

(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：

（和文）多項目観測と解析高度化による火山活動の定量的理解

（英文）Quantitative understanding of volcanic activity through multi-observation and improved analysis

(3) 関連の深い建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(4) 火山活動・噴火機構の解明とモデル化

(4) その他関連する建議の項目：

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(3) 火山の噴火発生・活動推移に関する定量的な評価と予測の試行（重点研究）

5 分野横断で取り組む地震・火山噴火に関する総合的研究

(5) 大規模火山噴火

6 観測基盤と研究推進体制の整備

(1) 観測研究基盤の開発・整備

イ. 観測・解析技術の開発

(5) 令和5年度までの関連する研究成果（または観測実績）の概要：

第2次研究計画の主に1. 地震・火山現象の解明のための研究において実施された、火口近傍の多項目観測により、マグマ蓄積過程や噴火過程の理解が進んだ[例えば、1-4]。さらに、空中電界変動計計測を実施し地震計や空振計で確かに検知できていない噴火を検知することが可能となった。絶対重力測定を伊豆大島、桜島で実施し、伊豆大島においては相対重力計による重力結果とGNSSデータとを組み合わせることにより、長期的な重力増加が検出され地下の圧力ソースをモデリングすることが可能となった。桜島においては、地殻変動では説明できないような長期的な重力変化の信号が検出されてきている。霧島火山の地震活動について調査し、2008年新燃岳噴火以降、新燃岳火口直下で発生する火山性地震の活動が、韓国岳西方に推定されているマグマ溜まりの活動と密接に関係していることが明らかになった。データ解析の高度化を進め、機械学習を用いた火山性地震検出手法により霧島火山の地震活動の詳細な描像が明らかになった。ノイズに隠れた微弱な連続振動を抽出する解析手法を確立させ、同火山の火山活動との関係性を検証した[4]。噴火等の表面現象に伴う空振をより簡便に精度よく計測するため、空振観測方法を確立し、実用化させた[5]。また、地震観測点の空振に対する応答を評価する手法を開発し、観測情報の限られた噴火の理解に役立てた。衛星画像解析を進め、GCOM-C（しきさい）SGLI画像の処理とその情報公開システムを完成させ、ひまわり8号の観測と空振・地震等の観測、噴出物の検討結果等を併せ、福岡ノ場2021年噴火やトンガ2022年噴火の解析を進めた[6]。フェリーを用いた海上からの紫外分光測定による火山ガス測定を実施し、口永良部島の測定の他に、南西諸島の諏訪之瀬島、中之島、薩摩硫黄島火山での二酸化硫黄フラックスの繰り返し測定法を確立した[7]。さらに空中磁気測量を伊豆大島・三宅島・霧島火山で実施し、伊豆大島カルデラ、三宅島、霧島火山では、伏在するマグマに関連する磁気変化、三宅島2000年噴火カルデラ縁に沿った弱磁化、霧島2011年噴火以降の火口内に滞留した溶岩の冷却に伴う帯磁が、それぞれ検出された[8-11]。1977年より2012年まで継続してきた中伊豆観測点でのラドン観測によって、1978年の伊豆大島近海地震のときの地下水ラドン濃度がネガティブ変化したのに対し2011年の東北地方太平洋沖地震のときの地下水ラドン濃度がポジティブ変化したことを捉え、その変化の仕組みについて報告した[12]。このとき

使用した理論は、伊豆大島近海地震の時のラドン濃度変化をヘッドスペース仮定によって説明するものである[13]。市販の静電捕集型のラドン計を用いて立川断層周辺の深部地下水ラドン濃度の二次元分布を調べることによって、2011年の東北地方太平洋沖地震によって地震発生確率が上昇したと考えられた立川断層の南端位置とラドン濃度の現状の値を報告した[14]。

[1] Aoki et al., (2013) Geol. Soc. Lond. Spec. Publ. 380, 67-84. [2] Takeo et al. (2022) Proceedings of the Japan Academy, 98, 416-438. [3] Yukutake et al., (2021) J. Geophys. Res. 126. [4] Ichihara et al. (2023), Scientific Reports 13. [5] Yamakawa et al., (2023) Earth Planets Space 75. [6] Yamaguchi et al., (2023) Frontiers in Earth Science, 11, 1145343. [7] Mori et al. (2017) J. Nat. Disasters, 38, 105-118. [8] Koyama et al., (2022) J. Disaster Res., 17, 5, 644-653. [9] Koyama et al., (2022) JVGR, 425. 107527. [10] Koyama et al (2021) Earth, Planets and Space, 73, 1, 139. [11] Koyama et al, (2013) Earth, Planets and Space, 65, 6, 657-666. [12] Tsunomori, F., & Kuo, T. (2010) Radiation Measurements, 45(1), 139-142. [13] Tsunomori, F., & Tanaka, H. (2014) Radiation Measurements, 60, 35-41. [14] Tsunomori et al., (2017) J Environ Radioact, 172, 106-112.

(6) 本課題の5か年の到達目標：

本課題では、「火口近傍での多項目観測」、「火山活動評価のための解析高度化」、「衛星データ解析手法の高度化」、「新たな観測手法の開発」、「モデル実験」の5つの項目について、以下に示す計画のもと実施する。

1. 火口近傍での多項目観測

比較的短かい間隔で噴火を繰り返す活動的な火山は噴火の全過程にわたるデータが得られるほか、現在活動中もしくは噴火準備過程にある火山は噴火過程やマグマ蓄積過程に関する理解を得る重要なデータを提供してくれる。ここでは、浅間山・霧島・伊豆大島などを対象とし、地震・GNSS・傾斜・重力・電磁気・空振・火山ガス等の多項目の観測を実施しデータを取得する。加えて、噴火が発生している桜島を中心に空振計アレー、空中電界変動計、可視・赤外カメラを設置する。噴火発生前後に現れる観測データの特徴を把握し、噴火発生検知のアルゴリズムを構築する。また、周辺の定常観測点の地震・地盤変動データも活用し、火道・マグマ溜まり内と噴煙過程の関連性を調べ、噴火ダイナミクスの理解を得る。また、空中電界変動計による観測例は少ないため、前建議で設置した阿蘇山、霧島、浅間山で継続し、活動の活発化が見られた際は、できるだけ多項目の観測を展開する。浅間山、伊豆大島及び阿蘇において、超伝導重力計、絶対重力計、および相対重力計を用いた精密重力観測を行う。これにより、活動的な火山における重力観測技術を向上させるとともに、マグマの動きに関連した信号をとらえることを目指す。特に感度の高い重力計である超伝導重力計を用いた観測を浅間山で初めて実施し、かつてない高精度での密度変化のモニタリングを試み、火山活動にかかわる地下の物質移動機構の解明に資するデータを取得する。霧島火山では、2008年以降の噴火活動の準備過程を明らかにするため、1980年代から2011までの地震データを整理し、1991年、1992年に新燃岳で発生した微噴火の前から現在の噴火活動に至るまでの地震活動の特徴を明らかにする。

2. 火山活動評価のための解析高度化

火山浅部で起きる火山構造成地震や低周波地震などの活動様式を機械学習などの手法をもとにリアルタイムで把握するとともに、詳細な活動特性を通して現象の発生メカニズムの解明やマグマ供給過程などの噴火現象につながる過程との関連性についての理解を深めていく。霧島、浅間山、伊豆大島、富士山などを対象領域として、火口近傍の高密度観測で取得されたデータを活用し、高精度な地震の検出及び震源決定、イベント分類を各火山で実施、活動特性の把握を行う。さらに群発地震活動について、地震活動様式や地殻変動データ等をもとに、マグマ性流体との関係などの発生メカニズムの理解を深める。火山深部での深部低周波地震についても、地震検出やメカニズム解推定を通して火山深部でのマグマ供給過程の解明につなげる。非噴火時から噴火や噴火未遂などの長期的な火山活動の推移を、ノイズに隠れた微弱な連続振動を抽出するSeismic Background Level (SBL)の解析や、地震・空振統合解析手法を発展させ、噴火発生の検知や推移の把握、噴火機構解明に役立てる。

3. 衛星データ解析手法の高度化

これまで開発・運用を行ってきたアジア太平洋域のリアルタイム火山観測システム (RealVOLC) の運用を継続しつつ、観測機能の拡張と観測結果を用いた噴火発生機構の解明とモデル化を行い、防災への応用を検討する。観測機能の拡張として、1) AHIの赤外面像を用いた火山灰・火山ガス (二酸

化硫黄)の解析システムの開発、2) 国外機関が運用する衛星 (Sentinel-5P/TROPOMI、GEO-KOMPSAT-2B/GEMS等) による二酸化硫黄放出量の解析システムの構築、3) SGLI等を用いた海域火山の変色水モニタリングシステムの開発等を実施する。さらにひまわり9号が2029年度に設計寿命を迎えることから、後継機のデータを用いたモニタリングが継続できるよう、現行システムの改良を実施する。上記の運用で得られる観測結果 (熱異常、火山灰噴出量、二酸化硫黄放出量等) を用いて高時間分解能を持つ時系列データを提供し、商用衛星等で観測される高分解能画像 (地上分解能1m以下) や他の観測項目と合わせて、噴火推移の詳細な把握を行う。特に、溶岩ドーム形成やブルカノ式噴火、プリニー式噴火などの熱異常や火山灰・火山ガス放出量が顕著なイベントに対し、噴火推移の詳細な復元と各種観測量による定量的なモデル化を行い、噴火発生機構の解明を目指す。一方TROPOMIなどの人工衛星データの活用には、大規模な噴火を継続しているときは定量が可能であるが、活動度が低下し噴煙規模が下がってきたとき、どのような活動レベルまで推定できるのかが明確になっていない。これは、TROPOMIの解析による定量値が、二酸化硫黄量だけでなく、噴煙の高度、表面 (海面) の状況、大気エアロゾルの分布や雲の状況に大きく左右されるためである。このため、TROPOMIデータの海域火山における非噴火時の二酸化硫黄放出の定量性を把握するため、TROPOMIデータ検証や実測データとの比較が不可欠である。現行建議で確立された定期フェリーを用いた海上からの紫外分光測定による火山ガス (二酸化硫黄) 放出率のモニタリングネットワークによる南西諸島の離島火山の海上からの実測測定データとTROPOMIデータを比較し、海面状況や気象条件などの様々なパラメータを検討することで、二酸化硫黄検出の特性を明確にし、定量性を検証する。

4. 新たな観測手法の開発

火口近傍はSNが高く良質なデータが得られるが、観測の実施は容易ではない。火口近傍観測に適した観測装置の開発や、飛行体の活用など観測に必要な様々な技術開発も進める必要がある。そのため、ドローンを用いた火山観測手法の開発・高度化を進め、空中磁気測量等をさらに進める。噴火活動が近いことが予測される伊豆大島や三宅島などでマグマ上昇に伴う熱消磁を捉えるための測定を行う。霧島新燃岳では、前回噴火後の冷却過程を捉えるとともに、将来起こりうる噴火活動に備えて磁場変化を測定する。火山活動に伴って山体から放出されるラドン・トロン濃度の時間変化を安定して観測するため、アルファ線スペクトル法による土壌ラドン・トロン濃度の超小型観測装置を開発し、山体に面的に設置して観測を行い火山活動のモニタリングを行うことを試み、火山活動の推移を評価する手法として有効かどうかを検証する。伊豆大島・阿蘇山・桜島などで実証観測を行い、火山活動とラドン・トロン濃度比の時間変化を比較する。

5. モデル実験

多項目観測データから背景にある物理・化学過程の理解を進めるための室内実験を実施し、現有の火山噴火模擬実験システムを運用改良し、噴火推移や振動メカニズムを明らかにする。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

令和6年度

浅間山・霧島・伊豆大島などで多項目観測を実施する。長野県松代に設置されている2台の超伝導重力計の1台 (小型のiGravタイプ) を浅間火山観測所に移設し、連続観測を実施する。松代における超伝導重力計観測も連動させ、可搬型相対重力計による結合や、ローカルな気圧観測アレイの構築などにより、観測精度のさらなる向上を図る。超伝導重力計の検定するために、1年に2回程度 (1回あたり3日程度) の頻度で、同観測所において絶対重力計による測定を行う。さらにスーパーハイブリッド重力測定を2回程度の頻度で実施する。霧島観測所において1980年~1994年の紙記録として残っている読み取り値と震源データをデジタル化する。また1994年~1999年のWINシステムにより磁気テープに収録された連続データを読み出し、トリガー処理・震源決定を行う。

各火山での観測データを整備するとともに、火山性地震検出や異常現象検出のための機械学習手法の開発検討を進める。

衛星データ解析による火山灰・火山ガスのモニタリングシステムの試作を進める。過去のフェリーデータを再度点検し、必要があれば再解析を行う。その後、TROPOMIデータと詳細に比較検討し、どのような条件であれば、TROPOMIデータで二酸化硫黄が検出されるのか、海域火山におけるTROPOMIの二酸化硫黄検出特性を明確にする。また同様な作業を新規のフェリーデータにも行う。この際、衛星「ひまわり」の可視画像や赤外画像と合わせつつ検証していく予定である。

ドローンを用いた火山観測手法の開発・高度化を進める。1秒サンプリングで7200秒までのスペク

トル変化を記録することでラドン濃度とトロン濃度の時間変化と放出率を同時に求めることができる装置を製作する。

令和7～8年度

浅間山・霧島・伊豆大島などで多項目観測を実施する。超伝導重力計観測を継続させるとともに、検定のための絶対重力計による測定、スーパーハイブリット重力測定を実施する。霧島火山での個々の地震イベントとモニター紙記録の波形を紐付し、 possible の限り波形の分類を行う。前年度に得られた読み取りデータを用いて精密相対震源決定法による震源再決定を行い、他の観測データ（主に地殻変動）と比較検討しながら、霧島火山群の噴火準備過程の考察を行う。

火山性地震検出や異常現象検出のための機械学習アルゴリズムの開発検討を進めるとともに、浅間山、霧島、伊豆大島などを対象に火山性地震検出を実施、群発地震や深部低周波地震の活動特性の検証を進める。各火山におけるSBLと火山活動との関係についても検証を進める。

試作した火山灰・火山ガスモニタリングシステムの評価によるシステムの改善と、変色水モニタリングシステムの試作・改善・実装を進める。過去のフェリーデータの再度点検、再解析を行うとともに、令和8年度はTROPOMIデータとフェリー観測データで独立に活動評価を行い、TROPOMIの活動把握の能力を検証する。

ドローンを用いた火山観測手法の開発・高度化を進めるとともに、令和7年度に霧島で、令和8年度に霧島または口永良部島でマグマ上昇に伴う熱消磁を捉えるための測定を行う。土壌ラドン・トロン濃度測定装置機能の実証実験を行うため、装置を火山山体に面的に設置する。令和8年度以降は、各火山の活動にともなって観測値がどのように変化するかを評価し、この観測法が火山活動の推移を評価する手法として有効かどうかを検証する。

令和9～10年度

浅間山・霧島・伊豆大島などで多項目観測を実施する。超伝導重力計観測を継続させるとともに、検定のための絶対重力計による測定、スーパーハイブリット重力測定を実施する。

火山性地震活動様式やSBL変動と火山活動との関係やその発生原因検証を進めるとともに、開発された手法による自動での火山性地震モニタリングや火山異常検出などの実装につなげる。

衛星データ解析システムの評価・改善を行い、さらに顕著なイベントのあった火山での観測結果にもとづく、噴火推移把握のためのパラメータの抽出・評価を行う。それまでに得られた海域火山でのTROPOMIの二酸化硫黄検出特性の知見を元に、他の海域火山の活動時にどのような活動把握が可能になるか明らかにしていく。

令和10年度に伊豆大島または三宅島でドローン観測を実施し、解析・とりまとめの実施、必要に応じて補充観測を行う。ラドン・トロン濃度観測を継続し、各火山の活動にともなって観測値がどのように変化するかを評価し、この観測法が火山活動の推移を評価する手法として有効かどうかを検証する。

また、各年度において多項目観測で観測された現象の物理過程の理解をするための室内実験、モデリングを実施し、背景にある物理・化学過程の理解を進める。

(8) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

市原 美恵（東京大学地震研究所）、今西 祐一（東京大学地震研究所）、及川 純（東京大学地震研究所）、大湊 隆雄（東京大学地震研究所）、金子 隆之（東京大学地震研究所）、小山 崇夫（東京大学地震研究所）、森田 雅明（東京大学地震研究所）、行竹 洋平（東京大学地震研究所）

他機関との共同研究の有無：有

角森 史昭（東京大学大学院理学系研究科）、名和 一成（産業技術総合研究所）、西村 太志（東北大学大学院理学研究科）、森 俊哉（東京大学大学院理学系研究科）

(9) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：

電話：

e-mail：

URL：

(10) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：行竹洋平

所属：東京大学地震研究所