

1.1.2 実地形と構造を有限要素モデルに組み込む手法

1.1.2.1 はじめに

マグマだまりの成長等を想定した、地下の圧力変化に伴う地表面変化を詳細にシミュレーション計算するには、有限要素法を用いることが有効である。なぜなら、圧力源の形状、複雑な地表面地形あるいは物性の違いによる内部構造等を、詳細に再現したモデルを作成して、数値解を計算できるからである。他の数値計算のうち、差分法は複雑な形状は扱うことができず、また境界要素法は複雑な形状は扱うことが可能だが均質構造以外を扱うのは困難である。よって、有限要素法は他の数値計算法に比べて複雑な形状や構造の扱いに優れている。圧力源の応力変化に対する地表面変位の解析解は、球核や板状等の特殊な形状については与えられているが(Mogi, 1958, Okada, 1992)、複雑な地形や構造を仮定した場合の解析解を導出することは容易ではない。

ここでは、汎用の有限要素法計算ソフトウェアである ANSYS Ver.7.0 (ANSYS, Inc.) を利用し、国土地理院の50mメッシュあるいは250mメッシュの数値地図を使って、実地形を再現した有限要素計算用ソリッドモデルを作成するための、スクリプトバッチファイルを作成するツールを開発したので紹介する。

ソリッドモデルの構築は、単純な幾何形状の場合はトップダウンモデリング(最初に概観のモデリングを行い、順に細部を行う)が行われるが、火山体の地形を表現するためには10~100m 間隔の地表面節点を与えるために、点→線→面→ボリュームの順に構築していくボトムアップモデリングを行う。その最も基本的な要素である点の座標を数値地図から自動的に組み込んで、いくつかのパラメータ与えることにより、実地形を詳細に再現したソリッドモデルを自動的に構築する。

1.1.2.2 パラメータの設定

パラメータには、不変パラメータと可変パラメータがある。作成しようとするソリッドモデルのパラメータは、一部を除いて、入力用ファイルに設定することで可変となる。その不変パラメータと可変パラメータ、及び観測点パラメータについて説明する。

不変パラメータ

地表面要素の形状：

地表面分割の面要素の形状は、XY 平面に投影した形状が正三角形となるようにした。これは、四面体構造のフリーメッシング(要素分割)を行うことを前提としている。また、地表面における平面歪計算において、正三角形が最も安定した解を計算できることにも考慮している。ただし、形状の座標値に無理数を与えることはできないため、正確にはY方向に0.999971倍に圧縮した正三角形となっている(底辺：高さ = 1 : 0.866)。

面要素形状の二重構造：

面要素形状の規模は、内側と外側の二重構造を与える。その境界は正六角形の形状となる。また外側領域の外形も同様に正六角形になり、上面は全体として三角形の集合体の蜂の巣のような構造になる (Fig. 1.1.2.1)。

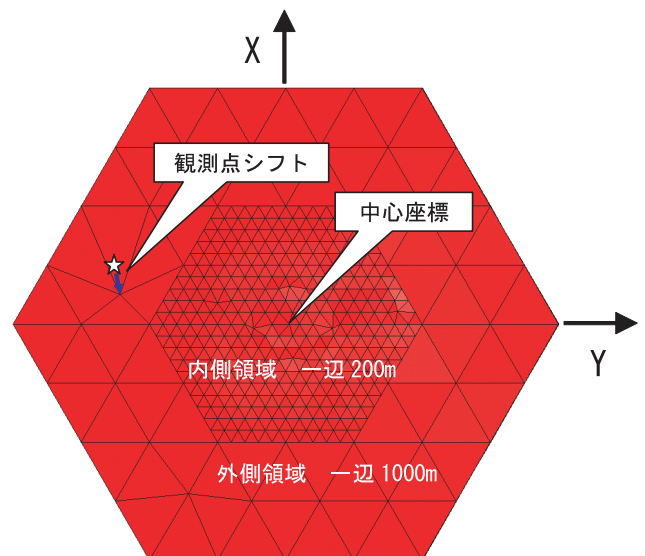


Fig. 1.1.2.1 Element distribution on the surface of the solid model.

可変パラメータ

ソリッドモデルの中心座標，深さ，面要素規模，領域規模は任意のパラメータとして，環境ファイルの中で与えられる (Env. dat)。

内側領域，外側領域ともに，面要素規模（一辺の長さ）は自由に与えられるが，領域の境界節点の整合性から，外側領域の面要素の一辺の長さは内側領域のその整数倍としなければならない。内側領域，および外側領域がなす六角形の領域規模は，拘束条件なく与えることができる。また，次に説明する観測点設定のための観測点数を与える。

使用する数値地図の枚数を与える。ただし， $N \times M$ 枚の地図ファイルを用意する。 N は緯度方向の行数， M は経度方向の列数で，数値地図のファイル名を羅列する。

観測点設定

観測点の座標は，必ずしも与えた条件の三角形の節点には一致しない。そこで観測点ファイル (Stn. dat) で複数の座標を与えることにより，観測点の座標が三角形網の節点になるように，自動的に与えた最も近い節点を観測点座標にシフトする。観測点シフトを行わない場合は，環境ファイルの観測点数のパラメータに0を代入することで可能となる。

1.1.2.3 プログラム

C言語で作成し，パーソナルコンピュータ上で実行できる，汎用プログラムである。実行ファイル (Honeycom. exe)，パラメータ設定ファイル (Stn. dat：観測点パラメータ，Env. dat：モデルパラメータ)，標高データ (国土地理院の数値地図) を，同一ディレクトリに用意し，実行することにより，honeycom. cmds という名前のスクリプトファイルが出力される。これを ANSYS Batch Launcher で，インプットファイルに入力し実行することにより，ソリッドボリュームのデータベースファイルが作成される。

プログラムを実行することにより，スクリプトファイル作成にはいる。実行時間は地表面分割数によるが，長いと数分以上かかる。地表面要素の分割数（三角形の数）が大きいと，スクリプトファイルの実行時間が長いだけでなく，プログラムが完了できない。分割数は以下のとおりである。

$$N = 6 \times (N1^2 + N2^2 - (N1 \times L1 / L2) \times 2)$$

$N1$ ：内側領域の三角形の半径方向の並びの数

$N2$ ：外側領域の三角形の半径方向の並びの数

$L1$ ：内側領域の三角形の一辺の長さ [m]

$L2$ ：外側領域の三角形の一辺の長さ [m]

分割数に対するスクリプトファイル実行時間については，Fig. 1.1.2.2のような依存性（約3.5乗に比例）があり，おおむね6,000以内とすることが現実的である。また，地表面要素で6,000を超えると，フリーメッシングで全体を要素分割した場合，節点数は100,000を超える。われわれが有限要素計算で使用した計算機環境

(Intel Pentium III, RAM 1GB) では，節点数が100,000を超えると，おおむね計算時間は1時間を超える。計算時間は節点数のほぼ3乗に比例するため，地表面要素の分割数は，10,000程度が限界である。

50mDEMと250mDEMから作成されたボリュームの違いを Fig. 1.1.2.3に示す。左は50mDEM，右が250mDEMで，内側領域の面要素の一辺の長さは200m，外側領域の一辺の長さは，1000m，内側領域六角形の長さは3000mである。

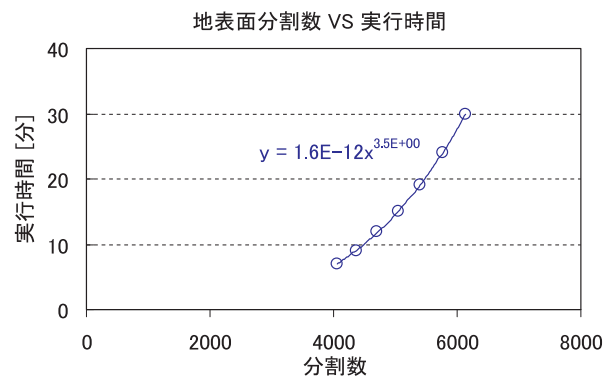


Fig. 1.1.2.2 Calculation time according to the number of elements on the surface.

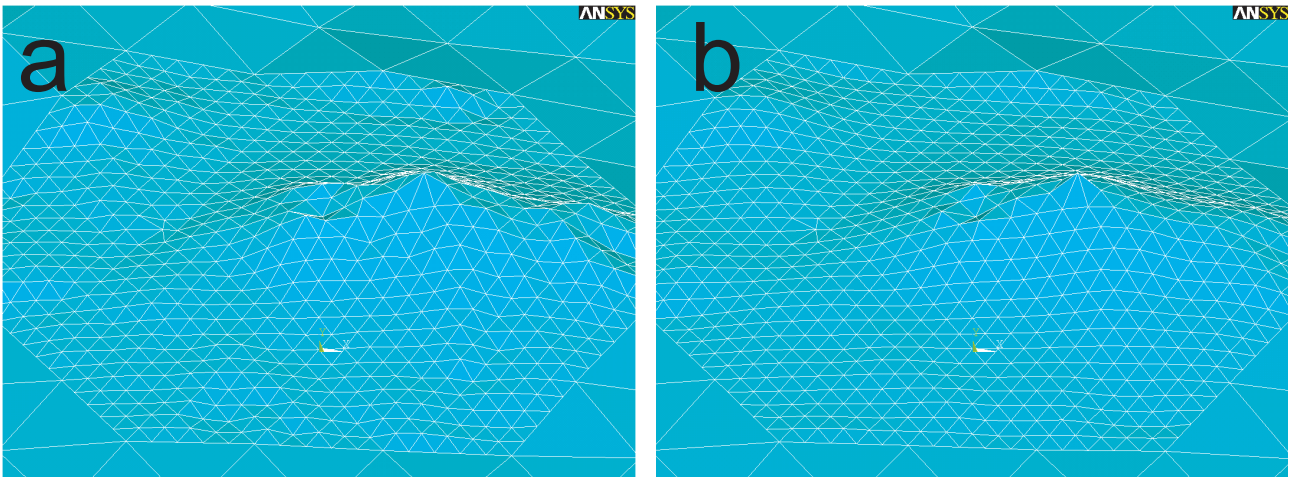


Fig. 1.1.2.3 Topographical differences according to the numerical maps. a: 50 m DEM. b: 250 m DEM.

1.1.2.4 内部物性構造

剛性率やポアソン比等の3次元物性構造を多層構造として取り入れるためには、その構造境界で分割されたボリューム分割を行っておく必要がある。そのためには、構造境界の標高データを、同様の数値地図フォーマットで用意しておき、同様の手法でいくつものソリッドボリュームを作成して、それらを結合処理等をする必要がある。これにより、任意の3次元多層構造のソリッドボリュームが完成する。

Fig. 1.1.2.4は3次元物性構造を取り入れた雲仙岳の例である。雲仙岳は噴火活動により1億立方メートルの溶岩ドームを形成したが、噴出後の溶岩の物性は既存山体と異なるため、詳細なシミュレーションを行うには3次元構造を考慮する必要がある。噴火前後での数値地図データを用いてソリッドボリュームを作成し、その差分のボリューム（平成新山）に既存山体とは異なる物性パラメータを与えた。

(高木朗充)

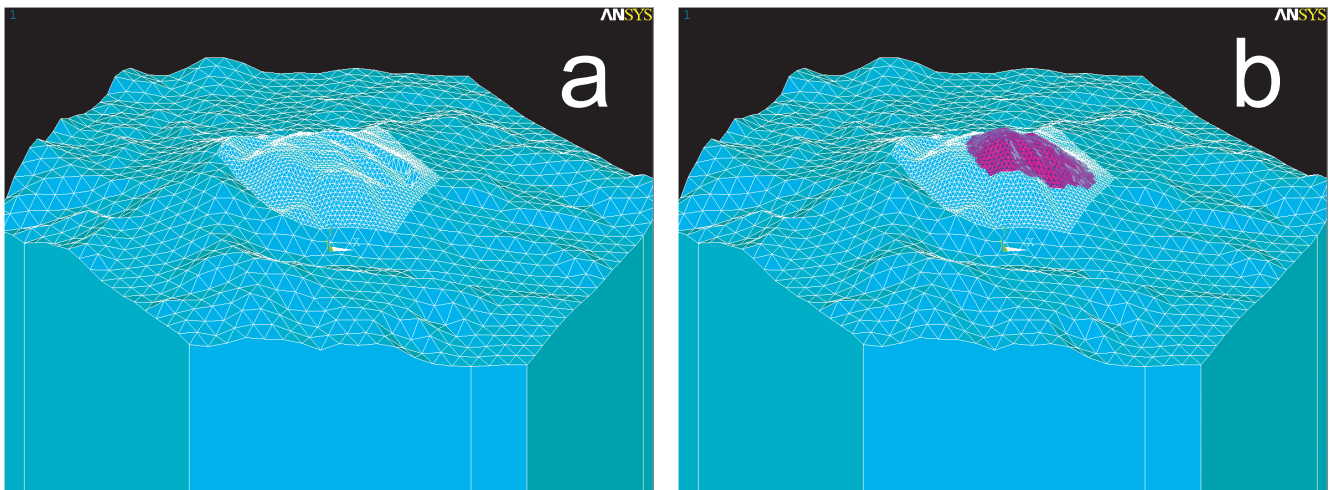


Fig. 1.1.2.4 Application of the volume dividing the three-dimensional (3D) structure of the physical property (Unzen volcano model). a: Before formation of the lava dome. b: After formation of the lava dome.

参考文献

- Mogi, K., 1958 : Relations between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surfaces around them. *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **36**, 99-134.
- Okada, Y., 1992 : Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **82**, 1018-1040.