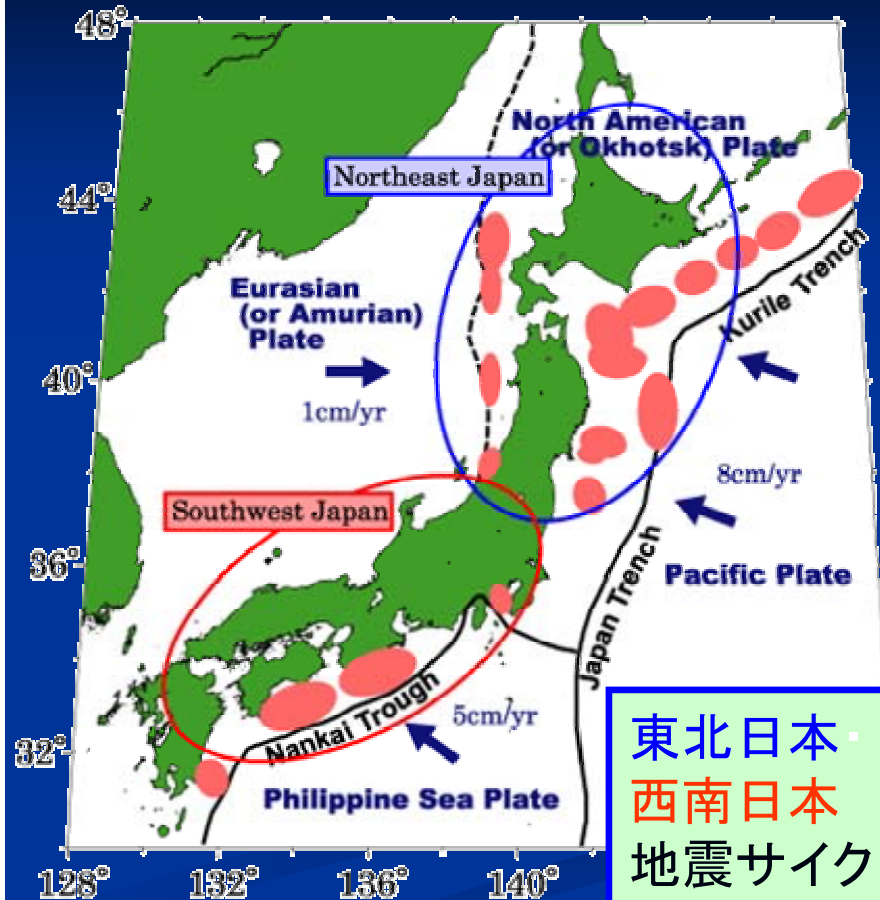


# 複雑断層系の地震発生過程 シミュレーション

平原和朗（名大）・加藤尚之・宮武隆（東大地震研）・堀高峰（固体地球統合フロンティア研究システム）・兵藤守（地球シミュレータセンター）・和田義孝（諏訪東京理科大）・光井能麻（名大）・殷峻（ASTOM）・宮村倫司（日本大）・仲間豊（富士総合研究所）・金井崇（慶應大）・飯塚幹夫（高度情報科学技術研究機構）

# 研究概要

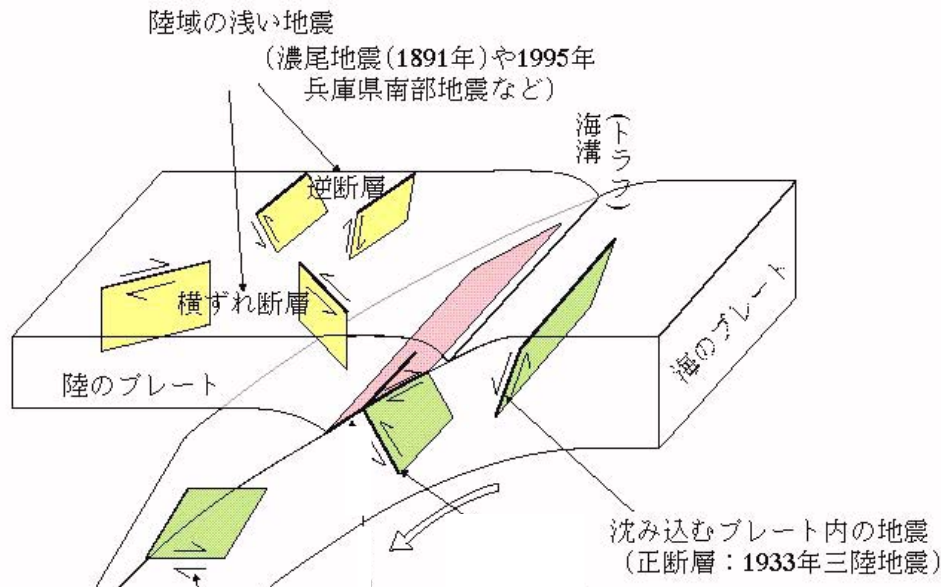
- 東北日本および西南日本における地震発生過程のシミュレーションを行う。
- 特に、南海トラフ巨大地震サイクルのモデリングを中心に、西南日本下に複雑な形状で沈み込むフィリピン海プレート構造を含む3次元不均質場での、複数の断層の相互作用を考慮した地震発生過程のシミュレーションを行う。
- 得られる動的破壊モデルは、地震波動伝播グループにおける強震動予測に役立てられる。



東北日本  
西南日本  
地震サイク  
ルモデル

# 研究目的

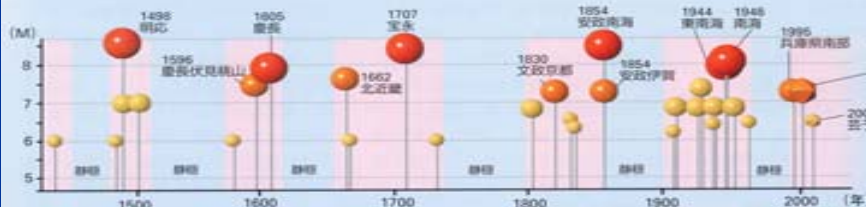
- 3次元的に複雑な地下構造内の様々な場所で起こる地震サイクルシミュレーション
- それらの相互作用



2000年10月におきた鳥取県西部地震(M7.3)で倒壊した出雲大社上道教会。震源は米子市の南約20キロ。147人の負傷者がいた。

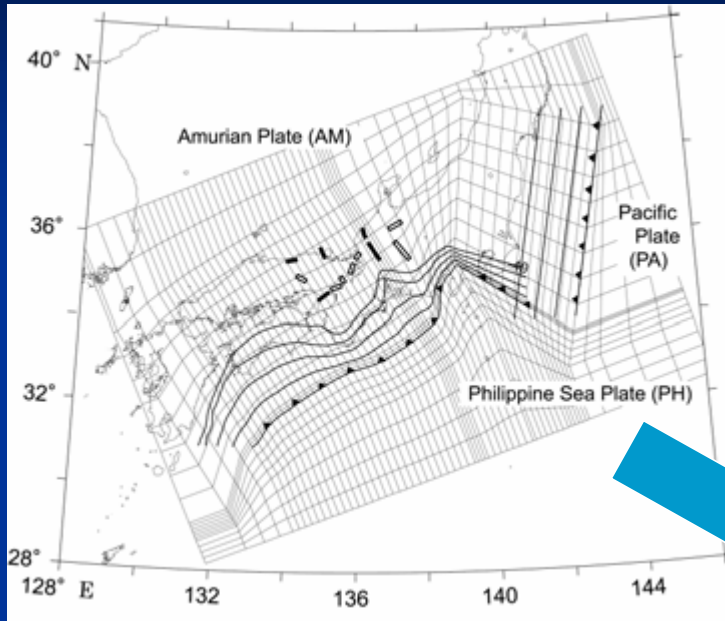


1995年以後西日本でおきた主な地震と場所



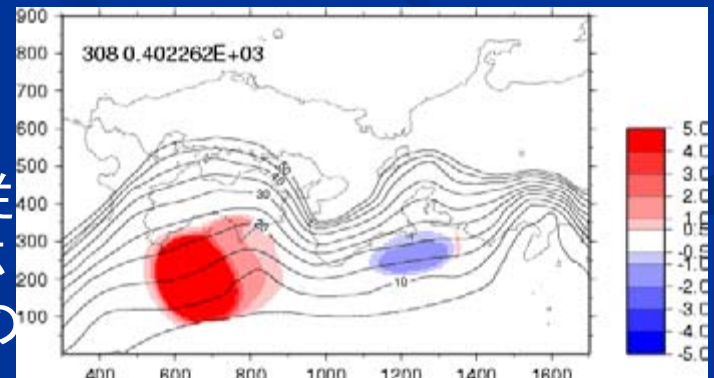
中世以後現在までの南海地震と近畿地方(右上の赤い点線の範囲内)の内陸性地震とそのマグニチュードを示す。歴史的に南海地震がおこる30~40年前から、内陸性地震がたびたびおきていることがわかる。1995年に兵庫県南部地震がおり、すでに次の南海地震へ向けた活動がはじまったと考えられる。

# 計算手法



有限要素法(GeoFEM)により3次元不均質構造を考慮したグリーン関数を計算

すべり速度・状態依存摩擦法則に従う摩擦力と変形に伴う断層面での応力とが釣り合うとして面上のすべりの時間発展を計算



# 今年度の当初計画と達成度

## 準静的地震サイクルシミュレーション

1) まずは、平面境界および弾性問題を扱い、実際のアスペリティーやセグメントに対応する摩擦パラメータ分布(十勝沖～三陸沖・東海～南海)を与え、数百年の地震サイクルを計算する。 ----→●

2) 次に、粘弾性媒質中でのグリーン関数を計算し、準静的地震発生サイクルシミュレーションを実行する。 -----→●

## 動的破壊伝播シミュレーション

3) 接触解析を用いたGeoFEM動的破壊伝播シミュレーションモジュールを、領域を限った東北日本および西南日本モデルさらには東海地方モデルで開発する。 ----→▲

4) これにはプレート形状に加え、内陸の複雑な地殻構造を含む有限要素モデルをソフトウェアCHIKAKU(理研・原研)を用いて作成する。

-----→▲

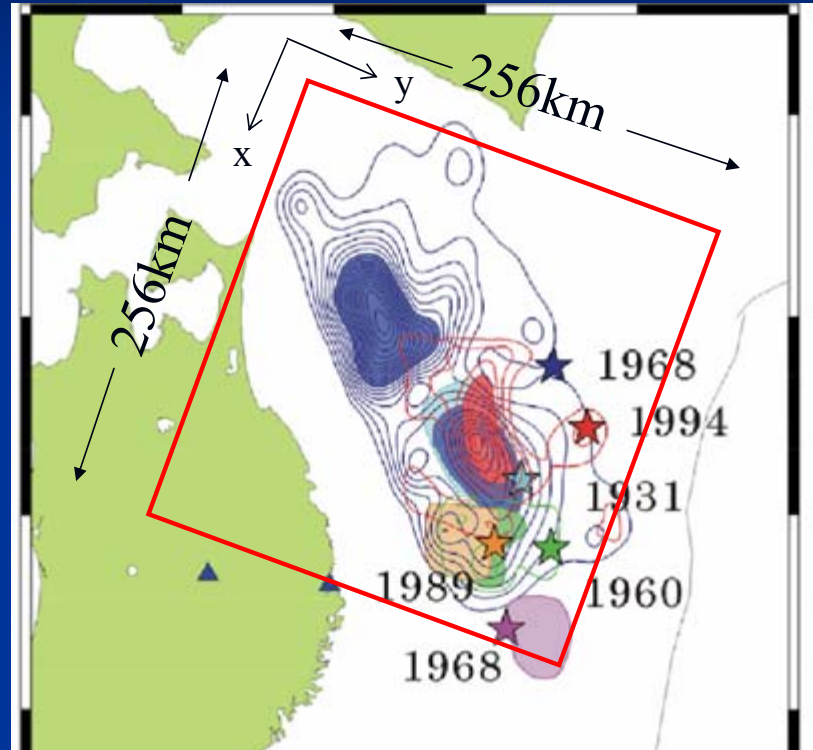
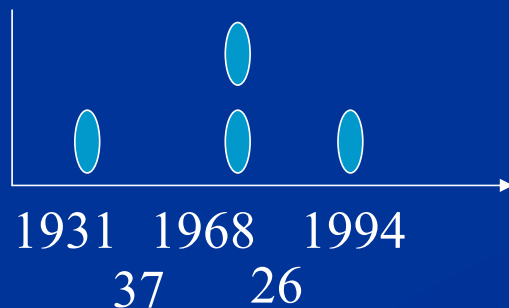
# 地震サイクルシミュレーション

- 半無限弾性媒質のグリーン関数
- 平面断層
- 摩擦特性の不均質
  - 東北日本(十勝沖～三陸沖)
  - 西南日本(東海～南海)
- ES上での大規模計算

# 1994三陸はるか沖 & 1968十勝沖

## ■ アスペリティの連動および単独破壊

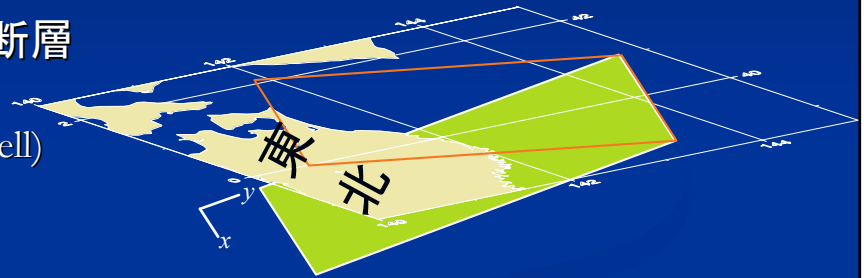
- 上記の地震で共通のアスペリティが破壊
- 1968年の際は2つのアスペリティが連動
- さらに前(1931年)は1994年同様浅い方のみ



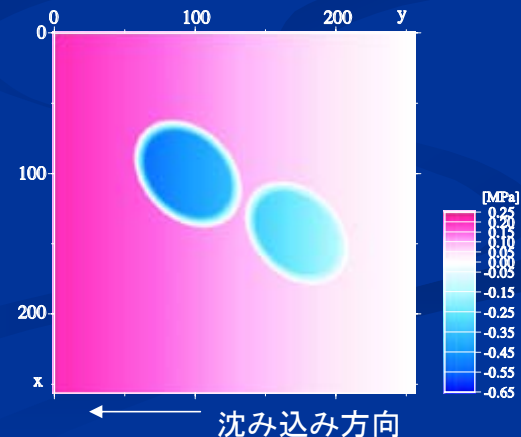
# 1994三陸はるか沖 & 1968十勝沖

## ■ モデル

- 半無限均質弾性体中の平面断層
  - Dip=18°
  - 256km x 256km (1km x 1km cell)
- すべり速度・状態依存摩擦則
- プレート間相対運動速度
  - 8cm/year, y軸方向
- 摩擦特性分布
  - 2つの隣接した不安定領域
  - 法線応力深さ依存を考慮

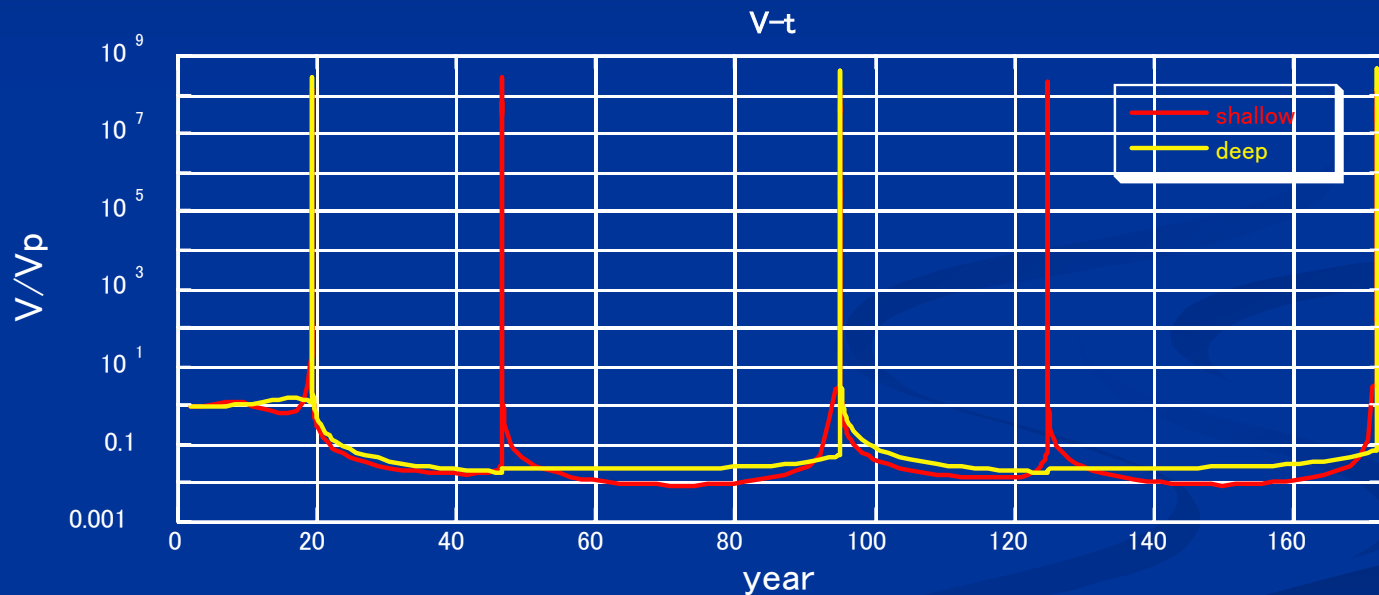


(a-b)  $\sigma_n$ の分布



# 1994三陸はるか沖 & 1968十勝沖

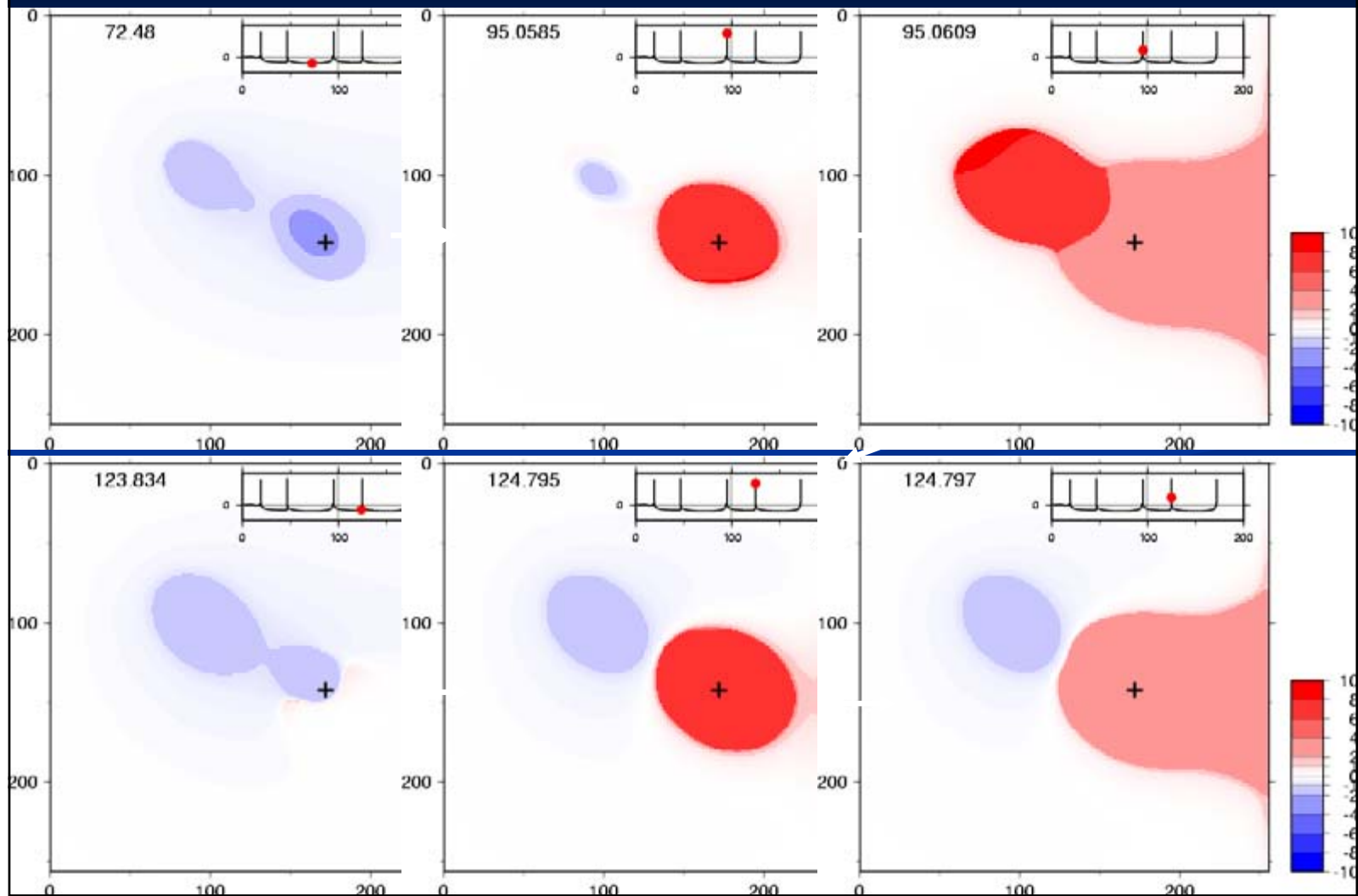
## ■ すべり速度の時間変化



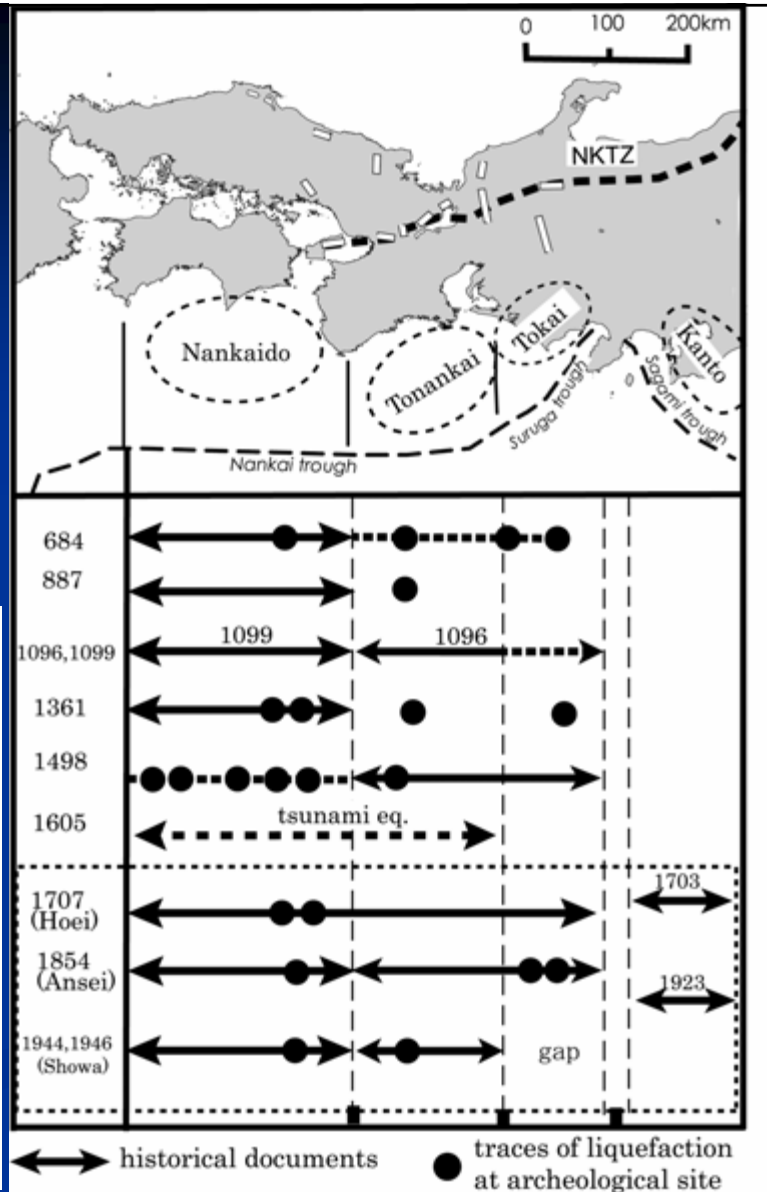
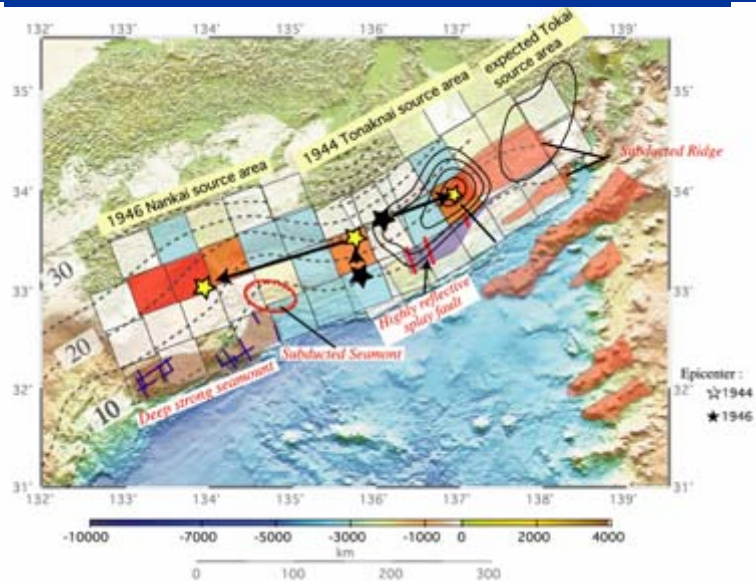
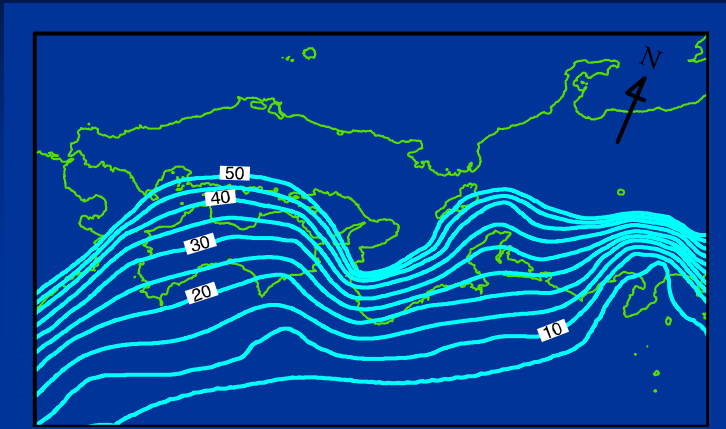
次のすべ意分布の図の+の位置におけるすべり速度の時間変化を示している

# すべり速度分布のスナップショット

青は固着 赤は地震時すべり  
白はプレート速度ですべてている。



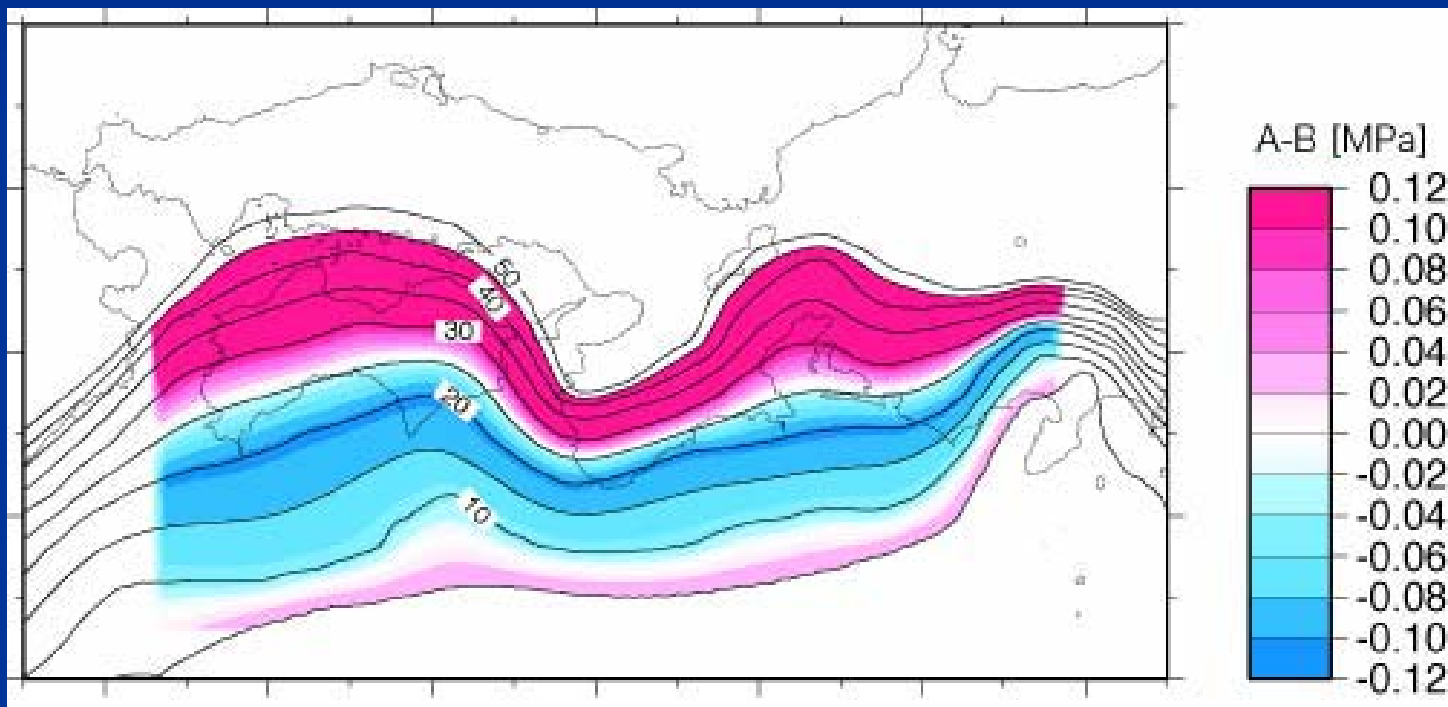
# 南海トラフ



# 南海トラフ

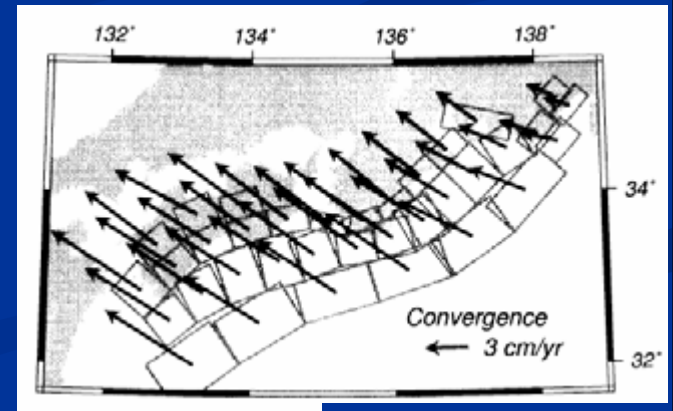
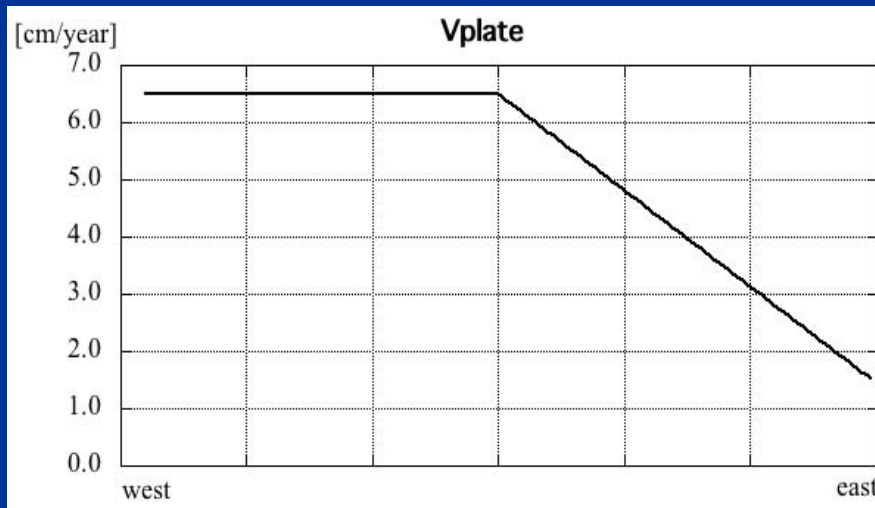
## ■ モデル

- 平面断層 : 691.2km x 307.2km (1.2km x 1.2km cell)
- プレート形状に対応した摩擦特性の不均質分布



# フィリピン海プレートの収束速度

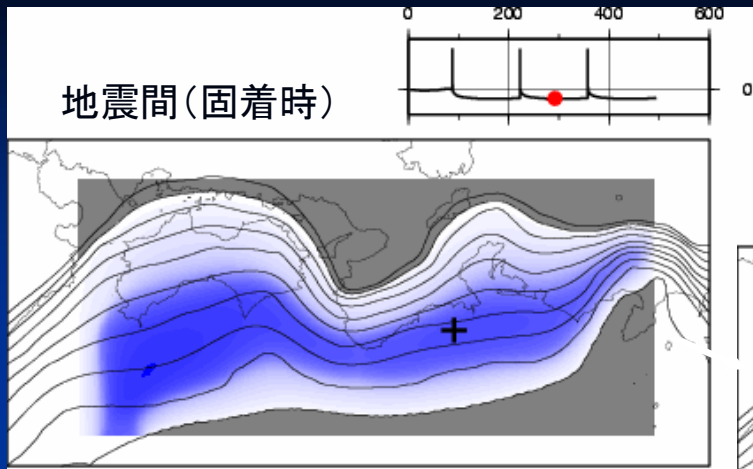
- 速度: 東から西へ速度が増加
- 収束方向:  $N55^{\circ} W$  (Miyazaki and Heki, 2001)



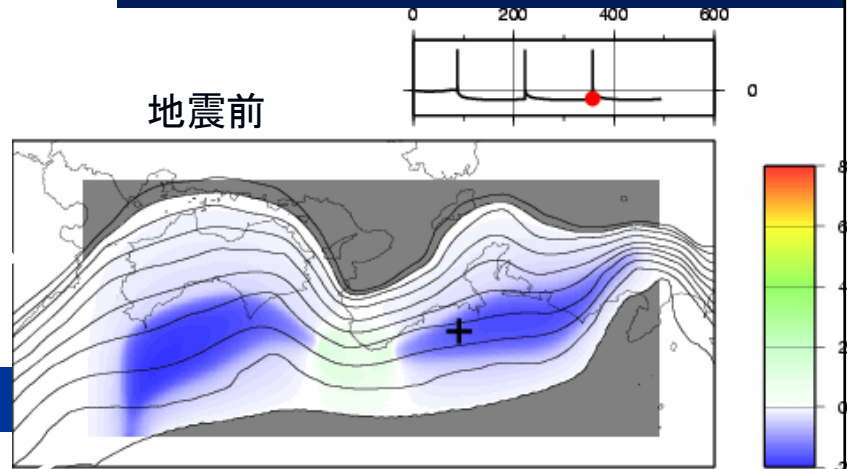
Heki and Miyazaki, 2001

# すべり分布のスナップショット

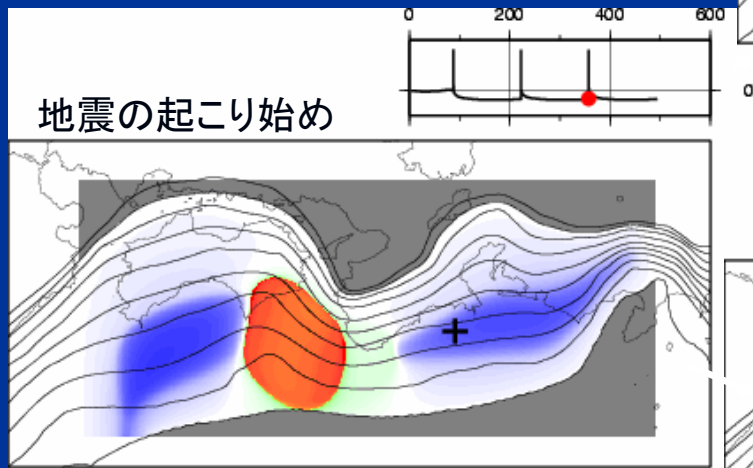
地震間(固着時)



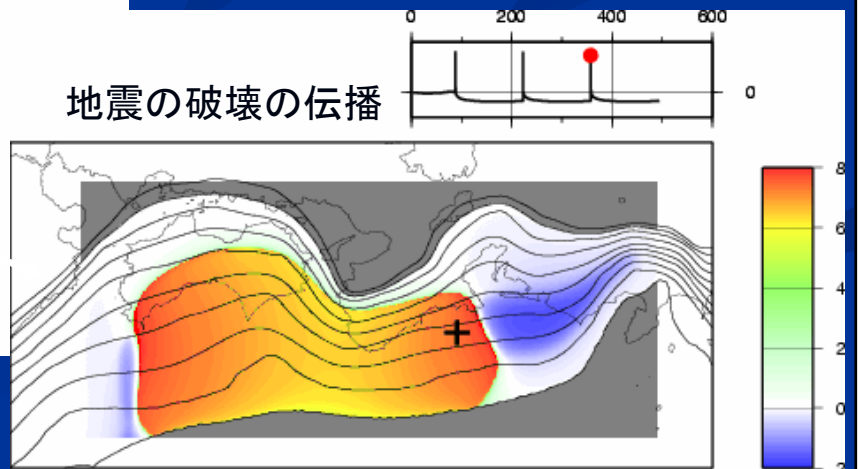
地震前



地震の起こり始め



地震の破壊の伝播



# GeoFEMでのグリーン関数計算

## ■ モデル構築

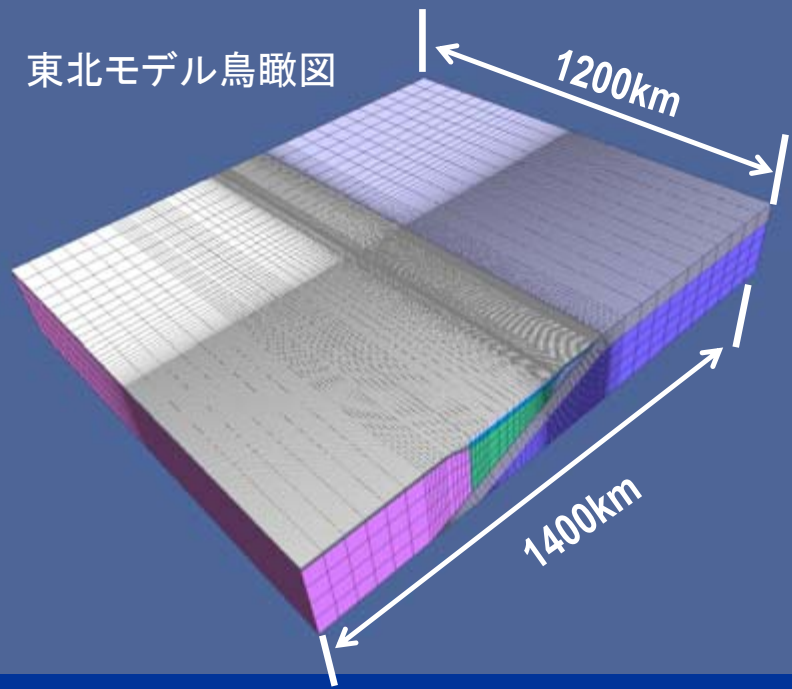
- 東北日本(2.5次元、平面断層)
- 西南日本(3次元、疑似曲面断層)

## ■ 地震サイクル計算との結合

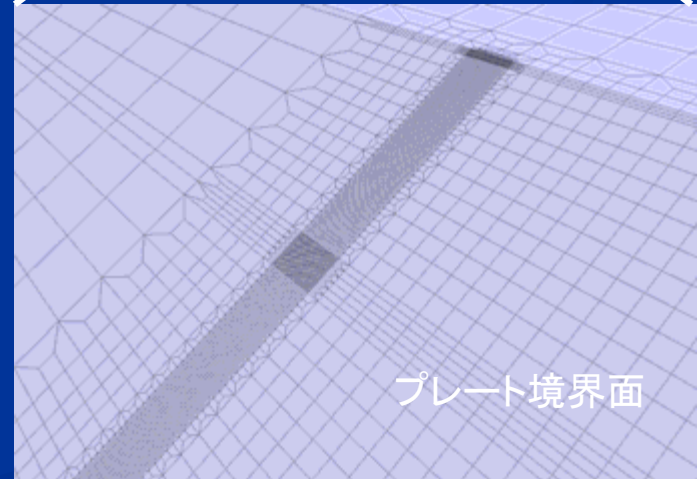
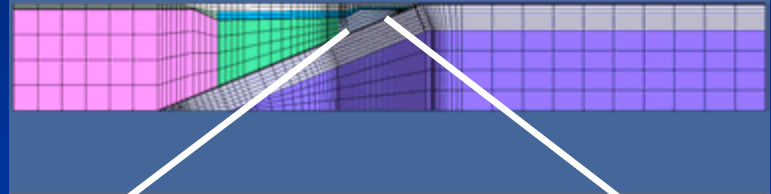
- 単純なプレート形状モデルでは完成

# 東北日本FEMモデル

東北モデル鳥瞰図

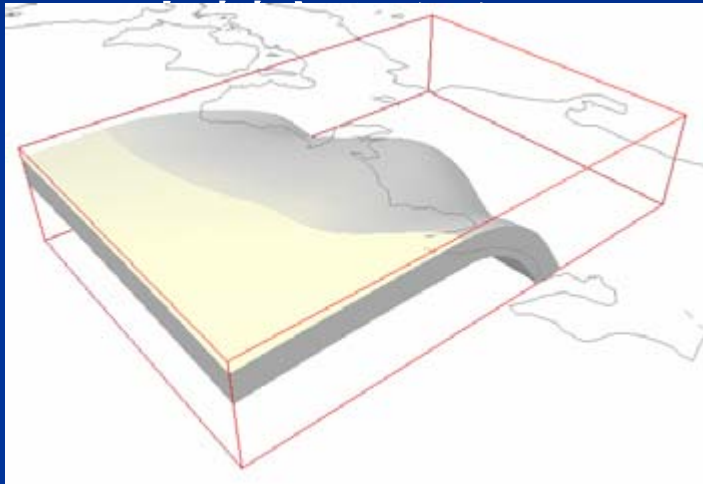


二次元断面

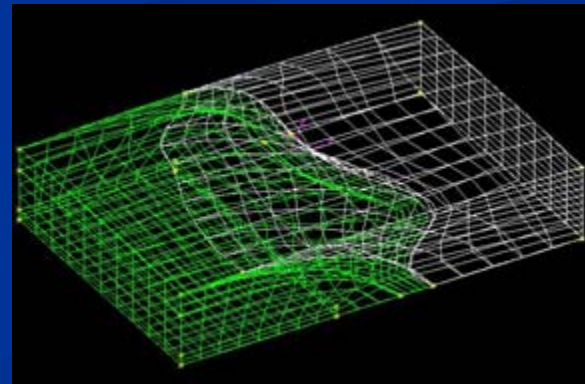
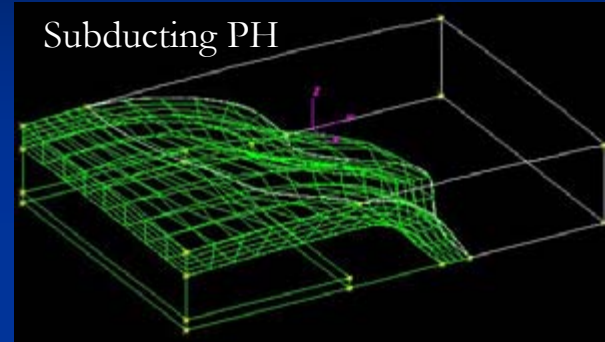


プレート境界面

# 西南日本FEMモデル

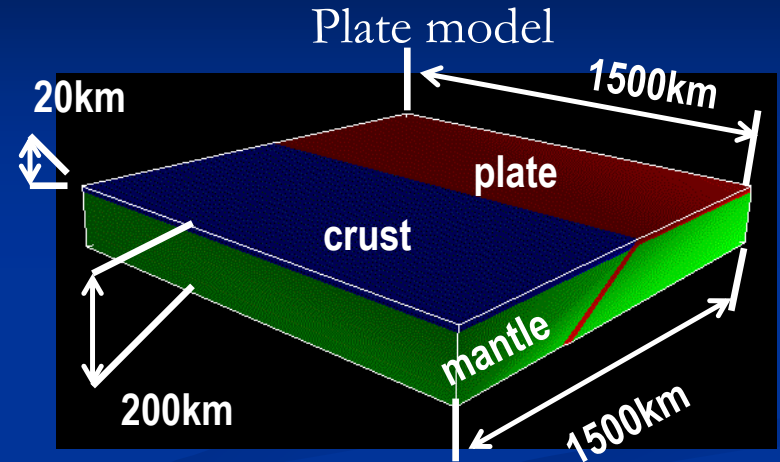


CHIKAKU CAD(理研・原研)



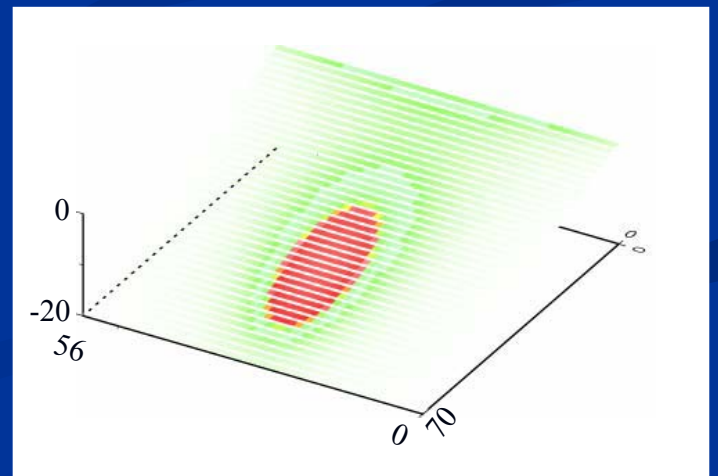
# 地震サイクル計算との結合

- 単純プレート形状



- 粘弾性を考慮した地震サイクルの計算

- すべり速度分布のスナップショット



# これまでの成果と今後の課題

## ■ 成果

- 大規模弾性地震サイクルシミュレーション
  - **三陸沖の2つのアスペリティーの連動**
  - **南海トラフ巨大地震:**
    - **紀伊半島沖からの破壊開始**
- GeoFEM粘弾性応答計算のESでの最適化

## ■ 今後の課題

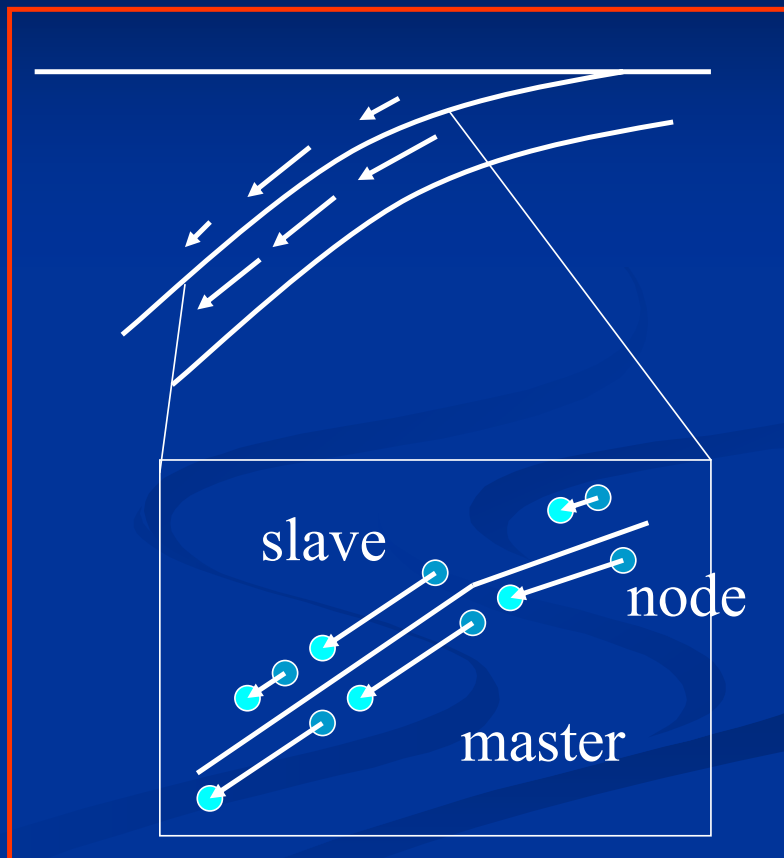
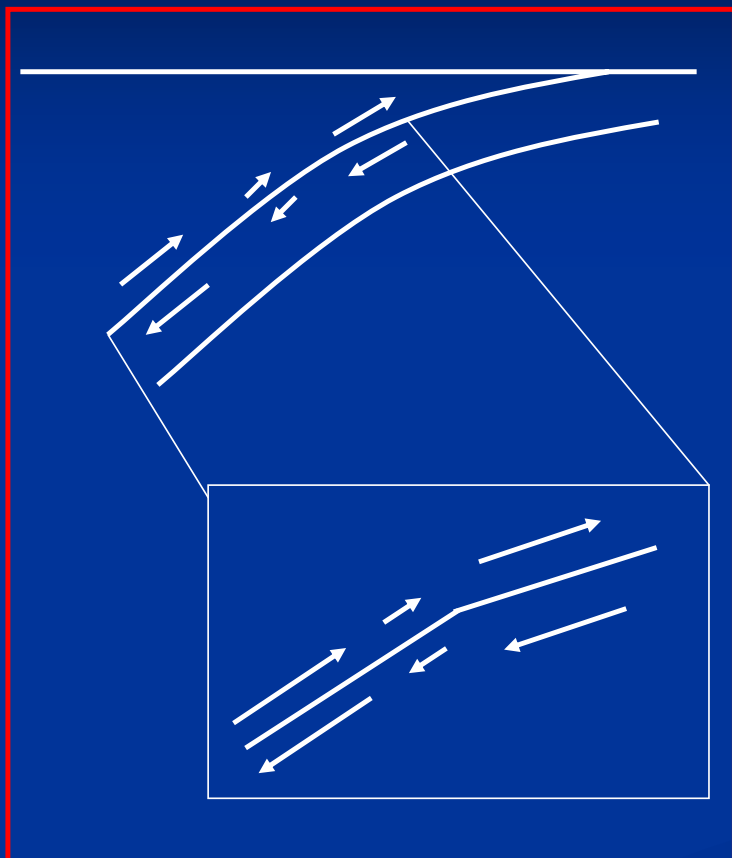
- 大規模有限要素モデルの調整
- 大規模粘弾性地震サイクルシミュレーション
- GeoFEMによる動的破壊過程計算

# 補足説明

# プレート境界・断層

ディスロケーション

FEM接触解析



固着状態・地震発生→摩擦パラメータ推定

# 基礎方程式(各小断層)

- つりあいの式(地震波放出の影響を考慮)

$$\tau_i = -\sum_j k_{ij}(\delta_j - V_{pl}t) - \eta V_i$$

- 摩擦法則

$$\tau_i = \left[ \mu_{pl} + \Theta_i + a_i \ln(V_i/V_{pl}) \right] \sigma_n$$

$$\frac{d\Theta_i}{dt} = -\frac{V_i}{L_i} \left[ \Theta_i + b_i \ln(V_i/V_{pl}) \right]$$



## ■ 解くべき式

$$\frac{dV_i}{dt} = -\frac{\sum_j k_{ij}(V_j - V_{pl}) + \sigma_n d\Theta_i/dt}{a\sigma_n/V_i + \eta}$$

$$\frac{d\Theta_i}{dt} = -\frac{V_i}{L_i} \left[ \Theta_i + b_i \ln(V_i/V_{pl}) \right]$$

## ■ 計算

- グリーン関数  $k_{ij}$ : 半無限弾性 (Okada, 1992)
- 時間積分: 時間刻み幅可変のRunge-Kutta法 (Press et al. 1992)
- 32node x 8PE x 5.7hour
  - 4000steps (145years, 5seismic cycles)
  - 1.1TFLOPS (4.3GFLOPS/PE), 99.5% vector ratio

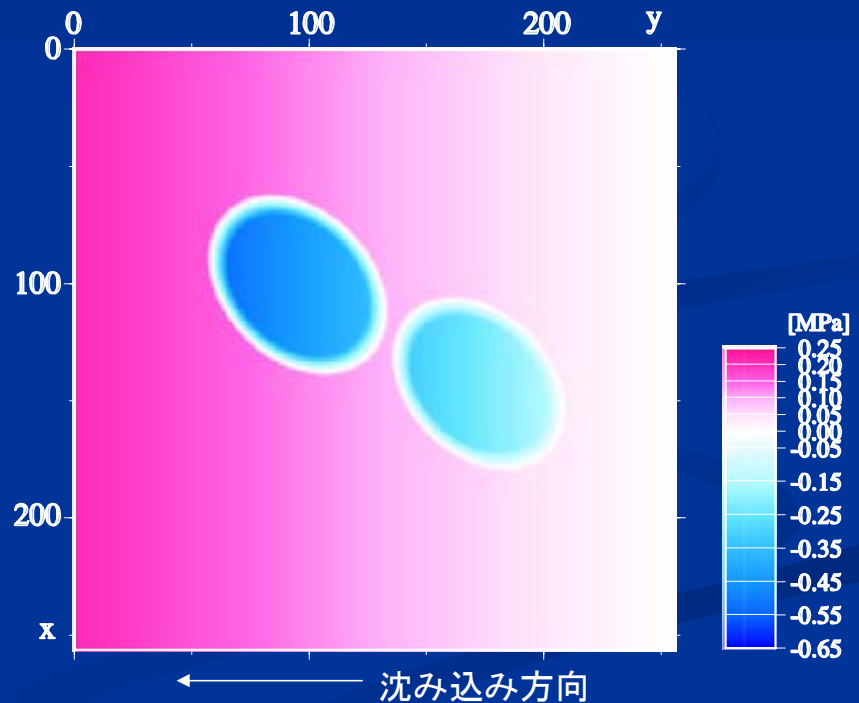
三陸沖

# 1994三陸はるか沖 & 1968十勝沖

## ■ 摩擦特性の分布

- $a=1.0e-3$
- $b=1.5e-3$ (アスペリティ内)
- $b=8.5e-4$ (外)
- $L=5\text{cm}$  (深部15cm)
- 法線応力の深さ依存を考慮

(a-b)  $\sigma_n$ の分布



# 南海トラフ

## ■ モデル

- 平面断層 : 691.2km x 307.2km (1.2km x 1.2km cell)
- プレート形状に対応した摩擦特性の不均質分布

## ■ 計算

- 576x256cells, 128node x 8PE x 5.4 hour
  - 3000 steps (380 years, 3 seismic cycles)
  - 3.5TFLOPS, (3.4GFLOPS/PE), 99.1% vector ratio

# 何が大変か？

## ■ モデル

- 1km × 1kmセル上の応力を正確求めるには・・・
  - 変位を与えるセルの近傍を50m～100mメッシュ分割
  - モデル規模が非常に大

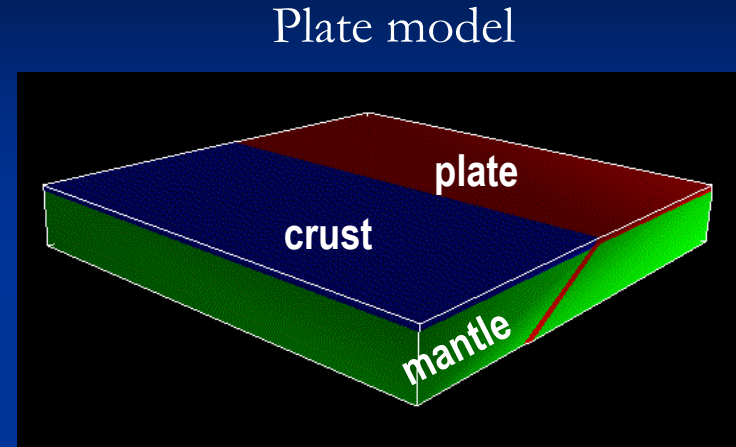
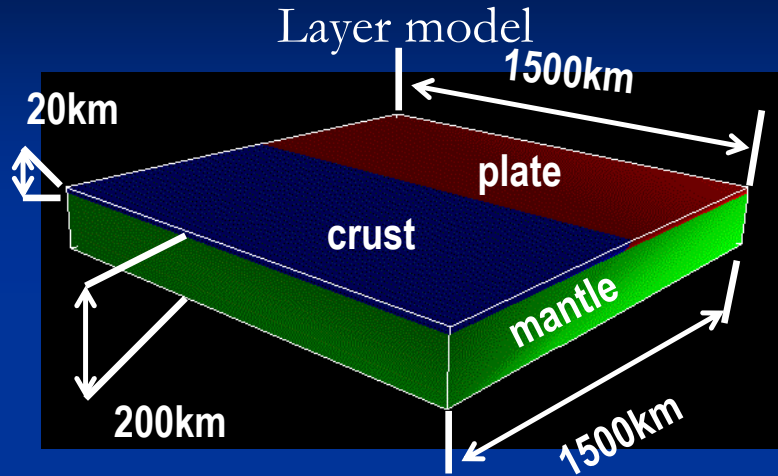
## ■ 計算量

- (例えば200km × 600km)断層を考えると
  - $200 \times 600 = 120,000$ 個のセルに対する応力応答関数の時間変化を計算する必要あり

## ■ 全 $K_{ij}$ を記憶するためのメモリー or ファイル容量

- $(120,000)^2 \times \text{タイムステップ} \times 8 \text{バイト} = \text{数十TB?}$

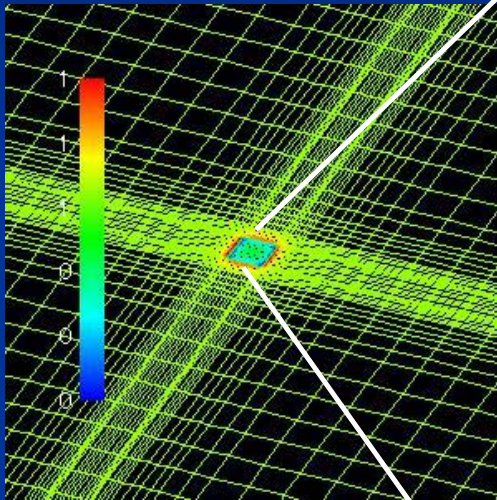
# 粘弾性構造



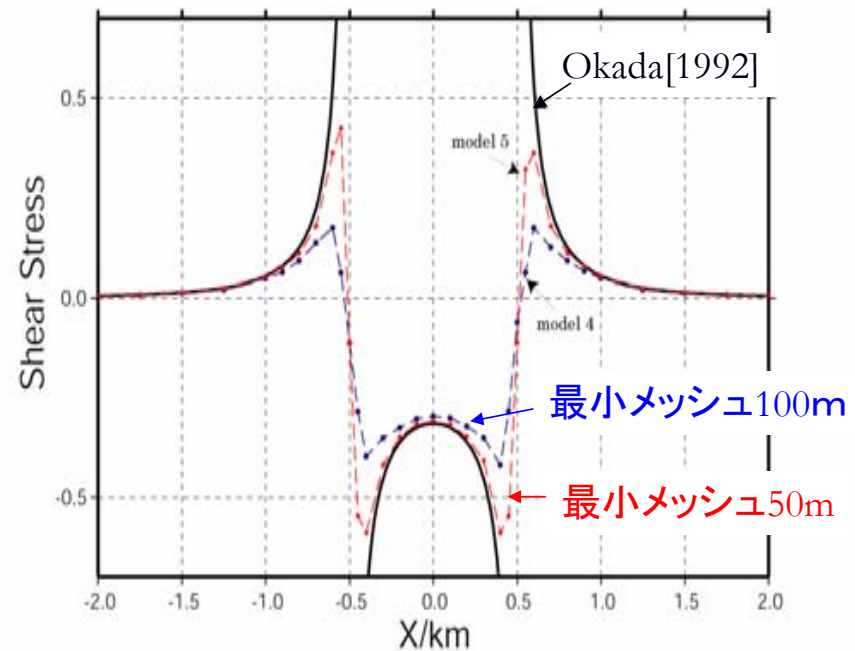
	剛性率(Pa)	ポアソン比	粘性率 (Pa·s)	緩和時間 (yr)
Crust/plate (Elastic)	6.48E+10	0.250	—	—
Mantle (visco-elastic)	6.58E+10	0.298	1.0E+19	4.8

Material property

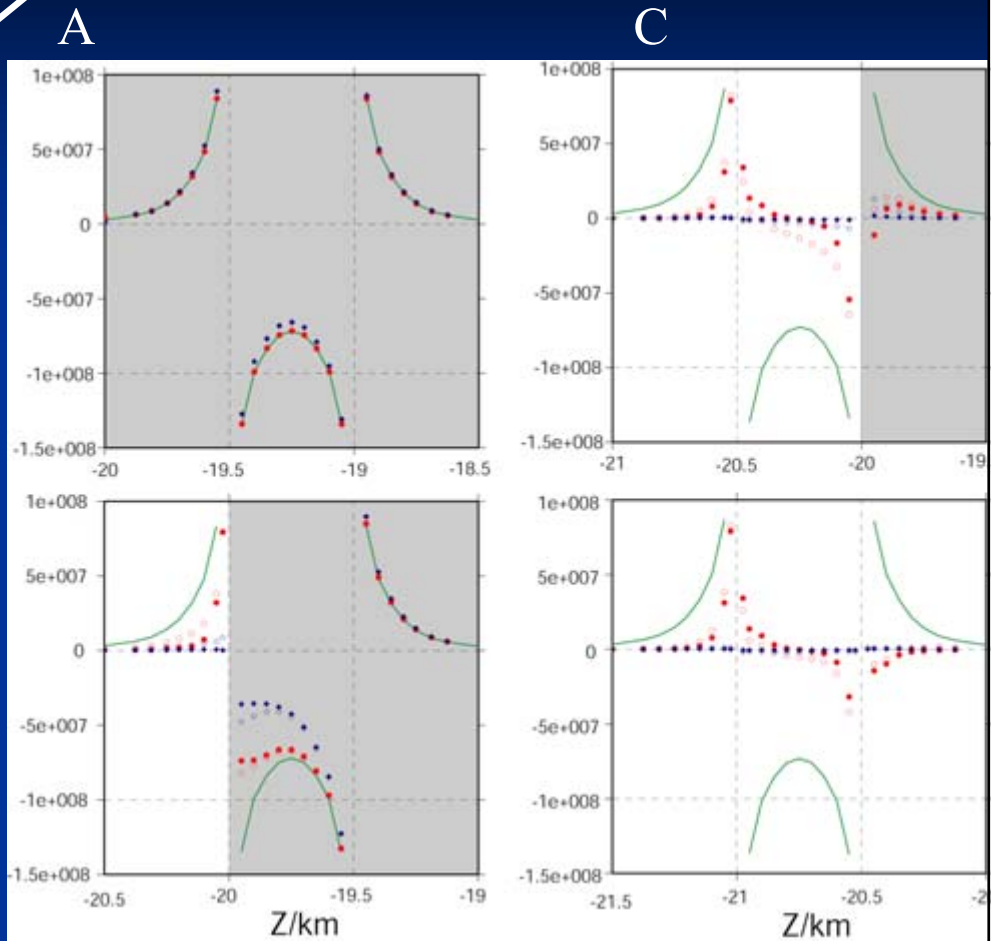
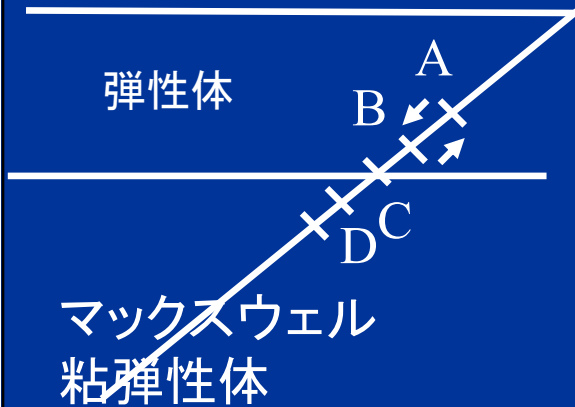
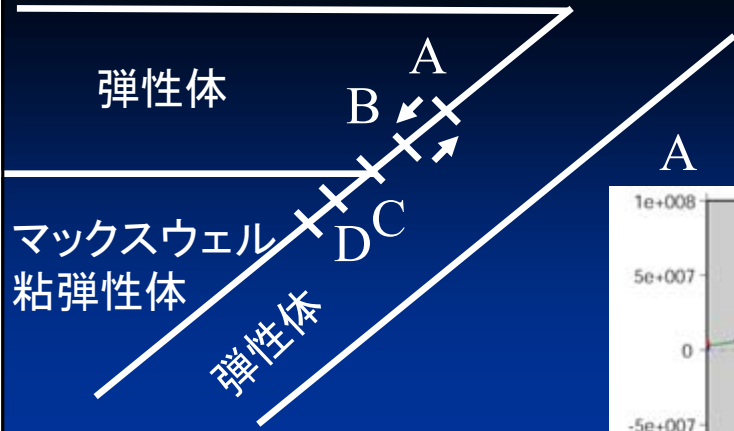
# 必要メッシュサイズ



## ① STRIKE DIRECTION



# 粘弾性グリーン関数



A

C

B

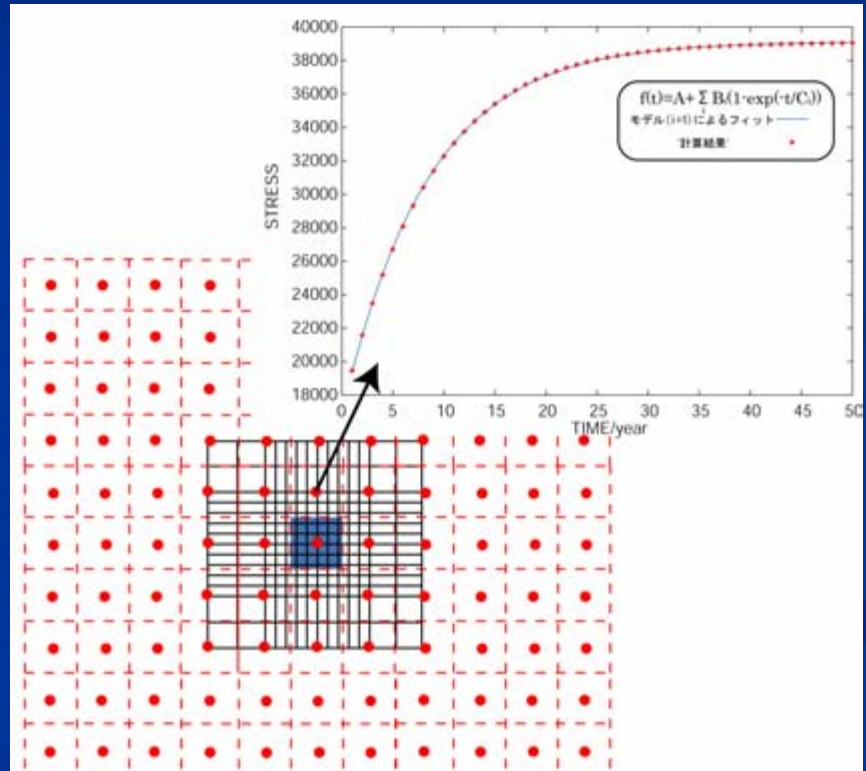
D

# Visco-elastic 応力応答関数

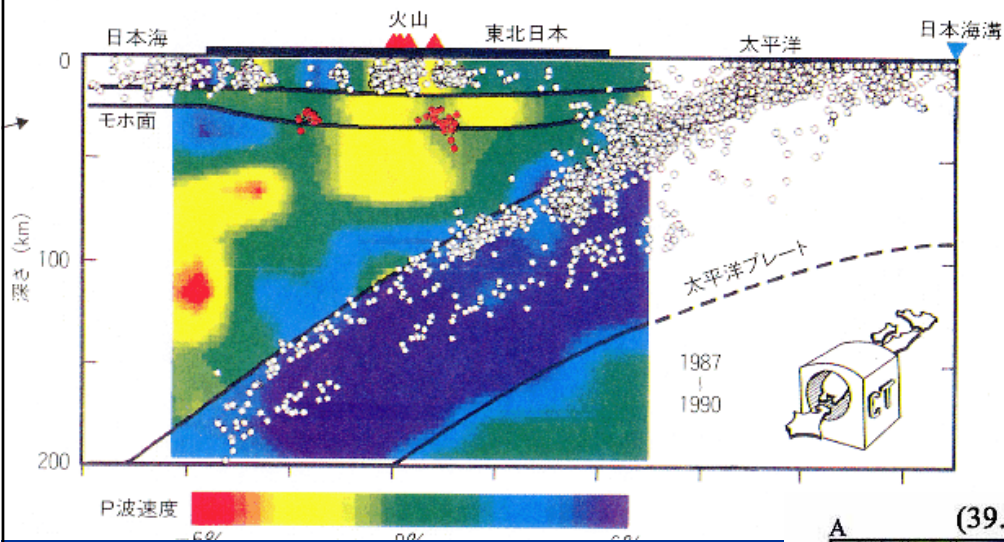
- GeoFEM計算結果の  
パラメタ化

$$f(t) = f_0 + \sum_i A_i \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \right\}$$

(  $f_0$  : 弾性応答  
 $\tau$  : 緩和時間)



# 東北地方の地下深部に沈み込んだプレートの状態



# なぜFEM?

強い3次元  
不均質構造

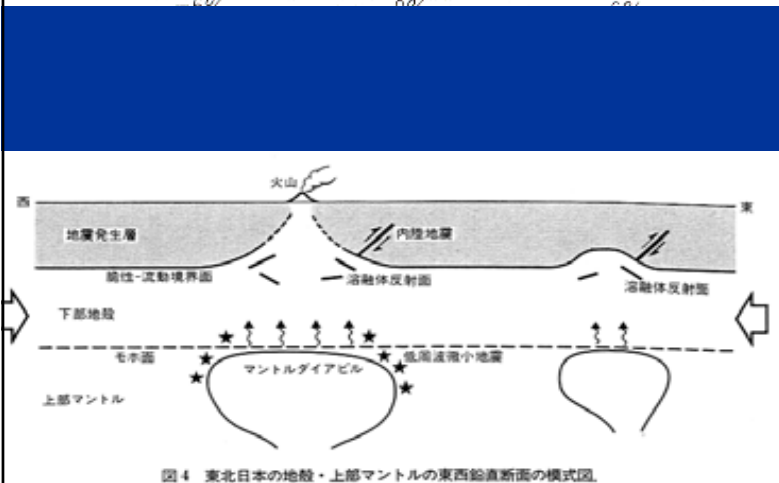


図4 東北日本の地殻・上部マントルの東西鉛直断面の模式図。

