

特集「無人観測ロボット その2」

伊豆大島火山のマグマ供給システムと噴火予測

渡辺 秀文¹

(要旨) 最初に、伊豆大島火山1986年噴火前後の観測データを総合して得られた、噴火の中長期的前兆過程の概念モデルとその実証結果を紹介する。次に、1989年後半以降再開した深部からのマグマ供給による山体膨張変動の特徴、およびそれと大島直下の上部マントルで発生する深部低周波地震活動との関連についての新しい知見、それらから得られる山体変動メカニズムの仮説を紹介する。最後に、噴火準備過程とその進行状況の指標が得られる可能性を述べ、仮説を実証するための今後の課題をあげる。

1. はじめに：噴火予知研究の現状と課題

火山噴火を予知するためには、以下の5要素(噴火の時期、場所、規模、様式、推移)を予測する必要がある。もし、これらの全てに答えることを予知というならば、噴火予知はまだ当分は不可能であろう。その理由は、マグマそのものや火山噴火に至るメカニズムをまだ完全には理解できていないためである。表1に、火山噴火予知研究の現状と関連する課題を模式的に示す。

これまで火山噴火予知の研究では、噴火の前兆現象を捉えることに多くの努力を払ってきた。その結果現在では、常時観測を続けている火山で噴火が起こる場

合には、ある程度の予測をすることができるようになった。例えば、ハワイのキラウエア火山や鹿児島県の桜島火山では、噴火の予報が可能な段階になっている。噴火の数時間前には山体がごくわずかに膨らみ、小さな地震も起こるので、こういう噴火の兆候が捕捉されると、これから数時間以内に噴火が起るだろうという予報が可能である。このように、噴火がもうすぐ起こるかどうかを予知することを短期的予知という。その火山で同じ様式の噴火が繰り返し起こっている場合には、噴火に伴って発生する異常現象を数多く観測して経験をつめば、短期予知はかなりの程度実用的になる。数百年あるいは数千年に1回噴火するような火山では、このような経験を積むことはできないが、そのような火山でも観測体制がある程度整っていれば、噴火前に何らかの異常現象が捉えられるので、噴火が起こりそうだと予測することが可能な場合がある。例えば、雲仙普賢岳が1990年11月17日に198年ぶりに噴火を始めた際には、火山研究者達はその数ヵ月前から噴火の可能性を認識し、1ヵ月前には確実に噴火するだろうと予測して、様々な観測の準備をしていた。

しかし、今は静かな火山が10年後に噴火するか、あるいは10年間は噴火しないかどうかという、中長期的な予知については非常に困難である。噴火に前兆現象があるとしても、その前兆がいつ発生するのか予想できないからである。中長期予測の方法としては、各火山の過去の噴火の記録を解き明かして、何年毎に

表1：火山噴火予知研究の現状と課題。

活動プロセス	長期	中期	短期	推移	今後の課題
マグマ供給系	△	○	○	△	構造探査・噴火履歴
供給様式	△	○	○	△	集中観測
噴火準備過程	△	○	◎	—	観測解析技術開発 物理化学モデル
マグマの移動	—	—	◎	○	3次元構造・応力場
	>10年	-10年	<1年		

△ 研究例少ない ○ 統合観測による事例研究進展中 ◎ 常時観測により可能

1. 東京大学名誉教授
watanabe@eri.u-tokyo.ac.jp

噴火する特徴があるかなどを調べることが考えられる(噴火履歴の解明)。さらに根本的には、噴火に至る仕組みを理解し、観測によってそれらを把握することが必要である(噴火準備過程の把握)。

噴火の様式(爆発的噴火、溶岩噴泉、水蒸気爆発など)についての予知もかなりやっかいである。ひとつの火山でもいろいろなタイプの噴火をすることがあるので、将来起こる噴火がどのような様式のものかを正確に予測することは大変困難である。それでも過去の噴火の様式を詳しく調べれば、その火山でどのようなタイプの噴火が多いのかはわかるし、その場合に災害を減らすためにはどのような準備をしておけばよいかも予測することができる。

もうひとつやっかいな問題は、噴火が始まった後で今後どうなるだろうかという見通しに関する予知である。残念ながら、現在のところこの予知はほとんど不可能である。その理由は、噴火を引き起こすマグマが地下にどのくらい蓄えられているのかがよく分からないからであり、たとえそれが分かったとしても、その内どれだけが噴出してしまえば噴火が終わるのかなどが分からないからである。これらの問題に答えるためには、地下に蓄えられたマグマの量を知るとともに、噴火が起こるメカニズムについてより具体的に理解を深める必要がある。

火山活動の仕組みについてもっと理解を深め、活動予測をより確実なものとするために、最近いくつかの新しい試みがなされている。ひとつは火山体の地下構造を詳しく調べることによって、マグマ溜まりの位置、形、大きさやマグマの上昇経路となる火道、さまざまな異常現象発生の鍵となる地下水の分布などを明らかにしようとする試みである。マグマはどこにあるのか?噴火の前にはどのように上昇してくるのか?その時噴火の前兆現象はどこでどのように発生するのか?これらが分かれば、噴火前の短期的な異常現象が観測された際に、その意味を的確に解釈することができるであろう。もうひとつは、中長期的予測をめざして噴火の準備過程、すなわち噴火と噴火の間に地下のマグマ溜りでは何が進行しているのかを明らかにしようとする試みである。本論文では、これらの問題に関して伊豆大島火山において実施されてきた研究の成果をレビューする。

2. 伊豆大島火山の噴火履歴と噴火シナリオ

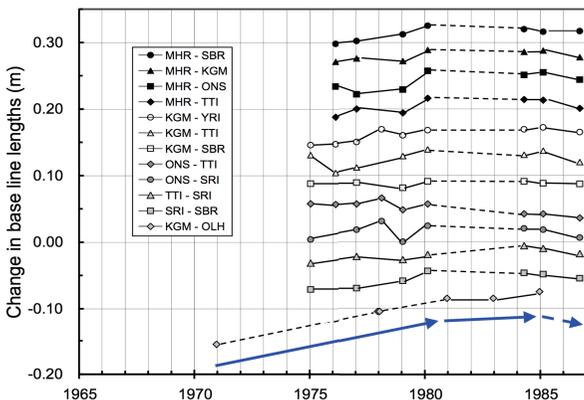
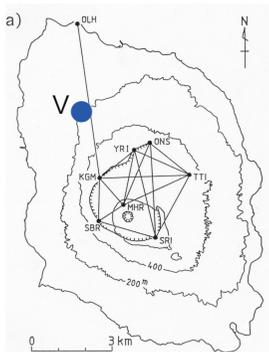
伊豆大島火山の基盤をなす3個の火山は、10万年前よりも古い時代に活動したものと推定されている。現在の伊豆大島火山は数万年前から活動を開始し、スコリア(黒灰色の多孔質噴出物)、溶岩流、火山灰放出というパターンを繰り返して山体を形成した。約1700年前の大噴火に伴い山頂カルデラが形成された。噴火堆積物の地質学的調査によってその後の詳細な噴火履歴が明らかにされ、数億トン以上を噴出する大規模噴火が150～200年間隔で繰り返し発生したことがわかっている。最後の大規模噴火が安永噴火(1777～92年)である。安永噴火以降は中規模以下の噴火のみで、最近では数千万トンを噴出する中規模噴火が30～40年間隔で繰り返し発生している。1986年噴火が最新の中規模噴火である。

3. 伊豆大島火山1986年噴火の前兆過程と概念モデル

1986年噴火では、噴火前後の観測により様々な前兆現象が観測され、マグマ供給システムについて重要な情報が得られた。以下に、噴火の10年以上前から観測された前兆過程の特徴とそれを説明するモデルを紹介する。

噴火開始前には、多くの場合、火山体の隆起・膨張や地震活動の高まりが観測される。しかし伊豆大島火山1986年噴火では、噴火の数年前から噴火開始直前に至るまで、山頂カルデラ内では隆起・膨張が観測されず、地震活動の高まりもみられなかった。図1に、光波測距による山頂カルデラと北山腹を横断する基線長の変化とカルデラ内の年間地震発生回数の推移を示す。1970年代から1980年頃にかけては、経年的な基線長の伸びと地震活動の高まりが認められるが、噴火開始前の数年間は特に顕著な異常変化は認められない。一方山頂火口周辺では、1980年頃以降、地磁気全力や見かけ比抵抗の経年的な減少が観測され、特に噴火の3ヶ月前からは減少速度が加速した[1]。これらは、明らかに火口地下の温度上昇を示すもので、噴火の短期的な前兆現象であった。1986年10月に開催された火山噴火予知連絡会では、これらの一見矛盾する異常現象の解釈に苦慮したが、地殻変動観測で山頂部の隆

山体変動：EDM



地震活動

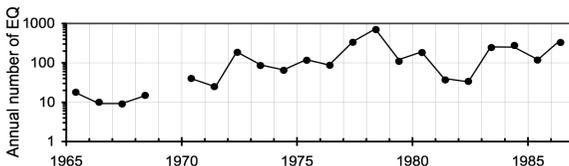


図1：伊豆大島火山1986年噴火前のカルデラおよび北山腹を横断する基線長の変化と地震活動。記号Vは気象庁体積歪計の設置場所。

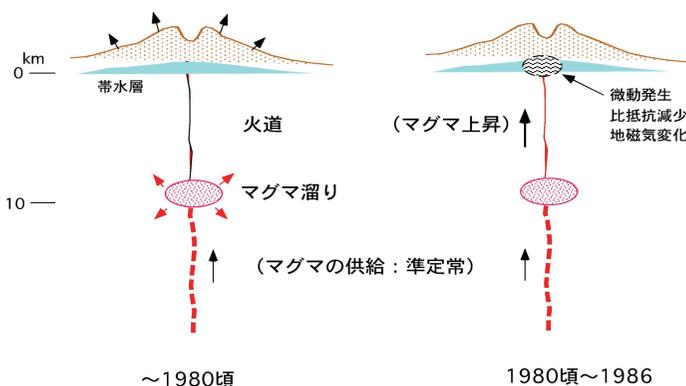
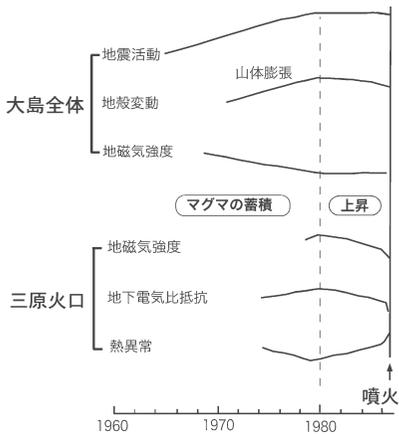


図2：伊豆大島火山1986年噴火前兆過程の模式図。 図3：伊豆大島火山1986年噴火のマグマ供給系概念モデル。

起・膨張が認められないことを重視し、本格的な噴火はしばらく後であろうと判断された。しかし実際には、その約1ヶ月後に山頂噴火が始まった。このことは、当時の噴火予知計画関係者には痛恨事であり、筆者にとってもその後の観測研究の強い動機となった。

筆者は噴火後、噴火前の地震、地殻変動、電磁気観測データを総合的に検討し、一見矛盾する前兆現象が

統一的に説明できることに気づいた[2]。1986年噴火の前兆過程の模式図を図2に、それを統一的に説明する概念モデルを図3に示す。深部からマグマ溜りへの準定常的なマグマ供給により山体膨張が継続していたが、1980年頃にマグマ溜りから火口へ向けて火山ガスやマグマが上昇開始するとともに、山体膨張が鈍化し、火口地下浅部の温度上昇により地磁気や比抵抗の

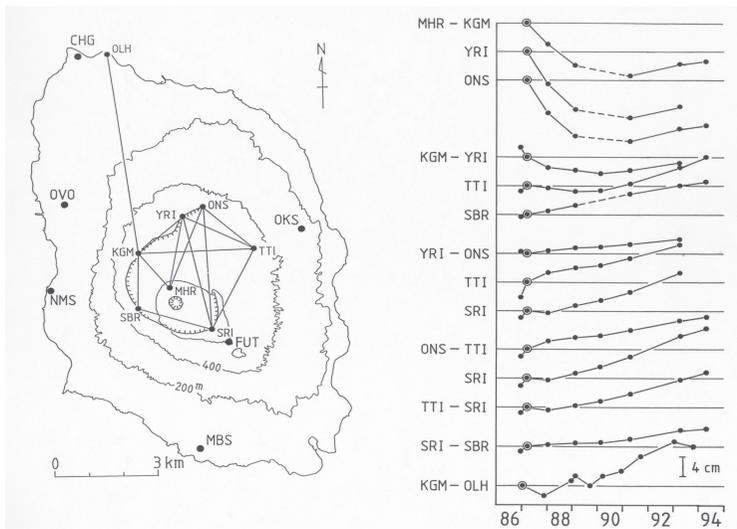


図4：1986年噴火後のカルデラおよび北山腹を横断する基線長の変化。

異常変化が始まったというわけである。このモデルの基本的な仮定は、「噴火準備期における深部からの準定常的なマグマ供給・蓄積による山体膨張の継続」であるが、噴火後も繰り返した光波測距およびその後のGPS観測によって実証された(図4) [2, 3]。伊豆大島火山の山体膨張は1989年後半に再開し、表面現象は静穏であるが現在も継続している。

4. マグマ供給システムに関する課題と観測成果

伊豆大島火山の中長期的な噴火予測のためには、マグマ供給システムと噴火準備の物理化学過程を解明する必要がある。具体的な課題としては、マグマ供給系の3次元構造の解明、深部からのマグマ供給・蓄積過程の把握、噴火に至る過程の理解(特に、マグマ溜り内の揮発成分濃度や気泡存在度の変化、噴火へ向けてのマグマ再上昇開始の条件など)があげられる。これらの課題を解決するために、噴火後も様々な観測研究が実施され、いくつかの重要な成果が得られている。以下に、それらを紹介する。

1986年噴火後に整備された稠密地震観測網によって、大島周辺で発生する地震の精密な震源決定ができるようになった。1997-98年に大島周辺で発生した地震の震源分布を図5に示す。震源の深さの下限が、大島沿岸から海域では5 kmより深い、大島中央部

直下では海面下約2 kmと浅くなっているのが注目される。点線より深い領域では殆ど地震が発生していない(earthquake-free zone)。また、国土地理院が噴火後に実施した三角点のGPS測量により、大島がカルデラ北部を中心として放射状に膨張していることが分

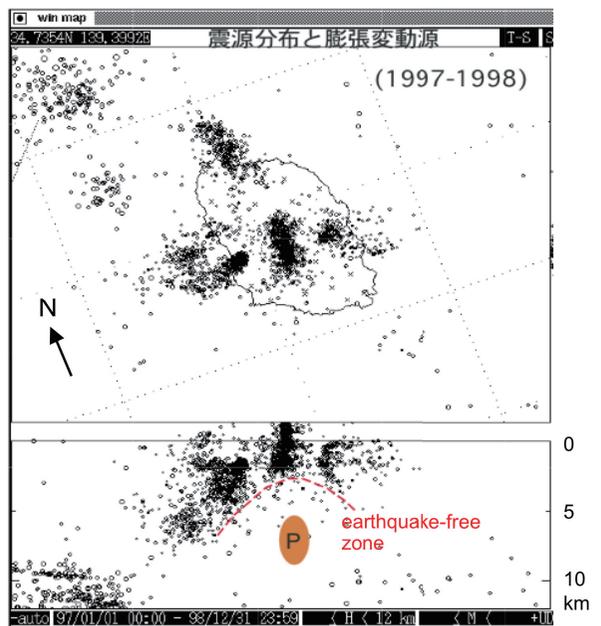


図5：伊豆大島周辺で1997-98年に発生した地震の震源分布と山体膨張変動源の推定領域(P)。

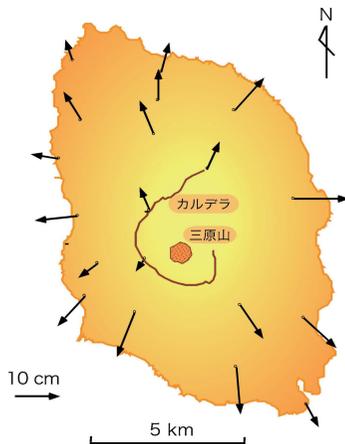


図6：伊豆大島火山における三角点の水平変位ベクトル(1988-94年)．国土地理院GPS繰り返し測量による ([4]より転載)．

かった(図6) [4]．膨張変動源の深さは約5～9 kmと推定され、図5の下部断面図に記号Pで示してある．さらに、稠密地震観測網を用いて、大島周辺数百kmの範囲で発生する近地地震からの入射P波の散乱波形を観測し、散乱波トモグラフィーによって大島地下の散乱体分布がイメージングされた(図7)．深さ9 km付近の強い散乱体はメルトでないと説明できず、マグマ溜りと解釈された[5]．これら独立な三つの観測成果を総合すると、伊豆大島火山の主マグマ溜りは大島中央部の地下9 km付近にあり、その周囲には、高温のために変形するが地震は発生しない、延性領域が存在するものと推定される．

残された重要課題は、マグマ溜り内でどのような物理化学的变化が進行し噴火に至るのかという噴火準備過程の理解と、それを如何にして観測により捉えるかという問題である．

5. 最近の山体変動の特徴と噴火準備過程の探求

最近の山体変動の特徴、および山体変動と大島直上の上部マントルで発生する深部低周波地震活動との時間的な相互関連から、噴火準備過程の解明にとって重要な情報が得られている．以下に概要を紹介する．

伊豆大島においては、1996年頃から国土地理院によりGPS連続観測が開始され、その後、東京大学地震研究所、防災科学技術研究所、気象庁によって稠密

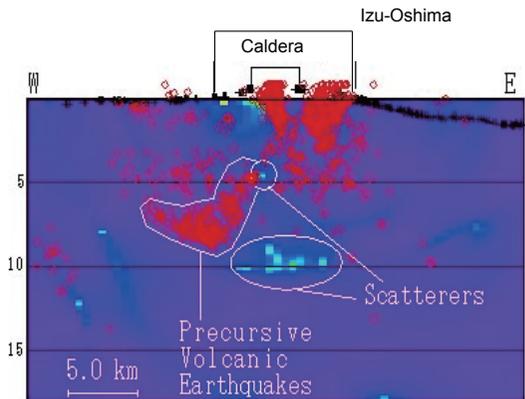


図7：散乱波トモグラフィーによって捉えられた伊豆大島地下の散乱体分布(青色)と震源分布(赤色)の山頂カルデラを通る東西断面図([5]より転載)．

なGPS連続観測網が展開されている．国土地理院による大島を南北、東西に横断する基線長の経年変化を図8に示す．経年的な山体膨張が継続しているが、その速度には鈍化傾向が認められる．また重畳して、収縮・膨張の揺らぎが繰り返し発生している．このような山体膨張の特徴は、伊豆大島北西山腹に設置されている、より高感度な体積歪計の観測データにさらに明瞭に認められる(図9)．図9の上部は、トレンド補正後の歪変化と指数減衰曲線で近似した長期トレンド除去後の残差変動、下部はカルデラ内で発生する地震の月間回数である．経年的な膨張変動は2006年までは指数減衰曲線で非常に良く近似できるが、2007年以降、経年的な膨張速度が指数減衰トレンドから外れて大きくなっていることが分かる．殆どの残差変動イベントは収縮から始まり膨張に転じており、膨張加速期間にカルデラ内の地震発生回数が増大していることが注目される．また、残差変動の振幅と継続時間は1999年頃以降増大しており、最後の2010年のイベントでは振幅が約 2μ strainとなっている(図10)．このような歪の収縮-膨張変動は1986年噴火前にも観測されており、振幅は最大で約 5μ strainであった．これらの膨張変動の特徴から、以下に述べるように、噴火準備過程について重要な示唆を得ることができる．

殆どの残差変動イベントが収縮から始まり膨張に転じることは、変動メカニズムについての重要な制約である．収縮の原因としては、深部から上昇蓄積したマ

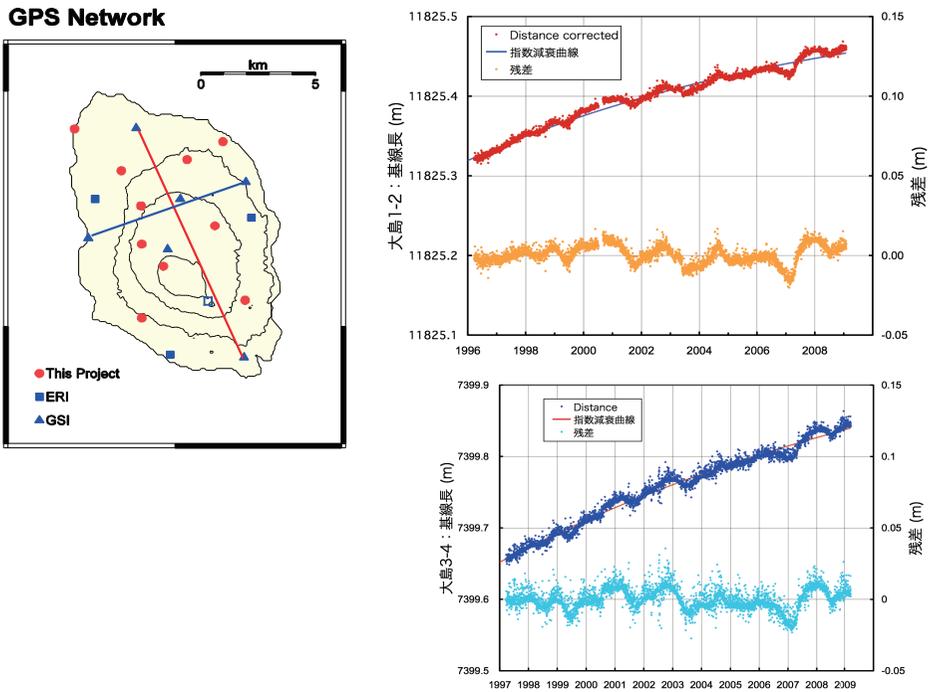


図8：図左は、伊豆大島における稠密GPS観測網。図右は、国土地理院による山体を横断する基線長の経年変化(図右上：山体を南北に横断する基線長変化，図右下：山体を東西に横断する基線長変化，曲線は指数減衰曲線による近似，右上と右下の図の下部は観測値から近似曲線を差し引いた残差)。

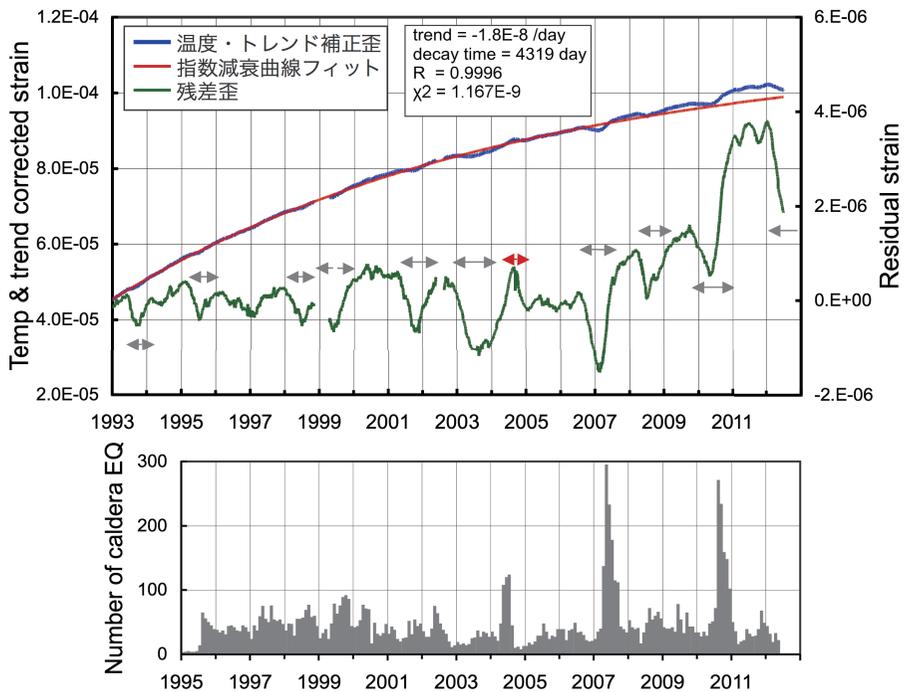


図9：図上は、伊豆大島北西山腹の気象庁高感度体積歪計(図1の記号V)によって捉えられた、歪の経年変化と指数減衰曲線で近似した長期トレンドを差し引いた残差変動。図下は、カルデラ内で発生する地震の月間回数。

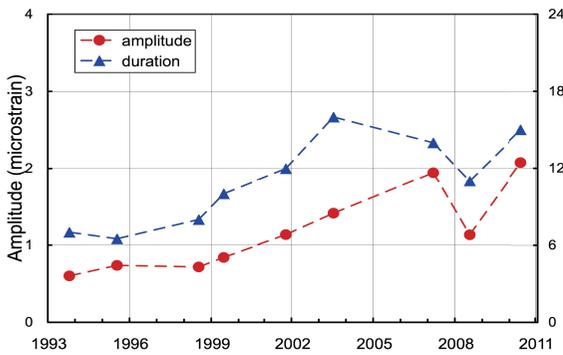


図10：歪収縮-膨張変動イベントの振幅と継続時間の推移。

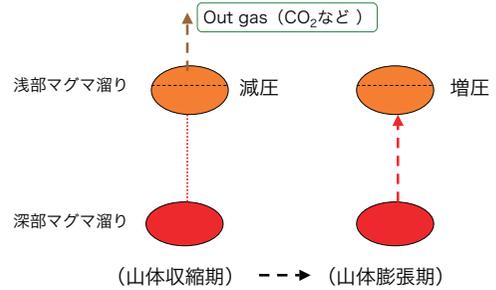


図11：山体収縮-膨張変動サイクル発生メカニズムの概念モデル。

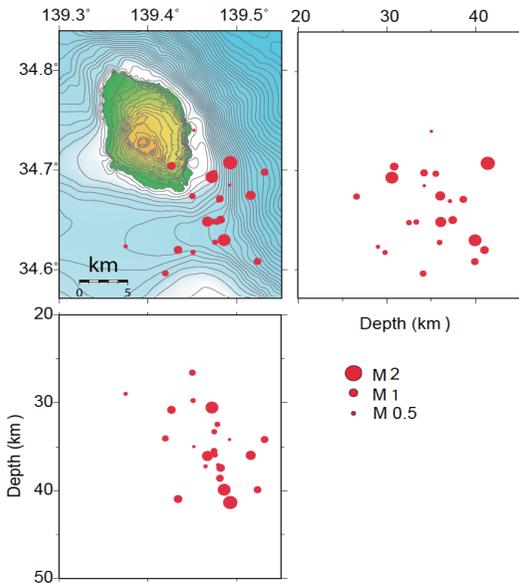


図12：伊豆大島南東直下の上部マントルに発生する深部低周波地震の震源分布(2001-11年, 気象庁一元化震源による)。

グマの後退とマグマ溜りからのガス流出による減圧が考えられるが、収縮-膨張サイクルの規則性を考えると前者は考え難い。収縮-膨張サイクルを説明する概念モデルを図11に示す：(1)浅部マグマ溜り上部に濃縮したCO₂に富む気泡が間欠的に外部へ流出することにより減圧し、(2)その結果生じる深部マグマ溜りとの圧力差の変化により、深部から浅部へ向けて揮発性に富むマグマの上昇が起こり、(3)浅部マグマ溜りへ上昇したマグマの発泡により浅部マグマ溜りの増圧が起こる。このモデルが正しければ、1999年以降に

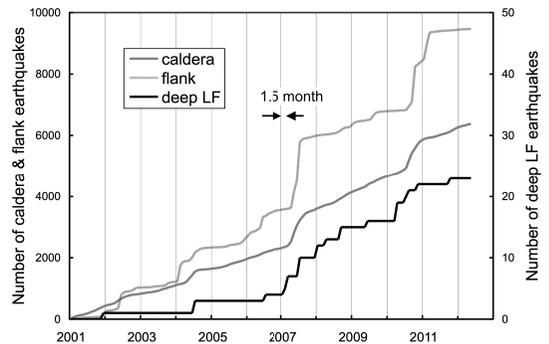


図13：深部低周波地震、山体周辺およびカルデラ内で発生する地震の積算回数。

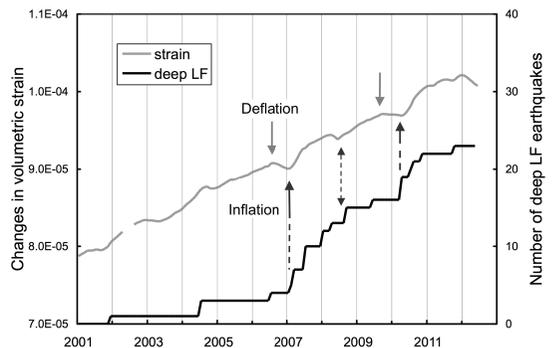


図14：体積歪変化と深部低周波地震積算回数の関係。

観測されている収縮-膨張変動の振幅増大は、浅部マグマ溜り上部の気泡に富んだ領域の体積増加を示唆し、噴火準備過程の進行を示す重要な指標となる可能性がある。例えば、図10の収縮-膨張変動振幅の増加傾向

をそのまま外挿すると、1986年噴火前の最大振幅約5 μ strainに達するのは約10年後となる。

経年的な膨張速度が2007年以降それまでの指数減衰的なトレンドから外れて大きくなっていることについても、大島直下深さ30~40 kmの上部マントルに発生する深部低周波地震活動から新たな知見が得られている。気象庁一元化処理による2001-2011年の期間の深部低周波地震の震源分布を図12に、深部低周波地震と山体周辺およびカルデラ内で発生する地震の積算回数を図13に示す。図13から、深部低周波地震の発生回数が2007年以降増大していること、それに約1.5ヶ月遅れて山体周辺の地震回数が増加していることが分かる。また、2010年の膨張イベントに際しても同様な時間的な関連が認められる。従って、2007年以降の山体膨張速度の増大は、上部マントルからのマグマ供給率の増大によるものと考えられる。さらに、体積歪変化と深部低周波地震の積算発生回数の関係を調べると、2007年および2010年の両イベントとも、山体収縮が先行し、その後の反転膨張と深部低周波地震の発生回数増加がほぼ同期していることが分かった(図14)。このことは、図11に示した収縮-膨張サイクルの概念モデルを支持する重要な観測事実である。

6. 今後の課題

本論文では、1986年噴火前後の観測データを総合して得られた伊豆大島火山のマグマ供給システムに関する概念モデル、およびその実証結果を紹介した。また、最近の山体変動の特徴および山体変動と大島直下の深部低周波地震活動との関連にもとづき、山体収縮-膨張変動の概念モデルを提案した。特に、浅部マグマ溜りからのガス流出が山体収縮-膨張サイクルをトリガーするという仮説は、収縮-膨張変動の振幅変化から噴火準備過程の進行状況を推定する指標を得られることになるので、重要な実証課題である。そのためには、山体変動と火口周辺でのCO₂ガス放出量変化との関連を調べる必要がある。筆者は2005年以来、山頂火口近傍で地中CO₂ガス濃度の連続観測を継続しているが、山体膨張の加速に引き続いて地中CO₂濃度が上昇することを確認している。今後も観測を継続し、山体収縮期にもCO₂濃度の上昇が見られるかどうかを確認する予定である。

謝辞

国土地理院からはGPS測位データ、気象庁からは体積歪変化データおよび深部低周波地震の一元化震源データを提供していただきました。伊豆大島無人観測ロボットシンポジウムにおける講演および遊星人への投稿の機会をいただいた主催者代表・佐伯和人先生に感謝致します。

参考文献

- [1] Yukutake, T. et al., 1990, J. Geomag. Geoelectr. 42, 151, 277.
- [2] 渡辺秀文, 1998, 火山 43, 271.
- [3] 渡辺秀文, 1995, 科学 65, 631.
- [4] 国土地理院, 1996, 火山噴火予知連絡会報 65, 38.
- [5] Mikada, et al., 1997, Phys. Earth Planet. Inter. 104, 257.