

3. 1. 2 和泉山脈地殻構造探査（和泉測線 2006）

(1) 業務の内容

(a) 業務題目：和泉山脈地殻構造探査（和泉測線 2006）

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
東京大学地震研究所	教授	佐藤 比呂志	satow@eri.u-tokyo.ac.jp
東京大学地震研究所	教授	平田 直	hirata@eri.u-tokyo.ac.jp
東京大学地震研究所	教授	岩崎 貴哉	iwasaki@eri.u-tokyo.ac.jp
東京大学地震研究所	教授	瀧 一起	koketsu@eri.u-tokyo.ac.jp
京都大学防災研究所	教授	伊藤 潔	ito@rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp
千葉大学理学部	教授	伊藤 谷生	tito@earth.s.chiba-u.ac.jp
独立行政法人防災科学技術研究所	主任研究員	笠原 敬司	kasa@geo.bosai.go.jp
東京大学地震研究所	産学官連携研究員	加藤 直子	naoko@eri.u-tokyo.ac.jp
東京大学地震研究所	大学院生	新井 隆太	ryuta@eri.u-tokyo.ac.jp

(c) 業務の目的

大都市圏において大規模な地震に伴って発生する強震動を高い精度で予測するためには、少なくとも震源断層の形態や特性、強震動伝搬経路の弾性波速度構造などが解明される必要がある。本業務では大都市圏に被害を与える震源断層の形態や特性、強震動伝搬経路の弾性波速度構造などについて制御震源を用いて明らかにすることを目的とする。

(d) 5カ年の年次実施計画：制御震源による地殻構造探査の年次計画について、3.1.1 参照。

(e) 平成 18 年度業務目的

和泉山脈は大阪平野の南縁を限り、山脈の南麓には中央構造線が東西方向に位置する。これまでの反射法地震探査によって、紀伊半島の中央構造線活断層系は地下 1 km では北に緩やかに傾斜する形状を示していることが明らかにされている。こうした構造が地震発生層まで連続する場合には、大阪平野南部が震源断層の直上に位置することになるため、この震源断層の深部形状を明らかにすることは重要である。中央構造線断層帯の深部形状を明らかにするために、大阪府泉佐野市日根野から南方向に和泉山脈及び紀ノ川を横断し、和歌山県紀の川市打田町高野に至る約 22km の区間において、反射法、広角反射法及び屈折法による構造探査を実施した。

(2) 平成 18 年度の成果

(a) 業務の要約

中央構造線の深部形状を明らかにするために、大阪府泉佐野市日根野から南方向に和泉山脈及び紀ノ川を横断し、和歌山県紀の川市打田町高野に至る約 22km の区間において、反射法、広角反射法及び屈折法による構造探査を実施した。その結果、中央構造線からの断層反射をもとに地下約 7km までの断層のイメージングに成功した。この結果、断層面は北に 35～40 度で傾斜することが判明し、大阪平野南部が震源域となることが明らかになった。

(b) 業務の成果

1) 調査地域

本調査の測線は、大阪府泉佐野市日根野を北端として、府道/県道 62 号泉佐野打田線(粉河街道)沿いに南下し、大阪府泉佐野市大木、和歌山県紀の川市茶口から池田隧道を通過し、国道 424 号線の区間を経て紀ノ川に達する。紀ノ川以南は和歌山県紀の川市打田町道沿いに、同高野地区に至る。測線長は道路沿いで約 22km、平滑化した投影測線上で約 18km である。調査測線北側は大阪府泉佐野市の区域、南側は和歌山県紀の川市の区域に相当する。

図 1 に国土地理院の 20 万分の 1 地勢図に測線を重ねて示した調査測線概略図を示す。図 2、3 調査測線に受振点、発震点及び CMP 広域重合測線(広角反射法重合測線)を重複表示した測線位置図を示した。また、図 4 には地質図上に調査測線を重複表示した図面を示した。

地殻構造探査測線は、大阪平野南部から和泉山脈をとおり紀ノ川南岸に至るもので、ほぼ東西方向の走向を示す主要な地質帯にほぼ直交して設定している。紀ノ川南岸には、三波川結晶片岩類が分布する(牧本ほか、2004)¹⁾。これらは泥質片岩・苦鉄質片岩・形質片岩などから構成され、高压変成作用を被る。東西走向の片理面が卓越し、東西方向の褶曲軸跡を示す褶曲が発達する。原岩の年代については、後期ジュラ紀と推定されている(Isozaki and Itaya, 1990)²⁾。紀ノ川沿いには、三波川結晶片岩類を不整合で覆って、菖蒲谷層群(牧本ほか、2004)¹⁾が東西方向に分布する。菖蒲谷層群は上部鮮新統から更新統の礫・砂・シルトなどからなる河川性堆積物から構成される。菖蒲谷層群の層序・年代については、深度 625m の根来観測井ボーリングについて水野ほか(1999)³⁾の詳細な記載がある。菖蒲谷層群は和泉山脈南縁の根来南断層によって、北方の白亜系和泉層群と接する。根来南断層の北方に東西走向で併走する根来断層は、右横ずれの変位地形を示す活断層であり(岡田・寒川, 1978)⁴⁾、浅層反射法地震探査(吉川ほか, 1992)⁵⁾やボーリング結果から根来南断層と地下で収れんすると考えられている(水野ほか, 1999)³⁾。いずれも中央構造線活断層系に属する断層である。油圧インパクトを震源とした浅層反射法地震探査では、地下 700m まで約 30 度の北傾斜を示す根来南断層の形状がイメージされており、根来南断層の上盤側のボーリングによっても、地下約 140m で北傾斜の断層の存在が確認されている(水野ほか, 1999)³⁾。根来断層は 1.8~3.5mm/年の右横ずれ変位を示す活断層であり(斉藤ほか, 1997)⁶⁾、活断層の発掘結果などから地震調査研究推進本部(2003)⁷⁾は、最新活動時期を 1 世紀以降 4 世紀以前と判断した。

中央構造線の北側には東西方向に和泉層群が分布する(市原ほか, 1986⁸⁾; 牧本ほか, 2004¹⁾)。和泉層群は、白亜紀後期に中央構造線の北縁に形成された東西方向に伸びるトラフを充填した砂岩・泥岩互層からなる。測線周辺では、ENE-WSW 走向の南傾斜を示す。和泉層群北縁の和泉山脈北部では、下位の泉南-領家複合岩体を不整合で覆う。

和泉山脈北麓には、ほぼ東西方向に泉南-領家コンプレックス(市原ほか, 1986)⁸⁾が分布する。主として花崗岩類・片麻岩類・珪長質火山岩類からなる。白亜紀前期に貫入した深成・火山岩類である。これらを不整合で覆い、大阪平野には大阪層群が分布する。主として陸水域で堆積した鮮新世後期から更新世の堆積物からなる。



図1 調査測線位置図〔受振点、発震点及びCDP 広域重合測線〕(国土地理院 1:200、000 地勢図に加筆)

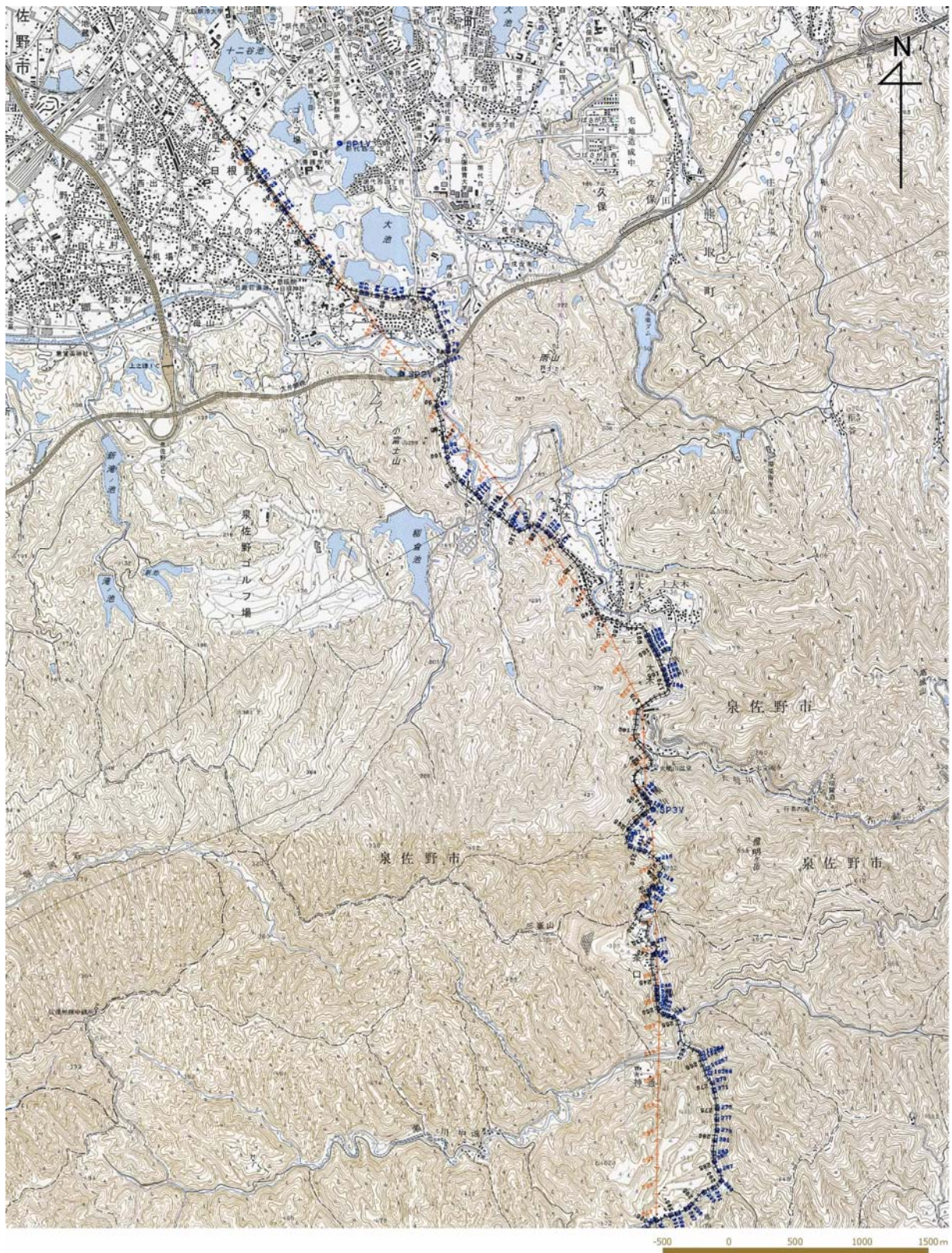


図2 調査測線詳細図 [1]受振点、発震点及びCMP 重合測線
 国土地理院発行 1:25,000 地形図(樽井、内畑、岩出及び粉河)に加筆

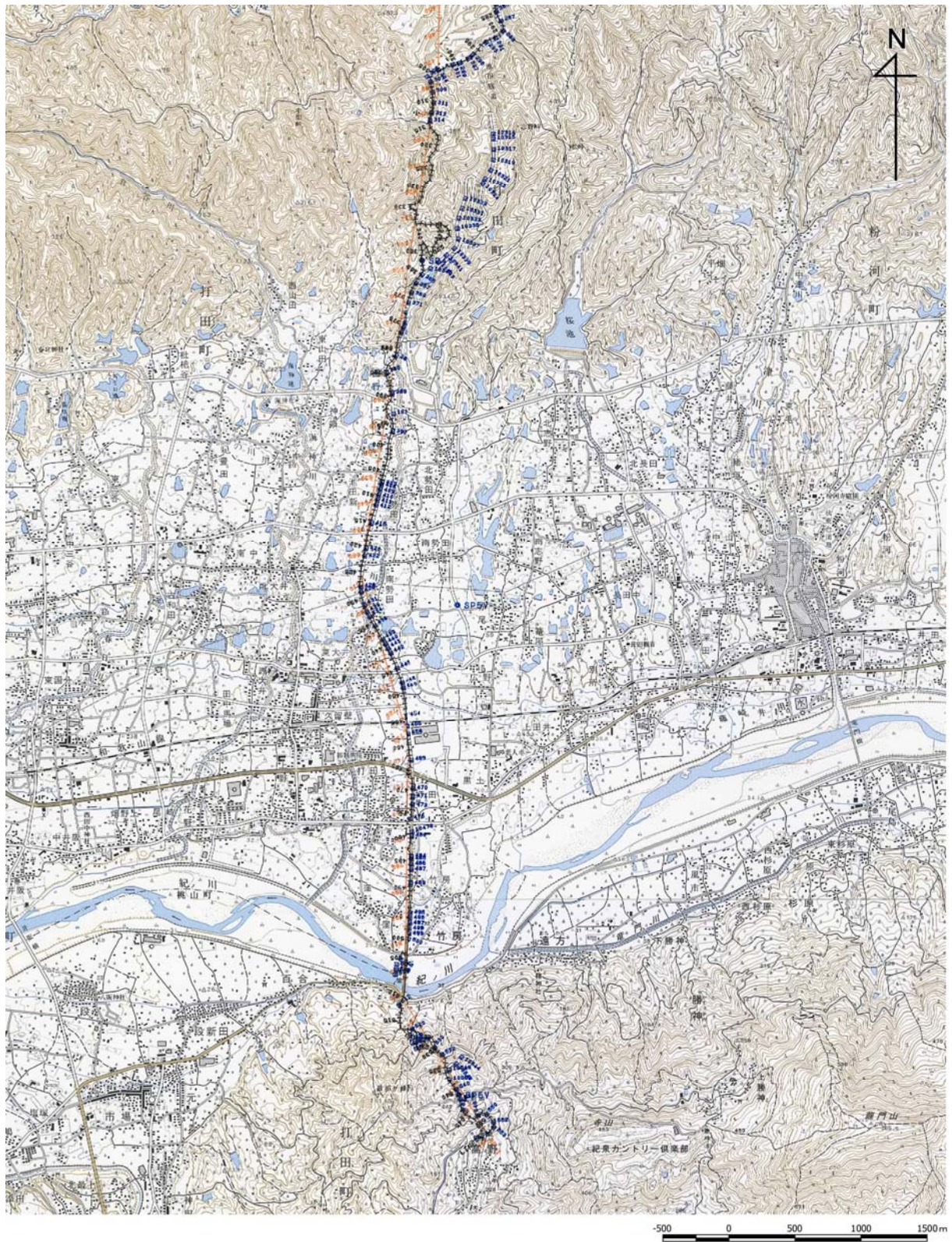


図3 調査測線詳細図 [2]受振点、発震点及びCMP 重合測線
 国土地理院発行 1:50,000 地形図(岩出、丸栖、粉河及び龍門山)に加筆

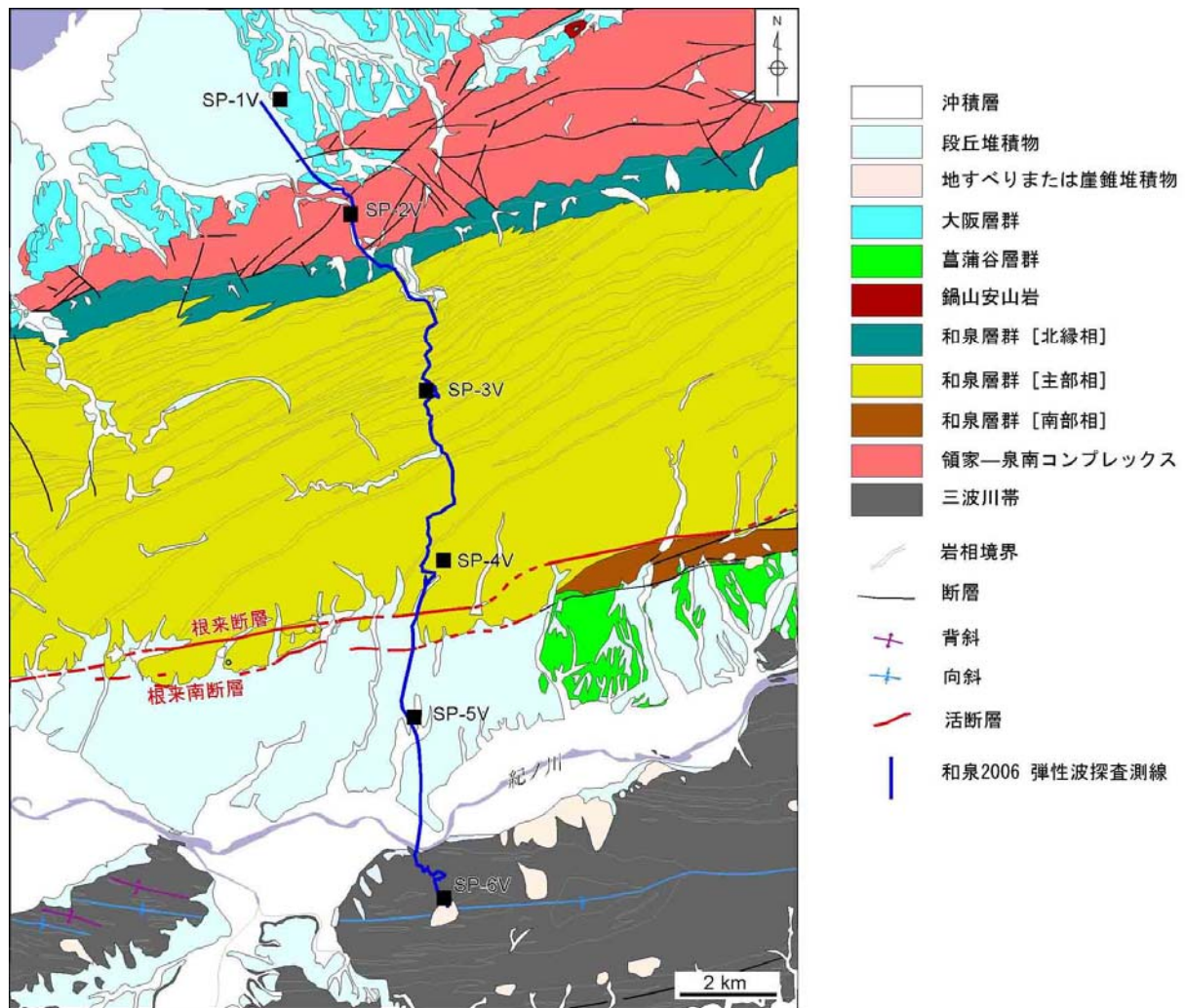


図4 和泉2006探査測線と測線周辺の地質(牧本ほか, 2004¹⁾; 市原ほか, 1986⁸⁾; 岡田ほか, 1997⁹⁾).

2) データ取得作業

a) 調査測線

大阪府泉佐野市日根野から和歌山県紀の川市打田町高野に至る全受振区間において、パイブレータ反射法及び広角反射法データを取得した。中央構造線近傍では高分解能区間として稠密な受振器展開を行った。(高分解能区間での探査は、「断層モデル等の構築」での研究として実施したもので、詳細は3.3.2節を参照されたい。)この区間では、有線テレメトリー方式の受振システムに加えて、独立型データ収録装置 MS2000D が併用された。以下に、両システムが併用された区間に加えて、有線テレメトリーシステムのみによってデータ取得を行った区間(大阪府側の北部区間及び和歌山県側の南部区間)に区分して、測線概要を記述する。尚、受振点起点番号としては、有線テレメトリーシステム G-DAPS4 展開区間については'1'、また、独立型受振システム MS-2000D 展開区間については'近接する有線展開受振点番号+MS2000 区間内番号'による六桁番号が付けられた。さらに発震点番号は原則として近接する受振点番号と同一番号とし、発震測線が受振測線に対してオフセットを持つ場合には、'発震点位置を受振測線に対して投影した場合の受振測線上の番号+10000'を発震点番号として与えた。

i) 有線テレメトリー北部区間(大阪府泉佐野市日根野-和歌山県紀の川市打田町神通)

受振区間: Loc. 1-305(受振測線長: 12.2km)

有線テレメトリー北部区間は、更新世後期の段丘堆積層、鮮新世～更新世前期にかけての大阪層群下部に被覆された大阪平野から、平野南縁部以南の領家花崗岩に被覆された地域を南下し、白亜紀後期の海成砂泥互層からなる和泉層群が分布する地域に相当する。調査測線の北端は大阪府泉佐野市日根野地区であり、泉州地域に古来より広範囲に分布する溜池の一つである十二池の西側に位置している。測線北端から日根野東上交差点に至る府道 247 号土丸栄線沿いの約 2.0km の区間は、古い木造家屋が府道西側に分布する箇所が多く、泉佐野市街地に向かう車両通行量も多いことから、受振点位置の選択及び大型パイブレータによる発震点の確保には詳細な踏査が必要であった。日根野東上から土丸交差点を南下し、阪和自動車道を横断する区間では、切通しの擁壁に沿った受振器設置が容易であり、測線周辺には集落及び店舗等が存在しないことからパイブレータ 4 台による標準発震が可能であった。

阪和自動車道高架下から和歌山県紀の川市打田町神通の池田隧道北側に至る約 8.8km の区間では、府道/県道 62 号泉佐野打田線(粉河街道)沿いに調査測線が設定された。粉河街道は、和泉山脈を横断して和歌山県と大阪府を結ぶ他の幹線道路と対比して日中の車両通行量が少なく、中央構造線活断層帯の大阪側への深部構造の把握する上で、受振及びパイブレータ発震の測線条件が相対的に良好であると判断された。但し、朝夕は車両通行量が多いため、この区間の発震作業は午前 9 時から午後 3 時頃までに限定された。また、和泉層群露頭からバラス等を採取する中規模採石場が二箇所存在するため、日中は大型車両の通行が間歇的にあり、粉河街道沿いの一部幅員減少区間及び屈曲区間では発震作業に制約を受けた。また、大阪府泉佐野市大木の上大木地区と犬鳴山温泉周辺地区の計約 1.4km の区間では、民家及び小規模店舗が密集しており、受振機材の設置は地域自治会の協力を受けて実施された。尚、和歌山県側の神通温泉南側の約 450m 区間では旧道沿いに受振器が展開され、粉河街道沿いにオフセット発震点が設定された。

この有線テレメトリー北部区間では、受振器は原則として道路路肩の表土が露出している部分を選択して設置した。擁壁、側溝等のコンクリート構造物に被覆され、表土が見出せない約 30%の区間では、アルミ製受振器スタンドを使用した。

ii) 有線及び独立型受振システム併用区間(和歌山県紀の川市打田町神通-同打田町東大井)

受振区間：Loc. 306-440(受振測線長：5.4km)

有線及び独立型受振システム併用区間は、和泉層群の分布域から和泉山脈南麓の中央構造線断層帯(根来断層、根来南断層)を横断し、紀ノ川北側に広がる沖積層及び段丘堆積物の被覆地域に相当する。この区間の北側起点は、県道 62 号泉佐野打田線(粉河街道)沿いの池田隧道北側入口から紀の川市市道である重行中畑線を南下し、紀の川市打田町中畑地区への分岐に位置している。この地点が調査測線全体における最大標高点(350m)に相当する。和歌山県側の粉河街道は池田隧道の約 550m 区間及び隧道南側の屈曲部において受振器設置条件が良好ではなく、中央構造線断層帯を横断する測線の直線性及びノイズレベルに関しても問題があることから、市道重行中畑線の約 2.3km 区間に有線テレメトリーシステムと独立型受振システムの両受振機材が組み合わせて敷設された。市道重行中畑線と粉河街道が合流する地点から紀ノ川方面への約 3.1km の区間は見通しの良い直線路であり、家屋及び小規模店舗の密集箇所は無いものの約 50~100m 間隔程度で点在している。従って、連続的なバイブレータ発震点の設定には制約があった。平野部の測線沿いには水田及び畑作地が広がり、受振機材設置は比較的容易であることから、アルミ製受振器スタンドの使用箇所は 10%以下であった。

iii) 有線テレメトリー南部区間(和歌山県紀の川市打田町東大井-同紀ノ川市打田町高野)

受振区間：Loc. 441-555(受振測線長：4.6km)

有線テレメトリー南部区間は、紀ノ川北側に広がる沖積層及び段丘堆積物の被覆地域から紀ノ川を横断し、三波川帯結晶片岩が露出する地域に至る。紀ノ川の北側は、県道 62 号泉佐野打田線(粉河街道)及び国道 424 号線に沿って測線が設定されている。この区間は国道 24 号線に出入りする車両が増加し、和泉山脈南麓地域と異なって車両通行量が比較的多く、かつ JR 和歌山線高架の南側に位置する 24 時間操業の大規模電池工場の定常ノイズも大きい。また、和泉山脈南麓地域と同様に家屋及び小規模店舗の密集箇所は無いものの約 50~100m 間隔程度で点在しているため、バイブレータ発震点の設定と発震エネルギーの確保には詳細な選点作業を要した。但し、河川敷を含めた紀ノ川北側約 700m の区間では連続的な標準仕様による発震点の確保が可能であった。紀ノ川以南の三波川帯結晶片岩の被覆区間約 1.6km(投影測線上で約 1.25km)では、紀の川市市道である竹房橋五百谷線沿いに測線が設定された。この区間は比高変化が大きいものの、車両通行量は非常に少なく、紀ノ川北側の鮮新-更新統である菖蒲谷層の基底面に相当する三波川帯上面に関して紀ノ川を隔てて'Undershoot'する広角発震実施の観点から高エネルギー発震点を確保した。

有線テレメトリー南部区間では受振機材の設置条件は、和泉山脈南麓地域と同様に全般的に容易であり、アルミ製受振器スタンドの使用箇所は 10%以下であった。

b) 調査概要

本調査では、高分解能反射法、反射法、屈折法及び広角反射法のデータ取得が平成 18 年 8 月 17 日から同年 9 月 1 日の期間に実施された。その種別は、次の様に時間順に総括される。図 5 に本調査の測定作業フローチャートを示した。尚、下記の測線区間は高分解能区間(3.3.2 節参照)の重複部の受振器展開を含んでいる。

Phase-1: 高分解能反射法データ取得、3.3.2 節参照、(和歌山県紀の川市神通-同紀の川市打田町東大井)

Phase-2: 反射法データ取得(大阪府泉佐野市日根野-和歌山県紀の川市打田町神通)

Phase-3: 屈折法及び広角反射法データ取得(上同)

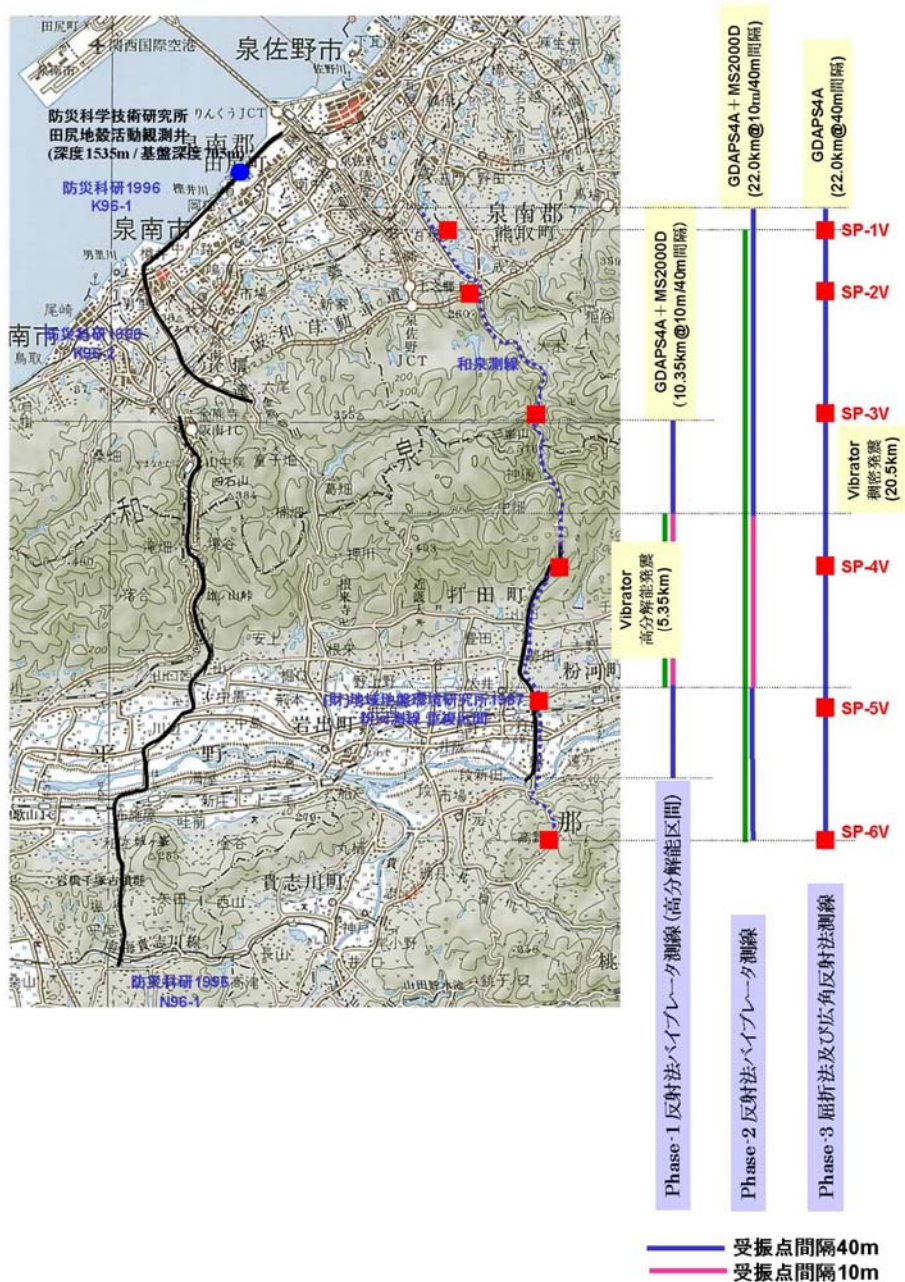


図5 和泉測線データ取得作業フローチャート

c) データ取得内容

本節では、受振器設置作業及びバイブレータ発震作業の詳細内容に関して記述する。

i) 受振器設置作業1 [有線テレメトリーG-DAPS4 システム設置作業]

屈折法及び広角反射法データ取得においては全測線(測線長 22.2km)内で、Phase-1 から Phase-3 までの全期間において有線テレメトリーシステムが設置された。有線テレメトリーシステムによる受振区間では、主として道路(幹線道、地域道及び農道)の路肩及び紀ノ川の河川敷及び堤防道路に沿って設置された。受振器、データ伝送装置(RSU)、バッテリーユニット及び本線ケーブルは、調査測線に沿って 40m 間隔で設置された木杭を目印にして敷設された。各受振点では原則として 9 個の受振器 (ジオフォン)

が標準 25m のアレイ長によって設置された。受振器からの信号が集約されるデータ伝送装置(RSU)では、6 受振点毎のデータに対して A/D 変換、相互相関、ノイズエディットを伴う垂直重合処理が実施され、観測車に伝送された。

有線テレメトリー区間の受振器設置作業は平成 18 年 8 月 18 日に開始されたが、屈折法及び広角反射法のデータ取得終了まで 12 日間に及ぶ展開期間を前提として、側溝及び用水路路肩への有線ケーブル埋設作業、受振測線が幹線県道及び国道を横断する際の用水管及び排水溝等を用いたケーブル敷設作業が、所轄関係機関の承認を経て実施された。

本調査では、吉川ほか(1992)⁵⁾による中央構造線を横断する浅層反射法記録を参照し、中央構造線の深部延長及び三波川帯、領家帯の接合関係を明確にイメージングするために、原則として全受振区間にわたる固定展開によってデータを取得した。

ii) バイブレータ発震作業〔反射法データ取得作業〕

反射法データ取得作業(発震点数 200 点)ではバイブロサイズ 4 台を震源として、受振測線に沿った約 80m 間隔の標準発震点を 176 点、発震エネルギーを確保するためオフセット発震点を 24 點選点した。各発震点においてはホールドダウンウェイトに対する制御出力を 80%として 12 回以上のスイープを行うことを標準仕様としたが、調査測線近傍の建造物、構築物、路面強度及び埋設管設置状況についての保安上の配慮から、標準発震エネルギーを確保できた発震点は約 36%に過ぎなかった。バイブレータのアレイパターンについては、40m の範囲内で適宜移動を行った。図 6 に今回の測定作業で採用された発震パターンの模式図を示す。標準反射法データ取得作業では、中央構造線断層帯の深部延長把握に探査の焦点を当てる目的から、表層近傍での起震エネルギーの減衰、低周波帯域に発震エネルギーを集中させることによるバイブレータ起震機構への負荷等を総合的に勘案して、End 周波数を 40Hz とすることに決定した。また、発震回数に関する逐次加算法によるパラメータテストの結果、長大オフセット箇所における屈折初動エネルギー及び三波川帯上面相当の反射波 S/N の確保を考慮すると、少なくとも約 12 回以上のスイープ回数が必要であると判断された。

iv) バイブレータ発震作業〔屈折法及び広角反射法データ取得作業〕

屈折法及び広角反射法バイブレータ発震点は下記の 6 点である。この屈折法データ取得時には、有線テレメトリー受振点区間[Loc. 1-55]22.2km の固定展開が確保された。

SP-1V… 大阪府泉南郡熊取町朝代西 京都大学原子炉実験所敷地内(Loc. 30, T-offset..620m)

発震回数… 125 回(発震台数..4 台)

発震時刻… 平成 18 年 8 月 27 日 20 時 01 分～8 月 27 日 21 時 42 分

SP-2V… 大阪府泉佐野市土丸 阪和自動車道高架下(Loc. 78, T-offset..440m)

発震回数… 100 回(発震台数..4 台)

発震時刻… 平成 18 年 8 月 27 日 22 時 19 分～8 月 27 日 23 時 43 分

SP-3V… 大阪府泉佐野市大木 粉河街道待避スペース(Loc. 199)

発震回数… 100 回(発震台数..4 台)

発震時刻… 平成 18 年 8 月 28 日 0 時 34 分～8 月 28 日 1 時 55 分

SP-4V… 和歌山県紀の川市打田町重行 粉河街道退避スペース(Loc. 363)

発震回数… 175 回(発震台数..4 台)

発震時刻… 平成 18 年 8 月 29 日 0 時 32 分～8 月 29 日 2 時 53 分

SP-5V… 和歌山県紀の川市打田町南勢田 紀の川市市道 (Loc. 436, T-offset...675m)

発震回数… 100 回 (発震台数..4 台)

発震時刻… 平成 18 年 8 月 28 日 20 時 17 分～8 月 28 日 21 時 39 分

SP-6V… 和歌山県紀の川市打田町高野 紀の川市市道 (Loc. 542)

発震回数… 100 回 (発震台数..4 台)

発震時刻… 平成 18 年 8 月 28 日 22 時 15 分～8 月 28 日 23 時 38 分

屈折法発震においては、反射法発震よりもさらに 30Hz 以下の低周波数帯域におけるエネルギー確保を目的として、スweep周波数 6-30Hz 及びスweep長 24 秒が採用された。大阪府泉南郡熊取町、同泉佐野市及び和歌山県紀の川市打田町の市街地内における集中発震点 SP-1V、SP-2V、SP-5V 及び SP-6V では 20 時以降の準夜間に発震作業が実施され、和泉山脈横断区間に位置する SP-3V 及び SP-4V では午前 0 時以降の深夜に発震作業が実施された。図 7 は、測線全区間におけるバックグラウンドノイズの時間及び空間変化を示したものである。紀ノ川北側の市街地区間を除外して、20 時-5 時までの夜間の平均ノイズレベルは、9 時-17 時の昼間と比較して 18~24dB 平均値が低いことから、準夜間及び深夜の発震作業は有効であったことが示唆される。

現地調査の作業状況については、図 8 に現場写真を示した。

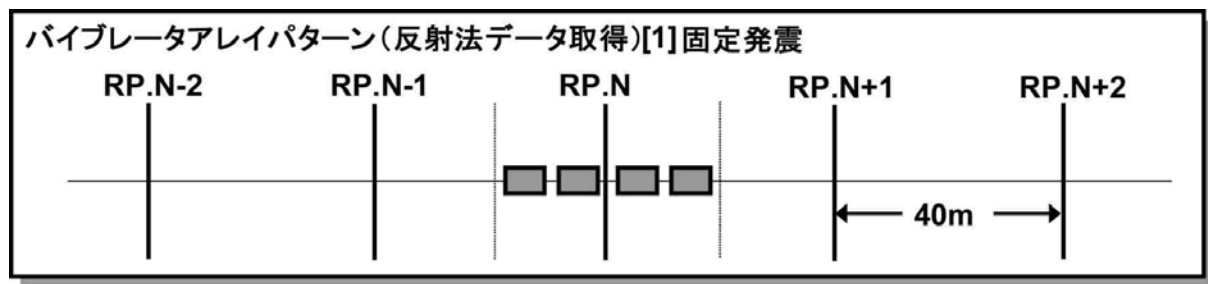


図 6 パイプレータ発震アレイパターン

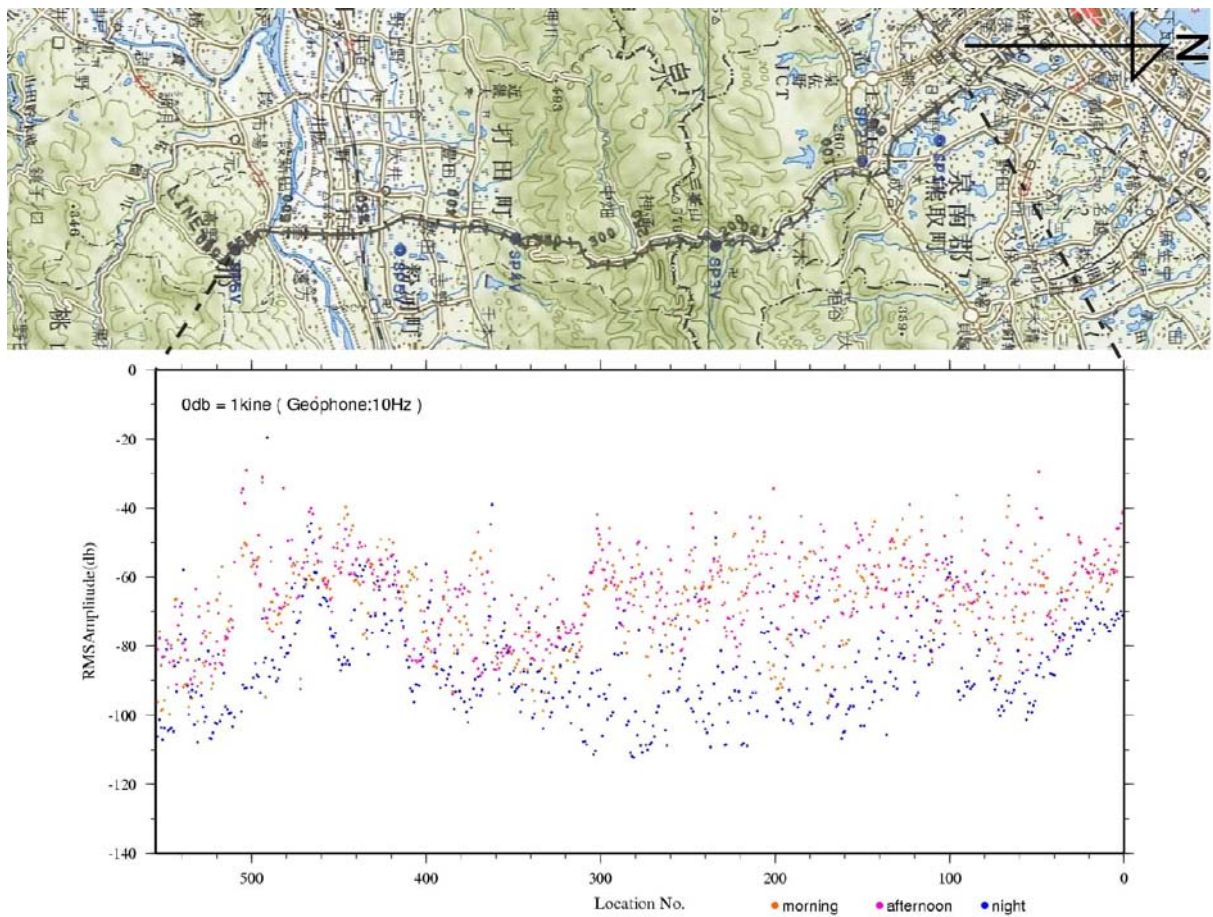


図7 バックグラウンドノイズの時間及び空間変化



図 8a 大阪府泉佐野市土丸地区における受振器設置状況



図 8b 和歌山県紀の川市打田町窪地区におけるバイブレータ 4 台による発震状況



図 8c 和歌山県紀の川市打田町竹房地区。紀ノ川南部の三波川変成岩帯被覆区間における発震作業。前方に紀ノ川方面を望む。

3) 調査仕様

a) 反射法データ取得

測線全区間において、パイプロサイス車 4 台 (HEMI) を震源とした反射法地震探査が実施された。調査仕様として表 1 のパラメータが採用された。

b) 屈折法及び広角反射法データ取得

調査測線上に約 4.0~5.0km 間隔のパイブレータ多重発震点が選定され、パイプロサイス車 4 台 (HEMI) を震源とした屈折法及び広角反射法データが取得された。調査仕様として表 1 のパラメータが採用された。

表 1 データ取得仕様一覧

調査項目/測定諸元	反射法地震探査	屈折法及び広角反射法地震探査
調査順	Phase-2	Phase-3
受振測線長	22.2km(道路沿い)	22.2km(道路沿い)
調査測線位置概要	本調査の測線は、大阪府泉佐野市日根野を北端として、府道/県道62号泉佐野打田線(粉河街道)沿いに南下し、大阪府泉佐野市大木、和歌山県紀の川市茶口から池田隧道を通過し、国道424号線の区間を経て紀ノ川に達する。紀ノ川以南は和歌山県紀の川市打田町道沿いに、同高野地区に至る。測線長は道路沿いで約22km、平滑化した投影測線上で約18kmである。	
受振測線区間	全測線区間	全測線区間
発震系パラメータ		
震源	パイブレータ(HEMI)	パイブレータ(HEMI)
パイブレータ台数	4台	4台
標準発震点間隔	10m	-
発震区間	約5.4km(道路沿い)	-
スイープ長	20 sec	24 sec
標準発震回数/発震点	12回(標準)	100-175回
スイープ周波数	6~40Hz	6~30Hz
パイブレータアレイ長	B-B	B-B
測線長に対する発震点設定割合	36.0%	-
総発震点数	200点	6点
受振系パラメータ		
受振点間隔	40m(標準展開),10m(稠密展開)	40m(原則)
受振器種別	SM-7 / SM-24 10Hz	
受振器数/受振点	3-9個組	
展開パターン	固定展開	固定展開
展開長	22.2km	22.2km
受振測線長(GDAPS-4A)	22.2km	22.2km
受振点数(GDAPS-4A)	555点	555点
受振測線長(MS2000D)	5.4km	—
受振点数(MS2000D)	405点	—
総受振点数	960点	—
展開設定に関わる特記事項	MS2000D展開は40m間隔の有線受振器間に10m間隔で内挿設置	—
記録系パラメータ		
GDAPS-4A(有線テレメトリーシステム)		
サンプルレート	4msec	4msec
チャンネル数	555(固定)	555(固定)
Diversity Edit パラメータ	W=4.0sec, α=3.0	W=4.0sec, α=3.0
プリアンプゲイン	30dB	30dB
相互相関	CAS	CAS
記録長	16sec	20sec
独立型記録システム		
サンプルレート	4msec	—
記録長	連続観測(データ取得後に編集作業を実施)	—