

DFEMによる地殻変動解析 Crustal Deformation Analysis with DFEM

地理地殻活動研究センター 鷲谷 威

Geography and Crustal Dynamics Research Center, Takeshi SAGIYA

茨城大学 呉 智深

Ibaraki University, Zhishen WU

富士総合研究所 *寺川寿子・伊神正貫・本間高弘・**安藤知明

Fuji Research Institute Corporation, Toshiko TERAKAWA, Masatsura IGAMI,
Takahiro HOMMA, Tomoaki ANDO

*現所属 東京大学大学院理学系研究科 **現所属 先端力学シミュレーション研究所

要 旨

国土地理院では、数値シミュレーションによる地殻変動研究の一環として、DFEMのプログラム開発を実施している。DFEMは媒質内における不連続面(断層)の生成・成長を精度良く追求できるように機能拡張された有限要素法の一つであり、断層などの不連続変位を本質的に伴う地殻変動の解析に有効と考えられる。国土地理院では、工学分野で開発されたDFEMに対して、地殻変動解析への応用を念頭に3次元問題解析用のプログラムを開発し、さらに粘弾性解析機能、既存断層解析機能、断層変位入力機能などを追加するとともに、大規模な解析が行えるようにした。また、岩石実験、実際の地殻変動データに基づく解析を行い、プログラムの動作を検証した。

においては、数値シミュレーションを行って検証するに足る観測データが最近になってようやく得られるようになってきたことも重要な要因の一つと考えられる。国土地理院が行っている日本全国のGPS連続観測網によるデータはその最も典型的な例である。

国土地理院では、平成10年度より総合技術開発プロジェクト「地殻活動観測データの総合解析技術の開発」を実施している。この研究は、国土地理院において長年にわたり蓄積され、また日々更新されつつある様々な観測データに基づいて地殻活動の理解を進めるため、データベースの整備、観測データの解析方法の開発、シミュレーション手法の開発、観測網の最適化などを目的としている。DFEMによる地殻変動解析プログラムの開発は、この研究の一環として実施されている。DFEMはDiscontinuous Finite Element Method(不連続有限要素法)の略称であり、連続媒質内における亀裂(不連続面)の発生、成長を精度良く追跡できるように拡張された有限要素法の一つである。DFEMは元々コンクリート材料等の解析を目的として開発されたものであり(呉ほか, 1998)、この方法を地殻変動解析に適用するには、様々な変更を加える必要がある。

以下では、まずDFEMの理論についてその概要を説明し、次に地殻変動解析のために行われた機能拡張の内容を解説する。さらに、地殻活動に関連した解析例を紹介する。

2. DFEMの概要

2.1 方程式の導出

DFEMは不連続面を含む固体系に適用可能な有限要素法である。図-1に示すような不連続固体系を考えよう。連続的な2つの領域 V^+ 、 V^- がそれぞれ表面 S_i^+ 、 S_i^- を境界面として接しており、この部分が不連続面となっている。不連続面とは、そこで媒質中の変位が不連続にな

1. はじめに

近年、地震の発生や地殻変動に関する研究は、地震や地殻変動の観測網が整備されたことにより長足の進歩を遂げている。観測データが質・量とも飛躍的に向上した結果、観測で得られたデータを適切に解釈し、様々な現象の掘って立つ物理過程の本質的な理解を目指すことが、研究の次なる方向性としてクローズアップされている。

観察や観測で得られた知見を説明するために、仮説(モデル)を立て、それを更なる観測や実験を通して検証することは自然科学の常道である。ただ、こと固体地球科学分野に関しては、対象とする地球があまりにも大きく、複雑で、しかも自然に生起する現象の時間スケールが長いこと、人間の通常のライフサイクルの中では仮説の検証を十分に行うことができない場合が多い。

こうした問題を解決する手段として、近年、数値シミュレーションによる研究が盛んに行われるようになりつつある。この背景には、計算機のハードウェア・ソフトウェア両面における飛躍的進歩があるのだが、固体地球科学

るような場所（断層や亀裂など）を指す。ここで、 \mathbf{r}^+ 、 \mathbf{r}^- を不連続面 S_i^+ 、 S_i^- に作用する力、 \mathbf{u}^+ 、 \mathbf{u}^- を S_i^+ 、 S_i^- における変位、 \mathbf{q} は S において作用する表面力とする。不連続面においては、次式が成立する。

$$\begin{aligned} \mathbf{r}^+ + \mathbf{r}^- &= \mathbf{0} & \text{on } S_i &= S_i^+ \cup S_i^- \\ \mathbf{u}^+ - \mathbf{u}^- &= \Delta \mathbf{U} & \text{on } S_i &= S_i^+ \cup S_i^- \end{aligned} \quad (1)$$

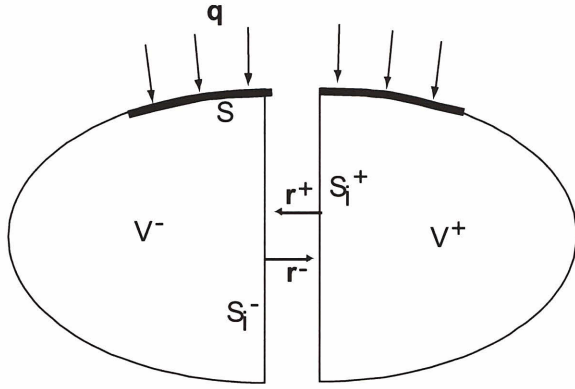


図-1 DFEMの概念図

ここで、 $\Delta \mathbf{U}$ は不連続面における変位の跳びの量である。

この不連続固体系に対して、体積力を無視した場合の増分境界値問題を考えると、一般化された仮想仕事の原理は以下の式で表される。

$$\begin{aligned} \int_V (\nabla_s \delta(\Delta \mathbf{u}))^T \cdot \Delta \boldsymbol{\sigma} dV - \int_S \delta(\Delta \mathbf{u})^T \cdot \Delta \mathbf{q} dS \\ + \int_{S_i} \delta(\Delta \mathbf{U})^T \cdot \Delta \mathbf{r} dS = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

ここで $\Delta \mathbf{u}$ は変位増分ベクトル、 $\Delta \boldsymbol{\sigma}$ は応力増分ベクトル、 $\nabla_s(\Delta \mathbf{u})$ は歪み増分場、 $\Delta \mathbf{q}$ は表面力増分ベクトルである。

次に、アイソパラメトリック要素を用いて(2)式を離散化することを考える。そのためには、不連続面を持つ要素内部において変位を補間する関係式が必要となる。不連続面を考慮した場合のある節点における変位 $\Delta \bar{\mathbf{u}}$ は、不連続面による影響を無視した場合の変位 $\Delta \tilde{\mathbf{u}}$ 、および不連続面における変位の跳び $\Delta \mathbf{U}$ を用いて以下のように表現される。

$$\begin{aligned} \Delta \bar{\mathbf{u}} &= \Delta \tilde{\mathbf{u}} + \phi \Delta \mathbf{U} \\ \phi &= \begin{cases} \omega & \text{in } V^+ \\ \omega - 1 & \text{in } V^- \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

ω は不連続要素に関する定数であり、その与え方には任意性が残るが、一例として $\omega = V^+/V^-$ とすることが考えられる。このとき、不連続要素内部の変位増分場 $\Delta \mathbf{u}$ は以下のように補間される。

$$\Delta \mathbf{u} = \mathbf{N}_u \Delta \bar{\mathbf{u}} + \mathbf{N}_i \Delta \mathbf{U} \quad (4)$$

ここで \mathbf{N}_u は通常の有限要素法における変位補間関数である。 \mathbf{N}_i はDFEMを特徴付ける不連続補間関数であり、具体的には以下のような形になる。

$$\mathbf{N}_i = \phi \mathbf{I}_{3 \times 3} - \mathbf{N}_u \mathbf{P} \quad (5)$$

$$\mathbf{P} = [\phi_1 \mathbf{I}_{3 \times 3}, \phi_2 \mathbf{I}_{3 \times 3}, \dots, \phi_m \mathbf{I}_{3 \times 3}]^T$$

$$\phi_j = \begin{cases} \omega & (\text{第 } j \text{ 節点が } V^+ \text{ 側}) \\ \omega - 1 & (\text{第 } j \text{ 節点が } V^- \text{ 側}) \end{cases}$$

$\mathbf{I}_{3 \times 3}$ は、 3×3 の単位行列、 m は各有限要素における節点数である。

このように求められた不連続面を考慮した変位場から要素内における歪みや応力を計算して(1)式に代入することにより、以下の連立方程式が得られる。

$$\begin{cases} \mathbf{K} \Delta \bar{\mathbf{u}} - \mathbf{K} \mathbf{P} \Delta \mathbf{U} = \Delta \bar{\mathbf{f}}_u \\ -\mathbf{P}^T \mathbf{K} \Delta \bar{\mathbf{u}} + (\mathbf{P}^T \mathbf{K} \mathbf{P} + \mathbf{K}_{ii}) \Delta \mathbf{U} = \Delta \bar{\mathbf{f}}_i \end{cases} \quad (6)$$

ここで

$$\begin{aligned} \mathbf{K} &= \int_V \mathbf{B}_u^T \mathbf{D}_i \mathbf{B}_u dV \\ \mathbf{K}_{ii} &= \int_{S_i} \Delta \mathbf{N}_i^T \mathbf{D}_i \Delta \mathbf{N}_i dS \\ \Delta \bar{\mathbf{f}}_u &= \int_S \mathbf{N}_u^T \Delta \mathbf{q} dS \\ \Delta \bar{\mathbf{f}}_i &= \int_S \mathbf{N}_i^T \Delta \mathbf{q} dS \end{aligned} \quad (7)$$

である。 \mathbf{B}_u は変位増分とひずみ増分の線形関係を定義する変位 ∇ ひずみ行列であり、 \mathbf{D}_i は不連続面における変位の跳びの増分 $\Delta \mathbf{u}_i$ と反力増分 $\Delta \mathbf{r}$ を関係付ける不連続面の剛性行列である。

連立方程式(6)から不連続面における変位の跳び $\Delta \mathbf{U}$ を消去すると、一般の有限要素法と同じ自由度の方程式が得られる。

$$\bar{\mathbf{K}} \Delta \bar{\mathbf{u}} = \Delta \bar{\mathbf{f}} \quad (8)$$

ここで

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{K}} &= \mathbf{K} - \mathbf{K} \mathbf{P} (\mathbf{K}_{ii} + \mathbf{P}^T \mathbf{K} \mathbf{P})^{-1} \mathbf{P}^T \mathbf{K} \\ \Delta \bar{\mathbf{f}} &= \Delta \bar{\mathbf{f}}_u + \mathbf{K} \mathbf{P} (\mathbf{K}_{ii} + \mathbf{P}^T \mathbf{K} \mathbf{P})^{-1} \Delta \bar{\mathbf{f}}_i \end{aligned} \quad (9)$$

である。また、不連続面における変位の跳びの量は

$$\Delta \bar{\mathbf{U}}_i = (\mathbf{P}^T \mathbf{K} \mathbf{P} + \mathbf{K}_{ii})^{-1} (\Delta \bar{\mathbf{f}}_i + \mathbf{P}^T \mathbf{K} \Delta \mathbf{u}) \quad (10)$$

と計算することができる。

このように、DFEMでは、解くべき方程式が通常の有限要素法と同じ形に帰着する。このことは、これまでに有限要素法のために開発された大規模方程式用のソルバなどの資産をそのまま利用して不連続体の解析ができることを意味する。

2. 2 不連続面の構成関係

不連続面における変位の跳びの増分 ΔU と反力増分 $\Delta \mathbf{r}$ を関係づける剛性行列 \mathbf{D}_i は、以下のように定義される。

$$\mathbf{D}_i = \mathbf{T} \begin{bmatrix} E_n & 0 & 0 \\ 0 & E_t & 0 \\ 0 & 0 & E_s \end{bmatrix} \mathbf{T}^{-1} \quad (11)$$

E_n は不連続面に垂直な方向の変位成分に対して、 E_t および E_s は不連続面に沿った 2 方向の変位成分に対して構成関係を記述するパラメータであり、 \mathbf{T} は不連続面に準拠した局所座標系を全体座標系に変換する回転行列である。

不連続面の構成関係としては、変位の増加とともに強度の低下が起きるようなものを想定する。実際のDFEMプログラムでは低下の仕方として線形モデルおよび exponential モデルの 2 種類から選ぶことができる。線形モデルは亀裂発生限界荷重 f と破壊エネルギー G を用いて以下のように定義される。

$$E = \begin{cases} -f^2/2G & \delta \leq d \\ 0 & \delta > d \end{cases} \quad (12)$$

ここで、 δ は不連続面の変位量であり、 d は断面の強度が 0 になる時の臨界変位量 $2G/f$ である。一方、exponential モデルは以下のように定義される。

$$E = -\frac{f^2}{G} \exp\left(-\frac{f}{G} \delta\right) \quad (13)$$

不連続面の変位が発生するかどうかは、不連続面に作用する引張応力ないし剪断応力が、それぞれのモードの亀裂発生限界荷重を越えたかどうかで判断される。新しい破壊面が形成される際には、応力値が最大となる面について、亀裂発生条件が満たされるかどうかを判定する。亀裂発生の判定には Mohr-Coulomb の破壊基準を採用している。

3. 国土地理院における開発内容

国土地理院ではDFEMの地殻変動解析への応用を目的とした調査研究を行っている。国土地理院による開発で追加・拡張されたDFEMプログラムの機能の概要について以下に述べる。

3. 1 プログラムの三次元化

DFEMの定式化は 3 次元問題に適用可能な形で行われていたが、実際に計算を行うためのプログラムは 2 次元問題用のものしか存在しなかった。そこで、平成10年度に 3 次元DFEMのプログラムを作成した。

3次元有限要素法シミュレーションを行う際には、有限要素モデルの構築が最も手間のかかる作業となる。この作業を効率化するために、有限要素法用のプリポストプロセッサが開発されている。DFEMでは、こうした市販のソフトウェアを利用してモデル構築作業を容易にするため、入力ファイル形式を市販のプリポストプロセッサであるPATRANを用いて作成可能なものに極力近づけて、手入力による入力ファイルの修正を最小限にするよう工夫した。また、解析結果の出力に関しては、市販ソフトのAVSを用いて図化できるような出力形式にしている。

3. 2 既存断面解析機能

地殻内で発生する大地震の多くは、地殻内に存在する弱線、すなわち活断層で発生する。このため、地殻変動の解析においては、活断層など既知の構造を解析に反映させるのが望ましい。DFEMは元来工学的な応用を目的として開発されたものであり、無傷の媒質を対象としていた。そこで、既存断層が存在する条件下で解析を行う機能を開発した。

既存断層機能を利用する際には、有限要素モデルを作成した後に、既存断層を含む要素に対して既存断層の向きを方向ベクトルで指定するとともに、既存断層の物性値（限界応力、破壊エネルギー等）をDFEM要素に対して定義する場合と同様に与える。こうして既存断層を設定した後は、通常と同様に解析を行うことができる。

3. 3 粘弾性解析機能

地殻変動の解析においては、数十年から数千年以上に及ぶ非常に長い時間を対象とした解析を行う場合がある。このような長い時間領域を対象とする場合、地球内部では流動的な変形も生じるようになる。地球表層の厚さ数十kmはリソスフェア（岩石圏）と呼ばれ、地質学的な時間スケールにおいても弾性体としての扱いが可能と考えられているが、その下に位置するアセノスフェア（流動圏）と呼ばれる領域は、瞬間的に加えられた応力変化に対して弾性的に振舞うが、数十年以上の時間スケールでは流動を生じ、応力を解放してしまう性質を持つ。このような性質は粘弾性と呼ばれ、最も単純な場合、ばね

とダッシュポットを直列につないだMaxwell模型で説明される。

地殻変動解析を目的としたDFEMプログラムを開発するにあたり、こうした粘弾性媒質を扱うことは必要不可欠であることから、粘弾性解析機能を追加した。

3. 4 断層変位入力機能

日本列島における地殻変動をシミュレーションするような場合、過去に実際に発生した大地震の影響を正しく計算に取り入れることは重要な要素の一つである。大地震の発生に伴う地殻変動は、地球内部の断層面にすべり（変位の食い違い）を与えることによって表現できるが、このためにはDFEMで通常扱うのとは別に断層面の不連続変位を直接モデルに取り込むことが必要となる。そこで、Melosh and Rafesky (1981)による分割接点法（split node technique）を用いて断層変位を境界条件として取り込むことができるようプログラムを改良した。

断層変位を入力する場合、DFEM本来の機能による不連続面の形成・成長とは異なり、断層面の形状をあらかじめ想定しておくことが必要である。変位を入力する断層面は有限要素の境界から構成されるものとして定義しておく必要がある。

3. 5 初期応力解析機能

地殻変動解析と工学分野におけるシミュレーションとの違いの一つに初期応力状態が挙げられる。地球内部では深度が大きくなるにつれて圧力が増加しており、すべての計算は歪んだ状態から計算を開始する必要がある。また、断層の破壊に関係するのは、平衡状態からのずれである偏差応力である。プレート運動などの結果、地球内部では静岩圧平衡から外れた応力状態が実現されていることが地震発生メカニズムの研究などから明らかになっている。そのため、シミュレーションを行う場合には、このような応力状態を正しく再現した上で計算を開始する必要がある。

そこで、DFEMプログラムには単純な自重解析に加えて初期応力解析機能を導入した。この機能を用いると、媒質に予め荷重を加えて変形させ、応力-歪み状態を作ったあとに変形を0にリセットし、歪んだ状態からシミュレーションを開始することができる。

3. 6 大規模解析機能

3次元的地殻変動のモデル化を行う場合、モデルの要素数は非常に大きいものとなり、比較的簡単な問題設定でも数万要素になってしまう。例えば、水平方向に100km四方、深さ60kmまでの領域を2 km単位の立方体で分割すると要素数は75000となる。

このような問題を解く場合、連立方程式を直接解くのを避けることにより計算効率を上げられる場合がある。有限要素法の場合、それぞれの方程式は隣接する要素間

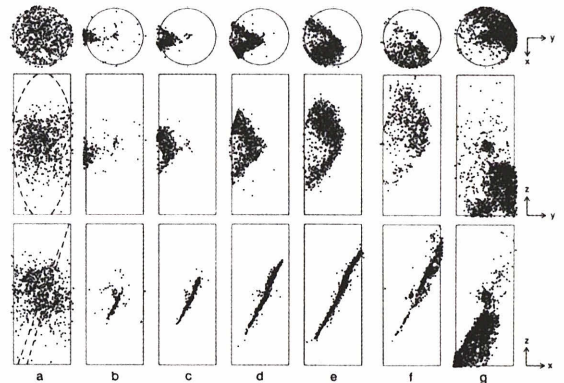


図-2 花崗岩の三軸圧縮試験により発生したAE分布の時間変化。亀裂が発生するとbのようにAEが1箇所集中し、それから破壊が進展していく（cからg）。Lockner et al. (1992)による

の力の釣り合いを表現したもので、適当な変換を施してやると、解くべき行列の対角要素周辺のみ非零成分が集まり、それ以外は0となるような形に変換できる場合が多い。このような連立方程式は、共役勾配法などの反復解法によって効率良く解くことができる。

DFEMプログラムを大規模問題に対しても適用可能なものにするため、ソルバ部分を共役勾配法を用いたものに置き換えた。これにより、DFEMプログラムを10万要素程度の大規模問題にまで適用可能になった。

DFEMでは過重荷解析における非線形解析のために弧長増分法による収束計算を行っており、この計算では荷重変位特性の除荷判定に行列式の符号を利用している。直接法で方程式を解く場合には、計算の過程で行列式が計算されていたので問題なかったが、反復解法を用いると行列式の計算ができなくなってしまう。そこで行列式を必要としない判定法を新たに開発して導入している。

4. 解析例

以下では、DFEMの機能を検証するために行った解析結果の一部を示す。

4. 1 花崗岩の3軸圧縮試験シミュレーション

最初に示す解析例は地殻変動ではなく、岩石破壊実験のシミュレーションである。地殻変動の事例だと、シミュレーション結果が正しいかどうかの判断が難しい場合が多いので、最初の解析例題としては実験結果との比較対照が行い易いものを選んだ。

Lockner et al. (1992)は、花崗岩試料の3軸圧縮破壊実験を行い、AE (Acoustic Emission) 震源分布に基づいて試料内における破壊面の成長過程をモニターした（図-2）。本解析では、2次元のDFEMプログラムを用いて、この岩石実験の数値シミュレーションを行った。

解析にあたり、試料全体をDFEM要素として定義し、

物性値名	一般部	弱部
ヤング率 (GPa)	4.70×10	4.70×10
ポアソン比	0.124	0.124
せん断強度 (MPa)	1.75×10	1.00×10
せん断破壊エネルギー (N/m)	8.75×10^4	8.75×10^2
内部摩擦角 (°)	30	30

表-1 物性値一覧

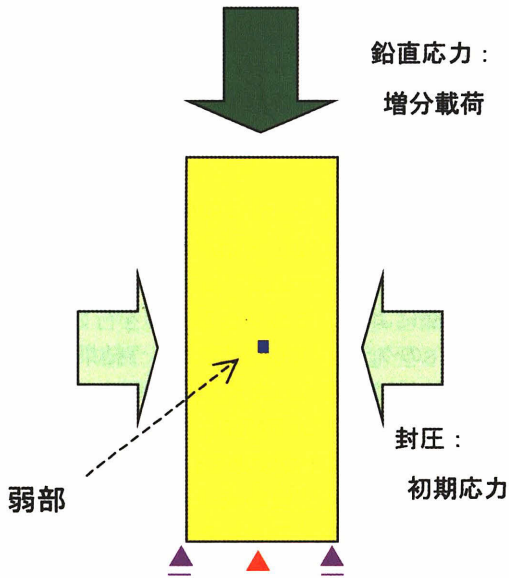


図-3 3軸圧縮試験モデルの構造図および境界条件。

試料中心部に剪断破壊エネルギーが小さい部分を1要素だけ設定した。これは、実験室内の花崗岩試料も強度に不均質があり、破壊実験の際には、弱い部分から壊れ始めることを想定したものである。解析に用いた物性値の一覧を表-1に、モデルの概要を図-3に示す。

試料の側方から50MPaの封圧による初期応力に加えた後に鉛直応力を増分载荷したところ、鉛直応力が160MPaに達したところで剪断応力による破壊が発生し、鉛直応力を更に増加させると破壊が進展していく様子が再現された。破壊面はX字型の共役面として得られたが、

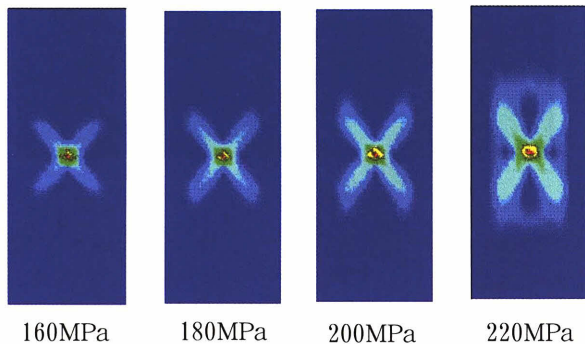


図-4 破壊進展の様子。数字は鉛直応力の値を示す

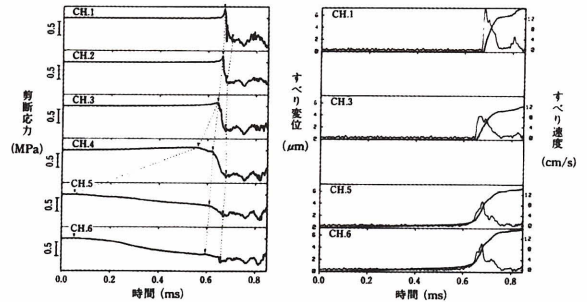
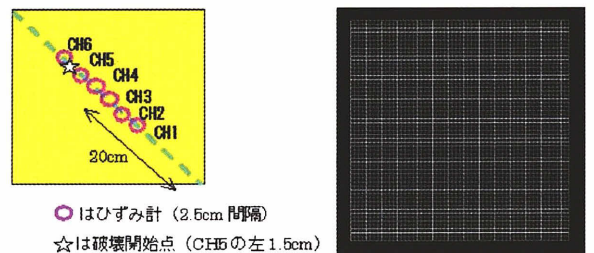
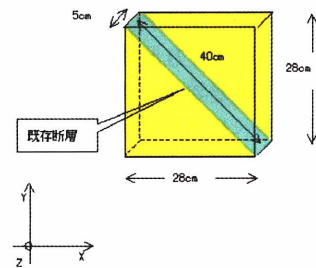


図-5 花崗岩の固着すべり実験により得られた剪断応力(左), すべり変位およびすべり速度(右)の時間変化。各センサの位置は図-6を参照。Ohnaka and Kuwahara(1990)による。

これは、シミュレーションでは均質な媒質が仮定されているためだと考えられる。実際の岩石試料では、強度が不均質であるため、より破壊し易い面において選択的に破壊が進行したのであろう。シミュレーションで得られた破壊面は最大圧縮軸と約30度の角度をなしており、この値は岩石について仮定した内部摩擦角と良く一致していた。この結果から、DFEMは岩石試料の破壊を精度良く追跡できる手法であることが確認された。

4. 2 花崗岩の固着すべり実験シミュレーション

次の解析例題も岩石実験のシミュレーションであるが、今度は固着すべり実験を扱う。Ohnaka and Kuwahara(1990)は花崗岩試料の固着すべり実験を行って、接触面におけるすべり量と応力の関係(摩擦構成則)を推定した。その結果は、図-5のグラフに示され、接触面の一部で前駆的なすべり(破壊核)が発生し、その領



○はひずみ計(2.5cm間隔)
☆は破壊開始点(CH5の左1.5cm)

図-6 解析モデルと解析メッシュ

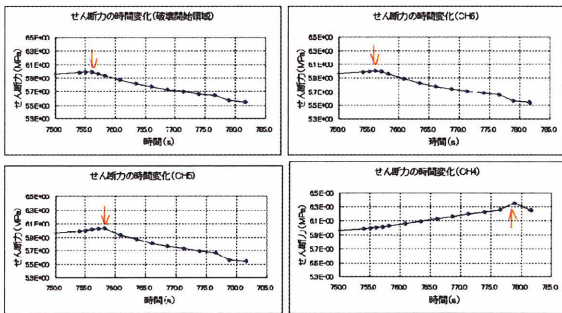


図-7 (a) 剪断応力の時間変化. 矢印は破壊が発生した時点を示す

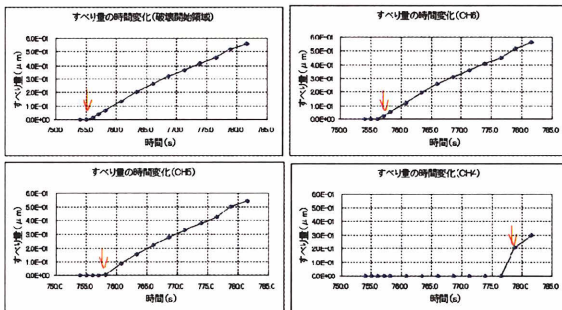


図-7 (b) 断層すべりの時間変化

域が次第に広がる。そして破壊核のサイズがある値に達したところで、それまでの準静的な過程から動的な破壊に切り替わり、一気に高速の破壊(すべり)が生じる。すべりの増加とともに剪断応力は増加するが、すべりの量が断層面の破壊強度 τ_p に達すると剪断応力は減少し、ほぼ一定値(残留応力値)に落ち着く。応力値が残留応力値に落ちるまでのすべり量は臨界変位量 D_c と呼ばれ、断層の性質を規定する重要な量である。

こうした実験室内における断層の破壊核形成過程について、DFEMによる再現を試みた。モデルの概念図を図-6に示す。1辺28cmの正方形媒質を考え、縦・横それぞれに56分割して有限要素モデルを作る。正方形の対角線上に既存断層(すべり面)の存在を仮定してDFEM要素を配置した。岩石試料のヤング率を20GPa、ポアソン比を0.12、剪断破壊強度を200MPaとし、既存断層部

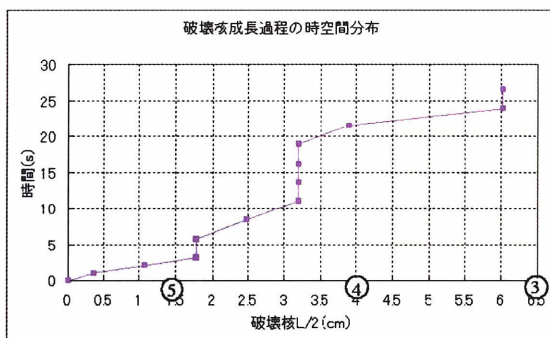


図-8 破壊領域の成長過程。丸で囲んだ数字はセンサの位置を示す。

分は強度を予め小さくしてある。また、摩擦構成則のパラメータ(τ_p , D_c など)は断層面上で不均質な分布をしていると考えられるが、Ohnaka and Kuwahara (1990)の実験結果でCH5とCH6の間で破壊が開始していることから、それに合わせて剪断破壊強度や臨界すべり量の分布を設定した。解析にあたっては、まず3.1MPaの封圧を載荷し、次に垂直方向から0.02MPa/sで増分載荷した。

解析結果を図-7に示す。接触面に加わる剪断応力を増加させていくと、強度の最も小さいCH5とCH6の間から破壊が始まり、次第にそれが周囲へと伝播していく様子が再現された。この解析結果によれば、破壊開始点から1.8cm以内の範囲において、約0.7cm/sの速度で破壊が進展したことになる。

Ohnaka and Kuwahara (1990)の実験結果では、破壊核形成の初期過程は破壊開始点から2.5cm以下の範囲で発生している。Shibasaki and Matsu'ura (1998)は境界積分法によるシミュレーションを行い、2.1cm以内で1.4cm/sのクラック成長速度という結果を得ている。今回の解析結果は、こうした以前の結果と同じオーダーの数値を与えており、DFEMにより破壊核形成の初期過程が再現できたと言えそうである。図-8に示すように、DFEMで再現された破壊核の成長過程はぎくしゃくとしたものになっているが、こうした結果は、摩擦構成則の取り扱いやメッシュサイズなどに起因するものではないかと考えられる。本格的な解析を行う際には、モデルの空間分解能や摩擦の取り扱いに十分な注意を払う必要がある。

4. 3 伊豆諸島の地殻変動解析

最後の解析例として、伊豆諸島で2000年に発生した地震・火山活動に関する解析結果について議論する。

2000年6月26日に三宅島で火山活動が開始し、その後、三宅島における火口の陥没・噴火や、三宅島から神津島、新島に至る周辺での活発な群発地震活動など、それまでに例を見ない活発な地殻活動が数ヶ月間継続した。この

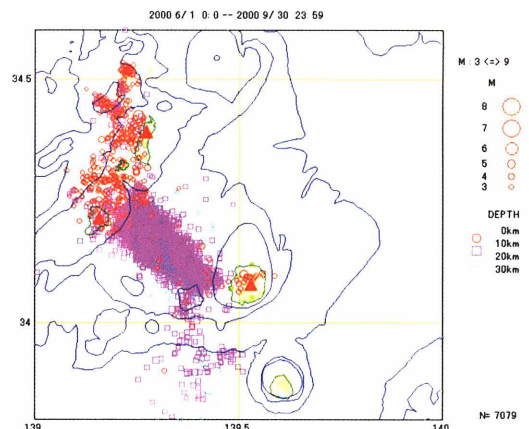


図-9 2000年6月～9月の震源分布 (M 3以上、深さ30km以下)

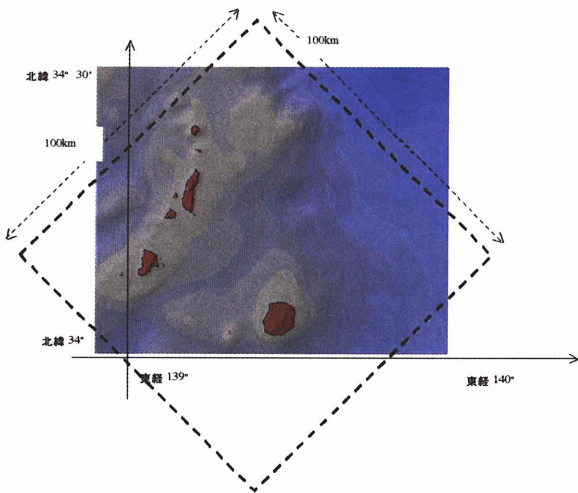


図-10 モデル化した領域

一連の活動は三宅島直下のマグマ溜まりと群発地震域におけるダイクの貫入、およびそれらに誘発されたと考えられる断層運動によるものと解釈されている (Nishimura et al., 2001)。

ここでは、三宅島直下のマグマ溜まりにおける減圧や、三宅島北西沖に貫入したダイクによって生じた応力変化によって一連の地震が誘発された可能性について検討するための予備的な解析を実施した。

図-9は三宅島、神津島、新島の周辺において2000年6月から9月までに発生した地震（マグニチュード3以上）の震源分布である。この地域の地殻変動解析を行うために、図-10のようにモデル領域を定めた。モデル領域は水平方向に100km×100km、深さ0～60kmで、一辺2kmの立方体で分割して有限要素メッシュを作成した。本モデルの節点数は80631、要素数は75000である。本モデルでは、深さ0～20kmを上部地殻、20～36kmを下部地殻、36～60kmをマントルとし、それぞれの領域

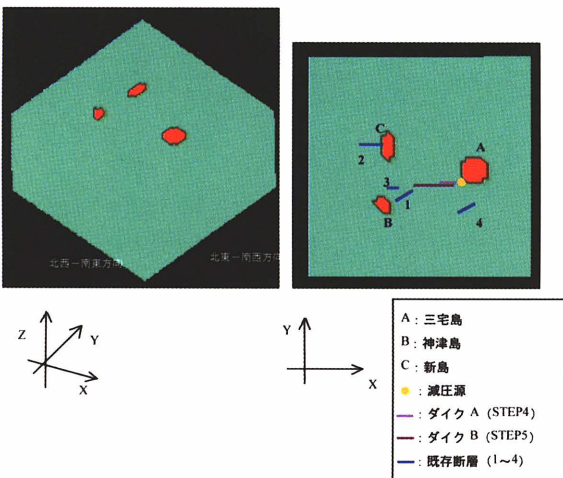


図-11 伊豆諸島の解析モデル

として適当な地震波速度を与えて弾性定数を定めた。さらに群発地震活動の中で発生したM6クラスの震源メカニズム解を参考にして、図-11に示すように4つの既存断層を設定した。既存断層以外の地殻部分もすべてDFEM要素とし、新たな断層面が形成される可能性も検討対象としている。既存断層を仮定した要素については、破壊強度を無傷の媒質の1/20～1/50に、破壊エネルギーは8～20%程度に設定している。なお、本解析では、対象とする事象の時間スケールが数ヶ月程度と短いため、すべての媒質を弾性体として解析を行っている。

解析手順としては、まず静岩圧平衡の応力状態を作るために自重解析を行い、次にこの地域の広域応力場と合致するよう、北西～南東方向に圧縮力最大、北東～南西

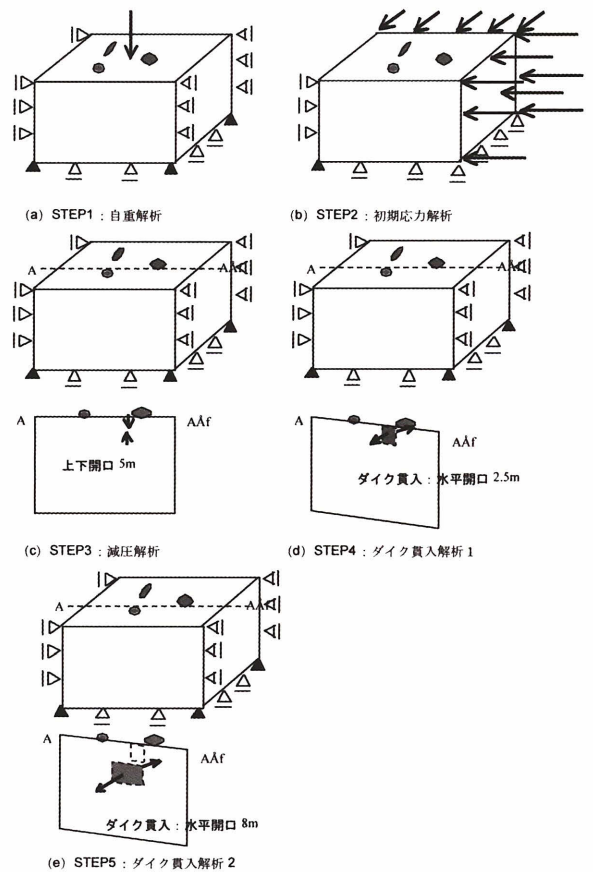


図-12 解析手順 STEP1から5まで順に行う

方向に最小となる初期応力場を作成する。ここに、まず、三宅島のマグマ溜まりにおける減圧の影響として、水平の面に負の開口量（深さ8km、4km²の範囲に-5mの開口量）を与え、さらに、三宅島西部および三宅島・神津島間におけるダイク貫入の影響として正の開口量（三宅島西部：深さ0.3km、7.4km×12kmの鉛直面に2.4mの開口量、三宅島・神津島間：深さ16km、20km×10kmの鉛直面に8mの開口量）を与え、周囲の応力変化状況および既存断層面の挙動について調べた (図-12)。

解析を行った結果、三宅島西部におけるダイクの貫入

(STEP4)により、神津島東方の既存断層1においてすべりが発生し、深さ0~4kmの範囲で最大1cm程度のすべりとなった。さらに、三宅島・神津島間のダイク貫入(STEP5)により、既存断層1におけるすべりは、範囲、すべり量ともに増大し、深さ0~10kmの範囲が最大3.5cmすべるという結果が得られた。また、この他の既存断層についてはすべりは発生しなかった。

この解析では、M6クラスの地震が複数発生した事実を再現することはできなかったが、神津島東方沖で発生した地震については、それがマグマの活動に伴って誘発された可能性があることを示すことができた。

この計算により得られた既存断層のすべり量は数cm程度と大変小さいが、こうした結果は、既存断層の構成則に強く依存する。この解析では、既存断層について剪断破壊強度が10MPa、臨界変位量が5mで、断層面の強度が断層のすべり量に対して線形に減少するような構成則が仮定されているが、これはあくまで仮定された値である。シミュレーションで実際の事象が再現できるかどうか検証することを通して仮定した構成則の妥当性を検討する必要がある。

このモデルにおけるもう一つの不確定要素は、初期応力解析機能で与えた初期応力場である。地震のメカニズム解などのデータから主応力軸の方向はほぼ分かっているが、その絶対値は良く分からない。従って、初期応力場の与え方には大きな自由度があり、それによってシミュレーションの結果も変わるはずである。

5. 考 察

伊豆諸島における地殻変動のシミュレーション結果は、現在観測により得られる情報がまだまだ不十分であり、現実的な数値シミュレーションを行うことが困難であることを図らずも示している。それゆえ、現段階における地殻活動シミュレーションの課題は、将来起きる事象を予測することよりも、これまでに起きた現象を再現するためにはどのような境界条件や物性値を与えれば良いか調べることであり、いわば現実に即したパラメータを探すことだと言える。これは言うてみれば、擬似的な観測とでも呼ぶことができるだろう。こうした数値実験によって、観測では十分に拘束しきれないパラメータを、数値シミュレーションを通して推定したり、特定のパラメータに対して解析結果の敏感さを調べたりすることができる。期待される。このような課題に取り組む際には、できるだけバラエティに富んだ現象を再現できるようなパラメータを探すことが必要であり、2000年に伊豆諸島で発生した地殻活動は、モデルが説明し得る事象の幅を広げる機会を提供するという意味で大変重要である。

将来、適切に設定されたパラメータを用いてある程度の事象を説明できるようになった場合、特に可能なパラメータの組み合わせ(モデル)が複数あるような場合には、それぞれのモデルを用いて予測を行い、どちらのモ

デルがより予測能力を持つか比較することを通して、モデルの改良を図ることも可能である。こうして、数値シミュレーションと実際の自然現象の観測とが互いにフィードバックし合う関係を作ることができれば、地震や地殻変動などの現象も大きく進展することが期待される。

そうは言っても、実際の数値シミュレーションには様々な困難が付きまとう。先にも述べたように、日本列島規模の地殻変動と言った大規模な現象を取り扱う場合、扱うべきモデルはすぐに大規模なものとなってしまい、通常の計算機では解けない問題になってしまう。現在のプログラムでは十萬要素程度の問題まで扱うことが可能であるが、さらなる大規模化を図るためには、プログラムの並列化を行う必要がある。

また、現在のDFEMプログラムで扱えるのは、準静的なプロセスだけである。慣性の効果を取り入れる必要がある動的な断層破壊過程は対象外となっている。このように、解析プログラムには特徴や限界があるので、そうした点をわきまえて解析に使用する必要がある。

6. おわりに

これまでに開発されたDFEMのプログラムは地殻変動解析を行うために必要な機能をほぼ備えている。今後は様々な事例について解析を行い、解析事例を増やすとともに解析手法についての経験を蓄積していくことが重要である。その目的のためにはユーザを増やすことが必要と考えられる。そのためには、解析手法を解説したマニュアルが必要であり、平成14年度にその作成を行う予定である。また、国土地理院以外の研究者にもプログラムを公開して使って頂くことを予定している。

参考文献

- Lockner, D. A. , J. D. Byerlee, V. Kuksenko, A. Ponomarev, and A. Sidorin, Observations of quasistatic fault growth from acoustic emissions, in *Fault Mechanics and Transport Properties of Rocks*, ed. by B. Evans and T. F. Wong, Academic Press, London, -31, 1992.
- Melosh and Rafesky, A simple and efficient method for introducing faults into finite element computations, *Bull. Seismol. Soc. Am.* , 71, 1391-1400, 1981.
- Nishimura, T. , S. Ozawa, M. Murakami, T. Sagiya, T. Tada, M. Kaidzu, and M. Ukawa, Crustal deformation caused by magma migration in the northern Izu islands, Japan, *Geophys. Res. Lett.* , 28, 3745-3748, 2001.
- Ohnaka, M. and Y. Kuwahara, Characteristic feature of local breakdown near crack-tip in the transition zone from nucleation to unstable rupture during stick-slip shear failure, *Tectonophys.* , 175, 197-220, 1990.
- Shibazaki, B. , and M. Matsu'ura, Transition process from nucleation to high-speed rupture propagation: scaling from stick-slip experiments to natural earthquakes, *Geophys. J. Int.* , 132, 14-30, 1998.
- 呉智深・町田篤彦・高東劭, 一般的な不連続変形を考慮した混合型有限要素解析法の開発, *土木学会論文集*, 598, I-44, 149-159, 1998.

