

四半世紀にわたる近畿地方北部の応力空間分布とその時間変化

片尾 浩

要 旨

P波の押し引きデータから直接応力場を推定する方法を応用することで、個々の地震の発震機構を確定する過程を経ずに応力分布を推定する可能性を検討してきた。本手法を過去の京都大学阿武山観測所系微小地震観測網の手動検測データに適用し、1976年～2001年の四半世紀にわたる期間での、丹波山地の微小地震活動域における応力場の空間分布とその時間的変化を概観することを目指した。丹波山地の中央部は、一貫してほぼ東西方向の圧縮場にあること、逆断層的な応力場と横ずれ断層的な応力場が混在し、そのどちらが卓越するかは時間的にあるいは地域によって変化していることが示された。

キーワード： 応力場，微小地震，発震機構，丹波山地

1. はじめに

将来の大地震発生予測の研究には、基礎的なデータとして地下の応力状態を知ることが最も重要となるが、現在のところ地下十数kmの地震発生深度において直接応力を計測する手段は存在しない。自然地震の発震機構（メカニズム）を調べることは、間接的に地域の応力場を知る手がかりとなる。

精度のよい発震機構解決定のためには、ある地震について20点程度の観測点で明確に初動極性の読み

取りが行われることが必要であり、観測点分布密度によって発震機構が決定可能なマグニチュード（M）の下限がほぼ決まることになる。現在の気象庁、大学等による国の高感度基盤観測網を用いると、内陸地殻内のM2.0以上の地震について精度よく発震機構を求めることが可能である。しかし、過去の観測点分布が粗い時期については条件が悪くなり、M3.0程度の規模以上でなければ発震機構を決定することは困難であった。必然的に得られる発震機構解の数も少なく、空間的・時間的に分解能の高い応力推定は

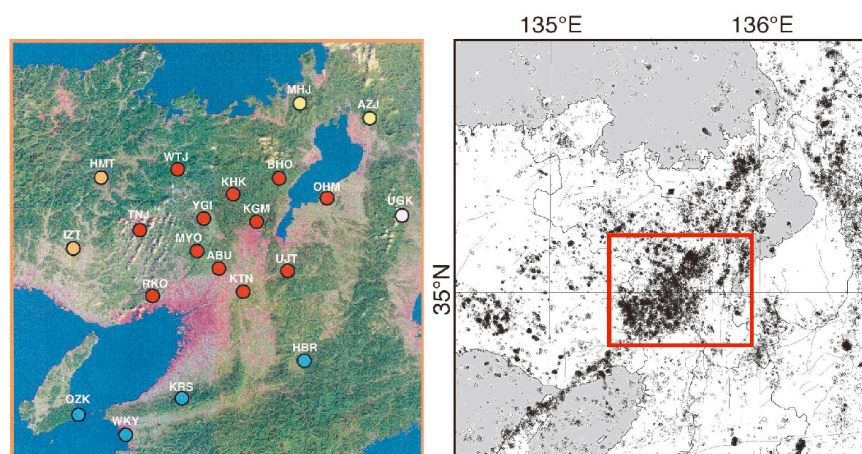


Fig.1 (Left) Station distribution around the Northern Kinki district. Red ones are stations of the Abuyama seismic network. (Right) Epicenter distribution around the Northern Kinki district. Red rectangle shows analysis area of this study.

行うことが不可能である。

各々の地震のメカニズム解のP軸やT軸は、地域応力場の主応力軸と一致するとは限らない。その地域の応力場を推定するには、多数の地震について発震機構を求め、次いでそれらを基に応力テンソルインバージョン法を用いる。

片尾 (2010) は、P波の押し引きから直接応力場を得るHoriuchi et al.(1995)の方法を用いて、個々の発震機構を確定する過程を経ずに、少ない押し引きデータから応力場の推定する方法を検討し、このような方法が最も有効であると思われる例として、過去の京都大学阿武山観測所系のルーチン再観測データへの応用を試みた。今回本論文では、さらに応用を進め、阿武山系観測網の四半世紀 (1976年～2001年) にわたる手動観測データを対象とした解析結果を報告する。

2. データ・方法

1995年以前の阿武山系観測網では、観測された近地の地震すべてについて、手動観測により精密な読取り作業が行われており、その高い震源決定精度には定評があった。丹波山地を中心とした近畿地方北部のM1.0以上の微小地震はほぼもれなく検知されている。しかし、これらの手動読み取りは阿武山系直属の12点の観測点のみを対象としているため、初動の押し引きデータも一つの地震につき最大で12点に限られ、単独でメカニズム解を精度よく求めることは困難である。Fig. 1左図の観測点分布図で赤丸で示されているのが阿武山系直属の12点である。当時、隣接する観測網の波形データは、隣接データ交換網によるごく一部の点を除けば、収録・処理されていなかった。メカニズムを求めるためには阿武山系のみ12点という観測点数は少なく、オフラインで他の観測網のデータを収集・追加するなどの作業が必要であった (例えばIio, 1996など)。精度の良い読み取りがなされていながら観測点数には不足があるというデータ上の制約条件は、本研究の方法を実際に適用する対象としてふさわしい状況であると考えられる。

1995年以降は、阿武山系の観測システムが更新され (大見ほか, 1999)、鳥取系、北陸系など所内の他の観測網や他大学の観測点 (Fig. 1左図で赤以外に塗られた点) からのデータが多く利用できるようになった。さらに1997年には気象庁の津波地震観測網のデータがリアルタイムで利用可能になった。京大防災研におけるルーチン業務としても、阿武山系直属の12点に加えこれら隣接観測網の点についても可能な限り読み取りを行った。したがって、1995年以降

はそれ以前と利用できる観測点数大幅に増加したことになり、メカニズム・応力決定精度もその前後で大きな変化があったと考えられる。これらの観測点データを用いることで、この時期はM2.5以上程度の地震であれば、阿武山系システムのデータセットだけでも十分メカニズムを決定することが可能であった (片尾・飯尾, 2004; 小笠原ほか, 2006など)。

1997年10月に気象庁により大学観測網も含む一元化処理が開始され、日々の観測データも公開されるようになったことを受けて、2002年以降京大阿武山系独自の手動再観測はルーチン業務としては行わないことになった。したがって本研究では、2001年以前の阿武山系独自の手動観測が行われていた時期を対象としている。

なお、京大防災研の観測システムにおいて、防災科学技術研究所の高感度地震観測網Hi-netのデータが利用可能になったのは2002年であるため、本研究では用いられていない。

大阪府北部および京都府中部にかけての丹波山地は定常的に微小地震活動が活発な地域である。1995年兵庫県南部地震の発生前の約2年間に、丹波山地の微小地震活動が顕著に低下したことはよく知られている (片尾, 2002)。本研究では、Fig. 1右図に示す赤い矩形の範囲で、北摂・丹波山地における応力場の空間・時間的变化を見つめる。大阪府北部から京都府中部にかけてのこの領域は、阿武山系観測網のカバーする地域の中心部に位置し、震源決定精度が良く、また周囲の観測点の方位分布もまんべんなくとれるため、メカニズムの決定にも有利である。この矩形範囲で1997年～1994年の間、約1700個の微小地震が阿武山系観測網の旧システムにより決定されている。近畿地方北部では琵琶湖西岸地域も地震活動が活発であるが、丹波山地中央部に比べ地震が少ないことと、観測点配置がよくないことから、今回の解析範囲からは除外した。

水平方向10km x 10kmの正方形の小領域40個を5km間隔で重複して配置し、時間的にも2年間に分割して、各々の小領域について応力インバージョンを行った。この辺りでの地震発生層は5～15kmの深さ範囲であるので、個々の小領域は1辺10kmの立方体に準ずると考えてよいだろう。1976年のテレメータ観測開始以降、旧システムで観測されていた1994年までの間、各々の時空間領域に対応する地震の再観測読み取りデータを集めHoriuchi et al.(1995)によるインバージョンプログラムの入力とした。

1995年1月17日の兵庫県南部地震の直後から丹波山地の微小地震活動は活発化し (片尾, 2002)、それ以前の数倍のレートで地震が発生するようになった。兵庫県南部地震を契機に京大防災研の観測システム



Fig.2 The stress field around the Tamba region for 2 years long periods during 1976-1994.

も、WINシステム（卜部・東田，1992）を基本とする新しい観測システムSATARNに切り替えられた（大見ほか，1999）1995年～2001年にはSATARN阿武山系システムにより約20000個の微小地震が観測されている。SATARNにおいて個々の地震ごとに観測結果が収められている「pickファイル」を読み込み，応力インバージョンを行った。空間的な小領域の取り方は1994年以前と共通しているが，地震活動活発化により地震数が以前の数倍となっているため，M2.0以上のものに限定して計算を行った。この時期はデータに収録されている観測点数が多く，メカニズムがよく決まる可能性のある地震も多く含まれているが，比較のため1994年以前と同じ手法で処理を行った。

3. 結果

Fig. 2に，1976年～1994年の阿武山系旧システムによる観測結果をもとに2年間ごとに解析した結果を示す。地図の範囲は全て，Fig. 1右図に示す赤い矩形の範囲と同じである。各小領域における応力インバージョン結果のうち最適解のみを下半球投影のメカニズム解に模して表示している。横ずれ断層的な応力場を赤で，逆断層的な場を緑で，正断層的な場を青で，中間的なものを灰色で，各々の「押し」の領域を塗ることで表現している。各断層型の分類基準は，Yamanaka et al. (2002)に倣っている。小領域内の地震数が20個に満たないものは，精度の信頼性が低いものとして色を薄くして表示している。

過去の研究においては，この地域の σ_1 は一貫してほぼ東西圧縮であり，南北もしくは垂直方向の σ_2 ， σ_3 は拮抗しており，個々の地震のメカニズムとしては逆断層と横ずれ断層が混在している状態を呈するとされている。Fig. 2でも全体がほぼ東西方向の圧縮場にあることは共通している。しかし，ある小領域が逆断層場か横ずれ断層場であるかは，時間的に変化しているように見える。本来 σ_2 ， σ_3 には大きな差がなく，逆断層場であるか横ずれ断層場であるかは，種々の要因で容易に入れ替わるのかもしれない。ただし，各小領域におけるインバージョン結果では応力比 $R=(\sigma_1-\sigma_3)/(\sigma_2-\sigma_3)$ は，バラつきがあるものの平均的には0.5前後の値を示し，個々の時空間領域においては σ_2 と σ_3 がほぼ等しく分離できないという訳でもないようである。

本研究の解析対象領域の中でも周辺部では，地震数が不足している場合もあり，観測点配置の面からも応力決定精度は中心部よりも劣ると考えられる。正断層的な応力場を示す領域が，解析範囲の縁辺部で少なからず示されているが，実際には丹波山地において正断層的なメカニズムを持つ地震は極めて稀であり，実際に正断層場が存在するとは考えにくい。縁辺部からみると観測点配置が偏ってしまうことと地震数が少ないために生じた偽の結果であると考えられる。

全体的な傾向として，1970年代後半は比較的横ずれ断層的な領域が卓越していたものが，1980年代前半にかけて逆断層型を示す領域が散在するようになり中間型を示す領域も増加していく。1987年以降は

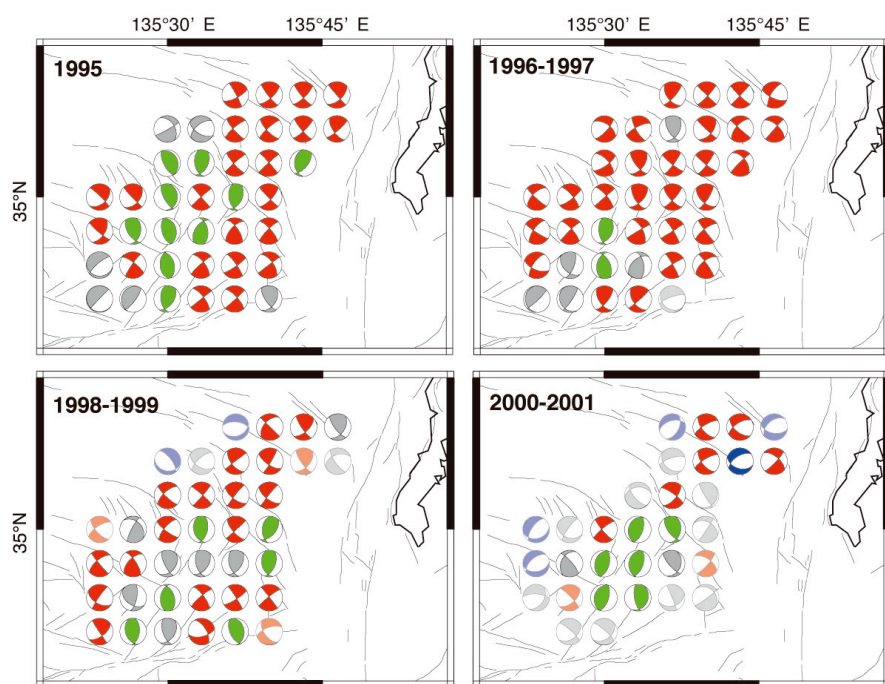


Fig.3 The stress field around the Tamba region during 1995-2001.

逆断層型が支配的な時期が数年続いている。その後、横ずれ的な応力場の回復が見られるが、1992年ごろからは再び逆断層的なものが増える傾向にあったように見える。

この間、丹波山地の地震活動は極めて定常的であり、地震発生レートに長期的な変化は見られない。周辺地域で特筆すべき大地震や顕著な地殻活動は無く、むしろ丹波山地ではこのような微妙な応力場の時間的な変化が半ば周期的に生じているのかもしれないという想像もできる。

Fig. 3は、1995年以降SATARNシステムにより収録・再観測されたデータを基に、同様の解析を行った結果である。小領域の配置などは1994年以前と共通しているが、地震活動の活発化に伴いM2.0以上の地震に限り解析を行った。地震数の増加により1995年は1年間のみとし、それ以降は2年間ごとに区切りインバージョンを行った。1995年～1997年にかけて、解析領域全域で横ずれ断層的な応力場が支配的であることがわかる。その後次第に逆断層や中間的な場が増えていく。最後の2000年～2001年には卓越する断層型は見られなくなっているが、これはマグニチュードに下限を設けたため対象とする地震数が少なくなった影響もあるようで検討の必要がある。

4. 考察

このような応力場の時間変化と、領域内外の地震活動との間の何らかの相関があるであろうか？1987年5月には、この地域ではこの30年間で最大規模となるM5.0の地震が京都府亀岡市（図のほぼ中央）で発生している。この地震は南北走向の逆断層であったが、1987-1989年頃は領域中央部のほとんどが逆断層場を示している。M5クラスの震源域はせいぜい3km程度であることを考えると、地震の規模以上に広い範囲で全体的に逆断層的な応力場にあった可能性が示唆される。

その後、横ずれ的な応力場の回復が見られるが、1995年の兵庫県南部地震に先行して、1992年後半からこの地域の地震活動は静穏化していた時期には、再び逆断層的なものが増える傾向にあったように見える。

兵庫県南部地震発生後は、横ずれ断層型が支配的な応力場に戻っているように見える（Fig. 3）。とくに、1996年～1997年には解析領域全体が横ずれ断層的な場にあることは顕著な特徴である。この時期は地震活動もそれ以前の数倍に活発化しており、兵庫県南部地震の断層運動が、隣接する丹波山地に影響を与えた可能性が高い。その後、徐々に横ずれ断層の卓越性が薄れていく傾向にある。

藤野・片尾(2009)は、琵琶湖西岸地域において約500個押し引きによるメカニズムを求め、これに小笠原ほか（2006）による丹波山地のメカニズム解データおよそ800個を加え、さらに応力テンソルインバージョンによって琵琶湖から丹波山地にかけての近畿地方北部の応力の空間変化を求めた。その結果、琵琶湖西岸地域は東西圧縮の逆断層的な場にあり、それより西方の丹波山地では横ずれ断層的な応力場にあることを示し、その境界は花折断層の西方約10kmであるとした。しかしながら、小笠原ら（2006）による丹波山地のデータは1998年以前のものが主であり、藤野・片尾(2009)による琵琶湖西岸地域の結果は主に2000年以降のデータを基にしており時期が異なる。数年スケールで地域の応力場が変化しているのであれば、東西で応力場が違うという結果は見かけ上のものに過ぎない可能性もあり、今後検討が必要であろう。

今後さらに空間的／時間的な区分を変えて解析を進めるとともに、応力場変化の原因として領域内外の地震活動との相関を考察していく予定である。同時に、本手法の信頼性・誤差および適用限界についても今後検討を重ねる必要がある。将来微小地震観測網の自動処理に組み込んで地域応力場の時々刻々のモニタリングを行うことも考えられる。

謝 辞

本研究では、堀内茂木博士による応力テンソルインバージョンプログラムを使用させていただきました。作図には、によるGMT(Wessel and Smith, 1998)を使用しました。

参考文献

- ト部卓・東田進也（1992）：win-微小地震観測網波形観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，No.1,C22-P18.
- 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（1999）：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，42, B-1, 45-60.
- 小笠原知彦・片尾浩・飯尾能久（2006）：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，京都大学防災研究所年報，49, B, 331-338.
- 片尾浩（2002）：丹波山地の地震活動，月刊地球，号外38, 42-49.
- 片尾浩，飯尾能久（2004）：丹波山地の微小地震の

- 発震機構, 京都大学防災研究所年報, 47, B, 673-677.
- 片尾浩 (2010) : 初動押し引きから直接精細な応力分布を求める試み, 京都大学防災研究所年報, 53, B, 213-217.
- 藤野宏興・片尾浩 (2009) : 琵琶湖西岸地域における微小地震のメカニズムと応力場, 京都大学防災研究所年報, 52, B, 275-284.
- Horiuchi, S., G. Rocco and A. Hasegawa (1995): 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., 100(5), 8327-8338.
- 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, 11, 209-11, 216.
- Yamanaka, H., Y. Hirasasu and H. Katao, Spatial distribution of atypical aftershocks of the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake, Earth Planets Space, 54, 933-945, 2002.
- Wessel, P. and W. H. Smith (1998): New, improved version of Generic Mapping Tools released, EOS Trans. Am. Geophys. Union, 79, 579.

Spatial and Temporal Variation of Crustal Stress Field over a Quarter of a Century in the Northern Kinki District

Hiroshi KATAO

Synopsis

To derive detailed crustal stress field, we tried to calculate regional stress field directly from the first motion polarity data using the algorism by Horiuchi et al, (1995). Especially, the direct calculation method in this study is suitable for the old data of Abuyama Observatory to investigate the stress field in the northern Kinki district. Manually checked P-wave polarity data for numerous micro-earthquakes during 1997-2001 are available for this study. The stress field around the Tamba region have been E-W compressional throughout the analyzed period. However, strike-slip mode and reverse-fault mode are coexisting and varying with time and location.

Keywords: stress field, focal mechanism, micro-earthquake, Tamba region