

巨大地震による地殻変動の解析

菊池 愛子* 井田 喜明**, ***, **** 戸田 則雄*

Analysis of the Diastrophism by a Massive Earthquake

Aiko Kikuchi*, Yoshiaki Ida**, ***, **** and Norio Toda*

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震発生(M9.0)では自然の脅威を思い知らされた。地震は地球表面上のプレート運動に伴って発生するものであるが、東北地方太平洋沖地震では陸側プレートに固着していた海洋側プレートの一部がはずれて断層を生じ、その面を境に激しくすべって強い地震の揺れをもたらした。断層運動の影響により地表の変形および地中応力の変化がもたらされる。東北地方太平洋沖地震が発生直後に海底にある地表面の隆起により巨大な津波が発生し、東北やその周辺の火山で火山性地震の活動も活発化した。また地中に発生した応力は時間とともに拡散し伝搬する。時間がたてば断層近傍の最大応力は低減するが、断層周辺部ではむしろ応力が増加することもある。今後の影響評価のために、地中応力などの解析が有効な手段となると考えられる。

当社では断層運動により発生する地殻変動および経年変化が地盤に与える影響を解析するプログラムを開発[1]しており、実地震の解析に適用した実績もあるので、ここに報告する。

Key word: 巨大地震、地殻変動

1. 断層運動に伴う地殻変動の解析手法

1.1. 概要

本プログラムでは、火山などの地形や局所的な地殻構造の効果を適切に評価することを可能にするために、解析手法は形状表現に優れる有限要素法を用いている。

地盤の材質としては地震発生後の弾性余効を求めるために弾性のみならず粘性を含むものとする。

地震荷重は地下に発生した断層面のすべりによりもたらされる。従来これは split node 法によって断層面上のくいちがい変位を表現しており、

*アドバンスソフト株式会社 第1事業部

Computational Science and Engineering
Division I, AdvanceSoft Corporation

** アドバンスソフト株式会社 研究開発センター

Research and Development Center,

AdvanceSoft Corporation

*** 東京大学 名誉教授

Professor Emeritus, The University of Tokyo

**** 兵庫県立大学 名誉教授

Professor Emeritus, University of Hyogo

当社でもこの方法を採用していた。

しかし split node 法において断層面上の節点は計算の都合で設けた仮想の節点であり、上層や下層の節点を表しているわけではない。従って、断層面近傍の応力については実際の値とは異なるため評価することができず、この部分の応力は無視していた。

しかし地震発生後の弾性余効を求める粘弾性解析においては各時間ステップの応力から決まる粘性ひずみ速度が後続の時間ステップに影響を与えるため、断層面上でも正確な応力分布が必要となる。

従って断層処理に際し、新たに多節点間の拘束条件を表す MPC (MultiPointConstraint) を用いることとした。具体的には断層面上の相対する節点を二重節点とし両者間の相対変位 (3 方向成分) を規定する方法である。

広域地盤を表す大規模モデルの解析が必要であることから、「大規模並列計算機の反復法における自由度消去 MPC 法 (MPCCG 法)」をシステムに実装している。断層面上の応力が把握できる

ようになったことは今後の断層の構成則や破壊進展解析への展開にとっても重要と考えている。

1.2. 準静的粘弾性解析

粘弾性体 (Maxwell の粘弾性モデル) の準静的境界値問題を支配する基礎方程式を以下に示す。

(1) つり合いの式

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + f_i = 0 \quad (1)$$

(2) ひずみの式

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

ただし、 σ ; 応力

ε ; 全ひずみ

u ; 変位

(3) Maxwell 粘弾性の構成方程式

まず 1 次元のモデルで説明する。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} &= \frac{\sigma^n}{A} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial \sigma}{\partial t} \\ \varepsilon &= \frac{\partial u}{\partial t} \end{aligned} \quad (3)$$

A, n ; 材料定数。 $n=1$ の時、 A は粘性率 η と一致する。

λ, μ ; ラメの定数

3 次元において、式(3)を一般化して以下のよう
に書く。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon_{ij}}{\partial t} &= \frac{\sigma^{n-1}}{A} (\sigma_{ij} + p \delta_{ij}) + \frac{\partial}{\partial t} (s_{ijkl} \sigma_{kl}) \\ \text{with} \\ \sigma^2 &= \frac{1}{2} \left[\sigma_{xx}'^2 + \sigma_{yy}'^2 + \sigma_{zz}'^2 + 2(\tau_{xy}'^2 + \tau_{yz}'^2 + \tau_{zx}'^2) \right] \\ \sigma_{ij}' &= \sigma_{ij} - p \delta_{ij} \\ p &= -\frac{1}{3} \sigma_{ii} \end{aligned} \quad (4)$$

s_{ijkl} ; 弾性コンプライアンス定数弾性スティフ

ネス定数の逆数。

p ; 圧力

式(4)から応力速度は次式で表される。

$$\begin{aligned} \dot{\sigma}_{ij} &= C_{ijkl} \left[\dot{\varepsilon}_{kl} - \frac{\sigma^{n-1}}{A} (\sigma_{kl} + p \delta_{kl}) \right] \\ &= C_{ijkl} [\dot{\varepsilon}_{kl} - \dot{\varepsilon}_{kl}^{vp}] \end{aligned} \quad (5)$$

C_{ijkl} ; 弾性スティフネス定数

これを次式のように表す。

$$\{\dot{\sigma}\} = [D] \{\dot{\varepsilon}\} - \{\dot{\varepsilon}^{vp}\} \quad (6)$$

ただし

$$[D] = \begin{bmatrix} \lambda + 2\mu & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda + 2\mu & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & \lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu \end{bmatrix}$$

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{vp} = \frac{\sigma^{n-1}}{A} (\sigma_{ij} + p \delta_{ij}) = f(\sigma'_{ij})$$

$$\{\sigma\} = (\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{zx})^t$$

$$\{\varepsilon\} = (\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx})^t$$

$$\{\varepsilon^{vp}\} = (\varepsilon_{xx}^{vp}, \varepsilon_{yy}^{vp}, \varepsilon_{zz}^{vp}, \gamma_{xy}^{vp}, \gamma_{yz}^{vp}, \gamma_{zx}^{vp})^t \quad (7)$$

ただし

ε^{vp} ; 粘性ひずみ

$\gamma_{ij} = 2\varepsilon_{ij} = 2\varepsilon_{ji}$; 工学ひずみ

ラメの定数である λ, μ は以下の式から求められる。

$$\lambda = \rho (V_p^2 - 2V_s^2) \quad \mu = \rho V_s^2 \quad (8)$$

ただし ρ ; 質量密度

V_p, V_s ; P 波と S 波の速度

1.3. 仮想仕事の原理

準静的問題に対して仮想仕事の原理により、時間 t において以下の式が成り立つ。

$$\begin{aligned} \int_V \sigma_{ij}(t) \delta \varepsilon_{ij}(t) dV - \int_V b_i(t) \delta u_i dV \\ - \int_S T_i(t) \delta u_i dS = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

ただし

b_i ; 単位体積当たりの物体力

T_i ; 表面圧力

$\delta u_i, \delta \varepsilon_{ij}$; 仮想変位、仮想ひずみ

式(5)を積分すると、時間 t における応力が得られる。

$$\sigma_{ij}(t) = \int_0^t C_{ijkl} \{ \dot{\varepsilon}_{kl}(\tau) - \dot{\varepsilon}_{kl}^{vp}(\tau) \} d\tau \quad (10)$$

式(9)に式(10)を代入して整理する。

$$\begin{aligned} & \int_V \delta \varepsilon_{ij} C_{ijkl} \varepsilon_{kl} dV \\ &= \int_V b_i(t) \delta u_i dV + \int_S T_i(t) \delta u_i dS \\ &+ \int_V C_{ijkl} \varepsilon_{kl}^{vp}(t) \delta \varepsilon_{ij} dV \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} & \int_V \delta \left\{ \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) \right\} \\ & C_{ijkl} \left\{ \frac{1}{2} (u_{k,l} + u_{l,k}) \right\} dV \\ &= \int_V b_i(t) \delta u_i dV + \int_S \delta u_i T_i(t) dS \\ &+ \int_V \delta \left\{ \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) \right\} C_{ijkl} \varepsilon_{kl}^{vp}(t) dV \end{aligned} \quad (12)$$

変位やひずみを節点変位で補間して離散化する。

$$\begin{aligned} & \int_V \delta \left\{ \frac{1}{2} (N^m u_i^m)_{,j} + \frac{1}{2} (N^m u_j^m)_{,i} \right\} \\ & C_{ijkl} \left\{ \frac{1}{2} (N^m u_k^m)_{,l} + \frac{1}{2} (N^m u_l^m)_{,k} \right\} dV \\ &= \int_V N^m \delta u_i^m b_i(t) dV + \int_S N^m \delta u_i^m T_i(t) dS \\ &+ \int_V \delta \left\{ \frac{1}{2} (N^m u_i^m)_{,j} + \frac{1}{2} (N^m u_j^m)_{,i} \right\} C_{ijkl} \varepsilon_{kl}^{vp}(t) dV \end{aligned} \quad (13)$$

ここで

N ; 形状関数

m ; 節点

両辺の節点仮想変位を省略すると、時間 t における節点変位を求める計算式が得られる。

$$[K]\{u\} = \{f_1\} + \{f_2\} = \{f\} \quad (14)$$

ただし

$$[K] = \int_V [B]^T [D] [B] dV$$

$$[B]_m = \begin{bmatrix} N_{,x}^m & 0 & 0 \\ 0 & N_{,y}^m & 0 \\ 0 & 0 & N_{,z}^m \\ N_{,y}^m & N_{,x}^m & 0 \\ 0 & N_{,z}^m & N_{,y}^m \\ N_{,z}^m & 0 & N_{,x}^m \end{bmatrix} \quad (15)$$

$\{u\}$; 節点変位ベクトル

$$\begin{aligned} \{f_1\} &= \int_V [N]^T \{b\} dV + \int_S [N]^T \{T\} dS \\ \{f_2\} &= \int_V [B]^T [D] \{\varepsilon^{vp}\} dV \end{aligned} \quad (16)$$

ここに、 $\{f_1\}$ は粘弾性体の単位体積に働く体積力と表面力による外力ベクトル、 $\{f_2\}$ は粘性ひずみ発生による応力低減に相当する外力ベクトルである。

1.4. 地震断層の処理

1.4.1. split node 法

従来多くのプログラムで split node 法が使用されているので紹介する。この方法によれば、単一の節点に対し、断層面の上方と下方で異なる変位を与えることができる。このことにより地震断層のすべり変位による影響を模擬することができる。

アルゴリズムは以下のように示される。図 1 に示す 2 つの要素を考える。要素①の節点 f 、と要素②の節点 f は全体剛性を組み上げた時に同一節点となるが、それぞれ相異なる変位を持つとする。

2 点の変位を同一視するために、各要素における変位を以下のように表す。

$$\begin{aligned} u_f^{(1)} &= u_f + \Delta u_f^{(1)} \\ u_f^{(2)} &= u_f + \Delta u_f^{(2)} \end{aligned} \quad (17)$$

ただし

$u_f^{(1)}, u_f^{(2)}$; 断層面の上下で相異なる実際の変位

u_f ; 全体に組み上げられた時の断層面上の変位

$\Delta u_f^{(1)}, \Delta u_f^{(2)}$; u_f に対する各要素における変位増分。

断層すべりを表わすために $\Delta u_f^{(1)}$ 、 $\Delta u_f^{(2)}$ に半分のすべり量を与える。

変位増分 $\Delta u_f^{(1)}$ 、 $\Delta u_f^{(2)}$ の影響を荷重項として処理すれば、式(18)となり全体の方程式を組み立てることができ、全体系での断層面変位を u_f として、各節点の変位を求めることができる。

$$\begin{bmatrix} K_{11}^{(1)} & K_{1f}^{(1)} & 0 \\ K_{f1}^{(1)} & K_{ff}^{(1)} + K_{ff}^{(2)} & K_{f2}^{(2)} \\ 0 & K_{2f}^{(2)} & K_{22}^{(2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_f \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 - K_{1f}^{(1)} \Delta u_f^{(1)} \\ F_f - K_{ff}^{(1)} \Delta u_f^{(1)} - K_{ff}^{(2)} \Delta u_f^{(2)} \\ F_2 - K_{2f}^{(2)} \Delta u_f^{(2)} \end{bmatrix} \quad (18)$$

ここで u_1 ; 要素①の節点の変位 (ただし断層面上の点は除く)

u_2 ; 要素②の節点の変位 (ただし断層面上の点は除く)

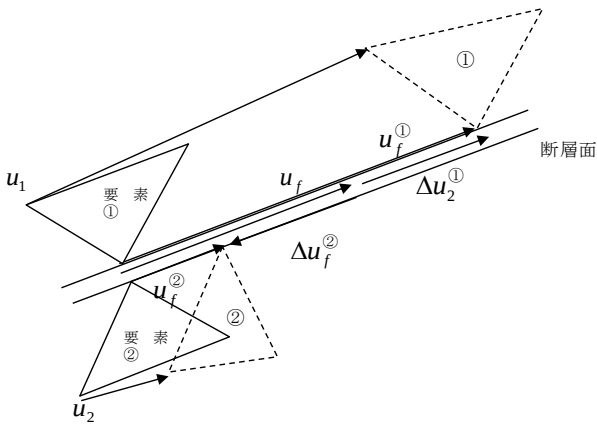


図 1 全体構造における変位

ここで示したように u_f は実際の断層面の上下節点の変位の平均値となる仮想の変位となる。

1.5. MPCCG 法 (今回の方法)

断層すべりを、断層を介して対面する上層・下層の節点の相対変位量として指定を行う MPC 条件として扱う。前述のように大規模計算に対応するため、行列の求解に反復法を使用するので、MPC の処理はペナルティ法ではなく、MPCCG 法を使用する。アルゴリズムを以下に示す。

解くべき方程式は力のつりあいの方程式である。

$$[K]\{u\} = \{f\} \quad (19)$$

これを以下の MPC による制約条件を満たして解く。

断層すべりの場合は以下の条件式となる。(簡潔化のため、説明は断層すべりを 1 次元とする。)

$$u_{upper} - u_{lower} = u_\delta \quad (20)$$

ただし

u_{upper}, u_{lower} ; 断層上層、下層の節点変位

u_δ ; 断層すべり量

全体節点変位は上層、下層の節点変位およびそれ以外の節点変位で構成される。地盤全体の節点変位ベクトル $\{u\}$ は以下のように表せる。

$$\begin{aligned} \{u\} &= \begin{Bmatrix} u_{upper} \\ u_{lower} \\ u_{etc} \end{Bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 \\ u_{lower} \\ u_{etc} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} u_\delta \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (21)$$

また上層の節点変位は従属自由度、それ以外の節点変位は独立自由度として扱う。

上の式を変換行列 T をつかってあらわす。変換行列 T は独立自由度の行については対角に 1 となり、従属自由度の行については従属自由度変位の値に寄与する独立自由度変位の列のみに係数値をいれる。

$$\{u\} = [T] \begin{Bmatrix} 0 \\ u_{lower} \\ u_{etc} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} u_\delta \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (22)$$

MPCCG 法は MPC の制約条件を考慮して、つりあい式を反復法で求解する方法である。

上式右辺の第 1 項中に表れる、全自由度のうち、独立自由度のみが意味 (値) を持つ変位ベクトルを $\{u_{master}\}$ 、断層すべりベクトルを $\{\bar{u}\}$ とし、独立自由度ベクトル $\{u_{master}\}$ から全体変位ベクトルへの変換行列を T とすると、制約条件は下式で表すことができる。

$$\{u\} = [T]\{u_{master}\} + \{\bar{u}\} \quad (23)$$

これをつりあい方程式に代入し、定数項を右辺に移項すると以下となる。

$$[K][T]\{u_{master}\} = \{f\} - [K]\{\bar{u}\} \quad (24)$$

さらに、係数行列を対称にするため、両辺の左から $\mathbf{T}^T$ をかけると下式が得られる。

$$[T]^T[K][T]\{u_{master}\} = [T]^T\{\{f\} - [K]\{\bar{u}\}\} \quad (25)$$

対称にすることにより、従来の対称行列のアルゴリズムに組み込むことができる。この方程式が、最終的に解くべき、断層すべり条件を組み込んだ方程式である。本アルゴリズムでは、この方程式に対して反復解法を適用する。

最後に求解された独立自由度（下層）の変位から従属自由度（上層）の節点変位を求める。このように上層、下層の節点を各々設けたことにより、断層面近傍の要素応力も正しく求められることとなる。

2. 地殻変動解析システムの開発

2.1. システムの特徴

本システムは地震による地殻変動およびその後の余効変動を解析するものである。以下のような特徴を持つ。

(1) 断層近傍要素の応力およびひずみの評価

断層のくいちがい処理を解析する手段として split node 法にかえて、MPCCG 法を導入したため、断層近傍要素の応力およびひずみが直接評価できる。従って断層近傍における地震発生時の応力、ひずみを求めることができ、経年変化時の粘性効果も正しく評価できる。

(2) 広域地盤への適用

地盤は独立した領域ではなく半無限に続いている。従って解析対象領域が影響をうけない範囲までをモデル領域として選択することから、モデルの大規模化、それに伴う膨大な計算が必要となる。また地球が球体である影響への対応も必要と

なる。本ソルバーは大規模並列計算機能を持つ構造解析プログラム Advance/FrontSTR をベースとして開発したことにより、メモリ、CPU など計算負荷を分散して大規模モデルを実用的な時間で解析することを可能としている。

また大規模モデルでは計算時間のみならず入力データ作成作業時間の増大も深刻である。そのため専用の地盤モデラーを開発し入力データの自動生成を行っている。モデルは直交座標のみならず球座標でも扱えるため、球殻モデルにも対応している。

(3) 広範囲断層の表現

断層には東北地方太平洋沖地震の震源にみられるように百 km 以上の幅を持っているものも存在する。これらの断層の多くはプレート表面に沿う複雑な曲面形状となる。断層面を任意の三角形、四角形のパッチの集合として扱い、有限要素モデル上の断層面形状、断層すべりデータは地盤モデラーで自動生成する。

(4) 複雑な地中構造の自動生成

地盤の応答を精度よく解析するためには地表面の形状や不均質な速度構造のモデル化も必要である。専用地盤モデラーでは地表面の形状（陸地および海底面）や地中の速度構造のデータベースを保有しており、メッシュ生成は地表面形状を参照して行い、同時に作成したメッシュ毎の材質を自動設定している。

(5) 解析結果の自動抽出、編集出力

大規模モデルの経時変化データは膨大なデータ量となり、全データを保存することは不可能である。また保存できたとしても注目すべきデータを選別する作業が困難である。そのため本システムでは専用のポスト処理機能を開発した。これを用いて、解析結果から指定部分や断面について応力や変位を抽出してファイルしておき、結果の編集出力や経時変化の出力を行える。

2.2. システムの構成

広域の地殻変動を実用的に解析するため、システムは専用地盤モデラーや専用プリポスト・プロセッサを含み図 2 に示す構成としている。

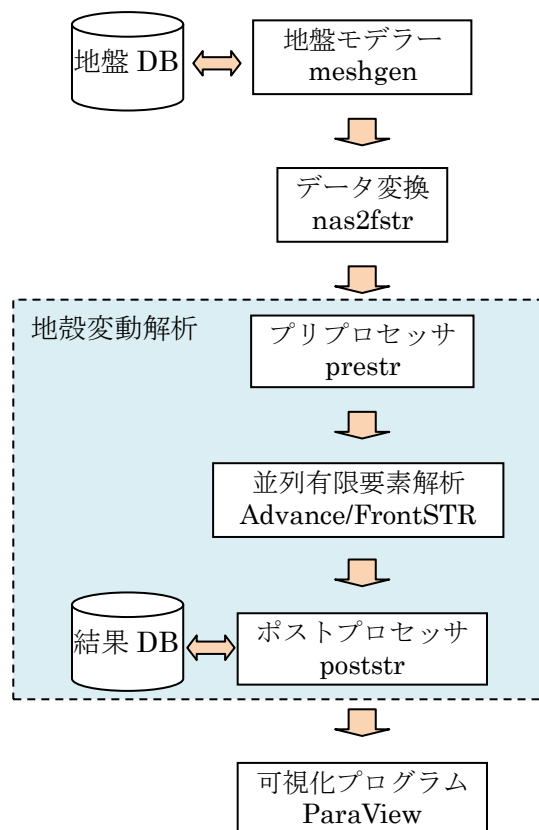


図 2 地殻変動解析システム

3. 東北地方太平洋沖地震の準静的応力解析

3.1. 解析概要

対象地盤領域：北緯 28 度～46 度、東経 128 度～149 度、深さ 400km

境界条件：地表（海底面を含む）は応力ゼロの自由境界。

側面と底面は無限遠方で変位や応力がゼロ

地盤の速度構造：3 次元不均質構造。日本列島とその近傍で得られた地震波速度構造に基づく

球面の効果：地盤形状を球殻で作成して地球の曲率の効果を表現。

地震荷重：東北地方太平洋沖地震（表 2 参照）

粘性特性；大陸地殻にあたる深度 30km までは高粘性領域として 10^{30} Pa.s、以下の深度は低粘性領域として 10^{20} Pa.s とした。

表 1 計算制御条件

項目	記入値
解析開始時間（年）	0.0
解析終了時間（年）	10.0
全計算ステップ数	10
時間増分（年）	1.0

3.2. 地盤モデル

モデル化範囲を図 3 に示す。ほぼ日本全土をカバーしており、南は諏訪之瀬島から北は北海道にいたる殆どの火山を包含している（本データは日本にある火山周辺における応力変化を把握する前段階の解析として実施したものである）。

従来は地盤モデル化に際し、経線の間隔が不変であるという仮定を行い、直交座標系を用いて直方体として作成していた。しかし広範囲な領域を対象とする場合、この方法では幾何学的誤差（例えば球体である実際の地球とメルカトル図法の地図との間に発生する寸法誤差）が非常に大きくなり、座標がモデル化に依存するために実際の地点（例えば観測点）を一意に決めることができない問題がある。そのため、局所のズームアップ解析を行う場合などに全体モデルと局所モデルの整合性がとりにくい。また地形や地盤データベース等の緯度経度で定義されたデータの適用についても同様の問題が生ずる。そこでこのような困難を避けるため、球座標系を用いて、球殻モデルを入力することとした。

（地球半径は 6366km とした。）

内部の解析自体は、モデルのほぼ中央に相当する北緯 38.5 度、東経 138.5 度、標高 0m を原点とし、緯線方向に X 軸、経線方向に Y 軸、鉛直上方に Z 軸を有する直交座標系で行った。

変位や応力等の結果の出力は、球座標系への座標変換を行い、緯線方向・経線方向・地球半径方向等の成分としても表示できるようにした。

3.3. 地震断層

震源モデルとして断層 1 および断層 2 を表 2 のように配置した。この震源モデルは日本国土地理院が提案した東北地方太平洋沖地震の震源モデル（平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震に伴う地殻

変動と震源断層モデル <http://www.gsi.go.jp/cais/topic110422>

-index.html) である。

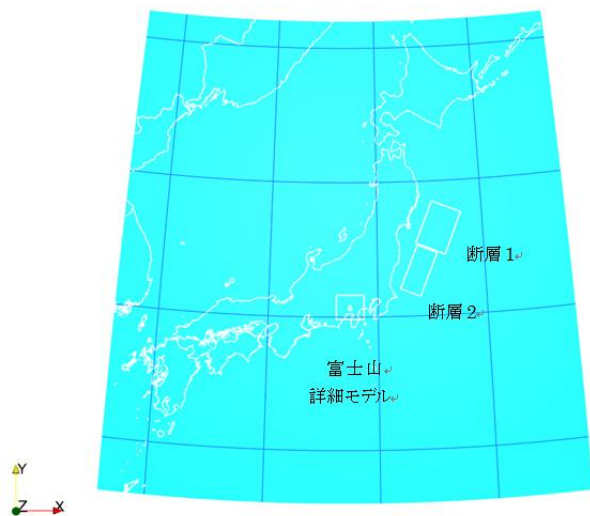


図 3 東北地方太平洋沖地震解析モデル化範囲

表 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
上端深さ (km)	5.1	17
長さ (km)	186	194
幅 (km)	129	88
走向角 (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

3.4. 有限要素モデル

地盤モデラーにより、簡潔なデータ入力 (約 50 行) から

図 4 に示すような総節点数 569891、総要素数 542163 の地盤モデルを生成した。有限要素は基本的に六面体 1 次要素で作成し、断層面の近傍などの不規則な形状において四面体 1 次要素等を使用している。材質は地盤データベースから自動設定した。(図 5、図 6、図 7 参照) 断層面は図 8 に示すようにモデル化した。

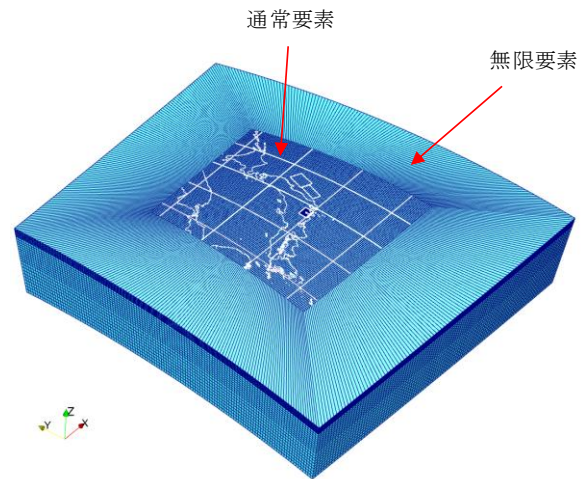


図 4 全体解析モデルメッシュ図

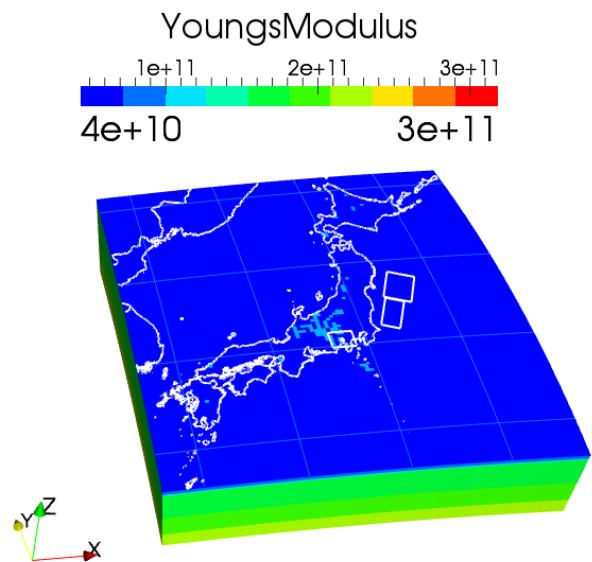


図 5 ヤング率分布図 (Pa)

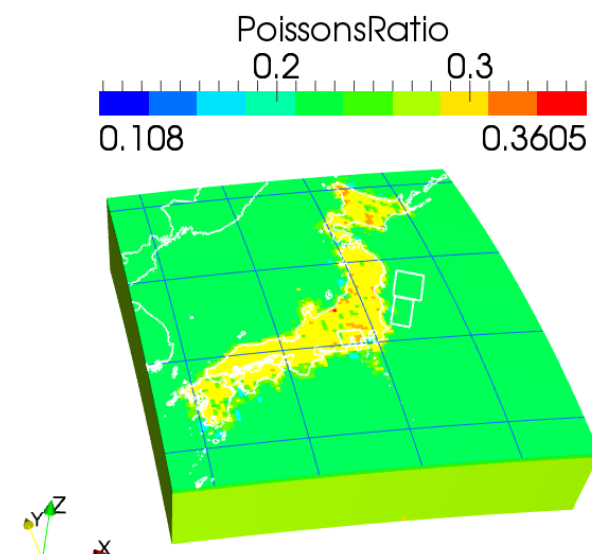


図 6 ポアソン比分布図

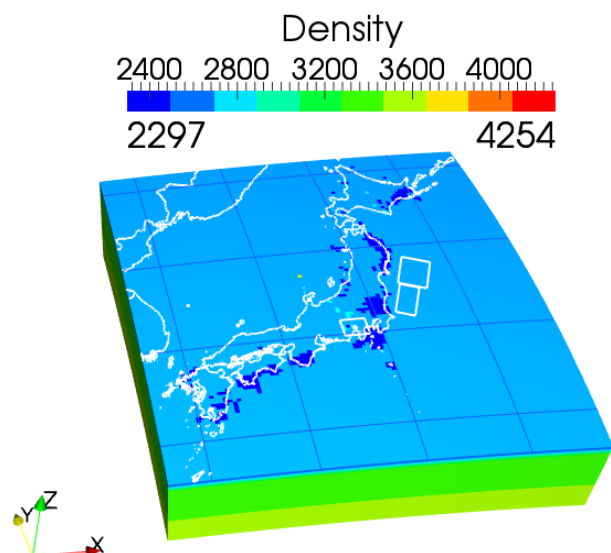


図 7 密度分布図 (kg/m^3)

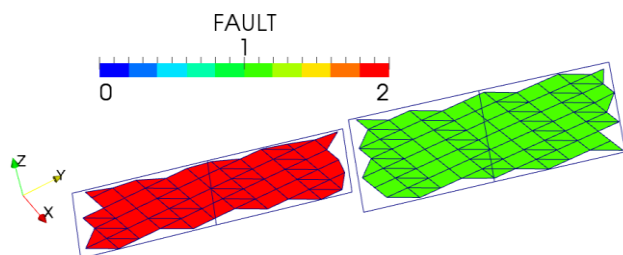


図 8 断層面のメッシュ分割

3.5. 解析結果

3.5.1. 変位応答

図 9 および図 10 に 0 年後および 10 年後の変位ベクトルを示す。図 11 から図 16 に変位各成分のコンターを示す。スケールは、全体解析結果における最小値と最大値で設定した。

変位の単位 ; m

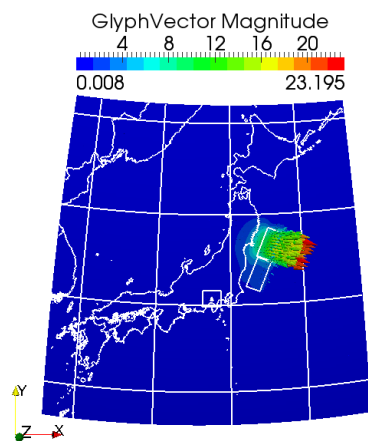


図 9 変位ベクトル (0 年)

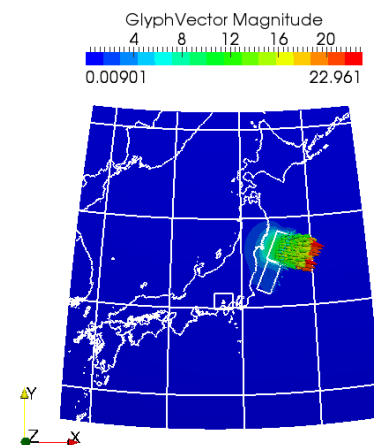


図 10 変位ベクトル (10 年)

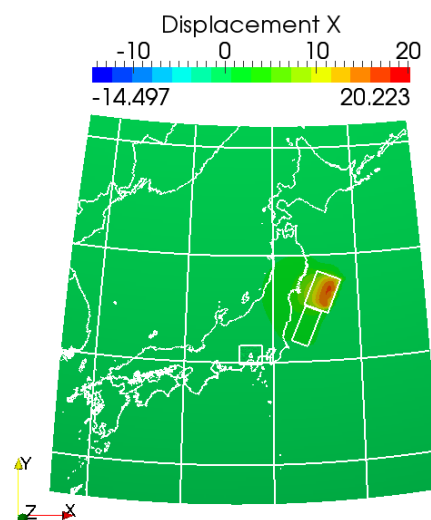


図 11 X 軸方向変位分布 (0 年)

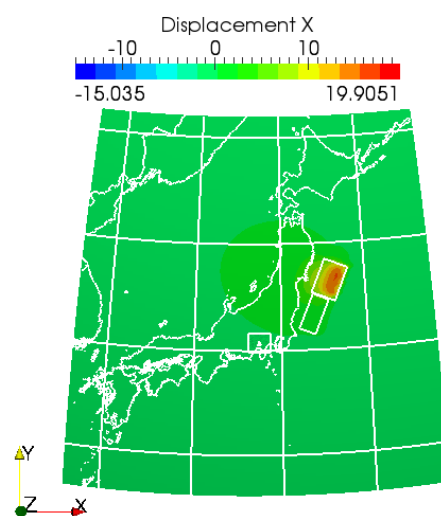


図 12 X 軸方向変位分布 (10 年)

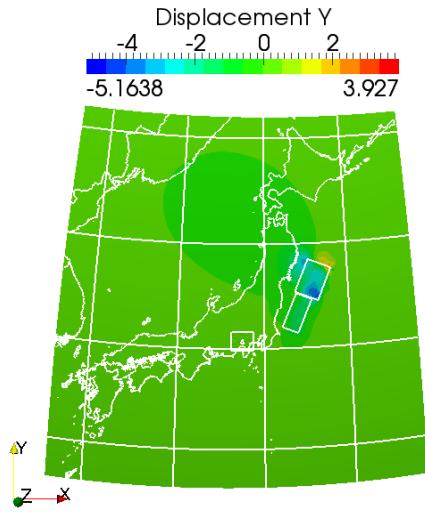


図 13 Y 軸方向変位分布 (0 年)

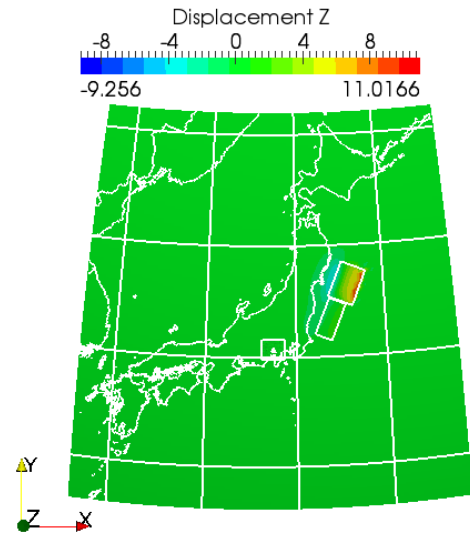


図 16 Z 軸方向変位分布 (10 年)

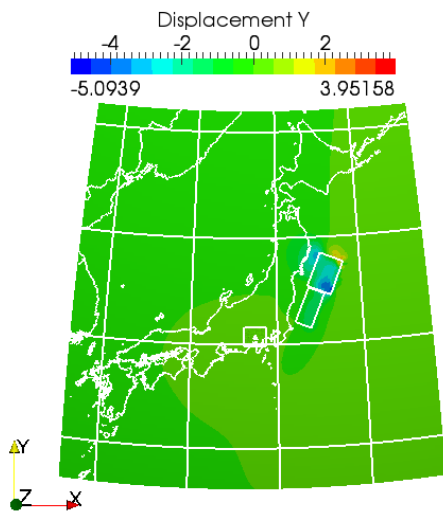


図 14 Y 軸方向変位分布 (10 年)

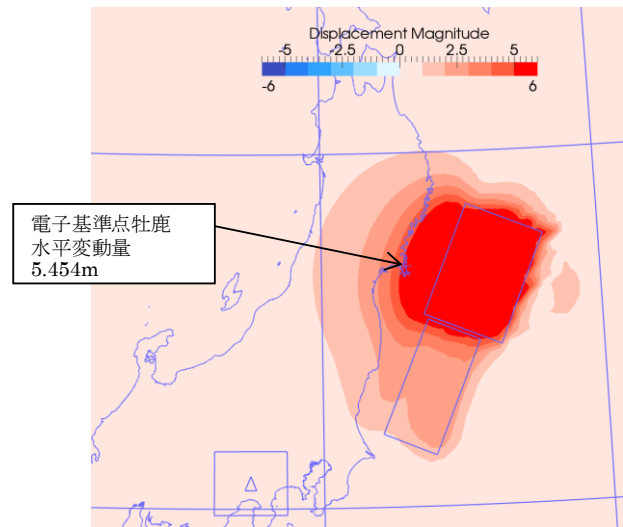


図 17 東日本水平方向地殻変動量計算値(m)

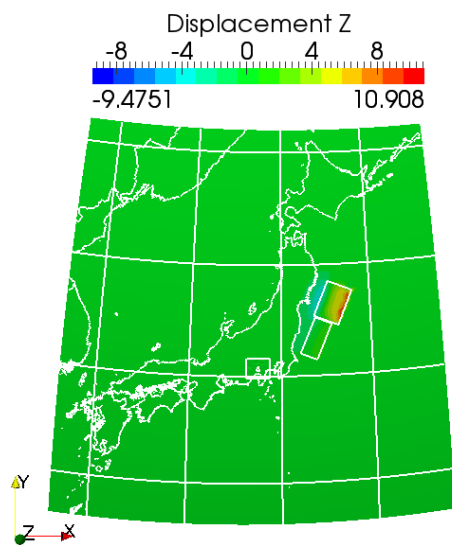


図 15 Z 軸方向変位分布 (0 年)

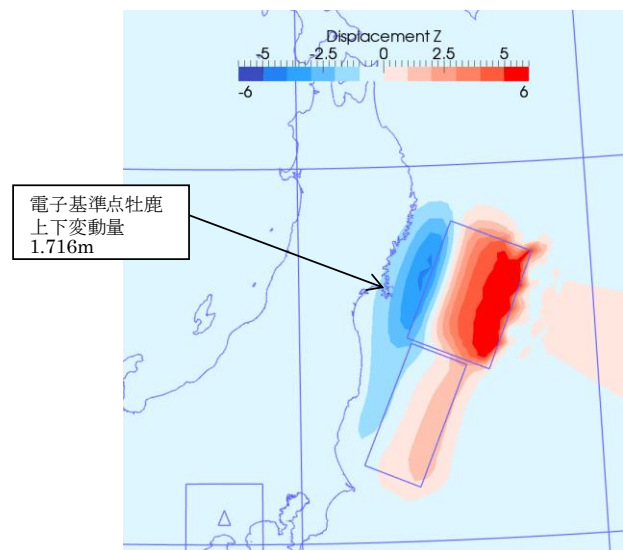


図 18 東日本上下方向地殻変動量計算値(m)

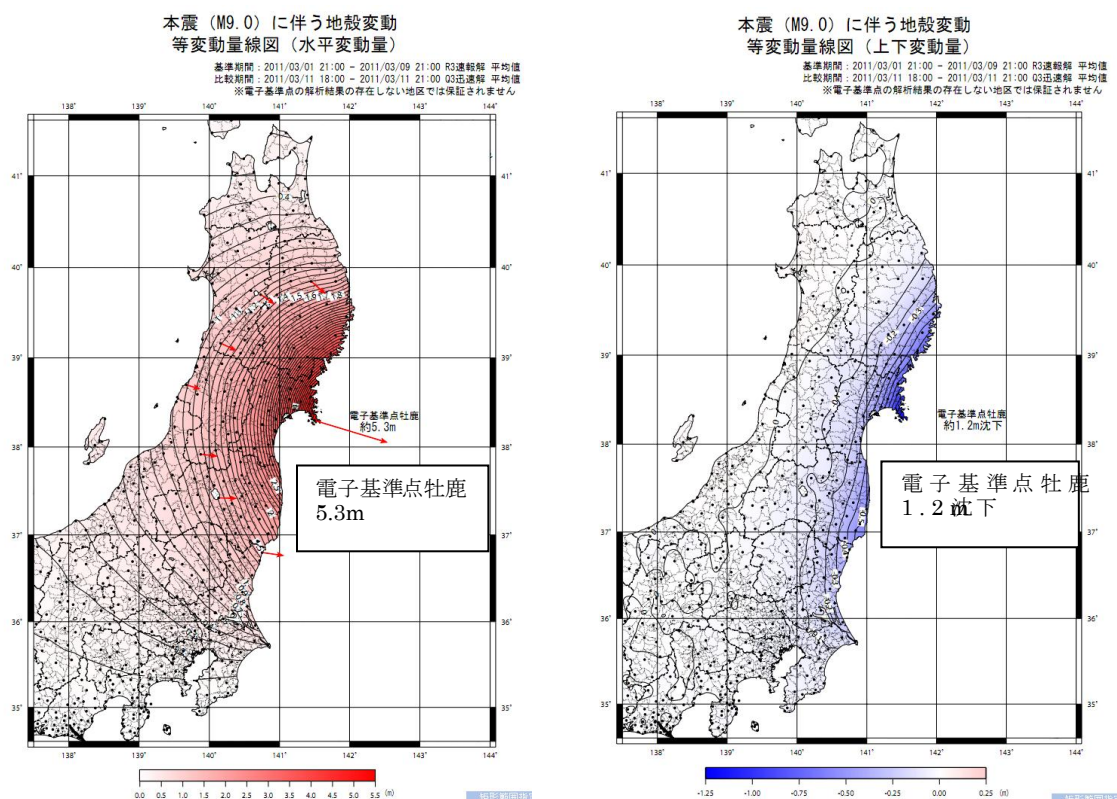


図 19 東日本地殻変動観測値 (水平方向、上下方向) (m)

また地震直後 0 年の変位応答解析結果の水平方向の変動量を図 17 に、上下方向の変動量を図 18 に示す。予想されるように、陸の近くで沈降が、陸から離れた広い範囲で隆起の解析結果が得られた。

地震直後の GPS による観測値と有限要素法による本計算の結果を比較する。

日本国土地理院が観測した地殻変動量[7]を図 19 に示す。

これから水平方向の全体的な分布と、電子基準点 鹿の水平変動量 5.454m は観測量 5.3m に 3% 程度の誤差で良く一致している。上下方向変動量については、全体的な分布は概ね合っているが、電子基準点 鹿の上下変動量 1.716m は、観測量 1.2m と比較すると 43% 多めの沈降量を与えることになる。

3.5.2. 応力応答

図 20 に 0 年における最大主応力線図を示す。スケールは各時間における最大値－最小値で設定しているが、地中の断層面に発生している最大

主応力の最大値は、地表には現れていない。10 年後の最大主応力線図を図 21 に示す。10 年の最大主応力値は、0 年の約 77% に緩和されている。

地中の応力として図 22 に示す位置における鉛直断面で断層面近傍の応力を示す。まず別途 split node 法により求めた応力を図 23 に示し、次いで今回の MPCCG 法による応力を図 24 に示した。本来、断層面は地中のき裂に相当しているため、断層面の両端に強い応力が集中するはずである。split node 法では断層面上の変位が上層下層の平均値を表す仮想的な変位となっているため、断層面全体に強い応力が表示される。MPCCG 法では断層面の両端に応力が集中する妥当な結果となっている。今後断層面上の応力に着目するような場合は、MPCCG 法が効力を発揮すると予想される。

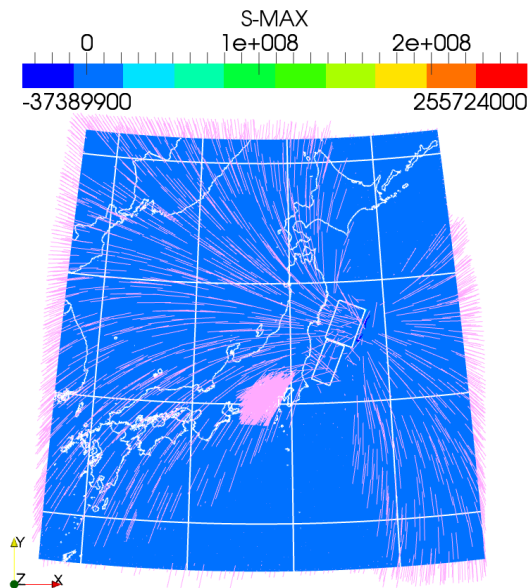


図 20 最大主応力線図 (0 年) (Pa)

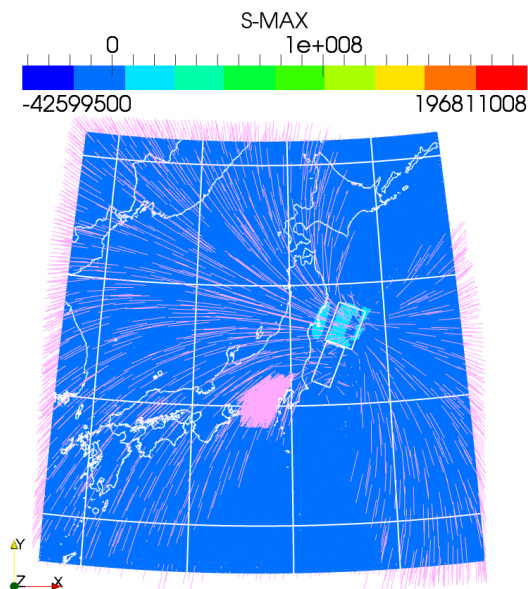


図 21 最大主応力線図 (10 年) (Pa)

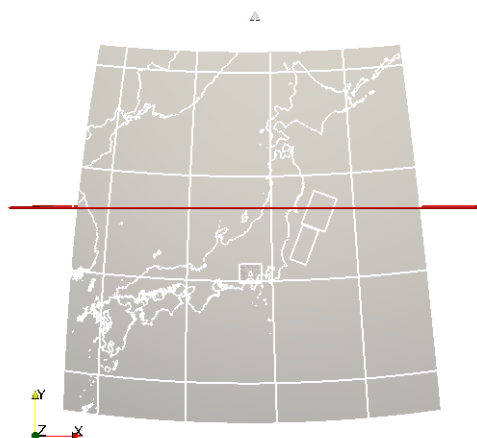


図 22 切断面位置

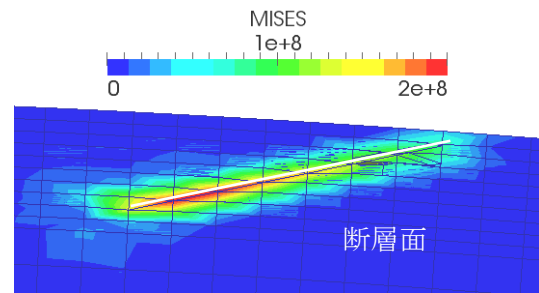


図 23 Split Node 法での断層面ミーゼス応力分布 (Pa)

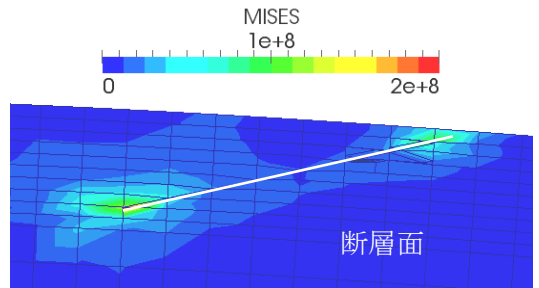


図 24 MPCCG 法での断層面ミーゼス応力分布 (Pa)

3.6. 計算時間

表 3 に全体モデルの計算における各プログラム毎の所要時間を示す。使用計算機は前後処理に、32bit の WindowsPC Core(TM)2 CPU 6300@1.86GHz、OS/XP を、有限要素解析には CentOS release5.7 の Intel(R) Xeon(R) X5600@2.80GHz を搭載した PC クラスタを用いシリアル計算で実行した。

表 3 計算所要時間

プログラム名	所要時間
meshgen	5 分 49 秒
nas2fstr	50 秒
prestr	2 分 53 秒
FrontSTR	3 時間 32 分 52 秒
poststr	3 分 25 秒

4. まとめ

1) 地盤の粘弾性解析システムを開発した。広域地盤において地震による直後の地殻変動およびその後の余効変動を調べることができる。本システムは大規模モデルの解を実用的な計算時間で得

るために並列計算処理機能を備えている。また大規模モデルの入出力データ操作を効率的に行うために解析モデルの自動作成、解析結果の抽出、自動編集等のツールも備えている。

2) 断層すべりの処理は split node 法から MPCCG 法に変更した。これにより断層近傍の応力分布が評価できるようになり、断層近傍の粘性の影響も適正に評価できるようになった。

3) 上記システムにより東北地方太平洋沖地震が日本列島に及ぼす影響について調べるため、日本列島の部分球殻モデルを作成し、断層すべりによる粘弾性解析を行った。

地震直後の解析結果を日本国土地理院の観測値と比較したが、観測基準点において本解析結果は、水平変動量に関して数%の誤差で一致していることが確認できた。

地下深部の低粘性領域の粘性を 10^{20} Pa.s に設定した粘弾性解析結果では地震発生より 10 年後に最大主応力が約 77%に低減した。

参考文献

- [1] 菊池愛子・董勤喜,有限要素法による地震断層解析(概要),アドバンスシミュレーション, Vol. 4, pp.100-113,2010.11
- [2] 末光啓二・徳永健一、Advance/FrontSTR の部品アセンブリ解析機能、アドバンスシミュレーション, Vol. 8, pp.26-40,2011.7
- [3] H.J. Melosh and A. Raefsky, A simple and efficient method for introducing faults into finite element computations, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 71, No. 5, pp.1391-1400, October 1981.
- [4] Zienkiewicz, O.C., et al, A novel boundary infinite element, Int. J. Numer. Meth. Eng., Vol. 19, pp.393-404, 1983.
- [5] Y. Okada, Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 75, No. 4, pp.1135-1154,

August 1985.

- [6] 戸田 則雄, “断層面を含む地盤モデルのメッシュ生成”,アドバンスシミュレーション 2010.11, Vol.4, p114-121
- [7] <http://www.gsi.go.jp/common/000059957.pdf> および <http://www.gsi.go.jp/common/000059956.pdf>