

地震すべりによる地殻変動の解析 プレート間地震への応用事例

防災セミナー

2013年4月25日(木)開催

戸田 則雄



Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved

目 次

- 1.断層運動に伴う地殻変動解析手法
- 2.地殻変動解析システム
- 3.東北地方太平洋沖地震と富士山への影響
- 4.まとめ



Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved

1.断層運動に伴う地殻変動解析手法

1.1 静的弾性解析を含む準静的粘弾性解析

□釣り合い式

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + f_i = 0 \quad \sigma_{ij} : \text{応力}, \quad f_i : \text{体積力}$$

□ひずみの式

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad \varepsilon_{ij} : \text{歪}, \quad u_i : \text{変位}$$



□Maxwell粘弾性の構成方程式

$$\frac{\partial \varepsilon_{ij}}{\partial t} = \frac{\sigma^{n-1}}{A} (\sigma_{ij} + p \delta_{ij}) + \frac{\partial}{\partial t} (s_{ijkl} \sigma_{kl})$$

σ : 相当応力, A, n : 材料定数, $p = -\frac{1}{3} \sigma_{ii}$: 圧力

s_{ijkl} : 弾性コンプライアンス

□求解方程式

$$[K]\{u\} = \{f_1\} + \{f_2\}$$

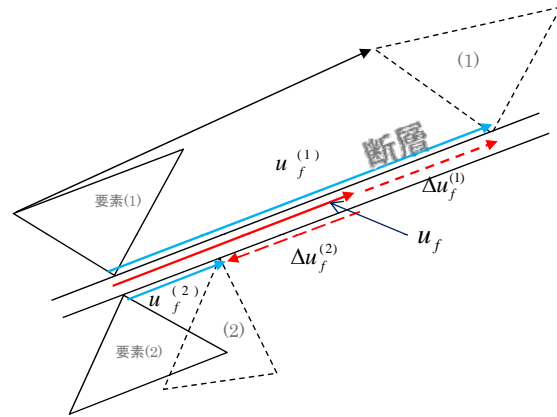
$\{f_1\}$: 体積力と表面力による外力ベクトル

$\{f_2\}$: 粘性歪発生による応力低減に相当する外力ベクトル



1.2 地震断層の処理

□ Split Node法



$$u_f^{(1)} = u_f + \Delta u_f^{(1)}$$

$$u_f^{(2)} = u_f + \Delta u_f^{(2)}$$

$u_f^{(1)}, u_f^{(2)}$: 断層面上層と下層の変位

u_f : 実際に解析で用いられる仮想変位

$\Delta u_f^{(1)}, \Delta u_f^{(2)}$: u_f に対する各要素における変位増分で断層すべり量の1/2を与える.



□ MPC法 (MPCCG法)

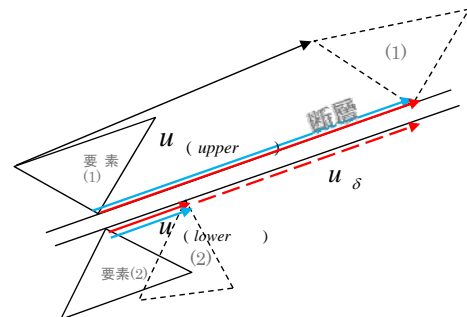
断層上節点の変位

$$u_{(upper)} - u_{(lower)} = u_\delta$$

$u_{(upper)}$: 断層上面節点の変位

$u_{(lower)}$: 断層下面節点の変位

u_δ : すべり量



地盤全体の変位は,

$$\{u\} = \begin{Bmatrix} u_{upper} \\ u_{lower} \\ u_{etc} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 \\ u_{lower} \\ u_{etc} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} u_\delta \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

最終的に解くべき求解方程式は上式の変換行列をTとすると

$$[T]^T [K] [T] \{u_{master}\} = [T]^T \{f\} - [K] \{\bar{u}\}$$



2. 地殻変動解析システム

2.1 課題と対策

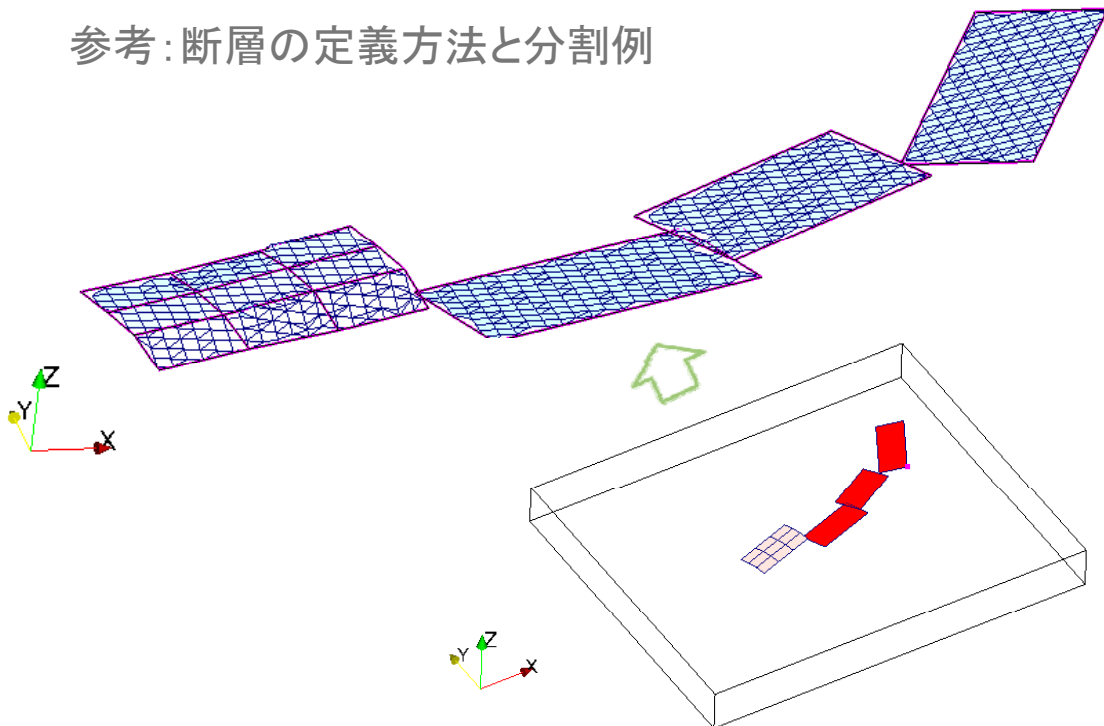
課題	対策
断層近傍要素の応力や歪の評価	MPCCG法
広域地盤への適用	球座標系でのモデル作成と応力評価, 無限要素による半無限領域解析
断層を含むメッシュ生成	断層を三・四角形で表現し柔軟な断層生成
複雑な地中構造	三次元地震波速度構造※, フィリピン海プレート面※※(東北大中島先生作成), 数値地図(国土地理院, JTOPO30), マグマ
大規模データ可視化	地表・任意切断面・部分構造抽出と可視化, 結果データベース

※出典: [Matsubara, M. and K. Obara, The 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku earthquake related to a strong velocity gradient with the Pacific plate, Earth Planets Space, 63, 663-667, 2011](#)

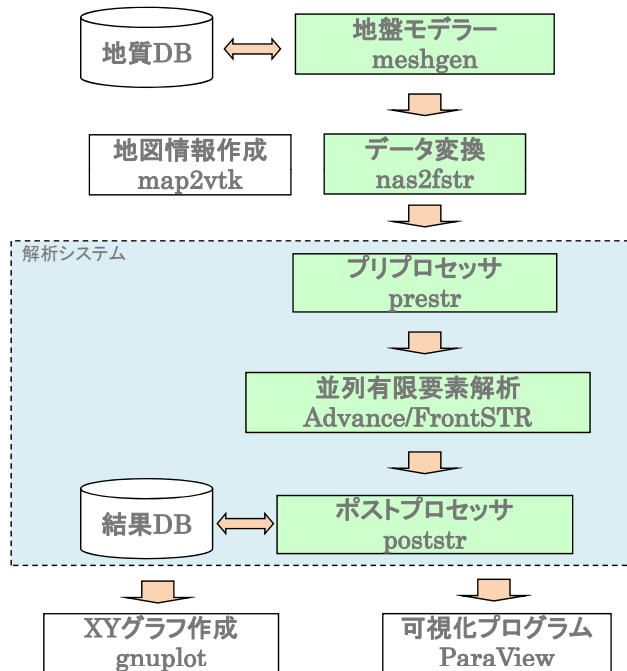
※※出典: Nakajima, J., and A. Hasegawa (2007), Subduction of the Philippine Seaplate beneath southwestern Japan: Slab geometry and its relationship to arc magmatism, J. Geophys. Res., 112, B08306, doi:10.1029/2006JB004770.



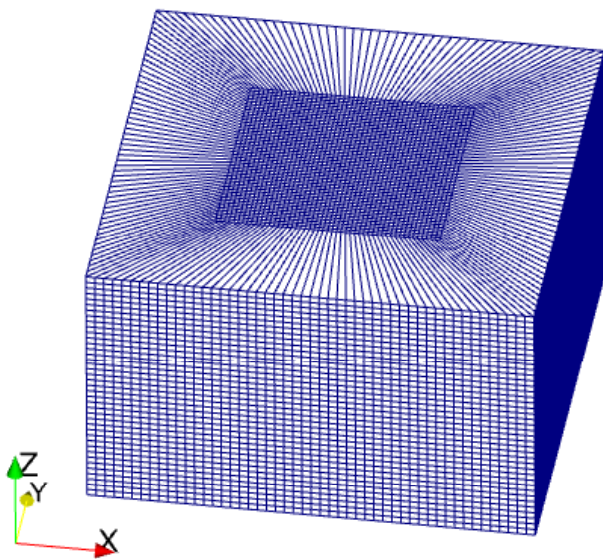
参考: 断層の定義方法と分割例



2.2 システム構成



2.3 精度検証(解析モデル)

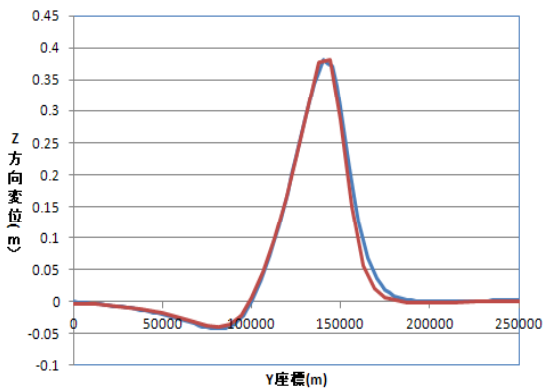


項目	内容
走向角	90°
傾斜角	30°
すべり角	0°
すべり量	$U_1=0m, U_2=1m, U_3=0m$
断層深さ	$d=40km$
断層面規模	50km(L), 50km(W)
地盤規模	250km(EW) × 250km(NS) × 150km(Depth)
地盤材質	$V_s=6325m/s, V_p=10954m/s, \rho=1000kg/m^3$
問題サイズ	節点数: 117341, 要素数: 110560, 要素サイズ5km
計算時間	445秒(2ステップ, WinPC)

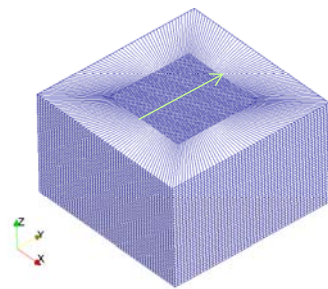
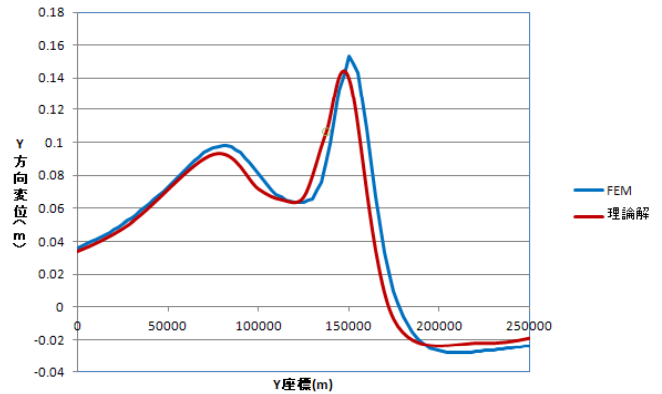


2.3 精度検証(解析結果)

中央部NS方向地表面のZ方向変位



中央部NS方向地表面のY方向変位



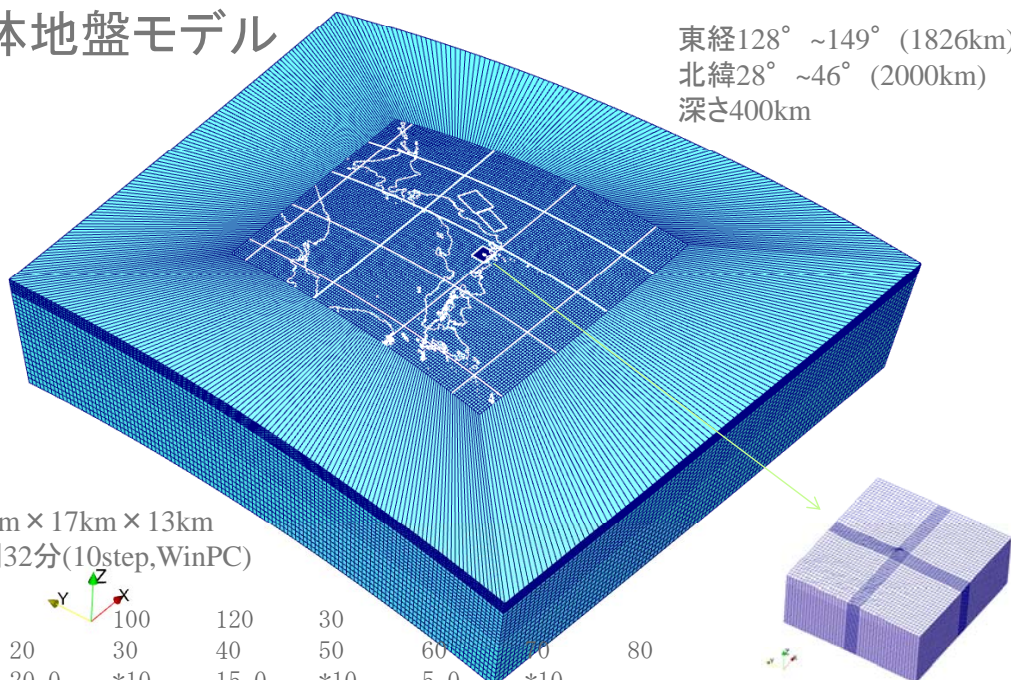
理論値は、「岡田モデル」
(Okada.BSSA 75,1135-
1154,1985)による。



3. 東北地方太平洋沖地震と富士山への影響

3.1 全体地盤モデル

東経128° ~149° (1826km)
北緯28° ~46° (2000km)
深さ400km

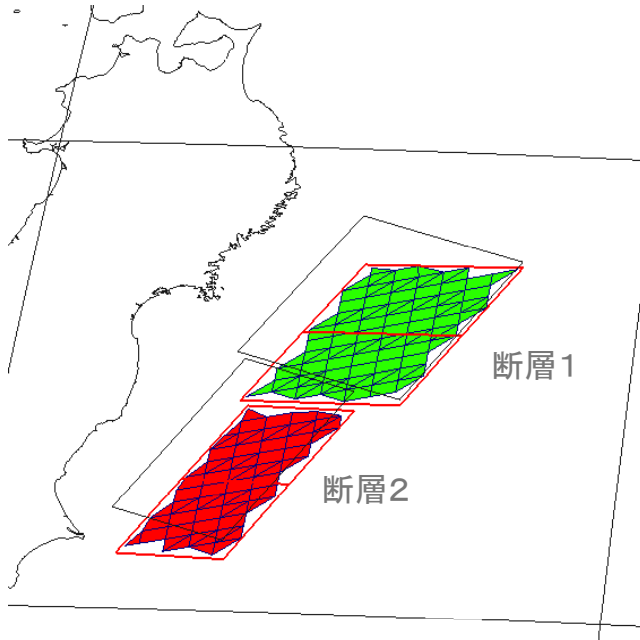


節点数:569891
要素数:542163
要素サイズ:18km×17km×13km
計算時間:3時間32分(10step,WinPC)

#HEXA	10		100	120	30			
+	10	20	30	40	50	60	70	80
+	Z	20.0	*10	15.0	*10	5.0	*10	



3.2 震源モデル



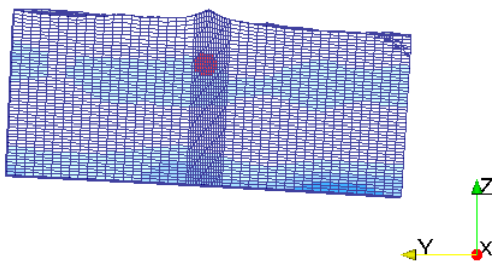
項目	断層1	断層2
緯度	38.80	37.33
経度	144.00	142.80
上端深(km)	5.1	17.0
長さ(km)	186	194
幅(km)	129	88
走行角(度)	203	203
傾斜角(度)	16	15
すべり角(度)	101	83
すべり量(m)	24.7	6.1
マグニチュード	8.8	8.3

出典: <http://www.gsi.go.jp/cais/topic110422-index.html>



3.3 富士山詳細部

マグマ特性	内容
Vs	0m/sec
Vp	2500m/sec
密度	2500kg/m3
位置	富士山直下10km
形状・サイズ	半径3km球体



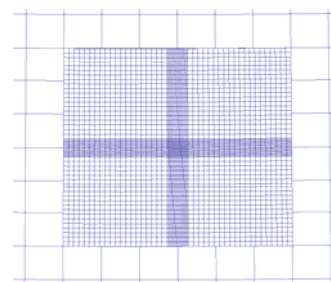
多段解析(ズーミング解析)

全体の粗メッシュ解析終了後、境界変位を抽出して富士山の細分メッシュ解析を実行。
メッシュ作成は容易だが、境界条件抽出が面倒。



一段解析

全体の粗メッシュ部分と富士山の細分メッシュ部分の一体解析。
メッシュの粗密の違いは、GLUE機能でMPC条件を自動生成して解決。境界条件の抽出が不要。



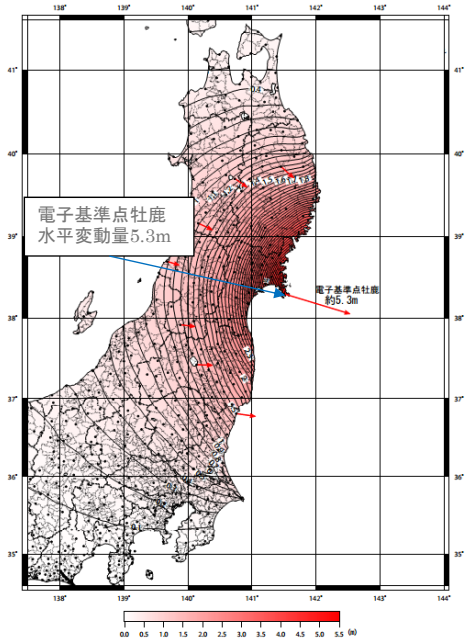
MPC条件による細分側節点の変位補間



3.4 解析結果(水平変位)

本震 (M9.0) に伴う地殻変動
等変動量線図 (水平変動量)

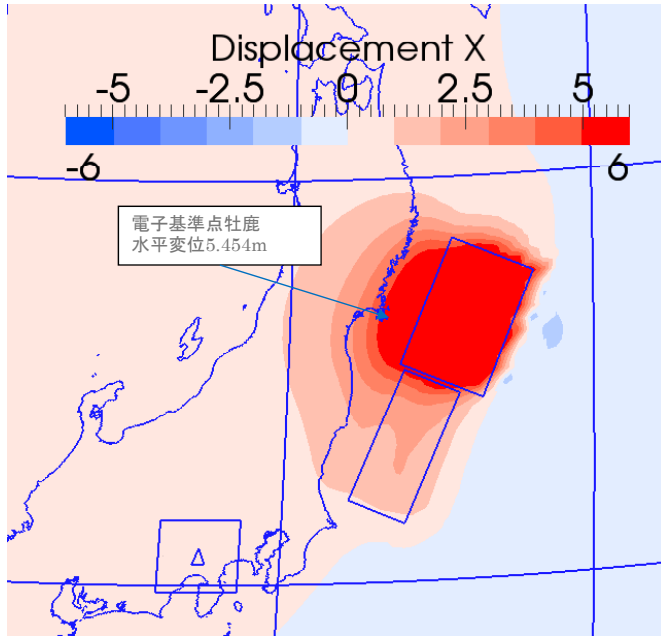
基準期間: 2011/03/01 21:00 - 2011/03/09 21:00 30秒幅解 平均値
比較期間: 2011/03/11 18:00 - 2011/03/11 21:00 03秒速解 平均値
※電子基準点の解析結果の存在しない地区では保証されません



出典: <http://www.gsi.go.jp/chibankansi/chikakukansi40005.html>



地表における水平変位(解析結果)

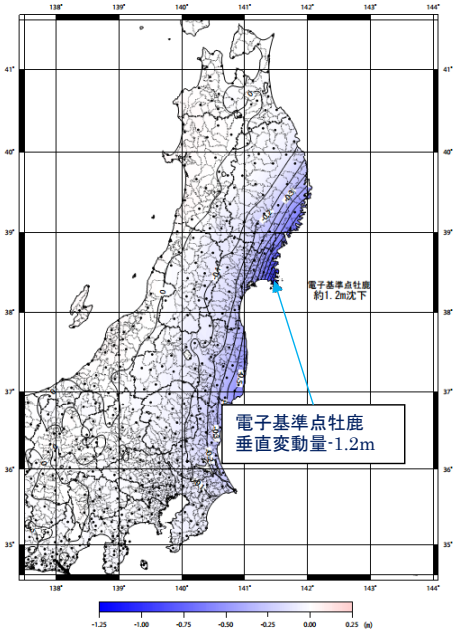


単位: m

3.4 解析結果(鉛直変位)

本震 (M9.0) に伴う地殻変動
等変動量線図 (上下変動量)

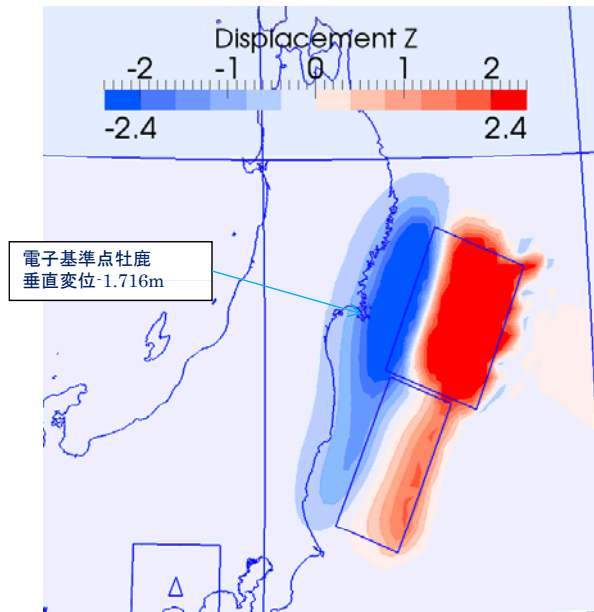
基準期間: 2011/03/01 21:00 - 2011/03/09 21:00 30秒幅解 平均値
比較期間: 2011/03/11 18:00 - 2011/03/11 21:00 03秒速解 平均値
※電子基準点の解析結果の存在しない地区では保証されません



出典: <http://www.gsi.go.jp/chibankansi/chikakukansi40005.html>

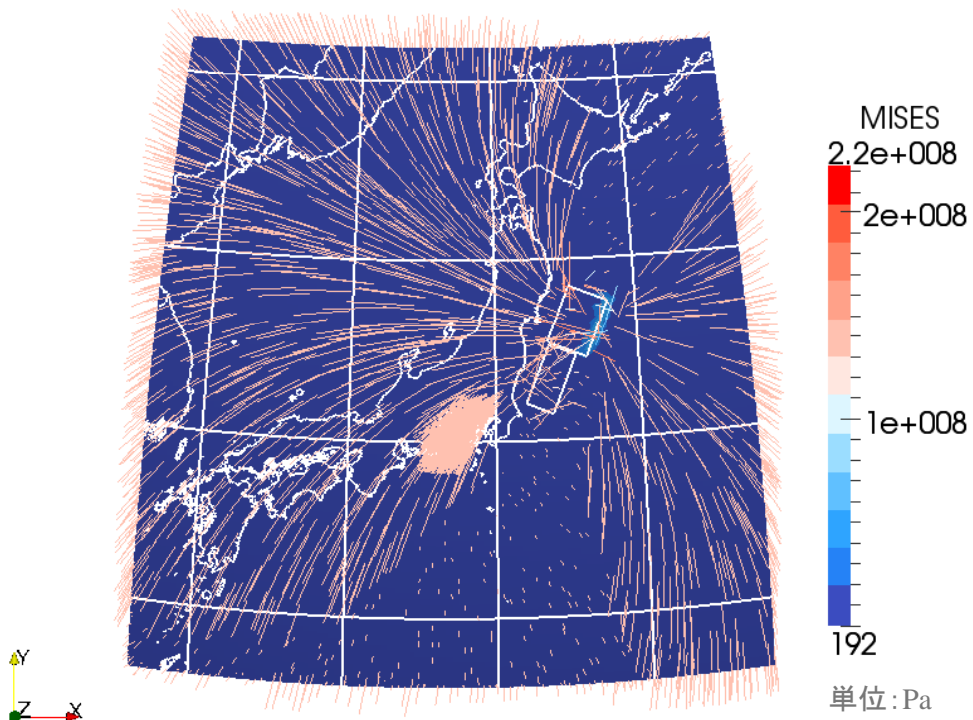


地表における鉛直変位 (解析結果)



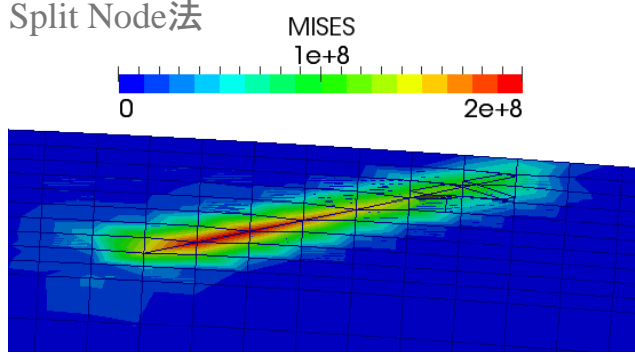
単位: m

3.4 解析結果(最大主応力線)

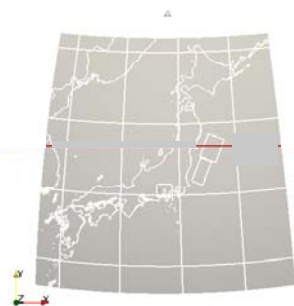
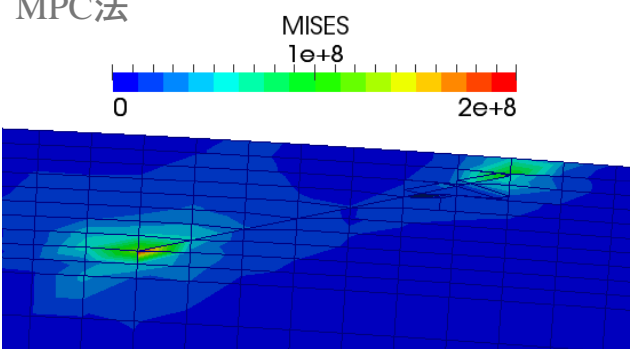


3.4 解析結果(断層付近応力分布)

Split Node法



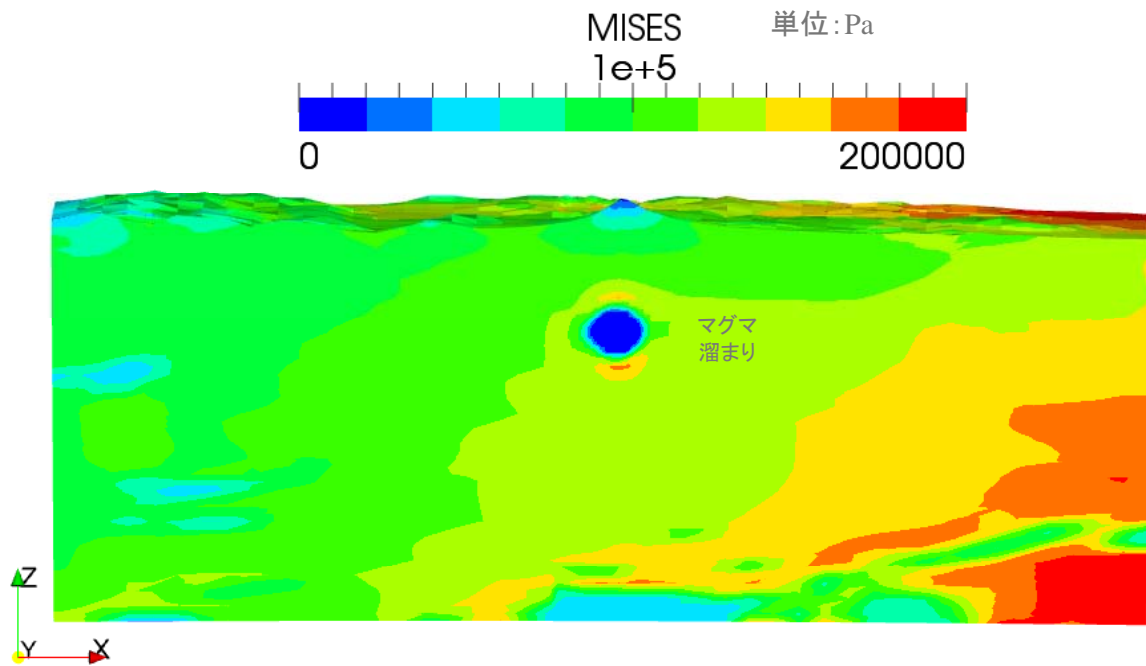
MPC法



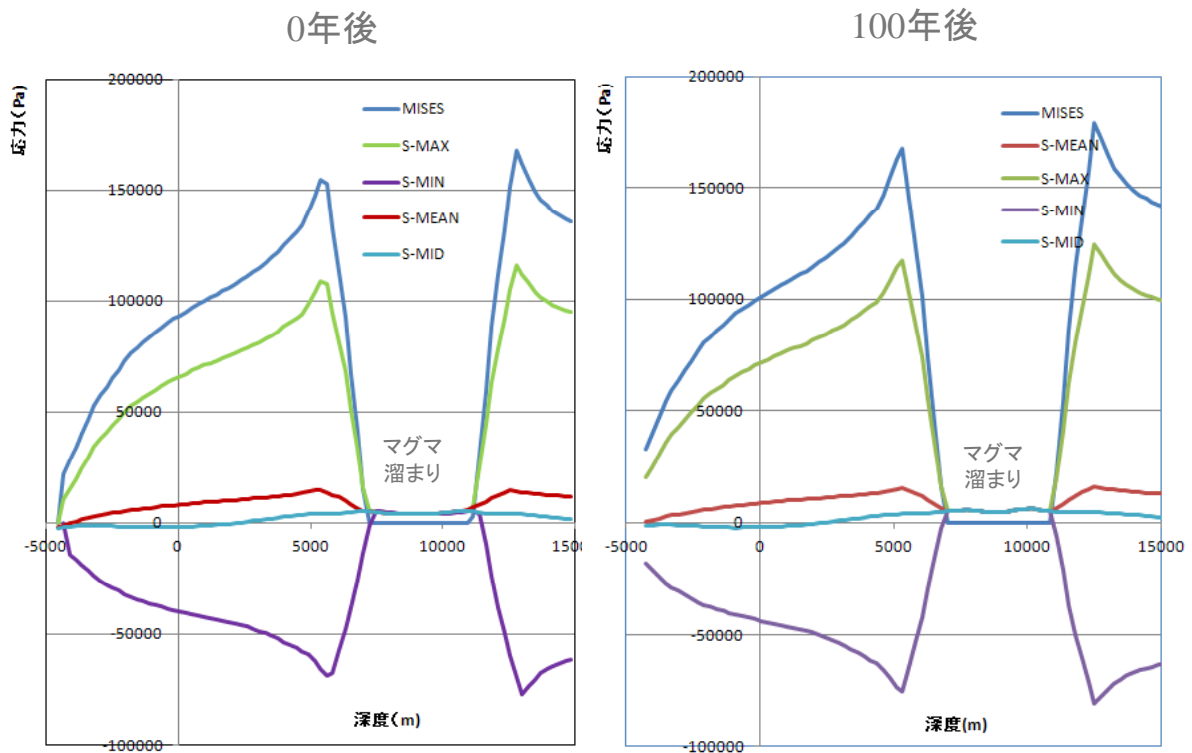
切断位置



3.4 解析結果(富士山直下応力分布)



3.4 解析結果(富士山鉛直方向応力変化)



4.まとめ

- 構造解析プログラムに断層運動に伴う地殻変動解析機能を加えた.
- 断層の処理にMPC法を採用して断層付近の応力を高精度で評価できるようにした. MPCCG法を用いることにより大規模モデルの解析もできるようになった.
- 専用のプリポストプロセッサの具備により複雑で大規模な断層の解析を効率的に計算することが可能である.
- 東北地方太平洋沖地震に適用し, 富士山周囲における影響を評価した.



Advance/FrontSTRは東京大学生産技術研究所革新的シミュレーション研究センターが実施した文部科学省次世代IT基盤構築のための研究開発「革新的シミュレーションソフトウェアの研究開発」プロジェクトおよび「イノベーション基盤シミュレーションソフトウェアの研究開発」プロジェクトの成果(ソフトウェア)をアドバンスソフトが商品化したものです。アドバンスソフトは、これらのプロジェクトに参加し、ソフトウェアの開発を担当しましたが、その成果を独自に改良して商用パッケージソフトウェアとし、販売保守を行なっております。

