

( 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づけられる。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すすめる。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考慮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地震破壊を包括的に理解するモデリング研究をおこなう。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すべり弱化解距離  $d_c$  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およ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、およ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、および、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22年度成果の概要：

平成22年度は、それぞれのシミュレーション研究と手法開発研究を継続し、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) 微動と同期したスロースリップのモデリング研究：微動は地震波をわずかに放出し動的枠組みでのモデル化が必要となる。ここでは効率的な計算手法を用いて動的枠組みでの長時間計算を可能にした。流体で飽和した熱多孔質弾性体中に断層を仮定し、摩擦発熱、すべりによる空隙生成および流体・熱の拡散を考慮に入れた。計算によると、空隙生成率が十分に大きい時に、スロースリップと同期した微動が散発的に起きることがわかった。これは、断層上の空隙生成率が大きい場合、断層へ向けて流体が容易に流入し、断層上の流体圧が一時的に高まるためである。ただし、静止摩擦係数が全体として小さい場合は、微動を伴わないスロースリップが起こる。

1-2) 地震間における断層帯内の pore compaction による間隙流体圧変動が地震サイクルに及ぼす影響評価：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り沈殿物が生じ間隙体積が減少し流体圧が上昇する。Gratier et al. (2003) の定式化によれば、pore compaction は  $\phi(t) = \phi_0 \exp(-\lambda t)$  ( $\phi_0$  は間隙率、 $\lambda$  は時定数) で与えられる。この場合、簡単のため流体の流れがないとすると、pore compaction により間隙流体圧は時間とともに線形的に増加することになる。外部から一定速度  $v_0$  でローディングされ、速度・状態依存則に従う一自由度断層モデルでは、図1に示すように、pore compaction は、a) 断層を安定化させ、ついには地震発生を抑える(水圧破碎に至るがこのプロセスはモデル化されていない)、b) 外部ローディング速度より大きな見かけすべり速度を生じさせる、こと

が分かった。これに対し、ダイラタンシーは間隙圧を下げる。上記の pore compaction に加え、速度依存のダイラタンシー ( $d/dt=Yv$ ) を与えた時のシミュレーション結果を図 2 に示す。b) は物理的には問題があるが、 $Y$  の値によりこの効果を抑えることができる。

## 2) 媒質の不均質を考慮したシミュレーション研究

2-1) 3次元不均質多孔質弾性媒質中での余効変動シミュレーション研究：昨年に引き続き、海溝型地震の断層すべりの取り扱いに向けて検討を行った。

2-2) 西南日本3次元不均質構造モデルの構築：不均質媒質の影響評価を目指したモデル構築のため、地殻構造については、Katsumata (2010) データによる、コンラッド面およびモホ面の3次元形状を、フィリピン海プレートの構造については、Nakajima and Hasegawa (2007), Hirose et al. (2008) による、フィリピン海プレートの3次元形状を参考に形状モデルの検討を行った。

2-3) 東北日本脊梁山脈周辺における3次元断層形成と応力集中過程のモデル化：東北日本全域を対象に、最近観測された地温勾配の情報等を基に地殻、最上部マントル内の温度構造を設定し、有限要素法により変形と断層形成過程のモデル化を実施した。その結果、実際の地形とある程度調和的な、東北日本全域にわたる脊梁山脈の形成を再現することができた。

2-4) 粒子法に基づく破壊計算手法の開発：高速度デジタルビデオカメラを用いた動的室内実験で撮影された、不均質構造材料中の破壊の伝播の様子を力学的に模擬するための数値計算手法を粒子法に基づき開発した。さらに、簡単な弾性体モデルを用いて波動伝播の物理過程の予備的なシミュレーションを行い、当該数値計算手法を使用する利点、改善を施すべき点につき考察を行った。

2-5) 境界積分方程式法の拡張による境界破壊の計算手法の開発：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、解析に必要なとなる応力カーネル関数をモード III 型の静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：AE 統計性の背後にあるメカニズムを解明し実際の地震活動への解析へ応用することを目的として、離散要素モデルの詳細な解析を続行した。その結果、AE の大きさ・頻度分布はジャミング転移点と呼ばれるある臨界密度においてのみベキ則になり、他の密度では一般にベキ則にならないことを発見した。また、再来時間の分布関数はベキ則に従うが、その指数は下限マグニチュードに依存することを発見した。これらの事実が意味するものは、離散モデルにおける AE 活動が自己組織化臨界ではなくジャミング転移点という特定の分岐点における揺らぎの増大であるということである。その揺らぎの統計性について、地震活動との類似性および相違点を明らかにすることができた。また、AE イベントは摩擦構成法則のマイクロ素過程でもあるため、これら結果の副産物として、AE イベントのダイナミクスに基づいた摩擦構成法則を理論的に導出することができた。

## (8) 平成 22 年度の成果に関連の深いもので、平成 22 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：

Mitsui Y. and Hirahara K., Interseismic pore compaction suppresses earthquake occurrence and causes faster apparent fault loading, *Geophysical Research Letters*, 36, L20305, doi:10.1029/2009GL039932, 2009.

Hatano, T., Critical scaling of granular rheology, *Progress of Theoretical Physics Supplement*, 184, pp. 143-152, 2010.

Hatano, T., Constitutive law of dense granular matter, *Journal of Physics, Conference Series* 258, 012006, doi:10.1088/1742-6596/258/1/012006, 2010.

Uenishi, K., Numerical Modeling of Arrest and Resumption of Dynamic Rupture Propagation at Material Inhomogeneities. In: *Proceedings of the 2010 SSJ (Seismological Society of Japan) Fall Meeting (Hiroshima, Japan, 27-29 October 2010)*, P3-37, Seismological Society of Japan, Tokyo, Japan, 2010.

Kame, N., An Extended Boundary Integral Equation Method, a versatile method for rupture dynamics interacting with medium interfaces. In: *Proceedings of the 2010 SSJ (Seismological Society of Japan) Fall Meeting (Hiroshima, Japan, 27-29 October 2010)*, C22-11, Seismological Society of Japan, Tokyo, Japan, 2010.

( 9 ) 平成 23 年度実施計画の概要 :

平成 23 年は、各々のモデリング研究の取り組みを継続するとともに、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。また、観測・実験の模擬を実現するための新たな数値手法の開発を継続する。

1) 間隙流体を考慮したシミュレーション研究

1-1) 22 年度の動的モデル化は、精度が良いという利点があるが、計算時間がせいぜい 20 分程度に限られる。これは、実際に観測されるスロースリップの継続時間に比べはるかに短い。さらに計算手法を改良し長時間計算を目指す。

1-2) 速度・状態依存に従う一自由度断層モデルに、これまで開発してきた、地震サイクルを通しての間隙流体圧変動要因を組み込んだ、単純化した地震サイクルシミュレーションを行い、間隙流体圧変動を組み込むことの重要性を考える。

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) 3 次元不均質多孔質弾性媒質での断層すべりを扱える有限要素法による、海溝型地震の余効変動プロトタイプモデルの構築を図る。

2-2) 不均質媒質の影響評価を目指して、西南日本について、地殻・フィリピン海プレートの境界モデルを構築する。

2-3) 中部日本を対象に、塑性変形および非線形粘弾性を考慮した有限要素法により、断層形成、応力蓄積、そして歪み集中過程のモデル化を行う。

2-4) 22 年度に開発した数値計算コードを予備シミュレーション結果に基づき改良し、波動や破壊の伝播に対する構造不均質性の影響ならびに動的な大変形の力学的効果をも合わせて模擬できるように発展させる。

2-5) 応力カーネル関数をモード III 動的破壊に対して導出し、これを利用した破壊成長シミュレーションプログラムを開発する。

3) より一般の分岐クラスに関して、そのまわりの揺らぎの性質を力学モデルを用いたシミュレーションによって明らかにする。たとえば速度状態依存摩擦法則で記述される滑りの安定・不安定分岐はホップ分岐であることが知られているため、ホップ分岐近傍の揺らぎの性質を実際の地震活動と比較することは重要である。その際、「再来時間分布関数のベキが下限マグニチュードに依存しない」性質は一つの指導原理であり、そのような性質をもつ分岐点を探すことによって地震活動との対応を探る。それらの作業と並行して、離散モデルに空間不均一性と強度回復過程を導入し、シミュレーションによって不均一性がもたらす統計性の変化を調べる。

( 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>

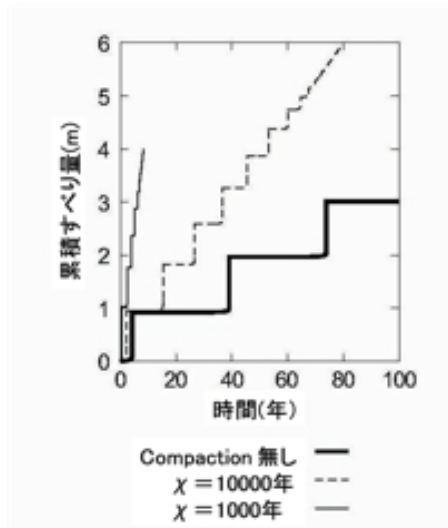


図1. 外部ローディング速度 ( $V_0=30\text{mm/年}$ ) とし, pore compaction により時間とともに線形に間隙圧が上昇するモデルを考慮した場合の累積すべり発展

Compaction 無しの場合 (太線) に比べ, pore compaction を考える (点線, 細線) と, みかけのすべり速度が増し, 断層を安定化させ, やがて地震が発生しなくなる (Mitsui and Hirahara (2009) を改変)

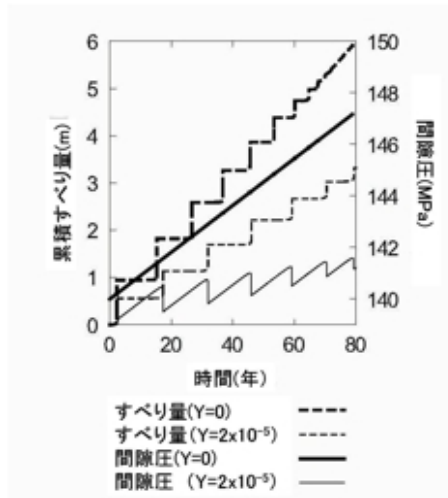


図2. pore compaction と速度依存のダイラタンシーを考慮した場合のすべり量と間隙圧の時間発展

= 10000年 ( $v_0=30\text{mm/年}$ ) とした pore compaction に速度依存のダイラタンシーを加えると, pore compaction による間隙圧増加が抑えられ, 通常地震発生サイクルに近くなる (Mitsui and Hirahara (2009) を改変)