

## 断層面を含む地盤モデルのメッシュ生成

戸田 則雄\*

## Mesh generation for the ground model including fault planes

Norio Toda\*

断層面を有限要素モデルに組み込む方法について検討し、3次元空間に分布する任意の断層面を考慮してソリッド要素を自動生成するアルゴリズムを開発した。この手法を有限要素メッシュ生成プログラムに実装して、東海・東南海・南海地震の解析モデルで想定されている震源に適用し、大規模並列有限要素法構造解析プログラム Advance/FrontSTR で解析を行った。本論文では、断層面組み込みアルゴリズムおよびその適用例について報告する。

## 1. はじめに

地震動解析においては、モデル化の柔軟性から有限要素法が使用されている[1]。しかしこれまでは、解析対象とする地殻構造に依存した形で有限要素を生成せざるを得なかったため、データ作成に膨大な工数と時間を要していた。しかも複雑な幾何形状を余儀なくされることから、従来はデローニ法を用いて4面体要素を自動生成する手法が使われることが多い。

しかし解析精度上は、少ない要素でよりよい精度が得られる点から、6面体要素を用いて解析を行いたいというニーズがある。さらに要素の品質が悪い場合、解析プログラムの数値的安定性を損ないその結果計算コストが増大してしまう懸念もあることから、良好な品質のメッシュを作成することが望まれる。

そこで我々は、写像法をベースとして、任意の断層面を組み込んでソリッド要素を自動生成するアルゴリズムを開発した。これは6面体要素を主体として、断層面周辺のみ4面体要素や5面体要素を生成するもので、捩れやアスペクト比の大きな要素が生成されることは少なく、断層付近のメッシュの乱れも断層付近に限定される性質がある。

断層面の定義と要素分割の定義はそれぞれ独立に取り扱えることから、データ記述量およびデータ

作成に要する工数を大幅に削減できる。

## 2. 2次元メッシュへの断層の組み込み

断層のメッシュへの組み込みアルゴリズムを構築するためにまず2次元問題で検討する。その後明らかにした手法を3次元問題へ拡張する。

したがってこの場合有限要素は3角形あるいは4角形の平面要素として、断層は曲線であるとして扱う。

## 2.1. 断層による分割

図1のような直交格子で分割された領域に曲線で示した断層が貫入する場合のメッシュ分割を考える。ここで断層曲線と格子線の交点をそのまま新たな節点として採用すると、いろいろな問題が生じる。たとえば、

- ・複雑な分割パターンとなる。
- ・小さなメッシュ、細長いメッシュなど品質の劣る要素が多数生成される。
- ・メッシュ分割が不能になる場合もある。
- ・要素分割アルゴリズムが複雑。

\*アドバンスソフト株式会社 技術第5部

5<sup>th</sup> Technical Division, AdvanceSoft Corporation

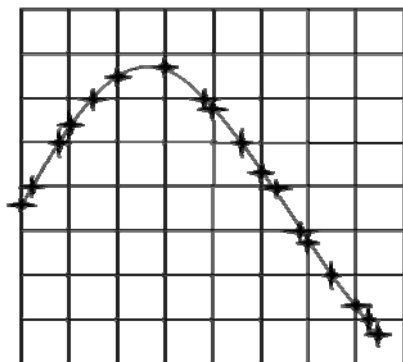


図 1 直交格子と断層曲線

この中で最大の問題点は、要素分割アルゴリズムが複雑になってしまうことである。2次元問題の場合はこれでよいとしても、3次元に拡張した場合、任意に切断された領域をメッシュに分割することは非常に困難となる。

## 2.2. 近似断層曲線

そこで要素生成はできるだけ単純な分割パターンのみを用いて、分割トポロジは変更することなく、格子点位置だけを断層上に移動することによって断層形状をメッシュ分割に取り入れる方法を考案した。これを以下に示す。

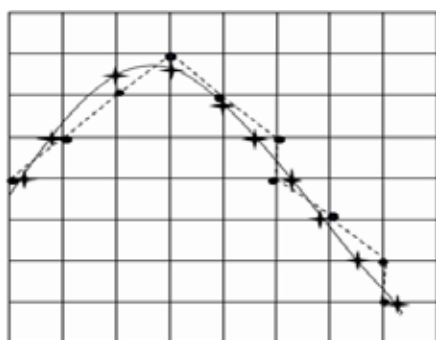


図 2 近似断層曲線

図 2 では断層曲線に最も近い格子線あるいは格子領域内の対角線を破線で示す。これを近似断層曲線と呼ぶことにする。この近似断層曲線と格子線が分割トポロジとなる。すなわち図 2 の個々の格子領域は、近似断層曲線がない場合や格子線上に近似断層曲線がある場合は、1 個の 4 辺形要素に対応し、対角線の近似断層曲線がある場合は、2 個の 3 辺形

要素に分割される。その後この近似断層曲線を図 3 に示すように、断層曲線上に移動すれば、断層を取り込んだメッシュ分割が完成する。

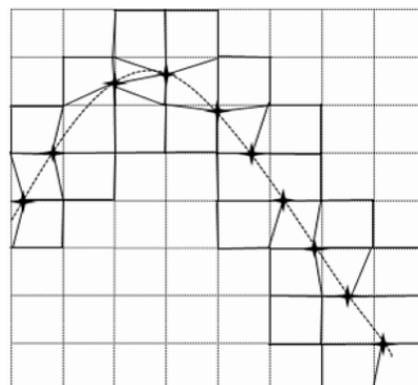


図 3 近似断層曲線の移動

この方法は断層曲線が多価になる場合にも適用できるほか、前記の方法に比べて次のような利点がある。

- ・新たな節点を生成する必要がない。
- ・分割パターンは、前もって定められたシンプルなものに限定される。
- ・要素の品質がよい。
- ・断層周囲の一部のメッシュ形状が乱れるだけで、その影響は断層を離れるとすぐに消失する。
- ・分割アルゴリズムが単純で、3次元問題に拡張するのが容易。

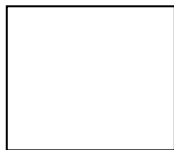
## 2.3. 断層を組み込むメッシュ生成アルゴリズム

まず断層曲線が通過する格子領域毎に、断層曲線に最も近い格子線分あるいは対角線を選択することによって、近似断層曲線を決定する。それには、格子線と断層曲線の交点を求め、より近い方の格子点を断層が通るものとすればよい。

これで近似断層曲線は、元の断層曲線上に乗り、断層曲線を折れ線近似したものとなる。

要素は、格子領域毎に断層線分によりどのように分割されているかを考えて分割する。要素と断層線分との関係により以下のように分類して処理できる。

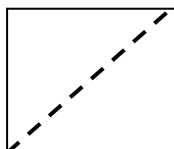
- a) 格子領域に断層との交点が 1 個以下の場合  
この場合は断層は格子領域を分割しないので、そのまま格子領域を 4 辺形要素とすればよい。



- b) 格子領域に断層との交点が 2 個の場合で、交点  
が対角線上にない場合  
図のように格子の上辺に破線で示す断層線がある  
場合である。この場合も格子領域が 4 辺形要素  
となる。断層線の位置により 4 通りある。



- c) 格子領域に断層との交点が 2 個の場合で、交点  
が対角線上にある場合  
格子領域は 2 個の 3 角形に分割される。断層線  
の位置により 2 通り。



### 3. 3 次元メッシュへの断層の組み込み

これまでの検討により断層線と格子線との交点に新たな節点を設けたり、既存格子トポロジーを大きく変更したりせずに、格子面に断層線を組み込むことができることが明らかになった。このコンセプトをベースとして、実際の 3 次元メッシュに、断層面を取り込む方法について検討する。

#### 3.1. 断層面ポリゴン

3 次元の場合、断層面は 3 角形あるいは 4 角形の平面ポリゴンの集合体であるとする。このポリゴンの内部では滑り量をはじめとする断層パラメータは一定である。各平面ポリゴンの法線ベクトルは、

断層面の正領域と負領域を区別する重要なデータであるので、その構成節点の回り順に注意する必要がある。

#### 3.2. 3 次元格子

3 次元メッシュを生成するためここでは写像法によるメッシュ分割法を用いた。これは正規直交空間における規則的な分割を実空間に写像することによってソリッド要素を生成するもので、ここで提案する断層組み込みアルゴリズムとの相性がよいと考えられる。写像関数としては、直線を直線に写像する関数を使用しないと、分割されたメッシュが歪んだり交点計算が複雑になってしまう。ここではアイソパラメトリック要素の 2 次 6 面体に関する形状関数を使用した。

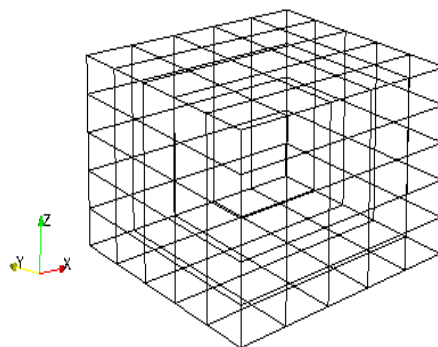


図 4 3 次元格子

2 次元の場合に平面内を直交格子で分割したのと同様に、図 4 に示すような 3 次元直交格子で領域を分割したとしてアルゴリズムを検討する。ただしこれは、アルゴリズムが直交格子のみにしか適用できないということを意味するわけではない。

#### 3.3. 近似断層曲面の決定

2 次元問題では、断層は線分として表現されたが、3 次元問題では断層は図 4 の各格子領域を切断する平面の断層面となるので、これを近似断層曲面と呼ぶことにする。

各格子領域で近似断層曲面を決定するアルゴリズムは、2 次元の場合とほとんど同じである。つま

リブロックのX,Y,Z軸方向の全格子線について断層面との交点を求め、その格子線上で交点に最も近い格子点が近似断層曲面を通過することになる。

2次元問題の場合は、断層と格子線の交点の有無を判別するのに、格子線分と断層線分の交点を識別するだけで済んだ。3次元問題の場合は、格子線分と断層面ポリゴンとの交点であるから、交点が断層面ポリゴンの上にあるかどうかの判定だけでなく、断層面ポリゴンの内部にあることも含めて判定する必要がある。

### 3.4. 格子点の断層面上への移動

1個の格子点に関して、3本の格子線がその格子点を通過するので、合計3個の交点が得られる。その中で、最も格子点に近い交点を格子点の新しい座標とすればよい。

### 3.5. 要素生成

3.3で作成した格子点情報を用いて、1個の格子領域毎に、各格子点が断層面上にあるかどうかを判定する。このパターンを分類することによってメッシュ分割ができる。

パターンの分類は、1個の断層面について行うものとする。複数の断層面が1格子領域と関連するとしても、1個の領域を2通りに分割することはできないからである。したがってその場合は、断層面として3角形あるいは4角形のポリゴンを構成する断層面だけを考慮して、その他の断層面の情報は無視するものとする。そうしないと誤ったパターン分類を犯す虞がある。

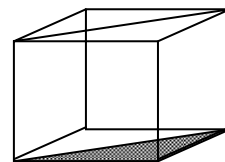
#### (1) 断層面上の点が2以下の場合

断層面は格子領域に接しているかもしれないが、格子領域を分割してはいない。この場合は格子領域がそのまま1個の6面体要素となる。

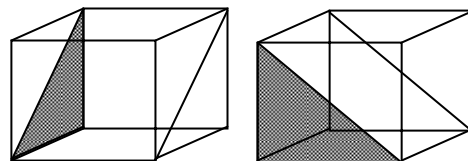
#### (2) 断層面と交差する点が3個の場合

(a) 格子領域の上面における断層点数が0個の場合は、断層面は下面の3角形として2個のプリズム要素に分割される。これは下面のどの点を中心とするかによって4通りある。ここでハッチング部分は断

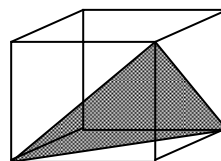
層面上にある面を示す。



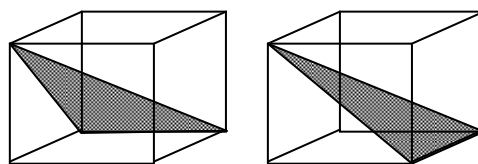
(b) 格子領域の上面における断層点数が1個で1面にすべての断層点がある場合は、2個のプリズム要素に分割され8通りある。



(c) 格子領域の上面における断層点数が1個の場合で、下面節点を中心とする斜面上に断層面がある場合5個のテトラ要素に分割される。中心とする節点により4通りある。



(d) 格子領域の上面に断層点数が1個の場合で、その点を用いて6個のテトラに分割する場合は、中心とする上面の節点と断層面の位置により合計8通りある。



(e) 格子領域の上面に断層点数が対角に位置する2個の場合は、断層面はある1点を中心とする斜面として5個のテトラ要素に分割される。これは(c)の上下を逆にしたパターンとなる。4通りある。

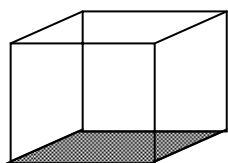
(f) 格子領域の上面に断層点数が2個の場合で、それが東西南北面の片方だけに存在する場合は、(b)と同様の分割形式となるが、上下が逆のパターンである。合計8通りある。

(g) 格子領域の上面に断層点数が 2 個の場合で、6 個のテトラに分割する場合がある。これは(d)の上下を逆転したパターンとなる。8 通りある。

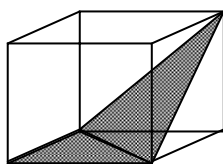
(h) 格子領域の上面に断層点数が 3 個の場合は、(a) を上下逆にしたパターンで、2 個のプリズムに分割される。断層面は上面の 3 角形で、どの点を中心とするかにより 4 通りある。

(3) 断層面と交差する点が 4 個の場合

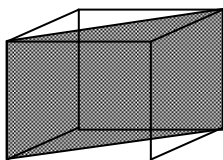
(a) 格子領域の上面に断層点数が 0 個の場合は、断層面は下面の 4 辺形として 1 個のヘキサ要素とする。



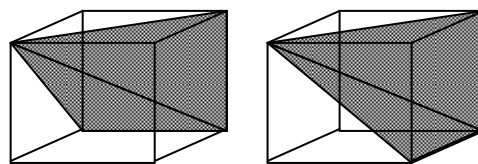
(b) 格子領域の上面に断層点数が 1 個の場合は、断層面は下面の 3 角形およびそれに接続する斜面。5 個のテトラ要素に分割。4 通り。



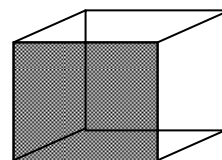
(c) 格子領域の上面に断層点数が対角位置に 2 個の場合で下面の断層点も同じ位置にある場合、断層面は断層点を接続する 4 角形の面、2 個のプリズム要素に分割。6 通り。



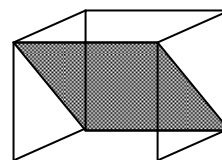
(d) 格子領域の上面に断層点数が対角位置に 2 個あり、下面の断層点位置が対角にない場合は、断層面は 2 つの 3 角形となる。断層面が底部のどの点を通るかにより 2 種類あり、それぞれ 4 通りある。



(e) 格子領域の上面に断層点数が隣接位置に 2 個で、かつ下面の断層点も同じ位置にある場合、断層面は格子領域の側面。1 個のヘキサ要素。4 通り。



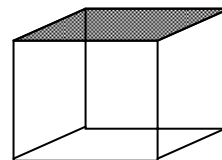
(f) 格子領域の上面に断層点数が隣接位置に 2 個で、下面も隣接する位置にある場合 2 個のプリズムに分割され、断層面は対角面にある。4 通り。



(g) 格子領域の上面に断層点数が隣接位置に 2 個で、下面の断層点に対角位置に 2 個ある場合、(d)のパターンを上下逆転したものとなる。2 種類あり、それぞれ 4 通りある。

(h) 格子領域の上面に断層点数が 3 個の場合は、(b) の上下を逆転したパターンとなる。断層面は上面の 3 角形と斜面。5 個のテトラ要素に分割。4 通り。

(i) 格子領域の上面に断層点数が 4 個の場合は、断層面は上面の 4 角形。1 個のヘキサ要素となる。



メッシュ分割パターンが膨大になる点を除けば 3 次元メッシュに断層面を組み込む方法は 2 次元の場合と基本的に変わらない。

#### 4. 断層荷重の生成

文献[2]に基づいてスプリットノード法に必要な荷重計算を実行するためには、断層面に接する要素について表 1 の内容を持つ荷重データを作成して、構造解析プログラムに渡す必要がある。

表 1 断層荷重の内容

項目	内容
要素番号	断層に接する要素のみ
断層番号	断層パラメータを記述する断層番号
断層との位置関係	=1：要素が断層面の正領域にある。 =2：要素が断層面の負領域にある。
構成節点 1	=0：断層と接していない。 =1：断層と接している。
.....	.....
構成節点 n	=0：断層と接していない。 =1：断層と接している。

すべてのメッシュ分割が終了した後、断層面と接する要素については、対応する断層面との位置関係を調べ、その要素が断層面の正領域にあるか、あるいは負領域にあるか調べればよい。

#### 5. 地盤データベースの組み込み

文献[3]に示された考えに基づき構築された地質データベースを利用する。これは統計 129 度から 146 度、北緯 29 度から 46 度、地盤深さ 400km から -5km までの地盤について、経度・緯度・深さを指定すれば、その地点における地震縦波速度 (km/sec)、地震横波速度 (km/sec) および信頼性等を出力するものである。

今回は地質データベースを構成する 4 個のファイル：地盤深さファイル、経度ファイル、緯度ファイル、地震波速度ファイルを、直接参照することによって、直接地質特性を検索した。つまり個々の要素重心位置をベースとして、地質特性を検索して、該当する地盤格子点の地質特性から 6 面体 2 次要素

の形状関数を用いて補間する。

地震波速度から、ラーメの定数を求めるためには地盤密度が必要であるが、これは縦波速度による回帰式を利用して決定した。

#### 6. 適用例

##### 6.1. 解析範囲と震源モデル

対象とした地盤領域は北緯 30 度～40 度、東経 130 度～140 度の地域で、経度方向に 953km、緯度方向に 778km、深さ方向に 100km の範囲である。この地盤領域の中に図 5 に示す 4 個の断層面を配置した。これらの断層に関する断層パラメータは表 2 の通りである。

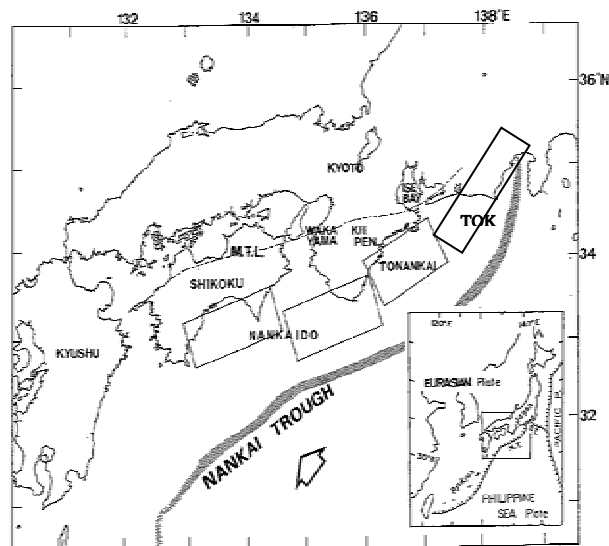


図 5 震源モデル

表 2 断層パラメータ

断層	長さ 2L	幅 W	深さ H	走行角 $\theta$	傾斜角 $\delta$	すべり角 $\lambda$	すべり量
南海(西側)	150km	70km	4km	19.03°	20°	116.6°	6m
南海(東側)	150km	70km	4km	19.44°	25°	116.6°	3m
東南海	130km	70km	4km	30.57°	25°	108°	4m
東海	149km	63km	10km	208°	15°	89°	2.85m

## 6.2. 境界条件

解析範囲となる地盤の地表面を除く 5 面に無限境界要素を発生することによって、無限遠で変位がゼロとなる境界条件を採用した。

## 6.3. 解析モデル

図 6 に自動生成した解析モデルの無限要素を除いたメッシュ図に海岸線を重ねたものを示す。節点数 232,422，通常要素数 201,494，無限要素数 18,000，材質数 471 種類であった。生成所要時間は PC で約 1 分を要した。

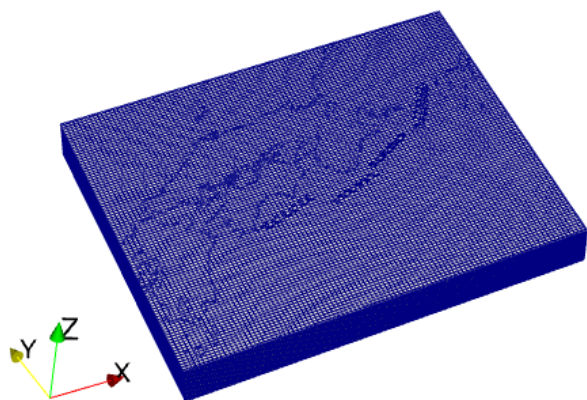


図 6 南海・東南海・東海モデルメッシュ

材質データについては、地質データベースから、ヤング率、ポアソン比および密度についてその最大値と最小値を求め、各 20 段階に区分して、それらに材質番号を割り当てるものとしているので、全体で  $20 \times 20 \times 20 = 8000$  種類の材質データが生成されるはずであるが、実際に使用されている材質数は上記のように 471 種類程度で済む。

材質データのうちヤング率について地盤内の分布を図 7 に示す。ほぼ地盤の深さに比例してヤング率が変化していることが分かる。

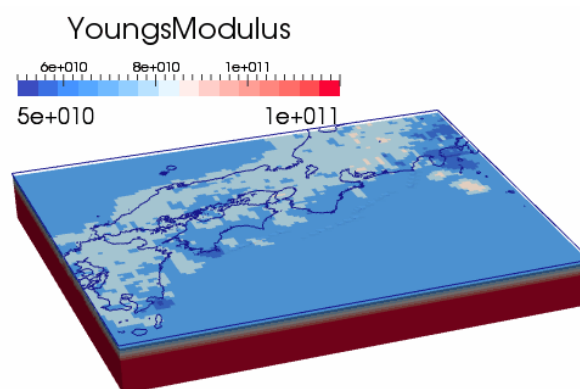


図 7 地盤のヤング率の分布

図 8 は、4 個の断層面とその内部に生成された断層面のメッシュ分割を示している。断層面を可視化するために 4 辺形の断層ポリゴン内部に計 1009 個の断層面を示すシェル要素が生成されている。

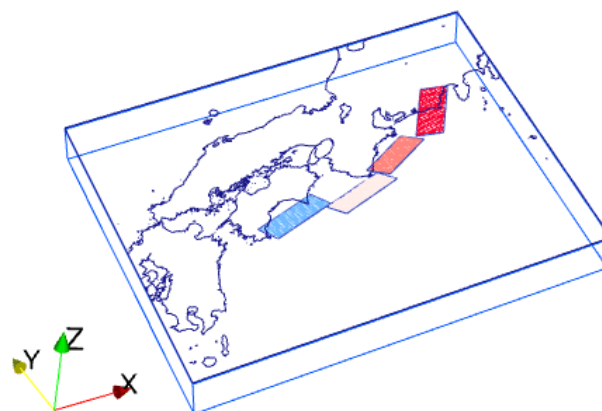


図 8 断層面



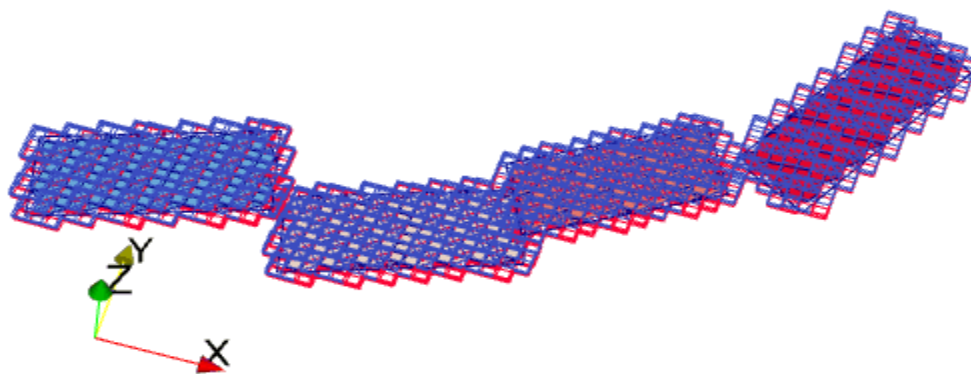


図 9 断層面と断層荷重を受ける要素

図 9 には、断層面ポリゴン上のシェル要素と、その周囲にある断層荷重を受ける要素を表示している。断層荷重を受ける要素は、断層面上にあるか下にあるかで断層荷重の方向が異なるので、上面にある要素を薄い線で、下面にある要素を濃い線で表示している。

#### 6.4. 解析結果

図 10 に解析結果の一例として地表における変位のコンターを示す。地表付近でも表 2 で指定した滑り量に匹敵する変位が生じていることが観察される。

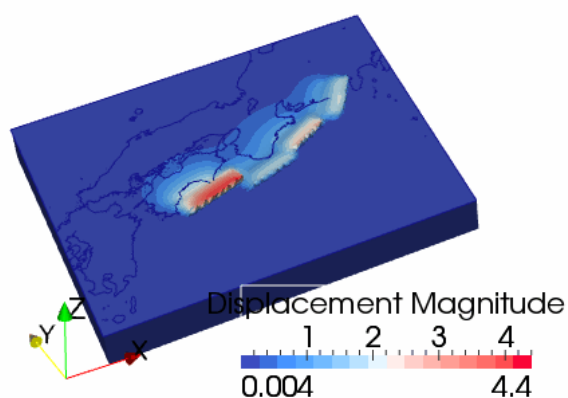


図 10 地表における地盤変位

動生成するアルゴリズムを開発し、東海・東南海・南海地震モデルのメッシュデータ作成に適用した。

本手法は任意の傾斜を有する断層面に適用できる汎用性を有する。さらにメッシュ分割を指定する際に、断層面の形状等を考慮する必要がないので、前もって複雑なブロック分割を要求されることもないため、データ記述量が大幅に削減できる利点がある。

#### 参考文献

- [1] S. Yoshioka, M. Hashimoto and K. Hirahara, Displacement fields due to the 1946 Nankaido earthquake in a laterally inhomogeneous structure with the subducting Philippine Sea plate—a three-dimensional finite element approach, *Tectonophysics*, 159(1989) 121-136.
- [2] 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.
- [3] M. Matsubara, K. Obara and K. Kasahara, Three-dimensional P- and S- wave velocity structures beneath the Japan Islands obtained by high-density seismic stations by seismic tomography, *Tectonophysics*, 454(2008) 86-103.

#### 7. まとめ

写像法を用いたメッシュ生成アルゴリズムをベースとして、断層面を考慮してソリッド要素を自