

2.4 三宅島

2.4.1 地形及び地下構造を考慮した三宅島の地殻変動の評価

2.4.1.1 はじめに

山川 (1955) は、半無限均質弾性体の中に十分に小さい球状の空洞 (圧力球) が存在する場合を扱い、その球における圧力が変化したときに弾性体の表面にどのような変位がもたらされるかを解析解として与えた。また、この解を用いて Mogi (1958) は、桜島における地殻変動の解析を行った。以来、この手法はマグマだまりの圧力変化に伴う地表の変位を解析する簡便な手法として、今日にいたるまで多くの火山の地殻変動解析に用いられており、茂木・山川モデルもしくは茂木モデルと呼ばれている。

円筒座標で表示した茂木モデルによる地表の変位 U_z (上向き)、 U_r (動径方向) は、大地の弾性定数を μ 、 λ 、圧力球の半径と深さを a 、 D 、圧力球の圧力変化を P としたとき、次式のように表される。ただし、地表は $Z=0$ に対応するとし、原点からの水平距離を r としている。

$$\begin{cases} U_z = \frac{\lambda + 2\mu}{2\mu(\lambda + \mu)} a^3 P \frac{D}{(r^2 + D^2)^{3/2}} \\ U_r = \frac{\lambda + 2\mu}{2\mu(\lambda + \mu)} a^3 P \frac{r}{(r^2 + D^2)^{3/2}} \end{cases} \quad (2.4.1.1)$$

また、このとき圧力球の体積変化 dV は、次式で表される。

$$dV = \frac{\pi}{\mu} a^3 P \quad (2.4.1.2)$$

式 (2.4.1.1) から分かるように、 U_z 、 U_r の観測から a 、 P をそれぞれ一意的に求めることはできないが、式 (2.4.1.2) に示した dV は一意的に求めることができる。実際の火山における地殻変動解析では、これらの式を用いて火山の圧力源 (多くの場合マグマだまりと想定される) の位置や深さ、その体積変化などの火山活動の評価や推移予測にとって重要なパラメータを推定している。

一方、実際の火山においては、

- 1) 火山地形が存在するため、地表は平面ではない
- 2) 火山体やその地下には不均質な地下構造があると考えられ均質な弾性体ではない
- 3) 圧力球が十分に小さいという仮定が成り立つことは保証されない
- 4) 圧力源と想定するマグマだまりなどの形状は球形とは限らない

など、茂木モデルの前提条件は近似的にしか満たされていない。そのため、火山において実際に生じる地殻変動は、茂木モデルの式 (2.4.1.1) とは系統的にずれることが予想される。これまで行われてきた火山における多くの地殻変動解析では、このような系統的なずれの評価を明確に行わないまま茂木モデルを適用してきた面があり、解析によって得られた圧力源の深さや圧力源の体積変化など、推定されたパラメータに伴う誤差がどの程度であるかが不明確だったといえる。

たとえ圧力源が十分に小さな球であっても、地形と地下構造が存在する場合は、地表における変位を解析解として与えることが一般的に困難である。そのため、このような問題を取り扱うときは有限要素法 (Finite Element Method, FEM) などの数値的な手法が用いられている (Dieterich and Decker, 1975)。ここでは、三宅島を例に、有限要素法を用いることで構造、地形を考慮した地殻変動を試算し、通常行われている茂木モデルによる結果と比較した。それによって茂木モデルによる地殻変動解析が抱える誤差を明らかにするとともに、茂木モデルによって推定される圧力源のパラメータについて系統的なずれを調べた。三宅島は2000年6月から火山活動が活

発化し、その後7月には山頂カルデラの形成、8月には高度1万mを超える噴煙をあげる噴火が発生した。このような状況下では、GPSなどによる地殻変動観測は、三宅島の海岸部で実施せざるをえず、山頂火口（山頂カルデラ）をほぼ等距離に取り巻くような観測体制を余儀なくされた。そのため、地殻変動が山頂から遠ざかるにつれてどのように変化し、またどのように減衰するかを観測で捉えることが困難であり、茂木モデルによる解析などは、観測点の配置に偏りが無い場合比べて大きな誤差を伴うものとみられる。

個別の火山における地形や地下構造を考慮した地殻変動解析はこれまでも行われたことがあるものの、Trasatti et al. (2003)が行ったMt. Etnaなどごく少数の例にとどまっている。また、三宅島はもとより日本国内の火山で地形と地下構造を考慮した地殻変動解析が行われた例はほとんどない。

なお、上記の3)、4)の影響について本論文では取り扱わないが、3)については坂井他(2007b)が(第1.3.3節)、4)については第1.3章において評価結果を述べている。また、本論文で用いる有限要素法の数値的な精度については坂井他(2007a)が詳細に議論している(第1.1.1節)。

2.4.1.2 三宅島の有限要素モデル

有限要素法の計算に用いた三宅島の有限要素モデルには、近似的な地形と地震波速度構造から推定される水平5層構造を設定した。

近似した山体地形 (Fig. 2.4.1.1) としては、三宅島の地形図、三宅島周辺の海底地形図を参考にして、山頂火口を中心に軸対称なものを用いた。そのモデルにおいて、三宅島周辺の斜面をのぞく海底地形は、深さ500mで一定とした。海面下も含む三宅島全体の地形は円錐台で近似し、円錐台の下面の半径は10km、上面の半径は800m、高さ1200mとした (Fig. 2.4.1.1左)。また、2000年噴火で形成された山頂火口（山頂カルデラ）も地殻変動に影響を与える地形であるとみられるので、山頂火口の形状を逆円錐台で近似し、上面の半径800m、下面の半径500m、高さ450mとした (Fig. 2.4.1.1右)。

三宅島の地下構造には、菊地ほか(2001)による水平5層の地震波速度構造および各層の密度から、弾性定数を求めて有限要素モデルに与えた。用いた5層構造を Table 2.4.1.1に示した。通常茂木モデルによる計算では、弾性定数 $\mu = 30\text{GPa}$ 、 $\lambda = \mu$ が用いられるが、この値は Table 2.4.1.1のモデルの第3層とほぼ同等の値であることが分かる。

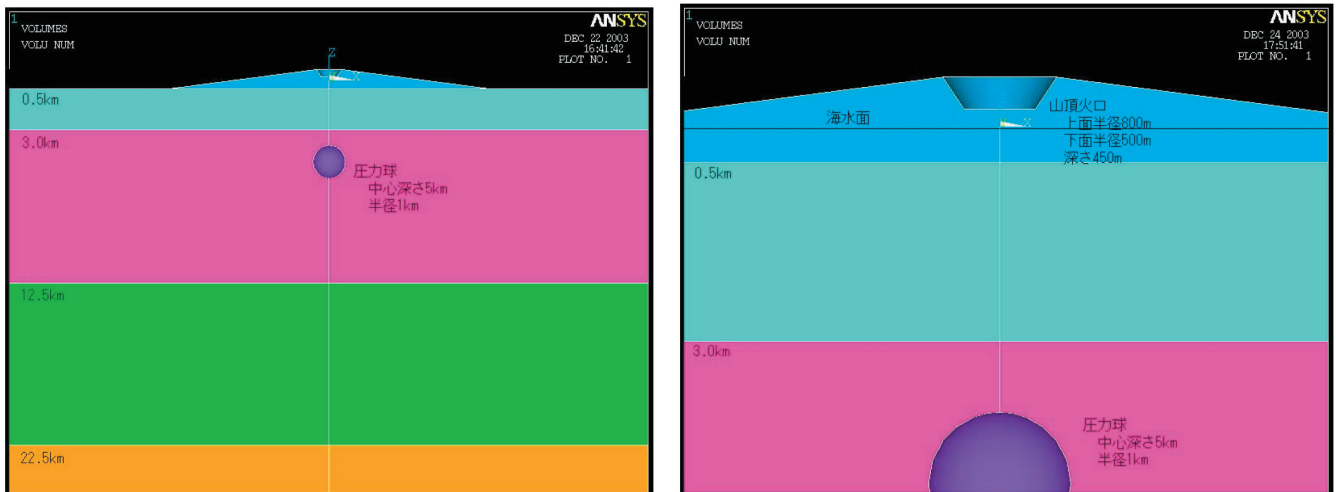


Fig. 2.4.1.1 Topography and underground structure of Miyakejima for the FE models are displayed for the case of a spherical pressure source of depth $D = 5$ km and radius $a = 1$ km. The vertical section of the entire island (left) and a section around the summit crater (right) are displayed. Layers of the structure are painted in colors.

Table 2.4.1.1 Underground structure of Miyakejima, a horizontally stratified five-layer model after Kikuchi *et al.* (2001).

	上面までの 深さ (km)	Vp (km/s)	Vs (km/s)	ρ (ton/m ³)	μ (GPa)	λ (GPa)	ポアソン比 σ
第1層	0.0	2.20	1.20	2.0	2.88	3.92	0.288
第2層	0.5	3.60	2.08	2.4	10.4	10.3	0.249
第3層	3.0	6.00	3.46	2.7	32.3	32.6	0.251
第4層	12.5	6.70	3.86	2.8	41.7	42.3	0.252
第5層	22.5	8.00	4.60	3.3	69.8	71.5	0.253

なお、圧力球の深さ D、圧力球の半径 a については、D = 5 km、a = 1 km の場合、D = 5 km、a = 2.5 km の場合、D = 2.5 km、a = 1 km の場合の 3 通りについて有限要素モデルを作成した。Fig. 2.4.1.1 に示したのは D = 5 km、a = 1 km の例である。この例の有限要素モデルでは、要素数 34600、節点数 51674 の要素分割を行った。有限要素法の計算では各節点の変位を求めることとし、その際、圧力球の面上には $\Delta P = 10^7 \text{Pa}$ ($\approx 100 \text{atm}$) の圧力変化を与えた。

なお、比較のために、上記の近似地形および 5 層構造を与えたモデルの他に、

- ・ 5 層構造モデル (地形なし)
- ・ 半無限均質モデル (構造なし、地形なし) ただし、 $\mu = 30 \text{GPa}$ 、 $\lambda = \mu$

の有限要素モデルも用いた。これらと比較することで地下構造や地形が変位にあたる影響をより明確にすることができる。

2.4.1.3 地殻変動の計算結果

三宅島の各有限要素モデルを用いて地表の垂直変位 U_z 、水平変位 U_r を求めた。そのうち、圧力球が、D = 5 km、a = 1 km の場合の計算結果を Fig. 2.4.1.2 に示した。この図では、横軸に山頂火口からの水平距離 r をとり、縦軸に変位 U_z 、 U_r をとった。示した計算結果は、

- ・ 5 層の地下構造と近似した地形を与えた有限要素モデル (山体 + 5 層 FEM)
- ・ 5 層の地下構造のみを与えた地表が平面となっている有限要素モデル (平面 5 層 FEM)
- ・ 地下構造も地形も与えない均質半無限の有限要素モデル (均質 FEM)
- ・ $\mu = 30 \text{GPa}$ の均質半無限弾性体についての解析解 (茂木モデル)

の 4 種類である。「茂木モデル」は、通常地殻変動解析で用いられており、他の計算結果を評価する基準となる。なお、「山体 + 5 層 FEM」については、 $r = 800 \text{m}$ の火口縁から外側の変位のみを図に示した。

Fig. 2.4.1.2 に示された 4 つのモデルの計算結果に共通する特徴として、 U_z は $r = 0 \text{m}$ で最大であり 1 ~ 1.4 cm ほどの変位であること、 r が大きくなるにつれて次第に減少し 0 に近づくことがあげられる。 U_r は $r = 0 \text{m}$ では対称性のために 0 であるが、 r とともに増加し $r = 3 \sim 4 \text{km}$ で最大となり 0.4 ~ 0.7 cm の変位となること、それより外側では r が大きくなるにつれて減少し 0 に近づいていくことも共通した特徴である。

次に個別のモデルについて、それぞれの特徴をみる。

まず、「均質 FEM」と「茂木モデル」の結果を比較する。これらは、同じ条件の弾性体の変位を、数値的に求めた場合および解析的に求めた場合にあたる。有限要素法による計算は連続媒質を離散化して数値解を求めているため、常に離散化による誤差を伴う。したがって、両者の比較は有限要素法によって変位が精度良く求められているかどうかの判断の材料となる。Fig. 2.4.1.2 をみると、 U_r 、 U_z とともにこれら二つのモデルによる計算結果はよく一致しており、われわれの有限要素モデルでは離散化に伴う計算結果の誤差は十分に小さいことがわかる。このような有限要素法の計算結果は、解析解の計算結果と同様に、定量的な変位の解析にも利用可能と考えられる。

次に「平面5層FEM」の変位を見る。Fig. 2.4.1.2から明らかなように、この有限要素モデルによる U_z は茂木モデルと比較して、 $r=0\text{ m}$ から $r=5000\text{ m}$ にかけて変位が大きい。特に $r=0\text{ m}$ では顕著で、茂木モデルでは U_z が約 1 cm なのに対し、この平面5層FEMでは U_z が約 1.4 cm とおおよそ40%大きくなっている。これは原点付近の垂直変位 U_z が、地下構造の影響によって増幅されたことを意味している。そのような増幅は、水平変位 U_r でさらに顕著である。図に示した $r=0\text{ m}$ から $r=10000\text{ m}$ までのすべの範囲で、このモデルの U_r は茂木モデルの U_r よりも大きい。また、 $r=3000\text{ m}$ から $r=4000\text{ m}$ にかけて U_r が最大となる付近で比較すると、茂木モデルでは約 0.4 cm の水平変位であるのに対して、このモデルでは約 0.7 cm と、地下構造によって80%ほど変位が増幅されていることがわかる。

「山体+5層FEM」の変位は、 $r=5000\text{ m}$ よりも外側では平面5層FEMの場合と大きな差はないが、 $r=5000\text{ m}$ よりも内側では U_z 、 U_r とも平面5層FEMよりも小さくなる傾向がある。ただし、茂木モデルで計算された変位に比べると明らかに大きく、地下構造によって変位が増幅されていることはこのモデルでも有意である。また、 U_r は $r=3600\text{ m}$ 付近に最大があり、それより内側（火口側）では次第に変位が小さくなる傾向があるが、火口縁付近の $r=1000\text{ m}$ 付近から $r=800\text{ m}$ にかけては変位が逆に大きくなる傾向がみられる。これは、第1.2.2節に述べたような火口地形の影響らしい。

「山体+5層FEM」は地下構造および地形を考慮しており、起こりうる地殻変動を茂木モデルよりも正確に予測していると考えられる。これらのモデルによる計算結果に数十%に及ぶ差異がみられることは、茂木モデルから予測される変位は、三宅島の場合、数十%の誤差を含む可能性があることを示している。また、三宅島のようになだらかな山体を持つ火山でも、上記のように地形の影響が明瞭にあることは特筆に値する。

式(2.4.1.1)から分かるように、茂木モデルでは水平距離 r が圧力源の深さ D と同じになるところ($r=D$)で、 $U_z=U_r$ となる性質がある。確かに、Fig. 2.4.1.2の茂木モデルの計算結果では、 $r=5000\text{ m}$ のところで U_z と U_r が等しくなっており、この水平距離は圧力源の深さ 5 km に等しい。それに対して「平面5層FEM」では $r=3200\text{ m}$ で U_z と U_r がほぼ同じ大きさになり、「山体+5層FEM」では $r=3400\text{ m}$ でほぼ同じ大きさになっている。これらは、「平面5層FEM」や「山体+5層FEM」で計算された変位が、圧力源の深さがより浅い茂木モデル($D=3.2\text{ km}$ または $D=3.4\text{ km}$)の変位に類似した分布となっていることを示唆している。

Fig. 2.4.1.2に示したのは、圧力球が $D=5\text{ km}$ 、 $a=1\text{ km}$ の場合であるが、 $D=5\text{ km}$ 、 $a=2.5\text{ km}$ の場合、 $D=2.5\text{ km}$ 、 $a=1\text{ km}$ の場合についても同様に計算をおこなった。このうち、圧力球の半径が 1 km の場合について、茂木モデル($\mu=30\text{ GPa}$)の変位を基準にして、有限要素モデルで計算された変位がどれほど大きくなっているかを増幅率で表し、Table 2.4.1.2に示した。増幅率は、中央からの距離が 4 km の地点における水平変位、垂直変位について求めた。いずれの場合も地表の変位は有意に増幅されており、深さ 5 km の垂直変位増幅率を除けば、かなり大きな増幅率になっている。また、増幅率は水平変位のほうが垂直変位に比べて大きいことがわかる。

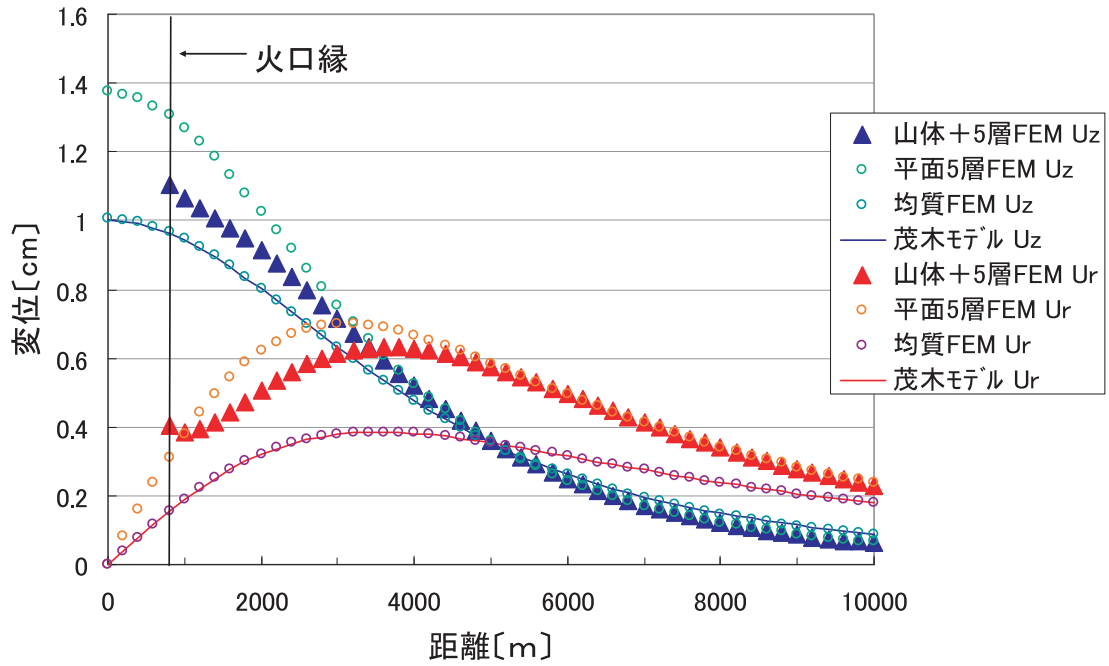


Fig. 2.4.1.2 Calculation result of the surface deformation by FE models and by the Mogi model are displayed for the case when the spherical pressure source is located at the depth $D = 5$ km and has the radius $a = 1$ km. The abscissa indicates the distance in meters from the center of the island. The coordinate indicates displacements in centimeters. Vertical displacements (U_z) are displayed for the FE model with topography and five-layer structure (blue triangle), for the FE model of five-layer structure (green circle), for the FE model of uniform structure (dark green circle), and for the Mogi model (blue line). Horizontal displacements (U_r) for those models are in the red triangle, the red circle, the violet circle, and the red line. The crater rim is located at the distance of 800 m.

Table 2.4.1.2 Amplitude factors referred to in the Mogi model of horizontal and vertical displacements calculated by the FE model with topography and five-layer structure at the distance of 4 km. D means the depth of the pressure source.

圧力源の深さ (D)	水平変位増幅率	垂直変位増幅率
5km	1.647	1.088
2.5km	3.246	2.104

2.4.1.4 GPS 観測点において予想される変位と最適茂木モデルのパラメータ

水平変位と垂直変位の大きさが等しくなる地点を等変位地点とよぶことにすると、茂木モデルには、前節でのべたように中央から等変位地点までの水平距離が、地表から圧力源までの深さに等しいという性質がある。「山体+5層」のように等変位地点が中央に近づいた位置にある場合、その変位データを茂木モデルによって解析すると、圧力源の深さは実際よりも浅く推定されることになる。

さて、式 (2.4.1.1) 及び式 (2.4.1.2) から分かるように、茂木モデルによる解析では、圧力球の体積変化が地殻変動の強度（大きさ）に比例するパラメータである。三宅島有限要素モデル（山体+5層FEM）による地殻変動を茂木モデルによって解析した場合、圧力源の体積変化 dV はどうなるのだろうか。変位が増幅されているという側面からは、 dV が過大評価されると予想される。一方では、圧力源の深さが実際よりも浅く推定されるという側面から、 dV が過小評価されることが予想される。 dV の推定は両者の影響を受けるので、どのようなずれが生じるかを定性的に述べるのはなかなかむずかしい。また、過大評価、過小評価の程度は、解析データとしてどの地点のデータを用いるかにも依存するので、ずれの大きさを一般的に述べることは困難である。

このような事情をふまえた上で、三宅島の実際の GPS 観測点の位置を用いて、これらの点における有限要素法の計算結果を観測データと見立てて茂木モデルで解析した場合、 D や dV などのパラメータの推定がどのようにずれるかを定量的に検証した。

三宅島の GPS 観測点としては、国土地理院の伊豆、坪田、三池、阿古、気象庁の三宅島空港、新湊池、神着の7点を選んだ (Fig. 2.4.1.3)。これらは2002年頃の全島民が避難していた時期に稼働していた観測点である。いずれも海岸から遠くない場所に位置しており、中央火口からの距離は約3~5 km である。検証では、前述の地下構造と地形を考慮した三宅島の有限要素モデル (山体+5層 FEM) の計算結果から、これらの7観測点における変位3成分 (U_x , U_y , U_z) をサンプリングして用いた。

通常的地殻変動解析では、これらの観測点におけるデータから地殻変動を引き起こしている圧力源の推定が行われる。ここでは同様に、サンプリングした変位を観測データであるとみなした解析を行い、観測された変位と最もよく一致する茂木モデル (最適茂木モデル) を最小自乗法によって求めることによって、圧力源の位置 (X , Y)、深さ (D)、体積変化 (dV) のパラメータを推定した。なお、最小自乗法の計算にあたって U_x , U_y の標準偏差を 1 cm, U_z の標準偏差を 2 cm と仮定し、データを加重した。

解析は、前出の3つの三宅島有限要素モデルについて行った。3つのモデルは、地下構造と山体及び火口の近似地形は同一であるが、圧力源の深さ (D) または半径 (a) がそれぞれ異なっている。ただし、圧力源の表面における圧力変化は、いずれも 10^7 Pa を与えた。また、有限要素法の計算によってえられた圧力源の表面の変位から体積変化 (dV) の計算も行った。

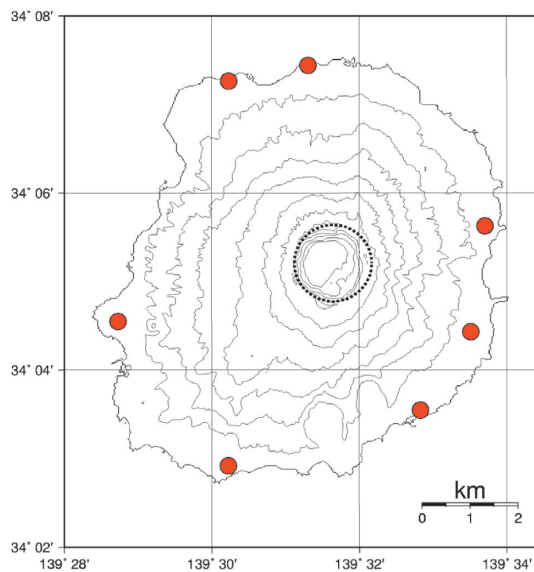


Fig. 2.4.1.3 Locations of GPS observation points in Miyakejima operated by the GSI and the JMA are designated by the red circle. The dotted line designates the position of the summit crater.

$D = 5$ km, $a = 1$ km の場合の解析の結果を Fig. 2.4.1.4 に、 $D = 5$ km, $a = 2.5$ km の場合を Fig. 2.4.1.5 に、 $D = 2.5$ km, $a = 1$ km の場合を Fig. 2.4.1.6 に、それぞれ示した。いずれの場合でも、中央火口から距離 3~5 km 程度の観測点のあるところでは、最適茂木モデルの変位が、有限要素法 (山体+5層 FEM) で計算された変位をほぼ近似していることがわかる。しかしながら、それ以外の場所、たとえば火口周辺、特に火口縁付近では両者の不一致はかなり大きく、最適茂木モデルで推定される変位が、地下構造と地形を考慮した変位 (山体+5層 FEM) を 50% もしくはそれ以上上回っている。また、観測点よりも火口から離れた場所で明らかな差がみられる場合 ($D = 5$ km, $a = 1$ km, Fig. 2.4.1.4) もある。

このように海岸付近の GPS 観測点のデータを用いて三宅島全体の地殻変動を茂木モデルで推定する場合、火口周辺における変位には数十%の系統的な誤差が含まれる可能性がある。そのような誤差の有無を確認する意味

でも、火口周辺における観測は重要であるといえる。また逆に、海岸付近のGPS観測点のデータしか解析に用いることができない場合、ここで示したような地下構造や地形を与えた有限要素モデルを用いて観測データの解析を行えば、解析の精度を大幅に改善できるものと期待される。

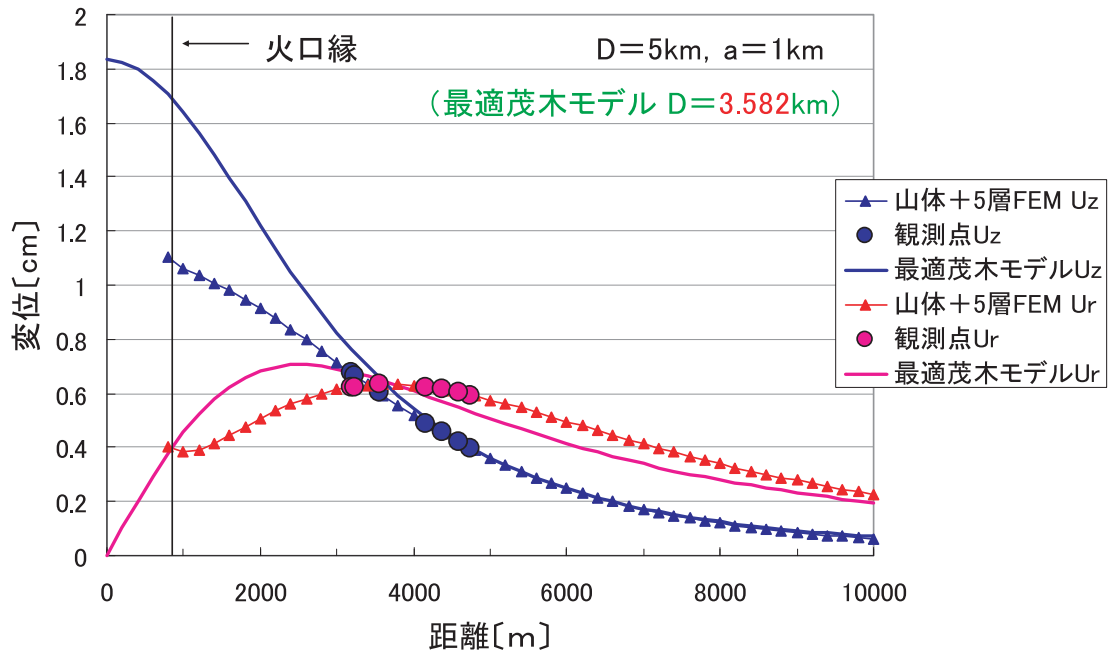


Fig. 2.4.1.4 Surface displacement calculated by the FE model with topography and five-layer structure that has the pressure source at the depth $D = 5$ km and the radius $a = 1$ km (triangle), and displacement at the GPS observation points by the FE model (solid circle). The solid line denotes the displacement of the optimum Mogi model fit to the values at the GPS observation points. The blue symbols and the blue line correspond to vertical displacements, and the red symbols and the red line correspond to horizontal displacements. The source depth of the optimum Mogi model is estimated as 3.582 km.

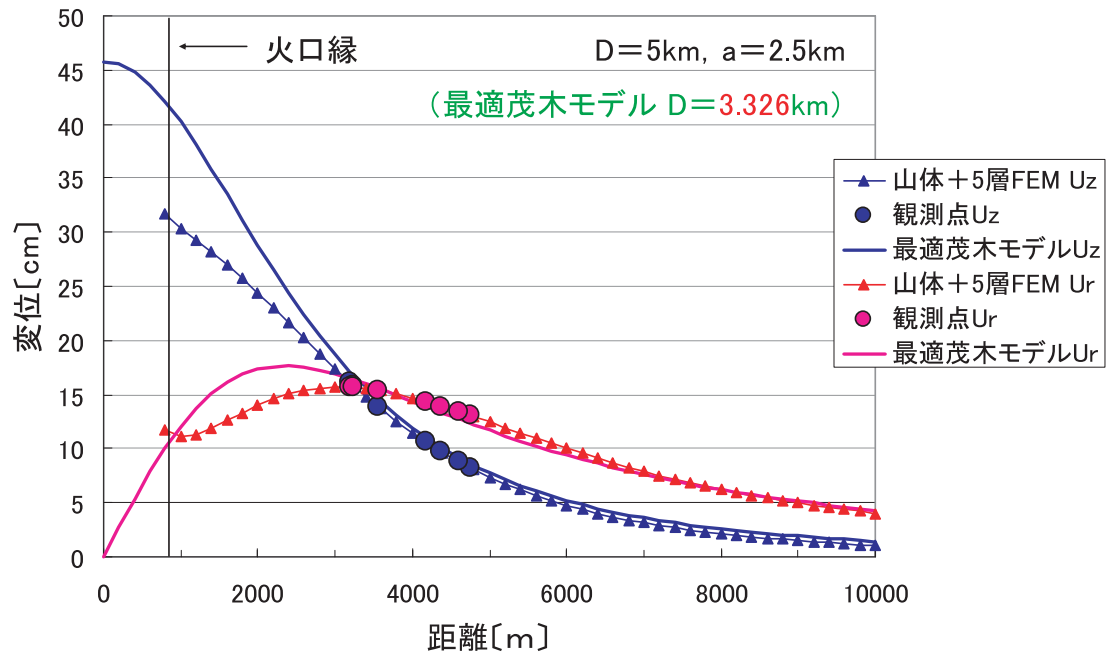


Fig. 2.4.1.5 Surface displacement calculated by the FE model with topography and five-layer structure that has the pressure source at the depth $D = 5$ km and the radius $a = 2.5$ km (triangle), and displacement at the GPS observation points by the FE model (solid circle). The solid line indicates the displacement of the optimum Mogi model fit to the values at the GPS observation points. The blue symbols and the blue line correspond to vertical displacements, and the red symbols and the red line correspond to horizontal displacements. The source depth of the optimum Mogi model is estimated as 3.326 km.

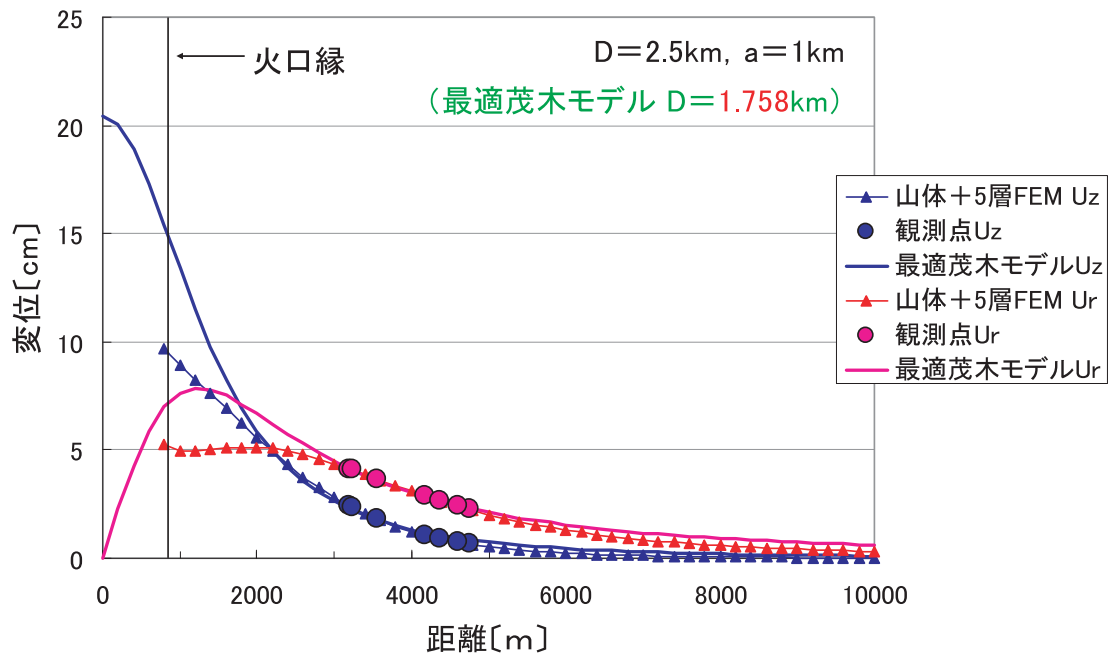


Fig. 2.4.1.6 Surface displacement calculated by the FE model with topography and five-layer structure that has the pressure source at the depth $D = 2.5$ km and the radius $a = 1$ km (triangle), and displacement at the GPS observation points by the FE model (solid circle). The solid line denotes the displacement of the optimum Mogi model fit to the values at the GPS observation points. The blue symbols and the blue line correspond to vertical displacements, and the red symbols and the red line correspond to horizontal displacements. The source depth of the optimum Mogi model is estimated as 1.758 km.

最小自乗法で求められた最適茂木モデルの圧力源の深さ、体積変化のパラメータ (D_M , dV_M) などを Table 2.4.1.3にまとめた。まず、圧力源の位置 X_M , Y_M をみることにする。有限要素モデルでは原点の直下に圧力源を想定しているため、これらの値は0であるが、最適茂木モデルによって推定された位置には最大200m程度のずれがあることがわかる。ただし、いずれの場合も、圧力源までの代表的な距離 (= 標高 + 深さ D) に比べれば5%にも満たない大きさである。次に、圧力源の深さについて調べてみる。前節の定性的な考察でも最適茂木モデルによる推定 D_M は浅くなると示唆されていたが、実際の結果も有意に浅くなっていることがわかる。いずれのケースでも深さは約30%浅く推定されている。さて、圧力源の体積変化について定性的予想は困難であったが、最適茂木モデルと有限要素モデルの比率 dV_M/dV は0.964から1.08となっている。体積変化の推定のずれは数%程度であり、深さの推定のずれに比べるとはるかに小さいという結果が得られた。この結果は体積変化を過大評価する要因、過小評価する要因が相互に打ち消しあった結果であると考えられるので、圧力源の深さや大きさ、もしくは観測点の位置を変えた場合、これらのパラメータにどのようなずれが生じるかは、それぞれについての数値実験を行わないと明確に出来ないだろう。

Table 2.4.1.3 Estimated parameters of the optimum Mogi model corresponding to each FE model.

有限要素モデルのパラメータ			最適茂木モデルで推定されたパラメータ				両者の比	
深さ D (km)	半径 a (km)	体積変化 dV (m ³)	位置 X _M (m)	位置 Y _M (km)	深さ D _M (km)	体積増加 dV _M (m ³)	深さ比 D _M /D	体積比 dV _M /dV
5	1	9.91×10 ⁷	0.04	-0.20	3.58	9.85×10 ⁷	0.716	0.994
5	2.5	2.20×10 ⁹	0.02	-0.10	3.33	2.12×10 ⁹	0.665	0.964
2.5	1	2.45×10 ⁸	0.00	0.02	1.76	2.64×10 ⁸	0.703	1.08

2.4.1.5 まとめ

地下構造（水平5層構造）と地形（軸対称な近似地形）を与えて三宅島火山の有限要素モデルを作成し、それを用いて地下の球形の圧力源（圧力球）に圧力変化が生じた場合の地表の変位（地殻変動）を推定した。その結果によれば、垂直変位 U_z、水平変位 U_r は、同様の圧力球で同様の圧力変化が生じたときの一様半無限（茂木モデル）の場合に比べて有意に大きくなり、特に U_r について顕著だった。このような変位の増幅は、地下構造の影響によるところが大きかった。また、三宅島のようななだらかな火山でも中腹以上では地形の影響が無視できないことが明らかにされた。地形の影響は、火口周辺の地域では変位を小さくする向きに作用していた。

有限要素モデルで求められた変位から、海岸付近に位置する実際の GPS 観測点に対応する変位をサンプリングし、通常の観測データと同様に茂木モデルによって解析したところ、圧力源の深さが約30%も浅く推定されることが明らかになった。また、圧力源の体積変化の推定についてのずれは±数%だった。

海岸付近の GPS 観測点のデータのみを用いて三宅島全体の地殻変動を茂木モデルで推定する場合、火口周辺の変位には数十%の系統的な推定誤差が含まれる可能性がある。そのような誤差を評価するためにも、火口周辺における GPS 観測の重要性は高い。また、海岸付近の GPS 観測点のデータのみで解析を行う場合には、地下構造や地形を与えた有限要素モデルを用いることで、より高い精度の解析結果が期待できる。

三宅島の GPS などで観測された地殻変動については、これまで様々な解析が行われ（たとえば Ueda et al., 2005）、三宅島火山の地下の活動を明らかにしている。ただし、それらの解析は、従来行われて来たように一様半無限弾性体を仮定して行われたものであるため、ここで示したように推定される圧力源の深さが30%ほど浅くなるといった、決して小さくはない誤差を含むことがあり得る。地殻変動解析をより精密に行い、火山活動評価を高度化するためには、本論文で示したように地下構造や地形を考慮した地殻変動解析を行うことが不可欠である。

(山本哲也)

謝辞

本研究は、平成15年12月に行われた火山噴火予知連絡会・三宅島火山活動モデルの検討会を機に着手されました。研究の契機と成果を発表する場を与えてくださった火山噴火予知連絡会の方々、気象庁地震火山部火山課の方々に深く感謝の意を表します。

参考文献

- Dieterich, J. H. and R. W. Decker, 1975: Finite element modeling of surface deformation associated with volcanism, *J. Geophys. Res.*, **38**, 99-134.
- 菊池正幸・山中佳子・瀬戸一、2001：三宅島2000年噴火活動に伴う長周期地震のメカニズムとその解釈，*地学雑誌*, **110**, 204-216.

- Mogi, K., 1958: Relation between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surface around them, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **38**, 99-134.
- 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, 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, 気象研究所研究報告, **58**, 17-30.
- Trasatti, E., C. Giunchi and M. Bonafede, 2003: Effects of topography and rheological layering on ground deformation in volcanic regions, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **122**, 89-110.
- Ueda, H., E. Fujita, M. Ukawa, E. Yamamoto, M. Irwan and F. Kimata, 2005: Magma intrusion and discharge process at the initial stage of the 2000 activity of Miyakejima, Central Japan, inferred from tilt and GPS data, *Geophys. J. Int.*, **161**, 891-906.
- 山川宜男, 1955: 内部力源による半無限弾性体の変形について, 地震2, **8**, 84-98.