

(1) 実施機関名：

東京大学地震研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

予測シミュレーションモデル高度化のための手法開発

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象予測のための観測研究の推進

(2) 地震・火山現象に関する予測システムの構築

(2-1) 地震発生予測システム

イ．地殻活動予測シミュレーションの高度化

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象予測のための観測研究の推進

(2) 地震・火山現象に関する予測システムの構築

(2-1) 地震発生予測システム

ア．地殻活動予測シミュレーションとデータ同化

2. 地震・火山現象解明のための観測研究の推進

(3) 地震発生先行・破壊過程と火山噴火過程

(3-1) 地震発生先行過程

ア．観測データによる先行現象の評価

イ．先行現象の発生機構の解明

(4) 地震発生・火山噴火素過程

ア．岩石の変形・破壊の物理的・化学的素過程

ウ．摩擦・破壊現象の規模依存性

(5) 本課題の 5 か年の到達目標：

これまで地殻活動予測シミュレーションモデル構築のための研究が進められてきた．現在のモデルはかなり単純なものであるが，将来へ向けての第一段階のモデルと位置付けられる．本研究ではより現実的なモデル構築を目指して，現在考慮されていない破壊/変形の物理過程のモデリング研究，それらをモデルに組み込むために必要となる数値計算法開発の研究を進める．間隙流体/摩擦熱の効果に関する研究においては，間隙流体や摩擦熱の効果を検討に入れることにより，ゆっくりとした流体移動と高速な断層滑りまでの一見多様に見える動的な地震破壊を包括的に理解するモデリング研究を行う．また，間隙流体/摩擦熱の効果による有効法線応力変化を考慮して，単純化したシステムを用いて地震発生サイクルのシミュレーションを行い，再来間隔などの長期的な影響の評価を行う．間隙流体を含む多孔質弾性媒質中における余効変動シミュレーションにおいては，物理的/地学的にもっともらしい境界条件を考慮に入れた余効変動シミュレーションの改良を行う．摩擦構成則の研究においては，地

震発生環境を模した高温室内実験において見いだされた断層摩擦における特徴的滑り弱化距離 d_c が大きくなる強度回復過程を対象とし、 d_c が大きくなる強度回復過程の物理/化学機構のモデリング（支配方程式の導出）を行う。破壊現象の時空統計性に関するシミュレーション研究においては、破壊現象まで扱える粘弾性体の離散モデルを用いて、地震の時空相関の統計性及び変形集中の動的過程を明らかにする。並行して、地質学的不均一構造をモデル化し、プレート駆動によって発生する応力場の 3 次元空間構造、及び地震発生の時空統計性を明らかにすることを目指す。不均質媒質中の破壊伝播/地震発生サイクルシミュレーションにおいては、不均質媒質中の地震破壊伝播計算手法の開発を行い、不均質構造の断層破壊への力学的効果の解明を目指す。弾性/粘弾性不均質構造を考慮したシミュレーション研究においては、特に西南日本についてトモグラフィーにより得られた地殻・上部マントル構造の 3 次元地震波速度構造、モホ面、プレート境界面の形状のコンパイルを行い、それをモデル化した FEM シミュレーションを行い不均質媒質の影響評価を目指す。

（ 6 ）本課題の 5 か年計画の概要：

平成 21 年度においては、従来の地殻活動予測シミュレーションでは考慮されていない物理過程、及び、それらをモデルに組み込むために必要となる数値計算手法について現在の状況/問題点を整理し、今後 5 年間の研究で目指す方向性を検討する。これにより重点的に行うシミュレーションモデル高度化の局面について明確に意識するとともに、各研究において物理過程のモデリング、計算手法コードの開発をすすめる。

平成 22 年度においては、開発中の数値計算手法の有効性の検証、予備的なシミュレーションを行い、それぞれの研究で取り扱うことのできる物理過程とその条件範囲を確認する。

平成 23 年度においては、各研究を継続し、発展させる。

平成 24 年度においては、各研究において、シミュレーションコードのプロトタイプを用いてモデルシミュレーションを行う。これより、モデル化要素のシミュレーション結果への影響について予備的な評価をまとめる。

平成 25 年度においては、シミュレーションコードに更なる改良を加えて追加のシミュレーションを行い、結果の整理をおこなう。また、モデル研究で得られた知見を、予測シミュレーションモデル高度化のためにどのようにフィードバックするかについて検討を行う。

（ 7 ）計画期間中（平成 21 年度～25 年度）の成果の概要：

1) 間隙流体を考慮したシミュレーション研究

(1-1) 間隙流体圧変動が支配する地震サイクルシミュレーション

RSF に従う摩擦係数の変動に加えて間隙流体圧変動が地震サイクルに及ぼす影響を簡単な 1 次元モデルで考察した。地震時には、摩擦発熱による間隙流体圧上昇（TP: Thermal Pressurization）により有効法線応力が減少し、摩擦力低下が生じる。断層帯における滑り幅と断層帯での透水係数構造に依存するが、RSF 単独の場合に比べて極端な速度弱化を引き起こし、大滑りおよび大きな応力降下、および地震サイクル間隔の長期化と言った現象を引き起こす。また、地震間には、断層帯内の間隙内では圧力溶解等の化学変化による沈殿物の生成により間隙体積が減少（pore compaction）し、流体圧が上昇する。また、岩石中に応力がかかると滑り速度に依存して間隙が発達し（ダイラタンス）間隙体積が増大し間隙流体圧が下がることも考えられる。将来的にはこれらの影響を地震サイクルシミュレーションの際に考慮に入れる必要性を示した。次に、2 次元モデルを用いて 2011 年東北地方太平洋沖地震における、海溝近傍の特大滑りが、TP により生じた可能性を示した。津波堆積物からはこの地震サイクルの繰り返し間隔は数百年と言われている。Kato and Yoshida(2011) は、大きな滑りを生じた浅部領域に、大きな有効法線応力と特徴的滑り距離（ L ）を持つ強い固着域（強パッチ）を置き、深部の宮城沖地震に対応するアスペリティを二つ配置して、観測された地震サイクルの特徴を再現することに成功している。しかしながら、Mitsui et al.(2012) は、この浅部の強パッチの代わりに、TP 領域を組み込み（図 1）地震時における摩擦力の低下により大きい地震時滑りを生じさせ、数百年という長い繰

り返し間隔を持つ超巨大地震発生サイクルの再現に成功した(図2)。

(1-2) 実験室の動的弱化摩擦則を考慮した超巨大地震の3次元準動的発生サイクルモデル

断層物質の摩擦実験では、高速で摩擦強度が著しく低下することが確認されている。本研究では、高速での摩擦強度の低下を考慮するために、二つの状態変数を有する滑り速度・状態依存則や Thermal Pressurization(TP)を組み込んだ東北地方太平洋沖地震の3次元準動的発生サイクルモデルを構築した。図にTPを組み込んだ東北地方太平洋沖地震の3次元準動的発生サイクルシミュレーションの結果を示す。浅部のアスペリティで、高速でTPが有効に働くことで、M9クラスの地震が発生する(図3)。余効滑りは、地震時滑りと相補的な分布を示す。さらに、平成25年度は本モデルを千島海溝南部に適用することで、M8クラスの地震とM8.8の超巨大地震の再現を行った。

(1-3) 断層流体の流れを考慮した微動と同期したスロースリップのモデリング研究

一見、多様に見える地震破壊の包括的理解を目指し、摩擦発熱、ダイラタンシー硬化および流体圧変化の効果を数理的・数値的に解析した。数理的には、1次元モデルに基づき、系の振る舞いの多様性の発現が少数の無次元パラメタに支配されることを見出した。具体的には、ダイラタンシー硬化の摩擦発熱に対する相対的卓越度を表すパラメタ S_u と、流体拡散率の摩擦発熱率に対する相対的卓越度を表すパラメタ S_u' の違いとして、通常地震とスロー地震の違いが理解できた。また、これにより、ダイラタンシー硬化の重要性が確認できた。上記の1次元モデルを、2次元モデルに拡張し数値計算を実行することにより、1次元モデルで得られた結果が2次元でも概ね成り立つことが確認できた。さらに、これら二つの無次元数の違いとして、滑り弱化と滑り強化、クラック型滑りとパルス型滑りの違いも包括的にモデル化できた。また、H25年度はスロースリップイベントと同期し、逆方向に伝播する微動についても、上記モデルで基本機構の説明が可能であることがわかった。なお、このモデルでは、流体拡散による小規模の滑りの励起が微動を発生させる。

2) 媒質の不均質性を考慮したシミュレーション研究

(2-1) 不均質粘弾性媒質中での地震サイクルモデル

これまで、地震サイクルシミュレーションは均質半無限弾性体を仮定して行われてきたが、不均質媒質および粘弾性の影響を調べる基礎的な研究として、3次元不均質構造モデル構築に向けて、コンラッド面、モホ面、プレート形状データのコンパイルを行なった。H25年度は、商用FEMソフトウェアABAQUSを用いて、東北地方をモデル化して、2次元不均質粘弾性モデルを構築して、予備的な準静的地震サイクルシミュレーションを行なった。図4はFEメッシュモデルで、プレート境界での滑り弱化域(深さ5-45km)では1kmのメッシュサイズとした。上部地殻(1)と太平洋スラブ(7)は弾性体で、他の領域にはマクスウェル粘弾性に近い三要素固体物性を与えている。プレート中心を固定し、重力を作用させ、定常状態を得た後、プレート中心部(白矢印)に9cm/年の変位速度を与える。プレート境界はRFSに従う摩擦力が働くとしている。図5は各深さでの累積滑りを示したものであるが、滑りが安定していない。粘弾性による媒質の安定化過程の可能性はあるが、今後更に検討が必要である。

(2-2) 層構造媒質中での動的破壊計算法の開発

断層極近傍で観測された媒質境界破壊を取り扱う動的破壊解析の定式化を行い、解析に必要となる応力核関数をモードIII型の動的亀裂に対して導出した。

3) 破壊現象の時空統計性に関するシミュレーション研究

地震活動のアナログモデルとしてのバネブロックモデル、セルオートマトンモデル、離散粒子系などの研究を行っている統計物理分野の研究を固体地球科学分野との学際的研究として実らせる努力がなされた。典型的なアナログ実験の一つとして、ゲル材料を用いた滑り摩擦実験を挙げる。これはプレート境界で発生する地震サイクルを模擬するもので、 b 値と媒質のレオロジー・滑り速度との関係などを通して、複雑なスティック-スリップサイクルを特徴づけた(Yamaguchi et al., 2001)。他方、上部地殻のアナログとしての離散粒子系に関する実験的研究においても大きな進展を得た。平成25年度は、粉体層に固体塊を陥入させた際の応答をアコースティックエミッション信号として取得し(図6)、そのイベントサイズ分布を詳細に調べた。実験より得られたサイズ分布は、GR則に類似したべき分布となり

(図 7)、実験においてはベキ指数と構成粒子サイズとの関係を明らかにすることができた (Matsuyama and Katsuragi, 2014)。サイズ分布は変形・破壊の様式と関係があり、その変化の傾向は同様の先行研究の結果とも整合的であった。また、統計物理分野の研究者と固体地球科学研究者の共著論文として、両分野に共通する問題を整理して俯瞰するレビュー論文を IF50 程度の著名ジャーナルに出版できたことも特筆に値する (Kawamura et al., 2012)。

Gutenberg-Richter 則や大森・宇津則のパラメータの揺らぎは地震活動を特徴づける重要な指標と見なされ、少なからぬ興味を持って研究されてきた。ごく近年になって、「b 値と c 値が地震のメカニズム解に有意に依存する」という研究が現れている。この結果をもって「b 値と c 値は地震発生場における差応力が大きいと減少する」という興味深い仮説が提唱されている。しかし断層にかかる応力の測定は事実上不可能であり、この仮説を直接検証するすべはない。したがって研究者にできる唯一の仕事は、何らかのモデル(実験・数値問わず)を用いてその仮説を検証し、背後にあるメカニズムを解明することである。そこで、一定速度での変形を受ける内陸地殻を模擬した離散要素モデルに注目し、モデルにおける「地震活動」の統計的性質を長時間シミュレーションによって調べた。平成 21 - 22 年度においては、モデル内において Gutenberg-Richter 則と大森則を確認し、b 値と c 値が破壊発生時の剪断応力の減少関数であることを発見した。さらに、b 値と c 値の応力依存性に関して定量的関係式を数値的に明らかにすることができた。平成 23 - 24 年度にかけて、対応する抽象的な数理モデルを構築し、余震発生過程が一般化されたアレニウス則で決定されるとの仮定のもと、c 値の応力依存性の定量的関係式を導出した。この関係式を離散要素モデルシミュレーションの結果と比較し、両者が半定量的に整合することを確認した。平成 25 年度においてはシミュレーション・数理モデルと、実際の地震活動との比較を行った。地震活動における断層剪断応力の絶対値は当然分らないものの、c 値の深さ依存性を応力依存性と読み替えることにより、シミュレーション・数理モデルと定性的に同じ振る舞いが確認された。この振る舞いを与える本質的メカニズムは一般化されたアレニウス則にあり、今後更なる観測研究によってその妥当性を検証していくことが必要である。

(8) 平成 25 年度の成果に関連の深いもので、平成 25 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等) :

Suzuki, T. and Yamashita, T., Effects of Shear Heating, Slip-Induced Dilatancy and Fluid Flow on Diversity of 1-D Dynamic Earthquake Slip, J. Geophys. Res., 2014 accepted.

平原和朗・永坂英明・今井敏、ABAQUS 2 次元地震サイクルモデル(1)、日本地震学会 2013 年度秋季大会、P1-44, 2013.

Matsuyama, K., Katsuragi H., Power law statistics of force and acoustic emission from a slowly penetrated granular bed, Nonlin. Processes Geophys., 21, 1-8, 2014.

(9) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

東京大学地震研究所 亀伸樹, 加藤尚之, 山下輝夫, 波多野恭弘, 堀宗朗

他機関との共同研究の有無 : 有

京都大学理学研究科 平原和朗

京都大学防災研究所 橋本学

大阪大学理学研究院 川村光

神戸大学都市安全研究センター 上西幸司

建築研究所国際地震工学センター 芝崎文一郎

地震研究所の共同利用にて参加研究者を公募する。

(10) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名 : 東京大学地震研究所

電話 : 03-5841-5694

e-mail : kame@eri.u-tokyo.ac.jp

(11) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名 : 亀伸樹

所属 : 東京大学地震研究所

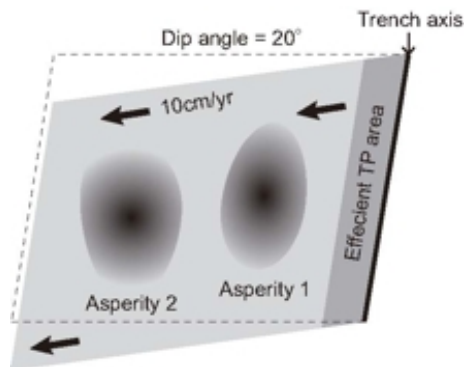


図 1

宮城沖震源域の模式図。傾斜角 20 °で沈み込む太平洋スラブ境界面を 2 次元モデルで近似した。海溝近傍の浅部に TP が働く領域、深部に 2 つのアスペリティを設定している。(Mitsui et al.,2012)

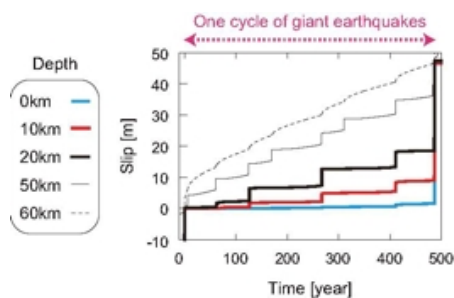


図 2

超巨大地震サイクル中での、各深さ (0,10,20,50,60km) における積算滑り量 (左図)。深さ 0,10km は TP 領域、20km が Asperity1、50km は Asperity2、60km は深部安定滑り域に対応する。(Mitsui et al.,2012)

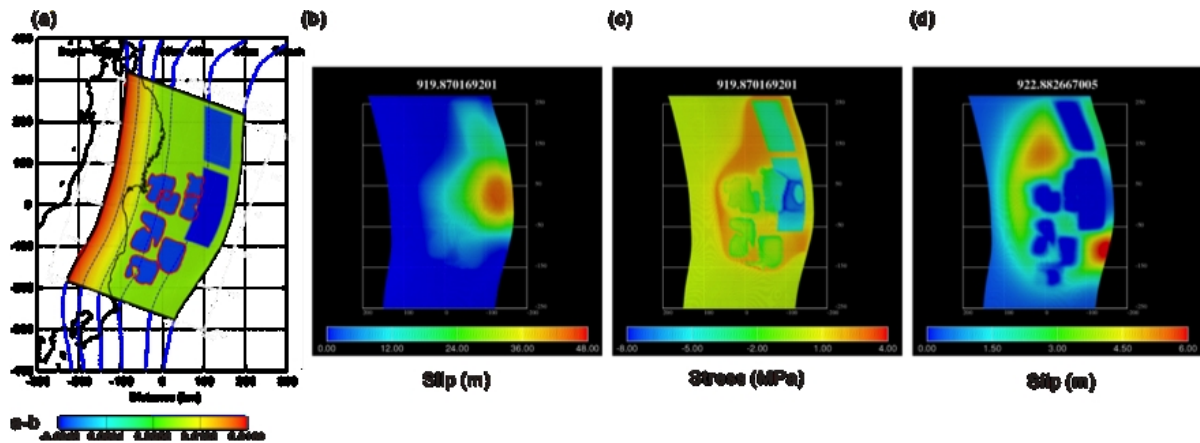


図 3

TPを組み込んだ東北地方太平洋沖地震の発生サイクルモデル。(a) 仮定した a-b の空間分布。(b) M9 クラスの超巨大地震の滑り分布。(c) 超巨大地震時の応力変化。浅部アスペリティで最大で 8MPa 程度の応力降下が生じている。(d) 地震直後から 3 年間に生じた余効滑り。

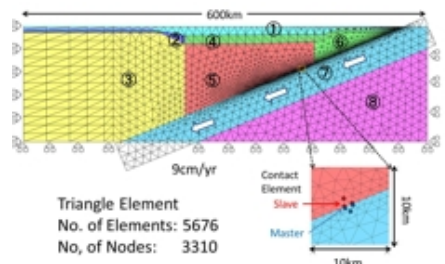


図 4

2次元 ABAQUS.FEM メッシュ図 (1) 上部地殻、(7) 太平洋プレート：弾性、粘弾性特性を持つ。RFS で、深さ 5-45km まで速度弱化特性を与えている。

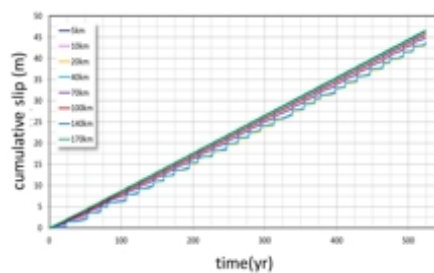


図 5

プレート境界面の各深さにおける累積滑りの時間発展

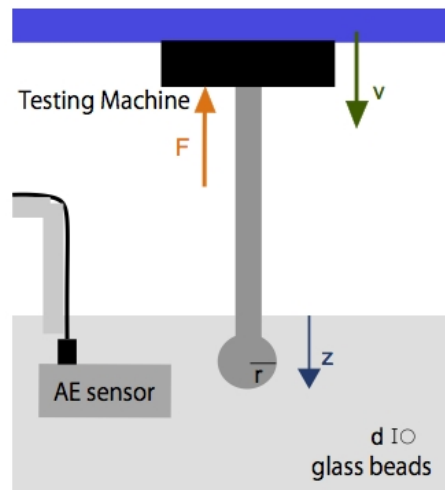


図 6
離散粒子系に固体塊を押し込む実験装置

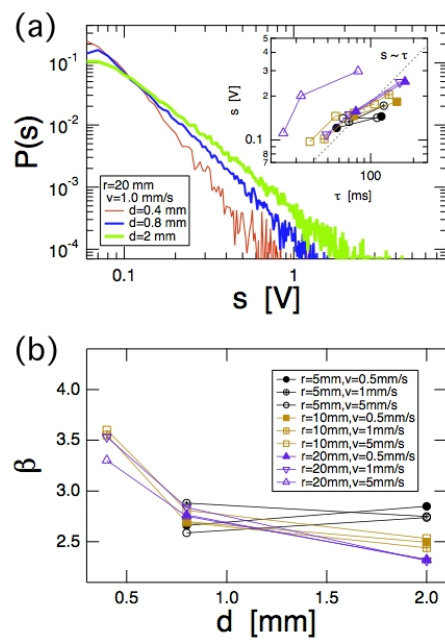


図 7
(a) 粉体中の AE 強度の頻度分布、(b) 粒径と AE 強度頻度分布の傾きとの関係