

## 国際地震工学センター

### - 1 特定の領域における高精度破壊核形成過程のモデル化に関する研究

#### High Resolution Numerical Modeling of the Nucleation Process for Great Earthquakes at a Certain Area

(研究期間 平成 10 ~ 14 年度)

国際地震工学センター

芝崎文一郎

International Institute of Seismology and Earthquake Engineering

Bunichiro Shibasaki

Synopsis- We develop a numerical model of the earthquake generation processes from the quasi-static nucleation to high-speed dynamic rupture propagation. This model can include the geometry of the plate boundary, frictional constitutive law, the effect of the dilatancy, and flow laws at the deeper part of the seismogenic zone. By the numerical simulations using this model, we can interpret geodetic observations such as the silent slip event in the Tokai region.

**【研究目的及び経過】** 最近の高精度GPS連続観測により、地殻変動を連続的にモニターすることが可能になってきた。地殻変動データを適切に解釈し、将来の活動を予測するためには、地殻変動データを解釈することを可能にする物理モデルが必要である。他方、最近の地震発生過程の物理に関する理解の飛躍的進展により、地震発生過程のシミュレーションモデルを構築することが可能となってきた。そのような背景から、総プロ「地殻活動連続観測データの総合解析技術の開発」が開始した。本研究では、特に、日本列島周辺の地殻活動総合モデルの一部として、破壊核（先駆すべりが生じる領域）形成から動的破壊伝播に至る過程のモデル化を行った。そして、特定の領域に対して、破壊核形成過程を再現し、最適な地殻変動観測網設計への指針を提供した。また、最近発生したゆっくり地震（スローイベント）の物理機構に対する物理的解釈を提供した。

**【研究内容】** 研究は、二つの項目からなる。

#### (I) 断層摩擦構成則、破壊力学実験データの調査

断層摩擦構成則を規定するパラメーターの温度、法線応力、水、断層物質などに対する依存性に関する研究を調査した。特に、高温熱水下的摩擦構成則の実験的研究を調査し、それに基づき、断層構成則を規定するパラメーターの深さ分布を推定した。また、脆性 - 塑性遷移領域では、流動と摩擦が競合している可能性があるが、どのような定式化で表現されるかについて調査を行った。

さらに、構成則の特性を調べるために、破壊核形成から高速破壊に至る全過程のモデル化を実施し、摩擦構成則が地震発生過程にどのような影響を及ぼすかを、準静的及び動的解析からなる境界要素法により、数値計算を行って調べた。

#### (II) 地殻変形の評価システムの開発

特定の領域における海溝型大地震に関して、破壊核

形成から高速破壊に至る過程を高精度でシミュレーションを行うためのツールを開発した。本ソフトウェアは以下の機能を有する。

(1) 三角要素を使用することで任意プレート境界の形状を取り入れることが可能。

(2) 構成関係は、すべり速度と状態に依存する構成関係とすべりに依存する構成則を用いる。

(3) 境界要素法を用いた準静的、動的解析。

(4) 地殻流体や断層物質の効果を取り入れる。

(5) 地表における地殻変動計算。

まず、任意プレート境界をモデル化するためには、三角要素を用いたモデル化を行う必要がある。このために、任意プレート境界に対する三角要素作成ソフトを開発した。次に、摩擦構成則とテクトニック応力蓄積過程を含む弾性体の平衡方程式もしくは運動方程式を解くソルバーを開発した。準静的破壊核形成過程を解析する場合、力の平衡方程式を解くが、動的破壊伝播を解く場合、運動方程式を解くことになる。

基本モデルは、(1)-(3)からなるが、より現実的な地震発生モデルを行うためには、地殻流体や断層物質の効果を取り入れる必要がある。本研究では、破壊核形成にダイラタンシーと地殻流体圧の減少を伴うシミュレーションモデルを開発した。また、流動と摩擦が共存する構成関係を使ったモデル化も行った。

**【研究結果】**

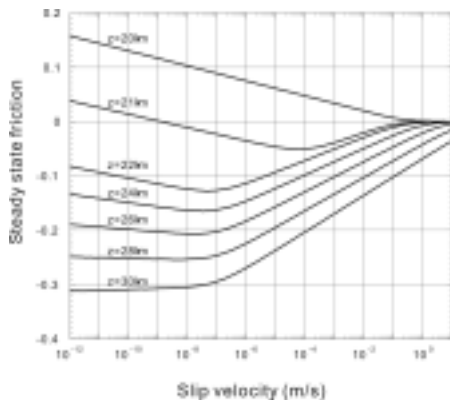
#### (I) 断層摩擦構成則、破壊力学実験データの調査

断層摩擦構成則によりシミュレーション結果が大変異なる。従って、どのような断層摩擦構成則を使用するかが大変重要な鍵となる。本研究では、試行錯誤的なシミュレーションにより、Dieterich-Ruinaの構成則がより地震発生過程を適切にモデル化できることがわかった。この構成則には、直接効果と時間発展効果の二つの効果

が含まれている。それらの効果は、カットオフすべり速度を有し、ある程度以上の高速すべりでは、すべり速度依存性がなくなると考えられる。カットオフすべり速度を適当に設定することで、低速で、すべり速度弱化的、高速で、すべり速度強化的の摩擦特性が再現できる(図1)。この摩擦則の定常摩擦は、安定 - 不安定領域で、低速ですべり速度弱化的、高速ですべり速度強化的の特性を示している。また、摩擦の安定領域から塑性領域における摩擦構成則を検討した結果、流動則と摩擦則が直列で繋がっている構成則でモデル化できることがわかった。このような摩擦構成則により、より現実的な地震発生過程の物理モデル構築が可能となった。

(II) 地殻変形の評価システムの開発  
 主要な研究結果は以下にまとめられる。

図1 遷移領域における摩擦構成則のすべり速度依存性



(1) 南海トラフを想定した破壊核形成過程。すべり依存則と南海トラフの形状を考慮したシミュレーションにより、紀伊半島沖の断層面で応力集中が起こり、破壊が開始しやすいことを示した。

(2) ダイラタンシーを考慮した破壊核形成過程のモデル化。破壊核形成に伴うダイラタンシーにより流体圧が著しく減少し、遅れ破壊が生じ、破壊核のサイズが大きくなることが明らかになった。

(3) 新しい破壊核形成過程のシナリオ。地震発生準備過程は、先ず断層深部における応力蓄積過程、次に、断層深部広域にわたる加速すべり、最後に局在化した破壊核形成過程からなることが明らかになった。

(4) ゆっくり地震の物理機構の解明。最近になって、発生するゆっくり地震のモデル化を行った。ゆっくり地震の発生は、不安定 - 安定遷移領域における応力集中と摩擦の遷移的な性質に起因する。例えば、図1を用いたシミュレーション結果が図2に示されている。断層深部で、地震発生前にゆっくり地震が発生していることがわかる。ゆっくり地震の場合、すべり速度が大きな領域が移動する現象で、破壊核形成過程とは異なっている。

【参考文献】 1) B.Shibasaki, 2002, Nucleation of large earthquakes determined by the seismic-aseismic boundary: agreement between models and observations, Phys. Earth Planet. Int., 134, 129-138.  
 2) B.Shibasaki, and Y. Iio, 2003, On the physical mechanism of silent slip events along the deeper part of the seismogenic zone, Geophys. Res. Lett. In press.

図2 スローイベントのシミュレーション結果。

