

(1) 実施機関名：

東京大学地震研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

フィリピン海プレート北縁における地殻構造と火山深部構造の解明

(3) 最も関連の深い建議の項目：

2. 地震・火山現象解明のための観測研究の推進

(1) 日本列島及び周辺域の長期・広域の地震・火山現象

エ. 地震活動と火山活動の相互作用

(4) その他関連する建議の項目：

2. 地震・火山現象解明のための観測研究の推進

(2) 地震・火山噴火に至る準備過程

(2-2) 火山噴火準備過程

ア. マグマ上昇・蓄積過程

(5) 本課題の5か年の到達目標：

建議に記載されている「海底観測を含む地震，地殻変動，地球電磁気等観測を行い，火山流体の移動と地震活動の関連を明らかにする」ため，マグマ移動に伴う火山性地震や群発地震の活動度の高いフィリピン海プレート北縁の伊豆大島，伊豆東部，富士山等の地域の構造を，地震探査，電磁気探査，重力探査から推定する．これらの地域では，これまでの研究で浅部構造がある程度解明されているので，火山噴火に直接かわるマグマ溜りの存在が指摘されている深さ約 10km 以深の地殻構造に焦点を当てて，火山の深部構造の解明を行う．地震波速度構造，比抵抗構造から，地下の火山流体の分布を明らかにし，この地域における地震活動と火山活動の関連を明らかにする．

伊豆大島では，海陸合同の人工地震探査を実施し，深さ 4km 付近の浅部と深さ 10km 付近の深部でのマグマ分布の検出を試みる．海中発破及びエアガンによる多数の制御震源と稠密な陸上と海底の地震観測を組み合わせ，深さ 10km 付近からの反射波の地域分布に注目し，マグマ分布の推定を目指す．また，伊豆大島で観測されている間欠的な山体膨張とそれに同期する地震活動の時間変化を，マグマ蓄積が及ぼす応力変化を定量的に推定し，地震活動の時間変化の原因を火山体の不均質構造，周辺の広域応力場の影響も考慮に入れて解明する．

伊豆半島東方沖群発地震活動では，これまでマグマ貫入深度が 5 km 付近と 8km 付近の 2 つのグループに分かれる可能性が指摘されているが，過去の観測データを再解析し，貫入深度が 2 つに分かれることを精度の高い震源分布や地殻変動データから再検証する．この 2 つのマグマ貫入深度の違いの原因を，その南東約 30km に存在する伊豆大島の火山深部構造やマグマ蓄積の様式と比較することにより，明らかにすることを目指す．

富士山では，東西方向の電磁気構造探査により深さ 25km 以深に低比抵抗領域が存在するモデルが提唱されているが，低比抵抗域の広がりや富士山直下で発生する低周波地震との関連については明らかにされていない．この課題により南北方向の電磁気構造探査を行い，この深部低比抵抗体の空間的

な広がりを求め、地震波速度構造の結果と比較し、富士山の地下構造と山体直下の深部低周波地震の発生の関連を明らかにする。

(6) 本課題の5か年計画の概要：

平成21年度には、伊豆半島～伊豆大島～房総半島沖の領域の南西～北東方向に走行を持つ総延長約70kmの測線で、陸上観測点約250点、海底観測点約30点の観測点を設置し、9か所で海中発破を実施する人工地震探査を行うとともに、測線に沿ってエアガンによる制御震源を発振する大規模構造探査を実施する。これにより、伊豆大島直下及びその周辺の地震波速度構造の推定を行う。屈折法解析と同時に反射法解析も行い、これまでの解析では不明瞭であった深さ約10kmでの反射面（速度不連続面）付近の構造を精度良く推定する。1999年に実施した北西～南東に測線を設定した人工地震構造探査の結果とも併せて、深さ約10kmからの反射波の強度分布からマグマ蓄積場所を特定できるか否かの可能性を検証し、伊豆大島火山のマグマ蓄積に関する新たな知見を得ることを目指す。

上記構造探査で得られる速度構造の情報を用いて、浅部マグマ溜り（深さ約4km）と深部マグマ溜り（深さ約10km）を分離したマグマ蓄積時間変化の検出を試みる。これらのマグマ溜りは、それぞれ1986年噴火の際の割れ目噴火のマグマの起源と山頂噴火のマグマの起源に相当すると考えられ、相互のマグマ蓄積の関連を解明することは、地下のマグマ蓄積現象の本質を理解する上で極めて重要な情報である。更に、マグマ蓄積に伴う応力変化を定量的に解析し、火山体の不均質構造、周辺の広域応力場の影響も考慮に入れ、伊豆大島で見られる山体膨張に同期した地震活動の時間変化を説明するモデルを構築する。

平成22年度には、平成21年度に実施した人工地震構造探査の解析を更に進め、1999年に実施した構造探査実験も併合して解析し、伊豆大島近傍の地震波速度構造をより精度良く推定することを試みる。更に、絶対重力計による高精度重力測定を伊豆大島火山観測所、鉦端観測点で実施すると共に、これらの点を基準とした相対重力測定を伊豆大島のカルデラ内を中心とした地域で実施する。また、伊豆大島で超長周期MT観測を行い、これまで実施してきたAMT観測、MT観測のデータと併合処理し、伊豆大島の地下数kmまでの比抵抗構造を明らかにする。比抵抗構造と地震波速度構造を比較し、伊豆大島の地下の火山流体の分布の検出を試みる。

平成23年度には、フィリピン海北縁に位置する富士山周辺において、絶対重力と相対重力の測定を行う。また、これまで蓄積された伊豆大島、伊豆半島、富士山周辺の地震記録を解析して地下構造の推定を行い、人工地震探査の結果と比較する。これまでの地震活動、地殻変動、構造探査の結果を統合し、伊豆大島、伊豆半島の火山性流体の存在を検証し、マグマ供給系を明らかにする。また、これらのマグマ供給系の構造と、この地域の地震活動を火山性流体の存在とこの地域の広域応力場の関連を考慮に入れて考察する。

平成24年度には、伊豆大島における絶対重力と相対重力を再測し、平成22年度の測定と比較して重力の時間変化を調査する。有意な重力変化があった場合には地殻変動等の観測データと比較し、その原因の地球物理学的な意義を明らかにする。富士山周辺において、これまで実施してきた北西～南東方向の電磁気構造探査と直交する北東～南西方向の電磁気構造探査を実施し、富士山直下の3次元電磁気構造探査を行い、富士山のマグマ供給系を明らかにする。また、これまでに蓄積されてきた自然地震の観測データを用いて、伊豆半島から富士山周辺にかけての地震活動と、火山性深部低周波地震、マグマ貫入に起因する地殻変動を関連について明らかにする。

平成25年度には、富士山周辺で絶対重力及び相対重力の測定を行い、平成23年度の測定結果の比較し、重力の時間変化を調査する。有意な重力変化があった場合には地殻変動等の観測データと比較し、その原因の地球物理学的な意義を明らかにする。伊豆大島では超長周期MT観測を行い、平成22年に実施した同様の観測と比較し、伊豆大島の地下数kmまでの比抵抗構造の時間変化の検出を試みる。これまでの各種構造探査の結果を統合し、この地域の火山性流体の存在が、地震活動とマグマ蓄積活動に与える影響を明らかにし、この地域の地震活動と火山活動の関連を明らかにする。

(7) 計画期間中(平成21年度~25年度)の成果の概要:

伊豆半島、伊豆諸島の位置するフィリピン海北縁は、伊豆半島北方でのプレートの衝突と相模湾と駿河湾における沈み込みにより、ほぼ水平方向に最大主応力と最小主応力を持つ応力場に支配され、深部からのマグマの上昇に呼応した火山性地震活動やダイク貫入に伴う群発地震活動が、高い頻度で発生している。例えば、1986年の伊豆大島噴火、2000年三宅島噴火の際の地震活動や、1970年代後半から現在まで続く伊豆半島東方沖群発地震活動では、ダイク状のマグマが貫入を示唆する地震活動が観測されている。このような地震は、広域応力場とマグマの貫入により生じる応力の両者の影響で発生していることが知られている。本研究は、特徴的な広域応力場にあるフィリピン海北縁において地震活動と火山活動が強く関連しているダイク貫入現象を中心とした、以下の研究を実施した。

(1) 地震活動から推定した繰り返し発生するダイク貫入現象(伊豆東方沖)

(2) ダイク貫入を起こす火山島直下の地震波速度構造(伊豆大島)

(3) 火山直下の地下比抵抗構造と重力探査(伊豆大島、富士山)

(4) 2000年三宅島噴火に伴う震源移動から推定した大規模マグマ貫入機構

(5) 山体膨張・収縮を繰り返す火山での地震活動の定量的なモデル化(伊豆大島)

このうち、(1)~(3)は昨年度までの成果であるので、簡単に概要を記述し、(4)及び(5)について詳細に記述する。また、最後に、地震活動と火山活動の相互作用について総括する。

(1) 地震活動から推定した繰り返し発生するダイク貫入現象

伊豆半島東方沖で発生する群発地震は、震源分布、発震機構解、震源移動、地殻変動の時間変化より、ほとんどの地震は貫入するマグマの先端で発生し、震源移動がマグマの移動を描出していることが明らかにされている。2009年12月に発生した群発地震は、1970年代から発生した一連の群発地震活動によるマグマ蓄積の時間変化を理解する上で、極めて有効な事例となった。

この地域の群発地震活動は、1)主活動が深さ3~7 kmである浅い活動と、7~10kmの深い活動に大別でき、それらは異なる密度のマグマがそれぞれの浮力中立で停留したと見られる。2)1990年代は浅い活動が多かったのに対して、2000年以降は2009年12月を除いて全て深い活動であり、1998年以降11年ぶりの浅い活動であった。3)今回の活動を除き、これまで全ての群発地震活動の震源は、鉛直から約20度傾斜した面上に並ぶ。これは周辺応力の作る最小主応力の方向に垂直な面にマグマが貫入してきたことを示している。4)マグマ中立深度とダイク内の過剰圧には系統的な相関が存在する。これはマグマ先端での破壊条件が、ダイクの広がり制御していることを示している。

この活動はa)震源が深さ8から6 kmに上昇する活動、b)深さ6kmから浮力中立深度と思われる4.5kmまで上昇する活動、c)浮力中立点周りに広がる活動の3つの活動に明瞭に分類できる。これまでの活動ではa)とb)に明瞭な区分はなかった。更に、深さ8~6kmに上昇する活動の震源はこれまでと同様に、鉛直から約20度傾斜した面に分布するが、それより浅い活動の震源はほぼ鉛直の面上に分布し、これまでの活動とは異なった面上に群発地震は発生した。この活動は、マグマが上昇する際に、深いマグマ蓄積領域と浅いマグマ蓄積領域の境界で、これまでと異なる新たな面を形成し、そこに貫入したと考えられる。このようなことが起こったのは、マグマの浮力中立深度付近の局所的な最小主応力の方向が、これまでの一連のマグマ蓄積により変化したと考えることができるかも知れない。この現象は、マグマ蓄積範囲が拡大してマグマ溜りが拡張を始める過程を示し、より大きなマグマ溜りへの成長過程の初期段階にあることを示していると考えられる。

(2) ダイク貫入を起こす火山島直下の地震波速度構造

伊豆大島では1986年噴火の際に、大規模なダイク貫入が発生したことが知られている。ダイクはマグマの浮力中立深度に沿って水平に広がると考えられているため、火山周辺の構造を知ることが極めて重要である。特に、次の噴火においてもダイク貫入現象の発生が懸念される伊豆大島周辺の構造を事前に知っておくことは、ダイク貫入現象の科学的な理解の深化と共に山腹噴火の可能性も考えられることから、火山防災上も極めて重要である。

人工地震による構造探査実験を、2009年10月26日から11月3日の期間に実施した。伊豆半島下田沖から伊豆大島を通り、房総半島沖まで西南西~東北東に並ぶ約60kmの測線に、約2km間隔で海

底地震計 39 台を設置した。また、伊豆大島島内には約 50m 間隔で、東西方向に約 180 台、南北方向に約 100 台の地震計を配置した。人工地震は、測線上に 5～8 km 間隔で 9 か所において薬量 300kg のダイナマイトによる海中発破と測線上及び伊豆大島沿岸 1 周で容量 50 リットルのエアガン発震を行った（図 1）。海底地震計は全ての震源を、伊豆大島島内の稠密地震観測点は、海中発破及び伊豆大島沿岸でのエアガン発振の信号を記録した。陸上観測点、海底地震計ともほぼ全てのデータが回収できた。

これらの観測データを解析し、伊豆大島周辺の地震波速度構造を推定した。解析から以下の特徴を得た。1) 初動走時を説明するには、伊豆大島東方約 15km でフィリピン海プレートが約 20 度で東方に沈み込む構造でなければならない。この構造が測線の東側の走時に大きな影響を与えている。2) 火山の基盤を形成している第 4 層の地震波速度は 5.8-6.2km/s と推定され、その上面の深度は伊豆大島と伊豆半島の間で約 4km であるが伊豆大島に向かって徐々に浅くなり、伊豆大島島内ではほぼ 2.5km となる。一方、伊豆大島の東側では急激に深くなり、フィリピン海プレートの沈み込みの場所で約 4.5km となる。3) 伊豆大島島内における基盤面の以浅の構造については、1999 年の構造探査の結果（伊東、2003）とほぼ一致している。4) 伊豆大島火山の直下 7.5km に P 波速度が 6.8km/s の基盤が、北西 - 南東測線と南西 - 北東測線の両方で盛り上がっている構造が明らかになった。基盤が火山直下で盛り上がるというのは、どの火山においても共通して見られるが、伊豆大島において基盤の深さが正確に得られたのは初めてである。

（3）火山直下の地下比抵抗構造、重力探査

伊豆大島におけるカルデラ北部深さ約 5km で発生する間欠的な山体膨張源周囲をはじめとする全島にわたる火山体深部比抵抗構造を調査するため、広帯域 MT 法観測を実施した（図 3）。観測には Metronix 社 ADU07 型測定装置を 10 台用い、2010 年 12 月 - 2011 年 1 月、2011 年 1 月 - 2011 年 2 月の 2 期間で、のべ 20 箇所で観測を行った。局所的なノイズを除去するため、宮城県丸森町に遠隔参照観測点を置いた。また、伊豆大島では、課題番号 1402：「特定地域の地殻活動モニタリングシステムの高度化」による長基線地電位差ならびに 3 成分磁場連続モニタリング観測を実施しており、これらのデータから長周期、長基線のネットワーク MT 応答関数が推定できるので、帯域 MT 法データとあわせて全島にわたる深部構造が明らかになると期待できる。

三原山火口直下の現在の状況を明らかにするため、人工電流源を用いた ACTIVE 観測を 2011 年 1 月に実施した。火口周辺の比抵抗構造変化の検知のために、三原山中央火口丘縁の 5 箇所で鉛直磁場観測を常時実施しているのに加え、電流源に直交する配置の 4 箇所で観測を実施し、磁場 - 電流間応答関数の推定を図った。

富士山直下の比抵抗構造を調べるために、これまで 2002 2003 年、2011 年 6 11 月、2012 年 6～7 月の 3 期間で合計約 40 地点において広帯域 MT 探査を行った他、2009 年に AMT 探査を行った。特に、東北地方太平洋沖地震直後の 2011 年 3 月 15 日に富士山直下で発生した M6.4 地震震源域を通る北西 - 南東方向の測線に沿った断面での比抵抗構造を、2 次元解析の手法と 3 次元解析の手法で解析した。共に、海水および海底及び陸上の地形をモデルに組み込み、陸地の初期比抵抗値を 1000 ohm-m、空気を比抵抗 108 ohm-m とした。推定された構造では、両解析とも 2011 年 3 月 15 日の地震とその余震の震源域が、マグマや熱水の存在を支持する低比抵抗域となる結果が得られているが、結果の有意性については更に検討する必要がある。

2012 年 10 月に、伊豆大島において、絶対重力観測 2 点を基準とし、そこからの 29 点の相対重力測定を行うハイブリッド重力測定を実施した。測定精度は、絶対重力測定は 1 マイクロガル程度、相対重力観測は 10 マイクロガル程度と見積もられる。この結果を、2009 年 6 月に実施した同様の測定の結果と比較したところ、(a) 中央火口近傍の重力増加（+10～+30 マイクロガル）、及び (b) カルデラ内北東部の重力減少（-10～-40 マイクロガル）を確認した。これらの特徴は、ほぼ同時期に行われた国土地理院の観測でも見出されている。特徴 (a) については、火口近傍の 1km 程度の狭い範囲では、5～6cm の沈降が生じていることが、国土地理院の水準測量（2008 年 10 月～2012 年 10 月）で明らかになっている。そのため重力にもフリーエア効果だけで 20 マイクロガル程度の増加が期待され、観測された 10～30 マイクロガル程度の増加と概ね、整合している。特徴 (b) については、島全体の北

東上がり（南西下がり）の傾動が引き続き生じていることが、水準測量で明らかになっており、これにより、北東部の重力減少の一部（10 マイクロガル程度）は説明可能であるが、それでもなお説明しきれない重力減少（20 マイクロガル程度）が残る。地下水起源の擾乱が、この重力減少に含まれている可能性もある。

現在地下水の回復が著しい三宅島で重力測定を実施した。このような地下水の回復現象は終息期の火山活動を理解する上で重要であり、測定が急がれるので計画の変更を行い、三宅島においてハイブリッド重力観測を実施した。その結果、2006 年～2010 年の 4 年間の間に、火口を中心として 20～40 マイクロガルに及ぶ同心円状の重力増加を見出した。この変動は海水準付近の地下水層の回復としてモデル化でき、SO₂ 放出量の漸減とも整合した結果を得た。

（４）2000 年三宅島噴火に伴う震源移動から推定した大規模マグマ貫入機構

2000 年三宅島噴火では、6 月末から震源が山頂から北西岸に移動し、7 月 1 日までの約 5 日間で神津島・新島付近まで大きく移動した。その後も 8 月末まで三宅島北西海域で多くの地震が発生し、大規模なダイク貫入が発生したと考えられている。これまで全体の地震活動が必ずしも詳細に解明されていなかった 2000 年三宅島噴火活動時の震源分布を精度良く再決定し、それに基づき 2000 年三宅島噴火に伴う大規模なダイク貫入現象の理解を目指した。

これまで震源は、震源域から遠く離れた島嶼部の観測点のデータを用いて推定されていた。7 月 2 日以降は、震源域直上に海底地震計が設置され、そのデータを用いた解析も行われているが、活動の一部の期間だけにとどまっている。そのため、海底地震計のデータを有し、高精度に震源が推定できる地震を「参照地震」とし、海底地震計が設置されていない時期も含めて地震活動度の高かった 2000 年 6 月 26 日から 8 月 31 日までの活動全体のできるだけ多くの地震の震源を、参照地震との相対位置で推定するという手法を用いて再決定した。

このような場合でよく用いられる Double Difference 法に以下のような改良を行い、解析した。(1) 震源精度の高い参照地震の震源を極力動かさないという拘束条件を付けて、参照地震とその他の地震の震源を同時に再決定するように改良した。その際、波形相関を用いた精度の高い初動時間差も利用した。(2) 公開されている Double Difference 法や、これを用いた多くの先行研究では、震源決定の際の速度を成層構造で与えている。これをそのまま利用すると、速度構造の境界で、見かけ上の震源の集中が現れた。この影響を取り除くため、深さ方向に連続な速度構造を利用できるようにプログラムを改良した。

この解析により、約 3000 個の参照地震を用いて、約 3 万個の地震の震源を再決定した。得られた震源分布には以下の特徴が見られる。

(1) 地震活動は、震源が三宅島からその北西海域に大きく移動する活動初期（7 月 1 日まで）と、それ以降の、多くの地震が約 2 か月間継続して海域で発生する主活動期に分けられる。(2) 活動初期では、地震はいくつかのクラスターに分かれてバースト的に活動した。三宅島に最も近いものから、クラスターごとに時間差を持って北西方向に震源が移動する。三宅島に最も近いクラスターは、それ以外のものと震源の配列方向が異なる。また、このクラスターは活動初期以降には地震がほとんど発生していない（図 1）。(3) 主活動期は、ほぼ鉛直の面上（主活動域）で発生している。面の走向は広域応力場の主圧軸方向とほぼ一致している。この期間は、地震が領域の色々な場所でバースト的に発生した。1 つのバーストは数時間から半日程度の活動を行い、震源が深部から浅部に移動する活動が多く見られた。また、震源の深さ断面を見ると、震源が分布するほぼ鉛直の断面は、構造境界の存在が示唆される深さ 12km 付近で鉛直から少し屈曲することが新たに分かった（図 2）。(4) 主活動期後半になると、主活動域の両端で、主活動域と震源の配列方向が異なる地震活動が高まった。この時の発震機構解は、広域応力場から期待されるものと一致し、節面を震源分布方向に持つ横ずれ断層であった。

主活動域の大規模なダイクを形成したマグマが、三宅島から水平方向に供給されたか、直下の深部から供給されたかについてはこれまで定説がなかった。本研究は、精度の良い震源分布から、上記に挙げた地震活動の特徴を見出した。また、GEONET の神津島と新島の基線長変化が 8 月下旬まで徐々に延びていること、地震の鉛直断面で折れ曲がり見られる深度が人工地震探査で速度境界を持つこと

などから、主活動域のダイクは三宅島のマグマ供給系と独立して存在し、ダイク直下の深部から上昇してきたと考えるほうがより妥当であることが明らかになった。これは、大規模なダイクが必ずしもマグマの水平方向に移動してできるのではなく、深部にある既存のマグマ溜りから上昇し、ダイクを形成する例もあることを示し、ダイク形成に関する新たな知見が得られた（図3）。

（5）山体膨張・収縮を繰り返す火山での地震活動の定量的なモデル化

火山は地殻の構造的弱点としてひずみが集中すると同時に、静穏期の火山においても地下にマグマが蓄積し、それに伴い応力場が変化している。この変化に呼応して、火山性地震が発生することが考えられる。これまでの稠密な地震及び地殻変動観測から、伊豆大島周辺では2～3年の間隔で間欠的に山体の収縮と膨張が急激に進むことが明らかになっている。急激な山体膨張期及び収縮期の圧力源の位置を推定すると、伊豆大島カルデラ北部の地下約5kmのほぼ同じ場所に推定される。地震活動については、稠密な地震観測網から震源が推定され、カルデラ内の地下1～2kmで発生するグループ（以下、「カルデラ地震」と呼ぶ。図4の赤丸）と、主として海岸線から沿岸部にかけて深さ約4km以深で発生するグループ（「沿岸部地震」と呼ぶ。図4の青丸）に分けられる。前者は、急激な膨張期以外でも地震が発生し、膨張レートの増加に伴い徐々に活動度が上昇するのに対し、後者は時期に明瞭な相関がなくバースト的活動を行う。共に、ストライク・スリップが卓越する火山構造性地震である。両者のうちカルデラ地震に注目して、火山体のひずみ場の変化と地震活動の変化の関係を調べた。

地殻変動データを時間依存インバージョン法で解析し、マグマ蓄積量の時間変化を推定し（図5（c））、震源域における応力変化を求めた。この応力変化をRate and State Friction Law（RSF則）に代入し、モデルに基づく地震活動度（青線）と観測された地震発生頻度（赤棒グラフ）を比較した。この時、RSF則のパラメータである $A\sigma$ を2003年11月～2014年1月までの全期間で7KPaと一定にしたのが図5（a）である。これを見ると、基本的には地震活動度はRSF則でうまく説明できるが、2011年以降はモデルから予想される地震活動度と観測値が大きくずれる。このことは、応力変化以外の影響を考慮する必要があることを示している。

アイランド・Northern Volcanic Rift Zoneでは、深さ10km以深の地殻にダイクが貫入した後、ダイク走向の延長上の浅部で微小地震が発生したことが知られ、これはダイクから放出された二酸化炭素が地殻浅部の断層面における封圧を上げたことが原因と考えられている。また、静穏期にあるイタリア・ブルカノ島のLa Fossa火山では、噴気温度の上昇、つまり揮発性成分の増加と地震活動の上昇に良い相関があることが知られている。このように、貫入したマグマから放出された揮発性成分が、地震活動を高めることがいくつかの火山で知られている。そこで、山体の膨張時に揮発性成分が増加して断層面の封圧が増加する、収縮時には減少するという効果を導入した。また、長期的な山体膨張のトレンドが低下した2011年以降は、深部から新たなマグマの供給が少なく、マグマから地下への揮発性成分の供給は少なくなると考え、山体膨張時でも封圧が増加しないモデルを導入した。このように膨張時と収縮時で $A\sigma$ をそれぞれ5KPaと15KPaにしたのが図5（b）であり、このモデルによると全期間を通して、地震活動度はRSF則で良く説明できる。

ここで示したことは、1) 火山周辺の地震活動の変化は、マグマ蓄積による応力場の変化とマグマから地下に揮発性成分が放出される等の効果が相乗して起こる。2) 応力場の変化は、RSF則に基づいたモデルで定量的に評価できる。3) それで説明できない地震活動の変化は、他の火山の例から揮発性成分による効果が最も有力である。という点である。つまり、逆に言えば、応力場の変化で説明できない地震活動の変化から、地下の揮発性成分の量の変化が推定できる可能性があるということである。ここでは伊豆大島の例を示したが、元となるモデルは一般的なものであり、観測網が整備された火山であれば、どの火山でもこの手法は適用できる。これは、地震活動度の変化の応力変化による応答が事前に判っていれば、噴火前に先行物質として上昇してくると考えられている揮発性成分を検知できる可能性があることを示している。これは今後起こる火山噴火の規模や噴火様式の予測に役に立つことが考えられる。

上記のことは、地震活動度がこれまでと違った意味で、新たな地下状態のモニタリング手法となり得ることを示している。今後は、応力変化以外の効果が、揮発性成分の変化によるものであるか否か

を検証するため、火山ガス等を直接的に観測し、モデルを検証することを目指す必要がある。

5 カ年の総括

今期の地震及び火山噴火予知のための観測研究計画は、地震予知研究計画と火山噴火予知研究計画が統合され、ひとつの研究計画となった。そのため、両研究分野の融合がひとつの大きな目標であった。本計画はそれを強く意識し、地震研究のノウハウを火山研究に活かし火山防災に資する火山現象の解明と、火山という自然界におけるひずみ場が大きく変動する場での地震活動の研究を行った。具体的には、精密な震源分布と震源移動からマグマ移動現象を伊豆東部で解明し、繰り返しマグマが貫入することによるマグマ蓄積状況の変遷を明らかにしたこと、また、2000 年三宅島噴火に伴う海域の大規模ダイクは三宅島から水平にマグマが移動して形成されたのではなく、直下から徐々に供給され蓄積して形成されたことを明らかにしたことである。これらの知見は、今後両地域を始め、同様のテクトニックのクセティングにある伊豆大島をはじめとする伊豆諸島の火山が火山活動を開始したときに、将来の活動を予測する基盤となる重要な知見である。更に、地震活動と応力変化の関係を火山という応力時間変化大きい場で研究することにより、地震活動に関する根源的な理解を進める端緒を開く研究成果が得られつつある。今後は、この成果をまとめるとともに、地震研究と火山研究の一層の融合に努める必要がある。

(8) 平成 25 年度の成果に関連の深いもので、平成 25 年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

Y. MORITA, Volcano-tectonic earthquakes correlated to stress rate in Izu-Oshima volcano, IAVCEI abstract, 476, 2013.

森田裕一、伊豆大島における火山構造的な地震活動の定量的モデル化、日本火山学会秋季大会、A2-08,2013.

松山諒太郎、森田裕一、酒井慎一、2000 年三宅島噴火初期のマグマの移動の推定（2）- 相似波形を用いた震源決定、日本火山学会秋季大会、A2-11,2013.

森田裕一、伊豆大島火山における地震活動のモデル化、日本地震学会秋季大会、2013.

松山諒太郎、森田裕一、酒井慎一、2000 年三宅島噴火初期のマグマの移動の推定（1）- 相似波形を用いた震源決定、地球惑星科学連合大会、SVC48-P27,2013.

(9) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

東京大学地震研究所 森田裕一（地震探査、地殻変動観測）、篠原雅尚（地震探査）、上嶋誠（電磁気探査）、大久保修平（重力探査）

他機関との共同研究の有無：有

北海道大学理学院、秋田大学工学資源学部、東北大学理学院、東京工業大学地球流体化学研究センター、名古屋大学環境学研究科、京都大学防災研究所、九州大学理学院

(10) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：東京大学地震研究所

電話：03-5841-5704

e-mail：morita@eri.u-tokyo.ac.jp

URL：

(11) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：森田裕一

所属：東京大学地震研究所 地震火山噴火予知研究推進センター

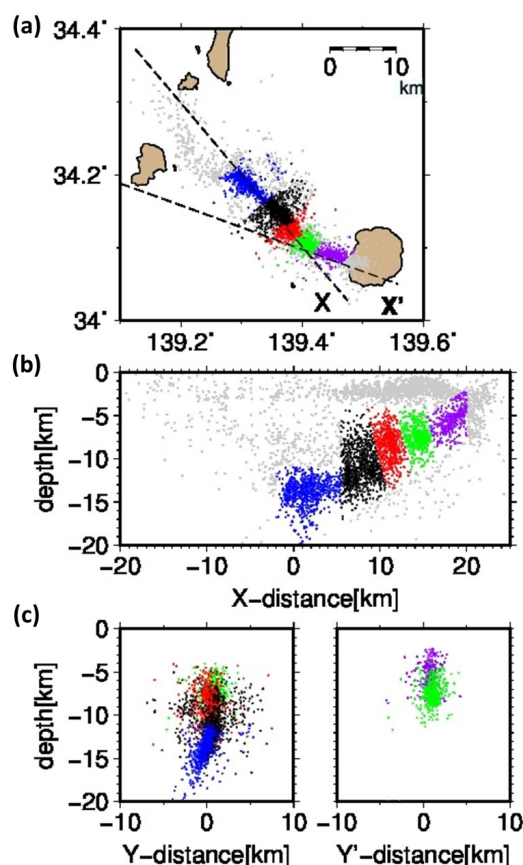


図 1. 2000 年三宅島噴火に伴うダイク貫入初期の地震活動

2000 年 6 月 27 日から 7 月 1 日までの震源分布. 震源分布や地震活動から 5 つのクラスターに分けられる. クラスター 1 (紫色) とそれ以降の活動で震源分布の走向が異なることや, クラスター 1 の領域では 6 月 28 日以降地震活動が起きていないことから, クラスター 1 は雄山山頂直下から移動してきたマグマが形成したダイク. その他のクラスターは海域の深部からマグマが供給されて形成されたダイクと考えられる.

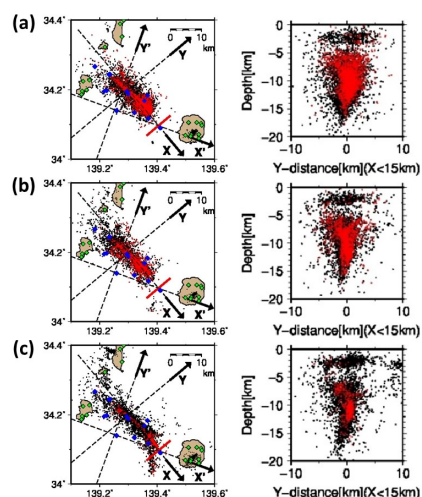


図 2. 再決定した三宅島と神津島・新島間の海域の地震の震源

(a)7月2日から7月23日, (b)7月24日から8月9日, (c)8月10日から8月31日の期間での震央分布と鉛直断面図. 赤: 海底地震計のデータを有する地震 (参照地震). 黒: 海底地震計データのない地震 (参照地震との相対位置によって震源を推定した). 震源がほぼ鉛直の板状の領域に分布している. 活動期の後半になって, 三宅島西方沖の地震活動が開始した.

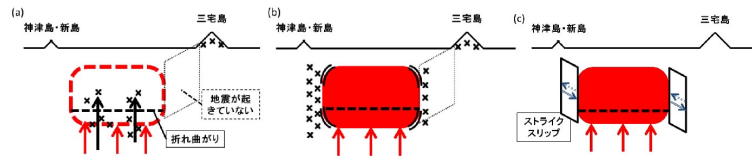


図3. 三宅島と神津島・新島間の海域下でのダイク形成の機構の模式図

(a) 三宅島と神津島・新島間の海域下で形成されたダイクは、2ヶ月間にわたり地震活動が継続し、その期間のいくつかのバースト活動では震源が深部から浅部へ移動する特徴が見られた。赤はマグマの動き、黒は震源移動を示す。(b) 三宅島とこの海域のダイクを結ぶ領域では、7月1日までの活動初期の極めて短い時期にのみ地震は発生したが、それ以降地震は発生しなかった。(c) 活動後半になると、ダイク先端でストライクスリップの地震が発生するようになった。

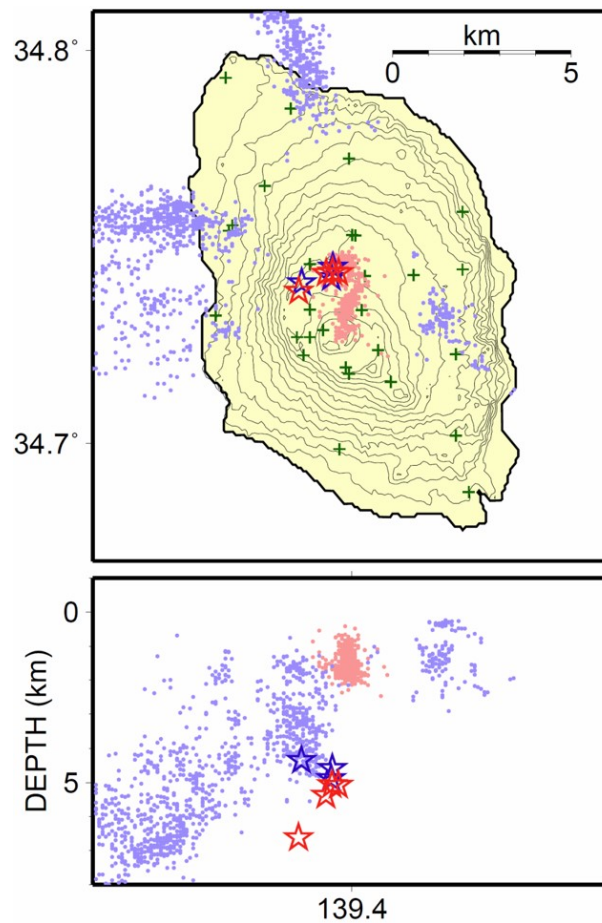


図4. 伊豆大島における地震活動と山体膨張・収縮の圧力源の位置

伊豆大島では、山体の膨張に同期して地震活動が高くなる。地震活動のパターンや震源分布の違いから、カルデラ内浅部の地震（赤丸）と沿岸部の地震（青丸）に分けられる。山体膨張時の圧力源（赤星印）と収縮時の圧力源（青星印）はカルデラ内北部の地下約5kmのほぼ同じ場所に存在する。

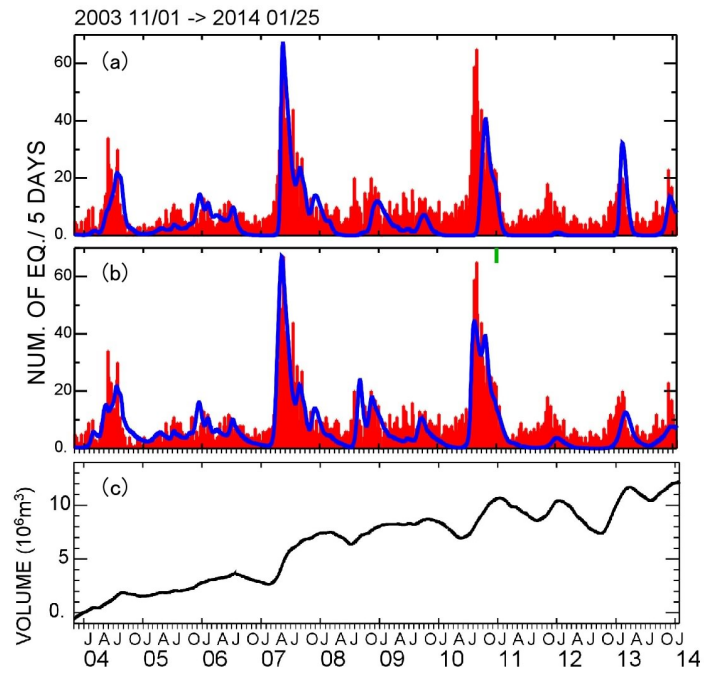


図 5. 伊豆大島のカルデラ内の実際の地震活動と RFS 則で推定された地震活動度

(a) 赤棒グラフ：伊豆大島カルデラ内浅部で発生している一定の基準で選んだ 5 日毎の地震数．青線：震源域におけるマグマ蓄積による応力場の変化から RSF 則を用いて推定した地震活動度． $A \sigma = 7 \text{ kPa}$ とした．(b)(a) と同じであるが，震源域で揮発性成分による影響で， $A \sigma$ が 5 kPa と 15 kPa が変化するモデルを用いて推定した地震数．2011 年以降，(a) では観測値を説明できなかったが，(b) では良く説明できる．(c) 伊豆大島の地下に蓄積するマグマ体積の時間変化．長期的には 2011 年頃から蓄積率が低下したと見える．