

1.2.2 火口地形が地殻変動に及ぼす影響

前節では単純な円錐山体の地下に球圧力源が存在する場合の変位について考察したが、山頂部に凹状の火口地形が存在する場合、火口近傍の地点の変位は、円錐山体の影響に加えて火口地形の影響も受けることが予想される。そこで、本節では、まず基本モデルとして円錐山体および円錐台山体を用意し、次にその山頂部分に様々な凹状の火口地形を作成してFE解析を行う。

1.2.2.1 基本的な4つの山体モデルの変位

まず、基本モデルとなる円錐山体および円錐台山体モデルとして、富士山の山体規模を大まかに模した次の2モデルを用意した。これらをモデル①②とする。

- ① 円錐山体（底面半径16km，高さ4 km，斜面傾斜14.04°）
- ② 円錐台山体（モデル①の山頂部から小円錐〔高さ3.75～4 km，底面半径1 km〕を差し引いたもの，標高3.75kmの山頂部に半径1 kmの平坦な火口原を有する）

さらに、モデル②の山頂部分から以下に示す形状を差し引き、モデル③④を作成した。

- ③ 火口地形1（モデル②の山頂部から逆円錐台〔上面半径1 km，底面半径0.5km，高さ0.5km〕を差し引いたもの）
- ④ 火口地形2（モデル②の山頂部から半球〔半径1 km〕を差し引いたもの）

なお、上記各モデルの火口地形の設定に際しては、その効果が顕著に現れるよう、実際の富士山の火口より大きな火口地形を設定した。

これら4モデルの山体中心直下の深さ $D = 4$ km（海水面を基準とする）に半径 $a = 0.5$ kmの充分小さな球圧力源 ($a/D = 0.125$) を置いてFE解析を行った。各FEモデルの概念図を Fig. 1.2.2.1(a)～(d) に示す。なお、

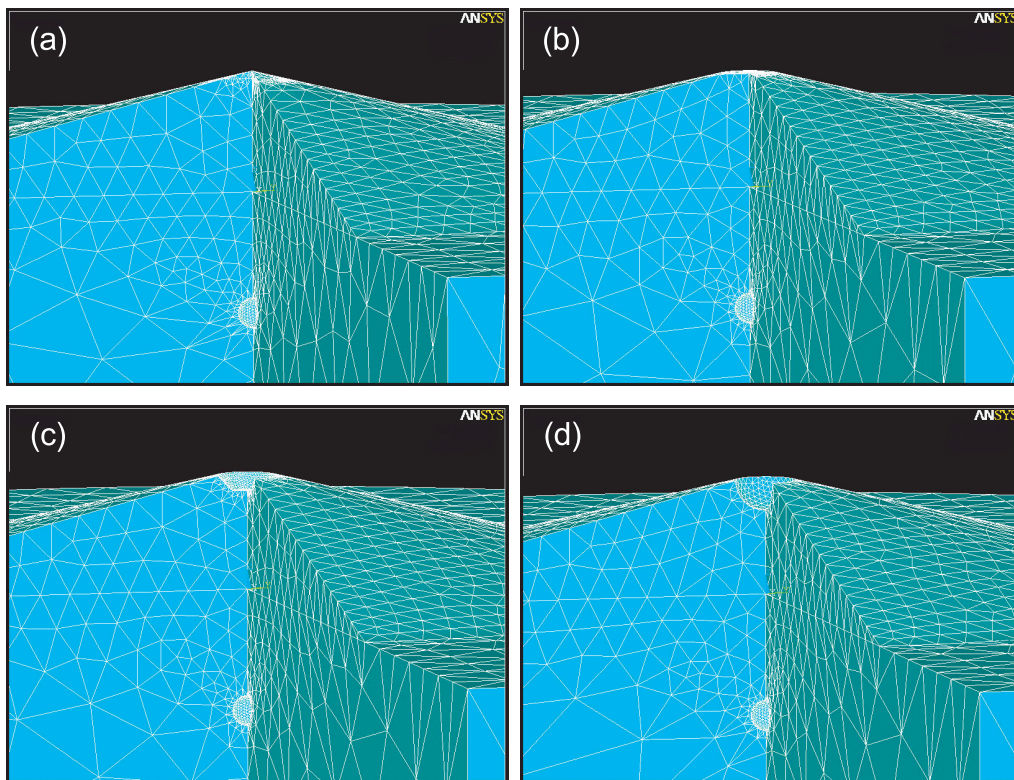


Fig. 1.2.2.1 Schematic illustration of four basic volcano edifice models ($D = 4$ km, $a = 0.5$ km). (a) Model ① (cone). (b) Model ② (truncated cone). (c) Model ③ (inverted truncated cone subtracted from the summit of Model ②). (d) Model ④ (half sphere subtracted from the summit of Model ②)

これらはあくまで概念図であり、図を見易くするため、実際に解析を行ったFEモデルよりもメッシングを粗く設定し、かつ、モデル中心部のみを示している。実際のFE解析では、モデル領域は半径 R 、高さ H とも100km ($=25D$)の円柱モデル領域を設定し、かつ十分に細かいメッシングを設定することにより、十分に高い計算精度を確保した(坂井・他, 2007および1.1.1節参照)。今回実際に解析を行った各FEモデルの要素数は3~4万個、節点数は6~7万個である。モデル底面および側面の境界条件は完全固定とし、剛性率 $\mu = 40\text{GPa}$ 、ポアソン比 $\sigma = 0.25$ (従ってヤング率 $E = 100\text{GPa}$)、圧力変化 $\Delta P = 1000\text{atm} = 0.101325\text{GPa}$ とした。

4つのFEモデルの地表面変位を、標高補正茂木モデル(1.2.1節参照、グラフ中では“m-Mogi”と表示)と併せてFig. 1.2.2.2(a)~(d)に示す。ここでは水平距離 r (球圧力源直上あるいは山体中心からの水平距離)が10kmまでの地表面上の各節点における上下変位 U_z および水平変位 U_r を示した。なお、 $r \leq 1\text{ km}$ については、変位の様子をより詳しく見るためメッシングを細かく設定してある。モデル③および④では、 $r < 1\text{ km}$ は火口内の節点、 $r = 1\text{ km}$ は火口縁上の節点、 $r > 1\text{ km}$ は山体斜面上の節点となる。さて、Fig. 1.2.2.2(a)~(d)からは、各FEモデルの変位は標高補正茂木モデルと概ね良く一致しているが、モデル③および④の山頂部(特に U_r)では標高補正茂木モデルとの食い違いが顕著であることが分かる。

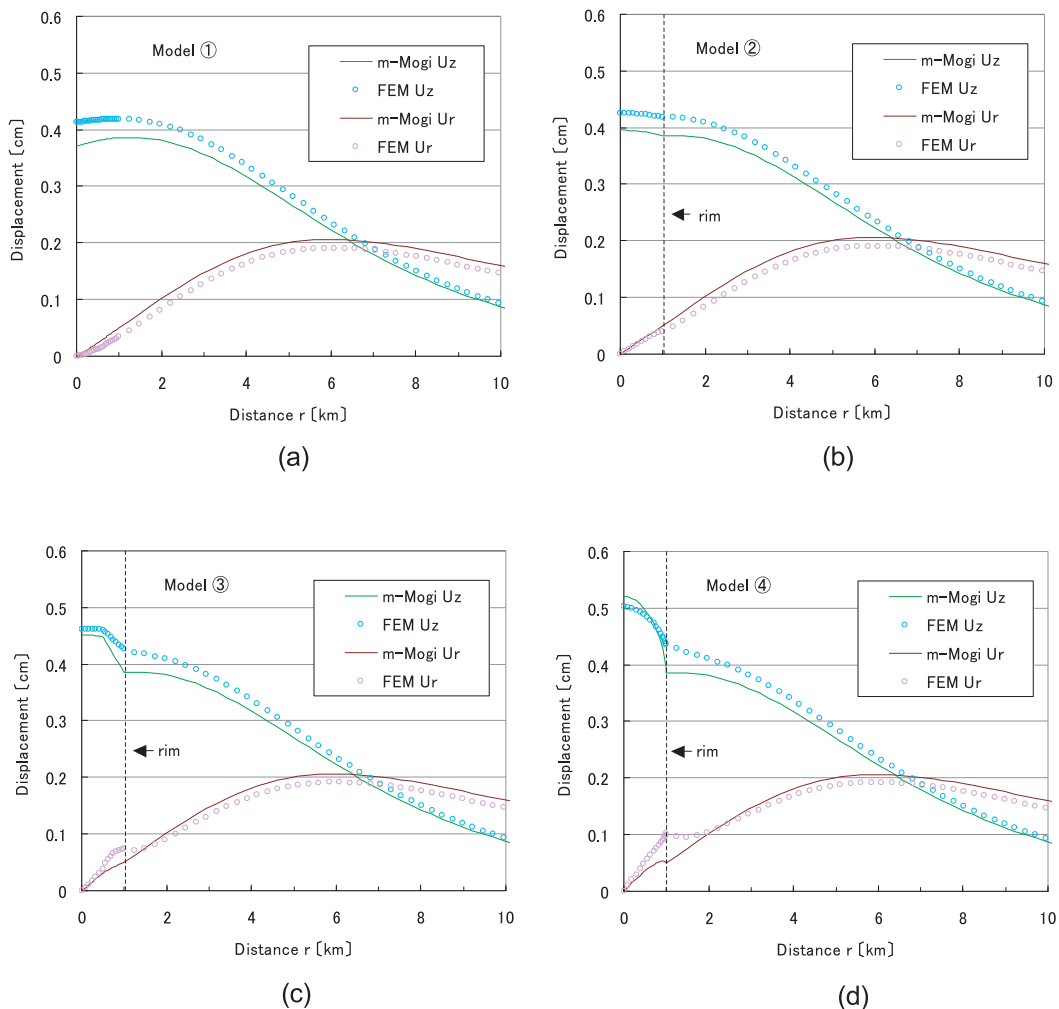


Fig. 1.2.2.2 (a)~(d) Surface displacements of four basic volcano edifice models.
Here, “m-Mogi” indicates the modified Mogi model

また、Fig. 1.2.2.2(a)~(d)のFE解析結果を重ね合わせたものをFig. 1.2.2.3に示す。なお、Fig. 1.2.2.3では、図の見易さを考慮して、 $r < 1\text{ km}$ (モデル②では火口原内、モデル③④では火口内)の節点については表示を省略し、 $r \geq 1\text{ km}$ (火口縁および山体斜面上)の節点の変位のみを示した。また、Fig. 1.2.2.2では縦軸を具体的な変位量で示したが、これらの変位量は剛性率 μ あるいは圧力変化 ΔP を変えることによって直ちに变化

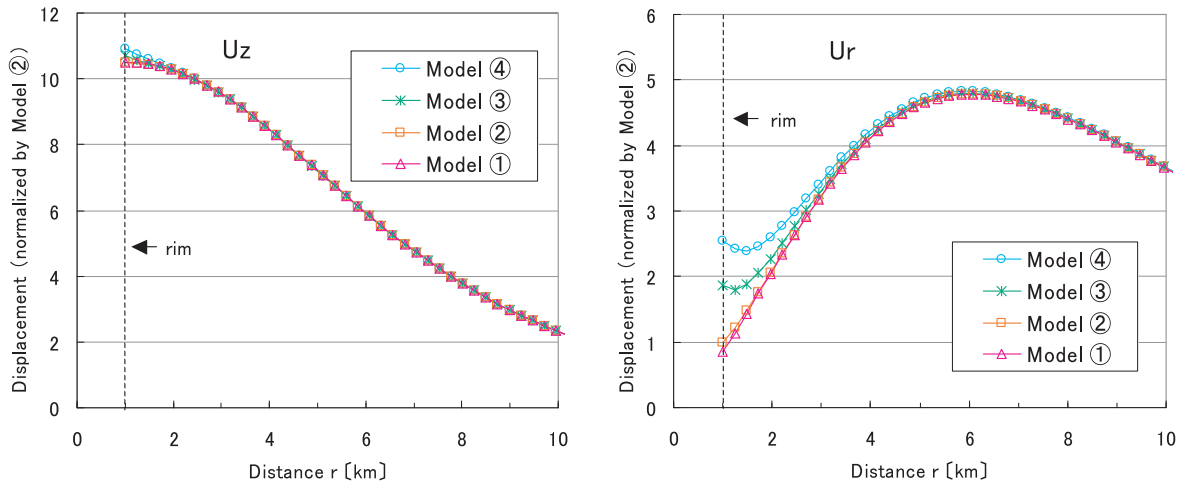


Fig. 1.2.2.3 Results of FE analysis of Models ①~④.

する値であり(変位量は ΔP に比例し μ に反比例する), 縦軸の絶対値にはさほど意味はない。そこで, Fig. 1. 2. 2. 3 の縦軸はモデル②(円錐台山体)の $r = 1$ km(火口原の縁)での U_r の大きさ(0.0399cm)で規格化した。

さて, Fig. 1. 2. 2. 3では, U_z については4つのモデルの間にほとんど差異は見られない。一方, U_r については, $r = 1$ kmに近い地点で各モデル間に大きな差異が見られる。モデル①の場合は, $r = 1$ kmでの U_r はモデル②の0.85倍と, さほど大きくは違わないが, モデル③ではモデル②の1.86倍(モデル①の2.19倍)と顕著な違いが見られ, さらにモデル④の場合はモデル②の2.55倍(モデル①の3.00倍)に達する。ここで, モデル③④の火口容積 V に注目すると, モデル③の V は0.92km³, モデル④の V は2.09km³であり, V の大きさと火口縁近傍での U_r の大きさはと比例的な関係にあることが推察される。他方, 火口縁からおおよそ火口半径の2~3倍程度離ればモデル間の差異はほとんど見られなくなる。

1. 2. 2. 2 様々な火口地形モデルの変位

前項の結果を受け, 以下の⑤~⑮に示す計11個の山体モデルを追加作成してFE解析を行った。それらはモデル②(円錐台山体)の山頂部から以下に列挙する形状を差し引いたものである。なお, 球圧力源の D および a や, モデル領域, および各種定数については前項と同じ設定とした。

i) 山頂部から円柱を差し引いたモデル

- ⑤ 半径1 km, 高さ0.3kmの円柱
- ⑥ 半径1 km, 高さ0.45kmの円柱
- ⑦ 半径1 km, 高さ0.5kmの円柱
- ⑧ 半径1 km, 高さ0.6kmの円柱
- ⑨ 半径1 km, 高さ0.75kmの円柱

ii) 山頂部から逆円錐(台)を差し引いたモデル その1(火口内斜面傾斜45°)

- ⑩ 上面半径1 km, 底面半径0.75km, 高さ0.25kmの逆円錐台
- ⑪ 上面半径1 km, 底面半径0.25km, 高さ0.75kmの逆円錐台
- ⑫ 上面半径1 km, 高さ1 kmの逆円錐

iii) 山頂部から逆円錐(台)を差し引いたモデル その2(火口深さ0.5km)

- ⑬ 上面半径1 km, 底面半径0.75km, 高さ0.5kmの逆円錐台
- ⑭ 上面半径1 km, 底面半径0.25km, 高さ0.5kmの逆円錐台
- ⑮ 上面半径1 km, 高さ0.5kmの逆円錐

以上に示した各モデルの諸量を, 先出のモデル③と共に Table 1. 2. 2. 1に示す。Table 1. 2. 2. 1には各モデルの火口容積 V (Table 1. 2. 2. 1中では“Volume”と表記)についてもまとめたほか, i) および ii) の逆円錐(台)

Table 1.2.2.1 Parameters of craters of Models ⑤~⑮ (including Model ③).

Column			
Model	Radius [km]	Height [km]	Volume [km ³]
⑤	1	0.3	0.943
⑥	1	0.45	1.414
⑦	1	0.5	1.571
⑧	1	0.6	1.885
⑨	1	0.75	2.356

Inverted Cone / Inverted Truncated Cone					
Model	Top radius [km]	Bottom radius [km]	Height [km]	Volume [km ³]	incline [deg]
③	1	0.5	0.5	0.916	45
⑩	1	0.75	0.25	0.605	45
⑪	1	0.25	0.75	1.031	45
⑫	1	—	1	1.047	45
⑬	1	0.75	0.5	1.211	63.4

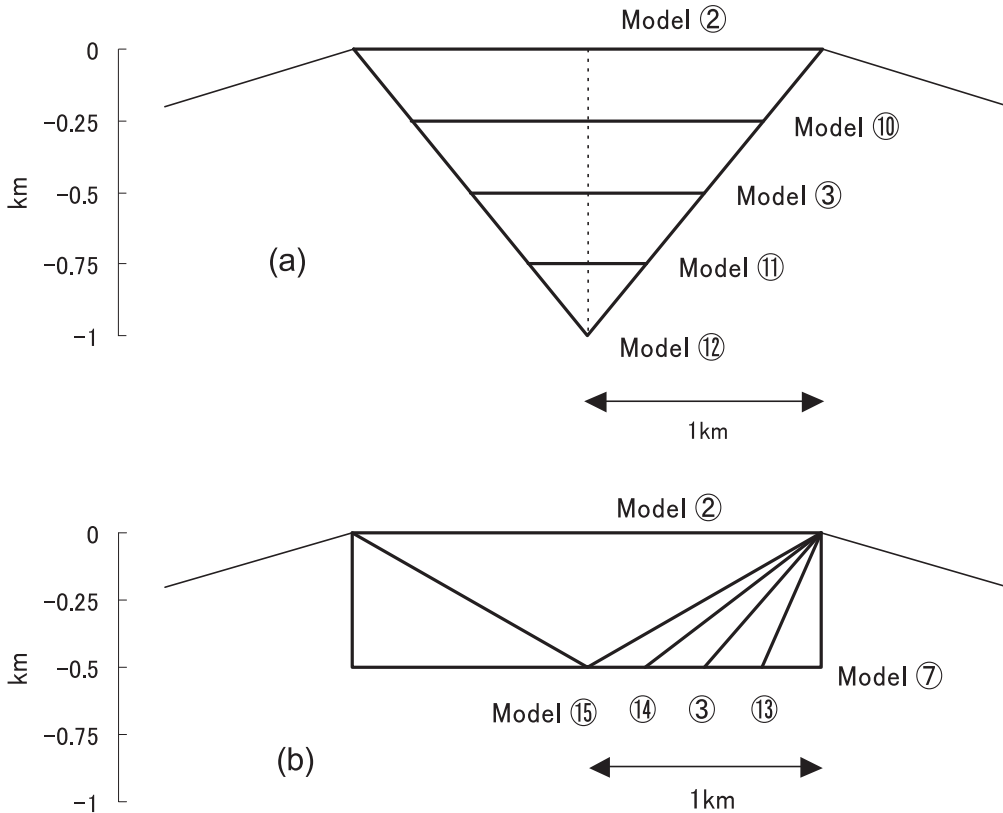


Fig. 1.2.2.4 (a) Schematic illustration of Models ⑩ ⑪ ⑫, including Models ② ③.
 (b) Schematic illustration of Models ⑬ ⑭ ⑮, including Models ② ③ ⑦.

を差し引いたモデルについては火口内斜面の傾斜も度単位で示した。また、ii) およびiii) の各モデルの概念図を、モデル②③⑦と共に Fig. 1.2.2.4(a) (b) に示す。

前項で見たモデル①~④と同様、 U_z および火口縁から遠い地点での U_r についてはモデル間の差異がほとんど見られないため、以下では主に火口縁 ($r=1$ km) での U_r (以下、これを $U_{r(rim)}$ とする) に注目する。なお、以下のグラフでも、先の Fig. 1.2.2.3と同様に図の見易さを考慮し、かつ、地殻変動が観測されるような活動的な火山では、火口内部への地殻変動観測点の設置は現実的ではないことも考慮して、火口内部 ($r < 1$ km) の節点の変位については表示を省略し、火口縁 ($r=1$ km) 以遠の山体斜面上の節点の変位のみを示す。また、縦軸

はモデル② (円錐台山体) の $U_{r(rim)}$ で規格化する。

まず, i) の円柱を差し引いた各モデル (モデル⑤~⑨) の U_r を, モデル②の結果と併せて Fig. 1.2.2.5(a) に示す。

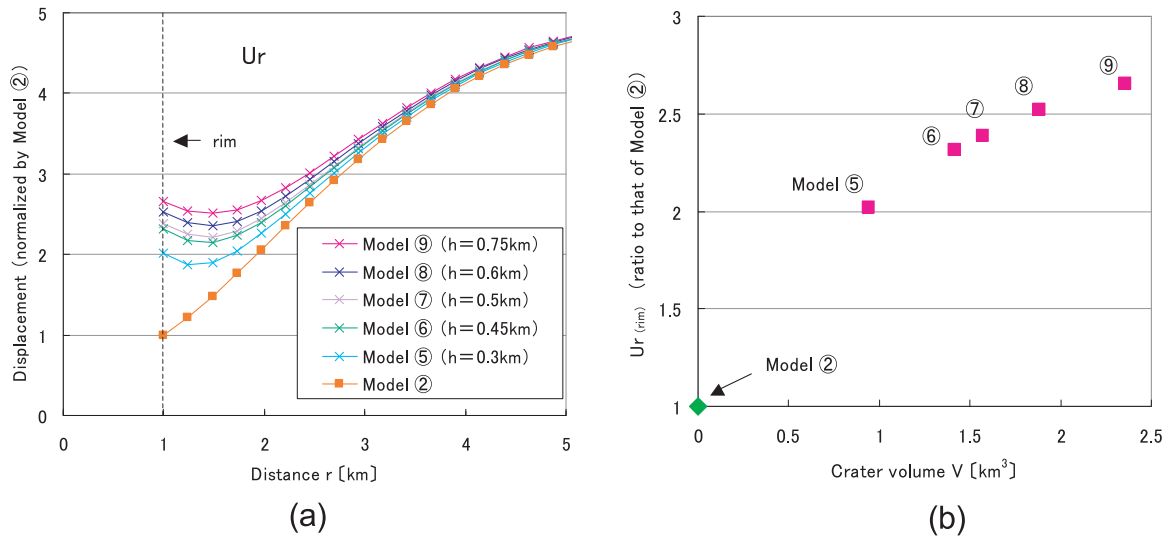


Fig. 1.2.2.5 (a) U_r of Models ⑤~⑨ (Models in which columns were subtracted from the summit).
 (b) Relationship between V (crater capacity) and $U_{r(rim)}$ (U_r at the crater rim) on Models ⑤~⑨.

横軸は火口縁付近での変位の様子を詳しく見るため $r=5$ km までを表示した。山頂部から差し引いた円柱の高さが高いほど, つまり V が大きいほど, $U_{r(rim)}$ が大きいことが分かる。両者の関係をさらに詳しく見るため, V を横軸に, $U_{r(rim)}$ を縦軸に取ったグラフを Fig. 1.2.2.5(b) に示す。 V と $U_{r(rim)}$ は比例的な関係にあることが一目瞭然である。なお, モデル② (円錐台山体) については V を 0 とした。

次に, ii) の逆円錐 (台) を差し引いた各モデル (モデル⑩~⑫) の U_r を, モデル②およびモデル③の結果と併せて Fig. 1.2.2.6(a) に示す。また, V と $U_{r(rim)}$ との関係を Fig. 1.2.2.6(b) に示す。ここでも両者は比例的な関係にある。

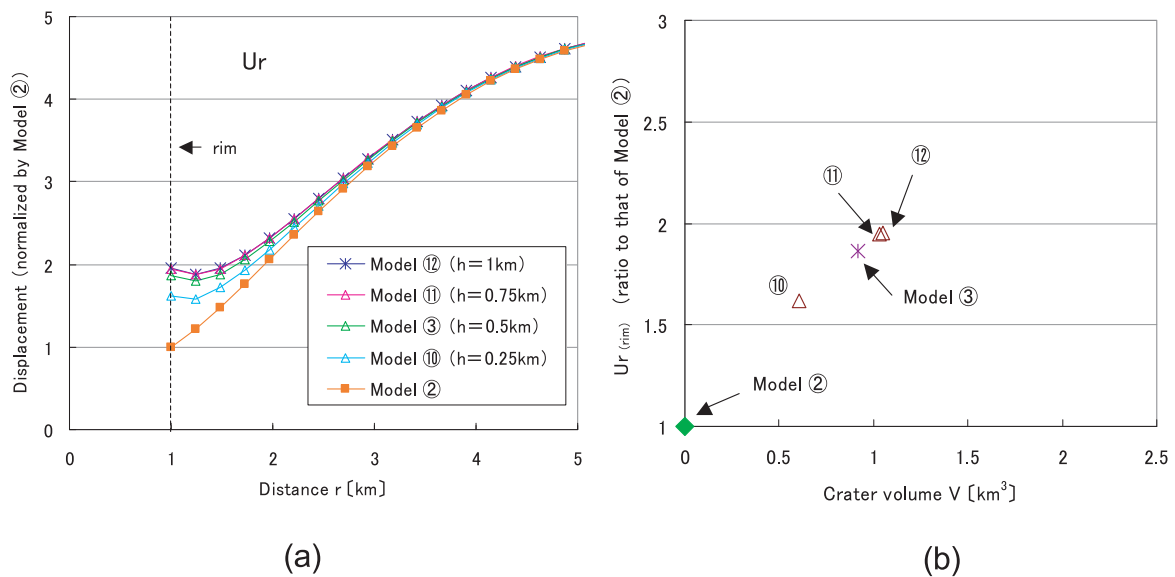


Fig. 1.2.2.6 (a) U_r of Models ⑩~⑫. (b) Relationship between V and $U_{r(rim)}$ on Models ⑩~⑫.

また、iii)に示した各モデル(モデル⑬~⑮)の U_r を、モデル②およびモデル③⑦の結果と併せてFig. 1. 2. 2. 7 (a) に示し、 V と $U_{r(rim)}$ との関係をFig. 1. 2. 2. 7(b) に示す。両者はやはり比例的な関係にある。

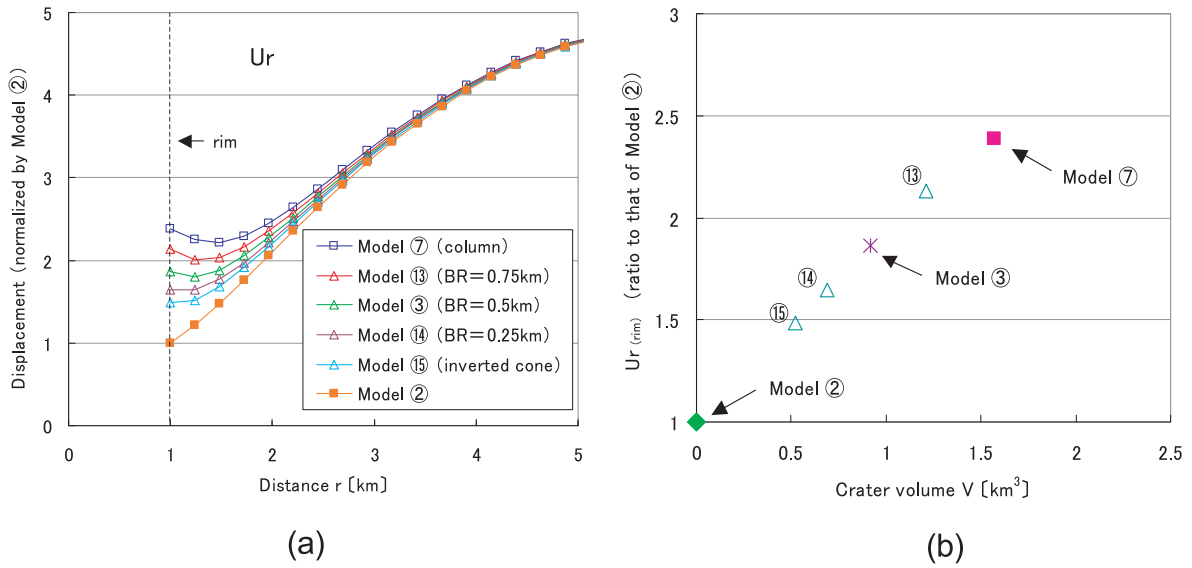


Fig. 1.2.2.7 (a) U_r of Models ⑬~⑮. "BR" in the graph means radius of the crater bottom. (b) Relationship between V and $U_{r(rim)}$ on Models ⑬~⑮.

それでは、 $U_{r(rim)}$ は V のみに比例して大きくなり、火口形状にはよらないのであろうか。Fig. 1. 2. 2. 5(b), Fig. 1. 2. 2. 6(b) および Fig. 1. 2. 2. 7(b) を重ね合わせたものを Fig. 1. 2. 2. 8 に示す。Fig. 1. 2. 2. 8 にはモデル④(半球差し引き)も併せて示した(●印)。 $U_{r(rim)}$ は火口形状にほとんど関係なく、 V にほぼ比例的である様子が見て取れる。細かく見ると、 V が同程度でも火口内斜面傾斜が大きいほど $U_{r(rim)}$ が大きくなる傾向があるが、その効果も高々10%程度であり、基本的には $U_{r(rim)}$ は V に比例的であると言える。

1. 2. 2. 3 球圧力源の深さを浅くした場合

前項では球圧力源の深さ D を4 kmとしたが、 D を変化させた場合、火口縁近傍の変位にどのような変化が現れるかは興味深い問題である。そこで本節では、 D を変化させた場合の一例として、モデル①~④において D を2 kmと浅くした場合の変位を見る(D 以外のモデルパラメータは不変とする)。

4つのFEモデルの U_r をFig. 1. 2. 2. 9に示す。なお、ここでも縦軸はモデル②の $U_{r(rim)}$ で規格化した。まず、 U_r の最大値に注目すると、 D が2 kmと浅くなったことに対応して、 U_r の最大値は $r=4.5$ km付近と、 D が4 kmの場合(Fig. 1. 2. 2. 3参照、 U_r の最大値は $r=6$ km付近)に比べて近距離に現れている。次に、 $U_{r(rim)}$ について見ると、Fig. 1. 2. 2. 3と比較してモデル③および④の $U_{r(rim)}$ の値自体にほとんど変化はない。しかしながら、注目すべきは、 U_r の最大値がFig. 1. 2. 2. 3の場合より小さくなっている分、モデル③④の $U_{r(rim)}$ の値と U_r の最大値との比がFig. 1. 2. 2. 3の場合より有意に大きくなっていることである。その結果、特にモデル④では、 U_r のグラフ全体の形が平坦に近くなっている。

このような特徴は、 D がさらに浅くなるとますます顕著になる。一方、 D が4 kmより深くなると、このよう

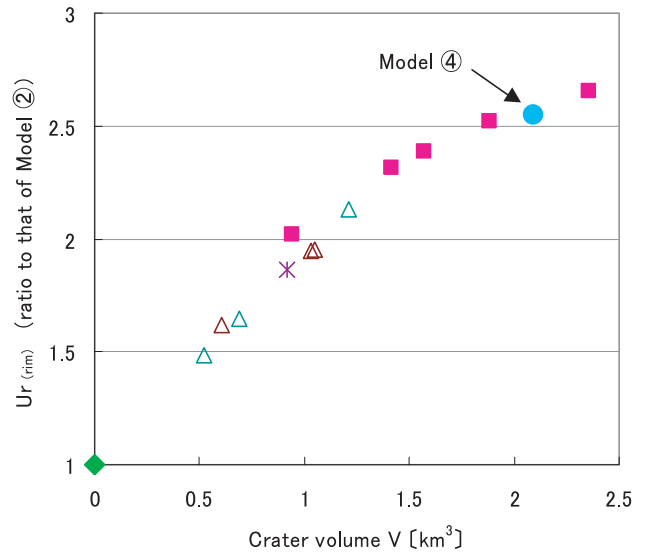


Fig. 1.2.2.8 Relationship between V and $U_{r(rim)}$ on Models ④~⑮.

な特徴はあまり見られなくなる。

なお、火口縁近傍 ($r = 1 \sim 2$ km) での U_r のグラフの形状は、 $D = 4$ km の場合とほぼ同じであるため、火口縁近傍の変位データのみから D を決定することは困難であろう。

1.2.2.4 まとめ

以上の結果は、凹状の火口地形が存在する火山の火口縁近傍で得られた水平変位データを解析するには注意が必要であることを示す。火口縁近傍のみの水平変位データを用いる場合、標高補正茂木モデルを単に適用すると、地下の圧力変化あるいは体積増加量を、ここで見た例だけでも最大で3倍程度過大評価してしまう可能性があることが分かった。あるいは、火口縁近傍から山体斜面下部までの水平変位データを用いる場合でも、火口縁近傍のデータだけが標高補正茂木モデルに合致しないといったことが起こり得よう。特に、2000年噴火以降の三宅島やカルデラ火山のように火口容積が大きな火山では、ここで見た火口地形の効果を考慮することは重要と考えられる。

逆に言えば、火口縁は、観測対象火山の火口容積が大きいほど、また圧力源の深さが浅いほど、微小な水平変位を捉えるのに有利な場所でもある。

なお、以上の結果についても全てFEモデルの相似則 (1.1.1節参照) が成り立つことを付記する。例えば、上記の各モデルを1/4に縮小し、底面半径4 km、高さ1 kmの円錐山体モデルを基本モデルとして各火口形状モデルを作成した場合、 r が0.25km ($= 1 \text{ km} \div 4$) の火口縁では上記と全く同様の結果が得られる。

(坂井孝行)

参考文献

坂井孝行・山本哲也・福井敬一・藤原健治・高木朗充・中禮正明, 2007: 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.

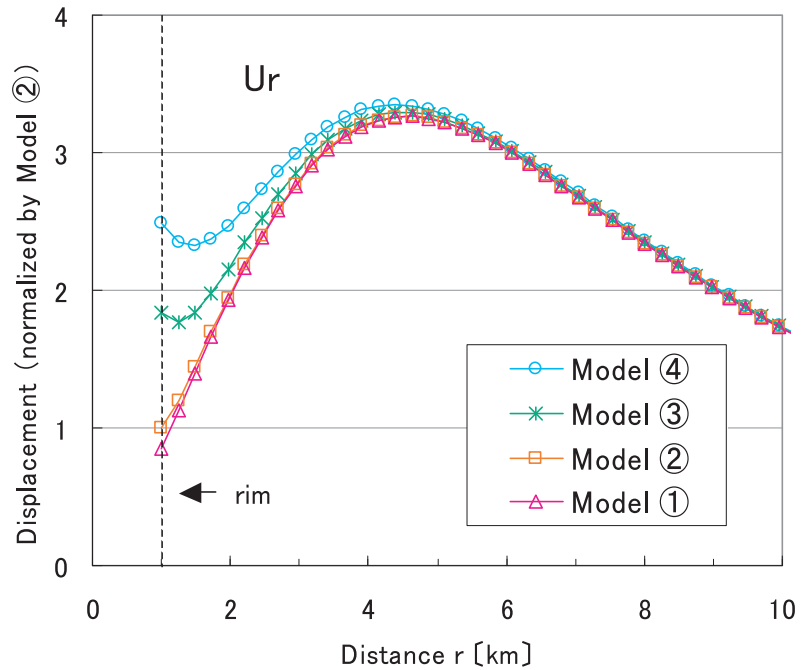


Fig. 1.2.2.9 U_r of Models ①~④ when the spherical pressure source is placed at the depth of 2 km.