

マグマ貫入による地殻変動の解析と
その噴火予知への応用

工業技術院地質調査所
埼玉大学工学部
東京理科大学工学部

小出 仁
浜島良吉
川井忠彦

Analysis of tectonic deformation by magma intrusion and its
application to prediction of volcanic eruption

by

Hitoshi KOIDE

(Geological Survey of Japan)

Ryokichi HAMAJIMA

(Saitama University)

Tadahiko KAWAI

(Science University of Tokyo)

ABSTRACT

On the November 15th, 1986, the first volcanic eruption since 1974 started in the summit crater of the Izu-Oshima volcano. Earthquake swarms, volcanic tremors, etc. signaled the earlier subsurface magmatic activity, but the subsidence of central surface of the volcano prevented the short-term prediction of the eruption.

In many cases, the inflation of central surface of volcano proved of the most reliable precursor of volcanic eruption. However, Koide and Bhattacharji (1975) pointed out that rock mass could be depressed in the central area by the increase of magma pressure above the magma body which has long-vertical depth with narrow horizontal section. In this paper, the authors applied the rigid-body-spring method (RBSM) for a realistic simulation model of tectonic effect of subsurface magma intrusion where differential movements along fractures have vital role for deformation of the crust. In the two dimensional calculation, an elliptical hole is assumed in a rectangular plate. The wall of hole is applied with magma pressure. At the start of calculation, magma pressure is equal to the lithostatic pressure at the top of magma reservoir. Then, magma pressure increased step by step with the rate of 0.5 MPa. The aspect ratios (b/a) of magma body were taken as 1, 5, 10 and ∞ . The results of calculation show that fractures start at the top of magma body of higher aspect ratios (that is dike-like magma body) and extend upwards forming fracture zone of funnel shape. The calculated vertical displacement of earth's surface indicates that a simple domal uplift is formed over a circular magma body, but that a central trough-

like depression with flank uplifts is formed over magma bodies of higher aspect ratios.

In the Izu-Oshima volcano, trough-like subsidence during the time span which includes the eruption event, is clearly shown from the comparison of leveling data. The result of calculation indicates that the width of trough-like depression is nearly twice of the depth of top of magma intrusion. As the width of trough in the Izu-Oshima is about 4km in the narrowest part, the top of main magma intrusion is expected at the depth of about 2km in the south-eastern part of Izu-Oshima volcano. The maximum subsidence of about 30cm is expected by the magma pressure of about 6 MPa.

The results of three-dimensional calculation, also, clearly indicate that the trough-like subsidence in the Izu-Oshima volcano is a kind of "keystone graben" where the trough depression is formed by splitting of rock mass by the intrusion of dike-like magma wedge. Therefore, the subsidence of summit of Izu-Oshima volcano indicated the subsurface intrusion of magma and increase of magma pressure, that is, the subsidence is also the precursory phenomena of volcanic eruption in some cases.

1. はじめに

地震予知や火山噴火予知を実現するためには、地殻の破壊のプロセスを理解し、破壊に伴う地殻の変形やその他の前兆現象を定量的に説明する必要がある。このような場合、巨大な体積の天然の岩体が対象となるので、不均質性や不連続性が重要なファクターとなる。そして、地下水やマグマやガスといった流体の効果も大きい。また、熱の影響もある。このような複雑な系を解析することは容易ではない。

地殻の変形をモデル化する際に、従来は、連続体として扱われることが多かった。しかし、実際の地殻の変動には不連続性、すなわち割れ目の進展や不連続面におけるすべりや割れ目中の流体の移動が主要なファクターであり、不連続性を考慮した不連続性解析が必要であると考えられる。地熱開発や廃棄物の地中埋設の影響評価にも同様な問題が中心課題になる。特に高レベル放射性廃棄物地層処分においては、割れ目中の地下水の移動が主要な問題になっている。

不連続性岩盤の応力解析には、様々な方法があるが¹⁾、本論文では川井²⁾の提案による剛体バネモデル(RBSM)を用いて、1986年の伊豆大島噴火に伴う地殻変動の解析を試みた。解析は主に2次元で行なったが、3次元解析も実施した。さらに割れ目進展を考慮した熱移動と浸透流の連成解析も試みている³⁾。

2. 深部でのマグマ貫入による地表変動

火山の噴火に先立って、地下でマグマの移動があれば、地表に何らかの変動があると期待される。地下のマグマ溜り内部でマグマ圧が増大すれば、マグマ溜り直上を中心にドーム状の隆起が生じる場合があることが、茂木⁴⁾によって理論的に示されている。火山の地下でマグマ圧が増大し、それが噴火に結びつくとなれば、噴火直前に火山の中央部が隆起することは、直観的にも理解しやすい。これは茂木モデルと呼ばれ、実際に噴火前後の多くの火山地表部の隆起・沈降の観測例にはほぼ適合することが明らかになっている。したがって、火山中央部の隆起現象は噴火の前兆であり、もっとも信頼できる噴火予知のための指標と考えられている。茂木モデルは点集中心力が作用した時の弾性解に基づいている。しかし、地下のマグマ溜りは実際にははるかに複雑であり、その形態によって、マグマ圧による地表への影響が大きく異なり、マグマ圧が増大すると地表が沈降する場合があることが指摘されている⁵⁾。1986年の伊豆大島噴火は地下のマグマ圧増加によって地表が逆に沈降した例になった。

三次元弾性論の解析解に基づいた予測によると⁵⁾、マグマ溜りの形状が球に近い場合は、茂木モデル⁴⁾で示されたと同様に、マグマ圧によって地表にドーム状の隆起が生じる。しかし、水平断面が円形でも、深さ方向に伸びた偏長型のマグマ溜りの場合には、広域的には球状マグマ溜りと同様にドーム状に隆起するが、ドームの頂部

には逆に小円形のカルデラ状陥没が生じる。また、鉛直に立った板状(岩脈状)のマグマ溜りの場合には、グラベン状の陥没と周囲の広い隆起域が生じる。上下に伸びたマグマ溜りの中のマグマ圧が増加すると、マグマ溜りの頂部を押し上げる力以上に、地下深部で横方向に拡げる効果が大きいため、地表に近い天井部分が深部の拡大に引きずられて落ちこむもので、アーチ状石組の両脚部を拡げると頂部の「キーストーン」が落ちこむ現象から、キーストーン効果と呼ばれる⁵⁾。しかし、このモデルは弾性解に基づいているため、重力の影響や岩盤の不均質や非弾性変形の影響が不明であった。マグマ貫入による地殻変動の完全なシミュレーションを目指すためには、数値解析が必要である。

3. 不連続性岩盤へのマグマ貫入の解析

解析解の場合には、均質な弾性体以外には解を得ることが困難である。火山付近では、通常は割れ目が多く、岩盤は破碎された状態に近い。数値計算法として多く用いられている従来の有限要素法や境界要素法でも、割れ目の多い岩盤の変形を予測するためには十分とはいえない。

このように割れ目が多く、不連続な岩盤の変形を見積るために適した数値計算法として、RBSM(剛体バネモデル)が提案されている²⁾。RBSMは、不連続面によって岩体があらかじめ分割されているとして、隣接する剛な要素の不連続面での相互変位を見積ることにより、岩体全体の変形を計算する。

ここでは地下にマグマ溜りが存在するとして、マグマ圧の上昇により周囲の岩体中のクラックの発生と進展をRBSMにより追跡すると共に、地表の変位を調べた。解析はまず、2次元の平面ひずみ状態で行い、マグマ溜りの形状は鉛直方向の半径が b 、水平方向の半径が a であるような楕円形とする(Fig.1)。 a と b の比を、 $a/b=$

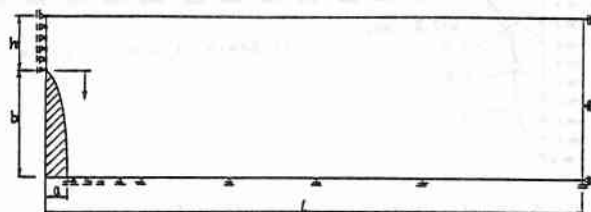
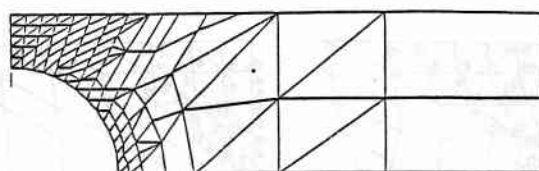


Fig.1, Model for calculation of magma intrusion

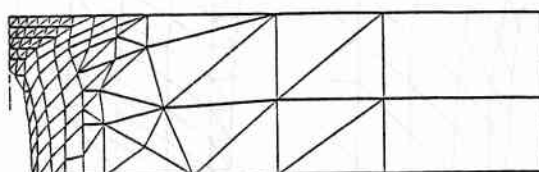
1(円形), $a/b=1/5$, $a/b=1/10$, $a/b=0$ (きわめて狭いスリット)の各場合の計算を行うことにより、マグマ溜りの形状の効果を調べた。平面ひずみ状態を考え、地表とマグマ溜り以外はローラー指示とする。岩体の剛性率を10GPa, ボアソン比を0.25, 比重を2.7とする。一方マグマの比重は2.5と仮定する。自荷重のみによる応力状態とし、マグマ溜り頂部で最初は岩圧とマグマ圧が同じ状態からスタートして、1ステップあたりマグマ圧のみを0.5MPaずつ上昇させる。RBSM法による数値計算のためのメッシュ分割をFig.2に示す。

割れ目の発生条件は、剪断破壊はモール・クーロンの条件によって判定し、粘着力を5MPa, マサツ角を30度とする。また、引張り強度を5MPaとする。 $h=100m, b=200m$ の場合の、割れ目の進行過程を示す(Fig.3)。图中的波線は引っ張り割れ目、太実線が剪断割れ目であり、円中の数字は割れ目発生時のステップ数を示す。マグマ溜りが円に近い場合は、地表から割れ目が入り出すが、アスペクト比が大きい細長い楕円状のマグマ溜りでは、マグマ溜り頂部から上方へ扇型に破壊が進行している。

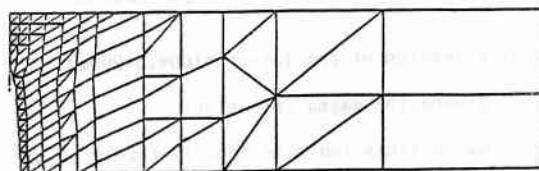
地表における上下変位(Fig.4)は、円形のマグマ溜り上では単純な隆起であるが、細長い楕円状マグマ溜り上では、中央部では激しい沈下となり、その外側で隆起す



(a)Aspect ratio (b/a)=1



(b)Aspect ratio (b/a)=5



(c)Aspect ratio (b/a)=10

Fig.2, Element divisions for rigid-body-spring method(RBSM)

る。大局的には三次元弾性解の結果と同様に、いわゆるキーストーン効果によるグラーベン（地溝）状の沈降帯が形成され、その外側は広く隆起する。

アスペクト比のもっとも極端な場合として、マグマ溜りの幅 $a=0$ の場合を、計算した。アスペクト比 $a/b=1/10$ の場合と大局的には似ている。すなわち、アスペクト比 $1/10$ 程度以下になると、ほとんどアスペクト比の効果は地表変動には表われないことがわかる。このように細長い形状のマグマ溜りを、岩脈モデルと呼ぶことにする。マグマ溜り頂部までの深さ h を100m, 1000m, 2000m, 4000mとして、地表の上下変動を調べると、変位のパターンは相

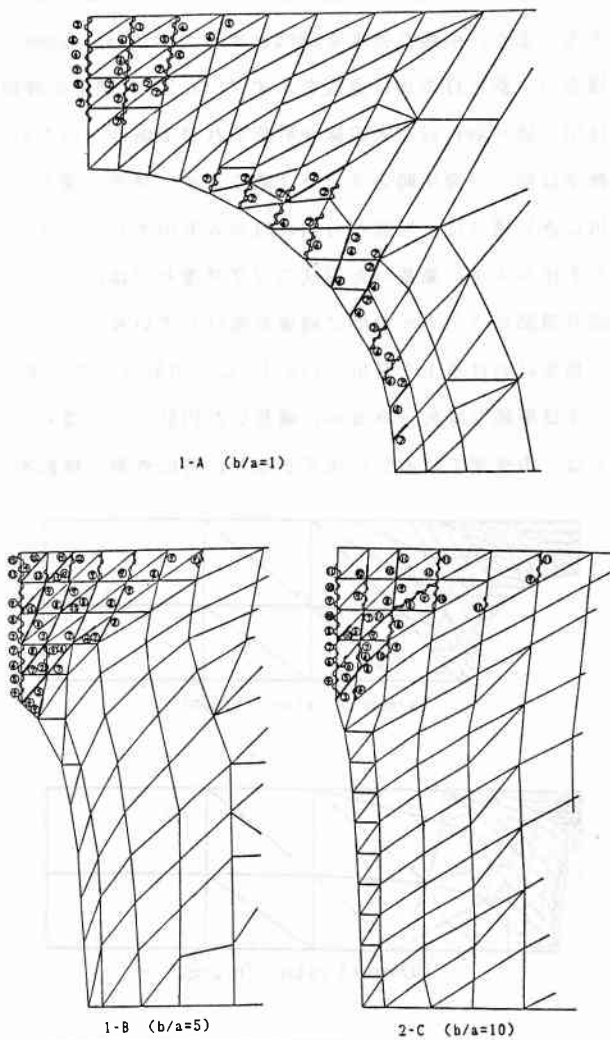


Fig.3, Extension of fractures($h=100\text{m}, b=200\text{m}$) around the magma intrusion.

Waved lines indicate tensile fractures and thick lines denote shear fractures. The numbers in circles indicate steps when fractures are formed.

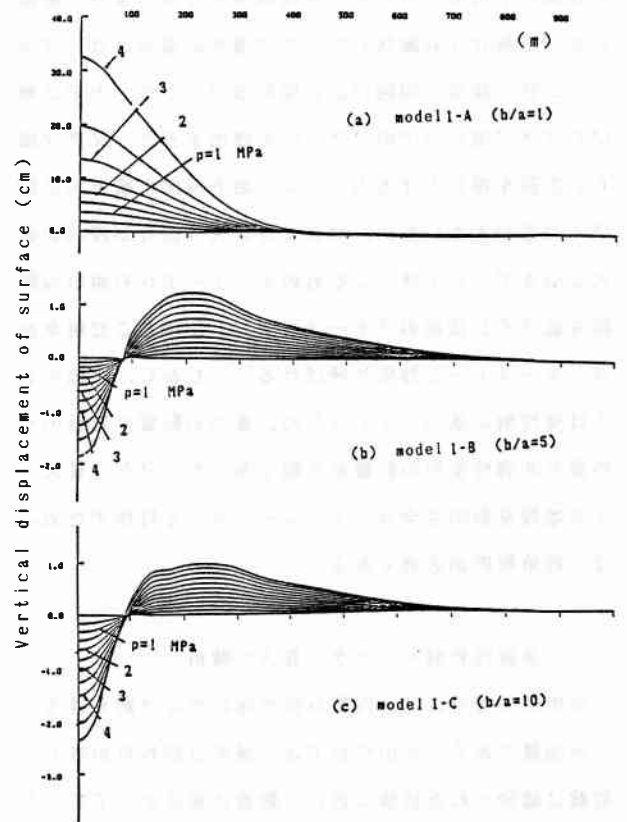


Fig.4, Vertical displacement of surface over subsurface magma intrusion ($h=100\text{m}, b=200\text{m}$).

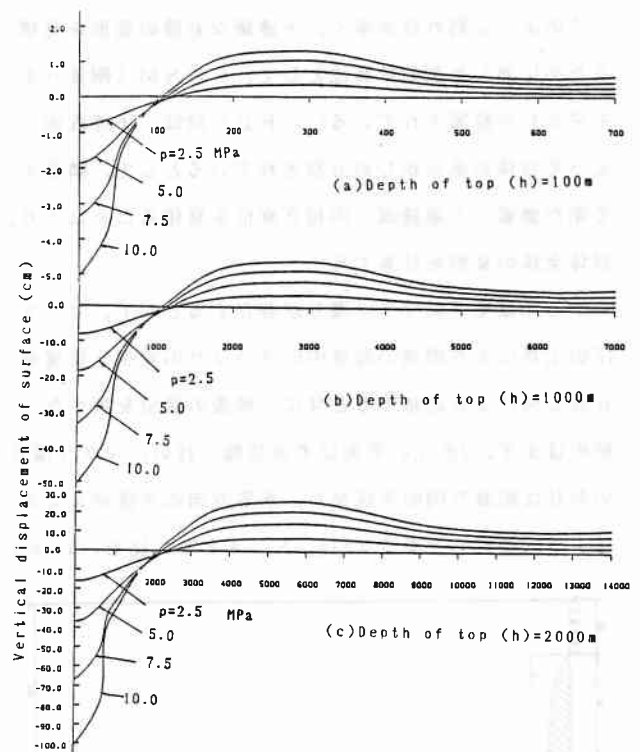


Fig.5, Vertical displacement of surface over a subsurface very thin dike-like magma intrusion ($a=0$).

似だがスケールが変わることがわかる (Fig.5). 沈降帯の幅は、地表からマグマ溜りまでの深さのおおよそ2倍程度となっている。

2次元モデルは、3次元的にはマグマ溜りが奥行き方向に無限に伸びている場合に相当するが、実際はマグマ溜りは有限である。そこで3次元解析を行なって、3次元的なマグマ溜りの形状の効果を調べた。マグマ溜りの幅 $a=0$ とした岩脈モデルで、マグマ溜り頂部までの深度 $h=1000\text{m}$ とする。岩脈の奥行き方向(水平)の半長を 2000m とした場合の地表変位の概要をFig.6に示した。すなわち、中心部の地表で隆起沈降量がもっとも大きく(マグマ圧 10MPa の時、最大沈降量 23cm 、最大隆起量 13cm)、沈降帯の幅がもっとも狭い(約 1.5km)。岩脈の貫入範囲より外側では、沈降量が小さくなると共に沈降幅は拡がり、しだいに沈降域が不明瞭になる。破壊の進展を調べると、上方および側方に破壊域が放射状に拡がり、マグマ溜りが拡大して行くことが判る (Fig.9)。

建設省国土地理院による伊豆大島における水準測量によれば⁶⁾、昭和57年の測量結果と比較して、噴火のあった昭和61年11~12月の測量結果は、島の北西から南東にかけて最大約 30cm 以上の沈下を示し、その両脇に当る島の北東及び南西部では約 10cm 以上の隆起となった (Fig.8)。地溝状の沈降域の幅はおおよそ $4\sim 6\text{km}$ 程度であるから、本解析結果から、この地殻変動を生じたマグマ溜り本体の頂部は伊豆大島の南東部約 $2\sim 3\text{km}$ の深度にあり、岩脈状に北西~南東方向に伸びていると推定される (Fig.9)。山科・多田ら⁷⁾、⁶⁾は弾性くいちがいモデルによるあてはめを行ない、ほぼ同様な結論を得ている。RBSMと弾性くいちがいモデルがほぼ同様な結果を得たことから、地下の岩盤の性状が多少異なっても地表変位にはあまり影響していないと考えられる。マグマ圧は岩脈の長さによって変わるが、本解析結果からは少なくとも 6MPa 以上は上昇したと考えられる。マグマ溜り頂部の周囲に生じた割れ目を通して、マグマはさらに上昇し、北西部で噴火に至ったと考えられる。

4. 火山噴火予知への応用

1986年11月の伊豆大島三原山の噴火は、正確な噴火の予知ができなかったとして、各方面に様々な波紋を投げ

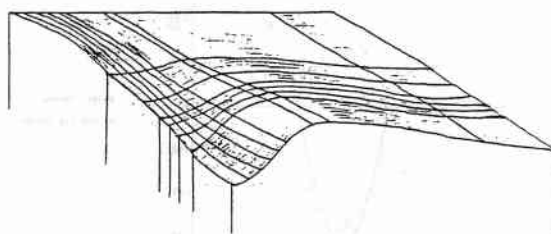


Fig.6, Sketch of vertical displacement of volcanic surface due to a subsurface dike-like intrusion calculated from the three dimensional RBSM model.

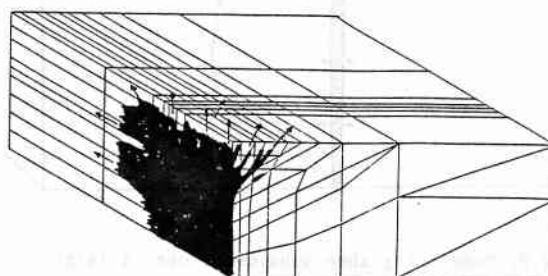


Fig.7, Extension of fractures around a dike-like magma intrusion estimated from the three dimensional RBSM model.

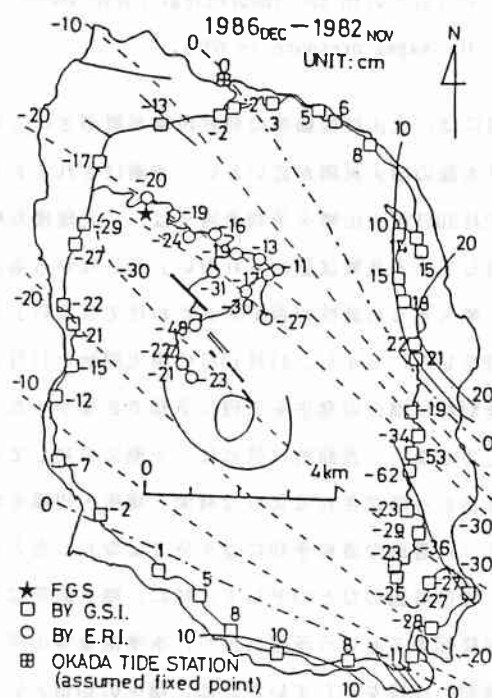


Fig.8, Vertical displacement of the Izu-Oshima volcano measured by leveling during the time interval including the volcanic eruption (after Tada and Hashimoto, 1987).

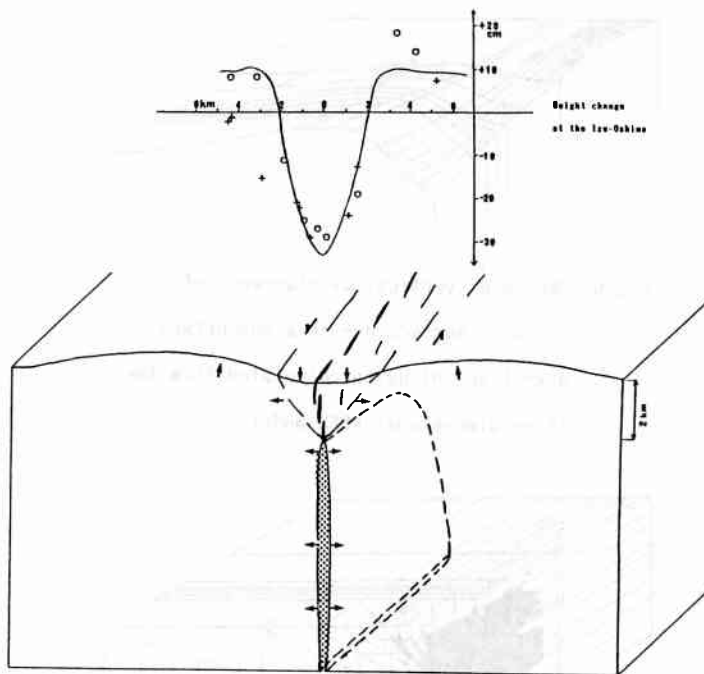


Fig.9, Model of graben subsidence over a large dike-like magma intrusion in the Izu-Oshima volcano.

The upper diagram shows the vertical displacement measured in the Izu-Oshima volcano with the theoretical curve where the magma pressure is 6MPa.

た。実際には、火山性微動等の前兆現象が観測されていて、伊豆大島の噴火再開が近いという予測はされており、1986年10月30日の火山噴火予知連絡会は、「大規模な噴火が切迫している兆候は認められない」としながらも、「将来、噴火する可能性が否定されたわけではない」という発表をした。しかし、11月15日の噴火開始と11月21日の山腹割れ目噴火の発生を正確に予知できなかったことは否定できない。長期的に見れば、予測に成功していたが、社会から要求されるような時間・場所・規模を特定したような適確な直前予知には十分ではなかったといえよう。その原因のひとつとして、特に、噴火直前には山頂部が隆起するという予想に反し、水準測量等のデータが山頂部の沈降を示していたため、噴火の切迫という判断に踏みきれなかったといわれている⁹⁾。

地下のマグマの圧力が増大したとき、マグマ溜りの形態によって、直上の地表部が隆起する場合と、逆に沈降

する場合があることが明らかになった。広域的にはいずれの場合も隆起する。玄武岩質の粘性の低いマグマは、細い割れ目中に貫入しやすいので、岩脈型マグマ溜りを作り、マグマ貫入による沈降現象が生じやすい。今回の大島の割れ目噴火は、その典型であると考えられる。

火山噴火予知のための地殻変動の観測は有効であるが、少数点の上下変動観測のみでは十分ではない。かなり広い範囲での面的な観測が必要であり、また水平歪や応力変化等の観測との併用も望まれる。地下の巨大な岩脈の貫入が噴火直前であったが、あるいはかなり前に貫入していたかというような問題も、長期継続的かつ面的な観測があってはじめて明らかになるだろう。

【参考文献】

- 1) 浜島良吉・川井忠彦・山下清明・草深守人・山田俊雄：亀裂および節理系岩盤の進行性破壊の解析に関する研究，応用地質，28巻，pp.115-125，1987.
- 2) Kawai, T.: Some consideration on the finite element method, Int. J. for Numerical Methods in Engineering, vol.16, pp.81-119, 1980.
- 3) 浜島良吉・渡辺正明・桜井孝臣・船生健一：不連続性を考慮した岩盤内の熱移動，浸透流，応力解析について，第11回構造工学における数値解析法シンポジウム論文集，pp.97-102，1987.
- 4) 茂木清夫：桜島の噴火と周辺の地殻変動との関係，火山，第2集，1巻，pp.9-18，1957.
- 5) 小出 仁：流体貫入（ダイアビル）機構の解析とテクトニクス，月刊地球，vol.4，35号，pp.15-22，1982.
- 6) 多田 堯・橋本 学：1986年伊豆大島噴火と地殻変動，月刊地球，vol.19，97号，pp.396-403，1987.
- 7) 山科健一郎・多田 堯・橋本 学・山本英二・島田誠一・上垣内 修：1986年伊豆大島火山噴火の力学的モデル，日本火山学会講演予稿集，No.1，pp.51，1987.
- 8) 伊藤和明：火山噴火予知と防災，岩波ブックレット 80，63p.1987.

第7回岩の力学国内シンポジウム講演論文集

Proceedings of the 7th Japan Symposium on Rock Mechanics



1987年12月1日(火)~2日(水)

於：農協ホール・日経ホール(東京)

共催：岩の力学連合会，土木学会，土質工学会，日本鉱学会，日本材料学会

協賛：骨材資源工学会，地震学会，地すべり学会，日本応用地質学会
日本測地学会，日本地質学会，物理探査学会，地熱学会