

地震と地震動に関する計算科学の現状と課題

堀 宗朗¹

¹ 東京大学地震研究所
〒112-3302 東京都文京区弥生 1-1-1
hori@eri.u-tokyo.ac.jp

近年の電子・通信機器の進歩に伴い、陸上・海域、さらには衛星を使った大規模な高精度・高分解能の観測が実現した。この結果、地震学の母体である固体地球科学の分野では、観測研究が活性化し、飛躍的な発展を遂げた。この観測研究の成果を受けて、地震や地震動に関するさまざまな現象に対し、合理的なモデルと大規模数値計算を使って予測・再現を試みるシミュレーション研究^[1]も進められている。特に、2002年より稼働を始めた巨大計算機、地球シミュレータを使ったシミュレーション研究は大きな成果をあげている。地球シミュレータを使ったシミュレーションは計算科学の進歩とも密接に関係している。本講演では、基盤となる観測研究に触れながら、シミュレーション研究が対象とする地震と地震動の計算科学の現状と課題を紹介する。

地球シミュレータを使った地震と地震動のシミュレーション研究の成果の一つとして、地殻内の断層破壊から発生する地震波が地表に達して地盤を揺らす、という地震動過程^[2]を予測・再現するシミュレーションが実現できたことである。これは「どのような地震（地震動）が起こるか」という地震予知につながるシミュレーションである。我が国に展開された地震観測ネットワークの観測結果が活用されているが、何と云っても、波動伝播過程の大規模数値計算が可能となったことは重要である。地殻のモデル化とともに、大規模数値計算を効率的に実行できるコードが開発されている。一方、計算は線形差分計算であり、複雑な形状を持つ地盤や地表の構造のモデル化には限界がある。シミュレーションの時間・空間分解能も、例えば耐震設計に利用できるレベルには達していない。高速脆性破壊である断層の破壊過程も必ずしも十分には解明されていない。シミュレーションの精度や分解能の向上には、このような課題の解決が望まれる。

地球シミュレータを使ったシミュレーション研究の成果のもう一つとして、巨大地震発生評価^[3]のシミュレーションがあげられる。これはプレート境界に起こる巨大地震を対象としたもので、「何時地震が起こるか」という地震予知につながるシミュレーションである。周期的に発生する釜石沖の地震観測の例が示すように、地震はある時間周期で生じる現象である。プレートやプレート境界を対象とした100km単位の物理モデルと、100年単位での時間スケールで、地球シミュレータを使った大規模数値計算によって、いわゆる南海・東南海・東海地震の地震サイクルを再現するシミュレーション研究が進められている。世界的にもこの種のシミュレーション研究は端緒に着いたばかりである。基盤となる陸域や海域観測には未解決の課題は多いものの、精力的にプレートやプレート境界のモデルや数値計算手法も研究・開発が進められている。特に、地震観測の他、衛星観測の一つであるGPSを使った地殻変動の観測を利用し、より正しいモデルを構築するデータ同化の研究は脚光を浴びている。

観測重視の固体地球科学の分野において、地震と地震動の計算科学は一定の役割を果たし、大きな成果をあげている。事実、我が国の地震と強震動の計算科学は世界を文字通りリードしている。また、固体地球科学と計算力学という二つの分野融合が成功した例とも考えることもできる。

●参考文献

[1] Hori, M. *Introduction to computational earthquake engineering*, Imperial College Press, 2006.

[2] Furumura, T. Hayakawa, M. Nakamura, K. Koketsu, and T. Baba, Development of long-period ground motions from the Nankai Trough, Japan, earthquakes: Observations and computer simulation of the 1944 Tonankai (Mw8.1) and the 2004 SE Off-Kii Peninsula (Mw7) Earthquakes, *Pure Appl. Geophys.*, **165**, 585-607, 2008.

[3] Takane Hori, Mechanisms for variation in size and occurrence interval of interplate earthquakes, *Zishin*, **61**, S391-S402, 2009.

地震と地震動に関する 計算科学の現状と課題

堀宗朗
東京大学地震研究所

はじめに

◆ 固体地球科学

- 観測が中心
- 陸域
- 海域
- 衛星

観測と密接な関係

◆ 計算科学に対するサポート

- 地球シミュレータと次世代スパコン
- 地震予知とシミュレーション研究

比較的良好な計算環境

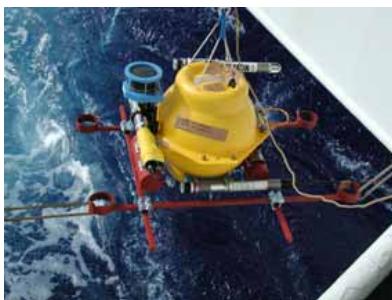
陸域: ネットワーク



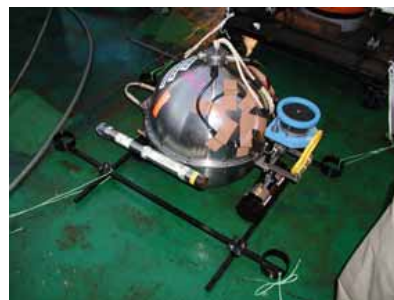
気象庁
大学
防災科学技術研究所
その他の機関
(気象庁)

防災科学技術研究所
強い地震の観測ネットワーク K-Net
約1000点, 25km間隔

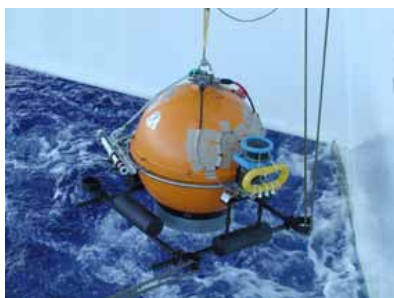
海域: 海底地震計



短周期 (4.5Hz) 短期 (3ヶ月) 観測用



短周期 (1Hz) 長期 (1年まで) 観測用

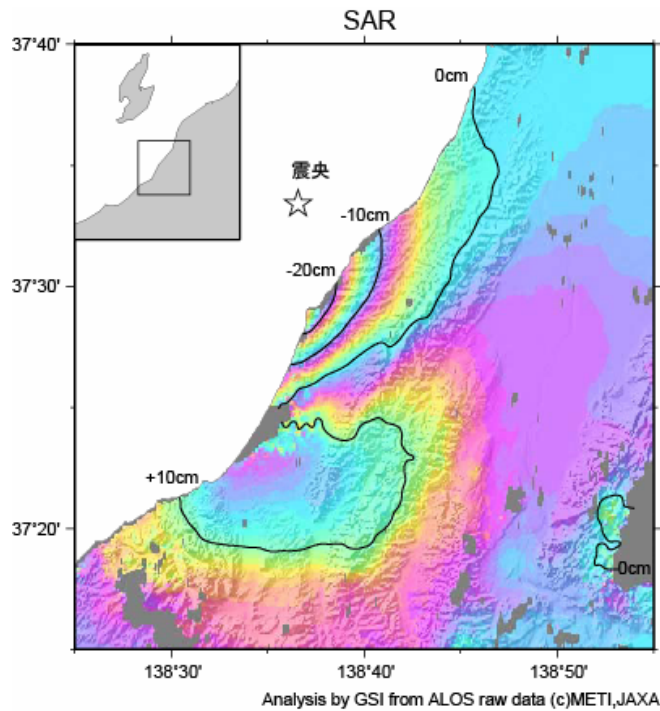


広帯域 (360秒まで) 長期 (1年以上) 観測用

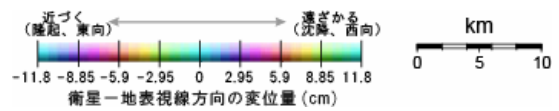


光ケーブル式海底地震・津波観測

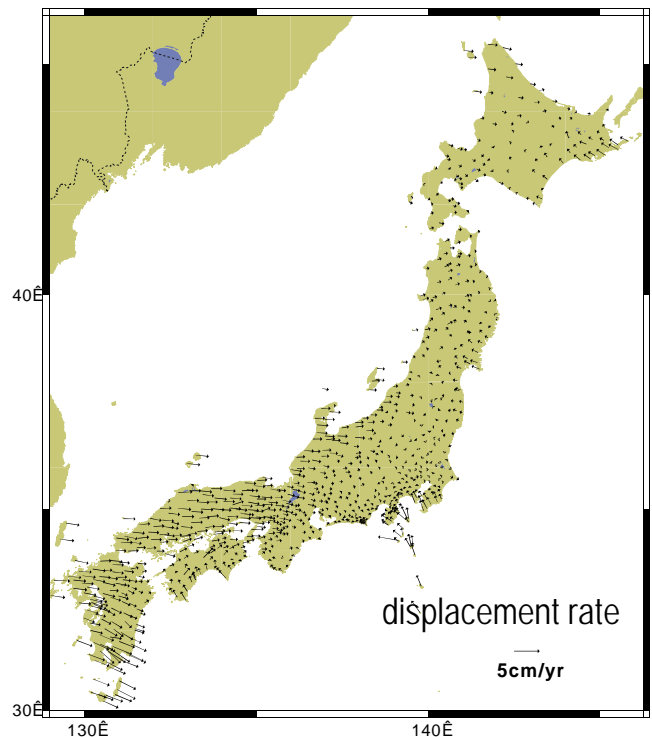
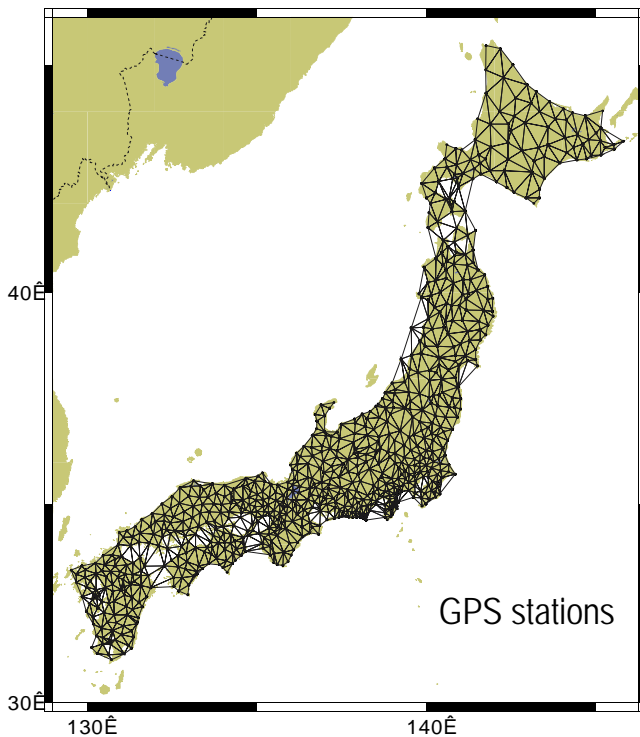
衛星: SAR



「だいち」が観測した、2007年新潟県中越沖地震による地殻変動の分布。この地震によって、20cm以上も地面が沈んでいることがわかる。
(国土地理院)



衛星: GPS



地震と地震動の計算科学

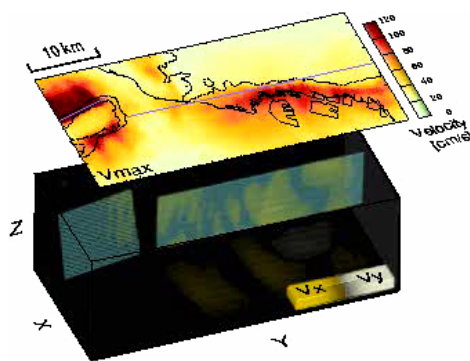
◆地震動過程

- 物理 断層破壊
地殻波動伝播
- 数理・計算 有限差分法・スペクトル要素
- 地殻モデル 速度構造

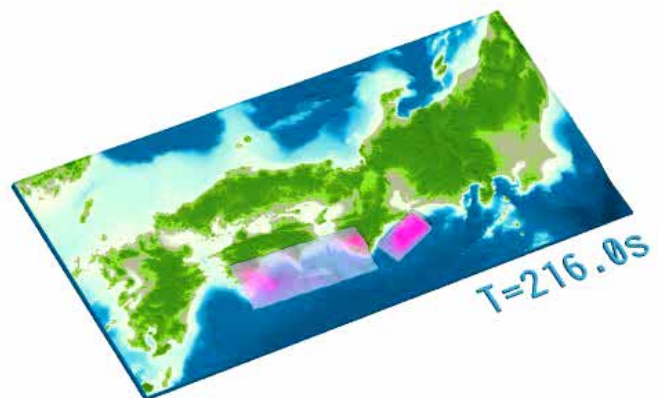
◆巨大地震動発生評価

- 南海トラフ 東海・東南海・南海地震
連動性
- 地震予知研究 シミュレーション研究
- CREST マルチフィジクス・マルチスケール

強震動シミュレーション

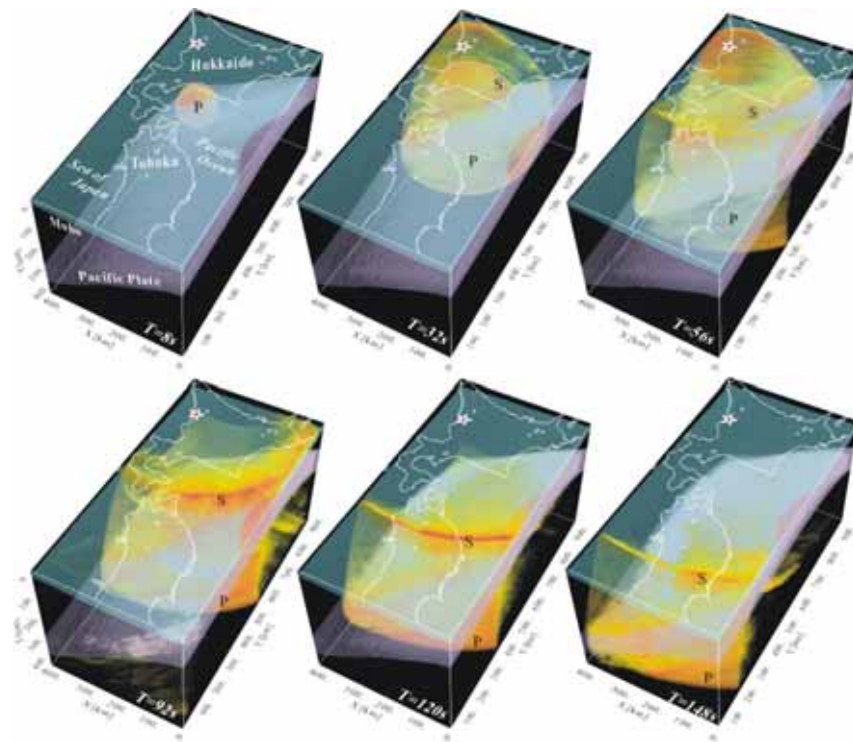


阪神・淡路大震災：再現

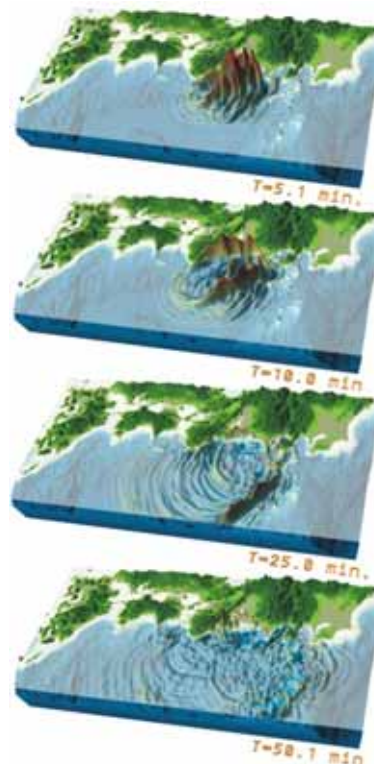
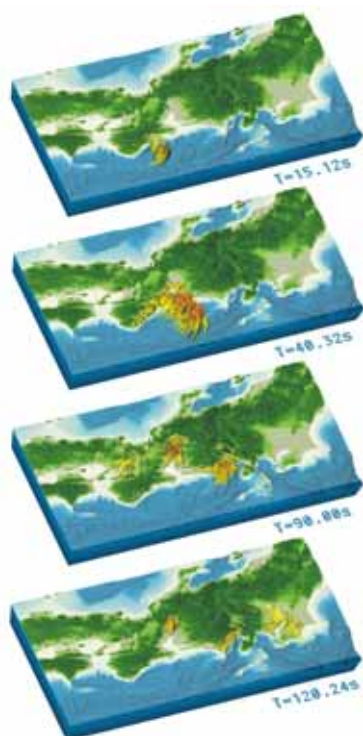


南海・東南海地震：予測

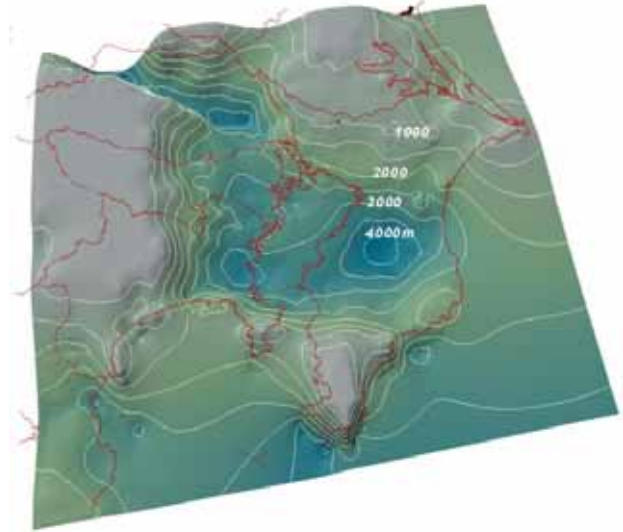
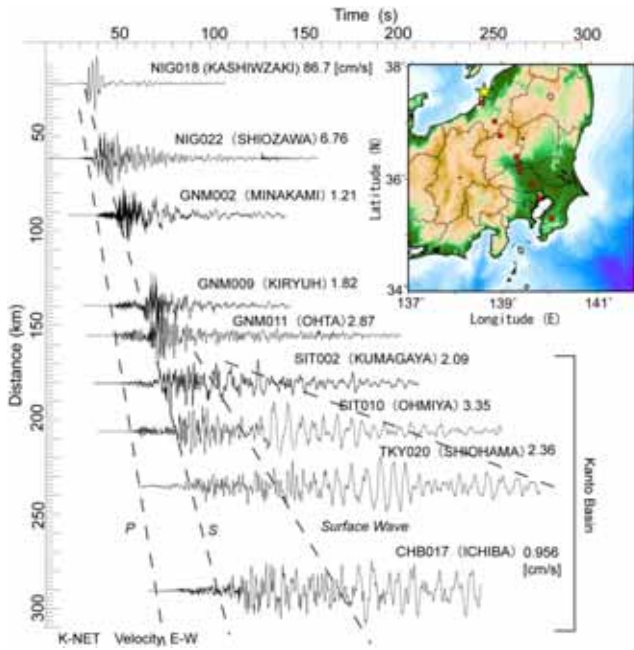
異常震域シミュレーション



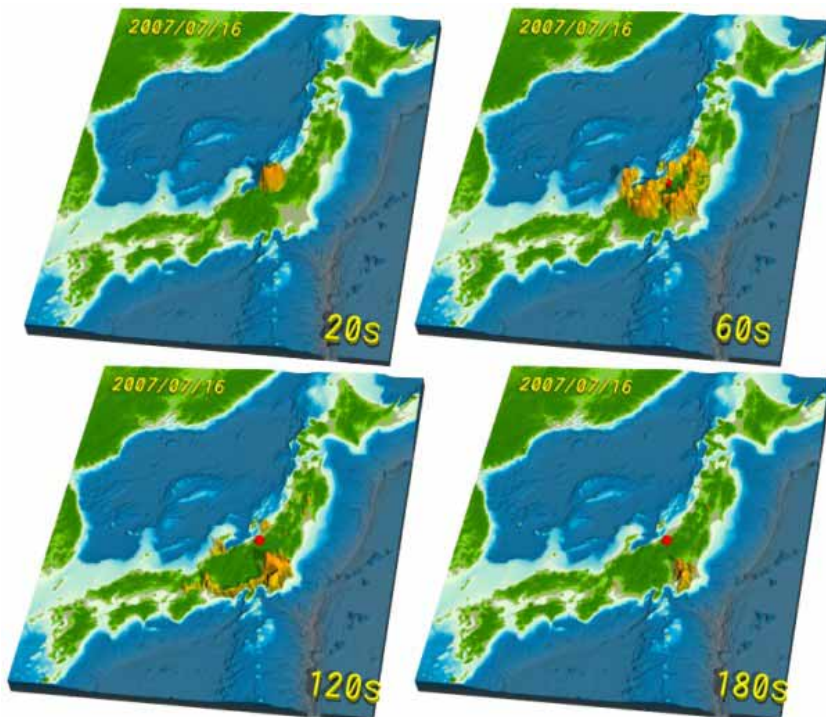
地震動 & 津波シミュレーション



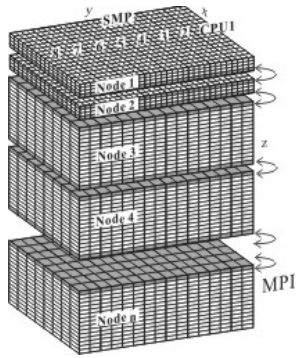
2007新潟県中越沖地震



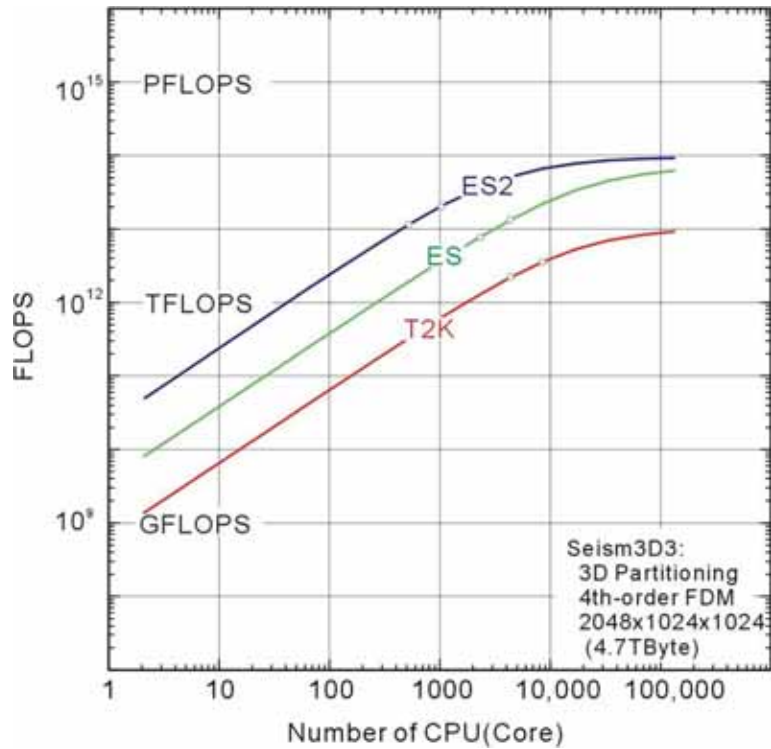
2007新潟県中越沖地震



計算科学的側面



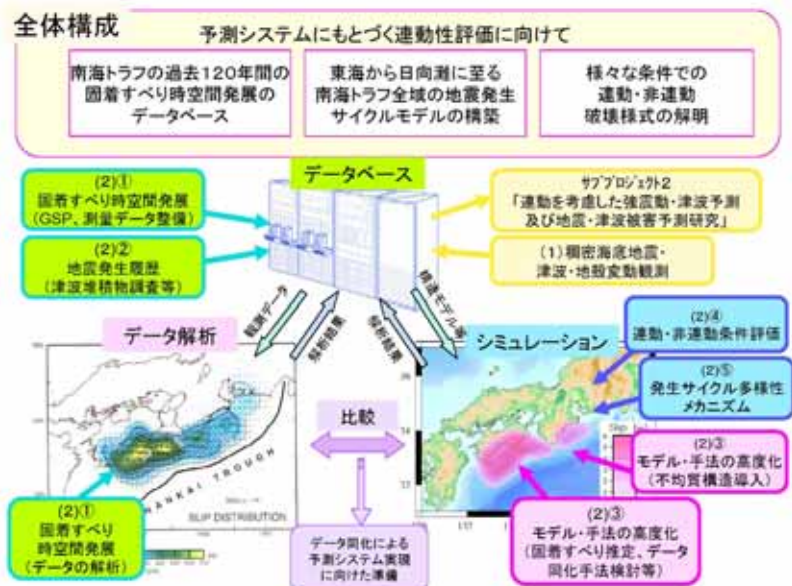
大規模並列計算
計算性能の検証



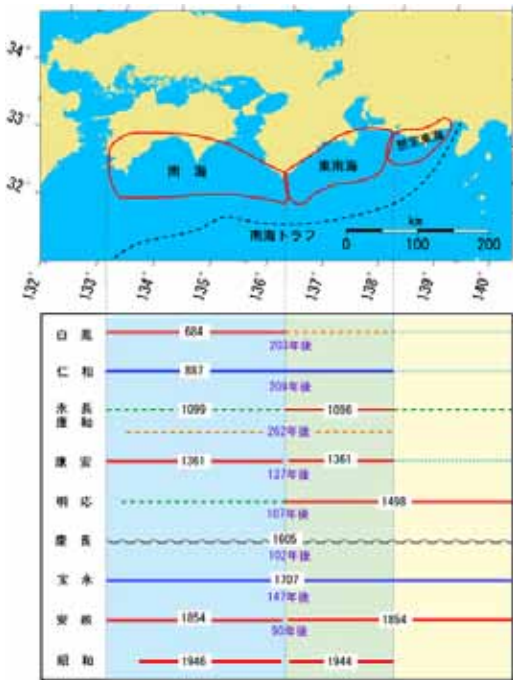
巨大地震発生評価

◆南海トラフでの巨大地震発生の評価

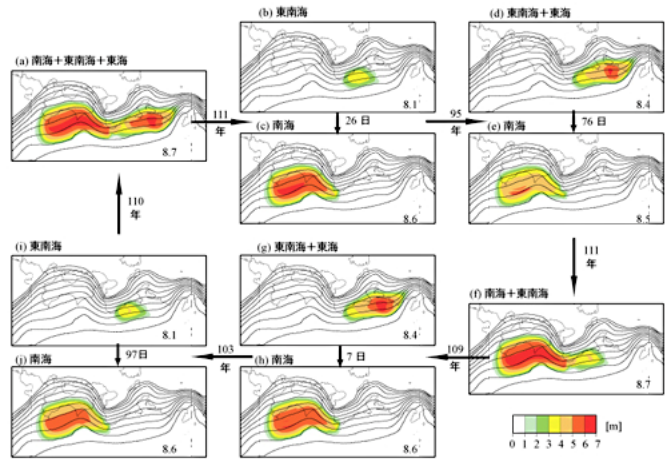
- 東海・東南海・南海地震
- 連動性
- データ同化



連動性



—は確実。---は可能性が高い、---は可能性がある、---は不明を意味する。~は津波地震、-は運動を示す。



地殻活動予測シミュレーション

◆モデルの対象

- 北米・太平洋・フィリピン海・ユーラシアプレート
- 日本列島域を一つのシステム

◆リアルタイム解析

- 膨大な地殻活動データの観測
- データ同化

◆大地震発生過程の定量的な予測

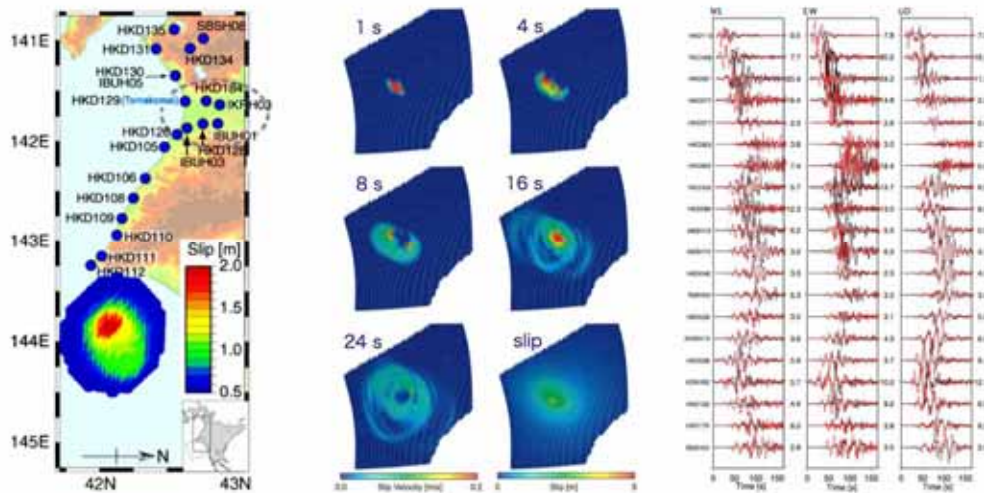
- プレート相対運動によって駆動される広域応力の増加
- 準静的な震源核の形成
- 動的破壊の開始・伝播・停止

日本列島域

● CAMP(Crustal Activity Modeling Program)モデルの構築

- 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

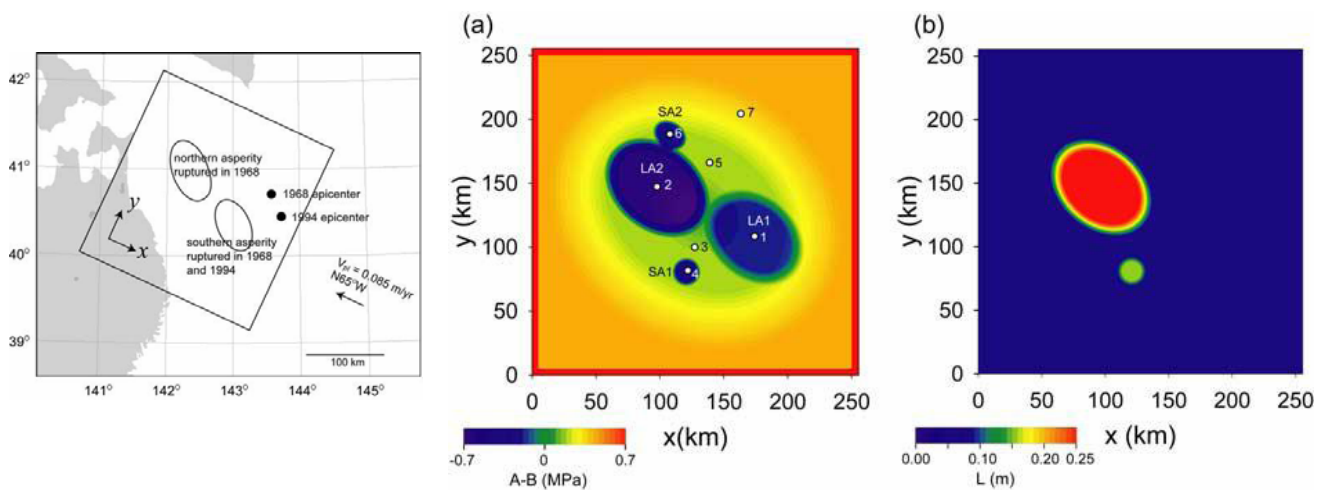
2003年十勝沖地震 (M8.0)



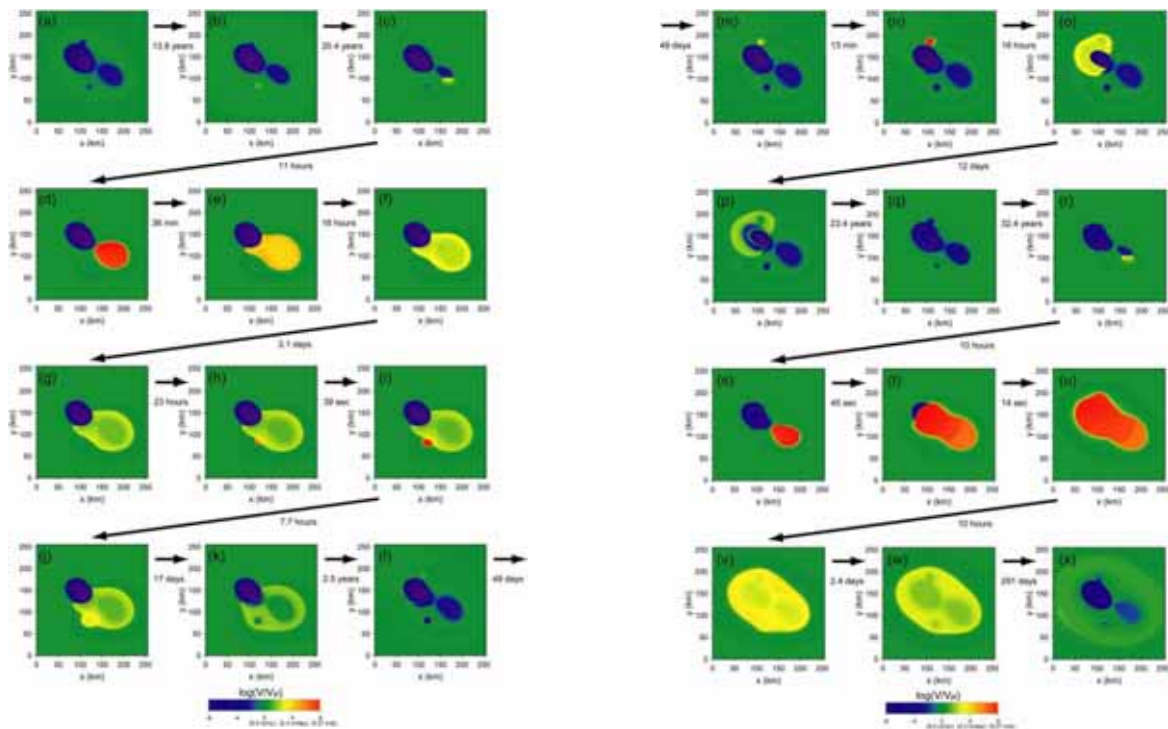
特定の地域

● 1994年三陸はるか沖地震 (M7.6)

- 摩擦特性の不均一性を考慮
- 余効滑りと最大余震 (M7.2) の再現
- 三陸沖のプレート境界地震の繰返しを説明するアスペリティモデルの構築



三陸沖地震発生サイクル



予測シミュレーションの高度化

- ◆ 余効変動のGPSデータ時間依存逆解析による摩擦パラメータ推定
- ◆ 熱多孔質媒質中での破壊伝播シミュレーション
- ◆ 離散要素法による粉体シミュレーション
- ◆ 内陸地震のモデル化に向けた粘弾塑性有限要素法(FEM)コードの開発
- ◆ 有限要素法およびその拡張によるプレート境界域周辺の地殻変動シミュレーション
- ◆ 不均質媒質における破壊伝播シミュレーションモデルの高度化

地震・津波災害予測システム

◆ 地震発生予測サブシステム

- 地震 / 地殻変動データの逆解析
- 地震発生と波動伝播の連成シミュレーション

◆ 強震動 / 津波予測サブシステム

- 2008年中国四川地震の長周期地震動シミュレーション
- 地震 - 津波連成シミュレーションコードの高度化
- 次世代スパコンに向けた大規模並列計算コードの整備

◆ 人工構造物振動予測サブシステム

- 都市構造物群の地震時挙動評価
- 貯蔵タンクの流体構造連成解析手法の開発

地震・津波災害予測システム

◆ 地震発生予測サブシステム

- 地震 / 地殻変動データの逆解析
- 地震発生と波動伝播の連成シミュレーション

+ 階層連結プラットフォーム
多階層解析支援データリザボアの開発
並列前処理手法の開発と並列プログラミングモデル

◆ 強震動 / 津波予測サブシステム

- 2008年中国四川地震の長周期地震動シミュレーション
- 地震 - 津波連成シミュレーションコードの高度化
- 次世代スパコンに向けた大規模並列計算コードの整備

◆ 人工構造物振動予測サブシステム

- 都市構造物群の地震時挙動評価
- 貯蔵タンクの流体構造連成解析手法の開発

おわりに

- ◆ 観測重視の固体地球科学の中で、地震と地震動の計算科学は一定の役割を果たしている
 - 災害軽減
 - 地震予知
- ◆ 固体地球科学分野のシミュレーションをリード
- ◆ 研究分野融合の成功例