

(1) 実施機関名：

京都大学理学研究科

(2) 研究課題（または観測項目）名：

（和文）既存データに基づく噴火発生予測及び活動推移評価の試み

（英文）An attempt to the evaluation of the volcanic activities and the prediction of the eruptions based on the existing observed data

(3) 関連の深い建議の項目：

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）

(4) その他関連する建議の項目：

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

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

(6) 高リスク小規模火山噴火

(5) 本課題の5か年の到達目標：

（ア）多項目観測データに基づき、時系列フィルタリングやデータ同化などの時系列解析、統計解析手法を適用し、阿蘇火山の火山活動推移モデルを構築して火山活動の評価を行う。その知見を用い阿蘇火山以外の火山にもターゲットを広げ、火山噴火予測が可能かを評価する。またこうした研究で得られる知見をVUI（火山活動活発化指数）に統合し高度化を目指す。

（イ）大地震により生じる膨張場に火山が位置する場合や火山周辺のGNSSが山体膨張を示す場合、噴火の発生頻度が高まることが報告されている。これらの先行研究以降に発生した地震、山体膨張現象のデータから火山の活動レベルを評価し、火山噴火発生の予測を試行し、その的中率を評価する。

（ウ）国内のいくつかの熱水系卓越火山に対して、MODISデータの観測が開始された2000年～2023年頃までの画像解析を行い、熱異常があるかどうか、水蒸気噴火やunrest現象に対応するかどうかを検証する。可能であれば、噴火したケースと噴火未遂に終わったケースで違いがあるかどうかを明らかにし、現状では困難な場合が多い熱水系卓越火山の活動評価に対して有効な手法かどうか検証する。上記3つの研究を核として、多方面のアプローチで火山噴火活動評価、及び噴火予測の試行に取り組む。

(6) 本課題の5か年計画の概要：

（ア）令和6年度においては既存データのコンパイルを行う。2014年に始まる阿蘇火山の一連の噴火活動の基幹について各種の観測データをまとめる。特にマグマ噴火や水蒸気噴火などの規模の大きな活動前後のデータを収集しコンパイルする。令和7年-8年においては、各データの多変量相関分析や時系列解析を通し、噴火活動や火山活動の推移との関連を解析する。また令和9年-10年度で活動推移評価の高度化・未来予測を試み、活動度評価の定量化を試みる。こうした知見を阿蘇火山以外の火山にも適用し噴火活動評価を試み、更に噴火予測が可能であることを検討する。

（イ）地震・測地記録に基づく火山噴火発生の予測試行

令和6年-令和7年度においては、国内で記録されている国土地理院等によるGNSSデータを、系統的に解析し、山体変形を定量的に評価する。世界各地で発生する大地震により生じる活火山の歪み場を評価し、2011年以降に発生した大地震について噴火発生との関係を調べる。令和8年-令和10年において国内の活動的火山についてGNSSデータを用いて山体膨張を評価し、準リアルタイムで噴火の発生の可

能性を議論する。世界の大地震による歪み場を随時計算し、周辺の活火山の噴火発生の可能性を議論する。

(ウ) MODISデータを用いた熱異常の検出

令和6年-令和7年度においてGirona et al. (2021)の解析方法を草津白根山周辺の約20年分のMODISデータに適用し、2018年の本白根山噴火や2014年の湯釜周辺のunrest現象に対応する火山体表面の熱的状态変化の検出を試みる。続く令和8年-令和10年において草津白根山を対象とした解析で培ったノウハウを、口永良部島や弥陀ヶ原など過去20年間に噴火や火山活動の活発化が観測された熱水系卓越型火山に適用し、水蒸気噴火の発生予測に有効な手法であるかどうかを検証する。

上記研究テーマの他に、国内の火山研究者を集めた研究集会を定期的に開催する。令和6年、8年、10年に対面で、また令和7年、令和9年にはオンラインで研究集会を開催する。この研究集会で研究参加者及び研究協力者の間で噴火予測に関連した研究成果を共有しその情報を集積すると共に、噴火予測に至るための新たな着想について議論する。

(7) 令和7年度の成果の概要：

・今年度の成果の概要

(ア) 阿蘇火山における既存データに元づく統計学的なアプローチによる噴火予測試行

火山観測から得られる多項目の時系列データから、物理的な実態を抽出する手法として「データ同化」は理論上、非常に有力なアプローチである。しかし、実際の火山現場において、考え得る全ての物理要素を網羅した精密なモデルを個別の火山に適用することは極めて困難である。その理由は、火道形状や地下構造の不均質性など、局所的な要素に起因する未知パラメータが膨大であり、モデルの複雑化が結果として解の不安定性や有意性の喪失を招く。そこで今年度においては、火山活動の根本的駆動要素である「熱エネルギー（エンタルピー）」に着目し、観測データをエネルギー収支という物理制約のもとで統合する手法を構築した。複雑な地下構造を詳細に仮定するのではなく、卓越する物理量に絞ることで、安定かつ解釈可能なモデル化を試みた。

・手法の概要

観測方程式には地磁気全磁力データ、SO₂放出量、噴煙高度を用い、地下エンタルピー H に比例して磁場が変化すると仮定した。そして地下の累積エンタルピーを H とし、その時間変化を

$$dH/dt = Q_{in} - (Q_{gas} + Q_{plume})$$

で表した。ここに Q_{in} ：深部からの熱供給、 Q_{gas} ：SO₂放出に伴う熱損失、 Q_{plume} ：噴煙対流による熱損失である。これらを状態空間モデルとして定式化し、拡張カルマンフィルタを適用することで、累積エンタルピー H 、深部熱供給量 Q_{in} を逐次推定した。

・今回得られた結果

阿蘇山中岳第一火口（2007-2025年データ）に適用した結果、2014年および2019年前後の活動期には、 Q_{in} の顕著な上昇が推定され、短期的に dH/dt が正となる期間が確認された。これは、噴火期に先立ち地下の熱供給が増加する可能性を示唆する。

(イ) 地震・測地記録に基づく火山噴火発生の予測試行

2025年7月30日にカムチャッカ半島でMw8.8の巨大地震が発生した。その4日後に同半島にあるクラシェニンコフ火山が約500年振りに噴火した。そこで、USGSのMw8.8の地震の断層面解や前震・余震のモーメントテンソル解にもとづき、ひずみ場を計算したところ、カムチャッカ半島の広い範囲で膨張場となること、同火山も0.23 micro strainの膨張場となることが分かった。大地震により0.5micro strain以上の膨張場になると噴火の発生頻度が2-3倍になる（Nishimura SR,2021）。ことから、クラシェニンコフ火山も誘発された可能性がある。また、0.5micro strain以上の膨張場となったカムチャッカ半島には多くの火山がある。これらの火山では、過去約100年にVEI2以上の噴火は約0.8回/年で発生していることから、今後10年ほどは年2-3回程度の噴火（VEI \geq 2）が発生すると見積もった。

2025年12月8日の青森県東方沖地震（Mw 7.5）により生じた静的応力場を計算した。閾値0.5 micro strainの膨張となっているのは恐山のみとなった。クラシェニンコフ火山を参考に閾値を0.2 micro strain とすると十和田、八甲田山、恵山のほか、1900年代に合計10回噴火している北海道駒ヶ岳も噴火の誘発の可能性がある。

(ウ) MODISデータを用いた熱異常の検出

本年度も引き続き、Girona et al.(2021)で提案されたMODISデータの解析手法を、草津白根山を含む

領域で取得された画像データに適用した。昨年度問題となったノイズの影響を避けるために、計算領域内の様々な場所をリファレンスにとり、得られる熱異常時間変化について検討した結果、最終的に草津白根山から16 km北東の新潟県および長野県との県境付近をリファレンスとした。推定された熱異常の時間変化は、2000年以降に草津白根火山で観測された5つの火山活動活発化イベントとの関連を示唆した。また、2024年から火山活動の活発化が認められていたため、解析期間を2025年7月まで延ばしたが、熱異常は認められなかった。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況

本年度の研究は、(ア)、(イ)、(ウ)の三つの異なるアプローチを通じて、多項目観測データを統合し、火山活動の物理過程を定量的に抽出するという建議の中心的課題に貢献している。

(ア)については、地磁気・ SO_2 ・噴煙高度という多項目観測データを地下エネルギー収支という単一の物理量に還元し、噴火の物理をエンタルピー収支として大幅に簡略化した点にある。これにより、地下エンタルピーおよび深部熱供給量を逐次推定する枠組みを構築した。その結果、噴火に関連する地下の熱的状态変化を定量的に把握できる可能性が示された。本手法は特定の地下構造に強く依存せず、他の火山にも適用可能な汎用的手法である。

(イ)については、巨大地震に伴う静的ひずみ場を計算し、既存研究で示された「膨張ひずみと噴火頻度の関係」を用いて、誘発噴火の可能性評価将来噴火頻度の統計的見積りを行った。これは、広域地殻変動と火山活動の力学的結合を定量化する試みであり、地震－火山相互作用の理解を深化させるものである。

(ウ)については、MODISデータを用いて熱異常を長期的に追跡し、過去の火山活動活発化イベントとの関連直近期間における熱異常の有無を客観的に評価した。これは、衛星観測による面的・継続的監視の有効性を検証したものであり、多角的観測統合の推進という建議の趣旨に沿うものである。

・「災害の軽減に貢献する」という目標に対する位置づけ

本年度の成果は、火山災害軽減に向けた基礎的かつ実践的な知見を提供する。

(ア)エネルギー収支モデルにより、地表面現象が顕在化する前段階での熱供給増大の検出噴火ポテンシャルの定量評価についてその可能性が示された。これは、噴火準備過程の早期把握につながる基盤的技術となり得る。

(イ)大地震後のひずみ場を用いて、噴火誘発の可能性が高まる火山の抽出、中期的噴火頻度の見積りを行ったことは、地震後の火山監視体制の重点化に資する。これは防災上、監視リソース配分の合理化に直結する成果である。

(ウ)衛星熱異常解析は、地上観測が困難な火山の遠隔監視、広域的な異常検出を可能とする。草津白根山では直近期間に顕著な熱異常は認められず、過度な警戒を避ける判断材料ともなり得る情報である。

(8) 令和7年度の成果に関連の深いもので、令和7年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Utsugi, M, 2025, Joint inversion of magnetic and gravity data using group lasso regularization, E.P.S., Vol. 77., 査読有, 謝辞有

・学会・シンポジウム等での発表

西村 太志 2025年7月30日カムチャッカ半島地震（Mw8.8）による火山噴火の誘発の可能性 日本地震学会2025年度秋季大会、福岡, 2025

(9) 令和7年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(10) 令和8年度実施計画の概要：

(ア) 次年度は、推定された供給熱量（ Q_{in} ）および累積エンタルピー（ H ）と、LPT（長周期地震）

やA型地震の発生頻度などの経験的指標との相関関係について、時間遅れや因果関係を含めた詳細な解析を行う。あわせて、状態空間モデルの高度化を図り、過去の噴火イベントとの対応を精査し、予測精度の定量的検証を進める。更に、地磁気変化とHとの関係をより精密化するため、阿蘇における既存の空中磁気データを用い、著者が開発したインバージョン手法による磁化構造解析を実施する。これにより、熱消磁効果の物理的妥当性を検証し、観測方程式の高度化を図る

(イ) 次年度も、引き続き国内で記録されている国土地理院等によるGNSSデータの系統的解析を実施し、山体変形を定量的に評価する。また世界各地で発生する大地震により生じる活火山の歪み場の評価を継続実施する。

(ウ) 来年度は、草津白根山で得られた結果の論文化を進めるとともに、口永良部島や弥陀ヶ原など2000年以降に噴火や火山活動の活発化が観測された熱水系卓越型火山で取得された衛星熱画像データの解析を行う。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

宇津木充（京都大学理学研究科）

他機関との共同研究の有無：有

西村太志（東北大学理学研究科）、廣瀬郁（東北大学理学研究科）、神田径（東京科学大学総合研究院）、金子隆之（東京大学地震研究所）、橋本武志（北海道大学理学研究科）、青山裕（北海道大学理学研究科）、山本希（東北大学理学研究科）、前野深（東京大学地震研究所）、行武洋平（東京大学地震研究所）、寺田暁彦（東京科学大学総合研究院）、前田裕太（名古屋大学環境学研究科）、中道治久（京都大学防災研究所）、相沢広記（九州大学理学研究科）

(12) 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：京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設

電話：0977220713

e-mail：utsugi.mitsuru.5c@kyoto-u.ac.jp

URL：http://www.vgs.kyoto-u.ac.jp/

(13) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：宇津木充

所属：京都大学