

# 地震波形データを用いた 地震の震源パラメタの自動決定システム

久家慶子

理博 京都大学助手 大学院理学研究科地球物理学教室 (〒606-8502 京都市左京区北白川追分町)

本研究では、地震の断層面の方向や大きさなどの自動決定を念頭におき、3つのステップからなる自動解析システムを構築している。3つのステップは、1) 地震のメカニズム解の決定、2) 断層面と断層長の決定、3) 矩形断層上でのすべり量の時空間分布の決定、からなる。データは強震計でとられた波形データを利用する。システムの動作確認は、兵庫県南部地震など、過去の大きな地震の記録を用いて行われた。システムは、現在、強震ネットや関西地震観測研究協議会のデータを利用して動作している。ここ数年、北陸・近畿から中国地方の浅い小・中地震がステップ1のシステムを起動し、メカニズム解を自動決定、電子メールやホームページでその結果を公表している。

**Key words :** automation, focal mechanism, moment tensor, fault plane, fault length, slip distribution

## 1. はじめに

兵庫県南部地震などによって引き起こされた強震動の研究から、地震の震源域周辺の地震動は、地震の断層面の向きや大きさ、すべりの伝播方向、アスペリティの位置など、地震の震源特性に影響を受けることが指摘されてきた。このことは、大地震発生後、地震記録のない領域を含めたあらゆる地域での地震動を速やかに推測・評価するためには、震源特性を見積もる、つまり、地震の震源パラメタを推定することが、必要な過程であることを示唆する。

現在いくつかの研究機関で動いている地震の震源パラメタの自動決定システムでは、地震の震源が1つの点である(点震源)という仮定のもとに、地震のメカニズムであるモーメントテンソル解の自動決定を行っている<sup>1)</sup>。一方、震源域周辺の強震動の空間分布や特性は、メカニズムのみならず、断層面の方向・大きさや断層面上でのすべり量の時空間分布に左右される。地震動の予測という点では、点震源を仮定したモーメントテンソル解の推定から、更に一步すすんだ自動解析が要求される。

本研究では、モーメントテンソル解とともに地震の断層面の方向や大きさなどの自動決定も念頭におき、図1に示すような3つのステップからなる自動解析システムを構築している。データは地震の震源特性に敏感であると考えられる強震計でとられた時系列データ(波形データ)を利用する。システムが階層構造をもつことにより、小さな地震では、ステップ1だけ、大きな地震ではステップ1-3と、地震の規模に応じて解析過程を選択する。また、大きな地震では、結果を、各ステップで決まり次第、公表することができる。

### ステップ1

モーメントテンソル推定

メカニズムの決定

### ステップ2

線状点震源のすべり量の決定

断層面と断層の長さの決定

### ステップ3

矩形断層でのすべり量分布の決定

すべり量の時空間分布の決定

図-1 本システムの3つのステップ

## 2. 兵庫県南部地震の強震記録でのテスト

3つのステップからなる解析システム(図-1)の動作確認は、過去の大きな地震の強震データを利用して行っている。図2は、兵庫県南部地震に対し

て、気象庁や関西地震観測研究協議会 (CEORKA) などの強震データを用いて求められた結果である。本解析では、強震計でとられた時系列データ (P 波、S 波を含む 3 成分) を、時間積分して変位に変換し、バンドパスフィルター (例えば 0.04 から 0.1-0.2Hz) をかけた時系列データにしている。この時系列データの形 (波形) にできるだけ近い計算波形を作り出すことにより、各ステップで、震源パラメタを決定していく。計算波形を作成するときに必要なグリーン関数は、京都大学防災研究所地震予知研究センター阿武山観測所が震源決定に使用している水平成層構造モデルを仮定して計算している。この構造モデルはすべての観測点に共通である。

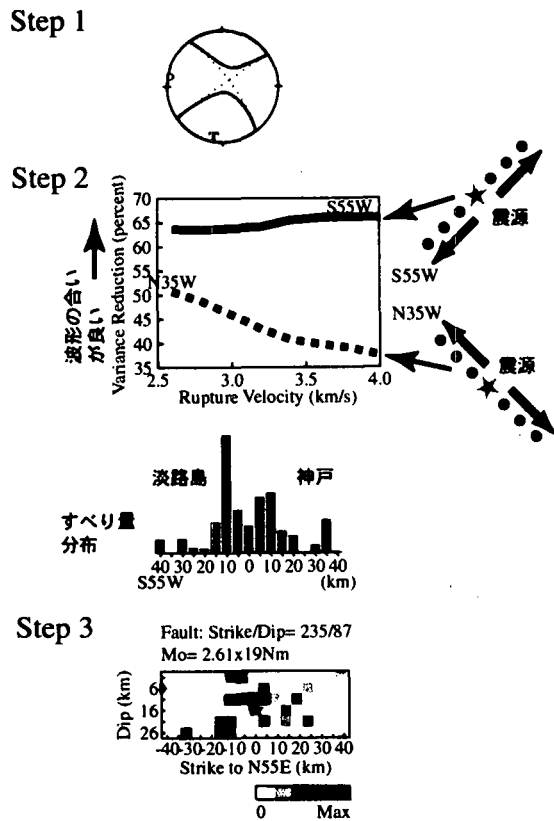


図-2 兵庫県南部地震の強震記録からえられた結果。

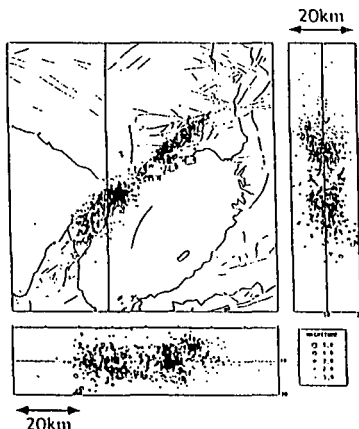


図-3 兵庫県南部地震の余震 (本震から 2 日以内) <sup>3)</sup>

兵庫県南部地震のモーメントテンソル解 (図 2) は、ステップ 1 で安定に求められ、北東-南西走向と北西-南東走向のほぼ垂直な節面をもつ横ずれ断層のメカニズムとなる。この北東-南西走向と北西-南東走向のほぼ垂直な 2 つの節面のどちらかが断層面である。ただし、この段階ではわからない。

ステップ 2 (図 2) では、ステップ 1 で得られたメカニズムの 2 つの節面の走向にそって、震源から両方向に一定の間隔で線状に並ぶ複数の点震源を仮定する。各点震源のすべりの大きさ (モーメント解放量) を、観測された波形を使って決定する。仮定した 2 つの走向の間で、観測された波形と計算から予測される波形の合い具合を比較し、2 つの波形がより似ている方向に地震のすべりが伝播した (つまり、その走向に断層面がある) と判断する。また、地震の起こった領域 (断層の大きさ) は、すべりの大きい領域として判断する。地震のすべりは、震源から一定速度で伝播すると仮定し、いくつかの速度を試みる。点震源を並べる範囲は、内陸地震のマグニチュードと余震域の直径の間の経験式<sup>2)</sup>から決める。余震分布の情報はまったく使用しない。

兵庫県南部地震のステップ 2 の結果 (図 2) で、2 つの走向を比較すると、北東-南西方向に点震源を並べた場合の方が、北西-南東方向に並べた場合よりも観測波形と計算波形の合いがよい (Variance Reduction の値が大きい)。つまり、断層面は北東-南西走向の節面であると判断できる。図 2 には、波形の合いが最も良いときのすべり量 (棒線) の分布も示している (ゼロが震源にあたる)。大きなすべりは、震源から南西方向の淡路島側に約 15km、北東方向の神戸側に約 35km の約 50km 長の範囲にあり、特に震源の両側に顕著である。余震が分布する領域 (図 3) や他の震源過程の研究から推定されているすべり分布と調和的である。

ステップ 3 では、ステップ 2 で決定された断層面をもとに矩形断層を仮定し、すべり量の 2 次元的な分布を推定する。図 2 は、走向方向に 80km (ステップ 2 と同じ範囲)、深さ方向に 26km までひろがるほぼ鉛直な矩形断層上でのすべり量の分布である。ステップ 2 と同様に、すべりは、震源 (星印) から一定速度で伝播すると仮定し、いくつかの速度を試みている。

ステップ 3 では、ステップ 2 では見えなかったすべり量の深さ分布がみえるようになる (図 2)。大きなすべり量 (色の濃い部分) が震源の淡路島側隣の浅い部分にあらわれる一方、神戸側では、震源と同じ程度の深さにひろく、地震のすべりが起こっていたことがわかる。これらの結果は他の震源過程の研究結果とも矛盾しない。

### 3. 北陸・近畿地方から中国地方の浅い小中地震に対するメカニズム解の自動決定

本システム(図1)のうち、ステップ1については、北陸・近畿地方から中国地方の深さ30km以浅の地震に対して、強震ネット<sup>4)</sup>のデータを用いて1996年から、関西地震観測研究協議会<sup>5,6,7)</sup>のデータを用いては1999年4月から、モーメントテンソル解を自動決定している。

解析に必要な震源の位置と時間には、京都大学防災研究所地震予知研究センター微小地震観測網SATARNシステムにより自動決定され、電子メールで自動配信されている結果を用いている。震源の深さについては、いくつかの深さを試み、波形の合い具合が最もよい深さでの解を最終解としている。バンドパスフィルターの帯域、使用する観測点の範囲は、地震のマグニチュードに応じて決めている。

#### (1) 強震ネット(K-NET)

図4は、1996年以降、強震ネットの波形データを用いて決定された53の地震のメカニズム解を示す。これまでに起こった地震のマグニチュード( $M_{JMA}$ )は、3.4から5.5までで、約90%が $M_{JMA} < 4.5$ である。最大の地震は、1997年9月4日の鳥取県西部の地震である。メカニズムの自動決定がされるか否かは、主に、SATARNの震源情報の有無に依存している。強震ネットのデータセンターにデータがありながら、自動解析が行われなかった地震(灰色のメカニズム解17つ)は、規模が比較的小さく、SATARNの検地能力が低いと思われるところに多い。

決定されたメカニズム解の多くは東西方向に主ひずみ圧縮軸をもつ(図4)。西南日本に働いているといわれている東西圧縮の応力場と調和的である。いくつかの解は、東西方向の圧縮とはP波の押し引きが逆のメカニズムとなり、メカニズムの自動決定がうまくいっていないことを暗示している(例えば、1999年8月2日大阪府南部の地震)。このように押し引きが反転したメカニズムは、震源の深さなどが大きくずれ、半波長ずれた波形をモデリングしてしまうことによって生じている。

これまでに決定された解を、強震ネットの記録から読み取ったP波初動の分布と比較すると、約70-80%の解が調和的である。防災科学技術研究所のフリージア(Freesia)<sup>1)</sup>によってモーメントテンソル解が決定されている地震(1997年6月以降約20つ)では、ほとんどの地震でその解が類似する。地震の規模が小さいこと、データの周期帯が短周期であること( $M_{JMA} < 5$ の地震で0.3-1Hz)、観測点の設置場所が岩上に限らないことなどを考えると、かなり安定した解をもたらしている。

強震ネットはデータの収集と公開がリアルタイムでは行われていない。そのため、システムは、現在、1日に1回、強震ネットのデータセンターに自動的に接続、データをチェック、新しい地震のデータがあり、しかも、そのデータに相当するSATARN震源が配信されているとき、モーメントテンソル解の自動解析を開始する仕組みになっている。結果は、電子メールで配布するとともに、ホームページ(<http://www-seisl.kugi.kyoto-u.ac.jp/auto-mt/jukebox/>)でみることができる。

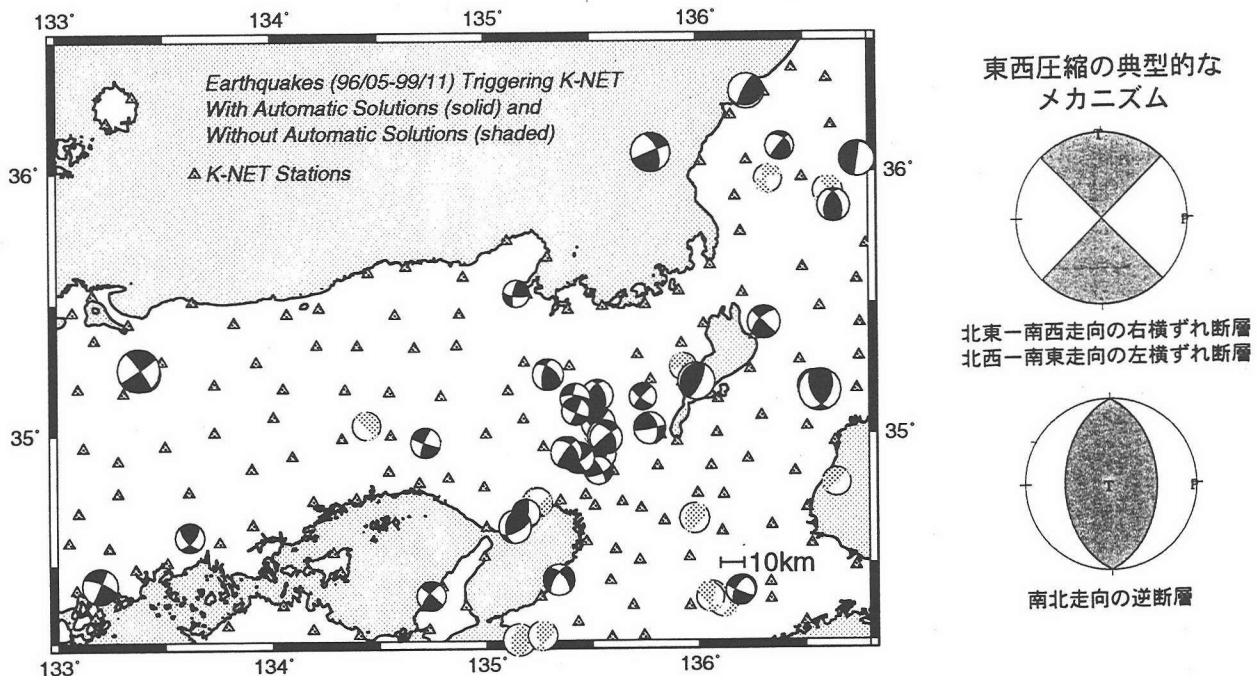


図-4 強震ネットのデータを用いて決定されたメカニズム解。

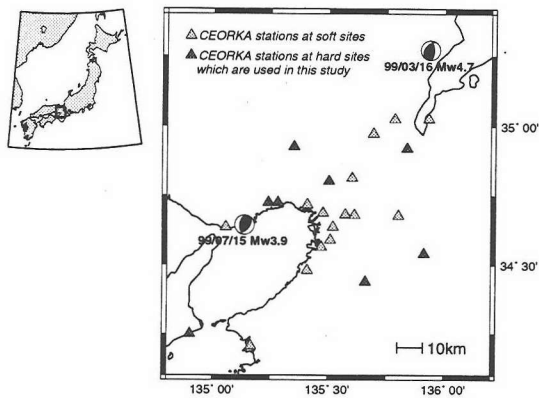


図-5 CEORKAの強震ネット

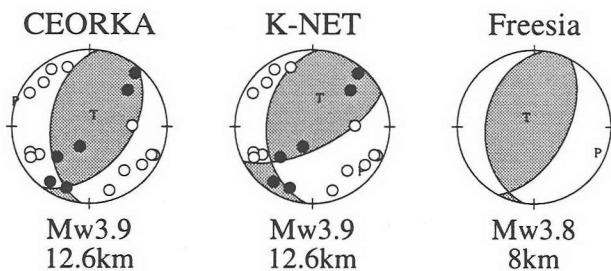


図-6 1999年7月15日大阪湾の地震 ( $M_{JA}3.8$ ) のメカニズム解。P波初動 (●が押し、○が引き) はK-NETとCEORKAの原記録からの読み取り。

## (2) 関西地震観測研究協議会 (CEORKA) ネット

関西地震観測研究協議会<sup>5,6,7)</sup>では、大阪盆地を中心に関西地域に強震ネットを展開し(図5)、地震発生後、これらの観測点のデータを自動的に収集するシステム稼働している。このシステムにより収集されたデータを用いて、地震後速やかに、モーメントテンソル解の自動決定を行うシステムの試運転を1999年4月から行っている。自動決定システムは、CEORKAからのデータ収集・転送終了を告げる電子メールを受信することによって起動する。比較的硬い岩上の観測点のデータが3点以上で収集され、そのデータに相当する地震のSATARN(あるいはCEORKA)の震源情報が利用できるとき、実際の解析を開始する。図7は、7月15日に発生した大阪湾の地震( $M_{JA}3.8$ )の自動解である。CEORKAの神戸本山MOT、神戸大学KOB、豊中TYNの3観測点の記録から自動的に決定されたメカニズム解は、北北東-南南西走向の逆断層で、強震ネットやフリージアで決定された解と類似する。CEORKAでは速度型強震計(VSE-11&12)を設置しているため、強震ネットにくらべて長周期帯での波形の使用が可能である。いくつかの地震に対するテストでは、波形のモデリングがよく、少数の観測点でも解が安定に求められる傾向を示している。例えば、CEORKAネット外の3月16日

滋賀県北部の地震(図6)でも、3観測点のデータを用いて、フリージアや強震ネットなどと調和的なメカニズム解が求められている。

## 4. まとめ

地震動の早期予測にむけて、地震の震源パラメタの自動解析システムを構築している。システムは、(1)メカニズム解の決定、(2)断層面と断層長の決定、(3)矩形断層上でのすべり量の時空間分布の決定という3つのステップからなる。

システムの動作確認には、兵庫県南部地震など、過去の大きな地震の強震記録を用いた。決定される断層面の方向、大きなすべりを伴った領域の大きさや分布は、余震の分布や他の研究者らによる解析の結果などと調和的である。

システムのステップ(1)については、K-NETやCEORKAのデータを用いて、ここ数年、中国地方から近畿・北陸地方に発生した小中地震に対して、メカニズム解が自動決定されてきた。防災科学技術研究所で決定されている解やP波の初動分布とも調和的な解をもたらしている。

強震ネットでもとられた波形データが地震発生後速やかに収集され、本研究のような自動解析システムにつなげられれば、短時間に、断層面の方向と大きさ、アスペリティの位置などが推定できるだろう。

謝辞: SATARNシステムの運営と震源情報の公表は、京都大学防災研究所地震予知研究センターSATARN関係者によって行われている。関西地震観測研究協議会のデータ自動収集システムは、地域地盤環境研究所の香川氏、赤澤氏によって構築、運営され、お二人には、本稿のCEORKAのデータを用いた自動解析システム運転のためにもご協力いただいている。本研究では、関西地震観測研究協議会、気象庁、K-NET、滋賀県生活環境部消防防災課、京都大学防災研究所によって運営されている強震計のデータを用いた。記して感謝する。

## 参考文献

- 1) 福山・石田・Dreger・川井(1998)地震2、51、149-156.
- 2) 宇津徳治(1984)地震学第2版.
- 3) 京都大学防災研究所(1996)防災研究への取り組み.
- 4) Kinoshita(1998)Seis. Res. Lett., 69, 309-332.
- 5) 関西地震観測研究協議会(1994)地震学会秋季大会予稿C45.
- 6) 香川・赤澤(1998)日本地震学会秋季大会予稿B67.
- 7) 関西地震観測研究協議会(1999)ニュースレター第3号.