

兵庫県南部地震における特異余震メカニズム解の空間分布

山中寛志* 平松良浩* 片尾浩

* 金沢大学理学部

要旨

兵庫県南部地震後の詳細な応力分布状態を調べるため、GROUPS-95 のデータを用いて余震の震源とメカニズム解の再決定を行った。東西圧縮の広域応力場と不一致なメカニズム解を持つ余震を特異な余震と定義し、既に報告されている各種の物理量と比較した。特異な余震の震源は本震のすべり量に大きな差がある領域に位置している。本震破壊域に沿ったすべり量や応力の不均質な分布により局地的な応力場の乱れが生じ、特異な余震が発生したと考えられる。

キーワード：特異な余震, 応力場, 不均質, 兵庫県南部地震

1. はじめに

1995年1月17日午前5時46分、兵庫県南部地震 ($M_{max}=7.2$) が起こった。気象庁による本震の震源は、北緯 34.595° 、東経 135.036° 、深さ 17.9 km (明石海峡下) である。神戸市をはじめとする多くの街が被害を受け、5,500人以上の死者を出した。

本震後、明石海峡より北東側の六甲断層系 (Fig. 1) や南西側の淡路島北中部周辺で、多くの余震が北東-南西方向約 70 km にわたり発生した (e.g., Hirata *et al.*, 1996; Katao *et al.*, 1997)。淡路島の野島断層では、本震による表面破壊跡が観察された。一方、神戸側の六甲断層系では、本震破壊の表面到達は見つかっていない (e.g., Nakamura and Ando, 1996)。有馬-高槻構造線より北側の丹波山地付近では、兵庫県南部地震以前から地震活動が大変活発であった。対照的に、有馬-高槻構造線より南側では、兵庫県南部地震以前に観測された地震は非常に少ない (Katao *et al.*, 1997)。

兵庫県南部地震後これまでに、余震分布の特徴 (Hirata *et al.*, 1996; Nakamura and Ando, 1996; Katao *et al.*, 1997)、明石海峡での断層形状の食い違い

(Nakamura and Ando, 1996; Takahashi *et al.*, 1996)、本震前の広域応力場 (Iio, 1996) と本震後の広域応力場 (Katao *et al.*, 1997)、本震のすべり分布 (Bouchon *et al.*, 1998; Ide and Takeo, 1997)、本震前後の断層面上の応力分布 (Bouchon *et al.*, 1998)、P波・S波速度構造 (Zhao and Negishi, 1998)、本震破壊域周辺のS波スプリッティング (Tadokoro *et al.*, 1999) など各種の報告がなされている。

Katao *et al.* (1997) は、兵庫県南部地震後の本震破壊域周辺の応力状態を調べるために、常設地震計ネットワークにより得られたデータを用いて余震のメカニズム解を決定し、本震前の地震のメカニズム (Iio, 1996) との比較を行っている。多くの余震はおおよそ東-西圧縮のメカニズムを示すが、広域応力場と一致しない南-北圧縮や正断層タイプの余震が起きていることを報告した。しかしながら、常設地震計ネットワークは既知の活断層と余震分布により推定される本震破壊域を網羅しておらず、そのデータを用いて決定された震源とメカニズム解の決定精度は必ずしも良いとはいえない。

本研究では、1995 兵庫県南部地震大学合同余震観測 (Geophysical Research Group Organized by Universities for Prediction Seismology in 1995; 以下、

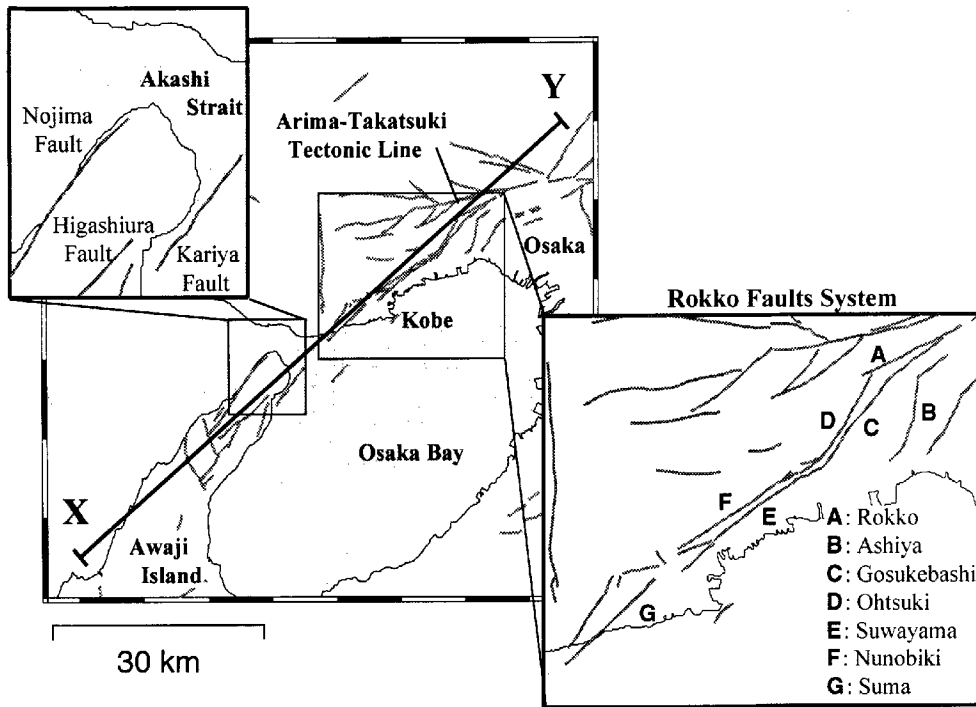


Fig. 1. The distribution of active faults. The Rokko Faults System is consist of active faults called (A) the Rokko Fault, (B) the Ashiya Fault, (C) the Gosukebashi Fault, (D) the Ohtsuki Fault, (E) the Suwayama Fault, (F) the Nunobiki Fault and (G) the Suma Fault respectively. Line X-Y shows the cross sections in Figures 8-11.

GROUPS-95 と略す) により得られたデータを用いて、余震の (1) 震源の再決定, (2) メカニズム解の決定を行った。常設地震計ネットワークのみならず、GROUPS-95 により本震破壊域周辺に密に配置された臨時観測点の波形データも使用することによって、高精度の震源決定およびメカニズム解の決定が可能である。言い換えれば、本震後の本震破壊域周辺の詳細な応力分布の情報を得ることができる。本稿ではまず余震メカニズム解の空間分布の特徴を述べ、次に兵庫県南部地震に関連して報告されている種々の物理量と余震メカニズム解の空間分布を比較し、その原因について考察を行う。

2. データ及び解析

本研究ではマグニチュード 2.3 以上の余震に関して、GROUPS-95 により得られた波形データを用いて震源の再決定、震源メカニズム解の決定を行った。

GROUPS-95 は、京都大学防災研究所によって運営される阿武山地震ネットワークと東京大学地震研究所によって運営される和歌山地震ネットワークの二つの常設地震計ネットワークに加え、27 点の臨時観測点 (Fig. 2) を余震域を中心に展開した。この

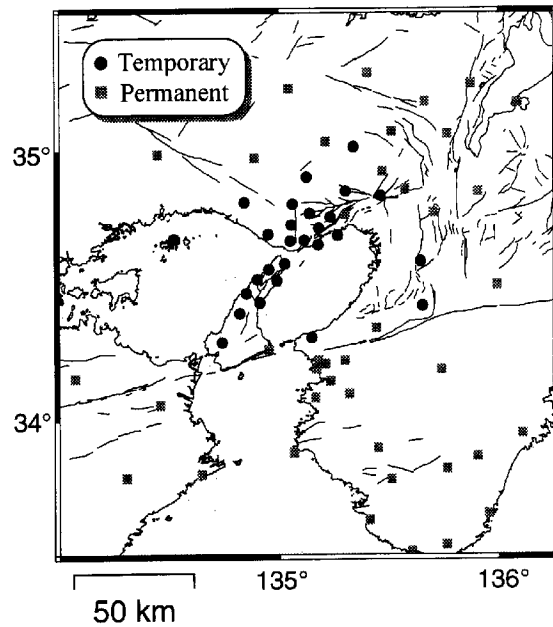


Fig. 2. Distribution of the seismic stations used in this study. Solid circles are temporary stations deployed by GROUPS-95 following the Hyogo-ken Nanbu earthquake. Gray squares are permanent stations.

観測は、1995年1月26日から5月12日まで(第1期)と、1995年10月1日から1996年1月12日まで(第2期)の2期間行われた。1995年2月14日には、27点の臨時観測点全ての設置が完了している。しかしながら、1995年4月には27点の臨時観測点が10点に減らされた。

データセットは、自動処理によりイベントファイルが作成された後、P波、S波の到着時刻やP波の極性の再読み取りが手動により施されている。しかしながら、多数のイベントを処理しているため、P波極性に誤りや、走時誤差の大きい観測点を震源決定に用いている可能性が非常に高い。本研究では、多くの観測点でP波初動の読み取りが可能なマグニチュード2.3以上の余震について、手動読み取りによるP波の到着時刻と極性の再検討をWIN(ト部・東田, 1991)を用いて行った。震源の再決定に用いた震源決定プログラムは、HYPOMH(Hirata and Matsu'ura, 1987)である。震源決定の際に使用した速度構造をFig. 3に示す。震源決定の精度を高めるために、震源から遠く観測点での走時誤差が大きい観測点はできるだけ省くよう注意した。また、S/N比が悪く、P波の到着時刻が読みとりにくいデータ(マグニチュードの小さい地震に多い)も震源決定の誤差が大きくなるため可能な限り除いた。震源の再決定と同時に再読み取りしたP波極性から、マグニチュード2.3以上の余震全てに関して震源メカニズム解を決定した。メカニズム解の決定には、Maeda(1992)によるプログラムを用いた。得られたP軸、T軸方向は、azimuthが $\pm 5^\circ$ 、plungeが $\pm 15^\circ$ 程度の

範囲内に収まっている。

最終的に、第1期から244イベント、第2期からは34イベントの本震破壊域に沿った余震についてメカニズム解が得られた。

3. 結果

本研究で解析しメカニズム解の決定された余震について、震源、メカニズムタイプとP(圧縮)軸方向をFig. 4, 5, 6に示す。また本稿の最後に、これらのイベント全てに関する断層パラメーターをTable 1(第1期)とTable 2(第2期)に示す。決定したメカニズムのタイプ分けにはKatao *et al.* (1997)と同じ定義を用いた。P(圧縮)軸の傾きが水平方向から 60° 以上立つ場合をNormalタイプ、T(伸張)軸の傾きが水平方向から 60° 以上立つ場合をReverseタイプ、Null(中立)軸の傾きが水平から 45° 以上立つ場合をStrike-slipタイプ、それ以外をIntermediateタイプとしている。

余震分布や決定したメカニズム解の特徴を示すために、本震破壊域周辺の余震域を三つの地域に分割した。三つの地域とは明石海峡を境に、有馬-高槻構造線までを神戸地域、余震活動の活発だった淡路島中部までを淡路地域、そして余震活動のあまり活発でなかった明石海峡である。以下にそれぞれの地域の余震分布やメカニズム解の特徴について述べる。

3.1 神戸地域

神戸地域(Fig. 4)では、六甲断層系に沿って多くの余震が観測された。

六甲断層、五助橋断層、芦屋断層の北東端付近(有馬高槻構造線のすぐ南側)に、strike-slipタイプの余震のクラスターがある(Fig. 4-a)。これらの余震のP軸方向は、おおよそ東南東-西北西であり、非常によく揃っている。

五助橋断層と大月断層の南端付近には、reverseタイプの余震のクラスターが存在する(Fig. 4-b)。これらの余震も、おおよそ東-西から東南東-西北西のP軸方向を示す。しかしながら、神戸地域のstrike-slipタイプをはじめとするほとんどの余震が、深さ約6-8 km以深で起きているのに対し、これらのreverseタイプの余震は、深さが6-7 km以浅で起きていることが特徴的である。

諏訪山断層、布引断層から須磨断層沿いにかけて、主にstrike-slipタイプの余震が起こっている。これらの余震のP軸方向も、東-西から東南東-西北西方向が主体である。しかしながらFig. 4-cで見られ

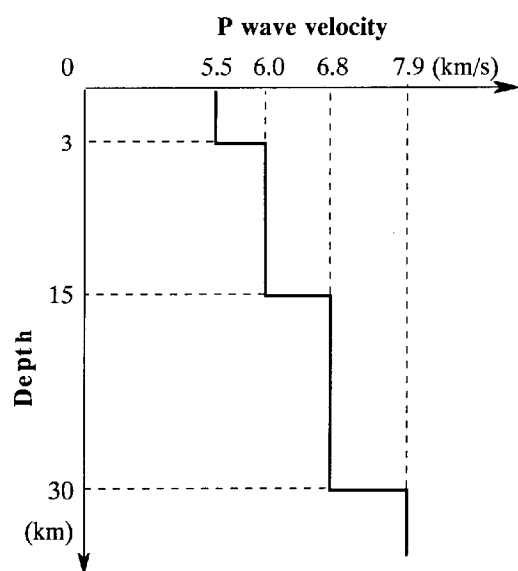


Fig. 3. P-wave velocity structure used for the hypocenter determination.

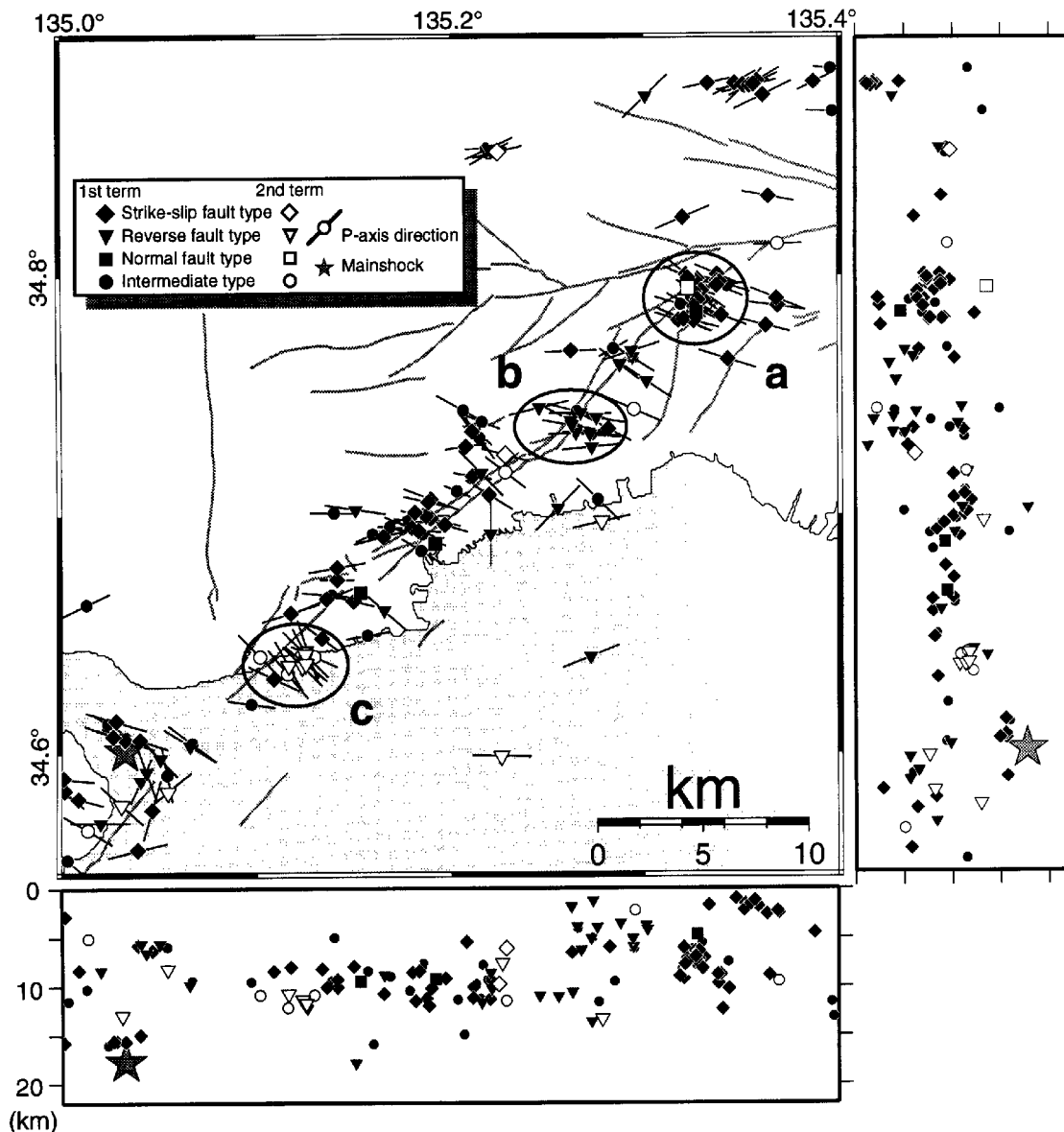


Fig. 4. Focal mechanism type of aftershocks in the Kobe region. Diamonds are strike-slip type. Triangles are reverse-fault type. Squares are normal-fault type. Circles are intermediate type. Solid and open symbols represent the aftershocks observed in the 1st term (from Jan. 26 to May 12, 1995) and 2nd term (from Oct. 1, 1995 to Jan. 12, 1996), respectively. Short bars attached to epicenter circles represent the horizontal projection of P axis. Star shows the hypocenter of the mainshock.

るように、須磨断層沿いでは活断層の走行に対してほぼ垂直な南東-北西方向の P 軸を持つ reverse タイプの余震が、深さ 12 km 付近でクラスターを形成して起こった。これらの reverse タイプの余震は主に第 2 期に起こった余震である。

3.2 淡路地域

淡路地域 (Fig. 5) においては、中部以北で余震活動が活発であった。この地域では、本震の表面破壊

が北西部の野島断層で観察された。しかしながら、余震は野島断層の直下でほとんど起こらず、北東部の東浦断層、仮屋断層沿いや野島断層の南端付近に多く起こった。

野島断層の南端付近の余震は、クラスターを形成しているように見える。これらの余震の P 軸方向は、神戸地域の多くの余震の P 軸方向とほぼ同じで、おおよそ東-西から東南東-西北西方向である。しかしながら、深さに関して幅広い分布をしており、

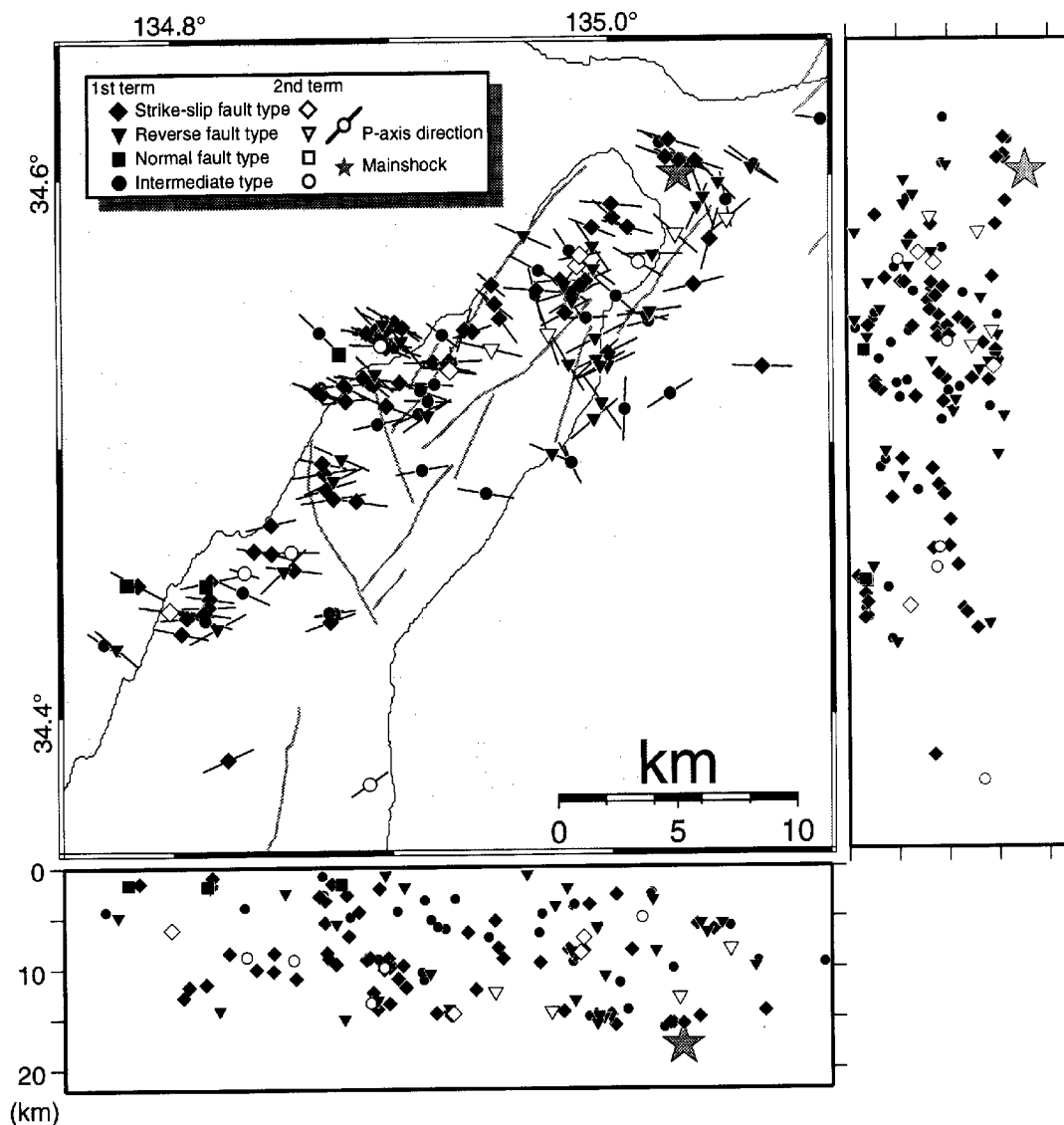


Fig. 5. Focal mechanism type of aftershocks in the Awaji region. All symbols are the same as those in Figure 4. Short bars attached to epicenter circles represent the horizontal projection of P axis. Star shows the hypocenter of the minshock.

神戸地域のような水平分布、深さ分布、メカニズムタイプに関してほぼ一致したクラスターとは異なっている。

淡路島北東部でも、多数の余震が起こった。これらの余震は、野島断層南端付近や神戸地域の様なクラスターを形成していない。また、P 軸方向においてもおよそ北東-南西から南東-北西まで、あるいは南-北に近い P 軸方向が存在し、非常にばらつきが大きい。比較的 reverse タイプの余震が多く起きているが、神戸地域のような狭い範囲でのメカニズムタイプの一致はあまり見られない。

3.3 明石海峡

明石海峡 (Fig. 6) では、本震破壊域周辺の他の余震域と比べて余震が非常に少ないことが、Hirata *et al.* (1996), Nakamura and Ando (1996) などにより報告されている。また、本震と4つの前震の震源がある場所である。本研究結果から、ここでは余震の小さなクラスターが2つ確認された。

1つは、明石海峡中央部で、深さ約 15-16 km 付近に存在するクラスターである (Fig. 6-a)。ここは、本震の震源に非常に近く、また前震の起こった場所とほぼ一致する。これらの余震のメカニズムは前震と同じく概ね strike-slip タイプであり、P 軸方向は

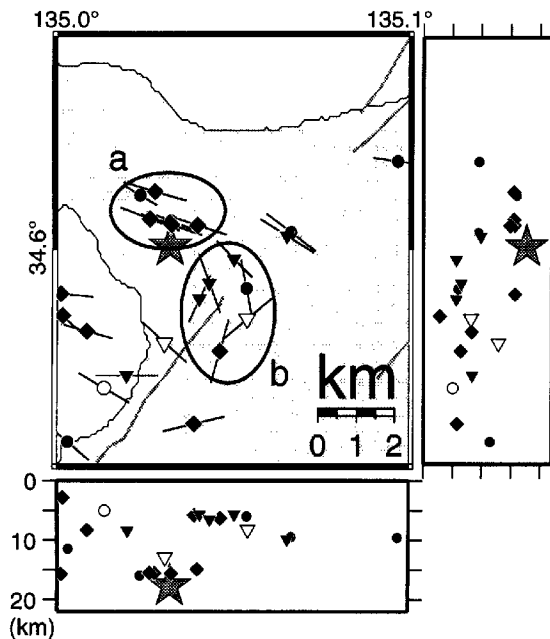


Fig. 6. Focal mechanism type of aftershocks in Akashi Strait. All symbols are the same as those in Figure 4. Short bars attached to epicenter circles represent the horizontal projection of P axis. Star shows the hypocenter of the mainshock.

一様にほぼ東-西方向である。しかし、Katao *et al.* (1997) により決定された2つの前震のP軸方向と比較すると、約 10° 程度、南-北方向に偏っている。

もう1つのクラスターは、明石海峡東部の深さ約6 km付近に存在するクラスターである (Fig. 6-b)。主に reverse タイプの余震のクラスターであるが、これらの余震のP軸方向はどれもほぼ南-北であり、余震域全体にわたって多く見られる東-西から東南東-西北西の圧縮方向から大きくずれる。

4. 議論

本研究でメカニズム解を決定したマグニチュード2.3以上の余震に関して、本震破壊域、またその周辺で起こった余震は概ね strike-slip タイプと reverse タイプであった。また、メカニズム解から得られたP軸方向は、おおよそ東-西から東南東-西北西方向が主であった (Fig. 4, 5, 6)。Katao *et al.* (1997) は、多くの余震のP軸方向がおおよそ東-西方向であり、Iio (1996) で報告された兵庫県南部地震以前の近畿地方が東-西圧縮の広域応力場であったこととの比較から、本震破壊域は本震後もおおよそ東-西圧縮の応力場で支配されていると示唆した。本研究において、

本震破壊域に沿って観測された、六甲断層付近、五助橋断層北端付近の strike-slip タイプのクラスター (Fig. 4-a)、五助橋断層南端付近の reverse タイプのクラスター (Fig. 4-b)、野島断層南端付近のクラスター (Fig. 5) に見られる余震のP軸方向は東-西方向であり、本震後も東-西圧縮の広域応力場に支配されていることが分かる。

しかしながら、本震破壊域に沿って東-西圧縮に合わないP軸を持つ余震も数多く観測された。Katao *et al.* (1997) でも指摘されているように、本震破壊域に沿って少数ながら normal タイプのイベントが観測された。Fig. 4-c で見られるように須磨断層沿いで起こった余震のほとんど (主に reverse タイプのクラスター) は、断層の走行に垂直な南東-北西方向のP軸を示している。明石海峡東部 (Fig. 6-b) では、おおよそ南-北圧縮の余震がクラスターを形成して起こった。また淡路島北東部では、P軸方向の非常に大きなばらつきを明瞭に捉えることができた (Fig. 5)。

そこで本研究では、上述のような東-西圧縮の広域応力場と一致しないメカニズムを示した余震を、特異メカニズム解を持つ余震 (以下、特異な余震と略す) と定義し、その空間的な分布を調査した (Fig. 7)。本研究における特異な余震とは、P軸の方位が東-西方向から 45° 以上離れている余震、またはP軸の傾きが水平方向から 45° 以上立っている余震を示す。上述の定義による48個の余震は、全体の約1/6に相当する。これらの特異な余震の空間分布や本研究で決定した本震破壊域周辺の余震全ての空間分布を、すでに報告されているすべり分布や応力分布のトモグラフィーなどと比較し、特異な余震の起こる原因を考察する。

Fig. 8 に、Bouchon *et al.* (1998) により求められた本震直後の応力分布と本研究で再決定した余震の分布を、本震破壊域に沿った断面で示す。Bouchon *et al.* (1998) では、強震計のデータを用いたインバージョンから、応力分布やすべり分布を求めている。神戸地域では、深さ約10 km付近で余震が帯状に分布しており、応力の比較的高い領域も約10-15 km付近に分布している。淡路地域では、余震が深さ方向に幅広く分布しているが、応力の高い領域もまた深さ0-15 kmと広い幅を持っている。本震破壊域において、本震後の応力の高い地域と余震分布が非常によく対応する。このことから、余震は主に本震後の応力の高い領域で起こり、余震分布の形状は本震後の応力量に依存していると考えられる。

Fig. 9 と Fig. 10 は、特異な余震のみを Bouchon *et al.* (1998) により求められた本震後の応力分布、本

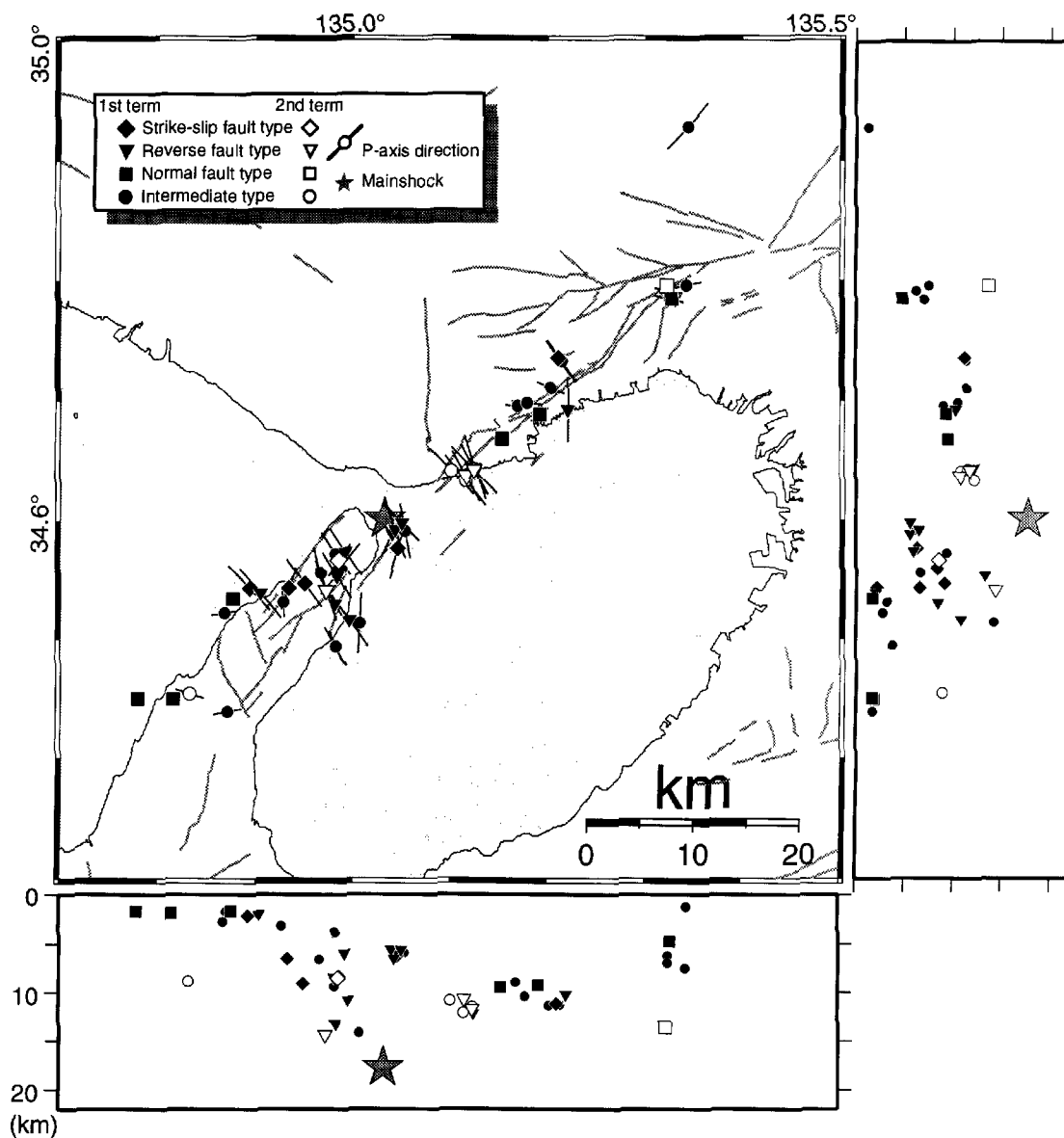


Fig. 7. Distribution of the unusual aftershocks whose direction of P axis is not consistent with the regional stress field of approximately E-W compression. All symbols are the same as those in Figure 4. Short bars attached to epicenter circles represent direction of P axis. Star shows the hypocenter of the mainshock.

震のすべり分布とそれぞれ比較した図である。神戸地域において、諏訪山断層周辺、また須磨断層に沿って特異な余震が存在する (Fig. 7)。応力分布との比較 (Fig. 9) において、これらの特異な余震は本震後の応力の高い領域と低い領域の境界付近に位置しているように見える。次に、これらの余震を本震のすべり分布と比較する (Fig. 10)。神戸地域では深さ約 10 km 以深で比較的滑り量が大きく、対照的に深さ 10 km 以浅ではほとんど滑っていない。諏訪山断層周辺の特異な余震 (特に諏訪山断層と須磨断層

の境界付近の normal タイプと normal タイプに近い余震) は、深さ 10 km 付近のすべりの境界がもたらした局所的に乱れた応力場によって起こった余震と考えることができる。須磨断層沿いに観察された主に reverse タイプの余震のクラスターにおいても、応力分布やすべり分布との比較からそれぞれの境界付近に位置していることが分かる。しかしながら、他の神戸地域のような strike-slip タイプのクラスターの浅部に分布している特異な余震とは異なり、同じメカニズムの余震 (メカニズムタイプ分けの都合

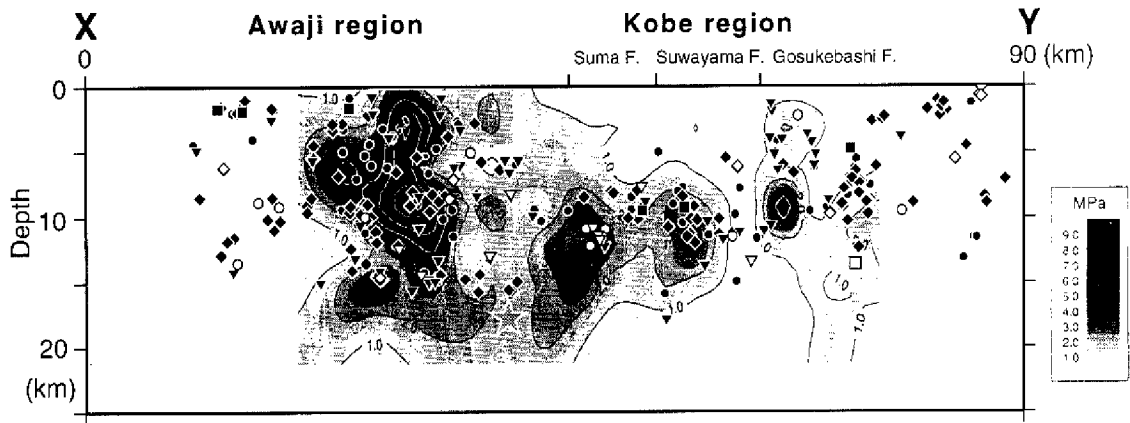


Fig. 8. Cross section of hypocenter distribution of the aftershocks with the final stress on the mainshock faults reported by Bouchon et al. (1998) along X-Y shown in Figure 1. All symbols are the same as those in Figure 4.

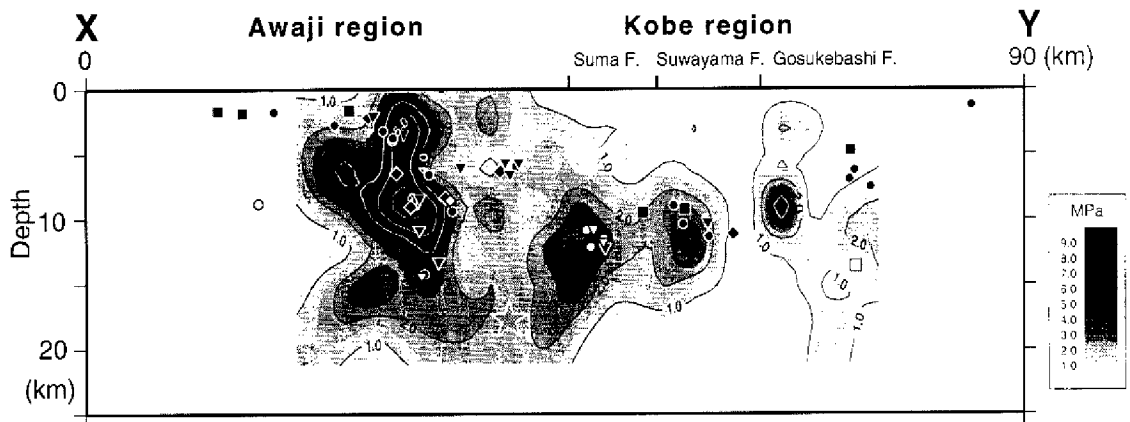


Fig. 9. Cross section of the locations of the unusual aftershocks with the final stress on the mainshock faults reported by Bouchon et al. (1998) along X-Y shown in Figure 1. All symbols are the same as those in Figure 4.

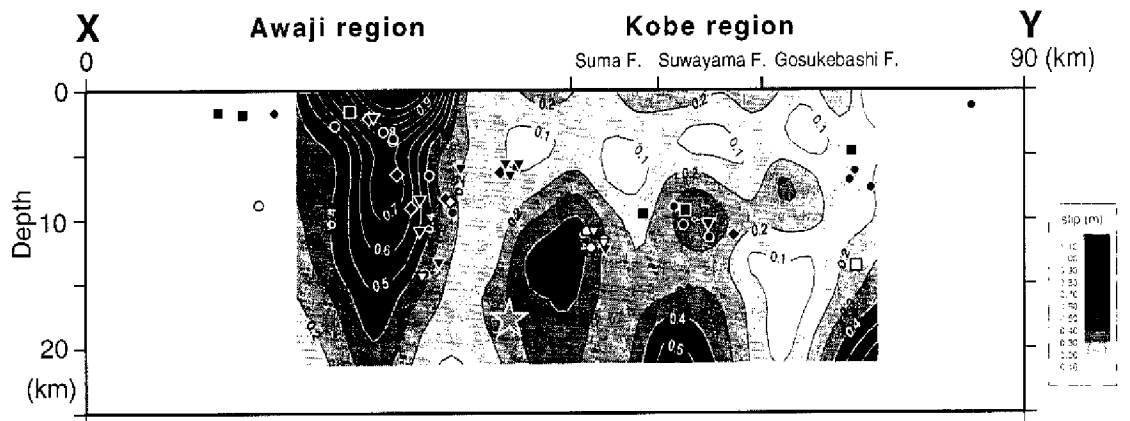


Fig. 10. Cross section of the locations of the unusual aftershocks with the slip distribution reported by Bouchon et al. (1998) along X-Y shown in Figure 1. All symbols are the same as those in Figure 4.

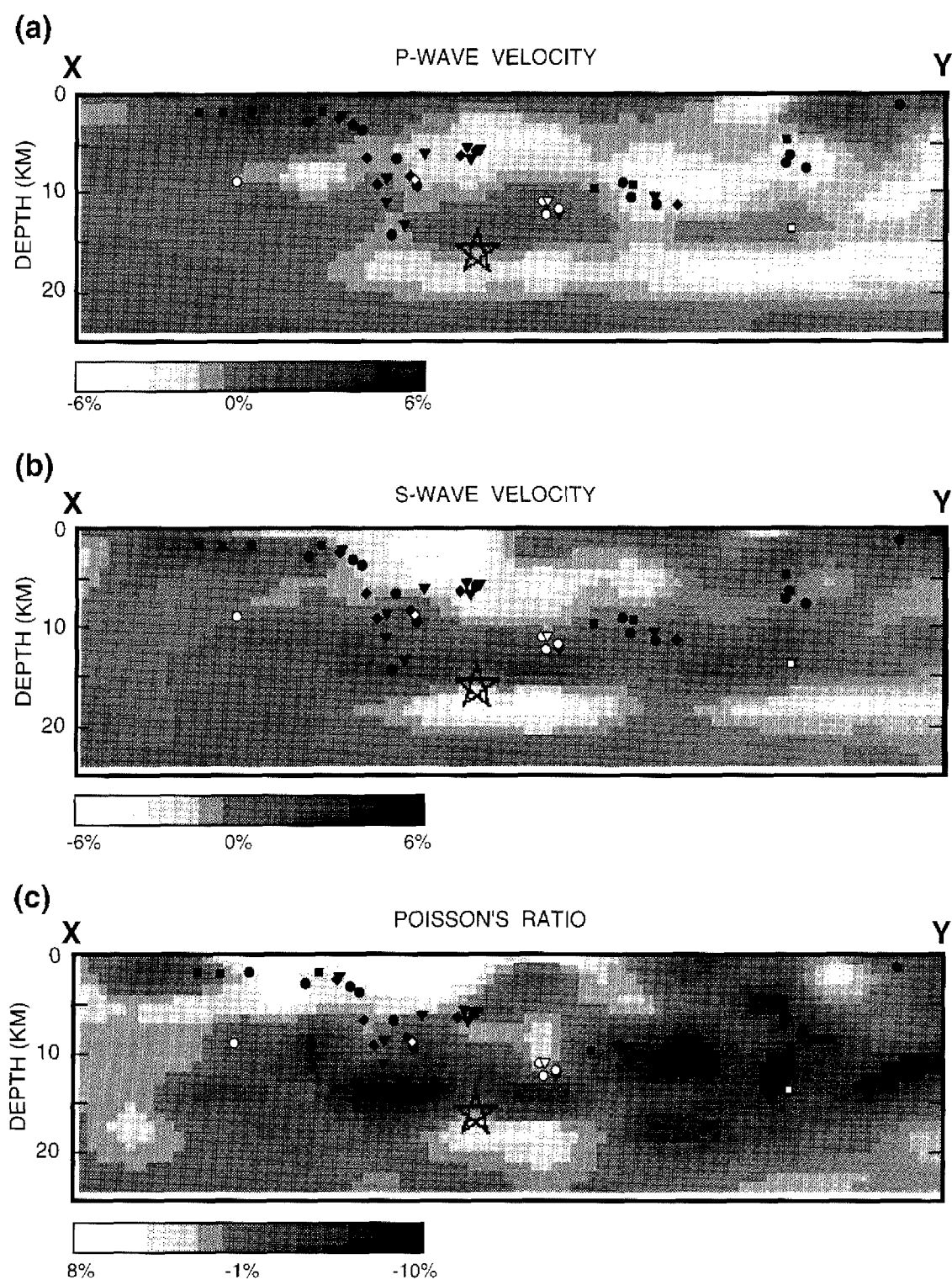


Fig. 11. Cross section of the locations of the unusual aftershocks with the (A) P wave velocity, (B) S wave velocity, and (C) Poisson's ratio reported by Zhao and Negishi (1998) along X-Y shown in Figure 1. All Symbols are the same as those in Figure 4.

上、reverse タイプと intermediate タイプに分かれている)が、ほぼ同じ深さで活断層に対して平行に整列している。さらに、これらの余震の P 軸方向は、どれも活断層に対して垂直である (Fig. 7)。これらのことから須磨断層沿いで起こった余震のクラスターは、断層すべりの境界付近での不均質性によって乱された局所的な応力場によるものであるか、あるいは、広域応力場による剪断応力が本震のすべりにより十分に取り除かれていたという、二つの説明が考えられる。

淡路地域においては、余震の P 軸方向のばらつきが著しい北東部に特異な余震が多数観測された (Fig. 7)。淡路地域では、神戸地域とは対照的に、浅い部分でも本震によるすべり量が大きく、深さ 15 km 付近まですべり量の大きい領域が広がっている (Fig. 10)。また、淡路島北端付近では、本震前後において応力の大変低い領域があり、本震のすべり量も大変小さい。淡路地域における特異な余震は、このすべり量の大きい領域と小さい領域との境界付近に位置する (Fig. 10 の 5 km 以深において、すべり量の大きな領域の北東側にプロットされる余震。Fig. 7 では、東浦断層付近に位置する余震)。このことから、淡路島北東部についても、本震断層のすべりの不均質が局所的にこの地域の応力場を変化させたと考えられる。また Fig. 10 から、淡路島北東部における特異な余震が起こる領域は、神戸地域で特異な余震が起こる領域よりもすべり量のコンター間隔が密である (Fig. 10 のコンター間隔は 0.1 m)。すなわち、淡路島北東部では、本震破壊域に沿った断層すべりに関する不均質の程度が非常に大きい。ゆえに応力場が乱された程度も大きく、特異な余震の起こりやすい領域であると考えられる。

Tadokoro *et al.* (1999) は、本震破壊域に沿った地域の S 波スプリットングを解析し、淡路島北部周辺での速い S 波の方向が既知の活断層に対して様々な方向を向くことを示した。これは本研究で決定した余震メカニズム解の P 軸方向と調和的である。彼らは、速い S 波の方向が広域応力場と一致せずに南北に近い方向を示す地域に関して、複雑な地質構造がその原因であることを示唆している。淡路島北東部において、P 軸方向のばらつきが大きく、また特異な余震が比較的広い範囲に分布していることは、地域的な地質構造の複雑さにも起因しているかもしれない。

明石海峡東部の深さ約 6 km 付近に存在する南-北圧縮の余震のクラスターについては、本震でのすべり分布や本震後の応力分布との対応は明瞭ではない。Zhao and Negishi (1998) では兵庫県南部地震の

余震域に沿った P 波、S 波の速度構造とポアソン比の分布をトモグラフィーで求めている (Fig. 11)。明石海峡では、深さ 4-5 km 以浅における S 波速度が 3% 程度遅く、またポアソン比は 2-4% 程度高くなっている。深さ 6 km 付近の南-北圧縮のクラスターは、この S 波速度構造の大きく変化する境界付近に対応しているようにも見える。しかしながら、広域応力場の方向とほぼ垂直な P 軸を持つ余震が起こる原因を、地殻の地震波速度だけから推測することはできない。P 波速度構造との比較においても、明瞭な対応を見つけれない。この余震のクラスターは、Nakamura and Ando (1996), Takahashi *et al.* (1996) などによって報告されたような、明石海峡での断層形状の食い違いによる幾何学的な原因により起こった余震かもしれない。

5. 結論

兵庫県南部地震の余震について、震源の再決定と震源メカニズムの決定を、GROUPS-95 のデータを用いて行った。本震後の支配的な応力場は東-西から東南東-西北西方向である。神戸地域では、P 軸方向とメカニズムタイプがそろったクラスターが認められた。淡路北東部では、P 軸方向のばらつきが非常に大きい。明石海峡では、南-北圧縮の余震が起こった。この方向は、広域応力場に対してほぼ垂直である。本震破壊域に沿って起こった特異な余震の分布を、本震断層のすべり分布や、本震後の応力分布などと比較した。特異な余震は、すべり量の大きい領域とごく小さい領域の境界付近や、応力の高い領域と小さな領域との境界付近に起こる。したがって、特異な余震は本震破壊域に沿ったすべり分布や応力分布の不均質による局所的な応力場の乱れに起因していると考えられる。

謝辞

愛媛大学理学部の趙大鵬博士と京都大学防災研究所地震予知研究センターの根岸弘明氏には図を頂くにあたり大変お世話になり、また京都大学防災研究所地震予知研究センターの田所敬一氏にはデータを頂く際大変便宜を図っていただきました。ここに御礼申し上げますと共に、大学合同余震観測グループの皆様へ感謝いたします。

参考文献

ト部 卓・東田進也 (1991): ワークステーションによる微小地震観測網波形検測支援システム, 地震学会講演予稿集, No. 1, 70.

- Aki, K. and P. G. Richards (1980), *Quantitative Seismology*, Vol. 1, W. H. Freeman and Company, New York.
- Bouchon, M., H. Sekiguchi, K. Irikura, and T. Iwata (1998): Some characteristics of the stress field of the 1995 Hyogo-ken Nanbu (Kobe) earthquake, *J. Geophys. Res.*, **103**, B10, 24271-24282.
- Hirata, N., and M. Matsu'ura (1987): Maximum-likelihood estimation of hypocenter with origin time eliminated using nonlinear inversion technique, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **47**, 50-61.
- Hirata, N., S. Ohmi, S. Sakai, K. Katsumata, S. Matsumoto, T. Takanami, A. Yamamoto, T. Iidaka, T. Urabe, M. Sekine, T. Ooida, F. Yamazaki, H. Katao, Y. Umeda, M. Nakamura, N. Seto, T. Matsushima, H. Shimizu, and Japanese University Group of the Urgent Joint Observation for the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake (1996): Urgent joint observation of aftershocks of the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake, *J. Phys. Earth*, **44**, 317-328.
- Ide, S., and M. Takeo (1997): Determination of constitutive relations of fault slip based on seismic wave analysis, *J. Geophys. Res.*, **102**, B12, 27379-27391.
- Iio, Y. (1996): Depth-dependent change in the focal mechanism of shallow earthquakes: Implications for brittle-plastic transition in a seismogenic region, *J. Geophys. Res.*, **101**, B5, 11209-11216.
- Katao, H., N. Maeda, Y. Hiramatsu, Y. Iio, and S. Nakao (1997): Detailed mapping of focal mechanisms in/around the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake rupture zone, *J. Phys. Earth*, **45**, 105-119.
- Maeda, N. (1992): A method of determining focal mechanisms and quantifying the uncertainty of the determining focal mechanisms for microearthquakes, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **82**, 2410-2429.
- Nakamura, M., and M. Ando (1996): Aftershock distribution of the January 17, 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake determined by the JHD method, *J. Phys. Earth*, **44**, 329-335.
- Tadokoro, K., M. Ando, and Y. Umeda (1999): S wave splitting in the aftershock region of the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake, *J. Geophys. Res.*, **104**, 981-991.
- Takahashi, N., K. Suyehiro, M. Shinohara, A. Kubo, A. Nishizawa, and H. Matsuoka (1996): Aftershocks and faults of the Hyogo-ken Nanbu earthquake beneath Akashi Strait, *J. Phys. Earth*, **44**, 337-347.
- Zhao, D., and H. Negishi (1998): The 1995 Kobe earthquake: Seismic image of the source zone and its implications for the rupture nucleation, *J. Geophys. Res.*, **103**, B5, 9967-9986.

付録

Table 1. List of focal mechanism solutions for aftershocks ($M > 2.3$) in the 1st term: serial number, origin time (JST), location, magnitude, fault parameters (strike, dip, and rake in degree) for two nodal planes, orientation (plunge and azimuth) for P-axis and T-axis, respectively. The fault parameter follow the notation defined by Aki and Richards (1980). (Plunge of P-axis and T-axis are measured down from the horizontal.)

No.	Y	M	D	H	M	S	Lat.	Lon.	Dep.	Mag.	Nodal plane - 1			Nodal plane - 2			P - axis		T - axis	
											Strike	Dip	Rake	Strike	Dip	Rake	Plun.	Azim.	Plun.	Azim.
1	95	1	28	16	13	24.34	34.695	135.168	9.00	2.6	270.3	28.8	-36.3	32.7	73.6	-114.0	55.0	272.6	24.9	141.1
2	95	1	28	19	0	27.79	34.613	135.027	15.55	3.2	236.4	65.6	155.7	337.0	68.0	26.4	1.5	106.3	33.9	197.3
3	95	1	28	19	55	11.24	34.613	135.023	15.92	3.4	327.9	23.1	7.1	231.4	87.2	113.0	38.0	300.8	43.2	163.6
4	95	1	29	4	52	36.00	34.384	134.825	8.53	3.0	289.0	72.0	-2.4	19.7	87.8	-161.9	14.3	245.8	11.0	153.0
5	95	1	29	6	8	6.06	34.542	134.937	12.18	2.4	105.2	50.7	-14.1	204.3	79.1	-139.8	35.6	72.7	18.3	328.9
6	95	1	29	9	41	39.05	34.673	135.141	10.13	3.0	57.0	57.6	-151.2	310.6	66.0	-35.9	41.8	270.7	5.3	5.5
7	95	1	29	16	2	45.67	34.695	135.180	8.60	3.3	245.7	75.1	173.4	337.4	83.6	15.0	5.9	110.8	15.1	202.4
8	95	1	30	4	21	54.48	34.707	135.276	11.63	2.7	258.0	49.1	141.3	15.6	61.8	48.0	7.4	134.1	52.8	234.0
9	95	1	30	14	43	36.09	34.543	134.893	2.16	3.2	9.5	58.7	28.6	263.7	65.9	145.3	4.5	318.0	41.1	224.1
10	95	1	30	18	59	14.75	34.519	135.028	10.11	2.6	181.1	32.9	135.9	310.2	67.8	65.1	19.0	58.6	59.4	184.3
11	95	1	31	1	43	20.77	34.545	134.896	0.78	3.2	12.8	18.6	69.9	214.0	72.6	96.6	27.3	298.7	61.9	134.0
12	95	1	31	5	36	49.31	34.699	135.189	10.15	2.4	231.7	59.5	149.2	338.5	63.8	34.4	2.7	104.3	42.1	196.7
13	95	1	31	9	36	6.91	34.734	135.273	5.07	2.7	154.7	46.3	46.3	28.8	58.5	125.9	6.8	94.2	59.1	352.6
14	95	1	31	11	36	32.62	34.539	134.905	2.02	2.6	71.6	49.2	121.0	209.0	49.5	59.2	0.2	320.3	67.0	50.6
15	95	1	31	16	18	52.76	34.944	135.376	7.11	2.4	216.5	60.5	-178.6	125.8	88.8	-29.5	21.3	77.1	19.5	175.0
16	95	1	31	19	34	9.74	34.668	135.153	9.51	2.6	77.6	42.1	-106.5	279.4	50.0	-75.6	78.3	249.5	4.0	359.2
17	95	2	1	1	34	40.25	34.781	135.326	7.68	2.7	61.5	64.5	175.6	153.4	86.0	25.6	14.8	284.6	20.7	20.4
18	95	2	1	5	41	53.98	34.561	134.989	3.79	2.5	200.8	53.3	159.3	303.5	73.5	38.5	12.8	68.1	38.6	168.5
19	95	2	1	12	45	49.05	34.659	135.117	8.01	2.5	304.2	57.5	28.7	197.9	66.1	144.0	5.4	252.8	41.8	158.0
20	95	2	1	18	20	19.47	34.744	135.206	14.90	2.9	354.3	55.8	37.1	241.3	60.1	139.6	2.6	298.7	48.6	205.8

No.	Y	M	D	H	M	S	Lat.	Lon.	Dep.	Mag.	Nodal plane - 1			Nodal plane - 2			P - axis		T - axis	
											Strike	Dip	Rake	Strike	Dip	Rake	Plun.	Azim.	Plun.	Azim.
8	95	10	14	2	39	32.99	34.642	135.124	11.77	2.2	251.8	52.0	129.4	18.7	52.5	50.9	0.2	135.1	60.0	225.6
9	95	10	14	21	27	27.21	34.567	134.985	8.60	2.5	73.2	61.4	-24.3	175.5	68.8	-149.1	36.5	36.5	4.8	303.0
10	95	10	15	1	32	47.67	34.633	135.115	12.15	2.7	199.4	54.1	43.2	80.5	56.3	135.2	1.3	140.4	53.8	48.6
11	95	10	22	1	1	28.93	34.852	135.224	9.77	2.4	299.5	74.7	-10.0	32.2	80.3	-164.5	17.8	256.5	3.8	165.2
12	95	10	23	17	14	34.78	34.725	135.228	6.15	2.4	326.4	55.6	6.5	232.7	84.7	145.4	19.5	284.5	27.7	183.8
13	95	10	25	21	56	50.53	34.637	135.123	11.34	2.3	43.2	32.6	87.9	225.7	57.4	91.4	12.4	314.7	77.6	140.2
14	95	11	9	20	29	52.55	34.454	134.832	8.84	3.2	258.6	52.5	-146.3	146.5	63.9	-42.7	47.9	107.3	6.9	204.9
15	95	11	13	10	56	-0.27	34.570	134.987	7.11	2.6	225.4	48.9	-174.4	131.7	85.7	-41.2	31.1	80.1	24.4	186.0
16	95	11	13	15	30	57.14	34.638	135.125	11.71	2.7	59.5	33.6	118.1	206.9	60.8	72.7	14.1	309.4	69.1	80.7
17	95	11	15	11	55	15.77	34.641	135.101	10.89	2.3	73.2	50.7	130.2	200.0	53.8	51.7	1.7	316.0	59.9	49.0
18	95	11	15	19	58	46.50	34.813	135.369	9.54	2.5	222.9	40.5	157.4	330.4	75.5	51.7	21.2	88.4	45.6	201.7
19	95	11	16	16	23	57.24	34.536	134.946	12.38	2.2	202.8	40.4	103.4	5.5	50.9	78.9	5.4	103.3	79.8	224.8
20	95	11	17	17	46	52.13	34.642	135.124	11.53	2.2	24.7	45.8	33.2	270.2	66.9	130.7	12.5	332.0	50.4	226.5
21	95	11	19	15	42	19.86	34.528	134.927	14.54	2.6	234.3	73.8	-171.6	142.0	82.0	-16.4	17.2	97.2	5.7	189.0
22	95	11	23	17	1	28.03	34.584	135.054	8.20	2.3	149.8	40.0	103.5	312.4	51.3	78.9	5.8	50.3	79.6	173.6
23	95	12	8	17	15	8.57	34.718	135.228	11.50	2.7	175.3	41.4	26.8	64.6	72.6	128.2	18.6	127.1	47.9	15.2
24	95	12	16	4	49	38.44	34.375	134.889	13.44	3.1	95.0	29.7	18.4	348.9	81.0	118.4	30.2	56.0	46.5	288.1
25	95	12	22	19	7	12.05	34.461	134.854	9.16	3.3	147.6	41.6	41.2	24.4	64.1	123.8	12.7	90.7	56.9	340.5
26	95	12	27	9	18	15.17	34.439	134.799	6.17	3.1	145.2	68.8	15.1	49.7	75.9	158.1	4.8	98.5	25.3	6.2
27	96	1	3	20	55	30.24	34.905	135.382	0.69	3.1	294.1	75.7	-11.4	26.9	78.9	-165.5	18.1	250.9	2.2	160.2
28	96	1	4	15	19	56.56	34.795	135.323	13.60	2.3	111.1	45.5	-77.9	274.0	45.8	-102.1	81.4	103.3	0.1	12.5
29	96	1	5	19	29	14.35	34.698	135.278	13.29	2.3	195.4	45.7	131.1	324.1	57.4	56.1	6.5	77.5	61.1	179.4
30	96	1	8	3	37	14.79	34.903	135.387	0.08	2.9	190.4	64.4	176.5	281.9	86.9	25.7	15.5	53.3	20.2	149.2
31	96	1	10	15	57	24.12	34.541	134.972	14.34	2.2	245.4	43.3	81.6	76.9	47.3	97.8	2.0	161.4	83.9	51.8
32	96	1	11	2	5	29.74	34.903	135.387	0.82	2.4	117.2	70.9	-17.8	213.2	73.3	-160.0	25.8	75.6	1.6	344.8
33	96	1	11	2	22	12.65	34.599	135.226	7.63	2.3	193.7	39.3	107.5	351.6	52.9	76.2	6.9	91.4	77.0	213.1
34	96	1	15	7	20	24.48	34.537	134.895	9.95	2.4	215.9	54.8	141.5	330.5	59.4	42.0	2.7	92.3	50.1	185.5

Spatial distribution of unusual aftershocks of the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake

Hiroshi YAMANAKA*, Yoshihiro HIRAMATSU*, Hiroshi KATAO

* Department of Earth Sciences, Faculty of Science, Kanazawa University

Synopsis

To reveal the detailed stress field after the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake, we relocate hypocenter for aftershocks ($M > 2.3$) and determine these focal mechanisms using seismic records obtained by GROUPS-95. Some aftershocks show nearly N-S compression or normal fault type events whose mechanism aren't consistent with the regional stress field of approximately E-W compression. We define these aftershocks as the unusual aftershocks. These are mainly located at the upper boundary between slipped and unslipped zone in the mainshock. We suggest that the unusual aftershocks are caused by the disturbance of the local stress field due to the heterogeneities of the slip and the stress distribution of the main rupture.

Keywords: unusual aftershocks, stress field, heterogeneity, the Hyogo-ken Nanbu earthquake