

結合レイリー振動子系の数値的解析と 地震活動シミュレーターとしての応用

学位論文内容の要旨

本論文は、ばねにつながれたブロックを一定の起動速度で動かそうとするときに、ブロックと起動部との摩擦を連続関数として与えて、ブロックの動きが振動的になるような方程式を与えたレイリー振動子 (Rayleigh, 1894) を複数結合すること(結合レイリー振動子系)により、ブロックの変位の時間変化が地震発生 of 臨界的性質を再現できるモデルパラメーターの値の範囲を数値的に解析して明らかにしたものである。この様な挙動を示すパラメータを用いて、結合レイリー振動子系を地震活動の時系列的再現性を検証するシミュレーターとして応用できることを明らかにした。

結合レイリー振動子系は、地震断層のスティックスリップを再現した現象論的力学モデルである (Maeda and Yokomori, 1999) といえる。この系で重要なパラメーターは、起動速度 a と振動子の非線形性の強さを決める非線形パラメーター ε 、そして隣接する振動子の相対変位に比例する弾性係数 κ と相対速度に比例する粘性係数 η の 4 つである。4 つのパラメーターの値を系統的に変えて数値計算することにより、ブロックの運動にカオス的な挙動、特に地震活動のような臨界的な挙動が現れる条件を明らかにした。その結果、結合レイリー振動子系の挙動は、レイリー振動子の起動速度 a と非線形パラメーター ε の値によって主に制御されるが、基本的には 1 個のレイリー振動子の挙動で説明できることが分かった。多数の数値計算により、結合レイリー振動子系の挙動の変化をパラメーター a 、 ε の相図によって示すことができ、臨界的挙動の起こりうる範囲を明確にした。結合レイリー振動子系のカオス的な挙動が現れるパラメーターの領域では、レイリー振動子にカナル現象と呼ばれるリミットサイクルの変形が起こっており、外力に対して不安定な状態になっていることが明らかになった。特に、地震活動のような臨界的な挙動が現れるようなパラメーター領域では、リミットサイクルが急激な縮退をし、最も外力に対し敏感な状態であった。物理的に言えば、カナル現象はスティックスリップ状態から定常すべり状態へと相転移する過程で起こる現象であり、摩擦状態の相転移点近傍で系が臨界性を示すことが分かった。

次に、地震活動の統計的な性質を再現するパラメーターの値のある範囲において、時系列的な再現性を調べた。まず、モデルから作られたイベントデータのマグニチュードと時間のスケールを、現実の震源データの b 値と平均発生率を用いて現実のスケールに揃える。次に現実のデータとスケール変換後のモデルデータからエネルギー解放積算値の時系列を作り、現実の時系列と同じ長さの時系列をモデルのデータからサンプリングして相関を取り、サンプリングす

る部分を少しずつ更新して現実の時系列と相関の高いサンプルを探す。相関の高さは、相関係数と二つの時系列データの回帰曲線の傾きの比率の積によって定義される相関指数によって評価した。このようにしてモデルの中から現実と近似した時系列のパターンを探し出し、得られた相関指数の高さや、相関を取った後の再現性を見ることで、モデルの時系列的再現性を評価する。時系列的再現性の高いモデルを構築することができれば、新たな地震活動の予測モデルとして活用することができる。モデルの再帰性を定量的に調べることで、時系列的再現性の評価に必要なモデルデータの量を求めた。モデルデータから 10,000step の長さの任意のサンプルを 1000 個用意して、上記の手法と同様に元のモデルデータと相関を取り、得られた最高相関指数の確率分布を示した。その結果、1G step 計算したモデルデータでは、0.990 以上の相関指数が 92.5% の割合で得られることが分かり、本研究ではこの相関指数の値を時系列的再現性の評価において期待する精度と考え、必要なモデルデータの量を 1G step 以上とした。

これを踏まえて、1G step 以上計算したモデルデータを用いて、地震活動の時系列的再現を北海道の太平洋プレート沈み込み帯を二つの領域に分けて行った。1994 年 1 月 1 日から 2002 年 12 月 31 日までの時系列の相関を取り、2003 年の十勝沖地震及び 2004 年の釧路沖地震の予測を試みた。どちらの領域でも、モデルデータから高い相関の時系列が見つかるが、相関を取った期間の後の挙動には大きなばらつきがあり、現実の地震活動を決定論的に予測できるものではないことを示している。このモデルは大きなイベントに特徴的なスケールが存在せず、固有地震のような特徴的なスケールが現れるような現象に適用するには、適当なモデルではなかった可能性がある。しかし、相関を取ることで、その後の期間の大きなイベントの発生確率は上がっており、確率論的な予測ができる可能性があることも分かった。モデル方程式の明確さから準周期性の見られる現象のシミュレーターとしての応用の可能性はありうることを示すことができた。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 笠 原 稔
副 査 教 授 池 田 隆 司
副 査 准教授 谷 岡 勇市郎

学 位 論 文 題 名

結合レイリー振動子系の数値的解析と 地震活動シミュレーターとしての応用

本研究は、ばねにつながれたブロックを一定の起動速度で動かそうとするときに、ブロックと起動部との摩擦を連続関数として与えて、ブロックの動きが振動的になるような方程式を与えたレイリー振動子 (Rayleigh, 1894) を基本として、複数結合すること (結合レイリー振動子系) により、ブロックの変位の時間変化が地震発生の臨界的性質を再現できるモデルであることを検証したものである。モデルパラメーターの値の範囲を数値的に解析して、臨界的性質の出現する範囲明らかにしたものである。その結果、結合レイリー振動子系は、地震断層のスティックスリップを再現した現象論的力学モデルであるといえる点に着目して、地震活動の時系列的再現性を検証するシミュレーターとして応用できることを明らかにした。

この系で重要なパラメーターは、起動速度 a と振動子の非線形性の強さを決める非線形パラメーター ε 、そして隣接するブロックの相互作用を決める、隣接するブロックの相対変位に比例する弾性係数 κ と相対速度に比例する粘性係数 η の 4 つである。4 つのパラメーターの値を系統的に変えて数値計算することにより、ブロックの運動にカオス的な挙動、特に地震活動のような臨界的な挙動が現れる条件を明らかにした。その結果、結合レイリー振動子系の挙動は、レイリー振動子の起動速度 a と非線形パラメーター ε の値によって主に制御されるが、基本的には 1 個のレイリー振動子の挙動で説明できることが分かった。多数の数値計算により、結合レイリー振動子系の挙動の変化をパラメーター a , ε の相図によって示すことができ、臨界的挙動の起こりうる範囲を明確にした。

モデルから作られたイベントデータのマグニチュードと時間のスケールを、現実の震源データの b 値とイベントの発生時間間隔から決まる平均発生率を用いて現実のスケールに揃えることで、地震活動の時系列をシミュレートできることを示した。次に、モデルデータから 10,000step の長さの任意のサンプルを 1000 個用意して、すべてのモデルデータとの相関を取り、時系列的再現性が得られる計算ステップを検討した。その結果、1G step 計算したモデルデータでは、0.990 以上の相関指数が 92.5% の割合で得ら

れることが分かり、この長さを時系列的再現性が保証される目安とすることができる。

これを踏まえて、1G step 以上計算したモデルデータを用いて、地震活動の時系列的再現性を、北海道の太平洋プレート沈み込み帯の二つの領域について検討した。1994年1月1日から2002年12月31日までの現実の時系列とモデルデータとの相関を取り、相関指数0.990以上のモデルデータを探し出し、その後の時系列から、2003年の十勝沖地震及び2004年の釧路沖地震の予測を試みた。どちらの領域でも、モデルデータから高い相関の時系列が見つかるが、相関を取った期間の後の挙動には大きなばらつきがあり、現実の地震活動を決定論的に予測できるものではないことを示している。このモデルは大きなイベントに特徴的なスケールが存在せず、固有地震のような特徴的なスケールが現れるような現象に適用するには、適当なモデルではなかった可能性がある。しかし、相関を取ることで、その後の期間の大きなイベントの発生確率は上がっており、確率論的な予測ができる可能性があることも分かった。モデル方程式の明確さから臨界的性質を示しながら準周期性の見られる現象のシミュレーターとしての応用の可能性はありうることを示すことができた。

これを要するに、著者は、地震シミュレーターとして、結合レイリー振動子系の適用できるパラメーターの範囲を決定し、実際の地震活動との比較の方法を確立し、その応用範囲についての評価を確立できた。地震活動シミュレーターのひとつの方法を新たに提案できたことは、今後の地震活動予測手法の発展に貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士（理学）の学位を授与される資格あるものと認める。