

平成 22 年 6 月 10 日現在

研究種目：若手研究（スタートアップ）

研究期間：2008～2009

課題番号：20840048

研究課題名（和文） 室内実験を用いたデータ同化手法の開発-地震発生予測を目指して-

研究課題名（英文） Development of data assimilation method using laboratory experiments toward earthquake prediction

研究代表者

安藤 亮輔（ANDO RYOSUKE）

独立行政法人産業技術総合研究所・活断層・地震研究センター・研究員

研究者番号：10455256

研究成果の概要（和文）：

本研究では、物理モデルを用いた地震発生の予測を目指して、室内実験系での模擬地震を用いて、データ同化手法を開発している。データ同化とは、断層の固着滑りを表現する物理モデルを構築し、観測データによりモデルの未知パラメタを推定し、将来予測をするといった手法である。そのために、本研究期間内においては、実験装置の立ち上げとデータ取得、物理モデルのシミュレーションのための数値計算コードの開発を行った。また、そのシミュレーションコードを用いて実際の地震のモデル化を行った。

研究成果の概要（英文）：

Toward the prediction of earthquake generation, we are developing data assimilation systems in terms of laboratory analog earthquakes. The data assimilation is a method to estimate model parameters of a mechanical model describing earthquake generation processes by using observational data. The future of the system is forecasted based on this model. During the funded two years, we developed laboratory apparatus to obtain targeted data and numerical simulation codes to calculate the behavior of the mechanical model. We also modeled actual earthquake phenomena using the developed simulation codes.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,320,000	396,000	1,716,000
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,520,000	756,000	3,276,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：地震現象，地震災害・予測，テクトニクス

1. 研究開始当初の背景

データ同化とは、天気予報で実用化されて

いるように、ある現象を物理学的に表現する力学モデルを構築し、このモデルの初期条件

やモデルパラメタを、時々刻々得られる観測データから推定し、さらに将来予測を行う手法である。従来岩石等の摩擦実験では、自然地震の発生とその繰り返しに似た固着と滑りが繰り返す現象が観察されている。また、地震破壊の物理過程を考慮して、物理法則に基づいてモデル化し、シミュレーションを行うことによって、地震発生現象を理解しようという研究も広く行われている。しかし、観測データと力学モデルに基づいて地震発生を予測するような研究は、地震予知研究における重要性が指摘され（地震及び火山噴火予知のための観測研究計画の推進について（建議），2008）ながら、国内外問わずまだごく初歩的段階にある。そこで本研究では、新しい発想で、室内実験と力学モデル、データ同化の手法を組み合わせることで、これまでにない地震発生予測を目指した手法開発を行う。

室内岩石実験は、地震現象理解の有力な手段であり、さまざまな実験条件・装置構成で行われており長い歴史がある（Scholz, 2002）が、本研究の目的のためには、地震の繰り返し、つまり多数回の固着滑り（岩石中への応力の蓄積と断層面での滑りによる解消）を再現することが最重要課題である。このような実験はすでに多く行われている。中でも、Yoshida & Kato (2001)では、断層面周辺に多数設置した歪み計により、詳細な測定がなされている（図1）。ここで用いられた装置は、東京大学地震研究所に設置されており、本研究ではこれを再起動させて用いる。また、より単純で高精度の制御の可能な実験システムとして、回転剪断実験装置がある。これは、二つの試料を接触させて回転させることで、同様の固着滑り現象を発生させられる。本装置も地震研究所にて運用されており、共同研究者の協力の得て使用する。

地震も含めて、岩石の固着滑り・破壊現象は、弾性体の応答と滑り面（断層面）上の境界条件である摩擦構成則により、力学的に記述できることが分かっている（大中・松浦，2002）。弾性応答は、近年の数値計算技術の発展により様々な手法が存在し、本研究に用いるのに十分な技術開発がされている。我々は、境界要素法の開発を行っている（Ando et al., 2007）。それに対し、摩擦構成則は、1970年代から主に室内実験を用いて多数の研究があるが、確定的定式化はない。しかし、地震発生深さの一般的な岩石では、摩擦力が、滑り量と負の相関（滑り弱化）があり、かつ接触時間と正の相関（強度回復）があるという特徴は、共通して定式化されている（例えばRate & State依存則として、Dietrich, 1979, 1981; Luina, 1983, 滑り依存則としてAochi & Matsuura, 2002; Ohnaka, 2003）。他方で、系の大局的振る舞いは、摩擦則の詳細

に依らず、摩擦特性を表す基本的な巨視的パラメタ群（応力降下量、破壊エネルギー等）によって再現できることが、理論的に分かっている（例えばTse and Rice, 1986）。本研究では、この特徴を利用して力学モデルの支配方程式を定式化し、地震現象に適したデータ同化手法を構築する。

データ同化は、気象・海洋の分野ではすでに実用化されている。データ同化の導入によってシミュレーションの初期条件・境界条件や数値モデルに含まれるパラメタを実際の観測に基づいて適切なものに修正することで、天気予報が可能になっている（露木，1997）。しかし、地震発生関連の分野では観測問題、支配方程式の未確立のため、Johanson et al. (2006)などに若干ある他は、ほとんど研究例がない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、地震現象の理解と予測への適用を目指して、基礎的なデータ同化手法の開発と実証実験を行うことである。本研究では、実際の地震現象（固着・滑りおよび破壊）を模擬した、実験室系を用いて実証的に研究する。実際の地震現象にデータ同化を適用するには、地表での観測値を地下深部に存在する断層面の状態に変換する必要があると同時に、非線形性の高い断層面での物理過程を理解しモデル化（支配方程式を確立）する必要がある。前者については、様々な逆解析技術の開発や高密度高精度の観測網の整備として、固有の研究開発が求められる。本研究では、もう一つの柱である後者に焦点を絞り、地震破壊現象を物理的に記述する適切な力学モデルの構築と、それを効率的にデータと同化させる手法の開発を行う。室内実験では、固着滑りの生じる断層面（試料の接合面）近傍で、変形をモニターすることで、断層面での固着滑りを精度良く評価できる。また、実験条件を目的に応じて調整でき、さらに、断層面の摩擦特性を独立して測定できる利点もある。地震は、気象と比較しても支配方程式に未知の部分が多く、データ同化手法はほとんど確立されていない。このような研究対象に対して、本研究では、系の制御と測定が比較的容易な実験室系をアナログとして用いることで、実際の地震現象に対する本手法適用への筋道をつける。

3. 研究の方法

本研究では、(1) (模擬)地震に適したデータ同化のための力学モデルの構築、(2)室内実験によるデータの取得、(3)逐次的データ同化システムの開発とデータ同化システムの実証実験を行っている。(1)の力学モデルについては、我々が実際の地震のモデル化を含めた理論研究ために開発する計算

コードを拡張使用し、(2)の室内実験に関しては当該装置の運用者と共同した。このことで研究資源の共通化を図り、効率的な研究実施体制を整えた。

データ同化の概念と手法を簡単に説明する。本研究では、状態空間モデルと呼ばれる手法を適用し、室内実験で得られるデータの時空間同化アルゴリズムを構築する。状態空間モデルでは、観測可能量(観測ベクトル)から、直接観測できないが系の状態を記述する興味のある量(状態ベクトル)を逐次的に推定する。具体的に観測ベクトルとは、岩石表面に設置したゲージで観測される歪みであり、状態ベクトルとは、岩石の接触面全域での応力や滑りである(図2と3参照)。つまり、システムモデル(系を数値的に表現した力学モデル)を用いた状態ベクトルの時間発展の更新(予測と呼ぶ)と、観測モデルを通じた観測データによる状態ベクトルの修正(フィルタリング、平滑化と呼ぶ)を繰り返すことで、状態ベクトルの初期値からの発展を逐次推定する。そのようにデータ同化された状態ベクトルを用いて、将来のシステムの状態を予測する(中村他、2005)。

4. 研究成果

本研究実施期間においては、時間的な制約の下、(1)力学モデルのシミュレーションを行うための数値計算コードの開発、および(2)実験装置の立ち上げとデータ取得に注力した。以下において、それぞれについて現在までに上がっている成果を示す。

(1)シミュレーションコードの開発

シミュレーションコードの開発については、境界積分方程式法を用いた手法を完成させた。本研究が対象とするのは、岩石の固着滑り現象であるが、大きく分けて、固着時と破壊の初期過程を記述する慣性項を無視した準静的過程と、滑り時を記述する動的過程があり、それぞれ支配方程式が異なるが、従来準静的枠組みで固着滑りのサイクルを扱うことが多かった。本研究では、それぞれの過程を統一的に扱うことを可能とする、シミュレーションコードを開発した。また、通常、境界積分方程式法は、無限媒質を扱うがここでは有限媒質を扱えるように手法を改良した。このような計算手法の導入は、地震のモデル研究では、世界的にみても先進的のものであり、筆者はこの計算コードを用いて、2008年岩手・宮城内陸地震のモデル化と、近年注目を浴びている非火山性深部低周波地震/微動のモデル化をそれぞれ行った。これらの研究成果は、それぞれ国内外で学会発表するとともに英文誌上で速やかに公表した。

(2)実験装置立ち上げとデータ取得

大型実験装置を用いた固着滑り実験については、図2、図3に示したように、装置の

立ち上げを完了させ、歪みの時間変化をデジタル収録できるように設定した。ただし、現状では数点の記録にのみ固着滑りが観察されるが、当初期待したような接触面全面での優位な歪み変化のデータを得るに至っていない。これは、試料作成上の課題であると考えられるため、現在改良を行っているところである。

一方、大型剪断実験装置を補完するため、より制御の容易な回転剪断実験装置(図4)を用いてデータを取得した。この回転剪断試験器では、自由度は回転軸の1のみであるため、データ同化に用いる力学モデルも、1自由度の古典的なバネスライダモデルを適用できる。その単純さのため、データ同化手法開発の初期段階に扱う問題として適しているという利点がある。なお、データ同化の問題として適当なのは、パラメタ推定の極めて容易な完全に周期的であるような変化ではなく、ある程度のバラツキをもった変化である。そこで接触面の状態に揺らぎを与えるため、ここでは回転板と固定台との間にガラスビーズの層を挟み込んで実験を行った。この実験装置で得られた結果の一部を国内外の学会で発表した。

回転剪断実験装置で取得した回転板の回転角とトルクの時系列データの一例を図4と5に示す。地震現象との対応では回転角は滑り量に、トルクは力にそれぞれ焼き直すことが出来る。両図で示されたように、固着時の力の増加と滑り時の力の解放が見て取れる。さらに、期待したとおり、ある程度のバラツキを持った周期的変化が得られた。また、滑りの直前には降伏と呼ばれる徐々に力が低下する過程も見られ、データ同化の問題として使用可能であることが確認できた。

データ同化に用いる力学モデルに必要な特性を把握するために、予備的なデータ解析を行い、その周期性の特徴を調べた。図6に、固着滑り周期の変化の時間的相関を表す散布図を示す。ここでは、あるステップとその次のステップで前後の周期の時間変化の間に負の相関が認められる。これは、周期の揺らぎを押さえようとする機構が働いていることを示しており、この系を表現するための力学モデルには、周期を規定する応力降下量が時間的にはほとんど変化しないというような条件が必要であることを示している。ここで得られた知見は、仮定する力学モデルの優劣を評価する上で重要である。

今後、まず1自由度系で、データ同化システムを完成させる。さらに、大型剪断実験装置で得られる多自由度系に対しての、同化システムを構築していく。

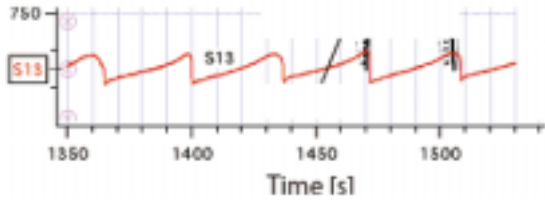


図 1．固着滑り実験による歪みの時間変化．固着状態における歪みの単調増加，滑りイベント発生に伴う急激な減少，その直前の前駆的なゆっくり滑りの，繰り返しが観察される．Yoshida&Kato (2001)を改変



図 2．大型剪断実験装置の全景．画面奥の油圧ピストンから画面手前の岩石試料に載荷される．



図 3．大型剪断実験装置の岩石試料部分の拡大図．岩石試料は三つのブロックからなり，画面上で横方向に二つの接触面が存在する．そのうち，奥の面は，岩石どうしの接触面であり固着滑りを発生させる．この面の周辺に 20 チャンネルの歪み計を設置して，固着滑りの繰り返しに伴う歪みの時系列記録を取得した．手前側の面は剪断強度の低いテフロンシートを挟むことで，固着滑りを発生させ

ない．試料のうち，中間の大きなブロックを左から等速で押し接触面に剪断応力を生じさせる．同時に試料を画面奥方向から圧縮することで接触面に法線応力を与える．



図 4．回転剪断実験装置の全景．画面中央部の赤丸で示した回転円盤とその下部に固定した試料とを接触させ，円盤上部に伸びる軸に上方から回転運動を加えることで試料に力が加わる．この力が試料の剪断強度を超えると滑りが生じるが，一定速度での載荷を続けることで固着滑りの繰り返しが観察される．

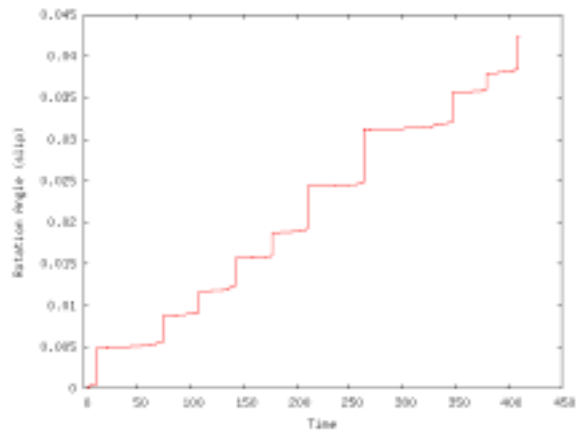


図 4．回転剪断試験で得られた回転板の回転角度の時間変化．階段状の変化は，固着滑りの結果であり，回転部分にはほとんど動かず，滑り時にステップ状の運動を生じる．

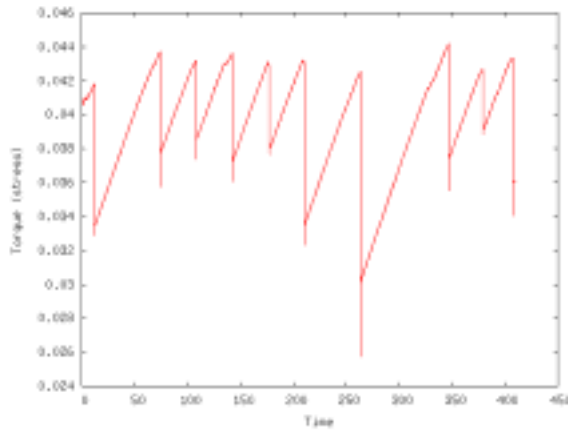


図5．回転試験器で得られた試料に加えられた力の時間変化．

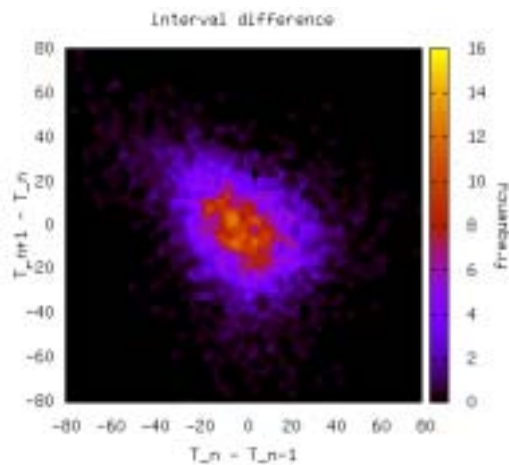


図6．回転実験装置で得られた固着滑りの周期 T の時間変化の相関．縦軸と横軸は、それぞれ $n+1$ 回目と n 回目の周期の差 $T_{n+1}-T_n$ と n 回目と $n-1$ 回目の周期の差 T_n-T_{n-1} ，カラーコンターはその出現頻度である．もし、周期に時間変化が無い場合は、原点に集中した分布を示すが、ここでは右下がりの負の相関が見られる．これは、固着滑り周期に大きな変化が生じたら次のステップではそれを戻す（安定化させる）方向に変化が生じることを示している．

5．主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕(計2件)

Ando R., R. Nakata and T. Hori, A slip pulse model with fault heterogeneity for low-frequency earthquakes and tremor along plate interfaces, *Geophys. Res. Lett.*, 査読有り, VOL. 37, 2010, L10310,

doi:10.1029/2010GL043056.

Ando, R. and S. Okuyama, Deep roots of inland active faults and mechanics of earthquakes illuminated by volcanism, *Geophys. Res. Lett.*, 査読有り, VOL. 37, 2010, L10308, doi:10.1029/2010GL042956.

〔学会発表〕(計10件)

Kuwano, O., R. Ando and K. Hatano, Transition from velocity weakening to strong velocity strengthening friction in dense granular shear experiments, American Geophysical Union Fall Meeting, 2009/12/18, San Francisco.

Ando, R., R. Nakata and T. Hori, A Dynamic Model of Deep Low-frequency Earthquakes, American Geophysical Union Fall Meeting, 2009/12/14, San Francisco.

Ando, R., Lower crustal roots of active faults illuminated by volcanoes, French-Japanese Workshop on Earthquake Source, 2009/10/29, Paris, France.

桑野修, 安藤亮輔, 波多野恭宏, 粉体層の高速摩擦実験, 日本地球惑星科学連合, 2009年10月21日, 京都市.

安藤亮輔, 中田令子, 堀高峰, 深部低周波地震の発生過程に関する理論的考察, 日本地震学会大会, 2009年10月20日, 京都市.

Ando, R. and S. Okuyama, Frictional heterogeneity due to geothermal anomaly near volcanoes: Physical modeling for the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku, Japan, earthquake, American Geophysical Union Fall Meeting, 2008/12/19, San Francisco, USA.

Ando, R. and S. Okuyama, Physical model of the Iwate-Miyagi Nairiku, Japan, earthquake: Frictional heterogeneity due to geothermal anomaly, General Assembly of Asian Seismological Commission, 2008/11/25, Tsukuba, Japan.

Ando, R. and S. Okuyama, Physical source modeling for the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku, Japan, Earthquake: The effects of frictional heterogeneity due to geothermal anomaly near volcanoes, 7th U.S. Japan Natural Resource Panel, 2008/10/29, Seattle, USA.

桑野修, 安藤亮輔, 波多野恭宏, 粉体層の高速摩擦実験, 日本地球惑星科学連合, 2009年5月18日, 千葉市.

安藤亮輔, 奥山哲, 火山に照らされた内陸活断層の根元, 日本地球惑星科学連合, 2009年5月17日, 千葉市.

〔その他〕
ホームページ等
<http://staff.aist.go.jp/ryo-ando/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

安藤 亮輔 (ANDO RYOSUKE)
独立行政法人産業技術総合研究所・活断
層・地震研究センター・研究員
研究者番号：10455256

(2) 研究分担者

無し ()

研究者番号：

(3) 連携研究者

無し ()

研究者番号：