

2.(1)「地殻活動予測シミュレーションモデルの構築」研究計画

「地殻活動予測シミュレーションモデルの構築」研究計画の目標は、北米、太平洋、フィリピン海、ユーラシアの四つのプレートが複雑に相互作用する日本列島域を一つのシステムとしてモデル化し、常時観測網からの膨大な地殻活動データをリアルタイムで解析・同化することで、プレート相対運動によって駆動される広域応力の増加から準静的な震源核の形成を経て動的破壊の開始・伝播・停止に至る大地震発生過程の定量的な予測を行うことにある。本研究計画では、上記の目標を達成するために、「ア・日本列島域」を対象とした地殻活動予測シミュレーションモデルを開発する。また、稠密な観測が行われている「イ・特定の地域」においては、より詳細な地域モデルを開発し、地殻変動データや地震活動データをリアルタイムで取り込んだ予測シミュレーションを行う。さらに、「ウ・予測シミュレーションモデルの高度化」のために、地震発生の物理・化学過程に関する基礎的シミュレーション研究を推進する。

ア・日本列島域

(GPS データインバージョンによる北海道・東北地域のプレート境界面の固着状態の推定)

地殻変動データの逆解析では、これまで、直接的または間接的な先験情報を取り込んだ方法が広く用いられてきた。しかし、プレート境界の固着状態を正しく推定するためには、上記の二つの逆解析法を自然な形で統合する必要がある。そこで、直接的及び間接的先験情報を観測データと結合してモデルを構築し、地殻変動データ解析の新しい逆解析手法を定式化することに成功した(Matsuura, Noda & Fukahata, 2007)。この新しい定式化に基づく日本列島全域の統合地殻変動データ解析プログラムを開発し、北海道 - 東北地域の GPS データの解析を通じてその有効性の検証を行った(図 37)(東京大学理学系研究科 [課題番号: 1502])。

(CMT データインバージョンによる日本列島全域の三次元地殻応力パターンの推定)

地震破壊は震源域周辺の応力場を反映するという考えに基づき、地震の CMT データから地震発生応力場を推定する逆解析手法を開発した(Terakawa & Matsuura, 2008)。この新しい応力逆解析手法を防災科学技術研究所の 15,000 個の地震の CMT データ(防災科学技術研究所 CMT カタログ)に適用し、日本列島域の三次元地殻応力パターンを求めた。

(動的破壊と波動伝播シミュレーション)

2003 年十勝沖地震(M8.0)をターゲットとしたシミュレーション研究を行い、震源のパラメータの不確定さが動的破壊と波動伝播のシミュレーションによって計算される地震動にどの程度のばらつきを生じさせるかを系統的に調べた(Fukuyama et al., 2007)。地震動に影響するのは、アスペリティのどの部分から地震の破壊が始まったかが重要である。そこで、ここでは、地震の破壊開始位置の不確定性が、計算される地震動にどのような影響を及ぼすかを系統的に調べた。

動的破壊伝播の計算は、三角要素を用いた境界積分方程式法によって行った。断層面の応力は滑りと時間に依存する構成則に従うと仮定し、断層面の形状はプレート形状モデルによって与えられる。さらに、そこで得られた滑り時間関数を用いて、観測されるであろう地震動を有限差分法により計算を行った。地震の破壊開始位置をアスペリティの周囲の 5ヶ所に設定し、それぞれの地震の動的破壊の進展を計算した。そこで得られた滑り時間関数を用いて地震動の計算を行った。基準モデル(発震点を実際の 2003 年十勝沖地震の震源位置近くに置いたモデル、Model S)と

の比較により地震動のばらつきを評価した。また、現実の速度構造に近い三次元地殻構造を用いて計算した場合と、地表付近の盆地などの複雑な速度構造を無視した一次元速度構造を用いたモデルで計算を行った場合とで比較を行った(図 38)。一次元構造を用いた場合と三次元構造を用いた場合、ともに、周期 5 秒で震源位置による地震動の応答スペクトルのばらつきは 2 倍程度、15 秒で 4 倍程度になる事が分かった。2003 年十勝沖地震を想定した地震動の予測を行った場合、震源パラメータ、特に破壊開始点の位置の不確定性による地震動のばらつきは、4 倍程度以下である事が分かった。この事は、地震動を評価すべき地域の三次元地殻構造が十分信頼できるレベルでモデル化されており、せん断応力分布を精度よく推定する事が出来たならば、将来発生する大地震によって生じる地震動に関して、決定論的なアプローチによりある程度の推定を行う事が出来る事を示唆している(防災科学技術研究所[課題番号:3016])。

イ. 特定の地域

(三陸沖プレート境界型地震発生サイクル・シミュレーションモデルの構築)

プレート境界面上のアスペリティでは、周囲の定常的な非地震性滑りにより応力集中が生じていると考えられる。この不均一な初期応力分布は、アスペリティでの地震発生時の破壊伝播過程に大きな影響を及ぼすであろう。非地震性滑り領域中に存在する円形アスペリティでの地震発生サイクルの数値シミュレーションを行った(Kato, 2007)。動的破壊が始まると、応力集中している円周域で破壊は伝播しやすく、応力が比較的小さいアスペリティ中心部では破壊伝播が比較的遅くなる。その結果、アスペリティ破壊の最終段階では、円周域を右回りと左回りで伝播する破壊先端が衝突することにより大きな滑り速度が生じる(図 39)。これは、1968 年(昭和 43 年)十勝沖地震(M7.9)や 1994 年三陸はるか沖地震など、いくつかのプレート境界地震について観測されているアスペリティ破壊の最終段階での顕著な短周期地震波発生を説明可能である(東京大学地震研究所[課題番号:1411])。

(南海トラフ沿い巨大地震発生サイクル・シミュレーションモデルの構築)

地球シミュレータを用いた平面断層モデルの大規模地震発生サイクル・シミュレーションで、南海トラフでの再来間隔変化のパターンがこれまで再現できていたが、プレート三次元形状を導入すると連動したりしなかったりが再現できなかった。その他にも、再来間隔が倍半分と大きな変化をすることが再現できないなどの課題があった。摩擦特性のうち速度依存性を規定するパラメータではなく、破壊エネルギーの分布に不均質を与えることで、上記の課題の解決につながる事が分かった。このモデルは、規模の異なる地震の共存や間欠のゆっくり滑りの発生(図 40)、余効滑りの発生といった、南海トラフに限らずプレート境界での様々な地震・滑り現象を扱える普遍性の高いものである(名古屋大学[課題番号:1704]、海洋研究開発機構[課題番号:4001])。

滑りの進展に伴う間隙水圧の時間変化が地震発生サイクルに及ぼす影響を数値シミュレーションによる検討した(Mitsui and Hirahara, 2007)。プレート境界や断層に間隙流体が含まれると、プレート境界や断層での滑りの進展に伴う圧縮や地震時の膨張により、間隙圧が増減し、破壊の進展に影響を及ぼすことが予想される。間隙圧の変化を考慮して、沈み込み帯における二次元地震発生サイクル・シミュレーションを行った。その結果、間隙圧の時間変化を含む過剰間隙圧モデルでは、震源が浅くなる事が分かった(名古屋大学[課題番号:1704])。

コメント [m1]: 9 .

削除: 連動する・しないといったことや、倍半分の大きな再来間隔の変化は三次元プレート形状を導入しても生じる。

ウ. 予測シミュレーションモデルの高度化

非線形有限要素法により不均質レオロジー構造を考慮して、東北日本脊梁山地周辺における地殻・上部マントルの変形と断層形成過程のモデル化を行い、下部地殻及び上部マントルの低粘性領域における短縮変形により上部地殻において応力集中が生じ断層が形成されることを明らかにした。図 2 a は定常状態での絶対応力場（相当応力）である。このモデルを用いて、断層運動（塑性変形）をある期間止めることで地震間における応力蓄積過程を調べた。定常的な絶対応力場で、200~300MPa に達している。それに対して、図 2 b は 3000 年間、断層運動（塑性変形）を止めた場合の相当応力の変化で、その大きさは 5MPa 程度で、定常的な絶対応力場に比べて非常に小さい。定常状態での絶対応力場と異なり、三つの断層帯に沿って浅部まで応力が蓄積されている様子が理解できる。図 2 c は、3000 年間、断層運動を止めている間に生じる粘性歪である。この粘性歪により、図 2 b に示される応力集中が起こると考えられる。本研究により、東北日本脊梁山地周辺で発生する内陸大地震の応力蓄積過程のモデル化が可能であることが示された（東京大学地震研究所 [課題番号 : 1412]）。

不均質媒質中における地震断層の準静的成長に関する定量的シミュレーションを行い、地表堆積物の層構造での横ずれ断層（mode III）成長停止機構を調べた（Kame et al., 2008）。地表堆積層の剛性率と初期せん断応力を深部の半無限媒質のそれらの 1/10 とし、破壊伝播による応力を計算して、境界面に向かう破壊伝播のシミュレーションを行った。破壊が境界を横切ると歪が連続であっても弾性定数が不連続に 1/10 になることにより応力レベルが低下して、断層成長が層の途中で停止する可能性がある（東京大学地震研究所 [課題番号 : 1412]）。

熱多孔性媒質を仮定して自発成長する二次元動的破壊の理論的・数値的解析を行った（Suzuki and Yamashita, 2007）。一次元モデル及び二次元モデルを用いた数値シミュレーションから、空隙率の非弾性的な増加率とせん断変形帯幅の積に比例する量である無次元パラメータを用いて多様な動的断層滑りを統一的に説明できることが分かった。いくつかの観測事実と照らし合わせることで、このパラメータのとりべき範囲についての推定を行った。この範囲内においては、ほぼ、一般的に滑り強化が起きていることが確認された（東京大学地震研究所 [課題番号 : 1412]）。

2004 年 9 月 5 日に発生した紀伊半島南東沖の地震（M7.1）の余効変動に関して、粘性緩和による変動を沈み込み帯の三次元構造を考慮して、有限要素法による数値計算により推定した。東海および紀伊半島周辺の GPS 連続観測の時系列データから一次の経年変化成分、年周・半年周成分を取り除いた非定常地殻変動時系列との比較から、粘性率が $10^{18} \sim 10^{19} \text{Pa} \cdot \text{s}$ であるときに、観測された時系列をよく説明することが分かった。そして地震発生後 3 年間で粘性緩和による変動量は、志摩半島周辺で南方向に 1 cm 弱、東海地方周辺で南西方向に 5 mm 弱の大きさと推定できた。このことから、東海地方の非定常地殻変動には、2000 年秋以降浜名湖直下で発生しているゆっくり滑りによる変動に加えて、2004 年 9 月以降は紀伊半島南東沖の地震の余効変動が加わっていると考えられ、ゆっくり滑りの推定の際には、余効変動の影響を取り除かなければ、誤った解釈をしかねないことが分かった（国土地理院 [課題番号 : 6024]）。

課題と展望

これまで、地殻・マントルの弾性 - 粘弾性構造、プレート境界の三次元形状、断層構成則の環境依存性を考慮した、日本列島域の地殻活動シミュレーションモデルの原型を「地球シミュレータ」上に構築し、プレート境界での準静的応力増加 - 動的破壊伝播 - 地震波動伝播の連成シミュレーションに成功した。しかし、このモデルによるシミュレーションが真に予測としての意味を持つためには、広域地震 / 地殻変動観測データから予測シミュレーションに必要な情報を様々な

方法で抽出する必要がある。地震発生サイクル・シミュレーションなどを通じて、プレート境界面の摩擦構成則パラメータの空間分布についての知識は、次第に充実したものになってきつつある。また、地殻変動データ逆解析により、地殻変動データから日本列島周辺域のプレート境界での滑り分布の変動履歴を復元することが可能になりつつある。また、地震の CMT データを用いた応力逆解析手法を広域地震活動データに適用する研究も進められている。今後は、これまでの研究成果を集約した標準モデルを設定し、各種データとシミュレーションを統合した研究をより充実させる必要がある。

参考文献

- Fukuyama, E., Aoi, S. and Hashimoto, C., Ando, R., Matsu'ura, M., Simulation of earthquake dynamic rupture and ground motions for the 2003 Tokachi-oki earthquake, Workshop on Numerical Modeling of Earthquake Source Dynamics, 25, Smolenice, Slovakia, 2007.
- Kame, N., S. Saito, and K. Oguni, Quasi-static analysis of strike fault growth in layered media, *Geophys. J. Int.*, 173, 309-314, 2008.
- Kato, N., How frictional properties lead to either rupture-front focusing or cracklike behavior, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 97, 2182-2189, 2007.
- Matsu'ura, M., A. Noda, and Y. Fukahata, Geodetic data inversion based on Bayesian formulation with direct and indirect prior information, *Geophys. J. Inter.*, 171, 1342-1351, 2007.
- Mitsui, Y. and K. Hirahara, Two-dimensional model calculations of earthquake cycle on a fluid-infiltrated plate interface as a subduction zone: Focal depth dependence on pore pressure conditions, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L09310, doi:10.2929/2007/GL029597, 2007.
- Suzuki, T., and T. Yamashita, Understanding of slip-weakening and-strengthening in a single framework of modeling and its seismological implications, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L13303, doi:10.2929/2007GL030260, 2007.
- Terakawa, T. and M. Matsu'ura, CMT data inversion using a Bayesian information criterion to estimate seismogenic stress fields, *Geophys. J. Int.*, 172, 674-685, 2008.

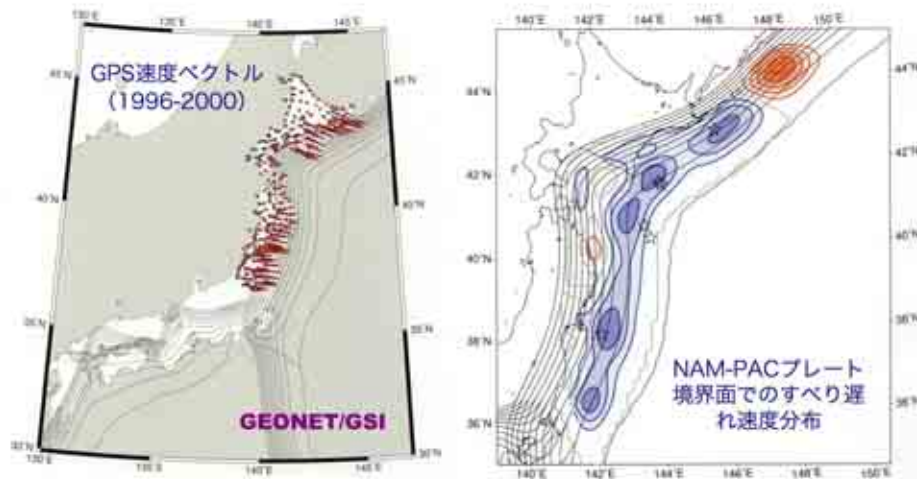


図37: GPSデータの逆解析で推定した北海道・東北地域の北米 - 太平洋プレート境界面の固着状態。左) 解析に用いたGPS水平速度データ。右) 北米 - 太平洋プレート境界面での滑り遅れ速度分布。等値線間隔は4cm/yr。星印は過去に発生したプレート間地震の震央位置を示す(東京大学理学系研究科 [課題番号: 1502])。

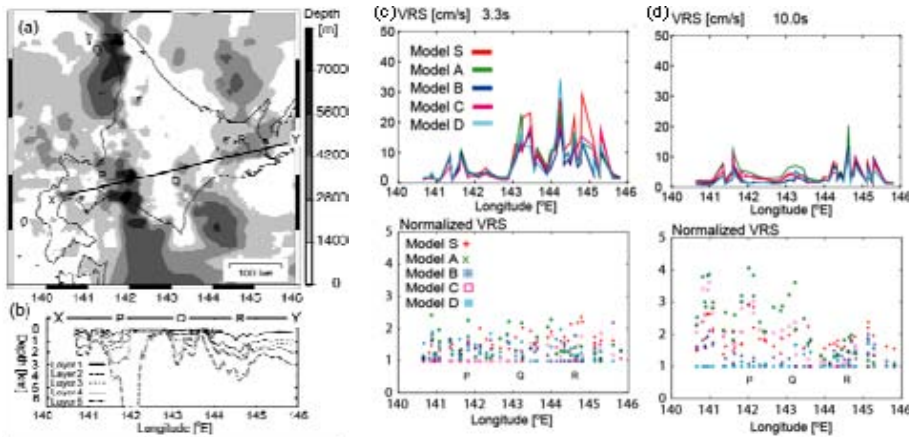


図38: 動的破壊と波動電波シミュレーション。(a)三次元構造における基盤上面の深さ分布。(b)ラインX-Yに沿った速度構造。(c) 周期3.3秒における揺れの大きさ。ラインX-Yに沿って、各モデルによって計算された応答スペクトル値(上)と、そのばらつき(下)をプロットしている。ばらつきは、五つのモデルの中の最小値を1としたときの各モデルの相対値を示している。(d) 周期10秒の時の結果(防災科学技術研究所[課題番号: 3016])。

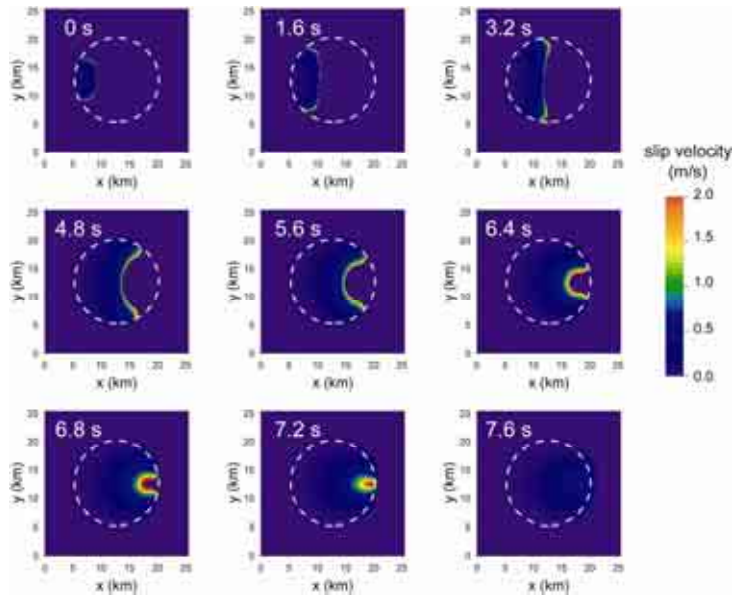


図39：円形アスペリティ破壊時の滑り速度のスナップショット。破壊はアスペリティの左端から始まり、応力集中している縁で破壊伝播が速く、アスペリティ内部で伝播が遅い（東京大学地震研究所 [課題番号：1411]）。

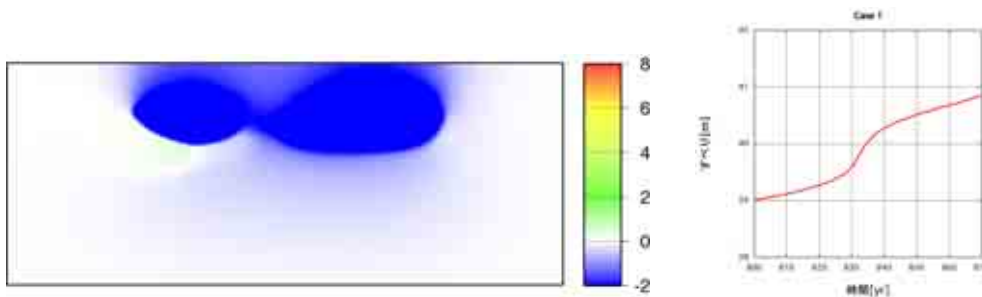


図40：(左) 間欠的ゆっくり滑り発生時の滑り速度分布。黄緑がゆっくり滑り、青が固着領域。(右) 1点での滑り積算量の時間変化（名古屋大学 [課題番号：1704]、海洋研究開発機構 [課題番号：4001]）。