

論文審査の結果の要旨

氏名 橋本 千尋

プレート境界では、大地震が繰り返し発生する。このような大地震発生サイクルの物理法則を確立し、その法則の基づいてシミュレーションモデルを構築することは、地球物理学的に大変魅力的で、かつ挑戦的な課題と言えよう。大地震の発生サイクルは、プレートの相対運動に伴うテクトニック応力の蓄積、準静的破壊核の形成、動的破壊の開始・伝播・停止、及びその後のアセノスフェアの粘性緩和と断層強度の回復などの諸過程から成る。これらの諸過程に関する研究は、これまで個別的に、かつそれぞれの時間スケールに対応した形で発展してきた。しかし、これらの過程は孤立系で進行するものではなく、強くカップリングしていると考えられる。したがって、地震発生サイクルの統一モデルを構築するためには、これらの過程を一連のものとして取り扱うことが必要である。本研究は、横ずれ型プレート境界における大地震発生サイクルを、上記の立場から統一的理解するための3次元モデルを構築し、数値シミュレーションを通して、地震発生サイクルの全過程の詳細とそれに伴う断層構成関係の時間的发展様式を明らかにしたものである。

第1章は本論文の緒言にあたる部分である。まず、地震発生サイクルの諸過程の簡潔な説明がなされている。更に、各サイクルに対する研究が個別的に進展しており、それを統一的に取り扱うことの必要性が述べられている。これが本論文の動機づけであり、またこの研究分野における本論文の重要性に他ならない。この章の後半では、過去の地震発生サイクルの研究及びその問題点(限界)が、簡潔に述べられている。これにより、本研究の位置付けが、より鮮明になっている。

第2章では、本論文の基本となる基本的考え、即ち、地震発生サイクルの基本要素(過程)について記述されている。地震発生サイクルは、適切な構造モデル上で定義されたすべり応答関数、断層構成則及び系の駆動力としてのプレート相対運動をカップルさせた方程式系によって完全に記述される。特に本論文では、弾性的リソスフェアとマックスウェル型粘弾性を持つアセノスフェアとからなる2層構造モデルを設定し、プレート境界面のすべりに対する粘弾性応力応答関数を新たに定式化した。実際、アセノスフェアの粘弾性的応力緩和現象はサンアンドレアス断層における測地データから裏付けられており、地震発生サイクルの基本過程としての重要性強調されている。更に、本論文で提出された定式化に基づく理論計算により、上記の測地データの基本的パターンをうまく説明できることが示されており、本論文における粘弾性的応力緩和の取り扱いの妥当性を裏付けている。また、断層構成則として Aochi and Matsu'ura(1999)のすべりと時間に依存する構成則を用い、これらをカップルさせた系に対して駆動力としてのプレート相対運動を与え、横ずれ型プレート境界における大地震の発生サイクルモデルを構築した。

第3章では、地震発生サイクルの各々の過程に対する数学的定式化がなされている。プレー

ト境界におけるすべり運動による粘弾性的応力蓄積に関しては、まず境界面におけるステップ型すべりに関する解をいわゆる対応原理によって求める。任意の時間依存性をもつすべりに関する解は、ステップ型すべりの解を用いた履歴積分の形で表現することができる。尚、プレート境界のすべりは、定常的なプレート運動による部分と、それからのずれに相当する部分（たとえば back slip などの擾乱の部分）に分けて取り扱われている。

一方、プレート境界の断層構成則として Aochi and Matsu'ura(1999)のすべりと時間に依存する構成則を用いた。即ち、断層面の形状変化は、波数領域上において断層面上のすべりと時間に関する微形式として与えられる。前者は運動に伴う磨耗の効果を、後者は時間に伴う固着の効果に対応している。構成則を支配しているのは、これら2つの効果に対応する係数、即ち磨耗レートと固着レートである。この構成則の重要な点は、断層構成関係を規定する最大せん断応力及び臨界印変位量が予め設定されているわけではなく、断層面のすべりに依存しながら変化していくことである。尚、本研究においては、断層表面形状が回復し得る最大値は、ある波数帯においてフラクタル（波数の $2/3$ 乗に逆比例）と仮定している。この章では3つの極限的状态における構成則の振る舞いについて、物理的考察がなされ、本論文で扱った構成則は、従来の研究における構成則を包含した、一般性の高いものであることが示されている。

第4章は、第3章で提出した定式がに基づいて本論文で開発した計算アルゴリズムについて述べられている。このアルゴリズムでは、プレート境界のすべり分布（擾乱部分）を2次元スプライン関数の重ね合わせとして表す。この展開係数（時間の関数でもある）を未知パラメータとする。即ち、このすべり分布から計算されるプレート境界における応力値と、構成則から計算される応力値のマッチングを取る。基本的にこのプロセスは非線形であり、非線形最小二乗法アルゴリズムを適応している。

第5章は、シミュレーション結果についての記述である。まず、横ずれ型プレート境界において長さ60kmの地震発生領域を想定した場合の結果が提出されている。この場合のせん断応力蓄積・解放過程を示すとともに、1地震サイクルにわたる断層強度の変化過程を明らかにした。これによれば、断層強度は大地震の発生とともに一気に低下するが、地震後の断層固着により徐々に強度を回復する過程が再現された。特に、最大せん断強度が地震直後に急速に回復するのに対して、臨界変位量は時間とともに徐々に回復していくことが明らかになった。更に、断層構成関係の時間的変遷は、地震時のすべりによって磨耗した断層面形状が固着によってフラクタル的性質を回復していく過程に対応している。この場合、波長の小さい方から順にフラクタル的構造を回復していく。

次に、大小2つの断層セグメントからなる断層系での地震サイクルのシミュレーションを行った。断層セグメントは強度回復レートの大きい領域、その間のクリープ領域は強度回復レートの小さい領域として表現される。実際の計算では、幅10kmのクリープ領域を挟む長さ30kmと50kmのセグメントからなる複合断層系を仮定した。その結果、プレートの相対運動により各断層セグメントに応力が蓄積し、小さいセグメントの不安定破壊（地震）が発生する。この破壊に伴う弾性的応力変化とそれに引き続く粘弾性的な応力再配分によって大きいセグメント

の応力蓄積過程が加速されて不安定破壊に至る過程が、明らかになった。このシミュレーションで仮定したパラメータでは、両セグメントの破壊発生の時間間隔は2年であった。

第6章は、前章までの結果を踏まえ、これまでの関連する研究成果との対比・議論を進めている。特に、Shibazaki and Matsu'ura(1998)の結果によれば、地震断層のサイズは、臨界変位量によってスケールされており、その定数は 10^{-5} 程度である。本論文のシミュレーションでは仮定した地震断層のサイズと破壊直前の臨界変位との関係とほぼ調和的である。また、本論文では、複数の断層の不安定破壊間の相互作用として、粘弾性的な応力再配分過程が重要な役割を果たしていることがわかった。特に、粘弾性的効果は、不安定破壊発生の時間間隔を決定する重要な要因として注目される。このような断層間相互作用は、トルコの北アナトリア断層や西南日本の南海トラフでしばしば観測されるものである。

第7章は結論であり、本論文の基本的考え方及び結果が簡潔にまとめられている。

尚、本論文の第2-4章までの基本的考え方、定式化及び計算手法の一部は、松浦充宏氏との共同研究であるが、論文提出者が主体となって行った研究である。従って、論文提出者の寄与が十分であると認められる。

以上述べたように、本論文は地震発生サイクルを構成する物理過程を統一的に取り扱い、モデル化するための数学的定式化を行い、かつ実際の計算のアルゴリズムを提出した。この計算手法により、断層面上の構成則の時間発展や、断層間相互作用について興味深い結果を提出した。従って、博士（理学）の学位を授与できると認める。