

## 論文内容の要旨

論文題目 **Absolute Strength of the San Andreas Fault Inferred from Tectonic Loading Simulation and CMT Data Inversion**

**(応力蓄積シミュレーションと CMT データインバージョン  
に基づくサン・アンドレアス断層の絶対強度の推定)**

氏名 寺川寿子

### 1. はじめに

地殻応力 - 熱流量パラドックスは、サン・アンドレアス断層 (SAF) の絶対強度を巡る学際的な論争として広く知られている。断層の絶対強度を知ることは地震発生の物理を理解する上で重要であるが、一般に、絶対強度を直接測定することは難しい。また、地震観測からは地殻応力場の変化に関する情報が得られるが、その絶対レベルを推定することは困難である。これまでの研究では、様々な力学的モデルを仮定した SAF 周辺応力場のパターンの解釈を通じて SAF の絶対強度の推定がなされてきた。しかし、これらのモデルでは、肝心の地殻応力の蓄積メカニズムが正しく表現されているとは言えない。本研究では、「応力蓄積の根本的な原因はプレート間の力学的相互作用にある」という考えに立って、南カリフォルニアのピックベンドセグメント (BBS) 周辺域を対象に変位の食い違い理論に基づく絶対応力場の数値シミュレーションを行い、その結果と地震の CMT データを用いた応力インバージョンの解析結果を比較することにより SAF の絶対強度の推定を試みた。

### 2. BBS 周辺域の 3 次元応力蓄積シミュレーション

SAF 周辺域の絶対応力場は、SAF での力学的相互作用に起因するテクトニック応力場と、岩石の自重によるリソスタティック応力場から成る。地震サイクルを超えた長い時間スケールで見れば、SAF は一定の抵抗を受けながらプレート相対運動速度  $V_{pl}$  で定常すべり運動を行っていると考えてよい。テクトニック応力場は、SAF の定常すべり運動に起因するテクトニック応力場と地震発生サイクルに伴う変動応力場から成る。定常的なテクトニック応力場にリソスタティック応力場を加えたものが、SAF 周辺域の定常的な絶対応力場である。本研究では、BBS 周辺域のテクトニック条件を考慮した 3 次元の応力蓄

積モデルを構築し、変位の食い違い理論に基づく数値シミュレーションにより BBS 周辺域の定常的な絶対応力場を計算した。

### BBS 周辺域のテクトニクスと構造モデル

BBS の走向はプレート相対運動方向に対して約 20 度斜行している。プレート間の力学的相互作用は、プレート境界面の幾何学形状に強く依存するため [Hashimoto & Matsu'ura, 2006]、絶対応力場を正しく見積もるためには現実的なテクトニック環境を考慮した 3 次元の応力蓄積モデルを構築する必要がある。そこで、まず、地殻・マントルを重力場の下にある弾性的リソスフェアと粘弾性的アセノスフェアから成る 2 層構造媒質で表現し、SAF はリソスフェアを完全に切断する垂直プレート境界面であるとし、BBS をプレート相対運動方向と 20 度斜行した長さ 200km のセグメント、それ以外の部分をプレート相対運動に平行な走向を持つ境界面としてモデル化した (図 1)。

### 地殻応力の蓄積メカニズム

BBS でのプレート相対運動は、横ずれ成分  $V_{pl}\cos 20^\circ$  に加え、収束成分  $V_{pl}\sin 20^\circ$  を持つ。プレート収束運動は BBS のすべりでは解消できないため、BBS に働く法線応力は経年的に増大する。これは BBS の絶対強度を増加させ、さらには横ずれ運動に起因する応力場の増大を引き起こす。しかし、地殻の強度は有限であるため、プレート収束運動に起因する応力場を解消する何らかのメカニズムが働くはずである。ここでは、プレート収束運動に起因する応力が臨界値に達すると、BBS 周辺域の SAF に平行な走向を持つ衝上断層群の運動により応力増分が解消され、ある定応力状態が実現されるとした。

### 絶対応力場の計算手法

プレート境界で満たすべき条件は、モデル領域である BBS では断層構成関係に従ってすべりが進行し、モデル領域外の SAF では  $V_{pl}$  で定常すべりが進行すると設定した。このような境界条件の下で、SAF とスラスト断層群の摩擦係数を与え、時間ステップ毎に平衡方程式を解く。計算には、変位の食い違い理論に基づいて導出された、弾性・粘弾性二層構造での応力のすべり応答関数を用いた [Hashimoto & Matsu'ura, 2000; Fukahata & Matsu'ura, 2005]。仮定した断層構成関係は、剪断応力が絶対強度に達するまではすべりが 0、強度に達した後は応力を強度レベルに保ったまますべりが進行するものとし、絶対強度は BBS に働く法線応力の増大を考慮して時間発展させる。時間ステップ毎に BBS 周辺域の剪断応力場を調べながら、断層から 100km 以内で衝上断層運動が生じる応力状態 (定応力状態) に達するまで計算を行った。

### BBS 周辺域の地震発生応力場の抽出

テクトニック応力場の有意な成分は、SAF の横ずれ運動に起因する剪断応力 ( $\sigma_{xy}$ ,  $\sigma_{xz}$ ) と、収束運動に起因する直応力 ( $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$ ) である。剪断応力は SAF (BBS) の絶対強度に、収束運動に起因する直応力は周辺の衝上断層群の絶対強度に、それぞれ比例する。シミュレーション結果を地震データのインバージョン解析結果と比較するために、絶対応力場を応力の解放様式である 3 つの独立なモード (等方爆発、亀裂の開口、断層すべり) に分解して断層すべりに関する応力場 (地震発生応力場) のみを取り出し、SAF の絶対強度との関係を分析した。BBS から 50km 以内の領域では、SAF の絶対強度によって地震発生応力場のパターンが顕著に変化する。SAF の絶対強度を見積もる上で有効な情報としては、地震

発生応力場の空間パターン，プレート収束運動に伴う応力増分を解消する断層運動の形態，最大水平主圧縮軸の回転が起こる範囲などがあることがわかった．

### 3. CMT データインバージョン手法の開発

地震は震源近傍の地震発生応力場を反映して起こるという考えに基づき，地震の CMT データから地震発生応力場を推定するインバージョン解析手法を開発した．この手法では，震源位置にピークを持ち，地震モーメントに比例する広がりを持つ正規分布関数を真の地震発生応力場に掛けて体積積分したものが CMT 解であるとして，CMT 解と地震発生応力場を定量的に結びつける．応力場を 3 次のスプライン関数の重ね合わせで表現することにより，離散化された線形の観測方程式が得られる．これに「応力場は空間的に滑らかに変化する」という先験的拘束条件をベイズの規則で結合し，観測データからの情報と先験的な拘束条件の相対的な重みを超パラメータで調節するベイズ型モデルを構築する．最適解は，Yabuki & Matsu'ura (1992) のアルゴリズムに従い，ABIC 最小の規準により求める．こうして，対象領域内の任意の点で空間的に平滑化された応力テンソルの 6 成分の値を推定誤差と共に求めることが可能となる．この解析手法を太平洋プレートが北米プレートの下に沈み込んでいる東北地方の地震データ (NIED, Seismic Moment Tensor Catalogue) に適用し，その有効性を検証した．

### 4. BBS 周辺域の応力場の解析と SAF の絶対強度の推定

CMT データインバージョン手法を BBS 周辺域の地震データに適用し，地震発生応力場のパターンを推定した．ここでは十分な CMT データが得られなかったため，地震メカニズム解 (SCDEC, 2000-Hauksson: 3-D Earthquake Focal Mechanisms) とマグニチュードから推定される地震モーメントを用いて，CMT 解に相当するモーメントテンソルを計算し，これらをデータとした．以下に，インバージョン解析で得られた BBS 周辺域の地震発生応力場の特徴をまとめる．

- (1) 発生が期待される地震のタイプは BBS の近傍ではこれと斜行する衝上断層型 BBS から 50-100km 以内では BBS と平行な衝上断層型，100km 以遠では BBS と斜行する横ずれ断層型である．
- (2) BBS の南西約 40km にプレート収束運動に起因する応力増分を解消する帯状の領域が存在する．
- (3) 最大水平主圧縮軸の回転は BBS から 55km 以内の領域で生じている．

### 5. 結論

BBS 周辺域の応力蓄積シミュレーションと CMT データインバージョン解析の結果を比較して，SAF (BBS) の摩擦係数は約 0.3，脆性破壊領域での平均的な絶対強度は約 140MPa であるという結論を得た．推定された SAF の摩擦係数は，岩石の摩擦実験から得られる標準的な値 (0.6) に比べて有意に小さい．しかし，プレート収束運動が生み出す法線応力が高いため，BBS での絶対強度そのものは，これまで多くの研究者が報告してきた値 (10MPa 程度) よりも 1 桁大きい．

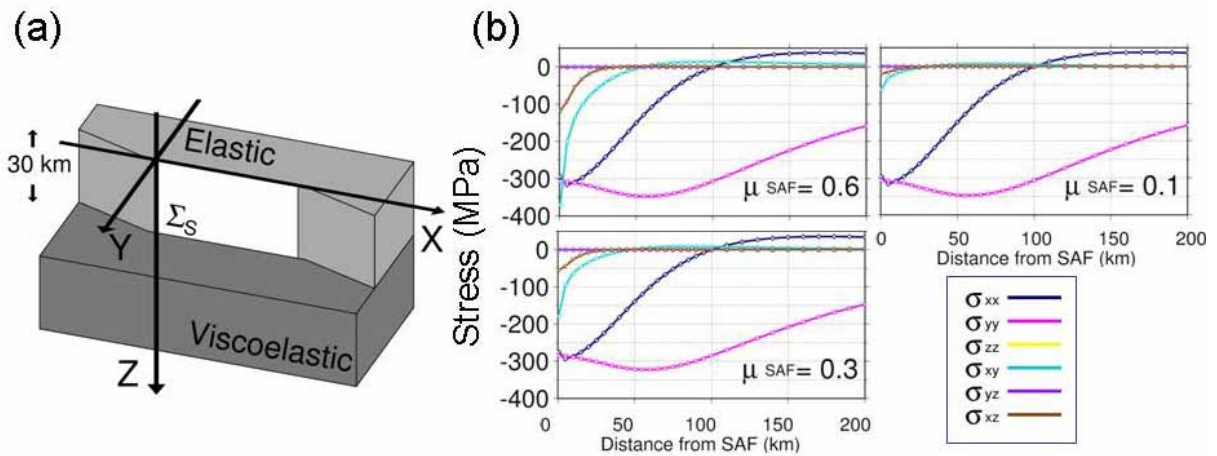


図 1. (a) BBS 周辺域の構造モデルと座標系 ( $\Sigma_s$  はモデル領域 = BBS) (b) BBS 中央部でのテクトニック応力場の成分 (周辺域の衝上断層の摩擦係数は 0.6 に固定).

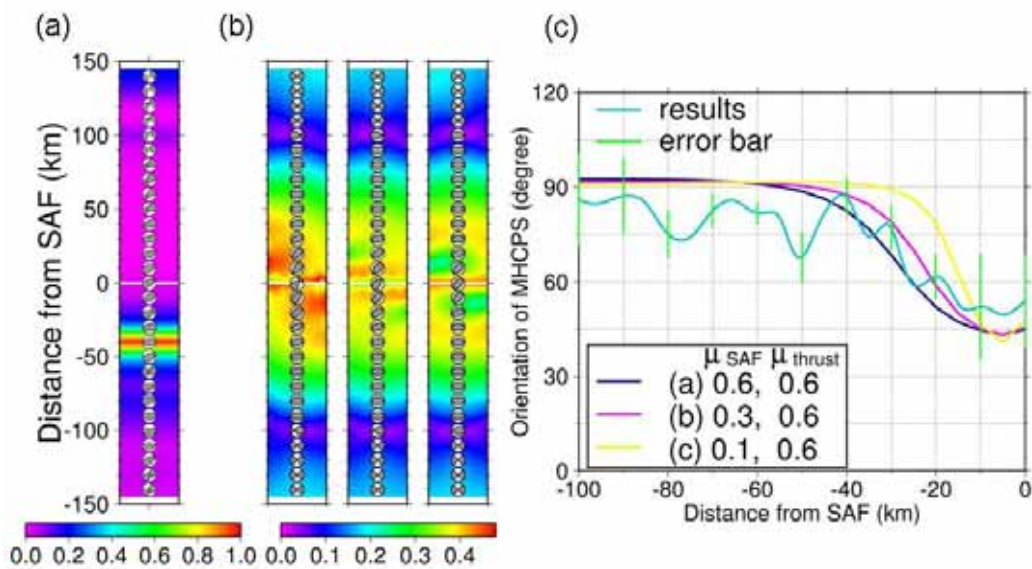


図 2. BBS 中央部での地震発生応力場 .(a) インバージョン解析結果 .期待される地震のタイプを下半球投影の震源球で表現した .コンターは最大値で規格化した応力解放量 .(b) 数値シミュレーション結果 .コンター値が大きいほど断層運動が起こりやすい応力状態にある .SAF の摩擦係数は 左から 0.6 ,0.3 , 0.1 とした .(c) 最大水平主圧縮軸の回転 . 解析結果をエラーバー付きの水色の線で表示 .

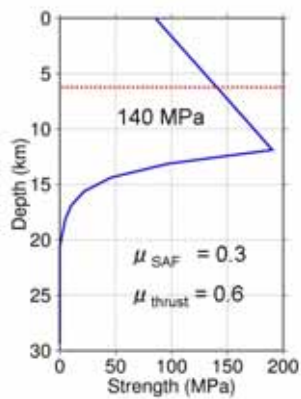


図 3. 応力蓄積シミュレーションと CMT データインバージョン解析に基づいて推定した SAF(BBS) の絶対強度分布