

論文の内容の要旨

論文題目 Estimation of fault geometry and slip-weakening parameters from waveform inversion and application to dynamic ruptures of earthquakes on a bending fault

(波形インバージョンを用いた断層形状とすべり弱化パラメタの推定
および屈曲した断層の動的破壊への応用)

氏名 呉長江

異なるテクトニック環境で起きた三つの地震を分析する。1999年の台湾集集地震はユーラシアプレートとフィリピン海プレートとの衝突境界の近くにある浅い低角逆断層上に起きた。2000年の鳥取県西部地震が内陸横ずれ断層上に、一方2003年の宮城沖地震は大陸プレートの下に沈み込む太平洋プレートのスラブにある高角逆断層上に起きた。断層形状を推定する為、できるだけ多くの強振動観測点が含まれることが望ましい。台湾集集地震には強振動観測点47点とGPS観測点60点、宮城沖地震には強振動観測点20点、鳥取県西部地震には強振動観測点18点のデータを使った。

台湾集集地震は複雑な地表断層が現れた。地表断層の走向はほぼ南東 5° であるが断層の北の端では、走行は東北東-西南西になる。観測データを説明するため、マルチフォルトモデルが必要である。インバージョンの結果、断層上に南の方はすべりが主に浅い部分に集中し、北の方は深い部分まで伝播したことが分かる。最大のすべり(ほぼ20m)は北の端の断層上に起きた。南から北まですべりベクトルは明らかに回転していて、故に北の端の分岐断層は殆ど純逆断層である。地震モーメントが 2.7×10^{20} Nmで、本震の破壊継続時間が40秒弱である。余震は主にすべりが小さいところ、あるいはすべりが無いところに起きた。

鳥取県西部地震の場合は余震分布をもとに北の方 16° で屈曲した断層モデルを導入する。破壊継続時間が約 9 秒弱で、地震モーメントが 1.2×10^{19} Nm である。大きいすべりは主に深さ 3km から 6km までに限定された。地表面に近づくと、すべり量は急激に小さくなった。我々の結果で、最初の 2.5 秒間小さな初期破壊が発生し、大きなすべりは 2.5 秒後深さ 10km で始まったことが分かる。最初の 5 秒間のすべりは基本的に南の断層面上で起きた。北の断層破壊は 5 秒後に始まった。南断層面から北断層面への破壊伝播の遅れは明らかである。更に、南断層面上のすべりは北のほうより大きい。

スラブ中で起きた逆断層地震として挙げる 2003 年の宮城沖地震では余震の情報から断層形状を推定するのが困難である。波形分析を基に、我々は同じ走向であるが傾斜角の違う 2 枚の断層面で構成される断層モデルを提案する。P 波の初動から得られた震源メカニズムに基づいて、その中で南側の断層面の傾斜角は 87° であることを推定した。S 波偏向角度の分析から北側の断層面の傾斜角は 60° であることがわかった。インバージョンの結果、主破壊は南断層面で始まったことがわかった。最初の 5 秒間、すべりは主に南断層面上に限定されていた。破壊は 5 秒後から北断層面へ伝播し始まった。北断層面上での大きなすべりは主に深い部分に集中していた。地震モーメントは 5.0×10^{19} Nm である。各小断層からモーメントテンソルの総和はハーバード CMT 解と似ている。

これらの三つの地震は異なるテクトニック環境で起きており、波形分析から、それぞれ複雑な断層形状を持っていたことがわかる。地表断層あるいは余震分布から直接推定される複雑な破壊パターンは、単に地表面現象だけでなく、断層全体の破壊運動も表している。さらに、これらの浅い地震のみならず宮城沖地震のようなスラブ中で起きた深い地震も複雑な断層形状を示していた。

非直交グリッドメッシュにマッピング手法を応用して、我々は新しい差分法 (FDM) プログラムを開発した。このプログラムは屈曲した逆断層を含む 3 次元モデルに適用できる。

波形インバージョンに応用される展開関数、フィルター、スムージング及び離散化影響を考慮するため、台湾集集地震の D_c 下限を推定する数値実験を行なった。結果として、非アスペリティ領域で D_c 下限は 2 m であるのに対し、応力降下量 25MPa のアスペリティ領域で D_c の下限は 4m となる。我々のシミュレーション結果は地表破壊の影響でアスペリティ上部での見掛けの D_c は実際より大きくなることを示唆する。

開発した FDM を用いてそれぞれの断層面上の応力履歴を計算する。得られた stress history から D_c を推定する。推定された D_c はそれぞれの地震ことに大いに異なる。台湾集

集地震の場合、推定された D_c は主に 2m から 5m まで変動する。一方、鳥取県西部地震では主に 0.5m から 1.5 m、宮城沖地震では 0.8m から 2.3m となった。これらの結果から以下のことがわかる：地震が大きいほど D_c は大きくなる；さらに、すべりが大きいほど D_c は大きくなる。 D_c の空間的不均一性が自然断層面上の粗さのフラクタル分布を反映しているかも知れない。だとすれば、非弾性 process zone/fracture zone の幅は最終のすべり量 D_{final} 或は D_c の関数となり、更に、大きいすべりが起きた領域で厚い fracture zone、小さいすべりが起きた領域で薄い fracture zone が予想できる。これは台湾集地震起きた車籠埔断層の掘削コアの観測事実からも裏付けられている。ところで、すべりが大きければ摩擦熱により起きたメルトあるいは fluid pressurization から見掛けの D_c が大きくなる可能性がある。更に、 D_c が D_{final} に比例することから D_c が $M_0^{1/3}$ に比例することがわかる。

台湾集地震の加速度波形のスペクトルや車籠埔断層の掘削コアの観測事実を参考にして、北のほうは大きな D_c 、そして南の方は 2m より小さな D_c の推定値が適当である。

動的な破壊シミュレーションで、逆断層モデルの場合は 20° より小さい角度で屈曲する幾何配置から明らかな効果が観測されていないことがわかった。何故ならば、この屈曲による傾斜角度の差は、高々 2° だからである。複雑な広域応力を与えた場合、動的なモデルから得られたすべりベクトルのパターンが運動学的なモデルと同様に回転していることがわかった。

鳥取県西部地震のような横ずれ地震の場合は、均一な初期応力とピーク破壊強度を与えた屈曲した断層モデルによりスムーズな動的破壊をもたらす。最終すべり分布は明瞭に断層幾何配置から影響され、結局断層は曲がりのところで分離された二つのクラックのように振舞う。南と北の断層面に不均一な初期応力とピーク破壊強度を与えると、運動学的なモデルのような破壊パターンおよびすべり分布が得られる。

運動学的な震源モデルからえられた大きなすべり速度および相対的に長い立ち上がり時間を再現するため、我々は均一なピーク破壊強度と初期応力を仮定した単純なモデルに不均質な応力降下量と D_c を導入する。このように単純なモデルで運動学的な破壊パターンが良く再現できる。しかし、最終すべりは運動学的なすべりより大きい。