

## 4. 全体成果概要

1. プロジェクトの概要で触れたように、奈良盆地東縁断層帯における重点的な調査観測では、奈良盆地東縁断層帯とその周辺で発生する地震との関連性に基づく構成断層の再検討と、再検討された構成断層における地震規模及び長期的な発生時期の予測精度の高度化、断層帯周辺における地殻活動の現状把握の高度化、強震動の予測精度の高度化等の調査観測研究を3ヵ年計画で実施した。

本調査観測では、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研究、2) 断層帯周辺の地殻活動の現状把握の高度化に関する調査研究、3) 断層帯周辺における強震動予測の高度化に関する研究、の3つのサブテーマ研究グループを構築して、調査観測、研究を進めるとともに、これらの活断層調査を実施に際して、関係の自治体等と連携を図るとともに、研究成果を地域へ普及・還元する観点から、4) 地域連携・地域の内在ハザード情報共有、のサブテーマを設定した。

本年度（令和3年度）実施した調査観測を含め、3年間の成果概要を以下に記す。

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研究では、3年間の調査観測結果を踏まえて、奈良盆地東縁断層帯の位置・形状や過去の活動に関するデータを、従来の長期評価結果との比較も含めて特性表を作成した。断層帯の位置・形状については、京都府綴喜郡井手町付近を境に、北部と南部に二分されることが判明した。断層帯の過去の活動に関しては、多くのデータを新たに取得することができた。最新活動時期については、断層帯の北部と南部のそれぞれについてデータを取得したが、時期を精度良く絞り込むことはできず、ある年代以降もしくはある年代以前としか限定することができなかった。また、最新活動より前の断層活動の時期を解明することができなかったので、活動間隔を直接算出することはできなかった。

一方、断層帯の上下変位速度や1回のずれの量については断層帯に沿って比較的信頼度の高いデータが得られたことから、それらに基づいて平均活動間隔を算出することができた。また、地質学的な調査や建造物の被害状況の調査から、当該断層帯の北に連なる琵琶湖西岸断層帯の最新活動である1185年の地震では、奈良盆地東縁断層帯が連動しなかったことが明らかとなった。また古文書には、奈良盆地東縁断層帯が活動したことを示すような被害の記録は残されていないことが明らかとなった。奈良盆地内の遺跡には地震痕跡が数多く残されており、それらを統一した基準で収集しデータベース化した。

本調査観測は、京都盆地・奈良盆地という、古くから人工改変・都市化が進んでいる地域での活断層調査であったため、高度経済成長期の大規模な人工改変前の地形を復元するため、断層帯北部の京都市山科区で空中写真の図化を行った。また奈良盆地北東部では、航空レーザ計測を実施し、デジタル標高モデルを作成し、断層変位量の正確な見積もりや微細な変位地形の解析に役立てた。また、本調査地域も含む関西圏で掘削されたボーリングのデータベースである「関西圏地盤情報データベース」は、都市圏ならではの高密度のデータベースが構築されていたことから、地質断面図の作成や埋没段丘面の認定、掘削予

定地の地下地質の予察的検討に大変有益であった。加えて、当該地域で過去に実施された既存の豊富な地下地質データ（反射法地震探査データやボーリングデータ）を活用することで、逆断層である奈良盆地東縁断層帯の断層変位量分布の見積もりを行うことができた。

古文書の記録が多く残る奈良や京都が調査地域に含まれるために、古文書の解読による歴史地震像の検討を行うこともできた。古代から中世の奈良や京都に被害を及ぼした内陸直下型地震が複数あることが明らかとなると共に、被害の程度からそれらは奈良盆地東縁断層帯で想定されているような大地震ではなかったことが明らかとなった。また、奈良盆地やその周辺に多数分布する遺跡の発掘記録を系統的に調査しデータベース化した。これらの調査は、本調査観測対象地域の特徴を反映したユニークな調査として十分な成果を上げることができた。

2) 断層帯周辺の地殻活動の現状把握の高度化に関する調査研究では、奈良盆地東縁断層帯及び周辺断層帯を対象に、地質踏査、地震観測、微動観測、重力観測、反射法地震探査断面の検討を行い、現在・過去の応力場、断層の活動しやすさ、基盤深度分布及び堆積層の変形状況、及び、変形を説明する深部断層形状等について、以下に述べる新たな知見が得られた。なお、推定した応力場、断層のすべり方向、深部断層形状、各種観測データは他のサブテーマにも提供され、地下構造モデル構築や強震動予測にも利用された。

奈良盆地東縁断層帯周辺の 15 地点に高感度地震計を設置し、2年3ヶ月間の連続観測を実施した。この観測網に加え周辺定常観測点のデータと統合して、地震活動が低調である当地域において、M0.4以上の多くの地震メカニズムを決定できた。これにより、微小地震の発震機構解はほぼ東西方向にP軸を持っていることが分かった。これは広域応力場と整合的であるため、より長期間のデータから推定された広域応力場の情報を使って断層の活動性の評価などを行うことが適当であると考えられる。

この臨時地震観測網と周辺の既存地震観測点の雑微動データを用いた表面波解析により、Rayleigh波とLove波の位相速度を求め、これらから奈良盆地東縁断層帯周辺の基盤速度を推定した。速度構造の3次元化も実施し、奈良盆地での基盤の落ち込みを捉えることができた。基盤の速度構造は、地震発生過程を理解する上での基本情報であるものの、本断層帯周辺のように地震活動の乏しい地域では、定常地震観測網による長期間のデータを用いても、自然地震記録を用いた地震波速度推定では特に浅部の拘束が難しい。活断層周辺のような重要地域では、本調査観測で実施したような臨時観測による震源決定に加えて、雑微動の表面波解析を適宜組み合わせた構造の検討が重要かつ有用である。

当該断層帯に隣接する琵琶湖西岸断層帯や花折断層帯の応力状態を把握するため、高感度稠密臨時地震観測網「満点地震観測網」による発震機構解析結果を用いて、応力逆解析を実施した。花折断層帯は、西から東に向かって横ずれ型から逆断層型へと空間変化している応力場の境界に位置するほぼ鉛直の断層であることが推定された一方、琵琶湖西岸断層帯については、その深部構造を推定することができなかった。最大主圧縮応力の方位について、花折断層帯付近においては深さ10 kmにおいて、その15 km西においては深さ15 kmにおいて、周囲にくらべて回転していることが推定されたが、それらの成因については現時点で答えはない。

琵琶湖西岸断層帯の深部が低角なリストリックな断層となる場合は、上記の最大主圧縮応力の方位の空間変化が推定された領域に伸びる可能性があるが、低角な断層すべりではこ

のような応力場の空間変化を引き起こすことは難しいことも分かった。今後さらにデータを増やして、最大主圧縮応力の方位分布に関する空間分解能を上げ、琵琶湖西岸断層帯の深部構造の解明につなげることが重要であると考えられる。

奈良盆地東縁断層帯周辺の地殻活動及び変形構造に関する既往研究の整理・データ収集、応力変遷解析のための野外地質調査を行った。応力逆解析の結果を踏まえると、北北西－南南東方向に水平最大圧縮軸を持つ逆断層型応力は大阪層群の堆積後まで継続していた可能性がある。すなわち、応力場の水平最大圧縮軸の方向が北北西－南南東方向から東西方向へ変化し、奈良盆地周辺が現在の東西方向の圧縮場にさらされたのが10万年間程度の可能性がある。このように、現在の応力状態の把握にとどまらず、過去の応力変遷を推定することで、対象となる断層に対して現在の応力状態が被っている時間の理解が進み、対象となる断層の応力蓄積の理解をより進めることに繋がる。

奈良盆地周辺の活断層帯を含めて Slip Tendency 法による断層の活動のしやすさ (ST) を求めた。地震のメカニズム解での応力を用いた ST としては、奈良盆地東縁断層帯南部よりも、奈良盆地東縁断層帯北部の方が ST は高く求められた。第四紀以降の応力変遷における ST の変化としては、奈良盆地東縁断層帯では現在起きている地震のメカニズム解での応力の ST が最も高い。一方、花折断層帯ではどの応力場でも ST は低く、琵琶湖西岸断層帯ではどの応力場でも ST は高い。奈良盆地周辺活断層 (和束谷断層や木津川断層を含む) では、地震のメカニズム解での応力の ST が最も高いことがわかった。

基盤構造把握のため、京都盆地南部から奈良盆地南部にかけて微動アレイ探査と単点微動観測を面的に稠密実施した。京都盆地南部から奈良盆地南部にかけての広域の基盤上面深度分布を明らかにし、当地域の堆積盆の形成に関わるとみられる系統的な基盤深度急変部を見出した。微動探査は、通常、特定地域の地震動増幅特性の把握を目的として実施されることが多い。本調査観測では、微動 H/V スペクトル比のピーク周期が当地域では基盤上面深度とよく対応するという既往知見を利用して、微動観測を面的な構造探査と位置づけて稠密実施した。

奈良盆地東縁断層帯に起因する基盤上面形状を明らかにすることを目的として、重力探査を実施した。また、その観測結果と既存のボーリング・反射法地震探査結果及び本調査観測で実施された反射法地震探査結果とあわせて、基盤上面形状を推定する解析を行った。その結果、重力異常から推定される基盤上面形状として、奈良盆地東縁断層帯に起因する顕著な基盤上面の食い違いを確認した。また、奈良盆地東縁断層帯に起因する基盤上面の食い違いは、北部の方が大きく、南部に向かって小さくなる傾向が示唆された。奈良盆地内でも北から南に向かう変化として、北から南に向かって基盤上面深度が浅くなる傾向が見られた。盆地内の構造的特徴も北部では南北方向の構造が卓越するのに対して、南部では北東－南西方向の構造が卓越する傾向が見られた。ただし、定量的な評価を実施するためには、2次元断面での解析において並行する反射法地震探査から推定された基盤上面と、重力探査の結果が必ずしも一致しないことについて、その原因も含めて検討することは、今後の課題となった。

京都盆地及び奈良盆地で自治体や企業等により実施された反射法地震探査データを収集・整理し、奈良盆地東縁断層帯及びその周辺の地下構造に関する資料を三次元的に集約した。深度断面の地質学的な解釈、活構造図との対応関係の検討により、断層帯の北部では単斜構

造が、断層帯の南部には東傾斜の逆断層に伴う一連の断層関連褶曲が発達しており、変動地形と地下構造が調和的であることを示した。他方で、現河床及び氾濫原においては、地下に確認できた活構造に対応する変動地形が保存されていない場合がある。そのため、断層の位置・形状に関する信頼性の高い資料を得るためには、地形・地質的な調査と反射法地震探査をはじめとする物理探査を総合的に検討することが重要である。

収集された反射法地震探査記録断面を用いて、断層帯の活動開始後の累積的な変形量の空間分布、大阪層群基底面の高度分布について検討した。さらに、バランス断面法の1つであるFault-bend Foldによって、地表面2～3 km程度までの断層形状を検討した。断層面の推定には自由度があるものの、地質構造を合理的に説明可能な解釈の1つとして、大阪層群相当層の変形を再現できる断層形状を示した。本地域のように堆積層が厚く分布する領域では、反射法地震探査によって得られる反射断面は断層形状を推定にきわめて重要である。よって、必要に応じて新たな探査資料を蓄積することに加え、公共性の高い調査研究において既存の探査資料を有効活用できる体制を整備することが重要である。

3) 断層帯周辺における強震動予測の高度化に関する研究では、当該断層帯が活動した場合の強震動予測を実施することを目的とした。そのため、震源断層に近い、京都盆地南部～京都山城地域～奈良盆地を中心とした地域の浅部・深部地盤構造モデルの構築・高度化を進めるとともに、サブテーマ1(3.1節)、サブテーマ2(3.2節)で得られた知見をもとに奈良盆地東縁断層帯の震源断層モデルを設定して強震動予測を実施した。

当該地域の断層構造、堆積層構造を知るため、各機関の既往の反射法探査測線位置を踏まえ、宇治市、奈良市(2測線)、天理市において探査を実施し、測線を横切る断層帯の地下形状及び堆積盆地構造に関する情報を新たに得た。近接した奈良の2測線の測定により、周囲の反射断面に比して反射断面が明確でない領域が見つかり、本地域の断層運動に関する可能性を指摘した。また、奈良測線沿いにおいて、300 mのオールコアボーリングとVSP探査を実施し、地質特性、堆積年代情報を得、周辺の長尺ボーリング地質柱状図と比較することで、当該地域の活動特性を検討した。VSP探査では深さ300 mまでの堆積層のP波、S波速度の直接計測を実施する一方、盆地基盤面からの反射相を利用して、堆積層深部を含む堆積層の速度構造の深さ分布を得た。

当該地域の深部地盤構造モデルをより高度化するため、既往物理探査データの収集・整理と深いボーリング地質柱状図を収集するとともに、既往調査資料が十分でない地域を中心に微動アレイ、単点微動観測を実施し基礎資料を得た。サブテーマ2において実施された微動観測情報も深部地盤構造モデル高度化に活用した。これらを統合的に分析し、山科盆地～京都盆地南部～山城盆地(木津川低地)～奈良盆地、及び周辺の近江盆地南部の深部地盤構造モデルの高度化を行った。作成されたモデルは、小地震の地震動シミュレーションを通して、既往モデルに比して観測記録の説明性が向上し、よりよいモデルになったことが確認された。

当該地域の工学的基盤面以浅を対象とした浅部地盤構造モデルと強震動計算に必要な浅部地盤の動的変形試験情報を収集した。既往調査の浅部地盤のPS検層結果や動的変形試験結果を踏まえ、動的変形特性試験試料がない天理市において浅層ボーリングを実施し、採取した試料を用いて動的変形特性試験を実施した。また、工学的基盤相当以浅の浅部S波速度構造を得るため極小～小半径微動アレイ探査を対象領域の盆地内で多数実施した。

この調査結果と、各種ボーリング資料に基づく浅部地盤の地層モデルを用いて、浅部の土質区分等とS波速度の経験式を新たに得ることにより浅部地盤構造モデルを構築した。ここでの方法で得られた経験式は稠密な微動観測データを元に作られているため、当該地域全体の平均的な特性を表現しているといえる。これまでのS波検層結果を土質区分、N値等と結び付けた浅部のS波速度経験式に対して、微動アレイ探査を用いたS波速度構造情報と地層モデルを組み合わせることによる新しい経験式提案法と浅部地盤構造モデル構築は、今後の展開でも期待される。

サブテーマ1と2で得られた情報をもとに、震源断層モデルの設定を行った。サブテーマ1において実施された、奈良盆地東縁断層帯の詳細な位置や分布、及び活動履歴調査結果に基づき、京都府綴喜郡井手町付近(井手断層)では断層変位地形が不明瞭になることから、ここを境として断層帯は断層帯北部と断層帯南部に二分されること、断層帯北部の北側に存在する琵琶湖西岸断層帯南部と奈良盆地東縁断層帯北部の最新活動時期の比較からは、最新活動は連動しなかったと考えられることがわかった。このことから、当該断層帯の強震動予測のための震源断層モデルは、黄檗断層群から穴師撓曲に至る断層帯を想定し、井手断層のところで北部と南部の2つのセグメントに分かれるモデルとした。

震源断層面の傾斜角やすべり方向といった震源パラメータはサブテーマ2の検討によって得られたものを用いた。その後、レシピ(震源断層を特定した地震の強震動予測手法)に基づいて奈良盆地東縁断層帯の震源断層モデル(特性化震源モデル)を設定し、破壊開始点と強震動生成域の組み合わせにより合計6通りの地震シナリオを設定した。上述の浅部・深部地盤構造モデルを用いて地震動計算を行って、活動した場合の地表震度分布を求め、揺れの分布の特徴やシナリオ間の比較を行った。どの地震シナリオにおいても震源断層近傍である奈良盆地、山城盆地、京都盆地南部、山科盆地、近江盆地南部では強い揺れに見舞われる可能性があることがわかり、断層近傍では上盤側で隆起、西向き、下盤側で沈降、東向きの永久変位が生じることを示した。

4) 地域連携・地域の内在ハザード情報共有では、関係の自治体の危機管理担当、インフラストラクチャ会社の危機管理担当等と当該地域の地震ハザードと本調査観測の成果共有を行い、意見交換を実施した。

令和元年度は対面で実施したものの、令和2、3年度は社会情勢を踏まえてオンラインで実施した。構成は2部構成とし、第1部では話題提供として、本調査観測の経緯、狙いや観測調査成果、並びに奈良県の活断層、史料に見られる奈良県の歴史地震、考古資料に残された自然災害についての話題提供を行った。都度、アンケートをとり、参加者が地震災害として気になる地表地震断層変位についての話題提供も3年目に行った。第2部では、社会科学の専門家をコーディネーターあるいはモデレーターとして、第1部の登壇者に参加者からの質疑に対する応答、あるいは登壇者相互の質問等を行うパネルディスカッションを実施した。実施後に参加者にアンケートをとり、本会の満足度や難易度を把握し、次回以降に活用した。こういった地域勉強会は、奈良盆地東縁断層帯をきっかけにして、当該地域の地震ハザードに関して、地震ハザードやリスクコミュニケーションの専門家と現場担当者、事業責任者が情報共有し、リスクコミュニケーションをするプラットフォームの場が形成されたことが成果と考えることができる。

本調査観測で実施したボーリング調査、トレンチ掘削調査及びピット掘削調査にあたって

は、各調査地の地権者及び自治会長に協力いただいたほか、京都府、京都市、木津川市、奈良県、奈良市、天理市の危機管理担当部署には、現地調査の実施にあたり種々ご協力いただいた。天理市教育委員会文化財課には、遺跡内でのピット掘削調査に際し、調査許可の取得・掘削時の現地確認・出土した土器片の時代鑑定などで大変お世話になった。平城宮跡内で行った地中レーダ探査に際しては、独立行政法人国立文化財機構奈良文化財研究所と文化庁にお世話になった。京都府教育庁文化財保護課・京都市文化芸術都市推進室文化財保護課・木津川市教育委員会文化財保護課の方々には、京都市山科区大宅地区及び木津川市上狛地区のボーリングに際してお世話になった。京都府流域下水道事務所には、ボーリング資料を閲覧させていただいた。国土交通省国土地理院からは、同院が管理する航空レーザ測量データの利用を許可いただいた。京都市埋蔵文化財研究所からは、研究所所蔵資料の転載許可をいただいた。滋賀県立琵琶湖博物館の里口保文博士と産業技術総合研究所の水野清秀氏からは、それぞれ虫生野テフラ及び阿須公園4テフラの模式試料を提供いただいた。京都市埋蔵文化財研究所の内田好昭氏には、遺跡発掘時の遺物の産出状況等を教えていただいた。臨時高感度地震観測網の構築にあたっては、郷之口生産森林組合、木津川市高麗財産区、山城町森林公園、独立行政法人国立文化財機構奈良文化財研究所、奈良市東部出張所、社会福祉法人宝山寺福祉事業団、障害児福祉センター奈良仔鹿園、学校法人奈良大学、桜井市笠区、奈良市月ヶ瀬月瀬区、桜井市倉橋土地改良区、学校法人関西大学、奈良県野外活動センター、奈良市長谷町の植田様、および、宇治田原町、木津川市、南山城村、奈良市、南山城村、宇陀市のご協力を賜った。反射法地震探査の実施にあたっては、奈良教育大学、奈良市、天理市、宇治市、巨椋池土地改良区事務所、国土交通省近畿地方整備局京都国道事務所、京都大学宇治地区事務部、調査対象地域の関係自治会及び地域の皆様にご協力いただいた。大深度ボーリング調査の実施に関しては、奈良市と西日本旅客鉄道株式会社にご協力いただいた。浅層ボーリング調査の実施に関しては、天理市及び天理市体育施設等指定管理者株式会社エスエスケイのお世話になった。ボーリング資料の収集・整理に際しては、京都府、奈良県、滋賀県、奈良市、大和高田市、大和郡山市、天理市、橿原市、桜井市、磯城郡田原本町、木津川市、国土交通省近畿地方整備局奈良国道事務所、滋賀県立琵琶湖博物館里口保文博士のご協力を得た。既往の反射法地震探査データの利用に関しては、京都府、京都市、大阪府、国立研究開発法人産業技術総合研究所、西日本高速道路株式会社、東京大学地震研究所の協力を得た。微動観測にあたっては、地域の多くの方々のご理解とご協力のおかげで実施することができた。記して感謝する。