

( 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体化距離  $d_c$  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23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) 微動と同期したスロースリップのモデリング研究を継続した。流体で飽和した熱多孔質弾性体中に断層を仮定し、摩擦発熱とすべりによる空隙生成および流体拡散を考慮に入れた。計算簡素化のため仮定した断層に直交する流体拡散のモデルでは、すでに破壊が生じた方向へ逆方向伝播する微動伝播の観測を再現できない。野外観察などから透水係数は断層に平行な方向で大きな値をとり、これを考慮したより現実的な流体が断層方向に流れるモデルを構築することにより逆方向伝播する微動の伝播速度を再現することに成功した。

(1-2) 地震時摩擦発熱による断層帯内の間隙流体圧上昇が地震サイクルに及ぼす影響評価：プレート境界浅部海溝近傍の間隙流体を考慮して、数百年の間隔で海溝側浅部に大きな地震時すべりを引き起こした2011年東北地方太平洋沖地震サイクルの2次元沈み込み帯モデルを構築した。Kato and Yoshida(2011)は大きなすべりを生じた浅部領域に、大きな有効法線応力と特徴的すべり距離( $L$ )を持つ強い固着域(強パッチ)を置き、宮城沖地震に対応する深部アスペリティを二つ配置し、地震サイクルの特徴を再現することに成功した。ここでは、浅部に地震時摩擦発熱による間隙流体圧の上昇(TP: Thermal Pressurization)を起こす領域(TP領域)を組み込み(図1)、数百年の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。摩擦パラメータの深さ分布(図2)として、宮城沖深部に負の  $a_n - b_n = (a - b) - (p - p_0)$  ( $a, b$ : 摩擦パラメータ,  $p$ : 法線応力,  $p_0$ : 通常の間隙流体圧)を持つ Asperity 1

と Asperity2 を与えて、浅部は  $a_n - b_n = 0 (>0)$  で安定すべりを起こす領域に設定した。図3に超巨大地震サイクル中での TP 領域(深さ 0,10km), Asperity1(深さ 20km), Asperity2(深さ 50km), 深部安定すべり域(深さ 60km)におけるすべり発展を示す。487年の超巨大地震サイクル中に Asperity1 および Asperity 2 では繰り返し M7クラスの地震が発生するのに対し、浅部は固着して、超巨大地震発生時に大きな 50m に及ぶすべりを発生させている。3月11日の東北地方太平洋沖地震発生前の3月9日に M7.3の地震が発生している。このシミュレーションでも、Asperity 1で地震が直前に発生している(図3右図)。シミュレーションではパラメータによりこの時間差は数時間から数日程度である。ただ、図3中図に示すように Asperity 1で地震が発生しても超巨大地震の発生にすぐにつながるわけではないが、超巨大地震が発生した場合について、直前を細かく見ると Asperity1での地震の余効すべりがほかの時に比べ大きいことが分かっている。

図では、間隙流体拡散係数  $= 10^{-2} \text{m}^2/\text{s}$ ,  $D_{tp}=10\text{km}$  の場合のみを示しているが、 $\alpha$  を小さく、 $D_{tp}$  を大きくするほど繰り返し間隔が 300-700年と大きくなると、また TP 領域の応力効果量も 15-23MPa と大きくなる。このように、間隙流体に関する係数が地震サイクル毎に異なると繰り返し間隔が変わる可能性がある。

## 2) 媒質の不均質性を考慮したシミュレーション研究

(2-1)3次元不均質多孔質弾性体中での余効変動シミュレーション研究、(2-2)西日本3次元不均質モデルの構築：本年度の取り組みはなく、(1-2)に焦点を絞り研究を行った。

(2-3)3次元断層形成と応力集中過程のモデル化：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試験計算を行った。

(2-4)粒子法に基づく破壊計算法の開発：H22年度に開発した粒子法数値計算コードを、簡単な弾性体モデルを用いた波動伝播物理過程の予備シミュレーション結果に基づき改良し、構造不均質性が波動の伝播や破壊の発生に与える影響なども合わせて模擬できるように発展させた。2011年東日本大震災やニュージーランド・クライストチャーチ地震による構造物的被害を例として取り上げ、改良した数値計算コードの実用性について検証した。

(2-5)境界破壊の計算法の開発：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、解析に必要な応力核関数を H23年度はモード III 型の動的亀裂に対して導出した。

(2-6)高速摩擦特性を考慮した東北地方太平洋沖地震発生サイクルのモデル化を行った(図4)。最近の高速摩擦実験の結果を参考にして、高速度で著しい弱化を示すすべり速度・状態依存則を考慮した。低速では、アスペリティ内で速度弱化、その周辺では速度強化を示す。高速では全領域で速度弱化を示し、状態変数は大きな臨界相対変位量で遷移する。宮城県沖、福島県沖、茨城県沖のアスペリティでは、Mw7.5程度の破壊が生じるが、いずれも大規模な破壊に成長しない。宮城県沖付近の大きなアスペリティ内の固着域で破壊が生じると、高速における摩擦強度の低下により大きなすべりが生じ、低速ですべり速度強化の領域も不安定化し、他のアスペリティに破壊が伝播する。

## 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

(3-1)H22年度までに、岩石破壊を模擬した簡単なモデルについてのシミュレーションによって、Gutenberg-Richter 則や大森則を確認し、 $b$  値と  $c$  値が破壊発生時の剪断応力に依存する(応力の減少関数である)ことを発見した。この性質がもし実際の地震でも成り立っているのならば、地震発生場の剪断応力レベルを(微小)地震活動から推定できることになり、地震予知のための強力な手がかりとなり得る。ただしモデルで確認された性質が実際の断層においても成り立っているのかどうかの問題である。この問題を解決するためには、モデルを越えて破壊現象一般に通じる数理を抽出し、破壊現象の統計性に剪断応力がいかにして影響を及ぼすか、その論理を詰めるべきである。そのような目論みから、H23年度においてはまず余震発生についての数理的仮定から出発し、大森則における  $c$  値と Gutenberg-Richter 則の  $b$  値の間に成り立つ関係式を導出した。この関係式は実際の地震カタログや破壊モデルのシミュレーション結果を部分的に説明する。ただしより精緻な比較、および剪断応力依存性の関係式は今後の課題として残っている。

(3-2)速度状態依存摩擦則を用いたバネ-ブロックモデルに対する数値シミュレーションにより、地

震の統計的諸性質と破壊核形成過程を調べた。その結果、先行現象としての破壊核形成過程出現のための物性パラメータに関する条件や、破壊臨界核サイズ付近での断層速度と摩擦弱化パラメータ  $b$  との関係を見出した。

( 8 ) 平成 23 年度の成果に関連の深いもので、平成 23 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等) :

Yamashita, T. and Suzuki, T., Dynamic modeling of slow slip coupled with tremor, *J. Geophys. Res.*, 116, B05301, doi:10.1029/2010JB008136, 2011.

Mitsui, Y., N. Kato, Y. Fukahata and K. Hirahara, Megaquake cycle at the Tohoku subduction zone with thermal fluid pressurization near the surface, *Earth Planet. Sci. Lett.*, in press, 2012.

Shibazaki, B., T. Matsuzawa, A. Tsutsumi, K. Ujiie, A. Hasegawa, and Y. Ito, 3D modeling of the cycle of a great Tohoku-oki earthquake, considering frictional behavior at low to high slip velocities, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L21305, doi:10.1029/2011GL049308, 2011.

Uenishi, K., Simulation of fundamental rupture dynamics in inhomogeneous materials based on a particle method, *Proceedings of the 2011 SSJ Fall Meeting*, B32-13, 2011.

Kame, N. and T. Kusakabe, Proposal of extended boundary integral equation method for rupture dynamics interacting with medium interfaces, *J. Appl. Mech.*, in press, 2012.

Yamamoto, T., H. Yoshino and H. Kawamura, Simulation study of the inhomogeneous Olami-Feder-Christensen model of earthquakes, *Eur. Phys. J. B* 77, 559-564, 2010.

Kawamura, H., T. Yamamoto, T. Kotani and H. Yoshino, Asperity characteristics of the Olami-Feder-Christensen model of earthquakes, *Phys. Rev. E*, 81(3), 031119-(1-10), 2010.

Kawamura, H., T. Hatano, N. Kato, B. Soumya, and B. Chakrabarty, Statistical Physics of Fracture, Friction and Earthquake, *Rev. Mod. Phys.*, accepted, 2012.

Hatano, T. and O. Kuwano, Origin of the velocity-strengthening nature of granular friction, *Pure Appl. Geophys.* DOI: 10.1007/s00024-011-0409-9, 2011.

Kuwano, O. and T. Hatano, Flash weakening is limited by granular dynamics, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L17305, 2011.

Hatano, T., Rheology and dynamical heterogeneity in frictionless beads at jamming density, *J. Phys. Conf. Ser.* 319, 012011, 2011.

( 9 ) 平成 24 年度実施計画の概要 :

1) 間隙流体を考慮したシミュレーション研究

(1-1) 透水係数に異方性を考慮して、より一般的な取扱いを行う。さらに、これまで考慮してこなかった脱水反応を考慮に入れたモデリングの予備的解析を行う。

(1-2) これまで開発してきた速度状態依存則と間隙流体圧変動要因を組み込んだ断層モデルを用いて、単純化した一自由度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) 来年度は主に (2-6) に重点的に取り組む。

(2-4) 担当者異動により H23 年度で終了。

(2-5) 開発した境界破壊計算法により、破壊シミュレーションを行う。

(2-6) 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、地震前、地震時、余効すべりを再現し、実際の観測事実と比較することでモデルの改善を図る。

### 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

(3-1) H23 で導出した Gutenberg-Richter 則の  $b$  値と大森則の  $c$  値の間に成り立つ関係式をより系統的なカタログ解析により確立する。これらの量の剪断応力依存性を示す作業も重要な難問として残っている。H24 では今一度破壊モデルに立ち返り、モデルにおける  $b$  値の剪断応力依存性を解析的に計算する。そのメカニズムに基づき、より普遍的な関係式についてカタログ解析とのフィードバックを交えながら帰納的に推定する。

(3-2) 速度状態依存摩擦則を用いたバネ - ブロックモデルに対し、粘弾性の効果や断層地殻を通した長距離相互作用の効果を取り入れた数値シミュレーションを行い、地震の統計的諸性質と破壊核形成過程の物理を調べる。

#### (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

#### (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

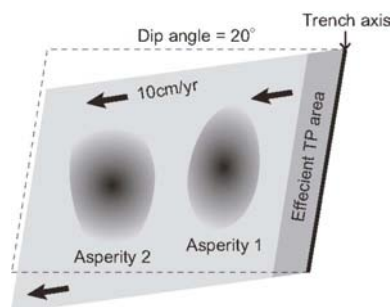


図 1. 宮城沖震源域の模式図

傾斜角  $20^\circ$  で沈み込む太平洋スラブ境界面を図 2 のように 2 次元モデルで近似した。海溝近傍の浅部に TP (Thermal Pressurization) 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)

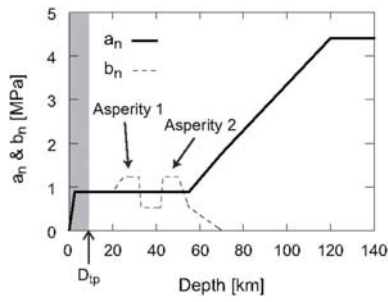


図 2. 摩擦パラメータ  $a_n = a(-p_0)$ ,  $b_n = b(-p_0)$  の深さ分布

$a, b$  は速度・状態依存摩擦構成則での摩擦パラメータ,  $p_0$  は、法線応力, 通常の間隙流体圧を表す。特徴的すべり距離  $L$  は深さによらず  $0.05\text{m}$  と設定している。  $D_{tp}$  は TP が働く深さ領域を表す。(Mitsui et al., 2012)

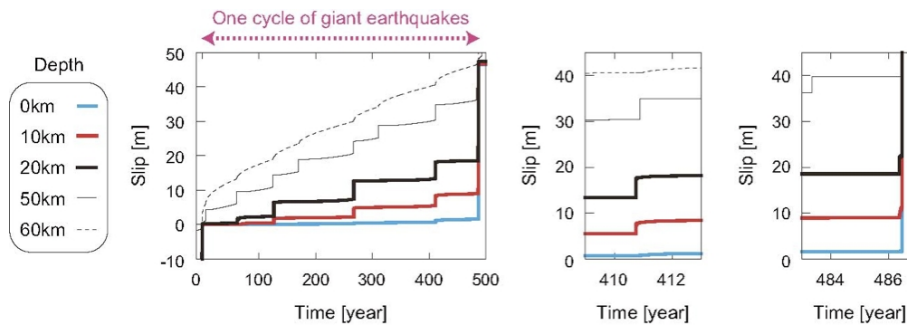


図 3.

超巨大地震サイクル中での、各深さ ( 0,10,20,50,60km ) における積算すべり量 ( 左図 ), 410 年 ( 中図 ), 超巨大地震発生直前 ( 右図 ) の拡大図。深さ 0,10km は TP 領域, 20km が Asperity1, 50km は Asperity2, 60km は深部安定すべり域に対応する。ここでは、間隙流体拡散係数  $= 10^{-2}\text{m}^2/\text{s}$ ,  $D_{tp}=10\text{km}$  の場合を示している。(Mitsui et al., 2012)

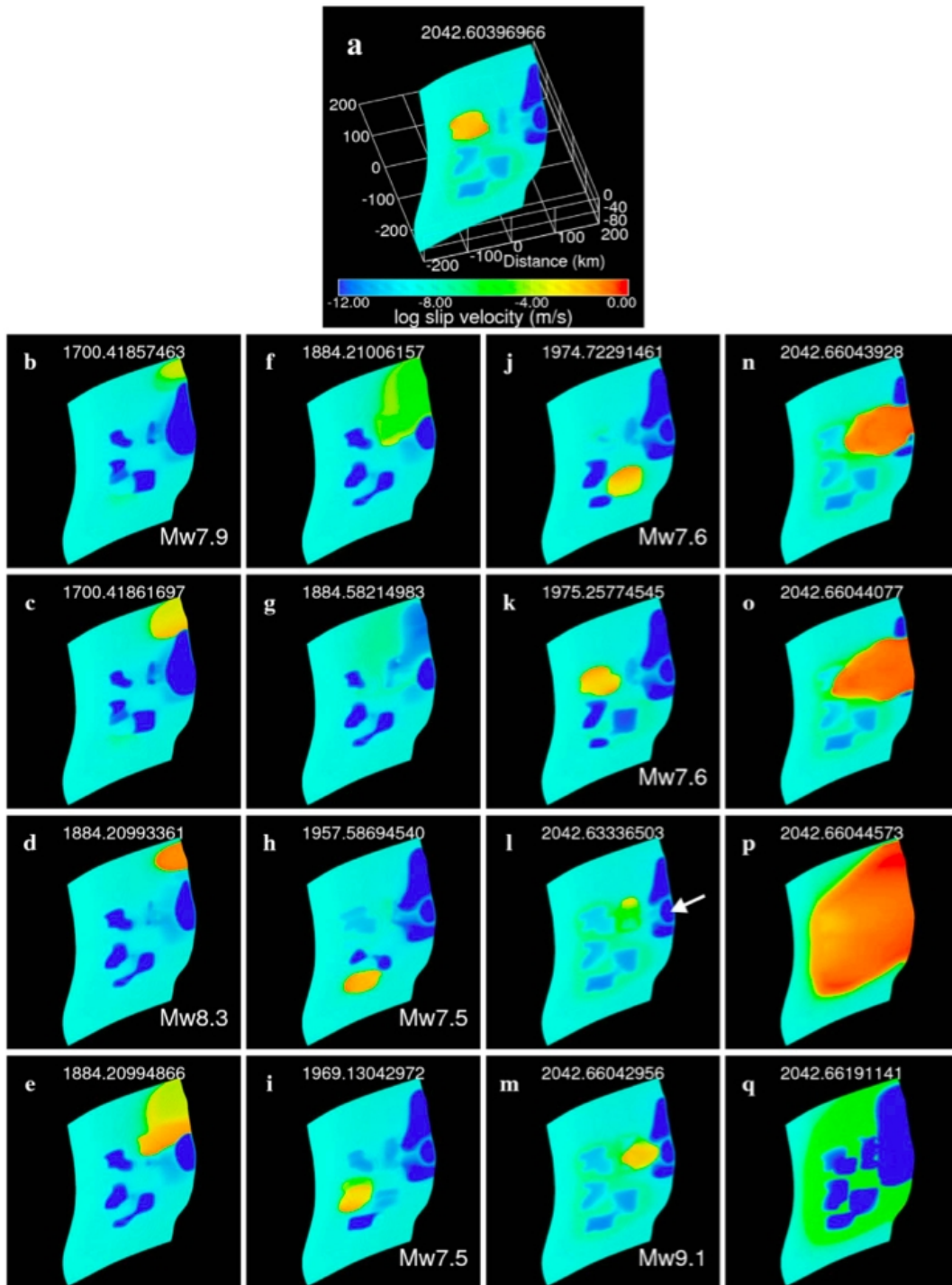


図 4.

東北地方太平洋沖地震発生サイクルシミュレーションにより得られたすべり速度．aに空間スケールとすべり速度のスケールが示されている．b-g：三陸沖地震，h：茨城県沖地震，i, j：福島県沖地震，k：宮城県沖地震，m-q：東北地方太平洋沖地震．数字は経過時間（年）を示す．(Shibazaki et al., 2011)