

( 1 ) 実施機関名：

九州大学

( 2 ) 研究課題(または観測項目)名：

別府 島原地溝帯における地震活動と火山活動の相互作用の研究

( 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

( 1 ) 日本列島及び周辺域の長期・広域の地震・火山現象

ウ．広域の地殻構造と地殻流体の分布

( 2 ) 地震・火山噴火に至る準備過程

( 2-1 ) 地震準備過程

ウ．ひずみ集中帯の成因と内陸地震発生の準備過程

( 5 ) 本課題の 5 か年の到達目標：

九州中部の別府湾と島原半島には南北伸張場による正断層が発達しており、別府と島原を結び九州中部を東北東 西南西に横断する地域は、別府 島原地溝帯と呼ばれている。別府 島原地溝帯には多くの活火山が分布するが、中でも阿蘇山は世界有数のカルデラを有し現在でも活発な状態が続いている。また、この地溝帯に沿った地域はひずみ速度も大きく、地震活動も活発であり、九州の内陸被害地震の多くもこの地域に集中している。このように、九州中部の活発な内陸地震活動と火山活動は、地溝帯形成という共通のテクトニクスの下で相互に影響を及ぼしあって発生していると考えられる。しかしながら、別府-島原地溝帯については、マントル物質の上昇・湧き出しによる Continental Rift であるという説がある一方、中央構造線の西方延長部の右横ずれ運動にともなう Pull-apart Basin であるという説もあり、その実体と成因は現時点において明らかではない。

そこで本研究では、稠密観測及び制御震源地震探査に基づいて九州中部地域の地殻構造を明らかにし、別府-島原地溝帯の実体解明を試みる。さらに、別府-島原地溝帯の地殻構造モデルを用いて有限要素法等によるシミュレーションを実施して地溝帯のひずみや起震応力の空間分布を再現し、ローディング機構及び地震・火山活動の関連について理解を深めることを 5 か年の到達目標とする。

( 6 ) 本課題の 5 か年計画の概要：

平成 21 年度は、阿蘇山を含み、別府 島原地溝帯を横断する領域において稠密自然地震観測及び GPS 観測を開始する。これらの臨時観測は、当該地域の地殻活動状況を見ながら、必要に応じて再配置等をしながら、平成 25 年度まで継続する。解析については、平成 21 年度は既存データの解析を行い、当該地域の地殻水平ひずみ分布と地震活動・起震応力分布を明らかにするとともに、レシーバ関

数解析により、九州地域における地殻・上部マントルの不均質構造、特にモホ面の深度分布を推定する。また、平成 23 年度に予定している制御震源地震探査に向けて、九州地域における過去の構造研究成果や平成 21 年度の解析結果を参照しながら探査計画を検討する。

平成 22 年度は、臨時観測のデータを加えて、地殻水平ひずみ分布、震源分布、起震応力分布、及びレシーバ関数解析によるモホ面深度分布の高精度化をはかる。また、地震波速度トモグラフィーを実施して、当該地域の地殻・上部マントルの分解能 20km 程度の 3 次元速度構造を明らかにする。さらに、平成 23 年度の制御震源地震探査の測線及び発破点の現地調査を実施して、探査計画を確定する。

平成 23 年度は、阿蘇山を通り別府-島原地溝帯を横断する測線において制御震源地震探査を実施し、地溝帯及び阿蘇カルデラの地殻構造解析を行う。また、GPS 観測データに基づき、当該地域の水平地殻変動のモデル化に着手する。

平成 24 年度は、制御震源地震探査の屈折法及び反射法解析を進め、別府-島原地溝帯（含阿蘇カルデラ）を横断する地殻構造を明らかにする。さらに、制御震源地震探査と稠密自然地震観測のデータを用いて地震波トモグラフィーを行い、地溝帯下において分解能 5km 程度の 3 次元速度構造を明らかにする。これらの成果に基づき、当該地域の地殻構造モデルを作る。また、この地殻構造モデルを参照しながら、水平地殻変動のモデル化を行う。

平成 25 年度は、地殻構造モデルと水平地殻変動モデルに基づいて、別府-島原地溝帯の実体を明らかにし、その成因について考察する。また、地殻構造モデルを用いて有限要素法等によるシミュレーションを実施して地溝帯及び阿蘇カルデラ周辺のひずみや起震応力の空間分布を再現し、地溝帯における内陸地震のローディング機構と地震・火山相互作用に関する理解を深化させる。

#### ( 7 ) 計画期間中(平成 21 年度～25 年度)の成果の概要：

本研究では、別府 島原地溝帯を横断する領域において稠密自然地震観測及び GPS 観測を実施し、当該地域の地殻構造とひずみ・応力場を明らかにすることを目指した。特に、地殻構造の特徴から別府 島原地溝帯の実体解明を行い、九州内陸における地震発生準備過程（地震発生層へのローディング機構と地震・火山の相互作用）に関する理解を深めることを目的とした。

別府 島原地溝帯とその周辺における臨時稠密観測は平成 21 年度に開始、25 年度まで継続して地震および地殻変動データを取得した。既存のデータおよび臨時観測データの解析により、別府 島原地溝帯を中心とした九州内陸部の地殻構造、ひずみ場、起震応力場および間隙水圧が推定された。以下にそれらの成果の概要を示す：

##### 1) 地殻構造

レシーバ関数 (RF) 解析を平成 21 年度から 25 年度まで継続して行い、九州のモホ面の深度分布を明らかにした。遠地震 (マグニチュード 5.5 以上、震央距離 30-90 °) の波形解析により得られた RF を深さ領域に変換し、モホ面深度を決定した。RF は解析手法や精度の検討などにより毎年改訂を行った。現時点 (平成 25 年度) におけるモホ面深度分布を図 1 に示す。これによると、大分熊本構造線の南東側、出水清武構造線の北東側の地域でモホ面の深度が 40km 程度と、周囲より地殻が厚くなっている。それ以外の広範囲の地域ではモホ面は 30-35km の深さに存在し、九州地方の北部には 40km 程度までモホ面が深くなる領域、南部には 30km よりもモホ面が浅くなる領域が存在する。しかし、別府 - 島原地溝帯に対応する帯状のモホ面の盛り上がりは認められない。

さらに、平成 25 年度はより詳細な RF 解析を行い、阿蘇カルデラの地殻構造を明らかにした。その結果、中央火口丘東斜面の直下 8-17km の深さ、およびカルデラ西部の地下 13-22km の深さに低速度層 ( $V_s < 3.0\text{km/s}$ ) が存在することが明らかになった。Takei (2002, JGR) の手法を用いると、低速度層には最大で 15% のメルトあるいは 30% の水が含まれていると推定できる。中央火口丘東斜面直下には、流体の流動により引き起こされると考えられる深部低周波地震の震源域 (深さ 15-25km) やシル状圧力源 (深さ 15.5km) が存在し、その流体が低速度の形成に関与している可能性がある。しかし、阿蘇カルデラ直下においてモホ面が浅くなるような特徴は見られない。

また、平成 23 年度は、阿蘇山を通り別府-島原地溝帯を横断する約 152km の南北測線において制御

震源地震探査を実施した。この探査のP波初動データを用いて、トモグラフィ解析により高精度の地震波速度構造断面が得られた。速度構造には顕著な水平方向の速度不均質が見られ、臼杵 八代構造線を境にして、南側の付加帯が存在する領域よりも北側の火山岩類や火砕流堆積物が見られる領域で、低速度領域が厚くなるなど、地質構造との良い対応が見られる。特に、別府-島原地溝帯の東端部である別府-万年山断層帯の下部は、深部まで低速度領域が延びており、地溝帯の内部が低速度であることが示された。

さらに、平成25年度には、本計画で展開された臨時地震観測点のデータと定常観測点（九州大学、Hinet、気象庁、京大阿蘇・別府）のデータを統合処理して得られた走時データを用いて、従来よりも高分解能のトモグラフィ解析を行なった。トモグラフィ手法は、Rawlinson et al(2006)によるFMTOMOを用いた。最小グリッドサイズは緯度および経度方向に0.05度、深さ方向に6kmである。解析の結果、別府-島原地溝帯では、表層部にP波およびS波低速度領域が分布していること、深度20kmの断面では、阿蘇火山から九重火山にかけて、P波、S波ともに低速度の領域が広がっていることなどが明らかになった。ただし、レーバ関数解析で示された阿蘇カルデラ内の低速度領域は検出されなかった。

このように、別府-島原地溝帯の内部では地殻の浅部および深部に低速度域が存在し、これらは基盤の落ち込みや活発な火山活動をもたらすマグマの存在を示唆する結果となっている。また、別府-島原地溝帯西部の島原半島では、下部地殻のS波速度が地溝内外で異なり、地溝内で地殻の薄化が起こっている可能性がある。しかしながら、別府-島原地溝帯の全域にわたるモホ面の顕著な盛り上がりは認められず、地殻内の地震発生層の深さ(D90)は、地溝帯の東部(別府地溝)と西部(雲仙地溝)で大きく異なっている。地溝帯の成因についてはさらなるデータ蓄積と詳細な解析に基づく検討が必要である。

## 2) ひずみ場

国土地理院が展開するGEONET観測点を補完し、別府-島原地溝帯の地殻変動をより詳細に明らかにするため、21点の連続観測点とキャンペーン観測点を増設し、平成25年度まで観測を継続した。解析はBernese GPS Software Ver. 5.0を用い、IGS精密暦、IGSの地球回転パラメタを使用した。大気伝搬遅延量はGMFマッピング関数をBerneseに組み込み、1時間毎に、また大気伝搬遅延勾配は6時間毎に推定した。

2010年1月～5月まで1週間毎の各観測点の短期再現性を調べたところ、南北成分で1～4mm、東西成分で1～8mm、上下成分で3～13mmであった。また、1年以上の観測期間がある観測点の観測点速度は周辺のGEONET観測点の速度と調和的であることが確認された。国東半島から西都市に至る測線と久留米市から延岡市に至る測線において、測線に沿う方向と直交する方向の観測点速度を調べたところ、測線に直交する方向の観測点速度は断層を挟んで変化していることがわかった。

また平成25年度には、東日本太平洋沖地震による影響を調べるため、2011年3月11日の前後10日間の座標値の平均をとり、その差をとって地震時変位を求めた。ひずみ変化は佐藤・他(2002)の方法により求めた。東西、南北の変位データをGMTのsurfaceコマンドを使って、5分間隔で内挿した。各グリッド間で変位の差を求めて東西、南北、せん断ひずみを求め、さらに主ひずみ、面積ひずみ、最大せん断ひずみを求めた。地震時ひずみ変化の空間分布は長波長の変化が期待されるが、得られた空間は、東西方向のひずみ変化は九州中央部で伸び・縮変化が3回繰り返すなど短波長の変化があることがわかった。

## 3) 応力場と間隙水圧

地殻応力場については、微小地震の発震機構解をもちいて応力テンソルインバージョンを行い、九州内陸部における主応力の方向と応力比の分布を求めた。その結果、最小主応力軸は南北から北西-南東方向でおおよそ水平面内にあることが確認された。この軸は阿蘇火山周辺において時計回りに回転している結果が得られ、本研究で得られたひずみ分布と整合性を持つ。また、応力比は別府-島原地溝帯において非常に大きく、最大主応力が中間主応力とかなり近い値を持つことが明らかになった。

また、断層の破壊はクーロン・ナビエの破壊基準によると仮定し、地殻の強度を低下させる間隙水

圧の空間分布について検討した。本研究では Terakawa et al. (2010) の方法を用い、ある応力場の中の発震機構解の違いが間隙水圧の変化であると見なして、間隙水圧を推定した。その結果、平均間隙水圧は別府-島原地溝帯で小さく、福岡西方沖地震や日奈久断層周辺では大きくなっていることが示された。このことは、活断層地域では高間隙水圧であることを示唆している。一方、別府-島原地溝帯では応力比が大きく（すなわち最大主応力が小さく）、断層面に作用する法線応力が小さいため、相対的に強度が低下し、低い間隙水圧で破壊している可能性がある。

このように、別府-島原地溝帯を中心として、九州地域の地殻構造、ひずみ速度分布、応力分布、地震発生層の厚さ分布が従来よりも高い精度で明らかにされ、平均的間隙水圧分布が推定された。別府地域には大きなひずみが集中しており、そこでは微小地震活動が高い。この地域は地震発生層の厚さ（D90）が他の地域と比べて薄く、このためにひずみ速度が大きくなっている可能性が示された。この結果は応力比の空間変化からも支持され、ひずみ集中メカニズムに関して重要な知見が得られた。

しかしながら別府-島原地溝帯の構造に関しては、RF解析によるモホ面深度と地震発生層の深度はかならずしも整合的ではなく、地溝帯の実体と成因の解明については依然として課題が残されている。このため、本5か年研究では、当初計画していた「別府-島原地溝帯の構造モデルの構築とそれを用いたひずみ・応力シミュレーション」は実施することができなかった。これらについては、次期計画において新たに地球電磁気観測を実施するなどして当該地域の構造モデル構築に努め、別府-島原地溝帯の実体と成因、および九州内陸部における地震のローディングプロセスと火山との相互作用についての理解を目指す。

(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）：

(9) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

九州大学大学院理学研究院附属地震火山観測研究センター（清水 洋，他4名）

他機関との共同研究の有無：有

京都大学大学院理学研究科（大倉敬宏，他2名）

鹿児島大学理学部（宮町宏樹，他3名）

以上は研究期間を通して常時参加する機関および参加者である。

この他に、平成23年度に予定している制御震源地震探査については、東京大学地震研究所や秋田大学工学資源学部など全国の関係機関の協力のもとに実施（筒井智樹，他約20名）。

(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：九州大学大学院理学研究院附属地震火山観測研究センター

電話：0957-62-6621

e-mail：hshimizu@kyudai.jp

URL：www.sevo.kyushu-u.ac.jp

(11) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：清水洋

所属：九州大学大学院理学研究院附属地震火山観測研究センター

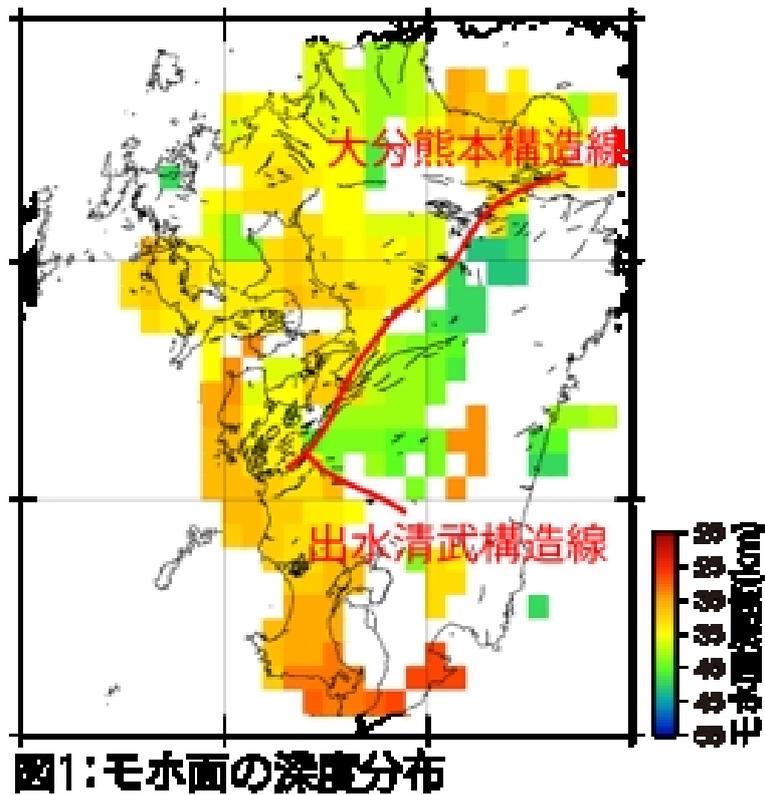


図1:モホ面の深度分布

図1 九州におけるモホ面の深度分布

レーザ関数解析による推定．大分熊本構造線と出水清武構造線の東側の九州山地の下でモホ面が深くなっている．