

(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）平成 24 年度成果の概要：

それぞれの研究継続と 2011 年太平洋沖地震発生を受けた課題に取り組み以下の成果を得た。

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

前年度は、2011 年東北地方太平洋沖地震での宮城県沖日本海溝浅部における地震時特大滑りと津波堆積物から推定される数百年に及ぶ地震サイクルを説明するために、浅部に間隙流体の存在を考えた。地震時摩擦発熱により間隙流体圧が上昇し（TP: Thermal Pressurization）、有効法線応力の低下を招き、特大地震時滑りや全応力解放が生じ、数百年に及ぶ地震サイクルになるという、2次元準動的シミュレーションを行った (Mitsui et al., 2012)。

地震時滑り・応力降下量及び地震サイクルの繰り返し間隔は、TP が働く領域の深さ及び間隙流体拡散係数によることを示したが、間隙流体圧は地震時のみならず全地震サイクルを通じて大きく変動している。これについて Mitsui (2011) に従い考察を行った。摩擦力は、速度状態依存則に従う摩擦係数の変化、及び間隙流体圧の変化を通して有効法線応力の変化にも依存する。間隙流体圧は、地震時には上記の TP に加えて滑り破壊によるダイラレーション、更に地震間では準静的なガウジの変形に伴う空隙率変化及び圧力溶解などによる空隙減少により変動する。Mitsui (2011) は、速度状態依存摩擦則に従う断層に、上記の変動要因を全て入れ、1自由度で準動的シミュレーションを行っている。図 1 に間隙流体圧の時間変動と累積滑りを示す。水理定数などは固定しても、断層滑り幅が変わるだけで、間隙流体圧変動は大きく変わり、全く異なる地震サイクルになる可能性がある。実際の東北地方

太平洋沖地震断層周辺の水理状態は明らかではないが、地震サイクルを通じての間隙流体圧変化が地震サイクルに大きく影響を与える可能性がある。各種パラメータが不確定であるが、今後実際の地震サイクルシミュレーションでこういった効果を取り入れることを検討する必要がある。

(1-2) Thermal Pressurization を考慮した東北地方太平洋沖地震の 3 次元発生サイクルモデル

Thermal Pressurization を考慮した東北地方太平洋沖地震の 3 次元発生サイクルモデルを構築し、浅部に大きなアスペリティを設定することで、M7.5 クラスの地震と M9 クラスの地震を再現できることを示した(図 2)。また、高速摩擦を考慮した東北地方太平洋沖地震の 3 次元発生サイクルモデルにより、余効滑りのモデル化を行った。

(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

野外観察などにに基づき、断層近傍の流体は断層に沿って流れると仮定した。ダイラタンシー硬化が卓越する場合、スロースリップをモデル化できただけでなく、スロースリップと同期し逆方向伝播する微動の伝播速度も再現することに成功した(図 3)。スロースリップや微動を再現するために必要とされる透水係数としては、 $1.0 \times 10^{-10} \text{m}^2$ 程度のものが必要となる。これは、断層の露頭観測で通常えられるものよりはるかに大きな値である。

2) 媒質の不均質性を考慮したシミュレーション研究：2 次元粘弾性地震サイクルシミュレーションの 1 次元モデル作成

商用 FEM ソフトウェア ABAQUS を用いた 2 次元粘弾性地震サイクルシミュレーションのため、やや粗いメッシュサイズであるが 1 次元モデルの開発を行った。Hirahara (2002) は ABAQUS を用いて、重力が作用する粘弾性媒質中で、プレートを沈み込ませ、プレート境界での地震発生域に摩擦を与え、百年に一度摩擦をゼロにして擬似的に地震時滑りの粘弾性応答を見た。当時は速度状態依存摩擦則に従う地震サイクル計算には多大な時間を要したが、WS の性能向上により 2 次元であれば現実的モデルでの計算が可能になってきた。そこで、モデル領域が境界に近いとか、プレート境界でのメッシュサイズが粗すぎるといった問題はあるが、まずは Hirahara (2002) と同じ粗いメッシュで、速度状態依存摩擦則に従う地震サイクルシミュレーションを行うべく、ABAQUS の最新バージョンに対応した、摩擦則を表すサブルーチンの書き換えやモデルフォーマットの再作成を行った。図 4 に東北地方をイメージしたメッシュ図を示す。

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

地震観測研究において、Gutenberg-Richter 則の b 値と大森則の c 値がともに応力に依存することが Schorlemmer et al. (2005)、Narteau et al. (2009) などの先行研究によって示唆されている。しかし、定量的検証と物理的メカニズムの解明は未だなされていない。前年度において抽象的な数理モデルを用いて b 値と c 値の間に成り立つ関係式を導出し、本年度においては岩石破壊実験を模擬した数値シミュレーションを用いてこの関係式を定量的にチェックした。しかしその結果は否定的なものであったため、当初計画を変更して新たにモデルを立て直すことになった。 c 値は短時間プロセスに対応するため、動的な地震波トリガリングが重要であると考え、その余震発生過程をモデル化した。モデルにおける重要な仮定は、余震発生率がアレニウス則によって記述されるというものである。モデルにおける重要なパラメータは、温度に対応する量である。この温度パラメータが本震の地震波強度に比例すると仮定すると、 b 値と c 値の間の関係式を導くことができる。

- (8) 平成 24 年度の成果に関連の深いもので、平成 24 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：
波多野恭弘，摩擦法則におけるミクロ・マクロ対応，表面科学会学術講演会，平成 24 年 11 月 20 日，仙台市。

H. Kawamura, T. Hatano, N. Kato, B. Soumya, and B. Chakrabarty, Statistical physics of fracture, friction and Earthquake, Rev. Mod. Phys. 84, 839, DOI: 10.1103/RevModPhys.84.839, 2012.

Shibazaki, B., K. Obara, T. Matsuzawa, and H. Hirose, Modeling of slow slip events along the deep subduction zone in the Kii Peninsula and Tokai regions, southwest Japan, J. Geophys. Res., 117, B06311, doi: 10.1029/2011JB009083, 2012.

- Shibazaki, B., A. Kato, Modeling the development of a complex fault configuration in the source region of two destructive intraplate earthquakes in the mid-Niigata region, *Tectonophysics*, 562-563, 26-33, 2012.
- T. Hatano, Relaxation dynamics of jamming soft spheres, *The 3rd Workshop on Computational and Statistical Physics*, Kyoto, 2012.10.20.
- Yamashita, T., Generation of slow slip coupled with tremor due to fluid flow along a fault, *Geophys. J. Int.*, doi:10.1093/gji/ggs117, 2013.

(9) 平成 25 年度実施計画の概要 :

各々のモデリング研究を継続して発展させるとともに、シミュレーション結果に基づく地震現象の解釈と議論を進める。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。

1) 間隙流体を考慮したシミュレーション研究

岩石や浅部断層物質の高速摩擦特性を考慮した 3 次元地震発生サイクルシミュレーションにより、超巨大地震の発生サイクルを再現し、実際の観測事実と比較することでモデルの改善を図る。

2) 媒質の不均質性を考慮したシミュレーション研究

ABAQUS 2 次元粘弾性地震サイクル 1 次モデルにおいて、プレート境界部分のメッシュ細分化・プレート境界の影響の低減といったモデル及びおよび摩擦パラメータ分布を改良し、不均質粘弾性媒質を考慮した、東北地方太平洋沖地震サイクルシミュレーションを行い、地震サイクルを通してのプレート境界滑り発展とそれに伴う日本列島の変動を議論する。

将来的には不均質構造の影響及び動的破壊過程を地震サイクル計算に含めることを目指して、今年度は手始めに、2 次元スペクトル要素法による簡単な動的破壊伝播の予備的シミュレーションを行なった。来年度は、不均質弾性構造や現実的な摩擦特性を断層面に与え、東北地方太平洋沖地震の動的破壊伝播モデルを構築する。

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

平成 24 年度で考案した余震発生モデルの定量的検証を行う。実際の地震観測データで信頼のおける c 値を得ることは難しいため、まず、岩石破壊実験を模擬したシミュレーションのデータからこの関係式を検証する。その結果が肯定的であることが分かったら、実際の地震観測データの解析に移行する。

(10) 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。

(11) 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

URL : <http://www.eri.u-tokyo.ac.jp>

(12) 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

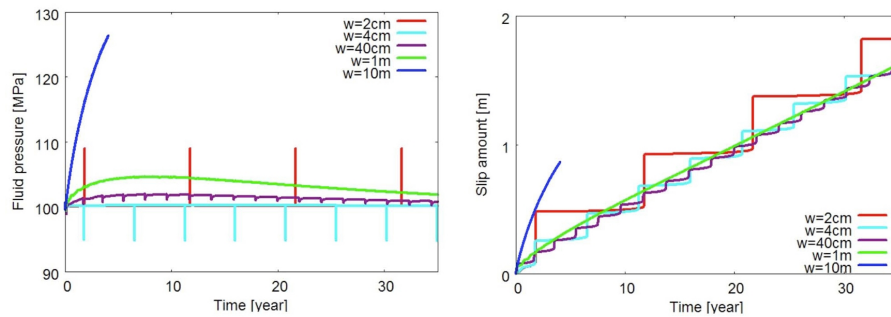


図 1

速度状態依存則に従う断層で、地震時における TP・ダイラタンシー、地震間における準静的ガウジ変形及び圧力溶解など化学変化による空隙変化の影響を組み込んだ、1 自由度準動的地震サイクルシミュレーション例 (Mitsui, 2011) . (左) 間隙流体圧変動、(右) 累積滑りの時間変動．裁荷速度 3cm/年 ，剛性率 27GPa ，透水率 10^{-20}m^2 ，空隙形成係数 1.7^{-6} ，滑り依存ダイレーション係数 0.0005 ，化学反応による空隙減少の特征的時間 10年 とし，地震時滑り幅 W を変えて地震サイクルシミュレーションを行っている．

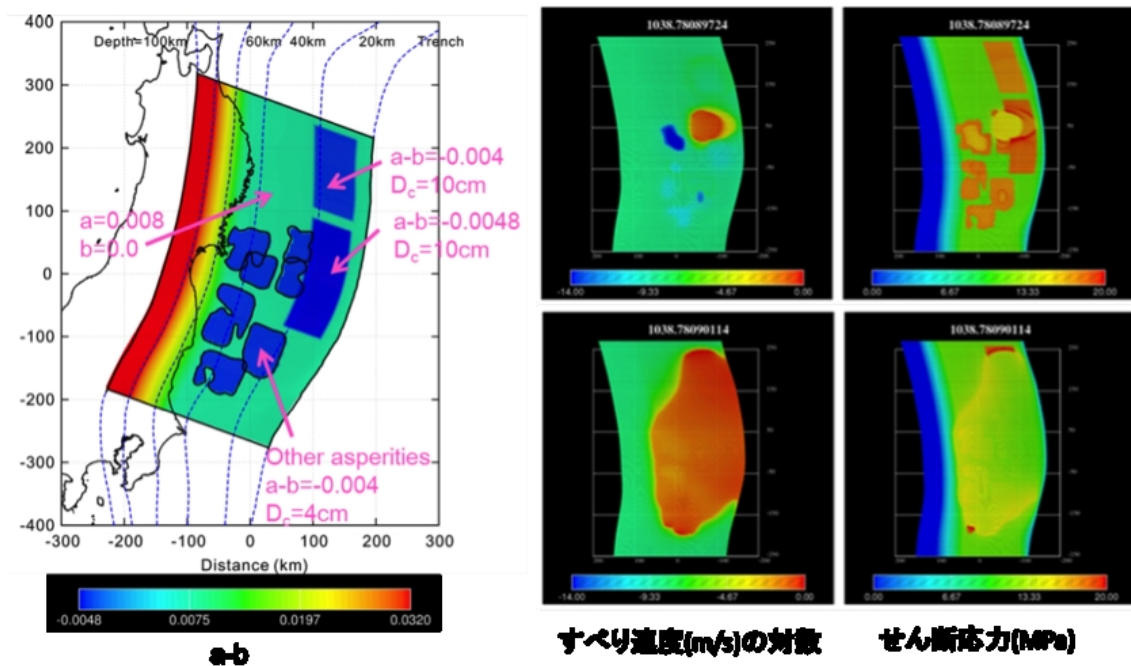


図 2

東北地方太平洋沖地震の 3 次元発生サイクルモデル : (左) アスぺリティの分布 (右) M9 クラス時の滑り速度とせん断応力の分布．

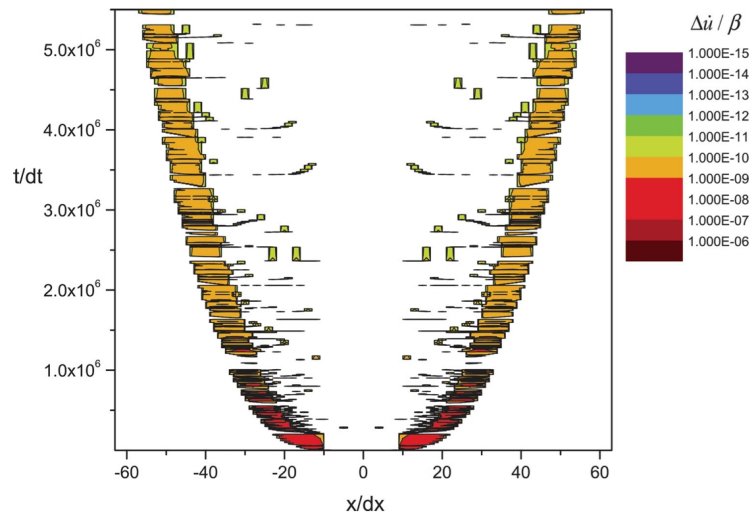


図 3

微動と同期したスロースリップのモデリング解析における滑り速度の時空間発展図．スロースリップと同期し逆方向伝播する微動の伝播速度も再現された．

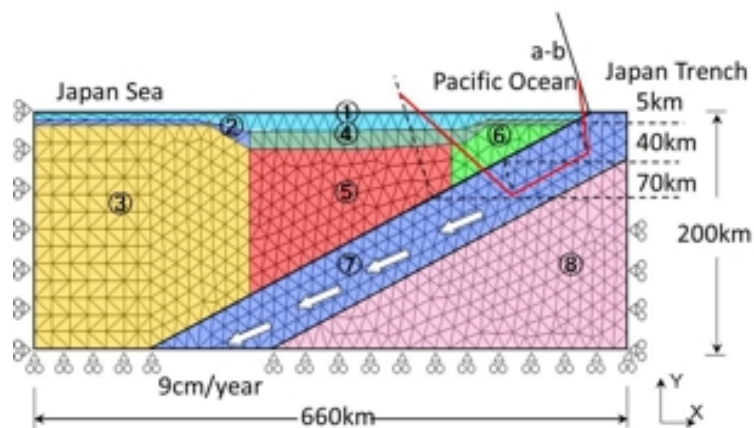


図 4

2次元 ABAQUS 粘弾性地震サイクル 1 次モデル: (1) 弾性体上部地殻, (2) (4) 粘弾性下部地殻, (3) (5) (6) 粘弾性マントルウェッジ, (7) 弾性太平洋スラブ (中央部節点に沈み込み速度を与える), (8) 粘弾性マントル．プレート境界はマスター・スレーブ法で接触解析を行い, 速度状態依存則に従う摩擦パラメータを指定する．