

4. 全体成果概要

平成 26 年度から 28 年度まで 3 年間、別府一万年山断層帯（大分平野一由布院断層帯東部）の重点的な調査観測を、京都大学大学院理学研究科、九州大学大学院理学研究院、国立研究開発法人産業技術総合研究所を中心に、40 名を超える研究担当者で、運営委員会の外部委員の先生方のご指導、地元自治体等の協力のもと遂行することができた。その全体成果の概要をまとめる。

・調査観測の成果の概要

別府一万年山断層帯は大分県玖珠町万年山付近から別府湾周辺域まで続く長大な活断層帯である。この断層帯では様々な調査が実施されてきたが、このうち別府一万年山断層帯（大分平野一由布院断層帯東部）は由布院盆地から大分平野に続く断層帯で、この区間が活動した場合、大分市、別府市などの都市や周辺地域に甚大な影響を及ぼす断層帯であることがわかっている。この活断層が活動した場合の社会的インパクトの高さに加えて、地震調査委員会の別府一万年山断層帯の長期評価（地震調査研究推進本部、2005）では、大分平野一由布院断層帯東部で発生する地震の規模はマグニチュード 7.2 程度で、今後 30 年以内の地震発生確率は最大 4%と評価されている。また、地震後経過率は最大 1.0 であり、地震発生の可能性が高いと推定されることに加え、全国の活断層帯と比較して、平均変位速度が大きく、平均活動間隔も短いことから、活動度が相対的に高いと考えられる。また、別府一万年山断層帯の東端は、中央構造線断層帯に連続している可能性があることから、両断層帯の関係について検討が必要とされている。

この断層が活動した場合の地震災害の軽減をめざして、断層帯の地表付近の詳細な位置・形状、過去の活動履歴と平均変位速度といった活断層基本情報の高度化と、地下の震源断層の形状評価、及びそれに基づく震源域での強震動評価の高度化を達成するための総合的な調査研究を行うことを課題とした。当該断層帯は別府一万年山断層帯の東部分として調査観測が行われてきたが、陸域・海域・伏在平野にまたがり、断層の分布・形状が複雑であり、また中央構造線断層帯西端部との関係も重要な課題である。本研究では既存の調査結果を基礎として、それらを補完するため、ボーリング調査、トレンチ調査、海域音波探査、自然地震観測、人工地震探査、電磁気探査、重力探査、水位変動観測、アレイ微動観測、等を行うことを課題とした。これらの調査観測の成果に基づいて、活断層の位置や活動履歴、平均変位速度等を断層帯全体で評価することにより、活断層の基本情報の高度化を図ることを課題とした。さらに自然地震探査や電磁気探査によって地震発生層の媒質の不均質性を探り、既往の地下構造観測情報と比較しながら、浅部構造観測調査も含め震源断層形状の高度化を試みることを課題とした。本対象断層帯に位置し、当該断層が活動した場合に大きな揺れに見舞われる可能性が高い大分平野および別府扇状地等の地下構造モデルの高度化を図るとともに、その地下構造モデルと震源断層モデルに基づいた強震動予測を行うことを課題とした。

これらの課題に取り組むために、1)活断層の活動区間を正確に把握するための詳細位置・形状等の調査及び断層活動履歴や平均変位速度の解明のための調査観測、2)断層帯の三次元的形状・断層帯周辺の地殻構造解明のための調査観測、3)断層帯周辺における強震動予測の高度化のための研究、についての調査観測、研究をすすめた。平成 26 年度～28 年度の成果概要は下記のとおり

りである。

- 1) 活断層の活動区間を正確に把握するための詳細位置・形状等の調査及び断層活動履歴や平均変位速度の解明のための調査観測：

平成 26 年度の陸域調査では、1970 年代撮影の縮尺約 2 万分の 1、1948 年に米軍が撮影した縮尺約 1.5 万分の 1 空中写真を用いて、活断層のトレース及び変位様式を検討した。歴史資料の調査を実施し、1596 年の慶長豊後地震の記録の収集・解析を実施した。また、大分平野については、ボーリング資料によるアカホヤ火山灰の深度分布も考慮して断層トレースを推定した。海域調査では海底地形調査および音波探査による位置・形状の把握を目的とした調査を実施した。伏在部の調査では、別府扇状地の南側に分布する朝見川断層の活動履歴を解明するために、同断層の沈降側において新たに二本のボーリングコア掘削とそれらの分析を実施した。これらの掘削地点近傍で得られていた既存の二本のボーリングコア試料の分析結果と総合して、同断層の活動履歴について検討した。

平成 27 年度の陸域調査では、平成 26 年度調査で対象とした伽藍岳北断層について、1970 年代に国土地理院が撮影した縮尺約 2 万分の 1、1948 年に米軍が撮影した縮尺約 1.5 万分の 1 空中写真を用いて、活断層のトレース及び変位様式を再検討・確認した。それらの情報と現地踏査で確認した地点でピット調査を実施した。また、慶長元年(1596)に発生した「慶長豊後地震」に関する、大分県内外の古文書・記録類を収集し地震に関する基本情報の整理を行った。古文書・記録類のうち、地震発生と同時期あるいは時期を隔てたものではないものでは慶長元年閏 7 月 9 日、後世に編纂されたものでは同月 12 日や 13 日と様々であった。このことは、別府湾沿岸に被害をもたらした地震が、複数回発生した可能性を示唆すると考えられる。また、古文書・記録による被害状況の情報整理も実施した。海域調査では海底地形調査および音波探査調査結果を解析した図面作製等を実施した。また、長期間（数千年程度）にわたる地震時イベントの記録を明らかにするために、大分沖や高崎山沖、別府沖の別府湾最深部などで 20m~10m 級の堆積物採取を行い、各種解析を実施した。その結果、30 回程度のイベント層が認定された。伏在部の調査では、大分平野において、府内断層の活動履歴を解明するために同断層の沈降側において新たに一本のボーリングコアを掘削して分析を進めた。同コアは上位から人工盛土、デルタプレーン、デルタフロント、プロデルタ、エスチュアリー、網状河川流路の堆積物で構成されていることが明らかになった。

平成 28 年度の調査観測では、別府一万年山断層帯（大分平野一由布院断層帯東部）の詳細な位置や分布を明らかにするために、陸域では、空中写真判読・地表踏査により、全域の活断層分布図を作成し、位置や分布を明らかにする情報をまとめた。歴史資料調査では、文禄 5 年（10 月に慶長元年となる、以下慶長元年で表記を統一する）閏 7 月に発生した、「慶長豊後地震」に関する、大分県内外の古文書・記録類を収集し地震に関する基本情報の整理を行った。これまでの調査で、地震の日付も閏 7 月 9 日あるいは 12 日、両者の併記などと、記録によって混在する状況が確認された。また、被害地域については速見郡南部（大分県別府市・由布市湯布院町）に及び、後世の公的記録では、耕地などが地震発生より 50 年後でも復興できない所があること、およそ土地が失われたこと（史料では「滅地」と表現される）が確認された。このような古文書・記録類の記載

をふまえ、「慶長豊後地震」を人々はどのように記録したのか、あるいは記憶していったのかという視点に留意した。「慶長豊後地震」に関わる人々の記録の情報整理は、発生日付が異なる複数の地震を1つの地震と捉えるなど、「地震の記憶」を語り継ぐ中でさまざまな「歴史」が語られた。その理由としては、慶長元年閏七月に豊後周辺では、近接した日付に複数回大規模な地震が発生したためである。そして、慶長豊後地震は過去の災害の具体相を探る上で、「語られた歴史」としての伝承を情報として利活用すべきタイプと位置づけられよう。海域の調査では、地下構造探査として、深部構造を対象とした既存のエアガン探査データの再解析、ブーマー探査、極表層部を対象とした卓越周波数 10kHz を主体とした音波探査結果のまとめを実施した。また、27 年度採取の 20m 級のピストンコア堆積物解析により、鬼界アカホヤ火山灰層準以降の約 7300 年間に 34 層のイベント層を認定したが、3000 年～6000 年前程度の期間では、相対的にイベント層の頻度が少ないことが明らかになった。さらに、4 月 16 日の一連の熊本地震時の由布院を震源とする地震時に由布院・別府で震度 6 弱を観測した地震による影響を見積もるために表層採泥を実施し、堆積物を調査した。伏在部の調査では、別府扇状地南部の朝見川断層周辺の浜脇～朝見地区でボーリング調査の成果を整理し、浜脇地区において 600 cal BP 以前に形成された氾濫原堆積物が地表下 3～4 m に埋没していることを認定して、同時期以降に沈降イベントがあったと推定した。この時期には西暦 1596 年の慶長豊後地震に同地域において甚大な被害が報告されている。それ以前の沈降イベントを示唆する現象として朝見地区において 1900 cal BP 頃に堆積速度の急増を認定した。両イベントが共に朝見川断層の活動によるものならば、同断層の活動間隔は 1500 年程度となる。最後に、浜脇地区の朝見川断層を挟んだ地質地形断面の鬼界アカホヤ火山灰層の標高差に基づいて、5.2 mm/yr 程度の平均上下変位速度を推定した。大分平野西部の府内断層周辺においてボーリング調査と地中レーダー探査を実施して、府内断層の低下側に 400 cal BP 頃に形成された厚さ数 10 cm の泥層が標高-0.5～1.0 m に連続的に分布することが明らかになった。この泥層は断層の上昇側には連続せず、800 cal BP 頃に形成された泥層が分布する。断層を挟んだ両泥層の珪藻化石群集組成は、断層の上昇側の泥層の方が海の影響を強く受けていた。これらを根拠に 800～400 cal BP の間に地表変位があり、その古地震イベントは西暦 1596 年の慶長豊後地震に相当する可能性を指摘した。また同地域の標高-4～-8 m において 2000～2200 cal BP の植物片を含んだ厚さ 2～4 m の泥層も確認した。この泥層の上面は断層を挟んで 3～4 m 程度標高差があり、上位にある断層の上昇側の泥層の珪藻化石群集の方が低下側よりも塩水の影響が大きかった。したがって、2000 cal BP 以降に少なくとも 3～4 m の上下変位を生じさせた古地震が推定できる。以上をまとめると府内断層の古地震の再来間隔は少なくとも 1200 年程度であると考えられる。大分市中島西地区周辺において府内断層を挟んで、海水準上昇期の内湾泥層に挟在する鬼界アカホヤ火山灰層が 20 m、約 18000 年前の沖積層基底礫層の上面が 47 m 上下方向に分布深度が違っていることを根拠にして、同断層の長期的な平均上下変位速度を 2.6～2.7 mm/yr と推定した。

2) 断層帯の三次元的形状・断層帯周辺の地殻構造解明のための調査観測：

(2-1) 深部地殻構造調査：自然地震によるこの地域の調査においては、過去 20 年余の震源データを再解析し、地震発生層、応力場、非弾性ひずみの分布を明らかにした。別府-万年山断層帯では地震発生層深度が九州内陸の他地域に比べて浅く、脆性領域が薄いことが示された。

これは GPS によるせん断ひずみの空間分布のうち、せん断ひずみの大きい領域と対応していることが明らかになった。また、地震活動から推定される応力場は、地形学的・地質学的に推定される活断層形成の応力場と整合的であり、正断層パターンが卓越している。非弾性ひずみは別府-万年山地域で $10^{-7}/\text{yr}$ のレートを示す。また、変形は活断層と同様な方向で進んでいる。また、本研究で実施した地震観測データを中心に用い、断層帯下の不均質構造を推定した結果、断層帯南部や火山体近傍に強い散乱を示す不均質構造が存在することが明らかになった。

比抵抗構造に関しては、新たに 100 箇所を広帯域 MT 調査を行った。その結果、深さ 2 km までの浅部において別府~大分市から九重山にかけて、低重力-低比抵抗な媒質で満たされた陥没構造の存在が明らかになった。深さ 3 km より深部では、地表断層の東西走行に対応する比抵抗構造は見られず、むしろ北東-南西走行の比抵抗構造が卓越していることが示唆された。3 次元解析からは、(1) 鶴見岳、由布岳、伽藍岳に囲まれる部分に向かって深部から上昇する低比抵抗領域、(2) 大分市南部の低比抵抗領域がイメージングされた。(1)、(2)とも北東-南西方向に伸びる形状をしており、現在の地震活動はその周辺で発生している。また、朝見川断層は、(2)の低比抵抗域の北縁に位置することが明らかになった。

(2-2) 浅部地殻構造調査：既存の地球物理学的資料（反射法地震探査、重力調査など）の収集・整理を進めるとともに、特に反射法地震探査については、既存データの再解析やデジタル化を実施した。また、大分平野及び別府扇状地において新規の反射法地震探査データを取得し、別府-万年山断層帯の断層分布及び深部形状の把握と共に、別府湾及び周辺陸域における強震動予測の厳密化に向けた三次元構造モデル構築に資する基礎資料を提示した。さらに、断層帯周辺の地震活動や地殻変動の解析高度化のために、GPS および地震観測地点を増強し、解析システムや収録システムを活用し解析を進めた。また、断層帯構造の解明のための稠密重力調査を継続実施した。あわせて、盆地浅部における地盤構造の高度化に必要な地盤モデル構築に向けて、既存ボーリングの情報収集整理を進め、ボーリングデータベースを構築した。

(2-3) 水理構造調査：別府・由布院・大分平野等に存在する温泉掘削の情報の整理を進めるとともに、水位観測や水質分析を追加して水理的解析を実施した。さらに、フラックスメーターを活用して、平野域での分布調査を進め、断層との関係の考察を進めた。また、海域でのラドンガスの分布状況を調査し、地下からの湧出と経路に関する調査を実施した。浅層の比抵抗探査を実施して、浅層地下構造との関連を明らかにする調査を実施した。

(2-4) 応力変遷史解析調査： 野外携行データ記録システム等を活用した小断層解析による応力変化史の解析および地質調査に基づく断層帯形成のプロセスの解明を進めるとともに、地殻内応力シミュレーション装置を用いた、三次元断層構造形成の解析を進めた。また、現地地質調査や年代測定により、別府湾周辺の地質構造発達史をまとめることができた。成果として別府-万年山断層帯（大分平野-由布院断層帯東部）の構造評価、震源断層形状モデルの提案、地殻構造モデルの提案を進めることができた。

3) 断層帯周辺における強震動予測の高度化のための研究：

(1) 微動アレイ探査による深い速度構造の推定

固有周期 10 秒の 3 成分速度計を用いて大分平野 12 カ所、別府扇状地 5 カ所、由布院盆地、日出町 2 カ所、杵築市、宇佐、九重町千町無田、日田市中心部の計 24 箇所にて最大半径 1 km 以上の微動アレイ観測を実施し、0.2 Hz から 5-10Hz の範囲でレイリー波の観測位相速度を得た。既往速度構造モデルから計算される理論位相速度と観測値との比較を行い、地震基盤相当以浅の深部速度構造モデル(2017 重点モデル)の改良に生かした。

(2) 小半径微動アレイ観測および単点微動観測による浅部速度構造の推定

大分平野の浅部速度構造を対象に 109 か所にて小半径の微動アレイ探査を行った。概ね 1 Hz から 20Hz の範囲で分散性を有する位相速度を得た。位相速度から簡易変換により速度構造を求め、位相速度および H/V スペクトルのピークを再現する速度構造を得た。大分平野の伏在断層および河川流路に規制された速度構造が確認された。ここで得た速度構造および位相速度は、(3.3.7)の浅部速度構造モデル(2017 重点浅部速度構造モデル)の作成および妥当性検討に用いられた。また、大分平野および別府湾周辺域の多数地点にて単点微動観測を行い微動 H/V スペクトルを得た。微動 H/V スペクトルとレイリー波の理論 H/V スペクトルとの比較を行い、既往速度構造モデルおよび 2017 重点浅部速度構造モデルの妥当性について検討した。

(3) 連続微動観測記録を用いた地震波干渉法解析

別府湾を取り囲む全 12 点の広帯域地震計から成る連続微動観測網(BEP-NET)を構築し、観測データを蓄積した。地震波干渉法および遠地地震の解析により、別府湾を跨ぐ観測点ペアでの群速度および別府湾の平均的な位相速度を推定した。既往の地下構造モデルと本調査観測において修正したモデルを用いて、3次元差分法により連続微動観測点間の理論グリーン関数を計算した。地震波干渉法によって得られた観測点間のグリーン関数との比較により、モデルの妥当性を検証した。

(4) 地震記録の収集・解析

大分県内の自治体震度計(全 49 点)にて 2014 年 9 月以降に観測された 68 地震および 2016 年熊本地震の本震、湯布院付近の誘発地震等の 15 地震の観測記録を収集・整理した。地震記録の主要動部分を用いた H/V スペクトルの算出と、後続波部分を用いた R/V スペクトルの算出を行った。これらから既往の速度構造モデルを修正すべき地点について検討した。また、自治体震度観測点周辺にて単点微動観測および小半径微動アレイ観測を実施し、震度観測点直下の速度構造について検討した。さらに、既往強震観測点を補うため、大分平野内の 8 点および別府南部の 1 点にて、2016 年 8 月末から 2017 年 2 月上旬にかけて連続強震観測を実施し、取得した地震記録(2016 年鳥取県中部地震(M6.6)、2016 年熊本地震の余震など)を用いて大分平野の増幅特性を検討した。

(5) 別府湾内の地殻内地震および 2016 年熊本地震で動的誘発された大分県中部の地震活動を用いた応力場解析

本重点観測で展開した別府湾周辺微動連続観測網（BEP-NET）で捉えられた、2015年5月下旬の別府湾内における地殻内地震および2016年熊本地震で動的誘発された大分県中部の地震活動について、発震機構解を推定し応力場を推定した。このうち、別府湾内の応力場は、動力学計算に基づく震源モデルの作成の際に用いられた。

(6) 深部速度構造モデルの作成

大分県（2008）による深部速度構造モデルを初期モデルとして、大分県全域を含む速度構造モデルを作成した（2017重点モデル）。別府湾内については、深部音波探査データの再解析結果に基づいて既往速度構造モデルの層境界深度を変更するとともに、微動アレイ探査に基づいて基盤以浅の速度構造を修正した。その他の地域では、地震動 R/V および微動アレイ探査による観測位相速度を参照して、速度構造モデルを修正した。

(7) 浅部速度構造モデルの作成

大分平野および別府扇状地を主対象に、ボーリングデータを収集整理し、工学的基盤以浅の浅部速度構造モデルを作成した。速度構造モデルは250mメッシュモデルとして表現した。土質モデルおよびN値構造モデルを作成した後に、既往の関係式を用いてS波速度構造に変換した。作成したモデルは（3.3.2）で実施した大分平野における稠密微動アレイ観測による位相速度をよく説明するものとなった。

(8) 深部速度構造モデルの検証

中小地震の再現計算を行い、既往速度構造モデルと（3.3.6）で作成した深部速度構造モデル（2017重点モデル）の検証を行った。大分県南部の稍深発地震と別府周辺の浅い地震を対象に3次元差分法にて地震動を計算し比較したところ、本重点観測にて作成した深部速度構造モデルの方が波形の一致度が改善されたことが確認された。

また、別府湾周辺域を対象に表面加震の理論グリーン関数の時刻歴波形を計算し、（3.3.3）で行った地震波干渉法解析による観測グリーン関数（相互相関関数）と比較した。詳細な検討は今後の課題であるが、おおむね対応する波群が得られることを確認した。

(9) 断層形状の設定

別府湾周辺における反射法地震探査断面および既往知見をもとに検討し、震源として設定する断層形状を設定した。最終的に、豊予海峡セグメント、三佐断層セグメント、府内・朝見川・堀田セグメントを震源断層として考慮するものとした。豊予海峡セグメントは、大分平野の東（大在沖断層群）まで伸び、北落ちで伸張成分を伴う右横ずれ断層、三佐断層セグメントは、北落ちの正断層、府内・朝見川・堀田セグメントも北落ちの正断層であるものとした。豊予海峡セグメントの傾斜は70度とし、正断層部分の断層傾斜は45度または60度の2種類を想定することとした。

(10) 震源モデルの構築

設定した断層形状モデルおよび広域応力場モデルを構築し、境界積分方程式法による動力学的シミュレーションによって破壊シナリオを評価した。得られた断層滑り角をセグメントごとに平均化した値を運動学的モデルによる強震動予測計算の震源パラメータとした。滑り角以外の断層パラメータは、地震本部の強震動レシピ（イ）に従って設定し、背景領域とアスペリティ領域からなる震源モデルを構築した。破壊開始位置は断層東端深部もしくは西端深部とし、背景領域の破壊が各アスペリティに達した際に等方的破壊伝播が始まるよう設定した。

(11) 地震動計算

構築した深部地下構造モデル（2017 重点モデル）と震源モデル（3.3.10）を用いて、ハイブリッド法による広帯域地震動計算を実施した。マッチング周期は1秒とし、短周期側を統計的グリーン関数法で、長周期側を3次元差分法で計算した。差分法計算は、最小S波速度350m/sまで考慮する別府湾周辺域の計算と、最小S波速度600m/sとした大分県全域の計算の2ケースを実施した。ハイブリッド法におけるマッチングは工学的基盤上で実施した。地表面の地震動は等価線形解析を用いた。

正断層部分の傾斜角が45度、60度の2ケースについて、東端、西端の破壊開始位置を設定し、計4つの地震シナリオの計算を実施した。その結果、別府湾周辺域に対しては、破壊が近づく東破壊の方が堆積盆地の形状による効果もあり、一般的に強い地震動となることがわかった。大分平野および別府南部の別府湾岸域では最大速度100cm/s以上で震度7相当となる地震動が予測された。

最後に本重点調査による地震動計算と、地震本部の長期評価に基づく震源モデルおよびJ-SHISの深部速度構造を設定した計算とを比較した。その結果、大分平野に対しては、新たに構築した速度構造モデルの方が強い地震動を及ぼすこと、本重点調査（3.3.10）で設定した震源モデルの方が大分平野の南部まで大きめの地震動が予測されることがわかった。