

2201 地震・火山相互作用下の内陸地震・火山噴火発生場解明およびモデル化の研究

担当者 松本聡 (matumoto@sevo.kyushu-u.ac.jp)

・実施機関（代表機関）名

九州大学、京都大学、北海道大学、鹿児島大学

・研究目的

概要

本研究では広域の応力・変形場と火山の相互作用下の地震および火山噴火の発生場の解明、ならびに地震および火山噴火ポテンシャル評価手法の開発、予測モデルへの寄与を目的とする。特に不均質性が大きい火山周辺に着目することで、応力やひずみの集中、強度低下などを支配する構造や力学特性など発生場の特徴を明らかにするとともに、カルデラ噴火のような低頻度大規模火山活動のポテンシャル評価に必要なマグマ溜りの位置や形状に関する情報を得る。特に、今計画では弾性層の特性を明らかにし、次期以降に下部地殻をはじめとする非弾性変形の影響を加味したモデリングに発展させるための基礎的知見を得る。さらに、地震動によって火山噴火や地下の流体運動が励起される仕組みについて実験的に調べる。

火山の地震発生場に対する作用：地震発生場に及ぼす火山の影響は非弾性体・力源、流体供給源、熱源としての火山の作用が考えられる。上部マントルから供給されるマグマは、それ自体の貫入により地殻の不均質性を作りだすほか、もたらされる熱は既存の地殻を変成させ、マグマ起源流体は地殻の強度に代表される力学特性を大きく変化させる。そのため火山周辺部では地殻の物質的・力学的不均質性が大きいと考えられる。また、マグマ溜りの膨張やダイクの貫入のようなマグマそのものの動的な動きは、周辺部へ局所的な応力の増加をもたらすため、地震を誘発する可能性が指摘されている。これらを解明するために、地震活動および発震機構の詳細把握、偏差応力場、GNSSによるひずみ速度場の推定、速度・減衰・比抵抗などの構造パラメータ推定を通じてアプローチする。そのうえで、現在考えられている概念モデル(5.2で説明)の定量化を試み、地震・火山噴火ポテンシャル評価へ寄与する。

非弾性体・力源としての作用をモデル化するためには、火山体周辺の応力場・ひずみ速度場の時空間的変動から弾性・非弾性的なふるまいを検出することが必要である。同時に、場の応答を知る上ための構造把握も推進する。本研究ではこれらの要因を明らかにするために、主として対照的な応力状態にある九州および北海道において研究を進める。流体供給源としての作用は、地殻流体存在の把握と地震活動に対する間隙流体圧影響の把握という両面から進めていく。流体の存在は地震波速度構造・減衰構造の推定、さらに流体の分布量や連結度を反映する比抵抗構造を推定することで把握する。一方、地震活動は周辺で発生する地震の発震機構解から間隙流体圧の把握を試み、活動特性との関係を理解する。火山の熱的作用は、脆性破壊領域を薄くし、脆性領域の層厚さの空間的な変化は、広域応力場下で応力集中を作り出す。これらの脆性領域とマグマの関係は現象として観測されているものの、その定量的なモデル化は行われていない。これを速度・比抵抗構造等から推定されるマグマの分布形態とあわせて、複数の火山において系統的に比較することで現象論的なモデル化を進める。

火山噴火発生場：マグマだまり、火道、熱水系によって特徴づけられる。これらの規模、時空間特性を把握することが将来の噴火予測にとって重要である。第一段階として、地殻内のマグマ供給系を地震学的、電磁気学的手法により、これまでにない高空間分解能でとらえる。求められた地震波速度構造と比抵抗構造をあわせ、地殻深部から火山体浅部における流体の存在範囲およびその存在様式を明らかにする。

火山噴火や低周波地震、群発地震が、テクトニックな地震動によって誘発される現象は、地下でのマグマや流体の状態が、その運動に関してある種の臨界状態にあることを意味している。そこで、臨界状態（過飽和度）の程度や、強制力としての地震や地殻変動の振幅・周波数特性がマグマや流体の不安定性に対してどのような影響を与えるか、実験やシミュレーションを用いて明らかにする。その結果から、臨界状態と強制力を与えてマグマや流体の不安定性を判断する「トリガリング・ダイアグラム」を作成する。また、観測から得られた情報から、マグマや地熱流体深度と温度を推定し、どの程度の臨界状態にあるかについて制約を与える。さらに、観測から推定された臨界状態に、実験によって得られた「トリガリング・ダイアグラム」を応用し、将来の予知予測に寄与する。

背景

火山の地震発生場に対する作用

九州では、GNSS観測による定常的な（5年スケールでの）ひずみ集中が阿蘇・九重火山、別府地域を中心としてみられる。また、東北地方太平洋沖地震による地震時変形も同様な地域でひずみ集中がみられる。これは、九州地域のひずみ集中が主に弾性体としての応答によって引き起こされている可能性を示唆している。一方、応力場については別府島原地溝帯において、西に向かって応力比が変化し、西側（熊本地域）で最大主圧縮応力（ σ_1 ）と中間主圧縮応力（ σ_2 ）がほぼ等しくなることが見出された。これは σ_2 が鉛直であることから、 σ_1 の低下であると考えられる。この東西のトレンドを説明することができるモデルとして、地震発生層厚変化モデルがある。九州地域の地震発生層下限にほぼ対応する深さ（D90）が別府では浅く、熊本では深いことが明らかに

なった。この発生層の厚さ変化は速度構造 (Saiga et al., 2010) でも別府から阿蘇にかけての下部地殻が低速度であることから支持されている。地震発生層が弾性的に応力を支えることができると考えると、別府周辺で大きなひずみ、高い圧縮応力が実現でき、東へ向かうと σ_1 が低下するという現象を定性的に説明することができる。火山周辺域ではさらに細かい変化が検出されつつある。阿蘇火山周辺で主応力軸が回転したり、ひずみ集中域は九重よりさらに南に広がっていたりする現象は、局所的な空間変化を引き起こす可能性がある。現在 20km 程度の分解能で推定されているが、集中域周辺でさらに詳細に変形・応力場を知る必要がある。

北海道においては、M6 クラスの地殻内地震が集中して発生している東部において MT 観測を実施し、カルデラ下にマグマ溜りの可能性のある幅 10km 弱の低比抵抗体を検出した。これは、SAR 解析により見出された 1994 年からのマグマ溜りの膨張による力源の位置と一致することから、マグマ溜りである可能性が非常に高い。この膨張期には群発地震が発生したが、M4 を超えるような地震は発生しなかった。この事例を用いて膨張による Δ CFF の定量的な評価を行うことで、地震発生ポテンシャル評価の試行ができる可能性がある。GNSS 観測からは、カルデラ地域のひずみ速度が周辺部に比べて大きいことやカルデラ内部では複雑な歪の空間分布を示すことを見出し、火山が周辺の変形場に影響を与えていることを明らかにした。これに加え、重力測定と基盤ボーリング資料解析からカルデラの 3 次元基盤構造を、深層ボーリングデータ解析より地下温度構造の空間的分布を明らかにし、同位体分析による地下水流動系の調査と合わせて、地温勾配データを熱伝導と対流系によるものに分離するための基礎的な知見を得た。これらから、北海道東部の火山地帯には周辺部とは異なる異常な構造が存在し、それに対応する大きな歪速度や熱構造が見られることが明らかにされた。

地震発生特性と地殻強度

九州内の内陸地震はおもに福岡県西部地震余震域や日奈久断層帯などの断層近傍の地震活動と熊本地方の広い範囲で群発する活動がみられる。発震機構解から間隙流体圧を推定する方法 (Terakawa et al., 2010) を用いて調べた結果、断層地域では間隙流体圧が高く、群発地域では低いことが示された。面状に地震が発生する断層地域で間隙流体圧が高く、体積的に地震が発生する地域で低くなるのは一見妥当だが、1) 間隙流体圧が低くても破壊を起こすか、2) 広い範囲で流体を供給することができるか、3) 摩擦係数や凝着力などの仮定は正しいかなど、検討すべき点が多い。また、群発地域が火山体に近く、マグマ供給系との関連の検討が必要である。

火山噴火発生場

阿蘇火山では水準測量、GNSS観測によるデータ、レシーバ関数解析 (Abe et al, 2010)、速度トモグラフィ解析を詳細に行い、火山直下にシル状、球状マグマだまりが存在していることを明らかにした。阿蘇カルデラを縦断するMT観測の結果、深さ 10km までの比抵抗の 2 次元構造が明らかになり、深さ数 km の浅部熱水系の空間的な広がりが明らかとなった。また、広帯域MT探査により、霧島、桜島でのマグマ供給系が推定された。九重火山では高密度AMT観測が行われており、95年に噴火が発生した硫黄山地下 1km 程度までの浅部比抵抗構造が明らかになり地下の熱的状態の推定がなされている。一方、2011年1月に噴火した霧島・新燃岳周辺ではGNSS観測から、マグマソースの位置を深さ 8km から 9km に推定された。さらに、この位置の周囲で地震波速度トモグラフィによる低速度域も見出されている (八木原他, 2013)。これらの関係を明らかにするため、測地データを使った推定精度の高精度化が必要である。

目標設定

上記で述べた現在までの知見と課題から、本研究では以下の解決すべき問題点を示す。

火山の地震発生場に対する作用

本研究では脆性領域の厚さ変化と流体供給による応力一強度の関係が九州および北海道で定量的にひずみ速度場・応力場などの観測量を説明することが可能かどうか、モデルの検討も含めて研究を進める。具体的には大きく分けて次の 2 つの項目について研究を進める。

(ア)地震発生層厚と火山は応力場・変形場を支配しているか？

広域応力下にある地殻において脆性層の厚さは弾性的な応答をすとした定性的な解釈が定量的に正しいのか否かについて評価する。特に、火山周辺においては 20 km スケール以下での空間変化の可能性があるため、変形集中域で詳しくひずみ・応力状態を把握する。また、地震発生層下限、構造特性を同程度の分解能で推定する。それらの結果から有限要素法を用いて、弾性応答としてのひずみ・応力場を説明できるモデルを構築する。さらに、弾性応答から粘弾性を含んだモデルに拡張するため、今後発生する豊後水道スロースリップの応答、定常的な変形、大規模地震発生時の応答もしくは東北地方太平洋沖地震後の余効変動をとらえる観測を行い、数年程度までの時定数の地殻応答を表現できるモデルを有限要素法を用いて作成する。

(イ)地震発生様式と間隙流体圧は関係しているか？

九州地域においては断層地域と別府島原地溝帯に地震活動が集中しているが、現在の見積りでは断層地域は相対的に間隙流体圧が高く、別府島原、特に熊本周辺では間隙流体圧が低い。震源の分布形状は断層帯では 2 次元的で群発域では 3 次元的である。仮に、流体が発生層下部から供給されていると考えると、断層帯では限定された流路が存在し、群発域では広い範囲に供給路が存在する必要がある。また、地震活動がない地域には流体供給路

が存在しないと考えることができる。これらを明らかにするためには流体供給路の分布範囲を知る必要があるが、その方法の一つとして比抵抗構造探査を地震発生域、そうでない地域を網羅して実施することで流体の広域的な分布を推定する。また、速度や減衰構造などを推定してこれと併せてモデル化する。また、発震機構解から見積られる間隙流体圧は推定誤差に強く依存すが、現在の発震機構解は誤差 30 度程度が平均的である。これは間隙水圧に換算すると最大数十 MPa にも達する。この推定の向上をめざし、発震機構解の推定精度を現在の数分の 1 にすることを目標とする。

噴火発生場

噴火発生場については、広域応力場・ひずみ速度場の下でのマグマ供給系を構造特性として求めることが目的となる。モホ面形状、噴火様式とマグマだまりなどの供給系が伸張場・圧縮場でどのように異なるか見出すことは噴火ポテンシャル見積りの上で重要な足掛かりである。これを火山近傍の稠密な観測データ取得によって可能にする。また、地下流体に対しての外部からの擾乱が、内部での圧力増加にどのように影響を与えるか実験とシミュレーションを用いて明らかにし動的トリガリングの可能性を検討する。

共同研究あり。

地震、GNSS観測（機関代表）：(九大)・大倉敬宏（京大）・高橋浩晃（北大）・中尾茂（鹿児島大）

室内実験：寅丸敦志（九大）

電磁気観測および噴火発生場観測：全国連携