

(2-2)活断層帯の微小地震の発震機構

片尾浩（京都大学防災研究所）

katao@rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp

小笠原知彦（京都大学防災研究所）

oga@rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp

飯尾能久（京都大学防災研究所）

iio@rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp

(a) 業務の要約

平成 16 年度に続き、丹波山地の定常活動を中心に近畿地方北部における微小地震の発震機構データをまとめて解析した。今年度は既存の発震機構データをコンパイルするだけでなく、データの欠落している期間についても、新に発震機構を求め、兵庫県南部地震前後の十数年間にわたる連続的なデータセットを作成し、それに基づく解析を行った。近畿地方北部では、過去のデータにも見られるように P 軸方位は東西もしくはやや東南東-西北西方向が卓越し、断層型は横ずれ断層と逆断層が混在している。丹波山地においては兵庫県南部地震前に東西方向であった P 軸方位は、同地震以後も概ね東西方向で変化は無いように見えるが、震源域に隣接する丹波山地の西南部において、P 軸方位が北東-南西方向に変化したことが分かった。また、応力テンソルインバージョン解析を、丹波山地を細かく区切った多数の小領域について行い、兵庫県南部地震前後の期間について応力場の変化をみた。兵庫県南部地震後の主応力軸に大きな変化は無いものの、丹波山地南西部では有意な応力場の変化があったことが示唆された。

丹波山地における発震機構／応力場の変化は、兵庫県南部地震による理論的な応力変化に基づく Δ CFF の値と、定性的によく合致する結果が得られた。

(b) 業務の実施方法

微小地震の発震機構を調べることは、その地域の応力場やテクトニクス、過去あるいは将来の被害地震の発生機構を知る上でも重要である。本研究では、丹波山地の定常活動を中心に近畿地方北部における既存の微小地震の発震機構データを整理し解析する。

大阪府北部から京都府中部にかけての丹波山地の微小地震活動は定常的で非常に活発である。もっとも活動的な地域だけでも 40km 四方におよび、日本列島の他の定常活動域や群発域に比べて大きな面積を占める。丹波山地は近畿三角帯の西縁に位置し、新潟神戸歪み集中帯の一翼を担う場所である。従って、近畿地方や広域のテクトニクスを論じる上でも重要であると考えられる。

丹波山地周辺には、京都大学防災研究所阿武山観測所系の微小地震観測網が設けられている。従来から観測点密度が高く、精度のよい震源データが集められている。しかし、ルーチン的にメカニズム解の決定はされていなかった。

本研究では、1992 年から 1998 年までの約 900 個の微小地震のメカニズム解を新たに決定し、1991 年以前の飯尾のデータセットと統合することで、兵庫県南部地震の前後の丹波山地の地震活動と応力場について考察した。

1) P 波初動の押し引きによるメカニズム解の決定

P 波初動の押し引きに基づき、Maeda (1992)¹⁾の方法を用いて、丹波山地におけるメカ

ニズム解の決定をおこなった。一個の地震について複数求めたメカニズム解候補のP軸のazimuthのバラつきが $\pm 15^\circ$ 以内であるものを精度のよいものとして解析に用い、それより精度の劣るものは解析から除外した。

1995年以降のデータについては、京都大学防災研究所地震予知研究センターの微小地震観測システム：SATARNシステム(大見・他、1999²⁾)により収録された波形データを、地震波形検出プログラムwin(ト部ほか、1992³⁾)をもちいることでP波初動の読み取りをおこなった。M2.5以上のイベント約800個について、メカニズム解を決定した。そのうち515個を精度のよいものとし、「兵庫県南部地震後」のデータとして、その後の解析にもちいた。

今年度新に1992年から1994年の3年間に阿武山系地震観測網で観測されたM2.0以上のイベント約230個について、阿武山観測所における旧型ミニコンシステムによって収録処理された波形データをwinフォーマットに変換したのちに、あらためてP波初動の読み取りをおこない、メカニズム解を決定した。最終的にはP軸のazimuthが 15° 程度に収まるもの81個を解析にもちいた。

1978年から1991年までの14年間については、飯尾により決定されたメカニズム解データが存在する。これは阿武山系観測網のみならず、他の機関の観測網のデータも可能な限り収集して求められたメカニズム解で、丹波山地におけるM2.5以上の地震をほぼ網羅し、Iio(1996)⁴⁾などの基になっているデータセットである。本研究では南部地震前後の変化をほぼ同数の地震数で比較するために、飯尾によるデータのうち、1988年から1991年までの約1100個から精度の良い529個を選び本解析のデータに加えた。これに1992～1994年のデータを合わせた610個を「兵庫県南部地震前」のデータとして用いた。

2) 応力テンソルインバージョンによる応力場の推定

単一の微小地震のメカニズム解のP軸やT軸は必ずしも地域応力場の主応力軸とは一致しない。そこで応力テンソルインバージョン法をもちいて、丹波山地における応力方向の空間分布を定量的に推定した。本研究ではHoriuchi et al. (1995)⁵⁾により開発されたインバージョン法をもちいた。丹波山地における微小地震活動が最も活発な地域を、 0.15° 四方(約17km \times 12km)の対象領域を 0.05° ずつずらしていくことにより、多数の小領域においてインバージョンをおこなった。ただし、各領域内のイベント数が10個以下の場合には解析を行わなかった。また、推定された応力解について、Gephart and Forsyth (1984)⁶⁾に従って95%信頼区間を推定した。

3) 兵庫県南部地震による応力変化との比較

上で求めたメカニズム解および応力テンソルインバージョンによる応力軸の変化が、兵庫県南部地震本震による応力の変化と整合するか調べるために、丹波山地における Δ CFFを計算した。計算にはMICAP-G(内藤・吉川、1999)⁷⁾をもちいた。兵庫県南部地震の断層モデルはHashimoto et al. (1995)⁸⁾によるモデルを用いた。

(c) 業務の成果

1) P波初動の押し引きによるメカニズム解の決定

図1および図2に、各々兵庫県南部地震前と後の解析期間について、P波初動の押し引きによって求められたメカニズム解のP軸の方位分布を示す。

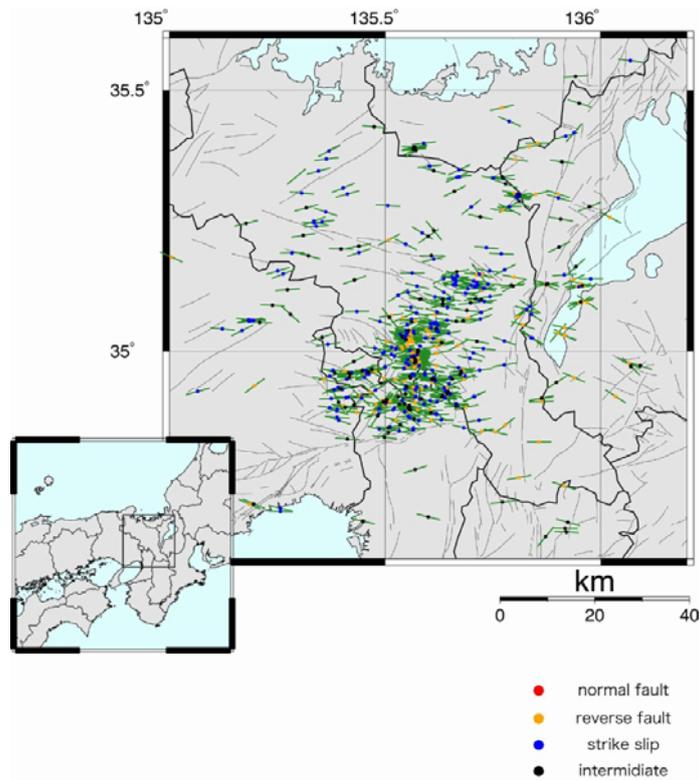


図1 1988年から1994年までの610イベントのP軸方位分布を示す。○は震央を、色は断層のタイプをあらわす。棒はP軸の azimuth である。

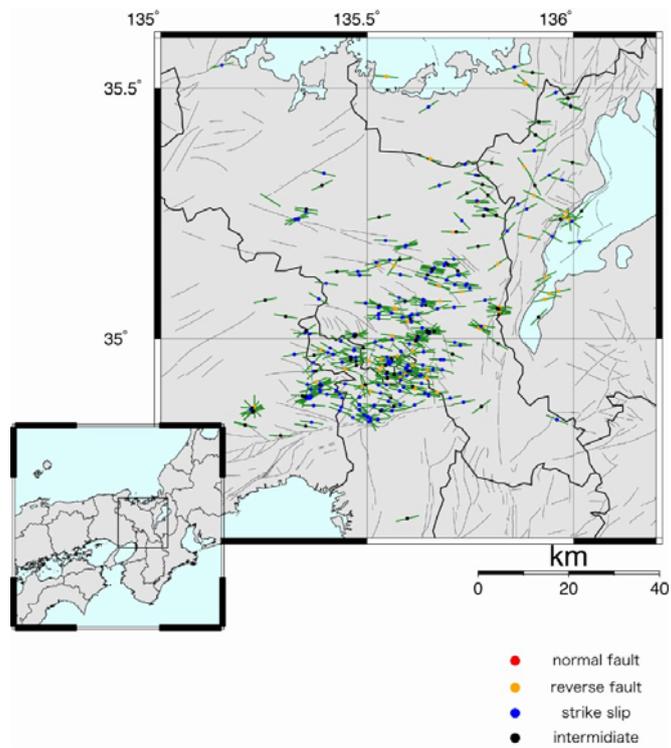


図2 1995年から1998年までの515イベントのP軸方位分布を示す。○は震央を、色は断層のタイプをあらわす。棒はP軸の azimuth である。

P 軸、および T 軸方位の比較をしてみると、1988-1994 年(兵庫県南部地震前)には、P 軸の卓越方位は東西もしくはやや東南東-西北西で、plunge もほぼ水平である (図 3)。

1995-1998 年(兵庫県南部地震後)、P 軸方位は東西もしくは東南東-西北西に卓越方向をもっているものの、兵庫県南部地震前に比べ、そのバラつきは大きくなり、plunge の角度も 10° より大きいものが同地震前に比べ増えている。同様に T 軸の azimuth も卓越方向は南北であるが、T 軸の plunge をみると、同地震前にはすべての角度にかたよりなく分布していたものが 40° より小さい角度の割合が相対的に増えている。実際に横ずれ断層解が 46%から 53%に増え、逆断層解が 30%から 20%に減ったことと調和的である。

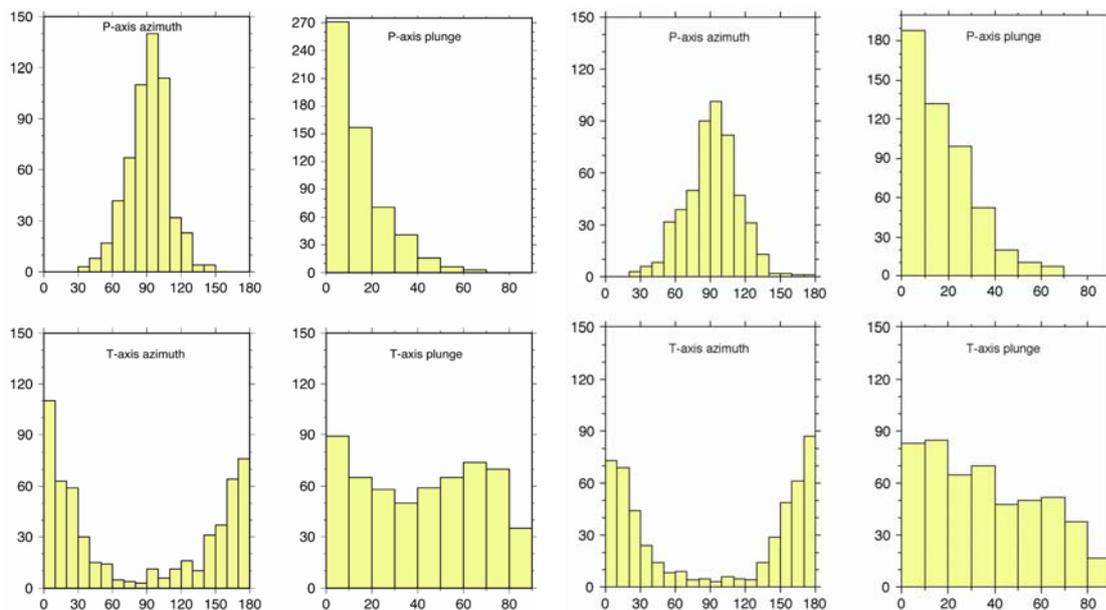


図 3 (左)1988年から1994年までの微小地震のP軸 azimuth、plungeおよびT軸 azimuth、plunge の分布。azimuth は北から時計回りの角度、plunge は水平面から下向きの角度をあらわす。(右) 同じく 1995年から1998年までの微小地震のP軸 azimuth、plungeおよびT軸 azimuth、plunge の分布。

1988-1994 年(兵庫県南部地震前)の全 610 イベントを断層タイプで分類すると、正断層型 3 イベント、逆断層型 186 イベント、横ずれ断層型 281 イベント、中間型 140 イベントである。断層タイプは横ずれ型が半数近くを占める。ついで、逆断層型が 3 割、中間型が 2 割である。逆断層、横ずれ断層、中間型が混在しているのが特徴である。

1995-1998 年(兵庫県南部地震後)については、全 515 イベントの内訳は正断層型 7 イベント、逆断層型 107 イベント、横ずれ断層型 276 イベント、中間型 125 イベントである。兵庫県南部地震前と比べ、逆断層型の地震が大きく減り、代わりに横ずれ断層の卓越性が増している。

2) 応力テンソルインバージョンの結果

丹波山地を小領域に分割して、兵庫県南部地震前後の期間各々で応力テンソルインバ

ージョンを行った結果が図4および図5である。領域設定の方法を各々の図の左上に示している。ただし、各領域内のイベント数が10個以下の場合には解析を行わなかった。一見して、兵庫県南部地震後の応力軸は同地震前に比べ、信頼区間が大きくなっていることが分かる。応力テンソルインバージョン法は、解析にもちいるイベント数が少ないほど、95%信頼区間が大きくなる可能性がある。しかしながら、イベント数が両期間ともに100を超えるような領域でも、兵庫県南部地震後の信頼範囲が明らかに広いことなどから、推定された信頼範囲の広さは必ずしもイベント数よるものではないことが分かる。従って、兵庫県南部地震後には同地震前に比べ、丹波山地の応力軸により局所的な擾乱が増加したと考えられる。

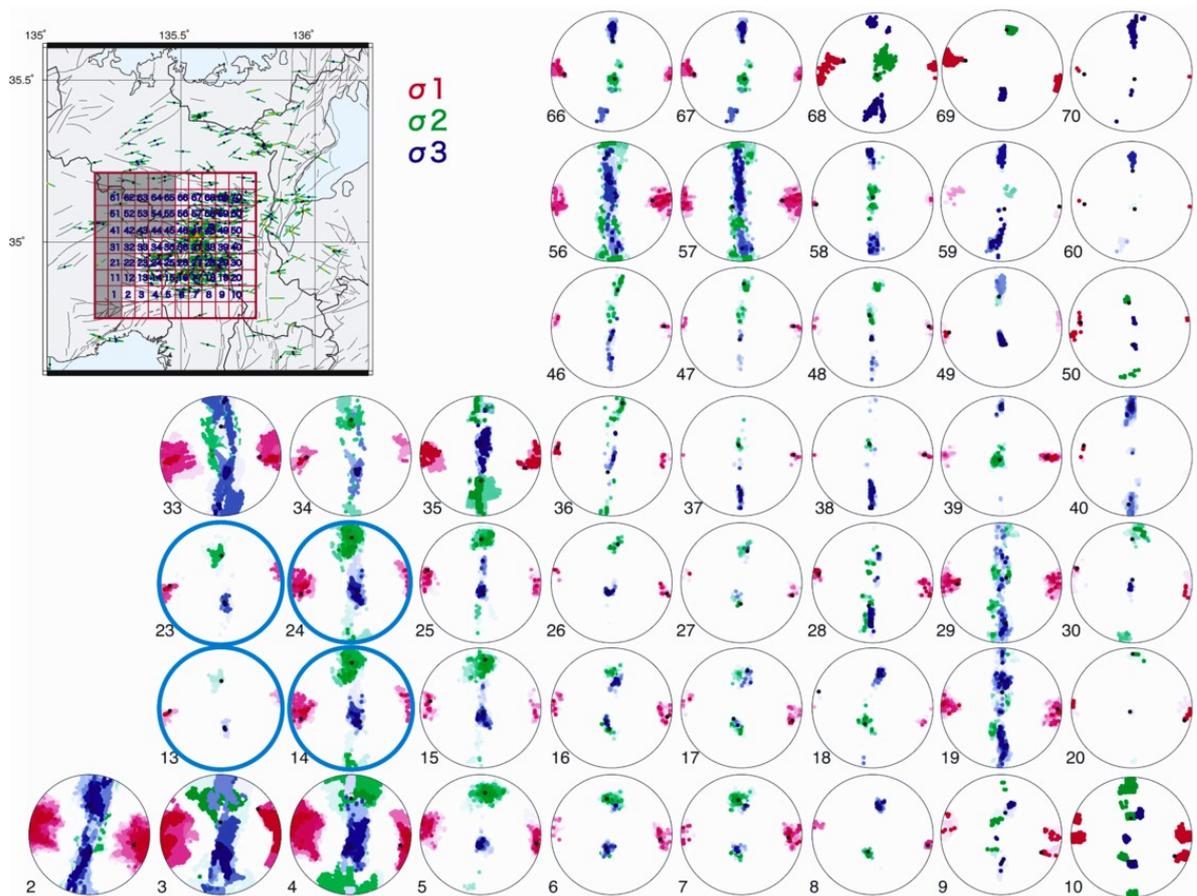


図4 丹波山地南西部における応力テンソルインバージョンにより推定された応力軸。赤いドットは σ_1 、緑は σ_2 、青は σ_3 をあらわし、Gephart and Forsyth (1984) 6)により推定される95%信頼区間を色の濃淡でプロットし、黒い点は最適解をあらわしている。解析期間は1988-1994年である。

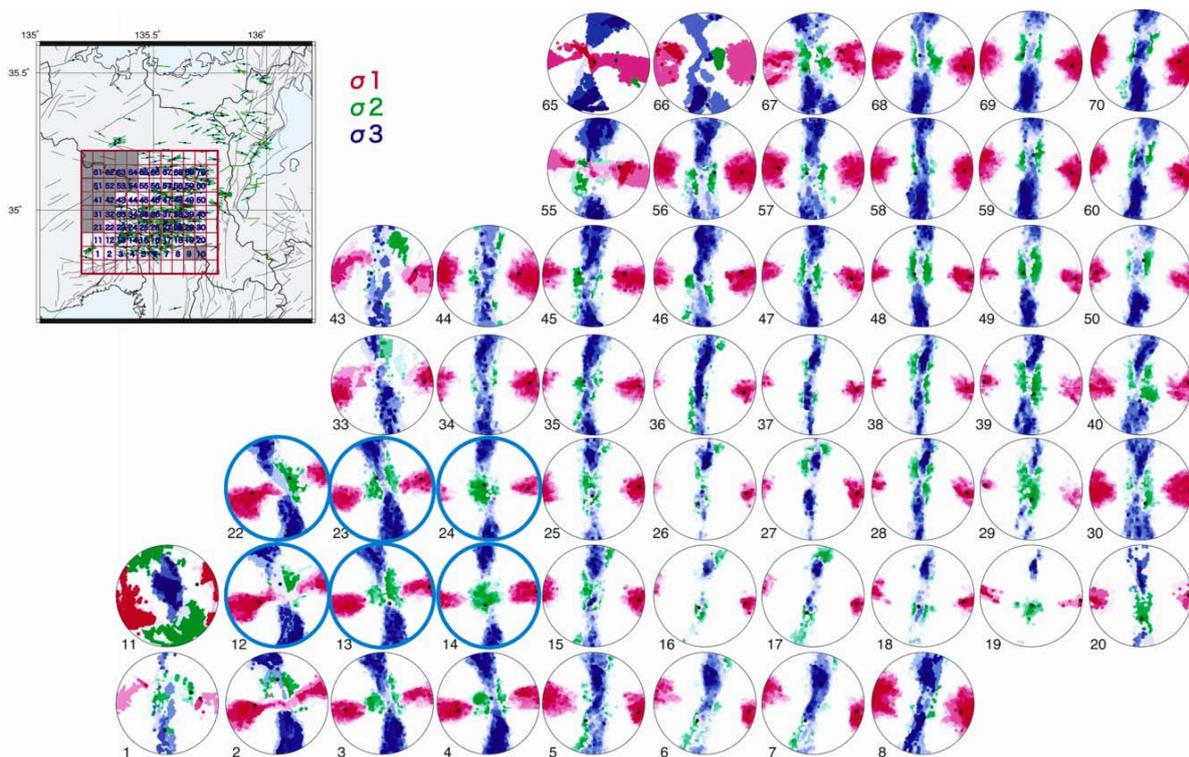


図5 図4と同じく丹波山地南西部における応力テンソルインバージョンにより推定された応力軸。解析期間は1995-1998年である。

解析領域を細かく分け、それぞれ地域応力軸の特徴を見た。

- a) 丹波山地南西部(図6)：兵庫県南部地震後に、 σ_1 軸が東西からやや北東-南西向きに変化し、 σ_3 軸の plunge が変化していることが大きな違いである。兵庫県南部地震直前の1994年後半には猪名川町付近の群発地震など、地震活動の変化が見られ、同地震直後にも震源の浅い活発な活動が観測されている。また兵庫県南部地震余震域に最も近く、全解析領域で最も応力軸に変化があった地域である。この結果は、P波初動の押し引きで決めたメカニズム解から推定される応力軸の変化とも調和的である。
- b) 丹波山地南部：有馬高槻構造線付近におこる微小地震は丹波山地の一般的なP軸の方位と異なり、南西-北東向きであることが知られている。兵庫県南部地震後にこのような傾向は顕著になっている。
- c) 丹波山地のその他の地域：両期間ともにほぼ東西圧縮で、兵庫県南部地震による大きな方向の変化は見られない。

3) 兵庫県南部地震による応力変化との比較

ΔCFF を計算は、大きく分けて、① 丹波山地の平均的な特徴として、東西圧縮が主であるため、走向が $N45^\circ E$ の右横ずれ断層、および走向が $N135^\circ E$ の左横ずれ断層、② 丹波山地南西部(猪名川町付近)において、軸が東西から東北東-西南西に変化したことから、 $N25^\circ E$ 右横ずれ断層、および $N115^\circ E$ の左横ずれ断層、の2つの場合について行っ

た。

走向 $N45^\circ E$ 、もしくは $N135^\circ E$ の横ずれ断層は深さ 0-10km で特に増加していることから深さ 8km および 15km の ΔCFF を、丹波山地南西部での兵庫県南部地震後の主要な活動は深さ約 3km だったので、 $N25^\circ E$ および $N115^\circ E$ の横ずれ断層は深さ 3km での ΔCFF を計算した。

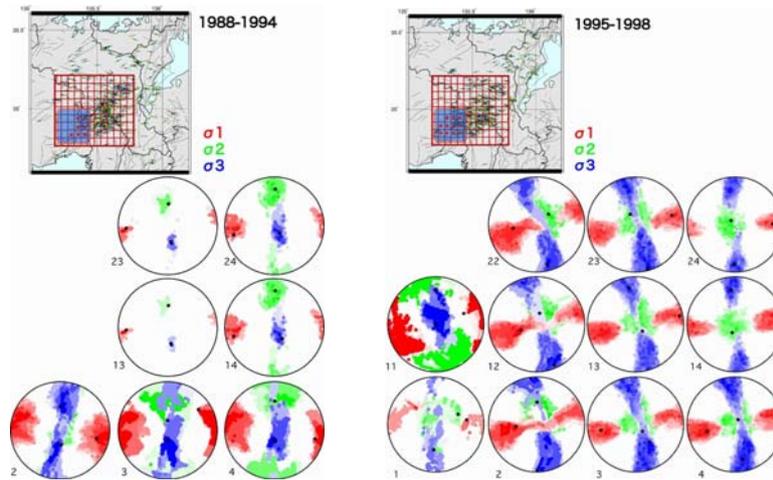


図6 (左) 丹波山地南西部における応力テンソルインバージョンにより推定された応力軸。赤いドットは σ_1 、緑は σ_2 、青は σ_3 。95%信頼区間を色の濃淡で表している。黒い点は最適解。解析期間は1988-1994年である。(右)同じく丹波山地南西部における応力軸。解析範囲は地図の青く囲んだ領域で、解析期間は1995-1998年である。

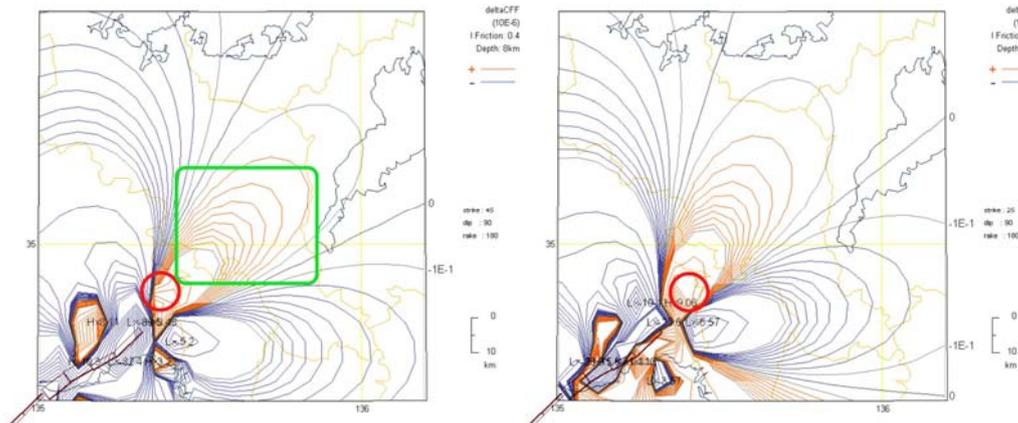


図7 (左) strike= 45° 、Dip= 90° 、rake= 180° の深さ 8km の断層に対する ΔCFF 。赤が ΔCFF の増加域、青が ΔCFF の減少域をあらわす。地図内の緑の矩形枠は東西圧縮が卓越する領域。赤の円形枠は北東-南西圧縮が卓越する領域。(右) strike= 25° 、Dip= 90° 、rake= 180° の深さ 3km の断層に対する ΔCFF 。地図内の赤の円形の枠は北東-南西圧縮が卓越する領域。

図7(左)は、深さ8kmのstrike=45°の場合の右横ずれ断層に対する Δ CFFである。兵庫県南部地震後に地震活動が活発化した全域が増加域にあたり、兵庫県南部地震による応力の変化が丹波山地の地震活動を増加させたといえる。丹波山地はほぼ全域が増加域にはいるが、猪名川町付近の群発地震発生域はちょうど減少域と増加域の境にあたり、この地域で兵庫県南部地震後に東西圧縮のメカニズム解がほとんどみられないことと一致する。

図7(右)では深さ3kmにおけるstrike=25°の場合の横ずれ断層に対する Δ CFFである。猪名川町付近は増加域に入った。この地域では兵庫県南部地震前の1994年7月、11月に群発地震活動が起こり、同地震後にはさらに活発な活動を呈した。しかも、同地震の発生を境として、P軸方位が東西から北東-南西に変化したことが大きな特徴である。 Δ CFFの結果はこのような地震活動と非常によい相関を持つといえる。

南西部における応力場の変化については、兵庫県南部地震前後で主たる地震活動域の深さが変化するなど今後検討を要する課題が残されている。また、これらの外部要因(兵庫県南部地震)によるメカニズム/応力場の変化は、個々の微小地震の断層強度の推定や地域応力の絶対値の推定などについて、重要な情報をもたらすと考えられ、今後も精力的に解析を進めていく必要がある。

(d) 結論ならびに今後の課題

丹波山地の定常活動を中心に近畿地方北部における微小地震の発震機構データをまとめて解析した。今年度はデータの欠落している期間についても、新に発震機構を求め、兵庫県南部地震前後の十数年間にわたる連続的なデータセットを作成し、それに基づく解析を行った。応力テンソルインバージョン解析も導入して、定量的かつ詳細に応力場の変化をみた。その結果、兵庫県南部地震後で主応力軸に大きな変化は無いものの、丹波山地南西部では有意な応力場の変化があったことが示唆され、これが兵庫県南部地震による理論的な応力変化に定性的に合致することを示した。

今後の研究の進め方としては、

- 1) 今年度の解析の空間範囲としては、花折断層・琵琶湖西岸断層地域が含まれていない。次年度において可能な限り同地域のデータも増やし、解析に加える。
- 2) 花折断層・琵琶湖西岸断層地域、有馬高槻構造線といった、地震活動が比較的活発な主要活断層について、断層の幾何学的配置と発震機構を詳細に比較解析し、将来の内陸大地震の被害予測に有用な情報、破壊開始点やアスペリティの位置などの推定を試みる。
- 3) 十分な押し引きデータが得られない極微小地震についても発震機構が求められるよう、振幅情報を利用した実用的かつ簡便な発震機構決定法を開発すると同時に、準リアルタイムでの発震機構(=応力場)モニタを試みる。

(e) 引用文献

- 1) Maeda, N.: A method of determining focal mechanisms and quantifying the uncertainty of the determined focal mechanisms for microearthquakes, Bull. Seism.

Soc. Am., Vol.82, pp.2410-2429, 1992.

- 2) 大見士朗, 渡辺邦彦, 平野憲雄, 中川渥, 竹内文朗, 片尾浩, 竹内晴子, 浅田照行, 小泉誠, 伊藤潔, 和田博夫, 澁谷拓郎, 中尾節郎, 松村一男, 許斐直, 近藤和男, 渡辺晃: 微小地震観測網 SATARN システムの現状と概要, 京都大学防災研究所年報, Vol.42, B-1, pp.45-60, 1999.
- 3) ト部卓, 東田信也: win-微小地震観測網波形験測支援のためのワークステーション・プログラム(強化版), 地震学会講演予稿集, No1, C22-P18, 1992.
- 4) Iio, Y.: Depth-dependent change in the focal mechanism of shallow earthquakes: Implications for brittle-plastic transition in a seismogenic region, J. Geophys. Res., Vol.101, No.B5, pp.11209-11216, 1996.
- 5) Horiuchi, S., Rocco, G. and Hasegawa, A.: Discrimination of fault planes from auxiliary planes based on simultaneous determination of stress tensor and a large number of a fault plane solutions, J.Geophys.Res.,Vol.100, No.5, pp.8327-8338, 1995.
- 6) Gephart, W.J. and Forsyth, D. W.: An improved method for determining the regional stress tensor using earthquake focal mechanism data: Application to the San Fernando Earthquake Sequence, J.Geophys.Res., Vol.89, No.B11, pp.9305-9320, 1984.
- 7) 内藤宏人, 吉川澄夫: 地殻変動解析支援プログラム MICAP-G の開発, 地震, Vol.2, No52, pp.101-103, 1999.
- 8) Hashimoto, M., Sagiya, T., Tsuji, H., Hatanaka, Y., and Tada, T.: Co-seismic displacements of the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake, J.Phys.Earth., Vol.44, pp.255-279, 1995.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
片尾浩, 飯尾能久	丹波山地における微小地震のメカニズム解決定と応力場の推定	日本地震学会秋季大会	平成 17 年 10 月
Ogasawara, T., Katao, H., and Iio, Y.	Determination of Focal Mechanisms of Microearthquakes and Estimation of the Stress Field in the Tanba Region, Central Japan	AGU, Fall Meeting	平成 17 年 12 月

(g) 特許出願, ソフトウェア開発, 仕様・標準等の策定

- 1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成 18 年度業務計画案

本研究では、活断層における地震活動の解析から、強震動の予測のための震源モデルにおける断層パラメータの推定に寄与することを目的とする。JHD 法を用いた震源再決定の結果得られる精度のよい震源データに基づき、断層近傍での地震や b 値の不均質分布を調べ、将来の大地震時のアスペリティや破壊開始点を推定する。平成 18 年度は、有馬高槻構造線周辺地域について調査を行うとともに、これまでの成果をとりまとめて、近畿圏中央部のいくつかの活断層の深部構造モデルを作成する。

花折断層帯、琵琶湖西岸断層帯についても発震機構解のデータを追加して解析を行う。有馬高槻構造線も含めて、地震活動が比較的活発な主要活断層について、断層の幾何学的配置と発震機構を詳細に比較解析し、将来の内陸大地震の被害予測に有用な情報、破壊開始点やアスペリティの位置などの推定を試みる。十分な押し引きデータが得られない極微小地震についても発震機構が求められるよう、振幅情報を利用した実用的かつ簡便な発震機構決定法を開発すると同時に、準リアルタイムでの発震機構 (= 応力場) モニタを試みる。