

高浜断層周辺における浅部地下構造調査の実施 Shallow structure survey around Takahama Fault Area in Aichi prefecture, central Japan

木下佐和子^{1*}・山口和雄¹・伊藤 忍¹・住田達哉¹
Sawako Kinoshita¹, Kazuo Yamaguchi¹, Shinobu Ito¹ and Tatsuya Sumita¹

Abstract: Takahama fault is distributed at the southern end of the Sanage-Takahama Fault Area. We conducted a P-wave shallow seismic reflection survey, a vertical seismic profile (VSP) survey, and the interferometry survey around Takahama Fault Area, Aichi Prefecture, central Japan, to clarify the spatial distribution and the amount of the activity of the Takahama fault. The shot records of the reflection survey and VSP survey show high signal-to-noise ratio. We are going to conduct further analyses to gain more insight into the geological information around the coastal zone of the Mikawa Bay.

Keywords: seismic reflection survey, Takahama Fault

要 旨

高浜断層は愛知県豊田市から西尾市にかけて分布する猿投—高浜断層帯の南部に位置する断層である。我々は、高浜断層の位置・撓曲崖をはさんだ地下の地層変位量などを明らかにすることを目指し、愛知県の油ヶ淵周辺において浅部反射法探査と VSP 検層、高浜川沿いにおいて地震波干渉法の調査を実施した。3つの調査全てで良好なデータが得られたので、今後データ処理をすすめ、三河湾沿岸域における地質情報の整備を行う。

1. はじめに

沿岸域の地質・活断層プロジェクトでは日本全国の大都市圏沿岸地域と沿岸海域の地質・地盤情報の整備を行っており、平成 29 年度から 31 年度は伊勢湾・三河湾沿岸域を対象に様々な調査が行われる。本報告では、三河湾沿岸域調査の一環として、平成 29 年度に愛知県の高浜断層周辺で行った浅部地下構造調査（反射法地震探査・VSP 検層・地震波干渉法）のデータ取得状況に関してまとめる。なお、平成 29 年度は三重県鈴鹿市においても陸域の地震探査を行っている（木下ほか、2018 本報告）。

三河湾沿岸域には知多半島、西三河平野、三河山地、東三河平野、渥美半島などが分布している（第 1 図）。西三河平野は、西は衣浦湾、北は猿投 - 知多隆起帯、東は三河山地に囲まれた堆積平野で、主に段丘などの台地と矢作川と油ヶ淵の沖積低地で構成されている（牧之内ほか 2011）。衣浦湾の東から矢作川を越えて西尾市

にかけては、河成低地と段丘の境界付近に高浜断層が分布していると考えられている（愛知県、1996）。高浜断層は大高一府断層帯の南に存在する、西尾市まで続く一連の猿投—高浜断層帯の南部に位置する断層である（地震調査委員会、2004）。中田・今泉編（2002）などでは、撓曲崖をつなぎ高浜断層の位置を推定しているが、撓曲崖が不連続の場所もあり、詳細な断層位置は不明確である。

愛知県では 1995 年に高浜撓曲崖を対象にした調査を実施している（愛知県、1996）。その調査で、高浜撓曲の地下構造を明らかにするために撓曲崖を通る約 800 m の東西の測線において浅部反射法調査を実施した。その結果、撓曲崖の下に地層の食い違いがあることから、撓曲崖の下に傾斜 70～80 度の断層があると推定した。反射法地震探査は断層の位置を推定するために有用な手法のひとつであるが、愛知県が 1995 年に実施した調査測線より東では、高浜断層を横切るような反射法地震探査は行われておらず、さらなる調査が必要である。

本調査では、高浜断層の位置を明らかにし、撓曲崖をはさんだ地下の地層変位量などを明らかにすることを目的として、愛知県高浜市・碧南市・安城市において、以下の 3 種類の地下構造調査を行った。

1：浅部反射法地震探査（油ヶ淵周辺）

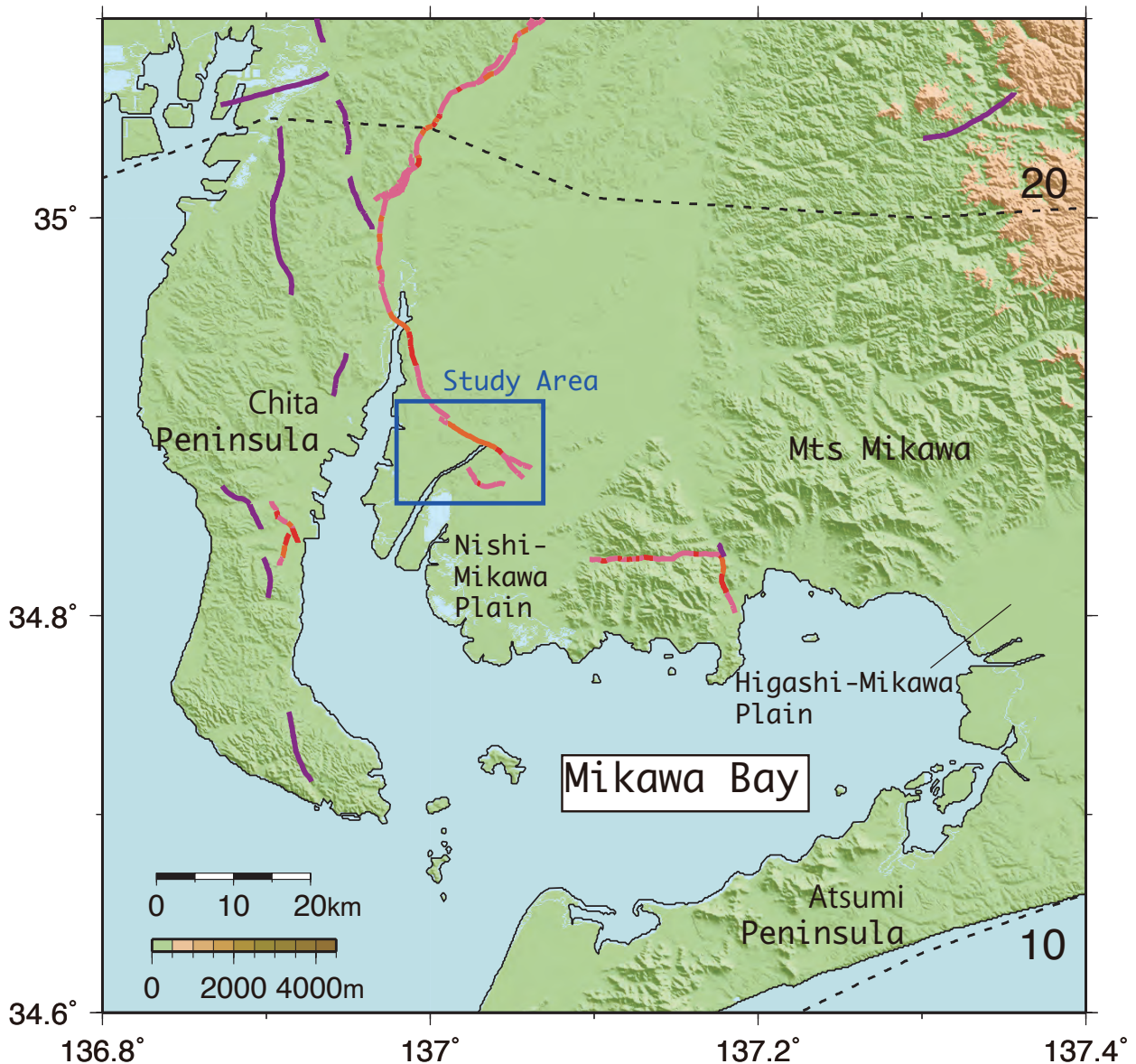
2：VSP 検層（油ヶ淵周辺）

3：地震波干渉法（高浜川周辺）

反射法地震探査は地表で人工的に弾性波を発生させ、地下の地震波速度や密度が変化する境界面で反射した波を地表の受振器で計測し、地下の境界面をイメージする手法である（物理探査学会、1998）。VSP 検層はボーリングの坑井を利用し、地表で発震した地震波

*Correspondence

1 産業技術総合研究所 地質調査総合センター 地質情報研究部門 (AIST, Geological Survey of Japan, Research Institute of Geology and Geoinformation)



第 1 図 三河湾沿岸域の地形と Hirose *et al.* (2008) によるフィリピン海プレートの深度 (km). 標高データは国土地理院の数値地図 250 m メッシュ標高を使用した. 赤, オレンジ, ピンク, 紫の実線は中田・今泉編 (2002) による断層位置を表し, それぞれ活断層, 活断層 (位置不明確), 活断層 (位置不明), 推定活断層を表す. 赤色の四角は本調査領域を表す.

Fig.1 Tectonic setting around the coastal area of Mikawa Bay. Depth contours indicate the upper surface of the subducting Philippine Sea plate (km) from Hirose *et al.* 2008. Colors indicate digital elevation model (250m grid) from Geospatial Information Authority of Japan (GSI). Red, orange, pink, and purple solid lines represent spatial distributions of active faults, active faults whose location are indecisive, active faults whose location are concealed, and estimated active faults from Nakata and Imaizumi eds. (2002), respectively. A blue square represents survey regions.

を坑内に展開した受振器で計測し, 坑井周辺の地下構造を調べる手法である (物理探査学会 1998). 油ヶ淵周辺では平成 29 年度にボーリング調査も行っており, VSP 検層はその坑井を利用した. 地震波干渉法は 2 点の観測点で得られた常時微動の相互相関関数から, 2 点間のグリーン関数を求める手法で地下の擬似的な反射面や S 波速度構造を求めることができる (中原, 2016 など). 震源を使用しないため, 発震を行うことができ

ない狭い道などで有効な手法である (伊藤ほか, 2010 ; 伊藤・山口, 2011 など). 今回はケーススタディとして, 南北を撓曲崖に囲まれた, 断層が通っていると予想される高浜川の堤防で調査を実施した.

2. 調査概要

以下に 3 種類の探査それぞれの調査概要を記す.



第2図 調査路線周辺の地図（国土地理院発行数値地図25,000地図画像）。基図に20万分の1シームレス地質図（産業技術総合研究所，2015）を用いた。実線に関しては第1図同様断層を表す。

Fig.2 Digital Map 25,000 from GSI with Seamless Digital Geological Map of Japan (1:200,000) from AIST (2015). Blue solid lines represent survey lines. Red, orange, pink, and purple solid lines are the same as Fig. 1.

1) 反射法に関して

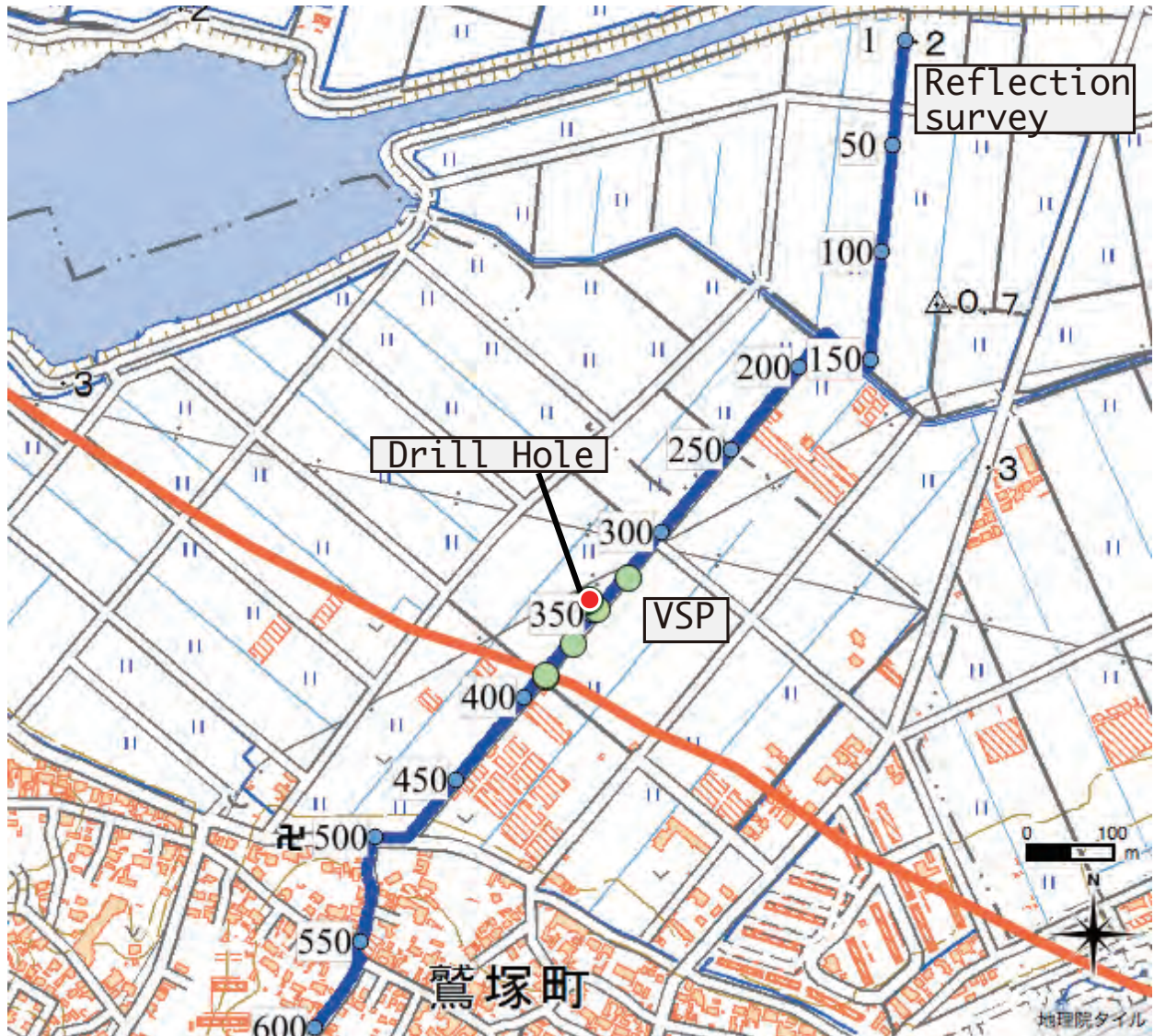
本調査は2018年3月26日から30日の合計5日間行った。機材は、三重県鈴鹿市における反射法探査（木下ほか2018，本報告）と同じものを用いた。震源はP波油圧インパクト（JMI-mini65，地球科学総合研究所製）を用い，発震間隔は2m，発震は基本的には1点につき8回としたが，路面の舗装や調査の進捗状況などに応じて適宜発震回数を調節した。受振器は固有周波数28Hzの上下動シングルジオフォン（Geospace社製GS-20DM内蔵）を使用した。波形収録にはテレメトリー型地震探査システムDSS-12（サンコーコンサルタント社製）を使用し，0.5msサンプリングで2秒間記録した。受振器は2m間隔に設置し，192点を同時に設置して48点ずつ展開移動した。調査機器の詳細を第1表に記す。測線は半場川の堤防から始まり，農道を南西方向に進み，ボーリング実施点を通り，鷺塚町の住宅街の中にある撓曲崖を登った場所まで，総延長約1,200メートル，総受振点数は600点と設定した（第1表，第2,3図）。この測線は中田・今泉編（2002）による高浜断層の推定位置と交差し，高浜断層の正確な位置や東海層群の水平分布を調べるのに適した場所である。測線は未舗装の部分とアスファルトで舗装されている部分があり，受振器のスパイクは道の端に刺し，住宅街などでスパイクが刺せない場所は粘土を使用して受振器を固定した。調査の様子を第4図に示した。

第1表 反射法における調査パラメータ詳細
Table1 Field parameters for the reflection survey.

測線名	碧南反射測線
調査地域	油ヶ淵周辺
調査期間	2018年3月26日から3月30日
測線長	1198m
受振点数	600点
受振点間隔	2m
受振点展開方法	192チャンネルを同時展開し48点ずつ移動
震源	P波油圧インパクト(JMI-Mini65)
発震点数	600点
発震間隔	2m
発震回数	8回(道路の状況に応じて適宜調節)
受振器	GS20-DM(GeoSpace社製)
受振器固有周波数	28Hz
収録装置	DSS-12(サンコーコンサルタント製)
記録長	2秒
サンプリング間隔	0.5ms

2) VSPに関して

調査は2018年3月21日から24日の合計4日間行った。調査機器の詳細は第2表に記した。発震は坑井脇及び，坑井横の農道上で坑井から最近接点からの水平距離0m，南北に約40m，南北に約80mの計6か所の位置で当初行う予定で，発振点番号を北から1, 2, 3, 4,



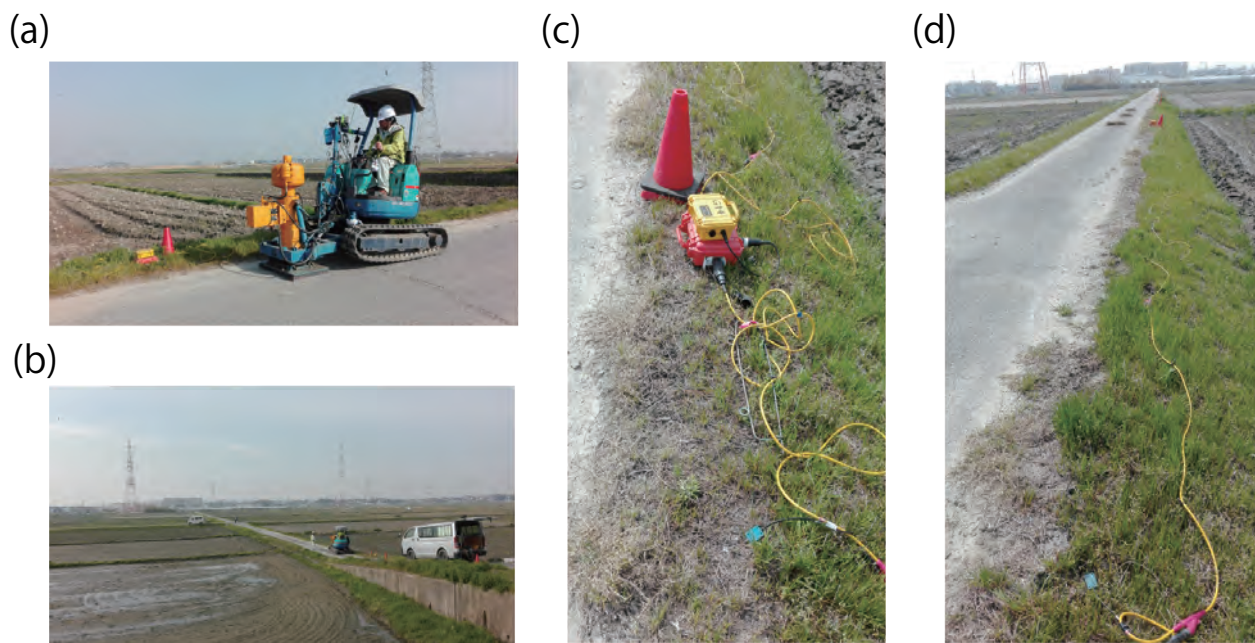
第3図 反射測線の詳細図。

(a) 反射法の測線周辺の地図。青線と数値は受振点・発震点番号（2 m 間隔）。基図に国土地理院発行数値地図 25,000（地図画像）を用いた。オレンジの実線は第1図と同様。赤の丸印は坑井、緑の丸印はVSPの発震点を表す。

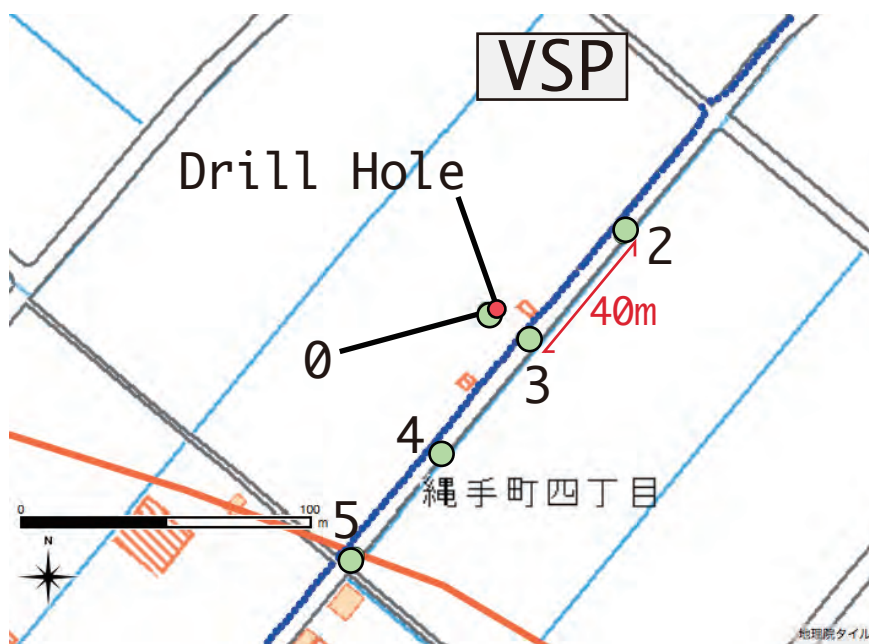
Fig.3 Detailed information of survey lines. (a) Line 1 with Digital Map 25,000 (Map Image) from GSI. Numbers and a blue line represent receiver and shot points. Red and green circles indicate the location of the drill hole and shot points of VSP survey, respectively.

5, 坑井脇を0と付した。現場での時間の都合上、発振点1での発振は行えず、全部で5か所での発振となった（第5図）。発振点0での発振はドロップヒッターのみ、発振点2での発振は油圧インパクトのみである。受振器はハイドロフォン（Geometrics社製）で、チャンネル数は24、受振器間隔は0.5 mである。探鉱機はstrataviserNZ（Geometrics社製）を使用し、サンプリングは0.25 ms間隔で、収録は2秒間行った。受振器の深度計測は、地表（標高1.375 m）より50 cm上に設けられた孔口を基準に行った。坑井には標高-33.72 mまで116 φ、標高-8.62 mまで140 φの鉄製ケーシングが入られていたが、2日目はケーシングがある状態で最深点

から地表部まで全ての区間で測定した。3日目には116 φのケーシングを抜いての測定を試みたが、ケーシングの抜管後間もなく、孔壁の変形が発生したため、深度26 m以浅のみのデータしか取得できなかった。測定区間ごとの受振器の最深点は、孔口を基準に、2日目は、深度78 m（途中から77.5 m）、72, 60, 48, 36, 24, 12 mの7箇所、3日目は、深度26 m, 14 mの2箇所に設定した。標高に換算すると、ケーシングありの状態では標高-76.12 m（途中から-75.62 m）以浅を0.5 m刻みで切れ目なく受振できている。ケーシングの無い測定については、116 φケーシング最深点の標高-33.72 mから-24.12 mと140 φケーシングのある標高-8.62 m以浅



第4図 反射法の調査機器，現場調査の様子。
 (a) JMI-Mini65(地球科学総合研究所). (b) 観測の様子. (c) DSS-12(サンコーコンサルタント社製). (d) 測線の状況.
 Fig.4 Survey systems and field operations of the reflection survey.
 (a) JMI-Mini65(JGI, inc.). (b) Field operations. (c) DSS-12 system (Suncoah Consultants) (e) Survey Line.



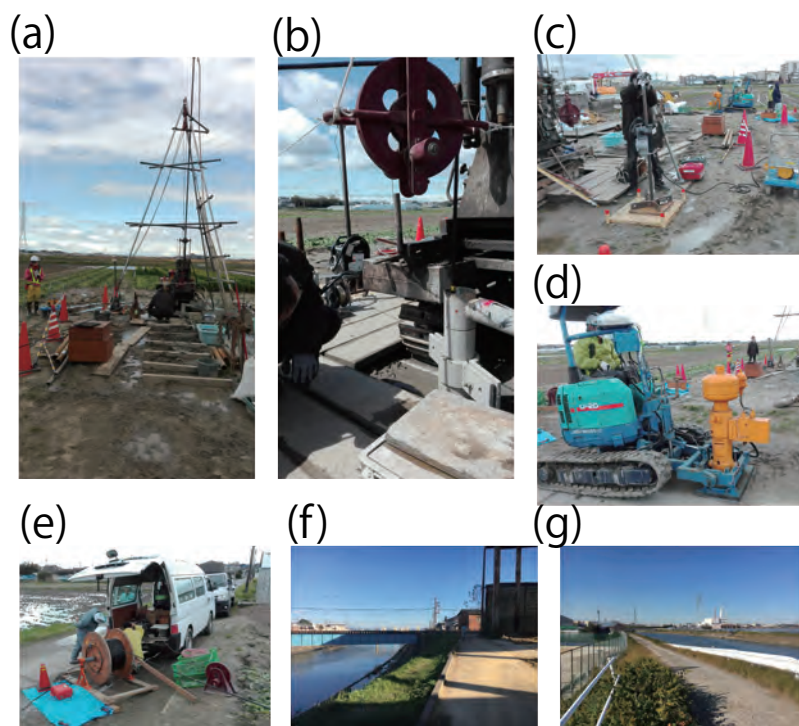
第5図 VSPの詳細図. 赤の丸印は坑井, 緑の丸印はVSPの発震点を表す. 基図に国土地理院発行数値地図25,000(地図画像)を用いた.

Fig.5 Detailed information of the VSP survey with Digital Map 25,000 (Map Image) from GSI. Red and green circles indicate the location of the drill hole and shot points of VSP survey, respectively.

が欠測区間となる. なお, 孔内水位は標高0.18 mであった(2018年3月13日測定). 調査の様子は第6図に示した.

3) 地震波干渉法に関して

地震波干渉法のデータ取得は2018年1月15日から19日に行った. データ取得方法は伊藤ほか(2010), 伊藤・山口(2011)と同様である. 使用した機器など調査諸元は第3表にまとめた. 受振器は固有周波数10 Hz



第 6 図 VSP, 干渉法の調査機器, 現場調査の様子. (a) (b) 坑井. (c) ドロップヒッター (日本地工株式会社製). (d) JMI-Mini65 (地球科学総合研究所). (e) 観測車. (f) (g) 干渉法測線の状況.
 Fig. 6 Survey systems and field operations of the VSP survey and interferometry. (a)(b) Drilling Site. (c) Drop Hitter (Nippon Chiko co., ltd). (d) JMI-Mini65(JGI, inc.). (e) Field operations. (f)(g) Survey Line of the interferometry.

第 2 表 VSP 検層における調査パラメータ詳細.
 Table2 Field parameters for the VSP survey.

測線名	碧南VSP測線
調査地域	油ヶ淵周辺
調査期間	2018年3月21日から3月24日
受振器	ハイドロフォン(Geometrics社製)
周波数特性	10-10,000Hz
チャンネル数	24
受振レベル	0.5m-77.5m
受振レベル数	156
レベル間隔	0.5m
震源	ドロップヒッター(重錐質量60kg)、P波油圧インパクト(JMI-Mini65)
垂直重合数	4から16回(状況に応じて適宜調整)
収録装置	StrataViser NZ(Geometrics社製)
記録長	2秒
サンプリング間隔	0.25ms

第 3 表 干渉法における調査パラメータ詳細.
 Table3 Field parameters for the interferometry.

測線名	高浜川干渉法測線
調査地域	高浜川沿い
調査期間	2018年1月15日から1月19日
測線長	950m
受振点数	96
受振点間隔	10m
受振点展開方法	192(96×3成分)チャンネルを同時展開
受振器	SNG-32CT(GeoSpace社製)
受振器固有周波数	10Hz
収録装置	DSS-12(サンコーコンサルタント製)
記録長	1分
サンプリング間隔	1ms

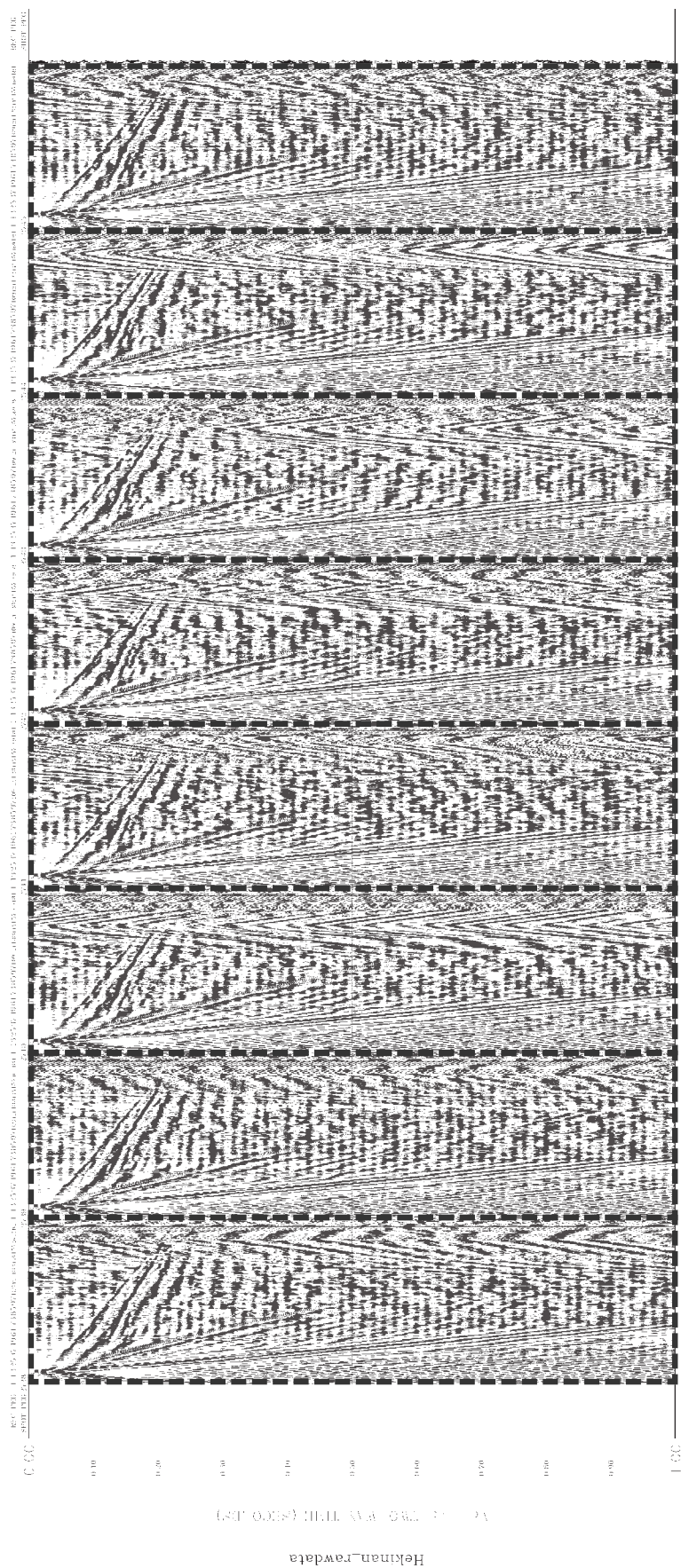
の3成分ジオフォン(OYO Geospace社製GS-32CT内蔵)を使用し、水平動成分が測線の向きに平行・直交になるように設置した。探鉱機はテレメトリー型地震探査システムDSS-12(サンコーコンサルタント社製)を使用し、1msサンプリングで60秒ずつ、合計約13時間記録した。受振器は10m間隔に96点を設置し、測線の長さは約950mに設定した。本調査は高浜川沿いの堤防で実施したが、途中の道は非常に狭い部分があり、



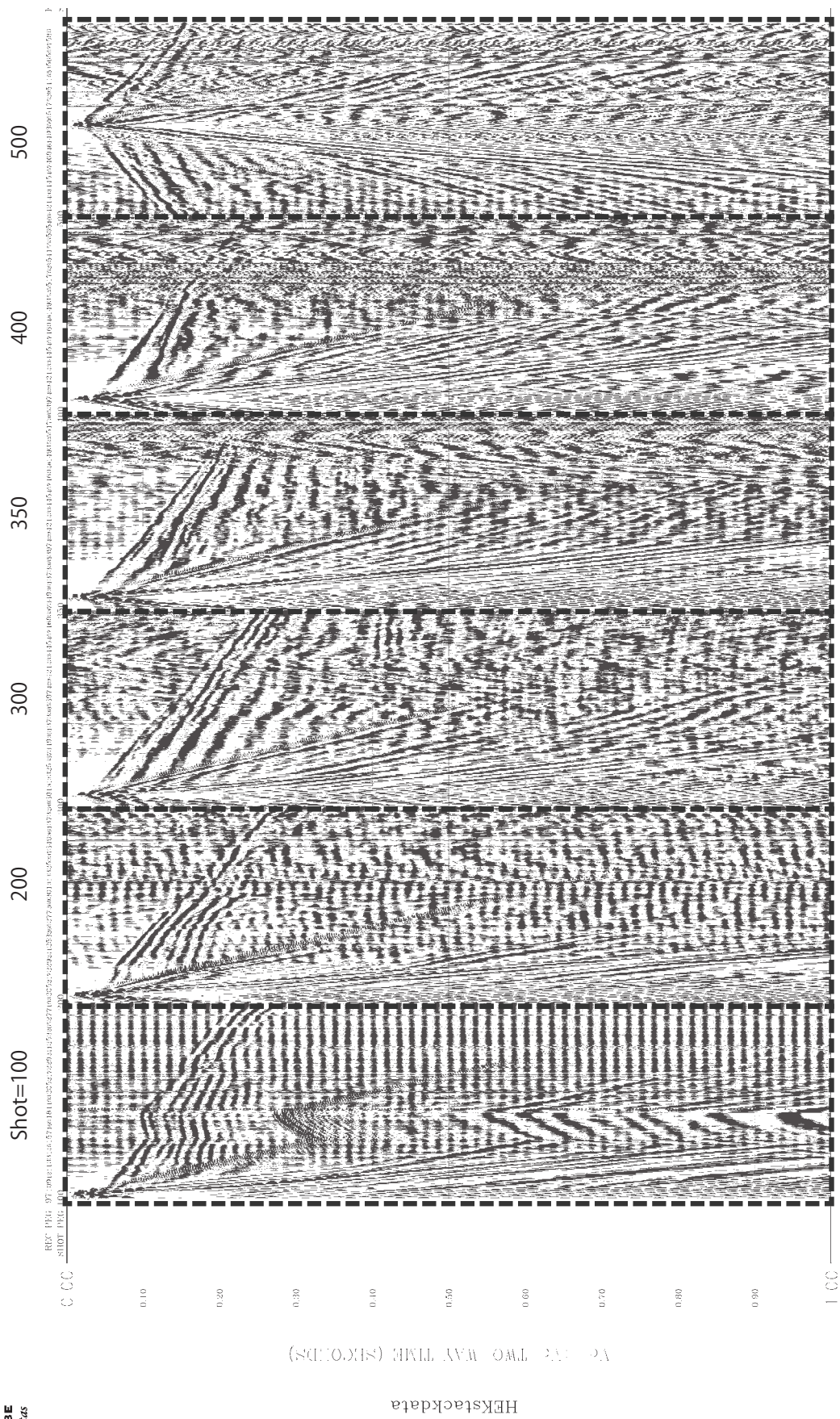
第7図 干渉法の詳細図。青線と数値は受振点番号(10 m 間隔)。緑は中田・今泉編(2002)。緑は中田・今泉編(2002)による活撓曲の領域を示す。基図に国土地理院発行数値地図 25,000 (地図画像) を用いた。

Fig.7 Detailed information of the interferometry with Digital Map 25,000 (Map Image) from GSI. Numbers and blue dots represent receiver points. Green areas indicate active flexures from Nakata and Imaizumi eds. (2002).

Shot=350



第8図 反射法における発震記録（発震点350）。横軸が受振・発震点で縦軸が往復走時を表す。
 Fig.8 Examples of shot records at shot-number 350 for the reflection survey. Horizontal and vertical axes are receiver channel and two-way travelttime, respectively.



第9図 反射法における発震記録を垂直重合し、振幅調整を行った波形(発震点100, 200, 300, 350, 400, 500).
 Fig.9 Stacked shot records with gain control after diversity stack of shot gathers at shot-number 100, 200, 300, 350, 400, and 500 for the reflection survey line. Parameters are same as Fig. 8.

反射法地震探査を実施することは難しい(第6, 7図)。また, 中田・今泉編(2002)による高浜川の北と南にある撓曲崖を結ぶ場所を横切るように測線を設定した。

3. 取得データ

1) 反射法に関して

現場では, 発震原記録をスタックするなどの簡単な処理を適宜実施し, 発震記録を確認しながら調査を行った。今回の探査測線では, 人(徒歩), 自転車, 車の振動などのノイズの他, 高圧送電線による60 Hzの交流電流などが主なノイズ源となったが, ほとんどのノイズはダイバーシティスタックで消えることを確認した。第8図は発震原記録の例である。ほとんどの測点において初動は測点の端までとどき, 記録波形は概ね良好であった。第9図は発震原記録をダイバーシティスタックしたものであり, スタックによってノイズが軽減し, 良好な記録になることがわかる。本測線は全体を通して良好な記録が得られたため, 今後解析をすすめVSP検層や地震波干渉法, またボーリングと比較する予定である。

2) VSP 検層について

現場では, 発震原記録を確認しながら調査を行った。今回の探査では強風, 高圧送電線による60 Hzの交流電流などが主なノイズ源となった。第10図は発震点4におけるドロップヒッターと油圧インパクトの発震原記録を, それぞれダイバーシティスタックした波形の例である。48 mよりも深部は2日目のデータ, 浅部は3日目のデータを表示している。深度48 mから72 mの部分はケーシングによるチューブ波が非常に卓越している。72 m以深では見かけ速度約330 m/sの上方進行波が複数あり, S波の反射波と考えられる。また, 振幅は小さいが直達波の直後にも見かけ速度約1,700 m/sの上昇進行波があり, P波の反射波と考えられる。今後解析をすすめ反射法地震探査や地震波干渉法, またボーリングデータと比較する予定である。

3) 地震波干渉法について

第11図は現場で収録された波形の一例である。周辺の道路を通行する車両ノイズと思われる波形が記録されており, 他の時間帯では電車の振動も記録されていた。今後, 相互相関関数を計算し, 擬似的な反射断面を求める解析, 表面波の分散曲線から地下のS波速度構造を見積る解析などを実施し, 上記の反射法地震探査とVSP検層の結果と比較する予定である。

4. まとめ

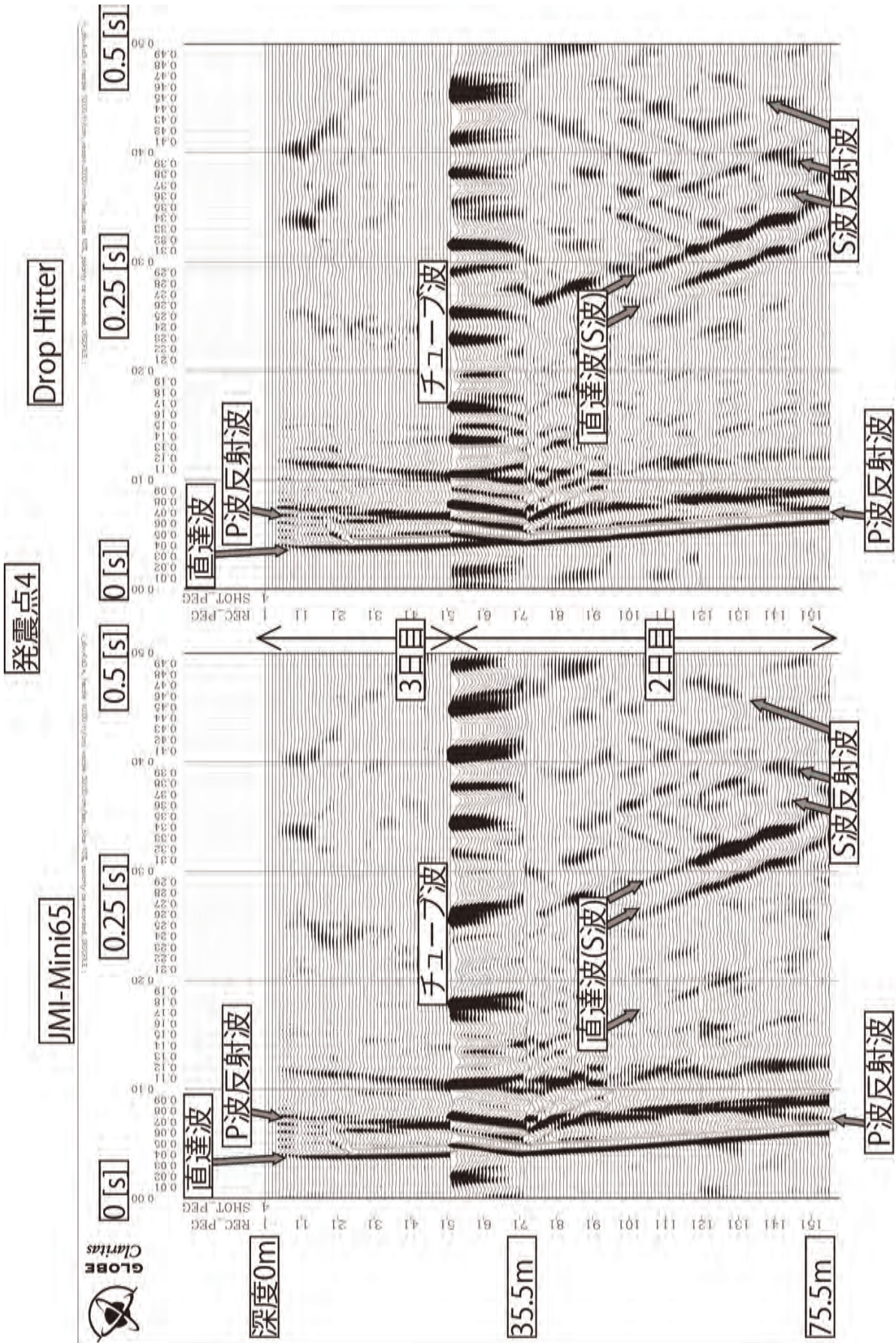
本調査では, 高浜断層の構造を解明するために, 愛知県高浜市・碧南市・安城市において浅部反射法探査・VSP検層・地震波干渉法の調査を実施した。データは良好で, 今後詳細なデータ処理を進め, ボーリングデータや重力探査など他調査の結果や先行研究との比較を行い, 高浜断層の位置を解明し, 地下の地層変位量を明らかにしたい。

謝辞: 本調査の測線設定に際し地質情報研究部門の阿部朋弥氏, 中島 礼氏から助言をいただいた。本調査の計画とデータの解釈に関して, 地質情報研究部門の横倉隆伸氏, 本調査の実施にあたり活断層火山研究部門の塚本 齊氏にご協力いただいた。調査の実施にあたり, 愛知県庁, 碧南市役所, 安城市役所, 測線が通る鷺塚町町内会長様, 愛知県知立建設事務所, 高浜市役所, 三伸興業株式会社にご協力いただいた。現地でのデータ取得に関しては(株)ジオシスにご協力いただいた。また反射法のデータ解析と図の作成にはClaritas (GNS, New Zealand), 一部の図の作成にはQGIS, GMT mapping tools (Wessel and Smith, 1998)を使用した。記して感謝の意を表する。

文 献

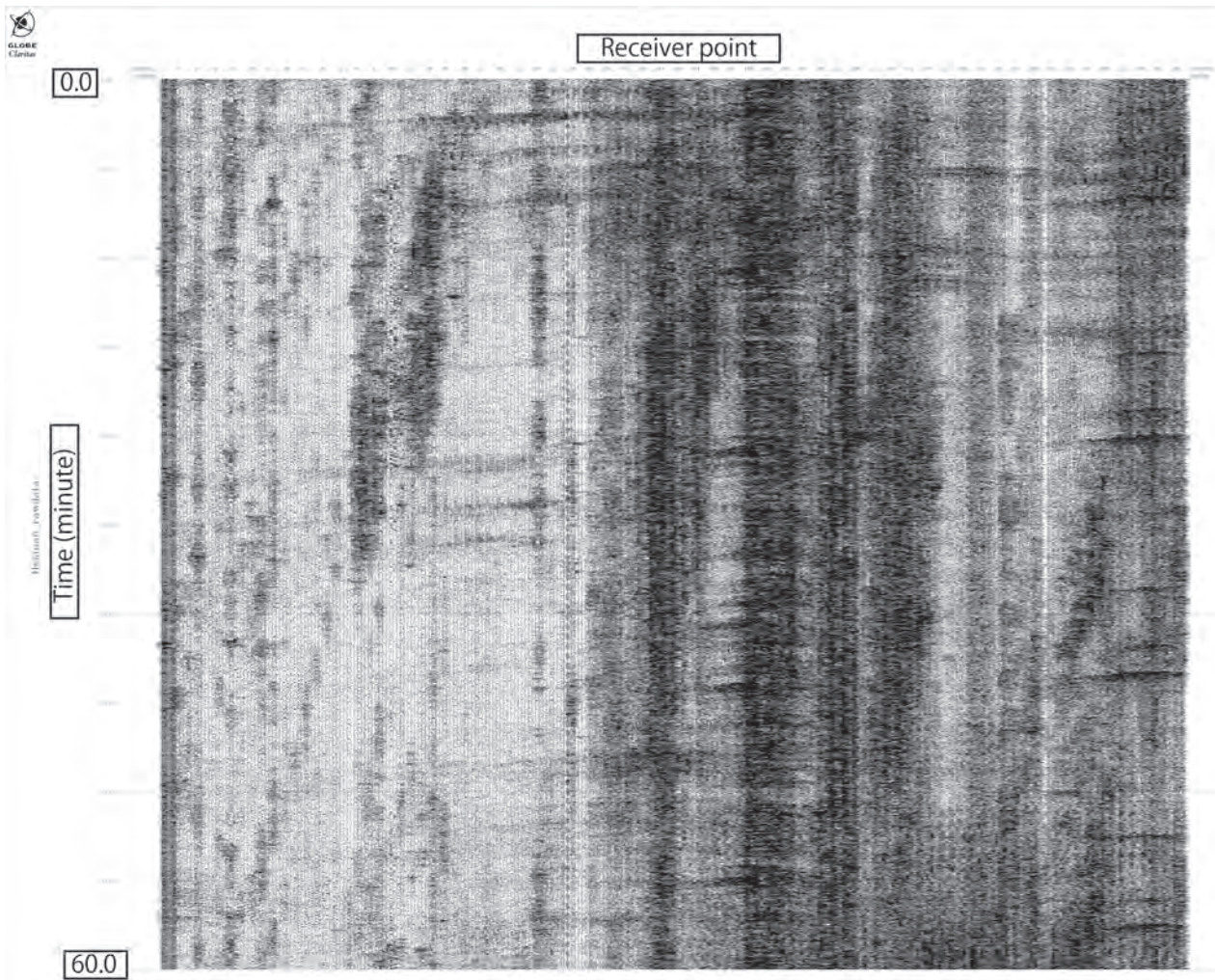
- 愛知県(1996)平成7年度地震調査研究交付金 加木屋断層, 高浜撓曲崖及びその周辺の断層に関する調査成果報告書. 311.
- 物理探査学会(1998)物理探査ハンドブック.
- Hirose, F., J. Nakajima, and A. Hasegawa (2008) Three-dimensional seismic velocity structure and configuration of the Philippine Sea slab in southwestern Japan estimated by double-difference tomography, *J. Geophys. Res.*, 113, B09315, doi:10.1029/2007JB005274
- 伊藤 忍・山口和雄(2011)群馬県館林市における地震波干渉法実験. 平成23年度沿岸域の地質・活断層調査研究報告, 産業技術総合地質調査総合センター速報 no.59, 89-95.
- 伊藤 忍・山口和雄・加野直巳・横倉隆伸・楳原京子(2010)旭山撓曲南方延長における地震波干渉法による地下構造調査. 平成21年度沿岸域の地質・活断層調査研究報告, 産業技術総合研究所地質調査総合センター速報 no.54, 81-87.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会(2004)屏風山・恵那山断層帯及び猿投山断層帯の長期評価について. https://www.jishin.go.jp/main/chousa/04oct_byou-bu/index.htm (確認日2018年4月20日)

- 木下佐和子・山口和雄・伊藤 忍・住田達哉 (2018)
三重県鈴鹿市における浅部反射法地震探査の実施. 平成 29 年度沿岸域の地質・活断層調査研究報告, 産業技術総合研究所地質調査総合センター速報, no. 76, 45-57.
- 牧之内 猛・加藤麻衣・大石康雄・塚本将康・武邑圭司・大島 武・杉浦 武 (2011) 愛知県安城市の地下地質. 地質学雑誌, 117(2), 79-94.
- 中原 恒 (2016) 地震波干渉法 その 2 応用. 地震 第 2 輯, 125-133.
- 中田 高・今泉俊文 (2002), 活断層詳細デジタルマップ. 東京大学出版会, DVD-ROM 2 枚・60p, 付図 1 葉.
- 産業技術総合研究所地質調査総合センター (編) (2015) 20 万分の 1 日本シームレス地質図 2015 年 5 月 29 日版. 産業技術総合研究所地質調査総合センター. <https://gbank.gsj.jp/seamless/> (確認日 2018 年 4 月 20 日)
- Wessel, P. and Smith, W. H. F. (1998) New, improved version of generic mapping tools released. *EOS Trans. American Geophysical Union*, **79**, 579.



第10図 VSPの発震記録を垂直重合した波形。(左) 発震点4におけるJMI-Mini65の波形(右) 発震点4におけるドロップヒッターの波形。縦軸が受振点(深さの2倍)で横軸が時間を表す。

Fig. 10 Stacked shot records after diversity stacks of shot gathers. (left) Shot number 4 with JMI-Mini65. (right) Shot number 3 with Drop Hitter. Vertical and horizontal axes are receiver channels and times, respectively.



第 11 図 干渉法の前記録。縦軸が時間（分）で横軸が受振点を表す。

Fig.11 Examples of raw traces at all receivers for the seismic interferometry. Horizontal and vertical axes are receiver points and travel-time, respectively.