

平成15年度地球シミュレータ利用報告会  
松浦充宏（東京大学理学系研究科）

# 日本列島域の地殻活動予測シミュレーション

## *Predictive Simulation for Crustal Activity in and around Japan*

CAMPグループ代表：松浦 充宏

*Mitsuhiro Matsu'ura / University of Tokyo, Takeshi Sagiya / Nagoya University  
Chihiro Hashimoto, Takane Hori, Aitaro Kato / IFREE, JAMSTEC  
Shinzaburo Ozawa, Takuya Nishimura / Geographical Institute  
Takaya Iwasaki, Naoshi Hirata / ERI, University of Tokyo  
Bunichiro Shibazaki / Building Research Institute  
Taku Tada / Tokyo University of Science  
Toshinori Sato / Chiba University  
Eiichi Fukuyama / NIED  
Kengo Nakajima / RIST*

# Crustal Activity Modelling Program (CAMP)

大規模シミュレーションによる  
日本列島域の地殻活動予測

長期的な広域地殻変動と  
地震活動パターンの変化

テクトニック応力の蓄積

主断層の  
余効すべりと  
余震活動

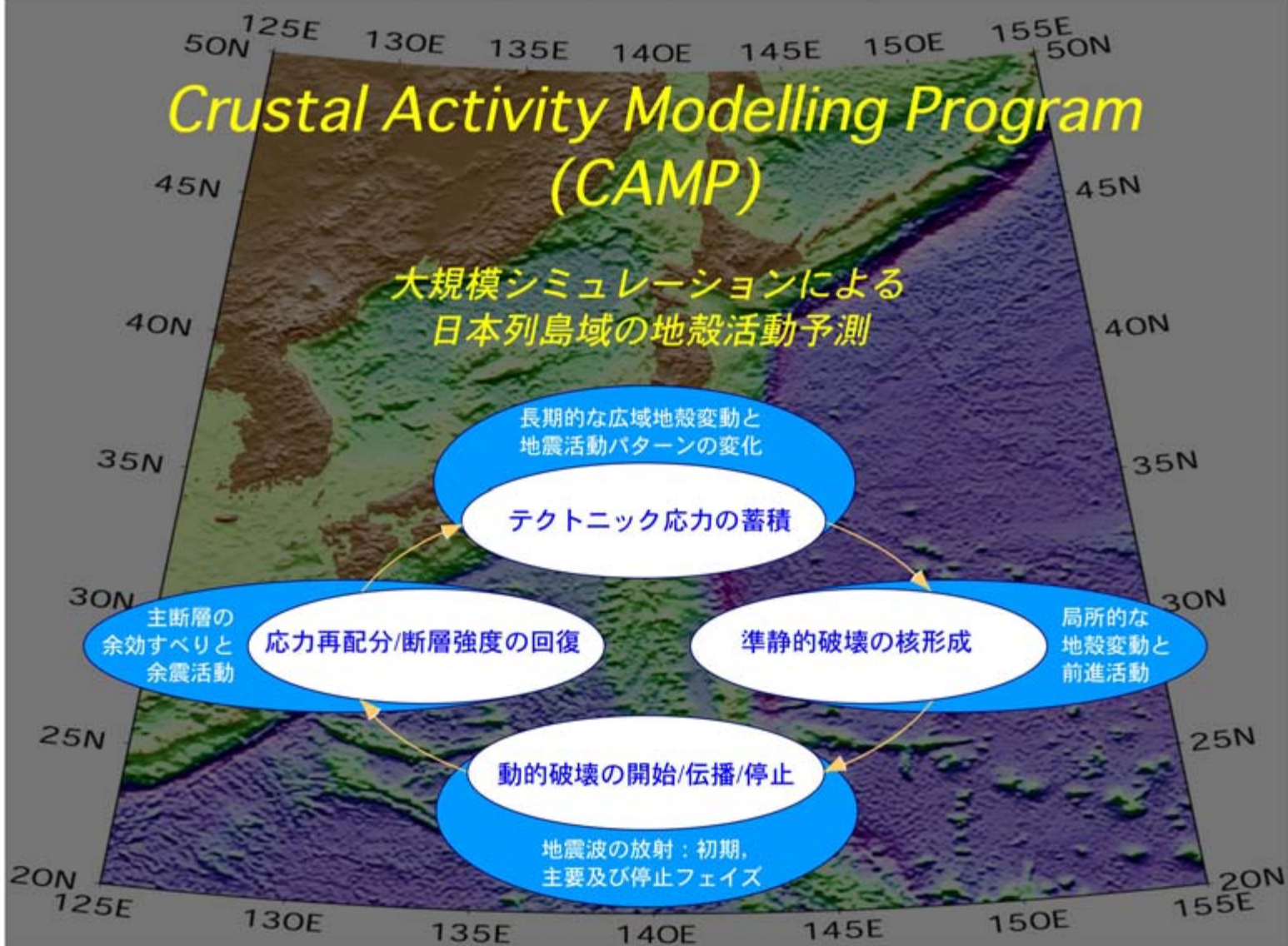
応力再配分/断層強度の回復

準静的破壊の核形成

局所的な  
地殻変動と  
前進活動

動的破壊の開始/伝播/停止

地震波の放射：初期、  
主要及び停止フェイズ



# 地震発生サイクルの全過程を支配する基礎方程式

すべり応答関数

断層すべりに伴う剪断応力場の変化

$$\tau(\mathbf{x}, t) = \tau^{ss}(\mathbf{x}) + \int_{-\infty}^t \int_{\Sigma} H(\mathbf{x}, t - t'; \mathbf{x}', 0) [\partial w_s(\mathbf{x}', t') / \partial t'] d\mathbf{x}' dt'$$

断層構成則

プレート境界で満たすべき条件

$$\tau(\mathbf{x}, t) = \tau_s(w, t; \mathbf{x}) \quad dw/dt > 0$$

$$\tau(\mathbf{x}, t) \leq \tau_s(w, t; \mathbf{x}) \quad dw/dt = 0$$

すべりと接触時間に依存する断層強度

$$\tau_s(w, t; \mathbf{x}) = c(\mathbf{x}) \left[ \int_0^{\infty} k^2 \sin^2(kw/2) |Y(k; w, t)|^2 dk \right]^{1/2} + \tau^{ss}(\mathbf{x})$$

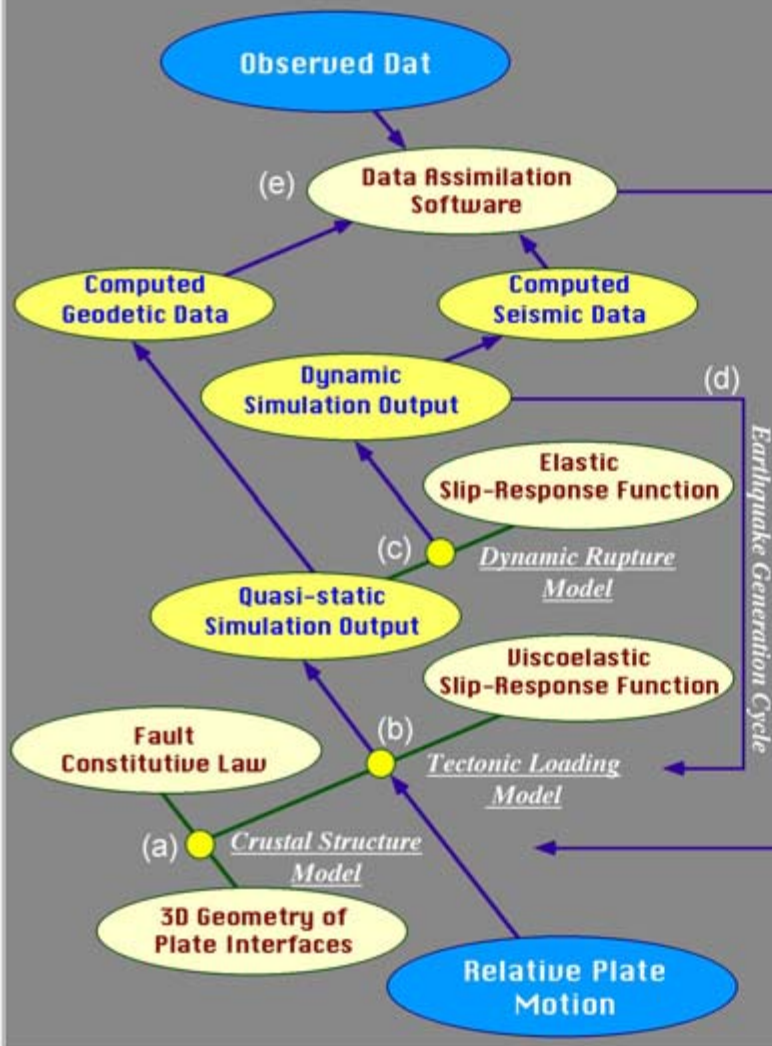
$$d|Y(k; w, t)| = -\alpha(\mathbf{x})k|Y(k; w, t)|dw + \beta(\mathbf{x})k^2[|\bar{Y}(k)| - |Y(k; w, t)|]dt$$

定常すべりとすべり遅れ

$$w(\mathbf{x}, t) = V_p t + w_s(\mathbf{x}, t)$$

プレート相対運動

# Simulation System for Earthquake Prediction



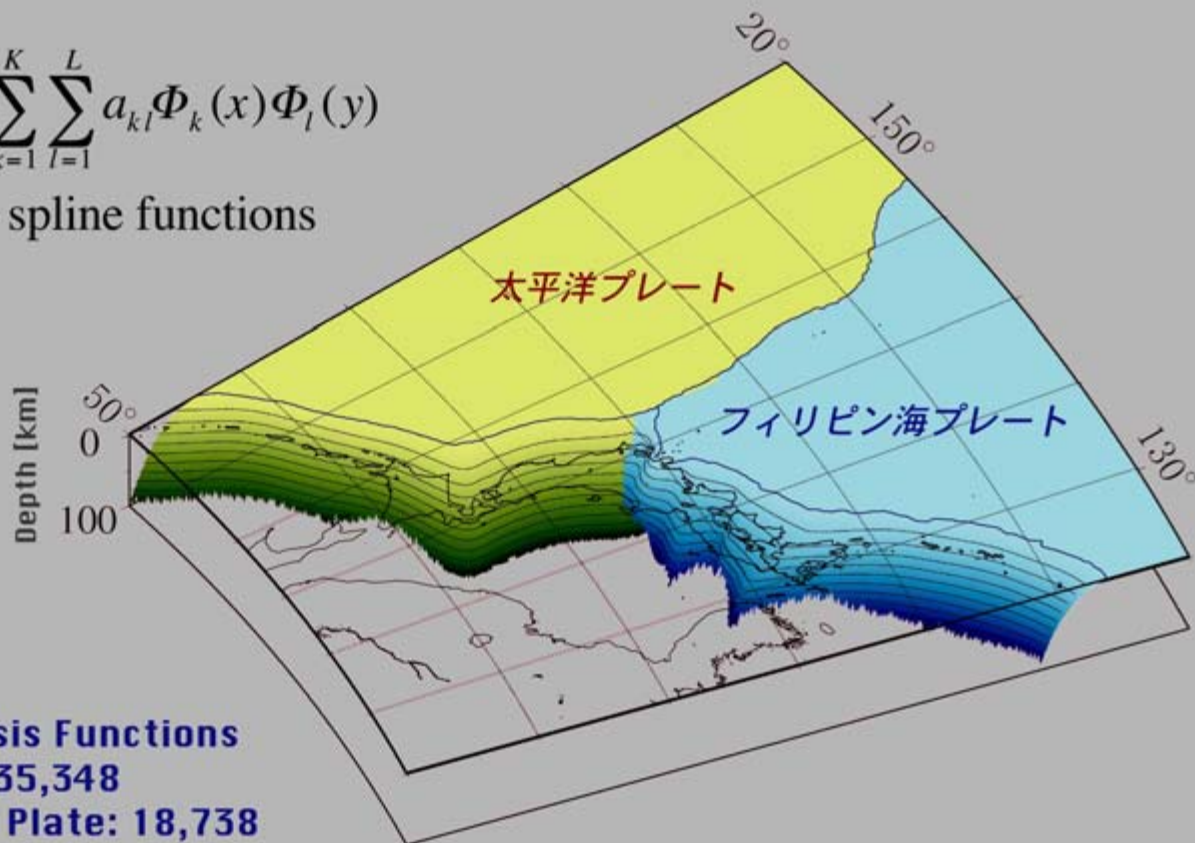
## 地震発生予測のための地殻活動 統合シミュレーション・システム

- (a) 地殻・マントル構造モデル
  - 地殻・マントルの粘弾性構造
  - プレート境界面の3次元形状
  - プレート境界面の摩擦特性
- (b) 準静的応力蓄積モデル
  - 準静的粘弾性すべり応答関数
  - すべりと時間に依存する断層構成則
  - 駆動力としてのプレート相対運動
- (c) 動的破壊伝播モデル
  - 動的弾性すべり応答関数
  - すべりに依存する断層構成則
  - 3次元屈曲分岐断層での破壊伝播
- (d) 地震発生サイクルモデル
  - 準静的モデルと動的モデルのシステム結合
- (e) 地殻活動データの解析・同化
  - 観測データのインバージョン解析
  - 観測データとシミュレーション結果の同化

# 日本列島域の3次元プレート境界面形状： 中解像度スタンダードモデル

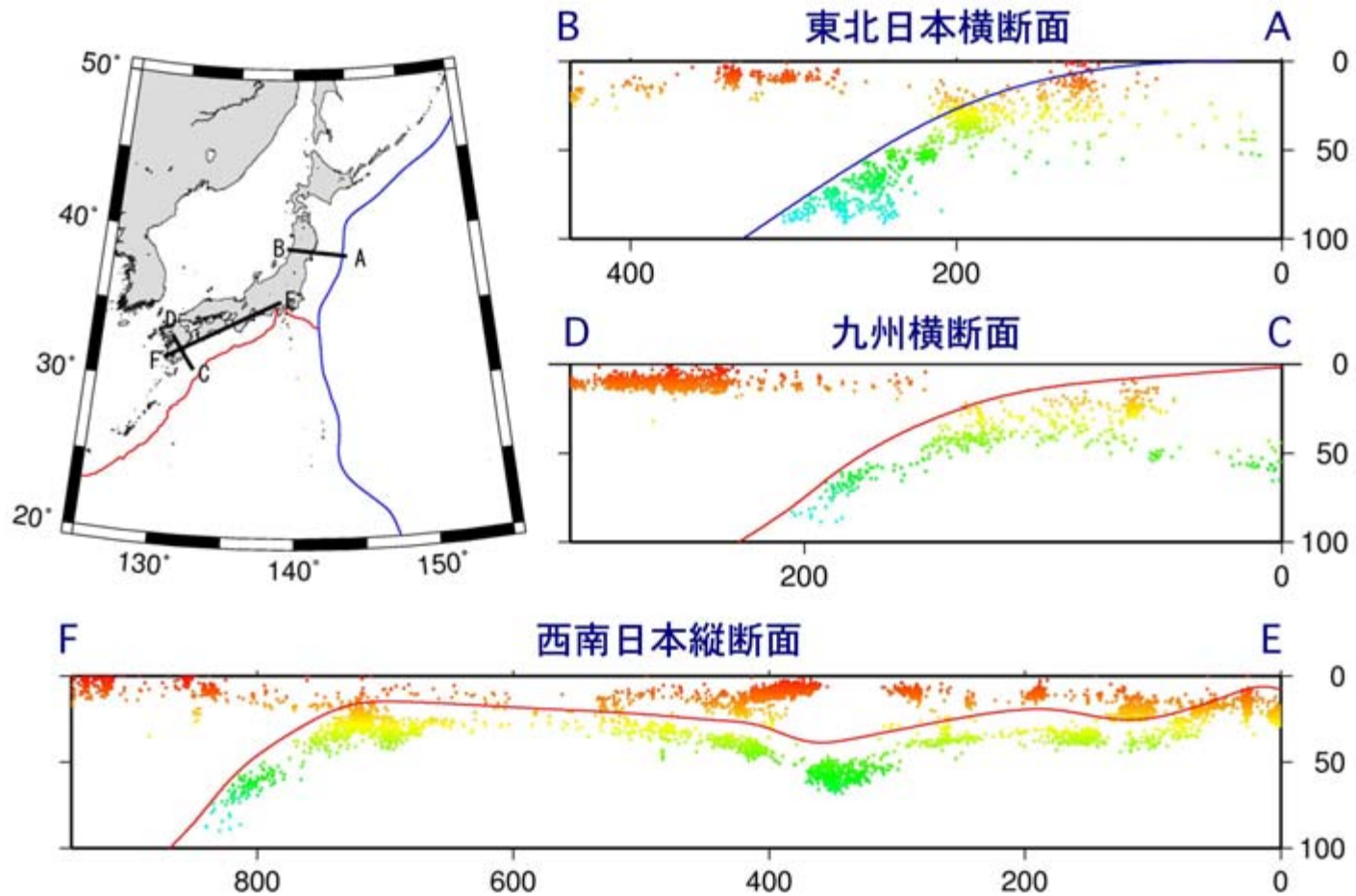
$$z = f(x, y) = \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L a_{kl} \Phi_k(x) \Phi_l(y)$$

$\Phi_j$ ; Cubic B - spline functions

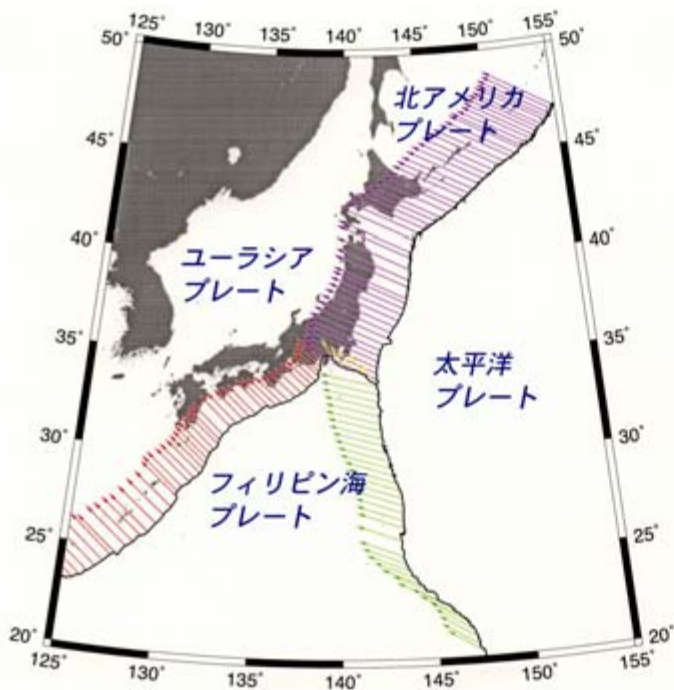


**Number of Basis Functions**  
**Pacific Plate: 35,348**  
**Philippine Sea Plate: 18,738**

# プレート境界の断面形状と地震の震源分布の比較

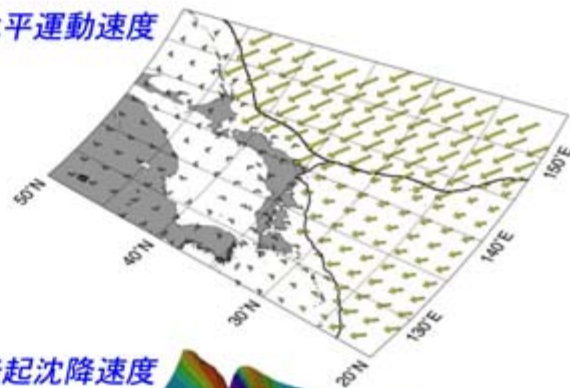


# 海洋プレートの沈み込みが 引き起こす島弧-海溝系の 長期的地殻変形運動

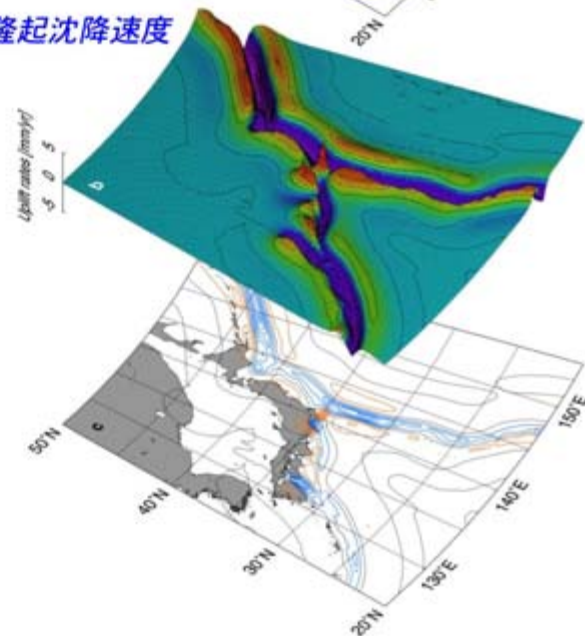


(a) プレート境界での収束運動ベクトル (NUVEL-1A)

水平運動速度



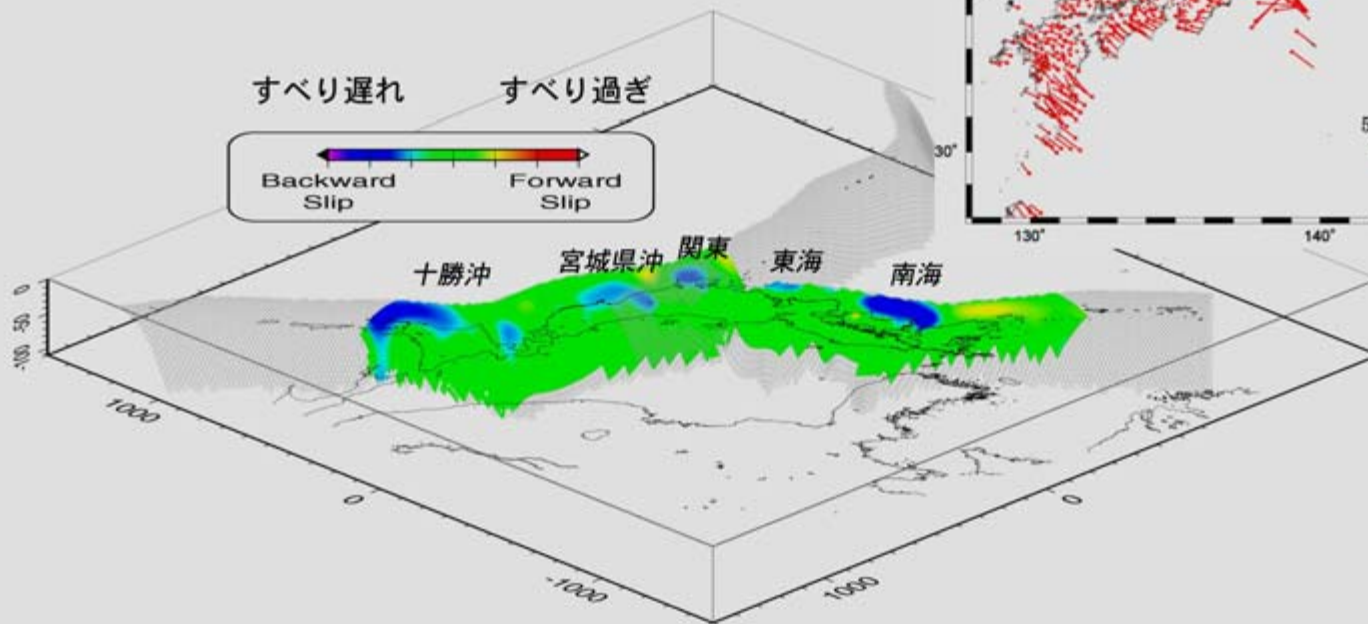
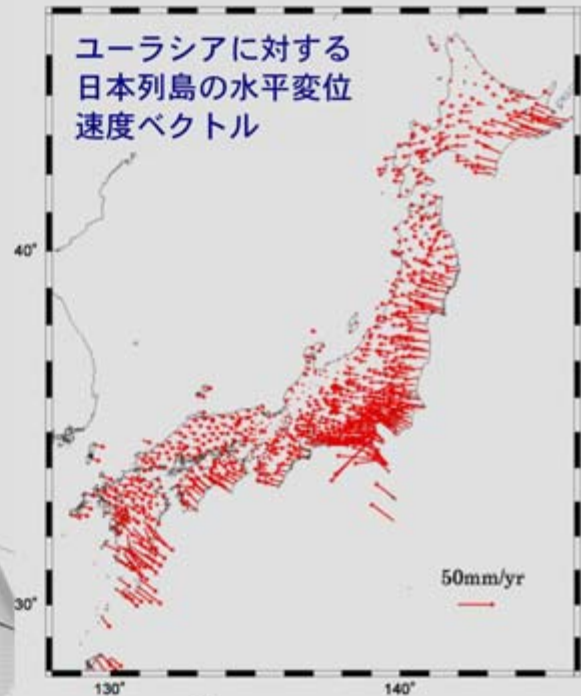
隆起沈降速度



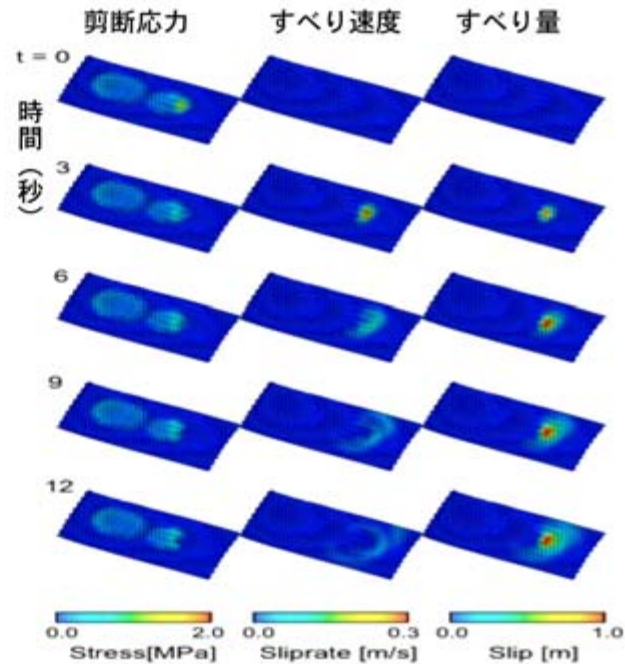
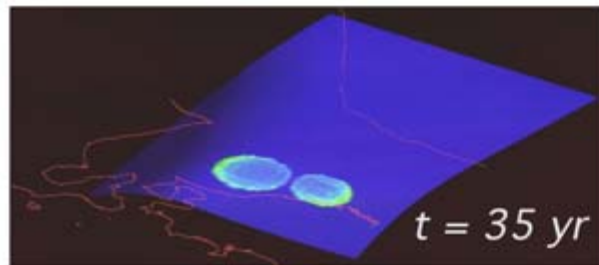
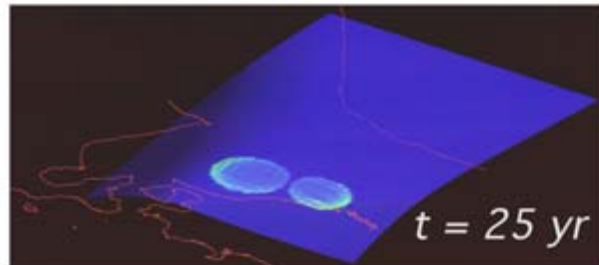
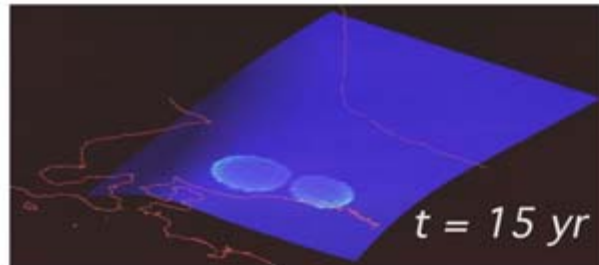
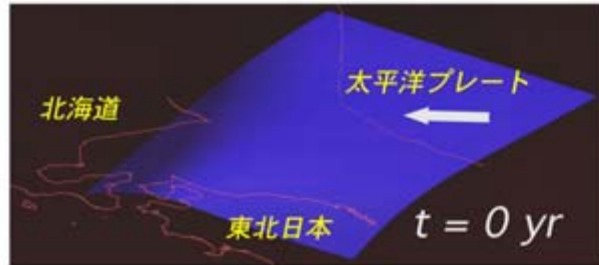
(b) プレートの沈み込みに伴う地殻変形運動

# GPSデータのインバージョン解析 から求めたプレート境界での すべり遅れ／すべり過ぎ分布

ユーラシアに対する  
日本列島の水平変位  
速度ベクトル



# 1968年十勝沖地震 (M8.2) の震源域 における応力蓄積—解放過程の 予測シミュレーション



左：プレート沈み込みによる震源域での準静的な応力蓄積過程。  
右： $t = 35 \text{ yr}$  の応力状態で強い擾乱を与え強制的に動的破壊を  
起こそうとしたシミュレーション。震源域の応力蓄積が臨界状  
態に達していないので、動的破壊は加速することなく停止する。

## 地殻内の応力状態と発生する地震のタイプ

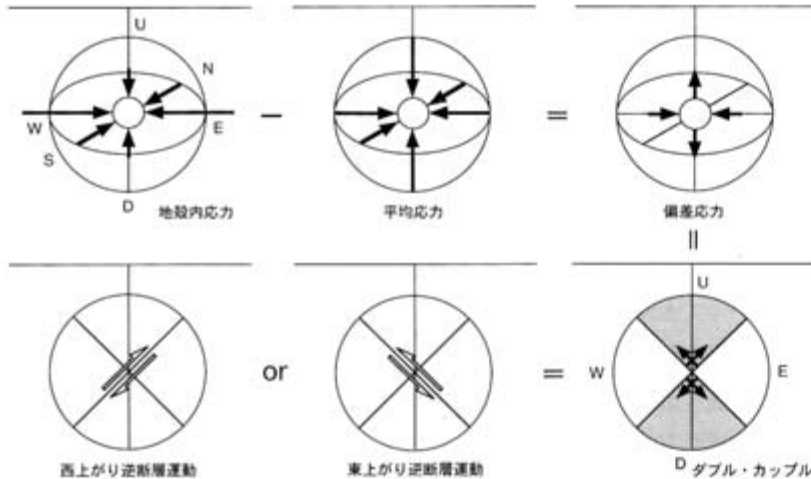


図 1.2.7(a) 鉛直方向の応力が最大主応力（最小圧縮応力）の場合：逆断層運動

上図：東西方向の圧縮応力場による東上がりもしくは西上がり逆断層地震の例

右図：東西圧一南北伸張応力場による左横ずれもしくは右横ずれ垂直断層地震の例

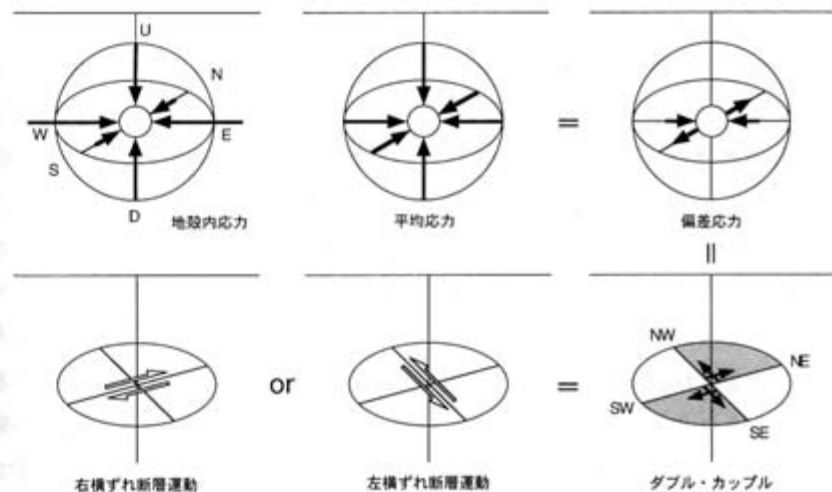
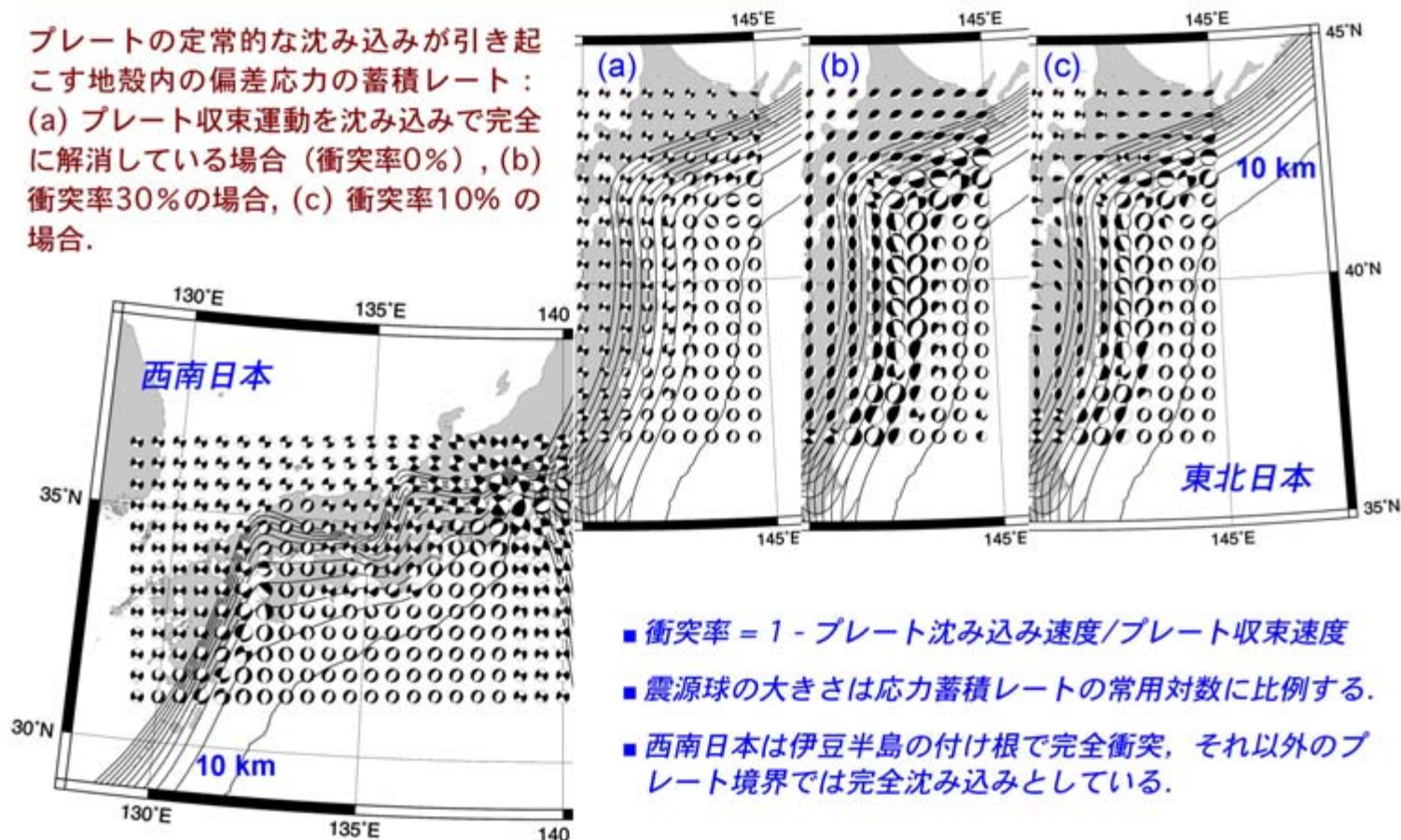


図 1.2.7(b) 鉛直方向の応力が中間主応力の場合：垂直横ずれ断層運動

地殻内に働く応力から平均法線応力を差し引いた残りの偏差応力が、地震破壊を引き起こす。偏差応力は伸張と圧縮の一对の力として表現されるが、これはダブルカップルの力のシステムと等価である。

## 太平洋プレートの定常沈み込みに依る東北日本弧の 長期的な地殻内応力の蓄積レート

プレートの定常的な沈み込みが引き起こす地殻内の偏差応力の蓄積レート：  
(a) プレート収束運動を沈み込みで完全に解消している場合（衝突率0%），(b) 衝突率30%の場合，(c) 衝突率10%の場合。



- 衝突率 =  $1 - \text{プレート沈み込み速度} / \text{プレート収束速度}$
- 震源球の大きさは応力蓄積レートの常用対数に比例する。
- 西南日本は伊豆半島の付け根で完全衝突，それ以外のプレート境界では完全沈み込みとしている。

## 地球シミュレータ共同プロジェクト2003年の研究成果

- (a) 2002年に作成した日本列島域のプレート境界3次元形状モデルの妥当性を、地震の震源分布データ、フリーエア重力異常データおよび構造探査データと比較/検証した。
- (b) 準静的な粘弾性すべり応答の計算コードをベクトル化(99.4%)し、太平洋プレートの沈み込み運動によって駆動される1968年十勝沖地震の震源域の準静的応力蓄積過程のシミュレーションを行った。
- (c) 2002年に開発した3次元屈曲分岐断層での破壊伝播シミュレーションコードを最適化し、2003年時点で次の十勝沖地震が発生する可能性を検証するシミュレーションを行った。
- (d) GPSデータのインバージョン解析により、日本列島周辺域のプレート境界の現在のすべり遅れ分布(固着域の分布)を推定した。
- (e) プレート収束運動の1割が地殻内変形で解消される(衝突率10%)とすると、東北日本弧の地殻内応力の蓄積パターンがうまく説明できることを示した。