

1.5 火山用地殻活動解析支援ソフトウェアの開発

1.5.1 はじめに

気象庁では平成13年度に発足した火山監視・情報センターにおいて、火山活動の監視を目的として、GPSや傾斜計を用いた地殻変動観測、プロトン磁力計による全磁力繰り返し観測が実施されるようになり、これらのデータから火山活動を総合的に評価することが求められている。このため、マグマの貫入や熱水活動に伴う火山体の変形、熱消磁や溶岩の冷却に伴う帯磁による地磁気変化、あるいはマグマの貫入等の圧力に伴って生じるピエゾ磁気による地磁気変化などを推定し、観測データと比較することで、マグマの供給等に関連した圧力源や熱消磁域などを推定し、火山活動を総合的に評価するための判断材料を提供するためのパーソナルコンピュータ上で稼働するソフトウェア「火山用地殻活動解析支援ソフトウェア」（略称 MaGCAP-V；マグキャップブイ）を開発した。MaGCAP-Vは Magnetic and geodetic data computer analysis program for volcano あるいは Geomagnetic and crustal deformation data analysis program for volcano, Magnetic and geodetic data componound analysis program for volcano の略であり、後述する MICAP-G をもじって名付けられた。

これまでも気象研究所によって、パーソナルコンピュータ上で地震活動を解析するための SEIS-PC（石川・ほか、1985；石川、1986；石川・中村、1997）、電子基準点等の GPS データ解析のために SEIS-PC を元に開発された GPS データ簡易表示プログラム SEIS-GPS（中村、1999）あるいはその後継ソフトウェアである PAT-ME、断層運動や点圧力源に伴う地殻変動の解析のための地殻変動解析支援プログラム MICAP-G（内藤・吉川、1999；山本・吉川、2001；山本、2005）が開発され、広く活用されている。また、国土地理院が実施している三角測量、水準測量、潮位観測、GPS 連続観測データの解析のため Web ブラウザをインターフェースに用いた地殻活動観測データ総合解析システム（鷺谷・ほか、2003）も開発されている。PAT-ME は国土地理院の電子基準点データのように解析対象領域に多くの観測点が存在する場合の GPS データ解析に適したソフトウェアであり、MICAP-G と PAT-ME は連携して使用することで観測データとモデル計算値を比較できるようになっている。今回開発したソフトウェアは地形の影響が大きい火山地域を対象とし、地殻変動のみならず地磁気データも同時に取り扱え、観測データとモデル計算結果を相互に比較しながら解析することが可能な GUI（Graphical User Interface）ベースのソフトウェアとなっている。

MaGCAP-V では地形の影響を考慮するため、火山における地殻変動データの解析に用いられてきた茂木モデル（茂木、1957；Mogi, 1958）や Okada（1992）によるディスロケーションモデルを改良したモデルを用いている。さらに、本ソフトには実地形や構造の影響も考慮した解析を行うため、有限要素法シミュレーション結果データベース（以下 FEM-DB と記す）を用いたモデル推定機能も組み込まれている。

本ソフトウェアは Microsoft 社製の Visual C++ Ver. 6.0 を使用して開発され、Microsoft Windows 2000もしくは Windows XP 上で動作する。快適な操作のためには Intel 社製の Pentium 4, 2.8GHz 相当以上の CPU, 512 MB 以上の主メモリ、解像度1024×768ピクセル以上のディスプレイを有する計算機の使用を推奨する。また、ハードディスク空き容量は観測データ、地図データ、リスト出力などのため数100Mbyte, FEM-DB を利用する場合は 1 Gbyte 以上を推奨する。

1.5.2 MaGCAP-V で使用するデータ

利用可能な観測データは

- ① GPS 観測で得られる X, Y, Z 座標、緯度、経度、楕円体高（緯度以降はなくとも可）の時値、日値
- ②変位（東西、南北、上下成分）の時値、日値
- ③傾斜直交2成分および傾斜計に付随する温度の分値、時値、日値
- ④地磁気データ（基準点からの全磁力相互差）の分値、時値、日値、月値
- ⑤気圧、気温、湿度、降水量の時値
- ⑥震源データ（発生時刻、緯度、経度、深さ、マグニチュード）

である。ここで変位は水準測量データ、GPS 観測結果の図から読み取った変位量、有限要素法などを用いてシミュレートされた変位量などの利用を想定している。GPS や地磁気の繰り返し観測データも連続観測データと同じ様に取り扱うことが可能である。

モデル計算と等高線などの地形表示のために国土地理院数値標高データ（50m, 250m, 1 km メッシュ）あるいはユーザーが作成したメッシュ標高データを用い、平面図への表示用として国土地理院数値地図25000（行政界・海岸線、平成12年版以前のファイル仕様）の海岸線、行政界ラインデータ、ユーザーが作成したラインデータを用いることができる。また、東京測地系から測地系2000への変換機能を有している。地図データは火山位置を原点とした平面直角座標系に変換して用いられる。

火山の位置情報や、地磁気パラメータ（偏角、伏角、全磁力の標準値、磁化係数、応力磁化係数、ラメの剛性率、キューリー点深度）および観測点情報を設定するファイル名を格納した「火山ファイル」を利用する。

1.5.3 MaGCAP-V の機能

MaGCAP-V が有する全機能を Table 1.5.1 に示す。以下に、主な機能について解説する。

1.5.3.1 観測データ表示機能

任意の観測種目を組み合わせた時系列図、任意の観測種目、観測期間を重ね合わせた分布図（観測点位置へのマークやベクトル表示、カラーマップ）の表示と印刷が可能である。

GPS 座標値（緯度、経度、楕円体高）、変位各成分、傾斜二成分、全磁力値、気象観測値の時間変化を線グラフや散布図としてグラフ表示し、GPS 座標値を除く 5 項目までを重ね合わせた図を作成できる。線グラフと散布図を重ね合わせることで記号を線で結んだグラフとして表現することも可能である。GPS、地磁気データでは任意に選定した基準観測点と観測点との間の相対的な変動量を図示できる。GPS や変位では成分毎の変動量以外に基線長の時間変化も図示できる。なお、降水量は棒グラフで表示される。

GPS、変位、全磁力、傾斜データの指定した 2 時期の変化量あるいは選択した期間に含まれるデータから推定される変化率の平面分布図と任意の方向に直交する断面に投影した断面図が表示できる。GPS、変位、全磁力では任意に選択した基準点との相対値を利用できる。GPS や変位データでは広域応力場の影響を除去する機能や、三角網における主歪や各種歪のカラーマップを表示する機能も有している。これらのうち、任意の 6 項目を重ね合わせて表示できる。表現方法としては観測種目に応じて、ベクトル表現、観測量に応じて色づけした記号を観測点に描画する方法、縦棒の長さで表現する方法、観測データから内挿して求めたカラーマップで描画する方法がある。カラーマップでは内挿する格子点間隔を指定でき、格子点間隔を細かくすることで滑らかな分布を表現できる。観測点位置に描画した場合は観測値を、三角網に歪を描画した場合は三角網の重心位置の座標と歪各成分が、カラーマップで描画した場合は格子点における内挿値を座標値とともにテキストファイルに出力可能である。

傾斜、GPS、変位データから軌跡図を描くことができる。平面図の観測点位置に表示することも可能であり、GPS や変位では断面図にもその面内の軌跡が表示される。

1.5.3.2 モデル推定計算機能

地殻変動データや地磁気観測データを茂木モデルや熱消磁モデルなどの解析解に当てはめ、パラメータ推定を行い、その結果を表示する機能である。

地殻変動データに対して利用可能なモデルは、マグマの貫入や後退などによる球状圧力源の増圧、減圧あるいは体積の増減に伴う地殻変動を表現する茂木モデル（茂木, 1957; Mogi, 1958）、Okada (1992) によってまとめられた断層運動やダイクの開閉などによる変位を表現するディスロケーションモデル（以下、岡田モデルと呼ぶ）およびこれらを組み合わせた複合モデルであり、地磁気データに対しては、球、円柱、円錐、円錐台、傾いた直方体領域の磁化変化およびこれらを組み合わせた複合モデル、複数の茂木モデルを圧力源とするピエゾ磁気

Table 1.5.1 Function of MaGCAP-V.

		火山用地殻活動解析支援ソフトウェア MaGCAP-V Ver. 1.1 機能一覧			
		GPS、変位	傾斜	地磁気	統合機能
使用データ	観測データ	GPS、変位時値、日値 繰り返し観測は日値データとして取り扱う	傾斜（温度つき）分値、時値、日値	全磁力分値、時値、日値、月値 繰り返し観測は日値データとして取り扱う	気象データ（気圧、気温、相対湿度、降水量）時値
	地震データ	気象庁フォーマット震源データ（発生年月日時刻、緯度、経度、深さ、マグニチュード）			
	地図データ	国土地理院数値地図（50m、250m、1kmメッシュ）標高、数値地図 25000（海岸線・行政界） ユーザー作成標高データ、ラインデータ			
観測データ表示	時系列表示	1 観測点の座標 任意基準点からの NS、EW、UD 相対変位 変化、基線長変化 折れ線、点列	傾斜 2 成分、温度 折れ線	観測値あるいは任意基準点からの相互差 折れ線、点列	5 観測種目までの任意データを組み合わせ表示
	分布図表示データ	指定期間間の変化量、指定期間の変化率 基準点を任意に選択可能（変位量については基準点を指定しないことも可能） 広域応力場の影響を除去可能	指定期間間の変化量、指定期間の変化率	指定期間間の変化量、指定期間の変化率 観測値あるいは任意基準点からの相互差	
	分布図	水平、上下変位量を観測点に色付き印、縦棒、ベクトル（水平、上下）、数値表示 EW、NS、UD 変位、基線長変化、EW、NS 歪、せん断歪、面積歪みの RGB マップ表示 三角網付き主歪みの二軸ベクトル表示 複数の期間のデータ、複数の表示方法による図を重ね合わせ表示可能	観測点にベクトル、数値表示 複数の期間のデータを重ね合わせ表示可能	観測点に色付き印、縦棒、数値表示 RGB マップ表示 複数の期間のデータ、複数の表示方法による図を重ね合わせ表示可能	6 種類までの任意データを組み合わせ表示（観測期間が異なることも可、傾斜軌跡図との重ね合わせは不可）
	断面図	標高断面図に色付き印、縦棒、ベクトル表示（複数期間、複数の表示方法を重ね合わせ可能） 複数の期間の観測値の指定位置からの水平距離－変位関係図	複数の期間の観測値の指定位置からの水平距離－傾斜関係図	標高断面図に色付き印、縦棒表示（複数期間、複数の表示方法を重ね合わせ可能） 複数の期間の任意方向の距離－相互差関係関係図	平面図と同じ組み合わせで標高断面図に表示
	軌跡図	複数の観測点を 1 枚に表示（水平、鉛直面内） 平面図、断面図の観測点位置に表示	複数の観測点を 1 枚に表示 平面図の観測点位置に表示	—	
	軌跡図	複数の観測点を 1 枚に表示（水平、鉛直面内） 平面図、断面図の観測点位置に表示	複数の観測点を 1 枚に表示 平面図の観測点位置に表示	—	
モデル計算	使用モデル	複合茂木、岡田モデル FEM 計算結果データベース		球、円柱、円錐台、直方体消磁 茂木モデルによるビエソ磁気	球（茂木モデル、球の消磁／帯磁） ダイク（岡田モデル、直方体領域の消磁／帯磁）
	推定量	水平変位、上下変位、三次元変位	傾斜	地磁気変化	GPS、変位、傾斜、地磁気データを組み合わせ利用可能
	モデル推定	グリッドサーチ（水平、上下重み付け、水平、鉛直方向探索格子表示） 単独茂木モデル体積変化最小自乗法＋空間グリッドサーチ（水平、上下重み付け） 逆解析（水平、上下重み付け、変化率の場合は推定誤差を考慮） FEM-DB サーチ FEM-DB 内挿 観測点標高を考慮 基準点からの相対変位量推定値をモデル推定に利用するの、変位量自体をモデル推定に利用するの、かどうか選択可能 グリッドサーチの場合、観測量として三次元、水平、上下ベクトル、三次元、水平スカラー選択可能 広域応力場の影響を付加可能	グリッドサーチ（水平、鉛直方向探索格子表示） 単独茂木モデル体積変化最小自乗法＋空間グリッドサーチ 逆解析（変化率の場合は推定誤差を考慮） FEM-DB サーチ FEM-DB 内挿 観測点標高を考慮 グリッドサーチの場合、観測量としてベクトル、スカラー選択可能	グリッドサーチ（水平、鉛直方向探索格子表示） 逆解析（変化率の場合は推定誤差を考慮） 観測点標高を考慮	重み付きグリッドサーチ（水平、鉛直方向探索格子表示） 重み付き逆解析（変化率の場合は誤差を考慮） 観測点標高を考慮
	推定量表示	観測点に色付き印、縦棒、ベクトル、数値表示 任意標高、地表面格子におけるコンター、ベクトル、RGB マップ表示 FEM 計算結果の FEM 計算点におけるベクトル、色付き印、縦棒表示 基準点を任意に選択可能	観測点にベクトル、数値表示 任意標高、地表面格子におけるベクトル表示 FEM 計算結果の FEM 計算点におけるベクトル表示	観測点に色付き印、縦棒、数値 任意標高、地表面格子におけるコンター、RGB マップ表示 基準点を任意に選択可能	5 種類までの任意推定値を任意の表示法で組み合わせ表示
	断面図	平面図と同じ組み合わせで標高断面図に色付き印、縦棒、ベクトル表示 複数の深さの茂木モデルの水平距離－変位関係図	複数の深さの茂木モデルの水平距離－傾斜関係図	平面図と同じ組み合わせで標高断面図に色付き印、縦棒表示 複数のモデルの計算値を重ね合わせた任意方向の距離－全磁力相互差関係図	平面図と同じ組み合わせで標高断面図に表示
	観測値との重ね合わせ表示	平面図、標高断面図への観測値、推定値の任意の組み合わせでの重ね合わせ（推定値 5 種、観測値 6 種） 複数の深さの茂木モデル水平距離－変位量関係図への複数期間の観測値の重ね合わせ	平面図への観測値、推定値の任意の組み合わせでの重ね合わせ（推定値 5 種、観測値 6 種） 複数の深さの茂木モデル水平距離－傾斜関係図への複数期間の観測値の重ね合わせ	複数の期間の観測値と計算値を重ね合わせた任意方向の距離－全磁力相互差関係図	
	モデル表示	推定量表示画面の平面図、標高断面図に表示（表示色変更、非表示可）			
	出力				
出力	画面出力	画面印刷（PostScript ファイル、PDF ファイルとして出力すれば編集可能） メタ画像（編集可能）、BMP 画像としてクリップボードにコピー			
	データ出力	表示形式に従って観測値、推定値をテキストファイルに保存（断面図を含む） 推定パラメータ、誤差をテキストファイルに保存			
地震データ表示		平面図、断面図への震源データの表示（深さ、マグニチュード毎に印の色、大きさ、種類を指定） モデル推定値（5 種まで）と震源分布の重ね合わせ表示			
その他	画面レイアウト	平面図描画中心緯度経度、スケール指定 標高断面図表示、非表示選択、平面図、標高断面図表示領域比率可変 断面方向指定、表示標高指定 標高断面図への観測データ等表示範囲指定（データ等非表示可） タイトル、凡例表示位置、文字サイズ可変			
	観測点位置図	平面図、標高断面図の観測点位置に指定した属性（色、種類、サイズ）の印、観測点名などを表示（観測点毎に属性変更可能）			
	地図表現	等高線、陰影図、ラインデータ			
	観測点選択	表示観測点、モデル推定に使用する観測点を選択可能			
	ステータス表示	マウス位置の緯度、経度、観測点名を表示			
	パラメータ保存	画面表示パラメータ、モデル推定パラメータ、モデル推定結果等をケースデータとして保存し、再利用可能			
	ヘルプ	ヘルプファイル（PDF ファイル）の表示			

モデルである。球の磁化変化による地表面における全磁力変化は相当する大きさの双極子によって生じる値として求めることができる。球以外の形状については、帯磁した直方体によって生じる磁場を求める計算式 (Bhattacharyya ; 1964) を利用して求めた。すなわち領域を水平、鉛直方向に分割して直方体の集合で近似し、各々の直方体による全磁力変化を Bhattacharyya (1964) で求め、これらを加え合わせることで求められる。茂木モデルによる地殻変動量計算で標高補正茂木モデル (本報告1.4節) を用いる等、地殻変動量や地磁気変化量の計算には地形の影響を考慮している。

観測データからグリッドサーチあるいは逆解析によって最適モデルを推定し、推定結果を表示、テキストファイルに出力する。観測種目毎に重みを与えることで、異なる観測種目を組み合わせて最適モデルを推定することも可能である。地磁気と地殻変動を組み合わせた場合は、地殻変動に対する茂木モデル、岡田モデルそれぞれに対して同じ形状の消磁あるいは帯磁モデルを用いている。茂木モデルによる地殻変動データ解析の場合は圧力源の位置をグリッドサーチで、大きさは最小二乗法で求める方法も用意している。この方法は標高補正茂木モデルではなく、通常の標高を考慮しない茂木モデルによる推定になる。この方法によってあらかじめ、圧力源の大きさを求め、この値を初期値として、グリッドサーチあるいは逆解析を行うことで、最適な推定値を得るまでの時間を短縮することができる。グリッドサーチでは探索範囲や探索間隔を地図上に表示する機能や推定値が探索範囲の端点に求められた場合、警告を表示する機能、繰り返し計算回数を表示しサーチを実行するかどうか選択する機能など、グリッドサーチによる解析を補助する機能を備えている。

推定されたモデルを用いて観測点や地表面格子あるいは任意の標高面格子での値を求め観測値と同様に色々な表現法で分布図を描き、観測値と重ね合わせたり、複数の推定結果を重ね合わせたりして表示することが可能である。

GPS や変位データに対するモデル推定では広域応力場を考慮するかどうか、観測値を水平ベクトル、スカラー量、上下変動、あるいは三次元ベクトルとして当てはめるかが選択可能である。傾斜についても観測値をベクトル量として取り扱うかスカラー量としてモデル推定を行うか選択可能である。変位については観測量を絶対変位として扱う方法と、基準点を指定しそこからの相対変位量をモデル推定に用いる方法を選択できる。このオプションは変位観測値にトレンド等なんらかのバイアスが乗っていた場合に、これを除去してモデル推定するために利用できる。GPS や変位、地磁気データのモデル推定では「基準点の推定量を0.0」にするかどうか選択できる。GPS データや地磁気データでは通常このオプションを選択して解析するが、基準点が遠方で推定変動量が小さいが、この地点における観測誤差が大きいことが想定されるような場合にこのオプションを選択しないで解析した方が良い場合がある。

1.5.3.3 FEM-DB 利用機能

FEM-DB から、圧力源の位置などが指定した値に近い FE モデルを抽出する機能、抽出されたあるいは指定した FM モデルの計算結果を分布図として表示する機能、FE 計算値から観測点や格子点における変動量を推定し、それを表示する機能、FEM-DB を利用して地殻変動観測データをモデリングする機能が含まれている。この機能については1.5.4節に詳しく述べる。

1.5.3.4 震源データ表示機能

震源データを深さ、マグニチュードに応じて形状、色、寸法で区分した記号で平面図、断面図に表示する機能であり、モデル推定結果と重ね合わせて表示できる。

1.5.3.5 解析パラメータ等の保存機能

データの表示、モデル推定に使用した各種パラメータ、最終推定結果をケースデータと呼ぶファイルに保存する。このファイルを読み込むことで、後日同じ条件で解析を行うことができる。また、モデル推定過程におけるすべての誤差、図示される形式に従った各種観測値、推定値やモデルパラメータをテキストファイルに出力でき

る。表示画面を BMP ファイルあるいはメタファイルとして Windows のクリップボードにコピーし、他のソフトウェアで利用できる。

1.5.4 有限要素法シミュレーション結果データベース（FEM-DB）を利用した地殻変動データの解析

火山における地殻変動をモデリングするため、球状圧力源や回転楕円体圧力源、ダイクなどによる地表面の変形を説明する解析解が用いられている。近年、有限要素法（FEM）や境界要素法を用いた解析も行われるようになってきた。我々は三次元 FEM を用いて火山の地殻変動を精度良くシミュレーションする際に必要となる計算領域などの基礎的な問題を検討した上で、実地形や構造を組み込んだ三次元 FEM を用いて、GPS データなどから火山活動を評価する手法を開発し、この手法を浅間山や伊豆大島などの地殻変動観測データに適用しマグマ供給系を推定した（2.2節，2.3節）。このような FEM を用いたモデル推定には有限要素解析（以下 FE 解析と記す）を行うためのソフトウェアと計算機を必要とし、最終的な結果を得るまでに長い時間と FE 解析に関する専門的な知識、経験が必要とする。このため、個別に FE 解析を行わなくとも同等のモデル推定を容易に行えるよう、FEM を利用して事前に作成した有限要素法シミュレーション結果データベース（FEM-DB）と観測データとを比較することでモデル推定を行う手法を開発し、この機能を MaGCAP-V に組み込んだ。

1.5.4.1 有限要素法シミュレーション結果データベース（FEM-DB）

FEM-DB は種々の形状（球、円柱、回転楕円体）の圧力源もしくはダイクが火山下の種々の位置にある場合に生じる地表面変位を三次元 FEM によって計算した結果（計算結果ファイル）と、個々の計算条件や計算結果ファイル名などを記述したデータベース属性ファイル（以下、属性ファイルと記す）、計算点（節点）の座標を記述した地表面格子座標ファイル（以下、座標ファイルと記す）から構成されているファイル群である。Fig. 1.5.1

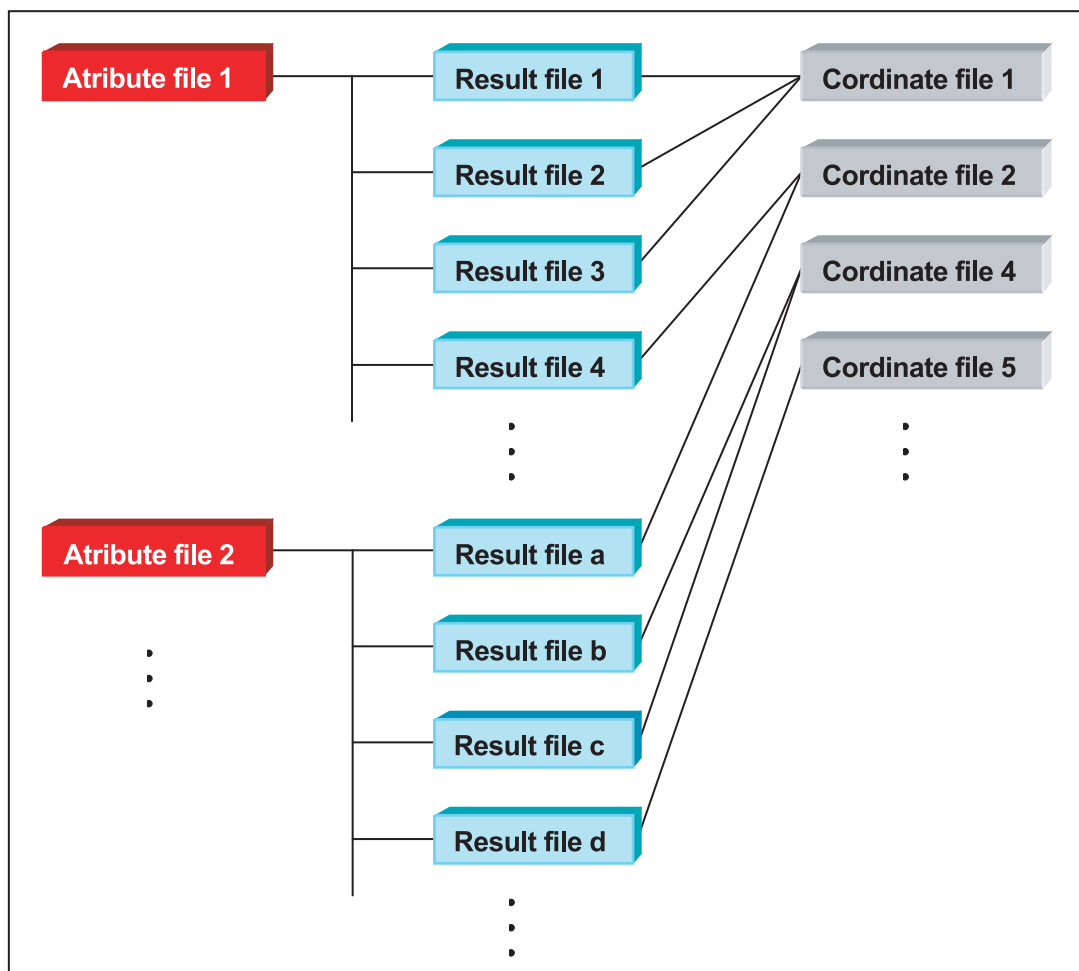


Fig. 1.5.1 Structure of FEM-DB.

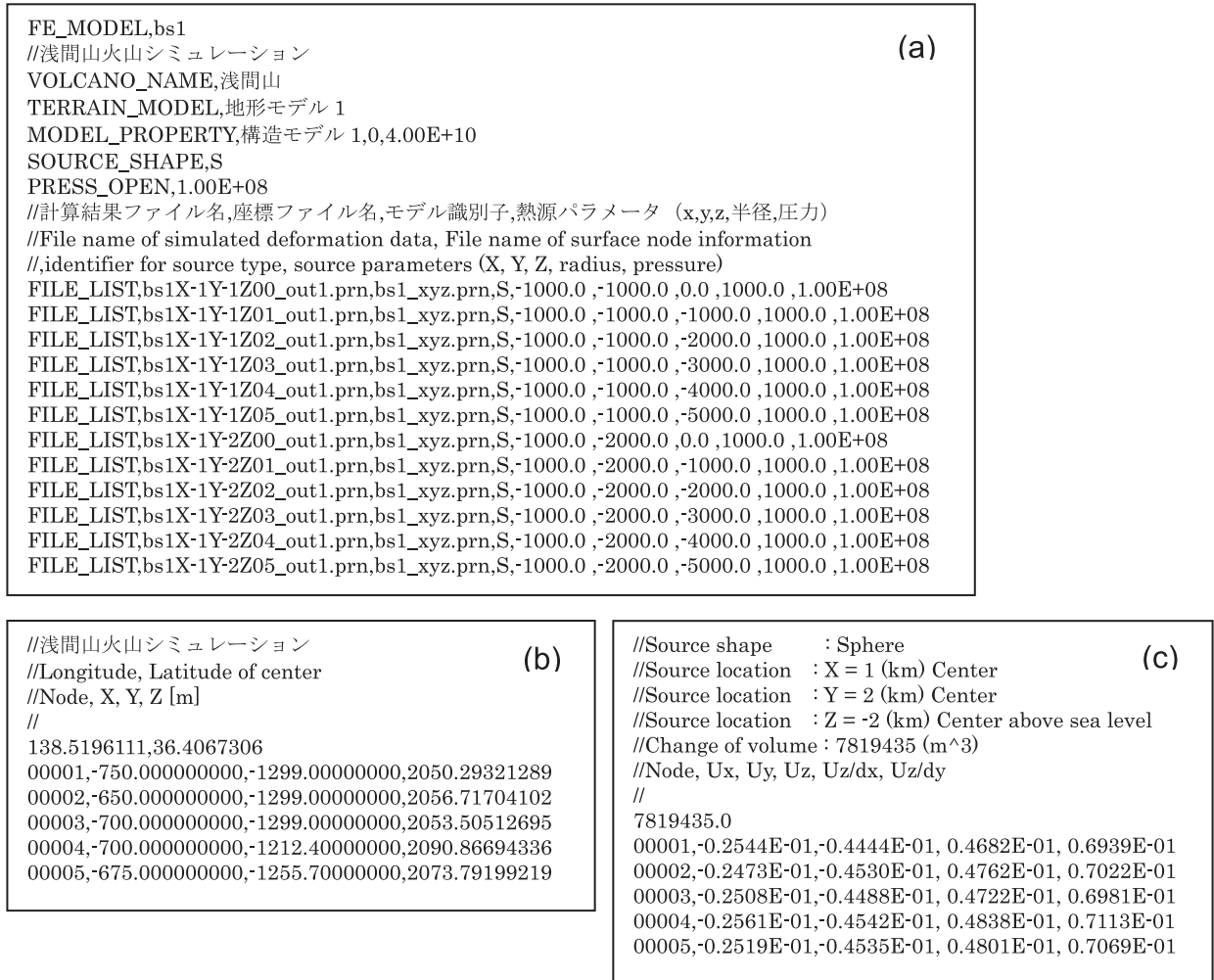


Fig. 1.5.2 Examples of (a) an attribute file, (b) a surface node coordinates file, and (c) a simulated deformation data file in FEM-DB.

Table 1.5.2 Source parameters that are defined in the attribute file in FEM-DB.

Source type (identifier)	Source parameters
Sphere (S)	Location, Depth, Radius, Pressure
Cylinder (C)	Location, Depth, Height, Radius, Strike angle, Dip angle, Pressure
Spheroid (E)	Location, Depth, Polar radius, Equatorial radius, Strike angle, Dip angle, Pressure
Dike (D)	Location, Depth, Length, Width, Strike angle, Dip angle, Open dislocation

にデータベースの構成を、Fig. 1. 5. 2(a)～(c)に各ファイルの例を示す。属性ファイルの先頭部分には有限要素モデル名（座標ファイル，結果ファイルを格納するフォルダ名になる），火山名（1.5.2項で記した「火山ファイル」に記述された火山名），FE 解析で使した地形モデル，構造モデル，変動源の形状を現すパラメータ（モデル識別子，Table 1. 5. 2），体積変化量あるいは開口量が記述され，この後に，この条件下で計算された結果を格納した結果ファイル名，座標ファイル名，モデル識別子，ソースパラメータからなるデータ行が続く。ソースパラメータは変動源の形状に応じたパラメータであり，球の場合は中心の座標，半径，圧力，円柱の場合は中心の座標，高さ，半径，走行，傾斜，圧力，回転楕円体の場合は中心の座標，極半径，回転半径，走向，傾斜，圧力，開口ダイクの場合は中心の座標，長さ，幅，走向，傾斜，開口量である。微小な球状圧力源による地殻変動を与える茂木モデルの場合，地殻変動量は変動源の半径 a と圧力変動量 ΔP ，山体の剛性率 μ からなるパラメータ $3a^3\Delta P/4\mu$ に比例し，ダイクについても地殻変動量は開口量に比例する。このため圧力源の大きさあるいはダイクの開口量については一つの値についてのみ計算した。

有限要素モデルの作成，変動量の計算，計算結果のテキストファイルへの出力は ANSYS Inc. の汎用有限要素法解析ソフトウェア ANSYS を使用した。有限要素モデルの作成からデータベースの作成に至るまで半自動的にを行うため，変動源の位置に応じて有限要素モデルを作成し，ANSYS の計算結果から FEM-DB に必要とするデータを出力させるためのバッチファイルを生成するプログラムを作成した。地形モデルは国土地理院50m メッシュ（標高）を利用し，1.1.2項の方法で作成した。Fig. 1.5.3に浅間山における円柱状圧力源による地殻変動量を求めるために使用した有限要素モデルを示す。一辺120km，高さ120km の六角柱の上部に国土地理院数値標高データから作成した浅間山の地形を付け加え，山体表面，中間部，外部のメッシュサイズは各々100m, 500m, 8 km，六角柱底部のメッシュサイズは30km とし，計算時間を節約するため円柱圧力源の周りに仮想的な球を置いた。このモデルの要素数は約15万である。

MaGCAP-V では実地形を用いた FEM-DB 以外に1.2.1項に述べた円錐山体付加モデルについて作成された FEM-DB も利用できる。以下ではこのような円錐山体を仮想火山と呼ぶ。

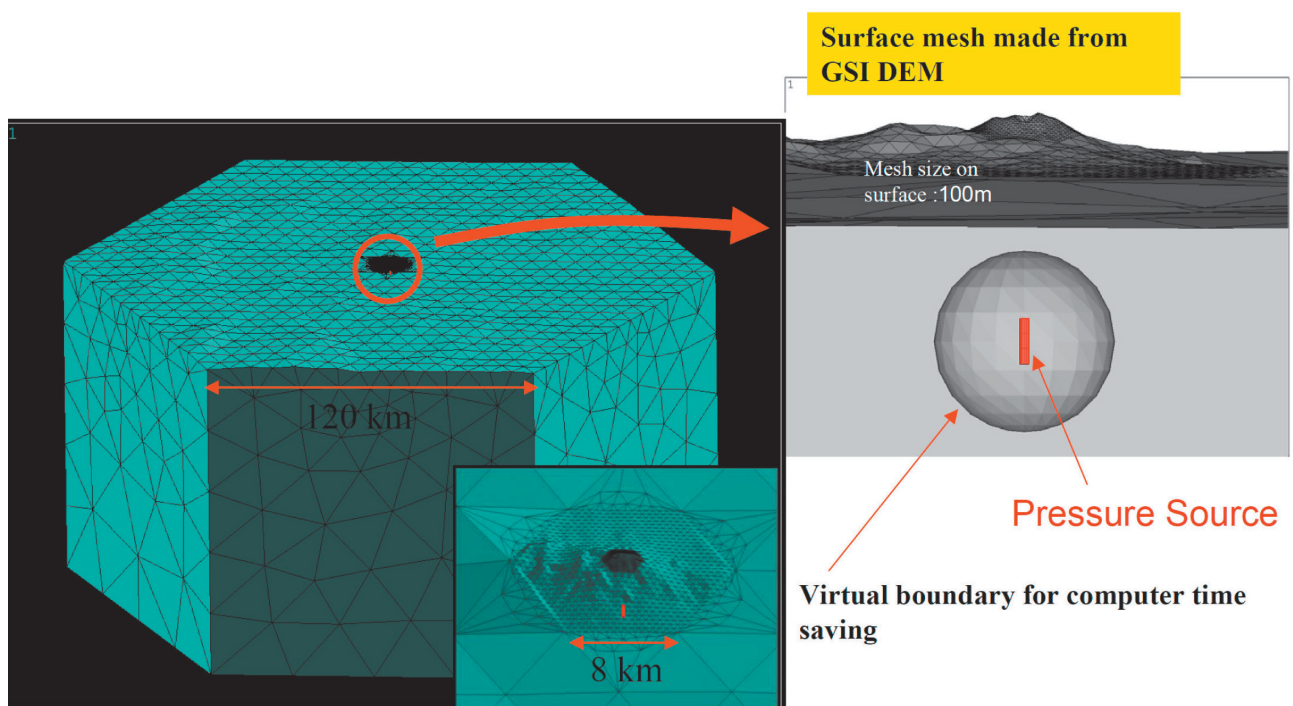


Fig. 1.5.3 Example of a 3D FE model of Asama volcano. The red bar indicates a cylindrical pressure source. The region of the model is a hexagonal column with a side of 120 km and a height of 120 km. The topography is generated from the 50 m mesh DEM of the Geographical Survey Institute of Japan (GSI). The mesh size on the center part of the volcano is 100 m, and that on the top surface is 500 m. The total number of elements is about 150,000. The bottom and lateral boundary conditions are fixed.

1.5.4.2 FEM-DB に基づく観測点における変動量

FEM-DB から必要とする形状，圧力源位置のモデルを抽出し，FE 解析によって求められた地表面節点における変動量や，これから推定した観測点や格子点における変動量をベクトル表示やカラーマップで表示しテキストファイルに出力できる。このような図は1.5.3.1項で述べたのと同様に，観測値や他のモデルと重ね合わせて表示することができる。Fig. 1.5.4には FEM で求められた浅間山の山頂直下海水面にある球状圧力源によって生じる山頂付近の水平変動量（青矢印）と，同じ圧力源に対し標高補正茂木モデルで求めた水平変動量（赤矢印）を示す。左側，下側に示した断面図はそれぞれ平面図の赤細線で示した圧力源を横切る東西，南北方向の線上の変位であり，各断面に投影した変位を示している。圧力源の北東の領域で水平変位ベクトルの方向が45度ほど違っていたり，山頂部の上下変位が標高補正茂木モデルで小さくなっていたりすることなど，山頂付近の解析には標高補正茂木モデルでは不十分であることが分かる。なお，FEM で求められた節点における変動量から観測点

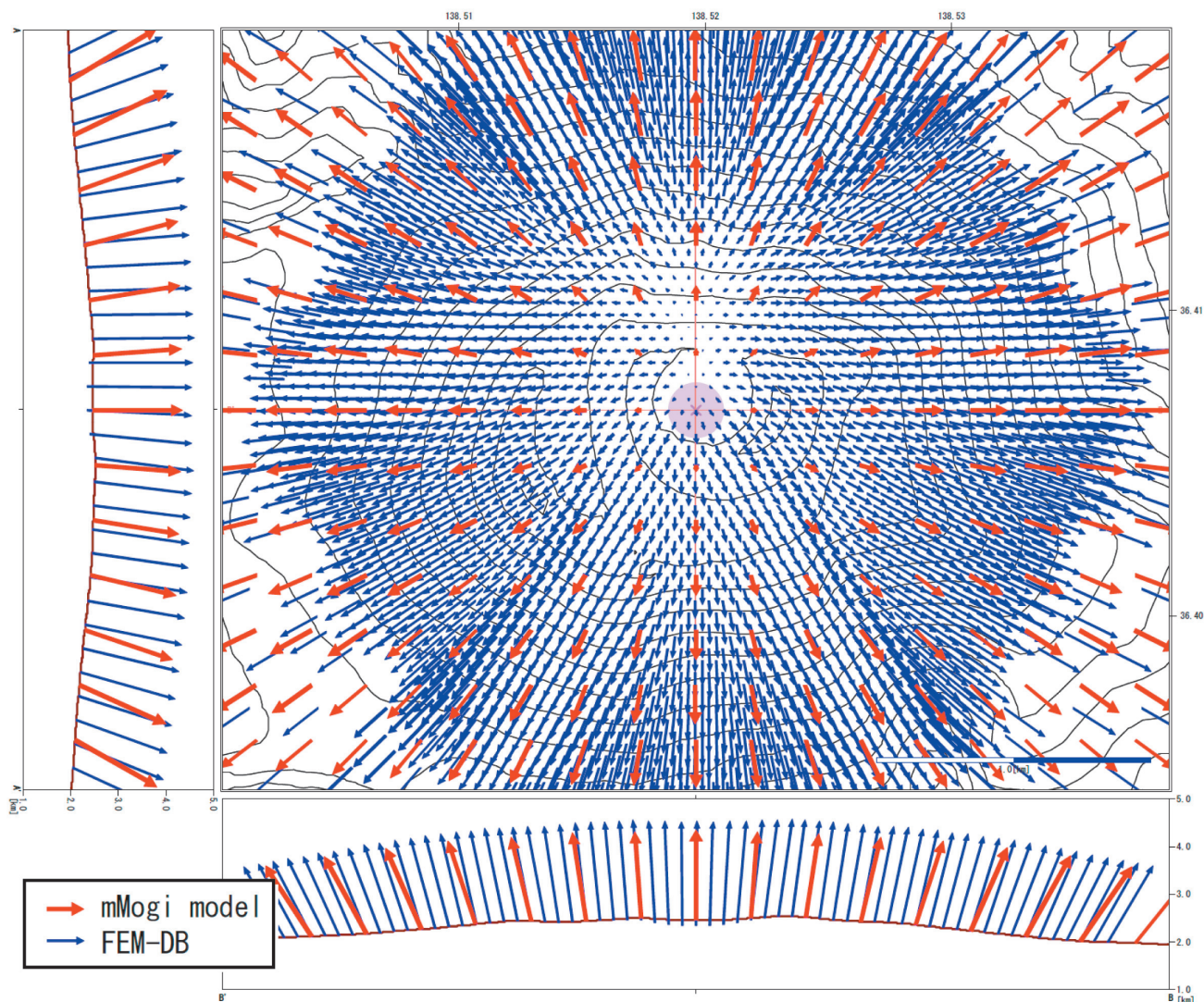


Fig. 1.5.4 Example of the surface horizontal displacement field in a FEM-DB on Asama volcano. The blue arrows denote the displacements plotted at each node on the surface; the red arrows denote the displacements calculated with the mMogi model.

や格子点における変動量を推定する際、標高は考慮していない。このため、標高が急変するような場所では良い推定値は得られない。

対象火山を円錐山体で近似させることにより、あらかじめ実地形を組み込んだFEM-DBを準備しなくとも、有限要素解析の成果を利用することができる仕組みを用意した。すなわち、仮想火山の地表面格子座標を水平方向、上下方向に移動、拡大縮小して対象火山の地表面に近づける。その際、圧力源の深さ、圧力源の半径、変動量も同じ倍率で拡大縮小した値を用いる。このようにして求めた仮想火山の変位分布は拡大縮小したモデルについてFE解析で求めたものと同じ結果を与える。

1.5.4.3 FEM-DB を利用したモデル推定

FEM-DBを利用してモデル推定を行う手法として、①FEM-DBから最適なモデルを選択する方法、②①で得られた最適なモデルとその周辺の変動源の計算結果を用いて、より確からしいモデルを内挿推定する方法をMaGCAP-Vに組み込んだ。前述したようにFEM-DBでは変動源の大きさ（圧力あるいは開口量）を一定としているが、地表面変形量は変動源の大きさに比例することから、観測値とFEM計算値との比から変動源の大きさを推定している。

(1) 最適モデル選択

FEM-DB から最適なモデルを抽出するにはまず、各変動源モデルに対して、FEM で求められた地表面節点における変動量から観測点における変動量 (U_{FEM}) を内挿推定し、この値と観測値 (U_{obs}) との比から変動源の大きさ (FEM 計算で与えた変動源の大きさに対する倍率 F) を推定する。次に誤差二乗和 $\Sigma (F \cdot U_{FEM} - U_{obs})^2$ を計算し、これが最小となるモデルを最適モデルとして選択する。ここで、解析解への当てはめと同様、水平ベクトルが最も良く合うモデルを推定するか、あるいは水平変動の大きさや上下変動の大きさ、三次元ベクトルが最も良く合うモデルを推定するか指定することが可能である。変動源は2個あっても良い。

(2) 内挿推定

(1) で選択された最適モデルとその周辺に位置する変動源モデルから構成される格子を小さな格子 (サブグリッド) に分割し (Fig. 1.5.5), このサブグリッドに変動源がある場合に観測点で生じる変位を最適モデルとその周辺の格子に位置する変動源によって生じる計算値から推定する。この推定値を用いて、(1) と同様の方法でサブグリッドに位置する変動源の中から最適なモデルを選択する。

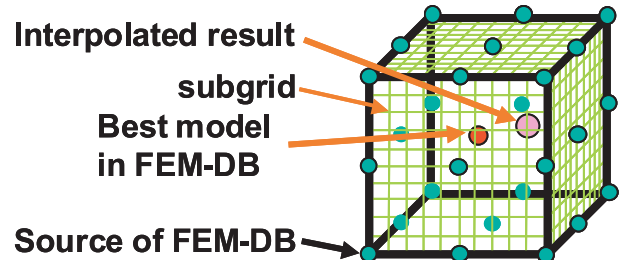


Fig. 1.5.5 Conceptual diagram of FEM-DB interpolation modeling.

1.5.4.4 FEM-DB を利用したモデル推定手法の検証

前項の推定手法の妥当性を検証するため、浅間山に球状圧力源がある場合について GPS 観測点で生じる地殻変動量を三次元 FEM で求め、これを観測量として本手法を適用し、求められたモデルと与えたモデルとを比較した。FEM-DB は浅間山の実地形を組み込んだ有限要素モデルを用いて山頂を中心として東西南北各 5 km 四方、海拔 0 ~ 5 km、各 1 km 毎の格子上に球状圧力源がある場合について求めた地表面の変形量を用い、FEM-DB 内挿推定におけるサブグリッド間隔は 100 m とした。Table 1.5.3 に圧力源が山頂の北東、北西、南西にある 3 つのケースについての結果を示す。表の given model の欄が与えた圧力源の位置 (有限要素モデルの原点 (浅間山火口中心部の海面) からの東西 X、南北 Y 方向の距離、および標高 Z で示す) である。ここでは、三次元ベクトル、水平変位および上下変位について茂木モデルや標高補正茂木モデルを当てはめて推定した結果も示した。圧力源の大きさは与えたモデルに対する比で示している。NRMSE は使用した各成分の最大値で規格化した二乗平均誤差を百分率で表している。茂木モデルの括弧内の Z が推定された深さで、その上の値は推定された圧力源直上の地表面標高を加えた値すなわち求められた圧力源深さが地表面からの値と見なした場合の圧力源標高である。Fig. 1.5.6 は一番目の例について、三次元ベクトルに対して色々なモデルで求めた圧力源の位置を MaGCAP-V の機能を用いて図示したものである。赤矢印は観測量として与えた変位ベクトルである。FEM-DB 内挿推定結果は与えたモデルをほぼ再現しており、この手法が妥当なことを示している。茂木モデルによって求められる圧力源の深さは概ね、地表面からの距離と見なせば、真の標高に近いことが分かる。茂木モデルと標高補正茂木モデルを比較すると、二乗平均誤差は茂木モデルの方が小さくなるものの、圧力源の位置や大きさは標高補正茂木モデルの方が与えたモデルに近い。このことから標高補正茂木モデルが圧力源モデルの推定に有効であることが分かる。

1.5.5 MaGCAP-V の使用例

2.1.2 項「霧島山における GPS 観測」、2.2 節「浅間山」、2.5 節「樽前山」では解析に MaGCAP-V が利用されている。ここでは、これらの節で使用していない特徴的な出力例を紹介する。

(1) GPS データの各種表現

Fig. 1.5.7 は樽前山の GPS 観測データ (本報告書 2.5 節参照) を各種表現で表示したものである。濃い灰色矢印が観測値、薄い灰色矢印は標高補正茂木モデルに当てはめた場合の計算値であり、青い四角印で示した基準点からの相対変位である。圧力源は樽前山溶岩ドーム直下標高 730 m に求められ、平面図、断面図に × 印で示され

Table 1.5.3 Estimated source parameters by using various methods for the test datasets which simulated by FEM on Asama volcano.

EXAMPLE 1

Method	X (m)	Y (m)	Z (m)	ratio of source size	NRMSE(%)
given model	1200	800	-2600	1.000	
mMogi model to 3D vector data	1474	1002	-2540	1.100	4.0
mMogi model to horizontal displacement	1754	1272	-3090	1.450	4.2
mMogi model to vertical displacement	1043	633	-2440	1.020	0.9
Mogi model to 3D vector data	1656	1124	-2734 (-4478)	1.060	1.8
Mogi model to horizontal displacement	1606	1104	-2790 (-4550)	1.131	2.1
Mogi model to vertical displacement	1726	1074	-2970 (-4710)	1.140	1.0
FEM-DB search	1000	1000	-3000	1.163	2.2
FEM-DB interpolation	1200	800	-2700	1.030	0.2

EXAMPLE 2

Method	X (m)	Y (m)	Z (m)	ratio of source size	NRMSE(%)
given model	-800	400	-3200	1.000	
mMogi model to 3D vector data	-877	607	-3070	1.060	10.0
mMogi model to horizontal displacement	-1117	977	-6460	3.150	21.8
mMogi model to vertical displacement	-766	308	-2800	0.960	2.4
Mogi model to 3D vector data	-926	751	-3700 (-5839)	1.250	10.1
Mogi model to horizontal displacement	-1036	861	-8306 (-10420)	5.790	20.3
Mogi model to vertical displacement	-726	572	-3742 (-5960)	1.250	3.1
FEM-DB search	-1000	1000	-4000	1.303	14.6
FEM-DB interpolation	-700	400	-3000	0.948	7.8

EXAMPLE 3

Method	X (m)	Y (m)	Z (m)	ratio of source size	NRMSE(%)
given model	-1900	-1800	-4700	1.000	
mMogi model to 3D vector data	-2168	-2402	-4480	1.109	1.5
mMogi model to horizontal displacement	-2378	-2552	-3710	0.830	1.6
mMogi model to vertical displacement	-1777	-1622	-4010	0.900	0.2
Mogi model to 3D vector data	-2262	-2545	-5247 (-7093)	1.229	0.9
Mogi model to horizontal displacement	-2216	-2439	-4957 (-6840)	1.160	0.9
Mogi model to vertical displacement	-2155	-2529	-5565 (-7420)	1.290	0.5
FEM-DB search	-2000	-2000	-5000	1.094	0.6
FEM-DB interpolation	-1900	-1800	-4700	0.995	0.2

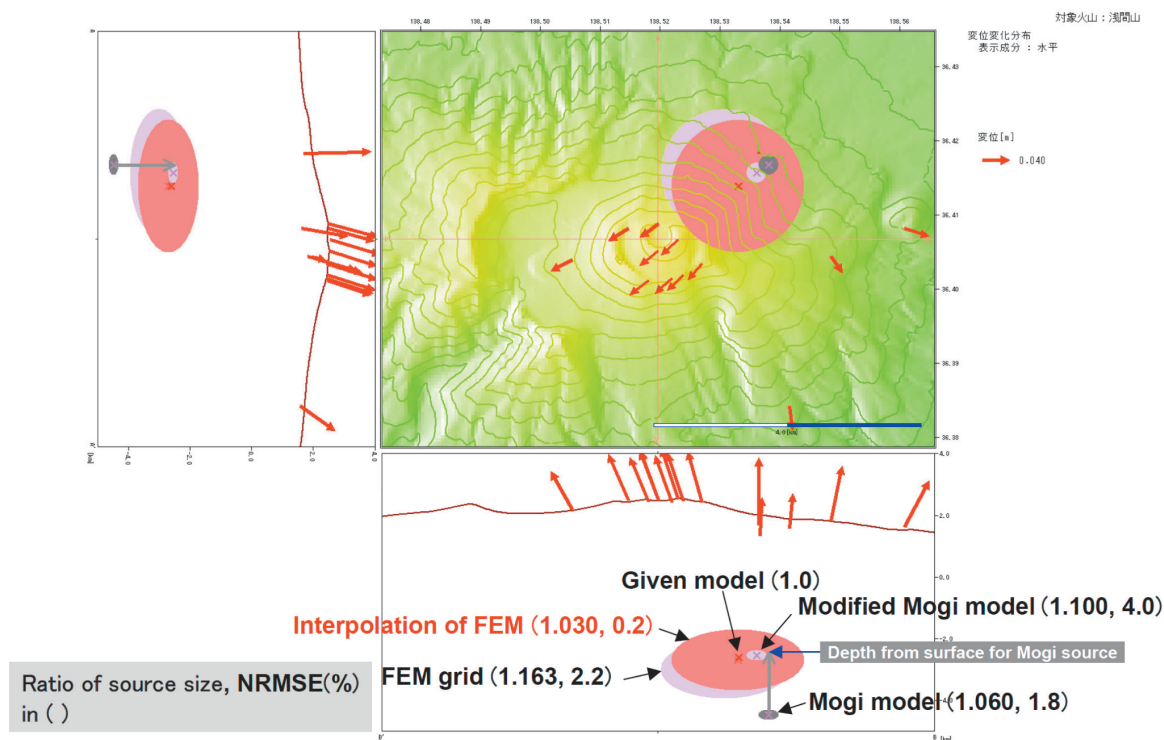


Fig. 1.5.6 Given source and sources estimated with various methods (Mogi model, mMogi model, FEM-DB search, FEM-DB interpolation) for the simulated data EXAMPLE 1 presented in Table 1.5.3. The power of the pressure source and the normalized root mean square error against the maximum displacement of the corresponding component are indicated in parentheses.

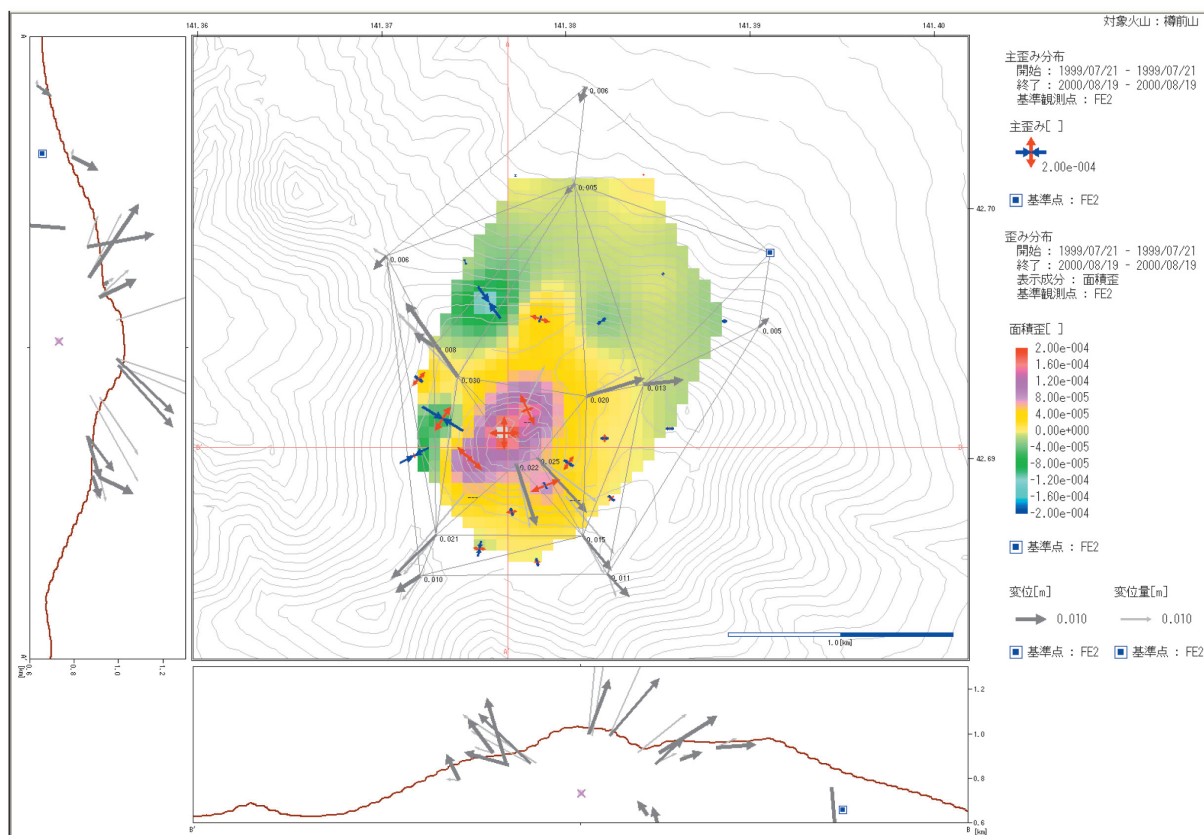


Fig. 1.5.7 Example of the expression of GPS observation data on Tarumae volcano from July 1999 to August 2000. The thick arrows indicate the observed displacements, and the thin arrows indicate the displacements estimated by the mMogi model. The source position is designated as a cross mark in the plan and cross section. The pairs of red and blue arrows indicate the principal strain. The colored map reveals the distribution of the areal strain.

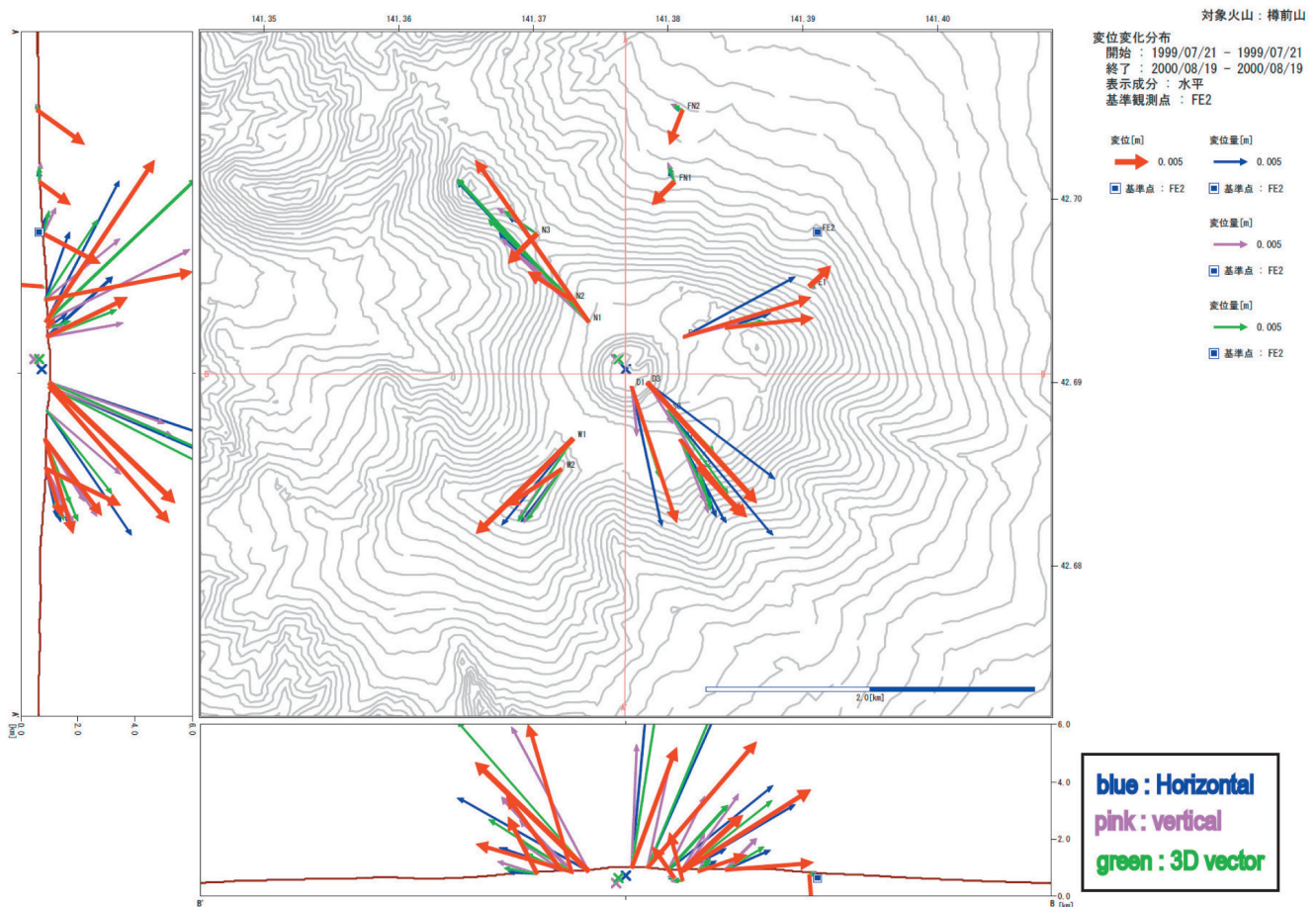


Fig. 1.5.8 Example of displacement vectors estimated by the mMogi model from horizontal displacement (blue), vertical displacements (pink), and 3D vector data (green). The red arrows denote observed displacements of the GPS observation point on Tarumae volcano from July 1999 to August 2000.

ている。三角網の重心に赤矢印と青矢印で観測値から求めた主歪を、カラーマップで面積歪を示している。平面図の左側、下側に示した断面図は平面図の赤色の縦線、横線に沿った断面で、変位ベクトルはこれらの面に投影したものである。この断面図の縦横比は1になっているため、変位ベクトルを地下に延長した交点付近に圧力源があることが分かる。

(2) GPS の色々な成分から推定した変動源

Fig. 1. 5. 8は樽前山のGPS観測データ（本報告書2.5節参照）について、モデル推定に用いる成分によって推定結果がどの程度異なるかを示した図である。青、桃、緑色の×印と矢印はそれぞれ水平変位ベクトル、上下変位、三次元ベクトルに対して標高補正茂木モデルで推定した圧力源位置とそれぞれについて計算された相対変位ベクトルである。圧力源は各々標高730m、470m、644mに求められる。1. 4. 3. 3項で上下変位データを用いて推定した圧力源は水平変位データを用いて推定した圧力源より浅くなると述べた。しかしながら、ここで示したデータでは上下変位を用いて推定した圧力源の方が深くなった。これは樽前山では溶岩ドーム上の観測点の変動が、他とは異なっていることに起因していると思われる。

(3) 複数の圧力源、ダイクによる地殻変動分布

Fig. 1. 5. 9は2. 3節で示す伊豆大島のマグマ供給系（カルデラ北東部海面下7 kmの球状増圧源、伊豆大島中央部の北北西～南南東方向に伸びる南側が浅くなる開口ダイク、三原山山頂直下浅部の球状収縮源）によって生じるGPS観測点における相対変位（赤矢印。基準点は中央部の青四角の観測点）と傾斜分布（青矢印。矢印はダウン方向）を示している。上端が傾いたダイクを岡田モデルでは取り扱えない、このためここでは上端が水平な5つのダイクに分割して表現している。平面図、断面図には変動源の形状が表示されている。膨張源は桃色、収縮源は水色で示されているが、これらは任意の色に変更可能である。MaGCAP-Vでは個々の変動源によって生

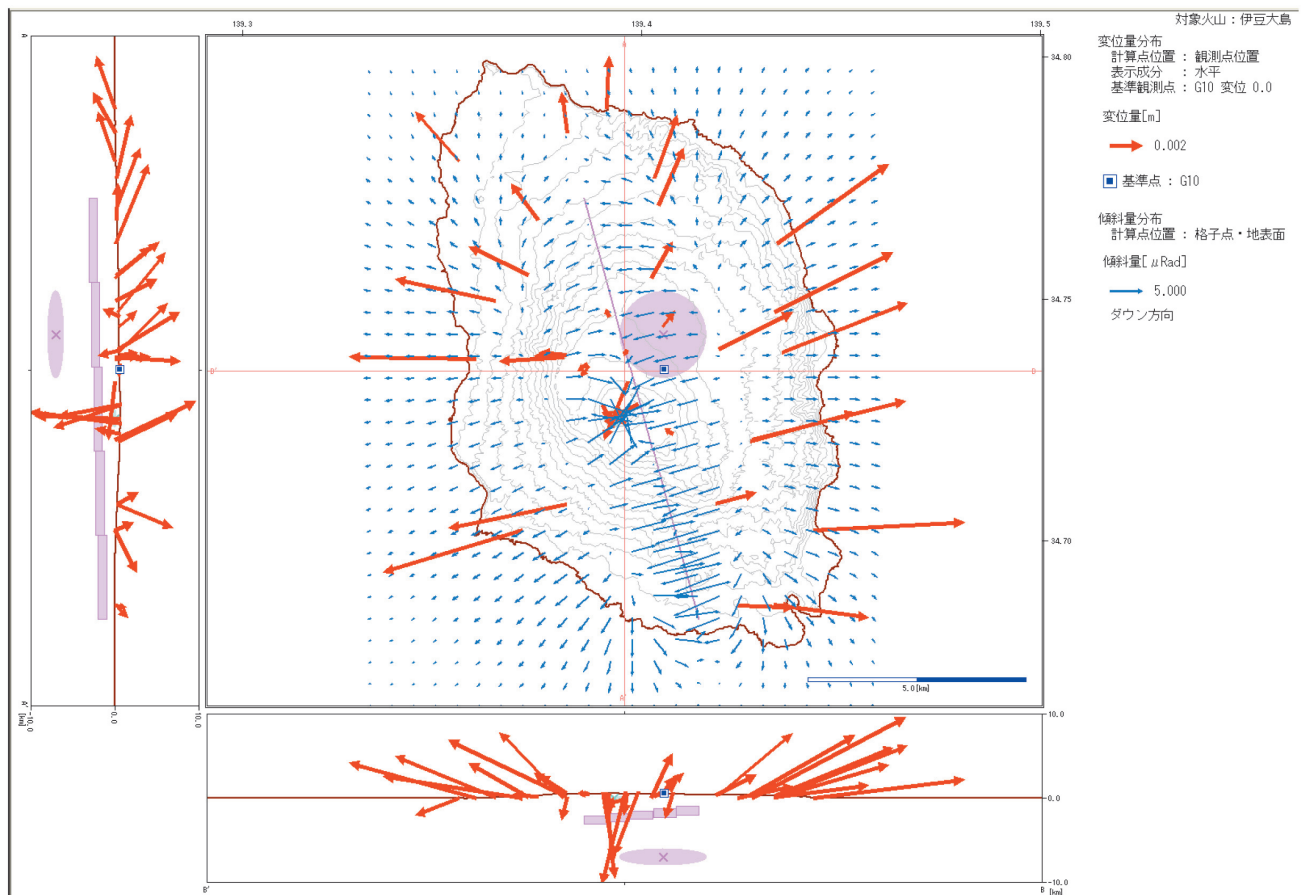


Fig. 1.5.9 Displacement vectors (red arrow) at the GPS observation point on Izu-Oshima volcano and tilt vectors (blue arrow) caused by an inflation Mogi source (pink circle), a deflation Mogi source (blue cross mark), and an open dike (pink box). A dike with a tilt top is approximated as five pieces of dike.

じる変動量分布を簡単に分離表示することが可能である。

(4) 地震断層に伴う変位と震源分布

Fig. 1. 5. 10は2003年9月26日に発生した気象庁マグニチュード8.0の十勝沖地震の断層運動によって生じる水平変位（青矢印）と上下変位（カラーマップ）の分布，2003年8月の震源分布を示す。断面図は平面図の斜めの十字線に沿う方向のものである。震源は深さとマグニチュードに応じてマークの色や形状を変えて表現できる。ここで，断層運動による地殻変動量の計算には国土地理院（2004）によって推定された断層パラメーター（東経144.64度、北緯42.05度、深さ15.7km、長さ92.0km、幅90.0km、走向角241°、傾斜角23°、すべり量4.84m、すべり角度124°）を使用している。MaGCAP-Vでは地磁気モデルにおいて地殻変動と共通した直方体モデルを使用できるようにしていることもあり，基点の位置は上端の端点ではなく，断層の中心位置としている。

(5) ダイクとシルによって生じる地殻変動分布の比較

Fig. 1. 5. 11はダイクとシルによる上下変動量分布の相違を示したものである。開口量は両者とも1mである。細い矢印で示したシル状の増圧源によって生じる地殻変動は全面で隆起となるが，太い矢印で示したダイクでは直上で沈降（青矢印）となり，変動量はシルの方が大きくなることが分かる。この図では地表面格子での変位量を表示しているが，任意標高面での値を表示することも可能で，表示する格子間隔，東西，南北方向の表示数を指定できる。

(6) 火道の消磁に伴う地磁気変化

Fig. 1. 5. 12は浅間山の山頂火道（半径50m，長さ2000m）の消磁によって生じる地磁気変化の分布である。釜山火口の南縁で約10nTの減少であり，山頂火道の消磁による地磁気変化をプロトン磁力計による全磁力繰り返し観測で捉えるのは困難であることが分かる。

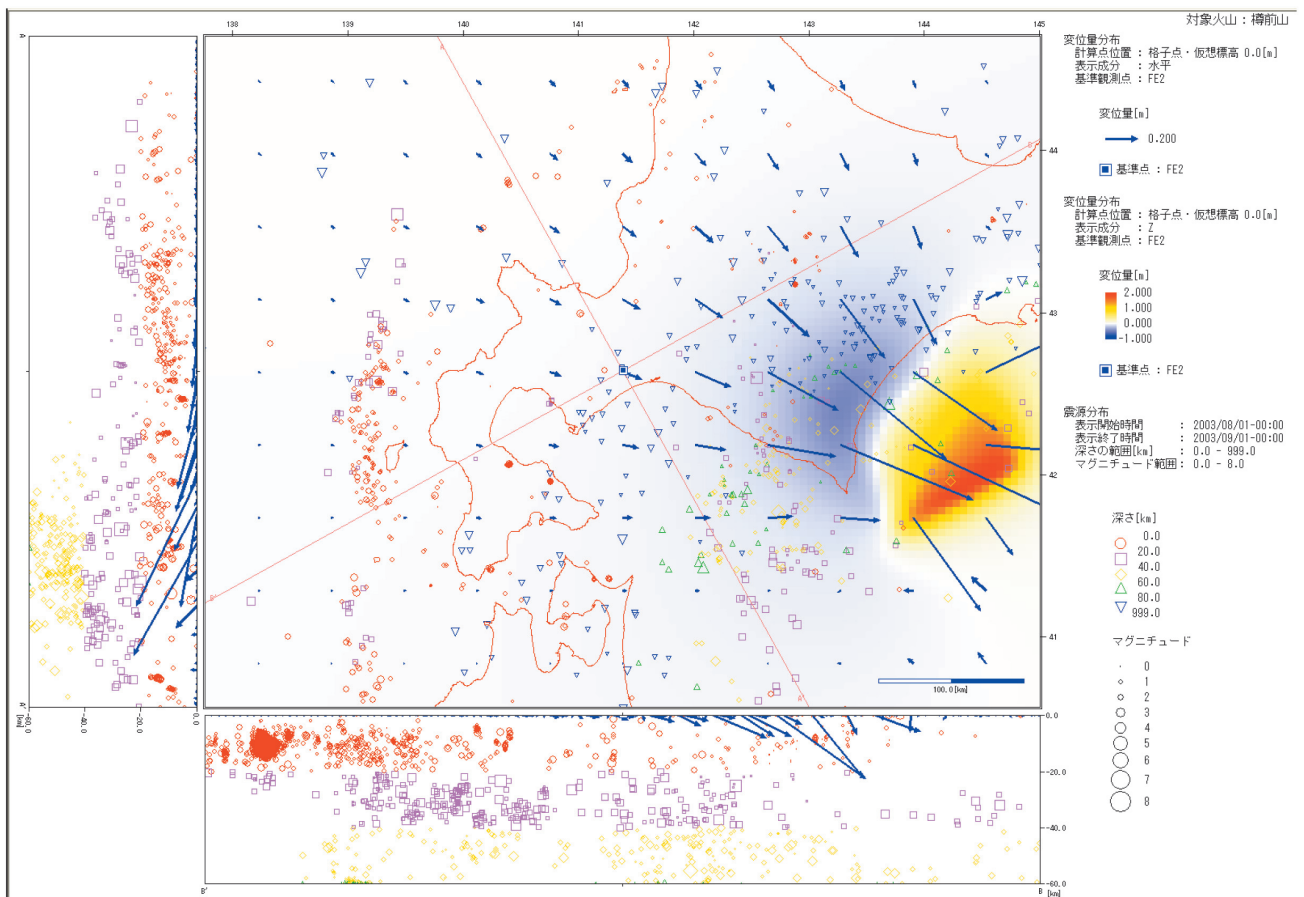


Fig. 1.5.10 Horizontal displacement (blue arrow) vector and the vertical displacements (color map) caused by the 2003 Tokachi-Oki Earthquake and hypocenter distribution in August 2003.

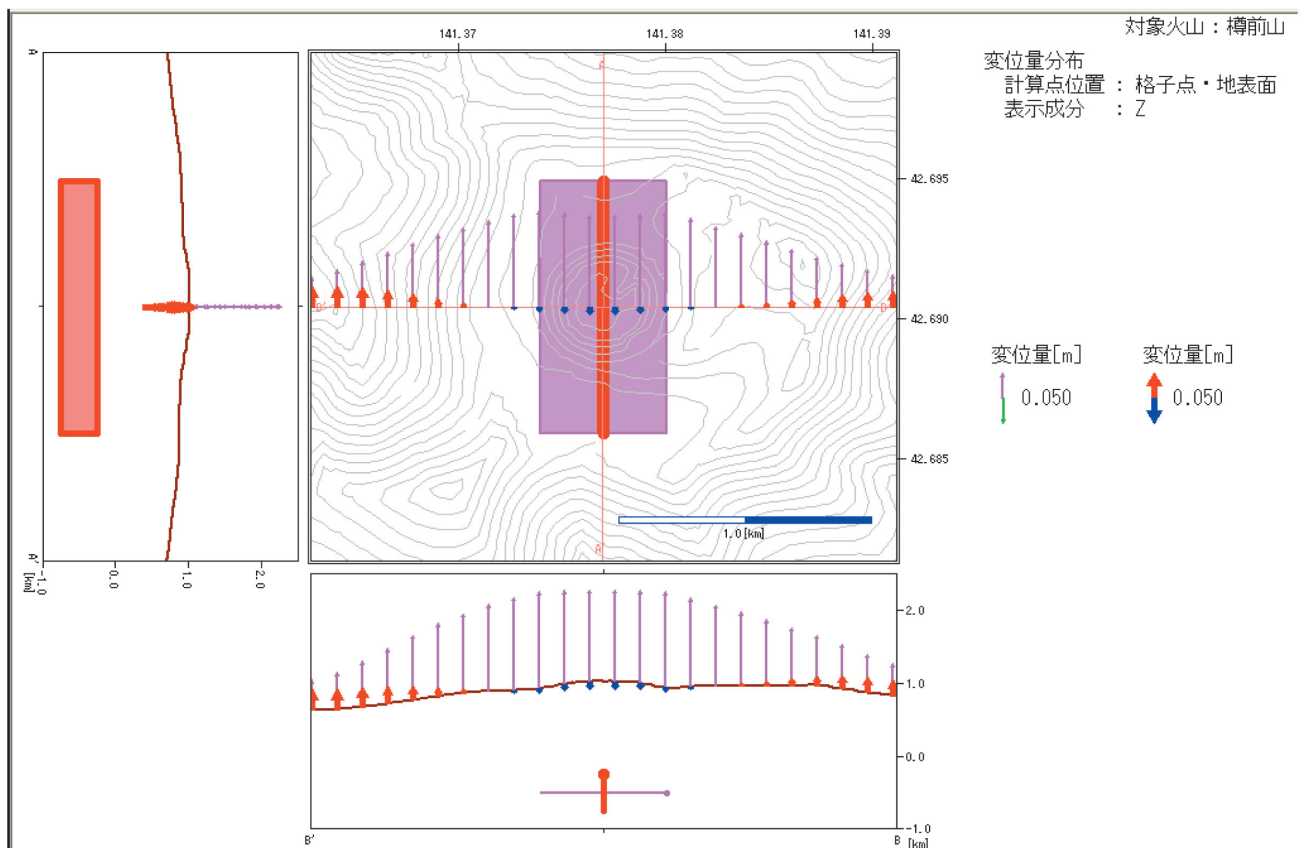


Fig. 1.5.11 Vertical displacements generated by dike (thick arrows) and sill (thin arrows).

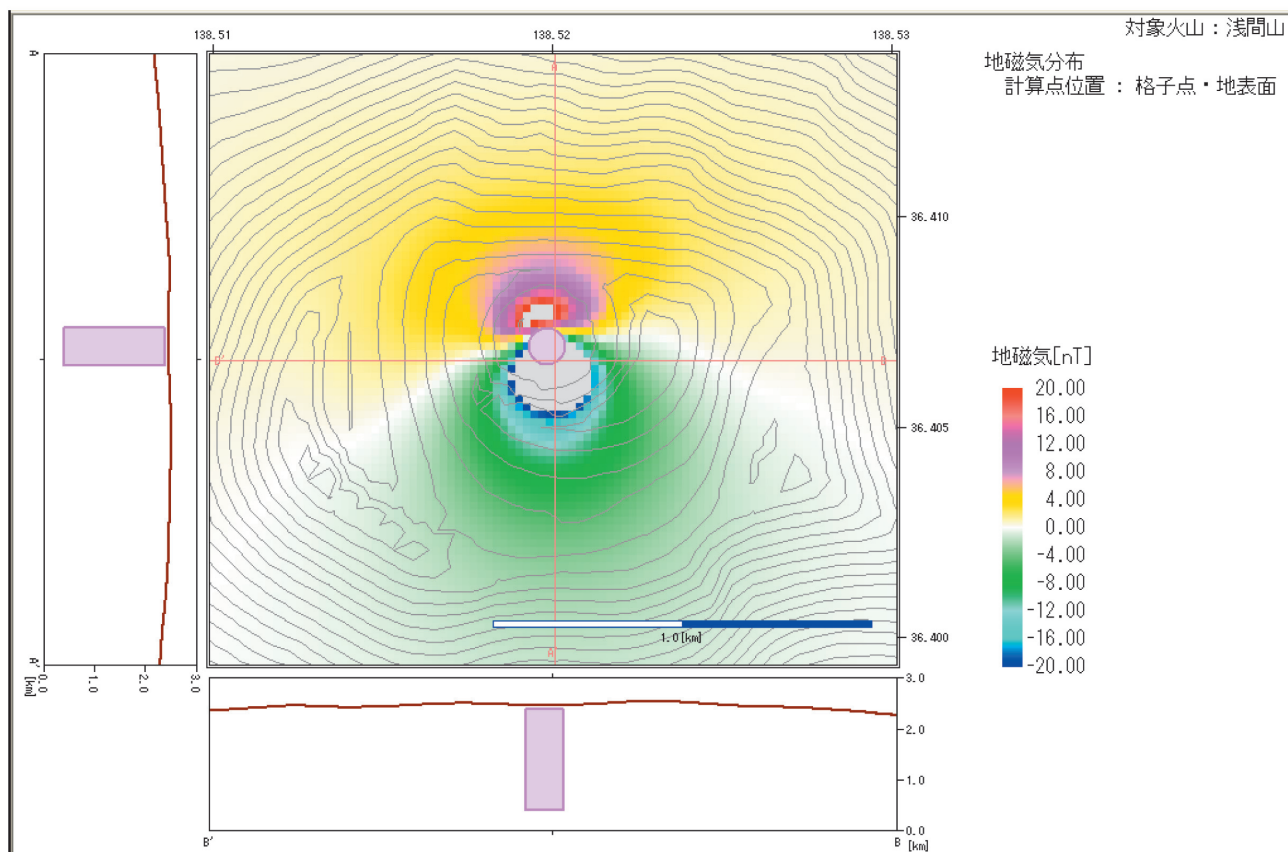


Fig. 1.5.12 Magnetic field generated by the demagnetized region of the vent (500 m radius, 2 km length) at Asama volcano.

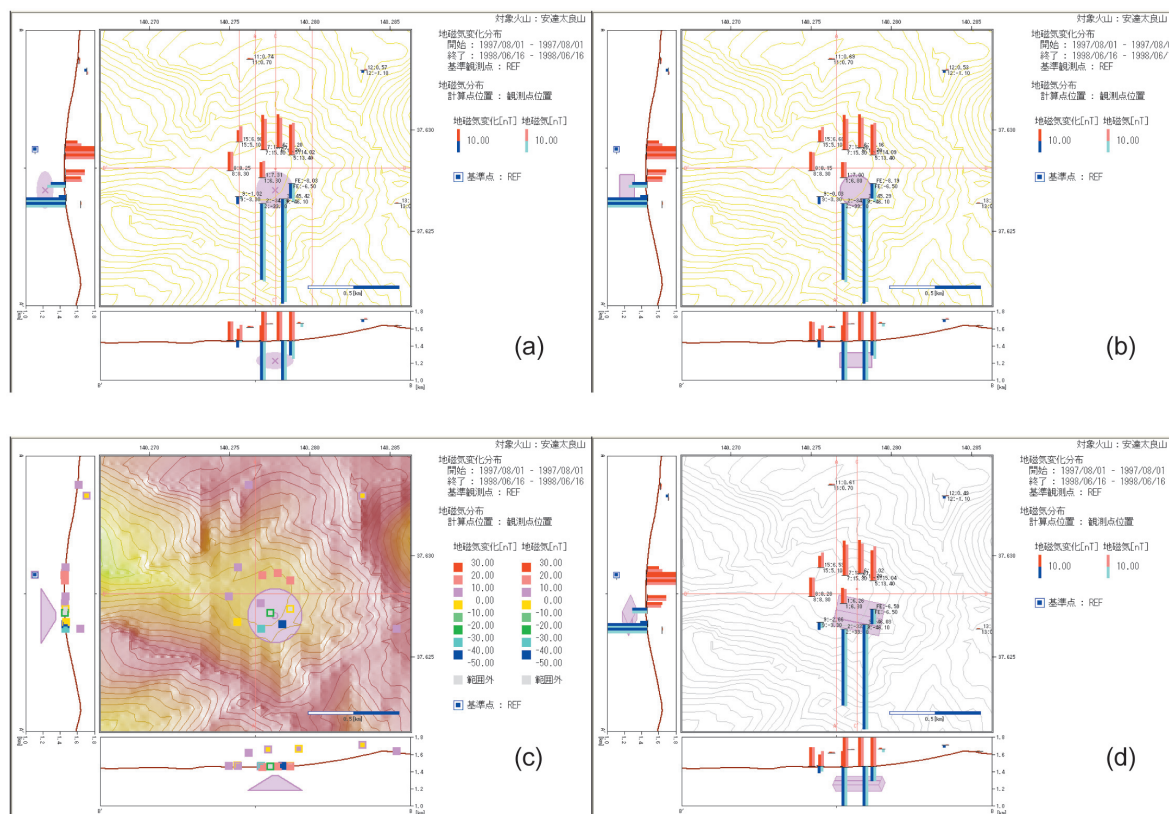


Fig. 1.5.13 Demagnetized region of different shapes ((a) sphere, (b) disk, (c) truncated cone, (d) rectangle) estimated for the magnetic change from August 1997 to June 1998 at Adatara volcano. The left and right side vertical bars at observation points in Figs. (a), (b), and (d) denote the observed and calculated magnetic changes. The outer and inner sides of the marks in Fig. (c) indicate the observed and calculated values.

(7) 各種形状の熱消磁域推定

Fig. 1.5.13 は安達太良山における 1997 年 8 月～1998 年 6 月の地磁気変化（山本・他、投稿中）を色々な形状の消磁域でモデル化した結果である。(c) 図では四角の内側に計算値を、外側に観測値を色分けして表示しており、他は各観測点に表示した左側の縦棒が観測値で右側が計算値である。この図では観測点略号と観測値、計算値の値も表示させている。(a)から(d)は各々球、円柱、円錐台、直方体でモデル化した結果である。Table 1.5.4 に推定された熱消磁域の位置、寸法、体積、誤差二乗和を示す。岩体の磁化係数は 1 A/m、偏角、伏角は各々 -7.17°, 50.74°としている。この例ではどのような形状を仮定しても消磁域の位置、体積ともほぼ同じ結果となっている。

Table 1.5.4 Demagnetized region of some shapes estimated for the magnetic change from August 1998 to June 1998 at Adataro volcano.

Model shape	Lon. (deg)	Lat. (deg)	El. (m)	Radius/ Top radius/ Width (m)	Bottom radius/ Length (m)	Height (m)	Volume (10 ⁶ m ³)	Error
Sphere	140.2778	37.6270	1230	105			4.82	25.80
Cylinder	140.2778	37.6270	1237	89		181	4.47	30.66
Cone	140.2778	37.6270	1280	5	157	193	5.11	25.93
Rectangular	140.2780	37.6270	1260	260	111	135	3.90	17.54

1.5.6 おわりに

本ソフトウェアはすでに気象庁各火山監視・情報センターにおける火山活動の評価、調査研究に活用されており、その成果は火山噴火予知連絡会などで公表されている。また、大学や研究機関においても利用されている。このソフトウェアは今後、テレメータされている観測データを自動的に取り込み、変動源の時間変化をモデル化する機能、異常判定を行える機能を持った、マグマ動態解析システムとも呼べるソフトウェアへと発展させることができる。さらに干渉 SAR や光波測距、重力データなども解析できる、火山における地殻活動解析のためのより汎用的なソフトウェアへと発展させることもできる (Fig. 1.5.15)。一方で、本ソフトウェアは機能が多く、利用者から取り付きにくいという声も聞く、このような点にも配慮した構成とすることも必要である。また、英語版を作成すれば海外の火山研究者の利用にも供することができると考えられる。

(福井敬一)

謝辞

本ソフトウェアのプロトタイプは科学技術振興調整費「雲仙火山：科学掘削による噴火機構とマグマ活動解明のための国際共同研究」(マグマ冷却過程の解明)によって作成された。中村浩二氏(前気象研究所、現気象庁地震予知情報課)には SEIS-GPS,PAT-ME を、内藤宏人氏(前気象研究所、現札幌管区气象台)、山本剛靖氏(気象研究所)には MICAP-G を参考にするため協力を頂いた。断層運動、ダイクによる地殻変動量の計算は Okada (1992)を、ピエゾ磁気の計算には Sasai (1991a, 1991b)を参考にした。本ソフトウェアのプログラミング作業はみずほ情報総研株式会社(旧(株)富士総合研究所)が実施した。特に同社赤坂望氏には多大の貢献を頂いた。ここに記して、以上の方々に感謝の意を表します。

参考文献

- Bhattacharyya, B. K., 1964 : Magnetic anomalies due to prism-shaped bodies with arbitrary polarization. *Geophysics*, **29**, 517-531.
- 石川有三, 1986 : SEIS-PC 改訂版の概要. 情報地質, **11**, 65-74.

スレター, 13(2), 57.

山本哲也・高木朗充・福井敬一・大和田毅：安達太良山の火山活動の総合的観測と推定される熱水活動. 気象研究所研究報告, 査読中.