

地震工学委員会平成30年度第4回研究会  
～地震工学と他分野の横断研究促進のための研究紹介～

## 高性能計算による断層変位解析

2019年3月5日

大成建設株式会社

- 本研究は東京大学地震研究所 堀教授、電力中央研究所 澤田氏との共同で実施したものです。
- 本研究の一部は、経済産業省資源エネルギー庁 発電用原子炉等安全対策高度化技術基盤整備事業(原子力発電所のリスク評価、研究に係る基盤整備)として実施したものです。



1. 本研究の背景と位置づけ
2. 断層変位評価手法の開発
3. 実地震への適用
4. まとめと展望

# 1. 本研究の背景と位置づけ



- ◆ 地震の外力には、地震動の他、地表に現れる断層変位がある.
- ◆ 原子力発電所のような重要構造物に関しては断層変位評価・対策の必要性が指摘されている.

## 2016年 熊本地震



地震調査研究推進本部 地震調査委員会(2016), 平成 28 年(2016 年)熊本地震の評価

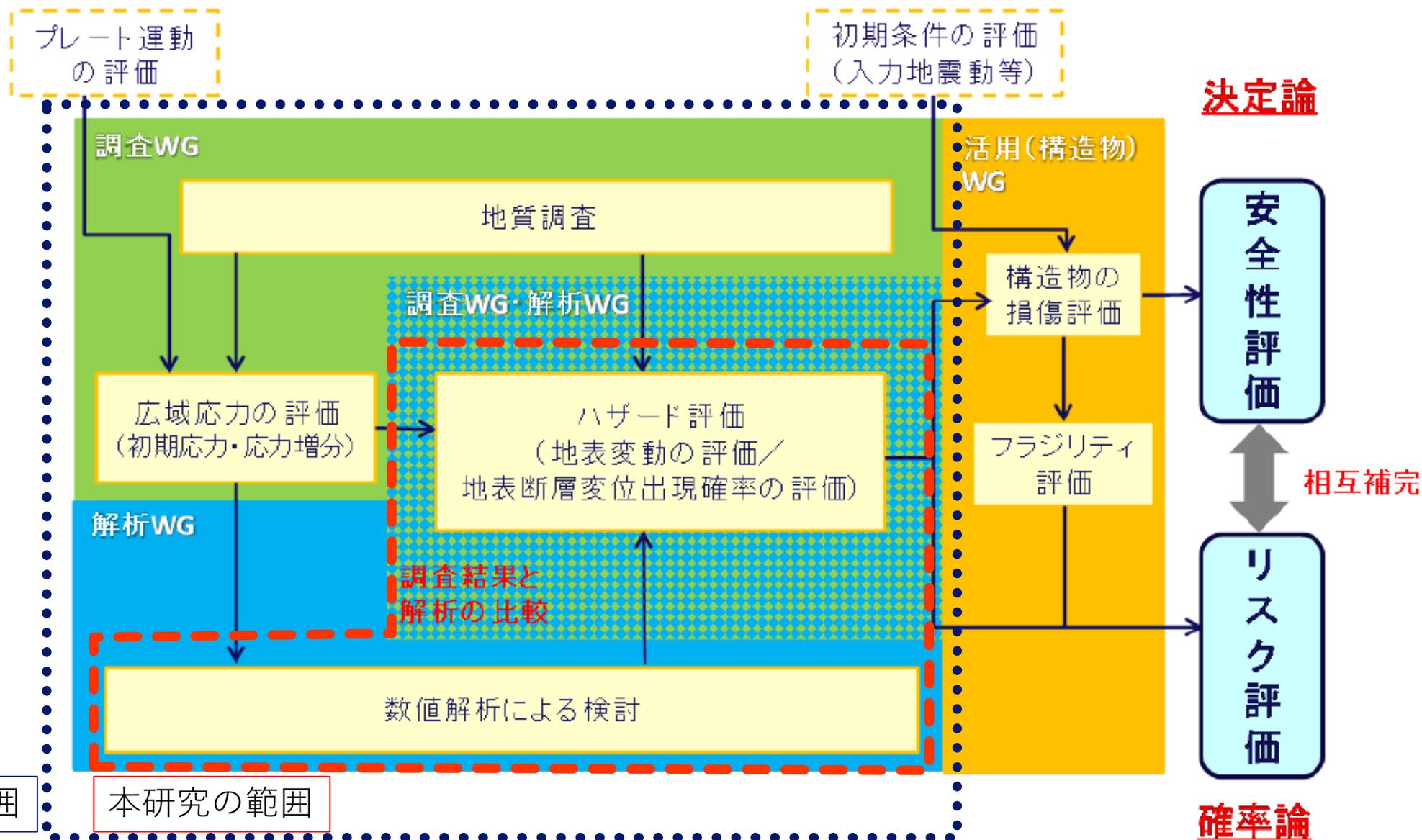
## 1999年 集集地震(台湾)



鈞鼎攝影版權所有、翻印必究

<http://skyfly.vf.com.tw/921-4.jpg>

# 本研究の位置づけ



規制基準の範囲

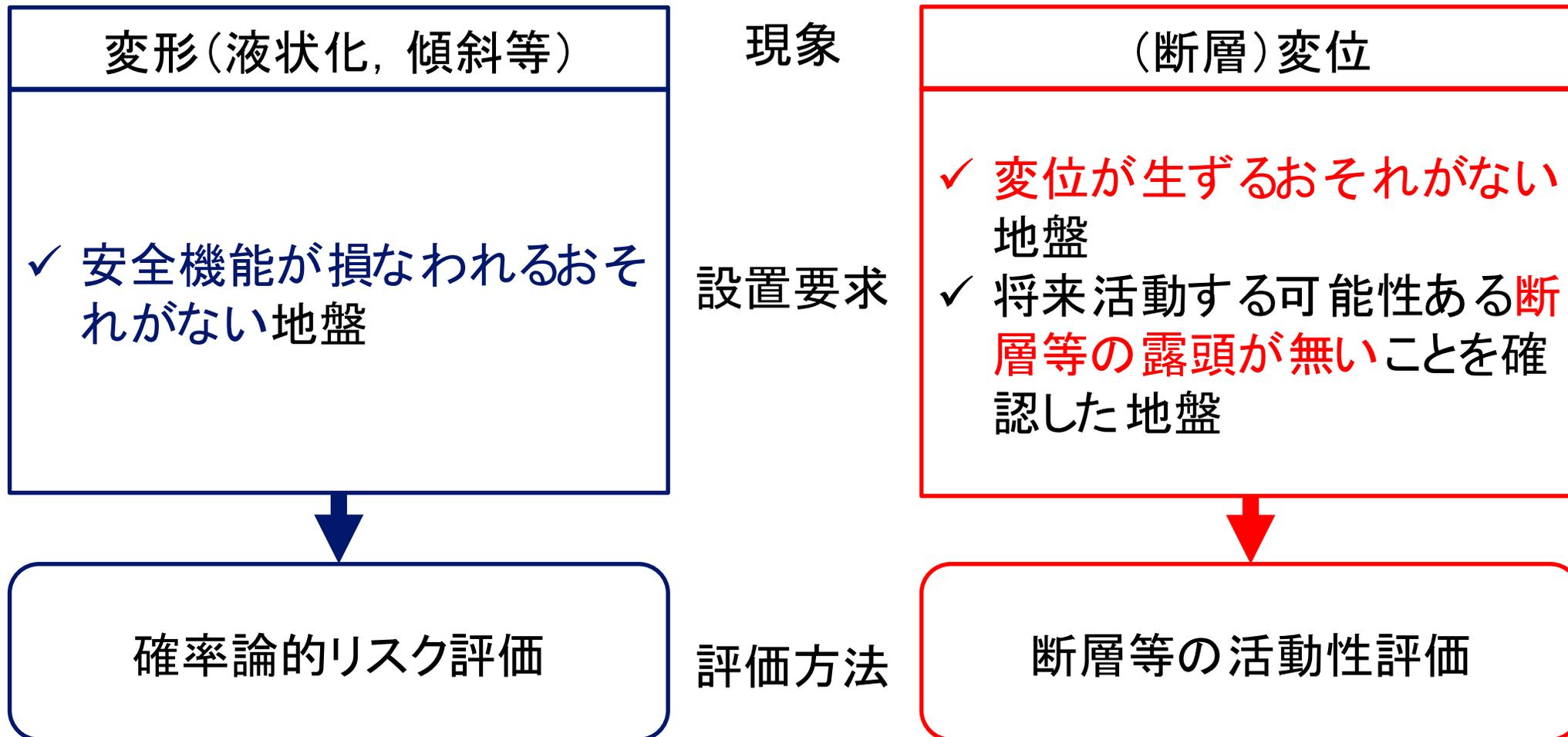
本研究の範囲



## ◆ 設計基準対象施設の地盤に対する規制基準

実用発電用原子炉及びその付属施設の位置, 構造及び設備の基準に関する規則

実用発電用原子炉及びその付属施設の位置, 構造及び設備の基準に関する規則の解釈



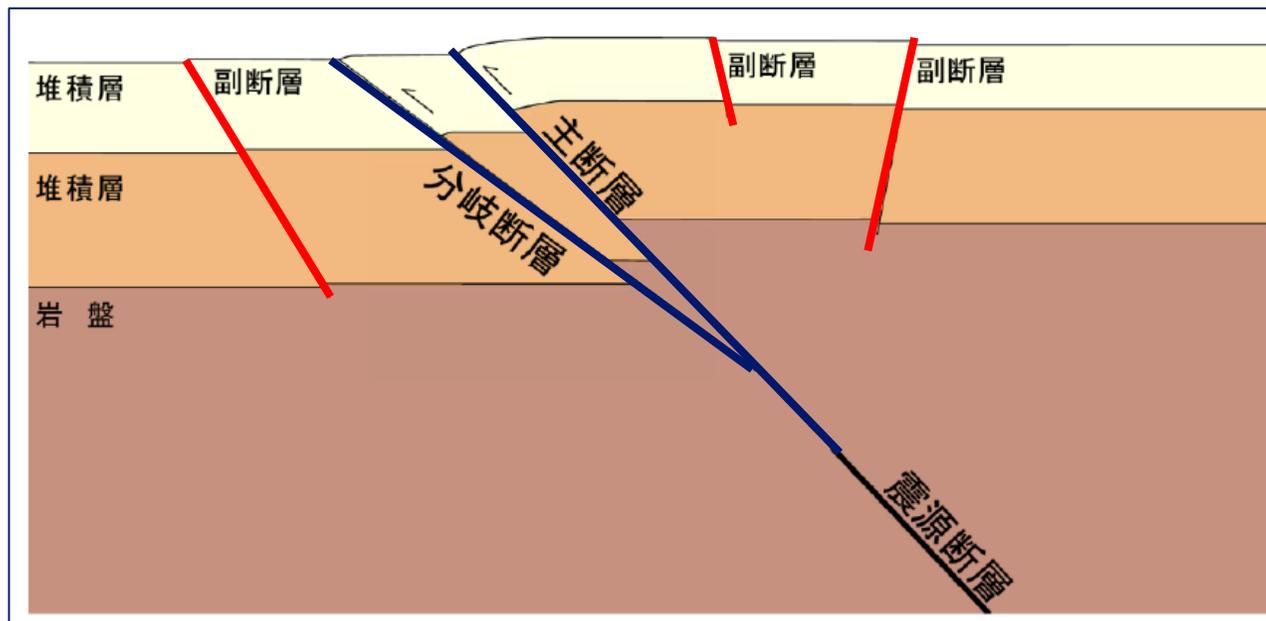


## ◆ 既設原子力施設の地質状況

- 建設時に詳細な地質調査が実施されているため、**主断層**が施設直下に存在する可能性は極めて低い

## ◆ 評価の目的

- 主断層が活動した時に、**確認された破砕帯等**が活動し得るかを数値解析的に評価  
⇒ **破砕帯の活動性評価**



**主断層**: 震源断層の地表延長部の断層

**副断層**: 主断層及び分岐断層の周辺に副次的に生じた断層

日本原子力学会(2017), 断層変位に対するリスク評価と工学的な対応策調査報告書

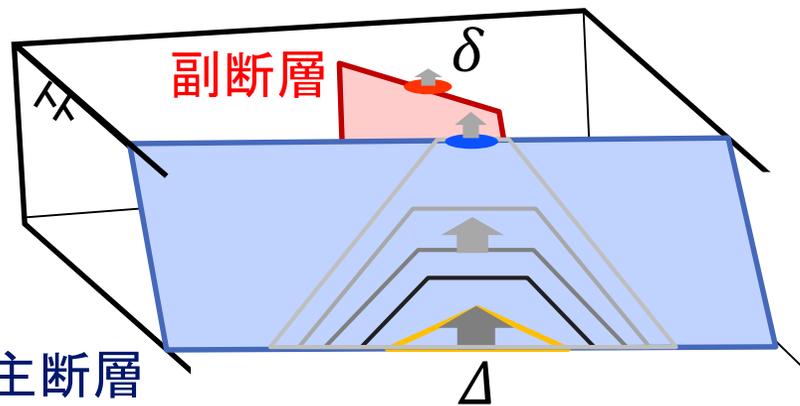


## ◆ 断層挙動の捉え方

- ◆ 断層面: 過去にずれ変位が生じた**変位の不連続面**
- ◆ 断層挙動: 断層に新たにずれ変位が生じる**破壊現象**

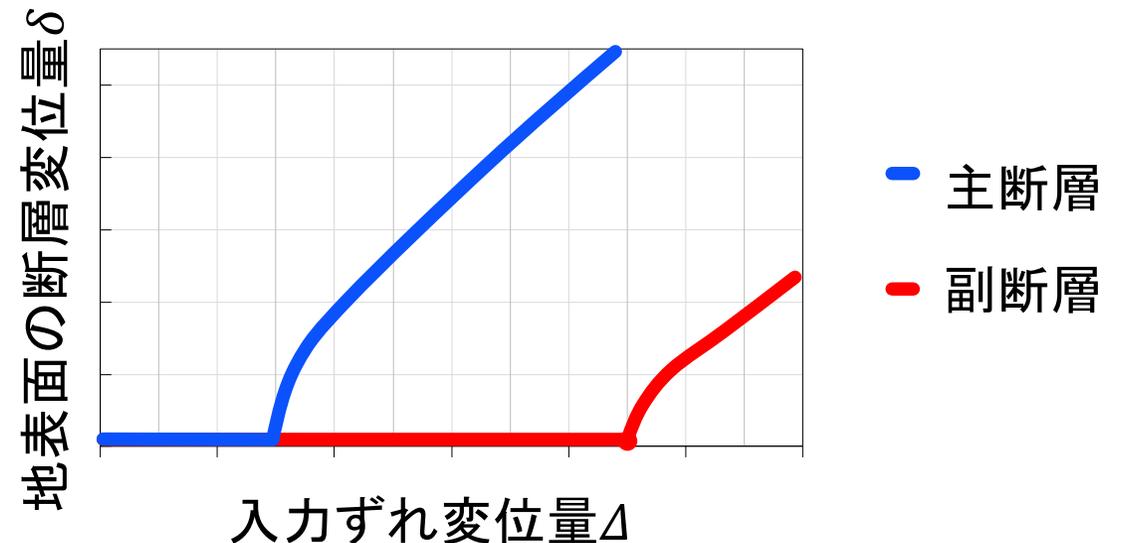
## ◆ 連続体力学の数理問題(初期値境界値問題)

- 主断層底部で発生した**ずれ変位の伝播散逸**を評価
- 入力エネルギーは断層面のずれの仕事, 岩盤の歪エネルギーに変換
  - 入力エネルギーが小  $\Rightarrow$  底部の断層と岩盤でエネルギーを吸収
  - 入力エネルギーが大  $\Rightarrow$  吸収しきれず, 地表面に到達



$\Delta$ : 入力ずれ変位量

$\delta$ : 地表面の断層変位量



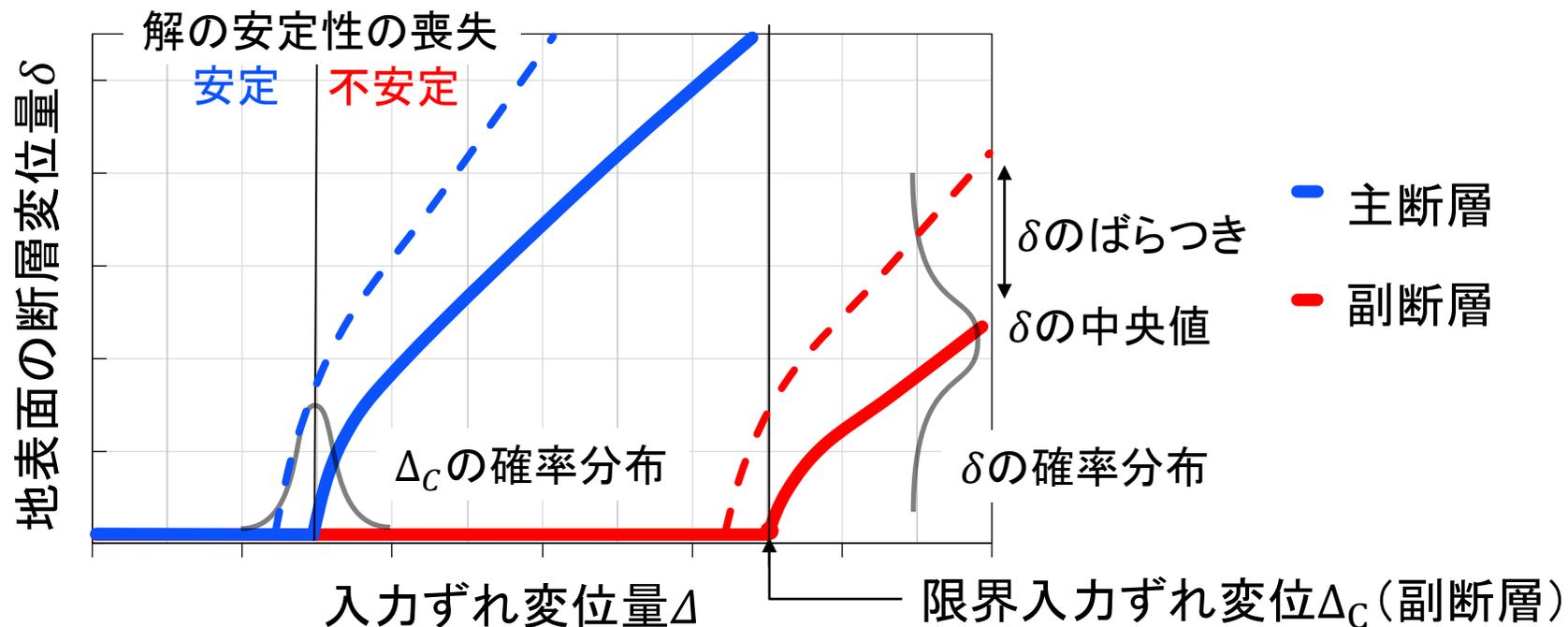


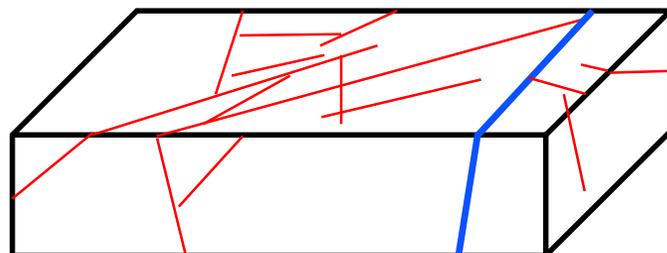
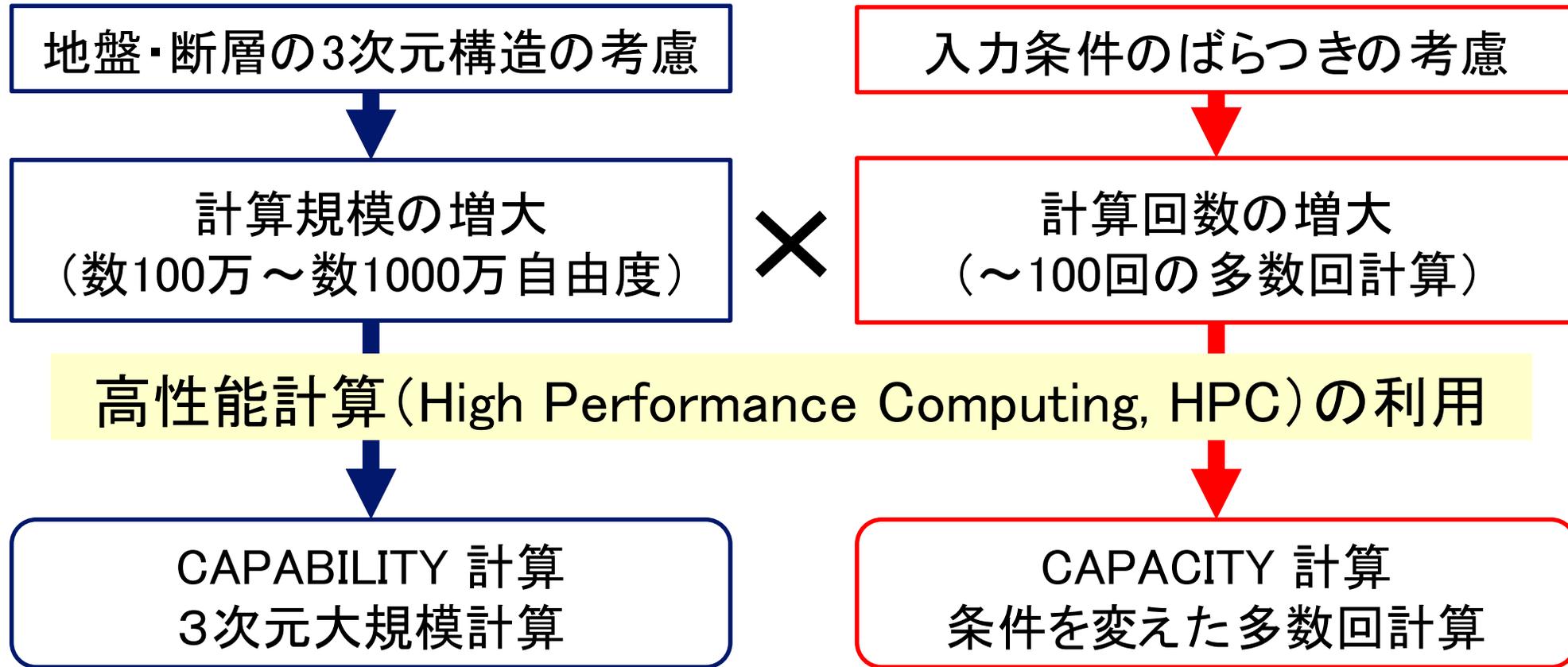
## ◆ 評価指標

- ① 地表でずれ変位を発生させる入力ずれ変位の限界値(限界入力ずれ変位  $\Delta_C$ )
- ② 地表でのずれ変位の大きさ  $\delta$

## ◆ 入力条件の不確実性の考慮

- 破壊現象を伴う問題は入力条件のばらつきの影響大
- 破壊後の解は**数理的に不安定**になり, 入力条件の若干の乱れで解が大きくばらつく.





断層・破砕帯の分布  
(主断層との距離, 角度等)



### ◆ 断層挙動の解の数理的分析

- 断層面のずれに対する解の数理的安全性を考慮した数値解析

### ◆ 大規模計算プログラムの整備と検証

- オープンソース並列FEM解析プログラムFrontISTRへの機能追加

FrontISTR研究会, <http://www.multi.k.utokyo.ac.jp/FrontISTR/>

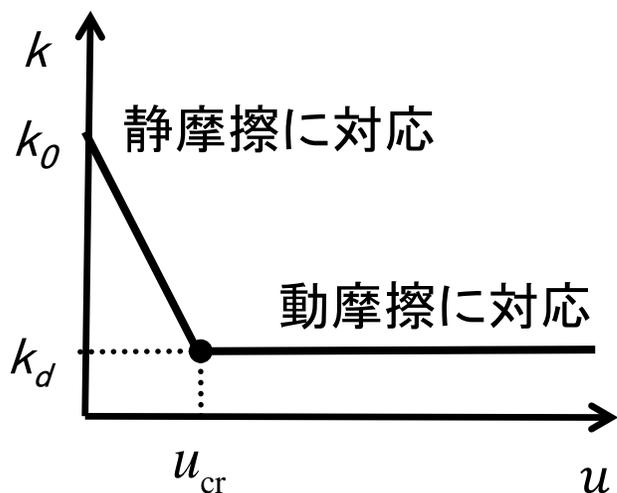
- ✓ 変位の不連続面を評価するアイソパラメトリックな3次元ジョイント要素
- ✓ エネルギー保存を満たすシンプレクティック時間積分
- プログラムの検証
  - ✓ 格子サイズ収束性
  - ✓ 時間増分収束性
  - ✓ スケーラビリティの確認



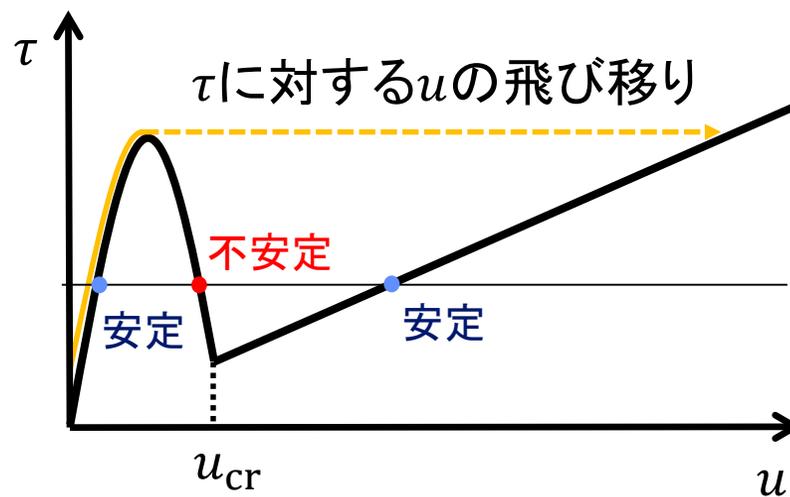
## ◆ 断層の構成式: ずれ $u$ -せん断力 $\tau$ の非線形ばねとして設定

- 外力に対する解が3つ存在 (1つは不安定な解).
- ピーク強度を超えると, 解が一時的に不安定化し, **変位の飛び移り**が発生
- 解のない問題よりも安定

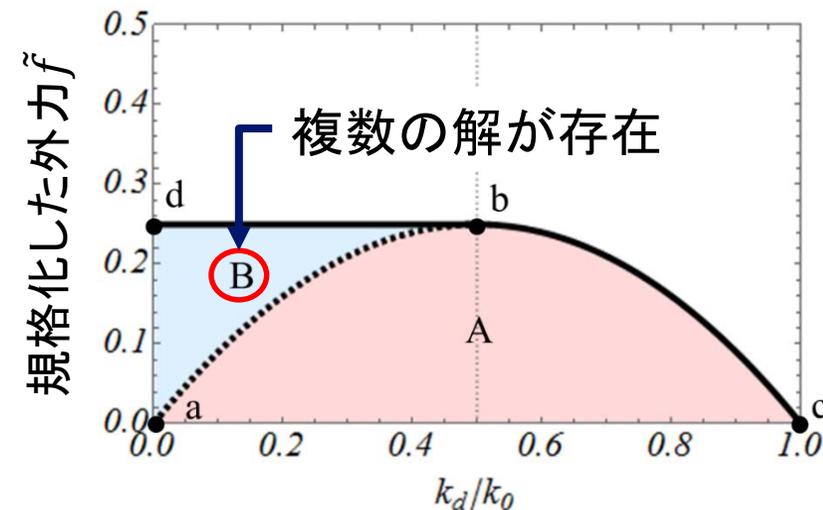
## ◆ 断層挙動についても急激な滑りを起こす 場合があることを示唆



ずれ-ばね係数関係



ずれ-せん断力関係

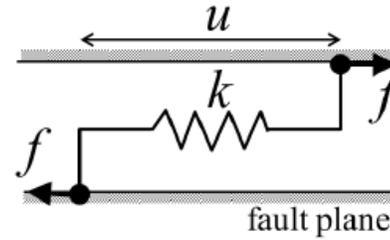


解のパラメータスペース



## ◆ ラグランジアンから厳密に導出

- ラグランジアンの変分:  $\delta L_j = \int \delta u k u d s$

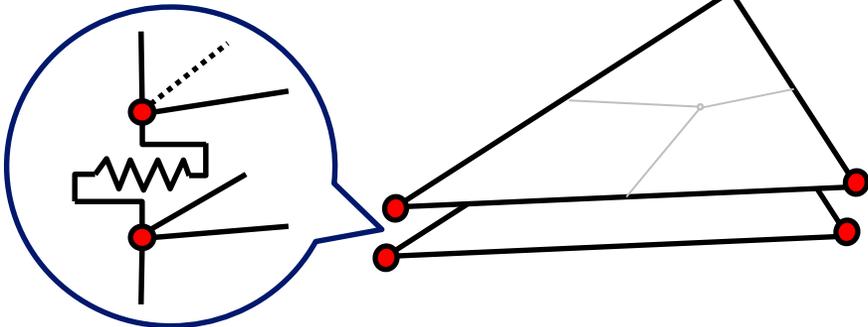


$u$ : 相対変位  
 $k$ : ばね定数  
 $s$ : 要素の面積

⇒ 複雑な不連続面形状やトラクション関数への適用  
 格子サイズ収束性の実現

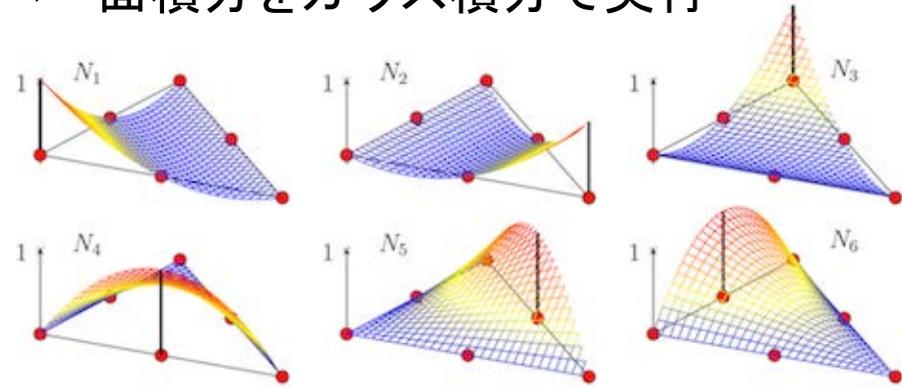
### 修正 Goodman型

- ✓ ばねを節点に配置
- ✓ 面積分を各節点の専有面積の和で表現



### アイソパラメトリック型

- ✓ 形状関数を用いて要素内を補間
- ✓ 面積分をガウス積分で実行



Guigen Zhang (2017), CRC press

形状関数の例(三角形2次要素)



## ◆ ハミルトニアン $H$ 形式での定式化

⇒ 時間積分によりハミルトニアンを変えない (エネルギー保存)

- 時間変化 ⇔ 正準変換 (ハミルトニアンを変えない変換)

連続体の通常の数値解析

ラグランジュアン  $L = T - V$

$$L(\mathbf{v}, \mathbf{u})$$

$\mathbf{u}$ : 変位  
 $\mathbf{v}$ : 速度

ラグランジェ  
方程式

$$\frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial L}{\partial \mathbf{v}} - \frac{\partial L}{\partial \mathbf{u}} = \mathbf{0}$$

ルジャンドル変換

ハミルトニアン  $H = T + V$

$$H(\mathbf{p}, \mathbf{u}) = \mathbf{p} \cdot \mathbf{v} - L(\mathbf{v}, \mathbf{u})$$

$\mathbf{u}$ : 変位  
 $\mathbf{p}$ : 運動量

正準方程式

$$\frac{\partial \mathbf{p}}{\partial t} = - \frac{\partial H}{\partial \mathbf{u}}, \quad \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = \frac{\partial H}{\partial \mathbf{p}}$$

2次シンプレクティック積分  
Stormer - Verletの方法

$$\mathbf{p}_{n+\frac{1}{2}} = \mathbf{p}_n - \frac{\Delta t}{2} \nabla_{\mathbf{u}} V(\mathbf{u}_{n+1})$$

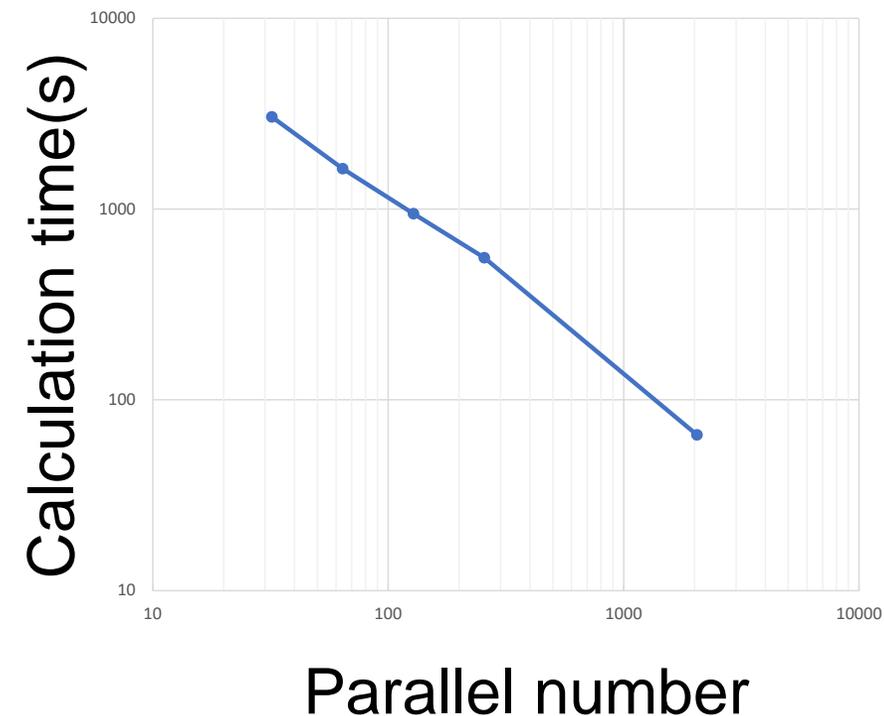
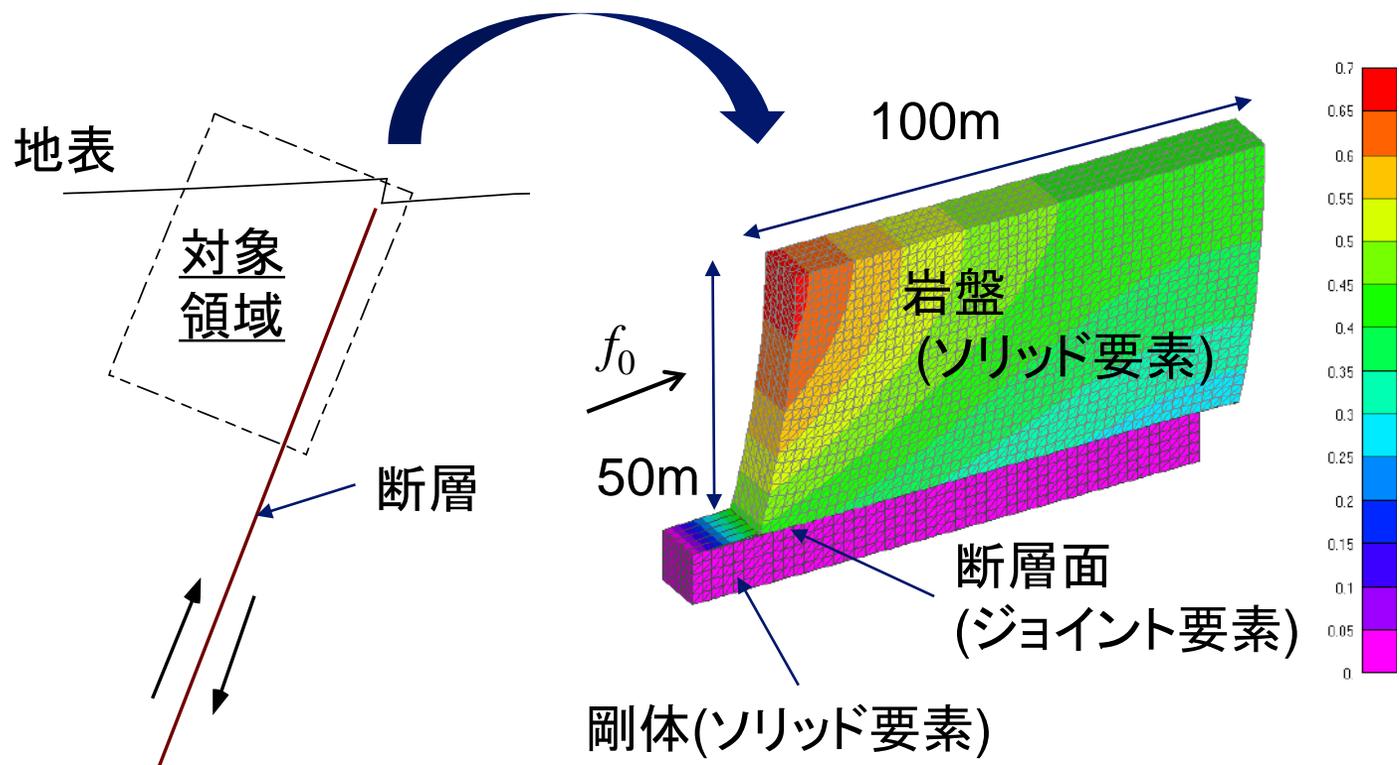
$$\mathbf{u}_{n+1} = \mathbf{u}_n + \Delta t \nabla_{\mathbf{p}} T(\mathbf{p}_{n+\frac{1}{2}})$$

$$\mathbf{p}_{n+1} = \mathbf{p}_{n+\frac{1}{2}} - \frac{\Delta t}{2} \nabla_{\mathbf{u}} V(\mathbf{u}_{n+1})$$

$T$ : 運動エネルギー,  $V$ : ポテンシャルエネルギー

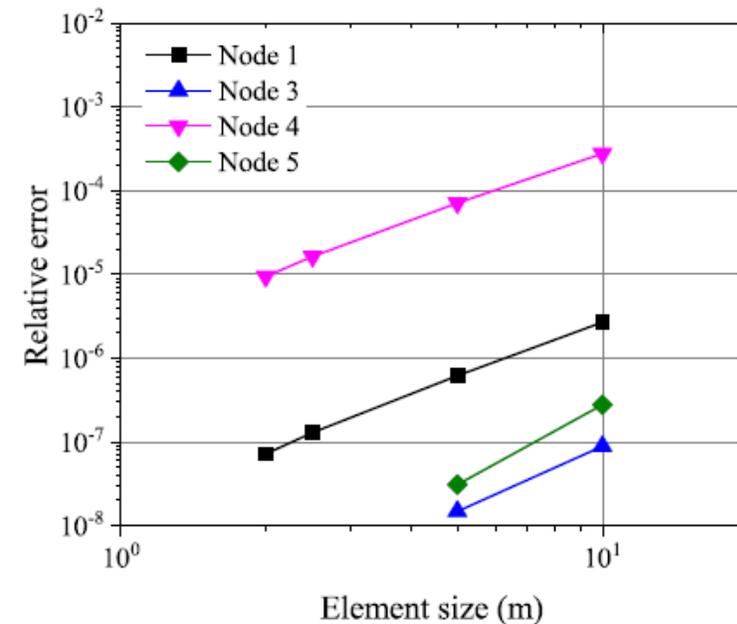
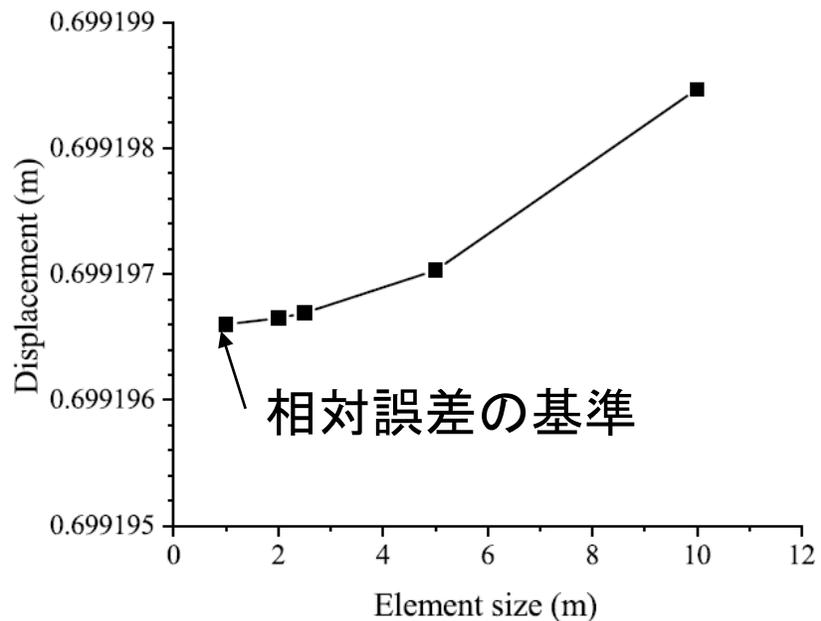
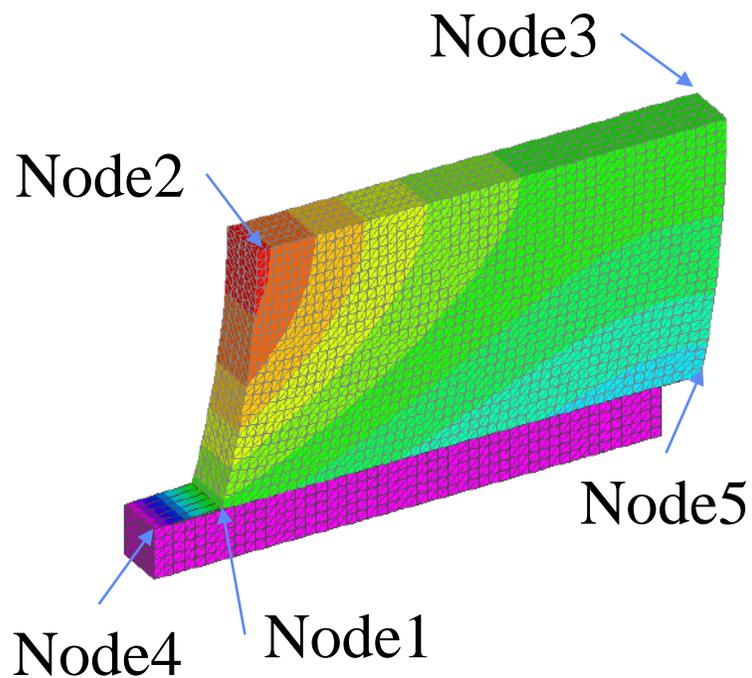


- ◆ 1次的な断層変位問題
  - ソリッド要素: 四面体2次
  - ジョイント要素: 三角形2次
- ◆ スケーラビリティの確認(2048並列まで確認)



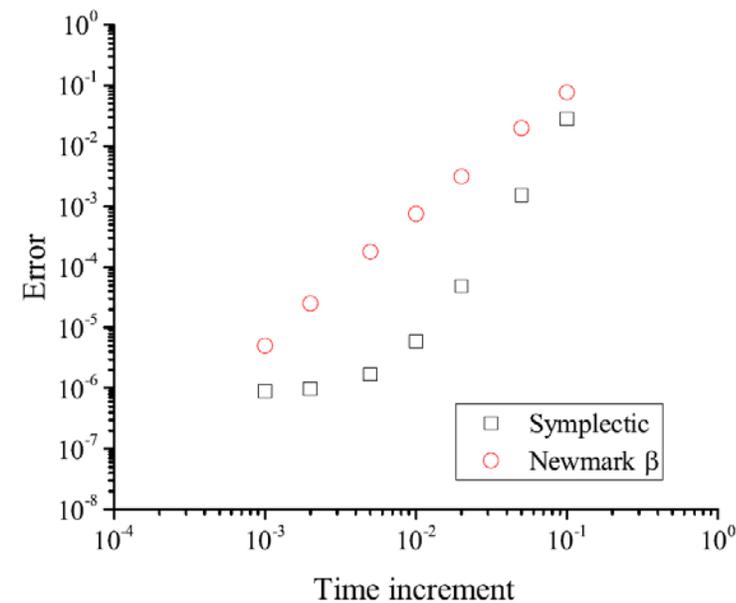
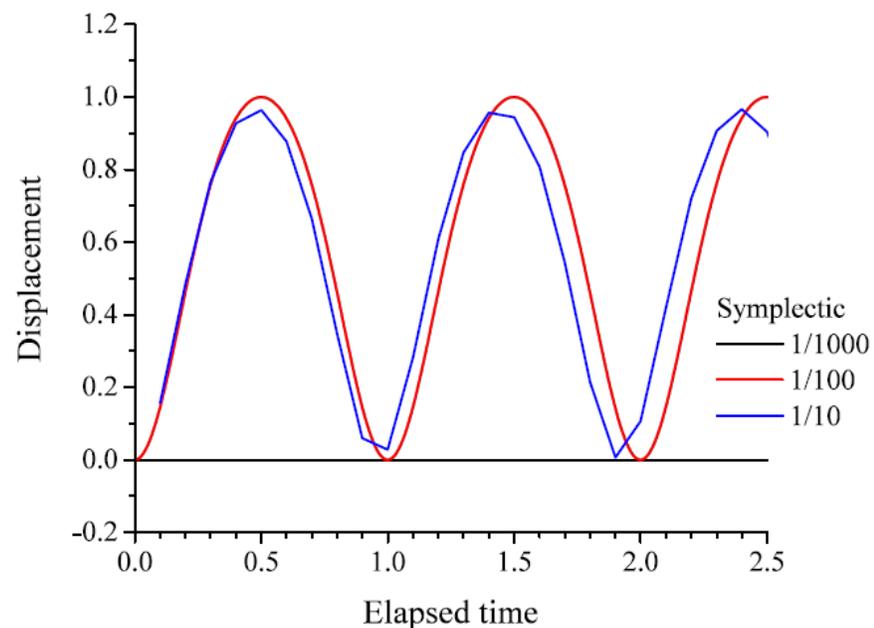
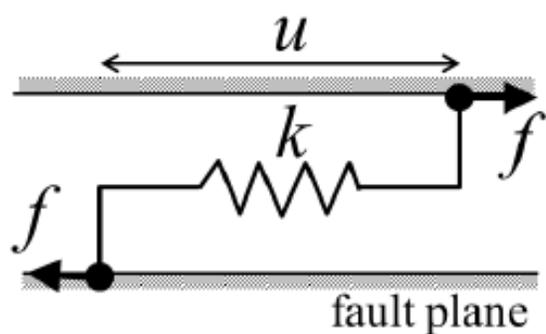


- ◆ 格子サイズを1m ~ 10mで設定
- ◆ 格子サイズ収束性を確認
  - 2次要素⇒2次収束(格子サイズ1mの結果を基準)





- ◆ 1質点系のバネの振動
  - ◆ 陰的Newmark  $\beta$  法と陽的2次シンプレクティック積分法の比較
    - 陰的Newmark  $\beta$  法は2次収束
    - 陽的シンプレクティック積分法は2次以上の収束
- ⇒ 陽的解法でも陰的Newmark  $\beta$  法と同等以上の評価を実現





## STEP 1 : 食い違い弾性論 (理論解)

- 食い違い弾性論 (Okada (1992))に基づいて, 主断層 (地震断層) のずれによる広域地盤の変形を理論的に評価.

## STEP 2 : 建屋周辺の数値解析 (3次元FEM)

- 浅部 (地下1km程度) の詳細解析モデルの境界にSTEP1の結果を作用させ, 主断層の活動による変形や断層のずれを評価.

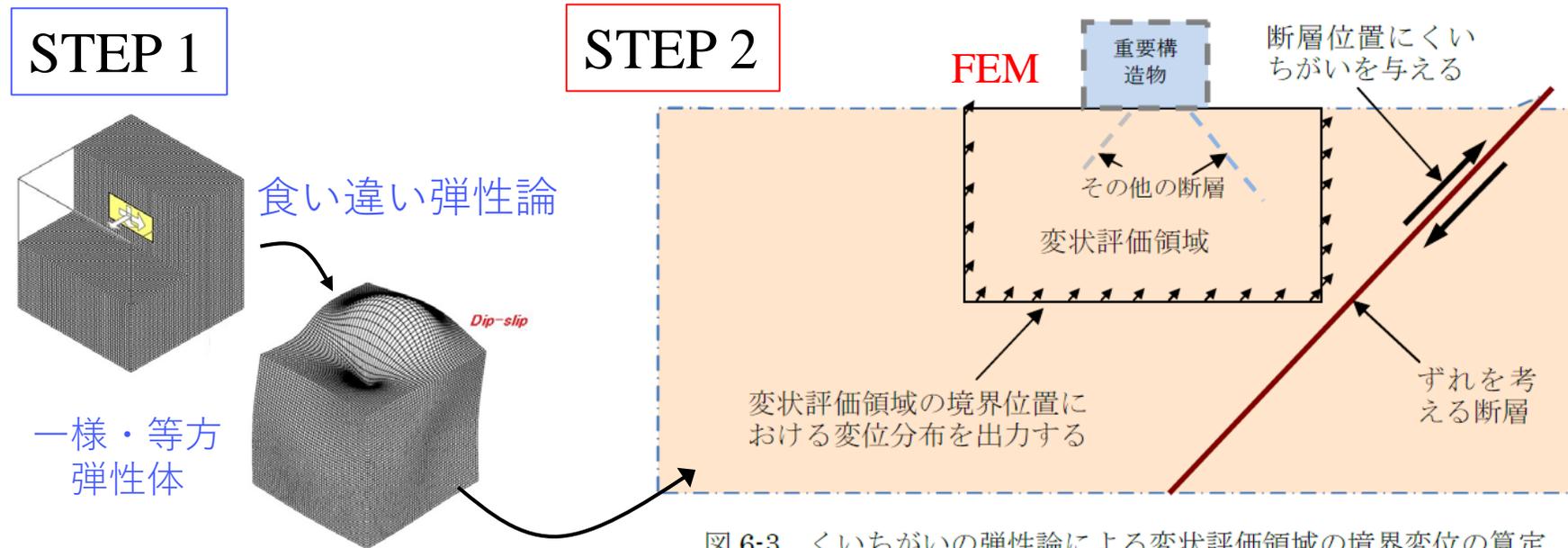


図 6-3 くいちがいの弾性論による変状評価領域の境界変位の算定

Okada (1992)

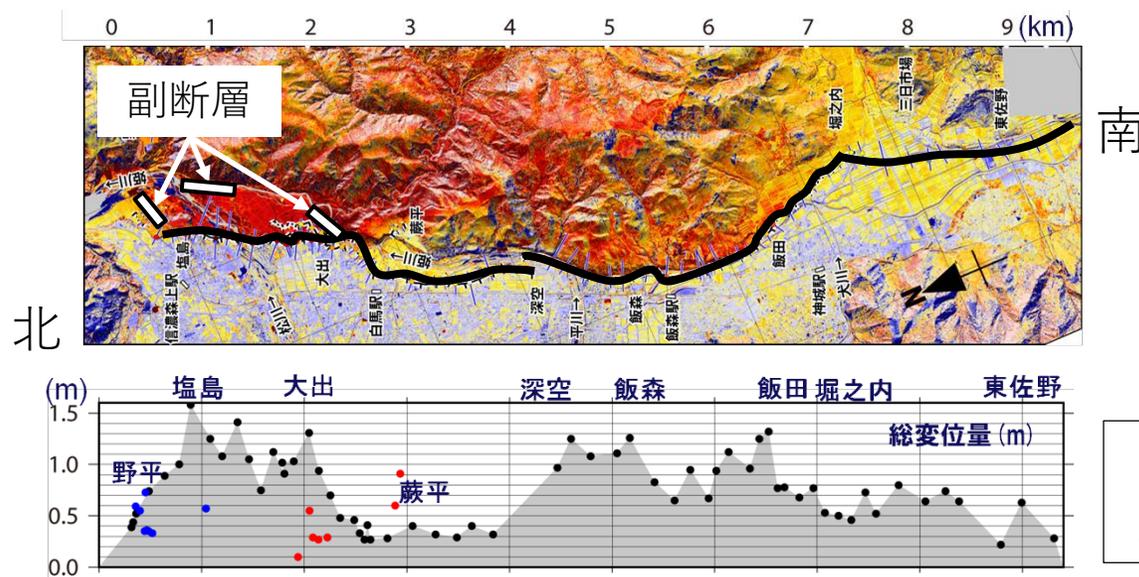
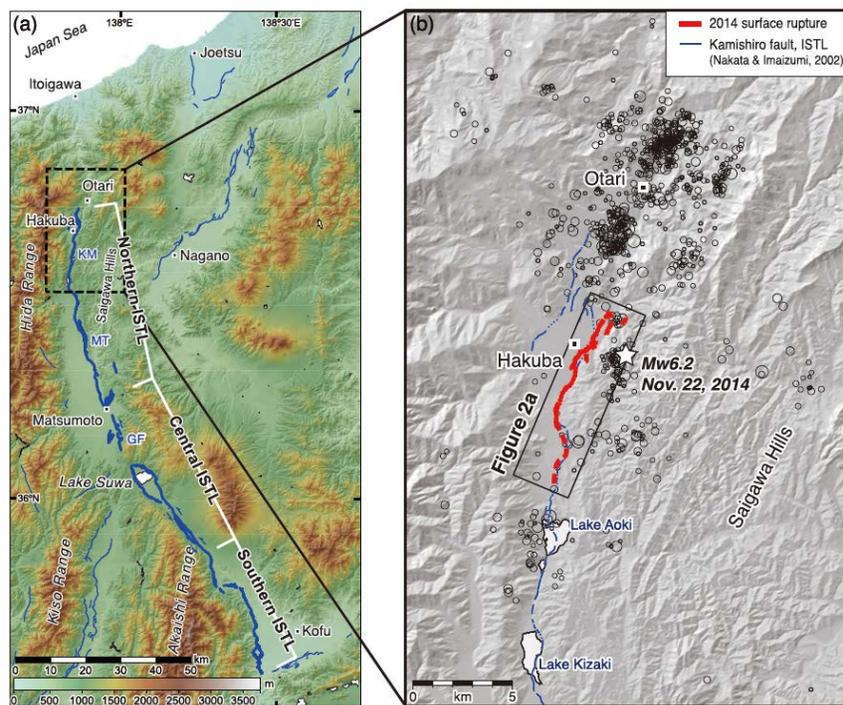
JANSI (2013), 原子力発電所敷地内断層の変位に対する評価手法に関する調査・検討報告書

### 3. 実断層への適用



#### ◆ 2014年長野県北部地震(神城断層)(2014年11月22日, $M_{JMA}$ 6.7, $M_w$ 6.3)

- 発震機構: 西北西-東南東に圧縮軸を持つ逆断層型, 東側が隆起
- 震源域南側9kmに地表地震断層, 北端で副断層が発生
  - 主断層: 1m前後(最大1.6m)
  - 副断層: 主断層の半分程度(0.3m~0.7m程度)

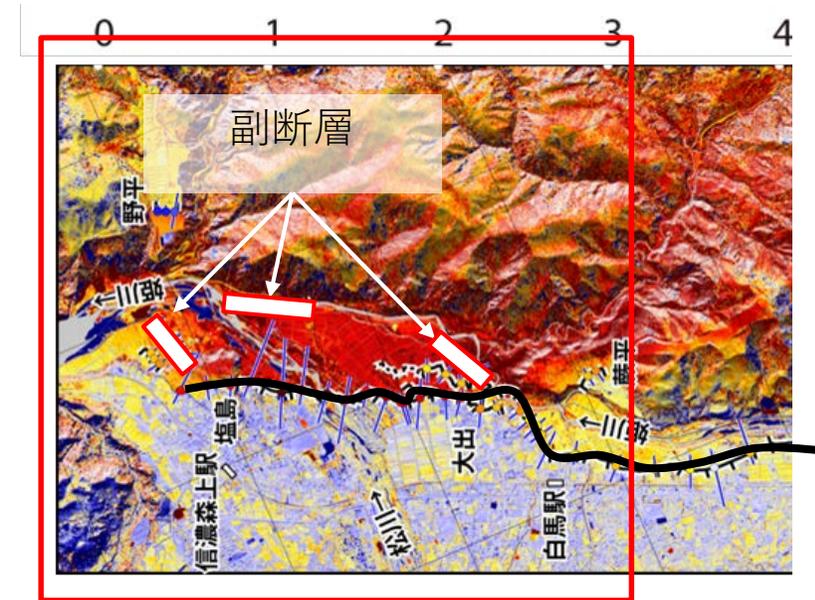
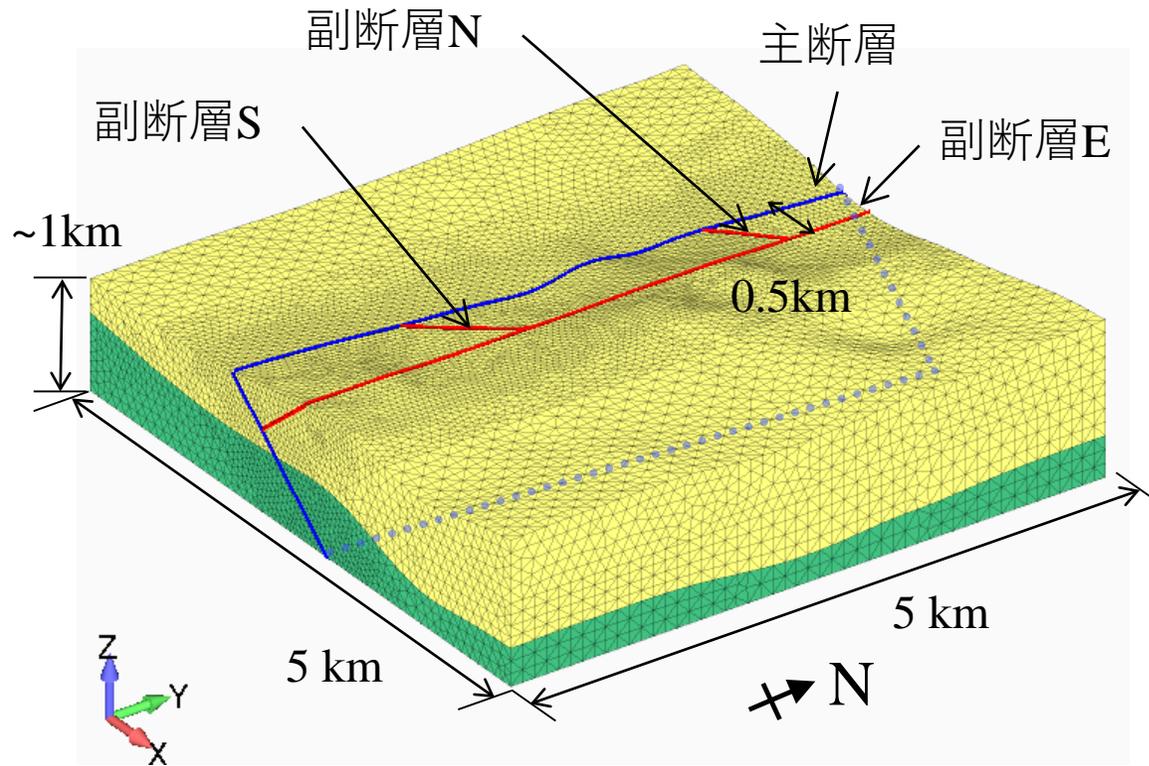


DEM差分解析 青柳(2016), 日本地球惑星連合2016年大会 に加筆

石村ら(2016), 活断層研究



- ◆ 副断層が発生した地表地震断層の北側5km x 5km x 約1kmをモデル化
  - 地層・標高: 防災科研J-SHIS地盤データベースに基づきVsで2層
  - 断層: 主断層1面, 副断層3面を弱面として設定
- ◆ モデルの規模: 約217万自由度 ← 従来の計算機では対応不可

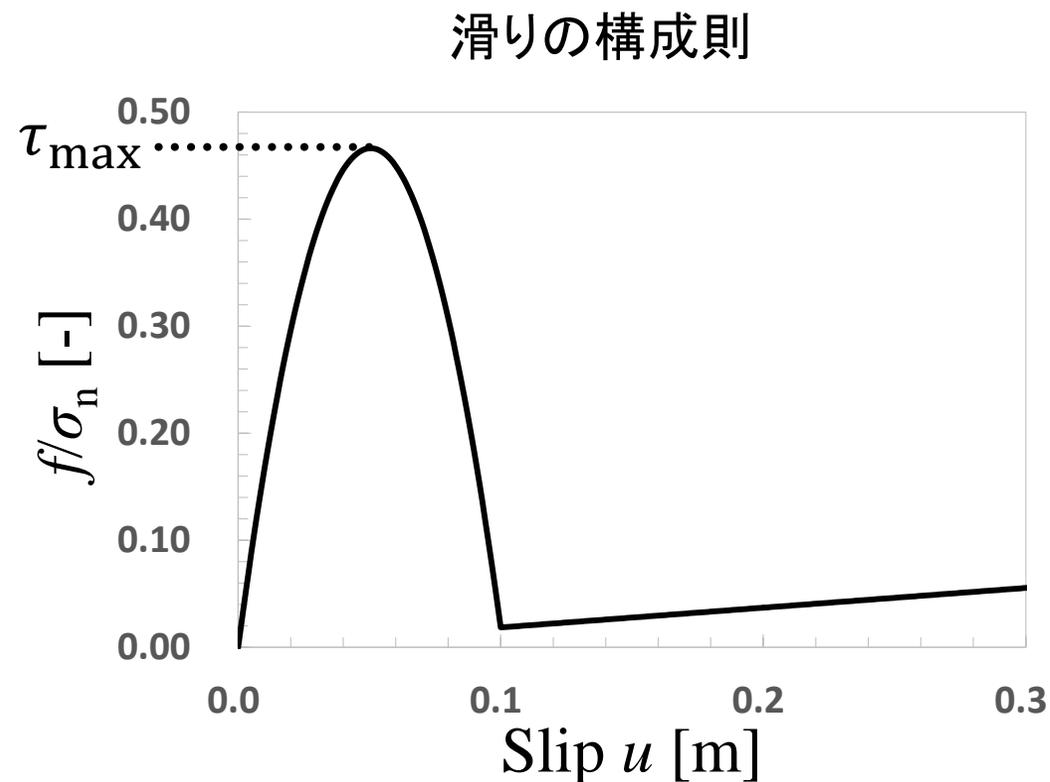


計算対象領域



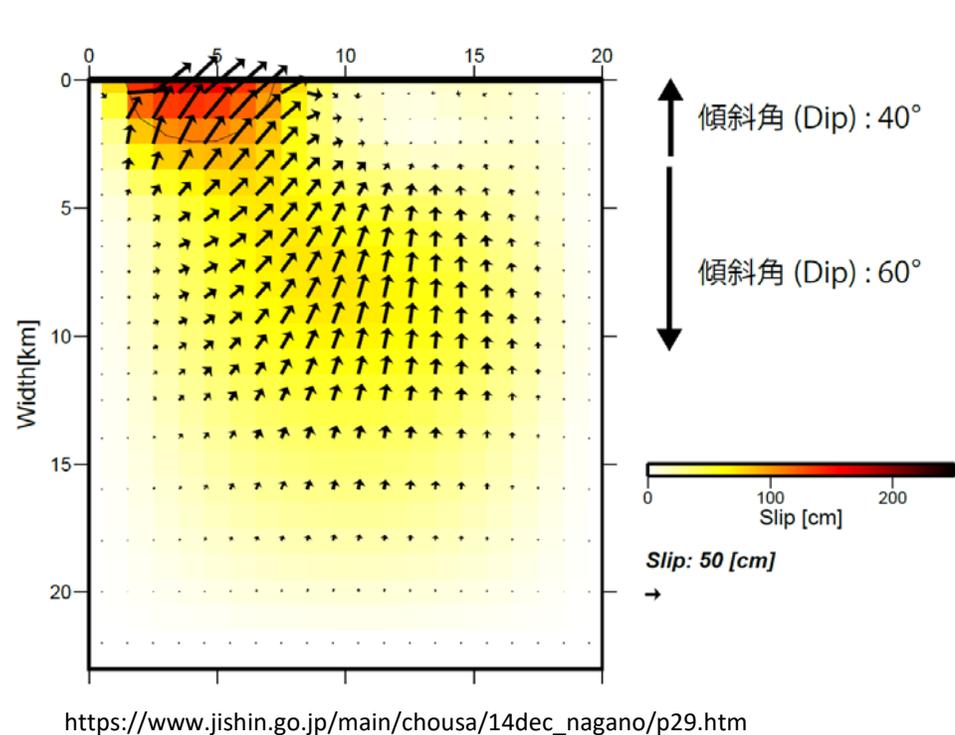
- ◆ 岩盤: 弾性体とし, J-SHIS地盤データベースの物性値を使用
- ◆ 断層面: ピーク強度 $\tau_{\max}$ に拘束圧依存性 $\sigma_n$ を考慮
  - $\tau_{\max} = \sigma_n \tan \phi + c$
  - 摩擦角, 粘着力は典型的な値として設定

	Material property	Value
Rock of the first layer	Young's modulus	10.03 GPa
	Poisson's ratio	0.3491
	Density	2.2 ton/m <sup>3</sup>
Rock of the second layer	Young's modulus	27.72GPa
	Poisson's ratio	0.3097
	Density	2.4 ton/m <sup>3</sup>
Fault plane	Friction angle $\phi$	25.0 deg
	Cohesion $c$	0.025 MPa

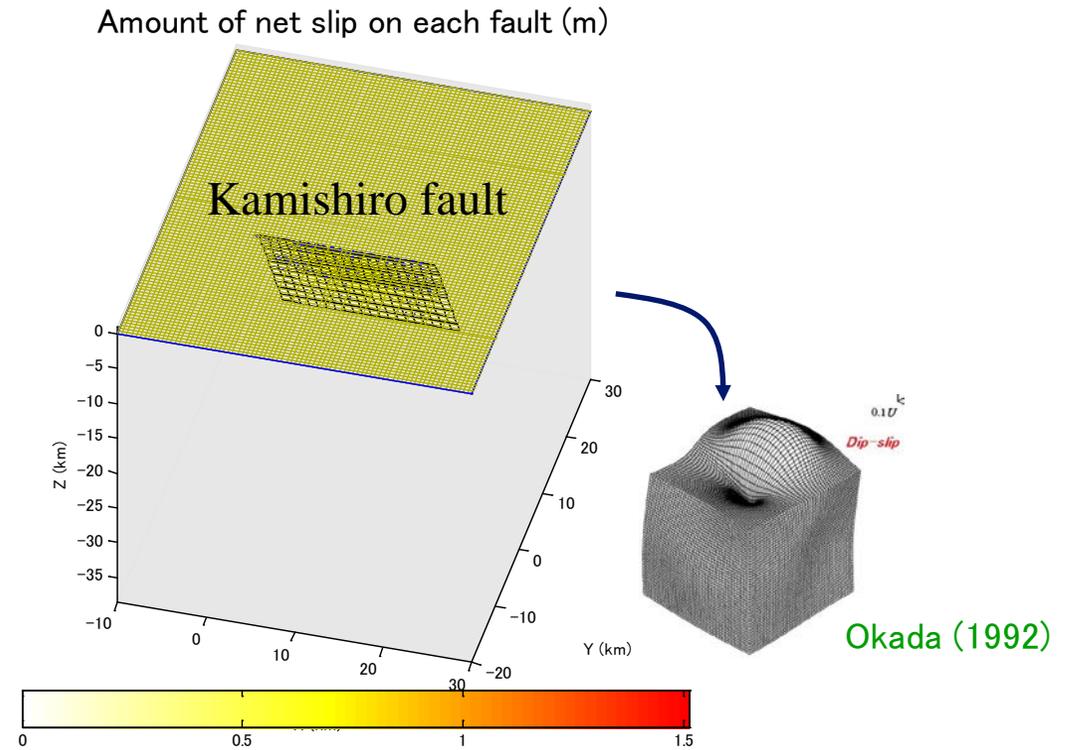




- ◆ 食い違い弾性論 (Okada (1985))に基づいて, 主断層 (地震断層)のずれによる広域地盤の変形を理論的に評価
  - 主断層面上の滑り分布: 国土地理院の震源逆解析結果



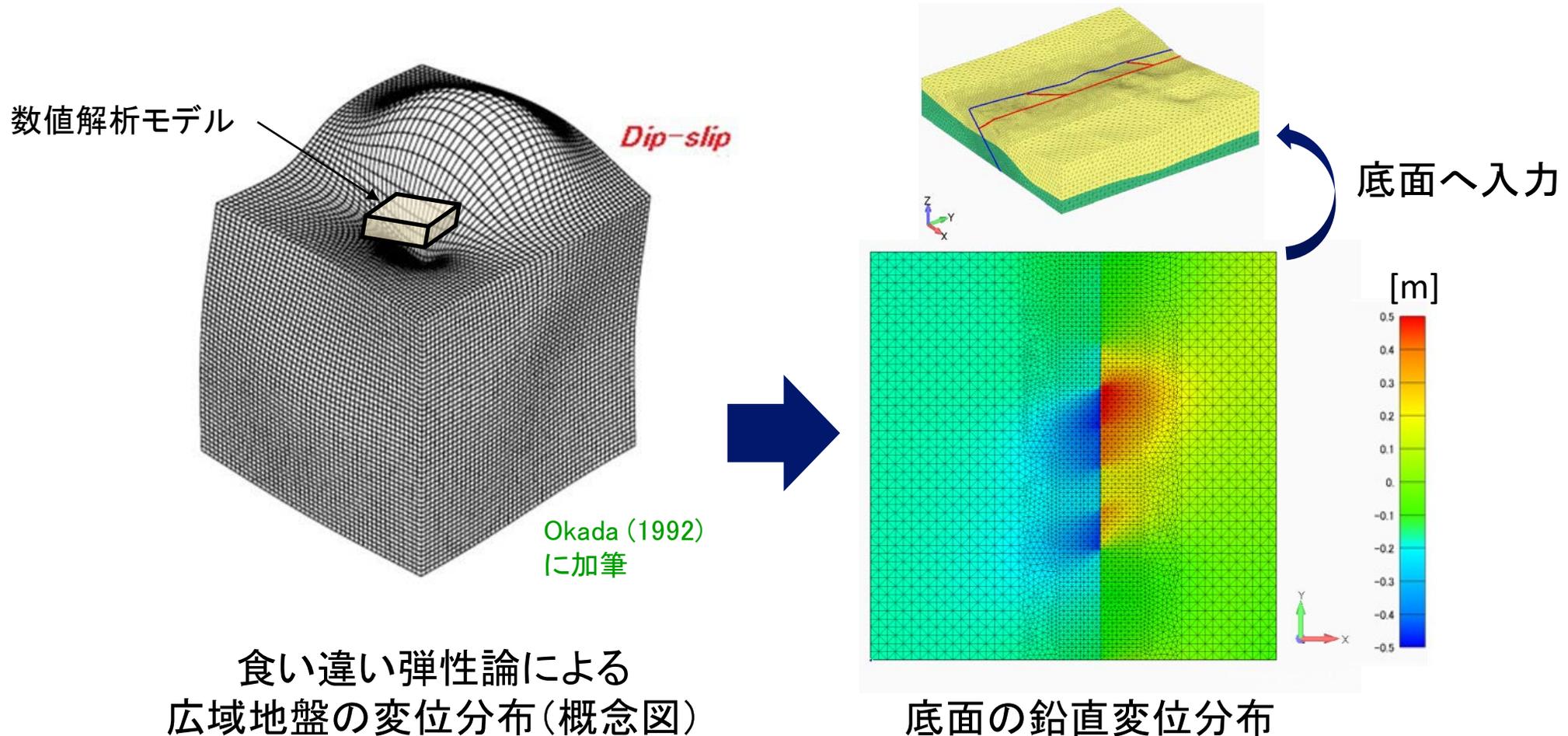
神城断層の震源逆解析結果 国土地理院 (2015)



食い違い弾性論の計算



- ◆ STEP 1で得られた変位分布を浅部の数値解析モデルの底部に作用
  - 最大ずれ変位 $\Delta$ を3.0mまで漸増的に载荷する準静的プッシュオーバー解析



食い違い弾性論による  
広域地盤の変位分布(概念図)

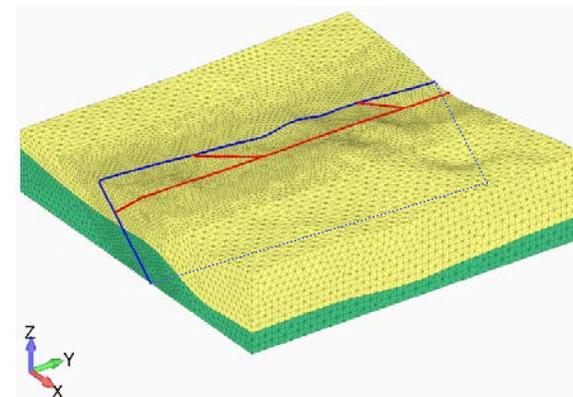
底面の鉛直変位分布



## ◆ 鉛直変位量

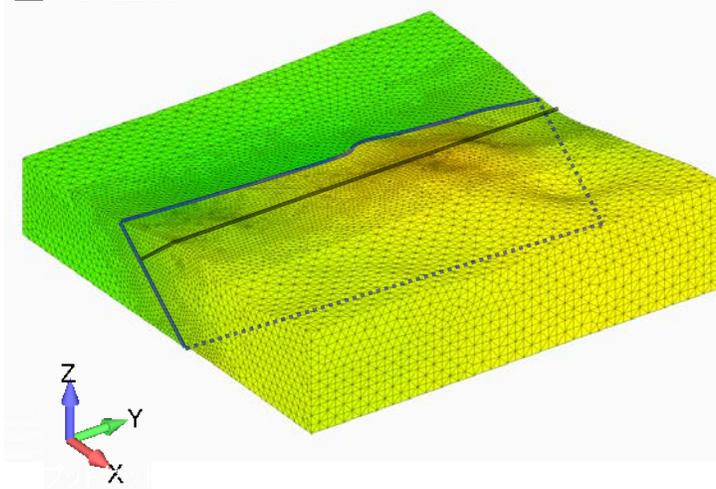
- 逆断層: (相対的に) 上盤が上がる

## ◆ 3次元的な変形, 傾斜等を評価可能

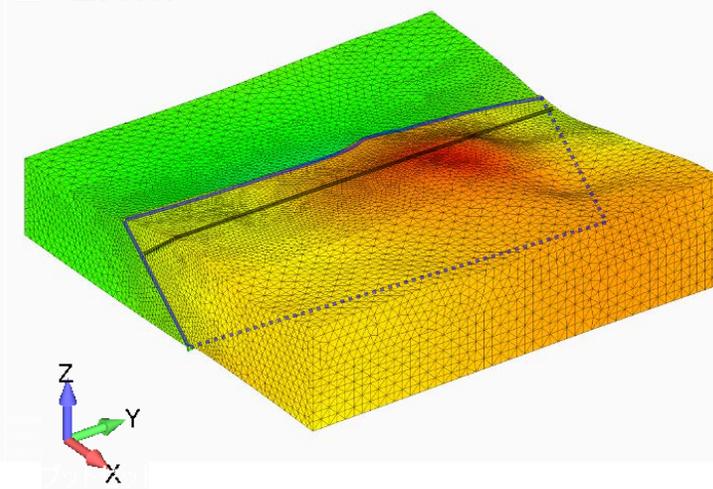


主断層深部の最大ずれ変位

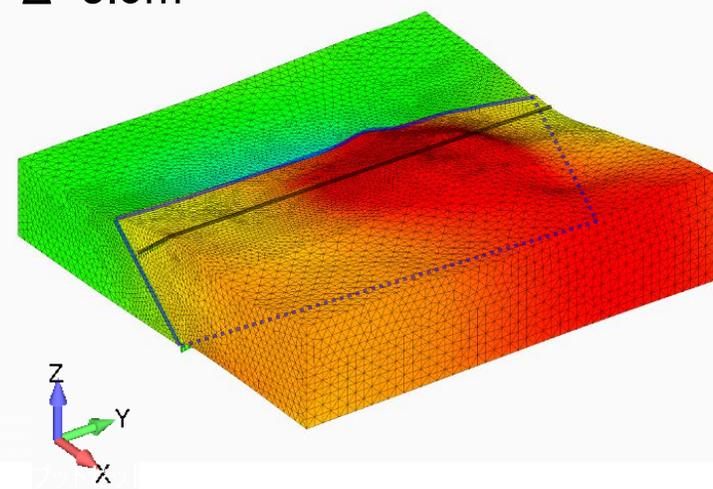
$\Delta=1.2\text{m}$



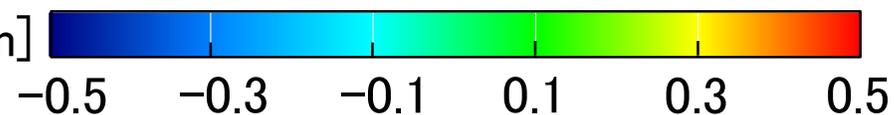
$\Delta=2.1\text{m}$



$\Delta=3.0\text{m}$



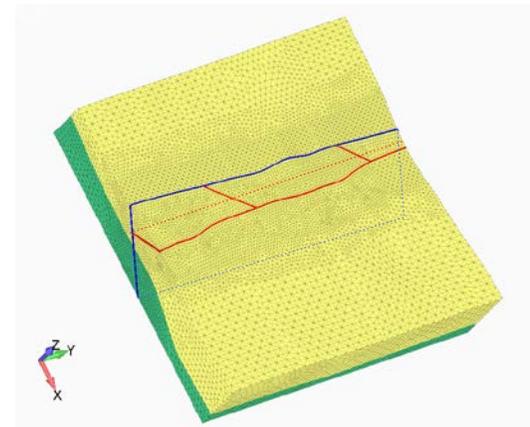
鉛直変位量 [m]





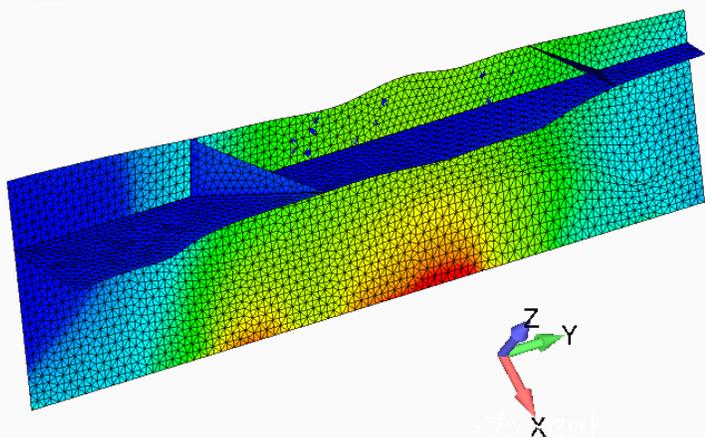
## ◆ 断層面上のずれ変位量

- 底面のずれ変位が断層面上を伝播散逸
- 地表面まで到達する
- 副断層Eにもずれ変位が発生

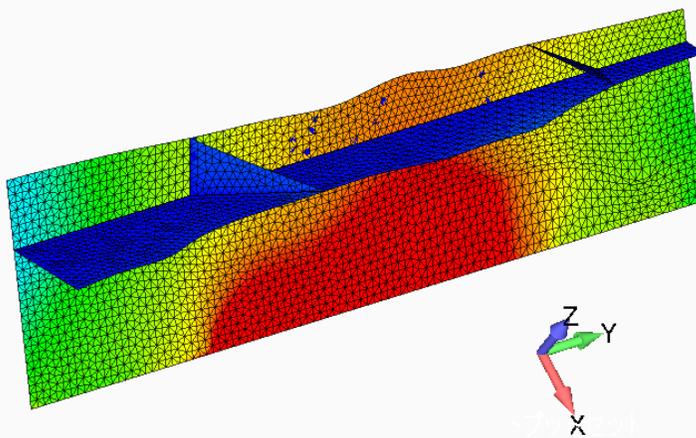


主断層深部の最大ずれ変位

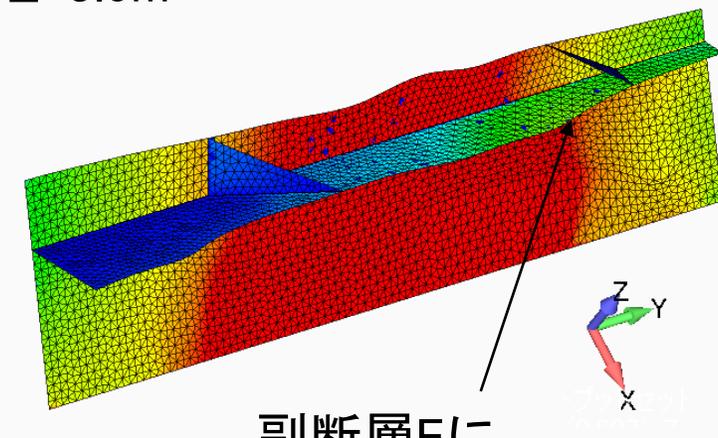
$\Delta=1.2\text{m}$



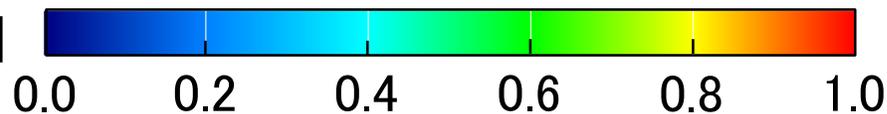
$\Delta=2.1\text{m}$



$\Delta=3.0\text{m}$



ずれ変位量 [m]



副断層Eに  
ずれ変位が発生

# 計算結果: 評価点のずれ変位量

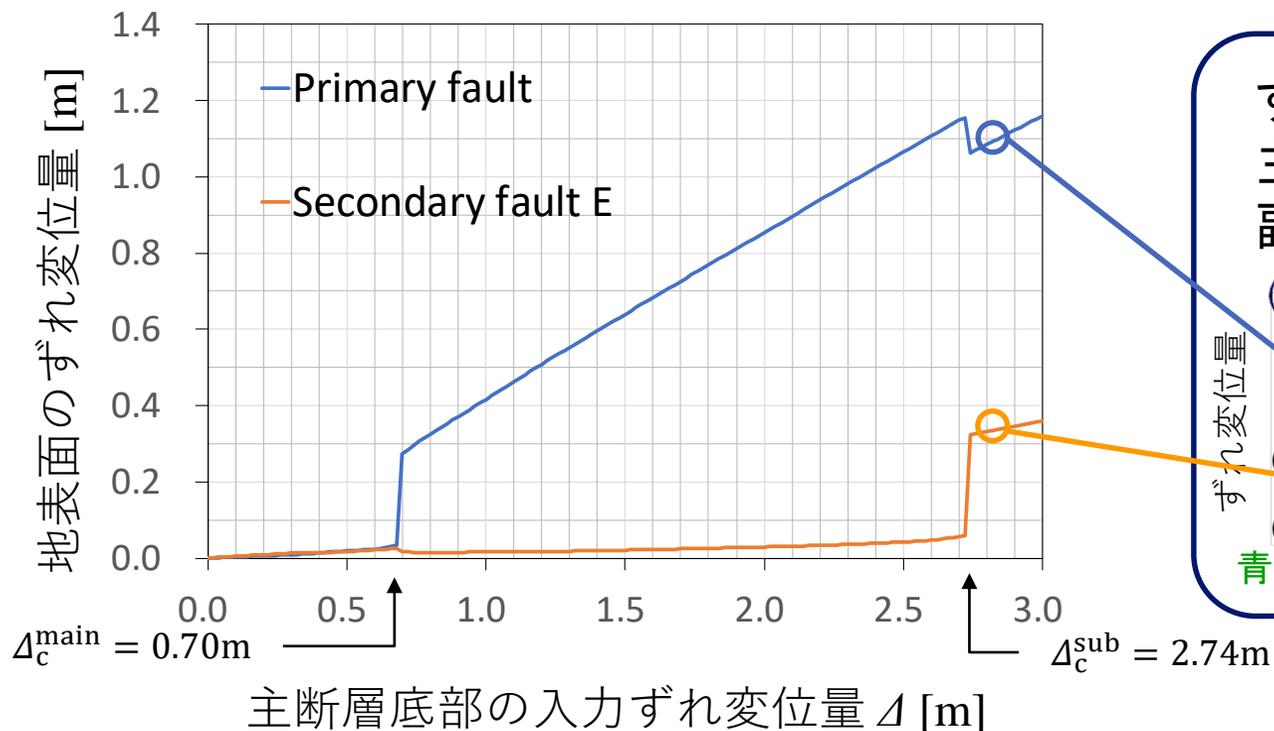
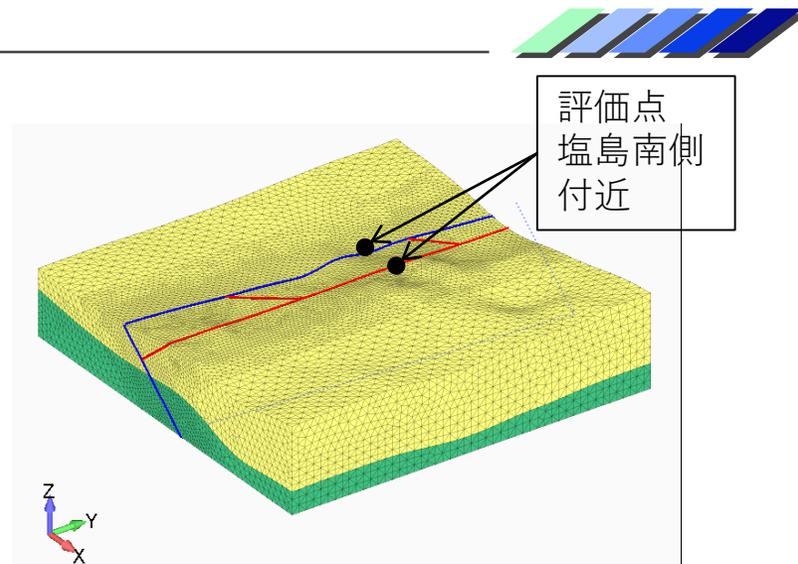
## ◆ 入力ずれ変位 $\Delta$ -ずれ変位量の関係

- 限界入力ずれ変位 $\Delta_c$ でずれ変位が増大し, 地表面に出現

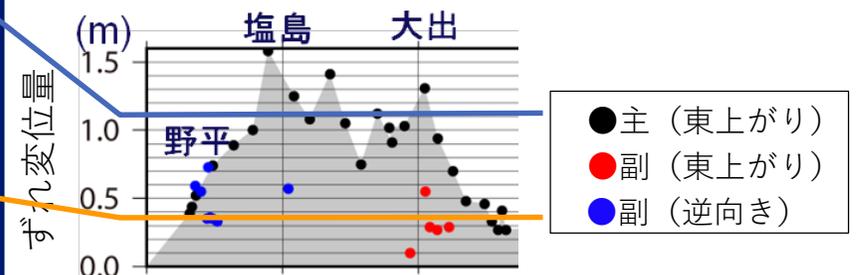
## ◆ ずれ変位量はおおむね観測と一致

- 主断層が1.1mで, 副断層が0.3-0.4m

⇒ 開発手法により, **副断層変位を評価可能**



ずれ変位量の観測結果  
主断層: 1.0m程度  
副断層: 0.3~0.7m程度



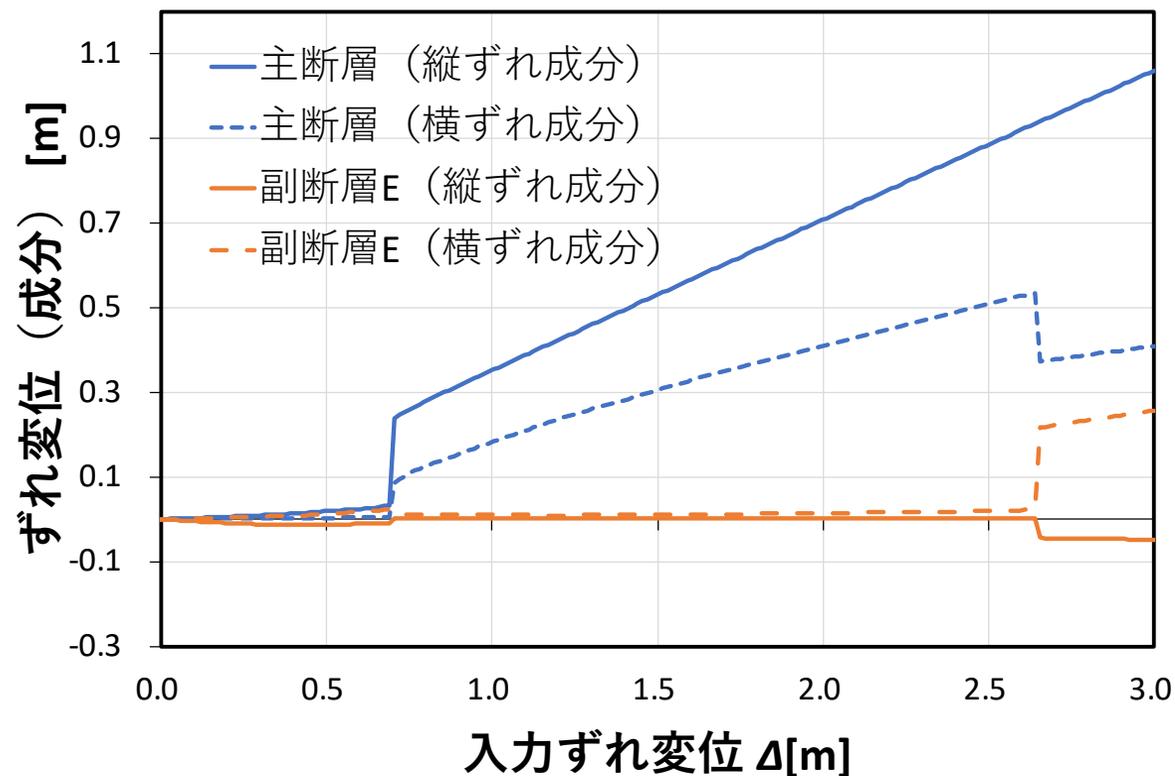
青柳(2016), 日本地球惑星連合2016年大会 に加筆

# 計算結果:ずれ変位成分

◆ 入力ずれ変位 $\Delta$ -ずれ変位成分の関係

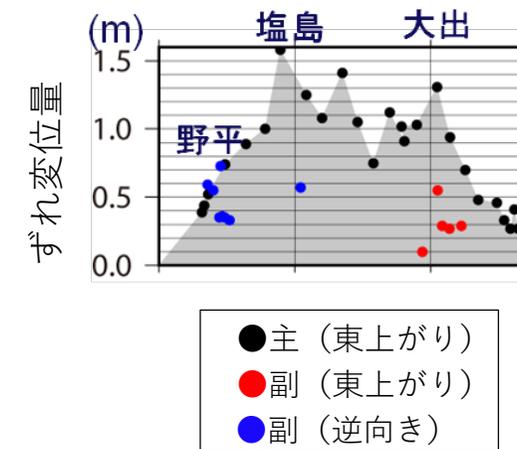
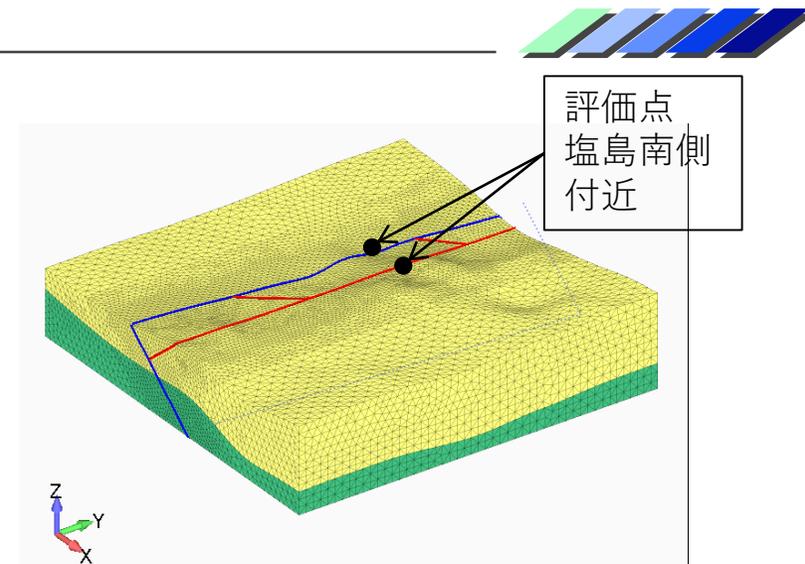
◆ ずれ変位成分もおおむね一致

- 主断層: 東上がり, 左横ずれ
- 副断層: **西上がり(バックスラスト)**, 左横ずれ



主断層: 東上がり  
左横ずれ

副断層E: 西上がり  
左横ずれ



青柳(2016), 日本地球惑星連合2016年大会

# 計算結果: 物性値の不確実性の影響の例

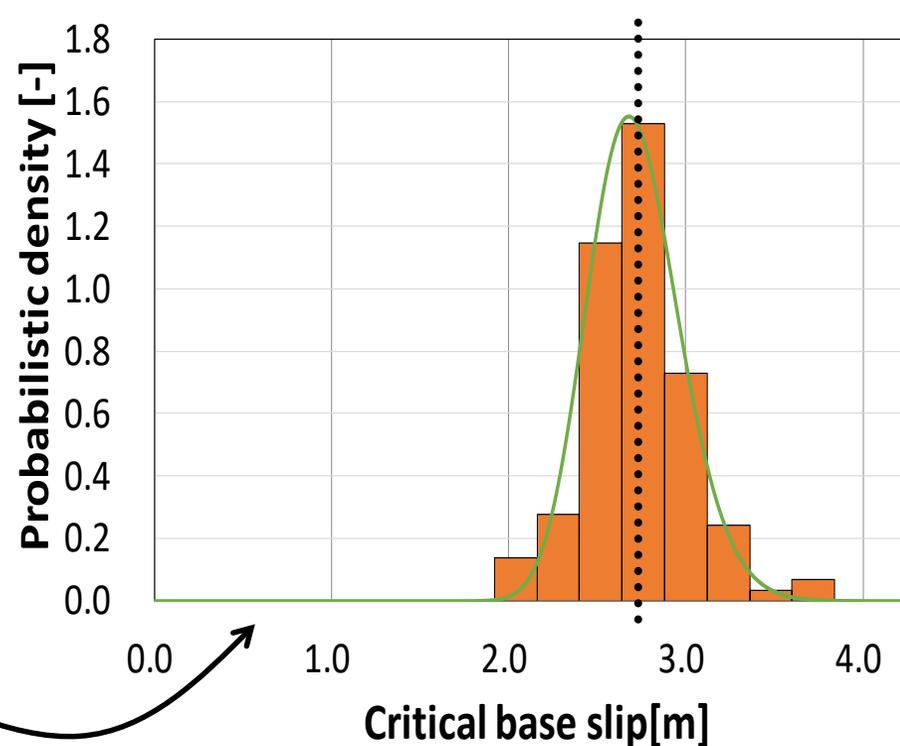
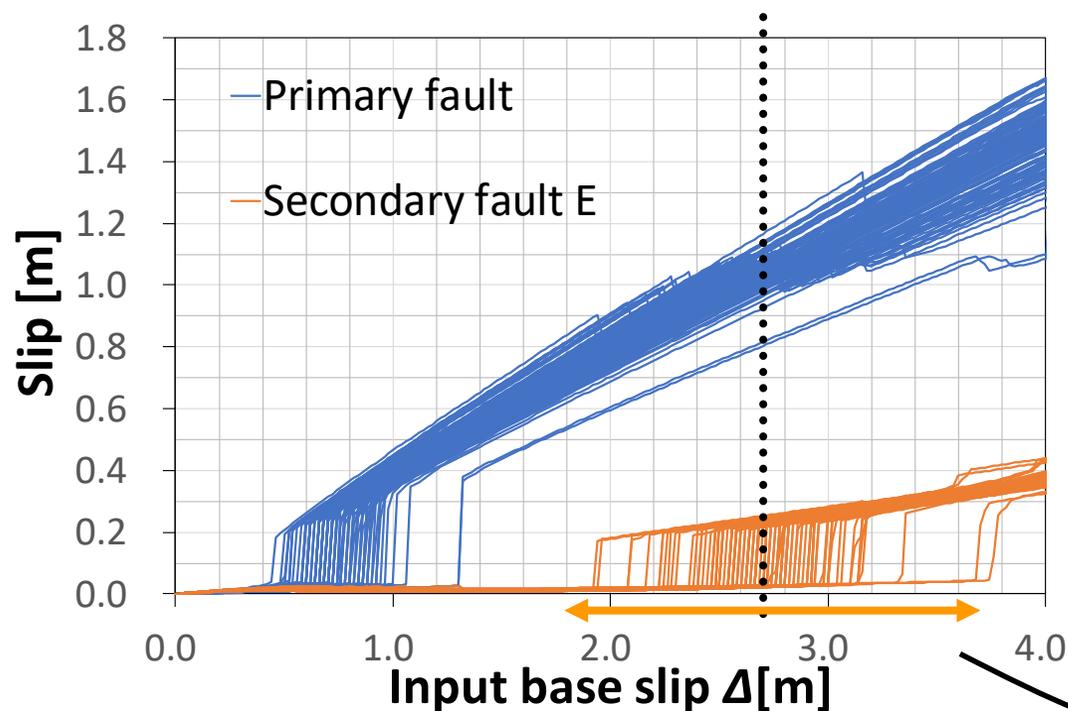
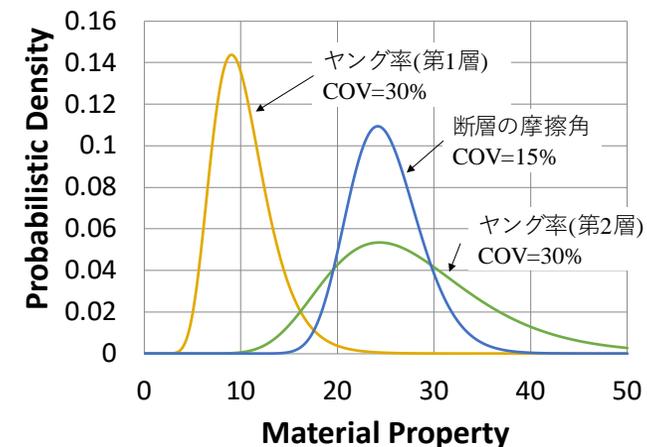


◆ 多数回計算(120回)により, 物性値の不確実性を評価

- 各層の地盤のヤング率
- 断層面の摩擦角

◆  $\Delta_C$  は物性値の不確実性により大きくばらつく

- 確率分布は対数正規分布でよく近似できる. ( $R^2=0.999$ )



決定論: 2.74m  
期待値: 2.71 m  
標準偏差: 0.26 m



## ◆ 高性能計算による断層変位評価手法の開発

- 数値解析プログラムの整備と検証
  - FrontISTRをベースとした開発・機能追加
  - プログラムの検証(格子サイズ収束性, 時間増分収束性)
- 実地震を対象とした解析による妥当性確認
- 岩盤・断層の物性のばらつきによる影響評価の例示

⇒ 一定の品質を担保した数値解析手法を開発

## ◆ 実務への適用には, 入力条件(不確実性を含む)の設定方法が重要

⇒ 有識者・ステークホルダーのコンセンサスを得た入力条件の設定

- 物性値, 断層配置, 入力ずれ変位分布・量

## ◆ 地震動の影響, 重畳の検討