

初動押し引きから直接精細な応力分布を求める試み

片尾 浩

要 旨

地殻深部における応力場を知るには、多くの地震について初動の押し引きから発震機構を求め、それを基に応力テンソルインバージョンを行うのが通例であるが、精度よく発震機構を求めるのはある程度以上のマグニチュードを持った地震に限られる。このことは空間的および時間的に対象領域を細分化し応力の変化を見ようとする際、大きな制約となっている。今回は、Horiuchi et al. (1995) によるP波の押し引きから直接応力場を得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場を推定する可能性を検討した。本手法を過去の京都大学阿武山観測所系のルーチン観測データに適用し、1995年の兵庫県南部地震発生前の時期に丹波山地の微小地震活動域における地域応力場の時間的変化の検出を試みた。

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

地震活動の解析や将来の発生予測等の研究には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地殻応力を計測する手段は存在しない。自然地震はその地域の応力場を反映して発生すると考えられ、その発震機構（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が、個々の地震のメカニズム解のP軸およびT軸は必ずしも地域応力場の主応力軸と一致するとは限らない。地下の地震発生域における応力場を知るには、まず多くの地震について初動の押し引きから発震機構を求め、次いでそれらを基に応力テンソルインバージョンを行うのが通例の手順である。

しかし精度のよい発震機構解を得るためには、ひとつの地震について20点前後の観測点で明確な初動極性の読み取りが行われることが必要となり、観測点分布密度によって発震機構決定可能な地震の規模（マグニチュード： M ）の下限が決まってしまう。例えば、現在の気象庁、大学、防災科技研等による基盤観測網のデータを基に内陸地殻内の地震を対象とする場合、発震機構を精密に求められるのはおよそ $M 2.0$ 以上のものに限られる。

解析可能な地震の M に制限があると、空間的および時間的に対象領域を細分化し精細な応力の変化

を見ようとする場合、十分な地震数を得られないケースが出てくる。単独で精度よく発震機構解を求められる地震のみをデータとして採用することは、応力場推定の上で大きな制約となっているとも言える。もし発震機構解を得られないような小地震の押し引きデータも活用できれば、解析データは大幅に増えることになり、これまで解析不可能であった地震活動の低い地域での適用が機体で切る。また、地震活動の高い地域でも、時間的・空間的に細かく分割した小領域での解析が可能となる可能性がある。

2. 方法・既存データとの比較

本研究では、Horiuchi et al.(1995)によるP波の押し引きから直接応力場を得るインバージョン法を『額面通り』に使用することを考えた。Horiuchi et al.(1995)のアルゴリズムでは、入力データとしては個々のP波初動の極性を与え、地震ごとに発震機構を確定する過程を経ずに直接応力テンソル解を得ることができる。この方法を適用することにより、押し引きデータが少ないため単独では発震機構をうまく決められない地震のデータをも、応力場の推定に活用できるかもしれない。その可能性を探るため以下のような方法をとった。

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

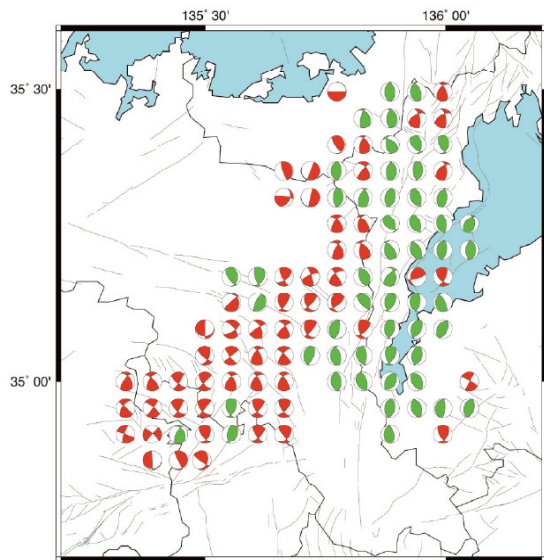


Fig.1 The best solutions of the results of stress tensor inversion shown as mechanism solutions around the Tamba region. Green plots represent reverse fault type stress field. Reds represent other type of stress field.

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を行い、琵琶湖から丹波山地にかけての応力の空間変化を求めた。（Fig. 1）彼らは地震予知研究センターの微小地震観測網：SATARNの波形データを基に、手動験測でP波の初動センスをすべて読み取り発震機構を求めている。この際、発震機構を精度よく求めることができるMの下限は、防災科学技術研究所の高感度地震観測網（Hi-net）がSATARNに接続された2002年以降はM1.5、大学および気象庁のデータを基にしている2001年以前の時期はM2.0であった。

藤野らによる結果をいわば正当的手法による「お手本」とし、単独で発震機構解を求められないような小地震の押し引きデータを利用した場合をシミュレートして結果を比較してみた。ここでは、藤野・片尾(2009)の基になった1つの地震につき20～30観測点分の初動が読取られているデータを加工し、押し引きデータを強制的に間引いて1つ地震についての10点以下に制限したものを用意した。これで個々の地震の発震機構を単独で決めることは困難な状況設定をシミュレートしている。Fig.1と同様に、応力インバージョンを行う小領域として10km x 10kmの領域を5km間隔で重複して配置している。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。

シミュレーションの結果をFig. 2に示す。各領域で

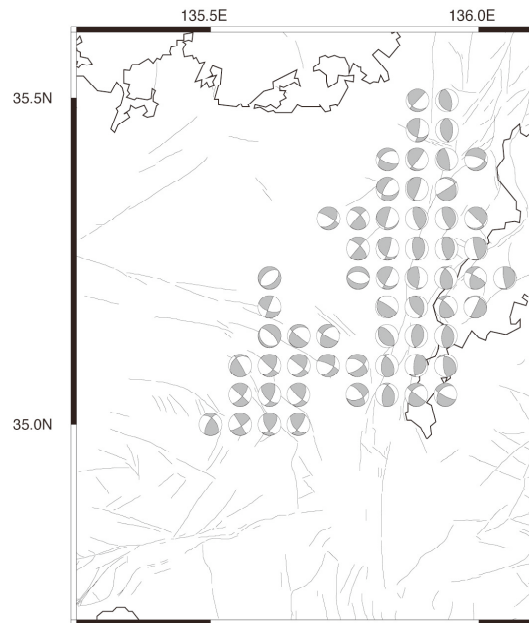


Fig.2 The results of stress tensor inversion based on modified data including small number of P-arrival polarity.

求まった最適の応力テンソルを発震機構の形で表している。これを藤野・片尾(2009)の結果と比較すると、個々の応力軸の方位などには若干の差異が認められるものの、全体的に東西方向の圧縮場であること、琵琶湖西岸における逆断層的な応力場が西方の丹波山地にかけて横ずれ的なものに変化しているなど、藤野らの解析で得られた結果の主要な特徴が再現できていることがわかる。

しかしながらデータの間引きをさらにすすめて、1地震あたり5観測点程度に少なくすると、東西圧縮という特徴も乱れてしまい、意味のある結果を得ることはできなくなることがわかった。

3. 過去の験測データへの応用例

本研究の手法を、1995年以前の京都大学阿武山観測所系のルーチン験測データに応用を試みた。1995年以前の京都大学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、手動験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。丹波山地のM1.0以上の微小地震はほぼもれなく検知されている。P波初動の押し引きも可能な限り読み取られているが、これらの手動読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、押し引きも最大で12点に限られる。

（Fig. 3）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・処理されていないためである。オフラインで他

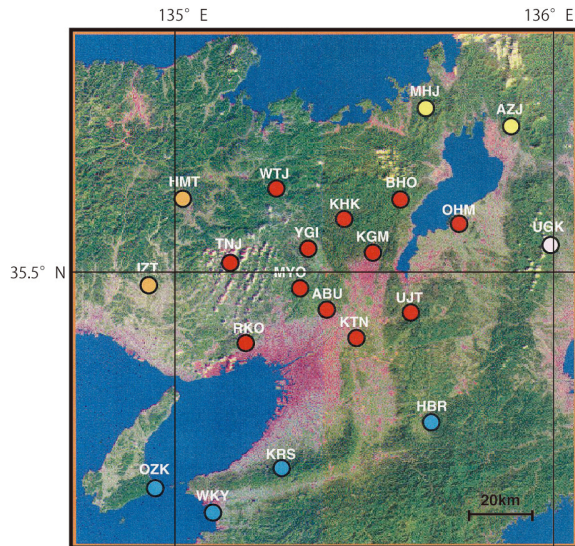


Fig. 3 Station distribution for the microearthquake observation in 1990 around the northern Kinki district.

の観測網のデータを収集・追加するなどの作業（例えばIio,1996など）をすることなく、阿武山系のデータ単独で発震機構を決定するには、12点という観測点数は少ないといえる。このようなデータ上の制約は、本研究の方法を実際に適用する対象として最もふさわしい状況であると思われる、

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）。Fig. 4に丹波山地における積算地震発生数のグラフを示す。赤い直線を重ねている時期が、兵庫県南部地震前の静穏期である。今回は1987年1月～1989年12月の3年間（期間A）、1990年1月～1992年6月の2年6ヶ月（期間B）、1992年6月～1994年6月の2年間（期間C）、ならびに1994年5月～1994年12月の7ヶ月間（期間D）の4つの期間にわけて、本研究の手法を用いて丹波山地の地殻応力場を求めた（Fig. 5）。期間AおよびBは静穏化の始まる前の定常的な活動の時期、期間Cは兵庫県南部地震前の静穏期に、期間Dは静穏化後兵庫県南部地震直前に地震活動が活発化した半年間の時期にあたる。これまでの解析に倣い空間的には1辺10kmの立方体領域を5km間隔で配置し、各々で本研究の手法による応力テンソルインバージョンを行った。

なお、Fig. 5では地震数が20個以下しかなく結果の信頼性が不足している領域についてはプロットしていない（期間Dは例外で、すべての結果を示している）。地震活動自体は図の中心付近、地理的には京都府中部の亀岡市周辺で特に活発である。また、阿武山系の観測点配置からも同地域はちょうどネットの中心

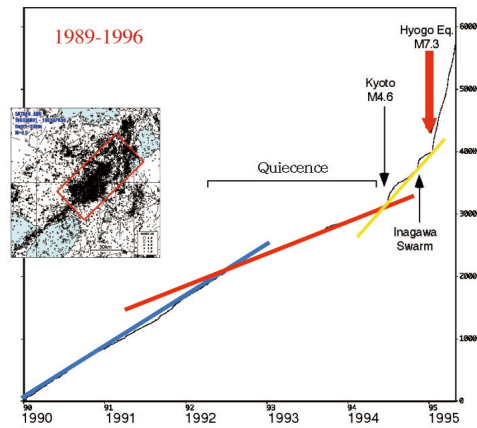


Fig. 4 Cumulative number of earthquake in the Tamba region from 1989 to 1996.

付近に位置するため、震源決定精度、発震機構決定精度ともに優れており、本解析でも応力場決定の信頼性が高い場所と云える。その一方で阿武山系観測網の外縁部にあたる地域では、地震数も少なく、観測点配置上も大きな偏りがあり、解析精度については不利な場所であろう。正断層型の解が周縁部に多く見られるが、これは使用している観測点の配置が偏っているために生じたもので、真のものではないと考えられる。

各期間共通して丹波山地において東西圧縮場が卓越していることを示している。過去に決められた発震機構解もほぼ東西のP軸方位分布を示し、南北走向の逆断層型、もしくは北東-南西および北西-南東走向の横ずれ断層型が混在している。期間Bの図からは、琵琶湖周辺の逆断層型の応力場が、西方の丹波山地にかけて横ずれ型に変化する様子も読み取れ、藤野・片尾（2009）の結果とほぼ同じ特徴がみられる。

4つの時期を比べると、図の中央部（大阪府北部および京都府中部の北摂・丹波地域）で期間Bでは東西圧縮横ずれ型の応力が卓越しているのに対し、期間A、Cでは同じく東西圧縮ながら逆断層型の応力場に変化しており、期間Dでも同じ特徴が見られる。

信頼性が高いと考えられる丹波山地中央部に注目しても、時期により微妙な応力場の変化がみられるのは興味深い。もともと丹波山地の微小地震の発震機構はP軸が東西であることは共通しているが、横ずれ型と逆断層型が混在して発生している。すなわち σ_1 は東西方向で揺るぎないものであるのに対して、南北方向の水平応力と垂直応力はほぼ拮抗している状態で、容易に σ_2 と σ_3 が入れ替わる状態にあると考えられる。当初、地震活動が静穏化した期間Cに、中央部にて逆断層が卓越するのは、兵庫県南部地震に先行する応力変化があったためかと考えられた。

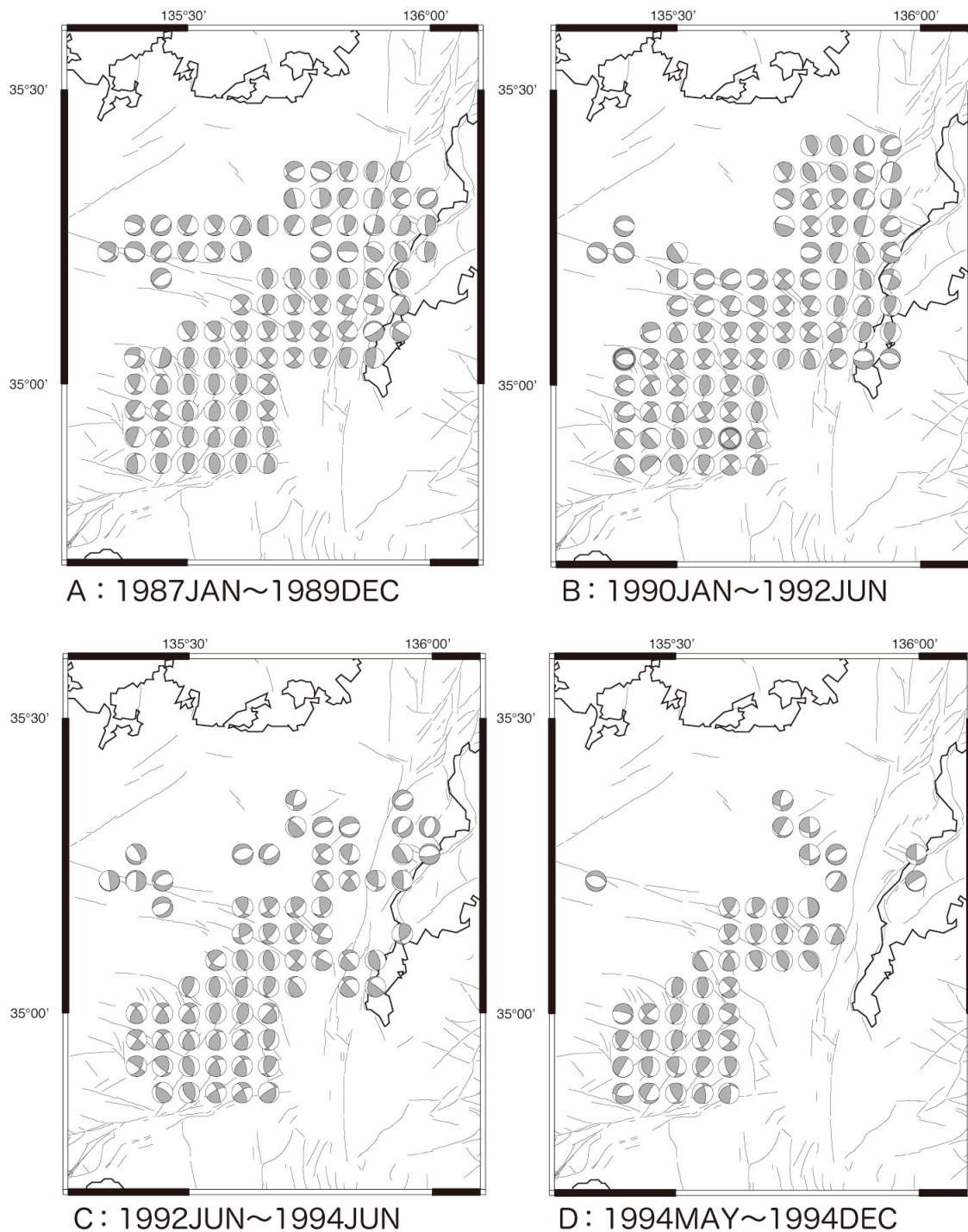


Fig.5 The stress field around the Tamba region calculated by method of this study for 4 period before the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake.

しかしながら、期間Aでも同様に逆断層型が卓越していることがわかった。兵庫県南部地震との関連性は明確ではなくなり、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。期間Aには亀岡市南部にて1987年5月にM5.0の逆断層型の

地震が発生し、それに引き続き多数の余震が観測されている。期間Aの逆断層応力場は、この一連の活動の影響を受けているものかもしれない。少なくともM5.0に続く余震活動が、地震数で他の地域を圧倒して多く存在することは結果に影響を与えている可能性がある。今後、空間・時間範囲をずらして、こ

これらの局所的な活動を除外したデータではどのようになるかを見るなどにより、時間変化の主たる要因は何かを見極める必要がある。

4. 今後の展望と問題点

この方法の応用をすすめていくことにより、Mが小さいためこれまで発震機構解析からは除外されていた微小地震のデータを多数利用して、応力場推定の空間的/時間的分解能を向上させることができるかもしれない。また、「地震活動が極めて低調な地域/時期」「時間的にも空間的にも小さな地震空白域」といった、従来発震機構・応力解析が不可能であった地域や時期についても何らかの応力場の変化を知る手段となり得るかもしれない。処理としては比較的単純な手法であるので、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（新たな地震が発生するたび）のモニタリングを行うことも考えられる。

一方、この方法による結果は、応力軸の方位などで従来の「正攻法」による解析結果との偏差も少なくない、さらに、1つの地震あたりの押し引きデータ数を減らしていく（例えば5個以下）と正しい解が求まらなくなり、その限界の設定には注意が必要である。そもそもこれらの結果が、たまたま少ない観測点数でも発震機構をうまく決めることができた少数の地震に依存している可能性がある。とすればその他の地震については無意味なデータを加えるばかりで、結果を混乱させているに過ぎないということ

になりかねない。これらの結果の信頼性・誤差および本手法の適用限界についても今後検討を重ねる必要がある。

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。

参考文献

- 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.
- 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.

The Crustal Stress Field Directly Derived from the First Motion Polarities

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 algorithm by Horiuchi et al, (1995). Especially, the direct calculation method in this study is suitable for the Abuyama's old data to investigate the stress field in the northern Kinki district before the Hyogo-ken Nanbu earthquake in 1995. Because, the data set of the Abuyama Observatory in the last century is very precise, but number of station was too small to derive the focal mechanisms of each earthquakes.

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