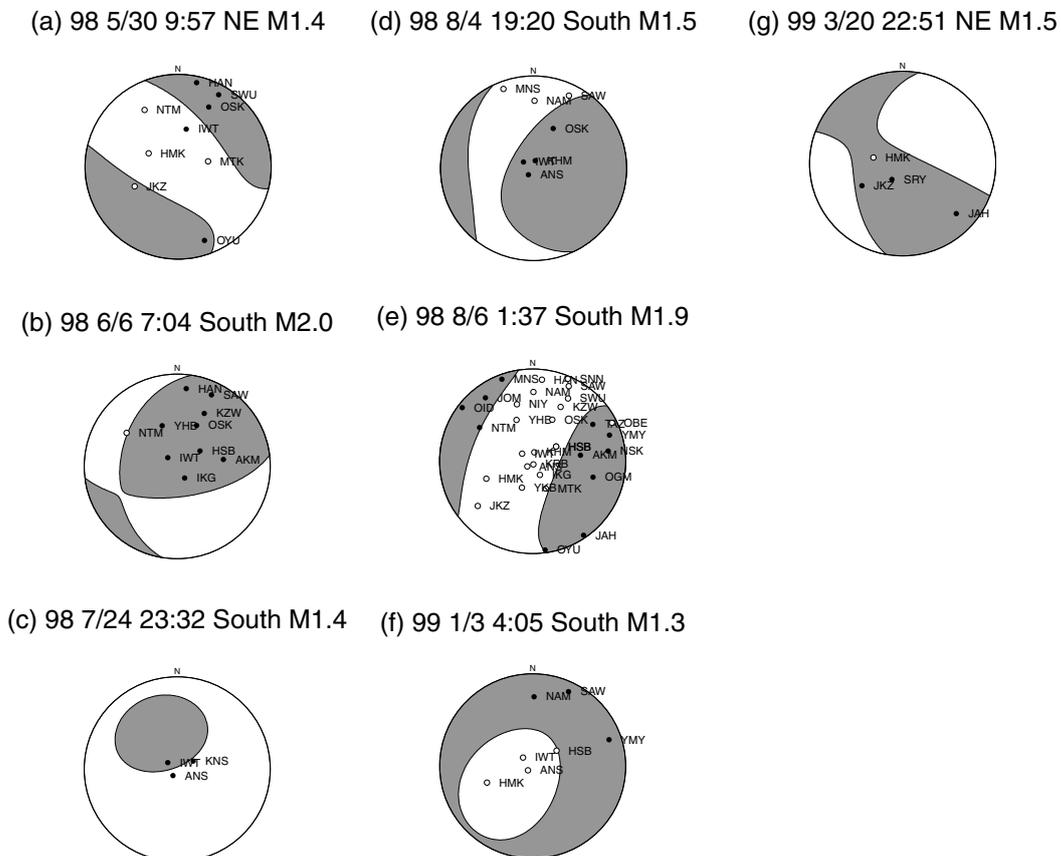


Fig. 4. Source mechanisms estimated for seven DLF events. Lower focal hemispheres are shown in equal area projection, with compressional fields shaded. (a) Event 9805300957. (b) Event 9806060704. (c) Event 9807242332. (d) Event 9808041920. (e) Event 9808060137. (f) Event 9901030405. (g) Event 9903202251. Most of P polarities are consistent with the estimated source mechanisms.

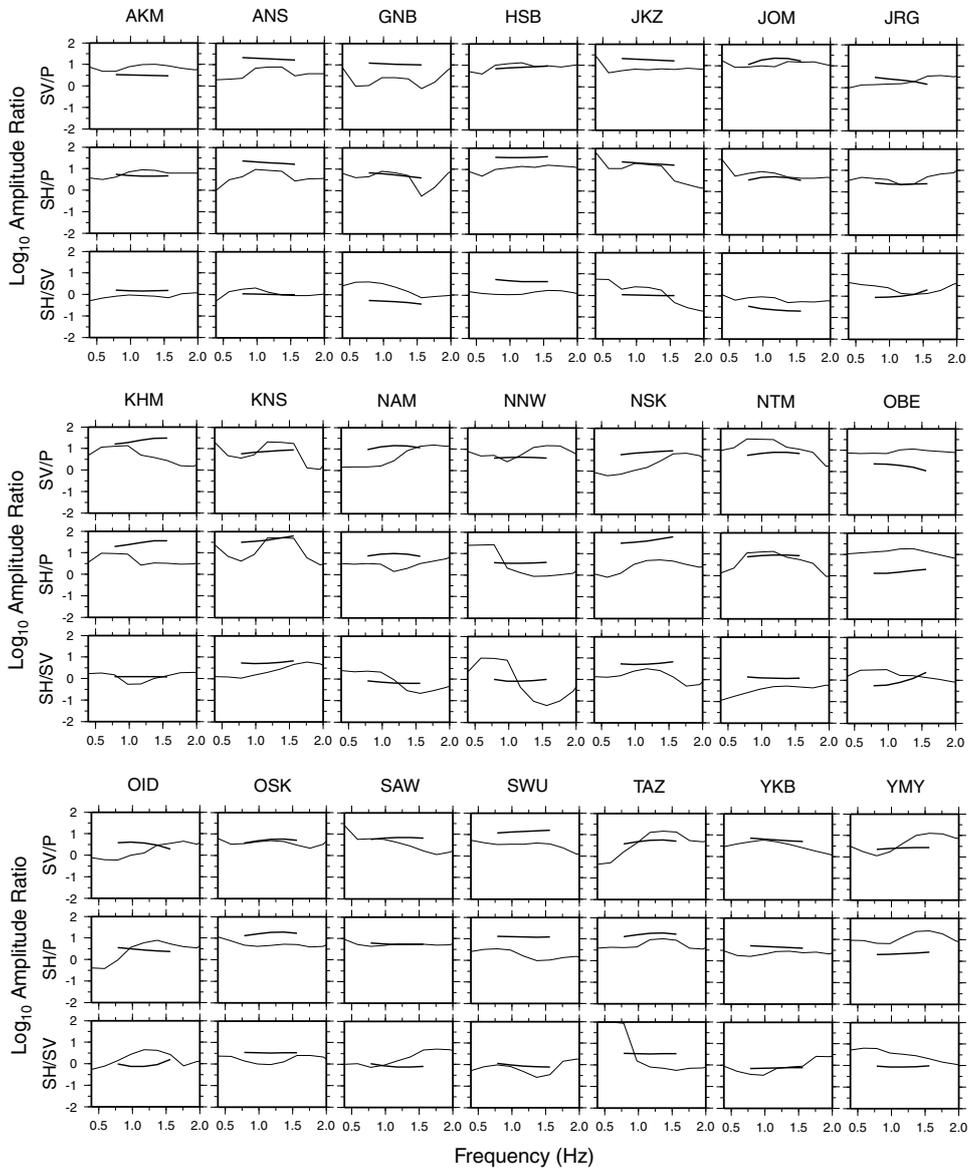


Fig. 5. Comparisons of the observed amplitude spectral ratios (thin lines) to the theoretical amplitude spectral ratios (thick lines) for the best-fit moment tensor solution for a deep low-frequency event (07/24/98, 23:32). The frequency ranges used for inversion is denoted by a range of theoretical ratios. On the whole, the theoretical amplitude ratios closely fit the observed ones.

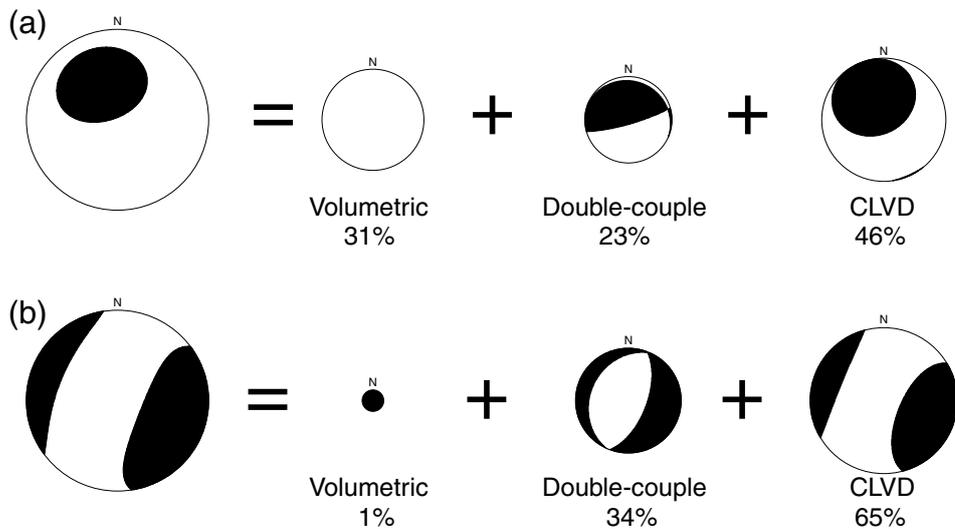


Fig. 6. Decomposition into volumetric, DC and CLVD parts for DLF events (a) 07/24/98, 23:32, (b) 08/06/98 1:37. Lower focal hemispheres are shown in equal area projection, with compressional fields shaded. The area of each plot is proportional to the largest principal moment.