

1.2 様々な火山の構造を仮定した力学的数値シミュレーション

1.2.1 円錐山体が地殻変動に及ぼす影響

1.2.1.1 はじめに

火山活動に伴う地殻変動を説明するモデルとして「茂木-山川モデル」(あるいは、単に茂木モデル)が広く用いられてきた。山川(1955)によって導出された表面が平坦な半無限媒質の内部に存在する微小な球状圧力源によって地表面で生じる地殻変動を表現する解析解を茂木(1957)が桜島の水準測量データの解釈に適用したことから、この解析解を茂木モデルと呼ぶようになった。近年、GPSなどの地殻変動観測機器の高度化や干渉SARの技術により火口周辺における地殻変動観測データを取得できるようになり、従来広く用いられてきた地表面が平坦と仮定して求めたこの解析解を観測に当てはめることが必ずしも妥当ではない場合もあると考えられる。

火山地域における地殻変動データに対する地形の影響を明らかにするため、円錐山体の地下に配置した球状圧力源によって生じる地表面の変位を有限要素解析(以下、FE解析)で求めた。本項では、その定性的な性質について述べる。さらに、1.4節ではこの計算結果を用いて茂木モデル、「標高補正茂木モデル」によって推定される圧力源パラメータの性質について議論する。

1.2.1.2 有限要素モデルの作成

円柱の地表面中心部に種々の高さ H 、底面半径 R を有する円錐山体(以下、山体と呼ぶ)を付加した有限要素モデル(以後、円錐山体付加モデルと記す)を作成した。坂井・他(2007, 本報告1.1.1項)でFE解析によって求められる地殻変動の計算精度とモデルサイズの関係が議論されている。この結果によると、圧力源深さ D と同程度の距離までの変位を1%の精度で求めるには D の15倍程度のモデルサイズで良く、この時 $3D$ の距離では上下変位は92%の精度で、水平変位は99%の精度で求められる。 $D=10$ kmで30 kmの距離までの結果を用いることを想定し、モデル領域は半径150 km、高さ150 kmの円柱とした。実際のFE解析には円柱を1/4に切断し、切断面に対称境界条件を置いた90度モデルを用いた。圧力源は半径(a)1 kmの球を深さ10 km(円柱表面からの深さ)に配置した。圧力源表面を約100 m、山頂から30 kmまでの地表面は水平方向が500 m(円錐底面半径が2 kmと小さいモデルでは山体部は100 m)となるように、この外部の地表面は5 km、円柱の底面と側面を約20 kmのサイズで、四面体十節点要素(1.1.1項参照)を用いて要素分割した。圧力源と円錐山体の周囲を半径30 km、高さ20 kmの小円柱で囲み、その外部の要素サイズを大きくすることで、要素数を10万程度に減らし計算を効率化した。底面、円柱外周の境界条件は完全固定とし、円柱部分および山体部分の剛性率 μ 、ポアソン比は各々一定値40 GPa、0.25、圧力源表面に加わる圧力 ΔP は1000 atm(101.325 MPa)とした。Fig. 1.2.1.1に底面半径15 km、高さ5 kmの円錐山体を付加した有限要素モデルを示す。有限要素モデルの作成、解析にはANSYS Inc.のANSYS Ver. 7.0を用いた。

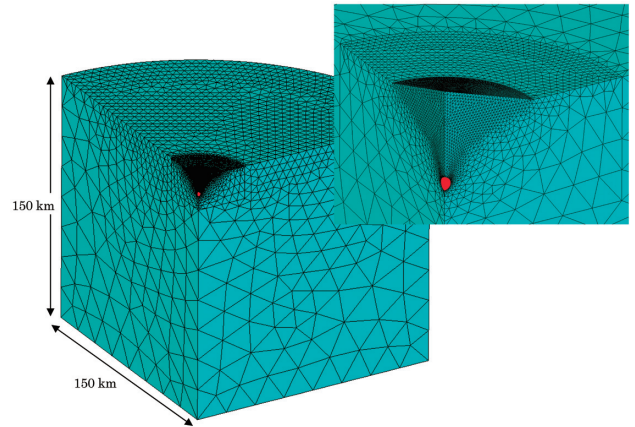


Fig. 1.2.1.1 Example of a 3D FE model of conical volcanic topography on a cylinder. The conic radius (R) is 15 km and the height (H) is 5 km. The radius and height of the cylinder are 150 km. The red circle denotes a pressure source with depth (D) of 10 km, radius (a) of 1 km, and pressure load (ΔP) of 1000 atm. The boundary condition on the bottom and lateral surfaces of the cylinder is fixed, and the radius section is symmetric. The rigidity of the medium (μ) is 40 GPa, and the poisson ratio is 0.25. The mesh size on the horizontal conic surface is 500 m; the mesh size of the surface of the pressure source is about 100 m; the mesh size on the outer side of the cylinder is about 20 km. This model is called the H5-R15-D10-a1 model.

1.2.1.3 球状圧力源によって円錐山体上に生じる地殻変動

Fig. 1.2.1.2(a) に $H = 4$ km, $R = 15$ km の円錐山体の下10 km (円柱部分の表面からの深さ) に半径1 km の球状圧力源を置いて FE 解析で求められた上下変位 U_z と水平変位 U_r を, $D = 10, 12, 14$ km の茂木モデルによる変位とともに示す。Fig. 1.2.1.2(b) には $H = 4$ km, $R = 4$ km の急峻な円錐山体についての計算結果を示す。図中, 縦の点線は山体とその外部の平坦な部分との境界を示している。

Fig. 1.2.1.2(a) に示した富士山を想定した, $R = 15$ km, $H = 4$ km の円錐山体付加モデルの上下変位は山麓部から山体の外側で $D = 10$ km の茂木モデルの結果 (以後, $U_z (D=10)$ と記す) と2%前後の差ではほぼ一致しているが, 山体表面では山頂に近づくほどその差は大きくなっている。山頂では $U_z (D=14)$ の値に近く, 山頂から1.8 km 離れた地点で最大値をとっている (この距離は500 m 間隔の節点での変位から3次スプライン内挿して求めた)。FE 解析の精度とも関係し, 正確にはさらに巨大な円柱を設定して求める必要があるが, 山麓から山裾にかけての上下変位は $U_z (D=10)$ より大きくなっている。水平変位は山体の内外とも $D = 10$ km の茂木モデルの値 (以後, $U_r (D=10)$ と記す) より小さく, 山頂部では $U_r (D=14)$ に近くなっている。水平変位が最大となる地点は山頂から水平距離10.3 km の地点であり, $U_r (D=14)$ が最大となる位置9.9 km に近い。

山体がさらに急峻になった, $H = 4$ km, $R = 4$ km の円錐山体付加モデルの場合 (Fig. 1.2.1.2(b)), 山頂付近において, 水平方向にはほとんど変位せず, 上下変位は山体の境界部で屈曲し, 山頂に向け次第に小さくなり, 山体部では茂木モデルによる変位分布とは全く異なった様相を示す。しかし, 上下変位は山体のすぐ外側から, 水平変位は山体の2倍ほど離れた地点から $D = 10$ km の茂木モデルの変位にほぼ一致するようになる。水平変位が最大値を取る地点は山頂から7.5 km と $U_r (D=10)$ が最大となる位置7.1 km に近い。山頂部の上下変位は山の高さは同じでも傾斜が緩やかな山体に比べ大きくなっている。

Fig. 1.2.1.3に同じ高さで底面半径が異なる円錐山体 ($H = 4$ km, $R = 2, 4, 10, 15$ km) を付加したモデル, Fig. 1.2.1.4に底面半径が同じで高さが異なる円錐山体 ($R = 15$ km, $H = 1, 2, 4, 6$ km) を付加したモデルにおいて $D = 10$ km に球状圧力源が

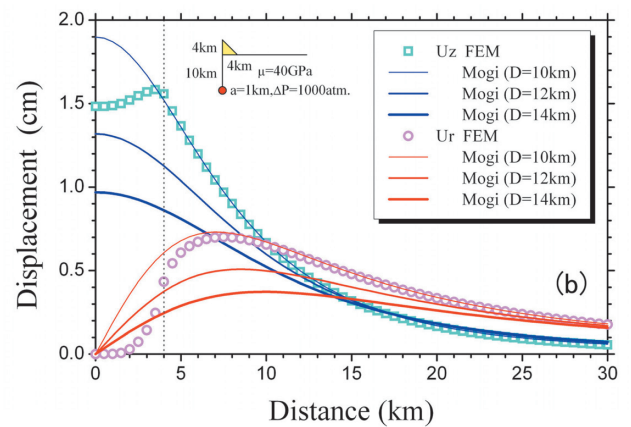
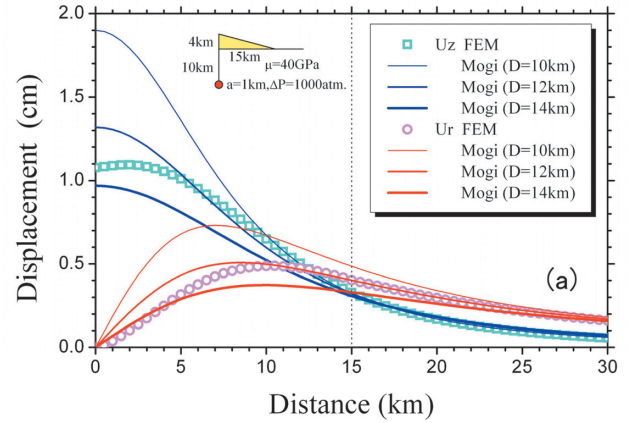


Fig. 1.2.1.2 (a) Comparison of results for the H4-R15-D10-a1 model and Mogi's solutions for $D = 10, 12$, and 14 km. (b) Comparison of results of H4-R4-D10-a1 model and Mogi's solutions.

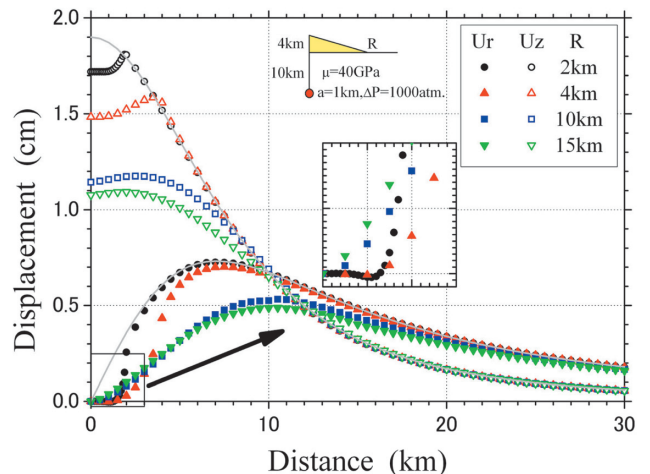


Fig. 1.2.1.3 Comparison of results for H4-R2-D10-a1, H4-R4-D10-a1, H4-R10-D10-a1, and H4-R15-D10-a1 models, and Mogi's solutions for $D = 10$ km.

ある場合に求められた水平，上下変位を，茂木モデルによる水平，上下変位（灰色の線）とともに示す。上下変位は山頂からの圧力源深さが同じ（ H が同じ）であっても山体が大きくなるほど（ R が大きくなるほど）小さくなっている。山麓部の水平変位は山体が大きくなるほど小さくなるが，山頂部では山体が小さく急峻になるほど小さくなる。Fig. 1. 2. 1. 4から山体部の変位は圧力源深さを山頂からの距離に置き換えた茂木モデルの変位に近いこと，しかし，山体が高く，急峻になるとその差は次第に大きくなることが分かる。

このように山体表面での変位は水平，上下とも $D = 10$ km として茂木モデルによって求められる変位より小さくなり，山頂部の水平変位を除き山体が大きいほど変位量は小さくなる。これは，山体部では地表面からの圧力源深さが10 km よりも大きくなることと，山体の重量によって変位が抑えられることが影響しているためである。しかしながら，山体とその外周の平坦部分との境界付近の上下変位は茂木モデルで求められるものよりわずかではあるが大きくなる。急峻な山体で，山頂部が水平方向にほとんど変位せず，地表面が平坦な場合に生じる上下変位に近いことは，平坦な地表面に棒が鉛直方向に立っていた場合，棒はその下端の変動量だけ上方に変位するだけで，水平方向には動かないであろうことと同様であろう。

1. 2. 1. 4 標高補正茂木モデル

前項で述べたように FE 解析で得られた変位は茂木モデル

$$U_r = \frac{3a^3\Delta P}{4\mu} \frac{r}{(D^2 + r^2)^{3/2}} \quad (1)$$

$$U_z = \frac{3a^3\Delta P}{4\mu} \frac{D}{(D^2 + r^2)^{3/2}} \quad (2)$$

における圧力源深さ D を山頂からの深さと置き換えた変位に近かった。ここで， r は圧力源からの水平距離である。そこで， D を観測点における地表面（標高 h ）からの深さ $D + h$ で置き換えた

$$U_r = \frac{3a^3\Delta P}{4\mu} \frac{r}{((D + h)^2 + r^2)^{3/2}} \quad (3)$$

$$U_z = \frac{3a^3\Delta P}{4\mu} \frac{D + h}{((D + h)^2 + r^2)^{3/2}} \quad (4)$$

として変位分布を求めると，Fig. 1. 2. 1. 5(a) の太線のように，FE 解析結果を良く表現できる。このモデルを「標高補正茂木モデル」と呼ぶことにする。山体の傾斜がなだらかな場合，このような簡単な方法で，山体斜面の変位を茂木モデルと比べると圧倒的に良く表現できるようになる。しかしながら，Fig. 1. 2. 1. 5(b) のように急峻な山体の場合，ずれは大きくなる。特に，上下変位のずれが大きい。このモデルによって圧力源の位置や大きさを推定した場合の推定値の特徴については1. 4節で詳しく述べる。

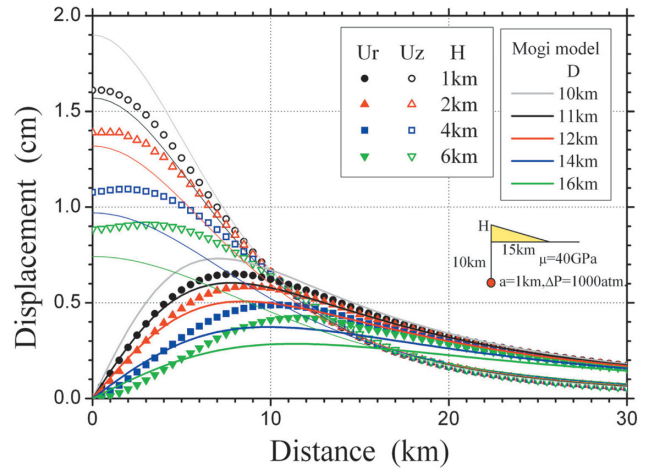


Fig. 1.2.1.4 Comparison of results for H1-R15-D10-a1, H2-R15-D10-a1, H4-R15-D10-a1, and H6-R15-D10-a1 models, and Mogi's solutions for $D = 10, 11, 12, 14$, and 16 km.

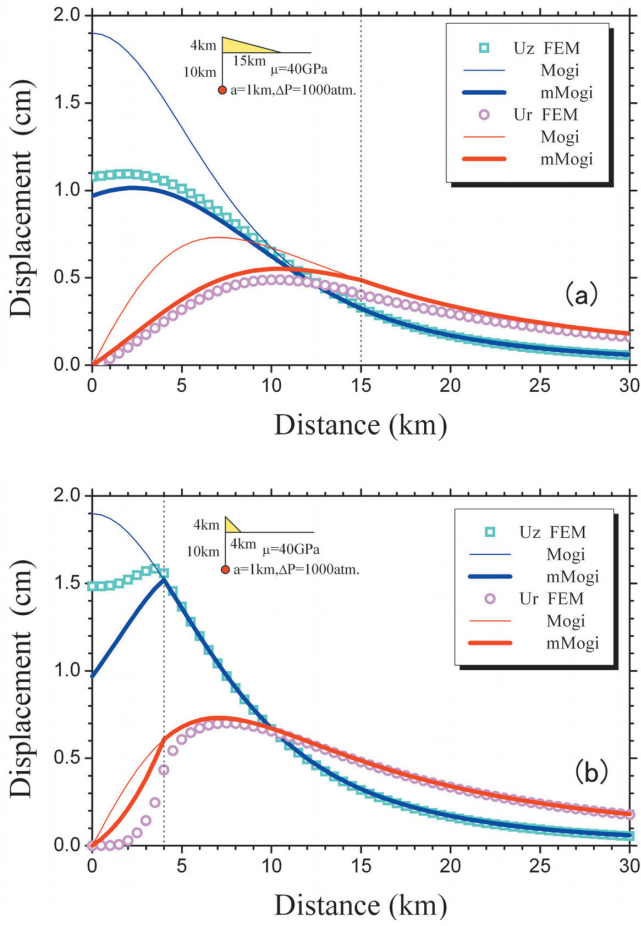


Fig. 1.2.1.5 (a) Comparison of results for the H4-R15-D10-a1 model, modified Mogi's solutions (mMogi, eqs. (3) and (4)), and Mogi's solutions for $D = 10$ km. (b) Comparison of results for the H4-R4-D10-a1 model, mMogi's solutions, and Mogi's solutions for $D = 10$ km.

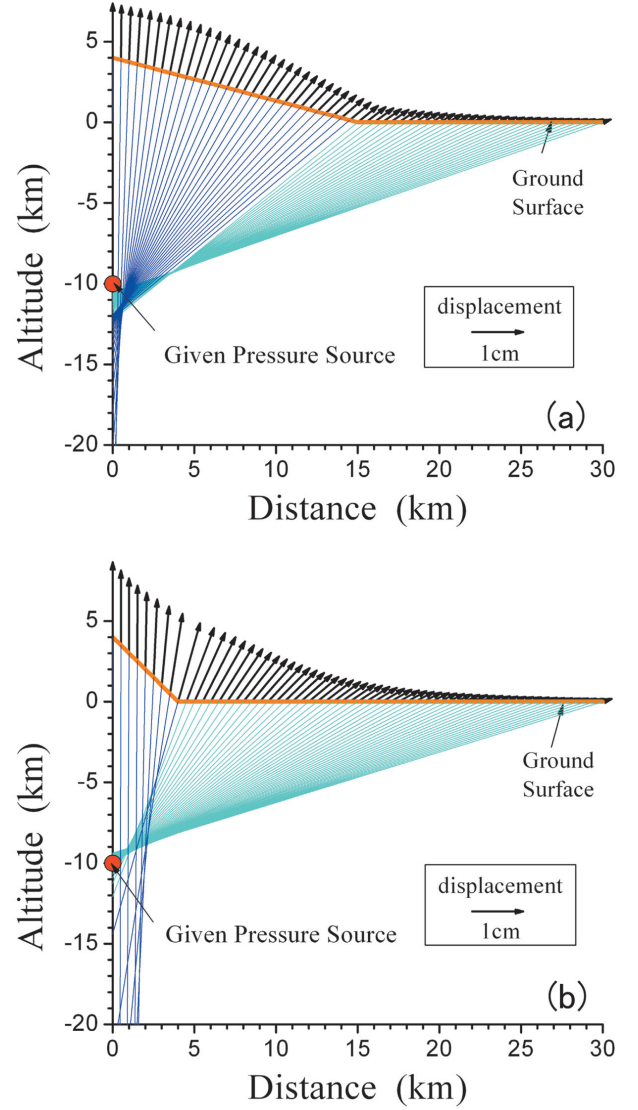


Fig. 1.2.1.6 (a) Displacement vectors of the H4-R15-D10-a1 model plotted on a conic surface and lines along the direction of the displacement vector. (b) Results for the H4-R4-D10-a1 model.

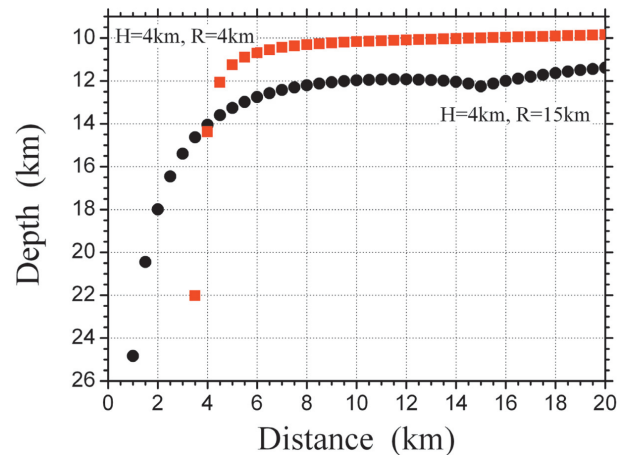


Fig. 1.2.1.7 Relationship between the depth at which the extension of the displacement vector intersects the line of X (horizontal distance from source) = 0 and the calculated horizontal position on a conic surface for the cases presented in Fig. 1.2.1.6.

1.2.1.5 地表面上の変位ベクトルの方向

地表面が平坦な場合、圧力源の深さに係わりなく変位ベクトルは圧力源の中心と観測点を結んだ方向を向き、変位ベクトルの交点から圧力源の位置を推定できることを坂井・他（2007a, 本報告1.1.1項）、坂井・他（2007b, 本報告1.3.3項）で述べた。山体がある場合はどうであろうか。Fig. 1.2.1.6(a) に $R=15$ km, $H=4$ km の山頂直下 $D=10$ km に圧力源がある場合の地表面の変位ベクトルとそれを山体内に延長した直線を、Fig. 1.2.1.7にこの直線と山頂からの垂線とが交わる深さを示す。山頂から8 km 程度離れるとこの深さは約12 km に落ちていくが。山頂に近い変位ベクトルから求められる深さは非常に深くなる。Fig. 1.2.1.6(b) に示した急峻な山体の場合は山体部の変位ベクトルはさらに深い方向を向き、山体の2倍程度の距離になると圧力源深さに近くなる。火山地域でのGPS観測データを用いて圧力源の位置を推定する方法として、変位ベクトルの交点あるいは変位ベクトルと山頂から下ろした垂線との交点から推定する方法（例えば斉藤・井口, 2006）や斜面方向を茂木モデルにおける平坦面として茂木モデルによって推定する方法が用いられることがあるが、ここで得られた結果はこれらの方法では圧力源が深く求まってしまっていることを示している。

（福井敬一）

参考文献

- 茂木清夫, 1957: 桜島の噴火と周辺の地殻変動との関係. 火山, **1**, 9-18.
- 斉藤英二・井口正人, 2006: 口永良部島火山におけるGPS連続観測による気象要素を加味した3次元変位検出. 火山, **51**, 21-30.
- 坂井孝行・山本哲也・福井敬一・藤原健治・高木朗充・中禮正明, 2007a: 有限要素法による火山性地殻変動の計算精度の確立－茂木-山川モデルの再現－, 気象研究所研究報告, **58**, 1-15.
- 坂井孝行・山本哲也・福井敬一・藤原健治・高木朗充・中禮正明, 2007b: 深さに比して相対的に大きな半径を有する球圧力源による地表面変位-有限要素法による計算-. 気象研究所研究報告, **58**, 17-30.
- 山川宣男, 1955: 内部圧力源による半無限弾性体の変形について. 地震, **8**, 84-98.