#### 3. 研究報告

# 3.1 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

## (1)業務の内容

(a)業務題目 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

## (b) 担当者

所属機関	役職	氏名
同志社大学理工学部	教授	堤 浩之
国立研究開発法人産業技術総合研究所地質情報研究部	主任研究員	小松原 琢
門		
奈良大学文学部	教授	池田 安隆
法政大学人間環境学部	准教授	杉戸 信彦
一般財団法人電力中央研究所地球工学研究所	主任研究員	木村 治夫
国立大学法人東京大学地震研究所附属地震予知研究セ	助教	西山 昭仁
ンター		
独立行政法人国立文化財機構奈良文化財研究所	研究員	村田 泰輔
同志社大学理工学部	調査補助員	土井 有紀
同志社大学大学院理工学研究科	博士課程(前	梶井 宇宙
	期課程) 1年	
同志社大学理工学部	学部4年	小林 亜紀
同志社大学理工学部	学部4年	小松 春香
同志社大学理工学部	学部4年	西原 夢実
同志社大学理工学部	学部4年	吉田 至良

(c) 業務の目的

奈良盆地東縁断層帯について、変動地形学的調査や物理探査等により、地表付近での詳細な断層位置と分布形状、および変位速度を明らかにする。またトレンチ調査やボーリン グ調査等の地質学的調査・歴史史料の調査・考古学的調査により、過去の活動履歴を明ら かにする。さらに周辺の断層帯との連続性や連動性を明らかにすることを業務の目的とす る。

(d) 3 ヵ年の年次実施業務の要約

1) 令和元年度:

奈良盆地東縁断層帯の詳細な位置や分布を明らかにするために、空中写真判読や既 存の反射法地震探査断面・ボーリングデータの解析によって、縮尺 2.5 万分の1の活 断層分布図の作成作業を行った。それを基に、断層変位地形の現地踏査や地形面の編 年のためのピット掘削調査を行い、次年度以降の詳細調査候補地を選定した。奈良盆 地北東部については航空レーザ測量により 0.5 mメッシュのデジタル標高データを、 山科盆地東縁部については米軍や国土地理院撮影の空中写真から、大規模な人工改変 前の地形の5mメッシュのデジタル標高データを整備した。木津川低地東部の大阪層 群基底の高度分布を明らかにするために、地表踏査を行った。奈良盆地に被害を及ぼ した主な歴史地震について、史料の解析により被害状況をまとめるとともに、奈良盆 地に位置する遺跡の発掘現場で確認された地震痕跡のカタログ作成作業を行った。各 研究に関する情報交換と議論のために、関係者間の打合せやサブテーマ会議を行った。 2) 令和2年度:

奈良盆地東縁断層帯の詳細な位置や分布を明らかにするために、空中写真判読や既 存の反射法地震探査断面・ボーリングデータの解析及び令和元年度に整備した地形デ ータの解析により、縮尺 2.5 万分の1の活断層分布図の作成作業を行う。それを基に 現地踏査を行い、断層変位地形や段丘堆積物の観察・記載を行う。木津川低地東部の 大阪層群基底の高度分布を現地踏査によって明らかにし、断層の連続性や変位量分布 を議論する。断層帯の過去複数回の活動履歴、特に最新活動時期を明らかにするため に、調査適地を選定し物理探査・ボーリング調査・トレンチ調査等を行う。あわせて 関連の試料分析(テフラ分析・放射性炭素年代測定等)を行う。奈良盆地や京都盆地 の南部に被害をおよぼした歴史地震について、史料の解析により被害状況をまとめる。 さらに、奈良盆地に位置する遺跡の発掘現場で確認された地震痕跡のカタログ作成作 業を継続する。本調査研究で得られる奈良盆地東縁断層帯の位置・形状に基づいて、 花折断層帯や琵琶湖西岸断層帯などの周辺の断層帯との連続性を検討する。各研究に 関する情報交換と議論のために、関係者間の打合せやサブテーマ会議を行う。なお活 動履歴調査にあたっては、候補となる地点について事前に情報を可能な限り入手し、 調査の実施方法等について十分な検討を行う。トレンチ掘削地点やボーリング掘削地 点においては、複数の第三者による確認を行う。

3) 令和3年度:

奈良盆地東縁断層帯の詳細な位置や分布を明らかにするために、令和元~2年度の 空中写真判読等の室内解析結果と野外踏査結果を整理して、縮尺2.5万分の1の活断 層分布図を完成する。これと既存の反射法地震探査断面図、及び木津川低地東部の大 阪層群の地質構造調査結果等を統合して、奈良盆地東縁断層帯のセグメンテーション モデルを構築する。断層帯の過去複数回の活動履歴、特に最新活動時期を明らかにす るために、物理探査・ボーリング調査・トレンチ調査等を行う。あわせて関連の試料 分析(テフラ分析・放射性炭素年代測定等)を行う。奈良盆地や京都盆地の南部に被 害をおよぼした歴史地震について、史料の解析により被害状況をまとめ、さらに奈良 盆地に位置する遺跡の発掘現場で確認された地震痕跡のカタログを完成する。活動履 歴に関する上記の調査結果を統合して断層帯全体の活動履歴データをまとめるために、 サブテーマ会議を実施する。本調査研究で得られる奈良盆地東縁断層帯の位置・形状・ 活動履歴データに基づいて、花折断層帯や琵琶湖西岸断層帯などの周辺の断層帯との 連続性や連動性を検討する。なお活動履歴調査にあたっては、候補となる地点につい

7

て事前に情報を可能な限り入手し、調査の実施方法等について十分な検討を行う。ト レンチ掘削地点やボーリング掘削地点においては、複数の第三者による確認を行う。

### (2) 令和元年度の成果

(a) 業務の要約

奈良盆地北東部で航空レーザ測量を実施し、0.5 m間隔のデジタル標高データを作成し た。山科盆地東縁部の米軍及び国土地理院撮影の空中写真を数値図化し、大規模な人工改 変以前の地形の5m間隔のデジタル標高データを作成した。米軍撮影の縮尺約1万分の1 の空中写真を判読して、縮尺2.5万分の1の予察的な活断層分布図を作成した。新期の断 層変位地形が保存されている地域を中心に現地踏査を行い、次年度以降の詳細調査候補地 を奈良盆地と山科盆地で選定した。さらに木津川低地東縁の大阪層群の現地踏査を行い、 同層基底の高度分布を明らかにした。奈良に被害をおよぼした歴史地震について、東大寺 や法隆寺などの被害状況の整理を行った。奈良盆地に位置する考古遺跡に残された液状化 等の地震痕跡データベースの作成方針を固め、データの整理作業を開始した。

(b) 業務の成果

- 1) 奈良盆地北東部の航空レーザ測量
- a) 調査地域と作業の概要

奈良盆地北東部における奈良盆地東縁断層帯調査の基礎データとするために、航空レー ザ測量による地形データの収集・整備を行った。地形データの収集・整備範囲を図1に示 す。奈良市から天理市に至る奈良盆地の北東部の35 km<sup>2</sup>の範囲である。作業項目と数量を 表1に示す。

作業項目	数量
航空レーザ計測	35.0 km <sup>2</sup>
調整用基準点の設置	4ヶ所
三次元計測データ及びオリジナルデータ作成	$35.0 \text{ km}^2$
グラウンドデータ作成	$35.0 \text{ km}^2$
グリッド(標高)データ作成	35.0 km <sup>2</sup>

表1 奈良盆地北東部の航空レーザ測量の作業項目と数量



図1 奈良盆地北東部の航空レーザ測量による地形データ整備範囲(青線)と山科盆地-京都盆地南部における空中写真を使った数値図化範囲(赤線)

b) 航空レーザ計測

i) 計測の諸元

航空レーザ計測の諸元を表2に、小型飛行機に固定された使用機器を図2に示す。計測 のための飛行ルートの計画図を図3に示す。平行する C-1~C-9 のルートを飛行して計測 が行われた。レーザースキャナの位置を連続キネマティック法で求めるための GNSS 固定 局は、基線距離(計測機体と固定局の距離)を50 km以下とするため、電子基準点「京都 加茂」と「天理」を使用した。

使用機体	固定翼	
使用機器	Terrain Mapper	
FOV(視野角)	$40^\circ$ ( $\pm 20^\circ$ )	
パルスレート	1000 kHz	
スキャン回数	150 Hz	
対地高度	2000 m	
速度	130 knots	
ラップ率	55 %ラップ	
計測点密度	1m×1mの範囲に4点以上	
デジタルカメラ画素数	8000 万画素	

表2 計測の諸元



図2 使用機器の設置状況



図3 計測のための飛行ルートの計画図。地理院地図に加筆。

ii) 航空レーザ計測・測量システム

計測データは、固定局の GNSS 観測データ、航空機の GNSS 観測データ、IMU 観測データ 及びレーザ測距データについて取得した。計測の概念図を図4に示す。航空レーザ計測は、 天候や雲の状況をふまえて、2019年10月23日(水)に3コース、2019年11月5日(火) に6コースを計測した。

データの取得は以下のような基準に沿って行われた。

- ① 同一コースの航空レーザ計測は、直線かつ等高度で行う。
- ② 同一コースにおける対地速度は一定の速度を保つように努める。
- ③ 計測データは、作業地域の外周を格子間隔(0.5 m)の10倍以上の距離を延伸した範囲 について取得する。
- ④ GNSS 観測については、次のとおり行う。
  - ・固定局及び航空機上の GNSS 観測のデータ取得間隔は1秒以下とする。
  - ・取得時の GNSS 衛星の数は、5個以上とする。
  - ・GNSS 観測結果等は、GNSS 衛星の配置等を記載した手簿、記簿等の資料、基線解析結 果等を記載した精度管理表に整理する。



図4 航空レーザ計測の概念図

iii) 計測結果の点検

航空レーザ計測終了後に航跡図・計測漏れ点検図・精度管理表を作成し、再計測が必要 か否かの判定を速やかに行った。判定の結果、良好な計測状態であったことを確認した。 以下に各作業内容及び結果を示す。まず計画コース上に飛行軌跡を展開した航跡図を作成 し(図5)、すべてのコースについて計画コース通りの飛行ができていること、適正なサイ ドラップが確保されていることを確認した。さらに、計測した全コースの計測範囲を重ね 合わせした計測漏れ点検図を作成し、コース間のラップ切れなどが存在しないこと、対象 範囲をすべて計測できていることを確認した。GNSS/IMU解析計算では、計測済みの全ての データに対して、表3に示す項目の確認を行った。全ての精度基準項目が基準内であり、 良好な結果であることを確認した。



	精月	度管理項目	制限値または条件	結果	評価
キネマ	1	GNSS 衛星数	5個以上	最小 10 個	0
	2	PDOP 值	3以下が標準	最大 1.780	0
ティック 解析	3	位置座標の 往復差の平均値	0.3 m以内	最大 0.025 m	0
71 11	4	解の品質基準	収束フロート解及び その他が0個	収束フロート解及 びその他が0個	0
	5	位置の 標準偏差の平均値	0.10 m以内	最大 0.006 m	0
最適軌跡 解析	6	位置の 標準偏差の最大値	0.15 m以内	最大 0.006 m	0
	$\bigcirc$	位置の RMS の平均値	0.10 m以内	最大 0.006 m	0
	8	姿勢の RMS の平均値	0.03 degree 以内	最大 0.003 deg.	0

表3 GNSS/IMU 精度基準の確認結果

c) 調整用基準点の設置

調整用基準点の測定は、4級基準点測量及び4級水準測量により実施することを原則と し、必要に応じて以下のように行った。図6に調整用基準点配点図を、図7に調整用基準 点明細表を示す。

① 水平位置の測定の際に近傍に必要な既知点がない場合には、単点観測法に準じて行う。

② 標高の測定において近傍に必要な水準点がない場合には、測定する調整用基準点に最も近い2点以上の水準点及び調整用基準点に GNSS 測量機を設置し、スタティック法により行う。



図6 調整用基準点配点図。赤三角のP1~P4が調整用基準点を示す。

様式第3-20

# 調整用基準点明細表

世界測地系(製地成集2011) ジオイド・モデル 日本のジオイドモデル2011 Ver.2



図7 調整用基準点明細表

d) 三次元計測データ作成

航空レーザ計測で取得したデータの照射角、ジャイロ回転角、加速度、空中 GNSS 情報及 び地上 GNSS 情報を統合させ、各計測ポイントの3成分(XYH)を解析し、三次元計測デー タを作成した。

i) 欠測率の確認

欠測率の確認は、三次元計測データで 0.5 m×0.5 mの範囲に1点以上計測できていない領域が基準値以下であることを確認した。以下にその手順を示す。

① 計測間隔の格子データ(メッシュ)を作成した。

- ② メッシュと三次元計測データを重ね合せ、計測点が無いメッシュを抽出した。ただし、 水部(水域)は含まないものとした。
- ③ 計測対象範囲内にあるメッシュ総数で②のメッシュ数を割った数値を欠測率とした。

④ 国土基本図郭ごとに欠測率を算出し、その値が15 %未満であることを確認した。

欠測率の確認結果を表4に示す。制限値を大きく下回る結果であることが確認できた。

地区名	奈良市
センサ	近赤外線
図郭数	25 図郭
制限值	15 %
最大値	9.18 %
最小值	1.39 %
平均值	6.07 %
評価	0

表4 欠測率調查結果

ii)コース間検証

コース間で計測誤差があるかを確かめるため、2つのコースの重複区間で検証ポイント を取得し、そのポイントの標高較差を確認した。以下にその手順を示す。

- ① 点検箇所の数は、(コース長 km/10+1)の小数点以下切り上げとした。
- ② 点検箇所は、重複部分のコースの端点にとり、重複部分の上下に均等に配置した。
- ③ 点検箇所の標高値は、平坦で明瞭な地点を選定し、半径 0.5 mの円内にある標高値を 平均化した(図 8)。
- ④ 重複コースごとの標高値の較差の平均値の絶対値が 30 cm を制限値として、精度管 理を行った。

点検の結果、全ての地区で、コース間において標高較差の最大値は制限値±0.30 m以内 であり、良好な結果であることを確認した。表5にコース間検証結果を示す。



図8 コース間点検箇所のデータ抽出方法

地区名	奈良市
比較したコース間数	9
センサ	近赤外線
制限值	$\pm 0.30$ m
最大値	0.05 m
最小値	0.00 m
平均值	0.01 m
標準偏差	0.01 m
評価	0

表5 コース間検証結果

iii) 航空レーザ用写真地図の作成

航空レーザ計測と同時撮影の画像より、航空レーザ用写真地図を作成した(図9)。

- ① 地上解像度は 0.20 m とし、取得した画像を貼り合わせる処理(モザイク処理)により作成した。
- ② 画像データ形式は TIFF 形式とした。
- ③ 画像の位置情報ファイル (ワールドファイル)を併せて作成した。



図9 航空レーザ用写真地図の例

iv)水部(水域)ポリゴンデータ作成

水域の範囲を明示するため、航空レーザ用写真地図を基に、河川・溜池等の水部を対象 に水部ポリゴンを作成した。データ形式は shape ファイルとした。

e) オリジナルデータ作成

オリジナルデータ作成とは、調整用基準点との点検結果を用いて、三次元計測データの 標高を調整して作成することをいう。調整用基準点との比較検証については以下のような 要領で、実測で取得した調整用基準点と3次元計測データの標高を比較した。

- ① 半径 0.5 mの円内にある各計測点との標高の差分を求める。
- ② 求めた差分の平均値、最大値、最小値、標準偏差を求め、制限値内(25 cm 以内)に あるか否かを確認する。
- ③ 作業地域全体で較差の傾向が同じ場合は、補正を行う。
- その結果、平均値、標準偏差、最大誤差が制限値内に収まることが確認できた(表6)。

地区名	奈良市
点数	4
センサ	近赤外線
制限值	0.25 m
最大値	0.05 m
最小值	-0.06 m
平均值	0.00 m
標準偏差	0.05 m
評価	0

表6 調整用基準点との比較結果

f) グラウンドデータ作成

オリジナルデータから、植生や建物等の影響を取り除くフィルタリング処理を行い、地 表面の高さを示すデータ(グラウンドデータ)を作成した(図10)。フィルタリングは、ま ずオリジナルデータから地物と地表面を自動判別する自動フィルタリング処理を実施した。 その後、自動処理のみでは正確な地表・地物の判別は不可能なため、手動処理により誤認 識箇所の修正を行う手動フィルタリングを実施した。手動フィルタリングは、陰影図など の地形表現手法で地表面形状を確認し、精度向上に努めた。フィルタリングの例を図11に 示す。



図 10 グラウンドデータ作成の概念図



図 11 フィルタリング結果(標高段彩表示)

g) グリッド(標高) データ作成

グリッドデータは、グランドデータから不整三角形網(TIN: Triangulated Irregular Network)による内挿補間 0.5 m グリッドで作成した(図 12)。データ形式は、X・Y・ZをCSV 形式とテキスト形式の2種類で記録した。数値地形図データファイル作成作業では表7のデータを作成した。



グラウンドデータ

TIN による内挿補間 0.5m 間隔のグリッドデータに変換

図 12 グリッドデータ作成方法

	項目	備考	
格納	データリスト	テキストデータ	
粉荷地形网	オリジナルデータ	CSV 形式テキストデータ、LAS 形式	
一 数恒地形凶 データ	グラウンドデータ	CSV 形式テキストデータ	
9-9	グリッドデータ	CSV 形式、メッシュ形式テキストデータ	
等	高線データ	Shape 形式	
水部才	ポリゴンデータ	Shape 形式	
低密度ポリゴンデータ		Shape 形式	
航空レーザ用写真地図		TIFF 形式画像データ、位置情報ファイル	

表7 数値地形図データファイル一覧

2)山科盆地東部と京都盆地南部の空中写真の図化 空中写真からの地形復元は、表8のような手順で行った。

a)資料収集

図1に示した対象地域の過去の地形について、米軍撮影空中写真や国土地理院撮影空中 写真を使って地形復元を行うために、大規模な地形改変以前に撮影された以下の写真を収 集した。当初の図化範囲については、米軍が1946年に撮影した縮尺11906分の1の空中写 真を、追加で行った図化範囲については、国土地理院が1961年に撮影した縮尺10000分の 1の空中写真を使用した。

さらに現在の地形に関するデータを収集した(表9)。空中写真の標定は、収集した現況 地形図データの座標値を用いて実施した。標定にあたっては、空中写真と現況地形図デー タを比較し、経年変化のない箇所を画像標定点として選定した。

b)数值図化

数値図化は、標定後のモデルに基づき、地形に関わる情報を数値形式(X・Y・Zの座標値 と所定の分類コード)で取得し記録した。数値図化に用いる数値図化機は、所定の精度を 保持できる性能を有するデジタルステレオ図化機とし、数値図化時にデータの取得状況や 結線情報が図形としてモニタリングでき、かつ編集機能がついているものとした(図13)。 取得項目は、等高線・標高点・ブレークラインとした。地形改変の無い箇所においては、 数値図化データと国土地理院数値標高データの比較を行い、精度確認を実施した。図14に 米軍撮影空中写真を使った数値図化の例を、図15に国土地理院数値標高データとの比較 を示す。差分が大きな地域は、戦後に地形の人工改変が行われた地域である。

c)数值編集

数値図化データについて、図形編集装置を用いて、追加・削除・修正等の処理を行い、 編集済みデータを作成した。点検はモニター上で行い、矛盾箇所を修正した。

d) 数値地形図データファイル作成

数値編集済みデータを基に、国土交通省公共測量作業規程に準拠した数値地形図データ ファイル (DM データファイル)を作成した。今後の GIS での利用を考慮し、DM 形式に加 え、CAD (DXF)形式、Shape 形式の3種類を作成した。数値地形図データファイルから、内 挿補間により 5.0 m間隔のグリッドデータを作成した。データ形式は、X・Y・Z をテキス ト形式で記録した (図 16)。

表8 山科盆地東部と京都盆地南部の空中写真からの地形復元の作業項目と数量

作業項目	数量
資料収集	34.5 $\text{km}^2$
数值図化	34.5 $\text{km}^2$
数值編集	34.5 $\text{km}^2$
数値地形図データファイル作成	34.5 $\text{km}^2$

作成機関	地形図等	備考
国土地理院	基盤地図情報 基本項目	水平位置の取得
国土地理院	基盤地図情報 数値標高データ	標高の取得
国土地理院	電子国土基本図(オルソ画像)	水平位置の取得

表9 収集した現況地形図データ



図13 デジタルステレオ図化機 (Summit Evolution)





図 15 国土地理院数値標高データとの比較



図 16 グリッドデータ作成

3) 奈良盆地の奈良市八島町地区及び今市町-池田町地区における沖積面の変位

奈良盆地東縁断層帯の最近の活動時期や変位量に関する知見を得るため、米軍撮影の大 縮尺空中写真を用いた地形判読、高解像度 DEM を用いた地形解析、及び現地踏査を実施し た。その結果、八島町地区(奈良市八島町)及び今市町-池田町地区(奈良市今市町〜池 田町)において、沖積面の変位が新たに確認された(図 17)。

八島町地区は、天理撓曲の地表トレース上に位置する。本地区には、東から西へと流下 する河川によって、南北幅約100 mの細長い谷底面が東西方向に発達している(図18)。 谷底面の北半部は、東西方向に連続する段丘崖を境として、南半部よりやや高く、沖積段 丘面となっている(図19)。この沖積段丘面の西縁は比高約2.0 mの西落ち低崖地形によ って限られる(図20、21)。本地区の河川は東から西へと流下しているため、この西落ち 低崖地形は侵食によって形成されたとは考えられず、天理撓曲の最近の活動によって形成 された低断層崖であると判断される。本地区の地形は、(1)沖積段丘面相当の地形面が谷底 面全体に形成された、(2)天理撓曲が活動し(比高からみておそらく最新活動のみ)、谷底 面全体が西側に比べて相対的に約2.0 m隆起した、(3)河川の下刻作用及び側刻作用によ って谷底面の南半部が侵食された、というプロセスで形成されたと考えられる。

沖積段丘面(谷底面北半部)の形成時期を明らかにするため、2020年3月9日、ふたつ のピットを人力で掘削した。それぞれ八島町ピット1・2と呼ぶ(図18、22)。掘削地点は 現在畑として利用されているが、1970年測量・1972年編集の地形図(奈良県立橿原考古学 研究所編, 1981)によると、当時は水田として利用されていた。

ピットの柱状図を図 23 に示す。いずれのピットでも、地表面より、耕作土、水田の床土、 フラッドローム、段丘礫層が確認された。八島町ピット2においては、放射性炭素年代測 定試料がフラッドロームから得られ、沖積段丘面の形成時期や天理撓曲の活動時期を推定 するうえで重要である。試料の年代測定は令和2年度に行う予定である。

今市町-池田町地区は、帯解断層の地表トレース上に位置する(図 17)。ここでは、中 位段丘面の西縁を限る撓曲崖のすぐ南方の沖積面に、比高約0.5~1m(概略値)の西落ち 低崖地形が約60mにわたって北北西-南南東方向にのびている(図 24)。付近に広がる沖 積面は西に緩く傾斜し、この低崖地形を侵食崖として説明することはできない。帯解断層 の最近の活動(比高からみておそらく最新活動のみ)によって形成されたと判断される。 この低崖地形が人工改変を受けていることは、低崖地形に沿って水路が整備されているこ

とから明白である。しかし、付近の沖積面の傾斜は非常に緩やかであるため、比高約 0.5 ~1m(概略値)にも達する低崖地形が人工改変のみで形成されたとは考えにくく、帯解断 層による上下変位によってその原形が形成された可能性が高い。令和2年度以降に層序や 構造に関するデータを取得し、最近の活動時期や変位量に関する検討を行う予定である。

22



図 17 八島町地区及び今市町-池田町地区の位置。基図は 1:25,000 都市圏活断層図「桜井」(相馬・他, 1998)。



図 18 八島町地区の地形。位置は図 17 参照。基図は地理院地図による(2008 年 5 月撮影 航空写真のオルソ画像)。



図 19 八島町地区の地形(その1)。ため池の堤防上(図 18 参照)から西に向かって撮影 (2020 年 2 月 4 日撮影)。写真中央を手前から奥にのびる段丘崖を境として、谷底面の 北半部は南半部より高く、沖積段丘面となっていることがわかる。写真やや奥の電線の ある箇所が県道 188 号線。天理撓曲は県道 188 号付近を南北方向にのびる。



図 20 八島町地区の地形(その2)。県道 188 号線歩道(図 18 参照)から北に向かって撮影(2019年11月27日撮影)。白点線より奥が沖積段丘面。天理撓曲は県道 188 号線付近を通過する。



図 21 八島町地区の地形断面図。断面の位置は図 18 の A-A'である。本調査観測によって 整備した 0.5 mメッシュ DEM を用いて作成した。



図 22 八島町地区におけるピット掘削調査。掘削位置は図 18 参照。左写真の手前が八島 町ピット1、奥が八島町ピット2。右写真は八島町ピット1の南壁面の様子。2020 年 3 月9日撮影。



図23 八島町ピット1・2の地質柱状図



図 24 今市町-池田町地区の地形。位置は図 17 参照。中位段丘面の南端部を東西方向に 走る舗装道路から南に向かって撮影(2020 年 1 月 8 日撮影)。矢印が変動崖を示す。

4) 山科盆地の新期断層変位地形

空中写真判読や今年度に整備した数値地形情報をもとに、山科盆地東縁に分布する低位 段丘~沖積面の断層変位の有無を検討した。また自治体の埋蔵文化財調査研究機関より遺 跡発掘調査資料を入手し、これらの地形面の離水年代を検討した(図 25)。

その結果、京都市山科区大宅地区で黄檗断層により変位を受けている最低位の段丘面上 に、完形の甕棺を産する縄文時代後期~晩期の遺構が存在することが分かった(図 26)。 また宇治川沿いの沖積低地では、広い範囲で古墳時代以降まで堆積作用が継続しているこ とが明らかとなった。

これらの調査結果から、黄檗断層の新期活動履歴と変位速度を明らかにするためには、 大宅遺跡周辺の最低位面とそれを開析する沖積面の年代や変位量を求めることが重要であ ると考えられる。また宇治傾動帯の新期活動に関しては、特に古墳時代以前の変位を示す 変位基準面を特定することが困難であることなどが判明した。



図 25 山科盆地東部の活断層と新期の地形面の編年に重要な遺跡の分布。地理院地図に加 筆。



図 26 京都市山科区大宅地区の地形区分と遺構の分布。遺構の分布は京都市埋蔵文化財研 究所資料による。京都市都市開発局の1:2500都市計画基本図(昭和44年作成「勧修寺」 および昭和48年作成「行者ケ森」)に加筆。

5) 木津川低地東縁の大阪層群の構造調査

本調査は、奈良盆地東縁断層帯のセグメント区分の基礎資料とするため、第四紀前期に おける断層帯の形成過程と断層帯沿いの多地点における大阪層群基底の上下変位量とそれ を指標とした変位速度分布を明らかにすることを目的としている。

令和元年度には、断層帯中央部の井手断層を対象として、大阪層群の層序・構造と基底 高度に関する地表踏査を行った。踏査は、木津川屈曲点北側の木津川市上狛地区から井手 町安養寺地区に至る範囲を対象とした(図 27)。踏査にあたっては、木津川市及び井手町 発行の 1:2500 都市計画図を基図として用い、大阪層群の構造と露頭の標高を正確に把握 するように努めた。調査地はたけのこ産地のため、窓状に表土を削り取って作られた小さ な(面積数 m<sup>2</sup>程度)人工露頭が数多く存在する。こうした小さな人工露頭を記載するにあた っては、GNSS によって位置と標高を確定する作業を行いつつ調査を行った。露頭状況は、 1/20~1/100 程度の柱状図ないし同程度のスケッチとして記載し必要に応じて写真撮影を 行った。また適当な地層が分布する地点では、火山灰と花粉分析用の試料を採取した。

8箇所で大阪層群の基底標高を確認することができた(図 27)。大阪層群基底の標高は、 上狛地区で T.P. +100 m 前後、綺田地区では約 170 m であり、丘陵背面高度が 250 m 以上 の地域には大阪層群は分布しない。なお、大阪層群基底の露頭状況や反射法地震探査結果 (京都府, 2006;岡田・他, 2019)から、大阪層群基底には 50~100 m 程度の起伏がある と考えられる。

丘陵南端に近い木津川市上狛の露頭(位置は図 27 に示す)では、花崗岩と大阪層群基底 の不整合面が約 60 度南西に傾斜し、基底から数 m の層準に傾斜不整合の可能性をもつ層 準が認められる(図 28)。木津川市神童子の露頭では、大阪層群基底部に花崗岩が約 50 度 の傾斜で衝上しており、かつ大阪層群基底部は衝上断層に引きずられるように西に 10~30 度傾斜する(図 29)。この引きずり構造の中で、大阪層群基底から約 1 m 上位の層準で明確 な傾斜不整合が認められる。池田・他(2005)で記載された井手町安養寺の露頭では、大 阪層群内に明確な傾斜不整合が確認される(図 30)。

また上狛地区と安養寺地区では、それぞれ黒色細粒テフラと白色~桃白色ガラス質テフ ラが認められた。このうち黒色細粒テフラは、池田・他(2010)の山城(IV)火山灰層に 野外観察上の特徴が似ている。山城(IV)火山灰層下位の大阪層群基底部には、古琵琶湖 層群の虫生野テフラに対比される(里口・他,2013)山城(I)火山灰層が挟在する(池 田・他,2010)。虫生野テフラは、Matuyama 逆磁極期下部に位置する(Hayashida and Yokoyama, 1983)。白色~桃白色ガラス質テフラは、池田・他(2003,2004a・b)が報告した井手(I) 火山灰層に野外観察上の特徴が似ている。井手(I)火山灰層は、鉱物組成・ガラスの屈 折率などから、恵比寿峠福田テフラ(1.75 Ma)に対比される(池田・他,2010)。これら のテフラは、産出した露頭の位置から、上狛急傾斜露頭や神童子断層露頭の傾斜不整合層 準よりも上位に位置すると考えられる。

これらをまとめると、①大阪層群基底部の層準(約2~2.5 Ma)に、断層活動に伴って 形成された傾斜不整合があること、②傾斜不整合層準の上位に前期更新世前半に降下した と考えられるテフラが存在すること、③井手断層隆起側では標高 T.P.+170 m 付近に大阪 層群基底が認められ、断層沈降側の反射法地震探査結果(京都府,2006)と合わせて考え ると、井手断層は大阪層群基底堆積以降約520 m 変位していること、が明らかになった。

井手断層の活動開始期は大阪層群基底堆積時ないしそれ以前に遡ると考えられる。井手 断層周辺の大阪層群基底部には、Matuyama 逆磁極期下部の虫生野テフラが挟在することか ら、井手断層の活動は前期更新世ジェラシアン期ないしそれ以前に始まったと考えられる。 また、大阪層群基底堆積以降現在に至る期間の井手断層の平均変位速度は、0.2~0.3mm/yr と考えられる。今後は、奈良盆地東縁断層全体で同様の調査を行い、断層帯を構成する各 断層の活動時期・変位量及び変位速度を求め、セグメント区分のための基礎資料としたい。



図 27 木津川低地帯南部における大阪層群基底の高度分布と主要露頭位置図。地理院地図 に加筆。



図 28 木津川市上狛における大阪層群の急傾斜を示す露頭







6) 歴史地震

a) 奈良に被害を及ぼした歴史地震

奈良盆地北部に位置する奈良は、和銅三年(710年)の平城京遷都以来、古代・中世にお ける東大寺や興福寺などの門前郷、近世における江戸幕府直轄地の奈良町に至るまで、寺 院の堂舎や町家など数多くの建造物が建ち並び、多数の人々が集住する空間が営まれてき た。そのため奈良については、古代・中世・近世の各時代における史料が現存しており、 前近代の奈良が大きな揺れを伴う地震に襲われ、大寺院の建造物が被害を受けた場合、そ の被害状況は奈良の僧侶だけでなく、京都の公家の手によっても記録されていた。奈良や 京都で記された信頼性の高い史料にみられる被害地震の記録に基づいて、前近代に奈良に 被害を及ぼした歴史地震を挙げると次のようになる。

○ 1070年11月25日(延久2年10月20日)の地震

- ◇ 1096 年 12 月 11 日 (嘉保 3 年 11 月 24 日)の東海地震
- 1177年11月20日(治承元年10月28日)の地震
- ◇ 1361 年 7 月 26 日 (康安元年 6 月 24 日)の南海地震
- 1494 年 6 月 10 日 (明応 3 年 5 月 7 日) の地震
- ◎ 1596年9月5日(文禄5年閏7月13日)の文禄伏見地震
- ◇ 1707 年 10 月 28 日 (宝永 4 年 10 月 4 日)の宝永地震
- ◎ 1854年7月9日(嘉永7年6月15日)の嘉永伊賀上野地震
  - ※ ○:奈良盆地周辺で発生したと推定されている内陸地震(内陸活断層地震)。
    ◇:南海トラフ沿いで発生したと推定されている地震(海溝型巨大地震)。
    - ◎:最大被災地と震央が推定されている内陸地震(内陸活断層地震)。
    - 年月日の後の()は太陰太陽暦を示す。

奈良での歴史地震には、奈良盆地近傍の内陸活断層による地震だけでなく、紀伊半島沖 で発生した南海トラフ巨大地震(東海地震・南海地震)も含まれている。古代・中世の被 害地震の場合には、現存する史料が奈良と京都に限られ、被害分布の判明する範囲が限定 されるために、震度分布に基づく震央の推定は困難である。しかし、前近代の奈良に関し ては、他の地域に比べて長期間にわたる史料が現存しており、各時代で幾度も被害地震に 遭遇しているために、複数の歴史地震の事例について比較・検討が可能である。

また現在の奈良には、地震による被災後も現存している建造物が複数あることから、史 料の記録と被災した建造物の双方を用いて、前近代の地震被害を調査することが可能であ る。史料から窺える古代・中世の奈良での建造物の地震被害について概観すると、東大寺 や興福寺など大寺院に関する被害の記録が多く、庶民が居住する町家に関するものは僅少 である。これは、現存する古代・中世の史料が、奈良の僧侶や京都の公家の手による記録 に限定されており、それらには庶民に関する記録が少ないためである。

なお、前近代の奈良における建造物は、地震による被災だけでなく、建立後に火災に遭 遇して焼失し、その後度々建て替えられている場合も多い。そのため、地震で被害を受け た建造物の被害程度を評価する際には、再建時期を把握して構造の変更や経年劣化などを 調査し、地震被害に及ぼす影響について検討する必要がある。

本年度は、史料に記された地震被害の記録に基づき、東大寺の鐘楼と薬師寺の東塔を事例として、地震と建造物との関係について検討を行った。

b) 東大寺の鐘楼の被害

現在、大仏殿東方の高台に位置する東大寺の鐘楼は、東大寺の建立当時から同じ場所に 位置している。創建時の鐘楼は、989年9月15日(永祚元年8月13日)の大風で倒壊し ており〔東大寺別当次第〕、その後に新たな鐘楼が再建されている。

東大寺の鐘楼では、上記の1070年11月(延久2年10月)の地震の折に鐘の鈕(把手) が切れて鐘が落下し〔百錬抄〕、1096年12月(嘉保3年11月)の東海地震の折には鐘が 地面に落下し〔中右記〕、1177年11月(治承元年10月)の地震の折にも鐘が落下してい る〔玉葉〕。

現在の鐘楼は、13世紀初期に新規に建立されたもので、地震で3度被災した平安時代後期の鐘楼とは異なる建造物である。13世紀初期の鐘楼の新造後、地震とは関係なく鐘楼の 鐘が落下しており、1239年(延応元年)には鐘の釣手金具が新調されている。

このように、平安時代後期に発生した3度の地震の際に、東大寺の鐘楼は大破や倒壊と いった大きな被害を蒙っていないにも拘わらず、鐘楼に懸けられた鐘の落下という被害の みが生じている。また、1239年に鐘の釣手金具が新調されて以降、地震による鐘の落下は 史料から確認できない。そのため、平安時代後期の地震による相次ぐ鐘の落下は、地震の 揺れの大きさや特性よりも、むしろ鐘本体と鐘の鈕との接合部分もしくは鈕自体の強度不 足、あるいは鐘自体と鐘楼との接続部分の脆弱性が主因と考えることができる。

c) 薬師寺の東塔の被害

奈良時代初期の730年(天平2年)の建立とされる薬師寺の東塔は、江戸時代末期までの約1100年間に少なくとも3回の地震被害を受けている。なお、薬師寺の西塔は、1528年 9月20日(享禄元年9月7日)に筒井順興の乱によって焼失しており、前近代の西塔は現存していない。

1096 年 12 月(嘉保3年 11 月)の東海地震では薬師寺の東塔に特に被害はなく〔中右 記〕、1361 年 7 月(康安元年 6 月)の南海地震の折に、東西両塔のうちの一基は九輪(塔最 上部の尖塔)が落下し、一基は大きく歪んでいる〔嘉元記〕。また、1494 年 6 月(明応3 年 5 月)の地震では薬師寺の東塔に特に被害はみられず〔大乗院寺社雑事記〕、1707 年 10 月 (宝永4年10月)の宝永地震の折に、東塔の九輪が折損している〔西院堂方諸日記〕。さ らに、1854 年 7 月(嘉永7 年 6 月)の嘉永伊賀上野地震の折に、東塔の四重目(二層屋根) から上部が九輪と共に南東方向へかなり傾斜しており、九輪は以前から南東方向へ少し歪 んでいたのが、今回の地震で非常に歪んでいる〔公文所日記〕。

このように、薬師寺の東塔は、創建時から江戸時代末期に至るまで、地震によって倒壊 した記録はみられない。しかし、塔の最上部にあたる九輪(相輪)については、落下・破 損・傾斜といった被害が生じている。

今後、薬師寺の東塔のように、複数回の歴史地震で被災した建造物に関して、他の災害 による被災履歴やその後の修覆履歴などを調査し、地震被害に及ぼす影響について検討す る必要がある。

#### 7) 考古遺跡の地震跡

奈良盆地東縁断層帯の活動履歴調査に関わる考古資料からのアプローチとして、i)現 在行われている発掘調査現場から、液状化や地すべり構造などの地震動による変形地質構 造を識別・抽出し、地震発生時期の絞り込みを行う、ii)既刊の発掘調査報告書や論文な どから地震痕跡情報を集成し、層位・遺構からの地震発生時期の絞り込みを行う、という 2つがある。発掘調査現場からの地震痕跡情報の抽出のために、地質切取試料や剥ぎ取り 試料を採取し、軟 X 線や X 線 CT を用いた非破壊構造分析による地震痕跡の識別を行い、 さらに地震発生時期については、層位や遺構さらに放射性炭素年代測定を適用し時期の絞 り込みを行っている。集成された地震痕跡情報については、緯度・経度による位置情報と、 発掘調査成果に基づく表層地質情報・地形情報を軸としてデータベース化し、GIS 型検索 システムの構築を目指す。このデータベースは、本調査研究完了後も、奈良文化財研究所 にて情報の拡充を進めつつ維持・管理していく予定である。

奈良盆地東縁断層帯付近の遺跡を抽出するため、奈良県教育委員会および京都府・市と の協働統合型地図情報システム(遺跡マップ)を利用し、国土地理院の提供する活断層図 と重ね合わせ、奈良盆地東縁断層帯ー遺跡分布地図を作成した。この結果、奈良盆地東縁 断層帯は現在の奈良盆地東縁の丘陵~山地帯を形成しており、その近辺には弥生時代以降 の多くの古墳、墳墓、さらに横穴墓が分布していることがわかる。この付近には酒舟石遺 跡や高松塚古墳、牽牛子塚古墳、さらに山田寺など地震痕跡がすでに報告されている遺跡 群や、薬師寺、東大寺、興福寺といった地震記録史料を有する寺社仏閣が多く分布する。 現在、それら以外の遺跡群について調査記録を精査し、地震痕跡情報の集成を進めており、 令和2年1月末の時点で、奈良盆地東縁断層帯付近の遺跡調査地点 10,024 地点のデータ 整理が進み、データベース入力のためのカルテ作成が進んでいる。またこの丘陵〜山地帯 の西側には、扇状地と低湿地が広がり、奈良(大和)湖成層による軟弱地盤層が広く堆積 する。この低湿地帯には藤原宮・京および平城宮・京を中心とした古代の遺跡群が広がっ ており、2016 年以降、両宮・京の発掘調査現場から多くの液状化痕跡(噴砂・砂脈)の検 出報告がある(村田, 2016, 2017, 2018a, 2018b, 2019)。2019年度発掘調査においても、 平城宮第1次大極殿院朝堂院東南域の平城第612次発掘調査地では、大極殿院整地土直下 から噴砂痕を検出し、古墳時代~7世紀末までに発生した地震であることを明らかにした。 また同年度の平城京・法華寺阿弥陀朝堂院南西部の発掘調査現場からは、奈良時代遺構面 を突き破り、平安時代の土師器が検出された遺物包含層に被覆された噴砂層を発見した。 これは奈良時代以降から平安時代までの地震痕跡と考えられ、史料に残る近畿地方に大き な揺れをもたらした地震としては、美濃地震(745【天平17】年)、美濃・飛騨・信濃地震 (762【天平宝字6】年)、京都地震(827【天長4】年)、信濃地震(841【承和8】年)、 伊豆地震(841【承和8】年)、奈良地震(855【斉衝2】年)などが挙げられる。一方、史 料に残らない地震事例も多く、更なる検討が必要である。

これら既刊報告書等からの情報集成と、発掘調査現場からの痕跡情報抽出によって、奈 良県内は100~200年おきのステージで地震が頻発している傾向が見えてきている。今後、 地震発生時期の絞り込みを進め、この画期の検証精度を上げていくことが望まれる。

33

(c) 結論ならびに今後の課題

奈良盆地東縁断層帯の詳細な位置や分布、及び活動履歴を明らかにすることを目的とした 調査を行った。奈良盆地北東部で航空レーザ測量を、山科盆地東縁部で空中写真の数値図化 を行い、デジタル標高データを整備した。空中写真判読で新たに認定された新期の断層変位 地形の現地踏査を行い、次年度以降の詳細調査候補地を奈良盆地と山科盆地で選定した。さ らに木津川低地東縁の大阪層群の現地踏査を行い、同層基底の高度分布を明らかにした。奈 良に被害をおよぼした歴史地震について、東大寺や法隆寺などの被害状況の整理を行った。 奈良盆地に位置する考古遺跡に残された液状化等の地震痕跡データベースの作成方針を固め、 データの整理作業を開始した。令和2年度以降は、活動履歴の解明に適した地点で古地震学 的調査を行うと共に、活断層分布図の作成や大阪層群の変位量分布情報の収集を進め、断層 帯のセグメンテーションの議論を進める。また歴史地震や考古遺跡の地震跡に関する情報の 収集・整理を進める予定である。

奈良市八島町でのピット掘削調査にあたっては、地権者に土地の使用許可を頂いた。山科 盆地周辺の遺跡発掘調査資料の入手に際しては、京都府・滋賀県下の自治体の埋蔵文化財調 査研究機関に便宜を図って頂いた。上記の皆様・機関に厚く御礼申し上げます。

(d) 引用文献

- Hayashida, A. and Yokoyama, T., Paleomagnetic chronology of the Plio-Pleistocene Kobiwako Group to the southeast of Lake Biwa, Central Japan, Journal of Geological Society of Japan, 89, 209-221, 1983.
- 池田俊夫・石倉一頼・栗林眞理子・高世真一郎・田中功一・吉水一郎,京都府南部木津川 東岸の新期新生代層(第一報)-露頭における井手火山灰層の層相記載(1)-,地学 研究,52,73-85,2003.
- 池田俊夫・石倉一頼・栗林眞理子・高世真一郎・田中功一・吉水一郎,京都府南部木津川 東岸の新期新生代層(第二報)-露頭における井手火山灰層の層相記載(2)-,地学 研究,52,195-213,2004a.
- 池田俊夫・栗林眞理子・中川要之助・宇野政博,京都府南部木津川東岸の新期新生代層(第 三報) - 露頭における井手火山灰層の層相記載(3) -,地学研究,53,3-15,2004b.
- 池田俊夫・栗林眞理子,京都府南部木津川東岸の新期新生代層(第五報)-井手丘陵で見 られる代表的な地質構造を示す露頭-,地学研究,53,195-205,2005.
- 池田俊夫・中川要之助・橋本定樹,京都府南部木津川東岸の新期新生代層(第八報)-山 城丘陵棚倉地域の山城火山灰層-,地学研究,58,203-220,2010.
- 京都府,平成17年度京都府地震被害想定基礎調查業務報告書,2006.
- 村田泰輔,5自然科学分析(2)地震痕跡,「右京一条二坊四坪・二条二坊一坪・一条南大路・西一坊大路の調査-第530次・546次・560次-」,奈良文化財研究所紀要2016,148-152,2016.
- 村田泰輔,8自然科学分析,「平城京朱雀門周辺・朱雀大路・二条大路の調査-第552次・ 566次・577次・578次-」,奈良文化財研究所紀要2017,214-230,2017.
- 村田泰輔, 4池状遺構 SG4550 の地質学的検討,「山田道の調査-第193・194 次-」, 奈良 文化財研究所紀要 2018, 130-138, 2018a.

- 村田泰輔,自然科学分析,「平城宮東院地区の調査-第583次・第587次・第593次-」, 奈良文化財研究所紀要2018,178-181,2018b.
- 村田泰輔, 6地質学的調査,「藤原大極殿院の調査-第195・198次-」, 奈良文化財研究所 紀要 2019, 76-84, 2019.
- 奈良県立橿原考古学研究所編,大和国条里復原図,財団法人由良大和古代文化研究基金・ 吉川弘文館,112枚・117p,1981.
- 岡田篤正・堅山公洋・松川耕治・末廣匡基,新名神高速道路(京都府城陽地区)における 反射法探査,日本活断層学会 2019 年度秋季大会講演要旨集, 2019.
- 里口保文・池田俊夫・石田志朗,山城丘陵から検出された Msn-Jwg4 テフラ,日本地質学会 第120年学術大会講演要旨集,2013.
- 相馬秀廣·八木浩司·岡田篤正·中田 高·池田安隆, 1:25,000都市圈活断層図「桜井」, 国土地理院技術資料 D1-No. 350, 1998.