

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	加納 将行
論文題目	Estimation of frictional parameters in afterslip areas by assimilating GPS data: Application to the 2003 Tokachi-oki earthquake (GPS データの同化による余効すべり域の摩擦パラメータの推定: 2003 年十勝沖地震への適用)		
(論文内容の要旨)			
<p>近年の観測網の充実により、沈み込み型プレート境界においては、揺れを伴う地震だけではなく、地震によって誘起される非地震性すべり (余効すべり) や、自発的に開始する非地震性すべり (スロースリップ) など、多様なすべり現象が観測されてきた。岩石実験結果を基に構築された「すべり速度と状態に依存する摩擦構成則」に従えば、このようなすべりの多様性は断層面の摩擦特性の違いによって説明可能である。この摩擦構成則は地震サイクルを再現するシミュレーションの支配方程式としてよく用いられ、多様な地震発生パターンや非地震性すべりが再現されている。摩擦特性を表現する摩擦パラメータ (a, b, L) の推定は、実際の断層の空間スケールでは、a-b のみ推定された例や、断層をバネとスライダーで単純化したモデルを用いて推定された例の数例に限られる。このため、シミュレーションでは、実際の地震発生サイクルに合うように試行錯誤的にパラメータの設定が行なわれてきた。</p> <p>ところで、2003 年十勝沖地震では、余効すべりの伝播によって約 1 年後に釧路沖地震が誘発された可能性が指摘されている。本研究では、余効すべりの伝播の予測を目的とした余効すべり域の摩擦パラメータの推定手法の開発を行なった。基礎となる手法はアジョイント法であり、シミュレーションの支配方程式を拘束条件として、シミュレーション結果から得られる観測量の計算値が観測データに最も合うようにモデル変数の初期値やパラメータを推定する手法である。計算の効率化のため、時間可変ルンゲクッタ法を用いたアルゴリズムを新たに導入した。</p> <p>最初に摩擦パラメータの推定可能性を検討するために、単純な系を用いた数値実験を行なった。モデル変数の初期値や地震発生域の摩擦パラメータは既知とし、余効すべり域の摩擦パラメータのみ推定した。まず、断層面上のすべり速度を観測データとした場合、観測データが余効すべりの加速過程の情報を含めば、全ての摩擦パラメータが真値から±10%の範囲内で求まることが示された。また、地表面における変位を観測データとして同様の実験を行なった場合も結果はほぼ同様で、実際の GPS データを用いた摩擦パラメータが推定可能であることが示された。</p> <p>この結果を受けて、開発した手法を 2003 年十勝沖地震後の余効すべりに適用した。観測データとして国土地理院により公表されている GPS 解析結果を用いた。また、震源域の摩擦パラメータは、シミュレーションにおいて現実的な地震サイクルが得られる値に固定し、すべり速度の初期値は複数の地震サイクルを経て発生した地震直後の値に固定した。また、初期時刻では定常状態にあるとした。断層面の摩擦パラメータの空間分布を 6 通り仮定し、これらに対して実際の GPS データを同化した。得られた赤池情報量規準 (AIC) の値から最適なモデルを選択し、余効すべり域の摩擦パラメータ分布を推定した。その結果、本震震源域の東と西とで摩擦特性が有意に異なることや、余効すべり域の摩擦特性が有意に速度強化を示すことが示唆された。また、a-b の値は 10^{-3} 程度で先行研究の結果と整合的であり、さらに、新たに L や a の値の推定にも成功した。</p>			

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

プレート境界等の断層面では、高速破壊現象である地震に加え、地震に誘起されて発生する余効すべりや、自発的に発生するスロースリップなど、多様なすべり現象が観測されている。岩石実験結果から導出された「すべり速度と状態に依存する摩擦構成則」に従えば、このようなすべりの多様性は、断層面の摩擦特性の違いによって説明可能であり、この摩擦構成則は地震サイクルを再現するシミュレーションの支配方程式としてよく用いられている。この摩擦特性を表現する摩擦パラメータ (a, b, L) は、岩石実験による測定は行なわれているものの、地震発生領域と同等の空間スケールでの推定は、一部の摩擦パラメータのみの推定や、極端に単純化されたモデルを用いて推定した数例しか行なわれていなかった。

ところで、プレート境界における海溝型地震後に発生する余効すべりは、断層面上を伝播して別の地震を誘発することがあると指摘されている。申請者は、実際の観測データと、現実的な断層モデルおよび摩擦構成則を組み合わせて余効すべり域の摩擦パラメータを推定することの重要性を早くから認識し、大気・海洋分野のデータ同化で用いられているアジョイント法をいち早く地震サイクルのシミュレーションに導入し、その定式化を行った。地震学では観測と理論・シミュレーションの研究が独立に行われてきており、本研究は両者を融合しようとする先駆的な研究として高く評価できる。

申請者は、最初に、摩擦パラメータの推定可能性を検討するために、単純な断層ジオメトリを用いた数値実験を行なった。この実験では、余効すべり域のパラメータが空間的に一様で、かつモデル変数の初期値や地震発生域のパラメータが既知であり、断層面のすべり速度が直接観測可能という仮定をおき、余効すべり域の摩擦パラメータを推定した。この結果、観測データに余効すべりの加速過程が含まれていれば、摩擦パラメータの推定値は全て真値から±10%以内に収束することを示した。また、データとして地表面および海底での変位を用いた場合もほぼ同様の結果を得ている。このように、従来推定が困難とされてきた断層面上の摩擦パラメータを推定する枠組みを構築したことは、今後発展が期待される地震発生予測の研究において、一つの指針を与える貴重な成果である。

上記の結果を踏まえて、申請者は、2003年十勝沖地震後に発生した余効すべり域のパラメータ推定を行なった。ここでは、震源域の摩擦パラメータは現実的な地震再来間隔を与える値に、すべり速度の初期値は複数の地震サイクルを経て発生した地震直後の結果を基に推定し、固定した。また、初期時刻で定常状態を仮定した。これらの仮定の下で、断層面の摩擦パラメータ分布に非一様性を許す6通りの摩擦パラメータ分布を仮定した。これらに対して実際のGPSデータを同化し、得られたAICの値から、本震震源域の東と西とで摩擦特性が有意に異なることを示した。また、余効すべり域の摩擦特性は有意に速度強化を示すことが示され、 $a-b$ が 10^{-3} のオーダーという先行研究の結果と整合的であるだけでなく、新たに L や a の推定を行った。この結果は、プレート境界における地震発生に関する重要な知見として評価できる。

以上述べたように、申請者は現実的なジオメトリを用いた地震サイクルのシミュレーションに対して初めてデータ同化の手法を適用し、プレート境界面の摩擦特性に関する新しい知見を得ることに成功した。よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成26年1月21日に論文内容とそれに関連した口頭試問を行ない、その結果、合格と認めた。

要旨公開可能日： 年 月 日以降